

博士論文

セルオートマトンによる二階層の複雑系モデルを用いた
建築物の避難安全性評価方法の開発

Development of Evacuation Safety Evaluation Method of Building
using Double-layered Complex Model by Cellular Automata

国立大学法人 横浜国立大学大学院 環境情報学府

篠崎 喜彦

Nobuhiko Shinozaki

2015 年 6 月

セルオートマトンによる二階層の複雑系モデルを用いた
建築物の避難安全性評価方法の開発

Development of Evacuation Safety Evaluation Method of Building
using Double-layered Complex Model by Cellular Automata

所 属： 横浜国立大学大学院 環境情報学府
博士課程後期（環境システム学専攻）

指導教官： 森下 信 教授

学籍番号： 10TB005

氏 名： 篠崎 喜彦

目次

第1章 序論

1-1. 研究の背景.....	1
1-2. 研究の目的と意義.....	5
1-3. 研究における問題点の分析.....	6
1-4. 研究の方法.....	11
1-5. 論文の構成.....	16

第2章 従来の避難行動時間の予測計算方法における問題点と解決方法の提案

2-1. 日本の建築避難計画に関わる性能規定.....	19
2-2. 従来の避難時間の予測計算方法の概要.....	20
(1) 避難者モデル.....	20
(2) 避難空間モデル.....	21
(3) 避難開始時間.....	23
(4) 居室避難行動時間.....	27
(5) 階避難行動時間.....	30
(6) 全館避難行動時間.....	32
2-3. 従来の避難行動時間の予測計算方法における問題点.....	33
2-4. 解決方法の提案.....	34

第3章 従来の避難シミュレーションモデルとセルオートマトンの概要

3-1. 従来の避難シミュレーションモデルの概要.....	39
3-2. セルオートマトンの概要.....	43
(1) 1次元セルオートマトン.....	43
(2) 2次元セルオートマトン.....	47

第4章 セルオートマトンによる一方向流モデルの構築

4-1. 本章の目的.....	50
4-2. セルの設定.....	50
4-3. 方向ベクトル.....	51

4-4. 自由歩行速度.....	52
4-5. 水平路一方向流モデル.....	54
(1) 群集流動及び再現目標とする歩行行動状態.....	54
(2) パーソナルスペースと局所近傍則の設定.....	54
(3) 水平路一方向流におけるシミュレーション方法とシミュレーション結果.....	57
4-6. 階段一方向流モデル.....	60
(1) 再現目標とする歩行行動状態.....	60
(2) パーソナルスペースと局所近傍則の設定.....	60
(3) 階段一方向流におけるシミュレーション方法とシミュレーション結果.....	62
4-7. 小括.....	64

第5章 一方向流モデルの歩行行動シミュレーション適用化検証

5-1. 本章の目的.....	65
5-2. 水平路のネック部における歩行行動シミュレーション.....	65
(1) 平面モデルと設定条件.....	65
(2) シミュレーション結果と考察.....	66
5-3. 水平路の合流における歩行行動シミュレーション.....	67
(1) 平面モデルと設定条件.....	67
(2) シミュレーション結果と考察.....	68
5-4. 水平路と階段の合流における歩行行動シミュレーション.....	70
(1) 水平路と階段モデルと設定条件.....	70
(2) シミュレーション結果と考察.....	72
5-5. 小括.....	76

第6章 一方向流モデルによる歩行行動モデルの避難シミュレーション適用化検証

6-1. 本章の目的.....	77
6-2. 本避難シミュレーションにおける避難行動モデル.....	77
(1) 避難行動モデル.....	77
(2) 複数の出口がある場合の避難行動ルール.....	78
6-3. 居室避難シミュレーション.....	79
(1) 平面モデルと設定条件.....	79
(2) シミュレーション結果と考察.....	80

6-4. 居室避難を含めた階避難シミュレーション.....	82
(1) 平面モデルと設定条件	82
(2) シミュレーション結果と考察	83
i) 居室避難.....	83
ii) 階避難.....	83
6-5. 居室避難, 階避難を含めた全館避難シミュレーション.....	86
(1) 建物モデルと設定条件	86
(2) シミュレーション結果と考察	88
i) 居室避難.....	88
ii) 階避難.....	88
iii) 全館避難.....	90
6-6. 小括	93
 第7章 本避難シミュレーションを用いた建築物の避難計画における実用有効性の検証	
7-1. 本章の目的.....	95
7-2. 高層建築物の階段配置計画における課題.....	95
7-3. 高層事務所ビルにおけるケーススタディ.....	96
(1) 建物モデルと設定条件	96
(2) シミュレーション結果と考察	100
i) 階避難.....	100
ii) 全館避難.....	100
iii) 検証法と本避難シミュレーションの比較検討	102
7-4. 小括	105
 第8章 結論	
8-1. まとめ	106
8-2. 今後の課題と発展可能性	110
 参考文献リスト.....	113
 謝辞.....	118

第1章 序論

1-1. 研究の背景

近年の建築技術の進歩に呼応して建築物の巨大化，高層化が急速に進んでいるが，Council on Tall Buildings and Urban Habitat（高層建築と都市居住に関する国際委員会）の報告によると，2014年現在における高さ200m以上の超高層建築物は，既に世界で935棟に達している^[1]。過去の技術進化の歴史を俯瞰すると，ほぼ同時期に登場した複数の技術によって新しい時代が開花する偶然または何がしかの必然を見ることがあるが，現在の建築物の巨大化，高層化も，まさしく19世紀の建築材料としての鉄とガラスの登場，アンリ・ラブルースト（仏，Henri Labrouste），ギュスターヴ・エッフェル（仏，Alexandre Gustave Eiffel），ジョゼフ・パクストン（英，Sir Joseph Paxton）等による構造計算法の登場，エリシャ・グレーヴズ・オーティス（米，Elisha Graves Otis）によるエレベーター設備における落下防止装置の発明等の複数の技術進化に端を発するものであり，現在でもコンピュータによる高度な構造解析技術や，エレベーター設備制御等の様々な超高層技術における著しい競争の集積が，建築物の巨大化，高層化の進歩を牽引している^[2]。

