論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションによる木造住宅密集地域の減災対策評価に関する研究
Title(English)	Evaluation of Disaster Mitigation Measures in Densely Built-up Wooden Residential Areas by Human Behavior Simulation Considering Property Damage in a Large Earthquake
著者(和文)	沖拓弥
Author(English)	Takuya Oki
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第4149号, 授与年月日:2018年1月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:大佛 俊泰,中井 検裕,竹内 徹,藤井 晴行,斎尾 直子,鍵 直樹
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第4149号, Conferred date:2018/1/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

東京工業大学 環境・社会理工学院
建築学系 建築学コース
平成 29 年度　学位論文

大地震時の物的被害を考慮した
人間行動シミュレーションによる
木造住宅密集地域の減災対策評価に関する研究

提 出 者　：　沖　拓弥（東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系 助教）
指導教員　：　大佛俊泰　教授

目次

第１章　序論 5
1.1　研究の背景 6
1.2　既往の関連研究 6
1.2.1　木密地域における整備事業 7
1.2.2　木密地域の整備事業に関する既存の評価手法 9
1.2.3　発災直後の地域住民による救助活動に関する既往研究 11
1.2.4　発災直後の地域住民による消防活動に関する既往研究 13
1.2.5　木密地域における広域避難に関する既往研究 15
1.3　本研究の目的と位置づけ 17
1.4　本論文の構成 18
参考文献（第１章） 20
第２章　大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデルの構築 24
2.1　シミュレーションモデルの全体像 25
2.2　物的被害モデル 26
2.2.1　建物倒壊 27
2.2.2　瓦礫による道路閉塞 28
2.2.3　出火・延焼 29
2.2.4　火災による道路閉塞 30
2.3　建物内閉じ込めモデル 31
2.4　地域住民による救助活動モデル 33
2.5　地域住民による消火活動モデル 34
2.6　広域避難行動モデル 36
2.7　街路・街区内閉じ込めモデル 40
2.8　大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデルの構築 40
2.9　本章のまとめ 43
参考文献（第２章） 46
第３章　物的・人的被害の推定 48
3.1　分析対象地域とシミュレーションの想定 49
3.2　物的被害の推定結果 53
3.3　地域住民の消火活動による焼損建物数の低減効果 54
3.4　地域住民の救助・消火活動による死亡者数の低減効果 55
3.5　地域住民による救助・消火活動実施のリスク 60
3.6　避難行動戦略（避難開始のタイミング）と人的被害の関係 61
3.7　建物内・街路内・街区内での閉じ込めや逃げ遅れの傾向 63

3.8　人的被害と空間性状の関係 65
3.9　本章のまとめ 67
参考文献（第3章） 69
第4章　建物内対策による減災効果の評価 70
4.1　建物内対策とシミュレーションによる減災効果の評価方法 71
4.2　現状における物的・人的被害 74
4.3　家庭用消火器の完備（対策①）による減災効果 74
4.4　感震ブレーカーの完備（対策②・対策③）による減災効果 75
4.5　本章のまとめ 76
参考文献（第4章） 77
第5章　建物間の延焼阻止・遅延対策による減災効果の評価 78
5.1 建物間の延焼阻止・遅延対策とシミュレーションによる減災効果の評価方法 79
5.2　出火件数と火元初期消火の成否 81
5.3　延焼阻止活動の成否 82
5.4　延焼阻止成功に転じた事例の分析 83
5.5　延焼阻止失敗事例の分析 85
5.6　本章のまとめ 87
参考文献（第5章） 88
第6章　市街地整備による減災効果の評価 89
6.1　市街地整備とシミュレーションによる減災効果の評価方法 90
6.2　過去に実施された木密事業の減災効果 90
6.2.1　分析対象地域とシミュレーションの想定 90
6.2.2　市街地の空間性状の変化 92
6.2.3　建物全壊率・建物焼損率・道路閉塞率 93
6.2.4　避難困難率・避難時間 95
6.3　狭隘道路における交差点間短縮避難経路の整備効果 97
6.3.1　分析の視点 97
6.3.2　シミュレーションの方法 97
6.3.3　建物単位にみた避難困難率の低減 98
6.3.4　地域別にみた避難困難者数・避難困難率の低減 99
6.3.5　避難距離に与える影響 101
6.3.6　交差点間短縮避難経路整備のメリット 102
6.4　道路整備（防災生活道路整備と沿道建築物不燃化建替）による減災効果 102
6.4.1　分析の視点 102
6.4.2　整備対象とする建物・道路の想定 103
6.4.3　シミュレーションの結果 105

6.5　道路の整備順が減災効果に及ぼす影響 106
6.5.1　分析の視点 106
6.5.2　シミュレーションの結果 107
6.6　耐震化率の改善による減災効果 109
6.6.1　分析の視点 109
6.6.2　市街地における耐震化のモデル化 109
6.6.3　本節における分析対象地域 111
6.6.4　耐震化率と物的被害割合の経年変化 112
6.6.5　広域避難シミュレーションの結果 114
6.7　本章のまとめ 115
参考文献（第６章） 118
第７章　結論 119
7.1　本研究のまとめ 120
7.2　想定される本研究成果の利用場面 122
7.3　本モデル利用時の留意点 123
7.4　今後の課題 123
参考文献（第７章） 125
付　録 126
付録１　シミュレーションでの乱数の扱いについて 127
付録２　「大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデル」を用いた物的・人的被害の推定結果の検証について 131
2.1　建物全壊率 131
2.2　出火件数 132
2.3　焼失（焼損）建物率 132
2.4　死亡者数 132
2.5　自力脱出困難者発生数 132
2.6　比較表（表 8.2.1）算出の根拠 133
図表リスト 138
学位申請者の研究業績（博士論文該当のみ） 142
謝辞 145

第１章　序論

1.1　研究の背景
1.2　既往の関連研究
1.3　本研究の目的と位置づけ
1.4　本論文の構成

第 1 章　序論

1.1　研究の背景

大震災や大火，戦時の空襲などを経験した日本の大都市の「木造住宅密集地域（以下，木密地域）」では，燃えにくい建物への建替えや，区画整理による道路拡幅が行われてきた。一方で，被害を免れた地域では，昔ながらの様子をとどめたまま現在に至っており，東京の下町のように，どこか懐かしさを感じさせる独特の雰囲気を有している。また長く住み続けている住民を中心に，地域コミュニティが活発である場合が多い。しかし，道路が狭隘で複雑に入り組み，老朽化した木造家屋が高密度に建ち並ぶこうした地域では，大地震時には大火が発生する可能性が高く，さらに，倒壊した木造家屋が避難場所への円滑な避難や救助・消防活動を妨げることで，甚大な人的被害を引き起こす恐れがある。

木密地域における大地震時の物的・人的被害を低減させるためには，近い将来発生すると言われている巨大地震を想定した具体的な地域防災計画の立案と，ハード，ソフト両面での減災対策が喫緊の課題である。しかし，木密地域の改善は必ずしも順調に進んでいるとはいえず，大地震発生時の危険性が高い地域が依然として多く残存しているのが現状である。被害低減に向けた施策の有効性を検討し，木密地域での減災対策を具体的に推し進めていく上では，様々な大地震発生シナリオ（曜日・発災時刻・気象条件・震度等）のもと，市街地のどこで，どのような物的・人的被害が生じるかを詳細に予見し，さらに，具体的かつ多様な施策による減災効果を定量的に比較・評価可能な手法を構築することが求められる。

1.2　既往の関連研究

本節では，まず，木密地域における整備事業や，整備効果に関する既存の評価手法について概観し，木密地域の改善が進まない理由や，具体的な減災対策の効果を評価するための指標に求められる要件を整理する。次に，地域住民による大地震時の救助・消火活動や広域避難行動に関する既往研究をレビューし，得られている知見や課題等を整理する。また，物的被害（建物倒壊・道路閉塞・火災延焼）の影響を考慮した人的被害を推定する上で，既往研究の成果をどのように活用し，どのように課題を克服すべきか議論する。さらに，各種施策による減災対策を評価するための手法について検討する。

1.2.1　木密地域における整備事業

木密地域改善の必要性は以前から指摘されており，国や地方自治体も，木密地域の整備を促進させるための様々な取り組みを行ってきた。例えば，2003 年に国土交通省は，東京，大阪などの大都市を中心に，全国で約 8,000ha の地区を「地震時等において大規模な火災の可能性があり重点的に改善すべき密集市街地（重点密集市街地）」に指定している[1]。2011 年には，新たに，住生活基本計画で「地震時等に著しく危険な密集市街地」6,000ha が公表された[2]。また，東京都は，大地震時に特に甚大な被害が想定される整備地域（約 7,000ha）を対象に，2020 年までに(1)市街地の不燃化により延焼による焼失ゼロ（不燃領域率 70%），(2)延焼遮断帯となる主要な都市計画道路を 100%整備，という２つの目標を達成すべく，2012 年に「木密地域不燃化 10 年プロジェクト」実施方針を策定し，様々な取り組みを行っている[3]。さらに，各市区町村は，これらの方針や調査・報告に基づき，一刻も早く重点密集市街地の最低限の安全を確保するべく努力してきた。具体的には，(1)建物を耐火性・耐震性の高い建物に建て替えることで，燃えにくい・壊れにくい街をつくるための整備と，(2)幅員の狭い道路を拡幅することで，建物の倒壊や火災による道路閉塞を起こりにくくするための整備を推進してきた。しかし，これらの手法は整備に関わる建物の数が多く，整備コストが高くなり，また，沿道建物全ての建て替えが完了するまでに長い年月を要するという難点がある。その結果，住民の合意が得られない場合や，事業の採算が取れない場合が多く，木密地域の整備は必ずしも順調に進んでいるとはいえない[4]（図 1.2.1）。また，巨視的に見ると整備が進んでいるように見えても，微視的には進んでいない箇所も多い。例えば，図 1.2.2 の例では，広幅員道路沿いでは建物の耐震化が進んでいるが，そうした道路に囲まれたエリア内の耐震化や道路拡幅は進んでおらず，大地震発生時の安全性には空間的な偏りがあると考えられる。

整備に要するコストや時間，地域住民との合意形成の観点からは，整備箇所をできるだけ少なく抑えつつ，高い改善効果が得られるような施策について検討することが重要である。そのためには，木密地域整備事業（以下，木密事業）の効果について，ミクロな空間スケールで定量的に評価し，効果的かつ効率的な整備手法を具体的に提示することによって，関係者の理解・協力を得ることが必要である。

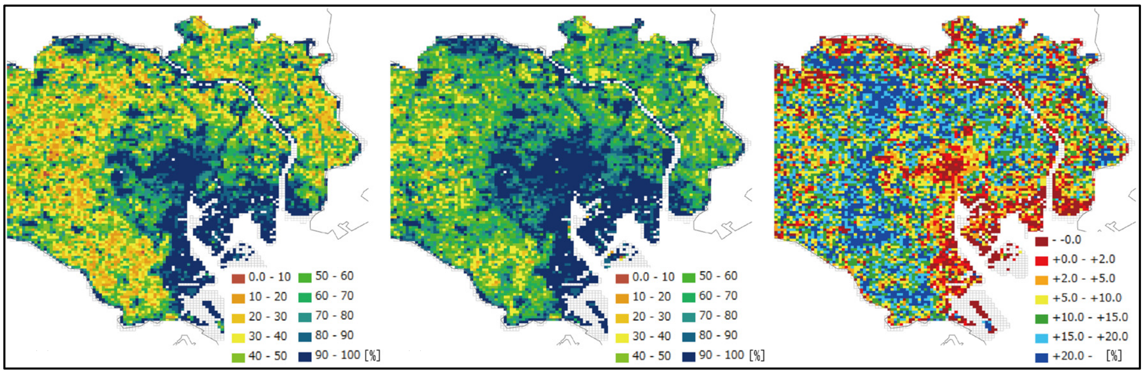


図 1.2.1　東京都 23 区における不燃領域率[1]の比較

（左：1991 年，中央：2011 年，右：20 年間での変化[2011 年の値－1991 年の値]）

※建物現況調査および市街地状況調査のデータから，筆者が算出・作成

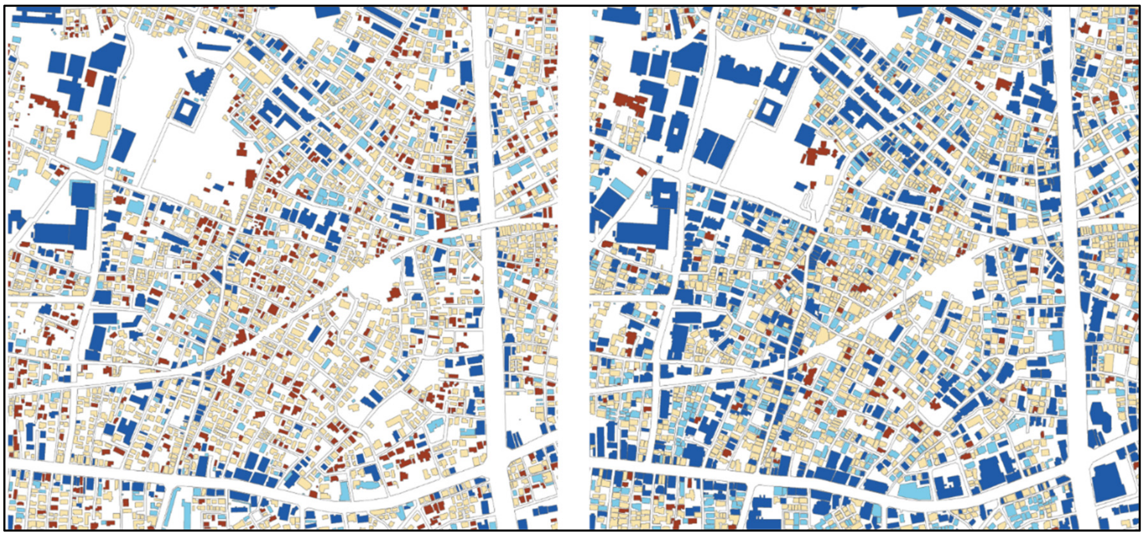


図 1.2.2　防火構造の空間分布の比較（左：1991 年，右：2011 年）

※建物現況調査のデータを使用して，筆者が作成

■裸木造　■防火造　■準耐火造　■耐火造

1　不燃領域率は以下のように定義される。

不燃領域率[%]＝空地率[%]＋（1－空地率[%]/100）×不燃化率[%]

空地率[%]＝対象市街地の空地総面積/対象市街地面積×100

空地は，幅員 6m 以上の道路と，短辺または直径 10m 以上で，かつ，面積が 100m² 以上の水面，鉄道敷，公園，運動場，学校，一団地の施設などを指す（東京都の定義）。

不燃化率[%]＝（地域内耐火建築総面積＋0.8×地域内準耐火建築総面積）/地域内建築総面積×100

1.2.2　木密地域の整備事業に関する既存の評価手法

整備効果や木密事業の進捗状況は，これまでにも，様々な指標を用いて評価されてきた。表 1.2.1 に，主要な指標を 3 つに分類し，それぞれの概要・特徴・長所・短所を整理してある。これまでは，市街地の防災性能を，空間性状に基づき算出される物的指標（建物倒壊危険度，火災危険度，道路閉塞危険度等）により評価し，整備目標と関連付ける場合が多かった[5 - 9]。これらの指標は，計算機の性能や利用可能なデータの制約から，250m メッシュや町丁目単位等のスケールではあるものの，地域全体の平均的な空間性状の改善度を広域で把握可能という長所があり，主に国や都道府県レベルでの政策決定に用いられてきた。しかし，整備に直接関係する人々にとっては，街区・道路レベルの局所的な安全性を，実際の市街地において想定される人的被害の観点から直接評価できる指標の方が有意義である。例えば，人々が大地震発生直後に避難場所まで安全に避難出来るかどうかに着目し，地理的状況に基づき地域の避難危険性を評価する手法を検討した研究[10, 11]や，避難場所までの避難経路の安全性評価手法を検討した研究[12 - 15]がある。一方，これらの指標は，市街地の GIS データ（建物・道路等）や国勢調査から得られる地域の夜間人口等，静的なデータを用いて算出されている例が多い。すなわち，発災時刻の違いによる滞留者属性の違いや，物的被害（建物倒壊による道路閉塞や火災延焼）の影響，あるいは，避難者同士の相互作用（道路混雑等）について考慮した指標ではない。また，大地震時に，地域住民自身による救助活動や消火活動等，広域避難行動以外の活動が円滑に行われるかどうかも重要な視点であるが，これらを考慮した既存の指標はほとんど存在しない。

表 1.2.1　木密地域の防災性能と整備事業進捗の評価に関する既存の指標

文献	分類	概要	特徴	長所	短所
[5] [6]	空間性状からみた市街地の防災性能評価（倒壊危険度，火災危険度，道路閉塞危険度） ※避難危険度を除く	火災に対する安全性改善効果と整備目標との関連付け	市街地レベル （町丁目単位など）	地域全体の平均的な空間性状の改善度を，広域で把握可能	街区・道路レベルでの局所的な安全性評価には不適
[7]		建物倒壊危険度，火災危険度，総合危険度などの指標から構成	町丁目別 約 5 年ごとに公表		
[8]		平均建蔽率や空地率，木造建物構成率など，木造建物の密集度合いに関する指標	町丁目・消防署管轄・250m メッシュ別 約 5 年ごとに公表		
[9]		(1) 防災性能上脆弱な区域の抽出 (2) ある一定水準まで防災性能を向上させるための方法の検討	グリッド状仮想都市パーコレーション理論	市街地特性に依存せず，一般的な議論が可能	実際の街区で，どのような整備を行えば安全性向上が図れるのかを把握することが困難
[10]	地理的状況に基づく地域の避難危険性評価	建物倒壊と道路閉塞をモデル化した上で，道路ネットワーク上のノードから避難地までの到達可能性を 4 段階で評価し，避難危険性の高い地区を抽出	街区・道路単位	建物倒壊と道路閉塞の考慮	避難者の存在を考慮していない
[11]		避難場所までの到達不能率と平均避難距離，避難先における避難者密度から，地震火災リスクを考慮した地区全体の避難危険性を評価	町丁目単位	火災リスクの考慮	夜間人口を用いた避難者数把握にとどまる
[12]	避難場所までの避難経路の安全性検討	(1) 実際の街区を骨格道路へのアクセス性によって類型化 (2) パターンごとの具体的な改善手法の提案	街区・道路単位 フィールドワーク	地域住民等と協力した避難経路の計画，危険箇所の調査，具体的な改善手法の検討	木密事業の効果を定量的に検証したものではない
[13]		(1) 災害時の避難リスクが集積しているエリアを現地調査 (2) 避難経路沿道の環境評価			
[14]		延焼危険性の低い「クラスター間道路」を優先して避難したときの危険性について議論	街区・道路単位 延焼クラスター	火災リスクの考慮	建物倒壊や道路閉塞，避難者が殺到することによる混雑等，大地震時に想定される複雑な状況は非考慮
[15]		複数の指標（避難距離や避難場所への到達確率等）に基づく，大地震発生直後の個々人の最適避難経路推奨方法の提案	街区・道路単位 多目的遺伝的アルゴリズム（MOGA） 多目的最適解問題	(1) 容易に入手可能な調査データの利用 (2) 指標の重み付けや追加・削除が容易	大地震時の道路閉塞箇所や出火点の違い，火災延焼の影響，個人ごとの避難開始時間の違い等は考慮不可能

1.2.3　発災直後の地域住民による救助活動に関する既往研究

大地震時における建物内閉じ込め者の生存率を高めるためには，一刻も早い救出・搬送が重要である。しかし，消防隊員や地域の消防団員は，発災直後から数時間後にかけて，同時多発的に発生する火災の消火活動に優先的に出動する必要があり，警察官であれば交通整理等に従事する必要がある。また，自衛隊員や地震の直接的な被害を受けていない地域からの応援も，発災直後には期待することが難しい。そこで，家族や近隣の住民によって行われる救助活動が非常に重要である。

表 1.2.2 に，大地震時の救助活動に関する既往研究の概要・特徴・課題を整理してある。大地震発生直後の救助活動については，特に 1995 年に発生した阪神・淡路大震災（兵庫県南部地震）時の調査報告[16 - 19]に基づき，これまでに多くの研究がなされている。しかし，そのほとんどが公的機関（消防隊，警察，自衛隊等）による救助活動を対象とした研究であり，地域住民による活動を対象としたものは多くない。今後起こりうる災害に対する施策を検討する上では，これらの貴重な調査結果に基づき，地域住民による一連の救助活動プロセスをモデル化し，シミュレーションで如何に有益な知見を得ることが出来るかが鍵となる。既往の救助活動シミュレーションでは，特に，仮想都市を用いた RoboCup-Rescue Project [20 - 23]が有名である。一方，人的被害推定や地域防災計画策定に資することを目的として，実際の市街地 GIS データを用いた研究[24 - 26]も見受けられるが，精緻なモデルを用いたシミュレーションを広域で実行する上では，計算負荷低減のための工夫が必要になる。また，救助活動者同士の相互作用だけでなく，大地震時の物的被害や他の活動（消火活動・広域避難行動等）との関連が，十分に考慮されているとは言い難い。

表 1.2.2　大地震時の地域住民による救助活動に関する既往研究

文献	分類	概要	特徴	備考
[16]	阪神・淡路大震災時の調査・報告	(1) 地震発生後の要救助者の人数，救助活動者の救助能力，および，発災から1日ごとの生存率から最終的な救出者数を算出する概念モデルを提案 (2) 救出者数を増加させるためには，救助能力が重要なファクターであることを示唆	消防隊と一部自衛隊による救助活動を対象	家族や近隣住民による救助活動の影響は考慮されていない
[17]		(1) 生存者の救出は主に家族や地域住民によってなされた (2) 救助に要する合計時間は，要救出者のいる建物の構造や，要救出者数，救出活動者数，および，地震発生からの日数に依存	消防署による神戸市の捜索・救助（SAR）記録に基づく	
[18]		地震時の救助活動，避難所運営，復興のそれぞれの段階において，近隣住民，町内会，地域といったコミュニティが重要な役割と機能を担うと主張	規模・発災後の段階別にコミュニティの役割と機能を整理	定性的な議論にとどまる
[19]		(1) 救助プロセス，閉じ込めの捜索，掘り起こし，掘り起こした閉じ込め者の扱い，活動を行った消防隊員からの意見をそれぞれ整理 (2) 発災から最初の数時間での救助活動が重要で，特に，閉じ込め者の捜索の効率性が救助活動全体の効率性を大きく左右すると主張	救助活動用ロボット開発の視点から，大地震時の救助活動について考察	定性的な議論が中心
[20]	ロボカップレスキュープロジェクト（RCRP）	RCRP の紹介	(1) 仮想都市 (2) 大地震発生直後の救助活動を標準化された問題に置き換え，学際的・国際的に取り組み可能	実際の都市での救助活動効果を直接検証不可能
[21]		RCRP の紹介および救助活動効果の検証		
[22] [23]		被害（犠牲者数）を最小化するために，Combinatorial Auction Mechanism をベースとした Task Allocation Model を用いた例		
[24]	家族や地域住民による実市街地における救助活動シミュレーション	(1) 建物内閉じ込め，避難，閉じ込め現場への移動，救出活動，および応援要請をそれぞれモデル化 (2) 救助活動参加確率が向上した場合や，近隣の閉じ込め者捜索範囲を拡大した場合等のケーススタディを通じ，地域のコミュニティ意識を向上させることの重要性を主張	(1) 阪神・淡路大震災時の調査結果に基づくパラメータを使用 (2)MAS (3) 救助活動者同士の相互作用の考慮	計算負荷の問題から，スタディエリアは町丁目1つ分の狭いエリアに限定
[25]		(1) 閉じ込め者の家族および専門の救助チームによる救助活動をモデル化 (2) それぞれの瓦礫除去能力に差を持たせながらも，全体的に見ると家族が大きな役割を果たす可能性を示唆 (3) 消防署や救助チームの数が変化した場合や，訓練により救助チームの瓦礫除去速度が上昇した場合の影響について分析・考察		大地震時における道路閉塞・火災延焼の影響や，人々の広域避難行動は非考慮
[26]		実市街地における大地震時の物的被害を考慮し，救助活動シミュレーションを行っている数少ない例	(1)MAS (2) 救助活動者同士の相互作用と物的被害の考慮	災害時要援護者の救助に特化

1.2.4　発災直後の地域住民による消防活動に関する既往研究

大地震発生直後には，様々な原因により複数の建物から火災が発生することが想定されている。このとき，既存の公設消防力だけでは，全ての火災を食い止めるのは困難であることが，既に多くの研究によって示されている。したがって，そもそも火災を発生させないように事前の対策をとり，万が一出火しても，隣棟に延焼するなど，手をつけられない状態になる前に，地域住民自らの手によって消火できるか否かが，最終的な焼失規模の大小に大きく影響する。実際に，1995 年の阪神・淡路大震災では，救助活動のみならず，発災直後の小規模な火災に対する消火活動に，地域住民が大きく貢献したことが報告されている[27]。

表 1.2.3 に，大地震時の地域住民による消火活動に関する既往研究の概要・特徴・課題を整理してある。火災予防審議会・東京消防庁は，大地震発生・出火後の消火活動の段階を詳細にモデル化している[28, 29]。[29]の手法によれば，基礎的な情報から，GIS だけで各町会・自治会の住民による初期消火対策効果を比較的容易に求めることができる。一方で，大地震発生時において，(1)道路閉塞等の影響で資器材配置位置へ到達できない場合や，(2)大幅な迂回によって放水開始までの時間が長くなることで，消火可能面積が相当狭まる場合，(3)避難・救助活動への参加によって，消火活動に参加可能な人数が想定よりも少なくなる場合は考慮されていない。

これらの課題に対する解決策として，地域住民による消火活動フローや，消火可否の判定方法，初期消火効果の評価方法等を，MAS モデルに組み込むことで，物的被害や延焼阻止活動を行う地域住民同士の相互作用を考慮する方法が考えられる[30, 31]。しかし，いずれも，消火活動者同士の相互作用，大地震時の物的被害，広域避難行動等をモデルに組み込み，多くの大地震発生パターンについてシミュレーションを実行したものではなく，大地震発生直後の状況の不確実性を十分に考慮しているとはいえない。

また，地域住民が自ら実施可能な延焼阻止活動の一つであるバケツリレーは，延焼阻止能力こそ劣るものの，基本的に誰でも取り組むことが可能であり，阪神・淡路大震災時には被害軽減に貢献したという報告もある[32]。他の消火資器材と比較して多くの地域住民が参加する可能性が高いことから，効果的な人員配分を行うことが重要である[33]。将来的には，シミュレーションモデルにバケツリレーを組み込むことで，消火効果と人的被害を一層精緻に推計することが期待される。

表 1.2.3　大地震時の地域住民による消火活動に関する既往研究

文献	分類	概要	特徴	課題
[27]	地域住民による大地震時における消火活動の実態調査	阪神・淡路大震災時，発災直後の小規模な火災に対する消火活動に，地域住民が大きく貢献したことを報告	阪神・淡路大震災時の調査・報告に基づく	シミュレーションへの応用
[28]	大地震発生後の消火活動のモデル化，および，地震時の初期消火活動に関する対策の検証	大地震発生・出火後の消火活動を，(1) 火元初期消火，(2) 隣保初期消火，(3) 地域住民による延焼阻止活動，(4) 公設消防による延焼阻止活動，の 4 段階に区分	多様な指標に基づき，市街地の大地震時における初期消火対策の進捗状況を評価する手法の構築	(1) 時間の概念が組み込まれていない (2) 初期消火以降のプロセスはモデル化されていない (3) 推定式のパラメータ数が多く，データ取得が容易でない
[29]		(1) 住民が行う初期消火・延焼阻止活動のモデル化 (2) 東京都の各消防署管轄内の初期消火可能範囲を算出 (3) 昼夜別，使用資器材別に，住民の初期消火対策効果を推定	基礎的な情報（町会・自治会ごとの人口密度，木造系予想出火件数，木造系棟数，水利位置，初期消火資器材配置位置）から，GIS を用いて，地域住民による初期消火対策効果を比較的容易に算出可能	物的被害の影響（放水開始までの時間の遅延）を考慮していない
[30]	大地震発生後の消火活動のモデル化，および，シミュレーション	消火器による消火活動を想定したシミュレーションにより，自主防災組織の初期消火活動能力を評価	簡易的なモデルで，MAS モデルに組み込みやすい	(1) 避難行動等との関連は非考慮 (2) モデルの妥当性評価の検討(特に消火効果)
[31]		地域住民による消火活動フローや，パラメータの値，消火可否の判定方法，初期消火効果の評価方法などをモデルに組み込み，シミュレーションを実行	セルオートマトン MAS モデル 物的被害や延焼阻止活動を行う地域住民同士の相互作用を考慮	
[32]	大地震時のバケツリレーによる消火活動を扱った研究	阪神・淡路大震災時，地域住民によるバケツリレーが被害軽減に貢献したことを報告	阪神・淡路大震災時の調査・報告に基づく	実市街地におけるシミュレーション
[33]		バケツリレーでの効果的な人員配分の定量的検討	数理モデルによるバケツリレーのモデル化	

1.2.5　木密地域における広域避難に関する既往研究

緊急時における群集の避難行動をモデル化・シミュレートした既往研究は数多い[34, 35]。しかし，その多くは，高層住宅や大規模商業施設，鉄道駅構内，地下街，船舶，航空機など，閉じられた空間から外部へと脱出する行動を記述する類のものであり，都市レベルでシミュレーションを行っている例は，日本を除くとほとんど見られない。日本は，幾度となく大きな地震に襲われ，多くの尊い生命が犠牲になってきたことから，これまで多くの研究者が，大地震時における都市レベルの避難シミュレータの開発と，これを活用した分析に取り組んできた。

大地震時における都市レベルの避難行動には，主に，津波から逃れるための高台や津波避難ビルへの避難（以下，津波避難）と，火災延焼から逃れるための一時集合場所や広域避難場所への避難（以下，火災避難）の 2 通りがある。津波避難の場合は，徒歩や車両によって，一刻も早く安全な場所へと避難することで，避難完了時間を短縮し，津波に巻き込まれ死亡する人の数を最小化することが目的になる。一方，木密地域において想定すべき火災避難の場合は，必ずしも最短距離で早く避難することが良いとは限らず，建物の倒壊や火災の延焼，道路の閉塞を避けながら，出来るだけ安全な経路を選択して避難することが重要である。

群集避難行動のモデル化の手法は, (1)物理モデル手法, (2)セルオートマトン法, (3)MAS, の 3 つに大別される[36]。物理モデル手法は，計算負荷が高くなる傾向にあるが，避難者が他の避難者や障害物から受ける相互作用や衝突回避行動，より安全な経路を経由して避難しようとする心理的特性，確率論的な経路選択行動，火災による累積の受熱温度を用いた避難者の死亡判定等を表現しやすい[37 - 40]。一方，MAS を用いると，地震発生から時々刻々と火災や道路混雑状況が変化する過程や，避難者・救助活動者・消火活動者等にそれぞれ行動ルールを設定しシミュレーションを実行することで，相互作用の影響を比較的容易に分析することができる[41 - 44]。

また，大地震時の同時多発火災を想定した広域避難シミュレーションについては，過去に実際の災害事例がほとんど存在しないことから，一般には，シミュレーション結果の検証やモデルのキャリブレーションが困難である（一部，延焼動態図と火災による死亡者数の空間分布に基づき，モデルの精度を検証している研究がある[39, 40]）。そのため，複数の比較シナリオを設定し，シナリオ間でシミュレーション結果を比較して，各種施策の効果を定量的に評価する方法を採用することが多い。

表 1.2.4　大地震時の広域避難行動に関する既往研究

文献	分類	概要	特徴	課題
[34]	緊急時における群集避難行動のモデル化の例	Social Force モデルの提案	避難者が他の避難者や障害物から受ける相互作用を表現可能	実市街地を対象としたシミュレーションへの応用
[35]		RVO モデルの提案	避難者同士の衝突回避行動までも表現可能	
[36]	群集避難行動モデルの整理	群集避難行動のモデル化手法と，各手法が有する特徴の整理	(1) 物理モデル手法，(2) セルオートマトン法，(3)MAS の 3 つに大別	
[37]	物理モデルを用いた避難シミュレーションの例	JR 大阪駅の地下街における群集の避難行動シミュレーション	(1)Social Force モデルの使用 (2)GPU コンピューティングによる大規模計算の高速化	物理モデルを用いると，一般的に計算負荷が高くなる傾向
[38]		物理モデル手法の違いによるシミュレーション結果の比較	Social Force モデルと RVO モデルの比較	
[39] [40]		(1) 市街地大火時における住民避難シミュレーションモデルの構築 (2) 関東大震災（1923 年）時の延焼動態図と火災による死亡者数の空間分布を用いた，モデル精度の検証	(1) ポテンシャル理論（避難者がそれぞれ現在の居場所からポテンシャルの低い方向に向かって避難） (2) 避難者の心理的特性，確率論的な経路選択，輻射熱の影響の組み込み	
[41]	MAS モデルを用いた広域避難シミュレーションの例	災害時の住民の行動特性と歩行速度をふまえたモデルを MAS により構築し，避難者エージェントへの避難誘導が避難結果に与える影響について考察	(1) 災害時における住民行動特性の組み込み (2) 避難誘導の影響の考察	(1) 精緻な行動を表現しようとするほど，モデルが複雑となり，計算負荷が増大 (2) 広域でのシミュレーションには，計算負荷を抑える工夫が必要
[42]		広域避難完了者率の時間変化を評価指標とした，効果的な避難方法の提案	(1) 木密地域を対象 (2) 大地震時の広域火災を考慮	
[43]		避難中に避難者が受ける火災リスクや，避難場所の混雑度等を評価	(1) 大地震発生後の物的被害の考慮 (2) 都市内滞留者の多様性（施設内滞留者・都市内移動者・徒歩帰宅者）の考慮	
[44]		大地震による道路閉塞や火災延焼が発生した状況下での，避難者間での情報伝聞行動をモデル化	(1) グリッド状仮想都市 (2) 避難者間での情報伝聞行動の考慮 (3) 避難誘導効果の検証	

1.3　本研究の目的と位置づけ

前節で概観したように，これまでは，市街地の空間性状に基づき，火災に対する安全性や避難危険性，避難場所までの避難経路の安全性を評価する研究が多くなされてきたが，大地震時の人的被害を精緻に推定し，その結果を市街地性状評価に応用している事例は，ほとんど見られなかった。近年になって，計算機の性能向上や利用可能データの急増に伴い，物理モデルや MAS モデル等の概念に基づく広域避難シミュレーションの研究が盛んに行われるようになった。また，1995 年の阪神・淡路大震災を契機に，地域住民による救助・消火活動の重要性が指摘されるようになり，活動プロセスのモデル化も試みられている。

筆者は，人的被害低減に向けた施策の有効性を検討し，地域での整備を具体的に推し進めていく上で，大地震時の物的被害モデルと各人間行動モデルを統合したシミュレーションモデルを用いた市街地性状評価が有効であると考えている。しかし，独自に発展してきたこれらの行動モデルを全て統合し，シミュレーション分析を行っている研究事例は，いまだ見当たらない。

各分野における既往研究のレビューに基づくと，木密地域における防災性能評価や人的被害推計，整備事業の評価，防災計画の策定等を行う上では，次に挙げる 6 つの視点や方法が重要と考えられる。

(1) スケール：これまで 250m メッシュや町丁目単位のようなマクロスケールで評価されてきた市街地性状を，街区・道路レベルのミクロなスケールで評価する。

(2) 評価指標：大地震時に想定される物的被害の観点だけでなく，想定される人的被害の程度を直接把握可能な評価指標（避難困難率，死亡者数，閉じ込め者数等）を使用する。

(3) 多様なシナリオ：人的被害の程度は，発災時刻や物的被害パターン（道路閉塞や出火点の位置等）に大きく依存することから，静的なデータではなく，詳細かつ具体的な発災シナリオを多数想定し，シミュレーションを実行する。

(4) 相互作用：救助活動者・消火活動者・広域避難者の間の相互作用，および，物的被害が各行動に及ぼす影響を考慮する。

(5) 時間の概念：大地震発生後の火災延焼や，救出・放水開始までに要する時間等，各行動の成否を大きく左右する概念を考慮する。

(6) 効果の検証：過去の災害事例に基づき，シミュレーション結果の検証やモデルのキャリブレーションを行うことは困難であることから，各種施策の効果を定量的に評価できる，適切な比較シナリオを設定する。

こうした背景をふまえ，本研究は，以下の 2 点に取り組むことを目的とする（図 1.3.1）。

- 大地震時の物的・人的被害を，多様なシナリオの下，建物・道路単位のミクロな空間スケールで推定可能である総合的なシミュレーションモデルを構築するために，これま

で別々に検討されてきた大地震時の物的被害（建物倒壊・道路閉塞・火災延焼），建物内・街路内閉じ込め，地域住民による各種活動（救助活動・消火活動・広域避難行動）のモデルを，相互作用や時間の概念を考慮可能なマルチエージェントシミュレーション（MAS）モデルの形式で統合する。

- 木密地域の減災対策評価や合意形成におけるシミュレーションの有用性を示すために，各種減災対策（建物内対策・建物間対策・市街地整備施策）の実施効果を，様々な物的・人的被害指標に基づき定量的に評価する具体例を示す。

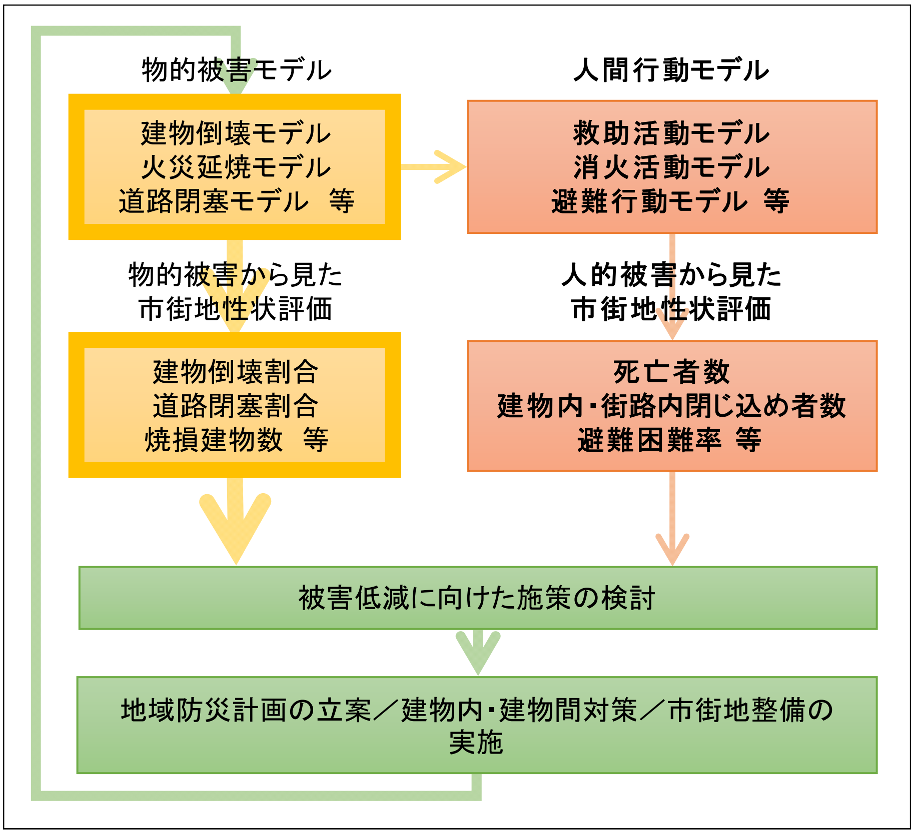


図 1.3.1　大地震時の被害低減に向けた施策の検討プロセス（模式図）

1.4　本論文の構成

第 2 章では，本研究で用いる大地震時の物的被害・人間行動シミュレーションモデルを構成する，5 つのサブモデル（物的被害モデル，建物内閉じ込めモデル，地域住民による救助活動モデル，地域住民による消火活動モデル，広域避難行動モデル）について詳述する。本モデルを用いることで，物的被害（建物倒壊・道路閉塞・火災延焼）と，多様なふるまいをする都市内滞留者との間の相互作用を考慮しながら，建物・道路単位で物的・人的被害を推

定することが可能となる。

第 3 章では，第 2 章で構築したシミュレーションモデルを用いて，東京都内の実際の木造住宅密集地域を例に，首都直下地震時を想定したシミュレーションを実行し，大地震時における物的・人的被害の推定を試みる。ここでは，地域住民による救助・消火活動の効果とリスクを定量化するとともに，建物内・街路内・街区内での閉じ込めや逃げ遅れの傾向，および，避難開始のタイミングと人的被害の関係について分析することで，本シミュレーションモデルを活用することの利点を具体的に示す。

第 4 章では，建物内における減災対策の一例として，家庭用消火器や感震ブレーカーを各家庭に完備することによって，出火率がどの程度低減し，その結果，焼損建物数や死亡者数をどの程度低減できる可能性があるかを，シミュレーションにより検証する。

第 5 章では，木密地域内における道路閉塞率の低減やスタンドパイプの増設等の施策に対して，建物間への樹木・生垣の設置を想定し，隣接建物への延焼に要する時間を仮想的に遅延させることで，建物間延焼阻止・遅延策の有効性を評価する。具体的には，火元建物の住民による消火が失敗したケースを対象に，スタンドパイプ等の消火用資器材を用いた周辺住民の消火活動によって，隣接建物への延焼をどの程度阻止できる可能性があるかを，シミュレーションで想定ごとに推定する。さらに，延焼阻止に成功した建物の構造や建築面積，および，延焼阻止に失敗した事例の特徴を分析し，延焼阻止活動の成功要件を整理する。

第 6 章では，各種の市街地整備事業の実施効果を，大地震時の物的・人的被害低減効果の観点から定量的に評価する。具体的には，まず，過去に実施された木密地域整備事業の減災効果を評価する。また，道路拡幅や建替えが困難な狭隘道路沿いにおいて，街路内閉じ込めの危険性を低減させることを目的とする，緊急時のみ通行可能な「交差点間短縮避難経路」の整備効果を検証する。次に，防災生活道路の拡幅と，その沿道建築物の不燃化・耐震化が優先的に実施された場合，および，道路拡幅・沿道整備と建物内対策を組み合わせて実施した場合の減災効果を分析する。このとき，道路の整備順による被害低減の効果・効率の違いを比較し，限られた時間やコストを有効に活用した整備方法についても検討する。最後に，地域内の建替行動をモデル化した上で，地域内の耐震化が今後進んだ場合に期待される減災効果を，市街地性状の異なる東京都内の複数地域間で比較する。

第 7 章では，本研究の成果を総括するとともに，想定される利用場面や利用時の留意点，および，今後の課題と展開について整理する。

参考文献（第 1 章）

[1]　国土交通省：「地震時等において大規模な火災の可能性があり重点的に改善すべき密集市街地」における改善施策について，報道発表資料，2003.12,
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha03/07/071226_.html [2017.10.25 参照]
[2]　国土交通省：住生活基本計画（全国計画），2011.3,
http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_tk2_000032.html [2017.10.25 参照]
[3]　東京都都市整備局：木密地域不燃化１０年プロジェクトにおける取組,
http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/mokumitu/index.html [2017.10.25 参照]
[4]　都市再生本部：「密集市街地の緊急整備」—重点密集市街地の解消に向けた取組の一層の強化—，都市再生プロジェクト（第十二次決定），2007,
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/tiiki/toshisaisei/03project/dai12/kettei.html [2017.10.25 参照]
[5]　国土開発技術研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト　都市防火対策手法成果集成版，1983
[6]　国土交通省：国土交通省総合技術開発プロジェクト　循環型社会および安全な環境形成のための建築・都市基盤整備技術の開発　まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発（防災まちづくり総プロ）報告書，2003
[7]　東京都：地震に関する地域危険度測定調査（第 7 回），2013.9,
http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/chousa_6/home.htm [2017.10.10 参照]
[8]　東京消防庁：市街地状況調査（第 9 回），2015.3，http://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-bousaika/sigaitijoukyou/all.pdf [2017.10.25 参照]
[9]　久貝壽之・加藤孝明：道路閉塞からみた道路網防災性能の構造の解明—パーコレーション理論に基づいた地区レベル道路網の防災性能評価に関する基礎的研究（その 4）—，日本建築学会計画系論文集，No.615，pp.113-120，2007.5
[10]　市川総子・阪田知彦・吉川徹：建物倒壊および道路閉塞のモデル化による避難経路の危険度を考慮した避難地への到達可能性に関する研究，GIS—理論と応用，Vol.12，No.1，pp. 47-56，2004.
[11]　武末裕樹・鈴木勉・糸井川栄一：地震火災リスクを考慮した避難危険性の評価に関する研究，都市計画論文集，Vo. 43，No.3，pp. 25-30，2008.
[12]　野田明宏・市川真弓・荒川佳大・真野洋介：墨田区一寺言問地区における路地整備手法からみた対象エリアの実態—木造密集市街地における避難経路としての路地網の形成手法 1—，日本建築学会大会学術講演梗概集，F-1 分冊，pp. 851-852，2011.7
[13]　飯島縁・村松健児・野田明宏・真野洋介：木造密集市街地における災害時避難リスク集積エリアの抽出と避難経路沿道の環境評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，F-1

分冊，pp. 503-504, 2009.7
[14]　イブラヒム　リズカ　オクトラ・吉田聡・佐土原聡：GIS を活用した沿道街区における火災危険性から見た避難経路安全性の評価手法，地理情報システム学会講演論文集，Vol. 18，pp. 155-158，2009.10
[15]　Y. Shimura and K. Yamamoto, "Method of searching for earthquake disaster evacuation routes using multi-objective GA and GIS," J. of Geographic Information System, Vol.6, No.5, pp.492-525, 2014.10
[16]　Y. Kuwata and S. Takada, "Rescue ability for earthquake casuality during the 1995 Kobe Earthquake," Report of Research Center for Urban Safety and Security Kobe University 4, pp. 215-220, 2000
[17]　H. Murakami, T. Takemoto, and K. Sakamoto, "Study of search and rescue operations in the 1995 Hanshin-Awaji earthquake: Analysis of labor work in relation with building types," Proc. of the 12th World Conf. on Earthquake Eng., 0272, pp. 1-8, 2000
[18]　N. Iwasaki, "Role and functions of local communities in earthquake rescue, shelter administration and reconstruction," Int. J. of Japanese Sociology 9.1, pp. 111-119, 2000
[19]　S. Tadokoro, T. Takamori, K. Osuka, and S. Tsurutani, "Investigation report of the rescue problem at Hanshin-Awaji earthquake in Kobe," Intelligent Robots and Systems, 2000.(IROS 2000). Proc. 2000 IEEE/RSJ Int. Conf. on. Vol. 3. IEEE, 2000
[20]　S. Tadokoro, H. Kitano, T. Takahashi, I. Noda, H. Matsubara, et al., "The robocup-rescue project: A robotic approach to the disaster mitigation problem." Robotics and Automation, 2000. Proc.. ICRA'00. IEEE Int. Conf. on. Vol. 4. IEEE, 2000
[21]　T. Takahashi, "Agent-based disaster simulation evaluation and its probability model interpretation," Proc. of ISCRAM, 2007
[22]　K. Arai, T. X. Sang, and N. T. Uyen, "Task allocation model for rescue disabled persons in disaster area with help of volunteers," simulation, Vol. 1, No. 4, 2012
[23]　B. López, S. Suárez, and J. L. De la Rosa, "Task allocation in rescue operations using combinatorial auctions," Artificial Intelligence Research and Development, 100, pp. 233-243, 2003
[24]　T. Furuya and S. Sadohara, "Modeling and simulation of rescue activity by the local residents in the seismic disaster," ESRI Int. User Conf., 2004
[25]　A. Tani, T. Yamamura, Y. Waridashi, H. Kawamura, and A. Takizawa, "Simulation on rescue in case of earthquake disaster by multi-agent system," Proc., 13th World Conf. on Earthquake Eng., 2004
[26]　上田遼・瀬尾和大・元木健太郎：地域防災力に着目した地震火災時の災害時要援護

者救助シミュレーション—東京都杉並区阿佐ヶ谷高円寺の木造密集市街地を例として，日本建築学会計画系論文集，Vol. 72，No. 622，pp. 137-144，2007.12
[27]　日本火災学会：1995 年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書，1996.11
[28]　東京消防庁：減災目標を達成するため木造住宅密集地域において緊急に実施すべき震災対策，火災予防審議会答申（第 19 期），2011.3
[29]　東京消防庁：地震火災による人的被害の軽減方策，火災予防審議会答申（第 21 期），2015.4
[30]　金井淳子・梶秀樹：自主防災組織の初期消火活動能力評価に関する研究--大震火災における消火器による消火活動を想定したシミュレーション，日本建築学会計画系論文集，No. 552，pp. 207-213，2002.2
[31]　Y. Gohnai, A. Ohgai, and K. Watanabe, “A simulation model development of firefightingactivity by community residents against coseismic firespread using multi-agent system: As a support tool for community-based disaster prevention planning,” DDSS2008, 2008.
[32]　総務省消防庁：自主防災組織の活動体制等の整備に関する調査研究報告書，1996.3
[33]　鳥山和人・糸井川栄一：震災時における住民によるバケツリレーのための効果的な人員配分に関する研究，地域安全学会論文集，Vol. 9，pp. 209-216，2007.11
[34]　D. Helbing, I. Farkas, and T. Vicsek, “Simulating dynamical features of escape panic,” Nature 407, pp. 487-490, 2000
[35]　J. van den Berg, M. Lin, and D. Manocha, “Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation - ICRA'08, pp. 1928-1935, 2008
[36]　堀宗朗・宮嶋宙・犬飼洋平・小国健二：地震時避難行動予測のためのエージェントシミュレーション，土木学会論文集 A1，Vol. 64，No. 4，pp. 1017-1036，2008.12
[37]　K. Yasufuku, “Scalable evacuation simulation and visualization using GPU computing,” Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012. Springer International Publishing, pp. 1365-1373, 2014
[38]　安福健祐：避難行動フレームワークを用いた群集歩行モデルの比較分析と避難安全検証への適用性，日本建築学会計画系論文集，Vol. 75，No. 655，pp. 2081-2088，2010.9
[39]　T. Nishino, T. Tanaka, and S. Tsuburaya, “Development and validation of a potential-based model for city evacuation in post-earthquake fires,” Earthquake Spectra, Vol. 29, No. 3, pp. 911-936, 2013
[40]　T. Nishino, S. Tsuburaya, K. Himoto, and T. Tanaka, “A study on the estimation of the evacuation behaviors of Tokyo City residents in the Kanto Earthquake Fire,” Fire Safety Sc., Proc. of the 9TH Int. Symp., pp. 453-464, 2008
[41]　村木雄二・狩野均：マルチエージェントモデルを用いた広域災害避難シミュレーシ

