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

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	高層ビルの大規模防災訓練実測データに基づく階段避難シミュレーションモデルの開発
Title(English)	
著者(和文)	門倉博之
Author(English)	Hiroyuki Kadokura
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:甲第10207号, 授与年月日:2016年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:末松 孝司,元結 正次郎,翠川 三郎,大佛 俊泰,室町 泰徳,松岡 昌志,大野 隆造
Citation(English)	Degree:, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10207号, Conferred date:2016/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

高層ビルの大規模防災訓練実測データに基づく
階段避難シミュレーションモデルの開発

2016 年 3 月

東京工業大学大学院総合理工学研究科

人間環境システム専攻

門倉博之

目次

第 1 章　序論 3
1.1.　研究の背景と課題 3
1.2.　関連する既往の研究 4
1.2.1.　階段避難の実測データに関する研究 4
1.2.2.　避難計算に関する法制度 7
1.2.3.　避難シミュレーションモデルに関する研究 10
1.2.4.　避難方法に関する研究 13
1.3.　研究の目的 14
1.4.　論文の構成 15
1.5.　用語の定義 16
第 2 章　避難訓練実測データに基づく階段室内の滞留発生に関する分析 17
2.1.　高層建築物の避難訓練調査の概要 17
2.1.1.　順次避難計画の概要 17
2.1.2.　観測対象とする階段室 19
2.1.3.　避難訓練の観測方法 20
2.1.4.　各階の避難訓練参加者数 22
2.2.　訓練観測の結果 23
2.2.1.　階段室内への流入時刻 23
2.2.2.　避難完了時間 24
2.2.3.　階段室内の歩行速度 26
2.2.4.　階段室内の流動係数測定位置 29
2.2.5.　1 階階段室出口の流動係数 30
2.2.6.　合流時の流動係数 31
2.2.7.　複数階にわたる流動係数 33
2.2.8.　階踊り場の合流比 34
2.2.9.　階踊り場の密度 35
2.2.10.　中間踊り場の密度 37
2.2.11.　階段部の密度 38
2.2.12.　階段室 1 層内の人数 39
2.2.13.　階段室内の密度、歩行速度、流動係数の関係 41
2.3.　順次避難における階段室内の滞留発生状況 46
2.3.1.　訓練参加者の移動軌跡 49
2.3.2.　合流を原因とする滞留 50

2.3.3.　階段室内の高密状態を原因とする滞留 51
2.4.　滞留発生要因の考察 52
2.5.　まとめ 53
第 3 章　階段避難シミュレーションモデルの構築 54
3.1.　階段室と避難者行動のモデル化について 54
3.1.1.　セルオートマトンモデル 55
3.1.2.　避難者行動のモデル化 56
3.1.3.　階段避難シミュレーションシステムの概要 57
3.2.　階段避難シミュレーションの設定条件 58
3.2.1.　階段室の設定条件 58
3.2.2.　階段室のセル表現化 59
3.2.3.　避難者の設定条件 61
3.2.4.　階段避難シミュレーション結果の比較検討項目 62
3.3.　階段避難シミュレーションの再現性検証 63
3.3.1.　避難時間 63
3.3.2.　階段室内の流動状況 64
3.3.3.　階段室内の混雑状況 68
3.4.　まとめ 76
第 4 章　滞留発生を避ける避難方法の検討と提案 77
4.1.　アンケートによる滞留時間の評価 77
4.1.1.　アンケート調査の概要 77
4.1.2.　アンケート調査結果 77
4.2.　避難時における潜在的な影響要因と評価指標 85
4.3.　順次避難計画の策定手順 86
4.4.　階段避難シミュレーションによる避難方法のケーススタディ 87
4.4.1.　全館一斉避難による階段避難の評価 88
4.4.2.　順次避難計画における避難フェーズ間隔の評価 92
4.4.3.　順次避難計画における発災シナリオの比較検証 104
4.4.4.　避難方法のケーススタディ検証結果のまとめ 108
4.5.　避難方法の提案 110
4.6.　まとめ 111
第 5 章　結論 112
5.1.　総括 112
5.2.　今後の課題 114
参考文献 115
謝辞 118

第1章　序論

1.1.　研究の背景と課題

現在、首都圏では複数の再開発計画が進行しており、IT 企業のオフィス入居需要など高層建築物の竣工が増加傾向にある[1)]。そのため、今後、高層化に従って在館者がより増加し、効率面から企業の拠点集約なども相まって高密度化していくと考えられる。

一方、2001 年に米国ニューヨーク市で発生した世界貿易センタービルの倒壊テロ事件でもみられたように、高層建築物において大規模な火災や非常事態が発生したときに、在館者が全館避難を強いられる場合のあることが現実となっている。特に今後発生すると想定されている首都直下地震等では、高層建築物における火災発生時の場合、在館者が全館で一斉に避難を開始する事態が危惧される。また、その際、階段室内が混雑・高密度状態になると予想され、在館者の避難時間の遅延や歩行への影響など危険な状態を引き起こすことが考えられる。そのため、高層建築物における避難計画の検討は喫緊の課題となっており、混雑・高密度状態を避ける実用的な避難方法が求められている。

しかしながら、避難計画を策定するにあたっては、避難シミュレーションによる事前検証が有効と考えられるが、高層建築物における全館避難の再現は困難であることから、これまで階段室内における滞留のメカニズムは断片的にしか解明されておらず、現状では避難シミュレーションモデルへの反映がなされていない。その結果、どのような避難計画が、避難安全上、また避難完了時間上、最も効率的であるのかの検証については、実際の避難実測データが少ないため、十分に実施されてこなかったのが現状である。

本研究は、東京都内のある高層事務所ビルにおいて実施された「順次避難計画」による全館避難訓練について、筆者が参加したこれまで過去 8 回（2007 年、2008 年、2010 年、2011 年、2012 年、2013 年、2014 年、2015 年実施）[2)3)4)5)6)7)8) 9)10)]の実測調査のうち、最も訓練参加者の多かった 2012 年の実測結果[10)]をもとに行ったものである。

1.2. 関連する既往の研究

関連する既往研究として、①階段避難の実測データに関する研究、②避難計算に関する法制度、③避難シミュレーションモデルに関する研究、ならびに④避難方法に関する研究が挙げられる。詳細を以下に述べる。

1.2.1. 階段避難の実測データに関する研究

階段避難の実測データに関しては、①実際の災害時における避難データに関するもの、②避難訓練による実測データに関するもの、③実験による実測データ、④平常時の実測データに関するものが既往研究として挙げられる。

まず、実際の災害時における避難データに関するものとしては、2001 年 9 月 11 日ニューヨークの世界貿易センター倒壊テロ事件について NIST の報告 [11]が挙げられる。WTC1 での 10 階から 91 階の 368 人へのインタビューをもとに避難時の平均歩行速度を 0.2m/秒と算出している。また、避難シミュレータ（Simulex、EXODUS、EXIT89）により、避難者数（8,800 人、19,800 人、25,500 人）、避難開始時間（10 分後に避難開始）、90 階以上の損傷有無、エレベーターの使用有無などを条件としたケーススタディにより避難完了時間を算出している。

避難訓練による実測データとしては、高層建築物の階段避難で 1,000 人規模が参加した事例は少なく、R.D. Peacock ら [12]による 10 階、18 階、24 階、31 階建ての 4 つのオフィスビルにて行われた一斉避難による避難訓練結果の報告が挙げられる。避難訓練参加者は、各オフィスの 1 階段室あたり約 200 名～700 名である。特に 24 階建ビルでは北側階段 249 名・南側階段 356 名となり、歩行速度が 0.56 ± 0.12m/秒、避難完了時間 1,090 秒としている（表１－１）。さらに、速度と密度の関係を散布図で表しており、SFPE Handbook の線形式にあてはめている。しかしながら、この実測データは非常に貴重なデータであるが、1 階段室あたり 1,000 人以上の規模ではなく、滞留に関しての報告が見られない。

表１－１　10 階、18 階、24 階、31 階建てオフィスビルの避難訓練結果 [12]

階数	階段室毎の避難者数	避難完了時間（秒）	平均歩行速度（m/秒）
10	436 / 368	1,022	0.44 ± 0.19
18	255 / 292 / 340/ 197	1,192	0.44 ± 0.15
24	249 / 356	1,090	0.56 ± 0.12
31	704 / 538	1,002	0.52 ± 0.10

実験によるデータについては、階段室内の滞留に関するものとして、北後ら[13]、あるいは佐野ら[14]の先行研究例がある。これらの研究では、1 層の階段室において、2 群集の合流を実験的に行い、踊り場における合流比、群集密度と歩行速度の関係式を算出しているが、複層数の階における合流の影響や階段 1 層全体について分析したものではない。また、池畠ら[15]によると、合流比率について 4 つの実験と関澤らの訓練結果を取り上げ比較している（表１－２）。訓練では、多数の訓練参加者により、実験では再現が困難な「滞留密度が高めで定常的な流動状態」、「下階の合流による停止状態」の歩行データが計測されている。

また、山本ら[16]によると、密度の上限値を表す基準値として、水平路（雑踏警備業務の手引き：歩行時 2.0 人/㎡、停止時 4.0 人/㎡、行列 3.5 人/㎡）、階段室（建設省告示第 1441 号：4.0 人/㎡）、ESC を示している。アンケートと伴に階段昇降実験を行い、階段で安全が確保出来る収容密度の上限を 4.0 人/㎡としている。室崎[17]によると、避難施設の容量として、1m あたり 100～120 人以上、もしくは 1 ㎡あたり 5 人以上の待ち滞留が生じると、将棋倒しなどの恐れが顕在化するとしている。

表１－２　群集の合流に関する既往研究（合流比）[15]

実験および訓練ケース		実験 1	実験 2	実験 3	実験 4	訓練
		北後ら	佐野ら	細野ら	池畠ら	関澤ら
報告年		1985 年	2005 年	2009 年	2014 年	2005 年
合流タイプ		順方向	順方向	対面、順方向	対面方向	順方向
幅（m）	階段	1.2	1.4	1.15	1.27	1.2
	附室扉	1.3	1.0	1.25	0.91	1.0
避難者数	階段側	68	20	60	約 100 人	全館 1000 人以上
	附室側	85	7	27		
階段室扉		なし	あり/なし	あり	あり/なし	あり
合流比（階段側：附室側）		0.4：0.6	記載なし	0.81：0.4	１：１	１：１

観測データによるものとしては、階段室内における観測データは少なく、通路における歩行速度、流動係数、密度を観測しているものが主に報告されている。河上ら[18]によると、歩行速度 V（m/秒）、流動係数 N（人/m/秒）、密度ρ（人/㎡）の関係式を V=a-bρ、N=ρV=ρ(a-bρ)となる直線式を紹介している（表１－３）。特に密度と流動係数の関係については、僅かに観測されているものとして、J. L. Pauls[19]が紹介している高層事務所ビルのデータがあるが、階段の仕様や測定した個所など詳細については不明である。

表１－３　観測データによる歩行速度、流動係数、密度の関係

データ観測者	観測場所	報告年	a	b
①吉岡昭雄	通勤	1980	1.61	0.33
②竹内伝史	住宅地道路	1975	1.50	0.38
③J.J.Fruin	通勤	1974	1.356	0.341
④Older	買い物通り	1968	1.311	0.337
⑤Navin & Wheeler	大学内歩道	1969	1.63	0.60
⑥毛利正光、塚口博司	屋外歩行路	1977	1.48	0.204
⑦上田光雄	駅階段下り	1955	0.856	0.125
⑧J. L. Pauls	高層事務所ビル	1980	1.26	0.33

注）河上省吾ら[18]、pp.111-113 に⑧を加筆した。

1.2.2. 避難計算に関する法制度

避難計算に関する法制度として、防災計画書と避難安全検証法が挙げられる。防災計画書は、1981 年に旧建設省から防災計画書作成に関する通達が公布され、一定規模以上の建築物に対して防災計画書の作成が指導されてきたが、2000 年に通達が失効したため、以降は特定行政庁ごとの条例などで運用されている[20)21)]。

一方、避難安全検証法（告示 1441 号、1442 号）は、2000 年 6 月に改正建築基準法が施行され、建物の避難安全を設計する場合、避難関係規定の仕様基準によるもの、もしくは性能検証が要求されるようになった。仕様基準によるものを「ルート A」と呼び、性能検証によるものを「ルート B」と「ルート C」と呼んでいる。ルート B は避難安全検証法と呼ばれるもので、ルート C は建物個別の条件に応じてシミュレーションなどを用いた詳細な検証により安全性を立証したい場合に用いられる。避難安全検証法は、避難完了時間が煙降下時間以下であることを確認するものであり、直通階段まで避難が完了するまでの階避難安全検証法、地上までの避難が完了するまでの全館避難安全検証法から構成される。

特に、全館避難安全検証法[22)]は、第 1 段階として、各階が階避難安全性能を有していることについて、階避難安全検証により確かめる。第 2 段階では、想定される火災室ごとに、在館者の全てが地上へ避難を終了するまでに要する時間を全館の避難開始時間、地上までの歩行時間、地上への出口の扉通過時間の合計として算出する。次に、全館煙降下時間を算出し、全館の避難終了時間が全館煙降下時間を超えないことを確認するものである。一般的に、地上までの歩行時間は、最上階の各部分から直通階段までの歩行距離が最も長い地点にいる避難者が、直通階段を経由して地上に到達するのに要する時間を算定するものとしている。

避難安全検証法の歩行時間算出に用いられる階段降下歩行速度は、事務所の場合 0.78m/秒としている（表１－４）。階段部分の歩行距離は、段鼻を結んだ斜線に沿って測った長さを表している。扉通過時間を算出する際、扉通過後の廊下・階段室等の部分への収容可能人数が十分に多い場合には、扉通過の流動係数を 1.5 人/m/秒とし、収容可能人数が不足する場合には 1.3 人/m/秒と低減し算出するものとしている。また、収容可能人数の算出には、一人当たりの必要滞留面積として階段室は 0.25 ㎡/人を用いる。このことから、階段室の最大収容密度は 4.0 人/㎡としている（表１－５）。

以上のように、避難安全検証法では、階段避難の計算手法や計算に用いられる流動係数や歩行速度が示されているが、地上出口への扉通過時間による避難時間への影響はあるものの、避難完了時間の算出にとどまり、階段室内の滞留については考慮されていない。

表１－４　避難安全検証法における歩行速度

建築物又は居室の用途	建築物の部分の種類	避難の方向	歩行速度（m/秒）
劇場その他これに類する用途	階段	上り	0.45
		下り	0.60
	客席部分	－	0.50
	階段及び客席部分以外の部分	－	1.00
百貨店、展示場その他これらに類する用途又は共同住宅、ホテルその他これらに類する用途（病院、診療所及び児童福祉施設等を除く。）	階段	上り	0.45
		下り	0.60
	階段以外の建築物の部分	－	1.00
学校、事務所その他これらに類する用途	階段	上り	0.58
		下り	0.78
	階段以外の建築物の部分	－	1.30

表１－５　必要滞留面積

避難経路等の部分	一人当たりの必要滞留面積（㎡/人）	最大密度（人/㎡）
階段の附室又はバルコニー	0.2	5.0
階段室	0.25	4.0
廊下その他の通路	0.3	3.3

注）2001 年版 避難安全検証法の解説及び計算例とその解説[22)]、p.47 に最大密度を加筆した。

防災計画書[17)23)]については、高さが 31m を超える高層建築物や複合用途建築物など建築計画が一定規模を超えた場合は、地方自治体の建築主事の判断によって提出を求められることがあり、避難計算が必要となる場合がある。新・建築防災計画指針による避難計算では、避難安全検証法のような煙降下時間を求めるのではなく、居室等の面積から求める避難許容時間を基準値とし、避難完了時間と比較することで判定を行うものである。各階ごとの避難対象人数を求め、避難計算の対象とする階として、

・最も人数が多い階
・同じ平面、同じ人数の階が多数ある場合にはその代表的な階
・宴会場や大会議室など、不特定多数が集まる階
・避難階段が少ない割に避難対象人数が多い階
・避難路が偏っているなど安全性に問題があると思われる階

を選定するものとしている。選定した対象階について、避難開始時間、居室避難時間、廊下避難時間、階避難時間を求め、それぞれに対する許容時間と比較する。また、廊下や附室に最大滞留人数を収容できるための面積が確保されているか評価する。

用いられる歩行速度は、事務所の場合 1.3m/秒としている（表１−６）。また、ネック通過時に用いられる流動係数は、1.5 人/m/秒としている。避難経路上のネックで発生する最大滞留人数を収容する面積を算出するための一人あたりの面積は、廊下 0.3 ㎡（密度：3.3 人/㎡）、附室・バルコニー0.2 ㎡（密度：5 人/㎡）としている。

以上のように、防災計画書は居室から廊下や附室への避難時間と滞留を評価するものとしており、階段避難や階段室内の滞留については考慮されていない。

表１−６　新・建築防災計画指針における歩行速度

用途	歩行速度（m/秒）
事務所、学校など	1.3
百貨店、ホテル、集会室などの不特定多数の用途部分	1.0
密度の高い（1.0 人/㎡以上）用途部分	0.5

1.2.3. 避難シミュレーションモデルに関する研究

まず、一般的にみられる歩行者シミュレーションモデルの特徴について整理する。歩行者シミュレーションモデル [24]は、主にセルオートマトンモデルとマルチエージェントモデルに大別することができる。

セルオートマトンモデル [25)26)]は、セル（格子）を空間構造として持ち、各セルに設定されたルールに基づき、歩行者を次のセルに移動させるモデルを指す。歩行者行動として、前セルが空いていれば他者に近づくまで前進し（自己駆動)、前セルの歩行者が停止していると停止する（排除体積効果）モデルが主に用いられている。移動方向の制御には、ポテンシャル値をセルに与え、ポテンシャルマップを作成する。ポテンシャルマップの現在地点のセル値と隣接する移動可能な地点のセル値を比較し、次の移動セルを決定する。

一方、マルチエージェントモデル [27]は、主に座標を空間構造として持ち、エージェントと呼ばれる個々に設定したルールを持つ歩行者が自律的に判断・移動するモデルを指す。歩行者行動として、個々の歩行者が周囲の歩行者、壁や障害物などの状況に応じ、衝突回避や減速など相互作用しながら移動する。移動方向の制御には、方向ベクトルを持ち、衝突回避や目的地点方向に対して旋回する（図１−１）。

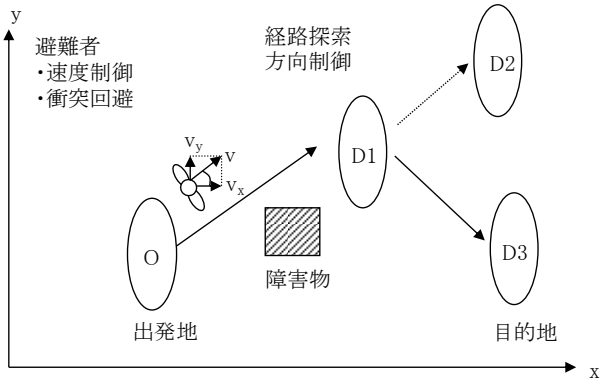


図１−１　マルチエージェントモデルの歩行者行動例 [27]

各歩行者シミュレーションモデルのメリット・デメリットを述べる（表１−７）。セルオートマトンモデルのメリットは、衝突判定が容易にできることや、レーンに沿った移動や追従・行列を表現しやすいなど設定が簡便であり、最大収容人数が予め設定できることなどが挙げられる。デメリットとしては、セルの大きさに依存するため壁などの形状表現や歩行者の位置表現が荒いなど精緻な挙動の再現は難しいことが挙げられる。

マルチエージェントモデルのメリットは、壁などの形状表現や相互の衝突回避・減速など精度の高い挙動の再現が可能であるなどが挙げられる。デメリットとしては、多様な形状を表現できるため衝突判定が複雑になることや、相互作用による歩行者同士のデッドロックが生じやすい、個々の自由度が高いため行列を表現しにくいなど、設定が煩雑であることが挙げられる。

表１−７　主な歩行者シミュレーションモデルの特徴

特徴	セルオートマトンモデル	マルチエージェントモデル
空間構造	セル空間	座標空間
歩行者行動	自己駆動・排除体積効果	相互作用
移動方向の制御	ポテンシャルマップ	方向ベクトル
メリット	設定が簡便	精度の高い挙動
デメリット	形状・位置表現など挙動が荒い	設定が煩雑

次に、国内で利用されている主な避難シミュレーションシステム[28]を表１−８に示す。

マルチエージェントモデルとしては、掛川ら[29]による煙流動－避難行動連携モデルが挙げられる。居室等の空間は扉を介して連結され、扉を移動目標として各空間を移動するシステムとなっている。階段室においては、傾斜方向の速度ベクトルをモデル化している。

峯岸ら[30][31]は、歩行者シミュレーションシステム「SimTread」を用いて、階段内における合流性状をモデル化し、その再現性を確認している。階段のポテンシャルマップを作成し、あるポテンシャル源に到達したら、次に向かうように設定している。

「buildingEXODUS」[32]は、ノード・アークという、ポテンシャル値を設定した格子点上を移動するシステムである。階段部では、現在の位置と前の人の間に１段を保持しようとし、階段降下速度はJ.J.Fruinの調査結果に基づき、性年齢別に応じて初期値を選択できる。

「artisoc」[24]は、セルオートマトンをベースにしているが、座標空間を持ち、マルチエージェントモデルとして対応可能なシステムである。ポテンシャルマップと速度設定により、移動制御している。複数階からなる階段室は、各フロアの平面の階段部分のセルを上下に連結しているものとして表現している[33]。

セルオートマトンモデルの類型として、井田ら[34]による「階段シミュレータ」が挙げられる。避難安全検証法をベースにしながら、階避難と全館避難時間を予測し、階ごとの避難者人数を考慮した計算ができる。階段室をセル（階段の収容人数：階段面積×4 人/㎡）で簡便に表し、避難者は 1 秒ごとに隣接セルに移動するモデルである。階段のセルを人数列ベクトルで表し、逐次計算している。著者によると、「各階の人の流動は一定の精度で予測出来ても、階段での合流以降の予測精度が追い付かないことを避難シミュレーション全般に共通する課題」として指摘しているように、階段室内の混雑については考慮されていない。

表１−８　国内で利用されている主な避難シミュレーションシステム

概要	煙流動－避難行動連携モデル	SimTread	buildingEXODUS	D-MACS	artisoc	階段シミュレータ
システム提供	清水建設	竹中工務店(A&A)	フォーラムエイト(グリニッジ大学)	ベクトル総研	構造計画研究所	鹿島建設
空間構造	座標空間	座標空間	ノード・アーク	座標空間	セル空間・座標空間	セル空間
シミュレーションモデル	マルチエージェント	マルチエージェント	マルチエージェント	マルチエージェント	セルオートマトン・マルチエージェント	セルオートマトンの類型

注)「避難シミュレーションモデルの現状とこれから」シンポジウム（日本火災学会）[28]より抜粋し、加筆修正した。

1.2.4. 避難方法に関する研究

主な避難計画として、Enrico Ronchi ら[35]により、避難施設と避難方法が紹介されている。ハード的な避難方法である避難施設については、「階段避難」、「エレベーター避難」、「スカイブリッジ」「中間避難階」などが挙げられている。「スカイブリッジ」は、ツインタワーを空中連絡通路で結び、一方のタワーで出火した場合、連絡通路を使って隣のタワーに避難するものである。ソフト的な避難方法としては、「一斉避難」、「順次避難」、「籠城区画や一時避難待機区画へ避難後の時間差避難」などが挙げられている。「一斉雛」は実用的でないとされており、「順次避難」が紹介されている。「順次避難」は、出火階、直上階、直下階の 3 フロアの人々がその下の防火区画された階に避難するものとしており、防火区画階があることやスタッフの教育と適切な連絡手段があることを前提としている。ここでは、マレーシアの超高層ビルであるペトロナスツインタワー（88 階建て）、ボストンのプルデンシャルタワー（52 階建て）の事例が紹介されている。

また、J. L. Pauls[36)37)]によって、「順次避難」の概念が紹介されている。「一斉避難」は、ビルの各階にいる人々を一斉に避難させる方法であり、「順次避難」は、アナウンス放送によって、まず出火階、次に直上階、そしてさらに上の階というように、時間差を設けて、順次避難させる方法としている。新・建築防災計画指針[22]においても、「多層の火災階においては、垂直避難動線である階段における混乱を防ぐため、原則として全館同時避難が生じないように計画し、出火階、次いでその直上階、さらには煙が伝搬する恐れのある最上階というように危険が及びやすい階から順次避難させる計画とすべきである」と重要性について指摘しているが、具体的な「順次避難」に関する計画事例は見られない。

一方、先に述べたペトロナスツインタワーの避難計画[38]は、2 段階の複合的な避難方法となる先進的な事例である。まず 1 段階目として、出火階、直上階、直下階の 3 フロアが、それぞれ 3 階下の階に一時避難階として避難する。留まっていることが出来なくなった場合、2 段階目として、

- 最上階（78～88 階）：42 階まで階段降下し、「スカイブリッジ」を渡り隣の棟に避難後、エレベーターで 1 階出口まで避難
- 高層階（61～77 階）：42 階まで階段降下し、「スカイブリッジ」を渡り隣の棟に避難後、エレベーターで 1 階出口まで避難
- 中層階（40～60 階）：41 階まで降下し、「スカイブリッジ」を渡り隣の棟に避難後、エレベーターで 1 階出口まで避難
- 低層階（1～37 階）：1 階出口まで階段避難

とする全館避難を行うものとしている。しかしながら、2 段階目の避難は「一斉避難」であることや、避難訓練等での実測結果については、報告されていない。

1.3.　研究の目的

混雑・高密度状態の階段室における避難者の歩行特性について、調査・実測したデータに基づき、階段避難シミュレーションモデルを構築し、事前検証による階段室内の混雑軽減・回避の避難ルールの提案を目的とし、以下について明らかにする。

・階段室内の滞留メカニズムの解明

・階段避難シミュレーションモデルの構築による実用的な混雑軽減手法の確立

1.4.　論文の構成

本論文は、「高層ビルの大規模防災訓練実測データに基づく階段避難シミュレーションモデルの開発」と題して、５章から構成されている。各章の概要は、以下の通りである。

第１章「序論」では、本研究の背景と既往研究として、①階段避難の実測データ、②階段避難計算に関する法制度、③避難シミュレーションモデル、および④避難方法についてのレビューにより、本研究の位置付けを示し、研究目的について述べた。

第２章「避難訓練実測データに基づく階段室内の滞留発生に関する分析」では、東京都内の 25 階建て高層事務所ビルで実施された全館避難訓練において実測調査を行い、訓練参加者の階段室内の流動状況を数値化・分析した。階段室内で生じた滞留については、①合流を原因とする滞留と②階段室内の高密状態を原因とする滞留の 2 種類の滞留があること、および階段室内における滞留発生の過程を明らかにした。

第３章「階段避難シミュレーションモデルの構築」では、第２章で得られた避難訓練の分析結果をもとに、セルオートマトンモデルにて階段室を単純モデル化することを試み、階段避難シミュレーションへの実装を行った。避難訓練の実測値と比較し、全館避難時の滞留現象の再現性を確認した。

第４章「滞留発生を避ける避難方法の検討と提案」では、まず第２章の全館避難訓練の参加者に対して実施したアンケート調査結果を分析し、滞留時間に対する心理的影響度について評価指標を提案した。次に、第３章で構築した階段避難シミュレーションにより、評価指標をもとに滞留発生を避ける避難方法として、順次避難計画の有効性を検証し、実用的な混雑軽減手法の提案を行った。

第５章「結論」では、本研究で得られた結果を総括し、階段避難シミュレーションモデルの汎用化と精度向上、滞留発生を避ける避難方法の実用化に向けた今後の課題について言及した。

1.5.　用語の定義

（１）混雑と滞留

待ち（滞留）とは、J. J. Fruin[39]によると「サービスを待っている一人以上の歩行者。歩道や施設の容量が不十分な場合、歩行者の待ち行列が起こり、滞留が発生する。行列の長さと待ち時間は交通流の性格によって異なる。混雑した所では交通量に波があるので、断続的に待ちが発生する」と定義している。

本論文では、「混雑」は混んでいる状態を表し、「滞留」は混雑している状態でかつ断続的な停止状態を表すものと定義する。

（２）階段室の名称

本論文での階段室の各エリアの名称ついては、階踊り場（階の床部にある扉のある踊り場のこと）、階段部（段床部のこと）、中間踊り場（階の間にある扉のない踊り場のこと）と呼ぶものとする。階段室 1 層とは、階踊り場とその上階までの階段部および中間踊り場を合わせたものとする。

第2章　避難訓練実測データに基づく階段室内の滞留発生に関する分析

2.1.　高層建築物の避難訓練調査の概要

本章では、多人数が参加する全館避難訓練[10]において、訓練参加者の階段室内の流動状況および降下軌跡を把握するとともに、階段室内で生じる滞留発生要因について考察を行うものとする。

一般的には火災発生階及びその直上階が優先的に避難し、他の階はそのあと避難する順次避難が考えられている。本避難訓練は、順次避難に基づき実施された極めて珍しい避難計画となっているのが特徴である。

2.1.1.　順次避難計画の概要

対象建物は、地上 25 階建ての高層建築物であり、主に事務所を用途とする。避難訓練は、4 階の厨房を出火階とした全館避難である。

避難方法は、順次避難とし、

・Ⅰフェーズ：出火階とその上階「4・5・6 階」

・Ⅱフェーズ：火災階に近い上階と最上層階「7～12、21～25 階」

・Ⅲフェーズ：火災階から遠い上層階「3、13～20 階」

のフェーズ毎に、防災センターの館内放送による避難開始の指示に従い行われた（図２－１）。避難放送は、実施年毎に避難開始時刻と放送文を改善しながら実施している（表２－１）。避難経路は、各階より南北の階段 2 系統を使用し、1 階屋外の建物前広場までとしている。本調査では、南側の階段のみを観測対象とした（図２－２）。

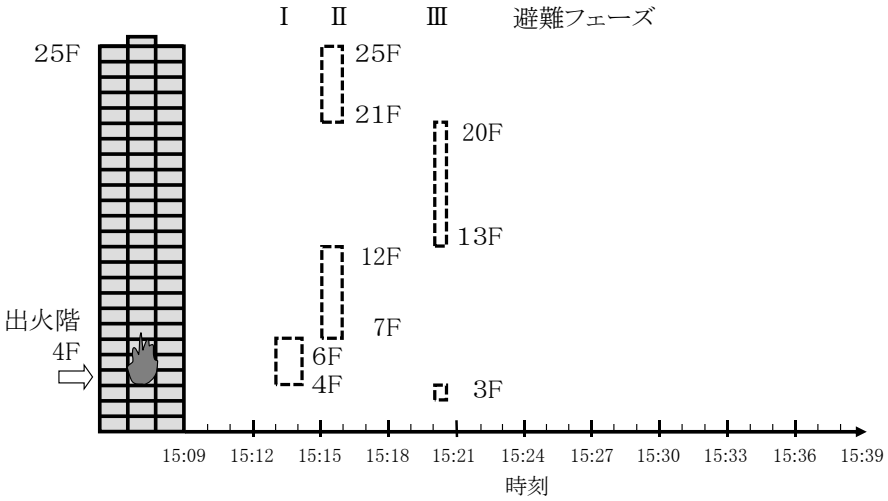
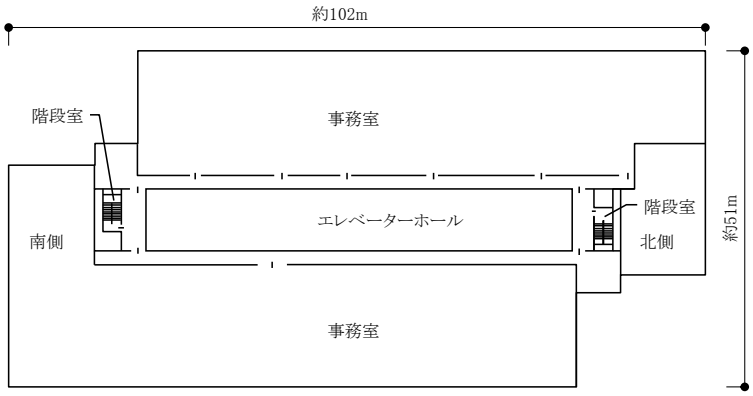


図２－１　順次避難計画における避難開始フェーズ

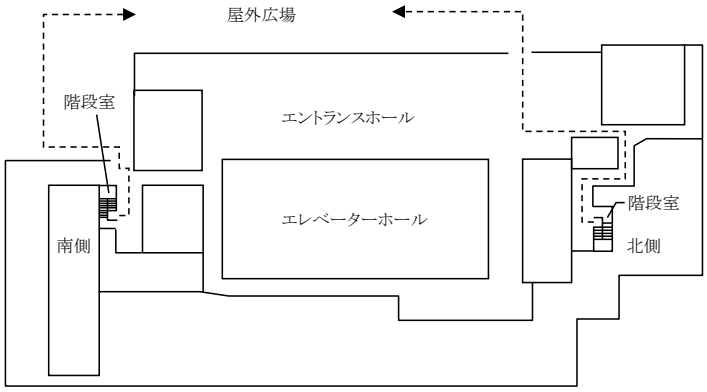
注）図中の破線は避難開始階と避難放送時間の範囲を表す。

表２－１　避難開始時刻

避難フェーズ	放送内容	時刻	時間（秒）
	火災報知機作動	15:10:07	52
		15:10:59	
	－	－	61
	4階火災発生放送	15:12:00	42
		15:12:42	
	－	－	18
Ⅰ	4階、5階、6階避難開始	15:13:00	71
		15:14:11	
	－	－	50
Ⅱ	7～12階、21～25階避難開始	15:15:01	56
		15:15:57	
	－	－	243
Ⅲ	3階、13～20階避難開始	15:20:00	32
		15:20:32	



（a）9～24 階平面図



（b）1 階平面図

図２－２　対象建物の避難経路

2.1.2. 観測対象とする階段室

対象建物（25 階建て）の観測対象とする階段は、階段幅 1.2m の折り返し階段である（図２－３）。階高は、1 階から 6 階までが 4.1m（うち 2～3 階 4.4m）、7 階以上が 3.8m である。また、階段室の寸法は 2.6m×6.52m、扉幅は各階 1m である。階踊り場、中間踊り場、階段部の各寸法を図２－４に示す。

図２－３　観測対象の階段

表２-２　階段寸法

階	1～2階	2～3階	3～7階	7～25階
階高	4.1 m	4.4 m	4.1 m	3.8 m
踏面	280 mm			
蹴上	171 mm	170 mm	171 mm	173 mm
階段幅	1.2 m			

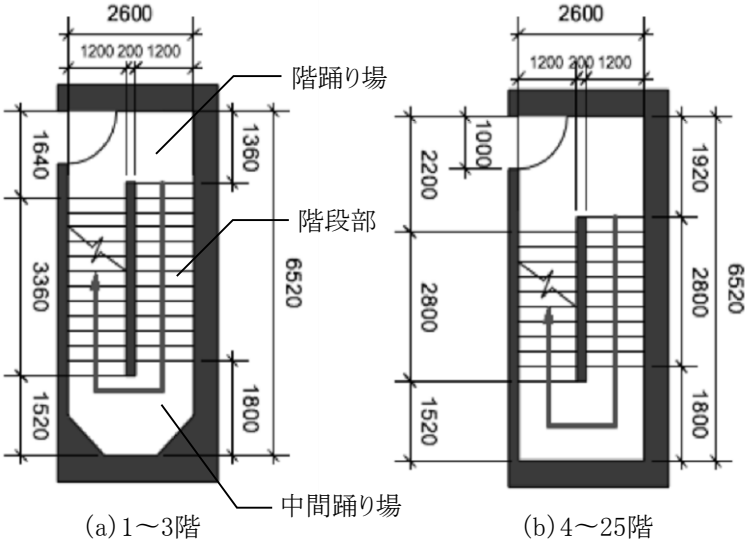


図２－４　階段室の寸法（mm）

2.1.3. 避難訓練の観測方法

階段室内の訓練参加者の流動状況を記録するために、階踊り場へ 1 階から 24 階までビデオカメラを各 1 台（合計 24 台）、13-14 階の階段部上下の中間踊り場に各 1 台設置（合計 3 台）して撮影を行った（図２−５、表２−３）。各ビデオカメラは、時刻を標準時間に秒単位で合わせており、全映像の同期が取れるようにした。分析にあたっては、ビデオ映像の時刻をもとに時系列の流動状況を把握した。

また、避難集団の歩行移動を把握するため、被験者に集団の移動に対するトレーサーの役割を与え、避難集団とともに一緒に行動させた。筆者ら実験班から参加した被験者は、大学生２０名（男性 12 名、女性 8 名）である。これらの被験者を 6 階から 24 階に各 1 名（うち 22 階のみ 2 名）配置し、各自ストップウォッチにより各階の階踊り場位置間の歩行時間を測定した（表２−３）。避難開始に際しては、被験者は階段室の附室にて待機し、各階の避難放送に従い階段室の附室に到着した避難集団の中または最後尾にて避難を開始するものとした。歩行時間の測定については、まず附室から階踊り場の床に片足が着地したときを避難開始時間とし、一つ下の階踊り場に着地するまでの時間を避難開始階の歩行時間とした。以降、一層下の階踊り場に着地するまでを階踊り場位置間の歩行時間とし、1 階のみ階段室出口通過後に着地するまでとした。