一方で現在の建築物の避難計画については，例えば100年前に造られた建築物と見比べた場合，防火区画や排煙設備を設けた付室（階段前室）の設置等の二次的な階段構造についての改善は徐々に積み重ねられているとしても，根本的な建築プラン側の計画技術についての進歩は余り見られず，構造計算やエレベーター設備計画等における高度の解析技術の進歩と比較するとその進歩の歩調は異なり，その技術水準は遅れている印象があることは否めない。ひとたび出来上がった建築物の避難計画の良し悪しを計算法やシミュレーション等によりチェックする方法はあるが，その所与の避難計画自体は他の前例の模倣や熟練設計者の経験的直観により創られているものであり，工学的に裏付けられた合理的な手順によるものではない。またその建築物の避難計画に関わる法令自体も科学的あるいは工学的に裏付けられたものではなく，防災分野の専門家の経験則や諸外国の法令の相互の参照に基づく規定となっている^[3]。一般的に建物災害は頻繁に発生するものではなく，避難階段等の避難施設は建物内部に隠れ日常的に目に触れる機会が無いいため余り問題視されないこと，また建物災害が発生したとしても火災の場合は後の研究に結びつくデータが残っていない場合が多いこと，更

に緊急事態の再現実験も容易ではないことが、この進歩の遅れの要因として考えられる。過去の建物災害において避難上の重大事故が発生した際、その都度教訓として法令改善に努め、現在では建物運用上の不手際による事故は未だに散見されるとしても、法令の不備による避難上の重大事故が特に発生していないことを考えると、現在の避難計画方法自体は相応の安全性を具備しているとも言える。しかし一方で、即座に危険な状況であるとは言えないにしても、現在の避難計画方法を合理的に肯定または否定する方法論もないため、人々の想定を超え急速に進歩する超高層建築物の避難施設においては、もしかすると分不相応の役割を与えられているのではないかと考えられる。少なくとも現在の避難計画技術は、昨今急速に進化する他の超高層諸技術の進歩競争に比べて、満足に対峙できる技術レベルには至っていないと言える。避難階段等の避難施設はインシヤルコストも高く、建築計画上のレントブル比やコア計画に大きな影響を及ぼすキーデバイスであり、更に災害時の人命に関わる最も重要な設備であるため、少なくとも他の超高層技術の進歩と歩調を合わせた合理的な避難施設の計画手法の登場が望まれるべきである。

現在の高層建築物では、経済的な基準階設計（各階プランを同一形状とする設計）が主流であり、そのため避難階段は直通階段（最上階から避難階まで同じ平面位置で縦方向一直線に繋がっている形式）が慣習化された手法となっている。直通階段は日本を含む諸外国の法規制にもなっており、それなりに安全性を保持した計画方法と言えるが、この直通階段も前述の防災分野の専門家の経験的判断や諸外国規定の相互の参照に基づくものであり、工学的に裏付けられた設計法ではない。一方で日本の建築基準法では、階数や建物規模に応じて避難施設を要求する規定は 15 階までとなっているため、例えば 15 階建て事務所ビルと同じ基準階プランで 50 階建て、100 階建ての超高層建築物を計画することは可能であり、そのことに対して直通階段を増やすなどの更なる追加的な法的制約は設けられてない。この法規制には建築設計の専門家でもなくともおそらく違和感を覚えるのではないと思われる。しかし法的な規制があろうと無かろうと、建築物の安全性に対する建築主や建築設計者の社会的責任意識と、その手段としての避難計画方法があれば、より安全な建物を作ることは可能である。日本ではこのような課題に対して、任意ではあるが 2000 年から避難安全検証法^[4]という諸外国には無い性能規定を施行しており、この避難安全検証法により多くの高層建築物が誕生している。しかしこの避難安全検証法は、火災時の避難安全性の可否を

単に判定するだけの簡易計算法であるため^[5]，単純なケースを除き実態に即した適正な避難時間の算出はできず，またその目標とするクライテリア（避難経路における煙降下時間）が一定値でなく設計内容により恣意的に変えることが可能となっているため，最低限の避難安全性能の評価は可能であるが，昨今の建築物の巨大化，高層化に対処するための避難計画方法としては不十分なものとなっている。またこの避難安全検証法の適用によって排煙設備や避難階段等の防火避難規定が適用除外できるため，その結果として，建設コストと避難安全性能のトレードオフが可能となり，従来の仕様設計方法よりも却って安全性が劣る建築計画を誘発しているケースが多く見られるようになった。このように避難安全検証法による性能規定化は，一意的な仕様規定から自由で合理的な性能設計への新たな道を開いたものであるが，一方で建築設計者の矜持に期待するだけでは解決できない新たな難問を生じさせることとなった。

一方でコンピュータによる避難シミュレーションについては今まで多くの研究成果が報告され，また幾つかのシミュレーションソフトが市販されており利用することができる。しかし多くの避難シミュレーションではそのモデルの妥当性の証明が困難であるため，建築計画の場面において十分有効に実用できるレベルに至っているとは言えない。シミュレーションモデルの妥当性の証明は，再現目標と再現結果との照合によって示されることとなるが，この再現目標の設定については，人間は通常あまり意識せずに思考の対象範囲とそれ以外を棲み分けることができるが，コンピュータは人間と違い，再現目標の対象範囲の設定が極めて複雑で困難となる「フレーム問題」が人工知能の分野で指摘されている^[6]。これは例えば地震や火災や台風等の災害時に避難を行う場合，大抵の人間は災害発生地点と現地点の位置関係，災害の拡大・接近状況，避難指示等の情報，現地点での周囲の反応状況，自分自身の年齢，性別，性格，体調，立場等の無数の情報を特に秩序立てるわけでもなく，何が行動判断に関係する情報か抽出し，殆ど無意識かつ同時並行的に，避難するか否か，どの方向へ避難するか，まだ余裕はあるのか，何を持ち出すか等の判断を，例えば子どもといえどもそれなりに行っているが，コンピュータにおいては一つの行為を行うにあたり，その行為に関係する条件を自動的に設定したり選別したりすることができないため，その都度関係する条件を全て列挙した上でプログラム化しておかなければならないという問題である。そのため，何を再現対象として何を捨象しているのか，その再現目標が不明瞭となっているシミュレーションが多く見受けられ，これがシミュレーションの再現結

