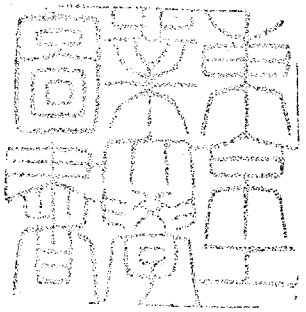
T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	建築安全計画手法に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	青木義次
Author(English)	YOSHITSUGU AOKI
出典(和文)	学位:工学博士, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第888号, 授与年月日:1979年5月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第888号, Conferred date:1979/5/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)



建築安全計画手法に関する研究

青　木　義　次

東京工業大学 437577

建築安全計画手法に関する研究

目　　次

第1章　建築安全計画の基礎的問題

第2章　建築安全性とその意識構造

第3章　建築安全性の計量化

第4章　建築安全計画の最適化

第5章　建築安全性の確率的分析と計画手法

第6章　まとめ

まえがき　——目的及び構成

建築の発生は急激な変化から身を守るシェルターとしての役割から始まるともいわれ、人間のいとなみを維持する最も基本的な機能をなしているところに建築の一つの意味があるといえる。しかし、今日のように高密化した社会においては建築の機能も転輾化し、建築安全計画自体もこうした状況に対応しうる原理と手法が必要であり、本論文の目的は建築安全計画の原理の探究と具体的な安全計画手法の開発にある。

従来、建築安全性に関する研究は個々の技術的解決に力点がおかれることが多く、災害の発生過程における人間的・社会的要因を含む多数の要因及びその複雑な確率的関連性に直面せざるを得ないような具体的な安全計画の場では、技術的研究成果が充分に生かされないという状況が生じることが指摘されてきた。近年、構造安全性に関しA.M. Freudenthal("Safety of Structure" 1947)を中心として確率論的研究が進められ発展をみているが、人命と経済性の相反したニーズに対応しうる総合的建築安全計画に関する研究はなされていない。この点に注目し、本論文では以下の4項目を基本目標としている。

(i) より総合的な安全計画手法の確立

(ii) 災害現象を確率論的にとらえた安全計画手法の確立

(iii) 明確な論理に基づく意思決定プロセスとしての安全計画手法の確立

(iv) 具体的応用可能な安全計画手法の確立

本論文は6章より構成され、第1章より第4章が上記目標(i),(ii),(iii)に対応し、第5章では目標(iv)にそってより具体的な応用分析を試みており、第6章が本論文のまとめとなっている。

第1章「建築安全計画の基礎的問題」では安全計画の問題点を整理し、総合的安全計画の必要性，明確な論理に基づく意思決定としての安全計画の必要性等を示した。

第2章「建築安全性とその意識構造」では建築安全性を総合的にとらえるため，住民の建築安全性の認識形式を分析し，いくつかの安全計画上の指針を得た。

第3章「建築安全性の計量化」では，前章で得られた住民の側からみた安全認識を工学的に計量化するため安全性の計量化に関する基礎的検討を行なった。

第4章「建築安全計画の最適化」では，前章の結果に基づき，安全計画のおかれているろっの状況にそくした

計画の最適化の方法を求めている。

第1の方法は、複数の計画対象を有し、それぞれの安全レベル x_i の計画により全体の安全性が決定されるという総合的安全計画の問題を扱うものである。まず、個々の安全レベル x_i の関数として安全の効用 $f(x_i)$ をとるとこの安全効用関数の限界効用逓減性が成立する事を示した。さらに全体の安全効用が、個々の安全効用関数の和として与えられる場合に、全体の安全効用を(予算などの)制約のもとで最大化するように各対象の安全レベルを設定するという問題を解き、最適化のアルゴリズムを求めた。

第2の方法は、安全性能以外の居住性などの要求性能も同時に考慮しながら安全計画を行う場合の方法であり、とくに各性能間のウェイトもしくは各性能による目的関数等などの価値尺度が明確化できない場合に適用できる方法となっている。この方法の原理は(メリット)−(デメリット),(メリット)/(デメリット),−(デメリット)/(メリット)の3つの尺度とベクトルの支配概念及びそれを拡張した順序概念を導入して順序評価を行なうものである。また、この方法を行なうために必要な計算アルゴリズムを求め、数値例を示した。

SEKIREI A4 NO. 54

第3の方法は、計画者の提案した計画案がそのまま実現するとは限らないという不確定な状況下での安全計画の最適化の方法である。まず、複数の評価軸を有する最適化問題の中で従来用いられてきたパレート最適概念のみでは安全計画の決定基準として不充分であること及び計画者の提案から実現までの状況を考慮にいれた計画原理が必要であることを示した。この観点から、不確定な達成率を有する計画状況に対応して「ある計画Aがいかなる達成率となっても、他の全ての計画においてはAより不利となるような達成率の可能性があり、逆にA以外の計画のいかなる達成率の場合にもAの方がより有利な場合が存在する」という概念を数学的に定式化し、これを基準とするパレート・レイ・オプティマムという最適概念を提案した。さらにパレート・レイ・オプティマムの基準により得られる最適解は提案可能集合のパレート最適集合の中に存在していることが証明された。とくに安全計画の尺度が修復不可能な損失（人命的損失）と修復可能な損失（経済的損失）の二次元で表わされる場合は、提案集合についてのある種の条件下で、唯一の最適解に限定されることが示された。

SEKIREI A4 NO 54

第5章「建築安全性の確率的分析と計画手法」においては、以上の結果を受けて具体的に分析をすすめ、第1節「建築内火災拡大の確率的分析」，第2節「類焼拡大防止計画の確率論的分析」では火災安全計画手法について検討し、第3節「建築信頼性の要因分析と安全計画手法」，第4節「重要度係数の最適化」，第5節「建築材料の品質管理システムの最適化」において建築構造物の信頼性について検討している。

第1節では建物内，第2節では建物間の火災拡大について確率過程として数理的に定式化し，火災データから未知パラメーターを推定し，人命安全，経済的損失を計量的に分析し，火災拡大防止計画の方法を求めた。

第3節では信頼性解析上の問題点を整理するとともに建築材料のバラツキを推定し、さらに構造物耐力のバラツキを専門家に対するアンケート調査から推定した。さらに第4章で求めた手法のケース・スタディを行なった。第4節では重要度係数（用途係数）の合理的決定法を求めた。第5節では建築材料の中でも重要なコンクリート強度についてその品質管理システムの最適化方法を示した。

謝辞

本研究を進めるにあたって多くの人々の御協力をここにおいて感謝いたします。東京工業大学建築学科助教授谷口汎邦博士には本論文をまとめるに際し，文字通り一字一句まで御指導いただき，あらためて感謝致します。

建設省建築研究所所長中野清司博士には入所以来，建築構造安全性に関する御指導をいただき，とくに構造安全性に関連した第5章3，4節においては多くの御助言，指導をたまわり，感謝いたします。建設省建築研究所研究調整官上村克郎博士には建築材料に関する御指導をいただき，とくに材料強度のバラツキに関する第5章3，5節においてはデータの収集の御協力の他，建築材料の品質管理について細部にわたる御指導をたまわり，感謝いたします。建設省建築研究所第4研究部部長阪口理博士には本論文をまとめるに際し，公私にわたって御協力いただき，記して感謝の意を表します。東京理科大学教授川越邦雄博士には火災安全性に関する御指導をいただき，とくに第5章1，2節の火災の確率的な研究を進めるにあたり，多くの御助言の他，研究室の方々の協力もいただき，感謝いたします。

第2章の研究を進めるにあたって，東京理科大学川越

研究室の48年度，49年度の卒論生の方の御協力を得ましたことを感謝いたします。

第2章の研究を進めるに際し，火災学会防火システム委員会の御協力を得，委員の方々から御助言をいただき，感謝いたします。

第3章，第4章の研究にあたっては筑波大学助教授松原望，江藤肇博士に御助言をいただき，又，東京工業大学制御学科，東京大学生産技術研究所の研究者を中心とするあいまいシステム研究会の方々の御助言をいただき，感謝いたします。

第5章1，2節の研究については建築研究所防火研究室長若松孝旺博士，関根孝室長，森下弥三郎研究員，長谷見雄二研究員の御助言をいただき，感謝いたします。とくに森下研究員にはデータ収集の協力を得ました。又，データを提供していただいた東京消防庁の方々及び消防研究所神忠久氏に感謝いたします。データ解析の際に御協力いただいた東京理科大学川越研究室の諸兄に感謝いたします。

第5章3，4，5節の研究にあたり，耐震性能総合開発プロジェクトの目標公準委員会の各委員の御助言に感謝いたします。(財)建材試験センター工事用材料検

直所の諸氏には材料試験データの閲覧に際し御協力いただき，感謝いたします。千葉大学中川亨講師には信頼性及び建設コストに関する研究御指導をいただき，感謝の意を表します。建設省建築研究所第2研究部友沢史紀博士にはコンクリートの品質管理に関して御助言をいただき，感謝いたします。

東京工業大学鈴木光男教授には東京工業大学社会工学科在学中より，修士論文のまとめを含めて多くの御教示，御助言をいただき，感謝いたします。

本研究を進めるに際して，上記の他に多くの方々に御助言，御協力があったことをここに記し，感謝を表する次第です。とくに建設省建築研究所第4研究部の諸兄をはじめとし，第2研究部，第3研究部，第5研究部の諸氏に感謝の意を表します。

SEKIREI A4 NO. 54

第1章　建築安全計画の基礎的問題

1－1　はじめに

1－2　計画的視点からの安全工学

1－3　安全計画対象の公共性

1－4　安全対策の高度化と住民の論理

1－5　安全性の市場経済からの逸脱

1－1 はじめに

建築の発生は環境の急激な変化から身を守るシェルターとしての役割から始まるといわれ，人間のいとなみを維持する最も基本的な機能をになっているところに建築の意味があると考えられる。しかし，今日のように高密化した社会において，また，建築の機能が複雑化し，その内部で火器類の使用がさかんになるにつれ，建築自身が人間にとって外的環境としての危険性を有するに至っている。

ここで論じられるのは個々の災害の事例ではなく，建築空間を計画し，作り上げていく段階で必要となってくる建築安全性に関する基本的な考え方についてである。ここで，個々の対応策を考える方法を戦術的と呼び，それらの対応策の中に共通に潜んでいる原理を適用することを戦略的と呼ぶとすれば，先に述べた基本的という意味は戦略的な問題を検討するという意味である。

このような戦略的安全計画の考え方は，現在学問的にはもちろん現場の段階でも普及している考え方とはいえない。しかしながら，以下に示すような種々の理由でこのような考え方の必要性が増加しているといえよう。こうした基礎的問題を若干整理しておこう。

1－2 計画的視点からの安全工学

災害を天災，人災と区別する考え方がある。天災とは地震，嵐，風，雪，洪水などによってもたらされた災害のことを指し，不注意による交通事故やタバコの投げ捨てなどによる火災は人災といわれるのが普通である。しかし，この2つの区別はそれほど明確なものではない。昭和28年に発生した九州筑後川の洪水においては天災ではなく，その災害の生じた原因は人間側にあるという考え方を提出した人もいる。実際に，1920年から1970年の風水害の被害を調べてみると図1－1のようになる。大型台風による影響によって年間被害が変動するので，社会的状況の影響をみるためデータを平準化して調べてみる必要がある。図1－2は前後合せて5年間の被害を平均した各年の被害を示したものである。この図をみると家屋被害は第2次大戦前後に大きくなっている。死者，行方不明者についても同様である。これらの傾向が大戦前後の荒廃した社会状況の中での災害に対する対策のおこたりにのみ起因するものではないが，こうした社会的状況，対策のおくれと被害の大きさにはなんらかの関係があるということが充分考えられる。従って，災害は単に自然の現象によって決まるものではなく，人間の側の災

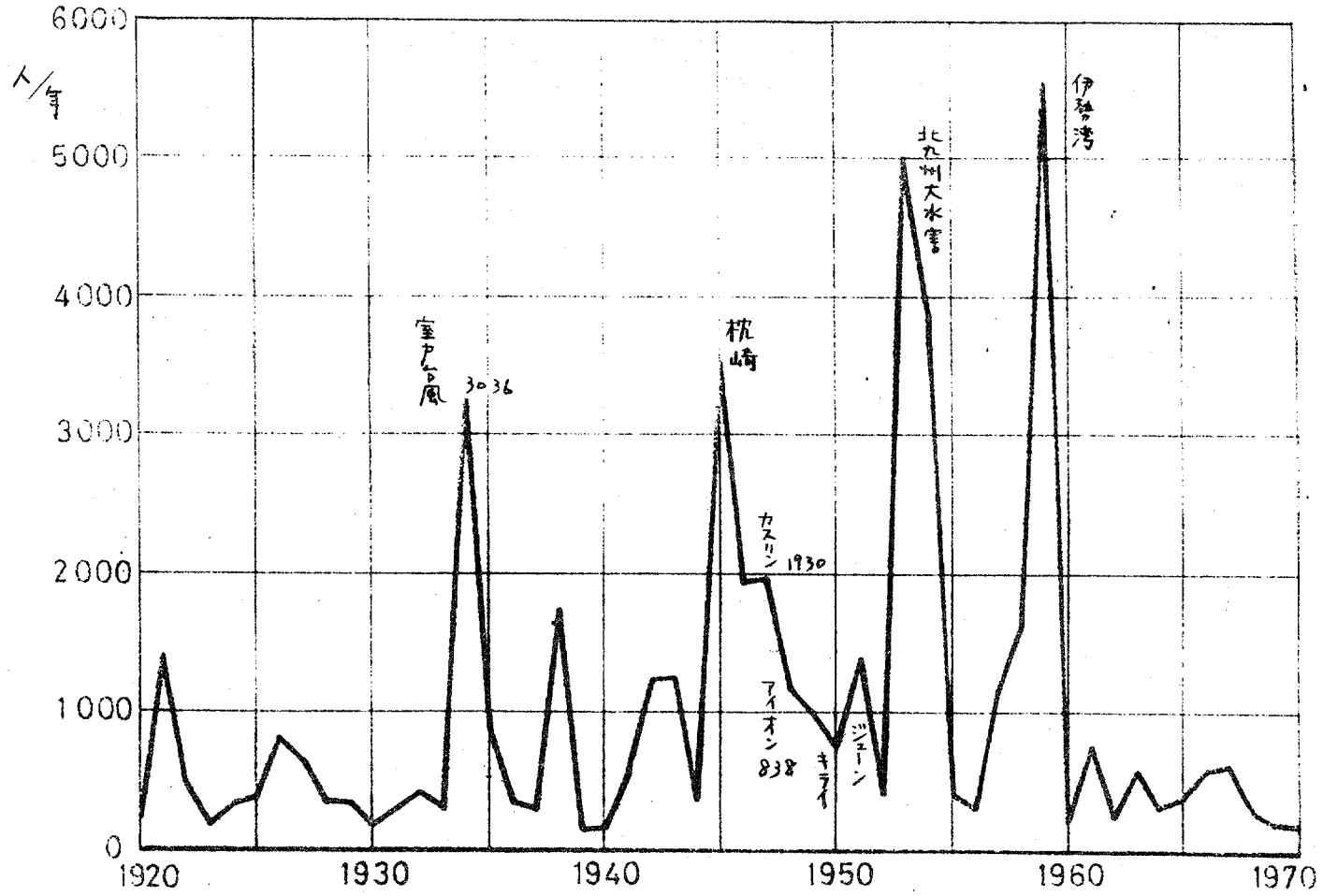


図 1-1-1 風水害による死者・行方不明者数

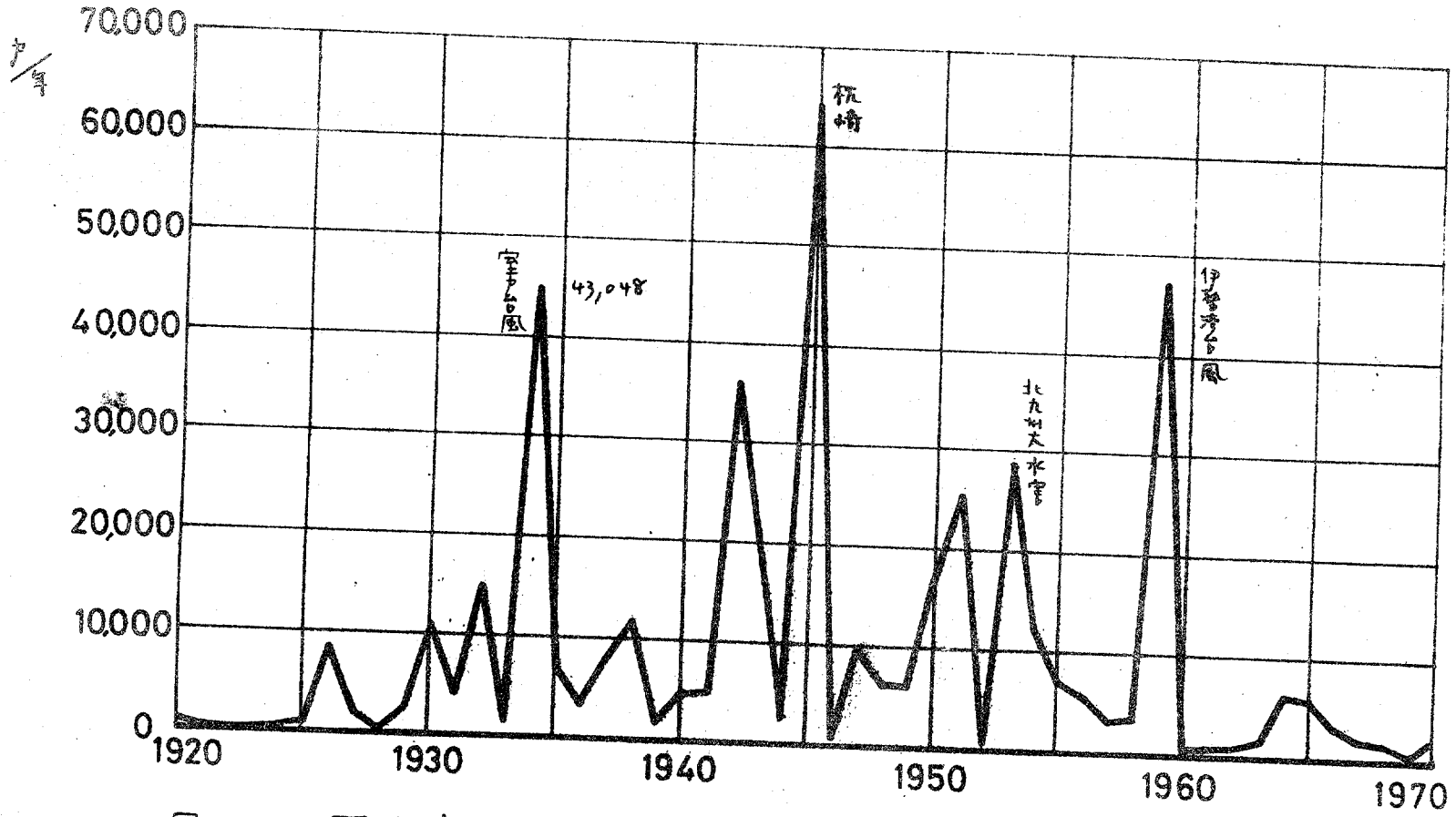


図 1-1-2 風水害による家屋全壊流失戸数

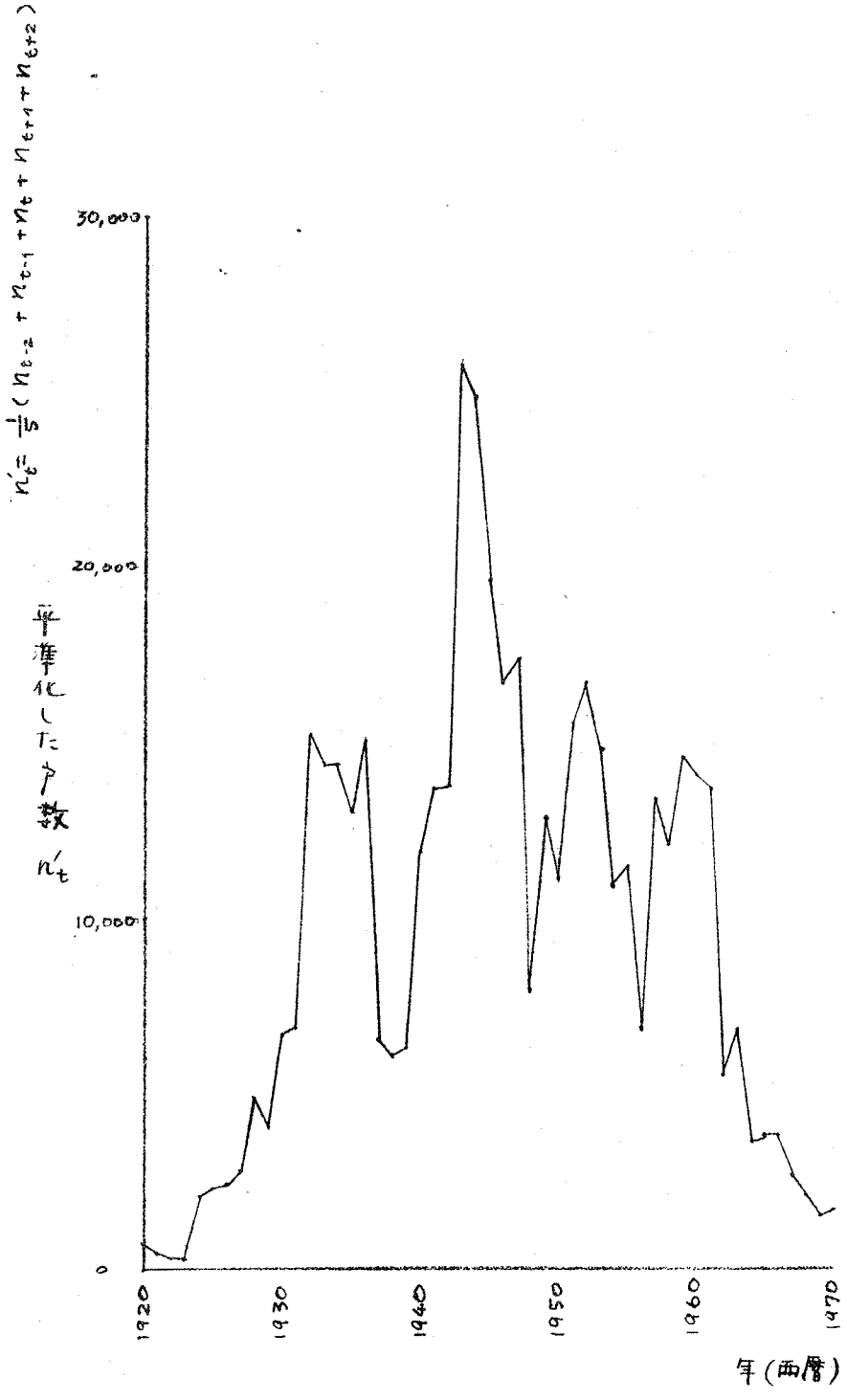


図1-2-1 平準化した家屋全壊流失戸数
(前後5年平均)

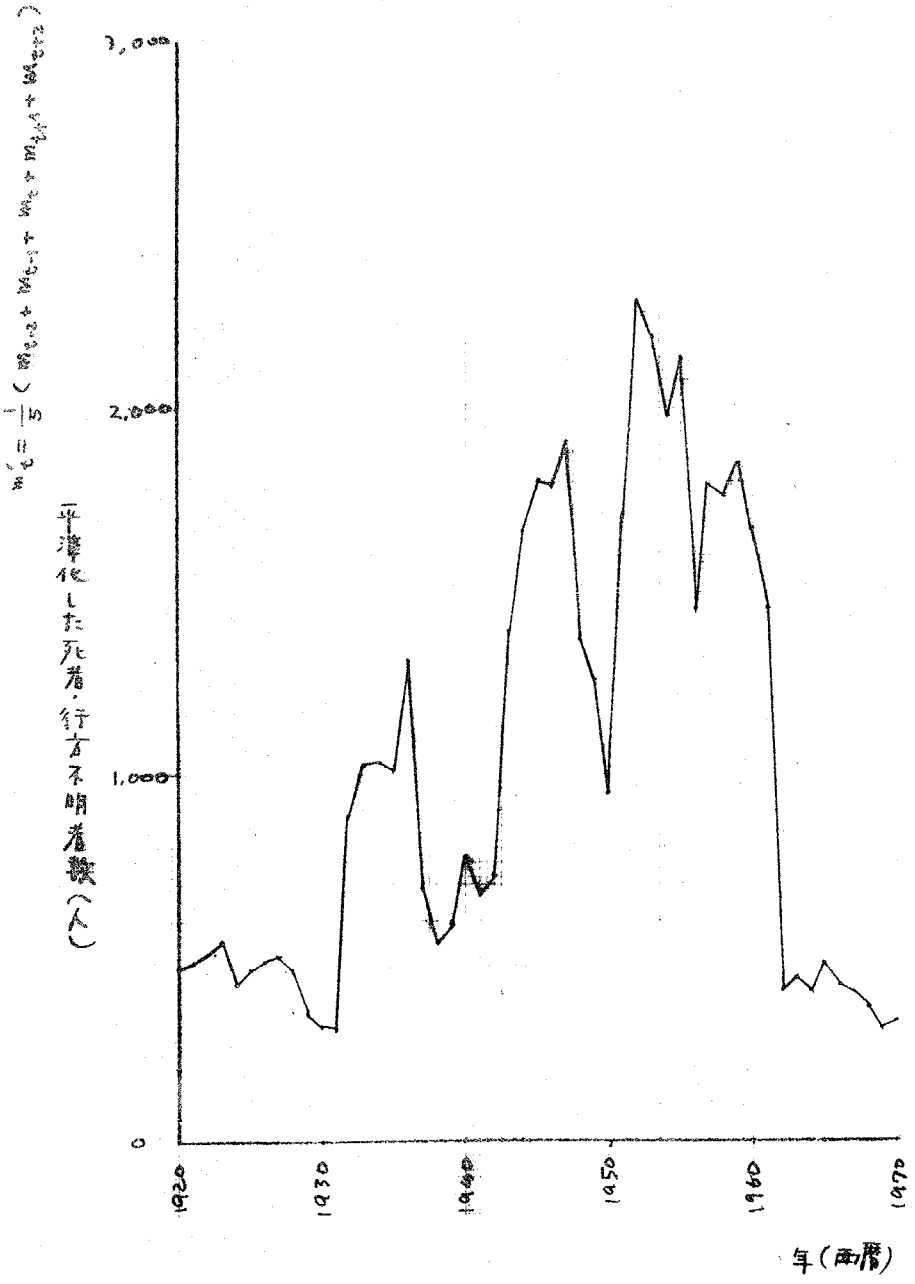


図 1-2-2　平準化した死者行方不明者数
(前後5年間)

害に対する計画性の貧困といったものと関係しているといえる。そうした意味で，災害とは人間の力の及ばないもの（自然）と人間とのたえまない争いの中での人間の側の敗北ということができる（この考え方は以後に本直に数理的な形で表わされることになる）。

以上のような災害に対する考え方がだんだん広まりつつあり，災害は天災ではなく人災であるといういわゆる人災論への考え方の台頭ということになってくる。こうした考え方に立てば，災害は単に偶然にやってきて人間にはどうしようもないものであるというあきらめの考え方はとられずに，むしろ前もって計画的に安全の対策を講じることによって被害をより小さくすることができるという考え方をとる。また，災害現象を単に観察するというよりは，どのような手段を講じることがより効果的であるかというような計画的な視点もでてくる。従って，分析的な安全研究からより総合的な研究へと安全研究もその性質を少しづつ変えている。

上述の視点にたって研究を進めるために，まず，以下に安全計画のおかれている状況について検討を考えておく必要がある。

1－3　安全計画対象の公共性

災害の基本的な特徴として，常に対象物の外側から与えられる不確定な要因が存在することがあげられる。この不確定な要因が及ぼす影響の範囲は，時には単体建築物のみではなく，複数の建築物にまたがることがあり，建築空間の安全性をとりあげるとき，個々の建築物の安全性に限定することは困難であるといえる。

本研究の基本的な研究対象領域は建築空間の安全計画であるが，個々の建物の計画に限定することは，上述のように問題の基本的特徴を見失うおそれがあるので，建築計画レベルから地区計画レベルにまたがった安全計画の基本的方法を検討することを本研究の主目的とする。

東京都区内のランダムに抽出した地区における住民アンケート調査（昭和49年・文2章参照）によれば，住民の安全意識のうちでも，自己の住んでいる「自宅の危険度」とそれをとりまく地区の「周辺危険度」とには強い関係があることを示している。図1-3は，このアンケートによって得られた自宅の危険度と周辺危険度との相関関係を示すもので，自宅危険度が一単位（アンケートでは，危険度を0～10の10段階で測定している）増加するとき，周辺危険度は約0.6だけ増加するということを意味しており，この種の調査として

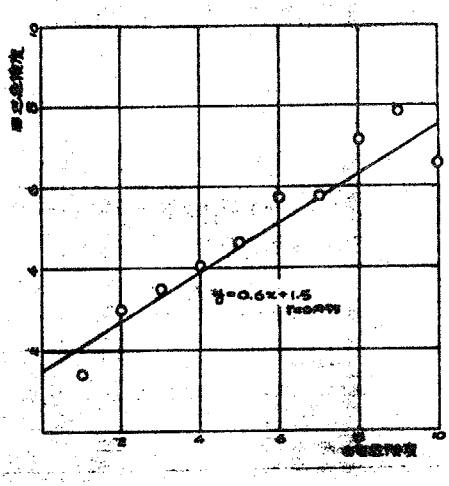


図 1-3 自宅危険度と周辺危険度

はかなり高い相関係数を持っている。この事実は災害に対する問題が自己の居住する空間のみで解決するものではなく，周辺の空間まで含めた検討が必要であることを意味している。すなわち，住民の安全に関する認識によれば，安全の問題は個々の私的な空間だけの問題ではなく，周辺の公共的な空間へとまたがっているといえる。

上述の住民の直観的な認識と現実の災害の傾向とは無関係ではない。たとえば昭和51年版消防白書によると，昭和50年中の建物火災のうち，別の建物に延焼した火災件数の割合は15.7%に至っており，個々の建物の安全性だけでなく，建物間の安全性といったことも大きな問題となることが示唆されている。

さらに，都市空間の多様化，高密化に伴い，個々の建物段階ではなく，広域的な視点で安全の問題を考えなければならないといえる。火災被害のなかでも最も大きな要因ともいえる出火率をとっても，都市化に伴ってその値は増加を示している。たとえば昭和45年の大都市，大都市を除く都市，町村での出火率（人口1万人当り出火件数）は，それぞれ7.7，7.2，3.4となっており，いかに都市の空間が災害要因をもっているかがわかる。時間的考えても同様の傾向を示すといえる。すなわち，町村

段階での出火件数の経年変化をみると、図1-4のように増加していることがみられ、都市周辺地域が都市化されるにしたがって、出火要因も年々増加しているといえる。又、これらのうちより大きな災害に導くと思われる危険物施設の数は年々増加しているのが現状である（図1-5）。このような都市化に伴う災害の要因の増加という問題も単に個々の個人的空間の安全計画を進めるだけでは解決しない問題といえる。

都市内における居住形式の変化も災害を考える際、重要な要因といえる。昭和50年中建物火災による死亡者の中で、60.9%にあたる789人が専用住宅の火災による犠牲者で、26.6%にあたる345人が共同住宅、併用住宅、併用共同住宅の火災による犠牲者である。こうした共同住宅での災害という問題も、今後大きなウエイトをもってくるものと考えられる。図1-6は昭和38年から昭和48年までの東京都の住戸形式の比率を表わしたものであるが、昭和38年一戸建住宅が約50%の割合にあったものが、昭和48年では約40%に減少しており、共同住宅がこれと反対に増加し、昭和48年で50%を越えている。これらの集合住宅の増加という傾向も、安全の問題が単に個人の問題ではなく、公共性を有する住空間の問題となりつつ

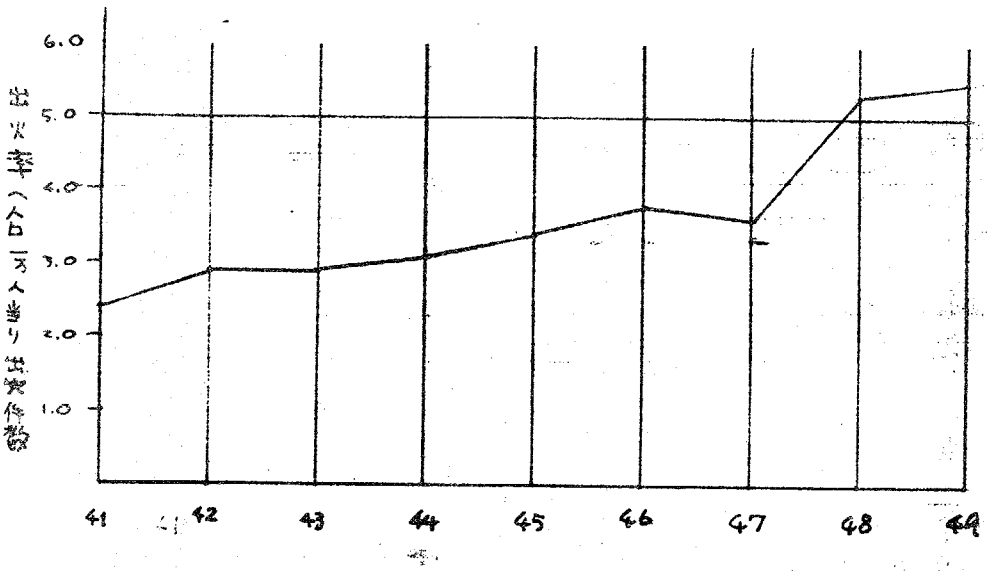
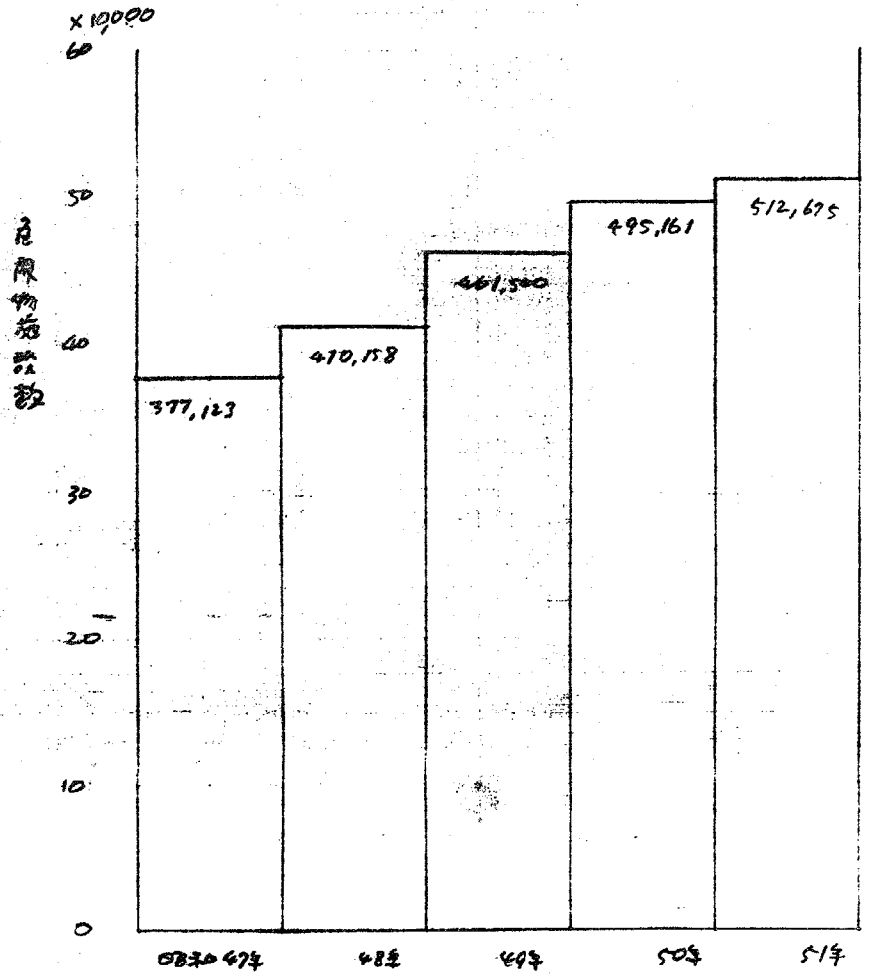
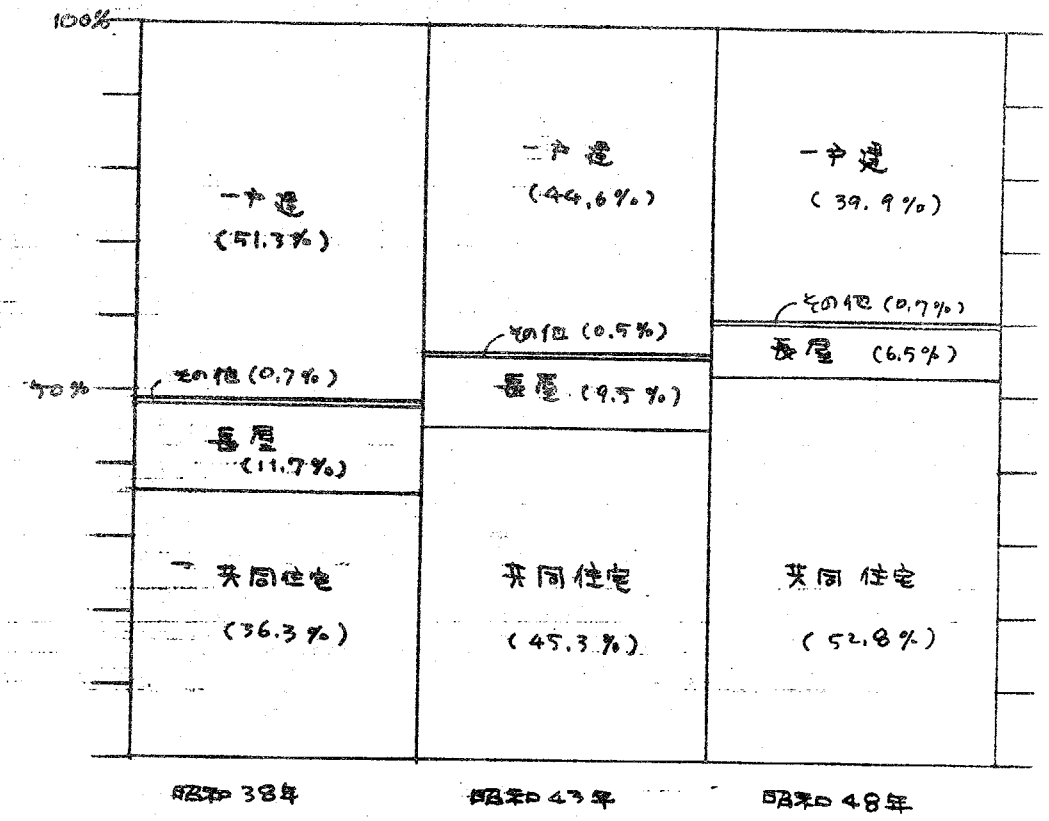


図1-4　町村における出火率の動向



（いずれも 3月31日 現在として） 消防白書 昭和51年版 より作成）

図 1-5 危険物の増加



(住宅統計調査報告 昭和38年, 昭和43年, 昭和48年
第3巻 都道府県編 その13 東京都 ―― 総理府統計局 ―― より作成)

図1-6 集合住宅の普及

あることを示している。

昭和50年中の火災のなかで、4人以上の死者を出した火災は16件あるが、そのうちの約半数にあたる7件が共同住宅、併用住宅、旅館、遊戯場であり、むしろ個人的空間よりも公的空間における災害のほうが、より大きな人的損害をこうむる傾向にあるといえる。

以上、2、3のデータをとりあげ、検討した結果、建築空間の安全性の問題が個人の空間から公的な空間へとまたがっていること、集合住宅の増加ならびに危険物の増加、都市化の傾向の増長からみて、公共性を有する建築空間の安全計画の問題が重視されるべきであると考えられる。さらに、それらを整理するならば、次のようにいうことができる。

1) 安全計画の対象は不特定多数の人間が関与する。

2) 災害の拡大も多数の人間の判断に左右される要因に強く依存している。

以上のことを考えてみれば、単なる個人のレベルでの利害観念にもとづく判断によって、安全計画というものがなされるだけでは不充分であり、より客観的な、公的なレベルでの安全計画というものの必要性が指摘される。

1－4　安全対策の高度化と住民の論理

建築物の安全性についてはこれまで構造上あるいは防火上の観点から多くの研究がなされており，すでに具体的な建築安全の技術を提供している。ここで住民の側からみた建築安全性という視点をことさら強調するのは，次のような理由によるものである。たとえば避難口，避難階段ということが防災上の観点から義務づけられ確保されているにもかかわらず，実際の火災において避難口や避難階段が防犯上の理由からロックされていたり，建築計画上の収納スペースの不充分さから物置きがわりになっていたりして避難の役をなさず，惨事にいたることがあるが，こうしたことは防火という視点をこえて，防犯あるいは建築計画上の諸問題と関連ある形で防災計画をたてなければならないことを示している。しかし，現状ではこうした総合的な検討が困難である場合が多い。それは各安全対策が狭い工学分野の各部分において提案され，具体的な場での総合的な調整がなされていない実に帰するという面があると思われる。こうした縦割化された技術体系からの成果を住民を取り囲む建築という場で具現するためには，住民の論理とでも呼ぶべきものが壁となってくるように思われるのである。

SEKIRO A4 NO. 54

さらに，現代の防火対策が高度になるにつれて人間の安全を確保するという視点よりも，その安全対策システム自体の論理による自走の危険性が生じてくるということである。防災技術が電子的装置によって確保されること自体は大きな進歩といえても，ひとたび電源が得られずその技術が失われたとき，人間はより大きな落差をもって危険と恐怖の状態へと陥るおそれがある。また，建築構造学の発展によりとくに日本では耐震技術が発達しており，主要構造物の破壊による人的被害は火災などのそれに比べて非常に少ない。しかし，地震時における火災の発生はいわゆる二次構造部材あるいは家具などの破壊によって生ずる可能性も大きく，人命保護という観点からは二次部材の安全性の確保ということは住民側からみれば，決して二次的な問題ではないといえる。ともあれ，こうした研究あるいは技術レベルの高度化にともなって，防災対策自身はよりレベルの高いものへと発展していくにもかかわらず，その複雑化された防災システムは具体的な場で真に住民のものとなりえないという危険性をもつにいたっているのである。

以上の観点から，次章では住民の安全認識の分析を行う。

1－5　安全性の市場経済からの逸脱

安全計画において各対象の安全さのレベルを設定する際，現状の建物が危険であるとか，安全であるとかいうときに，過剰に作られてはいないだろうかという疑問が起こる。省資源，省エネルギーといった面からみると，建築材料による消費はばかにならないので，こうした疑問は当然生じうるのである。また，日本と諸外国とを比べたときに，安全のとり方にかなりの差があることも指摘されている。また，逆に安全が過少に取り扱われていないだろうかという考えも起ってくる。住宅建設を急ぐあまり，レベルの低い住宅を急増せざるをえないということもある。こうした疑問に対し，以下のように言われる場合がある。

「建築物もひとつの経済的な財にほかならない。従って，あまりにも危険なものや，安全すぎるような建物は，経済のいわゆる見えざる手によって排除され，適当なものだけが生き残る。従って，経済的なメカニズムの中で，より多く需要されるものが望ましい安全性をもった建物にほかならない。」

この推論は市場メカニズムが有効に機能するために前提となる諸条件の中で「品質に関する情報の完全性」とい

うものが成り立たないときは非現実的な推論である。建物をひとつの経済的な財とみなすときに，これが市場経済の中では建物に対する品質，安全性とか居住性とかいったものが買い手にわかっていなければならないからである。ところが，現実には買い手が，建築の安全性を知りうる知識を充分兼ね備えていないのが現状である。このような状況で市場メカニズムが作用すると，品質が次第に低下していくことがAkerlof（文献4）の逆淘汰のモデルとして知られており，さらにこれが加速されるとArrow（文献5）によって強調されたmoral hazard（道徳的危険）への問題へとつながっていくのである。従って，見えざる手の中に建築の安全性といったものをゆだねると，むしろより危険で，より高価な建築空間が作られるという場合さえ考えうるのである。

従って，社会的な場で安全というものがより適切に取り扱われるためには，買い手に対する安全の程度に関しての適切な情報が存在しなければならない。このことは住宅などの場合，買い手は一般住宅であることを考えれば，誰にでも容易にわかる安全の評価尺度が必要であるといえる。事実，このような理由で工業化住宅については性能評定制度があり，また，最近では住宅の性能を統

合的に評価するために，総合プロジェクト研究も行われている。

こうした観点から第3章では安全というものをいかに計量するかという問題において検討を行う。

文献

1) 青木義次，「建築安全性の基礎的問題」，建築研究所秋季講演梗概集，昭和52年，pp 29－47

2) 消防白書，昭和51年度版

3) 住宅統計調査報告，昭和38年，昭和43年，昭和48年

4) Akerlof, G. A., "The Market for Lemons; Quality Uncertainty and the Market Mechanism", Quaterly Journal of Economics, Vol. 84, August, 1970, pp. 488－500

5) Arrow, K. J. and Lind, R. C., "Uncertainty and the Evaluation of Public Investments", American Review, Vol. 60, June, 1970, pp 364－375

第2章　建築安全性とその意識構造

2－1　住民の安全性の認識

2－1－1　住民の安全に対する認識
2－1－2　危険度の二つの意味
2－1－3　状況と危険度
2－1－4　危険の認識範囲
2－1－5　住民の属性と危険度
2－1－6　防災対策と危険度

2－2　安全性評価意識

2－2－1　調査の実施概容
2－2－2　人命の経済的評価の可能性
2－2－3　不確定さに対する評価

付録2－1　順序数量化手法

SEKIREI A4 NO 54

2－1　住民の安全性の認識

2－1－1　住民の安全に対する認識

建築物の安全性については，今日まで構造上あるいは防災上の観点よりいくつかの尺度があたえられ，工学的に評価分析されている。しかし，そこに住む人間が建築空間の安全性をいかに把握し評価しているかという問題については，充分な研究がなされているとはいえない。「1－4 安全対策の高度化と住民の論理」で述べたように，より現実的な防災対策の確立のためには住民の現場に即した観点からの建築安全性に対する認識を分析しておく必要があるといえる。

しかし，住民の認識を分析する際，住民がアンケートなどで表明するものには曖昧さが含まれているということを無視することはできない。予備アンケート及びヒヤリングの結果，「危険さ」を住民が表明する際，以下の二つの概念を区別せず主観的に危険さを表明していることがわかった。

(1)　ある出来事が生じた場合のその出来事の危険さの程度

(2)　ある出来事が生じた場合のその出来事の危険さの程度とその出来事が生起する可能性の程度を同時に考慮したこわさの程度

現実的にはこの二つを区別する場合も，区別しない場合もあり，アンケート等の結果を分析する際にはこの二つを分離する必要があると考えられる。さらに，住民の危険に対する認識は次のような要因と関連をもってくることが考えられる。

a) 災害起因（地震，火災，犯罪，出水など）

b) 直前状態

c) 災害の認識の空間的範囲

d) 住民の属性

e) 防災対策

ここで直前状態というのは，住民が地震などの災害起因の影響をうける直前にどのような状況にあったかというものである。就寝中，入浴中，エレベーター内にいるなど直前の状況により，同じ災害起因でもその危険感は異なると考えられる。また，災害の認識の空間的範囲も自分のいる部屋，自分のいる家屋，周辺建物，地区，都市といったような認識の範囲が存在していると考えられる。自分の実行している防災対策と危険感の関係も予想される。以下ではこうした側面から危険度をとらえることにしたい。

2-1-2 危険度の二つの意味

先に述べたように「ある出来事が生じた場合のその出来事の危険さの程度」と「この危険さとその生起可能性も同時に考慮した危険さの程度」を区別する必要がある。そこで，以下のように変数を定義しておこう。

(1) 危険度 x；ある出来事が生じた場合のその出来事の危険さ

(2) 生起可能性 p；ある出来事が生じる可能性に対する主観的に把握された程度

(3) 住民の表明する危険さの程度；d

(4) 結合係数 α；住民が危険度そのものを表明する割合と住民が危険度と生起可能性を同時に考慮して表明する割合との比　$(0 \leq \alpha \leq 1)$

以上の準備のもとで，住民の主観的な危険感に対する表明は以下のようにとうえることができる。

$$d = \alpha \cdot x + (1-\alpha) \cdot x \cdot p \qquad (2-1)$$

ここで，住民の表明する危険さの程度 d 及びその表明の仕方 α は表明する個人によってバラつくことが考えられるが，我々が必要とするのは，個人個人の表明によってバラつかない，災害の起因，直前状況等を同じものについては一定の値となるような危険度 x，生起可能性 p が

得られることが望ましい。ところで，アンケート調査で得られるのは住民の表明する危険さの程度dと生起可能性pのみであり，直接危険度x，結合係数αを得ることはできない。また，未知数x，αの2つ，既知数d，pの2つのもとでは(2-1)式よりx，αを求めることはできない。しかしながら，アンケートデータから(2-1)式と独立な関係式を求めることができれば，その関係式と(2-1)式を用いてx，αを解くことができる。そこでこれらの関係を調べるために実際にアンケートを実施してそのデータを解析することにしよう。

まず，災害の想定として先にあげた災害の起因（ここでは以下外的条件と呼ぶ）と直前状態を以下のように設定した。

(a) 外的条件

A：関東大震災クラスの地震

B：家屋が揺れるくらいの地震

C：人体が揺れを感じるくらいの地震

D：あなたの上の階で火災が発生

E：あなたと同じ階で火災が発生

F：あなたの下の階で火災が発生

G：あなたの部屋で火災が発生

H: 屋根のカワラが飛ぶような暴風

I: 濠雨で出水したとき

J: 犯罪(強盗・切盗)

(b) 直前状態

1. 部屋に1人でいるとき

2. 幼児と一緒に部屋にいるとき

3. ガス・電気器具を使用中

4. ベランダにいるとき

5. 就寝中

6 入浴中

7 階段・通路にいるとき

8. エレベーター内にいるとき

9 屋上にいるとき

10 団地内店舗に買物にいっているとき

11 公園・運動場にいるとき

12 車に乗っているとき

アンケートではこれらの組み合せ(計120ケース)のそれぞれの災害想定について各々の状況の生起すると思われる主観的な可能性Pと、その主観的危険感αを5段階評価で問うものである。アンケート対象者は高島平,金町駅前団地(いわゆる面開発高層高密集合住宅である)

の居住者であり，居住ブロック，居住階別の層別サンプリングを実施し，アンケート回収の中より有効400のデータを得た。調査実施日は昭和48年8月8日～11日である（本研究に当ってはいくつかのアンケート調査を実施しているので，区別するため必要に応じてこのアンケートを高層住宅居住者アンケートと呼ぶ（文献1参照））。このデータを分析すると生起可能性を高く評価する回答者は主観的な危険さの程度dも高く評価するという傾向をもっているので，以下の線型モデルを想定し回帰分析を行ってみた。

$$d = t_1 + t_2 p \qquad (2-2)$$

この結果，表2-1のような結果となった。従って，災害の起因が犯罪の場合，自分の部屋での火災の場合，直前状態がエレベーター内にいるとき，屋上にいるときの場合では若干相関が低いが，全体的には（2-2）式の関係は高い相関係数をもっているといえよう（相関が悪かった場合はデータにおいて極端な評価のもの，たとえば犯罪の場合，自分の部屋での火災の場合，エレベーター内の場合はいづれも危険さの主観的評価値が最上級の値で評価するものが多く，結果として相関が悪くなったものと考えられる）。

SEKIREI A4 NO. 54

表2-1　線型モデルにおける相関の程度

外的条件 / 直前状態	A 関東大震災クラスの地震	B 家屋が揺れるくらいの地震	C 人体が揺れを感じるくらいの地震	D あなたの上の階で火災が発生	E あなたと同じ階で火災が発生	F あなたの下の階で火災が発生	G あなたの部屋で火災が発生	H 屋根のカワラが飛ぶような暴風	I 豪雨で出水したとき	J 犯罪（強盗・その他）
1 部屋に1人でいるとき	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +
2 幼児と一緒に部屋にいるとき	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+	+ + +	+ + +	+
3 ガス・電気器具を使用中	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+
4 ベランダにいるとき	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ +
5 就寝中	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ +
6 入浴中	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+
7 階段・通路にいるとき	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ +	+ + +	+ + +	+ + +
8 エレベーター内にいるとき	+ +	+ + +	+ + +	+ + +	+ +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+
9 屋上にいるとき	+ + +	+ + +	+ + +	+ +	+ + +	+ + +	+ +	+ + +	+ + +	+ +
10 団地内店舗に買物にいっているとき	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ +	+ + +	+ + +	+ + +
11 公園・運動場にいるとき	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ +	+ + +	+ + +	+ +
12 車に乗っているとき	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +	+ +	+ + +	+ + +	+ +

<凡例> + + + : $\gamma > 0.9$　　+ + : $\gamma > 0.8$　　+ : $\gamma > 0.7$

以上の結果から（2-2）式が成立するものとして以下の分析を進めることにしたい。

まず，（2-2）式及び（2-1）式の対応から

$$t_1 = \alpha x, \quad t_2 = (1-\alpha)x \tag{2-3}$$

が得られるが，（2-2）式の回帰分析から t_1, t_2 が得られるので，上式の関係式より

$$x = t_1 + t_2 \tag{2-4}$$

$$\alpha = t_1/(t_1 + t_2) \tag{2-5}$$

もうることができる。

2-1-3 状況と危険度

以上の手続きによって危険度Xを実際に求めてみると表2-2のようになる（アンケートでは1～5の評価値であるが，0～1の値に基準化してある）。また，各直前状態別，各外的条件別の生起可能性を求めたものが表2-3である（アンケートでは1～5の評価値であるが，0～1の値に基準化してある）。さらに，各直前状況，各外的条件毎に危険度Xを図示すると図2-1のようになる。また，図2-2では先に述べた結合係数αを図示してある。これらの結果によれば，住民のもっている危険さの認識では以下のようになっていることがわかる。

a) 地震の災害について言えば，地震の規模に応じて危険度も増加している。

b) 火災については，その危険度は自分の部屋での出火，自分と同一階での出火，下階での出火，上階での出火の順になっている。

c) 犯罪に対する危険感がきわめて高い（関東大震災程度の危険感をもっている）。

d) 幼児といるとき，ガス器具を使用しているとき，エレベーターにいるとき，屋上にいるときなどで高い危険度となっている。

DESIGNED A4 NO. 54

表2-2 各想定状況別の危険度

外的条件 / 直前状態	A 関東大震災クラスの地震	B 家屋が揺れるくらいの地震	C 人体が揺れる感じくらいの地震	D あなたの上の階で火災が発生	E あなたと同じ階で火災が発生	F あなたの下の階で火災が発生	G あなたの部屋で火災が発生	H 屋根のカワラが飛ぶような暴風	I 浸水したとき	J 犯罪(強盗,ひったくり)
1 部屋に1人でいるとき	0.832	0.568	0.378	0.825	0.871	0.915	0.983	0.770	0.638	0.926
2 幼児と一緒に部屋にいるとき	0.998	0.711	0.503	0.895	0.930	0.985	1.000	0.877	0.885	1.000
3 ガス・電気器具を使用中	0.988	0.823	0.572	0.893	0.889	0.919	0.999	0.840	0.805	1.000
4 ベランダにいるとき	0.926	0.772	0.593	0.894	0.920	0.931	0.983	0.825	0.798	0.958
5 就寝中	0.894	0.682	0.452	0.894	0.933	0.923	0.953	0.819	0.723	0.997
6 入浴中	0.927	0.804	0.596	0.896	0.898	0.908	0.930	0.803	0.846	1.000
7 階段・通路にいるとき	0.873	0.757	0.501	0.869	0.915	0.885	0.915	0.827	0.846	0.954
8 エレベーター内にいるとき	0.952	0.818	0.668	0.840	0.875	0.865	0.931	0.815	0.912	1.000
9 屋上にいるとき	0.971	0.697	0.529	0.894	0.851	0.827	0.949	0.926	0.863	0.984
10 団地内店舗に買物にいっているとき	0.876	0.733	0.509	0.805	0.790	0.790	0.888	0.981	0.918	0.903
11 公園・運動場にいるとき	0.820	0.579	0.352	0.745	0.735	0.753	0.842	0.875	0.990	0.892
12 車に乗っているとき	0.860	0.634	0.462	0.760	0.781	0.737	0.810	0.894	0.952	0.929

表2-3　生起可能性（0～1に基準化）

外的事件 / 直前状態	A 関東大震災クラスの地震	B 家屋が揺れるくらいの地震	C 人体が揺れるくらいの地震	D あなたの上の階で火災が発生	E あなたと同じ階で火災が発生	F あなたの下の階で火災が発生	G あなたの部屋で火災が発生	H 屋根のガラスが割れるような暴風	I 豪雨で床上したとき	J 犯罪（強盗・ナカ盗）
1 部屋に1人でいるとき	0.550	0.575	0.543	0.478	0.490	0.500	0.465	0.370	0.233	0.493
2 幼児と一緒に部屋にいるとき	0.520	0.485	0.438	0.375	0.388	0.403	0.353	0.265	0.180	0.383
3 ガス・電気器具を使用中	0.638	0.380	0.588	0.500	0.518	0.510	0.495	0.358	0.215	0.388
4 ベランダにいるとき	0.538	0.518	0.493	0.448	0.458	0.473	0.443	0.385	0.250	0.413
5 就寝中	0.660	0.575	0.553	0.488	0.495	0.503	0.433	0.348	0.230	0.463
6 入浴中	0.608	0.515	0.343	0.463	0.480	0.483	0.440	0.308	0.218	0.453
7 階段・通路にいるとき	0.538	0.480	0.453	0.400	0.420	0.430	0.373	0.315	0.208	0.445
8 エレベーター内にいるとき	0.605	0.500	0.495	0.400	0.410	0.398	0.318	0.273	0.215	0.485
9 屋上にいるとき	0.425	0.370	0.370	0.325	0.345	0.335	0.303	0.313	0.185	0.415
10 周辺内店舗に買物にうかがうとき	0.585	0.483	0.433	0.338	0.360	0.350	0.313	0.345	0.258	0.325
11 公園・運動場にいるとき	0.438	0.385	0.358	0.295	0.318	0.318	0.303	0.353	0.255	0.343
12 車にのっているとき	0.468	0.400	0.370	0.273	0.280	0.283	0.255	0.305	0.270	0.333

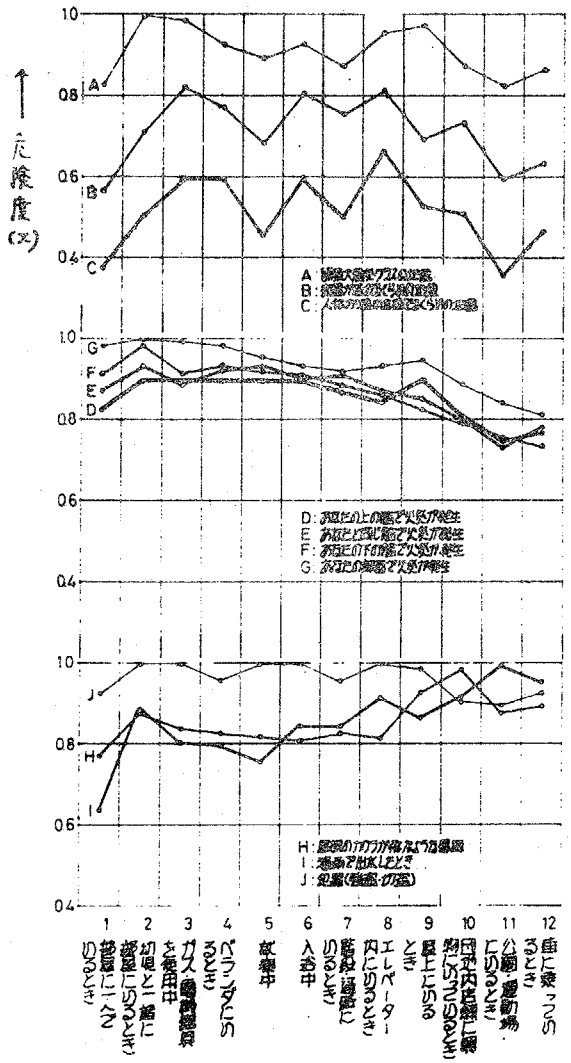


図 2-1　各想定状況別危険度(x)

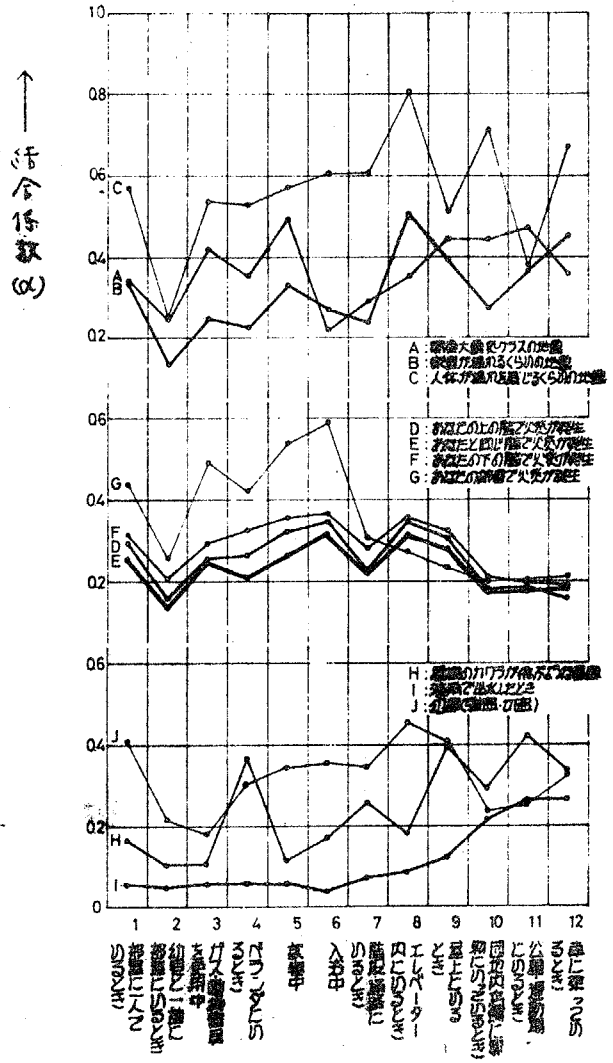


図 2-2　各想定状況別結合係数(α)

e) 大地震の生起可能性が高く評価されている。

f) ガス器具の使用中，就寝中の可能性が高く，ついで入浴中，エレベーター内にいるときの可能性が高く評価されている。

g) 豪雨の生起可能性はきわめて低い（このことはアンケート回答者の居住環境が高層住宅であるためと思われる）。

h) 幼児と一緒にいる場合は結合係数αの値は小さく，従って，可能性を含めた危険さの評価がなされる傾向が強いことがわかる。

i) エレベーター内にいる場合は（豪雨，暴風の場合を除いて）結合係数αが大きく，従って，可能性を含めない危険さの評価がなされる傾向が強い。

以上の様な安全計画に対し次の諸実に住民側からの期待があると考えてよいと思われ，こうした実における，より現実的，総合的な研究が期待されているといえよう。

1) 出火場所に応じた避難計画（b に関して）

2) 防犯と関連をもった安全計画（避難のためのルートが防犯上好ましくないという場合などにおける総合的な防犯＋安全計画の必要性）（c に関連して）

3) 幼児などのいる家庭の安全計画の特殊性（d, h に関連して）

4) ガス器具等の安全性の確保（d, f に関連して）

5) エレベーターの安全性の確保，とくに耐震性，耐火性の向上ならびに防犯上の検討（c, d, f, i に関連して）

2-1-4 危険の認識範囲

危険性というものは最終的には人命に対する被害というものに結びついて考えられるが，災害の発生場所，災害の拡大の仕方によりその結びつき方は異なる。つまり，災害の形態と人命の被害との関係が問題となっている。こうした災害の発生拡大範囲と危険感との関連を検討しておこう。

まず，独立住宅に住む場合と集合住宅に住む場合によって空間の範囲の設定の仕方も異なってくるので，ここではそれぞれアンケートを実施し，それらの結果を検討することにしたい。

a) 独立住宅の場合

独立住宅の場合については，以下のような方法でアンケート調査を実施した(他のアンケート調査と区別するため必要に応じて都内個人住宅居住者調査と呼ぶ(文献2参照))。東京消防庁の危険度マップの作成等に用いられた正方メッシュの各ブロックよりランダムサンプリングで10ブロックを選出し，そのブロック内の個人住宅居住世帯を調査対象とした。アンケート回収状況は表2-4に示されている。また，全体の有効回収率は79.4%であった。この調査においては，自分の住む家の危険さの程度と自宅

表2-4 回収状況

ブロック ナンバー	所属区	準絶 回収数	有効 回収数
01	港	32	32
02	大田	47	45
03	世田谷	42	38
04	新宿	38	36
05	文京	31	26
06	板橋	41	39
07	練馬	68	64
08	足立	52	47
09	江東	43	40
10	江戸川	35	30

周辺の危険さの程度を1～10の10段階評価で質問している。便宜上，前者を自宅危険度，後者を周辺危険度と呼ぶことにする。

まず，自宅危険度 x（$x=1\sim10$）と回答したものを一つのグループとして回答者を分類する。この各グループにおける周辺危険度の値の平均値を求めプロットすると図2－3のようになる。この結果をみると自宅危険度の増加にともない周辺危険度も増加していることがわかる。ちなみに自宅危険度を x とし，各自宅危険度における周辺危険度の平均値を y とすると

$$y=0.6x+1.5 \quad (r=0.975) \qquad (4-1)$$

なる回帰式を求めることができる。このことから自宅危険度と周辺危険度は高い相関関係にあることがわかる。従って，住民の安全に対する認識を考えると自分の住む空間とその周辺の空間とをかけ離して把握することはすべきでなく，より広い視点での建築安全計画が期待されていると言える。

(b) 集合住宅の場合

先に述べた高層住宅居住者アンケートにおいては，火災の発生場所として，自分の部屋，自分の居住階とその上，下階について比較したが，図2－1にみるごとく外

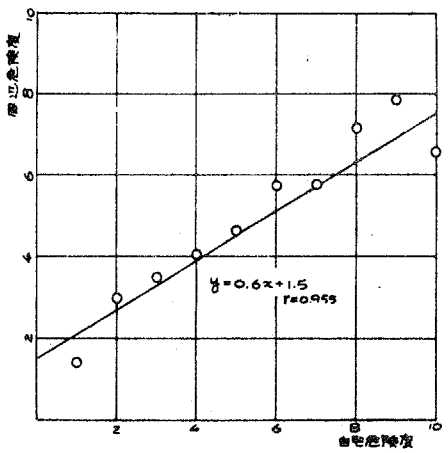


図 2-3 自宅危険度と周辺危険度

出火場合（自分の部屋から出ている場合）を除いては自分の部屋の出火，自分と同じ階の出火，下階の出火，上階の出火の順になっており，空間の安全から考えられるひとつの階層性が構成されているといえよう。

SEKISEI A4 NO 54

2-1-5 住民の属性と危険度

危険さの程度に対する認識というものも認識する個人の性格，住環境などに深く依存している。ここではとくに家族に老人，病人を含む場合，住居の構造種別，高層住宅における住居階等と危険さの認識との関係を調べてみる。

先に述べた都内個人住宅調査において，a) 寝たばこをするかしないか，b) たばこの投げ捨てをしたことがあるかないか，にそれぞれ回答者を分類し，各グループ毎に自宅危険度の平均値を求めると図2-4のようになる。この結果，安全上好ましくない行為をする人ほど危険意識が低いことがわかる。すなわち，個人の生活上の行為というものと安全意識には一定の関係があり，危険意識の低い人ほど安全上好ましくない行為をする傾向を内在しているともいえる。

また，都内個人住宅居住者調査において，a) 老人のいる家といない家 b) 病人のいる家といない家についてそれぞれ回答者を分類し，そのグループ毎に自宅危険度の平均値を求めてみると図2-5のようになる。この図からわかるように明らかに老人のいる場合，病人のいる場合は自分の住む環境に対してより高い危険意識をもって

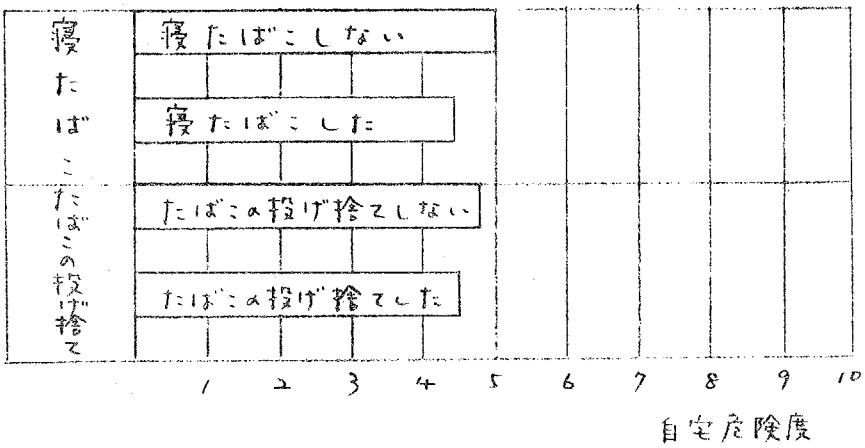


図2－4 生活行為と危険度

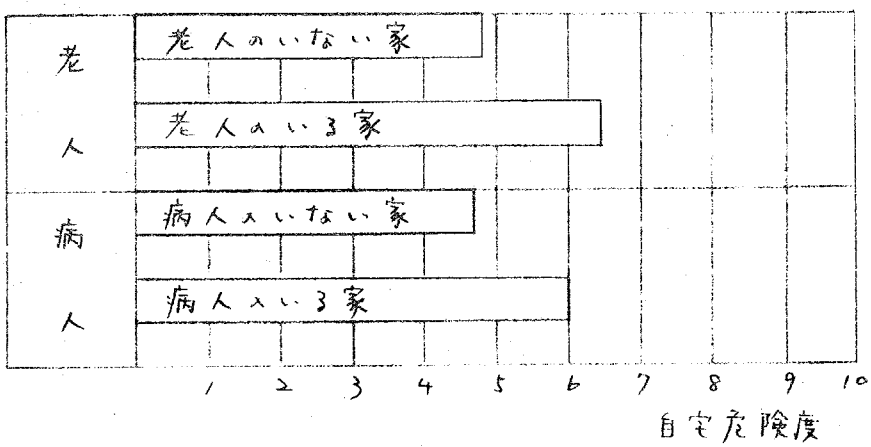


図2－5 家族の属性の差による危険意識の差

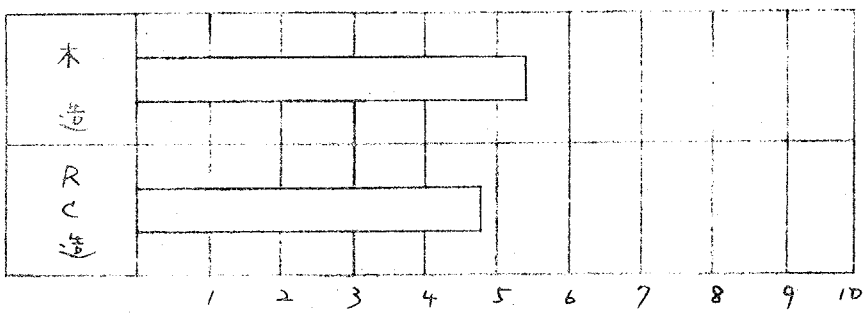


図2－6 住宅タイプと危険度

いることがわかる。さらに，個人の住む住宅の構造種別と危険さの程度の認識の関係をみるため，アンケート回答者のうちから木造家屋に住む者とRC造の家屋に住む者についてそれぞれのグループの危険度の平均値を求めてみると図2－6のようになる。このことから住環境の防災安全性能が住民の危険意識に影響を与えていることがわかる。

一方，先の高層住宅居住者アンケートにおいては居住階によって若干の危険意識の差がみられたので，より詳しく分析するため，居住者を次の三つのグループに分けて危険さの主観的表明α，生起可能性pを調べる。

i) 低層部居住者；1階から4階に住む居住者

ii) 中層部居住者；5階から9階に住む居住者

iii) 高層部居住者；10階から14階に住む居住者

このとき，地震に関する危険さの程度αは図2－7に示されている。この結果から地震に関しては高層部に住むほど危険意識は高いということができる。しかし，大地震の生起可能性に対する認識を調べてみると図2－8のようになり，高層部居住者はその可能性を低く考えていることがわかる。また，火災に関する危険さの程度αについては図2－9のようになる。また，生起可能性に関

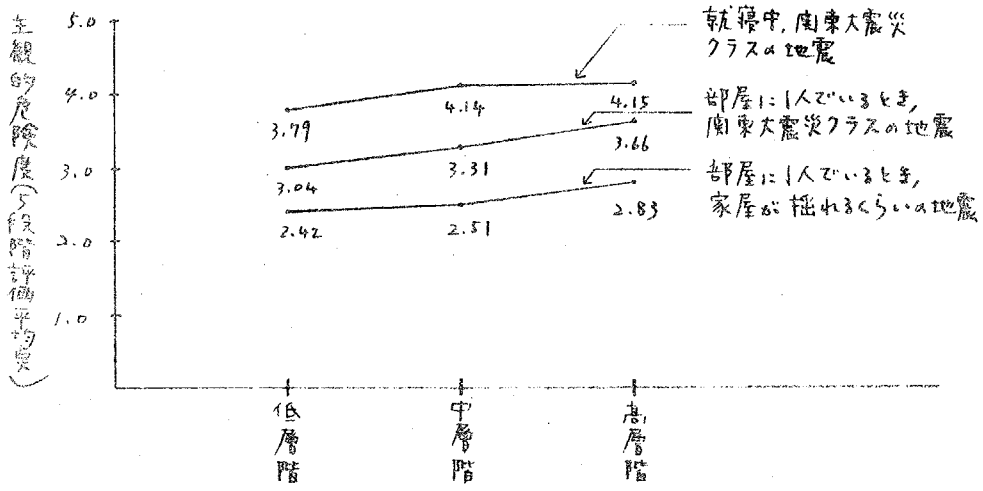


図2-7　居住階と危険度（地震に関して）

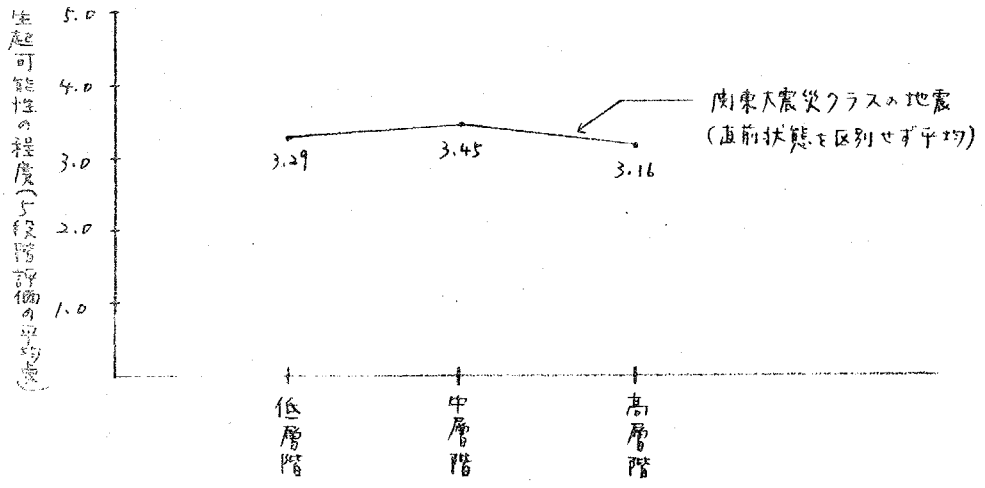


図2-8　居住階と生起可能性の認識（地震に関して）

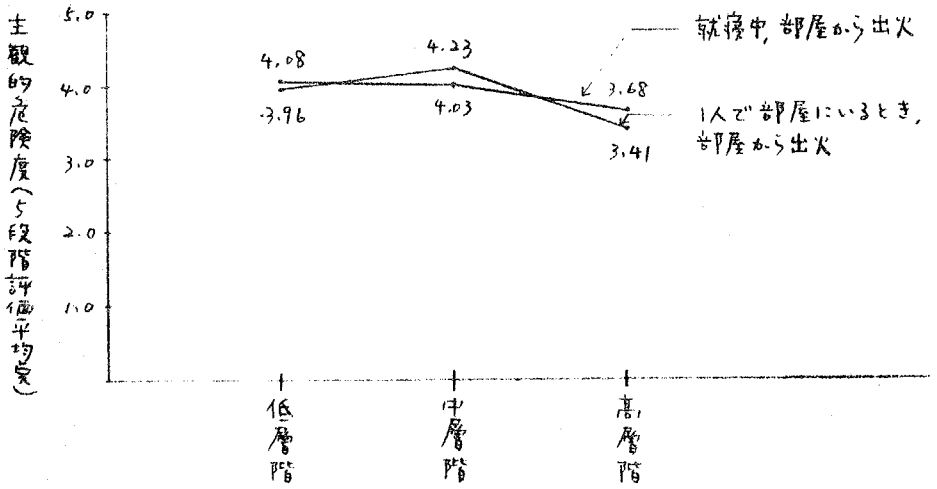


図2-9　居住階と危険度（火災に関して）

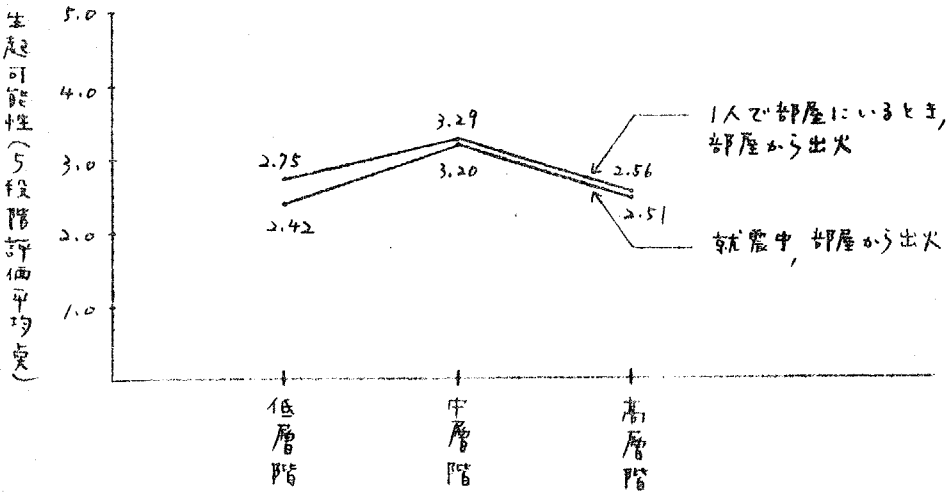


図2-10　居住階と生起可能性の認識（火災に関して）

しても調べてみると図2-10のようになっている。これらの結果から高層部居住者の災害に対する認識は地震，火災ともに中層部，低層部居住者に比較して楽観的であると考えることができる。

以上の住民の属性と危険度の認識との関係を調べた結果，住民の性格と住環境生活行為及び安全の認識には図2-11のような一定の関係が存在しており，こうした関係を考慮した建築計画，建築安全計画が期待されるといえよう。

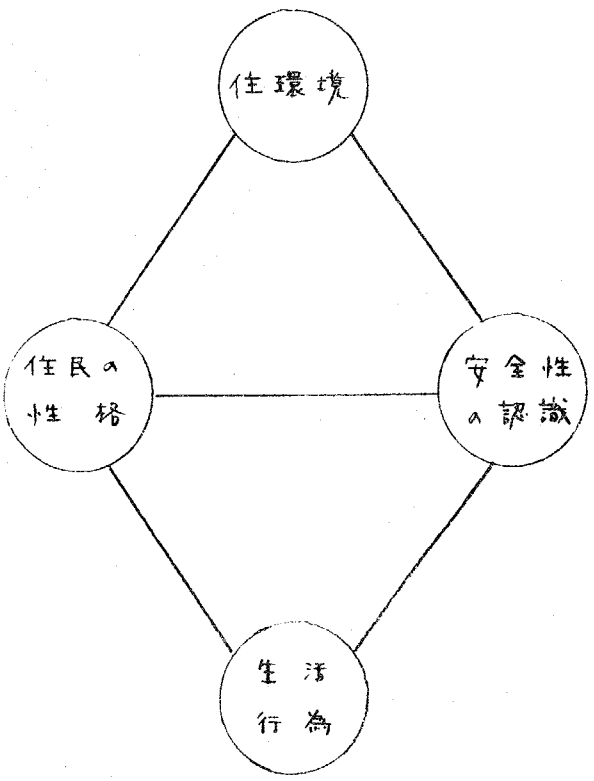


図2-11 安全性の認識と関連要素

SEKIDO A4 NO 54

2-1-6 防災対策と危険度

危険意識と防災対策の関係を検討しておこう。

個人住宅でなしうる対策としては家屋の構造の選択(耐火造他)があるが，ここでは主に以下にあげるような付加的な対策についてのみ検討することにしよう。

i) スプリンクラーの設置

ii) 消火器の設置

iii) 火災報知器の設置

iv) 非常ベルの取り付け

v) 避難用具の準備

vi) 水のくみおき

vii) 保険加入

これらの対策は個人的な判断である程度の経済的負担をともなうものもあるが，非較的容易に実行できるものである。これらの対策を講じた場合の効果に対する評価値として都内個人住宅居住者調査における自宅危険度の10段階評価値dとその回答者が実行している各対策の関係を検討する。まず，上記のi)～vii)の7つの対策を併用しているケースが多いので，実際に行われているこれらの対策の組み合せを調べると表2-5のようになる。

ところで，こうした47種類の対策の組み合せx(x=

表2-5　防災対策組み合せ

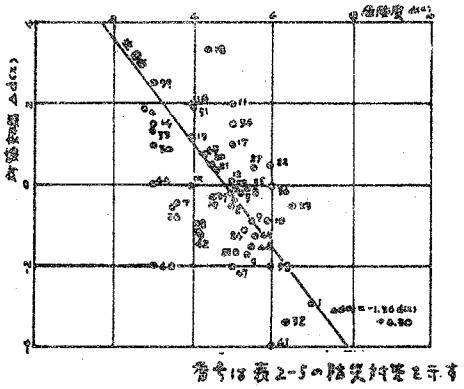
防災対策	スプリンクラー	消火器	火災報知器	非常ベル	避難用具	水のくみおき	保険
1	○						
2		○					
3			○				
4	○		○				
5		○	○				
6	○	○	○				
7				○			
8		○		○			
9			○	○			
10		○	○	○			
11	○	○	○	○			
12					○		
13	○		○		○		
14				○	○		
15		○		○	○		
16			○	○	○		
17		○	○	○	○		
18						○	
19		○				○	
20			○			○	
21		○	○			○	
22		○			○	○	
23		○	○	○	○	○	
24							○

防災対策	スプリンクラー	消火器	火災報知器	非常ベル	避難用具	水のくみおき	保険
25		○					○
26			○				○
27		○	○				○
28				○			○
29		○		○			○
30			○	○			○
31	○		○	○			○
32		○	○	○			○
33	○	○	○	○			○
34					○		○
35		○			○		○
36			○	○	○		○
37		○				○	○
38			○			○	○
39	○	○	○			○	○
40			○	○		○	○
41		○	○	○		○	○
42					○	○	○
43		○			○	○	○
44			○		○	○	○
45		○	○		○	○	○
46		○		○	○	○	○
47			○	○	○	○	○

1～47）のそれぞれに該当する人の危険度の平均値を $d(x)$ とし，さらに，現状ではこの対策組み合せ x を実行していないが，今後この対策組み合せ x を実行したいと希望している人の危険度の平均値を $d'(x)$ とする。このとき，対策組み合せ x の効果を次の式で表わすことにしよう。

$$\Delta d(x) = d'(x) - d(x)$$

この値は対策 x がなされていない人となされている人の危険度の差であり，従って，対策 x の効果ということができる。図2－12は横軸に対策 x を実施している人の危険度の平均値 $d(x)$，縦軸に対策 x の効果 $\Delta d(x)$ をとって各対策を示したものである。従って，危険度 $d(x)$ が小さく，効果 $\Delta d(x)$ が大きいもの，すなわち，図中，左上方に位置するものほど好ましい対策ということができよう。この結果，18. 水のくみおき，39. スプリンクラー＋消火器＋火災報知器＋水のくみおき＋保険，4. スプリンクラー＋火災報知器，16. 火災報知器＋非常ベル＋避難用具，31. スプリンクラー＋火災報知器＋非常ベル＋保険の各組み合せが高い評価となっている。これらの対策には2つの傾向があり，1つは18，39，4，11に見るように積極的に消火対策を考えているもので


危険度 d(cm)
対策効果 Δd(cm)
4
2
0
-2
-4
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
30
32
34
36
38
40
42
44
46
48
50
52
54
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67

り，もう1つは16，31に見るように覚知，避難に重点をおくものである。また，住民の側から水のくみおきという非常に初歩的な対策が高く評価されていることも注目できる。調査対象地区の一部でヒヤリング調査を合せて行った結果では，水のくみおきのようにたやすくできることが対策の実行にとって現実的に重要であるという考えをもつ回答者が多かったことがこれらの分析結果と対応しているといえる。

以上の住民の危険度の認識の分析より得られる諸結果をみると，それらはいづれも住民のいわば自分の生命を現実の場で守るという，より基本的なより現実的な視点からの認識であり，単に工学的結果だけを用いて防災対策を考えることは危険であり，こうした認識にもとづいたより基本的な総合防災対策が期待されているといえる。

2－2　安全性評価意識

2－2－1　調査の実施概容

調査の実施形式はある決められた地域の住民に対し，自宅訪問によるアンケート配布回収形式で行われた。

対象地区，調査日時は表2－6に示されている。アンケート用紙が図2－13に示されている。

調査の実施状況は表2－6に示されている。配布数は配布対象数に対して全数を計画したが，留守宅等があり，配布数は結局240となった。回収は配布の約84%にあたる201の数を得た。しかし，これらの回収データの中には各問において回答のないものが含まれており，不完全なものが多く，結局，有効データとして用いるのはこの回収された中から95のサンプルに限ることになった。

この95のうちでも各質問毎に分けると，有効データは表に示すように若干小さな数となっている。

問1　以下に各々二つの火災事例の概略を記載致しましたが、左右のどちらがより好ましくない火災であると思いますか。1～30の各設例にならって、○印を（左の方がどちらも好ましくない場合）、×印（右の方が左より好ましくない場合）、△印（左右の差はないと考える場合）、いずれかの記号で記入して下さい。

（例）　1（2人、5千万）△　R（0人、1千万）

（2人の死者の方が好ましくないと考える場合）

1	（1人、500万）	□	（0人、1　億）	16	（5人、1千万）	□	（5人、5千万）
2	（3人、100万）	□	（1人、500万）	17	（3人、1　億）	□	（5人、5千万）
3	（0人、1　億）	□	（1人、1千万）	18	（1人、1千万）	□	（3人、500万）
4	（3人、1千万）	□	（1人、5千万）	19	（5人、500万）	□	（5人、5千万）
5	（0人、5千万）	□	（1人、500万）	20	（0人、5千万）	□	（1人、100万）
6	（3人、1　億）	□	（5人、1千万）	21	（3人、1千万）	□	（5人、500万）
7	（0人、1　億）	□	（1人、100万）	22	（1人、5千万）	□	（0人、1　億）
8	（5人、100万）	□	（3人、1　億）	23	（1人、5千万）	□	（3人、500万）
9	（1人、1千万）	□	（0人、5千万）	24	（1人、500万）	□	（0人、1千万）
10	（1人、5千万）	□	（3人、100万）	25	（3人、5千万）	□	（1人、1　億）
11	（5人、500万）	□	（3人、5千万）	26	（3人、100万）	□	（1人、1　億）
12	（1人、100万）	□	（0人、500万）	27	（5人、500万）	□	（3人、1　億）
13	（0人、1千万）	□	（1人、100万）	28	（5人、100万）	□	（3人、500万）
14	（3人、1千万）	□	（1人、1　億）	29	（3人、500万）	□	（1人、1　億）
15	（3人、1千万）	□	（5人、500万）	30	（1人、1千万）	□	（3人、100万）

問2　右の表にあるものは、ある6都市の最近10年間の火災死傷者数の数を調べたものです。この6都市の人口、産業、生活上の利便性等の条件がほぼ等しいとみた場合、どの都市に住みたいと思いますか。住みたいと思う順に番号をつけて下さい。（右上図参照）

年	A市	B市	C市	D市	E市	F市
	(人)	(人)	(人)	(人)	(人)	(人)
66	10	10	9	8	5	4
67	12	13	10	11	7	7
68	8	6	7	5	3	1
69	13	16	10	12	8	9
70	11	9	8	7	5	5
71	14	20	11	16	10	15
72	7	4	6	3	2	1
73	9	7	7	6	4	2
74	10	8	8	6	4	3
75	11	12	9	9	6	6
平　均	10.5	10.5	8.5	8.3	5.4	5.1
標準偏差*	2.1	4.6	1.5	3.6	2.3	4.1
住みたいと思う順番	(　)	(　)	(　)	(　)	(　)	(　)

* 標準偏差とはバラツキを表わす数で、大きい程ばらついていることを示す。

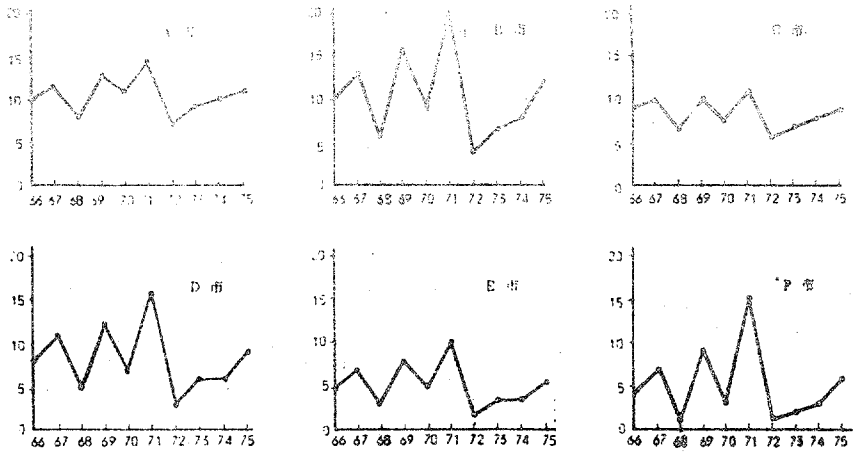


図 2-13　アンケート内容

図 2-13　アンケート内容

表2-6 調査状況及び分析有効データ状況

1. 調査年月日

アンケート配布：昭和52年10月11日(火)～13日(木)
アンケート回収：昭和52年 10月12日(水)～14日(金)，24日(月)

2. 調査対象地区

東京都江東区大島四丁目

3. 回収状況

配布対象数 …467(世帯)
配布数 …240 (配布率 240/467=0.514)
回収数 …201 (回収率 201/240=0.838)
有効回収数* …95 (有効率 95/201=0.473)
* 問1，問2のそれぞれにおいて完全に答えてあるもの)

4. 各質問別 有効データ数

問1 … 88
問2 … 90

5 問1における同一内容質問(2組)についての回答状況

2組とも同一回答 …… 64 (72.7%)
1組が同一回答でないもの … 18 (20.5%)
2組とも同一回答でないもの … 6 (6.8%)

6. 上記について同一回答でないものを除いた「整合性のあるデータ」数

問1 …… 64
問2 …… 67

2－2－2　人命の経済的評価の可能性

2－2－2－1　評価者の態度の安定性

先のアンケートにおける質問は2つの部分から成っており，その最初の問は人命と金銭的損失の明示された2つの災害のどちらがより好ましからざる災害であるかを問うものであるが，こうした問自身，解答者に人命を金銭で評価するという意図をもっているように理解される可能性がある。そこで，もし回答者がこうした人命と金銭を比較することに強く反発する態度を持っているとすれば，それは回答拒否の形で表われる可能性がある。まず，先に述べた回収状況からいうと，配布と回収の比率すなわち回収率は約84％で，他の調査と比較してもそれほど顕著な差があるとはいえない。しかし，回収された中から有効なサンプルの比率を考えると約47％で，アンケートに対する回答者のとりつきにくさ，回答のしにくさといったものが反映しているように思われる。すなわち，有効回収率がかりに通常のアンケートで80％だったとすれば，約30％の人がこのアンケートに対して回答しにくいために不完全な回答を行ったと考えることができる。このことは，アンケートに対する，とりわけ人命と金銭を比較するというアンケートに対して，回答者の心

理的な低抗があったと考えてよいのではないかと思われる。従って，後に述べる回答した人の中から得られる結果というものも，こうした回答をしなかった人がいたという前提のもとに評価されなければならない。

このアンケートにおいては，先に述べたように同一質問が2つ組みこまれており，同一質問に対して同一回答をするか否かにより回答者の評価態度というものが一定しているか一定していないかというものを間接的に知りうるようになっている。例えばすなわち人命と金銭を比較する質問における有効データ数は88であったが，2組とも同一の回答を行ったのは約73%にあたる64人であり，1組については同一回答でなかったもの18人，2組とも同一回答でないもの6人という割合になった。従って，27%の人が同一質問に対して違った答を下すという不安定な回答を行っているわけである。このことからもこの質問に対する回答のしにくさというものをうかがい知ることができる。以後の分析では，この同一質問に対して同一の回答を行っている人のデータをかりに整合性のあるデータと呼び，同一質問に対して異なる回答を行っているものをかりに整合性のないデータと呼ぶ。そこで，この整合性のあるデータのみを用いた集計分析結果を

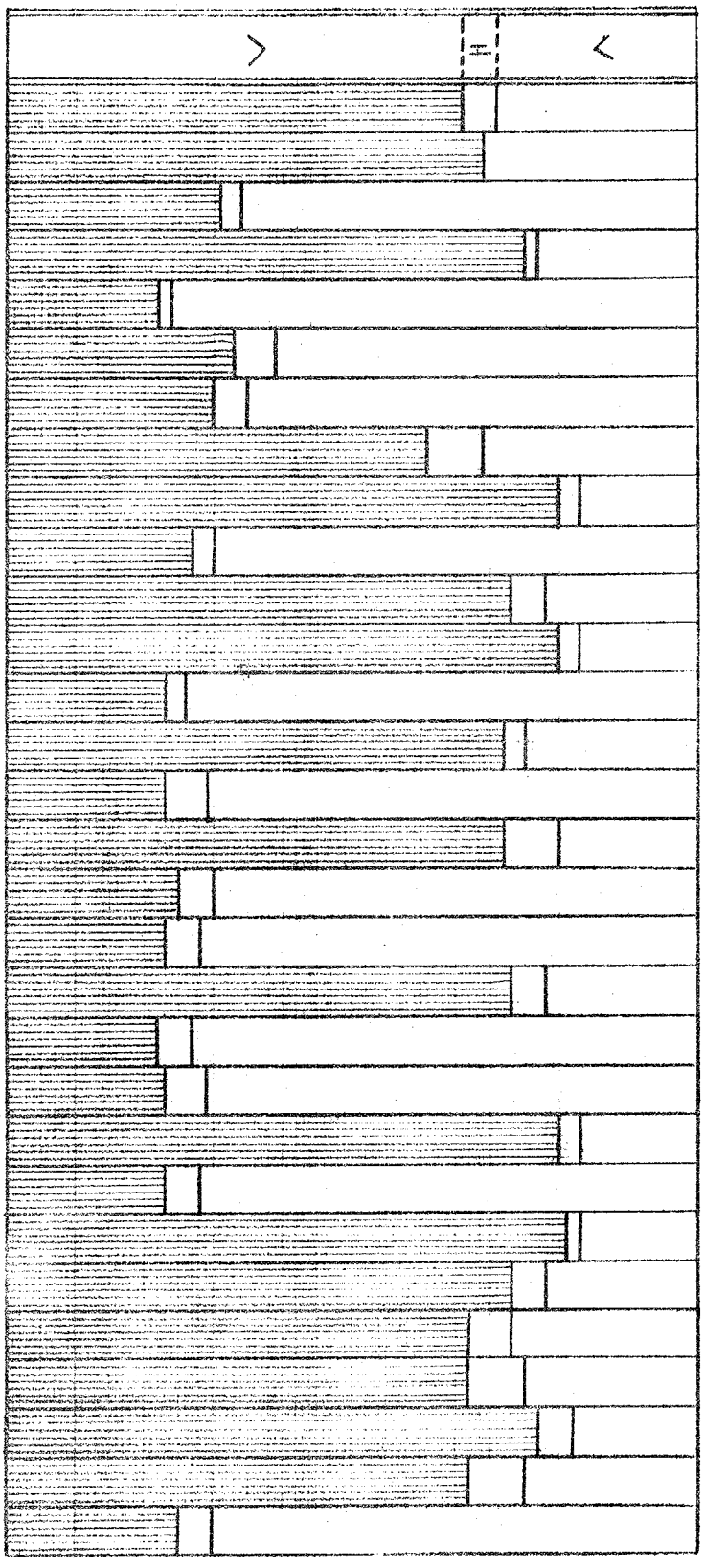
中心にして論じる。

2-2-2-2　各比較における評価の割合

人命と金銭の明示された2つの災害の比較についての評価の割合が図2-14に記されている。この結果，ほとんどの人が人命損失の大小によって災害の大きさを比較しているということができる。人命の損失の大きい方をより好ましくないとする人の割合は各質問とも70%前後であり，逆に20%程度の人が人命よりも金銭的損失の大きさを重視しているということができる。

人命の損失の差が一定でも金銭の損失の差が変ってくると，その割合は多少変ることが予想されるので，人命の損失がなく1億円の金銭的損失を生じるような災害と1人の人命損失を伴う災害とを比較してみると，図2-15-Aのようになる。これでみると，同じ1人の人命的損失でも損害金額が減少するに従って，人命の損失の方が好ましいとする割合は減少する。すなわち，人命1人，金銭的損失5千万円の災害というものと，人命0人，金銭的損失1億円の災害とを比較すると，80%以上の人が人命0人の方が好ましいとしているのに対して，人命1人，1千万円の金銭的損失と，人命0人のものとを比較すると，人

サンプル数 64



1	(1人, 500万)	(0人, 1億)
2	(3人, 100万)	(1人, 500万)
3	(0人, 1億)	(1人, 1千万)
4	(3人, 1千万)	(1人, 5千万)
5	(0人, 5千万)	(1人, 500万)
6	(3人, 1億)	(5人, 1千万)
7	(0人, 1億)	(1人, 100万)
8	(5人, 100万)	(3人, 1億)
9	(1人, 1千万)	(0人, 5千万)
10	(1人, 5千万)	(3人, 100万)
11	(5人, 500万)	(3人, 5千万)
12	(1人, 100万)	(0人, 500万)
13	(0人, 1千万)	(1人, 100万)
14	(3人, 1千万)	(1人, 1億)
15	(3人, 1千万)	(5人, 500万)
16	(5人, 1千万)	(3人, 5千万)
17	(3人, 1億)	(5人, 5千万)
18	(1人, 1千万)	(3人, 500万)
19	(5人, 500万)	(3人, 5千万)
20	(0人, 5千万)	(1人, 100万)
21	(3人, 1千万)	(5人, 500万)
22	(1人, 5千万)	(0人, 1億)
23	(1人, 5千万)	(3人, 500万)
24	(1人, 500万)	(0人, 1千万)
25	(3人, 5千万)	(1人, 1億)
26	(3人, 100万)	(1人, 1億)
27	(5人, 500万)	(3人, 1億)
28	(5人, 100万)	(3人, 500万)
29	(3人, 500万)	(1人, 1億)
30	(1人, 1千万)	(3人, 100万)

図 2-14　人命損失と金銭的損失の比較評価割合

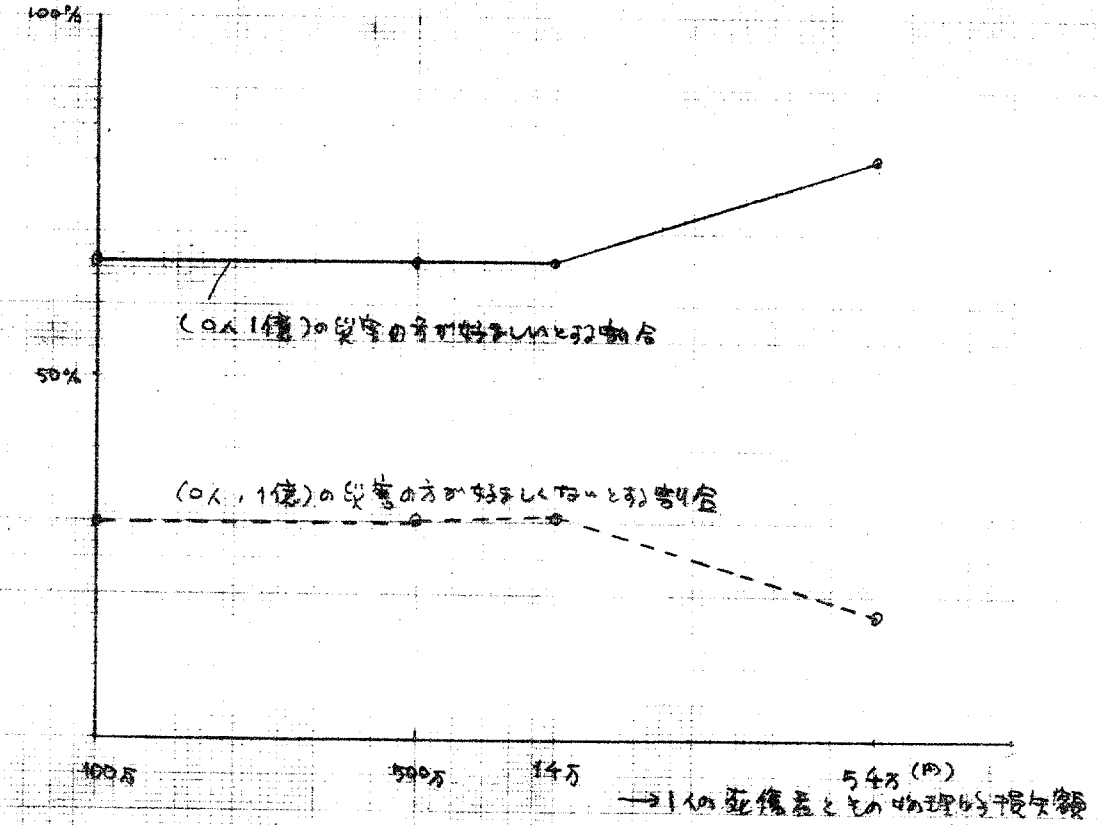


図2-15-A (0人，1億の災害とくらべたときの 1人の災害の評価

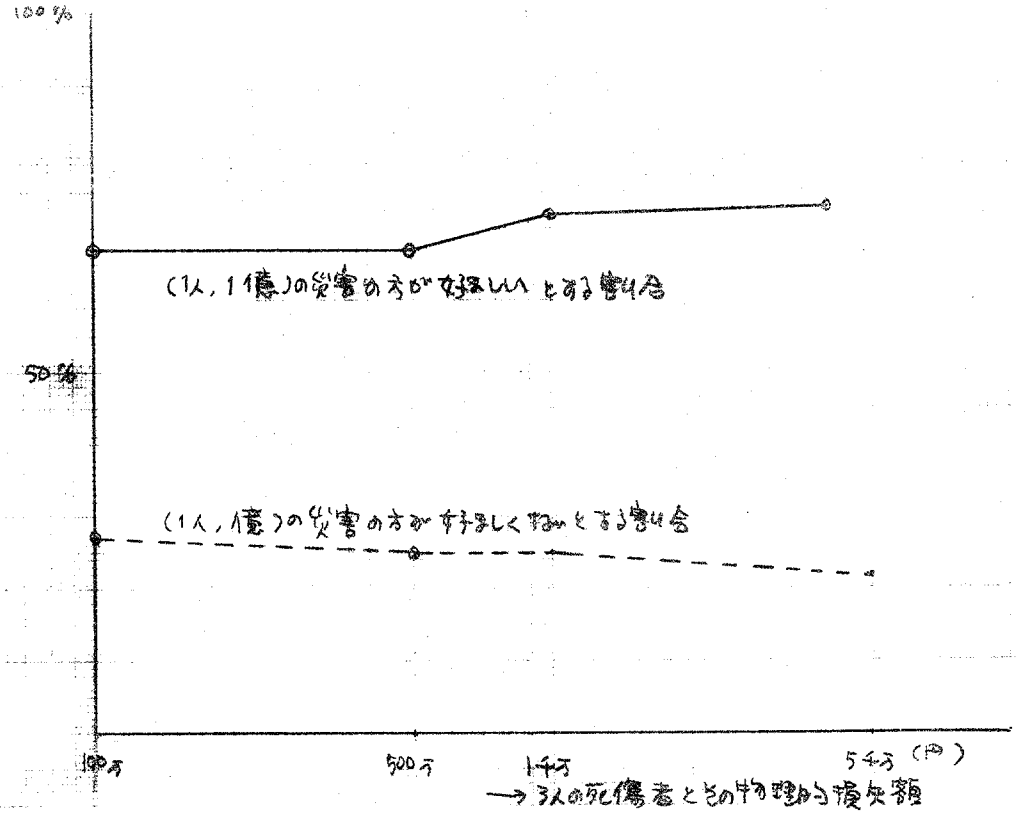


図2-15-3　(1人, 1億)の災害とくらべたときの3人の災害の評価

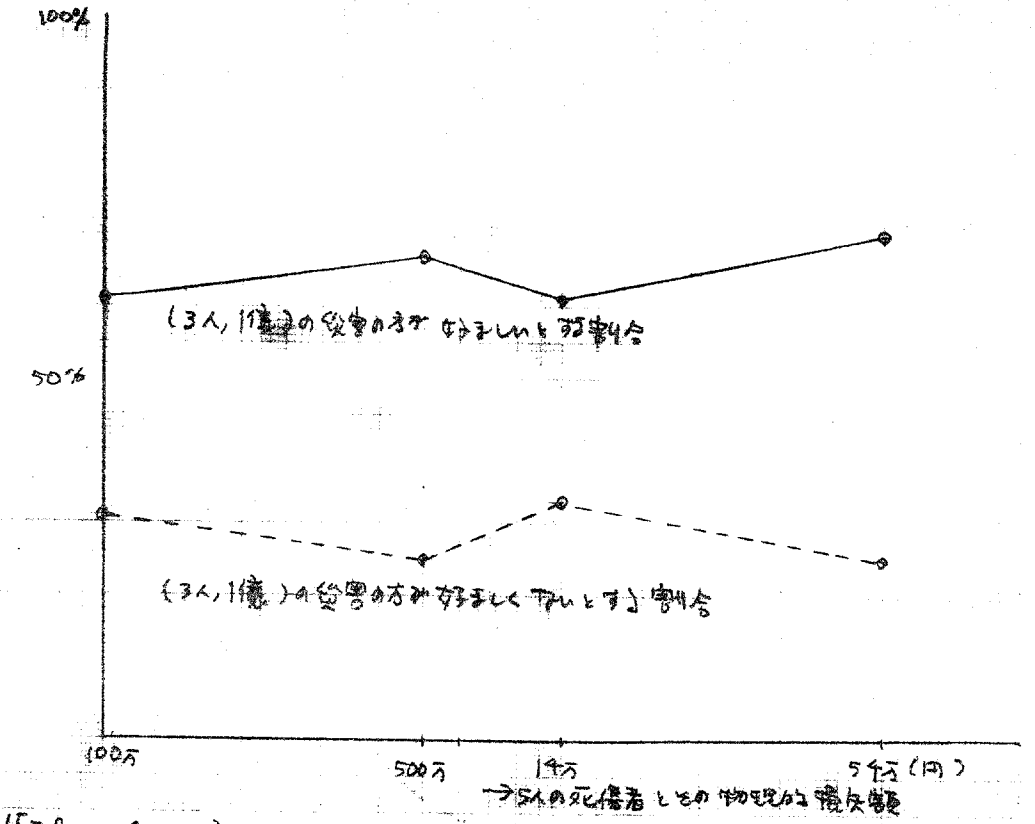


図 2-15-c (3人, 1億)の災害とくらべたときの 5人の災害の評価

命0人の方が好ましいとする割合は76%に落ちている。この差は金銭的損失の大小によって起こったと考えられるわけである。すなわち，1人の死傷者をだしている災害の中でも金銭的損失が増加すれば，より好ましくないと判断される率は当然のことながら増加するのである。同様の検討を人命損失が1人の場合と3人の場合について行ったものが図2-15-Bであり，人命3人と5人のものについて比較したものが図2-15-Cである。図2-15-Bについては先と同様な傾向が見られたが，図2-15-Cにおいては，途中で予想される結果と異なった傾向が見られる。このことは，人命的損失が0人，1人，3人といった程度の場合はかなり整合性のある判断を下しているが，3人から5人といった人命的損失が増加してくるにしたがい，5人と3人の差というものが不明確になってくることによるものではないかと考えられる。

図2-16には各比較の傾向も70%以上の人が死傷者の少ない方を好ましいと考える場合に実線で，60%から69%の人が死傷者の少ない方を好ましいとしている場合を点線で図示している。この図からいえるように，金銭的な差が少ない場合にはほとんど70%以上の人が死傷者の少ない方を良しと判断している。しかし，損失額が100

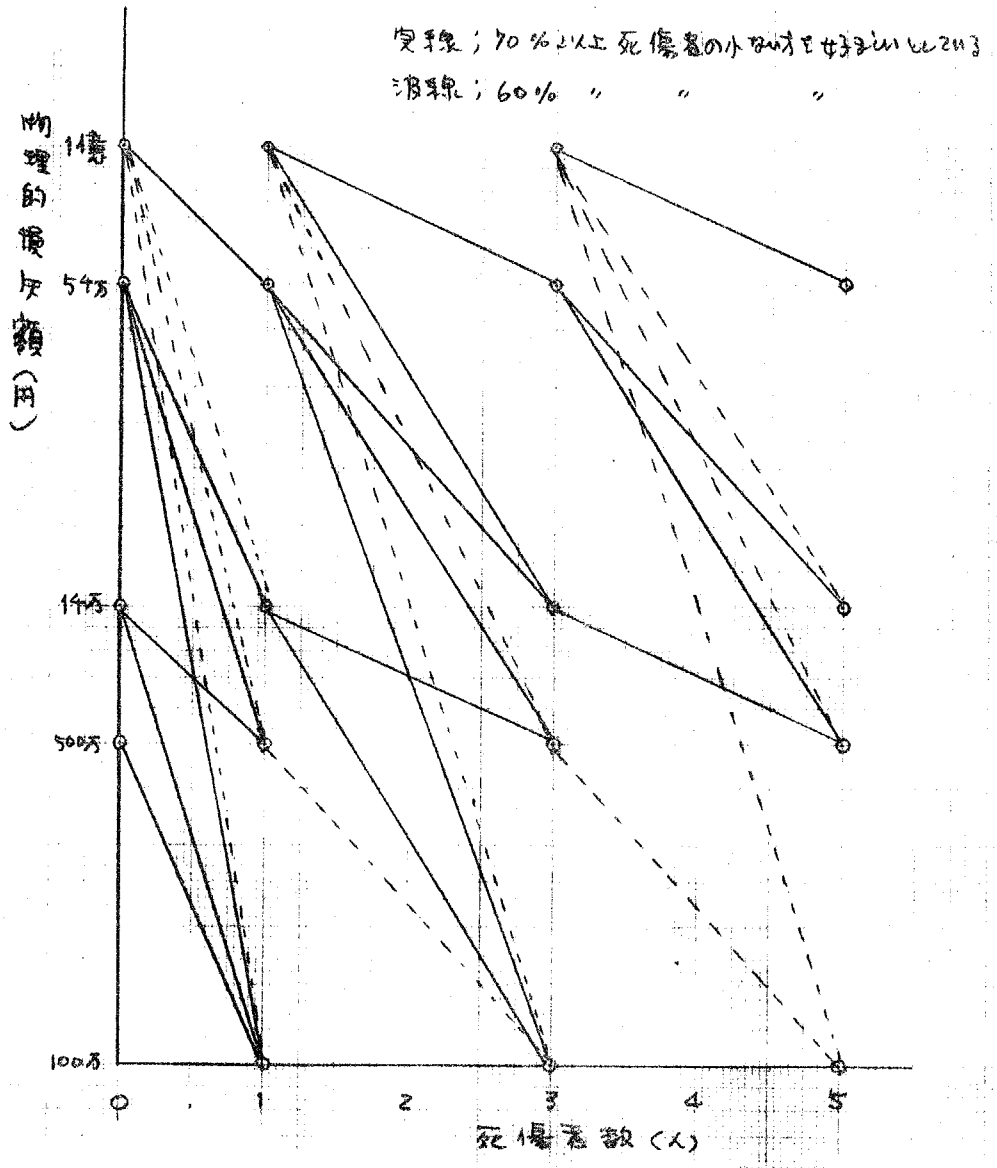


図 2-16 死傷者と物理的損失との関係

0円と1億円というように2ケタ程度離れる場合には，死傷者の少ない方を好ましいと判断する人の率は減り，60%内外に下ってしまう。以上のことから，各回答者は人命を主に災害を評価しているが，それに加えて金銭的な側面もある程度加味していると考えられる。

2－2－2－3　人命の経済的評価の可能性

以上みてきた結果からすると，まず，人命と金銭を比較するということに対してある一定の割合の人々が心理的抵抗をもっているということがいえよう。さらに，これらの比較をするにしても半数以上の人々が人命の損失のみで災害の大きさを評価するという傾向をもっていることがわかる。また，ある一定の割合の人々が人命と金銭的損失を合せて評価していることもみのがせない。さらに回答者の中には論理的整合性をもたないもの，人命よりも金銭的損失の方にウェイトをおいて評価するものが若干いることもわかる。

これらの結果から災害の評価を考える際，とくに重要なのは人命であり，それらは半数以

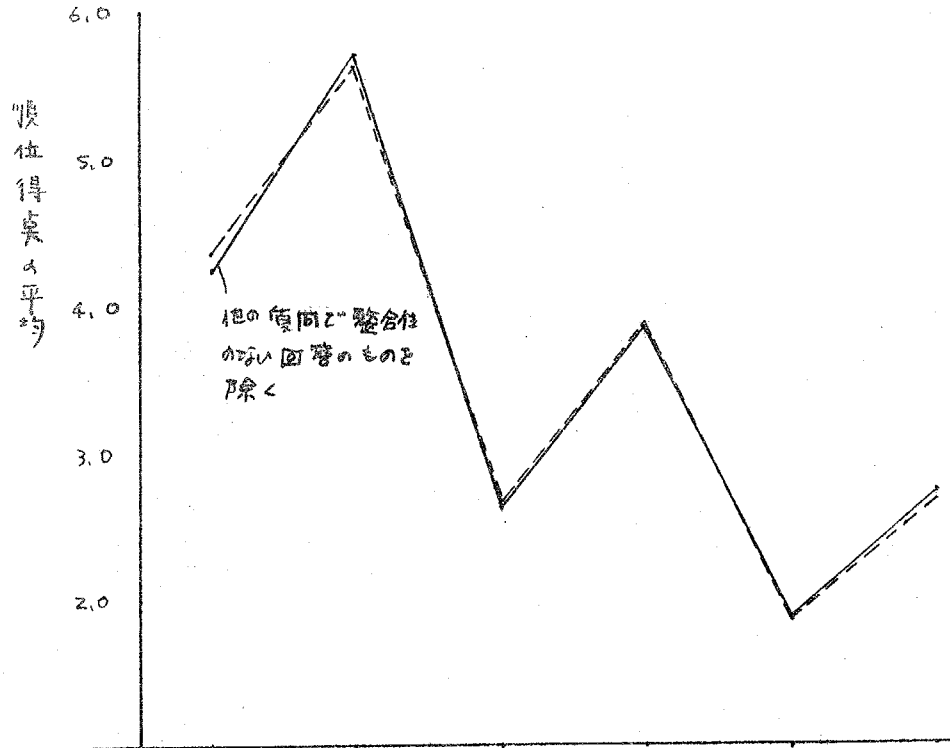
上の人々に納得できる評価基準であるといえる。さらに，金銭の損失というものもある程度評価の要素としてとりいれなければならないということもいえる。

2－2－3　不確定さに対する評価

2－2－3－1　順位得点からみた評価

2－2－3－1－a)　順位得点

最近10年間の災害死傷者のデータが明示されているAからFの6都市について、そこに住む場合を考えた選考順位を問うというのが問2の内題であった。これらの回答から得られる順位をそのまま数値すなわち1位ならば1点，2位ならば2点，‥‥6位ならば6点というように順位を数値化してとりあつかい，それらを順位得点と呼ぶことにしよう。この順位得点の平均値を図示したものが図2－17である。この結果，順位はE，C，F，D，A，Bの順になっていることがわかる。CとFはほぼ同じ順位得点と考えられる。これらをみると，まず，死傷者数平均値の大小関係が大きくこ



都市名		A	B	C	D	E	F
都市のデータ	平均	10.5	10.5	8.5	8.3	5.4	5.1
	標準偏差	2.1	4.6	1.5	3.6	2.3	4.1
	最大値	14	20	11	16	10	15
	最小値	7	4	6	3	2	1

図2-17 順位得点の平均

れらの順位に影響を与えている。死傷者のバラツキを示す標準偏差の値もこの順位に影響を与えていることがわかる。すなわち，回答者は与えられたデータの性質をかなり詳しく把握して評価していると考えられる。

2－2－3－1－b) 順位得点と重回帰分析

まず，先に得られた順位得点の平均値を各都市の災害死傷者数平均値と標準偏差で説明するという可能性を検討しよう。すなわち，以下のモデルを考えるわけである。

$$y = a_0 + a_1 m + a_2 \sigma$$

ここで，y：順位得点

m：災害死傷者数の平均値

σ：災害死傷者数の標準偏差

a_1, a_2, a_3 はパラメーター

この考え方では，線形性が仮定されているが，近似的。局所的にこのような仮定を使ってもさしつかえないのではないかと思われる。ここで，データから a_0, a_1, a_2 という未知パラメーターを決めなければならないが，それらは重回帰分析の手続きによって直ちに得ることができる。その結果は図2－18に示されている。この結果，

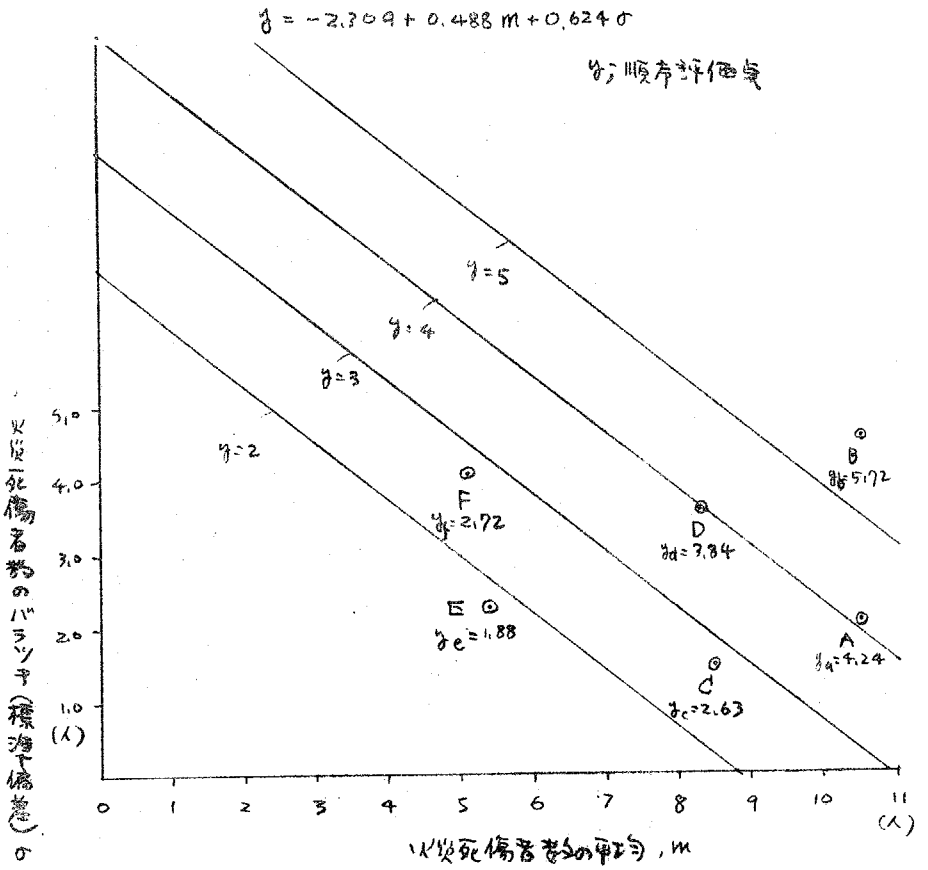


図 2-18 平均とバラツキからみた火災死傷者評価

(1Dの質問で整合性のない回答をした5名を除く)

得られる順位得点の等しい点を結ぶ直線が図中に示されている。この直線の傾きは平均値と標準偏差のどちらがよりきいてくるかというウェイトを示すことになる。今回得られたデータから考えると，平均値と標準偏差のそれぞれのウェイトはおよそ5：6の比率になっていることがわかる。すなわち，バラツキのもつ意味というものは非常に大きいということがこの結果からわかるわけである。

ところで，回答者の考え方がどのようなものであるかを考えてみると，平均値とバラツキ以外に10年間のデータにおける死傷者数の最大値・最小値というものを見ながら判断しているということも考えられるわけで，こうした考えに立って順位得点を説明するモデルも以下のように考えてみよう。

$$y = b_0 + b_1 u + b_2 v$$

ここで，y：順位得点

u：火災死傷者数の最大値

v：火災死傷者数の最小値

b_0, b_1, b_2 はパラメーター

先と同様にこのモデルを使って重回帰分析を行い，パラメーターを求めてその結果を図示したものが図ユ-19であ

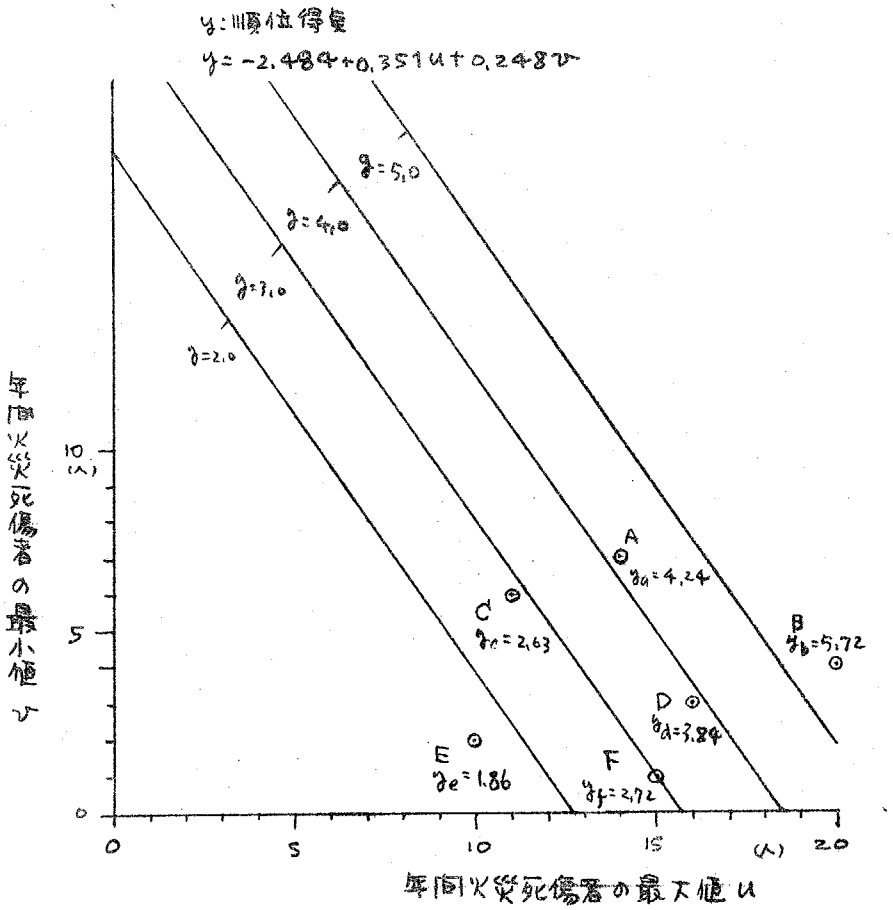


図2-19 火災死傷者の10年間最大値・最小値と評価(順位得点)
(他の質問の回答で整合性のないものを除く)

る。図中の直線は等しい順位得点を与えるような組み合せを結んだものである。この得られた結果を用いると，最大値のウェイトb_1，最小値のウェイトb_2のウェイトの比率は約2：1になっており，最大値が評価の際，より重視されていることがわかる。

先に調べた平均値と標準偏差による順位得点の説明と，この最小値と最大値による順位得点の説明との説得性は2つの重回帰分析で得られるF分布検定値の大小によって比較することができる。どちらの場合も危険率0.05でモデルの有意性が認められるが，平均値と標準偏差によるモデルの方がよりすぐれたモデルであることが，その検定値の大きさからいうことができる。すなわち，評価者は最大値と最小値で比較しているというよりも，平均値と標準偏差で比較していると考えた方がより順位得点を説明できるということである。

2－2－3－1－c) 順位得点のバラツキ

各都市の順位のつけ方というものが回答者によって異なるわけであるが，中には評価者によらずほぼ同じような順位となるような対象都市もあるわけである。この順位得点が1位であったり，6位であったりと評価者によって評価が大きく変化する割合を順位得点のバラツキの、

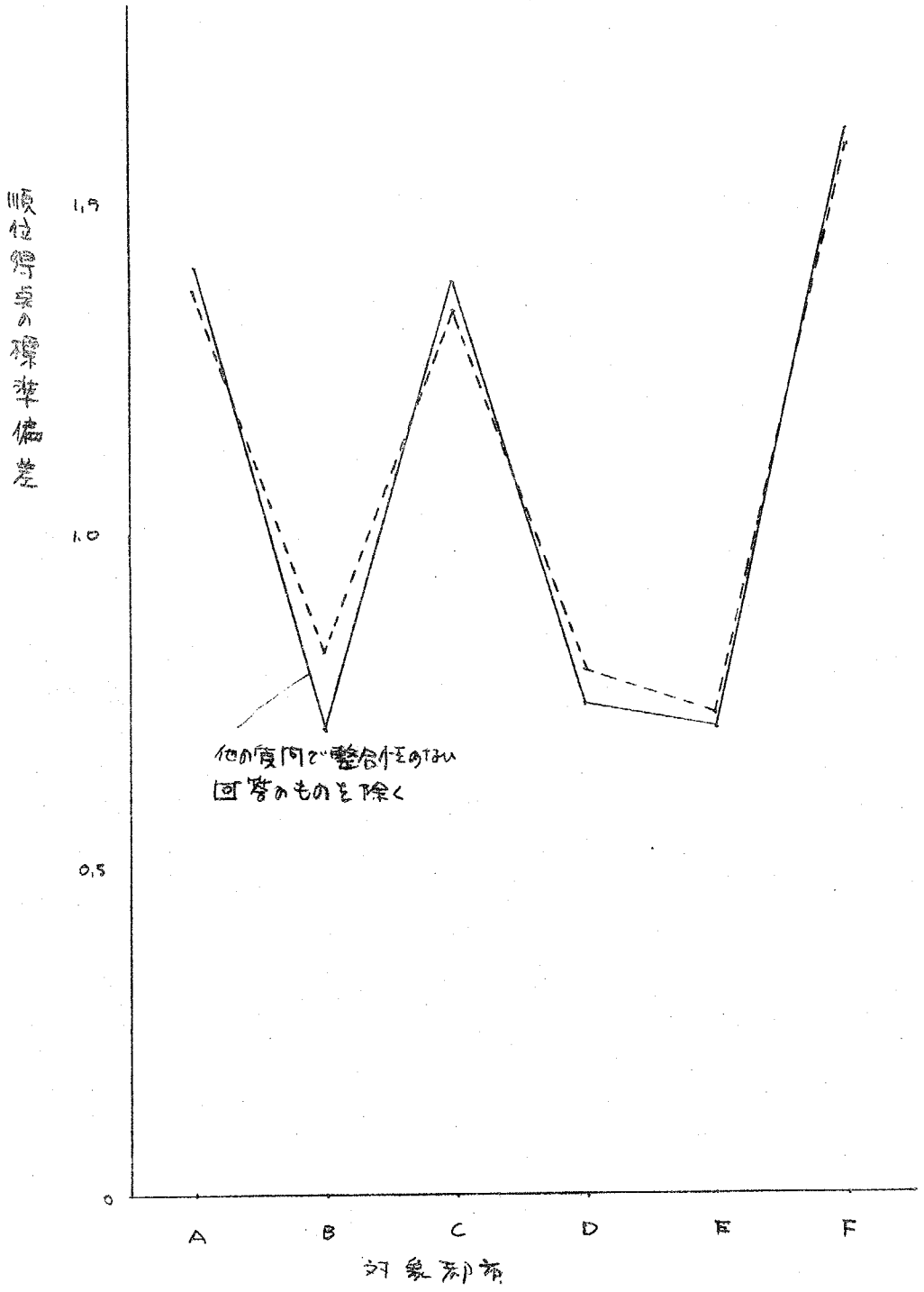
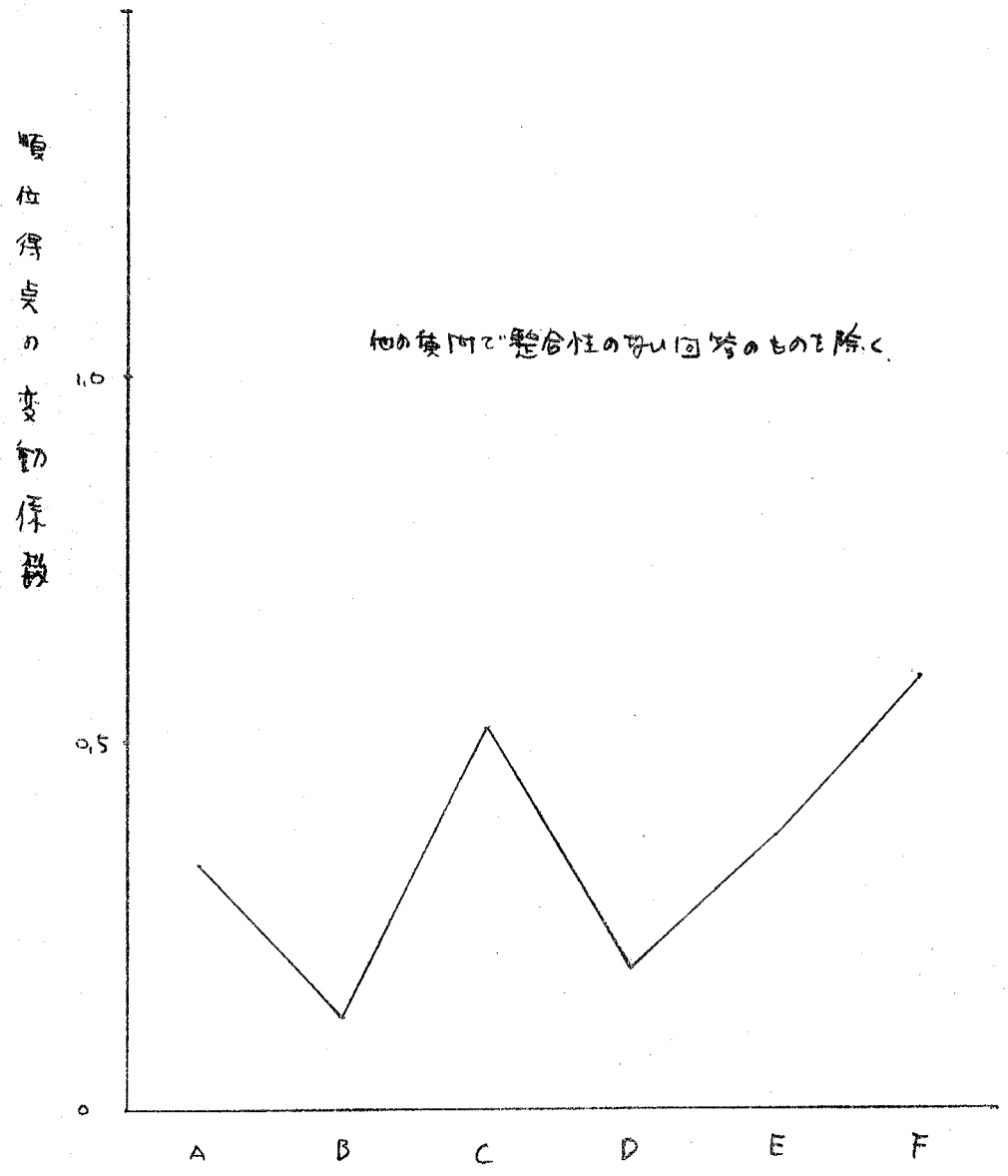


図 2-20 評価のバラツキ



図ユ-21 評価のしにくさ（評価のバラツキ）

う検討することができる。もしこの順位得点のバラツキが大きな値であれば，各評価者によって1位と評価されたり，6位と評価されたり，評価がわかれているということがいえるので，いわば評価の不安定さを調べることができる。図2-20は順位得点の標準偏差を示したものであるが，A，C，Fの評価のバラツキが大きいことがわかる。また，各都市の順位得点そのものが異なっているためこの標準偏差値を順位得点の平均値で割った値，つまり順位得点の変動係数を調べてみると図2-21のようになる。この結果からもC，Fの都市がバラツキの大きいことがわかる。Fのこの評価のバラツキが大きかったことは平均死傷者数が5.4人と小さいわりにその最大値が15人とかなり大きくなっているためではないかと思われる。

2－2－3－1－d) 順位得点の相関関係

各都市の順位得点の相関関係を調べてみると表2-7のようになる。これらの表からAとCが相関が高く，AとF，CとFが逆相関が高いことがわかる。これはおそらくAとCが標準偏差が小さいという類似的な性質をもっているために評価順位も似てくるということになり，逆にFはバラツキが大きいという逆の性質をもってくるということから，AとCと逆相関関係になってきたのではないかと推定される。

表2-7-A　相関係数マトリックス

	A	B	C	D	E	F
A	1.000	-0.427	0.714	-0.647	-0.289	-0.874
B	-0.427	1.000	-0.509	0.393	-0.338	0.335
C	0.714	-0.509	1.000	-0.689	-0.124	-0.887
D	-0.647	0.393	-0.689	1.000	-0.294	0.646
E	-0.289	-0.338	-0.124	-0.294	1.000	0.208
F	-0.874	0.335	-0.887	0.646	0.208	1.000

注：他の質問で整合性のない回答のものを除く

表2-7-B　相関係数マトリックス

	A	B	C	D	E	F
A	1.000	-0.318	0.706	-0.564	-0.374	-0.845
B	-0.318	1.000	-0.257	0.021	-0.276	0.091
C	0.706	-0.257	1.000	-0.695	-0.178	-0.896
D	-0.564	0.021	-0.695	1.000	-0.210	0.655
E	-0.374	-0.276	-0.178	-0.210	1.000	0.267
F	-0.845	0.091	-0.896	0.655	0.267	1.000

サンプル数：90

2-2-3-2 順序マトリックス

評価者によって与えられた各都市の順位というものからそれぞれの都市を比較した場合に，何割の人々がその2つの都市のうちどちらを上位の順位においているかということがわかる。その結果が表2-8に示されている。たとえばAとBを比較した場合，77.6%の人々がA市よりもB市の方が順位が上であると答えていることがわかる。表中からE市は他のすべての都市と比較して上位であると半数以上の人が常に判断していることがわかる。この順序関係から得られる結果と，先の順位得点の平均から得られる結果はほぼ似ているということがいえる。すなわち，順位得点がほぼ等しいようなCとFの場合をとってみると，Cよりも下が上位である割合は50.7%となっており，ほぼ半数であることがわかる。

2-2-3-3 順序数量化

2-2-3-3-a) 順序数量化の手法

比較判断した各都市の順位の上下関係で上位になっている割合と下位になっている割合をすでに表2-8として求めた。この順序関係マトリックスから各対象の評価値を数量的に求めることが可能である。

まず，Aという都市とBという都市の災害上からみた悪さというものが x_a, x_b という値であったとしよう。まず，Aという都市を考えた場合，人によってその評価

表2-8-A 順序関係マトリックス

	A	B	C	D	E	F
A	0.000	0.776	0.060	0.418	0.149	0.358
B	0.224	0.000	0.015	0.015	0.015	0.015
C	0.940	0.985	0.000	0.627	0.313	0.507
D	0.582	0.985	0.373	0.000	0.015	0.209
E	0.851	0.985	0.687	0.985	0.000	0.612
F	0.642	0.970	0.493	0.791	0.388	0.000

注： 他の質問で整合性のない回答のものを除く

表2-8-B 順序関係マトリックス

	A	B	C	D	E	F
A	0.000	0.744	0.044	0.389	0.144	0.322
B	0.256	0.000	0.011	0.044	0.022	0.033
C	0.956	0.989	0.000	0.622	0.300	0.478
D	0.611	0.956	0.378	0.000	0.011	0.189
E	0.856	0.978	0.700	0.989	0.000	0.622
F	0.678	0.956	0.522	0.811	0.378	0.000

サンプル数： 90

は異なり，全体としてみると，z_a を中心として図2-22のようにばらつくことが考えられる。同様にBについても同じようにばらついていると考えられ，そこで，AとBを比較した場合，全体として図2-23のようにばら

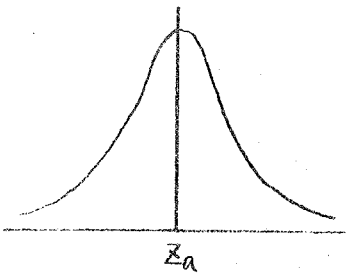


図 2-22

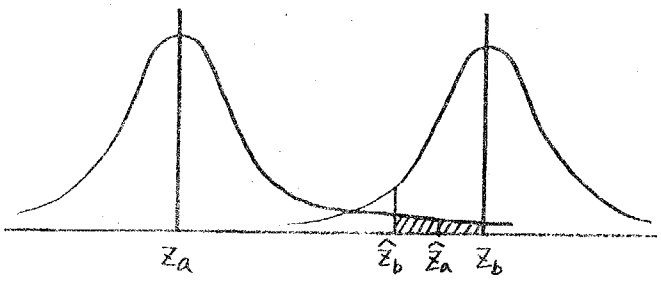
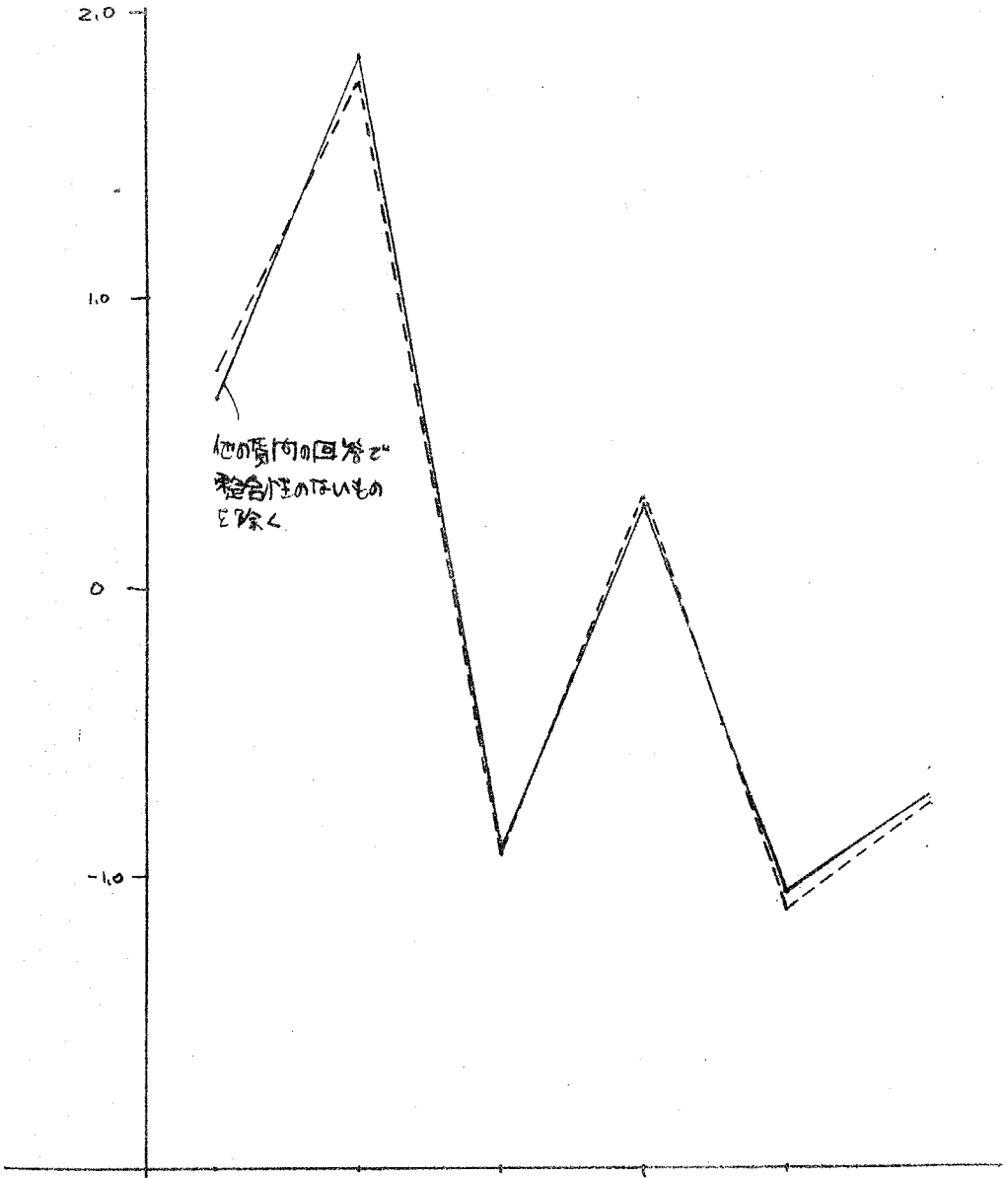


図 2-23

つき，たとえば図のように $z_a < z_b$ であっても，各回答者による A都市，B都市の評価値 $\hat{z}_a, \hat{z}_b$ は図aのように $\hat{z}_b < \hat{z}_a$ となる可能性もある。このような $\hat{z}_b < \hat{z}_a$ あるいは $\hat{z}_a < \hat{z}_b$ となる確率は z_a, z_b の間の距離とそれぞれの間のバラツキの程度によって決まってくるので，逆にもし $\hat{z}_b < \hat{z}_a$ となる確率がデータから得られれば，ある種の仮定のもとで，z_a, z_b を求めることができる。この推定の手続きについては，付録2-1に示されているので，ここでは，詳しく述べない。上の確率の値としては順序関係マトリックスの値を用いることができる。

2－2－3－3－b) 順序数量化よりみた評価



	A	B	C	D	E	F
平均	10.5	10.5	8.5	8.3	5.4	5.1
標準偏差	2.1	4.6	1.5	3.6	2.3	4.1
最大値	14	20	11	16	10	15
最小値	7	4	6	3	2	1

図2-24 順序数量化による各部分の評価

前項で述べた順序数量化の手法によって各都市の評価値を計算し，求めた結果が図2-24に示されている。この結果は先の順位得点から得られる結果と非常に似ている。すなわち，この結果得られた各都市の評価の好ましい順はE，C，F，D，B，Aの順となっている。Fの評価が順序得点に比べてやや落ちたことが注目される。

2-2-3-3-c) 順序数量化の重回帰分析

先の順位得点を重回帰によって平均とバラツキ（標準偏差）で説明することと及び最大値・最小値で説明することを試みたが，ここでは順序数量化によって得られた結果を用い火災死傷者の平均と標準偏差で説明する重回帰分析と，同じく火災死傷者の最大値と最小値で説明する重回帰分析を行う。前者の分析結果が図2-25に示されている。この結果，平均値と標準偏差のウェイトは多少変化している。多少細かにみると，先の順位得点をそのまま平均と標準偏差で回帰したときのそれぞれのウェイトの比率は0.499/0.578=0.863であったのに対し，順序数量化を行ったのちのそれぞれのウェイトの比率は0.386/0.501=0.770となっており，順序数量化を行ったあとでは平均値のウェイトがやや減少したことがわかる。

SEKIGU A4 NO. 54

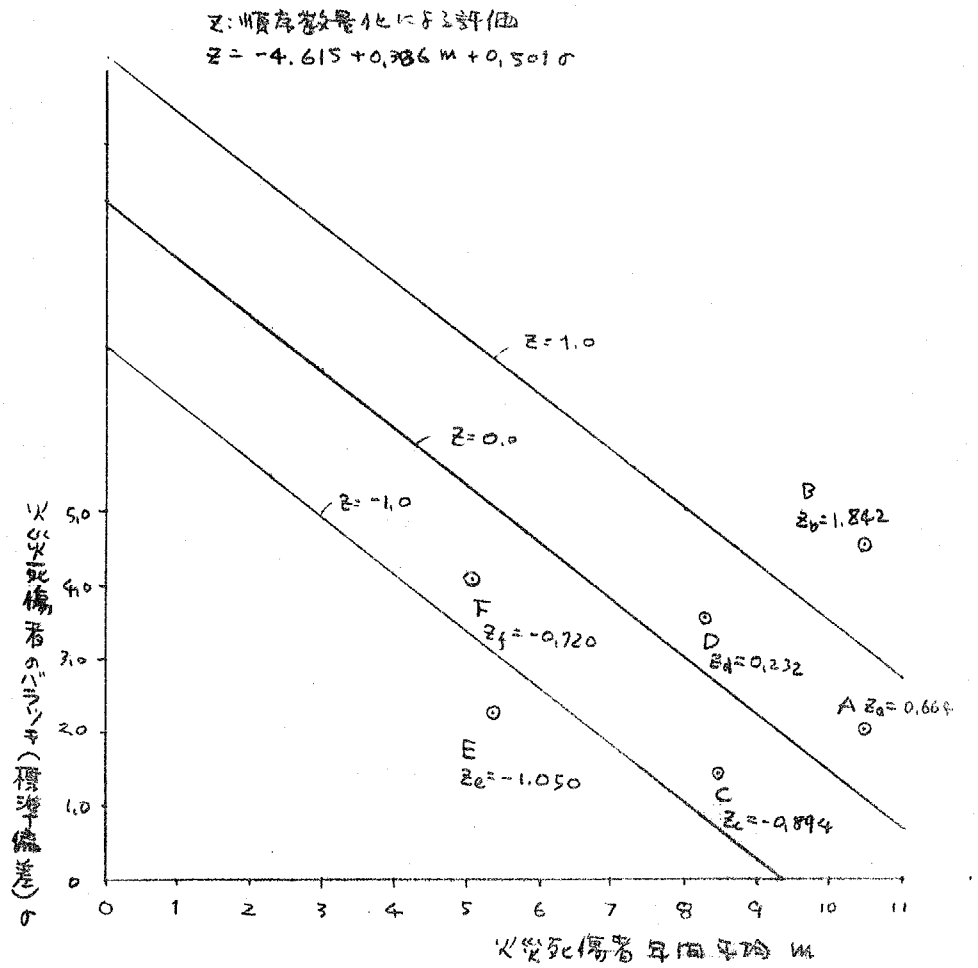


図 2-25. 平均とバラツキからみた火災死傷者の評価(順序数量化)
(他の要因で整合性のない回答のものを除く)

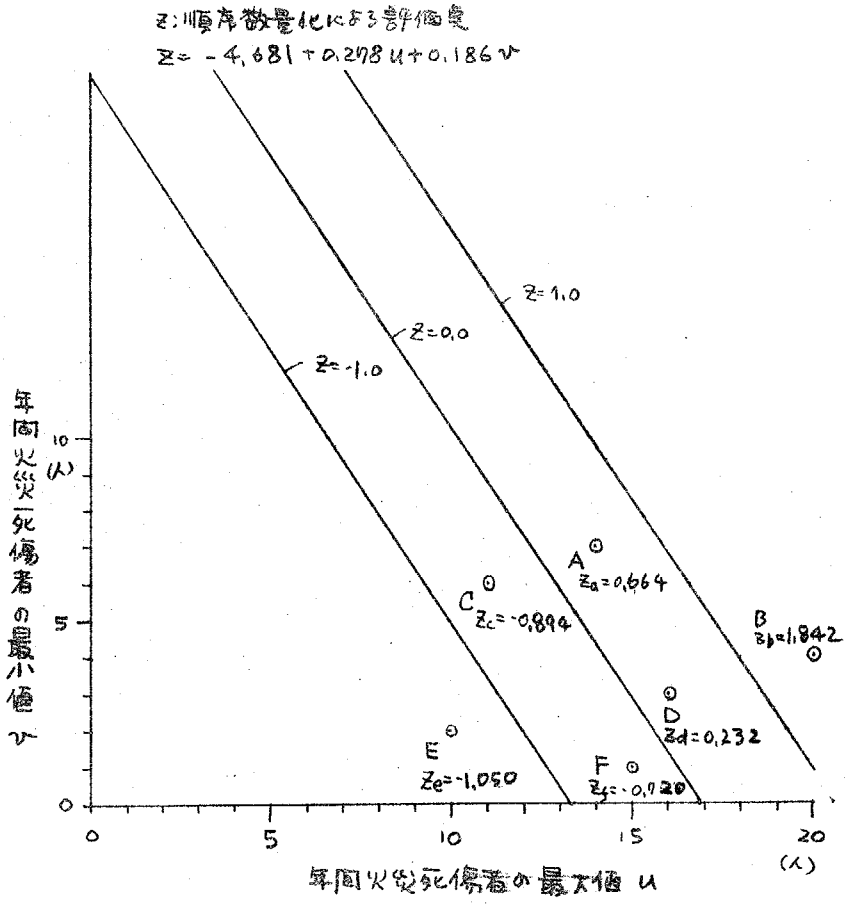


図 2-26 火災死傷者の10年間最大値・最小値と評価(順序数量化評価)

(4つの質問の回答で整合性のないものは除く)

火災死傷者の最大値と最小値を用いて順序数量化による評価点を重回帰分析によって説明したものが図2-26である。先の順位得点をそのまま重回帰分析を行い，得られた最大値と最小値のウェイトの比率は0.351/0.248=1.415であるのに対し，順序数量化による評価点を用いて分析した結果は0.278/0.186=1.494となっており，さほど変化していないことがわかる。どちらの重回帰分析も危険率0.05で有意性がみられるものであるが，順序数量化を行った分析は順序得点からじかに回帰分析を行った結果よりもF分布検定値からみたかぎりでは，データとの一致度は悪くなっている。このことは順序数量化による結果が好ましくないというのではなく，順序数量化によって評価の非線形性が検出されるようになったと考えるべきと思われる。

2-2-3-4　不確定さに対する評価

バラツキをもつ過去の災害データからそれらを評価する際，人間の評価というものがどのような点に注目するのかということも調べてきた。その結果，平均値と標準偏差及び最大被害でかなり評価のパターンを説明できると思われる。約4割程度でどの人が平均値にウェイトをおいた考え方で評価をしているが，全体的に

みると，バラツキというものが評価に与える影響は平均値のそれよりも若干上回る程度に重要であることがわかる。

付録 2-1

順序列数量化手法

はじめに

都市の好ましさ，住宅の良さなどの総合的評価の問題はきわめて重要な研究課題となってきている。しかし，これらの評価が物理的な性能値からの演繹のみで計量することは困難であり，最終的な評価主体である人間の判断をぬきにしては考えられない。しかしながら，人間の評価判断には個人的な差異や各状況で同一主体が異なる判断を下すという可能性もあり，その数量化にはきわめて難しい問題が内在している。

かつて，経済学における効用の測定に関しての議論の中でその効用を連続的な数としてとらえるよりも，順序的な数としてとらえる方がより現実的ではないかという考えが強くなってきた。著名な経済学者パレートも効用を「等しい，大きい，小さい」しか測定できない序数的なものであることを指摘した。

ここでは，評価主体からの評価として各評価対象の順序関係のみが測定されている場合についての各対象へのより合理的な評価値（連続数）を与える問題を検討する。

1 問題の前提

先にあげた都市の好ましさの問題を考えると，対象としての都市，評価値としての好ましさ，評価する評価主体としての人間（これを以後評価者と呼ぶ）が存在している。ここで，評価値は未知の量であり，最終的に求めるべき値である。計測可能な値は各評価者が判定した対象への評価の序列である。例をあげると，アンケート等によってn個の都市についての好ましさを調査し，各回答者（評価者）が都市を好ましい順に並べた場合を考えると，この都市の並び順が我々の得られる唯一のデータである。この点をやや数理的な形で整理しておこう。

i) 対象jがある（$j=1\sim n$，nは対象の数）

ii) 評価者kがいる（$k=1\sim m$，mは評価者の数）

iii) データとしては，評価者kについて対象への評価順位O_{kj}が得られている。すなわち，データは以下のマトリックスで表わすことが可能である。

$$D=\begin{bmatrix} O_{11}, O_{12}, O_{13} \cdots\cdots O_{1n} \\ O_{21}, O_{22}, O_{23} \cdots\cdots O_{2n} \\ O_{31}, O_{32}, O_{33} \cdots\cdots O_{3n} \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ O_{m1}, O_{m2}, O_{m3} \cdots\cdots O_{mn} \end{bmatrix} \qquad (1)$$

たとえば3つの都市A, B, Cについて4人の人が以下のように好ましさを順序づけたとしよう。

1) A > B > C

2) B > A > C

3) C > B > A

4) A > C > B

このとき，データは以下のように書き表わせる。

$$D = \begin{matrix} (A) & (B) & (C) \\ \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \\ 1 & 3 & 2 \end{bmatrix} \begin{matrix} \cdots (1) \\ \cdots (2) \\ \cdots (3) \\ \cdots (4) \end{matrix}$$

2. 数量化のための仮定

上記のデータから各対象の評価値を決定するために以下のように考える。すなわち，対象iの各評価者による評価値x_iは評価の状況や評価者によって異なった値となることが考えられるので，一種の確率量であると考える。従って，この評価値x_iの普遍推定量に相当する$\bar{x}_i$をこの対象iの真の評価値と考えることにする。逆に言うと，対象iの真の評価値$\bar{x}_i$があり，ここを中心としてばらついて評価される結果として、各評価者から対象iの評価値をx_iであると判定されると考えるわけである。そ

ここで，確率量 x_i が平均 $\bar{x}_i$ を中心としてばらつくということを厳密に以下のように表現する。

仮定 1. 対象 i の各評価者による評価値 x_i は真の評価値 $\bar{x}_i$ を平均値として用い，標準偏差 σ_i の正規分布に従う確率量である。

この仮定は次のようにいうこともできる。x_i の確率密度関数は以下の式で与えられる。

$$f(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp -\left[\frac{(x_i - \bar{x}_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \qquad (2)$$

この考え方は等現尺度法と呼ばれる 2 対順序対から評価値を与える数量化手法の考え方と同じである。この考え方をより具体的にいうと以下のようになるといえよう。

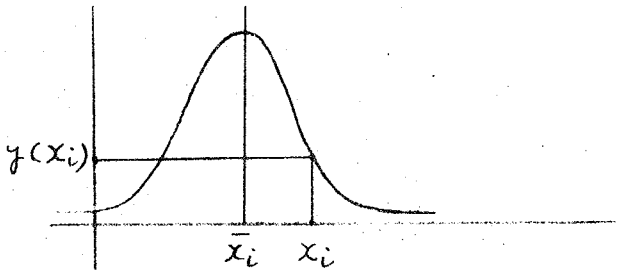


図 1

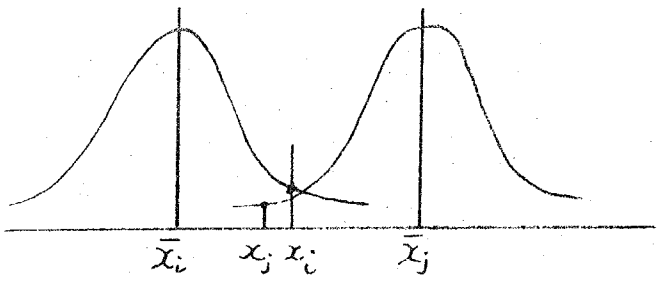


図 2

i, jという2つの対象を考えてみよう。このとき，対象iと対象jの真の評価値は$\bar{x}_i$と$\bar{x}_j$であるとする。もちろんこの2つの値は未知の量である。そこで各評価者が対象iを評価するとき，その評価値がx_iとなる確率が図1の$g(x_i)$である。すなわち，評価者によっては$\bar{x}_i$よりも大きな値を考える人もいれば，小さな値を考える人もいるわけである。そこで同様に対象jについても考えると図2のようなx_i, x_jが出現したとしよう。このとき，この評価者は真の評価値$\bar{x}_i$, $\bar{x}_j$が

$$\bar{x}_i < \bar{x}_j \qquad (3)$$

であるにもかかわらず，この個人の評価値の順序はたまたま

$$x_j < x_i \qquad (4)$$

となっている。ここで，この個人が上のように判断したのであるから，当然この個人の表わす順序は

$$O_j < O_i \qquad (5)$$

であると考えられる。逆にいうと，(5)のような順序が個人によって判定することから，この個人は(4)のように考えていると考えるわけである。そして(4)のような考えが生じる確率というものが，各データで得られる(4)のような関係のデータの割合と一致するように$\bar{x}_i$, $\bar{x}_j$ (σ_i, σ_j)

を決定しようと試みるのが等現尺度法の考え方であり，ここで述べる手法も同様の考え方に立っている。この確率的な関係については次節で述べるとして，もう1つの仮定について整理しておこう。

上のような考え方から x_i を推定する際，(2)式の σ_i が未知である場合，求めることはできない。等現尺度法の場合，通常 σ_i を定数として仮定することが多い。ここでは次のような考え方から σ_i をとらえることにする。先ず，各対象 i の評価値 k の順位 O_{ki} ($O_{ki}=1, 2, 3, \cdots n$) をそのまま各評価者からの評価値 x_i にきわめて類似したものであると考えよう（もちろん，大小関係は逆転している）。そこで，この数値を y_{ki} で記す。すなわち

$$y_{ki} = O_{ki} \tag{6}$$

とおく。例で示すと，評価者 k が対象 i の順位を3番目に好ましいものと判定するとすれば，$y_{ki}=3.0$ ということになる。そこで，データから得られる y_{ki} のバラツキを考えると，それは次のような性格をもっていることがわかる。

(a) y_{ki} がばらついていれば，x_i もばらついている。

この性質を述べるために，y_{ki} から得られる標準偏差 σ_{yi}

とおくと，次のような関係を(a)から直ちに得られることができる。

(b) $\sigma_i = \alpha f(\sigma_{yi})$ (7)

fは単調非減少関数

そこで，この性質(b)の最も簡単な表現として次の仮定を設ける。

仮定2 $\sigma_i = \alpha \sigma_{yi}$ (8)

αは正定数

以上の仮定1，仮定2によって求めるべき対象しの評価値$\bar{x}_i$が2，3の数理的な仮定のもとで求めることができる。2，3の数理的な仮定というのは評価値$\bar{x}_i$というものを標準化しなければならないということである。すなわち，

仮定3-1 $\sum_{i=1}^{n} \bar{x}_i = 0$ (9)

仮定3-2 $\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2 = 1$ (10)

ということである。この仮定がない場合，得られる$\bar{x}_i$は上の仮定によって得られる値の線形変換した値の組となっていることが知られている。従って，仮定3は単に数値の表現上の問題であるということができる。言いかえれば評価値を全部たせばちょうど0になるように評価

値を定めるというのが仮定3-1であり，仮定3-2はそのひろがりを標準化したものである。

3. 基本的関係式

まず，対象i及び対象jについて

$$O_i < O_j \tag{11}$$

となる割合を$\hat{P}_{ij}$とする。また，我々の考え方，仮定1から得られる

$$x_i < x_j \tag{12}$$

となる確率をP_{ij}とし，このP_{ij}と$\hat{P}_{ij}$がより一致するように$\bar{x}_i$，σ_iを求めるのが我々の課題である。まず，P_{ij}について次のように考えることができる。

$$P_{ij} = Prob\ (x_i < x_j) \tag{13}$$

であり，かつx_i，x_jは(2)式の形で表わされる正規分布に従う確率変量であるので，正規分布の性質から次のように考えることができる。まず，

$$z = x_i - x_j \tag{14}$$

という変量を考えると

$$Prob\ (x_i < x_j) = Prob\ (z < 0) \tag{15}$$

であり，また，zの確率密度関数は

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_z} \exp\left[-\frac{(z-\bar{z})}{2\sigma_z^2}\right] \tag{16-1}$$

ここで　$\bar{z} = \bar{x}_i - \bar{x}_j$　(16-2)

$\sigma_z^2 = \sigma_i^2 + \sigma_j^2$　(16-3)

となる。従って

$$P_{ij} = \int_{-\infty}^{0} f(z)\,dz \tag{17}$$

であり，ここでさらに次のように2つの量を定めておく。

$$u = \frac{z - \bar{z}}{\sigma_z} \tag{18}$$

$$\bar{u} = -\frac{\bar{z}}{\sigma_z} \tag{19}$$

この変数を使って、P_{ij}は以下のようになる。

$$P_{ij} = \int_{-\infty}^{\bar{u}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] du \tag{20}$$

これは，標準正規分布の累積分布関数

$$\Phi(t) = \int_{-\infty}^{t} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] dx \tag{21}$$

の$\bar{u}$における値にほかならないので，結局，

$$P_{ij} = \Phi(\bar{u}) \tag{22}$$

となる。さらにΦの逆関数をΦ^{-1}とおくと

$$\Phi^{-1}(P_{ij}) = \bar{u} \tag{23}$$

を得ることができる。これを，我々が求めるべき未知変量のみで表わすと

$$\Phi^{-1}(P_{ij}) = -\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_j}{\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}} \tag{24}$$

となり，さらに(8)式を用いて次の式をうることができる。

$$\Phi^{-1}(P_{ij}) = -\frac{\overline{x_i} - \overline{x_j}}{\alpha\sqrt{\sigma_{yi}^2 + \sigma_{yj}^2}} \tag{25}$$

一方，(8)式及び(10)式で表わされる仮定を用いると

$$\alpha^2 = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n} \sigma_{yi}^2} \tag{26}$$

または

$$\alpha = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^{n} \sigma_{yi}^2}} \tag{27}$$

となる。

4 未知量の推定

(25)及び(27)式をもとに得られるデータ，各評価者kの各対象iへの評価順位 o_{ki} を用いて $\overline{x_i}$ を推定することを試みる。この際，バラツキ σ_{yi} は以下のように求めることができる。

$$\sigma_{yi} = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}(y_{ki} - \overline{y_i})^2} \tag{28}$$

ただし

$$\overline{y_i} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} y_{ki} \tag{29}$$

ここで，y_{ki} は(6)式からただちに得られる。

一方，$x_i < x_j$ となる確率 P_{ij} は $o_i < o_j$ となる割合

P_{ij} で表わそうとしているので，結局，未知量は $\bar{x}_i$ ($i=1\sim n$) のみになる。ところで，P_{ij} を $\hat{P}_{ij}$ でより一致するように推定しなければならないので，最小自乗法の考え方から以下の値を最小化するように未知量 $\bar{x}_i$ を求めることが考えられる。

$$Q=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=i+1}^{n}\left\{\Phi^{-1}(P_{ij})-\Phi^{-1}(\hat{P}_{ij})\right\}^2 \tag{30}$$

従って，極値条件として

$$\frac{\partial Q}{\partial \bar{x}_i}=0 \qquad (i=1\sim n) \tag{31}$$

を解けばよい。しかしながら，(31) 式を簡単な型に解くことは難しい。そこで，(30) 式とほぼ同じ考えにたち，(25) 式より

$$\bar{x}_i-\bar{x}_j=-\alpha\sqrt{\sigma_{yi}^2+\sigma_{yj}^2}\cdot\Phi^{-1}(P_{ij}) \tag{32}$$

であることを考慮して，次式で与えられる量を最小化することを考える。

$$Q_1=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=i+1}^{n}\left\{\bar{x}_i-\bar{x}_j+\alpha\sqrt{\sigma_{yi}^2+\sigma_{yj}^2}\,\Phi^{-1}(\hat{P}_{ij})\right\}^2 \tag{33}$$

この Q_1 を最小化することと前述の Q を最小化することは一般とは異なるが，σ_{yi} がそれぞれ同一の値を示すときは一致する。Q_1 の値を最小化するように $\bar{x}_i$ ($i=1\sim n$) を決定するため，次の方程式を解けばよい。

$$\frac{\partial Q_1}{\partial \bar{x}_i} = 0 \qquad (i = 1 \sim n) \tag{34}$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial \bar{x}_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \left\{ \bar{x}_i - \bar{x}_j + \alpha \sqrt{\sigma_{y_i}^2 + \sigma_{y_j}^2}\ \Phi^{-1}(\hat{P}_{ij}) \right\} \tag{35}$$

従って

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^{n} \bar{x}_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^{n} \bar{x}_j + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \alpha \sqrt{\sigma_{y_i}^2 + \sigma_{y_j}^2}\ \Phi^{-1}(\hat{P}_{ij}) = 0 \tag{36}$$

すなわち

$$(n-1)\bar{x}_i - \left(\sum_{j=1}^{n} \bar{x}_j - x_i \right) + \alpha \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \sqrt{\sigma_{y_i}^2 + \sigma_{y_j}^2}\ \Phi^{-1}(\hat{P}_{ij}) = 0 \tag{37}$$

故に以下の式をうる。

$$n x_i = \sum_{j=1}^{n} x_j - \alpha \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \sqrt{\sigma_{y_i}^2 + \sigma_{y_j}^2}\ \Phi^{-1}(\hat{P}_{ij}) \tag{38}$$

ところで，(9)式の仮定から上式左辺第2項は0に等しいので

$$\bar{x}_i = -\frac{\alpha}{n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \sqrt{\sigma_{y_i}^2 + \sigma_{y_j}^2}\ \Phi(\hat{P}_{ij}) \tag{39}$$

ところで，α は(27)式で与えられている量であるから，結局、以下の結果をうる。

$$\bar{x}_i = -\frac{1}{\sqrt{n \sum_{j=1}^{n} \sigma_{y_i}^2}} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \sqrt{\sigma_{y_i}^2 + \sigma_{y_j}^2}\ \Phi(\hat{P}_{ij}) \tag{40}$$

これが求める対象 i の評価値 $\bar{x}_i$ であり，P_{ij} はデータの順序列から，σ_{y_i} はデータ順位を直接数値化した(6)式

で示されている）場合のバラツキから得られる標準偏差であり，(28)式及び(29)式から得られるので，結局(40)式を用いれば，データから対象しの評価値が求まることになる。

文献

1) 青木義次,「住民の側よりみた建築安全性の評価尺度について」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和49年10月

2) 青木義次, 川越邦雄, 奈良松範,「住民の安全意識と防災対策の評価構造 ― 住民の側よりみた建築安全性の研究(その2)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和50年10月

第3章　建築安全性の計量化

3－1　安全概念の類型

3－1－1　安全概念の類型化の必要
3－1－2　建築安全概念が必要とされる場
3－1－3　建築安全概念及び関連概念
3－1－4　建築安全概念の類型

3－2　安全の計量的評価の基礎的問題

3－3　比較判断からの効用的安全尺度の構成

3－4　修復不可能性と安全の二次元計量化

3－4－1　安全の素朴な意味
3－4－2　修復不可能性の意味
3－4－3　安全の二次元計量化
3－4－4　確率的システムにおける二次元計量化

3-1 安全概念の類型

3-1-1 安全概念の類型化の必要性

安全性の計量化に先だち，建築空間の安全性という概念をより明確にするための概念分析作業を最初に進めよう。

まず，建築空間の安全性について，明確な形で評価しようという必要性のバックグラウンドについて検討を加えておきたい。

安全性という問題が顕在化してきたのはそれほど古くない。建築の安全性というのはむしろネガティブな概念としてそれまで存在していたのである。というのは，何年かに1度という地震の起り方に依存しており，日常的な意味でのあるいは建設時においての性能概念からはやや異なっているのである。事実，通常の建物設計における従来の構造設計プロセスでは，安全のレベルに関係する外力の想定が学会規準等で与えられている最低基準値をそのまま用いて設計される場合が多く，明確な性能概念として安全性が認識されていないのが現実である。

ところが，建築というひとつの社会的文脈の中での技術行為をとらえてみると，建築安全性に対する社会的な要請というものは日増しに増加しており，こうした建築

工学に対する社会的な要請の性質を整理しておくことが必要に思える。そこで，これらの社会的要請の根拠となる建築の生産，供給システムとの関係を次のような側面から検討しておこう。

(1) 建築の商品化

(2) 工法，材料などの進歩と多様化

(3) 量産性

建築の商品化とは，建築空間というものが貨幣価値として評価されるということであり，ひとつの市場メカニズムの要素となることである。ところで，ここで問題となるのは，第1章（1-5）で述べたように他の経済的財と異なる性質を建築物はもっているということである。さらに，その性能が明確にされない場合，市場における情報不完全性からモラル・ハザードと呼ばれる品質低下現象が生じることが知られており，こうした観点から安全の概念の明確化と計量化が必要とされてきている。

一方，工法あるいは材料などが今日めまぐるしく開発され，これまでになかったような素材を構成要素とする建築空間ができつつある。また，建築空間自体の形状も人間生活の多様化にともない，これまでになかったような平面構造を作りつつある。かつて，一定のプランにも

とづく建築空間が一定の技術で構成されていた時代は，その安全の程度というのはおそらく一定だったであろうと思われるが，今日の状況は，個々の建築物によってその安全の程度が極端に異なってくることが予想される。こうした問題について技術的なサイドからのより計量的な安全性の評価情報が必要となってきているのである。

さらに，量産性という建築生産のシステムが確立しつつあり，個々の建物の安全性というのではなく，ある量産型の安全性という漠然とした概念が生じつつある。具体的に言うと，これまで個々の建築物は個々にその安全性をチェックしてきたのであったが，量産される建築システムはいわゆるシステム評価として安全性をとうとなければならなくなっている。建設省の性能認定制度ではある基本プランから出来上るプレファブ住宅の集合について認定しており，個々のプレファブ住宅の安全性ということと，プレファブ住宅の集合を規定するプレファブ・システムの安全性という2通りの安全性の概念が生れつつある。たとえば壁材などの選択についての自由度をもっているプレファブ・システムでは，個々のプレファブ住宅は壁材の選択によって安全の程度はさまざまに変化してしまうのが現状である。また，この認定制度の中で

は施工の問題が考慮されているものの最終的な認定の中に充分組み込まれていないので，認定された住宅がプレファブ・システムから作られたプレファブ住宅であって，どこまで安全であるかということは明確にとらえることは非常に難しいのが現状である。また，量産性の問題は1つのプランからいくつもの建築が作られるということからその影響の範囲も大きく，ひとつの社会的な問題としてとらえる必要性があるとさえ言われている。

3－1－2　建築安全概念が必要とされる場

以上に概括したような安全ということを考える，あるいは評価する必要性があり，そうした必要性に応じた安全概念の明確化が期待されている。従って，こうした安全概念が使われる場を整理してみよう。そのために建築空間の問題に登場してくる人々を類型化しておくことが必要であろう。とりあえず，以下のように建築の主体として整理してみる。

1) 施主（居住者）

2) 設計家

3) エンジニア

4) 総合工事業

5) 専門工事業

表3-1 各主体の安全概念及び研究課題

	安全概念と(関心)	研究者に課せられた課題
施主(居住者)	心理的に感じられる安全感(コストと安全の関係)	安全度をわかりやすく評価する方法の提案
設計者	安全の法的規準(デザインと安全の両立)	安全設計体系の確立
技術者(構造設計)	安全の法的規準及び構造解析上の諸概念(荷重,応力解析,靭性,法的規準,設計上の制約)	同上
総合工事業者	施工上の信頼性(安全度と施工技術及びコストの関係)	施工の安全に及ぼす影響の計量化
専門工事業者	同上	同上
職人・技能工	現物的安全概念(自己の能力と安全度の関係 eg. 溶接技能)	技能レベルと安全性との関係の把握
材料メーカー	材料の品質信頼性(コストと信頼性及び企画)	材料信頼性と安全度との関係の明確化
販売業者	同上	同上
研究者	許容応力,塑性設計法,靭性,破壊確率(構造体の物理的特性)	安全性研究の体系化と研究推進の研究計画
行政体	安全の法的基準(申請,設計図書からの安全度の読み取り)	法的基準,規準などの妥当性の検討
周辺住民 一般の人 ジャーナリズム等	心理的な広域レベルでの安全意識(都市防災など)	補修技術の確立 既存建物の評価 建築安全性の知識の普及

6) 職人・技能工

7) 設計・部材メーカー

8) 販売業者

9) 研究者

10) 行政体

11) 一般利用者（周辺住民）

以上のような各主体毎にその安全概念というものは異なっているのが通常であり，また，この問題に対する課題も異なっているといえる。それらを整理すると表3-1のようになる。

以上のような各主体毎の安全概念を統一的にとらえることは非常に難しい。しかし，こうした考え方の異なる各主体の相互作用によって建築空間が構成されるという現状を見ると，そこには何らかの意味での共通の概念が必要となることはいうまでもない。そこで，これらの各主体にあてはまる最小限の共通性を整理することがまず必要であると思われる。

3-1-3 建築安全概念及び関連概念

建築安全性という不明瞭な概念をただ漠然と議論するのではなく，ひとつの定義を与えそれに肉付けをしてゆくという分析の方法をとろう。

d1-1：建築安全性とは主体の欲求を満たす建築物の性能のひとつである。

d1-2：主体とは個人または社会集団である。

d1-3：欲求とは経済的，道徳的，美的，文化的，心理的欲求を含む「あるものを望ましい」とする傾向のすべてである。

d1-4：建築物とは物理的（経験科学的）に記述可能なシステムである。

d1-5：性能とは順序比較が可能な属性である。

以上の定義だけでは建築安全性をユニークに規定することはできない。たとえば居住性なども上の定義に合致する（ただし，建築物を住宅に限定する必要があるであろう）。しかし，この定義の中にはすでに重要な主張，考え方が含まれているので注意しなければならない。その最も重要なことは，建築安全性が単に物理的な諸量から決定されるのではなく，主体の欲求との関連でとらえねばならないということである。このことは建築学が理学でなく，工学に属していることに対応している。また，さらに個人または社会集団が建築物に対して何如なる欲求をもっているかという心理的，社会的側面と建築物との関係についての知識が必要であることも主張している。

さらに，欲求のタイプとして経済的，道徳的，美的，文化的，心理的欲求の各タイプがあり，それらの相互関係が建築安全性の課題となっていることも主張している。最後の定義では性能が単なる属性ではなく，順序比較，すなわちどちらがより好ましいかを比較判断できるものでなければならないことも主張している。この主張をより強くすれば，安全性をひとつの連続的な数値として表わすことを主張することになってくるが，ここではそこまで強い主張はもち込んでいない。例をとって補足すると階高という建築物の属性は，そのままでは安全性とは関係はない。なぜならd1-5を満たすが，d1-3の欲求との関連が明示されていなければならないからである。つまり，階高が増加したほうが欲求を満たすのか，減少したほうが満たすのかということがはっきりしていないからである。

3-1-4 建築安全概念の類型

安全性を主体の欲求と関係づけたことから個人と集団という2つの視点が存在しうる。また，その欲求という概念から欲求の持続範囲として短期的，長期的の両視点が存在しうる。すなわち，個人の段階でとらえられる安全概念と集団（ときには国家など）の段階でとらえられ

る安全概念とがその様相を異にするわけである。さらに，時間的に見て安全概念が固定しているかというと，短期的ないしはある時点のみで考えられる安全というものと，長いタイム・スパンの中で考えられている安全の概念とは異なるのが通常である。

1) 個人レベルでの安全概念：自己の利害あるいは心理的欲求によって判断される安全概念

2) 社会レベルでの安全概念：他者への影響，社会生活上の問題として判断される安全概念

3) 短期的視野での安全概念：その時点での心理的，社会的ニーズによって判断される安全概念

4) 長期的視野での安全概念：未来の諸結果などを考慮して判断される安全概念

従って，以上の組み合せを考え，さらに前述の表3－1を考慮に入れて整理すると表3－2及び表3－3のように安全概念と安全性に関する問題が類型化できるのではなかろうかと思われる。

以上の安全の概念の類型化をとおして安全という概念が建築空間の構成上非常に重要な役割をはたしており，また，建築の問題の広範囲な領域をおおっていることもわかる。さらに，建築安全計画という領域が単に理学的な（

表3-2　安全概念の類型

	短期（状況的）	長期（普遍的）	
個人レベル	安全感	経済的損失を考えた安全概念	（欲求性向からの安全概念）
社会レベル（集団）	既存の社会的規準などと関連した安全意識	社会的な規準を考えた安全概念	（規範的意味をもつ安全概念）
	（感覚的な安全概念）	（認識的な安全概念）	

表3-3　建築安全性に関する問題

	短期(状況的)	長期(普遍的)	研究レベル
個人レベル	安全感などの心理的側面と建築物の諸量との関係の把握	安全の効用的把握に基づく個々のレベルでの安全性能の決定	安全意識,安全の効用などの心理的・経済的研究
社会レベル	既存の法体系あるいはその他の規準のもつ社会的影響,意味についての検討 パニックなどの研究	科学的根拠に基づく安全性の社会的規準	法律的問題,基準の社会的影響などの研究
研究レベル	安全に対する感情的道徳的側面についての研究	物理的諸量,安全性能の合理的な決定のための基礎科学(現代の建築構造学はこの一部を行っている	総合的な建築安全性の研究

建築空間を物理的にとらえ，それを力学の問題として解決するという傾向にあった）領域だけでなく，他の建築の諸分野（建築計画など）のように建築空間の物理的特性と空間を利用する人間の側の諸特性とを同時に解析しなければならないという，理学ではなく工学の役割を担わされてきつつあるということが明白となってきた。

また，これまで安全というものを構造物とその災害にあったときの経済的損失という考えにもとづく分析が提案されていたが，それらは安全概念のひとつの類型であって，基本的な他の安全概念をおおっていないということが明白となってきた（表3-2及び表3-3参照）。

建築空間の安全性という問題をとおして多くの問題が具体的な場でとらえられているということも表3-1から読みとることができる。こうした問題解決のためにより基本的な問題は結局安全というものを正確にとらえ，それを工学の問題として解決するということにつきるのだということも明らかになったといえよう。

本研究では以上の観点にたって社会的，長期的視点の安全概念を中心にその計量化，最適化という安全計画の基本的方法と確立を試みるものである。しかし，先に述べたようにこれらの種々の安全概念は相互に関連しあう

ており，そのためすでに第2章において個人的短期的な視点，個人的長期的な視点の安全概念として住民の安全意識と安全に対する評価を分析した。次節はより社会的長期的な安全概念の計量化のための分析を進めることにする。

KOKUYO A4 NO 54

3-2 安全の計量的評価の基礎的問題

建築空間を創造するとき，それは何らかの意味において既存の建築空間よりすぐれていなければならない。ここで，問題となるのはどのような意味ですぐれているかという視点の問題である。評価とはこうした視点を明確にしたうえで成り立つことである。この視点毎の評価の差異は当然ありうることでもあり，むしろその差が評価の本質的な問題といえるのであり，この点に注目して安全性の評価の問題を，すなわち安全性を効用として計量化する可能性についての問題を整理してみたいと思う。

評価の問題に積極的に取り組んだ最初の試みは恐らくベンサムの快楽計算（hedonic calculas）であるといえよう（注：このことは「道徳及び立法の諸原理序説」に述べられており，文献2に訳出されている）。この考え方は経済学における効用という概念の確立につながっているものであり，良きにつけ，悪しきにつけ，価値を計量的に把握しようという功利主義的な考え方の基本ともいえる。さらに，現在のシステムズ・アプローチ等の手法の中に組み入れられて評価の基本的な手法概念になっている（この考え方から始まる経済学における効用の概念の変遷についての概略が文献3において述べられてい

る)。この概念の果した役割のひとつに、価値を客体と主体の相互作用として取り上げた点がある。すなわち、経済的な意味での財(商品など)の価値はその財の性質のみによって決まるのではなく、むしろそれを欲する主体(消費者)の欲求の程度に依存するということである。たとえば建築空間の価値は、そこに人間が住み、社会的な意味での生活を営むが故に空間の価値が生まれるのであって、人間の生活に何ら貢献しない建物は、物理的には建築と認められるかもしれないが、価値としてはゼロに等しいのである。

ところが、この主体の側の欲求の程度に依存するという考え方がひとつの問題を生じさせていることもみのがせない。建築空間における問題を考えてみると、先に述べたようにそこにたずさわる人々が施主(消費者)、設計者、施工者など、複雑多様に入り組んでおり、ひとつの視点から評価できないということである。設計者に良いとされる空間も、施工の側からみると好ましくなかったりする場合が多いのである。また、集合住宅のような複数の居住者がいる場合にも家の好みが異なり、どの集合住宅が好ましいかという点では、意見の一致をみることは非常に難しい問題である。この種の問題について、

すでに経済学者K.J.アローによって否定的な結論が数学的な手続きによって導かれている。彼は社会の全員にあてはまる評価(social welfare function)というものが一般的には得られないということも証明した("General Possibility Theorem" 文献4参照)。この結果をどうみるかは別として,次の単純なケースについて全体の評価の問題を考えておこう。

まず,個人A,B,Cの3人が住宅の評価をする場合を考えよう。評価する住宅としてH_1, H_2, H_3という3つのメーカーの住宅があるとしよう。このとき,各自が次のように評価したとしよう。

A:「H_1よりH_2のほうが良い」

B:「H_2よりH_3のほうが良い」

C:「H_3よりH_1のほうが良い」

この状況下で,より客観的な立場から総合評価するとすれば,どのような順序付けを行ったらいいのであろうか。

AとBの意見をとれば

$H_1 < H_2$

$H_2 < H_3$

(ここで,記法 $a < b$ はaよりbが好ましいという意味を表わす)

ということになり，単純に考えて（より良いという比較は，通常，推移律という性質をもつことから）

$H_1 < H_3$

ということになるが，この考えはCの考え方と正反対になってしまう。この単純な（三すくみの）原理が上の社会的評価の本質的なところともいえよう。従って，考え方の異なる人が何人か集まると，評価というのは不可能に近いということである。