図２−５　階段室内へのビデオカメラ設置状況

表２−３　各階へのビデオカメラ設置台数と被験者人数

フェーズ	階	被験者（人）	ビデオカメラ設置数（台）	
			階踊り場	階段部・中間踊り場
Ⅱ	25	−	−	
	24	1	1	
	23	1	1	
	22	2	1	
	21	1	1	
Ⅲ	20	1	1	
	19	1	1	
	18	1	1	
	17	1	1	
	16	1	1	
	15	1	1	
	14	1	1	3
	13	1	1	
Ⅱ	12	1	1	
	11	1	1	
	10	1	1	
	9	1	1	
	8	1	1	
	7	1	1	
Ⅰ	6	1	1	
	5	−	1	
	4	−	1	
Ⅲ	3	−	1	
	2	−	1	
	1	−	1	
	合計	20	24	3

2.1.4. 各階の避難訓練参加者数

当日の建物在館者は 5,516 人である（通常約 6,000 名）。このうち、避難訓練参加者は、高層ビル内の従業員 2,088 名であり、観測対象とする南側階段を使用した避難者（年齢 20～50 代、男女比 7:3）は、1,137 人（被験者 20 名を含む）であった。各階からの避難訓練参加者のうち、11 階(148 名)、13 階(122 名)、14 階(106 名)が他の階に比べて避難者が特に多かった（表２－４）。

表２－４　各階の訓練参加者数

フェーズ	階数	訓練参加者数（人）
Ⅱ	25	4
	24	73
	23	46
	22	63
	21	32
Ⅲ	20	38
	19	4
	18	29
	17	47
	16	26
	15	25
	14	106
	13	122
Ⅱ	12	70
	11	148
	10	97
	9	26
	8	1
	7	5
Ⅰ	6	75
	5	29
	4	45
Ⅲ	3	22
	2	4
	総数	1,137

2.2.　訓練観測の結果

2.2.1.　階段室内への流入時刻

図２−６の横破線は、ビデオカメラを設置した 2 階から 24 階までの避難者が、附室から階段室内へ流入した時刻を表している。そのうち、○は各階に配置した被験者 20 名を表し、被験者が階段室に流入した時刻を表す。各階の避難者は、各フェーズの避難放送が終了した時刻頃（概ねⅠフェーズ避難者は 15 時 14 分、Ⅱフェーズ避難者は 15 時 16 分、Ⅲフェーズ避難者は 15 時 21 分）から階段室内に流入を開始している。なお、各階の被験者は、最初の避難者集団の中に入り避難（22 階のみ 2 人目が後方に入り避難）している。

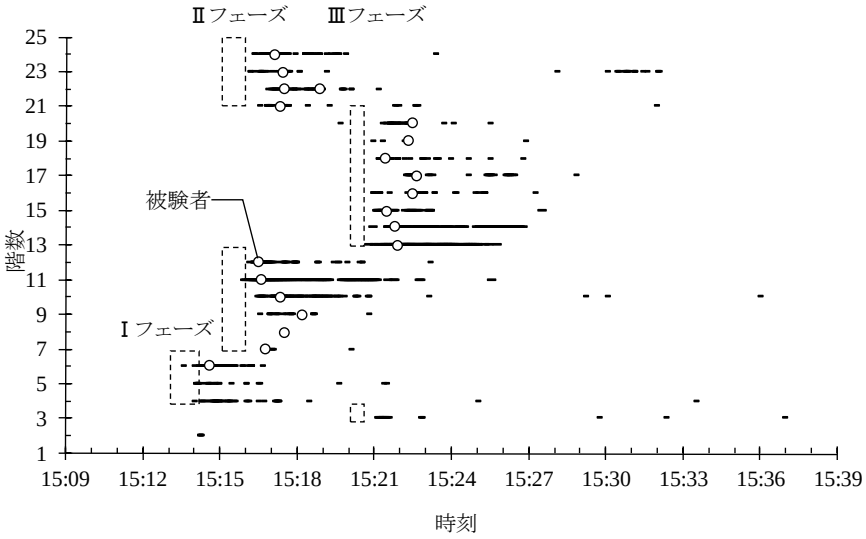


図２−６　階段室内への流入時刻

注）○は被験者を表し、階段室に流入した時刻を表す。

2.2.2. 避難完了時間

避難完了時間は、Ⅰフェーズの避難放送を開始した 15 時 13 分 0 秒を避難開始時刻とし、1 階階段室出口までを避難完了とする（図２－７）。その際、1 階階段室出口のビデオ映像（後述する図２-14 の流出断面 D）により、時刻毎の避難者完了者数をカウントした。

避難者 1,137 名（うち被験者 20 名）の避難完了時間は、24 分 45 秒という結果となっている。最初の避難者が 15 時 14 分 27 秒に 1 階階段室出口に到着しており、その後 15 時 37 分 45 秒に最後の避難者が到達している。

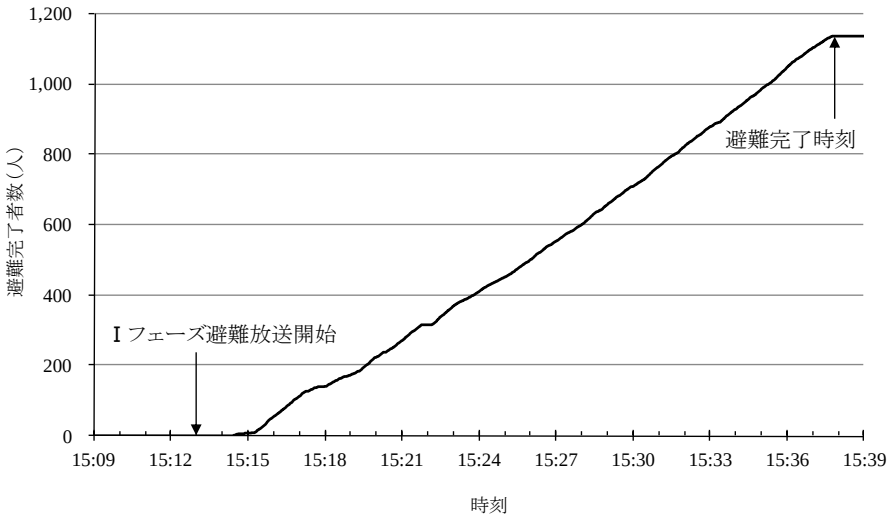


図２－７　避難完了時間

また、各階に配置した被験者の避難開始階から 1 階階段室出口までの避難時間および避難訓練前に測定した単独歩行時の歩行時間を図２−８に示す。なお、階段降下にかかる歩行時間は、各被験者が測定したストップウォッチの時間を用いた。

避難フェーズがⅡフェーズ上層とⅢフェーズに避難を開始した被験者の避難時間は長くなっており、単独歩行時に比べて約 2〜4 倍となっている。特に 20 階の被験者の避難時間は 14 分 33 秒と最も長く、単独歩行時の歩行時間 5 分 16 秒に比べて 7 分 17 秒の遅延が生じている。

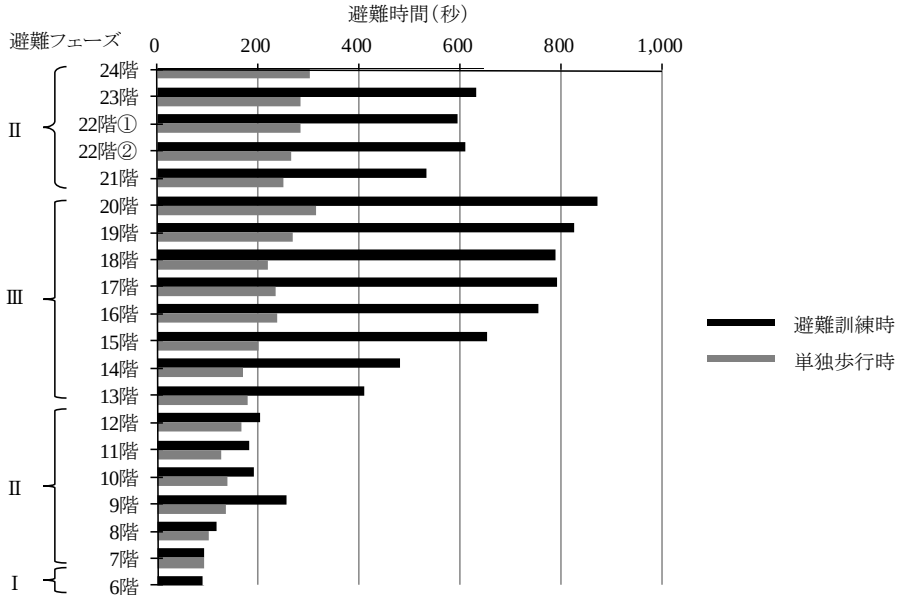
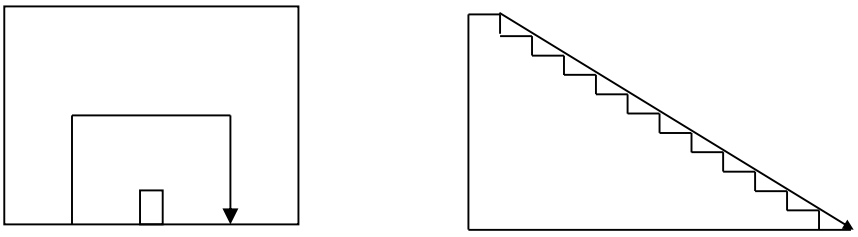


図２−８　被験者の避難時間

2.2.3. 階段室内の歩行速度

階段降下にかかる歩行時間の実測結果に基づいて、被験者の各階の階踊り場間の歩行速度を算出した。なお、階段室内の歩行速度は、階段室全体と階段室各エリアの歩行速度について把握するものとした。歩行速度を算出するにあたっての歩行距離は、階踊り場および中間踊り場では中央をコの字に結んだ距離とし、階段部では段鼻を結んだ斜線に沿った距離とした（図２－９）。



(a)階踊り場　　(b)階段部

図２－９　階段室内の歩行距離位置

（１）階段室全体の歩行速度

図２-10 は、避難訓練時において各階から避難を開始する被験者の歩行速度を表す。避難訓練時の群集内における被験者の歩行速度は、平均 0.56m/秒（標準偏差（SD）=0.16）であった。これは、図２-11 に示す訓練に先立って行った単独自由歩行による平均歩行速度 0.96m/秒（SD=0.10）に比べて約 4 割遅く、群衆内での歩行による影響が大きく見られる。

フェーズ毎の歩行速度については、Ⅰフェーズ被験者の歩行速度が平均 0.78m/秒（SD=0.00）、Ⅱフェーズ被験者の歩行速度が平均 0.66m/秒（SD=0.13）、Ⅲフェーズ被験者の歩行速度が平均 0.40m/秒（SD=0.02）となっている。そのうち、Ⅱフェーズ上層階（21～24 階）被験者の歩行速度が平均 0.57m/秒（SD=0.04）、Ⅱフェーズ下層階（7～12 階）被験者の歩行速度が平均 0.73m/秒（SD=0.13）となっている。

また、後述するように下の階で発生した合流の影響により、Ⅱフェーズ上層階の被験者は 12～13 階で平均 0.22m/秒（SD=0.03）までの速度低減がみられるが、Ⅱフェーズ下層階の被験者については平均 0.73m/秒と合流の影響が小さい。同様にⅢフェーズの被験者の歩行速度は 14～18 階で平均 0.12m/秒（SD=0.05）まで低下している。

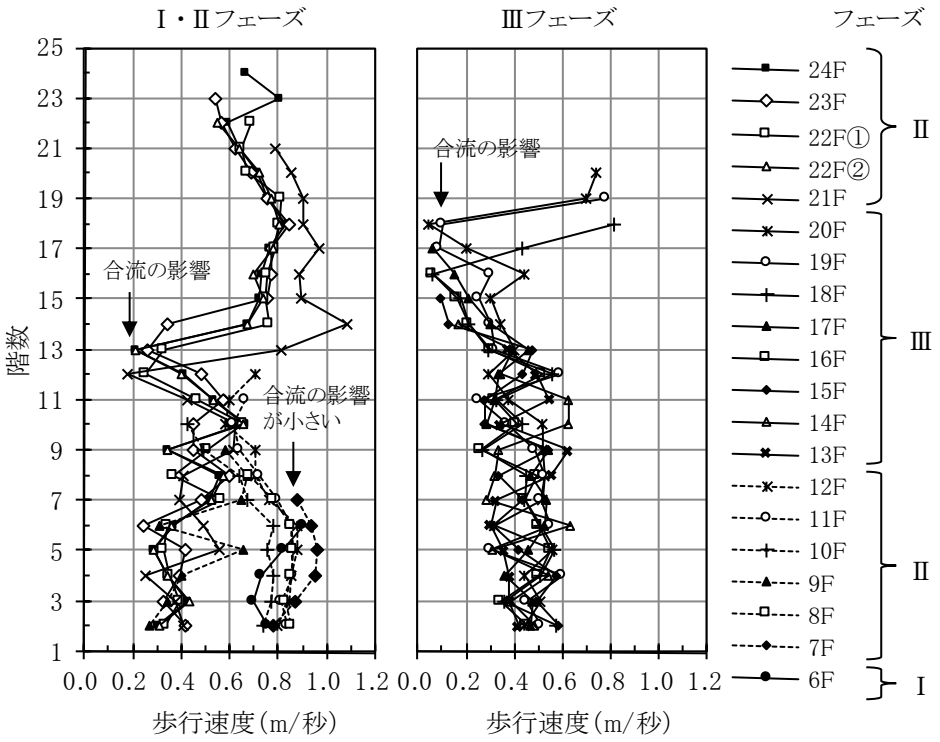


図２-10　避難訓練時における各階からの被験者の歩行速度

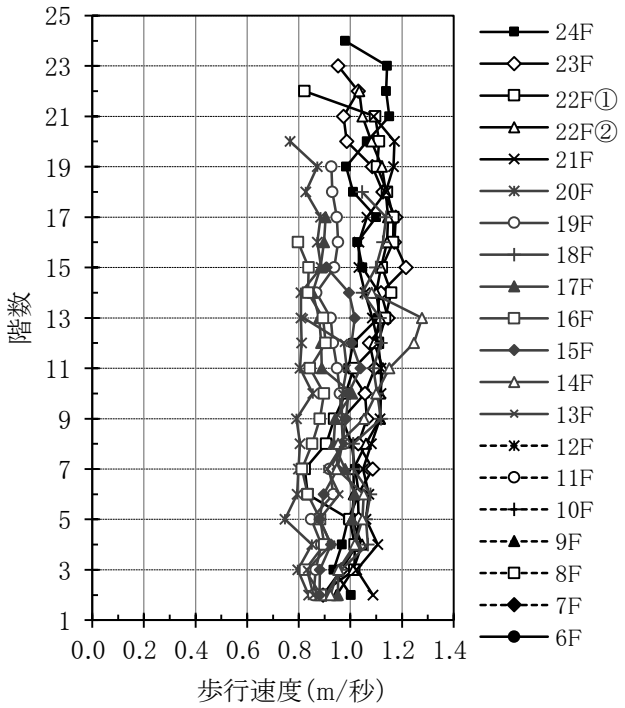


図２-11　単独自由歩行における各階からの被験者の歩行速度

（２）階段室各エリアの歩行速度

避難訓練時の階段室各エリアの歩行速度を図２-12 に示す。ビデオカメラを設置している 13 階階踊り場、13～14 階中間踊り場の映像から、避難訓練時の群集内における被験者（12 名）の歩行速度を算出した。

被験者の歩行速度は、14 階階踊り場で平均 0.80m/秒（SD=0.53）、13～14 階階段部上で平均 0.49m/秒（SD=0.25）、中間階踊り場で平均 0.52m/秒（SD=0.27）、13～14 階階段部下で平均 0.26m/秒（SD=0.29）、13 階階踊り場で平均 0.50m/秒（SD=0.29）である。13～14 階階段部下の歩行速度は、13 階階踊り場の合流の影響により、13～14 階階段部上に比べると半減している。

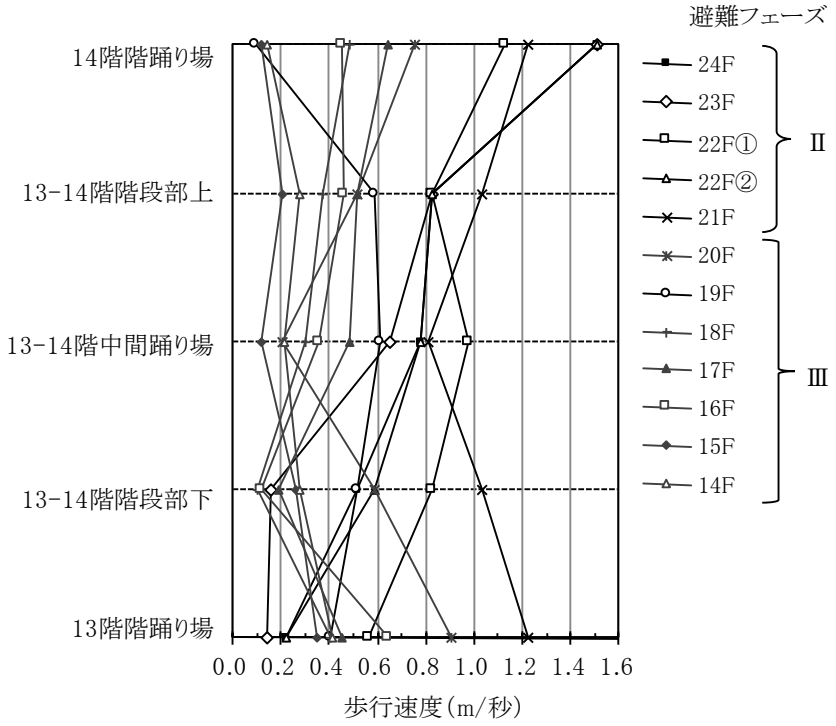


図２-12　階段室各エリアの歩行速度（13～14 階）

2.2.4. 階段室内の流動係数測定位置

階段室内の流動状況を把握するため、避難者の多い階の代表として 6 階、11 階、13 階、14 階と 1 階階段室出口の流動係数を算出した。流動係数の測定位置は、図２-13 に示す階踊り場における 3 つの断面（上階からの流入断面 A、附室からの流入断面 B、下階への流出断面 C）とし、以下 A、B、C 断面と呼ぶものとする。また、同様に図２-14 に示す 1 階階段室出口の流動係数測定位置は、流出断面 D とし、以下 D 断面と呼ぶものとする。なお、流動係数の算出にあたっては、各階の階踊り場のビデオ映像から、各断面の通過人数を 1 秒ごとに目視でカウントした。

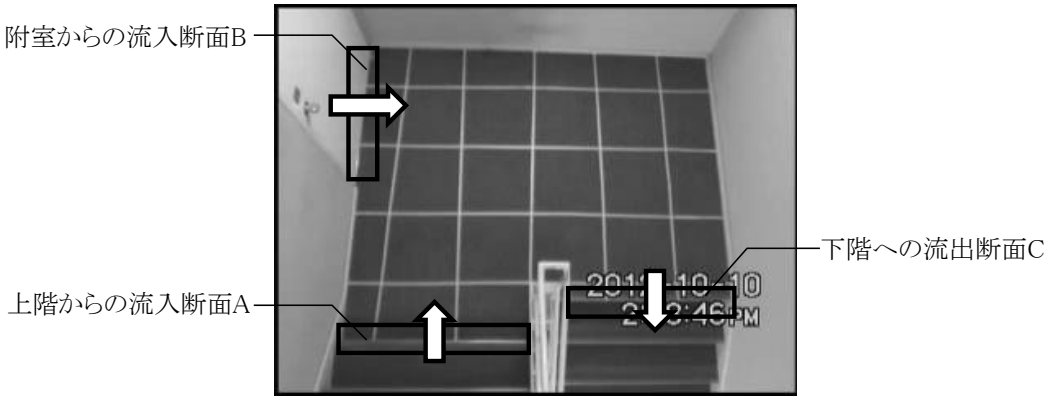


図２-13　階段室内の流動係数測定位置（階踊り場）

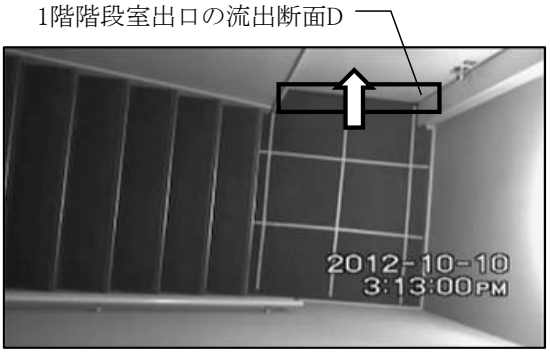


図２-14　1 階階段室出口の流動係数測定位置

2.2.5. １階階段室出口の流動係数

1 階の階段室出口における時刻毎の流動係数を図２-15 に示す。図２-15 は、1 階階段室出口のビデオ映像から、D 断面の扉通過人数を 1 秒ごとに目視でカウントし、15 秒ごとに集計した流動係数を時系列に表した。なお、１階階段室から屋外へ出る部分や建物前広場においては、混雑などにより避難者の移動が停止する様な状況は見られず円滑であり、階段室内の流動に影響のない状態であった。1 階階段室出口での流動係数は、最大 1.27 人/m/秒となっている。また、15 時 22 分 15 秒以降大きな流動低下はなく、15 時 22 分 15 秒から 15 時 37 分 45 秒までの流動量を定常（一定）と見なすと、平均 0.88 人/m/秒（SD=0.17）となっている。これは、実際の避難訓練時の一般的な流動係数を示すものと考えられる。

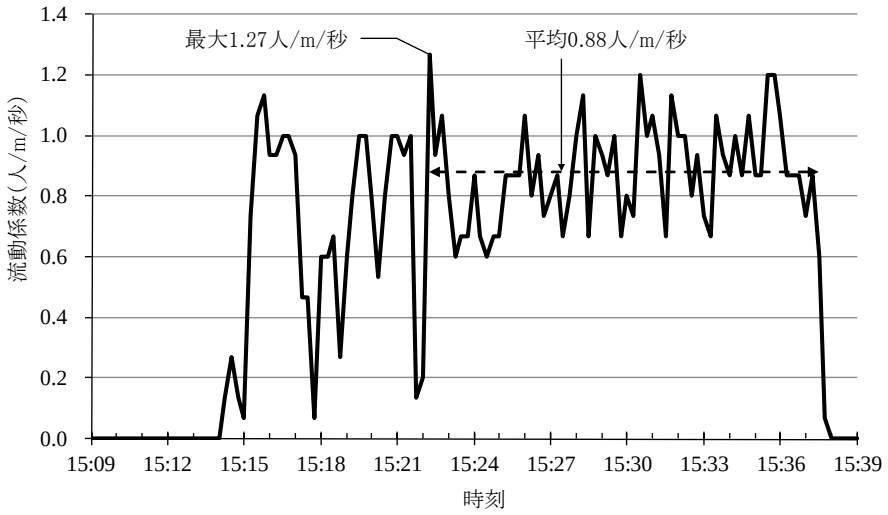


図２-15　１階階段室出口の流動係数

2.2.6. 合流時の流動係数

合流時の状況を把握するため、図２-13 の上階からの流入断面 A と附室からの流入断面 B の流動係数を算出した。6 階、11 階、13 階の階踊り場について、15 秒ごとに集計した流動係数を時系列で表したものを図に示す。

6 階の階踊り場では、Ⅰフェーズであるため合流が発生せず、B 断面からは流動係数が平均 0.54 人/m/秒（SD=0.34）、最大 1.13 人/m/秒の流入の後、A 断面から流動係数が平均 0.76 人/m/秒（SD=0.23）、最大 1.06 人/m/秒の流入があった（図２-16）。

11 階の階踊り場では、A および B 断面からの避難者がⅡフェーズ避難開始直後から 278 秒間合流（図２-17 中の 15 時 16 分 30 秒から 15 時 21 分 8 秒）し、A 断面からは流動係数が平均 0.31 人/m/秒（SD=0.14）、B 断面からは流動係数が平均 0.45 人/m/秒（SD=0.23）、最大 0.93 人/m/秒の流入であった（図２-17）。合流解消後の 15 時 21 分以降、A 断面の流動係数は平均 0.71 人/m/秒（SD=0.24）と約 2 倍まで増加しており、流動係数が 0.9～1.0 人/m/秒程度まで増加（最大 1.06 人/m/秒）すると再び減少するように、その後増減を繰り返している。

13 階の階踊り場では、Ⅲフェーズ避難開始後、225 秒間合流（図２-18 中の 15 時 21 分 25 秒から 15 時 25 分 10 秒）し、A 断面からは流動係数が平均 0.35 人/m/秒（SD=0.10）、B 断面からは流動係数が平均 0.48 人/m/秒（SD=0.20）、最大 0.87 人/m/秒の流入であった（図２-18）。合流時間帯においては、上層階からの歩行者は内側に 2 列から 1 列、附室から階段室内への歩行者は外側に 1 列になり合流している。

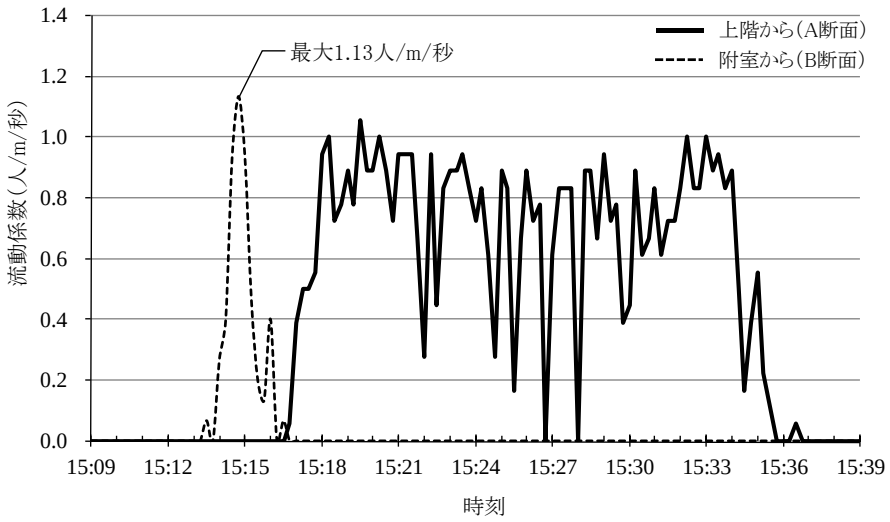


図２-16　合流時の流動係数（6 階）

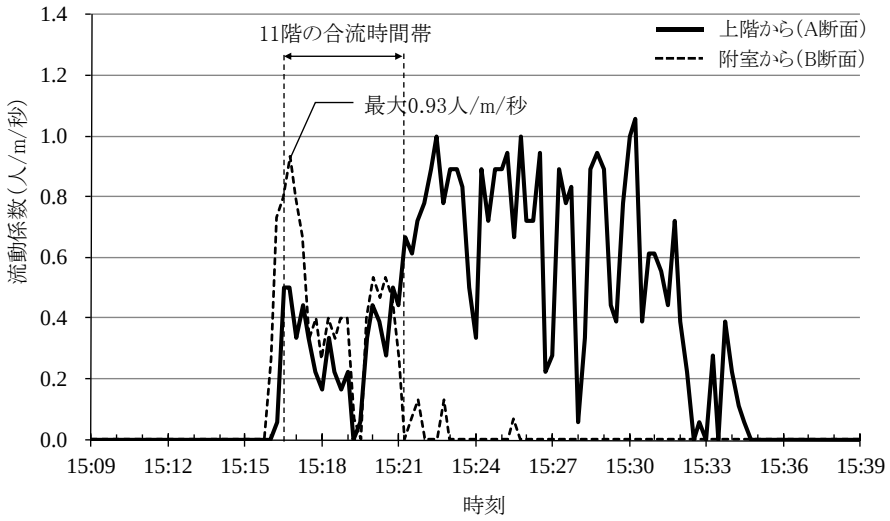


図２-17　合流時の流動係数（11 階）

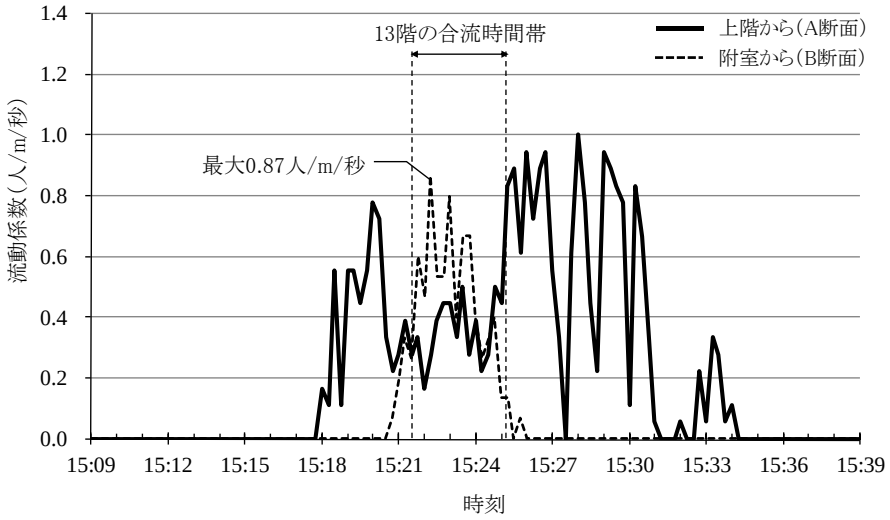


図２-18　合流時の流動係数（13 階）

2.2.7. 複数階にわたる流動係数

複数階にわたる流動状況を把握するため、ここでは 13 階から 15 階における図２-13 に示す下階への流出断面 C の流動係数を算出した。13 階から 15 階までの階踊り場について、15 秒ごとに集計した流動係数を時系列で表したものを図２-19 に示す。13 階の合流時間帯（図２-19 中の 15 時 21 分 25 秒から 15 時 25 分 3 秒）では、複数階にわたる流動係数の変化が見られた。12 階の合流は生じておらず、13 階の階踊り場から 12 階への流動係数は平均 0.76 人/m/秒（SD=0.17）となっている。その時、14 階の階踊り場から 13 階への流動係数は平均 0.38 人/m/秒（SD=0.17）と半減している。また、14 階においても合流が生じており、15 階の階踊り場から 14 階への流動係数は平均 0.19 人/m/秒（SD=0.14）と更に半減している。このように合流が生じた階の上階では流動係数が半減しており、合流が流動を阻害する要因となっているとともに、その影響(約 1/2)は上階になるほど累乗的に及んでいる。

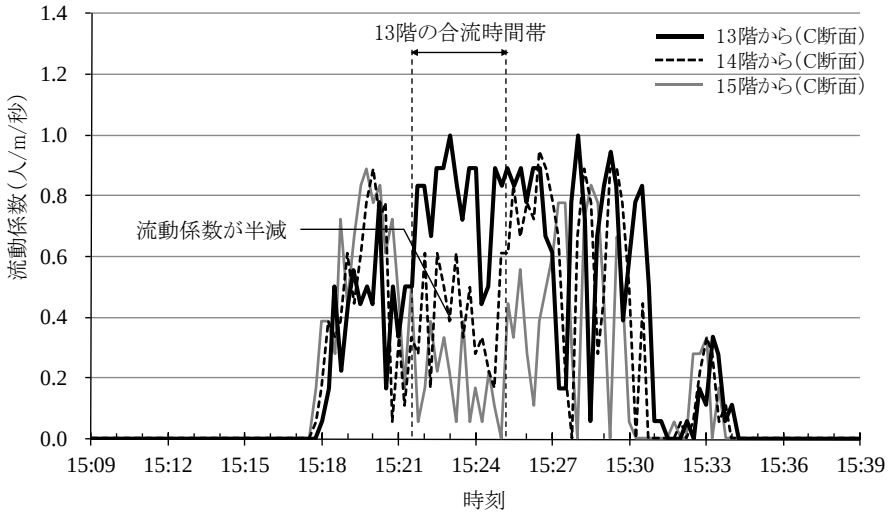


図２-19　複数階にわたる流動係数（13～15 階）

2.2.8. 階踊り場の合流比

階段室内踊り場において、階段の上階および階段附室からの流入者の合流が生じている。合流による流動量への影響を把握するため、合流比を算出する。なお、合流比は、一定時間定常流と見なした状況の上階からの流入断面 A と附室からの流入断面 B の流動量の比率を表すものとした。特に避難者の多い 11 階および 13 階、14 階について示す（表２−５）。各階の合流比は、11 階では 45.0：55.0、13 階では 45.6：54.4、14 階では 46.1：53.9 となり附室からの流入量が僅かに多いが、どの階も同様に、概ね 1：1 となる結果となった。

表２−５　階踊り場の合流比

階	11 階		13 階		14 階	
流入方向	上階から（A 断面）	附室から（B 断面）	上階から（A 断面）	附室から（B 断面）	上階から（A 断面）	附室から（B 断面）
時刻	15:16:30～15:21:08		15:21:25～15:25:10		15:21:36～15:26:47	
測定時間（秒）	278		225		311	
流動量（人）	104	127	94	112	88	103
合流比（%）	45.0	55.0	45.6	54.4	46.1	53.9

2.2.9. 階踊り場の密度

階段室内の混雑状況を把握するため、図２-20、21、22 に 11 階、13 階の階踊り場の時刻毎の密度を示す。ここでは、1 秒ごとの A 断面と B 断面における通過人数の累積量から C 断面における通過人数の累積量の差をとることにより、階踊り場内の人数を算出し、図２-13(b)に示す階踊り場の面積を用いて密度を算出した。6 階では、合流が生じておらず、全フェーズ避難開始後の 15 時 24 分 45 秒に最大 2.8 人/㎡（階踊り場内に 13 人）となっている（図２-20)。

11 階の密度は、合流が生じている間に平均 2.49 人/㎡（SD=0.53)、最大 3.57 人/㎡（階踊り場内に 19 人）となっている（図２-21)。合流解消後には平均 1.44 人/㎡（SD=0.47）まで減少している。同様に 13 階の密度は、合流が生じている間に平均 2.36 人/㎡(SD=0.42)、最大 3.38 人/㎡（階踊り場内に 18 人）となっている（図２-22)。合流解消後には平均 1.51 人/㎡（SD=0.61）まで減少している。なお、図２-20、21、22 に合流解消後の一時的なピーク値が見られるが、この影響については 2.3.3 項で述べる。

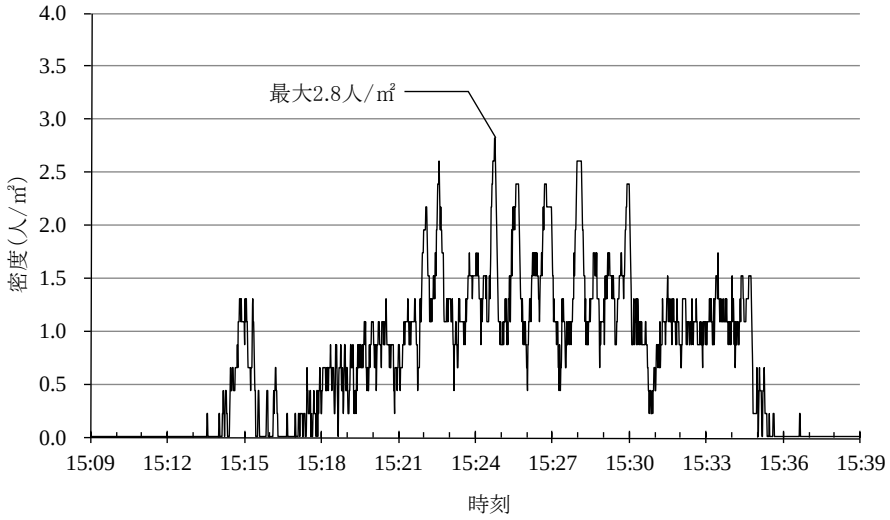


図２-20　階踊り場の密度（6 階）

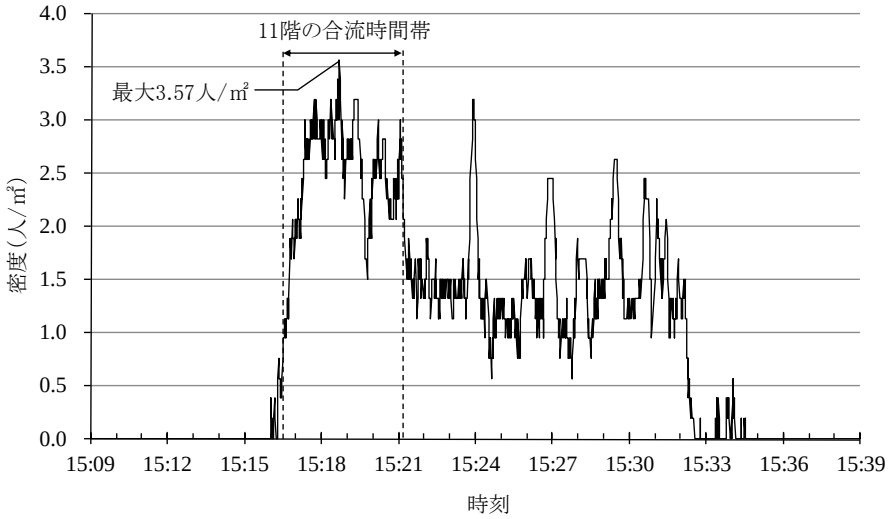


図２-21　階踊り場の密度（11 階）

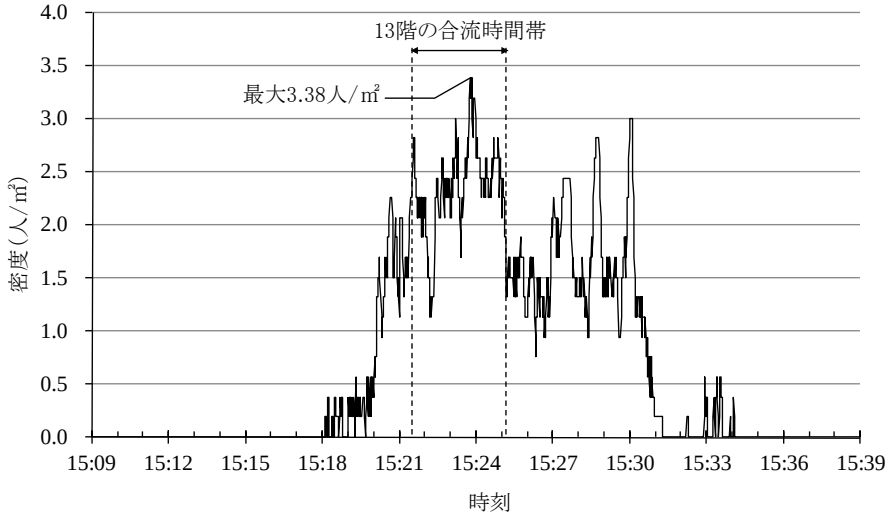


図２-22　階踊り場の密度（13 階）

2.2.10. 中間踊り場の密度

図２-23 に 13 階中間踊り場の時刻毎の密度を示す。13 階中間踊り場の密度は、13 階の合流が生じている間には平均 1.79 人/㎡（SD=0.49）、13 階の合流解消後に最大 3.03 人/㎡（中間踊り場内に 13 人）となっている。