果の妥当性証明を困難にしている。また再現目標と再現結果との照合において、仮に従来の計算法とシミュレーションの再現結果が一致し、そのシミュレーションモデルの妥当性が証明できたとしても、一方でその再現結果が従来の計算法で予測できるのであれば、そもそもの話としてシミュレーションの存在意義はなくなる。従ってシミュレーションの存在意義は従来の計算法では予測不能な現象の再現及び解析にあることになるが、今度はその再現結果の妥当性の証明が従来の計算法との比較ではできないというジレンマを抱えることとなる。そのため多くの避難シミュレーション研究では、そのシミュレーション結果の妥当性証明を再現実験等における実測結果に頼ることとなるが、前述の通り多くの避難シミュレーションではその再現目標の対象範囲を明確に示さず、むしろ予期せぬ創發現象を期待し、多様な現実現象を再現目標としているケースが多い。従ってその再現結果の妥当性が証明できずに、結論が見出せない堂々巡りに陥るケースが多く見受けられる。このシミュレーションモデルの妥当性証明が、避難シミュレーション研究において最も困難とするところである。その結果、現在の避難シミュレーション活用については、日本では東京消防庁が行っている優良防火対象物認定表示制度「優マーク」^[7]において、竣工後の建築物に対する避難シミュレーション活用を認めているケースが一部としてあるが、建築計画における場面では、今のところ主要な設計判断には用いることはせず、再現が困難な避難行動実験を補完する程度の利用に留まっているのが実状である。

本研究における問題提起は、某超高層ビルの建築計画において、最適な避難階段の配置検討を求められた実務上の経験に端を発している。私はここ 10 数年、建築物の防災計画、避難安全設計に関わっている建築エンジニアであるが、その従来の想定を超えた巨大な平面プランを持つ建築物における最適な避難階段の数、位置等に対して、避難安全性能の定量的評価を適正に行うことができる計画方法論が無いため、具体的に論証することが出来ず、忸怩たる思いをしたことが本研究の出発点となっている。しかし建築業界ではこのように当然なされている筈の基礎的な研究がなされていないことについての問題提起は前述の通り余り聞かれず、むしろ問題としても扱われていないのが現状である。前例がない規模や複雑さを持った建築物の避難施設ほどリスクもコストも巨大となるが、このような建築物ほど一旦完成すると巨大な社会資本として長期間に渡り存在し続けることとなる。また建築主は企業として経済的な収益性を追求するのは当然であるが、近年では同時に企業倫理及び社会的責任も果たさなけれ

ばならない時代要請がある。そのため建築設計者もその建築物に対して単に法令に遵守しているだけでなく、工学的な根拠に基づいた設計提案を行い、合理的で最適な選択であることの説明責任が建築主や社会に対して求められるようになってきている。更に一方で、近年の超高層関連技術の進歩に牽引され、中東、東南アジア、中国等の新興国における建築物の超高層化競争は特に著しく、また現在の構造解析技術やエレベーター技術等に基づく試算では、高さ 1 マイル（約 1600m）の建設が可能とされている^[8]。2014 年現在、世界で最も高い超高層ビルは、2010 年にアラブ首長国連邦のドバイに完成した高さ 828m、地上 160 階のブルジュ・ハリファであるが、サウジアラビアでは 2019 年までに、高さ 1007m、地上 167 階のキングダム・タワーを建設することを発表し、既に 2014 年 4 月に着工している。また中東では他にも高さ 1000m を超える数棟の超々高層建築物の計画を発表しており、数年後に訪れる 2020 年代の世界は、高さ 500m 級の超高層ビルは当たり前となり、高さ 1000m 級の超々高層ビル競争時代に突入することが予見されている^[9]。このような急速な建築物の巨大化、高層化の流れや、前述の合理的な説明が求められる社会的変化の中で、最適な避難安全設計が具体的に提示できる工学的手法の確立は急務であると言える。

1-2. 研究の目的と意義

本研究の広義的な到達目標は、急速に巨大化、高層化する建築物の高度な安全性要求に対応するための合理的で安全な新しい避難計画の最適化方法を提案することである。近年では火災覚知に基づく避難開始設定の研究や、災害時におけるパニック等を抑制・回避するための避難誘導等の研究に見られるように、多様な条件下における建築計画のソフト側の避難安全研究が盛んであるが、このような傾向に対して、本研究は建築計画のハード側の工夫によって、建築物の避難安全性能を向上させることを目指している。そのためには建築物が具備している避難安全性能を、その避難計画の実態に応じて定量的に解析し、その理論値を算出する工学的手法の確立が必要である。その避難安全性能の理論値については、一定の条件下における居室避難、階避難、及び全館避難行動時間の適正な値の算出により可能になると考えている。これらの避難行動時間を避難シミュレーションにより適正に解析し、建築物が具備している避難安全性能を定量的に評価することが本研究の具体的な目的である。従って、本研究における避難シミュレーションの再現目標とする避難行動状態は、多様な人間モデル及び

多様な条件下における現実現象そのものの再現ではなく、多様な現実現象を代表する一定の人間モデル及び一定の条件下における避難行動状態の再現となる。

建築形態が巨大化・多様化していく中で、如何に建築物の安全性への配慮を図っていても、想定外の災害が起こりうる可能性が全く無くなるとは言い難い。そのため数多くのケーススタディを可能とする避難シミュレーションは、今後の建築設計過程においてますます求められる課題となっている。その数多くのケーススタディ結果の比較評価により、従来相反すると考えられている建築物の避難安全性（避難行動時間）と経済的効率性（避難施設面積）の最適化が可能となり、建築計画時における合理的な意思決定、合意形成が進み、更に従来の常識にとらわれない新しい避難計画の提案が可能になることが期待できる。また一方で超高層建築物だけでなく、大型競技場やコンサート会場、大型商業施設、駅舎等の避難計画や、街区レベルの広域避難計画における利用効果も期待できる。そのような意義を持つ本研究の具体的な目的は“適正な避難行動時間の算出”であり、この避難行動時間算出の可否が本研究の成否を分けることとなる。それでは、一見すると簡単とも思えるこの避難行動時間の算出が今まで何故できていないのか？ 研究を開始する前に次節以降において、現状の問題点とその原因分析及び問題解決手順の設定について概説する。