以上，検討してきたのは評価の一般的な状況での可能性の問題であり，その可能性がアローの結果によって否定的に解かれたことによって，以下では一般的な状況ではなく，安全計画という特殊な問題の中での評価の方法，すなわち，安全性の計量化の可能性の問題から検討しなければならないといえよう。従って，以下では安全性に関して，以下のような大きく2つのケースについて検討する。

i) 安全計画対象の任意の2つに対して，どちらがより安全かどうかを比較判断可能な場合

ii) 安全性を人命的損失と経済的損失の2つで評価できる場合

前者については次節で計量化の可能性を示すとともに，

4章の前半で最適化の計画手法を示す。後者については3-4節でその意味を検討し，4章の後半でその最適化の計画手法を2つのケースについて示す。

3-3 比較判断からの効用的安全尺度の構成

ここでは，安全さの程度というものについて，比較が可能であるという条件から安全性について数量的な尺度を構成することを試みる。この方法はすでにフォン・ノイマンが数値的効用の構成の問題として公理的に計量化を試みたものである。従って，本節では，安全性というものについてフォン・ノイマン×効用に関する公理（文献5）との関連を示し，そうした条件下で成立する安全性を数値的に示す方法を検討する。

まず，安全さの程度を検討する対象の集合をUとし，個々の対象を$u, v, w, \cdots$と記す。このとき，任意の対象u, vについてどちらがより安全であるか，あるいは安全上どちらがより好ましいかについて比較可能であるとしよう。このことは「uよりvが安全上好ましい」ということを

$$u \ll v$$

と記すとすれば，任意の2つの対象に対して

$$u \ll v \qquad (3-1)$$

$$v \ll u \qquad (3-2)$$

のいづれかが成立していることを示す。しかしながら，現実的には「uとvが安全上，差がない」ということが

ありうるので，このことを

$$u \equiv v \tag{3-3}$$

と記すことにしよう。ここで，数値に関する大小記号 $>$，$<$ と同じように (3-2) の場合について

$$u \gg v \tag{3-2'}$$

なる記法を導入する。すなわち

$$u \gg v \overset{df}{\Longleftrightarrow} v \ll u \tag{3-4}$$

である。

次に，安全性に関する好ましさの概念からして，次の推移律と呼ばれる法則が成立していると考えよう。すなわち

「u より v が安全上好ましい」かつ

「v より w が安全上好ましい」とき

「u より w が安全上好ましい」

このことは，先の記法では

$$u \ll v,\ v \ll w \text{ ならば } u \ll w \tag{3-5}$$

と記すことができる。

ところで，任意の対象に関して (3-1), (3-2), (3-3) のいずれかひとつが必ず成立し，さらに (3-5) が成立することを次のようにいうことができる。

$u \ll v$ は U に関する全順序関係である。 (3-6)

以上によって，実質的に安全の評価対象 U を実数へと写す基本的な条件ができあがったといえる。というのは，実数上における通常の意味の $>$，$<$ の関係は全順序関係であるからである。以下では，構成的に対象に数を対応させる関数をつくるために必要な条件を整理しておこう。

まず，対象がいくつか組み合されてできる対象について検討しよう。より具体的に考えるために，次のケースを考える。耐火造の建物だけが建てられている地区を u，非耐火造の建物だけで建てられている地区を v とするとき，当然，両者の混在した地区が考えられる。ここで，耐火造の割合が α，非耐火造の割合が $1-\alpha$ の地区 w を以下のように記すことにしよう。

$$w \equiv \alpha u \oplus (1-\alpha) v \qquad (3-7)$$

ここで，記号 $\oplus$ は数値の加算を意味するものではなく「対象 u と対象 v をウェイト α，$(1-\alpha)$ で組み合せた」ことを意味する記号である。

ここで，単純だが重要な性質が成立している。つまり，耐火造100%の地区 u と非耐火造100%の地区 v を比べた場合，通常，前者が安全と考えられる。すなわち，「耐火造100%の地区の方が非耐火造100%の地区より好

ましい」と考えられるが，このとき，この考え方をとることを前提とするとき，「耐火造100%の地区Uは耐火造と非耐火造の混在地区Vよりは安全上好ましい」と考えることができよう。以上の推論のプロセスを記号で示すと

$$U \gg V \Rightarrow U \gg \alpha U \oplus (1-\alpha) V \qquad (3-8)$$

となる。さらに，同様なプロセスで

$$U \ll V \Rightarrow U \ll \alpha U \oplus (1-\alpha) V \qquad (3-9)$$

となる。以上の2つの条件は，上記の地区の耐火性能に関する問題の他にも種々の安全の問題の中で組み合せがありうる場合には，おおむね成立していると考えてさしつかえないと思われる。

さらに，耐火造，防火造，木造の3種があるような場合を考えると

（耐火造100%の地区）≫（防火造100%の地区）

（防火造100%の地区）≫（木造 100%の地区）

が成立しており，耐火造と木造の混在地区で以下の条件をみたしているものが考えられる。

（耐火造と木造の混在地区）≫（防火造100%の地区）

たとえば耐火造の割合が100%に近い場合には，上の関係が成立しているといえよう。このとき，先の組み合せ

の記法では，上の関係は下記のようになる。

$$u \gg w \gg v \Rightarrow \exists\alpha\,[\alpha u \oplus (1-\alpha) v \gg w] \quad (3\text{-}10)$$

同様に

$$u \ll w \ll v \Rightarrow \exists\alpha\,[\alpha u \oplus (1-\alpha) v \ll w] \quad (3\text{-}11)$$

さらに，組み合せの仕方から明らかなように

$$\alpha u \oplus (1-\alpha) v \equiv w \quad (3\text{-}12)$$

という w と

$$(1-\alpha) v \oplus \alpha u \equiv w' \quad (3\text{-}13)$$

という w' とは同じものと考えて差しつかえない。従って，w と w' とは安全上差がないから

$$\alpha u \oplus (1-\alpha) v \equiv (1-\alpha) v \oplus \alpha u \quad (3\text{-}14)$$

となる。また，ある都市を考え，耐火造の割合が β，非耐火造の割合が $(1-\beta)$ である地区 u があり，その面積は都市全体の $\alpha \times 100\%$ であり，この地区以外は非耐火造からなっているとすると，この都市は先の記法では

$$z \equiv \alpha w \oplus (1-\alpha) v \quad (3\text{-}15)$$

$$w \equiv \beta u \oplus (1-\beta) v \quad (3\text{-}16)$$

となり，従って，

$$z \equiv \alpha(\beta u \oplus (1-\beta) v) \oplus (1-\alpha) v \quad (3\text{-}17)$$

と表わせる。一方，この都市の耐火造の比率は明らかに $\alpha\beta$ であり，非耐火造の割合は $1-\alpha\beta$ である。従って，

この都市の安全さは他の条件を一定と考えれば，耐火造の割合$\alpha\beta$，非耐火造の割合$1-\alpha\beta$の地区の安全さは同じであると考えられるので

$$\alpha(\beta u \oplus (1-\beta)v) \oplus (1-\alpha)v \equiv \alpha\beta u \oplus (1-\alpha\beta)v \quad (3-18)$$

が成立するといえよう。(3-17)，(3-18)の性質も通常の安全の問題では成立しているといえよう。

これまで整理してきた条件(3-6)，(3-8)，(3-9)，(3-10)，(3-17)及び(3-18)は安全計画の対象に関しては，通常の場合，成立しているといえるが，これらの条件の一部が成立していない可能性も考えられよう。とくに人命と経済的な利益を比べざるを得ない場合については，どちらを優先させるべきか比較できないというようなケースも考えられ，このような場合は条件(3-6)はみたされない。こうした特殊ケースは，しかし，安全計画上，重要な意味をもっており，次節でとくにこの問題を検討しよう。従って，ここでは上の条件(3-6)，(3-8)，(3-9)，(3-10)，(3-11)，(3-17)及び(3-18)が成立する場合に限って検討を続けよう。

ところで，この条件群はフォン・ノイマンが数値的効用を導きだす公理系のそれぞれの公理と完全に一致している。また，フォン・ノイマンはこの公理系から数学的

手続きのみを用いて数値的効用の存在定理と一意性定理を演繹している。このことは，条件(3-6)，(3-8)，(3-9)，(3-10)，(3-11)，(3-17)及び(3-18)より次の性質を有する安全性の効用尺度fが構成できることを示す。

A) 対象uに関して以下の2つの性質をみたす$f(u)$なる数値を与えることができる。

i) $u \gg v \Rightarrow f(u) > f(v)$

ii) $f(\alpha u \oplus (1-\alpha) v) = \alpha f(u) + (1-\alpha) f(v)$

が成立する。

B) 数値の与え方はいくつか存在しうるが，それらの与え方には次の関係が成立している。

i) 2通りの数値の与え方$f(u)$と$f'(u)$については通常

$$f'(u) = a_1 f(u) + a_0$$

ここで，a_0, a_1は $a_1 > 0$ なる定数

と表わされる。

前者は対象u, v, ---- に対してそれぞれの安全の程度を数値$f(u)$, $f(v)$, ---- と表わすことができて，安全上より好ましいものがより大きな数値となっており，uとvとのウェイトα, $(1-\alpha)$での組み合せたものは，数値$f(u)$と$f(v)$にウェイトα, $(1-\alpha)$でかけたものに等しい

ことを示している。さらに，後者はこのような数値の与え方はいく通りかありうるが，どのような与え方でも厳密と目盛りのとり方に依存するような差だけであり，たとえば温度を摂氏で測るか華氏で測るかの差だけであり，本質的な意味の差はありえないことを示している。

従って，条件(3-6)，(3-8)，(3-9)，(3-10)，(3-11)，(3-17)及び(3-18)が成立する場合には各対象の安全さの程度を示す整合的な数値を与えることができ，この数値を用いてこれらの最大化を行うことが安全計画の課題となる。4章の前半ではこのような場合の安全計画手法を検討する。

3-4 修復不可能性と安全の二次元計量化

3-4-1 安全の素朴な意味

前節で述べたように，安全さの程度について比較可能すなわち，どちらがより好ましいというような判断が可能で，かつ推移律が成立するならば，安全さの程度を数値的に表わすことが可能であるが，ここでは比較可能でない場合についてその主要な意味とその場合の計量化の方法を提案する。

我々が安全であるというのは一体どういうたぐいのことを意味しているのか非常に曖昧である。安全の問題を取り扱う場合，図3-1のようにその考えているシステムについて様々な状態というものを考え，その状態が安全であると考えることが行われている。そして，ある外部または内部からの影響によって危険な出来事が発生し，そのシステムの状態が安全から危険へと状態遷移するというふうに考える。この一見面倒な安全と危険に関する記述の仕方は非常に有用である。図3-1は状態の移り変りを示す図であるので，状態遷移図と呼ばれ，シャノン図と呼ばれる場合もある。この図では安全という状態と危険という状態の2つのみを考えているが，この他にいろいろな状態を考えることもできる。また，安全な状

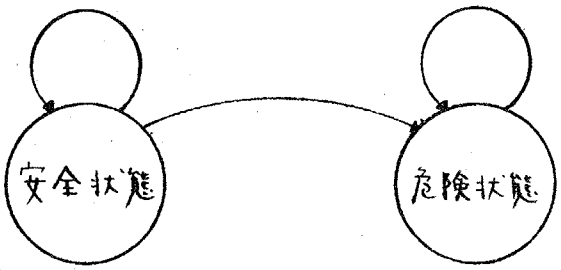


図3-1 安全状態と危険状態

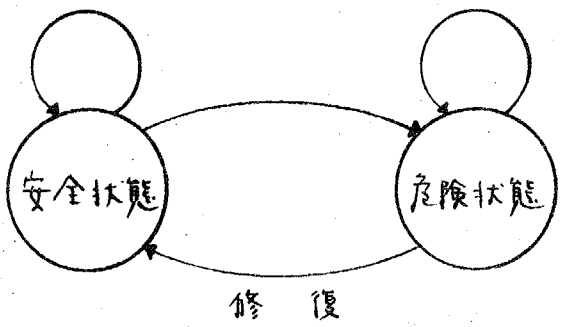


図3-2 修復のあるシステム

態から危険な状態への遷移，すなわち危険な出来事の発生を矢印で記しているが，危険な状態から修復することができるようなシステムにおいては，図3-2のように修復の状態遷移も考えられるわけである。ここで，安全と危険という概念が状態として定義されたわけであるが，安全な状態から危険な状態の遷移に関しては2通りのケースが考えられる。ひとつは確定的に危険な出来事が発生するという場合であり，もうひとつは不確定的に危険な出来事が発生するという場合である。たとえば地震の発生や火災の出火というものは不確定的であると考えられる。一方，故意に放火などを行った場合には，安全な状態から危険な状態へは確定的に状態遷移するというように考えられる。通常，我々の対象とする研究範囲では不確定的な場合が多い。この不確定的な場合についても厳密には2通りの不確定さがありうる。ひとつは確率論的な意味での不確定さである。もうひとつは認識論的な意味での不確定さである。前者は地震の発生などのように客観的な物理現象の発生する確率に関するものである。後者はむしろ安全とか危険とかを評価する側の考え方に依存する不確定さであり，たとえば地震によって建物にキレツが生じたというような場合，そのキレツの形状に

よっては危険な場合もあるし，それほど危険でない場合もありうる。従って，キレツが生じたという段階では危険な出来事が発生し，その建物は危険なのかあるいは安全なのか，評価しかねる場合がある。このような場合，確率論的な意味での曖昧さではなく，どこまでを安全とみなし，どこまでを危険とみなすという意味での曖昧さである。このような曖昧さを最近ではMITのZadeh（文献6）等によってFuzzy集合理論として数学的に定式化されるようになってきている。建築の分野においても，ブロックリー（文献7），中野（文献8）によって構造の破壊に関する分析に応用されている。

3-4-2 修復不可能性の意味

先の図3-1，図3-2でみたように，危険な状態になったといってもその危険な状態には2通りのケースが考えられることがわかった。すなわち，修復不可能なケースと修復可能なケースである。そこで，この2つの危険な状態を区別し，図3-3にみるように状態遷移図を書くことができる。このとき，修復可能な危険状態は，再び安全な状態へ戻れるという意味で，それほど致命的でない段階といえる。これに反して，修復不可能な危険状態になると，再び安全な状態へと復帰することはでき

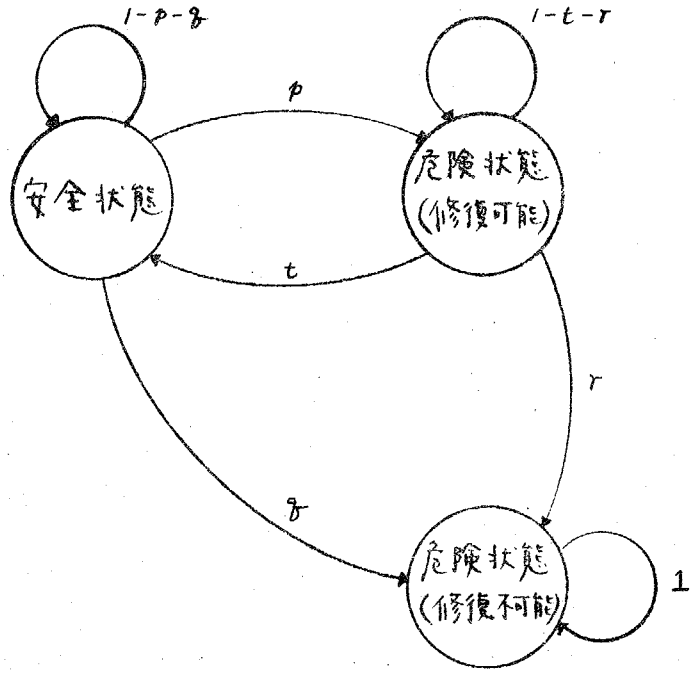


図 3-3　2つのタイプの危険状態

ない。人間の命がことさう安全の問題において重要視されるのは，まさに生命というものが一度死に至れば再び生き返ることができないという点にあり，これに反し，お金で買えるような物的な損失は保険などによってまた買い戻すことができるという意味で，生命に比べに較的軽微な損失と考えられるのである。物的な損失においても，世の中にひとつしかないというような文化財，一度被害を受ければもう元に戻ることのない自然環境等は修復不可能な状態へ移る危険性をもっているという意味で，人命と同じように重要視されるわけである。

以上みたように，安全という問題は，本質的には修復不可能な状態へと移る危険性を常に内在しているという点に基本的な特徴があるといえよう。この修復不可能な状態のことを，一旦その状態に入れば再び外へ出ることができないという意味で，吸収状態と呼ばれることもある。吸収状態をもつシステムの挙動は吸収状態をもたないシステムのそれと比べて大きく異なる性質を有している。それは，状態遷移の確率がど人な値であっても（厳密には，安全な状態から修復可能な危険な状態へ至る状態遷移のすべてのパスについて，

その確率が0でない場合について），時間がたつにつれて修復不可能に至っている確率は徐々に増加してゆき，無限に時間がたつとこの修復不可能な状態の確率は1に漸近する。また，安全な状態にとどまっている確率は0に近づく。図3－4は図3－3のような確率をもっているときにおける安全な状態にある確率と，修復可能な危険な状態にある確率と，修復不可能な危険な状態にある確率を時間の進行にそって計算したものである。このような修復不可能な状態が存在しないようなシステムにおいては，たとえば図3－2のようなシステムにおいては，修復の確率を大きくすることによって安全な状態にとどまる確率を大きくすることができる（図3－4）。

このように修復不可能な危険状態，先に述べたように生命の死，ひとつしかありえないものの損失ということの危険性は，そのシステムが変らない以上，時間がたつにつれて不可避的に増加するのである。このことは人間の死ということを考えても，年令の増加に伴い平均余命が小さくなっていくことによって示されている（図3-5）。

そのシステムの死が訪れるまでは，修復不可能な状態の確率は常に増加するということは熱力学的現象とよく似ている。そこで，この類似性から安全の問題を多少考

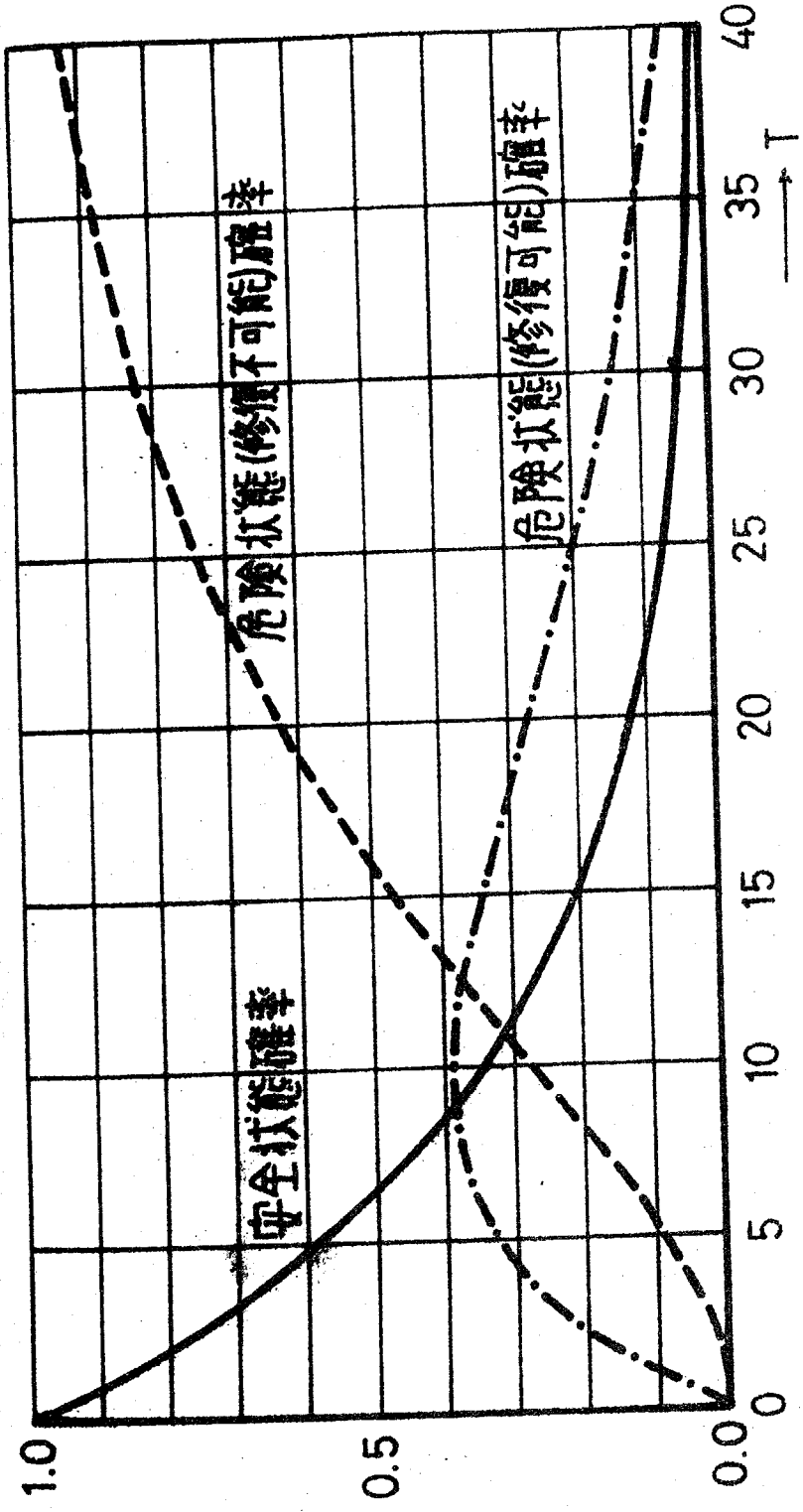


図 3-4-1 各状態の存在確率 ($p=0.1$, $q=0.001$, $t=0.0$, $r=0.1$)

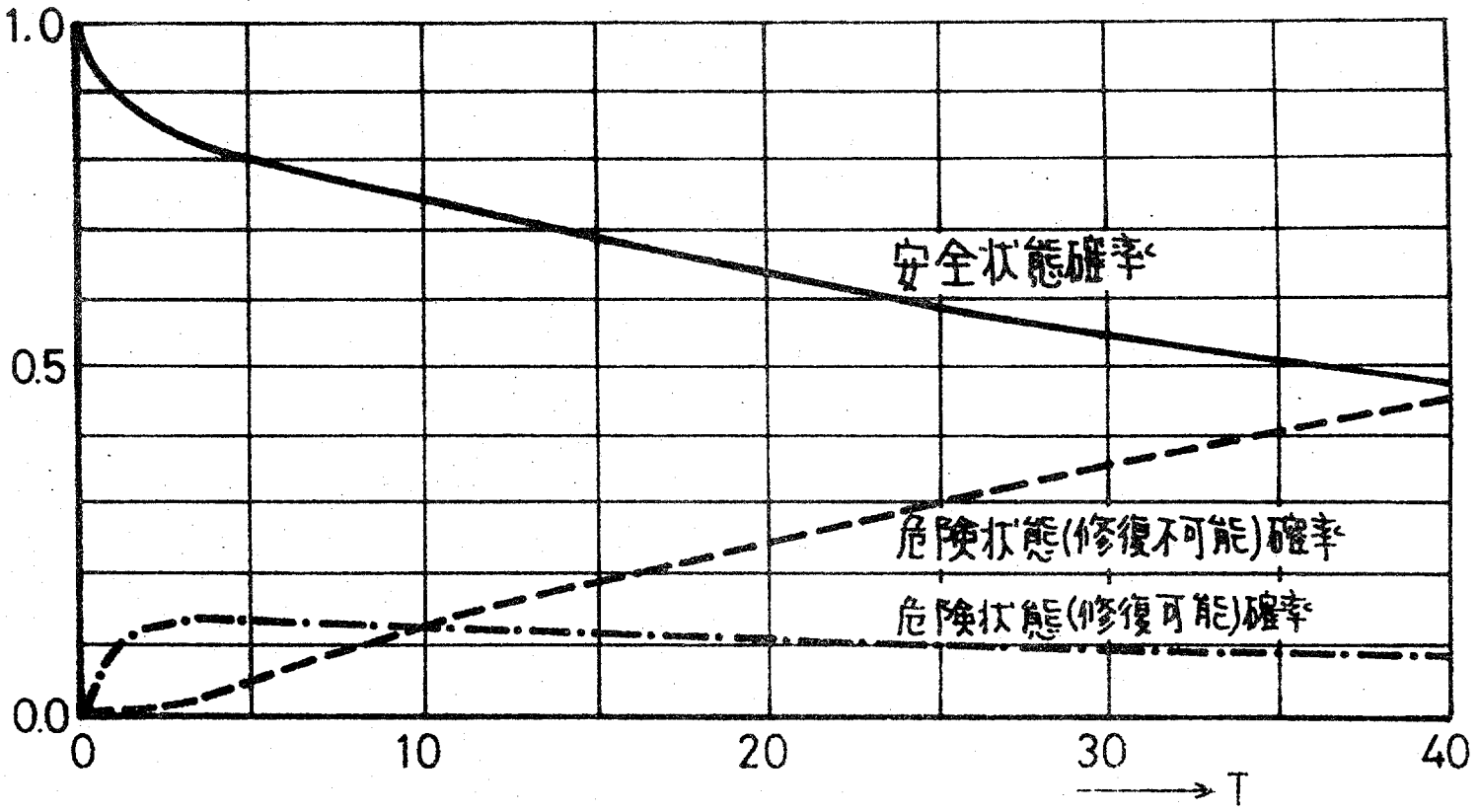


図3-4-2　各状態の存在確率　($p=0.1$, $q=0.001$, $t=0.5$, $r=0.1$)

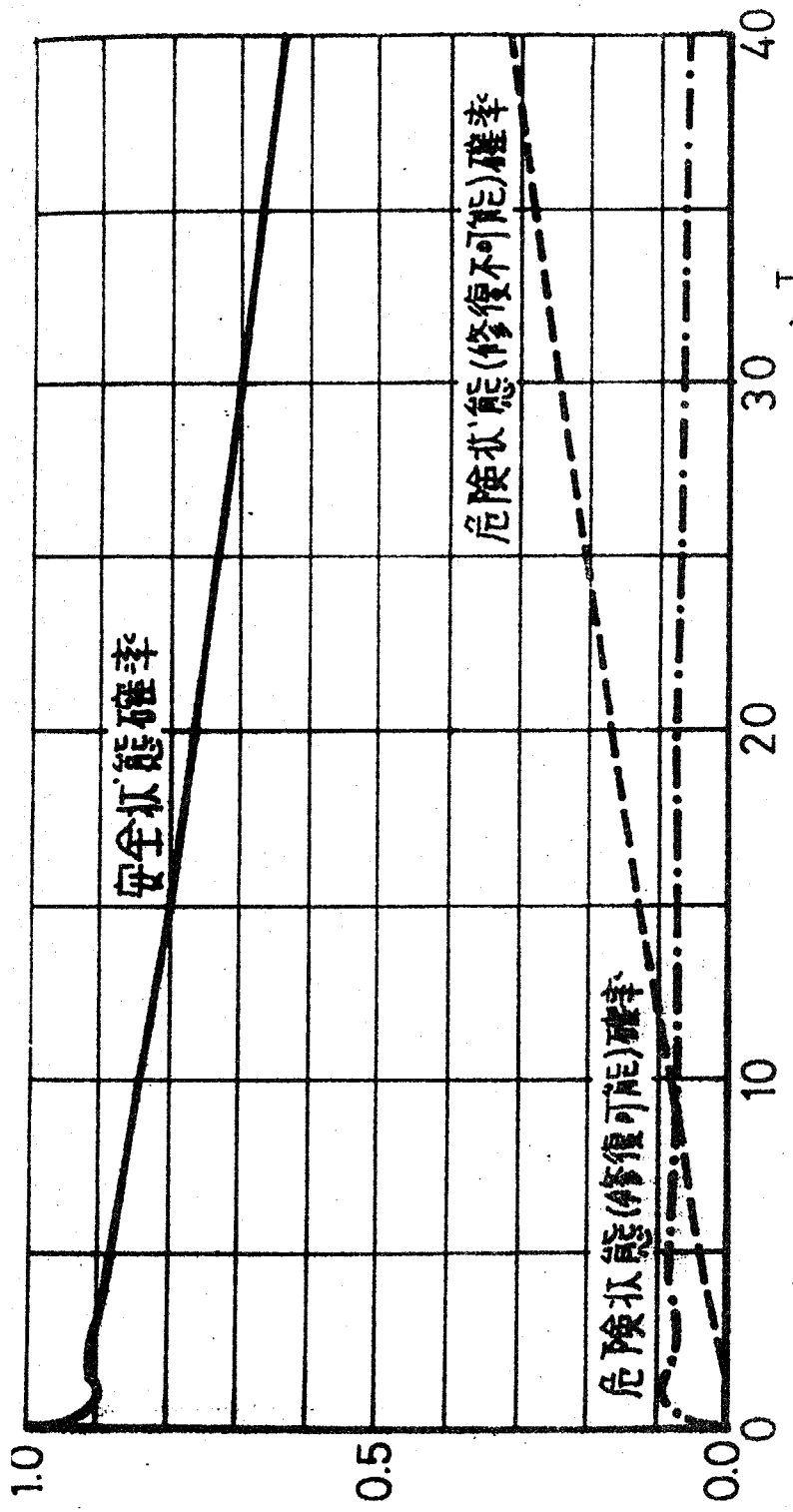


図3-4-3 各状態の存在確率 ($\mu = 0.1$, $\beta = 0.001$, $t = 1.0$, $r = 0.1$)

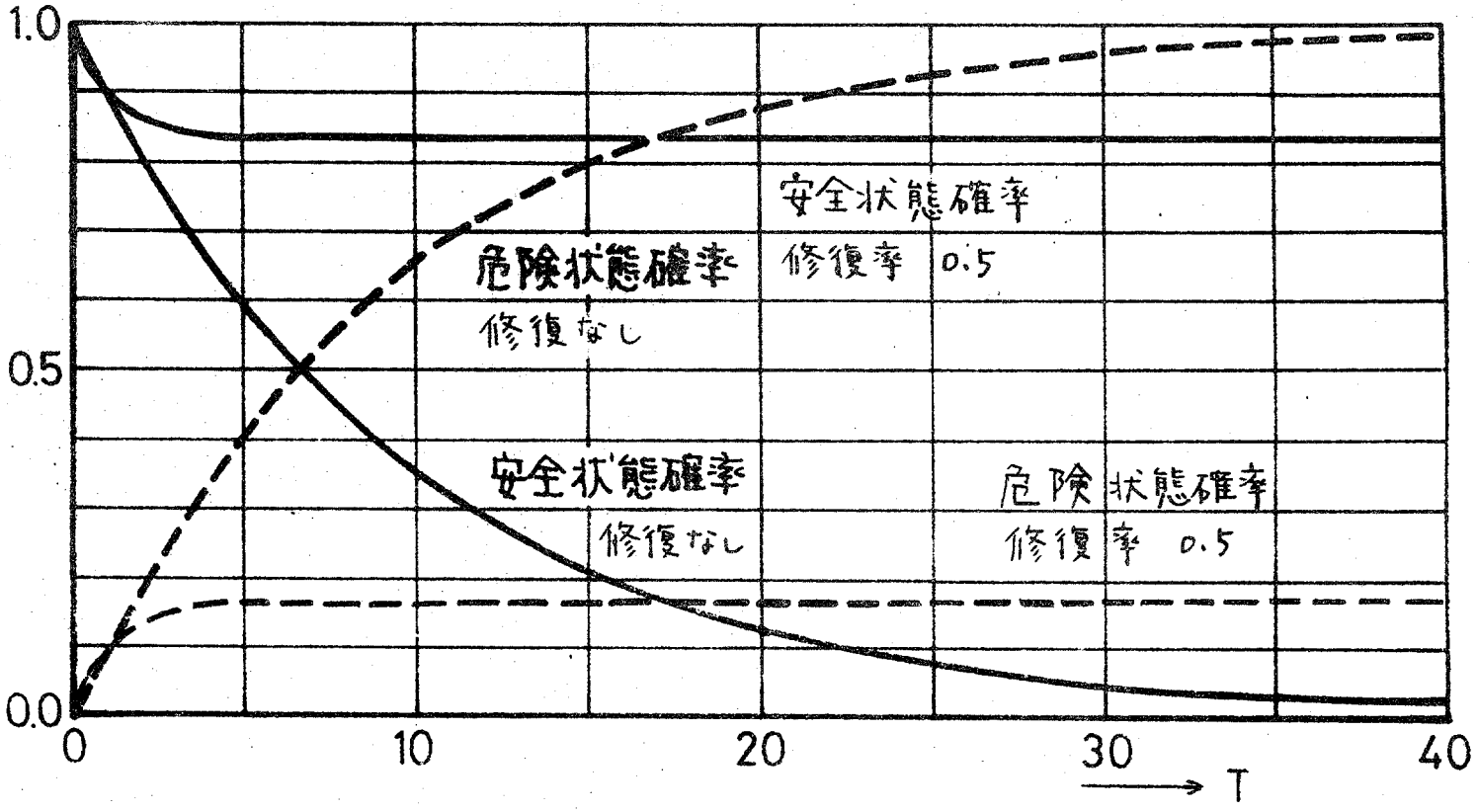


図3-4-4 各状態の存在確率（修復可能な場合（図4-2）と修復不可能な場合（図4-1）との差）

（$P=0.1$）

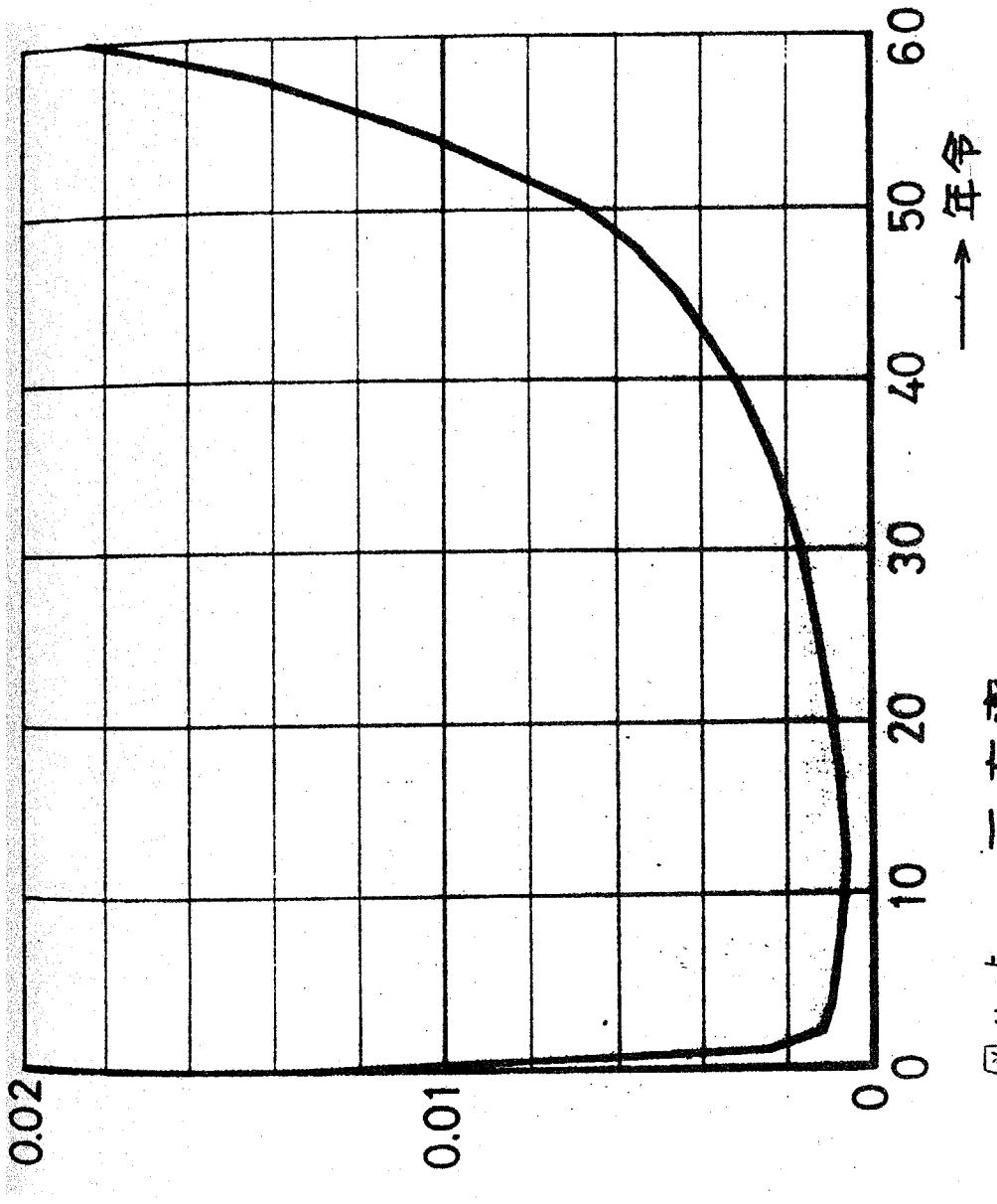


図 4-5

えてみることも重要であると思われる。熱力学的法則によれば，エントロピーは常に増加し，いわゆる「秩序」は崩壊してゆくことになる。ところで，生命が生きてゆくのは生態システムの秩序を維持してゆくことにほかならない。このことはエントロピーを増加させずに保つということを意味しており，ある科学者はこの事実を，生命は負のエントロピーを食べているという表現を用いて述べている。すなわち，生命システムは，常にエントロピーが増加してゆくという熱力学的法則下で局所的にマイナスのエントロピーをとりこみながら自己の生態システムのエントロピーの増加を定常的にくいとめている。この現象を生物学者は生態システムのホメオシタシス（恒常性）と呼んでいる。

このような実を考えると，修復不可能な状態をもつシステムが修復不可能に至る確率を増加させずにおくためには，常に負の危険性をとりかこむというようなシステム的方法がとられなければならない。実際，このようなことが安全の場合可能であろうか。単に固定したシステムにとどまっていれば，常に修復不可能に至る確率は増加するということであるから，絶えずそのシステムの改革を行って安全を維持するということが，熱力学的法則

下で生命が生きながらえていくということと同等である。このようなシステムの改革ということが安全計画の基本的課題であるといえよう。

3-4-3 安全の二次元計量化

第1章でみたように，社会工学的システムの中で安全というものがより適切に取り扱われるためには，買い手に対する安全の程度に関しての適切な情報が存在しなければならない。このことは，買い手が一般住民であることを考えれば，誰にでも容易にわかる安全の評価尺度が必要であるといえる。事実，このようなために工業化住宅などでは性能認定制度があり，安全性について評価している。ここでは前項の修復不可能性の意味をふまえて安全さの程度を計量的に表わす方法を提案する。

先に述べたように，明確な安全の尺度がなければならないが，工学的分野では，リライアビリティー（信頼性），アベイラビリティーといった尺度でシステムの安全性能を規定することが多い（文献9, 10, 11）。信頼性とは故障が発生していない確率として定義され，また，アベイラビリティーは種々の定義の仕方があるが，基本的にはシステムの使用時間中の故障せずにいる時間の割合として定義される。以上のような信頼性工学の分野に使われる

尺度は，安全の問題を考える際重要であることは確かであるが，それだけで充分であるということはできない。というのも信頼性工学自身が主に電球などの工業製品の性能表示に応用するために用いられ，それらの故障によってもたらされる影響は，物理的損失にとどまっているのが通常であり，建築の場合のようにその安全性が失われるとき，人命の損傷に至るというような危険性をはらんだ場合とは多くの点で異なっているのである。とくに信頼性工学の中で中心的な役割を演じるアベイラビリティーの概念は修復可能であることを前提とした考え方であり，先に述べた修復不可能な危険性をはらむシステムには充分とはいえないところがある。そこで，次のような2つの尺度を併用することを提案したい（文献12,13）。

1) 修復不可能な状態に至る確率 P

2) 全体のシステムの経済的損失の期待値 L

前者はいわば取り返しのつかないような状態に至る可能性を測る尺度であり，後者は修復可能な損害がある場合や安全な状態でいることのメリット等を評価する尺度である。前者はある規準以下におさえるというような考え方（安全ミニマム）がとられるべき値であり，これまで日常生活の中でどの程度までの危険性が許容されてきた

かというような点から決められるべき値である。

後者はその値を最小化すべきような値である。場合によっては、後者の尺度は安全の状態にいるとき得られるメリットを中心に考えられ、損失をマイナスの量ととれば、ひとつの経済的な効用尺度となる。ところで、この2つの尺度が同時に独立に存在しているわけではなく、建築物の建設の場合を考えてみればわかるように、前者の確率を小さくするということは、地震などについて考えれば、設計用地震力を大きくとるなどの方策がとられるということであり、それは当然コストに大きくはね返り、2番目の尺度である経済的な損失を増加させる。このように2つの尺度にはトレード・オフ（競合）関係があり、非常に難しい問題となる。特殊なケースとして、この2つの尺度をひとつにまとめるというような考え方が用いられることもある。そのような考え方に立てば、次のような値を最小化することが最も合理的とみなすことになる。

$$G = \omega_1 P + \omega_2 L$$

ここで、ω_1, ω_2 はそれぞれのウェイトを表わしている。

しかし、このような考え方は第1の尺度Pを1人の人間

の命が失われる確率と考えれば，w_1/w_2という値は経済的尺度ではかった人命の価値を表わすことになり，きわめてシビアな考え方となる。すなわち，人命を金銭で評価するということにほかならない。このような考え方が可能であるかどうかは今のところ不明である。もしこのようなウェイト付けの方法が可能であれば，安全の程度をGという数値で表わすことが可能であり，それは前節で示した効用的安全尺度と同じものになる。従って，ここではむしろこのような考え方を避けて安全の評価を行うことを試みる。このように2つの尺度を併用するということによって最適化の問題は非常に難しくなるが，第4章の後半ではこうした制約のもとで最適化を行う技法を求める。

この2つの尺度によって安全さの程度を示すことを以後，安全の二次元計量化と呼ぶ。次節ではこの二次元計量化の意味を明確にすること，並びに実際にこの2つの数値；修復不可能な状態に至る確率，全体の経済的損失の期待値を具体的に求める手続きを，より基本的にシステムについて実行することを試みる。

3－4－4　確率的システムにおける二次元計量化

3－4－4－1　確率的システムの代数的表現

図3-3に示したように安全計画の対象システムは状態遷移システムとしてとらえることができるが，この状態遷移は確定的ではない。修復という状態遷移を除いてはすべて対象システムにかかる外的要因（構造計画の場合，外力，火災の場合，出火等）によって状態遷移するものであり，それらはすべて確率的である。また，修復するか、しないかという点については人間の意志によるものであり，その修復のする程度をひとつの数値で表わせば，以後の分析に見られるごとく，確率的に取り扱うことができるであろう。以上のことから対象システムを確率的状態遷移システムとしてとらえることができる。

図3-3のシステムの挙動を状態遷移確率マトリックスを用いて表わすと，

$$P=\begin{bmatrix} 1-p-q & p & q \\ t & 1-r-t & r \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (4-1)$$

となる。

また，各変数にはその定義上次のような制限がかかっている。p, q, rは状態遷移確率であるということから，また，それらは0であったり，1であったりしたときには意味をもちえないので

i) $0<p,\ q,\ r<1$ (4-2-1)

となる。また，修復をする程度もは

ii) $0 \leqq t \leqq 1-\gamma$ (4-2-2)

でなければならない。さらに，安全な状態から修復不可能な状態に至る確率と，修復可能な状態から修復不可能な状態に至る確率をくべた場合，通常のケースでは後者の方が大きいと考えられるので

iii) $\gamma \geq g$ (4-2-3)

でなければならない。

こうした条件のもとで，状態遷移のプロセスというものは，確率状態ベクトルを用いて表わすことができる。すなわち，

$$\pi(T) = (x_1^T, x_2^T, x_3^T) \quad (4-3)$$

ここで，x_i^T は時刻 T における状態 i である確率というベクトルで，時刻 T における状態を記述することができる。一方，先に定義した遷移確率行列における各要素 P_{ij} は状態 i から状態 j への遷移確率にほかならないから

$$\pi(T) = \pi(T-1)P \quad (4-4)$$

という状態遷移方程式が成立する。

また，安全な状態を基準にして検討するので，このシステムの初期状態は

$$\pi(0) = (1, 0, 0) \tag{4-5}$$

で与えられる。

3-4-4-2 システムの挙動解析

Z-変換によるこのシステムの解析を行う。まず，(4-4)式をZ-変換することによって

$$\frac{1}{z}\left(\Pi(z) - \pi(0)\right) = \Pi(z)P \tag{4-6}$$

をうる。ここで，$\Pi(z)$は$\pi(n)$のZ-変換である。また，行列$(I - zP)$の逆行列は存在しており，(4-6)式は次のように変形することができる。

$$\Pi(z) = \pi(0)\left(I - zP\right)^{-1} \tag{4-7}$$

ところで，(4-1)式より

$$I - zP = \begin{bmatrix} 1-z(1-p-q) & -zp & -zq \\ -zt & 1-z(1-r-t) & -zr \\ 0 & 0 & 1-z \end{bmatrix} \tag{4-8}$$

であるので，この行列式の値は

$$|I - zP| = (1-z)\left\{1-(2-p-q-r-t)z+(1-p-q-r-t+pr+qr+qt)z^2\right\} \tag{4-9}$$

となる。この方程式の右辺は実数θ, ωを用いて次のように書き表わすことができる。

$$|I - zP| = (1-z)(1-\theta z)(1-\omega z) \tag{4-10}$$

$$\theta \geq \omega \tag{4-11-1}$$

$$\theta \cdot \omega = 1 - p - q - r - t + pr + qr + qt \qquad (4-11-2)$$

$$\theta + \omega = 2 - p - q - r - t \qquad (4-11-3)$$

$$\theta - \omega = \sqrt{p^2+q^2+r^2+t^2+2(pq+pr+rt-pr-qr-qt)} \qquad (4-11-4)$$

$$\theta = \frac{1}{2}\left(2-p-q-r-t+\sqrt{p^2+q^2+r^2+t^2+2(pq+pt+rt-pr-qr-qt)}\right) \qquad (4-11-5)$$

$$\omega = \frac{1}{2}\left(2-p-q-r-t-\sqrt{p^2+q^2+r^2+t^2+2(pq+pt+rt-pr-qr-qt)}\right) \qquad (4-11-6)$$

従って，$(I-zP)$ の逆行列は

$$(I-zP)^{-1} = \frac{1}{|I-zP|}\begin{bmatrix} A_{11} & -A_{21} & A_{31} \\ -A_{12} & A_{22} & -A_{32} \\ A_{13} & -A_{23} & A_{33} \end{bmatrix} \qquad (4-12)$$

$$= \begin{bmatrix} \vdots & & \\ \cdots & \dfrac{(-1)^{(i+j)} A_{ji}}{(1-z)(1-\theta z)(1-\omega z)} & \cdots \\ \vdots & & \end{bmatrix} \qquad (4-13)$$

となり，従って，各要素を部分分数の形に変形することにより

$$(I-zP)^{-1} = \begin{bmatrix} \vdots & & \\ \cdots & \dfrac{a_{ij}}{1-z} + \dfrac{b_{ij}}{1-\theta w} + \dfrac{c_{ij}}{1-\omega z} & \cdots \\ \vdots & & \end{bmatrix} \qquad (4-14)$$

すなわち，

$$(I-zP)^{-1} = \frac{1}{1-z}\left[a_{ij}\right] + \frac{1}{1-\theta z}\left[b_{ij}\right] + \frac{1}{1-\omega z}\left[c_{ij}\right] \qquad (4-15)$$

と書ける。従って，

$$\Pi(z) = \pi(0)\left\{\frac{1}{1-z}[a_{ij}] + \frac{1}{1-\theta z}[b_{ij}] + \frac{1}{1-\omega z}[c_{ij}]\right\} \qquad (4-16)$$

となる。ここで，逆z-変換を行えば，次の方程式をう る。

$$\pi(T) = \pi(0)\{[a_{ij}] + \theta^T[b_{ij}] + \omega^T[c_{ij}]\} \qquad (4-17)$$

一方，(4-5)式より，$\pi(0)$は1番目の要素のみについて1であり，他は0であることから，上の方程式は次のように簡単な形に書き変えることができる。

$$\pi(T) = (a_{11}, a_{12}, a_{13}) + \theta^T(b_{11}, b_{12}, b_{13}) + \omega^T(c_{11}, c_{12}, c_{13}) \qquad (4-18)$$

(4-8)式から(4-14)式までの手続きをへて，実際，a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}の値を次のように求めることができる。

$$a_{11} = 0 \qquad (4-19-1)$$

$$a_{12} = 0 \qquad (4-19-2)$$

$$a_{13} = 1 \qquad (4-19-3)$$

$$b_{11} = \frac{1}{\theta-\omega}\{\theta - 1 + r + t\} \qquad (4-19-4)$$

$$b_{12} = \frac{p}{\theta-\omega} \qquad (4-19-5)$$

$$b_{13} = \frac{1}{\theta-\omega}\{-\theta + 1 - p - r + t\} \qquad (4-19-6)$$

$$c_{11} = \frac{-1}{\theta-\omega}\{\omega - 1 + r + t\} \qquad (4-19-7)$$

$$c_{12} = \frac{-p}{\theta-\omega} \qquad (4-19-8)$$

$$c_{13} = \frac{-1}{\theta-\omega}\{-\omega + 1 - p - r - t\} \qquad (4-19-9)$$

従って，n単位時間後の状態確率は次のように記述することができる。

$$\pi(t)=(0,0,1)+\frac{\theta^T}{\theta-\omega}(\theta-1+r+t,\ p,\ -\theta+1-p-r-t)-\frac{\omega^T}{\theta-\omega}(\omega-1+r+t,\ p,\ -\omega+1-p-r-t) \tag{4-20}$$

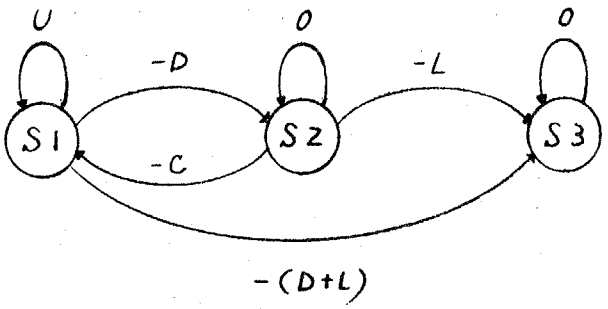
ただし，θ及びωは(4-11-5)，(4-11-6)式に与えられている。ここで求められたベクトルπ(T)の第3要素が修復不可能状態に至る確率にほかならない。

3-4-4-3　システムの損失解析

通常，対象となるシステムは安全の状態を持続すればそれなりの利益をうるものである。しかし，危険な出来事が発生した場合は大きな損害を生じ，さらに，修復可能な状態から安全な状態へと修復するには，修復費用を要するのが通常である。従って，図3-6のように各状態遷移に利得(損失)をあわせて考えることができる。以上のシステムを再び以下のように行列表示に書くことができる。

$$R=[r_{ij}]=\begin{bmatrix} U & -D & -(D+L) \\ -C & 0 & -L \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4-21}$$

ここで，r_{ij}は状態iから状態jへの推移に伴う利得で



S1; 安全の状態
S2; 修復可能な危険状態
S3; 修復不可能な危険状態
U; 安全な状態が持続するときに考えられる効用
D; 安全な状態から修復可能な状態へと移るような出来事が発生したときの損失
L; 修復不可能な状態が生じるときの損失
C; 修復費用

図3-6 利得をもつ状態遷移システム

ある。また，状態iにあるときに次の1単位時間の推移での期待総利得を$v_i(n)$で定義すると，次の再帰関係式が成立している。利子率一定である場合，将来価値の現在価値としての補正率α（利子率＋1）をとって

$$v_i(T) = \sum_{j=1}^{3} p_{ij}\left[r_{ij} + \alpha v_j(T-1)\right] \tag{4-22}$$

さらに

$$g_i = \sum_{j=1}^{3} p_{ij}\, r_{ij} \tag{4-23}$$

なる定数を用れば，（4-22）式は

$$v_i(T) = g_i + \alpha \sum_{j=1}^{3} p_{ij}\, v_j(T-1) \tag{4-24}$$

と書き直すことができる。また，

$$v(T) = \begin{bmatrix} v_1(T) \\ v_2(T) \\ v_3(T) \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} \tag{4-25}$$

なるベクトルを考えれば

$$v(T) = g + \alpha P\, v(T-1) \tag{4-26}$$

となる。また，初期建設コストC_0を考えると

$$v(0) = \begin{bmatrix} -C_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4-27}$$

とおくことができよう。（4-26）式をZ－変換すると，

$$\frac{1}{z}\left[V(z) - v(0)\right] = \frac{1}{1-z}\, g + \alpha P V(z) \tag{4-28}$$

となり，$v(T)$ の z-変換は次のように書ける。

$$V(z) = \frac{z}{1-z}(I-\alpha z P)^{-1} g + (I-\alpha z P)^{-1} v(0) \qquad (4-29)$$

(4-15)式より

$$V(z) = \frac{z}{1-z}\cdot\frac{1}{1-\alpha z}[a_{ij}]g + \frac{z}{1-z}\cdot\frac{1}{1-\alpha\theta z}[b_{ij}]g + \frac{z}{1-z}\cdot\frac{1}{1-\alpha\omega z}[c_{ij}]g$$

$$+ \frac{1}{1-\alpha z}[a_{ij}]v(0) + \frac{1}{1-\alpha\theta z}[b_{ij}]v(0) + \frac{1}{1-\alpha\omega z}[c_{ij}]v(0) \qquad (4-30)$$

再び部分分数に分離することにより

$$V(z) = \frac{1}{1-\alpha}\left(\frac{1}{1-z}-\frac{1}{1-\alpha z}\right)[a_{ij}]g + \frac{1}{1-\alpha\theta}\left(\frac{1}{1-z}-\frac{1}{1-\alpha\theta z}\right)[b_{ij}]g + \frac{1}{1-\alpha\omega}\left(\frac{1}{1-z}-\frac{1}{1-\alpha\omega z}\right)[c_{ij}]g$$

$$+ \frac{1}{1-\alpha z}[a_{ij}]v(0) + \frac{1}{1-\alpha\theta z}[b_{ij}]v(0) + \frac{1}{1-\alpha\omega z}[c_{ij}]v(0) \qquad (4-31)$$

となり，従って，逆 z-変換を用いて

$$v(T) = \frac{1}{1-\alpha}(1-\alpha^T)[a_{ij}]g + \frac{1}{1-\alpha\theta}(1-(\alpha\theta)^T)[b_{ij}]g + \frac{1}{1-\alpha\omega}(1-(\alpha\omega)^T)[c_{ij}]g$$

$$+ \alpha^T[a_{ij}]v(0) + (\alpha\theta)^T[b_{ij}]v(0) + (\alpha\omega)^T[c_{ij}]v(0) \qquad (4-32)$$

となる。初期状態は $\pi(0)=(1,0,0)$，すなわち，安全状態であったとき，利得は

$$v_1(T) = \frac{1}{1-\alpha}(1-\alpha^T)(a_{11},a_{12},a_{13})g + \frac{1}{1-\alpha\theta}(1-(\alpha\theta)^T)(b_{11},b_{12},b_{13})g$$

$$+ \frac{1}{1-\alpha\omega}(1-(\alpha\omega)^T)(c_{11},c_{12},c_{13})g$$

$$+ \alpha^T(a_{11},a_{12},a_{13})v(0) + (\alpha\theta)^T(b_{11},b_{12},b_{13})v(0)$$

$$+ (\alpha\omega)^T(c_{11},c_{12},c_{13})v(0) \qquad (4-33)$$

となる。一方，行列P，Rの要素から

$$q_1 = p_{11}r_{11} + p_{12}r_{12} + p_{13}r_{13}$$

$$= (1-p-q)U - pD - qL \qquad (4-34-1)$$

$$q_2 = p_{21}r_{21} + p_{22}r_{22} + p_{23}r_{23}$$

$$= -tC - rL \qquad (4-34-2)$$

$$q_3 = p_{31}r_{31} + p_{32}r_{32} + p_{33}r_{33}$$

$$= 0 \qquad (4-34-3)$$

また，a_{ij}，b_{ij}，c_{ij}は(4-19)に与えられており，それらを用いると

$$(a_{11}, a_{12}, a_{13})q = 0 \qquad (4-35)$$

$$(b_{11}, b_{12}, b_{13})q = \frac{1}{\theta-\omega}\{(\theta-1+r+t)(1-p-q)U - (\theta-1+r+t)pD$$
$$-(\theta q - q + rq + tq + pr)L - ptC\} \qquad (4-36)$$

$$(c_{11}, c_{12}, c_{13})q = \frac{1}{\theta-\omega}\{(\omega-1+r+t)(1-p-q)U - (\omega-1+r+t)pD$$
$$-(\omega q - q + rq + tq + pr)L - ptC\} \qquad (4-37)$$

であり，(4-27)式より

$$(a_{11}, a_{12}, a_{13})v(0) = 0 \qquad (4-38-1)$$

$$(b_{11}, b_{12}, b_{13})v(0) = \frac{-C_0}{\theta-\omega}\{\theta-1+r+t\} \qquad (4-38-2)$$

$$(c_{11}, c_{12}, c_{13})v(0) = \frac{C_0}{\theta-\omega}\{\omega-1+r+t\} \qquad (4-38-3)$$

であることから，結局，利得$v_1(T)$は

$$
\begin{aligned}
\psi_1(T) = \frac{1}{\theta-\omega}\Bigg\{ & \left(\sum_{i=0}^{T-1}(\alpha\theta)^i\right) \\
& \times\Big((\theta-1+\gamma+t)(1-p-q)U-(\theta-1+\gamma+t)pD-(\theta q-q+q\gamma+qt+p\gamma)L-ptC\Big) \\
& -\left(\sum_{i=0}^{T-1}(\alpha\omega)^i\right) \\
& \times\Big((\omega-1+\gamma+t)(1-p-q)U-(\omega-1+\gamma+t)pD-(\omega q-q+q\gamma+qt+p\gamma)L-ptC\Big) \\
& -\alpha^T\cdot C_0 \\
& \times\left(\theta^T(\theta-1+\gamma+t)-\omega^T(\omega-1+\gamma+t)\right)\Bigg\} \qquad (4-39)
\end{aligned}
$$

であり，これがシステム全体の経済的損失の期待値である。

上記の結果は離散時間のシステムについての結果であり，容易に連続時間のシステムについても拡張することができる(第5章第1節においては危険な状態を6つのフェイズとしてとらえ，連続時間として解析を行っている)。また，具体的な問題に応じてここで示された基本的方法が，それらの問題の特殊性に応じた形で具体的方法が示される。

以上のプロセスによって修復可能な状態に至る確率とシステムの経済的損失の期待値を求める原理的な方法が示され，二次元計量化の具体的方法が明確になったといえよう。

文献

1) 志村正道，「パターン認識と学習機械」，昭晃堂，昭和46年

2) 世界の名著「ベンサム，J.S.ミル」，中央公論社，昭和42年

3) 青木義次，「建築における社会工学」，建築技術，昭和49年

4) Arrow, K.J., "Social Choices and Individual Values", Jhon Wiley, 1951

5) フォン・ノイマン，モルゲンシュタイン，「ゲームの理論と経済行動」，東京図書，昭和47年

6) Zadeh, L.A., "Fuzzy Sets", Information & Control, 1965, 8, PP 338-353

7) Blockley, D.I., "Predicting the Likelihood of Structural Accidents", Proc., Civil Engineers, Part 2, 1975, 59, Dec., PP 659-668

8) 中野清司，「実用的な危険度の計算法（その2）」，目標公準作成委員会資料，昭和51年

9) 斉藤嘉博，「信頼性の基礎数学」，東京電気大学出版，昭和47年

10) 依田浩, 「信頼性理論入門」, 朝倉書店, 昭和47年

11) 塩見弘, 「信頼性工学入門」, 丸善, 昭和47年

12) Y. Aoki, "Optimization of Environmental Planning under the Risk-aversion of Non-repairable Damage", Summary of Papers on General Fuzzy Problems Report No. 2, December, 1976

13) 青木義次, 「計画の構造と手法」, 建築研究報告 No. 80, 建設省建築研究所, 6月, 昭和52年

SEKIREI A4 NO. 54

第4章　建築安全計画の最適化

4－1　安全の投入理論

4－1－1　安全効用関数の限界効用逓減性
4－1－2　安全の投入問題
4－1－3　安全投入の最適アルゴリズム
4－1－4　最適アルゴリズムの実行と安全状態の変化

4－2　多次元評価

4－2－1　建築システム
4－2－2　支配概念とメリット・デメリット概念
4－2－3　支配概念の拡張
4－2－4　判断基準とその関係
4－2－5　総合評価システム
4－2－6　総合評価の計算アルゴリズム
4－2－7　数値例
4－2－8　各定理の証明

4－3　パレート・レイ・オプティマム

4－3－1　パレート最適性
4－3－2　安全計画のおかれている状況
4－3－3　安全計画最適性の原理
4－3－4　パレート・レイ・オプティマム
4－3－5　安全計画のパレート・レイ・オプティマム

4－1　安全の投入理論

4－1－1　安全効用関数の限界効用逓減性

安全計画の中でとりわけ重要な問題は計画対象の各部分の安全のレベルを全体的にみてより効果的に設定することである。たとえば構造設計の場合，各部材に対してより効果的に安全係数を設定することなどが重要な安全計画の課題となる。ところで，第4章3節で示したように，安全さの程度を比較できるとすれば，効用的な安全尺度が構成できる。この数値のことを以後，単に安全効用と呼ぶことにしよう。このとき，現実の安全計画の中で問題となるのは安全係数などで示される物理的数値と先の人間側からの評価とでもいうべき安全効用とをいかに結びつけるかということである。言葉をかえて言うならば，安全係数などという工学的数値を全体の安全計画の中で，どのように設定することが限られた制約条件のもとで最も安全上効果的かということでもある。このため安全係数などの物理的諸量を安全の投入量，または安全のインデックスと呼んでおく（以後，安全のインデックスが増加すれば，より安全となるように各インデックスの符号を決めるものとする）。このとき，先の問題は安全のインデックスと安全効用との関係を明確にすること

である。通常，安全係数を決めれば，安全の程度も決まってくるので，より数理的に述べるならば，我々の問題は安全のインデックスの関数としての安全効用関数の性質を規定することにほかならない。

一方，建築空間は様々な構造形式と様々な用途にわかれ，こうした空間を総合的な見地から評価するということはひとつの都市行政上の課題でもある。ここでは，n種類の建築空間があり（たとえば木造住宅，RC住宅，鉄骨住宅，RC事務所，高層事務所建築等），それらの安全のインデックスc_iを最適に決定する問題を想定しておこう。

安全のインデックスc_iを増加させるとき，それぞれのタイプ毎に異なる費用増加が考えられるので，iタイプの建築空間の安全のインデックスがc_iのときの費用は単位当り費用p_iを用いて次のようになる。

$$p_i \cdot c_i$$

一方，安全のインデックス，たとえば安全係数などは破壊の確率あるいは想定荷重に対する耐力の比などとして表わされるひとつの工学的な量であるから，社会学的な見地からその安全の価値というものを測るとすれば，次のような安全の効用関数によって表現される。

$u(c_i)$

さらに，各建築空間はそれ自身用途の差などから相対的に価値の重みが異なっているので，iタイプの建築空間の安全のインデックスをc_iとしたとき，この相対的な価値は

$\pi_i \cdot u(c_i)$

とウェイト付けられる。π_iは，たとえば同一レベルの地震があったときに生じる被害の建物種類による差などから決まってくるものであり，劇場などの場合，この値は大きいものとなることが考えられる。以後，このπ_iを建物種類iの影響係数と呼ぶ。

以上の定式化のもとで，総合的な見地からより安全な建築空間を建設するための安全インデックスc_iの決定問題は次のような数学的な形になる。

【問題1】

$$U = \sum_i \pi_i \cdot u(c_i) \qquad (5-1)$$

を

$$\sum p_i c_i \leqq W \qquad (5-2)$$

の条件下で最大化する

$$c^* = (c_1^*, c_2^*, \cdots, c_n^*)$$

を求めること。

ここで，Wは費用の制約を表わしている。

安全の効用関数uは安全インデックスcに関する関数であるが，もしこに関する線形関数であり，π_iが定数であるとすれば，上述の問題は線形計画法の問題となる。しかし，一般に関数uの形は不明であり，線形となると仮定することはできない。以下ではこの関数の形について検討するものである。

上述の問題はラングランジェ乗数λを用いて次の問題に変形される。

$$\left.\frac{\partial L}{\partial c_i}\right|_{c_i=c_i^*} = 0 \quad \text{for all } i \tag{5-3}$$

ここで，

$$L = \sum \pi_i u(c_i) + \lambda(W - \sum p_i c_i) \tag{5-4}$$

(5-3)及び(5-4)式から，ただちに

$$\pi_i u'(c) - \lambda p_i = 0 \tag{5-5}$$

すなわち，

$$u'(c) = \lambda \cdot \frac{p_i}{\pi_i} \tag{5-6}$$

をうる。

一方，(5-4)式をWで偏微分した場合においても，その値は0とならなければならない。すなわち，

$$\frac{\partial}{\partial W}\left(\sum \pi_i u(c_i)\right) - \lambda = 0 \tag{5-7}$$

従って，λの値は

$$\lambda = \frac{\partial U}{\partial W} \tag{5-8}$$

となり，右辺は予算が増大したときの安全の総合価値の増分であるから，明らかに正の値となっている。従って，

$$\lambda > 0 \tag{5-9}$$

となる。

ところで，安全にするためのコストpがより安く，その影響の度合πがより大きい建築種別に対しては，他の建築種別よりもより安全に設計すると考えられるので，

$$p_i < p_j \text{ and } \pi_i > \pi_j \Leftrightarrow c_i > c_j \tag{5-10}$$

ということが主張できる（記号$\Leftrightarrow$は命題の同値関係を示している）。この式からただちに（π_iは0でないと考えてかまわないので）

$$\frac{p_i}{\pi_i} < \frac{p_j}{\pi_j} \Leftrightarrow c_i > c_j \tag{5-11}$$

をうる。さらに，条件(5-9)及び(5-6)式から

$$u'(c_i) < u'(c_j) \Leftrightarrow c_i > c_j \tag{5-12}$$

を導くことができる。このことは安全のインデックスcの限界効用uは減少するということ，すなわち

$$\frac{\partial^2 u}{\partial c^2} < 0 \tag{5-13}$$

であることを示しており，図4-1のような形で関数c

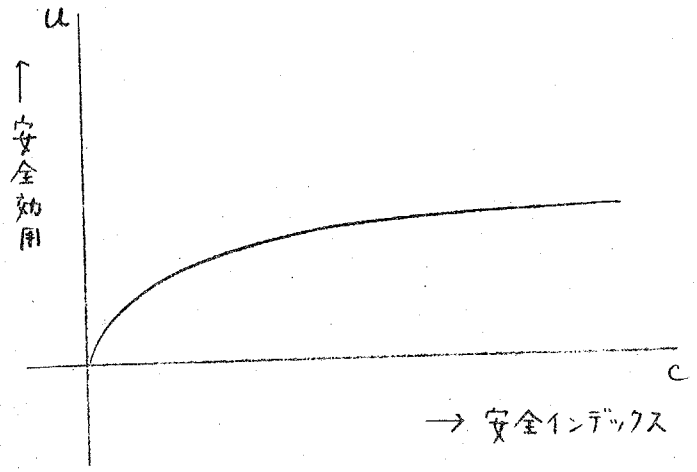


図 4-1　安全効用曲線

が表現されることを意味している。

以上のことをまとめると，次の命題をうる。

【命題1】「安全×効用×関数Uは上に凸な単調増加関数である」

注：上で論じたことは，関数Uの2階偏微分が負であることを示したにすぎず，1階偏微分の値が正であることは証明していない。しかし，それは安全のインデックスというものの符号のとりきめから，Cが増加すればUは増加することになると決められていることから明らかである。

4-1-2 安全の投入問題

先に述べたように，安全計画の中にはいくつもの対象があり，それぞれの安全さの程度を物理的にコントロールし，全体の安全さの程度をより人間にとって好ましいものにすることが我々の課題である。もちろん，そこには各種の制約が存在しており，そうした限られた条件下での現実的な最適化でなければならない。こうした問題については前項でも大まかに数学的定式化を行ったが，より厳密性をもたせるため，以下の命題群によって安全の投入問題を設定しておこう（先の定式化との大きな違

いは安全計画のより現実的な側面として，命題 $P-2$，$P-3$ が加わり，さらに前項で証明された事実，$P-5$ が加わっていることである）。

$P-1$：安全の計画の対象となっている部門が n 個ある。

$P-2$：すでに対象 i に t_i の投入がなされている（$i=1\sim n$）。

$P-3$：新たな投入 y_i は次の条件をみたさねばならない。

$$\sum_{i=1}^{n} y_i \leqq y$$

$P-4$：全体の安全評価は次の式で与えられるものとする。

$$g(x_1, x_2, \cdots, x_n) = \sum_{i=1}^{n} g_i(x_i)$$

ここで，$x_i = t_i + y_i$

$g_i(x_i)$；対象 i へ x_i の投入がなされたときの安全評価

$P-5$：各評価関数 g_i は2階微分可能であり，単調増加及び上に凸な性質を有している。

$P-6$：上に定義された $g(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ を最大とするような y_i（$i=1\sim n$）を求めなければならない。

(P-7): 投入のすべての段階で，より安全であることが保障されなければならない。厳密には，その分割投入によっても安全でなければならない。

以上の(P-1)～(P-7)がここで論じる安全の投入最適化問題である。この問題のもっている現実的な意味を，述べておかねばならない。(P-1)は安全の計画の範囲が有限個の要素にのみ限定されていることを主張している。現実的には我々をとりまく安全環境は無限の要素から成り立っていると考えざるをえない。しかし，そこへ計画的意図でより安全な場をつくるために投入がなされる，すなわちお金がかけられてより安全な空間を確保したりする範囲というものはすべての対象について行われるのではなく，そのうちの有限個の対象についてのみなのである。(P-2)において $t=0$ の場合，全く投入がなされていなかったということを示すことになり，より一般的問題を含んでいる。(P-3)は投入に制約があることを示している。特殊なケースとして投入が金額で表わされる場合は，a は予算制約額を示すことになる。(P-4)はこの中で一番問題が残されている定式化である。ここでは，全体の安全というものが部分の安全の和

になっているということを仮定している。すなわち，対象iと対象jの相互の影響による安全への効果あるいはデメリットが存在しないということを示している。従って，(p-1)と(p-4)の前提は対象を安全の目からみた独立な有限個に分解しとらえられるということを仮定しているのである。しかしながら，以下の議論にみるように，相互の影響を含む安全の効用関数 $g_{ij}(x_i, x_j)$ をこれに加えることによって分析が複雑になるが，ほぼ似たような結果を得られることが予想されるので，現実的な応用の面からみた簡便性から(p-4)の定式化をここでは採用することになる。ここで，加えて示しておきたいのは各対象にウェイト付けた各対象の安全効果の和を考えた場合，すなわち

$$g(x_1, x_2, \cdots, x_n) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i g_i(x_i)$$

なる安全の総効果が考えられるが，ウェイト α_i が定数である場合については（すなわち，α_i が x_j, $j \neq i$ の関数でない場合について），$\alpha_i g_i(x_i)$ を再び対象iの安全の評価関数 $g_i(x_i)$ ととらえなおせば(p-4)の定式化と同じことになるので，(p-4)の定式化はウェイト付けの考え方を含意している。ともあれ，(p-4)の定式化

には今後の問題が残されているのである。(P-5)はすでに述べた通り，前項で証明された命題において保障されている数学的な性質である。(P-6)が我々の計画に課せられた問題である。もちろん，gが危険の確率等のものであれば，最小化することが問題となるが，そのような場合は符号を取り変えることによって(P-6)のように定式化されるのである。(P-7)の意味はやや不明瞭であり，後の分析の中でより詳しく述べられることになるが，要請されていることは，投入総量yという制約の場合での最適化が、yが$\frac{y}{2}$の場合でも同じ原理によって最適化されなければならないという要請である。より具体的に述べるならば，100ドルの安全のための投入を行う場合の最適化は最初に50ドルつぎこんだときも最適であり，次の50ドルを投入したときも最適であるということであり，100ドル投入する全中経過において最適でないというような状況が生じないという要請である。この要請は最適化問題における非常に強い要請である。しかし，安全の問題を考えるならば，いくら小さなお金も最適に使われなければならないし，予算のどんな枠の中でも最適化されていなければならないのである。将来に100ドル×投入がなされ，その時点で最適になれば，現在の1

ドルはむだになってもよいというような経済投資的な考え方は受け入れられないというのが安全へなされる投入の最適性の基準なのである。

4－1－3　安全投入の最適アルゴリズム

定式化（P－7）から，ただちに次のような最適問題が解かれなければならない。すなわち，ある微小投入εを効果的に各部分へ配分することを考えなければならない。

従って，次の問題が第1に解かれなければならない問題となる。

> $\Delta g = g(x_1+\varepsilon_1, x_2+\varepsilon_2, \cdots, x_n+\varepsilon_n) - g(x_1, x_2, \cdots, x_n)$
>
> を最大化し，任意に定めた微小投入εに対し，
>
> $\sum \varepsilon_i \leq \varepsilon, \quad \varepsilon_i \geq 0$
>
> を満足する ε_i $(i = 1 \sim n)$ を求める。

ここで，εは微小投入であるから，定式化（P－4）及び（P－5）を用いて次のようにΔgを一次近似できる。

$$\Delta g = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i g_i'(x_i)$$

さらに，（P－5）から

$$g_i'(x) > 0$$

故にΔgを最大とするためには

$g_i'(x_i)$

の最も大きいものがひとつ存在するならば，そこへ集中投入すればよいことになる。以上のことから，次の補題を得る。

【補題1-1】:

各対象 i に x_i の投入がすでになされているとき，とくに対象 j のみが

$$g_j'(x_j) > g_i'(x_i)$$

for all i such that $i \neq j$ $i = 1 \sim n$

ならば，対象 j に上の条件を満足する範囲において集中投入していることが全体的な安全評価を最大化することになる。

上の補題は条件を満足する j が唯一のときのみ利用できるものであり，複数のものについてはこのかぎりではなくなる。すなわち，

$$g_i'(x_i) = g_j'(x_j) = \cdots = g_k'(x_k) > g_\ell'(x_\ell) > \cdots > g_m'(x_m)$$

となるような場合，上の補題は何ら最適な方法を述べていないのである。そこで，対象 i の番号の与え方は任意であるので，便宜上 $g_i'(x_i)$ の大きい順に対象の番号を与えることにすれば

$$g_1'(x_1) \geq g_2'(x_2) \geq \cdots\cdots \geq g_n'(x_n)$$

と順序付けられる。ここで

$$g_1'(x_1) \neq g_2'(x_2)$$

であるならば，すなわち

$$g_i'(x_i) > g_2'(x_2)$$

ならば，上の補題によって対象1に集中投入すればよいことになるので問題はない。従って，より一般的な

$$g_1'(x_1) = g_2'(x_2) = \cdots = g_k'(x_k) > g_{k+1}'(x_{k+1}) > \cdots > g_n'(x_n)$$

なる場合を以下に検討する。このとき，補題1-1を得たときと同じ理由によって，$k+1$からnの対象については投入する必要はないことが容易にわかる。従って，1からkの部門にεを最適に配分することが必要となってくる。このとき，補題1-1で得たように，一次近似によるΔgの把握では1からkの対象を区別することはできないので，テーラー展開項の二次の項まで取る必要が生じてくる。すなわち，

$$\Delta g = \sum_{i=1}^{n} \left[\varepsilon_i g_i'(x_i) + \frac{\varepsilon_i^2}{2} g_i''(x_i) \right]$$

となり，$k+1$以降の対象については明らかに投入しないのであるから

$$\Delta g = \sum_{i=1}^{k} \left[\varepsilon_i g_i'(x_i) + \frac{\varepsilon_i^2}{2} g_i''(x_i) \right]$$

となり，さらに対象1から対象kについて、$g_i'(x_i)$は等しいということから

$$\Delta g = g_1'(x_1) \sum_{i=1}^{k} \varepsilon_i + \sum_{i=1}^{k} \frac{\varepsilon_i^2}{2} g_i''(x_i)$$

となり，最適化されたときむだな配分がないので

$$\sum_{i=1}^{k} \varepsilon_i = \varepsilon$$

であることを考えれば

$$\Delta g = \varepsilon g_i'(x_i) + \sum_{i=1}^{k} \frac{\varepsilon_i^2}{2} g_i''(x_i)$$

となり，上式の右辺の第2項のみが配分の仕方によって変動する量となるので，結局，次の問題に帰着される。

$\sum \varepsilon_i = \varepsilon$ のもとで

$$Z = \sum_{i=1}^{k} \frac{\varepsilon_i^2}{2} g_i''(x_i)$$

を最大化するような ε_i ($i = 1 \sim k$) を求める。

ところで，(p-5)より $g_i''(x_i)$ は負であることから，次のような正の量を定義する。

$$a_i = -\frac{1}{2} g_i''(x_i)$$

このことによって，問題は

$\sum \varepsilon_i = \varepsilon$ のもとで

$$\varphi = \sum_{i=1}^{k} a_i \varepsilon_i^2$$

を最小とする ε_i を求める

というように単純化される。

上の問題の最適解 ε_i^*, $i = 1 \sim k$ を求める。ここで，明らかに

$$\varepsilon_i^* \geq 0$$

でなければならないので，最適解 ε_i^* が得られたときに 1 から k の対象をさらに次のように分類することができる。

$$I_0 = \{i \mid \varepsilon_i^* = 0\}$$

$$I_+ = \{i \mid \varepsilon_i^* > 0\}$$

すなわち，I_0 に含まれる対象は最適解によって投入されないことが決まった対象であり，I_+ に含まれる対象は必ず投入するということが最適化の結果として決まってくる対象である。そこで，以下に最適解からの摂動によって最適性の条件がずれてしまうという事実から逆に最適解の性質を調べるという方法を用いて最適条件をうる。摂動の仕方は対象 i と j について片方の最適投入 ε_i^* に

$+\delta$ の増分を与え，もう一方の最適投入 ε_j^* に $-\delta$ の増分を与えるという方法である。そこで，I_0 に含まれる対象については $-\delta$ の増分は考えられないので，とくに場合分けしなければならない。

【ケース1】:

$i \in I_+$, $j \in I_+$ について，次のような投入 ε_i の組を構成する。

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^* + \delta$$

$$\varepsilon_j = \varepsilon_j^* - \delta$$

i, j 以外の ℓ については

$$\varepsilon_\ell = \varepsilon_\ell^*$$

ただし，δ は任意の微小量

そこで，この δ の変化による φ の増分を調べる。

$$\Delta\varphi = \varphi(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \cdots, \varepsilon_k) - \varphi(\varepsilon_1^*, \varepsilon_i^*, \cdots, \varepsilon_k^*)$$

$$= a_i(\varepsilon_i^* + \delta)^2 - a_i(\varepsilon_i^*)^2$$

$$+ a_j(\varepsilon_j^* - \delta)^2 - a_j(\varepsilon_j^*)^2$$

$$= 2\delta(a_i\varepsilon_i^* - a_j\varepsilon_j^*) + \delta^2(a_i + a_j)$$

ここで，$(\varepsilon_1^*, \varepsilon_2^*, \cdots, \varepsilon_k^*)$ が最適であったということから，すなわち，φ が最小であったということから

$$\Delta\varphi \geq 0$$

となり，さらに δ を充分小さいものとみなすと

$$\Sigma \delta (a_i \varepsilon_i^* - a_j \varepsilon_j^*) \geqq 0$$

となる。

上の議論は，δ が正の場合でも負の場合でも成立しうるので，結局，上の不等式において等号のみが成立しなければならない。すなわち，

$$a_i \varepsilon_i^* - a_j \varepsilon_j^* = 0$$

であり，さらに i，j は I_+ に属する任意の対象であるから，結局，任意の $i \in I_+$ について

$$a_i \varepsilon_i^* = \lambda \text{（定数）}$$

でなければならない。

【ケース2】:

$i \in I_0$，$j \in I_+$ について，以下のような ε_i の組を構成する。このとき，$\varepsilon_i^* = 0$ であるので

$$\varepsilon_i = \delta \ (= \varepsilon_i^* + \delta)$$

$$\varepsilon_j = \varepsilon_j^* - \delta$$

i，j 以外の ℓ については

$$\varepsilon_\ell = \varepsilon_\ell^*$$

ただし，δ は任意の微小量

ケース1と同様にして

$$\Delta\varphi = \varphi(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \cdots, \varepsilon_n) - \varphi(\varepsilon_1^*, \varepsilon_2^*, \cdots, \varepsilon_n^*)$$
$$= a_i\delta^2 + a_j(\varepsilon_j^* - \delta)^2 - a_j(\varepsilon_j)^2$$

であり，充分小さな δ に対して

$$\Delta\varphi = -2a_j\varepsilon_j^*\delta$$

となる。ここで，a_j，δ はその定義により正であり，ε_j^* は $j \in I_+$ に入っていることから正数である。従って，

$$\Delta\varphi < 0$$

が導かれる。一方，ε_i^* $(i = 1 \sim n)$ の最適性により $\Delta\varphi$ は非負でなければならない。すなわち，矛盾が導かれる。故に最適解の中に

$$\varepsilon_i^* = 0$$

となるようなしはありえないことがわかる。

以上のケース1，ケース2の結果から ε_i^* が最適であるならば

i) $\varepsilon_i^* > 0$

ii) $a_i\varepsilon_i^* = \lambda$（定数）

でなければならない。

以上の結果は最適解の必要条件であるが，条件

$$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^* = \varepsilon$$

を用いることによって λ をユニークに求めることができる。すなわち

$$\varepsilon_i^* = \frac{\lambda}{a_i}$$

従って

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{\lambda}{a_i} = \varepsilon$$

となり，故に

$$\lambda = \varepsilon \Big/ \sum_{i=1}^{k} \frac{1}{a_i}$$

となる。さらに，この式を用いて，最適解は

$$\varepsilon_i^* = \frac{\lambda}{a_i} = \frac{\varepsilon}{a_i \sum_{i=1}^{k} \frac{1}{a_i}}$$

$$= \frac{\varepsilon}{g_i''(x_i) \sum_{i=1}^{k} \frac{1}{g_i''(x_i)}}$$

となる。

以上の結果をまとめると，安全の最適投入の手順は次のようになる。

手順1：現在の対象しへ投入されている投入量を x_i とするとき，その限界効用

$$g_i'(x_i)$$

を計測し，その最大のものが1つであれ

ば，その対象へ集中投入を行う。

手順2：もし限界効用が，最大な対象が複数であるとき，すなわち

$$g_1'(x_1) = g_2'(x_2) = \cdots = g_k'(x_k) > g_{k+1}(x_{k+1}) > \cdots > g_n(x_n)$$

のとき，

$$g_i''(x_i) \quad i = 1 \sim k$$

を計測し，各部門に次のような投入を行う。

$$\varepsilon_i^* = \frac{\varepsilon}{g_i''(x_i)\sum_{i=1}^{k}\frac{1}{g_i''(x_i)}} \quad for \quad i = 1 \sim k$$

$$\varepsilon_j^* = 0 \quad for \quad j = k+1 \sim n$$

4－1－4 最適アルゴリズムの実行と安全状態の変化

上に述べた最適化の手順を実行していくとき，投入量とその効用の変化はどのようになるであろうか。以下にこの点を検討する。

まず，手順1によってどのような変化が行われるか調べる。明らかに

$$g_1'(x_1) > g_2'(x_2) > \cdots\cdots$$

とするとき，第1部門への投入のみがなされるので，微小総投入量 ε のもとで，第1部門に関してのみ

$$g_1'(x_1 + \varepsilon)$$

と変化する。g_1'の単調減少性（これは経済学でいう限界効用逓減性と同義な性質である）より

$$g_1'(x_1) > g_1'(x_1+\varepsilon)$$

となる。ここで，変化の結果，次のような2つの状況が生じる。

i) $g_1'(x_1+\varepsilon) > g_2'(x_2)$

ii) $g_1'(x_1+\varepsilon) \leq g_2'(x_2)$

i)の場合が生じているならば，次の新たな投入も（もしそれが可能なら）第1部門のみになされることになる。ii)の場合，等号が成立していなければ，第2部門のみに投入がなされることになる。等号が成立していれば，手順2が行われる。手順2の結果は，以下に示すように，限界効用が等しくなるように（g_i'が等しくなるように）変化するので，結局，i)，ii)の2つの場合についてg_i'は投入が与えられるごとに等しくなっていくことになる。

手順2が実行された場合について，以下に検討する。以下の近似が任意の微小最適配分ε_i^*について成立している。

$$g_i'(x_i+\varepsilon_i^*) = g_i'(x_i) + \varepsilon_i^* g_i''(x_i)$$

ここで，ε_i^*に先に述べた結果を代入することによって

$$g_i'(x_i+\varepsilon_i^*) = g_i'(x_i) + \frac{\varepsilon}{\sum \frac{1}{g_i''(x_i)}}$$

となる。一方，投入 ε_i^* に関して，$g_i''(x_i)$ は定数であり，微小配分総額 ε も定数であるので，

$$\frac{\varepsilon}{\sum \frac{1}{g_i''(x_i)}} = \alpha \quad (\text{const.})$$

すなわち，

$$g_i'(x_i+\varepsilon_i^*) = C \quad (\text{const.})$$

とおくことができる。また，g_i' の単調減少性より

$$g_i'(x_i+\varepsilon_i^*) < g_i'(x_i)$$

となり，従って，上の2つの式から g_i' は各部門等しく，かつ減少していくことが示された。

以上，手順1，2によって安全の限界効用 $g_i'(x_i)$ は，投入がなされるにしたがって各部門とも等しくなるように変化していく。その際，限界効用自身は減少していく。これが最適投入がなされた際の各部門の安全効用の変化の挙動である。

加えて述べるならば，限界効用が等しくなっていくという経済原則が安全の問題の中にも成り立っているといえよう。

この最適アルゴリズムの応用は次8章に示される。

4－2　多次元評価

4－2－1　建築システム

「第3章 3－2 安全の計量的評価の基礎的問題」において示したように，同心対象に対する評価が人によって異なり，社会的に合意の成立する選択が可能でなくなる恐れがある。こうした状況は安全計画の場合，とくに安全性とその他の価値との比較判断において顕著であり，ときには安全さを重視するという名目で不合理な結果が導かれ，総合的には安全性のレベルの低下をきたすものさえある。たとえば構造安全性を強調するあまり，建築計画的な面での使い勝手の悪さなどが生じ，この使用機能の低下によって非常階段が物置きがわりに使用される等の安全上好ましくない結果を生じることなどがある。こうしたことから，狭い意味の安全性の向上は現実的な安全性の確保につながらないばかりか，逆の場合さえあるといえよう。

ここでは安全さの程度（前項でいう安全のインデックス）の他にいくつかの建築上重要な性能を設定して，これらの性能と安全性とがひとつの建築としてより整合的に成立するための方法を提案する。

ここでは建築全体を各種の性能で決まってくるひとつ

のシステムとしてとらえることから検討をはじめよう。

建築の評価を行おうとする場合，考慮すべき側面は多く，複雑である。そこで，この考慮すべき属性群（Properties，Physical Properties）を基本として，評価に至るプロセスを検討してみよう。

属性群の中には，いわゆる性能に寄与しないものもある場合があり，また，性能といわれているものも部分性能，総合性能と区別される場合もある。そこで，部分性能（Performance）というものから明確にしておこう。部分性能とは属性から決定されるものであり，次のようになる。

$$P_i(x) = f_i(C_j(x)) \quad j = 1, 2, \cdots, m \quad , i = 1, \cdots, n \qquad (2-1)$$

ここで，xは評価対象としての建築を示し，$C_j(x)$はxのもっている属性j（$j = 1, 2, \cdots, m$）の値であり，$P_i(x)$はxの部分性能iの値である。f_iは属性値から部分性能への関数であり，一価関数のときを考えれば図4・2のようになっているであろう。特殊な場合として属性そのものがひとつの部分性能と考えうる場合は

$$P_i(x) = C_j(x) \qquad (2-1')$$

となろう。

次に，総合性能について考えるとすれば，総合性能は

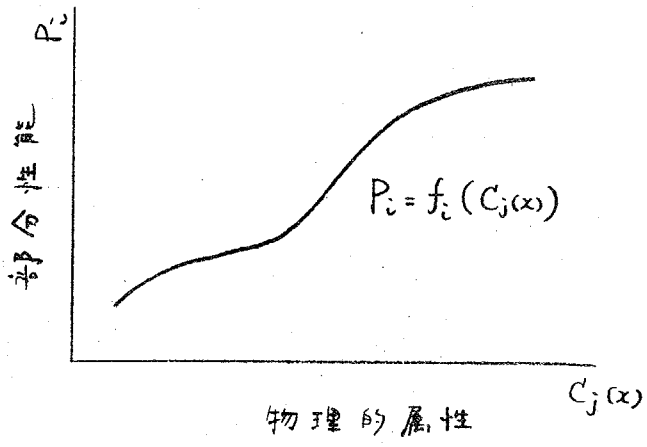


図 4－2　物理的属性と部分性能

基本的には部分性能のすべての値が決まっていれば決まるものであると考えられるので，次のように表現できよう。

$$T(x) = g(P_i(x)) \quad i=1\sim n \qquad (2-2)$$

$T(x)$は対象xのもつ総合性能

さらに，部分性能P_iのうちでもその性能値が上昇すれば好ましく，下降すれば好ましくないものと，逆にその性能値が上昇することは好ましくなく，下降することが好ましいという2つのタイプがある。前者の例としては壁材の遮音性能，後者の例としては断熱材の熱伝導などがあげられよう。そこで，前者のタイプの部分性能をメリット性能と呼び，後者をデメリット性能と呼ぶ。両者を区別するためメリット性能，デメリット性能を

$$P_i^+(x),\ P_j^-(x)$$

と右肩へ＋，－の記号を添えて表現する。ここで，総合性能を検討する立場からすると，対象の建築システムは次のベクトルと考えて差しつかえないといえよう。

$$(P_1^+(x), P_2^+(x), \cdots\cdots, P_n^+(x),\ P_{n+1}^-(x), P_{n+2}^-(x), \cdots, P_m^-(x))$$

以後，評価対象の建築システムxを上のベクトルと同一視して議論することにしよう。すなわち，上のベクトルを建築システムと呼ぶわけである。また，数学的取り扱

い上，上のベクトルの各要素は，1からℓまでがメリット性能，ℓ+1からmまでがデメリット性能であるとしておく。

4－2－2　支配概念とメリット・デメリット概念

メリット・デメリットの概念から当然の帰結として，2，3の命題が成立している。今，建築システムxとyがあり，メリット性能のすべてにおいてxの方がyよりも大きい値であり，デメリット性能のすべてについてxの方がyよりも小さい値であるというとき，誰もがxの方がyよりも良いというに違いないということである。以後の理論の展開はこの命題の明確な定式化とその拡張にほかならない。そのため第一歩として任意のベクトルについて，次の"支配"(domination)という概念を定義しておこう。

[定義4-1]：支配(domination)

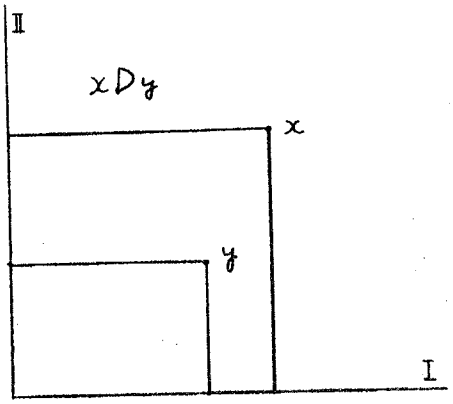
$$xDy \overset{\Delta}{\Longleftrightarrow} (\forall_i)[x_i \geq y_i] \qquad (2-3)$$

ただし，$x=(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，$y=(y_1, y_2, \cdots y_n)$

xDyは「xはyを支配する」と読む

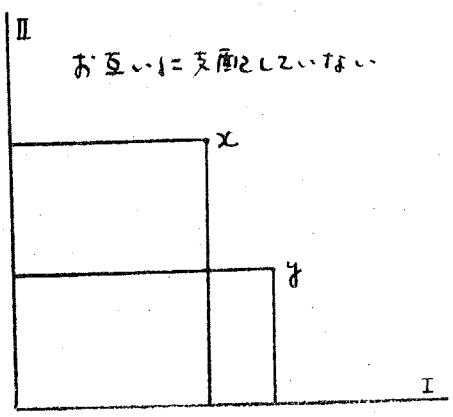
上の概念を具体的に理解するために，$x=(x_1, x_2)$，$y=(y_1, y_2)$のときの例が図4－3に示してある。

(a)



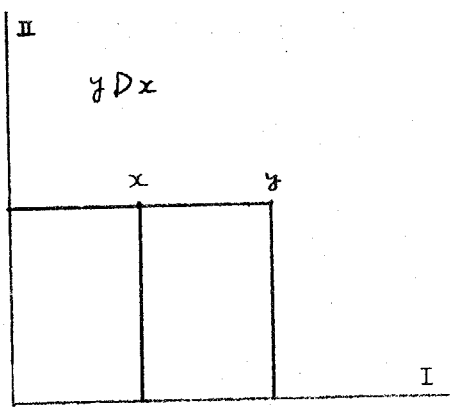
x = (4, 4)
y = (3, 2)

(b)



x = (3, 4)
y = (4, 2)

(c)



x = (2, 3)
y = (4, 3)

図 4-3 支配関係
(二次元の場合)

支配の概念は単にベクトルについての数学的概念にすぎないので，意味あるものとするためには，前節で定義された建築システムという性能値のベクトルを変換させておく必要がある。そこで，まずデメリット性能に負符号を与えることにより，あたかもメリット性能のようにみたてるという変換を考えよう。

[定義4-2]: Ⓗ変換

$$Ⓗ(x_i) \triangleq (P_1^+(x), P_2^+(x), \cdots, P_n^+(x), -P_{n+1}^-(x), -P_{n+2}^-(x), \cdots, -P_m^-(x)) \tag{2-4}$$

さらに，コスト・パーフォーマンスに近い考え方として各デメリット一単位当りのメリットを指標とみなすために，次のΛ変換を定義する。

[定義4-3]: Λ変換

$$\Lambda(x) \triangleq \left(\frac{P_1^+(x)}{P_{n+1}^-(x)}, \frac{P_2^+(x)}{P_{n+1}^-(x)}, \cdots, \frac{P_n^+(x)}{P_{n+1}^-(x)}, \right.$$
$$\frac{P_1^+(x)}{P_{n+2}^-(x)}, \frac{P_2^+(x)}{P_{n+2}^-(x)}, \cdots, \frac{P_n^+(x)}{P_{n+2}^-(x)},$$
$$\vdots \qquad \vdots \qquad \vdots$$
$$\left. \frac{P_1^+(x)}{P_m^-(x)}, \frac{P_2^+(x)}{P_m^-(x)}, \cdots, \frac{P_n^+(x)}{P_m^-(x)} \right) \tag{2-5}$$

さらに，Λ変換と逆の考え方でメリット当りのデメリットをみてから，さらにそれに負符号を加えたものとして

Ω変換を考えよう。

[定義4-4]: Ω変換

$$\Omega(x) \triangleq \left(-\frac{P_{n+1}^{-}(x)}{P_1^{+}(x)}, -\frac{P_{n+1}^{-}(x)}{P_2^{+}(x)}, \cdots -\frac{P_{n+1}^{-}(x)}{P_n^{+}(x)}, \right.$$

$$-\frac{P_{n+2}^{-}(x)}{P_1^{+}(x)}, -\frac{P_{n+2}^{-}(x)}{P_2^{+}(x)}, \cdots -\frac{P_{n+2}^{-}(x)}{P_n^{+}(x)}, \quad \ddots$$

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \vdots$$

$$\left. -\frac{P_m^{-}(x)}{P_1^{+}(x)}, -\frac{P_m^{-}(x)}{P_2^{+}(x)}, \cdots -\frac{P_m^{-}(x)}{P_2^{+}(x)} \right) \quad (2-6)$$

明らかに，ベクトルΩ(x)はベクトルΛ(x)の各要素を逆数にして負符号を加えたものである。上記の定義をもとにして前述の命題を明確化すれば

a) Ⓗ(x)ⒹⒽ(y) ならばyよりもxの方が好ましい，

b) Λ(x)DΛ(y) ならばyよりもxの方が好ましい，

c) Ω(x)DΩ(y) ならばyよりもxの方が好ましい。

4-2-3 支配概念の拡張

定義4-1から，建築システムを支配する順に順序付けることが可能となってきたが，ベクトルの値によっては図4-3-bのように，支配関係が成立しないものも生じてくるケースがある。このとき，総合判断をする側としてはこつのシステムのどちらが良いといえないとしてしま

う方法と，何か条件を仮定した上で両者を区別する方法とが考えられる。そこで，もし後者の場合，どのような条件を考えればよいのかが問題となる。そのため具体的にベクトルに数値を与えて検討してゆくこととしよう。

まず，3つのベクトル x, y, z を x=(3, 4), y=(5, 1), z=(4, 2) とする（図4-4）。このとき，x と y とを結んだ線分を考えてみよう。この線分上の点は

$$u = \alpha x + (1-\alpha) y \qquad 0 \le \alpha \le 1 \qquad (2-7)$$

と書くことができる。このとき，z は線分の内側にくる場合と外側にゆく場合が考えられる（図では内側）。もし内側にくるとすると，線分上のある点 u は

u D z

となっている（図の線分の中の太線部分の点 u はこのようになっている）。この z が線分 x y の内側にくることの意味を検討するために，線形計画法の場合と同じように次のような目的関数があったと想定してみよう。

$$g(x_1, x_2) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \,,\ a_1 > 0,\ a_2 > 0 \qquad (2-8)$$

このとき，$g = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$ は $X_1 X_2$ で与えられる空間で，g をパラメーターとする互いに平行な直線群となっており（図4-5-a，図4-5-b），各々の片は

$$\frac{g(x_1, x_2)}{a_1} - \frac{a_0}{a_1}, \qquad \frac{g(x_1, x_2)}{a_2} - \frac{a_0}{a_2}$$

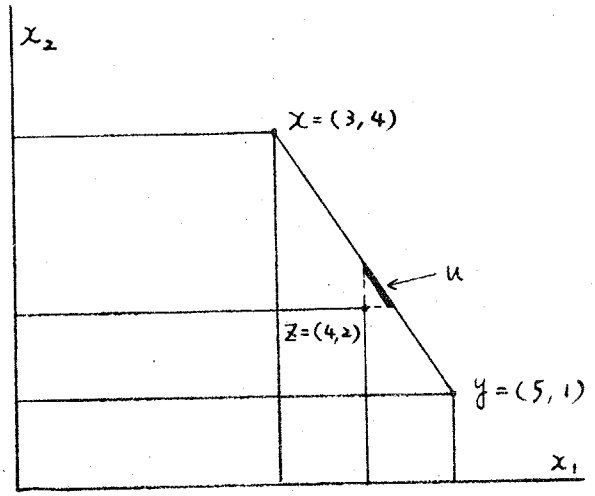
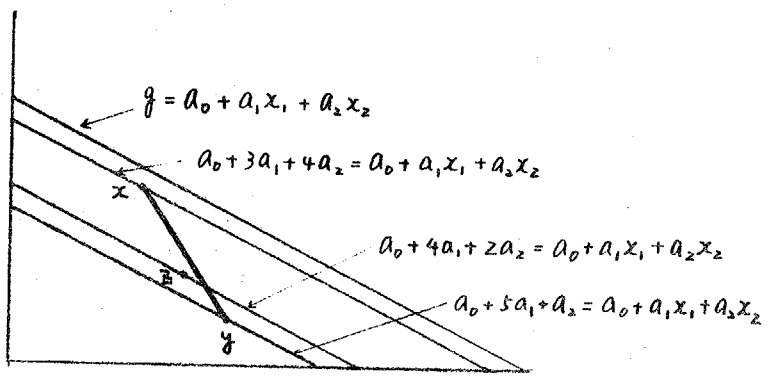
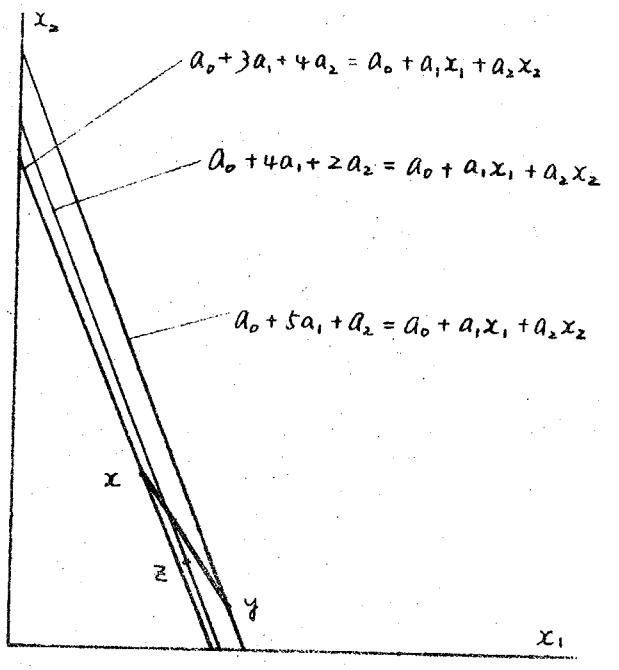


図 4-4 線分による支配



(a)



(b)

図 4-5　線型目的関数における位置関係

となり，$a_1>0$ $a_2>0$ のもとでは，g の大小関係はこの切片の大小関係と一致している。そこで，切片がより大きい直線を上側の直線と呼ぶとすると，上側の直線ほど g が大きい，すなわち目的関数の値が大きいということになる。さらに，この直線の傾きと線分 $x-y$ の傾きの大小から2つの場合（図4-5-a の場合，図4-5-b の場合，2つの傾きが等しいときはどちらかの場合の特殊な場合であると考えておく）があるが，どちらのケースも図からわかるように

"z を通る直線は x を通る直線か，y を通る直線の下側にある"

が常に成立するので，

"z で与えられる場合の目的関数の値は x または y で与えられる目的関数の値よりも小さい"

ということがいえる。このことは，実は $a_1\geq 0$ $a_2\geq 0$ の条件を満たすすべての目的関数についていえることである。従って，

u に対し，$u=\alpha x+(1-\alpha)y$ (2-9)

ということは"どんな線型目的関数（$a_1\geq 0$，$a_2\geq 0$）をとっても，z は x よりか劣っているか，または y よりか劣っているのどちらかである"ということを示している。

従って、この関係(2-9)は弱い順序関係を定義するものであることがわかるであろう。従って、この概念を明確にするため2, 3の定義を与えておこう。

[定義4-5]: 線型結合

$$\bigoplus_{j\in L}^{(注)} x^j \triangleq x^p \oplus x^q \oplus \cdots \oplus x^r \oplus \cdots \oplus x^s \qquad (2-10)$$

ただし, $\{p, q, \cdots, r \cdots s\} = L$

$$\triangleq \alpha_1 x^p + \alpha_2 x^q + \cdots + \alpha_i x^r + \cdots + \alpha_n x^s$$

ただし, $\sum \alpha_i = 1$, $\alpha_i \geq 0$ for all i

$$\triangleq \alpha [x^p, x^q, \cdots, x^r, \cdots, x^s]$$

ただし, $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \cdots \alpha_i, \cdots \alpha_n)$

ここで, $x^p, x^q, \cdots, x^r, \cdots x^s$ はn個のベクトル

上記の定義のもとに, 弱い順序関係の概念"優"(線型支配)もn次元の一般的な場合に定義することができる。

[定義4-6]: 優(線型支配)

$$\bigoplus_{j\in L} x^j \bar{D} y \overset{\triangle}{\Leftrightarrow} (\exists \alpha)[\alpha \cdot x^p, x^q, \cdots, x^s] = u,\ u D y] \qquad (2-11)$$

注: $\bigoplus_{j\in L} x^j$ はベクトルの線型結合の略表現であり, 結合ベクトルαも問題となるときは $\bigoplus_{\alpha, j\in L} x^j$ と表現する。前述の $u = \alpha x + (1-\alpha) y$ は $u = \bigoplus_{j\in L} x^j$, $x^1 = x$, $x^2 = y$ または $u = x \oplus y$ と表現できる。

上述の表現は"ベクトル $x^p, x^q, \cdots, x^s$ の組はyよりも優れている（または線型目的関数のもとで支配している）"，さらに簡略的に"⊕x^j 優 y"と読む。

4－2－4　判断基準とその関係

評価，とくに総合的な評価をするために種々の概念を明確にし定義してきた。メリットを表わすための変換としては $\Theta(x)$, $\Lambda(x)$, $\Omega(x)$ を，また，好ましさの順序付けとしては支配 D，優 $\bar{D}$ の2つがあるので，総合評価の基礎となるクライテリアとしては $3 \times 2 = 6$ 個のタイプが考えられる。

クライテリア1)　$\Theta(x) D \Theta(y)$ ならば「yよりxを好む」とする。

クライテリア2)　$\Lambda(x) D \Lambda(y)$ ならば「yよりxを好む」とする。

クライテリア3)　$\Omega(x) D \Omega(y)$ ならば「yよりxを好む」とする。

クライテリア4)　⊕$\Theta(x^j) \bar{D} \Theta(y)$ ならば「yよりも⊕x^j を好む」とする。

クライテリア5)　⊕$\Lambda(x^j) \bar{D} \Lambda(y)$ ならば「yよりも

$\oplus x^j$ を好む」とする。

クライテリア6) $\oplus\Omega(x^j) \bar{D} \Omega(y)$ ならば「y よりも $\oplus x^j$ を好む」とする。

しかしながら，これらのクライテリアを組み合せたクライテリアも考えられる。たとえば

クライテリア7) クライテリア1) 及び2) の条件を満たせば「y よりも x を好ましい」とする

などが考えられよう。結局，こうした複合クライテリアを考えてゆくと，2^6 個のクライテリアが考えられる。しかしながら，これらのクライテリアの間には2，3の重要な論理的関係が存在しており，$2^6 = 64$ 個ものクライテリアを考える必要のないことが以下の定理によって示される。

第1の定理は，すべての x^i が y を支配しているときは x^i の線形結合は y よりも優れているというものである。

【定理T1】: $$(\forall_i \in L)[x^i D y] \longrightarrow \underset{j \in L}{\oplus} x^j \bar{D} y \qquad (2-12)$$

次に，メリットを表現する各変換 $\Theta(x)$, $\Lambda(x)$ 及び $\Omega(x)$ についての関係を調べることにしよう。

【定理T2】: $$\Theta(x) D \Theta(y) \longrightarrow \Lambda(x) D \Lambda(y) \qquad (2-13)$$

この定理は，デメリットには符号を反対にして評価す

るという Θ 変換した場合に，yよりxが好ましいと評価されるときはコスト・パーフォーマンス的視点からの評価，すなわち Λ 変換での評価ではyよりxが好ましいとされるということを示している。

【定理T3】： $\Lambda(x) D \Lambda(y) \longleftrightarrow \Omega(x) D \Omega(y)$ (2-14)

この定理は，支配という好ましさの順序関係は（メリット／デメリット）でみても，－（デメリット／メリット）でみても変化しないということを意味している。しかしながら，支配という概念を優という概念におきかえた場合には次の定理しか成立していない。

【定理T4】： $\Omega(x) \bar{D} \Omega(y) \longrightarrow \Lambda(x) \bar{D} \Lambda(y)$ (2-15)

ただし，$\Omega(x) = \bigoplus_{j \in L} \Omega(x^j)$, $\Lambda(x) = \bigoplus_{j \in L} \Lambda(x^j)$

以上の定理によって評価のクライテリアは次の8つのもので網羅できることがわかる（条件のみを示す）。

評価基準A： $\Theta(x) D \Theta(y)$ （クライテリア1）

評価基準B： $\Lambda(x) D \Lambda(y)$ 及び $\bigoplus_{j \in L} \Theta(x^j) \bar{D} \Theta(y)$

（クライテリア2及び4）

評価基準C： $\Lambda(x) D \Lambda(y)$ （クライテリア2）

評価基準D： $\bigoplus_{j \in L} \Omega(x^j) \bar{D} \Omega(y)$ 及び $\bigoplus_{j \in L} \Theta(x^j) \bar{D} \Theta(y)$

（クライテリア6及び4）

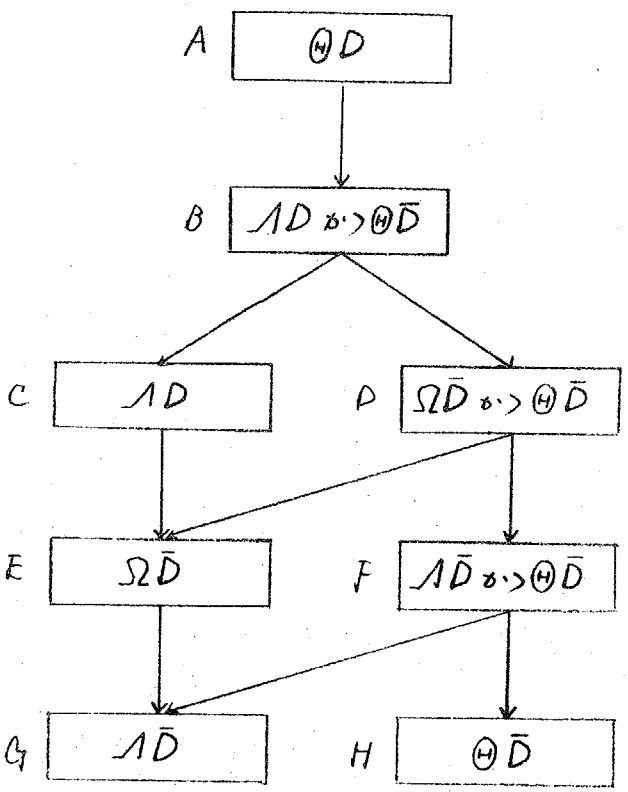


図 4-6　評価基準の論理的関係

評価基準E: $\bigoplus_{j\in L} \Omega(x^j)\,\bar{D}\,\Omega(y)$ (クライテリア6)

評価基準F: $\bigoplus_{j\in L} \Lambda(x^j)\,\bar{D}\,\Lambda(y)$ 及び $\bigoplus_{j\in L} \textcircled{H}(x^j)\,\bar{D}\,\textcircled{H}(y)$
(クライテリア5及び4)

評価基準G: $\bigoplus_{j\in L} \Lambda(x^j)\,\bar{D}\,\Lambda(y)$ (クライテリア5)

評価基準H: $\bigoplus_{j\in L} \textcircled{H}(x^j)\,\bar{D}\,\textcircled{H}(y)$ (クライテリア4)

さらに，これらの評価基準には前述のような論理的関係が存在するので，図4-6のように示すことができる。ただし，$\textcircled{H}D$, ΛD, ΩD, $\textcircled{H}\bar{D}$, $\Lambda\bar{D}$, $\Omega\bar{D}$ はそれぞれ $\textcircled{H}(x)D\textcircled{H}(y)$, $\Lambda(x)D\Lambda(y)$, $\Omega(x)D\Omega(y)$, $\bigoplus_{j\in L}\textcircled{H}(x^j)\bar{D}\textcircled{H}(y)$, $\bigoplus_{j\in L}\Lambda(x^j)D\Lambda(y)$, $\bigoplus_{j\in L}\Omega(x^j)\bar{D}\Omega(y)$ を示すものである。また，$\longrightarrow$ は論理的に含意することを意味する。

4-2-5 総合評価システム

上記の論理関係から与えられた建築システムの評価の方法としては，まず一番強い評価基準Aすなわち$\textcircled{H}$変換における支配関係から調べてゆき，良し悪しの評価ができないときには次に強い評価基準Bによって評価してゆくというように，強い評価基準から順に弱い評価基準をもちだしてゆくような方法が考えられる。すなわち論理的に一番強い評価基準Aというものは最もその前提となる仮定が少ない基準ともいえるわけであるから，評価基準

Aだけで評価できれば理想的であり，順に仮定が入りこんでくるということがいえる。

従って，前に示した定理のもとで考えるシスティマティックな総合評価方法としては，その論理関係を考慮した評価基準の適用順序の組み合せにより表5-1の14のシステムが可能である。すなわち，たとえば評価システム10では評価基準Aで評価し，良し悪しが判別されないものについては評価基準Bで評価し，さらに評価でどちらが好ましいか区別されなかったものには評価基準Dを適用し，さらに評価基準C，F，H，E，Gの順に適用してやればよい。

ここで，ひとつの問題となるのはすべての評価基準を適用しても評価できない，すなわちどちらが好ましいか区別できない建築システムがあったとした場合である。このとき，これまでの議論の進め方からも次のようにいうべきことがわかる。

"上記の評価システムで区別されないものはこの他の情報をたとえば目的関数を与えないで評価することはできないものであり，従って，それらの建築システムは工学的見地からはどちらがより好ましいか評価すべきではない"

表4-1 総合評価システム

評価システム	評価基準の適用順序
S 1	A B C D E F G H
S 2	A B C D E F H G
S 3	A B C D F F G H
S 4	A B C D F E H G
S 5	A B C D F H E G
S 6	A B D C E F G H
S 7	A B D C E F H G
S 8	A B D C F E G H
S 9	A B D C F E H G
S 10	A B D C F H E G
S 11	A B D F C E H G
S 12	A B D F C E G H
S 13	A B D F C H E G
S 14	A B D F H C E G

従って，ここにあげた総合評価システムが性能上区別できない建築システムについては目的関数を求めてこの目的関数の大小で評価するか，あるいは評価しないかどちらしかありえない。ときには評価しないということが有効な場合も存在しうる。

4－2－6　評価の計算アルゴリズム

これまで述べた評価システムを実際に使うためには，より簡単に判定するためのプログラム（計算技法）が必要となってくる。

単純な支配の概念

$x D y$

については図4-3-aから図4-3-cを見ればわかるように，x，yの各要素についての大小を比較すればよいので，計算というほどのものではない。問題は一般化した支配の概念（優の概念）

$$\bigoplus_{j \in L} x^j \bar{D} y$$

についての判定計算方法であり，とくにメリット，デメリットの数が多い場合には非常に複雑となる。

そこで，この判定計算方法（アルゴリズム）を求めるために2，3の初等幾何学的な概念を定義しておこう。

[定義4-7]: 超平面（n次元内のn点を結ぶ超平面）

$$M^{n-1}(a_1,a_2,\cdots,a_n)=\{x|x=\sum_{i=1}^{n}k_i a_i,\ \sum_{i=1}^{n}k_i=1,\ \forall k_i\in R\} \quad (2-16)$$

ここで，a_iはn次元空間内の点である。

[定義4-8]: n－単体（n次元内のn+1個の点によって構成される単体）

$$A^n(a_0,a_1,a_2,\cdots,a_n)=\{x|x=\sum_{i=0}^{n}k_i a_i,\ \sum_{i=0}^{n}k_i=1,\ \forall k_i\in R^+\cup\{0\}\} \quad (注1) \quad (2-17)$$

とくに $a_0=0$ である。

[定義4-9]: n－単体の内部

$$I^n(a_0,a_1,a_2,\cdots,a_n)=\{x|x=\sum_{i=0}^{n}k_i a_i,\ \sum_{i=0}^{n}k_i=1,\ \forall k_i\in R^+\} \quad (2-18)$$

とくに $a_0=0$ である。

以上の定義によって、次の命題が成立することがわかる。

【命題2】 与えられたn－単体 $A^n(a_0,a_1,a_2,\cdots,a_n)$ 及び y（$y\neq 0$）（注2）について

yがA^nに含まれる，ただし $y\neq 0$

注1: R^+は実数の正の部分を示す。従って，$x\in R^+\cup\{0\}$は $x\geq 0$ を示す。

注2: 後の評価判定のことを考えて，$i\neq 0$ ならば $a_i\neq 0$，異なる i，j について $a_i\neq a_j$ としておく。

ということと，$k, k_1, k_2, \cdots, k_{n-1}$ に関する線型方程式

$$k y = \sum_{i=1}^{n} k_i a_i \qquad (2-19)$$

ただし，$k_n = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} k_i$

の解が

$$k \geq 1 \quad k_i \geq 0 \quad i = 1 \sim n$$

を満たすということは同値である。

上の命題を有効にいかすために，$k, k_i (i = 1 \sim n)$ の計算法について検討しておこう。

【$y \in A^n$ 判定のための計算法】

与えられた y, a_i はベクトルであるから

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad a_i = \begin{bmatrix} a_{1i} \\ a_{2i} \\ \vdots \\ a_{ni} \end{bmatrix} \qquad (2-20)$$

と書くことができ，方程式 (2-19) は

$$k \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_{n-1} \\ 1 - \sum_{i=1}^{n-1} k_i \end{bmatrix} \qquad (2-19)'$$

と書ける。従って，右辺の a_{ij} によるマトリックス A，k_i によるベクトル K と書くと，方程式は

$$h_k y = AK \tag{2-19''}$$

と書ける。さらに，$A^{-1}y = z$ というベクトル z をとると

$$z = \frac{1}{h_k} K \tag{2-21}$$

となる。さらに

$$K' = \begin{bmatrix} h_1/h_k \\ h_2/h_k \\ \vdots \\ h_{n-1}/h_k \\ (1-\sum_{i=1}^{n-1} h_i)/h_k \end{bmatrix} \tag{2-22}$$

というベクトルを考えると

$$z = K' \tag{2-23}$$

となる。この式は左辺が y，A から与えられる既知の n 次元ベクトルであり，K' は n 個の未知数を含む n 次元ベクトルであることから，n 単体に含まれるか否かはベクトル $z\,(=A^{-1}y)$ によって一意的に決まることがわかる。

さらに，K' の要素をすべて加えると，$\frac{1}{h_k}$ となることから

$$h_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} z_i} \tag{2-24}$$

となり，従って，$h_k \geq 1$ という判定条件は

$$\sum_{i=1}^{n} z_i \leq 1 \qquad (2-25)$$

ということになる。また，上記の条件の成立のもとでは $k_i \geq 0$ $(i=1\sim n)$ という条件は

$$z_i \geq 0 \qquad (2-26)$$

ということになる。従って，$y \neq 0$ が A^n に含まれるということは条件 (2-25), (2-26) を満たすということと同値になることがわかる。

次に，$\oplus_{j\in L} x^j \bar{D} y$ の判定のためにその充分条件を導くことにする。そのため，再び2，3の定義を行っておく。

[定義4-10]：実 x の射影

$$S_i(x) \triangleq (x_1, x_2, \cdots, x_{i-1}, x_{i+1}, \cdots, x_n) \qquad (2-27)$$

ただし，$x = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$

[定義4-11]：集合 A の射影

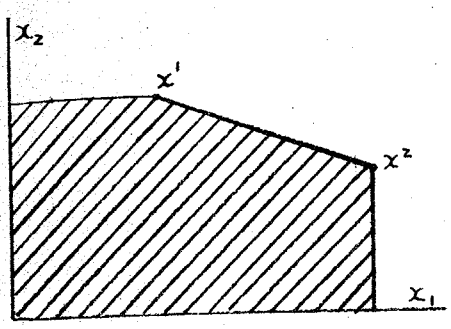
$$S_i(A) \triangleq \{s_i(x) \mid x \in A\} \qquad (2-28)$$

[定義4-12]：$\bar{C}(x^j \mid j \in L) \triangleq \{y \mid \oplus_{j\in L} x \bar{D} y\}$ (2-29)

[定義4-13]：$x^* \triangleq (z_1, z_2, \cdots, z_n)$ (2-30)

ただし，$z_i = \max_{j\in L} x_i^j$

上の定義4-12は図4-7に見るように $\oplus x^j$ によって



$\bar{C}(x^j | j \in \{1,2\})$

図4-7 定義5-12の関係

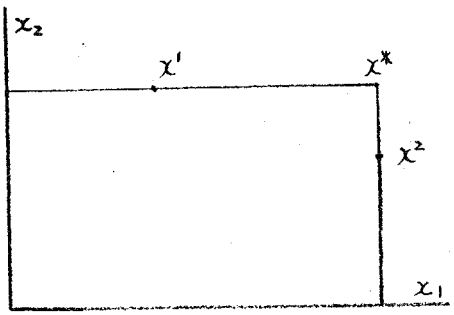


図4-8 定義5-13のx^*の位置

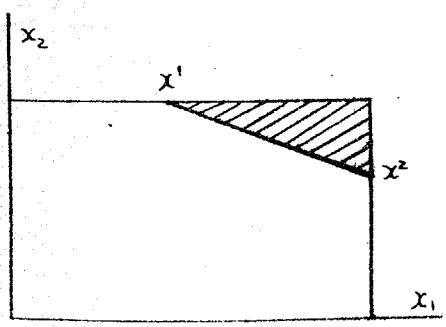


図4-9 x^*-コンベックス

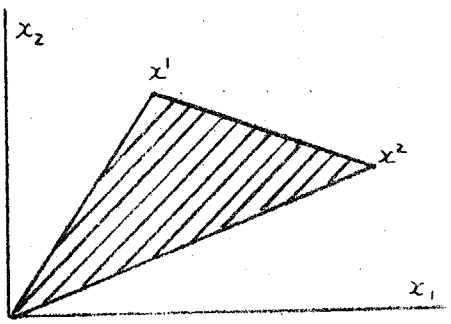


図4-10 $\bigoplus_{j \in L} x^j$ 単体

左義の意味で支配される y を集めた集合を意味しており，定義4-13は図4-8に示すような x^j のうちから最大のエレメントをとり構成できるベクトルにほかならない。

[定義4-14]: x^* - コンベックス (x^* - 凸体)

$$C(x^*, \bigoplus_{j\in L} x^j) \triangleq \{y \mid (\forall\alpha)(\forall\beta)[y = \beta \bigoplus_{\alpha, j\in L} x^j + (1-\beta)x^*, 0\le\beta\le 1]\} \tag{2-31}$$

[定義4-15]: $\bigoplus_{j\in L} x^j$ 単体

$$C(0, \bigoplus_{j\in L} x^j) \triangleq \{y \mid (\forall\alpha)(\forall\beta)[y = \beta \bigoplus_{\alpha, j\in L} x^j + (1+\beta)\cdot 0, 0\le\beta\le 1]\} \tag{2-32}$$

上の定義4-14及び定義4-15によって定まる集合がそれぞれ図4-9，図4-10に斜線で示されている。

[定義4-16]: $\bar{C}(x^j \mid j\in L)$ の射影 $S_i(\bar{C}(x^j \mid j\in L))$ の境界を B_i とすると

$$S_i(x) \in B_i \quad i = 1\sim n \tag{2-33}$$

を満たす点 x は唯ひとつ定まり x° とする。

上の定義4-16によって定まる点は図4-11に示されている。二次元空間の場合，x° は先に定義した x^* に一致する。

以上の定義のもとで，次の2つの補助定理が成立することが証明できる。

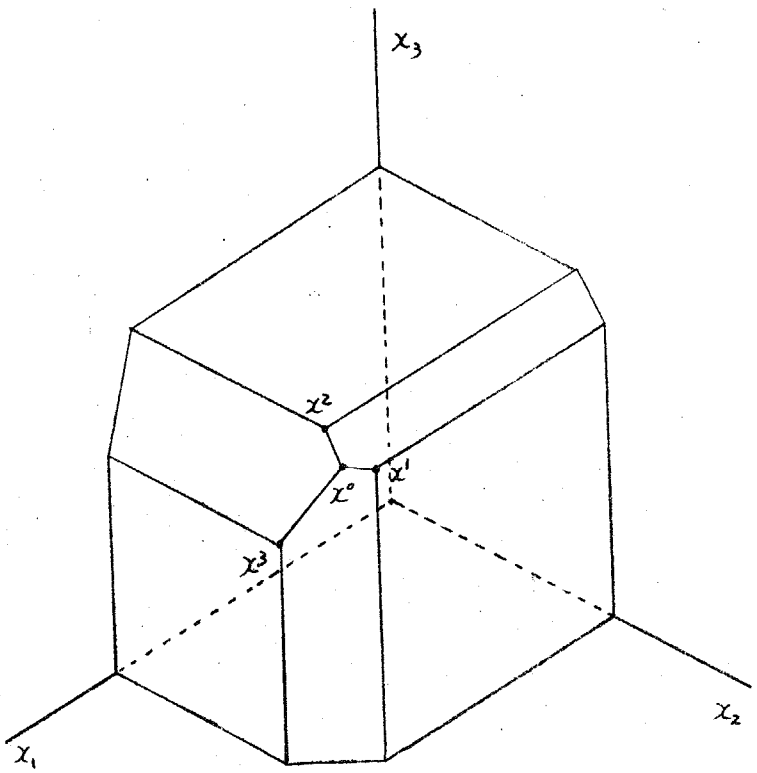


図4-11　定義4-16の関係

【補助定理 2-1】:

$$1)\ C(x^{\circ}, \bigoplus_{j\in L} x^j) \cup \bar{C}(x^j|j\in L) \supseteq \{y|(\forall i)[s_i(y)\in S_i(\bar{C}(x^j|j\in L))]\} \tag{2-34}$$

$$2)\ \{y|(\forall i)[s_i(y)\in S_i(\bar{C}(x^j|j\in L))]\} \cap (\bar{C}(x^j|j\in L))^{C} \subset C(x^{\circ}, \bigoplus_{j\in L} x^j) \tag{2-35}$$

【補助定理 2-2】:

$$C(x^{\circ}, \bigoplus_{j\in L} x^j) \subseteq C(x^{*}, \bigoplus_{j\in L} x^j) \tag{2-36}$$

この2つの補助定理を用いると、優概念、すなわち広義の支配関係

$$\bigoplus_{j\in L} x^j \bar{D} y$$

の充分条件を示す次の定理が証明できる。

【定理 T5】:

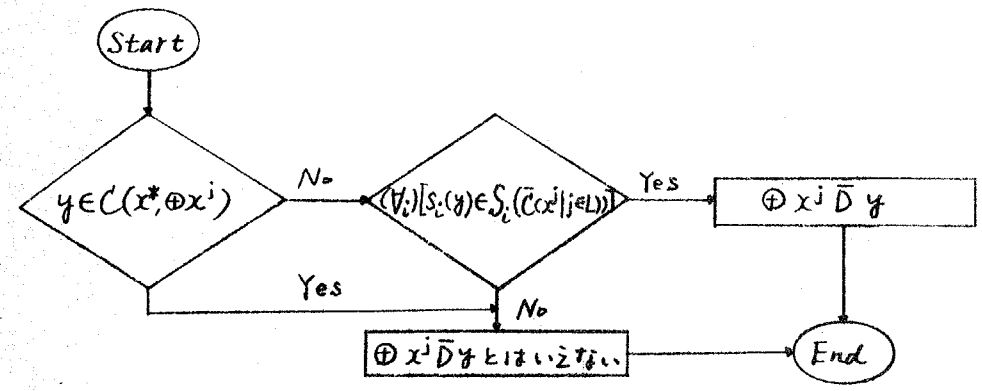
$$y\notin C(x^{*}, \bigoplus_{j\in L} x^j) \wedge (\forall i)[s_i(y)\in S_i(\bar{C}(x^j|j\in L))] \rightarrow y\in \bar{C}(x^j|j\in L) \tag{2-37}$$

この定理は $C(x^{*}, \bigoplus_{j\in L} x^j)$ に y が含まれず、また、y の射影が $\bar{C}(x^j|j\in L)$ の射影に含まれているならば、

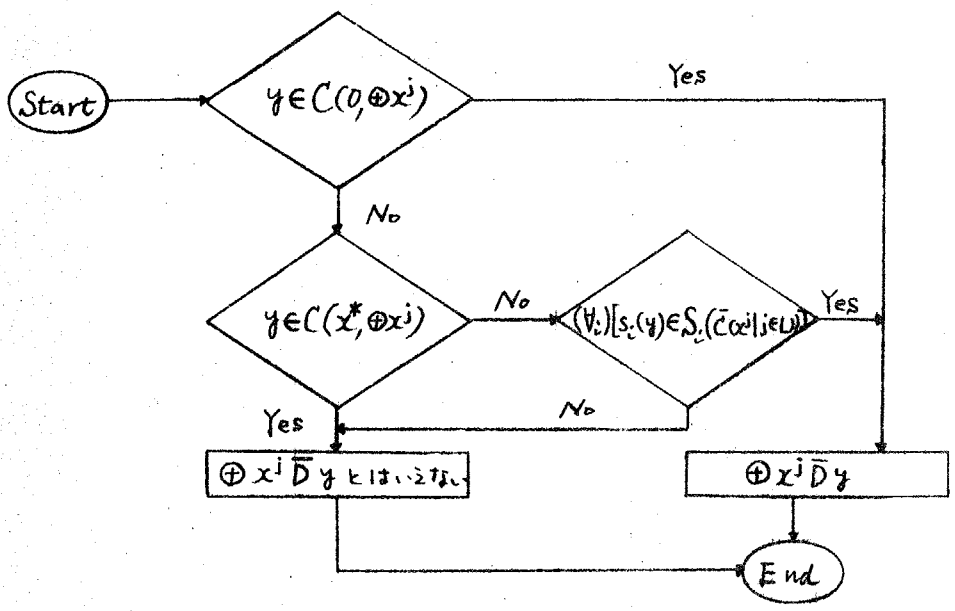
$$\bigoplus_{j\in L} x^j \bar{D} y$$

が成立しているということである。この充分条件は単体に y が含まれているか否かの判定に帰着するので、先に述べた計算方法が利用でき、計算機を使ってすみやかに

CALCULATION METHOD I:



CALCULATION METHOD II:



CALCULATION METHOD III:

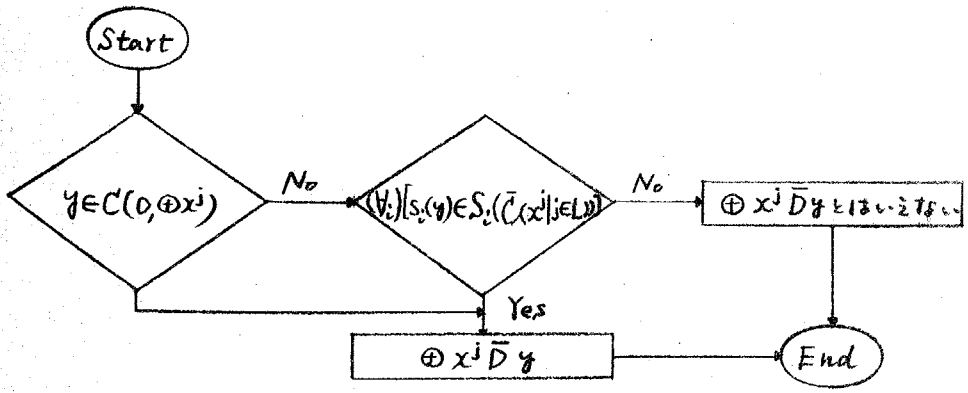


図 4-12 判定計算アルゴリズム

判定できる。この定理T5を利用した判定アルゴリズムが図4-12のCALUCULATION METHOD Ⅰである。さらに，効率を考えるとCALUCULATION METHOD Ⅱ，Ⅲとなる。

4-2-7 数値例

先に述べた計算法によって次のようなケースにおける総合評価を試みてみよう。提案された建築空間がx^1, x^2, ---, x^{10}と10通りあるとしよう。それぞれの部分性能として居住性，安全性及びコストがあり，前2者はメリットであり，コストはデメリットである。このとき，居住性，安全性の程度を$P_1^+(x^i)$, $P_2^+(x^i)$で示し，コストを$P_3^-(x^i)$で示すとすると，それぞれの建築空間x^i($i=1\sim10$)は表4-2で与えられているとしよう(ここに述べる評価方法は単位のとり方に依存していないので，どんな単位で部分性能をとらえてもかまわない。従って，性能値はすべて単位を記さない)。

総合評価システムS1に基づいてこの与えられた建築空間を評価していくことにする。まず，Ⓜ変換，Λ変換，Ω変換することにより表5-3をうる。また，それらの関係は図4-13～15に示されている。

1) 最初にクライテリアAによって調べてみると，

表 4-2　数値例

i	x^i	$P_1^+(x^i)$	$P_2^+(x^i)$	$P_3^-(x^i)$
1	x^1	5	35	5
2	x^2	9	24	4
3	x^3	10	10	4
4	x^4	20	15	5
5	x^5	18	6	3
6	x^6	15	12	6
7	x^7	22	6	4
8	x^8	41	21	10
9	x^9	20.8	7.9	3.8
10	x^{10}	21	10.45	5

表 4-3　数値例における各変換値

x^i	$-P_3^-(x^i)$	$30-P_3^-(x^i)$	$P_1^+(x^i)/P_3^-(x^i)$	$P_2^+(x^i)/P_3^-(x^i)$	$-P_3^-(x^i)/P_1^+(x^i)$	$-P_3^-(x^i)/P_2^+(x^i)$
x^1	−5	25	1	7	−1	−0.143
x^2	−4	26	2.25	6	−0.445	−0.167
x^3	−4	26	2.5	2.5	−0.4	−0.4
x^4	−5	25	4	3	−0.25	−0.333
x^5	−3	27	6	2	−0.167	−0.5
x^6	−6	24	2.5	2	−0.4	−0.5
x^7	−4	26	5.5	1.5	−0.182	−0.667
x^8	−10	20	4.1	2.1	−0.244	−0.476
x^9	−3.8	26.2	5.47	2.08	−0.18	−0.481
x^{10}	−5	25	4.2	2.09	−0.238	−0.478

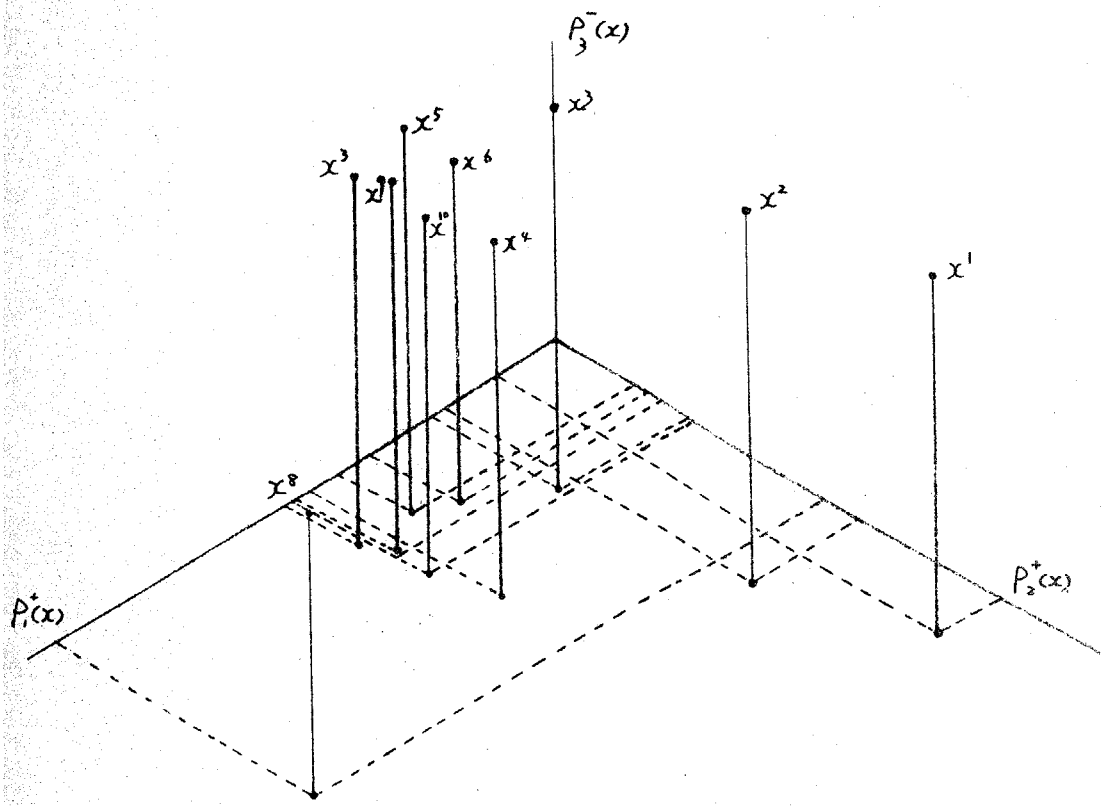


図 4-13　各数値例の各性能値

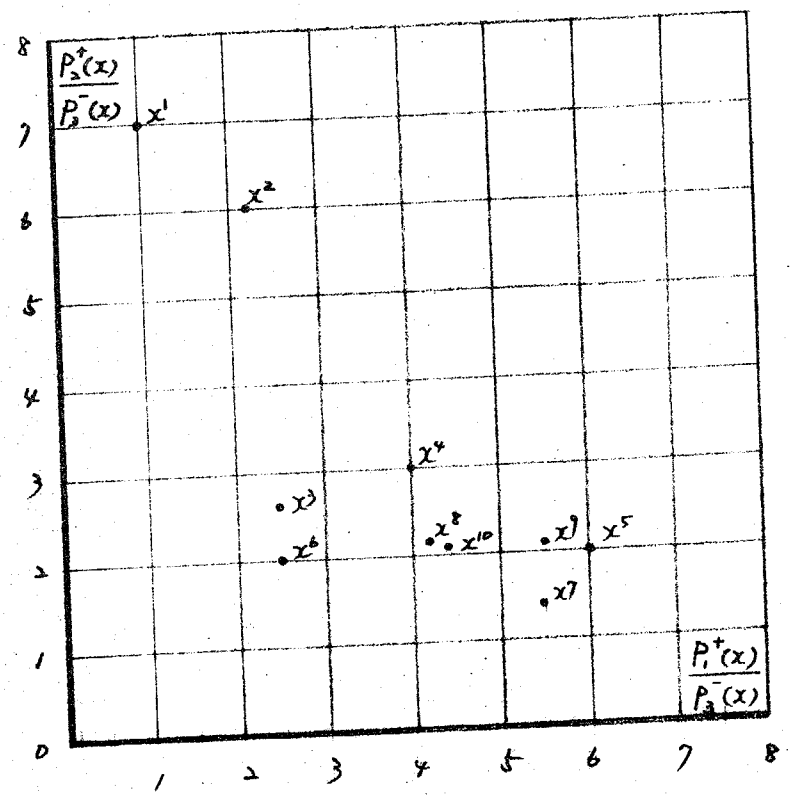


図 4-14 各数値例の1変換値

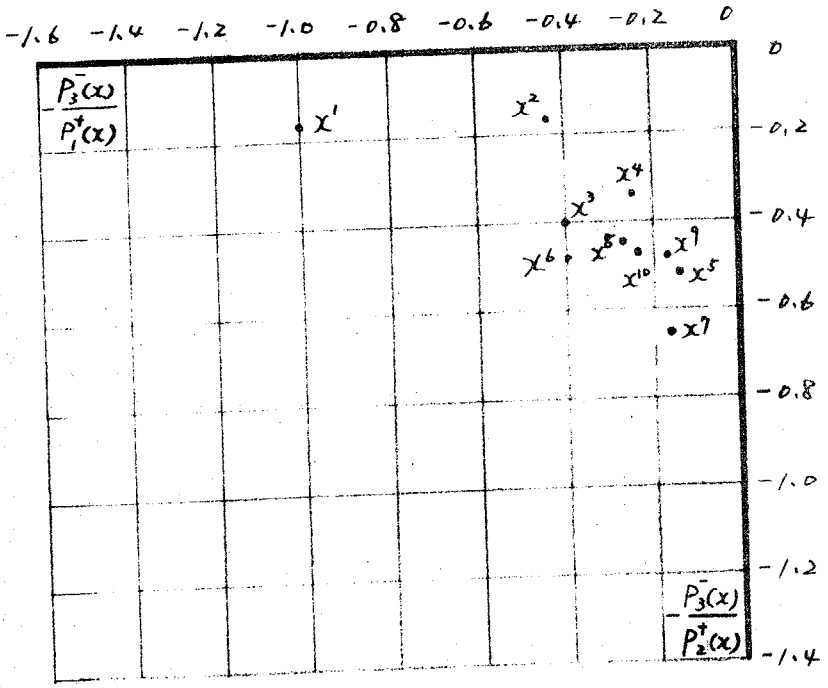


図 4-15 各数値例のΩ変換値

Ⓗ(x^4) D Ⓗ(x^6)

であることが Ⓗ(x^4) = (20, 15, −5), Ⓗ(x^6) = (15, 12, −6) からわかる。

2) 次に，クライテリアBに基づいて調べると

$\Lambda(x^4)$ D $\Lambda(x^3)$ から Ⓗ(x^3, x^4, x^5) $\bar{D}$ Ⓗ(x^3)

がわかる。

3) クライテリアCによると

$\Lambda(x^5)$ D $\Lambda(x^7)$

がわかる。

4) クライテリアDについては次の結果をうることができる。

$\Omega(x^2, x^5)$ $\bar{D}$ $\Omega(x^{10})$ から Ⓗ(x^2, x^5, x^8) $\bar{D}$ Ⓗ(x^{10})

Ⓗ(x^2, x^5, x^8) $\bar{D}$ Ⓗ(x^{10}) の判定計算はやや複雑なので，先に述べた方法による計算例を示しておこう。

$$A = \begin{bmatrix} P_1^+(x^2) & , & P_1^+(x^5) & , & P_1^+(x^8) \\ P_2^+(x^2) & , & P_2^+(x^5) & , & P_2^+(x^8) \\ 30 - P_3^-(x^2) & , & 30 - P_3^-(x^5) & , & 30 - P_3^-(x^8) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9, & 18, & 41 \\ 24, & 6, & 21 \\ 26, & 27, & 20 \end{bmatrix}$$

従って，

$$A^{-1} = \frac{1}{17337} \begin{bmatrix} -447, & 747, & 132 \\ 66, & -886, & 795 \\ 492, & 225, & -378 \end{bmatrix}$$

さらに

$$A^{-1}\cdot x^{10}=\frac{1}{17337}\begin{bmatrix}1719, & 15\\ 12002, & 70\\ 3233, & 25\end{bmatrix}$$

となる。このことから、$k_i \geq 0$ $i=1,2,3$, また

$$k=\frac{17337}{16955.1}=1.023\geq 1$$

であるから、従って、$k_i\geq 0$, $k\geq 1$ より

$\textcircled{H}(x^2, x^5, x^8)\ \bar{D}\ \textcircled{H}(x^{10})$

となる。

5) クライテリアEによれば

$\Omega(x^1, x^5)\ \bar{D}\ \Omega(x^8)$

となる。

6) クライテリアFについては、次のことが成立する。

$\Lambda(x^2, x^5)\ \bar{D}\ \Lambda(x^4)$ から $\textcircled{H}(x^2, x^5, x^8)\ \bar{D}\ \textcircled{H}(x^4)$

ここで、$\textcircled{H}(x^2, x^5, x^8)\ \bar{D}\ \textcircled{H}(x^4)$ の判定計算を例示してみよう。

まず、A を x^2, x^5, x^8 から構成して

$$A^{-1}x^4=\frac{1}{17337}\begin{bmatrix}-447, & 747, & 132\\ 66, & -886, & 795\\ 492, & 225, & -378\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}20\\15\\25\end{bmatrix}$$

$$=\frac{1}{17337}\begin{bmatrix}5565\\7905\\3765\end{bmatrix}$$

であるから，従って，$k_i > 0$ $i = 1, 2, 3$ 及び

$$k = \frac{17337}{17235} = 1.006 > 1$$

となって

$$\textcircled{H}(x^2, x^5, x^8) \bar{D} \textcircled{H}(x^4)$$

を判定できる。

7) クライテリアGについては以下の結果をうる。

$$A(x^1, x^5) \bar{D} A(x^9)$$

8) 与えられた問題では，デメリット性能がコストだけであったために，次の定理T6が成立し，クライテリアHは不用となる。

【定理T6】：デメリット性能がひとつの場合，次の関数が成立する。

$$\oplus\textcircled{H}(x^i) \bar{D} \textcircled{H}(y) \rightarrow \oplus A(x^i) \bar{D} A(y) \quad (2-38)$$

以上の結果を整理すると表4-4を得る。この表から建築空間x^6, x^3, x^7, x^{10}, x^8, x^4及びx^9は他の建築空間より劣るということがわかり，建築空間x^1, x^2, x^5は劣るということは示されていないことがわかる。そこで，我々はこれらの建築空間の中から好ましいものを選ぶとしたら，x^1, x^2, x^5のいづれかから選ぶべきであることがわかる。x^1, x^2, x^5のうち，どれが一番好ましいかに

表 4-4　判定結果

Building System x^i	Criteria							
	A	B	C	D	E	F	G	H
x^1					○		○	
x^2		○		○		○		
x^3		×						
x^4	○	○				×		
x^5		○	○	○	○	○	○	
x^6	×							
x^7			×					
x^8				○	×	○		
x^9							×	
x^{10}				×				

×；支配されているもの

○；支配しているもの

については，これまでの情報だけでは判断できないし，
また，判断すべきではない。

4－2－8　各定理の証明

【定理T1の証明】

$L=\{1,2,\cdots,n\}$ とすると，x^i は以下のように書ける。

$$x^i = 0\cdot x^1 + 0\cdot x^2 + \cdots + 0\cdot x^{i-1} + 1\cdot x^i + 0\cdot x^{i+1} + \cdots + 0\cdot x^n$$

従って，$\alpha=(0,0,\cdots,1,0,0,\cdots 0)$（ただし，$i$番目のみが1となっている）をとると，

$$x^i = \alpha[x^1, x^2, \cdots, x^n]$$

であり，かつ

$$x^i D y$$

であるから，定義4－6より

$$\overset{+}{\underset{j\in L}{\textcircled{}}} x^j \bar{D} y$$

【定理T2の証明】

$\Phi(x) D \Phi(y)$ とすると，定義4－1及び定義4－2より

$$(\forall_i)[P_i^+(x) \geq P_i(y)]$$

となり，かつ

$$(\forall_j)[-P_j^-(x) \geq -P_j^-(y)]$$

すなわち

$$(\forall j)\,[P_j^-(x) \le P_j^-(y)]$$

となる。従って，

$$(\forall i)(\forall j)\,[P_i^+(x)/P_j^-(x) \ge P_i^+(y)/P_j^-(y)]$$

となり，故に

$$\Lambda(x)\ D\ \Lambda(y)$$

となる。

【定理T3の証明】

$$\Lambda(x)\,D\,\Lambda(y) \leftrightarrow (\forall i)(\forall j)\,[P_i^+(x)/P_j^-(x) \ge P_i^+(y)/P_j^-(y)]$$

$$\leftrightarrow (\forall i)(\forall j)\left[-\frac{P_j^-(x)}{P_i^+(x)} > -\frac{P_j^-(y)}{P_i^+(y)}\right]$$

$$\leftrightarrow \Omega(x)\,D\,\Omega(y)$$

【定理T4の証明】

定義から

$$\Omega(x)\,\bar{D}\,\Omega(y) \leftrightarrow (\exists L)\left[\bigoplus_{j\in L}\Omega(x^j)\,\bar{D}\,(y)\right]$$

$$\leftrightarrow (\exists\alpha)\left[\alpha[\Omega(x^1),\Omega(x^2),\cdots,\Omega(x^s)]\,D\,\Omega(y)\right]$$

$$\leftrightarrow (\forall i)(\forall j)\left[\sum_{k\in L}\alpha_k\cdot\frac{-P_j^-(x^k)}{P_i^+(x^k)} \ge \frac{-P_j^-(y)}{P_i^+(y)}\right]$$

$$\leftrightarrow (\forall i)(\forall j)\left[\frac{1}{\sum\alpha_k\cdot P_j^-(x^k)/P_i^+(x^k)} \ge \frac{P_i^+(y)}{P_j^-(y)}\right]$$

となる。ここで，$\sum\alpha_k = 1$ であるから

$$\sum_{k=1}^{s}\alpha_k\frac{P_i^+(x^k)}{P_j^-(x^k)}\cdot\sum_{k=1}^{s}\alpha_k\frac{P_j^-(x^k)}{P_i^+(x^k)} \ge \prod_{k=1}^{s}\left(\frac{P_i^+(x^k)}{P_j^-(x^k)}\right)^{\alpha_k}\cdot\prod_{k=1}^{s}\left(\frac{P_j^-(x^k)}{P_i^+(x^k)}\right)^{\alpha_k}$$

となり，右辺の値は1であるから

$$\sum_{k=1}^{s}\alpha_k\cdot\frac{P_i^+(x^k)}{P_j^-(x^k)}\geq\frac{1}{\sum_{k=1}^{s}\alpha_k\cdot\frac{P_j^-(x^k)}{P_i^+(x^k)}}$$

となる。ところで，上式を使うと

$$\Omega(x)\bar{D}\Omega(y)\longrightarrow(\forall_i)(\forall_j)\left[\sum\alpha_k\frac{P_i^+(x^k)}{P_j^-(x^k)}\geq\frac{P_i^+(y)}{P_j^-(y)}\right]$$

$$\longleftrightarrow(\exists\alpha)[\alpha[\Lambda(x^1),\Lambda(x^2),\cdots,\Lambda(x^s)]]$$

$$\longleftrightarrow(\exists L)[\underset{j\in L}{\oplus}\Lambda(x^j)\,\bar{D}\,\Lambda(y)]$$

であるから，従って

$$\Omega(x)\,\bar{D}\,\Omega(y)\longrightarrow\Lambda(x)\bar{D}\Lambda(y)$$

となる。

【補助定理1の証明】

1) $y\notin C(x^\circ,\underset{j\in L}{\oplus}x^j)\cup\bar{C}(x^j|j\in L)$ と仮定しよう。このとき，x° の定義から

$$(\exists i)[s_i(y)\notin S_i(\bar{C}(x^j|j\in L))]$$

となる。故に

$$C(x^\circ,\underset{j\in L}{\oplus}x^j)\cup\bar{C}(x^j|j\in L)\supseteq\{y|(\forall_i)[s_i(y)\in S_i(\bar{C}(x^j|j\in L))]\}$$

2) $$C(x^\circ,\underset{j\in L}{\oplus}x^j)\cap\bar{C}(x^j|j\in L)=\phi$$

従って，1)の結果を考えると，明らかに次の結論をうる。

$$\{y|(\forall_i)[s_i(y)\in S_i(\bar{C}(x^j|j\in L))]\}\cap(\bar{C}(x^j|j\in L))^c\subseteq C(x^\circ,\underset{j\in L}{\oplus}x^j)$$

【補助定理 2 の証明】

もし $x^* D x^\circ$ ではないとすると

$$(\exists_i)[x_i^+ \leq x_i^\circ]$$

であるから，従って

$$x^\circ \in \{y \mid (\forall_i)[s_i(y) \in S_i(\bar{C}(x^j \mid j \in L))]\}$$

となる。しかし，このことは x° の定義と矛盾する。故に

$$x^\circ D x^*$$

でなければならない。すなわち

$$C(x^\circ, \bigoplus_{j \in L} x^j) \subseteq C(x^*, \bigoplus_{j \in L} x^j)$$

となる。

【定理 T5 の証明】

定義 4－14 によって

$$y \not\in C(x^*, \bigoplus_{j \in L} x^j) \leftrightarrow (\forall\alpha)(\forall\beta)[[y \neq \beta \bigoplus_{\alpha, j \in L} x^j + (1-\beta)x^*] \wedge [0 \leqq \beta < 1]]$$

となり，従って

$$(\forall\alpha)(\forall\beta)[[y \neq \beta \bigoplus_{\alpha, j \in L} x^j + (1-\beta)x^*] \wedge [0 \leqq \beta < 1] \wedge (\forall_i)[s_i(y) \in S_i(\bar{C}(x^j \mid j \in L))]$$

$$\leftrightarrow (\forall\alpha)(\forall\beta)[[y \neq \beta \bigoplus_{\alpha, j \in L} x^j + (1-\beta)x^*] \wedge [0 \leqq \beta < 1]$$

$$\wedge [[(\forall_i)[s_i(y) \in S_i(\bar{C}(x^j \mid j \in L))] \wedge (\exists z)[y_i \leqq z_i \wedge z \in \bar{C}]]$$

$$\vee [(\forall_i)[s_i(y) \in S_i(\bar{C}(x^j \mid j \in L))] \wedge \sim(\exists z)[y_i \leqq z_i \wedge z \in \bar{C}]]]$$

となる。ところで，定義 4－12 より

$$(\forall_i)[s_i(y)\in S_i(\bar{C}(x^j|j\in L))]\wedge(\exists z)[y_i\leqq z_i\wedge z\in\bar{C}]$$

$$\longleftrightarrow\quad y\in\bar{C}(x^j|j\in L)$$

となり，また，補助定理1の2)より

$$(\forall_i)[s_i(y)\in S_i(\bar{C}(x^j|j\in L))]\wedge\sim(\exists z)[y_i\leqq z_i\wedge z\in\bar{C}]$$

$$\longrightarrow\quad y\in C(x^\circ,\underset{j\in L}{\oplus}x^j)$$

となる。このことから以下のことが成立する。

$$y\notin C(x^\circ,\underset{j\in L}{\oplus}x^j)\wedge(\forall_i)[s_i(y)\in S_i(\bar{C}(x|j\in L))]\rightarrow y\in\bar{C}(x^j|j\in L)$$

故に

$$(C(x^\circ,\underset{j\in L}{\oplus}x^j))^C\cap\{y|(\forall_i)[s_i(y)\in S_i(\bar{C}(x^j|j\in L))]\subseteq\bar{C}(x^j|j\in L)$$

一方，補助定理2より

$$C(x^\circ,\underset{j\in L}{\oplus}x^j)\subseteq C(x^*,\underset{j\in L}{\oplus}x^j)$$

となり，故に

$$(C(x^*,\underset{j\in L}{\oplus}x^j))^C\cap\{y|(\forall_i)[s_i(y)\in S_i(\bar{C}(x^j|j\in L))]\}$$

$$\subseteq(C(x^\circ,\underset{j\in L}{\oplus}x^j))^C\cap\{y|(\forall_i)[s_i(y)\in S_i(\bar{C}(x^j|j\in L))]\}$$

となる。また

$$(C(x^\circ,\underset{j\in L}{\oplus}x^j))^C\cap\{y|(\forall_i)[s_i(y)\in S_i(\bar{C}(x^j|j\in L))]\}$$

$$\subseteq\bar{C}(x^j|j\in L)$$

であるから，従って，次のことが導ける。

$$y\notin C(x^*,\underset{j\in L}{\oplus}x^j)\wedge(\forall_i)[s_i(y)\in S_i(\bar{C}(x^j|j\in L))]$$

$$\longrightarrow\quad y\in\bar{C}(x^j|j\in L)$$

【定理16の証明】

定義から

$$\oplus\textcircled{H}(x^j)\bar{D}\textcircled{H}(y) \leftrightarrow (\forall i,\ell)\left[\sum_j \alpha_j x_i^j \geq y_i,\ -\sum_j \alpha_j x_\ell^j \geq -y_\ell\right]$$

$$\rightarrow (\forall i,\ell)\left[\frac{\sum_j \alpha_j x_i^j}{\sum_j \alpha_j x_\ell^j} \geq \frac{y_i}{y_\ell}\right]$$

となり，ℓ はひとつしかないので

$$\beta_j = \frac{\alpha_j x_\ell^j}{\sum_j \alpha_j x_\ell^j}$$

とおける。このとき

$$\sum_j \beta_j = \frac{\sum \alpha_j x_\ell^j}{\sum \alpha_j x_\ell^j} = 1$$

であるので，従って

$$\sum_j \beta_j \frac{x_i^j}{x_\ell^j} = \sum_j \left(\frac{\alpha_j x_\ell^j}{\sum \alpha_j x_\ell^j} \cdot \frac{x_i^j}{x_\ell^j}\right) = \frac{\sum \alpha_j x_i^j}{\sum \alpha_j x_\ell^j}$$

となる。故に

$$\oplus\textcircled{H}(x^j)\bar{D}\textcircled{H}(y) \longrightarrow (\forall i,\ell)\left[\sum_j \beta_j \frac{x_i^j}{x_\ell^j} \geq \frac{y_i}{y_\ell}\right]$$

$$\therefore \oplus\textcircled{H}(x^j)\bar{D}\textcircled{H}(y) \longrightarrow \oplus\Lambda(x^j)\bar{D}\Lambda(y)$$

となる。

4-3 パレート・レイ・オプティマム

4-3-1 パレート最適性

安全計画というものは，まったく何もない状況から不意に新しい状況を作りだすというものではなく，現在の状況からより現実的な手続きによって、より安全な状況へと移るためのプロセスを与えるものでなければならない。また，さらに，たとえ何らかの計画目標を決めたところで，その目標が100％実現されるとはかぎらず，目標が達成されなかった場合の危険性も考慮にいれた目標の設定がなされなければならない。従って，従来のような最適概念がそのまま現実の安全計画に妥当であるとはいえない。この節ではこうした状況下での安全計画の最適化の問題を検討するが，まず，従来，最も一般的に利用されるパレート最適性の概念を整理することにする。

まず，先に示したように対象はn個の性能で記されていることにしよう。この際，個々の性能のうち，他の性能が一定でひとつの性能が増加した場合には、より好ましくなったと考えてよいものとなるように各性能の符号を定めておく。このとき，対象xはn個の要素をもつベクトルで示される。すると，対象はn次元ユークリッド空間の点として与えられる（厳密にはユークリッド空間

である必要性はない。各要素において全順序関係が与えられうるものであればよく，さらにユークリッド空間R^nの部分集合でもよい)。そこで，このn次元空間の2点x, yについて，次のような順序関係を想定する

[定義4-17]: (1) すべての要素x_i, y_i ($i=1 \sim n$)について$x_i > y_i$のとき，そのときにかぎって$x > y$。

(2) 少なくともひとつのjについて$x_j = y_j$となるものがあるが，そのほかのものについては$x_i > y_i$のとき，そのときにかぎって$x \geq y$。

このn次元空間の点についての順序関係は経済学やその他の分野で応用されているもので，その性質もよく研究されている。これらの関係記号$>$, $\geq$は要素についての記号である場合と，ベクトルについての記号である場合の2つの場合があることに注意せねばならない。ベクトルx, yについて$x \geq y$かつ$y \geq x$が成立するとき，スカラー量についてと同様に$x = y$となる。以上の概念を使ってパレート最適性の定義を与えることができる。

[定義4-18]: 部分集合Sにおいて，ベクトルx, yが

$y > x$ なる y が存在しないとき，そのときにかぎって x は S におけるパレート最適集合の要素である。

この定義はいろいろな形で与えられうるが，価値的な問題を考える際，上の定義が一番直観的であるといえよう。このパレート最適性の概念は次のように述べることも可能であろう。すなわち，ある価値観に基づく人のメリットを減少することなしに，すべての人にとってより好ましい方向へと移すことが可能であれば，それはパレート最適な状態ではなく，逆にすでに不可能となっていればパレート最適な状態にすでになっている。

ところで，安全計画の問題についていうと，計画可能な集合を S とすれば，S は修復不可能確率を横軸，負方向，経済的利益の期待値を縦軸とする空間の閉部分集合（通常はコンベックスな集合）になることが多く，図4-16のように示すことができる。このとき，S におけるパレート最適な集合は図中の太線で記されるような集合となり，その中の一点をとくにパレート最適性の基準のみで選びだすことはできない。しかし，現実にはこのパレート最適な点のどれを選ぶかが安全計画の中でしばし

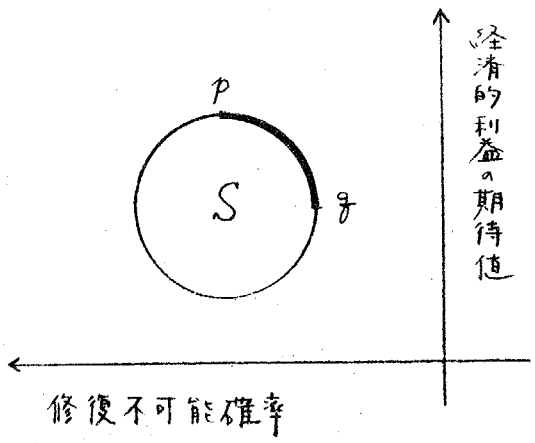


図4-16 パレート最適性

ば問題となってきている。たとえば，経済性を度外視して人命などの損失を最小限にすることを主張する人々の間では案gが好ましいとすると，逆に経済性を重視する人々はより案fの側へよった案を好ましいと主張することになり，パレート最適基準はこの2者間の納得できる解決を与えることができない。

しかし，安全計画というものはしばしば計画可能集合Sの中からひとつを選び計画せざるを得ないという状況におしこめられているのが現状であり，現実に適応できる何らかの基準が期待されている。以下では，実際の安全計画のおかれている状況を整理することから分析を始めよう。

4－3－2　安全計画のおかれている状況

まず，実際の計画の中でたびたび生ずることは，計画値xを定めて実施した場合でも，必ずしも計画値通りにならないということである。この場合，計画値xのときに実現される可能性のある値の集合を$A(x)$と記すことにしよう。ところで，こうした実現値というものが確率的な場合，その実現値の期待値をもって判断することもあるが，実際の各種の計画の中ではこうした期待値が有効な意味をもつ場合はかぎられており，実現される可能性

のある値のどれかを特定することは困難であり，以後，こうした特定化を前提としない最適化の方法を検討する。

次に，計画の中で重要な意味をもつにもかかわらず，計画の理論に取り入れられないものに計画実施以前の状況というものがある。とりわけ，計画の有効性を議論する場合，計画を実施した場合と実施する以前との比較判断というものが重要になってくるケースが多い。とくに再開発計画などの場合，現在の（開発前の）状況を基準として開発計画を実施した場合の効果を評価することが多い。また，計画可能なオルタナティブの中だけで選択したものが，やってもすると計画者のひとりよがりとなって現実的な意味をもたないというのも，こうした現在時点という状況を無視した場合に起ると考えてよいと思われる。従って，ここでは現在時点aが以後大きな役割をもつものと考えよう。

また，当然のことであるが，計画者が計画値として与えることのできる値というのも限定されているので，これを以後，計画者の提案可能な目標値の集合Sと呼ぶ（単に提案可能集合，計画可能集合ともよぶ）。この集合はこれまで種々の理論の中で定義されている計画可能集合とは意味が異なっている。すなわち，提案可能集合は

計画案が実現する値の集合という意味ではなく，単に計画者が計画案として提案できる値の集合であり，これまでいわれている計画可能集合Vはいわば次のように表現できるものである。

$$V = \bigcup_{x \in S} A(x)$$

以上までの点から言いうるのは，我々が考えている最適とは現在時点aと計画案xを実施した場合の実現値の集合$A(x)$を考慮してより好ましい計画案$x^* \in S$をさがしだすことであるといえよう。

以上の状況を簡単に図示すると，おおよそ図4-17のようになっているといえよう。しかし，厳密には後に定義を与える。

ところで，実際の計画の中でしばしば生じる困難な問題の中に次のようなケースがある。すなわち，計画者は提案可能な集合の中から必ずひとつ目標値を選択せねばならないということである。このことは当然のことのように思われるが，重要な内容を2つ含んでいる。それは

a) 計画者は提案可能な集合から目標値を選択しないということが許されていない。

b) 計画者は2つ以上の目標値を提案できない。

後者は中をもった計画案という形が許されている場合に

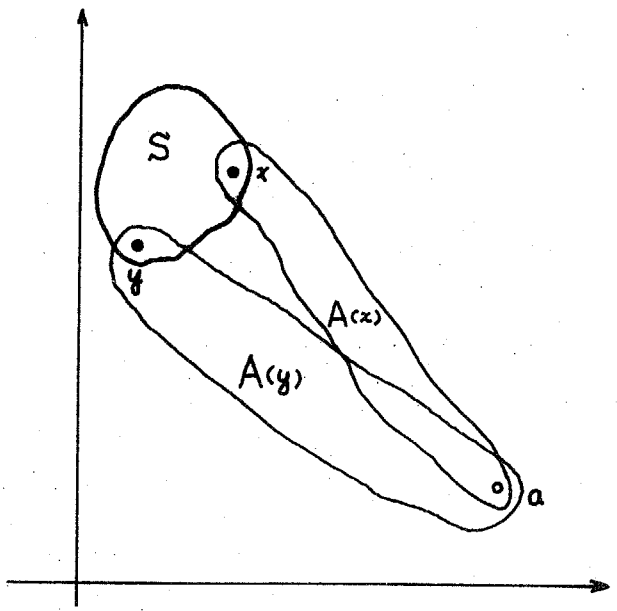


図4-17　提案可能集合と実現集合

は取りのぞかれるが，前者は，現実的にはきわめて重要なことであると言えよう。

ところで，提案可能な集合のいづれもが現在時点の状況よりすぐれているというのであれば，条件a)はそれほど問題はない。つまり，現在の時点の性能がベクトル $a \in R^n$ で表わされたとき，提案可能集合 $S \subseteq R^n$ が

$$\forall x \in S\ [x > a]$$

ならば（図4-18），計画案を提案するということはより好ましいものであり，条件a)は容易にみたされる。しかし，現実の計画の中には上式の条件をみたすものは少ない。通常，いづれかひとつの価値の減少を犠牲にして他の価値を上昇させるということが現実の計画に課せられている問題といえる。なぜならば，上式をみたすような場合，計画的な方法を実施しなくとも自然とより好ましいものが実現することが多いからである。

他方，上式の状況とは逆の場合を考えてみると，これも実際の計画にはまれである。すなわち

$$\forall x \in S\ [x < a]$$

であり，このとき，どんなものを提案しても現在の方がより好ましいのであれば計画をする必要はないといえよう。また，こうした状況下での計画は無意味であると

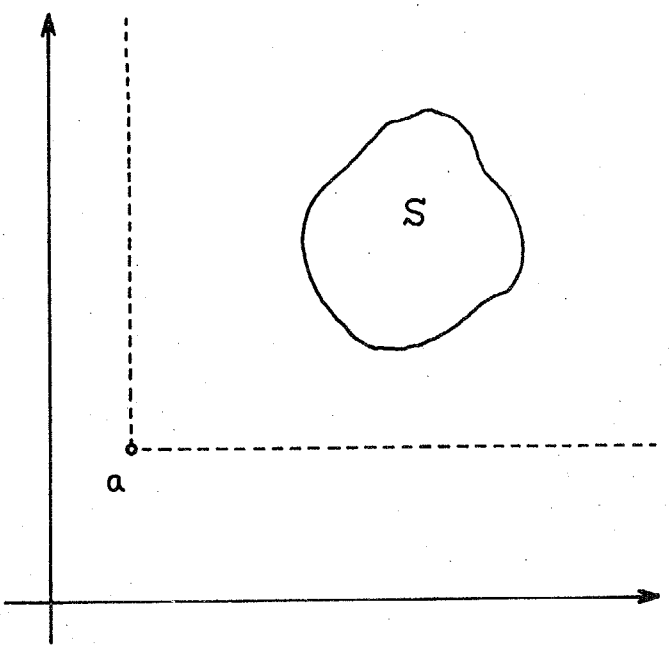


図 4-18　提案可能集合のいづれもが現在より好ましい場合

いえる。従って，以上の2つの条件式で示される状況は考えないことにする。故に我々の問題では提案可能集合は

$$\sim\exists y\in S[y>a]$$

$$\sim\forall y\in S[a>y]$$

の条件をみたす場合に限られる。

以上の実際の計画の中にある現実的状況を数学的に整理すると以下のようになる。

i) 計画の対象はn次元ベクトル空間R^n（もしくはその部分空間）内の点Xで示される。

ii) この空間内に定義4-17で示した順序関係が定められている（ただし，以後，混乱のないかぎり記号$\geq$と$>$を単に記号$>$で表わす）。

iii) 現在時点を表わす点$a\in R^n$が与えられている。

iv) 提案可能集合として空でない閉集合$S\subseteq R^n$が与えられている。

v) $x\in S$について$A(x)\subseteq R^n$が定まる。

vi) a) $\sim[\exists y\in S[y>a]]$

b) $\sim[\forall y\in S[a>y]]$

条件vi)は二次元の場合，図4-19のようになる。

4-3-3 安全計画最適性の原理

前項でみたような状況下で最適な安全計画とはどのようなものであろうか。そこでは単なるパレート最適性の原理では処理できない方法論が期待されており，この項ではそうした概念を定式化しよう。まず，現在時点が a で表わされるとき，2つの計画案 x，y を取り出し，それらについて比較することからはじめよう。もちろん，$x \in S$，$y \in S$ であり，前項の条件 i)～vi) が成立しているものとする。従って，2つの集合 $A(x)$，$A(y)$ が定まる。この2つの集合のどちらがより好ましいかによって計画案 x と y のどちらが好ましいかが決まるといえよう。

まず，極端な場合として R^2 における図4-20のように $A(x)$，$A(y)$ が定まったとすると $A(y)$ のどの点も $A(x)$ のどの点よりも劣っているので，どんなに不確定な出来事が起ったとしても x を採用しておいた方が好ましいといえる。比較条件は

$$\forall z \in A(x)\ \forall u \in A(y)\ [z > u]$$

となる。このとき，単に

$$A(x)\ R^*\ A(y)$$

と記す。ここで定義された R^* は集合についての関係である。従って，この関係 R^* で順序付けることによって

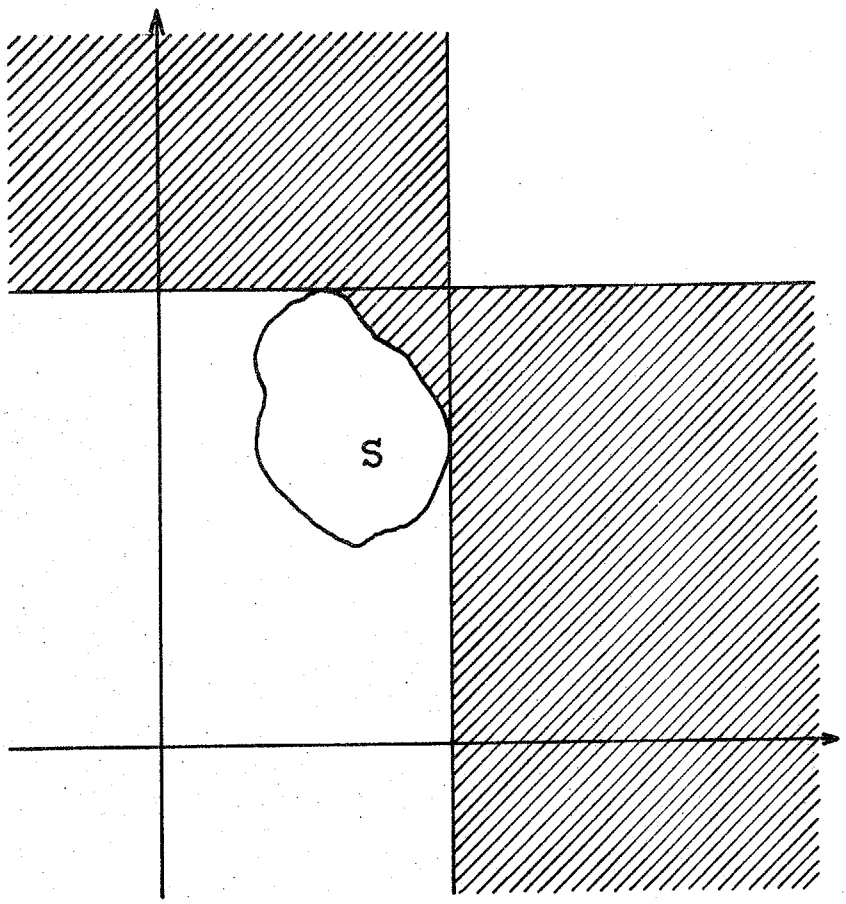


図 4-19　提案可能集合 S に対する現在時点 a_0 位置

より良い計画案xをさがしだすことが考えられる。しかしながら，A(x)，A(y)が都合よく，図4-20の形となることは現実の問題の中では期待できない。従って，もう少しA(x)，A(y)の比較条件をゆるやかにせねば具体的意味がない。

上の条件をゆるくすると次の図4-21のような場合が考えられる。この条件は次のように記すことができる。

$$\exists z \in A(x)[\forall u \in A(y)[z > u]]$$

and

$$\exists u \in A(y)[\forall z \in A(x)[z > u]]$$

条件の前半は，もし計画案yで計画を実施した場合に実現する値uのいづれについても，計画案xで実施した場合に予想される実現値zがあるということであり，このことは，もし計画案yで実施し，uが実現したとき，より良いものとが計画案xを実施しておりばありうたという「後悔」が残るということを意味したものである。後半は逆に計画案xをとったときに実現するいかなる値zにおいてもそれより好ましくない実現値uが計画案yをした場合にありうるということであり，このことは計画案xを実施し，zが実現したとき，計画案yをとればよりより好ましくないものが生じる可能性があり，むし

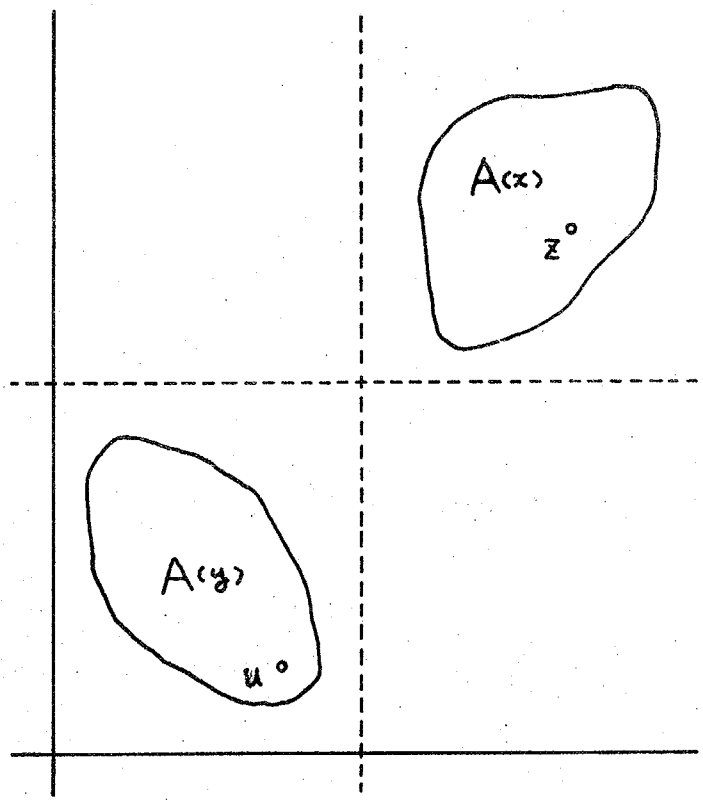


図 4-20　集合順序 R^*

る計画案xをとってよかったという「安心」があること
を意味するものである。

上述の条件が成立するとき

$$A(x)\ R\ A(y)$$

と記すことにしよう。以後，単に集合$A(y)$よりも集合$A(x)$の方が好ましいと呼ぶことにする。

以上の概念を用いて最適な計画というものの条件をまとめるとすれば次のようになる。

条件 i) x^*が最適な計画案であるとは（条件 i)～vi)のもとで

$$A(x)\ R\ A(x^*)$$

$x \in S,\ x^* \in S$なるxが存在しないことである。

すなわち，集合に定義された関係Rについて，$U(x^*)$よりも好ましいものがみつけられなければx^*を最適な計画案と考えるわけである。

ところで，この概念の意味するところと実際の安全計画の考え方と完全一致しており，実際の安全計画の漠然とした最適化の概念を数学的に定式化したものとして上記の最適性の条件は適切であると考えられよう。しかし，この条件についても現実的応用の際には不都合が生じる。

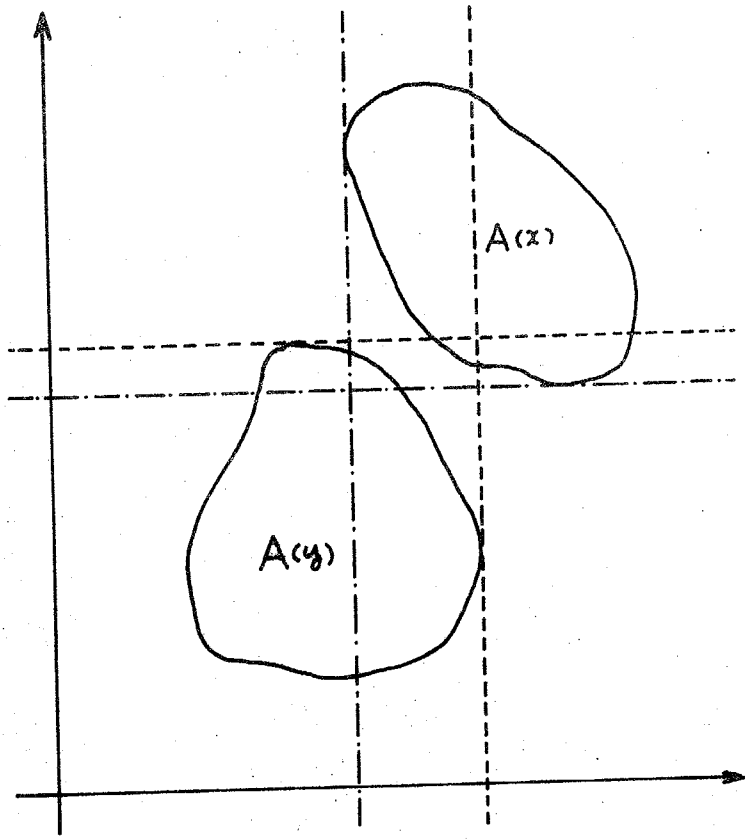


図 4-21　集合順序 R

それは，通常のケースでは計画案 x を採用したときに実現される値の集合 $A(x)$ は現在時点 a を含む場合が多く，このとき，上の条件での最適性の概念は非現実的なものとなってしまう。たとえば現在時点 a，計画案 x としたとき，達成の程度もとすると，実現される値の集合 $A(x)$ は

$$A(x)=\{z \mid z=tx+(1-t)a,\ t\geq 0\}$$

となるようなケースがありうる（図4-22）が，このとき，達成率もが0すなわち少しも計画案通りに実現できないとき，それは現在の状態 a のままでいることと同じである。従って，このとき，現在の状態 a はどんな計画案 x を採用しても

$$a \in A(x)$$

となることが考えられる。とくに，図4-22のような場合，a の点を除いては明らかに $A(x)$ の方が $A(y)$ よりも好ましいという先の条件と適合している。逆にいうならばどんな $A(x)$ にも共通な点が存在しているならば，それらの集合 $A(x)$ を関係 R で順序付けすることはできない。この場合，条件1）を適用するとすべての x が最適な計画案ということになってしまう。そこで，このような場合を取り除くことが考えられる。とくに達成率0，すなわち現在時点というものを計画案毎に比較するということは

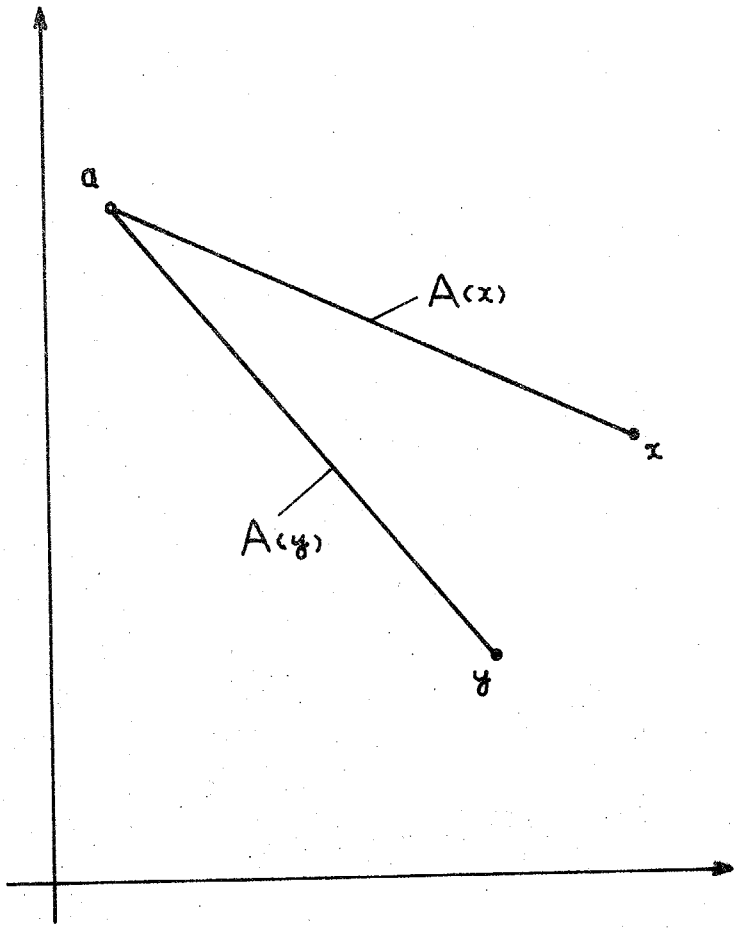


図4-22　aを共有する2つの可能集合

特殊なケースについて意味をもたないので，現在時点を取り除いて判断する。以下の最適条件を今後の安全計画の最適化の基本条件として定義する。

条件2) x^* が最適な計画案であるとは（条件1)～iv)のもとで）

$$Z(x)\ R\ Z(x^*)$$

なる $x \in S$ が存在しないことである。

ただし

$$x^* \in S$$

$$Z(y) = A(y) - \{a\}$$

この条件2)による最適性の基準を用いて安全計画の最適化がなしうるが，以下では安全計画にしばしば登場する場合を限定し，上記の最適性の基準を用いた場合の結果を得ることにしよう。

4－3－4 パレート・レイ・オプティマム

ここで提案するパレート・レイ・オプティマムの概念は，次のような場合に限って有効である。現在の状態から計画されたある未来の状態へと移行していくという状況があり，移行の程度については計画者は知ることはできない。このとき，計画者は移行すべき先であるひとつ

の計画案を示さなければならない。このような状態は実際の計画の中に多い。たとえば建物の安全性の目標値をひとつ設定してある地域改良を行うとすれば，その地域の規模が都市あるいは国土といったひろがりをもっている場合，一気に目標レベルの安全性を確保することは不可能であり，新しく建てかえる建物にかぎって新しい基準（目標）にそってつくられるので，目標値への移行は長い時間を要し，その目標値達成までの時間は不明であり，かつ各時点でより好ましい状況が設定されなければならない。この現在の状態 a から目標値 x への移行というものが，前項の例として示したように，達成率 t を用いて

$$z(t, x, a) = tx + (1-t)a, \quad t \geq 0$$

となる場合が多い。このとき，実現可能な状況というのは現在時点 a と目標値 x とを結ぶ半直線上の点として示すことができることを意味している（図4-23）。しかしながら，一般の計画の場合，こうした実現可能な値が直線上に表わされるとはかぎらない。しかし，図4-23のようなケースというものも安全計画の中では頻繁に表われ，また，この直線上に表わせるという条件を緩和した場合（たとえばベクトルについての $>$ の関係を保存する

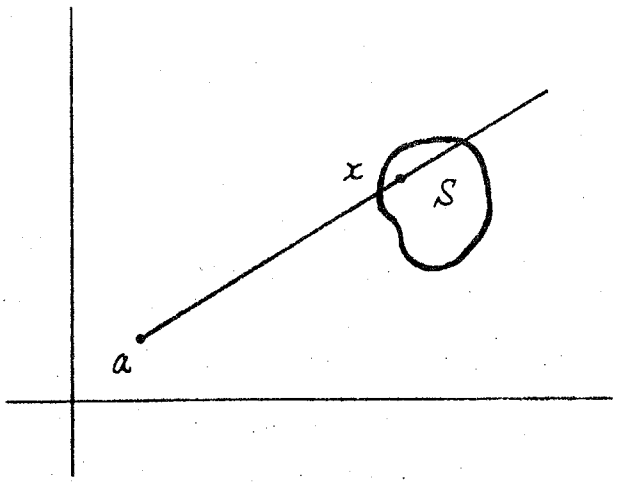


図 4-23 可能半直線

ような変換をほどこして$A(x)$を半直線に対応付けられるようなものが存在するような$A(x)$については，以下の議論は容易に拡張できる）についても同じような検討ができるので，以下の数学的手続きを簡単にするために実現値の集合は半直線状になるものと仮定して検討を進める。従って，このような概念を定式化するため，まず，次のような現状から目標値へ向けての移行を示す集合を以下のように定義する。