ョンにおける情報伝達の有効性，情報処理学会研究報告数理モデル化と問題解決（MPS），pp. 69-72，2004.12
[42]　馬淵ゆみ・瀬尾和大・元木健太郎・上田遼：木造密集地域における地震時の広域火災に対する避難計画に関する研究，地域安全学会論文集，Vol. 10，pp. 409-415，2008.11
[43]　T.Osaragi, T. Morisawa, and T. Oki, "Simulation model of evacuation behavior following a large-scale earthquake that takes into account various attributes of residents and transient occupants," Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012, Springer International Publishing, pp. 469-484, 2014
[44]　T. Tsuchiya, T. Osaragi, and T. Oki, "Influence of information-hearsay on wide-area evacuation at a large earthquake," Proc. of the ISCRAM 2015 Conf., 2015
[45]　T. Oki and T. Osaragi, "Modeling Human Behavior of Local Residents in the Aftermath of a Large Earthquake – Wide-Area Evacuation, Rescue and Firefighting in Densely Built-Up Wooden Residential Areas," Journal of Disaster Research (Special Issue on Disaster and Big Data), Vol. 11, No. 2, pp. 188-197, 2016.3

なお，本章の内容は，筆者らの既発表論文[45]の一部を加筆・修正したものである。

第２章　大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデルの構築

2.1　シミュレーションモデルの全体像
2.2　物的被害モデル
2.3　建物内閉じ込めモデル
2.4　地域住民による救助活動モデル
2.5　地域住民による消火活動モデル
2.6　広域避難行動モデル
2.7　街路・街区内閉じ込めモデル
2.8　大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデルの構築
2.9　本章のまとめ

第 2 章　大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデルの構築

2.1　シミュレーションモデルの全体像

本論文で用いるシミュレーションモデルは，5 つのサブモデル（(a)物的被害モデル，(b)建物内閉じ込めモデル，(c)地域住民による救助活動モデル，(d)地域住民による消火活動モデル，(e)避難行動モデル）を統合した，マルチエージェントベース・シミュレーション（MAS）モデルである（図 2.1.1）。すなわち，物的被害（建物倒壊・道路閉塞・火災延焼）と，多様な振る舞いをする都市内滞留者との間の相互作用を考慮しながら，建物・道路単位の物的・人的被害を推定することが可能である。

火災延焼等の物的被害や都市内滞留者の分布・状態・行動は，発災後，時々刻々と変化する。そこで，マルチエージェント・シミュレーションでは，一般的に，シミュレーション対象地区内の物的被害や都市内滞留者の分布・状態・行動を，一定の時間（本論文では 30 秒）間隔で更新する処理（ステップ処理）を行う。この時間間隔が短いほど，相互作用をきめ細かく考慮できる反面，計算時間は増大することになる。

次節以降で，各サブモデルの内容について詳述する。

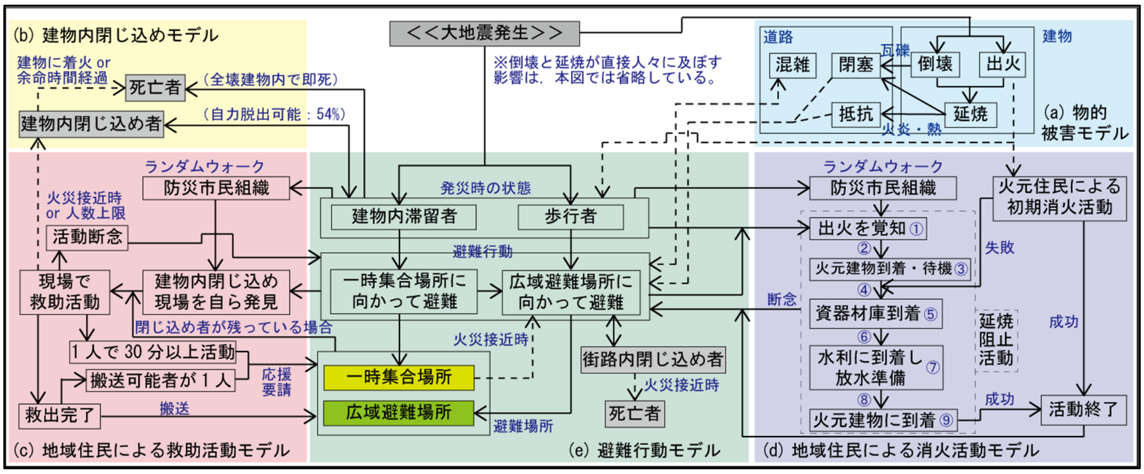


図 2.1.1　大地震時の物的被害・人間行動シミュレーションモデルの全体像[1,2][1]

---

1 救助活動と消火活動に優先度の違いは設定せず，先に建物内閉じ込め者を発見した場合には救助活動に参加し，先に出火を覚知した場合には消火活動に参加するようにモデル化している（同時に覚知した場合には，選択確率を 50%ずつと仮定して乱数で選択）。また，救助活動中に消火活動に転じること（また，その逆）はないものとしている。

2 地域住民自身が行う救助・消火活動（自助・共助）の効果をわかりやすくすること，および，大地震発生当日には公設機関（消防隊，消防団など）による救援・消防活動が十分に行えない可能性があること等を勘案し，本研究のシミュレーションモデルには，公設機関による活動を組み込んでいない。

2.2　物的被害モデル

物的被害モデルは，大地震発生直後の建物倒壊，出火・延焼，倒壊建物の瓦礫や火災による道路閉塞で構成される。本論文では，物的被害のモデル化に関する既往研究が整理されている文献[2]を参考に，多くの研究成果の中からモデルを選定し，それらを統合することで，一つの「物的被害モデル」を構築した。

物的被害の程度や分布の違いは，シミュレーション結果全体に大きな影響を及ぼす。そこで，シミュレーションに入力する物的被害データは，共通の地震動や発災時刻・季節・気象条件のもと，乱数シードの異なる複数ケース（例えば 100 ケース）を作成する。例えば，冬季（晴れ・北風 8m/sec）の平日 18 時に東京湾北部地震（M7.3）が発生したことを想定したとすると，各建物の全壊確率・出火確率は後述のように一意に定まるが，実際に各建物が全壊・出火するかどうかは，乱数を用いて確率的に設定する。すなわち，用いる乱数を変えることで，物的被害の空間分布が異なる被害データを得ることができる。このようにして，出来るだけ多くの異なる物的被害データを作成し，シミュレーションを実行することで，物的・人的被害のリスクを確率論的に議論する。

物的被害データの作成手順を図 2.2.1 に示してある。特に主要な概念について，以下で具体的に説明する。

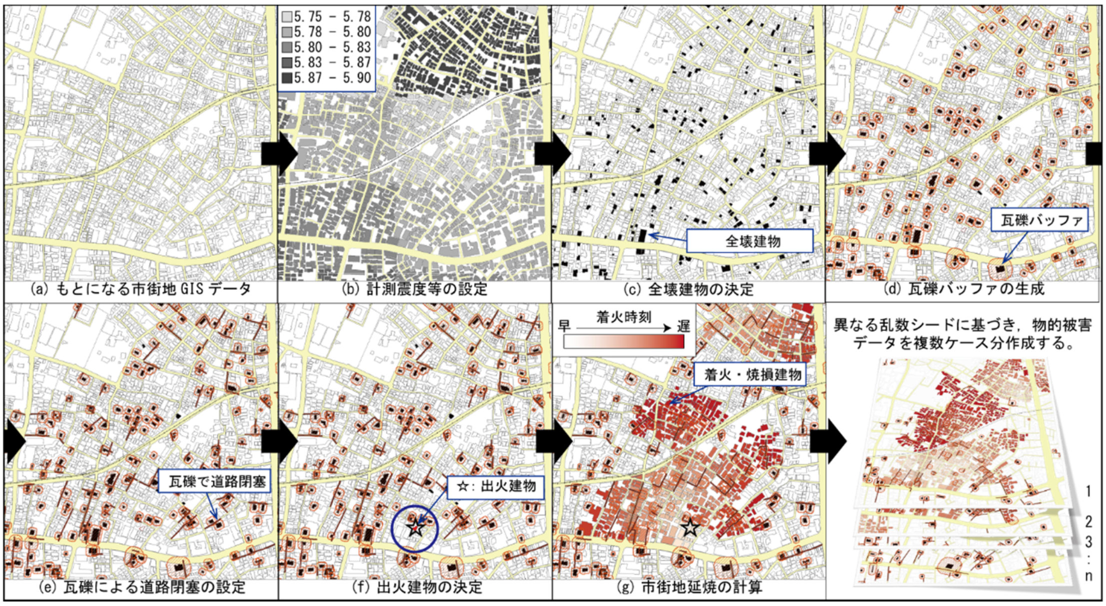


図 2.2.1　物的被害データの作成手順[3]

2.2.1　建物倒壊

各建物の実構造（木造/RC 造/S 造/軽量 S 造），建築年代，地表面応答（地表面最大速度 PGV/地震最大加速度 PGA/計測震度）に関するデータに基づき，建物被害関数（フラジリティカーブ，全壊率曲線）を用いて，建物ごとに全壊建物を推定する[3]。これまでに，様々な建物被害関数（[4 - 7]等）が提案されてきたが，本論文では，比較的最近建てられた木造建物の耐震性能を考慮でき，かつ，非木造建物のうち RC 造と S 造を区別可能である，文献[6]で提案されている関数を用いる（図 2.2.2）。

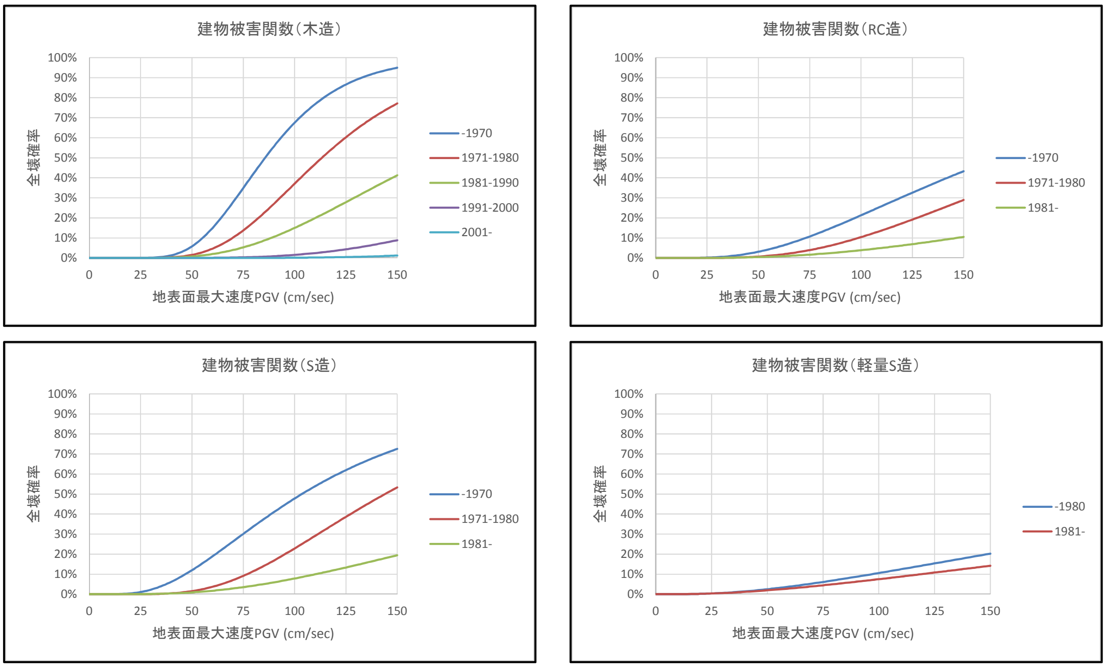


図 2.2.2　実構造別・建築年代別の建物被害関数
※「地震に関する地域危険度測定調査報告書（第 7 回）」[6]の
「第 2 章　建物倒壊危険度」をもとに筆者が作成。

地表面応答データは，詳細な地形・地盤データや震源データを用いて作成する場合（東京都[5]等）もあるが，本論文では，地形・地盤や不確実性の高い震源の影響を除外し，市街地整備に関わる地域の空間特性（旧耐震基準建物や木造建物の割合等）だけが，物的被害の量や分布の推定結果に及ぼす影響を評価するため，各建物に一律の地表面応答を仮定する。

[3] 各建物被害関数は，「各地域内で観測された，全壊建物数の建物総数に対する割合（全壊率）」をもとに導出されている。ここで「各地域内では，すべての地点で計測震度は等しく，（築年次が同じであれば）すべての建物の耐震性能は等しく，全壊したか否かは確率的事象であった」と仮定すれば，ある計測震度のもとで観測された全壊建物数は，ある確率分布に従って生起した事象であると考えることができる。そこで本論文では，全壊率曲線の値を，個々の建物の全壊確率の推定値と見なして分析している。

なお，各建物の実構造や建築年代に関する GIS データは，一般に入手困難である場合が多い。数少ない例として，建築確認申請データに基づき，東京都世田谷区が独自に GIS データ（以下，世田谷データ）を整備している。また，東京都内であれば，各建物の建築面積や階数，用途，防火構造（耐火造/準耐火造/防火木造/裸木造）に関する情報を含んだ詳細な GIS データ（東京都都市計画 GIS データ，以下，東京都データ）が整備されている。これは，5 年に一度行われる土地・建物利用現況調査（最新版は，2011 年[区部]および 2012 年[市部]）に基づいている。そこで本論文では，次のように各建物の実構造と建築年代を確率的に推定している（被害ケースごとに，異なる実構造・建築年代の推定結果を用いている）。

①実構造の推定：世田谷データから算出可能な防火構造別・延床面積別の実構造構成比をもとに，東京都データの各建物へと確率的に実構造を設定している。
②建築年次の推定：文献[6]のデータにおける，東京都世田谷区内全 277 町丁目の集計値に基づく，実構造別・階数別にみた各建築年代の建物構成比を用いて，確率的に各建物の建築年代を設定している。

2.2.2　瓦礫による道路閉塞

まず，全壊建物の周囲には，その建物の高さと等しい幅の瓦礫が飛散する[8]という安全側の仮定のもとで，瓦礫の幅と長さを算出し，瓦礫バッファを発生させる（図 2.2.1(d)）。これに基づき，閉塞候補道路群（瓦礫バッファによって，道路面ポリゴンが完全に分断される道路中心線リンクの集合）を抽出する。

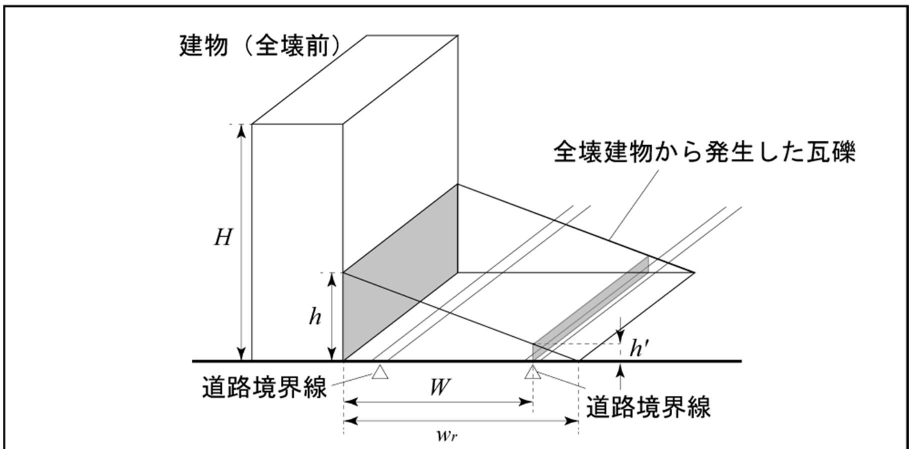
次に，瓦礫飛散の非一様性を考慮可能なシミュレーション手法[9]を用いて，分析対象地域内の閉塞道路割合を算出し，この割合に合致するよう，閉塞候補道路群からランダムに抽出した道路を「閉塞」と見なしている（図 2.2.1(e)）。具体的には，沿道建物 i が幅員 W の前面道路を閉塞させる確率 $f_i(W)$は，以下の式で表される。

$$f_i(W) = D_C \times (1.1753A - 0.0514) \times \exp\left[\frac{-W}{2.58P_{area}^{0.379} + 0.210F^{2.23} + 4.90A^{12}}\right]$$

ここで，Dc は，建物 i が倒壊するときに 1，非倒壊のときに 0 をとる変数，A は建蔽率（建物ごとの敷地情報が得られない場合には，建物 i が含まれるネット街区単位の建蔽率で代用），P_{area} は地区内の平均倒壊建物割合（例えば，建物 i が含まれるネット街区単位の平均倒壊建物割合），F は建物 i の階数，W は沿道建物のセットバックを考慮した道路幅員[m]である。

また，間渕らの研究成果[10]に基づき，全壊建物の瓦礫幅から（建物とは反対側の）道路

境界線上の瓦礫高さを推定している（図 2.2.3）。ここで算出した瓦礫高さは，地域住民が道路上の瓦礫を乗り越えて移動できるか否かの判定に使用する（後述）。ただし，全壊建物から道路に飛散する瓦礫によって，当該道路を通行中の歩行者が死亡・負傷することはモデル化していない。



①地震後の道路上の瓦礫幅w_r[m]と瓦礫高さh[m]の間には次の関係が成り立つ[10]。

$$h = 0.32w_r + 0.853 \quad \cdots \text{(i)}$$

②建物前面縁から（反対側）道路境界線までの距離をW[m]，
（反対側）道路境界線上の瓦礫高さをh'[m]とすると，以下の関係が成立する。

$$h' : h = (w_r - W) : w_r \quad \cdots \text{(ii)}$$

③ここで，w_rは建物高さH[m]に等しいと仮定すると，式(i)(ii)より，

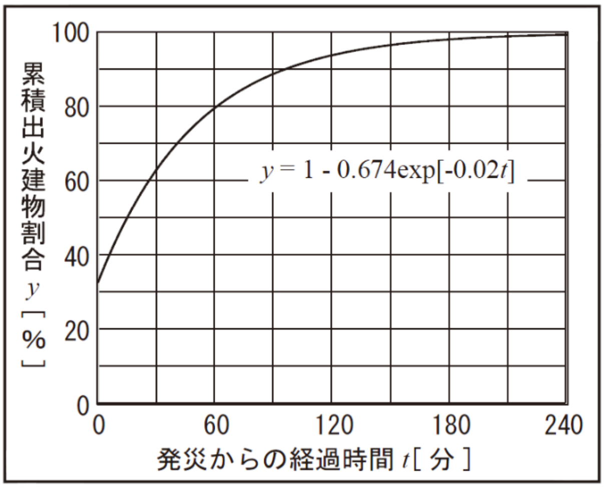
$$h' = (0.32H + 0.853)(1 - W/H)$$

図 2.2.3　全壊建物から発生する瓦礫高さのモデル化

2.2.3　出火・延焼

火元建物は，東京消防庁[11, 12]の建物用途別出火率に基づいてランダムに決定し，出火時刻は，発災から一定時間経過後の通電火災も考慮した累積出火関数[4][13]に基づき，確率的に設定する（図2.2.4）。また，延焼速度式[14]と延焼限界距離[9]に基づき，延焼シミュレーションを実行することで，発災後の市街地延焼を表現する。

[4] 図 2.2.4 の累積出火関数は，兵庫県南部地震に関する兵庫県及び大阪府の 23 の消防本部からの資料を基に，発災の 5 時 46 分から 8 時 46 分までの出火件数を時間経過の累積で表し，指数近似式を算定したものである[13]。本論文では，この関数は発災時刻に依存しないと考えている。



※「累積出火建物割合 y [%]」は，分析対象地域内における全ての火元建物の数を分母として，発災から t [分]が経過した時点で既に出火している建物の割合と定義される。

図2.2.4　出火時刻の設定方法[13]

2.2.4　火災による道路閉塞

道路閉塞を引き起こす要因には，倒壊建物から発生する瓦礫の他に，炎上中の建物から発生する火炎や熱が考えられる。これまでに，火災建物から発生する輻射熱量や気流温度に関する，多くの優れた既往研究が行われてきた。しかし，市街地の様々な要素や複雑な火災延焼性状を考慮しながら，歩行者が受ける熱量を道路リンク 1 本単位で計算し，その値をもとに道路の通行可否を判定することは容易ではない。

そこで本論文では，岩見ら[15]のモデル（避難者が受ける放射熱量を用いて沿道建物のタイプ別・道路幅員別の避難可能時間を算出するモデル）を参考に，炎上中の建物の前面道路が閉塞するまでの時間と，鎮火後に再び通行可能となる時間を設定する（表 2.2.1）。ここでは，一定幅員（10m）以下の道路では火災による輻射熱の影響を受けて通行が不能になるという仮定に基づき，道路中心線の両側に片側 5m の幅で発生させたバッファと重なる建物を，着火時に道路を閉塞させる建物と見なしている（図 2.2.5）。

表 2.2.1　火災による道路閉塞の表現方法

防火構造種別		耐火造	準耐火造	防火木造	裸木造
建物着火から前面道路閉塞までの時間[分]	$w \geqq 4$	30		8	5
	$w < 4$	$10+5w$			
鎮火から再度通行可能になるまでの時間[分]		60	110	70	

※w は建物前面道路の幅員[m]

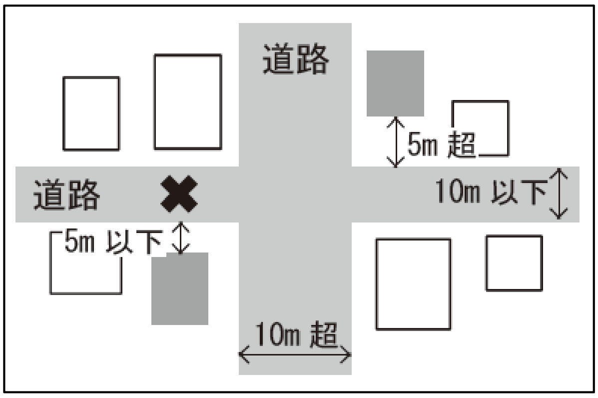


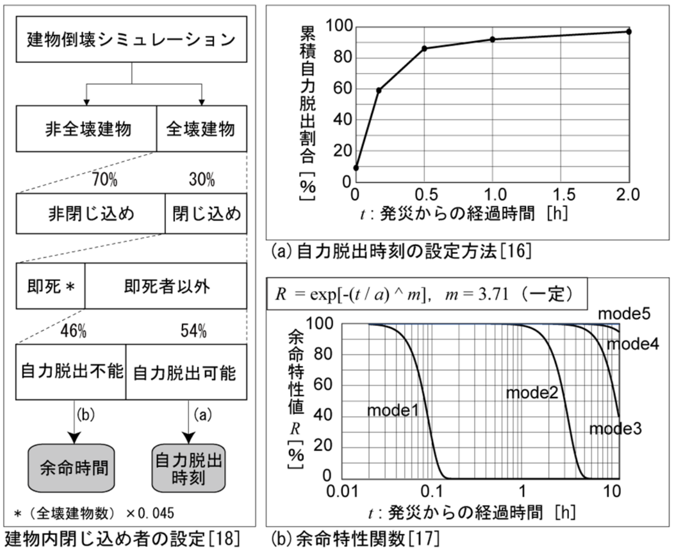
図 2.2.5　火災による道路閉塞のモデル化[5]

2.3　建物内閉じ込めモデル

図 2.3.1 に示す手順に従い，全壊建物内の滞留者の一部を「建物内閉じ込め者」と見なす。また，既往研究[16, 17]に基づき，自力脱出可能者には脱出時刻，自力脱出不能者には受傷度と死亡時刻を，それぞれ確率的に設定する。

基本的に，自力脱出可能者は，あらかじめ設定した自力脱出時刻に達した時点で避難を開始し，自力脱出不能者は，受傷度別の余命特性関数[17]に基づく「余命時間」に達した時点で死亡すると考えた（図 2.3.2(a)）。閉じ込め建物において救出活動が実施された場合には，救助活動参加者（1 現場あたり最大 5 人と仮定）の延べ活動時間が 222 分[16]に達した時点で，救出・搬送される（図 2.3.2(b)）。ただし，救出活動中に自力で脱出してしまう場合や，救出活動が間に合わず，死亡後に搬送される場合もある（図 2.3.2(c)）。また，閉じ込められている建物に火災が延焼した場合には，その時点で「死亡」と判断する（図 2.3.2(d)）。

[5] 建物火災や市街地延焼が人々の避難に与える影響について分析することは，理論的にも実験上も困難である。しかし，火災までの距離が近くなるほど火炎や輻射熱の影響が大きくなり，人々は出来るだけ火災を避けて避難するものと考えられる。そこで，本論文では試行的に，建物がセットバックしている場合や広幅員道路では火炎の影響を受けにくいので，幅員（10m）と炎上中の建物からの距離（5m 以下）によって道路閉塞を定義した。詳細な議論は今後の検討課題としたい。



(c) 余命特性関数における死因 mode 別のパラメータ値と存在比[17]

死因 mode			受傷度	パラメータ a	存在比（神戸市）
1	窒息群	窒息	死 / 瀕死	0.092	2%
2	外傷群	頭・胸部損傷	重傷	3.324	11%
3		腹部損傷	中傷	12.3	23%
4		四肢損傷	軽傷	26.59	30%
5		無傷（＝健常）	被害なし	66.48	34%

図 2.3.1　建物内閉じ込め者の設定方法[18]および
自力脱出時刻と余命時間の設定方法[16, 17]

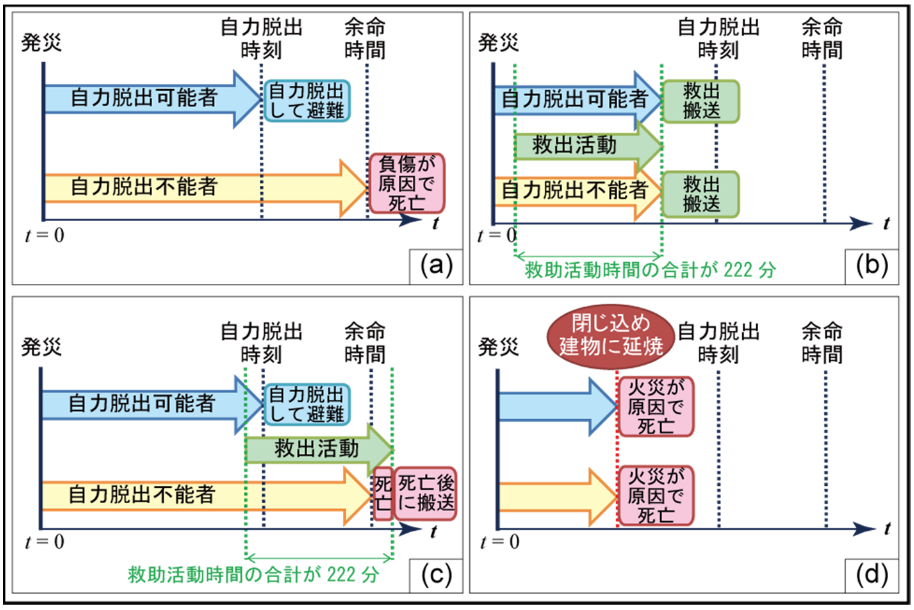


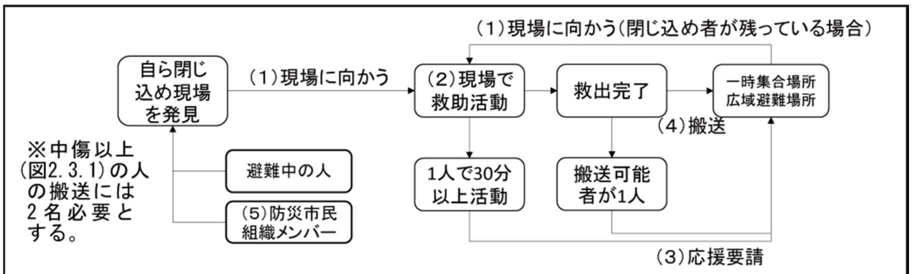
図 2.3.2　建物内閉じ込め者の脱出・救出・死亡

2.4　地域住民による救助活動モデル

本論文における「救助活動」とは，(1)建物内閉じ込め現場に向かう行動，(2)現場での救出活動，(3)応援要請，(4)救出者の避難場所への搬送，(5)防災市民組織メンバーが建物内閉じ込め者を探す行動の 5 つを指し，(1)～(5)の状態にある人々を，以下「救助活動参加者」と呼ぶ（図 2.4.1）。

防災市民組織のメンバー（地域住民全体の 1.7%[6]の人々をランダムに指定）は，発災から 15 分以内に行動を開始し，建物内閉じ込め者や出火現場を探しながら，地域内を巡回（ランダムウォーク）する。それ以外の人が応援要請を受けたとき，救助活動に参加するかどうかは，救助活動参加率（図 2.4.2）に基づいて決定する。ただし，避難中に，一定距離（20m）以内に建物内閉じ込め者を発見した場合には，必ず救助に参加するものとした。このとき，体力・運動能力調査[19]の結果を参考に，一部の高齢者は閉じ込め者の救助活動には参加できないと考えた（表 2.4.1）。

一旦救助活動に参加した者は，①救出者を避難場所に搬送し終えて，元の現場に他の閉じ込め者がいない場合，または，②救出活動中の現場から一定距離（30m）以内に火災が接近した場合に，救助活動を終了するものとした。ただし，②で避難を再開した際，避難経路上で別の建物内閉じ込め者を見つけた場合には，再度救助活動を行うこととした。



フェーズの説明（【参考】文献 [18]）	
(1)	建物内閉じ込め現場に向かっている人
(2)	建物内閉じ込め現場で救助活動中の人（1 現場につき最大 5 名と仮定）
(3)	応援要請のため一時集合場所・広域避難場所を目指している人
(4)	救出した建物内閉じ込め者を一時集合場所・広域避難場所へ搬送中の人
(5)	建物内閉じ込め現場を探しながら移動し続ける人（防災市民組織メンバー）

図 2.4.1　救助活動参加者のフェーズと行動フロー[18]

6 東京都 23 区の夜間人口に占める防災市民組織隊員数[20]の割合の平均値に基づき算出した。

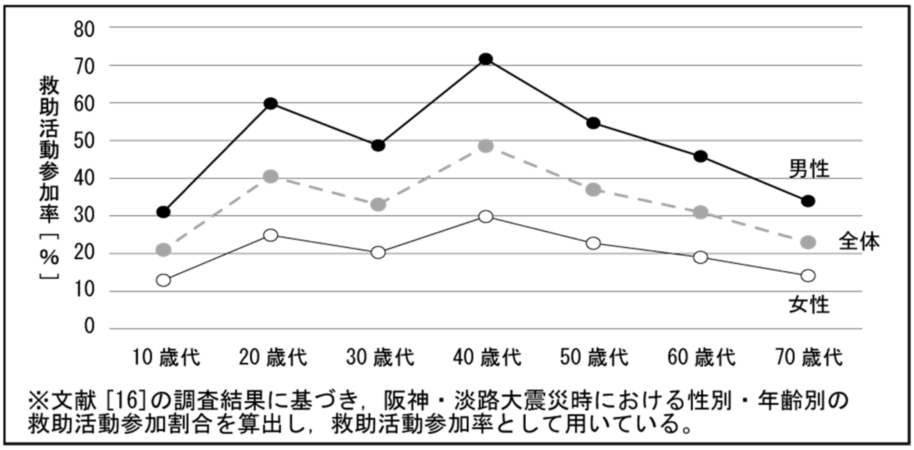


図 2.4.2　応援要請を受けた場合の救助活動参加率（性別・年齢別）[7][16]

表 2.4.1　高齢者の閉じ込め者救助可否のモデル化[19]

性別・年齢		閉じ込め救助活動参加不能	
男性	65-69	14.0%	H25 年度体力・運動能力調査 [19] を参考に，荷物を 10m 運ぶことが「できない」高齢者と「5kg 程度」しか運べない高齢者は，広域避難中に建物内閉じ込め現場に遭遇した場合でも，救助活動には参加できないものと仮定する。
	70-74	16.2%	
	75-79	21.2%	
女性	65-69	43.7%	
	70-74	49.0%	
	75-79	61.1%	

2.5　地域住民による消火活動モデル

火元建物内に防災行動可能者がいる場合には，出火から 1 分経過した後に「火元初期消火活動」[8]が行われるものとする。文献[21]によれば，計測震度と家具転倒率・防災行動可能率との関係は，図 2.5.1 のように表される（転倒防止対策無しの場合）。ここでは簡単のため，震度 6 弱と震度 6 強の間（計測震度 I＝5.5～6.5）の非全壊建物の防災行動可能率 P_a を，次式の線形モデル（図 2.5.1 の近似直線）で近似する。

$$P_a = -0.506I + 3.82$$

[7] 80 代以上および 10 歳未満は救助活動を行うことができないものとしている（救助活動参加率＝0%）。

[8] 家庭用消火器は，地域全体の 68.1%の建物に備わるものとし[21]，乱数で建物を選択している。住宅用火災警報器，住民の防災訓練参加経験，汲み置き風呂水や簡易消火器具の影響は考慮していない。また，延焼遅延効果を考慮した上で，建物内延焼の様子を精緻にモデル化することは困難であることから，2.5 節に示す簡便な方法で火元初期消火の成否を判定するにとどめた。

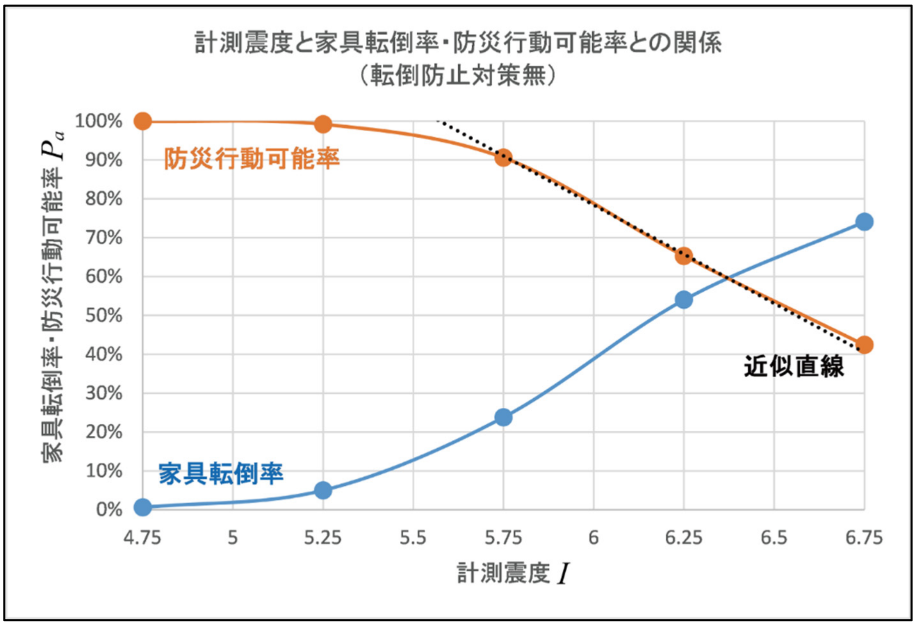


図 2.5.1　計測震度と家具転倒率・防災行動可能率との関係（転倒防止対策無）
※文献[21]に基づき，筆者が独自に作成。

なお，全壊建物の防災行動可能率は，計測震度によらず 7%とされているが，これは閉じ込め者（全壊建物内にいる人々のうち 30%）を含めた数字である。そこで，閉じ込め者の防災行動可能率を 0%とすると，非閉じ込め者の防災行動可能率 P_a'は，

$$0.3 \times 0 + (1 - 0.3) \times P_a' = 0.07$$

$$\therefore \quad P_a' = 10\ [\%]$$

となる。

火元初期消火活動の成否は家庭用消火器の有無のみにより決まるものとする。消火に失敗した場合には，出火から 2 分 30 秒後に「延焼阻止活動」[9]段階に遷移するものと考えた。

延焼阻止活動の一連の流れを図 2.5.2 に示してある。(1)「延焼阻止活動」段階に達した時点で，火元建物の重心点から一定距離（30m）以内にいる防災行動可能者は，火災を覚知し，(2)順次，火元建物に向かう。(3)火元建物への到着・待機者数が 4 名以上になった段階で，(4)4 名が資器材庫に向かい，(5)資器材庫での搬送準備（取り出しに要する時間：1 分[21]）が完了後，(6)資器材を持って火元建物の最寄りの（ホースが届く範囲内の）消防水利へ移

[9] 地域住民全員が資器材庫と消防水利の位置を全て把握している状況を想定している。このとき，断水の影響は考えず，消防水利は 100%使用可能としている。バケツリレーや街頭消火器による延焼阻止活動の存在は考慮していない。1 箇所の資器材庫には，D 級軽可搬消防ポンプまたはスタンドパイプのいずれか 1 台のみが存在するものとし，活動の成否にかかわらず，利用した資器材は資器材庫に返却しないものとした。火元建物以外の建物（延焼して着火した建物）に対しては，火災気流・輻射熱量の影響が大きいと考え，地域住民による消火活動は行われないものとした。放水活動を中止した後は，延焼の進行が再開される。また，延焼速度と放水量，必要放水量，焼損面積等を用いた延焼阻止活動の成否判定は，複雑でモデル化が困難であるため， 2.5 節に示す簡易な方法を採用した。

動する。さらに，(7)消防水利での放水準備（D 級軽可搬消防ポンプ：3 分，スタンドパイプ：2 分[21]）が完了すると，(8)ホースを持って火元建物へ向かう。このとき，(9)隣接建物へ延焼する前に火元建物に到着（放水を開始）できれば，延焼はそれ以上進まず，そのまま放水を 30 分間継続できれば，火元建物は鎮火し「延焼阻止成功」と考えた。

一方，①道路閉塞の影響等で目的地に到達できない場合，②他の火元建物からの延焼が接近した場合，③放水開始よりも前に隣接建物に延焼した場合については，「延焼阻止失敗」と考え，消火活動参加者は，一時集合場所に向けて直ちに避難するものとした。

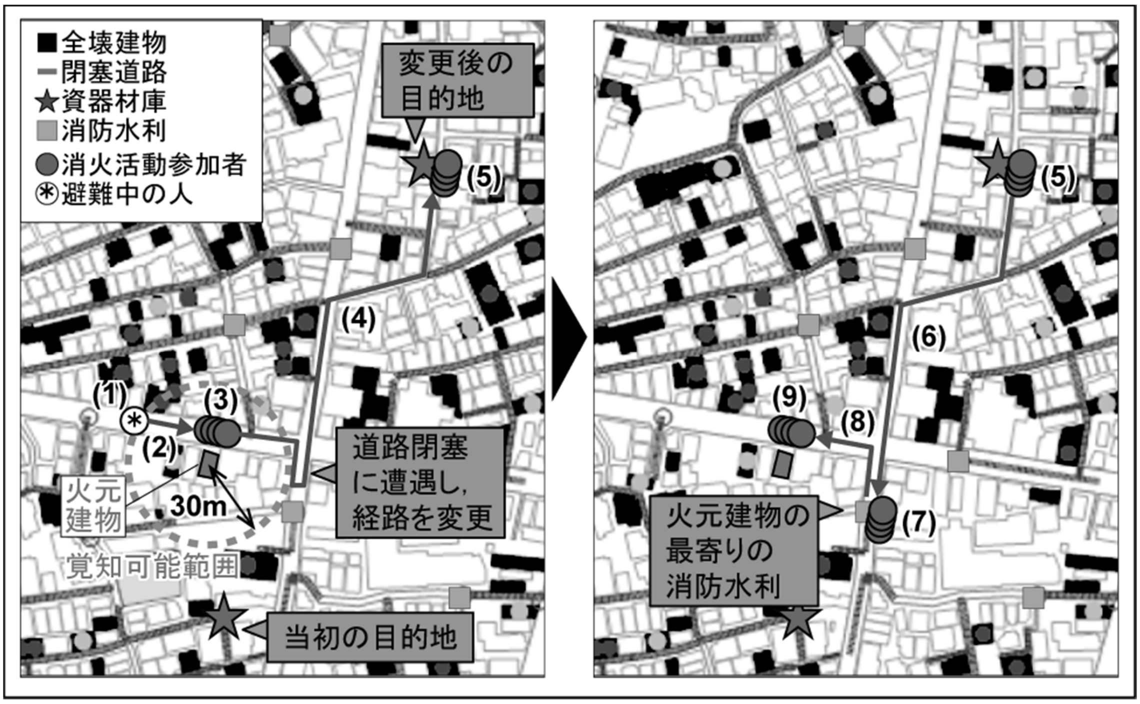


図 2.5.2　延焼阻止活動の流れ

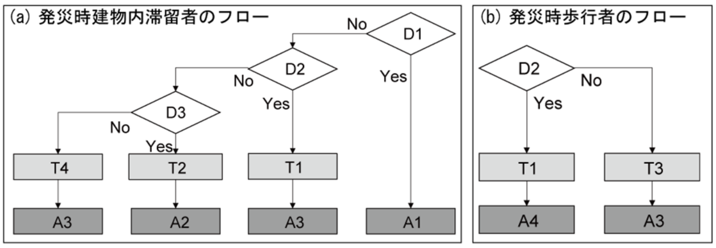
2.6　広域避難行動モデル

本論文では，大地震発生後に，建物の倒壊や大規模な市街地延焼等の二次被害から身を守ることを目的として，地域住民が一時集合場所（小中学校，街区公園，寺社等）や広域避難場所（大学キャンパス，総合公園，河川敷等）に避難する行動を「避難行動」と呼ぶ。関東大震災（1923 年）のように，地域で甚大な被害が発生した場合を想定して，死亡者・閉じ込め者以外の全員が，最終的に一時集合場所または広域避難場所を目指すものとし，避難完了後は，救助活動の応援要請または火災接近による再避難の必要がない限り，その場にとどまるものとする。

本論文の広域避難行動モデルでは，以下の視点から避難者の行動をモデル化している。

(1) **発災時の滞留場所**：平成20年東京都市圏パーソントリップ調査データ（PTデータ）に基づき，地震発生時における都市内滞留者の空間分布を推定する。PTデータを用いることで，任意の時刻における滞留者の位置を，建物・道路等のミクロな空間スケールで，性別・年齢・滞留/移動目的等の属性情報とともに推定できる[22–24]。本論文では，広幅員道路に囲まれたエリア内における建物内滞留者（自宅滞在者・自宅以外の施設滞在者）と歩行者のみを対象とし，鉄道や自動車で移動中の人々，および，広幅員道路を越えたエリア外からの流入者や徒歩帰宅者は，考慮しないこととする。

(2) **行動開始時点**：図2.6.1に，建物内滞留者と歩行者の行動開始のタイミング（T1～T4）と行動（A1～A4）の選択フローを示してある。発災後，歩行者は即座に避難を開始し（T3），建物内滞留者はPoisson分布[10]（λ = 3.35，関東大震災時の調査結果[25]に基づき推定，図2.6.2）に従い分散して避難を開始する（T4）。ただし，避難未開始時でも火災が150m以内に接近した場合には，その時点から5分以内に避難を開始するものとする（T1）。



【行動選択にかかわる因子】
D1：建物内閉じ込め者か　D2：150m 以内に火災が接近しているか
D3：防災市民組織のメンバーか
【行動開始のタイミング】
T1：5 分以内　T2：15 分以内　T3：即座　T4：Poisson 分布（λ=3.35）に従う
【行動の種類】
A1：行動を開始しない　A2：救助活動（建物内閉じ込め現場を探す）
A3：一時集合場所に向かって避難　A4：広域避難場所に向かって避難
※一度「Poisson 分布に従って行動を開始」を選択したとしても，実際の行動開始よりも前に火災が接近した場合には，行動を選択し直し，5 分以内に行動を開始する。

図 2.6.1　行動開始のタイミングと行動選択フロー

[10] 携帯電話などの情報機器や防災無線といった避難関連情報，さらに，避難者の年齢や世帯構成によって，避難開始のタイミングは大きく異なることが予想される。しかし，現時点において，これらの影響を加味して避難開始のタイミングをモデル化することは困難であることから，本論文では，入手可能であった文献[25]に記載されているデータに基づき，このデータへの近似性の高い Poisson 分布モデルを採用することとした。

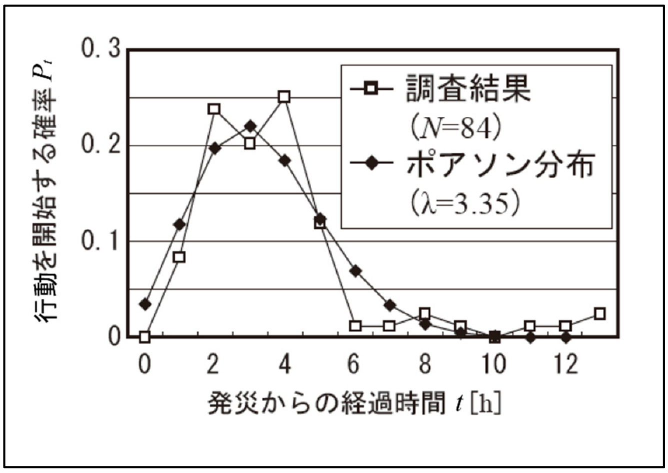


図 2.6.2　行動開始のタイミングの設定に用いる Poisson 分布[30]

(3)　**二段階避難**：地域住民は「二段階避難[26]」と呼ばれる避難方法に従うものとした。すなわち，まず最寄りの一時集合場所に向かって避難を試み（A3），一時集合場所到着後に火災が150m以内に接近した場合，または，道路閉塞の影響で一時集合場所に向かうことができない場合に，広域避難場所に向かって避難する（A4）ものと考えた。

(4)　**歩行経路**：地域住民は，行動開始時点では地域の道路閉塞状況に関する情報を一切有さない状態で，後述する移動コストが最小となる目的地・経路を選択（Dijkstra法を用いて算出）するものとする。移動中には，通過した交差点に接続する道路リンクの閉塞状況を逐次記憶していくようにモデル化した。交差点到達時に，次に通行する予定であった道路リンクが閉塞している場合，その時点で把握している道路閉塞・火災延焼状況[11]に基づき，その場所からの経路を再探索する。ただし，瓦礫による閉塞の場合は，（建物とは反対側の）道路境界線上の瓦礫高さ（2.2.3節参照）が2m未満であれば，その瓦礫を乗り越えて通行できるものと仮定した。このとき，体力・運動能力調査[19]の結果を用いて，一部の高齢者については，乗り越え可能な瓦礫高さを2mよりも低く設定している（表2.6.1）。なお，瓦礫の乗り越え可否に関する調査・実験はこれまで困難であったが，近年，VR（Virtual Reality，仮想現実）等の技術の普及に伴い，被験者実験を行うことが可能になりつつある。例えば，榊・渡邉[27]は，大地震時発生時の道路閉塞状況下において，歩行者が「通行できる」と判断する「瓦礫間の距離」および「瓦礫の高さ」を，VRを用いた被験者実験で明らかにすることを試みている。今後，こうした研究成果を用いることで，より現実に即した瓦礫乗り越え行動を記述可能となることが期待される。

[11] 道路閉塞は，それまでに通過した交差点に接続する道路リンクの状況のみを把握しているのに対し，火災延焼は，炎や煙等により，自身の周囲 200m 以内の状況を常に完全に把握しているものと想定した。

表 2.6.1　高齢者の瓦礫乗り越えのモデル化[19]

性別・年齢		乗越可能な瓦礫高さの上限 0.5m	1.0m	
男性	65-69	1.4%	29.7%	H25 年度体力・運動能力調査 [19] を参考に，階段を「手すりや壁につかまらないと昇れない」高齢者は 0.5m，「ゆっくりなら，手すりや壁につかまらずに昇れる」高齢者は 1.0m の瓦礫までしか乗り越え可能でないと仮定する。
	70-74	2.9%	35.6%	
	75-79	7.6%	44.3%	
女性	65-69	5.0%	35.1%	
	70-74	4.8%	41.0%	
	75-79	10.1%	53.9%	

(5) **移動コスト・通行速度**：道路リンク長さを，通行者の属性・瓦礫の有無を考慮した通行速度[12]（図2.6.3）で除すことで得られる通行時間に，火災建物からの直線距離に基づく抵抗（図2.6.4）を乗じた値を，各道路リンクの通行コストと定義する。目的地までの移動コストは，通行する各道路リンクの通行コストの総和である。基準となる通行速度は，Willis et al.の研究成果[28]に基づき，性別・年齢階級ごとに分布が異なるものと考えている。瓦礫を乗り越えている最中の通行速度は，ここでは一律10m/分とした。この移動コストに基づき経路探索を行うことで，瓦礫や火災の影響を出来るだけ避けた各個人の移動経路を推定できる。道路混雑度は，通行コスト算出時には考慮せず（c=1），道路リンク通行時には通行速度に影響を及ぼすものと考えた（図2.6.3）。