1-3. 研究における問題点の分析

日本における建築物の防火避難規定の原則は、建築基準法の仕様規定において定められているが、そこでは直通階段の位置と数については建物用途と居室からの歩行距離と重複距離に基づき規定しており、直通階段を含む避難施設の面積と幅員については建物用途と居室面積（更に言えば建物用途と居室面積から換算される各階人数）に基づき規定している。更に物販店舗では避難階段の幅員や出入口幅について直上階以上（地下の場合は当該階以下）の床面積に基づき規定している^[10]。アメリカにおける建築物の避難施設の規定は、「Building Exit Code.1927」,「Design and Construction of Building Exit Code.1935」,「Life Safety Code.1985」において徐々なる変遷が見られるが^[11], 階段を設置する場合の考え方の原則は、日本の仕様規定と同様に居室からの歩行距離及び各階人数に基づき階段数や階段幅を規定している。2000年に統一されたアメリカの建築コード「International Building Code」においては、階段幅は最低 44 インチ(1118mm)として、且つ各階の収容人数一人当たり 0.3 インチ(7.62mm)

以上と規定している。またイギリス、フランス、オーストラリアの諸外国における建築物の避難施設の規定でも細かな点について相違は見られるが、居室からの歩行距離と各階人数に基づき階段数や階段幅を規定する基本的な考え方は同様となっている^[3]。

このように諸外国の建築物の避難施設規定では共通した仕様規定が見られるが、日本における建築物の防火避難規定では、合理的で自由な設計を可能とする性能設計が任意で採用できるように、仕様規定とは別の設計ルートとして性能規定が用意されている。この点においては、日本は先進諸外国の中でも最も進んでいると言える。その性能規定における避難時間予測の基本的な考え方は、避難行動予測計算法における避難予測モデルの理論^[12]に示されており、また具体的な計算法としては、新・建築防災計画指針の避難計算法^[13]（以下「指針法」）と避難安全検証法^[4]（以下「検証法」）が現在公的に確立されている。それらの計算法では、どちらにおいても避難時間は避難開始時間と避難行動時間の和となっているが、本研究が対象としているのは後者の避難行動時間である（図 1-1 参照）。避難行動時間は更に歩行時間と出口通過時間により算出するが、先ず指針法における避難行動時間は、居室避難では歩行時間と出口通過時間の最大値を採用し（図 1-2 参照）、階避難では避難計算グラフを用いて具体的な避難状況を明示し、どちらも実態に近い避難行動時間を算出している。しかし指針法では、階段流入以降の予測方法を示していないため全館避難時間の算出ができず、また幾つもの火災シナリオに対して避難計算を行うことは実務上困難であるため、建築基準法では 2000 年 6 月に検証法を施行し、全館避難を含めた簡易計算法を示している。その検証法における避難行動時間は指針法と異なり、簡易的に歩行時間と出口



図 1-1 避難時間の考え方

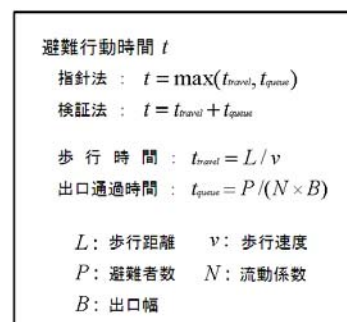


図 1-2 避難行動時間の考え方

通過時間の和としており（図 1-2 参照），実際の避難行動時間よりも長い安全側の指標値を示すことで多数の火災発生ケースに対する検証を行わずともリスクを排除することを意図している。一方で検証法は，実態に即した適正な避難行動時間の算出や，経過時刻毎の具体的な避難状況の把握ができないなど，その簡便さと引き換えに指針法における有用な機能が排除されている。そのため検証法では現在，本論文において「基準値問題」と「性能値問題」と称する 2 つの問題が生じることとなった。先ず性能設計とは，或る設計に基づき解析される性能値が基準値内であることにより，その設計が妥当であることを証明する設計法であるが，検証法では火災時の煙降下時間と避難時間との比較により避難安全性能の評価を行い，避難時間が煙降下時間よりも短いことを証明することにより，一部の防火避難規定に対して従来の仕様規定を超えた自由な設計を可能としている。ここで避難時間に対する基準値は煙降下時間である一方で，煙降下時間に対する基準値も避難時間であるため，例えば防火・防煙区画や排煙設備等を強化して煙降下時間を延長すれば，基準値自体の恣意的な調整が幾らでも可能となり，その基準値の調整によって過度に避難施設を縮小することも可能となる。一つはこのようにクリアすべき基準値が相対的で不定であることの問題（基準値問題）である。また検証法では，最も早いと想定される煙降下時間の代表値と，最も遅いと想定される避難時間の代表値同士を比較して，各々の代表値（性能値）が互いの代表値（基準値）に対して十分条件であることの証明を目的としているため，実態に即した煙降下時間や具体的な建物規模や在館者数に相応した適正な避難時間を精緻な方法で算出するまでの必要はない。そのため静的な計算法で解析できない複雑な状態における予測計算においては，簡易的に十分に余裕のある安全側の性能値が算出される仕組みを採っている。もう一つはこのように検証法のそもそもの目的により，適正な性能値の算出が不能であることの問題（性能値問題）である。これら 2 つの問題の中で，本研究では後者の性能値問題における避難行動時間の適正な算出がその問題解決の対象となるが，そこでの根本的な問題点を指針法も含めもう少し詳しく述べる。先ず指針法，検証法の予測計算法に基づき適正な避難行動時間の算出ができるのは単純な一方向流状態までであり，避難先空間に在室者が存在する場合や，他の空間からの避難者との合流が発生し一定の密度を超える場合は，歩行行動状態に滞留が生じるため指針法，検証法ともに避難行動時間が算出できない。そのため先ず指針法では安全側の判断として合流状態が生じる廊下，付室について滞留状態が生じないように必要最低

面積を制限している。一方、検証法では合流状態が生じる廊下、付室、階段における必要最低面積が下回る場合は、その廊下、付室、階段に流入する（全館避難においては階段流出も含む）出口流量を低下させることで、簡易的に安全側の数値が算出できる工夫を行っている。指針法、検証法は、他の先進諸外国にはない優れた予測計算方法であるが、このように適正な避難行動時間が算出できる範囲は合流が発生し一定の密度を超え滞留が生じる以前の単純な一方向流の状態までであり、避難行動時間の予測計算法としては限界があると言える。