［定義；可能半直線］：与えられた点$a \in R^n$と部分集合$S \subseteq R^n$について可能半直線（possible ray）が，Sの点xについて以下のように定義される。

$$T(x,a) = \{z \mid z = tx + (1-t)a,\ 0 \leq t\}$$

この定義の中でaは現在の状況を表わしており，Sは計画にとって提案可能な集合である。このとき，可能半直線はaから出発してxに向う半直線を意味している。

ところで，もし実現値の集合$T(x,a)$の中で明らかに

$$z_1, z_2 \in T(x,a)\ [z_1 < z_2]$$

なるものが存在する場合（図4-23），明らかにz_2の点が

これよりも好ましいので，それが実現するということは不合理であり，従って，安全計画の中で検討すべき実現値の集合 $\tau(x, a)$ をより限定しておくことにしよう。つまり，この可能半直線のうち，我々が問題とするものを以下のように限定する。

[定義；パレート・無差別半直線]：

可能半直線 $\tau(x, a)$ が集合 $\tau(x, a)$ のなかのすべての点が集合 $\tau(x, a)$ においてパレート最適ならば，この可能半直線はパレート・無差別半直線（parato indifference ray）と呼ばれる。

以上の準備のもとで，パレート・最適性の概念を以下のように定義することができる。

[定義；パレート・レイ・オプティマム]：

与えられた点 $a \in R^n$ 及び部分集合 $S \subseteq R^n$ が前項の条件 i) ～ vi) を満たしかつ実現可能集合 $U(x)$ がパレート・無差別半直線 $\tau(x, a)$ で与えられるとき，$x^* \in S$ なる点 x^* は以下の条件を満たすとき，そのときにかぎり点 a のパレート・レイ・オプティマム・ポイントになっているといわれる。

$$\sim[\exists x \in S[\tau'(x, a) R \tau'(x^*, a)]]$$

ただし, $T'(y,a) = T(y,a) - \{a\}$

この定義の中では, 実xがSにおいてパレート最適であるということを要請していない。しかし, 後に示す定義によって, パレート・オプティマムな実はすべてパレート最適であることが証明される。

このパレート・レイ・オプティマムの概念を明確にするために2, 3の検討を行わなければならないが, まず, パレート・無差別半直線について次のような補題が成り立っていることを示すことができる。

【補題3-1】: $x > x'$ のとき, $T'(x,a)\ R\ T'(x',a)$

ただし, $T'(y,a) = T(y,a) - \{a\}$

証明: ベクトルyのi番目の要素を以下では y_i と記すことにする。

(A) まず,

$z \in T'(x,a)$

なる任意のzを取りだすと, $T'(x,a)$ の定義から

$z = tx + (1-t)a \quad t > 0$

すなわち

$z_i = tx_i + (1-t)a_i \quad t > 0$

となる。一方，$x > x'$ より x, x' の各要素について

$$x_i = x'_i + \varepsilon_i$$

$\varepsilon_i \geq 0$ かつすべての i について等号は成立せず

従って，

$$z_i = t(x'_i + \varepsilon_i) + (1-t)a_i$$

$$= tx'_i + (1-t)a_i + \varepsilon_i t$$

となる。ここで，以下の z' を各要素を以下の式で与えることにより定義する。

$$z'_i = tx'_i + (1-t)a_i$$

すると

$$z_i = z'_i + \varepsilon_i t$$

となる。ここで，$t > 0$, $\varepsilon_i \geq 0$ ただし，等号がすべての i については成立しないということから

$$z > z'$$

である。一方，$t > 0$ であるから

$$z' \in \tau'(x', a)$$

となり，従って

$$\exists z' \in \tau'(x', a)\ \forall z \in \tau'(x, a)\ [z' < z]$$

となる。

(B) 次に、

$z' \in T'(x', a)$

なる任意の z' を取りだすと、$T'(x', a)$ の定義から

$z' = tx + (1-t)a \quad t > 0$

すなわち

$z'_i = tx_i + (1-t)a_i \quad t > 0$

となる。一方、$x > x'$ より x, x' の各要素は

$x'_i = x_i - \varepsilon_i$

$\varepsilon_i \geq 0$ かつすべての i については等号は成立せず

従って、

$z'_i = t(x_i - \varepsilon_i) + (1-t)a_i$

$= tx_i + (1-t)a_i - \varepsilon_i t$

となる。ここで、z を各要素を以下の式で与えることにより

$z_i = tx_i + (1-t)a_i$

となる。すると

$z'_i = z_i - \varepsilon_i t$

となり，ここで $t>0$，$\varepsilon_i \geq 0$ ただし等号はすべてのiについては成立しないということから

$$z' < z$$

となる。一方，$t>0$ であるから

$$z \in T'(x, a)$$

となり，故に

$$\exists z \in T'(x, a)\, \forall z' \in T'(x', a)\, [z' < z]$$

となる。以上の(A)(B)の2つの結果より

$$T'(x, a)\ R\ T'(x', a)$$

が導けたことになる。すなわち，この定理が証明された。

さらに，パレート・レイ・オプティマムの概念をより単純に表現するためにいくつかの幾何学的用語を準備しておくことが望ましい。

[定義；最小円錐]：

与えられた点 $a \in R^n$ と部分集合 $S \subseteq R^n$ について，最小円錐 $C(S, a)$ が以下のように定義される。

$$C(S, a) = \{z \mid z = tx + (1-t)a,\ 0 \leq t < \infty,\ x \in S\}$$

また，最小円錐の境界を次のように記す。

$\partial C(S,a)$

上で定義された最小円錐に関して，次のような補題が成り立つ。

【補題3-2】：最小円錐 $C(S,a)$ の内部任意の点 y に関して，次の条件をみたす点 $x \in S$ が存在する。

$$\tau(x,a) = \tau(y,a) = \{z \mid z = ty + (1-t)a\}$$

証明：$C(S,a) = \bigcup_{x \in S} \tau(x,a)$

より明らかである。

この補題を使って，次のようなパレート・レイ・オプティマムに関するひとつの結果を導くことができる。

【定理P1】：パレート・レイ・オプティマムな点の集合 $P_r(S,a)$ は以下の集合の部分集合となっている。

$$P_a(S) \cap \partial C(S,a)$$

ここで，$P_a(S)$ は S におけるパレート最適の集合を表わしている。

証明(A)：まず，パレート・レイ・オプティマムな点 $x^* \in P_r(S,a)$ が S のパレート最適集

合 $P_a(S)$ に属さないと仮定しよう。このとき，パレート最適性の定義から

$$\exists x^* \in S\,[x > x^*]$$

となり，従って，補題3-1より

$$t'(x, a)\, R\, t(x^*, a)$$

となり，従って，x^* はパレート・レイ・オプティマム・ポイントではない，つまり

$$x^* \notin P_r(S, a)$$

である。これは $x^* \in P_a(S, a)$ としたことと矛盾する。故に x^* がパレート最適集合 $P_a(S)$ に属さないとする仮定は矛盾をひきおこすので

$$x^* \in P_a(S)$$

でなければならない。

(B): $x^* \in P_r(S, a)$ なる点が最小円錐の境界 $\partial C(S, a)$ に属さないと仮定する。すなわち

$$x^* \notin \partial C(S, a)$$

である。一方，$x^* \in S$ であるから $S \subseteq C(S, a)$ であることを考えて

$$x^* \in C(S, a)$$

となる。故に x^* は集合 $C(S,a)$ の内点である。従って，充分小さな ε について x^* の開近傍 $E(x^*)$ を以下のように定めることができる（図4-24参照）。

$$E(x^*) \subseteq C(S,a) - \partial C(S,a)$$

$$E(x^*) = \{w \mid \|x^*, w\| < \varepsilon, \varepsilon > 0\}$$

このとき，$E(x^*)$ 内の点 z を以下のように定める。

$$z_i = x_i^* + \frac{1}{2}\varepsilon$$

$$z_j = x_j^* \quad \text{for all } j \neq i$$

このとき，明らかに

$$x^* < z$$

であるから，故に補題3-1より

$$\tau'(z,a)\, R\, \tau'(x^*,a) \qquad (*)$$

となる。一方，

$$z \in E(x^*) \subseteq C(S,a) - \partial C(S,a)$$

であるので，従って，

$$z \in C(S,a)$$

となり，故に補題3-2より

$$\exists x \in S\,[\tau(x,a) = \tau(z,a)]$$

となる。故に先の結果 $(*)$ 及び $\tau(x,a)$

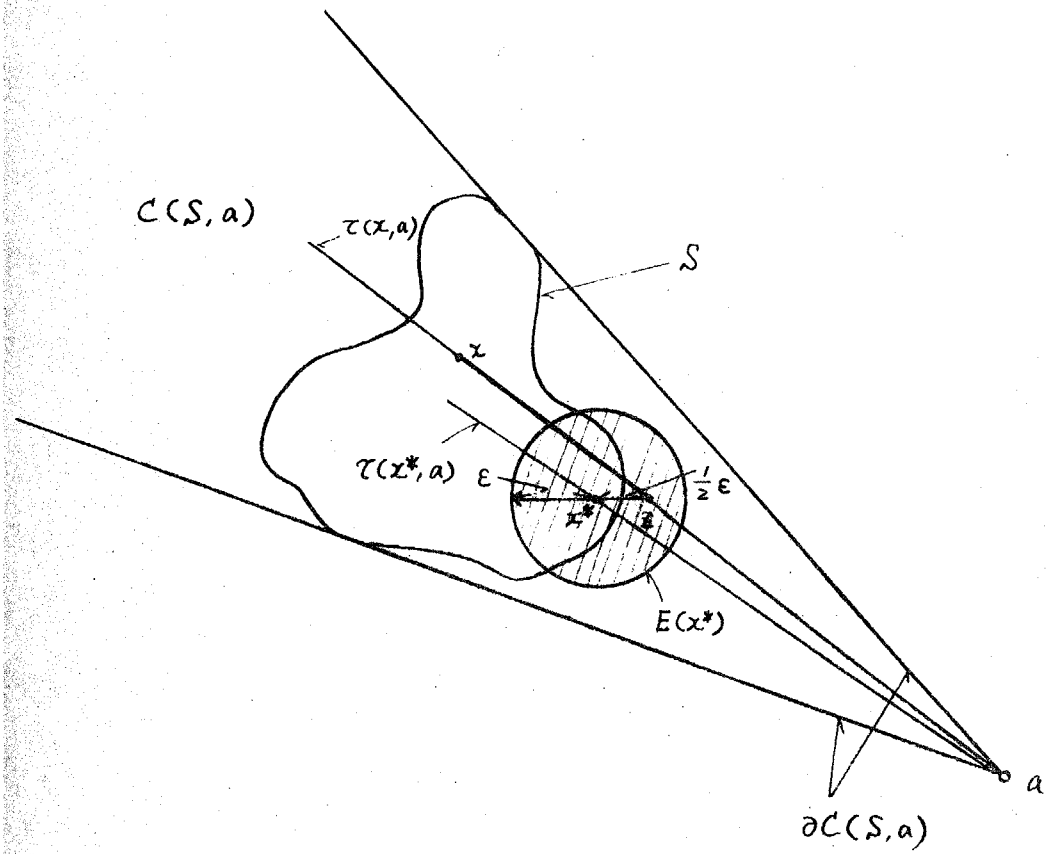


図 4-24 開近傍 $E(x^*)$

から定aを除くことにより

$$\exists x \in S\,[\tau'(x, a)\, R\, \tau'(x^*, a)]$$

となる。これは

$$x^* \notin P_r(S, a)$$

を意味する。故に最初の仮定は矛盾を導くので

$$x^* \in \partial C(S, a)$$

でなければならない。

以上の(A), (B)の結果より

$$x^* \in P_r(S, a) \Rightarrow x^* \in P_a(S) \cap \partial C(S, a)$$

すなわち

$$P_r(S, a) \subseteq P_a(S) \cap \partial C(S, a)$$

が証明された。

4-3-5 安全計画におけるパレート・レイ・オプティマム

第4章の後半で論述したように安全計画における主要な評価の尺度は修復不可能性と総合的経済的利益であった。ここでは，この2つの尺度で評価される場合にこれまで検討したパレート・レイ・オプティマムの条件による最適化を検討する。また，修復不可能性については通

常人命の損失を考えているので，以後，単にこれを人命損失と呼び，総合的経済的利益についても単に利益と呼ぶことにする。

より具体的に考えるために，次のような安全計画を想定しておくことにする。現在では全く開発されていないが，市街化，高層化が予想される地域があり，木造密集市街地が形成されないように，行政的に新設建物についてある程度の防火性能を義務づけることが考えられているとしよう。そこで，義務づけるべき防火性能をいかに定めるかがここでの安全計画の課題となっているとする。ここで，義務防火性能を y，この地域の建築床面積合計が F_0 として求めた人命の損失は $L(y)$，この地域から得られる利益は $U(y)$ であったとする。これを二次元ベクトルで以下のように記すことにする。

$$x(y) = (-L(y),\ U(y))$$

とすると，$x(y)$ の集合 S は図 4-25 のようになっているとしよう。また，現在時点は全く建物がなく，このままでは人命損失は L_0，利益は U_0，すなわち

$$a = (-L_0,\ U_0)$$

で，図 4-25 の a で示される。このとき，この地域の今後の開発の如何によっては建築床面積合計は左右するが，

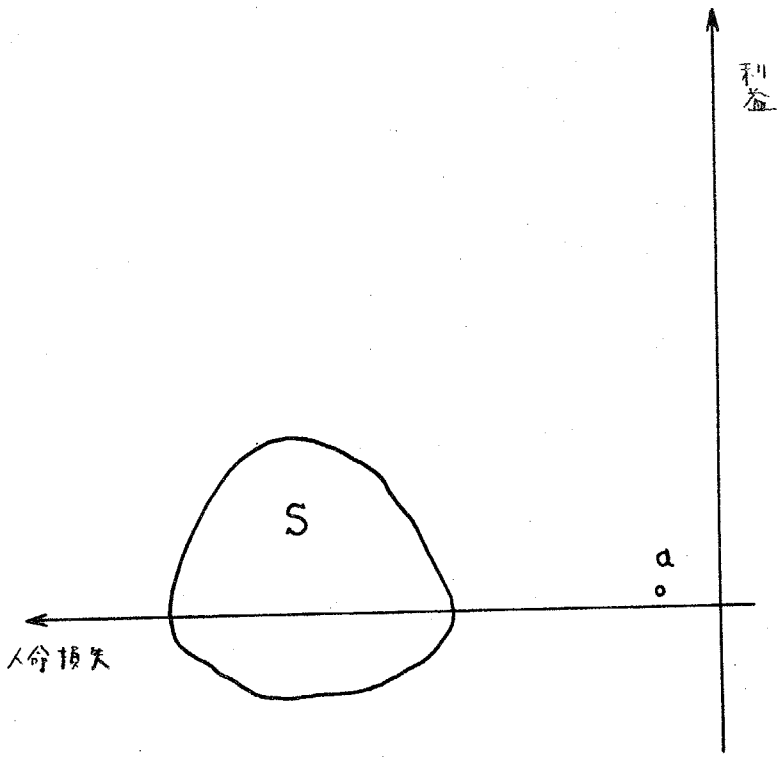


図4-25　人命損失－利益　空間における提案可能集合Sと現在時点a

この値が tF_0 $(t \geq 0)$ の場合は，もし防火性能 y を義務づけた場合には人命損失 $L(y,t)$，利益 $U(y,t)$ は以下の式で与えられるとしよう。

$$L(y,t) = tL(y) + (1-t)L_0$$

$$U(y,t) = tU(y) + (1-t)U_0$$

しかし，建築床面積合計がいくらになるかは開発がどの程度となるかに依存し，全く不明であるとする。このとき，より合理的な防火性能 y^* をいかに求めるかが問題となっている。

以上の問題では，実現する人命損失，利益の組

$$x(y,t) = (-L(y,t),\ U(y,t))$$

の集合は以下のように表現できる。

$$T(y,a) = \{z \mid z = t\,x(y) + (1-t)a\}$$

従って，パレート・レイ・オプティマムの基準を用いることができ（先の条件 i)～vi) は成立しているものとして），以下の手続きで最適な義務性能 y^* を求めることができる。

まず，定理P1より，最適な義務性能 y^* は（あるとすれば）

$$\partial C(S,a) \cap P_a(S)$$

の中に入っているので，S を包む a を頂点とする最小円錐を図4-2bのようにつくる。すると，二次元であるの

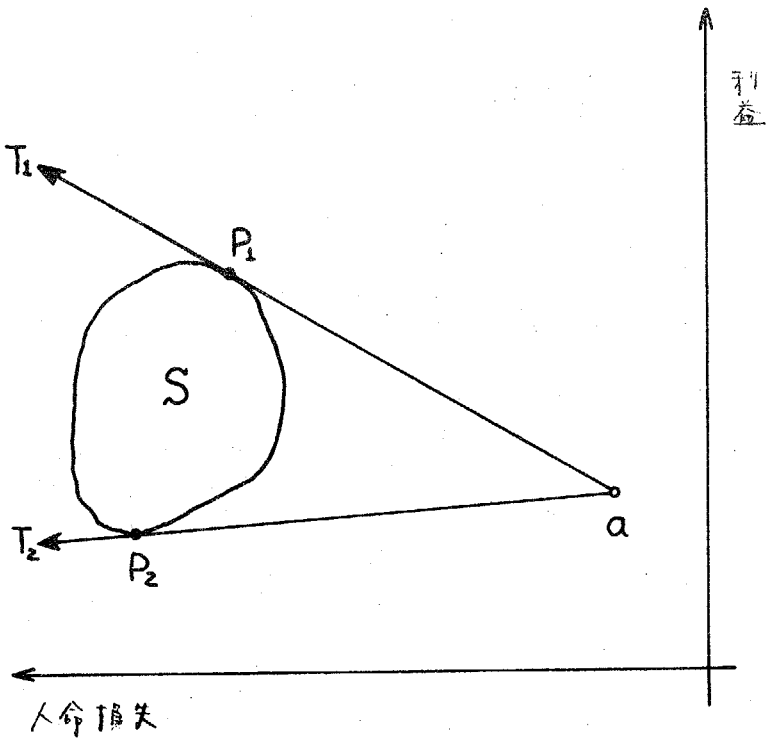


図4-26　最小円錐の境界（二次元）

で，$\partial C(S, a)$ は明らかに半直線 aT_1，aT_2 となる。従って，パレート・レイ・オプティマムな点は P_1 または P_2 に限られる。一方，定理P1の次ぎの条件よりパレート最適集合の一部でなければならないので，P_1 に限定される。故にもしパレート・レイ・オプティマムな点があるとしたら P_1 であることがわかる。この場合は P_1 は明らかにパレート・レイ・オプティマムな点になっている。従って，$x(y) = P_1$ となるが望ましい義務づけ防火性能といえる。

以上のように二次元空間における パレート・レイ・オプティマムな点は S がある性質をみたすときに唯ひとつ定まり，しかも a から S に接線を引くという操作によって求めることができる。この事実を示すために利益と人命損失の空間の原点を次のように基準化しておくことが望ましい。

$$x_0 = (-L_0, U_0) = (0, 0)$$

このとき，パレート・レイ・オプティマム・ポイント x^* の唯一性は以下の命題によって保障される。

【命題P1】：与えられた部分集合 S が次のように表現できるとき，パレート・レイ・オプティマムなポイントはただひとつ存在する。

$$S=\{(-L_1, U_1) \mid 0<U_1 \leq f(L_1),$$
$$L_s<L_1<L_g,\ f(L_s)$$
$$=f(L_g)=0,\ f'は単調減少,\ fは連続\}$$

図5-2から明らかに，aからSへ引いた接線が定まり，この接線が$\partial C(S,a)$となっており，その接点がパレート・レイ・オプティマム・ポイントx^*にほかならない。すなわち，部分集合て(x^*, a)が現状からの可能な計画への移行プロセス(x,a)に対して，集合順序Rの意味においてより好ましいものであるということを保障している。

こうにして決められた$x^*=(-L^*, U^*)$の人命的な損失Lがどのようになっているかを示すものが次の命題P2である。

【命題P2】: 命題P1のようにSを表現できるとき，
$x^*=(-L^*, U^*)$及び経済的な利益を最大化したときの人命的な損失L及び計画可能な集合内における人命的な損失の最小値L_sに次の関係が成り立っている(図4-2参照)。

$$L_s \leq L^* < \bar{L}$$

上の命題によって，パレート・レイ・オプティマムな点における人命的な損失は経済的に成り立ちうる最小の損

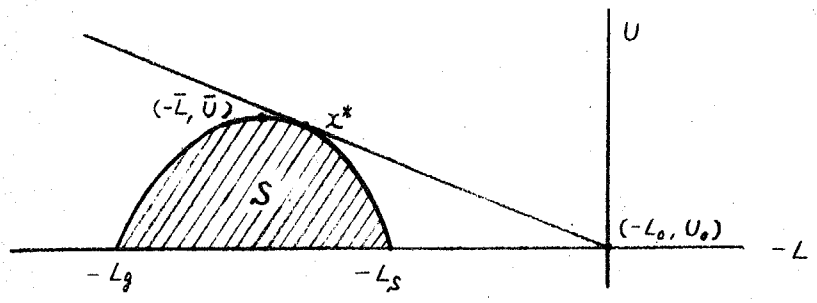


図4-27 パレート・レイ・オプティマム・ポイント

失 L_S よりも大きく，経済的利得のみを最大化した場合の人命的損失 L よりも小さいことが示されている。

第5章　建築安全性の確率的分析と計画手法

5－1　建築内火災拡大の確率的分析

5－1－1　出火確率
5－1－2　火災進展の確率的記述
5－1－3　火災進展の確率的尺度
5－1－4　確率モデルにおけるパラメーター推定
5－1－5　避難と人命危険度
5－1－6　消火機能
5－1－7　損失額計算
5－1－8　総合防火計画

5－2　類焼拡大防止計画の確率論的分析

5－2－1　類焼の要因
5－2－2　類焼確率関数の導出
5－2－3　統計データによる類焼確率関数の未知パラメーターの決定
5－2－4　類焼確率関数の時間的挙動
5－2－5　格子状建物配置モデルのシミュレーション分析
5－2－6　既存市街地における類焼シミュレーション解析
5－2－7　類焼性状からみた市街地安全計画の最適化
5－2－8　類焼防止からみた地区安全計画の方略

5－3　建築信頼性の要因分析と安全計画手法

5－3－1　信頼性解析における問題点
5－3－2　構造材料の不確定性状（コンクリート）
5－3－3　構造材料の不確定性状（鉄筋）
5－3－4　建築生産システムにおけるファジィネス解析
5－3－5　構造物の信頼性・経済性最適化

5－4　重要度係数の最適化

5－4－1　重要度係数と各規定
5－4－2　住民の側よりみた建築物の重要度の評価

5-4-3　建築のシステム記述
5-4-4　重要度係数の最適化
5-4-5　重要度係数の最適解
5-4-6　総効用最大化原理の意味と限界
5-4-7　重要度係数の最適化と実用値

付録 5-4 A1　(4-21)式，(4-22)式の導出

付録 5-4 A2　各種のオーダーについて

5-5　建築材料の品質管理システムの最適化

5-5-1　コンクリートの特殊性と建築安全性への影響
5-5-2　コンクリートの生産及び観測のシステム
5-5-3　コンクリート圧縮強度に関する確率的関係
5-5-4　品質管理システムの最適化
5-5-5　コンクリートの品質管理システム

付録 5-5 A1

付録 5-5 A2

5-1 建築内火災拡大の確率的分析

5-1-1 出火確率

5-1-1-1 出火率

建築単体火災の防災計画上，きわめて重要な意味をもつ量として出火率があげられる。まず，出火の建築防災計画上，重要な側面は次の2つの点に要約されると思われる。

(1) どの程度出火するか（出火のしやすさ）。

(2) 建築空間のどの場所で出火しやすいか。

前者は，通常，出火率と呼ばれている変量で表わされる場合が多い。この値は人口1万人当りの年間出火件数で定義されているものである。消防白書（昭和51年度版）によれば，図6-1のような傾向を示し，大都市の出火率が高く，市町村における出火率は低い（ここで，大都市とは札幌市，東京23区，川崎市，横浜市，名古屋市，京都市，大阪市，神戸市，北九州市，福岡市である）。とくに東京23区の出火率は6.99となっており，きわめて高い。こうしたことからも生活様式，建築空間の性質等によって出火のしやすさが左右されていることがわかる。しかし，防災機器の普及（石油等の出火原因物の利用の減少）等によって大都市の出火率が年々減少してきていることがわかる。反面，市町村段階では生活形態の都市型化等

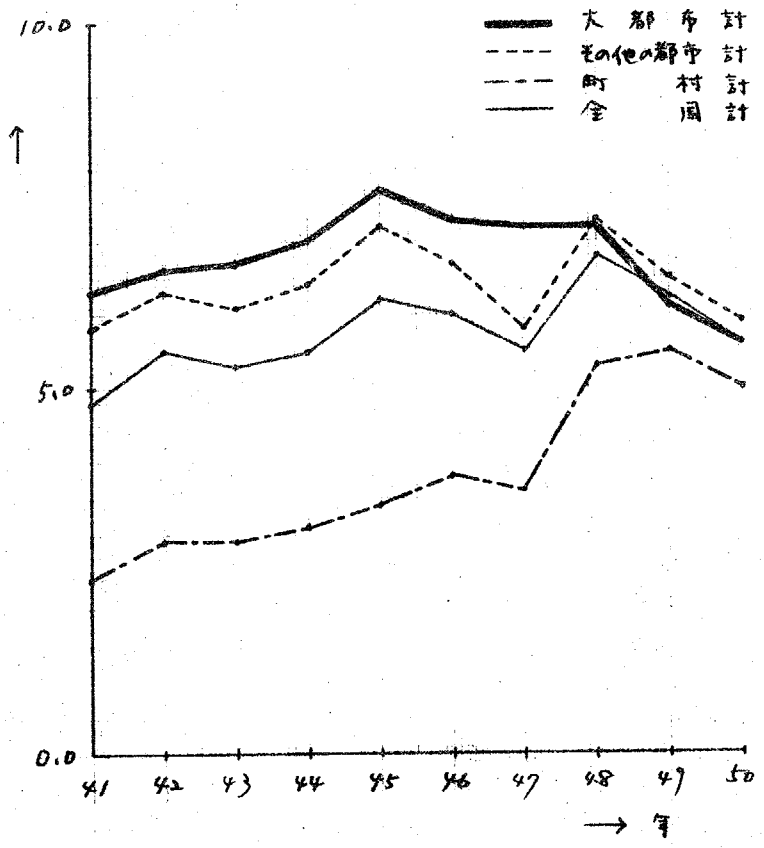


図6-1 出火率の経年変化

にともない，出火率は年々増加している。

以上のような出火率を前提として，建築物の防火安全対策を考えなければならないが，地震時などにおいてはこれらの値をはるかに上まわる出火が考えられるので，防災計画上は単に先に求めた出火率のみで判断することは好ましくない。地震時における出火率については，すでにいくつかの研究がなされているが，その値を十分な精度で推定することは困難な問題を含んでおり，単体火災の分析では，出火率をとくに限定して解析を行うことはさしひかえる。建築計画の全体的な視点からの防災対策としてむしろ次節で述べるような建築空間の出火場所の問題に視点をあわせる。

5－1－1－2　出火確率

まず，東京消防庁統計書の居住専用住宅出火場所別出火件数の資料より，表6－1のような住宅の各空間での出火確率を求めた。これからわかるように居室，台所，風呂場での出火確率が非常に大きい。しかし，これは各空間での単位面積当りの出火確率ではない。したがって，居室が大きな値を示しているのは，居室の面積が広いということにも原因している。また，居室の出火原因は他の資料等を参照すると、タバコによる出火が多く，また

表6-1　出火確率

出火場所	確率(%)
居室	42.4
押入	1.4
台所	31.4
廊下	1.0
便所	0.4
風呂場	12.1
屋根裏	2.2
天井内	0.3
壁内	2.8
外壁下	4.0
床下	0.8
玄関	1.1
合計	100.0

台所，風呂場等は火気の利用頻度の多いことに原因していると思われる。まず，このデータより単位面積当りの出火率を計算することが必要であるが，住宅の各部位及び室の面積に関するデータが出火のデータと同時に必要であるが，そうしたデータを得ることは非常に困難であり，ここでは標準プランを作成し，先のデータをこの標準プランで出火した場合にあてはめ，各単位面積当りの出火確率に分配することを考える。標準プランとしては住宅金融公庫選定の標準プラン218種のうちより，木造平屋の夫婦，子供2人程度の家族用の標準プランを選び，その一部を修正して、図6-2に示すようなプランを作成した。基本モデュールは90cmであり，以後メッシュにわける場合は90cm×90cmのメッシュとする。この出火確率の割りふりかたは、図6-3のフローチャートに示されている。この結果，単位面積当りの出火確率（与えられた住宅のどの単位面積において出火するかという確率）は図6-4に示されている。ここでは，台所は0.05以上の値となっており，ついで風呂場が0.02～0.03の値になっている。また，居室は約0.01程度であり，廊下等を含むその他の場所はきわめて低い。

このフローチャートによって各室別毎の出火確率を求

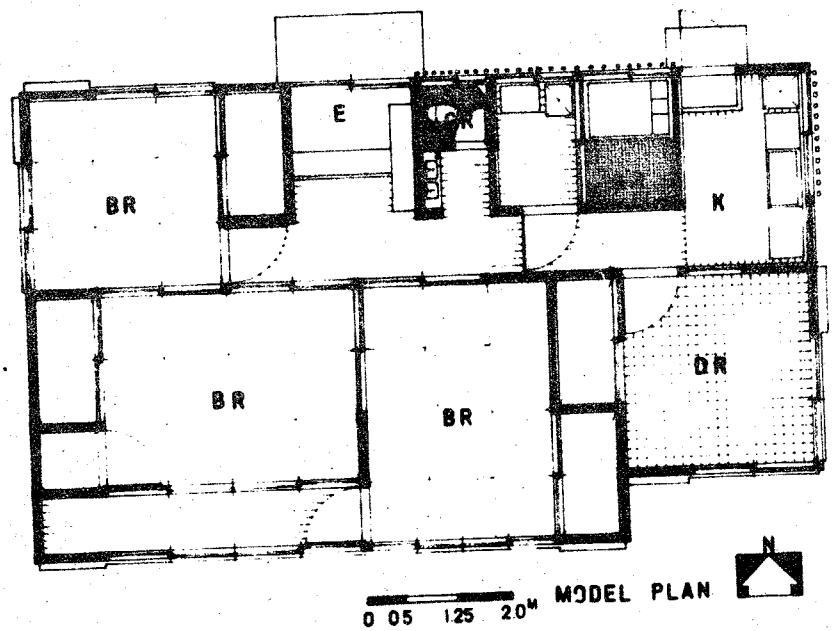


図 6-2　標準プラン

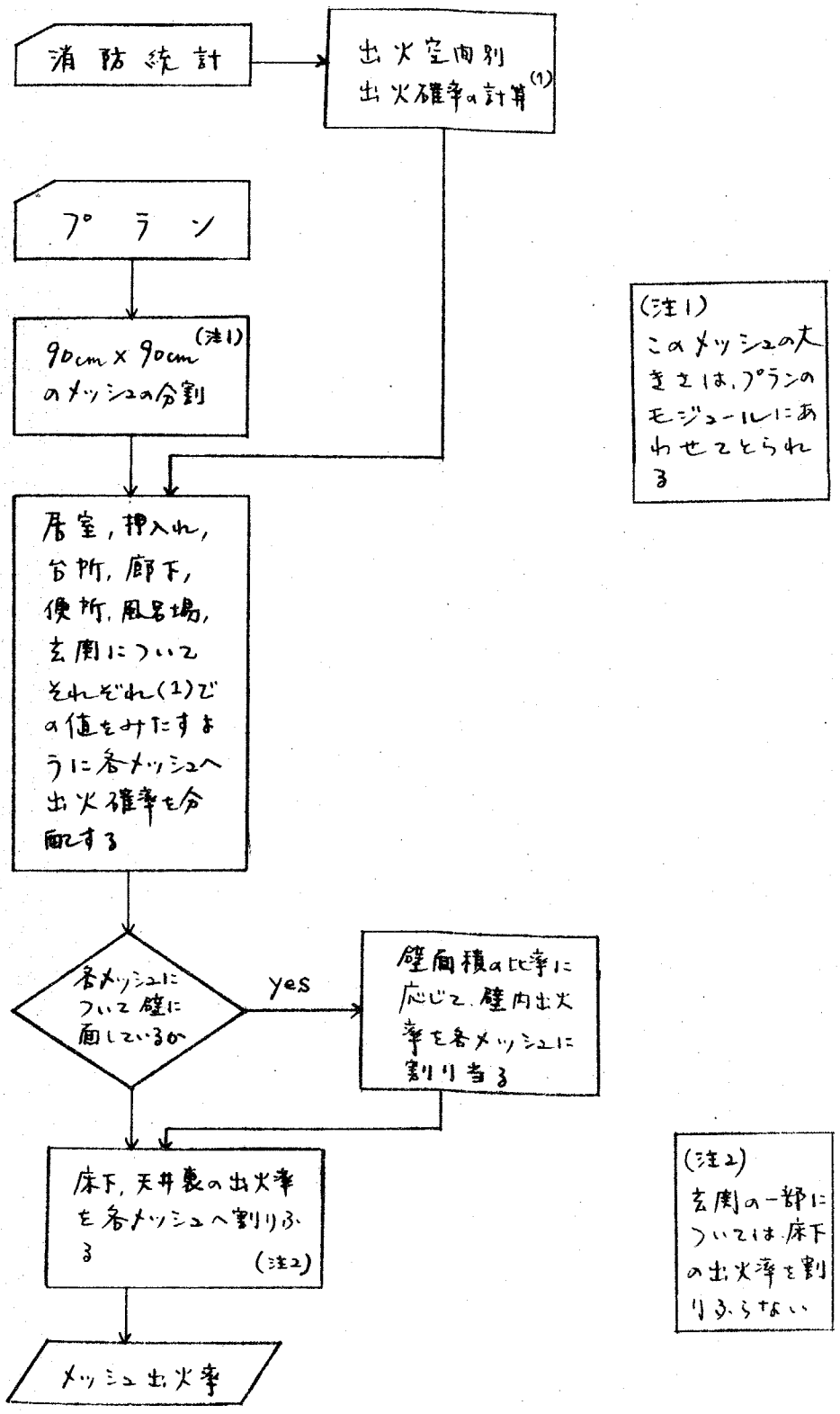


図 6-3　出火確率の割りふり方

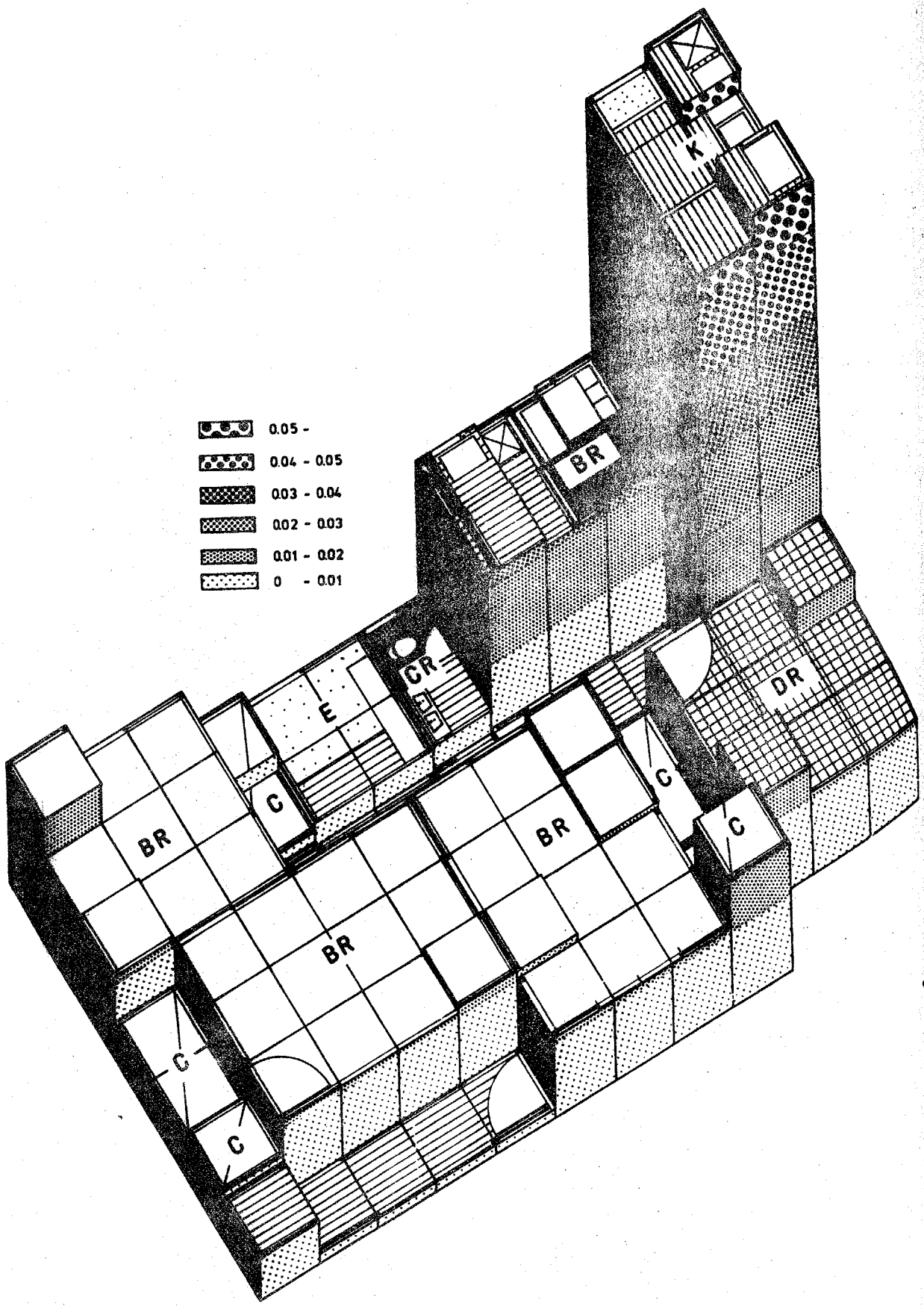


図 6-4 標準プランにおける出火確率分布

ることは，後に利用されるように，建築火災のシミュレーション等の解析に大きな役割を与えるほか，単にこの図6-4に示すようなディスプレイを用いることにより，建築設計段階において，安全対策を検討するうえでも重要な役割を演じることになると思われる。

5－1－2　火災進展の確率的記述

5－1－2－1　火災フェイズ

災害の拡大に関する種々の分析手法の応用にあたって，最も基本的な問題は災害の状態をどのように類型化し，それぞれの状態をいかに関係づけるかということである。

ここで行うのは火災の単一建物内での拡大をいくつかのフェイズに分解し，それらの関係を確率論的な見地から関係づけ，火災の拡大進行を正確に把握しようと試みるものである。

すでに森下等（文献2参照）によって，以下のようなフェイズにわけることが試みられている。

a）火源のみ

b）着火物燃焼（焼損物件2個以内）

c）室内局部

d）天井面拡大

e）全室内的

f）室間拡大

g）区画全焼

ここで，火源のみのフェイズから考えた場合に，焼損物件が生じるb）の着火物燃焼の段階から検討するという2つのケースが考えられる。まず，オーに前者の場合に

ついての数学的な定式化を行い，時刻もにおいての各状態になっている確率を求める。次に後者の場合について同様の検討を行い，最後に避難の問題を合わせて人命危険度を火災のフェイズ・アナリシスと関連づけて分析する。

5-1-2-2 火災フェイズの状態遷移

先にあげた a) から g) の7つのフェイズについて，ここでは簡単に0から6の番号を与えて記すことにする。加えて，消火された状態を番号7によって表わすことにする。すると，それぞれのフェイズに関する状態遷移は図6-5のように考えることができよう。

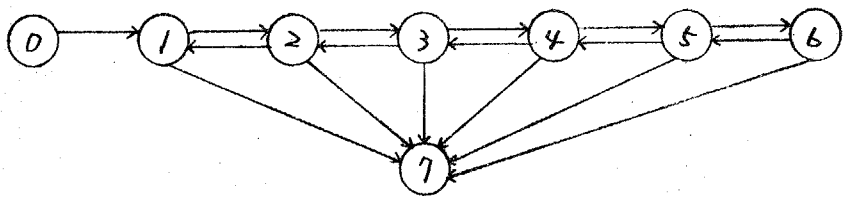


図 6-5　実際の状態遷移

しかし，このように複雑な状態遷移を考えた際，充分なデータを得ることは非常に困難である。

そこで，青木は図6-6のような構造のモデルを提案した（文献3参照）。



図6-6　連結型マルコフモデル

ここで，0は鎮火されている火災のフェイズでもある。先の図6-5に示されたモデルが，フェイズの数nに対して，3nの状態遷移に関するパラメーターを必要とするのに対して，このモデルでは2nの未知パラメーターを必要とする点でデータとの関連を得やすい。しかし，このモデルにおいて必要とされるデータは各時刻における各フェイズの状態に関するものであり，データの入手が非常に困難である。そこで，図6-5を図6-7のよう

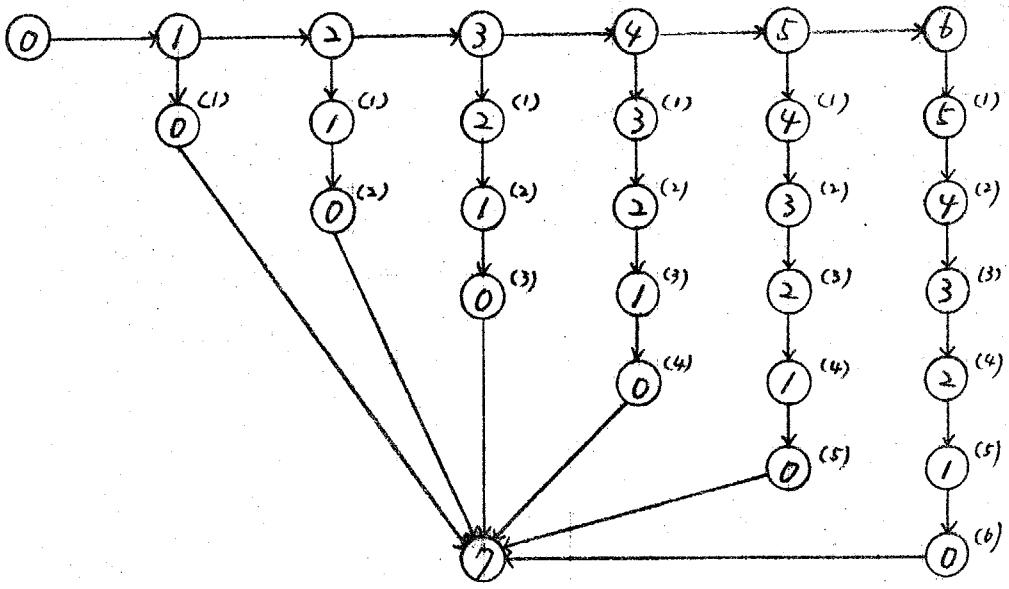


図6-7　火災フェイズの変形

に変形して考える。図6-5では、フェイズnからフェイズn-1へ一旦レベルが下がった火災は再びフェイズnの状態へともどることが可能であったのに対して、図6-7のモデルでは、一旦消火の方向に向いた火災はすべて再び火災の拡大はなされずに消火へと向っていくということを意味している。しかし、図6-7のモデルは図6-8のように簡略化して書けること、並びにデータをとる際にこのモデルにあった形でデータを分類することによって現実的な応用にはより適切な形になりうる。

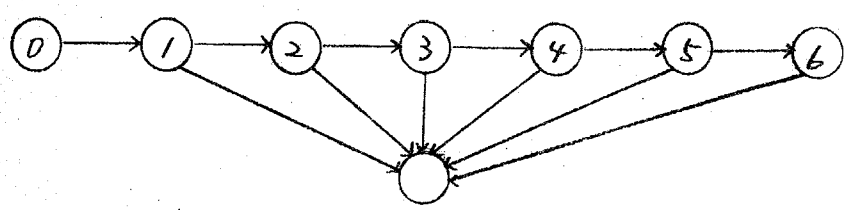


図6-8 火災フェイズの状態遷移モデル

さらに、各フェイズから消火されるケースを区別してデータを採取することが可能であるので、フェイズ7を各フェイズから消火ごとに分類し、図6-9のようなモデルを想定しておくことが望ましい。すなわち、各フェイズiになってから消火された場合、それらは状態i'の消火状態になると考えるわけである。また、火源のみのフェイズの段階からの観測は、実際の火災については不可能

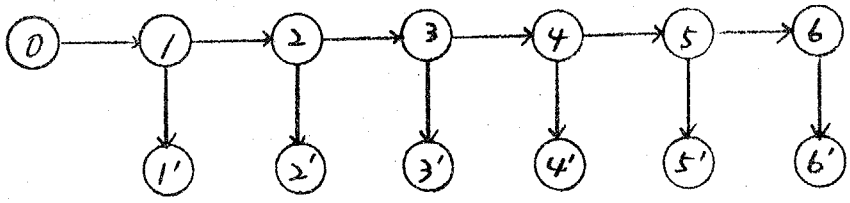


図6-9　火災フェイズの状態遷移モデル(I)

で、少くともフェイズ1すなわち着火物燃焼の状態に至っている火災データのみが入手可能であり、統計的に各パラメーターを求める際にはフェイズ0を含まないモデルすなわち火源のみの状態を除いた場合についてのモデルが必要であり、後に検討する。

5－1－2－3　火災フェイズの状態遷移確率微分方程式の導出

図6-9で与えられたモデルについて、次のような確率変量を定義しておこう。

$q_i(t)$：時刻tにおいて、火災フェイズがiである確率$(i=0\sim6)$

$p_i(t)$：時刻tにおいて、フェイズiから消火されたもの累積確率$(i=1\sim6)$

λ_i　：フェイズiからフェイズ$i+1$に至る瞬間遷移率$(i=0\sim5)$

γ_i　：フェイズiから消火される瞬間消火率

$(i=1\sim6)$

ここで，以下に与える方法論上の必要性から，現段階では，瞬間遷移率 λ_i ならびに瞬間消火率 γ_i は時間に依存しない定数であると仮定しておこう。時間の関数であると考えた場合は別の機会に述べる。それぞれの確率について，次のように考えることが可能である。

時刻 t から充分小さな時間 Δt たった場合のそれぞれの確率は，上に定義した諸変量を使うと次のように与えることが可能である。

$$g_0(t+\Delta t) = g_0(t)(1-\lambda_0\Delta t) \qquad (2-1)$$

$$g_i(t+\Delta t) = g_i(t)(1-\gamma_i\Delta t-\lambda_i\Delta t)+g_{i-1}(t)\cdot\lambda_{i-1}\Delta t \quad (i=1\sim5) \qquad (2-2)$$

$$g_6(t+\Delta t) = g_6(t)(1-\gamma_6\Delta t)+g_5(t)\lambda_5\Delta t \qquad (2-3)$$

$$p_i(t+\Delta t) = p_i(t)+g_i(t)\gamma_i\Delta t \quad (i=1\sim6) \qquad (2-4)$$

さらに，初期状態として，時刻0でフェイズ0にすべてがあったと考えれば，

$$g_0(0) = 1 \qquad (2-5)$$

$$g_i(0) = 0 \qquad i=1\sim6 \qquad (2-6)$$

$$p_i(0) = 0 \qquad i=1\sim6 \qquad (2-7)$$

まず，(2-1)式において $\Delta t \longrightarrow 0$ をとることにより

$$\frac{dg_0(t)}{dt} = -\lambda_0 g_0(t) \qquad (2-8)$$

同様に(2-2)式より

$$\frac{dg_i(t)}{dt} = -(\gamma_i + \lambda_i) g_i(t) + \lambda_{i-1} g_{i-1}(t) \quad (i = 1 \sim 5) \qquad (2-9)$$

(2-3)式から

$$\frac{dg_6(t)}{dt} = -\gamma_6 g_6(t) + \lambda_5 g_5(t) \qquad (2-10)$$

(2-4)式より

$$\frac{d}{dt} p_i(t) = \gamma_i g_i(t) \qquad (i = 1 \sim 6) \qquad (2-11)$$

ここで，より一般的に式の展開を行うために，上記の微分方程式系を以下のように表現しておこう。

$$\dot{g}_0(t) = -a_0 g_0(t) \qquad (2-12-a)$$

$$g_0(0) = 1 \qquad (2-12-b)$$

$$\left.\begin{aligned} \dot{g}_i(t) &= -a_i g_i(t) + \lambda_{i-1} g_{i-1}(t) \qquad (2-13-a) \\ g_i(0) &= 0 \qquad (2-13-b) \end{aligned}\right\} \quad i = 1 \sim 6$$

$$\left.\begin{aligned} \dot{p}_i(t) &= \gamma_i g_i(t) \qquad (2-14-a) \\ p_i(0) &= 0 \qquad (2-14-b) \end{aligned}\right\} \quad i = 1 \sim 6$$

$$a_i = \gamma_i + \lambda_i \qquad i = 1 \sim 5 \qquad (2-15-a)$$

$$a_0 = \lambda_0 \qquad (2-15-b)$$

$$a_6 = \gamma_6 \qquad (2-15-c)$$

従って，これらの微分方程式を解くことにより，

$$g_0(t) = e^{-\lambda_0 t} g_0(0) = e^{-\lambda_0 t} \qquad (2-16)$$

$$g_i(t) = e^{-a_i t} g_i(0) + e^{-a_i t} \int_0^t e^{a_i \tau} \lambda_{i-1} g_{i-1}(\tau)\, d\tau$$

$$= \lambda_{i-1} e^{-a_i t} \int_0^t e^{a_i \tau} g_{i-1}(\tau)\, d\tau \qquad (2-17)$$

$$p_i(t) = \int_0^t \gamma_i g_i(\tau)\, d\tau \qquad (2-18)$$

が得られ，さらに上の漸化式から $p_i(t)$，$g_i(t)$ を直接的な形に書きかえることができる。第 n 番目のフェイズに関して，次のように求めることができる。($n \geq 1$)

$$g_n(t) = \left(\prod_{i=0}^{n-1} \lambda_i \right) \cdot \left(\sum_{k=0}^{n} \frac{e^{-a_k t}}{\prod_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} (a_i - a_k)} \right) \qquad (2-19)$$

$$p_n(t) = \gamma_n \left(\prod_{i=0}^{n-1} \lambda_i \right) \cdot \left(\sum_{k=0}^{n} \frac{1 - e^{-a_k t}}{a_k \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} (a_i - a_k)} \right) \qquad (2-20)$$

さらに，最終的な各フェイズからの消火の割合は $t \to \infty$ とすることによって以下のように求められる。

$$p_n(\infty) = \gamma_n \left(\prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i \right) \Big/ \left(\prod_{i=1}^{n} a_i \right) \qquad (2-21)$$

また，各フェイズでの消火の時間的変化は次のように求めることができる。

$$f_n(t) = \frac{p_n(t)}{p_n(\infty)} = \lambda_0 \left(\prod_{i=1}^{n} a_i \right) \left(\sum_{k=0}^{n} \frac{1 - e^{-a_k t}}{a_k \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{n} (a_i - a_k)} \right) \qquad (2-22)$$

実際に得られるデータとして、この $f_n(t)$ に関するものと各フェイズからの消火の割合 $P_n(\infty)$ である。この2式に含まれている未知パラメーターは、先に述べたように12個あり、充分な数のデータが得られれば、(2-21)式及び(2-22)式から求めることができる。しかしながら、統計的見地から最小自乗法等の手法により、これらのパラメーターを推定する問題は非常に複雑となり、実効的でない。実際に得られるデータが着火したもののみに限られるということから、まずこれらのパラメーター推定に好ましい形のモデルを想定しておくことが望ましい。

5-1-2-4 着火後の火災フェイズの状態遷移確率微分方程式

ここでは、すでに着火してしまった場合についてのそれ以後の状態遷移についてのみ検討する。前に述べたと同じように、図6-10のように考えることができる。

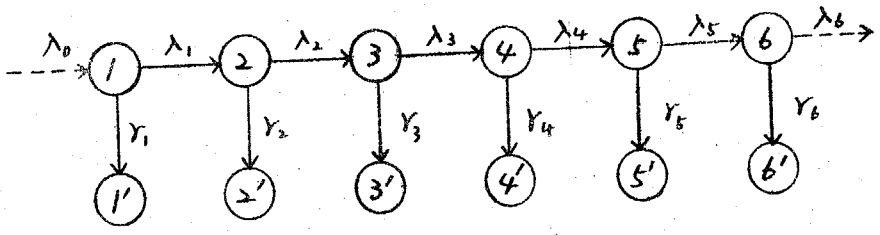


図 6-10 着火後の状態遷移

このとき、時刻 t から Δt だけたったそれぞれの確率は

以下のように表現しうる。

$$g_i(t+\Delta t) = g_i(t)(1-a_i\Delta t) + g_{i-1}(t)\cdot\lambda_{i-1}\Delta t, \quad i=1\sim 6 \qquad (2-23)$$

$$p_i(t+\Delta t) = p_i(t) + g_i(t)\,\gamma_i\Delta t \qquad i=1\sim 6 \qquad (2-24)$$

ただし,

$$a_i = \lambda_i + \gamma_i \qquad i=1\sim 6 \qquad (2-25\text{-}a)$$

$$\lambda_6 = 0 \qquad (2-25\text{-}b)$$

$$g_0(t)\cdot\lambda_0 \equiv 0 \qquad (2-25\text{-}c)$$

さらに、初期状態について

$$g_1(0) = 1 \qquad (2-26\text{-}a)$$

$$g_i(0) = 0 \qquad i=2\sim 6 \qquad (2-26\text{-}b)$$

$$p_i(0) = 0 \qquad i=1\sim 6 \qquad (2-26\text{-}c)$$

(2-23)式より

$$\frac{g_i(t+\Delta t)-g_i(t)}{\Delta t} = -a_i g_i(t) + \lambda_{i-1} g_{i-1}(t) \qquad (2-27)$$

さらに、$\Delta t \to 0$ とすることにより

$$\dot{g}_i(t) = -a_i g_i(t) + \lambda_{i-1} g_{i-1}(t) \qquad (2-28)$$

この微分方程式を解くことにより

$$g_i(t) = e^{-a_i t} g_i(0) + e^{-a_i t}\int_0^t e^{a_i\tau}\lambda_{i-1} g_{i-1}(\tau)\,d\tau \qquad (2-29)$$

ここで、初期条件(2-26)式を考えると

$$g_1(t) = e^{-a_1 t} \qquad (2-30\text{-}a)$$

$$g_i(t) = \lambda_{i-1} e^{-a_i t} \int_0^t e^{a_i t} g_{i-1}(\tau)\, d\tau \qquad (2-30\text{-}b)$$

(2-30)式で与えられる漸化式を逐次解くことにより，次の解が得られる。

$$g_n(t) = \left(\prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{e^{-a_k t}}{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n} (a_i - a_k)} \right) \qquad (2-31)$$

同様に，(2-24)式を整理して $\Delta t \to 0$ とすることにより

$$\dot{p}_i(t) = r_i g_i(t) \qquad (2-32)$$

を得る。この微分方程式の解は，初期条件を考え合せて

$$p_i(t) = \int_0^t r_i g_i(\tau)\, d\tau \qquad (2-33)$$

となる。(2-31)式の結果を代入することにより，(2-33)式は以下のようになる。

$$p_n(t) = r_n \left(\prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i \right) \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{1 - e^{-a_k t}}{a_k \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n} (a_i - a_k)} \right) \qquad (2-34)$$

さらに，最終的な各フェイズからの消火の割合は $t \to \infty$ とすることにより，次のように得られる。

$$p_n(\infty) = r_n \prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{a_k \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n} (a_i - a_k)} \qquad (2-35)$$

ここで，

$$\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{a_k \prod_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{n} (a_i - a_k)} = \frac{1}{\prod_{i=1}^{n} a_i} \qquad (2-36)$$

であることを考えると，次のように単純化される。

$$P_n(\infty) = \gamma_n \left(\prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i \right) \Big/ \left(\prod_{i=1}^{n} a_i \right) \qquad (2-37)$$

この値は先に求めた着火以前の場合も含めた時の値（(2-21)式で与えられている）と一致している。

さらに，各フェイズ内で消火の時間的動向を見ると，次のようになる。

$$f_n(t) = \frac{P_n(t)}{P_n(\infty)} = \left(\prod_{i=1}^{n} a_i \right) \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{1 - e^{-a_k t}}{a_k \prod_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{n} (a_i - a_k)} \right) \qquad (2-38)$$

または（2-36）式の結果を使って

$$f_n(t) = 1 - \left(\prod_{i=1}^{n} a_i \right) \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{e^{-a_k t}}{a_k \prod_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{n} (a_i - a_k)} \right) \qquad (2-39)$$

となる。さらに，各フェイズについて，時刻 t の段階で消火されていない確率（文献2において、残存確率 $R(t)$ という名称が与えられている）を $g_n(t)$ とすると，(2-39)式から

$$g_n(t) = \left(\prod_{i=1}^{n} a_i \right) \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{e^{-a_k t}}{a_k \prod_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{n} (a_i - a_k)} \right) \qquad (2-40)$$

を得る。以上の分析によって得られた確率関数における
パラメーター推定の問題は後に述べる。

5-1-3 火災進展の確率的尺度

5-1-3-1 平均到達時間

着火すなわちフェイズ1からおよそどの程度の時間が経過したときに、火災拡大がどのようなフェイズになっているかということをより単純に理解するために、着火後すなわち時刻0においてフェイズ1にあり、各フェイズnまでの移行に要する時間の平均値T_nをここで検討する。

時刻tにおいて、フェイズn-1よりフェイズnに移る確率（密度）を$S_n(t)$とおく。時刻tにおいて、フェイズnに移る確率はほぼこの$S_n(t)$によって決まり、その他の項目は消去可能な微小項目として考えられる。従って、次の平均時間に関する関係式をうる。

$$\int_0^\infty t S_n(t)\,dt = \int_0^\infty T_n S_n(t)\,dt \qquad (3-1)$$

または

$$T_n = \frac{\int_0^\infty t S_n(t)\,dt}{\int_0^\infty S_n(t)\,dt} \qquad (3-2)$$

一方、n-1のフェイズからの時間間隔dt内でのフェイズnへの遷移確率は

$$S_n(t)\,dt = \lambda_{n-1} g_{n-1}(t)\,dt \qquad (3-3)$$

従って，

$$T_n = \frac{\int_0^\infty t\, g_{n-1}(t)\,dt}{\int_0^\infty g_{n-1}(t)\,dt} \qquad (3-4)$$

となる。(2-31)式はパラメーターλ_i, a_iによって決まる新たなパラメーターA_{ij}を用いて、以下の式のように書を表わすことができる。

$$g_n(t) = \sum_{i=1}^{n} A_{ni} e^{-a_i t} \qquad (3-5)$$

この表現を用いると(3-4)式の分母は以下のようになる。

$$\int_0^\infty g_{n-1}(t)\,dt = \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ A_{n-1,i} \int_0^\infty e^{-a_i t}\,dt \right\} = \sum_{i=1}^{n-1} (A_{n-1,i}/a_i) \qquad (3-6)$$

また，分子項は

$$\int_0^\infty t\, g_{n-1}(t)\,dt = \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ A_{n-1,i} \int_0^\infty t e^{-a_i t}\,dt \right\} = \sum_{i=1}^{n-1} (A_{n-1,i}/a_i^2) \qquad (3-7)$$

となる。従って，フェイズnへの平均到達時間は次式で与えられる。

$$T_n = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (A_{n-1,i}/a_i^2)}{\sum_{i=1}^{n-1} (A_{n-1,i}/a_i)} \qquad (3-8)$$

この式は計算が複雑になるので，以下のような単純化が必要である。まず，A_{ni}の定義にさかのぼってみると，

(2-31)式と(3-5)式を比べることによって

$$A_{ni} = \left(\prod_{k=1}^{n-1} \lambda_k\right) \Big/ \prod_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^{n} (a_k - a_i) \qquad (3-9)$$

をうる。この式から直ちに

$$A_{ni} = A_{n-1,i} \times \frac{\lambda_{n-1}}{a_n - a_i} \qquad i = 1 \sim n+1 \qquad (3-10)$$

または

$$A_{n-1,i} = \frac{a_n - a_i}{\lambda_{n-1}} A_{ni} \qquad i = 1 \sim n-1 \qquad (3-11)$$

一方，オフフェイズからオンフェイズの存在確率は，時刻0においては0であるから，明らかに以下の関係式が得られる。

$$g_n(0) = \sum_{i=1}^{n} A_{ni} e^{-a_i \times 0} = \sum_{i=1}^{n} A_{ni}$$

$$= 0 \qquad (3-12)$$

以上の(3-11)式及び(3-12)式を用いて，次のような変形が可能である（ただし，$n \geq 2$）。

$$T_n + \frac{1}{a_n} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{a_n - a_i}{\lambda_{n-1}} \cdot A_{ni} \cdot \frac{1}{a_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{a_n - a_i}{\lambda_{n-1}} \cdot A_{ni} \cdot \frac{1}{a_i} \right)} - \frac{1}{a_n}$$

$$= \frac{a_n \sum_{i=1}^{n-1} (A_{ni}/a_i^2) \sum_{i=1}^{n-1} (A_{ni}/a_i)}{a_n \sum_{i=1}^{n-1} (A_{ni}/a_i) - \sum_{i=1}^{n-1} A_{ni}} - \frac{1}{a_n}$$

$$= \frac{a_n \sum_{i=1}^{n-1}(A_{ni}/a_i^2) - \sum_{i=1}^{n-1}(A_{ni}/a_i) + \sum_{i=1}^{n-1}(A_n/a_n) - \frac{1}{a_n}\sum_{i=1}^{n-1}A_{ni}}{a_n \sum_{i=1}^{n-1}(A_{ni}/a_i) - \sum_{i=1}^{n-1}A_{ni}}$$

$$= \frac{a_n \sum_{i=1}^{n-1}(A_{ni}/a_i^2) - \frac{1}{a_n}\sum_{i=1}^{n-1}A_{ni}}{a_n \sum_{i=1}^{n-1}(A_{ni}/a_i) - \sum_{i=1}^{n-1}A_{ni}}$$

$$= \frac{a_n \sum_{i=1}^{n}(A_{ni}/a_i^2) - \frac{1}{a_n}A_{nn} - \frac{1}{a_n}\sum_{i=1}^{n-1}A_{ni}}{a_n \sum_{i=1}^{n}(A_{ni}/a_i) - A_{nn} - \sum_{i=1}^{n-1}A_{ni}}$$

$$= \frac{a_n \sum_{i=1}^{n}(A_{ni}/a_i^2) - \frac{1}{a_n}\sum_{i=1}^{n}A_{ni}}{a_n \sum_{i=1}^{n}(A_{ni}/a_i) - \sum_{i=1}^{n}A_{ni}}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{n}(A_{ni}/a_i^2)}{\sum_{i=1}^{n}(A_{ni}/a_i)}$$

$$= T_{n+1} \qquad (3-13)$$

また，(3-8) 式より明らかに

$$T_2 = \frac{1}{a_1} \qquad (3-14)$$

(3-13) 式及び (3-14) 式より，一般に

$$T_n = \sum_{i=1}^{n-1}\frac{1}{a_i} \qquad (3-15)$$

をうる。

5－1－3－2　平均消火時間

消火までの時間の平均を各フェイズごとの消火に分類して考えてみると，上と同様の結果をうることができる。まず，次のように記号を定めておく。

$\bar{T}_n$: nフェイズからの消火についての消火までの平均時間

$U_n(t)$: 時刻tにおけるnフェイズからの消火確率

以上の定義のもとで，次のような平均時間に関する等式が得られる。

$$\int_0^\infty t U_n(t)dt = \int_0^\infty \bar{T}_n U_n(t)dt \qquad n=1\sim 6 \qquad (3-16)$$

または

$$\bar{T}_n = \frac{\int_0^\infty t U_n(t)dt}{\int_0^\infty U_n(t)dt} \qquad n=1\sim 6 \qquad (3-17)$$

一方，消火確率は次の関係式を有している。

$$U_n(t)dt = \gamma_n g_n(t)dt \qquad n=1\sim 6 \qquad (3-18)$$

(3-18)式を(3-17)式に代入することにより，次の結果をうる。

$$\bar{T}_n = \frac{\int_0^\infty t g_n(t)dt}{\int_0^\infty g_n(t)dt} \qquad (3-19)$$

(3-4)式と比較することにより

$$\bar{T}_n = T_{n+1} \qquad n=1\sim 5 \qquad (3-20)$$

また，一般に

$$\bar{T}_n = \sum_{n=1}^{n} \frac{1}{a_i} \qquad n=1\sim 6 \qquad (3-21)$$

を得る。

5－1－4　確率モデルにおけるパラメーター推定

5－1－4－1　未知パラメーター推定のためのデータ

着火後，各フェイズからの鎮火されるケースについてのデータをもとに，前述のモデルの未知パラメーターを推定することを試みる。データは文献2の研究の際に集められたものであり，昭和50年度及び昭和51年度の東京消防庁火災調査書，消防対策資料から森下によってまとめられたデータを利用させていただいた。時間単位を1分とし，各時刻毎に各フェイズから鎮火されてくるケースを計量し，先に定義した各フェイズについて時刻ｔの段階で消火されていない確率（文献2では残存確率と呼んでいる）を求めた。

この結果を図示すると図6－11のようになる。各フェイズからの鎮火の個数はフェイズ1～フェイズ6について，それぞれ23，120，80，7，47，58であり，計335のデータより成っている。フェイズ4の残存確率にバラツキがみられるのは，データ数の少ないことによると思われる。

ここに得られたデータから各フェイズ毎の消火までの時間の平均（平均消火時間）を求めることができる。分単位で鎮火時間を計測し，それぞれの頻度が表6－2に示

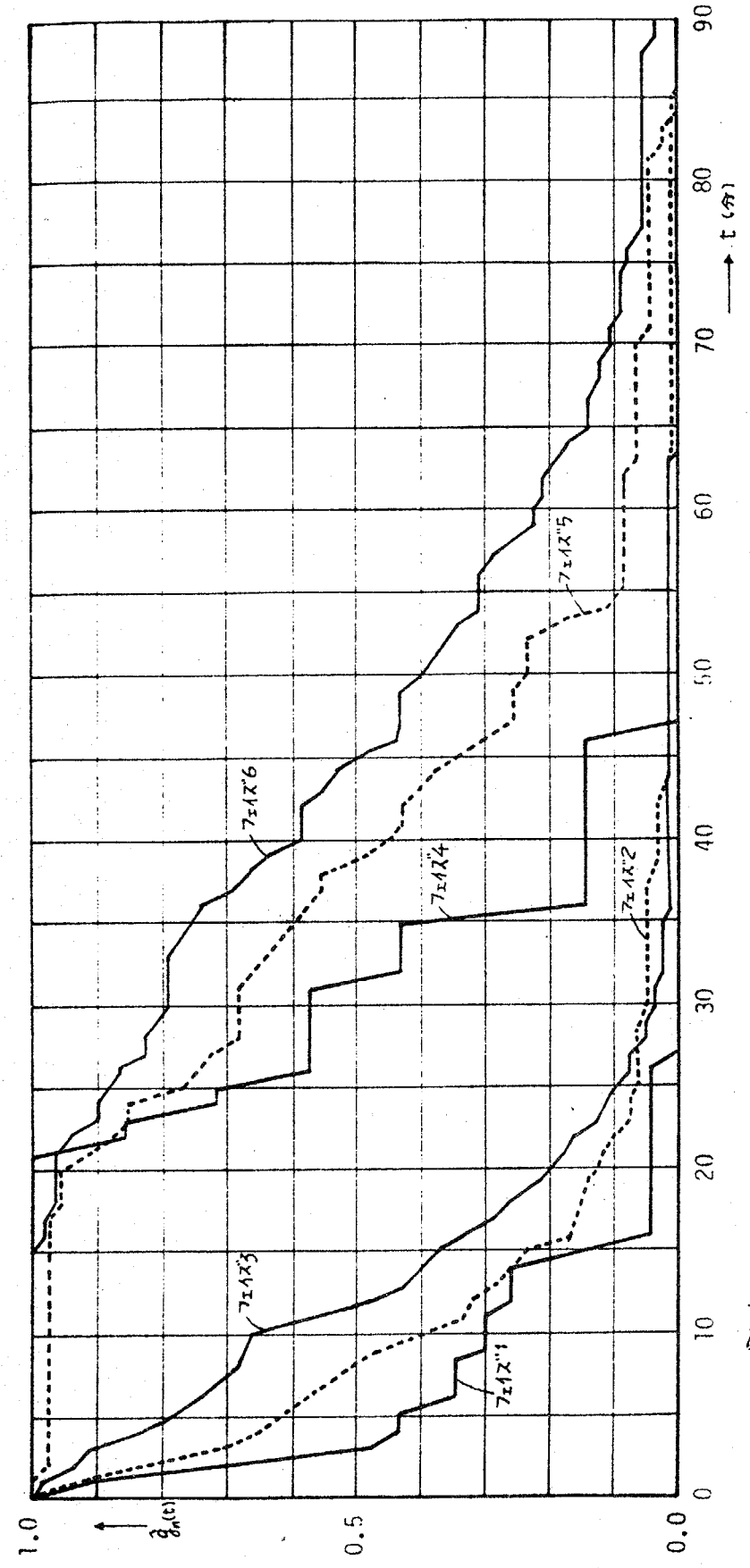


図 6-11 残存確率(データ) 全サンプル数375

められているので，それから各フェイズ毎の平均消火時間を求めると表6-3のようになる。

ところで，各フェイズの平均消火時間は「6-3 火災進展の確率的尺度」において求めた結果（(3-20)式）によって各フェイズへの平均到達時間に等しい。従って，表6-3からただちに平均到達時間が表6-4のように求めることができる。この結果を見ると，通常考えられている時間よりもかなり長い時間を要しているように思われる。たとえばフラッシュオーバーに相当する第3フェイズから第4フェイズへの遷移の行われる時間すなわち第4フェイズ到達時間の平均は14.13分となっているが，通常火災実験等で得られるフラッシュオーバーの値は建物の種別，開口条件，可燃物量に依存しているが，平均的には7分前後と考えられることが多い。この実験から得られる時間測定にはフラッシュオーバー時間に関する明確な定義は充分でない点があるとはいえ，着火時刻と各時刻による室内温度の正確な測定によるもので，それほど大きな誤差があるとは思えない。一方，表6-2に示したデータにおいては実際に火災に遭遇した住宅の鎮火後に調べられたデータであるため，以下のような誤差が介入していると考えられる。

表b-3　平均消火時間
（補正なし）

$\bar{T}_1$	7.272
$\bar{T}_2$	11.078
$\bar{T}_3$	14.130
$\bar{T}_4$	31.889
$\bar{T}_5$	39.753
$\bar{T}_6$	46.148

表b-4　平均到達時間
（補正なし）

T_2	7.272
T_3	11.078
T_4	14.130
T_5	31.889
T_6	39.753

(1) 着火(出火)時刻は厳密に測定できない。通常，覚知者の証言によるが，覚知者自身が正確な出火時刻を知りうることはまれである。また，出火時刻が覚知者によって明確にされえないときには覚知通報時刻(これは通報を受けた側，たとえば消防所で記録される)から逆算して推定されることもある。

(2) 消火時刻については消火もしくは鎮火に関する厳密な定義が一般化しているわけではなく，現場の消火作業にたずさわるものによって記録され，その際再燃の恐れがある場合は消火または鎮火とみなされないので，火災実験等で考えられているような消火時間よりもより長い時間として測定される恐れがある。

以上の2つの時刻測定に関する誤差要因は消火時間の測定に大きく影響を与えていると考えられ，そこで次節ではこの誤差要因を数理的に除去するデータ補正の問題を検討する。

5－1－4－2 時刻データに介入する誤差の補正

前項で述べたように消火時間の計測には2つのタイプの観測誤差が考えられた。すなわち出火(着火)時刻と鎮火(消火)時刻の2つの時刻計測の際に介入する誤差

があり，その2つの誤差要因を除去してより真実に近い消火時間のデータを求めることが望ましい。

まず，着火（出火）時刻をt_0とおく。また各フェイズからの消火（鎮火）時刻をt_i（$i=1\sim6$）とし，それらの観測値を$\hat{t}_i$（$i=0\sim6$）とする。以上の定義のもとで消火時刻の観測に関して，次の関係が成立する。

$$\hat{t}_i = t_i + \varepsilon_i \quad (i=0\sim6) \qquad (4-1)$$

ただし，

ε_i；観測誤差

また着火（出火）から消火（鎮火）に要する時間すなわち消火時間を各フェイズについて真の消火時間をτ_i（$i=1\sim6$），その観測値$\hat{\tau}_i$（$i=1\sim6$）とすると，先の定義から以下のように表わすことができる。

$$\tau_i = t_i - t_0 \quad (i=1\sim n) \qquad (4-2)$$

$$\hat{\tau}_i = \hat{t}_i - \hat{t}_0 \quad (i=1\sim n) \qquad (4-3)$$

一方，観測誤差ε_iの性質について考えてみよう。まず，ε_0すなわち着火（出火）時刻における誤差は前項で述べたように，覚知者の記憶あるいは覚知通報時刻からの推定などの際に混入するものであるが，全体的にみるならば，これらの推定等の結果は真の出火時刻を中心にばらついていると考えられるので，通常の誤差論で考えられ

るような次の性質をもつ確率変量と考えられる。

$$f(\varepsilon_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{\varepsilon_0^2}{\sigma_0^2}\right] \qquad (4-4)$$

すなわち出火（着火）時刻も観測する際に混入する誤差は平均値0，分散σ_0^2の正規分布をなしていると考えるわけである。さらに鎮火（消火）時刻の測定に対しては前項でみたように現場の安全側によった判断によって真の時刻よりもより遅く鎮火（消火）したと判定される可能性があり，これは消火時間t_cが大きいほど誤差の値も相対的に大きくなると考えられる。そこで今かりに各フェイズとも同じように判定されるとして相対誤差がαであると仮定して議論を展開してみよう。すなわち

$$\frac{\varepsilon_i}{t_i} = \alpha \qquad (4-5)$$

と仮定する。この仮定の重要な意味は各フェイズとも観測誤差（相対誤差）は同一であると考えた点にある。厳密に考えれば各フェイズによって観測誤差の介入の仕方も異なると考えることもできるが，異なるとしてもそれらの程度にどのような差が生じるかということを示すデータが得られない段階では，前式のように仮定しておくことが全体的な視点からはより多くの情報をうることになると思われる。また後に示すようにこの誤差αの値は

そのまま現場で消火活動にあたっている人々の鎮火時刻の判断における安全率として関連してくる。

以上の準備のもとで真の消火時間と消火時間の観測値との関係を以下のように求めることができる。まず(4-2), (4-3)式より

$$\hat{\tau}_i - \tau_i = (\hat{t}_i - \hat{t}_0) - (t_i - t_0)$$

$$= (\hat{t}_i - t_i) - (\hat{t}_0 - t_0) \qquad (4-6)$$

さらに(4-1)式より

$$\hat{\tau}_i - \tau_i = \varepsilon_i - \varepsilon_0 \qquad (4-7)$$

をうる。ところで(4-4)式で考えたように, 出火時刻観測における誤差ε_0の平均値は0に等しかったので, (4-7)式から各変数の平均をとる操作をほどこすことによって

$$m(\hat{\tau}_i) - m(\tau_i) = m(\varepsilon_i) - m(\varepsilon_0)$$

$$= m(\varepsilon_i) \qquad (4-8)$$

ただし,

$m(x)$; 変数xの平均

また(4-5)式において各変数に平均をほどこす操作を行えば,

$$m(\varepsilon_i) = \alpha \cdot m(\tau_i) \qquad (4-9)$$

が得られ, この結果を(4-8)式に代入することにより

$$m(\hat{\tau}_i) - m(\tau_i) = \alpha m(\tau_i) \qquad (4-10)$$

すなわち

$$\alpha = \frac{m(\hat{\tau}_i)}{m(\tau_i)} - 1 \qquad (4-11-1)$$

または

$$m(\hat{\tau}) = (1+\alpha)\, m(\tau) \qquad (4-11-2)$$

または

$$m(\tau) = \frac{1}{1+\alpha}\, m(\hat{\tau}) \qquad (4-11-3)$$

となる。ところで第4フェイズへの遷移はフェイズの定義からフラッシュオーバー時点に拡大すると考えられる。また前項で述べたように第4フェイズへの平均到達時間は，第3フェイズからの平均消火時間に等しいことが(3-20)式によって証明されているので，フラッシュオーバー時間 τ_f に関して次の関係式が成立している。

$$m(\tau_f) = T_4 \qquad (4-12)$$

$$T_4 = \bar{T}_3 \equiv m(\tau_3) \qquad (4-13)$$

従って，α の値は次のように求めることができる。

$$\alpha = \frac{m(\hat{\tau}_3)}{m(\tau_3)} - 1$$

$$= \frac{m(\hat{\tau}_3)}{m(\tau_f)} - 1 \qquad (4-14)$$

そこで実際にこの α の値を決定するために前項で得られ

たデータから求フラッシュオーバーの平均消火時間を求めておく。この結果は表6-5のようになる。フラッシュオーバーの平均時間は多くの実大実験あるいは内装材料における立体試験において試験されているが，後者は標準加熱曲線を用いており，実際の家屋と直接には比較することはできない。また実大火災実験の場合にしても着火方法，火災荷重，開口条件によってばらつくことが指摘されており，実際の住宅のフラッシュオーバー時刻がどのようになるかは厳密に予測することは困難であるが，7分前後，5分から10分の間と考えて，標準な場合にあてはまるのではないかと思われる。従って，フラッシュオーバー時間の平均値が5分から10分の場合について表6-5のデータより(4-14)式を使ってαを求めてみると表6-6のようになる。以上のことからαの値は

$$0.30 < \alpha < 2.43 \qquad (4-15)$$

の範囲にあり，現実的にはフラッシュオーバーの平均時間は木造7分，耐火造7分前後と考えてαの標準値として

$$\alpha_0 = 1.0 \qquad (4-16)$$

を用い，以後の分析に用いることにしたい。

以上の結果得られたαの値の意味について2，3検討

表6-5　ポストフラッシュオーバー平均消火時間

単位：分

	$\bar{t}_3$
全データ	14.130
木造	13.596
非木造*	14.505
耐火造	17.125
防火造	13.088

* 木造以外の構造タイプのすべて

表6-6　観測相対誤差αの値

m(フラッシュオーバー)	αの値					
	5	6	7	8	9	10
全データ	1.83	1.36	1.02	0.77	0.57	0.41
木造	1.72	1.27	0.94	0.70	0.51	0.36
非木造	1.90	1.42	1.07	0.81	0.61	0.45
耐火造	2.43	1.85	1.45	1.14	0.90	0.71
防火造	1.62	1.18	0.87	0.64	0.45	0.31

しておこう。(4-11-3)式より真の消火時間は $1/1+\alpha$ とな
っている。さらに(4-1)及び(4-5)式より

$$\tau_i = \hat{\tau}_i - \varepsilon_i + \varepsilon_0$$
$$= \hat{\tau}_i - \alpha\tau_i + \varepsilon_0$$

すなわち

$$\tau_i = \frac{1}{1+\alpha}\left\{\hat{\tau}_i + \varepsilon_0\right\} \qquad (4-17)$$

をうる。さらに ε_0 が $\hat{\tau}_i$ に対して充分小さいときには近
似的に

$$\tau_i = \frac{1}{1+\alpha}\hat{\tau}_i \qquad (4-18)$$

となり，観測時間 $\hat{\tau}_i$ は真の時間に比べて $1+\alpha$ 倍となっ
ていることがわかる。従って，このような状況下では観
測誤差 α_i というものは時間軸を $1/1+\alpha$ に短縮したこ
とを意味しており，もしかりに観測値の値を直接用い
て得られる瞬間遷移率，瞬間消火率等は $1/1+\alpha$ 倍され
て得られることになる。従って，この観測誤差 α はそのま
まこの確率的システム全体の性状の時間に関する尺度
を補正する安全率の役割とみなすことが可能である。
すなわち

$$\beta = 1+\alpha \qquad (4-19)$$

とおくと，この β の値をもしかりに2倍にとれば，2倍

の速さで系が進行することを意味し，避難の面からするとより危険に系が進展すると考えるわけであるから，そのような系で得られた結果を用いることは時間の進行に関して2倍の安全性を考えたことになるといえよう。先に述べたように標準的な値として $\alpha_0 = 1$ としたので，以後標準の安全率 β_0 は

$$\beta_0 = 2 \qquad (4-20)$$

である。

5－1－4－3　推定の考え方

上述のデータを用いて未知パラメーターを推定する方法としては2通りの考え方がある。ひとつは先に求めた平均消火時間 $\bar{T}_n$ と未知パラメーター a_i の関係（(3－21)）式より表6－3の値を補正して直接的に求めるものである。もうひとつの方法は以下の(4－21)式で与えられる理論値と先のデータの各時刻における残存確率 $\hat{g}_n$ とが一致するように未知パラメーターを決定する方法である。

$$g_n(t) = \left(\prod_{i=1}^{n} a_i\right)\left(\sum_{k=1}^{n} \frac{e^{-a_k t}}{a_k \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n} (a_i - a_k)}\right) \qquad (4-21)$$

前者は消火時間の平均値を求めるという意味で，後者の方法にくらべ，データの情報量を少しも用いていないといえ，また，データでは $T_i < T_{i+1}$ が成立していない場合が生じる可能性があり，このときは a_i を求めることはできない。従って，以下の節では後者による方法を用いて未知パラメータの推定を行う。また，前者によって求めた値と後者によって求めた値とを比較することにより，前者の方法でもある程度の信頼のおける推定が可能であることが後に示される。

5－1－4－4 推定アルゴリズム

まず，データから得られる残存確率 $\hat{g}_n(t)$ と（4－21）式で与えられる $g_n(t)$ がより一致するようにするということを次のように定式化する。

$$\left.\begin{aligned} &\min_{a_i,\ i=1\sim b} Q, \\ &Q = \sum_{t=1}^{tm}\sum_{n=1}^{b}\left\{\hat{g}_n(t) - g_n(t)\right\}^2 \end{aligned}\right\} \quad (4-22)$$

この定式化はいわゆる最小自乗法と呼ばれているものと同じであり，具体的には

$$\frac{\partial Q}{\partial a_i} = 0 \qquad (i = 1 \sim 6) \qquad (4-23)$$

を解くことによって未知パラメータ a_i ($i = 1 \sim 6$) を求めることができる。しかしながら，(4－23) 式の展開は非常に複雑であり，直接これらの連立方程式を解くことは容易でない。

ここでは，(4－22) 式で与えられる最小化問題を，座標方向逐次探索法と呼ばれる最小化アルゴリズムの考え方を導入し，Q を最小化する未知パラメータ a_i ($i = 1 \sim 6$) を探索によって求めるということを試みる。ここで使われる探索アルゴリズムの骨子は，Hooke と Jeeves によって与えられたアルゴリズムを変形したものである（文献4及び文献5参照）。まず，Hooke と Jeeves によって与えられたアルゴリズムを紹介しよう。まず，次の問題を想定する。

(1) ベクトル x の関数 $f(x)$ を最小とするような x を求める問題を考える。n 個の直交単位ベクトルの組を $e^{(i)}$ とし，探索ステップの長さを初期の段階で h とする。ベクトル x の初期値を $x^{(0)}$ とする。

(2) 以上の準備のもとで，新たに次のベクトルを仮定する。

$$x := x^{(i)} + h e^{(i)} \tag{4-24}$$

このとき

$$f(x) < f(x^{(i)}) \tag{4-25}$$

であれば

$$x^{(i+1)} := x \tag{4-26}$$

とし，もし(4-25)式がみたされなければ，次のようなベクトルを仮定する。

$$x := x^{(i)} - h e^{(i)} \tag{4-27}$$

ここで，再び(4-25)式で与えられる関係をチェックし，みたされれば，(4-27)式で与えられるxを新たな$x^{(i+1)}$とする。以上の2つの試みが失敗したときには，ベクトル$x^{(i)}$を加えずに次の段階に進む。

(3) もしn回の探索すなわち，(2)の試みがすべてのベクトル方向についてチェックされていないならば，(2)のプロセスを繰り返す。しがn度れになったとき，各ベクトルの直交方向をすべて探索したことになったので，n回の探索以前の状況と比較する。すなわち，

$$f(x^{(n+1)}) < f(x^{(0)}) \qquad (4-28)$$

であるかをチェックし，(4-28)式が成立していれば，新たに$x^{(n+1)}$を$x^{(0)}$と置きかえる。すなわち，

$$x^{(0)} := x^{(n+1)} \qquad (4-29)$$

また，最初の探索場所を（効率を考えて）次のようにおく。

$$x^{(1)} := x^{(n+1)} + (x^{(n+1)} - x^{(0)}) \qquad (4-30)$$

ただし，この式で示されている$x^{(n+1)}$, $x^{(0)}$は(4-29)式の入れかえを行う前の値である。

もし，(4-28)式が満たされていないとしたら，$x^{(0)}$はそのままとし，最初の探索場所$x^{(1)}$を$x^{(0)}$とする。すなわち，

$$x^{(1)} := x^{(0)} \qquad (4-31)$$

とする。ただし，このときすでに$x^{(1)}$と$x^{(0)}$が等しいのであれば，これ以降繰り返しが行われるので，意味がない。従って，その場合には探索ステップhを次のように縮めて，再び上の探索を繰り返す。

$$h := h/10 \qquad (4-32)$$

(4) 以上のプロセスを探索ステップがあらかじめ定めた値より小さくなるまで繰り返す。

以上がHookeとJeevesのアルゴリズムであり，(4-22)式で与えられるような非線形の最適問題には適している方法である。しかしながら，我々の問題では明らかに未知パラメーターは正の数であり，とくにどの値も異なっていなければならない（もし異なっていないとすれば，より単純な形に(4-21)式を書きかえることができる）。すなわち，

$$a_i \neq a_j \quad (i \neq j,\ i, j = 1 \sim 6) \qquad (4-33)$$

でなければならない。従って，上のHookeとJeevesのアルゴリズムに次の束を加える。

(1) (4-33)式をみたさない場合のfの値は非常に大きな一定値をとるものとする。

(2) 探索の際，負または0の要素をもつベクトルXはとらないようにする。

以上の2束を考慮して行う探索のアルゴリズムは，結局，図6-12に示されることになる。

上のアルゴリズムの収束性（有限ステップで終ること）は明らかであり，関数fが極端な多峰性を有していないかぎり適当な初期値により最小なfを与えるベクトルXを求めることができる。

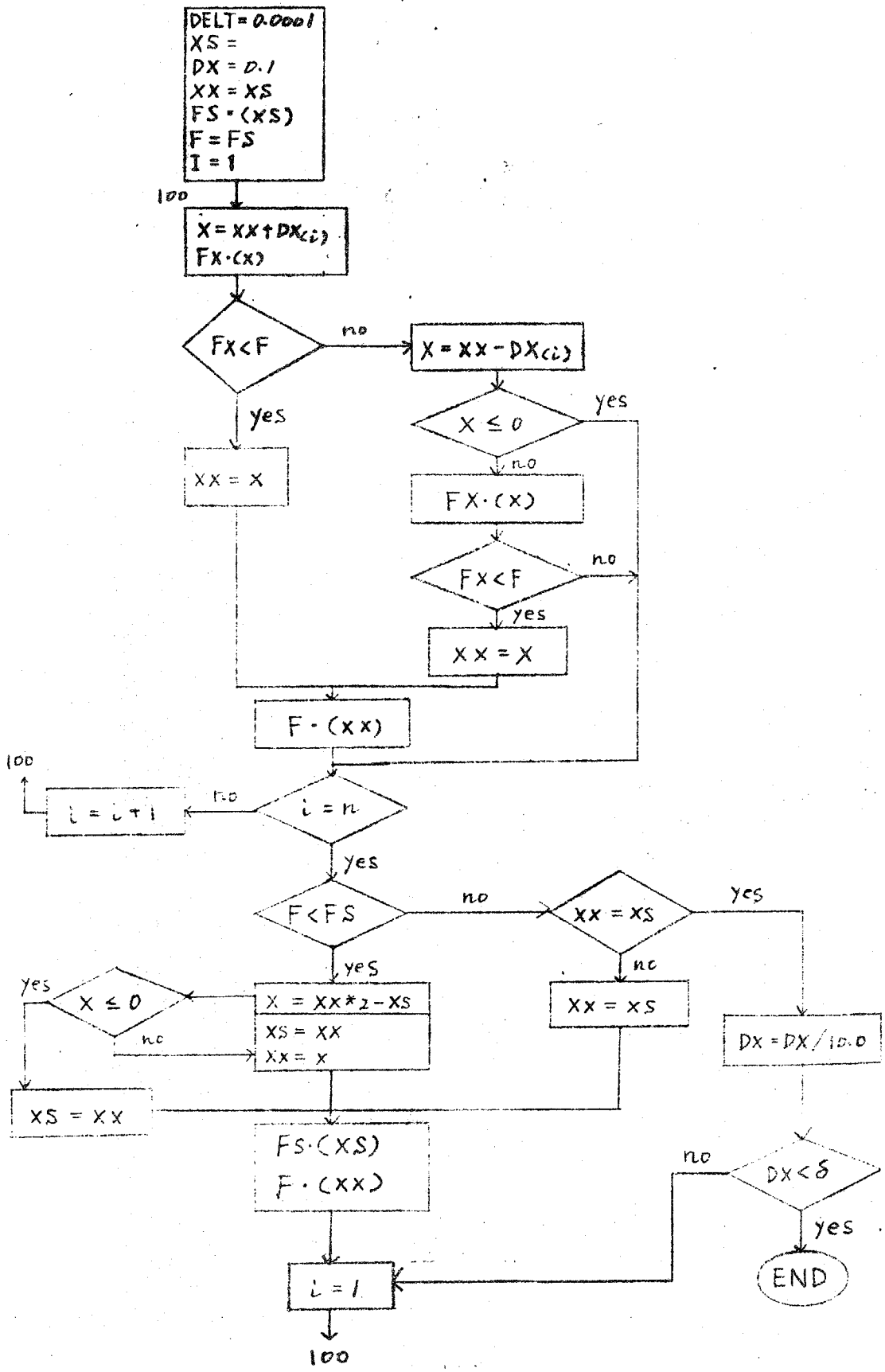


図6-12 改良HJアルゴリズム

5-1-4-5 推定結果

以上のアルゴリズムを用いて(4-22)式で与えられる問題を解くと表6-7の結果をうる。この結果を使って推定した$g_n(t)$とデータ$\hat{g}_n(t)$を図示したものが図6-13(フェイズ1~6)である。データ数の少ない第4フェイズについてはフィッティングがよくないが，その他のフェイズについてはほぼ一致した結果を得ている。

さらに推定したパラメーターa_iより(3-21)式を用いて平均消火時間を計算することができる。データから直接求めたものと比較してみると表6-8となる。この結果，データから直接得られるものと推定によるものとがほぼ一致しており，推定方法としてはとくに大きな問題はないと思われる。

5-1-4-6 瞬間消火率γ_i及び瞬間遷移率λ_iの推定

すでに求めた未知パラメーターa_iによって各フェイズからの消火されてくる確率の挙動を調べることができるが，本来の未知パラメーター瞬間フェイズ推移率λ_i及び各フェイズからの瞬間消火率γ_iは未定である。もうa_iの定義から次の関係式が得られている。

$$\lambda_i + \gamma_i = a_i \quad (i=1\sim5) \qquad (4-34-1)$$

$$\gamma_6 = a_6 \qquad (4-34-2)$$

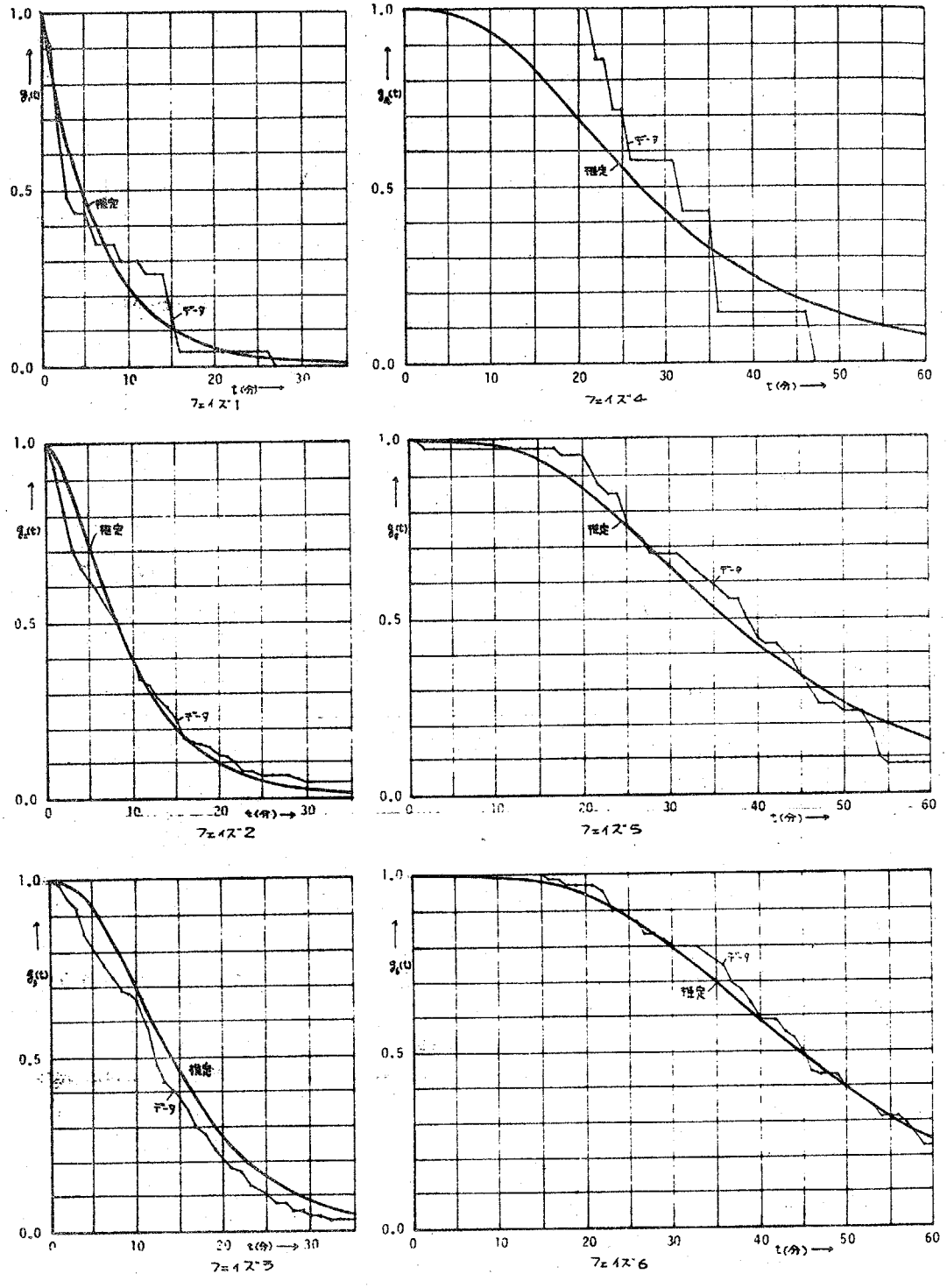


図6-13　残存確率の推定値とデータ

表 b-7　推定結果

a_1	0.2982
a_2	0.6062
a_3	0.3670
a_4	0.1298
a_5	0.2150
a_6	0.2600

($\alpha_0 = 1.0$ としたとき)

表 b-8　平均消火時間の比較

(単位：分)

フェイズ	データより直接得られる平均消火時間	推定結果を用いて得られる平均消火時間
1	3.64	3.36
2	5.54	5.01
3	7.07	7.23
4	15.94	15.28
5	19.88	20.09
6	23.07	23.93

注：(補正 $\alpha_0 = 1.0$ としている)

上の式は6個の方程式があり，11個の未知数(λ_i, $i=1\sim5$, γ_i, $i=1\sim6$)があるので，未知数を決定するにはあと5個のλ_i, γ_iに関する方程式が必要である。

ところで時間を無限大にとったときの各フェイズからの累積消火確率$P_i(\infty)$は(2-37)式で与えられており，これらの関係式から次の式を導くことができる。

$$\frac{\sum_{k=i+1}^{6} P_k(\infty)}{P_i(\infty)} = \frac{\lambda_i}{\gamma_i} \quad (i=1\sim5) \qquad (4-35)$$

すなわち

$$\gamma_i = \frac{P_i(\infty)}{\sum_{k=i+1}^{6} P_k(\infty)} \cdot \lambda_i \quad (i=1\sim5) \qquad (4-36)$$

この式を(4-34-1)式に代入して

$$\lambda_i = \frac{\sum_{k=i+1}^{6} P_k(\infty)}{\sum_{k=i}^{6} P_k(\infty)} \cdot a_i \quad (i=1\sim5) \qquad (4-37)$$

同様にして

$$\gamma_i = \frac{P_i(\infty)}{\sum_{k=1}^{6} P_k(\infty)} \cdot a_i \quad (i=1\sim5) \qquad (4-38)$$

をうる。一方，$P_i(\infty)$は全サンプル335がどのフェイズからの消火であったかという比率から決められるので，結局λ_i, γ_iは表6-9のように与えられる。これらの推定結果をみると，フェイズ1からフェイズ3までと，フ

表 6-9-1　瞬間遷移率

λ_1	$a_1 \times \frac{312}{335} = 0.2798$
λ_2	$a_2 \times \frac{192}{312} = 0.3730$
λ_3	$a_3 \times \frac{112}{192} = 0.2140$
λ_4	$a_4 \times \frac{105}{112} = 0.1216$
λ_5	$a_5 \times \frac{58}{105} = 0.1188$

表 6-9-2　瞬間消火率

γ_1	$a_1 \times \frac{23}{335} = 0.0204$
γ_2	$a_2 \times \frac{120}{312} = 0.2332$
γ_3	$a_3 \times \frac{80}{192} = 0.1530$
γ_4	$a_4 \times \frac{7}{112} = 0.0082$
γ_5	$a_5 \times \frac{47}{105} = 0.0962$
γ_6	$a_6 = 0.1300$

フェイズ4以降の性質が異なっているようにみえる。すなわちフェイズ1からフェイズ3においては，それぞれの瞬間遷移率は比較的大きく，早いスピードでフェイズ4に至るのに比較してフェイズ4以降はその移行がゆっくりとしている。これは1，2，3のフェイズが室内の段階で燃焼物が比較的少量であるのに比べ，4以降のフェイズでは燃焼物の量も増大し，室内拡大に時間を要すと考えられる。また瞬間消火率をとってみても1から3のフェイズについては比較的大きな値を示し，消しやすく，フェイズ4以降では消しにくいことを示している。とくにフェイズ2からの消火率が高い。より詳細な点については構造種別によって異なると思われるので，後に再検討する。以上のパラメーターの値の意味する性質は，フェイズ3からフェイズ4への移行がいわゆるフラッシュオーバーといわれる火災拡大上大きな変化点となっていることと対応している。

5－1－4－7　各フェイズの存在確率の挙動

先に求めた未知パラメーターを(5－31)式に代入することにより時刻tにおいてフェイズiに存在する確率$g_i(t)$を数値的に求めることができる。代入した結果は以下のようになる。

$$g_n(t) = \sum_{i=1}^{n} A_{ni}\, e^{-a_i t} \qquad (4-39)$$

という形となり，これらの結果を図示すると図6-14となる。この図からわかるように2～3分経過の段階でフェイズ2の存在確率が最大となり，約5分経過のときフェイズ3の存在確率がピークとなる。ほぼ10分経過のときにフェイズ4の存在確率が続いてピークとなる。これらの結果は初期火災の拡大を確率的に示しているものである。従って，各時間毎にこれらのフェイズの火災的性質が対応しているので，それぞれの対策がどの段階で有効かを検討することができる。

各フェイズへの火災拡大の進行を単純に把握するために平均到達時間を(3-15)式に従って求めてみると表6-10のようになる。図6-14の結果とこの平均到達時間とを比較してみると，フェイズ2については平均到達時間が滞留確率のピークよりうしろにあり，フェイズ3は平均到達時間とピークがほぼ一致し，フェイズ4についてはピークよりも平均値の方が前にある。従って，より細かい火災の挙動を検討する際には平均時間を用いる場合よりも滞留確率を用いて検討した場合の方がより確実な結果をうることになる。

表6-10　推定結果より得られる
平均到達時間

（単位：分）

T_2	3.36
T_3	5.01
T_4	7.73
T_5	15.43
T_6	20.09

（注：補正率 $\alpha_0=1$ としている）

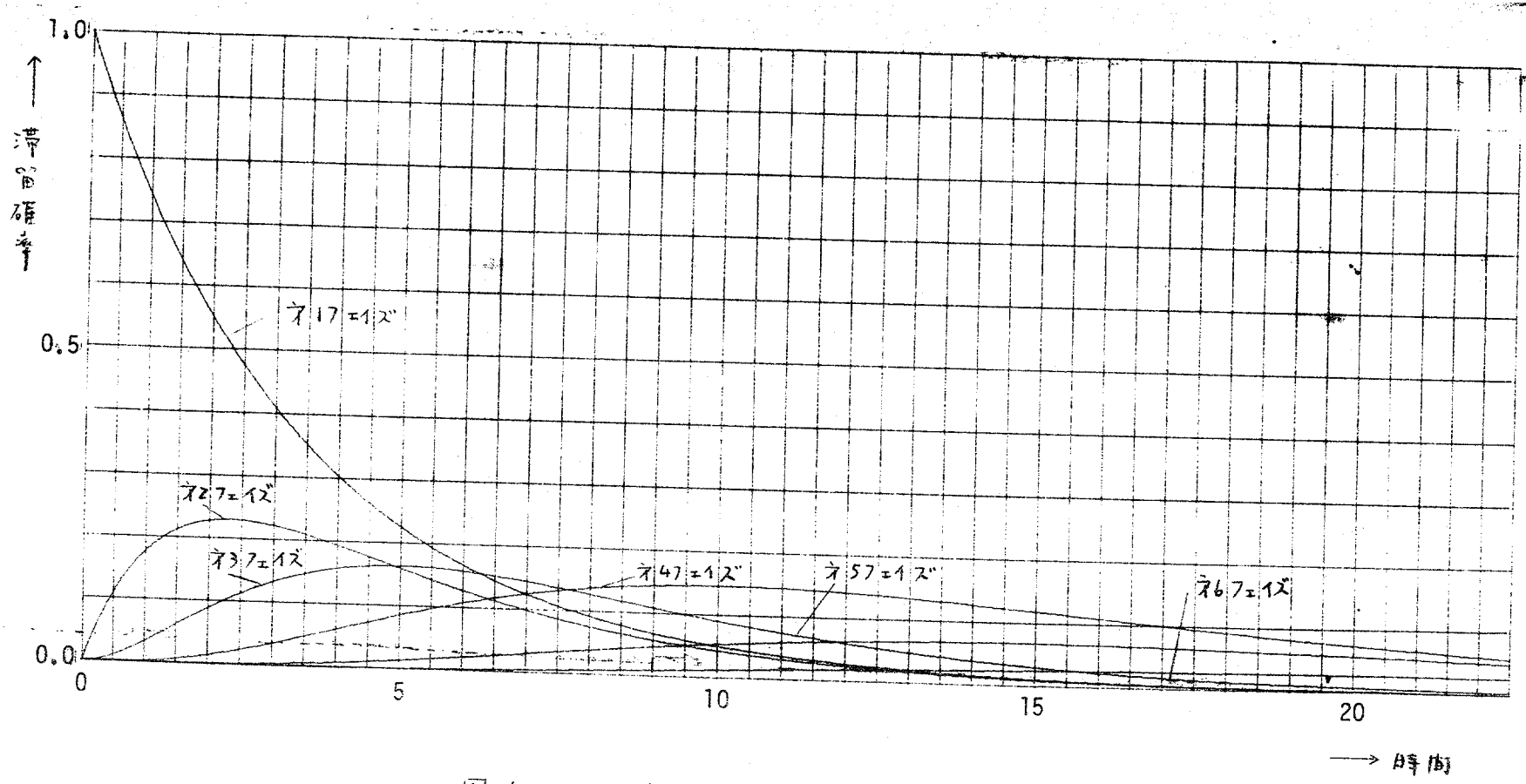


図 6-14　各フェイズの滞留確率の挙動

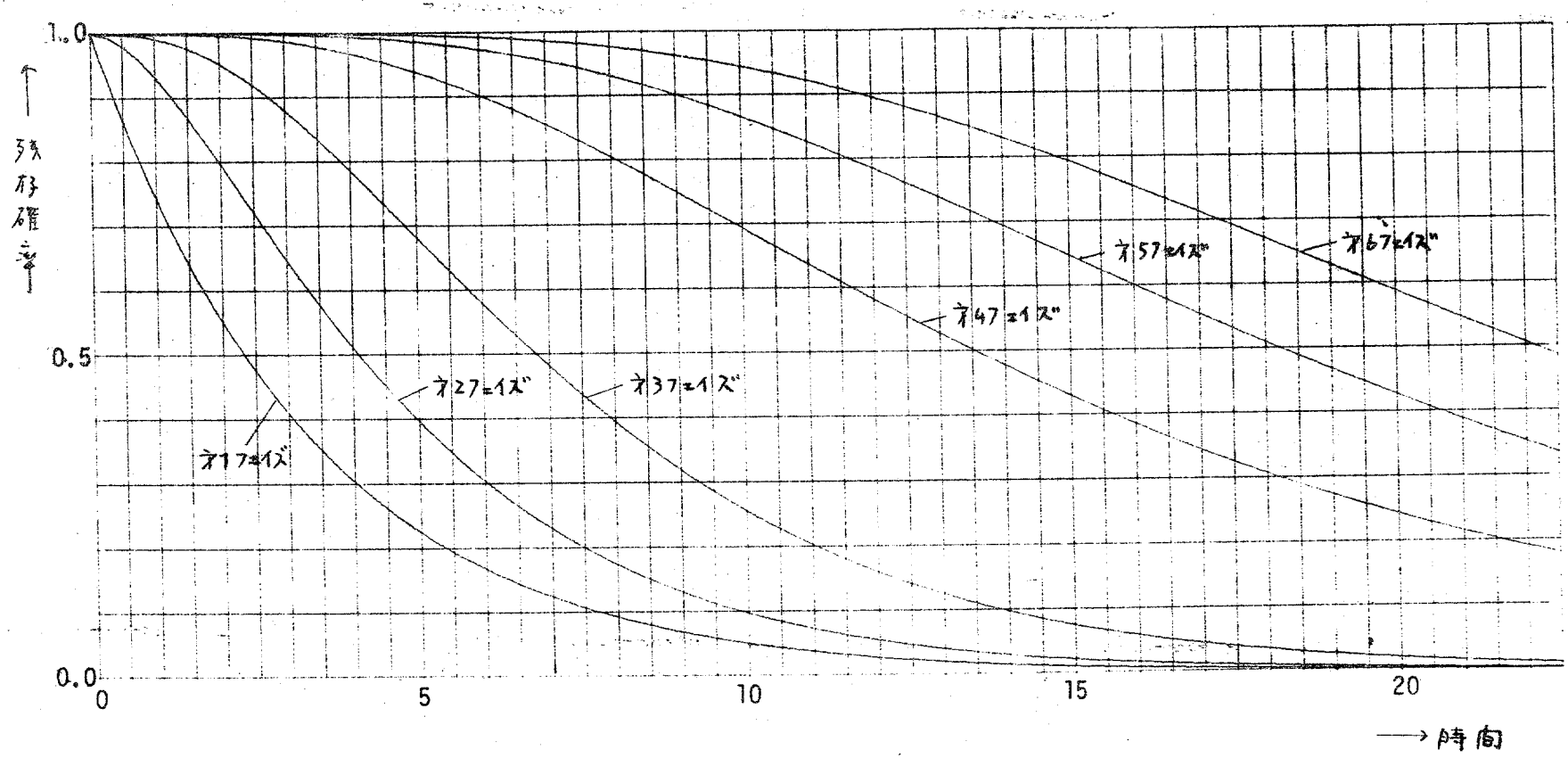


図 6-15　各フェイズの残存確率

また，オ1フェイズからオ3フェイズとオ4フェイズ以降がピーク時間においてもその性格を異にしていることが図6-14からわかる。すなわちフェイズ4以降の滞留確率のピークは明確でなく，その時間も10分以降になっている。こうしたフェイズ4以降の違いは，先の瞬間消火率，瞬間遷移率においてもその傾向の差が見られた。また図6-15には推定による各フェイズの残存確率曲線が示されているが，オ1フェイズからオ3フェイズの残存確率曲線とオ4フェイズ以降のそれとは離れた位置に示されていることがわかる。こうしたことからフラッシュオーバー以前と以後の質的な差が確率論的に把握されたといえよう。

5-1-4-8 ウェイト付け推定

先に「5-1-4-3 推定の考え方」のところで，パラメーターの推定方法として各フェイズのデータより得られる残存確率曲線 $g_i(t)$（図6-11）により一致するようにパラメーターを決定する方法を試みた。その際，(4-22)式を最小化する問題として推定アルゴリズムを構成した。ところが各フェイズの残存確率曲線 $g_i(t)$ を求める際に利用したデータのサンプル数は各フェイズによって異なっており，データの多いフェイズと少ないフェイズとが

同じウェイトで推定されてしまうために，データの少ないフェイズのバラツキが全体のフェイズのパラメーター推定結果に好ましくない影響を与える。このことは次項で分析するように，各構造種別毎に分析を試みる際に各フェイズのデータ数が小さくなり，その結果として上記の小サンプルのフェイズのバラツキの影響が強く，全体のパラメーター推定に影響してしまうことになってくるので注意せねばならない問題といえる。

以上の難点を避けるために各フェイズのデータから直接得られた残存確率曲線 $\hat{g}_i(t)$ と推定する $g_i(t)$ との誤差について各フェイズのデータ数によるウェイトをつけることを考える。すなわち，(4-22)式で与えられる最小化問題のかわりに次のように定式化する。

$$\underset{a_i\ i=1\sim b}{\mathrm{Min}}\ Q_w,$$

$$Q_w = \sum_{t=1}^{tm}\sum_{n=1}^{b}\left[\left\{\hat{g}_n(t) - g_n(t)\right\}^2 \cdot d_n\right] \qquad (4-40)$$

ただし，

d_n; n フェイズのデータ数

推定アルゴリズムについては「5-1-4-4 推定アルゴリズム」において述べた方法と同じであり，最小化すべき Q のかわりに Q_w を用いるだけである。

5-1-4-9 各構造タイプによる火災進展の差

以上みてきた分析はデータにおける標本の性質，この場合でいうと木造の火災におけるデータなのか，耐火造における火災のデ

ータなのかといった実が区別せずに行われてきた。しかしながら火災進展の傾向はこうした構造種別による発因の差に大きく起因しており，ここでは構造種別毎にパラメータ推定を行い，火災進展の確率的挙動の構造種別による差について検討したい。

データを構造種別に分けることによりデータ数が小さくなるので，当然前項で検討したウェイト付け方法による推定を行った。構造種別としては木造，耐火造，防火造とし，簡易耐火造はデータ数が少ないので除外したが，耐火造，防火造，簡易耐火造を含めたデータを非木造という構造タイプとして推定を行った。

推定結果は表6-12に示されている。まず，平均到達時間を検討してみると図6-19となる。この結果，木造は早い時間にオ2フェイズに到達し，やや時間をかけてオ3フェイズに到達する。しかし，フラッシュオーバーに相当するオ4フェイズへの到達は他の構造種別よりも早い。耐火造はオ2フェイズへの到達が遅いが，オ3フェイズへの到達は早い。しかし，フラッシュオーバーに相当するオ4フェイズへの到達時間は長く，安全上有利であることが示されている。防火造は耐火造と木造の中間的な性質を持っているということが，この図からもみてとれることができる。オ2フェイズとオ3フェイズの到達時間の差が耐火造，防火造については小さいので，推

造種別による要因の差に大きく起因しており，ここでは構造種別毎にパラメータ－推定を行い，火災進展の確率的挙動の構造種別による差について検討したい。

データを構造種別に分けることによりデータ数が小さくなるので，当然前項で検討したウェイト付け方法による推定を行った。構造種別としては木造，耐火造，防火造とし，簡易耐火造はデータ数が少ないので除外したが，耐火造，防火造，簡易耐火造を含めたデータを非木造という構造タイプとして推定を行った。

推定結果は表6－12に示されている。まず，平均到達時間を検討してみると図6－19となる。この結果，木造は早い時間にオ2フェイズに到達し，やや時間をかけてオ3フェイズに到達する。しかし，フラッシュオーバーに相当するオ4フェイズへの到達は他の構造種別よりも早い。耐火造はオ2フェイズへの到達が遅いが，オ3フェイズへの到達は早い。しかし，フラッシュオーバーに相当するオ4フェイズへの到達時間は長く，安全上有利であることが示されている。防火造は耐火造と木造の中間的な性質を持っているということが，この図からもみとれることができる。オ2フェイズとオ3フェイズの到達時間の差が耐火造，防火造については小さいので，推

表 6-12-1 ウェイト付け方法によるパラメータ推定値

本造

フェイズ	n_i	T_i	a_i	λ_i	γ_i	$\hat{T}_i$
1	11	2.639	0.4322	0.4074	0.0248	2.314
2	46	7.433	0.2470	0.1842	0.0628	6.362
3	58	6.789	2.1720	1.2388	0.9332	6.822
4	2	11.500	0.1606	0.1564	0.0042	13.049
5	27	19.555	0.1308	0.0837	0.0047	20.692
6	48	24.812	0.2464	———	0.2464	24.750

表 6-12-2 ウェイト付け方法によるパラメータ推定値

非本造

フェイズ	n_i	T_i	a_i	λ_i	γ_i	$\hat{T}_i$
1	12	4.578	0.2416	0.2213	0.0203	4.139
2	74	4.553	10.4155	4.5319	5.8835	4.235
3	22	7.253	0.2876	0.1766	0.1110	7.712
4	5	17.700	0.1264	0.1083	0.0181	15.624
5	20	18.525	0.3216	0.1072	0.2144	18.734
6	10	20.350	0.4295	———	0.4295	21.062

表 6-12-3 ウェイト付け方法によるパラメーター推定値

耐火造

フェイズ	n_i	T_i	a_i	λ_i	r_i	$\bar{T}_i$
1	8	4.875	0.2191	0.1957	0.0234	4.565
2	47	4.700	165.6512	49.4481	116.2031	4.571
3	8	8.563	0.2308	0.1385	0.0923	8.903
4	1	18.000	0.1321	0.1211	0.0110	16.471
5	11	19.565	0.2824	0.0000	0.2824	20.012
6	0	———	0.3120	———	0.3120	23.169

表 6-12-4 ウェイト付け方法によるパラメーター推定値

防火造

フェイズ	n_i	T_i	a_i	λ_i	r_i	$\bar{T}_i$
1	4	4.000	0.2908	0.2729	0.0179	3.439
2	26	4.062	3.5460	2.0346	1.5114	3.721
3	14	6.544	0.3056	0.1834	0.1222	6.993
4	4	17.625	0.1228	0.0994	0.0234	15.138
5	9	17.261	0.3730	0.1755	0.1975	17.819
6	8	22.000	0.2236	———	0.2236	22.291

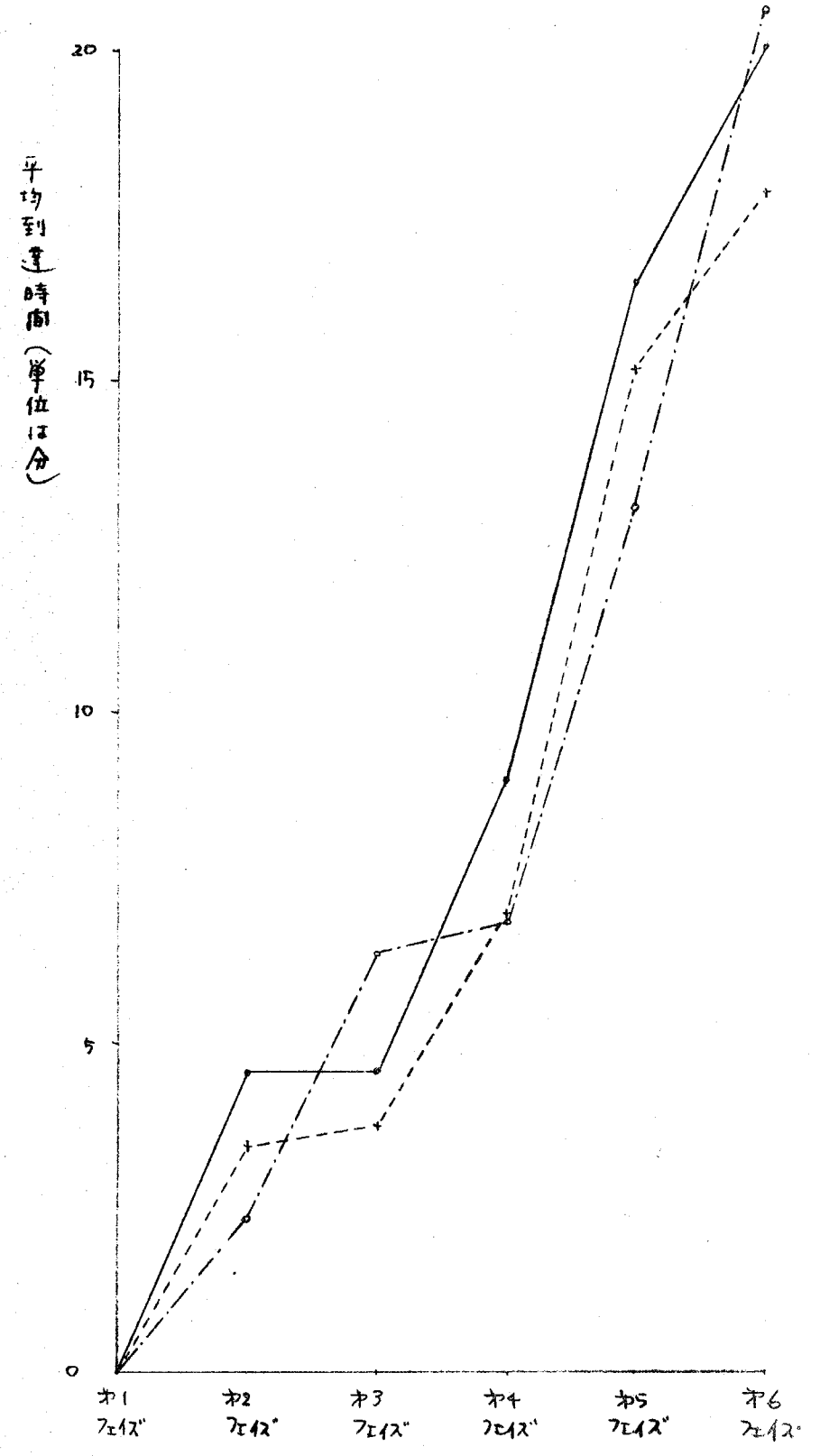


図 6-19 各フェイズ平均到達時間の構造別の差（推定結果より）
実線：耐火造　点線：防火造　一点鎖線：木造

定方法による影響が考えられるが，図6－20に示されているように直接平均到達時間をデータから計算した場合についてもこの傾向を持っており，これは推定方法による影響ではないといえる（耐火造のデータではオ3フェイズの平均到達時間がオ2フェイズのそれよりも小さくなっているという矛盾した結果となっているが，推定した結果はこうした矛盾が補正されていることが注目される）。

滞留確率の挙動が各構造種別毎に図6－21に示されている。この結果，構造種別により火災進展の状況が異なることがわかる。木造についてはオ2フェイズにおける滞留確率が大きく，ゆっくりオ3フェイズに至るが，耐火造においてはオ2フェイズにとどまっている確率は非常に小さく，オ3フェイズにすぐに移行するか，もしくは消火されてしまう。防火造においてもオ2フェイズにとどまっている確率は小さい。木造においてオ3フェイズに滞留する確率は小さい。逆に耐火造，防火造においてはオ3フェイズにとどまっている確率が大きくなっている。このことはオ3フェイズからオ4フェイズの移行すなわちフラッシュオーバーに至る場合，木造はたやすくフラッシュオーバーになるのに反して，防火造，耐火

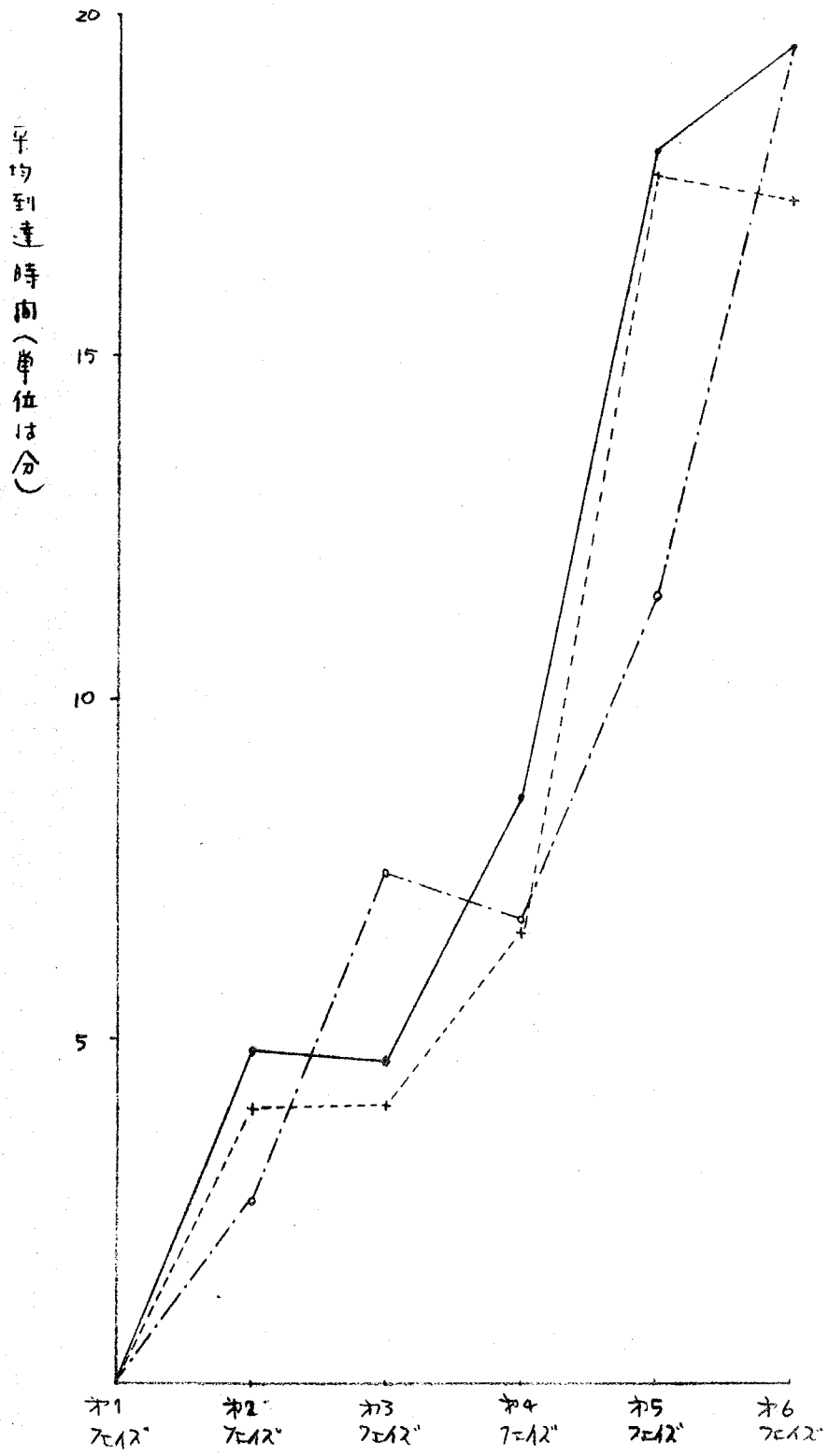


図 6-20 各フェイズ平均到達時間の構造別の差（データから直接計算）
実線；耐火造　点線；防火造　一点鎖線；木造

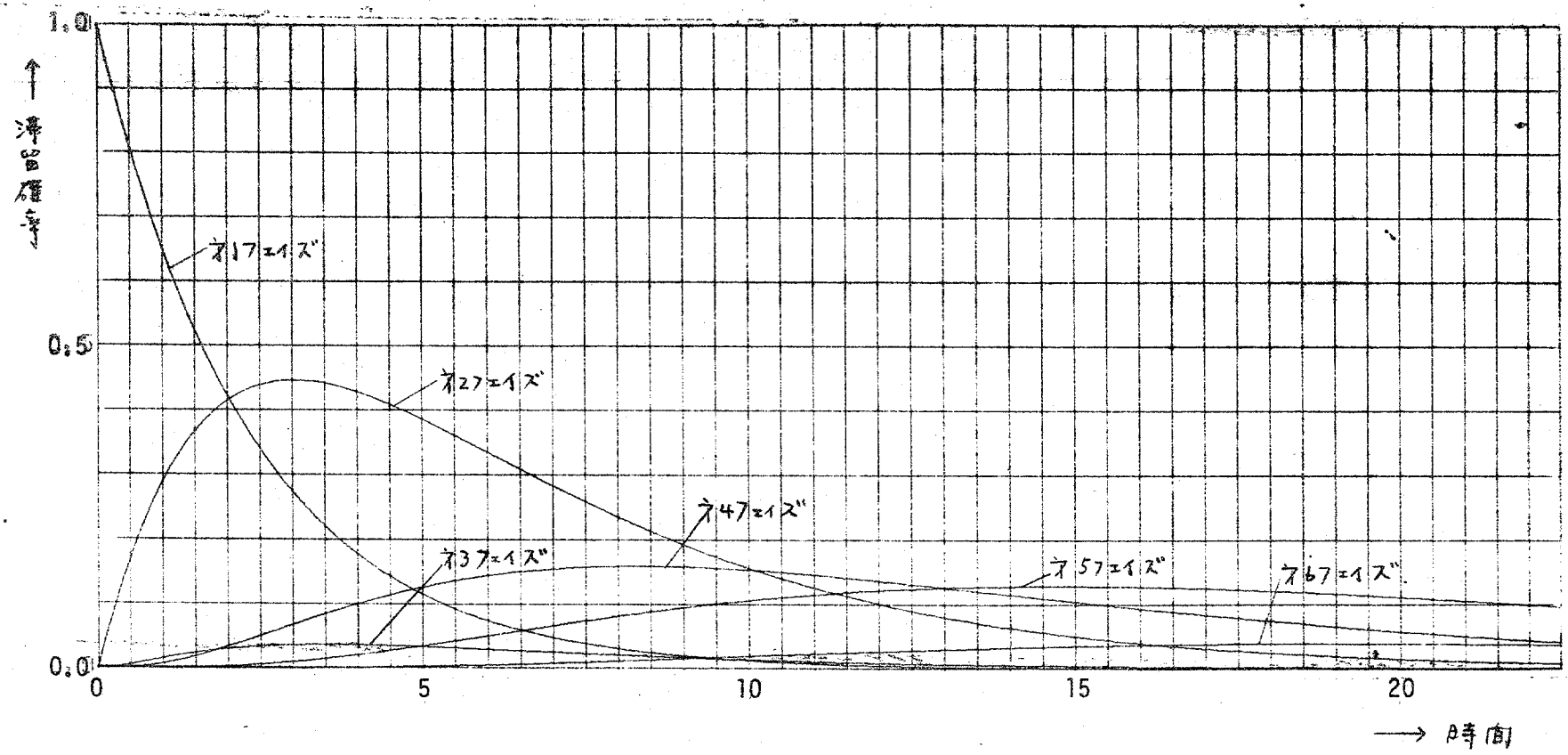


図 6-21-1　　木生における滞留確率の挙動（ウェイト付け推定）

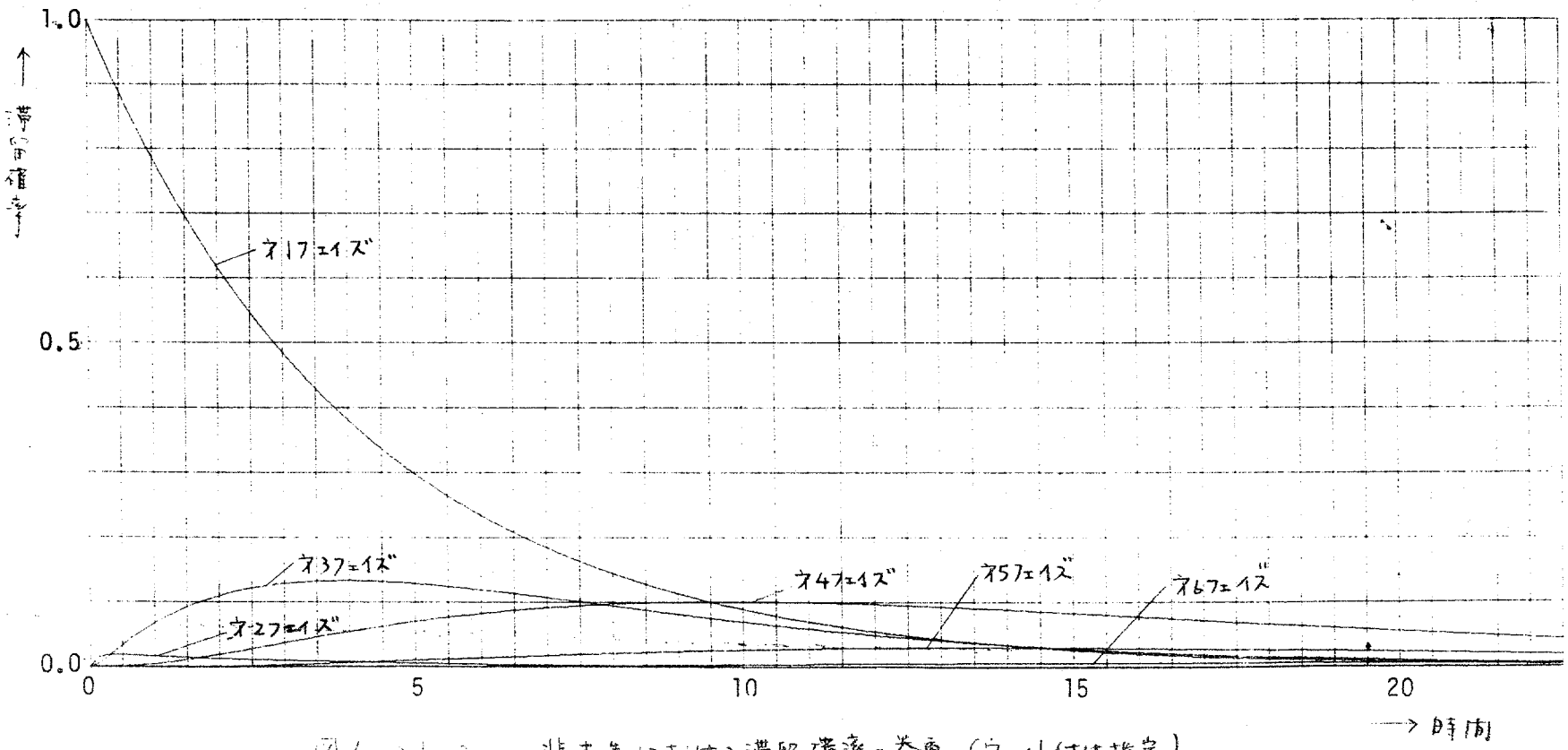


図6-2-2　非本走における滞留確率の挙動（ウェイト付け推定）

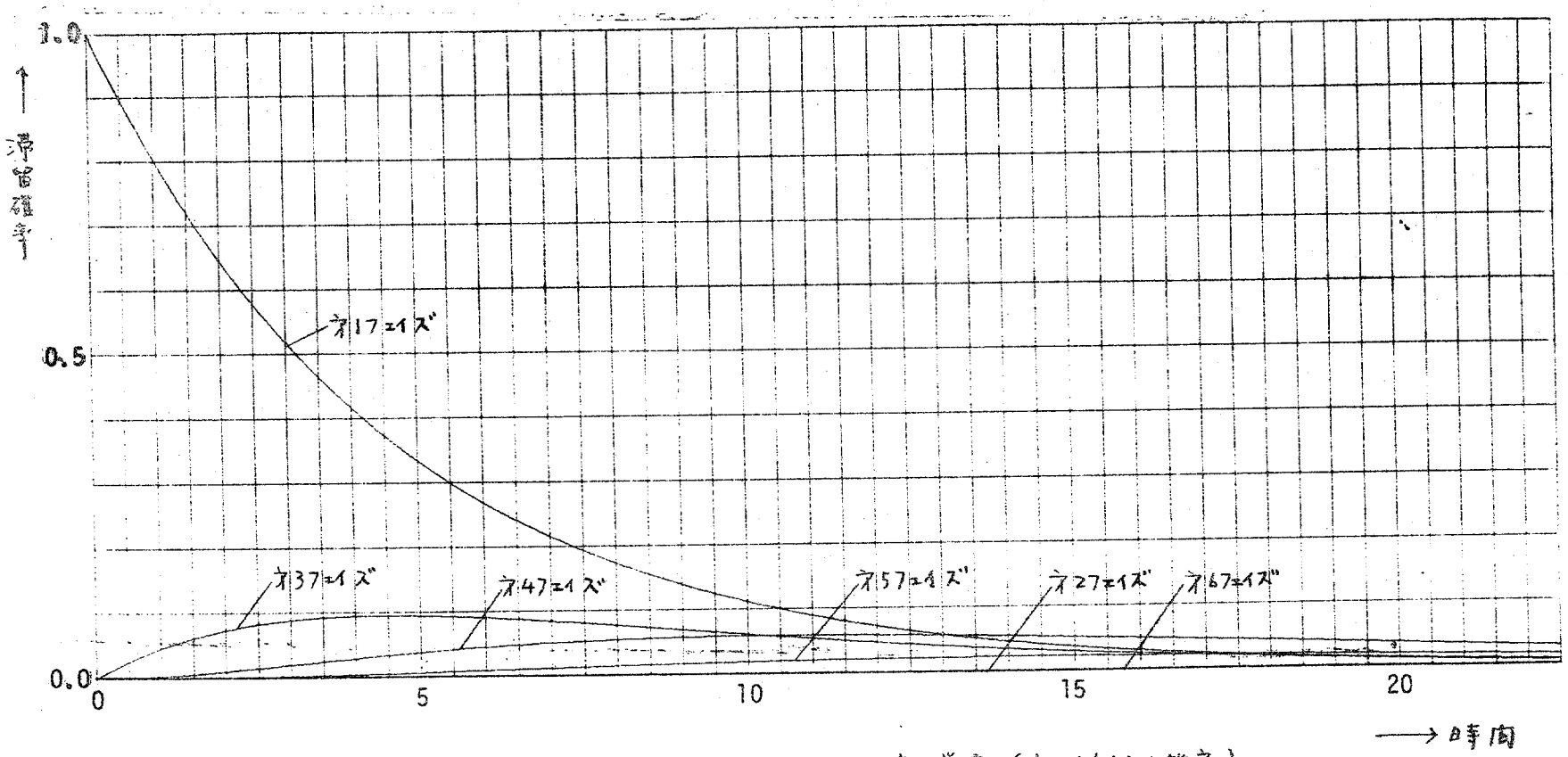


図 6-21-3　耐水道における滞留確率の挙動（ウェイト付け推定）

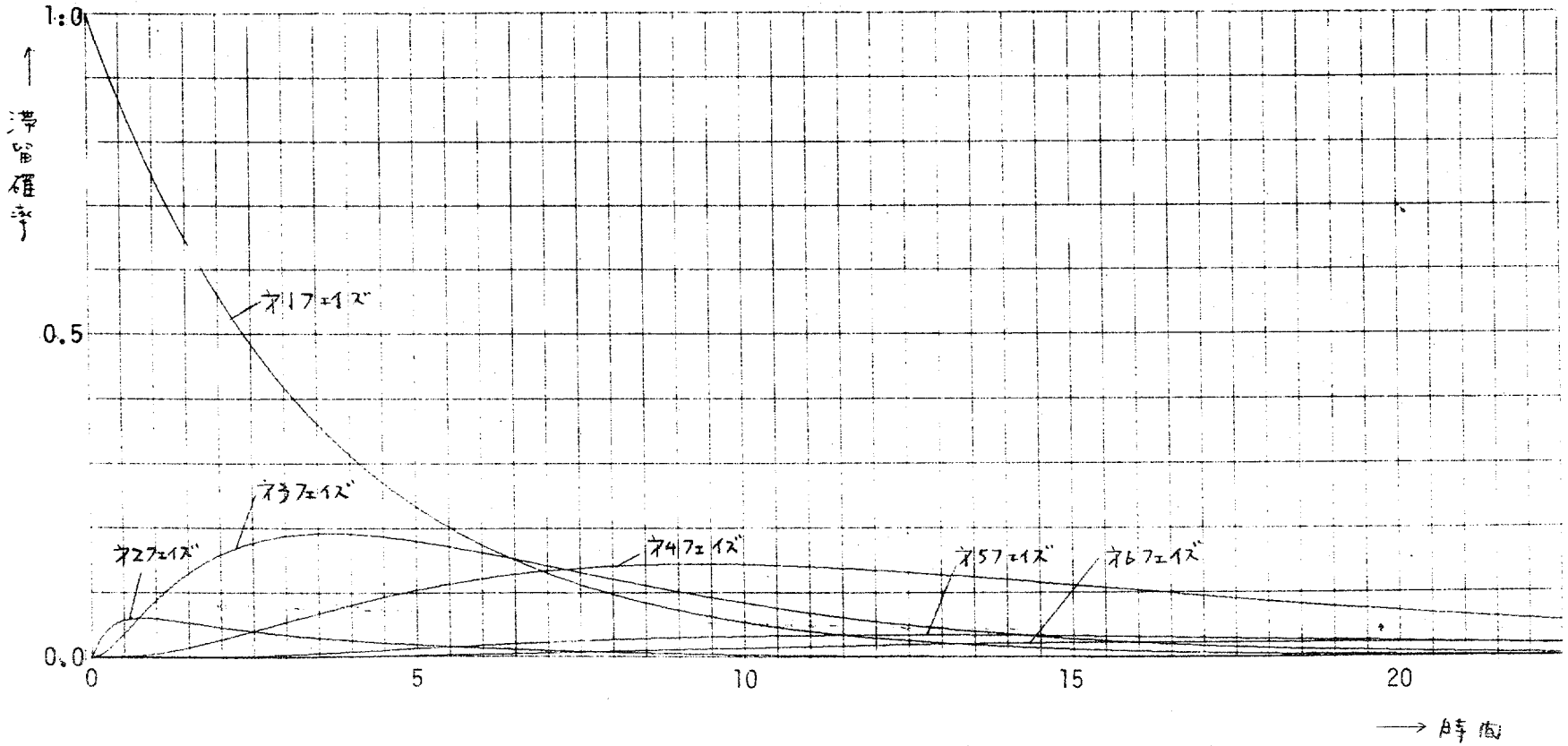


図 6-2|-4　　貯水池における滞留確率の挙動（ウェイト付け推定）

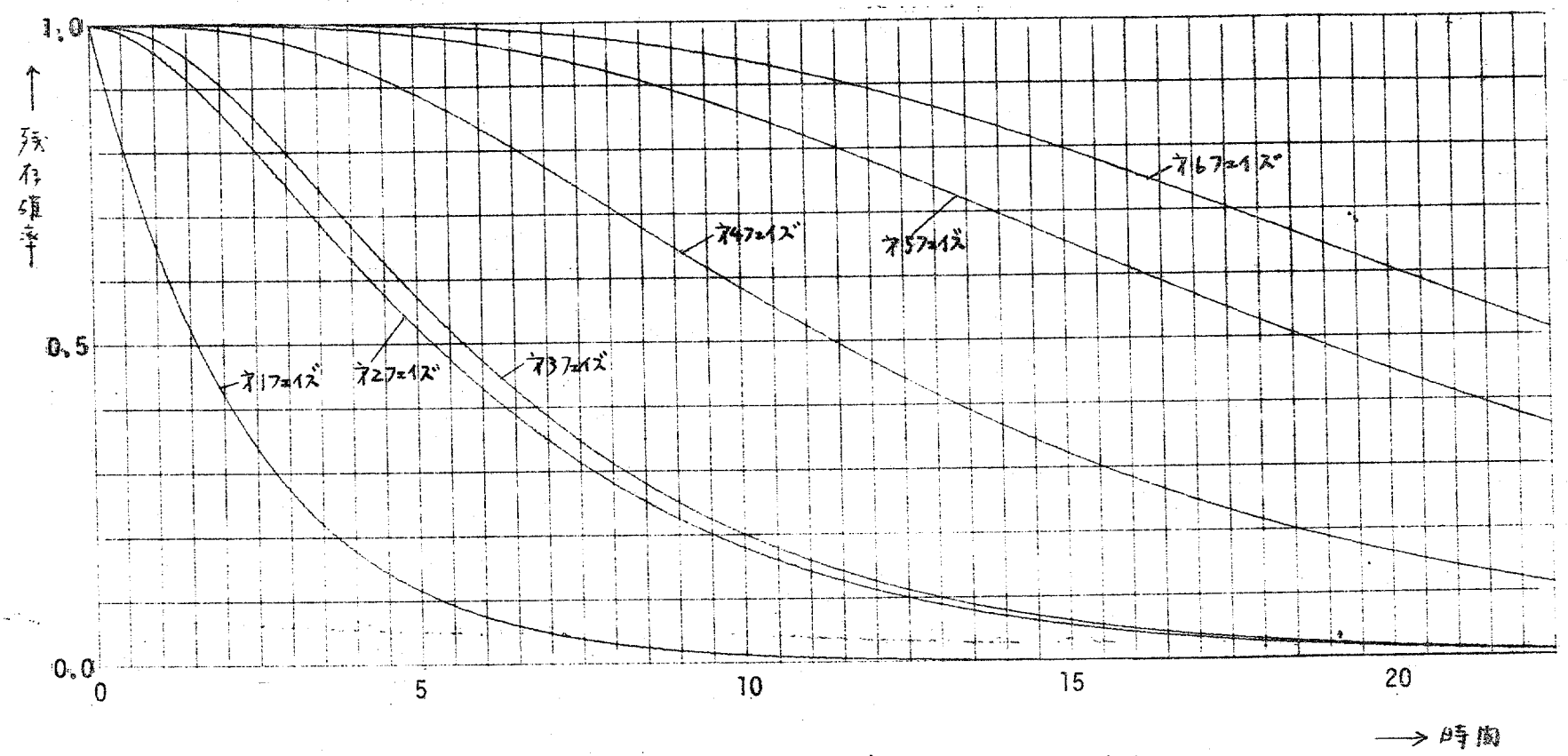


図 6-22-1　　木造における残存確率（ウェイト付け推定）

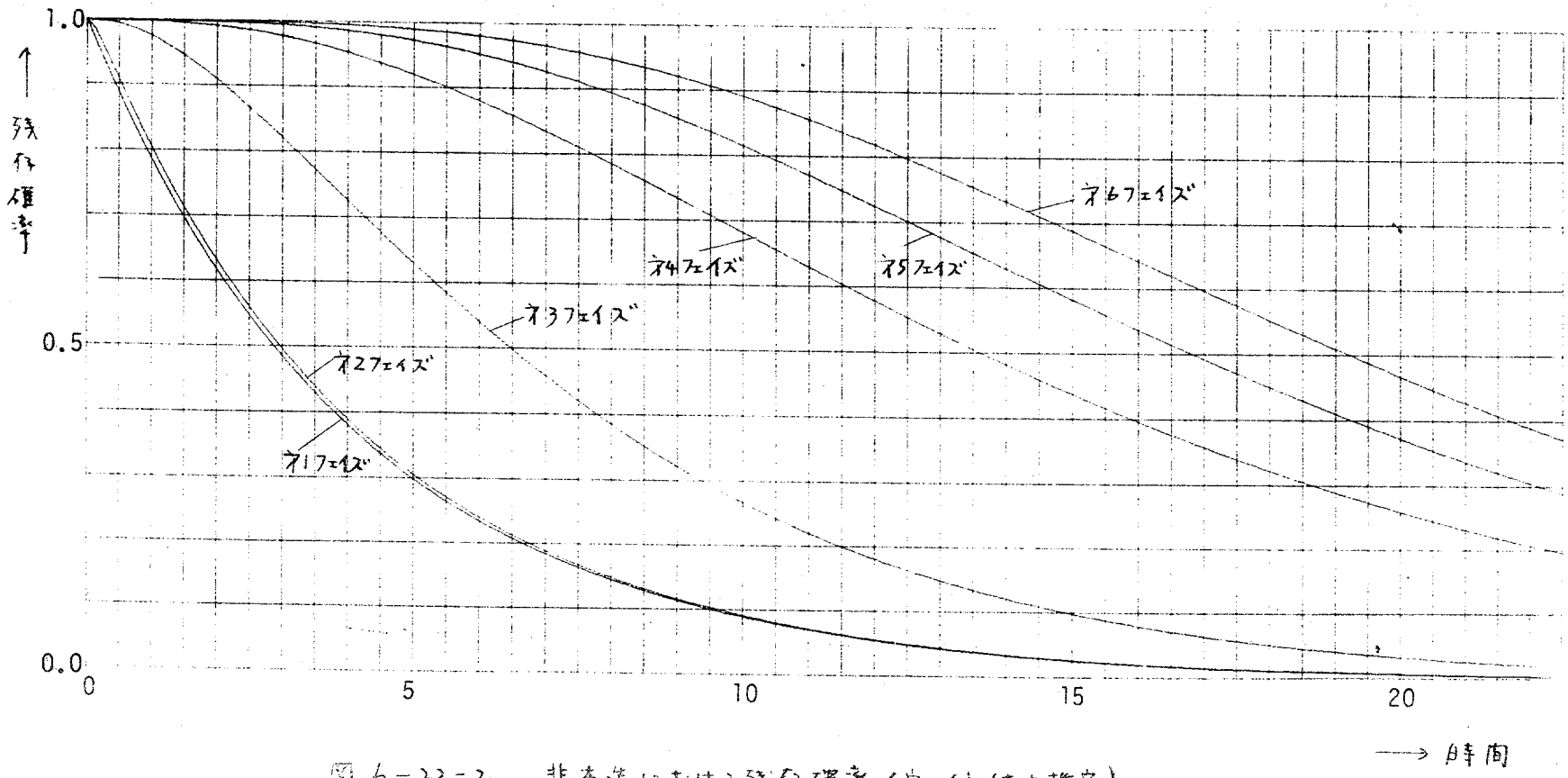


図 6-22-2　非本造における残存確率（ウェイト付け推定）

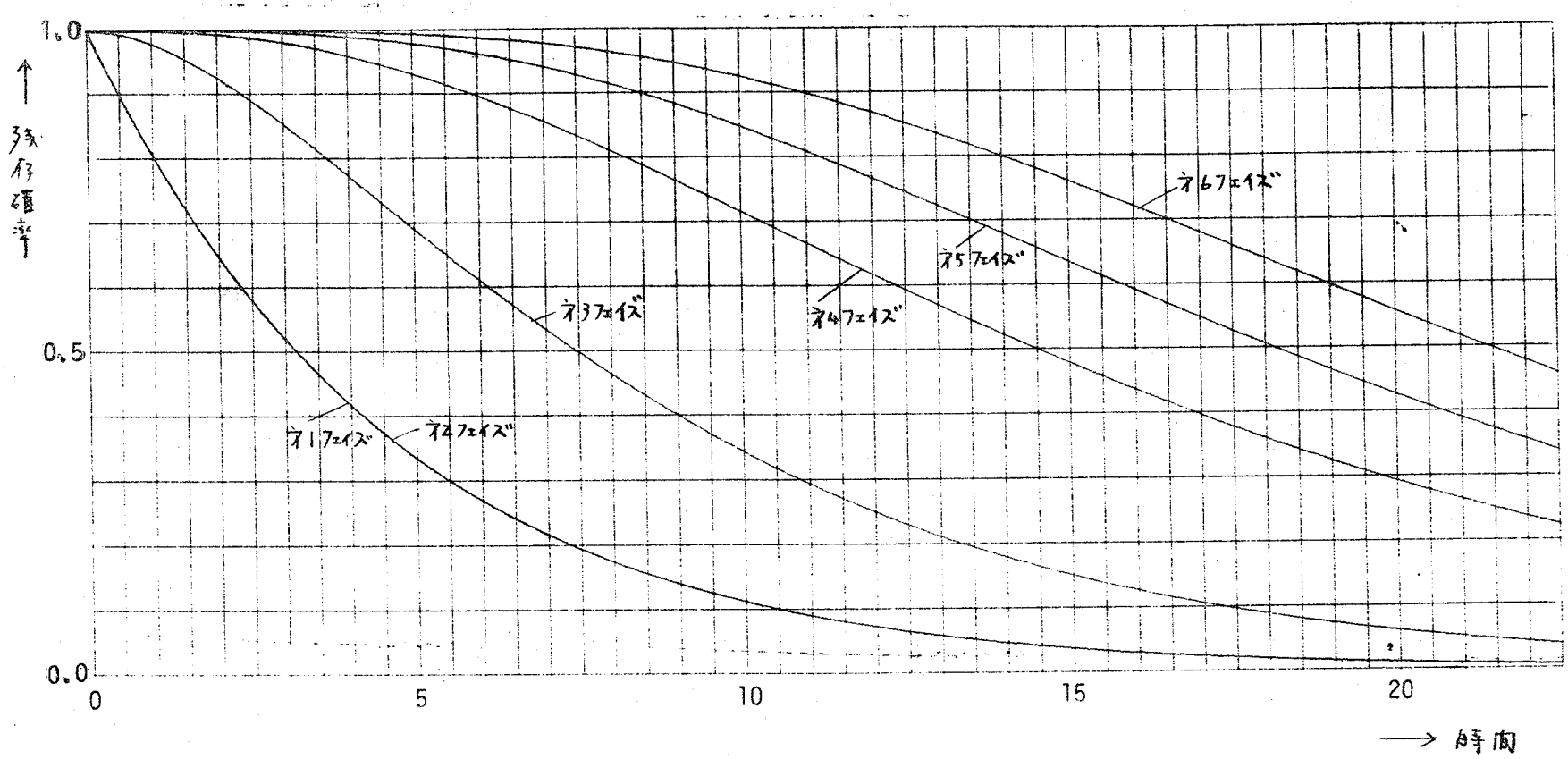


図 6-22-3　　耐火造における残存確率（ウェイト付け推定）

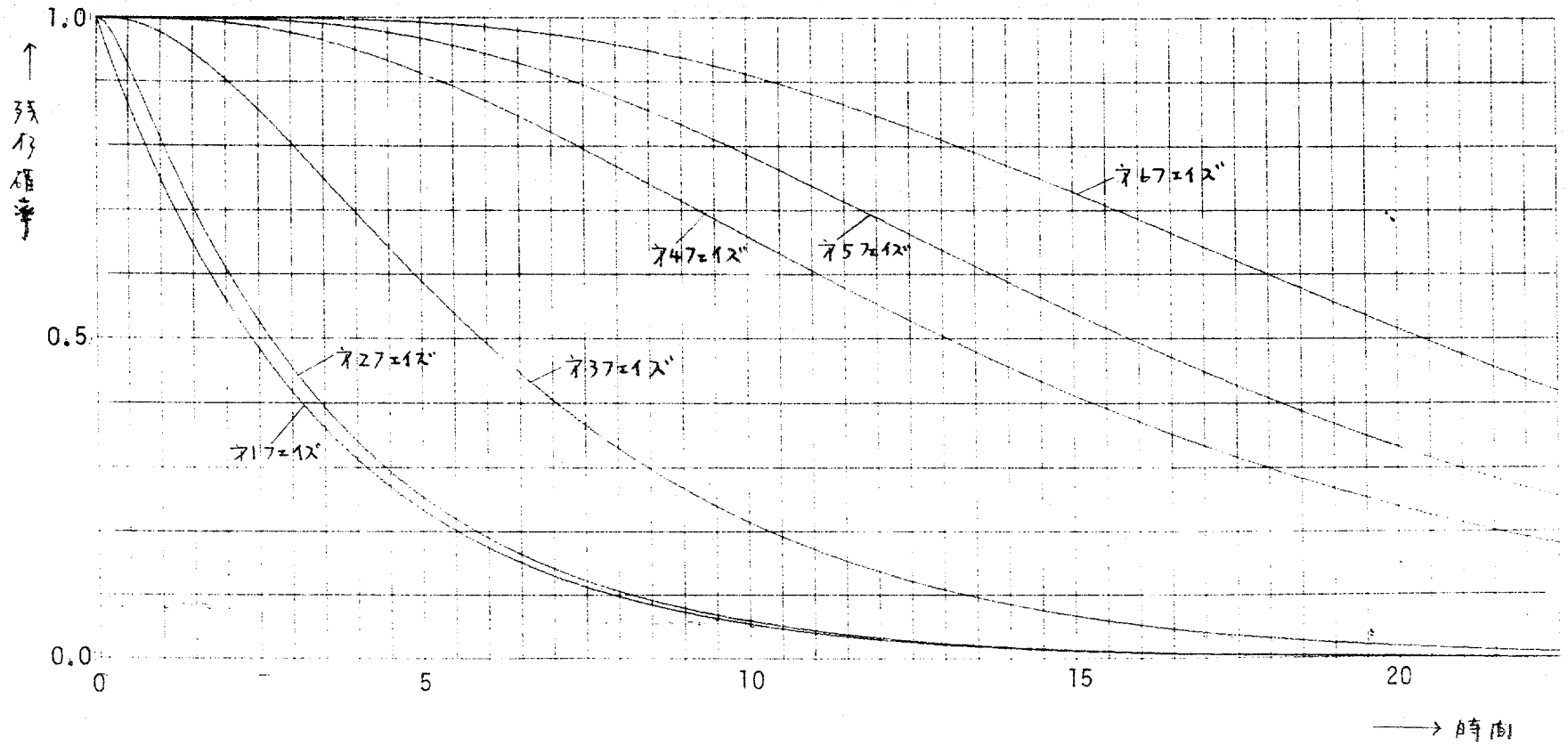


図 6-22-4　　防火造における残存確率（ウェイト付け推定）

造はなるとしても時間が掛するということがわかる。

構造種別における残存確率曲線が図6-22に示されている。残存確率曲線においても同上の傾向が示されている。木造においては才2フェイズから才3フェイズへの移行に時間を要するため，才2フェイズの残存確率と才3フェイズの残存確率曲線がほぼ一致している。これとは逆に耐火造，防火造においては才1フェイズと才2フェイズの残存確率曲線がほぼ一致してくる。また才4フェイズの残存確率について木造と耐火造，防火造とを比較してみると，木造，防火造，耐火造の順に減衰が早い。このことはフラッシュオーバーまでの確率的な火災拡大の傾向を見た場合，木造がより早く拡大し，次に防火造，耐火造の順になっていることがわかる。その差は残存確率0.5付近でそれぞれ1.5分の差がある。こうした初期火災拡大状況の時間進行に関する確率的な挙動の差異は人間の避難により大きく影響しており，人命の問題を考える場合のより重要な要因になってくる。次節ではこれらの結果を用いて人命の安全性の問題を考える。

5-1-5 避難と人命危険度

5-1-5-1 避難の確率モデル

先に分析したフェイズの遷移に関連して、人命に関する危険度の分析を行うことにする。火災の進行にともなって生じる人命に対する損傷は、覚知及び避難という2つの人間側のフェイズと対応している。従って、覚知及び避難が、どのような確率をもって達成しうるかという問題が生じる。この際、厳密に覚知時間に関するデータを得ることは困難であり、また、覚知から避難までの時間に関する統計的データもうることも難しい。従って、図6-23(a)にみられるような本来のシステムは、図6-23(b)のように単純化して考えざるをえないのが現状であろう。



図6-23(a) 覚知避難システム

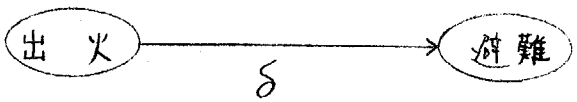


図6-23(b) 覚知避難確率モデル

ところで、出火の状態は先にあげた火災フェイズの1に

対応させることができる。従って，避難までの時刻は，前節でとりあげたモデルにおける時刻と原点は一致しているので，そのまま採用できる。

従って，時刻tで避難が完了していない確率を求めることが必要となる。これは，次のような関係式によって定義されうる。

$$P_e(t) = Prob\ (\text{時刻}t\text{で避難が完了していない})$$

$$P_e(t+\Delta t) = P_e(t)(1-\delta\Delta t) \qquad (5-1)$$

ここで，δは瞬間避難率（単位時間当り避難確率）

Δtを充分小さくとることによって

$$\dot{P}_e(t) = -\delta P_e(t) \qquad (5-2)$$

をうる。この微分方程式は容易に解くことができて，次のようになる。

$$P_e(t) = e^{-\delta t} P_e(0) \qquad (5-3)$$

さらに，先に述べたように，時刻0から覚知及び避難がなされるので，この時点では当然避難はなされていないから

$$P_e(0) = 1 \qquad (5-4)$$

と，初期条件を設定できる。従って，時刻tで避難が完了していない確率は以下の式で与えられることになる。

$$\boxed{P_e(t) = e^{-\delta t}} \qquad (5-5)$$

5-1-5-2 平均避難時間

前項で求めた避難未完了確率（(5-5)式）の意味をより明確にするため，並びにそこで使われたパラメーター瞬間避難確率δの意味を明確にするため平均避難時間とこれらの関係について検討する。

まず，時刻tとt+Δtの間に避難する確率$P(t/\Delta t)$は前項の時刻tで避難が完了していない確率$P_e(t)$を用いて次のように表わすことができる。

$$P(t/\Delta t) = P_e(t) - P_e(t+\Delta t) \qquad (5-6)$$

すなわち，時刻tで避難していない確率から時刻t+Δtで避難していない確率を差し引いたものが時刻tから時刻Δtまでの間に避難した確率にほかならないことを意味する。従って，$\Delta t \to 0$とすることにより時刻tでの避難確率密度関数$f_e(t)$は次のようになる。

$$f_e(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P(t/\Delta t)}{\Delta t} \qquad (5-7)$$

(5-6)式を(5-7)式に代入すると以下のようになる。

$$f_e(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_e(t) - P_e(t+\Delta t)}{\Delta t}$$

$$= -\lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_e(t+\Delta t) - P_e(t)}{(t+\Delta t) - \Delta t}$$

$$= -\frac{d}{dt}\left\{P_e(t)\right\} \qquad (5-8)$$

さらに(5-5)式の結果を上式に代入すれば

$$f_e(t) = -\frac{d}{dt}\left\{e^{-\delta t}\right\}$$

$$= \delta e^{-\delta t} \qquad (5-9)$$

となる。一方，平均避難時間 $m(te)$ は平均の定義式から以下の式で与えられる。

$$m(te) = \int_0^\infty t\, f_e(t)\, dt \qquad (5-10)$$

上式に(5-9)式の結果を代入し，積分を実行すれば以下の結果をうる。

$$m(te) = \int_0^\infty t\, \delta e^{-\delta t}\, dt$$

$$= \frac{1}{\delta} \qquad (5-11)$$

以上の結果からパラメーター δ すなわち瞬間避難率は平均避難時間の逆数として求めることができる。

5-1-5-3 避難失敗確率

火災の各フェイズで避難が完了していないとしたら，はたしていかなる人命の損傷が生じるであろうか。文献にあげられた研究でとられたデータについてみると，フェイズ0からフェイズ3における段階での人命の損傷のケースは非常に少ないという結果が得られている。またフェイズ3からフェイズ4への移行はいわゆるフラッシ

ュオーバーという状況に対応しており，人命の損傷もこのフェイズ以降で生じるものと考えられる（特殊なケース，たとえばガス爆発等の場合ではフェイズ分け自体が対応しないこともあり，初期段階で人命の損傷がなされることもある）。従って，この分析では第4フェイズ以降に火災が拡大しているにもかかわらず，避難が完了していないという事態が起る確率をもって人命の危険度を測る尺度とする。すなわちフラッシュオーバー後において避難が完了しない場合に人命の損傷が生じるものと考え，その確率を人命の危険度とするものである。従って人命危険度 P_2 は次の関係式で与えられることになる。

$$P_2 = \int_0^\infty P_e(t)\, P_*(t)\, dt \qquad (5-12)$$

ただし，

P_2：時刻 t においてフェイズ3からフェイズ4へ拡大する確率すなわち時刻 t におけるフラッシュオーバーの発生する確率

一方，上で必要とされる $P_*(t)$ は図6-24のようにフェイズ4以降をひとまとめにして考えればよいので，次の関係式をうる。

$$P_*(t)\,\Delta t = g_3(t)\cdot \lambda_3 \Delta t \qquad (5-13)$$

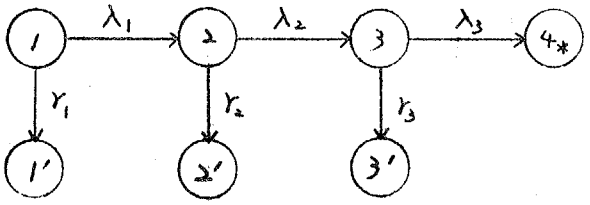


図 6－24　避難までの火災プロセス

すなわち

$$P_*(t) = \lambda_3 g_3(t) \tag{5-14}$$

となり，さらに(2－31)式の結果を上式に代入することによって

$$P_*(t) = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 \sum_{k=1}^{3} \frac{e^{-a_k t}}{\prod_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{3} (a_i - a_k)} \tag{5-15}$$

を得る。この結果及び(5－5)式を(5－12)式に代入し，避難失敗確率は

$$P_E = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 \sum_{k=1}^{3} \left\{ \frac{1}{\prod_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{3} (a_i - a_k)} \cdot \int_0^{\infty} e^{-(a_k+\delta)t}\, dt \right\} \tag{5-16}$$

となる。この積分を実行することにより，以下の結果を得る。

$$P_E = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 \sum_{k=1}^{3} \frac{1}{(a_k+\delta)\prod_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{3} (a_i - a_k)} \tag{5-17-1}$$

または

$$P_E = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 \left\{ \frac{1}{(a_1+\delta)(a_2-a_1)(a_3-a_1)} + \frac{1}{(a_2+\delta)(a_1-a_2)(a_3-a_2)} + \frac{1}{(a_3+\delta)(a_1-a_3)(a_2-a_3)} \right\} \tag{5-17-2}$$

ここで平均避難時間は厳密に計測することは非常に難しい問題でもあり，室の形状，使用状況，避難者の運動能力等に依存している。従って，この避難の不確定性にようずに火災個有の特徴というものを考えるために，2つの極端な状況を想定して検討しておくことにしたい。ひとつは瞬間的に避難が可能である場合についてであり，もうひとつは避難に無限の時間がかかる，すなわち避難ができない場合についてである。前者は恐らく避難失敗確率が0であることが直観的に理解できるものであり，以下にそれを数理的に示す。後者はより現実的な意味をもっているものであり，病人，幼児等のいわば自力によって避難が可能でないような状況にある人間の生命の確保の可能性を調べるうえでより重要な役割を果す量である。

1) 平均避難時間0の場合

瞬間避難率δの定義から，δの値は

$$\delta > 0 \qquad (5-18)$$

であるが，(5-11)式より平均避難時間が0ということは実現しない。すなわち，平均避難時間が限りなく0に近づくことは可能であっても0とはならない。従って，平均避難時間が0に限りなく近い場合を検討する。(5-11)式より

$$m(te) \to 0 \iff \delta \to \infty \qquad (5-19)$$

であることがただちにわかる。このとき(5-17)式においてパラメータ a_i, λ_i ($i=1\sim3$) がそれぞれ異なる正の有限の値であることを考えると、ただちに次の結果をうる。

$$\lim_{\delta\to\infty} P_e = 0 \qquad (5-20)$$

すなわち、平均避難時間が0に近づくとき、避難失敗確率は0に限りなく近づく。

2) 平均避難時間が無限大の場合

この場合は(5-11)式からただちに以下の場合に相当する。

$$m(te) \to \infty \iff \delta \to 0 \qquad (5-21)$$

従って、(5-11)式より

$$\lim_{\delta\to 0} P_e = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 \cdot \sum_{k=1}^{3} \frac{1}{a_k \prod_{\substack{i=1 \\ i\neq k}} (a_i - a_k)}$$

$$= \frac{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}{a_1 a_2 a_3} \qquad (5-22)$$

なる結果をうる。すなわち、もし避難が不可能である場合にはある一定の避難失敗確率がともなう。しかしながらこれは完全に失敗するということを意味していない。避難しない場合でも助かる可能性が有

ることを意味しており，それは以下に示すようにフラッシュオーバー以前に消火される可能性があることに起因している。

(5-22)式で与えられる避難不可能者における避難失敗確率の意味をより深く検討するために，(4-37)式で与えられている結果を(5-22)式に代入してみよう。すると以下のようになる。

$$\lim_{\delta\to 0} P_E = \frac{\sum_{k=2}^{6} p_k(\infty)}{\sum_{k=1}^{6} p_k(\infty)} a_1 \cdot \frac{\sum_{k=3}^{6} p_k(\infty)}{\sum_{k=2}^{6} p_k(\infty)} a_2 \cdot \frac{\sum_{k=4}^{6} p_k(\infty)}{\sum_{k=3}^{6} p_k(\infty)} a_3 \Big/ a_1 a_2 a_3$$

$$= \frac{\sum_{k=4}^{6} p_k(\infty)}{\sum_{k=1}^{6} p_k(\infty)} \qquad (5-23)$$

上式における分母は充分時間が経過した場合の対1フェイズから対6フェイズの鎮火したものの確率であり，分子は同じく対4フェイズから対6フェイズの鎮火したものの確率である。従って，(5-23)式で与えられる値は全火災データのうちフラッシュオーバー以後まで火災が進展したものの割合を意味することになる。以上のことからフラッシュオーバー以後に拡大する火災の割合というものが，幼児，病人などの生命にとってより重要な意味をもつパラメーターであることがわかる。

以上の考察のもとに先に求められたパラメーターを用いて実際に避難失敗確率を求めてみると図6-25のようになる。平均避難時間が2分未満については平均避難時間の値によって急激に避難失敗確率は変化していく。そして平均避難時間が10分を越えると，その値はそれほど変化しないものとなってくる。平均避難時間が10分では避難失敗確率は0.179であり，約2割の人命の損失が考えられる。避難の平均的な時間は住宅などにおいては5分未満であると考えられるので，避難失敗確率は1/10以下であると考えてさしつかえないのではないかと思われる。物理的な観点から避難距離を可能平均歩行速度で除した値は住宅の場合，1分未満であり，事務所等においてもそれほど大きくならない。しかしながら，現実の火災においては出火から避難までには覚知に要する時間のロスあるいは消火活動による時間等が加わり，平均避難時間を大きな値としている。さらにいったん避難したものの，幼児や病人の救出のために再び火災室へ入るというようなケースにおいては，避難時間は相当長くなることが予想され，避難失敗確率の計算にはこうした状況を考えあわせて，平均避難時間にして15秒から10分程度の範囲を想定しておかなければならないと思われる。

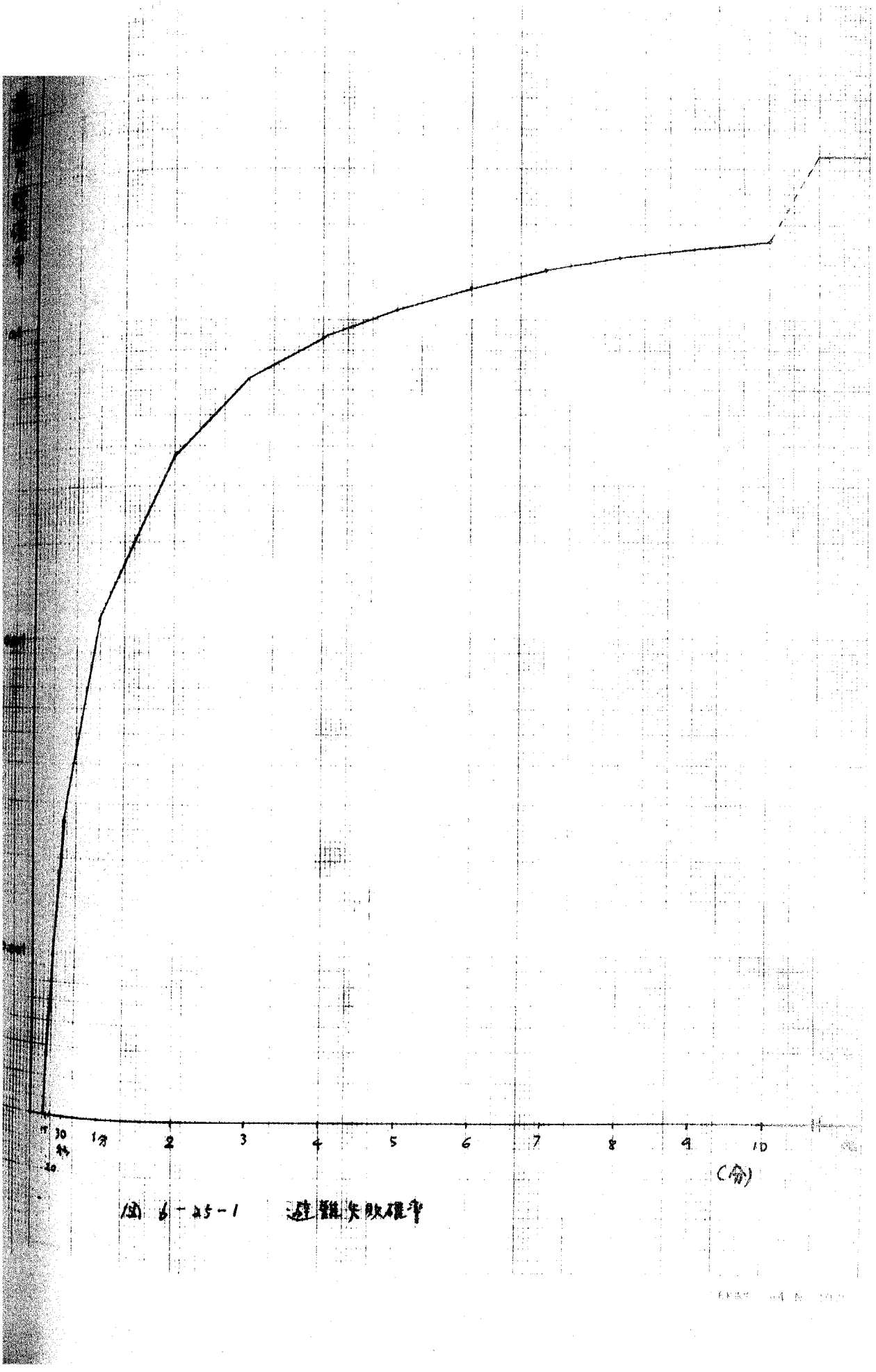


図 6-25-1 避難失敗確率

平均避難時間が小さい範囲では，その平均時間の増加とともに避難失敗確率は急激に増加する。そこで平均避難時間及び避難失敗確率の両者に対数をとり，グラフ化すると，5分未満の範囲で直線的な関係になってくる。その傾きはほぼ6～7であり，このことから5分未満では避難失敗確率は平均避難時間の6乗にほぼ比例していると実用上考えてよいと思われる。

5－1－5－4　各構造タイプによる避難失敗確率の差

「5－1－4－9 各構造タイプによる火災進展の差」で検討した各構造種別による結果を用いて避難失敗確率を構造別に求めることができる。図6－26は平均避難時間毎の各構造種別避難失敗確率を図示したものである。木造，防火造，耐火造を比較してみると，木造，防火造，耐火造の順に避難失敗確率が小さくなっていくのがわかる。とくに耐火造の場合，大きくその値が減少しているのがわかる。しかし，平均避難時間が1分前後の場合，構造の種別による違いよりも平均避難時間の数十秒の差の方がより効果的に避難失敗確率を増減させることがわかる。

以上のことから平均避難時間が小さい範囲では，避難能力すなわち平均避難時間が大きく避難失敗確率に影

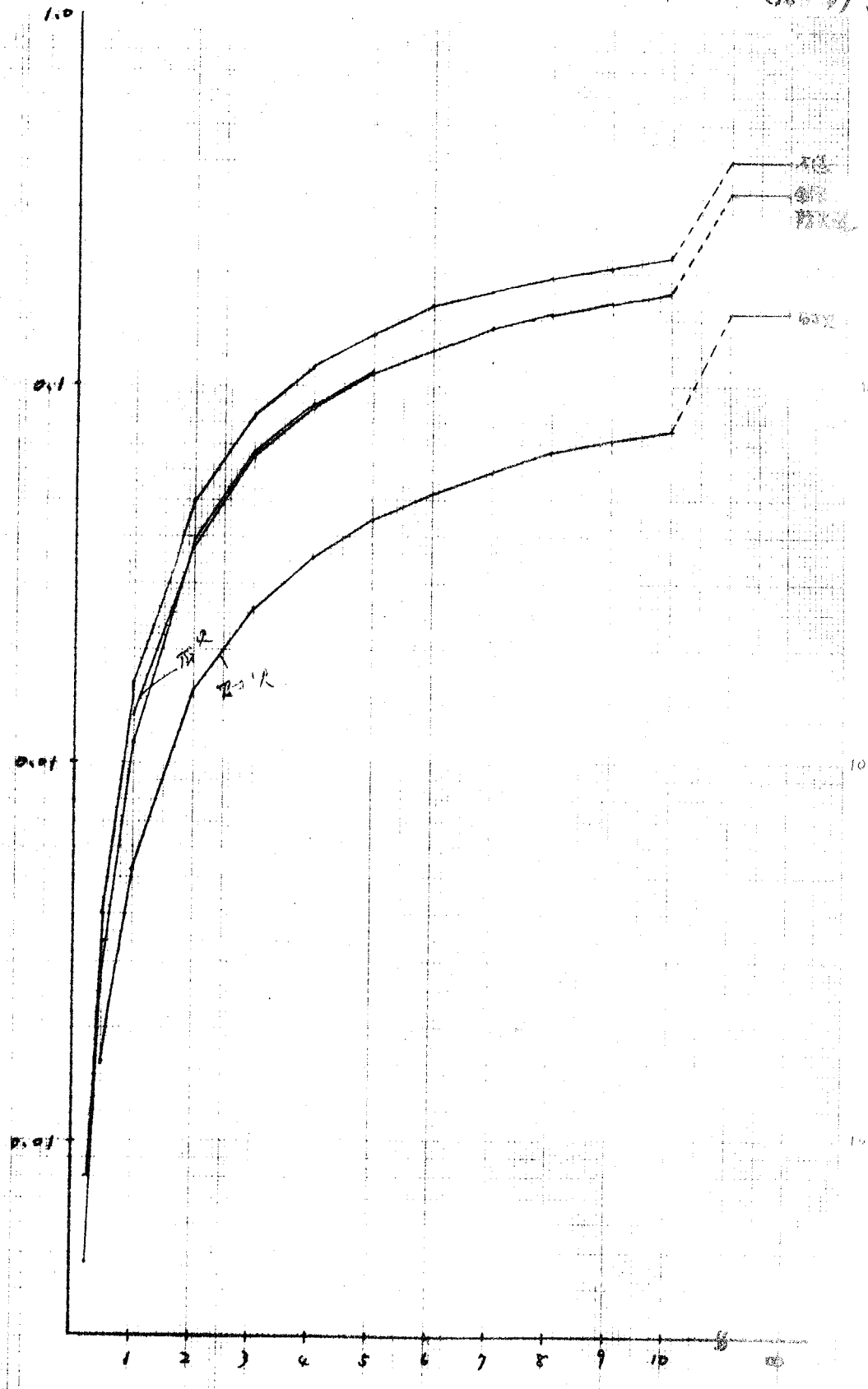


図 6-26 構造別避難失敗確率

響を与え，平均避難時間が5分こえるような場合については，構造種別による差が大きく，避難失敗確率を左右するといえる。幼児，病人等の避難能力の著しく低い状況が予想されるような機能をもつ建物，たとえば病院，保育所等については，以上のことから耐火造建物が望ましいということがいえよう。また上記以外のような建物については，平均避難時間の短縮，たとえば避難通路の短縮，覚知通報の短縮等による方法が効果的といえよう。

5-1-6 消火機能

5-1-6-1 消火機能計量化の困難性

火災の発生にともなって火災フェイズ進展の他に2つの主要なシステムが作動していると考えられる。ひとつは避難のシステムであり，もうひとつは消火のシステムである．避難については前節で検討した。消火のシステムの問題については充分な解明が行われていないのが現状であり，個々の消火機器の性能について2，3の信頼性に関する研究があるが，実際の火災における消火機能の定量的研究は充分とはいえない現状である。

通常の建物においては建物内の消火施設以上に公的消防機関（消防所）による消火活動にたよっているのが現状である。公的機関による消火活動の火災拡大防止における効果というものを計量的に把握することはきわめて難しい。従来いわれているのは出火から覚知の時間，覚知から消火活動開始までの時間，この2つの時間の長さが火災進展防止の面から非常に重要であることは定性的な面からいわれている。ここではこうした機能をより定量的に把握するため，消火活動開始までの時間に関する定量的，確率的検討を加えたい。

5－1－6－2　既存の研究

文献3においては消火活動開始時間を出火から覚知までの時間を消防自動車の火災現場到着の時間に分解し，後者を確率的にとらえることを試みている。そこでは消防自動車の到着累積確率関数を

$$f(t)=\sum_{n=0}^{n<t} e^{-m}\frac{m^n}{n!} \qquad (6-1)$$

の形で求めている。東京消防庁統計所の消防自動車到着時間のデータより，都区内において $m=4.5$ の値を得ている。この結果を用いて火災フェイズをマルコフ推定モデルとしてとらえた場合のシミュレーションを実施し，覚知時間に時間ロスが発生した場合の火災損失額がいかに上昇していくかという解析を行っている。そのシミュレーションモデルの概容は図6－27に，また，火災進展のモデルは図6－6に，出火確率は表6－13に，シミュレーションを行う家屋としては図6－2のものを用いている。また，推定された消防自動車の到着累積確率関数は図6－29のようになっており，損失計算に用いられる標準単価は表6－14である。これらをもとに覚知時間遅れによる火災損失額の期待値は3000回の出火拡大シミュレーションの結果が行われ，図6－30のような結果を

表 6-13　出火確率

出火場所	確率 (%)
居室	42.4
押入	1.4
台所	31.4
廊下	1.0
便所	0.4
風呂場	12.1
屋根	2.2
天井裏	0.3
壁内	2.8
外壁	4.0
床下	0.8
玄関	1.1
合計	100.0

表 6-14　損失額のための単価表

(円/m²)

玄関	49,600
居室	34,400
台所	63,000
浴室	85,000
洗面・脱衣室	96,700
便所	113,300
屋根	6,300
躯体	19,500

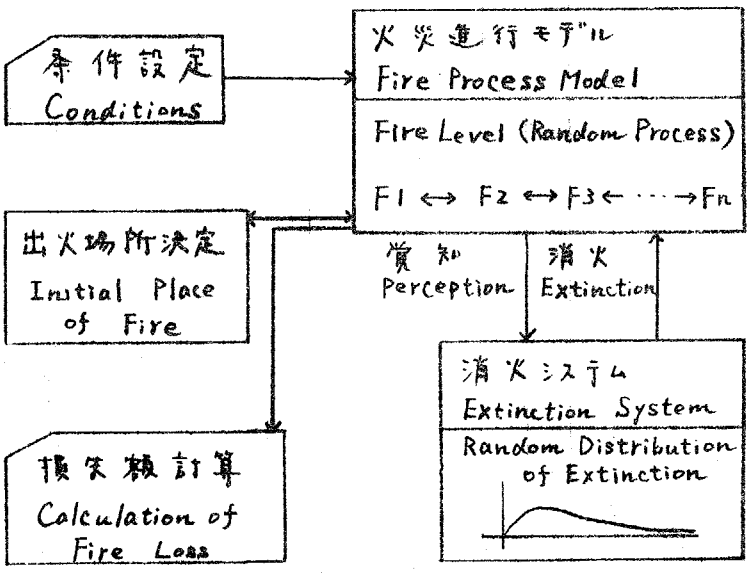


図6-27 シミュレーション・システム・モデル

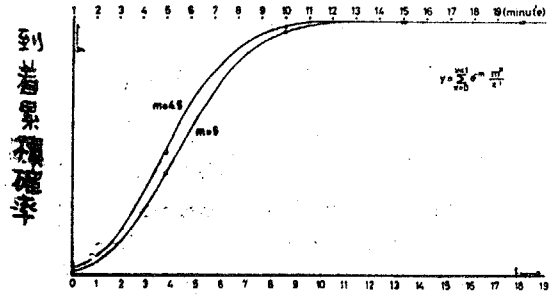


図6-29 消防自動車の到着累積確率関数

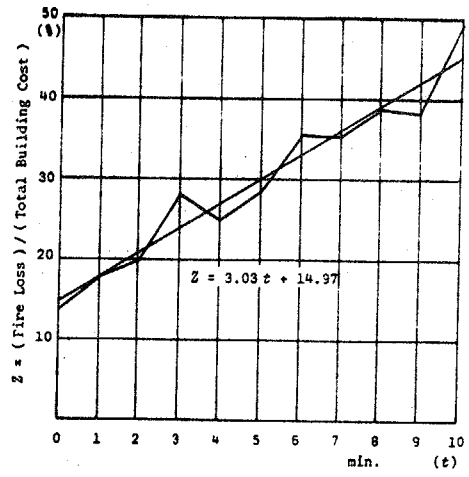


図6-30 覚知時間遅れと火災損害額の期待値

得た。このシミュレーションの結果では，覚知時間遅れ1分当り全建設コストの損害が約3%であることがわかる。この研究の段階では火災の進展に関するパラメーターの推定が充分でなく，それらの値を乱数で選択させているため充分な結果とはいえないが，火災進展の中における時間の重要性が把握された点で重要である。

5-1-6-3 消火活動開始時間の計量的研究

前項で与えられた消防自動車到着の累積確率関数については，データとのフィッティングのみが唯一の根拠である。従って，(6-1)式の意味は理論的な意味をもっているとはいいがたいので，より一般的観点から検討を進める必要がある。

到着に関する理論的な研究は待ち行列理論（文献13）において研究されており，フェイズkのアーラン分布という形がより一般的な到着時間のモデルとして考えられることが証明されているが，この分布型は以下のガンマ分布においてkを正数に限った場合に相当しているので，ここではより一般的に到着時間の分布型をガンマ分布として考える。

$$f(x) = \frac{\lambda^k}{\Gamma(k)} x^{k-1} e^{-\lambda x} \qquad (6-2)$$

とくに k が正整数のとき

$$f(x) = \frac{\lambda^k}{(k-1)!} x^{k-1} e^{-\lambda x} \qquad (6-3)$$

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda x)^n}{n!} \qquad (6-4)$$

この分布型は特殊なケースとして指数分布を含んでいる（$k=1$ のとき）。以下のようなパラメーター推定を行う場合には k を正数と考えておいた場合の方が計算が容易となるので，以下では k を正数と仮定して検討する。この仮定による誤差の影響というものはそれほど大きく分布型を変化させないので，大きな問題はないのではないかと思われる。