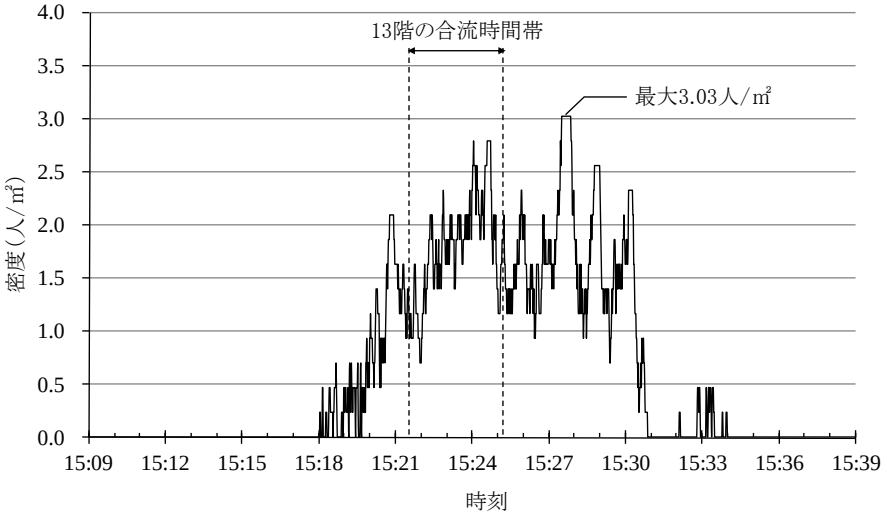


図２-23　中間踊り場の密度（13 階中間踊り場の密度）

2.2.11. 階段部の密度

図２-24、図２-25 に 13-14 階階段部の時刻毎の密度を示す。13-14 階上階段部の密度は、13 階で合流が生じている間に平均 2.35 人/㎡（SD=0.52）、最大 3.25 人/㎡（階段部内に 12 人）となっている。13-14 階下階段部の密度は、13 階で合流が生じている間に平均 2.53 人/㎡（SD=0.63）、最大 3.52 人/㎡（階段部内に 13 人）となっている。

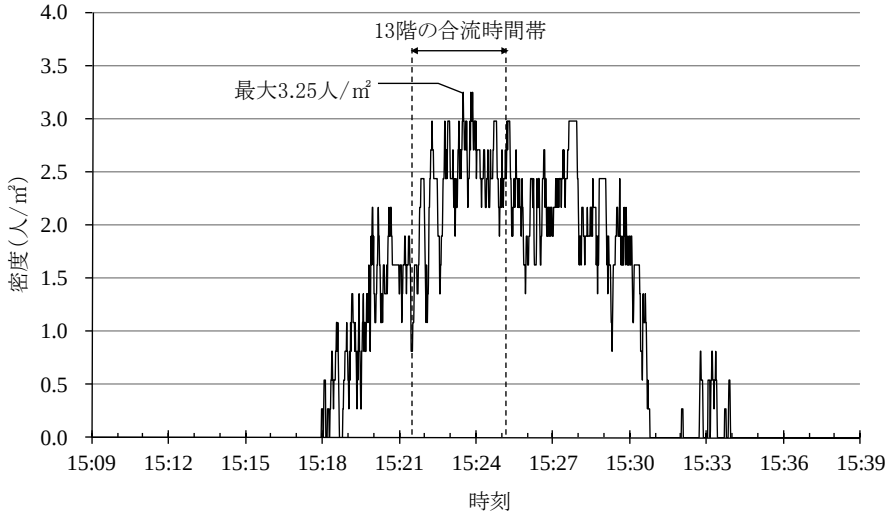


図２-24　階段部の密度（13-14 階上階段部の密度）

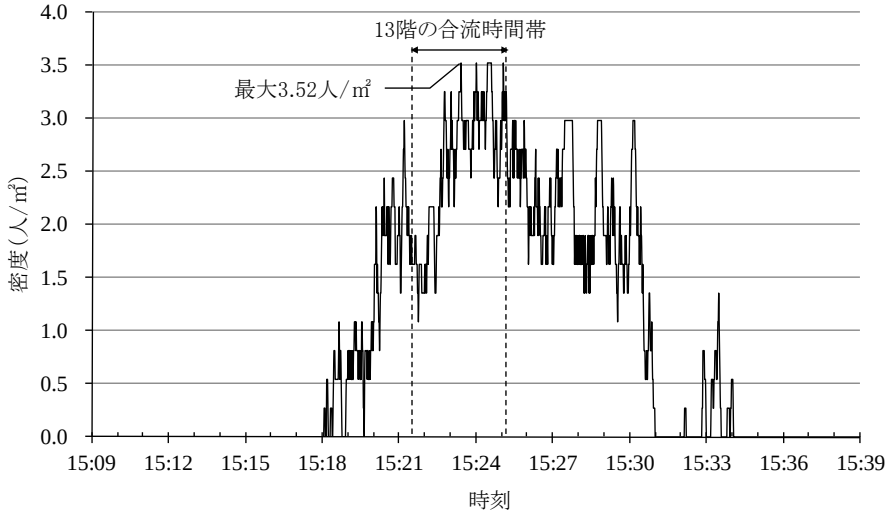


図２-25　階段部の密度（13-14 階下階段部の密度）

2.2.12. 階段室１層内の人数

階段室１層分の混雑状況を把握するため、図２-26 に 6 階、図２-27 に 11 階、図２-28 に 13 階の時刻毎の階段室 1 層内と階踊り場の人数をそれぞれ示す。なお、階段室 1 層内の人数の算出については、1 秒ごとの上階 C 断面の通過人数の累積量から、当該 C 断面の通過人数の累積量の差をとることにより、階段室 1 層内の人数を算出した。階踊り場内の人数については、2.2.9 項の算出によるものとした。また、階段部と中間踊り場の人数は、階段室 1 層内の人数と階踊り場の人数の差によるものとした。

6 階階段室の階踊り場人数は最大 13 人､6～7 階の階段部と中間踊り場人数は最大 32 人、階段室 1 層内の人数は最大 44 人となっている（図２-26)。また、11 階階段室の階踊り場人数は最大 19 人、11～12 階の階段部と中間踊り場人数は最大 31 人、階段室 1 層内の人数は最大 44 人となっている（図２-27)。階踊り場の最大人数（19 人）と階段部と中間踊り場の最大人数（31 人）を合わせると 50 人であるが、実際の階段室 1 層内の最大人数は 44 人となっている。これは、階段室内容量の制約のもと、階踊り場や階段部がそれぞれ同時に個々の最大値とはならないことによるものである。同様に 13 階階段室の階踊り場人数は最大 18 人、13～14 階の階段部と中間踊り場人数は最大 35 人、階段室 1 層内の人数は最大 48 人となっている（図２-28)。

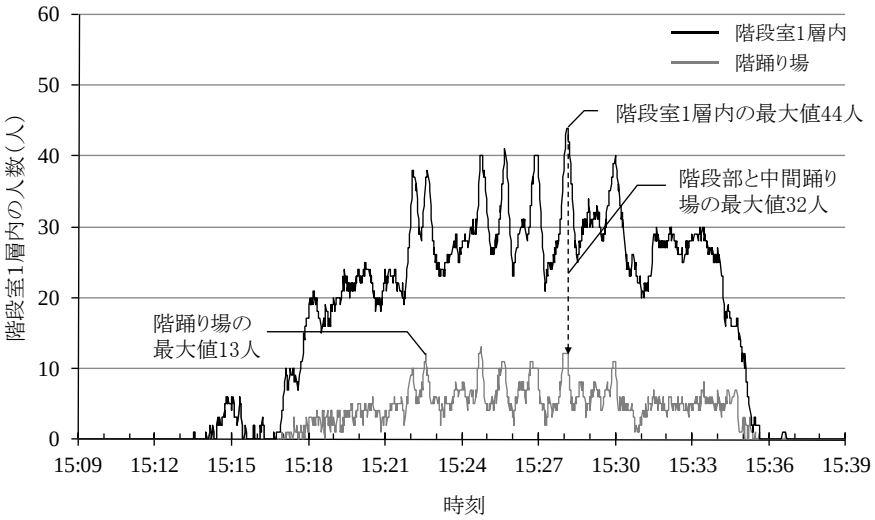


図２-26　階段室１層内の人数（6 階）

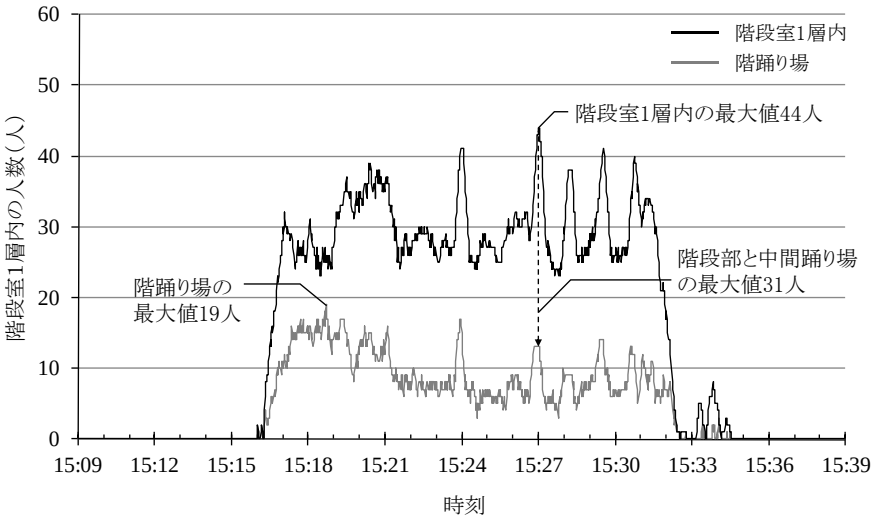


図２-27　階段室１層内の人数（11 階）

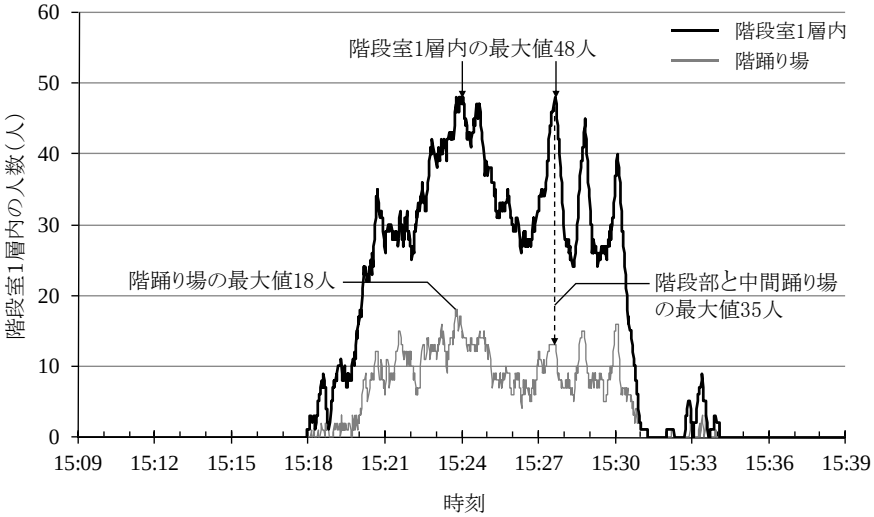


図２-28　階段室１層内の人数（13 階）

2.2.13. 階段室内の密度、歩行速度、流動係数の関係

（１）階段室１層内の密度と流動係数

階段室内の滞留状況を把握するため、6 階、11 階、13 階階段室 1 層内の密度と流動係数を同時刻で重ね合わせ、それぞれ図２-29、30、31 に示す。ここでの密度は、図２－４(b)に示す階段室１層の水平投影面積により算出した。また、流動係数の測定位置は、図２-13 における階踊り場から下階への流出断面 C とし、15 秒間の移動平均値とした。

2.2.9 項の階踊り場と同様に、各階段室 1 層内の密度においても、合流解消後において一時的なピーク値が見られた。6 階、11 階では、階段室 1 層内の密度が高くなると C 断面の流動係数が低下しており、複数回の変動が見られる（図２-29、30）。密度は、合流解消後において概ね 2.24 人/㎡(38 人)以上になると流動係数が 0.2 人/m/秒以下に減少している。

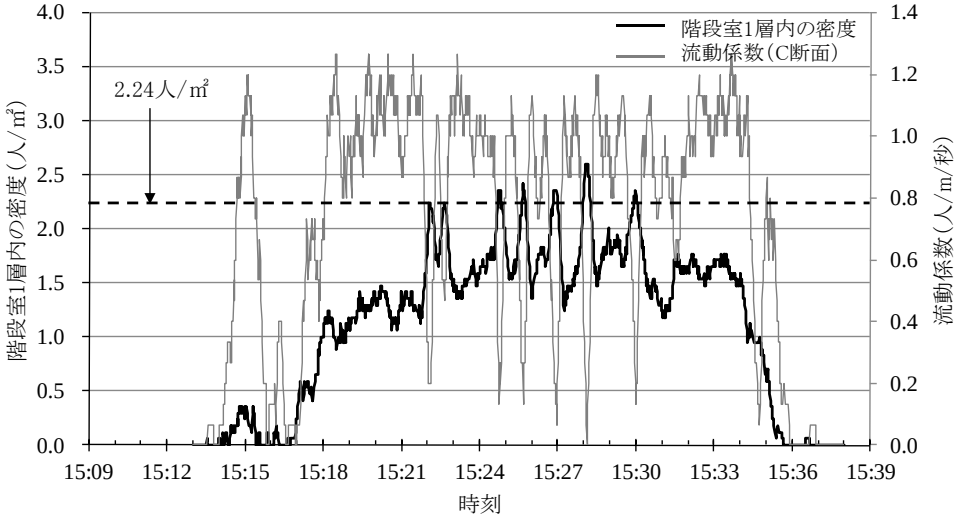


図２-29　6 階階段室１層内の密度と流動係数

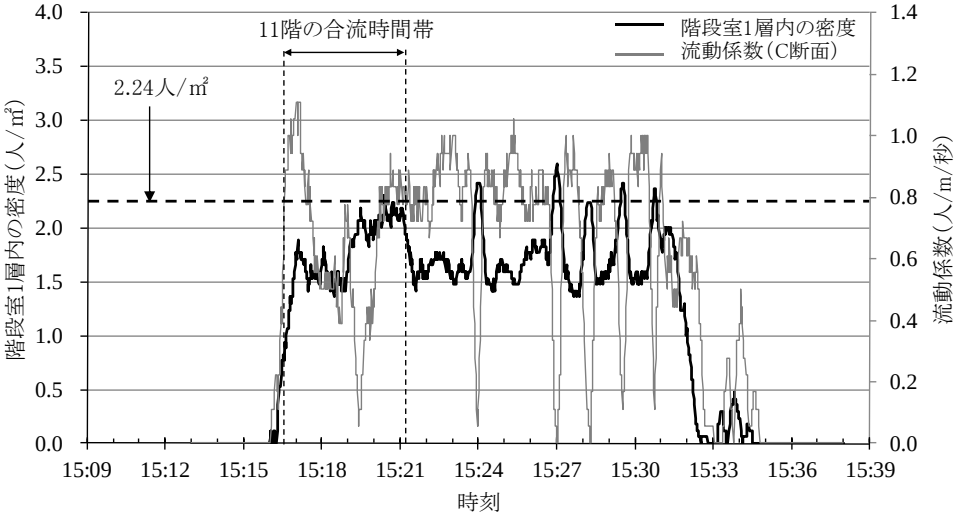


図２-30　11 階階段室１層内の密度と流動係数

13 階においても同様に、階段室 1 層内の密度が高くなると C 断面の流動係数が低下しており、複数回の変動が見られる（図２-31）。密度は、合流解消後において概ね 2.36 人/㎡（40 人）以上になると流動係数が 0.1 人/m/秒以下に減少している。

以上のことから、6 階、11、13 階では、密度はその下限値として、合流解消後において概ね 2.24 人/㎡（38 人）以上になると、流動係数が 0.2 人/m/秒以下に減少している。

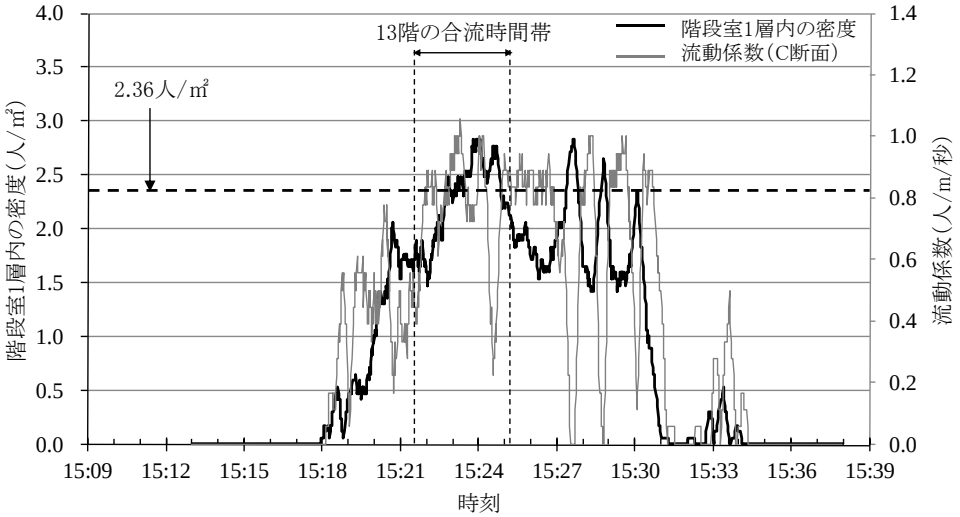


図２-31　13 階階段室 1 層内の密度と流動係数

（２）階段室１層内の密度と流動係数の関係

図２-32、33、34 は、6 階、11 階、13 階について 1 秒ごとの階段室 1 層内の密度と C 断面の流動係数の同時刻値（階段室 1 層内への流入が見られる時間帯）をプロットしたものである。図２-29、30、31 でも確認しているが、一般に、密度が増加するにつれて流動量は増加するが、一定の密度になると流動量が限界に達し、流動量が低下することが知られている。そこで、既往研究である J. L. Pauls[19)19)]による階段室内における一斉避難時の式（$N = 1.26\rho - 0.33\rho^2$）を参考にし、原点を通過する二次曲線で近似を試みた。N：流動係数（人/m/秒）、ρ：階段室 1 層内の密度（人/㎡）とした場合における階段室 1 層内の密度と流動係数の関係を式(１)(２)(３)に表し、図に実線で示す。各式の決定係数はそれぞれ R^2=0.63、0.61、0.49 である。

$$N = 1.57\rho - 0.60\rho^2 \quad (1)$$

$$N = 1.26\rho - 0.48\rho^2 \quad (2)$$

$$N = 1.14\rho - 0.42\rho^2 \quad (3)$$

下階の合流の影響が比較的少なく、流動時間の長い 11 階階段室について考察する。(２)式によると、階段室 1 層内の密度が 1.31 人/㎡（22.33 人）の時、流動係数は 0.83 人/m/秒と最大値を示している。また、図２-33 からも、この密度を境にして流動係数の減少傾向となり、図２-30 で見られたように、概ね密度が 2.24 人/㎡（38 人）以上となると流動量が低下し、滞留していることがわかる。その後、密度は 2.60 人/㎡（44 人）まで増加している。これは、実際の避難訓練時の一般的な密度の上限を示すと考えられる。なお、この値は図２-21 の階踊り場のみの密度に比べて低い値を示しているが、これは階段室全体では階段部の密度を含むためである。

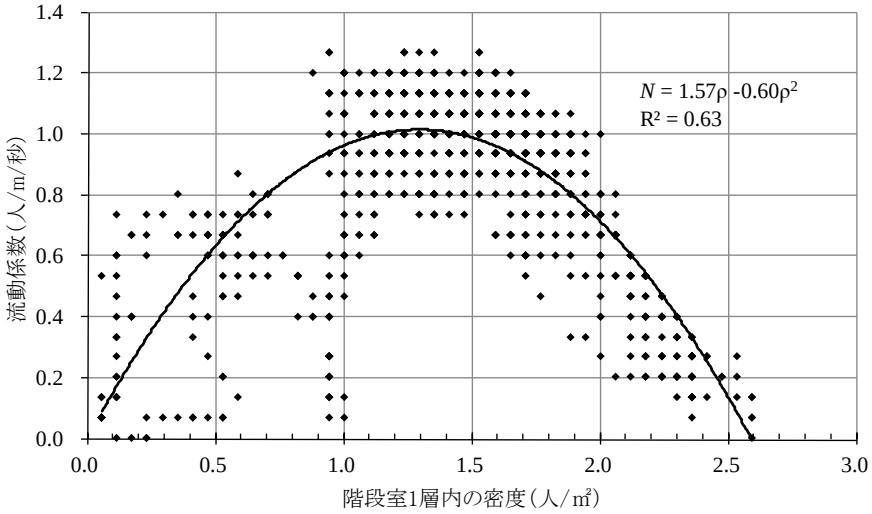


図２-32　6 階階段室 1 層内の密度と流動係数の関係

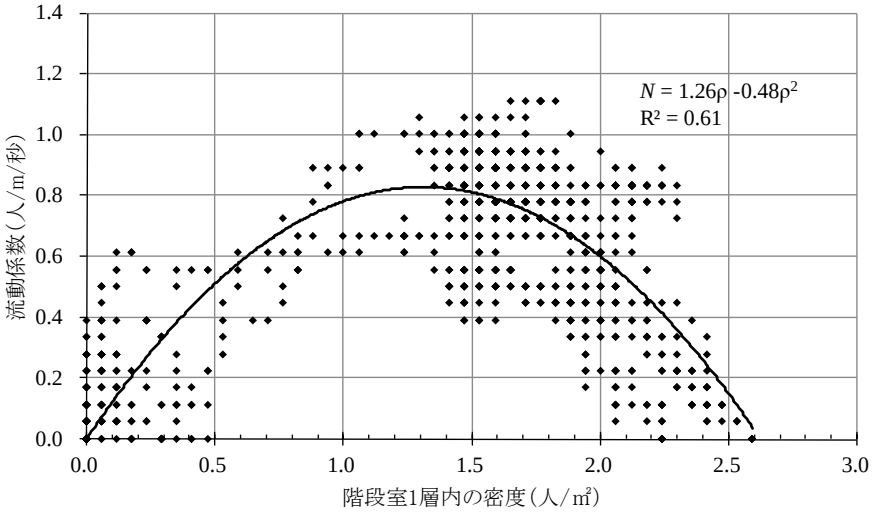


図２-33　11 階階段室１層内の密度と流動係数の関係

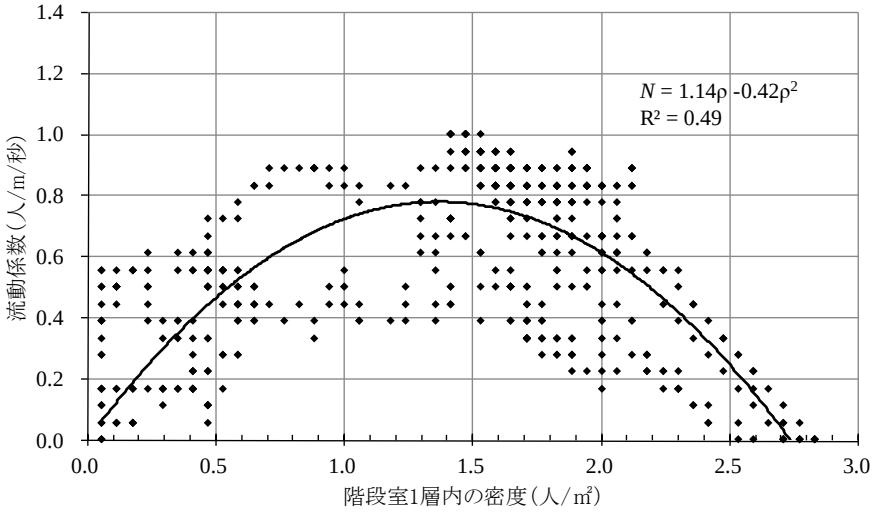


図２-34　13 階階段室１層内の密度と流動係数の関係

（３）階段部の密度と速度の関係

図２-35 は、図２-12 に示す被験者が 13-14 階上階段部を通過する際の速度と階段部の密度の同時刻値をプロットしたものである。密度が増加するにつれて速度が減少していることがわかる。V：歩行速度（人/秒）、ρ：階段部の密度（人/㎡）とした場合における 13-14 階上階段部の密度と歩行速度の関係を式（４）に表し、図２-35 に実線で示す。式（４）の決定係数は R^2=0.77 である。

$$V = 1.30 - 0.40\rho \qquad (4)$$

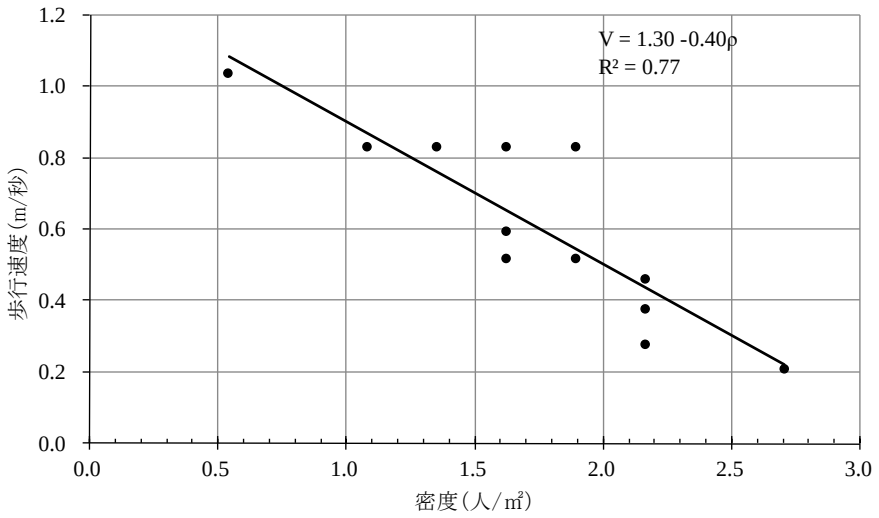


図２-35　13-14 階上階段部の密度と速度の関係

2.3. 順次避難における階段室内の滞留発生状況

本避難訓練では、予め計画した順次避難計画に従い、避難放送を実施している。そのため、Ⅱフェーズ上層階からの避難者と、Ⅲフェーズの避難開始者との合流は概ね避けることができたが、Ⅱフェーズ上層階の最後尾の避難者で部分的には生じる結果となった。

図２-36 は、各階から避難を開始した訓練参加者（被験者 20 名と従業員 3 名（24 階、22 階、12 階の最後尾））が各階を降下した軌跡を時系列で表したものである。図中の破線は、避難開始階と避難放送時間の範囲を表す。被験者の各階階踊り場（A 断面）通過時刻は、ビデオ映像から被験者が階踊り場に着地した時刻を確認し、これにストップウォッチにより測定した各階の所要時間を加え求めた。また、合流の状況を把握するため、階避難者の最後尾が判らない一部の階（24 階、22 階、12 階）については、ビデオ映像から最後尾の従業員の通過時刻を求め、図中に加えた。

訓練参加者のうち、22 階から先頭集団の後について避難開始した者（図２-37 中の 22 階避難者①）については、13・14 階避難者の避難開始前に 13～14 階を通過しているため、合流の影響がなかったが、同階からの避難者の最後尾に付いて避難開始した者（図２-36 中の 22 階避難者②）は、13・14 階避難開始後の避難となったことから、13 階から 15 階付近の合流の影響を受けていることがわかる。

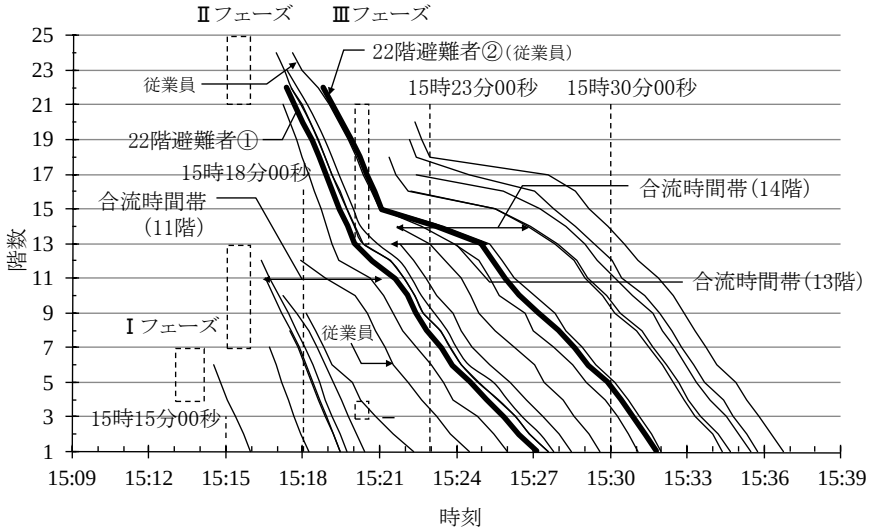
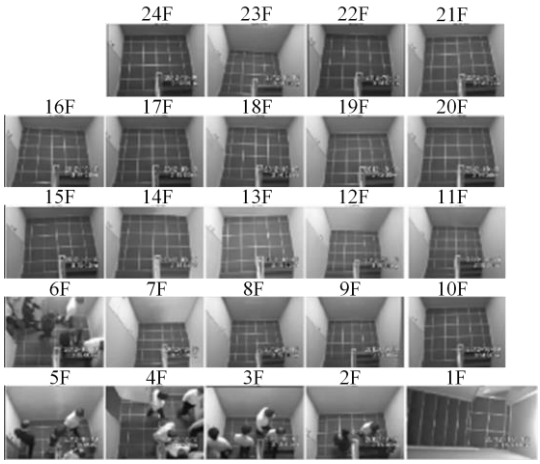
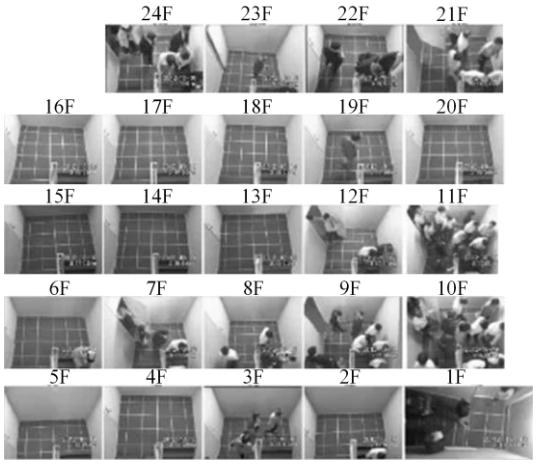


図２-36　訓練参加者による各階の通過時刻

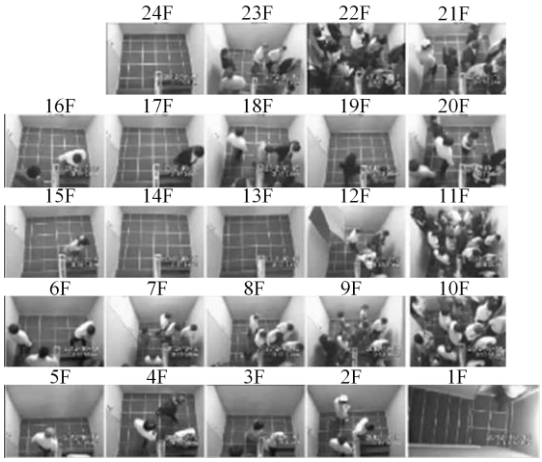
図２-37 に各階の階踊り場の様子の映像を時間毎に示す。(a) Ⅰフェーズ避難開始後（15 時 15 分 00 秒）では、6 階以下の避難開始状況が見られる。次に、(b) Ⅱフェーズ避難開始後（15 時 17 分 00 秒）では、7～12 階、21～24 階の避難開始をしている。(c) Ⅱフェーズ避難開始後（15 時 18 分 00 秒）では、10・11 階の合流が生じているが、上階への影響は見られない。(d) Ⅱフェーズ避難開始後（15 時 19 分 00 秒）も 10・11 階の合流が生じている。



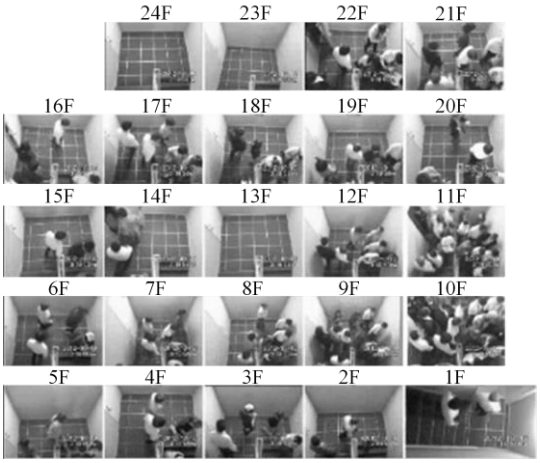
(a) Ⅰフェーズ後（15 時 15 分 00 秒）



(b) Ⅱフェーズ後（15 時 17 分 00 秒）



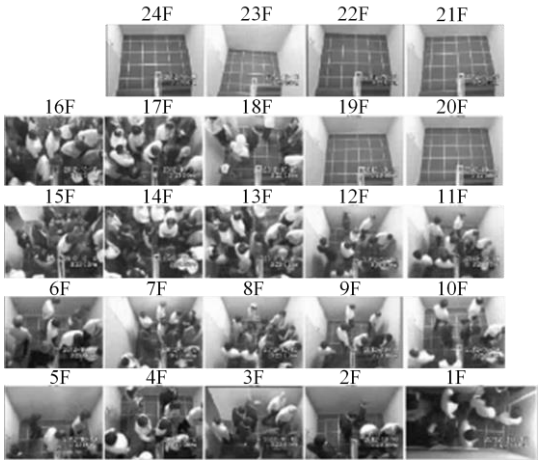
(c) Ⅱフェーズ後（15 時 18 分 00 秒）



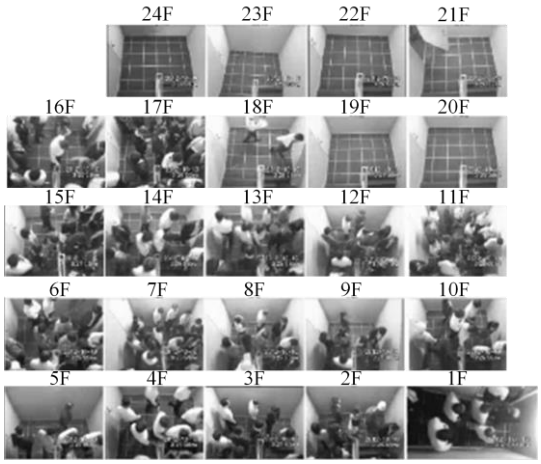
(d) Ⅱフェーズ後（15 時 19 分 00 秒）

図２-37　各階の階踊り場の混雑状況（Ⅰ・Ⅱフェーズ）

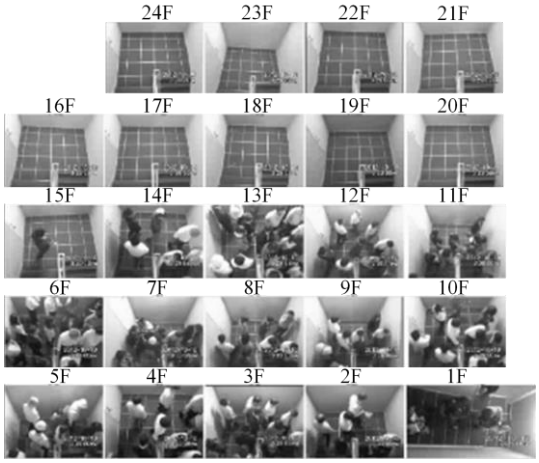
続いて、図２-38 の（e)Ⅲフェーズ避難開始後（15 時 23 分 00 秒)では、13・14 階の合流により、13 階から上層階で滞留が生じており、(f)Ⅲフェーズ後（15 時 27 分 00 秒）でも確認できる。(g)Ⅲフェーズ後（15 時 30 分 00 秒）では、合流は解消されているが、滞留が一部生じている。(h)Ⅲフェーズ後（15 時 33 分 00 秒）では、9 階以下の流動状況が確認できる。