<標準通行速度 s_0 の正規分布のパラメータ>

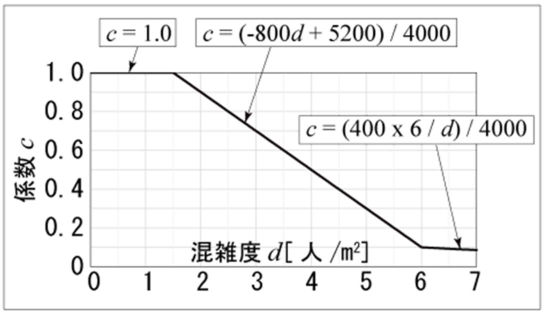
平均値 [m/分]	0-15	16-25	26-50	51-64	65-	平均
女性	91.4	92.6	87.9	82.5	69.6	84.7
男性	98.1	99.4	94.4	88.6	74.8	91.8
平均	94.8	96.1	91.1	85.5	71.9	88.2

（年齢区分 [歳]）

標準偏差 [m/分]	0-15	16-25	26-50	51-64	65-	平均
女性	26.5	19.1	14.6	14.4	15.2	17.2
男性	28.4	20.5	15.6	15.4	16.3	18.7
平均	27.4	19.8	15.1	14.9	15.7	17.9

（年齢区分 [歳]）

<混雑度 d[人/m2] と係数 c の関係>



Step①: 個々人の標準通行速度 s_0 を左上の表に基づき乱数で設定する。
Step②: 混雑度 d[人/m2] に応じた係数 c を右上の図に従って求める。
Step③: 混雑度を考慮した通行速度 s[m/分] を算出する（$s=s_0\times c$）。
Step④: 瓦礫乗り越え時の通行速度 s'は，本稿では一律 s'=10[m/分] と仮定する。
Step⑤: s と s'の遅い方を用いる。

※標準通行速度 s_0：混雑や瓦礫の影響のない状況での通行速度。

図 2.6.3　属性・混雑度・瓦礫の有無を考慮した通行速度の設定方法

12 救出者搬送時の移動速度に関して，先行研究において実験が試みられている。しかし，実際の大地震時においては，延焼火災の拡大状況（切迫性），負傷の程度（緊急度），搬送に携わる人の属性，路上の状況など，複数の要因が移動速度に影響を及ぼす可能性がある。そこで本稿では，簡単のため，搬送に携わる人の中から無作為に１名の代表者を抽出した上で，代表者の属性と道路混雑度，および，瓦礫の有無を考慮し，図 2.6.3 に示した方法で搬送時の移動速度を設定している。

$r_f = \exp[kD+C]$,
ただし
$k = -(\ln r_0)/D_0$
$C = \ln r_0$
r_0：火災からの距離が0mのときの抵抗
D_0：抵抗の値が1となる最小の距離 [m]
D：火災建物からの距離 [m]
r_f：歩行者が火災から受ける抵抗

Dijkstra 法を用いて歩行者の選択経路を推定する際，道路リンクの通行コストを，通行に要する時間に，火災建物から受ける抵抗を乗じた値と定義する。

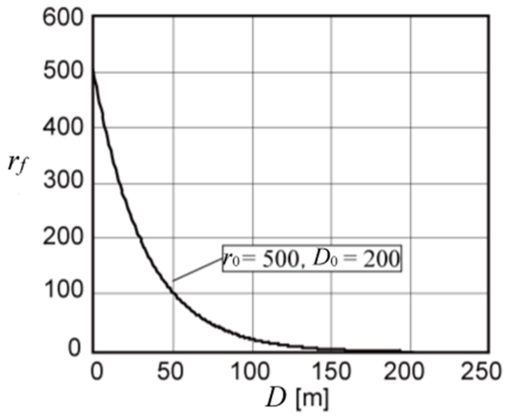


図 2.6.4　火災建物から受ける抵抗のモデル化[13][30]

2.7　街路・街区内閉じ込めモデル

街路あるいは街区内に閉じ込められた人々は，移動可能な道路リンクが存在する間は避難行動を続けるが，行き場を失ったことに気づいた時点（交差点到達時に，接続する道路が全て瓦礫・火災により通行不能になった時点）で移動をやめ，その場にとどまるものとした。さらに，この地点の 30m 以内に火災が迫り，延焼が継続する場合には，当該避難者は死亡すると考えた。なお，道路上の瓦礫が除去されることは考慮していない。

2.8　大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデルの構築

前節までに述べた各モデルを統合することで，大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデルを構築した。本シミュレーションモデルは，第 1 章において，木密地域における防災性能評価や人的被害推計，整備事業の評価，防災計画の策定等を行う上で

[13] 図 2.6.4 に示す火災抵抗モデルは，炎上中の建物から受ける抵抗 r_f（倍）と，炎上中の建物からの距離 D（m）との間に成立する性質を考慮し，以下の手順で定式化した。

① $\Delta r_f \,/\, \Delta D < 0$　（炎上中の建物から遠ざかるほど，抵抗は減少する。）
② $|\Delta r_f| \propto k_1|\Delta D|$　（抵抗の変化量は，炎上中の建物からの距離の変化量に比例する。）
③ $|\Delta r_f| \propto k_2 r_f$　（抵抗が大きくなるほど，抵抗はより大きく変化する。）

①，②，③より，$\Delta r_f = k \cdot \Delta D \cdot r_f$　を得る。この微分方程式を解き，$r_f = \exp[kD + C]$　を得る（ただし，k_1，k_2，k，C は定数）。
本モデルでは，歩行者は自身の周囲 200m 以内の火災延焼状況を常に把握して抵抗感を感じ，炎上中の建物から受ける抵抗は，距離に応じて指数関数的に減少する（仮に，0m のとき 500 倍，50m のとき 100 倍を基準）と想定している。詳細な議論は今後の検討課題としたい。

重要と述べた，6 つの視点・方法（(1)スケール，(2)評価指標，(3)多様なシナリオ，(4)相互作用，(5)時間の概念，(6)効果の検証）をいずれも満たしている。

本論文では，構築したシミュレーションモデルを，プログラミング言語 C#で実装した。図 2.8.1 に，本論文のシミュレーション分析における処理プロセスを示してある。入力データは，GIS データ（道路ノード，道路リンク，建物等のデータ），パーソントリップ調査に基づく分析対象地域内の滞留者データ，および，別のシミュレーションプログラムを用いてあらかじめ推定した物的被害データから構成される。さらに，ユーザは，いくつかのパラメータ（地震発生時刻，計算時間，計算ステップ間隔[例えば 30 秒]，物的被害ケース数など）を設定する必要がある。また，確率的事象に対する乱数シード（種）も用意しておく必要がある。この乱数シードから，シミュレーションの前処理段階で用いる乱数（表 2.8.1），建物ごとに設定する乱数（表 2.8.2），個人ごとに設定する乱数（表 2.8.3）をそれぞれ発生させる。そして，Double 型の乱数は，ある事象の生起確率との大小関係を比較することにより「その事象が生起するか否か」を設定するために用い，Int32 型の乱数は，ある集合（建物集合や個人集合，交差点集合など）から所与の数の要素を選択する場合などに使用される。これらの準備の後，あらかじめ設定した物的被害ケース数ぶんのシミュレーションを繰り返し実行すると，その結果は数種類のログデータとして出力される。この出力データを用いることで，シミュレーション結果を図表として示すことが可能である。さらに，本論文の第 3 章以降で行う分析のように，異なる想定条件のもとでシミュレーションを実行する場合にも，一部の入力データを置き換えるか，いくつかのパラメータを変更するだけで容易に対応できる。

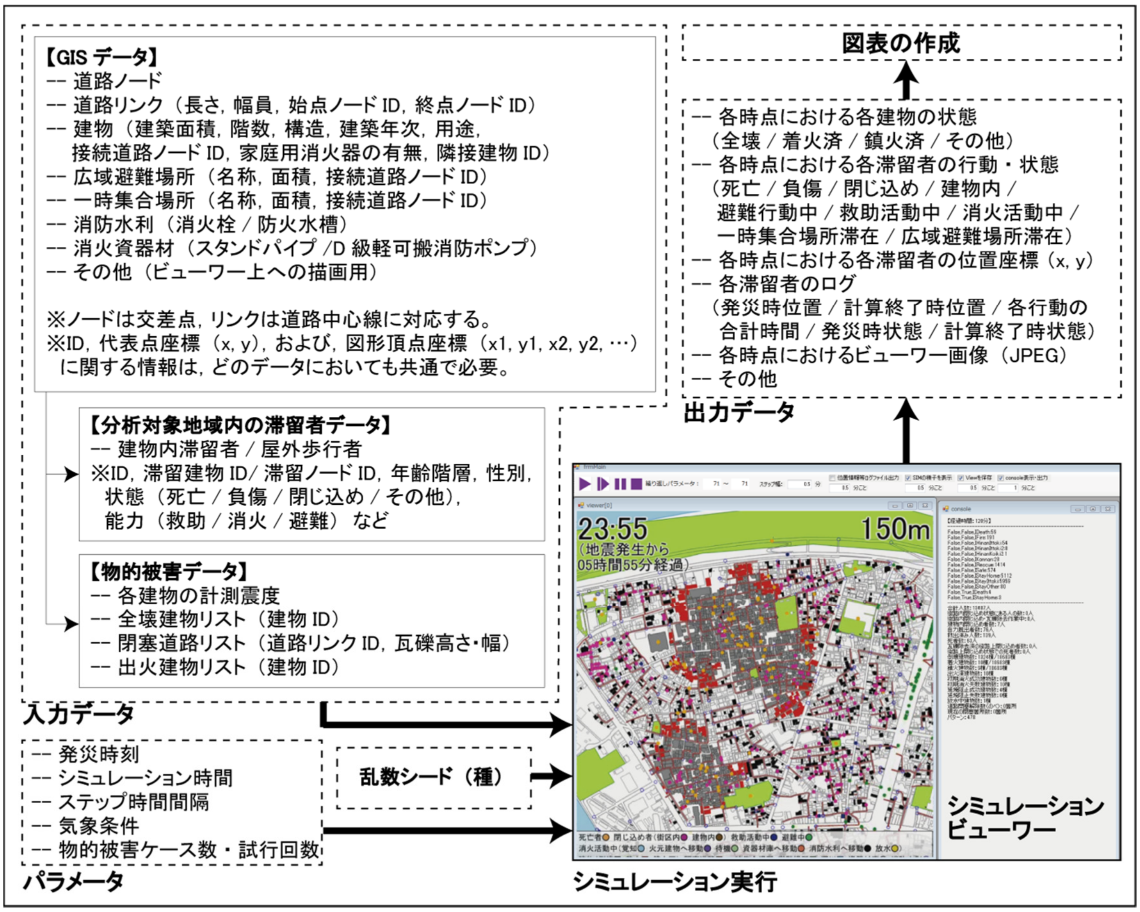


図 2.8.1　本論文のシミュレーション分析における処理プロセス[29]

表 2.8.1　シミュレーションの前処理（別プログラムであらかじめ実行する処理）で
使用している乱数の一覧

	内容	本文の関連箇所	関連する図表	種類
1	各建物の実構造を推定する	2.2.1節		Double
2	各建物の建築年次を推定する	2.2.1節		Double
3	全壊確率に基づき全壊建物を推定する（建物倒壊シミュレーション）	2.2.1節	図2.2.2	Double
4	閉塞道路を推定する（道路閉塞シミュレーション）	2.2.2節		Double
5	建物用途別出火率に基づき火元建物を推定する（建物出火シミュレーション）	2.2.3節		Double

※Double：0.0 以上 1.0 未満のランダムな浮動小数点数を使用。

表 2.8.2　建物ごとに設定している乱数の一覧

	内容	本文の関連箇所	関連する図表	種類
1	火元建物を出火順に並べ替える	2.2.3節		Int32
2	並び替えた火元建物に出火時刻を設定する	2.2.3節	図2.2.4	Int32
3	各建物に家庭用消火器が有るか否かを推定する	2.5節（脚注8）		Double

※Int32：0 以上のランダムな整数を使用。

※Double：0.0 以上 1.0 未満のランダムな浮動小数点数を使用。

表 2.8.3　個人ごとに設定している乱数の一覧

	内容	本文の関連箇所	関連する図表	種類
1	防災市民組織メンバーが，閉じ込め現場と火元建物を同時に覚知した場合，どちらに参加するかを選択する	2.1節（脚注1）		Double
2	全壊建物内の各滞在者が，建物内に閉じ込められるか否かを推定する	2.3節	図2.3.1	Double
3	建物内閉じ込め者の中から即死者を選択する	2.3節	図2.3.1	Int32
4	建物内閉じ込め者の中から自力脱出不能者を選択する	2.3節	図2.3.1	Double
5	各自力脱出不能者に負傷の程度を設定する	2.3節	図2.3.1(c)	Double
6	各自力脱出不能者に死亡時刻を設定する	2.3節	図2.3.1(b)	Int32
7	各自力脱出可能者に自力脱出時刻を設定する	2.3節	図2.3.1(a)	Int32
8	各全壊建物内の閉じ込め者の救出順序を設定する	2.3節		Int32
9	発災時の全自宅内滞在者の中から防災市民組織メンバーを選択する	2.4節		Int32
10	高齢者の救助活動参加可否を設定する	2.4節	表2.4.1	Double
11	応援要請を受けた場合に救助活動に参加するか否かを設定する	2.4節	図2.4.2	Double
12	救出者を搬送する2名を選択する（3名以上が現場で救出活動を行っていた場合）	2.4節	図2.4.1	Int32
13	閉じ込め現場で救出活動に参加する5名を選択する（6名以上が現場に参集した場合）	2.4節	図2.4.1	Int32
14	応援要請時の協力者を避難場所滞在者の中から選択する	2.4節	図2.4.1	Int32
15	複数の建物内閉じ込め現場がある場合に，救出活動に参加する現場を選択する	2.4節		Int32
16	複数の応援要請を受けた場合に，救出活動に参加する現場を選択する	2.4節		Int32
17	地域内を巡回中の防災市民組織メンバーが，交差点到達時に次の移動方向を選択する	2.4節		Int32
18	防災行動可否を設定する	2.5節	図2.5.1	Double
19	資器材庫に向かう4名を選択する（5名以上が火元建物に参集している場合）	2.5節		Int32
20	高齢者の瓦礫乗り越え可能高さを設定する	2.6節	表2.6.1	Double
21	各個人の行動開始時刻をPoisson分布に従って設定する	2.6節(2)	図2.6.1・図2.6.2	Double
22	各個人の行動開始時刻を0分後～5分後で設定する（火災接近時）	2.6節(2)	図2.6.1	Double
23	各個人の標準歩行速度を設定する	2.6節(5)	図2.6.3	Double
24	街路内・街区内閉じ込め者が交差点到達時に次の移動方向を選択する	2.7節		Int32

※Int32：0 以上のランダムな整数を使用。

※Double：0.0 以上 1.0 未満のランダムな浮動小数点数を使用。

2.9　本章のまとめ

本章では，第 3 章以降で用いる「大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデル」を構成する各サブモデルの内容について詳述し，それらを統合したシミュレーションモデルの全体像，および，シミュレーション分析の際の処理プロセスを説明した。

各サブモデルの概要，参考研究，および，本研究のオリジナリティを表 2.9.1 に整理してある。主に，兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）時の調査結果を援用しているが，道路閉塞や広域避難行動，救出成功や延焼阻止成功の判定，および，物的被害と人間行動の相互作用が生じる部分（表 2.9.1 に赤字で示してある部分）等には，一部，本研究で新たに構築したモデルを採用している。

本研究の成果は，「大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデル」の

表 2.9.1　各サブモデルの概要，参考研究，および，本研究のオリジナリティ

サブモデル		参考研究	概要	節
(a)物的被害モデル	建物倒壊	[6]	● 実構造（木造/RC 造/S 造/軽量 S 造），建築年代（～1970/1971～1980/1981～1990/1991～2000/2001～）別の建物被害関数（地表面最大速度 PGV と全壊確率との関係式）を使用	2.2.1
	瓦礫による道路閉塞	[8-10]	● 瓦礫飛散の非一様性を考慮 ● 瓦礫幅から（反対側）道路境界線上の瓦礫高さを推定し，地域住民の瓦礫乗り越え可否に使用	2.2.2
	出火・延焼	[11-14]	● 建物用途別の出火率 ● 出火時刻は，発災から一定時間経過後の通電火災も考慮した累積出火関数に基づき設定 ● 延焼速度式と延焼限界距離に基づき延焼性状を表現	2.2.3
	火災による道路閉塞	[15]	● 炎上中の建物の防火構造（耐火造/準耐火造/防火木造/裸木造）と前面道路幅員に基づき，道路の通行可否および通行不能となる時間帯を設定	2.2.4
(b)建物内閉じ込めモデル		[16-18]	● 自力脱出可否，自力脱出時刻，負傷の程度に応じた余命時間等を設定 ● 救助活動や火災延焼も安否を左右	2.3
(c)救助活動モデル		[16, 18-20]	● 5 段階のフェーズから構成 ● 一部の地域住民は「防災市民組織メンバー」として積極的に行動 ● 性別や年齢等の属性が救助活動参加意思や参加可否に影響 ● 一定の作業量[人・分]に達した時点で救出成功と見なし，避難場所に搬送 ● 道路閉塞や火災延焼の影響を受ける	2.4
(d)消火活動モデル		[21]	● 9 段階のフェーズから構成 ● 火元建物の住民による「火元初期消火」（家庭用消火器使用）が失敗した場合に，周辺住民による「延焼阻止活動」（D 級軽可搬消防ポンプやスタンドパイプを使用）を実施 ● 隣接建物への延焼前に放水を開始し，放水を 30 分間継続できれば延焼阻止成功と見なす ● 道路閉塞や火災延焼の影響を受ける	2.5
(e)広域避難行動モデル		[22-28]	● Poisson 分布（λ=3.35）に従って避難を開始（※火災接近時には即座に避難開始） ● 火災の抵抗を考慮して避難先・経路を決定 ● 道路閉塞箇所の記憶プロセスをモデル化し，経路選択に反映 ● 瓦礫高さ，性別，年齢に基づき瓦礫の乗り越え可否や歩行速度を設定 ● 通行可能な経路を失った時点でその場にとどまり，その 30m 以内に火災延焼が迫った時点で，火災に巻き込まれ死亡と判定	2.6 2.7

※赤字は，本研究のオリジナリティが存在する部分を示している。

「ひな型」を作成したことであるが，過去の災害事例は少ないため，シミュレーション結果の検証やモデルのキャリブレーションを行うことは容易ではない。特に，兵庫県南部地震時の調査結果に基づき構築したモデルの，別の場所・状況（例えば，首都直下地震や南海トラフ地震）を想定したシミュレーションへの適用可能性については議論の余地があるが，将来，別の大地震が発生した際には，随時，モデルの検証に取り組む予定である。また，人間行動モデルについては，調査・実験を行うこと自体が困難な概念も含まれていることから，シミュレーションにより，実際に起こり得る災害現象を「予測」することは困難である点に注意が必要である。そこで，条件や想定（行動戦略の違いや，各種減災対策の有無等）を変更してシミュレーションを実行することで，条件や想定の違いがどのような結果として現れるかを「相対的に」評価することに，本シミュレーションモデルの利用意義があると言える。

参考文献（第 2 章）

[1]　沖拓弥・大佛俊泰・廣川典昭：大地震時の地域住民による救助・消火活動の効果とリスク，地理情報システム学会講演論文集（CD-ROM），Vol. 25，2016.10

[2]　N. Hirokawa and T. Osaragi, “Earthquake Disaster Simulation System: Integration of Models for Building Collapse, Road Blockage, and Fire Spread,” Journal of Disaster Research, Vol. 11, No. 2, pp. 175-187, 2016.3

[3]　T. Oki and T. Osaragi, “Wide-area Evacuation Difficulty in Densely-built Wooden Residential Areas,” Proc. of the ISCRAM 2016 Conf., 2016.5

[4]　村尾修・山崎文雄：自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数，日本建築学会構造系論文集，No. 527，pp. 189-196，2000.1

[5]　東京都：首都直下地震等による東京の被害想定，2012.4,
http://www.bousai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html [2016.9.13 参照]

[6]　東京都：地震に関する地域危険度測定調査（第 7 回），2013.9,
http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/chousa_6/home.htm [2017.10.10 参照]

[7]　東京都：南海トラフ巨大地震等による東京の被害想定，2013.5,
http://www.bousai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000402.html [2017.10.10 参照]

[8]　市川総子・阪田知彦・吉川徹：建物倒壊および道路閉塞のモデル化による避難経路の危険度を考慮した避難地への到達可能性に関する研究，GIS—理論と応用，Vol.12，No.1，pp. 47-56，2004.6

[9]　国土交通省国土技術政策総合研究所：総合技術開発プロジェクト「まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発」，2003.

[10]　間渕利明ほか：道路上の震災ガレキ量の予測手法について，日本地震工学会大会—2012 梗概集，pp. 346-347，2012.11

[11]　東京消防庁：直下の地震を踏まえた新たな出火要因及び延焼性状の解明と対策，火災予防審議会答申（第 12 期），1997

[12]　東京消防庁：地震時における人口密集地域の災害危険要因の解明と消防対策について，火災予防審議会答申（第 16 期），2005

[13]　東京消防庁：地震火災による人的被害の軽減方策，火災予防審議会地震対策部会答申書（第 21 期），2015

[14]　東京消防庁：地震火災に関する地域の防災性能評価手法の開発と活用方策，火災予防審議会答申（第 14 期），2001

[15]　岩見達也・萩原一郎・石井儀光・勝又済：道路空間構成と市街地の火災安全性に関する基礎的検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，F-1 分冊，pp. 589-590，2006.7

[16]　竹田宏樹ほか：1995 年兵庫県南部地震における東灘区と北淡町の閉じ込め実態比較，地域安全学会梗概集，No.11，pp.49-52，2001.11

[17]　太田裕ほか：震後余命特性曲線の試算：訂正と補足―1995 年兵庫県南部地震の場合―，東濃地震科学研究所報告 Seq.7，No.7，2001.3
[18]　古屋貴司・佐土原聡：大地震被災時の住民による救助活動シミュレーションに関する研究，総合論文誌，Vol.2，pp.95-99，2004.2
[19]　文部科学省：体力・運動能力調査，2013
[20]　東京都総務局：「区市町村防災事業の現況（平成 23 年度版）」，2011
[21]　東京消防庁：減災目標を達成するため木造住宅密集地域において緊急に実施すべき震災対策，火災予防審議会答申（第 19 期），2011
[22]　大佛俊泰：都市防災計画のための鉄道利用者の時空間分布推定，日本建築学会計画系論文集，Vol.74，No.635，pp.137-144，2009.1
[23]　大佛俊泰：数値地図を用いた都市内滞留者の時空間分布推定，日本建築学会計画系論文集，Vol.73，No.634，pp.2673-2678，2008.12
[24]　大佛俊泰・島田廉：都市防災計画のための自動車利用者の時空間分布推定，日本建築学会計画系論文集，Vol.74，No.641，pp.1561-1568，2009.7
[25]　西田幸夫：関東大震災における火災延焼と避難について，歴史地震，No. 24，p. 166，2009
[26]　東京都：東京防災，避難の流れ，pp. 40-41，2015，http://www.bousai.metro.tokyo.jp/book/pdf/jp/20p7o404.pdf [2017.10.10 参照]
[27]　榊愛・渡邉里奈：大地震発生後の道路閉塞状況下における歩行者の通行可否判断基準：その 1　瓦礫間の距離・瓦礫高さと通行可否判断との関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，F-1 分冊，pp.799-800，2017.8
[28]　A. Willis, N. Gjersoe, C. Havard, J. Kerridge, and R. Kukla, "Human Movement Behaviour in Urban Spaces: Implications for the Design and Modelling of Effective Pedestrian Environments," Environment and Plann. B: Plann. and Design 2004, Vol. 31, No. 6, pp. 805-828, 2004
[29]　T. Oki and T. Osaragi, “Urban Improvement Policies for Reducing Human Damage in a Large Earthquake by Using Wide-Area Evacuation Simulation Incorporating Rescue and Firefighting by Local Residents,” Planning Support Science for Smarter Urban Futures, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer International Publishing, pp. 449-468, 2017.5
[30]　大佛俊泰・沖拓弥：密集市街地における大地震時の避難困難率について，日本建築学会計画系論文集，Vol. 77，No. 681，pp. 2561-2567，2012.11
[31]　T. Osaragi and T. Oki, “Wide-Area Evacuation Simulation Incorporating Rescue and Firefighting by Local Residents,” Journal of Disaster Research (Special Issue on Disaster and Big Data Part 2), Vol. 12, No. 2, pp. 296-310, 2017.3

なお，本章の内容は，筆者らの既発表論文[29 - 31]の一部を加筆・修正したものである。

第３章　物的・人的被害の推定

3.1　分析対象地域とシミュレーションの想定

3.2　物的被害の推定結果

3.3　地域住民の消火活動による焼損建物数の低減効果

3.4　地域住民の救助・消火活動による死亡者数の低減効果

3.5　地域住民による救助・消火活動実施のリスク

3.6　避難行動戦略（避難開始のタイミング）と人的被害の関係

3.7　建物内・街路内・街区内での閉じ込めや逃げ遅れの傾向

3.8　人的被害と空間性状の関係

3.9　本章のまとめ

※本文中で言及している物的・人的被害のシミュレーション結果は，特定の想定の下での推定値であり，分析対象地域で同様の物的・人的被害が必ず発生することを意味するものではない。

第 3 章　物的・人的被害の推定

3.1　分析対象地域とシミュレーションの想定

本章では，第 2 章で構築した「大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデル」を用いて，実際の市街地を例に，大地震時における物的・人的被害を推定することを試みる。さらに，地域住民による救助・消火活動の効果とリスクを定量的に明らかにするとともに，建物内・街路内・街区内での閉じ込めや逃げ遅れの傾向，また，避難行動戦略（避難開始のタイミング）と人的被害の関係について分析することで，本シミュレーションモデルを活用することの利点を具体的に示す。

本章の分析対象地域には，典型的な木造住宅密集地域として知られる東京都足立区千住地域の中から，広幅員道路に囲まれたエリア（図 3.1.1）を選定した。本エリアは，地域危険度調査[1]等において，大地震発生時の倒壊・火災危険度が非常に高いとされている。具体的には，火災延焼が地域全体に及ぶ危険性が非常に高く，さらに，倒壊家屋の瓦礫によって，緊急車両活動や地域住民の共助・避難行動が妨げられる可能性も高いと考えられているエリアである。

表 3.1.1 に，本章で実行するシミュレーションの想定を示してある。首都直下地震を想定した東京都の被害想定[2]等を参考に，地震動の強さ（震度・計測震度・地表面最大速度・地震加速度）や発災時刻，および，季節・風向・風速を設定した。計測震度，地表面最大速度，地震加速度間の関係は，文献[3, 4]に基づく。冬の午後 6 時は，火災延焼による焼損被害が最も深刻になるとされる発災時刻である。平成 20 年東京都市圏パーソントリップ（PT）調査データから推定される，対象エリア内の滞留者数（自宅滞在者数と自宅以外の施設滞在者数，および，屋外歩行者数の合計値）と高齢者率（全滞留者に占める 65 歳以上の滞留者の割合）の時間推移を図 3.1.2 に示してある。平日の午後 6 時時点では，9,638 人の滞留者が対象エリア内に存在し，そのうち約 35%が高齢者と推定される[1]。各滞留者の居場所を，2.6 節に示す方法で推定し，50m メッシュ単位で集計した結果を図 3.1.3 に示す。

[1] 発災時刻が異なれば，対象地域内における滞留者の数や空間分布，高齢者率等も異なる。特に，高齢者率の高い時刻では，救助活動に参加できない人（表 2.4.1）や，瓦礫を乗り越えられない人（表 2.6.1），あるいは，円滑に避難できない人（図 2.6.3）の割合も高くなることから，人的被害の様相も大きく異なることが予想される。発災時刻によって異なる被害の程度を把握することは，地域防災計画上重要な観点であり，本シミュレーションモデルを用いれば，時刻別の物的・人的被害を推定することも可能である（例えば，文献[5]では，高齢者率の最も高い午後 1 時と，最も低い午前 1 時のシミュレーション結果を比較している）。しかし，シミュレーション結果の組み合わせ数が多くなりすぎることから，本論文では，他の被害想定などでも用いられることの多い代表的な時刻である，午後 6 時（18 時）に発災した場合のシミュレーションのみを行っている。

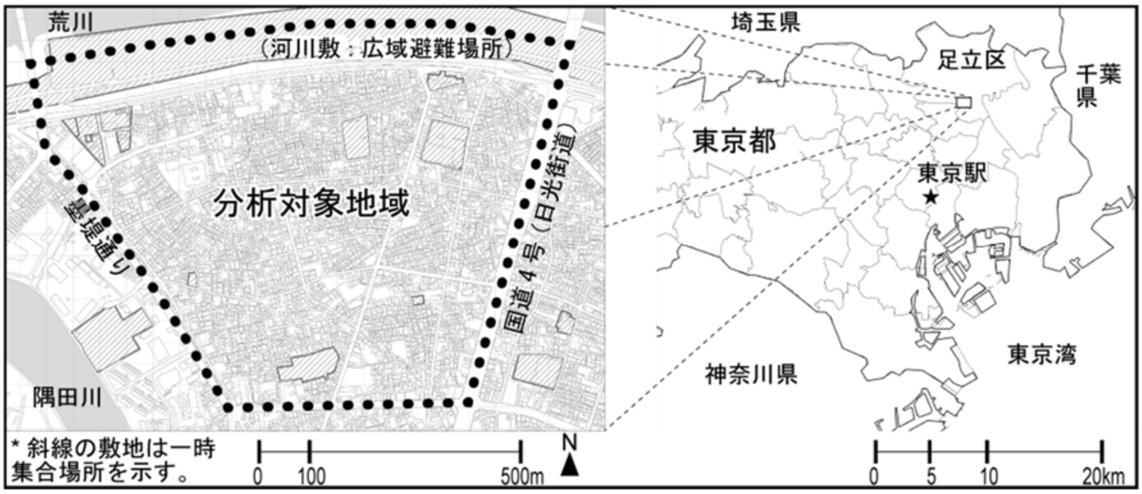


図 3.1.1　第 3 章のシミュレーションの分析対象地域[2]

表 3.1.1　第 3 章のシミュレーションの想定[3]

震度（計測震度）	6強（6.16）	
地表面最大速度	81.0cm/sec(kine)	
地震加速度	828cm/sec^2(gal)	
発災時刻	平日午後6時	
シミュレーション時間	発災から24時間後まで	
季節・風向・風速	冬季・北風8m/sec	
分析対象者の総数	9,638人	100.0%
（自宅滞在者）	6,875人	71.3%
（自宅外施設滞在者）	2,481人	25.7%
（屋外歩行者）	282人	2.9%
地域内の建物総数	4,392棟	
物的被害ケース数	100ケース	

＜比較する想定＞
＊救助・消火活動の効果とリスク→ (A) vs (B)
＊逃げ遅れの影響→ (A) vs (C)

(A) 150m 避難・救助活動あり・消火活動あり
(B) 150m 避難・救助活動**なし**・消火活動**なし**
(C) **50m** 避難・救助活動あり・消火活動あり

※「Xm 避難」は，自身の周囲 Xm 以内に火災が接近した場合に避難を開始することを意味

2　市街地を構成する建築物・道路等のデータには，東京都都市計画地理情報システムデータの一部である平成 23 年建物現況（区部）データを使用し，現実の市街地における建物特性や街路配置等に基づいたシミュレーションを実行している。当該データには，建築面積，階数（地上・地下），構造（耐火構造／準耐火造／防火造／裸木造），建物用途，区市町村・町丁目名称等に関する情報が含まれる。ただし，建物の実構造（木造・RC 造・S 造）や建築年次，高さ等，物的被害シミュレーションで使用する一部の属性は，建物現況（区部）データに含まれない。そこで，平成 20 年住宅・土地統計調査のデータや，東京都世田谷区が建物現況（区部）データをベースに独自に整備した GIS データを用いて，ケースごとに異なる乱数シードに基づき，これらの属性を補完している。また，資器材庫と消防水利は，東京消防庁提供の GIS データ（平成 26 年現在）を用いている。これらのデータは，第 4 章以降のシミュレーションにおいても同様に用いている。

3　1 ステップあたり 30 秒として，各エージェントへの計算処理を実行している。

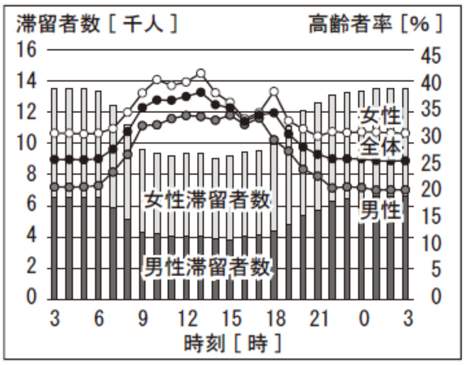


図 3.1.2　滞留者数と高齢者率の時間推移

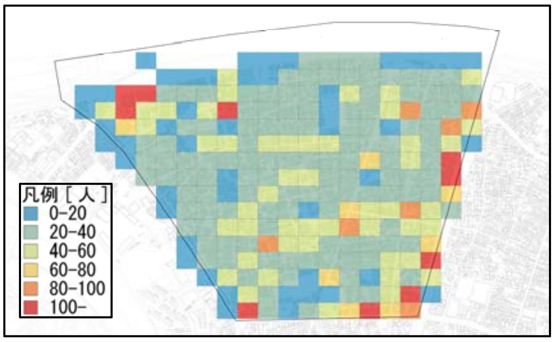


図 3.1.3　滞留者数の空間分布
（平日午後 6 時）

上記の条件の下，地域住民による救助・消火活動の有無，および，火災接近時に避難を開始するタイミング（火災までの距離が 150m または 50m）の異なる想定(A)～(C)（表 3.1.1 右）について，発災から 24 時間後までのシミュレーションを，それぞれ 100 通り[4]の物的被害ケースに対して実行する[5]。

シミュレーションを実行することで，図 3.1.4 の例のように，大地震発生後に物的被害がどのように拡大し，地域住民がどのように行動するかを視覚的にも把握できる。

[4] 本シミュレーションモデルでは，多くの確率的事象を取り扱っていることから，シミュレーション実行時には多くの場面で乱数を使用している（第 2 章の表 2.8.1～表 2.8.3 参照）。そこで，乱数の種を変えながら作成した，ある程度の数の物的被害ケースに対してシミュレーションを実行することで，乱数の影響で偶然生じた特異な事例を，平均的な傾向として議論してしまう危険性を低減させることができる。本論文では，計算時間の制約から，100 通りの物的被害ケースに限定してシミュレーションを実行している。しかし，100 通りという数が十分多く，また，100 通りというケース数で得られたシミュレーション結果に，どの程度の信頼性があるかを具体的に示すことは困難である。したがって，100 ケースのシミュレーションで得られた統計量（平均や分散）だけでなく，個々のケースにも着目して結果を解釈し，想定間の優劣について議論することが重要である。特に，リスク評価を行う上で，平均値のみを用いた議論では，甚大な被害が発生する特異な事例を見逃す危険性があり，注意が必要である。さらにケース数を増やすと，平均値がより安定的になるほか，甚大な人的被害が発生するケースが新たに抽出され，深刻な人的被害が発生する状況・要因について，新たな分析・考察が行えるようになる可能性がある。同様に，物的・人的被害に空間的偏りが存在する場合もあることから，被害率の空間分布を活用することも重要である。第 3 章では，以上の観点に基づく分析も行っている。

[5] 本論文では，シミュレーションの実行条件に関する用語を，それぞれ以下のように定義して使い分けている。

①想定（またはシナリオ）…「現状」「救助・消火活動なし」「家庭用消火器完備」等，ある特定の行動ルールや施策の影響を比較するための設定。

②ケース…異なる乱数に基づく物的被害の推定結果 1 セット。例えば「物的被害 100 ケース」は，物的被害の空間分布の異なる 100 セットのことを指す。

③回…ある想定・物的被害ケースの下，人間行動用の乱数を変えて実行するシミュレーションの回数（本論文では 1 回に統一している。このことの影響については，付録 1 で議論している）。

④件…出火した建物の数。例えば，「物的被害 1 ケースの平均出火件数は 3 件」等というように用いる。

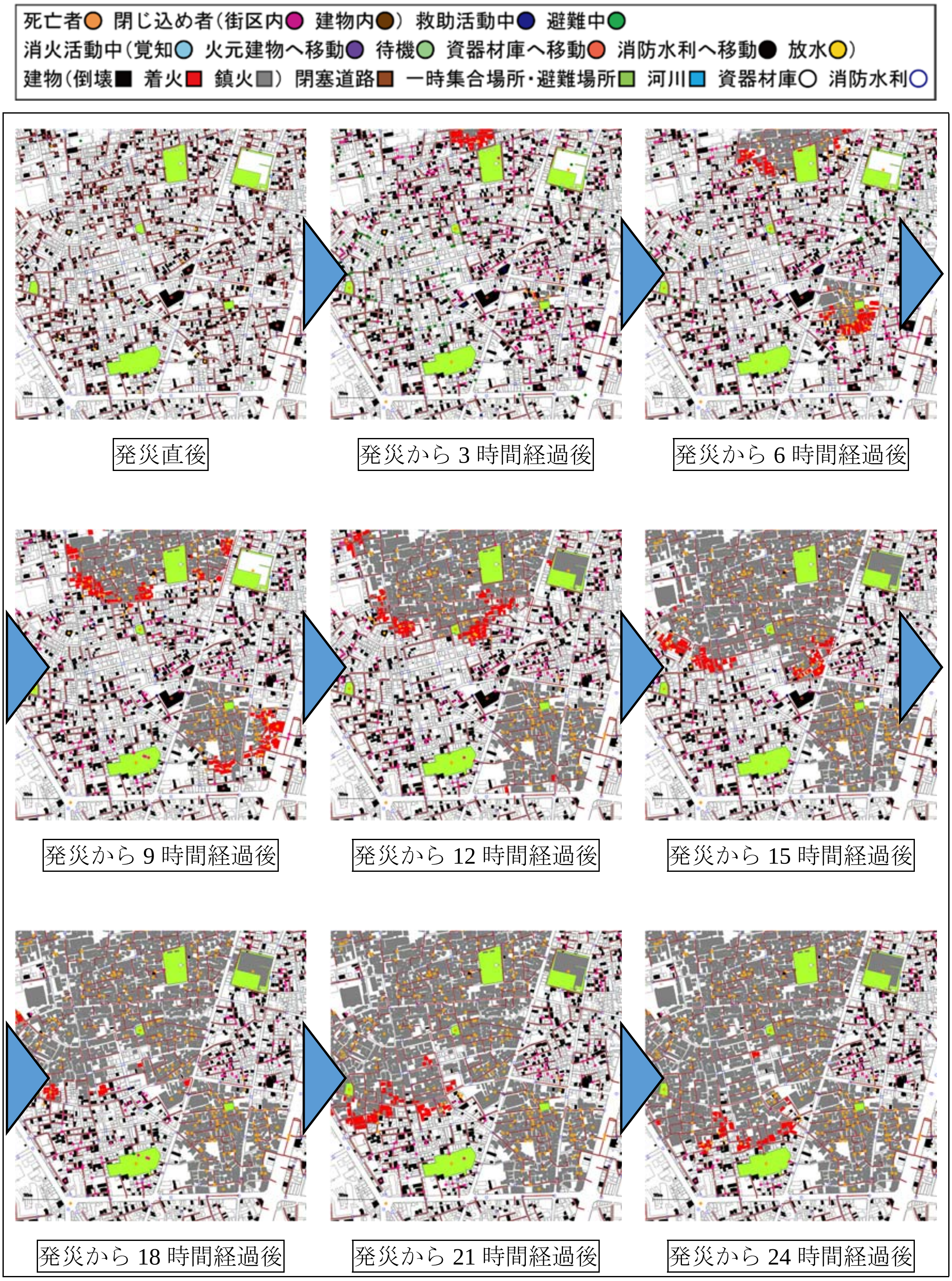


図 3.1.4　発災から 24 時間経過後までのシミュレーションの例

3.2　物的被害の推定結果

建物倒壊・道路閉塞シミュレーションの結果を表 3.2.1 に示してある。本地域のような典型的な木造住宅密集地域の場合，本シミュレーションモデルによれば，建物倒壊率は平均で約 20%，道路閉塞率は平均で約 31%と，非常に高い値を示すことがわかる。図 3.2.1 には，物的被害の時間推移を示してある。発災からある程度の時間が経過すると，新たに着火する建物と鎮火する建物の数がほぼ等しくなり，また，閉塞状態にある道路の数もおよそ一定になるが，その後は次第に逓減する。

表 3.2.1　倒壊・閉塞シミュレーションの結果

	建物倒壊率	道路閉塞率
平均値	19.7%	30.9%
中央値	19.7%	30.6%
最大値	21.9%	36.7%
最小値	17.7%	26.6%

※建物倒壊率は，分析対象地域内の全建物に占める全壊建物の割合。

※道路閉塞率は，分析対象地域内の全道路リンクに占める，瓦礫による閉塞道路リンクの割合。

※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値である。

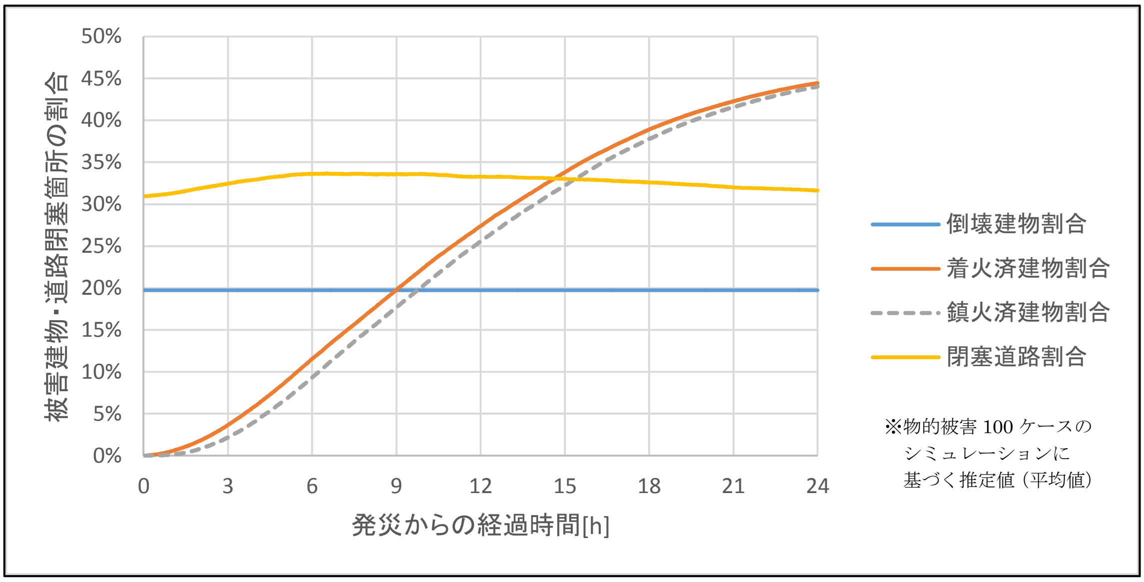
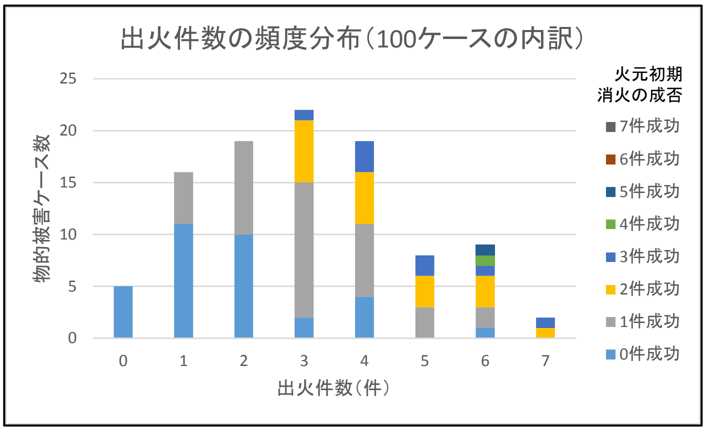


図 3.2.1　物的被害箇所数の時間推移

3.3　地域住民の消火活動による焼損建物数の低減効果

本シミュレーションモデルによれば，火元初期消火の成功率は平均 35.5%（3.0 件の出火のうち 1.1 件で成功）であった。出火件数と火元初期消火成功件数はいずれも分散が大きく，1 件も消火できない場合もあれば，ほぼ全ての火元建物で初期消火に成功している場合もある（図 3.3.1）。物的被害 100 ケースのうち，分析対象地域内の出火件数が 0 件であったものが 5 ケース，全ての火元建物において火元初期消火が成功したものが 6 ケースあった。すなわち，残りの 89 ケースにおいては，少なくとも 1 件の火元初期消火に失敗している。



	出火件数（件）	火元初期消火成功件数（件）
平均値	3.04	1.08
中央値	3	1
最大値	7	5
最小値	0	0

図 3.3.1　火元初期消火成功件数（物的被害 100 ケースの結果に基づく推定値）

火元建物の周囲にいる地域住民によって延焼阻止活動が試みられた 89 ケースのうち，延焼阻止に成功した事例が見られたのは 12 ケースのみであり，2 件以上の延焼阻止に成功したケースは見られない（図 3.3.2）。それにもかかわらず，発災から 24 時間経過後の平均焼損建物数は，消火活動を行わない場合と比較して 5 分の 1 程度減少している（表 3.3.1）。これは，消火活動なしでは甚大な焼損被害が発生するケースにおいて，火元初期消火や周辺住民による消火活動によって延焼阻止に成功すると，焼損建物数を大きく低減できるためである（詳しくは，後述する図 3.4.3 の物的被害ケース No.89，No.36，No.50 等がその例である）。

以上の結果は，木造住宅密集地域における大地震時の延焼阻止活動の困難さを示している。また，わずかな件数の延焼阻止であっても，焼損建物数を大きく減ずることができることから，より早い段階での火元初期消火の重要性を示唆している。換言すれば，木密地域においては，1 件の出火が大規模火災となる可能性は非常に高く，出火率を小さく抑える取り組みが何よりも重要である。

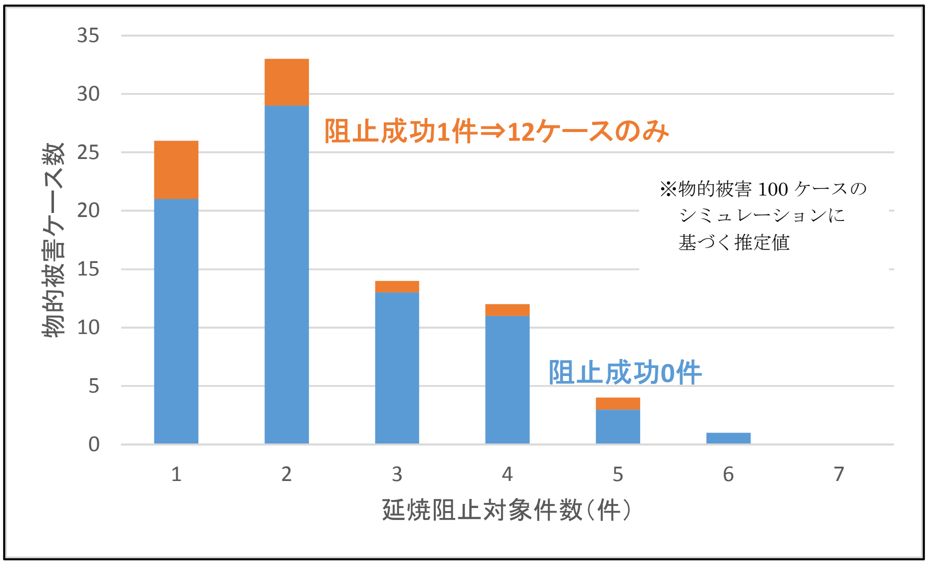


図 3.3.2　延焼阻止成功件数
（※2 件以上の阻止成功事例はなし）

表 3.3.1　焼損建物数の比較

		(A)救助・消火あり	(B)救助・消火なし
平均値	[棟]	1,985	2,411
	(割合)	45.2%	54.9%
中央値	[棟]	2,818	2,853
	(割合)	64.2%	65.0%
最大値	[棟]	4,026	4,042
	(割合)	91.7%	92.0%

※発災から 24 時間経過後の値。
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値である。
※（割合）は，対象地域内の全建物数（4,392 棟）に占める焼損建物数の割合。

3.4　地域住民の救助・消火活動による死亡者数の低減効果

図 3.4.1 には，救助活動者数の時間推移を示してある。発災直後に行動を開始する人々の多くが，何らかの形で救助活動に参加し，平均で 500 人前後，最大で 900 人以上が現場での救出活動に参加している時間帯も見受けられる。発災から約 1 時間が経過すると，現場での救出活動を終えた人々から順次，最寄りの一時集合場所・広域避難場所への搬送を行い，到着後はその一時集合場所・広域避難場所にそのまま留まる人々が多いため，救助活動者数は徐々に減少する。そして最終的には，建物内閉じ込め現場を探しながら移動し続ける防災市民組織メンバーだけとなる。