一方、災害時の避難行動については、既往のデータが乏しく再現実験が困難であることもあり、従来からコンピュータシステムを用いて避難行動状態を動的に再現するシミュレーションは数多く研究されている。その手法は人間モデルや空間モデルにおいて様々なタイプの組合せが見受けられるが、概ね「流体モデル」と「個体モデル」に大別できる。流体モデルとは、大きなメッシュや空間に複数の人を配置し、マクロな流体として導出した支配方程式により人の動きを全体の流動として見る手法であり流量モデルとも言われる。全体から個の要素の状態を分析する演繹的で確実性が高い手法と言えるが、この手法では予定された結果が解析されるように予め計算条件を組み込んでいるケースが多く、その場合、膨大な計算の手間と時間を省力化することはできても、従来の支配方程式で算出できない帰納的な現象を解析する手段にはならない。一方、個体モデルとは、ミクロな個体同士の相互作用から生じる創発現象により全体の状態を帰納的に再現することにより、従来の要素還元主義的な手法とは異なり、部分の和を超えた未知の創発現象の解析が期待できるシステム論的な手法である。この個体モデルには、セルオートマトン(Cellular Automata)、マルチエージェントシステム(Multi-Agent System)に代表される規則ベースのシミュレーション手法がある。既往研究においてセルオートマトンやマルチエージェントシステムによってもたらされる創発現象からある自然現象との関連が見出され、これらの手法の可能性が脚光を浴びる事例は少なくないが、それはごく一部の自然現象に留まっており、実際の現実現象の解明は生易しいものではない。またセルオートマトンやマルチエージェントシステムを用いた多くの既往研究では、本論文において「再現目標問題」、「再現結果問題」及び「再現実験問題」と称する3つの問題によりシミュレーションモデルの妥当性が証明できない難問を抱えており、本研究においても、これらの3つの問題は予め解決しておかなければならない大きな課題であると考えている。

先ず多くの避難シミュレーション研究において最初に行うモデル設定では、Floor Field モデルや Social Force モデルなどの既存モデルをベースとするもの、または独自の設定を行うものがあるが^{[14]~[21]}、これらの場合では複雑な現実現象に対して具体的な再現目標を与えることが極めて困難であるためか、最初に明確な再現目標を具体的に設定しているシミュレーションは皆無であると言える。セルオートマトンやマルチエージェントシステムにおける複雑系研究では「個々の要素の振る舞いから予測範囲を超える全体の現象再現を行う」というボトムアップ的手法が基本的な考え方として前提にあるが、その前提からすると明確な再現目標を予め規定しないこれらのモデル設定は不可避な結果であるかもしれない。しかしこれらのモデルではそのシミュレーション結果を比較評価するための再現目標を予め明確にしていなかったため、そもそもの方法論としてモデルの妥当性を証明することができない。これが「再現目標問題」である。従ってモデルの妥当性は、再現目標を明確に示した上で、シミュレーション結果と従来の計算法による予測結果との照合によって示せば良いと考えられるが、一方で従来の計算法でも予測できるのであれば、そのシミュレーションの存在意義は、前述の通り新しい知識を作り出すことではなく、計算の手間と時間の省力化以外に無いこととなる。反対にシミュレーションにより従来の計算法の予測範囲を超える再現を目標とする場合、今度はその再現結果の妥当性を証明することができない。このようなシミュレーション結果の扱いにおけるジレンマが「再現結果問題」である。既往研究ではこの問題の解決のために、実物大実験まで行いシミュレーション結果を比較し、更にその結果に基づきモデルの改良を加えても、なかなか結論が得られず堂々巡りを繰り返している事例、またはその後音沙汰が無くなる事例が散見される^{[22][23]}。これは学生や研究所員等の実験に精通した成人が、大学や研究所等の精通した建物内で行う類の実験が、多様な年齢や性別を含めた群集行動や災害に遭遇した際の避難者の反応等の現実現象を代表していないこと、またそもそも実験条件と比較対照する避難シミュレーションの再現目標との一致が不確かなことによる問題と、一方で仮に実験条件と再現目標が一致していたとしても、複雑系モデルの特徴として、シミュレーション結果を実験結果に一致させるために、複数ある初期パラメータのどのように調整すれば良いのかを分析することが困難であるという問題によるものである。これが「再現実験問題」である。また実物大実験までは行わないが、一部では他の既往研究等の実測結果をモデル設定に反映してシミュレーション精度を向上させようとする事例も

見受けられる^{[21][24]~[27]}。但しこれらの多くは未だ単純な通路上の歩行再現や出口通過など極めて部分的な検証とその範囲での補完的な活用に留まっており、全館避難を含めた建物全体の避難シミュレーションとして、全幅の信頼で実用しているシミュレーションモデルは少なくとも現状では皆無であると言える。これらが個体モデルにおけるシミュレーション研究の難しいところであるが、これらの問題を俯瞰してみると、複雑系分野の研究が従来の科学的方法には馴染まないことによって生じている必然的な問題であるとも言える。

以上が、単純な一方向流において合流が発生し一定の密度を超え滞留状態となる場合に適正な避難行動時間の算出ができず、その方法が今まで確立されていない原因であると考ええる。従って、同様のジレンマや再現実験の堂々巡りに陥ることを避けるためには、シミュレーション開発に入る前に、これらの問題に対して適切な解決方法を検討する必要がある。次節において本研究の方法を概説する。

1-4. 研究の方法

前節において、指針法や検証法による静的な計算法と、流体モデルや個体モデルによる動的なコンピュータシミュレーション方法の特徴にはそれぞれ一長一短があり、単純な一方向流において合流が発生し一定の密度を超え滞留状態となる場合では、適正な避難行動時間の算出方法が今まで確立されていなかった原因を足早に述べた。同様のジレンマや再現実験の堂々巡りに陥ることを避けるためには、幾つかの発想の転換を伴う出口戦略が必要であるが、その説明の前に前述の従来の科学的方法に立ち戻ることとする。その科学的方法とは、観察対象とする現象に関与すると考える要因のみに差異を与え、それ以外の条件を一定にコントロールする比較対照実験を通した仮説検証のことである。ここでその要因を人間モデルと空間モデルに大別した上で個体モデルにおけるシミュレーション研究をこの科学的方法に当て嵌めると、少なくとも最終的に実物大実験との比較検証を伴う研究の観察対象は、個々の人間モデルから創発される群集行動、またはその人間モデルと空間モデルとの相互作用から創発される群集行動であると言える。分かり易く言うと、この類の研究の目的は、実物大実験を通して、群集行動（現象）を構成する人間モデル（要因）を分析することである。それに対して本研究の目的は、“建築計画のハード側の工夫によって、建築物の避難安全性能を向上させること”であるため、観察対象とする現象に関与すると考える要因