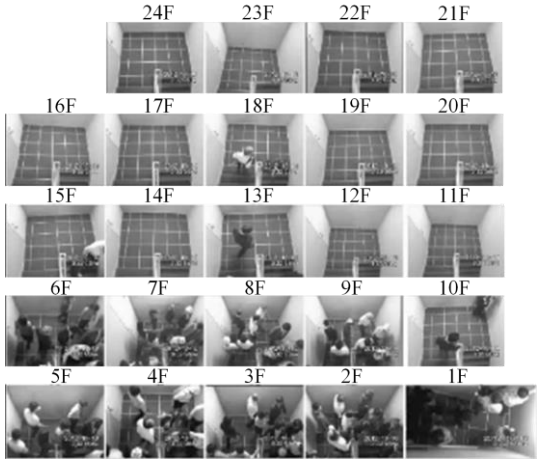
(e)Ⅲフェーズ後（15 時 23 分 00 秒）



(f)Ⅲフェーズ後（15 時 27 分 00 秒）



(g)Ⅲフェーズ後（15 時 30 分 00 秒）



(h)Ⅲフェーズ後（15 時 33 分 00 秒）

図２-38　各階の階踊り場の混雑状況（Ⅲフェーズ）

2.3.1. 訓練参加者の移動軌跡

以上の訓練観測結果より、合流時の複数階にわたる流動量の減少の伝播（図２-19)、合流時と合流解消後の流動量の減少と密度上昇（図２-29、図２-30、図２-31)、流動量と密度の関係（図２-32、図２-33、図２-34）を確認していることから、今回の避難訓練では次の 2 種類の滞留が生じていると考えられる。2.3.2 項から 2.4 節においてその滞留要因の考察を行なう。

①合流を原因とする滞留

避難者の多い階（11、13、14 階）について、階段室内への流入者と上階避難者の合流から滞留が生じ、この滞留が上層階に向かって伝播していく傾向が見られた。

②階段室内の高密状態を原因とする滞留

合流を原因とするものだけでなく、階段室内の高密状態から生じた一時停止が上層階に向かって滞留状態として伝播していく現象が生じている。

2.3.2. 合流を原因とする滞留

図２-39 は、図２-36 の訓練参加者の各階の通過時刻図をもとに、避難者の合流による滞留状況を時系列に表したものである。滞留については、各階の階踊り場のビデオ映像より、断続的な停止状態が発生・解消した時刻をもとに算出した。なお、図中の右上がりの斜め太線は、降下歩行速度が低下し、滞留が生じた状況が上階に伝播する様子を表している。

階段室内の階踊り場内への流入者と上階避難者との合流が生じた階は、先に述べたように上階からの避難者の流動量が累乗的に減少（約 1/2）し、これに起因する滞留状況が上層階に向かって伝播していることがわかる。階段室内の合流は、Ⅱフェーズ内 11 階と上階（12 階から 15 階まで伝播）、Ⅲフェーズ内の 3 階と上階（4 階から 8 階まで伝播）および 13 階、14 階の上階（15 階から 18 階まで伝播）で生じている。階踊り場内で連続停止した最大滞留時間は、14 階約 27 秒、15 階約 45 秒、16 階約 65 秒、17 階約 125 秒間、18 階約 127 秒間と上階にいくにしたがって順に大きくなっている。

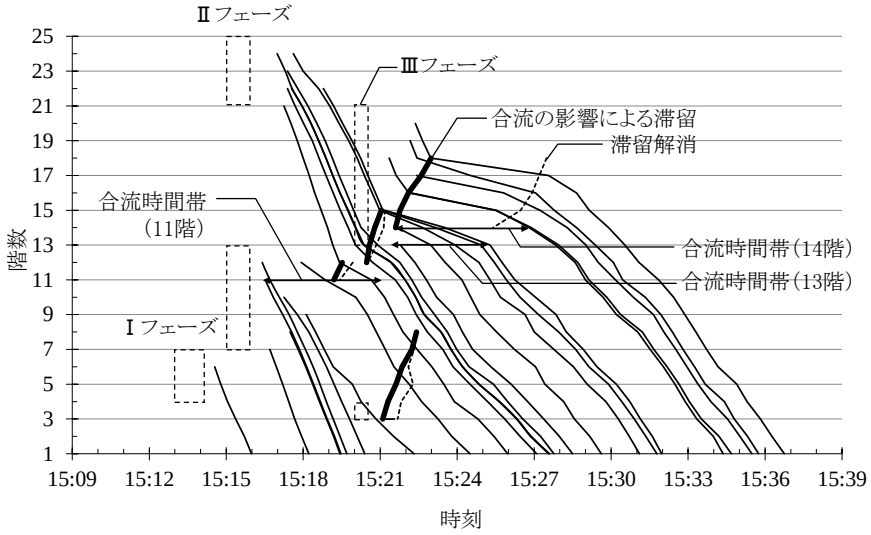


図２-39　合流を原因とする滞留

2.3.3. 階段室内の高密状態を原因とする滞留

階階段室内では、前述した合流を原因とするものだけでなく、下階の高密状態が伝播することにより滞留する状況が見られた。合流解消後、流動量の増加に伴い一定の密度となったが、下階の高密状態が伝播し、歩行速度が低下し停止状態となることで階段室内の密度が一時的に増加した。これは、図２-29、図２-30、図２-31 に示すように流動量が低下した際に、階段室内の密度の断続的な変化がノコギリ歯状のピーク値としてあらわれ、滞留が生じていたことが確認できる。その滞留は、上層階に向かって伝播し、階段室内での滞留を生じている。図２-40 は、図２-39 同様に図２-36 をもとに、高密状態を原因とする滞留状況を時系列に表したものである。滞留は 10 回程起こっており、平均 8 階層（最大 2 階から 16 階までの 15 階層）、上階に伝播している。これらの滞留は、平均 15.2 秒間隔で上階に伝播している。また、各階では、短時間であるが滞留から平均 12.2 秒後、停止状態が解消している。

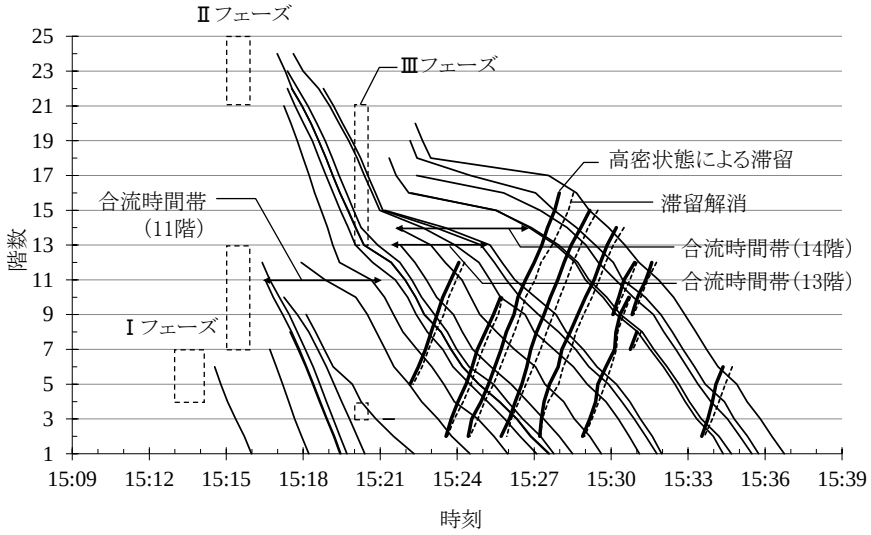


図２-40　高密状態を原因とする滞留

2.4. 滞留発生要因の考察

合流を原因とする滞留については、訓練参加者が多い複数階（11、13、14 階に 100 人以上の訓練参加者が集中）で生じている。階踊り場では、上階からの避難者は内側に 2 列から 1 列、階段室内への避難者は外側に 1 列になり合流している。そのため、合流が生じた階の上階では流動係数が半減しており、上階に従って流動量が累乗的に減少（約 1/2）し、滞留が生じている。上階は下階の移動後に移動するため、上階に従って滞留が長く生じており、最大滞留時間は 18 階で約 2 分間生じている。

一方、高密状態を原因とする滞留については、合流終了後にこの滞留が伝搬する現象が見られ、流動量と階段室内の人数が上昇した。これは、安全性を保つため、避難者間の距離をあけながら避難するために起こっていると考えられる。その結果、1 層あたりの階段室内の密度が概ね 2.24 人/㎡（38 人）以上になると、短時間ではあるが、階踊り場で平均 12.2 秒の滞留が生じている。

2.5. まとめ

本章では、都内の 25 階建て高層建築物で実施された多人数が参加する全館避難訓練における訓練参加者の行動を観測した結果をもとに、階段室内の流動状況や階段室内で生じる滞留発生状況の分析とその要因に関する考察を行なった。以下に、その結果を要約する。

（１）密度と流動係数の関係

11 階の階段室 1 層内の密度 ρ（人/㎡）と流動係数 N（人/m/秒）の関係として、$N = 1.26\rho - 0.48\rho^2$ となる近似式（２）が得られた。流動係数が最大値となる密度 1.31 人/㎡を境にして流動量が減少しており、密度は下限として概ね 2.24 人/㎡（38 人）以上となると滞留が発生していることがわかった。

（２）階段部の密度と速度の関係

13-14 階上階段部の V：歩行速度（人/秒）、ρ：階段部の密度（人/㎡）の関係として、$V = 1.30 - 0.40\rho$ となる近似式（４）が得られた。密度が増加するにつれて速度が減少している。

（３）階段室内の滞留発生とその要因

避難訓練観測結果から、次の 2 種類の滞留の発生が確認された。１つは、合流を原因とする滞留であり、複数階から 100 人以上の避難者が合流した場合、合流が生じた階の上階での流動量の減少（約 1/2）が累乗的に上階に伝播することを要因として発生するものである。もう１つは、階段室内の高密状態を原因とする滞留であり、多層にわたり階段室 1 層内の密度が概ね 2.24 人/㎡（38 人）以上になると発生し、やはりこの滞留も上層階に向かって伝播している。なお、合流を原因とする滞留の場合には停止時間が長く（約 2 分間）、一方、高密度状態を原因とする滞留では停止状態は短時間（平均 12.2 秒間）で解消していた。

第3章　階段避難シミュレーションモデルの構築

3.1.　階段室と避難者行動のモデル化について

本章では、階段避難実測結果に基づき、階段避難シミュレーションを実施するための階段室と避難者行動のモデル化を行う。なお、システム化の際には、企業の防災担当者などの実務者が避難訓練計画策定時に、避難時の混雑軽減を簡易に検証出来ることを目的に検討を行うものとした。

モデル化にあたり、本避難実測結果による階段避難時に見られた主な特徴として、

・踊り場、階段部といった階段室形状の制約から、避難者は概ね内側外側の 2 列での歩行となっており、階踊り場での合流時には附室からの流入者と上階からの流入者が列になり歩行している。

・密度の増加に伴い速度が低減しており、滞留が生じている。また、密度の上限として、おおよその最大収容人数がある。

・前に進もうとした時に滞留していると進めず、その滞留が上階に向かって伝搬している。

といったことが挙げられる。

これらの特徴を踏まえ、階段避難シミュレーションモデルは、階段室の滞留現象を明確にモデル化することを主眼とし、空間をセル（格子）により表現するセルオートマトンモデルを用いるものとした。

その理由として、先に表１−７に示しているセルオートマトンモデルの特徴のように、セルオートマトンモデルは、セルの大きさに依存するため、複雑な形状の建物や人の大きさ、合流時など精緻な挙動の再現が難しいなどデメリットがある。しかしながら、表３−１に示すように、階段室のモデル化については、階段室は矩形など比較的セルにて表現が容易な形状であることや、階段部は 2 列のセルにて表現しやすいなど形状の制約による影響は小さいと考えられる。また、避難者行動のモデル化については、セルを用いることで、前が停止していると停止する排除体積効果により、行列の再現が容易であり、階段室内の最大収容人数を予め設定することが出来きるため、滞留を考慮する上でのメリットがある。

次にセルオートマトンモデルについて述べる。

表３−１　階段室と避難者行動のモデル化

モデル化の対象	避難訓練実測結果	セルオートマトン
階段室	矩形形状・段	セル（格子）表現
避難者行動	行列・滞留	自己駆動・排除体積効果

3.1.1. セルオートマトンモデル

セルオートマトンの中でルール 184 と名付けられたものが、交通シミュレーションに用いられている最も基本的なモデルとされている[25)40)41)]。

ルール 184 モデルの基本動作を以下に示す。

・歩行者の速度は一定で加速はしない。

・前方が空いていれば、歩行者は前方へ移動する（自己駆動）。

・前方が空いていなければ、歩行者は現在のセルに留まる（排除堆積効果）。

時刻 t での注目セルの状態量をs_0^tとし、注目セルの左隣と右隣のセルの状態量をそれぞれs_i^t $(i=-1,0,1)$とする（図３−１）。セルの状態量$s_k^t=1$ $(k=-1,0,1)$とする。そのときそのセルに人が存在することを示し、$s_k^t=0$のときそのセルに人が存在しないことを示す。ルール 184 オートマトンのローカル・ルールは表のようになる（表３−２）。注目セルと近傍セルの関係が上列の場合に、次のタイムステップでは注目セルが下列の状態に遷移することを示している。

$$\{s_{-1}^t,\ s_0^t,\ s_1^t\}=\{100\}$$
$$\downarrow$$
$$\{s_0^{t+1}\}=\{1\}$$

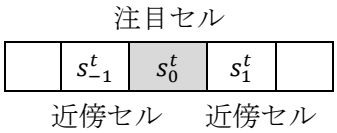


図３−１　注目セルと近傍セル

表３−２　ローカル・ルール

s_{-1}^t, s_0^t, s_1^t	111	110	101	100	011	010	001	000
s_0^{t+1}	1	0	1	1	1	0	0	0

3.1.2. 避難者行動のモデル化

避難者の行動は、基本動作をルール 184 モデルに準じたものとし、改良を行うものとした。以下に避難者の移動ルールを示す。

・一つのセルについて一人が占有し、設定所要時間に従い、前のセルが空いている場合は移動する（ルール 184 モデル）（図３－２）。セルには予め距離と歩行速度を設定し、設定所要時間を算出設定するものとした。

・避難経路については、OD（Origin、Destination）を設定し、OD に沿って移動する。

・セルには重みを設定する。OD 上で前方のセルが塞がっている場合、同一な重みを持ち、かつ空いているセルを経由して迂回するものとした（図３－３）。ただし、前方が同じ階からの避難者（同じ OD を持つもの）同士の場合には、デッドロックを避けるため行わないものとした。

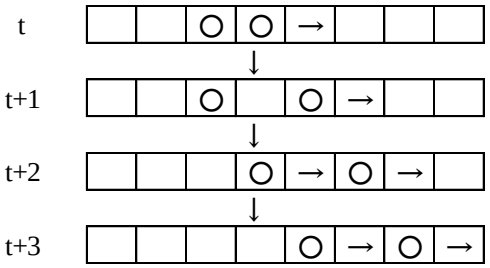


図３－２　避難者の移動ルール（ルール 184 モデル）

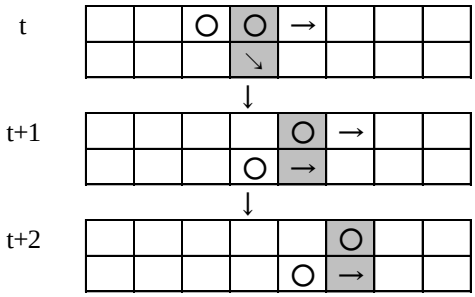


図３－３　迂回時の移動ルール（重み付けの設定）

3.1.3. 階段避難シミュレーションシステムの概要

階段避難シミュレーションシステムのため、階段室全体のシミュレーションモデルを便宜的に直線上に表現するものとした（図３-４）。

階段避難シミュレーションシステムに関しては、マイクロソフト社のエクセル上で VBA によるプログラミングを行い開発した [40)42)]。なお、本システムは、実務者が避難訓練計画策定時などに簡易に検証出来ることを目指し、設定や入力が簡便で、メールなどで送付できるなど普及しやすいことや、セルを既にインターフェースとして持ち、開発が容易なエクセル上で開発することにした。

階段避難シミュレーションシステムの画面例を図３-５に示す。図３-４に示す直線状に表現した階段室を 1～25 階まで積層し、上階から下階に螺旋状に避難するものとした。避難者が避難開始後、階段室を移動している状況を図３-５（ｂ）に表す。

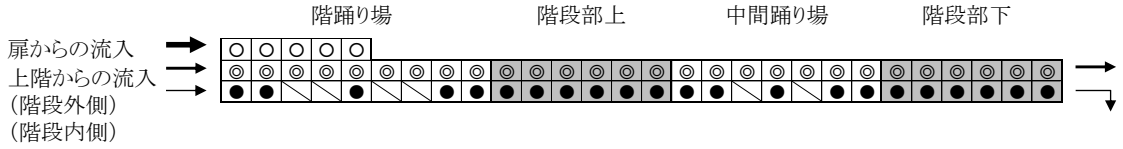
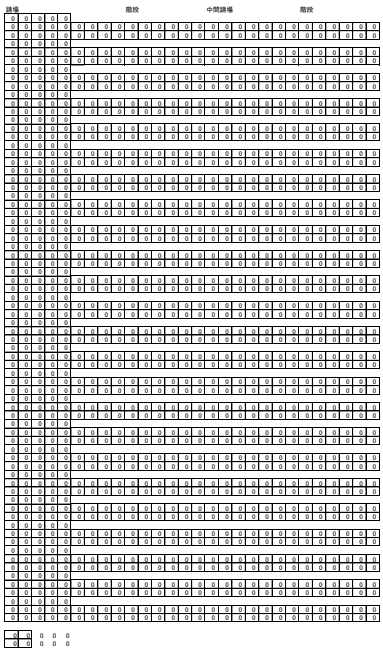
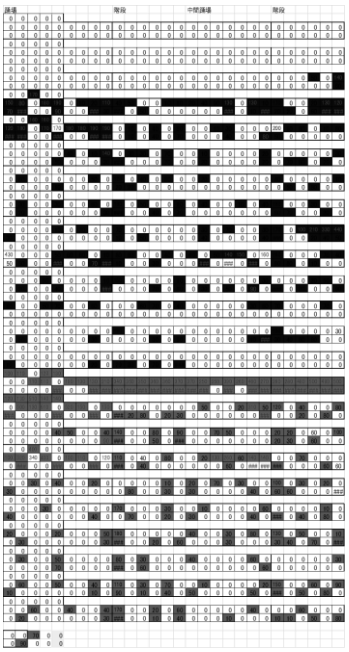


図３-４　階段避難シミュレーションシステムのためのモデル化



(a)避難開始前



（ｂ）避難開始後

図３-５　階段避難シミュレーションシステムの画面例

3.2. 階段避難シミュレーションの設定条件

階段避難シミュレーションと階段避難実測結果との比較を行い、滞留発生に関する再現性の検証を行う。階段避難シミュレーションを実施するにあたっての階段室と避難者の設定条件を以下に示す。

3.2.1. 階段室の設定条件

対象となる高層建築物の階段室の設定条件を下記に示す。

・高層建築物は 25 階建てとし、簡便のため 2 方向の避難路のうち一方の南側階段路を対象とする。また、避難経路は、各階の階段室入口から 1 階階段室出口までとした。

・階段幅は 1.2m とし、階高は 3.8m（8～25 階）とした。

・階段扉の開閉の影響は考慮しないものとした。

・階段室の容量（収用可能な人数）は、避難訓練の実測値より各階についてセル表現化を行い、設定した（図３－６）。階段室のセル表現化の手順は、次項にて示す。8～25 階の階段室については、階踊り場では最大 19 名、中間踊り場は 12 名とする。また、階段部では最大 12 名とし、階 1 層あたりの階段室の容量を 55 名と設定した。

・階踊り場のセルの大きさは、実測値の容量を反映するように調整し、基本サイズを0.52m×0.48m（=1人当たりの必要滞留面積0.25㎡/人）とし、階段部は2段を1人が占有するものとした。

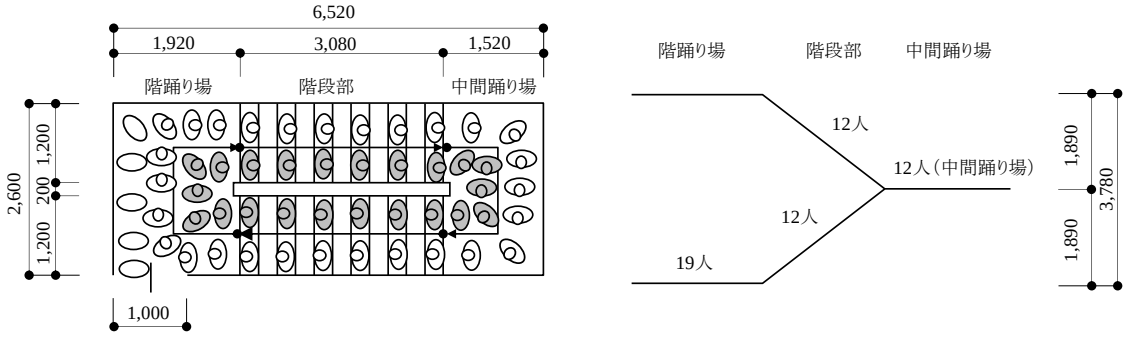
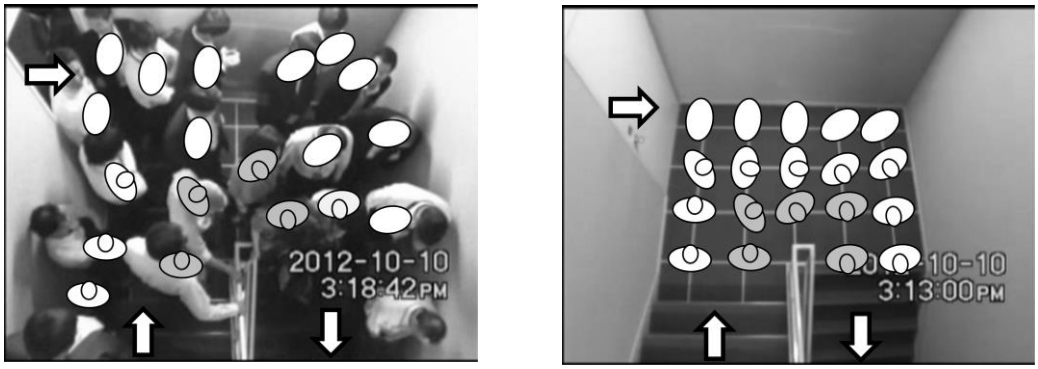


図３－６　階段室の容量（収用可能な人数）（8～25 階）

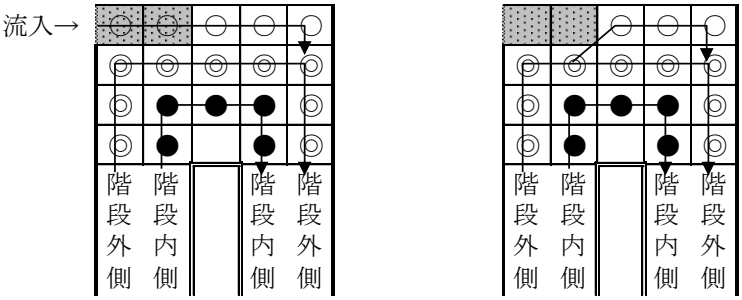
3.2.2. 階段室のセル表現化

階段室の空間モデルとして、避難訓練実測結果の階段室の最大収容人数と図３−７に示す映像による移動軌跡から、階踊り場、階段部、中間踊り場により構成される階段室のセル表現化を行う。8〜25 階のセル表現化した階踊り場を図３−８に示すと、合流時の最大収容人数を 19 名とし、合流が無い場合の最大人数を 17 名とする。階踊り場のシミュレーションモデル表現として、移動軌跡から、外側を歩行する場合９名、内側を歩行する場合５名、附室から階踊り場へ流入する場合 2 名とし、さらに外側に 3 名分の移動スペースを占有するものとした（図３−９）。



(a)避難者の移動軌跡　　(b)避難者の移動位置

図３−７　階踊り場の移動位置（合流時）（8〜25 階）



(a)合流時　　(b)合流の無い時

図３−８　階踊り場のセル化表現（8〜25 階）

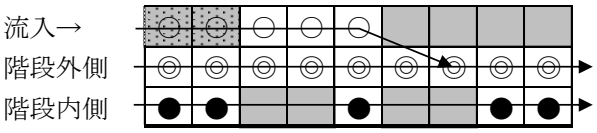
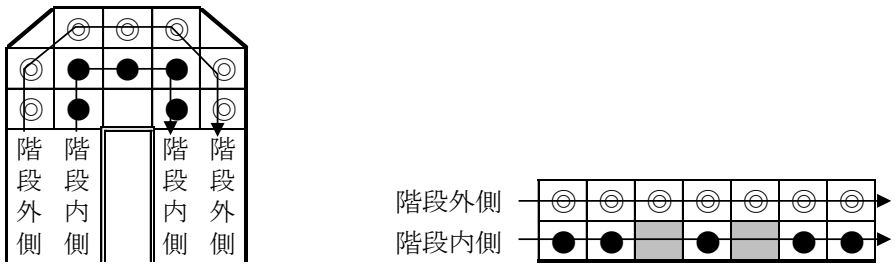


図３−９　階踊り場のシミュレーションモデル表現（8〜25 階）

中間踊り場についても同様に、最大収容人数 12 名とし、図３-10 に示すように外側を歩行する場合 7 名、内側を歩行する場合 5 名分の移動スペースを占有するものとした。1 階階段室出口については、最大収容人数 3 名とし、図３-11 に示す移動軌跡とした。階段部については、最大収容人数 12 名とする。移動軌跡から、最後の 1 段を除き、2 段を 1 名が占有するものとした（図３-12)。以上の階踊り場、階段部、中間踊り場のシミュレーションモデルを階段外側・内側に接続し、階段室全体のシミュレーションモデルを構成する（図３-13)。



(a)セル化表現　　(b)シミュレーションモデル表現

図３-10　中間踊り場

(a)セル化表現　　(b)シミュレーションモデル表現

図３-11　1 階階段室出口

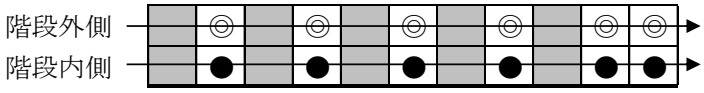


図３-12　階段部のシミュレーションモデル表現

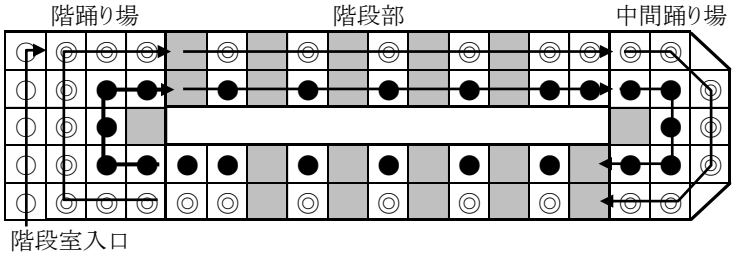


図３-13　階段室全体のシミュレーションモデル表現（8～25 階）

3.2.3. 避難者の設定条件

以下の避難者の設定条件に基づいて、避難シミュレーションを行うものとした。

・階段室内入り口付近では、階段室内への流入者と外側歩行者が合流する。階段部および中間踊り場においては、2列で進むものとする。

・歩行速度は、階段室全体の初期値として合流の影響が少ないと考えられるⅡフェーズ下層階（7～12 階）からの被験者の平均歩行速度 0.73m/秒を用いるものとした。ただし、図３-12 に示すように、観測結果より、階段部への流入時においてのみ、階段部内の混雑に応じて減速することを考慮し、階段部内の歩行速度 V（m/秒）と密度ρ（人/㎡）との関係として、式（２）V=1.30-0.40ρ を用いることとした。その際、式（２）より、階段部の密度が 1.4 人/㎡（5 人）以上となった場合に初期値（平均歩行速度 0.73m/秒）以下に減速するものとした。なお、踊り場では密度から減速するものとはせず、階段部が減速することにより間接的に影響を受けるものとした。

・階段室内への発生流入係数は、最も避難者が多かった 11 階の平均流動係数 0.45 人/秒を用いるものとする。

・避難者人数は、南側階段利用者 1,137 名と想定した。各階からの避難者を表３-３に示す。

・各階の避難開始については、避難訓練時の計画による順次避難（Ⅰフェーズ：0 秒、Ⅱフェーズ：120 秒、Ⅲフェーズ：420 秒）に従うものとした。

・シミュレーションは 0.1 秒ステップで行い、1 秒間隔で結果を算出するものとした。

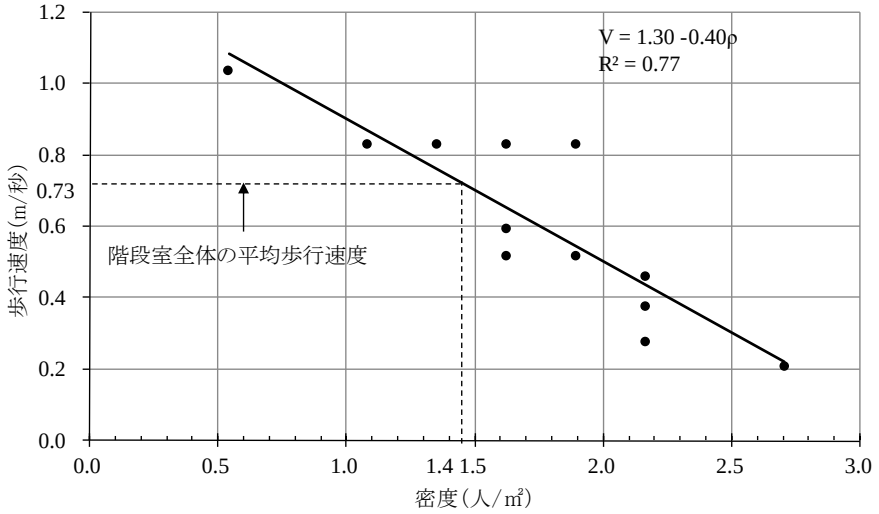


図３-14　階段部の密度と速度の関係

3.2.4. 階段避難シミュレーション結果の比較検討項目

階段避難シミュレーションと階段避難実測結果については、表３−３に示すように、

・避難時間：避難完了時間、各階からの平均避難時間

・階段室の流動状況：流動係数、複数階にわたる流動係数

・階段室内の混雑状況：階踊り場・中間踊り場・階段部の密度、階段室１層内の人数

の項目について比較するものとし、特に避難者の多い６階、11 階、13 階について比較検討する（表３−４）。各階の平均避難時間は、図２−８に示す各階からの被験者の避難時間と比較する。

表３−３　階段避難シミュレーション結果の比較検討項目

比較検討項目	階段避難シミュレーション結果
避難時間	避難完了時間、各階からの平均避難時間
階段室の流動状況	流動係数、複数階にわたる流動係数
階段室内の混雑状況	階踊り場・中間踊り場・階段部の密度、階段室１層内の人数

表３−４　各階の避難者数と避難開始時間

フェーズ	避難開始時間（秒）	階数	避難者数（人）
Ⅱ	120	25	4
		24	73
		23	46
		22	63
		21	32
Ⅲ	420	20	38
		19	4
		18	29
		17	47
		16	26
		15	25
		14	106
		13	122
Ⅱ	120	12	70
		11	148
		10	97
		9	26
		8	1
		7	5
Ⅰ	0	6	75
		5	29
		4	45
Ⅲ	420	3	22
		2	4
		総数	1,137

3.3. 階段避難シミュレーションの再現性検証

3.3.1. 避難時間

避難完了時間と各階からの避難時間について、シミュレーションと避難訓練結果の比較を行う。避難完了時間は、Ⅰフェーズ避難開始の15時13分から1階階段室出口までとする。シミュレーション結果は、25分22秒（避難訓練結果：24分45秒）となり、時系列に比較した際の相関係数はr=0.99と高い（図３-15）。また、各階からの平均避難時間も同様に、被験者の避難訓練実測結果と比較するとr=0.98と高い（図３-16）。なお、上層階の被験者の避難時間が短くなっているが、これは避難開始が概ね先頭集団のため、シミュレーション結果の平均値に比べると合流による滞留の影響が比較的少ないからと考える。

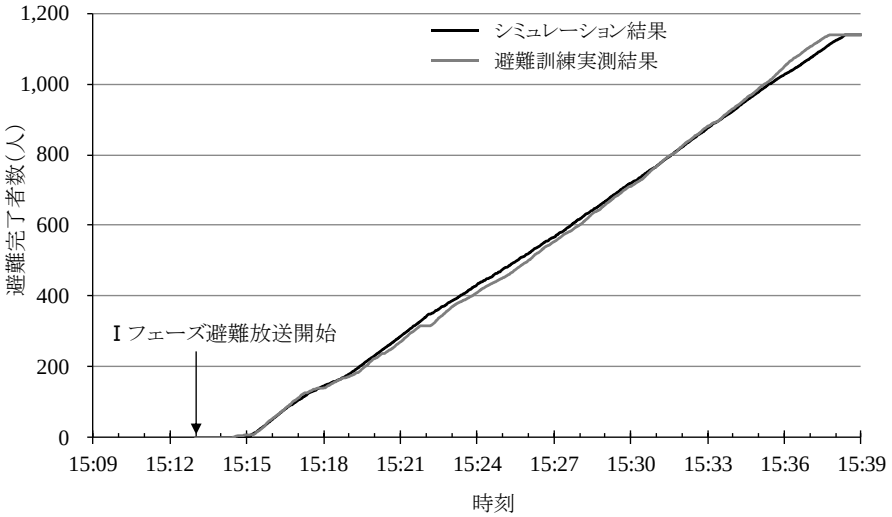


図３-15　避難完了時間（階段避難シミュレーションの結果）

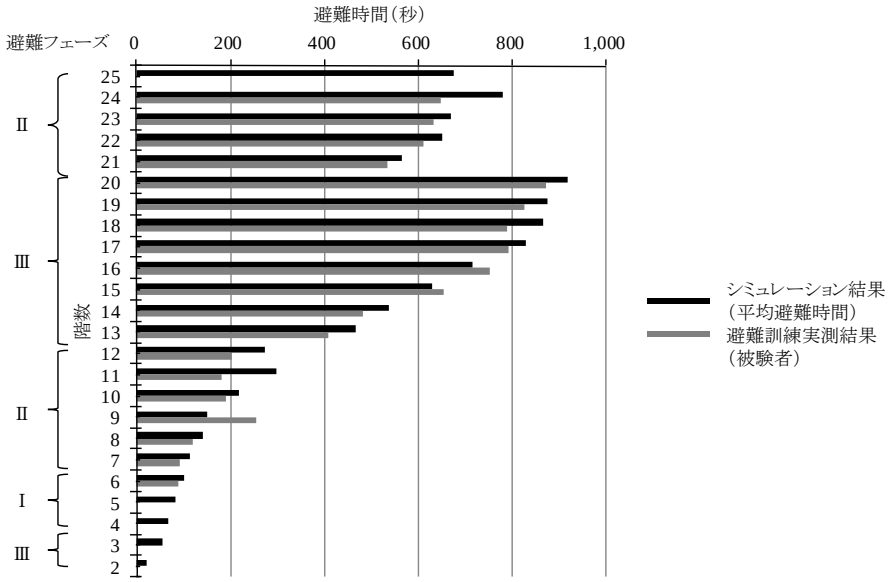


図３-16　各階からの平均避難時間（階段避難シミュレーションの結果）

3.3.2. 階段室内の流動状況

（１）階踊り場の流動係数

階段室内の流動状況の再現性確認のため、階踊り場の流動係数について、1 階、6 階、11 階、13 階の合流状況のシミュレーション結果と避難訓練結果について比較する。なお、合流状況については、上階からの流入断面 A と附室からの流入断面 B の流動係数とした。

1 階の流動係数は、最大 1.0 人/m/秒（避難訓練結果：最大 1.27 人/m/秒）、平均 0.83 人/m/秒（SD=0.1）（避難訓練結果：平均 0.88 人/m/秒）となっている（図３-17）。避難完了時間と同様に、1 階階段室出口での流動係数は概ね等しい結果となっている。

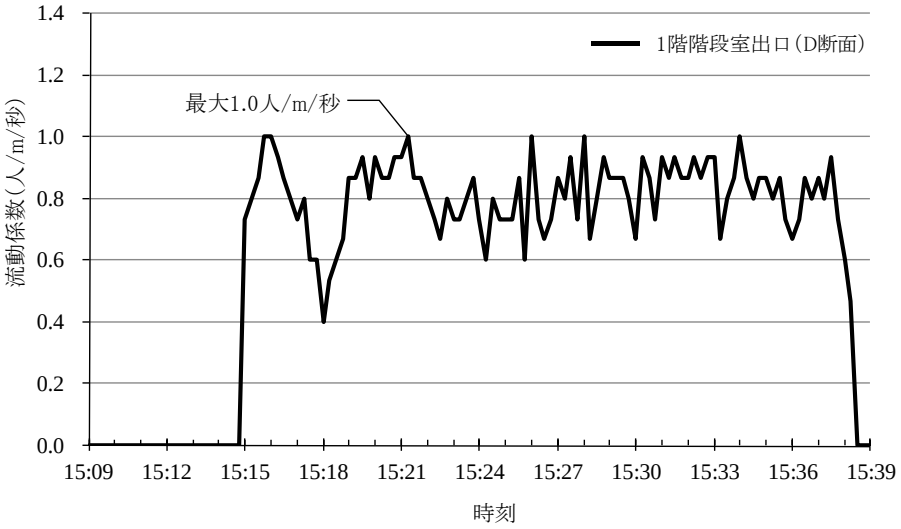


図３-17　１階の流動係数（階段避難シミュレーションの結果）

6 階の階踊り場では、B 断面から平均 0.45 人/m/秒（SD=0.06）の流入（避難訓練結果：平均 0.54 人/m/秒、最大 1.13 人/m/秒）、A 断面から平均 0.83 人/m/秒（SD=0.14）（避難訓練結果：平均 0.76 人/m/秒）となる結果となっている（図３-18）。