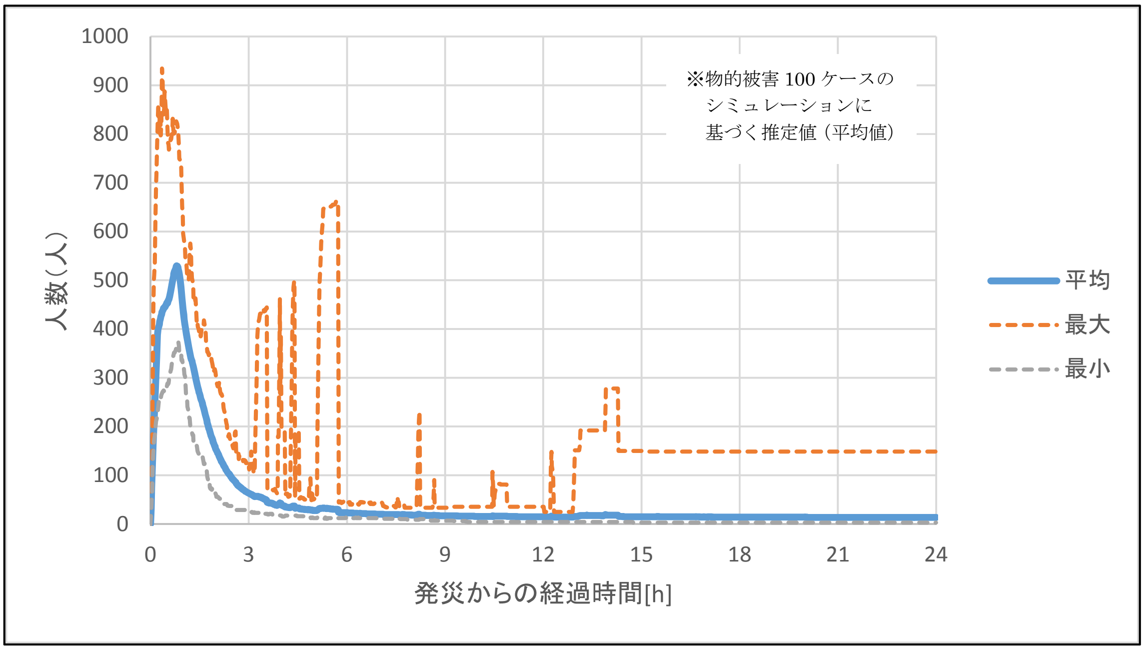


図 3.4.1　救助活動者数の時間推移

想定(A)（救助・消火あり）と想定(B)（救助・消火なし）を比較すると，物的被害 100 ケースの平均値で，死亡者数は 452 人から 309 人に減少している（表 3.4.1）。すなわち，地域住民自身が救助・消火活動を行うことで，本地域のような木密地域全体の死亡者数を 3 分の 2 程度まで低減できる可能性があることを示している。

表 3.4.1　死亡者数の比較

		(A)救助・消火あり	(B)救助・消火なし
平均値	[人]	309.2	452.3
	（割合）	3.2%	4.7%
中央値	[人]	363.5	489
	（割合）	3.8%	5.1%
最大値	[人]	795	901
	（割合）	8.2%	9.3%
最小値	[人]	49	104
	（割合）	0.5%	1.1%

※発災から 24 時間経過後の値。

※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値である。

※（割合）は，対象地域内の全滞留者（9,638 人）に占める死亡者の割合。

焼損建物の減少数と死亡者の減少数の間には，高い正の相関関係が見られる（図 3.4.2）。すなわち，消火活動により延焼を阻止できれば，人的被害を大きく低減させることが期待できる。特に，本章の分析対象地域のように，延焼遮断帯が存在せず，1 つの延焼クラスタ[6]を形成しているような地域では，1 件の火元初期消火の成否が，人的被害の程度を大きく左右する。また，救助活動と消火活動のいずれか一方ではなく，2 つの活動をあわせて実施することで，死亡者数を大きく低減できている。中には，火元初期消火や延焼阻止活動に失敗し，焼損建物をさほど低減できていないにもかかわらず，救助活動によって死亡者数を大きく減少させることに成功しているケースもある（図 3.4.3）。

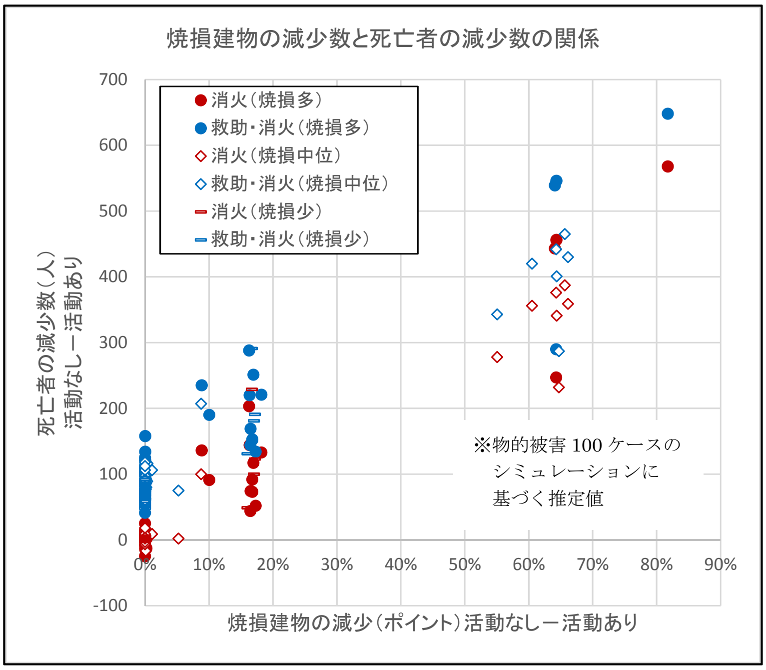


図 3.4.2　焼損建物の減少数と死亡者の減少数の関係[7]

※(多)・(中)・(少)は消火なしの場合の焼損建物数の程度。

※横軸と縦軸は，いずれも「(B)救助・消火なし－(A)救助・消火あり」の値。

※焼損建物割合の減少を x[ポイント]，死亡者の減少数を y[人]として線形回帰すると，

【消火のみの場合】$y=571.3x+3.70$　$R^2=0.919$

【(A)救助・消火ありの場合】$y=542.4x+93.2$　$R^2=0.876$

---

6 一群の建物のどこかで出火した場合に，その火災が放任されると，全ての建物がいずれは焼損する建物群のことで，いわば「延焼運命共同体」と言えるものである。加藤ら[6]が，延焼クラスタを用いた都市の火災リスク評価指標を提案しているが，延焼クラスタには時系列の概念が無いという短所もある。

7 図 3.4.2 と図 3.4.3 では，比較のため，救助活動のみを実施する想定と，消火活動のみを実施する想定に基づくシミュレーションを，それぞれ物的被害 100 ケースについて別途実行している。

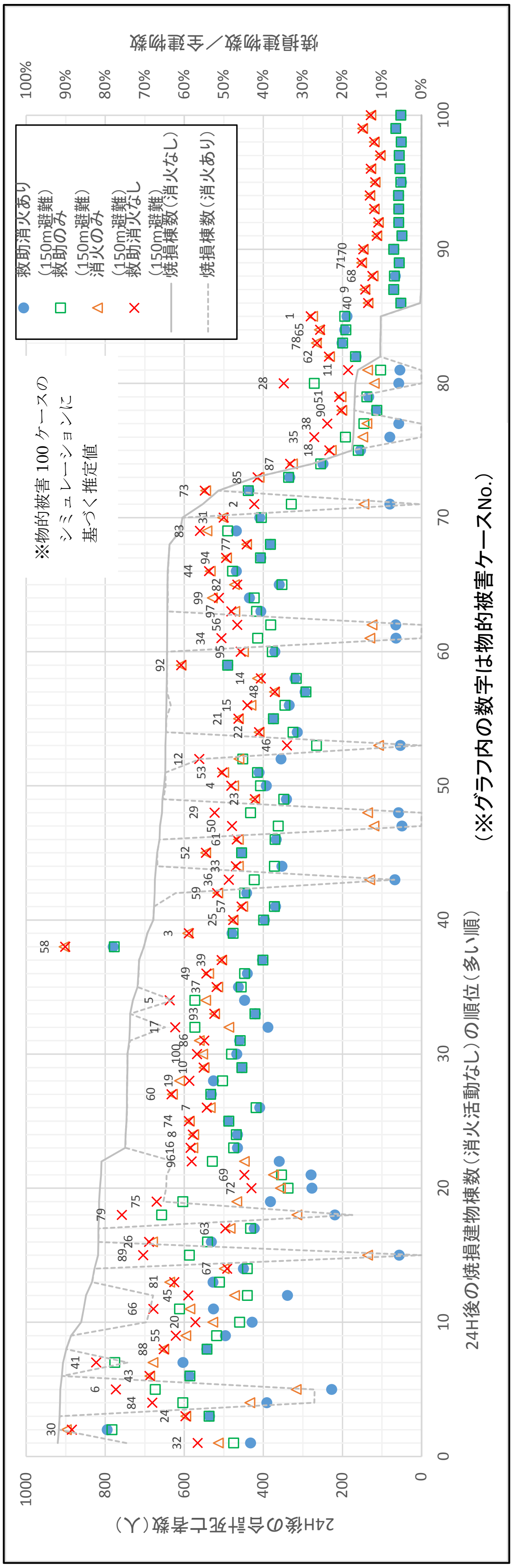


図 3.4.3　救助・消火活動の有無と死亡者数・焼損建物数の関係[5]

図 3.4.3 では，消火活動なし（実線の折れ線グラフ）の場合，物的被害ケース No.70 から No.80 の間で，焼損建物数が大きく減少している点が特徴的である。消火活動あり（破線の折れ線グラフ）の場合でも，消火活動が成功したと考えられるケースでは，焼損建物数が激減している様子が見てとれる。出火点（火元建物）の数や空間分布は，2.2.3 節で述べたように，建物用途別の出火率と乱数を用いて確率的に設定しており，分析対象地域内の出火件数の頻度分布は，ほぼ正規分布に近い（図 3.3.1）。それにもかかわらず，焼損建物数の分布が二極化してしまっている理由は，分析対象地域の西側全体が延焼クラスタ [6] を構成しているためと考えられる。すなわち，このシミュレーション結果は，本地域のような木密地域において，延焼クラスタを構成するエリア内から出火した火災の消火の成否が，焼損被害ひいては人的被害の大小を大きく左右することを意味している。

建物内閉じ込め者数の時間推移を見ると（図 3.4.4），発災から 30 分以内は自力で脱出する人が多く存在するため，救助活動の有無によらず，建物内閉じ込め者数は急激に減少する。その後，救助活動を行わない場合，発災から 2 時間半以降は建物内閉じ込め者にほとんど変化が見られなくなり，同時に，死亡者数の増加ペースが約 2 倍に加速する（図 3.4.5）。これに対し，救助活動を行う場合，建物内閉じ込め者は発災から約 1 時間が経過する頃から徐々に救出・搬送され始め，発災から約 5 時間後までは減少し続ける。それでも，新たに救出される人の数は次第に少なくなり，発災から約 6 時間が経過すると，救出済み人数にはほとんど変化がなくなる。

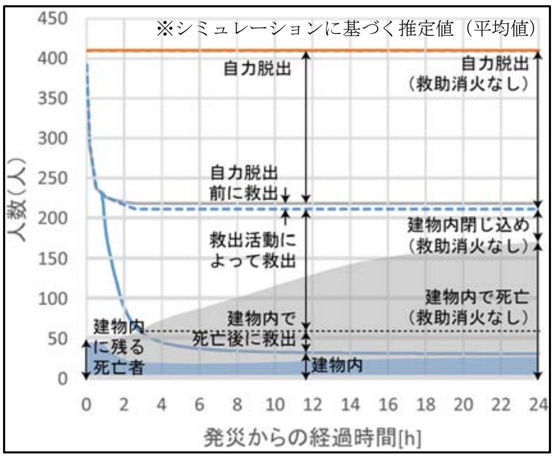


図 3.4.4　建物内閉じ込め者数の時間推移

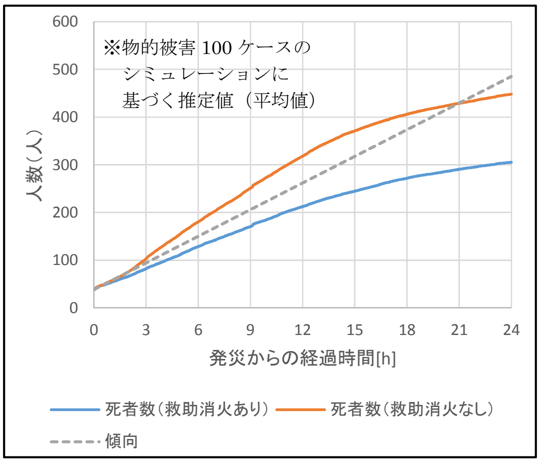
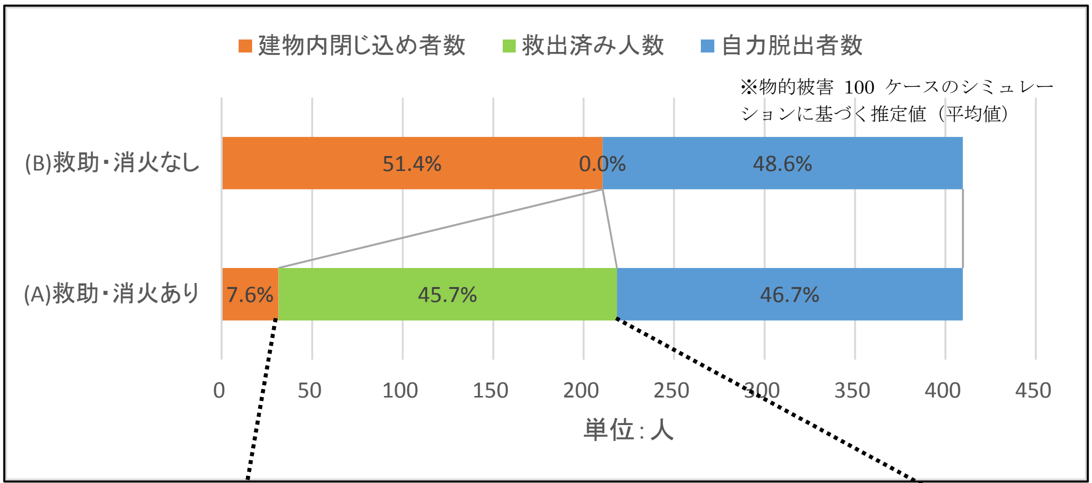


図 3.4.5　死亡者数の時間推移

救助活動が全く行われない場合，発災から 24 時間が経過しても，発災時における建物内閉じ込め者の 51.4%が建物内に取り残されるが，救助活動を行うことで，この割合を大きく減少させることができている（図 3.4.6）。ただし，救出者数には，既に建物内で死亡している人々も含まれ，また，建物から救出されても，瓦礫による道路閉塞の影響で一時集合場所・広域避難場所に到達できない場合がある。本シミュレーションモデルによれば，無事に搬送

完了する人の割合は，建物からの救出者全体の約 4 分の 3 であった。発災から 24 時間が経過しても建物内から救出されない人々は，建物配置や瓦礫の影響で，人々が通行しにくい（気づきにくい）箇所に取り残されている可能性がある。しかし，死亡者数の増加ペースは比較的鈍く，延焼は発災から 24 時間経過後も続く可能性があることを考慮すると，救助活動の効果は大きいと言える。



単位：人	救出者総数	即死後に救出	死亡後に救出（即死を除く）	救出後に火災で死亡	救出後に街路内閉じ込め	無事に搬送完了
平均値	187.3	33.3	7.1	4.1	5.4	137.4
構成比	100.0%	17.8%	3.8%	2.2%	2.9%	73.4%

図 3.4.6　建物からの救出者数の内訳（物的被害 100 ケースの推定値[平均値]）

3.5　地域住民による救助・消火活動実施のリスク

前節の分析で，地域住民による救助・消火活動には一定の効果が見込めることを示した。しかし，逃げ遅れて火災に巻き込まれ死亡する可能性があるなど，救助・消火活動にはリスクも伴う。特に，救助活動には，ある程度の時間を要するため，活動中に延焼が拡大し，逃げ遅れる可能性も考えられる。そこで，次のような比較実験を試みた。

まず，想定(A)（救助・消火あり）の下で，建物内閉じ込め現場での救出活動（図 2.4.1 フェーズ(2)）に一度でも参加した人々の，発災から 24 時間後の安否を求めた。次に，全く同一の人々が，救出活動に参加しなかった場合[想定(B)（救助・消火なし）]を想定して，同様に 24 時間後の安否を求めた。

表 3.5.1 には，両者の関係を求めた結果を示してある。地域住民による救出活動を想定した場合の死亡者数は平均 5.7 人（参加者全体の 0.85%）であった。ただし，救出活動に参加

した人で 24 時間後に無事であった人の中には，もし参加していなければ死亡していた人が 7.5 人存在した。すなわち，この程度の人数は偶然に左右され変動する量と考えられる。

表 3.5.1　救出活動への参加・不参加と安否（物的被害 100 ケースの推定値[平均値]）

		(B)救助活動なし		
		生存者	死亡者	合計
(A)救助活動あり	生存者	650.9	7.5	658.4
	死亡者	5.7	3.0	8.7
	合計	656.6	10.5	667.0

（単位：人）

3.6　避難行動戦略（避難開始のタイミング）と人的被害の関係

一時集合場所に滞在中の人々の数は，発災から約 5 時間後を境に次第に減少していくが，火災が接近して一時集合場所から再度避難する人々の影響で，広域避難場所に滞在する人々の数は増加し続ける（図 3.6.1）。避難場所滞在者数の時間推移に，救助・消火活動の有無による傾向の差はほとんど見られない。

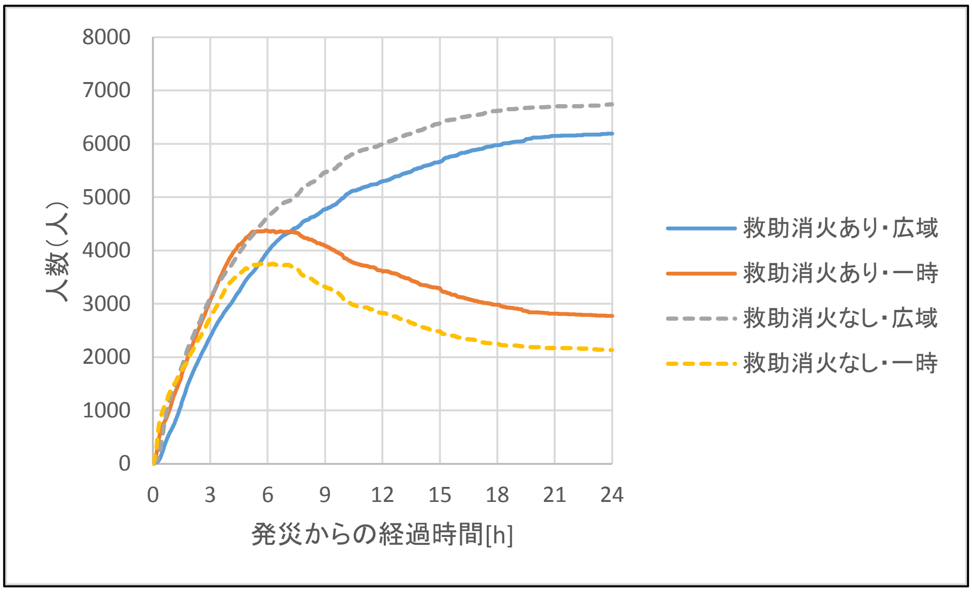


図 3.6.1　避難場所滞在者数の時間推移
（物的被害 100 ケースの推定値[平均値]に基づく一般的な時間推移）

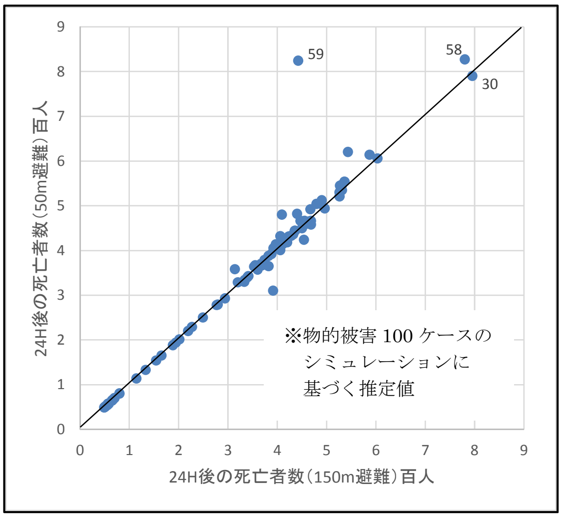
市街地火災の延焼速度は，速くても数百 m/h 程度であり，歩行速度と比較して非常に遅い。そのため，火災接近時の避難開始のタイミングが，周囲 150m 以内（想定(A)）から 50m

以内（想定(C)）に遅れることによる死亡者数の増加は，平均 9 人程度であった（表 3.6.1）。しかし，中には，400 人近くも死亡者数が増加したケースが見られた（図 3.6.2(a)，物的被害ケース No.59）。このケースを子細に分析すると，ある一時集合場所に滞在していた多数の人々が，広域避難場所へ避難を試みたものの，延焼火災の影響で街区内に閉じ込められ，その後，火災に巻き込まれ死亡していた。

表 3.6.1　避難開始のタイミングと死亡者数の関係（死亡原因別・救助消火あり）

※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値[人]		即死者	負傷による建物内での死亡者		火災による建物内での死亡者		火災による街路上での死亡者		全死亡者	
平均値	(A)150m避難	38.5		30.1		5.95		234.7		309.2
	(C)50m避難	38.5	0.47	30.5	0.02	5.97	8.2	242.9	8.7	317.8
最大値	(A)150m避難	42		87		24		670		795
	(C)50m避難	42	5	92		24	46	716	32	827
			※		※		※		※	

（注）※列はいずれも「(C)50m 避難－(A)150m 避難」の値。



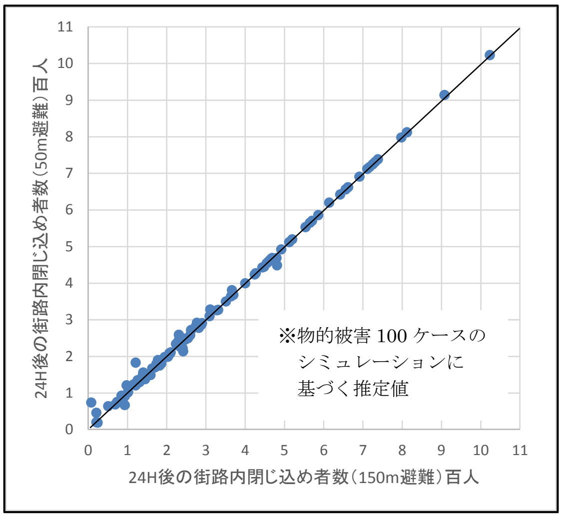


図 3.6.2　避難開始のタイミングと死亡者数（左）・街路内閉じ込め者数（右）の関係
（物的被害ケース別）

この結果は，頻度は低いながらも，逃げ遅れによって人的被害が著しく増加する可能性があることを示唆している。特に，多くの人々が滞在している一時集合場所においては，火災の延焼状況に応じて，早期に広域避難場所への避難を開始することが重要である。特に，木造住宅密集地域においては，一時集合場所にはとどまらず，集合した後は，秩序正しく広域避難場所へ移動することが望ましい。

3.7　建物内・街路内・街区内での閉じ込めや逃げ遅れの傾向

図 3.7.1 には，街路内閉じ込め者の時間推移を示してある。救助・消火活動を行う場合の方が，街路内閉じ込め者数が数十人程度多く見える。これは，救助・消火活動を行わない場合には，建物閉じ込め者や死亡者としてカウントされていた人々の影響である。建物内閉じ込め者の場合（図 3.4.3）とは異なり，時間推移に傾向の違いはさほど見られない。発災直後は多くの人々が街路上に閉じ込められていることに気づいていないが，時間の経過とともに避難を試み，閉じ込めに気づく人々の数が増加する。発災から約 7 時間が経過すると，街路内に閉じ込められて逃げ惑っている人々の数はピークを迎える（平均で約 466 人）。その後，火災延焼が拡大し，巻き込まれた人々が死亡者に転ずることで，街路内閉じ込め者数は次第に減少する。

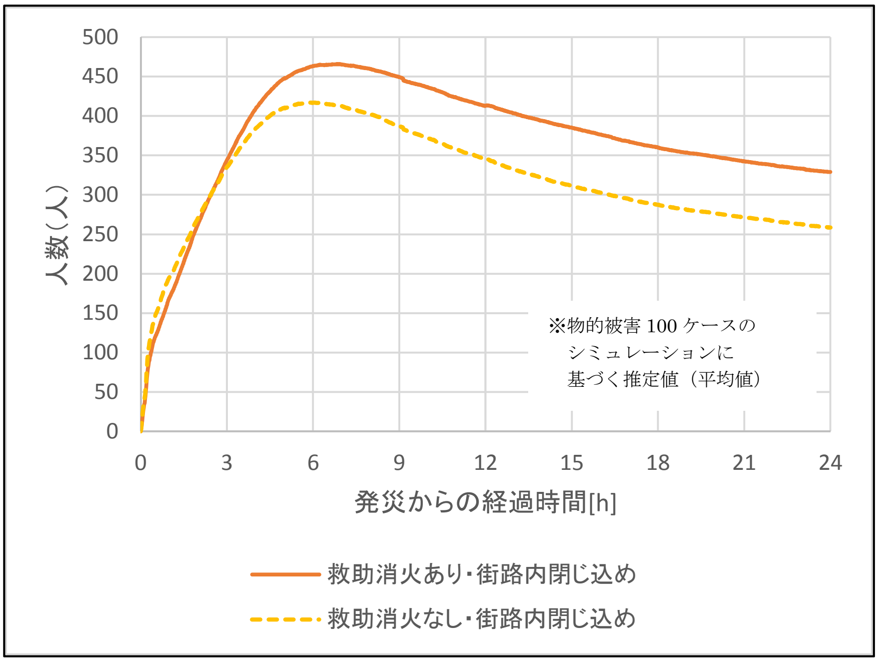


図 3.7.1　街路内閉じ込め者数の時間推移

死亡原因別の人数を物的被害ケースごとに見ると（図 3.7.2），即死者数や建物内での死亡者数は概ね一定であるのに対し，火災による街路上での死亡者数は，ケースによって大きく異なっている。この結果は，大地震時の人的被害を低減させる上で，地域住民の消火活動により延焼火災の発生を抑制するだけでなく，避難者が街路内に閉じ込められにくくするための市街地整備（緊急避難路の整備による三方向避難経路の確保等）の重要性を示唆している。こうした市街地整備の効果は第 6 章で検証する。

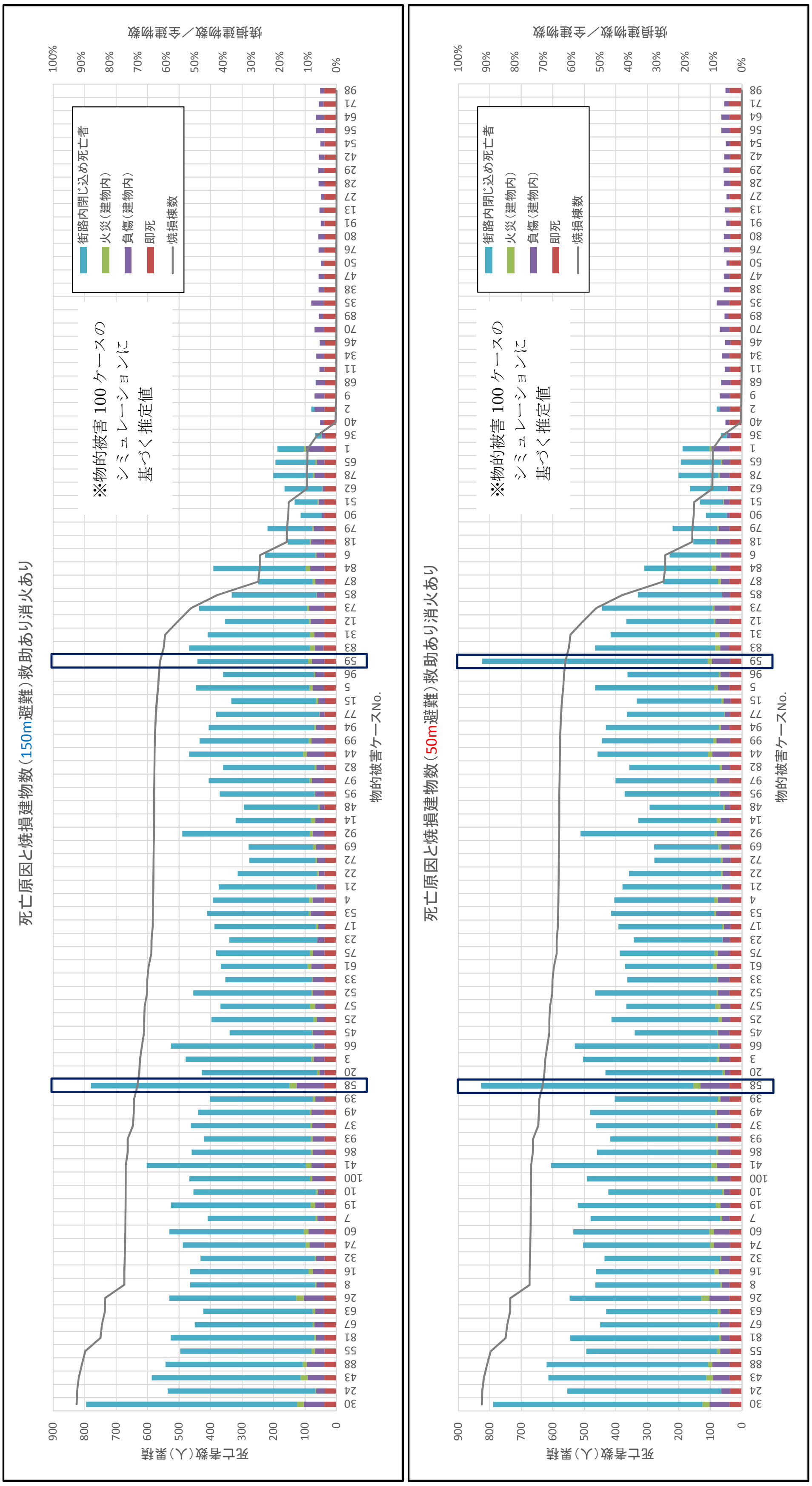


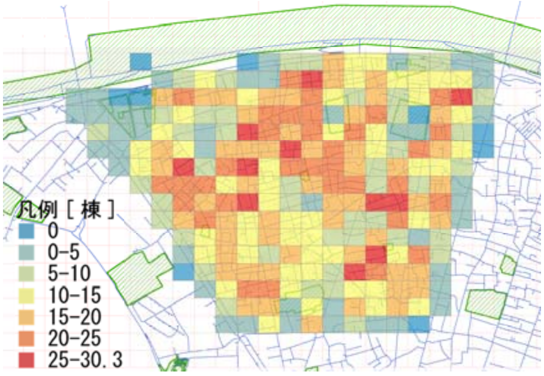
図 3.7.2　焼損建物数と死亡原因別人数の関係　（上：150m 避難，下：50m 避難）

「150m 避難」と「50m 避難」のいずれにおいても死亡者数が特に多い物的被害ケース（No. 58）は，焼損建物数は中程度（消火活動なしの場合：上位 38 位，消火活動ありの場合：上位 25 位）であるにもかかわらず，火災による街路上での死亡者数が，他のケースと比較して突出して多い。シミュレーション結果を詳細に見ると，数街区がまとまった程度のエリア内に，道路閉塞によって多数の人々が閉じ込められる「街区内閉じ込め」現象が発生していた（図 3.7.3）。深刻な街区内閉じ込めを引き起こす可能性のある道路や建物を特定し，耐震化・不燃化を優先的に実施することが必要である。

図 3.7.3　街区内閉じ込め現象の例（ケース No. 58，発災から 3 時間半経過後）

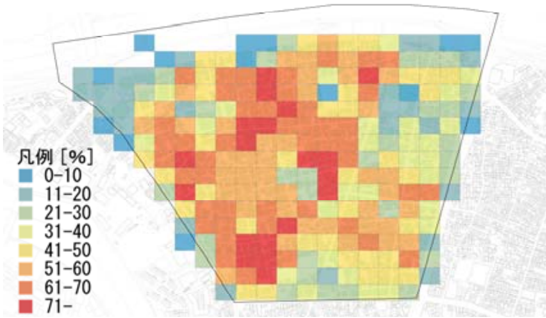
3.8　人的被害と空間性状の関係

文献[7]によれば，町丁目単位の木造建物棟数密度と避難困難率の間には，高い正の相関関係がある。同様に，50m メッシュ単位の木造建物棟数密度と死亡者発生率（100 回のシミュレーションに占める，死亡者が発生した回数の割合）の空間分布は類似しており（図 3.8.1(a)，図 3.8.1(b)），高い正の相関関係が見てとれる（図 3.8.1(e)）。木造建物が密集した地域では，倒壊建物が含まれやすいだけでなく，倒壊建物の瓦礫が道路を閉塞させることで避難行動や救助・消火活動を妨げ，また，火災も延焼しやすいためと考えられる。中には，50m メッシュ内の木造建物棟数が 25 棟，すなわち，木造建物が 10m 間隔で等間隔に建ち並んだ非常に密な状態に相当するメッシュも存在するが，そこでは 50%以上の確率で死亡者が発生する可能性があり，非常に危険である。



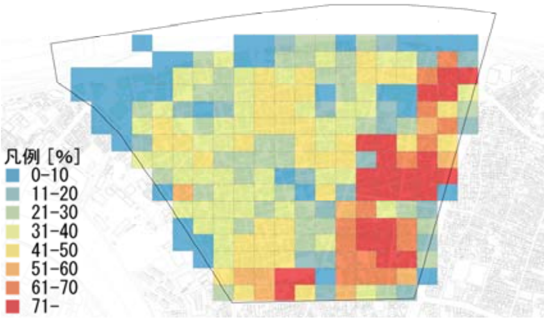
(a)木造建物棟数密度の空間分布

※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値



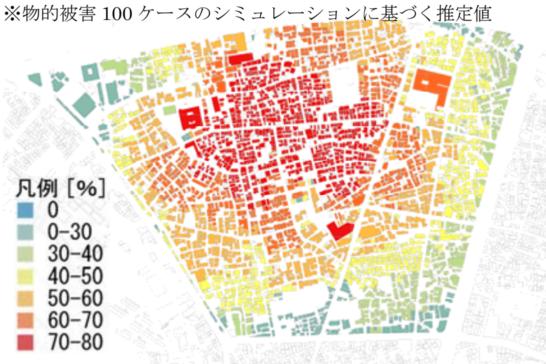
(b)死亡者発生率の空間分布
（救助・消火ありの例）

※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値

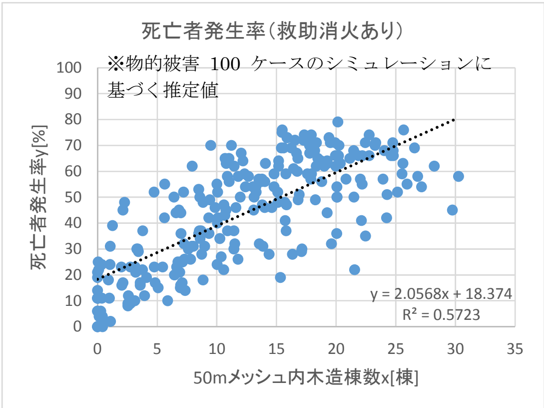


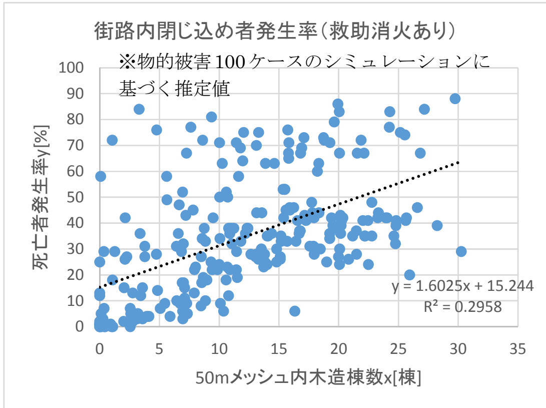
(c)街路内閉じ込め者発生率の空間分布
（救助・消火ありの例）

※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値



(d)建物焼損率の空間分布





死亡者発生率		
	救助消火あり	救助消火なし
回帰係数	2.06	2.66
切片	18.4	27.4
R2値	0.572	0.667

(e)木造建物棟数密度と
死亡者発生率の比較

街路内閉じ込め者発生率		
	救助消火あり	救助消火なし
回帰係数	1.60	1.25
切片	15.2	12.2
R2値	0.296	0.222

(f)木造建物棟数密度と
街路内閉じ込め者発生率の比較

図 3.8.1　木造建物棟数密度と死亡者・街路内閉じ込め者発生率の関係

※死亡者と街路内閉じ込め者の位置は，発災時にいた 50m メッシュ単位で集計している。

一方，街路内閉じ込め者の発生率に着目すると，木造建物棟数密度との相関は比較的低い（図 3.8.1(f)）。空間分布を見ると，分析対象地域の東側・南側に発生率の高いメッシュが目立つ（図 3.8.1(c)）。これは，建物焼損率（100 回のシミュレーションのうち，各建物が出火または他の建物から延焼被害を受けた回数，すなわち，焼失ポテンシャル[8]）の低い地域と対応している（図 3.8.1(d)）。すなわち，南側のエリアは，2 本の広幅員道路に面していることから，他の地域からの延焼の影響を受けにくく，街路上に閉じ込められた場合でも，火災に巻き込まれて死亡する可能性が低いためと推察される。

3.9　本章のまとめ

本章では，第 2 章で構築した「大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデル」を用いて，首都直下地震で想定されている規模と同程度の大地震が発生したことを想定し，典型的な木造住宅密集地域である東京都足立区千住地域を対象に，物的被害 100 ケース分のシミュレーションを実行した。そして，大地震時における地域の脆弱性を，物的被害（建物倒壊率，道路閉塞率，焼損建物割合等）と人的被害（死亡者数，建物内・街路内・街区内閉じ込め者数等）の両方の観点から定量化した。ここでのシミュレーション結果は，物的被害が地域住民の行動に影響を及ぼし，人的被害をもたらしている一方で，地域住民の消火活動によって焼損被害が軽減し，救助活動によって建物内閉じ込め者を救出する等，物的被害・救助活動者・消火活動者・広域避難者の間の相互作用を考慮したものである。また，分析対象地域内のどのような箇所で，どのような場合に，焼損被害や人的被害が大きくなりやすいかを，建物・道路・街区レベルのミクロスケールで明らかにした。

本シミュレーションモデルは，特に，複数の想定間の優劣を相対的に検討する場合に有効である。その一例として，本章では，地域住民自身が発災直後に救助・消火活動を行う場合と行わない場合，さらに，火災接近時の避難開始のタイミングが早い場合（火災が 150m 以内に迫った時点）と遅い場合（火災が 50m 以内に迫った時点）をそれぞれ比較し，救助・消火活動の効果とリスク，および，逃げ遅れの影響について分析した。ここでは，同一のシミュレーションモデルで，行動ルールのみを変更してシミュレーションを実行したことで，行動ルールの差が結果の違いとなって現れていると見なすことができる。

本章の主要なシミュレーション結果と得られた知見を以下に整理する。また，付録 2 では，250m メッシュ単位のマクロな被害推計手法を採用している文献[2]の想定と，本章のシミュレーション結果を比較することで，本シミュレーションモデルを用いた推定結果の妥当性の検証を試みている。

- 建物倒壊率は平均約 20%，道路閉塞率は平均約 31%と，非常に高い値を示した。
- 火元初期消火の成功率は平均 35.5%（3.0 件の出火のうち 1.1 件で成功）であった。

- 地域住民による延焼阻止活動が試みられた 89 ケースのうち，延焼阻止成功に成功した事例が見られたのは 12 ケースに過ぎず，2 件以上の延焼阻止に成功した事例は見られなかった。この結果は，木密地域における大地震時の延焼阻止活動の困難さを示唆している。
- 地域住民による消火活動を行う想定では，行わない想定と比較して，発災から 24 時間経過後の焼損建物数が 5 分の 1 程度減少した。延焼阻止活動の困難さを勘案すると，出火率を小さく抑え，より早い段階で火元初期消火を成功させることが重要である。
- 地域住民による救助・消火活動を行う想定では，行わない想定と比較して，発災から 24 時間経過後の死亡者数が 3 分の 2 程度まで低減した。
- 焼損建物数の減少量と死亡者数の低減量には高い相関関係が認められた。これは，焼損建物数の低減が，街路上で火災に巻き込まれ死亡する可能性のある人の数を低減することにつながっているためである。
- 木密地域において，地域住民による救助活動の効果は大きい。本地域の例では，救助活動が全く行われない場合，発災から 24 時間経過後も，発災時における建物内閉じ込め者の約半数が建物内に閉じ込められたままであるが，救助活動を行うことで，この数を 7.6%にまで減少させることが期待できる。
- 救助活動に参加しない場合と比較して，救助活動を行う地域住民自身が大きなリスクにさらされることを裏付けるシミュレーション結果は得られなかった。
- 火災接近時の避難のタイミングが遅れた場合，平均値レベルでは人的被害（死亡者数）の程度に大きな影響は見られなかったが，一時集合場所からの逃げ遅れにより，400 人近く死亡者数が増加した事例が 1 ケース見られた。
- 50m メッシュ単位の木造建物棟数密度と死亡者発生率の空間分布は類似しており，高い正の相関関係が見受けられた。
- 焼損建物数の程度の割に死亡者数が多いケースでは，数街区がまとまった程度のエリア内に，道路閉塞によって多数の人々が閉じ込められる「街区内閉じ込め」現象が発生していた。

第 4 章以降では，本モデルを応用し，具体的な各種減災対策（建物内対策・建物間対策・市街地整備施策）の実施効果を，大地震時における物的・人的被害の観点から評価することで，木密地域における施策評価・合意形成支援ツールとしての本モデルの有用性を示す。

参考文献（第 3 章）

[1]　東京都：地震に関する地域危険度測定調査（第 7 回），2013.9, http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/chousa_6/home.htm [2017.10.10 参照]

[2]　東京都：首都直下地震等による東京の被害想定，2012.4, http://www.bousai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html [2016.9.13 参照]

[3]　翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係，地域安全学会論文集，No.1，pp.51-56，1999

[4]　藤本一雄・翠川三郎：マグニチュードの影響を考慮した計測震度と地震動強さ指標の関係式，日本地震工学会論文集，Vol.10，No.2，pp.1-11，2010

[5]　沖拓弥・大佛俊泰：大地震時の地域住民による救助活動と広域避難時の逃げ遅れ，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2 分冊，pp. 259-260，2015.9

[6]　加藤孝明・程洪・亜力坤玉素甫・山口亮・名取晶子：建物単体データを用いた全スケール対応・出火確率統合型の地震火災リスクの評価手法の構築，地域安全学会論文集，Vol. 8，pp.279-288，2006.11

[7]　大佛俊泰・沖拓弥：密集市街地における大地震時の避難困難率について，日本建築学会計画系論文集，Vol. 77，No. 681，pp. 2561-2567，2012.11

[8]　廣川典昭・大佛俊泰：同時多発火災を想定した大規模延焼シミュレーションに基づく延焼危険性指標の提案と消防隊行動支援への活用，日本建築学会計画系論文集，Vol.82，No.732，pp.301-310，2017.2

[9]　沖拓弥・大佛俊泰：住民による救助活動を組み込んだ大地震時における木密地域の広域避難シミュレーション分析，日本建築学会計画系論文集，Vol. 81，No. 724，pp. 1345-1353，2016.6

[10]　T. Osaragi and T. Oki, “Wide-Area Evacuation Simulation Incorporating Rescue and Firefighting by Local Residents,” Journal of Disaster Research (Special Issue on Disaster and Big Data Part 2), Vol. 12, No. 2, pp. 296-310, 2017.3

なお，本章の内容は，筆者らの既発表論文[5, 9, 10]の一部を加筆・修正したものである。

第４章　建物内対策による減災効果の評価

4.1　建物内対策とシミュレーションによる減災効果の評価方法
4.2　現状における物的・人的被害
4.3　家庭用消火器の完備（対策①）による減災効果
4.4　感震ブレーカーの完備（対策②・対策③）による減災効果
4.5　本章のまとめ

※本文中で言及している物的・人的被害のシミュレーション結果は，特定の想定の下での推定値であり，分析対象地域で同様の物的・人的被害が必ず発生することを意味するものではない。

第 4 章　建物内対策による減災効果の評価

4.1　建物内対策とシミュレーションによる減災効果の評価方法

個々の建物内における減災対策は，各建物の所有者や居住者に委ねられているものの，最も基本的かつ重要な施策といえる。時には，個々の建物の災害脆弱性が，居住者自身の安全のみならず，周辺住民や市街地全体の安全性を大きく左右する場合もある。近年の例では，2016（平成 28）年 12 月 22 日に発生した糸魚川市大規模火災が記憶に新しい。

本章では，個々の建物内における減災対策に着目した分析を行う。その一例として，比較的低コストかつ容易に実施可能であると考えられる，家庭用消火器や感震ブレーカーを各家庭に完備することによって，出火率がどの程度低減し，その結果，焼損建物数や死亡者数をどの程度低減できる可能性があるかを，シミュレーションにより検証する。

分析対象地域とシミュレーションの想定条件は，第 3 章と同一とした（図 4.1.1，表 4.1.1）。そして，現状（平成 23 年時点）に加えて，建物内対策を実施することを想定した計 4 通りの比較想定（表 4.1.2）を設定し，各種対策の実施効果を相対的に評価する。ここでは，物的被害の程度を表す指標として焼損建物割合を，人的被害の程度を表す指標として死亡者数を用いる。また，物的被害の空間分布や人間行動の違いに由来するシミュレーション結果の不確実性を考慮するために，想定ごとに物的被害 100 ケース分のシミュレーションを実行し（物的被害 100 ケース×4 想定＝計 400 回），各ケースの値そのものや，100 ケースの平均値・中央値・最大値・最小値に基づき議論する。

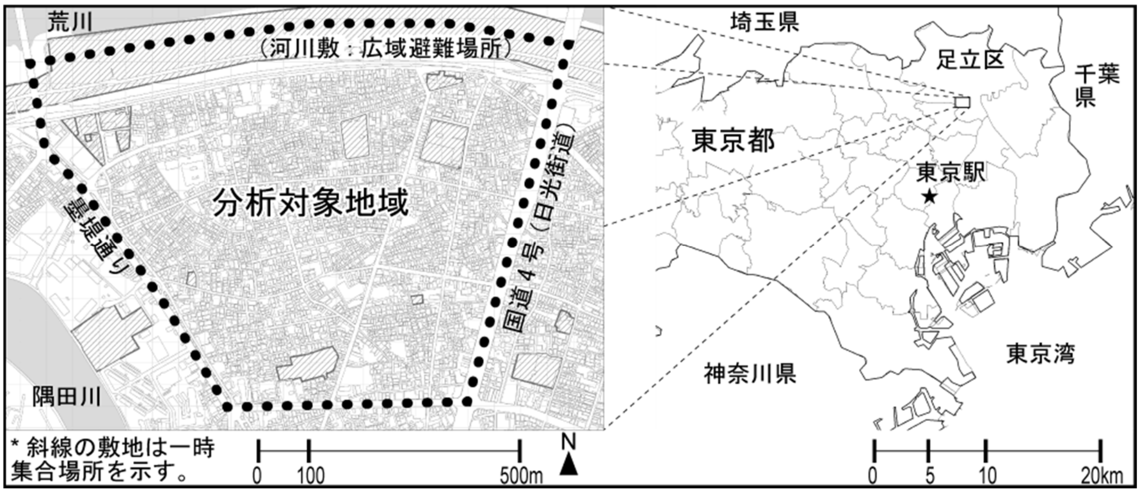


図 4.1.1　第 4 章のシミュレーションの分析対象地域

表 4.1.1　第 4 章のシミュレーションの想定

震度(計測震度)	6強(6.16)	
地表面最大速度	81.0cm/sec(kine)	
地震加速度	828cm/sec^2(gal)	
発災時刻	平日午後6時	
シミュレーション時間	発災から24時間後まで	
季節・風向・風速	冬季・北風8m/sec	
分析対象者の総数	9,638人	100.0%
(自宅滞在者)	6,875人	71.3%
(自宅外施設滞在者)	2,481人	25.7%
(屋外歩行者)	282人	2.9%
地域内の建物総数	4,392棟	
物的被害ケース数	100ケース	

表 4.1.2　対策評価のための比較想定

想定		想定する状況	節
現状		2011（平成 23）年当時における市街地の状況。 以降の想定のもととなる基本シナリオ。 ※家庭用消火器設置率は 68.1%[1]，感震ブレーカー設置率は 0%としている。	4.2 (第 3 章に対応)
建物内対策	対策①	現状から，地域内建物の家庭用消火器設置率が 100%に向上した状況。	4.3
	対策②	現状から，地域内建物の感震ブレーカー設置率が 100%に向上した状況。	4.4
	対策③	対策①と対策②の両方を実施した状況。	

※出火建物内にいる非閉じ込め者だけが家庭用消火器を使用できるものと想定している。
※全火元建物のうち，60%[2]の建物をケースごとに無作為に抽出し，通電火災が発生する建物とみなす。対策②・対策③では，これらの建物からの出火を感震ブレーカーで阻止可能としている。
※想定間の比較を容易にするため，物的被害の空間分布等は固定している。