以上の理論的な裏付けのもとで，昭和43年～50年の東京消防庁統計書におけるデータを用いて東京都23区における覚知から放水開始までの時間の累積分布を次の手続きで推定する。

$$Q = \sum_{i}^{n} (\hat{F}_i - F)^2 \qquad (6-5)$$

ただし，

$\hat{F}$；データより得られる5分，10分，15分，20分時における到着完了割合である。

F；ガンマ分布より与えられる。

n；データ数

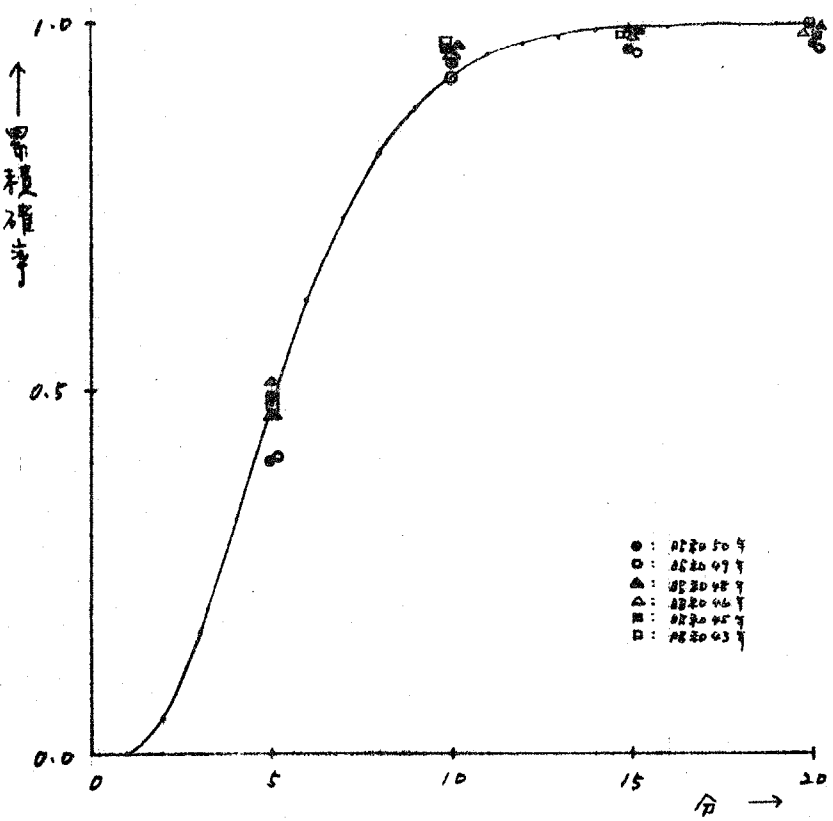


図 6-31-1 到着時間(覚知から放水までの時間)の累積分布

東京消防庁統計書より作成

東京 23区

推定曲線 ガンマ分布 $F = 1 - e^{-\lambda t} \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^n}{n!}$

$\lambda = 0.7143$, $k = 4$

平均 5.6, C.O.V. = 0.5

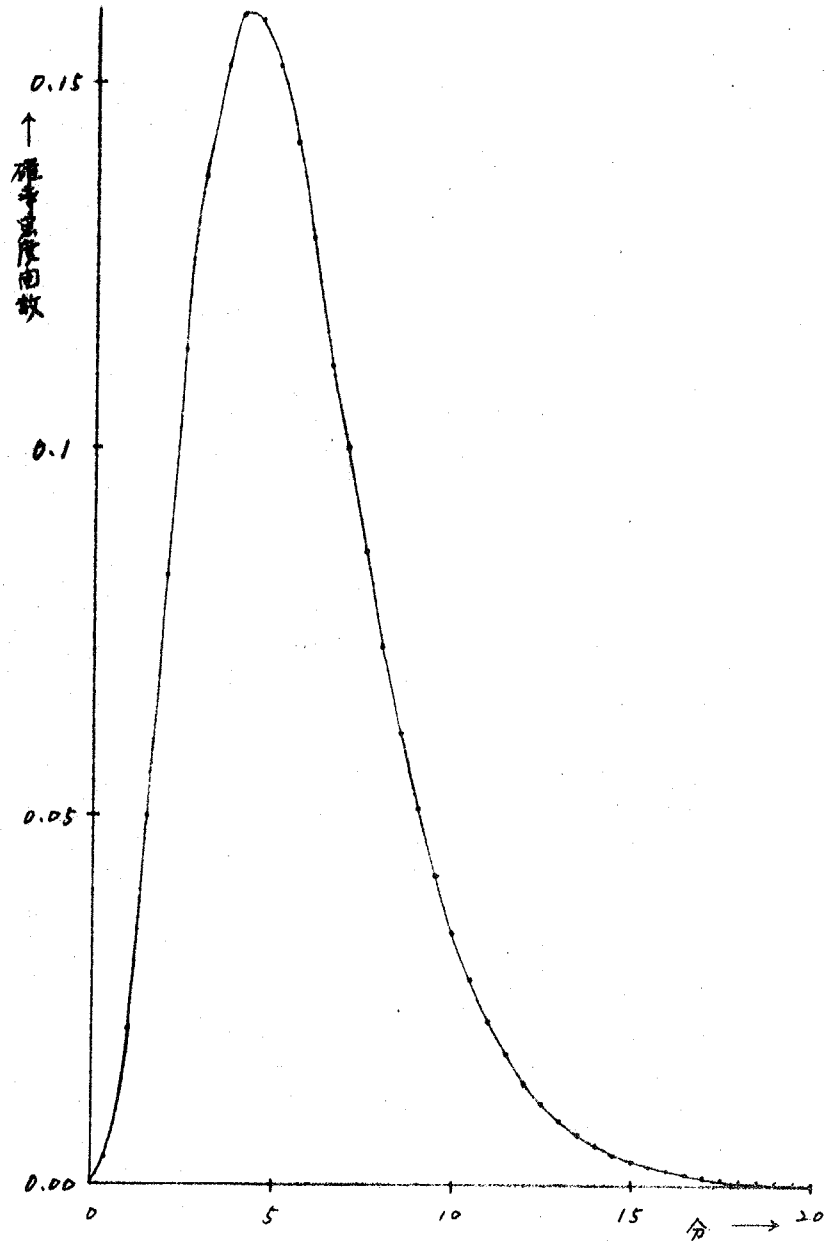


図 6-32-1　到着時間（覚知から放水まであの時間）の確率密度関数

東京消防庁統計書より推定

東京23区

推定曲線　ガンマ分布 $f = \frac{\lambda^{k} t^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda t}$

$\lambda = 0.7143$, $k = 4$

平均 5.6, C.O.V. = 0.5

上式で定義されるQを最小化するように未知パラメータ λ, k を求める。その結果が図6-31に示されている。ここで，得られたパラメーターを用いてその確率密度関数を図示すると図6-32のようになる。以上のことから東京23区においては約6分の時間を要して消火活動が始まるものと考えられる。この平均的な到着時間と前節までに求めたフラッシュ・オーバーの平均時間とはほぼ一致しており，覚知遅れがあった場合については平均的に考えると，フラッシュ・オーバーに間に合わない可能性が約半数あると考えてよいと思われる。従って，初期消火段階においては，公的消火機関の機能は充分に効果的に反映するとは考えられず，むしろ各種構造物の火災進展は内装材の不燃性等による建築的な防火対策がより重要な要因であると考えられる。また，大地震等における火災多発時には充分な消火活動は期待できないので，今後の分析ではこうした消火活動の効果というものを一応除外した状況下で検討することにする。

5-1-7 損失額計算

5-1-7-1 各フェイズ到達マトリックス

本節では火災による経済的損失を計量化する問題をこれまでの確率的な火災フェイズ拡大の理論と関連づけて求める。まず，経済的な損失を計算するために最終的にどのような状態で鎮火するか，あるいはどのフェイズまで到達してから消火したかという問題が最終的に求めなければならない課題となる。

ところで，建物の各部分空間（居室，廊下，竪坑などという空間）によって建設単価が異なるため同一フェイズまで火災が拡大しても損害額は空間によって異なることが予想される。そこで，どの空間から出火したかということと，どのフェイズまで拡大したかという2つの側面から火災の状況を記述しなければならないことになる。

1) 空間別出火率

「5-1-1-2 出火確率」において90×90(cm)のメッシュ毎の出火確率を計算する技法を示したが，各空間はこうしたメッシュの集まりと考えられるので，空間jの出火率s_jは空間j内のk番目のメッシュの出火確率s_{jk}の和として以下のように求めることができる。

$$s_j = \sum_k s_{jk} \qquad (7-1)$$

先に図6－2に示したモデルプランで示すと，空間別出火率は表6－15のようになる。

2) 到達確率

i番フェイズまで拡大してからそれより大きく拡大することなく，鎮火する確率 α_i は近似的には各火災に関するデータにおけるiフェイズから鎮火してくるデータ n_i の個数から以下のように求めることができる。

$$\alpha_i = \frac{n_i}{\sum_{k=1}^{k} n_k} \qquad (7-2)$$

この到達確率 α_i は，先に検討したデータでは（構造別にとりあつかわず，すべてを含めたデータにおいて）表6－16のようになっている。この値のみを用いてもかなり火災進展の状況をつかむことができるという点に関して文献8で検討されている。

3) 到達確率マトリックス

空間jで出火し，i番フェイズまで拡大し，消火される確率 γ_{ij} は各出火空間毎の出火確率とその空間から各フェイズへ到達する確率を調べることによって得られるが，現実のデータからこのように細かい区別をしたデータを構成することは相当多くの標本を必要とするために現実的に困難であり，また，バラツキも多いために得られる結果もそれほど信頼性の高いものでないことが予想される。従って，この確率はフェイズの進展が出火空間

表6-15 各室間の出火確率

出火室間	出火確率
1 玄関	0.0148
2 居室1	0.1087
3 居室2	0.1070
4 居室3	0.1466
5 居室4	0.1425
6 台所	0.3239
7 浴室	0.0839
8 洗面所	0.0425
9 便所	0.0080
10 廊下	0.0117
11 縁側	0.0104

表6-16 各フェイズへの到達割合

フェイズ	データ	割合
1	23	0.0687
2	120	0.3582
3	80	0.2388
4	7	0.0209
5	47	0.1403
6	58	0.1731
(計)	335	

にようず，ほぼ同じものとみなせるとして次のように求めることができる。

$$r_{ij} = s_j d_i \qquad (7-3)$$

このような単純化による誤差の影響は今後検討の余地があるが，この近似式は経済的損失の計算にのみ用いられ，かつ建設コストというものがかなり変動すること及び以降で論じられる経済的損失が建物の損失であり，その中に含まれる家具，貴重品等の損傷については除外しているという計算上のあらさを考えると，上式の近似にともなう誤差による影響は全体的にはそれほど大きいものと考えられない。しかし，人命などの被害に関して検討する場合についてはより精緻な到達確率 r_{ij} の推定が必要であり，今後データの完備にともない r_{ij} の直接的な推定が行われることが期待されているといえよう。

先の空間別出火確率 s_j と到達確率 d_i を用いて上の近似式を前提としてj空間から出火し，iフェイズまで拡大する確率 r_{ij} を表6-17のように求めることができる。

5-1-7-2 各フェイズの焼損状況

現実の火災データにおいて各フェイズに到達した場合の焼損面積を検討しておく必要がある。文献2において

表6-17　到達確率マトリックス

出火空間	出火確率	フェイズ1	フェイズ2	フェイズ3	フェイズ4	フェイズ5	フェイズ6
		0.0687	0.3582	0.2388	0.0209	0.1403	0.1731
1 玄関	0.0148	0.0010	0.0053	0.0035	0.0003	0.0021	0.0026
2 居室1	0.1087	0.0075	0.0389	0.0260	0.0023	0.0153	0.0188
3 居室2	0.1070	0.0074	0.0383	0.0256	0.0022	0.0150	0.0185
4 居室3	0.1466	0.0101	0.0525	0.0350	0.0031	0.0206	0.0253
5 居室4	0.1425	0.0098	0.0510	0.0340	0.0030	0.0200	0.0247
6 台所	0.3239	0.0223	0.1160	0.0773	0.0068	0.0454	0.0561
7 浴室	0.0839	0.0058	0.0301	0.0200	0.0018	0.0118	0.0145
8 洗面所	0.0425	0.0029	0.0152	0.0101	0.0009	0.0060	0.0074
9 便所	0.0080	0.0005	0.0029	0.0019	0.0002	0.0011	0.0014
10 廊下	0.0117	0.0008	0.0042	0.0028	0.0002	0.0016	0.0020
11 縁側	0.0104	0.0007	0.0037	0.0025	0.0002	0.0015	0.0018

表6-18　焼損面積

フェイズ	床	壁	天井
1	0.4125	0.1739	0
2	0.5615	0.7917	0
3	0.6625	3.0065	4.0063
4	(14.2857)	(17.0833)	(14.2857)
5	9.8913	17.3289	8.9872
6	9.6209	19.4107	9.7627

はすでにこうした観点から各フェイズでの焼損状況を調査している。建物の焼損状況は建物内の各室内で燃焼が起るためにその被害は床，壁，天井の各表面に発生すると考えられる。事実，火災被害記録のために焼損面積を測定する際にはすでにこのような観点から床焼損面積の他に壁焼損面積，天井焼損面積を記録する自治体が増えている。文献2で得られた各フェイズ毎の焼損面積データから各フェイズの平均焼損面積を求めてみると，表6－18のようになる。フェイズ4におけるデータ数が小さいのでばらついており，フェイズ5及びフェイズ6よりも大きな焼損面積となっている。こうしたバラツキは火災をうけた建築物の形状によって生じるものであるが，現段階ではこうした要因を検討することはきわめて困難であり，文献13，14で要因分析に関する研究が続けられている。従って，ここでは上記に得られた焼損面積の各フェイズ毎の平均値をひとつの目安として利用する。

5－1－7－3　損失額計算

a)　建設コストの焼損分析用展開

火災による物的損失は建築物の被害の他に家具等の内容物の被害にわけることができるが，先に述べたように内容物の被害は建築計画的なファクターに依存すること

なく決定されることが多いので，一応内容物の被害については除外して考えることにしたい。従って，建物の焼損が当面の分析対象となるが，この物的損失を金銭的損失で評価する際，それは次の2つの考えによって換算することが考えられる。

1) その建物の被災時点での価値から決定される物的損失の金銭的評価

2) その被害を再びつくりなおすとした場合の建設費用

上の2つの基本的な違いは，前者が建物の使用にともない建物自身の不動産的価値が減少し，いわゆる減価償却が考えられているのに対し，後者は被災時点においてのみに限定し，その価値を時間軸で考慮していないということにあると思われる。

本研究ではまず確率的な火災進展の状況と損失の関係を検討するので，後者によって金銭的換算を行う。しかし，後に検討する最適化の概念を取り入れる場合には建物の使用価値と火災損失の関係を考慮せねばならないので，利子率の補正による将来の経済的価値の現在評価を行うことによって時間の考慮が導入される。

従って，被害を建設コストで表わすことが考えられる

ので，被害分析に対応するように建設コストを分解しておくことが望ましい。建設コストのうち，通常の火災では基礎部分に被害を受けないので，基礎部分を除く建設コストを全コストと考えておくことにする。いわゆる「うわもの」と呼ばれる部分のコストがこの際問題となるわけである。

まず，建物は各部分空間（たとえば住宅の場合，居室，台所，廊下等，事務所，ビルの場合，各事務室，廊下，階段等の部分空間にわけることができる）jについてその空間をおおっている内装（躯体を除くという意味）部分の建設コストは床面積S_j，床面積当り単価c_{fj}，天井面積S_j（通常の建築物にあっては床面積と天井面積は等しいので，以後天井面積と床面積の広さの差は考えにいれない）及び天井面積当り単価c_{cj}，壁面積S_{wj}及び壁面積当り単価c_{wj}を用いてj空間の建設費用C_jは以下のように表現される。

$$C_j = S_j \cdot c_{fj} + S_j \cdot c_{cj} + S_{wj} \cdot c_{wj} \qquad (7-4)$$

一方，全建設単価のうち，上式で考慮されていなかったのは躯体部分費用と屋根または屋上部分の建設費用であるので，建築延床面積当り躯体部分建設単価c_s及び屋根部分建設単価c_rとすると，これらの部分の建設費用

(以後，一括して躯体コストと呼ぶ) C_S は以下のように表わされる。

$$C_S = \left(\sum_j S_j\right)\left\{c_s + c_r\right\} \qquad (7-5)$$

以上の結果から「うわもの」部分の建設費用 C_0 は

$$C_0 = \sum_j C_j + C_S \qquad (7-6)$$

と表わすことができる。

b) 燃焼額

先に定義した床，天井，壁面の各建設単価をもとに損失額を求めることができる。まず，空間 j で出火し，L フェイズまで拡大し，鎮火した場合の焼損面積を床，天井及び壁についてそれぞれ x_{fij}, x_{cij}, x_{wij} とすると，j 空間で出火し，L フェイズで鎮火した場合の損失額が以下のように計算できる。

$$L_{ij} = x_{fij}\,c_{fj} + x_{cij}\,c_{cj} + x_{wij}\,c_{wj} \qquad (7-7)$$

この式を用いて j 空間から出火し，L フェイズで鎮火した場合の焼損面積 x_{fij}, x_{cij}, x_{wij} のデータをもとに損失額を計算できるが，

i) データとして x_{fij}, x_{cij}, x_{wij} を求めることが現在の火災統計上非常に困難である，

ii) この損失式にはもともと内容物，取り付け器具等の焼損が含まれていない，

iii) たとえ厳密にこれらの式を精緻化したとしても現実的な焼損面積単価の変動が大きく，精緻化した意味が失なわれる可能性がある，

ことからデータの入手可能性を考慮して，またフェイズの意味を考え直すことにより以下のように単純化した損失計算式を得ることが現実的であると考えられる。

先に求めた表6－18において第1フェイズから第3フェイズに関しては大きな焼損面積のバラツキがなかったので，これを利用することにより損失額を表わす式を構成する。ただし，表6－18に得られているデータは出火場所を考慮しないデータである。すなわち，第i フェイズまで拡大し，鎮火する場合の焼損面積の平均値（この平均の意味は出火室内に関しても，全データに関する平均の2つの意味である）をそれぞれ床，天井，壁について x_{fi}, x_{ci}, x_{wi} とすると，損失額は

$$L_{ij} = x_{fi}c_{fj} + x_{ci}c_{cj} + x_{wi}c_{wj} \qquad (7-8)$$

となる。ここでもちろん第1フェイズから第3フェイズは火災室内での被害にとどまっているフェイズであるか

う次の条件をみたしていると考えざるをえない。

$$L_{ij} \leq C_j \qquad (7-9)$$

すなわち，ｉフェイズまでの損失額はその出火室の内装コストを上回ってはいない。従って，損失額をより一般的に記述するならば（7-8）式をより一般化し，以下のように再定義することが望ましい。

$$L_{ij} = \min\left[x_{fi}C_{fj} + x_{ci}C_{cj} + x_{wi}C_{wj},\ C_j\right] \quad (i=1\sim3) \qquad (7-10)$$

ｉ４フェイズはその定義から

$$L_{4j} = C_j \qquad (7-11)$$

とすることができる。すなわち，ｉ４フェイズはフラッシュオーバー時点に相当し，この時点の損害は通常ほぼ全面にわたる室内面の被害が見られるので，この室内の各面の被害の総和を単純化し，被害額と考えることができる。

ｉ５フェイズについては出火室内以外の部屋に被害がでていることを意味している。出火室内ｊ以外の室内の損失額をL_{je}とすると，L_{je}は躯体及び屋根部分の損失額C_{js}と，出火室内ｊ以外の室内の焼損額C_{je}との和として表わすことができる。すなわち，

$$L_{je} = C_{je} + C_{js} \qquad (7-12)$$

で表わされる。さらに第5フェイズでは出火室が全面的な被害にみまわれているので，第5フェイズでの被害金額は

$$L_{5j} = C_j + L_{je}$$
$$= C_j + C_{je} + C_{js} \qquad (7-13)$$

となっている。

第6フェイズについては家屋全体に被害が及んでいるので，その被害額は

$$L_{6j} = C_o \qquad (7-14)$$

と表わすことができる。

c) 損失額計算の略算式の導出

現在では焼損面積を測定し，記録する場合，床，天井，壁面のそれぞれについて計量しない場合もある。すなわち，より単純化して焼損を表現する場合，焼損床面積で表わす場合が多く，また，先に述べた理由 i) ii) iii) などから火災に対する対策の効果を経済的に分析するためにより単純化しておくことが望ましい。以下ではこうした損失額計算の略算の方法を検討する。しかし，より厳密に損失額を求める場合には前出の式にもどって検討することが望ましい。

まず，第1に考えられるのは各部分室内の形状に関す

る単純化である。事務所ビル，住宅などの建築物の部分空間は事務室，廊下，居室，台所などのようにわかれるが，通常の場合，各室の形状はおおよそ矩形である。また，天井高はほぼ各室一定であり，各室の立体的な形状は直方体と考えられる。従って，以下では各部分空間 j の天井高は h_j であり，床面の形状は a_j, b_j を辺とするような矩形であると考えよう。このとき

$$S_j = a_j \times b_j \quad , \quad S_{wj} = 2(a_j + b_j) \cdot h_j \qquad (7-15)$$

であることから

$$C_j = a_j b_j c_{fj} + a_j b_j c_{cj} + 2(a_j + b_j) \cdot h_j \cdot c_{wj} \qquad (7-16)$$

となる。さらに次の条件をみたすパラメーター $\bar{c}_j$ を導入する。

$$C_j = a_j b_j \bar{c}_j \qquad (7-17)$$

このとき，(7-16) 式及び (7-17) 式より

$$\bar{c}_j = c_{fj} + c_{cj} + \frac{2(a_j + b_j)}{a_j b_j} \cdot h_j \, c_{wj} \qquad (7-18)$$

をうることができる。ここでさらに以下のようなパラメーターを導入する。

$$\theta_j = \frac{2(a_j + b_j)}{a_j b_j} \cdot h_j \qquad (7-19)$$

このパラメーターは空間 j の形状から完全に決まってく

るものである。ちなみに0.9mmモデュールのいわゆる4畳半，6畳といったものについてこの値を計算してみると，表6-19のような結果をうる。従って，日本的住宅などの場合については日の値は3前後であることから，以後出火室によらずこの値を3とおくことにする。すると，先の式は

$$\bar{c}_j = c_{fj} + c_{cj} + 3c_{wj} \qquad (7-20)$$

となる。

一方，単価についてもより単純化しておいたほうが好ましい。すなわち，

$$c_{fj} = c_{cj} = c_{wj} = c_{xj} \qquad (7-21)$$

なる単純化を行う。このとき，上式から

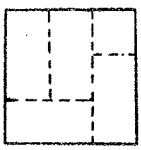
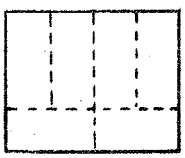
$$c_{fj} + c_{cj} + 3c_{wj} = 5c_{xj} \qquad (7-22)$$

をうる。さらに(7-20)式より

$$\bar{c}_j = 5c_{xj} \qquad (7-23)$$

が得られる。ところで，(7-17)式より $\bar{c}_j$ は各室の床面積当り建設単価(躯体及び屋根を除く)を表わしており，以後これを各室の(床面積当り)内装単価と呼ぶ。他方，c_{xj} は各室の表面積(床面，天井面，壁面の面積)当りの平均単価を意味しており，この値は(7-23)式より内装単価のおおよそ1/5であることがわかる。

表b-19 形状パラメータθの値（日本的住居における場合）

形状	平面形状	θ
0.9mm モデュールの4畳半 h = 2.3 （正方形）		3.407
0.9mm モデュールの6畳 h = 2.3		2.981

以上の前提を用い，表6-18の焼損面積のデータを用いることによって第1フェイズから第3フェイズの損失額は以下のように単純化して表わすことができる。第1フェイズについて

$$L_{1j} = \min\left[x_{f1}c_{fj} + x_{c1}c_{cj} + x_{w1}c_{wj},\ C_j\right]$$

$$= \min\left[(x_{f1} + x_{c1} + x_{w1})c_{xj},\ C_j\right]$$

$$= \min\left[(x_{f1} + x_{c1} + x_{w1}) \times \frac{1}{5}\bar{c}_j,\ C_j\right]$$

$$= \min\left[\frac{0.41 + 0.17 + 0.0}{5}\bar{c}_j,\ C_j\right]$$

$$= \min\left[0.12\,\bar{c}_j,\ C_j\right] \qquad (7-24)$$

さらに $C_j = S_j\bar{c}_j$ であり，S_j の具体的な値を考えると

$$L_{1j} = 0.12\,\bar{c}_j \qquad (7-25)$$

となる。同様に第2フェイズについて

$$L_{2j} = 0.27\,\bar{c}_j \qquad (7-26)$$

第3フェイズについて

$$L_{3j} = 1.54\,\bar{c}_j \qquad (7-27)$$

なる結果をうる。第4フェイズについては明らかに

$$L_{4j} = S_j\bar{c}_j = C_j \qquad (7-28)$$

である。

第5フェイズについては出火室から他の空間に拡大しているので，以下のような単純化が必要である。まず，

出火室以外の空間の躯体及び屋根部分を除く被害は空間jの隣接する部屋のコストの平均と考えることができる。すなわち，ここでは出火室外に拡大する際の他の空間はすべて隣接する空間のうちのいずれかであり，それぞれの類焼の確率は等しいと考えるわけである。従って，先に定義した C_{je} は

$$C_{je} = \frac{1}{n_{ej}} \sum_{p \in N_j} C_p \qquad (7-29)$$

ただし，

N_j；j空間と隣接する空間の集合

n_{ej}；j空間と隣接する空間の個数

となる。さらに，屋根部分における損失額は焼損部分の屋根面への投影面積 x_r 及び屋根部分の建築面積当り単価 c_r を用いて以下のように表わすことができる。

$$C_R = x_r c_r \qquad (7-30)$$

さらに，躯体部分については焼損面積の1階床面への投影面積 x_s と先の屋根部分への投影面積 x_r を用い，建築面積当りの躯体工事費単価 c_s を用いると以下のようになる。

$$C_S = \frac{x_r + x_s}{2} c_s \qquad (7-31)$$

この式では焼損部分の屋根部分への投影面積と床面への

投影面積との平均値をもって躯体の損失を表わす目安としている。以上の準備のもとで第5フェイズの損失は

$$L_{5j} = C_j + C_{je} + C_{js}$$

$$= C_j + \frac{1}{n_{ej}} \sum_{p \in N_j} C_p + C_R + C_S$$

$$= C_j + \frac{1}{n_{ej}} \sum_{p \in N_j} C_p + x_r c_r + \frac{x_r + x_s}{2} C_s \quad (7-32)$$

となり，さらに先の表7-4のデータをもとにより単純化して x_r, $\frac{x_r + x_s}{2}$ の値を定数としてみると

$$L_{5j} = C_j + \frac{1}{n_{ej}} \sum_{p \in N_j} C_p + 9c_r + 10C_s \quad (7-33)$$

となる。

第6フェイズについてはこれまで通り全建設費（ただし，基礎を除く）である。

d) 最終損失額

各室 j より出火し，第iフェイズまで拡大し，鎮火する確率は「5-1-7-1 各フェイズ到達マトリックス」で述べた通り r_{ij} であり，その時の損失額は前項で検討したように L_{ij} である。従って，火災が鎮火した場合の損失額の期待値（これも最終損失額と呼ぶ）は以下の式で表わすことができる。

$$L^* = \sum_{i,j} r_{ij} L_{ij} \quad (7-34)$$

さらに，建設費が年々そのときの経済状況によって変化してくるので，損害の実態を評価するためには次のような相対損失額を求めておいたほうが好ましい場合が多い。

$$\ell^* = \frac{L^*}{C_0} \qquad (7-35)$$

または

$$\ell^* = \sum_{ij} r_{ij} \ell_{ij} \qquad (7-36)$$

ただし，

$$\ell_{ij} = \frac{L_{ij}}{C_0} \qquad (7-37)$$

e) 最終損失額の具体的計算

先に求めた略算式を用いて標準プランにおける最終損失額の計算を実際に行って損失額からみた火災拡大の状況を検討しておこう。文献16より求めた先の表6-2の値をもとに先の略算式から，j空間より出火し，iフェイズまで進展した場合の損失額 L_{ij} を表6-20のように求めることができる。さらに相対的な損失額を求めると表6-21のようになる。この表と先の表6-17を用いて相対的な最終損失額は

$$\ell^* = \sum_i \sum_j r_{ij} \ell_{ij} = 0.2057 \qquad (7-38)$$

となる。すなわち，最終的には1回出火した場合に建設費の約20%の損害額をこうむるということが確率的に

表 6-20 損失額計算表（略式使用の場合）

出火室	室名	面積 S_j	単価（千円） $\bar{C}_j$	部分室コスト C_j	ネ1 $0.12\bar{C}_j$	ネ2 $0.27\bar{C}_j$	ネ3 $1.54\bar{C}_j$	ネ4 C_j	ネ5 $\frac{1}{n_{ej}}\sum C_r$	ネ5	ネ6
1	玄関	3.24	49.6	160.70	5.95	13.39	76.38	160.70	228.37	640.77	4530.69
2	居室1	8.91	34.4	306.50	4.13	9.29	52.98	306.50	257.92	816.12	4530.69
3	居室2	8.91	34.4	306.50	4.13	9.29	52.98	306.50	297.11	855.31	4530.69
4	居室3	11.34	34.4	390.10	4.13	9.29	52.98	390.10	264.72	906.52	4530.69
5	居室4	12.15	34.4	418.00	4.13	9.29	52.98	418.00	257.74	927.44	4530.69
6	台所	4.86	63.0	306.18	7.56	17.01	97.02	306.18	258.98	816.86	4530.69
7	浴室	3.24	85.0	275.40	10.20	22.95	130.90	275.40	219.29	746.39	4530.69
8	洗面所	1.62	96.7	156.65	11.60	26.11	148.92	156.65	218.00	626.35	4530.69
9	便所	1.62	113.3	183.55	13.60	30.59	174.48	183.55	170.80	606.05	4530.69
10	廊下	5.67	34.4	195.05	4.13	9.29	52.98	195.05	269.86	716.61	4530.69
11	縁側	4.05	34.4	139.32	4.13	9.29	52.98	139.32	404.05	795.02	4530.69
屋根		65.61	6.3	413.34							
躯体		65.61	19.5	1279.40							

表 6-21 相対損失額

出火室間	ﾈ1ﾌｪｲｽﾞ	ﾈ2ﾌｪｲｽﾞ	ﾈ3ﾌｪｲｽﾞ	ﾈ4ﾌｪｲｽﾞ	ﾈ5ﾌｪｲｽﾞ	ﾈ6ﾌｪｲｽﾞ
1 玄関	0.0013	0.0030	0.0169	0.0355	0.1414	1.0000
2 居室1	0.0009	0.0021	0.0117	0.0676	0.1801	1.0000
3 居室2	0.0009	0.0021	0.0117	0.0676	0.1888	1.0000
4 居室3	0.0009	0.0021	0.0117	0.0861	0.2001	1.0000
5 居室4	0.0009	0.0021	0.0117	0.0923	0.2047	1.0000
6 台所	0.0017	0.0038	0.0214	0.0676	0.1803	1.0000
7 浴室	0.0023	0.0051	0.0289	0.0608	0.1647	1.0000
8 洗面所	0.0026	0.0058	0.0329	0.0346	0.1382	1.0000
9 便所	0.0030	0.0068	0.0385	0.0405	0.1337	1.0000
10 廊下	0.0009	0.0021	0.0117	0.0431	0.1582	1.0000
11 縁側	0.0009	0.0021	0.0117	0.0308	0.1755	1.0000

こるわりである。ところで，損失額の大まかな時間的進展状況は各フェイズの損失額期待値から知ることができる。すなわち，

$$L_i = \sum_j s_j L_{ij} \qquad (7-39)$$

$$l_i = \sum_j s_j l_{ij} \qquad (7-40)$$

とすると L_i はどの空間で出火するかを考えずに平均的な第iフェイズまで拡大したときの損失額であり，この値によって各フェイズに至った場合の損失額を知ることができ，また，各フェイズへの到達時間がすでに知られているので，その結果を用いると図6-33のように損失額の時間的な増加の状況がわかる。図では台所出火の場合と居室出火の場合を示してあるが，火災の初期段階では居室にくらべ台所が単価が高いことから損害額が大きくでているが，フラッシュオーバー以後の段階では台所にくらべ居室がその床面積が大きいことから損害額が大きめにでることがわかる。こうした損失額の値をとってみても第3フェイズまでと第4フェイズ以降とは大きな差をもって表われてくることがわかる。

5－1－7－4　損失額の時間的推移

前項の最後で検討したように損失額の時間的な推移と

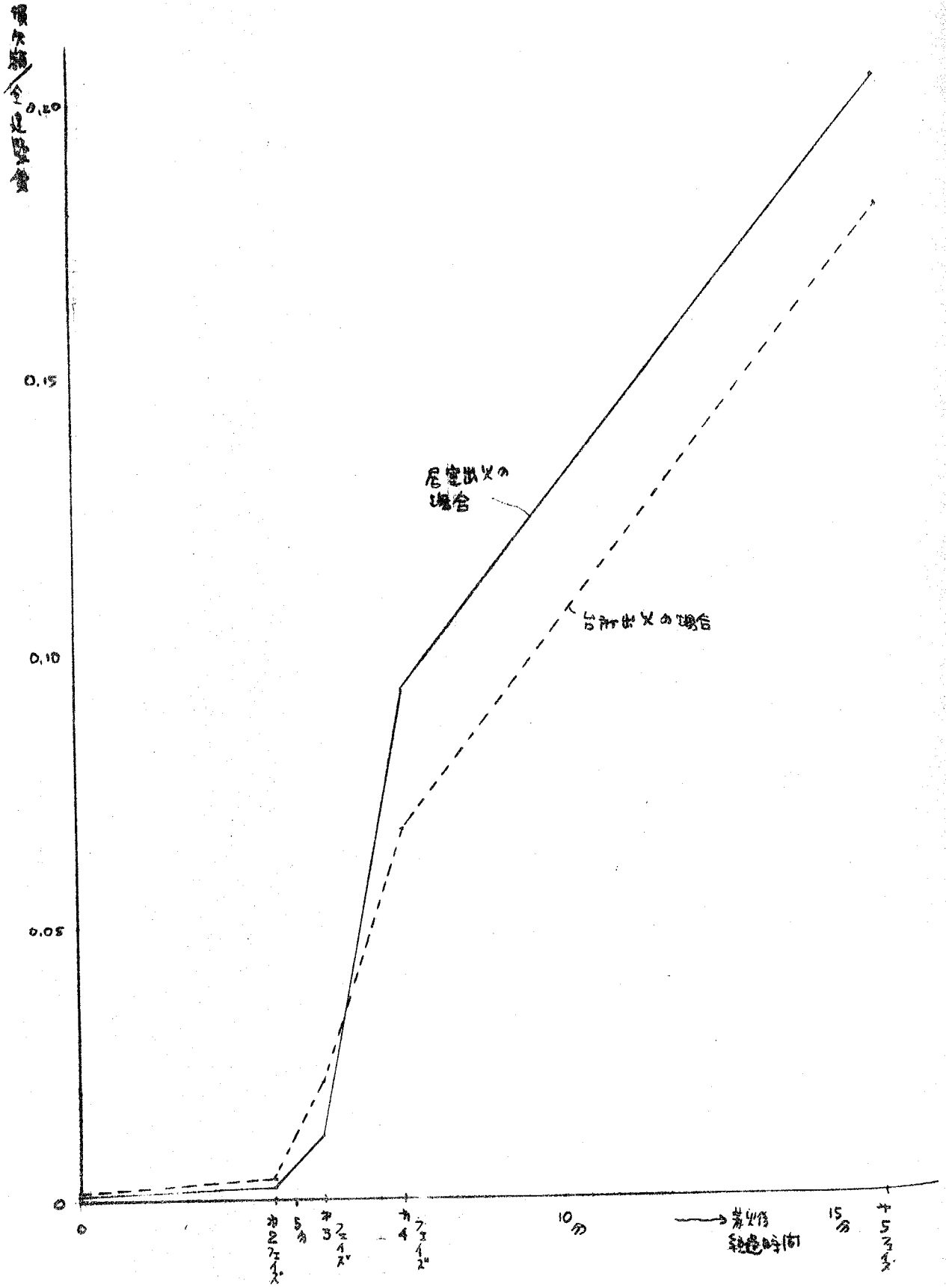


図 6-33　各フェイズ平均到達時間と相対損失額期待値

いうものも防災対策上重要な意味をもってくることが考えられるので，より深く検討しておくことが望ましい。ここでは図6-34のような状態遷移に損失をともなうような確率システムの損失を検討する。すなわち，各フェイズ$i-1$からiのフェイズに拡大する際にφ_iの損失をともなう系を考える。このとき，各場に全体の損失$\varphi(t)$の値は微少時間Δtの間に次のように増加することが考えられる。

$$\varphi(t+\Delta t)=\varphi(t)+\sum_{i=1}^{6}\varphi_i\int_t^{t+\Delta t}P_{rob}(i-1\to i|t)\,dt \qquad (7-41)$$

ところで「5-1-2 火災進展の確率的記述」の際検討したように

$$\int P_{rob}(i-1\to i|t)=dt=\lambda_{i-1}\Delta t\,g_{i-1}(t) \qquad (7-42)$$

であり，この結果を(7-41)式に代入すればただちに損害額が得られるが，我々が検討しているのはすでに出火してしまったものについて検討しているので，図6-34のかわりに図6-35で表わされる損失をともなう確率的システムについて考えなければならない。このとき，各場に損失について(7-41)式及び(7-42)式と同じように次の式を得ることができる。

$$\varphi(t+\Delta t)=\varphi(t)+\sum_{i=1}^{5}\lambda_i g_i(t)\cdot\Delta t\cdot\varphi_{i+1} \qquad (7-43)$$

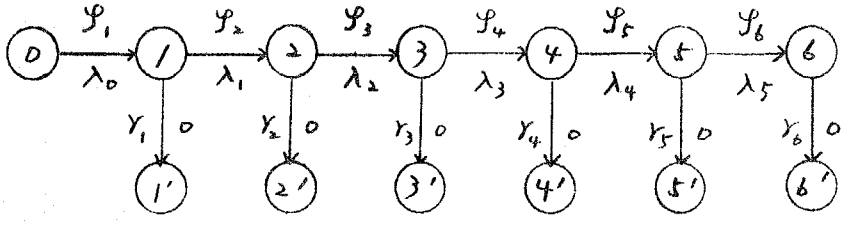


図 6-34　損失を伴う確率的フェイズ進展モデル

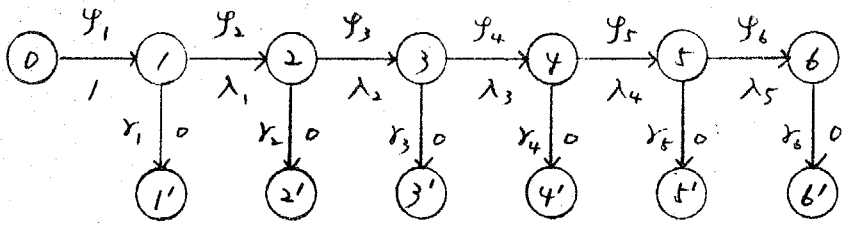


図 6-35　出火後の損失を伴う確率的フェイズ進展モデル

この式は次のように変形できる。

$$\frac{\varphi(t+\Delta t)-\varphi(t)}{\Delta t}=\sum_{i=1}^{5}\varphi_{i+1}\lambda_i g_i(t) \qquad (7-44)$$

さらに，微少時間を $\Delta t \to 0$ とすることによって次の微分方程式を得る。

$$\frac{d}{dt}\varphi(t)=\sum_{i=1}^{5}\varphi_{i+1}\lambda_i g_i(t) \qquad (7-45)$$

この微分方程式は「5-1-2 火災進展の確率的記述」で結果得られた $g_i(t)$ の値を代入することにより以下のように解くことができる。

$$\varphi(t)=\sum_{n=1}^{5}\left\{\varphi_{n+1}\left(\prod_{i=1}^{n}\lambda_i\right)\sum_{k=1}^{n}\frac{1-e^{-a_k t}}{a_k\prod_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{n}(a_i-a_k)}\right\}+\varphi_1 \qquad (7-46)$$

ここで，前項までに分析してきた結果と対応付けると，損失 φ_i と前項で定義した損失 L_i について

$$L_1=\varphi_1 \qquad (7-47-1)$$

$$L_2=\varphi_1+\varphi_2 \qquad (7-47-2)$$

$$L_3=\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3 \qquad (7-47-3)$$

$$L_4=\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3+\varphi_4 \qquad (7-47-4)$$

$$L_5=\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3+\varphi_4+\varphi_5 \qquad (7-47-5)$$

$$L_6=\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3+\varphi_4+\varphi_5+\varphi_6 \qquad (7-47-6)$$

となっており，逆に次の関係が成立している。

$$\varphi_1=L_1 \qquad (7-48-1)$$

$$\varphi_i = L_i - L_{i-1} \quad (i=2\sim6) \qquad (7-48-2)$$

また，相対的な各フェイズの損失 ℓ_i を用いる場合には上式における L_i のかわりに ℓ_i を代入すればよい。

この損失の時間的な変化は先に求めた相対損失 ℓ_i の実際的な値を導入することにより求めてみると図6-36のようになる。

また，特殊なケースとして $t\to\infty$ における相対損失額は次のように求めることができる。

$$\lim_{t\to\infty}\varphi(t) = \sum_{n=1}^{5}\left\{\varphi_{n+1}\left(\prod_{i=1}^{n}\lambda_i\right)\sum_{k=1}^{n}\frac{1}{a_k\prod_{\substack{i=1\\i\neq k}}^{n}(a_i-a_k)}\right\}+\ell_1 \qquad (7-49)$$

(2-36)式の結果を用いて

$$\lim_{t\to\infty}\varphi(t) = \sum_{n=1}^{5}\left\{\varphi_{n+1}\left(\prod_{i=1}^{n}\lambda_i\right)\Big/\left(\prod_{i=1}^{n}a_i\right)\right\}+\ell_1 \qquad (7-50)$$

さらに(2-37)式の結果を用いると

$$\left(\prod_{i=1}^{n}\lambda_i\right)\Big/\left(\prod_{i=1}^{n}a_i\right) = \frac{\lambda_n p_n(\infty)}{r_n} \qquad (7-51)$$

であり，

$$\lim_{t\to0}\varphi(t) = \sum_{n=1}^{5}\left(\varphi_{n+1}\cdot\frac{\lambda_n}{r_n}p_n(\infty)\right)+\ell_1 \qquad (7-52)$$

となる。さらに(4-35)式を用いると

$$\lim_{t\to\infty}\varphi(t) = \sum_{n=1}^{5}\left\{\varphi_{n+1}\cdot\frac{\sum_{k=n+1}^{6}p_k(\infty)}{p_n(\infty)}\cdot p_n(\infty)\right\}+\ell_1$$

$$= \sum_{n=1}^{5}\left(\varphi_{n+1}\sum_{n+1}^{6}p_k(\infty)\right)+\ell_1 \qquad (7-53)$$

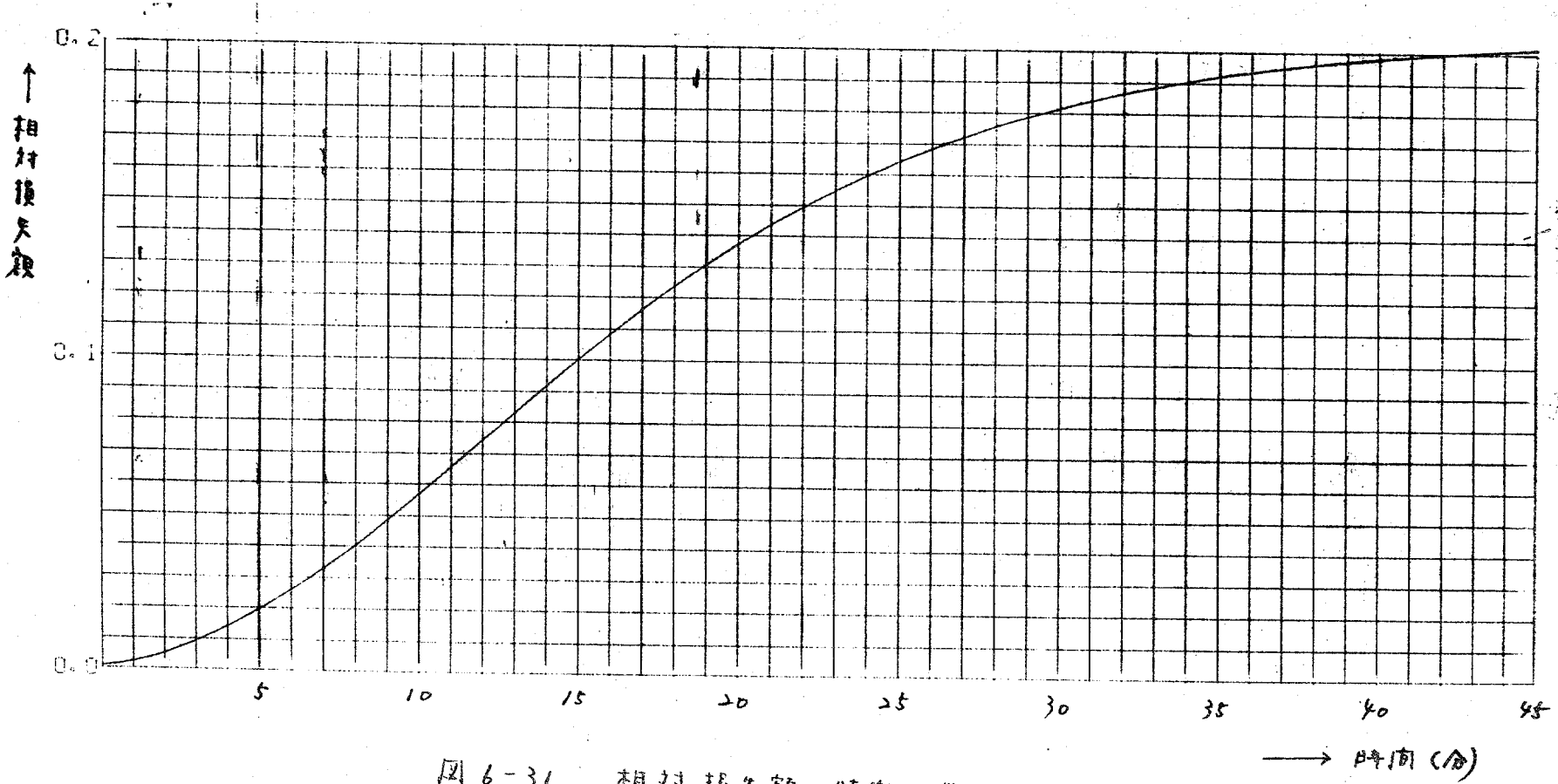


図 6-36　相対損失額の時間的挙動

となり，さらに先に定義した d_i を用いると

$$\lim_{t\to\infty}\varphi(t)=\sum_{n=1}^{5}\left(\varphi_{n+1}\sum_{k=n+1}^{6}d_k\right)+l_1$$

$$=(d_2+d_3+d_4+d_5+d_6)(l_2-l_1)$$

$$+(d_3+d_4+d_5+d_6)(l_3-l_2)$$

$$+(d_4+d_5+d_6)(l_4-l_3)$$

$$+(d_5+d_6)(l_5-l_4)$$

$$+d_6(l_6-l_5)$$

$$+l_1$$

$$=l_1(1-d_2-d_3-d_4-d_5-d_6)$$

$$+d_2l_2+d_3l_3+d_4l_4+d_5l_5+d_6l_6 \qquad (7-54)$$

となる。ここで $\sum_{i=1}^{6}d_i=1$ であることから

$$\lim_{t\to\infty}\varphi(t)=\sum_{k=1}^{6}d_il_i \qquad (7-55)$$

となり，結局，上式の右辺は前項までに求めたステアティックに考えた場合の損失額の期待値である。従って，時間が無限に経ったときの損失というものはステアティックに考えた場合の損失に等しく，前項でステアティックな損失額の期待値を最終損失額とよんだのはこの理由によるものである。

先に見た損失額の時間的推移の状況（図 6-36）を考え

ると、10～20分を経過した場合についてはほぼ最終損失額に収斂していることがいえるので、この項で検討したような時間を変数とする解析は初期火災の解析には有効であるが、全体的に見た場合は最終損失額によって経済的損失を検討しておけば充分ではないかと思われる。

5－1－7－5　各構造別損失額分析

経済的損失の状況は各構造種別によって異なる。ここでは木造、防火造、耐火造について先に求めた略算式に従って相対損失額を求めると表6－22のようになる。木造が最も相対損失額が大きく、次に防火造、耐火造の順になっていることがわかる。耐火造の相対損失は非常に小さく、防火造にくらべて1/5、木造にくらべて1/10となっている。従って、出火した場合の経済的な有意性というものが耐火造、防火造、木造の順になっているということができる。

次に損失額の時間的挙動を調べてみると図6－37のようになる。これらの結果からも前述の結果同様耐火造の経済的有意性がいえる。

しかし、以上の結果は損失額の状況のみから検討したものであり、建設に要する費用、出火の割合等を考慮した場合の全体的・経済的な有意性はこの段階では結論できない。

表6-22 構造別相対損失額（最終）

構造種別	相対損失額
木造	0.282794 = (0.28179)
防火造	0.157875 = (0.15698)
耐火造	0.031771 = (0.03074)
全体	0.205660 = (0.20480)

（）内はウェイト付け推定により求めたパラメーターを用いて(7-49)式より求めたもの

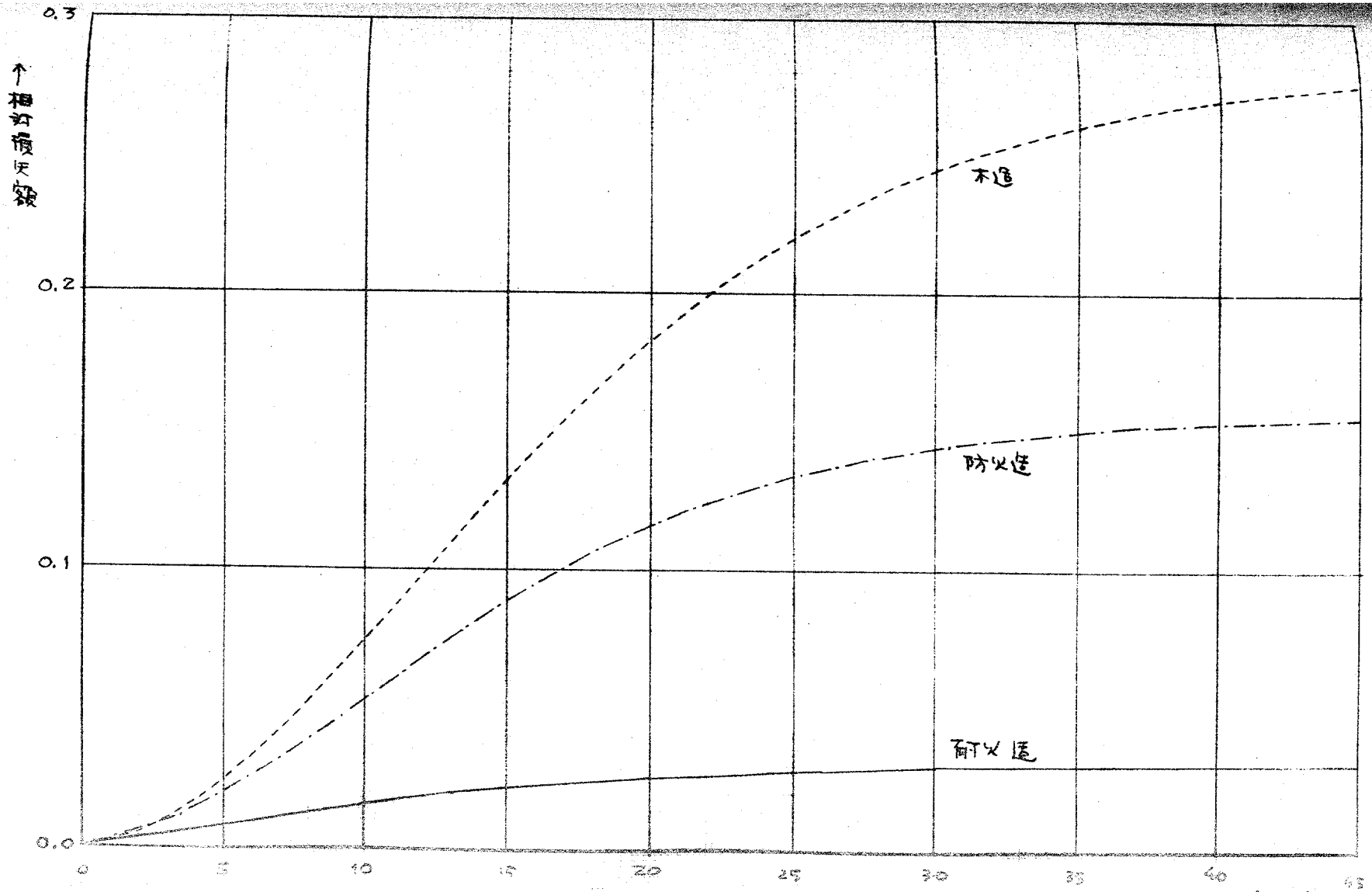


図 6-37 各構造種別における相対損傷値の時間的挙動

(p.98)

5-1-8 総合防火計画

5-1-8-1 総合経済的利益

建築物を構成する場合，その建築空間において何らかの建物使用による利益が期待されており，また，そうした利益を考える期間として建物使用年数がある。建物使用年数内の全経済的利益を評価する場合，未来における経済的価値は現在時点への価値へと換算し，評価しなければならない。以下では現在時点へ換算した全利益を求めるが，その建物が災害による被害を受けないことを前提として経済的利益を得るものと考えられるので，建物が焼失した場合はその後の利益は得ることはできないと考えなければならない。ここではその建物が出火した場合にはその以降の使用期間における経済的な利潤はないものと考えて全経済的利益を計量する。

まず，前節で定義した各変数及びあらたに以下の検討に必要な変量を次のように定めておく。

ℓ^*： 損失率

C_0： 初期コスト（建設コスト）

$U(t)$： t 年目の1年当り建物使用による利益

δ： 年当り出火率（建物当り）

T： 使用年数

β：　年利率

初期時点における損失は建設コスト C_0 である。

(1) 第1年目については使用利益 U_1，火災損失 $C_0 \ell^*$ であるから1年目の利益期待値は

$$(1-\delta)U(1) - \delta C_0 \ell^* \qquad (8-1)$$

であり，初期時点へ換算した価値は

$$\frac{1}{1+\beta}\{(1-\delta)U(1) - \delta C_0 \ell^*\} \qquad (8-2)$$

となる。

(2) 第2年目については第1年目で出火していないという前提のもとで、先と同様にして利益期待値は

$$\{(1-\delta)U(2) - \delta C_0 \ell^*\}(1-\delta) \qquad (8-3)$$

であり，初期時点換算した価値は

$$\frac{1-\delta}{(1+\beta)^2}\{(1-\delta)U(2) - \delta C_0 \ell^*\} \qquad (8-4)$$

となる。

(3) 以上の結果，T年間の経済的利益の現在価値へなおした総和は

$$U^* = -C_0 + \sum_{t=1}^{T} \frac{(1-\delta)^{t-1}}{(1+\beta)^t}\{(1-\delta)U(t) - \delta C_0 \ell^*\}$$

$$= -C_0 + \sum_{t=0}^{T-1} \frac{(1-\delta)^t}{(1+\beta)^{t+1}}\{(1-\delta)U(t) - \delta C_0 \ell^*\}$$

$$= -C_0 + \sum_{t=0}^{T-1}\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^{t+1} U(t) - \sum_{t=0}^{T-1}\frac{(1-\delta)^t}{(1+\beta)^{t+1}}\delta C_0 \ell^*$$

$$= -C_0 + \sum_{t=0}^{T-1}\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^{t+1} U(t) - \left\{\sum_{t=0}^{T-1}\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^{t}\right\} \frac{\delta C_0 l^*}{1+\beta} \qquad (8-5)$$

となる。ここで $\frac{1-\delta}{1+\beta} \neq 1$ と考えてよいので、上式中にあらわれる級数の和は簡単に求めることができ、結局、以下のように全経済的利益を求めることができる。

$$U^* = -C_0 + \sum_{t=0}^{T-1}\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^{t+1} U(t) - \frac{\delta C_0 l^*}{\beta+\delta}\left\{1-\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^{T}\right\} \qquad (8-6)$$

さらに、$U(t)$ が各年とも等しいという状況を考えれば、より単純な形へと上式を変形することができる。すなわち、

$$U(t) = U \qquad (8-7)$$

として

$$U^* = -C_0 + U\frac{1-\delta}{1+\beta}\cdot\sum_{t=0}^{T-1}\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^{t} - \frac{\delta C_0 l^*}{\beta+\delta}\left\{1-\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^{T}\right\}$$

$$= -C_0 + U\frac{1-\delta}{1+\beta}\cdot\frac{1-\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^{T}}{1-\frac{1-\delta}{1+\beta}} - \frac{\delta C_0 l^*}{\beta+\delta}\left\{1-\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^{T}\right\} \qquad (8-8)$$

となり、結局、次の結果をうる。

$$U^* = -C_0 + U\frac{1-\delta}{\beta+\delta}\left\{1-\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^{T}\right\} - \frac{\delta C_0 l^*}{\beta+\delta}\left\{1-\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^{T}\right\} \qquad (8-9)$$

この値の大小が経済的にみた場合の最適性を決定するものである。

5－1－8－2　構造種別による経済的最適性

a) 先に定義した変量のうち構造種別によって変化する値は

$$l^*,\ C_0,\ T,\ U,\ \delta$$

が考えられるが，

i) δ は使用状況によって決まると考えられる，

ii) U はその空間で計上できる利益であるから構造種別とは直接関係あると考えられない，

iii) 使用年数 T は使用状況，内装物の耐久性等を考えると構造体の耐久年数よりはるかに短いということが知られており，ここでは使用期間は構造種別によらず一定と考える。

以上のことから l^*, C_0 のみを構造種別によって変化する値と考えて分析し，構造種別 (k) について

$$l^*_{(k)},\ C_{0(k)}$$

と記す。

以上の準備のもとで経済的最適性を検討することができる。まず，構造種別 (k) と (m) があるとき，k が経済的に有利であるとは T 年間の経済利益の価値について

$$U^*_{(k)} > U^*_{(m)} \qquad (8-10)$$

であることを意味する。従って

$$\Delta U^*_{(k,m)} = U^*_{(k)} - U^*_{(m)} \qquad (8-11)$$

とおくと

$$\Delta U^*_{(k,m)} = \left[-C_{o(k)} + \frac{U(1-\delta)}{\beta+\delta}\left\{1-\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^T\right\} - \left(\frac{\delta C_{o(k)} l^*_{(k)}}{\beta+\delta}\right)\left\{1-\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^T\right\}\right]$$

$$-\left[-C_{o(m)} + \frac{U(1-\delta)}{\beta+\delta}\left\{1-\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^T\right\} - \left(\frac{\delta C_{o(m)} l^*_{(m)}}{\beta+\delta}\right)\left\{1-\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^T\right\}\right]$$

$$= -C_{o(k)}\left\{1+\frac{l^*_{(k)}\cdot\delta}{\beta+\delta}\left(1-\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^T\right)\right\}$$

$$+ C_{o(m)}\left\{1+\frac{l^*_{(m)}\delta}{\beta+\delta}\left(1-\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^T\right)\right\}$$

$$= -\left\{C_{o(k)} - C_{o(m)}\right\}$$

$$-\left\{C_{o(k)} l^*_{(k)} - C_{o(m)} l^*_{(m)}\right\}\frac{\delta}{\beta+\delta}\left\{1-\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^T\right\} \qquad (8-12)$$

となり，従って，kが有利であるための条件は

$$C_{o(m)} - C_{o(k)} > \left\{C_{o(k)} l^*_{(k)} - C_{o(m)} l^*_{(m)}\right\}\cdot K \qquad (8-13)$$

となり，ここで

$$K = \frac{\delta}{\beta+\delta}\left\{1-\left(\frac{1-\delta}{1+\beta}\right)^T\right\} \qquad (8-14)$$

であり，Kを判定係数，その逆数 $k^* = \frac{1}{K}$ をコスト・ベネフィット・クライテリアと呼ぶ。δの値については「5-1-1-1 出火率」で求めた1年当り出火件数Θが Θ = 5～6であることから，1世帯当り人員4人とし，ここで扱っている標準プランの建物については建物出火率

δが求まる。さらに，有利率を0.05～0.10の範囲で考えると，コスト・ベネフィット・クライテリアδ^*は表6-23のようになる。従って，合格判定係数の値として以下では$K_0=0.03$を標準値として考える。

(b) 耐火造と木造の経済的優位性の検討

上述の結果を用いて木造と耐火造の比較を行ってみよう。まず，耐火造と木造の建設コストについては昭和40年，45年，50年について（文献17参照）調べてみると，おおよそ，建設コストの耐火造と木造の比は

$$C_0(\text{耐火}) / C_0(\text{木造}) = 1.4 \qquad (8-15)$$

であり，(8-13)式の左辺は

$$-(1.4-1)C_0(\text{木造}) = -0.4\,C_0(\text{木造}) \qquad (8-16)$$

となり，(8-13)式の右辺は

$$(1.4\times 0.031771 - 1\times 0.282744)\times 0.03\times C_0(\text{木造})$$

$$= -0.007494\,C_0(\text{木造}) \qquad (8-17)$$

となり，従って，不等式条件はみたされない。すなわち，耐火造は木造に対し経済的に有利でない。このことは経済的利益の総和を考えた場合の結論であり，人命を考慮に入れない場合の最適化の結論である。耐火造の経済的に不利な側面は先の不等式条件を考えてみ

表6-23 コスト・ベネフィット・クライテリアの値

貸利率 / 出火率(1万人当り) / 建物使用年数	0.05		0.075		0.10	
	t	b	t	b	t	b
20	38.82	32.45	46.28	38.68	54.09	45.19
40	28.50	23.87	37.74	31.60	47.33	39.58
60	26.00	21.80	36.23	30.34	46.50	38.90
80	25.20	21.15	35.91	30.08	46.38	38.80
100	24.92	20.92	35.84	30.02	46.37	38.79

ると，出火率が小さい場合には建設コストの増加分が大きく，先の不等式条件に入りこみ，結局，木造が好ましいということになってしまっているわけである。しかしながら，ひとたび火災が起った場合の経済的優位性については前項で述べたとおり，耐火造が有利であることにはかわりない。従って，耐火造を普及させるためには何らかの意味で初期コストを低減しなければ耐火造が普及しえないことになると考えられる。次項では耐火造に補助金を与える場合の補助率の検討を行ってみる。

5－1－8－3　耐火造への建設資金援助の場合

耐火造のものについて建設補助金を与える場合に行政的には様々な形のものがありうる。しかし，ここではより単純な場合を考える。すなわち，耐火造の建設コストのγ倍を補助金として無償で建設者に与え，償還しないでよい場合を考える。この場合，補助を受けた側の総合経済利益について検討してみると，構造種別k（耐火を表わす）とm（木造を表わす）について前項で行ったと同じようにその総合利益の耐火造の場合と木造の場合の差は補助率γのもとで以下のようになる。

$$\Delta U^*_{(k,m,r)} = U^*_{(k)} - U^*_{(m)} + r C_{o(k)}$$

$$= C_{o(m)} - C_{o(k)} + r C_{o(k)} - K\left\{C_{o(k)} \ell^*_{(k)} - C_{o(m)} \ell^*_{(m)}\right\}$$

$$= C_{o(m)} - (1-r) C_{o(k)} - K\left\{C_{o(k)} \ell^*_{(k)} - C_{o(m)} \ell^*_{(m)}\right\} \quad (8-18)$$

さらに前項と同じように耐火造が有利であるという条件

$$\Delta U^*_{(k,m,r)} > 0 \quad (8-19)$$

を r に関して解くと

$$C_{o(m)} - K\left\{C_{o(k)} \ell^*_{(k)} - C_{o(m)} \ell^*_{(m)}\right\} > (1-r) C_{o(k)} \quad (8-20)$$

すなわち,

$$r > 1 - \frac{C_{o(m)}}{C_{o(k)}} + K\left\{\ell^*_{(k)} - \frac{C_{o(m)}}{C_{o(k)}} \ell^*_{(m)}\right\} \quad (8-21)$$

となる。ここで先の値を代入すると

$$\text{右辺} = 1 - \frac{1}{1.4} + 0.03\left\{0.031771 - \frac{0.282794}{1.4}\right\}$$

$$= 0.2806 \quad (8-22)$$

となり，従って 0.28% の建築費の補助が必要であるが，このとき，金額としては

$$0.2806\, C_{o(k)} \quad (8-23)$$

であり，一方，耐火造と木造の差額は

$$C_{o(k)} - C_{o(m)} \fallingdotseq C_{o(k)} - \frac{1}{1.4} C_{o(k)}$$

$$= C_{o(k)}\left(1 - \frac{1}{1.4}\right)$$

$$= 0.2857\,C_{O(R)} \qquad (8-24)$$

であるので，補助金と差額との比率は

$$\frac{0.2806}{0.2857} = 0.9821 \qquad (8-25)$$

となり，差額の約98%を補助しなければならないことを意味する。このことは経済的側面だけで考えてみると耐火造の普及のためには木造との建設費の差額をほぼ全額補助しなければならないことを意味するので，かなり困難であるといわざるを得ない。従って，耐火造の普及には経済性以外の視点の導入が必要であるともいえよう。

5-1-8-4 耐火造普及のための方略

耐火造普及のために考えられるいくつかの方法をここでは再検討しておきたいと思う。そのために，若干人命危険度と利益に関する経済的な考察を前もってしておくことが必要である。純粋に人命のみを考えた場合には単純に耐火造が好ましいことが結論できるが，現実的には必ずしも耐火造が木造と比較して常に選択されてはいるとは限らない。そこには木造のもつ経済的利益及びより広い意味での木造の良さからくる木造への選択傾向が内在しており，耐火造と木造との建設の際に行われる選択は必ずしも人命の安全のみから決定されているわけでは

ない。そこで広い意味での利益と人命危険度を取り上げると、そこに構造種別に対する選好の無差別曲線が描けると仮りに考えることができるであろう。この際、先に見たように耐火造は木造とくらべて人命危険度が小さく、総合的な利益は小さいので、無差別曲線及び耐火造、木造の位置は図6-38のようになっていると考えられる。ここで左上方がより好ましいものということができよう。耐火造をより多く普及させるためには耐火造と木造の間に無差別曲線が入りこみ、その左上方に耐火造が位置しなければならない。従って、このような評価の構造のもとで以下における耐火造普及のための各方略を再検討してみよう。

1) 補助金による耐火造の普及

前項で見たように補助率は非常に大きなものとなり、木造と耐火造の建築コストの差額のほぼ全額を補助しなければならないようなことになり、補助金のみで耐火造の普及を考えた場合には地方自治体の財政をきわめて困難にし、現実的な解決策とはなりえなくなってしまうおそれがある。従って、補助金のみによって解決することは困難である。

2) 法的規制

法的規制を設けた場合，その規制が実施され得るという範囲で問題がない。しかし，現実的には単なる構造種別としては耐火造であってもプランの形状，内装材等から耐火造化にともなうコスト増分の穴うめが行われる可能性もあり，また，充分な法律的規制が実施されるということも様々な問題を含んでおり，現実の都市を耐火造化するということには様々な困難がともなう。

う) 建築物の人命危険度に対する知識の普及

先に図6-38で示した無差別曲線は建物に対する知識にもとづいて構成されるものであり，防火知識の普及，安全教育によって変動するものである。たとえば人命に対する安全性をより重視するように社会的なコンセンサスが得られるとしたら，それは無差別曲線が図6-39のように変化することを意味する。このとき，耐火造はより強く選好されることになる。従って，耐火造の普及がより容易に行われることになる。こうした無差別曲線の移動は短期間のうちに行われるものではなく，長い文化的伝統の中で序々に変化するものであり，安全に対する教育等によって長期的視点の中で達成されなければならない方略であるといえよう。

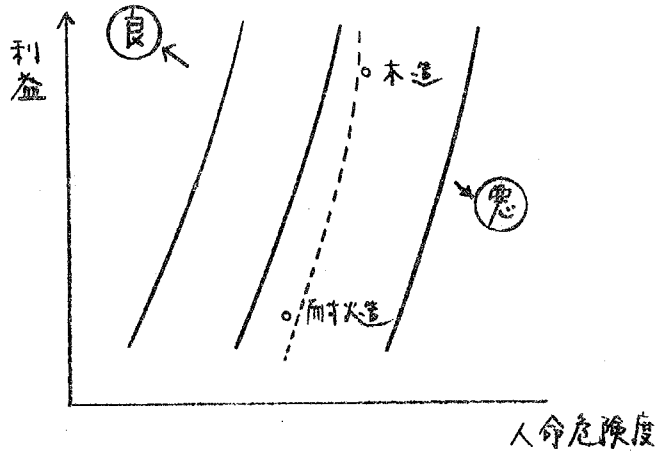


図 6-38 構造種別選好の無差別曲線

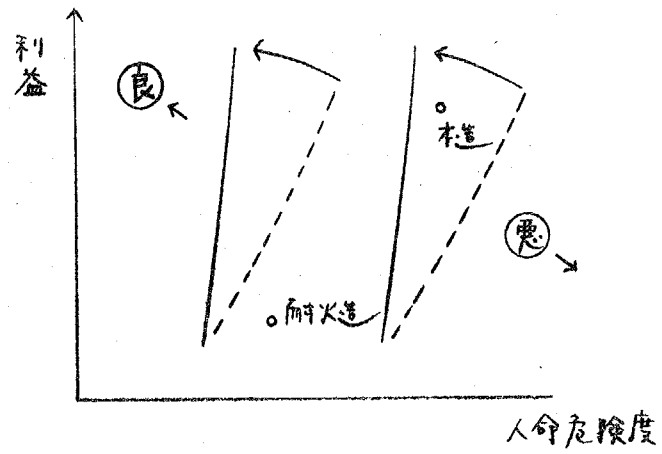


図 6-39 構造種別選好の無差別曲線の変化

4) 建設資金の金利低下，貸出しの増大

この場合，一種の所得増加と同じような効果が期待される。すなわち，もし高所得者ほど人命危険度重視の傾向があり，低所得にともなって利益重視の傾向があるとすれば，金利の低下，貸出しの増大にともない無差別曲線が図6-39のように移動したと同じ効果が期待できる。

以上の方略は図6-38における無差別曲線の形状と耐火造の位置に関連したものであったが，この他単に図6-38における耐火造の位置を上方へ押し上げる方略が考えられる。これは全経済利益U^*を表わす式及び$\Delta U^*_{(k,m)}$より次のようなものが考えられる。

5) 耐火造建物の年間利益Uの増大

このことは事務所，倉庫などの場合，充分考えられるものであり，本研究では用途による経済利益の差を考えていないが，現実的にはこうした用途の選択と構造の選択とが防火計画の面から再検討することが期待される。

6) 耐火造建物の使用年数Tの増大

実際，耐火造の建物は耐久年数が木造にくらべて長く，物理的に考えれば使用可能な年数は木造よりはる

かに長い。しかし，それにともなう内装，設備等の耐久有限が短く，使用有限が短くなってしまうのが現状である。こうした点から内装物の容易な取り変え等の方法が今後検討されなければならないが，こうした使用有限の増加は全体の経済的利益を大きく増加させ，結局は耐火造の普及につながってくるものと考えられる。

7) 年利率の低下

これは経済機構の状況によってうける変動であり，建築計画的にはこの値を減少することは考えられない。

8) 出火率の増大

もし出火率が増大すると，先に調べた条件から耐火造がより有利な方へ移動する。しかし，この出火率の値は明らかにより小さくおさえなければならない量であり，現実的にはこのような方略は考えられない。

以上のいくつかの方略のうち，結局，それぞれの方略が単独には有効に機能しえず，より総合的な形で実施されなければならないといえよう。長期的には建築安全性に対する認識の普及，都市計画的には用途と構造と防災面から検討しなおすこと，建築計画的には建物使用有限の

増加をうながすような平面計画，内装計画，設備計画が最終的に耐火造の普及に影響を及ぼすこと，経済的には補助金による耐火造への優遇ないしは建設資金の金利の低下，貸し出しの増大をはかることなどが考えられる。その他，法的規制によるものが考えられる。

文献

1) 青木義次,「火災フェイズの拡大に関する確率論的研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和52年10月

2) 「安全性に関する評価法及び測定法の開発」, 昭和51年度総合技術開発プロジェクト 住宅性能総合評価システムの開発報告書, 昭和52年3月

3) 青木義次,「火災損失額のシミュレーション分析よりみた防火対策の評価 — 住民の側よりみた建築安全性の研究 その3」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和50年10月

4) R. Hooke, J.A. Jeeves, "Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems," J. Assoc., Comput., March, 8, 212 - 228, 1961

5) L.C.W. Dixon, "Non-linear Optimization", 松原訳, 培風館, 昭和49年

6) 青木義次,「火災フェイズの拡大に関する確率論的研究(1) 各フェイズの滞留確率関数の算出」, 日本建築学会関東支部研究報告集, 昭和51年7月

7) 青木義次，「火災フィズの拡大に関する確率論的研究(2) 未知パラメーターの推定」，日本建築学会関東支部研究報告集，昭和53年7月

8) 森下弥三郎，「住宅における火災拡大過程に関する統計的考察」，日本火災学会研究発表会概要集，昭和52年5月

9) 消防白書，昭和51年度版

10) 東京消防庁統計書

11) 住宅平面図集，住宅金融普及協会編，新建築社刊，昭和45年

12) 星野，岸谷，吉成，「建築の防火避難設計」，日刊工業新聞社，昭和44年

13) 大前義次，「待ち行列理論と実際」，日科技連，昭和37年

14) 関沢愛，「住宅における火災拡大危険の要因分析」，日本火災学会研究協議会概要集，昭和52年12月

15) 森下洋三郎，「火災拡大過程の統計による解析 ― 住宅火災について」，日本火災学会研究協議会概要集，昭和52年12月

16) 「新しい住宅」，実業之日本社，昭和49年8月

17) 建築統計年報 昭和41年，46年，51年度版，建設省

SEKIREI A4 NO. 54

5-2 類焼拡大防止計画の確率論的分析

5-2-1 類焼の要因

5-2-1-1 延焼フェイズ

火災による人的、物理的損失をより少なくするためには単に単一建物内での火災進展の防止ばかりでなく、建物から建物へと拡がってゆく火災のフェイズを検討せねばならない。しかしながら、いわゆる延焼のプロセスについては研究上残された課題も多く、安全計画上、困難な問題も多い。

また、延焼という概念が、現在ではややあいまいに使用されており、以下、延焼のフェイズとして2、3の延焼概念を整理しておくことが今後の研究に先立ち必要であると思われる。

まず、前節での火災フェイズの定義と同様に、以下のように一応のフェイズを考えよう。

1. 単体内延焼
2. 類焼
3. 大火延焼

まず、単体内延焼とは、集合住宅などの単一の建物において、同じ建物内の各戸（各室）へ火災が拡がってゆく現象をさす。この場合も延焼と呼ばれるが、物理的には建物から別の建物への延焼とは異なる点が多く、むしろ

前節の次フェイズへのプロセスとしてとらえた方が研究上適当と思われる。

一方，建物から建物への延焼においても，火災事例を見た場合，区別を要する必要があるといえよう。すなわち，大火など延焼面積がある程度以上になった場合，輻射熱などが通常の火災と比べ大きく，また，火炎も発達し，その高さも通常火災の火炎に比べ高く，さらに飛び火などによる延焼が大きな要因となってくる。さらにこうした大火時では，局地的な風向，風力の変化も生じるといわれており，いわゆる大火まで発達した後の延焼と未発達の段階における延焼とは区別する必要があるといえよう。従って，充分明確な定義ではないが，大火まで発達していないフェイズにおける延焼を類焼と呼び，ある程度，規模の大きな火災となった段階での延焼を大火延焼と呼び，区別しておくことにしよう。

大火の場合，上述の他に炎の先端より風下側に500°C前後の高温熱気流が存在していることが知られており，延焼力は大きく，延焼の速度も速い。こうした状況に達してしまった段階では，通常の消防力では充分消火効果を期待することができない。従って，より効果的な防火対策としては，こうした大火に発達する前に延焼を阻止

することであり，建築計画，都市計画的にみても大火の発達に至る以前の段階で延焼を防止することが考えられなければならないと言える。後の格子状配置モデル地区における類焼シミュレーションで示されるように，ある程度の規模以下で鎮火されない場合，いづれもが大火規模の火災に発展し，その中間的延焼規模のものが生じるケースは少なく，この点からいっても小規模の延焼段階での消火の必要性があるといえる。

以上のことから，以後の分析では単体延焼は除外し，建物から他の建物への延焼を取り扱い，とくに大火に至る以前の延焼（以後，これを類焼と呼ぶ）を中心に分析を進める。

5-2-1-2 類焼要因及び既存の研究結果

延焼の要因のうち最も直接的なものは火炎の接触である。続いて輻射熱及び飛び火があるが，飛び火は同時多発火災と同じような効果があり，消火を困難にし，大火の発生への危険性を増大させるものである。この他，火炎周辺の熱気流などの効果も考えられる。

延焼を大火に発達する以前の段階に限定して，かつ隣接建物への類焼について考えれば主要因は火炎の接触

と輻射熱であり，浜田（文献1）によって多数の実大火災実験の結果よりその効果が定量的に研究されており，以下の検討もこの研究結果を基本前提としている。

一方，これらの類焼要因，すなわち火炎の接触，輻射熱はいとつの物理的現象であり，これらの現象を決定する環境条件として温度，風向，風力及び建物種別，建物立地性状などがある。とくに日本の市街地の多くは冬期において湿度が低く，火器の使用頻度が高いという悪条件が重なっており，以下の分析に際しては基本データを冬期（12月，1月，2月）のものを中心にして分析し，安全側の結果を得るため，より危険側のパラメーターを推定することを試みる。

建物種別としては，木造，防火造，耐火造の区別があり，火災データの統計上からこれよりも精密な分類は現段階では困難である。この他，立地性状としては，とくに隣接性状が類焼の上で重要な要因となってくる。

ここでは，以後の分析の基礎となるこれまでに知られている諸結果を整理しておこう。

先に述べたように浜田による実大建物の実験から輻射熱及び火炎の接触によって火源建物からの受熱量から被類焼側建物の表面温度（木造の場合；モルタル塗の場合は下地木ずり面温度）を求めて，その値を着火から見た

安全規準温度（260°Cが用いられることが多い）以下であるように建物間距離を設定し，安全隣棟間隔としている。また，この際，図7-1のように等温度となる点は火元建物の外壁面下端を原点としたとき，水平距離d，高さhとするとき，$h = ad^2$なる放物線の上にあることが示されている。とくに温度ピークが260°Cとなる4級温度標準曲線をうるときを類焼の危険限界とすると，このとき火元建物が普通木造の場合

$$h = 0.04 d^2$$

が危険限界であることが示されている。また，最近では枠組木造（ツーバイフォー）住宅の実大火災実験においても建物周辺（風下側）においてほぼ放物線に近い等輻射熱量の関係が確認されている（文献2）。

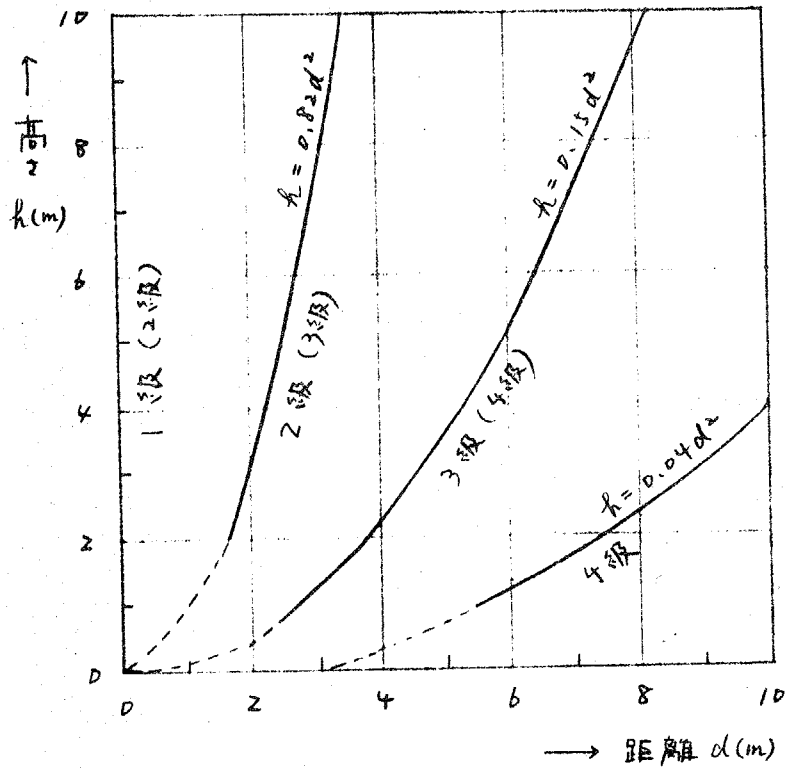


図 7-1 等温度曲線（文献1）

5－2－2　類焼確率関数の導出

5－2－2－1　確率的把握の必要性

類焼を決定する要因を前節で整理したが，現実の火災ではそれらの要因がすべて危険側の値となっているにもかかわらず，類焼しないもの，逆に安全側の値でも類焼してしまったものなどがあり，これらの要因でとらえられないランダムな要因が介入しているといえる。従って，従来の延焼モデルのような確定的な取り扱いを前提とすることなく，確率的な見地から検討をする必要があるといえよう。

一方，最近では都市的規模で発生する災害の危険性がとくに指摘されており，これに応じるためシミュレーション分析等を用いた研究がなされている。しかし，延焼モデルはその前提として浜田の延焼速度式（文献1）によるものが多く，基本的モデル構造は確定的であるといえよう。

従って，類焼現象レベルでの確率論的な研究が必要とされており，以下では類焼確率関数を物理的実験から得られる類焼条件式から導き，また，これまで各種延焼モデルでの問題点を克服しようと試みるものである。

既存の類焼確率関数は次のような線形回帰式で示され

ることが多い。

$$P = -ax + b \qquad (2-1)$$

ただし、P；類焼確率

x；距離

a, b；構造別のパラメーター

ところがこの式では

$$0 \leq x \leq b/a$$

の範囲でしか意味をもたず、幅員 b/a 以上の道路による類焼防止効果を検討することができず、シミュレーション分析の上でも不都合な結果をうむ可能性をもっている。

5－2－2－2　前提条件

類焼確率関数をより厳密に導くために、暗黙のうちに仮定としてくみこまれている条件を整理することからはじめる。

これまで（2-1式では）類焼確率は、水平距離の関数として与えられていたが、この仮定の妥当性から検討する。浜田稔博士の実大火災実験及び川越博士他による最近の実大火災実験による研究によれば、次の仮定が経験法則として認められている。

【仮定1】　$h = hx^2$ 上で同一の温度曲線をうる。

ただし，h；火元からの高さ

x；火元からの水平距離

k；パラメーター

【仮定2】 類焼は温度曲線に依存している。

ここで，建物の形状・材質及び環境条件等は一定であると考えておく。仮定1，仮定2によれば，高さ（類焼される側の建物）が重要な類焼要因として加わることになる。

今後，さらに多くの火災実験及び物理学的な面からの理論研究によって，これらの仮定について検討する必要があるが，ここでは以後この2つの仮定を前提として議論するものとする。ただし，パラメーターの決定については，得られた数理的結果に火災事例のデータを対応させて統計的に求める。

以下では，上記2つの仮定のみを前提として類焼確率関数の形を数理的手続きで導く。そのため上記の仮定を数学的表現に言いかえておくことにする。

【前提命題1】：類焼確率関数fは$k(=h/x^2)$の一価関数である。

この前提命題はひとつの温度曲線がパラメーター h で定まるという仮定1に，類焼はこの温度曲線に依存するという仮定2を組み合せたものに他ならない。さらに

$$h = h/x^2, \quad h > 0 \qquad (2-2)$$

であり，確率が区間 $[0, 1]$ の実数であることから，次の表現をとっても同値である。

【前提命題1'】：類焼確率関数 f は区間 $[0, \infty]$ を定義域区間 $[0, 1]$ を値域とする全単射の実関数である。

さらに，$h = hx^2$ で区切られた空間のうち，火元から近い方の領域の方が類焼しやすいことから，次の前提命題が成り立つ。

【前提命題2】：$h_1 < h_2 \longleftrightarrow f(h_1) < f(h_2)$

すなわち，関数 f は単調増加関数である。

また，類焼確率関数が不連続である理由はなく，むしろ連続関数であった方が取り扱いも便利であり，応用に適することから，数学的理由で次の仮定を加える。

【前提命題3】：類焼確率関数 f は連続である。

以上の準備のもとで類焼確率関数形を導出することが出

る。

5-2-2-3 類焼確率関数の導出

前提命題1', 2, 3を用いて, ただちに次の補助定理が導ける(物理的意味からして, この補助定理を前提命題と仮定しても差しつかえないと思われる)。

【補助定理1】: $f(0) = 0$ (2-3)

従って, 類焼確率関数と $h(=h/d^2)$ との関係は, およそ図7-2のような形をしていることがわかる。

さらに, この関数の形を厳密に決定するために, 次の非類焼確率(類焼しない確率)関数を定義しておく。

【定義7-1】: 非類焼確率関数とは以下の式で与えられる関数 $g(h)$ である。

$$g(h) = 1 - f(h) \quad (2-4)$$

従って, 明らかに以下のことが成立している。

$$0 \leq g(h) \leq 1 \quad (2-5)$$

g; 単調減少関数

ここで, ある家屋を想定し, その射影が図7-3に示すものとすると, 射影方向に火元が平行に存在していると き, 火元から $h(=h/d^2)$ を極大とする点は2ヶ所あり,

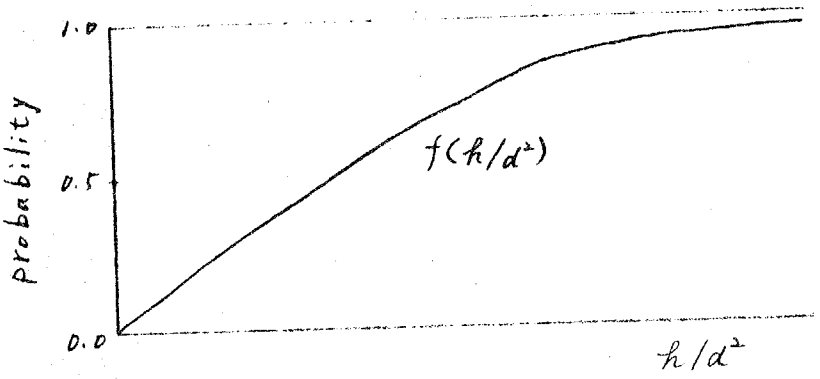


図 7-2　確率密度関数の概容

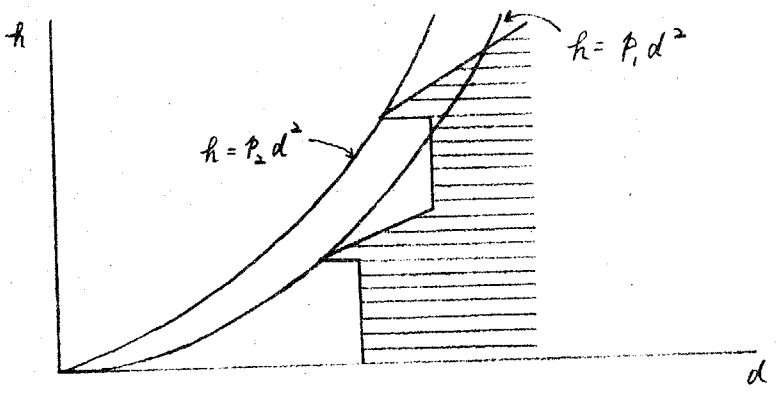


図 7-3　類焼実

それらを p_1, p_2 とすると，この2ヶ所からの類焼が考えられるから，この家屋の類焼しない確率は

$$l = g(p_1) \times g(p_2) \qquad (2-6)$$

で近似できる。

一般的には上のような実がn ヶ所あると考えなければならないので，(2-6)式は一般化すると次のようになる。

$$l = \prod_{i=1}^{n} g(p_i) \qquad (2-7)$$

そこで，類焼家屋の火元に近い実（類焼実）の平均の h/d^2 の値 k を考えると，l はこの k の関数となっていると考えられる。すなわち，

$$l = \prod_{i=1}^{n} g(k) = \left(g(k)\right)^n \qquad (2-8)$$

$$k = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} p_i \qquad (2-9)$$

従って，(2-7)式，(2-8)式及び(2-9)式より

$$\left\{g\left(\frac{1}{n}\sum p_i\right)\right\}^n = \prod_{i=1}^{n} g(p_i) \qquad (2-10)$$

対数をとって

$$n\log\left(\frac{1}{n}\sum p_i\right) = \sum \log(p_i) \qquad (2-11)$$

ここで

$$G_T(x) = \log(x) \qquad (2-12)$$

とおくと，(2-11)式は次のようになる。

$$G\left(\frac{1}{n}\sum p_i\right)=\frac{1}{n}\sum G(p_i) \tag{2-13}$$

この方程式はGについてのn位のイエンセンの関数方程式であり，次のように解ける。

$$G(x)=cx+c' \tag{2-14}$$

ただし，c，c'は定数パラメーターである。従って

$$\log g(h)=ch+c' \tag{2-15}$$

すなわち

$$g(h)=\exp[ch+c'] \tag{2-16}$$

となる。ここで，$h=0$のとき(2-3)及び(2-4)式より$g(0)=1$であることから$c'=0$であることがわかる。すなわち

$$g(h)=\exp[ch] \tag{2-17}$$

であり，従って，類焼確率関数は以下のようになる。

$$\begin{aligned} f(h)&=1-g(h)=1-\exp[ch] \\ &=1-\exp[ch/d^2] \end{aligned} \tag{2-18}$$

これが求める類焼確率関数であり，パラメーターcは建築物の性状，風の影響，温度等に依存している。

以下では実際に発生した火災におけるデータから，このパラメーターを決定することを試みる。

5-2-3 統計データによる類焼確率関数の未知パラメーターの決定

5-2-3-1 統計データ

類焼に関する公表されたデータは少なく，実大実験等の結果から統計的に分析するには充分なサンプル数が確保できない。

ここでは実際の火災における個々の調査書から類焼に関するデータを整理し，前項までに求めた類焼確率関数の未知パラメーターを統計的見地から決定する。

利用されたデータは東京都火災調査書によるもので，対象となっている火災は東京23区及び東京消防庁受託地域を対象とする昭和46年12月より昭和47年2月までの風速7.5m/sec以下の状況下で発生した合計1,443件を分析した。

風速7.5m/secを越える場合については件数が少ないこと，バラツキが大きいこと，データが完全でないものが多いなどの理由によって分析対象に入るものがなかった。データを冬期に限ったのは，空気の乾燥等，類焼しやすい条件，すなわち危険側のデータをとることによる解析結果としては，より安全となることを期待したものである。なお，データの閲覧に際しては消防研究所の神

忠久氏をはじめとする方々に御協力いただいた。

データを整理する際，建物間距離は火災調査書添付の建物配置図より，図中縮尺を用いて0.1mの単位まで読み取った。被類焼側高さは平屋家屋については3mとし，n階の建物は3×n mとした。また，類焼したかしないかの判定は火災調査書及び添付図書に記載された通りとした。

上記のように整理したデータの個数は建物構造種別毎に示すと表7-1のようになる。データ数としては，耐火造出火の事例が少なく，充分なサンプル数とはいえない。以下，一応整合性のある結果を得てはいるが，今後のデータの蓄積が必要といえる。

5-2-3-2 推定方法

類焼確率関数が水平距離d，被類焼建物高さhの関数となっているので，構造種別，風の条件別に未知パラメーターを決定することが考えられる。このとき，距離d，高さhが与えられ，そこでの類焼確率Pがデータとして与えられている場合，すなわち実際のデータとして

$$D_i = (d_i, h_i, P_i) \quad i = 1 \sim n \qquad (3-1)$$

なるn個のデータの組から(2-18)式の未知定数Cを推

表7-1　構造種別類焼データ数

		被類焼建物		
		木造	防火造	耐火造
火元建物	木造	553	323	64
	防火造	155	286	30
	耐火造	19	9	4

定する方法も，まず考えなければならない。

ところが，未知パラメーターCがeを底とする指数の中に入っているため，そのまま回帰分析を行うことは困難であり，まず以下のようなプロセスを考えてみよう。

すなわち，

$$\left.\begin{aligned} &P(h_i) = 1 - \exp[Ch_i] \\ &\text{ただし，}\quad h_i = h_i / d_i^2 \end{aligned}\right\} \quad (3-2)$$

という値$P(h_i)$とデータP_iが充分に一致するということを，$1-P_i$と$\exp[Ch_i]$とが充分一致するということと考え，さらに両者の対数をとったもの$\log(1-P_i)$とCh_iが一致するようにCを推定する。このことは次の関数を最小化するCを求めることに他ならない。

$$Q_1 = \sum_{i=1}^{n} \{\log(1-P_i) - Ch_i\}^2 \quad (3-3)$$

故に

$$\frac{\partial Q_1}{\partial C} = \sum_{i=1}^{n} (-h_i)\{\log(1-P_i) - Ch_i\} = 0 \quad (3-4)$$

従って

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{n} h_i \log(1-P_i)}{\sum_{i=1}^{n} h_i^2} \quad (3-5)$$

となる。求める類焼確率関数及びそのパラメーターは

$$\left.\begin{aligned} &f(d, h) = 1 - \exp[Ch/d^2] \\ &C = \frac{\sum_{i=1}^{n} (h_i/d_i^2) \cdot \log(1-P_i)}{\sum_{i=1}^{n} (h_i/d_i^2)^2} \end{aligned}\right\} \quad (3-6)$$

で与えられることになる。

ところで，この対数をとってからの最小自乗法の適用を行う方法で実際に推定を行ってみると，以下のような欠点をもっていることが判明した（文献3）。

(1) 水平距離 $x \fallingdotseq 0$ のデータのウェイトが強く働き，充分大きな距離のデータの値は推定値にあまりきいてこない。

(2) 従って，消防効果の影響を強く受ける近距離のデータが推定値を左右し，客観的な類焼確率の推定には好ましくない。

以上の欠点は $x \to 0$ のとき $P \to 1$ となっており

$$\log(1-P) \to -\infty \qquad (3-7)$$

となるために起るものである。すなわち対数変換は距離を不変に保たない，局所的に伸縮する変換であるのに対し，最小自乗法は距離の関数を最小化するものであるために上のような問題が生じるのである。

そこで，次のように対数をとらずに最小自乗法を適用する。

$$Q_2 = \sum_{i=1}^{n} \{P_i - (1 - e^{(k_i)})\}^2 \qquad (3-8)$$

ただし，$k_i = h_i / \alpha_i^2$

ところが，このまま $\frac{\partial Q_2}{\partial C}$ を求めても極値条件式 $\frac{\partial Q_2}{\partial C} = 0$

は解けない。従って後に示すような近似的方法を用いる。

そのために 2, 3 の数学的準備が必要である。

【補題 1】: $0 < a < b < 1$ に対して

$$|\log a - \log b| = \log\left(\frac{a+|a-b|}{a}\right) \qquad (3-9)$$

(証明) $b = ad$ とおく

$$|\log a - \log b| = \log b - \log a = \log ad - \log a$$

$$= \log d \qquad (3-10)$$

$$|a-b| = b - a = ad - a \qquad (3-11)$$

従って, (3-11) 式より

$$d = \{|a-b|+a\}/a$$

これを (3-10) 式に代入して (3-9) 式が導かれる。

【補題 2】: $|a-b|$ が充分小さいとき, 近似式

$$a|\log a - \log b| \fallingdotseq |a-b| \qquad (3-12)$$

が成立する。

(証明) 次の関数を考える。

$$g(|a-b|) = \frac{\log(a+|a-b|) - \log a}{|a-b|} \qquad (3-13)$$

とすると

$$\lim_{|a-b|\to 0} g(|a-b|) = (\log x)'_{|x=a} = \frac{1}{a} \qquad (3-14)$$

従って，充分小さい $|a-b|$ のもとで

$$\log(a+|a-b|) - \log a \fallingdotseq \frac{1}{a}|a-b|$$

となり，以下のように書くことができる。

$$\log \frac{a+|a-b|}{a} \fallingdotseq \frac{1}{a}|a-b| \qquad (3-15)$$

故に補題1の(3-9)式より

$$|\log a - \log b| \fallingdotseq \frac{1}{a}|a-b| \qquad (3-12')$$

従って，(3-12)式が得られる。

上の補題2の結果を利用すると

$$Q_2 = \sum_{i=1}^{n} \{(1-P_i) - e^{Ch_i}\}^2 \qquad (3-16)$$

$$\fallingdotseq \sum_{i=1}^{n} \{(1-P_i)|\log(1-P_i) - Ch_i|\}^2 \qquad (3-17)$$

(3-17)式の右辺を Q_3 とおくと

$$Q_3 = \sum_{i=1}^{n} (1-P_i)^2 (\log(1-P_i) - Ch_i)^2 \qquad (3-18)$$

となり，この値の最小化を考えればよいことになる。

$$\frac{\partial Q_3}{\partial C} = 0 \qquad (3-19)$$

(3-19)式を解けばよいから

$$\sum_{i=1}^{n} (1-P_i)^2 h_i \log(1-P_i) - \sum_{i=1}^{n} (1-P_i)^2 h_i^2 C = 0 \qquad (3-20)$$

となり，従って，求めるパラメータは以下の式で与え

られる。

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{n}(1-P_i)^2 h_i \log(1-P_i)}{\sum_{i=1}^{n}(1-P_i)^2 h_i^2}$$

ただし　$h_i = h_i/d_i$　　(3-21)

5-2-3-3　推定結果

ここで導出した推定方法によって，実際のデータを用いて構造種別毎に推定したものが表7-2である（風々性状；風速別，風向別による推定はサンプル数が小さくなってしまい，充分な結果が得られなかった）。ここで得られた結果は充分なサンプル数によるものではなく（とくに耐火造に関して），今後データの組織的な蓄積が必要であり，ここで得られた結果もそうしたデータによって再検討してゆくべきものであるといえる。

5-2-3-4　類焼確率からみた隣棟距離

類焼確率関数を水平距離に関して（$h=3m$として）示した図（図7-4）よりわかるように，1m～4mで距離の増加とともに類焼確率が減少していることがわかる。このことを正確にとらえるために，距離1単位増加当りの類焼確率の減少率を調べてみよう。

$$-\frac{\partial P}{\partial d} = \frac{2ch}{d^3} e^{ch/d^2}$$　　(3-22)

表7-2 パラメーターCの推定値

		被類焼建物		
		木造	防火造	耐火造
火元建物	木造	−2.016	−1.124	−0.034
	防火造	−1.470	−0.903	−0.053
	耐火造	−0.527	−0.029	−0.020

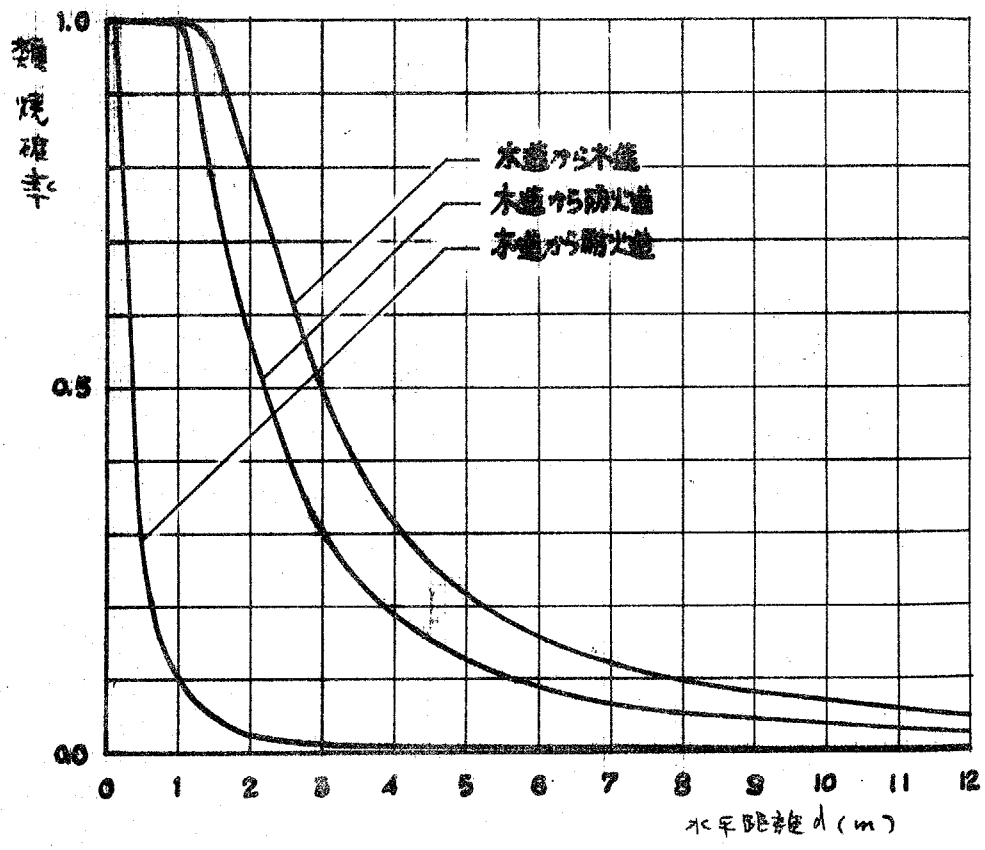


図7-4-1 類焼確率曲線（火元が木造の場合）
（h=3m）

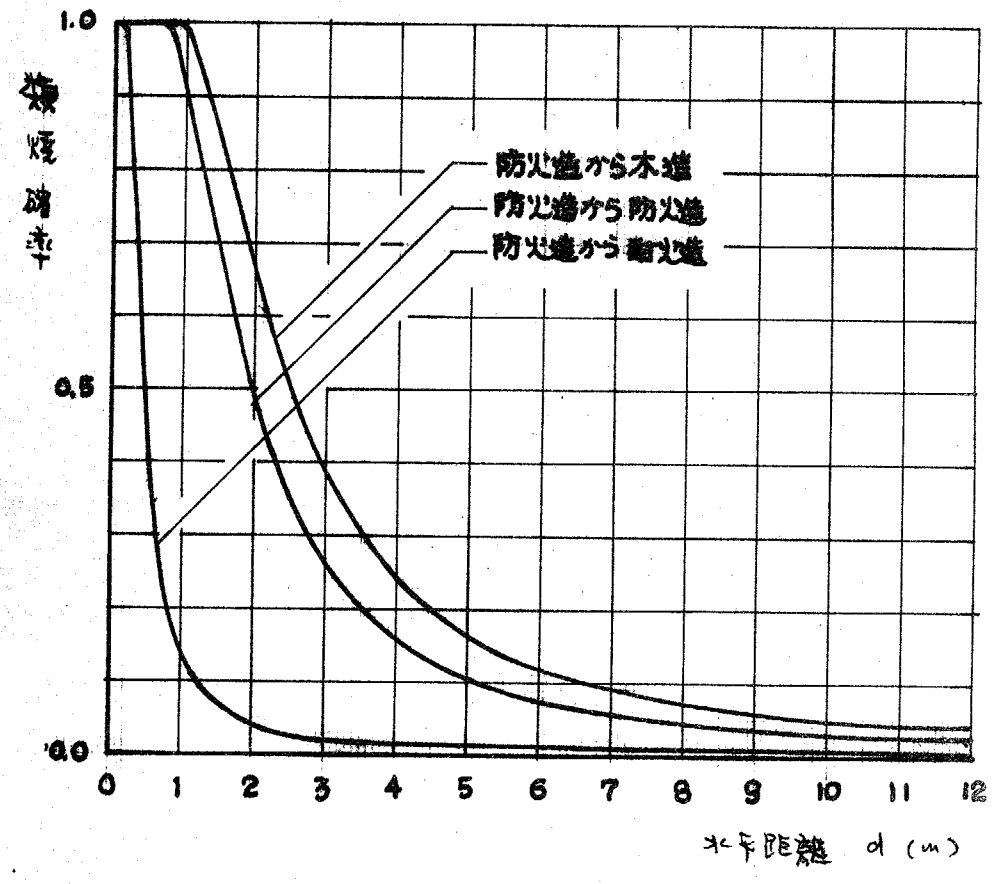


図7-4-2 類焼確率曲線（火元が防火造の場合）
（h=3m）

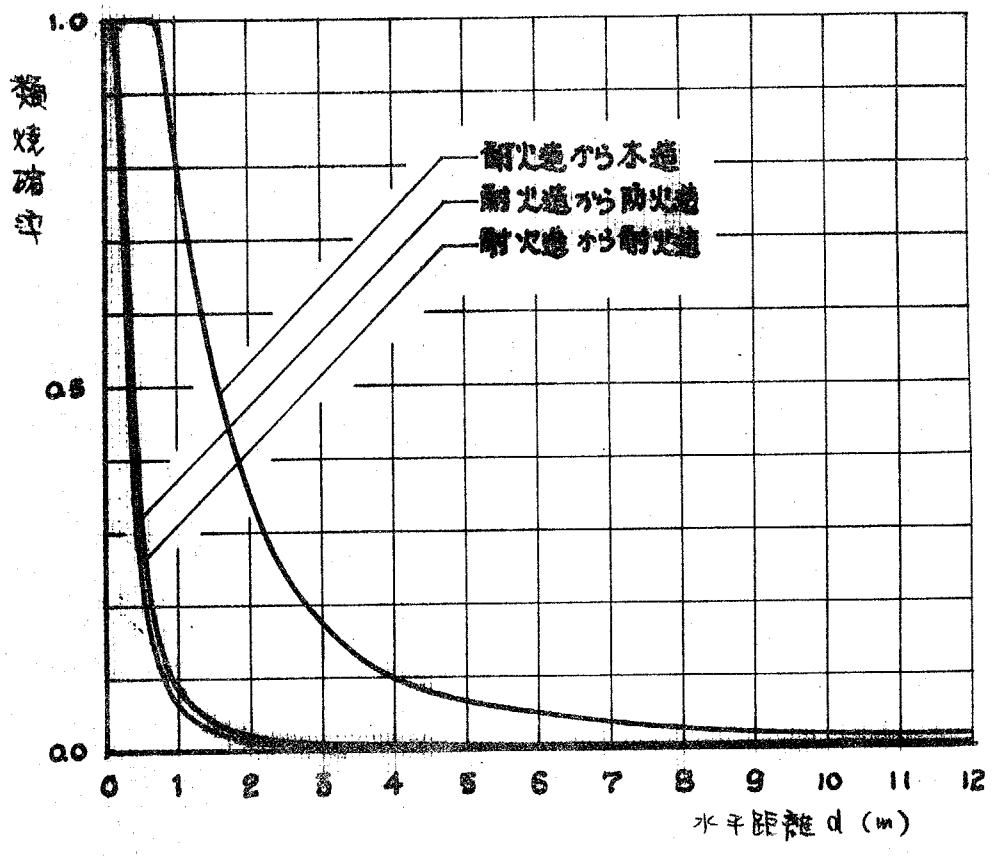


図 7-4-3 類焼確率曲線（火元が耐火造の場合）

さらに

$$\frac{\partial}{\partial d}\left(-\frac{\partial P}{\partial d}\right)=\frac{2ch}{d^4}\,e^{ch/d^2}\cdot\left(3+2chd^{-2}\right) \qquad (3-23)$$

となり，従って，距離の変化によって引き起される防災効果は（3-22）式で与えられる関数で見ることができ，それらは（3-23）式の値が0となるところでいうのピークとなるので

$$\frac{\partial}{\partial d}\left(-\frac{\partial P}{\partial d}\right)=0 \qquad (3-24)$$

を満たす距離

$$d_0=\sqrt{\frac{-2ch}{3}} \qquad (3-25)$$

で最大の距離の防災効果効率であることがわかる。これらの分析から，木造から木造，木造から防火造，防火造から防火造の類焼ケースでは2m付近で類焼確率の減少率が一番大きく，この付近の建物間距離にある建物は建物距離を少し長くとるだけでかなりの類焼防止効果があることがわかる。耐火造が火元または耐火造への類焼の場合は1m以下で減少率のピークがあり，耐火造からまたは耐火造への類焼は1m以上の距離をとることによりかなりの類焼防止効果があることがわかる。従って，こうした

観点から，新築（増築，改築）などの確認申請時について建物配置の行政指導を行うことによって，地区の安全性への効果が期待できるといえよう。

一方，類焼確率をどの程度以下におさえておけば安全といえるだろうかという疑問がありうるが，確率的見地からから考えれば，こうした最低基準値を設定することは困難であるが，既存の安全の目やすとされている確定的な結果と対応づけることはできる。浜田氏の研究に基づいて，木造1級火災における木造家屋の類焼の安全範囲として

$$h \geq 0.04 d^2 \qquad (3-26)$$

を提唱されている。ここではこの基準を採用したときの類焼確率値をひとつの安全の目やすとして計算しておこう。(3-18)式に $C = -2.016$（木造の場合），$h/d^2 = 0.04$ を代入して

$$P_* = 1 - \exp[-2.016 \times 0.04] = 0.077 \qquad (3-27)$$

をうる。すなわち，類焼の可能性が7.7%以上であれば類焼の危険があると考えるということである。この7.7%という値は構造の破壊確率あるいは各種の事故などからみると非常に高い値であるが，火災における類焼というものは出火を一次災害と考えれば，類焼はそこから引き起される二次的災害であり，事実，出火の確率は非

常に低く，類焼というイベントの発生する確率はこの出火の確率と類焼確率の積で与えられるために，類焼の安全の基準は他の基準にくらべれば高めにでるのは当然といえよう。たとえば出火率（1万人当り，1年間）を都市の場合，6.8前後であり（前節），また類焼が可能となる火災フェイズはフラッシュ・オーバー以後とすると，フラッシュ・オーバーにまで発展する割合は木造の場合0.4010であり，一建物当り平均4人の居住者とすると，木造から木造への類焼確率（年間）は以下のように求めることができる。ただし，被類焼建物の周囲に8個の木造建物があるとする。ひとつの建物の1年当り出火率は

$$P_0 = \frac{6.8 \times 4}{10000} = 2.72 \times 10^{-3} \left(\fallingdotseq \frac{1}{368} \right) \qquad (3-28)$$

であり，平均370年に1回の割で出火することになる。

一方，ひとつの周囲建物からの類焼確率は

$$P_1 = P_0 \times 0.4010 \times P_* = 8.399 \times 10^{-5} \qquad (3-29)$$

となる。8個の建物のいづれからも類焼しない確率は

$$1 - P_8 = (1 - P_1)^8 \qquad (3-30)$$

であり，従って

$$P_8 = 6.718 \times 10^{-4} \left(\fallingdotseq \frac{1}{1489} \right) \qquad (3-31)$$

となり，故に周囲の建物から類焼してくることは平均約1500年に1度ということになる。

5-2-4 類焼確率関数の時間的挙動

5-2-4-1 類焼確率関数の導出

前項まで類焼確率を構造種別，隣棟水平距離，被類焼側建物高さの関数として類焼確率を求めたが，実際には，火炎の接触，輻射の暴露時間の増加にともない類焼の可能性は増大していくものと思われる。しかしながら，現実の火災事例では消火活動の介入があるため，暴露は途中で中断されることになり，ある一定の類焼確率となって表われてくると考えられる。すなわち，前項までに求めた類焼確率は消火活動の効果が表われるまでの類焼確率であり，時間的に考えれば，消火活動が開始される以前は時間の増加にともない類焼確率は増加してゆくものと考えられる。本項ではこうした時間の関数としての類焼確率関数を求め，前項までの類焼確率関数との関係を調べる。

まず，建物の材料の特性は同一・隣棟水平距離，被類焼側建物高さなど前節までに要因として考えたものは一定とし，時間のみが変化するものと考える。このとき，一定要因は定数としてとらえられるので，類焼確率関数は時間tのみの関数と考えられる。すなわち

$$P = P(t) \qquad (4-1)$$

P；類焼確率

t；時間（被類焼建物への火炎の噴出，または熱輻射が開始された時点からの時間）

である。さらに，非類焼確率関数Qを次のように定義する。

$$Q(t) = 1 - P(t) \tag{4-2}$$

このとき，時刻tにおいて次のΔtの微小時間に類焼していない建物の$\gamma\Delta t \times 100\%$のものが類焼したとすると，確率的には以下のように記すことができる。

$$Q(t+\Delta t) = Q(t) - \gamma\Delta t\, Q(t) \tag{4-3}$$

このとき，γは単位時間における類焼の可能性を表わす（なぜならばγΔtが時間Δtにおける類焼の割合であるから）ので，（瞬間）類焼確率密度と呼ぶことができる。γは一般的には時間の変化にともない変化することも考えられ，より一般的には時刻tの関数となっていることが考えられる。

（4-3）式を変形すると（Q(t)が0となる1つ1つはすべての建物が必ず類焼してしまっていることを意味するので$0 \leq t < \infty$の範囲では意味がないので除外して考える。すなわちQ(t)≠0）

$$\frac{1}{Q(t)} \cdot \frac{Q(t+\Delta t) - Q(t)}{\Delta t} = -\gamma \tag{4-4}$$

となり，類焼確率密度 r の意味がより一層明確となったといえよう。ここで，微小時間 Δt が限りなく 0 に近づくとき

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{1}{Q(t)} \cdot \frac{Q(t+\Delta t)-Q(t)}{\Delta t} = \frac{1}{Q(t)} \cdot \frac{d}{dt} Q(t) \qquad (4-5)$$

となり，従って，(4-4) 式は以下のような微分方程式となる。

$$\frac{1}{Q(t)} \cdot \frac{d}{dt} Q(t) = -r \qquad (4-6)$$

この微分方程式は以下のように解くことができる。

$$\frac{d}{dt}\left[\log\left(Q(t)\right)\right] = -r \qquad (4-7)$$

すなわち

$$Q(t) = a \exp\left[-\int_0^t r\, dt\right] \qquad (4-8)$$

となる。ここでさらに時刻 0，すなわち火炎，熱輻射に少しも暴露されていない時点では類焼していないと考えられるので，

$$Q(0) = 1 \qquad (4-9)$$

なる初期条件が成立しているので (4-8) 式に代入すると

$$1 = a \exp[0] \qquad (4-10)$$

すなわち

$$a = 1 \qquad (4-11)$$

を得る。従って，非類焼確率関数は

$$Q(t) = \exp\left[-\int_0^t r\,dt\right] \qquad (4-12)$$

であり，類焼確率関数は

$$P(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t r\,dt\right] \qquad (4-13)$$

となる。

さらに丁度時刻 t において類焼するという確率，すなわち類焼確率密度関数 $p(t)$ は（4－13）式より，次のようになる。

$$p(t) = \frac{d}{dt} P(t) = r \cdot \exp\left[-\int_0^t r\,dt\right] \qquad (4-14)$$

5－2－4－2　類焼確率関数の単純化

上に求めた類焼確率関数はいづれも指数部分に積分項を含み，統計的データ等を利用して解析する際には困難がともなう。以下では，こうした応用上より適応性のある形で類焼確率関数を表わすことを考察しておこう。

まず，積分項は時間 t と r（r 自身も時間の関数）の関数となっているので

$$g(r, t) = \int_0^t r\,dt \qquad (4-15)$$

とおくことにしよう。このとき，$g(r, t)$ の値は図7－6の斜線部分の面積に相当するが，瞬間類焼密度 r の平均値を $\bar{r}$（時刻 t までの $r(t)$ についての平均値）とすると

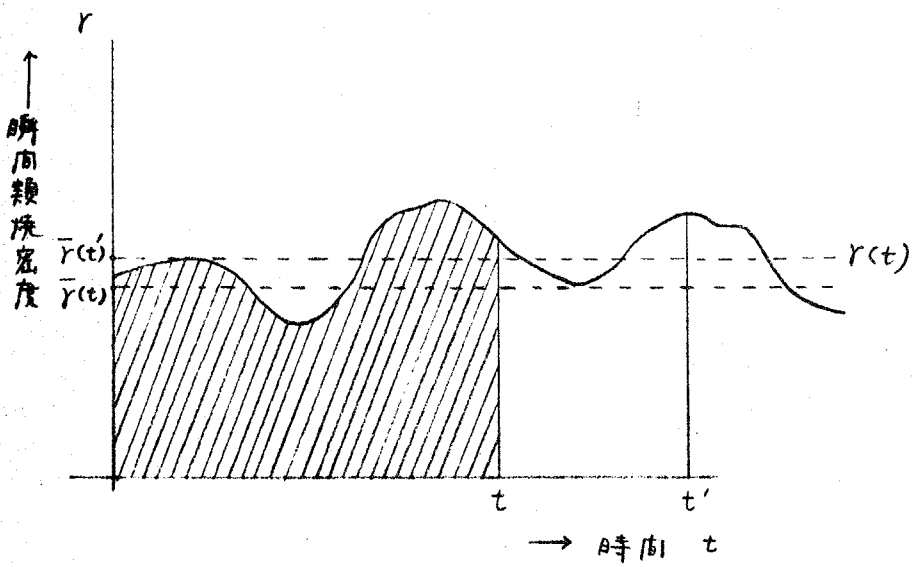


図 7-6 平均瞬間類焼密度

$$\bar{r}t = \int_0^t r\,dt \qquad (4-16)$$

となる。この $\bar{r}$ も厳密には時間の関数であり，変動するが，r の変動に比べると図から直観的にわかるように，小さく変動することになる。そこで，この $\bar{r}$ を定数と仮定し，解析の対象とする時間範囲で(4-16)式が成立しているものと考えることにする。この仮定のもとでは，(4-12)，(4-13)及び(4-14)式はそれぞれ

$$Q(t) = \exp[-\bar{r}t] \qquad (4-17)$$

$$P(t) = 1-\exp[-\bar{r}t] \qquad (4-18)$$

$$p(t) = r\exp[-\bar{r}t] \qquad (4-19)$$

と単純な形となる。

ところで，このような単純化がどの程度，現実の火災に適合しているか検討しておかねばならない。図7-7はツーバイフォー住宅の実大火災実験の際に水平距離3mの場所で観測された熱輻射量を示したものであるが，開口部からの火炎噴出の始まった時点以降では火炎の噴出にともない大きく変化しており，噴出以後50分経過の時間では輻射熱量の一定した上昇，下降という現象はみられない。従って，輻射熱量の増減は火災室の空気供給状況，火炎噴出口の形状などによって変動し，多くの火災事例について確率論的に考える際には輻射熱量を火炎噴出以降50分間程度については一定の類焼密度を

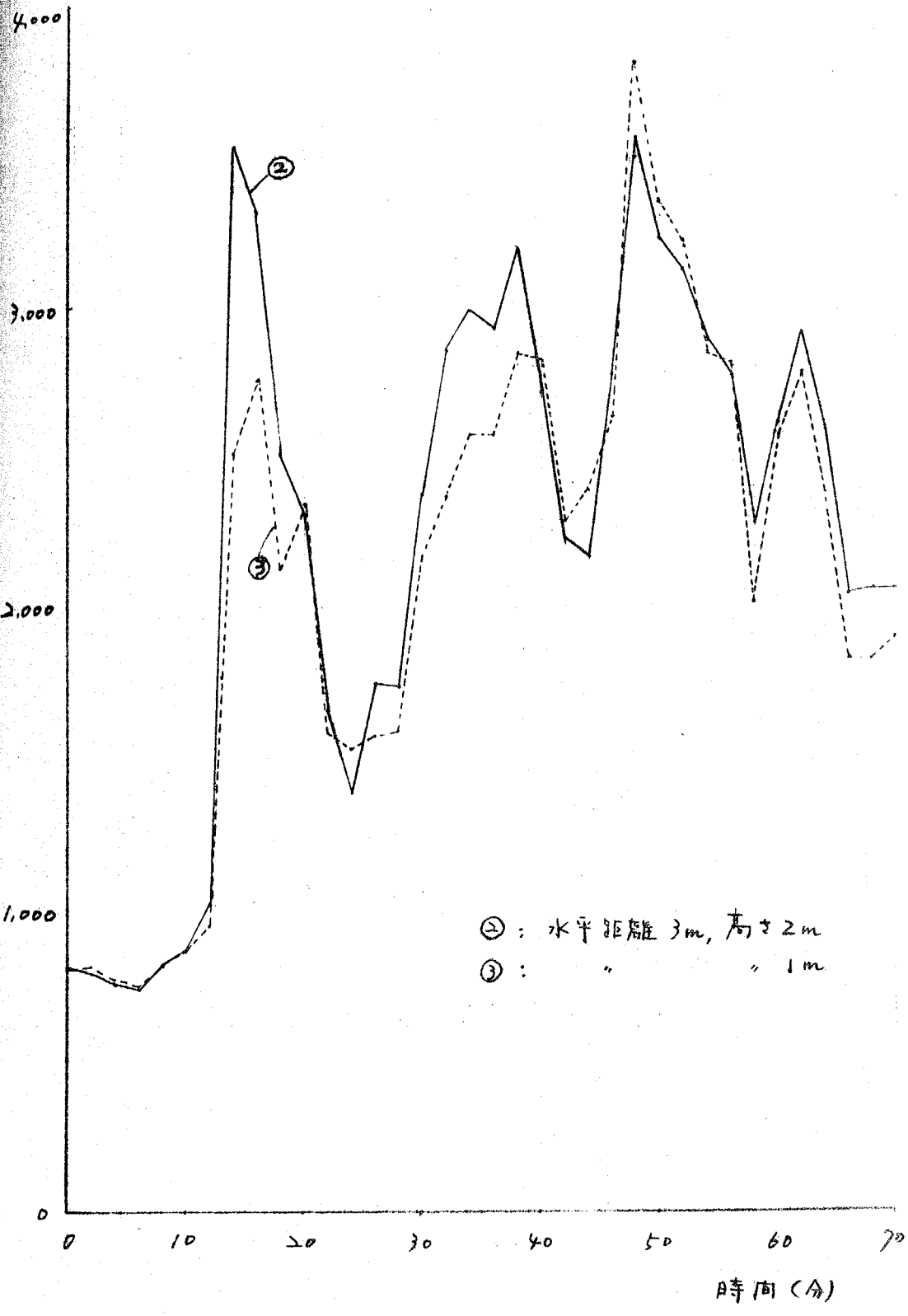

4,000
3,000
2,000
1,000
0
輻射熱量
kal/㎡
②
③
②：水平距離 3m, 高さ 2m
③：〃 〃 1m
0
10
20
30
40
50
60
70
時間（分）

図 7-7 輻射熱量

もっていると仮定しても，大きな誤差とはならないと考えられる。ただし，出火以降10分をこえる場合，当然のことながら，類焼の可能性は減少することが考えられ，今後，上述の単純化の適応可能な範囲を正確に限定する上でも多くの火災実験による建物周辺の熱輻射状況，火炎噴出状況の観測が期待されている。

従って，今後，多くの実験などによって精緻な分析が可能となることが望ましい。しかし，この単純化によって前節までに求めたデータを用いて実際にパラメータを決定し，具体的な数値として類焼確率の時間的挙動が把握できる利点をもっている。以下では，この確率的時間的な面から類焼の現象の解析を行う（以後，混同の可能性のない場合，下を単にPと略して記す）。

5－2－4－3　平均類焼時間及び類焼時間のバラツキ

類焼という現象は多くの要素によって決定される現象であり，その中には充分，確定的にとらえられない要因，確率的な要因が介在しており，統計的なデータを利用する際には確定的現象として解析を行うことは困難なばかりか，非現実的であるともいえる。従って，確率的な現象としてとらえなければならないと言えよう。

しながら，確率的な解析にともない複雑な取り扱いが必要となり，より単純な統計量を求めておくことが望ましい。そこで，ここでは火元建物から被類焼建物へと類焼するまでの時間（以後，類焼時間と呼ぶ）の平均値及びそのバラツキについて検討を加える。

まず，類焼時間の平均値Tは平均値の定義に基づいて

$$T = \int_0^\infty t\,p(t)\,dt = \bar{r}\int t\exp[-\bar{r}t]\,dt \qquad (4-20)$$
$$= \frac{1}{\bar{r}}$$

となり，平均類焼確率密度の逆数が平均類焼時間ということがわかる。逆に，平均類焼確率密度は平均類焼時間の逆数となる。

さらに，類焼時間のバラツキとして分散（平均値に関する二次モーメント）を求めてみると

$$V_T = E(t^2) - (E(t))^2$$
$$= \int_0^\infty t^2 p(t)\,dt - T^2$$
$$= \bar{r}\int_0^\infty t^2 e^{-\bar{r}t}\,dt - \frac{1}{\bar{r}^2}$$
$$= \frac{2}{\bar{r}^2} - \frac{1}{\bar{r}^2} = \frac{1}{\bar{r}^2} \qquad (4-21)$$

となる。

5－2－4－4　最終類焼確率関数との関係

5-2-2 項で求めた類焼確率関数は時間を変数として含

まないものであり，実際の火災において消火活動などが介入し，その最終結果として類焼したか，しなかったかという情報に基づくものであるので，ここでは時間の関数としての類焼確率関数と区別するため，最終類焼確率関数と呼ぶことにしよう。すなわち最終類焼確率関数P_*は

$$P_* = 1 - \exp[ch/d^2] \qquad (4-23)$$

で与えられるものであった（2-18式）。一方，時間の関数としての類焼確率関数$P(t)$は

$$P(t) = 1 - \exp[-\bar{r}t] \qquad (4-18)$$

である。ところで，類焼確率関数$P(t)$における平均類焼確率密度$\bar{r}$は類焼のしやすさを示すパラメーターともいえるが，現実の火災においては消火活動の介入によって，火元建物が鎮火されるに従って類焼の可能性はなくなり，$\bar{r}$は0となってしまうと考えられる。そこで，消火活動が介入し，類焼の可能性がなくなる時間もの確率密度を$\varphi(t)$とすると，時間の関数としての類焼確率関数$P(t)$と最終類焼確率関数P_*との関係式が以下のように得られる。

$$P_* = \int_0^\infty p(t) \cdot \varphi(t)\, dt \qquad (4-24)$$

ここで，(4-24)式を(4-25)式に代入することにより

$$P_* = \int_0^\infty \{1 - \exp[-\bar{r}t]\}\, \varphi(t)\, dt$$

$$= \int_0^\infty \varphi(t)\, dt - \int_0^\infty \exp[-\bar{r}t] \cdot \varphi(t)\, dt \qquad (4-25)$$

となる。上式の右1項は確率密度関数 $\varphi(t)$ を全域にわたって積分したものであるから1に等しい。すなわち,

$$1 - P_* = \int_0^\infty \exp[-\bar{r}t] \cdot \varphi(t)\, dt \qquad (4-26)$$

であり，従って，もし確率密度関数 $\varphi(t)$ が得られれば，上式の左辺は(4-23)式によって値が定まるので，(4-26)式は積分方程式になり，$\bar{r}$ はこの方程式をみたす定数として求めることができる。

ところで，実際の火災の類焼の可能性がなくなる時間 t を測定することは難しく，以下のような近似的関係を前提として $\varphi(t)$ を求めることを試みる。すなわち，5-2-3項で未知パラメーターを求めた際にデータとして利用した火災事例は東京都の実際の火災である。そこでは前節5-1-6-3で調べたような消火活動が行われており，明確に得られるのは覚知から消火活動開始までの時間に関する確率密度関数

$$\phi(t) = \frac{\lambda^k}{(k-1)!}\, t^{k-1} e^{-\lambda t} \qquad (4-27)$$

ただし，都区内の場合，$\lambda = 0.7143$

$k = 4$ $\qquad (4-28)$

であった。しかし，実際に類焼の可能性がなくなるのは消火活動が開始した後，その効果が表われてきた後であるので，$\varphi(t)$ と $\phi(t)$ の関係を概略図として示すと図7－8のようになる。

消火活動開始の方がその効果が表われることに先行するので，消火活動開始時間の確率密度関数 ϕ は消火効果の表われる時間の確率密度関数 φ より左側に位置している。ところで，覚知から消火活動開始までの平均時間 $t_3 - t_1$ は前節の結果より都区内で5，6分である。火災の噴出・熱輻射×開始時点をフラッシュオーバー以後のフェイズと考えると，7分～15分前後である。先の実大実験（文献2）においても着火後12分～14分において外部への熱輻射が開始している。一方，全室的火災のフェイズ（前節参照）まで拡大するまでの時間は7分でそのフェイズのまま鎮火する時間は16分であり，拡大から鎮火までの時間差は従って9分である。また，同様に室外へ拡大するフェイズについては到達時間16分，鎮火時間20分であり，その時間差は4分となっている。従って，火災の噴出時期をフラッシュオーバー直後と考えれば，鎮火効果の表われる時間は，火災噴出後，4分～9分前後であろうと思われる。従って，図7－9のように覚知時間

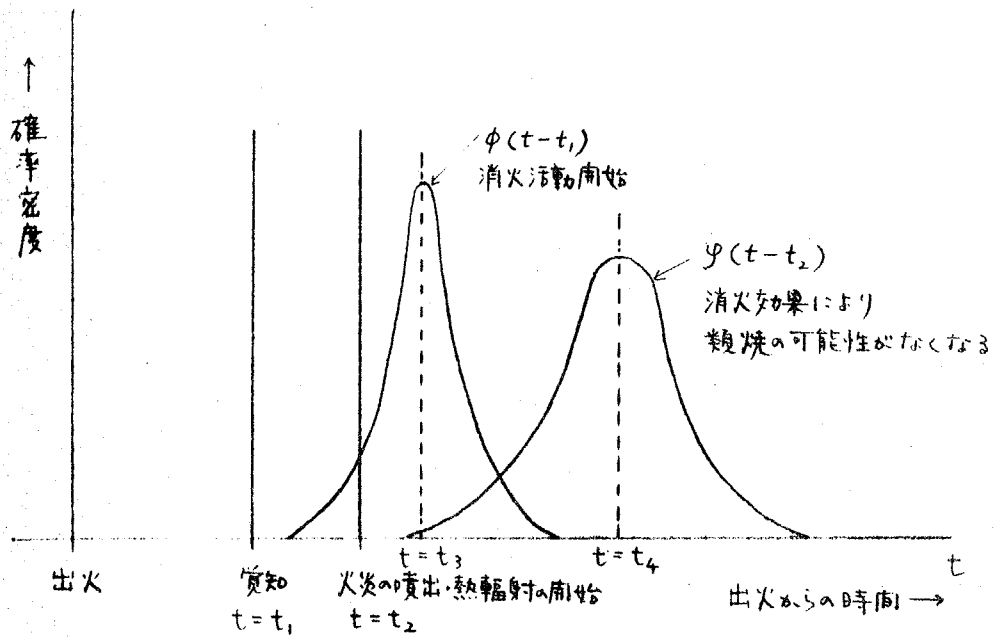


図7-8 消火開始とその効果の時間的関係

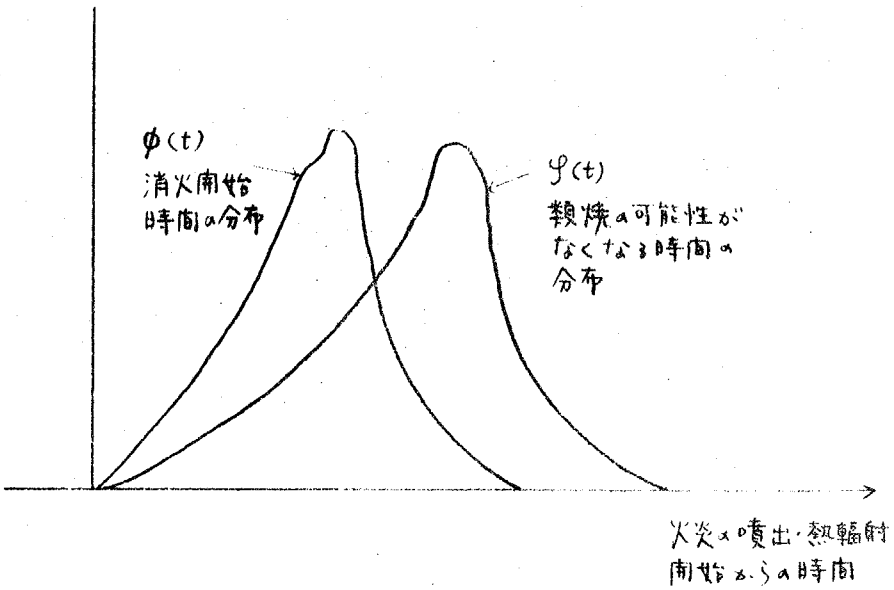


図7-9 消火開始時間分布の位置関係

を原点とした消火活動開始の確率分布$\phi(t)$を，火炎の噴出・熱輻射開始時点を原点とする消火活動の効果が表れ，類焼の可能性のなくなる時間の確率分布$\psi(t)$の上にどちらも火炎の噴出・熱輻射開始時点を原点とするように重ねた場合，$\phi(t)$は$\psi(t)$に比べてほぼ一致するか，左側に位置することが予想される。

ここで，もし$\psi(t)$より左側に位置する$\phi(t)$を(4-26)式に代入して解いて得られる$\bar{r}$の値と真の$\psi(t)$から得られる$\bar{r}$とがどのような関係になるか考察してみよう。$\psi(t)$よりも$\phi(t)$が左側にあるということは早く消火がなされるということを意味するが，現実より早く火元が消火すると仮定し，なおかつ，現実の類焼のデータを用いて推定すれば，時間当りの類焼の可能性$\bar{r}$はより大きく推定されることとなる。こうして得られる$\bar{r}$は真の$\bar{r}$にくらべて大きな値となり，結局，こうした危険側へ偏った$\bar{r}$を求めておけば，安全計画上では安全側へと偏ることになる。

従って，以下では真の類焼可能性のなくなる時間の確率密度関数$\psi(t)$の代りに消火開始時間の確率密度関数を用いて平均瞬間類焼確率密度$\bar{r}$を求める。(4-26)式に(4-27)式を代入すると

$$1-P_* = \int_0^\infty \exp[-\bar{r}t] \cdot \frac{\lambda^k}{(k-1)!} t^{k-1} e^{-\lambda t} dt \qquad (4-29)$$

となり，この右辺を $g(r, k, \lambda)$ とおくと

$$g(r, k\lambda) = \frac{\lambda^k}{(k-1)!} \int_0^\infty t^{k-1} \exp[-(\bar{r}+\lambda)t] dt$$

$$= \frac{\lambda^k}{(k-1)!} \left[\frac{\exp[-(\lambda+\bar{r})t}{-(\lambda+\bar{r})} \sum_{l=0}^{k-1} (-1)^l \cdot \frac{(k-1)!\, t^{k-1-l}}{(k-1-l)![-(\lambda+\bar{r})]^l} \right]_0^\infty$$

$$= \frac{\lambda^k}{\lambda+\bar{r}} \left[\exp[-(\lambda+\bar{r})t] \cdot \sum_{l=0}^{k-1} \cdot \frac{t^{k-1-l}}{(k-1-l)!(\lambda+\bar{r})^l} \right]_\infty^0$$

$$= \frac{\lambda^k}{\lambda+\bar{r}} \cdot \frac{1}{(\lambda+r)^{k-1}} = \left[\frac{\lambda}{\lambda+\bar{r}} \right]^k \qquad (4-30)$$

となり，従って（4-30）式を（4-29）式に代入すれば

$$1-P_* = \left[\frac{\lambda}{\lambda+\bar{r}} \right]^k \qquad (4-31)$$

となる。ここで，（4-23）式を（4-31）式に代入すれば

$$\exp[-ch/\alpha^2] = \left[\frac{\lambda}{\lambda+\bar{r}} \right]^k \qquad (4-32)$$

となり，さらにこの方程式を解くことにより

$$\bar{r} = \lambda[\exp[-ch/\alpha^2 k] - 1] \qquad (4-33)$$

をうる。ここで，パラメーターはすでに構造種別に求められている最終類焼確率のパラメーターであり，λ，k は前章で求められているものである。従って，東京都区内データより構造種別毎に平均瞬間類焼密度を求めると表7-3のようになる。

(株)KOKUYO A4 NO 54

表 7-3　平均瞬間類焼率度

火元建物	被類焼建物	$h=3, d=1$	$h=3, d=2$	$h=3, d=3$	$h=3, d=4$	$h=3, d=5$	$h=3, d=6$
木造	木造	2.52562	0.32812	0.13067	0.07079	0.04453	0.03064
	防火造	0.94525	0.16758	0.07014	0.03864	0.02450	0.01692
	耐火造	0.01845	0.00457	0.00203	0.00114	0.00073	0.00051
防火造	木造	1.43695	0.22669	0.09309	0.05096	0.03221	0.02221
	防火造	0.69177	0.13178	0.05583	0.03088	0.01961	0.01356
	耐火造	0.02897	0.00713	0.00316	0.00178	0.00114	0.00079
耐火造	木造	0.34626	0.07419	0.03207	0.01787	0.01138	0.00789
	防火造	0.01571	0.00389	0.00173	0.00097	0.00062	0.00043
	耐火造	0.01080	0.00268	0.00119	0.00067	0.00043	0.00030

これらの値からも隣棟距離5m内では距離の増加にともない急激に類焼の可能性が減少することがわかる。

ところで，消火活動開始時間の平均値$\bar{t}$は

$$\bar{t}=\int_0^\infty t\,\phi(t)\,dt \qquad (4-34)$$

で与えられるが，(4-27)式を代入すると

$$\bar{t}=h/\lambda \qquad (4-35)$$

なる結果をうることができる。東京都区内について数値を求めると

$$\bar{t}=5,6 \quad (分) \qquad (4-36)$$

である。この平均時間$\bar{t}$における類焼確率を木造から木造への場合について求めると，表7-4のようになる。さらに，最終類焼確率曲線の上に上記の結果をプロットすると図7-10のようになり，最終類焼確率P_*と平均時間$\bar{t}$における類焼確率$P(\bar{t})$とは一致している。このことから最終類焼確率P_*の代りに類焼確率$P(\bar{t})$を代入しても大きな誤差とならないことがわかるが，このことを利用すると，たとえば立地条件が悪く消火活動の開始が遅れるような地区の建物については平均時間$\bar{t}$をより大きな$\bar{t}'$とし，$P(\bar{t}')$を求め，これを最終類焼確率として利用することにより，立地条件などの効果を補正するこ

表7-4 平均時間毛における類焼確率 P(t)*

水平距離	1	2	3	4	5	6
P(t)	0.9999	0.8408	0.5189	0.3273	0.2207	0.1577

* ただし h=3m とした。

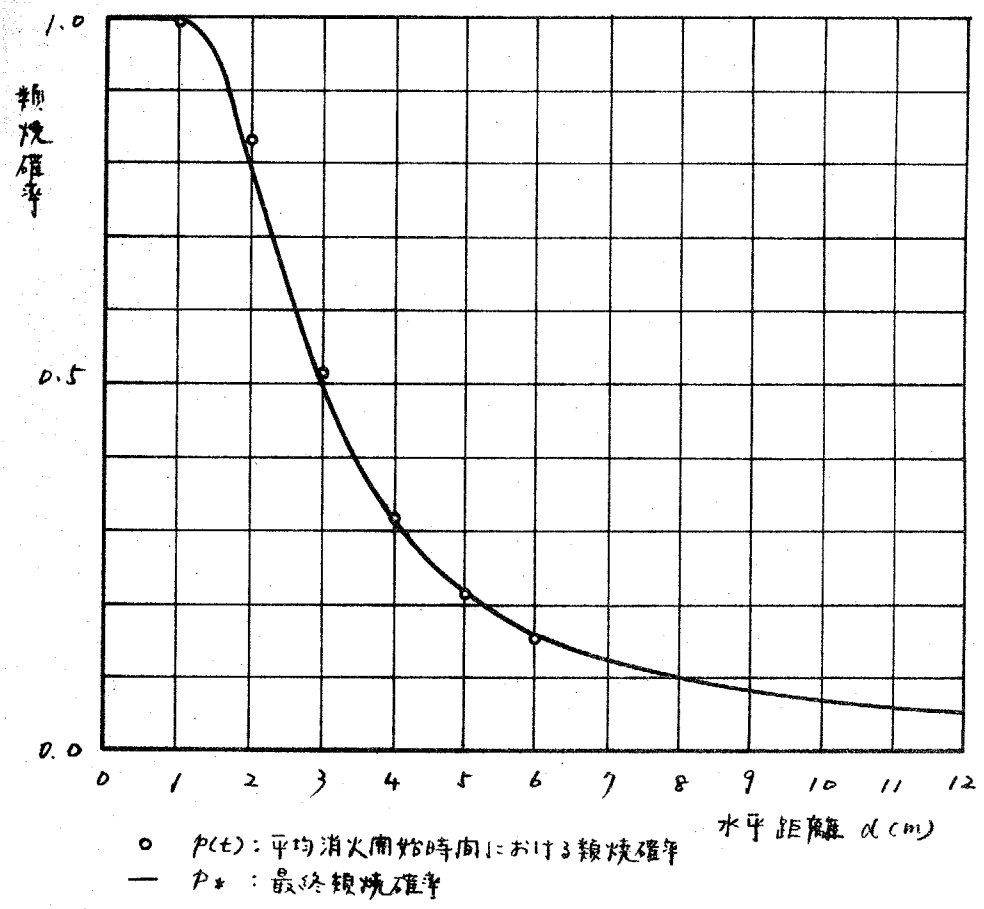


図 7-10 最終類焼確率曲線と平均時間 $\bar{t}$ における類焼確率 $p(\bar{t})$
（木造から木造の場合）

とができる。

5－2－4－5　延焼速度

前項までに得られた結果を用いて延焼速度式を導くことができる。まず，延焼時間の定義を明確にするため，図7－11のような隣棟状況を想定しておこう。

ところで，火元建物から火炎噴出熱輻射が始まるまで，すなわち類焼可能な状況になるまでに要する時間をT_a，火炎噴出・熱輻射開始から被類焼建物へ類焼するまでの時間をT_dとすると，延焼時間は

$$T_E = T_a + T_d \qquad (4-37)$$

となる。一方，延焼速度V_Eは，上記時間内に延焼方向に$a+d$分の長さだけ延焼していることから

$$V_E = \frac{a+d}{T_E} \qquad (4-38)$$

となる。従って，平均速度$\bar{V}_E$はT_E, T_a, T_d及びa, dの平均値をそれぞれ$E(T_E)$, $E(T_a)$, $E(T_d)$及び$\bar{a}$, $\bar{d}$と記すと

$$\bar{V}_E = \frac{\bar{a}+\bar{d}}{E(T_a)+E(T_d)} \qquad (4-39)$$

となる。ところで，$E(T_d)$は類焼の平均時間であるので(4－20)式より

$$E(T_d) = \frac{1}{\bar{r}} \qquad (4-40)$$

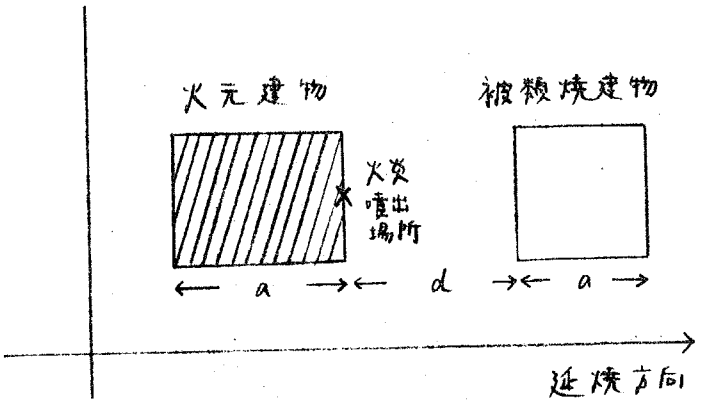


図 7-11 隣棟状況

となり，さらに（4－33）式の結果を代入すると

$$E(T_d) = \frac{1}{\lambda\left[\exp\left[-Ch/\bar{d}^2k\right]-1\right]} \qquad (4-41)$$

となる。一方，安全側をみこしてフラッシュ・オーバー直後に火炎の噴出・熱輻射が開始されるとすると，$E(T_a)$は前章で求めたようフェイズの到達平均時間T_3と考えられる。すなわち

$$E(T_a) = T_3 \qquad (4-42)$$

従って，平均延焼時間は

$$E(T_E) = T_3 + \frac{1}{\lambda\left[\exp\left[-Ch/\bar{d}^2k\right]-1\right]} \qquad (4-43)$$

となる。従って，延焼速度は（4－39）式に（4－43）式の結果を代入することにより

$$\bar{V}_E = \frac{\bar{a}+\bar{d}}{T_3 + \dfrac{1}{\lambda\left[\exp\left[Ch/\bar{d}^2k\right]-1\right]}}$$

$$= \frac{\lambda(\bar{a}+\bar{d})\left[\exp\left[Ch/\bar{d}^2k\right]-1\right]}{\lambda T_3\left[\exp\left[Ch/\bar{d}^2k\right]-1\right]+1}$$

$$= \frac{(\bar{a}+\bar{d})\left[\exp\left[Ch/\bar{d}^2k\right]-1\right]}{T_3\exp\left[Ch/\bar{d}^2k\right]-T_3+\frac{1}{\lambda}} \qquad (4-44)$$

となる。木造から木造への類焼の場合について，実際の数値を代入してみると，以下のようになる（$\bar{a}=10$(m)と仮定する）。

a) $h=3$m の場合

$$E(T_E) = 6.8 + \frac{1}{0.7143\left[\exp\left[1.512/\bar{d}^2\right]-1\right]} \qquad (4-45)$$

$$\bar{V}_E = \frac{(10+\bar{d})\left\{\exp\left[1.512/\bar{d}^2\right]-1\right\}}{6.8\exp\left[1.512/\bar{d}^2\right]-5.4} \qquad (4-46)$$

b) $h = 6$ m の場合

$$E(T_E) = 6.8 + \frac{1}{0.7143\left[\exp\left[3.024/\bar{d}^2\right]-1\right]} \qquad (4-47)$$

$$\bar{V}_E = \frac{(10+\bar{d})\left\{\exp\left[3.024/\bar{d}^2\right]-1\right\}}{6.8\exp\left[3.024/\bar{d}^2\right]-5.4} \qquad (4-48)$$

それぞれの隣棟距離 $\bar{d}$ のもとでの平均延焼時間，平均延焼速度を図示すると図7－12，図7－13のようになる。これらの結果と合せて既存の延焼式の結果も図示してある。既存の延焼式のうち，浜田（文献1）の延焼式は以下のようになる。

風下：
$$V_f = n \times k_f \times \frac{t+14}{t+25}$$
$$k_f = \frac{1.6(a+d)(1+0.1v+0.007v^2)}{3+\frac{3}{8}a+\frac{13.91d}{10+v}} \qquad (4-49)$$

風横側：
$$V_s = n \times k_s$$
$$k_s = \frac{(a+d)(1+0.005v^2)}{3+\frac{3}{8}a+\frac{27.83d}{20+v}} \qquad (4-50)$$

風上：
$$V_a = n \times k_a$$
$$k_a = \frac{(a+d)(1+0.002v^2)}{3+\frac{3}{8}a+\frac{34.78d}{25+v}} \qquad (4-51)$$

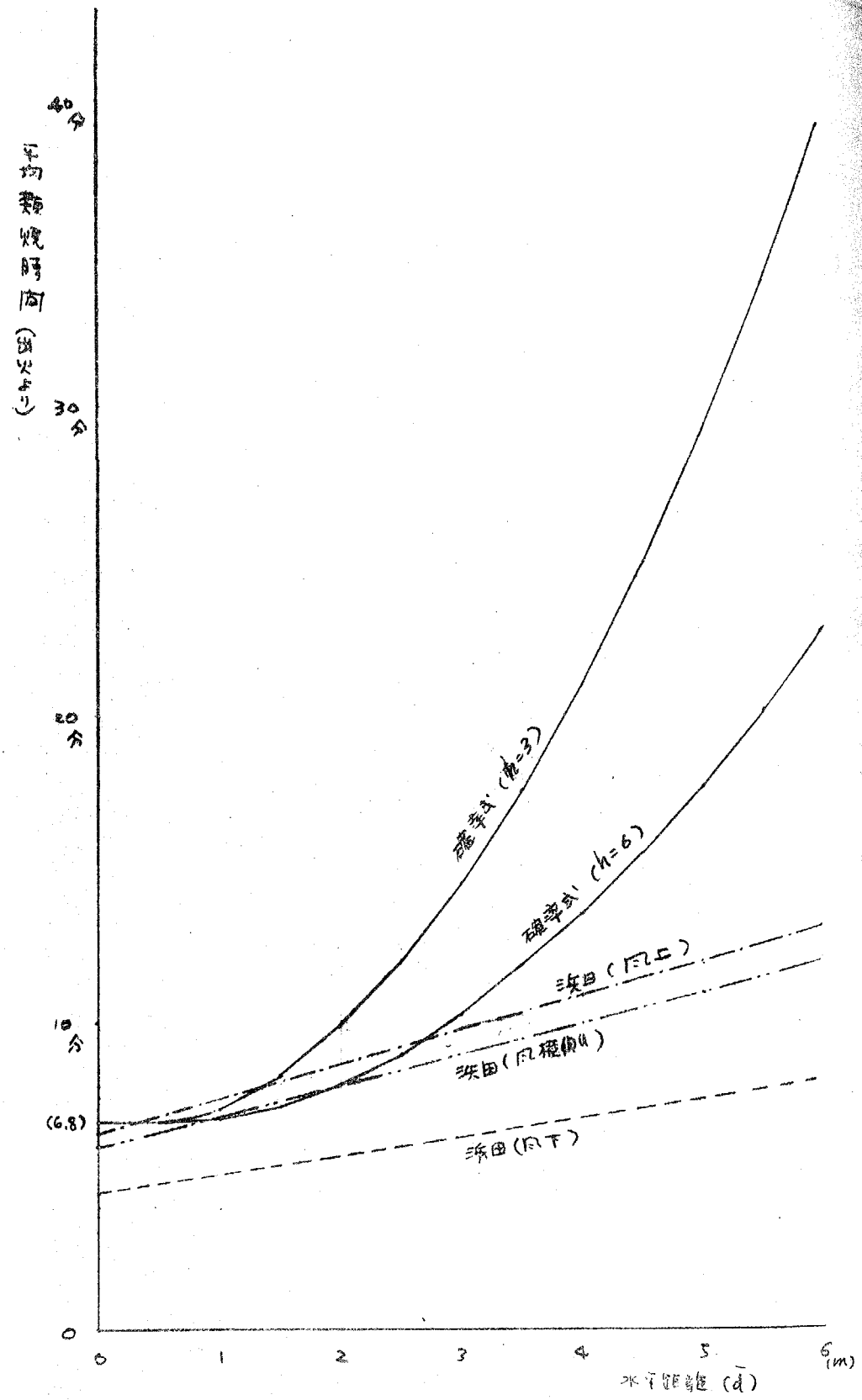

40分
30分
20分
10分
(6.8)
0
平均燃焼時間（出火より）
0
1
2
3
4
5
6(m)
水平距離（$\bar{d}$）
疎率式（n=3）
疎率式（n=6）
洲田（風上）
洲田（風横側）
洲田（風下）

図 7-12　平均燃焼時間

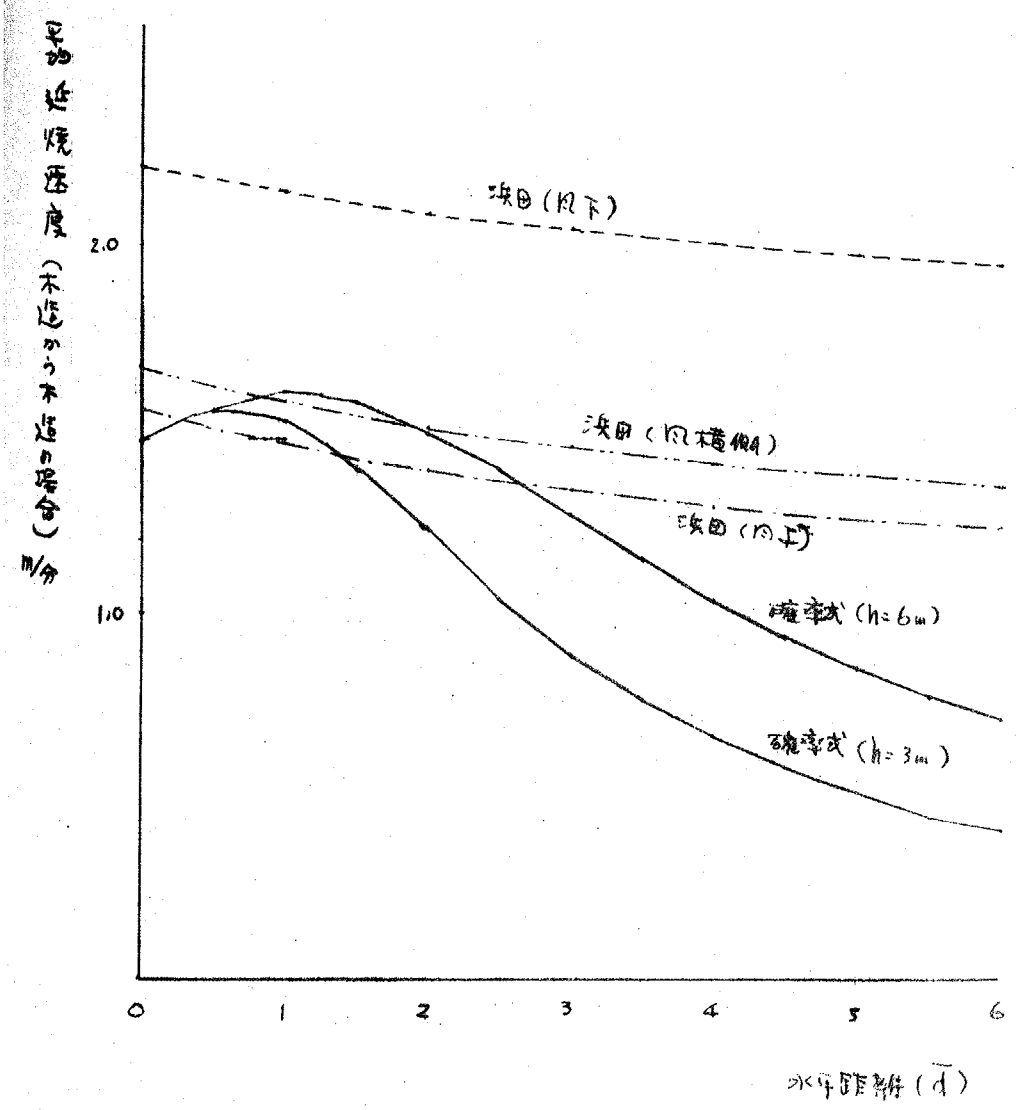

平均延焼速度（木造から木造の場合）m/分
2.0
1.0
浜田（風下）
浜田（風横側）
浜田（風上）
塔状（h=6m）
塔状（h=3m）
0
1
2
3
4
5
6
水平距離（d）

図7-13　平均延焼速度

ここで，木造市街地と仮定すると $\mu = 1.0$ となり，さらに風速を $v = 5\,m/sec$ と仮定すると，このとき

$$h_f = \frac{1.6 \times 1.675(a+d)}{3+\frac{3}{8}a+\frac{13.91}{15}d} = \frac{2.68(a+d)}{3+\frac{3}{8}a+0.927d} \qquad (4-52)$$

$$h_S = \frac{1.125(a+d)}{3+\frac{3}{8}a+\frac{27.83}{25}d} = \frac{1.125(a+d)}{3+\frac{3}{8}a+1.113d} \qquad (4-53)$$

$$h_a = \frac{1.05(a+d)}{3+\frac{3}{8}a+\frac{34.28}{30}d} = \frac{1.05(a+d)}{3+\frac{3}{8}a+1.159d} \qquad (4-54)$$

である。ここで，$a = 10m$，$t = 0$ とした結果を図7－12，図7－13に波線（風下），一点鎖線（風上），二点鎖線（風横側）として記してある。

これらの結果と比較すると，隣棟距離3m以上では，ここで確率式の平均値として求めた式に比べ，浜田式は大きな延焼速度となっている。隣棟距離が5mを越えると類焼の可能性が大きく減少することが知られているので，大火のような場合に火災が発展していない場合は，ここで導いた延焼速度式の方が現実と適合していると思われる。一方，浜田式は大火のような場合のデータを用いるため，延焼面積が充分に大きくなってから適合するのではないかと思われる。

5-2-5 格子状建物配置モデルのシミュレーション分析

5-2-5-1 シミュレーション分析の必要性

類焼現象がとくに安全上問題となるのは，類焼することにより火元建物数が増加し，連鎖反応のように被害が拡大する性質を有する点にあるといえよう。従って，火元建物から他の建物への類焼というミクロな視点を拡げて，他数の建物の中での火災の拡大現象について検討する必要がある。

しかしながら，前項までに求めた類焼確率関数を用いて理論的に類焼拡大の現状を記述する場合，隣棟建物の個数が2以上の場合は可能な類焼拡大の場合の数が指数的に増大するため確率的なアプローチはきわめて困難となる。このような問題を取りあつかうため，植口他（文献4）では，パーコレーションモデルによる解析を試みているが，理論的に取りあつかうことのできるのは限られたケースにしぼられてしまうのが現状である。従って，ここでは，以下，モンテカルロシミュレーションを繰り返すことによって建物群の類焼拡大の確率を数値的に求め，類焼防止計画上の知見を得ることを期待する。

5-2-5-2 格子モデル

建物配置の形状によって類焼拡大の形態も変化してくるが，より現実的な建物配置性状について解析を行うまえに，より単純な（特殊な）建物配置について解析を行うことにしよう。より具体的な建物配置の場合については次節で検討する。最も単純な建物配置として図7-14のように格子状に配置されたL×Lの建物を考える。

ここで，直接に類焼の可能性のある建物（以下，これを隣接建物と呼ぶ）を囲む4建物について

a) 囲む4建物のすぐ東，西，南，北に位置する4つの建物を隣接建物とする（図7-15）。これを4方向モデルと呼ぶ，

b) 囲む4建物のすぐ西，東，南，北に位置する4つの建物と北東，東南，南西，西北に位置する4つの建物の計8つの建物を隣接建物とする（図7-16）。これを8方向モデルと呼ぶ，

の2つのケースを考えよう。

5-2-5-3 シミュレーション

シミュレーション計算のためにL=25，すなわち625個の建物が格子上に配置しているものとし，この格子の中央に位置する建物で出火することを前提とした。

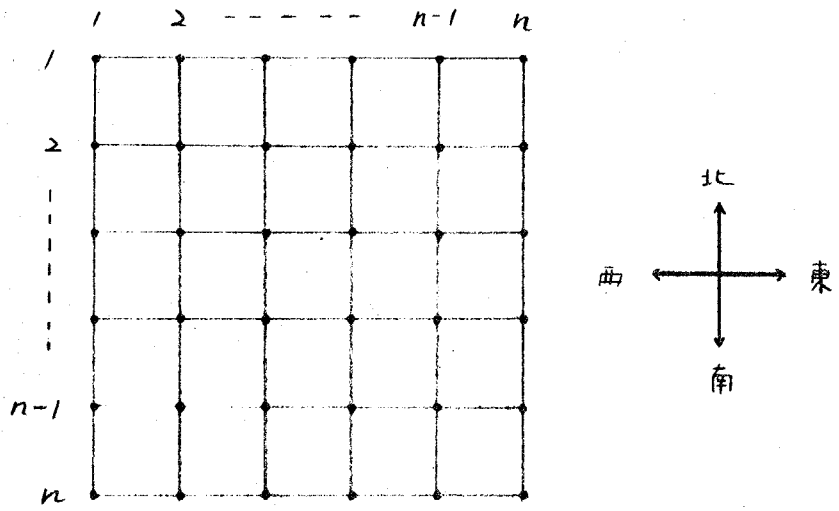


図 7-14 格子モデル

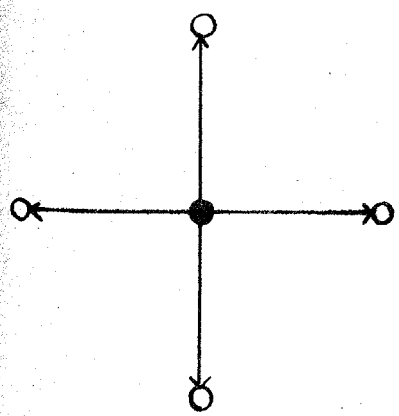


図 7-15 隣接建物
(4方向モデル)

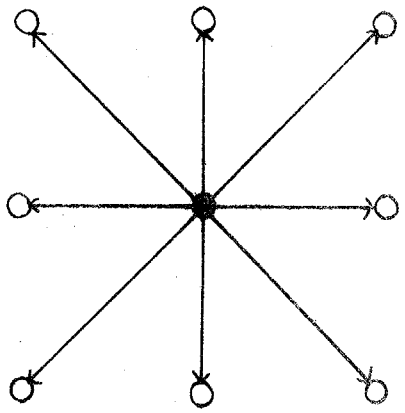


図 7-16 隣接建物
(8方向モデル)

まず，この出火点から与えられた確率 p で隣接建物へ類焼するものとし，0から1の一様乱数を発生させ，この乱数の値が p 以下であれば，その隣接建物へ類焼するものとし，p をこえるものについては類焼しないものとし，次にその類焼した建物を新たな火元として同様の操作を繰り返す（ただし，1回，類焼した建物については2度，繰り返して類焼させることはないものとする）。このようにして次々に類焼してゆき，全ての類焼点から拡大することがなくなった時点あるいは $n \times n$ のすべての建物が類焼してしまった時点で1回のシミュレーションを完了し，類焼した建物数を記録するとともに，こうしたシミュレーションを100回繰り返し，個々の建物へ類焼してきた回数の割合を被類焼率として求め，また，類焼建物数の分布を調べた。

また，建物から建物への類焼確率 p は，すべての建物に一様に同じ値を与えた場合についてのみシミュレーションを行い，4方向モデルについては p の値を0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6とし，8方向モデルについては p の値を0.1, 0.2, 0.3, 0.4のそれぞれの場合毎にシミュレーションを実行した。

7-2-5-4 シミュレーション結果

4方向モデルで行ったシミュレーションの結果得られた各格子点建物の被類焼確率が図7-17で示されている。この結果，$p=0.1\sim0.3$の場合では類焼する建物は中央の出火建物のすぐ近くの建物に限られることがわかるが，$p=0.5$, 0.6では出火点から離れた建物にまで類焼拡大していることがわかる。

また，類焼した建物数（これを以下焼失家屋数と呼ぶ）の累積確率分布を示したものが図7-18である。この図からわかるように個々の建物間の類焼確率pが0.3以下では焼失建物数が大きくなることはないが，$p=0.6$となるような場合，格子点のほとんどが焼失していることがわかる。また，$p=0.4$から$p=0.5$の付近で急激に焼失家屋数の分布形は変化すること，すなわち類焼確率が0.4未満と類焼確率が0.5以上では焼失家屋数が大きく異なり，前者では焼失家屋が出火点の付近に限られるのに対して，後者では火災は格子点の全域にひろがってゆく可能性がきわめて高くなる。従って，$p=0.4\sim0.5$の付近に建物群を考えた場合の類焼確率のクリティカルポイントとでもいう値が存在しているといえる。$p=0.5$以上でこのようにきわめて広く拡大してしまう理由とし

FIRE PROBABILITY AT (I,J)

J	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1																								
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.09	1.00	0.12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02	0.10	0.03	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

図7-17-1 各格子点の被類焼確率（4方向モデル $p=0.1$ の場合）

FIRE PROBABILITY AT (I,J)

J	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1																							
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.03	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02	0.04	0.04	0.04	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.20	0.08	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.05	0.21	1.00	0.16	0.04	0.02	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.02	0.02	0.08	0.19	0.08	0.03	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.02	0.04	0.03	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

図 7-17-2 各格子点の被類焼確率（4方向モデル $p=0.2$ a場合）

FIRE PROBABILITY AT (I,J)

I \ J	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.03	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0	0.03	0.03	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.01	0.03	0.04	0.06	0.14	0.06	0.02	0.0	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.04	0.08	0.20	0.38	0.16	0.03	0.02	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.04	0.03	0.12	0.26	1.00	0.30	0.09	0.03	0.03	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.03	0.06	0.12	0.17	0.35	0.19	0.06	0.03	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02	0.03	0.08	0.09	0.10	0.11	0.06	0.03	0.01	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02	0.03	0.04	0.03	0.09	0.05	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.02	0.01	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

図 7-17-3　各格子点の被類焼確率（4方向モデル $p=0.3$ の場合）

FIRE PROBABILITY AT (I,J)

J \ I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1																							
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.0	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.02	0.02	0.03	0.06	0.05	0.04	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.0	0.0	0.01	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.01	0.07	0.08	0.07	0.06	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.02	0.03	0.03	0.06	0.06	0.08	0.09	0.08	0.05	0.03	0.04	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02	0.03	0.07	0.09	0.11	0.11	0.10	0.11	0.07	0.07	0.04	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
9	0.0	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.07	0.13	0.15	0.10	0.12	0.13	0.09	0.10	0.08	0.06	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01
10	0.0	0.0	0.0	0.01	0.03	0.07	0.14	0.15	0.16	0.20	0.22	0.21	0.16	0.16	0.11	0.05	0.04	0.03	0.02	0.04	0.04	0.02	0.01
11	0.0	0.0	0.02	0.03	0.06	0.10	0.17	0.21	0.21	0.27	0.29	0.30	0.31	0.18	0.12	0.08	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
12	0.0	0.0	0.0	0.04	0.07	0.10	0.15	0.18	0.25	0.37	0.46	0.60	0.38	0.24	0.18	0.14	0.09	0.04	0.04	0.02	0.03	0.01	0.01
13	0.01	0.02	0.04	0.04	0.05	0.09	0.13	0.21	0.26	0.37	0.53	1.00	0.49	0.28	0.17	0.12	0.09	0.06	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01
14	0.0	0.02	0.03	0.03	0.05	0.06	0.08	0.18	0.21	0.35	0.43	0.57	0.42	0.34	0.24	0.17	0.08	0.07	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01
15	0.0	0.01	0.02	0.04	0.06	0.06	0.09	0.18	0.21	0.28	0.27	0.35	0.30	0.25	0.18	0.14	0.10	0.05	0.01	0.01	0.01	0.0	0.0
16	0.01	0.01	0.01	0.03	0.05	0.06	0.10	0.15	0.17	0.21	0.20	0.24	0.17	0.17	0.16	0.12	0.08	0.07	0.04	0.01	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04	0.07	0.09	0.15	0.16	0.16	0.14	0.08	0.07	0.08	0.09	0.07	0.06	0.04	0.01	0.0	0.0	0.0
18	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.06	0.08	0.08	0.10	0.09	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.03	0.04	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.07	0.06	0.08	0.06	0.05	0.02	0.05	0.02	0.02	0.02	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.03	0.02	0.04	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.0	0.01	0.0	0.0	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

図 7-17-4　各格子点の被類焼確率（4方向モデル $p=0.4$ の場合）

FIRE PROBABILITY AT (I,J)

I \ J	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1																								
2	0.09	0.14	0.16	0.19	0.18	0.20	0.27	0.26	0.29	0.24	0.20	0.22	0.26	0.23	0.23	0.26	0.27	0.22	0.27	0.21	0.19	0.14	0.08	
3	0.14	0.19	0.18	0.21	0.21	0.21	0.29	0.28	0.29	0.31	0.29	0.31	0.33	0.31	0.30	0.33	0.26	0.30	0.31	0.26	0.22	0.17	0.15	
4	0.15	0.19	0.26	0.23	0.22	0.25	0.28	0.31	0.34	0.33	0.34	0.34	0.39	0.35	0.36	0.30	0.32	0.30	0.34	0.27	0.22	0.23	0.16	
5	0.13	0.20	0.24	0.23	0.22	0.28	0.30	0.31	0.38	0.40	0.33	0.35	0.32	0.34	0.36	0.37	0.36	0.33	0.33	0.30	0.24	0.22	0.19	
6	0.16	0.21	0.22	0.22	0.27	0.32	0.34	0.35	0.43	0.44	0.38	0.36	0.36	0.36	0.39	0.42	0.37	0.35	0.34	0.37	0.30	0.30	0.27	0.24
7	0.21	0.25	0.26	0.25	0.30	0.35	0.35	0.38	0.45	0.48	0.42	0.38	0.38	0.39	0.39	0.39	0.35	0.37	0.33	0.36	0.32	0.32	0.28	0.23
8	0.24	0.26	0.26	0.29	0.30	0.39	0.39	0.41	0.48	0.47	0.42	0.40	0.40	0.42	0.37	0.34	0.35	0.32	0.35	0.33	0.32	0.28	0.19	
9	0.25	0.28	0.31	0.28	0.32	0.38	0.39	0.42	0.49	0.53	0.48	0.47	0.50	0.47	0.44	0.39	0.34	0.35	0.38	0.32	0.29	0.25	0.21	
10	0.25	0.26	0.31	0.27	0.32	0.36	0.40	0.47	0.50	0.49	0.55	0.56	0.51	0.51	0.44	0.42	0.40	0.40	0.37	0.36	0.26	0.26	0.22	
11	0.22	0.27	0.31	0.33	0.36	0.34	0.41	0.48	0.51	0.56	0.59	0.61	0.54	0.46	0.42	0.40	0.37	0.37	0.34	0.35	0.30	0.25	0.21	
12	0.22	0.25	0.32	0.37	0.42	0.41	0.40	0.46	0.51	0.58	0.64	0.71	0.63	0.58	0.48	0.46	0.36	0.34	0.35	0.35	0.28	0.26	0.24	
13	0.20	0.23	0.29	0.35	0.40	0.37	0.46	0.44	0.46	0.56	0.74	1.00	0.71	0.62	0.49	0.49	0.38	0.36	0.35	0.34	0.33	0.29	0.23	
14	0.22	0.25	0.30	0.32	0.39	0.39	0.42	0.43	0.49	0.54	0.66	0.77	0.65	0.60	0.50	0.47	0.40	0.36	0.37	0.33	0.37	0.36	0.26	
15	0.27	0.31	0.30	0.35	0.40	0.43	0.40	0.45	0.47	0.49	0.59	0.58	0.56	0.52	0.48	0.44	0.44	0.39	0.37	0.34	0.32	0.32	0.25	
16	0.24	0.32	0.34	0.33	0.37	0.38	0.36	0.42	0.47	0.44	0.54	0.56	0.55	0.47	0.47	0.41	0.39	0.38	0.39	0.37	0.30	0.26	0.24	
17	0.24	0.29	0.31	0.36	0.30	0.36	0.36	0.43	0.46	0.49	0.48	0.47	0.51	0.43	0.41	0.43	0.35	0.35	0.34	0.36	0.35	0.27	0.22	
18	0.18	0.25	0.28	0.36	0.35	0.38	0.31	0.41	0.47	0.46	0.48	0.50	0.47	0.43	0.40	0.37	0.37	0.36	0.34	0.37	0.33	0.25	0.20	
19	0.19	0.26	0.28	0.32	0.33	0.36	0.37	0.39	0.42	0.46	0.45	0.49	0.40	0.41	0.40	0.38	0.37	0.29	0.29	0.33	0.32	0.26	0.21	
20	0.20	0.23	0.27	0.28	0.29	0.36	0.34	0.38	0.42	0.46	0.47	0.42	0.40	0.39	0.38	0.36	0.33	0.29	0.28	0.30	0.28	0.23	0.18	
21	0.22	0.25	0.27	0.27	0.29	0.35	0.37	0.34	0.40	0.42	0.43	0.36	0.38	0.36	0.36	0.30	0.30	0.32	0.30	0.30	0.25	0.24	0.22	
22	0.21	0.24	0.28	0.26	0.29	0.31	0.33	0.34	0.33	0.33	0.39	0.41	0.36	0.36	0.34	0.28	0.25	0.29	0.28	0.24	0.22	0.20	0.18	
23	0.15	0.21	0.20	0.23	0.27	0.26	0.27	0.28	0.27	0.30	0.39	0.39	0.36	0.34	0.34	0.32	0.25	0.27	0.26	0.19	0.21	0.19	0.14	
24	0.13	0.18	0.16	0.21	0.42	0.22	0.18	0.22	0.26	0.29	0.31	0.32	0.46	0.25	0.26	0.28	0.25	0.19	0.19	0.16	0.15	0.13	0.13	

図 7-17-5　各格子点の被類焼確率（4方向モデル $p=0.5$ の場合）

FIRE PROBABILITY AT (I,J)

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1																							
2	0.56	0.64	0.68	0.75	0.79	0.72	0.73	0.78	0.72	0.82	0.75	0.80	0.76	0.80	0.81	0.77	0.80	0.76	0.74	0.72	0.68	0.68	0.53
3	0.67	0.71	0.74	0.80	0.84	0.85	0.86	0.84	0.82	0.86	0.86	0.88	0.86	0.84	0.84	0.87	0.86	0.88	0.86	0.80	0.78	0.75	0.65
4	0.68	0.74	0.74	0.81	0.85	0.88	0.91	0.87	0.85	0.88	0.90	0.90	0.86	0.88	0.85	0.87	0.88	0.91	0.87	0.81	0.81	0.77	0.71
5	0.69	0.76	0.84	0.86	0.88	0.89	0.92	0.87	0.88	0.90	0.90	0.89	0.88	0.88	0.89	0.88	0.84	0.87	0.85	0.81	0.79	0.75	0.70
6	0.71	0.78	0.83	0.87	0.86	0.86	0.89	0.88	0.89	0.89	0.90	0.88	0.86	0.88	0.89	0.89	0.91	0.86	0.81	0.82	0.81	0.82	0.78
7	0.74	0.80	0.85	0.84	0.85	0.85	0.90	0.90	0.91	0.92	0.94	0.88	0.93	0.90	0.87	0.87	0.88	0.89	0.83	0.83	0.77	0.74	0.74
8	0.69	0.79	0.84	0.78	0.89	0.87	0.90	0.90	0.92	0.90	0.90	0.89	0.91	0.90	0.87	0.89	0.85	0.87	0.84	0.85	0.80	0.80	0.75
9	0.69	0.80	0.85	0.87	0.87	0.89	0.91	0.89	0.93	0.92	0.90	0.89	0.87	0.87	0.86	0.86	0.86	0.84	0.84	0.85	0.80	0.83	0.76
10	0.65	0.76	0.83	0.85	0.88	0.86	0.89	0.89	0.90	0.92	0.92	0.89	0.88	0.88	0.88	0.90	0.89	0.86	0.83	0.84	0.84	0.87	0.74
11	0.68	0.80	0.82	0.85	0.88	0.88	0.88	0.90	0.93	0.91	0.90	0.89	0.89	0.87	0.91	0.89	0.88	0.90	0.87	0.86	0.86	0.81	0.77
12	0.72	0.79	0.83	0.85	0.89	0.88	0.90	0.88	0.91	0.89	0.90	0.91	0.87	0.92	0.92	0.90	0.89	0.88	0.91	0.87	0.83	0.84	0.75
13	0.69	0.79	0.83	0.83	0.87	0.91	0.90	0.93	0.94	0.92	0.91	1.00	0.94	0.93	0.89	0.89	0.91	0.92	0.87	0.86	0.84	0.84	0.78
14	0.70	0.81	0.83	0.84	0.86	0.91	0.93	0.89	0.91	0.92	0.91	0.94	0.95	0.90	0.89	0.88	0.93	0.91	0.86	0.86	0.83	0.85	0.75
15	0.69	0.81	0.87	0.87	0.91	0.87	0.89	0.91	0.87	0.92	0.89	0.90	0.91	0.91	0.89	0.90	0.91	0.91	0.89	0.90	0.84	0.86	0.77
16	0.73	0.76	0.79	0.83	0.84	0.88	0.86	0.90	0.94	0.93	0.92	0.94	0.94	0.93	0.91	0.89	0.90	0.92	0.89	0.88	0.88	0.89	0.81
17	0.76	0.79	0.82	0.78	0.87	0.90	0.91	0.86	0.90	0.91	0.90	0.94	0.94	0.94	0.93	0.88	0.92	0.88	0.90	0.84	0.85	0.83	0.77
18	0.73	0.78	0.80	0.90	0.86	0.90	0.89	0.90	0.90	0.89	0.91	0.92	0.91	0.92	0.93	0.85	0.86	0.87	0.80	0.87	0.84	0.80	0.79
19	0.73	0.78	0.82	0.86	0.86	0.88	0.86	0.84	0.90	0.89	0.86	0.89	0.86	0.91	0.89	0.86	0.85	0.85	0.86	0.85	0.84	0.81	0.76
20	0.75	0.81	0.81	0.84	0.81	0.86	0.92	0.88	0.90	0.89	0.83	0.87	0.89	0.91	0.85	0.87	0.88	0.84	0.83	0.81	0.80	0.75	0.66
21	0.72	0.79	0.82	0.83	0.84	0.87	0.89	0.87	0.89	0.90	0.84	0.85	0.85	0.88	0.86	0.88	0.83	0.87	0.84	0.79	0.80	0.76	0.66
22	0.67	0.73	0.79	0.81	0.85	0.85	0.83	0.88	0.88	0.90	0.84	0.89	0.84	0.84	0.85	0.89	0.85	0.86	0.83	0.85	0.77	0.73	0.63
23	0.56	0.66	0.78	0.78	0.79	0.86	0.82	0.87	0.84	0.84	0.86	0.88	0.88	0.86	0.84	0.85	0.84	0.84	0.84	0.81	0.74	0.69	0.62
24	0.48	0.59	0.75	0.74	0.75	0.77	0.74	0.81	0.75	0.83	0.82	0.81	0.81	0.72	0.75	0.72	0.77	0.74	0.76	0.76	0.71	0.62	0.55

図 7-17-6　各格子点の被類焼確率（4方向モデル $p=0.6\alpha$ 場合）

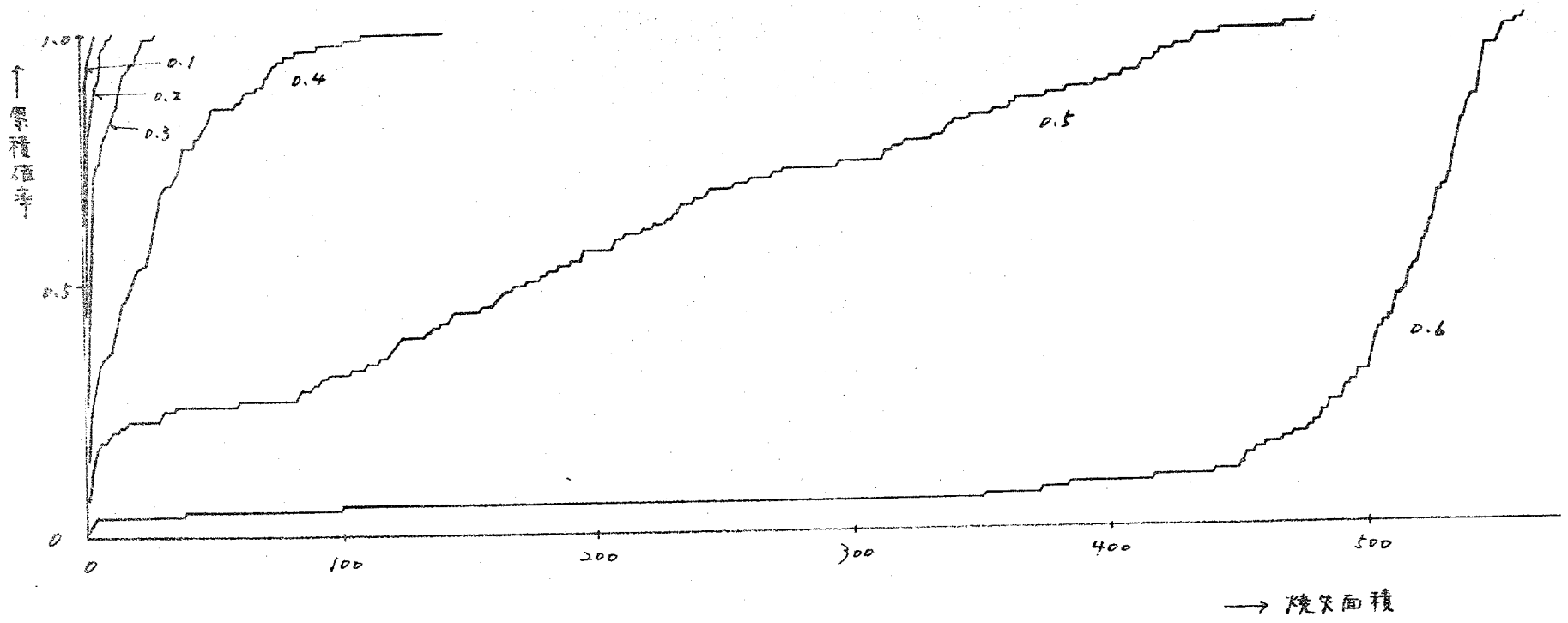


図 7-18　焼失家屋数の確率分布関数（4方向類焼格子モデル）

では，いったん火元となる建物の数が増えると確率的に類焼の可能性が増し，火元となる建物がさらに増えることとなり，次々に火元建物が爆発的に増加し，一種の連鎖反応となってしまうことに起因しており，中性子を受けて核反応を行い，受けた以上の数の中性子を放出してゆく核連鎖反応ときわめて類似している。

8方向モデルについても同様の結果を得ることができる。8方向モデルでは，焼失は $p=0.1$ では出火点付近に限られるが，$p=0.3$ 以上では焼失は格子の全域に及んでいることがわかる。また，図7-20からもわかるように，$p=0.2\sim0.3$ で大きく，その焼失のパターンを変化させていることがわかる。すなわち $p=0.2$ 未満では小規模の火災にとどまっているが，$p=0.3$ 以上では焼失家屋数の大きい火災がほとんどであり，全域に連鎖反応的に燃えひろがってゆくことがわかる。従って，8方向モデルの場合には $p=0.2\sim0.3$ 付近に前述の類焼確率のクリティカルポイントが存在していると考えられる。また，4方向モデルと8方向モデルを比較した場合，全体的な類焼拡大の傾向から個々の類焼確率は4方向の $p=0.2$ と8方向の $p=0.1$，4方向の $p=0.4$ と8方向の $p=0.2$，4方向の $p=0.6$ と8方向の $p=0.4$ とがほぼ対応