11 階の階踊り場では、合流時に B 断面から平均 0.38 人/m/秒（SD=0.06）の流入（避難訓練結果：平均 0.45 人/m/秒、最大 0.93 人/m/秒）、A 断面からは平均 0.48 人/m/秒（SD=0.14）（避難訓練結果：平均 0.31 人/m/秒）となっている（図３-19）。合流解消後には、A 断面からは平均 0.88 人/m/秒（SD=0.18）（避難訓練結果：平均 0.71 人/m/秒）と避難訓練結果と同様に約 2 倍まで増加する結果となっている。なお、6 階、11 階の附室（B 断面）からの流動係数は、11 階の避難訓練結果の平均値 0.45 人/m/秒を用いていることから、図２-16、図２-17 に示す避難訓練結果に見られたピーク値が表れていない結果となっている。

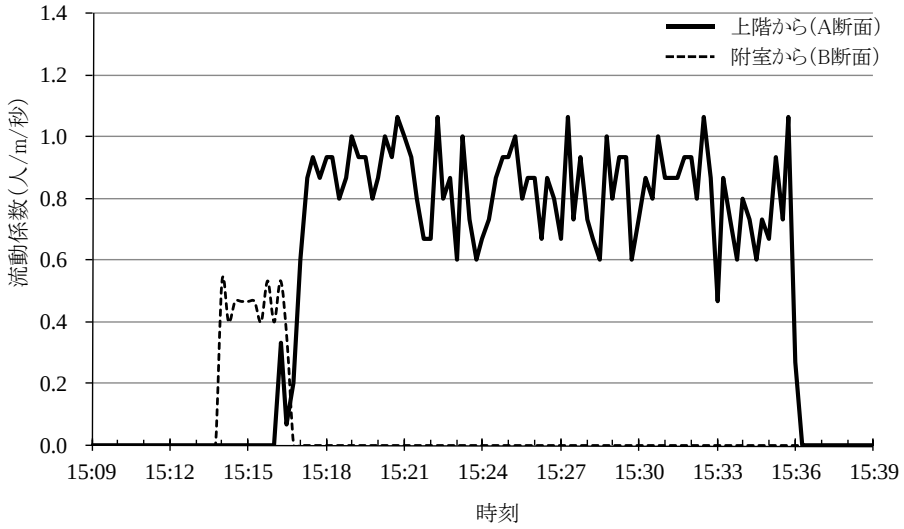


図３-18　6 階の階踊り場の流動係数（階段避難シミュレーションの結果）

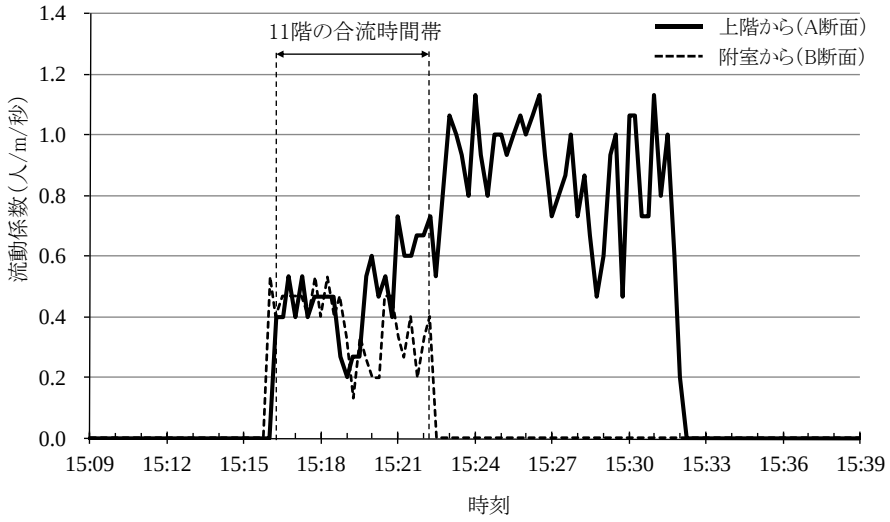


図３-19　11 階の階踊り場の流動係数（階段避難シミュレーションの結果）

13 階の階踊り場では、合流時に B 断面から平均 0.31 人/m/秒（SD=0.10）の流入（避難訓練結果：平均 0.48 人/m/秒、最大 0.87 人/m/秒）、A 断面からは平均 0.56 人/m/秒（SD=0.18）（避難訓練結果：平均 0.35 人/m/秒）となっている（図３-20）。合流解消後には、A 断面からは平均 0.72 人/m/秒（SD=0.32）（避難訓練結果：平均 0.67 人/m/秒）と避難訓練結果と同様に約 2 倍まで増加する結果となっている。なお、13 階附室（B 断面）からの流動係数も、6 階、11 階と同様に平均値を用いていることから、図２-18 に示す避難訓練結果に見られたピーク値が表れていない結果となっている。

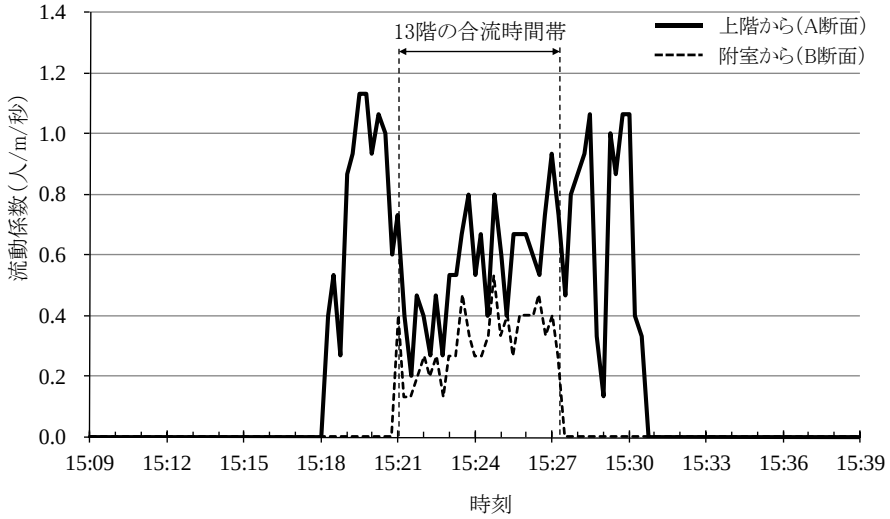


図３-20　13 階の階踊り場の流動係数（階段避難シミュレーションの結果）

（２）複数階にわたる流動係数

図３-21 に 13 階、14 階、15 階における下階への流出断面 C の流動係数を示す。13 階の階踊り場から 12 階への流動係数は平均 0.72 人/m/秒（SD=0.17）となっている。その時、14 階の階踊り場から 13 階への流動係数は平均 0.49 人/m/秒（SD=0.20）と減少している。また、14 階においても合流が生じており、15 階の階踊り場から 14 階への流動係数は平均 0.36 人/m/秒（SD=0.26）と更に減少している。このように合流が生じた階の上階では流動係数が減少していることが確認できる。

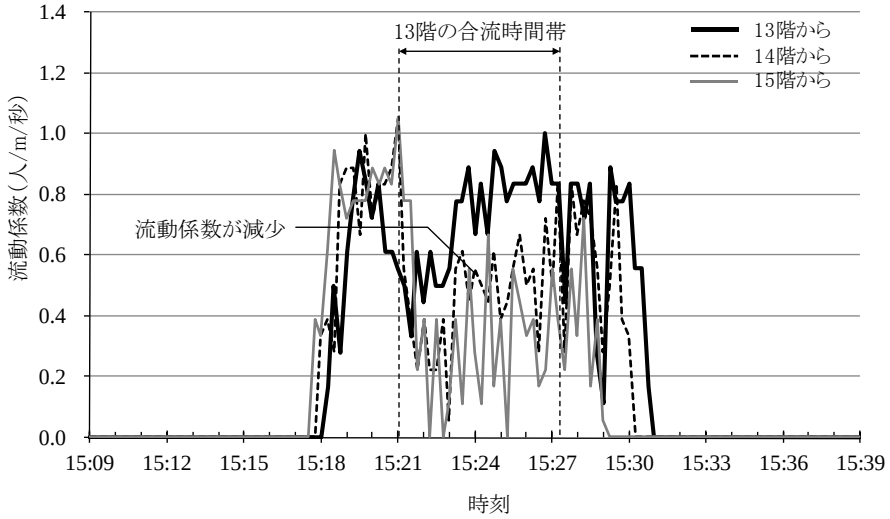


図３-21　複数階にわたる流動係数（階段避難シミュレーションの結果）

3.3.3. 階段室内の混雑状況

（１）階踊り場内の密度

混雑状況の再現性を確認するため、階踊り場内の密度について、6 階、11 階、13 階のシミュレーション結果と避難訓練結果について比較する。

6 階の密度は、最大 2.61 人/㎡（階踊り場内に 12 人）（避難訓練結果： 2.83 人/㎡）となっている（図３-22）。11 階の密度は、合流が生じている間に平均 2.16 人/㎡（SD=0.94）、最大 3.38 人/㎡（階踊り場内に 18 人）（避難訓練結果：最大 3.57 人/㎡）となり、合流解消後には平均 1.75 人/㎡（SD=0.39）（避難訓練結果：平均 1.44 人/㎡）まで減少している（図３-23）。なお、15 時 17～18 分に見られる避難訓練結果値との違いについては、階段室への発生流入係数が平均値を用いており、ピーク値とならないためと考えられる。

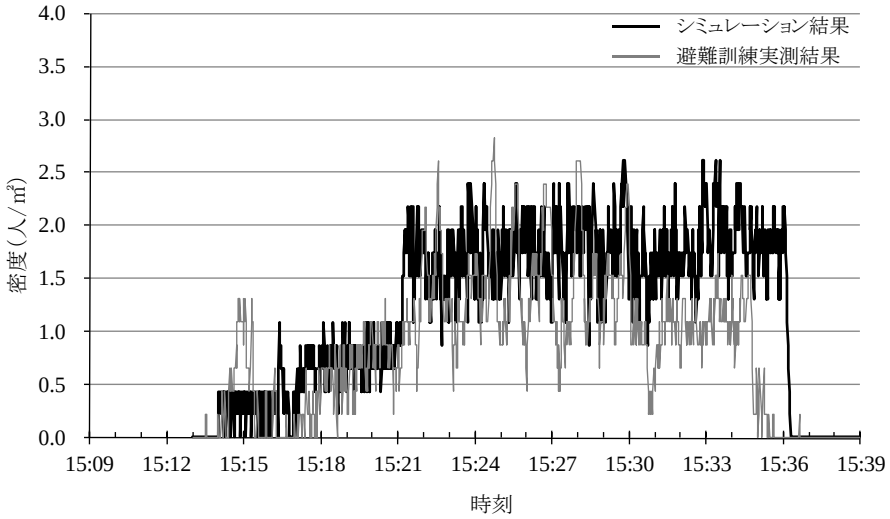


図３-22　6階踊り場内の密度（階段避難シミュレーションの結果）

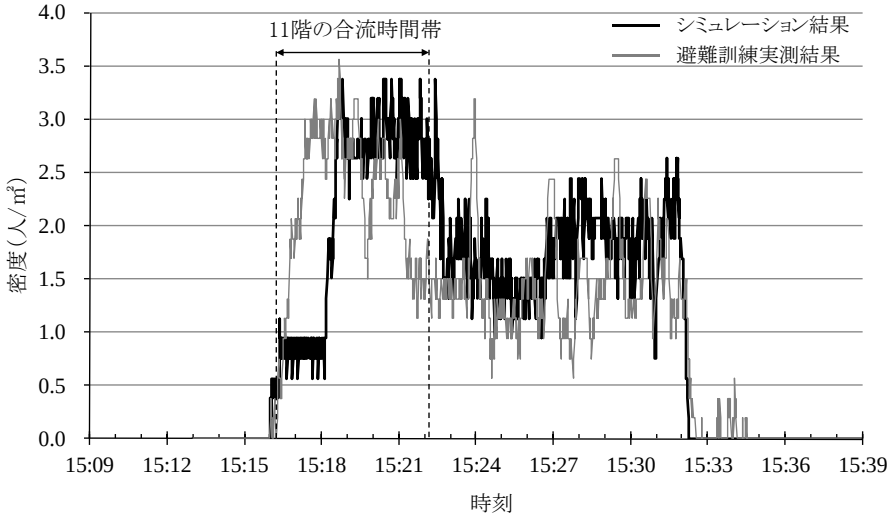


図３-23　11階踊り場内の密度（階段避難シミュレーションの結果）

同様に 13 階の密度は、合流が生じている間に平均 2.54 人/㎡（SD=0.33）、最大 3.38 人/㎡（階踊り場内に 18 人）（避難訓練結果：最大 3.38 人/㎡）となり、合流解消後には平均 1.93 人/㎡（SD=0.44）（避難訓練結果：平均 1.51 人/㎡）まで減少している（図３-22）。

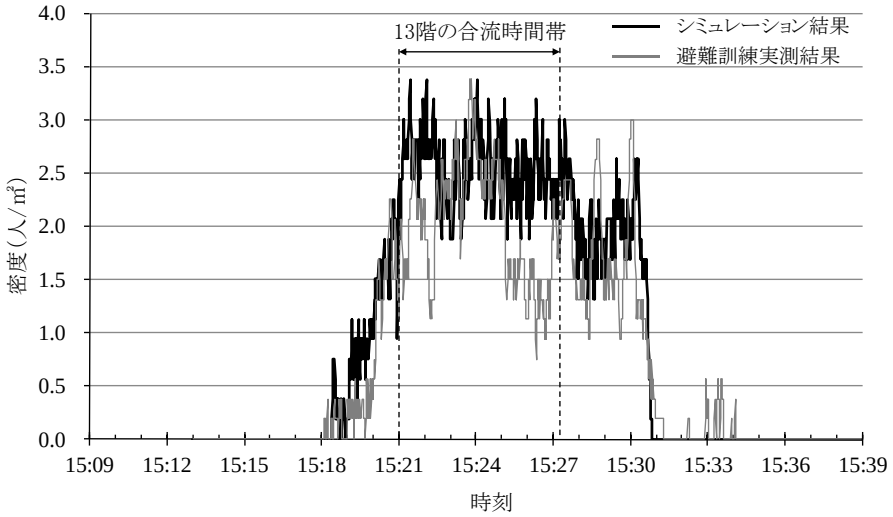


図３-24　13 階踊り場内の密度（階段避難シミュレーションの結果）

（２）中間踊り場内の密度

中間踊り場内の密度について、13 階中間踊り場のシミュレーション結果を図３-25 に示す。13 階中間踊り場の密度は、13 階の合流が生じている間には平均 1.78 人/㎡（SD=0.37）（避難訓練結果：平均 1.79 人/㎡）、最大 2.57 人/㎡（中間踊り場内に 11 人）（避難訓練結果：最大 3.03 人/㎡）となっている。

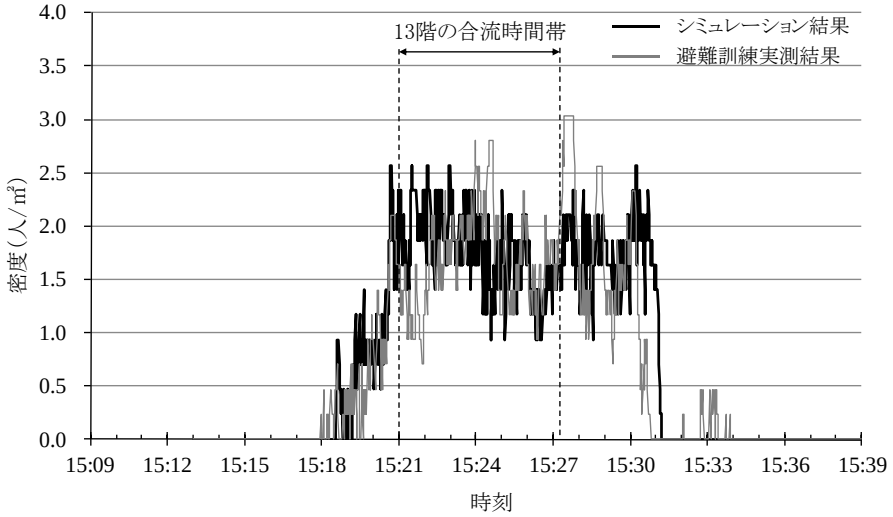


図３-25　13 階中間踊り場内の密度（階段避難シミュレーションの結果）

（３）階段部内の密度

階段部内の密度について、13-14 階階段部のシミュレーション結果を示す。13-14 階上階段部の密度は、13 階で合流が生じている間に平均 2.14 人/㎡（SD=0.32）（避難訓練結果：平均 2.35 人/㎡）、最大 2.98 人/㎡（階段部内に 11 人）（避難訓練結果：最大 3.25 人/㎡）となっている（図３-26）。13-14 階下階段部の密度は、13 階で合流が生じている間に平均 2.16 人/㎡（SD=0.36）（避難訓練結果：平均 2.53 人/㎡）、最大 3.2 人/㎡（階段部内に 12 人）（避難訓練結果：最大 3.52 人/㎡）となっている（図３-27）。

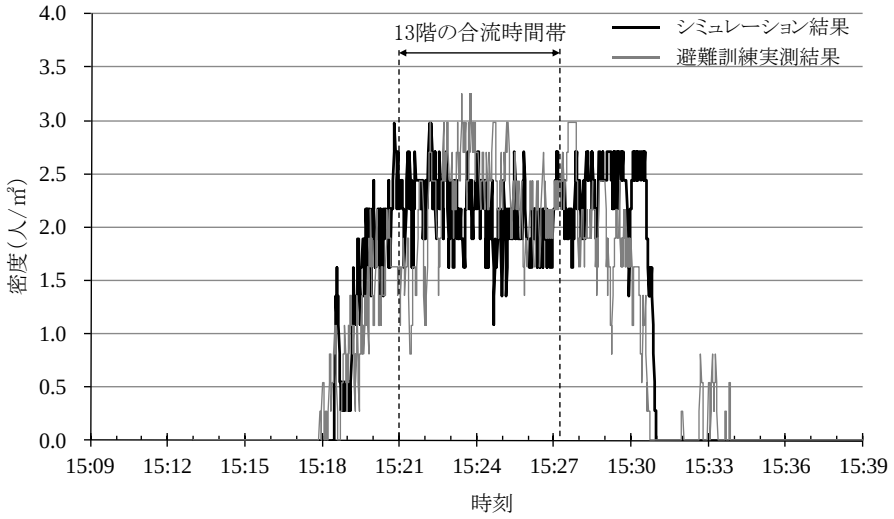


図３-26　13-14 階上階段部内の密度（階段避難シミュレーションの結果）

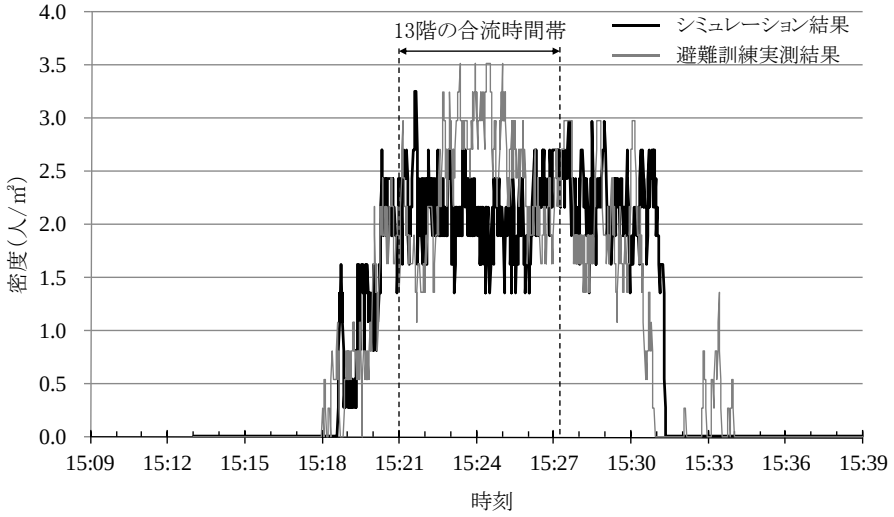


図３-27　13-14 階下階段部内の密度（階段避難シミュレーションの結果）

（４）階段室１層内の人数

階段室 1 層内の人数について、6 階、11 階、13 階のシミュレーション結果を示す。6 階階段室 1 層内の人数は最大 44 人（避難訓練結果：最大 42 人）となり、避難訓練結果と時系列に比較した際の相関係数は r=0.82 となっている（図３-28）。11 階階段室 1 層内の人数は最大 46 人（避難訓練結果：最大 44 人）となり、相関係数は r=0.69 となっている（図３-29）。なお、階踊り場の密度（図３-23）と同様に、15 時 17～18 分に見られる避難訓練結果値との違いについては、階段室への発生流入係数が平均値を用いていることから、ピーク値とならないためと考えられる。

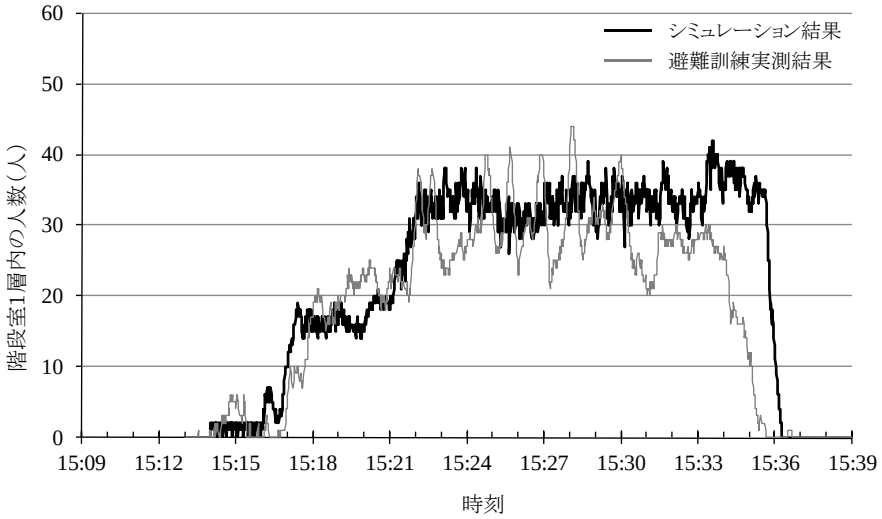


図３-28　6階階段室1層内の人数（階段避難シミュレーションの結果）

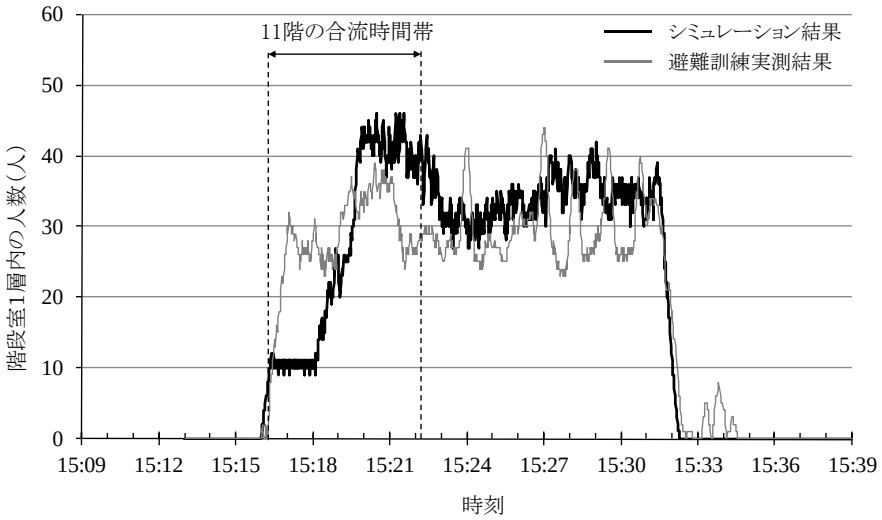


図３-29　11階階段室1層内の人数（階段避難シミュレーションの結果）

同様に13階階段室1層内の人数は最大48人（避難訓練結果：最大48人）となり、相関係数はr=0.77となっている（図３-30）。

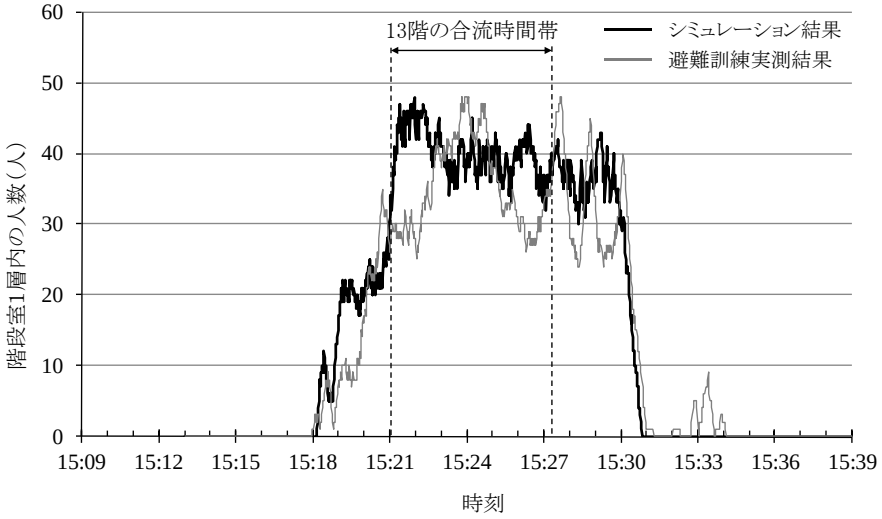


図３-30　13階階段室1層内の人数（階段避難シミュレーションの結果）

（５）階段室１層内の密度と流動係数の関係

図３-31、32、33 は、6 階、11 階、13 階について 1 秒ごとの階段室 1 層内の密度と C 断面の流動係数の同時刻値（階段室 1 層内への流入が見られる時間帯）をプロットしたものである。ここでの密度は、図２－４(b)に示す階段室 1 層の水平投影面積により算出した。また、流動係数の測定位置は、図２-13 における階踊り場から下階への流出断面 C とし、15 秒間の移動平均値とした。図２-32、33、34 同様に、原点を通過する二次曲線で近似を試みた。N：流動係数（人/m/秒）、ρ：階段室 1 層内の密度（人/㎡）とした場合における階段室 1 層内の密度と流動係数の関係を式（５）（６）（７）に表し、図に実線で示す。各式の決定係数はそれぞれ R^2=0.12、-0.27、0.16 である。

$$N = 1.14\rho - 0.60\rho^2 \quad (5)$$

$$N = 0.98\rho - 0.30\rho^2 \quad (6)$$

$$N = 0.95\rho - 0.28\rho^2 \quad (7)$$

実測結果では、密度が増加するにつれて流動量は増加しており、一定の密度になると流動量が限界に達し、流動量の低下と停止を確認している。図３-31、32、33 に示すシミュレーション結果では、密度が増加するにつれて流動量は増加しており、一定の密度になると流動量の低下が見られるが、停止状態までは確認できない。これは、非常に短い停止状態が生じていることが原因と考えられる。このことから、一定の密度になると流動量が低下する状態までを本シミュレーションの適応範囲とする。

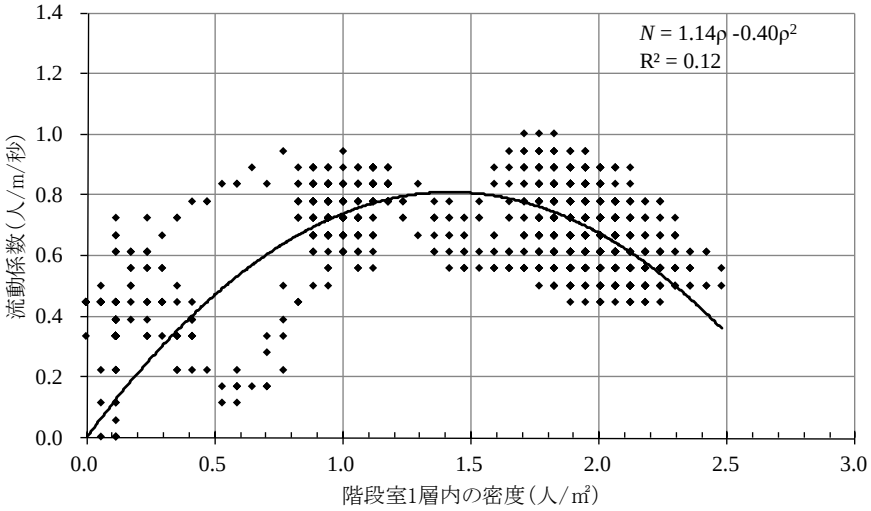


図３-31　6 階階段室１層内の密度と流動係数の関係（階段避難シミュレーション結果）

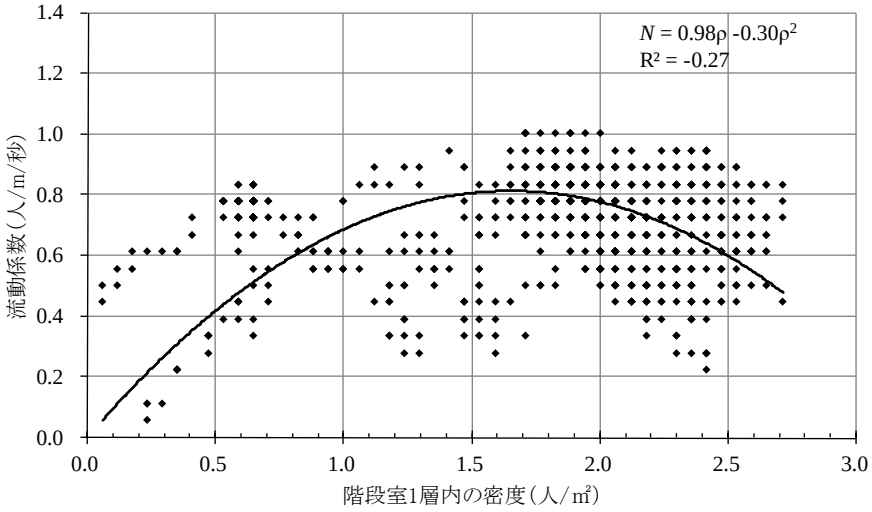


図３-32　11 階階段室１層内の密度と流動係数の関係（階段避難シミュレーション結果）

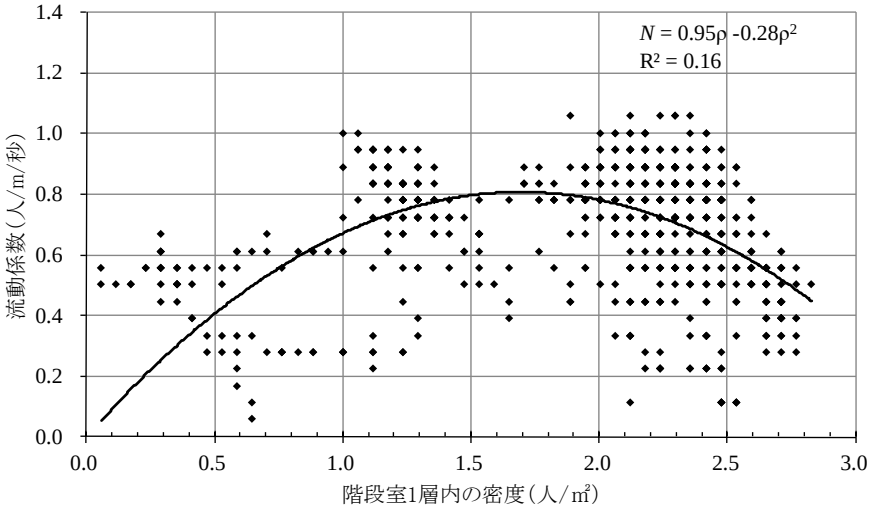


図３-33　13 階階段室１層内の密度と流動係数の関係（階段避難シミュレーション結果）

3.4. まとめ

本章では、避難訓練実測結果に基づき階段室のモデル化を試み、階段避難シミュレーションの再現性について検証した。階段避難シミュレーションの再現性については、滞留発生現象に対して、滞留時間、流動状況、階段室内の混雑度について比較を行った。以下に、その結果を要約する。

（１）階段室のモデル化

・階段避難シミュレーションモデルは、セルオートマトンモデルを用い、エクセルによる簡便なシステム化を図った。空間のモデル化に際しては、避難訓練実測結果の階段室内の最大収容人数により、各階について階踊り場、階段部、中間踊り場から構成される階段室のセル表現化を行った。階踊り場のセルの大きさは基本サイズを 0.52m×0.48m(=1 人当たりの必要滞留面積 0.25 ㎡/人)とし、階段部は 2 段を 1 人が占有するものとした。

・階段部内では、混雑に応じて減速することを考慮し、階段部内の歩行速度 V（m/秒）と密度 ρ（人/㎡）との関係として、V=1.30-0.40 ρ を用いた。

（２）階段避難シミュレーションによる滞留発生の再現性の検証

・避難完了時間は、25 分 22 秒（避難訓練結果：24 分 46 秒)、避難完了者数について避難訓練結果と時系列に比較した際の相関係数は r=0.99 となり、各階からの平均避難時間との比較では r=0.98 と高く、概ね滞留時間を再現している。

・流動状況については、1 階の流動係数は、平均 0.83 人/m/秒（避難訓練結果：平均 0.88 人/m/秒)。11 階の階踊り場では、合流時に B 断面から平均 0.38 人/m/秒の流入（避難訓練結果：平均 0.45 人/m/秒)、A 断面からは平均 0.48 人/m/秒（避難訓練結果：平均 0.31 人/m/秒）となっており、合流解消後には、A 断面からは平均 0.88 人/m/秒（避難訓練結果：平均 0.71 人/m/秒）と避難訓練結果と同様に約 2 倍まで増加する結果となっている。また、13 階から 15 階について、合流が生じた階の上階では流動係数が減少している。

・階段室内の混雑度として、階段室 1 層内の人数は 6 階では最大 44 人（避難訓練結果：最大 42 人)、時系列に比較した際の相関係数は r=0.82 となり、同様に 11 階では最大 46 人（避難訓練結果：最大 44 人）r=0.69、13 階は最大 48 人（避難訓練結果：最大 48 人）相関係数 r=0.77 となった。

・階段室 1 層内の密度と流動係数の関係として、密度が増加するにつれて流動量は増加しており、一定の密度になると流動量が低下している。

・以上のことから、滞留時間、流動状況、階段室内の混雑度について、本研究での目的に即した再現精度であることがわかった。

第4章　滞留発生を避ける避難方法の検討と提案

4.1.　アンケートによる滞留時間の評価

本章では、2 章における全館避難訓練の参加者に対して実施したアンケート調査を分析し、滞留時間に対する心理的影響度について評価指標を検討する。次に第３章で構築した階段避難シミュレーションにより、評価指標をもとに滞留発生を避ける避難方法を検討・提案する。次に、アンケート調査について述べる。

4.1.1.　アンケート調査の概要

避難訓練直後の 2012 年 10 月 10 日（水）から 1 週間、避難訓練参加者を対象として、以下のアンケート調査を実施した。

・調査対象：避難訓練参加者（3,304 名）、有効回答数（226 票）

・調査方法：イントラネットによる調査票配信・回収

・調査期間：2012 年 10 月 10 日（水）～2012 年 10 月 17 日（水）

・調査項目：①避難開始階、②避難開始のタイミング、③避難開始待ち時間の許容度、④階段室内の混雑状況、⑤階段室内の混雑許容度、⑥混雑の継続時間、⑦避難開始前の待機場所、⑧自由回答

4.1.2.　アンケート調査結果

（１）避難開始に関する回答者属性

アンケート回答者の避難開始階は 14 階、23 階、11 階、12 階と順に多く、避難訓練参加者と同傾向である（図４－１）。

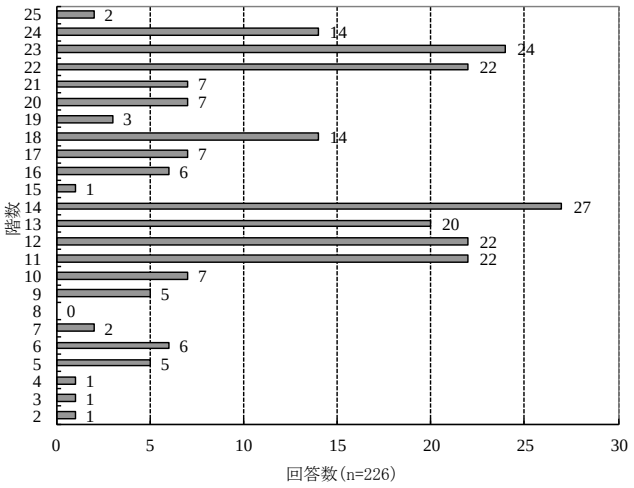


図４－１　アンケート回答者の避難開始階（n=226）

（２）避難開始前の待機場所について

避難訓練の待機場所は、図４－２に示すように、53%が「フロア室内」が良いとしている。次いで、「階段附室の前（エレベータ前)」は 14%となっている。「階段室内」については 1%と少ない。