それぞれの指標を物的被害ケース別・想定別に比較した結果を図 4.1.2 に，各想定の集計値の比較結果を図 4.1.3 および図 4.1.4 に示してある。次節以降で，各想定における結果の解釈について詳述する。

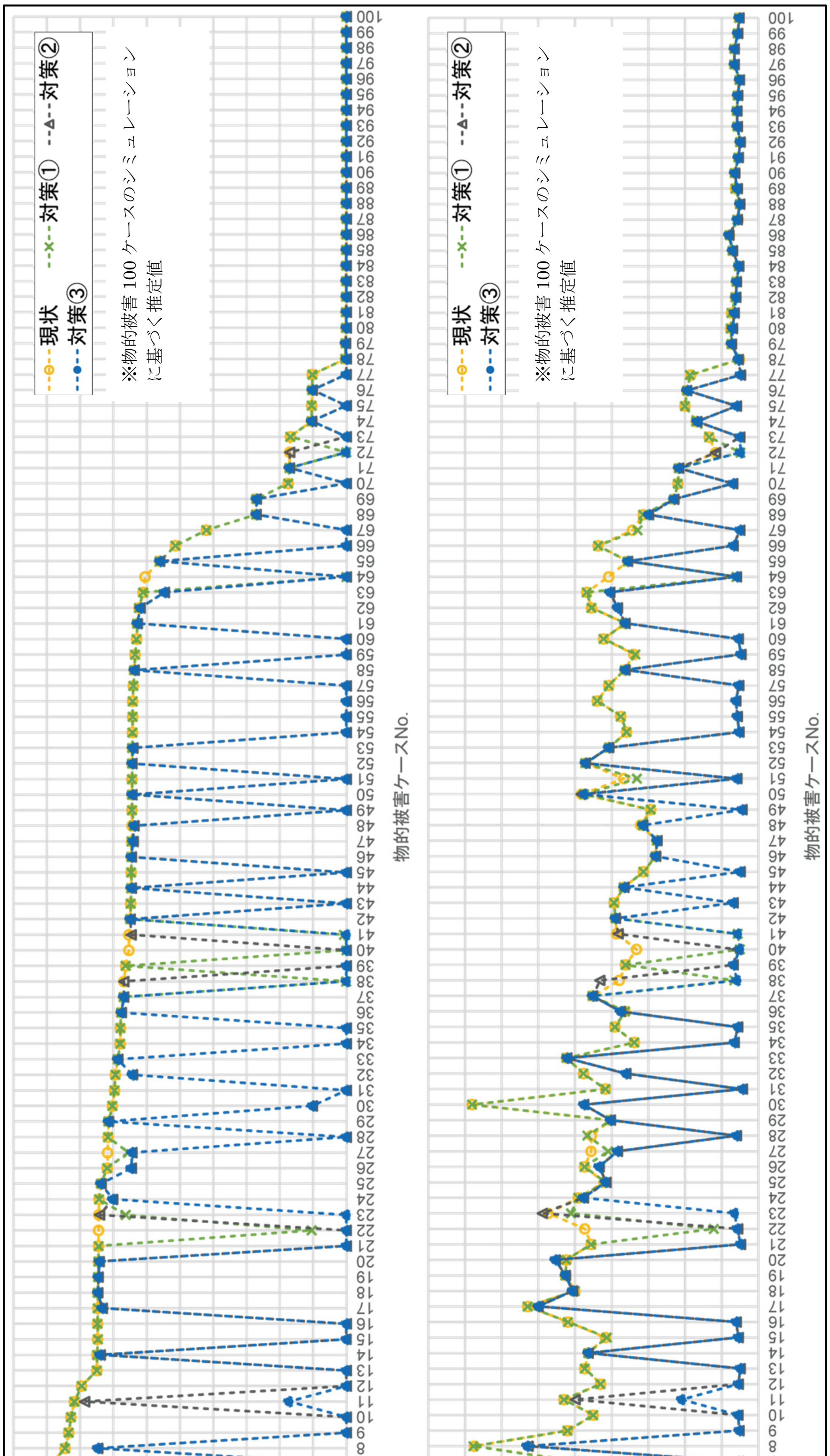


図 4.1.2　焼損建物割合（上）および死亡者数（下）の比較

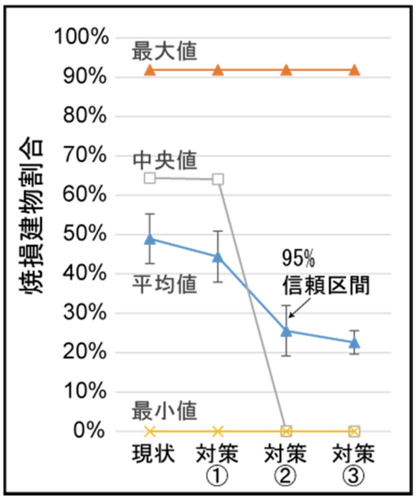


図 4.1.3　焼損建物割合の集計結果
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値（平均値）

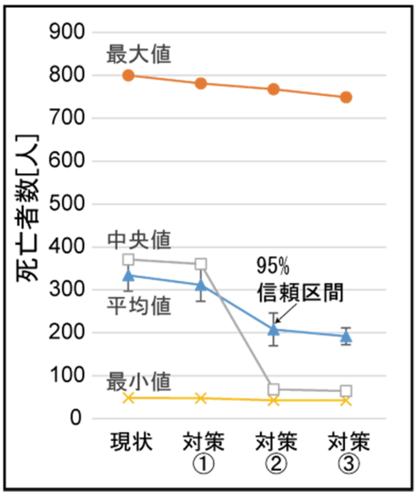


図 4.1.4　死亡者数の集計結果
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値（平均値）

4.2　現状における物的・人的被害

現状を想定したシミュレーション結果によれば，平均で全建物の 49.0%が焼損し，334 人が死亡する。本地域のような木造住宅密集地域においては，最も深刻な場合の焼損建物割合は 91.9%（物的被害ケース No.1），死亡者数は 800 人（物的被害ケース No.2）に上る。また，100 ケースのうちの 64 ケースで，分析対象地域の全建物の 6 割以上が焼損する可能性が見てとれる。これは，第 3 章で述べたように，分析対象地域の西側に位置する建物が，1 つの大規模な延焼クラスタを形成しているためである。すなわち，これらの建物からの出火がわずか 1 件であっても，その消火に失敗した場合，クラスタを構成するほぼ全ての建物が焼損し，300 人以上の地域住民が死亡する可能性を示唆している。一方，住民による消火が成功し，焼損建物割合がゼロである（または，限りなく小さい）場合，死亡者数は 100 人以下（平均死亡者数の 3 分の 1 以下）に減少する。こうした死亡者の大部分は，焼損被害の程度にかかわらず発生する，全壊建物内での即死者（圧死者）である。換言すると，死亡者数は焼損建物数に大きく依存していることから，人的被害を低減するためには，出火・延焼を防止することが最も重要である。

4.3　家庭用消火器の完備（対策①）による減災効果

大地震発生直後に調理器具や暖房器具から火災が発生した場合，建物内滞在者がすぐに消火器を用いて消火できるかどうかが重要である。東京消防庁の調査[1]によると，2011（平

成 23）年現在，消火器の所有率は全世帯の 68.1%（前節の想定）である。本節では，各建物・住戸に家庭用消火器の設置が義務付けられ，消火器設置率が 100%になることを想定する。ただし，出火元の建物内にいる人々だけが消火器を使用できるものと仮定している。

消火器設置率が 100%になった場合の焼損建物割合を見ると，現状（4.2 節）で少なくとも 1 棟が焼損したケースのうち，対策①によって焼損棟数がゼロになったケースは 5 ケースのみで，焼損棟数がある程度減少するケースも 13 ケースにすぎない。また，平均焼損建物割合は 44.4%，平均死亡者数は 312 人で，いずれも現状と比べて減少しているが，死亡者の数が 700 人を超えるケース（物的被害ケース No.2）も依然として存在する。

家庭用消火器の完備は，火元初期消火成功率を向上させる上で重要である。しかし，本節のシミュレーション結果に基づくと，対策①単独での減災効果は小さいと考えられる。これは，火元建物の居住者が留守の場合や，建物内部で閉じ込められている場合，あるいは，死傷している場合があるためである。

4.4　感震ブレーカーの完備（対策②・対策③）による減災効果

居住者が不在で初期消火が行われないケースの中には，地震発生から一定時間が経過した後に停電が復旧することで，地震によって損傷した電気製品や電気配線から出火する場合がある。実際に，兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災，1995 年 1 月）時に発生した 139 件の火災のうち 85 件（61%），東北地方太平洋沖地震（東日本大震災，2011 年 3 月）時に発生した火災 110 件のうち 71 件（65%）が，こうした通電火災が原因によるものであったと報告されている[2]。そこで，電気に起因する火災の発生を防止することを目的に，各住宅に「感震ブレーカー」の設置が推進されている。感震ブレーカーには，一定規模以上の振動を感知すると，自動的に通電を遮断する機能がある。すなわち，感震ブレーカーは，出火防止には有効であるが，火災延焼には無効である。また，重りの落下やバネの作動によりブレーカーを操作，電気を遮断する「簡易タイプ」，センサーが揺れを感知し，コンセントの電気を遮断する「コンセントタイプ」，センサーが揺れを感知し，ブレーカーを落として電気を遮断する「分電盤タイプ（内蔵型／後付型）」など，様々なタイプの感震ブレーカーが販売されている[2]。

本節では，全ての建物に，こうした感震ブレーカーを設置することによる，焼損建物割合や死亡者数の低減効果を検証する。具体的には，現状の想定で出火した全建物のうちの 60%の建物を無作為に抽出し，感震ブレーカーによって出火を阻止できるものとみなす。

感震ブレーカーの完備は，出火件数の減少に大きく寄与する。このことから，シミュレーション結果を見ると，対策②によって，地域全体が焼損するケースは大幅に減少し，焼損棟数が（ほぼ）ゼロとなるケース数も，現状の 23 ケースから 57 ケースに増加していることがわかる。しかし，平均焼損建物割合は 25.6%，平均死亡者数は 208 人に減少するものの，それぞれの最大値は現状と同程度である。また，対策①と対策②の両方を実施した場合（対策③）も，対策②単独で実施した場合と比較して，減災効果に大きな違いは見られない。

この結果は，感震ブレーカーの完備が，焼損建物数や死亡者数の期待値を低減する上では効果的である一方で，甚大な被害が発生するリスクを低減する観点からは不十分である可能性を示唆している。

4.5　本章のまとめ

本章では，第 2 章で構築した「大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデル」を用いて，建物内対策の一例として，家庭用消火器や感震ブレーカーが各建物に完備された状況を想定し，その減災効果を焼損建物割合と死亡者数の観点から評価した。

本章の主要なシミュレーション結果と得られた知見を以下に整理する。

- 家庭用消火器単独での減災効果は小さい。これは，居住者が留守の場合や，建物に閉じ込められている場合，あるいは，死傷している場合があるためである。
- 感震ブレーカーは，阪神・淡路大震災時や東日本大震災時の出火原因の約 6 割を占める電気火災の防止につながることから，焼損建物割合や死亡者数を（平均値レベルでは）大きく低減する効果が見られた。一方，電気火災以外の出火防止には無効であることから，最大被害は現状と同程度であった。
- 家庭用消火器と感震ブレーカー両方を完備しても，感震ブレーカーのみを完備した場合と比較して，減災効果に大きな違いは見られなかった。

本章のシミュレーション結果は，家庭用消火器や感震ブレーカーに一定の減災効果があり，これらの設置を各建物・世帯で促進していく施策の有効性を示している。しかし同時に，出火を確実にゼロに抑えることの困難さも明らかとなった。火元建物内での火元初期消火に失敗した場合，隣接建物への延焼を阻止できるか否かが，その後の焼損被害の程度を大きく左右すると考えられる。こうした観点から，第 5 章では，建物間の延焼阻止・遅延対策の有効性について，シミュレーションによる検討を試みる。

参考文献（第 4 章）

[1]　東京消防庁：減災目標を達成するため木造住宅密集地域において緊急に実施すべき震災対策，火災予防審議会答申（第 19 期），2011

[2]　内閣府：感震ブレーカー等の性能評価ガイドラインについて，大規模地震時の電気火災の発生抑制に関する検討会，2015.2,
http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/denkikasaitaisaku/pdf/kanden_guideline_gaiyou.pdf,
[2016.12.16 参照]

[3]　T. Oki and T. Osaragi, “Urban Improvement Policies for Reducing Human Damage in a Large Earthquake by Using Wide-Area Evacuation Simulation Incorporating Rescue and Firefighting by Local Residents,” Planning Support Science for Smarter Urban Futures, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer International Publishing, pp. 449-468, 2017.5

[4]　沖拓弥・大佛俊泰：家庭用消火器と感震ブレーカーの設置による減災効果―大地震時の物的被害・人間行動シミュレーションを用いた防災・減災対策の評価 その 2―，日本建築学会大会学術講演梗概集，F-1 分冊，pp. 813-814，2017.9

なお，本章の内容は，筆者らの既発表論文[3, 4]の一部を加筆・修正したものである。

第５章　建物間の延焼阻止・遅延対策による減災効果の評価

5.1　建物間の延焼阻止・遅延対策とシミュレーションによる減災効果の評価方法
5.2　出火件数と火元初期消火の成否
5.3　延焼阻止活動の成否
5.4　延焼阻止成功に転じた事例の分析
5.5　延焼阻止失敗事例の分析
5.6　本章のまとめ

※本文中で言及している物的・人的被害のシミュレーション結果は，特定の想定の下での推定値であり，分析対象地域で同様の物的・人的被害が必ず発生することを意味するものではない。

第 5 章　建物間の延焼阻止・遅延対策による減災効果の評価

5.1 建物間の延焼阻止・遅延対策とシミュレーションによる減災効果の評価方法

東京湾北部地震（M7.3）発生時には，800 棟以上の建物から出火し，最終的な焼失棟数は 20 万棟以上，火災による死傷者数は 2 万人以上に上ると想定されている[1]。大地震時特有の同時多発火災に対しては，公設消防力が不足する可能性が指摘されており[2]，火災延焼被害を低減する上で，地域住民自身の果たす役割は大きい。特に，いわゆる木造住宅密集地域においては，1 件の出火が大規模火災となる可能性が非常に高いことから，出火率そのものを低減させる取り組みが何よりも重要である。

第 4 章では，建物内で行う減災対策として，家庭用消火器や感震ブレーカーを完備することによって，出火率をどの程度低減でき，どの程度の物的・人的被害の低減効果が見られるかを，シミュレーションにより明らかにした。シミュレーション結果によれば，こうした建物内対策をもってしても，出火件数を確実にゼロに抑えることは困難であった。ただし，万が一出火した場合でも，火災の初期段階であれば，地域住民が行う消火活動によって，火災の拡大を阻止できる可能性がある。しかし，大地震発生直後の混乱した状況下において，地域住民による延焼阻止活動がどの程度機能するかについては，過去の調査事例も少なく，これまで十分に議論されているとは言い難い。そこで本章では，「大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデル」を用いて，木造住宅密集地域における地域住民による延焼阻止活動がどの程度機能するかを，シミュレーションにより明らかにする。本モデルを用いることで，物的被害と，多様な行動をとる地域住民との間の相互作用を考慮しながら，延焼阻止活動の成否を判定できる。

分析の内容は以下の通りである。まず，火元建物の住民による消火（火元初期消火）が失敗した場合に，スタンドパイプ等の消火用資器材を用いた周辺住民の消火活動によって，隣接建物への延焼をどの程度阻止できる可能性があるかを，シミュレーションで想定ごとに推定する。ここでは，木密地域内における延焼阻止活動の円滑性改善策（スタンドパイプの増設や，建物の耐震化による道路閉塞の影響の減少等）に対して，建物間への樹木や生垣の設置を想定し，隣接建物への延焼に要する時間を仮想的に遅延させることで，建物間延焼阻止・遅延対策の有効性を評価する。次に，延焼阻止に成功した事例に着目し，火元建物の構造や建築面積，および，出火から放水開始までの所要時間等を分析することで，延焼阻止活動が成功するための要件を整理する。また，延焼阻止成功率をさらに向上させるための知見を得ることを目的として，延焼阻止に失敗した事例に着目し，どの活動フェーズに時間を要し，どの時点で隣接建物に延焼してしまう事例が多いかを明らかにする。

本章のシミュレーションでは，第 4 章までと同様に，典型的な木造住宅密集地域である東京都足立区千住地域の中から，広幅員道路に囲まれたエリア（千住柳町周辺）を抽出し，分析対象地域とする（図 5.1.1）。シミュレーションの想定条件（地震動の強さ，発災時刻，気象条件等）についても，第 4 章までと同一である（表 5.1.1）。そして，地域住民による延焼阻止活動と各種施策の実施効果をそれぞれ把握するために，以下の 6 つの想定①～⑥の下で，物的被害の分布の異なる 100 ケース（合計 600 回）のシミュレーションを実行する。

想定①：2011（平成 23）年時点での市街地を想定。以降の想定のもととなる基本想定である。
想定②：対象地域内のスタンドパイプを大幅に増設する想定（図 5.1.1）。消火活動開始までの時間が短縮されることで，延焼阻止成功件数の増加が期待される。
想定③：建物の耐震化（例：耐震補強等）の結果，道路閉塞によって延焼阻止活動が妨げられることがなくなった状況を想定。道路閉塞による迂回が減少し，延焼阻止成功件数の増加が期待される。
想定④・⑤・⑥：建物の難燃化（例：建物間への樹木・生垣の設置等）の結果，延焼速度が低減し，出火建物から隣接建物への延焼に要する時間が，それぞれ 5 分・10 分・20 分増加した想定。消火活動開始までの猶予時間が増加することによって，延焼阻止成功件数の増加が期待される。

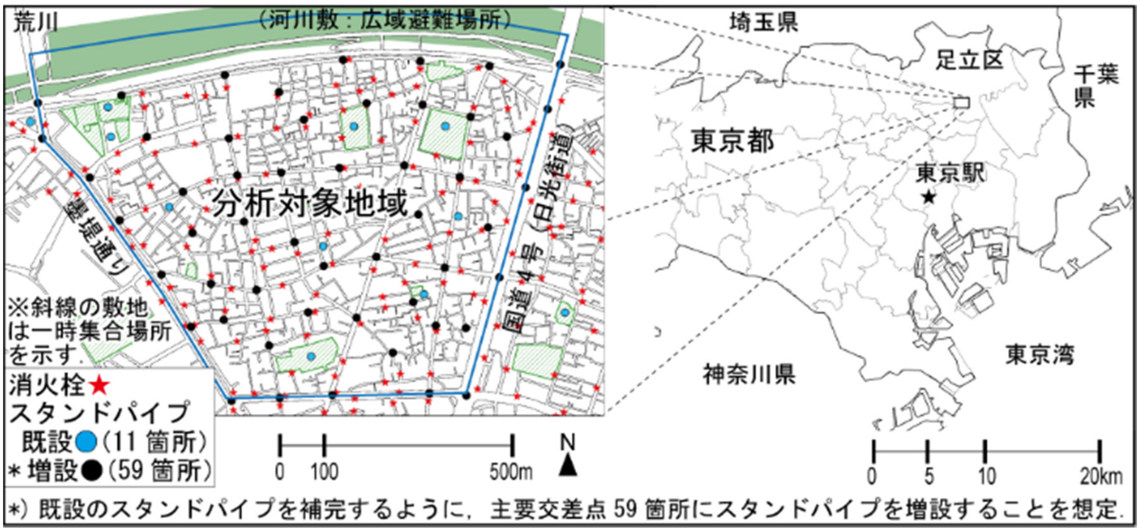


図 5.1.1　第 5 章のシミュレーションの分析対象地域

表 5.1.1　第 5 章のシミュレーションの想定

震度（計測震度）	6強（6.16）
地表面最大速度PGV	81.0 [cm/sec(kine)]
地震加速度PGA	828 [cm/sec^2(gal)]
発災時刻	平日の午後6時 （24時間後まで計算）
季節・天気・風向・風速	冬季・晴れ・北風・8 [m/sec]
対象地域内の全建物数	4,392 [棟]
分析対象者の総数	9,638 [人]
物的被害ケース数	100 [ケース]

※GIS データのうち，建物や道路は東京都都市計画 GIS データの平成 23 年土地・建物現況調査データを，消防水利やスタンドパイプ等は東京消防庁提供のデータ（平成 26 年現在）を使用している。

5.2　出火件数と火元初期消火の成否

出火件数の頻度分布を図 5.2.1 に示してある。物的被害 100 ケースの合計出火件数は 304 件（1 ケース平均 3.0 件，最大 7 件）であった。このうち，火元建物の住民自身による家庭用消火器を用いた消火（火元初期消火）が成功した事例は，約 108 件（全出火の 35.5%）にとどまった。火元初期消火の失敗原因は，「出火建物の住民不在」が最も多く（59.6%），次いで，「出火建物の住民が消火活動不能（死傷または閉じ込め）」（25.5%），「出火建物に家庭用消火器なし」（14.9%）の順に多い（図 5.2.2）。火元初期消火に失敗した，これらの合計約 196 件（全出火の 64.4%）で，延焼阻止活動が試みられる。

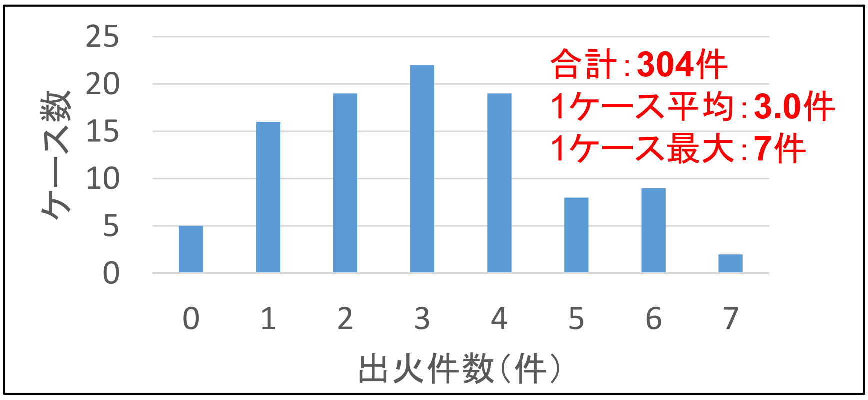


図 5.2.1　出火件数の頻度分布（物的被害 100 ケースの内訳）

※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値

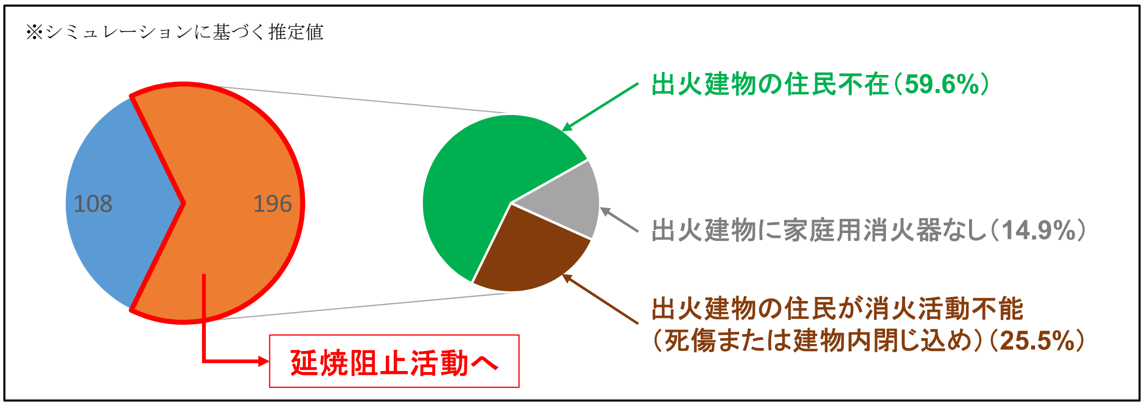


図 5.2.2　火元初期消火の成否

5.3　延焼阻止活動の成否

図 5.3.1 に，想定①～⑥における消火成功率（延焼阻止活動の実施対象件数に占める，消火成功件数の割合）と延焼阻止成功率（消火成功率に，建物内部での自然鎮火も含めた値）を示してある。想定①での延焼阻止成功率は 22.4%であるが，消火成功率は 6.1%と非常に低い。また，対象地域内の資器材の不足と偏り（図 5.1.1）が大幅に改善した想定②や，道路閉塞による影響を受けない想定③の下でも，延焼阻止成功率はそれぞれ 29.8%（想定②）と 25.4%（想定③）までの増加にとどまった。一方，出火建物から隣接建物への延焼に要する時間を仮想的に増加させた想定での延焼阻止成功率は，10 分増加すると 31.4%（想定⑤），20 分増加すると 40.5%（想定⑥）まで向上した。

想定①での延焼阻止失敗事例（計 152 件）における，出火から隣接建物延焼までの所要時間の分布を図 5.4.1(a)に示してある。142 件の火元が防火木造または裸木造であり，その平均建築面積は 49.0m^2，出火から隣接建物延焼までの所要時間は平均 9.5 分であった。すなわち，出火から 10 分以内に消火活動を開始しなければ，延焼阻止活動実施対象のうち半数以上（104 件）で隣接建物に延焼してしまうことになる。

火元建物の周辺住民が出火を覚知するまでに 2 分 30 秒，資器材庫での資器材の取り出しに 1 分，消防水利での放水準備に 2 分（スタンドパイプの場合）を要する本章の想定（2.5 節参照）の下では，移動に費やせる時間は 4 分 30 秒未満となる。想定②や想定③において，延焼阻止活動の円滑性が大幅に改善したことを想定しても，延焼阻止成功率の増加が限定的であったのは，この猶予時間の短さに起因していると考えられる。

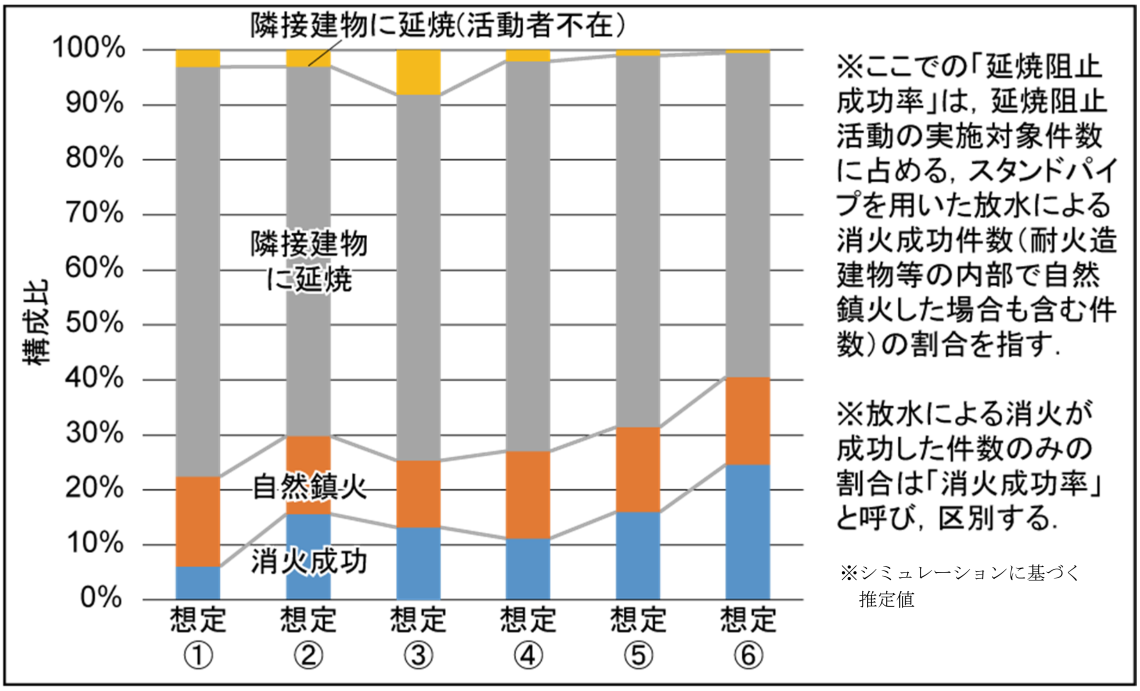


図 5.3.1　消火成功率と延焼阻止成功率の比較

5.4　延焼阻止成功に転じた事例の分析

想定②と想定③では，延焼阻止活動中のアクセシビリティが改善されることから，消火活動開始までの所要時間は短くなる（図 5.4.3）。ただし，想定①と比べて，延焼阻止成功事例の傾向に大きな差は見られない。すなわち，新たに延焼阻止が成功するようになる事例は，隣接建物延焼までの所要時間が元々長めで，延焼の可能性が低い耐火造建築物に集中している（図 5.4.1(b)，図 5.4.2）。

一方，延焼に要する時間が長くなる想定④～⑥では，新たに延焼阻止が成功するようになる事例は，想定①における隣接建物延焼までの所要時間の長短によらず幅広い（図 5.4.1(b)）。防火構造の内訳を見ると，防火木造・裸木造建物の消火成功件数が大きく増加していることがわかる（図 5.4.2）。消火活動開始までの所要時間には，想定①と比較して大差はないものの，消火に成功した建物の平均建築面積は大きく減少し，より小さな建物からの出火であっても延焼阻止が可能となっていることが確認できる（図 5.4.3）。

この結果は，本章の分析対象地域のような木造住宅密集地域においては，隣接建物への延焼のタイミングを遅らせることが，延焼阻止の成否を大きく左右することを示している。

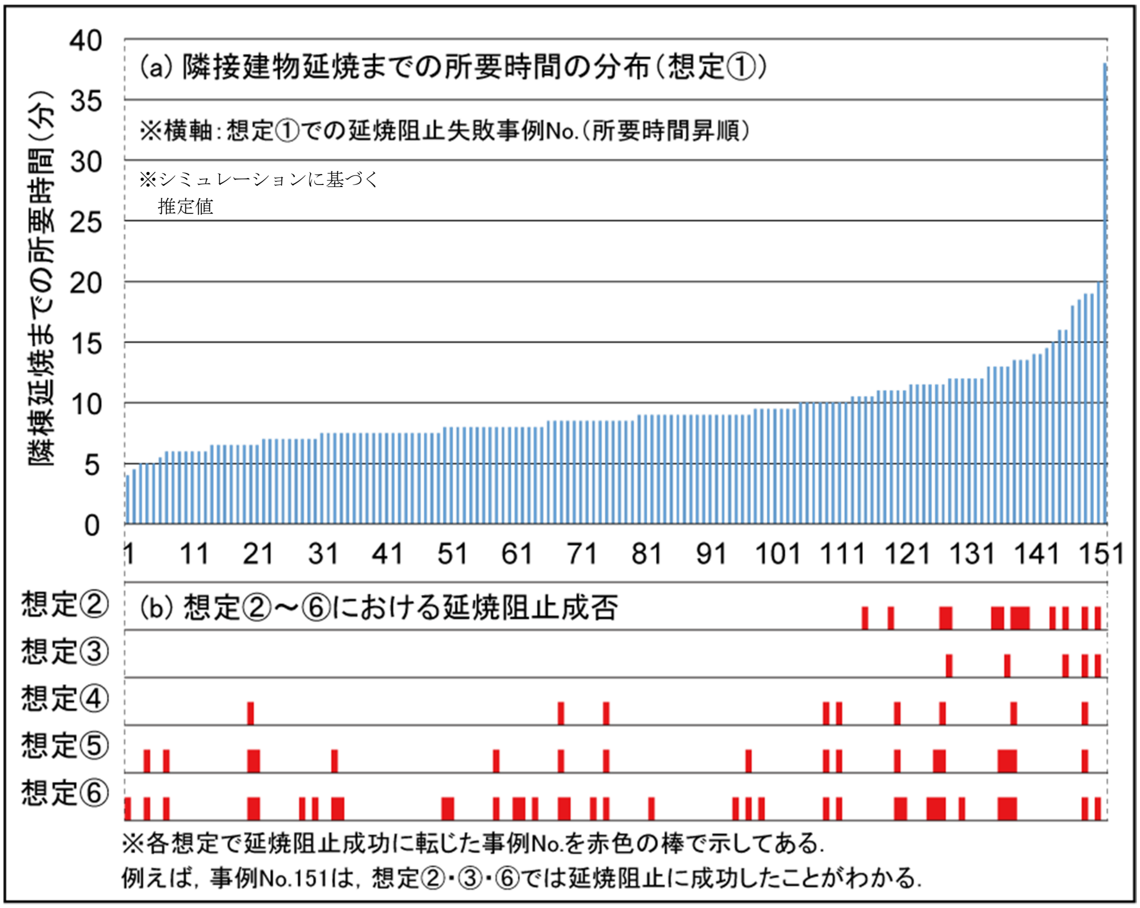


図 5.4.1　隣接建物延焼までの所要時間の分布と想定②～⑥における延焼阻止成否

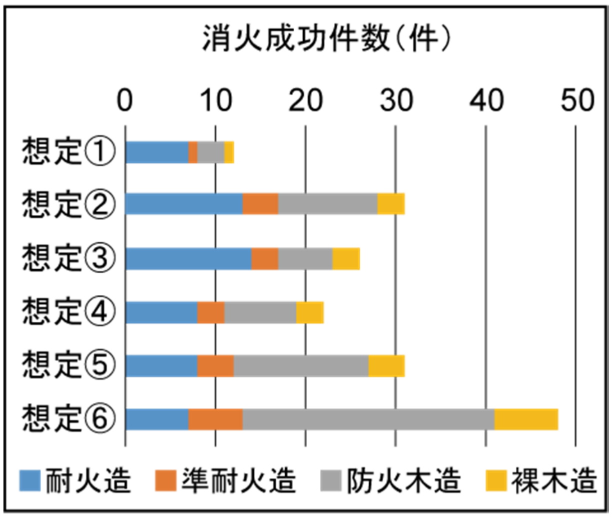


図 5.4.2　消火に成功した出火建物の防火構造構成比（想定別）

※シミュレーションに基づく推定値

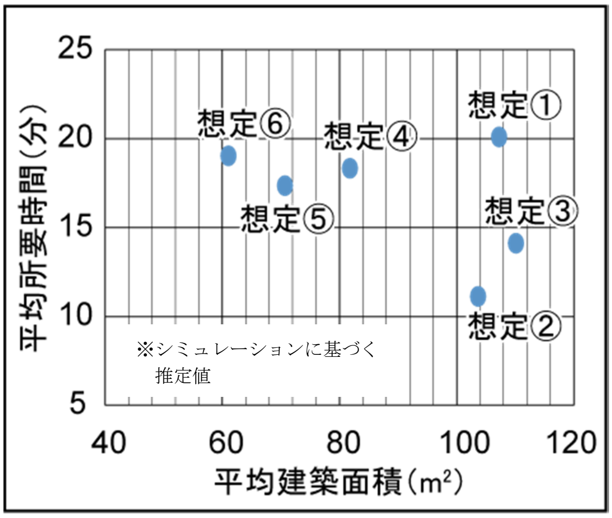


図 5.4.3　消火に成功した出火建物の平均建築面積と消火活動開始までの
平均所要時間（想定別）

5.5　延焼阻止失敗事例の分析

最も延焼阻止成功率の高い想定⑥においても，延焼阻止活動実施対象の約 6 割で消火活動が間に合わず，最終的に隣接建物に延焼している。本節では，延焼阻止成功率をさらに高めるために，各活動段階にどの程度の時間を要し，どの段階で隣接建物に延焼する事例が多いかを明らかにする。

隣接建物に延焼した時点における活動内容（2.5 節のフェーズ(1)～(9)に対応[1]）を見ると（図 5.5.1），いずれの想定においても，火元建物で待機中（フェーズ(3)）に隣接建物に延焼する事例が多いことがわかる。これは，大地震発生直後の混乱期において，資器材の搬送と放水に必要な人数（本論文では 4 人）が，出火後すぐに集合することの困難さを示唆している。出火のタイミングにも大きく依存するものの，火元建物の周辺住民がなるべく早く出火を覚知し，消火活動を開始できるような枠組みが必要と考えられる。また，想定①では，資器材庫に移動中（フェーズ(4)）に延焼する事例も多いが，他の想定では，それ以降の過程で延焼阻止に失敗する事例が増加している。

図 5.5.2 は，延焼阻止失敗事例を対象に，延焼阻止活動の各段階における所要時間を想定別に見たものである。想定④～⑥においては，資器材庫や消防水利への移動に長い時間を要

[1] 延焼阻止活動のフェーズは次の 9 段階としている。
(1)出火を覚知→(2)順次火元建物に向かう→(3)火元建物に到着・4 名揃うまで待機→(4)4 名が資器材庫へ移動→(5)資器材庫に到着・資器材の取り出し→(6)消防水利へ移動→(7)消防水利に到着・放水準備→(8)ホースを持って火元建物へ移動→(9)火元建物に到着・放水開始

する傾向が見られる。すなわち，道路閉塞率の低減や資器材の増設等が進めば，さらに延焼阻止成功率を高めることができる可能性がある。

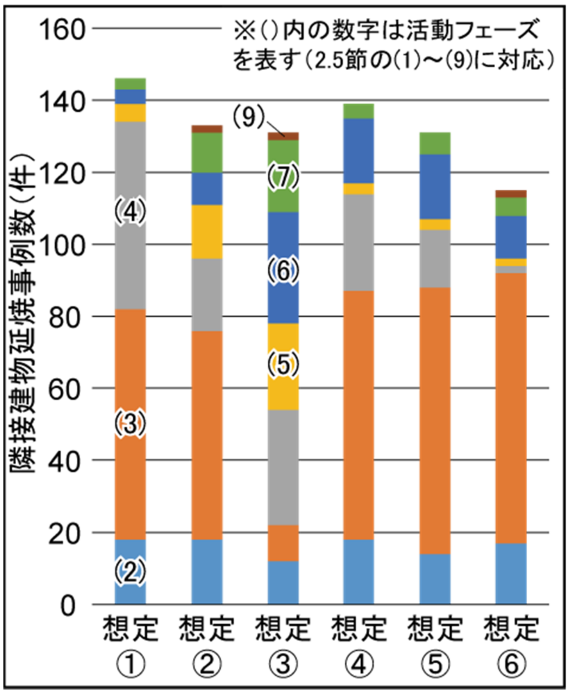


図 5.5.1　隣接建物に延焼したタイミング別・想定別に見た延焼阻止失敗事例数

※シミュレーションに基づく推定値

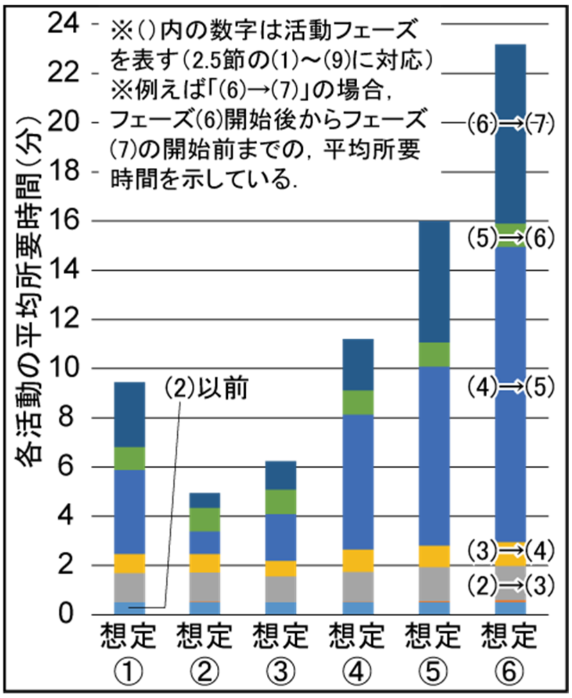


図 5.5.2　延焼阻止活動の各フェーズにおける所要時間の分布（延焼阻止失敗事例）

※シミュレーションに基づく推定値

5.6　本章のまとめ

本章では，大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデルを用いて，東京都足立区千住地域を例にシミュレーションを実行することで，地域住民による延焼阻止活動の有効性を検証した。また，延焼阻止成功率の向上を目的とした各種施策の比較評価を試みた。

本章の主要なシミュレーション結果と得られた知見を以下に整理する。

- 本章の分析対象地域のような木密地域においては，道路閉塞率が高く，延焼阻止活動を円滑に行うことが困難であるだけでなく，建築面積の小さい建物が多く，建物間隔も狭いため，出火から隣接建物へ延焼するまでの時間が非常に短いことが判明した。
- 現状での消火成功率は 6.1%程度と非常に低かった。
- スタンドパイプを大幅に増設した想定や，建物の耐震化が進み道路閉塞の影響を受けない想定の下でも，延焼阻止成功率は 3 割以下にとどまった。また，これらは延焼阻止活動中のアクセシビリティが改善される想定であることから，新たに延焼阻止に成功する事例は，延焼までの時間が元々長い耐火造建築物に集中していた。
- 火元建物に隣接する建物への延焼に要する時間が長くなった想定の下では，現状から 10 分長くなると延焼阻止成功率は約 3 割，20 分長くなると約 4 割程度まで増加した。また，新たに延焼阻止に成功する事例は，現状の隣接建物延焼までの所要時間の長短によらず幅広く分布していた。特に，防火木造・裸木造建物の消火成功件数が大きく増加し，より建築面積の小さい建物からの出火であっても延焼阻止に成功していることが確認された。
- 延焼阻止失敗事例に着目すると，最初に火元建物で待機中に，隣接建物へと延焼してしまう事例が多かった。この結果は，周辺住民がなるべく早く出火を覚知し，消火活動を開始できるような枠組みの必要性を示唆している。
- 隣接建物延焼までの時間が長くなった想定においても延焼阻止に失敗している事例では，資器材庫や消防水利への移動に長い時間を要する傾向が見られた。この結果は，延焼阻止成功率のさらなる向上のために，道路閉塞率の低減や資器材の増設等，アクセシビリティ改善施策をあわせて実施していくことの重要性を示唆している。

本章のシミュレーション結果によれば，建物内部の難燃化や建物間の樹木・生垣の設置など，延焼速度を低減させる取り組みにより，延焼阻止成功の可能性を高めることが期待できる。今後，ブロック塀や建物間植栽等，具体的な建物間延焼遅延対策による減災効果について，本章と同様のシミュレーション分析によって検証する予定である。

参考文献（第 5 章）

[1]　東京都：首都直下地震等による東京の被害想定，2012.4,
http://www.bousai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html [2017.8.16 参照]
[2]　廣川典昭・大佛俊泰：同時多発火災を想定した大規模延焼シミュレーションに基づく延焼危険性指標の提案と消防隊行動支援への活用，日本建築学会計画系論文集，Vol.82，No.732，pp.301-310，2017.2
[3]　沖拓弥・大佛俊泰：大地震時の地域住民による延焼阻止活動に関するシミュレーション分析，地理情報システム学会講演論文集（CD-ROM），Vol. 26，2017.10
[4]　T. Oki and T. Osaragi, “Effects of Firefighting Activities by Local Residents for Mitigating Fire Destruction Damage and Human Casualties in a Large Earthquake,” Journal of Disaster Research (Special Issue on Disaster and Big Data Part 3), Vol. 13，No. 2（査読審査中）

なお，本章の内容は，筆者らの論文[3, 4]の一部を加筆・修正したものである。

第６章　市街地整備による減災効果の評価

6.1　市街地整備とシミュレーションによる減災効果の評価方法
6.2　過去に実施された木密事業の減災効果
6.3　狭隘道路における交差点間短縮避難経路の整備効果
6.4　道路整備（防災生活道路整備と沿道建築物不燃化建替）による減災効果
6.5　道路の整備順が減災効果に及ぼす影響
6.6　耐震化率の改善による減災効果
6.7　本章のまとめ

※本文中で言及している物的・人的被害のシミュレーション結果は，特定の想定の下での推定値であり，分析対象地域で同様の物的・人的被害が必ず発生することを意味するものではない。

第 6 章　市街地整備による減災効果の評価

6.1　市街地整備とシミュレーションによる減災効果の評価方法

本章では，市街地整備前後の GIS データを用いて，同一のシミュレーションモデルおよび同一の行動ルールの下でシミュレーションを実行することで，各種市街地整備[1]の実施効果を，主に大地震時の物的被害・人的被害低減効果の観点から，定量的に評価することを試みる。具体的には，まず，6.2 節で，実際の木造住宅密集地域整備事業（木密事業）が行われる前後の GIS データを用いたシミュレーション結果を比較することで，過去に実施された木密事業の減災効果を評価する。また，6.3 節では，道路の拡幅や建物の建て替えが困難な狭隘道路の沿道において，街路内閉じ込めの危険性を低減させるための「交差点間短縮避難経路」の整備効果を検証する。6.4 節では，地域の軸となるような特定の道路（防災生活道路）の拡幅と，その沿道建築物の不燃化・耐震化が優先的に実施された場合の減災効果を分析する。さらに，6.5 節では，道路の整備順による被害低減の効果・効率の違いを比較することで，限られた時間・コストを有効に活用した整備方法について検討する。最後に，6.6 節では，地域内の建替行動をモデル化した上で，地域内の耐震化が今後進んだ場合に期待される減災効果をシミュレートする。

6.2　過去に実施された木密事業の減災効果

6.2.1　分析対象地域とシミュレーションの想定

本節では，東京都世田谷区若林 3 丁目・若林 4 丁目を分析対象地域とする[2]（図 6.2.1）。本地域は, 昭和 63 年から現在に至るまで木密事業が行われてきた地域である。具体的には,「若林 3・4 丁目地区 防災街区整備地区計画[1]」および「区役所周辺地区 地区街づくり計画[2]」に基づき，①避難路沿道・広域避難場所外周での建築物の不燃化，②敷地面積の最低限度の指定，③幅員 4m 未満の狭隘道路の拡幅等，延焼防止や避難路・緊急車両通行路の確保に重点を置いた整備が行われている。

---

1 ここでは，防災生活道路整備やその沿道建築物の不燃化建替等，面的・線的に行われる基盤整備だけでなく，経年変化とともに自然に進行する個々の建物の不燃化・耐震化も含めて「市街地整備」と呼んでいる。

2 建物現況調査データをベースに，各建物の建築年次や実構造（木造／RC 造／S 造）等の詳細な属性情報を含む GIS データが，5 年ごとに独自に整備されており，本節の分析に適していると考えた。

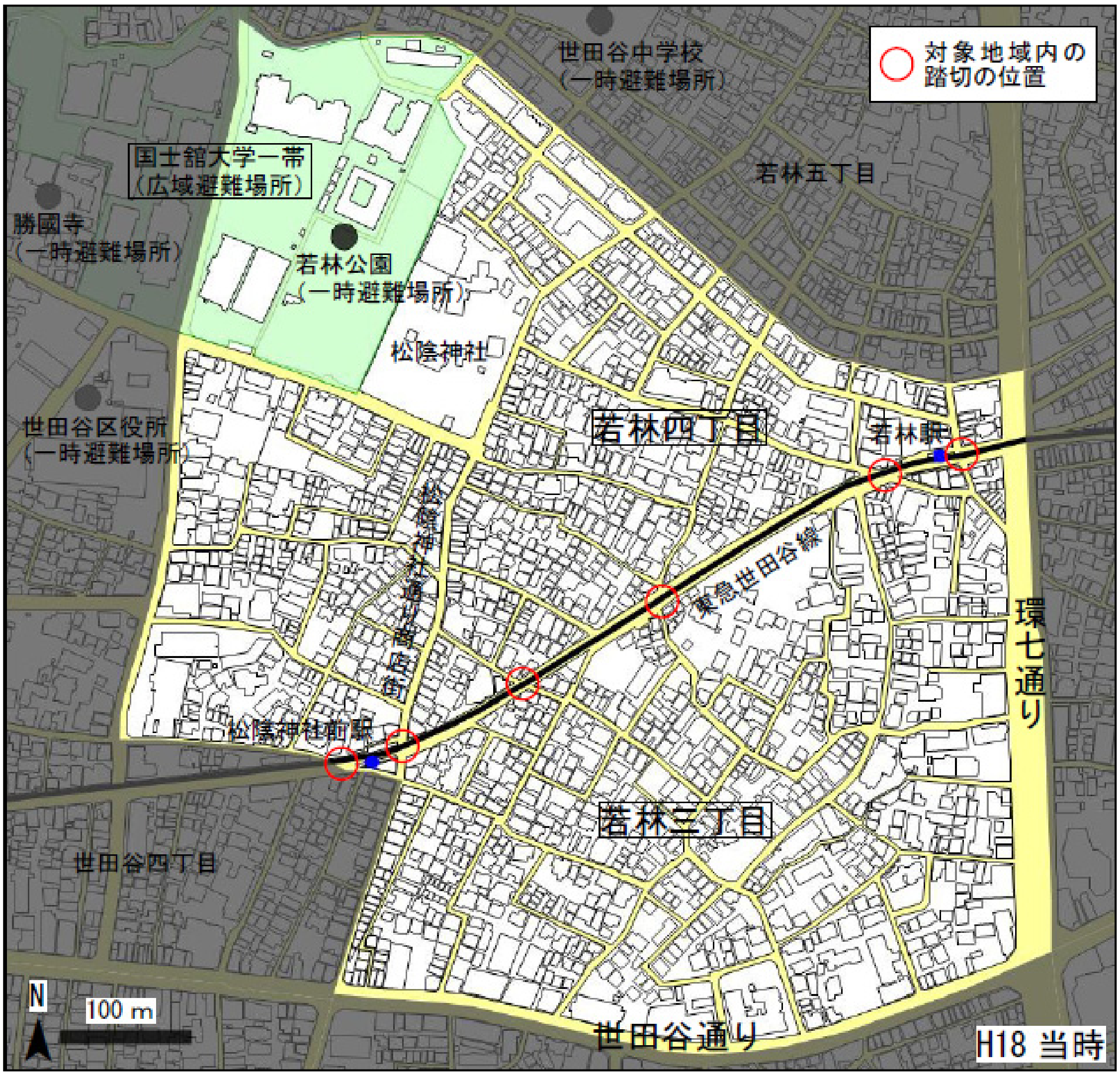


図 6.2.1　6.2 節のシミュレーションの分析対象地域

平成 3 年（以下，H3）と平成 18 年（以下，H18）当時の GIS データを用いて，表 6.2.1 に示す想定でそれぞれシミュレーションを実行し，その結果を比較することで，2 時点間に行われた木密事業を評価する。このとき，2 時点間の比較を容易にするため，(i)50m メッシュ単位で設定した計測震度[3]，(ii)地震発生直後の出火地点の数と位置，(iii)施設内滞留者と歩行者の発災時の居場所，および，(iv)同一人物・同一物的被害ケースの避難開始のタイミングを統一した。