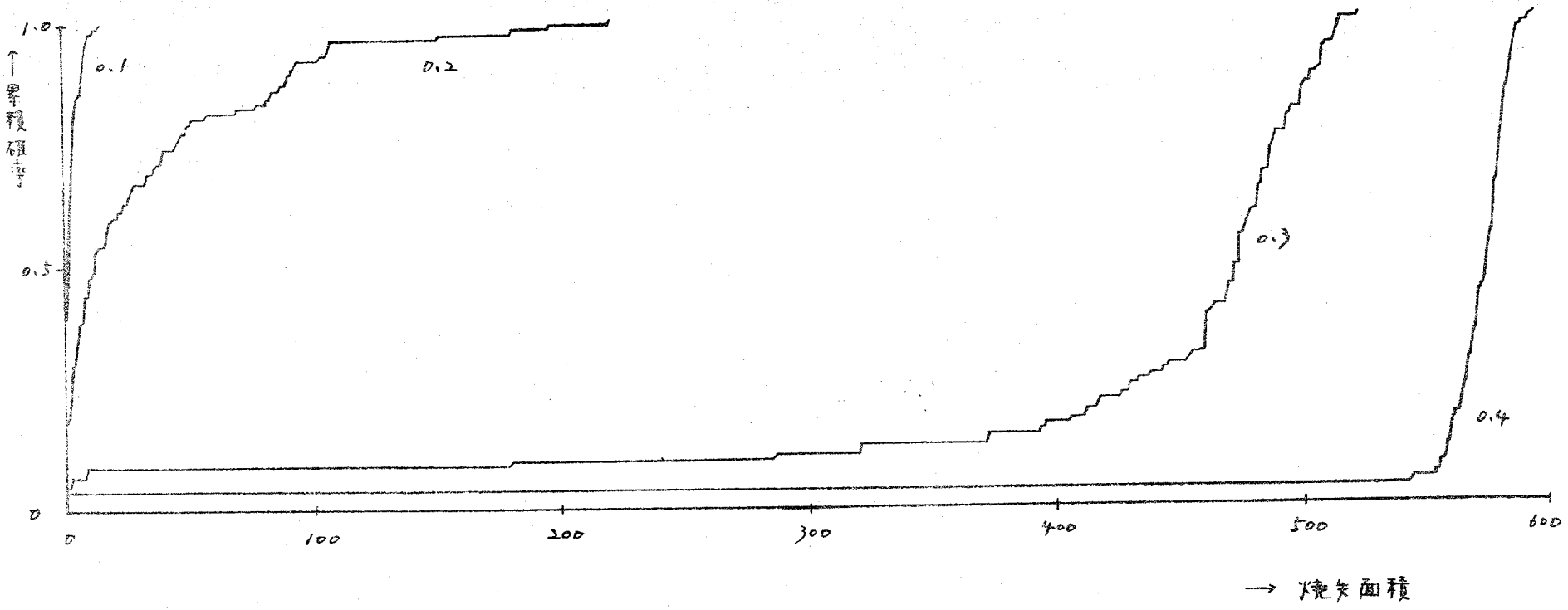


図 7 - 20　焼失家屋数の確率分布関数（8方向類焼格子モデル）

ていると考えられる。従って，隣接建物数というものも類焼確率の値と同様に類焼拡大現象では重要な意味をもってくるといえよう。

5－2－5－5　類焼拡大過程から考えられる安全距離

前記で得られたように隣接建物数が4の場合で類焼確率 $p=0.4\sim0.5$，隣接建物数が8の場合で類焼確率 $p=0.2\sim0.3$ で一種のクリティカルポイントが存在し，その値以上では全域に広がるような火災の多いことが示された。ここではこの値から逆算して安全隣棟距離を検討しておく。

まず，類焼確率のクリティカルポイントを p_* とし，それに対応する水平距離を d_* とすると（2－18）式より

$$p_* = 1 - \exp\left[ch/d_*^2\right] \qquad (5-1)$$

と表わすことができたので，この式より

$$ch/d_*^2 = \log(1-p_*) \qquad (5-2)$$

であり，$\log(1-p_*)$ が0でないとして

$$d_* = \sqrt{\frac{ch}{\log(1-p_*)}} \qquad (5-3)$$

となる。ここで，最も類焼の危険性の高い木造から木造への類焼を考え，類焼確率のクリティカルポイントとして安全側に考え，隣接建物数が4の場合 $p_*=0.4$，隣接建

物数が8の場合 $P_* = 0.2$ として（5-3）式より d_* を求めると、以下のようになる。

a) 隣接建物数が4の場合（木造から木造）

$d_* = 3.44$ ---（$h = 3m$ の場合）

$d_* = 4.87$ ---（$h = 6m$ の場合）

b) 隣接建物数が8の場合（木造から木造）

$d_* = 5.21$ ---（$h = 3m$ の場合）

$d_* = 7.36$ ---（$h = 6m$ の場合）

従って、これらの結果から、従来、隣接建物の数を考慮にいれないで考えていた安全距離は隣接建物数が小さい場合には充分安全な範囲にあるが、隣接建物の数が8をこえるような場合については不充分であることがわかる。とくに最近では都市の密集化、高度化にともない隣接建物数、建物高さは大きくなっていくことが考えられるので、より厳しい隣棟距離の確保が必要となってくるといえよう。

5-2-6 既存市街地における類焼シミュレーション解析

5-2-6-1 モデル地区の選定

前項では格子状に配置された建物群について類焼シミュレーションを行い防火安全上の2，3の知見を得たが，既存の市街地はこのように整然と配置する場合はまれであり，むしろ個々の建物間の配置は複雑に変化しており，その複雑な配置形状が類焼拡大性状に与える影響がありうるので，以下では現実市街地をモデルとしてシミュレーション解析を行うことを試みる。

モデル地区の選定にあたってはとくに建物が密集しており，類焼拡大防止がとくに必要とされるような既存市街地を想定したが，シミュレーション実行上の問題として以下のような制約が考えられた。

a) 対象として扱う地区（建物群）は周囲の地区と類焼効果から考えて独立性の高いこと，すなわち，他地区より当該地区への類焼拡大の可能性は小さく，また，当該地区から他地区への類焼拡大の可能性も少ないこと。

b) シミュレーション実行の計算時間及び記憶容量から建物数は500前後であること。

制約条件a)は対象とする地区から他の地区へと火災が拡

大し，さらにその火災が対象地区内の建物へと類焼するというようなケースが高い確率でありうる場合には，対象地区外の地区をも対象地区内に取りくまなければ非現実的となってしまうことからくる制約であり，現実的には対象地区がほぼ凸形であり，周囲が幅員の大きい道路あるいは類焼可能性の低い地区となっていることなどが望ましい。制約条件b)はシミュレーション計算を何回も繰り返すことによって，より正確な類焼状況を把握することを期待すると，1回のシミュレーション実行時間が短いほど好ましく，そのため外部記憶容量を使用しないことおよび建物数はなるべく少ないことが望ましい。この点を考えてCPUタイムを1時間前後となるシミュレーション解析を想定し，ここから建物数としては500程度であることとした。もちろん，計算機の計算速度性能が良いもの及び計算時間が長くなってもかまわないとすれば，制約条件b)は緩和される。

以上のような制約条件を考えて都区内の各地区を地図上より検討したが，完全にこのような条件をみたす密集した既存市街地は発見できなかったので，ほぼ上記条件をみたしている地区として東京都江東区大島4丁目地区を選定した。また，この地区は第2章で実施した災害了

シケートを実施した地区と一致している。

5-2-6-2 モデル現地調査及びモデル地区概況

類焼シミュレーションを実行するにあたって必要なデータとしては

1) 各建物の構造種別(木造, 防火造, 耐火造の区別),

2) 各建物の高さ(軒が大きい建物には軒高が必要),

3) 各建物間の水平距離(軒が大きいものについては軒先までの距離となる),

さらに, 焼失面積, 焼失損害額を求めるために必要なデータとして

4) 全建物床面積,

5) 各建物用途,

を現地調査(昭和51年8月4日～8月11日)によって調べ, 整理した。建設中の建物(2件)については完成しているものとして扱った。また, 長さについては1/10mまでの精度で測定し, 直接測定できない建物には目視によって推定した。床面積については建物間口, 奥行及び階数(ただし, 1階部分と2階部分で床面積が異なるというようなものは各階別の間口, 奥行)から求めた。

以上のような現地調査の結果を整理し, モデル地区を

図示すると図7-21となる。また，建物総数は412であり，構造種別，建物階数の内訳は表7-5及び表7-6のようになっている。これからわかるように約95%が木造及び防火造であり，2階以上の建物が85%であり，耐火造など類焼防止上好ましい建物は少ない。

さらに，建物と建物が直接面しており（熱輻射，火炎の接触の可能性があるもの），先の類焼確率関数から得られる結果からその水平距離が13m以下のものを隣接建物，すなわち類焼可能性がある建物どうしであるとし，それ以外の直接面していない，または面しているが14m以上であるものは直接類焼する可能性は無視するものとした。この結果，各建物についてその建物の隣接建物が定まり，隣接建物数の分布を整理すると表7-7のようになる。また，その隣接建物数の分布図を調べてみるとほぼ正規分布状となり，平均隣接建物数は6.38であり，前節で検討した格子モデルの4方向モデルと8方向モデルのほぼ中間の隣接建物数であるといえよう。また，各隣接建物の水平距離の分布を整理すると図7-23のようになり，きわめて類焼可能性の高いことが考えられる。

以下の検討の中での便宜のため，このモデル地区の部

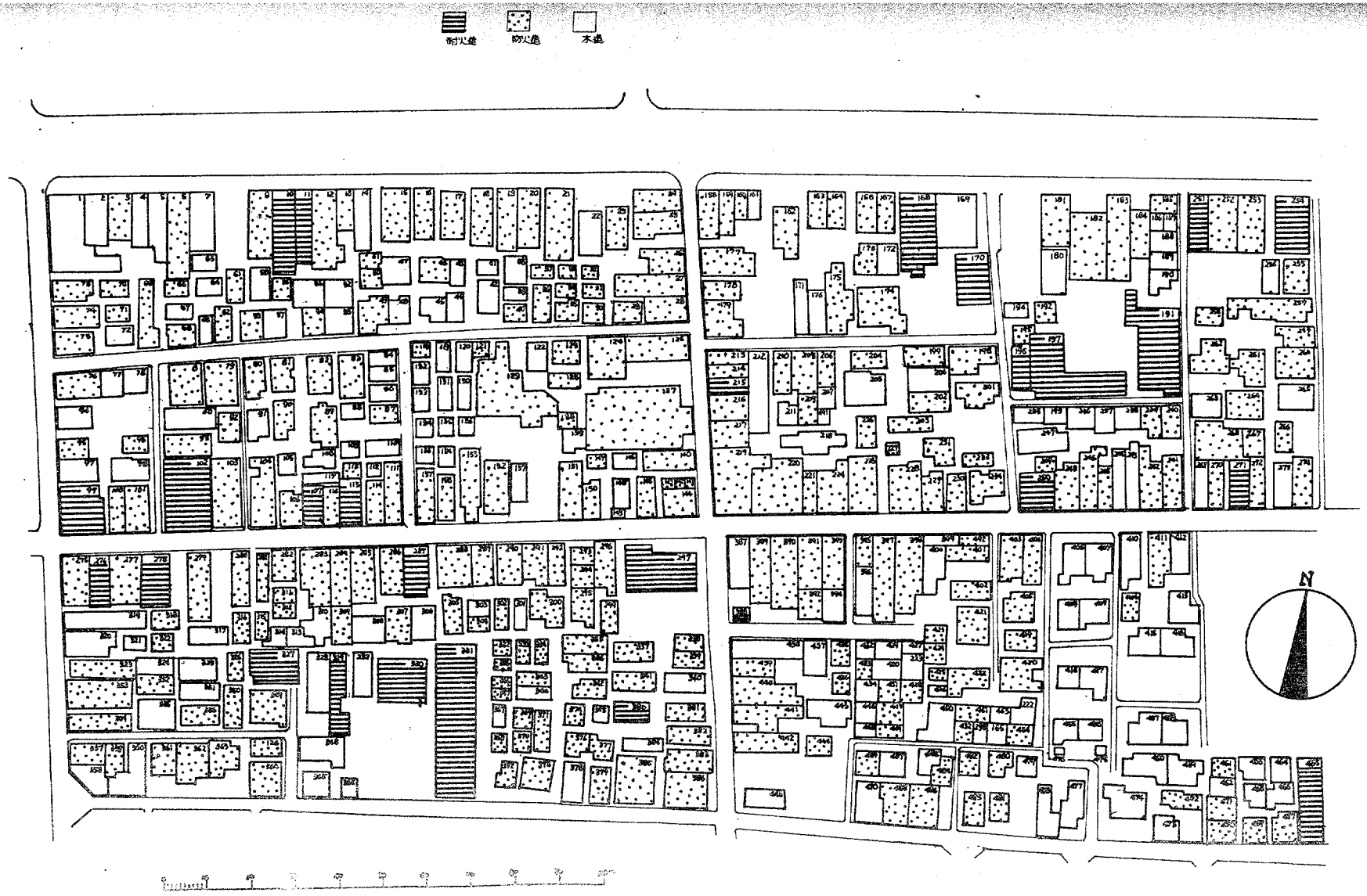


図7-20 構造現況図（現状）

表7-5 モデル地区構造種別

構造種別	建物数 (%)
木造	168 (34.1)
防火造	297 (60.4)
耐火造	27 (5.5)
(計)	492 (100.0)

表7-6 モデル地区建物数

建物階数	建物数 (%)
1階	74 (15.0)
2階	400 (81.3)
3階以上	18 (3.7)
計	492 (100.0)

表7-7　隣接建物数
（一戸当りの類焼する恐れのある戸数）

隣接建物数	戸数	割合	隣接建物数	戸数	割合
1	1	0.2%	8	85	17.3%
2	8	1.6%	9	33	6.7%
3	17	3.5%	10	6	1.2%
4	47	9.6%	11	3	0.6%
5	78	15.8%	12	4	0.8%
6	105	21.4%	13	2	0.4%
7	103	20.9%			
隣接建物数の平均 = 6.384					

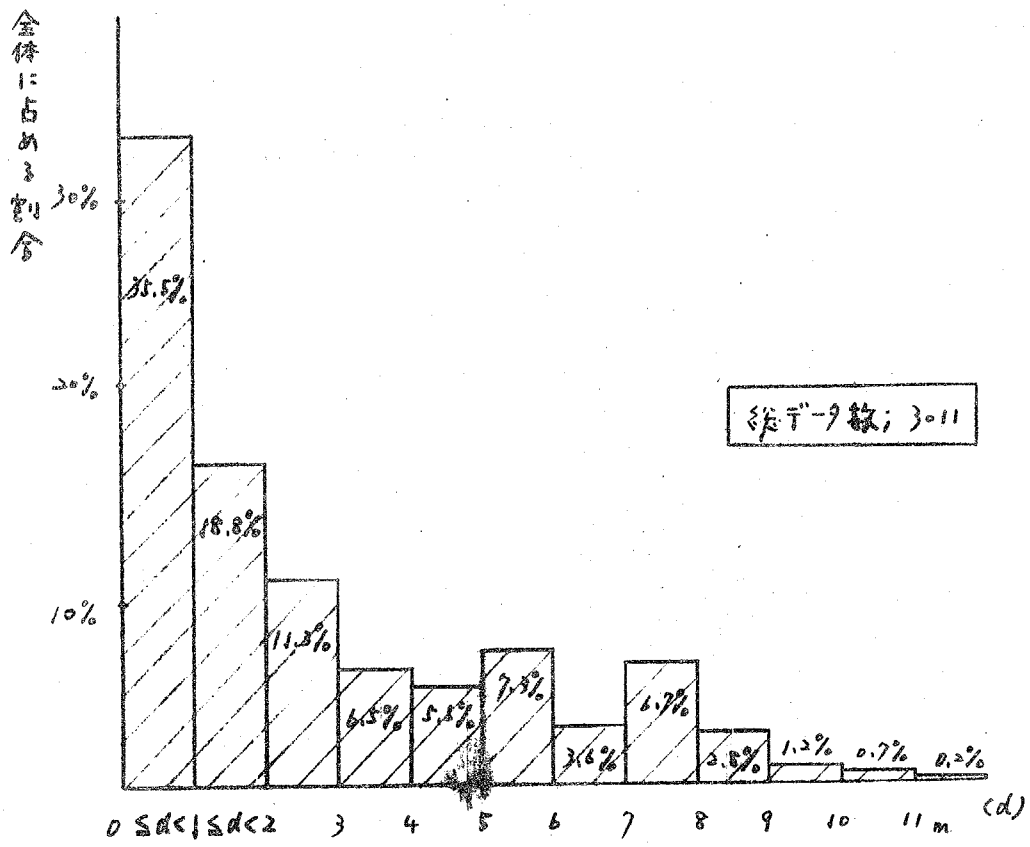

全体に占める割合
30%
20%
10%
35.5%
18.8%
11.3%
6.5%
5.8%
7.5%
3.6%
6.7%
2.8%
1.2%
0.7%
0.2%
総データ数; 3011
0 ≦d<1 1≦d<2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 m
(d)

図 7-23 隣棟距離

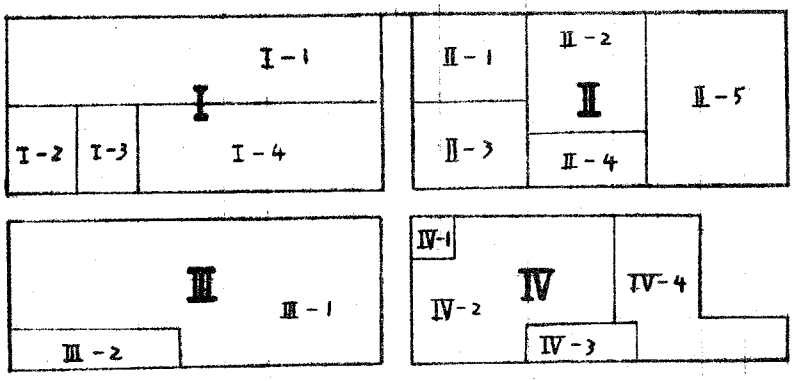


図 7-24 各ブロック 略号

分については図7-24のように略号を与えておくこととする。

5-2-6-3 類焼発達確率

これまで検討してきた類焼確率は，火元建物が火炎噴出または熱輻射により他の建物への類焼するというものであり，火元建物はこうした類焼可能な火災フェイズにまで火災が拡大していることを前提としていた。ところで，類焼のシミュレーションで問題となるのは出火あるいは類焼された建物が他の建物へ類焼可能な状態となる確率がどの程度であるかということである。

出火した後，類焼可能な状態まで火災が発達する確率を出火類焼発達確率，類焼された建物が類焼可能な状態にまで発達する確率を類焼類焼発達確率と呼び，これらをまとめて類焼発達確率と呼ぶことにする。ところで，出火類焼発達確率は建物の構造種別，出火室の区画性，初期の火災の噴出場所となる開口部の形状などさまざまな要因に左右されるが，これらの関係を明確にとらえることは非常に困難である。しかしながら，火災の噴出時点，あるいは建物周辺への熱輻射の急激な上昇が全室的火災フェイズにまで火災が拡大した直後であることが多く(

前出の図7-7 参照)、以下ではより安全をみて，フラッシュ・オーバーにまで至った火災は類焼の可能性のある火災，すなわち周辺建物に火炎・熱輻射などの影響を与えるものとし，従って，出火類焼発達確率を出火した後，フラッシュ・オーバーに至る確率，すなわち，前節で検討したオ4フェイズ，オ5フェイズ及びオ6フェイズのいずれかにまで発達する確率とする。この値は構造種別毎に前節で用いたデータによって求めることができ，表7-8のようになる。

これは通常の火災をもとに求めた値であるが，地震時については都防災会議における仮定値(約0.4)及び水野他(文献5)による研究結果(東京で全壊率2%として冬期夕方時で約0.6)があるが，この表7-8の結果(通常時)と比べて都防災会議の結果はそれほど差がなく，地震時などの場合はより大きな値となることが考えられるので，水野他の結果に近いのではないかと考えられる。地震時の出火類焼発達確率については後に再び検討する。

一方，類焼類焼発達確率については類焼された場所，構造種別，区画性など出火類焼発達確率と同様のさまざまな未知要因があり，加えて消火活動の効果などが介入しており，数値的に類焼発達確率を求めることは難しい

表7-8 出火類焼発達確率

構造種別	出火類焼発達確率
木造	0.4010
防火造	0.3231
耐火造	0.1600
平均	0.3343

問題であるといえる。これまでの多くのシミュレーションでは，類焼された建物は全て類焼可能な状態であるとすると同じような扱いがなされている場合が多い。すなわち，類焼類焼発達確率を1としているが，通常火災などではデータが少なく統計的に結論できないが，出火類焼発達確率よりも小さいといえる。従って，類焼類焼発達確率を1とするようなモデルは地震時あるいは何らかの理由で通常時と同じレベルの消火活動が不可能な場合を想定しているものといえよう。従って，通常時の類焼類焼発達確率としては一応出火類焼発達確率とほぼ等しいとしてシミュレーション解析を行うことにする。従って，以下では出火類焼発達確率と類焼類焼発達確率をまとめて類焼発達確率として取り扱う。

地震時については通常時類焼発達確率 p_0 と地震時類焼発達確率 p_0^*（先の水野他の結果では $p_0^* \fallingdotseq 0.6$ と考えられている）の関係を検討してみると，通常の消火活動の結果としての p_0 と全く消火活動がなく出火した火災が全て類焼可能な状態になる場合，すなわち類焼発達確率1の場合の中間に地震時の消火活動のレベルがあると考えるとすると

$$p_0^* = \alpha p_0 + (1-\alpha) \times 1.0 \qquad (6-1)$$

と記すことができよう。ここで p_o^* として水野他の結果及び p_o として構造種別を区別しない平均値としての値(表7-8)を用いる，すなわち

$$p_o^* = 0.6 \tag{6-2}$$

$$p_o = 0.3343 \tag{6-3}$$

なる値を(6-3)式に代入して未知数 α を解くと

$$\alpha \fallingdotseq 0.6 \tag{6-4}$$

となる。従って，この関係式(6-1)，(6-4)及び表7-8の結果を用いて地震時の類焼発達確率を求めることができる。しかしながら，より安全をみるため

$$\alpha = 0.5 \tag{6-5}$$

として計算を行う。この結果を整理すると通常時，地震時の類焼発達確率は表7-9のようになる。

以上で求めた類焼発達確率 p_o を用いると，出火または類焼された建物から他の建物への類焼確率 p は類焼確率関数 P を用いて以下のように表わすことができる。

$$p = p_o(1 - \exp[-cR/d^2]) \tag{6-6}$$

以下ではこの値を混乱がないかぎり再び類焼確率と呼び，シミュレーション分析の基本的な確率量として取り扱う。

表7-9 類焼発生確率

構造種別	類焼発生確率	
	通常時 P_0	地震時 P_0^*
木造	0.4010	0.7005
防火造	0.3231	0.6616
耐火造	0.1600	0.5800
平均	0.3343	0.6672

5－2－6－4　通常時の類焼シミュレーション解析

まず，5-2-6-2 で整理された地区の各建物，建物間距離などのデータから各建物間の類焼確率を（6-6）式に基づき求め，このデータを基にモンテカルロシミュレーションを行う。

シミュレーション手順はフローチャート（図7－25）に示されている。この結果を図示すると，図7－26－1のようになる。出火建物は○印で示されている。この結果を見ると火元建物の北側に位置する約3mの路地が大きく被類焼確率を減少させていることがわかる。しかしながら，火元から東に位置する南北に通る道の場合はその効果があらわれていない。これは道をはさんで左右に隣接した木造建物が位置しているために類焼の可能性が増加したものと考えられる。たとえば火元建物の西側ひとつ建物をおいた道にも約3m程度の中の南北に細長い空間があり，部分的には道があるのと同じような形となっているが，ここではその空間の左右が防火造であるために火元の反対側では大きく，被類焼確率を減少させている。また，各シミュレーションの類焼の拡大が止まる場所は道路，3m以上の距離，耐火造，防火造の中の防火造などが多い。

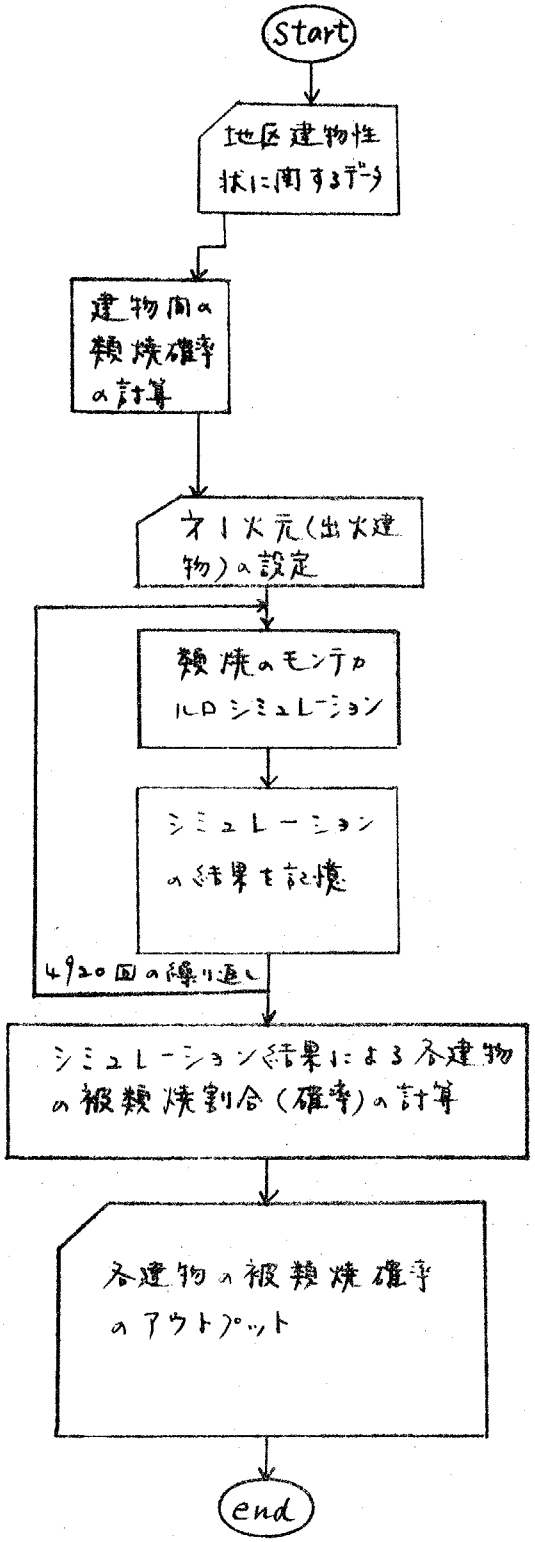


図 7-25　シミュレーションのフローチャート(出火点固定)

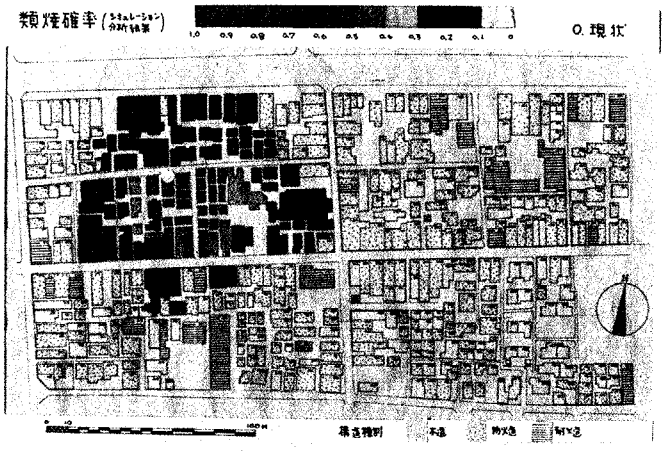


図 7-26-1 類焼シミュレーション(現状, 通常時)

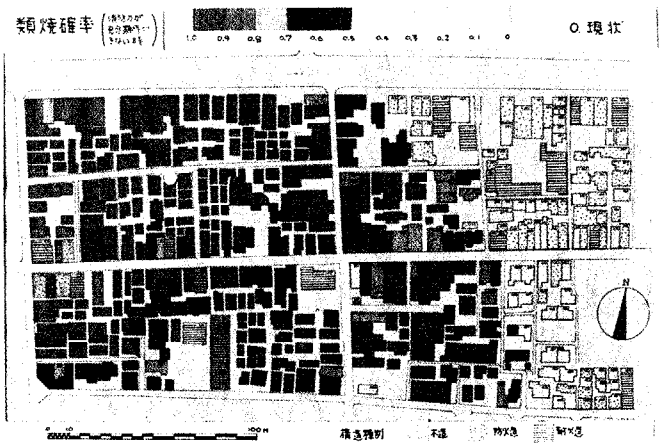


図 7-26-2 類焼シミュレーション(現状, 地震時)

確率的にとらえると，次のような興味深いケースも発見された。すなわち，火元建物からそれほど離れていない側の場所に防火造をはさんで耐火造建物が2つ並んでいるが，この2つの耐火造の被類焼確率よりもはさまれた防火造の被類焼確率の方が小さい。このことは，確率的にはこの2つの建物の右（東）または左（西）側から火災が拡大してくるケースにおいて左右の耐火造が燃え止りとなって防火造が類焼をまぬがれるということが起り，結果的には両隣の耐火造の類焼防止効果を防火造の建物が享受するということが起きている。こうした場合を考えると類焼防止，地区防災といった問題は個々の建物の居住者が自分の安全性（利益）のみを考えてゆくというよりも，相互に助け合って計画してゆくというコミュニティ論的な防災計画の視点が必要であるといえると同時に地区防災計画などにおける費用の分担といったものもその効果の受益者というものが木造から耐火造に改築した建物の施主とは必ずしも一致しないということも考慮しなければならないといえよう。

5－2－6－5　地震時の類焼シミュレーション

地震時については5-2-6-3で検討した地震時の場合を用

て前記と同様の手順で類焼のシミュレーションを行うことができる。この結果は図7-26-2に示されている。シミュレーションの結果得られる各建物の被類焼確率は通常時とくらべて大きく上回っている。各建物が一旦類焼されるとその建物が次には火元となって他の建物へ類焼するという可能性が増加することにより，全体的には次々と連鎖反応のように燃えひろがってゆく。

通常時には3m程度の幅員の道路がある程度類焼防止効果を表わしていたが，地震時にはこうした効果は期待することは危険であることがわかる。すなわちモデル地区のように木造と防火造の建物が密集している状況では図からわかるように容易に3m程度の道を飛びこえて類焼しており，被類焼確率が小さくなるのは次のような点に限られているといえる。

a) 道路または空地が耐火造のそばに確保されている。

b) 空地が確保されている。

c) 耐火造が隣接している。

また，地震時には防火造建物もそれほどの効果を示さないことが予想される。これらの効果については次項でモデル地区の現状を他の代替計画案で建てかえた場合を想定し，シミュレーションを行うことによってより明確に

することができる。

5－2－6－6　平均損失

前記までは特定の出火点を設定し，シミュレーションを繰り返し類焼状況を調べたが，地区の全体的な類焼性状を考える際には出火点を特定化することは好ましくない。従って，出火点をランダムに設定し，類焼シミュレーションを繰り返し検討する方法と，各建物についてその建物が出火した場合のシミュレーションを繰り返し，こうした繰り返しをすべての建物について実行する方法が考えられる。どちらの方法においても各建物毎の出火率の差があるのでまずそれを求めねばならないが，現段階ではこうした建物の性状毎に出火率を求めるための理論的な研究ならびにデータの蓄積がないため，より妥当な形で各建物毎の出火率を求めることはきわめて困難であるため，一応以下ではこのモデル地区の各建物について出火率は一様であると仮定した。

以上の前提のもとに各建物毎に出火するものとし，シミュレーションを一様に10回試み，こうした繰り返しを全建物について繰り返すという計4920回のシミュレーションを繰り返す方法をとった。このシミュレーション

回数は完全に充分なものとはいえないが，以下で述べる損失面積の値のシミュレーション結果を整理すると損失面積の標準偏差と平均値の比すなわち変動係数が通常時を想定したシミュレーションで0.0305，地震時シミュレーションにおいて0.0044となっており，以下で検討する程度の精度は確保されていると判断することができ一応，シミュレーションの繰り返し回数は上記のものでよいものとした。

損失としては建物の焼失面積及びその焼失額ならびに人命の損失が考えられるが、人命については次節において検討するものとし，ここでは焼失面積，焼失額を検討しよう。まず，各シミュレーションにおいてその建物が類焼された場合，その建物の床面積分の焼失があったものとし，各シミュレーション毎に焼失面積を求め，シミュレーションの繰り返しによって得られる焼失面積の値の平均値，標準偏差の値を計算するという方法をとった。

さらに焼失額は焼失床面積に建設単価を乗じた値とし，各シミュレーションの繰り返しによって得られる焼失額の値の平均値，標準偏差の値を計算した。しかし，建設単価は各建物の構造種別，建物用途によって異なるため以下のようにして求めた。まず，建築統計年報より昭和

44年から昭和48年の各年の全国の構造種別・用途別建築費総額をその建築延べ床面積で除し，構造種別・用途別全国平均の単位床面積当り建築費を求める。しかし，それらの値は年によってかなり変動しており，特定の年のデータを用いることは好ましくないので，これらのデータに基づいて回帰分析を行い，さらに昭和50年の構造別・用途別の建築単価を推定し，これを標準単価として用いることとした。この結果は表7-10に示されている。

以上の平均損失を求めるシミュレーションの手続きは図7-27のフローチャートに示される。シミュレーションの結果は表7-11のように得られる。また，現状の全床面積 46,123 m², 全建築費 216,264 万円であるので，これらに対する損失の割合を求めると表7-12のようになり，損失面積，損失額とも異なる。

表 7-10　　建築費（m²当たり）　　単位：円

用途別＼構造別	木造	防火造	耐火造
居住専用建築物	44,240	48,664	57,338
居住産業併用建築物	41,995	46,194	66,163
農林水産業用建築物	19,971	21,968	57,970
鉱工業用建築物	25,239	27,762	55,666
商業用建築物	34,908	38,398	65,149
公益事業用建築物	36,458	40,104	66,080
サービス業用建築物	40,896	44,985	67,485
公務・文教用建築物	41,773	45,950	61,327
事務所	37,837	41,620	68,690
店舗	38,514	42,365	63,980
工場及び作業場	23,316	25,648	58,328
倉庫	22,746	25,021	47,187
学校の校舎	40,814	44,895	56,872
病院・診療所	47,397	52,136	75,522

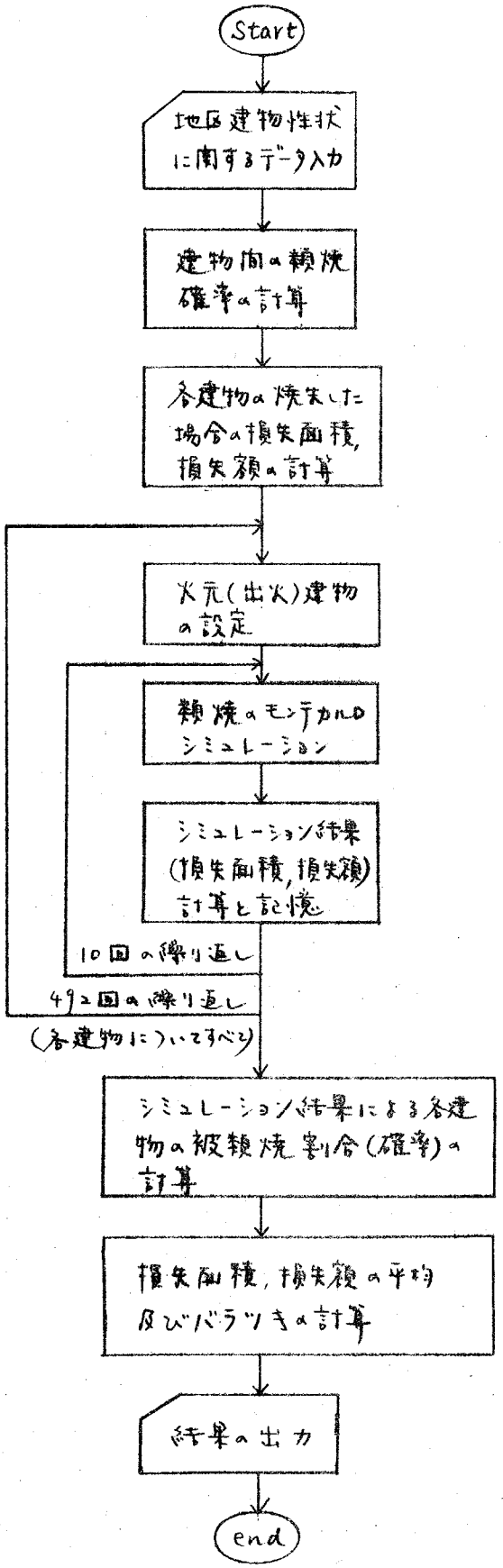


図 7-27 平均損失を求めるシミュレーションフローチャート

表7-11 現状における損失（シミュレーション結果）

	平均損失面積（標準偏差）（m^2）		平均損害額（標準偏差）（万円）	
通常時	1,477	(45)	6,708	(96)
地震時	26,546	(117)	122,620	(252)

表7-12 平均損失の現状に対する割合

	損失床面積/現状床面積	損失額/全建築費
通常時	3.2%	3.1%
地震時	57.8%	56.7%

SEKISUI A4 NO. 54

5-2-7 類焼性状からみた市街地安全計画の最適化

5-2-7-1 代替案

地区をより安全に維持・改善するためには前節の後半でも検討したようにさまざまな方法が併用されることが考えられるが，ここでは，行政指導あるいは補助金などによって各建物の新築・改築及び増築の際に，どのような方向へ導くべきかといったより具体的な問題を取り扱うことにする。従って，どのような地区がより安全になるか，しかもできるだけ経済的負担の少ない形で実行するにはどのような地区が好ましいかという点について検討しなければならない。以下では地区内一部（構造種別）などが変った場合，それが類焼防止上の効果をどの程度変化させ，また，この変更に際してどの程度の資金が必要かという問題を解析する。

地区の変更の仕方は多数ありうるが，以下ではいくつかのものに限定し，それらの評価を行うものとする。まず，類焼防止効果に影響するものとして

a) 木造を防火造に変更する（建てかえる），

b) 木造を耐火造に変更する（建てかえる），

c) 空地を設ける，

d) 各建物間の距離を各敷地内で移動し，距離をとる，

などが考えられるが，建物の配置とくに耐火造の配置によってもその効果が異なり，また，空地なども配置場所によって効果が異なることが予想される。各建物間の距離を各建物の敷地内で移動し距離をとるという方法は比較的密度の低い地区では可能であるが，当該地区ではほとんど敷地のいっぱいに各建物が配置されている場合か敷地に余裕のある建物はすでに隣接建物とできるだけ離れた形となっている場合が多く，この方法はこのモデル地区では適用可能ではないと考えられる。

以上の点から以下では次の代替案に限定して検討する。

(A) 現在，木造の建物を防火造建物とする(用途・床面積は変更なし)。

(B) モデル地区中央を東西，南北に通る道路に面する建物を全て耐火造とする（用途・床面積は変更なし）。

(C) 現在，木造が密集しており，なおかつブロック（モデル地区の中央を東西，南北に通る道路によって分割される4つの地区をブロックという）の中央に位置するいくつかの建物を取り除き空地とする。

(D) 上記で空地とした建物を耐火造とする(用途・床面積は変更なし)。

以下では各代替案を単に A) 防火造化 B) 耐火ベルト C) 空地ブロット D) 耐火ブロットと呼ぶことにする。また，各代替の性状及び変更（立て替え）費用なども調べてお

くことにする。

A) 防火造化

木造を全て防火造化を行うことによってモデル地区の構造種別の配置状況は図7-28のようになる。また，このときの構造種別の割合は表7-13のようになる。この代替案では現状の34%にあたる168の木造建物を防火造とするため，経済的に考えた場合，不利となり，全建築費を現状の場合と同様に計算してみると220,554万円となり，現状にくらべて4,291万円の建築費の増加となっている。この建築費の増加分を以後代替案の改善費用と呼ぶことにしよう。

B) 耐火ベルト

図7-29のように4つのブロックにわける東西，南北の道路に面する建物を耐火造にすることにより構造種別は表7-14のようになる。全建築費用は240,120万円となり，現状とくらべた費用増分，すなわち改善費は23,857万円となる。

C) 空地ブロット

密集建物群を取り除き空地とする場所は図7-30に示されている。取り除く建物群はブロックI，ブロックIVのうちの2ヶ所であり，取り除かれた建物数は表

わせて25であり，その結果，モデル地区の構造種別は表7-15のようになる。この代替案の場合の改善費用は以下のように考えることができる。まず，この空地化される場所に居住するものは現状と同条件でこのモデル地区外の場所に居住するとすれば，建築費の増分はないことになる。しかし，土地については他の地区に空地化した面積に等しい土地を求めなければならない。従って，空地化した面積に等しい土地の取得費用を改善費用と考えることができる。土地の取得費用としては国土庁「昭和51年都道府県地価調査結果あらまし」によると，東京の既成市街地の住宅地では10.8万円/m^2となっており，また，東京圏の既成市街地の5ヶ年平均公示価格は「環境が良好な住宅地」で9.16万円/m^2，「それ以外の住宅地」で7.05万円/m^2となっている（「昭和52年版 国土利用白書」）。従って，以下ではこれらのデータに基づき，土地の取得費用は10.0万円/m^2として計算を行うことにする。このとき，空地化を行った面積は計683m^2であるので，改善費用としては6,830万円ということになる。

D) 耐火プロット

空地プロットの場合に取り除いた建物と耐火造とす

表7-13 代替案A. 防火造化における構造種別

構造種別	建物数 (割合%)
木造	0 (0.0%)
防火造	465 (94.5%)
耐火造	27 (5.5%)

表7-14 代替案B. 耐火ベルトにおける構造種別

構造種別	建物数 (割合%)
木造	153 (31.1%)
防火造	209 (42.5%)
耐火造	130 (26.4%)

SEKIREI A4 NO 54

表7-15　代替案C. 空地プロットにおける構造種別

構造種別	建物数（割合%）
木造	152　(32.5%)
防火造	288　(61.7%)
耐火造	27　(5.6%)
計	467

表7-16　代替案D. 耐火プロットにおける構造種別

構造種別	建物数（割合%）
木造	152　(30.9%)
防火造	288　(58.5%)
耐火造	52　(10.6%)

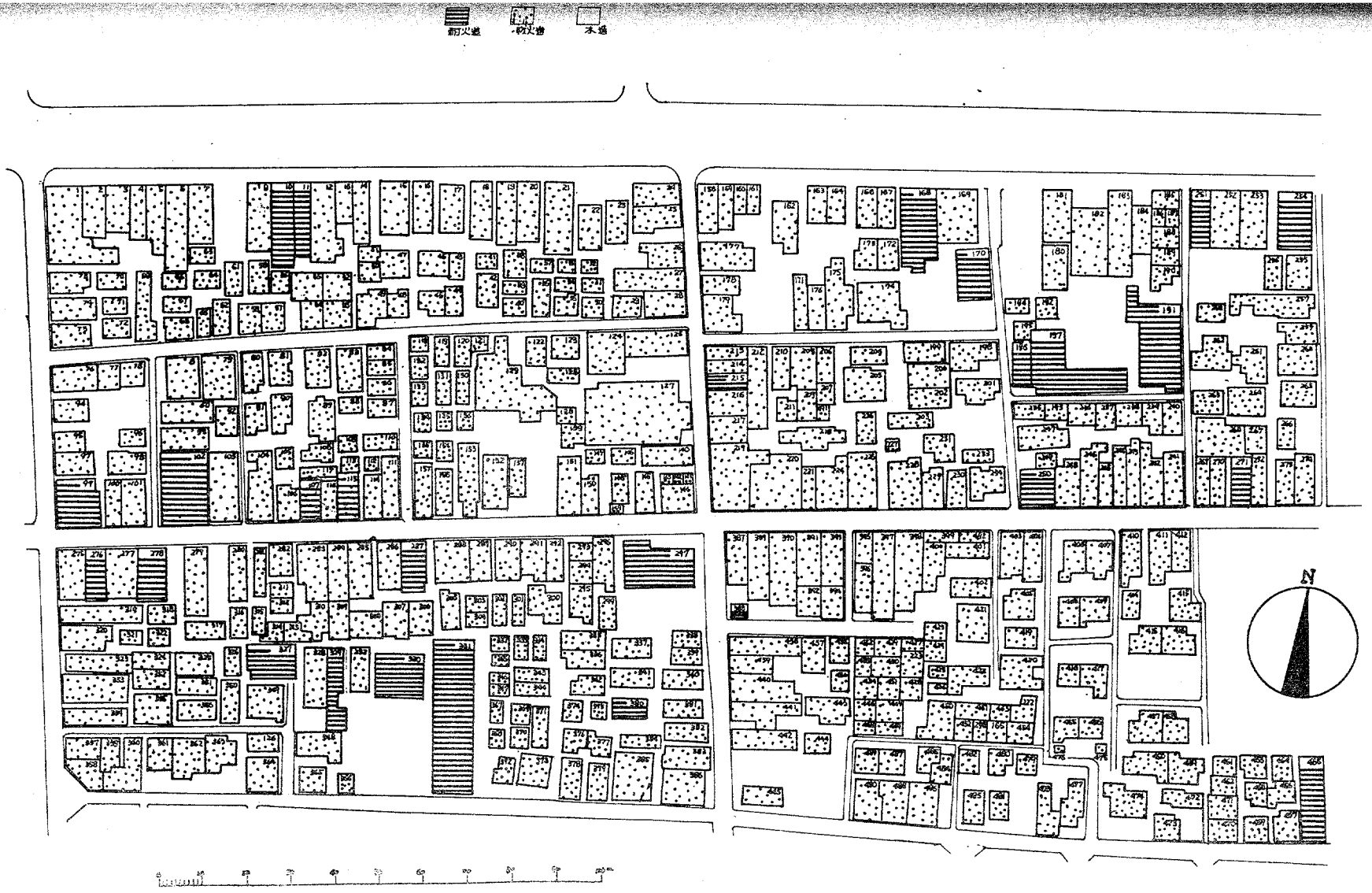
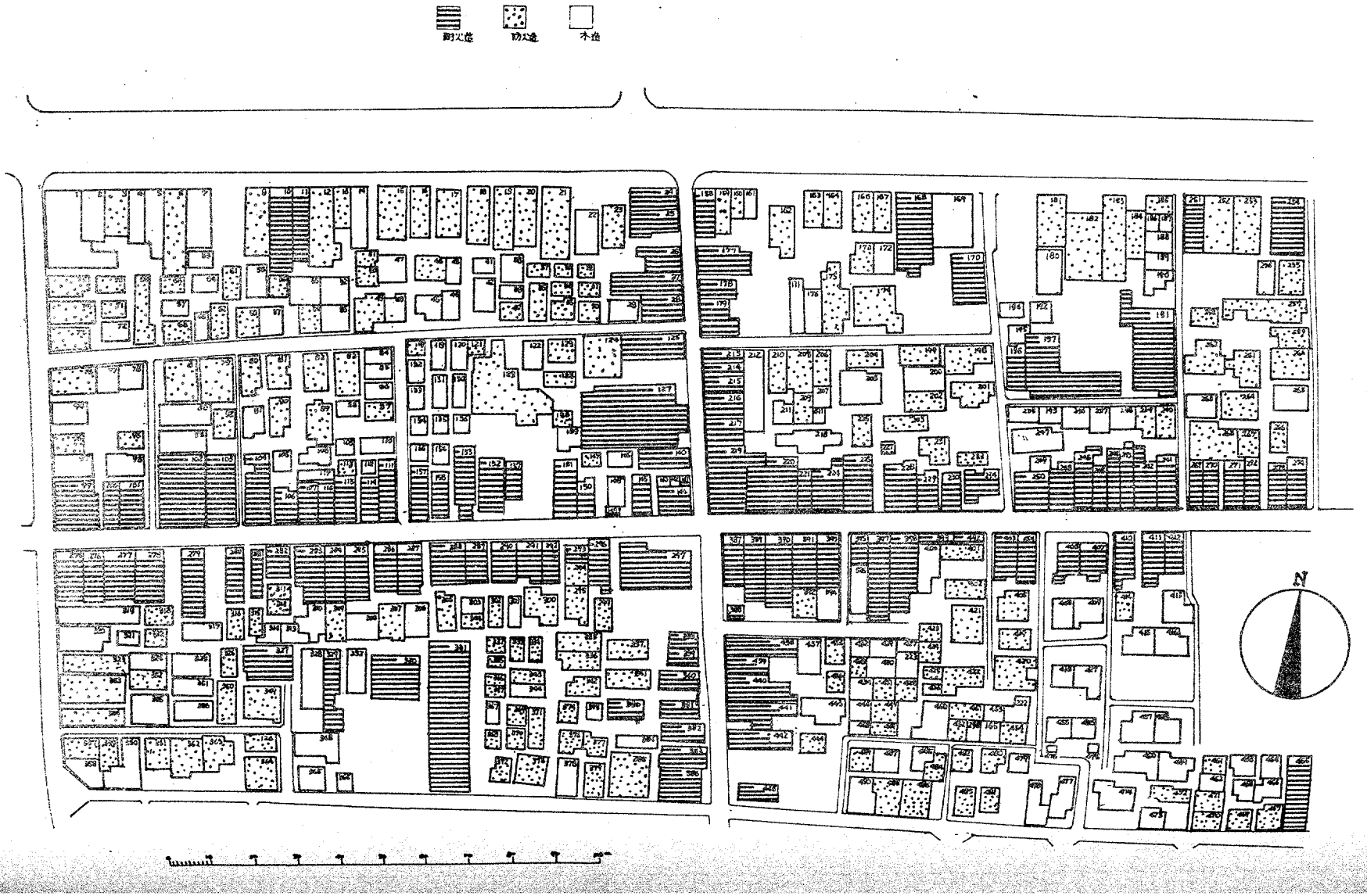


図 9-28　構造種別図（計画案A）


耐火造
防火造
木造
N

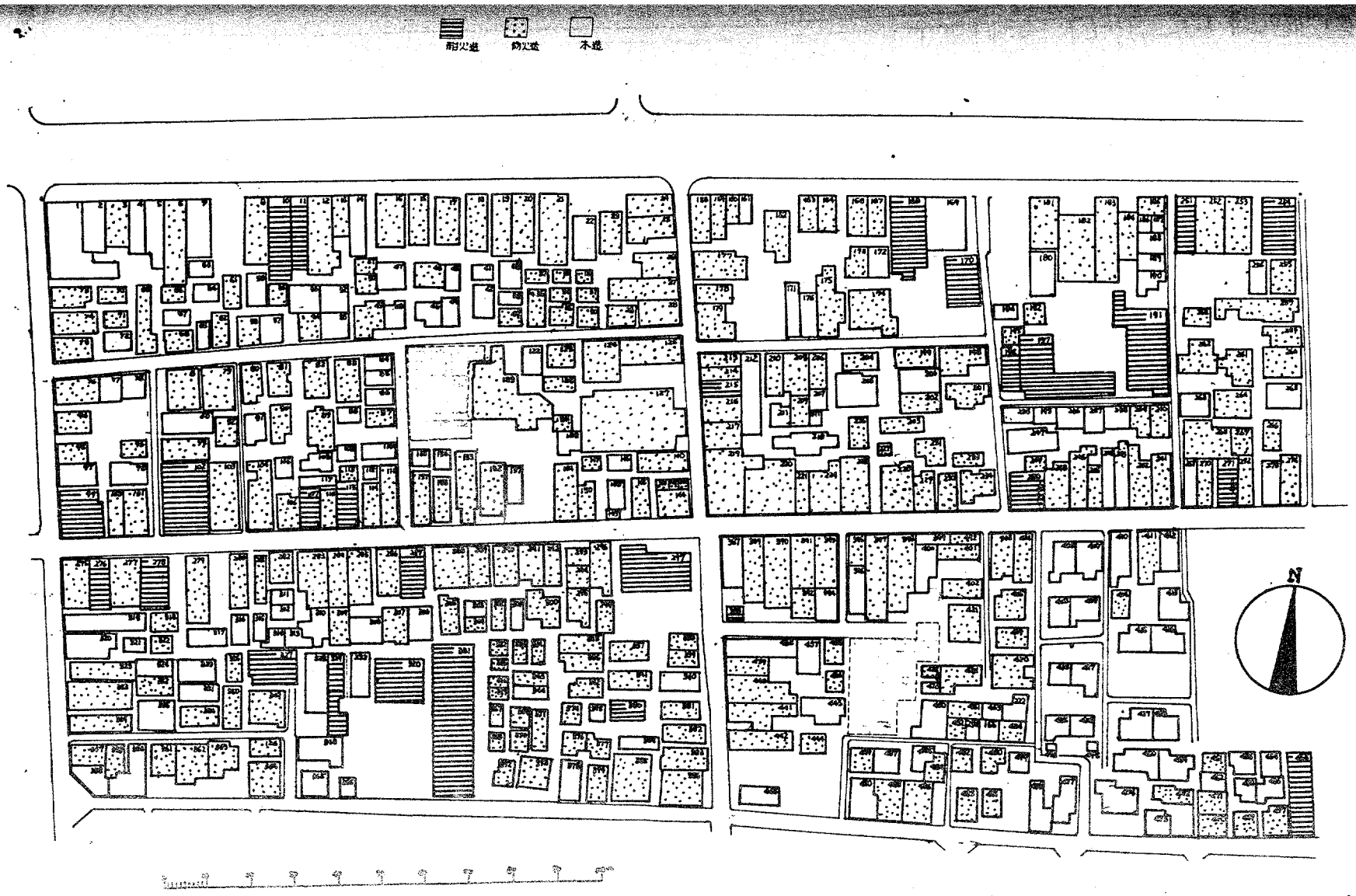


図 7-3. 構造種別図（打合せ）

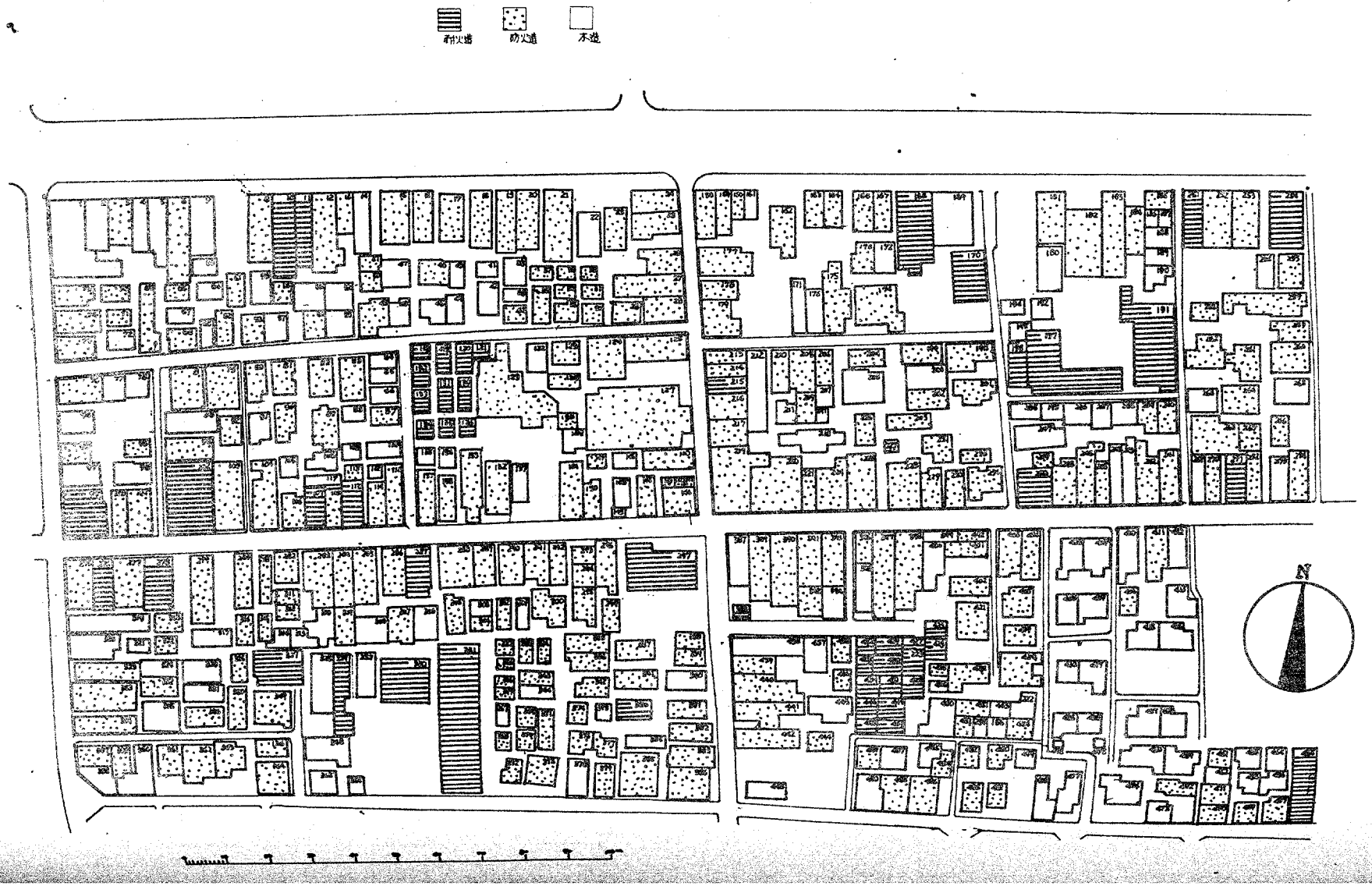

耐火造
防火造
不造
N

表7-17 各代替案の改善費用

代替案	改善費用（単位百円）
0. 現状	0
A. 防火建化	4,291
B. 耐火ベルト	23,857
C. 空地プロット	6,830
D. 耐火プロット	1,516

る案で図7-31に示されている。このときの構造種別の割合は表7-16のようになる。この代替案ではブロックⅠ，Ⅲにある計25の建物を耐火造とするため，全建築費は217,779百円となり，現状とくらべ2,516百円の建築費の増加となっている。

以上の各代替案を整理すると表7-17のようになる。

5-2-7-2 各代替案のシミュレーション分析

既存市街地の類焼性状を調べるために行ったと同じように出火点を固定し，通常時，地震時のシミュレーション（前項図7-25のフローチャートで手順が示されている）及び出火点を移動させ，平均損失を通常時，地震時について求めるシミュレーション（前項図7-27のフローチャートで手順が示されている）を実行し，各代替案の評価を行う。

A) 防火造化のシミュレーション分析

通常時の出火建物に固定した場合のシミュレーション結果が図7-32に示されている。現状の場合とくらべて被類焼確率，類焼面積が大きく減少している様子がわかる。とくに，既存市街地で出火点の東側の道路をへだてた木造密集建物群への類焼は防火造化するこ

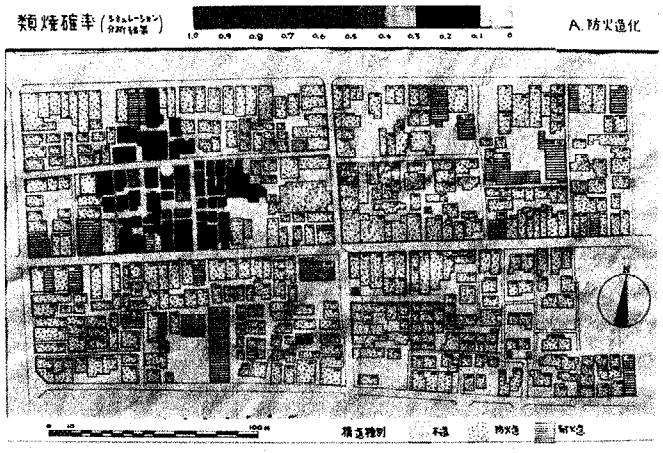


図7-32 類焼シミュレーション(A. 防火造化, 通常時)

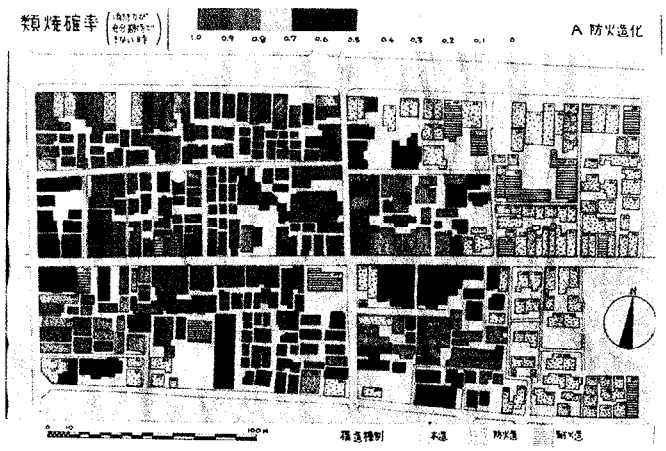


図7-33 類焼シミュレーション(A. 防火造化, 地震時)

表7-18　A. 防火造化における平均損失

	平均損失面積 (標準偏差) m^2	平均損害額 (標準偏差) 百円
通常時	835 (33)	3,892 (71)
地震時	21,184 (118)	99,386 (256)

表7-19　A. 防火造化と現状との平均損失の比率

	平均損失面積比率	平均損害額比率
通常時	0.565	0.580
地震時	0.798	0.811

とにより，類焼防止効果が明確に表われている。

地震時の場合は図7-33に示されており，現状とくらべて類焼防止効果が表われているのがみられるものの，ブロックIIIを除いては大きな差とはいえないといえよう。出火点を固定せずに出火点を移動させ，その平均的な損失を調べてみると表7-18のようになる。また，防火造化した場合の平均損失と現状の場合における平均損失との比較を行ってみると表7-19となる。この表によれば，防火造化を行うことにより通常時の火災では現状にくらべて5～6割の損失面積，損失額に減少させることができることがわかり，防火造化ということが，通常の火災の場合には効果的であるということができる。地震時の場合は現状にくらべ約8割程度の損失にとどめていることがわかる。

B) 耐火ベルトのシミュレーション分析

通常時の出火建物を固定した場合のシミュレーション分析の結果が図7-34に示されている。現状とくらべて効果が表われていることがみられるが，防火造化の場合ほど顕著ではない。しかし，ベルト状に配置された耐火造建物のために他のブロックへと類焼する確率は極端に減少している。地震時の場合のシミュレーション結果は図7-35に示されているが，いわゆる耐火ベルトによって他

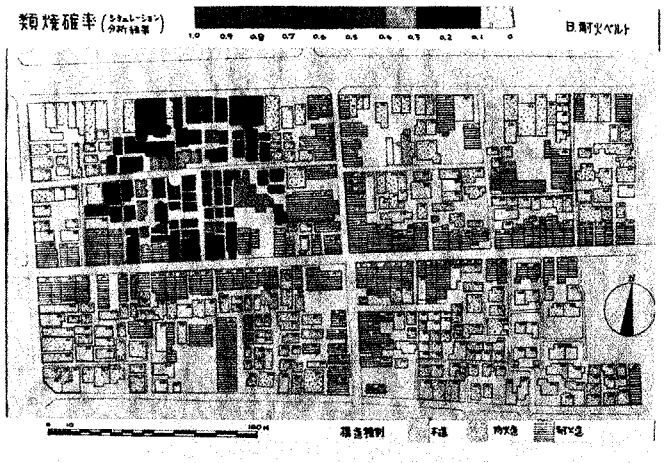


図7-34 類焼シミュレーション(B.耐火ベルト, 通常時)

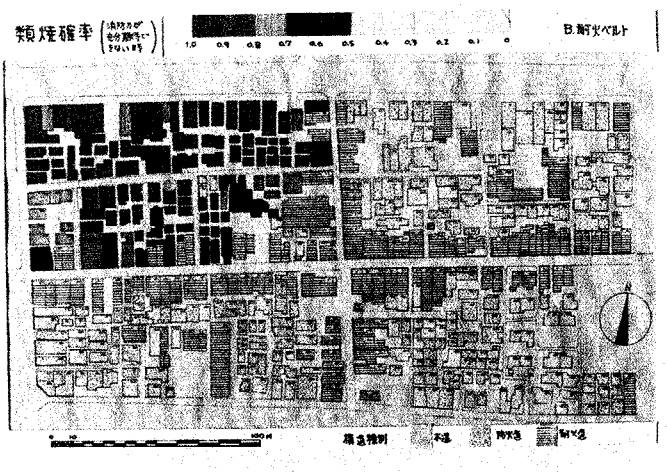


図7-35 類焼シミュレーション(B.耐火ベルト, 地震時)

表7-20　B. 耐火ベルトにおける平均損失

	平均損失面積 (標準偏差) m^2	平均損害額 (標準偏差) 万円
通常時	837 (34)	3,990 (73)
地震時	6,039 (72)	29,644 (158)

表7-21　B. 耐火ベルトと現状との平均損失の比率

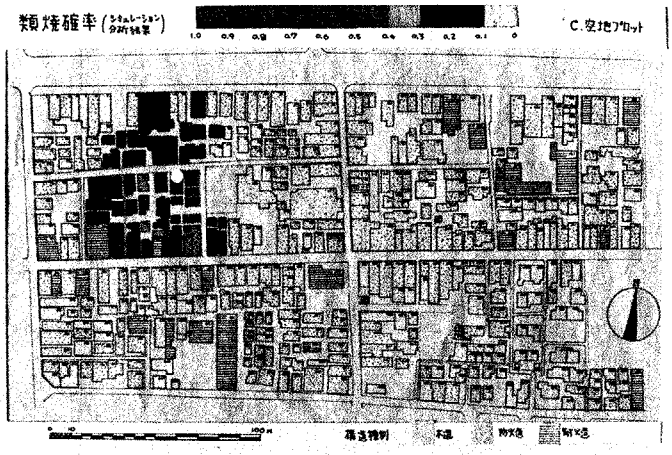
	平均損失面積比率	平均損失額比率
通常時	0.567	0.595
地震時	0.227	0.242

ブロックへの類焼が防止されていることが明確になっている。従ってこのような対策は通常時の火災よりも大火への拡大の恐れのある場合に有効なものであるといえる。平均損失は防火造化の場合と同じように求めることができ，表7-20に示されている。また，現状の場合の平均損失を基準にした平均損失の比率を求めると表7-21のようになる。これらの表からわかるように，通常時については耐火ベルトよりも防火造化の方がすぐれているが，地震時の場合には大きな類焼防止効果を発揮し，現状の損失にくらべ2～3割程度の損失にくいとめている。

c) 空地ブロットへシミュレーション分析

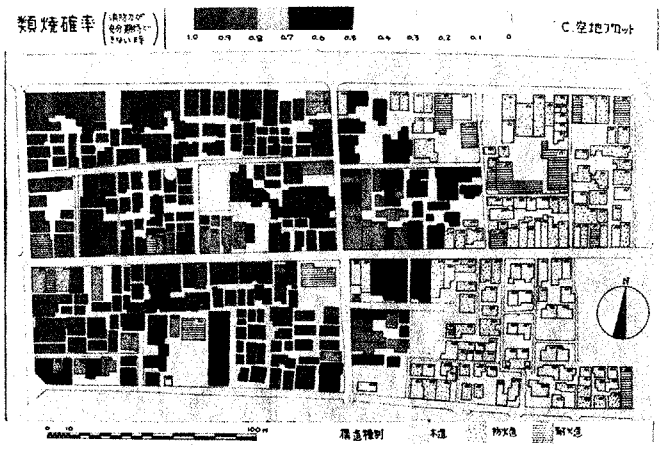
通常時の出火建物を固定した場合のシミュレーションの結果は図7-36に示されるとおり，空地をとった効果が明確に表われている。地震時の場合は図7-37に示されており，オIブロックで出火した火災は同ブロック内の空地については周囲からまわりこむようにして類焼するため大きな類焼防止効果は表われていないが，オIIIブロックまで類焼した火災はオIVブロックの空地で燃え止まるケースの多いことが図からわかる。

以上のことから空地の類焼防止効果は通常時の場合には大きいが，地震時の場合は周囲をかこまれるしま



FUJICOLOR ∞ 78

図 7-36 類焼シミュレーション(C.空地)ブロット, 通常時)



FUJICOLOR ∞ 78

図 7-37 類焼シミュレーション(C.空地)ブロット, 地震時)

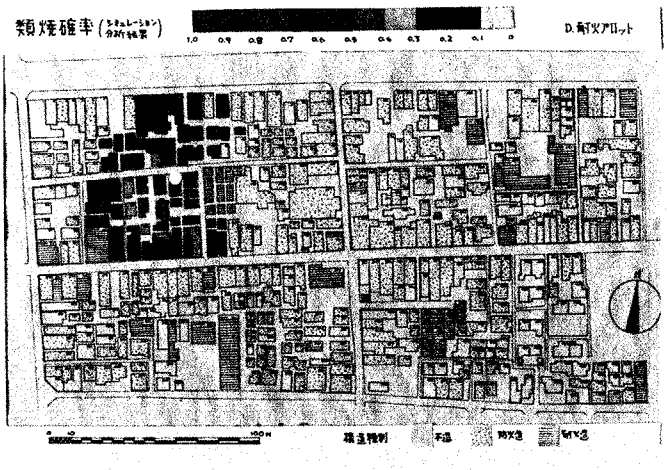


図7-38 類焼シミュレーション(D.耐火プロット, 通常時)

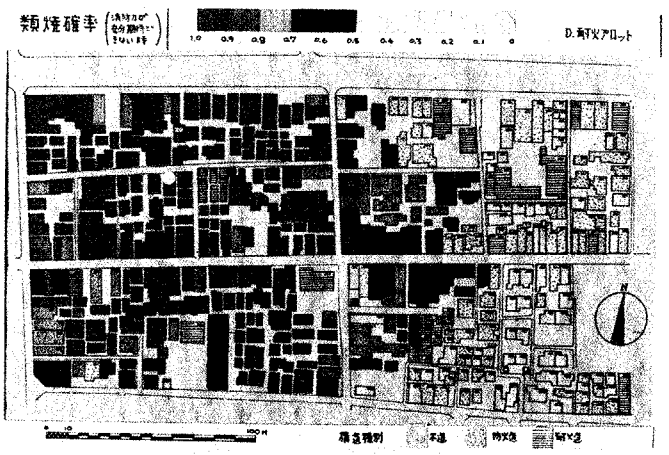


図7-39 類焼シミュレーション(D.耐火プロット, 地震時)

表7-24　D. 耐火プロットにおける平均損失

	平均損失面積 (標準偏差) m^2	平均損失額 (標準偏差) 万円
通常時	1,001 (36)	4,628 (77)
地震時	21,371 (118)	99,208 (253)

表7-25　D. 耐火プロットと現状との平均損失の比率

	平均損失面積比率	平均損失額比率
通常時	0.678	0.690
地震時	0.805	0.809

とが効果的であること，地震時については耐火ベルトのような方法が効果的であることが明確となった。また，耐火，空地などの配置・性状が類焼防止効果に大きく影響することが予想された。

また，地震時として類焼発達確率を表7-21の値から求めたが，最悪な場合として出火または類焼された建物が全て炎上し，他に類焼する可能性を必ずもつとした場合が考えられ，このとき，各代替案についてシミュレーション分析を行ってこれまでの結果を合せてみると図7-40のようになっている。これらの結果からも各単体建物において類焼可能なフェイズまで火災を発達させないことがいかに重要かがわかる。

各代替案のいづれが地区安全を考えるうえでより好ましいものかという問題については各案の改善費用などを含めた総合的観点から検討しなければならない。以下ではこうした問題について人命と経済的損失の二面から分析を行うことにする。

5-2-7-3　各代替案の評価

防災の効果を評価する場合，最も重要な点は人命の損失をいかに防止したかという点にあるといえよう。しか

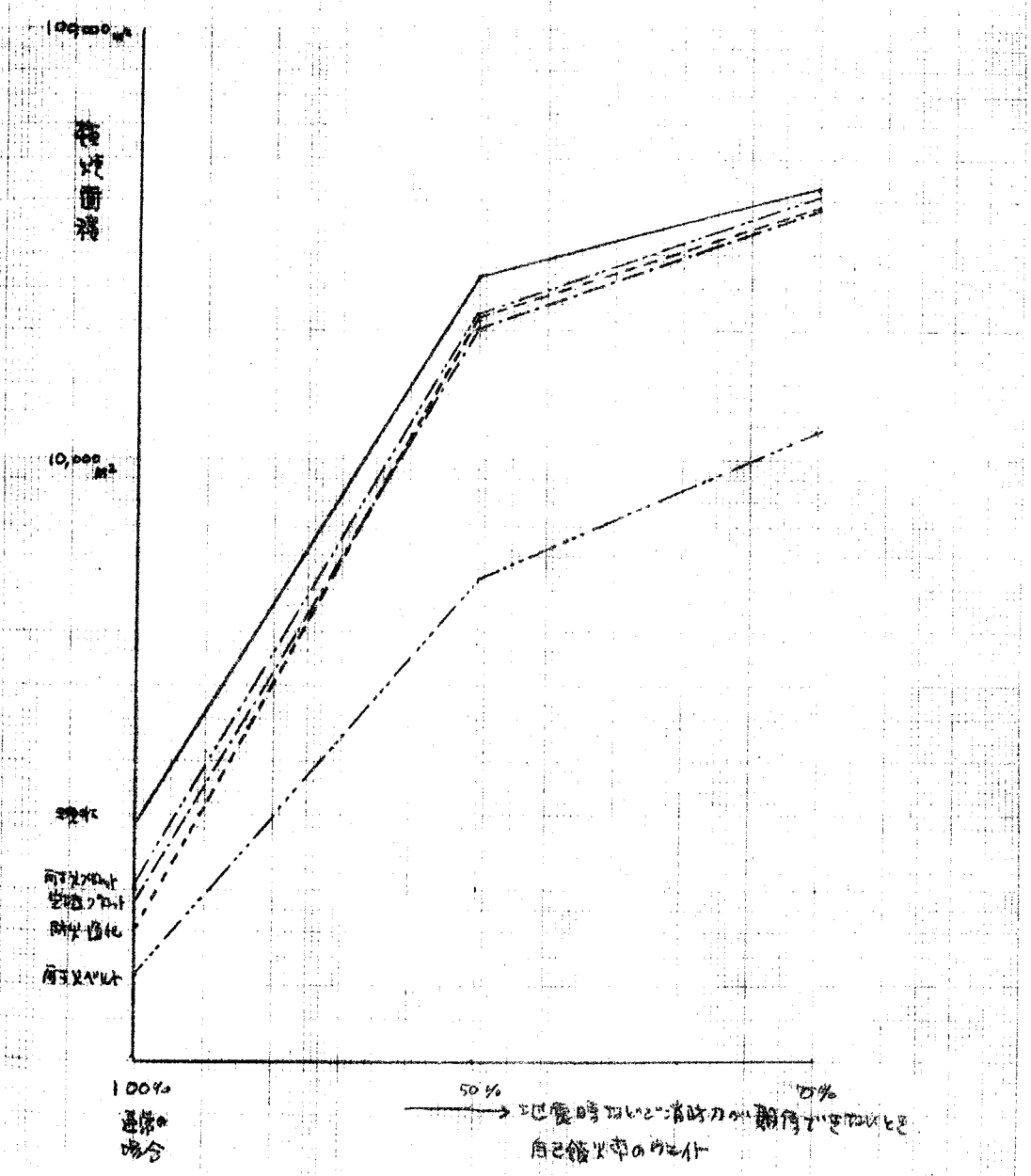


図 7-40 各代替案の消防力と延焼焼失面積

しながら，人命の損失を計量的に予想することは非常に難しいといえる。避難の流動を解析し，人命の損失を推定する方法などがとられることもあるが，そこで仮定される平均歩行速度においても本来確率量であり，また，病人，幼児，老人など歩行能力において健康成人などの歩行能力からくらべ極端に異なる場合には問題があるといえよう。とくに幼児，老人の火災死傷者が多いことを考えると，こういわゆる弱者の立場から人命の問題を考えなければならないといえる。

まず，各年の焼失面積と死者数，負傷者数との関係を調べてみると図7-41のようになり（文献6のデータによる），負傷者と焼失面積にはほぼ一定の関係があるが，焼失面積当りの死者数は昭和40年頃から増加している。このような増加を示す理由というものについて現在では明確にすることは困難であるが，火災時に避難が何らかの理由で出来ない人の割合が増加したことも充分に考えうる。

以上のような人命と焼失面積の関係から直接類焼面積とそこでの人命の損失を求めるには上記のような問題があるが，以下のシミュレーション分析の評価としては安全をみこして焼失面積1㎡当りについての死者数の期待

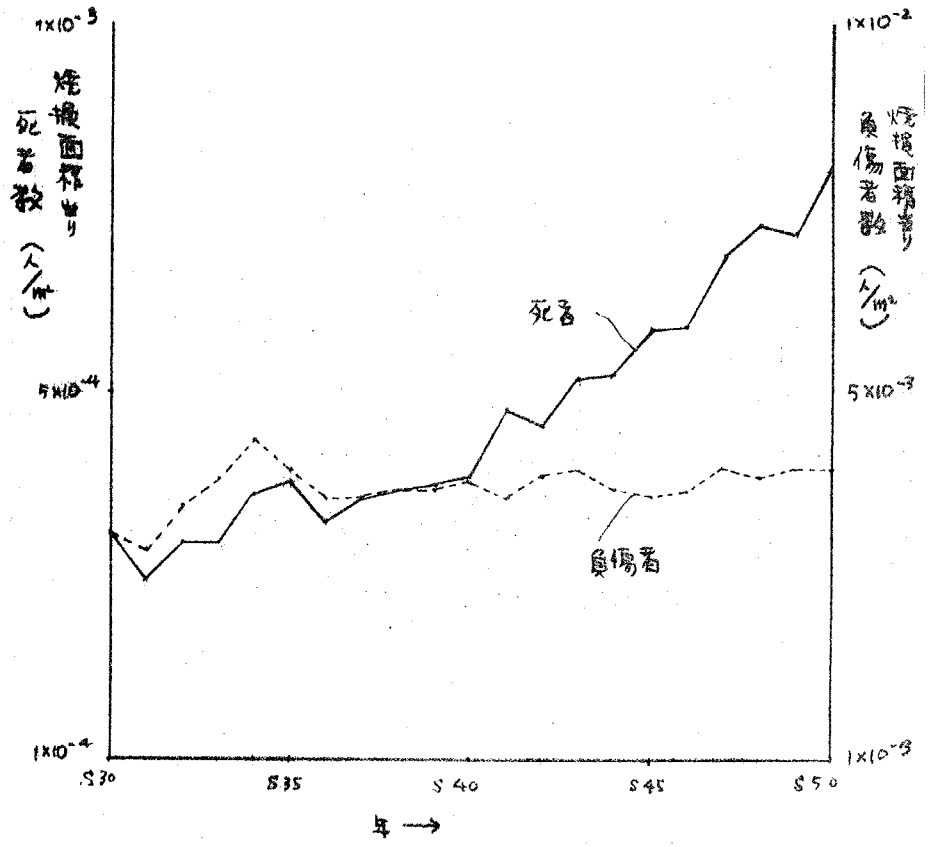


図 7-41 焼増面積当りの死者数・負傷者数

値を 1×10^{-3} 人と仮定することにする。この仮定にはこの他に以下のような問題点があり，今後の検討を必要とするが，この仮定から得られる結果はひとつの人命の安全性に対する相対的尺度としての意味しかもたないことに注意すればさしつかえないのではないかと思われる。

問題点とは先の図7-41で示した焼失面積当りの死者数のデータとなる火災のほとんどが類焼規模が小さいか，単体の火災でその拡大が停止したものであり，分析で行った地震時のシミュレーションのようなある程度まで拡大した類焼における焼失面積当りの死者数というものは，これらの単体，小規模類焼の段階での焼失面積当りの死者数よりも小さいと考えられる点である。実際，大火などの焼失面積の大きいものでは類焼される建物内の人員は避難時間の余裕があるケースが多く，焼失面積当りの死者数は小さい。従って，以下の死者数とはより安全側に考えるという点と，人命の安全性に対する相対尺度として死者数の期待値を考えるという仮定に基づく数量である。

以上の前提のもとに死者数を各代替案について求めると表7-26のようになる。

ところで，これらの代替案を評価する場合，1出火当

表7－26　各代替案のシミュレーション分析に基づく死者数期待値

（1出火当り：人）

代替案	通常時	地震時
0. 現状	1.5	26.5
A. 防火造化	0.8	21.2
B. 耐火ベルト	0.8	6.0
C. 空地プロット	1.0	20.0
D. 耐火プロット	1.0	21.4

りの人命の損失へみから考えることは，理想案の提案としては容認されうるかもしれないが，より現実的な有効性を考える際には意味をなさない。なぜならば，現実性を無視すればこの地区全体を空地とする案，この地区全体を耐火造の建物のみとするような案が考えられるが，これらの案では人命の安全性はきわめて高いが，そうした案を実行するだけの経済的背景，もしくは経済的な効果がなければ意味をもってこないばかりか，より具体的な安全への計画を過少評価してしまう危険性をもっている。

以下では経済性を含めた評価を行っておこう。まず，各建物の使用期間の平均値をTとし，この期間内の火災による人命損失，損失額及び建設コストを評価する（ただし，以下では利子率の影響は省略し，全て現在価値に1対1で換算されうるものと仮定する。このような仮定を導入しても各代替案の効果の順序は大きく変動しない）。

まず，通常時の場合の火災について各記号を以下のように定めておこう。

N ： 地区建物数

m ： 建物当り平均居住（収容）人員

P_0 ： 地区人口

δ ： 1年間1万人当り建物の出火件数

E_n ： 1年間当り地区出火件数

D ： 1出火当り損失額期待値

L_o ： 1出火当り死者数期待値

Q_T ： 期間Tにおける火災損失額

L_T ： 期間Tにおける火災死者数

C ： 改善費用

この他に地震の発生にともなって生じる火災について各記号を定めておく。

D^* ： 地震時1出火当り損失額期待値

L_o^* ： 地震時1出火当り死者数期待値

Δ ： 地震時建物当り出火率

T_R ： 想定地震のリターン・ピリオド

n^* ： 期間Tにおける想定地震発生回数

E_n^* ： 地区内での地震発生時における出火件数

以上の準備のもとでこの地区人口は

$$P_o = m \times N \qquad (7-1)$$

であり，1年当りの火災（地震時の火災を除く）の出火件数は

$$E_n = P_o \times \delta / 10{,}000 \qquad (7-2)$$

であり，T年間における火災（地震時の火災を除く）に

よる損失の期待値は

$$Q_T = D \times E_n \times T \qquad (7-3)$$

である。人命の損失については

$$L_T = L_0 \times E_n \times T \qquad (7-4)$$

となる。これらの関係を整理すると

$$Q_T = D \cdot m \cdot N \cdot \delta \cdot T \times 10^{-4} \qquad (7-5)$$

$$L_T = L_0 \cdot m \cdot N \cdot \delta \cdot T \times 10^{-4} \qquad (7-6)$$

となる。一方，地震時の火災については期間Tにおける想定地震の発生回数は

$$n^* = \frac{T}{T_R} \qquad (7-7)$$

であり，この地震によって発生する火災の発生件数は

$$E_n^* = \Delta \times N \qquad (7-8)$$

である。さらにT年間の地震にともなう火災の損失は

$$Q_T^* = D^* \cdot E_n^* \cdot n^* \qquad (7-9)$$

となり，人命については

$$L_T^* = L_0^* \cdot E_n^* \cdot n^* \qquad (7-10)$$

となる。これらを整理すると以下のようになる。

$$Q_T^* = D^* \cdot \Delta \cdot N \cdot T / T_R \qquad (7-11)$$

$$L_T^* = L_0^* \cdot \Delta \cdot N \cdot T / T_R \qquad (7-12)$$

以上の結果から，期間Tにおける人命の損失の期待値L

は

$$L = L_T + L_T^* \qquad (7-13)$$

となり，経済的損失の期待値Uは，初期建設コストの現状との差額（改善費用）Cを含めて，以下のようになる。

$$U = C + Q_T + Q_T^* \qquad (7-14)$$

次に，これらの値を各代替案について求めるために各変数の値について吟味しておくことにしよう。まず，建物数は空地プロットの場合を除いては

$$N = 492 \qquad (7-15)$$

であり，空地プロットの場合は

$$N' = 467 \qquad (7-16)$$

となっている。建物当り平均居住（収容）人員は1建物1家族のケースが多いので，以下では

$$m = 4 \text{ (人)} \qquad (7-17)$$

と仮定しておく。出火率δについては前節で検討したが，ここでは標準値として

$$\delta = 6.8 \quad (\text{件}/\text{年}\cdot 10{,}000\text{人}) \qquad (7-18)$$

としておく。また，想定地震のリターン・ピリオドについては明確な情報はないが，建物使用期限とあわせて

$$T = T_n = 60 \text{ (年)} \qquad (7-18)$$

と仮定しておく。また，地震時建物当り出火率は堀内・

水野（文献5）によれば，冬期炎上火災（ここで炎上とは単に出火しただけでなく，類焼の可能性をもつ火災まで発展する火災のこととする）の出火率は（建物数当り）全壊率2%の地震に関して0.174%であることを導いている。この値を採用すれば

(7-20)

$$\Delta = 0.00174$$

となる。

以上の数値を前提とし，各シミュレーション分析の結果より得られているデータ D^*, L_0^*, D, L_0 を（7-5），（7-6），（7-11）及び（7-12）式に代入すると表7-27のような結果をうることができる。これらの結果からも通常時における火災ではA.防火造化，D.耐火ベルトが効果的であり，地震時においてはB.耐火ベルトが他にくらべ大きく，効果が上回っている。空地プロットも地震時の効果は他より若干良いことがわかる。

通常の場合の火災に限定し（すなわち地震時の損失を含めずに），経済的損失（火災損失額と改善費用の和）と人命の損失を各代替案について求めてみると表7-28の結果をうる。この関係を図示すると図7-42のようになるが，これらの代替案の中では図からわかるようにA.防火造化 B.耐火ベルトがパレート最適であることが

表7-27 期間T(=60年)における各代替案の損失期待値

代替案	通常時		地震時	
	火災損失額 Q_T (万円)	火災死者数 L_T (人)	火災損失額 Q_T^* (万円)	火災死者数 L_T^* (人)
0. 現状	538,614	119	104,962	23
A. 防火造化	312,506	67	85,074	18
B. 耐火ベルト	320,375	51	25,375	5
C. 空地プロット	334,353	72	75,285	16
D. 耐火プロット	371,602	80	84,922	18

表7-28 地震時火災を除く各代替案の経済的損失及び人命損失

代替案	経済的損失(万円)	火災死者数 (人)
0. 現状	538,614	119
A. 防火造化	316,797	67
B. 耐火ベルト	344,232	51
C. 空地プロット	341,183	72
D. 耐火プロット	373,118	80

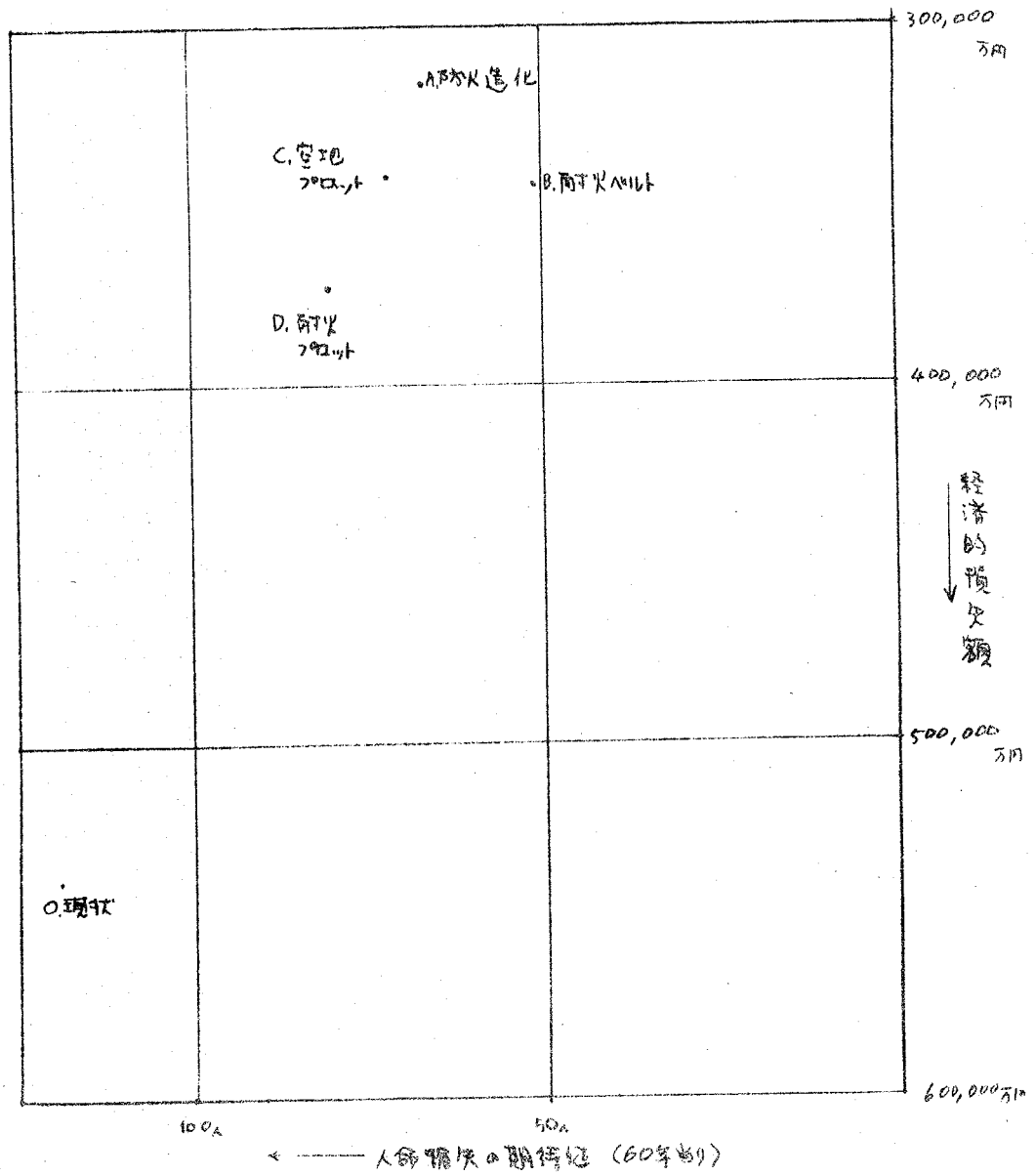


図 7-42 地震時火災を防ぐ場合の各代替案の評価

表7-29 各代替案の経済的損失と人命損失

代替案	経済的損失(万円)	人命的損失(人)
0. 現状	643,576	142
A. 防火建化	401,823	85
B. 耐火ベルト	369,607	72
C. 空地プロット	416,468	88
D. 耐火プロット	458,040	98

わかる。このことはより人命にウェイトをおいて評価を行えばB.耐火ベルトが好ましく，より経済的側面にウェイトをおいて考えるならば防火造化が好ましいといえよう。

さらに，地震時を含めた全体の経済的損失U及び人命損失の合計期待値Lは表7-29に示されるような値となる。この結果，経済的にみても人命へ実かうみてもB.耐火ベルトがこれらの代替案の中では最も好ましい。すなわち，人命と経済という面からみて，他の代替にくらべすぐれていることがわかる（図7-43参照）。また，現状にくらべるとどの代替案も人命，経済性ともにすぐれており，この地区の安全性をあげるためにはこのいづれの代替案であっても実行しさえすれば，現状よりは経済的・人命安全上より良い環境が確保できることを示している。

5-2-7-4 他のモデル地区におけるシミュレーション分析

これまで既存市街地の類焼シミュレーション分析した結果は，あくまでもここで取り上げたモデル地区についての結果であるため，他の地区の場合についても同様の

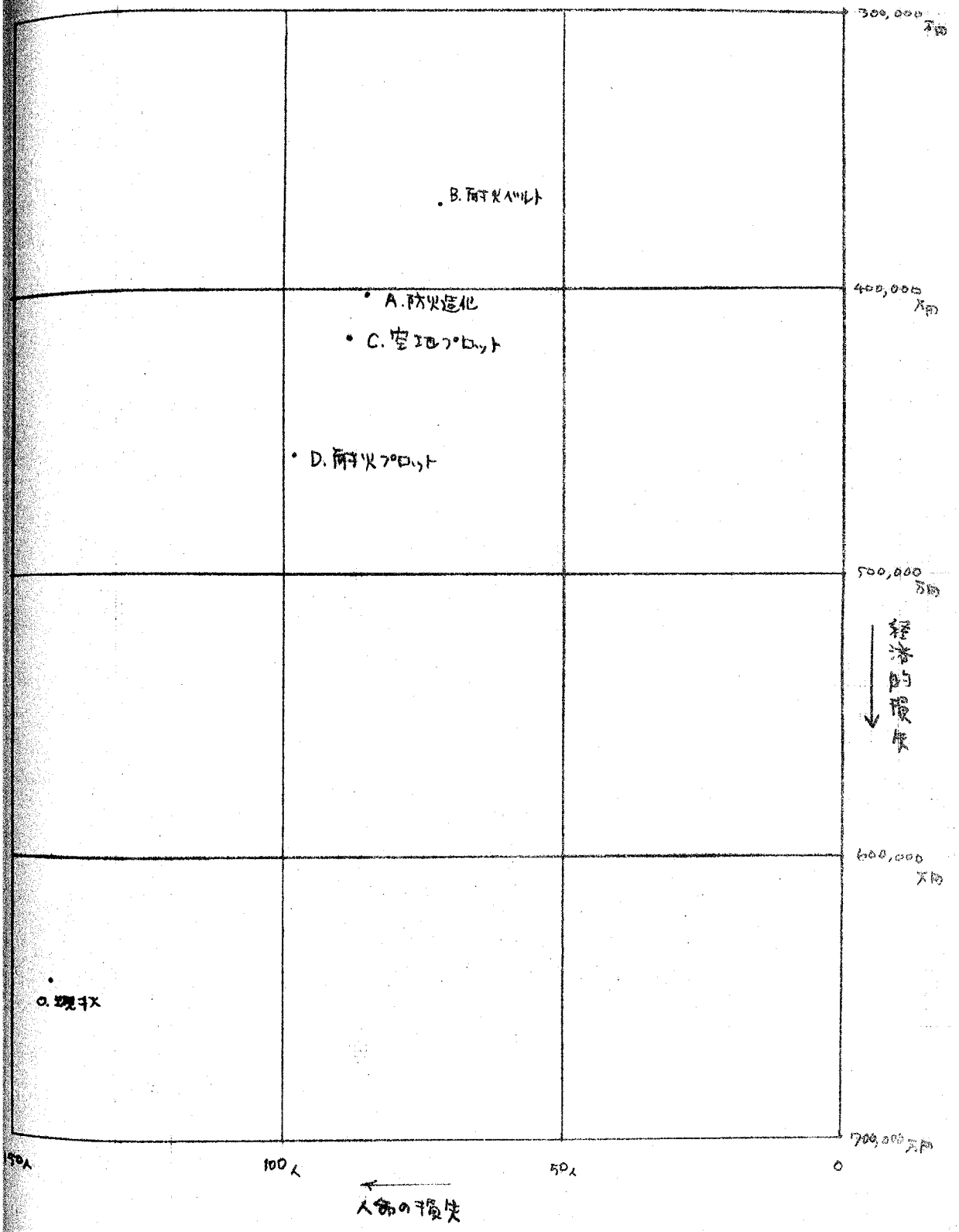


図 7-4) 各代替案の人命の損失 及び 経済的損失

の分析を繰り返し，より一般的な結果を得ることが望まれる。ここでは，これまでに分析したモデル地区よりもより低密度の住宅地についてのシミュレーション分析の結果を補足し比較することで，先のモデル地区にない側面についても検討しておく（本研究は文献7においてその一部を発表しており，ここではその結果を再整理するものである）。

モデル地区として取り上げたのは東京都大田区久ヶ原6丁目の9つのブロックであり，先の分析と同様現地調査によって各建物の構造種別，隣棟距離，建物用途，階数，高さ，延床面積を調べた。モデル地区内の建物数は239であり，構造種別としては表7-30に示されている。

類焼シミュレーションの方法は先に示した方法と同じであるが，モデル地区がおおよそ図7-44のような形状をしており，周囲の道路幅員が8～10mであり，モデル地区外との類焼したり，されたりすることはないと仮定したが，モデル地区外の影響も無視できないので，図7-44における記号Aで示したブロック内をとくに計画ブロックとし，このブロックA内について各種の改良計画を施し，シミュレーションを行う。また，シミュレーションの際の火元としてはこのブロックA（建物数27）に

表7-30 久ヶ原モデル地区における構造種別

構造種別	建物数 (割合%)
木造	87 (36.4%)
防火造	144 (60.3%)
耐火造	8 (3.3%)
計	239 (100.0%)

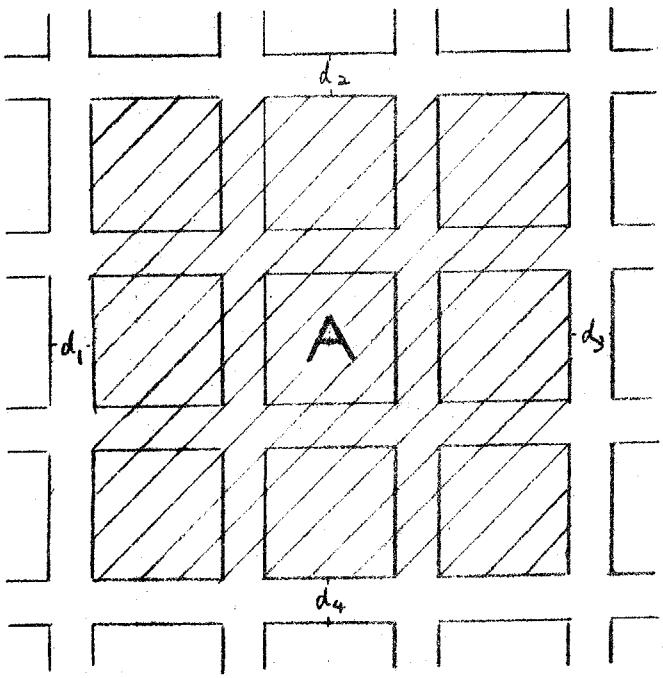


図7-44 久ヶ原モデル地区形状(斜線内)

ついて出火するものとし，シミュレーション実行の繰り返し（ユク×500回）の結果から平均した損失額を求める。こうすることによってブロックAをモデル地区とした同じ結果が得られることとなる。

シミュレーションは地震時の場合についてのみ行い，損失額の計算に必要な各種の値及び計算の手続きは前項の方法と全く同様である。

代替案として検討したものは以下のものである。

0) 現状のまま。

1) ブロックAの全建物を防火造化とする。

2) ブロックAの建物を各敷地内で移動させ，隣棟距離を1m以上とさせる。

3) ブロックAの建物を各敷地内で移動させ，隣棟距離を2m以上とさせる。

4) ブロックAの建物を各敷地内で移動させ，隣棟距離を3m以上とさせる。

これらの代替案についてシミュレーションを実行し，損失額を求め，改善費用を加えた経済的損失を求めると表ク-31が得られる。このことからも防火造化の効果が示された。隣棟距離の確保という点については1～2m程度では効果がないことが判かる。

表7-31 代替案の経済的損失

代替案	経済的損失額(百円)	現状に対する割合(%)
0) 現状	708	100.0
1) 防火造化	459	64.8
2) 隣棟1m以上	701	99.0
3) 隣棟2m以上	688	97.2
4) 隣棟3m以上	617	87.1

5-2-8 類焼防止からみた地区安全計画の方略

前項までの結果から地区を防災面から地区安全計画に関して、次のような事がいえよう。

(1) 前節の結果から単体の火災損失のみを考えると耐火造化は経済的メリットがなかったが、類焼ということまで考えれば、経済的にも人命の点からもより効果的であり、今後地区の耐火造化に対する公的私的を問わず、投資を行うべきであるといえる。

(2) 防火造化ということは地震時火災という点を考えないとすれば効果的であり、より具体的方略ともいえる。

(3) 隣棟距離は類焼確率関数の性質及び格子モデルシミュレーションにおける連鎖反応的現象、また、久ケ原モデル地区のシミュレーション分析の結果より3m程度では距離を増加させることは効果的であり、安全距離としては6m以上とすべきであろう。

(4) 耐火造化を行う場合、道路ぞいにベルト状に配置することが効果的であり、既存の市街地では店舗等が道路に面することが多く、店舗の商業的な効果と合せたRC化を積極的に補助するなど、事な

る構造種別だけでなく用途も考慮に入れた地域利便性を含めた地区防災計画ということも必要であるといえよう。

5) 空地を設けることは地震時の火災では防火造化をほどこすことよりも効果的であり，都市市街地に空地を設ける必要があるといえる。しかし，空地化を行うために必要な費用として土地代があり，都市市街地では防災のみでは経済的効率はそれほどよいものではない。従って，空地化を実行するためには遊び場，公園など都市環境上付加価値の高い空地を設け，こうした面から公共的な投資として経済的にも効果的な空間を地域に建設することができるといえよう

文献

1) 建築学体系 21「改訂版」，彰国社

2) 川越津隆，今泉勝吉，「枠組木造（ツーバイフォー）住宅の実大火災実験 ― 一般住宅型」，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和52年10月

3) 青木義次，「類焼確率関数の数理・統計的導出」，日本建築学会関東支部研究報告集，昭和51年

4) 樋口伊佐夫他，「災害の伝播に関する統計的研究」，研究集会資料，昭和49年

5) 水野引之，堀内三郎，「地震時の出火率に関する研究」，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和50年10月

6) 消防白書，昭和51年度版

7) 青木義次他，「地区防火計画のシミュレーション分析」，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和51年10月

SEKIREI A4 NO 54

5－3　建築信頼性の要因分析と安全計画手法

5－3－1　信頼性解析における問題点

5－3－1－1　構造物における主たるランダム要因

構造物(建築物)は常に自然環境の中にさらされている。とくに我国では地震及び強風といった外力が構造物に作用しており，こうした外的使用に抗して安全な建築空間を確保することが構造計画の主要な課題となっている。

文献1では耐震設計の基本方針を「…構造物の構造特性，用途，種別，規模，立地条件，類似構造物及び地盤の震害経験等を考慮し…(中略)…安全性の照査を行なう。」としており，構造物の計画または設計の範囲を相当広くとらえている。しかしながら，物理的な存在としての構造物の諸特性をとらえる上で，とくに重要な問題としてランダムな要因の介入があり，一応，次のようなランダム要因に分類されている。

(1)　外的なランダム要因

(2)　耐力のランダムな要因

このような区分が適切であるかどうかは別とし，従来，外力と耐力という二面からとらえる発想が構造計画面でとられているといえる。前者の要因は地震，風などの構造への影響の仕方はその発生，規模などの点から確定量でなく，確率量としてとらえるべき点が多く，それらを

決特にランダムな外力などと呼ぶことが多い。後者のランダムな要因とは，建築物の材料のランダムな性質に依存する要因，設計時における誤りの介入（まるめ誤差など），設計法の差異などに依存する要因，施工段階における不確定な要因などがある。従って，これらのランダムな要因を考慮して構造計画・設計を行うことが考えられている。

5-3-1-2 構造物の信頼性研究

構造物の安全性を考える際，確率論的な側面から検討したのはMaier, M（文献2）にさかのぼるといわれており，その後Freudenthal（文献3, 4）らによって検討され，1966年のFreudenthal他による報告（文献5）によって一応の信頼性解析の方法が整理され，以来，Cornell（文献6）及びAng他（文献7）をはじめとしてより具体的な構造物への適用を考慮するための研究が進められている。この他，Lind（文献8），Nakano他（文献9）によって各種の設計体系の信頼性の視点からの比較，体系化がなされてきた。構造物の信頼性の考え方は基本的にはつぎの式で表わされるものと同じである。

$$P_s = 1 - P_f = Prob(R \geq S) \qquad (1-1)$$

$$P_f = Prob(R < S) \qquad (1-2)$$

ここで,

P_S：信頼性

P_f：破壊の確率

R：耐力（resistance）

S：荷重（load）

ここで，通常，R, Sはランダムな量であり，その確率分布が与えられれば上記のP_S, P_fは実際に求めることができる。たとえば耐力，荷重とも正規分布をなしているとすると

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_R^2}}} \exp\left[-\frac{y^2}{2}\right] dy \qquad (1-3)$$

$$= \Phi\left(-\frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_R^2}}\right) \qquad (1-3')$$

ただし，

μ_R：耐力の平均値

μ_S：荷重の平均値

σ_R：耐力の標準偏差

σ_S：荷重の標準偏差

$\Phi(\ )$：標準正規分布の累積確率分布関数

となる。従って，このとき，各分布の1次，2次モーメントが与えられれば直接破壊の確率を求めることができ

る。しかしながら，実際には耐力，荷重が正規分布するとかぎらず，また，分布型を確定することは多くのデータを必要とし，現段階では分布型を確定することには困難な点が多い。以下ではこうした構造信頼性における2，3の問題点を整理することから検討をはじめる。

5-3-1-3 分布型の影響

第1の問題点は外力(荷重)及び耐力の確率分布を求めることがきわめて困難なこと及び分布型の仮定の仕方によって得られる破壊の確率が大きく異なってしまうということである。荷重の分布型としては

1) 正規分布
2) 対数正規分布
3) 極値分布 I (max)
4) 極値分布 II (max)
5) ガンマ分布

が考えられ，また，耐力については

1) 正規分布
2) 対数正規分布
3) ワイブル分布(極値分布III)
4) 極値分布 I (min)
5) ガンマ分布

が考えられる。これらのいずれの分布型もそれぞれの確率量の性質から決まってくるもので，どの分布を採用して信頼性を求めるかは荷重及び耐力のバラツキの機構から決めるべきであるが，分布型を決定する

とは次のような困難な点がある。

a) 分布型を決定するにはそれらの確率量のバラツキの発生機構の解明が必要であるが，今日の段階では明確でない点が多い。

b) 分布型を統計的に決定するには多くのデータを必要とするが，地震などによる外力については再現期間の長いものについてはデータをとることが困難である。

c) データが得られる場合でも分布の中央（平均値周辺）でのデータが大半となり，信頼性解析に必要な分布のすそ（平均値から離れた部分）のデータは少なくなり，分布型を統計に検討することは問題が多い。

従って，多くの場合，分布型を仮定し，信頼性を求めることが行われている。

分布型の仮定をする場合，その選択の仕方によって真の信頼性の値よりも危険側，または安全側に偏ってしまうので分布型に関する情報がない場合は，より安全側に偏るような選択が必要である。

表8－1は各分布型についてどちらが安全側となるかを示したものである。この表を用いて，より安全側の分

SEKISEI A4 NO. 54

表8-1-1 荷重分布の大小関係（大きい順の番号：大きい番号ほど安全側になる）

変動係数	平均からの偏差	正規分布	対数正規分布	極値分布Ⅰ	極値分布Ⅱ	ガンマ分布
0.1	+σ	5	3	2	1	4
	+2σ	1	3	4	5	2
	+3σ	1	3	4	5	2
	+4σ	1	3	4	5	2
	+5σ	1	3	4	5	2
0.2	+σ	5	3	2	1	4
	+2σ	1	3	5	4	2
	+3σ	1	3	4	5	2
	+4σ	1	3	4	5	2
0.3	+σ	5	3	2	1	4
	+2σ	1	3	5	4	2
	+3σ	1	3	4	5	2
0.4	+σ	5	2	3	1	4
	+2σ	1	5	3	2	4
0.5	+σ	5	2	3	1	4

表 8-1-2　耐力分布の大小関係（小さい順の番号：大きい番号ほど安全側になる）

変動係数	平均からの偏差	正規分布	対数正規分布	ワイブル分布	極値分布 I	ガンマ分布
0.1	−5σ	3	1	4	5	2
	−4σ	3	1	4	5	2
	−3σ	3	1	4	5	2
	−2σ	3	1	4	5	2
	−σ	5	3	2	1	4
0.2	−4σ	3	1	4	5	2
	−3σ	3	1	4	5	2
	−2σ	3	1	4	5	2
	−σ	4	2	5	1	3
0.3	−3σ	4	1	3	5	2
	−2σ	4	1	3	5	2
	−σ	4	1	5	2	3
0.4	−2σ	4	1	3	5	2
	−σ	4	1	5	2	3
0.5	−σ	4	1	3	5	2

分型を採用できる。

しかしながら，計算の簡便性などから正規分布を用いることが多く，荷重，耐力の分布型をともに正規分布とした場合と，上記の表から（破壊の確率が 10^{-4} 以下となるような範囲で）より安全側の組み合せである荷重を極値分布II型，耐力を極値分布I（min）型とした場合の破壊の確率の値をに較すると図8－1のようになる。

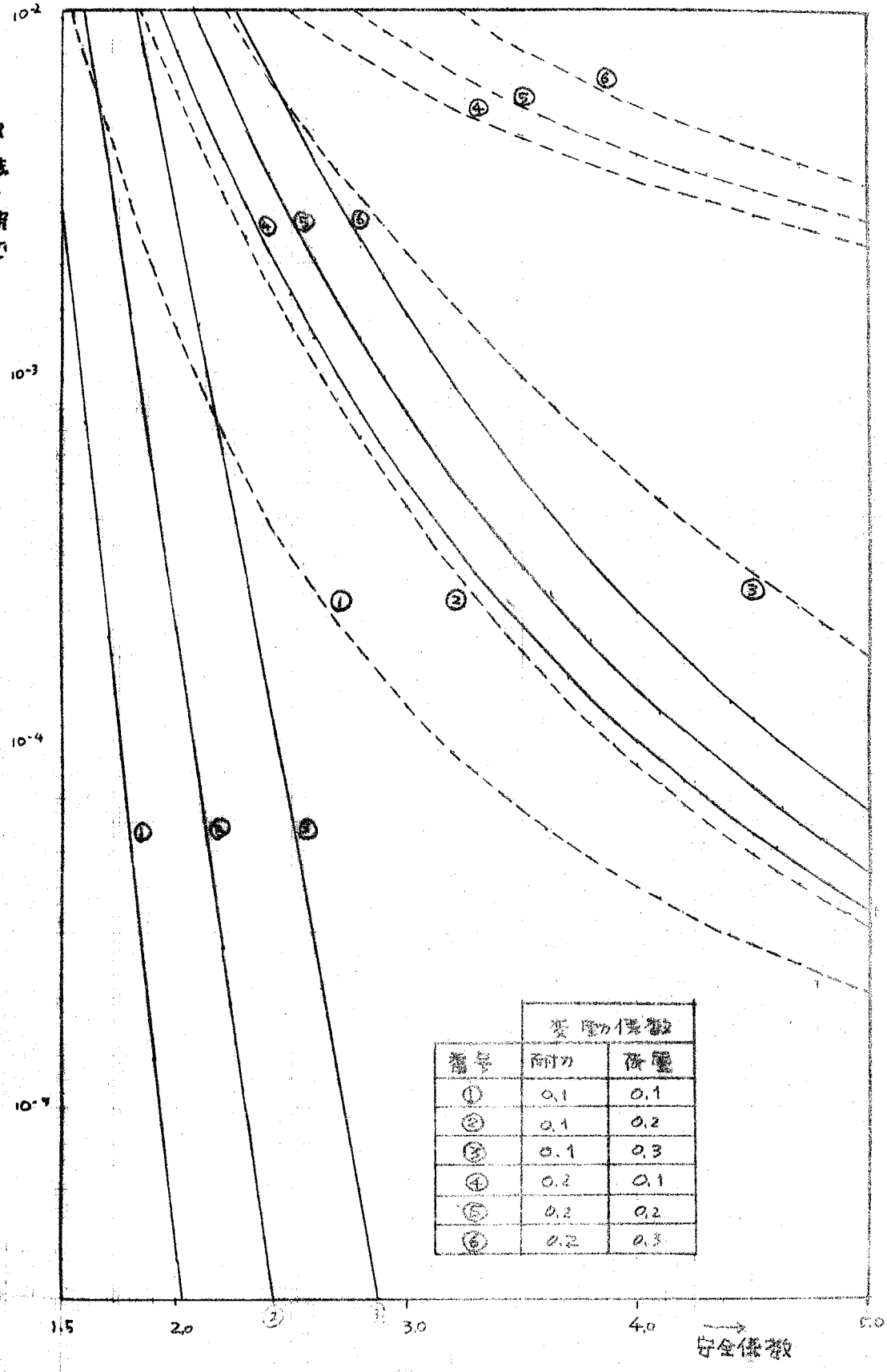
この図からわかるように破壊の確率は分布型の型によって大きく変化してしまうことがわかる。この問題を解決するに Ang（文献10）は（1－2）式にかわりに

$$P_{f_0} = Prob(R < \nu S) \qquad (1-4-1)$$

$$P_{f_S} = Prob(N > \nu) \qquad (1-4-2)$$

$$P_f = P_{f_0} \cdot P_{f_S} \qquad (1-4-3)$$

とし，（1－4－3）で与えられる量で破壊の確率をとうることを提案している。上式中，N は主観的な判定係数であり，$R < \nu S$ が客観的な破壊条件を示すことになる。（1－4－3）式で与えられる破壊確率の場合，分布型によってそれほど大きく確率の値が変化することがないといわれている。しかしながら，（1－4－2）式のように主観的な判断に依存する量をもちこんだことは物理的な破壊機



番号	変動係数 耐力	荷重
①	0.1	0.1
②	0.1	0.2
③	0.1	0.3
④	0.2	0.1
⑤	0.2	0.2
⑥	0.2	0.3

実線；耐力＝正規分布，荷重＝正規分布

点線；耐力＝極値分布Ⅰ(min)，荷重＝極値分布Ⅱ(max)

図8-1　破壊の確率

構に対する信頼性の枠をこえており，むしろひとつの意思決定論であるといえる。

このようなアプローチはとくに構造設計の段階では必要とされており，今後も実用的ないわゆる拡張信頼性（Extended Reliability）の研究がなされる傾向が考えられるが，それは物理的な破壊そのものの確率を調べる古典的な信頼性理論と基本的に考え方を異にするものであることに注意する必要がある。

5-3-1-4 二次モーメント法と実用上の問題点

構造設計という実用性の面から上記と異なる方法が用いられることが多い。この方法はCornell（文献11）によって提案され

$$\beta = \frac{u_R - u_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \qquad (1-5)$$

によって安全指標（Safety Index）を与え，この値で安全性を検討しようとするものである。事実，耐力，荷重が正規分布をなす場合は前述の（1-3）′より

$$P_f = \Phi(-\beta)$$

で与えられることとなり，安全指標が定まれば破壊の確率が1対1で定まる。この方法についても設計，施工時のバラツキ，不確定さを主観的な形で組み込むことも行

うことが提案されている。

しかしながら，この方法を用いる場合，これまで不注意に取り扱われてきた問題がある。以下，この点について検討を加えておく。

(a) 変動係数一定分析

これまで信頼性の議論を進める際，平均値の異なるものを同時に扱うことを可能にするため，バラツキの尺度として共通の変動係数がとられてきた。この考え方の中には暗黙のうちに変動係数が他の諸量を独立，とりわけ安全係数 $\alpha = \frac{u_r}{u_s}$ に依存しないという仮定を分析の前提の中に混入させていた。この仮定の良し悪しはここでは議論できないが，もしこの仮定が認められた場合にいかなる結果を生じるかを指摘しておきたい。

従って，現実の破壊確率は以下のように変形されよう。

$$P_f = \Phi\left(-\frac{u_r/u_s - 1}{\sqrt{\frac{u_r^2}{u_s^2}\cdot\frac{\sigma_r^2}{u_r^2} + \frac{\sigma_s^2}{u_s^2}}}\right)$$

$$= \Phi\left(-\frac{\alpha - 1}{\sqrt{\alpha^2\Omega_r^2 + \Omega_s^2}}\right)$$

ただし，

$$\alpha = \frac{u_r}{u_s}$$

$$\Omega_r = \frac{\sigma_r}{u_r}$$

$$\Omega_s = \frac{\sigma_s}{u_s}$$

ここで，さらに次の関数を定義しておこう。

$$\psi = \frac{\alpha - 1}{\sqrt{\alpha^2 \Omega_r^2 + \Omega_s^2}}$$

このとき，明らかに安全係数は1より大きいものとして ψ は正であるから，関数 P_f は

$$P_f = \Phi(-\psi)$$

と，ψ の関数となり，関数 Φ の性質から ψ が単調減少関数ということになる。従って，P_f の挙動を調べるには ψ の挙動を調べることによって充分にその目的が達せられる。ここで，ψ は変数 $\alpha, \Omega_r, \Omega_s$ の関数であるとみなすことができる。すなわち

$$\psi = \psi(\alpha, \Omega_r, \Omega_s) = \frac{\alpha - 1}{\sqrt{\alpha^2 \Omega_r^2 + \Omega_s^2}}$$

となり，変動係数が一定であるとすれば，ψ の挙動は安全係数 α の変化によるので，以下のような検討を加えよう。

$$\frac{\partial \psi}{\partial \alpha} = (\alpha^2 \Omega_r^2 + \Omega_s^2)^{-\frac{3}{2}} (\Omega_s^2 + \alpha \Omega_r^2)$$

$\alpha > 1$ であることから

$$\frac{\partial P_f}{\partial \alpha} < 0$$

となる。以上のことから

i) ψ は α に関して単調増加関数である，

ii) P_f は α に関して単調減少関数である，

また，$\alpha > 1$ で不連続的ではないので，P_f は

$$P_f > \lim_{\alpha \to \infty} \Phi(-\varphi)$$

であり，この右辺は

$$\lim_{\alpha \to \infty} \Phi(-\varphi) = \lim_{\alpha \to \infty} \left(- \frac{1 - \frac{1}{\alpha}}{\sqrt{\Omega_r^2 + \Omega_s^2/\alpha^2}} \right)$$

$$= \Phi\left(-\frac{1}{\Omega_r}\right)$$

となり，結局，破壊の確率は $\Phi\left(-\frac{1}{\Omega_r}\right)$ よりも小さくすることはできないのである。この限界線を示したものが図8－2である。さらに，安全係数 α を変化させたときの破壊の確率（これと対応する φ の値）を図示したものが図8－3である。これらの図からわかるように，耐力変動係数がある値以上であると，安全係数を充分高くとっても破壊の確率を小さくとることは困難になってくるのである。

(b) 耐力標準偏差一定のモデル

前述のように，安全率を高く見積っていくとき，すなわち耐力を増加させていくとき，その変動係数は一定であると仮定していたが，それは破壊確率の可能範囲が限定されてしまい，所定の破壊確率以下におさえることが不可能であることを示していた。この結果は変動係数一

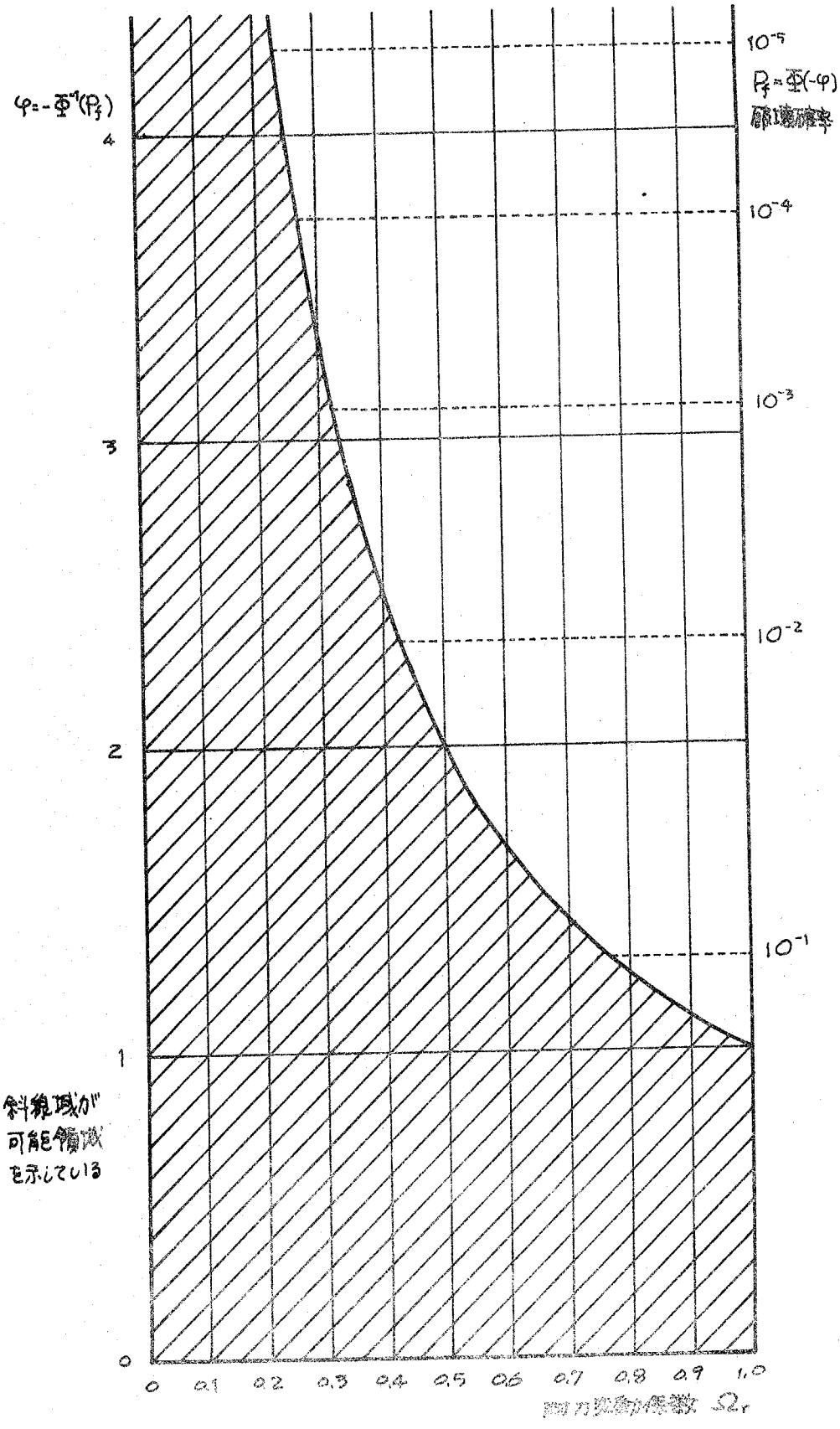


図 8-2 破壊確率の可能範囲

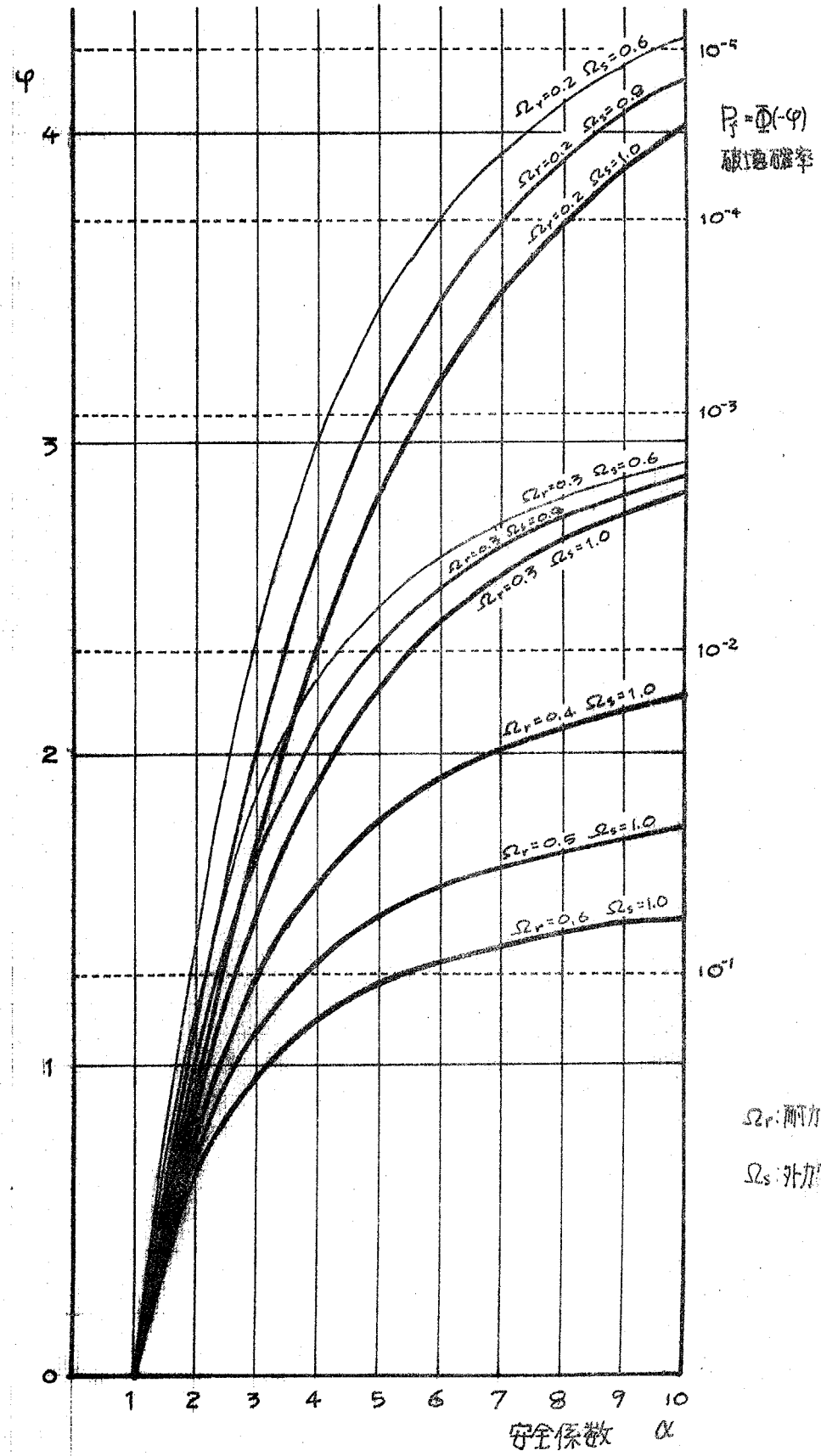


図 8-3 安全係数と破壊確率との関係（変動係数一定）

定という仮定によって引き起されるものである。また，こん例すか変動係数一定という考え方の妥当性については何らの明確な根拠が存在しているわけではない。そこでここではむしろ耐力の標準偏差が一定であるという観実に立った分析を行ってみたい。

前述と同様の記号を使用し，φに相当する量をφ^*とすれば，

$$\varphi^* = \frac{\alpha - 1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_r}{u_s}\right)^2 + \Omega_s^2}}$$

であり，$\alpha = 2$のときの耐力変動係数をΩ_{r2}とすると

$$\Omega_{r2} = \frac{\sigma_r}{u_s} = \frac{\sigma_r}{2u_s} \quad \left(\because \alpha = 2 = \frac{u_r}{u_s}\right)$$

であるから

$$\varphi^* = \frac{\alpha - 1}{\sqrt{4\Omega_{r2}^2 + \Omega_s^2}}$$

となる。このとき，$\alpha = 2$における変動係数はひとつの計測値と考えられるから，上式の分母はひとつの定係数となる。したがって，φはαに関して傾き$1/\sqrt{4\Omega_{r2}^2 + \Omega_s^2}$の直線となる。この関係は図8－4に示されている。もちろん，破壊確率は

$$P_f = \Phi(-\varphi^*)$$
$$= \Phi\left(-\frac{\alpha - 1}{\sqrt{4\Omega_{r2}^2 + \Omega_s^2}}\right)$$

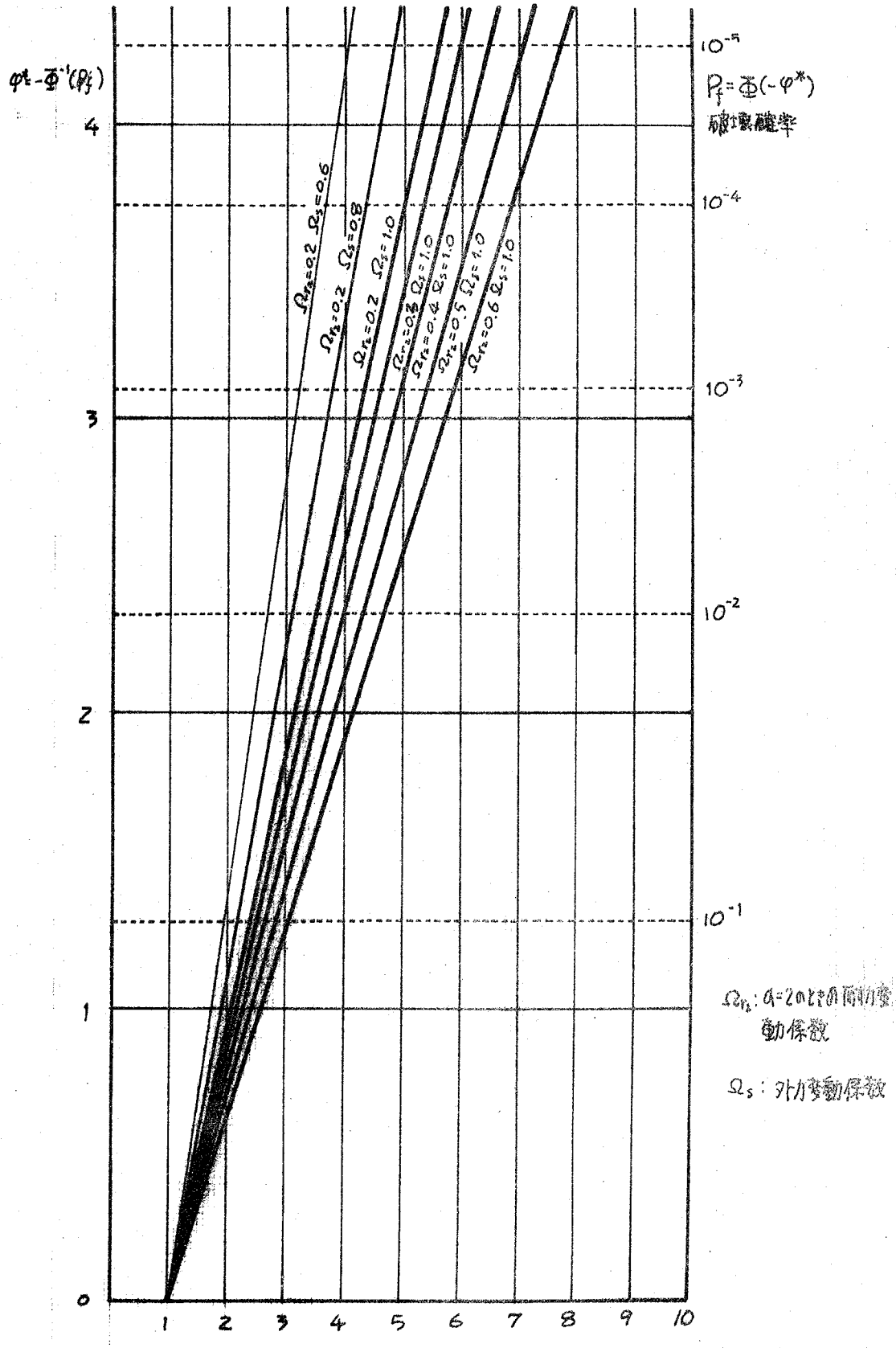


図 8－4 安全係数と破壊確率の関係（耐力標準偏差一定とした時）

となっている。

この場合，破壊確率は安全係数αに関して単調減少関数であり，明らかに

$$\lim_{\alpha \to \infty} P_f = 0$$

となっている。

以上のことから，通常，使われている信頼性解析に基づく安全度の把握の仕方の中に若干の注意すべき点があることが明確となった。とくに，以下に整理される2点は安全計画上重要な点であるといえる。

(1) もし変動係数Ω_rが一定であるとすれば，破壊確率はどのような安全係数を用いても$\beta\left(=\frac{1}{\Omega_r}\right)$以下にはなりえない。

従って，このような仮定がうけいれられる条件下では，耐力変動係数を一定以下におさえなければ，信頼性の議論は無意味となってしまうおそれがある。

(2) 耐力標準偏差を一定としたとりあつかいによれば上述の問題点は生じない。

一方，現実の問題にもとづいて考えてみるならば，耐力の標準偏差一定とした場合と，変動係数を一定とした場合の中間にあると考えられるので，ここに指摘

された結果は現実的な意味をもってくるケースが多いものと考えられる。すなわち，構造物の耐力の変動係数をある値以下におさめておくということはきわめて重要な安全の必要条件である（たとえば図8－3からわかるように，破壊確率を10^{-4}以下におさえようとする場合，耐力変動係数を0.2未満程度におさえておかなければ現実的に不可能ということになる）。

5-3-2 材料の不確定性状

5-3-2-1 コンクリート圧縮強度に関する統計的データ

構造物の力学的性質を左右するものの中でも，とくにバラツキの面から重要視されている問題としてコンクリートの品質の問題がある。ここではコンクリート圧縮強度のバラツキの基礎データ整理の一段階として，建築物に用いられたコンクリートの供試体による試験結果からその確率的性質を検討しようとするものである。

(a) 分析対象

本報告は(財)建材試験センター工事用材料検査所で行ったコンクリート圧縮強度試験のうち，昭和51年度受付の試験結果を分析したものである。上記の試験結果のうち，3本の供試体をひとつの組として取り扱い，1本ないし2本の供試体の試験結果については分析対象から除外した。また，28日圧縮強度試験結果のみを分析の対象と限定した。データ総数は9,855組(供試体の数にして29,565本)となっている。

(b) データ諸元

データとして取りあげたのは以下の項目である。

(1) 打設年月日

(2) 設計基準強度 (kg/cm^2)

(3) 指定強度 (kg/cm^2)

(4) 28日圧縮強度試験結果 (kg/cm^2)

(5) 供試体採取時点（荷卸しまたは筒先き）

(6) 供試体養生種別（標準養生，現場水中養生，現場空中（気中）養生）

5-3-2-2 コンクリート供試体データの基礎的性質

(a) コンクリート供試体の採取と養生タイプの区分

コンクリート供試体の採取場所は生コンクリートが工場から現場まで運搬され，現場到着の段階で荷卸しされるときに採取されるものと，コンクリートポンプ等で現場内運搬が行われ，打込まれる直前において採取されるものに二分されるのが通常である。前者を荷卸し，後者を筒先き（または打込み直前）と呼ぶことが多く，ここでもこの呼び名を採用する。図8-5によれば，荷卸し供試体が全体の98.52%をしめ，筒先き供試体は1.48%になっている。すなわち，本分析の対象となるほとんどの供試体が荷卸し段階で採取されたものであるといえる。

一方，養生タイプについては，標準養生と現場における養生があり，後者については，現場水中で養生されたものと放置されたものとが考えられる。また，湿砂中に

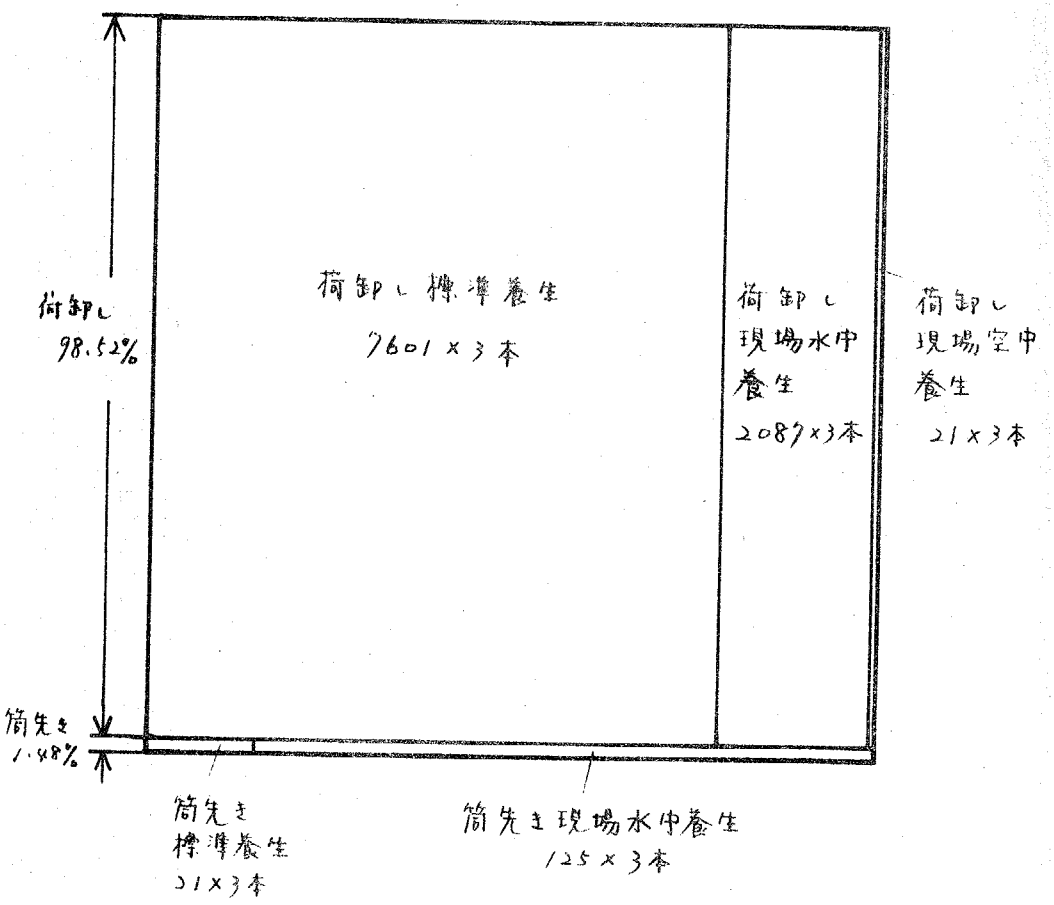


図 8-5　コンクリート供試体の採取・養生タイプの区分と割合
(全数　9815×3本)

おいて養生されるものもある。ここでは養生効果の点から現場で湿砂養生されるものも，現場水中養生のものと同じカテゴリーとすることにした。従って，養生の種別としては標準養生，現場水中養生，現場空中養生の3種類に区分けされている。図8－5からわかるように，荷卸し供試体においては8割近くが標準養生であり，約2割が現場水中養生である。現場空中養生は非常に少ない。また，簡先き供試体のものについては85%が現場水中養生で，残りが標準養生である。簡先き×現場空中養生のものはなかった。

東京都における昭和51年度コンクリート検査成績（文献12参照）で報告されている結果では現場養生3139件，標準養生512件であり，そのほとんどが簡先き採取であるとなっている。供試体の採取場所ならびに養生方法に関するこの報告との差の理由は定かではない。この点に関しては今後の検討が必要と思われる。本報告では概括的にいうならば，荷卸し時に試料採取して，標準養生した供試体が大半をしめているという点が指摘できる。

(6) 設計基準強度と指定強度

設計基準強度と指定強度の組み合せについて調べてみると表8－2のようになる。設計基準強度が180，210，

表8-2　設計基準強度と指定強度の組み合せ数

指定強度	設計基準強度 180	210	225	240
180	2280 246 0			
210	168 39 0	9078 2505 186		
225	28 45 6	99 15 3	261 108 15	
240	150 33 6	2835 798 75	0 18 15	1029 684 0
255		1869 333 3	63 12 0	0 6 0
270		3345 1056 66	105 9 0	186 87 0
300				252 48 0

上段：荷卸し標準養生
中段：荷卸し現場養生
下段：荷卸し現場養生

225, 240（単位は kg/cm²）のものの組み合せの数が表8－2に記されており，表の各欄の上，中，下段にはそれぞれ荷卸し標準養生，荷卸し現場養生，筒先き現場養生のものの供試体数が記されている。設計基準強度は210 kg/cm² のものが主であり，ついで180, 225, 240（kg/cm²）になっている。指定強度は打込み後の気温による温度補正値を設計基準強度に加えたものである。従って，冬期と夏期ではその補正の傾向が異なるために月別に調べてみる必要がある。図8－6から図8－9は設計基準強度がそれぞれ210, 180, 225, 240（kg/cm²）の場合についての月別の各指定強度の割合を図化したものである。さらに，補正の傾向を見るために月別の補正値の割合を調べたものが図8－10に示されている。これらの図からわかるように，5月から9月の夏期においてはほとんど補正が行われていないとみてよいであろう。また冬期においても20%～30%のものは補正が行われていない。この補正なしの理由は水セメント比の限度から調合が決まった場合の強度の余裕が補正値を上回っているためか，または杭などの地中に打込まれるコンクリートであるために補正値を0にとってあるためかであろう。その他の理由もあるかもしれないが，データのみからは不

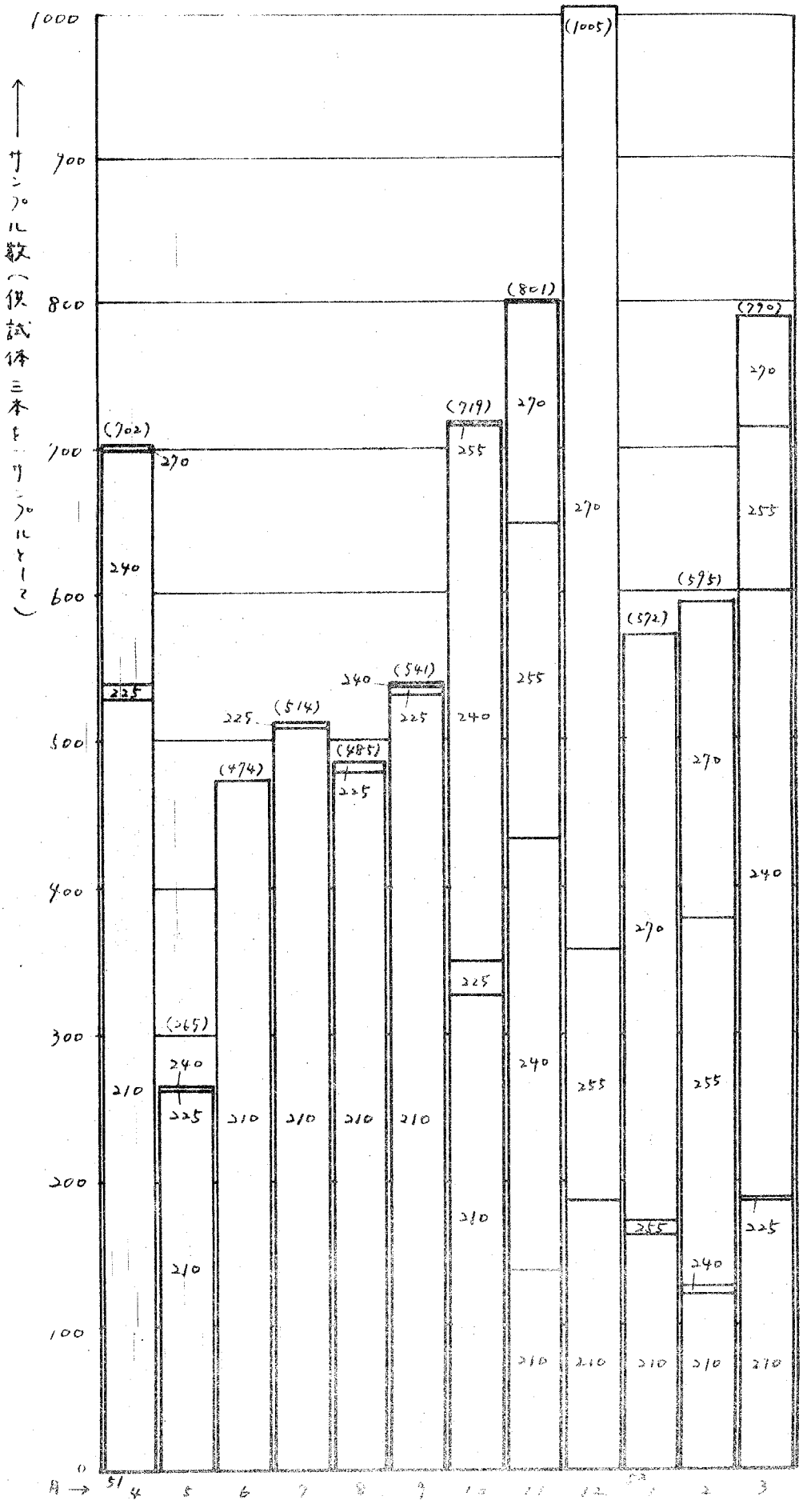


図8-6 1日当たり打設量の割合（設計基準強度 210kg/cm²）

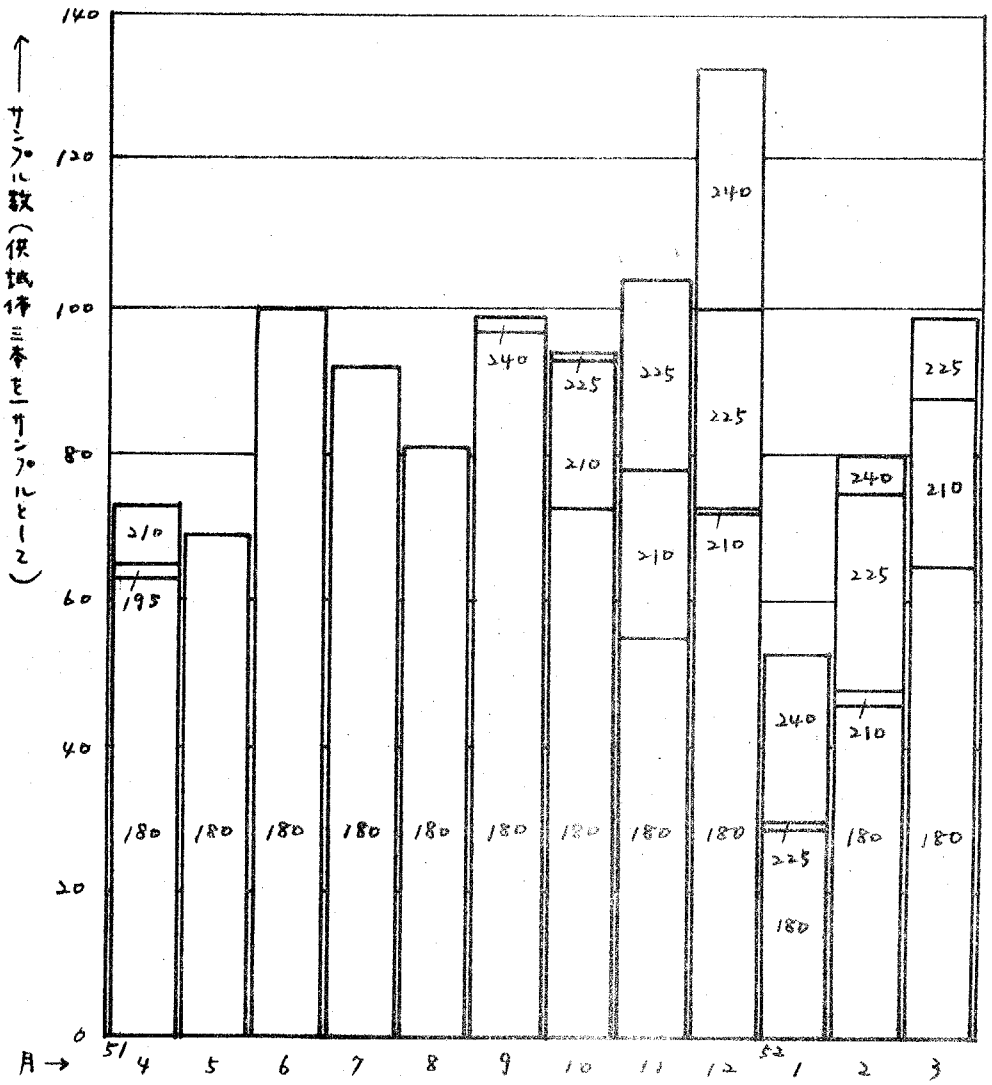


図8-7 指定強度の割合 （設計基準強度 180 kg/cm²）

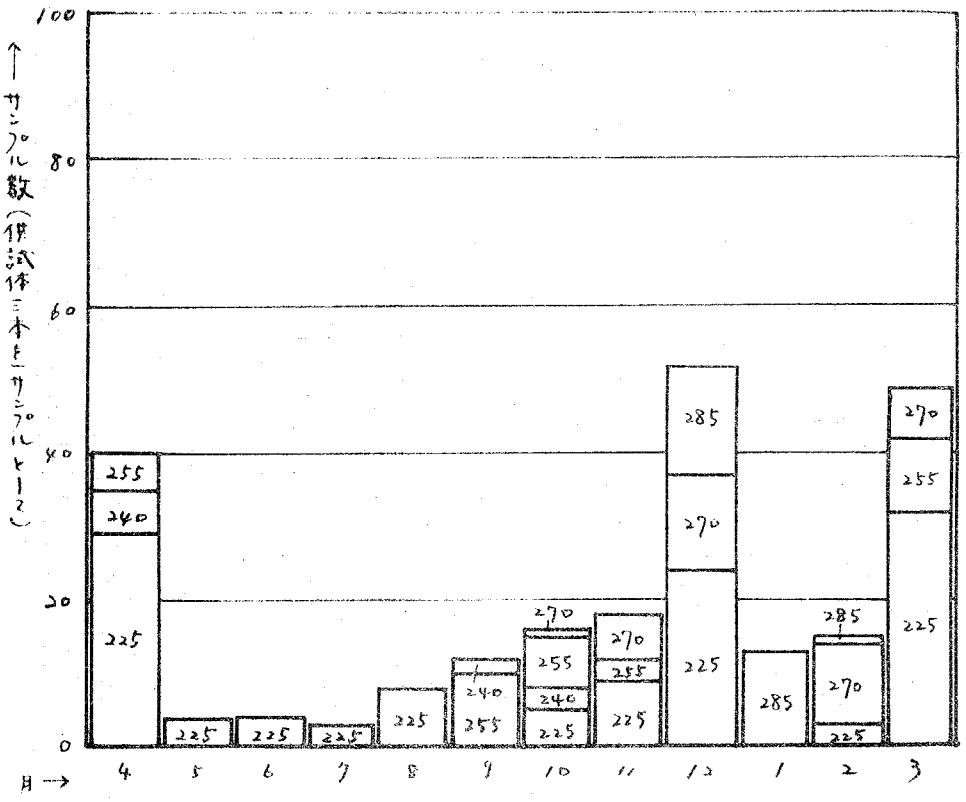


図8-8 指定強度の割合 (設計基準強度 225kg/cm²)

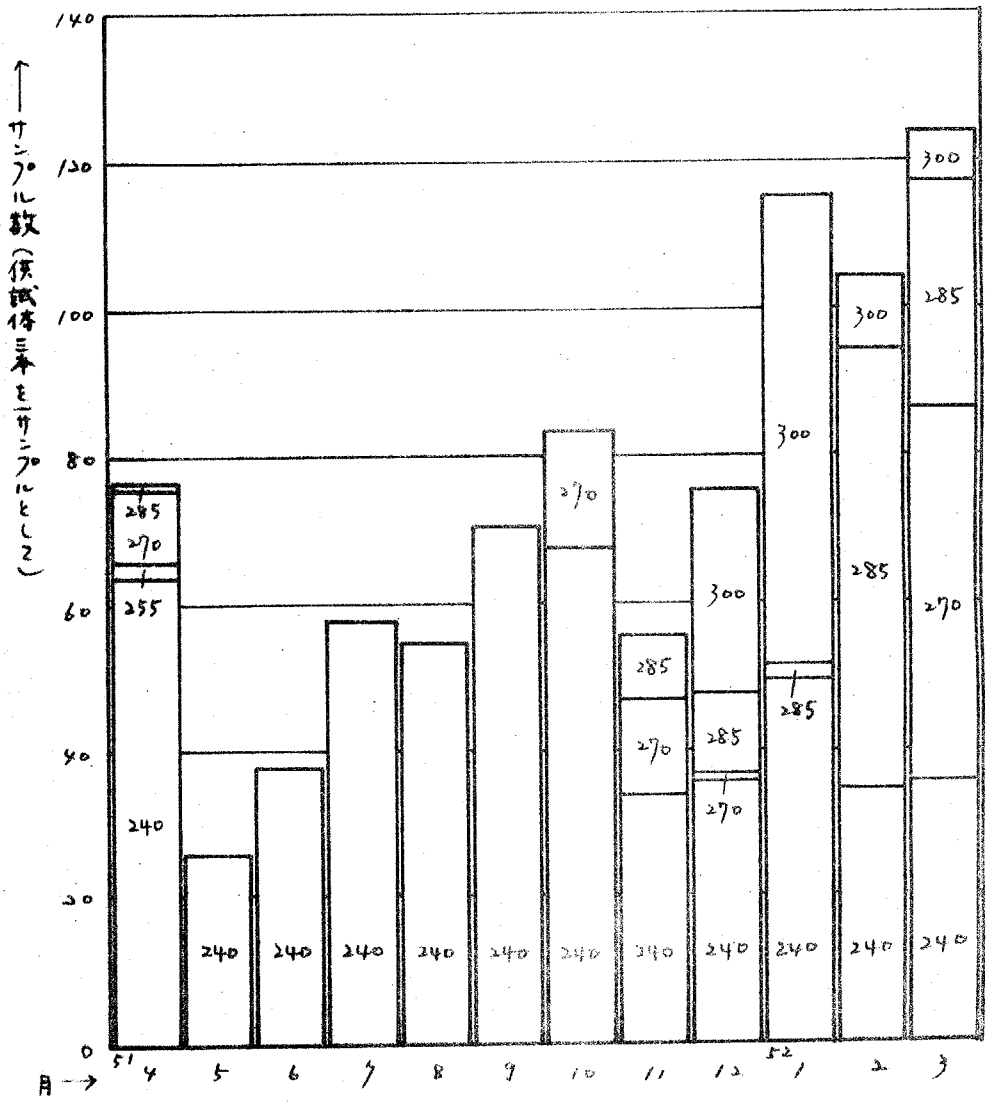


図8-9 指定強度の割合 （設計基準強度 240 kg/cm²）

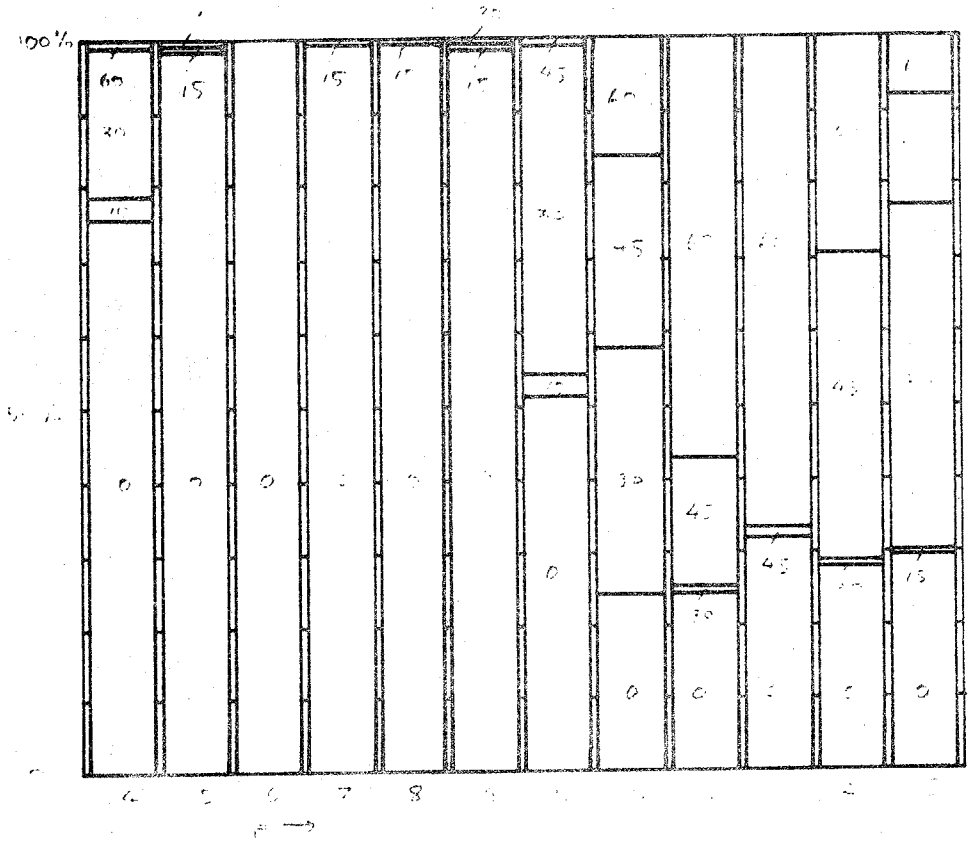


図 8-10 月別輸送量の割合 (平均12.8t/m³)
(合成 7ヶ月×3年)

門である。また，4月及び10月～3月の各月の主な補正値は以下のようになっている（単位は kg/cm^2）。

4月　T＝30

10月　T＝30

11月　T＝30，45，60

12月　T＝45，60

1月　T＝60

2月　T＝45，60

3月　T＝30，45

これらのデータがほぼ東京及びその周辺地区で打込まれたものと考えられるので，東京地方の各月の平均温度及び養生期間を考慮して翌月平均温度と当月平均温度との平均値を求め，図示すると図8－11のようになる。また，JASS 5による温度補正値T及び設計基準強度210 kg/cm^2の場合における指定強度の区分が図中に示されている。この図8－11から得られる温度補正値と図8－10の補正値の割合との対応はほぼ一致していると考えられる。

5－3－2－3　コンクリート圧縮強度

(a)　圧縮強度の平均値

指定強度別，月別の供試体から得られた28日圧縮強度

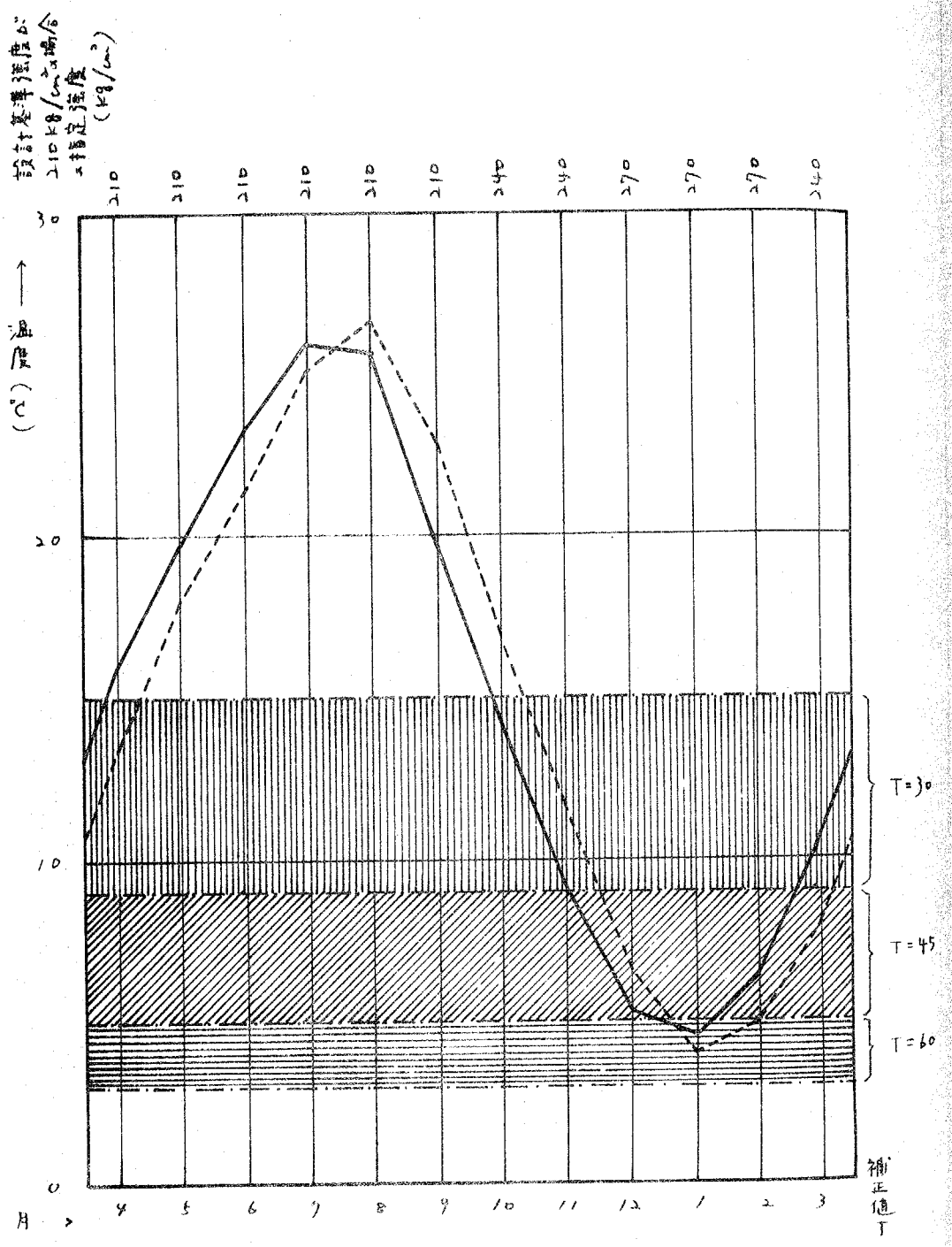


図 8-11 各月平均温度及び養生期間を考慮した補正温度

実線；養生期間を考慮した補正月別平均温度 $t_{\bar{c}}=(t_c+t_{c+1})/2$

点線；月別平均温度 t_c（東京理科年表 1941年～1970年の平均）

値を図示したものが図8－12から図8－14である。図8－12には荷卸し標準養生供試体から得られた結果を，図8－13には荷卸し現場養生供試体から得られた結果を，図8－14には筒先き現場養生供試体から得られた結果を示している。先に述べたように，筒先き現場養生の供試体の数は少ないので結果がばらついている。

荷卸し標準養生供試体のものについて各指定強度のものを比較してみると，圧縮強度の平均値の差はほぼ指定強度の差に等しいことがわかる。月別にみると，冬期における圧縮強度の平均値は夏期のそれに比べて高い値を示している。この理由として

(1) 生産者危険を回避するため生産者による調合強度の割り増し，

(2) 調合設計で利用されるバラツキσの値を冬期においてはより大きめにとっている，

ことが考えられる。この点については後に再び検討する。

現状のデータを見るかぎり，少なくとも調合設計段階では生産者による安全側への補正が加えられていると考えることができる。

現場養生のものについてもデータ数が少ないが，冬期の試験強度の方が夏期のそれにくらべて高いという結果

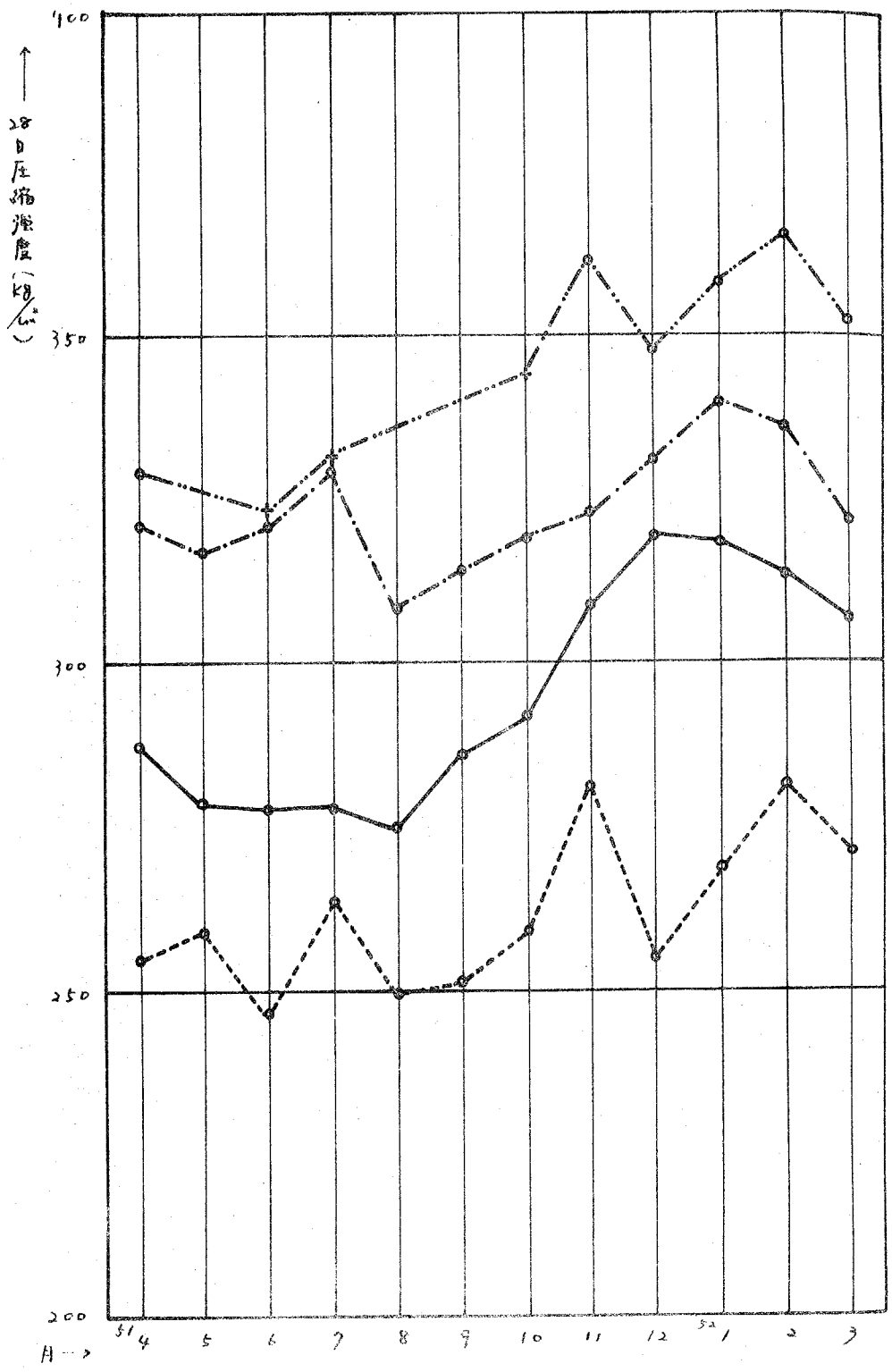


図8-12 各指定強度について2箇所採取し標準養生サンプルの強度（月別）

実線；指定強度 210kg/cm²
実線；指定強度 180kg/cm²
一点鎖線；指定強度 270kg/cm²
二点鎖線；指定強度 330kg/cm²

（●印はデータ数が10以上のもの）

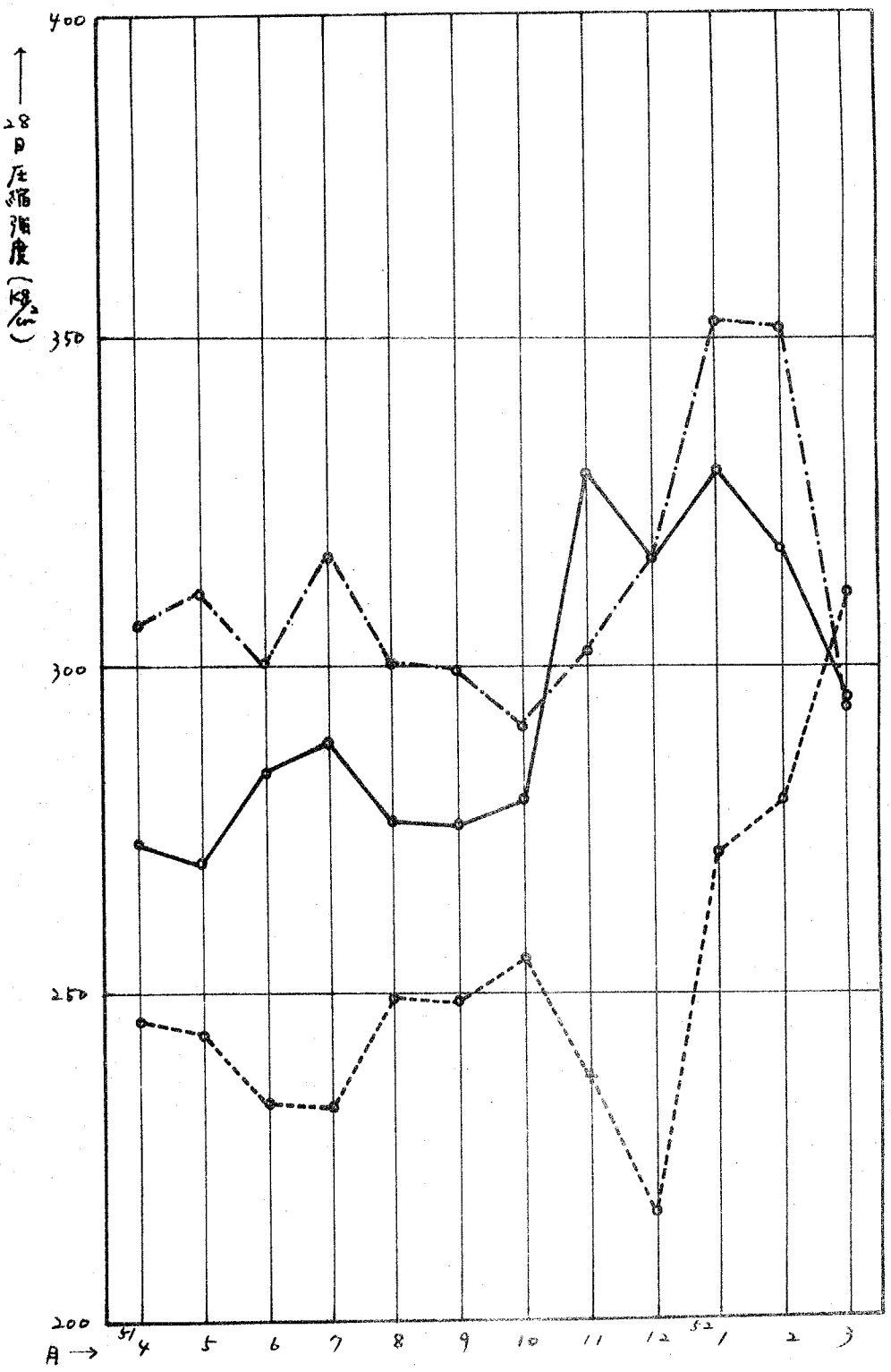


図 8-13 各指定強度についての傾斜し現場養生コンクリートの強度(月別)

実線; 指定強度 210 kg/cm²

点線; 指定強度 180 kg/cm²

一点鎖線; 指定強度 240 kg/cm²

(十印はデータ数が10以下の月)

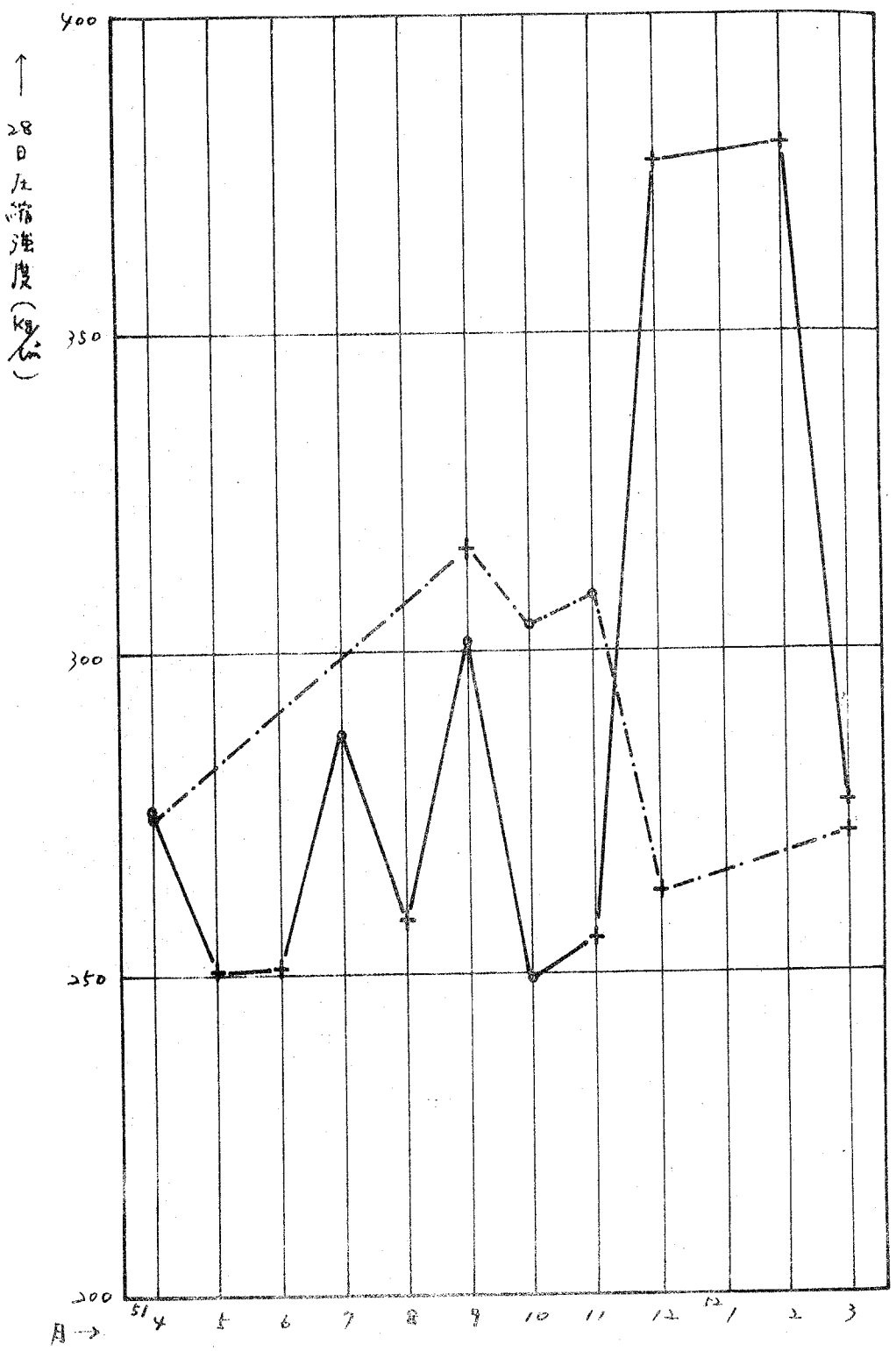


図8-14 各指定強度についての前生コン現場養生サンプルの強度(月別)

実線; 指定強度 300kg/cm²

一点鎖線; 指定強度 250kg/cm²

(*印は データ数が10ヶ以下の月)

が図8－13から推察できる。

(b) 圧縮強度の分布型

圧縮強度の分布型を調べてみることによって，どのようなバラツキをもっているかがわかる。図8－15はそれぞれの指定強度のものについて得られた供試体圧縮強度の累積確率分布型である。この結果，指定強度210kg/cm²のものについては荷卸し標準養生，荷卸し現場養生，筒先き現場養生の3つのタイプの供試体から得られる結果はほぼ一致している。しかし，指定強度240kg/cm²，270kg/cm²のものについては荷卸し標準養生のものにくらべ，荷卸し現場養生，筒先き現場養生の圧縮強度の分布は若干左側によっていることがわかる。すなわち，温度等の影響により圧縮強度の低下が生じていることがこの分布型からも読みとることができる。図8－16は荷卸し標準養生の圧縮強度分布を各指定強度について比較してみたものである。これによると，ほぼ指定強度の差に等しい量だけ各分布が平行移動的にずれていることがわかる。また，分布型の形状は正規分布の累積確率分布型とほぼ一致しており，分布型に依存するような特殊な解析をする場合を除いて強度のバラツキは正規分布をなすと考えてよいのではないかと思われる。ただし，より詳しくみ