（３）避難開始待ち時間の許容度

避難開始待ち時間については、図４－３に示すように、「我慢できる」「まあ我慢できる」で 71%を占める。一方、Ⅲフェーズについては、Ⅰフェーズ避難開始から 7 分後の避難となることもあり、41%が「あまり我慢できない」「我慢できない」としている。

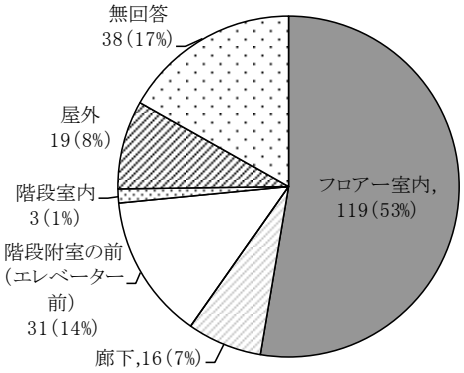


図４－２　避難開始前の待機場所（n=226）

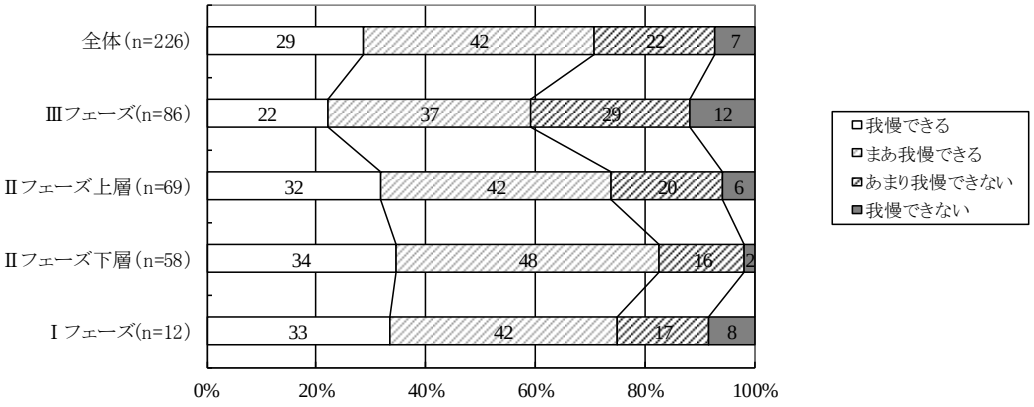


図４－３　避難開始待ち時間の許容度（n=226）

（４）避難開始のタイミング

避難開始のタイミングは、図４−４に示すように、避難放送終了後すぐにと回答した者が78%を占めている。次いで、14%が避難放送終了後、しばらく経った後に避難している。

（５）階段室内の混雑状況について

階段室内の混雑状況については、図４−５に示すように、Ⅲフェーズの避難者で「ずっと混雑していた」が 58%と多く、次いでⅡフェーズ上層階での「一時的に混雑していた」が55%と多い。Ⅰフェーズでは、「混雑していなかった」が４割を占める。

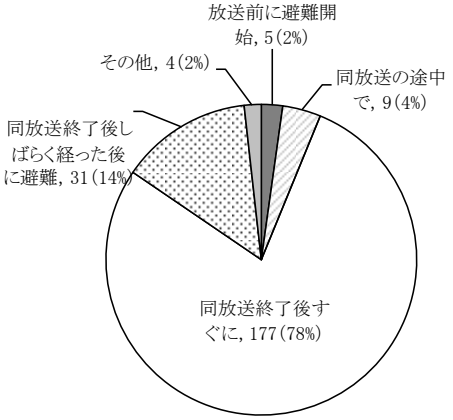


図４−４　避難開始のタイミング（n=226）

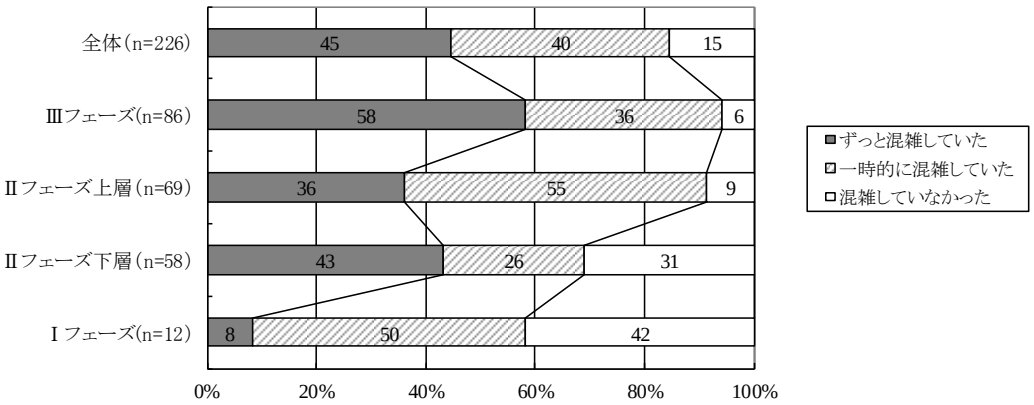


図４−５　階段室内の混雑状況（n=226）

階段室内の混雑状況を「我慢できる」「まあ我慢できる」と 73%の避難者が回答している（図４－６）。混雑していると回答の多いⅢフェーズの避難者では、61%が「我慢できる」「まあ我慢できる」としている（図４－７）。特に「一時的に混雑していた」と回答している避難者については、82%が「我慢できる」「まあ我慢できる」としている。

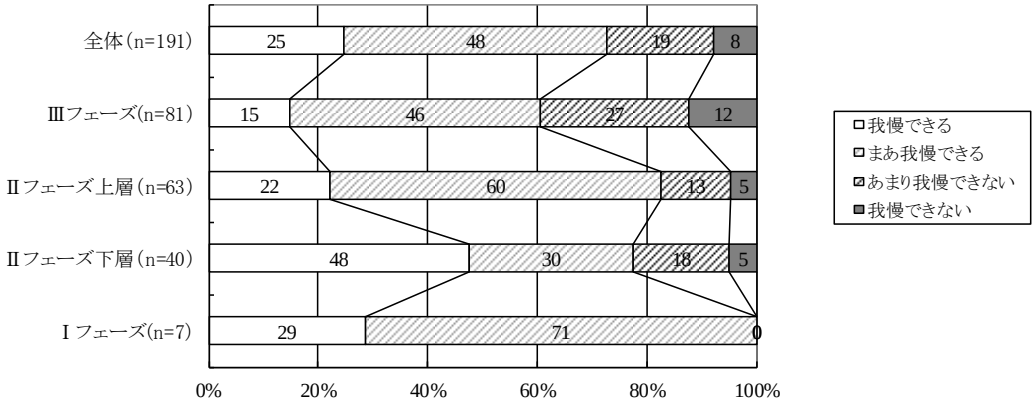


図４－６　階段室内の混雑許容度（n=191）

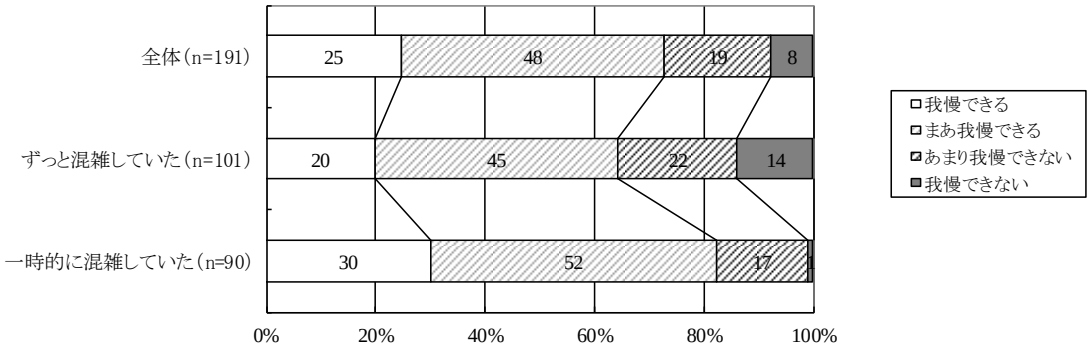


図４－７　階段室内の混雑状況と混雑許容度（n=191）

図２－８の避難訓練時における被験者の避難時間が 15 分程度であることから、実際の混雑継続時間は最大 15 分程度と考えられる。アンケート結果によると、混雑の継続時間は、6～10 分以下であれば 69%が「我慢できる」「まあ我慢できる」と回答している（図４－８）。11 分以上～15 分になると 60%が「あまり我慢できない」「我慢できない」としている。

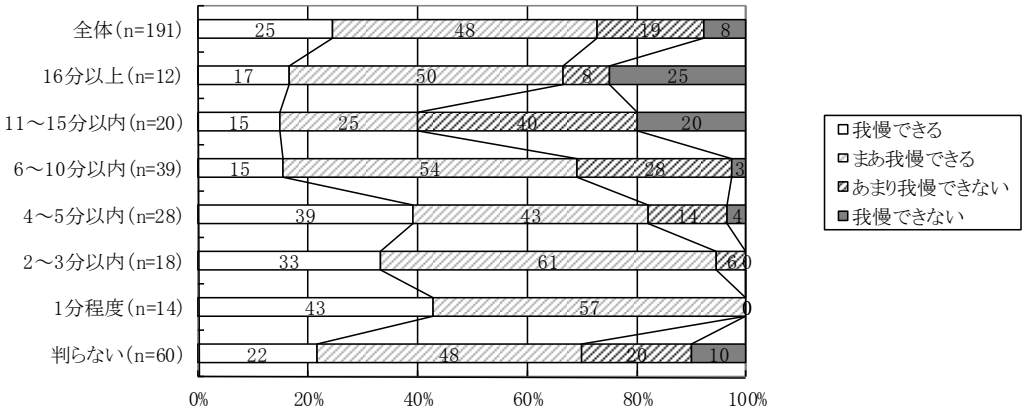


図４－８　階段室内の混雑継続時間と混雑許容度（n=191）

（６）自由回答について

アンケート調査の自由回答では、階段室内の混雑から、「実際の火災時の冷静な避難行動」、「実際の火災時の混雑」といったより混雑してしまうだろうという不安や危惧についての回答が最も多く、「ビル内の人数把握」、「避難訓練の全員参加」といった避難者数に関する意見もあった（表４－１）。以下に主な内容を示す（以降同様）。

・「今回は訓練だったのでスムーズに行ったと思うが、実際になると我も我もと混乱が始まると思う。その際、外部状況も含めて館内放送の内容やタイミング等を工夫し、落ち着いた行動/誘導を指南する策をさらに検討すると良いと思う（17 階避難者）」

・「今回は訓練だったが、本番でかつ火事が続いている状態であれば、避難のための待ち時間は長く感じると思うし、混乱も起きると思う（22 階避難者）」

・「避難訓練であり、業務上参加できなかった方も大勢いたと思われる。実際には訓練の何倍の人数を想定すべきなのか、ビル内に居た人数を把握すべきではないか？また、各フロアに被災時に何人の人間がいたのか、それらの人が確実に避難できたのか、をどうやって確認するのか？検討及び対処を期待（9 階避難者）」

次いで、避難放送の「内容」の判りやすさ、「英語対応」といった意見も見られた。

・「放送の内容をもう少し簡潔にすると良いと思う。またフロア別の避難指示の際、「階段の混雑を避けるために、指示のあったフロアは速やかに避難、それ以外のフロアは待機すること」と補足すると良いと思う（24 階避難者）」

・「緊急放送を英語でも流して欲しい。あれだけの量の情報を混乱時に通訳できない。また、英語しかわからない人は、あれだけの日本語を聞いていると不安感に駆られ、勝手な行動を始めると思う（25 階避難者）」

また、「順次避難訓練計画」については、理解不足に対する「事前説明」、「順番」への示唆、「屋外避難場所」「非常食の配布」など屋外の混雑についての意見もあった。

・「階段の混雑を緩和するために、時間差避難を行ったということは、後で初めて知った。昨日の非常放送ではその真意が理解できなかったので、そういうことも含めて放送の中で告知してほしい（11 階避難者）」

・「全社員が避難した場合、会社前から人があふれてしまうと思う。最終的にどこに避難すればよいのか判らなかった（14 階避難者）」

・「避難開始が早い階だったので、比較的スムーズに動けた。非常食を頂く際に行列ができており、それが階段にも続いていたようだ。折り返して並ぶようにすれば更にスムーズだったのではないかと思う（6 階避難者）」

特に「階段室扉への接触の危惧」については多く、「歩行困難者への対応」、火災による「片側階段のみ使用可能な場合の対応」、「避難誘導」など今後の課題も見られた。

・「非常階段の扉が階段側に開くため、階段を下りている人と扉がぶつかりそうになることが何回もあった（18 階避難者）」

・「身体的にケアが必要な方は、通常の避難タイミングよりも優先しての避難が望ましいの

ではないか。混雑した非常階段で目の不自由な方が避難していた（12 階避難者）」

・「火災エリアに近い階段は使えない可能性が高いが、その考慮がなかった。片側の階段しか使えなくなった場合に、どれくらい混乱が起きるのかも想定すべきだと思う（23 階避難者）」

表４－１　自由回答（n=148）

項目	回答内容	件数（複数回答）	
階段室内の混雑	実際の火災時の冷静な避難行動が必要	32	
	実際の火災時の混雑が心配	29	
	今回の混雑状況についての感想	5	
	避難訓練の全員参加が必要	2	
	ビル内の人数把握が必要	2	70
避難放送	内容がわかりにくい	14	
	英語対応が必要	4	18
順次避難計画	順次避難計画の事前説明が必要	5	
	順次避難の順番	5	
	順次避難計画の実行性	4	14
避難場所	屋外避難場所についての意見	6	
	屋外での混雑を懸念	5	11
避難時の課題点	階段室扉が開いた際の接触を危惧	14	
	歩行困難者への対応が必要	8	
	片側階段のみ使用可能な場合の検討が必要	7	
	避難誘導の不備	4	
	ヘルメットの配布が無い	3	
	参加者の態度が良くない	1	
	机の下への避難	1	38
その他	好意的な評価	9	
	安否確認メールの不具合	2	
	その他	15	26
全体（n=148）			177

（7）アンケート結果のまとめ

アンケート調査によれば、①避難開始前の状況として、避難訓練の待機場所（n=227）については、53%が「フロア室内」が良いとしている。②避難開始待ち時間については、Ⅲフェーズ（n=78）はⅠフェーズ避難開始から7分後の避難となることもあり、41%が「あまり我慢できない」「我慢できない」としている。③避難開始のタイミング（n=227）は、「避難放送終了後すぐに」が78%と多い。④階段室内の混雑状況については、Ⅲフェーズの避難者（n=87）のうち「ずっと混雑していた」が57%と多く、次いでⅡフェーズ上層階（n=69）のうち「一時的に混雑していた」を55%が回答している。特に「一時的に混雑していた」と回答している避難者（n=91）の 82%が「我慢できる」「まあ我慢できる」としており、一時的な混雑であれば我慢できるものと考える。また、混雑継続時間をみると11分以上～15分と回答した避難者（n=20）の60%が「あまり我慢できない」「我慢できない」としている。

アンケート調査の自由回答によれば、階段室内の混雑から、「実際の火災時の冷静な避難行動」、「実際の火災時の混雑」といったより混雑してしまうだろうという不安や危惧についての回答が最も多く、「ビル内の人数把握」、「避難訓練の全員参加」といった避難者数に関する意見もあった。避難放送の「内容」の判りやすさ、「英語対応」、「順次避難訓練計画」については、理解不足に対する「事前説明」、「順番」への示唆、「屋外避難場所」など屋外の混雑についての意見もあった。特に「階段室扉への接触」の危惧については多く、「歩行困難者への対応」、「片側階段のみ使用可能な場合の対応」、「避難誘導」など今後の課題も見られた。

4.2.　避難時における潜在的な影響要因と評価指標

避難安全確認の要件[17]として、フラッシュオーバーに遭遇しない、火煙に暴露されない、および群衆雪崩に巻き込まれないことが挙げられる。アンケート結果によると、避難時における影響要因として、主に身体的な影響として、階段を下りている人と階段室の扉が接触しそうになることへの危惧、混雑による蒸し暑さ、歩行困難者の身体的な苦痛などが意見として挙げられている。また、心理的な影響として、混雑継続時間に対する焦りや苛立ちなどが挙げられている。これらは、階段室内の混雑に起因するものと考えられることから、滞留時間の軽減を安全性の評価軸として重視する。

以上より、評価指標を表４－２に示す。避難効率性として、避難時間の全体が長時間しているかということについては、「避難完了時間」を評価する。また、安全性として、階段室内で滞留が生じているかということについては、「各階からの避難時間を単独歩行時間と比較」により評価する。階踊り場での合流の影響により、連続した長い停止時間が生じ、階踊り場で最も密度が高くなっていることから、避難者の多い階の「階踊り場の密度」、および同階に対して一定値以上の密度となる「混雑継続時間」により評価を行うものとする。

表４－２　避難計画の評価指標

避難計画の評価指標		避難結果
避難効率性		避難完了時間
安全性	滞留時間	各階からの避難時間を単独歩行時間と比較 （各階からの避難時間－単独歩行時間）
	混雑度	階踊り場の密度 混雑継続時間

4.3.　順次避難計画の策定手順

次節にて、避難方法の検討を行うにあたり、順次避難計画の策定手順について一案を示す。順次避難計画については、危険性の高さに応じて避難フェーズに分け、時間差を設け順番に避難するものとする。なお、階段室は、安全区画として附室を設け、開口部の防火及び遮煙性能を保有するなど、火災からの避難安全性を確保していることを前提とする。以下に順次避難計画の策定手順を示す。

１）避難者数を設定する。

在館者数を把握し、各階の避難者数を設定する。

２）危険性の高さに応じ、避難フェーズに分ける[43)]。

①出火階＋その直上階（出火階より下の階に避難する）

②上層階（煙が伝搬する恐れから上層階を優先避難する）

③下層階

３）避難開始時間を設定する。

避難フェーズごとの放送内容をもとに最小避難放送時間を決定し、連続しないように放送間隔を設け、避難開始時間を設定する。

なお、順次避難計画における避難時間[17)]は、最初の避難開始から各フェーズの避難開始までの時間を待機時間とし、各フェーズの避難開始から避難完了までを階段避難時間とする（図４－９）。各避難者の待機時間と階段避難時間を避難行動時間とし、最初の避難開始から避難者最後の完了時間を避難完了時間とする。

４）避難開始時間を最適化する。

安全面より①階段室内では上階からと階避難者との合流などによる混雑を避け、階段避難時間（滞留時間）を最小にする、避難効率性より②避難時間全体をできるだけ最小化し、待機時間を最小にするなど、避難開始時間を調整し最適化を図る。

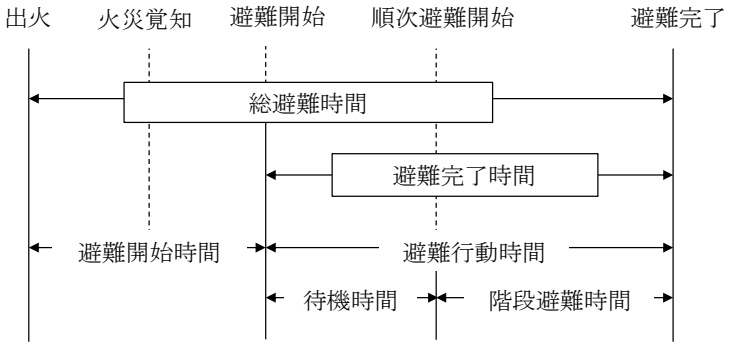


図４－９　順次避難計画における避難時間

4.4. 階段避難シミュレーションによる避難方法のケーススタディ

本節では、検討した評価指標（避難効率性、安全性（滞留時間、混雑度））をもとに、ある条件下の高層ビルにおける有効な避難方法について、前節の順次避難計画の策定手順に従い、階段避難シミュレーションを用いて検討する（図４-10）。まず、全館一斉避難と順次避難を比較し、順次避難計画の有効性について確認する。次に、順次避難計画による階段避難の評価として、避難フェーズ間隔の差異と発災シナリオ（出火階による違い）による影響について検証する。

なお、評価指標として、階踊り場の密度については、避難者数が多く、階踊り場での合流の影響が大きかった 13 階について評価する。また、その混雑継続時間については、避難訓練結果（2.2.9 項の階踊り場の密度）より、13 階合流時の平均値 2.36 人/㎡以上となる時間の合計時間について評価する。

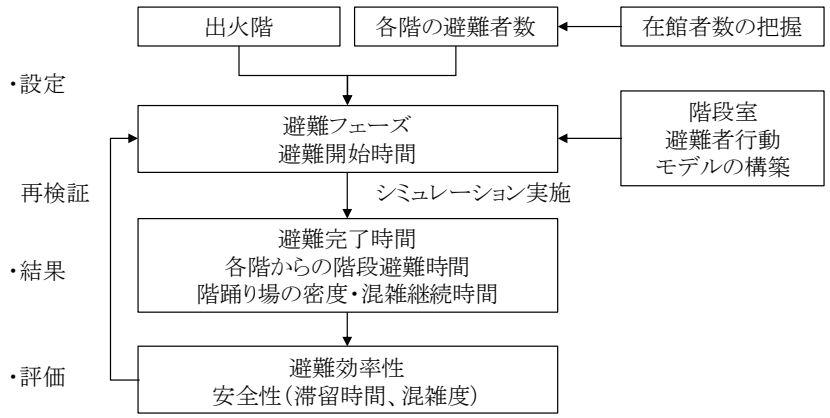


図４-10　階段避難シミュレーションによる検証手順

4.4.1. 全館一斉避難による階段避難の評価

一般的には全館一斉避難は、避難完了時間が短いとされるが、階段室内の混雑状況については混雑・高密度状態になると予想され、在館者の避難時間の遅延や歩行への影響など危険な状態を引き起こすことが考えられる。全館一斉避難と順次避難を比較し、順次避難計画の有効性について検証する。

１）シミュレーション条件

・3 章で構築した階段避難シミュレーションモデルおよび設定条件（各階の避難者数、歩行速度など）を用いる

・そのうち、全館一斉避難の避難開始時間は、0 秒後に全員が避難を開始するものとし、順次避難については、避難訓練の場合（低層階の出火）について比較する（表４−３）。

避難開始時間は、

Ⅰフェーズ：「4・5・6 階」　　（避難開始時間：0 秒後）

Ⅱフェーズ：「7～12、21～25 階」（避難開始時間：2 分後）

Ⅲフェーズ：「3、13～20 階」　　（避難開始時間：7 分後）

とする。

表４−３　避難フェーズ間隔（順次避難の場合）

<table>
<tr><th>階数</th><th>避難者数(人)</th><th>Ⅰ</th><th>Ⅱ</th><th>Ⅲ</th></tr>
<tr><td>25</td><td>4</td><td rowspan="12"></td><td rowspan="5">2分後避難開始</td><td rowspan="5"></td></tr>
<tr><td>24</td><td>73</td></tr>
<tr><td>23</td><td>46</td></tr>
<tr><td>22</td><td>63</td></tr>
<tr><td>21</td><td>32</td></tr>
<tr><td>20</td><td>38</td><td rowspan="8"></td><td rowspan="8">7分後避難開始</td></tr>
<tr><td>19</td><td>4</td></tr>
<tr><td>18</td><td>29</td></tr>
<tr><td>17</td><td>47</td></tr>
<tr><td>16</td><td>26</td></tr>
<tr><td>15</td><td>25</td></tr>
<tr><td>14</td><td>106</td></tr>
<tr><td>13</td><td>122</td></tr>
<tr><td>12</td><td>70</td><td rowspan="7">2分後避難開始</td><td rowspan="7"></td></tr>
<tr><td>11</td><td>148</td></tr>
<tr><td>10</td><td>97</td></tr>
<tr><td>9</td><td>26</td></tr>
<tr><td>8</td><td>1</td></tr>
<tr><td>7</td><td>5</td></tr>
<tr><td>6</td><td>75</td><td rowspan="3">0秒避難開始</td><td rowspan="4"></td></tr>
<tr><td>5</td><td>29</td></tr>
<tr><td>4</td><td>45</td></tr>
<tr><td>3</td><td>22</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">7分後避難開始</td></tr>
<tr><td>2</td><td>4</td></tr>
</table>

２）シミュレーション結果

避難完了時間は、Ⅰフェーズ避難放送開始時刻 15 時 13 分 0 秒から、1 階階段室出口までの到達完了時刻とした場合、全館一斉避難は 25 分 40 秒、順次避難は 25 分 22 秒となり、ほぼ同時間となっている（図４-11）。避難開始までの待機時間を含む各階からの平均避難行動時間については、全館一斉避難が 24 階で最大 21 分 41 秒、順次避難が 20 階で最大 22 分 20 秒と 39 秒間の差となっている（図４-12）。なお、僅差であるが、全館一斉避難が 18 秒遅く避難完了しており、これは、階段室内の人数が避難開始直後から常に多いことから、速度低下を招き、結果的に避難完了時間が長くなっていると考える。

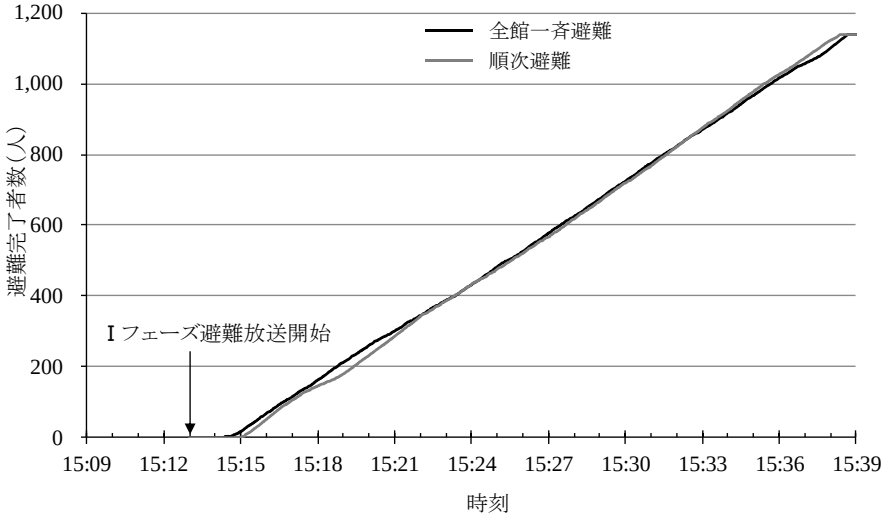


図４-11　避難完了時間（全館一斉避難と順次避難）

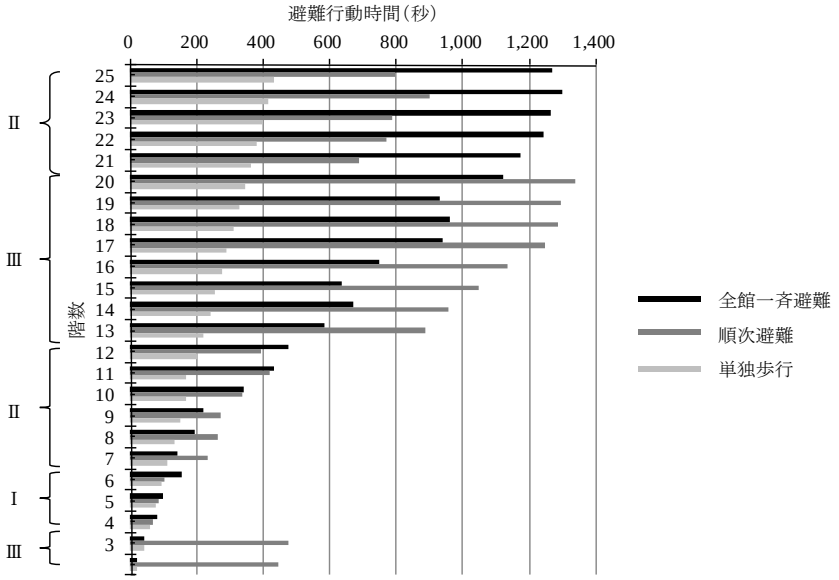


図４-12　各階からの平均避難行動時間（待機時間含む）（全館一斉避難と順次避難）

各階からの平均階段避難時間は、全館一斉避難が 24 階で最大 21 分 41 秒、順次避難が 20 階で最大 15 分 20 秒となっている（図４-13）。図４-11 に示したように、全館一斉避難の避難完了時間が 25 分 40 秒であることから、20 階以上の避難者は、避難完了時間近くまで、そのほとんどを階段室の中で過ごす結果となっている。階段避難と単独歩行を比較した平均滞留時間は、全館一斉避難が 6 分 39 秒（最大 24 階 14 分 46 秒）、順次避難が 3 分 38 秒（最大 15 階 15 分 20 秒）と約 3 分間の短縮効果が得られた（図４-14）。

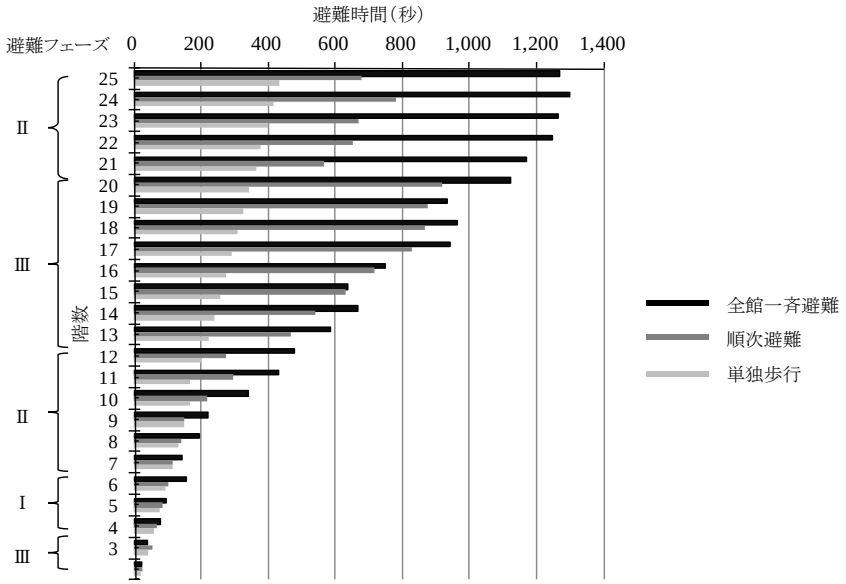


図４-13　各階からの平均階段避難時間（全館一斉避難と順次避難）

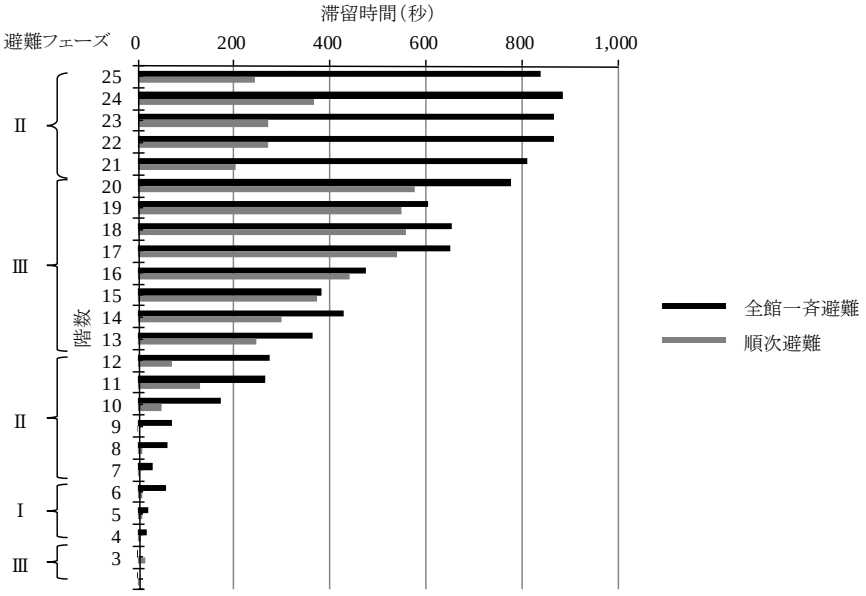


図４-14　各階避難者の平均滞留時間（全館一斉避難と順次避難）

階踊り場内の密度は、最も避難者の多い 13 階では全館一斉避難と順次避難で最大 3.38 人/㎡（18 人）と同値である。しかしながら、混雑継続時間として、実測結果での 13 階合流時の平均値 2.36 人/㎡以上となる合計時間をみると、全館一斉避難の場合 9 分 34 秒、順次避難では 5 分 4 秒となり、約 4 分半の短縮効果が見られる（図４-15）。

全館一斉避難は、避難開始直後から、階段室への流入が始まり、順次避難に比べて約 2 倍近く混雑時間が続く結果となっている。

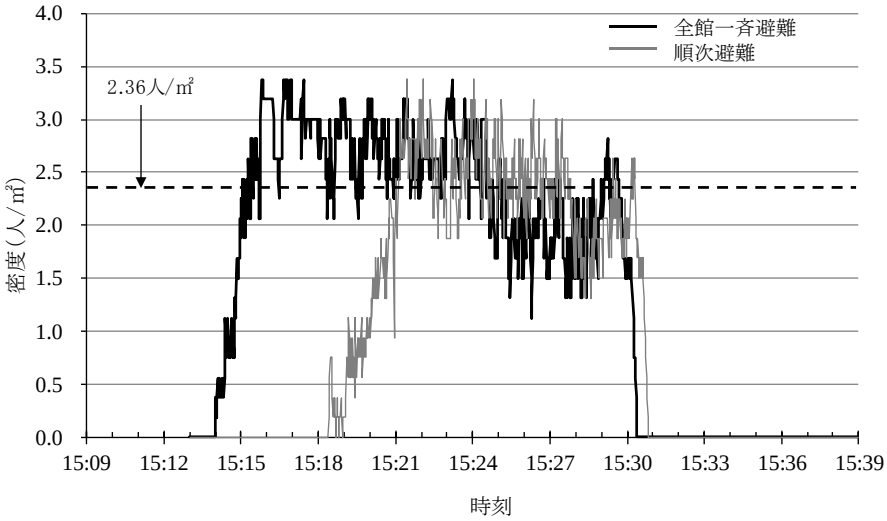


図４-15　階踊り場（13 階）の密度（全館一斉避難と順次避難）

4.4.2. 順次避難計画における避難フェーズ間隔の評価

順次避難計画における避難フェーズ間隔を変更した場合の効果について評価を行う。出火階が①低層階、②中層階、③高層階の場合について階段避難シミュレーションにより評価を行う。

（１）出火階が低層階の場合

避難訓練における順次避難計画では、Ⅱフェーズ上層階とⅢフェーズの避難者の合流を避けることにより滞留の軽減を目的としているが、Ⅲフェーズの避難開始時間を変更した際の効果について検証を行う。

１）シミュレーション条件

・3 章で構築した階段避難シミュレーションモデルおよび設定条件（各階の避難者数、歩行速度など）を用いる。

・そのうち、Ⅲフェーズの避難開始時間を避難訓練設定値に比べて 1 分間短縮した場合、1 分間・3 分間拡張した場合について比較する（表４-４）。

避難開始時間は、

Ⅰフェーズ：「4・5・6 階」　　（避難開始時間：0 秒後）

Ⅱフェーズ：「7～12、21～25 階」（避難開始時間：2 分後）

Ⅲフェーズ：「3、13～20 階」　　（避難開始時間：7 分後（避難訓練）

6 分後（1 分間短縮）、8 分後（1 分間拡張）、10 分後（3 分間拡張）

とする。

表４-４　避難フェーズ間隔（出火階が低層階の場合）

<table>
<tr><th>階数</th><th>避難者数(人)</th><th>Ⅰ</th><th>Ⅱ</th><th>Ⅲ</th></tr>
<tr><td>25</td><td>4</td><td rowspan="13">0秒避難開始</td><td rowspan="5">2分後避難開始</td><td rowspan="5"></td></tr>
<tr><td>24</td><td>73</td></tr>
<tr><td>23</td><td>46</td></tr>
<tr><td>22</td><td>63</td></tr>
<tr><td>21</td><td>32</td></tr>
<tr><td>20</td><td>38</td><td rowspan="8"></td><td rowspan="8">7分後避難開始（1分間短縮、1分間拡張、3分間拡張）</td></tr>
<tr><td>19</td><td>4</td></tr>
<tr><td>18</td><td>29</td></tr>
<tr><td>17</td><td>47</td></tr>
<tr><td>16</td><td>26</td></tr>
<tr><td>15</td><td>25</td></tr>
<tr><td>14</td><td>106</td></tr>
<tr><td>13</td><td>122</td></tr>
<tr><td>12</td><td>70</td><td rowspan="7">2分後避難開始</td><td rowspan="7"></td></tr>
<tr><td>11</td><td>148</td></tr>
<tr><td>10</td><td>97</td></tr>
<tr><td>9</td><td>26</td></tr>
<tr><td>8</td><td>1</td></tr>
<tr><td>7</td><td>5</td></tr>
<tr><td>6</td><td>75</td><td rowspan="3">0秒避難開始</td><td rowspan="5"></td></tr>
<tr><td>5</td><td>29</td></tr>
<tr><td>4</td><td>45</td></tr>
<tr><td>3</td><td>22</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">7分後避難開始</td></tr>
<tr><td>2</td><td>4</td></tr>
</table>