[3] 本節では，第 5 章までと異なり，東京都の被害想定[3]で想定されている震度分布を参考に，50m メッシュ単位で計測震度を確率的に設定している。具体的な設定の手順は，文献[4]に記載してある。

表 6.2.1　6.2 節のシミュレーションの想定

想定地震	東京湾北部地震（マグニチュード 7.3）。 地震動の最大速度と代表加速度は，設定した計測震度に基づき建物毎に設定。
気象条件	北風 8m/sec
出火件数	世田谷区内で 93 件（100 回の出火シミュレーション結果の平均値を使用）
発災時刻	冬の 18 時
試行回数	乱数に基づいて決定した 100 通りの物的被害ケースそれぞれについて，1 回の広域避難シミュレーションを実行（計 100 回）。
参考	東京都の被害想定[3]

6.2.2　市街地の空間性状の変化

防火構造別に分類した建物の空間分布（図 6.2.2）を見ると，H3 には広幅員道路沿いに耐火造・準耐火造の建物が点在しているだけであったが，H18 までに一定幅員以上の道路沿いで建物の不燃化・耐震化が進み，対象地域中心部においても耐火造や準耐火造の建物が増えていることがわかる。耐火造・準耐火造の構成率を見ても，若林 3 丁目・若林 4 丁目ともに H3 時点では約 19%であったが，H18 には約 35%まで増加している（図 6.2.3(a)）。この結果, 不燃領域率[4]の値は上昇しており, 地域全体の平均値でみると未だ十分とは言えないが, 不燃化は着実に進行しており，木密事業は一定の成果を上げていると評価することができる（図 6.2.3(b)）。

4　不燃領域率は以下のように定義される。
不燃領域率[%]＝空地率[%]＋（1－空地率[%]/100）×不燃化率[%]
空地率[%]＝対象市街地の空地総面積/対象市街地面積×100
空地は，幅員 6m 以上の道路と，短辺または直径 10m 以上で，かつ，面積が 100 ㎡以上の水面，鉄道敷，公園，運動場，学校，一団地の施設などを指す（東京都の定義）。
不燃化率[%]＝（地域内耐火建築総面積＋0.8×地域内準耐火建築総面積）/地域内建築総面積×100

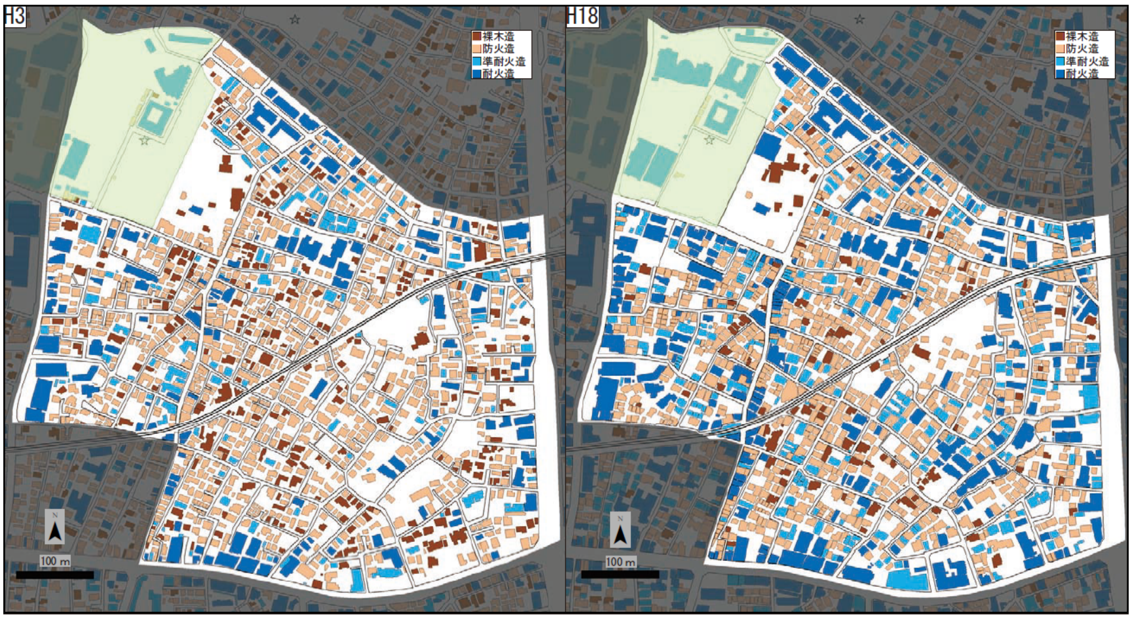


図 6.2.2　防火構造別に分類した建物の空間分布

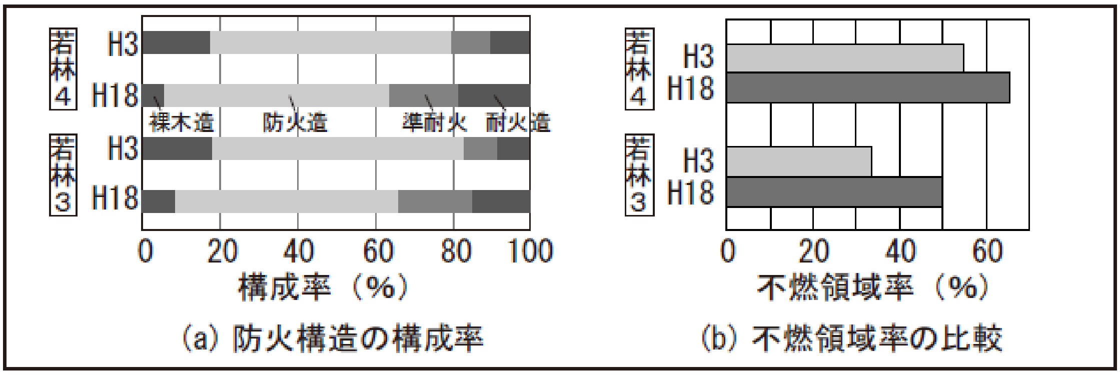


図 6.2.3　防火構造の構成率と不燃領域率の比較

6.2.3　建物全壊率・建物焼損率・道路閉塞率

H3 と H18 それぞれの市街地データを用いて建物倒壊シミュレーションを行った結果（図 6.2.4）を見ると，全壊率（100 回のシミュレーションのうち，各建物が全壊した回数の割合）の高い建物が少なくなっており，地域全体の平均全壊建物割合は H3 から H18 の 15 年間で両町丁目ともに 2 ポイント程度減少している（表 6.2.2①）。同様に，延焼シミュレーションの結果（図 6.2.5）によれば，15 年間で地域全体の焼損建物割合（平均値）は若林 3 丁目で 36.4%から 21.4%に，若林 4 丁目で 34.1%から 31.2%にそれぞれ減少している（表 6.2.2②）。このように，シミュレーション分析の結果からも，木密事業が市街地の不燃化・耐震化に一定の効果を上げていることを定量的に確認することができる。

表 6.2.2　物的被害シミュレーション結果の年次比較

※100 ケースの平均値		①地域全体の全壊建物割合	②地域全体の焼損建物割合	③地域全体の閉塞道路割合	
				③長さベース	④箇所ベース
若林 4	H3	5.42%	34.1%	21.0%	19.6%（44 箇所）
	H18	3.38%	31.2%	13.7%	15.3%（33 箇所）
若林 3	H3	7.05%	36.4%	24.7%	19.5%（38 箇所）
	H18	4.69%	21.4%	21.3%	18.3%（37 箇所）

図 6.2.4　各建物の全壊率（100 回のうち各建物が全壊した回数の割合[推定値]）

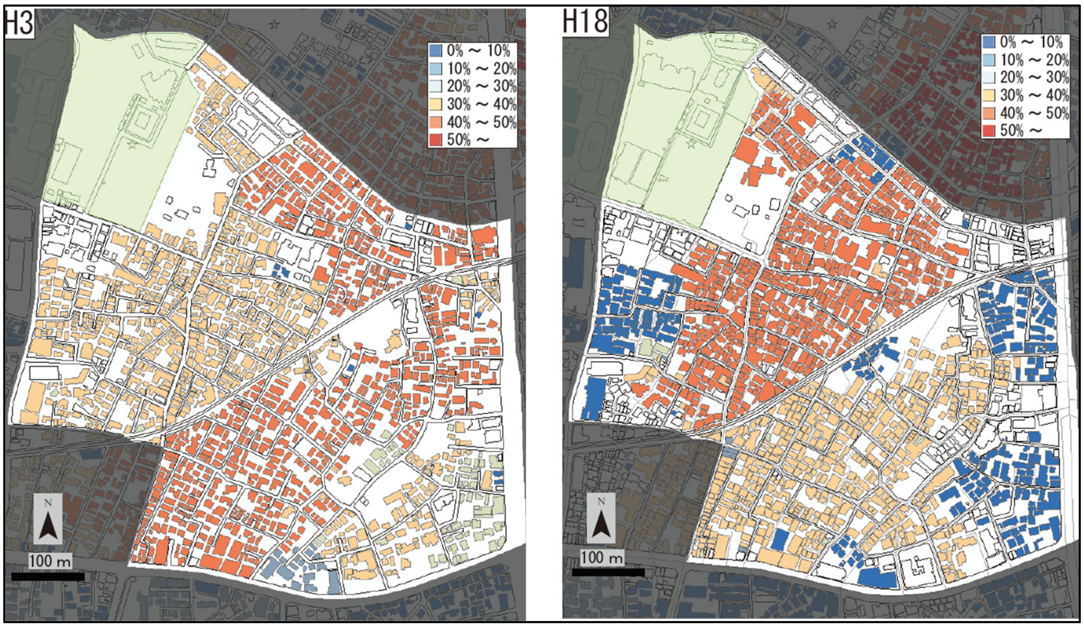


図 6.2.5　各建物の焼損率（100 回のうち各建物が焼損した回数の割合[推定値]）

また，建物倒壊に基づく道路閉塞シミュレーションの結果（図 6.2.6）を見ると，若林 4 丁目の道路閉塞率は H3 から H18 にかけて全体的に低減しているが，若林 3 丁目においては H18 においても依然として高いままである。また，地域全体の道路総延長に占める閉塞道路長さの割合や閉塞箇所の数も，H3 の値とあまり変わらない（表 6.2.2③・④）。これは，もともと建物全壊率のあまり高くなかった箇所を中心に不燃化・耐震化が進んだことや，不燃化・耐震化される際に建物の規模（高さ・面積）も大きくなることで，建物 1 棟だけで閉塞してしまう道路の数が増加することが原因であると推察される。

図 6.2.6　各道路の閉塞率（100 回のうち各道路が閉塞した回数の割合[推定値]）

6.2.4　避難困難率・避難時間

H3 と H18 の避難困難率（全避難者に占める，一時集合場所または広域避難場所まで到達できない人の割合）を比較すると，道路閉塞率の減少した若林 4 丁目で地域全体の平均避難困難率は約 8.7%減少している。また，道路閉塞率の改善量が小さい若林 3 丁目においても避難困難率は約 2.6%程度減少し（図 6.2.7），避難場所に到達するまでに要する時間や距離も減少している（図 6.2.8）。このことは，避難経路として有効に機能しうる道路の整備が進んだ可能性を示唆している。

一方，分析結果を子細に観察すると，道路幅員が狭く交差点間距離が長い道路（例えば，図 6.2.9 に黒太線で示す道路 A～D）では，建物別の避難困難率（100 回のシミュレーションのうち，各建物で一時集合場所または広域避難場所まで到達できない人が発生した回数）が

ほとんど改善していない。こうした道路では，複数箇所が閉塞し，閉じ込めが発生する可能性が高く避難困難となりやすい。さらに見通しが悪い場合には，閉塞の存在を知らずに進入することで，引き返す人との交錯等，混乱が危惧される。地域全体の避難困難率を低く抑えるためには，こうした局所的な危険箇所をシミュレーションで特定し，改善していくことが有効である。

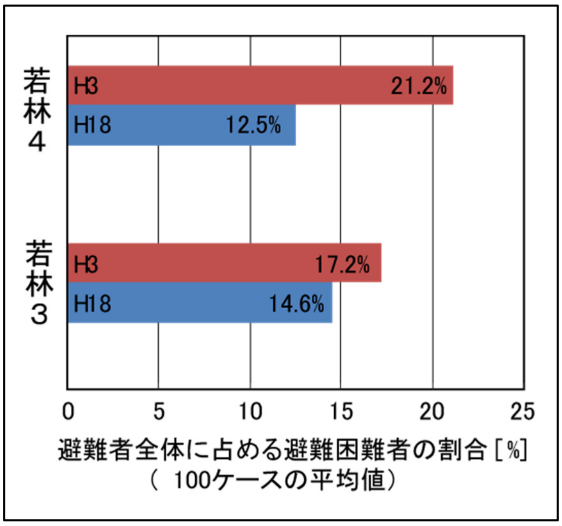


図 6.2.7　地域全体の避難困難率の比較
※シミュレーションに基づく推定値（平均値）

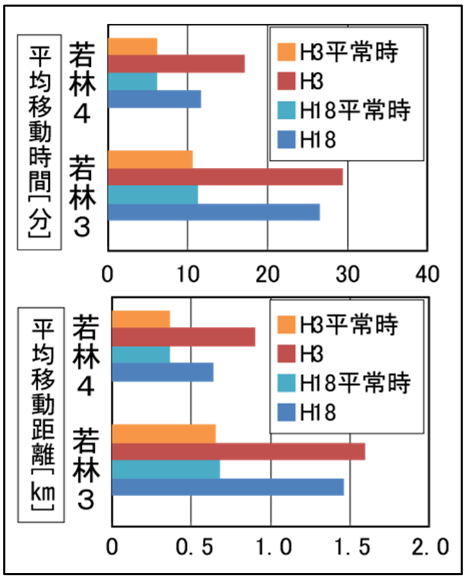


図 6.2.8　最初に到着した一時集合場所・広域避難場所までの平均移動時間・距離[5]
※シミュレーションに基づく推定値

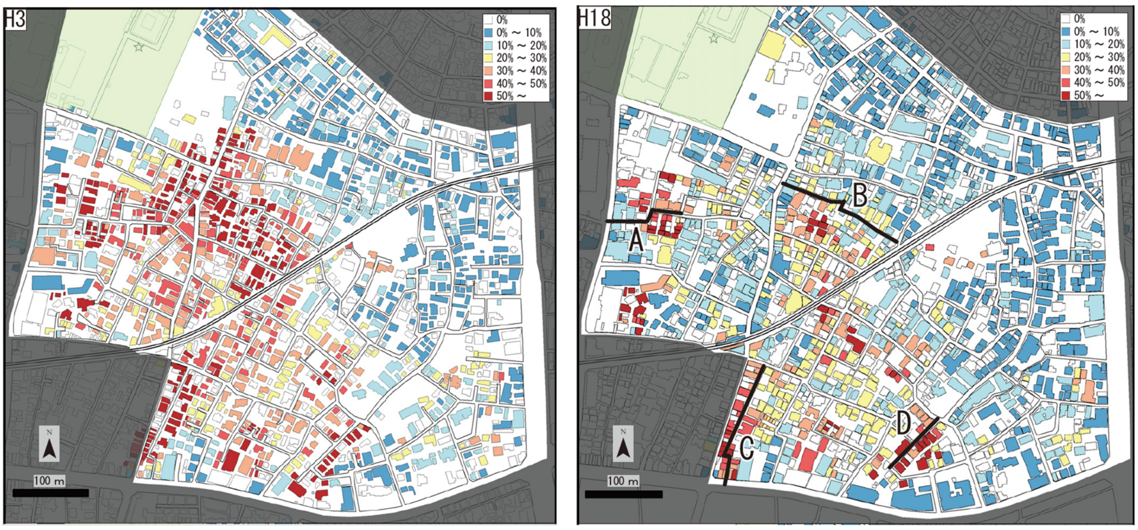


図 6.2.9　建物別にみた避難困難率の空間分布
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値

5 参考値として，それぞれの年次・町丁目の平常時の値（道路閉塞が全く存在しない状況下での平均移動時間・移動距離）も表示してある。

6.3　狭隘道路における交差点間短縮避難経路の整備効果

6.3.1　分析の視点

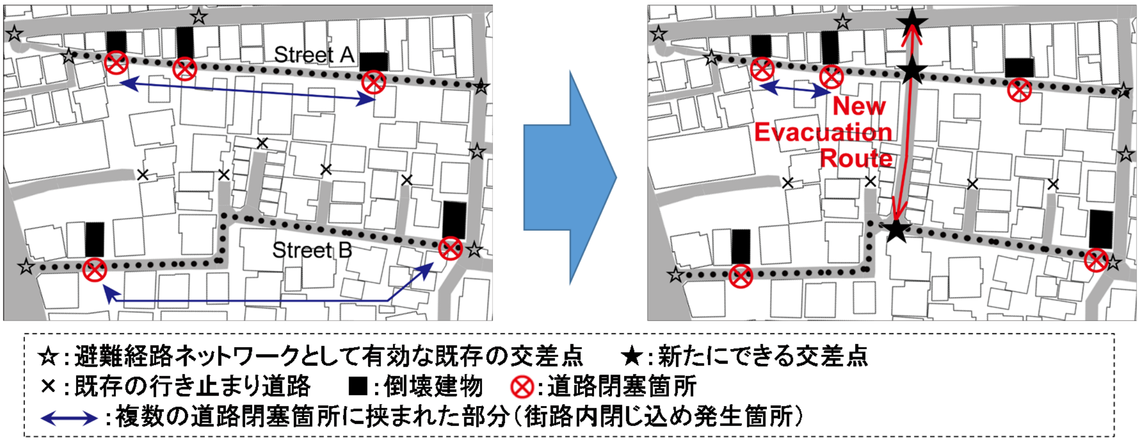
国道・都県道などの広幅員道路で囲まれた地域内において，防災生活道路の整備とその沿道建築物の不燃化・耐震化が進められている（その減災効果は次節で分析する）。しかし，防災生活道路で囲まれた，さらに狭いエリア（アンコ）内から防災生活道路（ガワ）まで到達するためには，狭隘道路を利用して避難しなければならない場合が多い。一般に，こうした道路の沿道には木造住宅が密に建ち並んでいることから，大地震時に建物が倒壊して道路を閉塞させる可能性が高く，また，道路の拡幅も困難である。そこで，狭いエリアでの街路内閉じ込めリスクを低減するための施策を，別途検討する必要がある。

前節のシミュレーション結果を精緻に眺めてみると，局所的に街路内閉じ込めリスクの高い建物は，片方の交差点ともう一方の交差点との間の距離が長く，かつ，幅員の狭い道路に面している場合が多いという特徴が見られる（図 6.2.9）。また，袋小路（行き止まり道路）に面する建物は，避難路が一方向に限られた状態に等しい。もし，建物倒壊や火災などで道路が閉塞すると，行き止まり道路内に閉じ込められることになる。こうした問題に対処するため，ある自治体では「行き止まり道路の緊急避難路整備事業」を実施している。具体的には，土地・建物の権利者と自治体が協定を締結し，（緊急時にのみ）近隣住民が通行することのできる二方向目の避難路を，庭先や建物間に設ける事業である。

そこで本節では，この事例に倣い，道路幅員が狭く交差点間距離の長い道路に着目し，避難に有効な経路を追加することで，どのような効果が得られるのかについてシミュレーションで検討する。以下では，本整備手法を「交差点間短縮避難経路整備」と呼ぶ。

6.3.2　シミュレーションの方法

木密事業により大きく改善したものの，局所的に避難困難率の高い箇所が残存する平成 18 年時点の状況について検討する。まず，避難困難率の空間分布（図 6.2.9）をもとに，交差点間短縮避難経路整備の優先順位を 3 段階で設定した。具体的には，避難困難率の値が高い道路から順に，地域内既存道路総延長に対する長さが 1%，2%，3%となるように，避難経路を設定した。このとき，既存の行き止まり道路（袋小路）を利用し，少ないコスト（短い距離）で高い効果が得られるよう配慮した。この例を図 6.3.1 に示してある。この準備のもとで，避難経路を段階的に増やしながら，物的被害 100 ケースそれぞれについてシミュレーションを実行する。結果の比較を容易にするために，シミュレーションの想定は 6.2 節と同一とした。



【現状（左図）】	【対策（右図）】
狭隘道路 A・B は交差点（☆印）間の距離が長く，複数箇所で閉塞が発生し，街路内閉じ込めが発生する可能性が高い。	家屋間に，避難に有効な経路を確保することで，街路内に閉じ込められる可能性が減少し，効率的・効果的な避難が可能となる。

図 6.3.1　交差点間短縮避難経路整備の例

6.3.3　建物単位にみた避難困難率の低減

優先順位が上位 1%（4 本）の避難経路を整備すると，経路に面する建物だけにとどまらず，その周辺の避難困難率が減少する（図 6.3.2(a)）。優先順位が上位 2%，3%の避難経路を追加し，整備量を増やしていくと，避難困難率はさらに減少するが，次第にその効率は低くなる（図 6.3.2(b),(c)）。また，避難経路の通し方によってもその効果は大きく異なる。例えば，上位 2%の段階で道路⑤の交差点間距離を短縮する避難経路は，複数の行き止まり道路を同時に解消するよう機能することから，広範囲にわたり避難困難率を低減させることに成功している（図 6.3.2 (b)）。

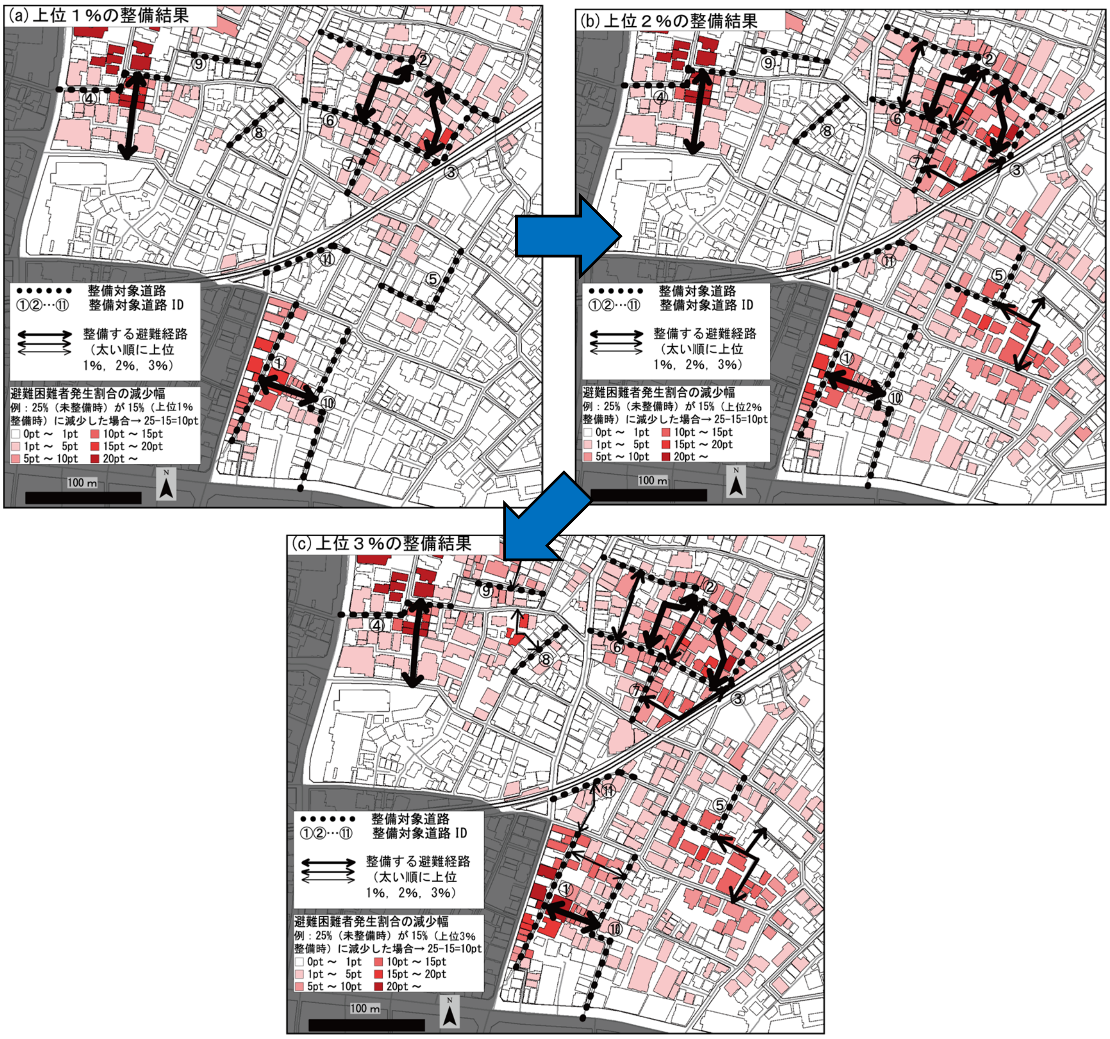


図 6.3.2　整備箇所と各建物の避難困難率低減効果の空間分布

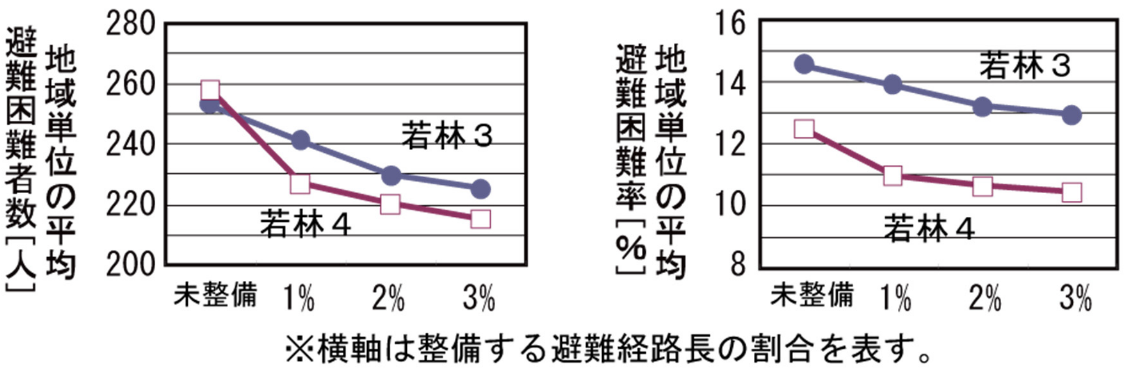
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値（平均値）

6.3.4　地域別にみた避難困難者数・避難困難率の低減

若林 3 丁目・若林 4 丁目の避難困難者数と避難困難率は，整備量を増やしていくと図 6.3.3 のように変化した。整備箇所 1 か所あたりの平均避難困難者数の減少量をみると，若林 3 丁目においては上位 1%の整備によって 11.8%，上位 2%の整備によって 11.9 人の避難困難者の減少が期待できる。一方，若林 4 丁目では，上位 1%の整備では 1 か所あたり平均 7.8 人の避難困難者の減少が期待できるものの，上位 2%の整備では 2.4 人の減少にとどまる。この整備効果の差は，若林 4 丁目よりも若林 3 丁目の方が，広域避難の困難性がより高いためであると考えられる。

また，文献[5]で得られた町丁目単位の木造密度・道路閉塞率・避難困難率の関係式（図 6.3.4）を用いると，上位 3%の避難経路整備に期待できる避難困難率の低減効果は，若林 3

丁目で約 36 棟，若林 4 丁目で約 57 棟の木造建物を，鉄骨造や鉄筋コンクリート造の建物に建て替えることに相当することがわかる。すなわち，交差点間短縮避難経路整備が避難困難率の低減に果たす効果は，多くの木造住宅を建て替えることに匹敵し，効果的かつ効率的な手法として評価できる。



単位：人（100 ケース平均）

	1% 整備	2% 整備	3% 整備
若林４	-7.8	-2.4	-2.3
若林３	-11.8	-11.9	-2.3

単位:ポイント（100 ケース平均）

	1% 整備	2% 整備	3% 整備
若林４	-0.38	-0.11	-0.11
若林３	-0.68	-0.69	-0.13

図 6.3.3　交差点間短縮避難経路による避難困難者数・避難困難率の低減効果・効率
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値（平均値）

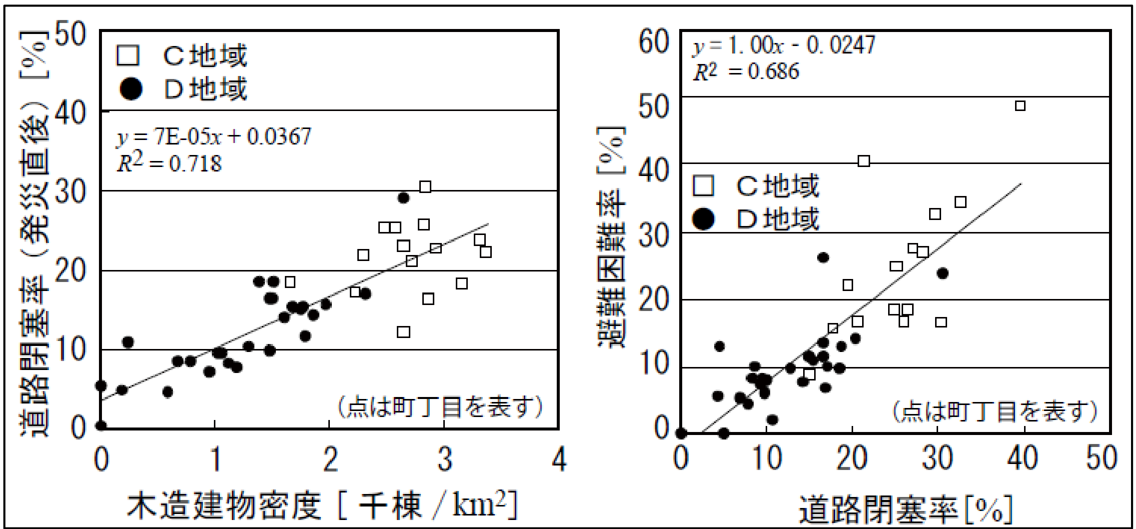


図 6.3.4　木造建物密度・道路閉塞率・避難困難率の関係[5]
（※C 地域・D 地域はそれぞれ世田谷区内のある地域である。）
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値（平均値）

6.3.5　避難距離に与える影響

交差点間短縮避難経路整備は，避難距離の短縮にはほとんど寄与しない（図 6.3.5）。一方，多少遠回りとなっても避難場所まで到達できる場合や，避難経路が大きく変化するため，整備前とは異なる避難場所に到達する場合も多い。実際，発災時の居場所から直線距離 100m 未満の範囲で避難困難となる人は大きく減少し（図 6.3.6 左），200〜700m 離れた避難場所に到達できる人が増えるという結果が得られている（図 6.3.6 右）。避難困難者は，発災時の居場所付近で大量に発生する傾向にあったが，交差点間距離を短縮したことで，3 方向目の避難路が確保されることになり，街路内に閉じ込められてしまう確率が低減したものと考えられる。

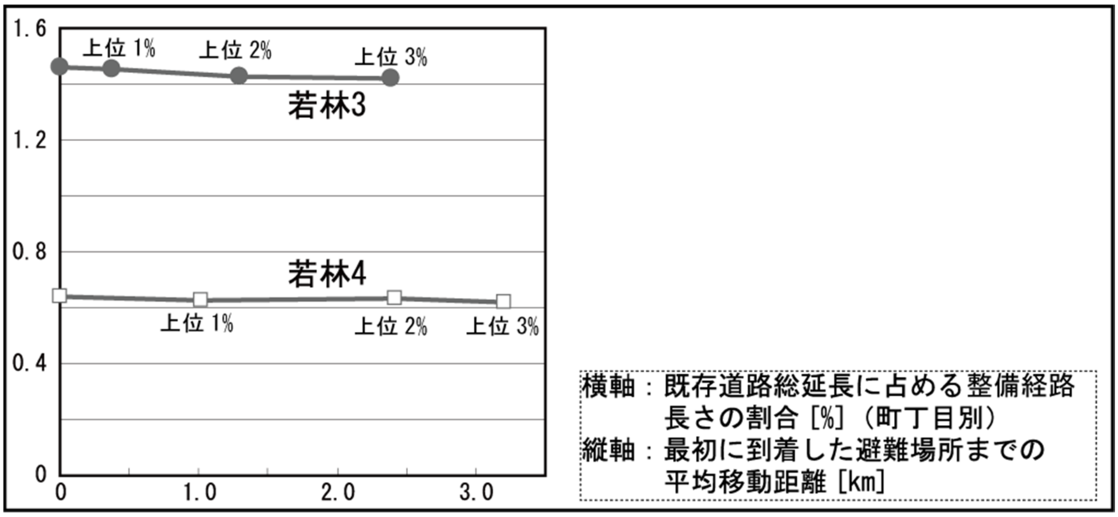


図 6.3.5　交差点間短縮避難経路整備による避難距離の変化
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値（平均値）

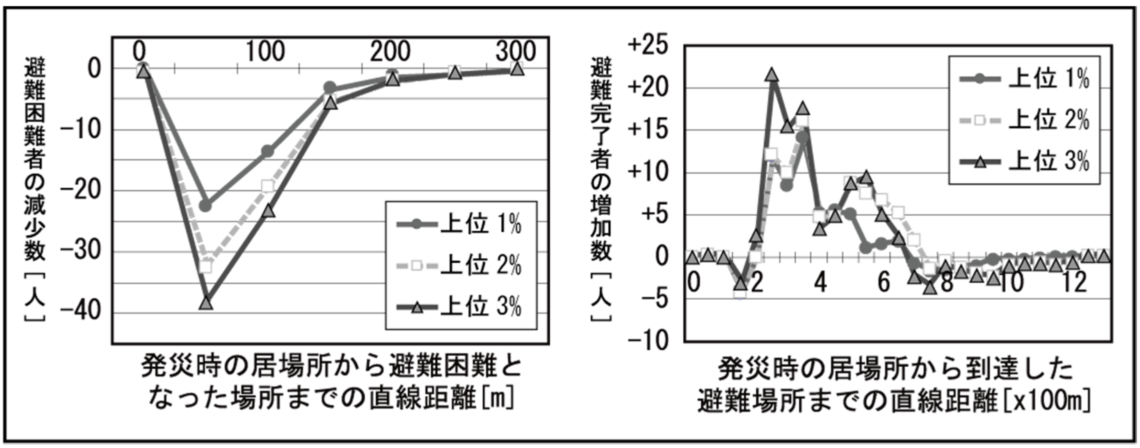


図 6.3.6　発災時の居場所と避難困難地点・到達避難場所間の直線距離の変化
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値（平均値）

6.3.6　交差点間短縮避難経路整備のメリット

従来の木密事業は，主に，建物の耐火性・耐震性を高め，狭隘道路の拡幅を図る方法を中心に進められてきた。しかし，こうした手法は整備対象となる建物が多く，高い費用と長い時間を要するという難点がある。こうした観点からも，交差点間短縮避難経路整備には，

①道路拡幅に比べ（特に，既存の行き止まり道路の延長線上に避難経路を設ける場合），整備に関わる建物数（合意形成に関わる人の数）が少なく，また，事業コストを低く抑えることが可能である。
②1 本の避難経路を整備することにより，その経路が接続する 2 本の道路の交差点間距離を一度に短縮することができるため効率的である。

等のメリットがあるため，今後の木密事業における重要な改善手法の一つとなり得る。

6.4　道路整備（防災生活道路整備と沿道建築物不燃化建替）による減災効果

6.4.1　分析の視点

一般に，道路の拡幅と沿道建物の整備には，多くの時間とコストを要する。行政のみならず，不動産事業者や地域住民も，拡幅された道路に沿って建替える（あるいは減築する）ための費用負担を余儀なくされる場合がある。また，ステークホルダーの数が多くなる傾向があることから，合意形成を図ることが容易ではない。一方，道路整備を行うことのメリットとして，日常生活面では，各建物の採光・通風に加えて，車両のアクセシビリティの改善も期待される。また，防災・減災の観点からは，救急車・消防車のアクセシビリティの向上や，地域住民の避難経路が確保されるという利点がある。すなわち，日常生活・災害時を問わず，地域の安全性や快適性を向上させることにつながる施策であると言える。

東京都は，「防災都市づくり推進計画」[6]において，延焼遮断帯として機能する都市計画道路の整備と並行し，延焼遮断帯に囲まれた地域内で，緊急車両の通行や円滑な消火・救援活動および避難を可能とする防災上重要な道路を「防災生活道路」として位置づけ，道路整備とあわせて沿道建築物の不燃化建替を促進している。こうした整備を効果的かつ効率的に進める上で，大地震時に想定される物的・人的被害の低減効果を定量的に把握しておくことは重要である。

そこで本節では，「大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデル」を用いて，防災生活道路整備と沿道建築物不燃化建替による減災効果の評価を試みる。分析対象地域は，第 5 章までと同じく，典型的な木造住宅密集地域である東京都足立区千住地域から選定した（図 6.4.1）。また，シミュレーションの想定条件は表 6.4.1 の通りである。

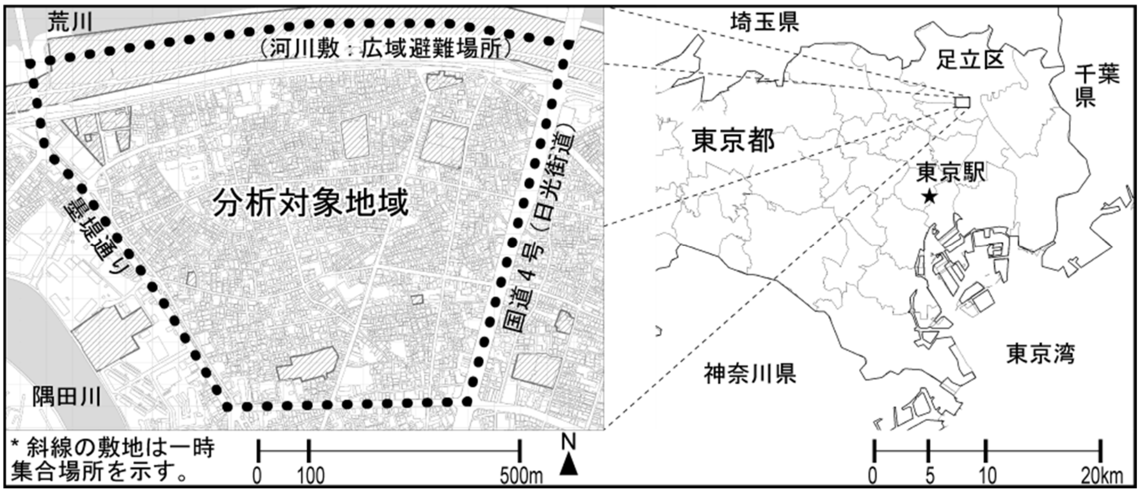


図 6.4.1　6.4 節のシミュレーションの分析対象地域

表 6.4.1　6.4 節のシミュレーションの想定

震度（計測震度）	6強（6.16）
地表面最大速度PGV	81.0 cm/sec（kine）
地震加速度PGA	828 cm/sec^2（gal）
発災時刻	冬の平日午後6時
シミュレーション時間	発災から24時間後まで
気象条件	晴れ・北風 8 m/sec
分析対象者の総数	9,638 人（H20PT調査データに基づく）
物的被害ケース数	100 ケース

6.4.2　整備対象とする建物・道路の想定

第 3 章で，現状（平成 23 年時点）を想定したシミュレーションを本地域で実行したところ，地域内のわずか 1 箇所から出火した場合であっても，火災が延焼し，対象地域の西側全体を焼損させてしまう可能性が高いことが判明した。これは，本地域の大半の道路が狭隘で，隣接する建物間の間隔も非常に狭いためである。さらに，倒壊家屋の瓦礫によって多くの道路閉塞箇所が発生し，多数の地域住民が街路内・街区内に閉じ込められ，火災の延焼によって犠牲になる可能性を指摘した。

東京都足立区は，分析対象地域の西側に位置する特定の狭隘道路（幅員 4m 未満の道路）を拡幅するための検討を既に開始している。具体的には，図 6.4.2 に示す A から F までの道路をアルファベット順に拡幅することが計画されている。しかし，この計画案による物的・人的被害の低減効果について，定量的な議論が十分に行われているとは言い難い。

本節では，図 6.4.2 の道路 A～F がそれぞれ幅員 6m に拡幅され，かつ，各道路沿いの全ての建物が耐火・耐震建築物（鉄筋コンクリート造）へと建替えられたことを想定する。整備が完了すると，大地震発生時の避難経路として機能する主要道路に囲まれた本地域において，幅員 6m の道路が約 250m 間隔で分布するようになる。道路 A～F 沿いの建物総数は 383 棟で，分析対象地域内の全建物の 8.7%に相当する。ここでは，これらの建物は全て，建替後には倒壊せず，かつ，隣接建物へと火災を延焼させないものと仮定する。また，分析の簡略化のために，沿道建物や道路の形状は更新せず，建物構造と道路幅員の値のみをシミュレーション上で仮想的に変更している。

さらに，上述の建物整備および道路拡幅に加えて，（第 4 章の想定と同様に）家庭用消火器と感震ブレーカーが各建物に完備されることで，減災効果がどの程度高まるかについても検証する。

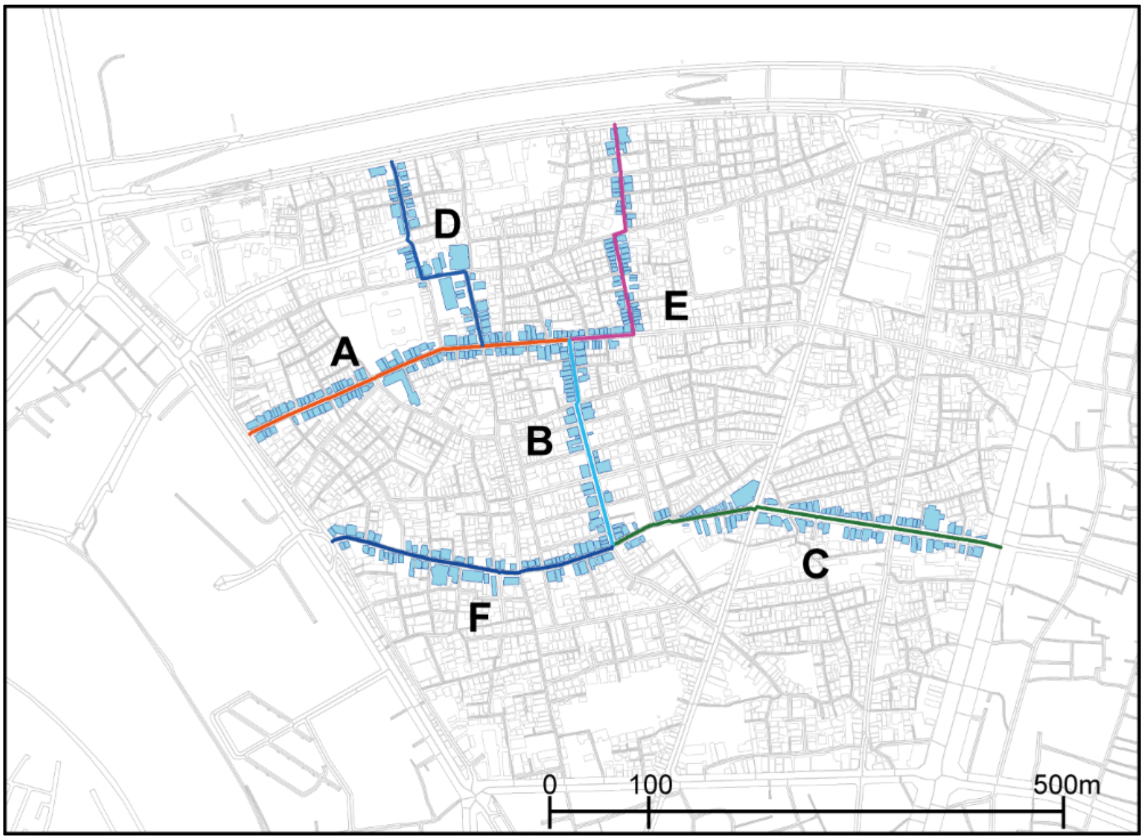


図 6.4.2　整備対象の建物・道路の空間分布

第 3 章と同様に，異なる 100 通りの物的被害ケースに対して，整備前後と建物内対策をあわせて実施した場合で各 1 回（合計 300 回）のシミュレーションを実行する。

6.4.3　シミュレーションの結果

大地震発生から 24 時間経過後の焼損建物割合と死亡者数を，それぞれ整備前後で比較した（図 6.4.3，図 6.4.4）。延焼遮断帯を兼ねる避難経路ネットワークの改善による，物的・人的被害の低減効果は大きいことがわかる。結果的に，対象地域全体が焼損するようなケースはほとんど無くなり，平均焼損建物割合は 17.8%，最大値は 54.8%に低下する。また，防災生活道路が整備されることで，避難者が街路内に閉じ込められにくくなる。すなわち，火災延焼による大量死のリスクが減る（図 6.4.5）ことから，平均死亡者数は 152 人，最大値は 472 人となり，大幅に減少している。さらに，これらの整備と建物内対策（家庭用消火器と感震ブレーカーの完備）をあわせて実施することで，減災効果は一層高まり，元々焼損被害のないケース（物的被害ケース No.78～No.100）と同程度まで被害が低減することが判明した（平均焼損建物割合：6.5%，平均死亡者数：89 人）。

凡例：○整備前（現状）□整備後　＋整備後に家庭用消火器と感震ブレーカー完備

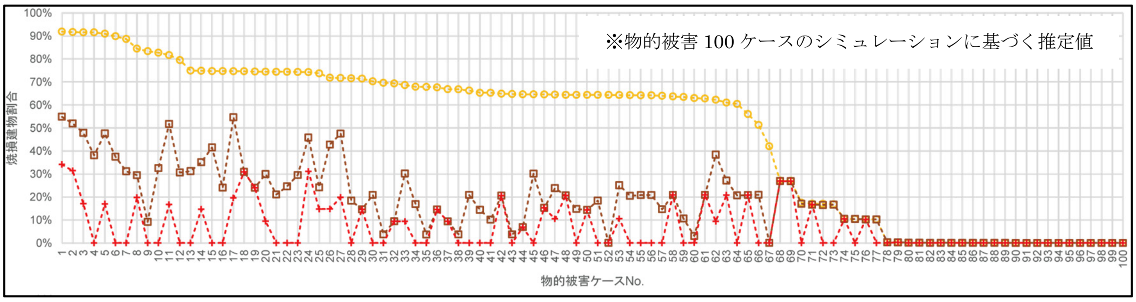


図 6.4.3　焼損建物割合の比較（物的被害ケース別）
※整備前（現状）での焼損建物割合の多い順に並べ，ケース No.をつけ直している。

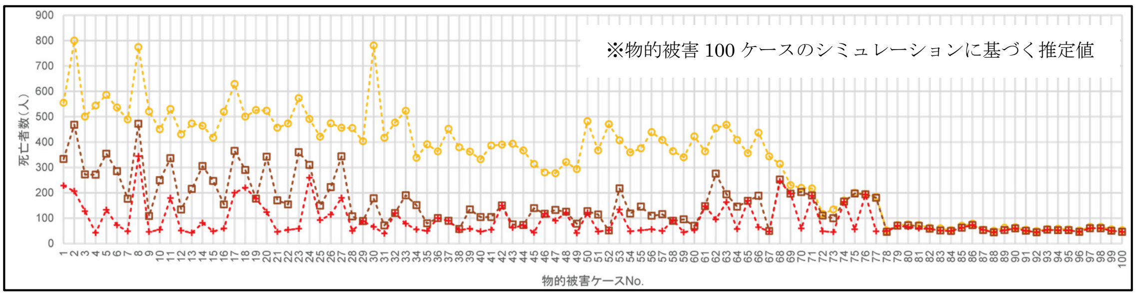


図 6.4.4　死亡者数の比較（物的被害ケース別）
※整備前（現状）での焼損建物割合の多い順に並べ，ケース No.をつけ直している。

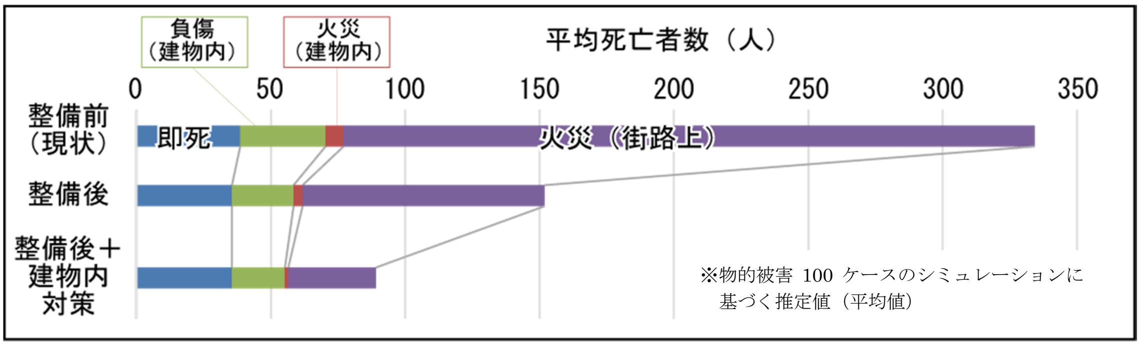


図 6.4.5　平均死亡者数の比較（死因別・想定別）

6.5　道路の整備順が減災効果に及ぼす影響

6.5.1　分析の視点

前節では，災害時における主要道路への道路網（避難経路ネットワーク）を強靭化すること，および，地域内に延焼遮断帯を形成することの効果を，シミュレーションにより検証した。避難経路の確保や，木造家屋の耐火建築物への建替えは重要な対策である。しかし，特定の道路やその沿道建物を一括して改善するような事業は，完了までにある程度の長い期間を要することが多い。それに対し，大地震が近い将来いつ発生してもおかしくないと言われている状況下においては，整備の「進め方」が減災効果を大きく左右する。例えば，沿道建物の建替えが無作為に進み，沿道全体の建替えが完了する前に大地震が発生してしまった場合には，当該道路やその沿道建物が，延焼遮断帯や安全な避難経路として十分に機能しない可能性も考えられる。