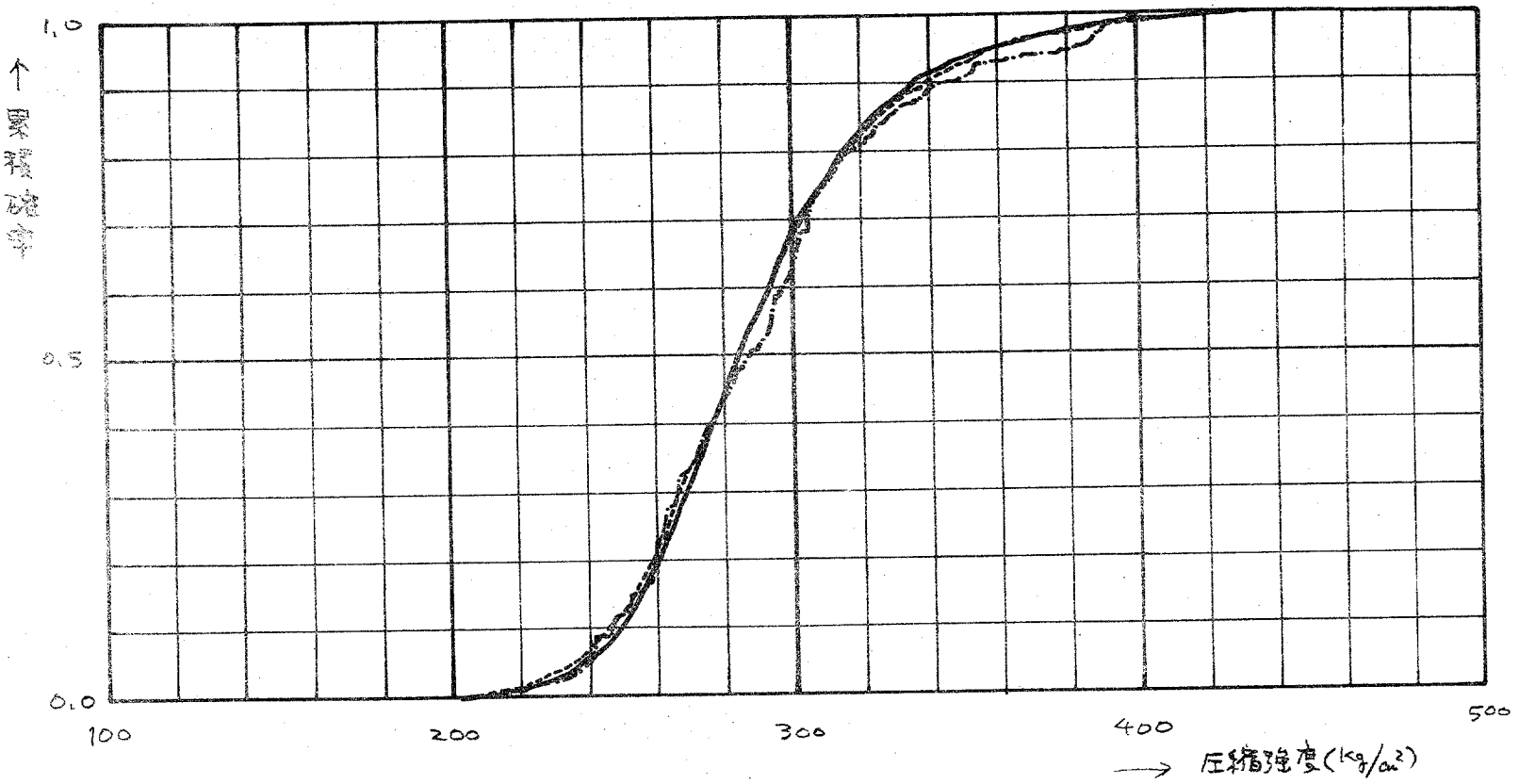


図8-15-1 指定強度 210 kg/cm² の 28日圧縮強度分布

実線：荷卸し 標準養生

点線：荷卸し 現場養生

一点鎖線：筒先 現場養生

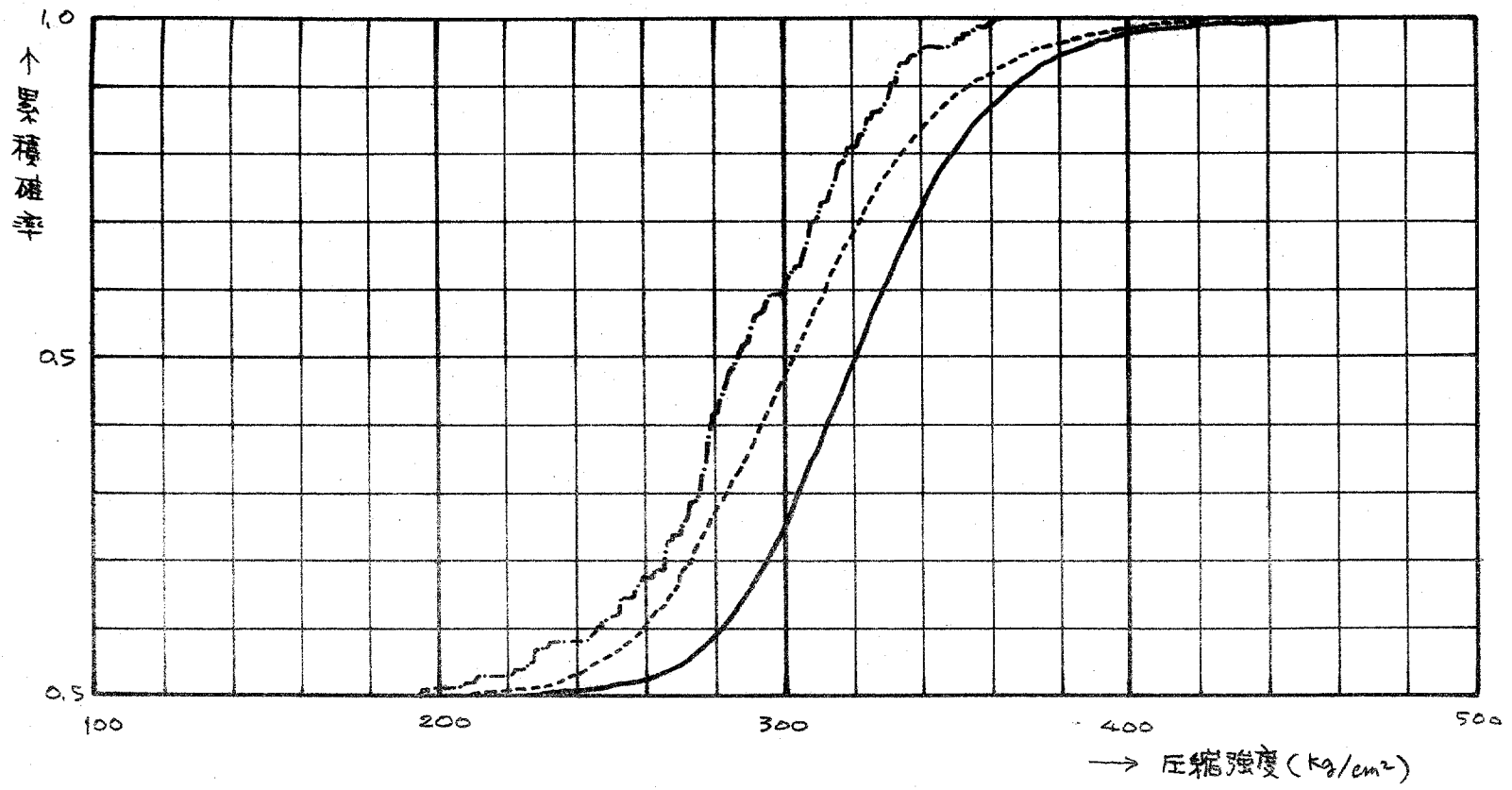


図8-15-2 指定強度 240 kg/cm²の28日圧縮強度分布

実線；脱型し標準養生

点線；脱型し現場養生

一点鎖線；脱型せず現場養生

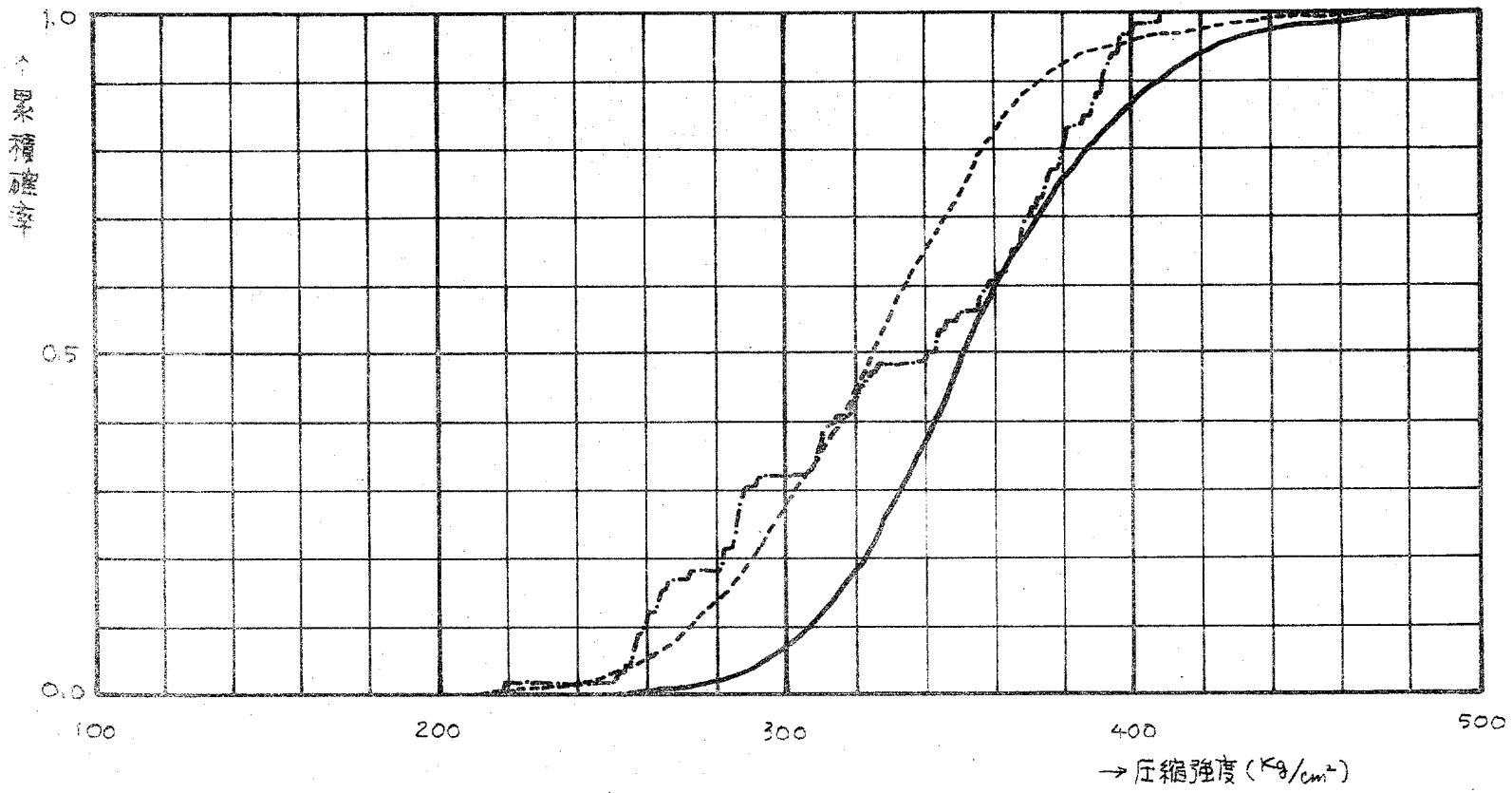


図8-15-3　指定強度270Kg/cm²の28圧縮強度分布

実線；荷卸し標準養生
点線；荷卸し現場養生
一点鎖線；筒抜き現場養生

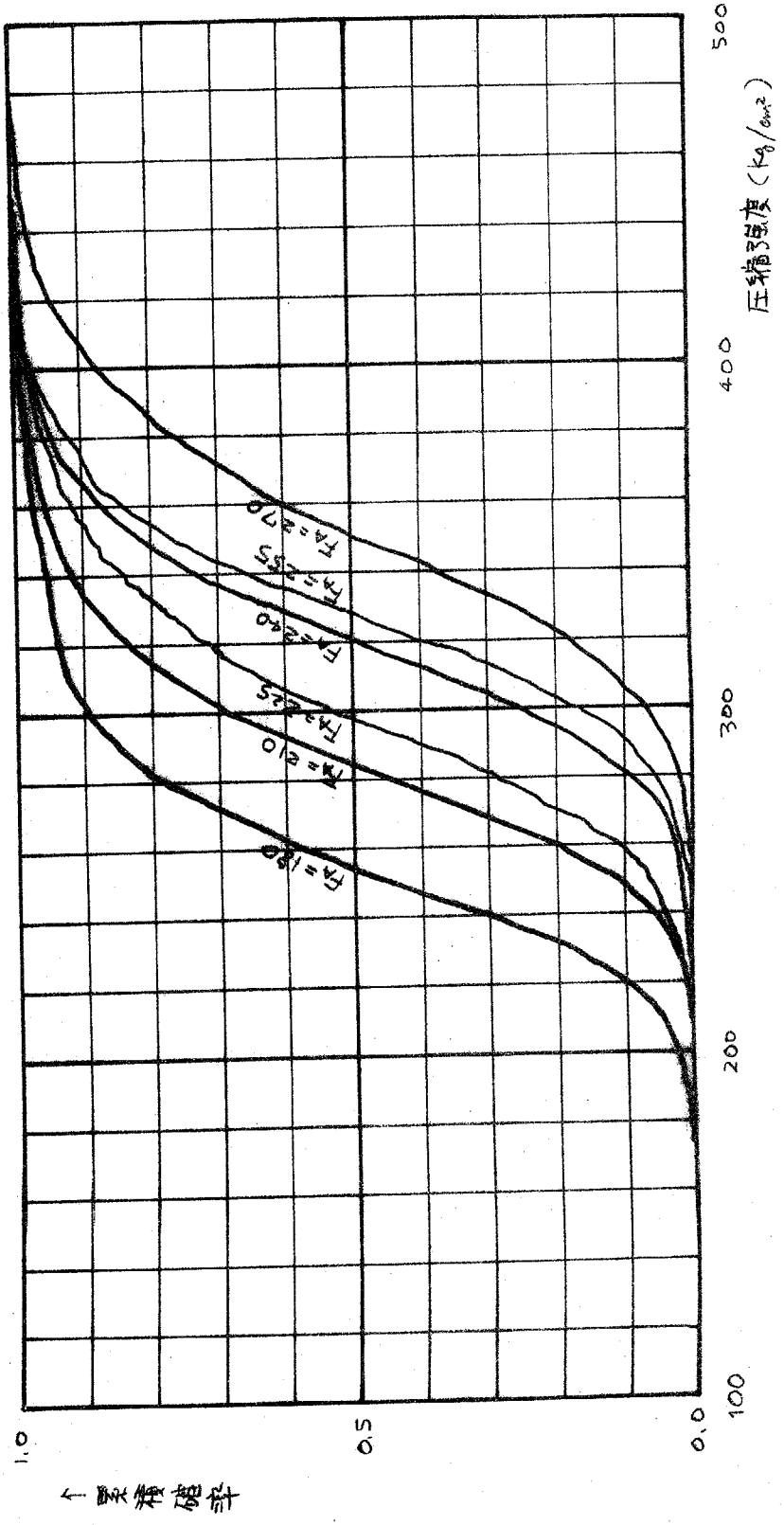


図 8-16　各材齢強度における荷卸し現場養生 28 日圧縮強度の分布

ると平均値よりも小さい範囲で分布がひずんでいることがわかる。すなわち，低い強度のものについてはその頻度が正規分布から予想される頻度より少なくなっている。このことは指定強度以下あるいは合否判定に用いられる許容値（JASS 5 合格判定係数）を下回るような可能性のあるコンクリートが発生しないように何らかの意図的な介入があったことが考えられる。

図8－17は設計基準強度210kg/cm²のものについて指定強度別に圧縮強度の累積確率分布型を示したものである。この図からも設計基準強度210kg/cm²，指定強度210kg/cm²すなわち，強度補正が行われていないものについては，荷卸し標準養生のものと他の材齢養生タイプのものとはほとんど差が見られない。このことは温度補正がなされない月はほぼ4月から9月であり，この期間では低温による現場での強度の低下がみられないためであろう。しかし，温度補正値30kg/cm²，すなわち設計基準強度210kg/cm²に対して指定強度240kg/cm²のものについてはおよそ30kg/cm²だけ現場養生のものが低い圧縮強度をもつ分布型となっている。すなわち，標準養生のものにくらべ，現場養生のものは温度補正値にほぼ等しい量だけの圧縮強度の低下が生じていることがわかる。温度補正値60kg/cm²

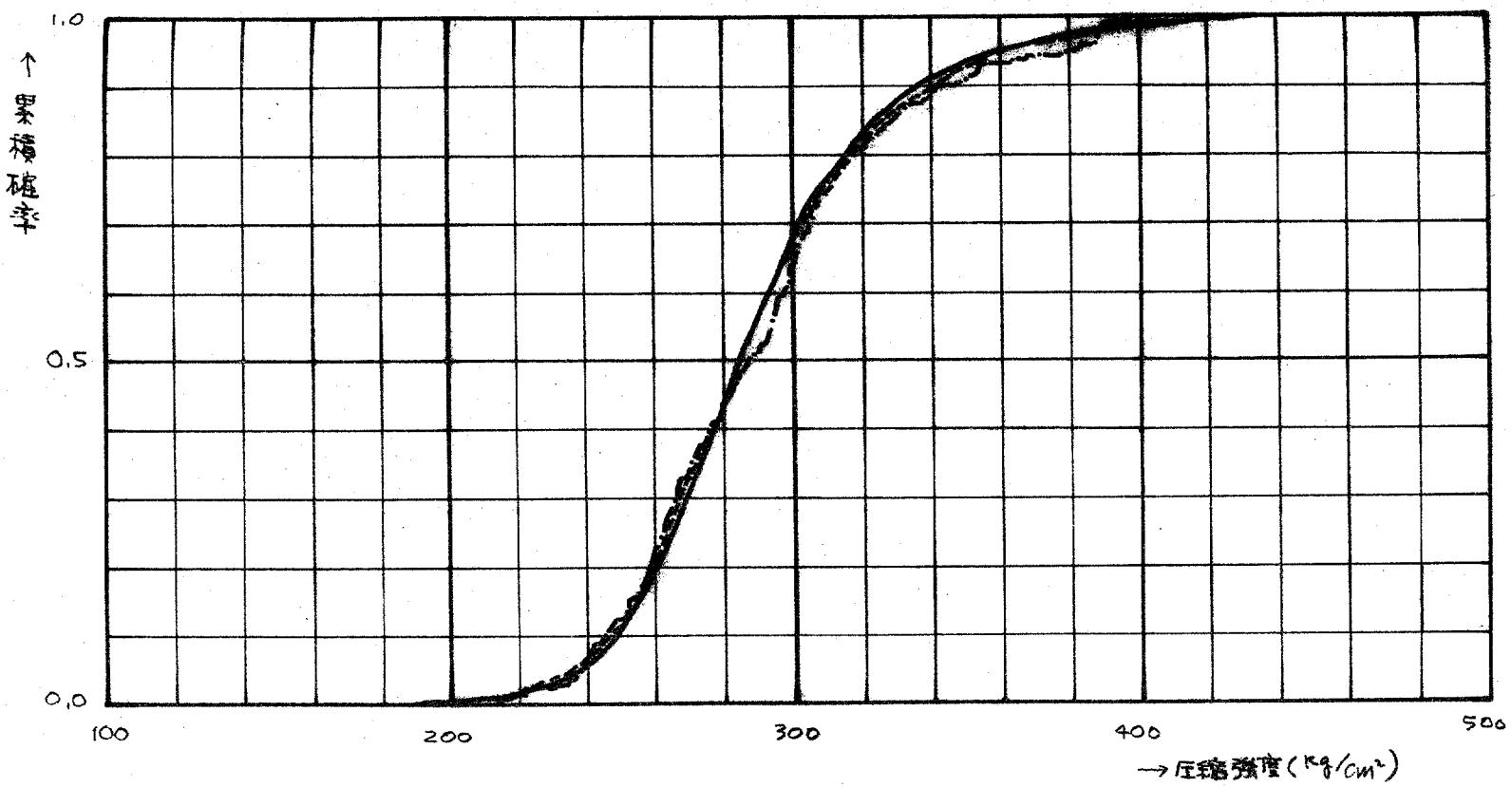


図 8-17-1 設計基準強度 210kg/cm² 指定強度 210kg/cm² の 28日 圧縮強度分布

実線；荷卸し標準養生

点線；荷卸し現場養生

一点鎖線；荷先き現場養生

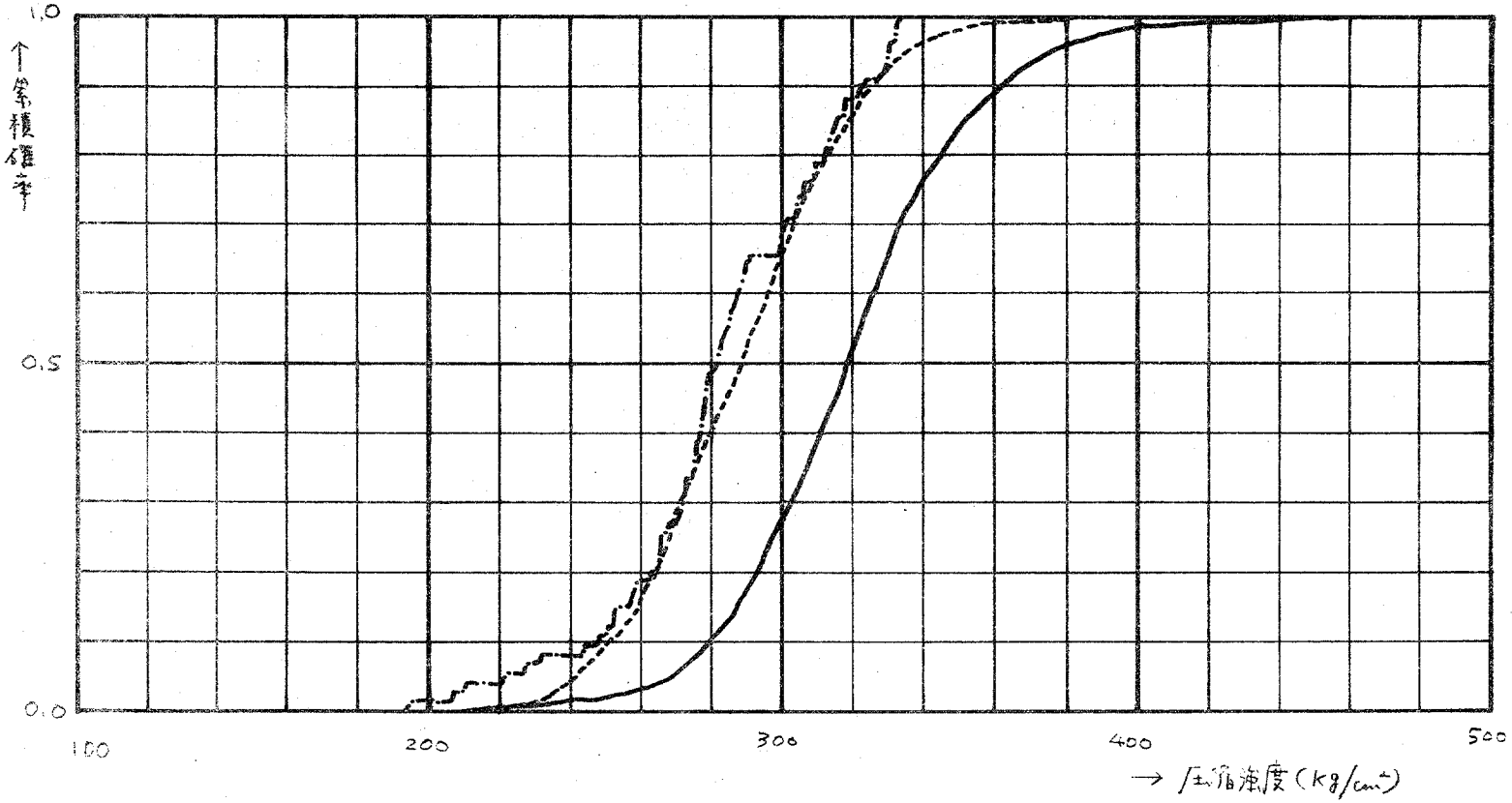


図 8-17-2　設計基準強度 210kg/cm² 指定強度 240kg/cm² の 28日 圧縮強度分布

実線；荷卸し標準養生

点線；荷卸し現場養生

一点鎖線；筒先き現場養生

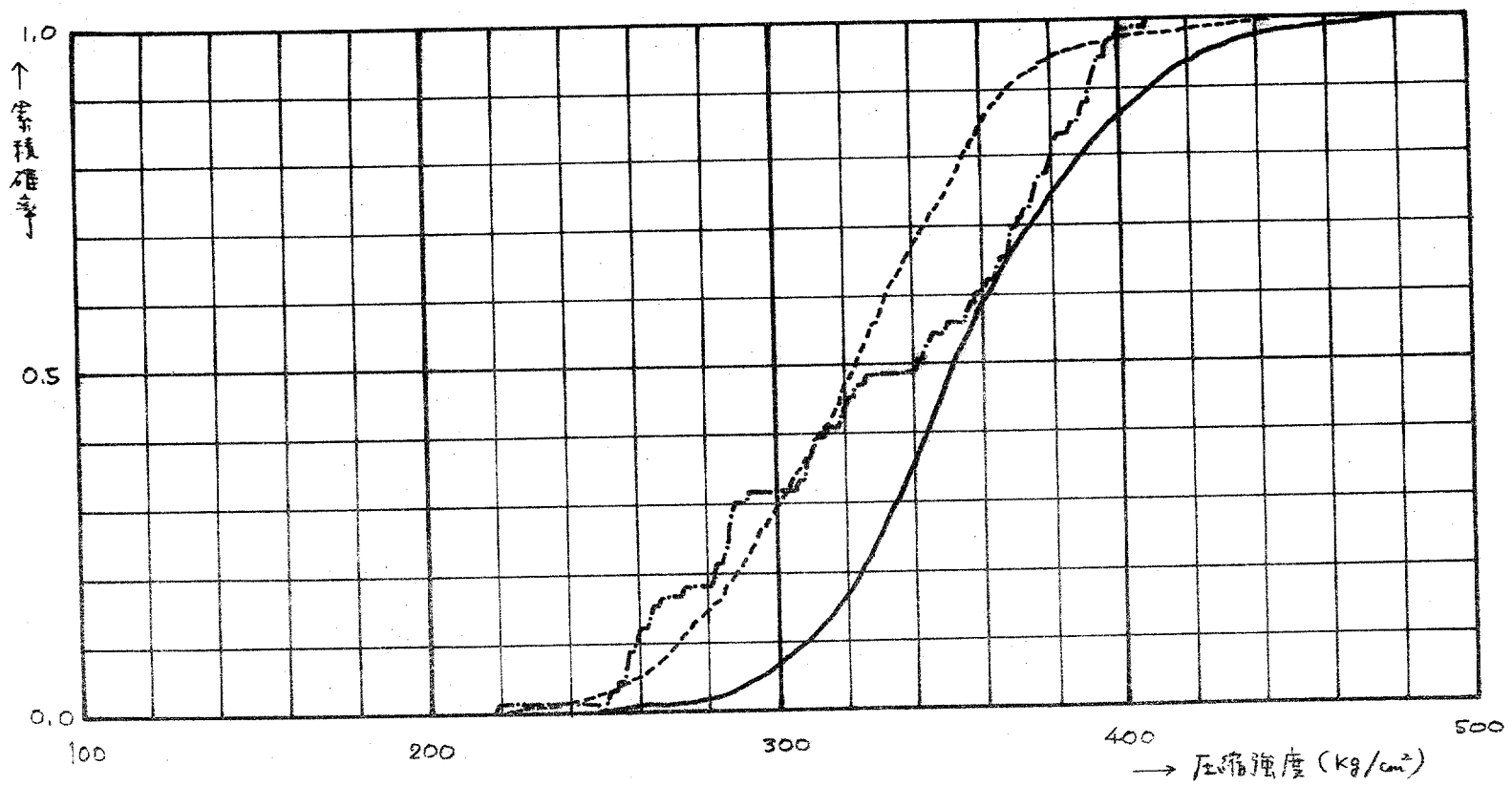


図 8-17-3 設計基準強度 210 kg/cm² 指定強度 270 kg/cm² の 28日圧縮強度分布

実線；荷卸し標準養生
点線；荷卸し現場養生
一点鎖線；筒先き現場養生

へもの，すなわち，設計基準強度210kg/cm²，指定強度270kg/cm²のものについても標準養生のものにくらべ，現場養生のものが圧縮強度の低下を示しており，平均的には約30kg/cm²程度低下している。しかし，分布の左側，すなわち強度の低い範囲においてはその差は40～50kg/cm²となっている。図8-18-1は設計基準強度210kg/cm²の荷卸し標準養生のものについて各指定強度別に分布型を比較したものである。この結果，ほぼ温度補正値に等しいだけ圧縮強度の低下が全体的に生じていることがこの分布型の比較により知られる。図8-18-2は荷卸し現場養生のものについて同様の比較を行ったものである。温度補正分に相当するだけ圧縮強度を割増しして調合しているが，現場養生における低温による圧縮強度の低下が生じるので，結局，28日圧縮強度は同じような圧縮強度分布型となってくることが予想され，実際，指定強度210kg/cm²（温度補正値なし）と指定強度240kg/cm²（温度補正値30kg/cm²）の分布型はほぼ一致している。指定強度270kg/cm²（温度補正値60kg/cm²）のものは現場における低温による圧縮強度低下がそれほど大きくないために，前者とくらべて全体的に大きい圧縮強度をもった分布型としてあらわれている。

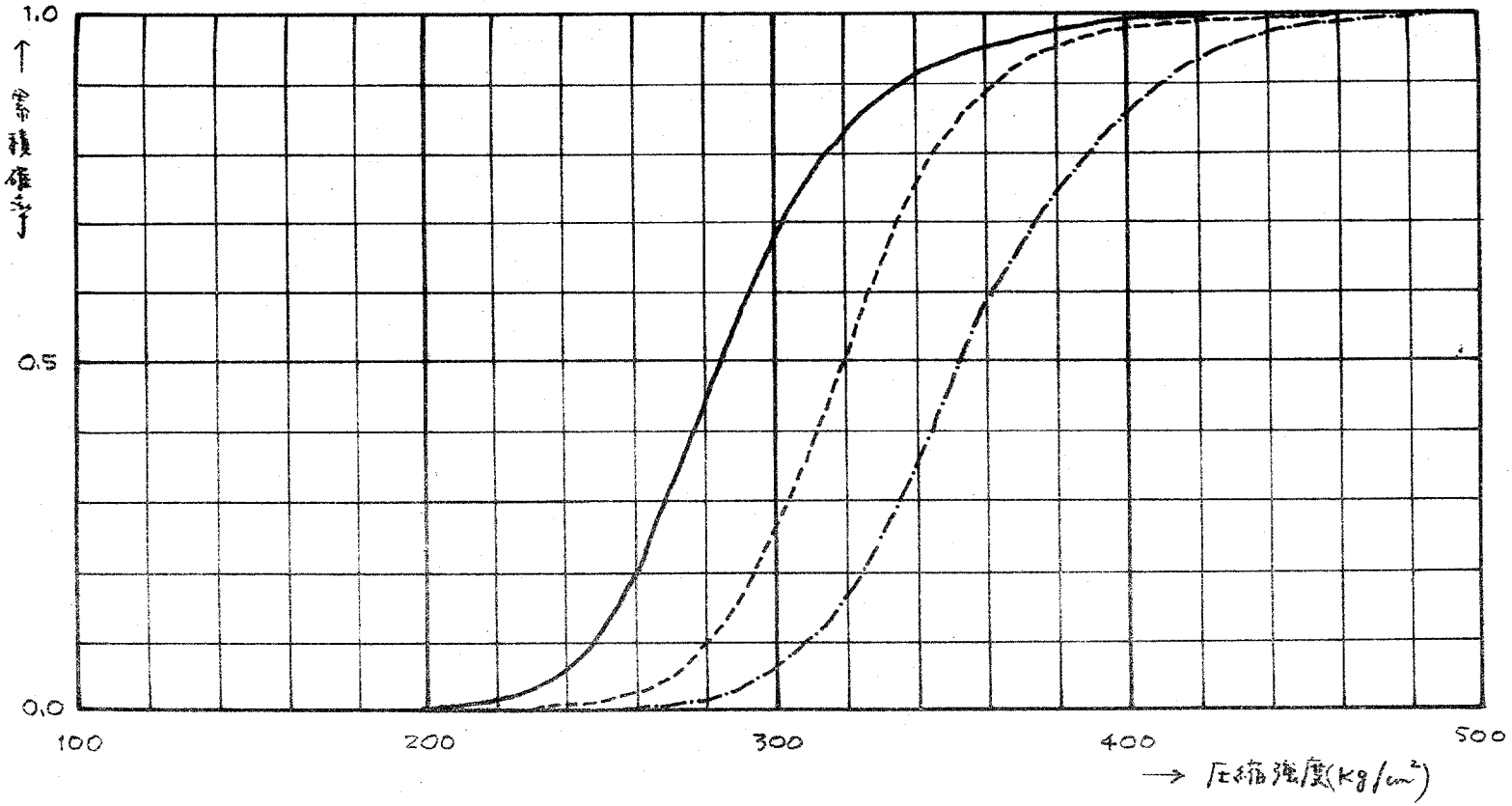


図8-18-1 設計基準強度210kg/cm²における指定強度別荷卸し標準養生強度の分布

実線；指定強度 210 kg/cm²

点線；指定強度 240 kg/cm²

一点鎖線；指定強度 270 kg/cm²

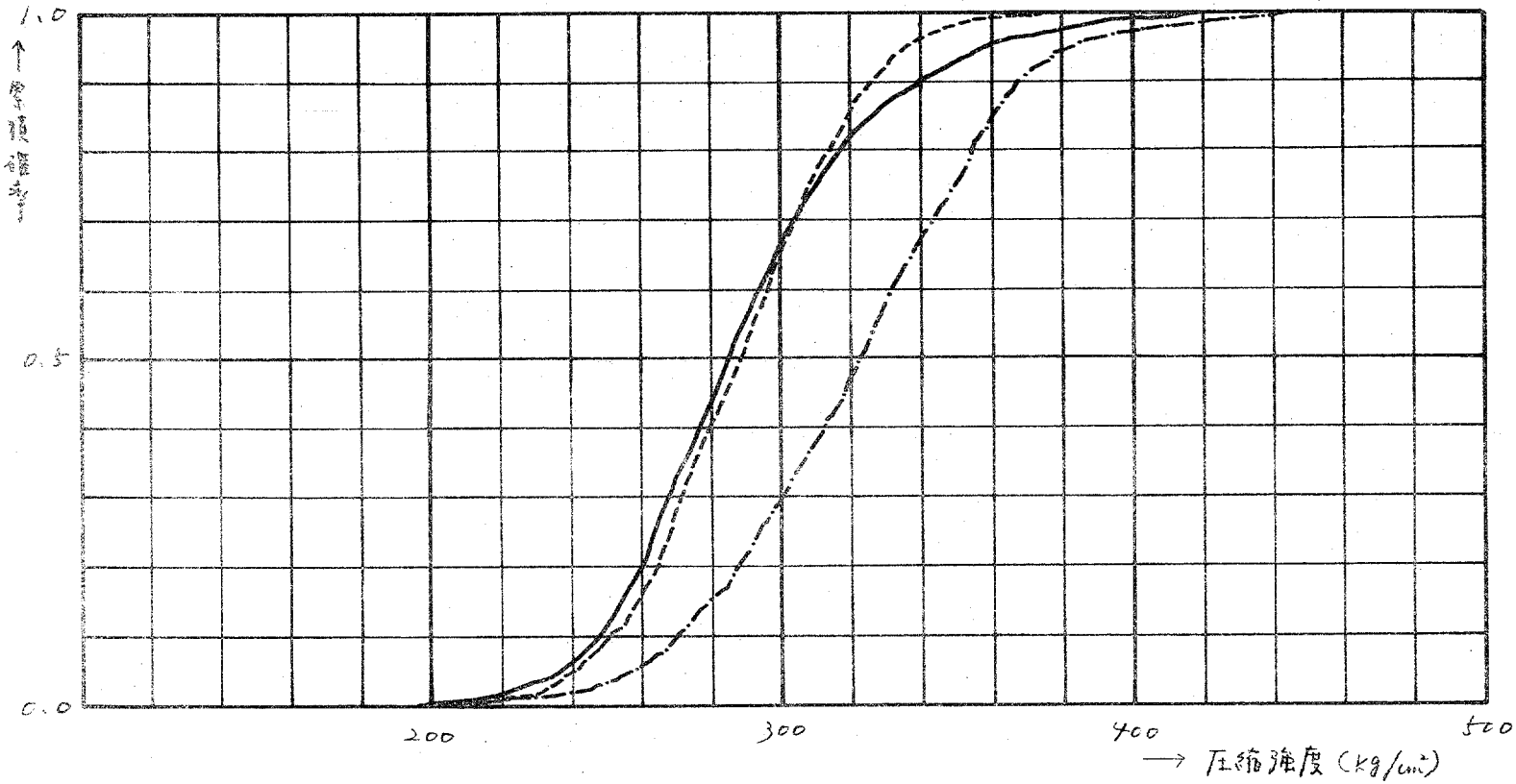


図8-18-2　設計基準強度 210 kg/cm² における指定強度別荷卸し現場養生強度の分布

実線；指定強度 210 kg/cm²
点線；指定強度 240 kg/cm²
一点鎖線；指定強度 270 kg/cm²

以上の分布型による検討から標準養生の圧縮強度にくらべ，現場養生の圧縮強度では温度補正値にほぼ等しい強度低下が発生していることがわかる。従って，もし構造体に打込まれたコンクリートの圧縮強度が充分に簡先き現場養生の圧縮強度で近似できるとすれば，現在使用されている温度補正値は充分機能しているといえよう。しかしながら，簡先き現場養生の供試体による28日圧縮強度の試験値が構造体に打込まれたコンクリートの圧縮強度と考えることは危険であり，簡先き現場養生の供試体の強度と，実際に打込まれたコンクリートの強度の差といったものが，今後より正確に測定されなければならないこととして期待される

(c) 供試体採取及び養生の仕方による差異

荷卸しから簡先きまでの段階では，現場内でのバケット，コンクリートポンプ等による運搬のために外乱が加わっていると考えられ，荷卸し段階で採取した供試体と簡先き段階で採取した供試体では，その得られる圧縮強度値が異なっていると考えられる。また，標準養生と現場養生では温度による影響を受け，その強度も大きく変化すると考えられる。

図8-19には荷卸し段階で採取した供試体のうち，標

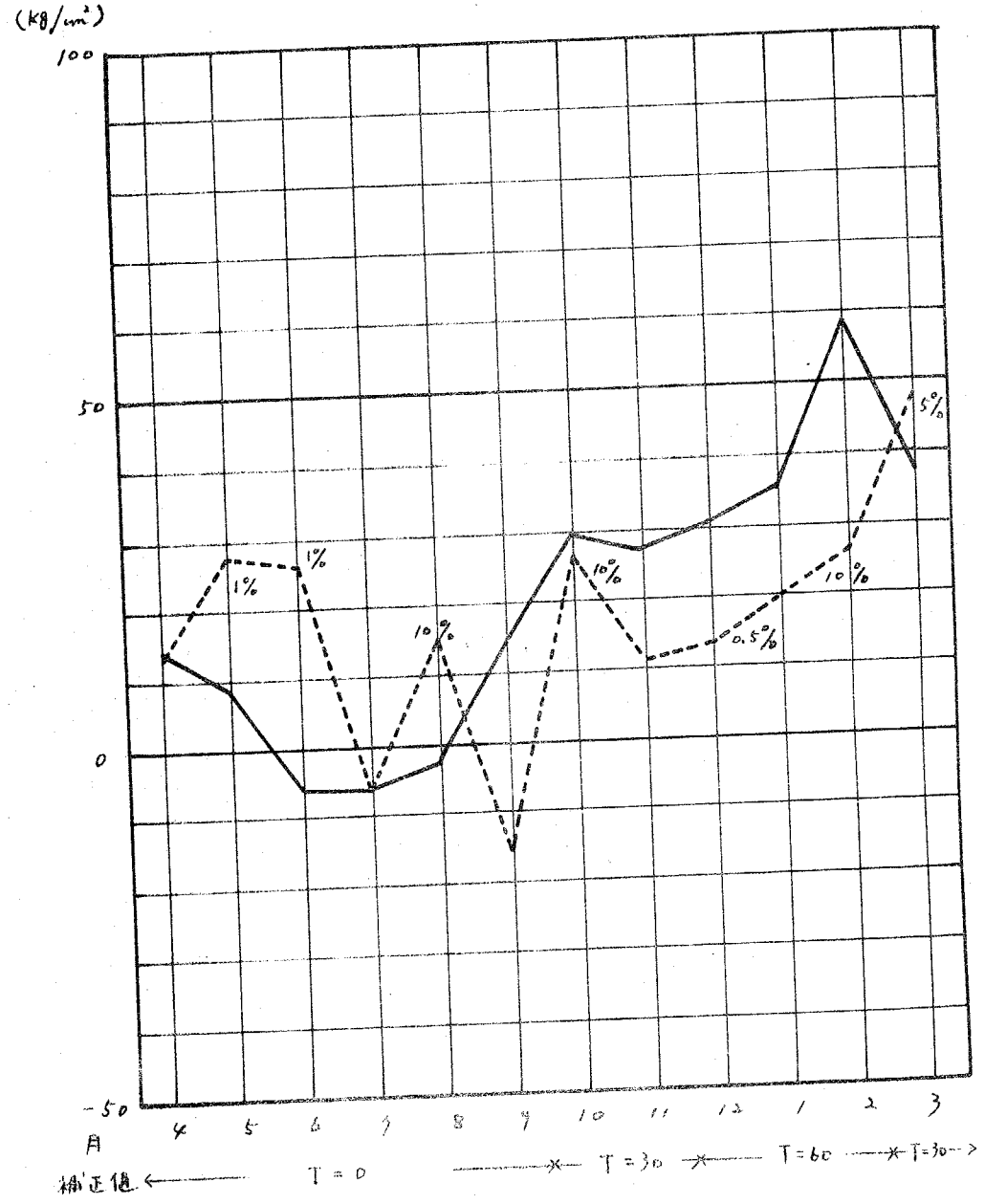


図 8-19　供試体の標準・養生の差による強度の差

実線；（荷卸し標準養生の強度）－（荷卸し現場養生の強度）

点線；（荷卸し標準養生の強度）－（前期現場養生の強度）

（各ポイントは各月の値の前後差
検定で差があるとされたものを示す）

準養生と現場養生の差を見るために，標準養生の各月の供試体から得られる圧縮強度試験値の平均値から現場養生のそれを差し引いた値を図示してある（4月から9月のものについては，設計基準強度210kg/cm²，指定強度210kg/cm²のものを，3月，10月，11月のものについては，設計基準強度210kg/cm²，指定強度240kg/cm²，12月，1月，2月のものについては，設計基準強度210kg/cm²，指定強度270kg/cm²のものを用いている。以下，各月の分析を行う場合はこの組み合せを採用する）。冬期にほぼ温度補正値に近い値の圧縮強度差が生じている。夏期においてはその差は見られず，むしろ現場養生のほうが大きな強度を有しているといえる。

参考のために，荷卸し標準養生のものと筒先き現場養生のものとの差が実線で示されている。この場合，夏期においても差がでてくる月がある。

図8－20には，同じ現場養生の供試体についての荷卸し段階で採取したものと筒先き段階で採取したものとの差を示している。各月によって異なるが，有意差等を考えてみると，5月，6月，8月，1月において荷卸しのものが筒先きのものより大きな圧縮強度を有していることが示されているが，2月のデータについては逆に荷卸

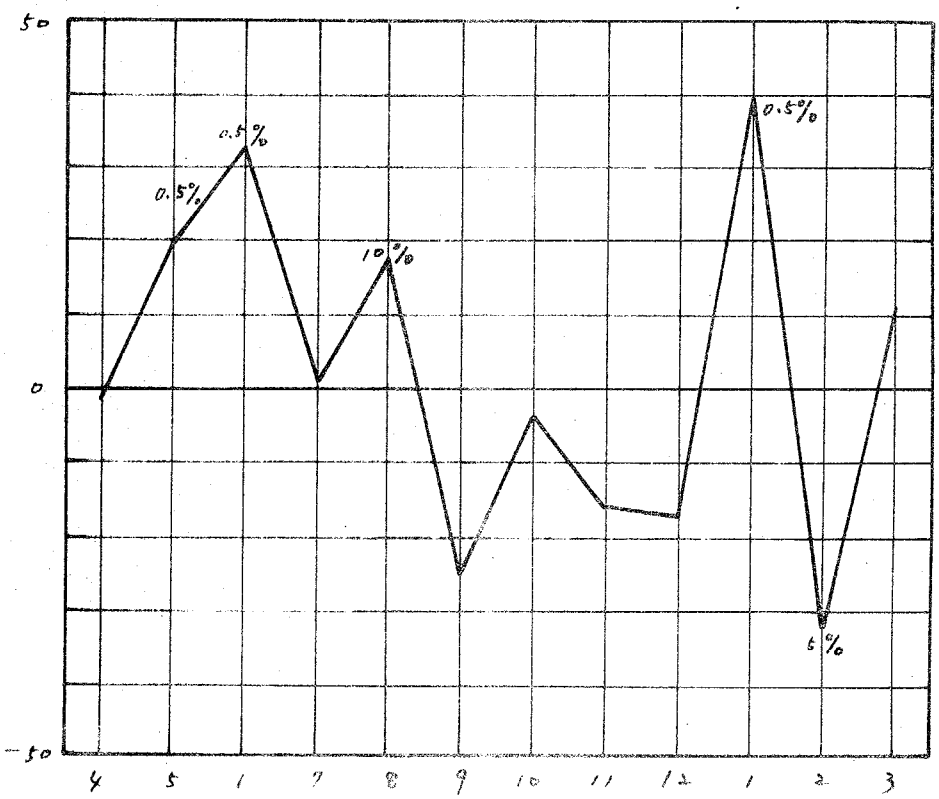


図 8-20 荷卸しと簡易法の濃度差

(各パーセント値はその値の有意差)
検定に差があるとされたもの

しゃもの方が筒先きのものより小さい圧縮強度となっている。従って，年間で見ると荷卸し段階のものと筒先き段階のものとの間に大きな差があるという結論は，この結果からはいきだせない。おそらく同じ筒先きというカテゴリーの中にも現場内運搬の方法が様々であること，ならびに今回のデータの中では筒先き採取のデータが少なかったことにより，以上のような結果になったのではないかと思われる。

(d) 圧縮強度のバラツキ

採取された供試体で観測されるコンクリート圧縮強度のバラツキは，供試体が採取される以前のバラツキと採取された後，圧縮試験が行われるまでのバラツキに区分することができるであろう。前者は，工場における品質管理のバラツキと運搬によるバラツキに分けることが可能であろう。荷卸しの供試体については「JIS A 5308 8. 検査」に定められているように，同一の運搬車から採取した試料より3個の供試体を1組として試験を行うので，以下のような方法によって推定できるのではないかと思われる。すなわち，1組3個の供試体から得られる圧縮強度試験値の平均値はその3本の供試体を採取したコンクリートの不偏推定圧縮強度であり（厳密に言えば，同じ養生を

した場合にかぎられる），その平均値のバラツキは採取されたコンクリートの荷卸し段階までの圧縮強度のバラツキであり，採取以後にかかるバラツキは平均値をとるという操作により標準偏差にして $\frac{1}{\sqrt{3}}$ の値に減少していると考えられる。すなわち，3個1組の同時採取供試体の圧縮強度試験値の平均値のバラツキというもので，採取直前までのバラツキをある程度知ることができる。荷卸し標準養生の3個1組の供試体の平均強度の標準偏差を調べてみると，図8-21のようになる（設計基準強度210kg/cm²，指定強度210kg/cm²のものについて示してある）。先にみたように，冬期において平均圧縮強度も増加しているので，平均圧縮強度の標準偏差を平均値で割った値，すなわち，変動係数も求め，実線で示してある。この結果を見ると，荷卸しまでのバラツキは夏期にくらべ，冬期の方が大きくなっているといえる。

コンクリート供試体が採取された後にかかる外乱については，3個1組の供試体が同時に採取されていることから，その3個の供試体の圧縮強度試験値から推定される圧縮強度の不偏分散が採取以降のバラツキと考えられる。この不偏分散から得られる標準偏差の平均値を月別に示したものが図8-22である。設計基準強度210kg/cm²，

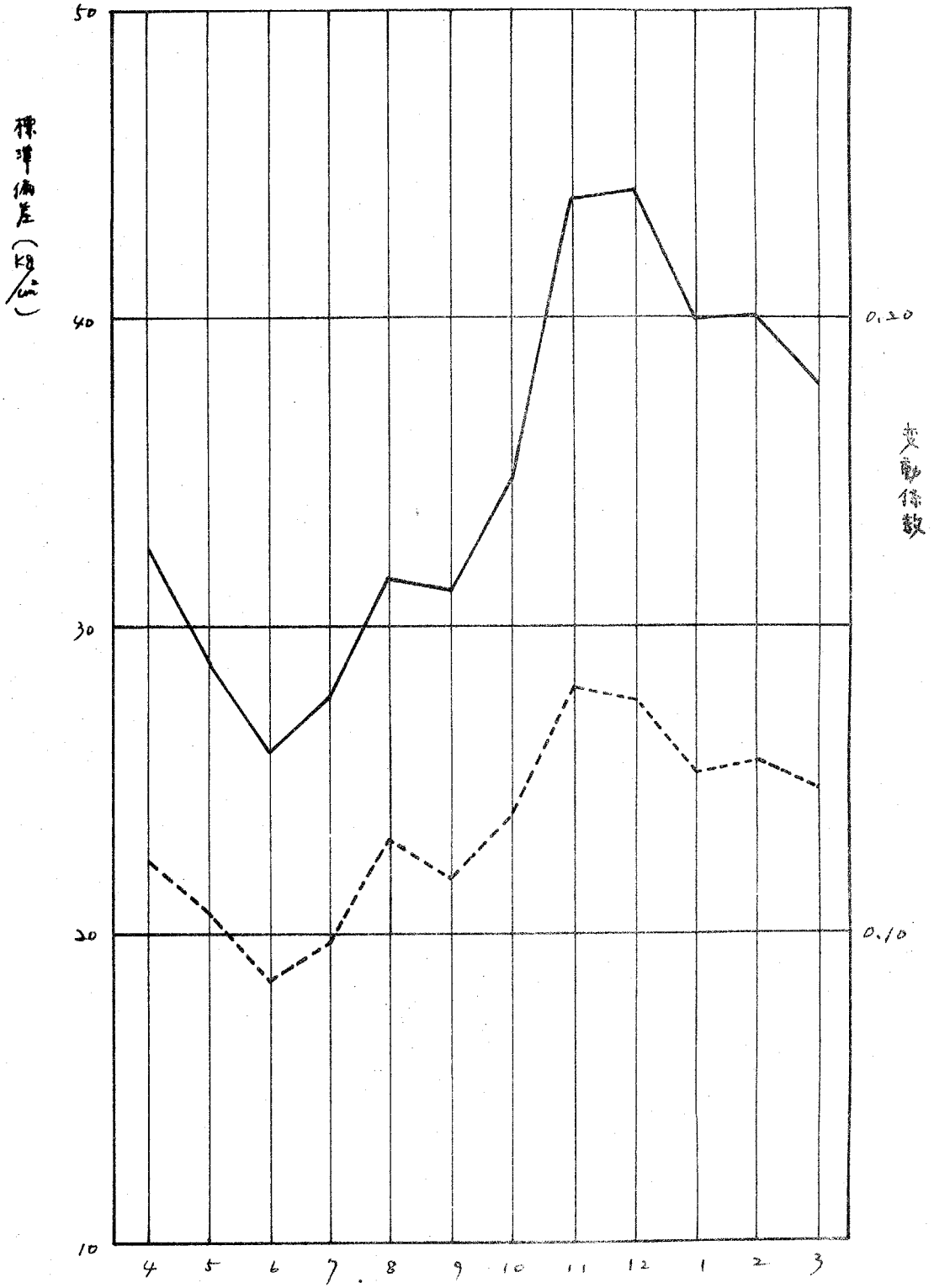


図8-21 月別荷卸し標準養生の3週平均の標準偏差，変動係数
（設計基準強度 210 kg/cm²，指定強度 210 kg/cm²）

実線；標準偏差
点線；変動係数

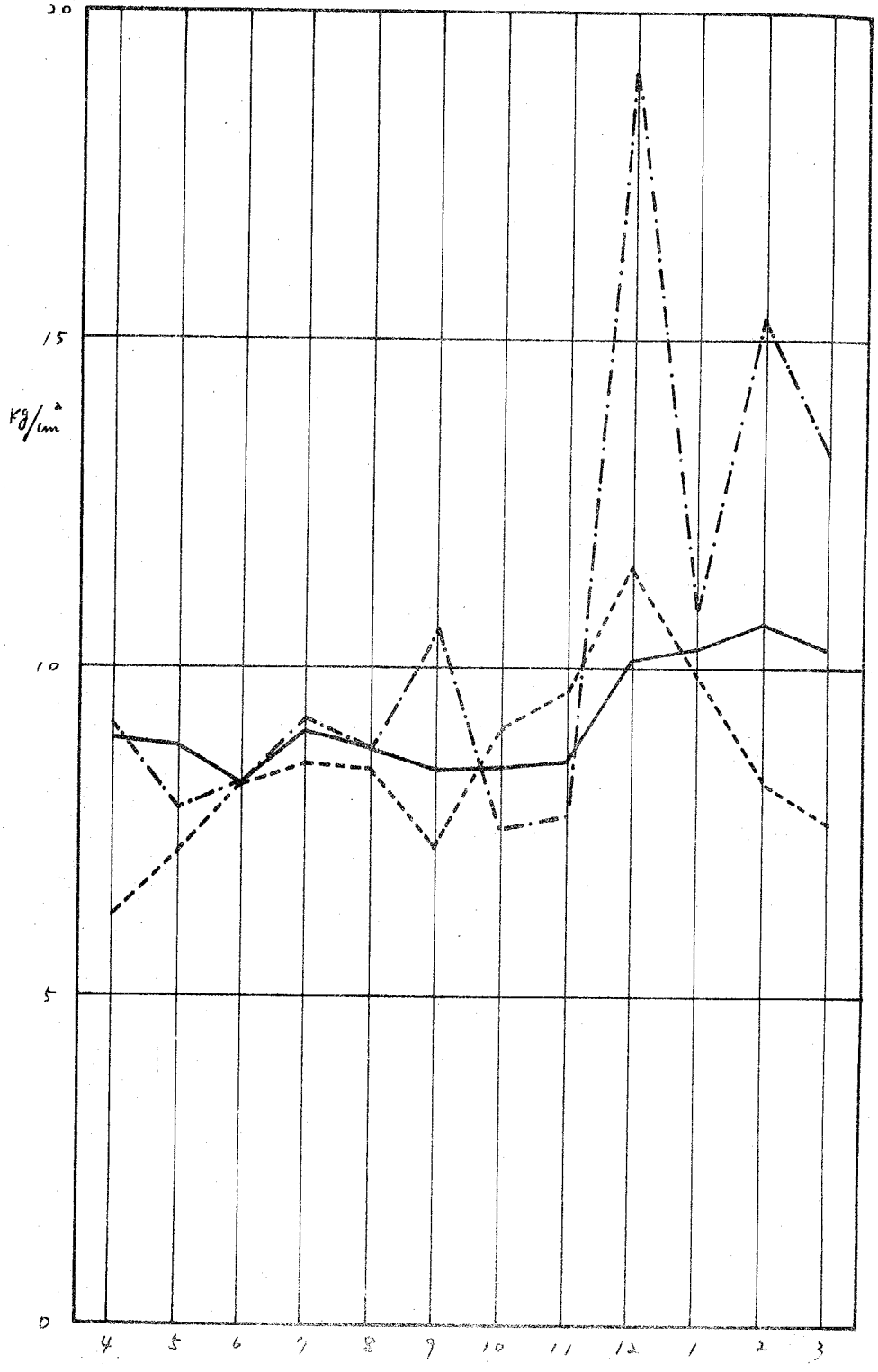


図 8-22 月別荷卸し強度のサンプリングから標準養生までの分もし

実線； 設計基準強度 210kg/cm², 指定強度 210kg/cm²

点線； 設計基準強度 180kg/cm², 指定強度 180kg/cm²

一点鎖線； 設計基準強度 240kg/cm², 指定強度 240kg/cm²

指定強度210kg/cm²のものについては8月と1月のこの分散値の有意差検定をしてみても有意差が確認される。すなわち，冬期においてはやはりサンプル採取以後のバラツキも大きいと考えることができる。しかし，それらは荷卸し以前のバラツキのように大きな差ではないと思われる。

(e) 生産者による安全側への補正

調合設計の段階で，調合強度はJASによる品質の級"常用"の場合，以下の2式で与えられる条件を満たすFの値が使用されることになっている。

$$F \geq (F_c + T) + 6$$

$$F \geq 0.7(F_c + T) + 3\sigma$$

ただし，

F_c；設計基準強度

T；温度補正値

σ；圧縮強度の標準偏差

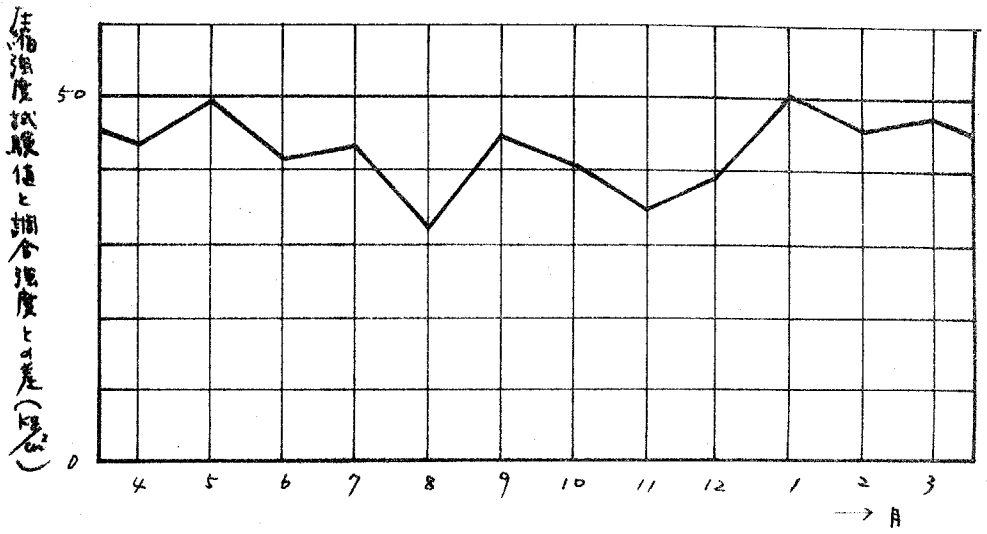
従って，この規準をみたす最小の調合強度（最低規準調合強度と呼ぶ）は以下の式で示すことができる。

$$F_{min} = Max[(F_c + T) + 6,\ 0.7(F_c + T) + 3\sigma]$$

ところで，生産者は利潤追求の原則から他の制約がない場合はこの最低規準調合強度F_{min}を調合強度とし

採用すると考えられるが，「(a) 圧縮強度の平均値」のところで調べたように，荷卸し強度の試験値は上記の F_{min} を上回っていた。この点をより明確にとらえるため，指定強度（F_c 十 T）が 210 kg/cm² のものについて図8－2に示した標準偏差 σ を用いて得られる最低規準調合強度 F_{min} と，実際に得られる荷卸し標準養生の圧縮強度試験値の月別平均値 X とを比較した結果を図8－3に示す。図からもわかるように，圧縮強度平均値は最低規準調合強度にくらべ，30～50 kg/cm² 程度大きな値を示している。冬期，夏期の区別によってこれらの差の値を説明することは困難であり，むしろ年間を通してほぼ一定の差が生じていると考えてよいのではないかと思える。

圧縮強度平均値と最低規準調合強度との差が生じる理由としては以下のようなプロセスが考えられる。最低規準調合強度 F_{min} は，圧縮強度が指定強度を下回る割合が 16％以下，ならびに指定強度の 70％を下回る割合が 0.135％以下になるように定められているが，このように調合した場合でも品質検査段階で合格しないものが生じる可能性があり，生産者の利潤追求の原則上からいってもこの不合格率（「JASS 5 5節 製造 5.5.1」における合格判定係数値を下回る割合）は高すぎると判



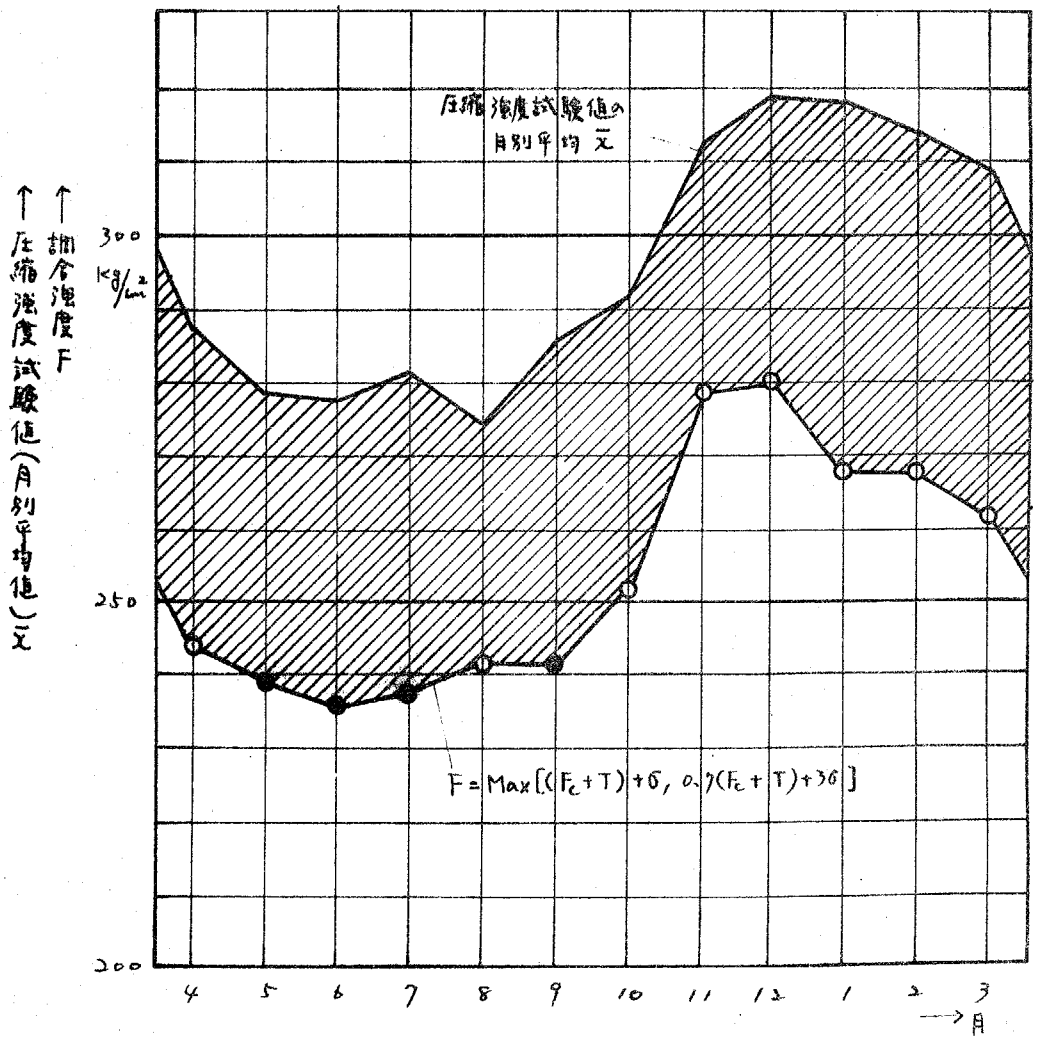


図 8-23　圧縮強度月別平均値と調合強度の差
($F_c + T = 210$ kg/cm² の場合)

○印；$F = F_c + T + 6$ の月
●印；$F = 0.7(F_c + T) + 30$ の月

断しているものと考えられる。すなわち，生産者にとってより低い不合格率がより経済的と判断されており，その結果として最低規準調合強度 F_{min} に 30～40 kg/cm² 程度の圧縮強度の上のせが調合設計段階で行われていると考えられる。

5-3-3 構造材料の不確定性状（鉄筋）

5-3-3-1 鉄筋強度のバラツキ要因

現在多く利用されている鉄筋（鉄筋コンクリート用棒鋼）を大きく分類すると

1. 熱間圧延棒鋼（略号 SR），
2. 熱間圧延異形棒鋼（略号 SD），
3. 再生棒鋼（略号 SRR または SDR），

となり，以上のもの以外のものも使用されている可能性がないとはいえないが，それらは非常に少ないと思われる。また，最近の鉄筋コンクリート造構造物においては熱間圧延異形棒鋼（以下，異形鉄筋と略す）が用いられるケースが多い。

ところで，鉄筋の構造物の耐力へうける効果を考慮した場合，単に鉄筋の機械的性質としての降伏点（JIS Z 2241 参照，以下，降伏強度と呼ぶ）及び引張強さ（引張試験の経過中，試験片の耐えた最大荷重を平行部の原断面積で除した商，以下，引張強度と呼ぶ）のみならず，使用された鉄筋の断面積及び設計時に想定した配筋位置からのズレ等が主要なバラツキ要因として考えなければならない。とくに配筋位置のズレの問題はコンクリート打込み時に発生することが多く，施工管理の主要な

事項でもある。また，施工過程では鉄筋の溶接というプロセスが建物の安全に関する信頼性へ与える影響が多い，といわれている。

以下では，とくに鉄筋の材料的性質に起因する下記の要因をとくにとりあげ，その確率的関係を次項で検討するとともに，品質検査，試験検査の各種結果の統計的データを用いてより具体的に鉄筋のバラツキ要因を検討する。

1) 使用される鉄筋の断面積または直径

2) 降伏強度

3) 引張強度

とくに異形鉄筋の場合，規定の断面積が確保されているか否かの品質管理が丸棒などそれにくらべ容易でなくなるため，へたもすれば設計時に想定されていた断面積以下の鉄筋が使用される可能性が増大することが懸念されている。

「-3-3-2 鉄筋強度に関する確率的関係

以下の検討のため，あらかじめ各変量の定義を与えておこう。

f_y; 降伏荷重（引張試験の経過中，試験片平行部が

降伏し始める以前の最大荷重）

f_y；降伏強度（前項参照）

F_t；引張強度（JIS Z 2241 参照）

f_t；引張強度（前項参照）

S；原断面積

r；断面が円形の場合におけるその直径

w；鉄筋の単位長さ当りの重さ

まず，定義より以下の各式が成立している。

$$F_y = S f_y \tag{3-1}$$

$$F_t = S f_t \tag{3-2}$$

円形断面のものについては

$$F_y = \frac{\pi}{4} r^2 f_y \tag{3-3}$$

$$F_t = \frac{\pi}{4} r^2 f_t \tag{3-4}$$

なる関係が成立している。

まず，円形断面のものについて直径rと断面積Sとの確率的関係を調べる。ここで直径rは非負の変量であるので，一応対数正規分布に従った分布をしていると仮定し，これから断面積Sの確率分布性状を求め，直径のバラツキが断面積のバラツキへどう影響を分析する。直径rが対数正規分布をなすとき，直径rの確率密度関数

は以下の式で与えられている。

$$f_r(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\eta_r x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\lambda_r}{\eta_r}\right)^2\right] \qquad (3-5)$$

従って，直径 r の対数 $\Phi = \ln(r)$ の確率密度関数は正規分布のそれであり

$$f_\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\eta_r} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(x-\lambda_r)^2}{\eta_r^2}\right] \qquad (3-6)$$

となる。ところで，断面が円形の場合には明らかに

$$S = \frac{\pi}{4} r^2 \qquad (3-7)$$

であり，従って

$$\ln S = \ln\frac{\pi}{4} + 2\ln r = \ln\frac{\pi}{4} + 2\Phi \qquad (3-8)$$

となる。ここで，$\ln\frac{\pi}{4}$ が定数，Φ が正規分布に従う確率変量であることから $\ln S$ は正規分布

$$f_{\ln S}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\eta_S} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(x-x_S)^2}{\eta_S^2}\right] \qquad (3-9)$$

に従い，その平均 λ_S，分散 η_S^2 は (3-8) 式より以下の式で与えられる。

$$\lambda_S = \ln\frac{\pi}{4} + 2\lambda_r \qquad (3-10)$$

$$\eta_S^2 = 4\eta_r^2 \qquad (3-11)$$

従って，断面積 S の確率分布は対数正規分布が

$$f_S(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\eta_S x} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(\ln(x)-\chi_S)^2}{\eta_S^2}\right] \qquad (3-12)$$

となる。

ここで，直径 r 及び断面積 S のそれぞれの平均，分散をそれぞれ（3-5）及び（3-12）式より求めると以下のようになる。

$$E(r) = \int_{-\infty}^{\infty} x f_r(x)\,dx = \exp\left[\lambda_r + \frac{1}{2}\eta_r^2\right] \qquad (3-13)$$

$$V(r) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f_r(x)\,dx - E(r) = \exp\left[2\lambda_r + \eta_r^2\right]\cdot\left(\exp\left[\eta_r^2\right]-1\right) \qquad (3-14)$$

$$E(S) = \int_{-\infty}^{\infty} x f_S(x)\,dx = \exp\left[\lambda_S + \frac{1}{2}\eta_S^2\right] \qquad (3-15)$$

$$V(S) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f_S(x)\,dx - E(S) = \exp\left[2\lambda_S + \eta_S^2\right]\cdot\left(\exp\left[\eta_S^2\right]-1\right) \qquad (3-16)$$

また，逆に（3-13）及び（3-14）式より

$$\lambda_r = \ln\left\{E(r)/\sqrt{1+\Omega^2(r)}\right\} \qquad (3-17)$$

$$\eta_r^2 = \ln\left\{1+\Omega^2(r)\right\} \qquad (3-18)$$

ただし，

$$\Omega(r) = \frac{\sqrt{V(r)}}{E(r)} \qquad (3-19)$$

となり，これらの式と（3-10）及び（3-11）式を用いると（3-15）及び（3-16）式は以下の結果をうる。

$$E(S) = \frac{\pi}{4} E^2(r) \qquad (3-20)$$

$$V(S) = E^2(S) \cdot \{4\Omega^2(r) + 6\Omega^4(r) + 4\Omega^6(r) + \Omega^8(r)\}$$

$$= \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \cdot E^4(r) \cdot \{4\Omega^2(r) + 6\Omega^4(r) + 4\Omega^6(r) + \Omega^8(r)\} \qquad (3-21)$$

$$\Omega(S) = \frac{\sqrt{V(S)}}{E(S)}$$

$$\geq 2\Omega(r)\sqrt{1 + \frac{3}{2}\Omega^2(r) + \Omega^4(r) + \frac{1}{4}\Omega^6(r)} \qquad (3-22)$$

ここで，注目すべきことは断面積の変動係数 $\Omega(S)$ は直径の変動係数 $\Omega(r)$ の2倍以上となるということである（図8-24参照）。もし材料の機械的性質が全く変動しないものであるとすると，断面積のバラツキがその鉄筋の負担できる荷重のバラツキということになり，この(3-22)式で示される事実は杭の直径の管理ということがきわめて重要であるということを示している。

次に，降伏強度が確率的に変動する場合の降伏荷重のバラツキ性状を検討する。先にみたように直径 r が対数正規分布をなす確率量であるとき，断面積も対数正規分布をなすので，以下では断面積 S が対数正規分布をなしているという前提で分析する。すなわち，(3-9)及び(3-12)式が成立している。さらに降伏強度も非負の数であるので，対数正規分布をなしていると仮定する。従って，降伏強度 f_y の確率密度関数は

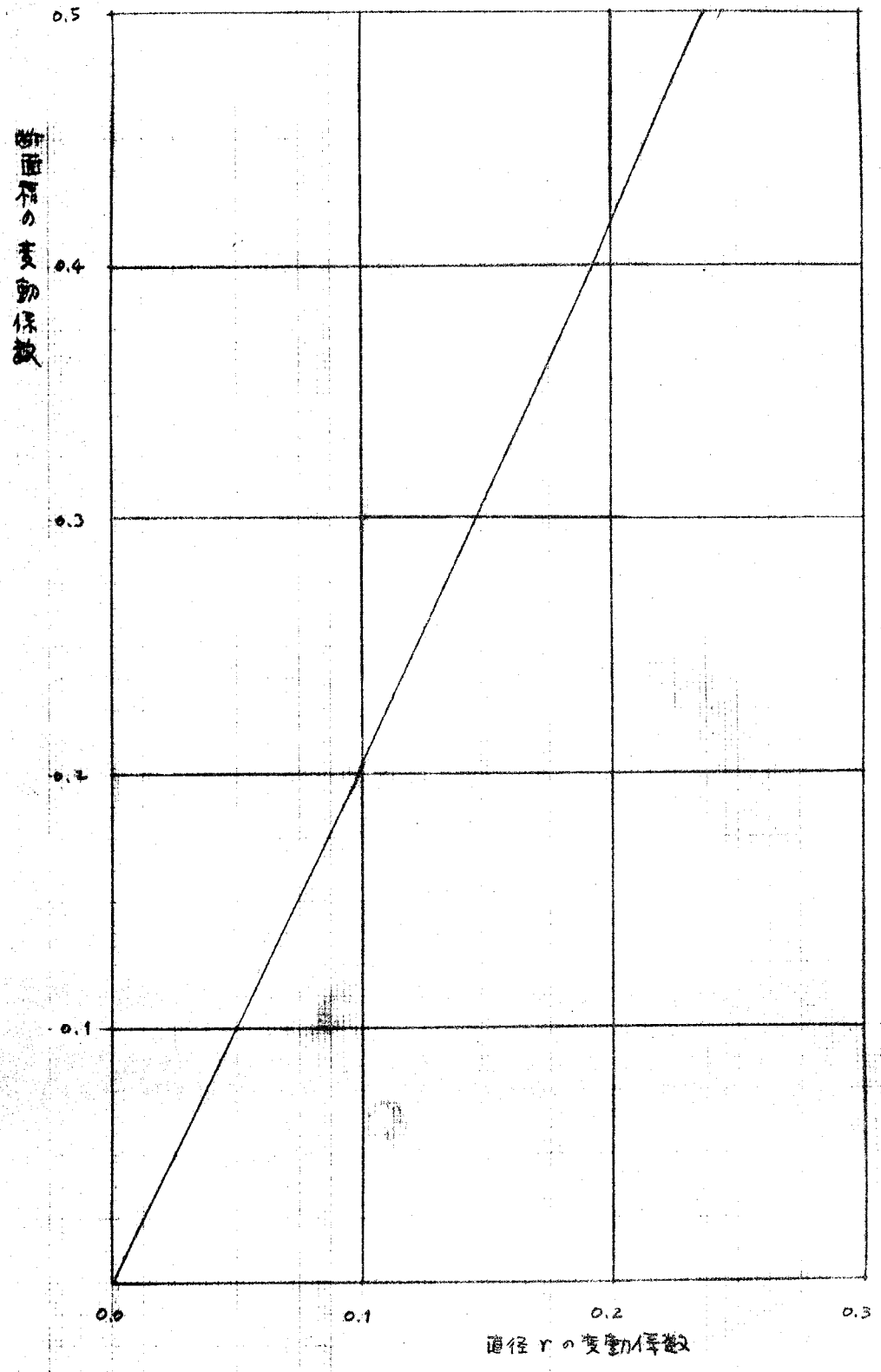


図 8-24 直径の変動係数と断面積の変動係数

$$f_{f_y}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\eta_y x} \exp\left[-\frac{1}{2}\,\frac{(\ln(x)-\lambda_y)^2}{\eta_y^2}\right] \qquad (3-23)$$

となり，降伏強度の対数 $\ln f_y$ の確率密度関数は正規分布

$$f_{\ln f_y}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\eta_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\,\frac{(x-\lambda_y)^2}{\eta_y^2}\right] \qquad (3-24)$$

となる。

一方，(3-1)式より

$$\ln F_y = \ln S + \ln f_y \qquad (3-25)$$

となる。ここで，断面積 S，降伏強度 f_y が独立であるとすると，$\ln S$，$\ln f_y$ がそれぞれ正規分布であることから $\ln f_y$ も正規分布となる。すなわち，

$$f_{\ln F_y}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\eta_{Fy}} \exp\left[-\frac{1}{2}\,\frac{(x-\lambda_{Fy})^2}{\eta_{Fy}^2}\right] \qquad (3-26)$$

ただし，

$$\lambda_{Fy} = \lambda_S + \lambda_y \qquad (3-27)$$

$$\eta_{Fy}^2 = \eta_S^2 + \eta_y^2 \qquad (3-28)$$

となる。従って，降伏強度 F_y は対数正規分布

$$f_{F_y}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\eta_{Fy} x} \exp\left[-\frac{1}{2}\,\frac{(\ln(x)-\lambda_{Fy})^2}{\eta_{Fy}^2}\right] \qquad (3-29)$$

に従う。その平均，分散は以下のように求めることができる。

$$E(F_y) = \int_{-\infty}^{\infty} x\, f_{F_y}(x)\, dx$$

$$= \exp\left[\lambda_{Fy} + \frac{1}{2}\eta_{Fy}^2\right] \qquad (3-30)$$

$$V(F_y) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f_{F_y}(x)\,dx - E(F_y)$$

$$= \exp\left[2\lambda_{F_y} + \eta_{F_y}^2\right] \cdot \left(\exp\left[\eta_{F_y}^2\right] - 1\right) \qquad (3-31)$$

ところで，(3-15) 及び (3-16) 式より

$$\lambda_S = \ln\left\{E(S)/\sqrt{1+\Omega^2(S)}\right\} \qquad (3-32)$$

$$\eta_S^2 = \ln\left\{1+\Omega(r)\right\} \qquad (3-33)$$

$$\Omega(r) = \frac{\sqrt{V(r)}}{E(r)} \qquad (3-34)$$

であり，同様にして

$$\lambda_y = \ln\left\{E(f_y)/\sqrt{1+\Omega^2(f_y)}\right\} \qquad (3-35)$$

$$\eta_y^2 = \ln\left\{1+\Omega^2(f_y)\right\} \qquad (3-36)$$

$$\Omega(f_y) = \frac{\sqrt{V(f_y)}}{E(f_y)} \qquad (3-37)$$

であり，これらを (3-27) 及び (3-28) 式に代入することによって

$$\lambda F_y = \ln \frac{E(S)\cdot E(f_y)}{\sqrt{1+\Omega^2(S)}\cdot\sqrt{1+\Omega^2(f_y)}} \qquad (3-38)$$

$$\eta_{F_y}^2 = \ln\left[\left\{1+\Omega^2(S)\right\}\cdot\left\{1+\Omega^2(f_y)\right\}\right] \qquad (3-39)$$

となり，さらにこの結果を (3-30) 及び (3-31) 式に代入することによって降伏強度の平均及び分散を以下のように求めることができる。

$$E(F_y) = E(S)\cdot E(f_y) \qquad (3-40)$$

$$V(F_y) = E^2(F_y)\cdot\left\{(1+\Omega^2(S))(1+\Omega^2(f_y)) - 1\right\}$$

$$= E^2(F_y)\cdot\{\Omega^2(S)+\Omega^2(f_y)+\Omega^2(S)\,\Omega^2(f_y)\} \quad (3-41)$$

$$\Omega(F_y)=\frac{\sqrt{V(F_y)}}{E(F_y)}=\sqrt{\Omega^2(S)+\Omega^2(f_y)+\Omega^2(S)\Omega^2(f_y)} \quad (3-42)$$

とくに，断面が円形の場合については（3－20）及び（3－22）式の結果を代入することにより

$$E(F_y)=\frac{\pi}{4}E^2(r)\cdot E(f_y) \quad (3-43)$$

$$\Omega(F_y)=\{4\Omega^2(r)+6\Omega^4(r)+4\Omega^6(r)+\Omega^8(r)+\Omega^2(f_y)+4\Omega^2(r)\Omega^2(f_y)+6\Omega^4(r)\Omega^2(f_y)+4\Omega^6(r)\Omega(f_y)+\Omega^8(r)\Omega^2(f_y)\}^{\frac{1}{2}} \quad (3-44)$$

となり，さらに，ここで各変動係数が

$$\Omega^2(r)<0.1 \quad (3-45)$$

$$\Omega^2(f_y)<0.1 \quad (3-46)$$

であることを考えて，以下のように単純化することもできる。

$$\Omega(F_y)=\sqrt{4\Omega^2(r)+6\Omega^4(r)+\Omega^2(f_y)+4\Omega^2(r)\Omega^2(f_y)} \quad (3-47)$$

これらの関係は図8－25に示されている。さらに，$\Omega(r)$，$\Omega(f_y)$が小さい範囲（$\Omega^4(r)$，$\Omega^2(r)\Omega^2(f_y)$が無視できる範囲）では，（3－47）式は

$$\Omega^2(F_y)=4\Omega^2(r)+\Omega^2(f_y) \quad (3-48)$$

となり，$\Omega^2(F_y)$が一定の関係は楕円の一部（$\Omega(r)\geq 0$，$\Omega(f_y)\geq 0$）となる。

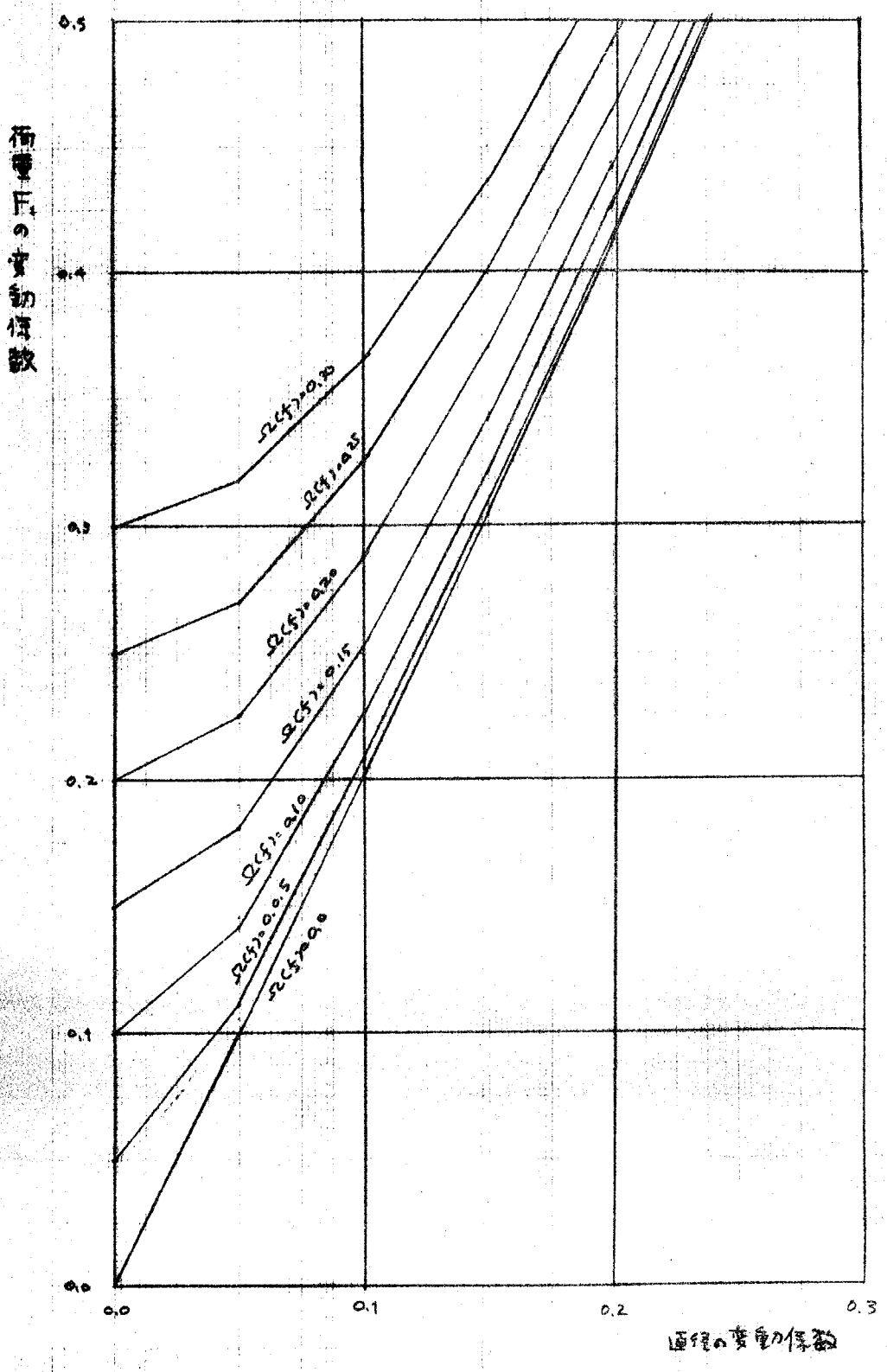


図 8－25　面積，強度の変動係数と荷重の変動係数

同様にして引張荷重，引張強度，直径についても上記と同様の結果をうることができる。すなわち，上述の各式において降伏荷重F_y，降伏強度f_yのかわりに引張荷重F_t，引張強度f_tを代入した式が成立する。

以上の結果から，直径のバラツキというものがある程度大きくなった場合は最終的に降伏強度F_y，引張強度F_tのバラツキに与える影響は大きいと考えられる。従って鉄筋の直径，または重量の管理というものが徹底して行われる必要があるといえよう。次項では，こうした視点から建設工事現場で工事に使用している材料の品質検査のための試験の際に得られたデータより，構造物に使用される鉄筋品質のバラツキを分析する。

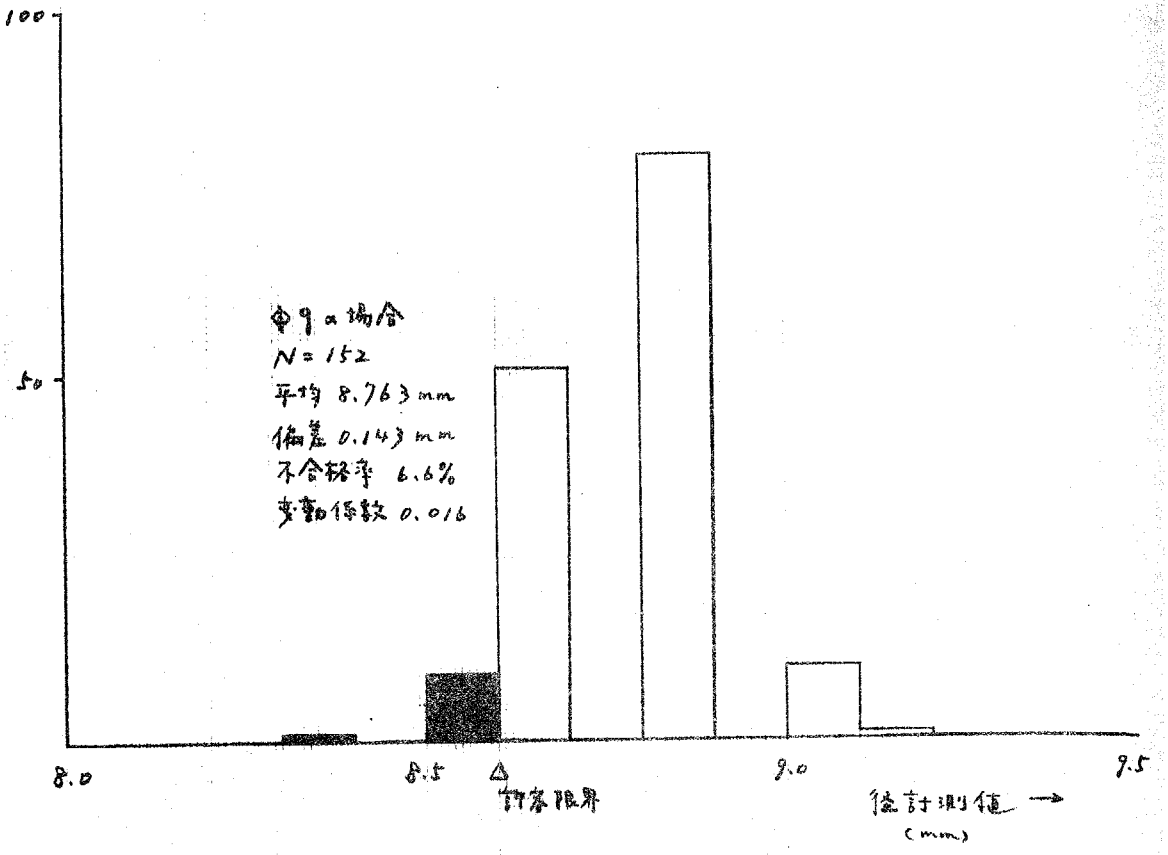
5-3-3-3 鉄筋引張強度のバラツキ

建築構造物の建設に使用される鉄筋の品質のバラツキについて調べるため，（財）建材試験センター工事用材料検査所で行ったコンクリート用棒鋼の試験結果のうち昭和61年1月～6月に実施した試験データを分析する。

先に述べたように鉄筋の断面積または直径のバラツキの影響は建物の信頼性にとって重要であるので，まず，この点から検討する。

図8-26は丸棒(熱間圧延棒鋼)の直径9mm(以下φ9と略す)及び13mm(以下φ13と略す)のものについての測定直径の分布を記したものである(φ9のものについては152本, φ13のものについては131本の試験サンプルである)。φ9についての直径の平均値は8.763mm, 標準偏差は0.143mmであり, φ13についての直径の平均12.746mm, 標準偏差0.126mmとなっており, 両者ともに規格寸法より平均0.1mm以上小さいことが明らかとなった。さらに, JIS G 3191に規定されている径の寸法許容差はφ9, φ13のものについてはいずれも±0.4mmであり, 不合格となるものがφ9の鉄筋については6.6%, φ13の鉄筋については3.1%となっており, 今後, 充分な品質検査が必要があるといえる。

異形鉄筋については使用頻度の比較的高い2種熱間圧延異形棒鋼(記号SD30)の直径呼び名D22のものについてその測定単位重量を調べてみると, 平均2.920kg/m, 標準偏差0.037kg/mであり, その分布は図8-27に示されている(データ数は109本)。JIS G 3112に規定されている単位重量はこの場合, 3.04kg/mであり, 許容差は±5%であるので, 2.89kg/m以下のものは不合格となる。従って, 109本のうち規定の単位重量以上のもの



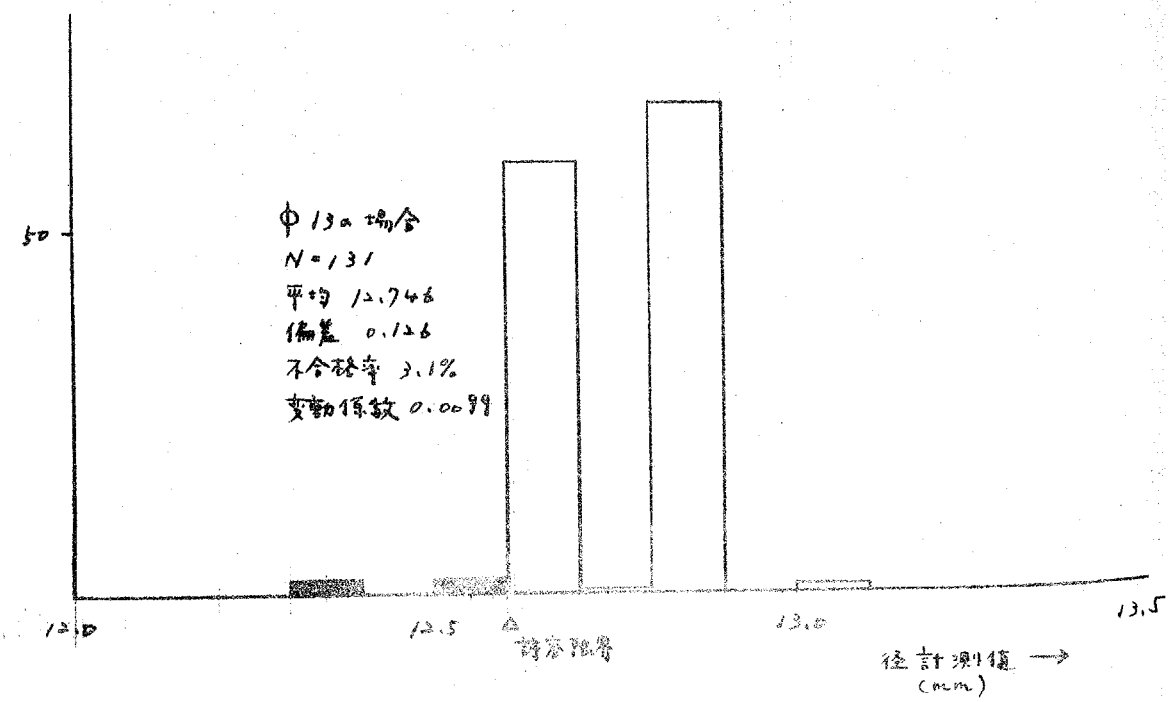


図 8-26 鉄筋(片持)の径のバラツキ

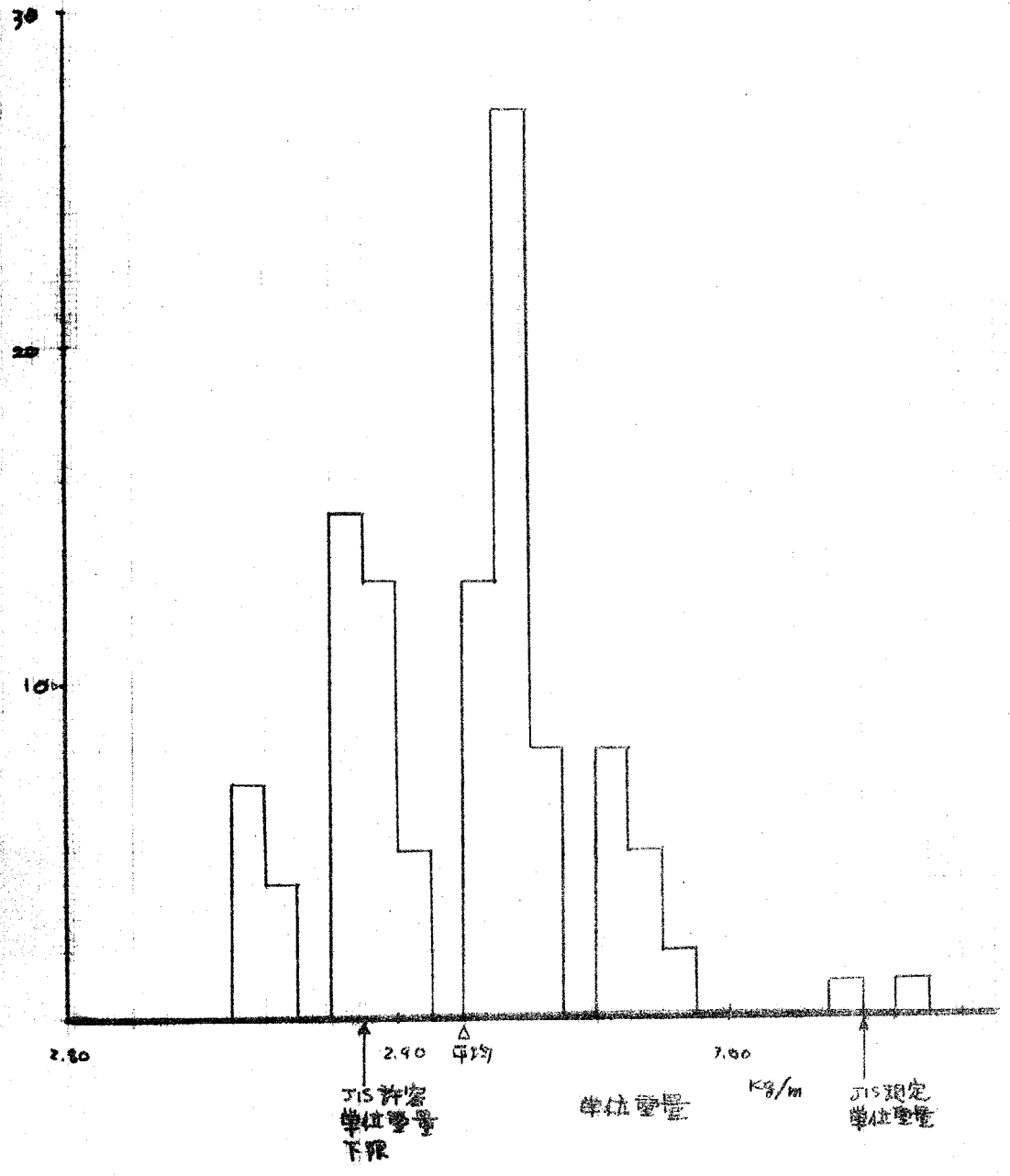


図 8-27 異形棒鋼 (SD30, D22) の単位重量のバラツキ

(サンプル数 109)

はわずか1本にすぎず，さらに許容範囲内からはずれてしまうものが26本（24%）にもなっており，異形鉄筋の断面積というものが不足していることが目だっている。

さらに，鉄筋の機械的性質として引張試験の結果を調べてみる。図8-28は熱間圧延棒鋼一種（SR24）のものについてφ9，φ13のものの降伏強度の試験値の累積分布曲線を示したものである。また，図8-29は引張強度の累積確率分布を示したものである。また，それぞれの平均，標準偏差，変動係数はそれぞれ表8-3のようになっている。これらの結果より，径の違いについてくらべると，φ9のものはバラツキが大きいが，φ9の方のバラツキは高い強度の方へ偏ったバラツキである。また，これらのバラツキの結果としてJIS G 3112に規定された引張強さの範囲を上回っているものがφ9で約15%，φ13で約5%であることがわかる。

さらに異径鉄筋についてその強度のバラツキを調べるため，熱間圧延異形棒鋼二種（SD30），呼び名D22のものについての強度の平均，標準偏差，変動係数を調べてみると表8-4のようになる。また，JIS G 3112によれば異形棒鋼（SD30，D22）の降伏点は30 kgf/mm² 以上，引張強さについては49 kgf/mm² ～63 kgf/mm² であ

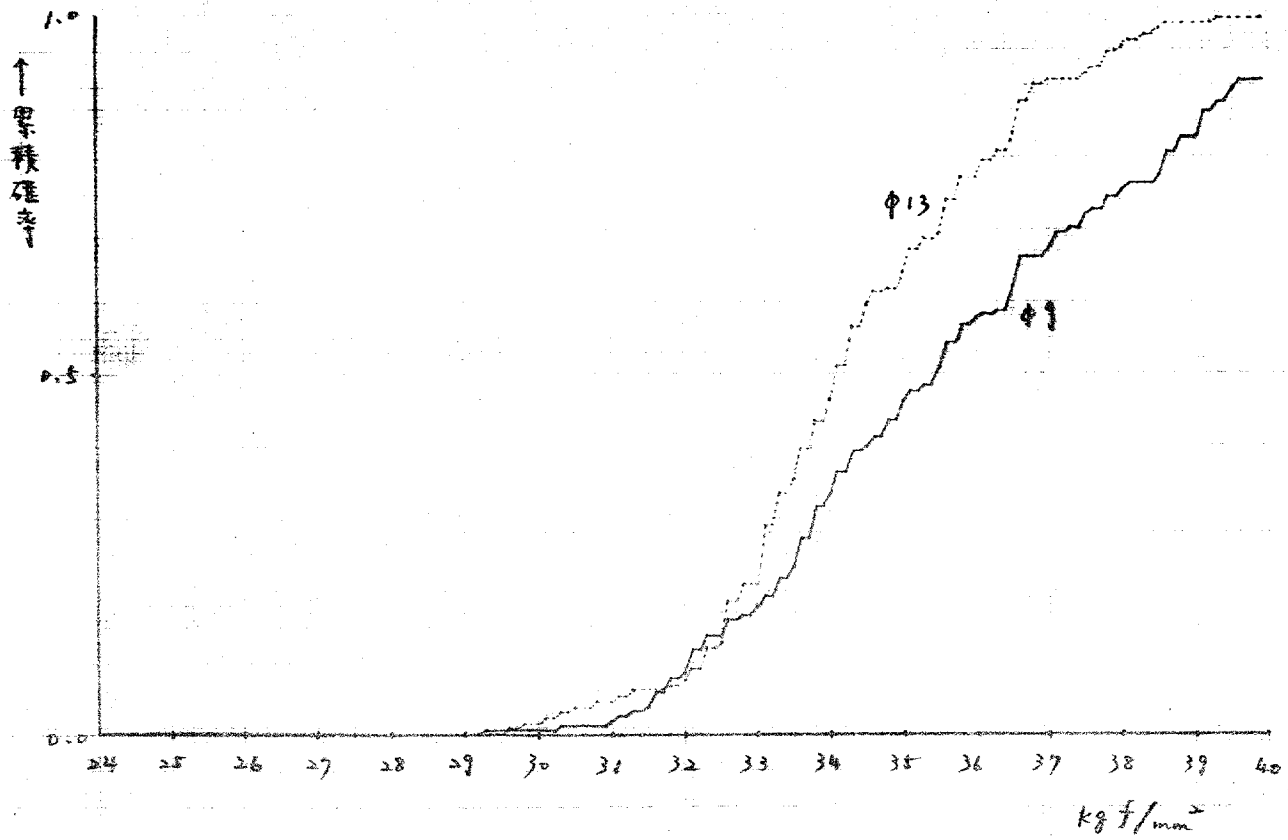


図8-28　降伏強度の累積確率分布（SR24）

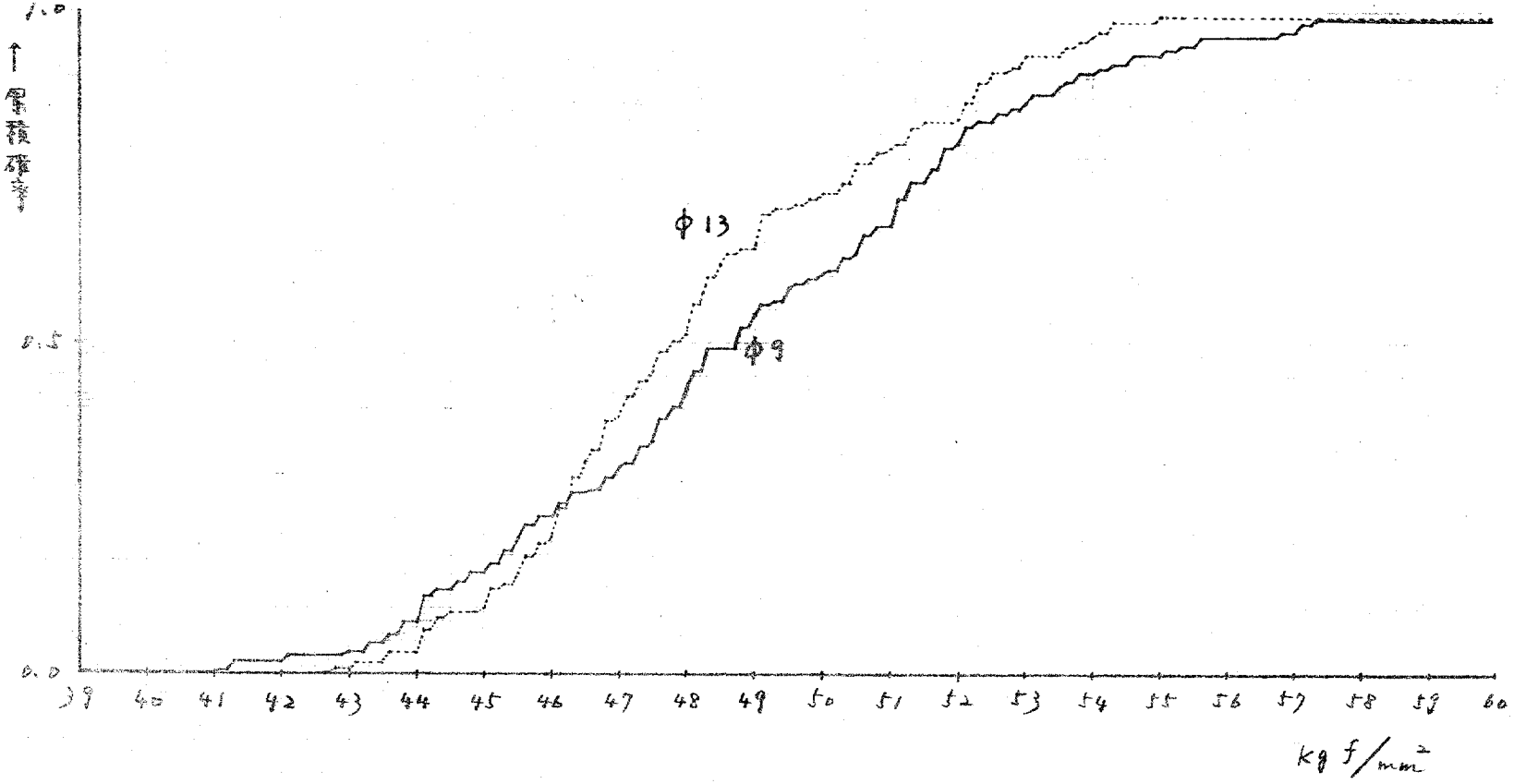


図 8－29　31張強度の累積確率分布（SR24）

表8-3　丸棒(SR24)の強度のバラツキ

径		平均 kgf/mm^2	標準偏差 kgf/mm^2	変動係数
φ9	降伏点(降伏強度)	35.93	3.36	0.093
	引張強さ(引張強度)	49.09	3.97	0.081
φ13	降伏点(降伏強度)	34.47	2.05	0.059
	引張強さ(引張強度)	48.39	3.07	0.063

表8-4　異形棒鋼(SD30, D22)の強度のバラツキ

	平均 kgf/mm^2	標準偏差 kgf/mm^2	変動係数
降伏点(降伏強度)	35.67	2.96	0.083
引張強さ(引張強度)	54.62	3.88	0.071

り，これらの条件をみたさないものは降伏点が30kgf/mm²未満のもの4.6%，引張強さ49kgf/mm²未満のもの9.2%となっており，コンクリートなどの品質と比較しても不合格率は高いといえる。

以上の分析は充分なサンプル数を用いているとはいえないが，鉄筋の径，引張強度についてJIS規格を満足していないものが実際の建築工事に用いられる可能性を示しており，品質管理を徹底させると同時に構造物の設計時においても鉄筋の品質にバラツキが生じていることを念頭においた設計の必要性があるといえる。

5-3-4 建築生産システムにおけるファジィネス解析

5-3-4-1 建築生産システムからみたバラツキ

現実の建築物には建築の構造力学的特性のみならず，建築物を支える地盤の条件などの外部要因の関与する部分が非常に重要であることは論を待たない。現実の建物の耐震性能を考える際にはこれまで力学的側面にのみ限定としてとらえられる要素の他に，施工の精度，設計過程での計算誤差などの影響が重要であるとされている。信頼性または安全性という場合，通常は現実の建物の物理的特性に主眼をおいて評価しているが，計画の過程での誤差，施工精度等の要件をこの耐震性能と関連して取り上げる場合，いかなる分析が可能であるかが問題となってくる。

ここでは信頼性の概念自体を物理的タームで明確に定義するということではなくて，むしろこうした純粋に物理的なアプローチ以前の安全概念の曖昧さを明確にするひとつの試みとして，設計，施工の過程をふまえた分析を行おうとするものである。

また，安全性を単に静的な荷重と強度の関係のみでとらえるということさえも，構造解析の立場からは問題があり，むしろ動的な力学的挙動，地盤との相互作用，靭

性などの面から総合的に検討しなければならない。従って，たとえばRC構造物などの設計用水平震度の下限値として0.2という値の規定も小堀（文献13における討論）が指摘したようにそれらの総合的な要因を考慮した換算静的荷重ということができる。すなわち，計画，設計で用いるべき値はより総合的な視点からとらえた結果をより単純化して用いる必要があるといえよう。

耐震性能の概念の中でとくに重要視されつつあるのは建物の強さそのものとそのバラツキである。とくに信頼性工学の建築構造物への応用がなされるにいたって，現実の建物の強さのバラツキという統計量の測定の問題が生じている。コンクリート試験体などのサンプルから着実にこうしたバラツキの計測が行われているとはいえ，単なる部材ではなく，建物全体としての強さのバラツキを，統計的な分析が可能なまでのデータを確保するまでにはかなりの研究を待たなければならないとされている。

そこで耐震性能についてのとくにそのバラツキについての情報をいかに確保するかという問題が生じる。ここでは次のような観点に立ち，これまでの研究者，技術者などの経験を充分活用してその中から現実の建物の耐震性能とそのバラツキを計測しようとするものである。こ

の観点は図8-30に見るごとく，現実の建物の構築に関与する研究者，技術者などの集団をおしう現実の建物に対する観測評価者であると考える点である。すなわち，長年にわたって施工や設計にたづさわってきた経験者，また行政サイドから現実の建物について関与してきた人々，また研究面から構造安全性を支えてきた人々は現実の建物に対して，より深い認識と現実的な意味での耐震性評価をしうる集団であると考えられる。現在，地上の最も高度の観測システムは人間自身であるといわれているが，いわば経験と勘によるこうした現実の建物に対する知見は多くの情報を備えているにちがいない。

こうした現実の建物及び設計者，施工者，行政，研究者，さらにそれをとりまく不確定な要因をひとつの不確定要因の多いシステムと，それに対する一種の観測評価システムと考えることができる。従って，我々の作業は観測評価システムからの観測という手続きによってこれらの関係者の主観的耐震性評価を計量することにほかならない。しかし，主観的な評価をより正確に計量するには従来用いられている確率論ないしは統計的枠組では充分でない面もある。以下では各専門家の判断をアンケート調査によって分析するが，分析方法としては各専門家

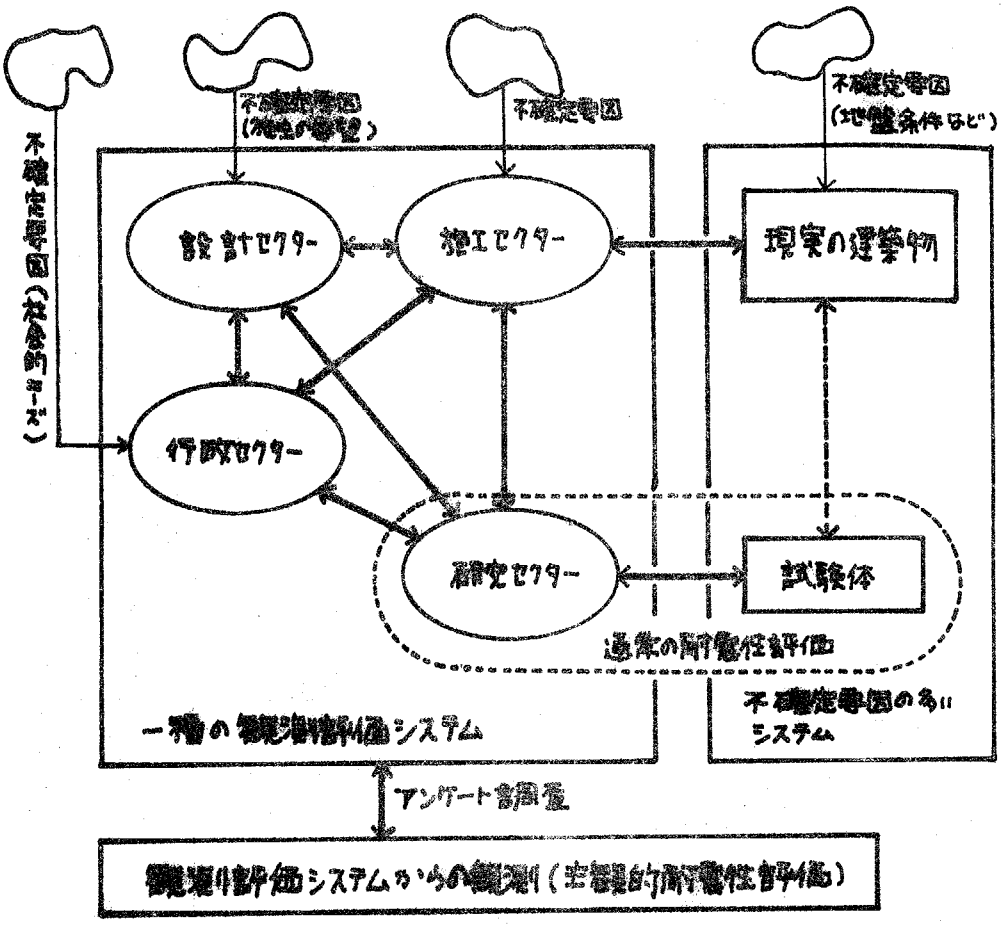


図 8-30 建築生産システムとアンケート調査による主観的耐震性評価の位置づけ

の判断といういわゆる主観的な観測値をより厳密に対応できるような方法が望ましい。そのため，まずこうした主観的評価に対応する理論的な検討を行う。

5-3-4-2 ファジィ分布

不確定さを通常ランダムネスとしてとらえ，数理的には確率として解析することは周知のことであるが，このような定式化がすべての不確定現象に可能であるかどうかは問題があるところである。

また，あらゆる現象を集合論の形で記述できるかどうかについても問題があるといえよう。

前者の問題の例としては，たとえば以下の場合がある。白と黒の石のはいった箱の中からランダムに石を取り出すとき，どちらの石が取り出されるかは確率論的な意味でのランダムネスであるが，白と黒の石がよごれてしまい，ひとつ取り出したものの，その石がどちらの石であるかという問題になると，その判定をめぐって曖昧さが残る。この種の曖昧さは確率論的に解決できるとはかぎらない。

また，後者の例としては，集合の定義と密接に関係するが，集合とはその集合に属するものであるのか否か

が判定できるものでなければならない。しかし，たとえば老人などという概念を考えた場合，何才以上が老人であるとか，どういう性質を有するものが老人であるというような老人であるか否かを明確に判定することはできない。しかし，このような曖昧さをもつ概念は不用かというと，むしろ具体的な場では必要な概念であるといえよう。

以上の2つの問題に対しMITのZadeh（文献13）はランダムネスに対しファジィネス（Fuzzyness）という概念を提案し，ファジィ集合論という数理的な理論体系を構成し，その後，多くの研究者によって具体的な問題への応用を試みており，理論的体系自身も発展している。ファジィ集合論において通常の四則演算及び「およそxがx_*である」程度を確率論と同じように定義し，その最大値を与えるメンバーシップ関数として以下の関数を得ることができる。

$$f_{x_*}(x) = \beta \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_*)^2}{2\sigma^2}\right] \qquad \cdots (4-36)$$

こうして得られた「およそx_*である」というファジィ集合のメンバーシップ関数$f_{x_*}(x)$をファジィ平均x_*，ファジィ偏差σのファジィ分布という。さらに

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_{x_*}(x)\,dx = 1 \qquad (4-37)$$

をみたすようにβが定められているものを正規ファジィ分布という。このとき，(4-37)式より

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$$

となり，(4-37)式をみたす正規ファジィ分布は

$$f_{x_*}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-x_*)}{2\sigma^2}\right] \qquad (4-38)$$

となり，確率論における平均x_*，標準偏差σの正規分布に一致する。しかしながら，正規分布が確率量を扱っているのに対して正規ファジィ分布は主観的な量を扱っていることを区別しなければならない。

以上の結果はある種の分布をもつランダムな量の組み合せの結果得られる量が正規分布に近づく（中心極限定理）という結果の主観的な実にまで拡張ということができよう。すなわち，主観的な機構を経てきたものも，他の何らかの情報がない場合には正規分布と同じような形でそのバラツキが計量できることも示すものである。しかしながら，ここで用いた条件をゆるめると他の分布型のファジィ分布も考えられるが，ここでは論じない。以下，このファジィ分布を応用するに際して必要な事項を

整理しておく。まず，以下の式で定義される積分を累積ファジィ分布という。

$$F(x)=\int_{-\infty}^{x} f_{x_*}(t)\,dt \tag{4-39}$$

とくに，$x_*=0$，$\sigma=1$ のファジィ分布を標準正規ファジィ分布といい，その累積ファジィ分布を

$$\Phi(x)=\int_{-\infty}^{x} f_0(t)\,dt$$

$$=\int_{-\infty}^{x}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\,e^{-\frac{t^2}{2}}\,dt \tag{4-40}$$

さらに，

$$\Omega=\frac{\sigma}{x_*} \tag{4-41}$$

をファジィ変動係数と呼ぶ。

5-3-4-3 ファジィ信頼性

構造物のファジィ信頼性または破壊ファジィネスは，前項までの準備のもとで次のように定義することができる。耐力についての主観的な判断にもとづき，定められたファジィ分布がファジィ平均 u_R，ファジィ標準偏差が σ_R であり，同様に荷重についてもファジィ平均 u_S，ファジィ標準偏差が σ_S が定められているとき

$$P_f=\int_{-\infty}^{\infty} f_S(x)\cdot\int_{-\infty}^{x} f_R(y)\,dy\,dx \tag{4-42}$$

をこのシステムの破壊ファジィネス

$$L = 1 - P_f \qquad (4-43)$$

をファジイ信頼性と呼ぶ。この式は通常の信頼性について主観的なバラツキも考慮に入れ，なおかつ各分布型を正規分布として取り扱う場合の信頼性と一致する。従って，通常の意味での信頼性の中に主観的な量が介在する場合は，ここで定義したファジイ信頼性と考えるべきである。しかしながら，混乱のないかぎり，以下ではファジイ信頼性を単に信頼性と呼ぶことにする。ところで，(4-42)式は(4-40)式の結果を用いると，

$$P_f = \Phi\left(-\frac{u_R - u_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right) \qquad (4-44)$$

となる。

以下ではこれまで整理した理論的枠組を用いてアンケートから得られる専門家の主観的な判断のデータを解析することを試みる。

5-3-4-4 バラツキ調査の概要

先に述べたように，耐震性能及びそのバラツキを行政分野，施工分野，設計分野，教育研究分野の各専門家に対して各分野50名程度のアンケートの回収を期待した調査を行い，その項目は構造種別，耐震性能要因の各側面から耐震性能の相対評価，耐震性能のバラツキ，各耐震性の要因のウェイト，各要因の変化にともなう耐震性

能の変化，各要因の変化の起る割合を調査した。なお，

構造種別としては

1) 木造在来工法
2) 木造プレハブ
3) RC 一般場所打
4) RC 場所打壁式
5) RC 壁式プレハブ
6) SRC 一般
7) SRC・HPC
8) S 超高層ビル
9) S 中高層ビル
10) S 低層建物
11) S 工場体育館等
12) PS
13) 補強コンクリートブロック造

要因としては

1) 設計者のレベル
2) 設計費用
3) 設計期間
4) 施工者のレベル
5) 工費

6) 工期

7) 材料

を取り上げた（調査用紙は資料1に示されている）。

アンケートの配布は各分野毎にサンプリングを行い，表8－5にあるごとく，4分野合計344サンプルの配布を昭和51年8月に行った。回収は郵送及び直接回収の併用がとられ，質問事項に対しての説明が調査期間及びそれ以後にわたって行われた。予定の回収期間以後に回収されるものが多く，回収期間は昭和51年11月10日まで行い，各分野合計208サンプルの回収があり，そのうち調査1においては計196の有効サンプルが，調査2においては計201の有効サンプルが得られ，その内訳は表8－5に示されている（各調査項目の細項目における部分的な未解答は，先の表では有効票として記されている）。有効サンプル数の率は，この種の調査としてはかなり高いものといえよう。とくに施工分野については回収を郵送によらなかったこともあり，高い有効率となっている。

5－3－4－5 各構造別の耐震性能とバラツキの単純分析

(1) 各構造の3分類別耐震性能

調査用紙1において，各構造種別についてその耐震性

表8-5　アンケート回収状況

各分野	アンケート送付数	返信数（返信率%）	有効サンプル数（有効率＝有効サンプル数／送付数%）	
			調査1	調査2
施工	50	46（92.0）	44（88.0）	46（92.0）
設計	113	58（51.3）	56（49.6）	57（50.4）
研究	125	70（56.0）	68（54.0）	64（51.2）
行政	56	34（60.0）	31（55.4）	34（60.7）
計	344	208（60.5）	196（57.0）	201（58.4）

能を評価者の立場から「良いもの」,「普通のもの」,「悪いもの」に3分類してもらい,それぞれの分類されたものの耐震性能を評定してもらったものをそれぞれ各構造種別における「良いものの耐震性能」,「普通のものの耐震性能」,「悪いものの耐震性能」と呼び,この評価のプロフィールを分析することとした。その結果が図8-12に示されている。いづれもRC一般場所打の普通のものの耐震性能をもとにして標準化している(以後この標準化した値をもって耐震性能と呼ぶ)。その結果RC壁式,SRC一般,超高層ビル(鉄骨)に高い耐震性の評価が与えられ,在来工法による木造,補強コンクリートブロック造に低い評価が与えられている。

また,3分類していることから,良いもの,悪いものの耐震性能と普通のものとの差が図中に表現されている。プレハブ(木造プレハブ,SRC・HPC,RC壁式プレハブ)及びPSにおいては,良いもの,悪いものの耐震性能が普通のものとくらべてそれほどはなれない。すなわち,以後に詳しく分析するが,バラツキが少ないという評価が与えられている。

以上の結果は評価者の評価点の単純平均によるものであったが,厳密にはこの平均のとり方に問題がないわけ

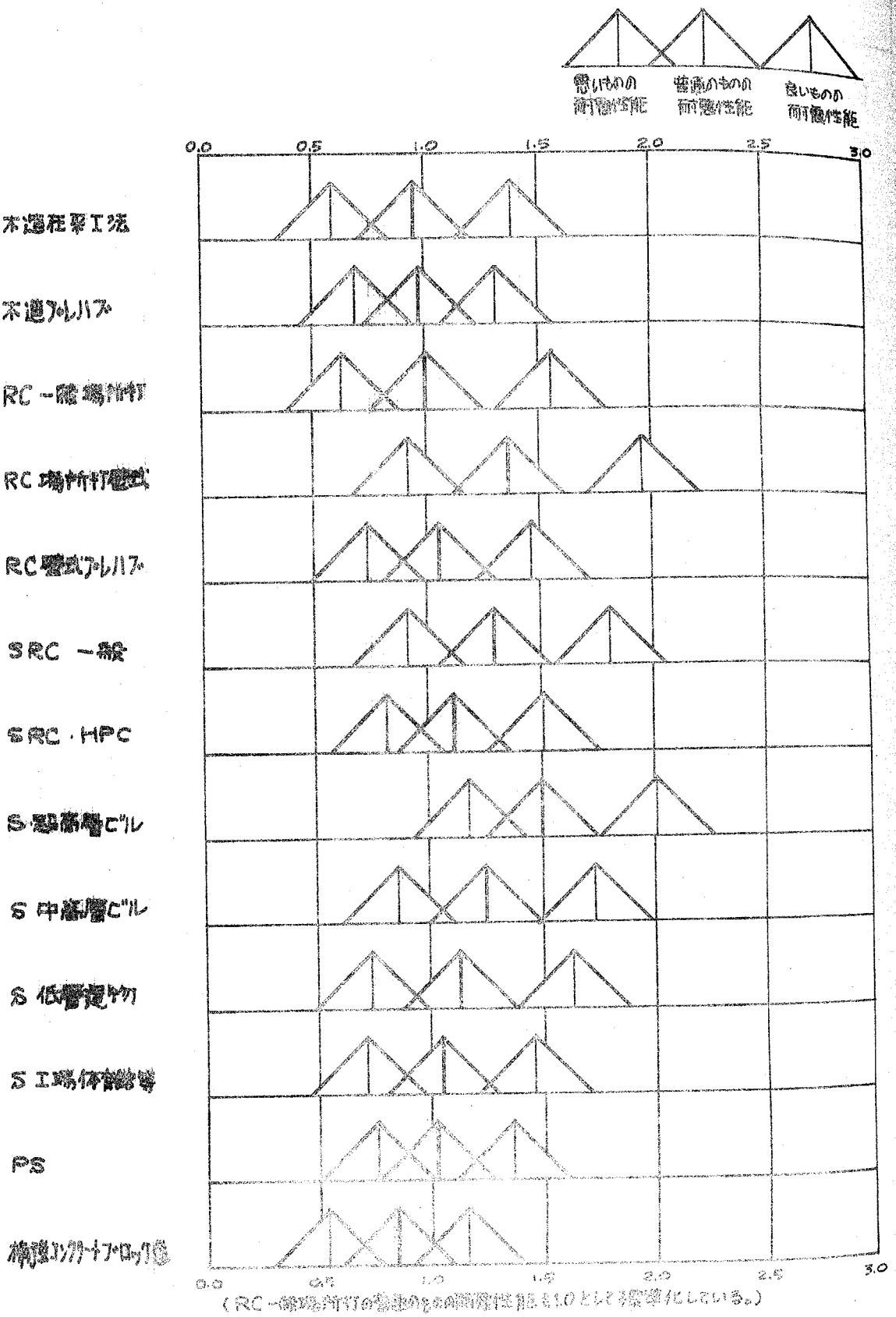


図 I-3.2 各構造の耐震性能（2次診断）（1981マンアル）

ではない。というのは，いづれも各構造物間の相対的な評価にはかならない，すなわち，RC一般場所打の普通のものの耐震性能を1.0として標準化しているので，このRC一般場所打のものに対する相対的な比率が評定となっている。比率をとっているためにそれを加算し，算術平均をとるということに問題があるのである。算術平均という演算は相対比率ではなく，その相対差に意味がある場合にのみ有効な量である。従って，こうした観定から平均の意味をとうとなおし，再分析する必要がある。そこで，評価者この評定をx_iとするとき，図8-12にとりあげた意味での算術平均は

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (4-45)$$

ただし，

n；評価者の数

であり，一方，比率という意味を重要視すれば，これにかんして次のような平均が考えられる。

$$x^* = \frac{1}{n}\sum_{i} \log x_i = \log\left(\prod_i x_i\right)^{\frac{1}{n}} \qquad (4-46)$$

これは評定x_iの比率に意味のある場合，その評定の対数値はその差に意味をもってくるので，普通の意味での算術平均をとることが有意義となってくるのである。この

値を対数をとる以前の値にもどすことにより，再び比率の意味をもった平均値を構成できる。すなわち，次の変量

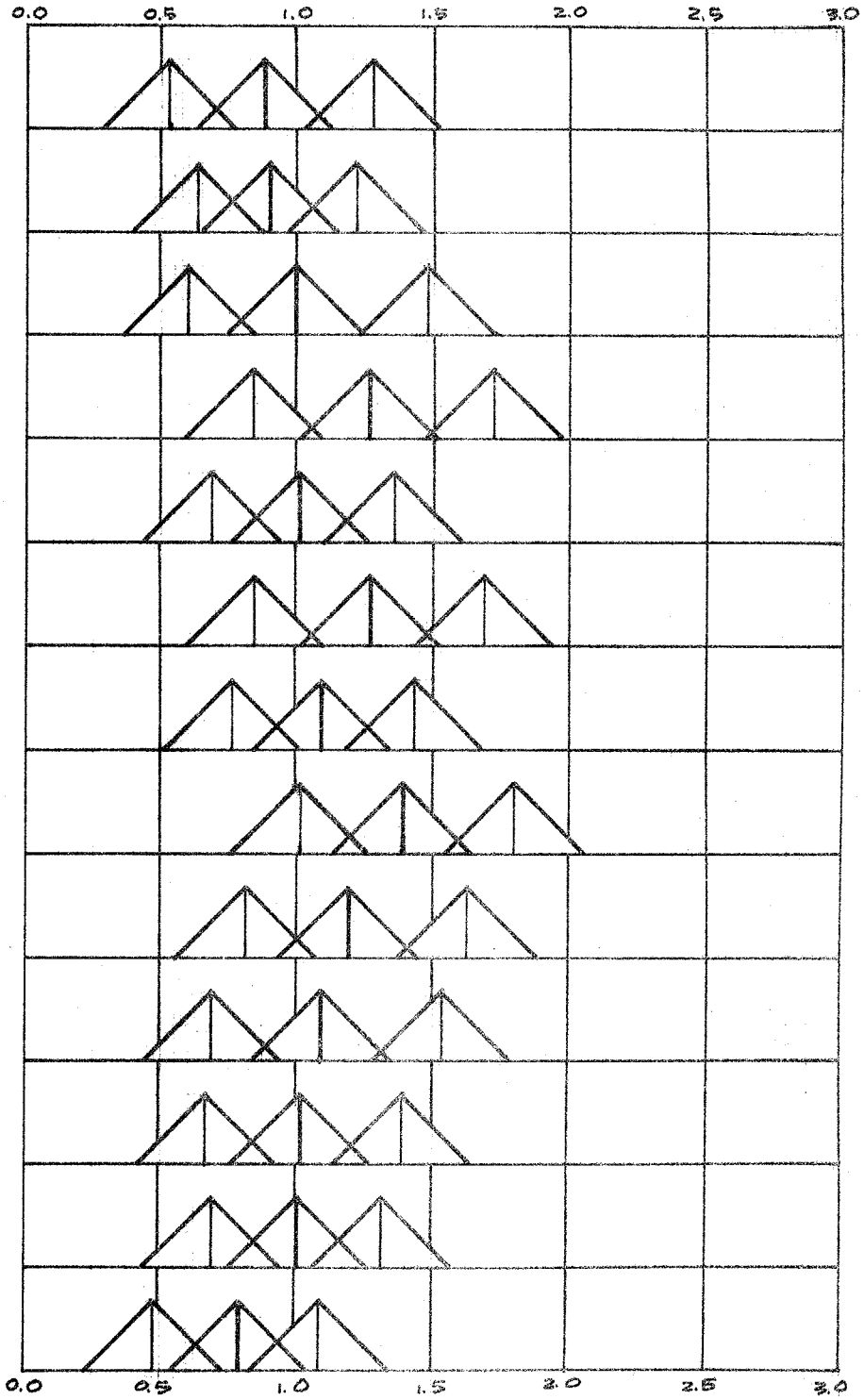
$$x^{**} = \exp[x^{*}] = \exp\left[\frac{1}{n}\sum_{i} \log x_i\right] \qquad (4-47)$$

が比率の意味を重要視した評価実となるのである。この値を図示すると図8－33になる。図8－32に示した性能値にくらべやや低めにあらわれているが，全体の傾向は変っていないことがわかる。従って，以後の分析ではこの比率を重要視した対数平均の分析にはうず，簡便な数値として単なる算術平均をとり，分析することとする。

(2) 各分野による耐震性能の評価の差

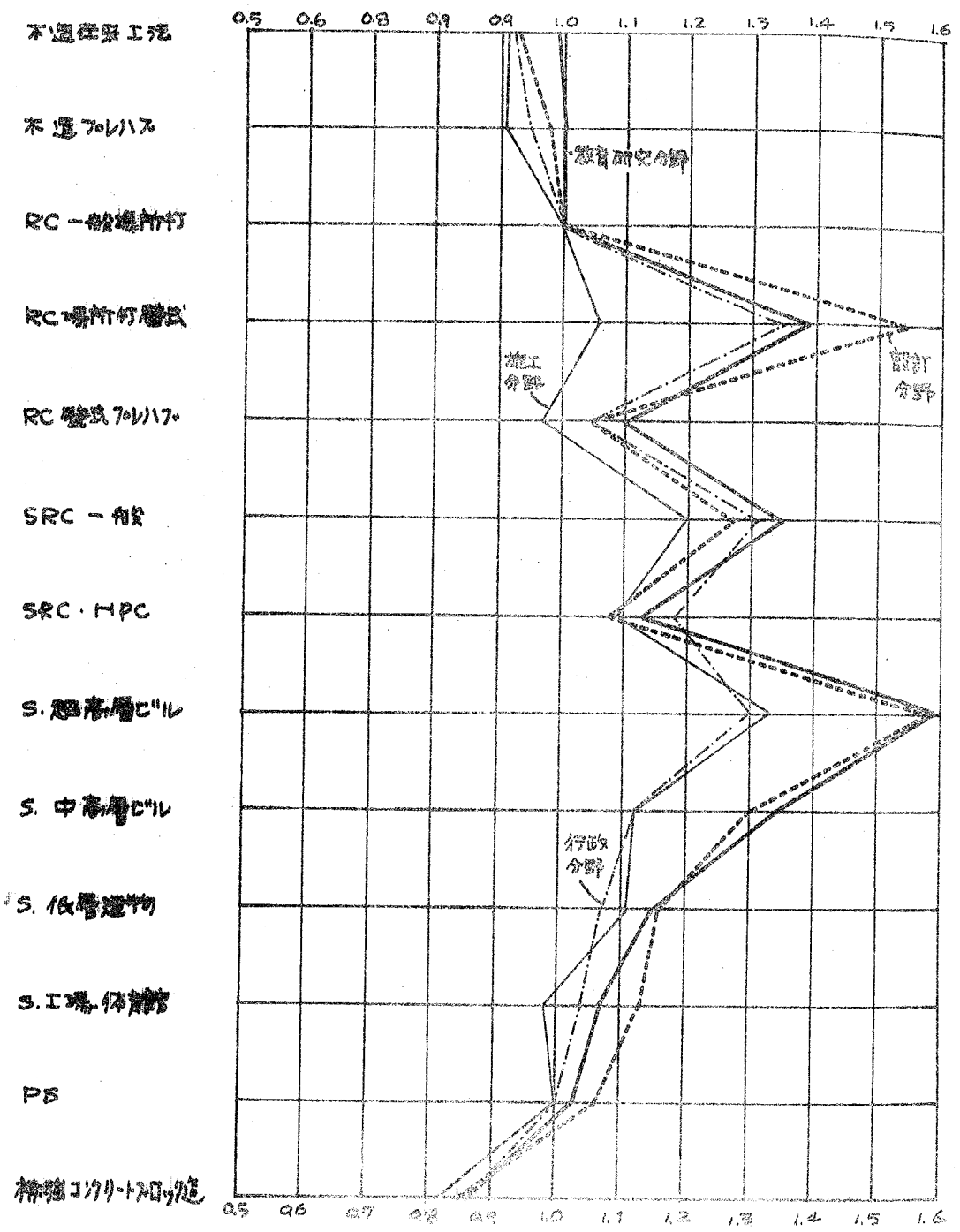
「普通のもの」について各分野からの評価の差も分析しておく。図8－34にその結果が示されている。RC一般場所打を基準にしているために他の構造種別のそれぞれについてみるわけにはいかないが，一応壁式に対する施工分野の評価が低いことは注目されよう。また，標準化というプロセスをふんでいることを考えれば，施工分野の評定の低さはRC一般場所打の評価が高いことを逆に示している。全体の評価の傾向としては，設計，研究分野においてRC壁式，超高層に対する評価が高いこと，施工分野ではRC一般場所打の評価が[illegible]高い





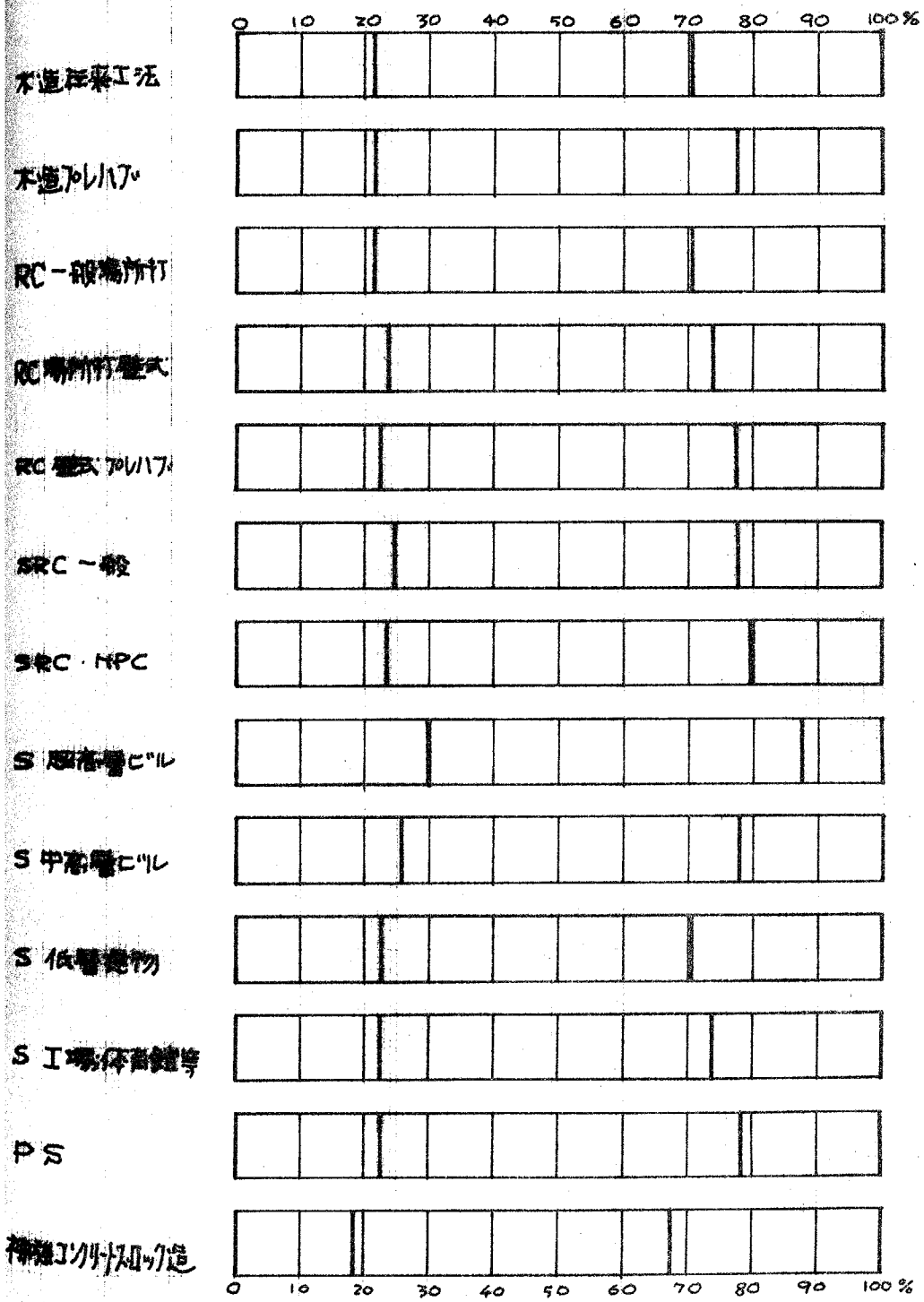
(RC一般場所打の普通のものの耐震性能を1.0として標準化している。)

図 8-33 各構造の耐震性能(3分類別、すべて数平均による。)(196サンプル)



(RC一般場所打を1.0として評価を標準化している。)

図 8-34 各種施設に対する各分野の評価(専門家アンケート)



(左から順に良いもの・普通・悪いもの の割合% が示されている。)

図 8－35　各構造の良いもの・普通・悪いもの の割合 (1.96サンプル)

こと，行政分野では鉄骨に低い評価が与えられていることが注目される。しかし，評価のプロフィールは各分野とも非常に似ているといえる。

(3) 各構造の3分類比率

先に述べたように，評価者によって各構造種別毎に良いもの，普通のもの，悪いものに3分類してもらったが，その割合をみると1.3と図8-35のようになる。この図から超高層，鉄骨中高層には良いものの割合が大きいとみられており，補強コンクリートブロック造については良いものの割合は少ないとされている。

一方，悪いものの比率については超高層では非常に少ないとされ，木造在来工法，RC一般場所打，鉄骨低層建物，補強コンクリートブロック造には悪いものの比率は大きいものとされている。

5-3-4-6 各構造の耐震性能のファジィ変動係数

(1) ファジィ変動係数の測定方法

先にみたような単純な分析ではバラツキを正確にとらえることはできない。というのは3分類の仕方と分類されたそれぞれの耐震性能は評価者によって異なっており，分類の仕方によって性能値は変るであろうし，性能値の

とり方によって分類の仕方も変るという相補関係にある。従って，ここでは何らかの仮定を設けることにより，この相対的な評価量からより客観的な値をさがさなければならない。

次の我々の視点は，主観的判断にもとづく性能値のバラツキは正規ファジィ分布に近いものとみなせるというものである。というのは耐震性能と呼ぶとき，それは個々の部材の性能ではなく，非常に多くの部材の性能の組み合せによって決まってくる変動値であり，この要素の数が多くになるにつれて，このバラツキを示す確率分布関数は正規分布に近づき（各分布型が同一のとき，中心極限定理によって証明できる），さらに，各評価者の主観的判断をへてきているので，ファジィ分布となることが考えられる（5-3-4-2 ファジィ分布参照）

ので，結局，最終的にファジィ信頼性を調べることにはならず，従って，以下の分析はファジィ変動係数の測定を目標とし，そのため，評価者のバラツキは正規ファジィ分布（以下では数学的には正規分布と全く一致し，主観的なデータを扱っているということは明らかであるので，単に正規分布と呼ぶ）となすと考えてよい。正規分布をとったことによる制約として分布の左右対称性が

考えられるが，この性質は好ましくない実もあるので，分布の左右を別々に分析するという方法を使う。まず，図3-16のような分布において，アンケートにおける「普通のものの耐震性能」はこの分布型のピークとなる性能値であると考え，x_2という数値を与えよう。このように性能値を分類したことにより，次のようなことが考えられる。まず，性能をa_1以上のものを良いもの，a_3以下のものを悪いもの，a_1からa_3のものを普通のものと分類したとすると，a_1から無限大までの性能値の平均値が良いものの耐震性能の評定x_1であり，a_1以上の性能になる程度（横線ハッチング部分）が良いものの割合y_1にほかならない。数式で書くと

$$y_1 = \int_{a_1}^{\infty} f(x)\,dx \qquad (4-48)$$

$$x_1 = \int_{a_1}^{\infty} x f(x)\,dx \qquad (4-49)$$

ただし，

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma_1}\right)^2\right], \quad \bar{x} = x_2 \qquad (4-50)$$

となる。ここで最終的に求めようとするものはファジィ変動係数（以下，単に変動係数と呼ぶ）

$$V_1 = \frac{\sigma_1}{x} \qquad (4-51)$$

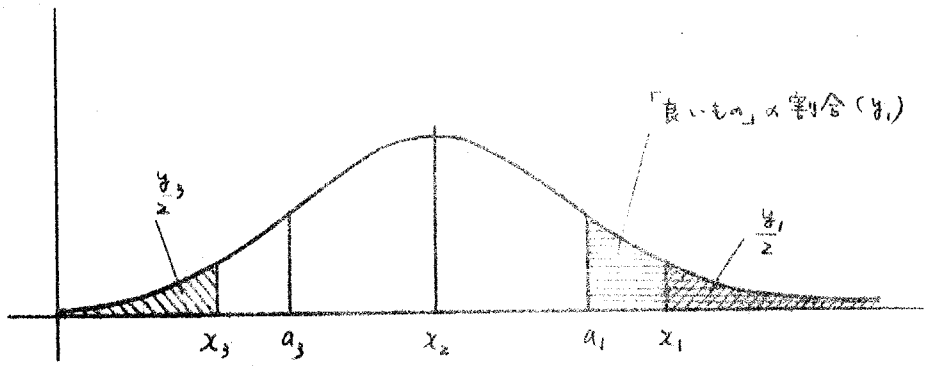


図 8-34　3分類と各性能

であるので，(4－48)式 ～ (4－51)式から変動係数Ω_1を求めることが問題となってくる。図8－36をみればわかるように，この問題は次のように単純にすることができる。

$$\frac{y_1}{2} \cong \int_{x_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_2}{\sigma_1}\right)^2\right] dx \qquad (4-52)$$

ただし，

y_1；良いものの割合

x_1；良いものの耐震性能

x_2；普通のものの耐震性能

この式はさらに標準正規ファジィ分布の分布関数Φ[(注)]を用いて

$$\frac{y_1}{2} = \Phi\left(\frac{x_2-x_1}{\sigma_1}\right) \qquad (4-53)$$

となり，この逆関数Φ^{-1}を用いて

$$\sigma_1 = \frac{x_2-x_1}{\Phi^{-1}\left(\frac{y_1}{2}\right)} \quad \left(\text{or} = \frac{x_1-x_2}{\Phi^{-1}\left(1-\frac{y_1}{2}\right)}\right) \qquad (4-54)$$

が得られる。良いものの割合とその耐震性能から得られる変動係数Ω_1は

$$\Omega_1 = \frac{1-(x_1/x_2)}{\Phi^{-1}\left(\frac{y_1}{2}\right)} \quad \left(\text{or} = \frac{(x_1/x_2)-1}{\Phi^{-1}\left(1-\frac{y_1}{2}\right)}\right) \qquad (4-55)$$

注：$\Phi(x) = \int_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[\quad\right]$

となる。同様のプロセスをへて悪いものの耐震性能及び悪いものの割合から求めることができる。すなわち

$$\frac{y_3}{2} \cong \int_{-\infty}^{x_3} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_3} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_2}{\sigma_3}\right)^2\right] dx \qquad (4-56)$$

ただし,

$\Omega_3 = \dfrac{\sigma_3}{x_2}$

y_3; 悪いものの割合

x_3; 悪いものの耐震性能

x_2; 普通のものの耐震性能

Ω_3; 悪いものから推定される変動係数

なる関係から

$$\Omega_3 = \frac{(x_3/x_2)-1}{\Phi^{-1}\left(\frac{y_3}{2}\right)} \qquad (4-57)$$

を得ることができる。また,全体の傾向をつかむためにこの2つの推定値の算術平均が考えられる。

$$\Omega = \frac{\Omega_1+\Omega_3}{2} = \frac{\sigma_1+\sigma_3}{2x_2} \qquad (4-58)$$

(2) 各構造物の変動係数

まず,図8-37には変動係数の算術平均Ωが各構造種別毎に図示されている。この結果,木造在来工法,RC一般場所打,鉄骨低層建物において0.4以上の変動係数

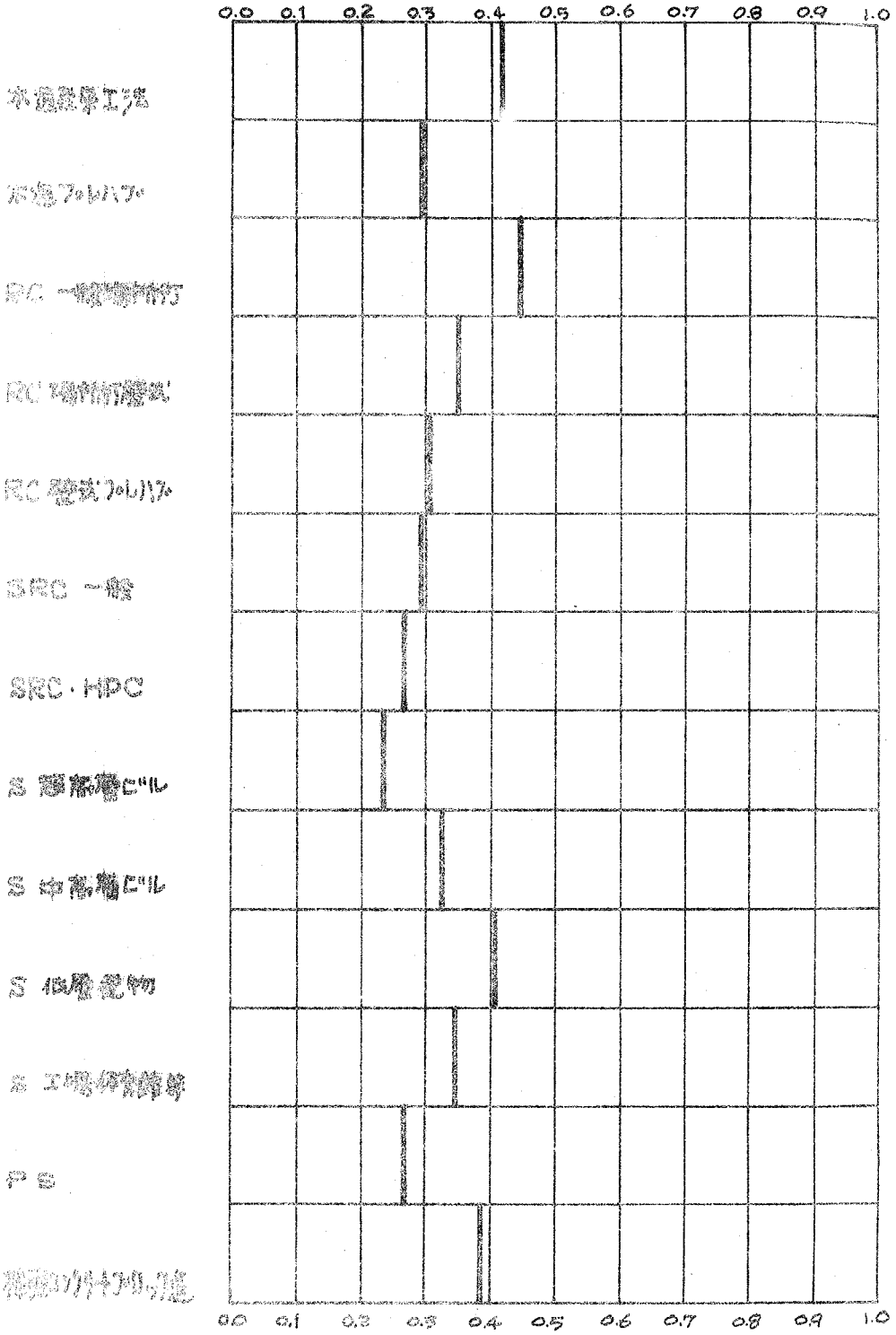
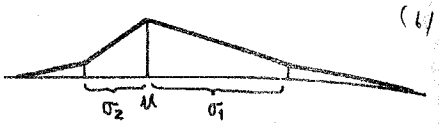


図 3-37 各構造の固有周期の度数分布(196サンプル)

がみられ，これらの構造におけるバラツキの程度が大きいということが示されている。一方，超高層ビル，SRC，HPC及びPSは変動係数の値は低く，バラツキの少ない構造種別といえる。比較的バラツキが少ないと思われるのはこのほかに木造プレハブ，SRC一般であり，いづれも0.3未満の変動係数と評価されている。

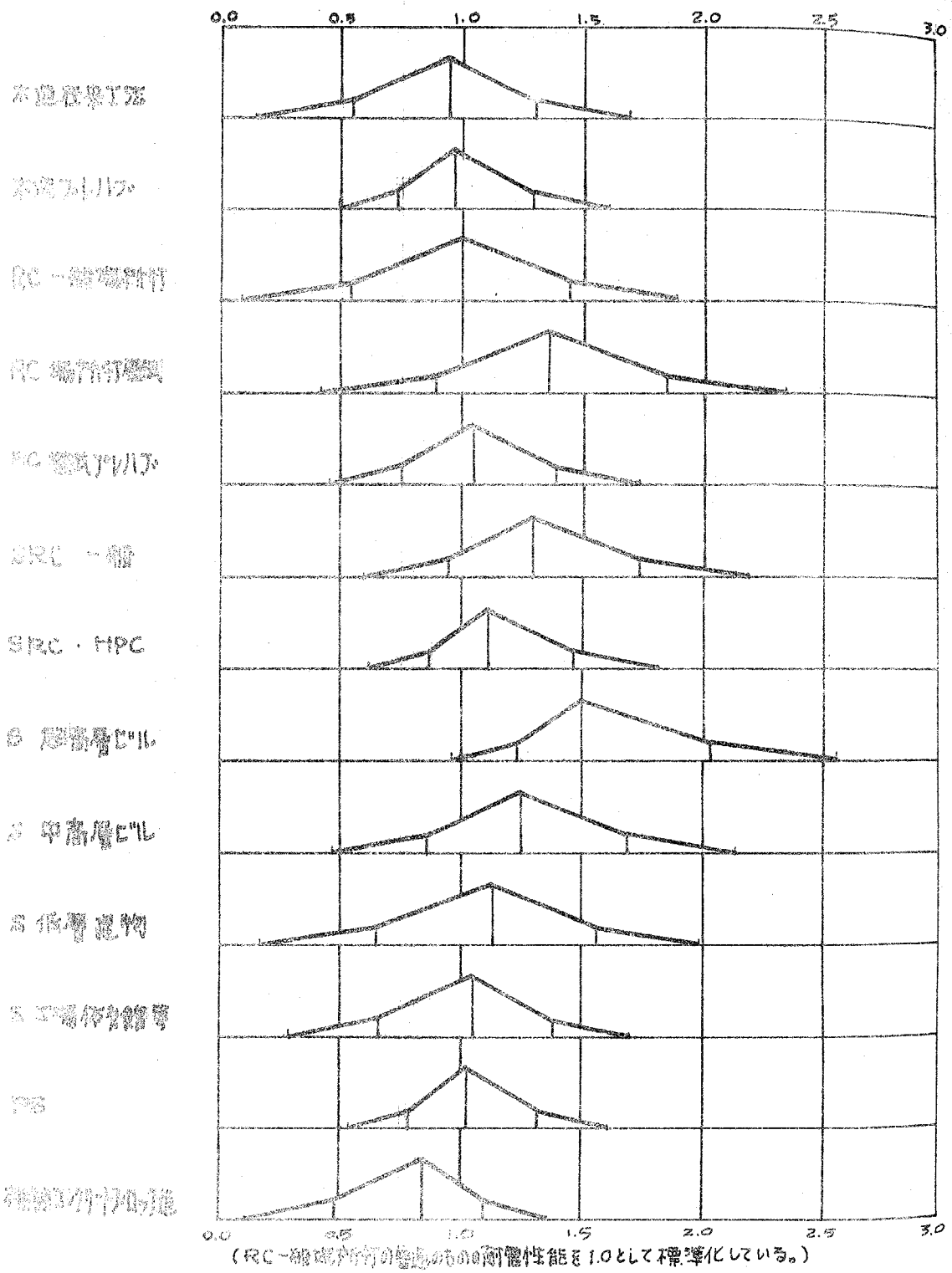
さらに，確率分布型の左右の非対称性，すなわち，良い方向へのバラツキと悪い方向へのバラツキの差という観点から図8-38には良い方向へのバラツキを示す尺度としての標準偏差σ_1及び悪い方向へのバラツキを示す標準偏差σ_2を用いてこのバラツキの分布型が近似的に示されている。この図から性能値が悪くなる可能性が直観的に理解できる。その結果，補強コンクリートブロック造，RC一般場所打，木造在来工法，鉄骨低層建物，鉄骨工場体育館等に耐震性能の悪い方向へのバラツキが大きいという可能性が示された。一方，RC場所打壁式，超高層ビル，鉄骨中高層ビル，PSは好ましい範囲のバラツキとなっていることが図からみてとれる。しかし，RC場所打壁式，超高層ビルが良い方向へのバラツキが非常に大きいことから，省資源あるいは経済性という観点からみれば過剰強度設計となる可能性が図から示唆される。



μ：普通のものの耐震性能の平均値

σ_1；良いものの耐震性能とその割合から推定された標準偏差の平均値

σ_2：悪いものの耐震性能とその割合から推定された標準偏差の平均値



（RC一般壁式構造の普通のものの耐震性能を1.0として標準化している。）

図 5－13　各構造の耐震性能の平均値と標準偏差（196サンプル）

この点PS，SRC・HPC，木造プレハブは非常にバラツキの少ないものとしてとらえることができよう。

(3) 変動係数についての各分野の評価の差

変動係数に対する，すなわち構造物のバラツキに対する各分野からの評価の差を見るために，各分野別の変動係数値を図8-3に示してある。変動係数の評価値のプロフィールは各分野とも似ているが，その値については差が見られる。なかでも行政分野でのバラツキに対する評価は小さいものとなっており，教育研究分野及び設計分野では高い変動係数，すなわちバラツキの多いものと評価される傾向がある。

また，SRC一般，SRC・HPC，超高層，鉄骨中高層，PSには，各分野ともほぼ一致した評価を下していることがわかる。

各分野の変動係数に対する大まかな認識差は，次のような順序として理解することができよう。

行政＜施工＜教育研究＜設計

こうした位置づけは構造に関する設計からその実現までのプロセスと対応づけると興味ある関係が導きだせるように思える。すなわち，計画の初段階に参画する設計サイドではそのバラツキを大きいものとおもわれ，施工，

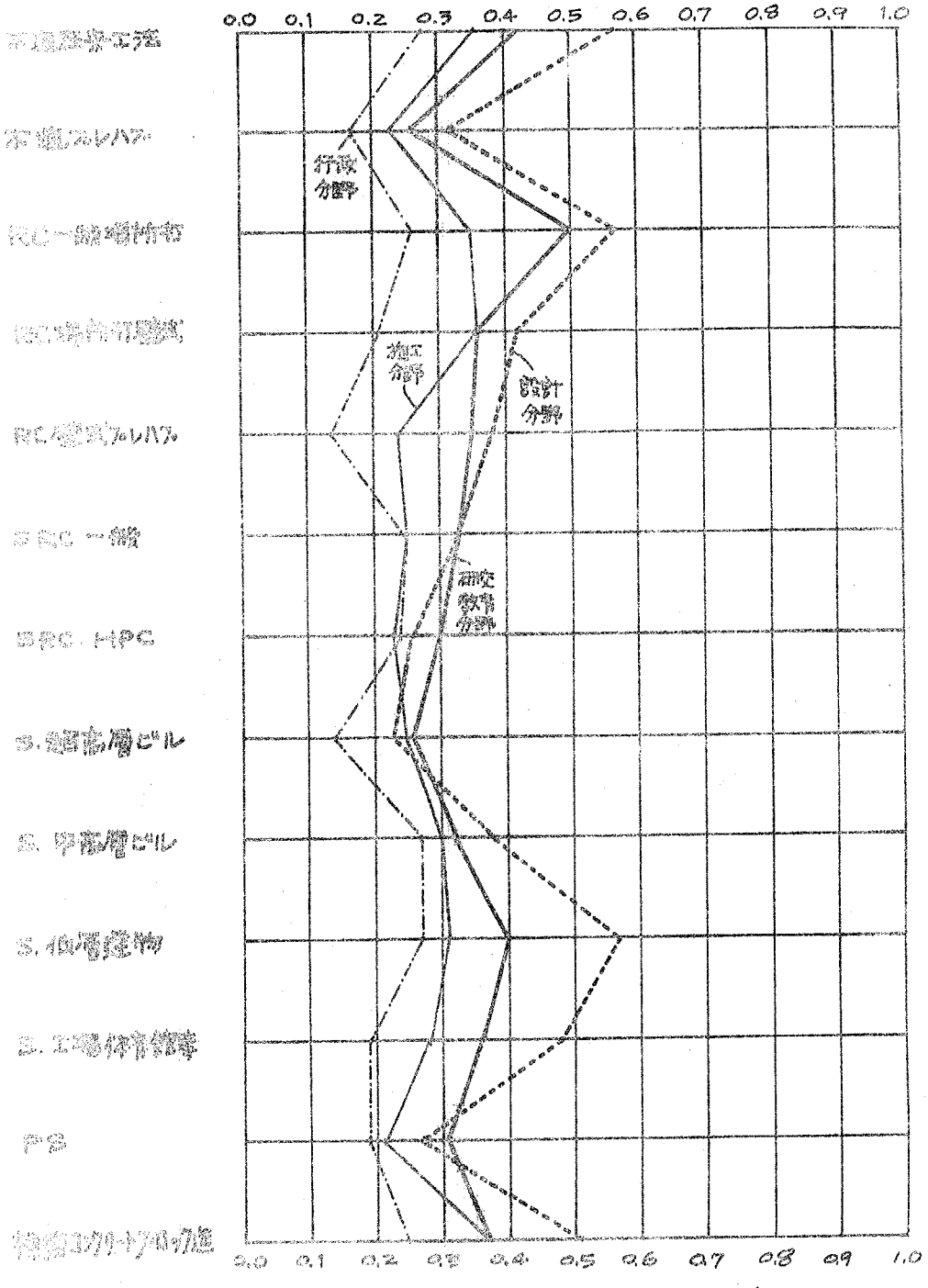


図 8-31 各施設のデータ収集ヒストリの各分野の評価の差

行政という現場ないしは完成に近い形でのものに関与する分野からはバラツキが小さく認識されているということである。教育研究分野の評価は設計と施工の中間に位置していることも興味深い。

(4) 性能値とバラツキからみた各構造の評価

これまでみてきたとおり，耐震性能は大きく変動する量であり，その平均的な性能値だけでは安全性を保障できない。すなわち，そのバラツキというものが同時に考えられてはじめて構造物に対する評価となりえるのである。ここでは，この耐震性能と変動係数を同時に検討するために，図8－40に見られるように各構造物を二次元空間の中に位置づけることを試みた。耐震性能値（各構造種別の普通のものの評価値でRC一般場所打ものを1.0として標準化している）は大きいほど好ましい。一方，変動係数は小さいほど好ましい。従って，図中左上方に位置する構造物ほど耐震性能があると考えることができる。

超高層がここでも高く評価されている。次にRC場所打壁式，SRC一般，鉄骨中高層が高い評価を与えられている。

木造在来工法によるものと木造プレハブとを図中で比較すれば，プレハブ化のメリットは変動係数のひきさげ

（剛申定工方程，耐震性上好ましいことを示している）

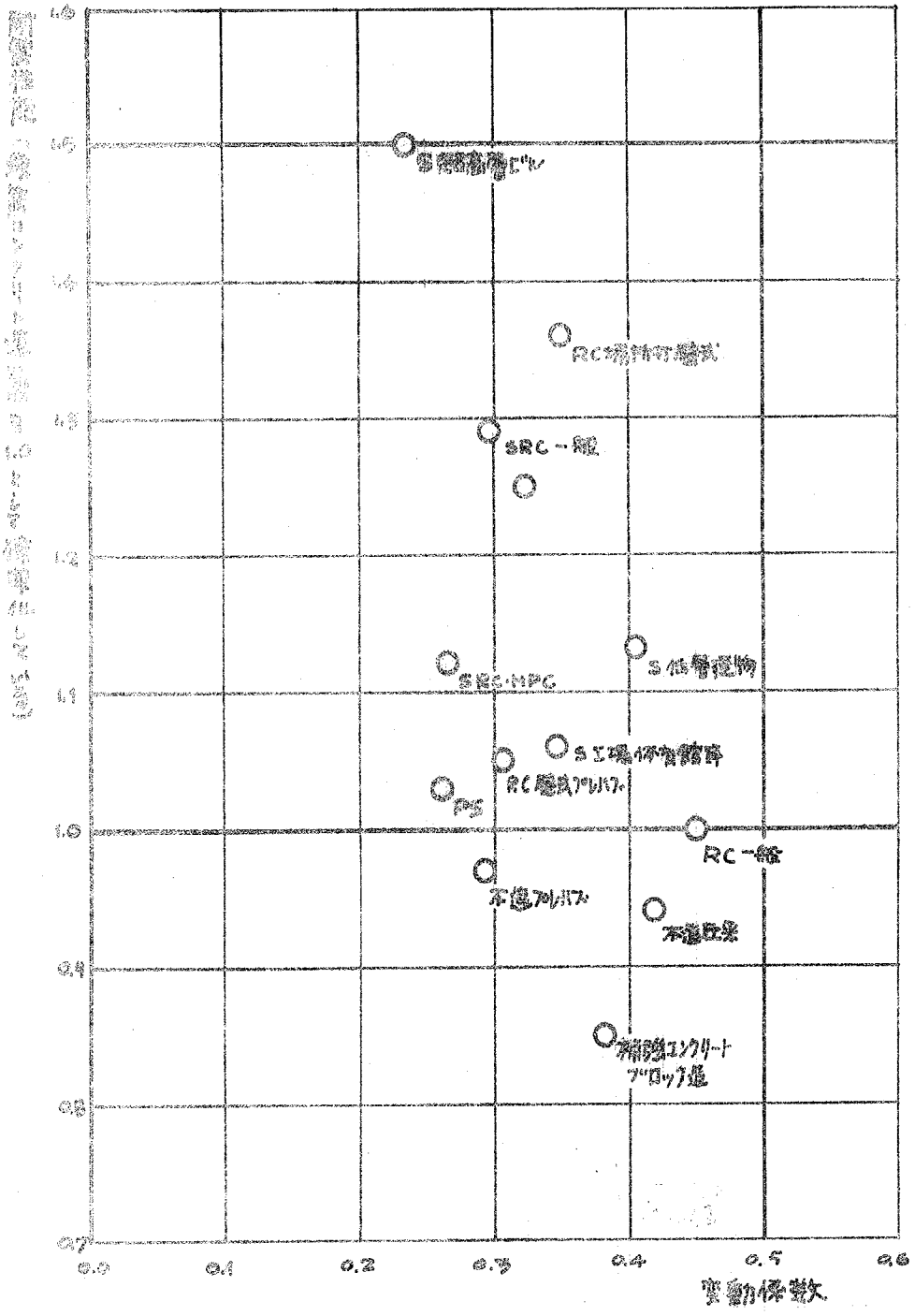


図 3-10 各構造の耐震性能と実動係数

にあるといえよう。プレハブ関係の木造プレハブ，RC壁式プレハブ，SRC・HPC，PSがこの図中でいとつのグループをなしていることは興味深い。補強コンクリートブロックはこの図中でもきわめて低い評価が与えられている。

5-3-4-7 耐震性能の要因分析

(1) 要因のウェイト

耐震性能に及ぼす各要因の影響を調べるために1) 木造在来工法 2) RC造一般場所打 3) RC造壁式プレハブ 4) SRC造一般 5) S造中高層ビルそれぞれの構造種別に対して次の要因についてのアンケート調査を行った。

1) 設計者のレベル
2) 設計費用
3) 設計期間
4) 施工者のレベル
5) 工費
6) 工期
7) 材料

まず，各要因の耐震性能に与える影響の大きさ（以下，

ウェイトと呼ぶ）を調べてみると図8-41のようになる。各構造種別ともほぼ同様のウェイトパターンをもっており，設計者のレベル及び施工者のレベルが大きな要因としてしめていることがわかる。この2つの要因のウェイトがほぼ全ウェイトの40%以上をしめている。要因のウェイト順位はほぼ

設計者のレベル > 施工者のレベル > 工費
> 材料 > 工期 > 設計費用 > 設計期間

となっている。ただし，RC造壁式プレハブにおいては若干そのウェイトが異なっている。つまり，RC造壁式プレハブにおいては他の構造種別にくらべ施工者のレベルのウェイトが大きく，材料のウェイトも大きい。

本造在来工法においては，工費のウェイトが比較的大きいということがいえる。また，S造中高層ビルの場合，設計者のレベル要因が大きいことがわかる。大まかにいえば，S造，SRCにおいては設計要因が大きくひびき，RC造においては施工者のレベル及び材料の要因が大きく，木造においては工費の要因が大きいといえるのではないかと思われる。

(2) 各分野の要因に対する認識の差

各分野からの評価の差……のウェイトについて検討

要因　(1) 設計者のレベル
(2) 設計費用
(3) 設計期間
(4) 施工者のレベル
(5) 工費
(6) 工期
(7) 材料

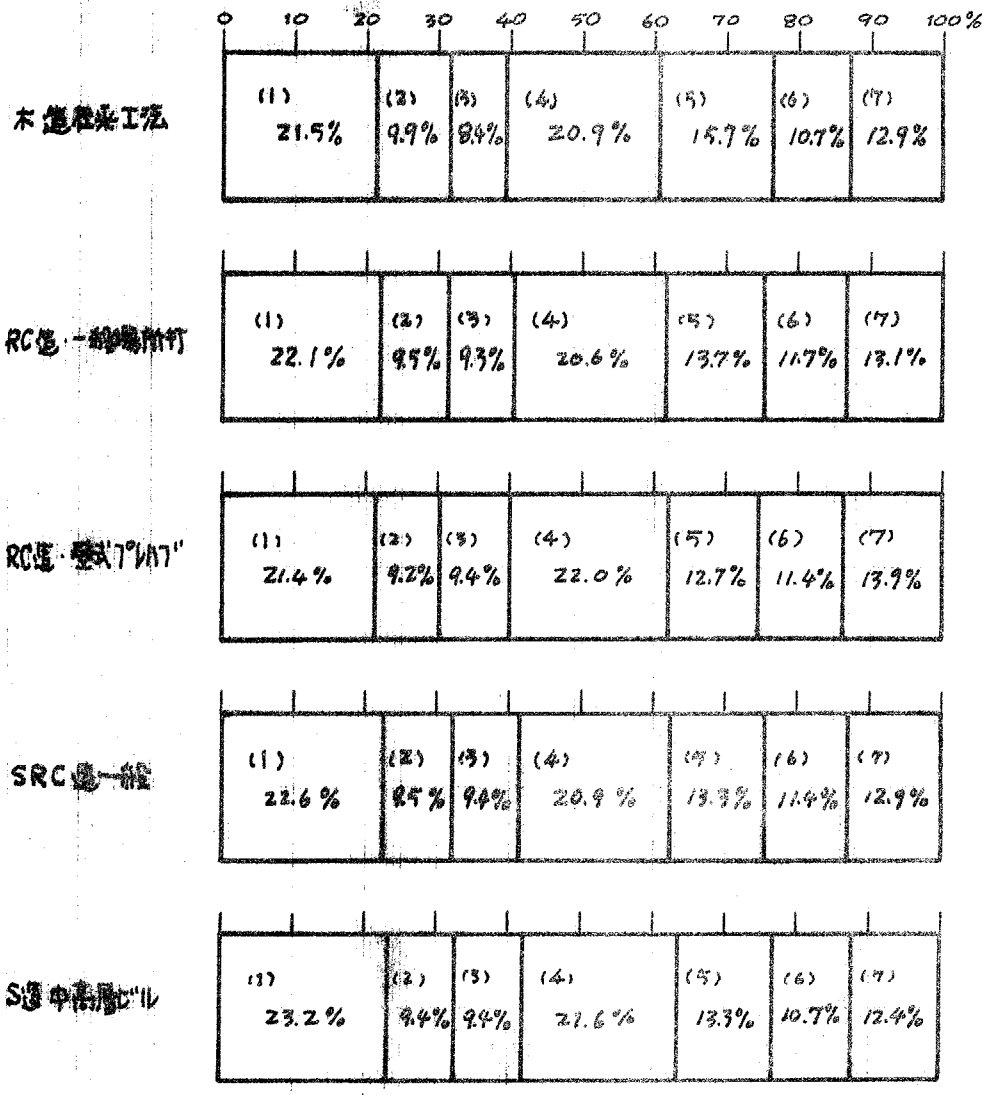


図 8-41　要因の耐震性へのウェイト（201サンプル）

するために設計関係要因及び施工，材料関係要因のウェイトに二分し，各分野の評価を図示したものが図8-42である。この結果，行政分野が比較的設計要因のウェイトを大きくみていること及び教育研究分野がその逆に施工，材料要因のウェイトを大きくみていることがわかる。しかし，これはさほどの大きな差ではない。

(1) 各要因のバラツキに関する分析

調査では各要因のレベルを好ましいレベル，普通のレベル，好ましくないレベルの3つに分類し，それぞれの割合を質問している。そこで，図8-43及び図8-44ではこの各要因における普通のレベルに対する好ましいレベルの割合と好ましくないレベルの割合をそれぞれ図示している。

まず，木造では設計者及び施工者のレベルが高いケースが少ないこと，また，設計費用における条件が好ましくない，すなわち設計費用が低すぎるというケースが多いこと，また，工費についても同様のことがいえる。すなわち，木造の在来工法によるものは金額的に非常に制限された状態で，レベルの低い設計者，施工者によって建設がなされるというケースが多いということを示している。

SANWA NO. 34

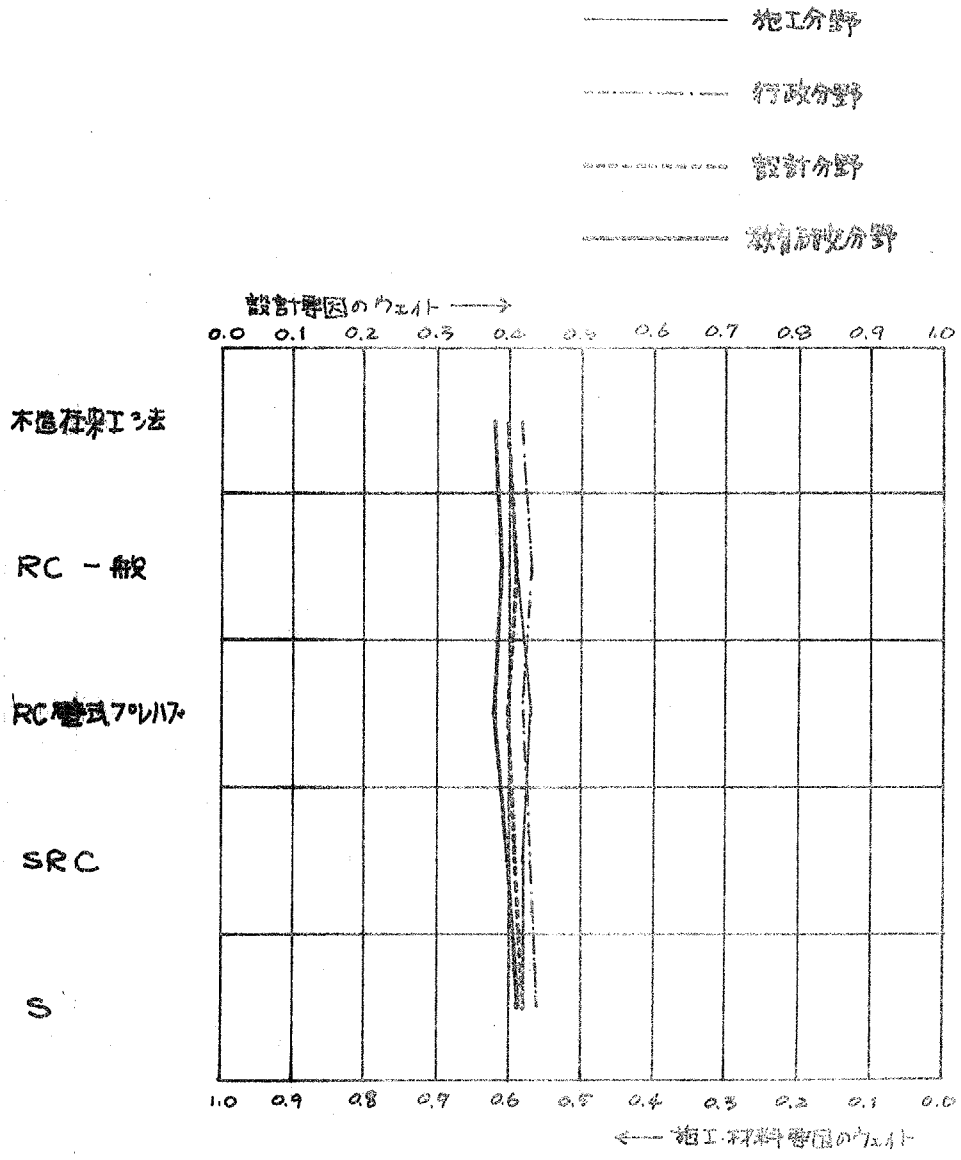


図 8-42 各構造の要因ウェイト・分野別評価

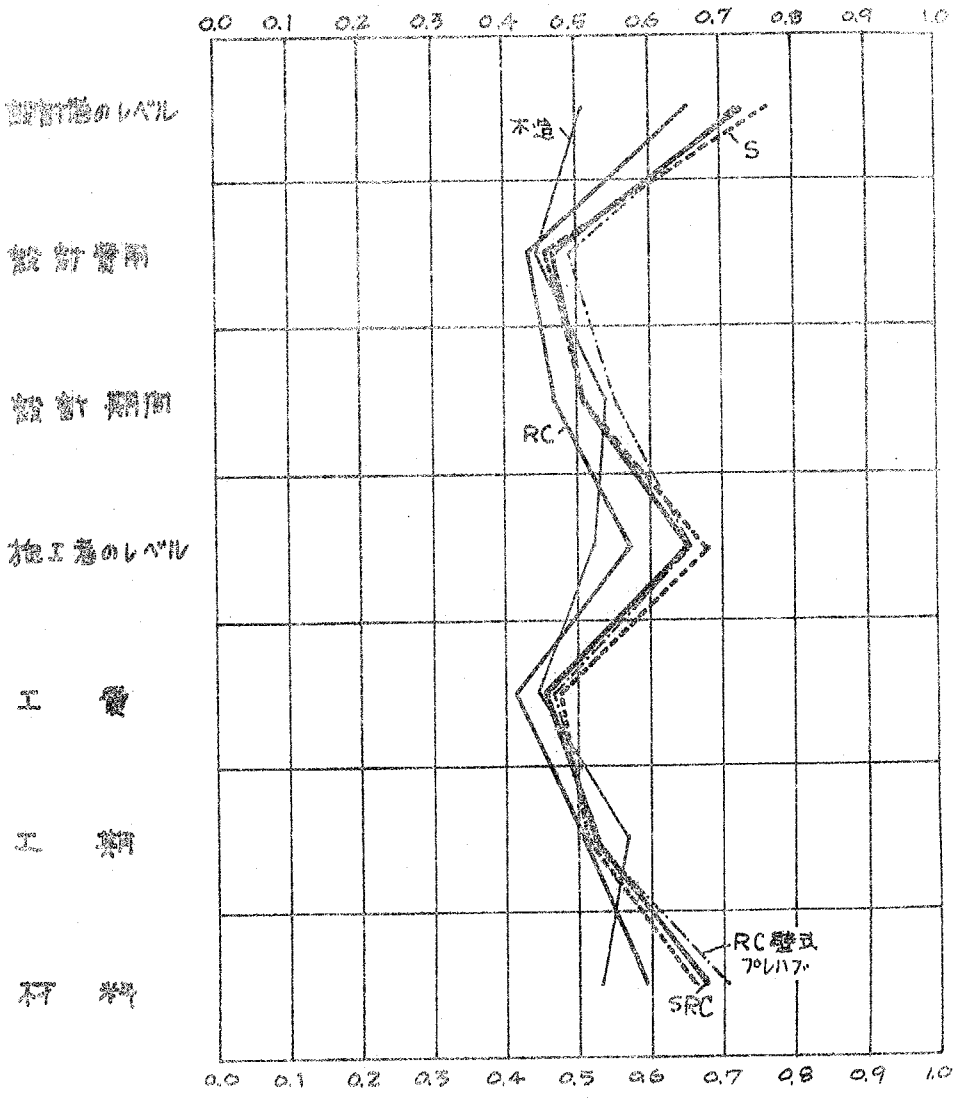


図 8-4) 各要因における各値のレベルに対する好ましいレベルの割合 (201サンプル)

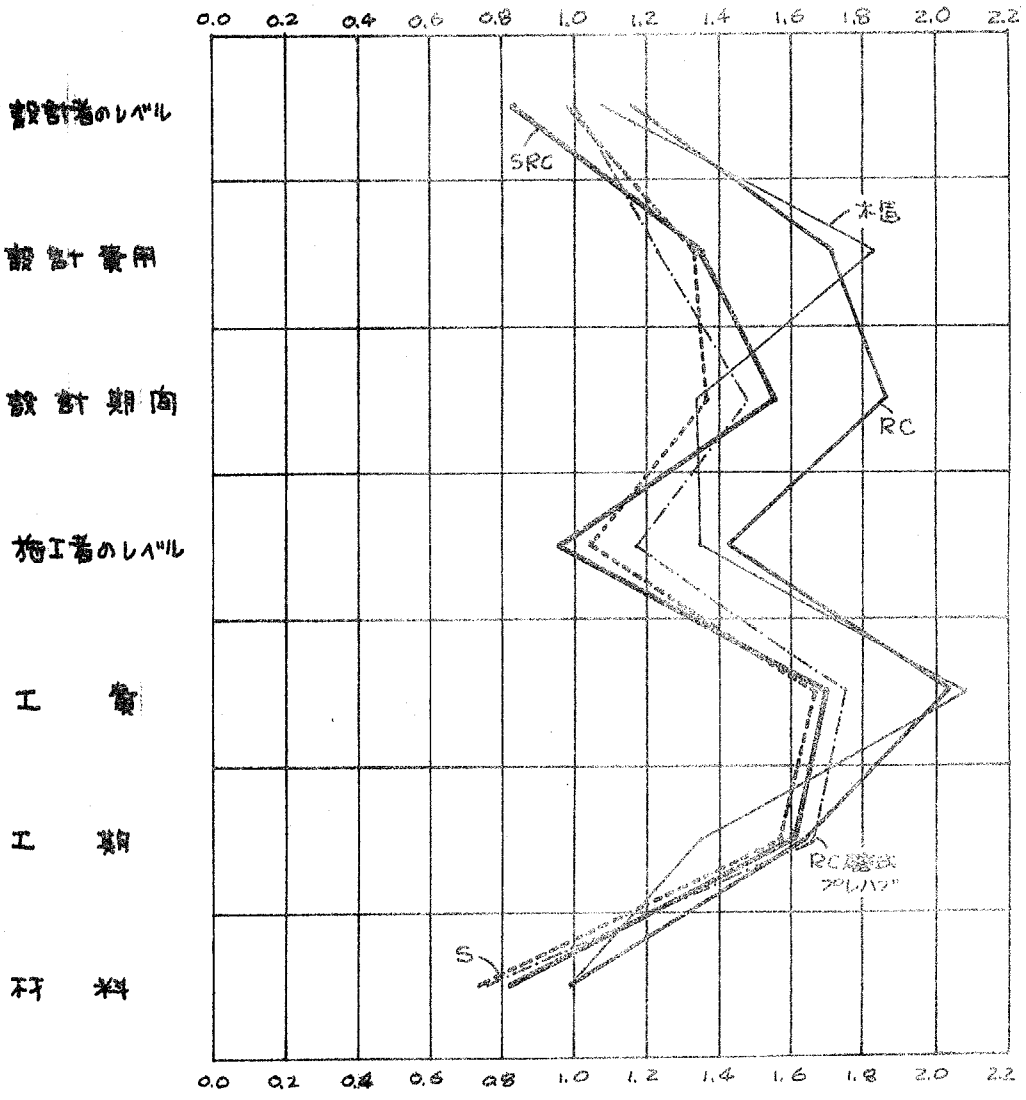


図 8-44 各要因における着目のレベルがすべてのレベルの中で好ましくないレベルの割合 (200サンプル)

RC造のものについては施工者のレベルにおいて好ましい場合が少ないということ，設計期間で好ましくないケースが多い，すなわち，充分な設計期間が与えられていないケースが多いこと，また，設計費用，工費が限定されている場合が多いことを示している。RC造は木造と同様設計費用，工費でしばられているケースが多く，施工者及び設計者のレベルは高いとはいえないということ，加えて，設計期間に制約のあるケースが多いことが示されている。

鉄骨造においては設計者のレベルにおいて好ましいケースが多いということがいえる。RC壁式プレハブ及びSRCについてもこの傾向は似たものとなっている。

以上の分析に加えて，他の要因を一定とした場合の耐震性能のバラツキを調べたものが図8-45に示されている。すなわち，他の要因が変化しないとしたとき，その要因のみが変化すれば，耐震性能自体は変動するわけであるが，各構造種別毎の変動係数を測定したと同様の論理を用いてこの耐震性能のバラツキを計測することができる。すなわち，バラツキが正規分布しているものと仮定して3分類したときの比率をその分類毎の性能値のこの分布型の標準偏差で表わすことができ，これを図示

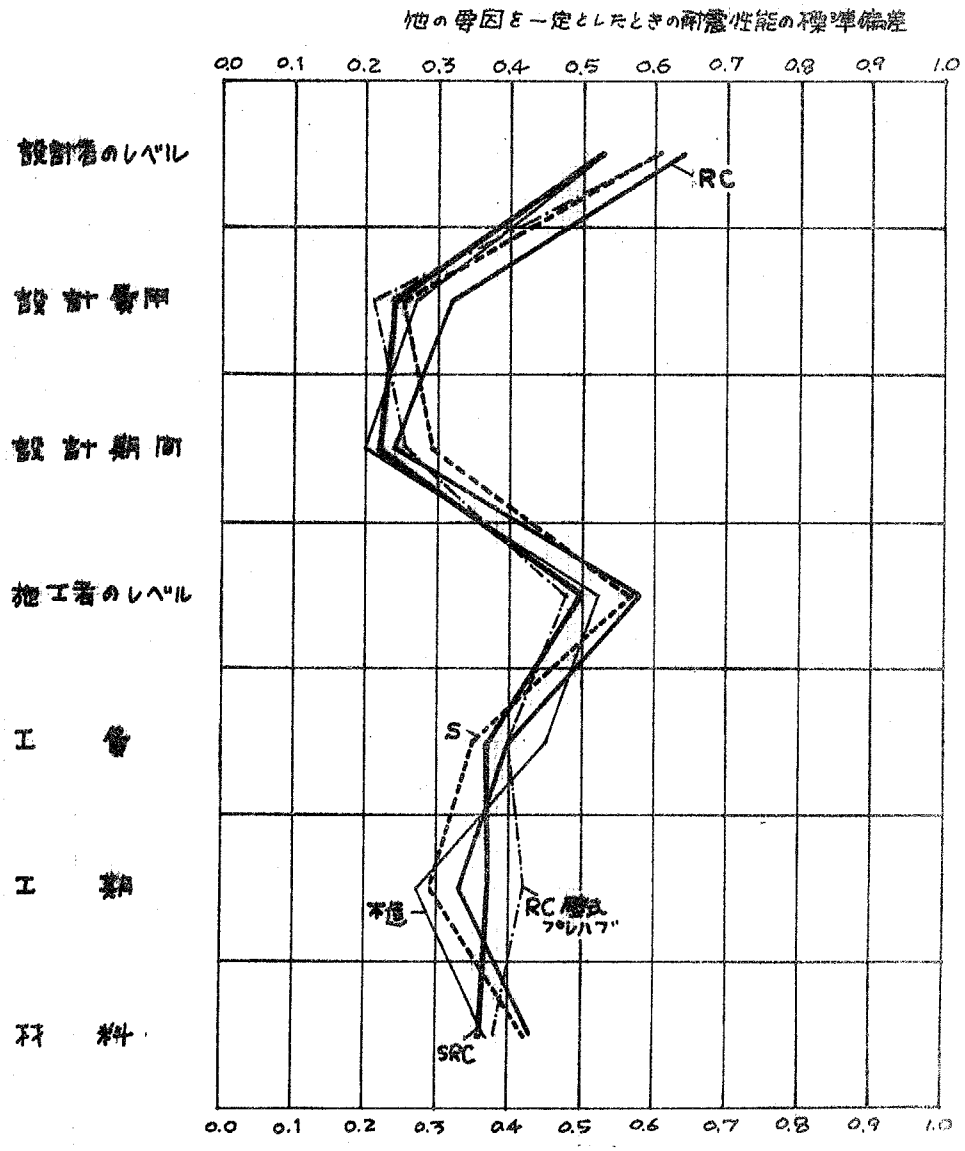


図　8－45　各要因別の偏差（201サンプル）

したものが図8－45となっているのである。

この結果，設計者のレベルに関してはRC，RC壁式，鉄骨のバラツキは多い。しかし，先に見たように，鉄骨のバラツキはむしろ好ましいレベルへのバラツキが主であるといえよう。施工者のレベルについても同様のことがいえる。すなわち，RCの施工者のレベルのバラツキは非常に大きく，危険な問題をはらんでいるが，鉄骨の施工者のレベルについてはバラツキは多いとはいえ，むしろそれは良い方向へのバラツキと考えられるのである。工期についてRC壁式プレハブのバラツキが多いが，この場合は危険なケースがありうる可能性を示唆している。

5－3－4－8 アンケート調査による耐震性能及びそのバラツキに関する評価

現在，建築物全体の耐震性能という概念自体が充分明確にとらえられていないという観点から建築生産システムと耐震性能との関係をシステム論的にとらえることにより，耐震性能の概念を計量的にとらえることを試みた。すなわち，構造物に直接間接的にたずさわっている専門家の直観的な主観的な経験認識を有効にいかし，統計的な立場から耐震性能をとらえようとするものである。そ

の結果，各構造物の耐震性能をそれらの相対的な性能として計測し，RC壁式，超高層ビル，鉄骨中高層ビルが耐震性能上高く評価されており，補強コンクリートブロック造，木造在来工法，木造プレハブが耐震性能上低い評価が与えられていることがわかる。

また，評価から推定されたファジィ変動係数からバラツキのあるなしを調べると，超高層ビル，PS，SRC・HPCがバラツキが小さく，RC一般場所打，木造在来工法，鉄骨低層建物に高いバラツキを有するものがあることがわかる。耐震性能及びそのバラツキの程度を考えると，超高層ビル，RC場所打壁式，SRC一般，鉄骨中高層ビルは好ましい評価が与えられており，RC一般場所打，補強コンクリートブロック造，木造在来工法，鉄骨低層建物，鉄骨工場体育館等には低い評価が与えられている。しかし，同時により強い方向へのバラツキが多く，過剰設計の可能性のあるものとして超高層ビル及びRC場所打壁式が考えられる。なお，これらの分析にもとづくファジィ変動係数の計測結果はすべての構造種別において0.45未満であり，PS，SRC・HPC，超高層ビルにおいては0.25程度，RC一般場所打が一番大きいファジィ変動係数を有しており，0.45程度である。

各要因の耐震性能に与える影響については，設計者のレベル及び施工者のレベルという二つの人的要因が大きなウェイトをしめており，続いて工費，材料の順になっている。木造においては工費のウェイトがやや高く，RC造及びSRC造においては施工者のレベル及び材料のレベルのウェイトが大きく，鉄骨中高層ビルでは設計者のレベルのウェイトが大きくなっているということがいえる。また，木造及びRCにおいては設計費用及び工費の制約が非常に強い場合があること，RCにおいては設計期間の制約されていることが指摘される。また，RC，RC造式プレハブ，鉄骨においては設計者及び施工者のレベルの要因の差が耐震性能のバラツキに大きな影響をもっていることがわかる。

各分野毎の評価の差というものに関しては，設計，研究分野が大きなバラツキをもっていると評価するのに対して，行政，施工分野は比較的小さなバラツキであると認識している点が注目される。要因については各分野間で大きな評価の差はない。

以上のことより，耐震性能を決定する要因として設計者のレベル，施工者のレベルという人的要因の重要性が指摘されると同時に，ノイズ変動係数の測定結果から

その値の範囲が明確となった。

5-3-4-9 既存鉄筋コンクリート建物のバラツキ

先にみた主観的な評価からみたバラツキ（ファジィ変動係数）は材料の変動係数が0.1程度であるからすると，かなり大きなバラツキといえる。従って，このようなファジィ変動係数がはたして現実的な意味をもちうるかという問題が起る。以下ではこのような点から既存鉄筋コンクリートの耐震性能のバラツキが材料バラツキよりもむしろファジィ変動係数で表わされる値に近いことを示し，ファジィ信頼性がより現実的な意味をもっていることを示す。