２）シミュレーション結果

避難完了時間については、1 分間短縮の場合 26 分 16 秒、避難訓練設定 25 分 22 秒、1 分間拡張の場合 25 分 33 秒、3 分拡張の場合 25 分 31 秒と僅かな差はあるが、ほぼ同様な結果となっている（図４-16）。避難開始までの待機時間を含む各階からの平均避難行動時間は、最大がⅢフェーズの 20 階となり、1 分間短縮の場合 23 分 17 秒、避難訓練設定 22 分 20 秒、1 分間拡張の場合 22 分 24 秒、3 分間拡張の場合は 22 分 11 秒と順に短くなっている（図４-17）。

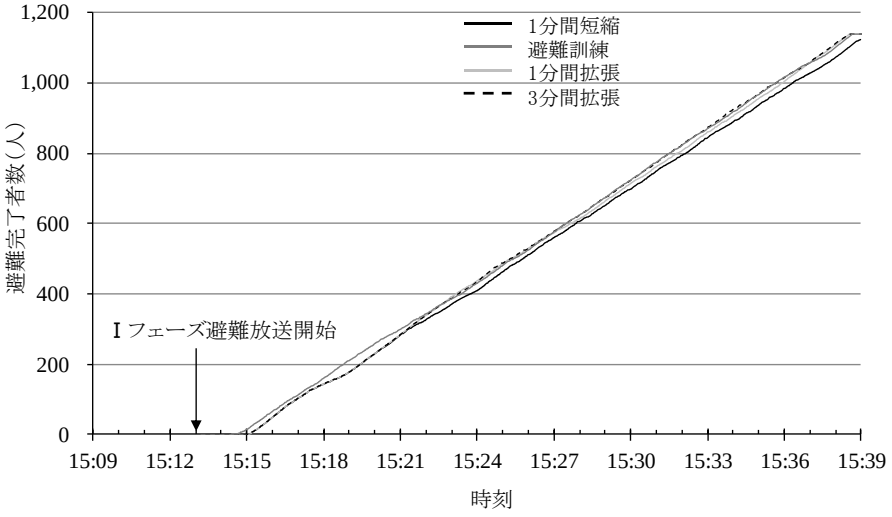


図４-16　避難完了時間（出火階が低層階の場合）

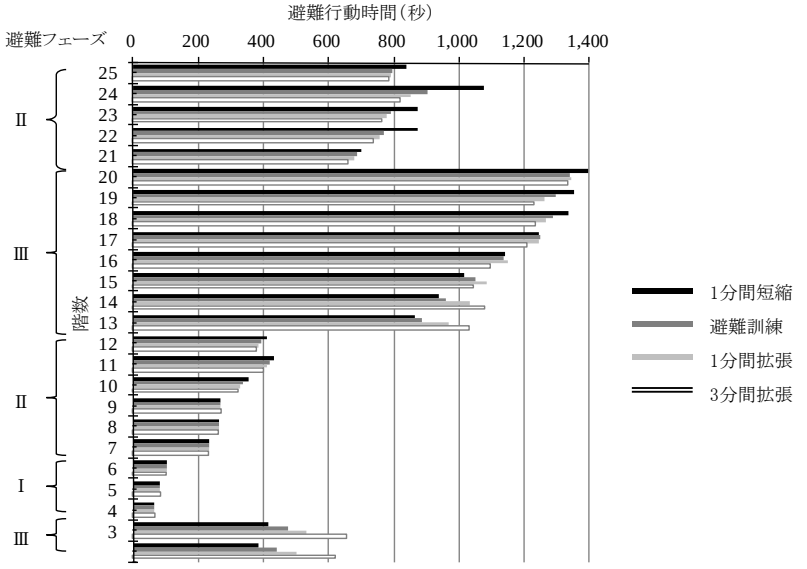


図４-17　各階からの平均避難行動時間（待機時間含む）（出火階が低層階の場合）

各階からの平均階段避難時間は、20 階が最大となり、1 分間短縮の場合 17 分 17 秒、避難訓練設定 15 分 20 秒、1 分間拡張の場合 14 分 24 秒、3 分間拡張の場合は 12 分 11 秒と順に短くなっている（図４-18）。階段避難と単独歩行を比較した平均滞留時間は、1 分間短縮の場合 4 分 21 秒（最大 20 階 11 分 33 秒）、避難訓練設定の場合 3 分 38 秒（最大 20 階 9 分 36 秒）、1 分間拡張の場合 3 分 19 秒（最大 20 階 8 分 40 秒）、3 分間拡張の場合 2 分 31 秒（最大 20 階 6 分 27 秒）と平均約 2 分の短縮効果となっている（図４-19）。

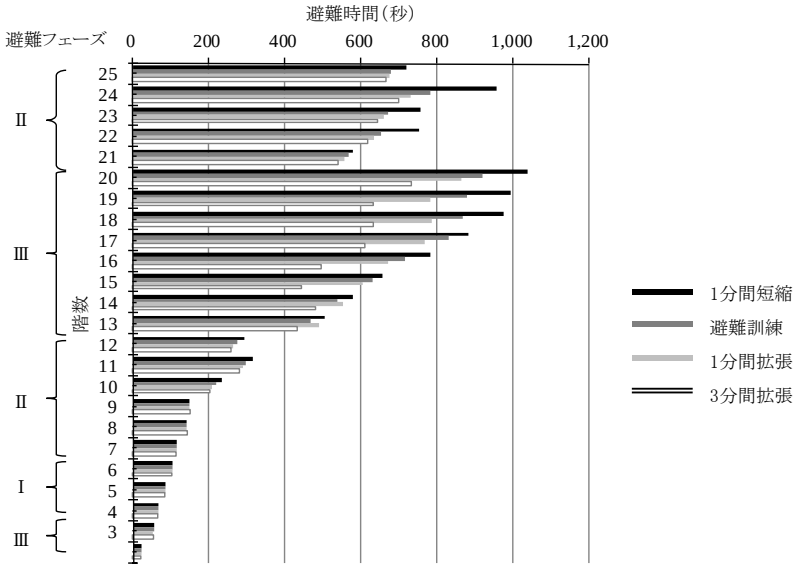


図４-18　各階からの平均階段避難時間（出火階が低層階の場合）

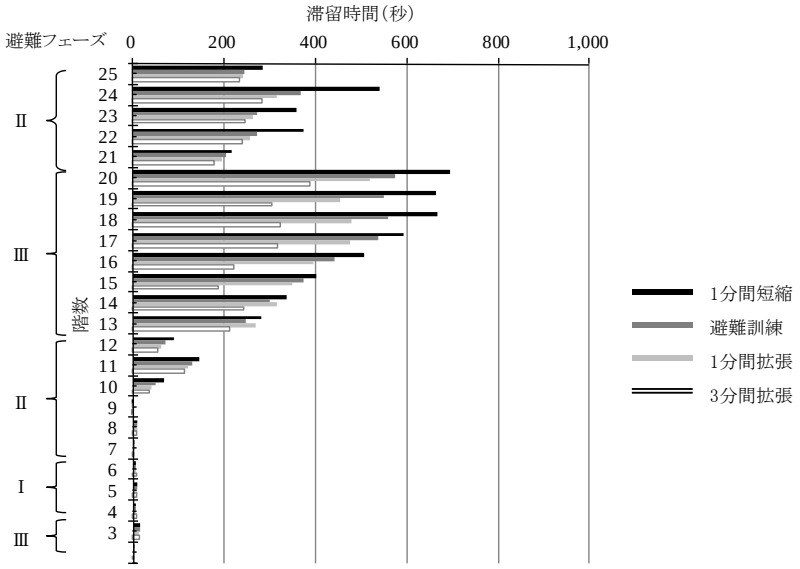


図４-19　各階避難者の平均滞留時間（出火階が低層階の場合）

階踊り場内の密度は、避難者の最も多い 13 階の最大値について、1 分間短縮の場合 3.19 人/㎡（17 人）、避難訓練設定 3.38 人/㎡（18 人）、1 分間拡張の場合 3.38 人/㎡（18 人）、3 分間拡張の場合 3.57 人/㎡（19 人）とほぼ同値となっている。また、混雑継続時間として、実測結果での 13 階合流時の平均値 2.36 人/㎡以上となる合計時間をみると、1 分間短縮の場合 6 分 53 秒、避難訓練設定 5 分 4 秒、1 分間拡張の場合 6 分 30 秒、3 分間拡張の場合 4 分 37 秒となり、3 分間拡張の場合が最も低減している（図４-20）。

3 分間拡張の場合には、Ⅲフェーズ避難者の 13 階が避難開始する前にⅡフェーズ上層階が 13 階以下に避難しているため、Ⅲフェーズ避難開始時に密度が一度低減している。このことから、3 分間拡張までが効果的な避難間隔であると考えられる。

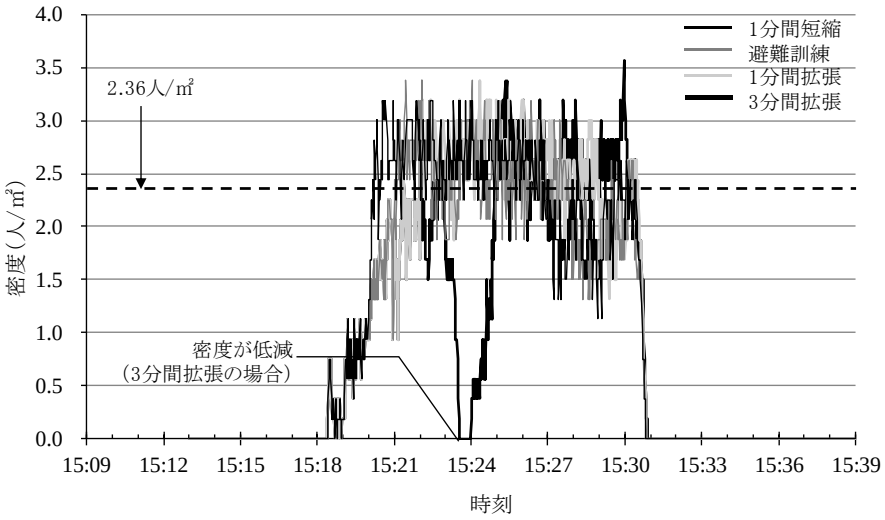


図４-20　階踊り場（13 階）の密度（出火階が低層階の場合）

（２）出火階が中層階の場合

高層ビルにおいては、出火階がいくつか想定されるが、低層階が出火した場合だけでなく、中層階が出火した場合について順次避難の評価を行う。

１）シミュレーション条件

・3 章で構築した階段避難シミュレーションモデルおよび設定条件（各階の避難者数、歩行速度など）を用いる。

・そのうち、出火階を 15 階とした中層階における順次避難計画について検証する。

避難開始の順番は、

Ⅰフェーズ：出火階とその上階「15・16・17 階」　（避難開始時間：0 秒後）

Ⅱフェーズ：火災階より上層と最下層階「2～6、18～25 階」（避難開始時間：2 分後）

Ⅲフェーズ：火災階の下層階「7～14 階」　（避難開始時間：7 分後）

とする（表４−５）。避難開始時間は避難訓練値をもとに設定する。

・Ⅲフェーズについては、低層階の出火時に効果が見られた 3 分間拡張した場合（10 分後に避難開始）についても評価を行う。

表４−５　避難フェーズ間隔（出火階が中層の場合）

<table>
<tr><th>階数</th><th>避難者数(人)</th><th>Ⅰ</th><th>Ⅱ</th><th>Ⅲ</th></tr>
<tr><td>25</td><td>4</td><td rowspan="8"></td><td rowspan="8">2分後避難開始</td><td rowspan="11"></td></tr>
<tr><td>24</td><td>73</td></tr>
<tr><td>23</td><td>46</td></tr>
<tr><td>22</td><td>63</td></tr>
<tr><td>21</td><td>32</td></tr>
<tr><td>20</td><td>38</td></tr>
<tr><td>19</td><td>4</td></tr>
<tr><td>18</td><td>29</td></tr>
<tr><td>17</td><td>47</td><td rowspan="3">0秒避難開始</td><td rowspan="9"></td></tr>
<tr><td>16</td><td>26</td></tr>
<tr><td>15</td><td>25</td></tr>
<tr><td>14</td><td>106</td><td rowspan="12"></td><td rowspan="9">7分後避難開始（3分間拡張）</td></tr>
<tr><td>13</td><td>122</td></tr>
<tr><td>12</td><td>70</td></tr>
<tr><td>11</td><td>148</td></tr>
<tr><td>10</td><td>97</td></tr>
<tr><td>9</td><td>26</td></tr>
<tr><td>8</td><td>1</td></tr>
<tr><td>7</td><td>5</td></tr>
<tr><td>6</td><td>75</td><td rowspan="5">2分後避難開始</td><td rowspan="5"></td></tr>
<tr><td>5</td><td>29</td></tr>
<tr><td>4</td><td>45</td></tr>
<tr><td>3</td><td>22</td></tr>
<tr><td>2</td><td>4</td></tr>
</table>

２）シミュレーション結果

避難完了時間は、Ⅰフェーズ避難放送開始時刻 15 時 13 分 0 秒から、中層階（15 階）を出火階にした場合は、避難訓練設定が 30 分 35 秒、3 分間拡張した場合が 28 分 24 秒となり、約 2 分間の短縮効果が見られた（図４-21）。避難開始までの待機時間を含む各階からの平均避難行動時間は、Ⅱフェーズ上層階の 24 階が避難訓練設定で最大 20 分 23 秒、3 分間拡張の場合は 12 分 11 秒と約 8 分間短縮している（図４-22）。

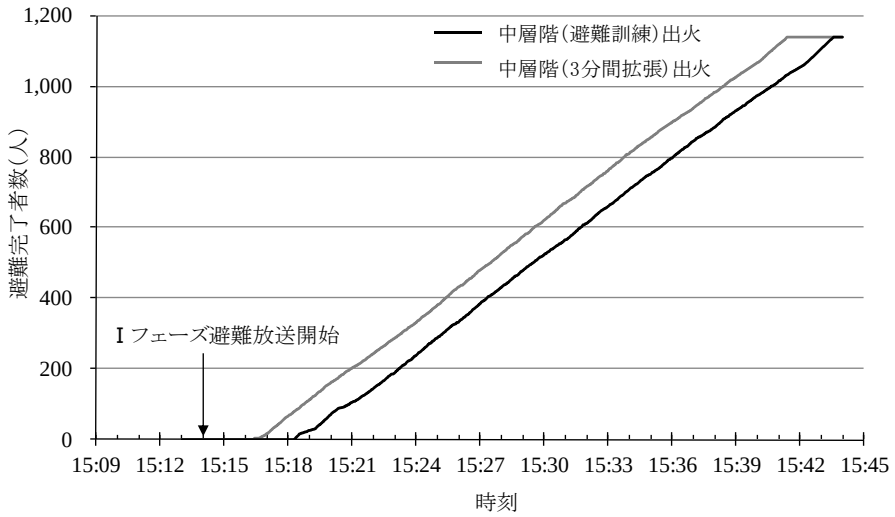


図４-21　避難完了時間（出火階が中層階の場合）

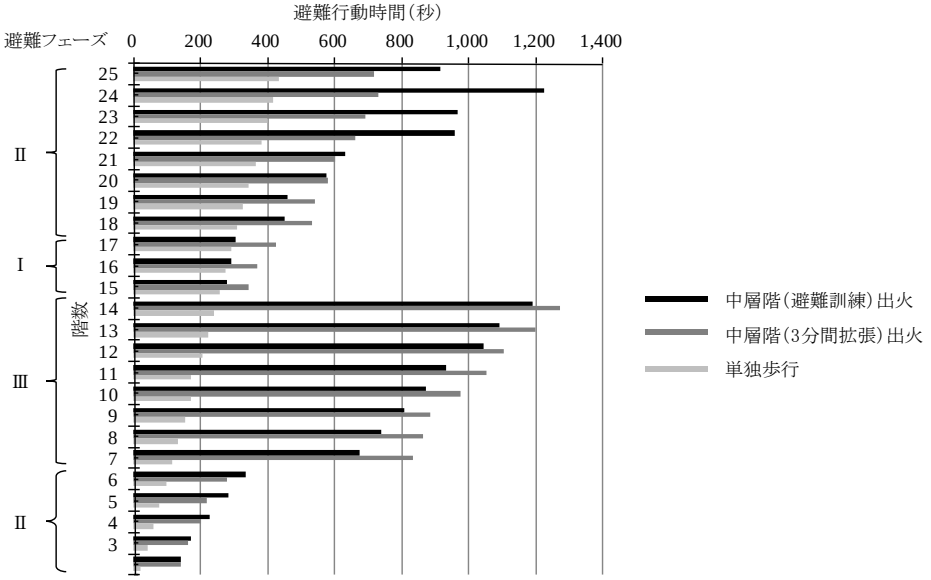


図４-22　各階からの平均避難行動時間（待機時間含む）（出火階が中層階の場合）

各階からの平均階段避難時間は、24 階では、最大が避難訓練設定で 18 分 20 秒、3 分間拡張の場合は 10 分 11 秒と 8 分間短縮している（図４-23）。階段避難と単独歩行を比較した平均滞留時間は、避難訓練設定が 3 分 35 秒（最大 24 階 11 分 28 秒）、3 分間拡張した場が 2 分 27 秒（最大 14 階 7 分 14 秒）と平均約 1 分間の短縮結果となっている（図４-24）。また、3 分間拡張することにより、Ⅱフェーズ上層 24 階の滞留が軽減しているが、Ⅲフェーズ 14 階の滞留が最大となっている。

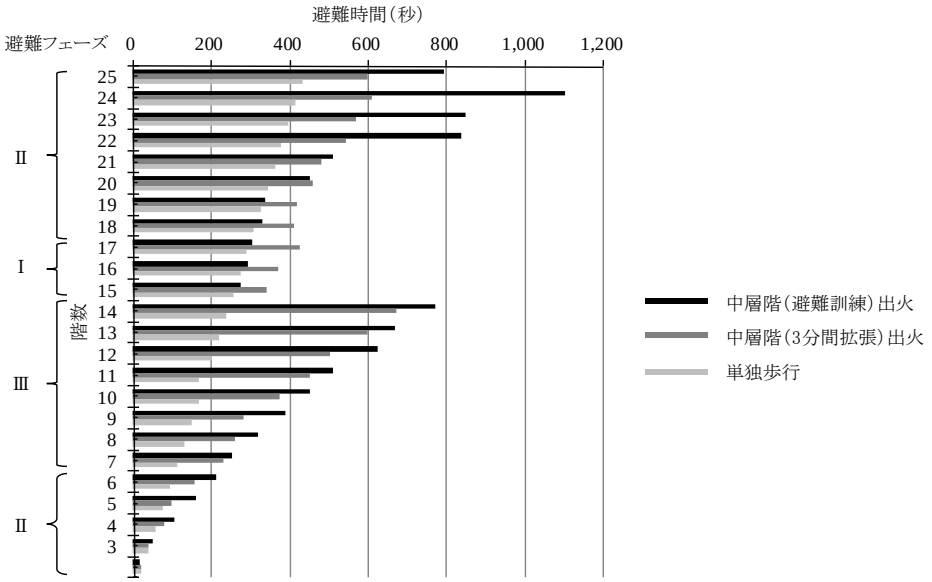


図４-23　各階からの平均階段避難時間（出火階が中層階の場合

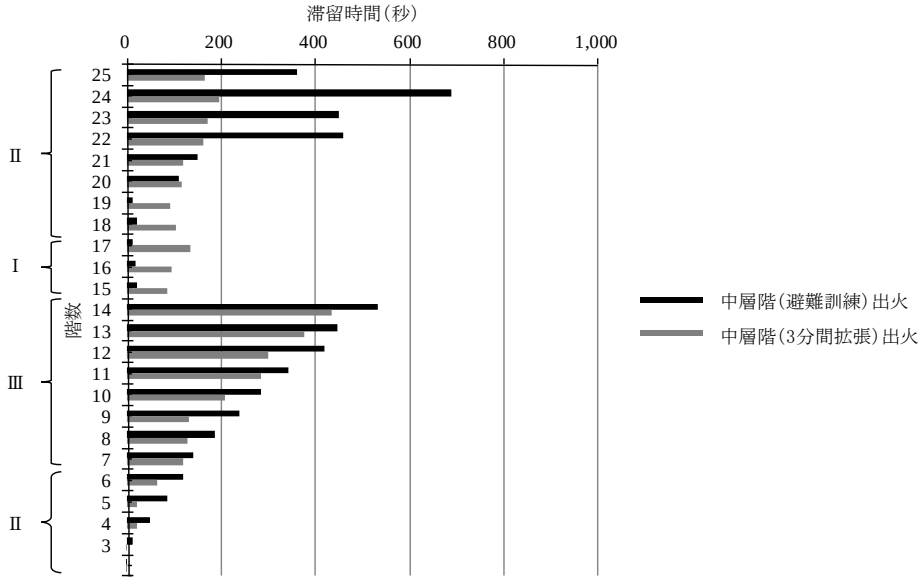


図４-24　各避難者の平均滞留時間（出火階が中層階の場合）

階踊り場内の密度は、最も避難者の多い 13 階について、避難訓練設定の場合で最大 3.38 人/㎡（18 人）、3 分間拡張の場合で最大 3.57 人/㎡（19 人）と同様な結果である。しかしながら、混雑継続時間として、実測結果での 13 階合流時の平均値 2.36 人/㎡以上となる合計時間をみると、避難訓練設定の場合は 11 分 42 秒、3 分間拡張の場合は 4 分 31 秒と 3 分間拡張の場合には、約 7 分間の短縮効果が見られる（図４-25）。

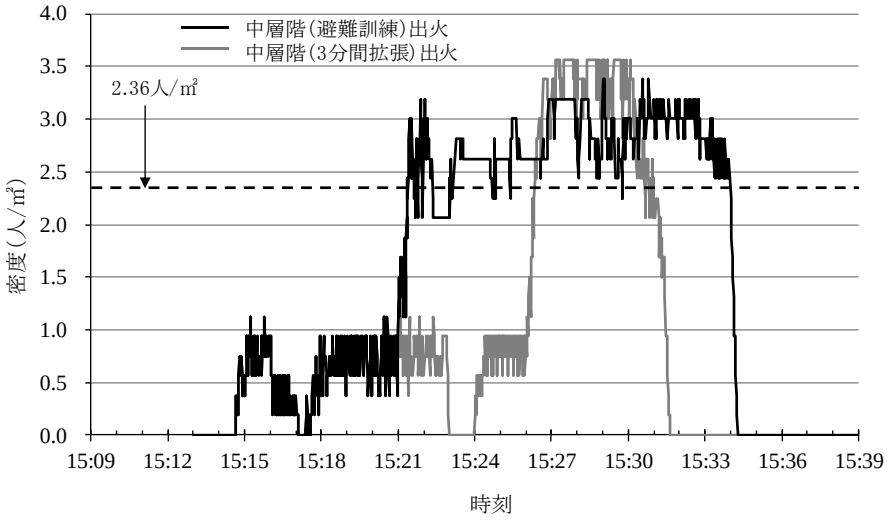


図４-25　階踊り場（13 階）の密度（出火階が中層階の場合）

（３）出火階が高層階の場合

高層階が出火した場合について順次避難の評価を行う。

1）シミュレーション条件

・3 章で構築した階段避難シミュレーションモデルおよび設定条件（各階の避難者数、歩行速度など）を用いる。

・そのうち、出火階を 23 階とした高層階における順次避難計画について検証する。

避難開始の順番は、

Ⅰフェーズ：出火階とその上階「23・24・25 階」　（避難開始時間：0 秒後）

Ⅱフェーズ：出火階に近い下階と最下層階「2～8、15～22 階」

（避難開始時間：2 分後）

Ⅲフェーズ：火災階から遠い下層階の「9～14 階」　（避難開始時間：7 分後）

とする。避難開始時間は避難訓練値をもとに設定する。

・ただし、Ⅱフェーズについては、Ⅰフェーズ「23・24・25 階」が避難を開始してから、出火より下の 22 階以下に避難するために 200 秒間を要することから、3 分 20 秒後に避難開始するものとする（表４－６）。

・Ⅲフェーズについては、低層階の出火時に効果が見られた 3 分間拡張した場合（10 分後に避難開始）についても評価を行う。

表４－６　避難フェーズ間隔（出火階が高層の場合）

<table>
<tr><th>階数</th><th>避難者数(人)</th><th>Ⅰ</th><th>Ⅱ</th><th>Ⅲ</th></tr>
<tr><td>25</td><td>4</td><td rowspan="3">0秒避難開始</td><td rowspan="3"></td><td rowspan="9"></td></tr>
<tr><td>24</td><td>73</td></tr>
<tr><td>23</td><td>46</td></tr>
<tr><td>22</td><td>63</td><td rowspan="18"></td><td rowspan="6">3分20秒後避難開始</td></tr>
<tr><td>21</td><td>32</td></tr>
<tr><td>20</td><td>38</td></tr>
<tr><td>19</td><td>4</td></tr>
<tr><td>18</td><td>29</td></tr>
<tr><td>17</td><td>47</td></tr>
<tr><td>16</td><td>26</td><td rowspan="6">7分後避難開始（3分間拡張）</td></tr>
<tr><td>15</td><td>25</td></tr>
<tr><td>14</td><td>106</td><td rowspan="6"></td></tr>
<tr><td>13</td><td>122</td></tr>
<tr><td>12</td><td>70</td></tr>
<tr><td>11</td><td>148</td></tr>
<tr><td>10</td><td>97</td></tr>
<tr><td>9</td><td>26</td></tr>
<tr><td>8</td><td>1</td><td rowspan="6">3分20秒後避難開始</td><td rowspan="6"></td></tr>
<tr><td>7</td><td>5</td></tr>
<tr><td>6</td><td>75</td></tr>
<tr><td>5</td><td>29</td></tr>
<tr><td>4</td><td>45</td></tr>
<tr><td>3</td><td>22</td></tr>
<tr><td>2</td><td>4</td></tr>
</table>

２）シミュレーション結果

避難完了時間は、Ⅰフェーズ避難放送開始時刻 15 時 13 分 0 秒から、高層階（23 階）を出火階にした場合は、避難訓練設定で 28 分 38 秒、3 分間拡張した場合 29 分 40 秒と、約 1 分間長い結果となった（図４-26）。避難開始までの待機時間を含む各階からの平均避難行動時間は、Ⅱフェーズ上層階の 22 階が避難訓練設定時に最大 23 分 48 秒、3 分間拡張の場合は 14 分 27 秒と 9 分 21 秒間短縮している（図４-27）。

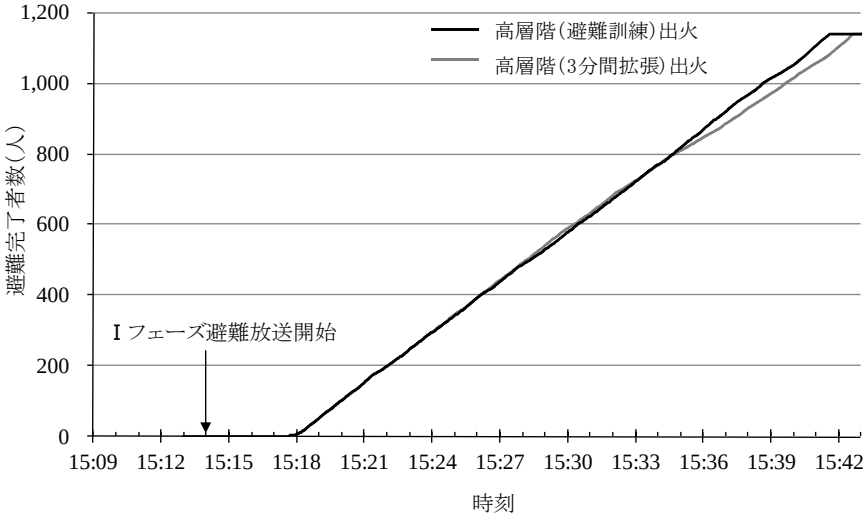


図４-26　避難完了時間（出火階が高層階の場合）

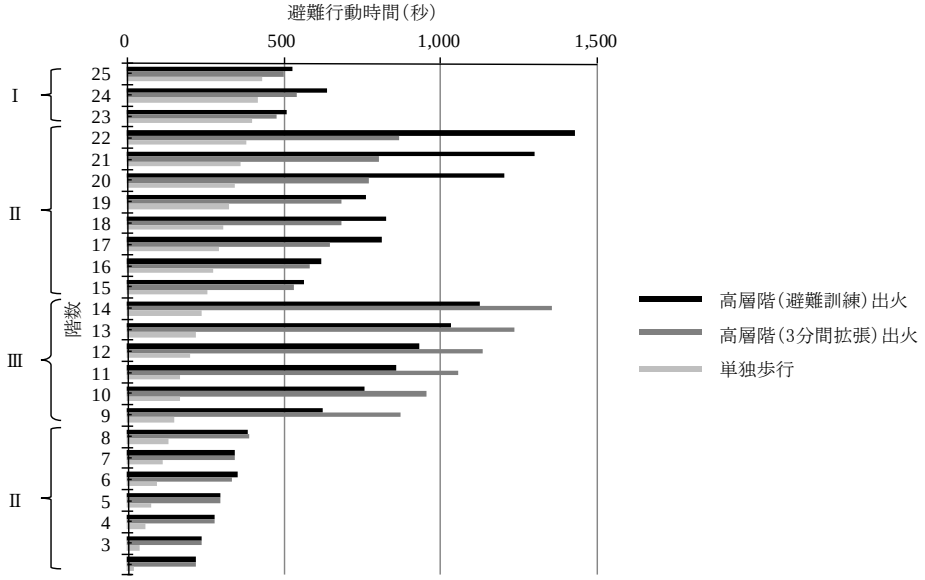


図４-27　各階からの平均避難行動時間（待機時間含む）（出火階が高層階の場合）

各階からの平均階段避難時間は、最大が避難訓練設定時に 22 階で 20 分 28 秒、3 分間拡張の場合は 11 分 7 秒と 9 分 21 秒間短縮している（図４-28）。階段避難と単独歩行を比較した平均滞留時間は、避難訓練設定が 3 分 55 秒（最大 22 階 14 分 9 秒）、3 分間拡張した場が 2 分 35 秒（最大 14 階 8 分 33 秒）と 1 分 20 秒間の短縮結果となっている（図４-29）。

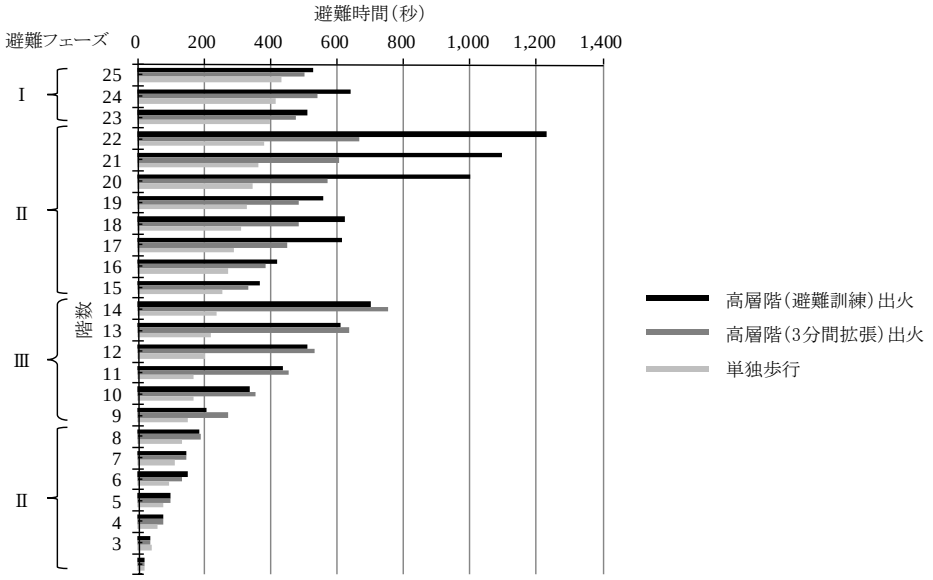


図４-28　各階からの平均階段避難時間（出火階が高層階の場合）

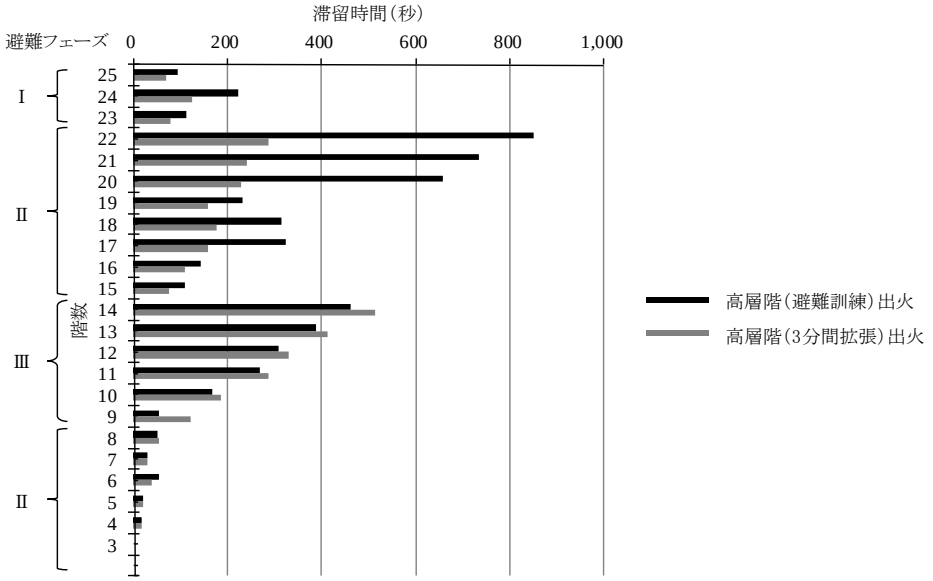


図４-29　各階避難者の平均滞留時間（出火階が高層階の場合）

階踊り場内の密度は、最も避難者の多い 13 階では避難訓練設定の場合で最大 3.57 人/㎡（19 人）、3 分間拡張の場合で最大 3.38 人/㎡（18 人）と同様な結果である。しかしながら、混雑継続時間として、実測結果での 13 階合流時の平均値 2.36 人/㎡以上となっている合計時間をみると、避難訓練設定の場合は 10 分 48 秒、3 分間拡張の場合は 6 分 38 秒となり、3 分間拡張とした場合には、混雑時間が約 4 分間の短縮効果が見られる（図４-30）。

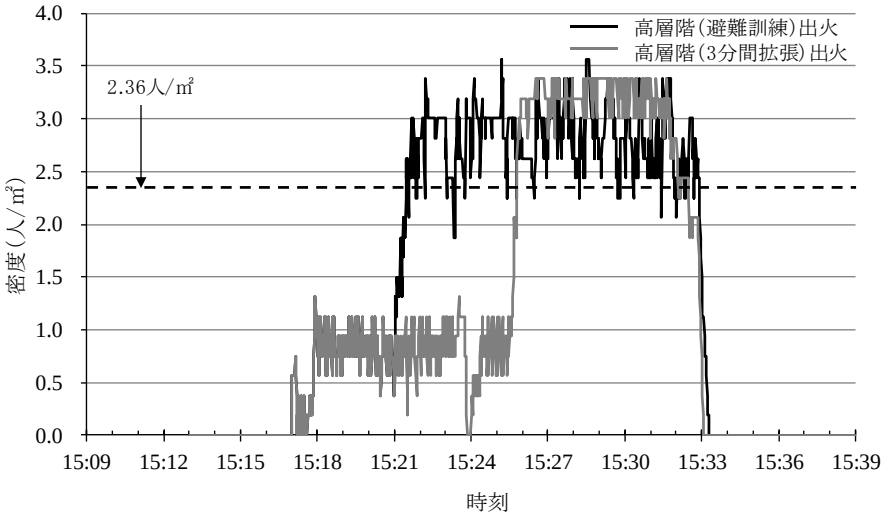


図４-30　階踊り場（13 階）の密度（出火階が高層階の場合）

4.4.3. 順次避難計画における発災シナリオの比較検証

順次避難計画における発災シナリオの比較検証を行う。発災シナリオとして、出火階が低層階（4 階）、中層階（15 階）、高層階（23 階）の場合について、階段避難シミュレーションにより比較を行う。

１）シミュレーション条件

・3 章で構築した階段避難シミュレーションモデルおよび設定条件（各階の避難者数、歩行速度など）を用いる。

・Ⅲフェーズについては、各発災シナリオで効果が見られた 3 分間拡張した場合（10 分後に避難開始）について評価を行う（表４－７）。

表４－７　出火階別の避難フェーズ

<table>
<tr><th>階数</th><th>避難者数（人）</th><th>低層出火</th><th>中層出火</th><th>高層出火</th></tr>
<tr><td>25</td><td>4</td><td rowspan="5">Ⅱ</td><td rowspan="8">Ⅱ</td><td rowspan="3">Ⅰ</td></tr>
<tr><td>24</td><td>73</td></tr>
<tr><td>23</td><td>46</td></tr>
<tr><td>22</td><td>63</td><td rowspan="8">Ⅱ</td></tr>
<tr><td>21</td><td>32</td></tr>
<tr><td>20</td><td>38</td><td rowspan="7">Ⅲ</td></tr>
<tr><td>19</td><td>4</td></tr>
<tr><td>18</td><td>29</td></tr>
<tr><td>17</td><td>47</td><td rowspan="3">Ⅰ</td></tr>
<tr><td>16</td><td>26</td></tr>
<tr><td>15</td><td>25</td></tr>
<tr><td>14</td><td>106</td><td rowspan="6">Ⅲ</td><td rowspan="4">Ⅲ</td></tr>
<tr><td>13</td><td>122</td></tr>
<tr><td>12</td><td>70</td><td rowspan="5">Ⅱ</td><td rowspan="4">Ⅲ</td></tr>
<tr><td>11</td><td>148</td></tr>
<tr><td>10</td><td>97</td></tr>
<tr><td>9</td><td>26</td></tr>
<tr><td>8</td><td>1</td><td rowspan="7">Ⅱ</td></tr>
<tr><td>7</td><td>5</td></tr>
<tr><td>6</td><td>75</td><td rowspan="3">Ⅰ</td><td rowspan="5">Ⅱ</td></tr>
<tr><td>5</td><td>29</td></tr>
<tr><td>4</td><td>45</td></tr>
<tr><td>3</td><td>22</td><td rowspan="2">Ⅲ</td></tr>
<tr><td>2</td><td>4</td></tr>
</table>