は、人間モデルではなく空間モデルとなり、多様な避難行動を再現する人間モデルの分析を目指す群集行動研究とはそもそもの目的が異なる。またあまりこの複雑で多様な人間モデルの分析に重きを置くと、研究目的とそのための手段の関係が主客転倒しかねない。従って本研究の避難シミュレーションにおいては、人間モデルは前述の“要因”ではなくむしろ一定にコントロールされた要因以外の“条件”であり、複雑な現象に付与している本質的な要素のみを抽出した普遍的な歩行行動モデルとして相当程度妥当であるという条件を満たせば一定の流体であれば十分であることになる。先ずこの従来の科学的方法に照らした研究目的の明確化により「再現実験問題」の堂々巡りに陥ることを回避する。







次に、この相当程度妥当であると認められる避難行動状態をどのように構築するかということが課題となる。指針法、検証法における静的な計算法では、動きのある避難行動状態を想像により補うことが余儀なくされるが、本研究では適正な避難行動時間の予測手段として、個体モデルのコンピュータシミュレーションにより、指針法、検証法そのものではなく、指針法、検証法が前提としている避難行動状態、即ち従来想像によって補っていた避難行動状態を具体的に再現することを目標とする。またこの再現目標の設定により「再現目標問題」が生じることを予め回避する。しかし適正な避難行動時間の算出には、最後に残された「再現結果問題」におけるジレンマが障害となり、従来の手法ではこのジレンマを一気に解決する決定打はないと考えられる。そこで本研究では、前述の流体モデルが持つ演繹的な長所と、個体モデルが持つ帰納的な長所を併せ持たせた複雑系モデルを考案した。従来からのジレンマに対して、本研究では以下に述べる二階層の複雑系（下位の複雑系を要素とする上位の複雑系）モデルを構築することにより実用上の解決は十分可能であると考えている。

先ず個体モデルでは、個体同士の相互作用から上位の階層となる全体現象を再現する際において、その構成要素が多いほど、また個体から上位の階層への飛躍の度合いが大きいほど相互作用の組合せが等比級数的に増加し、これがコントロールし切れないことにより再現目標と再現結果との間に著しい誤差が生じる。この問題解決には、「構成要素をできるだけ減らすこと」、「個体から上位の階層への飛躍の度合いを必要最小限に留めること」の2点の工夫が必要となる。この2点の工夫により、前提条件が増え適用範囲を狭めることとなるが、それと引き換えに再現目標と再現結果との間に生じる誤差の可能性を、最小限に抑制・排除することが期待できる。

第一に「構成要素をできるだけ減らすこと」を具体的に考えていくと、指針法、検証法の前提となる考え方を示す前述の「避難予測モデルの理論」に倣うことにより可能であると考ええる。この避難予測モデルの理論の基本的な考え方では、避難性状が予測可能な範囲に収まるように適切な火災や煙の制御対策を講じることにより、原則として避難者は設計者が策定した避難経路を整然と混乱なく避難することを大前提としている。避難者が煙や火等に遭遇した時の反応行動モデルを導入したり、火災時の避難者の行動を推測したりすることは、多くのマルチエージェントシステムにおける避難行動研究が目指すところであるが、避難予測モデルの理論ではそのような極限での避難者の性状は再現が困難でありその検証が殆ど不可能であるということ、またそれらの緊急事態における避難性状が解明されなくても避難安全設計は可能であるとして想定範囲から除外している。またこの避難者モデルでは、避難者は全て自力避難可能、避難者特性は個々に区別せず、避難者は全員が同一の特性を有することとしている。高齢者や障害者等の避難上不利な特性を有する避難者の扱いについては、現在までの避難に関する知見の範囲を超えているためモデルの予測対象から外しており、再現対象を現実的に可能な範囲に限定するための前提条件を明確にしている^[12]。

次に「個体から上位の階層への飛躍の度合いを必要最小限に留めること」については、二階層の複雑系（下位の複雑系を要素とする上位の複雑系）モデルを構築することにより可能となると考える。先ずその説明の前に群集流動タイプを理解する必要があるが、群集流動は表 1-1 に示す通り、群集流動の数と交差の有無により、一方向流、

表 1-1 群集流動の数と交差の有無による分類^[28]

		群集流動の数		
		1	2	3以上
	交差無し	I. 一方向流 	III. 対向流 	V. 層流 
	交差有り	II. 合流 	IV. 交差流 	VI. 交錯流 

合流，対向流，交差流，層流，交錯流の6つのタイプに分類できる。これらの群集流動タイプは再現対象によって異なり，例えば一般的な通路における人流は，一方向流，合流，対向流，交差流によって概ね構成されているが，駅のコンコースや横断歩道・スクランブル交差点における人流では，更に層流，交錯流の発生が頻繁に見受けられる。一方，建築物の避難計画では避難経路が明確である場合，避難者は各居室から廊下へ流出した後，原則として一つの直通階段へ向かい，直通階段へ流入した後は避難階へ向かって同一の方向へ避難することとなる。また避難予測モデルの理論においても，避難者は設計者が策定した避難経路を整然と混乱なく避難することを前提としているため，各居室から流出した避難者は同一の方向へ向かうこととなっている。従って，図1-3に示す通り，避難予測モデルの理論を前提とした建築物の避難計画では，一方向流，合流以外の群集流動（対向流，交差流，層流，交錯流）が発生する可能性は極めて低いと考えられる。従って本研究では，再現対象となる群集流動種類を限定し，一方向流，合流の2種類の群集流動（表1-1のⅠ，Ⅱ）までを再現目標とする。

次に具体的なモデルの設定についてであるが，先ずこの一方向流について，指針法，検証法における静的な計算法では，他の歩行者の影響による行動制限が無く一定の歩行速度での歩行が可能となる密度が概ね 1.0 人/m^2 程度までの自由歩行状態における最大歩行速度を 1.3m/s としている。また他の歩行者の影響による行動制限が発生する密度が概ね $1.0 \text{ 人/m}^2 \sim 4.0 \text{ 人/m}^2$ 程度までの群集流動状態における流率は，実測結果に基づく既往研究^[29]により， $1.5 \text{ 人/m} \cdot \text{s}$ 程度の非線形な定常状態になることを前提にして計算法を設定している。これらの一方向流の群集流動特性は，国土交通大臣認定における避難行動時間の予測方法の一つとして公的に提示されている特性となっている。本研究では，先ず個々の歩行者同士の相互作用から生じる創発現象により，