本節では，特定の道路とその沿道建物の整備順序が，物的・人的被害の低減効果・効率にどのように影響を及ぼすかを，シミュレーションを用いて検証する。具体的には，前節で整備対象とした道路 A～F（図 6.4.2）を 2 つのグループ（前半整備グループと後半整備グループ）に分けることを想定し，グループを構成する道路の組み合わせが異なる複数の整備シナリオ（${}_6C_3$＝20 シナリオ）を用意し，焼損建物数と死亡者数をシナリオ間で比較する[6]。なお，足立区の実際の整備計画案は，道路 A～C を前半に整備するシナリオに対応している。

このとき，組み合わせの数が多くなることから，本節では，前節のシミュレーションで用いた物的被害 100 ケースからランダムに抽出した共通の 10 ケースを対象に，各シナリオの下でのシミュレーションを実行する（物的被害 10 ケース×20 シナリオ＝計 200 回）。

[6] 前半整備グループを構成する 3 本の道路の番号を，6 文字の文字列 ABCDEF の中で強調して示し，整備シナリオの違いを表現する（例えば，「A**<u>BC</u>**D**<u>E</u>**F」は，道路 B，C および E を前半に整備するシナリオを意味する）。

6.5.2　シミュレーションの結果

図 6.5.1 と図 6.5.2 は，整備シナリオ別の焼損建物割合と死亡者数を示している。ここでは，分析対象地域全体の焼損建物割合と死亡者数の低減度合いの観点から，整備シナリオの優劣を評価することとする（局所的に見れば，シナリオの優劣が異なる場合があることに留意する必要がある）。

本シミュレーション結果に基づくと，道路 A あるいは道路 F を優先的に整備した場合に，物的・人的被害を低く抑えられる傾向が見てとれる（表 6.5.1）。一方，道路 C は，対象地域東端の広幅員道路（日光街道）に接続する主要な避難経路として機能する道路ではあるものの，この道路を前半に整備することの効果と効率（図 6.5.3）は，比較的低いことが判明した。これらの結果は，延焼クラスタを複数の小さな領域に分割するように，特定の道路とその沿道建物を整備する方法の有効性を示唆している。

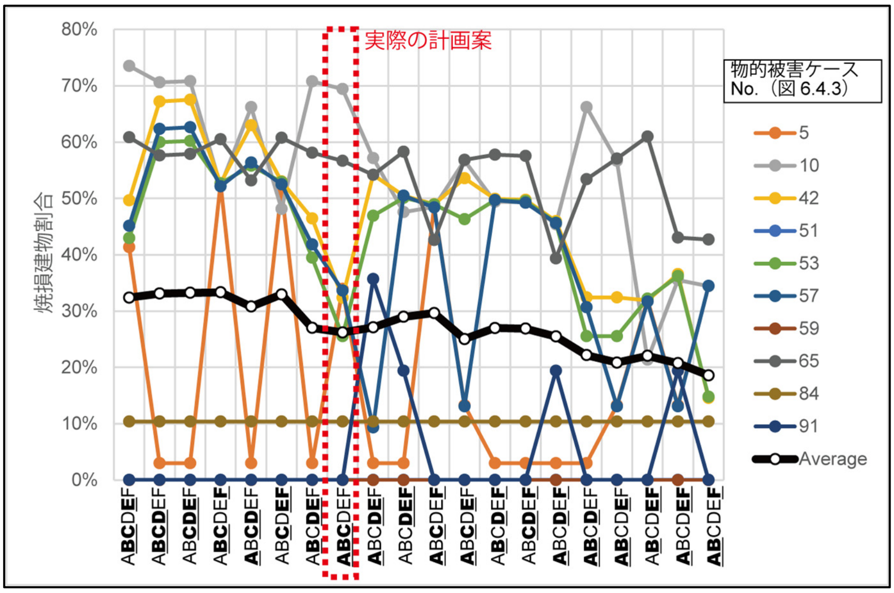


図 6.5.1　整備シナリオ別の焼損建物割合

（※シナリオを平均死亡者数の多い順に左から並べてある）

※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値

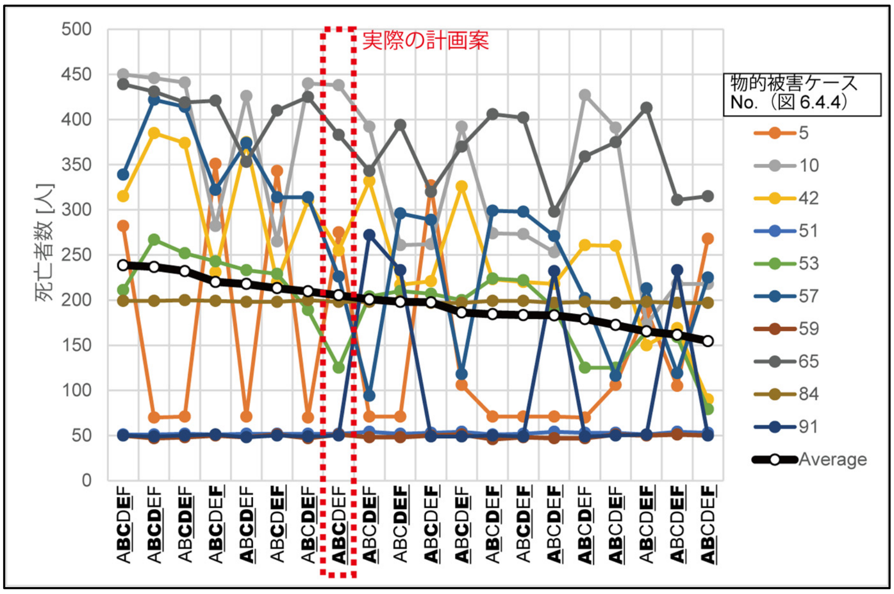


図 6.5.2　整備シナリオ別の死亡者数
(※シナリオを平均死亡者数の多い順に左から並べてある)
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値

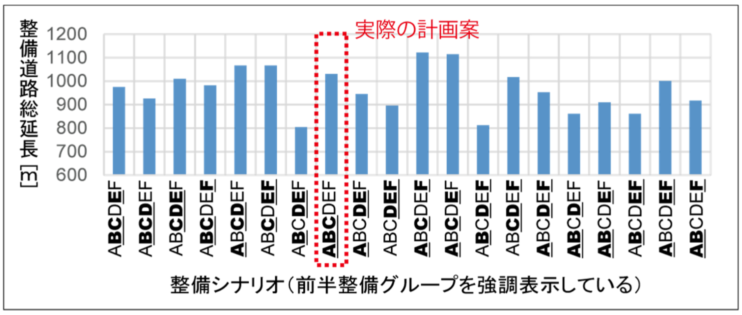


図 6.5.3　前半整備グループの整備道路総延長（整備シナリオ別）
(※シナリオを平均死亡者数の多い順に左から並べてある)

表 6.5.1　各整備シナリオの道路構成と死亡者数の大小との関係
(※シナリオを平均死亡者数の多い順に左から並べてある)

		整備シナリオ																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
道路	F				■		■				■	■		■	■	■			■	■	■
	E	■		■			■	■		■	■		■					■	■	■	
	D		■	■		■		■		■	■			■	■	■	■				
	C	■	■	■	■	■	■		■			■	■		■						
	B	■	■		■			■	■					■			■	■	■		■
	A					■			■	■		■	■			■	■	■		■	■

※平均死亡者数は，物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値である。

6.6　耐震化率の改善による減災効果

6.6.1　分析の視点

本節では，地域の耐震化を促進することによって，物的・人的被害を将来どの程度低減できるかを推定するための手法を示す。

耐震・耐火性能の不十分な木造住宅を，鉄筋コンクリート造や鉄骨造などに建替えることは，大地震時の物的・人的被害を低減する上で重要な課題である。これまでにも，建替えによって建物の構造・材料を不燃化することに着目した研究事例がいくつか存在する。例えば，Osaragi[7]は，建物の寿命に影響を及ぼす，建物自身や立地の特性を評価可能な統計モデルを提案している。また，不燃化された街への変化の速度を評価するためのモデルを構築し，木造住宅密集地域から得られた実際のデータを用いて，30 年間の建替シミュレーションを実行している[8]。ここでは，シミュレーション結果に基づき，建物の不燃化を促進するためには，補助金交付などの有効な計画が必要であることが示唆されている。さらに，特定の規則・条例（用途地域の変更，延床面積制限の緩和等）を実施することによる，住宅地域の不燃化促進効果・効率を，建物構造の経年変化をシミュレートすることで評価している[9]。ここで提案されている市街地の建替モデルは精緻であることから，建替メカニズムの理解や防災・減災計画を検討する上で有用な知見を得ることが出来る。しかし，これらの研究では，広域避難や緊急車両活動のような人々の活動への影響を分析していない。換言すれば，これらの研究でのシミュレーション結果に基づき，建替えに関する特定の施策が，大地震発生時の人々の活動の改善に十分効果的であるか否かを把握することは困難である。そこで本論文では，簡易的な建替モデルを構築した上で，市街地における耐震化の進行をシミュレートし，その結果に基づき，物的被害・人間行動シミュレーションを実行することとした。

6.6.2　市街地における耐震化のモデル化

最初に，新耐震基準建物（1981 年以降に，新耐震基準に基づき建てられた建物）への建替え傾向の推定モデルを構築した。具体的には，築年数別の建替え割合と，建替え後の構造種別を推定するための構造遷移マトリクスを，東京都世田谷区[7]における土地・建物利用現況調査データ（平成 13 年時点および平成 18 年時点）に基づき推定した。すなわち，建物データの図形情報と属性情報の両方の観点から 2 時点間のデータを比較することで，各建物が 5 年間で建替えられたか否かを判定した。

[7] 東京都世田谷区は，建物現況調査データをベースに，各建物の建築年次や実構造（木造／RC 造／S 造）等の詳細な属性情報を含む GIS データを 5 年ごとに独自に整備している，現時点では数少ない自治体である。

図 6.6.1 に，築年数と建替え割合の関係を示してある。推定結果の安定性のため，ここでは，建替え割合は建物構造によらないものと考えている。推定結果によれば，新築から毎年 0.05%のペースで建替え割合が増加していくことがわかる。また，構造遷移マトリクスは，建替え前後の構造が判明している事例のみを用いて推定した（表 6.6.1）。

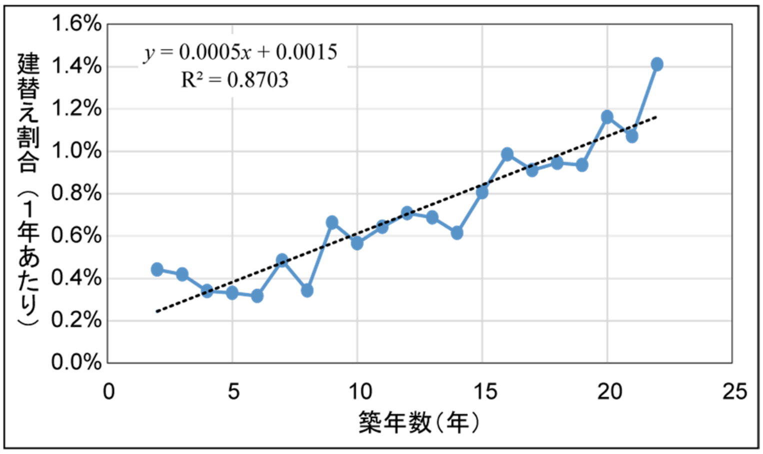


図 6.6.1　築年数別の建替え割合

表 6.6.1　建替え後の構造を推定するための構造遷移マトリクス

前＼後	木造	RC 造	S 造	合計
木造	67.8%	15.7%	16.5%	100%
RC 造	36.0%	51.7%	12.4%	100%
S 造	39.8%	34.9%	25.4%	100%
合計	56.4%	24.7%	18.9%	100%

シミュレーションでは，基準年（平成 23 年）から 30 年後まで 1 年ごとに，新耐震基準への建替え建物データを次の手順で用意した。

(1) 図 6.6.1 の築年数別の建替え割合に基づき，ある年において，各建物が建替えられるか否かを確率的に推定する。
(2) (1)で「建替え」と推定された建物については，表 6.6.1 の構造遷移マトリクスを用いて，建替え後の構造を推定する。

6.6.3　本節における分析対象地域

東京都内の木造住宅密集地域の中から，表 6.6.2 に示す複数の対象地域を選定した。多くの国道・都道（主要道路）が網目状に接続しており，全ての対象地域がこうした広幅員道路に囲まれている。墨田 A エリア，墨田 B エリア，および荒川エリアは，東京都 23 区の東部に位置している。東京都の第 7 回地域危険度調査[10]によれば，これらの地域は大地震時の総合危険度が非常に高いとされている（図 6.6.2 左上）。また，各地域の内側に存在する大半の道路が極端に狭い（図 6.6.2）。対照的に，杉並エリアと品川エリアは，それぞれ東京都 23 区の西側と南側に位置している。他の地域と同様に，これらの地域の内側には狭隘道路が多いものの，大地震時の総合危険度は比較的低いとされている（図 6.6.2）。

本節のシミュレーションにおいては，計算時間の制約から，各避難者は，主要道路上のいずれかの交差点（図 6.6.2 に星印で示す交差点）に到着した場合に，避難を完了した（安全が確保された）ものと考える[8]。各地域の建物数，道路リンク数，滞留者数（平日 18 時時点の建物内滞留者数と歩行者数の合計）を表 6.6.2 に示す。ここでは，物的被害モデルを用いて推定された，異なる物的被害（建物倒壊および道路閉塞）100 ケースを用意し，各ケースに対して 1 回（合計 100 回）の避難シミュレーションを実行した。

表 6.6.2　6.6 節の分析対象地域のプロフィール

エリア	墨田 A	墨田 B	荒川	杉並	品川	合計
構成町丁目	墨田 1〜5 東向島 4・5	八広 1〜5 東向島 6	荒川 5〜6 東尾久 1〜3	高円寺南 2〜4 阿佐ヶ谷南 1・2	中延 1〜6 西中延 1〜3 東中延 1・2 旗の台 2〜5 北馬込 1〜2 上池台 1	
建物数[棟]	6,713	5,851	4,931	6,300	9,799	33,594
道路リンク本数[本]	1,359	1,096	1,123	1,423	2,237	7,238
滞留者数[人]	16,269	14,336	11,091	22,035	26,321	90,052
エリア面積[km^2]	1.63	1.04	0.77	1.37	1.76	6.57

[8] 6.6 節では，建物の耐震化による減災効果を市街地性状の異なる地域間で比較することを重視していることから，火災延焼や救助・消火活動を考慮せず，主要道路までの避難に着目した簡易的なモデルを使用している。

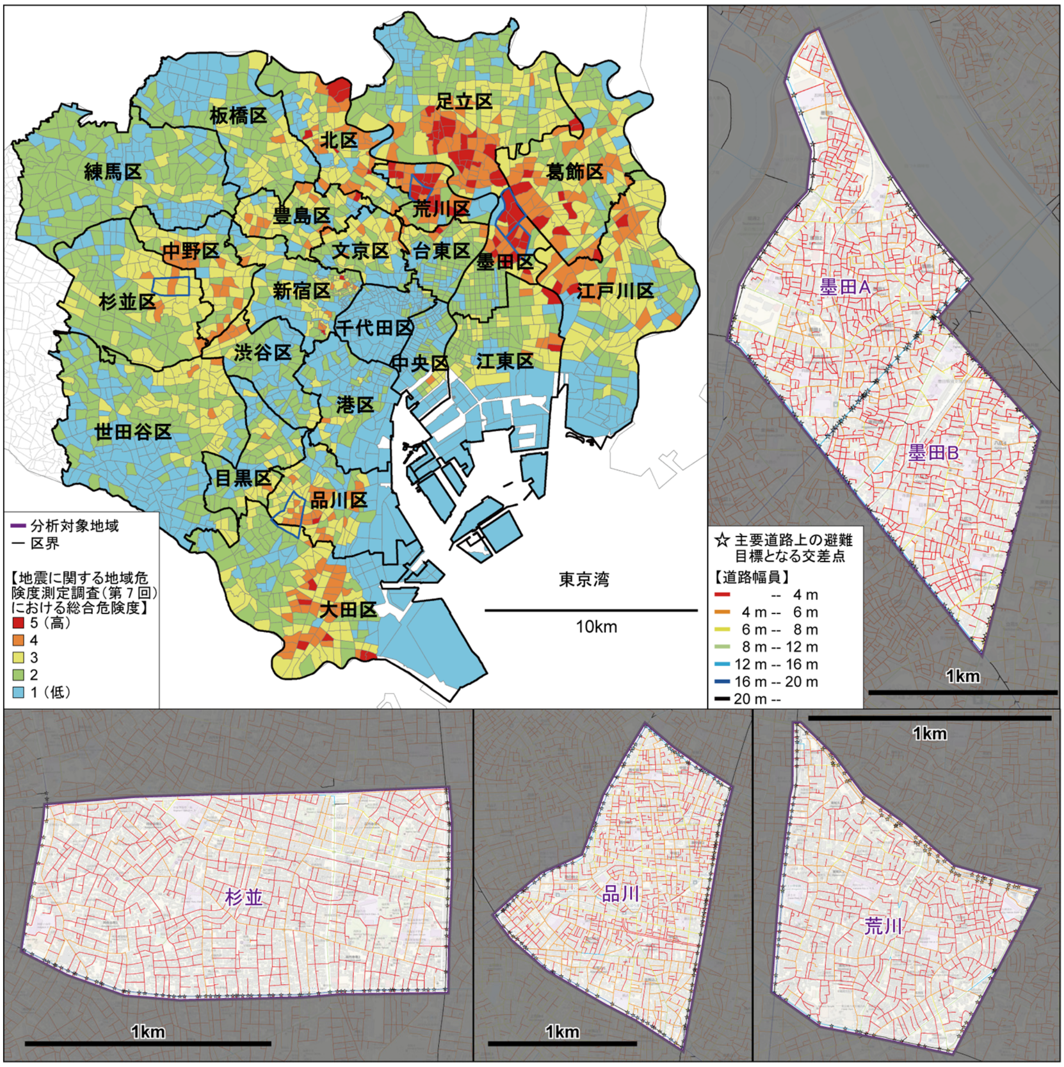


図 6.6.2　6.6 節の分析対象地域の地域危険度と道路幅員の空間分布

6.6.4　耐震化率と物的被害割合の経年変化

図 6.6.3 に，2011（平成 23）年を基準として 30 年後までの，新耐震基準建物の割合（以下，耐震化率[9]）の経年変化を示してある。年がたつにつれて，古い建物（図 6.6.1 で示すように，建替えのポテンシャルが高い建物）の数が減少していくことから，耐震化率の増加率も逓減していく。30 年後には，耐震化率は多くの地域で 80%以上となり，2011（平成 23）

[9] 6.6 節の分析は，火災延焼の影響ではなく，道路閉塞が広域避難に及ぼす影響に着目した分析であることから，不燃領域率には着目せず，耐震化率の経年変化のみを掲載している。しかし，6.6 節のシミュレーションでは，不燃領域率の変数の一つである「空地率」の変化を考慮していないことから，耐震化率の増加と不燃化率・不燃領域率の増加は概ね対応し，「耐震化率」を「不燃化率」や「不燃領域率」と読み替えても問題ないと考えられる。

年時点で耐震化率の差が大きかった墨田 A エリアと杉並エリアの差も，半分程度にまで減少している。

30 年後までのエリア内倒壊建物割合（シミュレーション 100 回の平均値）の経年変化を図 6.6.4 に示してある。エリア内に古い木造住宅の多い墨田 A エリア・墨田 B エリア・荒川エリアの倒壊建物割合は，その他のエリアの割合よりも大幅に高い。これらの 3 地域においても，建て替えが進むことで，倒壊建物割合は 10%程度にまで減少する可能性がある。エリア内閉塞道路割合についても，同様の傾向が見てとれる（図 6.6.5）。しかし，荒川エリアにおける，歩行者が通行不能である道路（倒壊建物の瓦礫流出後の有効幅員が 1m 未満の道路）の割合が，同程度の倒壊建物割合を示す墨田 A エリアや墨田 B エリアではなく，杉並エリアや品川エリアの割合とほぼ同程度である点は看過できない。これは，荒川エリアにおいては，幅員 4m 未満の狭隘道路が比較的少ないためであると推察される。

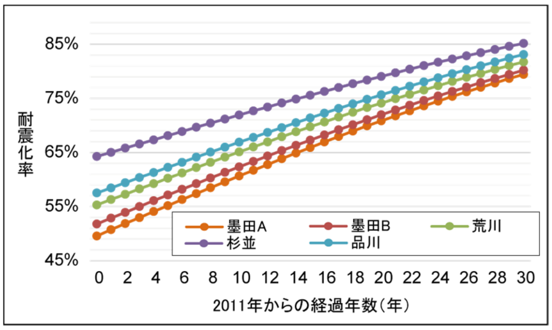


図 6.6.3　耐震化率の経年変化
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値

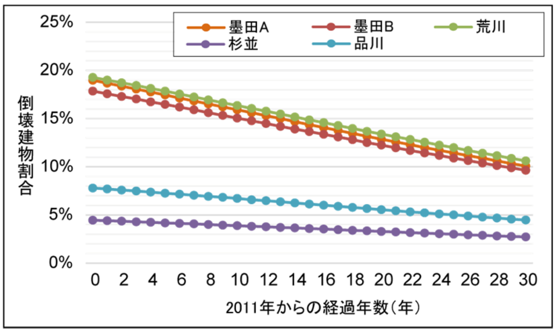
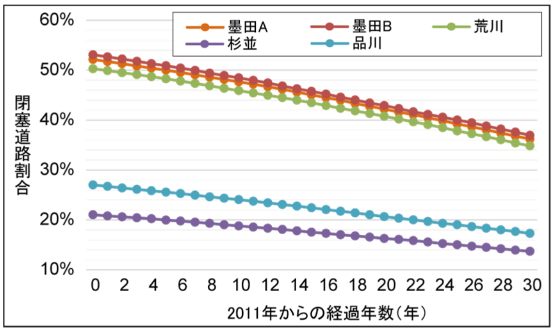
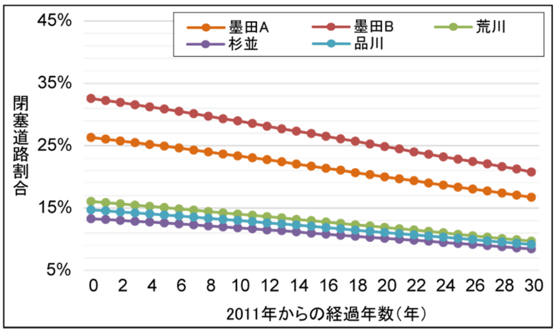


図 6.6.4　倒壊建物割合の経年変化
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値



(a)車両が通行不能である道路の割合



(b)歩行者が通行不能である道路の割合

図 6.6.5　閉塞道路割合の経年変化
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値

6.6.5　広域避難シミュレーションの結果

図 6.6.6 に，主要道路に到着するまでの平均移動距離の経年変化を示してある（これ以降の集計結果は，全て物的被害 100 ケースの平均値である）。道路閉塞が全く発生していない状況下での移動距離を，参考値として破線で示してある。道路閉塞有無間での移動距離の差は，墨田 A エリアと品川で特に大きい。これは，エリアが比較的広く，閉塞道路に遭遇した場合の迂回の影響が大きいためと考えられる。一方，旧耐震基準建物の建替えによる，閉塞有無間の差の減少効果は，これらの 2 地域でより大きいことがわかる。

シミュレーション結果に基づき，道路閉塞によって街路内・街区内に閉じ込められる避難者数の平均値を推定した（図 6.6.7）。基準年である 2011（平成 23）年には，墨田 A エリアと墨田 B エリアでそれぞれ約 2 千人が閉じ込められている。また，平均閉塞道路割合が比較的低い品川エリアにおいても，1 千人以上の街路内・街区内閉じ込め者が発生している。対象地域間の比較を容易にするために，各エリアの街路内・街区内閉じ込め者数を，それぞれのエリアにおける合計避難者数で除した値を求めると（図 6.6.8），エリア間の値の大小関係は，閉塞道路割合の場合と概ね対応していることがわかる。30 年が経過すると，街路内・街区内閉じ込め者数は基準年のおよそ半分の値に減少する可能性がある。

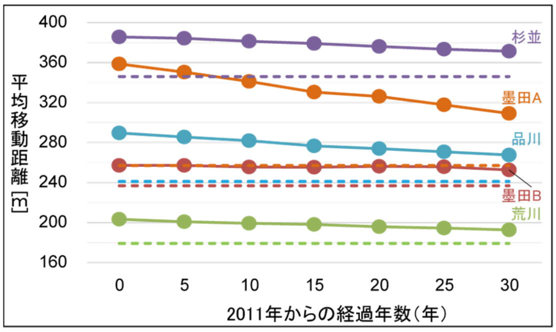


図 6.6.6　主要道路までの移動距離
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値

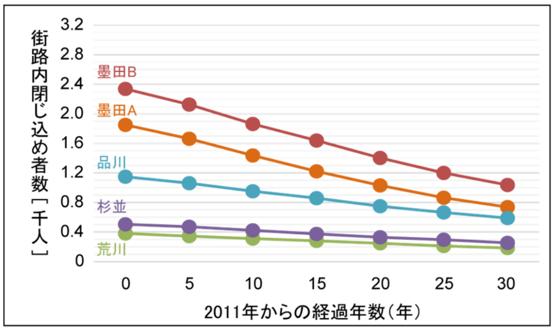


図 6.6.7　街路内閉じ込め者数
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値

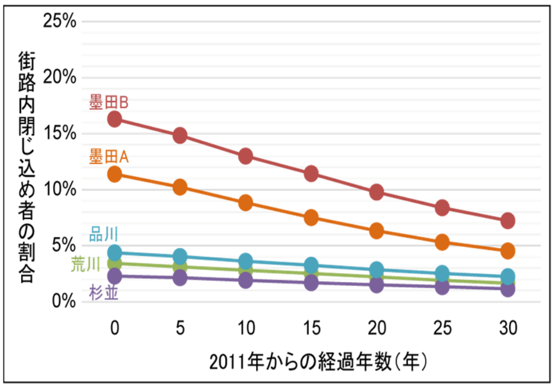


図 6.6.8　街路内閉じ込め者の割合
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値

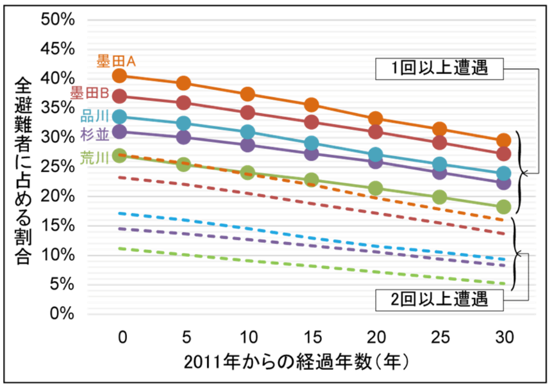


図 6.6.9　閉塞道路遭遇回数
※物的被害 100 ケースのシミュレーションに基づく推定値

図 6.6.9 は，避難経路上で閉塞道路に遭遇した回数別の避難者数を，各対象地域内の全避難者数に占める割合で示したものである。避難経路上で少なくとも一度閉塞道路に遭遇する避難者の割合は，30 年経過後には 10 ポイント程度減少することがわかる。

以上の結果を広域避難の観点から要約すると，以下のようになる。

- 旧耐震基準建物の建替えは，主要道路に到着するまでの移動距離の観点からは，あまり大きな効果がある訳ではない（図 6.6.6）。
- 旧耐震基準建物の建替えは，道路閉塞の危険性が高い地域（本節の例では，墨田 A エリアや墨田 B エリア）における街路内・街区内閉じ込め者を低減する上で，特に効果的である（図 6.6.8）。これは，市街地大火による犠牲者数を低減することにつながる重要な結果である。
- 広域避難に関係する全ての指標（図 6.6.6～図 6.6.9）の改善の程度は，耐震化率の上昇の程度（図 6.6.3）と比較して相当小さく，30 年が経過した後も十分に改善されるとは言い難い。この結果は，旧耐震基準建物の建替えが，避難困難性の減少に必ずしも直結するとは限らないことを示唆している。すなわち，本節では，旧耐震基準建物の建替えが地域内で無作為に進捗することを想定しているのに対し，道路閉塞現象は，沿道の全ての建物の倒壊・非倒壊に依存しているためである。

極論すると，ある道路の沿道建物が 1 棟以外全て耐震化されたとしても，残りの 1 棟が大地震時に倒壊することで，その道路が閉塞してしまうケースがあり得る。したがって，特に広域避難や救助・消防活動を行う上で重要と考えられる道路については，地域内の耐震化が自然に進行するのを待つだけでなく，例えば 6.4 節や 6.5 節で検討した手法等を用いて，優先的に整備を促進していくことが必要と言える。

6.7　本章のまとめ

本章では，大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデルを用いて，市街地整備による減災効果の評価を試みた。具体的には，過去に実施された木密事業，狭隘道路における交差点間短縮避難経路整備，防災生活道路整備と沿道建築物不燃化建替，道路の整備順の影響，および，市街地における建物耐震化を対象に，シミュレーション分析によって，それぞれの施策が大地震時における物的・人的被害の低減にどの程度寄与できる可能性があるかを明らかにした。

本章の主要なシミュレーション結果と得られた知見を以下に整理する。

【6.2 節　過去に実施された木密事業の減災効果】

- 東京都世田谷区若林 3 丁目・4 丁目を分析対象として，平成 3 年と平成 18 年の 2 時点間の変化に着目した。
- 15 年間で，耐火造・準耐火造の建物の構成率は 19%から 35%に増加しており，木密事業が市街地の不燃化・耐震化に一定の効果を上げていることを定量的に確認した。
- 市街地の不燃化・耐震化の進行に伴い，地域全体の全壊建物割合・焼損建物割合・閉塞道路割合がそれぞれ減少していることを，物的被害シミュレーションで確認した。
- 広域避難シミュレーションの結果, 地域全体の避難困難率は 15 年間に減少していたが, 整備箇所の偏りによって局所的に避難困難率の高い箇所が残存していた。特に，道路幅員が狭く交差点間距離が長い道路や，行き止まり道路の沿道に，避難困難率の高い建物が集中していることが明らかとなった。

【6.3 節　狭隘道路における交差点間短縮避難経路の整備効果】

- 狭隘道路沿いの建物の避難困難率を効果的かつ効率的に低減させるための手法として，災害時のみ利用可能な避難経路を庭先等に設ける「交差点間短縮避難経路」整備に着目した。広域避難困難性が深刻である道路ほど避難経路の整備効果が大きくなる傾向が見られた。
- 地域内既存道路総延長の約 3%に相当する長さの避難経路が整備されたことを想定すると，その減災効果は，若林 3 丁目で約 36 棟，若林 4 丁目で約 57 棟の木造建物を，鉄骨造や RC 造の建物に建て替えることに匹敵し, 効果的かつ効率的な手法と言える根拠を示した。
- 交差点間短縮避難経路整備によれば，滞留地点周辺の道路閉塞により閉じ込めに遭う避難困難者の量を大きく低減することが可能であることを定量的に示した。

【6.4 節　道路整備（防災生活道路整備と沿道建築物不燃化建替）による減災効果】

- 東京都足立区の実際の検討案を参考に，千住地域の 6 本の狭隘道路を防災生活道路と位置づけ，幅員 6m への拡幅と，沿道建物の RC 造への建て替えを想定したシミュレーションを実行した。
- 整備道路が延焼遮断帯のような機能を果たすことから，地域全体が焼損するケースはほとんど見られなくなり，焼損建物割合の平均値・最大値はいずれも大きく減少した。
- 避難経路ネットワークが改善することで，避難者が街路内に閉じ込められにくくなり，かつ，延焼被害も低減することから，死亡者数も平均値・最大値ともに大幅に減少することを示した。
- 上述の整備と（第 4 章で着目した）建物内対策（家庭用消火器と感震ブレーカーの完備）をあわせて実施することで，減災効果は一層高まり，焼損建物割合と死亡者数を元々焼損被害のないケースと同程度まで低減できる可能性を示した。

【6.5 節　道路の整備順が減災効果に及ぼす影響】

- 6.4 節で整備対象とした 6 本の狭隘道路のうち 3 本を整備することを想定した場合，整備する 3 本の選び方によって，減災効果にどの程度の差が生じるかを，シミュレーションにより分析した。
- 地域内の延焼クラスタが複数の小さな領域に分割されるように，特定の道路とその沿道建物を優先的に整備することの有効性を示した。

【6.6 節　耐震化率の改善による減災効果】

- 市街地の耐震化プロセスを簡易的にモデル化し，東京都 23 区内の 5 つのエリアを対象に，30 年後までの耐震化率・物的被害割合・広域避難困難性の経年変化を分析した。
- 耐震化率の向上に伴い，エリア内の物的被害割合（倒壊建物割合・閉塞道路割合）も低減する。倒壊建物割合の改善に比べると，閉塞道路割合の改善の程度は小さい。これは，道路閉塞現象が，沿道の全ての建物の倒壊・非倒壊に依存しているためと考えられる。
- 同様に，街路内閉じ込め者の割合も，30 年経過後に十分な減少が期待できるとは言えないことが判明した。この結果は，主要な避難経路沿道の整備を優先的に促進していく施策の重要性を示唆している。

市街地整備による減災効果は，従来までは，不燃領域率や延焼抵抗率[10]といった市街地の空間性状の数値変化だけで評価されることが多かった。また，市街地性状を改善するための具体的な整備手法や整備箇所に関する検討も，これまでは事業計画者の直感に頼ることが多かった。しかし，「大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデル」によれば，本章で示した例のように，各種市街地整備による減災効果を，物的被害・人的被害両方の観点から評価することが可能である。

10　延焼抵抗率は以下のように定義される。
延焼抵抗率[%]＝（1－セミグロス CVF）×100
セミグロス CVF は，対象となる建築物の周囲に延焼限界距離（耐火 0m，準耐火 3m，防火 6m，裸木造 12m）の半分の長さのバッファを発生させたときに，大規模空地等を除いた地区面積（セミグロス面積）に対するバッファ面積の占める割合のこと。

参考文献（第 6 章）

[1]　世田谷総合支所街づくり課：若林 3・4 丁目地区 防災街区整備地区計画，2008.2，http://www.city.setagaya.lg.jp/kurashi/102/120/345/346/d00123696_d/fil/pamplet62.pdf [2017.11.2 参照]
[2]　世田谷総合支所街づくり課・北沢総合支所街づくり課：区役所周辺地区 地区街づくり計画（その他地区），2008.2，http://www.city.setagaya.lg.jp/kurashi/102/120/345/346/d00123698_d/fil/pamplet45.pdf [2017.11.2 参照]
[3]　東京都：首都直下地震等による東京の被害想定，2012.4，http://www.bousai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html [2016.9.13 参照]
[4]　大佛俊泰・沖拓弥：広域避難の困難性からみた木造住宅密集地域整備事業の評価，日本建築学会計画系論文集，Vol. 79，No. 696，pp. 437-444，2014.2
[5]　大佛俊泰・沖拓弥：密集市街地における大地震時の避難困難率について，日本建築学会計画系論文集，Vol. 77，No. 681，pp. 2561-2567，2012.11
[6]　東京都：防災都市づくり推進計画（改定），2016.3，http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/bosai4.htm [2017.10.13 参照]
[7]　T. Osaragi, “Factors Leading to Buildings Being Demolished and Probability of Remainder,” International Conference on Safety and Security Engineering, Safety and Security Engineering, WIT Press., Vol. III, pp. 325-334, 2004
[8]　T. Osaragi, “The Life Span of Buildings and the Conversion of Cities to an Incombustible State,” International Conference on Safety and Security Engineering, Safety and Security Engineering, WIT Press., Vol. IV, pp. 495-504, 2005
[9]　T. Osaragi, “Towards an Incombustible City: Building Reconstruction in Potential and Probable Fireproofing of Urban Lots,” Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, Springer, 2013
[10]　東京都：地震に関する地域危険度測定調査（第 7 回），2013.9，http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/chousa_6/home.htm [2017.10.10 参照]
[11]　T. Osaragi and T. Oki, “Wide-Area Evacuation Simulation Incorporating Rescue and Firefighting by Local Residents,” Journal of Disaster Research (Special Issue on Disaster and Big Data Part 2), Vol. 12, No. 2, pp. 296-310, 2017.3
[12]　T. Oki and T. Osaragi, “Urban Improvement Policies for Reducing Human Damage in a Large Earthquake by Using Wide-Area Evacuation Simulation Incorporating Rescue and Firefighting by Local Residents,” Planning Support Science for Smarter Urban Futures, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer International Publishing, pp. 449-468, 2017.5

なお，本章の内容は，筆者らの既発表論文[4, 5, 11, 12]の一部を加筆・修正したものである。

第 7 章　結論

7.1　本研究のまとめ
7.2　想定される本研究成果の利用場面
7.3　本モデル利用時の留意点
7.4　今後の課題

※本文中で言及している物的・人的被害のシミュレーション結果は，特定の想定の下での推定値であり，分析対象地域で同様の物的・人的被害が必ず発生することを意味するものではない。

第 7 章　結論

7.1　本研究のまとめ

第 1 章では，まず，木密地域による整備事業の概要について述べ，整備効果に関する既存の評価手法や，大地震時の地域住民による救助活動・消火活動・広域避難行動に関する既往研究をレビューした。そして，本研究の目的は，①大地震時の物的・人的被害を，多様なシナリオの下，建物・道路単位のミクロな空間スケールで推定可能である総合的なシミュレーションモデルを構築するために，これまで別々に検討されてきた大地震時の物的被害（建物倒壊・道路閉塞・火災延焼），建物内・街路内閉じ込め，地域住民による各種活動（救助活動・消火活動・広域避難行動）のモデルを，相互作用や時間の概念を考慮可能なマルチエージェントシミュレーション（MAS）モデルの形式で統合すること，②木密地域の減災対策評価や合意形成におけるシミュレーションの有用性を示すために，各種減災対策（建物内対策・建物間対策・市街地整備施策）の実施効果を，様々な物的・人的被害指標に基づき定量的に評価する具体例を示すこと，の 2 点であることを述べた。

第 2 章では，大地震時の物的被害，建物内・街路内閉じ込め，地域住民による各種活動を統合し，総合的なシミュレーションモデルを構築した。本モデルは，マルチエージェント・シミュレーション（MAS）の考え方に基づいて構築することで，物的被害と多様なふるまいをする都市内滞留者との間に生じる相互作用の考慮や，建物・道路単位での物的・人的被害の推定を可能とした。モデルの構築にあたっては，過去の大地震発生事例に限りがあることから，主に兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）時の既往の調査結果を参考にしているが，瓦礫や火災による道路閉塞や広域避難行動，救出成功や延焼阻止成功の判定，および，物的被害と人間行動の相互作用が生じる部分等については，本研究で新たに構築したモデルを採用している。今後の大地震発生時に，モデルのキャリブレーションを行っていくことが課題ではあるが，これまで別々に検討が進められてきた，こうした多数のモデルを一つのシミュレーションモデルに統合し，大地震発生直後のシミュレーションを実行可能としたことは，本研究の主要な貢献内容の一つであると言える。

第 3 章では，第 2 章で構築したシミュレーションモデルを活用して，典型的な木造住宅密集地域として知られる東京都足立区千住地域を例に，首都直下地震と同程度の大地震時における物的・人的被害の推定を試みた。具体的には，物的被害 100 ケースに対してシミュレーションを実行し，建物倒壊率，道路閉塞率，焼損建物割合等の物的被害指標や，死亡者数，建物内・街路内・街区内閉じ込め者数等の人的被害指標を算出した。さらに，ダイナミックに変動する市街地の状態や，多様な相互作用を考慮可能である本シミュレーションモデルの特長を生かし，地域住民による救助・消火活動の効果とリスクを定量的に示した。例えば，大地震発生直後の混乱期における延焼阻止活動の困難さや，1 件の消火の成否が最終

的な焼損被害や人的被害の程度を大きく左右すること，地域住民の救助活動によって多数の建物内閉じ込め者を救出可能であることを示した。一方，救助・消火活動への参加者自身が犠牲となるリスクの高さを示す，有意な結果は得られなかった。また，どのような箇所で，どのような場合に，焼損被害や人的被害が大きくなりやすいかを，建物・道路・街区レベルのミクロスケールで明らかにした。100 ケースという限られたシミュレーション実行回数の中でも，一時集合場所からの逃げ遅れや，複数の道路閉塞の影響で，数街区分の広さのエリアから脱出できない「街区内閉じ込め」現象によって，多数の死亡者が発生する可能性のあるケースが確認された。

第 4 章では，本シミュレーションモデルを応用して，建物内対策による減災対策の評価を試みた。具体的には，建物内における減災対策の一例として，家庭用消火器や感震ブレーカーが各家庭に完備されたことを想定し，シミュレーションを実行した。その結果，家庭用消火器単独での減災効果は小さいこと，感震ブレーカーは出火率低減に有効であり，焼損建物数や死亡者数を大きく低減させる効果があるが，電気火災以外の火災の影響で，最大被害を低減させる効果は低いことが明らかになった。また，これらの建物内対策によっても出火を確実にゼロに抑えるのは困難であることを示した。

第 5 章では，火元建物内における家庭用消火器を用いた初期消火が失敗に終わった場合に，その後の延焼被害の程度を左右する最後の砦となる，火元建物とその隣接建物間の延焼阻止・遅延対策の有効性を，シミュレーションで検証した。木密地域においては，建築面積の小さい防火木造・裸木造建物が多く，建物間隔も狭いため，出火から隣接建物延焼までの所要時間は非常に短いことが判明した（平均 9.5 分）。さらに，道路閉塞率が高く，スタンドパイプ等の消火用資器材の配置密度も低いことから，周辺住民による消火活動の成功事例はわずかであった。ここで，建物間への樹木・生垣の設置を想定し，隣接建物への延焼に要する時間を仮想的に遅延させたところ，建築面積の小さい防火木造・裸木造建物でも多くの延焼阻止成功事例が見られるようになった。ただし，20 分延焼が遅延した場合を想定しても，依然として 6 割の火元建物では延焼阻止に失敗していた。延焼阻止失敗事例の特徴を分析したところ，周辺住民がなるべく早く出火を覚知できる体制づくりや，延焼阻止活動中の移動時間を短縮するための施策をあわせて実施することの必要性が明らかになった。

第 6 章では，各種市街地整備による減災効果を，大地震時の物的・人的被害低減効果の観点から定量的に評価した。まず，過去に実施された木密地域整備事業の減災効果に着目したところ，市街地の不燃化・耐震化の進行とともに，地域全体の物的被害割合や避難困難率は減少しており，整備事業が一定の成果を上げていることが確認された。一方，局所的に見ると，避難困難率の高い建物が残存している箇所が見受けられた。特に，幅員が狭く，交差点間距離が長い道路の沿道において顕著であった。こうした道路における街路内閉じ込めの危険性を低減させるためには，緊急時のみ通行可能な「交差点間短縮避難経路」の整備が効果的かつ効率的であることも，シミュレーションによって検証できた。次に，防災生活道路の拡幅と，その沿道建築物の不燃化・耐震化を優先的に実施することで，これらの建物・道

路が延焼遮断帯および主要避難経路の役割を果たし，焼損建物数・死亡者数ともに現状よりも大幅に低減可能であることを示した（建物内対策をあわせて実施することで，減災効果はさらに高まった）。このとき，限られた時間やコストを有効に活用するためには，整備順について検討することも重要であり，例えば延焼クラスタを複数の小さな領域に分割できるような道路を優先的に整備することで，被害をより抑制できる可能性が高いことがわかった。最後に，地域内において新耐震基準建物への建て替えが無作為に進行するだけでは，避難困難性の低減の度合いはあまり大きくなく，防災計画上特に重要な道路やその沿道建物の整備を優先的に進めていくことの重要性を示した。

7.2　想定される本研究成果の利用場面

本研究で構築した「大地震時における物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデル」を用いることで，様々な大地震発生シナリオ（曜日・発災時刻・気象条件・震度等）のもと，どこで，どの程度の物的・人的被害が生じるかを詳細に把握することができる。さらに，本論文の第 3 章～第 6 章で例示したように，具体的な行動ルールや各種減災対策（建物内対策・建物間対策・市街地整備施策）の実施効果を，大地震時における物的・人的被害の観点から定量的に比較・評価可能である。したがって，本研究で提案したモデルと一連の分析手法は，木密地域での減災対策をハード・ソフト両面で具体的に推し進めていく上での，施策評価・合意形成支援ツールとして有用であると考えている。例えば，以下のような場面で利用されることを想定している。

- シミュレーション動画によって，大地震時に地域内でどのような被害が発生する可能性があるかを視覚的に把握する。
- 閉塞しやすい街路や火災延焼リスクの高いエリア，あるいは，建物内・街路内・街区内閉じ込めの発生しやすいエリアを把握し，より安全な避難経路の策定や，地域住民自身による効果的･効率的な共助活動を実施するための資料とする（第 3 章の分析の応用）。
- 一時集合場所や広域避難場所の安全性を人的被害の観点から評価し，より安全な一時集合場所・広域避難場所の新設や，逃げ遅れの危険性が高い一時集合場所の見直しのための検討資料とする（第 3 章の分析の応用）。
- 街路内閉じ込め者が発生しやすい街路を抽出した上で，緊急時のみ利用可能な「交差点間短縮避難経路」の整備箇所について，行政担当者と近隣住民間の話し合いのための資料とする（第 6 章 6.3 節の分析の応用）。
- 限られた予算を最大限に生かし，物的・人的被害を出来るだけ低減させるための，建物・道路・街区・地区の整備優先度を検討するための資料とする（第 6 章 6.5 節・6.6 節の分析の応用）。

- 重要伝統的建造物群保存地区（重伝建地区）において，木造建物群の魅力を保全しつつ，その周囲の不燃化・耐震化を促進する施策などを，減災対策の観点から評価する。

実際，本論文で対象とした地域以外においても，地域防災・減災計画の検討プロセスや，行政担当者・地域住民等とのワークショップ等で既に活用されており，今後，利用事例をさらに増やしていく予定である。

7.3　本モデル利用時の留意点

本モデル利用時には，以下の点に留意する必要がある。

- 付録 2 で，250m メッシュ単位のマクロな被害推計手法を採用している文献[1]の想定と，第 3 章のシミュレーション結果を比較することで，本論文で構築したシミュレーションモデルを用いた推定結果の妥当性を示している。しかし，物的・人的被害の様相は，震源の位置や地震の規模によって大きく異なることから，本シミュレーションモデルを用いて，実際に起こり得る災害現象を「予測」することは難しい。また，人間行動についても，いくつかの「仮定」に基づいてモデル化していることから，正確な行動予測は困難である。あくまでも，条件や想定（行動戦略の違いや，各種減災対策の有無等）を変更してシミュレーションを実行することで，条件や想定の違いがどのような結果として現れるかを「相対的に」評価することに，本シミュレーションモデルの利用意義がある。
- 本モデルを用いてシミュレーションを実行することで，物的被害ケースごとに，様々な物的・人的被害指標が推定されるが，結果を総合的に判断し，施策の優劣の評価を行うことは利用者自身に委ねられている。本論文では，主に対象地域全体の物的被害や人的被害の平均値に基づき，施策の優劣を評価していたが，評価の視点が変われば優劣も変化する可能性もあり得る。例えば，最大値や分散など，異なる統計指標を用いた評価や，重要施設（避難場所，災害対策本部，重要文化財など）が存在する場所などでは，局所的な物的・人的被害の程度に基づき評価を行うことも考えられる。

7.4　今後の課題

図 2.8.1（第 2 章 2.8 節）で示したように，本モデルを用いたシミュレーションを実行するためには多くの入力データ（GIS データ，滞留者データ，物的被害データ）が必要となる。一部のデータが整備されていない場合には，別のデータを用いてある程度の補完が可能ではあるが，その分，推定精度は低下することになる。逆に，ミクロな情報（例えば，各建物で実際に行われた耐震診断の結果や，実際の住民の情報等）を入力すれば，より地域の実情

に即したシミュレーションを実行することもできる。建物・道路単位のミクロスケールで分析可能な本モデルの特長を生かす上では，各自治体における，ベースとなる GIS データ等の整備・更新・維持・管理が不可欠である。