２）シミュレーション結果

避難完了時間は、全館一斉避難の場合が 25 分 40 秒、低層階（4 階）の場合が 25 分 31 秒と速く、中層階（15 階）の場合が 28 分 24 秒、高層階（23 階）の場合が 29 分 40 秒と上層階での出火に従って避難完了時間が長くなっている（図４-31）。これは、順次避難では、上層階が避難開始してから下層階が避難するため、避難完了開始する時刻が遅くなることが原因と考えられる。避難開始までの待機時間を含む各階からの平均避難行動時間は、最大が高層階 14 階 22 分 32 秒、次に低層階 20 階 22 分 11 秒と長い（図４-32）。

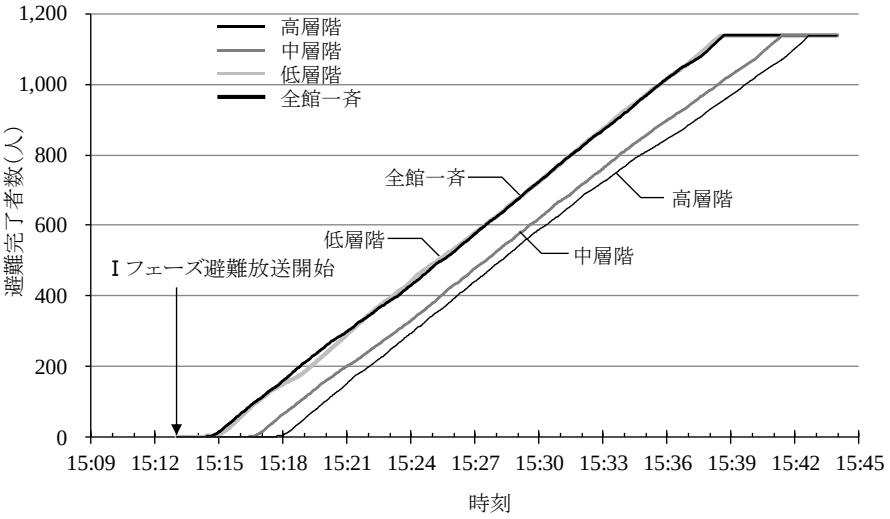


図４-31　避難完了時間（発災シナリオの比較検証）

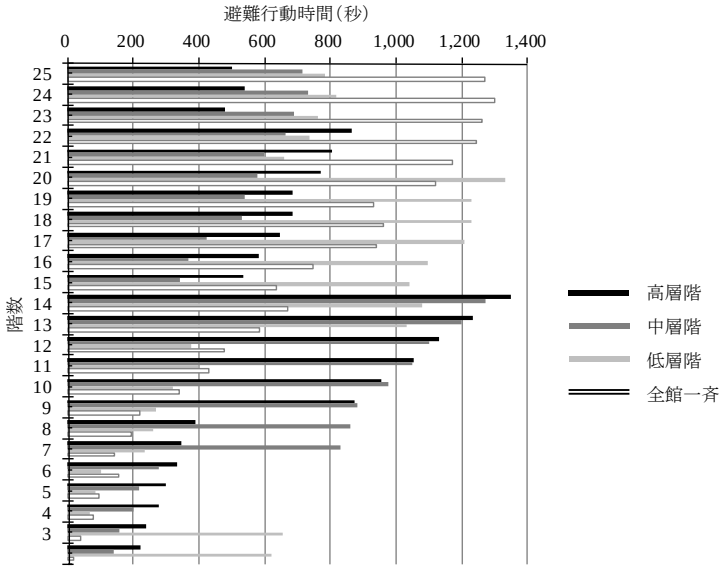


図４-32　各階からの平均避難行動時間（待機時間含む）（発災シナリオの比較検証）

階段避難時間（図４-33）と単独歩行時間を比較した平均滞留時間は、低層階 2 分 31 秒（最大 20 階 6 分 27 秒）、中層階 2 分 27 秒（最大 14 階 7 分 14 秒）、高層階 2 分 35 秒（最大 14 階 8 分 33 秒）と順次避難は同様な値である（図４-34）。また、全館一斉避難の 6 分 39 秒（最大 24 階 14 分 46 秒）に比べると、順次避難は約 4 分間短縮効果がある。順次避難の場合、Ⅲフェーズ最上階が最後尾近くなるため、滞留時間が長くなっている。

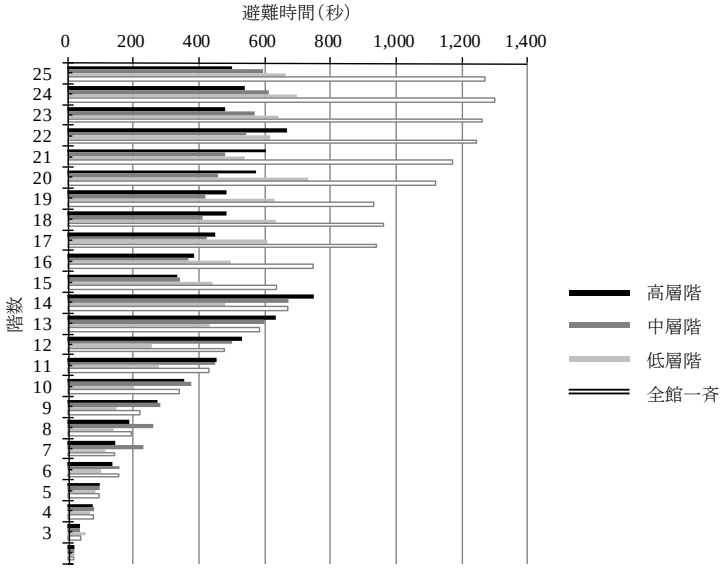


図４-33　各階からの平均階段避難時間（発災シナリオの比較検証）

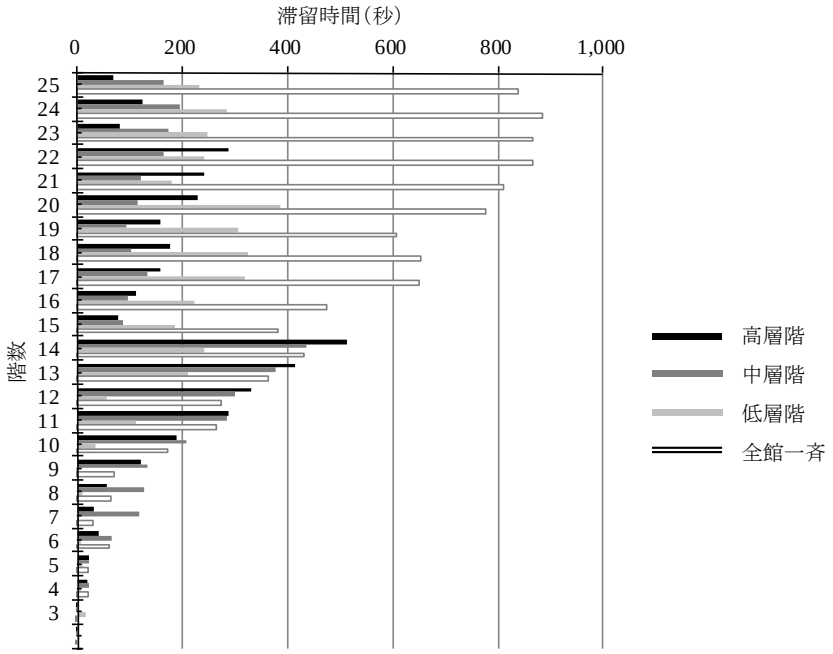


図４-34　各階避難者の平均滞留時間（発災シナリオの比較検証）

踊り場内の密度は、避難者の最も多い 13 階の最大値について、全館一斉避難の場合 3.38 人/㎡（18 人）、低層階（4 階）の場合 3.57 人/㎡（19 人）、中層階（15 階）の場合 3.57 人/㎡（19 人）、高層階（23 階）の場合 3.38 人/㎡（18 人）と同様な値となっている。

また、混雑継続時間として、実測結果での 13 階合流時の平均値 2.36 人/㎡以上となる合計時間をみると、全館一斉避難の場合 9 分 34 秒、低層階（4 階）の場合 4 分 37 秒、中層階（15 階）の場合 4 分 31 秒、高層階（23 階）の場合 6 分 38 秒となっており、順次避難は、全館一斉避難に比べて混雑時間約 3 分以上の軽減効果が見られる（図４-35）。

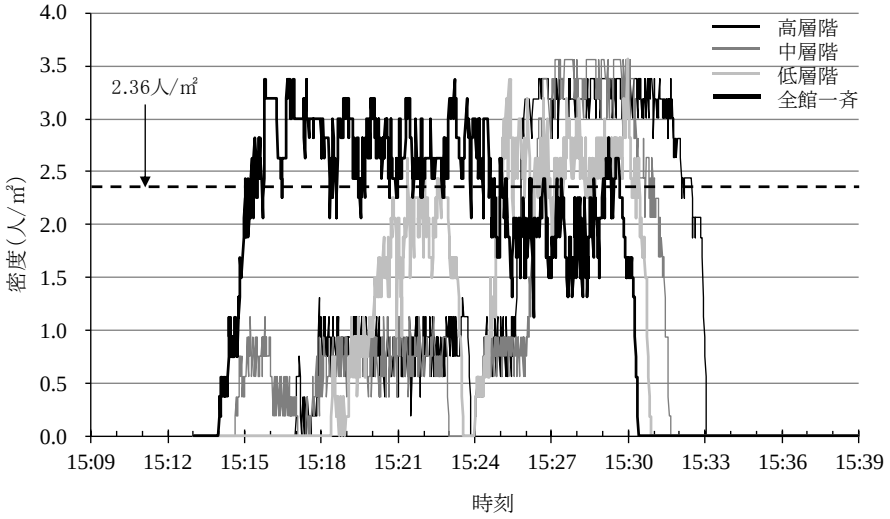


図４-35　階踊り場（13 階）の密度（発災シナリオの比較検証）

4.4.4. 避難方法のケーススタディ検証結果のまとめ

ある条件下（25 階建ての高層事務所ビルにおいて避難者 1,137 名が 1 つの階段室を避難した場合）における順次避難計画について、全館一斉避難との比較、避難フェーズ間隔の差異と出火階の違い（低層階、中層階、高層階）による効果を検証した。階段避難シミュレーションによる検証結果を表４−８に示す。また、シミュレーション結果の平均階段避難時間を基にした避難者の移動軌跡を図４-36 に示す。なお、図４-36 は、図４-33 の発災シナリオの比較検証における平均階段避難時間を基に、避難フェーズごとの階段避難開始時刻と避難完了時刻を結び移動軌跡とした。以下にケーススタディ検証結果を要約する。

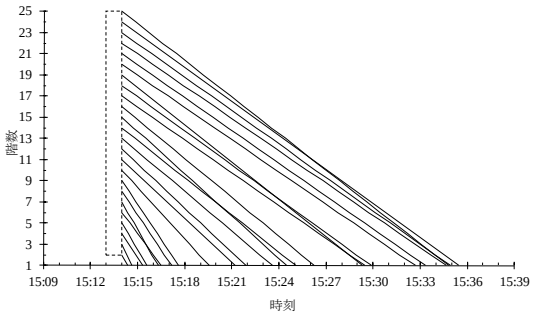
１）避難完了時間をみると、今回の条件下での順次避難計画では、高層での出火になるに従い長くなり、避難効率が低下する傾向にある。これは、出火階が優先的に避難し、次に上層階、下層階と順番に避難する計画となるため、図４-36(b)と図４-36(d)の比較にも示されるように、出火階である上層階が避難するまで、大多数である下層階が待機していることが要因となっている。

２）平均滞留時間は、順次避難計画を用いた場合、全館一斉避難に比べて 3 分間の短縮効果が得られた。また、避難フェーズの間隔を適正に空けることによって、Ⅲフェーズ避難者が避難開始する前にⅡフェーズ上層階がⅢフェーズ階以下に避難するなど、フェーズ間の合流を軽減させることから、滞留時間、混雑継続時間を更に短縮する効果がある。

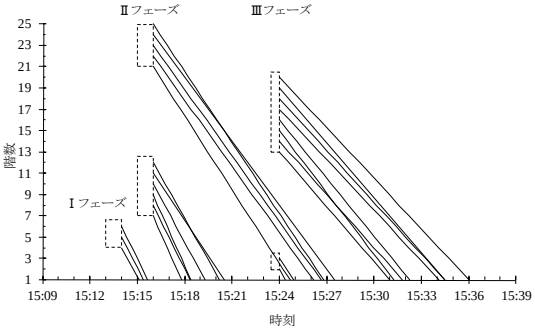
３）順次避難計画の場合、Ⅲフェーズ最上階の避難者が最後尾近くなるため、滞留時間が長くなる結果となっている。

表４−８　階段避難シミュレーションの結果

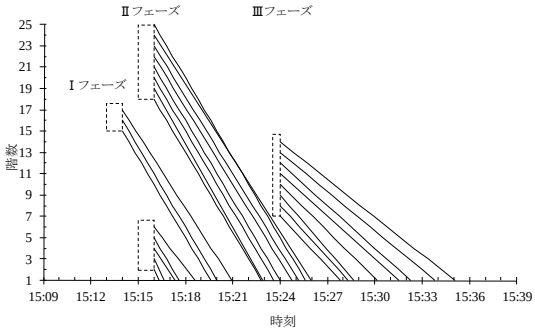
出火階	避難フェーズ間隔（Ⅱ−Ⅲフェーズ）	避難効率性	安全性				
		避難完了時間	最大平均滞留時間		平均滞留時間	13階の階踊り場内の最大密度（人/㎡）	13階の混雑継続時間（2.36人/㎡以上）
			避難開始階				
高層階(23階)	避難訓練設定	28分38秒	22	14分9秒	3分55秒	3.57	10分48秒
	3分拡張	29分40秒	14	8分33秒	2分35秒	3.38	6分38秒
中層階(15階)	避難訓練設定	30分35秒	24	11分28秒	3分35秒	3.38	11分42秒
	3分拡張	28分24秒	14	7分14秒	2分27秒	3.57	4分31秒
低層階(4階)	避難訓練設定	25分22秒	20	15分20秒	3分38秒	3.38	5分4秒
	3分拡張	25分31秒	20	6分27秒	2分31秒	3.57	4分37秒
全館一斉避難		25分40秒	24	14分46秒	6分39秒	3.38	9分34秒



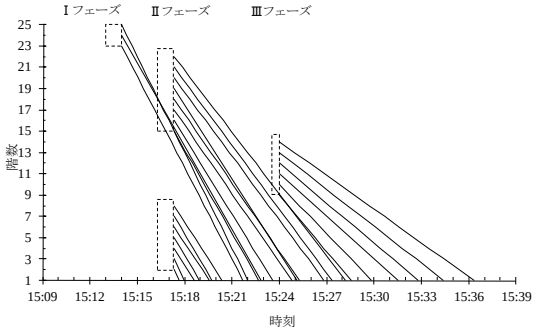
(a)全館一斉避難



(b)順次避難（出火階が低層階の場合）



(c)順次避難（出火階が中層階の場合）



(d)順次避難（出火階が高層階の場合）

図４-36　平均階段避難時間を基にした避難者の移動軌跡（発災シナリオ別の結果）

注）図４-33 を基に階段避難開始時刻と避難完了時刻を結び移動軌跡とした。

4.5. 避難方法の提案

本研究では、事務所用途とした地上 25 階建ての高層ビルを対象建物とし、南北 2 ヶ所設置された避難階段のうち1ヶ所を1,000人規模の避難者が全館避難する想定条件のもとで避難法について検証を行った。その際、避難方法としては、全員が一斉に避難を開始する「全館一斉避難」に対し、一般的には火災発生階及びその直上階が優先的に避難し、他の階はそのあと避難する「順次避難」について検証を行った。検証の結果、順次避難は全館一斉避難に比べて階段室内での滞留時間を軽減させることから、混雑軽減手法として順次避難の有効性を明らかにしている。

順次避難計画の作成にあたっては、4.3 節に策定手順の一案を示したが、出火階想定に基づき、危険性の高さに応じて順番に避難[43]し、滞留時間と避難時間全体を最小化するように避難フェーズの設定を行うことが必要となる。検証結果では、想定する出火階が高層階になるほど避難効率が低下することがわかったが、その他特に留意すべき点として、避難フェーズを分ける際には、避難フェーズ間の合流を避けることが大前提となり、フェーズ内における合流を避けるため避難者が多い階（本条件では概ね 100 人以上）を連続させないようにすることも重要となる。避難開始時間の設定では、避難放送文の長さ（本条件では概ね 1 分間）により避難フェーズ間の最小時間が決まってしまうことや、アンケート結果によると避難開始待ち時間が 7 分になると約 4 割が「あまり我慢できない」「我慢できない」としており、避難開始時間を遅くする際には留意すべき点である。

実効性のある避難計画とするためには、在館者数について常時把握することにより避難者が多くなる階を把握する、低層階や中層階など想定出火階ごとに様々な避難シナリオを施設状況に合わせて予め作成し、データベース化しておくことなど、種々の条件の変化に応じられるよう詳細な検討が必要である。また、避難者は順次避難計画に従って避難することが前提となる。本条件のような事務所用途では、順次避難計画を予め避難者に理解させることも可能であることから、避難方法について社員への事前説明や避難訓練の実施による避難方法の理解や教育、自分の階がいつ避難するかなどわかりやすい避難放送内容の作成などが必要となる。来客者やセミナー参加者など不特定多数を含む避難者となる場合は、誘導員の配置などが加えて重要になると考える。

4.6. まとめ

本章では、避難訓練参加者へのアンケート調査結果を分析し、滞留時間に対する心理的影響度について評価指標を検討した。次に第３章で構築した階段避難シミュレーションにより、評価指標をもとに滞留発生を避ける避難方法を検討・提案した。以下に要約する。

（１）アンケートによる滞留時間の評価

混雑継続時間に従って混雑への許容度は減少しており、階段室内の滞留時間の軽減が重要課題であることがわかった。

（２）避難時における潜在的な影響要因と評価指標

アンケート結果をもとに、避難時間の全体の効率性として「避難完了時間」、安全面として「滞留時間（各階からの階段避難時間と単独歩行時間の差)」と混雑度「階踊り場の密度」「混雑継続時間」による評価指標を提案した。

（３）順次避難計画の策定手順

順次避難計画は、危険性の高さに応じて避難フェーズに分け、時間差により順番に避難し、避難開始時間の調整により、滞留時間と避難時間全体を最小化するものとした。

（４）階段避難シミュレーションによる避難方法のケーススタディ

全館一斉避難と順次避難を比較し、順次避難の有効性を明らかにした。次に、順次避難計画について、避難フェーズ間隔の差異と出火階による違いについて検証した。

１）全館一斉避難による階段避難の評価

避難完了時間は、ほぼ同時間であるが、階段避難と単独歩行を比較した平均滞留時間、混雑継続時間について、順次避難の軽減効果があることがわかった。

２）順次避難計画による階段避難の評価

①避難フェーズ間隔を変更した場合

適正なフェーズ間隔により、滞留時間、混雑継続時間を更に短縮する効果があった。

②出火階を変更した場合

出火階を優先的に避難させた場合には、出火階が高層階になるほど避難効率が低下した。一方、平均滞留時間は低層階、中層階、高層階で同様な結果となり、Ⅲフェーズ最上階の避難者は、最後尾近くなるため滞留時間が長くなることがわかった。

（５）避難方法の提案

以上のことから、混雑軽減手法として順次避難の有効性を明らかにした。実効性のある避難計画とするためには、在館者数の把握、施設状況に合わせた想定出火階ごとの避難シナリオの作成、避難シナリオに従って避難できる訓練・仕組みなどが必要である。

第5章　結論

5.1.　総括

本研究では、階段室における避難安全性を向上し、かつ効率的である避難方法を検証・提案するため、大規模な全館避難訓練を実測調査し、階段室内の避難性状を数値化・分析することにより、階段避難シミュレーションモデルの開発を行った。本研究の成果を要約したものを以下に示す。

第１章「序論」では、既往の研究として、①階段避難の実測データに関する研究、②避難計算に関する法制度、③避難シミュレーションモデルに関する研究、および④避難方法に関する研究についてレビューした。①④階段避難・避難方法の実測データに関しては、1層の階段室での滞留は確認されているが、多層階での滞留や順次避難計画の事例は見られない。②避難計算に関する法制度に関しては、避難安全検証法を取り上げ、検証法が階段室内の混雑状況を考慮していない。③避難シミュレーションモデルに関しては、階段室のモデル化は行なわれているが、実測データ不在のため、多層階での滞留を再現するモデル化となっていないことについて指摘し、本研究の位置付けについて示した。

第２章「避難訓練実測データに基づく階段室内の滞留発生に関する分析」では、東京都内の 25 階建て高層事務所ビルで実施された全館避難訓練において、南北２ヶ所設置された避難階段のうち 1 ヶ所を 1,000 人規模の避難者が避難する訓練について実測調査した。避難方法は、危険性の高さに応じて避難フェーズに分け、時間差を設けて避難する順次避難計画によるものである。まずⅠフェーズとして、出火階とその上階（4・5・6 階）を避難し、次にⅡフェーズとしてその上層階と最上層階（7～12 階、21～25 階）、Ⅲフェーズとして上層階（3、13～20 階）と順番に避難開始した。

避難訓練の実測結果として、階段室内の流動性状と階段室内で生じる滞留発生状況の分析とその要因に関する考察を行なった。流動性状としては、避難完了時間・各階からの避難時間、階段室内の歩行速度、流動係数、密度とその関係について示した。また、階段室内での滞留としては、①合流を原因とする滞留と②階段室内の高密状態を原因とする滞留の 2 種類の滞留が多層階にわたり発生し、伝播する過程を明らかにした。階段室内での滞留の一つ目は、合流を原因とする滞留であり、複数階から 100 人以上の避難者が合流した場合、合流が生じた階の上階での流動量の減少（約 1/2）が累乗的に上階に伝播することを要因として発生するものである。二つ目は、階段室内の高密状態を原因とする滞留であり、多層にわたり階段室１層内の密度が下限として概ね 2.2 人/㎡（38 人）以上になると発生しており、この滞留も上層階に向かって伝播していた。なお、合流を原因とする滞留の場合には停止時間が長く（約２分間）、一方、高密度状態を原因とする滞留では停止状態は短時間（約 10 秒間）で解消していることがわかった。

第３章「階段避難シミュレーションモデルの構築」では、得られた避難訓練の分析結果をもとに、セルオートマトンモデルにて階段室を単純モデル化することを試み、階段避難シミュレーションへの実装を行った。空間のモデル化に際しては、避難訓練実測結果の階段室内の最大収容人数により、各階について階踊り場、階段部、中間踊り場から構成される階段室のセル表現化を行った。また、階段部内では、混雑に応じて減速することを考慮し、階段部内の歩行速度と密度との関係を適用した。

次に、避難訓練の実測値とシミュレーション結果を比較し、全館避難時の滞留現象の再現性を確認した。滞留発生現象については、避難時間として避難完了時間・各階からの平均避難時間、階段室の流動状況として流動係数・複数階にわたる流動係数、階段室内の混雑状況として階踊り場・中間踊り場・階段部の密度および階段室 1 層内の人数、階段室 1 層内の密度と流動係数の項目について比較し、本研究での目的に即した再現精度であることを明らかにした。

第４章「滞留発生を避ける避難方法の検討と提案」では、避難訓練への参加者に対して実施したアンケート調査結果を分析し、避難効率だけでなく、滞留時間に対する心理的影響度について評価指標を提案した。評価指標として、避難効率については「避難完了時間」により評価するものとし、安全性については「滞留時間（各階からの階段避難時間と単独歩行時間の差)」、「階踊り場の密度」とその「混雑継続時間」により評価を行うことを提案した。また、避難方法のケーススタディの実施にあたり、順次避難計画の策定手順の一案を示した。順次避難計画は、危険性の高さに応じて避難フェーズに分け、時間差により順番に避難するものとし、避難開始時間を調整することにより、①階段室内の合流による滞留時間を最小にする、②避難時間全体を最小化し、待機時間を最小にするものとした。

次に、避難方法として、実用的な混雑軽減手法について、全館一斉避難と順次避難を比較し、滞留時間の軽減効果が明らかになり、順次避難の有効性を確認した。順次避難については、避難フェーズ間隔の差異による影響を効率性と安全性の側面から検証し、効率的と考えられる避難間隔による滞留時間の緩和を確認した。また、出火階による違いとして、低層階、中層階、高層階での出火を比較した結果、滞留時間は同等ではあるが、出火階を優先的に避難させた場合には出火階が高層階になるほど避難効率が低下することを明らかにした。

5.2. 今後の課題

本研究では、滞留発生を避ける避難方法の実用化に向け、階段室内の避難実測データを分析し、単純モデル化することにより、滞留現象を明確に表現することを試みている。また、実務者が避難訓練計画策定に利用できる簡便なツールの構築を目指した。今後の課題として、①階段避難の実測データに関するもの、②階段避難シミュレーションに関するもの、③避難方法の実用化に関するものついて以下に述べる。

一つ目の階段避難の実測データに関するものとして、階段避難シミュレーションモデルの汎用化について課題を挙げる。汎用化のためには、様々な用途・構造の建築物について、避難訓練等の実測データの蓄積と分析が重要となる。特に建物の階数の影響は大きく、高層化に伴い避難者数を増加させる懸念がある。階段室の構造としては、踊り場や階段幅、踏面・蹴上といった階段室の寸法は収容人数を決定するものであり、階段室附室の設置位置すなわち階段室への入り口の位置は合流に大きく影響を持つものと考えられ、滞留時間を増大させる可能性がある。避難訓練などより多くの参加者による実測データの収集が重要である。

二つ目の階段避難シミュレーションに関しては、シミュレーションモデルの精度の課題について述べる。本研究で構築した階段シミュレーションは、入力データの簡便化やセルオートマトンによる単純モデル化を行っているが、時系列での混雑ピークなど再現性の限界が見られた。今後より精度の高い検証を行うためには、入力データのうち、特に階段室内流入時の流動係数は、平均値ではなく、不確定性を考慮し、ピーク値を持ったポアソン分布 [44]などの確率関数として扱うためのモデル化と実装が必要と考える。また、設定など煩雑になるが、合流時など避難者同士の相互作用を考慮するため、マルチエージェントタイプのシミュレータを使っての再現を今後の課題として挙げたい。

三つ目に、滞留発生を避ける避難方法の実用化に向けた課題を挙げる。避難方法として、本研究では順次避難が全館一斉避難に比べて有効であることを明らかにしたが、順次避難の実用化に向けては実効性のある避難計画が必要であり、在館者数の把握、施設状況に合わせた想定出火階ごとの避難シナリオの作成、避難シナリオに従って避難できるような訓練・仕組みなどが課題となる。さらに、障害者や高齢者などの災害弱者の混在など、避難者属性を変えての検証も重要な課題である。また、本研究では、順次避難計画の策定手順の一案を示したが、避難フェーズ内の合流による滞留や高層階での避難効率などの課題もあり、階段避難シミュレーションを活用し、新たな避難計画の検討も今後の課題として挙げたい。

参考文献

1) 週間ダイヤモンド：ゼネコン・不動産開発バブル，2014/12/06 号，ダイヤモンド社，2014.12

2) 関澤愛，佐野友紀，門倉博之：高層建築物の全館避難時における階段歩行に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2，pp.29-30，2009.7

3) 門倉博之，関澤愛，佐野友紀，大岩大祐，矢嶋雅倫：高層事務所ビルの全館避難訓練時における階段歩行に関する実測調査とその分析その 3―順次避難訓練における各階被験者の移動プロファイル分析―，平成 23 年度日本火災学会研究発表会概要集，pp.242-243，2011.5

4) 門倉博之，関澤愛，佐野友紀，矢嶋雅倫，増田誠良：高層事務所ビルの全館避難訓練時における階段歩行に関する実測調査とその分析その 5―順次避難訓練における被験者移動プロファイルと流動性状の分析―,平成 24 年度日本火災学会研究発表会概要集，pp.136-137，2012.5

5) Hiroyuki Kadokura, Ai Sekizawa, Tomonori Sano, Masanori Yajima, Satomi Masuda：Study On Congestion In Stairs During Phased Evacuation In A High-Rise Building, Proceedings of the 5th International Symposium on Human Behaviour in Fire, 2012.9

6) 門倉博之，関澤愛，佐野友紀，藤井皓介，関澤健太，増田誠良，安藤翔：高層事務所ビルの全館避難訓練時における階段歩行に関する実測調査とその分析その 8―順次避難訓練における階段内の滞留発生に関する分析―，平成 25 年度日本火災学会研究発表会概要集，pp.42-43，2013.5

7) 門倉博之、関澤愛、佐野友紀、水野雅之、藤井皓介、安藤翔、和田哲也：高層事務所ビルの全館避難訓練時における階段歩行に関する実測調査とその分析その 11―順次避難における階段室内の滞留発生に関する分析―、平成 26 年度日本火災学会研究発表会概要集、pp.178-181、2014.5

8) 矢嶋雅倫，佐野友紀，門倉博之，関澤愛：高層建築物避難訓練実態から見た階段室内での避難者の密度と歩行速度の関係および合流比,日本建築学会環境系論文集 710 号，pp.315-323，2015.4

9) 門倉博之、関澤愛、佐野友紀、水野雅之、藤井皓介、和田哲也：高層事務所ビルの全館避難訓練時における階段歩行に関する実測調査とその分析その 14―順次避難における階段室内の滞留発生に関する分析―、平成 27 年度日本火災学会研究発表会概要集、2015.5

10) 門倉博之，関澤愛，佐野友紀，藤井 皓介：高層建築物での順次避難における階段室内の滞留発生に関する研究―全館避難訓練時の行動実態観測に基づく分析と考察―，日本建築学会環境系論文集 716 号，pp.849-856，2015.10

11) AJason D. Averill, Dennis S. Mileti, Richard D. Peacock, Erica D. Kuligowski, N Groner, Guylene Proulx, Paul A. Reneke, Harold E. Nelson：Occupant Behavior,

Egress, and Emergency Communication. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster, NIST NCSTAR 1-7, 2005.9

12) Richard D. Peacock, Bryan L. Hoskins, Erica D. Kuligowski ：Overall and Local Movement Speeds During Fire Drill Evacuations in Buildings up to 31 Stories, Pedestrian and Evacuation Dynamics, pp.25-35, 2011.

13) 北後明彦，久保幸資，室崎益輝：階段室における 2 群集の合流に関する実験的研究，日本建築学会計画系論文報告集，No.358，pp.34-43，1985.12

14) 佐野友紀，竹市尚広，木村謙，大宮喜文，吉田克之，渡辺仁史：高層建築物避難を想定した階段室における在館者群集の合流特性，日本建築学会計画系論文集，No.598，pp.51-56，2005.12

15) 池畠由華，村上正浩，関澤愛：高層建築物の階段避難における流動性状に関する研究 階段踊場における合流方向と 2 群集の合流比率の分析，平成 26 年度日本火災学会研究発表会概要集，pp.38-39，2014.5

16) 山本昌和，石突光隆：駅の階段とホーム狭隘部における混雑時の歩行安全性評価，鉄道総研報告，第 27 巻第 6 号，2013.6

17) 室崎 益輝：現代建築学　建築防災・安全，鹿島出版会，pp.125-144，2000.1

18) 河上省吾，松井寛：交通工学，森北出版，pp.111-113，2004.11

19) J. L. Pauls:Calculating Evacuation Times for Tall Buildings, Fire Safety Journal, Vol.12, Issue 3, pp.213-236, 1987.12

20) 防災研究会 AFRI：建築防災計画の考え方・まとめ方，オーム社，pp.3-9，2006.1

21) 日本建築学会編：事例で解く改正建築基準法　性能規定化時代の防災・安全計画，彰国社，pp.16-19，2001.4

22) 国土交通省住宅局，国土交通省建築研究所：2001 年版 避難安全検証法の解説及び計算例とその解説，海文堂出版，2002.

23) 日本建築センター：新・建築防災計画指針，日本建築センター，1995.

24) 兼田敏之：artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション，構造計画研究所，pp.27-35，2010.4

25) 西成活裕：図解雑学　よくわかる渋滞学，ナツメ社，pp.106-107，2009.8

26) 小山維之，篠崎喜彦，森下　信：セルオートマトンによる群集流動の特性に基づく歩行行動のモデル化　避難行動シミュレーションの開発　その１，日本建築学会環境系論文集，No. 691，pp.669-677，2013.9

27) Hiroyuki Kadokura, Ai Sekizawa, Wataru Takahashi ： Study on availability and issues of evacuation using stopped escalators in a subway station, Fire and Materials, Volume 36 Issue 5-6, pp.416-428, 2012, DOI:10.1002/fam.1097

28) 日本火災学会（火災時の避難行動専門委員会）:「避難シミュレーションモデルの現状とこれから」に関するシンポジウム，日本火災学会，2010.7

29) 掛川秀史，海老原学，関澤愛，野竹宏彰，大脇厚：階段内歩行のモデル化による全館避難の検討　煙流動・避難行動連携モデルに関する研究―その 5－，平成 18 年度日本火災学会研究発表会概要集，pp.482-485，2006.
30) 峯岸 良和，吉田 克之，竹市 尚広，木村 謙，佐野 友紀，林田 和人，渡辺 仁史：マルチエージェントモデルにおける階段内歩行のモデル化－歩行者シミュレーションシステム SimTread の基本性能 その２－，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.81-84，2008.2
31) 峯岸 良和，竹市 尚広，吉田 克之：マルチエージェントモデルによる大規模ホールにおける避難性状の予測－歩行者シミュレーションシステム SimTread の実務的利用可能性の検証－，日本建築学会技術報告集，第 15 巻　第 29 号，pp.227-232，2009.2
32) フォーラムエイト：building EXODUS マニュアル（理論編），2014.1
33) 脇山 宗也，木村 香代子，添川 光雄：超高層建物を対象とした火災避難シミュレーションシステムの構築超高層建物を対象とした火災避難シミュレーションシステムの構築，第 51 回自動制御連合講演会，pp.1008-1011，2008.11
34) 井田卓造，桑名秀明，澤由季：階段シミュレータの開発，日本建築学会技術報告集　第 16 巻　第 34 号，pp.1009-1014，2010.10
35) Enrico Ronchi，Daniel Nilsson：Fire Evacuation in High-rise Buildings: a Review of Human Behaviour and Modelling Research，Lund University，2012.
36) J. L. Pauls：Evacuation and Other Fire Safety Measures In High-Rise Buildings，NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA，ASHRAE TRANSACTIONS，Vol.81，Part1，pp.528-534，1975
37) 安倍北夫，岡部慶三，三隅二不二：自然災害の行動科学，福村出版，pp.110-111，1988.10
38) Arlida Ariff：Review of Evacuation Procedures for Petronas Twin Towers，Proceedings of the CIB-CTBUH International Conference on Tall Buildings，pp.35-42，2003.10
39) J.J.Fruin：歩行者の空間－理論とデザイン－，鹿島出版会，pp.45-51，1974
40) 北栄輔，脇田佑希子：Excel で学ぶセルオートマトン，オーム社，pp.138-139，2011.11
41) 加藤 恭義，築山洋，光成友孝：セルオートマトン法―複雑系の自己組織化と超並列処理，森北出版，pp.18-22，1998.10
42) 三井和男：数学モデルを作って楽しく学ぼう　新 EXCEL コンピュータシミュレーション，森北出版，2012.3
43) 日本建築学会：生活空間の体験ワークブック，彰国社，p.135，2010.4
44) 鈴木成文，守屋秀夫，太田利彦：建築計画，実教出版，pp.264-265，2007.2

謝辞

本研究を遂行し学位論文をまとめるにあたり、指導教員の東京工業大学大学院末松孝司連携教授に多くのご支援とご指導を賜りました。末松先生には、これまでシミュレーション技術をご教授頂き、博士後期課程進学の機会を与えて頂きました。また、仕事と研究の両立が難しく、なかなか研究が進まない筆者を励まし、背中を押して頂きました。心より感謝申し上げます。

ご多忙の中、審査委員として貴重なご指摘、ご助言を頂いた東京工業大学大学院元結正次郎教授、同翠川三郎教授、同大佛俊泰教授、同室町泰徳准教授、同松岡昌志准教授、同大野隆造名誉教授に心より感謝申し上げます。また、副指導教員の元結先生には、博士後期課程進学前から貴重なご意見やご助言を頂きました。重ねてお礼申し上げます。

これまで長きにわたり、ご指導頂いた東京理科大学大学院の関澤愛教授に心より感謝申し上げます。関澤先生には、本研究の基となる避難訓練実測調査に参加するきっかけを与えて頂き、その後の論文執筆や国際会議発表などご指導頂きました。早稲田大学佐野友紀教授にも避難訓練実測調査を通じ、様々なご指導頂きました。心より感謝申し上げます。また、避難訓練実測調査に協力して頂いた皆様方に心より感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、ご支援やご協力を頂きながら、ここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々に心よりお礼申し上げます。

最後に、これまで私を支え応援し、研究と論文執筆の時間を私に与えてくれた妻に心より感謝致します。

2016 年 3 月

門倉　博之