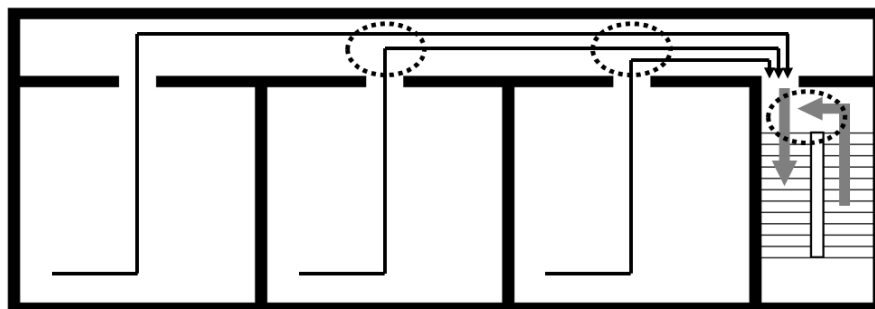


図1-3 建築物の避難計画における群集流動（一方向流・合流）の例

これらの特性を持つ一方向流の群集流動再現を行い、この一方向流モデルを下位の複雑系とする。この下位の複雑系となる一方向流モデルは、その再現目標とする具体的な一方向流の群集流動状態が先んじて存在し、シミュレーションではその再現目標と一致した状態が再現できる条件を分析して個体モデルを構築するため、従来の複雑系分野における研究の前提「個々の要素の振る舞いから未知の全体現象の再現を行う」というボトムアップ的手法とは反対の研究フローとなる。言い換えると、この下位の複雑系となる一方向流モデルは、従来の流体モデルと同様に予定された結果が再現できるように予め設定条件を組み込んでいる演繹型モデルとなるため、この一方向流モデルの妥当性は、従来の予測計算値との比較評価により説明可能となる。更にこの再現目標自体は過去の実測結果に基づいているため、現実現象との対応も同時に実現できることとなり、一定条件下における適用範囲の中で妥当で確実な再現性を持つモデルが構築できる。

次にこの下位の複雑系となる一方向流モデル同士の合流の再現を行い、この合流モデルを上位の複雑系として、この上位の複雑系により本研究が目的としている従来の計算法では解析できない“適正な避難行動時間の算出”を行う。要するに本研究では、従来の複雑系分野における研究の前提「個々の要素の振る舞いから“未知”の全体現象の再現」を行うことに対して、「個々の要素の振る舞いから“既知”の全体現象（一方向流）の再現」を行い、その「“既知”の全体現象（一方向流）の個々の群の振る舞いから、更なる“未知”の全体現象（合流）の再現」を行うこととしている。この点が二階層の複雑系モデルと称している所以である。またこの呼称について説明を加えると、実のところ“複雑系”の定義付けは難しく、様々な分野の専門家の間でも不一致が見られるが、本研究では「現象を構成する複数の要素が互いに影響を及ぼし合うことにより形成される系」としている^[30]。具体的には、現象を構成する要素の分析により現象を把握しようとする従来の「要素還元主義」に対して、現象を構成する要素の分析では現象を把握はできないと考え、複数の要素間の相互作用によって個々の要素には存在しなかった新たな性質、また先行与件から予測することが不可能な現象（創發現象）が発現する系として現象を把握しようとするシステム的方法論として位置付けている。その定義からすると合流状態の再現を目指す上位の合流モデルはともかく、再現結果が予測されている下位の一方向流モデルを複雑系モデルと称することに違和感があるかも知れない。但し、後述する再現目標から試行錯誤の上で設定し

た先行与件から、論理的に再現結果を予測することはやはり不可能であること、また設定した先行与件から個々の歩行者の歩行速度に対する支配方程式を与えることも不可能であることにより下位の一方向流モデルもやはり複雑系モデルであると考えている。話を戻し、前述の「再現結果問題」は、複雑で多様な人間モデルや災害モデルを取り入れるなど、広い範囲での現実現象を再現目標とした場合に、個体モデルから上位の階層への飛躍の度合いが大きくなり、相互作用の組合せも等比級数的に増加し、再現目標と再現結果との間に予測不能の誤差が生じ、これがコントロールし切れないことにより発生すると考えている。この誤差を完全に排除することはできないが、本研究における避難シミュレーションではこの上位の複雑系における“構成要素”は、妥当で確実な再現性を持つ一方向流モデルのみで明快であり、また“上位の階層への飛躍の度合い”も一方向流同士の合流のみであり極めて限定的であるため、個体から上位の階層への飛躍する際に生じる再現結果の誤差を出来る限り抑制・排除することは可能であると考えている。また合流モデルの再現結果の妥当性については、従来の科学的方法が目指す絶対な真というレベルで証明できなくても、知見と経験を兼ね備えた専門家の推察・判断や、数少ないが先行事例として示されている実測結果との照合によって、実用するにあたり相当程度妥当と判断することは十分可能であると考えている。尚、この上位の複雑系はシミュレーション設定者の意図に関わらず、シミュレーションの状態によって自律的に発生することとなる。このようなヒューリスティックなシミュレーション結果の活用は、実用的なエンジニアリングの世界では頻繁に行われているが、その再現結果の誤差を出来る限り抑制・排除するために、従来のジレンマを弁証法的に捉え、両者の長所を生かした下位の複雑系を要素とする二階層の複雑系を構築することが、本研究の大きな特徴であり、他の既往研究には無い独自の試みであると考えている。

1-5. 論文の構成

次章以降の論文の構成を示す。先ず下位の複雑系としての一方向流モデルが再現目標とする歩行行動状態を具体的に示さなければならないが、この再現目標とする歩行行動状態は、避難予測モデルの理論及び既往の実測結果に基づき規定された指針法、検証法が前提としている避難行動状態の特性に一致させたい。そのため、先ず第2章では、これらの従来の避難時間の予測方法の概要とその問題点を概説した上で、その