現行の設計体系にもとづいて設計された建物が十勝沖地震によって震害を受けて以来，いくつかの設計体系の検討が加えられているが，文献15では既存鉄筋コンクリート建物の耐震性判定の建設省建築研究所案により実際に既存建物調査をしている。この判定基準は実用性を考えて簡単な第1次判定から複雑な第4次判定までに段階がつけられている。そのうち，比較的簡単な第2，3次判定について，この調査結果をもとに既存鉄筋コンクリート造建物のバラツキを調べてみよう。

また，ネ2次判定法の概略を示すと

$$S_B = \frac{Q}{W} \cdot \alpha \qquad (4-59)$$

$$\alpha = \frac{R_L}{R_C \times R_e} \qquad (4-60)$$

ただし，

Q；その階の水平耐力（計算式はネ2次，ネ3次判定によって異なる）

W；その階より上部の重さ

α；補正係数 $0.5 \leq \alpha \leq 1.2$ とする

R_L；周もりや壁に顕著なキレツのないもの 1.0，
周もりや壁に斜めキレツのあるもの 1.5

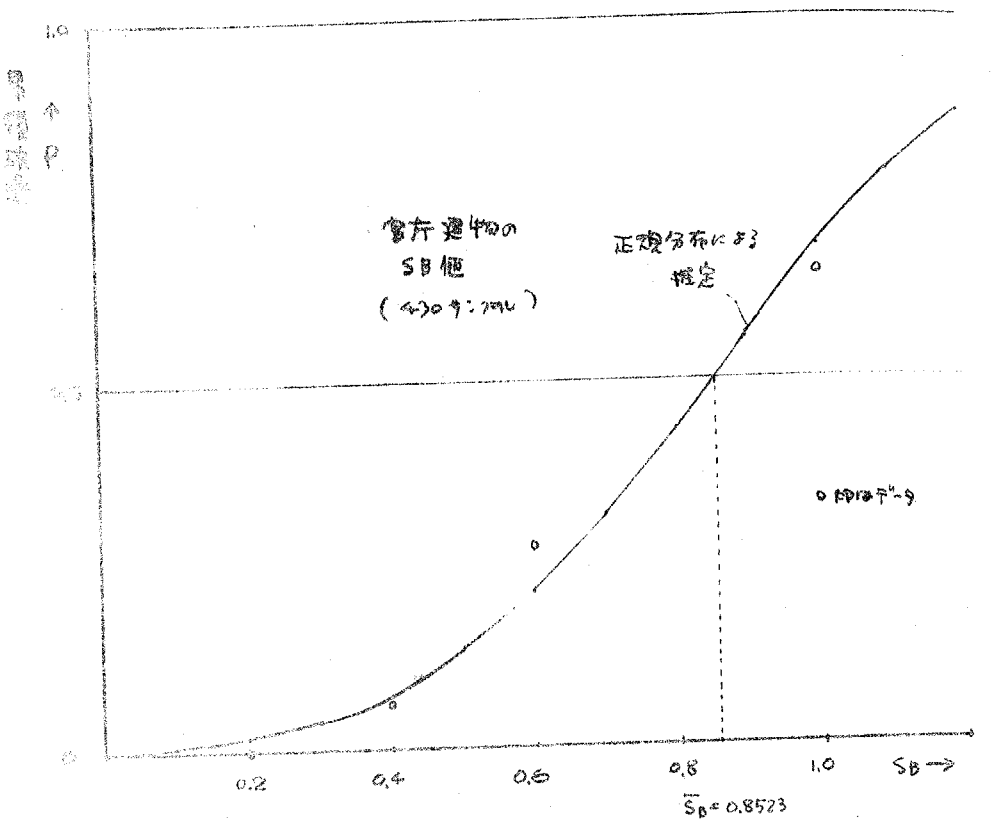
R_e；同一階の柱の可焼長さにかなり差のあるもの 1.5，
平面上及び端上，剛性の分布が比較的一様なもの 1.0

となる。この値 S_B を官庁建物について，調査結果を整理すると表8－6のようになる。この S_B 値頻度分布を正規分布で近似すると図8－46のようになる。また，平均，標準偏差，変動係数は表8－7のようになり，変動係数はいずれも0.5とかなり大きい値となっている。

キレツ性状は正規分布とした場合，データとそれほど適合でないので，ワイブル分布として近似すると以

表8-6 S_B 値の割合(官庁建物の耐震性能バラツキ)

S_B 値	全体	主要都市官庁建物	中小都市官庁建物
0.2未満	0.0	0.0	0.0
0.2以上, 0.4未満	0.063	0.114	0.041
0.4以上, 0.6未満	0.174	0.215	0.165
0.6以上, 1.0未満	0.407	0.342	0.422
1.0以上	0.356	0.329	0.362
(調査候数)	(430)	(79)	(351)



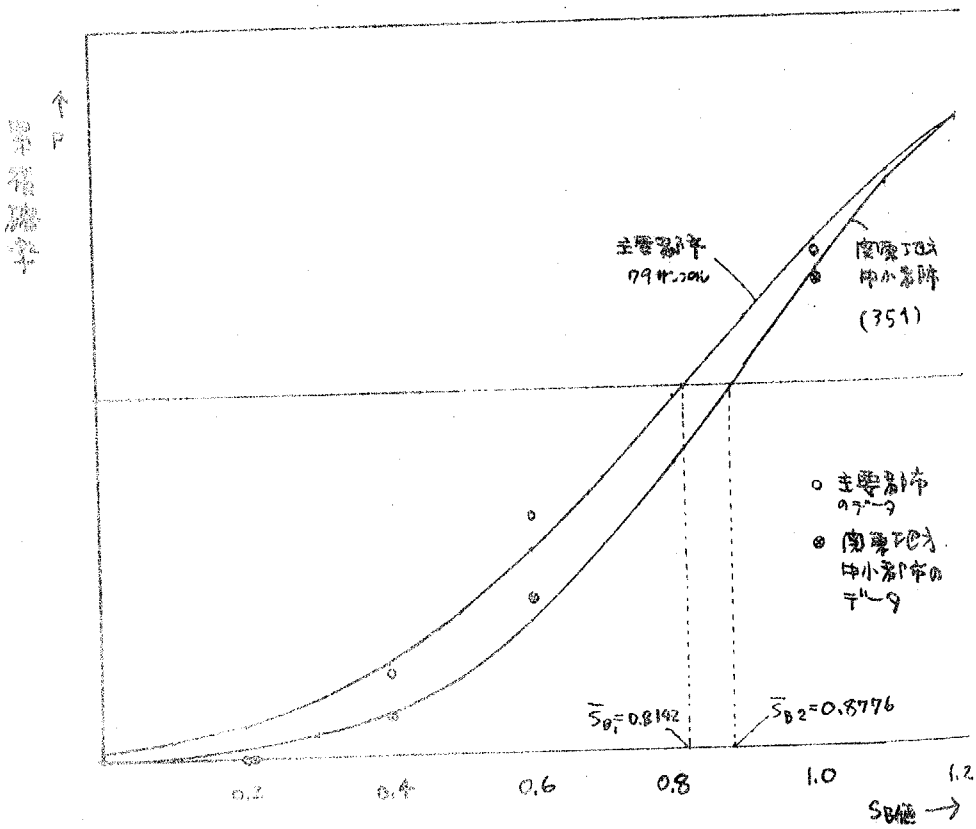


図3-4 官庁建物のSB値のパラツキ(正規分布による近似)

表8-7 S_B 値のバラツキ（正規分布とした場合）

	主要都市官庁建物	中小都市官庁建物	全　体
平　均	0.81	0.88	0.85
標準偏差	0.37	0.30	0.32
変動係数	0.45	0.35	0.37

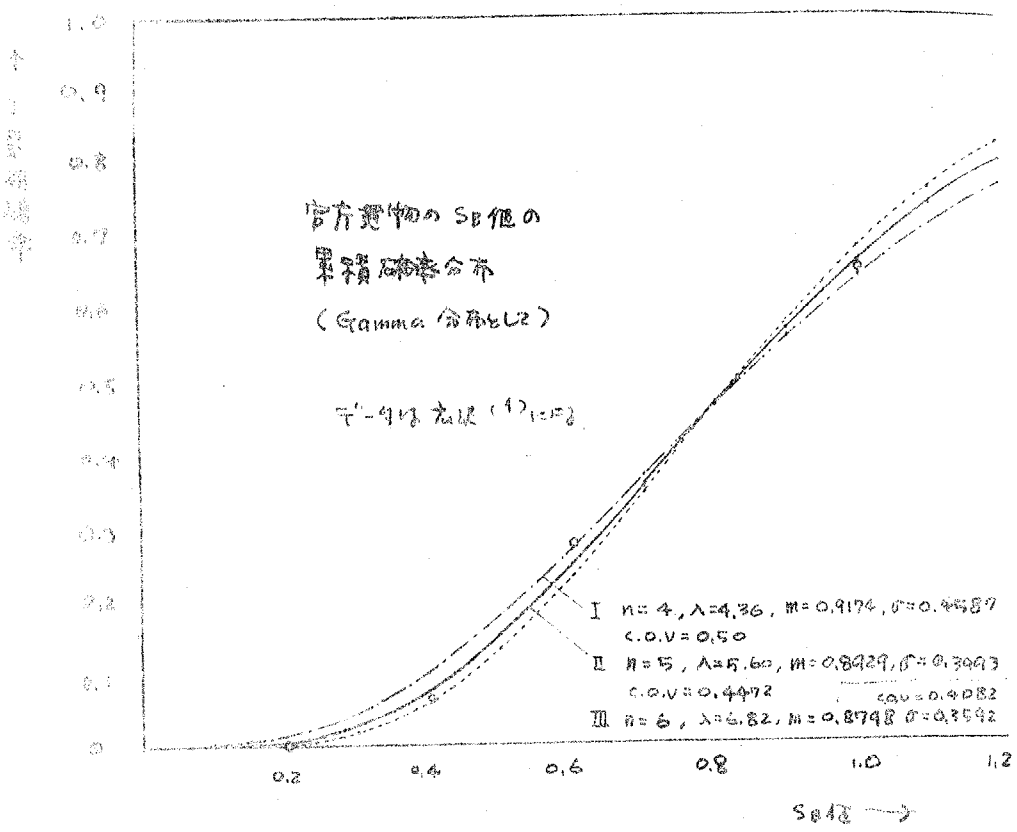


図 8-47 SB値のバラツキ(ガンマ分布による近似)

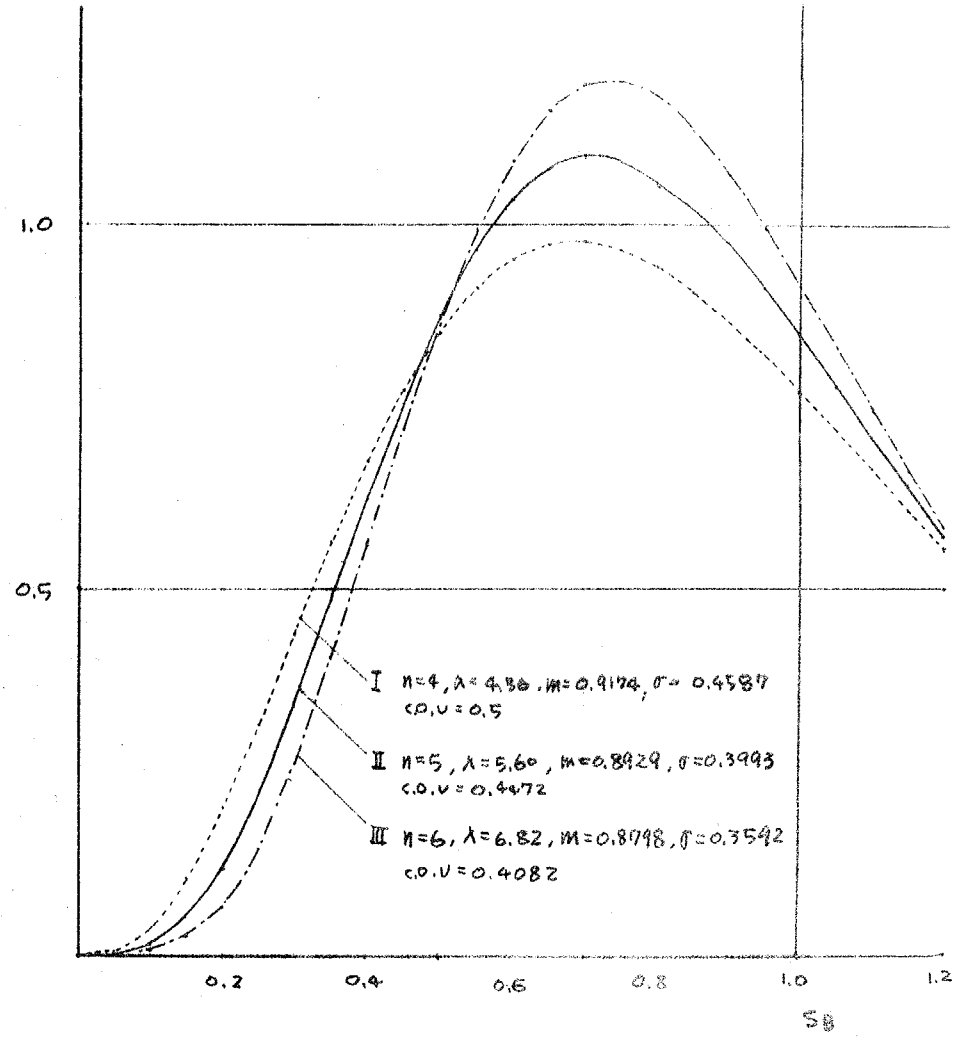


図 8-48 官庁建物の SB 値の確率密度関数 (Gamma 分布として)

$$\varphi(x) = \frac{\lambda e^{-\lambda x}(\lambda x)^{n-1}}{\Gamma(n)}$$

表-4.4のようになる。この場合でも変動係数は0.4～0.5となっており，かなり大きいバラツキといえる。こうしたバラツキは判定基準の内容からもわかるように，構造設計上のバラツキといえよう。判定方法が実用性を目ざし，かつ安全側に判断しているので，これらの値から実際の建物がこのように大きなバラツキをもっているということまで結論することはできないが，従来，考えられているような材料強度のバラツキのみを想定する信頼性解析のみでは不充分であり，より大きなバラツキを前提としなければ現実的でないといえよう。

従って，先に求めたファジィ変動係数が材料の変動係数よりも現実の建物強度のバラツキに近いといえよう。

5-3-5 構造物の信頼性・経済性最適化

5-3-5-1 問題の定式化の方法

構造設計の基本的な目標はより安全な構造物を設計することにあるが，それは限られた制約の中で進められなければならない。従来の最適設計の理論では確定的な不等式で表わされる構造物の非破壊条件式のもとで構造物の全重量の最小化を試みるというものであり，これを信頼性理論の立場から拡張した場合，次のような定式化となる)。

$$\text{Min} \quad W(x) \tag{5-1}$$

subject to

$$P_f(x) \leq P_{f*} \tag{5-2}$$

ここで，xは各部材の設計変量（たとえば断面積など）を示すベクトル，$W(x)$はxとしたときの全重量，$P_f(x)$はそのときの構造物の破壊の確率，P_{f*}は安全の基準となる破壊の確率

すなわち，破壊の確率を定めてその値以下となるとき，最も重量の小さいものを求めるというものであった。

しかしながら，上記の定式化には次のような問題がある。

1) 鉄骨造などの場合には重量と建設コストにはほぼ一定

の関係があり，(5-1)はそのまま経済性を表わすが，鉄筋コンクリート造などの場合，コンクリートと鉄筋という複合材であるため，重量のみで表わすことに問題があり，さらに型枠工事費などが工事費にしめる割合は無視できないので，適切でないといえる。

ｲ) 破壊の確率を表わす $P_f(x)$ はその確率分布型の選択によって大きく変化し，かつ多くの研究者によって述べられているように設計，施工のいわゆる主観的バラツキを考慮すると，$P_f(x)$ の値はかなり少のあるものとなり，(5-2)式の意味は曖昧となる。

ﾛ) 破壊の確率の下限値（基準値）としての P_{f*} を合理的な手続きで決定するためには，安全に対する価値観などの問題があり，現段階で社会的に了解可能な破壊の下限値 P_{f*} を定めることは困難であるといえよう。

以上の点から，むしろ，次のように考えておくことの方が現実的であるといえる。

「建設コストの制約（以後，予算制約額，ないしは予算額という）がもうすこしあれば，その制約のもとでよ

効果的に建物の信頼性を高めるように設計変量を決定する。」

この考え方を定式化すると

$$\mathrm{Min} \quad p_f(x) \tag{5-3}$$

subject to

$$C(x) \leq C_* \tag{5-4}$$

ここで，$C(x)$は設計変量xとしたときの建設コスト，C_*は予算額

このように定式化しておくと，先の定式化に対して次のような問題点の変化が生じている。

1) 設計変量とコストの関係を表わす関係式が必要となる。

2) 確率分布の選択によるp_fの変化による最適解の影響は，先の定式化によるものよりも小さい。

3) 破壊の確率の基準値p_{f*}のような値を必要としない。しかし，そのかわりにどの程度の予算をとるべきかというような問題が潜在的に残されている。

1)については古い設計変量とコストの関係式が経験的に得ることができ，3)の予算額そのものの妥当性については次のようなプロセスによって解決できる。

a) ある与えられた予算額で(5-3)，(5-4)の問題を

解き，その解 x_* が現行の法的基準をみたしていれば，それを採用し，もしみたしていなければ，予算額 C_* の変更を施主に要求する。

このプロセスは複雑であるようだが，第5章における最適投入理論の結果を用いれば，任意の予算額についての最適解 x_* の値が得られ，さらに予算額の変化にともなって最適解 x_* の変化（トラジェクトリ）が定まるので問題はない。この点については以下でより具体的に示す。

以下では第4章の最適投入理論を信頼性問題に応用する方法を明示するため，構造解析の点では大幅に単純化を行った場合についてのみその最適化のプロセスを提示するが，より精緻な解析にもとづいた形へと容易に拡張できる。

5-3-5-2 目的関数の定式化

目的関数としては前項で述べたように破壊の確率であるが，以下では各部材の安全係数の関数として表わす。

建築物の破壊の定義としては2，3の問題があるが，以下では全部材の一部に破壊があった場合を想定する。従って，各部材を1，2，…，i，…，n とし，各部材の破壊の確率を p_{fi} と記すと，全体の破壊の確率 p_f は以

下で示される。

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - P_{f_i}) \qquad (5-5)$$

ところで，第5章で示した最適投入問題の形に直すために以下に問題の形を考えよう。まず，

$$\min \quad P_f \qquad (5-6)$$

ということと

$$\max (1 - P_f) \qquad (5-7)$$

とは同じことであり，とすると

$$1 - P_f = \prod_{i=1}^{n}(1 - P_{f_i}) \qquad (5-8)$$

となるが，各部材の破壊の確率が充分に小さいもとでは

$$\prod_{i=1}^{n}(1 - P_{f_i}) \fallingdotseq 1 - \sum_{i=1}^{n} P_{f_i} = \sum_{i=1}^{n}(1 - P_{f_i}) - (n-1) \qquad (5-9)$$

となり，$n-1$ が定数であることから，結局，(5-6)の問題は

$$\max \sum_{i=1}^{n}(1 - P_{f_i}) \qquad (5-10)$$

という問題と同じことになる。従って，以下では

$$G_T = \sum_{i=1}^{n} g_i \qquad (5-11)$$

$$g_i = 1 - P_{f_i} \qquad (5-12)$$

と置くと，(5-11)式で表わされる G_T を最大化するという問題となり，第4章の最適投入問題の目標関数と同じ形となる。ところで，(5-12)式よりわかるように g_i は各部

枝の信頼性であり，目的関数Gは各部材の信頼性のすべて最大化することを意味している。

5-3-5-3 最適化

前項では目的関数を形式的に定式化したが，問題の解決には個々の部材について以下のような項目についての関係式を前もって明確にしておかねばならない。

1) 破壊確率 P_{fi} と安全係数 α_i との関係

2) 安全係数 α_i と設計変量（部材寸法など）x_i との関係

3) 設計変量 x_i とそれにともなうコスト C_i との関係

しかし，これらの関係については構造物の形式，材料などによって異なり，すべての場合に適用可能な関係式を得ることは困難であり，以下では，より一般的に最適化のプロセスを示すが，具体的な構造形式が与えられている場合については本項の方法に各関係式から得られる具体的数値を対応させることによって最適化の方法が求めることができ，その具体的例については次項で検討する。

まず，各部材の非破壊確率 g_i と安全係数 α_i との関係式を

$$g_i = g_i(\alpha_i) \qquad (5-13)$$

と記し，同様に安全係数 α_i と設計変量 x_i との関係式を

$$\alpha_i = \psi_i(x_i) \qquad (5-14)$$

と記すことにしよう。ここで，数学的には

$$g_i = g_i(\psi_i(x_i)) \qquad (5-15)$$

としても同じであるが，後に示されるように，通常のケースでは (5-14) 式は応力計算によって機械的に求めることができるのに対して (5-13) 式は材料のバラツキ，設計・施工過程でのバラツキ等を考慮せねばならず，バラツキをどの程度に評価するかという問題を内在しており，(5-13)，(5-14) 式というように区別しておいた方が見とおしもよく，実用的といえる。

一方，設計変量 x_i とコスト C_i の関係については

$$x_i = h_i(C_i) \qquad (5-16)$$

の形の関係式を求めることは数学的には問題がないが，通常のコスト計算プロセスは部材断面などが与えられてコストを求めるという形式が多く，(5-16) 式のように与えられたコストに対応する部材寸法を求めるということは非常に複雑となってしまう。従って，以下では

$$C_i = f_i(x_i) \qquad (5-17)$$

なる関係式が成立しているとしよう。

以上の準備のもとで，第5章5-1節で示した最適化の方法を用いると，コスト c_i に関する非破壊確率 g_i の一次微分，二次微分の値に関する情報によってどこに投入すれば最適となるかがきまるので，それらの値について検討しておこう。

まず，

$$\dot{g}_i(\alpha_i) = \frac{d}{d\alpha_i} g_i(\alpha) \tag{5-18}$$

$$\dot{\varphi}_i(x_i) = \frac{d}{dx_i} \varphi_i(x_i) \tag{5-19}$$

$$\dot{f}_i(x_i) = \frac{d}{dx_i} f_i(x_i) \tag{5-20}$$

と記すと，

$$\frac{\partial g_i}{\partial c_i} = \dot{g}_i(\alpha_i) \cdot \dot{\varphi}_i(x_i) / \dot{f}_i(x_i) \tag{5-21}$$

となり，同様に

$$\ddot{g}_i(\alpha_i) = \frac{d}{d\alpha_i} \dot{g}(\alpha_i) \tag{5-22}$$

$$\ddot{\varphi}_i(x_i) = \frac{d}{dx_i} \dot{\varphi}_i(x_i) \tag{5-23}$$

$$\ddot{f}_i(x_i) = \frac{d}{dx_i} \dot{f}_i(x_i) \tag{5-24}$$

とおくと，

$$\frac{d^2 g_i}{dc_i^2} = \frac{\dot{\varphi}_i^2(x_i)\cdot \ddot{g}_i(\alpha_i)}{\dot{f}_i^2(x_i)} + \frac{\dot{g}_i(\alpha_i)\cdot \ddot{\varphi}_i(x_i)}{\dot{f}_i^2(x_i)} - \frac{\dot{g}_i(\alpha_i)\cdot \dot{\varphi}_i(x_i)\cdot \ddot{f}_i(x_i)}{\dot{f}_i^3(x_i)} \quad (5-25)$$

となる。

ここで，第4章の結果を用いると，信頼性，経済性を含んだ最適化プロセスはフローチャート（図8-49）のように記すことができる。

最適化プロセスは通常の構造設計プロセス $\frac{dg_i}{dc_i}$，$\frac{d^2 g_i}{dc_i^2}$ の計算プロセスが付加したものがあり，計算量はそれほど増加しないと思われる。むしろ重要な点は通常の構造設計でも同じであるが，得られた計算結果を単にそのまま設計するというのではなく，現実的な施工の可能性（配筋などで都合の悪い点が生じないかなどの点）などより総合的な見地からの構造設計家の判断というものがより重要視されねば，ここでの最適化の方法の効果は期待できないといえよう。

5-3-5 4 ケース・スタディ

前項の最適化の方法をより具体的に示すために，次のような問題について検討してみよう。

[問題]；鉄筋コンクリート造多層（5階）のラーメンフレームの構造設計段階ですでにせん断力係数 $C_0 = 0.2$ で設計

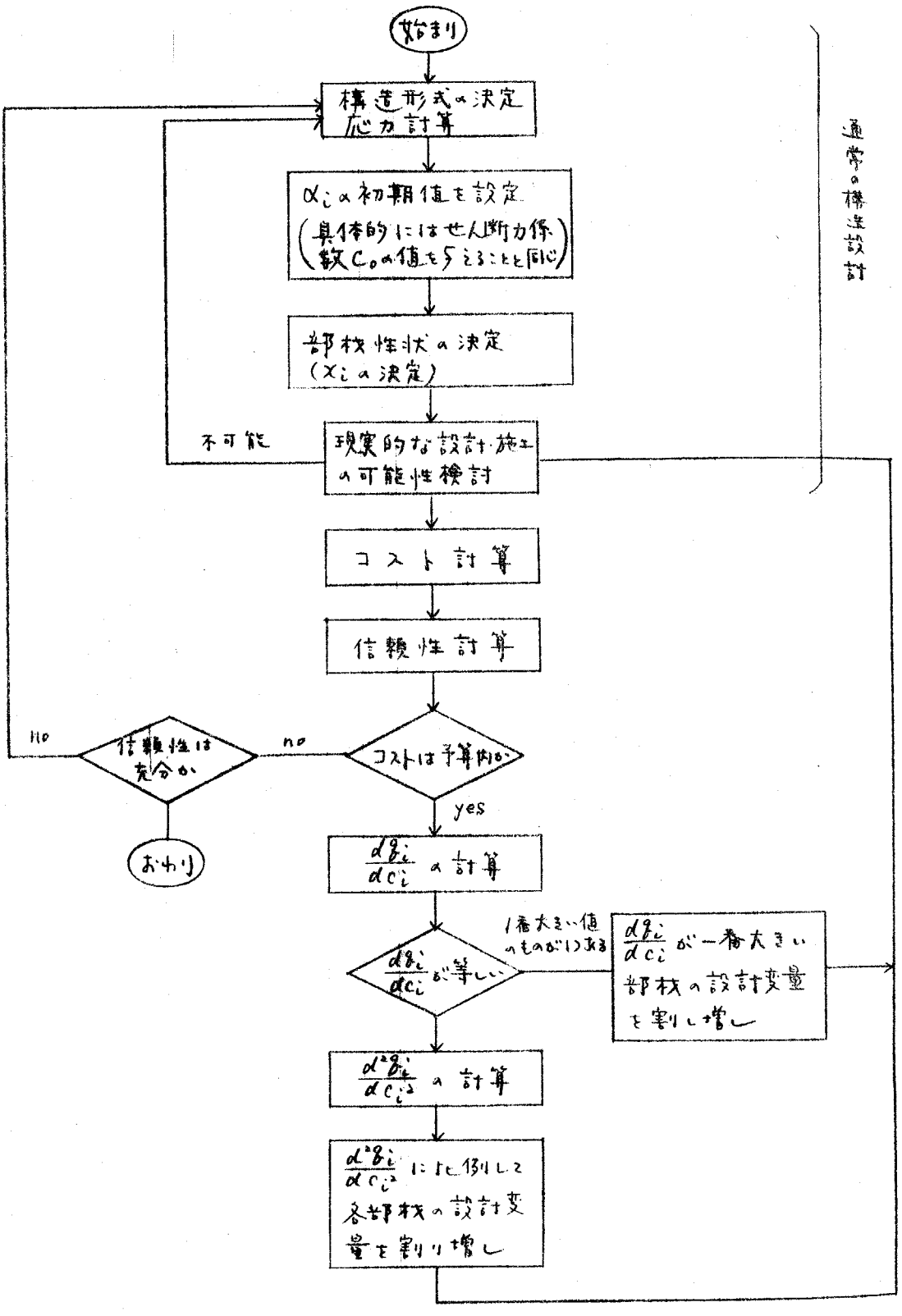


図 8-41 信頼性・経済性の最適化プロセス

したところ，予算的な余裕があり，残りの予算を用いて建物全体の信頼性を増加させたい。このとき，何階の柱部分の信頼性を増加させるように設計変更すべきか，何階のはり部分の信頼性を増加させるように設計変更すべきか，ただし，平面プランにおけるスパン長さはX方向，Y方向とも7m，階高は3mであり，変更は柱断面，はり断面の形状のみにかぎられているとする。

この問題に前項の最適化の方法を用いるが，構造解析そのものが目的ではないので，各関係式については略算式を用いる。以下で示される略算式はコストとの関係を調べるために中川（文献16）によって提案されたもので，ここでもこれらの略算式を用いるが，より精緻な分析を必要とする場合については，これらの略算式に対応するより精緻な関係式を用いればよい。

以下の分析に入る前に上述の問題の中で明示されていない点について，以下のように仮定しておこう。

i) 応力算定荷重としては $W_S = 1.0\ ton/m^2$

ii) 材料は指定強度 $F_c = 210\ kg/cm^2$ のコンクリートを用い，主鉄筋としてはSD30を用いるものとする。

iii) 断面の基本的形状として

1) 柱は $D_c \times D_c$ の正方形断面とし，$p_t = 0.4\%$ とする。

b) はりは $D_G \times b$ の長方形断面とし，とくに $b = 0.5 D_G$ とし，$p_t = 1\%$ とする。

iv) $C_0 = 0.2$ で設計したときの各部材の安全係数 α_i はすべて等しく，$\alpha_i = \alpha_0$ であったとする。

v) 荷重，耐力のバラツキは正規分布をなすと仮定する。

a) 構造計算略算式

フレームの数は多いとして，その内部のトラフレームをとりだして考える。

a-1) 柱について

$$M_c = 0.5s(n_* + 1 - n) \cdot l^2 \cdot h \cdot w_s \cdot C_0 \qquad (5-26)$$

$$N_c = w_s \bar{l}^2 (n_* + 1 - n) \qquad (5-27)$$

a-2) はりについて

$$M_G = 0.5(n_* + 1.5s - n) \cdot l^2 \cdot h \cdot w_s \cdot C_0 \qquad (5-28)$$

ただし，

M_c; 柱曲げモーメント

N_c; 柱軸力

M_G; はり端部曲げモーメント

n_*; 階数 (=5)

n; 対象の階

l; スパン長さ (7m)

w_s; 単位面積当り荷重 (1ton/m²)

C_0; せん断力係数

h; 階高 (3m)

b) 断面決定式

このとき，断面について次の関係式が成立している（文献16参照）

$$M_c = 170 D_c^3 \qquad (5-29)$$

$$M_g = 106 D_G^3 \qquad (5-30)$$

c) コスト計算式

c-1) 柱単位長当りコスト

$$C_F' = 4 D_c C_f + D_c^2 C_c + (188 D_c + 35.4 D_c - 15) \times 10^{-3} \times C_R \qquad (5-31)$$

c-2) はり単位長当りコスト

$$G_F' = (3.5 D_G - 0.2) C_f + 0.5 D_G^2 C_c + (73.3 D_G^2 + 12.2 D_G + 1.2) \times 10^{-3} \times C_R \qquad (5-32)$$

ただし，

C_f; 型枠工事費単価 (円/m²)

C_c; コンクリート工事費単価 (円/m²)

C_R；鉄筋工事費単価（円/ton）

上記（5-31），（5-32）式のそれぞれの第1項は型枠工事費，第2項はコンクリート工事費を表わしており，第3項は主筋，あばら筋の鉄筋工事費を表わしている。

以上の準備のもとで，信頼性の解析を行う。

前項の最適化の方法から各部材の信頼性のコストに関する一次微分の大小を調べ，その値のより大きな部材を補強すればよいので，以下では柱及びはりごとにこの値を求める。まず，$C_0 = 0.2$ で設計した場合の柱の曲げモーメントを M_0 とし，曲げモーメントが M_c のときの安全係数 α_c は以下の式で求められる。

$$\alpha_c = \frac{M_c}{M_{0c}} \alpha_0 \qquad (5-33)$$

同様に，はりの場合についても $C_0 = 0.2$ で設計したはり曲げモーメントを M_{0G} とすると，曲げモーメントが M_G となったときの安全係数 α_g は

$$\alpha_g = \frac{M_G}{M_{0G}} \alpha_0 \qquad (5-34)$$

となる。一方，（5-26）式に $C_0 = 0.2$ を代入すると

$$M_{0c} = 16.17(6-n) \qquad (5-35)$$

となり，さらに（5-28）式に $C_0 = 0.2$ を代入すると

$$M_{0G} = 14.7(6.55-n) \qquad (5-36)$$

を得る。従って，$C_0 = 0.2$ として設計した場合の断面は

(5-29) 及び (5-30) 式より

$$D_{oc} = \left\{ \frac{16.17(6-n)}{170} \right\}^{\frac{1}{3}} = 0.4565(6-n)^{\frac{1}{3}} \qquad (5-37)$$

$$D_{oG} = \left\{ \frac{14.7(6.55-n)}{106} \right\}^{\frac{1}{3}} = 0.5176(6.55-n)^{\frac{1}{3}} \qquad (5-38)$$

ただし

D_{oc} ; $C_0 = 0.2$ のときの柱せい

D_{oG} ; $C_0 = 0.2$ のときのはりせい

を得る。

前項の最適化プロセスでは各部材の非破壊確率 g_i と安全係数 α_i，設計変量 x_i と安全係数 α_i，設計変量 x_i とコスト C_i の各関係式を求める必要があった。まず，非破壊確率は先の正規分布の仮定 (V) よりただちに

$$g_i = \Phi\left(\frac{\alpha_i - 1}{\delta_i}\right) \qquad (5-39)$$

ただし，δ_i は荷重，耐力のバラツキから得られる量で各変動係数を Δ_{Si}，Δ_{Ri} とするとき

$$\delta_i = \sqrt{\Delta_{Si}^2 + \Delta_{Ri}^2} \qquad (5-40)$$

が成立している，

を得ることができる。さらに設計変量 x_i (柱の場合，設計変量は D_c，はりの場合は D_{cT}) と安全係数 α_i の関係式

は（5－33），（5－34）式に（5－29），（5－30）式を代入することにより

$$\text{柱；}\quad \alpha_c = \frac{\alpha_0}{M_{oc}} \cdot 170 D_c^3 \qquad (5-41)$$

$$\text{はり；}\quad \alpha_{G_T} = \frac{\alpha_0}{M_{oG_T}} \cdot 106 D_G^3 \qquad (5-42)$$

が得られる．また，設計変量とコストの関係式は（5－31），（5－32）式のもとで

$$\text{柱；}\quad C = h \times C_F' \qquad (5-43)$$

$$\text{はり；}\quad C_T = \ell \times C_F' \qquad (5-44)$$

が得られる．次に各関係式より次の結果を得ることができる．すなわち，（5－39）式より

$$f_i(\alpha_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\delta_i} \cdot \exp\left[-\frac{(\alpha_i - 1)^2}{2\delta_i^2}\right] \qquad (5-45)$$

が，（5－41）式より

$$\frac{d\alpha_c}{dD_c} = \frac{\alpha_0}{M_{oc}} \times 170 \times 3 \times D_c^2 \qquad (5-46)$$

が得られ，（5－42）式より

$$\frac{d\alpha_{G_T}}{dD_G} = \frac{\alpha_0}{M_{oG_T}} \times 106 \times 3 \times D_G^2 \qquad (5-47)$$

が得られる．さらに，（5－43）及び（5－31）式より

$$\frac{dC}{dD_c} = h\left\{4C_f + 2C_c \cdot D_c + (188 \times 2D_c + 35.4) \times 10^{-3} C_R\right\} \qquad (5-48)$$

が，（5－44）及び（5－32）式より

$$\frac{dG}{dD_G} = \ell \cdot \left\{ 2.5 C_f + C_c \cdot D_G + (73.3 \times 2 D_G + 12.2) \times 10^{-3} \cdot C_R \right. \qquad (5-49)$$

が得られる。以上の結果より，信頼性のコストに関する微分値は以下のようになる。

柱について

$$\frac{d\beta_c}{dC} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_c} \exp\left[-\frac{(\alpha_c - 1)^2}{2\delta_c^2} \right] \cdot \frac{3 \times 170 D_c^2 \cdot \alpha_0}{M_{oc}} \cdot \frac{1}{h\{4C_f + 2C_c D_c + (188 \times 2D_c + 35.4) \times 10^{-3} \times C_R\}}$$

$$(5-50)$$

はりについて

$$\frac{d\beta_G}{dG} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_G} \exp\left[-\frac{(\alpha_G - 1)^2}{2\delta_G^2} \right] \cdot \frac{3 \times 106 D_G^2 \alpha_0}{M_{oG}} \cdot \frac{1}{\ell\{2.5 C_f + 2 C_c D_G + (73.2 \times 2 D_G + 12.2) \times 10^{-3} \cdot C_R\}}$$

$$(5-51)$$

ここで，$C = 0.2$ ですでに設計してある時実を考えているので，(5-50) 及び (5-51) 式にそれぞれ

$$\left.\begin{aligned} \alpha_C &= \alpha_0 \\ \alpha_G &= \alpha_0 \\ D_C &= D_{oc} \\ D_G &= D_{oG} \end{aligned}\right\} \qquad (5-52)$$

を代入することによって

$$\left.\frac{d\beta_c}{dC}\right|_{C_0 = 0.2} = \phi_c$$

$$= \frac{3\alpha_0 \cdot \exp\left[-\frac{(\alpha_0 - 1)^2}{2\delta_c^2} \right]}{\sqrt{2\pi}\, \delta_c h D_{oc} \{4C_f + 2C_c D_{co} + (376 D_{co} + 35.4) \times 10^{-3} \cdot C_R\}}$$

$$(5-53)$$

$$\frac{\partial \beta_G}{\partial C}\Big|_{C_0=0.2} = \Phi_G$$

$$= \frac{3\alpha_0 \cdot \exp\left[-\frac{(\alpha_0-1)^2}{2\delta_G^2}\right]}{\sqrt{2\pi}\delta_G l D_{G0}\{2.5C_f + C_c D_G + (146.6 D_G + 12.2)\times 10^{-3} C_R\}} \quad (5-54)$$

が得られる。一方，各単価 C_f，C_c，C_R の値を1972年11月の積算資料により，以下のように求めることができる。

$$\left.\begin{aligned} C_f &= 2,360 \ (\text{円}/m^2) \\ C_c &= 11,330 \ (\text{円}/m^2) \\ C_R &= 95,000 \ (\text{円}/\text{ton}) \end{aligned}\right\} \quad (5-55)$$

この値及び(5-37)及び(5-38)式の結果を(5-53)及び(5-54)式に代入すると

n階の柱について

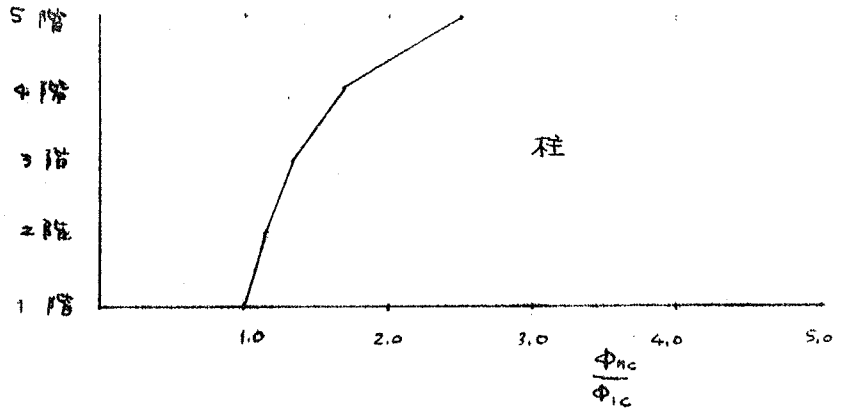
$$\Phi_{nC} = \frac{3\alpha_0 \exp\left[-\frac{(\alpha_0-1)^2}{2\delta_c^2}\right]}{\sqrt{2\pi}\delta_c \times 3\times 0.4565(6-n)^{\frac{1}{3}}\{12,803 + 58,380\times 0.4565(6-n)^{\frac{1}{3}}\}} \quad (5-56)$$

n階のはりについて

$$\Phi_{nG} = \frac{3\alpha_0 \exp\left[-\frac{(\alpha_0-1)^2}{2\delta_G^2}\right]}{\sqrt{2\pi}\delta_G \times 7\times 0.5176(6.55-n)^{\frac{1}{3}}\{7,059 + 25,257\times 0.5176(6.55-n)^{\frac{1}{3}}\}} \quad (5-57)$$

なる結果を得る。

以上の結果から最初の問題に解答を与えることができる。まず，(5-56)式及び(5-57)式は階数nに関して単調増加であり，1階との比率を調べると図8-50のようになり，最上階の柱またはばりの安全係数を増加させる



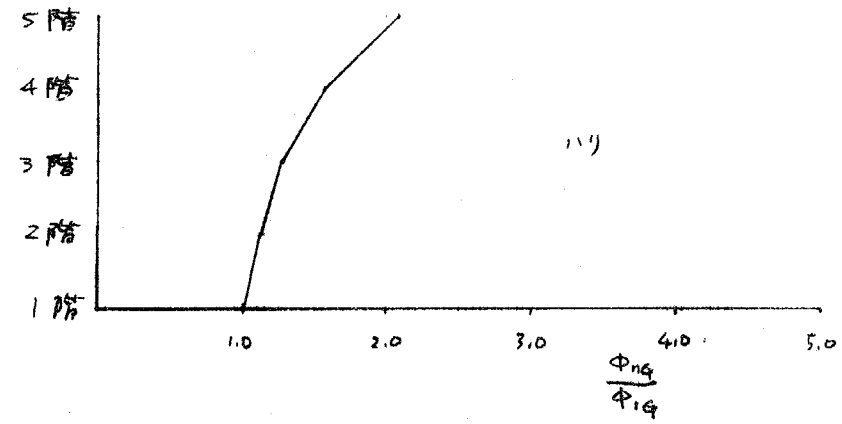


図 8 − 50　信頼性の投入効果（1階も1.0として基準化）

ことが最も効果的であるといえよう。また，柱とはりのどちらに投入すべきかは各部材のバラツキに依存しており，柱，はりのそれぞれの総合変動係数 δ_C, δ_G が次の条件をみたすときには柱に投入すべきであり，条件をみたさないときははりに投入すべきであるといえる。

$$\phi_{5C} \geq \phi_{5G} \qquad (5-58)$$

(5-58) は (5-56), (5-57) 式及び $n=5$ であることから

$$\exp\left[\frac{(\alpha_0-1)^2}{2}\left\{\frac{1}{\delta_G^2}-\frac{1}{\delta_C^2}\right\}\right]\cdot\frac{\delta_G}{\delta_C}\cdot 1.7219 \geq 1.0 \qquad (5-59)$$

となり，$\delta_C-\delta_G$ 空間上にこの条件式を調べると，図8-51のようになる。とくに δ_C と δ_G が等しい場合については (5-58) 式の条件をみたしているので，柱への投入がより経済性，信頼性の上からより有利であるといえる。

上記の結果を現実の建物に応用するには充分な注意を用する。すなわち，ここで試みた最適化のケース・スタディは多くの仮定のもとに行なわれており，これら仮定の吟味がその応用の際には慎重にチェックされるべきである。とくにこのケース・スタディでは暗黙のうちに許容応力度設計を前提としている実は現実的な安全性を考える際には再検討をせまられるであろう。しかしながら，第5章及び前項までに示された最適化手法はそうした条件下でもより広く成立している。

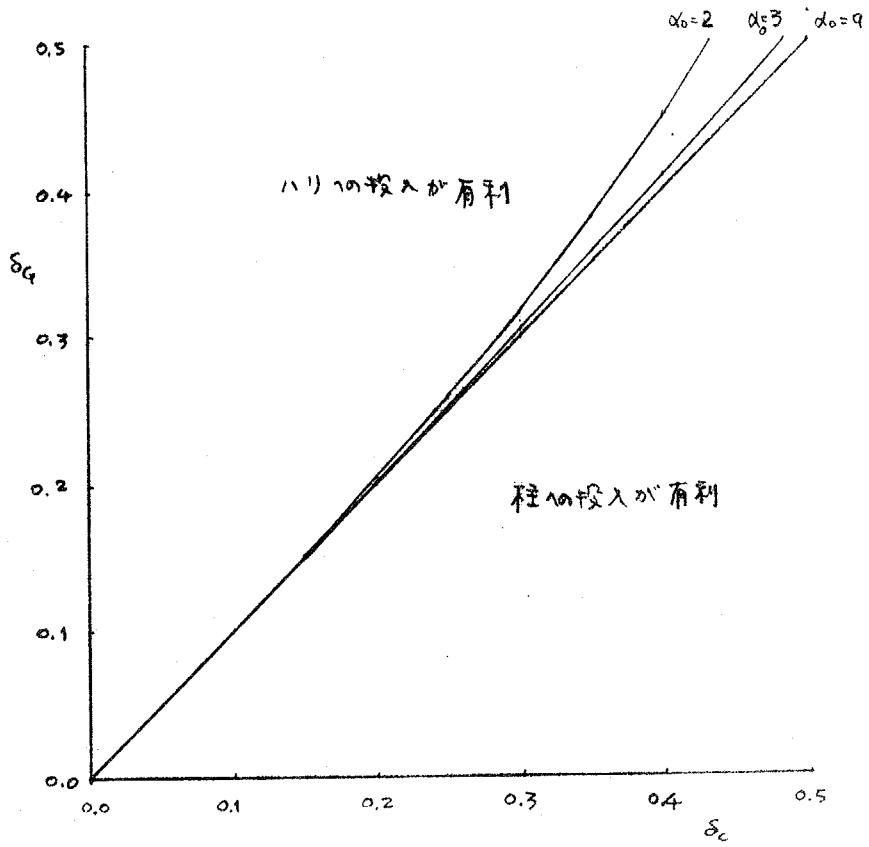

$\alpha_0=2$
$\alpha_0=3$
$\alpha_0=9$
0.5
0.4
δ_G
0.3
0.2
0.1
0.0
ハリへの投入が有利
柱への投入が有利
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
δ_C

図 8-5/ 最適投入領域

文献

1) 「新耐震設計法(案)」, 建築研究所研究報告 No.79, 昭和52年, 3月

2) Maier, M., "The Safety of Building and its Calucu-lation according to Ultimate Load instead of Admissible Stress", Springer-Verlag, Berlin, 1926

3) Freudenthal, A.M., "Safety of Structure", Trans., ASCE Vol.112, 1947

4) Freudenthal, A.M., "Safety and the Prabability of Structural Failure", Trans., ASCE, Vol.121, 1956

5) Freudenthal, A.M., Garrelts, J.M. & Shinozuka, M., "The Analysis of Structural Safety", ASCE, Vol.92, 1966

6) Cornell, C.A., "Bounds on the Reliability of Structural System", ASCE, Vol.93, 1967

7) Ang, A.H & Amin, M., "Roliability of Structure and Structural System", ASCE, Vol.94, 1918

SEKIREI A4 NO. 54

8) Lind, N.C., "Consistent Partial Safety Factors", ASCE, Vol.97, 1971

9) Nakano, k., Aoki, Y. & Watanabe, k., "A Proposal for a Rational Aseismic Structural Design Process", BRI Research Paper, No. 68, 1976

10) Ang, A.H.S., "Extended Reliability Basis of Structural Design under Uncertainties", Annuals of Reliability and Maintainability, Vol. 9, 1970

11) Cornell, C.A., "Structural Safety Specification Based on Second Moment", IABSE Symp., 1969

12) 寺田, 秋田, 浦井, 「東京都における昭和51年度コンクリート検査成績」, 第31回セメント技術大会講演要旨集, 昭和52年, 5月

13) 井上豊, 「建築構造物の安全性と信頼性」, 建築雑誌 Vol. 91, No. 1104, 昭和51年, 3月

14) Zadeh., L.A, "Fuzzy Set", Information & Control, 8, 1965

15) 広沢雅也，「既存鉄筋コンクリート造建物の耐震性判定基準」，建築技術，No.267，昭和48年，11月

16) 中川淳，「中高層ビルの構造コストプランニング(3)」，建築技術，昭和46年，6月

5－4　重要度係数の最適化

5－4－1　重要度係数と各規定

重要度係数は用途係数とも呼ばれ，社会的理由によって通常の建物に比べて強度を高いレベルに設定するために使用される補正値のことであり，これまで各種の提案の中で異なる形で定義されている。構造設計に関する各規定・提案について得られる内外の資料から整理すると表9－1のようになる。これらの各規定・提案の目的・対象とする災についても差異があり，とくに各規定・提案における用途・建物の重要さに与える補正の仕方も各規定・提案の計算手続きに基づいており，従って，単に重要度係数（Importance Factor）といってもその意味が多少異なっており，各提案間の重要度係数の値を直接に比較することは問題があるといえる。

しかし，現状の各規定・提案では大まかに述べるとすれば，次のような災があげられよう。

i）設計時に用いる荷重を重要度に応じて増加させるものがある。

ii）この他，判定の際に重要度に応じて判定に用いる数値を増減させる。

また，重要度としては災害時に果たすべき機能，多量の危険物を貯蔵するもの，多くの人員を収容するものな

表9-1　各規定における重要度係数（用途係数）

規定名称	重要度係数（用途係数）の規定
1) 建築規準法・同施行令（1971）	特に規定なし
2) 建築規準法・同施行令改訂案（1969．建築研究所）	用途係数に関する技術基準として次の用途係数をとり，地震及び風荷重に乗じている。

建築物またはその部分の用途		用途係数
(一)	災害時に公共の目的のための機能を保持することが必要である建築物，多量の危険物を収蔵する建築物，その他これらに類する建築物又は建築物における当該部分	1.25
(二)	(一)及び(三)に掲げる以外の建築物	1.00
(三)	災害時に人命を損傷するおそれのない建築物，又は仮設建築物	0.75

3) 日本建築学会地震荷重1案	次の重要度係数I_rをとり，許容ダクティリティーファクターを除し，重要度に応じ余裕を見込んでいる。

用途	I_r 最下層	I_r 最上層	
放送局・病院	2.0	2.0	中間層は直線補間
電話局・消防署	1.8	1.5	
行政庁・学校	1.6	1.3	
その他	1.3	1.0	

4) 日本建築学会地震荷重2案	基準剪断力係数を求めるときに重要度係数（用途係数）を乗じているが，値は特に決めてはいない。その解説では値を建築基準法・同施行令改訂案によっている。
5) 日本建築学会建築物荷重規準案	地震荷重は対象としていないが，雪荷重・風荷重の算定に際し，建築物の用途による重要度に応じ，原則

規定名称	重要度係数（用途係数）の規定

として次の用途係数Iを乗じている。

	建築物の用途	I
(一)	きわめて重要な建築物またはその部分	1.25
(二)	(一)及び(三)以外の建築物	1.00
(三)	応急仮設建築物・工事現場事務所・仮設興行場・博覧会建築物・仮設店舗などの仮設建築物	0.75

ここにいうきわめて重要な建築物とは，次のとおりである。災害時に

(1) 多数の人命を損傷するおそれのある建築物
(2) 救急避難の拠点となる病院・学校・公共建築物など
(3) その破壊が周囲に害を及ぼすおそれのある危険物を収蔵する建築物
(4) 高層建築物など
(5) その他，公共の目的のためその機能を保持することが必要な建築物

) 建築センター；小堀案（1975）	別途行政的に定めるものとする
) 武藤案（1975）	ベースシア係数 C_B に考慮される

建物種別	学校，病院，放送局など災害時にも機能保持を必要とするもの。多量の危険物を貯蔵する建物	I=2.0
	多人数の出入りする建物，集会所，超高層ビル	I=1.5
	その他の建物	I=1.0

) 高層建築技術指針（1972）	特に規定なし
) 既存RC建物の判定基準；建研広沢案（1971）	解説として，地域別低減係数×重要度別低減係数を用いて判定値 q_{BO} を低減している
) RC構造物の耐震性判定法；山田案（1971）	特に規定なし
) RC建物の耐震性判定法；山田案（1973）	特に規定なし

規定名称	重要度係数（用途係数）の規定
12) 既存RC建物の判定基準；岡田案（1975）	特に規定なし
13) 動的耐震判定；尾崎他（1975）	最大変形量から検討する。
14) 鉄筋コンクリート造校舎の耐震診断方法；学会（1975）	学校のみを対象
15) 鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法；梅村案（1973）	特に規定なし
16) Recommended Lateral Force Requirements and Commentary ; SEAOC（1974）	地震後の緊急活動に機能すべき構造物 I=1.5 病院，通信センター等他の構造物は I=1.0～1.5の範囲で適宜低減する。
17) Uniform Building Code; アメリカ（1976）	地震荷重を求める際に，次の重要度係数I（Occupancy Importance Factor）を乗じている。 用途 / I 重要な施設* / 1.5 1室に300人以上集会することが主な用途である建築物 / 1.25 その他 / 1.0 * ただし重要な施設とは，地震災害後において公共の安全と健康に関する緊急の事態に対処するため，安全でありまた使用が可能でなければならないものである。たとえば次のようなものであるが，必ずしもこれらだけではない。 1. 災害時に必要な病院や他の医療機関 2. 消防署，警察署 3. 緊急時に必要な行政庁，コミュニケーションセンター
18) National Building Code of Canada; カナダ（1975）	地震荷重を求める際に次の重要度係数I（Importance Factor）を乗じている。 I=1.3 災害後のサービスに用いられる建築物と学校 I=1.0 その他の建築物

規定名称	重要度係数（用途係数）の規定
i) Code of Practice for General Structural Design and Design Loading for Buildings ; ニュージーランド（1976）	地震荷重を求める際に次の重要度係数I（Importance Factor）を乗じている。 級 / 用途 / I I / 地震災害後直ちに機能を完全に果さなければならない重要な施設* / 1.6 II / Iに含まれない公共の建築物 / 1.3 III / その他の建築物 / 1.0 * 救急センター，消防署，病院，発電・変電所，警察署，放送局など
j) Standards and Regulations for Buildings in Seismic Regions ; ソビエト連邦	地震荷重を求める際に次の地域係数と重要度係数の積Z・Iを乗じている。 $Z \cdot I = 0.1,\ 0.05,\ 0.025$ その他階数による割増係数αを用いている（5階以上に適用）。 $\alpha = 1 + 0.1(n-5) \leqq 1.5$ n：階数
k) Deutshe Normen - DIN 4149 ; ドイツ（1957）	公共建物については地震調査資料を検討する。
l) Proposed Building Code for Mexico's Federal District ; メキシコ	きわめて重要なもの 1.3の重要度係数を与える。 （検討項目として，地震後に果すべき機能，地震の損害と建設コスト，モニュメンタルな性質をもつか否かなどがあげられている）
m) Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures (Third Revision)（インド，1975）	地震荷重を求める際に次の重要度係数I（Importance Factor）を乗じている。 / 構造物 / I I / 原子炉 / 6.0 II / ダム / 3.0 III / 可燃や有毒ガスや液体の収納庫 / 3.0 IV / 重要な建築物（病院，給水所，学校，重要な橋，重要な発電所，記念構造物，電話局，消防局，映画館，集会所，地下鉄の駅など） / 1.5 V / その他 / 1.0 * この値は参考値であり，設計者は経済性その他を考慮して適切な値を選ぶことができる。

ど，破壊によって引き起される災害拡大の程度に基づくものが多いが，この他メキシコの規準案において指摘されているように経済的効果，モニュメンタルな建築物に重要度を与えるなどという考え方もありうる。

従って，重要度係数は，災害時の社会（地域）へ与える影響，経済的効果などから考慮されるべき量であるといえよう。また，実際に設計するプロセスにおいては上記各提案の中に見られるように，剪断力係数を増減させる単純化された数値という形をとることが必要であるが，これらの重要度係数の値を決めた場合は，厳密には建物の動的特性・靭性あるいは信頼性を考慮した上で決められるべきであるといえよう。

ここでは建物を統一的なシステムとみなし，そのシステムを意味づける各変量は確定的な値と確率的な値とによって構成されており，重要度係数はこうして定義される建築システム間の関係を示すパラメーターとして定義されることになる。

以下ではまず，各建築物の重要度というものを住民の側から主観的な判断ではどのようになっているかを調べ，次に，建築を統一的なシステムとしてとらえ，重要度係数の意味を明確にするとともに，その最適化の方法を提

案し，二，三の場合における最適解を求める。

5-4-2 住民の側よりみた建築物の重要度の評価

5-4-2-1 建築物の用途種別と災害の進展フェイズ

重要度が考慮されるべき建築物としては建築基準法同施行令改訂案にもみられるように，「災害時に公共の目的のための機能を保持することが必要である建築物と多量の危険物を収蔵する建築物，その他これらに類型する建築物……」となっており，日本建築学会地震荷重ｱｲ等においては放送局，病院，電話局，消防署，行政庁，学校にそれぞれ重要度係数として余裕をみこんでいる。さらに，日本建築学会建築物荷重基準案では，きわめて重要な建築物の定義として「災害時に 1) 多数の人命を損傷するおそれのある建築物 2) 救急避難の拠点となる病院，学校，公共建築物など 3) その破壊が周囲に害を及ぼすおそれのある危険物を収蔵する建築物 4) 高層建築物など 5) その他，公共の目的のためその機能を保持することが必要な建築物」となっている。米国，カナダ，ニュージーランド，インドにおいてもこれと同様な構造上の余裕が都市施設に与えられている。そこで，多数の人命を損傷するおそれのある建築物として映画館，劇場，デパート，災害防止及び避難のための重要な施設として警察建物，消防建物，放送局をとりあげる。また，

幼児の集まる保育所及び小学校，ならびに公的な建物として警察・消防関係を除く公的建物をとりあげる。被災者のための病院，また，被災後の生活を支える機能として小売店舗をとりあげ，これらの都市施設の他に比較の標準として住宅をとりあげる。以上整理すると，次の10の都市建築物に整理される。

(1) 警察建物・消防建物

(2) 保育所

(3) 小売店舗

(4) 小学校

(5) 住宅

(6) デパート

(7) 区役所等公的建物（警察・消防関係を除く）

(8) 映画館・劇場

(9) 病院

(10) 放送局

また，これらの建築物の重要さも災害の進展にともなって変化することが考えられる。ここでは，災害時として関東大地震程度の地震によって都市市街地に被害が生じることを想定して災害の進展フェイズとして

I) 地震の発生時点（以下，単に「地震時」と略す）

Ⅱ) 地震後，火災がいくつか発生し，大火のおそれが生じている時点（以下，単に「地震後火災発生」と略す）

Ⅲ 地震発生後，約一週間の時期（以下，単に「地震後約一週間」と略す）

を想定し，都市市街地住民に対してアンケート調査を試みた。

5-4-2-2 調査概要

調査は市街地住民に対し上記の各災害フェイズ毎に各建築物をその重要さの順に順位を評定してもらう形式をとり，第2章に述べたアンケート調査と同時に実施した。アンケートを回収し，他の調査項目も合せて完全回答をしたものを集計し，次のような有効データ数となった。

5-4-2-3 順位得点からみた評価

(1) 順位得点

各施設の災害状況下，(a) 地震時 (b) 地震後火災多発時 (c) 約1週間後のそれぞれについての各施設の重要さの順位を質問し，回答結果のそれぞれの順位をその まま得点とみなし，その得点の平均値を求めたものが図7-1である。地震時においては病院，放送局，警察・消

表9-2　調査有効データ数

災害進展フェイズ	有効データ数
a. 地震時	86
b. 地震後火災発生	84
c 地震後一週間	85

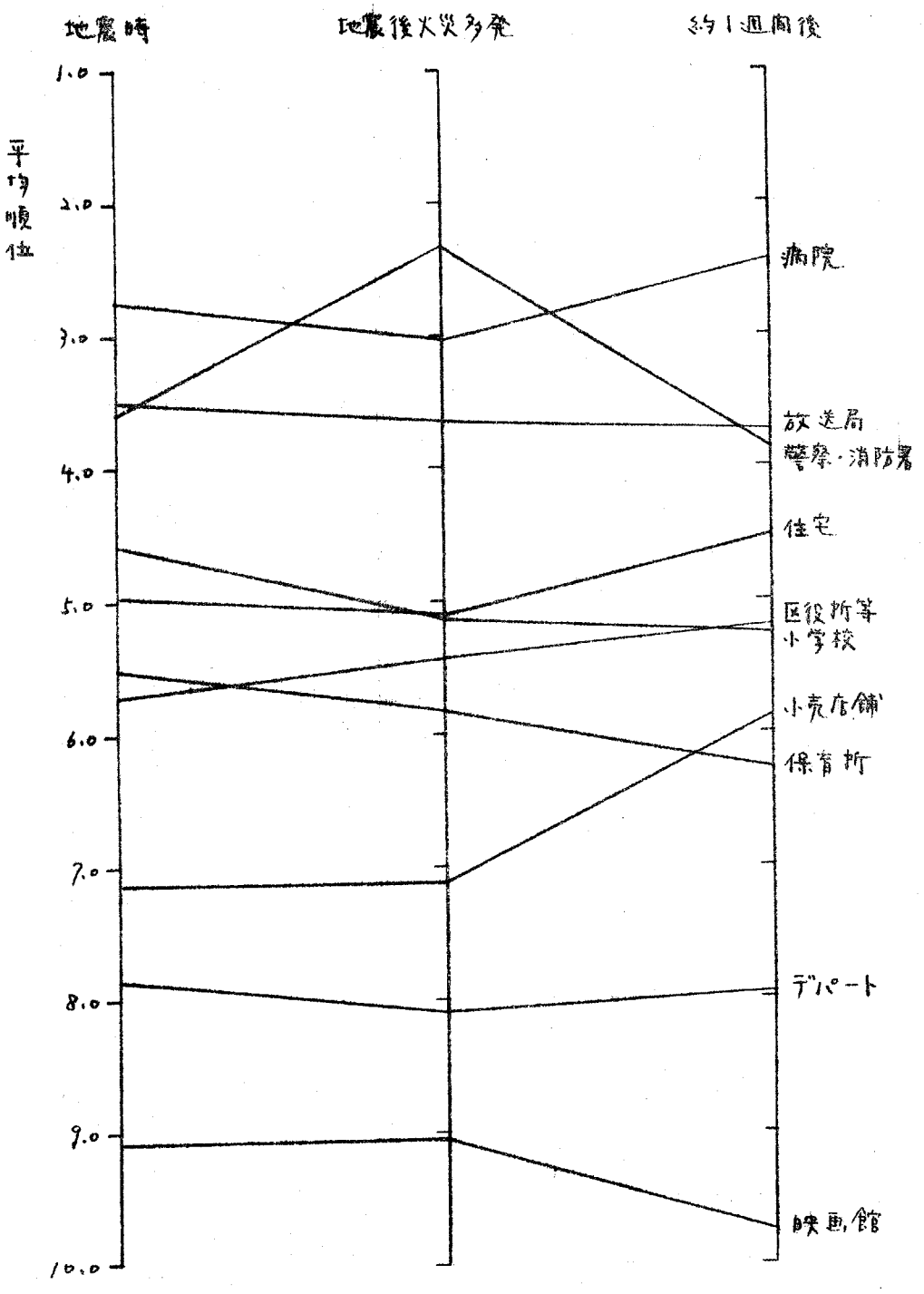


図 9-1-A　各施設の順位からみた評価

(他の質問で整合性のない回答のものについては除外)

署の順になる。その他の施設についてはほぼ同じような順位になっているが，区役所，小売店舗などが地震後に除々にその重要性を増してくることがわかる。デパート，映画館等の人がよく集まる施設についての重要さというものは，この結果を見るかぎり評価されていないといえる。

(2) 順位得点のバラツキ

評価する人々にとって受けとめ方が異なるので，かなり各施設の順位は人によってばらつくことが考えられる。図9－2は評価のバラツキを調べたものである。その結果，住宅，警察，消防署，区役所等，放送局についての順位得点の標準偏差は大きく，映画館，デパートの標準偏差は小さい。さらに各順位得点の平均値で標準偏差を割ったもの，すなわち変動係数を図示したものが図9－3である。これからみると，警察，消防署のバラツキは非常に大きく，ついで放送局，病院，住宅が高い変動係数である。また，映画館，デパートの変動係数は小さい。

ここで，順位得点がばらつくということのデータ上の特質を考えてみれば，評価者によって意見が別れるということを意味している。従って，警察・消防署，放送局，病院という上位3つの重要な施設の評価については，その3つの中での順位というものは人によって変ってくる

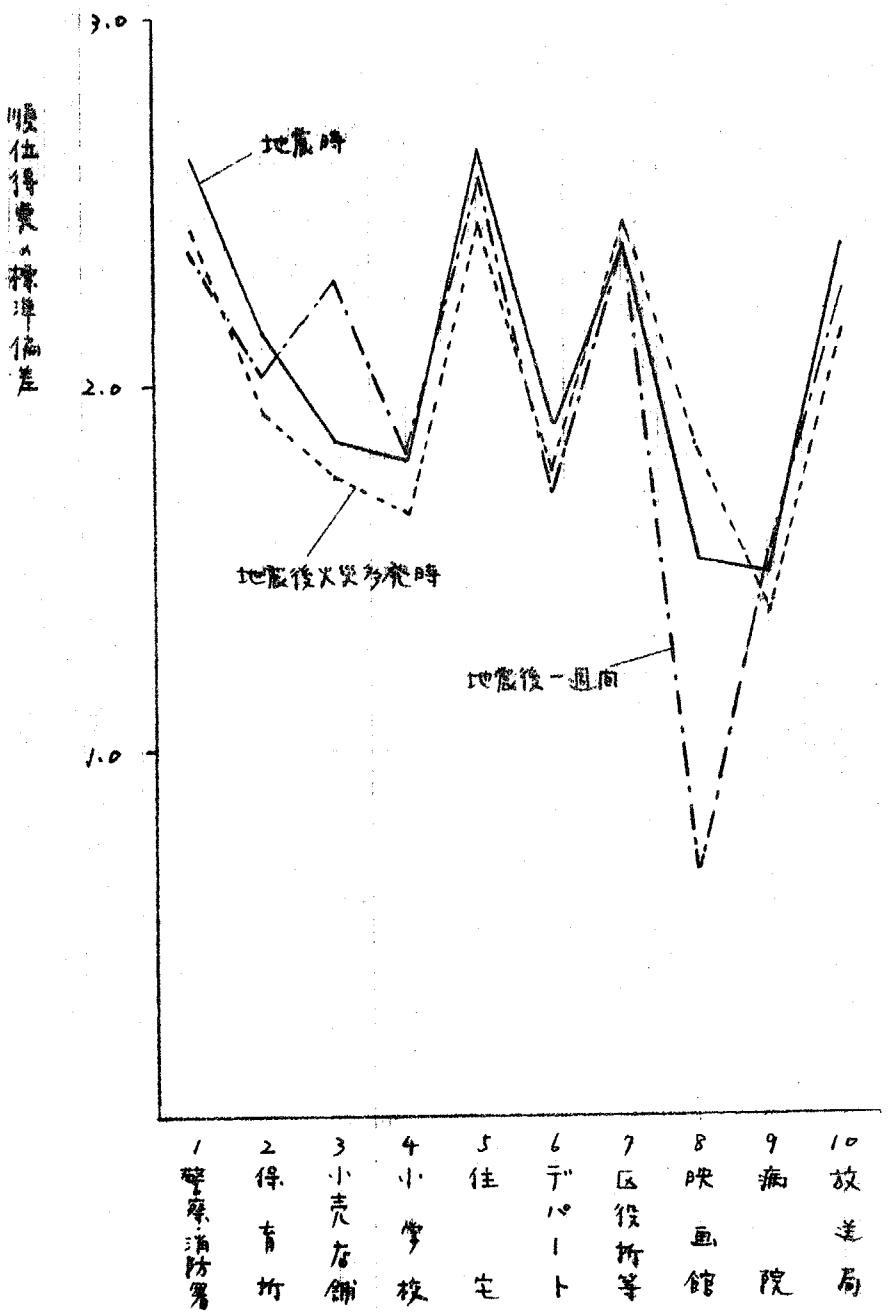


図 9-2-A　評価のバラツキ

(他の質問で整合性のない回答のものを除く)

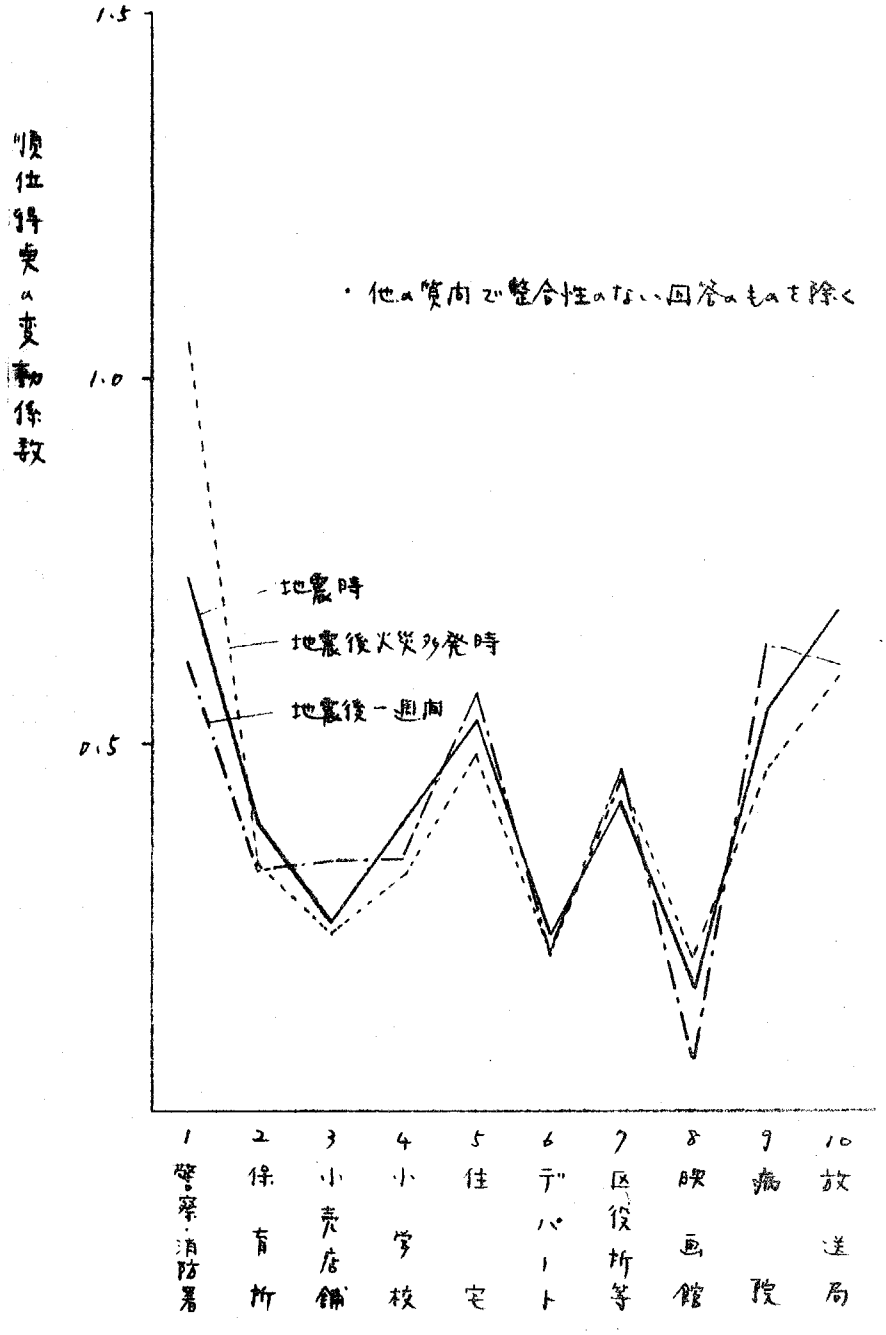


図9-3　評価のしにくさ（評価のバラツキ）

ことが推察される。一方，映画館，デパートというものはバラツキが少なく，多数の人がほぼ同意見であることがわかる。これらのことから警察・消防署，病院，放送局といった施設の重要性は，他の施設に比べてはっきりと認識されているが，そのうちの順位というものは人によってまちまちであり，一方，人の多く集まる映画館，デパートについてはほとんど異論はなく，評価が低いということができる。

5-4-2-4　順序数量化

(1)　順序マトリックス

各施設の評価順位のうち，上位に位置している割合と下位に位置している割合を求めてみると，表9-3のようになる。地震時において，病院は他のすべての施設に比べて上位である割合が過半数をこえている。地震後火災多発の時期には警察・消防建物が他の施設に比べて上位である割合がすべて過半数をこえている。さらに，地震後約一週間の時期では病院が他の施設に比べすべて過半数をこえた上位の関係になっている。これらの順序関係から地震後の災害の進展に伴い，重要さが病院，警察消防建物，病院というように変化していくことが理解で

表9-3-a)-A 順序関係マトリックス[aij]（地震時において）

	警察建物 消防建物	保育所	小売店舗	小学校	住宅	デパート	区役所等 公的建物	映画館 劇場	病院	放送局
警察建物・消防建物	0.000	0.682	0.879	0.652	0.636	0.864	0.833	0.894	0.455	0.470
保育所	0.318	0.000	0.727	0.288	0.439	0.894	0.485	0.939	0.106	0.258
小売店舗	0.121	0.273	0.000	0.182	0.197	0.682	0.394	0.788	0.045	0.136
小学校	0.348	0.697	0.818	0.000	0.561	0.939	0.576	0.955	0.167	0.318
住宅	0.364	0.561	0.803	0.439	0.000	0.803	0.545	0.894	0.242	0.348
デパート	0.136	0.106	0.318	0.061	0.197	0.000	0.212	0.879	0.045	0.136
区役所等公的建物	0.167	0.515	0.606	0.424	0.439	0.788	0.000	0.848	0.212	0.242
映画館・劇場	0.106	0.061	0.212	0.045	0.106	0.106	0.152	0.000	0.000	0.076
病院	0.515	0.894	0.955	0.833	0.758	0.955	0.788	1.000	0.000	0.515
放送局	0.515	0.742	0.864	0.682	0.652	0.864	0.742	0.924	0.470	0.000

注1：aijはj施設よりもし施設の方がより重要と判断された割合

注2：他の質問で整合性のない回答のものを除く

表9-3-b)-A 順序関係マトリックス[aij] (地震後、火災がいくつか発生し、大火のおそれがあるとき)

	警察建物 消防建物	保育所	小売店舗	小学校	住宅	デパート	区役所等公的建物	映画館 劇場	病院	放送局
警察建物・消防建物	0.000	0.875	0.938	0.828	0.797	0.891	0.875	0.922	0.766	0.750
保育所	0.125	0.000	0.703	0.344	0.422	0.891	0.422	0.906	0.094	0.234
小売店舗	0.063	0.297	0.000	0.203	0.188	0.766	0.328	0.844	0.063	0.109
小学校	0.172	0.641	0.797	0.000	0.500	0.875	0.484	0.938	0.156	0.250
住宅	0.203	0.578	0.813	0.500	0.000	0.844	0.516	0.906	0.234	0.266
デパート	0.109	0.109	0.234	0.125	0.156	0.000	0.172	0.828	0.031	0.125
区役所等公的建物	0.125	0.578	0.672	0.516	0.469	0.828	0.000	0.859	0.234	0.250
映画館・劇場	0.078	0.094	0.156	0.063	0.094	0.172	0.141	0.000	0.031	0.094
病院	0.219	0.906	0.938	0.828	0.766	0.969	0.766	0.969	0.000	0.578
放送局	0.234	0.766	0.891	0.734	0.719	0.875	0.750	0.906	0.406	0.000

注1: aijはj施設よりもし施設の方がより重要と判断された割合

注2: 他の質問で整合性のない回答メモを除く

SEKIREI A4 NO. 54

表9-3(1)-A 順序関係マトリックス[aij]（地震発生後、約1週間の時期において）

	警察建物 消防建物	保育所	小売店舗	小学校	住宅	デパート	区役所等公的建物	映画館 劇場	病院	放送局
警察建物・消防建物	0.000	0.723	0.692	0.662	0.600	0.908	0.708	0.985	0.308	0.508
保育所	0.277	0.000	0.462	0.262	0.308	0.769	0.385	0.969	0.062	0.185
小売店舗	0.308	0.538	0.000	0.415	0.231	0.862	0.431	0.938	0.154	0.246
小学校	0.338	0.723	0.585	0.000	0.385	0.892	0.400	1.000	0.123	0.277
住宅	0.400	0.677	0.769	0.600	0.000	0.846	0.538	0.969	0.246	0.415
デパート	0.092	0.231	0.138	0.108	0.154	0.000	0.231	0.938	0.015	0.123
区役所等公的建物	0.292	0.615	0.569	0.600	0.462	0.769	0.000	0.969	0.169	0.338
映画館・劇場	0.015	0.031	0.062	0.000	0.031	0.062	0.031	0.000	0.000	0.000
病院	0.677	0.938	0.846	0.877	0.754	0.985	0.831	1.000	0.000	0.631
放送局	0.477	0.815	0.754	0.723	0.585	0.877	0.646	1.000	0.354	0.000

注1：aijはj施設よりもし施設の方がより重要と判断された場合

注2：他の質問で整合性のない回答のものを除く

SEKIREI A4 NO. 54

きる。

(2) 順序数量化

先に第2章で行ったように，順序関係マトリックスから各施設の順序数量化を行うことができる。その結果得られたものが図9－4である。順序数量化によって得られた評価点からみると，それは順序得点の平均から得られた結果と非常に似ている。警察・消防署の地震時における評価が若干高くなっていることが図からわかるが，その他の点ではほぼ図9－1の結果と同じである。

5－4－2－5 各施設のクラスター・アナリシスによるグルーピング

(1) 順位得点の相関係数

順序数量化によって得た結果と順位得点をそのまま用いた結果は非常によく一致しているので，順位得点の相関係数を作成してみる。その結果は表9－4に示されている。それらの相関関係は概して強くないが，デパートと映画館・劇場の相関係数が地震時及び地震後火災多発時期において高い。このことは，人が多く集まるという性格の一致からきた相関関係であると思われる。逆に，この2つの施設は地震時及び地震後の火災多発時期にお

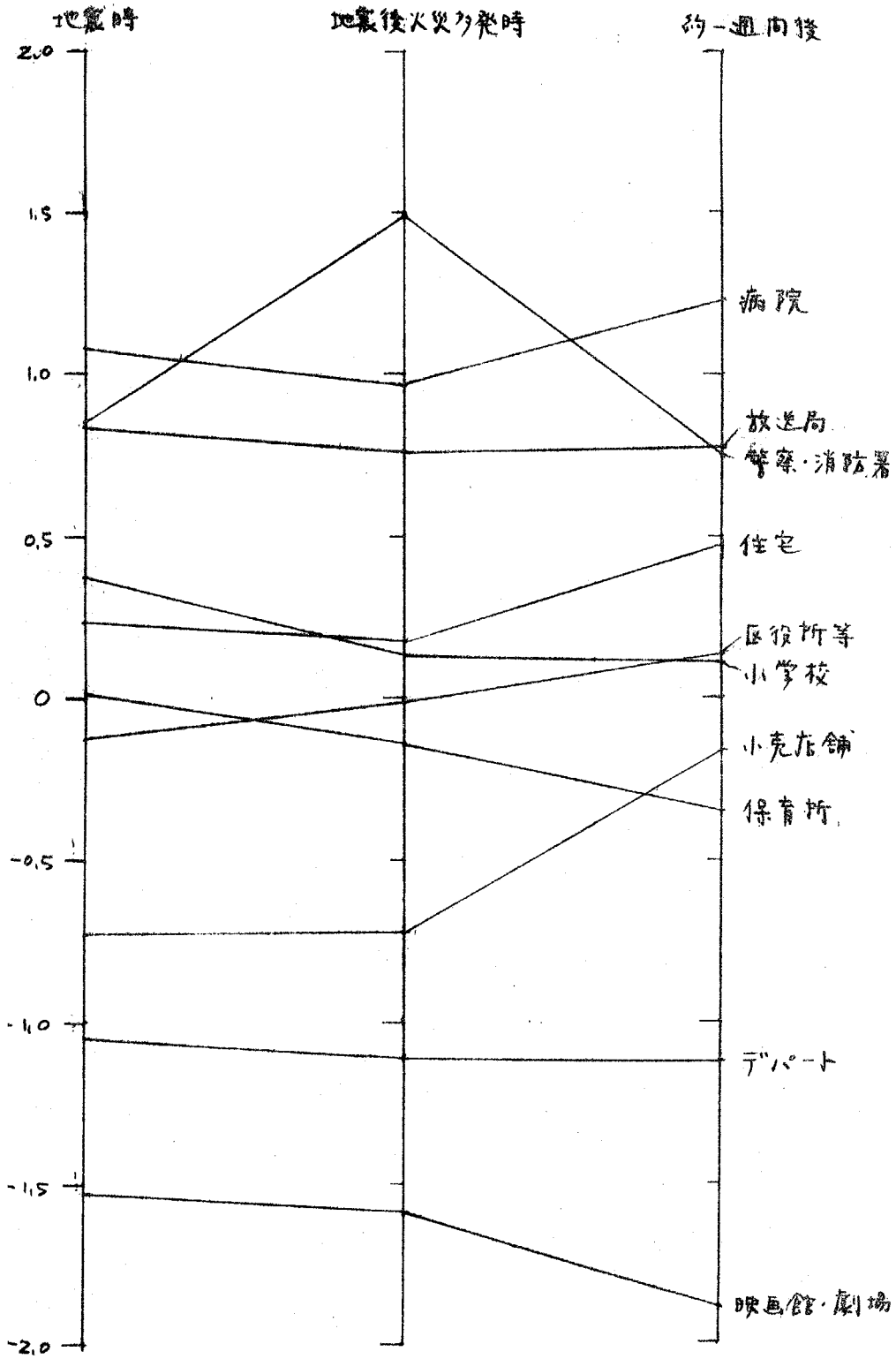


図9-4-A　順序列数量化による各施設の評価値
(他の質問で整合性のない回答を行ったものを除いた場合)

表9-4-(2)-A 相関係数マトリックス（地震時において）

	警察建物 消防建物	保育所	小売店舗	小学校	住宅	デパート	区役所等 公的建物	映画館 劇場	病院	放送局
警察建物・消防建物	1.000	-0.462	0.076	-0.445	-0.067	-0.638	0.349	-0.584	-0.167	0.378
保育所	-0.462	1.000	-0.215	0.651	-0.261	0.264	-0.503	0.195	0.202	-0.419
小売店舗	0.076	-0.215	1.000	-0.420	0.115	-0.124	-0.257	-0.258	0.080	0.055
小学校	-0.445	0.651	-0.420	1.000	-0.174	0.122	-0.148	0.252	0.078	-0.467
住宅	-0.067	-0.261	0.115	-0.174	1.000	-0.194	-0.187	-0.108	-0.070	-0.214
デパート	-0.638	0.264	-0.124	0.122	-0.194	1.000	-0.269	0.646	0.057	-0.317
区役所等公的建物	0.349	-0.503	-0.257	-0.148	-0.187	-0.269	1.000	-0.246	-0.394	0.221
映画館・劇場	-0.584	0.195	-0.258	0.252	-0.108	0.646	-0.246	1.000	0.057	-0.358
病院	-0.167	0.202	0.080	0.078	-0.070	0.057	-0.394	0.057	1.000	-0.300
放送局	0.378	-0.419	0.055	-0.467	-0.214	-0.317	0.221	-0.358	-0.300	1.000

注：他の質問で整合性のない回答のものを除く

SEKIREI A4 NO. 54

表9-4-b)-A　相関係数マトリックス（地震後、火災がいくつか発生し、大火のおそれがあるとき）

	警察建物 消防建物	保育所	小売店舗	小学校	住宅	デパート	区役所等公的建物	映画館 劇場	病院	放送局
警察建物・消防建物	1.000	-0.355	-0.219	-0.140	-0.236	-0.630	0.308	-0.641	-0.020	0.417
保育所	-0.355	1.000	-0.146	0.444	-0.184	0.151	-0.413	0.158	0.211	-0.411
小売店舗	-0.219	-0.416	1.000	-0.419	0.310	-0.085	-0.210	-0.007	-0.033	-0.125
小学校	-0.140	0.444	-0.419	1.000	-0.232	0.140	-0.162	0.018	-0.090	-0.197
住宅	-0.236	-0.184	0.310	-0.232	1.000	-0.045	-0.346	-0.019	-0.079	-0.170
デパート	-0.630	0.151	-0.085	0.140	-0.045	1.000	-0.164	0.620	-0.121	-0.481
区役所等公的建物	0.308	-0.413	-0.210	-0.162	-0.346	-0.164	1.000	-0.352	-0.315	0.209
映画館・劇場	-0.641	0.158	-0.007	0.018	-0.019	0.620	-0.352	1.000	0.024	-0.375
病院	-0.020	0.211	-0.033	-0.090	-0.079	-0.121	-0.315	0.024	1.000	-0.097
放送局	0.417	-0.411	-0.125	-0.197	-0.170	-0.481	0.209	-0.375	-0.097	1.000

注：他の質問で整合性のない回答のものを除く

SEKIREI A4 NO. 54

表9-4-(1)A　相関係数マトリックス（地震発生後、約1週間の時期において）

	警察建物 消防建物	保育所	小売店舗	小学校	住宅	デパート	区役所等公的建物	映画館 劇場	病院	放送局
警察建物・消防建物	1.000	-0.177	-0.428	-0.129	-0.362	-0.210	0.316	0.001	-0.158	0.045
保育所	-0.177	1.000	-0.243	0.468	-0.187	-0.112	-0.400	0.049	0.112	-0.156
小売店舗	-0.428	-0.243	1.000	-0.411	0.442	0.101	-0.279	-0.327	-0.151	-0.143
小学校	-0.129	0.468	-0.411	1.000	-0.208	0.131	-0.231	0.222	-0.016	-0.324
住宅	-0.362	-0.187	0.442	-0.208	1.000	-0.077	-0.422	-0.208	-0.028	-0.278
デパート	-0.210	-0.112	0.101	0.131	-0.077	1.000	-0.217	-0.006	-0.042	-0.324
区役所等公的建物	0.316	-0.400	-0.279	-0.231	-0.422	-0.217	1.000	0.057	-0.216	0.183
映画館・劇場	0.001	0.049	-0.327	0.222	-0.208	-0.006	0.057	1.000	0.007	-0.032
病院	-0.158	0.112	-0.151	-0.016	-0.028	-0.042	-0.216	0.007	1.000	-0.116
放送局	0.045	-0.156	-0.143	-0.324	-0.278	-0.324	0.183	-0.032	-0.116	1.000

注：他の質問で整合性のない回答のものを除く

SEKIREI A4 NO. 54

いて警察・消防建物と逆相関関係にある。警察・消防という積極的に防災につとめるための施設と，映画館，デパートというようなその中で多数の被災者が生じる可能性があるというネガティブな施設との関係がこの相関マトリックスから読みとることができる。この他，保育所と小学校が全体的に高い相関係数を示しており，幼・少年の災害危険性といった点での共通性がうかがわれる。地震後一週間たった時期では，全体的に相関係数が低くなっていることがみられる。

(3) クラスター・アナリシス

相関係数が高いもの（逆相関が高いものも含む）どおしをグループ化し，ふさ状に類型化していく数理的なテクニックとしてクラスター・アナリシスと呼ばれる手法がある。この手法については他の多くの文献で述べられているので，その詳細についてここでは論じない。この分析の結果得られるデンドログラムといわれる図を示したものが図9－5である。この図の中で左側ほど方で連結されているものほど相関が強く，右側に移るにしたがってその連結の度合いが小さくなってくることを示している。

まず，地震時においては（図9－5－a）保育所，小

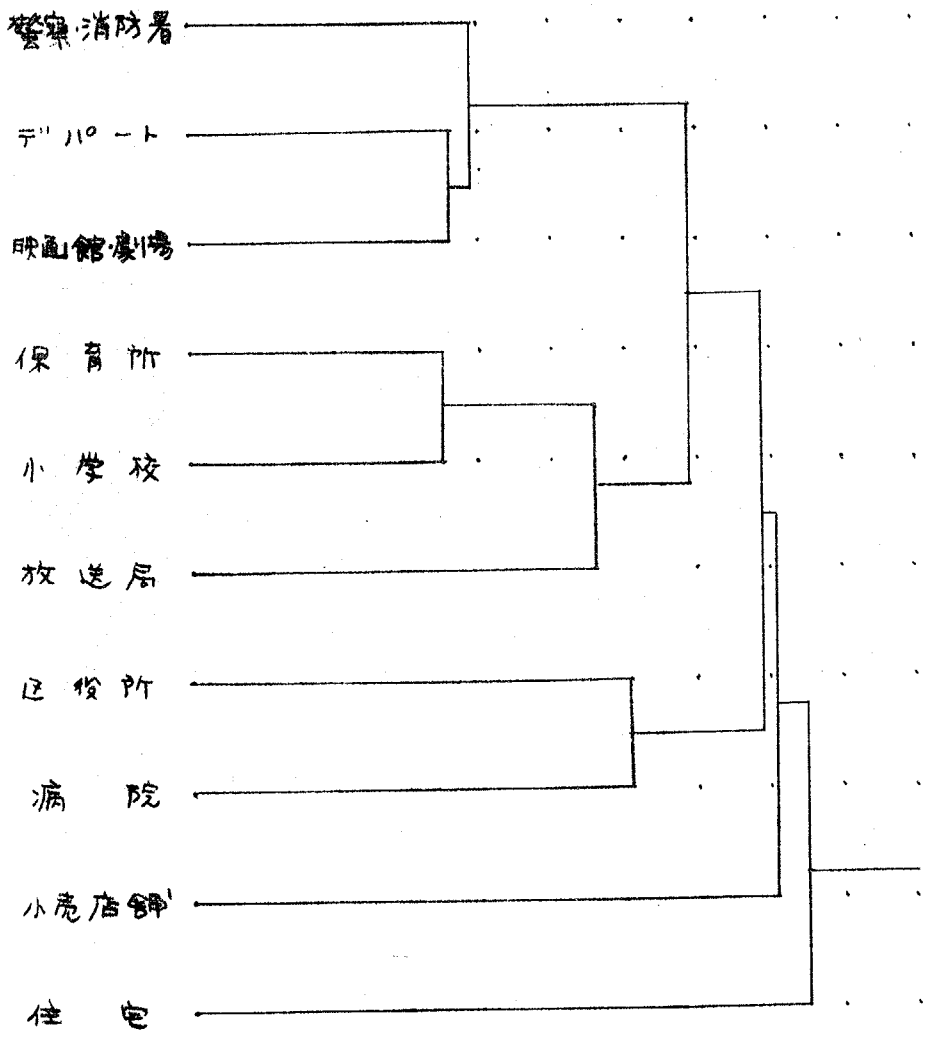


図9-5-a)-A　クラスター分析（地震時）

（他の設問で整合性のない回答者のを除く）

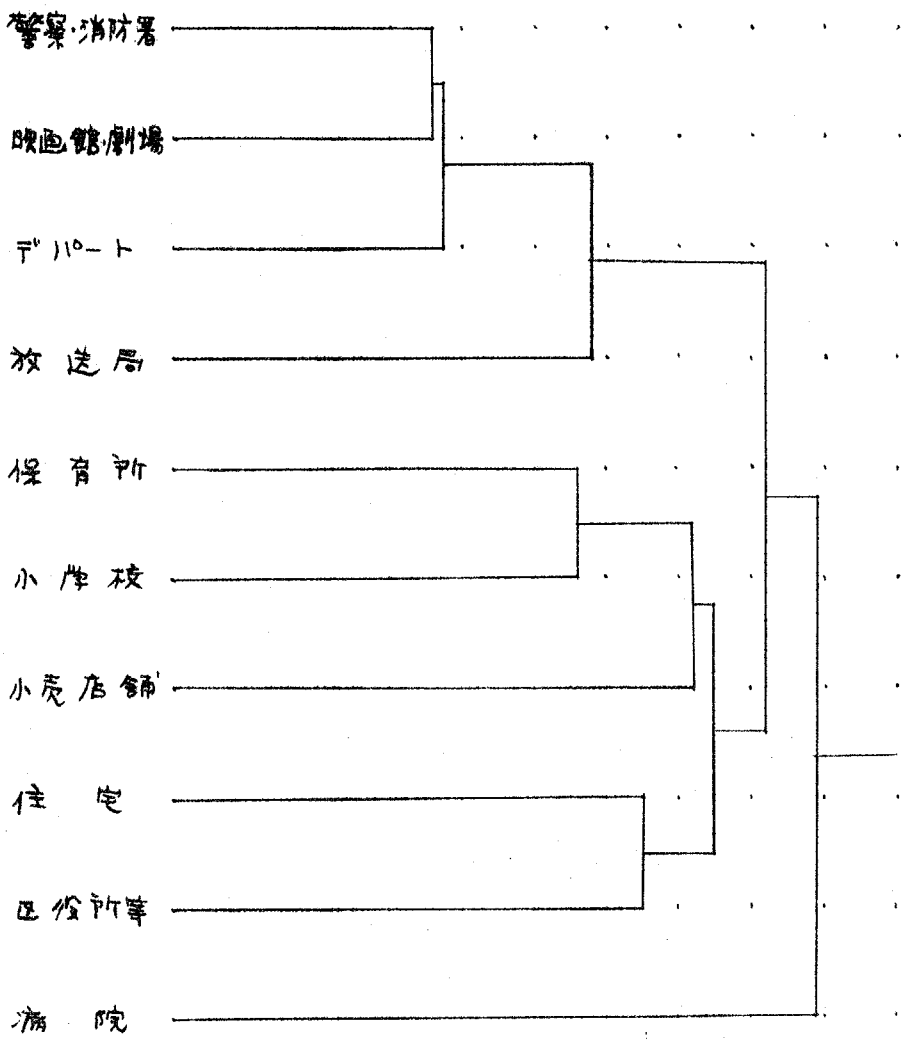


図 9-5-b)-A　クラスター分析（地震後火災多発時）
（他の項目で整合性のない回答のものを除く）

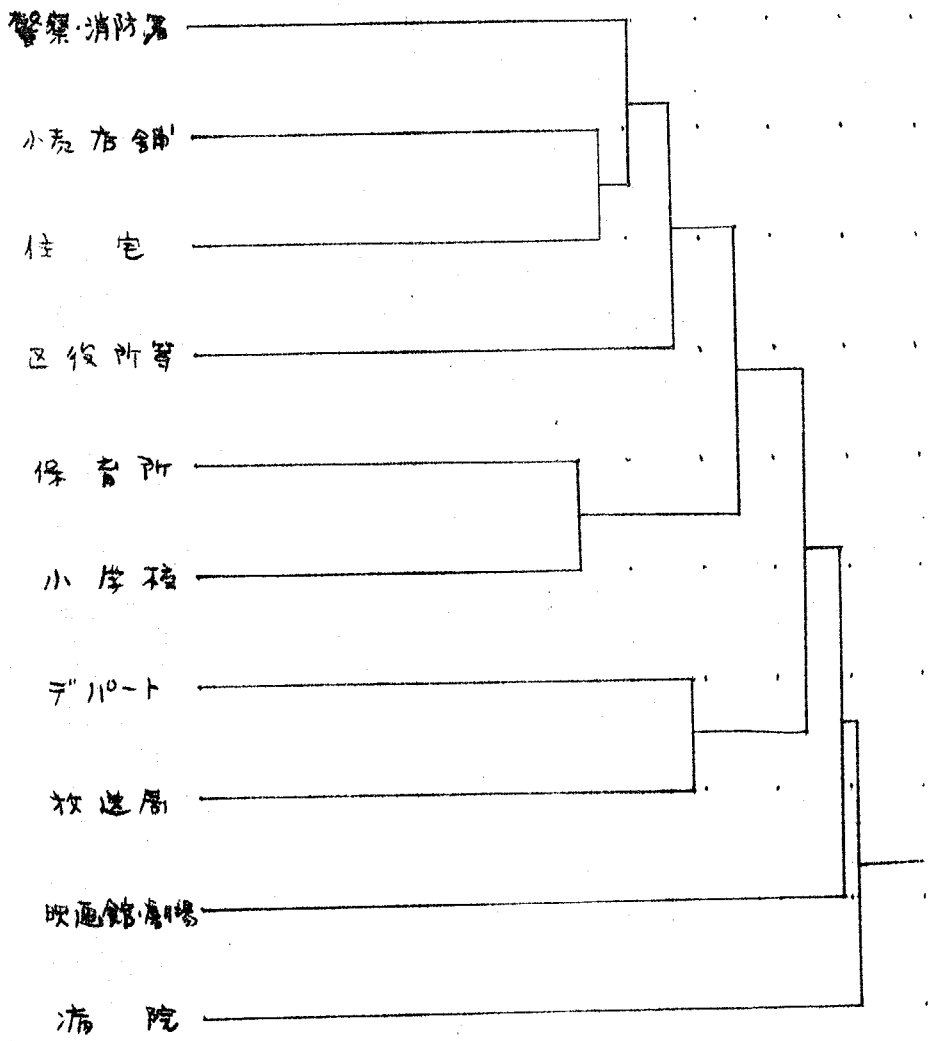


図9-5-α)-A　クラスター分析（地震後約一週間）
（他の質問で整合性のない回答をしたものを除く）

学校がひとつのクラスター，すなわち類似した施設としてグループ化されている。また，デパート，映画館・劇場という施設もひとつにまとまっている。地震時においては住宅がいちばん他の施設と無関係に評価されている。地震後火災多発時においては警察・消防署，映画館，デパートというグループと，保育所，小学校というグループが形成されていることがわかる。続いて，地震後1週間の時期では警察・消防署，小売店舗，住宅がひとつのグループ，保育所，小学校がひとつのグループとなってきている。また，病院は全時期を通じてかなり独立的な存在であることがわかる。地震後1週間たった時期において小売店舗というものが住宅ないしは警察・消防署と同じグループになってきているということは，災害後の生活的側面が強くイメージされてきているせいではないかと思われる。

5-4-2-6 災害の進展と各施設の評価

災害の進展にともなって，より重要視すべき対象は少しづつ変化しているということがまず言える。すなわち，地震時においては病院の重要さが第1位にランクされているが，地震後の火災多発時においては警察・消

防署というものの重要性が病院よりも上位となってくる。しかし，全体を通して病院，放送局，警察・消防署の重要性というものは各評価者によってほぼ一致しているのではないかと思われる。また，各施設の類似度を調べてみると，小学校，保育所という幼・少年のための施設と，デパート，映画館・劇場という人の集まる施設が同じような評価を得ていることがわかる。以上のことから，仮りに公的な施設を災害の面からみて類型化するとすれば，以下のようになるのではないかと思われる。

(1) アクティブな防災施設……警察・消防署

(2) 情報提供機能をもつ施設…放送局

(3) 生命の安全のための施設…病院

(4) 幼・少年の安全のための施設…保育所，小学校

(5) 多くの人が集まる所……デパート，映画館・劇場

(6) 災害後の生活のための施設…小売店舗，区役所等

5-4-3 建築のシステム記述

建築空間はそれ自体非常に複雑な，かつ非常に多くの要因から成り立つひとつの総合システムであり，それらの部分を個別的に分解してとらえるのでは不充分なところがある。しかし，建築空間全体を直接測定可能な量で表現することは非常に困難なばかりでなく，非現実的ともいえる。そこで，まず建築空間をとらえる視点から整理することによってサブシステムへと分解することを考える。その1の視点は，建築空間は物理的なひとつの対象であるとし，そこへ加わる力学的な外力と内力によって決定される物理的な挙動をとらえる視点である。その2の視点は，建物の建築経済的視点，とくにこの生産に要する建設コストのレベルを決定するという視点，間接的には建築空間の良し悪しもある程度このコストによって制約をうけるという視点である。この2つの視点は，物理的視点より安全度を上昇させると建設コストが増加し，経済的に不利になるという関連（トレード・オフ）を持っている。もうひとつの視点は，この建築空間が果す社会的役割についての視点である。とくに重要度係数を必要とされると思われる病院，放送局等のいわば公的な建築空間は，社会的な意味を持つが故に一般構造物に比べ

て重要度という形での安全レベルの修正が必要なのである。以上のう実を整理すると，以下のようになる。

1) 物理的，力学的側面

2) 建築経済的側面

3) 社会的側面

次に，各側面において建築空間をとらえる変量について検討しておきたい。ここでは建築空間を決定するのは二次部材等の要素もあるが，基本的には構造物あるいは構造と呼ばれる力学的対象物であり，外力がこの構造物に各点で作用しており，また，外力から引き起される変形を関係づける各部材の物性的諸量がある。これらの各変量はスカラー量であったり，ベクトル量であったり，あるいはテンソル量であったり，また，時間的な関数として変動する値であったりするが，これらをすべて取り扱うことは重要度係数の決定にとっては困難であるため，これらの諸量から決定される2つの統計量（各変量が確定的にとらえることができないので，結局，この量はひとつのランダム変量である）として構造物の最大外力，構造物の耐力を定義する。これらの2つの量はスカラー量であり，かつ多数の母数によって決定される確率分布を持っている。まず，構造物への最大外力を

$$S[s_1, s_2, \cdots, s_n]$$

とする。ここで，s_iは確率変量Sの確率分布を決定する量で，母数と呼ぶ。このとき，外力の出現値はその測定範囲を長くとればそれだけ最大外力の出現の割合は高くなるので，この統計量はある単位一定期間にそこで発生される外力から決定される最大外力の統計量にほかならない。そこで，その単位期間を一応1年として議論を進める。母数s_iは最大外力の平均値，標準偏差などの値として与えられるのが通常である。

同様に構造物の耐力を考えると，施工上のバラツキなどからランダム変量として

$$R[r_1, r_2, \cdots, r_m]$$

を構造物耐力を考える。さらに，重要度係数θを与えて設計された構造物の耐力R_2は

$$R_2[r_1', r_2', \cdots, r_{m'}', \theta]$$

なる統計量として表わされる。また，構造物への外力，構造物の耐力なる意味づけから，それらの関係

$$R < S$$

が成立しているとき，「構造物が壊れる」といい

$$R \geq S$$

のとき，「構造物は安全である」と呼ぶ。

さらに，R, R_2, S の確率密度関数のそれぞれ

$f_R(R, r_1, r_2, \cdots, r_m)$

$f_{R2}(R_2, r_1', r_2', \cdots, r_m', \theta)$

$f_S(S, s_1, s_2, \cdots, s_n)$

と表記しておく。従って，通常の建物が壊れる確率を p，重要度係数 θ をもって設計した建物の壊れる確率 p_2 は次の式で与えられる。

$$p = P(R < S) \qquad (3-1-1)$$

$$p_2 = P(R_2 < S) \qquad (3-1-2)$$

さらに，R と S，R_2 と S が統計的に独立であれば

$$p = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(R, r_1, r_2, \cdots, r_m) \cdot \int_R^{\infty} f_S(S, s_1, s_2, \cdots, s_n) dS dR \qquad (3-2-1)$$

$$p_2 = \int_{-\infty}^{\infty} f_{R2}(R_2, r_1', r_2', \cdots, r_m'\theta) \cdot \int_{R_2}^{\infty} f_S(S, s_1, s_2, \cdots, s_n) dS dR_2 \qquad (3-2-2)$$

となる。

建築経済的な視点からは，この建築空間の建設のための建設費 C_0 がひとつの量として考えられる。また，建設コストは重要度係数 θ を変化させた場合に変動すると思われるが，このとき，一般的には θ の非常に複雑な関数で表示されることが考えられる。そうした関数の中で共通に持っている重要な特徴は非減少関数であるということである。すなわち

$$\frac{\partial C_0}{\partial \theta} = \omega \geq 0 \qquad (3-3)$$

となっている。

建築空間の価値というものは各状況によって異なる。つまり，日常時における建築空間の価値と災害時における建築空間の価値ではその意味が異なっているのである。そこで，重要度係数θを与える建物を施設と呼び，重要度係数を与えない，すなわち重要度係数θ＝1とした建築空間を普通建物と呼ぶことにし，普通建物が壊れたときを異常時，それ以外を日常時と呼ぶと，日常時と異常時では施設の価値は異なっており，また，この施設も壊れることが考えられるので，結局，日常時と異常時，この施設の正常機能時と破壊された場合の組み合せによる表9－5のような4ケースが考えられる。各ケース毎にそこで得られる効用が考えられる。単位期間として年を採用しているので，各ケース毎に各状況下で1年間に得られる社会的価値の和がこの効用とされるわけである。つまり，効用U_1は日常時におけるこの施設が1年間サービスするときに得られる社会的価値であり，U_2は異常時にこの施設が1年間機能したときに得られる社会的価値であり，U_3は日常時にこの施設が壊れてしまうことによって失われる1年間の損失L_3に負符号をつけたものである。同様にU_4は通常建物もこの施設も破壊されたときに

表9-5　各状況組み合せと効用

施設の状況 / 通常建物の状況	施設が正常に機能	施設が破壊され，機能を失う
日常時：通常建物は壊れない	ケース1 効用 U_1	ケース3 効用 U_3
異常時：通常建物が破壊される	ケース2 効用 U_2	ケース4 効用 U_4

失われる1年間の損失L_4に負符号をつけたものである。

以上のことからビルディング・システム$\mathcal{B}$は物理的側面からとらえたシステムBP，経済的側面からとらえたシステムBE，社会的側面からとらえたシステムBSから構成され，さらに重要度係数という関係パラメータθが介在するシステム

$$\mathcal{B} = < BP,\ BE,\ BS,\ \theta > \qquad (3-4)$$

として表わされ，さらに物理的諸量は最大外力及び耐力というスカラー量としてまとめられているので

$$BP = < S,\ R,\ \theta > \qquad (3-5)$$

という3変数で表示される。また，経済的側面については建設コスト$\mathcal{M}$を考えているので

$$BE = < C_0,\ \theta > \qquad (3-6)$$

となり，社会的側面としては各状況下での効用によって示されるので

$$BS = < U_1,\ U_2,\ U_3,\ U_4 > \qquad (3-7)$$

となり，これらをまとめると

$$\mathcal{B} = < S,\ R,\ C_0,\ U_1,\ U_2,\ U_3,\ U_4,\ \theta > \qquad (3-8)$$

となる。これが今後検討される施設のシステム表示である。

以上の準備のもとで，次に重要度係数の最適化について検討を行う。

5-4-4 重要度係数の最適化

5-4-4-1 総効用最大化原理

効用は単位期間毎に計量されるので，この施設の有効使用年限下がくるまでは，この施設が壊れるまでの効用を加えた値が社会的効用の総和となる。そこで，1年目の社会的効用の期待値は

$$U^{(1)}=(1-p)(1-p_2)U_1+p(1-p_2)U_2+(1-p)p_2U_3+pp_2U_4 \quad (4-1)$$

で与えられる。ここで，各状況での効用が変動しない，すなわち，時間の関数でないと考えると，単に利子率 r に依存した形で2年目の効用も得ることができる。すなわち，1年目に壊れていないという条件のもとで $U^{(1)}$ と同じ効果が得られ，それが現在価値にみなおされるので，結局，

$$U^{(2)}=\frac{1-p_2}{1+r}U^{(1)} \quad (4-2)$$

となり，以下同様にして次の漸化式をうる。

$$U^{(n)}=\left(\frac{1-p_2}{1+r}\right)U^{(n-1)} \quad (n=2,3,\cdots,T) \quad (4-3)$$

社会的効用へこの施設の使用年限内の総和 U_S は明らかに

$$U_S=\sum_{i=1}^{T}U^{(i)} \quad (4-4)$$

であり，(4-3)式を利用して

$$U_S = \sum_{i=1}^{T} \left(\frac{1-p_2}{1+r}\right)^{i-1} U^{(i)}$$

$$= U^{(i)} \cdot \sum_{i=0}^{T-1} \left(\frac{1-p_2}{1+r}\right)^{i} \qquad (4-5)$$

となる。

一方，総効用は社会的効用の総和 U_S から建設に必要な費用を除いた値であり，また，建設時期（正確には建設費用支払い時期）がこの施設の利用の T_0 年前とすると，利用開始時を基準とした効用は

$$U = U_S - C \qquad (4-6)$$

ただし，$C = C_0(1+r)^{T_0}$ $\qquad (4-7)$

であり，重要度係数は他の諸条件が与えられているときには（4－6）式で与えられる総効用を最大化するように決められなければならない。このことは，総効用 U が θ に関しての微分可能性を前提として次の命題と同値である。

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = 0 \qquad (4-8)$$

（4－6）式の結果を使えば，

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = \frac{\partial U_S}{\partial \theta} - \frac{\partial C}{\partial \theta} \qquad (4-9)$$

であり，さらに

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = \left(-\frac{\partial p_2}{\partial \theta}\right)\left(-\frac{\partial U_S}{\partial p_2}\right) - \frac{\partial C}{\partial \theta} \qquad (4-10)$$

と表現できる。(4-10)式の形に変形する理由は効用に関する社会的要因と重要度係数と複雑な力学的諸要因を切り離し，ひとつの破壊確率p_2のみによって結ぶことにより社会的問題と力学的問題の錯綜化を防ぎ，より見通しのよい形にするためにすぎない。(4-10)式の結果を(4-8)式に代入することによって総効用最大化原理から要請されるひとつの均衡式が得られる。

$$-\frac{\partial p_2}{\partial \theta}=\left(\frac{\partial C}{\partial \theta}\right)\Big/\left(-\frac{\partial U_s}{\partial p_2}\right) \qquad (4-11)$$

p_2：施設の破壊確率（1年当り）

θ：施設の重要度

C：施設の建設コストの利用時点換算値

U_s：施設の社会的効用（便益）（1年当り）

左辺は重要度係数と壊れる確率の関係を表わす力学的側面から決定されるものであり，右辺の分子は強度を増加させることによって生じる建設コストの増加の割合を示すもので，純粋に建築経済的に把握できるものである。分母は壊れる確率と社会的利益と損益の問題であり，広い意味での厚生経済学ないしは公共投資の問題としてとりあげられるべきものである。重要度の決定ということがこうした力学的側面，経済的（コスト）側面，社会経

済的側面と深くかかわって決定されるという学際的側面を持っていることは問題の性質をうきぼりにしているといえる。

以後の分析の簡便化のために2，3の概念を導入しておくことが望ましい。(4-11)式の右辺分子の項は，次のように(3-3)式の表示を用いて表わしておくことが便利である。

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = (1+r)^{T_0} \cdot \frac{\partial C_0}{\partial \theta} = (1+r)^{T_0} \cdot \omega \qquad (4-12)$$

この変数ωを「(重要度の)コスト増加率」と呼ぶことにする。また，分母の項については

$$\tau = \left(-\frac{\partial U_s}{\partial P_2}\right) \times \frac{1}{(1+r)^{T_0}} \qquad (4-13)$$

として，この変数τを「(破壊確率の)効用変動率」と呼ぶことにする。以上の2つの定義のもとで(4-11)式は

$$-\frac{\partial P_2}{\partial \theta} = \omega/\tau \qquad (4-14)$$

となる。さらに，次の「重要度のコスト・パーフォーマンス・センシビリティ(費用便益感度)」という概念を以下のように定義すると

$$h = \omega/\tau \qquad (4-15)$$

となり，(4-11)式は

$$-\frac{\partial p_2}{\partial \theta} = k \qquad (4-16)$$

k：重要度のコスト・パーフォーマンス・センシビリティ

となる。結局，総効用最大化原理は社会的経済的条件から決まってくるコスト・パーフォーマンス・センシビリティ k と，力学的に決まってくる破壊確率の減少率（$-\partial p_2/\partial\theta$）との均衡条件として表わされることになる。

5-4-4-2 効用変動率の検討

前項で定義された効用変動率 γ について検討してみよう。（4-5）式を p_2 で偏微分することによって

$$\frac{\partial U_s}{\partial p_2} = \frac{\partial U^{(1)}}{\partial p_2}\sum_{i=0}^{T-1}\left(\frac{1-p_2}{1+r}\right)^i + U^{(1)}\sum_{i=0}^{T-1}\left[\frac{1}{(1+r)^i}\times\frac{\partial}{\partial p_2}(1-p_2)^i\right]$$

$$= \frac{\partial U^{(1)}}{\partial p_2}\sum_{i=0}^{T-1}\left(\frac{1-p_2}{1+r}\right)^i - U^{(1)}\sum_{i=0}^{T-1}\frac{i(1-p_2)^{i-1}}{(1+r)^i}$$

$$= \frac{\partial U^{(1)}}{\partial p_2}\sum_{i=0}^{T-1}\left(\frac{1-p_2}{1+r}\right)^i - \frac{U^{(1)}}{1-p_2}\sum_{i=1}^{T-1}\cdot i\left(\frac{1-p_2}{1+r}\right)^i \qquad (4-17)$$

となる。一方，

$$\frac{\partial U^{(1)}}{\partial p_2} = -\{U_1 - U_3 - p(U_1 - U_2 - U_3 + U_4)\} \qquad (4-18)$$

であり，また

$$b_0 = \sum_{i=0}^{T-1}\left(\frac{1-p_2}{1+r}\right)^i = \frac{1-\left(\frac{1-p_2}{1+r}\right)^T}{1-\frac{1-p_2}{1+r}}$$

$$= \frac{(1+r)^T - (1-p_2)^T}{(p_2+r)(1+r)^{T-1}} \qquad (4-19)$$

$$g_1 = \frac{1}{1-p_2} \sum_{i=0}^{T-1} i \cdot \left(\frac{1-p_2}{1+r}\right)^i$$

$$= \frac{1}{1-p_2} \left\{ \frac{\frac{1-p_2}{1+r}\left(1-\left(\frac{1-p_2}{1+r}\right)^{T-1}\right)}{\left(1-\frac{1-p_2}{1+r}\right)^2} - \frac{(T-1)\left(\frac{1-p_2}{1+r}\right)^T}{1-\frac{1-p_2}{1+r}} \right\}$$

$$= \frac{1}{p_2+r} \times \frac{(1+r)^T-(1-p_2)^T}{(p_2+r)(1+r)^{T-1}} - \frac{(1-p_2)^{T-1} \cdot T}{(p_2+r)(1+r)^{T-1}} \qquad (4-20)$$

あるいは

$$g_1 = \frac{1}{p_2+r} g_0 - \frac{(1-p_2)^{T-1} \cdot T}{(p_2+r)(1+r)^{T-1}} \qquad (4-20)'$$

となる。ところで，この施設の破壊確率 p_2 は他の変数に比べて非常に小さいので，上述の p_2 を含んだ高次の項はより単純化することができる。すなわち，g_0，g_1 を p_2 の関数と考え，テーラー展開し，p_2 の自乗以上の高次のところを切り捨てることによって (4-19) 式及び (4-20) 式は p_2 に関して以下のごとくより単純な形にできる（付5-4-A1参照）。

$$g_0 \cong \frac{(1+r)^T-1}{r(1+r)^{T-1}} - p_2 \cdot \frac{(1+r)^T - rT}{r(1+r)^{T-1}} \qquad (4-21)$$

$$g_1 \cong \frac{(1+r)^T-1-rT}{r^2(1+r)^{T-1}} - p_2 \left\{ \frac{1}{r} \times \frac{(1+r)^T-rT}{r(1+r)^{T-1}} + \frac{1}{r^2} \times \frac{(1+r)^T-1}{r(1+r)^{T-1}} - \frac{T(rT-r+1)}{r^2(1+r)^{T-1}} \right\} \qquad (4-22)$$

また，

$$g_{01} = \frac{(1+r)^T - 1}{r(1+r)^{T-1}} \qquad (4-23-1)$$

$$g_{02} = \frac{(1+r)^T - rT}{r(1+r)^{T-1}} \qquad (4-23-2)$$

$$g_{11} = \frac{(1+r)^T - 1 - rT}{r^2(1+r)^{T-1}} \qquad (4-23-3)$$

$$g_{12} = \frac{1}{r} \times \frac{(1+r)^T - rT}{r(1+r)^{T-1}} + \frac{1}{r^2} \times \frac{(1+r)^T - 1}{r(1+r)^{T-1}} - \frac{T(rT-r+1)}{r^2(1+r)^{T-1}} \qquad (4-23-4)$$

とおくことによって

$$g_0 = g_{01} - p_2 g_{02} \qquad (4-21')$$

$$g_1 = g_{11} - p_2 g_{12} \qquad (4-22')$$

となる。以上のことから

$$-\frac{\partial U_S}{\partial p_2} = \{U_1 - U_3 - p(U_1 - U_2 - U_3 + U_4)\}(g_{01} - p_2 g_{02}) + \{U_1(1-p-p_2) + pU_2 + p_2 U_3\}(g_{11} - p_2 g_{12}) \qquad (4-24)$$

となる。ただし，$p \cdot p_2$ の項は非常に小さく，省略している。さらに

$$-\frac{\partial U_S}{\partial p_2} = \{g_{01} - pg_{01} - p_2 g_{02} + g_{11} - pg_{11} - p_2 g_{11} - p_2 g_{12}\} U_1 + \{pg_{01} + pg_{11}\} U_2 + \{-g_{01} + pg_{01} + p_2 g_{02} + p_2 g_{11}\} U_3 - pg_{01} U_4 \qquad (4-25)$$

をうる。ここで，現状では $0.02 \leq r \leq 0.1$，$10 < T \leq 100$ であり，破壊確率 p, p_2 は中野（文献2・表16）によれば

0.5×10^{-6}と計算されており，ここでは以下のように仮定しておく。

$$p<10^{-4} \qquad p_2<\frac{1}{2}\times10^{-4} \tag{4-26}$$

さらに，通常建物が壊れた場合の施設の価値は壊れなかった場合に比べて相当量増加すると考えられ，その増加の程度も施設の種類，機能によって相当差があると考えられる。病院などの場合を考えると，緊急時といえどもサービス能力は数倍程度までにしか増加しえないと考えられるが，放送局のような場合，緊急時の情報の価値が何十倍にも増加するような場合には異常時の施設の価値U_2は正常時の場合に比べ，大きく増加すると思われる。これらの実際の増加量は今後検討の余地があるが，ここでは大はばに見積り，以下の範囲におさまっていると仮定する。

$$\left|\frac{U_2}{U_1}\right|<10^3,\quad \left|\frac{U_3}{U_1}\right|<10^2,\quad \left|\frac{U_4}{U_1}\right|<10^3 \tag{4-27}$$

以上の仮定(4-26)，(4-27)のもとで各項のオーダーを比較すると，以下のようになっている(付5-4A2参照)。

$$\left|\frac{g_{01}U_1}{g_{11}U_1}\right|<10^{-1},\quad \left|\frac{pg_{01}U_1}{g_{11}U_1}\right|<10^{-5},\quad \left|\frac{p_2g_{02}U_1}{g_{11}U_1}\right|<10^{-5}$$

$$\left|\frac{g_{11}U_1}{g_{11}U_1}\right|=1,\quad \left|\frac{pg_{11}U_1}{g_{11}U_1}\right|<10^{-4},\quad \left|\frac{p_2g_{11}U_1}{g_{11}U_1}\right|<10^{-4}$$

$$\left|\frac{p_2 g_{12} U_1}{g_{11} U_1}\right| < 10^{-2},\quad \left|\frac{p g_{01} U_2}{g_{11} U_1}\right| < 10^{-2},\quad \left|\frac{p g_{11} U_2}{g_{11} U_1}\right| < 10^{-1}$$

$$\left|\frac{g_{01} U_3}{g_{11} U_1}\right| < 10,\quad \left|\frac{p g_{01} U_3}{g_{11} U_1}\right| < 10^{-3},\quad \left|\frac{p_2 g_{02} U_3}{g_{11} U_1}\right| < 10^{-3}$$

$$\left|\frac{p_2 g_{11} U_3}{g_{11} U_1}\right| < 10^{-2},\quad \left|\frac{p g_{01} U_4}{g_{11} U_1}\right| < 10^{-2} \qquad (4-28)$$

また，現行の重要度係数に用いられる値は1.25，1.00，0.75（建築基準法同施行令改訂案等）のように，実用上では1/4程度のおうさの数値であるので，ここでは$g_{11} U_1$にくらべて10^{-2}以下のものを省略した式

$$-\frac{\partial U_5}{\partial p_2} \cong (g_{01} + g_{11}) U_1 + p g_{11} U_2 - g_{01} U_3 \qquad (4-29)$$

を以後の分析に用いることにしたい。上の式は(4-13)式より次のように変形することによって以後の分析に便利になる。すなわち，効用変動率では以下の式で与えられる。

$$\tau = g_{01}'(U_1 - U_3 + g_{11}'(U_1 + p U_2) \qquad (4-30)$$

ただし，

$$g_{01}' = \frac{(1+r)^T - 1}{r(1+r)^{T-1} + T_0}$$

$$g_{11}' = \frac{(1+r)^T - 1 - rT}{r^2(1+r)^{T-1} + T_0}$$

5-4-4-3 正常時効用の検討

計画の合目性から直ちに効用の総和は建設コストを上回っていなければならないといえる。しかし，このとき計画の段階で想定されている効用は，当該施設の機能が使用期間中正常に機能したとしての効用にほかならない。すなわち，通常建物も当該施設も壊れないとしたときの社会的効用の総和が建設コストを上回っていなければならないということが計画段階で要請されているわけであり，以下のように表わすことができる。

$$U_S\Big|_{\substack{p=0\\ p_2=0}} \geqq C \tag{4-31}$$

左辺は社会的効用の総和 U_S から直ちに

$$U_S\Big|_{\substack{p=0\\ p_2=0}} = \sum_{i=0}^{T-1} \frac{1}{(1+r)^i} \times U_1 \tag{4-32}$$

であることがわかる。従って，(4-31)式は

$$U_1 \sum_{i=0}^{T-1} \frac{1}{(1+r)^i} \geqq C \tag{4-33}$$

となり，整理すると

$$U_1 \geqq C \times \frac{1}{\sum (1+r)^i} = C \times \frac{r(1+r)^{T-1}}{(1+r)^T - 1} \tag{4-34}$$

となり，さらに前項で定義した記号 g_{01} を用いると，

$$U_1 \geq \frac{1}{g_{01}} C \tag{4-35}$$

となる。従って，正常時のこの施設の年間当り効用U_1は建設コストの$1/g_{01}$よりは大きくなくてはならないといえる。

そこで，この不等式で与えられる条件の中で正常時の効用U_1をどの程度に見積ればよいかということが次の問題となる。まず，次式で定義される回収年数T_*を検討しよう。

$$C = \sum_{i=0}^{T_*-1} \frac{1}{(1+r)^i} \times U_1 \qquad (4-36)$$

T_*は総便益と総費用が等しくなる年数を表わしており，施設の建設が社会的に有益なものでなければならないとすれば，施設の使用期間中に得られる社会的効用は建設コストCを上回って

$$T_* \leq T \qquad (4-37)$$

という関係式が成立している。正常時の社会的効用U_1は(4-36)式よりC及びT_*を用いて

$$U_1 = \frac{C}{\sum_{i=0}^{T_*-1} \frac{1}{(1+r)^i}} \qquad (4-38)$$

ないしは

$$U_1 = C \times \frac{r(1+r)^{T_*-1}}{(1+r)^{T_*}-1} \qquad (4-39)$$

で与えられる。もちろん，(4-38)式ないし(4-39)式

で与えられる U_1 は（4－34）式ないしは（4－35）式をみたしていることは明らかである。

利用開始時点での建設コスト C を建設コスト C_0 に書き改めると，（4－7）式を用いて

$$U_1 = C_0 \times \frac{r(1+r)^{T_*-1}+T_0}{(1+r)^{T_*}-1} \qquad (4-40)$$

となる。この（4－40）式の右辺の C_0 にかかる係数

$$k_r = \frac{r(1+r)^{T_*-1}+T_0}{(1+r)^{T_*}-1} \qquad (4-41)$$

は通常（資本）回収率と呼ばれるもので，$T_0=1$ とすると各利子率のもとで表9－6のような値となっている。

従って，病院等の都市施設は高速道路，民間ビルなどの例（$T_*=4\sim6$ の例がある）から考えて，また，その公共性も考え合せてみると，表9－6から T_* は10未満であると考えてよいであろう。故に現行利子率が5%ないし10%であるとすると，資本回収率の値は0.13～0.26程度であると考えられる。

$$0.13 < \frac{U_1}{C_0} = k_r < 0.26 \qquad (4-42)$$

である。

5－4－4－4 総効用最大化原理の展開

正常時の効用を基準にして各状況での効用を次のよう

表 9-6　回収率 k_r の値

T_* ＼ 利子率 r	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
1	1.01000	1.02000	1.03000	1.04000	1.05000	1.06000	1.07000	1.08000	1.09000	1.10000
2	0.50751	0.51505	0.52261	0.53020	0.53780	0.54544	0.55309	0.56077	0.56847	0.57619
3	0.34002	0.34675	0.35353	0.36035	0.36721	0.37411	0.38105	0.38803	0.39505	0.40211
4	0.25628	0.26262	0.26903	0.27549	0.28201	0.28859	0.29523	0.30192	0.30867	0.31547
5	0.20604	0.21216	0.21835	0.22463	0.23097	0.23740	0.24389	0.25046	0.25709	0.26380
6	0.17255	0.17853	0.18460	0.19076	0.19702	0.20336	0.20980	0.21632	0.22292	0.22961
7	0.14863	0.15451	0.16051	0.16661	0.17282	0.17914	0.18555	0.19207	0.19869	0.20541
8	0.13069	0.13651	0.14246	0.14853	0.15472	0.16104	0.16747	0.17401	0.18067	0.18744
9	0.11674	0.12252	0.12843	0.13449	0.14069	0.14702	0.15349	0.16008	0.16680	0.17364
10	0.10558	0.11133	0.11723	0.12329	0.12950	0.13587	0.14238	0.14903	0.15582	0.16275

に表わすことによって数式の意味をとりやすくすることができる。

$$U_2 = \eta U_1 \qquad (4-43-1)$$

$$U_3 = -\eta' U_1 \qquad (4-43-2)$$

この記号を使うと（4-30）式は

$$\tau = \left\{ g'_{01}(1+\eta') + g'_{11}(1+p\eta) \right\} U_1 \qquad (4-44)$$

ただし，

$$g'_{01} = \frac{(1+r)^T - 1}{r(1+r)^{T-1+T_0}}$$

$$g'_{11} = \frac{(1+r)^T - 1 - rT}{r^2(1+r)^{T-1+T_0}}$$

と変形できる。さらに（4-40）式を用いると

$$\tau = \frac{\{(1+r)^T - 1\}(1+\eta') + \frac{1}{r}\{(1+r)^T - 1 - rT\}(1+p\eta)}{r(1+r)^{T-1+T_0}} \times \frac{r(1+r)^{T_*-1+T_0}}{(1+r)^{T_*}-1} \times C_0$$

$$= \frac{\{(1+r)^T - 1\}(1+\eta') + \frac{1}{r}\{(1+r)^T - 1 - rT\}(1+p\eta)}{(1+r)^{T-T_*}\{(1+r)^{T_*}-1\}} \times C_0 \qquad (4-45)$$

となる。ここで，さらに補助変数 u を以下のように導入する。

$$u = \frac{\tau}{C_0}$$

$$= \frac{(1+r)^T - 1}{(1+r)^{T_*}-1} \cdot \frac{1}{(1+r)^{T-T_*}} \cdot (1+\eta')$$

$$+ \frac{(1+r)^T - 1 - rT}{(1+r)^{T_*}-1} \cdot \frac{1}{r(1+r)^{T-T_*}} (1+p\eta) \qquad (4-46)$$

この変数 u はコスト当り効用変動率と呼ぶことができる。

この変数 u を用いて

$$k = \frac{\omega}{\tau} = \frac{\omega}{C_0 \times u} = \frac{\omega}{C_0} \cdot \frac{1}{u} \tag{4-47}$$

また，コスト当りコスト増加率

$$\rho = \frac{\omega}{C_0} \tag{4-48}$$

とすると

$$k = \frac{\rho}{u} \tag{4-49}$$

となる。以上を整理すると，総効用最大化原理は(4-16)式より以下のように示される。

$$-\frac{\partial P_2}{\partial \theta} = \frac{\rho}{u} \tag{4-50}$$

ただし，

$$u = \frac{\tau}{C_0}$$

$$= \frac{(1+r)^T - 1}{(1+r)^{T_*} - 1} \cdot \frac{1}{(1+r)^{T-T_*}} \cdot (1+\eta')$$

$$+ \frac{(1+r)^T - 1 - rT}{(1+r)^{T_*} - 1} \cdot \frac{1}{r(1+r)^{T-T_*}} \cdot (1+p\eta)$$

$$\rho = \frac{\partial C_0}{\partial \theta} \Big/ C_0$$

C_0：建設コスト

r：社会的利子率

T：当該施設の利用年数

T_*：回収年数（純利益が総費用を上回る最初の年）

p：通常建物の年当り破壊確率

p_2：当該施設の年当り破壊確率

θ：重要度係数

5-4-5 重要度係数の最適解

5-4-5-1 コスト当り効用変動率及びコスト当りコスト増加率の値

前項で求めた重要度係数がみたすべき関係式を具体的に解き，最適な重要度係数を求める。この際，コスト当りの効用変動率，コスト当りコスト増加率の実際の値の範囲及び破壊確率の分布型が必要であるが，前二者については数値例により，その値の範囲を限定するとともに後者については正規分布の場合，対数正規分布の場合を想定して重要度係数を求めることを試みる。

前項（4-46）式で与えられたコスト当り効用変動率の値が実際どの程度になっているかということを検討しておくことにする。（4-46）式は2つの項の和から定義されている。すなわち，第1項は

$$\frac{(1+r)^T-1}{(1+r)^{T_*}-1}\cdot\frac{1}{(1+r)^{T-T_*}}\cdot(1+\eta')$$

であり，η'は，通常建物は破壊されずに施設が破壊された場合の損失を正常時に得られる効用で基準化したものであり，この施設のみが壊れた場合の効用に関する項であることがわかる。一方，第2項

$$\frac{(1+r)^T-1-rT}{(1+r)^{T_*}-1}\cdot\frac{1}{r(1+r)^{T-T_*}}\cdot(1+\eta'')$$

は通常建物が壊れた場合にこの建物が機能することによって得られる効用をまとめたものである。

これらの値を調べるために，まず，社会的利率 r，施設の利用年数 T，資本回収年 T_* に関する係数項

$$A = \frac{(1+r)^T - 1}{(1+r)^{T_*} - 1} \cdot \frac{1}{(1+r)^{T-T_*}} \qquad (5-1)$$

$$B = \frac{(1+r)^T - 1 - rT}{(1+r)^{T_*} - 1} \cdot \frac{1}{r(1+r)^{T-T_*}} \qquad (5-2)$$

の値を $0.01 \leq r \leq 0.1$，$20 \leq T \leq 100$，$1 \leq T_* \leq 50$ の範囲で試算を行った（付表 9-A1 ～ 9-A5 参照）。現実には $0.06 \leq r \leq 0.1$，$20 \leq T \leq 100$，$4 \leq T_* \leq 10$ であることが多いので

$$1.38 \leq A \leq 4.79 \qquad (5-3)$$

$$9.01 \leq B \leq 98.51 \qquad (5-4)$$

となる。

一方，p の値は前項で述べた通り，通常 10^{-6} 程度の値が採用されているので，前節で仮定した（4-26）式をここでも用いることにする。すなわち

$$p < 10^{-4} \qquad (5-5-1)$$

である。また，η，η' は前項（4-43）式の定義及び（4-27）式の仮定のもとで

$$\eta < 10^3, \quad \eta' < 10^2 \qquad (5-5-2)$$

であるので，p_4 は 10^{-1} よりも小さな値となっている。

そこで，以後の分析内容をわかりやすくする手段として以下のような標準値（正確には，統計的な意味の標準値ではなく，仮定（4-27）及び（5-5-1）の範囲の可能な値のうちのひとつという意味である）を準備しておく。

$$\gamma' = 4, \quad p_4 = 0.05$$

$$\gamma = 0.08, \quad T = 60, \quad T_* = 7$$

このとき，（4-46）式よりコスト当り効用変動率の標準値は

$$u_0 = 41.55$$

となり，一方，コスト当りコスト増加率の値についても概算しておくことにしよう。上部構造のみについてのコスト増を検討してみると，震度 0.2 による設計から 0.3 に鉄骨造の建物を設計変更させた場合，約 10% のコスト増があったという報告がなされている（文献3）。一方，別の報告では，総合病院の科目内訳毎の建設費（見積り）が調べられており（文献4），SRC 造，地上 13階，地下1階の延面積 21,284 m^2 の総合病院であるが，ここから躯体部分（基礎躯体，地下躯体を除く）の費用比率をとると約 30% になっている。従って，建設コスト当りのコスト増加率 β は，震度 0.2 を基準設計と考える

と，設計震度0.1当り増加率が0.1であるので，

$$f_0 = \left\{0.1 \Big/ \left(\frac{0.3-0.2}{0.2}\right)\right\} \times 0.3 = 0.06$$

となる。この値をひとつの目やすとして採用すると，重要度のコスト・パーフォーマンス・センシビリティ h は

$$h = \frac{f}{u}$$

で定義されていたので，標準値として

$$h_0 = \frac{f_0}{u_0} = \frac{0.06}{41.55} \cong 0.0014$$

となる。また，(5-4)，(5-5-1)，(5-5-2) 及び $0.03 < f < 0.18$ のもとで

$$0.000052 < h < 0.0173$$

である。

5-4-5-2 外力及び耐力に関する確率分布が正規分布の場合

建物が複雑なシステムであり，建物の外力，建物の耐力といった合成されたスカラーランダム変量は，正規分布に近づく可能性がありうる。そこで，先のランダム変量 R, R_2, S がそれぞれ正規分布 $[u_r, \sigma_r]$, $[0u_r, \sigma_r]$, $[u_s, \sigma_s]$[注1] で与えられる場合を考える。このとき，各

注1：記号 $[u, \sigma]$ は平均値 u，標準偏差 σ の正規分布を表わす。

変量が独立に変動すると考えれば，通常の建物が壊れる確率は

$$P = 1 - \Phi\left(\frac{u_r - u_s}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}}\right) \quad (注2) \qquad (5-6)$$

となり，この施設が壊れる確率は同様に

$$P_2 = 1 - \Phi\left(\frac{\theta u_r - u_s}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}}\right) \qquad (5-7)$$

となる。

一方，外力，耐力を総合的にとうえた意味での総合変動係数δを以下のように定義すると

$$\delta = \frac{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}}{u_r} \qquad (5-8)$$

また，通常建物の安全率β（中央安全率とも呼ばれる，文献5参照）を

$$\beta = \frac{u_s}{u_r} \qquad (5-9)$$

とすると，(5-6)式及び(5-7)式は

$$P = 1 - \Phi\left(\frac{1-\beta}{\delta}\right) \qquad (5-10)$$

$$P_2 = 1 - \Phi\left(\frac{\theta-\beta}{\delta}\right) \qquad (5-11)$$

注2：記号$\Phi(x)$は平均値0，標準偏差1の正規確率分布関数である。すなわち，以下の関数である。

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

また,

$$-\frac{\partial P_2}{\partial \theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta-\beta}{\delta}\right)^2\right] \qquad (5-12)$$

となる。

前項の(4-49), (4-50)式及び(5-12)式より

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta-\beta}{\delta}\right)^2\right] = h \qquad (5-13)$$

をうる。θについて この式を解くと

$$\theta = \beta \pm \delta\sqrt{2\log\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,h\delta}\right)} \qquad (5-14)$$

をうるが, θの範囲を考えて

$$\theta = \beta + \delta\sqrt{2\log\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,h\delta}\right)} \qquad (5-15)$$

をうる。また, 根号条件から

$$h\delta \leq \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\cong 0.399\right) \qquad (5-16)$$

が総効用最大化原理の成立しうる範囲となる。

(5-15)式から求めた重要度係数を図示したものが図9-6である。前項の$h_0 \fallingdotseq 0.001$を用いれば, 総合変動係数が0.4のときでおよそ1.8になっていることがわかる。さらに総合変動係数δが変化するとき, θはどの程度変化するかを検討しておこう。まず, (5-14)式から

$$\frac{\partial \theta}{\partial \delta} = \sqrt{2\log\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,h\delta}} - \frac{1}{\sqrt{2\log\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,h\delta}}} \qquad (5-17)$$

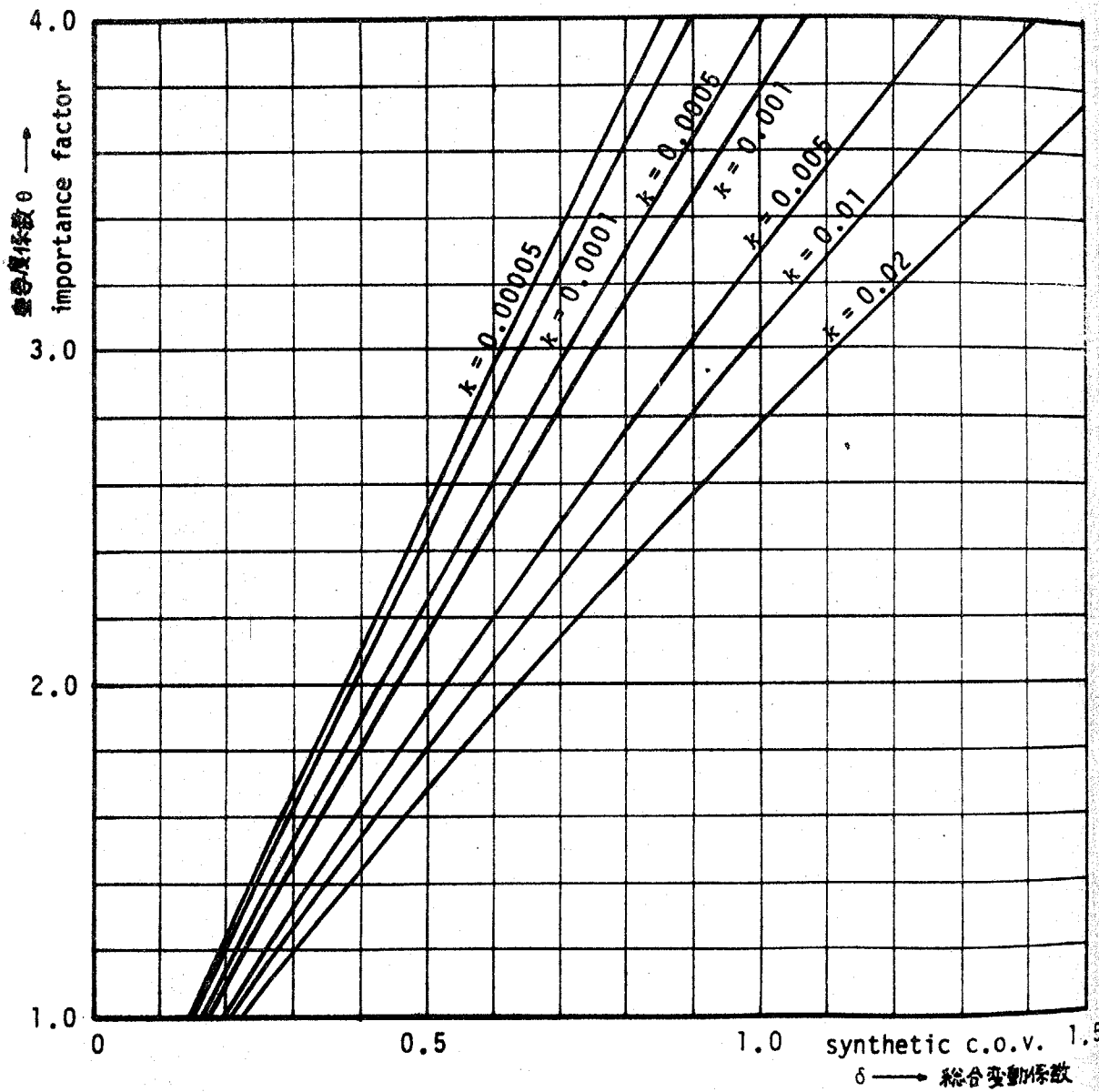


図 9-6. 重要度係数（外力，耐力がともに正規分布に従うとき）

Importance Factor (Normal Distribution)

をうる。従って，$\delta=0.4$，$k=0.001$ のときの上式の値は 3.447 である。すなわち，総合変動係数 δ が 0.1 増加するとき，重要度係数 θ はおよそ 0.35 程度の増加がみられることがわかる。

一方，総合変動係数は（5-8）式より

$$\delta=\sqrt{\left(\frac{\sigma_r}{u_r}\right)^2+\left(\frac{\sigma_s}{u_r}\right)^2}$$

$$=\sqrt{\left(\frac{\sigma_r}{u_r}\right)^2+\left(\frac{u_s}{u_r}\right)^2\left(\frac{\sigma_s}{u_s}\right)^2} \qquad (5-18)$$

と表わすことができる。また，各変動係数は

$$\Delta_r=\frac{\sigma_r}{u_r} \qquad (5-19)$$

$$\Delta_s=\frac{\sigma_s}{u_s} \qquad (5-20)$$

と書けるので，総合変動係数は（5-9）式で定義されている安全率 β を用いて

$$\delta=\sqrt{\Delta_r^2+\beta^2\cdot\Delta_s^2} \qquad (5-21)$$

となる。そこで，変動係数 $\Delta_r-\Delta_s$ 空間での等重要度曲線はどのようになるかを調べてみよう。（5-21）式及び（5-15）式より安全率 β，重要度コスト・パーフォーマンス・センシビリティ k が一定のもとでは等重要度曲線は楕円の一部となることがわかる（図9-7参照）。

β の $\frac{1}{3}$ のもとでの等重要度曲線が図9-8に示されて

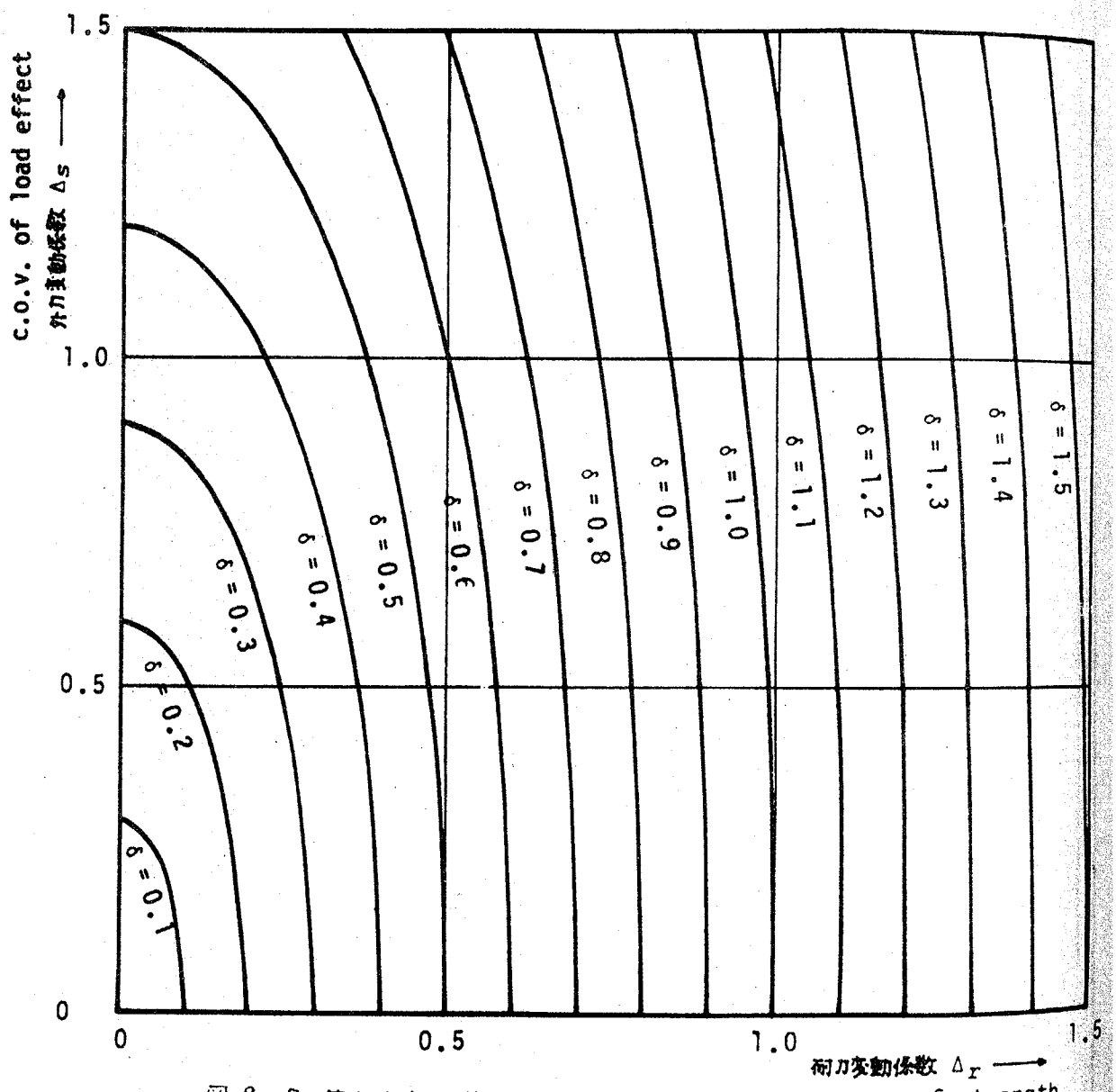


図 9-7 等総合変動係数曲線

Equivalent-Synthetic c.o.v. Curve

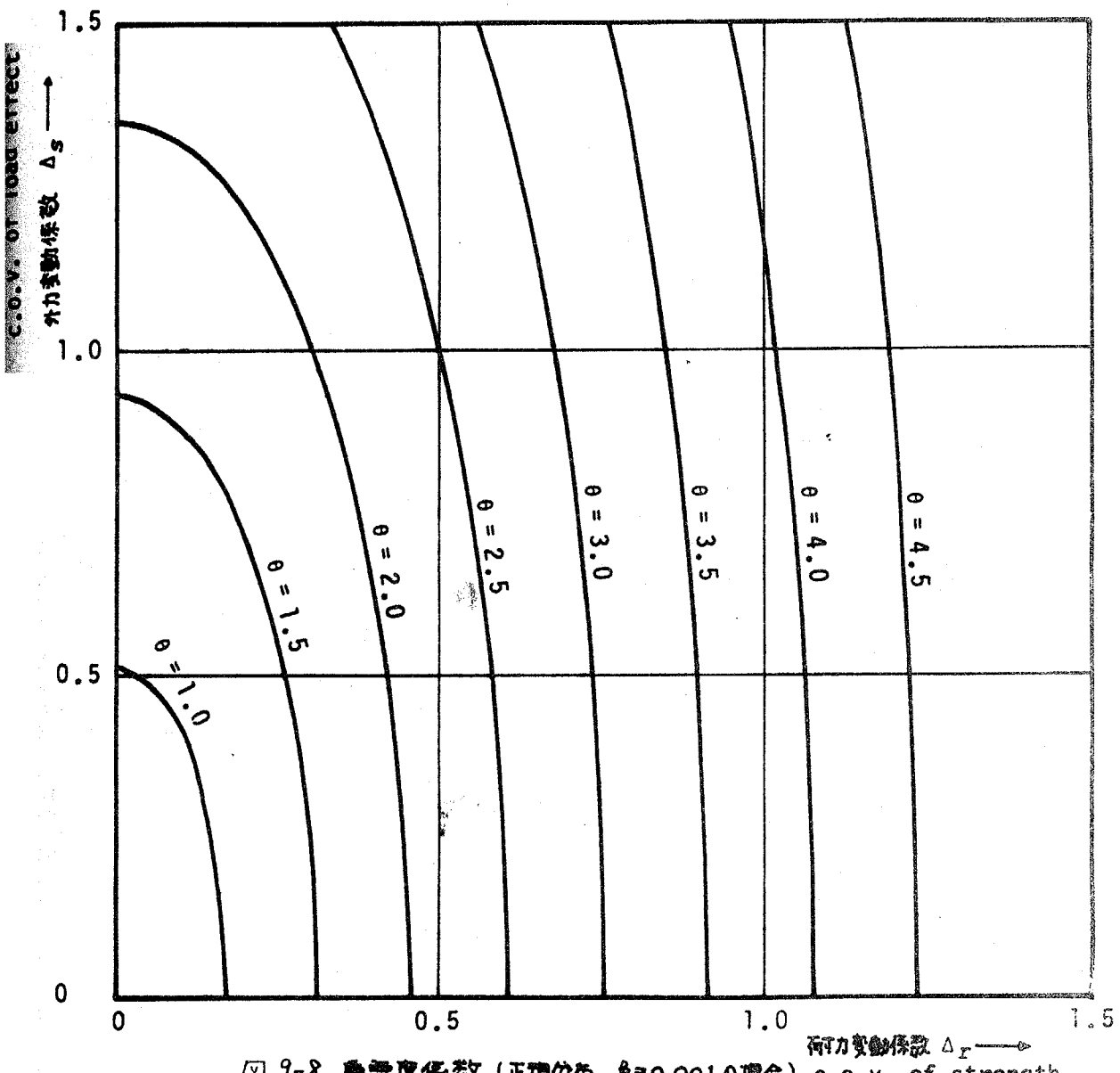


図 9-8 重要度係数（正規分布，k=0.001の場合） c.o.v. of strength

Importance Factor (Normal-Distribution, k = 0.001)

いる。

5-4-5-3 外力及び耐力に関する確率分布が対数正規分布の場合

耐力及び外力は建物の多くの要因によって決定される変数であるので，正規分布に近づくことが予想された。そこで，前項では耐力及び外力を表わす確率変数R，Sが正規分布である場合を検討したが，それらの物理的意味からして共に正の範囲で変動することが考えられる。そこで，こうした点を考慮して確率変数R，Sが対数正規分布の場合について検討する。このことは $\log R$，$\log S$ が正規分布 $[m_r, d_r]$，$[m_s, d_s]$ となっているケースにほかならない。このとき，確率変数R，Sの平均 u_r，u_s 及び標準偏差 σ_r，σ_s はそれぞれ以下のように関係づけられていることが知られている。

$$u_r = \exp\left[m_r + \frac{1}{2} d_r^2\right] \qquad (5-22)$$

$$u_s = \exp\left[m_s + \frac{1}{2} d_s^2\right] \qquad (5-23)$$

$$\sigma_r^2 = u_r^2 (e^{d_r^2} - 1) \qquad (5-24)$$

$$\sigma_s^2 = u_s^2 (e^{d_s^2} - 1) \qquad (5-25)$$

また，逆に上式より

$$m_r = \log u_r - \frac{1}{2}\log\left(1+\left(\frac{\sigma_r}{u_r}\right)^2\right) \tag{5-26}$$

$$m_S = \log u_S - \frac{1}{2}\log\left(1+\left(\frac{\sigma_S}{u_S}\right)^2\right) \tag{5-27}$$

$$\alpha_r^2 = \log\left(1+\left(\frac{\sigma_r}{u_r}\right)^2\right) \tag{5-28}$$

$$\alpha_S^2 = \log\left(1+\left(\frac{\sigma_S}{u_S}\right)^2\right) \tag{5-29}$$

と書くこともできる。一方，通常建物の破壊確率及び当該施設の破壊の確率は以下のように表わすことができる。

$$P = P\left(\frac{R}{S} < 1\right) \tag{5-30}$$

$$P_2 = P\left(\frac{\theta R}{S} < 1\right) = P\left(\frac{R}{S} < \frac{1}{\theta}\right) \tag{5-31}$$

ここで，

$$Z = \frac{R}{S} \tag{5-32}$$

なる確率変数を導入すれば，$\log Z (= \log R - \log S)$ も正規分布となっており，その平均，標準偏差はそれぞれ

$$m_z = m_r - m_S \tag{5-33}$$

$$\alpha_z = \sqrt{\alpha_r^2 + \alpha_S^2} \tag{5-34}$$

となり，従って，通常建物及び施設の破壊確率は

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\alpha_z}\int_0^1 \frac{1}{z}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\log z - m_z}{\alpha_z}\right)^2\right]dz \tag{5-35}$$

$$P_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\alpha_z}\int_0^{\frac{1}{\theta}} \frac{1}{z}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\log z - m_z}{\alpha_z}\right)^2\right]dz \tag{5-36}$$

で与えられる。ここで，適当な変数変換を行うことにより，それぞれの破壊確率は以下のように求められる。

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\frac{m_z}{d_z}} \exp\left[-\frac{1}{2}y^2\right] dy = 1 - \Phi\left(\frac{m_z}{d_z}\right) \qquad (5-37)$$

$$p_z = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\log\frac{1}{\theta} - m_z}{d_z}} \exp\left[-\frac{1}{2}y^2\right] dy = 1 - \Phi\left(\frac{m_z + \log\theta}{d_z}\right) \qquad (5-38)$$

さらに，上式から

$$\frac{\partial p_z}{\partial \theta} = -\frac{1}{\theta d_z} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{m_z + \log\theta}{d_z}\right)^2\right] \qquad (5-39)$$

となる。

一方，前項の(4-49)式，(4-50)式及び(5-39)式より以下の関係式をうる。

$$\frac{1}{\theta d_z} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{m_z + \log\theta}{d_z}\right)^2\right] = k \qquad (5-40)$$

この方程式を $\log\theta$ について解くと

$$\log\theta = -(m_z + d_z^2) \pm d_z\sqrt{2m_z + d_z^2 - \log 2\pi k^2 d_z^2} \qquad (5-41)$$

をうる。ここで，$\theta > 1$ を考えているので

$$\log\theta > 0 \qquad (5-42)$$

の範囲で解を求めればよく，方程式(5-40)の解は

$$\log\theta = -(m_z + d_z^2) + d_z\sqrt{2m_z + d_z^2 - \log 2\pi k^2 d_z^2} \qquad (5-43)$$

となり，θ については

$$\theta = \exp\left[-(m_z + d_z^2) + d_z\sqrt{2m_z + d_z^2 - \log 2\pi k^2 d_z^2}\right] \qquad (5-44)$$

となる。ただし，根号条件から

$$2m_z + d_z^2 - \log 2\pi k^2 d_z^2 \geq 0 \qquad (5-45)$$

でなければならない。

ここで，(5-33)式及び(5-26)式より

$$m_z = m_r - m_s$$

$$= \log u_r - \log u_s - \frac{1}{2}\left\{\log\left(1+\left(\frac{\sigma_r}{u_r}\right)^2\right) - \log\left(1+\left(\frac{\sigma_s}{u_s}\right)^2\right)\right\}$$

$$= -\log\frac{u_s}{u_r} - \frac{1}{2}\log\frac{1+\left(\frac{\sigma_r}{u_r}\right)^2}{1+\left(\frac{\sigma_s}{u_s}\right)^2} \qquad (5-46)$$

である。ここで，

$$\beta = \frac{u_s}{u_r} \qquad (5-47-1)$$

$$\Delta_r = \frac{\sigma_r}{u_r} \qquad (5-47-2)$$

$$\Delta_s = \frac{\sigma_s}{u_s} \qquad (5-47-3)$$

とおくと

$$m_z = -\log\beta - \frac{1}{2}\log\frac{1+\Delta_r^2}{1+\Delta_s^2} \qquad (5-48)$$

となる。一方，(5-34)式及び(5-28)，(5-29)式より

$$d_z^2 = d_r^2 + d_s^2$$

$$= \log(1+\Delta_r^2) + \log(1+\Delta_s^2)$$

$$= \log(1+\Delta_r^2)(1+\Delta_s^2) \qquad (5-49)$$

となる。従って，以上の結果を整理すれば，効用最大化原理は耐力，外力が対数正規分布をしている場合，以下

のように与えられる。

$$\theta = \exp\left[-(m_z + d_z^2) + d_z\sqrt{2m_z + d_z^2 - \log 2\pi k^2 d_z^2}\right] \qquad (5\text{-}50)$$

ただし，

$$D = 2m_z + d_z^2 - \log 2\pi k^2 d_z^2 \geq 0$$

$$m_z = -\log\beta - \frac{1}{2}\log\frac{1+\Delta_r^2}{1+\Delta_s^2}$$

$$d_z = \sqrt{\log(1+\Delta_r^2)(1+\Delta_s^2)}$$

Δ_r：耐力の変動係数

Δ_s：外力の変動係数

β：通常建物の安定率

k：重要度コスト・パーフォーマンス・センシビリティ

θ：重要度係数

ここで，条件（5-45）について検討しておこう。（5-48）式及び（5-49）式を（5-45）式に代入して整理すると

$$\frac{1}{(1+\Delta_s^2)^2}\log(1+\Delta_r^2)(1+\Delta_s^2) \leq \frac{1}{\beta^2 \times 2\pi k^2} \qquad (5\text{-}51)$$

となり，この不等式は $\beta \cong \frac{1}{3}$，$k < 0.1$ であることを考えると，通常の変動係数 Δ_r，Δ_s のもとでは常に満たされていることがわかる。故に（5-50）式における不等式条件は通常の場合不用であると考えられる。

$\Delta_\gamma - \Delta_S$ 空間での等重要度曲線を用いて（5-50）式の値を実際に表わしたものが図9-9である。

$h=0.001$ の場合，おおよそ図9-9-4から $\Delta_\gamma=0.35$，$\Delta_S=0.6$ のときで重要度係数2.6程度となることがわかる。

また，前項の結果と比較すると $h\leq 0.001$ の範囲では対数正規分布の場合の重要度係数の値が大きく，$h\geq 0.05$ の範囲では正規分布の場合に求めた重要度係数の値が大きくなっている。

ここでは正規分布と対数正規分布についてのみ検討を行ったが，他の極値分布をはじめとする分布形について今後検討の余地があるが，正規分布，対数正規分布のように式の展開を簡単に行うことは非常に難しい。

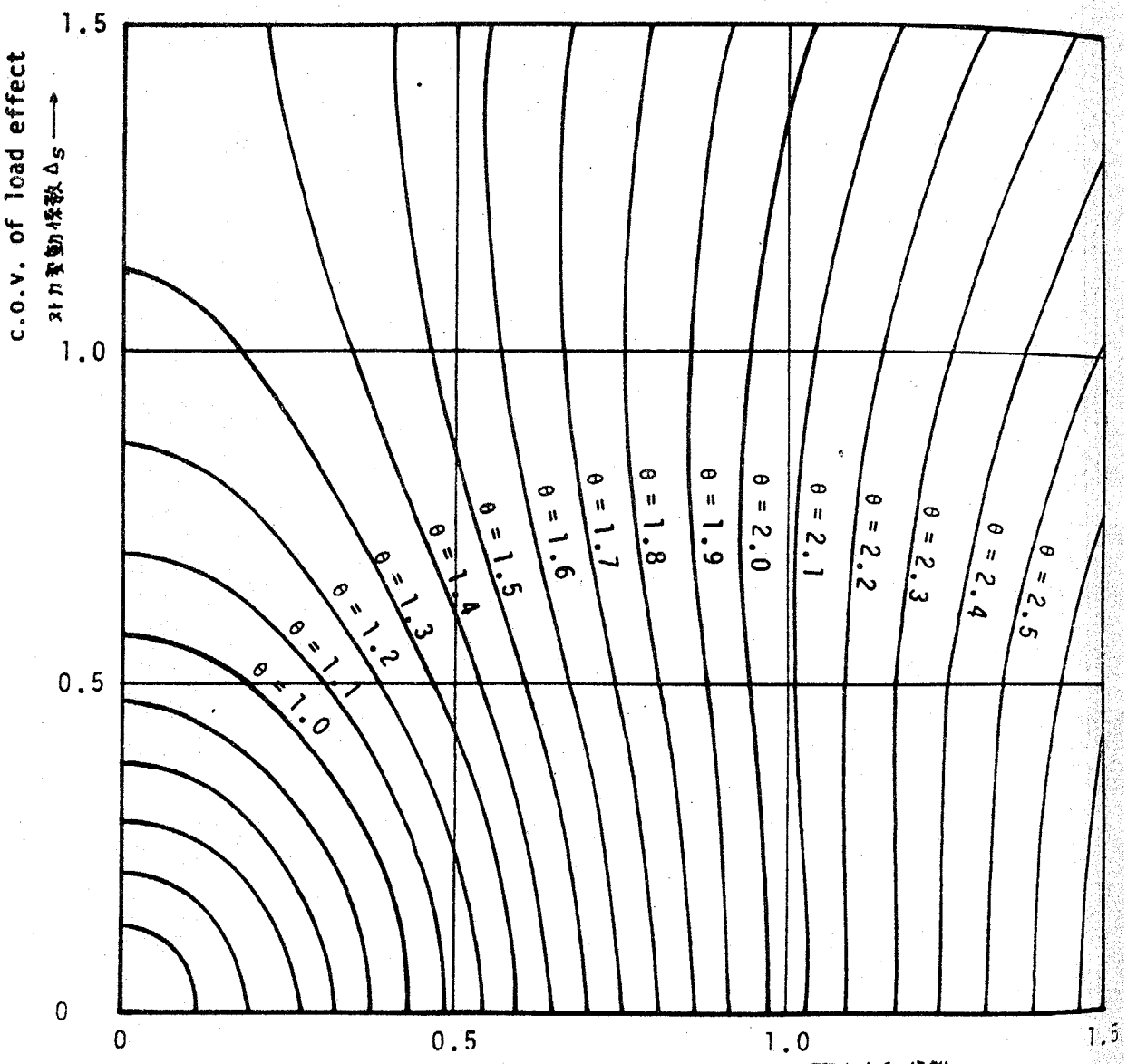


図9-9-1 重要度係数(対数正規分布, k=0.05 の場合)

Importance Factor (Log-Normal Distribution, k = 0.05)

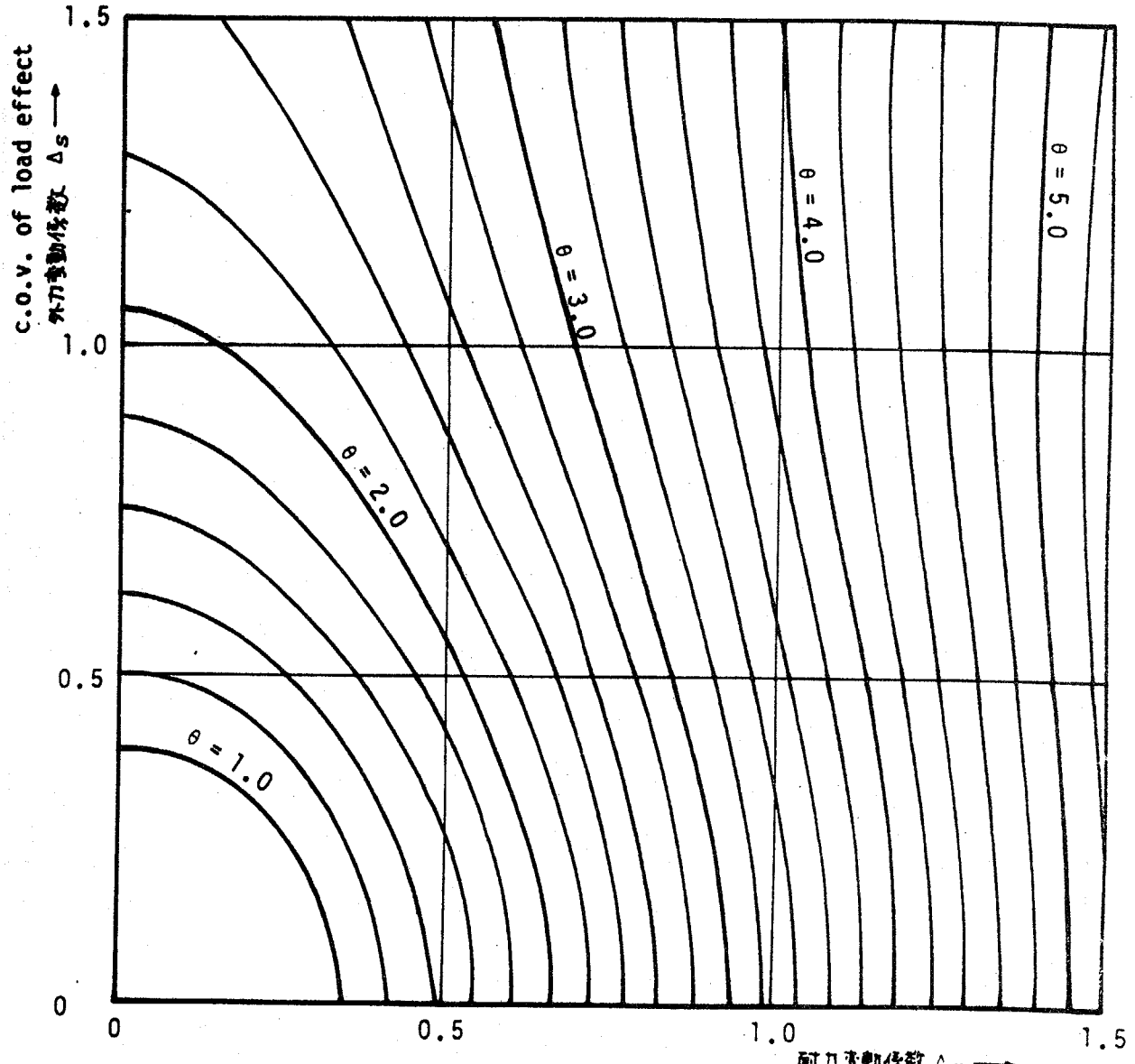


図 9-9-2 重要度係数（対数正規分布，$k=0.01$）

Importance Factor (Log-Normal Distribution, k = 0.01)

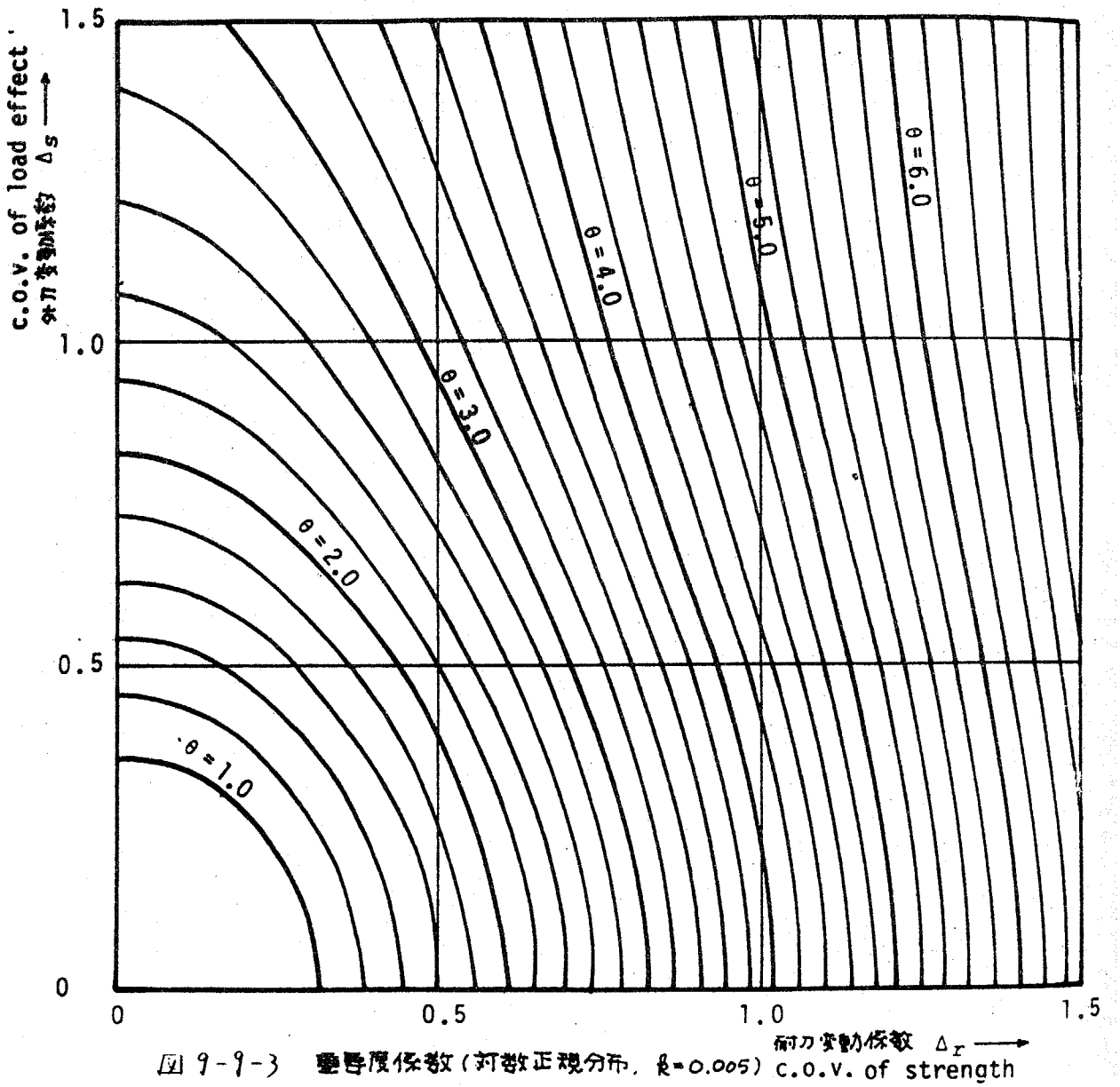


図 9-9-3 重要度係数(対数正規分布, $k=0.005$) C.O.V. of strength

Importance Factor (Log-Normal Distribution, k = 0.005)

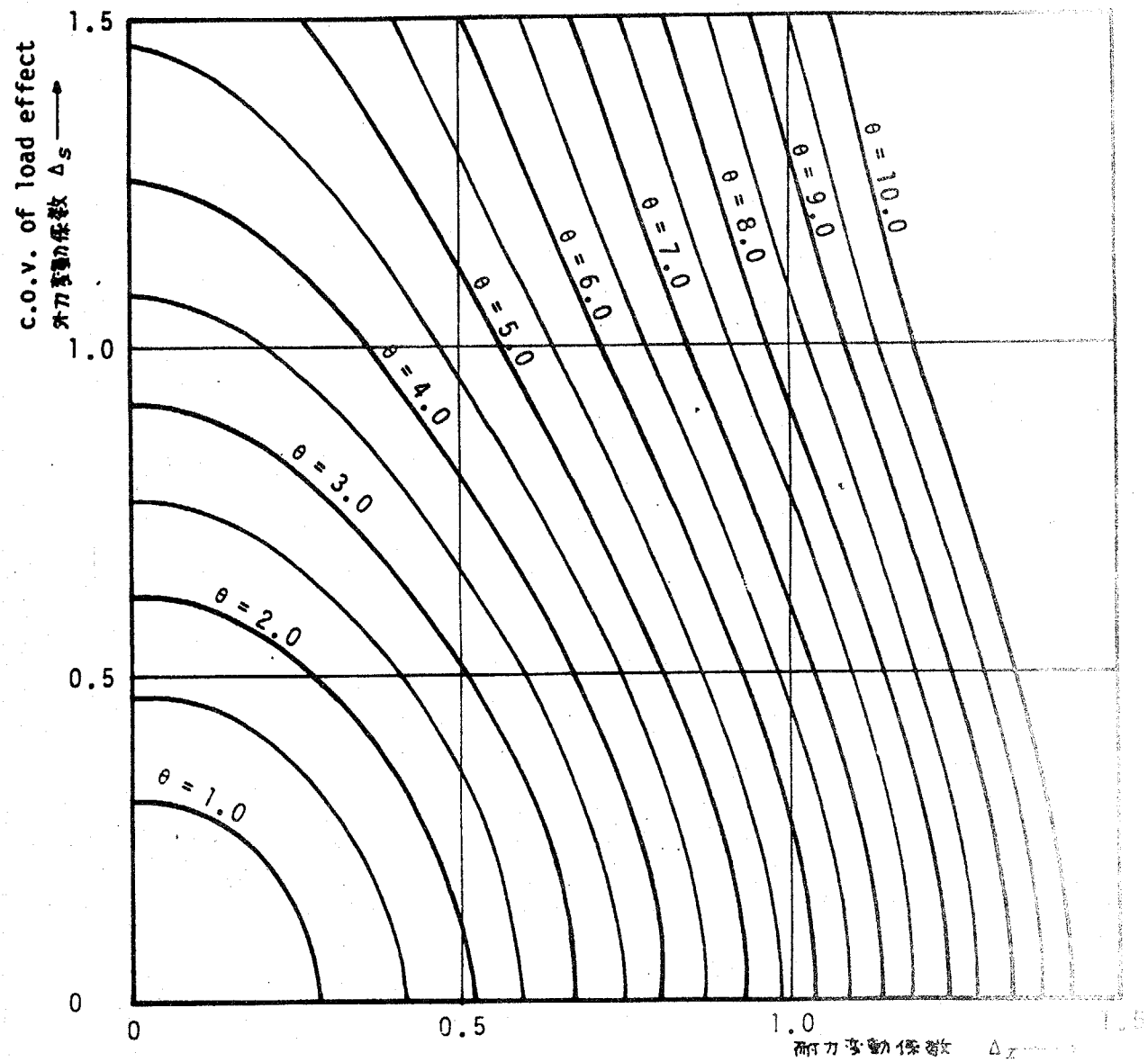


図 9-9-4 重要度係数（対数正規分布, k=0.001）

Importance Factor (Log-Normal Distribution, k = 0.0)

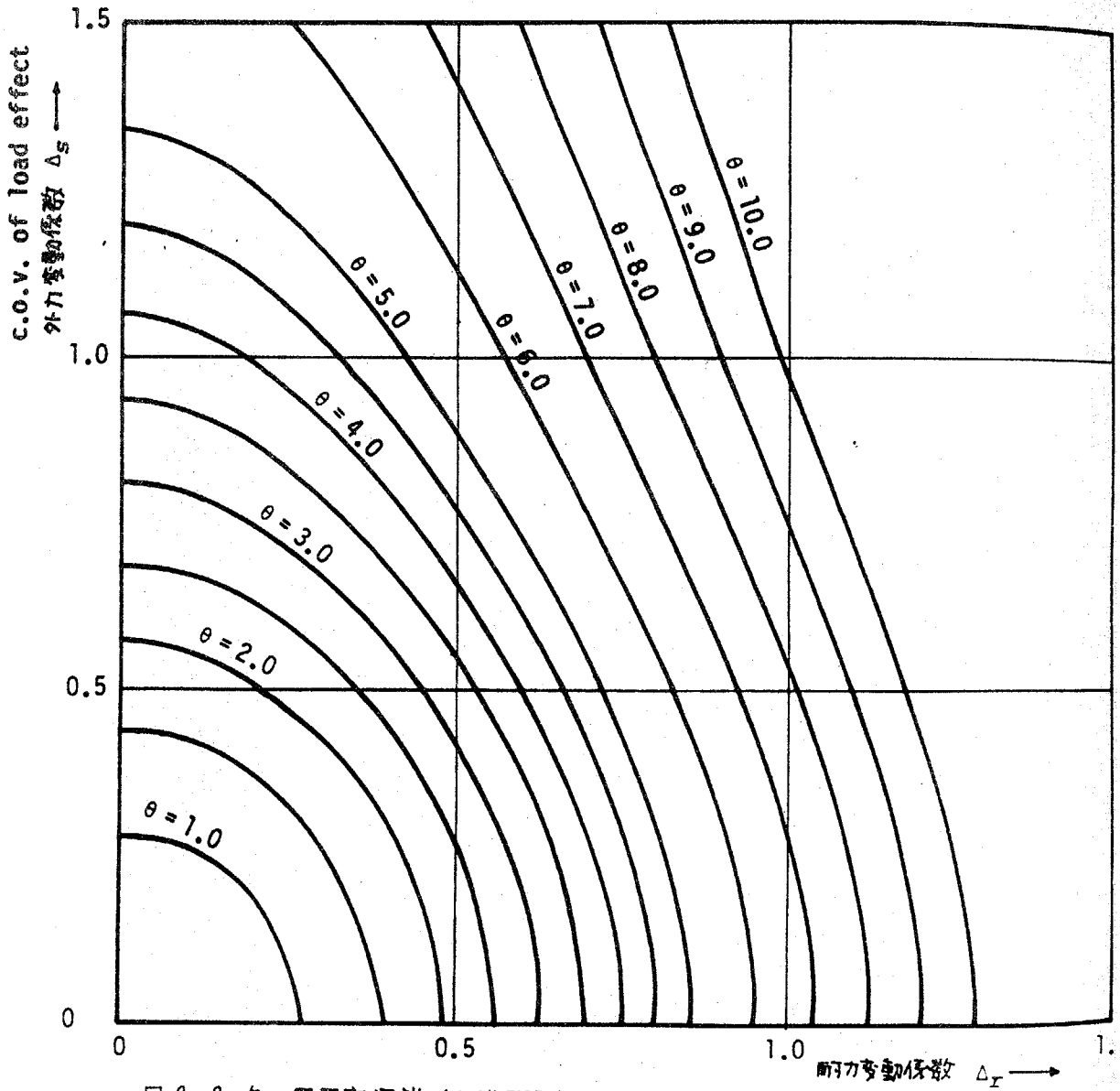


図 9-9-5 重要度係数（対数正規分布. $k=0.0005$） c.o.v. of strength

Importance Factor (Log-Normal Distribution, k = 0.0005)

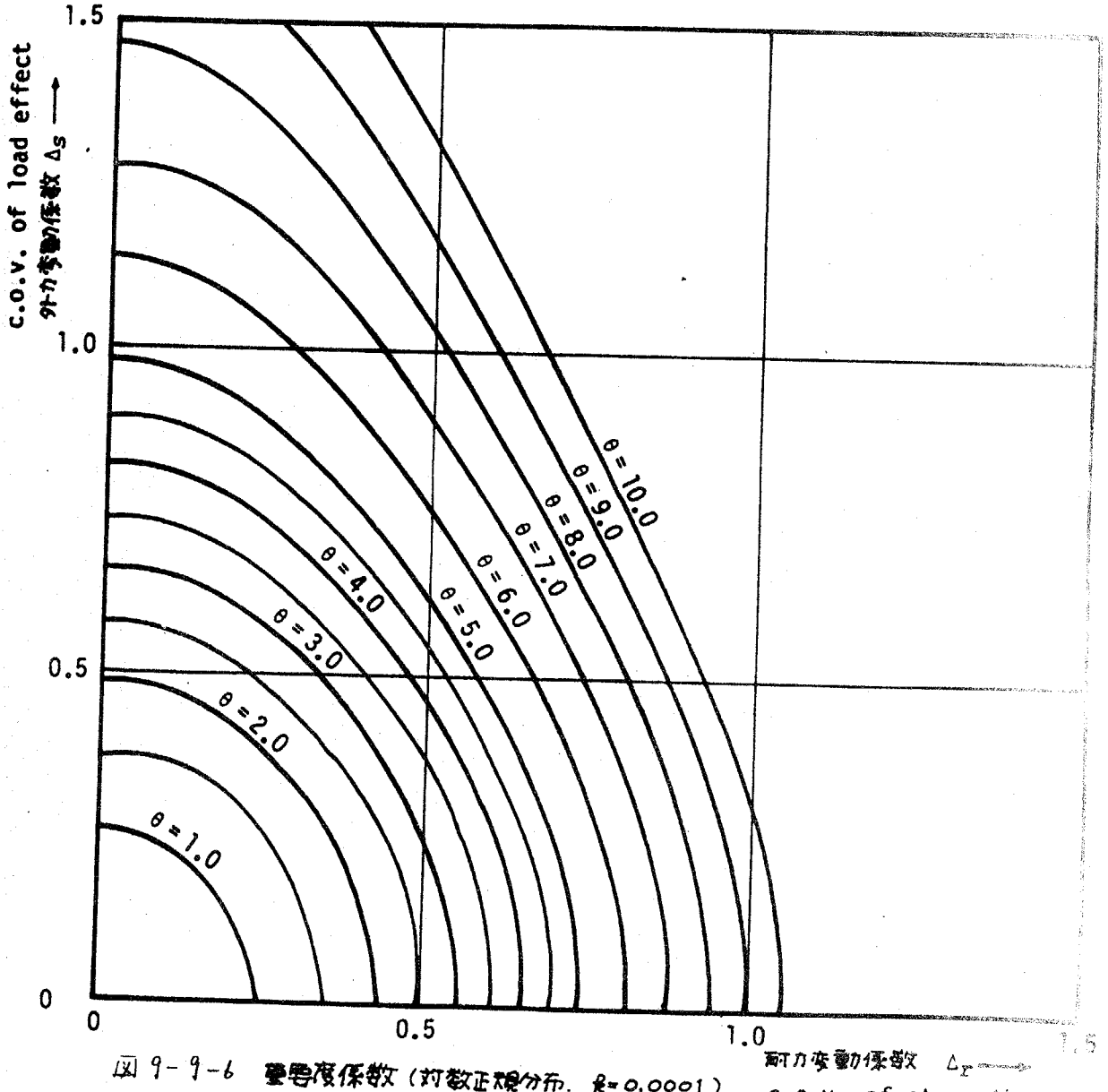


図 9-9-6 重要度係数（対数正規分布, $k=0.0001$）

Importance Factor (Log-Normal Distribution, k = 0.0001)

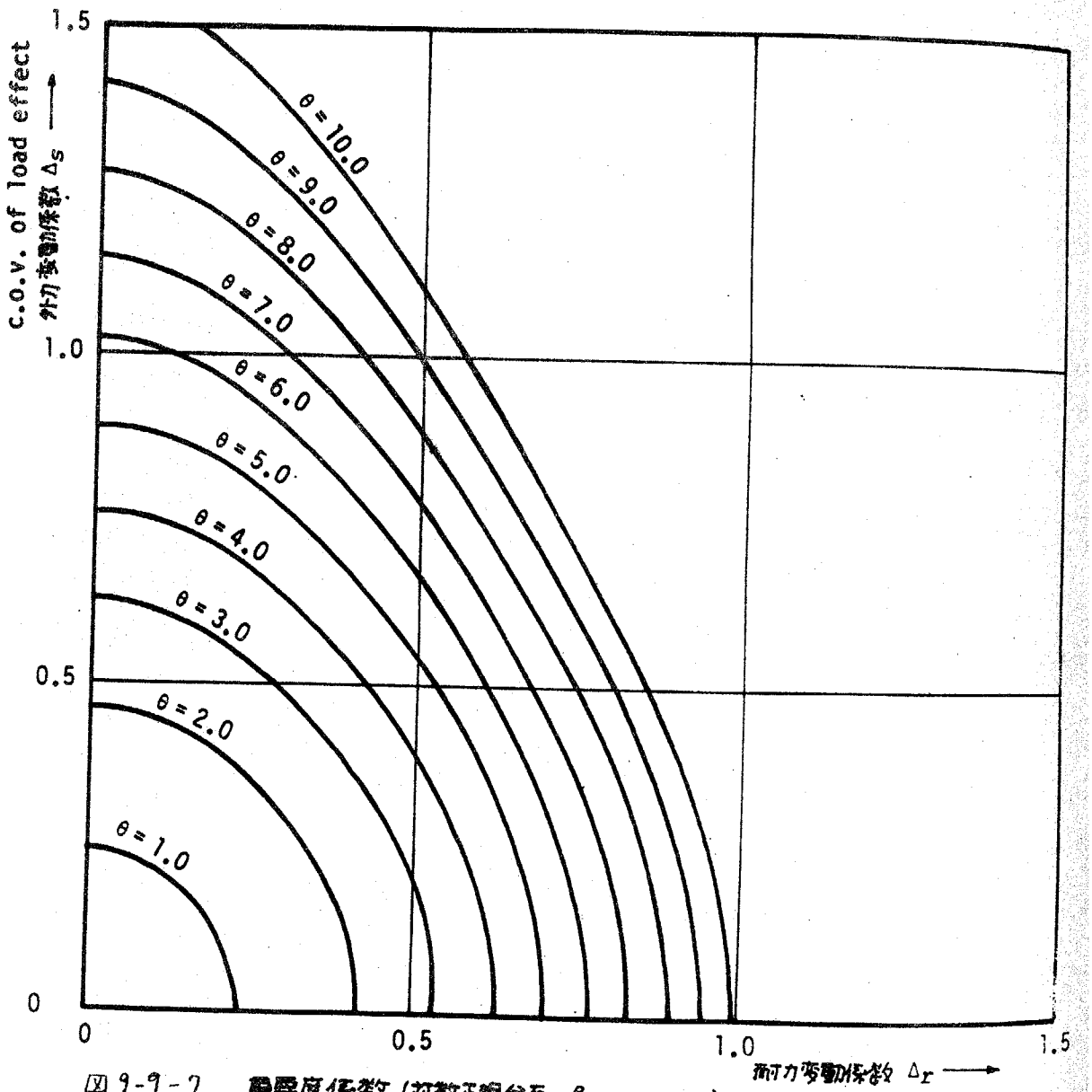


図 9-9-7 重要度係数（対数正規分布, $k=0.00005$）

Importance Factor (Log-Normal Distribution, k = 0.00005)