一方，本シミュレーションモデルには，入力データの作成やシミュレーションの実行に長い時間を要するという問題点がある。したがって，現時点では，広域での被害推定や，大地震発生直後の初動行動支援等，即時性が求められる状況への応用が困難である。大地震時の物的・人的被害を，広域で，かつ，迅速に推定するために，今後，本モデルを用いて得られたシミュレーション結果や知見を活用し，モデルを簡略化・汎用化することにも取り組む予定である。簡略化・汎用化したモデルを用いることで，シミュレーションを行うことなく，行政担当者や地域住民等が各地域の災害脆弱性や減災対策の効果を自ら把握できるようになるものと予想される。

本研究の成果が，将来，減災対策の評価や合意形成に幅広く活用され，木密地域における大地震時の物的・人的被害の低減につながることを期待したい。

参考文献（第 7 章）

[1]　東京都：首都直下地震等による東京の被害想定，2012.4,
http://www.bousai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html [2017.11.24 参照]

付　録

付録１　シミュレーションでの乱数の扱いについて

付録２　「大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデル」を用いた物的・人的被害の推定結果の検証について

※本文中で言及している物的・人的被害のシミュレーション結果は，特定の想定の下での推定値であり，分析対象地域で同様の物的・人的被害が必ず発生することを意味するものではない。

付録

付録１　シミュレーションでの乱数の扱いについて

本論文で用いている「大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデル」では，多くの確率的事象を取り扱っていることから，シミュレーション実行時には多くの場面で乱数を使用している（第 2 章 2.8 節参照）。具体的には，前処理段階で 5 種類の乱数（表 2.8.1）を，建物ごとに 3 種類の乱数（表 2.8.2）を，個人ごとに 24 種類の乱数（表 2.8.3）を使用しており，さらにこれらの値を物的被害ケースごとにも変動させている。

第 3 章の脚注 4 で述べたように，計算時間の制約から，本論文では 100 通りの物的被害ケースに限定してシミュレーションを実行している。このように，乱数の種を変えながら作成した，ある程度の数の物的被害ケースに対してシミュレーションを実行することで，乱数の影響で偶然生じた特異な事例を，平均的な傾向として議論してしまう危険性を低減させることができる。一方で，同一の物的被害ケースに対するシミュレーション回数は 1 回としているが，個人ごとに設定する乱数（表 2.8.3）の影響についても検討しておく必要がある。そこで本節では，物的被害 100 ケースのうち 2 ケース（代表的な 1 ケース，および，特異な 1 ケース）に着目し，各ケースに対して，個人ごとに設定する乱数の異なる 100 回のシミュレーションを実行することで，人間行動のバラつきの影響がどの程度生じるかを検証した。

図 8.1.1 に，第 3 章の想定(A)（150m 避難・救助活動あり・消火活動あり）の下で実行した物的被害 100 ケースのシミュレーション結果に基づく，焼損建物割合と死亡者数の関係を示してある。まず，この 100 ケースの中から，代表的な 1 ケースを選択する。

焼損建物割合の平均値と中央値はそれぞれ 45.2%と 64.2%，死亡者数の平均値と中央値はそれぞれ 309.2 人と 363.5 人である。第 3 章の図 3.4.3 に対する考察でも述べたように，発災から 24 時間経過後の延焼結果は二極化している（地域の大部分が焼損するか，あるいは逆に，ほとんど焼損せずに済む）。約 7 割のケースで地域の 60%以上が焼損している点を勘案すると，こうした大部分が焼損するケースから 1 ケースを選択するのが望ましいことから，焼損建物割合の中央値（64.2%）に近いケースに着目した。同程度の焼損建物割合であるケースは多いが，①対象地域の中心部付近から延焼が拡大している（図 8.1.2，図 8.1.3）ことや，②死亡者数の中央値（363.5 人）にも近いことから，ここでは，物的被害ケース No.82（焼損建物割合 64.2%，死亡者数 360 人）を代表ケースとして選択した。

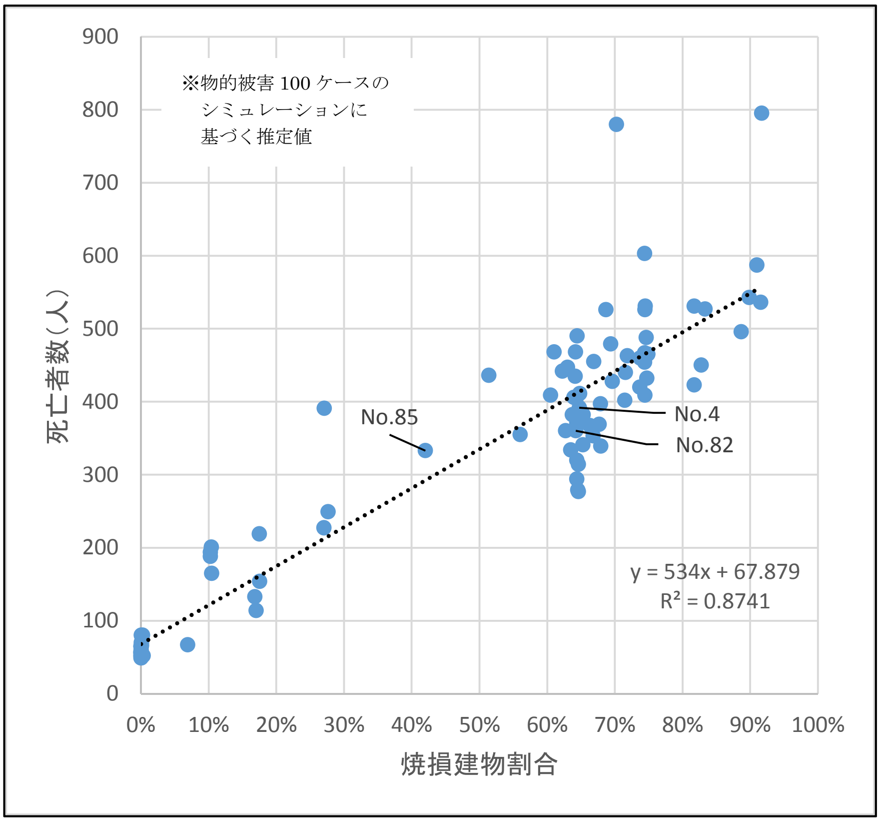
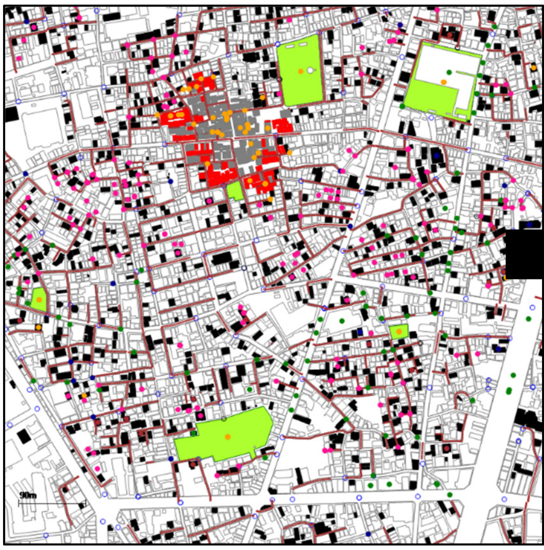


図 8.1.1　焼損建物割合と死亡者数の関係（物的被害 100 ケース，150m 避難）
※第 3 章における「想定(A)：150m 避難・救助活動あり・消火活動あり」の結果に対応。



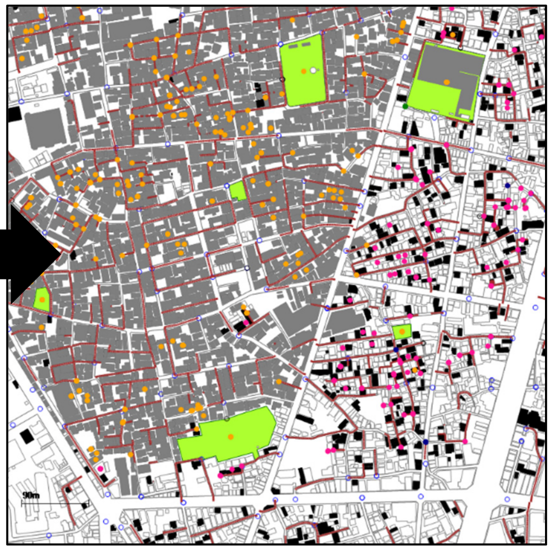


図 8.1.2　発災から 3 時間経過後の様子
（物的被害ケース No.82）

図 8.1.3　発災から 24 時間経過後の様子
（物的被害ケース No.82）

死亡者● 閉じ込め者（街区内● 建物内●） 救助活動中● 避難中●
消火活動中（覚知● 火元建物へ移動● 待機● 資器材庫へ移動● 消防水利へ移動● 放水●）
建物（倒壊■ 着火■ 鎮火■） 閉塞道路■ 一時集合場所・避難場所■ 河川■ 資器材庫○ 消防水利○

図 8.1.4　凡例（図 8.1.2 および図 8.1.3）

さらに，第 3 章 3.6 節の分析で，一時集合場所からの逃げ遅れによって多数の死亡者が発生する可能性があることが明らかとなった，物的被害ケース No.59（想定(C) : 50m 避難・救助活動あり・消火活動あり）を特異ケースとして選択した。これは，人間行動のバラつきによっては，逃げ遅れが生じない可能性があるためである。

以上の理由で選択した物的被害ケース No.82（150m 避難）および No.59（50m 避難）それぞれに対して，個人ごとに設定する乱数の異なる 100 回のシミュレーションを実行した。それ以外のシミュレーションの想定は第 3 章に揃えた。各想定・各回の発災から 24 時間経過後の焼損建物割合と死亡者数を，値の大きい順に並べた結果を図 8.1.5 および図 8.1.6 に示してある（参考値として，物的被害 100 ケースを各 1 回実行した，第 3 章のシミュレーション結果も示してある）。

物的被害ケース No.59（50m 避難）の結果に見られるように，延焼阻止活動の成否がわずかに変動した結果，焼損建物割合に差が生じる場合もある。しかし，延焼阻止成功率が低い点を勘案すると，火元建物の数や空間分布の影響に比べると，同一の物的被害ケースの下での人間行動の違いが焼損建物割合に及ぼす影響は小さいと言える。

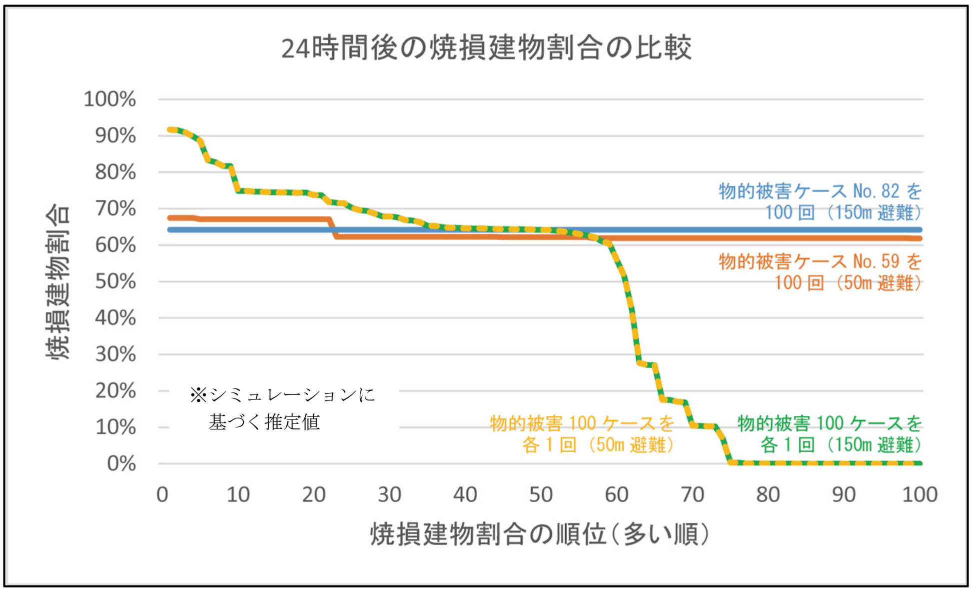


図 8.1.5　発災から 24 時間経過後の焼損建物割合の比較

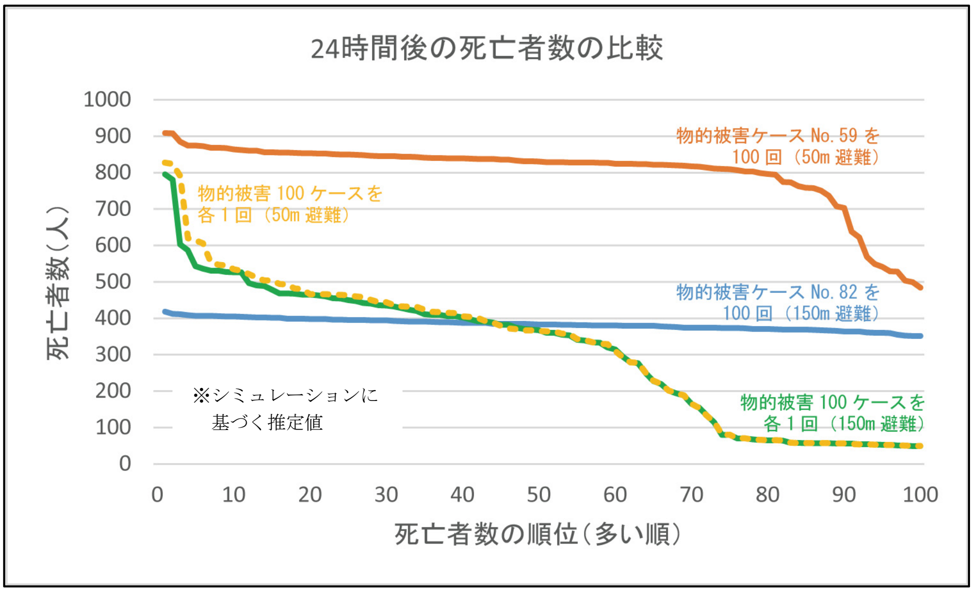


図 8.1.6　発災から 24 時間経過後の死亡者数の比較

死亡者数を比較すると（図 8.1.6），代表的な物的被害ケースとして選択した No.82（150m 避難）については，人間行動のバラつきによる影響が非常に軽微である一方，特異なケースとして選択した No.59（50m 避難）では，死亡者数の分散が比較的大きくなっていることがわかる。第 3 章で用いた乱数の下では，物的被害ケース No.59（50m 避難）における死亡者数は 824 人であった。すなわち，個人ごとに異なる乱数の設定次第では，さらに大きな人的被害が発生する場合や，逆に，一時集合場所からの逃げ遅れが発生しない場合もあり得たことを示している。しかし，焼損建物割合の場合と同様に，物的被害 100 ケースを各 1 回実行した場合に比べると死亡者数の分散は小さいことから，限られた計算時間を有効に活用する観点からは，できるだけ多くの物的被害ケースの下で 1 回のシミュレーションを実行する方が，物的・人的被害の様相の異なる多様なシミュレーション結果を得やすいと考えられる。

付録２　「大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデル」を用いた物的・人的被害の推定結果の検証について

本論文で構築した「大地震時の物的被害を考慮した人間行動シミュレーションモデル」は，特に物的被害について，既往研究で提案された多くのモデルを援用・統合している。このとき，各モデルの持つ誤差が累積されることから，本シミュレーションモデルを用いた推定結果にどの程度の誤差が生じる可能性があるかを検証しておくことは重要である。そこで本節では，250m メッシュ単位のマクロな被害推計手法を採用している東京都（2012）[1]の想定と比較することで，本シミュレーションモデルを用いた推定結果の妥当性の検証を試みる。

表 8.2.1 で，5 つの指標（(1)建物全壊率，(2)出火件数，(3)焼失（焼損）建物率，(4)死亡者数，(5)自力脱出困難者発生数）を対象に，被害推定結果を比較している。建物全壊率については，東京都（2013）[2]との比較も行っている。

表 8.2.1　被害推定結果の比較

対象地域内の値	被害想定 (東京都, 2012)		シミュレーション (本論文の第 3 章) ※想定(A)の平均値		地域危険度 測定調査 (東京都, 2013)
(1) 建物全壊率	8.68%	＜	19.8%	＜	30.5%
(2) 出火件数	2.02 件	≒	1.96 件		
(3) 焼失（焼損）建物率	47.8%	≒	45.2%		
(4) 死亡者数	ゆれ：15.3 人	＜	ゆれ：68.6 人 （即死 38.5 人） （受傷 30.1 人）		
	火災：40.2 人	≪	火災：240.7 人 （建物内 5.95 人） **（街路上 234.7 人）**		
	合計：55.5 人	≪	合計：309.3 人		
(5) 自力脱出困難者発生数	123.8 人	＜	210.7 人		

2.1　建物全壊率

対象地域内の建物総数（4,392 棟）に占める全壊建物数の割合。同様の建物被害関数（全壊確率曲線，フラジリティカーブ）を用いているが（2.2.1 節参照），それぞれ以下のように想定している計測震度が異なるため，建物全壊率の値に差が生じている。

[1] 東京都：首都直下地震等による東京の被害想定，2012.4,
http://www.bousai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html [2017.11.24 参照]
[2] 東京都：地震に関する地域危険度測定調査（第 7 回），2013.9,
http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/chousa_6/home.htm [2017.11.24 参照]

- 東京都（2012）：対象地域は東京湾北部地震（M7.3）時に全域で「震度 6 強（計測震度 6.0～6.5）」と想定されているが，計測震度自体は公表されていない。
- シミュレーション：対象地域内の計測震度を一律 6.16（地表面最大速度 PGV=81cm/sec 相当）に設定している。
- 東京都（2013）：工学的基盤に一律 30cm/sec の地震波が到来したことを想定している。これをもとに対象地域内の表層地盤における PGV の値を求めると 110cm/sec 前後となる。

2.2　出火件数

火元初期消火を考慮した値。シミュレーションの値は東京都（2012）の値の 97.0%であり，推定精度は良好である。

2.3　焼失（焼損）建物率

対象地域内の建物総数（4,392 棟）に占める焼失（焼損）建物数の割合。東京都（2012）は公設消防や消防団の消防活動による消火率を，シミュレーションは地域住民の消火活動の効果を，それぞれ考慮した値である。シミュレーションの値は東京都（2012）の値の 94.6%であり，推定精度は良好である。

2.4　死亡者数

ゆれが原因の死亡者数は，シミュレーションの方が多くなっている（計測震度の違いに起因）。また，シミュレーションでは，火災が原因の死亡者数が非常に多い。これは，火災延焼によって多くの街路上死亡者が発生する可能性を考慮しているためであり，本シミュレーションモデルの特長の一つと言える。東京都（2012）においても，延焼拡大時の逃げ惑いを考慮しているが，延焼拡大時の死亡者数を，過去の大火被害における焼失棟数と死者数のデータを用いて導いた関係式により算定している。このとき，大地震時のデータは関東地震（大正 12 年 9 月 1 日）のみであることから，道路閉塞等がなく，街路上死亡者数が少なく見積もられる傾向にあると考えられる。

2.5　自力脱出困難者発生数

計測震度の違いにより，シミュレーションの方が人数は多くなっている。

なお，負傷者に関しては，建物内閉じ込め者の受傷以外，十分にモデル化が行えておらず，検証が困難である。シミュレーションモデルにおける負傷者発生メカニズムの改良は，今後の課題である。

次頁以降に，比較表（表 8.2.1）算出の根拠を整理してある。

2.6　比較表（表 8.2.1）算出の根拠

表 8.2.2　足立区における被害想定（東京都（2012）より抜粋）

<table>
<tr><th colspan="3"></th><th>足立区全域</th></tr>
<tr><td colspan="3">夜間人口(人)</td><td>683,426</td></tr>
<tr><td colspan="3">昼間人口(人)</td><td>539,309</td></tr>
<tr><td colspan="3">面積(km^2)</td><td>53.2</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">建物棟数</td><td>木造</td><td>104,482</td></tr>
<tr><td>非木造</td><td>38,845</td></tr>
<tr><td rowspan="10">物的被害</td><td rowspan="2">ゆれ　建物全壊棟数</td><td>木造</td><td>9,235</td></tr>
<tr><td>非木造</td><td>698</td></tr>
<tr><td rowspan="2">ゆれ　建物全壊率</td><td>木造</td><td>8.8%</td></tr>
<tr><td>非木造</td><td>1.8%</td></tr>
<tr><td colspan="2">出火件数(火元初期消火考慮)</td><td>66</td></tr>
<tr><td colspan="2">出火率</td><td>0.046%</td></tr>
<tr><td rowspan="2">焼失棟数</td><td>倒壊建物を含む</td><td>16,124</td></tr>
<tr><td>倒壊建物を含まない</td><td>15,007</td></tr>
<tr><td rowspan="2">建物焼失率</td><td>倒壊建物を含む</td><td>11.2%</td></tr>
<tr><td>倒壊建物を含まない</td><td>10.5%</td></tr>
<tr><td rowspan="20">人的被害</td><td rowspan="5">死者</td><td>ゆれ・液状化建物被害</td><td>400</td></tr>
<tr><td>火災</td><td>309</td></tr>
<tr><td>ブロック塀等</td><td>3</td></tr>
<tr><td>屋外落下物</td><td>0</td></tr>
<tr><td>合計</td><td>712</td></tr>
<tr><td rowspan="5">負傷者</td><td>ゆれ・液状化建物被害</td><td>7,523</td></tr>
<tr><td>火災</td><td>1,395</td></tr>
<tr><td>ブロック塀等</td><td>104</td></tr>
<tr><td>屋外落下物</td><td>12</td></tr>
<tr><td>合計</td><td>9,034</td></tr>
<tr><td rowspan="5">うち重傷者</td><td>ゆれ・液状化建物被害</td><td>863</td></tr>
<tr><td>火災</td><td>389</td></tr>
<tr><td>ブロック塀等</td><td>40</td></tr>
<tr><td>屋外落下物</td><td>1</td></tr>
<tr><td>合計</td><td>1,293</td></tr>
<tr><td rowspan="5">死傷者(死者＋負傷者)</td><td>ゆれ・液状化建物被害</td><td>7,923</td></tr>
<tr><td>火災</td><td>1,704</td></tr>
<tr><td>ブロック塀等</td><td>107</td></tr>
<tr><td>屋外落下物</td><td>12</td></tr>
<tr><td>合計</td><td>9,746</td></tr>
<tr><td colspan="2">自力脱出困難者</td><td>発生数(人)</td><td>3,228</td></tr>
</table>

※東京湾北部地震（M7.3），冬，18 時，北風 8m/sec

表 8.2.3　対象地域を構成する町丁目の情報

			[a]	[b]	[c]=[a]/[b]	[d]	[f]=[d]/[e]	[g]=[f]*[c]	焼失 [i]	[k]=[i]/[j]	[l]=[k]*[c]	H24.4.1現在 [n]	[o]=[n]*[c]
			含まれる面積km^2	全体面積km^2	含まれる面積割合	建物倒壊危険量（棟/ha）×町丁目面積（ha）	【構成比】	*「一部のみ」換算	火災危険量（棟/ha）*町丁目面積（ha）	【構成比】	*「一部のみ」換算	住民基本台帳人口[人]≒夜間人口	*「一部のみ」換算
1	千住元町	全域	0.143	0.143	100.0%	230.2	0.69%	0.69%	433.1	2.59%	2.59%	3,355	3,355
2	千住大川町	全域	0.164	0.164	100.0%	340.4	1.02%	1.02%	681.3	4.08%	4.08%	3,692	3,692
3	千住柳町	全域	0.079	0.079	100.0%	199.9	0.60%	0.60%	462.6	2.77%	2.77%	1,740	1,740
4	千住寿町	全域	0.106	0.106	100.0%	273.1	0.82%	0.82%	358.6	2.15%	2.15%	3,153	3,153
5	千住龍田町	一部	0.078	0.098	80.2%	243.7	0.73%	0.59%	268.4	1.61%	1.29%	1,909	1,531
6	千住中居町	一部	0.023	0.126	18.2%	204.2	0.61%	0.11%	127.5	0.76%	0.14%	2,579	469
対象地域全域			0.593	0.716		1491.5	4.48%	3.84%	2331.4	13.95%	13.01%	16,428	13,940
足立区全域				53.2		33267.7	100.00%	[h]	16712.1	100.00%	[m]	669,097	
						[e]			[j]				

※千住龍田町と千住中居町は，町丁目の一部のみ対象地域に含まれるため，[c]面積割合の値を用いて各値を換算している。

※「[d]建物倒壊危険量」および「[i]火災危険量」は，『地震に関する地域危険度測定調査（第7回）』（東京都，2013）の算出に用いられている値であり，東京都に別途提供頂いたものである。

(1) 建物全壊率

【東京都（2012）の被害想定】

（足立区全域の建物全壊棟数）＝（木造）9,235＋（非木造）698＝9,933[棟]…①

（対象地域内の推定建物全壊棟数）＝①×[h]＝381.0[棟]…②

（対象地域内の推定建物全壊率）＝②/(分析対象地域内の全建物数)

＝381.0/4,392＝<u>8.68[%]</u>

【本論文第 3 章のシミュレーション】

（シミュレーションでの平均建物全壊率）＝<u>19.8[%]</u>

【東京都（2013）の地域危険度測定調査】

（対象地域内の推定建物全壊棟数）＝$\sum_i \sum_j A_i \times N_{ij} \times P_j$ =1,341[棟]

A_i：町丁目 i の面積のうち，対象地域に含まれる部分の割合[c]

N_{ij}：町丁目 i 内の分類 j（j=1～26）の全建物数[棟]

P_j：分類 j（j=1～26）の全壊率

（対象地域内の推定建物全壊率）＝1,341/4,392＝<u>30.5[%]</u>

(2) 出火件数　※火元初期消火を考慮した出火件数。

【東京都（2012）の被害想定】

（足立区全域の出火件数）＝66[件] …③

（対象地域内の推定出火件数）＝③×（対象地域内の全建物数）／（足立区内の全建物数）

＝66×4,392/(104,482+38,845)＝<u>2.02[件]</u>

【本論文第 3 章のシミュレーション】

（シミュレーションでの平均出火件数）＝3.04[件]

（シミュレーションでの平均火元初期消火成功件数）＝1.08[件]

（火元初期消火を考慮した平均出火件数）＝3.04－1.08＝<u>1.96[件]</u>

<u>(3) 焼失（焼損）建物数</u>　※倒壊建物を含む値。

【東京都（2012）の被害想定】

（足立区全域の焼失建物数）＝16,124[棟]…④

（対象地域内の推定焼失建物数）＝④×[m]＝2,097[棟]…⑤

（対象地域内の推定焼失建物率）＝⑤/(分析対象地域内の全建物数)

＝2,097/4,392＝<u>47.8[%]</u>

【本論文第 3 章のシミュレーション】※延焼阻止活動を考慮した値。

（シミュレーションでの平均焼損建物数の割合）＝<u>45.2[%]</u>

- 東京都(2012)においては，平成 9 年東京都被害想定の手法に基づき，**過去の大火被害における**焼失棟数と死者数のデータを用いて導いた関係式により，延焼拡大時の死者数を算定している（図 8.2.1)。大地震時のデータは関東地震（大正 12 年 9 月 1 日）のみであり，道路閉塞等がなく，街路内・街区内死亡者が発生しにくい推定式となっている。このことが，被害想定（東京都，2012）での火災による死亡者の少なさにつながっている。
- これに対し，本論文のシミュレーションは，火災延焼によって多くの街路内・街区内死亡者が発生する可能性を示したことに意義がある。

（延焼火災による死者数）
　＝［0.02180×（焼失棟数）］×（屋内滞留人口比率）

（屋内滞留人口比率）＝（発生時刻の屋内滞留人口）÷（屋内滞留人口の 24 時間平均）

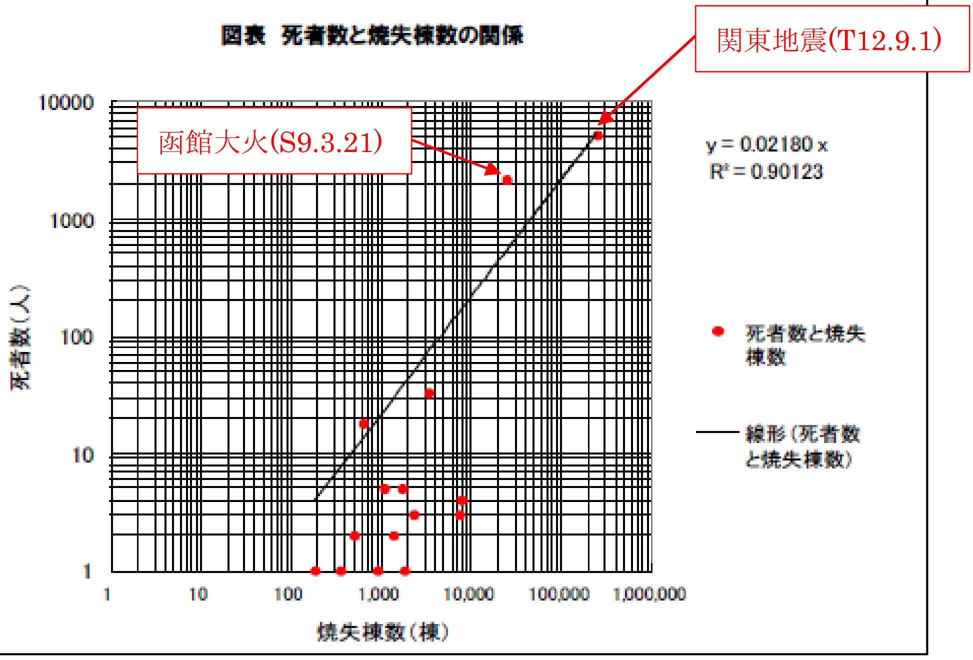


図 8.2.1　死者数と焼失棟数の関係
（東京都（2012）の被害想定「3.被害想定手法」p.3-31 より引用）

(4) 死亡者数

【東京都（2012）の被害想定】

足立区全域の死亡者数

　（ゆれ・液状化建物被害による死亡者数）＝400[人]

　　⇒（建物全壊棟数に対する死亡者数の割合）＝400/①9,933＝4.03[%]…⑥

　（火災による死亡者数）＝309[人]

　　⇒（焼失建物数に対する死亡者数の割合）＝309/④16,124＝1.92[%]…⑦

対象地域内の死亡者数

　（ゆれ・液状化建物被害による死亡者数）＝②381.0×⑥0.0403＝15.3[人]

　（火災による死亡者数）＝④16,124×⑦0.0192＝40.2[人]

　（合計死亡者数）＝15.3＋40.2＝55.5[人]

【本論文第 3 章のシミュレーション】※平均値

　（ゆれによる死亡者数）＝（即死者数）＋（負傷による建物内死亡者数）

＝38.5＋30.1＝68.6[人]

（火災による死亡者数）＝（火災による建物内死亡者数）＋（火災による街路上死亡者数）

＝5.95＋234.7＝240.7[人]

（合計死亡者数）＝68.6＋240.7＝309.3[人]

⑸ 自力脱出困難者発生数

【東京都（2012）の被害想定】

（足立区全域の自力脱出困難者発生数）＝3,228[人]

⇒（建物全壊棟数に対する割合）＝3,228/9,933＝32.5[%]…⑨

（分析対象地域内の自力脱出困難者発生数）＝③×⑨＝381.0×0.325＝123.8[人]

【本論文第 3 章のシミュレーション】※平均値

（平均自力脱出困難者発生数）＝210.7[人]

図表リスト

【第 1 章】

図 1.2.1　東京都 23 区における不燃領域率の比較 ……8
図 1.2.2　防火構造の空間分布の比較 ……8
表 1.2.1　木密地域の防災性能と整備事業進捗の評価に関する既存の指標 ……10
表 1.2.2　大地震時の地域住民による救助活動に関する既往研究 ……12
表 1.2.3　大地震時の地域住民による消火活動に関する既往研究 ……14
表 1.2.4　大地震時の広域避難行動に関する既往研究 ……16
図 1.3.1　大地震時の被害低減に向けた施策の検討プロセス（模式図） ……18

【第 2 章】

図 2.1.1　大地震時の物的被害・人間行動シミュレーションモデルの全体像 ……25
図 2.2.1　物的被害データの作成手順 ……26
図 2.2.2　実構造別・建築年代別の建物被害関数 ……27
図 2.2.3　全壊建物から発生する瓦礫高さのモデル化 ……29
図 2.2.4　出火時刻の設定方法 ……30
表 2.2.1　火災による道路閉塞の表現方法 ……30
図 2.2.5　火災による道路閉塞のモデル化 ……31
図 2.3.1　建物内閉じ込め者の設定方法および自力脱出時刻と余命時間の設定方法 ……32
図 2.3.2　建物内閉じ込め者の脱出・救出・死亡 ……32
図 2.4.1　救助活動参加者のフェーズと行動フロー ……33
図 2.4.2　応援要請を受けた場合の救助活動参加率（性別・年齢別） ……34
表 2.4.1　高齢者の閉じ込め者救助可否のモデル化 ……34
図 2.5.1　計測震度と家具転倒率・防災行動可能率との関係（転倒防止対策無） ……35
図 2.5.2　延焼阻止活動の流れ ……36
図 2.6.1　行動開始のタイミングと行動選択フロー ……37
図 2.6.2　行動開始のタイミングの設定に用いる Poisson 分布 ……38
表 2.6.1　高齢者の瓦礫乗り越えのモデル化 ……39
図 2.6.3　属性・混雑度・瓦礫の有無を考慮した通行速度の設定方法 ……39
図 2.6.4　火災建物から受ける抵抗のモデル化 ……40
図 2.8.1　本論文のシミュレーション分析における処理プロセス ……42
表 2.8.1　シミュレーションの前処理（別プログラムであらかじめ実行する処理）で
使用している乱数の一覧 ……42
表 2.8.2　建物ごとに設定している乱数の一覧 ……42

表 2.8.3　個人ごとに設定している乱数の一覧 ……43
表 2.9.1　各サブモデルの概要，参考研究，および，本研究のオリジナリティ ……44

【第 3 章】

図 3.1.1　第 3 章のシミュレーションの分析対象地域 ……50
表 3.1.1　第 3 章のシミュレーションの想定 ……50
図 3.1.2　滞留者数と高齢者率の時間推移 ……51
図 3.1.3　滞留者数の空間分布（平日午後 6 時） ……51
図 3.1.4　発災から 24 時間経過後までのシミュレーションの例 ……52
表 3.2.1　倒壊・閉塞シミュレーションの結果 ……53
図 3.2.1　物的被害箇所数の時間推移 ……53
図 3.3.1　火元初期消火成功件数 ……54
図 3.3.2　延焼阻止成功件数 ……55
表 3.3.1　焼損建物数の比較 ……55
図 3.4.1　救助活動者数の時間推移 ……56
表 3.4.1　死亡者数の比較 ……56
図 3.4.2　焼損建物の減少数と死亡者の減少数の関係 ……57
図 3.4.3　救助・消火活動の有無と死亡者数・焼損建物数の関係 ……58
図 3.4.4　建物内閉じ込め者数の時間推移 ……59
図 3.4.5　死亡者数の時間推移 ……59
図 3.4.6　建物からの救出者数の内訳 ……60
表 3.5.1　救出活動への参加・不参加と安否 ……61
図 3.6.1　避難場所滞在者数の時間推移 ……61
表 3.6.1　避難開始のタイミングと死亡者数の関係（死亡原因別・救助消火あり） ……62
図 3.6.2　避難開始のタイミングと死亡者数・街路内閉じ込め者数の関係 ……62
図 3.7.1　街路内閉じ込め者数の時間推移 ……63
図 3.7.2　焼損建物数と死亡原因別人数の関係 ……64
図 3.7.3　街区内閉じ込め現象の例 ……65
図 3.8.1　木造建物棟数密度と死亡者・街路内閉じ込め者発生率の関係 ……66

【第 4 章】

図 4.1.1　第 4 章のシミュレーションの分析対象地域 ……71
表 4.1.1　第 4 章のシミュレーションの想定 ……72
表 4.1.2　対策評価のための比較想定 ……72
図 4.1.2　焼損建物割合および死亡者数の比較 ……73
図 4.1.3　焼損建物割合の集計結果 ……74

図 4.1.4　死亡者数の集計結果 ……74

【第 5 章】

図 5.1.1　第 5 章のシミュレーションの分析対象地域 ……80
表 5.1.1　第 5 章のシミュレーションの想定 ……81
図 5.2.1　出火件数の頻度分布 ……81
図 5.2.2　火元初期消火の成否 ……82
図 5.3.1　消火成功率と延焼阻止成功率の比較 ……83
図 5.4.1　隣接建物延焼までの所要時間の分布と想定②～⑥における延焼阻止成否 ……84
図 5.4.2　消火に成功した出火建物の防火構造構成比 ……84
図 5.4.3　消火に成功した出火建物の平均建築面積と消火活動開始までの平均所要時間 85
図 5.5.1　隣接建物に延焼したタイミング別・想定別に見た延焼阻止失敗事例数 ……86
図 5.5.2　延焼阻止活動の各フェーズにおける所要時間の分布（延焼阻止失敗事例） …86

【第 6 章】

図 6.2.1　6.2 節のシミュレーションの分析対象地域 ……91
表 6.2.1　6.2 節のシミュレーションの想定 ……92
図 6.2.2　防火構造別に分類した建物の空間分布 ……93
図 6.2.3　防火構造の構成率と不燃領域率の比較 ……93
表 6.2.2　物的被害シミュレーション結果の年次比較 ……94
図 6.2.4　各建物の全壊率 ……94
図 6.2.5　各建物の焼損率 ……94
図 6.2.6　各道路の閉塞率 ……95
図 6.2.7　地域全体の避難困難率の比較 ……96
図 6.2.8　最初に到着した一時集合場所・広域避難場所までの平均移動時間・距離 ……96
図 6.2.9　建物別にみた避難困難率の空間分布 ……96
図 6.3.1　交差点間短縮避難経路整備の例 ……98
図 6.3.2　整備箇所と各建物の避難困難率低減効果の空間分布 ……99
図 6.3.3　交差点間短縮避難経路による避難困難者数・避難困難率の低減効果・効率 ··100
図 6.3.4　木造建物密度・道路閉塞率・避難困難率の関係 ……100
図 6.3.5　交差点間短縮避難経路整備による避難距離の変化 ……101
図 6.3.6　発災時の居場所と避難困難地点・到達避難場所間の直線距離の変化 ……101
図 6.4.1　6.4 節のシミュレーションの分析対象地域 ……103
表 6.4.1　6.4 節のシミュレーションの想定 ……103
図 6.4.2　整備対象の建物・道路の空間分布 ……104
図 6.4.3　焼損建物割合の比較（物的被害ケース別） ……105

図 6.4.4　死亡者数の比較（物的被害ケース別）…105
図 6.4.5　平均死亡者数の比較（死因別・想定別）…106
図 6.5.1　整備シナリオ別の焼損建物割合…107
図 6.5.2　整備シナリオ別の死亡者数…108
図 6.5.3　前半整備グループの整備道路総延長（整備シナリオ別）…108
表 6.5.1　各整備シナリオの道路構成と死亡者数の大小との関係…108
図 6.6.1　築年数別の建替え割合…110
表 6.6.1　建替え後の構造を推定するための構造遷移マトリクス…110
表 6.6.2　6.6 節の分析対象地域のプロフィール…111
図 6.6.2　6.6 節の分析対象地域の地域危険度と道路幅員の空間分布…112
図 6.6.3　耐震化率の経年変化…113
図 6.6.4　倒壊建物割合の経年変化…113
図 6.6.5　閉塞道路割合の経年変化…113
図 6.6.6　主要道路までの移動距離…114
図 6.6.7　街路内閉じ込め者数…114
図 6.6.8　街路内閉じ込め者の割合…114
図 6.6.9　閉塞道路遭遇回数…114

【第 7 章】
なし

【付録】
図 8.1.1　焼損建物割合と死亡者数の関係…128
図 8.1.2　発災から 3 時間経過後の様子（物的被害ケース No.82）…128
図 8.1.3　発災から 24 時間経過後の様子（物的被害ケース No.82）…128
図 8.1.4　凡例（図 8.1.2 および図 8.1.3）…129
図 8.1.5　発災から 24 時間経過後の焼損建物割合の比較…129
図 8.1.6　発災から 24 時間経過後の死亡者数の比較…130
表 8.2.1　被害推定結果の比較…131
表 8.2.2　足立区における被害想定…133
表 8.2.3　対象地域を構成する町丁目の情報…134
図 8.2.1　死者数と焼失棟数の関係…136

学位申請者の研究業績（博士論文該当のみ）

【学術雑誌発表論文（査読あり）】

[1] 大佛俊泰・沖拓弥：密集市街地における大地震時の避難困難率について，日本建築学会計画系論文集，Vol. 77，No. 681，pp. 2561-2567，2012 年 11 月【第 2 章】

[2] 大佛俊泰・沖拓弥：広域避難の困難性からみた木造住宅密集地域整備事業の評価，日本建築学会計画系論文集，Vol. 79，No. 696，pp. 437-444，2014 年 2 月【第 6 章】

[3] Takuya Oki and Toshihiro Osaragi: Modeling Human Behavior of Local Residents in the Aftermath of a Large Earthquake – Wide-Area Evacuation, Rescue and Firefighting in Densely Built-Up Wooden Residential Areas, Journal of Disaster Research (Special Issue on Disaster and Big Data), Vol. 11, No. 2, pp. 188-197, 2016 年 3 月【第 1 章】

[4] 沖拓弥・大佛俊泰：住民による救助活動を組み込んだ大地震時における木密地域の広域避難シミュレーション分析，日本建築学会計画系論文集，Vol. 81，No. 724，pp. 1345-1353，2016 年 6 月【第 3 章】

[5] Toshihiro Osaragi and Takuya Oki: Wide-Area Evacuation Simulation Incorporating Rescue and Firefighting by Local Residents, Journal of Disaster Research (Special Issue on Disaster and Big Data Part 2), Vol. 12, No. 2, pp. 296-310, 2017 年 3 月【第 2 章・第 3 章】

[6] Takuya Oki and Toshihiro Osaragi: Urban Improvement Policies for Reducing Human Damage in a Large Earthquake by Using Wide-Area Evacuation Simulation Incorporating Rescue and Firefighting by Local Residents, Planning Support Science for Smarter Urban Futures, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer International Publishing, pp. 449-468, 2017 年 5 月【第 2 章・第 4 章・第 6 章】

[7] Takuya Oki and Toshihiro Osaragi: Effects of Firefighting Activities by Local Residents for Mitigating Fire Destruction Damage and Human Casualties in a Large Earthquake, Journal of Disaster Research (Special Issue on Disaster and Big Data Part 3), Vol. 13，No. 2（査読審査中）【第 5 章】

【国際会議における発表（Full Paper 査読）】

[1] Takuya Oki and Toshihiro Osaragi: Wide-area Evacuation Difficulty in Densely-built Wooden Residential Areas, 13th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM 2016), Proceedings of the ISCRAM 2016 Conference, 2016 年 5 月【第 6 章】

[2] Takuya Oki and Toshihiro Osaragi: Evaluation of Conversion to Quake-Resistant Buildings in Terms of Wide-Area Evacuation and Fire-Brigade Accessibility, 14th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM 2017), Proceedings of the ISCRAM 2017 Conference, pp. 25-41, 2017 年 5 月【第 6 章】

【国際会議における発表（アブストラクト審査）】

[1] Takuya Oki and Toshihiro Osaragi: A Method for Evaluation of Wide-area Evacuation Difficulty in Case of Major Earthquake, 12th International Conference on Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning (DDSS 2014), Procedia Environmental Sciences, Elsevier, 2014 年 11 月【第 6 章】

[2] Takuya Oki and Toshihiro Osaragi: Reducing Wide-area Evacuation Difficulty in Densely Built-up Wooden Residential Areas: Effects of Adding New Evacuation Routes, 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM 2015), 2015 年 5 月（ポスター発表）【第 6 章】

[3] Takuya Oki and Toshihiro Osaragi: Effects of Rescue Activities by Local Residents Considering Property Damage and Wide-Area Evacuation Immediately after an Earthquake, 13th International Conference on Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning (DDSS 2016), Conference proceedings of DDSS 2016, 2016 年 6 月【第 3 章】

【国内会議における発表（査読なし）】

[1] 沖拓弥・大佛俊泰：密集市街地における大地震時の避難危険度，日本建築学会大会学術講演梗概集，F-1 分冊，pp. 863-864，2011 年 8 月【第 2 章・第 3 章】

[2] 沖拓弥・大佛俊泰：密集市街地の避難危険度評価, 地理情報システム学会講演論文集（CD-ROM），Vol. 20，2011 年 10 月【第 2 章・第 3 章】

[3] 沖拓弥・大佛俊泰：避難安全性からみた密集市街地性状に関する一考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，F-1 分冊，pp. 927-928，2012 年 9 月【第 2 章・第 3 章】

[4] 大佛俊泰・沖拓弥：大地震時における広域避難行動シミュレーション，スケジューリング・シンポジウム 2012 講演論文集，pp. 115-120，2012 年 9 月【第 2 章・第 3 章】

[5] 沖拓弥・大佛俊泰：密集市街地の空間性状と大地震時の避難困難率，地理情報システム学会講演論文集（CD-ROM），Vol. 21，2012 年 10 月【第 6 章】

[6] 沖拓弥・大佛俊泰：避難困難性からみた木造住宅密集地域における交差点間距離の短縮効果―大地震時の避難困難率低減に向けた広域避難シミュレーションの応用 その 2―，日本建築学会大会学術講演梗概集，F-1 分冊，pp. 149-150，2013 年 8 月【第 6 章】

[7] 沖拓弥・大佛俊泰：東京都足立区北千住における大地震時の徒歩帰宅・広域避難リスク評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，F-1 分冊，pp. 1055-1056，2014 年 9 月【第 3 章】

[8] 沖拓弥・大佛俊泰：大地震時の地域住民による救助活動と逃げ遅れについて，日本建築学会関東支部研究報告集Ⅱ，pp. 425-428，2015 年 3 月【第 2 章・第 3 章】

[9] 沖拓弥・大佛俊泰：大地震時の地域住民による救助活動と広域避難時の逃げ遅れ，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2 分冊，pp. 259-260，2015 年 9 月【第 2 章・第 3 章】

[10] 沖拓弥・大佛俊泰：大地震時における死亡者数・街路上閉じ込め者数の空間分布と要因分析―避難行動ルールと地域住民による救助活動を考慮したシミュレーションモデル―，地理情報システム学会講演論文集（CD-ROM），Vol. 24，2015 年 10 月【第 2 章・第 3 章】

[11] 沖拓弥・大佛俊泰：住民による救助・消火活動を考慮した大地震時の広域避難シミュレーション，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2 分冊，pp. 259-260，2016 年 8 月【第 2 章・第 3 章】

[12] 沖拓弥・大佛俊泰・廣川 典昭：大地震時の地域住民による救助・消火活動の効果とリスク，地理情報システム学会講演論文集（CD-ROM），Vol. 25，2016 年 10 月【第 2 章・第 3 章】

[13] 沖拓弥・大佛俊泰：家庭用消火器と感震ブレーカーの設置による減災効果―大地震時の物的被害・人間行動シミュレーションを用いた防災・減災対策の評価 その 2―，日本建築学会大会学術講演梗概集，F-1 分冊，pp. 813-814，2017 年 9 月【第 4 章】

[14] 沖拓弥・大佛俊泰：大地震時の地域住民による延焼阻止活動に関するシミュレーション分析，地理情報システム学会講演論文集（CD-ROM），Vol. 26，2017 年 10 月【第 5 章】

【受賞歴】

[1] 都市住宅学会 学生論文コンテスト 修士論文部門最優秀賞，2013 年 3 月

[2] 東京工業大学 情報環境学専攻賞，2013 年 3 月

[3] 東京工業大学 建築学科同窓会 冬夏賞（修士），2014 年 1 月

[4] 日本建築学会 都市計画部門 若手優秀発表，2014 年 9 月

[5] 日本建築学会 関東支部研究発表会 優秀発表，2015 年 3 月

[6] ISCRAM2017 Best Research Paper Award，2017 年 5 月

謝辞

本研究を進めるにあたり，多大なご指導ならびにご助言を頂きました，東京工業大学 環境・社会理工学院建築学系教授 大佛俊泰先生に心から感謝の意を表します。大佛先生には，学部生時代から，研究内容のみならず研究者としてのマナーなど，多くのことを懇切にご指導頂き，私を研究者の道へと導いて下さったのも大佛先生でした。学位論文をまとめるにあたり，ここに改めて感謝申し上げます。

また，副主査として論文審査を頂きました，中井検裕教授，竹内徹教授，藤井晴行教授，斎尾直子准教授，鍵直樹准教授の各先生方からは，的確なご指摘と有益なコメントを多数頂戴致しました。心より感謝申し上げます。

本論文で使用したパーソントリップ調査データにつきましては国土交通省関東地方整備局の皆様に，建物・道路の GIS データに関しては東京都都市整備局および東京都世田谷区役所の皆様に，消防水利や消火資器材の GIS データに関しては東京消防庁の皆様に，それぞれご提供頂きました。ここに感謝の意を表します。

また，本論文の多くの部分は，日本建築学会ならびに Journal of Disaster Research 等の学術委員会において審査して頂きました。貴重なご意見やご指摘を頂きました匿名の審査員に感謝致します。

最後に，研究生活を送る上で，大佛研究室の諸先輩方や立花助教，事務補佐員の岡さん，同期・後輩の皆さん，ならびに，友人や家族から，多くの支えを受けました。心より感謝致します。

なお，本研究は JSPS 科研費 21310105，同 25889023，ならびに，JST，CREST の助成を受けて行ったものです。

2018 年 1 月 31 日
東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系
沖　拓弥