5-4-6 総効用最大化原理の意味と限界

総効用最大化原理によって重要度係数の最適化を試みたが，その最適化の意味と限界について検討しておくべきであろう。

総効用最大化原理は（4-8）式及び（4-9）式によって次のように表現することが可能である。

$$\frac{\partial U_s}{\partial \theta} = \frac{\partial C}{\partial \theta} \qquad (6-1)$$

この式は社会的効用の重要度係数θに関する増加率と建設費の重要度係数θに関する増加率が相等しいことを示しており，経済学でいうところの限界効用と限界費用の相等しいという条件にほかならない。従って，総効用最大化原理自身が持っている意味は明確といえよう。

しかし，社会的効用U_sについては適用限界を明確にしておかねばならない。そのひとつは社会的効用が（4-5）式に見られるごとくひとつの期待値としてとられており，確率的変量であるということである。この確率的であるということによって，経済学的には次の2つの問題を生じる。

(1) 不確実性によって最適値を承認する社会的手続きが得にくい（情報不完全性による市場的均衡の失

数)。

(2) 期待値ばかりでなく，そのバラツキが意味を持ってくることがある(危険回避 risk-aversion の必要)。

前者については，重要度係数の決定が自由市場の経済原則に基づいて決定するのではなく，公的部門による決定(あるいは法的措置)が必要であることを示唆している(文献6，7，8，9参照)。後者については，社会的効用の分散が大きすぎる場合，総効用最大化原理のみでは不充分であり，ポートフォリオ選択理論等の適用が必要であるといえよう(文献8，10，11もしくは12参照)。

次に各状況下での効用 U_1, U_2, U_3, U_4 の計測の問題がある。効用計測は原則的には個人の選択活動観測を通して行われるべきものであるが，異常時(災害時)の価値観に基づく U_2, U_3, U_4 については，こうした観測は不可能であり，環境アセスメントなどに見られる主観的評価手法(デルファイ法など)による効用計測が期待される(文献13参照)。

上記のようないわば経済的社会的問題の他に構造力学的側面からの総効用最大化原理の意味と限界について簡単に考察しておくことにする。議論の明確化のために耐

力及び外力が正規分布の場合を考える。(5-15)式において(図9-6において)，重要度係数θは通常の変動係数の範囲では総合変動係数δの増加にともないほぼ定率で増加している。このことは施工などのバラツキは重要度係数で補正されることを意味している。しかし，バラツキがきわめて大きなものとなると，(5-15)式で与えられる重要度係数θは総合変動係数δの増加にもかかわらず減少し，ある値をδがこえると根号条件もみたされなくなる。このことは

$$-\infty < \frac{\partial \theta}{\partial \delta} < 0 \qquad (6-2)$$

の範囲，すなわち(5-17)式より

$$\frac{e^{-\frac{1}{2}}}{\sqrt{2\pi}k} < \delta < \frac{1}{\sqrt{2\pi}k} \qquad (6-3)$$

の範囲の総合変動係数については，構造耐力を弱くする方が経済的であるということを主張しており，さらに

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}k} < \delta \qquad (6-4)$$

の範囲の総合変動係数については最適解が得られないことを示している。この事実は次のように解釈すべきであると思われる。すなわち，あまりにもバラツキが大きい場合，むしろ弱い構造物を設計した方が合理的であると

いうことである。こうした考え方は人命の関与しない特殊な建築物にのみ適用されるべきものであり，通常の建築物，とくに公的施設等の建築物の安全性を考える際，非現実的であり，また，適用されるべきではないといえる。従って，現代の建築技術にはこうした異常なバラツキを回避することが要請されているのである。すなわち，統合変動係数を

$$\delta \leq \frac{e^{-\frac{1}{2}}}{\sqrt{2\pi}\,k_c} = 0.242 \times \frac{1}{k_c} \qquad (6-5)$$

の範囲におさめるような施工精度，設計精度が基本的に要求されているのである。実際，先に示した数値例によれば $k_c < 0.05$ であり，通常の設計，施工の場合，文献2の調査結果を参照すれば（6－5）式の条件はみたされていると思われる。

また，統合変動係数 δ を決定する耐力，外力の変動係数の計測も今後の課題として残されているといえよう。

5-4-7 重要度係数の最適化と実用値

建築空間をとらえる視点として，物理的（力学的）性質，経済的性質，社会的性質の3つに類型化し，建築空間をこの3つのサブシステムから構成されるトータル・システムとして定式化し，重要度の数をこのシステムの入力パラメーターとしてとらえた。このとき，物理的サブシステムは重要度係数を与えると終極的に破壊の確率が決まるシステムとなり，経済的サブシステムは建設費と重要度係数を関係づけるシステムとなっており，社会的サブシステムは破壊の確率によって決まる各状況下における建物利用の社会的効用を決定づけるシステムとなっている。

社会的な意味での総効用を建物使用期間内における社会的効用の総和から建設費を差し引いたものと考えると（将来価値は現在価値に修正して考える），この総効用を最大化する重要度係数が社会的な面からみた最適な重要度係数にほかならない。

この総効用最大化原理は以上の定式化のもとで（4-11）式で示される。また，重要度のコスト・パーフォーマンス・センシビリティ（費用便益感度）という概念を導入すれば，より単純な（4-16）式で示される。このことは，

社会的，経済的条件から決まってくる重要度のコスト・パーフォーマンス・センシビリティと重要度を変化させたときの破壊確率の減少率が等しくなる重要度が最適な重要度であることを指摘している。また，総効用最大化原理は現行の利子率のもとではさらに単純化することができ，(4-50)式で与えられるものとなる。

現実的な重要度係数の最適値の値を2，3のケースについて試みた結果が(5-15)式及び(5-50)式で示されている。前者は耐力及び外力が正規分布する場合の重要度係数の最適解であり，これらの関係は図9-6及び図9-8，図9-9に示されている。2つのケースを比較すると，上述の費用便益感度が0.001未満の場合は，対数正規分布の場合の最適重要度係数の値が大きく，また，費用便益感度が0.05以上の範囲では，正規分布の場合の最適重要度係数の値が大きくなっている。従って，費用便益感度が0.001未満の場合は対数正規分布として，0.05以上の場合は正規分布として求めた最適重要度係数を採用することがより安全である。種々の状況から考えられる費用便益感度の値は約0.005であるので，この場合の変動係数は耐力変動係数，外力変動係数がともに0.5の場合，重要度係数は2.0～2.2となっている。

また，この総効用最大化原理の適用限界及び適用可能性について前項で検討を行い，今後の研究の方向性を示唆した。とくに施工及び設計のバラツキをある一定値以下におさめることが，重要度係数最適化の基本必要条件であることが示された（(6-5)式）。また，各変動係数の計測問題及びその手法開発の必要性を示した。

以上の結果を実際の構造設計に適用するためには，各種構造物の耐力における変動係数の正確な把握が必要であり，また，各構造物規定における他の諸規定たとえば地域係数などとの関連についても考慮したより統合的構造設計体系における重要度係数として検討する必要があるといえよう。

付5-4 A1 (4-21)式, (4-22)式の導出

(4-19)式より $P_2 = 0$ のとき

$$g_0|_{P_2=0} = \frac{(1+r)^T - 1}{r(1+r)^{T-1}} \tag{A1}$$

となり, さらに P_2 に関する1階微分は

$$\frac{\partial g_0}{\partial P_2} = \frac{1}{(1+r)^{T-1}} \left\{ T(1-P_2)^{T-1} - \frac{(1+r)^T - (1-P_2)^T}{P_2 + r} \right. \tag{A2}$$

となり, その $P_2 = 0$ の値は

$$\frac{\partial g_0}{\partial P_2}\Big|_{P_2=0} = \frac{1}{(1+r)^{T-1}} \left\{ T - \frac{(1+r)^T - 1}{r} \right\} = \frac{rT - (1+r)^T}{r(1+r)^{T-1}} \tag{A3}$$

となり, さらに $\frac{\partial^2 g_0}{\partial P_2^2} \times P_2 \ll 1$ であることを考えると, $P_2 = 0$ における テーラー展開は

$$g_0 \cong \frac{(1+r)^T - 1}{r(1+r)^{T-1}} - P_2 \frac{(1+r)^T - rT}{r(1+r)^{T-1}} \tag{4-21}$$

となる。同様にして(4-20)式から, $P_2 = 0$ のとき

$$g_1|_{P_2=0} = \frac{(1+r)^T - 1 - rT}{r^2(1+r)^{T-1}} \tag{A4}$$

となり, さらに P_2 に関する1階微分において $P_2 = 0$ とおくと

$$\frac{\partial g_1}{\partial P_2}\Big|_{P_2=0} = -\left\{ \frac{1}{r} \times \frac{(1+r)^T - rT}{r(1+r)^{T-1}} + \frac{1}{r^2} \times \frac{(1+r)^T - 1}{r(1+r)^{T-1}} - \frac{T(rT - r + 1)}{r^2(1+r)^{T-1}} \right\} \tag{A5}$$

となり, $\frac{\partial^2 g_0}{\partial P_2^2} \ll 1$ であることを考えると以下のようになる。

$$g_1 = \frac{(1+r)^T - 1 - rT}{r^2(1+r)^{T-1}} - P_2 \left\{ \frac{1}{r} \times \frac{(1+r)^T - rT}{r(1+r)^{T-1}} + \frac{1}{r^2} \times \frac{(1+r)^T - 1}{r(1+r)^{T-1}} - \frac{T(rT - r + 1)}{r^2(1+r)^{T-1}} \right\} \tag{4-22}$$

付5-4 A2 本理の オーダー について

$(4-23-1)$ 式 ～ $(4-23-4)$ 式 より

$$\left|\frac{g_{01}}{g_{11}}\right| = \left| \frac{(1+r)^T-1}{r(1+r)^T-1} \times \frac{r^2(1+r)^T-1}{(1+r)^T-1-rT} \right|$$

$$= r \left| \frac{(1+r)^T-1}{(1+r)^T-1-rT} \right|$$

$$= r \left| 1 + \frac{rT}{(1+r)^T-1-rT} \right| \qquad (A\,6)$$

$$\left|\frac{g_{02}}{g_{11}}\right| = \left| \frac{(1+r)^T-rT}{r(1+r)^T-1} \times \frac{r^2(1+r)^T-1}{(1+r)^T-1-rT} \right|$$

$$= r \left| \frac{(1+r)^T-rT}{(1+r)^T-1-rT} \right|$$

$$= r \left| 1 + \frac{1}{(1+r)^T-1-rT} \right| \qquad (A\,7)$$

$$\left|\frac{g_{12}}{g_{11}}\right| = \left| \left\{ \frac{(1+r)^T-rT}{r^2(1+r)^T-1} + \frac{(1+r)^T-1}{r^2(1+r)^T-1} - \frac{T(rT-r+1)}{r^2(1+r)^T-1} \right\} \times \frac{r^2(1+r)^T-1}{(1+r)^T-1-rT} \right|$$

$$= \left| \frac{r(1+r)^T+(1+r)^T-1-r^2T-rT}{r\{(1+r)^T-1-rT\}} \right| \qquad (A\,8)$$

$$= \left| 1 + \frac{1}{r} + \frac{1}{(1+r)^T-1-rT} \right|$$

r は, $0.02 \leqq r \leqq 0.1$, $10 \leqq T \leqq 100$ のとき

$$\left|\frac{g_{01}}{g_{11}}\right| \leqslant 10^{-1} \qquad (A\,9-1)$$

$$\left|\frac{g_{02}}{g_{11}}\right| \leqslant 10^{-1} \qquad (A\,9-2)$$

$$\left|\frac{g_{12}}{g_{11}}\right| \leqslant 10^{2} \qquad (A\,9-3)$$

とうる。ここで

$$\left|\frac{U_2}{U_1}\right| < 10^3, \quad \left|\frac{U_3}{U_1}\right| < 10^2, \quad \left|\frac{U_4}{U_1}\right| < 10^3$$

ようびに

$$p < 10^{-4} \qquad p_2 < \frac{1}{2} \times 10^{-4}$$

のもとで（4-38）式の結果とうる。

付表9-A1 $A(=\frac{(1+r)^T-1}{(1+r)^{T*}-1}\cdot\frac{1}{(1+r)^{T-T*}})$ $B(=\frac{(1+r)^T-1-rT}{(1+r)^{T*}-1}\cdot\frac{1}{(1+r)^{T-T*}})$ の値　A：上段　B：下段

（建物使用年限 T ＝ 20 の時）

T＊ ＼ 利子率 r	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
1	18.22601 167.121	16.67846 147.493	15.32380 130.603	14.13394 116.027	13.08532 103.423	12.15812 92.464	11.33560 82.935	10.60360 74.617	9.95011 67.337	9.36492 60.948
2	9.15834 83.976	8.42180 74.477	7.77513 66.266	7.20554 59.151	6.70224 52.968	6.25612 47.579	5.85946 42.870	5.50571 38.743	5.18929 35.118	4.90543 31.925
3	6.13589 56.262	5.66994 50.141	5.25964 44.827	4.89725 40.202	4.57623 36.166	4.29101 32.634	4.03687 29.535	3.80977 26.809	3.60628 24.405	3.42343 22.280
4	4.62473 42.406	4.29427 37.976	4.00244 34.112	3.74400 30.735	3.51449 27.775	3.31012 25.174	3.12765 22.883	2.96430 20.860	2.81770 19.069	2.68573 17.479
5	3.71810 34.093	3.46909 30.678	3.24856 27.687	3.05276 25.061	2.87846 22.748	2.72292 20.708	2.58378 18.904	2.45902 17.304	2.34668 15.882	2.24586 14.616
6	3.11373 28.551	2.91915 25.815	2.74634 23.407	2.59252 21.282	2.45527 19.404	2.33255 17.739	2.22258 16.261	2.12382 14.945	2.03493 13.771	1.95478 12.722
7	2.68208 24.593	2.52649 22.343	2.38793 20.352	2.26428 18.588	2.15372 17.021	2.05466 15.626	1.96575 14.382	1.88580 13.270	1.81376 12.274	1.74873 11.381
8	2.35838 21.625	2.23213 19.740	2.11939 18.063	2.01854 16.571	1.92818 15.238	1.84707 14.047	1.77416 12.980	1.70850 12.023	1.64929 11.162	1.59582 10.386
9	2.10664 19.317	2.00330 17.716	1.91077 16.285	1.82780 15.005	1.75331 13.856	1.68633 12.825	1.62604 11.897	1.57169 11.050	1.52263 10.304	1.47830 9.621
10	1.90529 17.470	1.82035 16.098	1.74409 14.865	1.67556 13.755	1.61391 12.755	1.55839 11.852	1.50835 11.036	1.46319 10.296	1.42241 9.626	1.38554 9.017

付表9-A2 $A\left(=\frac{(1+r)^{T-1}}{(1+r)^{T*-1}}\cdot\frac{1}{(1+r)^{T-T*}}\right)$ $B\left(=\frac{(1+r)^{T-1-rT}}{(1+r)^{T*-1}}\cdot\frac{1}{(1+r)^{T-T*}}\right)$ の値

A：上段
B：下段
（建物使用年限 T = 40 の時）

T* ＼ 利子率 r	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
1	35.16303 602.825	27.90259 471.233	23.80822 372.602	20.58448 297.992	18.01704 241.022	15.94907 197.114	14.26493 162.953	12.87858 136.126	11.72552 114.860	10.75696 97.848
2	16.66401 302.912	14.08943 237.950	12.08003 189.054	10.49405 151.917	9.22824 123.451	8.20681 101.428	7.37366 84.232	6.68696 70.681	6.11522 59.903	5.63460 51.254
3	11.16452 202.944	9.48564 160.199	8.17177 127.890	7.13230 103.251	6.30096 84.291	5.62897 69.568	5.08007 58.031	4.62715 48.909	4.24975 41.629	3.93230 35.769
4	8.41491 152.963	7.18420 121.331	6.21850 97.321	5.45271 78.936	4.83907 64.734	4.34223 53.666	3.93590 44.961	3.60029 38.055	3.32046 32.526	3.08500 28.062
5	6.76525 122.976	5.80369 98.016	5.04722 78.990	4.44599 64.363	3.96332 53.019	3.57194 44.146	3.25148 37.143	2.98660 31.568	2.76564 27.091	2.57969 23.466
6	5.66557 102.987	4.88366 82.478	4.26693 66.778	3.77571 54.659	3.38064 45.224	3.05985 37.817	2.79694 31.950	2.57948 27.265	2.39803 23.490	2.24534 20.424
7	4.88016 88.710	4.22675 71.384	3.71007 58.062	3.29767 47.739	2.96543 39.670	2.69532 33.311	2.47374 28.258	2.29039 24.209	2.13739 20.937	2.00867 18.271
8	4.29117 78.003	3.73429 63.067	3.29285 51.534	2.93978 42.558	2.65488 35.516	2.42299 29.946	2.23263 25.504	2.07506 21.933	1.94358 19.039	1.83302 16.674
9	3.83313 69.677	3.35147 56.602	2.96872 46.461	2.66199 38.536	2.41411 32.295	2.21214 27.340	2.04624 23.375	1.90889 20.177	1.79431 17.577	1.69804 15.446
10	3.46675 63.017	3.04539 51.432	2.70976 44.408	2.44027 35.327	2.22218 29.727	2.04431 25.266	1.89814 21.683	1.77712 18.784	1.67621 16.420	1.59510 14.477

付表9-A3 $A(=\frac{(1+r)^{T-1}}{(1+r)^{T*-1}}\cdot\frac{1}{(1+r)^{T-T*}})$ $B(=\frac{(1+r)^{T-1-rT}}{(1+r)^{T*-1}}\cdot\frac{1}{(1+r)^{T-T*}})$ の値

A：上段
B：下段
（建物使用年限 T＝60 の時）

T＊ ＼ 年利子率 r	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
1	45.40459 1204.734	35.45610 840.172	28.50583 600.544	23.52843 439.917	19.87575 330.060	17.13111 253.365	15.02192 198.771	13.36668 159.084	12.04231 129.675	10.96387 107.471
2	22.81524 605.364	17.90358 424.245	14.46355 304.710	11.99489 224.271	10.18026 169.055	8.81504 130.383	7.76496 102.747	6.94039 82.601	6.28044 67.630	5.74298 56.294
3	15.28571 405.580	12.05350 285.621	9.78415 206.127	8.15234 152.426	6.95100 115.430	6.04615 89.428	5.34965 70.787	4.80252 57.157	4.36456 46.999	4.00794 39.287
4	11.52113 305.694	9.12903 216.323	7.44548 156.857	6.23255 116.531	5.33828 88.648	4.66405 68.986	4.14476 54.844	3.73674 44.473	3.41017 36.722	3.14435 30.822
5	9.26253 245.766	7.37481 174.755	6.04309 127.312	5.08185 95.017	4.37219 72.605	3.83666 56.748	3.42403 45.307	3.09979 36.892	2.84036 30.586	2.62931 25.773
6	7.75692 205.817	6.20572 147.052	5.10884 107.630	4.31570 80.692	3.72940 61.931	3.28663 48.612	2.94536 38.973	2.67724 31.863	2.46282 26.520	2.28853 22.433
7	6.68159 177.285	5.37097 127.271	4.44210 93.584	3.76929 70.475	3.27136 54.325	2.89508 42.821	2.60502 34.470	2.37719 28.292	2.19513 23.638	2.04731 20.068
8	5.87519 155.888	4.74520 112.443	3.94256 83.060	3.36022 62.827	2.92877 48.636	2.60257 38.495	2.35111 31.110	2.15370 25.632	1.99609 21.495	1.86828 18.314
9	5.24807 139.249	4.25875 100.916	3.55448 74.884	3.04270 56.890	2.66316 44.225	2.37609 35.145	2.15482 28.513	1.98123 23.580	1.84279 19.844	1.73070 16.965
10	4.74645 125.939	3.86981 91.700	3.24442 68.352	2.78927 52.152	2.45143 40.709	2.19582 32.478	1.99886 26.449	1.84447 21.952	1.72150 18.538	1.62211 15.900

付表9-A4 $A(=\frac{(1+r)^{T-1}}{(1+r)^{T*-1}}\cdot\frac{1}{(1+r)^{T-T*}})$ $B(=\frac{(1+r)^{T-1-rT}}{(1+r)^{T*-1}}\cdot\frac{1}{(1+r)^{T-T*}})$ の値

A：上段
B：下段
（建物使用年限T＝80の時）

T＊ ＼ 利子率 r	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
1	55.43709 1898.676	40.53940 1190.123	31.10679 778.769	24.87201 531.561	20.57628 377.628	17.49968 278.302	15.21755 211.940	13.47140 166.104	12.09883 133.449	10.99463 109.517
2	27.85645 954.061	20.47039 600.953	15.78325 395.139	12.67985 270.992	10.53907 193.419	9.00469 143.204	7.86607 109.554	6.99476 86.246	6.30992 69.598	5.75909 57.366
3	18.66320 639.200	13.78160 404.589	10.67689 267.300	8.61788 184.180	7.19599 132.065	6.17623 98.222	5.41932 75.477	4.84014 59.680	4.38505 48.367	4.01918 40.035
4	14.06681 481.777	10.43785 306.426	8.12482 203.408	6.58845 140.808	5.52643 101.424	4.76439 75.770	4.19874 58.477	3.76601 46.436	3.42618 37.791	3.15317 31.409
5	11.30916 387.330	8.43213 247.544	6.59447 165.095	5.37205 114.811	4.52629 83.069	3.91921 62.328	3.46861 48.309	3.12407 38.520	2.85369 31.476	2.63669 26.264
6	9.47087 324.370	7.09542 208.303	5.57499 139.572	4.56215 97.502	3.86085 70.857	3.35734 53.393	2.98372 41.555	2.69821 33.269	2.47438 27.292	2.29495 22.860
7	8.15794 279.403	6.14100 180.283	4.84741 121.357	3.98453 85.157	3.38666 62.154	2.95736 47.032	2.63894 36.753	2.39582 29.541	2.20543 24.326	2.05305 20.450
8	7.17336 245.682	5.42552 159.278	4.30229 107.709	3.55210 75.915	3.03200 55.645	2.65856 42.280	2.38173 33.171	2.17058 26.764	2.00546 22.120	1.87353 18.662
9	6.40767 219.458	4.86932 142.950	3.87880 97.107	3.21645 68.742	2.75703 50.599	2.42721 38.601	2.18289 30.402	1.99676 24.620	1.85144 20.421	1.73556 17.288
10	5.79521 198.481	4.42462 129.895	3.54045 88.636	2.94855 63.016	2.53783 46.576	2.24306 35.672	2.02489 28.201	1.85892 22.921	1.72958 19.077	1.62666 16.203

付表9-A5　$A(=\frac{(1+r)^{T-1}}{(1+r)^{T*-1}}\cdot\frac{1}{(1+r)^{T-T*}})$　$B(=\frac{(1+r)^{T-1}-rT}{(1+r)^{T*-1}}\cdot\frac{1}{(1+r)^{T-T*}})$ の値

A：上段
B：下段
（建物使用年限 T=100 の時）

T＊ ＼ 利子率 r	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
1	63.65917 2631.834	43.96032 1494.048	32.54687 906.250	25.48520 585.650	20.84031 400.837	17.61460 288.370	15.26810 216.354	13.49386 168.060	12.10892 134.325	10.99920 109.912
2	31.98794 1322.464	22.19778 754.420	16.51393 459.821	12.99245 298.567	10.67430 205.307	9.06382 148.385	7.89221 111.835	7.00643 87.262	6.31518 70.054	5.76149 57.573
3	21.43121 886.021	14.94455 507.910	11.17117 311.055	8.83034 202.921	7.28832 140.182	6.21679 101.776	5.43732 77.049	4.84821 60.382	4.38870 48.684	4.02086 40.179
4	16.13311 667.811	11.31865 384.679	8.50096 236.705	6.75088 155.135	5.59735 107.658	4.79568 78.511	4.21268 59.695	3.77229 46.982	3.42903 38.038	3.15448 31.522
5	12.98646 536.894	9.14368 310.760	6.89977 192.120	5.50449 126.493	4.58437 88.174	3.94495 64.583	3.48014 49.315	3.12928 38.974	2.85607 31.682	2.63778 26.359
6	10.87553 449.622	7.69417 261.496	5.83308 162.418	4.67462 107.423	3.91039 75.211	3.37939 55.324	2.99363 42.421	2.70271 33.661	2.47644 27.471	2.29591 22.942
7	9.36787 387.292	6.65921 226.322	5.07183 141.222	4.08277 93.822	3.43011 65.974	2.97678 48.733	2.64771 37.519	2.39981 29.889	2.20727 24.485	2.05391 20.524
8	8.23726 340.550	5.88335 199.953	4.50147 125.341	3.63967 83.640	3.07090 59.065	2.67602 43.809	2.38964 33.862	2.17420 27.079	2.00713 22.265	1.87430 18.729
9	7.35801 304.199	5.28021 179.455	4.05837 113.003	3.29575 75.736	2.79240 53.708	2.44315 39.997	2.19014 31.035	2.00009 24.910	1.85298 20.555	1.73628 17.350
10	6.65472 275.123	4.79799 163.066	3.70436 103.146	3.02124 69.428	2.57040 49.438	2.25779 36.963	2.03162 28.789	1.86202 23.191	1.73102 19.202	1.62734 16.262

文献

1) 「新耐震設計法の開発」，昭和52年度秋季講演会梗概集，建設省建築研究所

2) 中野清司，「建築構造の安全性に関する研究の現状」，建築研究報告 No.73，建設省建築研究所，昭和51年

3) 「目標公準に関する基本調査」，昭和51年度総合技術開発プロジェクト 新耐震設計法の開発報告書（委託），建設省建築研究所（担当 国土開発技術研究センター），昭和52年

4) 「建物物価」，建物物価調査会，昭和50年，2月号

5) 星谷勝，「確率的手法による構造解析」，鹿島出版会，昭和48年

6) Arrow, K.J., "Alternative Approaches to the Theory of Choice in Risk-Taking Situation," Econometrica, Vol. 19, 1951

7) Arrow, K.J., "The Limits of Organization," W.W. Norton & Company, 1974

8) 野口悠紀雄，「情報の経済理論」，東洋経済新報社，昭和49年

9) 青木義次，「構造安全性における論理的予備について」，建築研究所春季研究発表会オ4研究部資料，昭和51年

10) Tobin, J., "Liquidity Preference as Behavior Towards Risk," The Review of Economic Studies, Vol. 25

11) Markowitz, H.M., "Portfolio Selection : Efficient Diversification of Investment," Cowels Foundation for Research in Economics at Yale University, Monograph 16, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1959

12) Scott, F.R., "Multivariate Risk Aversion, Utility Independence and Separable Utility Functions," Management Science, Vol. 22, 1975

13) Aoki, Y., "Senario-Matrix Method as a Systematic Evaluation Method for Building Production," BRI

Research Paper No. 60, 1974

関連発表論文

1) 青木義次，「重要度係数の最適化」，建築研究報告 No. 74，建設省建築研究所，昭和51年

2) Nakano, K., Aoki, Y. & Watanabe, K., "A Proposal for a Rational Aseismic Structural Design Process," BRI Research Paper No. 68, 1976

3) Nakano, K., Ishiyama, Y. & Aoki, Y., "On the Object Postulate for Earthquake-Resistant Code," 9th Joint Meeting, U.S. Japan Panel on Wind and Seismic Effect, UJNR, 1977

4) 青木義次，「重要度係数の最適化 — 地域公共施設の構造安全計画 その1」，日本建築学会論文報告集 No. 266号，昭和53年

5) 青木義次，「重要度係数の最適解 — 地域公共施設の構造安全計画 その2」，日本建築学会論文報告集 No. 267号，昭和53年

5－5　建築材料の品質管理システムの最適化

5－5－1　コンクリートの特殊性と建築安全性への影響

建築物の安全性を考える際，単に計画段階で検討するにとどまらず，現場という場でより安全な建築物が完成するための管理というものが重要であることはいうまでもない。

ここでは建築の材料のなかでもバラツキが多いとされているコンクリートの圧縮強度についての品質管理上の問題を検討する。コンクリートの圧縮強度については建築基準法施行令において強度試験方法等に言及されているが，必ずしも明確な点がないとは言えない。この問題について日本建築学会大会においても昭和51年，52年に研究協議会のテーマとしてとりあげられ，なかでもコンクリートの調合，運搬，打ち込み，養生のプロセスなどの段階での強度を考えるか，すなわちどの段階で供試体を採取するか，また，採取された供試体をどのように扱うか（4週間強度判定までの養生の取り扱い）という点に関する問題が提起されている（文献1）。

他の工業生産品が工場出荷時点においてその性能をほぼ完全に発現しているのに対し，建設に用いられるコンクリートはいわば半完成品であり，工場出荷以後に大きな変動をともなってその性能を発現するので，品質管理上の判定には多くの困難がみられる。

一方，コンクリートの圧縮強度は建築物の安全性を決める上できわめて重要な役割を果しており，RC構造物の安全を考える際，重要なファクターのひとつであり，その品質管理は非常に重要といえる。以後の分析では，生コンクリートの工場出荷から建築空間の利用時点までのプロセスを種々の不確定要因が混入するランダムプロセスシステムとしてとらえ，安全上の観点から次のような2点を目標とする品質管理システムの最適化を考える。

(1) 強度試験結果から得られるデータをもとに判定したとき，危険と判定されるべきコンクリート圧縮強度を有する建築物が安全と誤って判定されることがないこと，あるいはきわめて少ないこと。

(2) 強度試験結果から得られるデータをもとに判定したとき，安全な圧縮強度を有する建築物のコンクリートに対して誤って危険と判定されることがないこと，あるいはきわめて少ないこと。

前者の要請は安全上きわめて重要な要請である。後者は前者の要請のみを考えて過剰に安全設計，施工されることによって浪費される建築的資源を最少にくい止めようとする要請であり，建築全体を考えた際，この要請を無視しては非現実的となってしまう。

以上の点を検討するため，以下では

(1) コンクリート生産品質管理過程のシステム的記述，

(2) コンクリート強度に関する確率的関係式の導出，

(3) 品質管理システムの総合最適化の数理的意味の検討，

を行う。

5-5-2 コンクリートの生産及び観測のシステム

まず，コンクリートの計画調合から最終的な強度発現に至るプロセスもシステム論的に要約しておこう。

コンクリート強度を決定するシステムは3つの部分に分割することができる。

(1) 設計系

(2) 生産系

(3) 観測系

ここでは品質管理上の問題が主なので，観測系に主眼をおいてシステムを記述する（図 10-1 参照）。

(1) 設計系は建築物の設計の最終的な段階として「設計基準強度」（設計基準強度を以後 F_c で記す*）の指

* 物理量として出現する値と，規準，設計等で人為的に定められた値を区別するために，以下，前者を小文字，後者を大文字で記す。

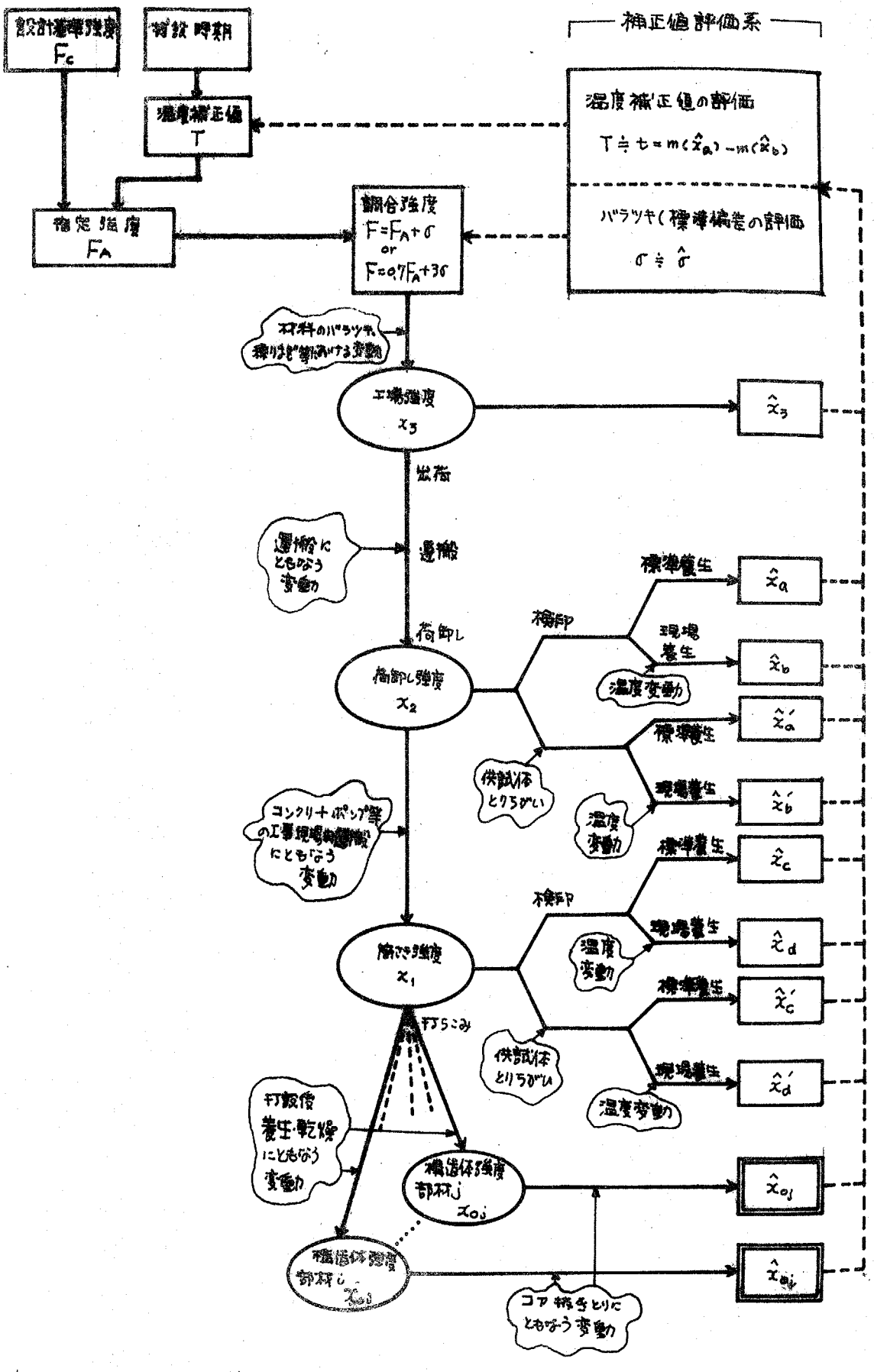


図 10-1 コンクリートの圧縮強度観測システム

定が行われることから始まる。通常，この設計基準強度がコンクリートの調合に必要な情報として指定され，冬季において低温による強度の低下をみこした温度補正が行われた場合（この温度補正値を丁と記す）は，F_c は「指定強度」（F_A）におきかえられる。

(2) 生産系では指定強度 F_A を目標にしてコンクリートが製造されるが（通常，「JASS 5 4節 調合」に定める調合強度Fが求められ，この値等から所要の水・セメント比を求め，計画調合が決定されるが），厳密にこの調合強度がそのままコンクリート圧縮強度として出現するわけではない。そこには調合段階におけるランダムな要因，安全をみこした不確定な圧縮強度の増加等が混入しており，すでに圧縮強度はランダム変量としてとらえなければならないといえよう。工場で製造されたまだ固まらないコンクリートをそのまま標準養生で養生した場合に出現するであろう圧縮強度を「工場強度」と呼んでおこう（このランダム変量を x_1 と記す）。さらに工場から現場までの運搬プロセスが実行されると，運搬に伴う変動が加わる。従って，現場荷卸し段階ではすでに同じコンクリートではなく，工場強度に運搬に伴う変動が加わった「荷卸し強度」（x_2）に変化している。また，現

場の荷卸し段階から打込みに至る工事現場内の運搬プロセスの中でコンクリートポンプなどを用いることによって伴う変動，荷卸しから打込みにかかる時間の変動等による変動が加わる。従って，打込み時の圧縮強度を「筒先き強度」(x_1)としてとらえる。通常，この筒先き強度が現場での最終的な試験可能な値であるといえる。しかし，これ以後がむしろ大きな変動が介入するプロセスであり，打込み後の締め固めや養生に伴う変動が加わる。そこで，こうした最終的な強度を「最終強度」(x_0)と考える。以上の各生産プロセスにおける圧縮強度はランダム変量であり，また，観測されていない量でもある。

(3) 観測系は生産プロセスの諸段階のそれぞれから供試体を採取し，試験を実施し，圧縮強度を測定するまでの段階を指すが，その中にも人為的な要因及び自然のランダムな要因が介入している。まず，通常行われる荷卸しの段階で得られる供試体からの圧縮試験結果をうるプロセス(JASS 5 5節製造)を考えてみると，現状ではその場で得られた供試体のサンプルがとりちがえられる可能性も存在しており，これがひとつのランダム要因ともいえる。さらに，得られた

供試体を標準養生で4週間管理する場合と，現場の温湿度の変動にまかせた場合（現場養生）がある．通常，現場養生には水中養生，空中養生，砂中養生等がある。こうした標準養生以外の場合に加わる変動を一括して温度変動と呼ぶ。以上の観測プロセスは簡先き強度についても同様であると考えられる。また，工場強度についてもほぼ同様なことが行われていると考えざるしかないであろう。以上の圧縮強度の観測以外に，構造体から抜取られたコアの圧縮強度を検討する方法もある。しかし，この抜取られたコアの圧縮強度試験値をただちにその建築物のコンクリート圧縮強度と考えることにはいくつかの難点がある。コアの抜取り場所によっては，当然圧縮強度が異なっており，柱，梁などにくらべ床，壁部分では乾燥速度の差等によって強度の差がみられるといわれている。また，柱など垂直方向に圧縮応力が生じる部材において，現段階では圧縮応力の方向にコアサンプルを抜取ることは難しい。従って，抜取りコアによる圧縮強度試験も完全な最終圧縮強度の測定ではなく，不確定な要因が混入しているといえるのである。

観測系には次のような温度補正値評価系とでもい

うべきシステムが付加されている。すなわち，冬季における温度低下等にともなう強度の温度補正値下をどのようにとらえるかという評価系が存在しているといえよう。温度補正値下は，標準養生された場合とそうでない場合との強度の比較によって求められる値であるが，通常，「JASS 5 4節 調合」に定められた補正値が調合設計に用いられている。

以上がコンクリートの強度に関する（観測を中心とした）システムの大まかな記述である。

5-5-3 コンクリート圧縮強度に関する確率的関係

5-5-3-1 記号の定義及び基本関係式

先にコンクリート生産・品質管理過程をシステム的に記述したが(図10-1),その確率的関係を調べるためより単純化して図10-2のように記すことにする。

荷卸し段階以後,外乱が加わらないとした場合に得られる28日圧縮強度を記号x_2で記し,荷卸し強度と呼ぶ(ここで,外乱が加わらないとは完全な温度管理のもとで養生されるという意味であり,近似的には標準養生されている場合がこれに相当すると考えられる)。

さらに,荷卸しから打込み直前まで(筒先きまで)に加わる外乱をε_{22}とし,その結果得られる圧縮強度,すなわち打設段階以後外乱が加わらないとした場合の28日圧縮強度をx_1と記し,筒先き強度と呼ぶ。

上の2つの定義から次の関係式がすでに得られている。

$$x_1 = x_2 + \varepsilon_{22} \qquad (3-1)$$

次に,打込み以後最終的なコンクリート圧縮強度x_0(最終強度と呼ぶ)が得られるまでに加わる外乱をε_{11}とすると,次の関係式が得られる。

$$x_0 = x_1 + \varepsilon_{11} \qquad (3-2)$$

上にあげた変量x_0, x_1, x_2, ε_{11}, ε_{22}は当然ここでなが

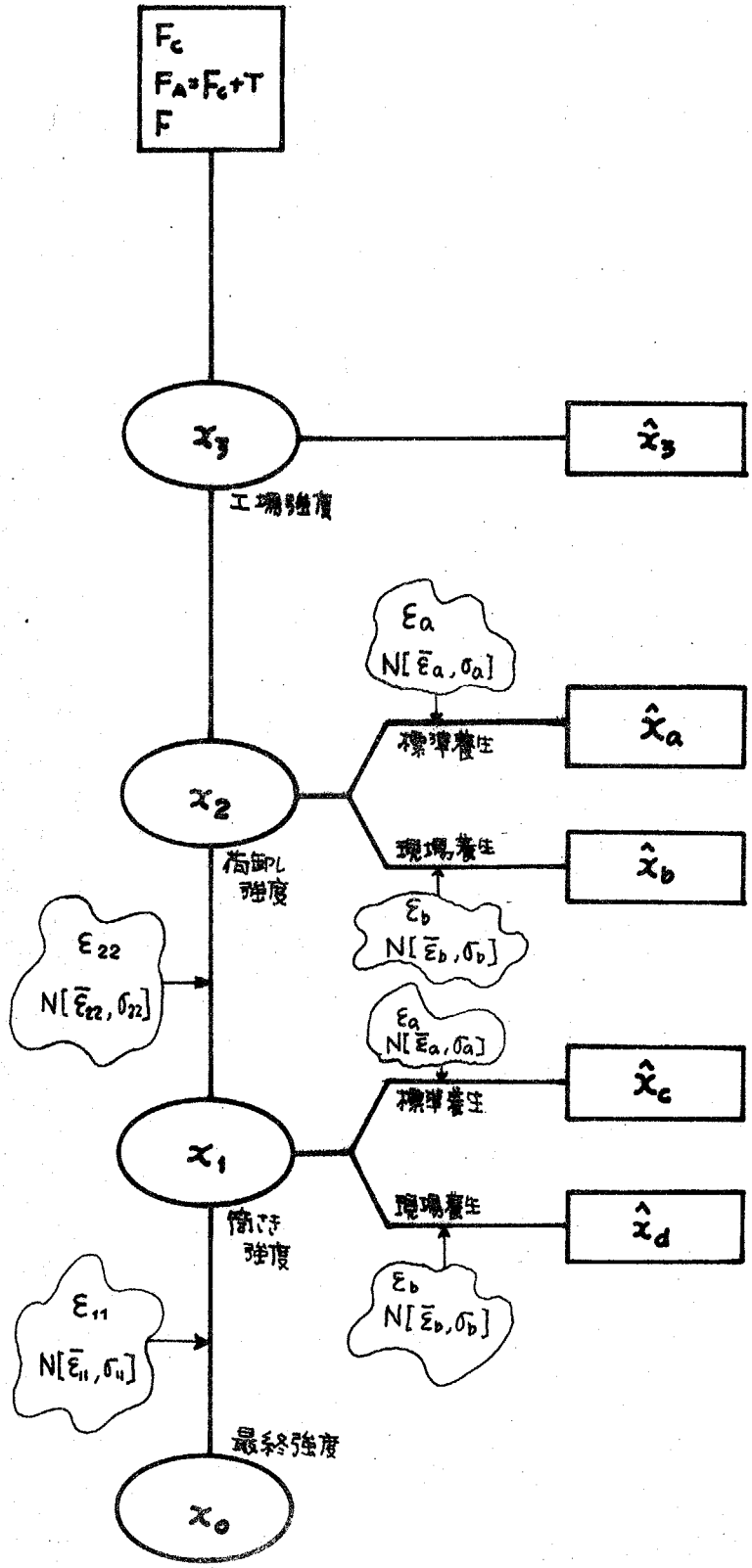


図 10-2 コンクリート圧縮強度の観測に介入する外乱

ら確率変量である。

次に観測値についての定義と関係式を検討することにしよう。荷卸し段階から得られる供試体については，標準養生の場合と現場養生の場合があり，後者についてはさらに現場の水中養生，現場空中養生，現場砂中養生などがあるが，現段階ではそれらを一括して現場養生と呼ぶことにしておく。以後，それらの区別が必要な場合には，ここで述べた数理的取り扱いは容易に拡張される。従って，荷卸し時試料採取した供試体を28日間標準養生し，「JIS A 1108 (A 1132)」に定める試験方法に基づいて得られる28日圧縮強度を観測値 $\hat{x}_a$ とし，同じく荷卸し時，試料採取28日間現場養生の圧縮強度を観測値 $\hat{x}_b$ で表わす．ここで，標準養生の際にかわる外乱を ε_a とし，現場養生の場合にかわる外乱を ε_b とすれば，次の関係式が得られる。

$$\hat{x}_a = x_2 + \varepsilon_a \qquad (3-3)$$

$$\hat{x}_b = x_2 + \varepsilon_b \qquad (3-4)$$

同様に，前先きで得られるコンクリートから作られる供試体の28日間の標準養生圧縮強度を観測値 $\hat{x}_c$ で表し，同じく28日間の現場養生圧縮強度を観測値 $\hat{x}_d$ で記すと，次の関係式も上と同様に得られる。

$$\hat{x}_c = x_1 + \varepsilon_a \qquad (3-5)$$

$$\hat{x}_d = x_1 + \varepsilon_b \qquad (3-6)$$

ここで，(3-1)式及び(3-2)式から得られる次の関係式

$$x_0 = x_2 + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{11} \qquad (3-7)$$

について，便宜上次のように合成外乱を加えている。

$$x_0 = x_2 + \varepsilon_{12} \qquad (3-8)$$

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} \qquad (3-9)$$

（また，以下の中で記号∧を適宜省略することがある）

これまでの取り扱いは外乱の性質について何も規定せずに，その関係だけを示したにすぎない。以下は基本的に外乱ε_{11}, ε_{22}, ε_a, ε_bは独立な確率量であること，加えて多くの要因が混入していることなど考慮し，正規分布に従った確率的挙動を示すものと仮定し，さらに細かな検討を加えることにしたい。

5-5-3-2 コンクリート圧縮強度と各観測値との確率的関係

まず，先に述べた各確率変数間の独立性と正規性への近似ということを以下のようにはっきりと定義しておくことにしよう。まず，荷卸し強度x_2についてもそれ以前のプロセスが複雑であるためにx_2自身もも次の正規確率分布に従っているものと考える。

$$f_2(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{(x-\bar{x}_2)^2}{\sigma_2^2}\right] \qquad (3-10)$$

(記号 $\bar{x}$ は x の平均を意味する)

さらに，外乱 ε_1, ε_2, ε_a, ε_b の確率分布も相互に独立に以下の正規分布に従うものと考える。

$$f_{11}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{11}} \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{(x-\bar{\varepsilon}_{11})^2}{\sigma_{11}^2}\right] \qquad (3-11)$$

$$f_{22}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{22}} \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{(x-\bar{\varepsilon}_{22})^2}{\sigma_{22}^2}\right] \qquad (3-12)$$

$$f_a(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_a} \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{(x-\bar{\varepsilon}_a)^2}{\sigma_a^2}\right] \qquad (3-13)$$

$$f_b(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_b} \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{(x-\bar{\varepsilon}_b)^2}{\sigma_b^2}\right] \qquad (3-14)$$

ここで，さらに先に述べたように，標準養生の際に得られる圧縮強度が外乱がなく管理・養生された場合と近似的に等しいと考えれば（しかし，標準養生に全く外乱がないということは意味しない），次の仮定が得られる。

$$\bar{\varepsilon}_a = 0 \qquad (3-15)$$

この仮定と (3-3) 式から

$$\bar{x}_2 = \bar{x}_a \qquad (3-16)$$

同様に (3-5) 式から次の式を得る。

$$\bar{x}_1 = \bar{x}_c \qquad (3-17)$$

(3-1) 式から各確率変量の独立性を用いて

$$\bar{\varepsilon}_{22} = \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \qquad (3-18)$$

同じく各変量の独立性から

$$\bar{\varepsilon}_b = \bar{x}_b - \bar{x}_2 \qquad (3-19)$$

となる。また，上式に(3-16)式を用いることにより

$$\bar{\varepsilon}_b = \bar{x}_b - \bar{x}_a \qquad (3-20)$$

より

$$\bar{\varepsilon}_{12} = \bar{\varepsilon}_{11} + \bar{\varepsilon}_{22} \qquad (3-21)$$

も成立している。現場養生による強度の低下は大きく温度に依存しているので，標準養生と現場養生の強度の差の平均をもとすると，以下のように記すことができる。

$$\bar{\varepsilon}_b = -t = \bar{x}_b - \bar{x}_a \qquad (3-22)$$

以上のことから，導出の際，正規分布と正規分布の組合せは正規分布となるということを用いて直ちに次の関係式を得る。

i) ε_{12} の分布

$$f_{12}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{12}} \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{(x-\bar{\varepsilon}_{12})^2}{\sigma_{12}^2}\right] \qquad (3-23)$$

ただし，

$$\sigma_{12}^2 = \sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2, \quad (\bar{\varepsilon}_{12} = \bar{\varepsilon}_{11} + \bar{\varepsilon}_{22}) \qquad (3-24)$$

ii) x_1 の分布

$$f_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{(x-\bar{x}_c)^2}{\sigma_1^2}\right] \qquad (3-25)$$

ただし,

$$\sigma_1^2 = \sigma_2^2 + \sigma_{22}^2 \qquad (3-26)$$

iii) $\hat{x}_a$ の分布

$$f_A(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_A} \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{(x-\bar{x}_a)^2}{\sigma_A^2}\right] \qquad (3-27)$$

ただし,

$$\sigma_A^2 = \sigma_2^2 + \sigma_a^2 \qquad (3-28)$$

iv) $\hat{x}_b$ の分布

$$f_B(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_B} \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{(x-\bar{x}_b)^2}{\sigma_B^2}\right] \qquad (3-29)$$

ただし,

$$\sigma_B^2 \quad \sigma_2^2 + \sigma_b^2, \quad (\bar{x}_b = \bar{x}_2 - t) \qquad (3-30)$$

v) $\hat{x}_c$ の分布

$$f_c(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{(x-\bar{x}_c)^2}{\sigma_c^2}\right] \qquad (3-31)$$

ただし,

$$\sigma_c^2 = \sigma_1^2 + \sigma_a^2, \quad (\bar{x}_c = \bar{x}_1) \qquad (3-32)$$

vi) $\hat{x}_d$ の分布

$$f_D(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_D} \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{(x-\bar{x}_d)^2}{\sigma_D^2}\right] \qquad (3-33)$$

ただし,

$$\sigma_D^2 = \sigma_1^2 + \sigma_b^2 \quad (\bar{x}_d = \bar{x}_1 - t) \qquad (3-34)$$

以上の準備のもとで，最終的なコンクリート圧縮

強度，すなわち，最終強度 x_0 と観測値の同時確率密度関数を導くことができる。

(A) 観測値 $\hat{x}_a$（荷卸し標準養生強度）の場合

x_0 と $\hat{x}_a$ の同時確率密度関数は以下のように，各変量の独立性より定義通り表現することができる。

$$f_{0a}(x_0, \hat{x}_a) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{12}(x_0 - x_2) \cdot f_a(x_a - x_2) \cdot f_2(x_2)\, dx_2 \qquad (3-35)$$

すなわち，荷卸し強度 x_2 が求められたもとで標準養生プロセスで $x_a - x_2$ の外乱が加わり，荷卸し以降 x_0 の強度が出るまでに $x_0 - x_2$ の外乱が加わる確率を，すべての x_2 について加えたものが x_0 と x_a の同時確率密度関数にほかならない。これは相互独立な確率関数であるから，上で求めた各分布を用いて次のように単純化することができる。

$$f_{0a}(x_0, \hat{x}_a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi\sqrt{2\pi}\,\sigma_{12}\sigma_a\sigma_2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\frac{(x_0 - x_2 - \bar{\varepsilon}_{12})^2}{\sigma_{12}^2} + \frac{(x_a - x_2)^2}{\sigma_a^2} + \frac{(x_2 - \bar{x}_a)^2}{\sigma_2^2}\right\}\right] dx_2 \qquad (3-36)$$

上式右辺の積分を実行するために

$$g = \frac{(x_0 - x_2 - \bar{\varepsilon}_{12})^2}{\sigma_{12}^2} + \frac{(x_a - x_2)^2}{\sigma_a^2} + \frac{(x_2 - \bar{x}_a)^2}{\sigma_2^2} \qquad (3-37)$$

とおく。この g を x_2 について，次のような二次形式に

変形することを考えると

$$g = a(x_2 - b)^2 + c \tag{3-38}$$

と変形でき，さらに

$$x = \sqrt{a}(x_2 - b) \tag{3-39}$$

なる変量を考えると

$$f_{0a}(x_0, \hat{x}_a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi\sqrt{2\pi}\sigma_{12}\sigma_a\sigma_2} \exp\left[-\frac{1}{2}x^2\right] \exp\left[-\frac{c}{2}\right] dx_2 \tag{3-40}$$

また．

$$dx = \sqrt{a}\, dx_2 \tag{3-41}$$

であることを考えて，積分変数を変数変換して

$$f_{0a}(x_0, \hat{x}_a) = \frac{1}{2\pi\sigma_{12}\sigma_a\sigma_2} \exp\left[-\frac{c}{2}\right] \cdot \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \tag{3-42}$$

最後の積分項は標準正規分布の$(-\infty, \infty)$の積分にほかならないから，その値は1となるので

$$f_{0a}(x_0, \hat{x}_a) = \frac{1}{2\pi\sigma_{12}\sigma_a\sigma_2\sqrt{a}} \exp\left[-\frac{c}{2}\right] \tag{3-43}$$

一方，(3-37)式と(3-38)式とを比較することにより，

a及びcを以下のように求めることができる。

$$a = \frac{\sigma_a^2\sigma_2^2 + \sigma_{12}^2\sigma_2^2 + \sigma_{12}^2\sigma_a^2}{\sigma_{12}^2\sigma_a^2\sigma_2^2} \tag{3-44}$$

$$c = \frac{\sigma_2^2(x_0 - \bar{\varepsilon}_{12} - \bar{x}_a)^2 + \sigma_a^2(x_0 - \bar{\varepsilon}_{12} - \bar{x}_a)^2 + \sigma_{12}^2(x_a - \bar{x}_a)^2}{\sigma_a^2\sigma_2^2 + \sigma_{12}^2\sigma_2^2 + \sigma_{12}^2\sigma_a^2} \tag{3-45}$$

従って，

$$f(x_0,\hat{x}_a)=\frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma_a^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_a^2}}\times$$

$$\exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{\sigma_2^2(x_0-\bar{x}_a-\bar{\varepsilon}_{12})^2+\sigma_a^2(x_0-\bar{x}_a-\bar{\varepsilon}_{12})^2+\sigma_{12}^2(x_a-\bar{x}_a)^2}{\sigma_a^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_a^2}\right]$$

(3-46)

を得る。

(B) 観測値 $\hat{x}_b$（荷卸し現場養生強度）の場合

前記の場合と同様にして x_0 と $\hat{x}_b$ の同時確率密度関数を以下のように得ることができる。

$$f_{ob}(x_0,\hat{x}_b)=\frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma_b^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_b^2}}\times$$

$$\exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{\sigma_2^2(x_0-x_b-t-\bar{\varepsilon}_{12})^2+\sigma_b^2(x_0-\bar{x}_a-\bar{\varepsilon}_{12})^2+\sigma_{12}^2(x_b+t-\bar{x}_a)^2}{\sigma_b^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_b^2}\right]$$

(3-47)

(C) 観測値 $\hat{x}_c$（簡先き標準養生強度）の場合

前記の場合と同様にして x_0 と $\hat{x}_c$ の同時確率密度関数を以下のように得ることができる。

$$f_{oc}(x_0,\hat{x}_c)=\frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma_a^2\sigma_1^2+\sigma_{11}^2\sigma_1^2+\sigma_{11}^2\sigma_a^2}}\times$$

$$\exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{\sigma_1^2(x_0-x_c-\bar{\varepsilon}_{11})^2+\sigma_a^2(x_0-\bar{x}_c-\bar{\varepsilon}_{11})^2+\sigma_{11}^2(x_c-\bar{x}_c)^2}{\sigma_a^2\sigma_1^2+\sigma_{11}^2\sigma_1^2+\sigma_{11}^2\sigma_a^2}\right]$$

(3-48)

(D) 観測値 $\hat{x}_d$（簡先き現場養生強度）の場合

前記の場合と同様にして x_0 と $\hat{x}_d$ の同時確率密度関数

を以下のように得ることができる。

$$f_{0d}(x_0,\hat{x}_d)=\frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma_b^2\sigma_1^2+\sigma_{11}^2\sigma_1^2+\sigma_{11}^2\sigma_b^2}}\times$$

$$\exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{\sigma_1^2(x_0-x_b-t-\bar{\varepsilon}_{11})^2+\sigma_b^2(x_0-\bar{x}_c-\bar{\varepsilon}_{11})^2+\sigma_{11}^2(x_b+t-\bar{x}_c)^2}{\sigma_b^2\sigma_1^2+\sigma_{11}^2\sigma_1^2+\sigma_{11}^2\sigma_b^2}\right]$$

(3-49)

5-5-3-3 品質管理システムの誤判定確率

(a) 各観測値のもとでの危険確率

各観測値 $\hat{x}_a$, $\hat{x}_b$, $\hat{x}_c$, $\hat{x}_d$ が得られたとき，各観測値のもとで最終強度 x_0 が危険範囲に入っている確率 P_{FA}, P_{FB}, P_{Fc}, P_{Fb} を求める。この場合，最終強度が危険範囲に入っているとは，ある定めた一定の許容規準値 F_0 よりも最終強度（確率変量）が小さいということである。すなわち，

$$x_0 < F_0 \qquad (3-50)$$

であるとき，安全上許容されない。この許容規準値 F_0 の値については種々の考えがありうるが，ここでは長期許容応力度（$\frac{1}{3}F_c$）または短期許容応力度（$\frac{2}{3}F_c$）を許容規準値と考えておくことにしたい。

(A) 荷卸し標準養生の場合

荷卸し標準養生28日圧縮試験強度が x と観測された場合，最終強度 x_0 が許容規準 F_0 にみたない確率，すなわち危険確率は以下の式で与えられる。

$$P_{FA}(x) = Prob\,(x_0 < F_0 | x) \qquad (3-51)$$

先に求めた同時確率密度関数を用いると，次の関係式が成立している。

$$f_A(x)\cdot P_{FA}(x) = \int_{-\infty}^{F_0} f_{0a}(x_0, x)\,dx_0$$

$$= \int_{-\infty}^{F_0} \frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma_a^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_a^2}} \times$$

$$\exp\left[-\frac{1}{2}\frac{\sigma_2^2(x_0-x-\bar{\varepsilon}_{12})^2+\sigma_a^2(x_0-\bar{x}_a-\bar{\varepsilon}_{12})^2+\sigma_{12}^2(x-\bar{x}_a)^2}{\sigma_a^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_a^2}\right]dx_0$$

$$(3-52)$$

ここで，積分を実行するために

$$y = \sqrt{\frac{\sigma_2^2+\sigma_a^2}{\sigma_a^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_a^2}}\left\{x_0 - \frac{\sigma_2^2(x+\bar{\varepsilon}_{12})+\sigma_a^2(\bar{x}_a+\bar{\varepsilon}_{12})}{\sigma_2^2+\sigma_a^2}\right\} \qquad (3-53)$$

とおくと

$$dy = \sqrt{\frac{\sigma_2^2+\sigma_a^2}{\sigma_a^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_a^2}}\,dx_0 \qquad (3-54)$$

また，変数 x_0 が F_0 となるときの y の値は

$$Y_{0A} = \sqrt{\frac{\sigma_2^2+\sigma_a^2}{\sigma_a^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_a^2}}\left(F_0 - \frac{\sigma_2^2(x+\bar{\varepsilon}_{12})+\sigma_a^2(\bar{x}_a+\bar{\varepsilon}_{12})}{\sigma_2^2+\sigma_a^2}\right) \qquad (3-55)$$

となっており，

$$f_A(x)\cdot P_{FA}(x) = \int_{-\infty}^{F} \frac{\exp\left[-\frac{y^2}{2}-\frac{1}{2}\frac{(x-\bar{x}_a)^2}{\sigma_2^2+\sigma_a^2}\right]}{2\pi\sqrt{\sigma_a^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_a^2}}\,dx_0 \qquad (3-56)$$

となる。ここで x_0 を y で変数変換することにより

$$f_A(x)\cdot P_{FA}(x)=\frac{\exp\left[-\frac{(x-\bar{x}_a)^2}{2(\sigma_2^2+\sigma_a^2)}\right]}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_2^2+\sigma_a^2}}\int_{-\infty}^{X_{OA}}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{y^2}{2}\right]dy \qquad (3-57)$$

をうる。上式の最後の積分項は標準正規確率の累積分布関数 $\Phi(X_{OA})$ にほかならないので，

$$f_A(x)\cdot P_{FA}(x)=\frac{\Phi(X_{OA})}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_2^2+\sigma_a^2}}\exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(x-\bar{x}_a)^2}{\sigma_2^2+\sigma_a^2}\right] \qquad (3-58)$$

従って，(3-27)，(3-28)式より

$$\left.\begin{aligned}&P_{FA}(x)=\Phi(X_{OA})\\&\text{ただし，}\\&X_{OA}=\sqrt{\frac{\sigma_2^2+\sigma_a^2}{\sigma_a^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_a^2}}\left\{F_0-\frac{\sigma_2^2(x+\bar{\varepsilon}_{12})+\sigma_a^2(\bar{x}_a+\bar{\varepsilon}_{12})}{\sigma_2^2+\sigma_a^2}\right\}\end{aligned}\right\} \qquad (3-59)$$

という結果をうる。

(B) 荷卸し現場養生の場合

荷卸し現場養生28日圧縮試験強度が x と観測された場合に最終強度 x_0 が許容規準 F_0 にみたない確率，すなわち危険確率は以下の式で与えられる。

$$P_{FB}(x)=P_{rob}(x_0<F_0|x) \qquad (3-60)$$

この関係式は同時確率密度関数を用いて以下のように書くことができる。

$$f_B(x)\cdot P_{FB}(x)=\int_{-\infty}^{F_0}f_{ob}(x_0,x)\,dx_0 \qquad (3-61)$$

ここで，(3-47)式の結果を代入し，積分を前項の場合

と同様に行うことにより，次の結果をうる。

$$\left.\begin{aligned} &P_{FB}(x) = \Phi(X_{oB}) \\ &\text{ただし，} \\ &X_{oB} = \frac{\sqrt{\sigma_2^2+\sigma_b^2}}{\sqrt{\sigma_b^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_2^2+\sigma_{12}^2\sigma_b^2}}\left\{F_o - \frac{\sigma_2^2(x+t+\bar{\varepsilon}_{12})+\sigma_b^2(\bar{x}_a+\bar{\varepsilon}_{12})}{\sigma_2^2+\sigma_b^2}\right\} \end{aligned}\right\} \quad (3-62)$$

(c) 簡先き標準養生の場合

簡先き標準養生28日圧縮試験強度が x と観測された場合に，最終強度 x_o が許容規準 F_o にみたない確率，すなわち危険確率は以下の式で与えられる。

$$f_c(x)\cdot P_{Fc}(x) = P_{rob}(x_o < F_o | x) \quad (3-63)$$

この関係式は同時確率密度関数を用いて以下のように書くことができる。

$$f_c(x)\cdot P_{Fc}(x) = \int_{-\infty}^{F_o} f_{oc}(x_o, x)\,dx_o \quad (3-64)$$

ここで，(3-48)式の結果を代入し，積分を実行し，次の結果をうる。

$$\left.\begin{aligned} &P_{Fc}(x) = \Phi(X_{oc}) \\ &\text{ただし，} \\ &X_{oc} = \frac{\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_a^2}}{\sqrt{\sigma_a^2\sigma_1^2+\sigma_{11}^2\sigma_1^2+\sigma_{11}^2\sigma_a^2}}\left\{F_o - \frac{\sigma_1^2(x+\bar{\varepsilon}_{11})+\sigma_a^2(\bar{x}_c+\bar{\varepsilon}_{11})}{\sigma_1^2+\sigma_a^2}\right\} \end{aligned}\right\} \quad (3-65)$$

(d) 簡先き現場養生の場合

簡先き現場養生28日圧縮試験強度が x と観測された

場合に，最終強度 x_0 が許容規準 F_0 にみたない確率，すなわち危険確率は以下の式で与えられる。

$$f_D(x)\cdot P_{FD}(x) = P_{rob}(x_0 < F_0 | x) \qquad (3-66)$$

この関係式は同時確率密度関数を用いて以下のように書くことができる。

$$f_D(x)\cdot P_{FD}(x) = \int_{-\infty}^{F_0} f_{0d}(x_0, x)\, dx_0 \qquad (3-67)$$

ここで，(3-49)式の結果を代入し，積分を実行し，次の結果をうる。

$$\left.\begin{aligned} &P_{FD}(x) = \Phi(X_{0D}) \\ &\text{ただし，} \\ &X_{0D} = \frac{\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_b^2}}{\sqrt{\sigma_b^2\sigma_1^2+\sigma_{11}^2\sigma_1^2+\sigma_{11}^2\sigma_b^2}}\left\{F_0 - \frac{\sigma_1^2(x+t+\bar{\varepsilon}_{11})+\sigma_b^2(\bar{x}_c+\bar{\varepsilon}_{11})}{\sigma_1^2+\sigma_b^2}\right\} \end{aligned}\right\} (3-68)$$

(b) 誤判定確率

観測値すなわちコンクリート供試体から得られる圧縮強度の試験値から打込まれた実際のコンクリート×最終強度を評価する際，二つの意味での誤りがありうる。すなわち，

(1) 圧縮強度試験結果から得られるデータをもとに判定したとき，危険と判定される最終強度を有する($x_0 < F_0$ となっている)コンクリートが安全と誤って判定される場合。

(2) 充分な最終強度を有する（$x_0 \geq F_0$ となっている）コンクリートに対し誤って危険と判定してしまう場合。

前者は安全上きわめて重要視すべき誤りであり，後者は過剰な強度という意味で，経済的・資源的視点からみて好ましくない誤りである。この二つの誤りが品質管理システムに常に内在する基本的な誤りである。

上述の(1)のタイプの誤り（以後，第一種の誤りないしは危険誤判定と呼ぶ）の確率（これを危険誤判定確率または危険設差と呼ぶ）はそれぞれ以下のように表わすことができる。

(A) 荷卸し標準養生の場合

$$P_{eA} = \int_{F_1}^{\infty} P_{FA}(x) \cdot f_A(x)\, dx \qquad (3-69)$$

(B) 荷卸し現場養生の場合

$$P_{eB} = \int_{F_1'}^{\infty} P_{FB}(x) \cdot f_B(x)\, dx \qquad (3-70)$$

(C) 筒先き標準養生の場合

$$P_{eC} = \int_{F_1}^{\infty} P_{FC}(x) \cdot f_C(x)\, dx \qquad (3-71)$$

(D) 筒先き現場養生の場合

$$P_{eD} = \int_{F_1'}^{\infty} P_{FD}(x) \cdot f_D(x)\, dx \qquad (3-72)$$

ここで，F_1は荷卸し標準養生のコンクリート供試体から得られる圧縮強度が判定規準値F_1以下であれば不合格とみなされ，F_1以上であれば合格とみなされる値であり，JASS 5では指定強度に合格判定係数を乗じた値である。また，F_1'は現場養生のコンクリート供試体から得られる圧縮強度が判定規準値F_1'以下であれば不合格とみなされ，F_1'以上であれば合格とみなされる値で，JASS 5では設計基準強度である。

上述の積分項の値は(3-58)及び(3-62)，(3-65)，(3-68)式から簡単に求めることができる。

一方，(2)のタイプの誤り（第二種の誤りまたは過剰誤判定と呼ぶ）の生じる確率（過剰誤判定確率または過剰誤差と呼ぶ）はそれぞれ以下のように与えられる。

(A) 荷卸し標準養生の場合

$$P_{oA} = \int_{-\infty}^{F_1} \int_{F_0}^{\infty} f(x_0, x)\, dx_0\, dx \qquad (3-73)$$

(B) 荷卸し現場養生の場合

$$P_{oB} = \int_{-\infty}^{F_1'} \int_{F_0}^{\infty} f(x_0, x)\, dx_0\, dx \qquad (3-74)$$

(C) 前先き標準養生の場合

$$P_{oC} = \int_{-\infty}^{F_1} \int_{F_0}^{\infty} f(x_0, x)\, dx_0\, dx \qquad (3-75)$$

(D) 箇先き現場養生の場合

$$P_{oD} = \int_{-\infty}^{F_1'} \int_{F_0}^{\infty} f(x_0, x)\, dx_0\, dx \qquad (3-76)$$

これらの過剰誤差は同時確率密度関数がすでに求められているので，以下のように書きかえることができる。

$$P_{oA} = \int_{-\infty}^{F_1} \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(x-\bar{x}_a)^2}{\sigma_2^2+\sigma_a^2}\right]}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_2^2+\sigma_a^2}} \int_{x_{oA}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] dt\, dx$$

$$= \int_{-\infty}^{F_1} \frac{\Phi(-X_{oA})}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_2^2+\sigma_a^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(x-\bar{x}_a)^2}{\sigma_2^2+\sigma_a^2}\right] dx \qquad (3-77)$$

同様に

$$P_{oB} = \int_{-\infty}^{F_1'} \frac{\Phi(-X_{oB})}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_2^2+\sigma_b^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(x+t-\bar{x}_a)^2}{\sigma_2^2+\sigma_b^2}\right] dx \qquad (3-78)$$

$$P_{oC} = \int_{-\infty}^{F_1} \frac{\Phi(-X_{oC})}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_a^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(x-\bar{x}_c)^2}{\sigma_1^2+\sigma_a^2}\right] dx \qquad (3-79)$$

$$P_{oD} = \int_{-\infty}^{F_1'} \frac{\Phi(X_{oD})}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_b^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(x+t-\bar{x}_c)^2}{\sigma_1^2+\sigma_b^2}\right] dx \qquad (3-80)$$

ところで，こうしたコンクリートの品質管理システムの中の二つの誤り，すなわち危険誤差及び過剰誤差を同時により小さくするようにすることが好ましい。しかし，次図にわかるように，危険誤差を少なくすると過剰誤差は増加し，過剰誤差を少なくすると危険誤差が増加するという相互関係が存在しており，単なる危険誤差の最小化もしくは過剰誤差の最小化という視点は非現実的である。

もとより，安全を考えているのであるから危険誤差と過剰誤差のウェイトは異なっているといえよう。従って，このウェイトが定数として得られる場合には，次のような値を最小化するようなPD質管理システムが最も好ましいといえよう。

$$P_{WA} = \omega_1 P_{eA} + \omega_2 P_{oA} \quad (3-81)$$

$$P_{WB} = \omega_1 P_{eB} + \omega_2 P_{oB} \quad (3-82)$$

$$P_{WC} = \omega_1 P_{eC} + \omega_2 P_{oC} \quad (3-83)$$

$$P_{WD} = \omega_1 P_{eD} + \omega_2 P_{oD} \quad (3-84)$$

しかし，一般には危険誤差と過剰誤差を比較すること，すなわち安全と経済的な利益を比較することはきわめて難しい問題を内在しており，上述の(3-81)式から(3-84)式のようなウェイトづけにより，安全性と経済性とを比較するという考え方を不用意に採用することはできない。そのため，次の項ではコンクリートPD質管理システム自身の「最適性」について，より徹底した検討を加えなければならない。

5-5-4 PD質管理システムの最適化

5-5-4-1 PD質管理の現状

コンクリートのPD質管理という問題は他のPD工業製品の

それと異なる面が多いが，なかでも工場出荷段階ではその品質性能というものが実現されていないということが指摘できる。コンクリート圧縮強度についていえば，出荷以降運搬，打設，養生というプロセスで受ける影響により圧縮強度の値は大きく変化する。

従って，このような特殊な工業生産品の品質の規定及び管理に関して多くの研究及び品質管理規定の検討がなされてきている。

ここではこうした品質管理の問題の中で，とくに圧縮強度の品質に関する検査及びその結果を用いて行われる合否判定の問題をひとつの判定システムの最適化の問題としてとらえることにしたい。

まず，コンクリート圧縮強度の検査については，とくに以下の点が問題となってくるといわれている。

a) コンクリート供試体の採取時点（荷卸し時点，打込み直前等）

b) 供試体の養生の仕方（標準，現場水中，現場気中，封緘等）

c) 供試体採取の割合（1回/150m³ 等）

d) 得られた試験値の合否判定規準

e) 現場環境（温度，湿度等）

この他にも多くの問題があるが，ここでは上にとりあげた点に的をしぼることにする。また，以後の検討の際はとくにことわりのないかぎり，レディーミクストコンクリートの場合を，品質のレベルとしてはJIS A 5308の規格内またはJASSによる品質の級"常用"の程度とし，建築の主として構造体に使用されるコンクリートを考え，供試体の材令は28日のものとする。

ところで，コンクリート圧縮強度に関する規定は検査規定のみでなく，調合設計の規定とも関連してくることもあるが，現状の諸規定を整理すると表10-1のようになる。ほとんど荷卸し標準養生の供試体を用いているが，構造物強度の推定のためにとくに打込み直前，現場養生のものを用いるものもある。また，諸規定で定義される指定強度，最小保証強度，公称強度，連続強度などは各規定の他の条件と関連があり，それらを単純に比較することには無理があるが，合否判定条件は

1) 圧縮強度試験の平均値がある値以上であること

2) バラツキの結果生じる小さな試験値についてはその最小許容値以上であること，または最小許容値以下になる割合があるパーセント以下であること

というように，平均，バラツキの2面から規定しているといえる。

表10-1　コンクリート強度の検査関連規定

国名	規格名(番号)又は規準名	強度規定と関連するコンクリート供試体の採取場所	供試体の養生	サンプル採取の割合	合否判定規準	
日本	JISA5308-1975	荷卸し	標準	150m³につき1回	1) 試験値が設計基準強度又は指定強度を下まわる割合は$\frac{1}{5}$以下 2) どの試験値も設計基準強度又は指定強度の70%を下まわらない	
	JASS5(建築工事標準仕様書)	荷卸し 打込み(ST-603) 現場(ST-604)	標準 現場(ST-604)		(構造体コンクリートの場合) 設計基準強度以上	
アメリカ	ASTM C94-74	荷卸し	標準 (-3)は現場	115m³に1回又は1日に1回の多い方	許容応力度法で構造物が設計されている場合(( )内は終局強度法で設計又はPC構造物) 1) 試験値が指定強度を下まわる割合は20(10)%以下 2) 連続する6(3)回の試験値が試験強度を下まわらない	
イギリス	B.S. 1726:62	荷卸し	標準	1日1回又は50m³に1回の多い方	1) 試験値が指定強度を下まわる割合は2.5%以下 2) 試験値が指定強度の85%を下まわらない	
西ドイツ	DIN 1045 DIN 1048 Blatt	荷卸し	標準	(BIコンクリート) 1) 500m³に1回 2) 各階に1回 3) 打設日並7日につき1回のうち多い方	1) 強度試験値の平均値は規定の連続強度を下まわらない 2) 強度試験値は規定の公称強度を下まわらない 3) 連続する3回の試験値のうち1回の試験値は公称強度の80%を下まわらない 4) 上記と関連して連続する3回の試験値の平均値は連続強度を下まわらない	(注) 連続強度=平均圧縮強度-最小規準値 公称強度=圧縮強度の最小規準値
フランス	NF P18-305, 4-1966	荷卸し	標準	2000m³以上は3回以上 2000m³以下は2回以上	1) 試験値の平均値は最小保証強度を下まわらない 2) 試験値が最小保証強度の90%を下まわる割合は10%以下 3) 試験値の総数が10以下の場合は1回以上最小保証強度を下まわらないこと	
			(注) 現場というのは「構造物にできるだけ近い状態の養生」ということを意味する			

SEKISEI A4 NO 54

やや数理的議論となるが、「割合」という概念と「確率」という概念は厳密には異なる概念である。しかし、各規定ではこの区別は明確ではなく、ここでは割合と確率を同じ概念としてあえて定式化を行うと、諸規定は以下のような数理的表現とほぼ同等である。

$$Prob(\bar{x} < \alpha_1 F_A) < p_* \qquad (4-1)$$

$$x > \alpha_2 F_A \qquad (4-2)$$

ここで、x：試験値

$\bar{x}$：いくつかの試験値の平均

F_A：指定強度（西ドイツ、フランスの場合は、それぞれ若干異なる仕方で規定されている）

α_1, α_2：規準値を得るための係数

p_*：許容確率

上の条件は試験値の平均値が指定強度のα_1倍に達しない確率はp_*以下でなければならないこと、下の条件は各試験値が指定強度のα_2倍に達していなければならないことを意味している。JIS及びJASS5の規定でいえば、

$\alpha_1 = 1.0 \quad p_* = \frac{1}{6}$

$\alpha_2 = 0.7$

である。ところで、上の確率的条件式はバラツキの性状について、標準偏差を知ることができ、さらにその分布

が正規分布であるということが仮定できれば，JASS 5の規定で用いているように，合格判定係数 k を用いて

$$\bar{x} / F_A > k \qquad (4-3)$$

ただし，

$$k = \frac{F - \alpha_0 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}}{F - \sigma}$$

σ：標準偏差

N：サンプル数

F：調合強度

α_0：k より決まってくる係数（$k = \frac{1}{6}$ のとき，$\alpha_0 = 1.282$）

というように書きかえることができる。従って，数理的な面から合否判定の問題をとらえるならば，コンクリートの合否判定システムは以下の二つの不等式条件で示されることになる。

$$\bar{x} > k F_A \qquad (4-4)$$

$$x > \alpha_2 F_A \qquad (4-5)$$

さらに，一般的に論ずる場合には x 及び $\bar{x}$ は観測値 $\hat{x}$ として一括して表現することによって，判定条件は

$$\hat{x} > \alpha F_A \qquad (4-6)$$

という形に代表して示すことができる。

当然のことながら，上式の α を大きくとることによっ

と規定を強くとることができ，好ましくない品質のものを見落す確率をより小さくすることができる。すなわちよりαを大きくとることにより，より安全側へ管理レベルをあげることができる。しかし，αを大きくとることにより，構造物として使用する場合に適格な品質のコンクリートが不適格として判定されてしまう確率が逆に増加してしまう。従って，αの値はあまりにも大きすぎては適切ではない。もちろん小さすぎても危険であるといえよう。

さらに，マクロな視点にたっていうならば，あまりにもαの値が高いということはセメント量の不必要な増大となり，資源の浪費となるばかりでなく，施工者サイドに不必要な工事コストの増加をうながし，こうしたコスト増をカバーするために，他のより安全上重要な要素において危険側への影響が生じることもあり，適切な判定レベルとしてのαの値が考えられなければならない。

しかしながら，このαの値の最適化の問題には構造安全性及び経済性の評価の面で充分なデータの得られていないのが現状であり，以降ではこのようなαの値のもつ数理的意味を検討するとともに現状の品質管理で行われているコンクリート供試体の採取の仕方，養生の仕

方の差異による誤判定確率の差を検討する。

5-5-4-2 判定システムの最適化の意味

まず，判定システムの意味から検討を加えよう。判定の際，基本となるカテゴリーは合格と不合格という二つのクラスである。以後，議論の簡単化のためにこの二つ以外のカテゴリーは想定しない。合格のクラスについては記号○，不合格のクラスについては記号△を用いて記すことにする。誤判定は先に述べたように二つあり，

a) 危険誤差，すなわち危険なもの（これを$\tilde{S}$と記す）を合格と判定する（記号$\tilde{S}\rightarrow\bigcirc$で記す）。

b) 過剰誤差，すなわち安全のもの（これをSと記す）を不合格と判定する（記号$S\rightarrow\triangle$で記す）。

誤判定の起る確率をそれぞれのタイプについてP_e, P_oとする。誤判定に伴う損失を（もしそれが計量できるならば），危険誤差の場合L_1で，過剰誤差の場合L_2で記す。このとき，判定システムの損失の期待値は以下の式で与えられることになる。

$$L = L_1 P_e + L_2 P_o \qquad (4-7)$$

ここで，現実的に考えられる判定システムはすべて観測値$\hat{x}$（記号^は以下省略する）をもとに○または△と判定するわけであるから，判定システムとは以下のような

関数と考えられる[*1]。

$$\delta : E \to \{\alpha, \tilde{\alpha}\} \tag{4-8}$$

ここで，E は観測値の集合

さらに，数理的処理の便宜上，判定を表わす関数 δ から次のような関数を定義しておく。

$$\left.\begin{aligned} \delta_1(x) &= 1 \quad \text{if } \delta(x) = \tilde{\alpha} \\ &= 0 \quad \text{if } \delta(x) = \alpha \end{aligned}\right\} \tag{4-9}$$

$$\left.\begin{aligned} \delta_2(x) &= 1 \quad \text{if } \delta(x) = \alpha \\ &= 0 \quad \text{if } \delta(x) = \tilde{\alpha} \end{aligned}\right\} \tag{4-10}$$

δ_1 は危険判定関数，δ_2 は安全判定関数と呼ぶ。明らかに次の関係を有している。

$$\delta_1(x) + \delta_2(x) = 1 \quad \text{for all } x \tag{4-11}$$

ここで，定義した関数を用いると，危険誤差及び過剰誤差は次のように一般的に記すことができる。

$$P_e = P(\tilde{S} \to \alpha \mid \delta)\, P(\tilde{S}) \tag{4-12}$$

---

*1 関数 δ は onto な関数であるとする。すなわち，全ての観測値 x について合格 α または不合格 $\tilde{\alpha}$ と必ず判定するものとする。判定をみあわせるというような判定の場合についても以下の数理的結論は容易に拡大できるが，ここではこのような判定のみあわせはないものと仮定する。

$$P_o = P(S \to \tilde{S}/\delta)\,P(S) \qquad (4-13)$$

上式の条件つき確率部分は判定システムδのもとで，$\tilde{S} \to S$ すなわち，危険なものを合格と判定するという確率及び判定システムδのもとでの$S \to \tilde{S}$ すなわち，安全なものが不合格と判定される確率を示している。これらの式は先に定義した関数δ_1, δ_2を用いて次のように書き表わすことができる。

$$P_e = \int_E \delta_2(x)\,P(x/\tilde{S})\,P(\tilde{S})\,dx \qquad (4-14)$$

$$P_o = \int_E \delta_1(x)\,P(x/S)\,P(S)\,dx \qquad (4-15)$$

以上の準備のもとで，判定システムの最適化の意味を検討してみよう。まずに考えられるのは次のような最適システムである。

【同時最適システム】：同時最適システムは危険誤差P_eを最小とし，同時に過剰誤差P_oを最小化するシステムである。

ところが，一般的には先に述べたように危険誤差と過剰誤差は独立的な変量ではなく，P_eを減少させればP_oが増加する，P_oを減少させればP_eが増加するという相互関係をもっており，現実的に[同時最適システム]としての判定システムを構成することは不可能である。従って，

これにかわる条件として「これ以上，良いような判定システム，すなわち P_e, P_0 ともにより小さい判定システムが他に見つけることができない」という意味での最適性の概念を考える。

【適格な判定システム】：危険誤差 P_e，過剰誤差 P_0 をともにより小さくするような他の判定システムが存在しない判定システムを，改良不可能な意味で最適である，または単に「適格な判定システムである」という。

この「適格性」の条件は最適な判定システムのもつべき最小条件といえる。

さらに(4-7)式のように期待損失を求めることができる場合については，この期待損失の値を最小化するようなシステムも考えられる。従って，次の最適性の概念が考えられる。

【E-最適システム】：期待損失を最小化する判定システムを期待損失最小判定システム，または E-最適性をもつシステムと呼ぶ。

以上の最適性の概念の相互の関係も考えておかねばならないであろう。適格な判定システムと E-最適な，すなわち期待損失最小のシステムとの関係をまず検討しよう。次の定理がその関係を示している。

【定理1】E-最適な判定システムは適格なシステムである。

【証明】まず，E-最適な判定システムをδ^*とすると，その定義より，任意の判定システムδについて(4-7)式のP_e, P_0を，それぞれ(4-12)及び(4-13)式を用いて書くことにより，

$$L_1 P(\tilde{S}\to\Delta|\delta^*)P(\tilde{S}) + L_2 P(S\to\tilde{\Delta}|\delta^*)P(S)$$
$$\leq L_1 P(\tilde{S}\to\Delta|\delta)P(\tilde{S}) + L_2 P(S\to\tilde{\Delta}|\delta)P(S) \qquad (4-16)$$

となる。さらに変形し

$$L_1 P(\tilde{S})\{P(\tilde{S}\to\Delta|\delta^*) - P(\tilde{S}\to\Delta|\delta)\}$$
$$\leq L_2 P(S)\{P(S\to\tilde{\Delta}|\delta) - P(S\to\tilde{\Delta}|\delta^*)\} \qquad (4-17)$$

ここで，もし

$$P(S\to\tilde{\Delta}|\delta^*) > P(S\to\tilde{\Delta}|\delta) \qquad (4-18)$$

$$P(\tilde{S}\to\Delta|\delta^*) > P(\tilde{S}\to\Delta|\delta) \qquad (4-19)$$

なるような判定システムδが存在するとすれば，$L_2P(S)$が正であることから，(4-18)式より(4-17)式の右辺は負となる。従って，左辺は負でなければならない。$L_1P(\bar{S})$が正であることを考えれば

$$P(\tilde{S}\to\Delta|\delta^*) < P(\tilde{S}\to\Delta|\delta) \qquad (4-20)$$

でなければならないが，これは(4-19)式と矛盾している。従って，(4-18)式及び(4-19)式を満足する判

定システムδは存在しない。従って，$P(S)$及び$P(\tilde{S})$が正であることを考慮して(4-18)式及び(4-19)式にそれぞれを掛けることにより，次の結果をうる。すなわち，以下の2つの条件

$$P(S)P(S\to\tilde{S}|\delta^*) > P(S)P(S\to\tilde{S}|\delta) \qquad (4-21)$$

$$P(\tilde{S})P(\tilde{S}\to S|\delta^*) > P(S)P(\tilde{S}\to S|\delta) \qquad (4-22)$$

をみたす判定システムδは存在しない。ここで，(4-21)式は判定システムδ^*のもとでの過剰誤差が他の判定システムδの過剰誤差よりも大きいことを示し，(4-22)式は判定システムδ^*の危険誤差が判定システムδの危険誤差よりも大きいことを示し，なおかつこのような判定システムδが存在しないということなので，結局E－最適な判定システムδ^*よりも，ともにより小さな危険誤差及び過剰誤差をもつような判定システムδは存在しないことになり，従って，E－最適な判定システムδ^*は適格な判定システムであることが証明された。

[QED]

次に，E－最適な(上の定理よりもちろん適格である)判定システムの1つを具体的に示すことにする。

【ベイズ判定システム】：次の条件をみたすように，判定関

数 δ_1^*, δ_2^* を定める。

$$\left.\begin{aligned} \delta_1^*(x) &= 1 \quad \text{if } L_2 P(x|S)P(S) \leq L_1 P(x|\tilde{S})P(\tilde{S}) \\ &= 0 \quad \text{上記以外} \\ \delta_2^*(x) &= 1 - \delta_1^*(x) \end{aligned}\right\} \quad (4-23)$$

このとき，判定システム δ^* はベイズの方程式と関連をもっていることから，ベイズ判定システムと呼ぶ。このベイズ判定システムが E－最適であることをまず示そう。

【定理2】ベイズ判定システム δ^* は E－最適である。

【証明】判定システム δ の損失期待値を $L(\delta)$ と表わすことにする。このとき，任意の判定システム δ とベイズ判定システム δ^* の損失期待値を比較すると、(4-7)式及び(4-14)(4-15)式を用いて次のように書き表わすことができる。

$$\begin{aligned} L(\delta) - L(\delta^*) = {} & L_1 \int_E \delta_2(x) P(x|\tilde{S})P(\tilde{S})dx + L_2 \int_E \delta_1(x) P(x|S)P(S)dx \\ & - L_1 \int_E \delta_2^*(x) P(x|\tilde{S})P(\tilde{S})dx - L_2 \int_E \delta_1^*(x) P(x|S)P(S)dx \end{aligned} \quad (4-24)$$

一方.

$$\begin{aligned} & L_1 \delta_2(x) P(x|\tilde{S})P(\tilde{S}) + L_2 \delta_1(x) P(x|S)P(S) \\ & \geq \delta_2(x) \cdot \min\left[L_1 P(x|\tilde{S})P(\tilde{S}),\ L_2 P(x|S)P(S)\right] \\ & + \delta_1(x) \cdot \min\left[L_1 P(x|\tilde{S})P(\tilde{S}),\ L_2 P(x|S)P(S)\right] \\ & = \{\delta_1(x) + \delta_2(x)\} \min\left[L_1 P(x|\tilde{S})P(\tilde{S}),\ L_2 P(x|S)P(S)\right] \end{aligned} \quad (4-25)$$

ここで，(4-11)式 すなわち

$$\delta_1(x) + \delta_2(x) = 1 \qquad (4-26)$$

であることを考えると，(4-25)式は以下のようになる。

$$L_1\delta_2(x)P(x|\tilde{S})P(\tilde{S}) + L_2\delta_1(x)P(x|S)P(S)$$
$$\geq \min[L_1P(x|\tilde{S})P(\tilde{S}),\ L_2P(x|S)P(x)] \qquad (4-27)$$

ところで，ベイズ判定システムδ^*の定義(4-23)式から

$$\delta_2^*(x)L_1P(x|\tilde{S})P(\tilde{S}) + \delta_1^*(x)L_2P(x|S)P(S)$$
$$= \min[L_1P(x|\tilde{S})P(\tilde{S}),\ L_2P(x|S)P(S)] \qquad (4-28)$$

従って，(4-27)式及び(4-28)式より

$$L_1\delta_2(x)P(x|\tilde{S})P(\tilde{S}) + L_2\delta_1(x)P(x|S)P(S)$$
$$\geq L_1\delta_2^*(x)P(x|\tilde{S})P(\tilde{S}) + L_2\delta_1^*(x)P(x|S)P(S) \qquad (4-29)$$

(4-29)式は任意のxについて成立していたので，可能な観測値xのすべてについて積分すれば，次の式となる。

$$L_1\int_E \delta_2(x)P(x|\tilde{S})P(\tilde{S})dx + L_2\int_E \delta_1(x)P(x|S)P(S)dx$$
$$\geq L_1\int_E \delta_2^*(x)P(x|\tilde{S})P(\tilde{S})dx + L_2\int_E \delta_1^*(x)P(x|S)P(S)dx \qquad (4-30)$$

故に

$$L(\delta) \geq L(\delta^*) \qquad (4-31)$$

従って，ベイズ判定システムδ^*は損失期待値を最小化している。すなわち，ベイズ判定システムは上-最適である。

[QED]

ここで，若干特殊な条件についても検討を加えておこう。種々の確率，たとえば安全な場合及び危険な場合の発生確率 $P(S)$, $P(\tilde{S})$ などは多くの場合知ることができない。このようなケースについてとくに検討を加えておく必要があるであろう。すなわち，未知な要素を含んでいる場合，判定システム自身もそれらの不確定性に応じて異なった形式をとらざるをえないのである。そこで，確率 $P(S)$, $P(\tilde{S})$ が未知である場合についての判定システムのうち，最適な判定システムは何かを考えておこう。

ここで，安全であること S 及び危険であること $\tilde{S}$ は排反現象であるから，次の関係式が成立する。

$$P(S)+P(\tilde{S})=1 \qquad (4-32)$$

従って，(4-32)式をみたす $P(S)$, $P(\tilde{S})$ を変化させた場合，期待損失も変化するが，当然次のような考え方がより合理的であると考えられるであろう。

【ミニマックス判定システム】：条件(4-32)式をみたす未知な $P(S)$, $P(\tilde{S})$ のもとで最悪の場合，すなわち期待損失が最大となるとき，この最大値のより小さいものがより好ましい。この考え方を厳密に書けば，次のような数式で表現されよう。

$$\min_{\delta} \max_{P(S),\ P(\tilde{S})} L(\delta) = \max_{P(S),\ P(\tilde{S})} L(\delta^*) \qquad (4-33)$$

すなわち，ゲームの理論における min max 解と同じ意味をもつ判定システムが好ましいということであり，これをミニマックス判定システムと呼ぶ。

この判定システムの意味は上に述べたとおり，各々の判定システムをとった場合の $P(S), P(\tilde{S})$ の未知な実からくる変動の中で最悪な場合を想定し，その最悪な場合の損失を各判定システムで比較した場合，一番小さいものがあれば，それが最も好ましい判定システムであると考えるものである。

(4-33)式をみたすミニマックス判定システムはより単純に次のように考えることもできる。

【定理3】 min max 判定システムは次の値を最小化する判定システムである。

$$\max_{P(S)} [L_1 P(\tilde{S} \to \Delta|\delta), L_2 P(S \to \tilde{\Delta}|\delta)] \qquad (4-34)$$

【証明】(4-32)式をみたしているので，判定システム δ の期待損失

$$L(\delta) = L_1 P(\tilde{S}) P(\tilde{S} \to \Delta|\delta) + L_2 P(S) P(S \to \tilde{\Delta}|\delta) \qquad (4-35)$$

は実 $L_1 P(\tilde{S} \to \Delta|\delta)$ と実 $L_2 P(S \to \tilde{\Delta}|\delta)$ を結ぶ線分上の実と考えることができる。従って，その最大値は明らかに両端でなければならないから，ただちに

$$\max_{P(S)} L(\delta) = \max_{P(S)} [L_1 P(\tilde{S} \to s | \delta), L_2 P(S \to \tilde{s} | \delta)] \qquad (4-36)$$

従って，$\max L(\delta)$ を最小化するミニマックス判定システムは

$$\max_{P(S)} [L_1 P(\tilde{S} \to s | \delta), L_2 P(S \to \tilde{s} | \delta)]$$

を最小化する判定システムでもある。

[QED]

以上検討してきた各種の最適概念観の論理的関係を，ここでまとめて示すと，以下のようになるであろう。

まず，判定システムの最適条件のうち最も弱い条件が適格であるということである。すなわち，危険誤差，過剰誤差が共に小さいというような判定システムがその他に存在しないとき，そのシステムは適格であり，この適格の条件が最も基本的な最適条件である。さらに過剰誤差と危険誤差が相互にある一定のウェイトをつけて換算できるとき（このことは，終局的には危険性というものを経済的利潤と対応させることを意味する），すなわち（4-7）式のように尺度をとることができるとき，このときに限って，その尺度値を最小化するような判定システムがあり，それをE-最適判定システムと呼んだ。E-

最適判定システムは［定理1］によって適格な判定システムであることが証明され，さらにE-最適なシステムのひとつとしてベイズ判定システムが具体的に提示された。以上の関係が図10-3に示されている。

このほか，安全ないしは危険になる確率 $P(S)$, $P(\bar{S})$ が未知の場合に適応できるミニマックス判定システムという概念も提示した。

現実的なコンクリートの品質管理の問題を考えるとき，危険であるという確率 $P(\bar{S})$，安全であるという確率 $P(S)$ は全く未知であるというわけではなく，ある程度それらの値を知ることができる。従って，現実的な問題を考えた際には，これらの値を妥当な範囲で仮定し，検討することが望ましいであろう。また，先に述べたように，危険誤差と過剰誤差はコンクリートの品質管理に関する問題についていえば，トレード・オフの関係，つまりどちらかが増加すると他方は減少するという関係にあるので，先に定義した同時最適判定システムは存在しないと考えてよいであろう。さらに，危険性を経済的利益と対応させるというような考え方，数学的な表現でいえば，(4-7)式のように危険誤差と過剰誤差にそれぞれのウェイトを与え，ひとつの尺度をつくるとい

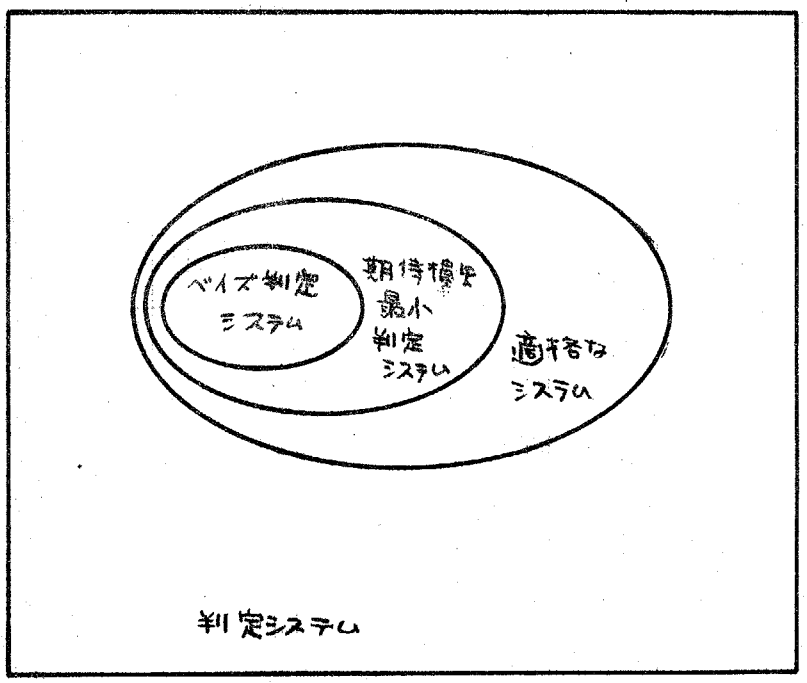


図 10-3　各種適格概念の論理的関係

うことは，現段階では難しい問題をはらんでいる。

従って，まず検討しなければならないのは，現在行っているコンクリートの品質管理のシステムが適格なシステムであるか否かということである。もし，適格でないとすれば，危険誤差も過剰誤差もより小さい判定のシステムが他に存在することを意味するので，その方法を現在の方法に変って選択する方が好ましいといえる。次節では，現状のコンクリートの品質管理における合否判定システムが適格であるかどうかを5-3節で求めたデータを用いて得られる危険誤差と過剰誤差を直接計算することによって検討する。

5-5-4-3 現状における品質管理システムの最適性の検討

すでに品質管理，とりわけコンクリート圧縮強度の試験値から合否を判定するシステムの最適化の問題を数理的に検討したが，最も基本的な要件として適格性という条件を示した。以下では実際に過剰誤差と危険誤差の値を「5-5-3-3(b) 誤判定確率」に求めた式に従って計算し，現状の判定システムが適格であるかどうかを検討する。

以下では設計基準強度 $\sigma_{28}=210\ kg/cm^2$ のものについて検討する。また，指定強度は東京都における各月別温度を想定し，温度補正値を4月から9月のものについ

いては0kg/cm², 10月, 11月及び3月のものについては30kg/cm²
12月, 1月及び2月については60kg/cm²として検討する。
従って, 荷卸し標準養生, 荷卸し現場養生, 筒先き
現場養生の供試体から得られるそれぞれの圧縮強度試験
値の平均, 標準偏差等は5-3節で求めた結果を用いる(
表10-2に整理されている)。

また, 誤判定計算のために前もって設定する必要のある値として許容規準値F_0がある。ここでは, この値については以下のようにして設定することにする。すなわち設計基準強度210kg/cm²のものを用いるということは, 構造設計段階では通常短期許容応力度はその2/3にあたる140kg/cm²を採用していることになるので, もし実際の構造体がこの値以下であれば, 構造設計段階で想定しなかった事態が生じる可能性がある。構造計画における荷重の設定段階で安全率がみこまれているとはいえ, 耐力がこの短期許容応力度以下になることは危険と考えなければならないであろう。従って, 許容基準値F_0としては140kg/cm²を採用し, 計算するものとする。

ところで, 現状のコンクリート圧縮強度の合否判定は, 荷卸し地点のコンクリート品質管理の場合, 標準養生の供試体を用い, N個の平均値が合否判定係数αを上まわ

表10-2 誤判定確率計算のためのデータ*

(単位: kg/cm²)

月	平均強度			標準偏差			観測における標準偏差	
	荷卸し標準	荷卸し現場	筒先き現場	荷卸し標準	荷卸し現場	筒先き現場	荷卸し標準	荷卸し現場
1	358.16	322.40	282.67	40.63	52.12	11.91	11.98	8.92
2	366.68	307.69	340.33	41.70	49.53	21.41	12.28	11.61
3	320.85	283.91	272.08	35.04	56.55	30.22	9.73	15.05
4	287.96	273.86	275.46	33.69	29.03	15.81	8.91	8.09
5	278.96	269.99	250.67	30.44	28.75	19.16	8.82	9.55
6	277.85	283.99	251.00	27.17	37.05	14.57	8.27	8.36
7	281.38	288.16	287.73	29.02	33.01	27.87	9.00	8.60
8	274.21	276.32	258.67	32.74	30.37	27.57	8.79	8.14
9	285.68	275.28	301.00	32.62	25.13	25.98	8.49	7.17
10	316.52	286.70	290.00	33.19	27.60	21.04	8.76	9.87
11	320.45	293.16	309.17	34.40	23.68	26.67	9.95	7.03
12	348.34	313.57	334.91	37.07	35.85	62.56	12.21	9.82

* この値は5-3節のデータ分析より求めたものである。

り，かついずれの試験結果も指定強度の70%以上の圧縮強度がでていなければならないというように2つの規準条件を組み合せている。一方，打込み直前におけるコンクリートの品質検査においては現場養生を基本とし，その一回の試験結果から得られるコンクリートの圧縮強度の平均値が設計基準強度以上であることを合格の規準条件としている。このように判定の仕方が異なる点があるために，それぞれの方法による誤差の意味を直接比較しても，その差が供試体の採取時点・養生の仕方による差異によるものか，荷卸し地点のコンクリートの品質検査におけるように2つの規準条件を用いるか，打込み直前のようにひとつの規準条件で判断するというような規準の細かさの差によるものなのか明確ではない。従って，本分析では最初にひとつの供試体を用いた場合における危険誤差と過剰誤差を計算する。また，合否判定は荷卸し標準養生のものについては指定強度以上，筒先き現場養生のものについては設計基準強度以上であることとする。

誤判定確率計算のために必要な値として，以上の他にコンクリート打設以降の強度変化値(ε_{11})とそのバラツキがあるが，文献3)では打設以降のこれらの値を調べるために打込み直前に採取された供試体の圧縮強度及び打設

されたコンクリートの各部材から採取された供試体の強度を調べているので，以下のように打設以降の圧縮強度変化値の平均値（$\bar{\varepsilon}_{11}$）を求めることができる（付10-A1参照）。

$$\bar{\varepsilon}_{11} = \bar{x}_0 - \bar{x}_c \qquad (4-37)$$

ただし，

$\bar{x}_0$：構造体コンクリート圧縮強度の平均値＝コア圧縮強度

$\bar{x}_c$：簡先き標準養生強度

$\bar{x}_0$として文献3)における各部材のコア圧縮強度，$\bar{x}_c$としてそれらに用いられたコンクリートの簡先き（打込み直前）標準養生供試体の圧縮強度を代入することにより，表10-3のように圧縮強度変化値ε_{11}の平均値を求めることができる。さらにバラツキについては以下の結果を得ることができる（付10-A1参照）。

$$\sigma_{11} = \sqrt{\sigma_0^2 - \sigma_c^2 + \sigma_a^2} \qquad (4-38)$$

ここで，

σ_1；簡先き（打込み直前）強度の標準偏差

σ_0；最終強度の標準偏差

σ_a；標準養生による圧縮強度変化の標準偏差

σ_c；簡先き標準養生による圧縮強度変化の標準偏差

σ_0としては，文献3)の各部材のコア強度の標準偏差を，σ_cとしては同じく簡先き（打込み直前）採取の供試体

表10-3 各季節別の判定誤差計算のための仮定値*(1)

(単位：kg/cm²)

	打設以降の圧縮強度変化値 $\bar{\varepsilon}_{11}$ (簡易な標準養生強度とコア圧縮強度の差)		
	夏期	秋期	冬期
柱	6	−49	−99
壁	14	−53	−102
梁	−31	−84	−118
床スラブ	−37	−71	−114

* 文献3より作成

の標準養生強度の標準偏差を代入，σ_aとしては第8章の「圧縮強度のバラツキ」で得られた値を代入することにより，表10-4のようにσ_{11}を求めることができる（文献3の夏期，秋期，冬期をそれぞれ8月，10月，1月と考えて対応させた）。

以上の準備のもとで，夏期(8月)，秋期(10月)，冬期(1月)の各部材別の誤判定確率を計算してみると図10-4のようになる。冬期においては各部材とも危険誤差は荷卸し標準養生の方が簡先き現場養生よりも大きく，過剰誤差は逆に簡先き現場養生の方が大きい。従って，荷卸し標準養生と簡先き現場養生とのどちらが最適な判定システムかという点については，どちらも適格なシステムということになり，どちらがよいということはいえない。秋期についてみてみると，各部材とも荷卸し標準養生のものがより小さい危険誤差をもち，簡先き現場養生のものがより小さい過剰誤差をもっており，どちらも適格である。夏期は冬期と同じような関係となっており，どちらも適格である。季節を比較すると危険誤差は秋期が小さく，次に夏期，冬期の順になっている。

上の結果から季節によって判定誤差の値は大きく変化することが予想されるので，次に月別の誤判定確率を計算しよう。しかし，1月，8月，10月以外の打設以降の

表 10-4 各季節別の判定誤差計算のための仮定値*(その2)

(単位：kg/cm²)

	打設以降の圧縮強度変化値のバラツキ(標準偏差)σ_{11}		
	夏　期	秋　期	冬　期
柱	34.27	15.21	19.42
壁	29.69	16.16	19.64
梁	12.10	11.38	22.37
床スラブ	18.42	11.06	9.49

* 文献3及び5-3節で求めた値を用いて作成

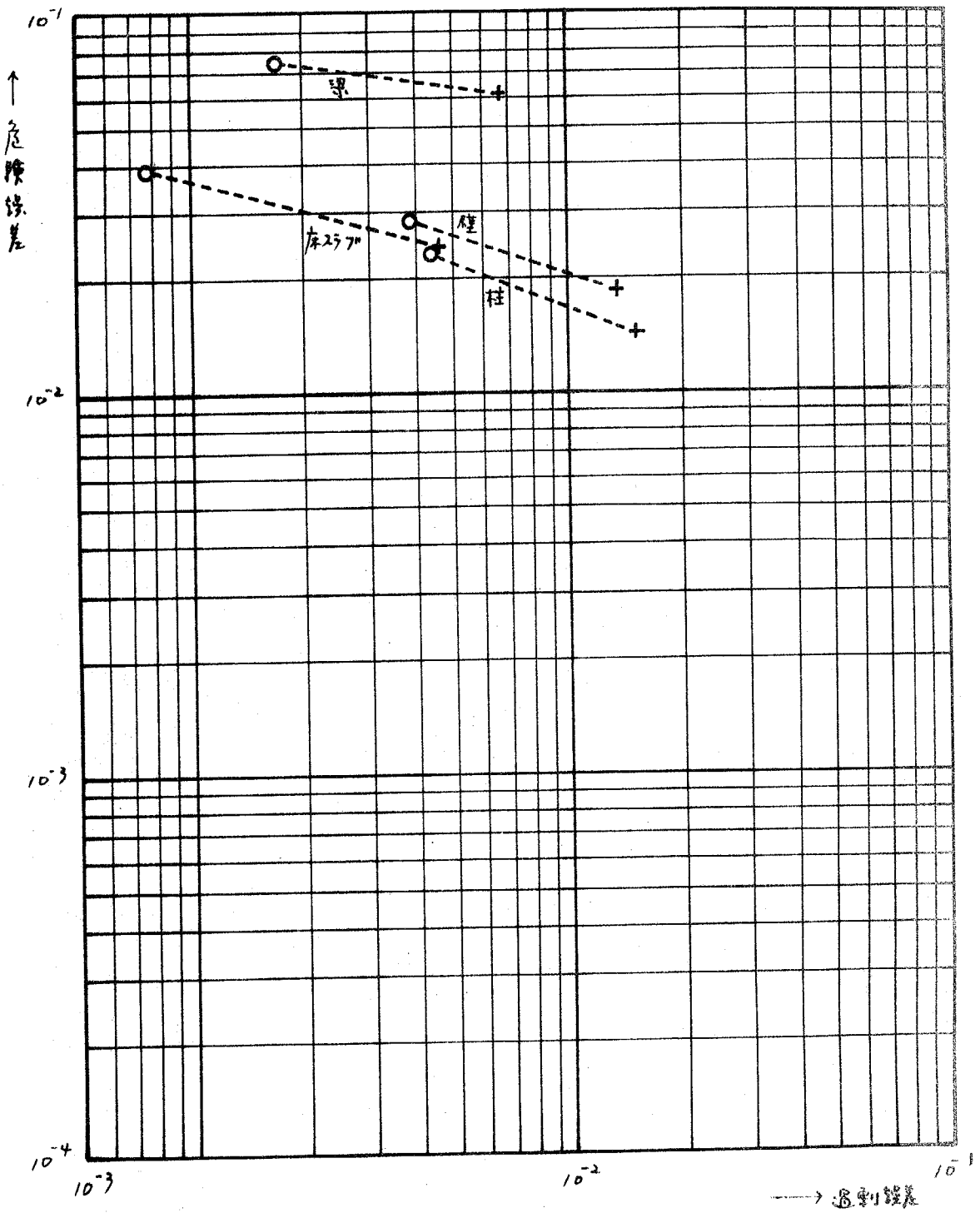


図 10-4-1　判定システムの誤差（1月）

○印；荷卸し標準養生
＋印；筒先き現場養生

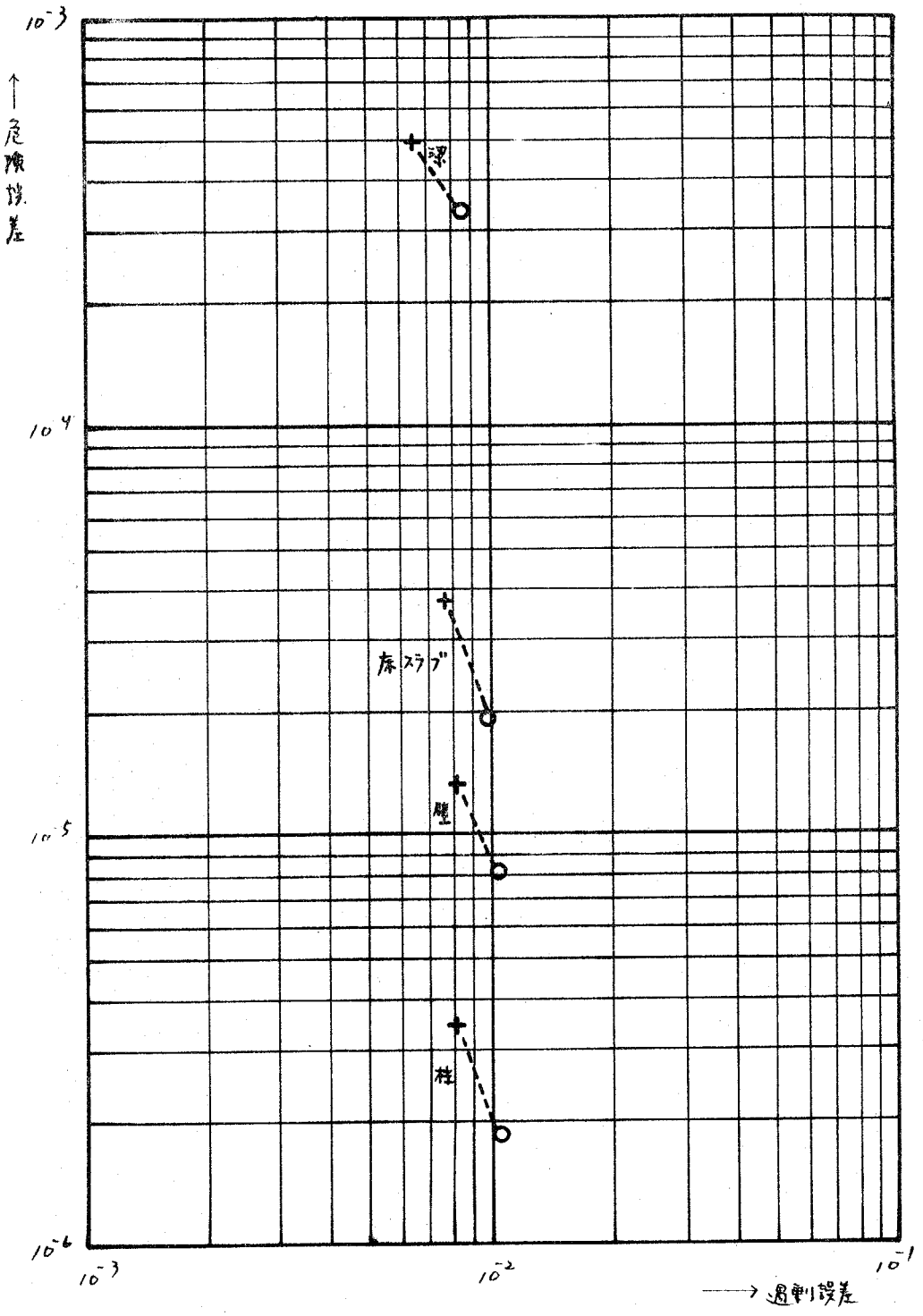


図10-4-2 判定システムの誤差（10月）

○印；荷卸し標準養生
＋印；箇先き現場養生

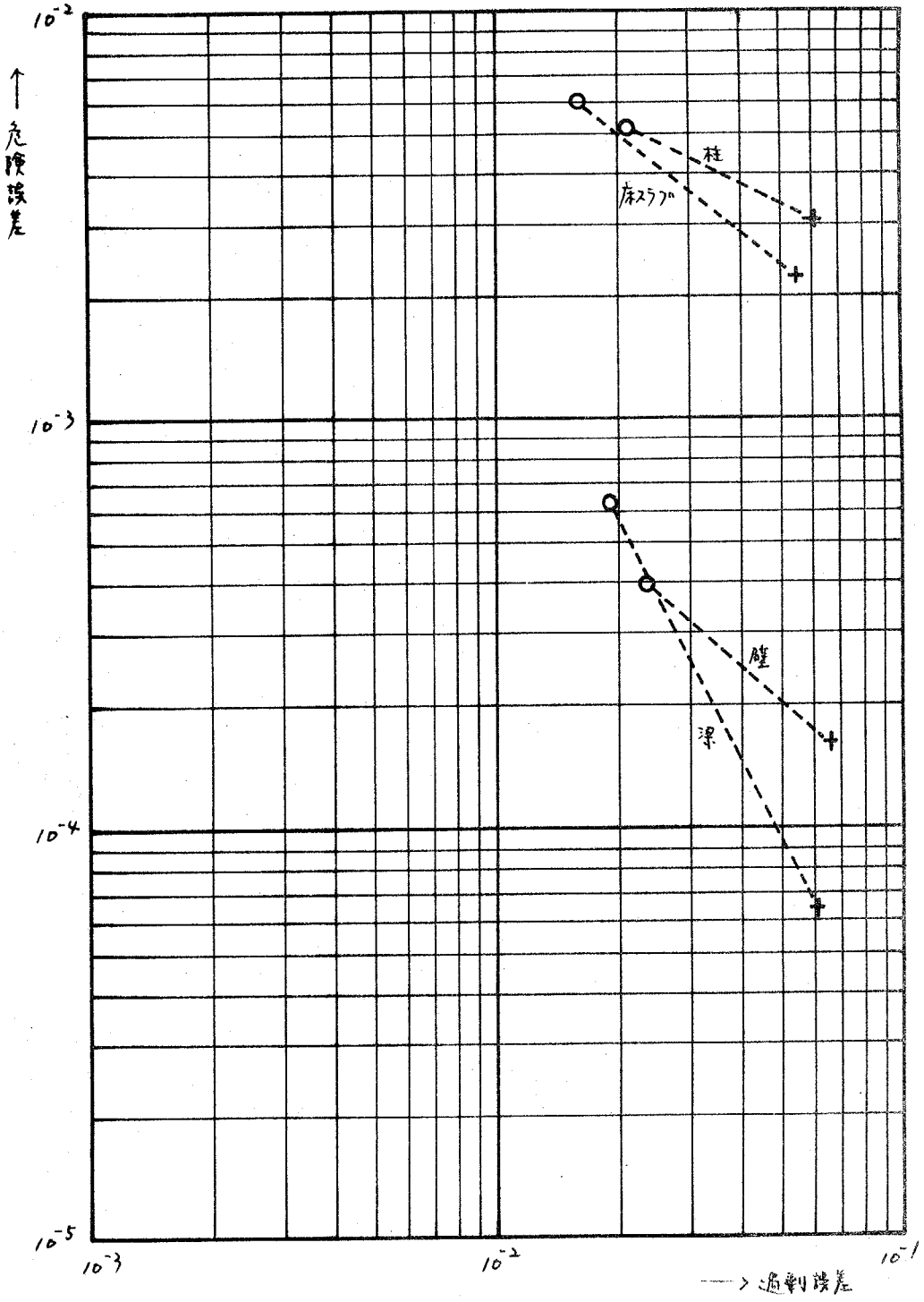


図 10-4-3　判定システムの誤差（8月）

○印；荷卸し標準養生

＋印；簡先き現場養生

強度の変化に関するデータはないので，柱と梁について1月，8月，10月を補間するように表10-5のようにそれらの値を仮定して計算する。その他のデータは表10-2と同じである。このとき，危険誤差と過剰誤差は図10-5のようになる。これからみると，過剰誤差はほぼ10^{-3}～10^{-1}の範囲にあり，柱，梁について大きな差はないが，危険誤差については，梁の場合，大きく変動する。すなわち6月，7月，8月の場合，非常に小さな値となるが，1月の場合は柱よりも若干大きな値となっている。

以上にみた誤判定確率の変動は打設以後のバラツキの値ε_{11}に大きく依存しているように思えるので，その効果をはっきりつかむためにε_{11}の平均$\bar{\varepsilon}_{11}$を-100～10(kg/cm^2)ε_{11}の標準偏差σ_{11}を0～35(kg/cm^2)の範囲で変化させた場合の誤判定確率を求めた結果が図10-6に示されている。図10-6-1は荷卸し標準養生供試体を用いた場合の危険誤差を，図10-6-2は筒先き現場養生供試体を用いた場合の危険誤差を，図10-6-3は荷卸し標準養生供試体を用いた場合の過剰誤差を，図10-6-4は筒先き現場養生供試体を用いた場合の過剰誤差の等しい曲線を示している。これらの結果から，過剰誤差は打設後のバラツキによる影響をそれほど受けていないが，危険誤差はかなり大きく影

表10－5 誤判定確率計算のための仮定値；打込み以後の強度変化値

月	柱		梁	
	変化の平均値	変化値の標準偏差	変化の平均値	変化値の標準偏差
1	－100	20	－100	20
2	－ 90	20	－ 80	15
3	－ 70	15	－ 60	10
4	－ 50	15	－ 50	10
5	－ 10	20	－ 40	10
6	0	25	－ 30	10
7	0	30	－ 30	10
8	0	35	－ 30	10
9	－ 10	25	－ 60	10
10	－ 50	15	－ 80	10
11	70	15	－ 90	10
12	－ 90	20	－100	15

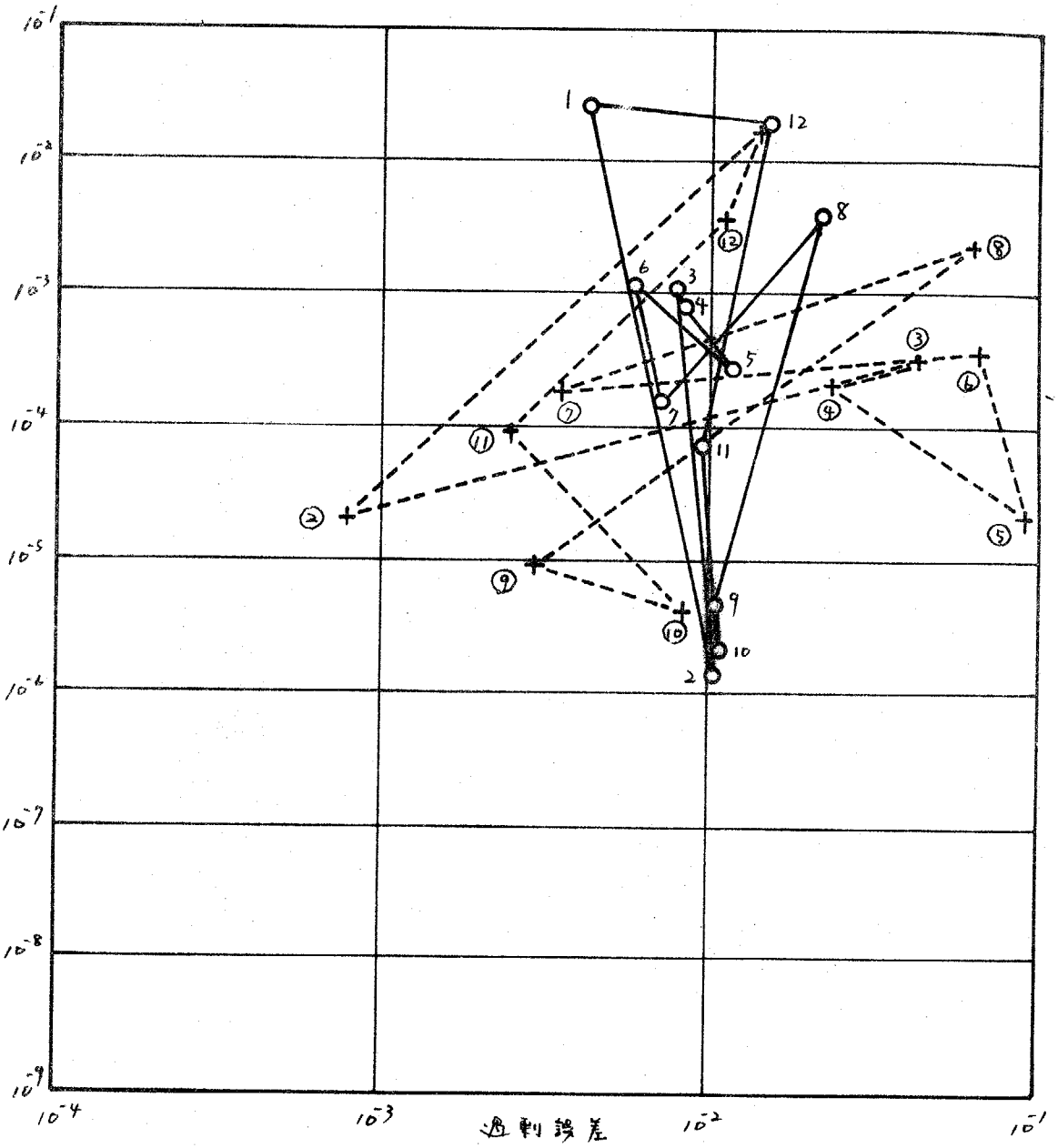


図10-5-1　月別の誤判定確率（柱）

数字；月を示す

実線；荷卸し標準養生

点線；簡先き現場養生

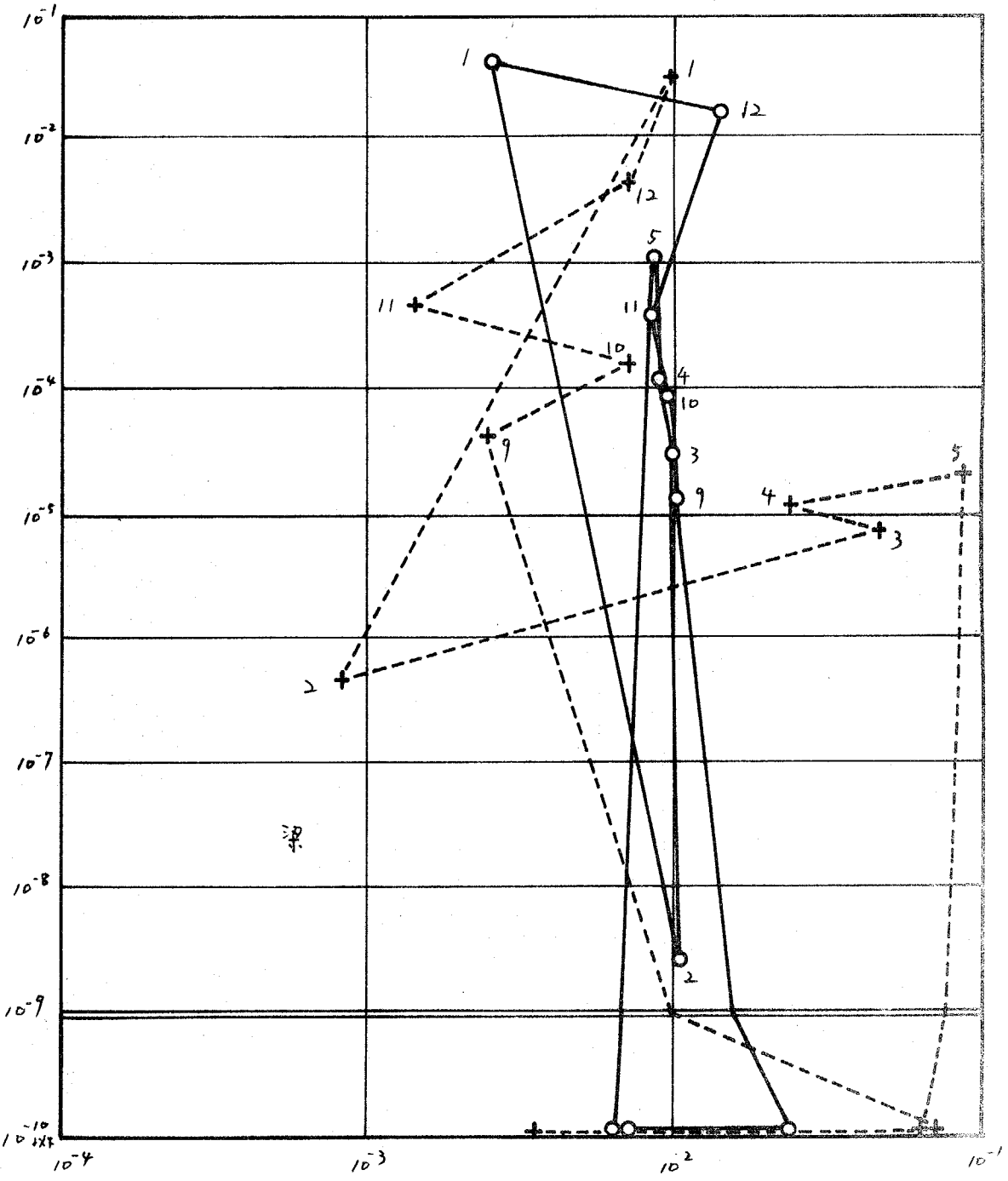


図 10-5-2　月別誤判定確率（梁）

数字；月を表わす
実線；荷卸し標準養生
実線；簡生き現場養生

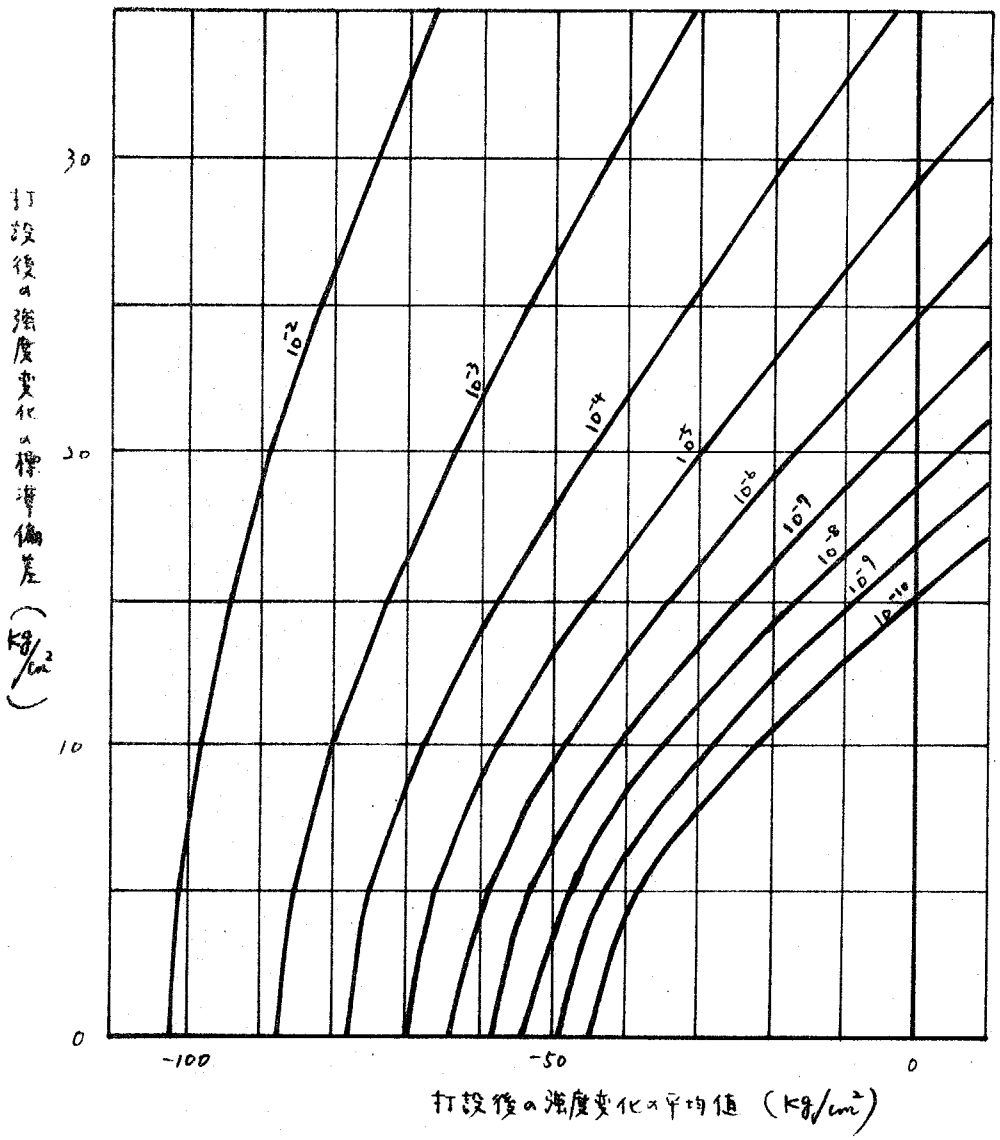


図 10-b-1 打設後の強度変化が誤判定確率へ与える影響 (1)
荷卸し標準養生供試体検査の危険誤差の等高線

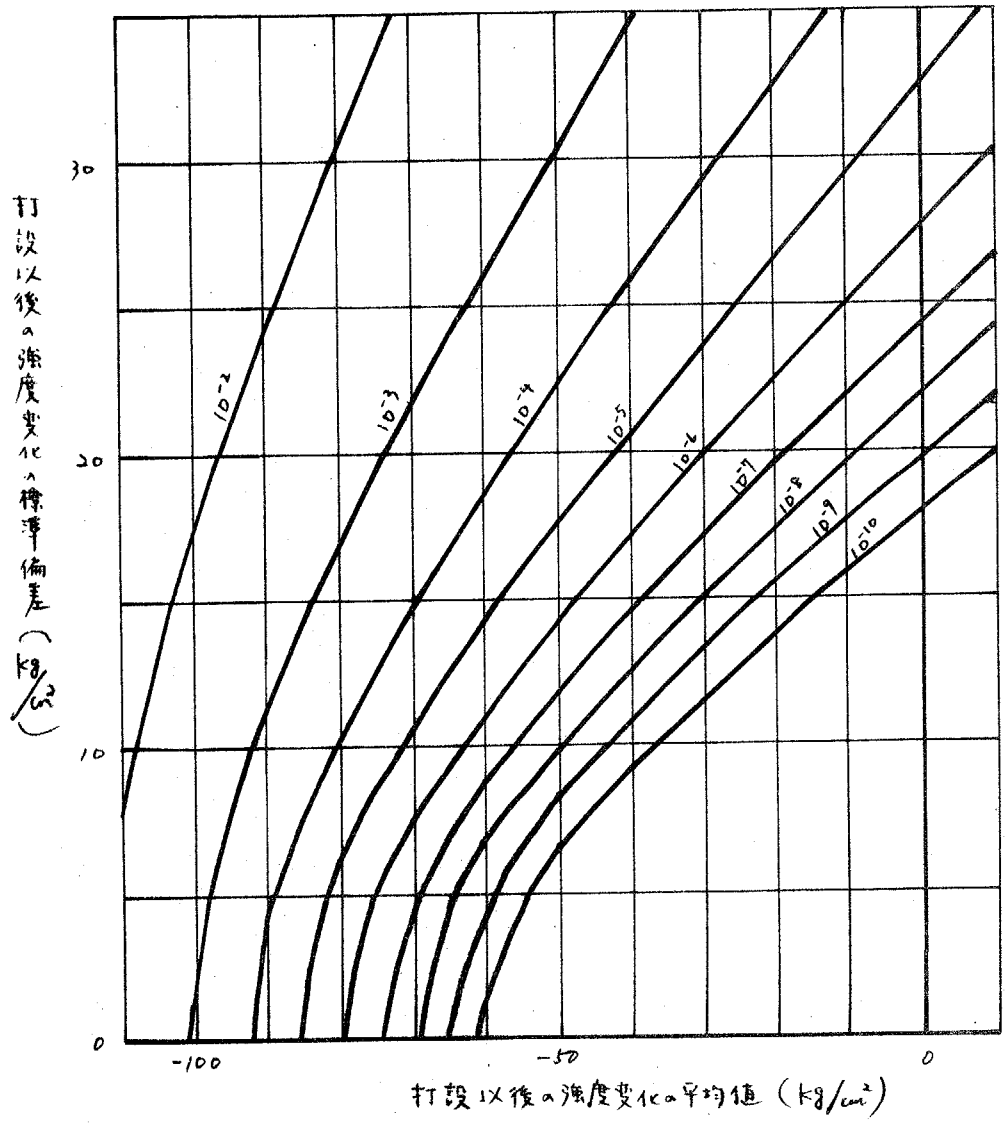


図 10-6-2　打設以後の強度変化が誤判定確率へ与える影響 (2)
簡易な現場養生供試体検査の危険誤差の等高線

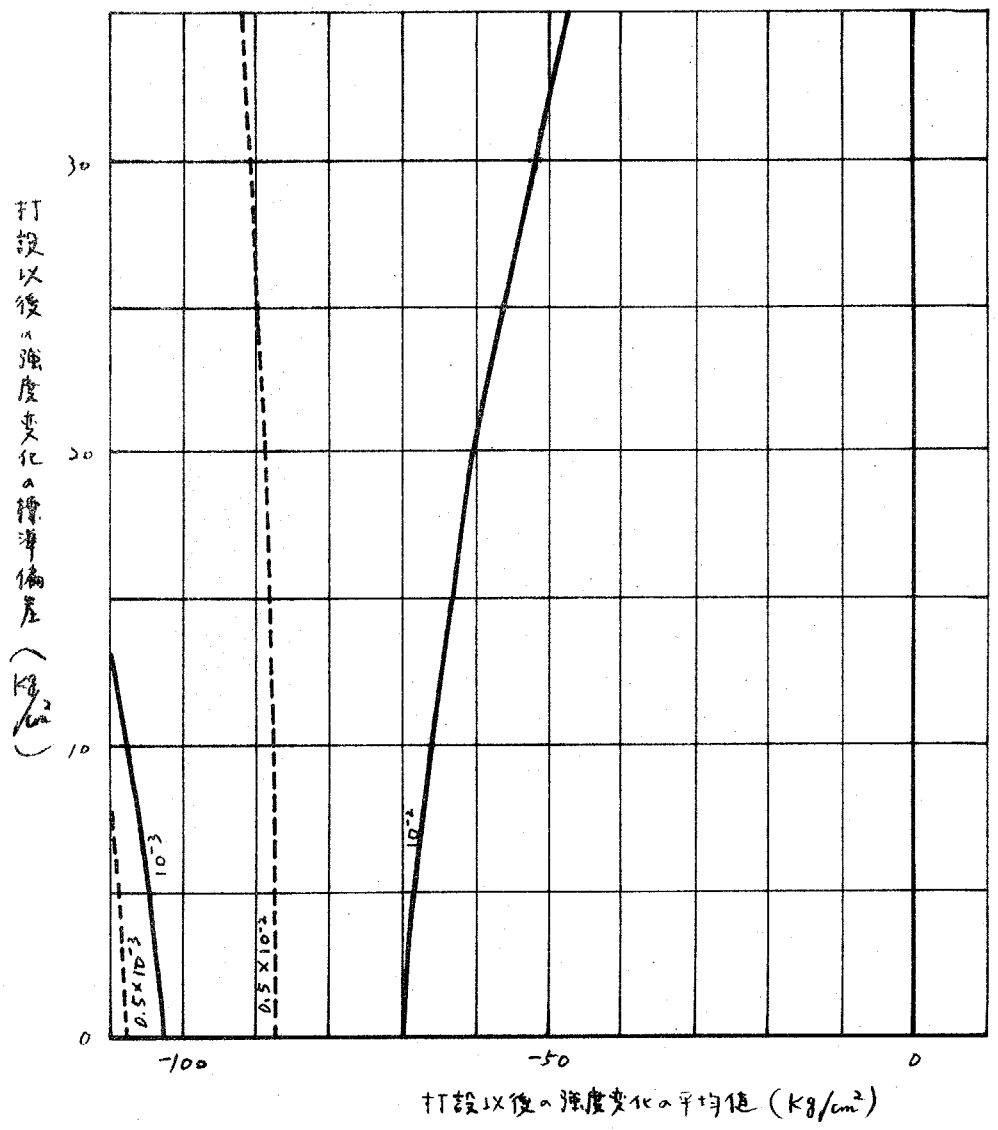


図10-6-3　打設以後の強度変化が誤判定確率へ与える影響 (3)
荷卸し標準養生供試体検査の過剰誤差の等高線

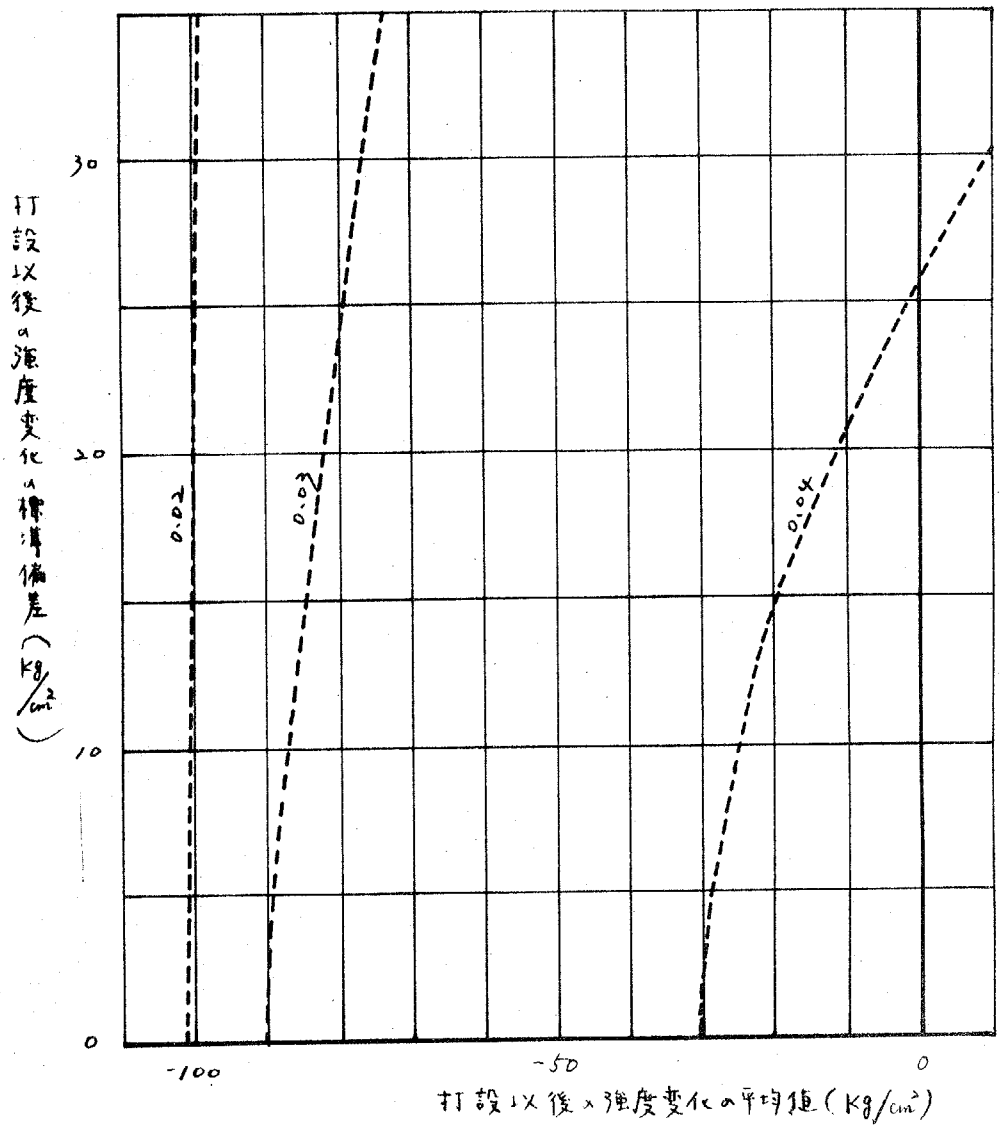


図10-6-4 打設以後の強度変化が誤判定確率の与える影響 (4)
簡先き現場養生供試体検査の過剰誤差の等高線

響を受けることがわかる。

以上の検討からみる限り，供試体の差，つまり荷卸し標準養生のものか，筒先き現場養生のものかの違いは一長一短であり，どちらも適格な判定システムであることがわかる。さらにこれらの検討から，判定誤差とりわけ危険誤差をより小さくおさえるためには，打設後のバラツキをより小さくおさえることがよいことがわかった。

これまでの結果は1回の試験結果のみを用いた場合の誤判定確率を調べたわけであるが，荷卸し段階でのpo質管理では

$$\bar{x}_a \geq k_6 F_A \qquad (4-39)$$

$$x_a \geq 0.7 F_A \qquad (4-40)$$

ただし，

x_a：荷卸し標準養生圧縮強度試験値

$\bar{x}_a$：荷卸し標準養生圧縮強度試験値の平均値

k_6：合格判定係数

F_A：指定強度

とおっており，現実的にはより誤判定確率の小さいすぐれたシステムとなっていることが考えられる。そこで，このような判定方式の誤判定確率を先に求めたものとを比較しておく。3本1組としてその平均値が(4-39)式

の条件をみたし，なおかつ最終強度が $210 \times \frac{2}{3} = 140\ kg/cm^2$ 以下である確率を危険誤差，(4-39)式の条件をみたさないが，最終強度は $140\ kg/cm^2$ を越えている確率を過剰誤差として求める（従って，(4-40)式の条件を用いていないので，現実の判定誤差と多少異なる）。まず，計算に必要な値を5-3節の「圧縮強度」の結果から，合格最低値 F_1 はJASS 5の合格判定係数 k（常用）を用いて求め，表10-6のようになる（付10-A2参照）。他のデータは表10-5の値を利用して危険誤差，過剰誤差を計算し，図10-7の結果をうる。この結果合格判定係数 k によってより強い合格規準 $F_1' = F_A \times k$ となったため，危険誤差は約 $\frac{1}{2}$ 程度に小さくなっている。過剰誤差は逆に約1.5倍程度大きくなっている。

5-5-5 コンクリートのp.q.c.管理システム

まず，コンクリートの調合，運搬，打設のプロセスを確率的プロセスシステムとしてとらえ，p.q.c.管理の問題もこのシステムに接続する観測誤差をともなう供試体圧縮強度の観測システムとしてとらえた。

さらに，コンクリート圧縮強度のバラツキを生産段階，調合，運搬，荷卸し，打込みの順に変化する一種の確率

表10-6　JASS5常用の式値より合否を判定する場合の誤判定確率計算のためのデータ

	設計基準強度	指定強度（温度補正値）	荷卸し標準養生供試体3本の平均値の平均値	荷卸し標準養生供試体3本の平均値から推定される標準偏差	JASS5常用の式値より求められる合格最低強度下
1	210	270（60）	358.15	38.63	280
2	210	270（60）	366.68	39.90	280
3	210	240（30）	320.84	33.68	249
4	210	210（0）	287.95	32.45	218
5	210	210（0）	278.51	29.10	218
6	210	210（0）	277.84	25.95	217
7	210	210（0）	281.38	27.71	217
8	210	210（0）	294.20	31.66	218
9	210	210（0）	285.67	31.38	218
10	210	240（30）	316.51	31.93	248
11	210	240（30）	320.44	32.68	248
12	210	270（60）	348.33	34.96	279

この他のデータは表10-5と同じ

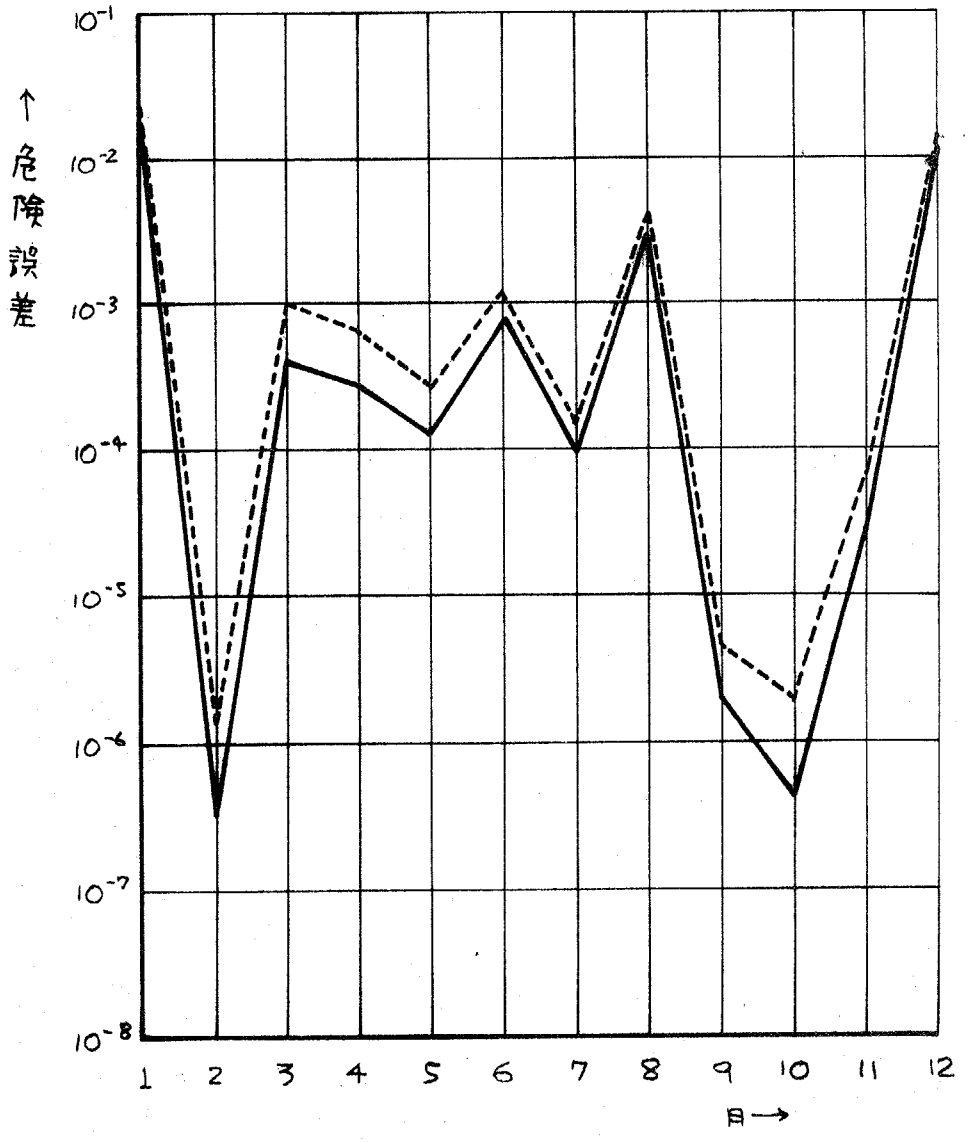


図10-7-1 JASS5の合格判定係数を用いた場合の危険誤差(柱)

実線：JASS5の合格判定係数を用いた場合(N=3)

点線：指定強度を最低合格基準とした場合(N=1)

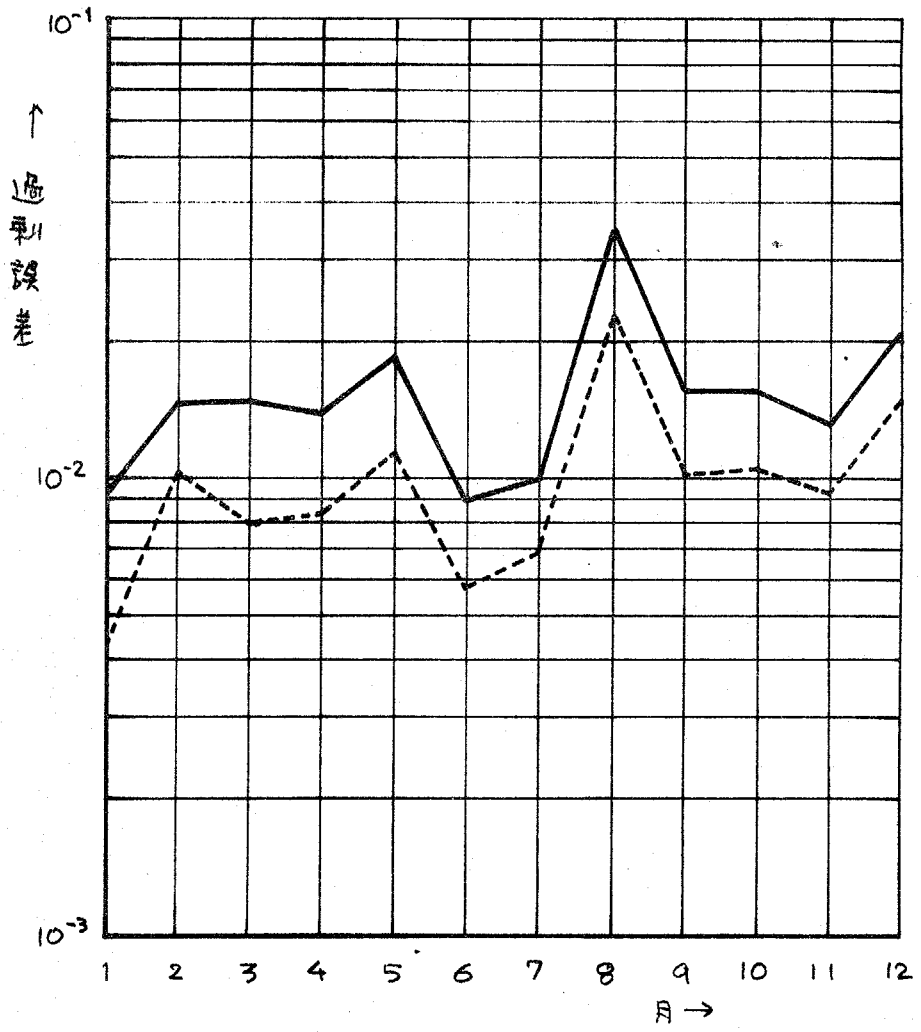


図10-7-2 JASS5の合格判定係数を用いた場合の過剰誤差（柱）

実線；JASS5の合格判定係数を用いた場合（N=3）

点線；指定強度を最低合格基準とした場合（N=1）

過程としてとらえ，それらの中に見い出される確率的関係を整理し，とくに最終強度と各観測値（シリンダー供試体強度）との確率的関係を求め，さらにシリンダー供試体を用いて品質管理の面から合否判定する場合の誤判定確率を求める式を誘導した。

コンクリート強度品質管理システムの最適化，とりわけその合否判定システムの最適化の問題を検討するため品質管理諸規定における現状を比較検討するとともに，より好ましい判定システムという素朴な概念を厳密に定義し，整理するとともにそれらの関係を導き，「危険誤差，過剰誤差のどちらもより小さいような，その他の判定方法がないとき，そのシステムを適格である」と呼び，この適格であることが最適判定システムの基本条件であることを示した。さらに，危険誤差と過剰誤差が何らかの形で換算可能な場合には期待損失最小判定システムが好ましく，その具体的な形としてはベイズ判定システムがあることを示した。このような論理的関係の分析のもとで，現状の判定システムの適格性を検討したが，全て適格であることが計算例によって明らかになるとともに危険誤差が打設後のバラツキに大きく依存していることが見い出された。従って，品質管理上，打設後のバラツ

きをより小さく押えることがより重要な今日的課題であることが示された。

また，実際に建築の構造体として打込まれるコンクリートの圧縮強度というものは単なる物理的な要因のみで決定されるというのではないということも今後の検討すべき課題といえよう。すなわち，コンクリートの生産プロセスにたずさわる各当事者の経済的利益の追求という要因が大きく影響を与えており，また，その影響の仕方も生産コストの低下による利潤追求という単純な形ではなく，5-3節の「生産者による安全側への補正」でみたように，生産者の長期にわたる利潤追及の面から逆に規定以上の強度に調合される場合もある。このようにみるとき，コンクリート圧縮強度は基本的には物理的要因によって左右されているが，実際に打込まれたコンクリート強度を考える際には人間の意図的な介入，たとえば経済的利潤の追求，生産性の向上，工期短縮等の要因による影響が重要な強度決定要因になっている。従って，コンクリートの強度という問題を建築安全性の立場から考えるならば，それはきわめて社会工学的な課題であり，コンクリート生産にたずさわる各当事者の社会学的分析を含めた，より科学的なより総合的な研究が期待されているといえる。

【付5-5 A1】 I) (4-37)式の導出

まず，筒先き強度 x_1 と最終強度 x_0 及び打設以降の圧縮強度変化 ε_{11} の定義より明らかに(3-2)式で示される関係をもっていたが，その確率変量に平均の操作をほどこすことにより

$$\bar{x}_0 = \bar{x}_1 + \bar{\varepsilon}_{11} \qquad (A1-1)$$

さらに，観測に関して(3-5)式が成立しているので，平均値について

$$\bar{x}_c = \bar{x}_1 + \bar{\varepsilon}_a \qquad (A1-2)$$

さらに，仮定(3-15)より

$$\bar{\varepsilon}_a = 0 \qquad (A1-3)$$

であったので，この3式よりただちに

$$\bar{\varepsilon}_{11} = \bar{x}_0 - \bar{x}_c \qquad (A1-4)$$

をうる。

II) (4-38)式の導出

(3-32)式より

$$\sigma_c^2 = \sigma_1^2 + \sigma_a^2 \qquad (A1-5)$$

が成立しており，さらに x_0，x_1 及び ε_{11} が正規分布すること及び(3-2)式の関係から

$$\sigma_0^2 = \sigma_1^2 + \sigma_{11}^2 \qquad (A1-6)$$

上記2式から直ちに以下の結果を得る

$$\sigma_{11} = \sqrt{\sigma_0^2 - \sigma_c^2 + \sigma_a^2} \qquad (A1-7)$$

【付5-5 A2】 合格最低規準 F_1 の導出

JASS 5 に定める合格判定係数 k は基本的には次のように定めたものと同じである（常用の場合）。

$$k = \frac{1 - \frac{1.282}{\sqrt{N}} \frac{\sigma}{F}}{1 - \frac{\sigma}{F}} \qquad (A2-1)$$

ここで，

σ：コンクリート圧縮強度の標準偏差

F：調合強度

N：試験回数，ここでは $N=3$ とする。

さらに，合格条件は（4-39）式で与えられていたので，最低合格強度（合格最低規準と呼ぶ）F_1 は

$$F_1 = k F_A \qquad (A2-2)$$

一方，調合強度は常用の場合

(1) $F_A + \sigma \geq 0.7 F_A + 3\sigma$ のとき

$$F = F_A + \sigma \qquad (A2-3)$$

(2) $F_A + \sigma < 0.7 F_A + 3\sigma$ のとき

$$F = 0.7 F_A + 3\sigma \qquad (A2-4)$$

となっており，このどちらになるかはσとF_Aの値によってきまる。すなわち，

$$\frac{\sigma}{F_A} \leq 0.15 \qquad (A2-5)$$

のときは(A2-3)が成立し，その他の場合，(A2-4)式となる。従って

(I) $\sigma \leq 0.15 F_A$のとき

このとき(A2-2)に(A2-1)，(A2-3)を代入することにより

$$F_1 = F_A + \sigma\left(1 - \frac{1.282}{\sqrt{3}}\right)$$

$$\fallingdotseq F_A + 0.2598 \cdot \sigma \qquad (A2-6)$$

を得る。

(II) $\sigma > 0.15 F_A$のとき

このとき(A2-2)に(A2-1)，(A2-4)を代入することにより

$$F_1 = F_A + F_A \times \frac{0.2578\sigma}{0.7F_A + 2\sigma} \qquad (A2-7)$$

をうる。

以上の結果を月別のF_A，σの値を代入して求めると，表10-6のようになる。

第6章　まとめ

本章は本論文における各章の内容及び結果を要約し，結論とするものである。

まず，「第1章 建築安全計画の基礎的問題」においては建築安全性に対する個々の対応策に共通する基本原理の確立の必要性を整理しまとめている。

まず，計画的視点から安全の問題をとりあげ，計画的な立ち遅れを示していると思われる第2次大戦前後の自然災害の被害が他の時期より大きくなっていることを示し，社会的状況（とりわけ自然に対する計画的対応の状況）と被害との関連性及びより総合的な安全計画の必要性を示した。

さらに建築安全性という問題が個々の建物にその範囲を限定できるものではなく，個々の建物をとりまく周辺の安全環境と結びついていることを示すとともに，最近の都市内の居住形式が単体（独立）形式から集合住宅形式へと変化しているとし，また，都市化にともない出火率の増加，危険物の増加が示され，単なる個々の建物の安全計画に限定することでは不充分であり，安全計画の対象はより公共的性質を有していることを示している。

一方，安全対策の高度化が進められているが，より具体的な場での安全性というものと遊離してしまう危険性が生じてきており，より現実的側面を把握するため住民の視実というものを尊重する必要があることを述べている。

加えて，市場メカニズムによってより安全性のすぐれた建築物が確保されるためには安全の程度を示すより単純な指標をもつる情報が必要であり，現状では市場メカニズムによってより危険なものが売買される危険性があり，公的部門等からより適切な安全性に対する情報提供の必要性を述べている。

「第2章　建築安全性とその意識構造」においては住民の安全に対する意識をアンケート調査により分析した結果を整理している。

住民の危険さに対する認識には次の2つの概念が区別されずに表明されている。

(1) ある出来事が生じた場合のその出来事の危険さの程度

(2) ある出来事が生じた場合のその出来事の危険さの程度と，その出来事が生起する可能性の程度を同時に考慮したこわさの程度

分析にあたってはこれらを統計的に分離して求めることを行った。これらの結果より，外的条件としてより危険と把握されているものは大地震，自分の部屋での出火，犯罪があげられ，また，幼児といるとき，ガス器具の使用中，エレベーター内にいるときなどの直前状態がより高い危険度となっている。

危険の認識範囲としては独立住宅居住者の場合，自宅の危険度と周辺の危険度の認識には高い相関が見られ，集合住宅居住者の場合，火災の例では自分の部屋の出火，自分と同じ階の出火，下階の出火というような危険の認識の階層があることが示された。

一方，危険に対する認識は住民の属性に強く依存しており，危険意識と安全上の行為，家庭内の病人の有無，老人の有無と危険度の認識，住民形式と危険度の認識に一定の関係があることが示された。また，高層集合住宅居住者ではより高層部に住む人程危険度を高く評価しているが，地震に対する危険認識を全体的にみると，中層部居住者がより危険と把握していることが明確となった。

対策に対する評価という点では水のくみおきなど容易にできるものが高く評価されていることが注目された。

さらに，災害を評価する場合，すでに生起している災害を評価する場合と，これから生起するかもしれない災害を評価する場合の2つに分類し，前者については災害によって生じた人命的損失と経済的損失の2つの評価軸が存在していること，後者については生起可能性に対する不確定さをいかにとらえるべきかという問題があり，これらを住民アンケートの分析を通して解析している。

人命的損失は経済的損失が金銭的補償によって修復可能であるのに対して，修復不可能であることがきわめて特殊な性質であるといえる。また，不確定さを表わす指標として損失の平均値，標準偏差値，最大値，最小値などが考えられる。以上の観点から都市居住者に対しアンケート調査を実施した。人命的損失（死傷者数）と経済的損失（損失額）の2つの情報のみが提示された一対の災害事例から好ましくない方を選択するという方法でアンケート調査した結果，約70%の回答者は人命的損失の大小のみで災害を評価していることが明確となった。また，各回答者の回答の論理的斉合性（推移律と矛盾しないこと）はかなり高く，住民の直観的判断も充分な斉合性をもっていることが明らかとなった。

不確定さについては6つの都市の過去10年間の死傷者

数のデータを提示し，他の条件が各都市一定の場合にどの都市がより好ましいかということをアンケート調査し，得られた好ましさの選択順位を災害死傷者数の平均値，標準偏差で説明する重回帰分析を行い，さらに最大値と最小値で説明する重回帰分析を行ったところ，どちらも危険率0.05のF分布検定の結果有意性が認められたが，平均値と標準偏差で説明したモデルの方がデータとより適合していることがわかった。

さらに順序数量化という分析手法を構成し，各都市の評価の順位の上下関係で上位と選択された割合と，下位と選択された割合から各都市の評価値を求め，前述と同様の回帰分析を実施した結果もほぼ同様の結果を得ることができた。

以上の結果から災害の評価にあたって約70%の人々は人命のみの損失で評価する傾向にあり，災害の不確定さについては単なる災害の平均値（期待値）のみでなく，そのバラツキも考慮にいれた評価が必要であることが明らかとなった。

「第3章 建築安全性の計量化」においては建築の安全性を計量的に検討するための概念整理と計量化方法の問題

実を整理し，二次元計量化という方法を提案している。

まず，建築安全性の概念の明確化を試み，建築の生産及び利用等に関与する各主体を対応させ安全概念を整理し，

(1) 個人レベルでとらえた安全概念と社会的レベルでとらえた安全概念，

(2) 短期的視野での安全概念と長期的視野での安全概念，

の二つの側面をクロスした類型が可能であり，本研究の後の章で中心的にとりあげる安全性の問題が社会的，長期的視野でとらえられる安全概念に対応していることを示した。

次に安全の計量的評価における基礎的問題を計測上の問題と評価の問題に二分し，前者については尺度，計測システム，パターンの特徴変量の問題としてその問題点を整理し，評価の問題としては計測値と評価値の区別，総合評価の困難さについて問題点を整理した。

上記の問題点の整理に基づき各対象の安全さの程度について順序評価が与えることができれば，数理的方法のみによって安全の程度が数理的に得られることをフォンノイマンの数値的効用の公理的体系と同等の体系で示し

た。

上記のように対象の安全さの程度について順序評価が得られない場合については別途の方法で安全性を計量化する必要があるが，ここでは安全の概念を分析した結果より，災害による損失が修復可能な損失と修復不可能な損失に区分でき，それぞれの意味を明確化することにより，安全性をこの2つの側面からとらえ，計量的には二次元のベクトルとして評価することを提案している。また，このような二次元計量化によって一般のマルコフ性を有するシステムについては安全性の解析が理論的に可能であることを示している。

「第4章 建築安全計画の最適化」においては安全計画のおかれている3つの状況にそくした計画の最適化の方法を求めている。

その1の方法は，安全計画の中で複数の対象のそれぞれの安全レベルをいかに計画してゆくことが全体としてより効果的となるかという問題を扱っており，構造計画における建物の信頼性をより効果的に増加させるために各部材の信頼性をいかに設定してゆくかという問題として後の章で応用される。まず個々の対象について，その安

全入効用fを安全のレベルxの関数と考え，この関数を安全効用関数と呼び，通常のケースではこの関数の二次微分が負となること，すなわち安全効用関数の限界効用逓減性が成立することを証明した。さらに複数の対象よりなるシステムの全体の安全効用が個々の安全効用関数の和として与えられるとき，常に全体の安全効用関数の値を最大化するために限られた（予算などの）制約の中で各対象の安全レベルをいかに設定するかという問題を解き，最適化のアルゴリズムを求めた。また，最適アルゴリズムを実行した場合，各対象の安全効用関数の一次微分が等しく変化してゆき，このアルゴリズムが限界効用が等しくなるという経済原理の一般化になっていることが示された。

次の方法は，安全性能以外の居住性，経済性などの観点を同時に考慮にいれながら安全計画を行う場合の方法であり，とくに各性能間のウェイトもしくは各性能による目的関数等などの価値尺度が明確化されていない場合に適用できる方法となっている。この方法の原理は（メリット）－（デメリット），（メリット）／（デメリット），－（デメリット）／（メリット）の3つの尺度のみを用いてベクトルの支配概念及びそれを拡張した順序

概念を導入して順序評価を行うものである。まず，それぞれの尺度に関する論理的関係を整理し，定理T1～T4を得る。さらにこの結果から論理的包含関係により順序づけられた8つの評価基準が得られ，この評価基準を順に適用させて評価する総合評価システムを構成した。また，この総合評価システムに基づいて実際に計算するためのアルゴリズムを求め，数値例を示した。

4つの方法は，計画者の提案した計画案がそのまま実現するとは限らないという不確定な状況下での安全計画の最適化の方法である。まず，複数の評価軸を有する最適化問題の中で従来用いられてきたパレート最適概念の問題点を整理し，かつ安全計画のおかれている状況を考察し，パレート最適概念のみでは安全計画における決定基準として不充分であることを示した。とくに計画者の提案したものが実現されるものとは一致せず，提案から実現までの状況を考慮した計画原理が必要であることを示した。この観点より不確定な達成率を有する計画状況に対応して「ある計画（提案）が他の計画にくらべていかなる達成率になっても不利になることがない」という意味を数学的に定式化し，これを基準としてパレート・レイ・オプティマムという最適概念を提案した。さらに

このパレート・レイ・オプティマムの基準による方法で得られる最適解は提案可能集合のパレート最適集合の中に存在していることが証明された。従って，2，3の数学的な条件下でパレート最適集合をより縮めた集合として最適集合が定まることが示された。とくに第3章の後半で述べたように安全計画の尺度が修復不可能な損失（人命的損失）と修復可能な損失（経済的損失）の二次元で表わされる場合は，提案集合がある条件をみたしている場合，唯一の最適解に限定されることが示された。

「第5章　建築安全性の確率的分析と計画手法」においては建築安全性をより具体的に確率的に分析するとともに計画手法について検討している。

「第1節　建築内火災拡大の確率的分析」においては建物（単体）の火災拡大プロセスを確率的見地から分析するとともに人命及び経済的損失を確率的に求めることを行う。

まず，出火室別出火確率の計算法を求め，建築室内の平面図よりメッシュ当り出火確率のパターンを表わす方法を例示し，建築計画における安全対策の検討のうえで有効な方法となることを示した。

次に，火災拡大の進展状況を記述するため，各火災拡大レベルを6つのフェイズに分解し，このフェイズを状態とする確率的状態遷移システムとして火災拡大をとらえることができることを示した。この確率的状態遷移システムを記述する確率微分方程式系を導出した。さらにこの微分方程式を，着火を初期状態とする解を求め，フェイズの進展を確率的に表わす式を求めている。また，確率式から各フェイズの平均到達時間，平均消火時間を求め，火災拡大性状をおおまかに表わす尺度としている。加えて，東京都における火災事例データより上記確率式の未知パラメーターを推定するためデータの補正，推定の方法を求めている。推定方法としてはデータとの自乗誤差を最小化する探索アルゴリズムを構成し，この方法により各構造種別の推定を行い，その結果よりその火災進展の差を検討し，確率的にみても木造は火災進展が早く，防火造，耐火造の順に遅くなることが示された。また，第3フェイズから第4フェイズへの移行はほぼフラッシュオーバー時点に対応し，木造はこの進展が他の構造のものにくらべて早いことが示された。さらに，この推定結果をもとに避難の失敗確率を求め，耐火造の有利性が示され，とくに避難能力のおとる病人，幼児の場合は決

定的な差となってくることが示された。

消火機能については，覚知時より消火活動開始までの時間の確率密度関数を東京都におけるデータから求め，ほぼガンマ分布で近似できること及び平均消火開始時間は5～7分であることが示された。

次に，上記の確率的な火災拡大プロセスについて損失額を求め，その損失の時間的挙動，構造種別による差を計算する方法を求めた。この損失解析に基づき構造種別の経済的最適性を検討した結果，耐火造は経済的には不利（最適でない）となっていることが明らかとなった。最後に耐火造建物の普及のための方略について上記の結果より予想される結果を整理した。

「第2節　類焼拡大防止計画の確率論的分析」においては計画的視点から小規模段階で延焼を防止することを中心課題とし，火元建物から放物線上に火炎，熱輻射の影響がみられるという実大火災実験の結果を前提として分析を行う。

まず，実験結果を前提とし，これを数理的に定式化するとともに数理的手続きのみを用いて類焼確率関数を火元建物からの水平距離，被類焼側の軒高の関数として導出した。この結果，類焼確率はeを底とし，距離の自乗

の逆数と高さの積を指数とする形で減少することが示された。

さらに東京都における火災事例データより類焼確率関数の未知パラメータを構造種別ごとに推定した。こうして得られた類焼確率関数の形状から安全隣棟距離の検討を行い，類焼される側の建物が軒高3m，木造から木造，木造から防火造，防火造から防火造，防火造から木造という類焼ケースではおよそ隣棟距離1m～5mの範囲の建物は水平距離を少し増加させるだけでも大きな効果があること，耐火造から，又は耐火造への類焼については水平距離を1m～2mとることにより大きく類焼の可能性を減少させることができることが示された。また，上記の類焼確率関数を用いてこれまで提案されている安全隣棟距離というものを確率的に評価し，この場合の他の建物から類焼されるということが生じる再現期間は1/500年となっており，妥当性をもっていることが示された。

次に，類焼確率を時間の関数としてとらえ，これを導出するとともにこの関数を用いて平均類焼時間，類焼時間のバラツキを導出した。さらに時間の関数としての類焼確率関数から延焼（類焼）速度式を導出し，これまで

各種シミュレーションモデルで用いられてきた浜田による延焼速度式との比較を行い，水平距離が2m前後では両式はほぼ一致することが示された。

格子状に配置された建物群における延焼状況をシミュレーション分析し，建物間の類焼確率がある一定の値をこえると連鎖反応的な延焼となり，大火にまで発達することが見いだされた。この連鎖反応的になる限界の類焼確率から逆に大火防止の意味での安全距離の検討を行い，木造市街地（平屋）の場合，4m～6mの距離が必要であり，とくに隣接建物数が多い場合は6m以上の距離が必要であることが明らかとなった。

既存市街地における類焼シミュレーションを前記の類焼確率密度関数を用いて実行し，類焼防止効果上好ましい建物配置性状を探すことを試み，空地，連続した耐火造建物等が好ましいことが明らかとなった。

さらに，既存市街地の改良計画案を設定し，それぞれについて類焼シミュレーションを実行し，改善費用，焼失面積，焼失額，損失人命の推定値を求め，各案を比較した結果，通常時（消防力が充分期待できる場合）については防火造化を行う計画案，ならびに道路ぞいに耐火造化を行う計画案が有効であること，地震時（消防力が

充分でない場合）については防火造化の計画案はそれほど効果がなく，道路ぞいに耐火造化を行うことが，経済的にも，人命の面からも好ましいことが明らかとなった。

他の既存市街地についても同様のシミュレーションを実行し，ほぼ同様の結果が得られ，以上の結果を用いて類焼防止の面から地区安全計画の方略に言及した。

「第3節　建築信頼性の要因分析と安全計画手法」においてはまず，構造物におけるランダムな要因の介入による安全性への影響の問題を整理し，信頼性解析においては分布型の採用の仕方によって破壊確率の値は大きく影響を受けることを示し，分布型が不明の場合として耐力を極値分布I min型，荷重を極値分布II max型としてとりあつかうことがより安全側となりうることを示し，耐力，荷重を正規分布とした場合との破壊確率の差を検討した。

以上の観点から建築に用いられる主な材料としてコンクリート及び鉄筋をとりあげ，そのバラツキを各々の材料試験データより解析を行った。コンクリートの圧縮強度については実際の建築構造物に用いられるコンクリートより採取された約3万本のコンクリート供試体の圧縮強度試験結果よりその統計的性質を検討した。圧縮強度

SEKIREI A4 NO. 54

の平均は指定強度にくらべ70～80 kg/cm²程度大きくなっていること，また，強度分布型はほぼ正規分布に近いものの，平均値より大きい値に偏っていることが示された。圧縮強度のバラツキについては変動係数にして10%～15%であるが，冬期のバラツキは夏期にくらべて大きくなっていることが示された。

建築に用いられる鉄筋の品質としてコンクリート用棒鋼の試験結果を分析し，丸棒の径，異型の単位重量（断面積×質量）の不足しているものが多く，ほとんどのものがJIS規定値以下であり，JIS許容規準下限に達していないものも多く，鉄筋の断面の不足がめだち，この点に関する品質管理の必要性を示した。引張試験強度としては丸棒の径の細かいものについてそのバラツキが大きいこと，異型のものについても降伏点，引張強さについてJIS規定以下となるものがみられた。

実際の建物のバラツキとしては各材料のバラツキのみではなく，設計時における誤差，施工時のバラツキなどが考えられ，それらを物理的に計量することは困難であるので，各分野の専門家による主観的判断をもとにファジィ分布を用いて各構造種別のバラツキを計量したところ，RC構造物が比較的バラツキが大きいことが示され，

また，バラツキの要因としては設計者のレベル，施工者のレベルが全体のバラツキ要因の中のウェイトの約40%をしめており，いわゆる人間的社会的要因が建物の安全性へ大きく介入していることが示された。また，RC構造物の変動係数は40%程度にもなっていることが推定された。

構造物の最適設計の方法はこれまでにもいくつかの提案があるが，ここでは分布型の影響をさけるために目的関数を建物全体の信頼性，制約条件を予算制約とする問題として定式化し，RC構造物の例について第4章の方法を用いて最適化を行う方法を例示した。

「第4節　重要度係数の最適化」においては公的建物などの構造設計時に安全率の割りましとして与えられる重要度係数（用途係数）の決定の方法を検討する。

最初に各種の構造基規準にみられる重要度係数の現状を整理するとともに住民のアンケート調査の分析より各種建物の災害時における住民側よりみた重要さを計量化し，病院，放送局及び消防建物の重要さが高く評価されることを示し，これらの住民評価のパターンより各施設（建物）の相関係数を基にしたクラスター分析を実施し，重要度を与えるべき都市施設を類型化した。

重要度係数をより適切に設定するため，まず，対象とする都市施設の建築物全体と物理的側面，経済的側面，社会的側面から記述し，物理的システムとしては設計耐力を設定する際の重要度係数と破壊確率との関係，経済的システムとしては重要度係数と建設費との関係，社会的システムとしては通常時，緊急時（地震時など）の当該施設が機能しているか否かの各状況についての社会的効用としてそれぞれを定式化し，建設費用を含めた施設の使用期間内の社会的総効用を最大化する重要度係数を求めることを試みた。

まず，この総効用最大化を表わす方程式を導出した。さらに現行の利子率，建物資本回収率のもとでこの総効用最大化原理を表わすより単純化した式を求めた。

次に，耐力，荷重がそれぞれ正規分布をなす場合，対数正規分布をなす場合について重要度係数の最適解を求め，耐力，荷重の変動係数及びコスト増加率等の数値が与えられた場合の重要度係数の最適値を計算し，最適重要度係数を求める図表を作成した。

また，この総効用最大化原理の適用限界及びその意味について言及し，施工及び設計段階でのバラツキをある一定値以下におさめることが基本必要条件であることを

示し，この条件がみたされなければ重要度係数の最適解が存在せず，重要度係数を与えることの意味が失われてしまうことを示した。

「第5節 建築材料の品質管理システムの最適化」においては生産・施工段階で安全のための管理を行うこともより重要な問題となっていることから，とくにバラツキが大きいとされているコンクリート強度の品質管理に関する最適化の問題を検討する。

まず，コンクリートの生産及びその品質の観測プロセスを確率的システムとして記述し，それらの確率的関係式の導出を試み，観測値としてのコンクリート供試体28日圧縮強度試験値と構造体に打ち込まれたコンクリートの最終強度との同時確率分布を導き，さらに観測値の値から判断した場合に生じる次の2つの誤りの発生する確率を表わす式を導出した。

(1) 危険なコンクリートが誤って合格と判定される確率

(2) 危険でないコンクリートが誤って不合格と判定される確率

一方，品質管理システムのいくつかの最適概念を

a) 同時最適システム；上記1)，2)の2つの確率を同時により小さくしているシステム

b) 適格判定システム；上記1), 2) の2つの確率を同時により小さくするシステムが他に存在しないようなシステム

c) E－最適システム；上記1), 2) の2つの確率にそれぞれのウェイトを付して加えた期待損失の値を最小化するシステム

の3つの最適規準として整理し，これらの論理的関係を示し，コンクリート品質管理の場合，同時最適システムは存在しないこと，かつ，E－最適システムは適格判定システムでもあることを証明した。これらの事実から，適格判定システムであることが最も重要な規準であることを示した。

さらに，現状における供試体の採取，養生の仕方によるそれぞれのシステムについて実際に第3節で求めたデータを用いて2つの誤判定確率を計算し，現状のコンクリート品質管理における合否判定方法はいずれも「適格な判定システム」となっていることを示した。

さらに，これらの誤判定確率をより小さくするためにも，より信頼性を高めるためにもコンクリート打設以後のバラツキをより小さくすることの重要性が示された。

SEKIREI A4 NO 54

関連発表論文

（共著）

論文章	論文名	発表形式	年月日	備考
第1章	建築安全性の基礎的問題	建築研究所秋季講演梗概集	52年	
第2章	住民の側よりみた建築安全性の評価尺度について	日本建築学会大会学術講演梗概集	49年10月	
	住民の安全意識と防災対策の評価構造 －住民の側よりみた建築安全性の研究（その2）－	日本建築学会大会学術講演梗概集	50年10月	小川越邦雄 奈良松範
	住民の側よりみた建築安全性	建築と積算	52年1月	
第3章	建築における社会工学	建築技術	49年	
	計画の構造と手法	建築研究所 建築研究報告 No.80	52年6月	
	最近の評価手法	ベターリビング	51年5月	
	建築空間の評価（その1）	建築技術	51年12月	
第4章	建築安全性の基礎的問題	建築研究所 秋季講演梗概集	52年	
	計画の構造と手法	建築研究所 建築研究報告 No.80	52年6月	

SEKIREI A4 NO. 54

論文章	論　文　名	発　表　形　式	年・月・日	備考
第4章	Optimization of Environmental Planning under the Risk-Aversion of Non-Repairable Damage	Summary of Papers on General Fuzzy Problems, Report No. 2	51年12月	
	Scenario-Matrix Method as a Systematic Evaluations Method for Building Production	B.R.I. Research Paper No. 59	49年3月	
	建築空間の評価（その2）	建築技術	52年1月	
	安全性の経済学	建築雑誌	53年7月	
	計画の社会的機能と状況的計画	都市計画	53年6月	
第5章	火災損失額のシミュレーション分析よりみた防火対策の評価 ― 住民の側よりみた建築安全性の研究（その3）―	日本建築学会大会学術講演梗概集	50年10月	
	火災フェイズの拡大に関する確率論的研究 (1) 各フェイズの滞留確率関数の導出	日本建築学会関東支部研究報告集	52年7月	
	火災フェイズの拡大に関する確率論的研究 (2) 未知パラメーターの推定	日本建築学会関東支部研究報告集	52年7月	
	火災フェイズの拡大に関する確率論的研究	日本建築学会大会学術講演梗概集	52年10月	
	火災フェイズ・アナリシス ― 損失をもたらすモデル ―	日本火災学会大会学術講演梗概集	53年6月	

SEKIREI A4 NO.54

論文章	論文名	発表形式	年・月・日	備考
第5章	火災フェイズの拡大に関する確率論的研究 — 確率過程モデルとそのパラメーター推定 —	日本火災学会論文集		提出中
	火災フェイズの拡大に関する確率論的研究 — 構造種別パラメーターの推定と応用 —	日本火災学会論文集		提出中
	Studies on Probabilistic Spread of Fire in Building	B.R.I. Research Paper	53年11月	
	類焼確率関数の数理・統計的導出	日本建築学会関東支部研究報告集	51年5月	
	地区防火計画のシミュレーション分析	日本建築学会大会学術講演梗概集	51年10月	
	類焼確率関数の数理的導出	日本建築学会大会学術講演梗概集	53年9月	
	目標公準に関する基本調査	総合技術開発プロジェクト「新耐震設計法の開発」報告書	52年3月	中野清司 渡部丹他
	A Proposal for a Rational Aseismic Structural Design Process	B.R.I. Research Paper, No. 68	51年9月	中野清司 渡辺一正
	On the Objective Postulate for Eearthquake-Resistant Code	日本天然会議, 耐風耐震構造専門部会	52年5月	中野清司 石山祐二
	コンクリートの品質に関する数理的考察	建築研究所 建築研究報告 No. 82	53年1月	

SEKIREI A4 NO. 51

論文章	論文名	発表形式	年・月・日	備考
第5章	コンクリートの品質管理に関する一考察（その1）	セメント・コンクリート	53年 3月	
	コンクリートの品質管理に関する一考察（その2）	セメント・コンクリート	53年 4月	
	コンクリート圧縮強度に関する統計的分析	セメント技術大会（第32回）講演要旨	53年 5月	上村 克郎
	コンクリートの品質管理に関する数理的考察	セメント技術大会（第32回）講演要旨	53年 5月	上村 克郎
	重要度係数の最適化	建築研究所 建築研究報告 No. 74	51年 9月	
	重要度係数の最適化 —地域公共施設の構造安全計画 その1—	日本建築学会論文報告集 No. 266号	53年 4月	
	重要度係数の最適解 —地域公共施設の構造安全計画 その2—	日本建築学会論文報告集 No. 267号	53年 5月	

SEKIREI A4 NO 54