改善方法の提案として、一方向流モデルが再現目標とする具体的な歩行行動状態の特性を示す。

次に下位の複雑系としての一方向流モデルを構築する。第2章で示した歩行行動状態を個体モデルによるコンピュータシミュレーションを用いて再現する前に、第3章において、従来の避難シミュレーション方法の概要と本研究の避難シミュレーションにおける数理モデルとして採用したセルオートマトンについて概説する。

第4章では、セルオートマトンを用いて下位の複雑系となる水平路一方向流モデルを構築するために、セルサイズ、歩行速度、方向ベクトル等の基本設定を示した上で、4方向の通路の流動シミュレーションによってパーソナルスペースと移動確率を決定する。またその水平路一方向流モデルの移動確率を調整することにより、階段一方向流モデルを構築する。

第5章では、下位の複雑系となる一方向流モデルの実用有効性を確認するために、出口通過、T字路における合流、水平路と階段における合流を再現し、予測される結果及び既往の実験結果との比較評価を行い、避難シミュレーションへの適用可能性を検証し、上位の複雑系となる合流まで含めた歩行行動モデル（合流モデル）を構築する。前提となる下位の複雑系（一方向流モデル）は妥当で現実性の高いモデルであるが、それらを合流させ帰納的な創発現象を発生させた上位の複雑系（合流モデル）は、論理的に従来の科学的方法が目指す絶対的な真と言えるモデルではない。しかし下位の複雑系（一方向流モデル）を構成要素にした再現結果が、予測される結果及び既往の実測結果と比較して、相当程度正しいことを示すことにより、上位の複雑系（合流モデル）も相当程度正しいモデルであり、建築物の避難シミュレーションへの適用に向けて問題が無いことを示す。

第6章では、一方向流モデル及び合流モデルによる本歩行行動モデルを、建築物の避難シミュレーションとして居室避難、階避難、全館避難に適用し、従来の予測計算値との比較評価、予測される結果及び既往の実測結果等の先行事例と比較評価を行う。その比較評価により、本避難シミュレーションは適正な避難行動時間の算出が可能であること、また合流が発生し一定の密度を超え滞留状態となる場合では、従来の静的な計算法（指針法、検証法）ではできない避難行動状態の再現及び適正な避難行動時間の算出が可能であることを確認する。

第7章では、本避難シミュレーションを、高層事務所ビルにおける所与の避難階段

配置検討に適用し、避難安全性と経済的効率性について検証法及びシミュレーションの定量的評価を行うことにより、最適な避難施設計画の提案が可能であることの一例を示し、本避難シミュレーションの実用有効性を検証する。第 5 章、第 6 章では、第 4 章で構築した人間モデルの妥当性の確認のため、空間モデルを一定条件とした検証を行うが、第 7 章ではその関係を逆転させ、妥当性が確認された人間モデルを一定条件として、空間モデルの比較対照検証を行う。尚、第 4 章から第 7 章については、2012 年にセルオートマトンの国際会議で発表した論文^[31]をベースにしてその内容を発展させ、2013 年から 2014 年に掛けて日本建築学会において公表した 2 つの論文^{[32][33]}を再構成した内容となっている。

最後に第 8 章の結論では、本研究結果を総括するとともに、本研究における方法論について改めて言及する。また本研究の今後の課題と発展可能性を示し、本論文を締め括る。

第2章 従来の避難行動時間の予測計算方法における問題点と解決方法の提案

2-1. 日本の建築避難計画に関わる性能規定

本章の主題に入る前に、日本における建築物の避難計画に関わる性能規定について、ここ50余年の動向を整理する。先ず1963年の建築基準法改正における容積率規制の導入によって、それまで原則31m以下に制限していた建築物の高さについて、31mを超える高層建築物の建設が可能となった。第一号として1964年に地上17階建てのホテルニューオータニが建設され、1968年には日本で初めての高さ100m以上となる霞が関ビルディング（高さ147m、地上36階）が建設された。日本における超高層ビル時代の幕開けである。この超高層化の動向を受け、1972年の建築基準法改正における建築物の防災基準の整備と併行して、建設省（現国土交通省）から「建築防災計画書の作成」が特定行政庁に通達された。また1981年7月から、建築基準法第38条に基づく建設省からの通達「高層建築物等に関わる防災計画の指導について」により、一定規模以上の建築物に対して、従来の建築基準法における仕様規定の建築確認に加えて、防災計画書の作成及び防災計画評定の受審が開始された^[1]。前述の通り、建築基準法における避難関連の仕様規定は、欧米の避難安全規定の参照や専門家の経験的判断によるもので工学的に裏付けられたものではないが、その長年の適用実績により一般的な建築物に対しては、相応の安全性が担保できる基準であると言える。しかし急速な技術の進歩により、建築物の規模や空間形態について法の想定範囲を超えるケースが容易に生じる時代となったため、仕様規定を対象とした建築確認だけでカバーしきれない部分については、防災計画書の作成と防災計画評定により補うことで、高層建築物の避難安全性能を確保した。またこれらの動向と関連して、日本建築センターでは1975年に初版を編集した「建築防災計画指針」について、1985年「新・建築防災計画指針」（指針法）^[2]を再編集して、その指針の中で火災時の居室避難及び階避難の評価方法、及び廊下、附室の滞留面積の評価方法を含めた防災計画書の作成方法を示し、徐々に内容を充実させ体裁を整備していった。

その後の2000年6月の建築基準法改正において建築基準法第38条が廃止されたため、それに基づく防災計画評定の通達も併せて廃止され、防災計画書の作成及び防災計画評定の受審は自治体の条例等に委ねることとなった。建設省ではこの改正に合わせて、指針法における複雑な避難計算法を改め全館避難を含めた簡易計算法を整備し、従来の仕様

規定とは別に性能規定としての避難安全検証法（検証法）^[3]を定め、告示に示した。またこの性能規定の適用は任意であるが、適用に当たっては確認申請による簡易な検証方法（ルートB）と大臣認定による高度な検証方法（ルートC）の2つの確認ルートを整備した。以上の結果として、指針法または検証法における計算方法が現在日本で確立されている避難時間の予測計算方法となっている。またこれらの建築基準法による仕様規定及び性能規定に加えて、各自治体における条例や消防法では、更に厳しい避難施設の設置基準を規定している。このような経緯で現在整備されている我が国の建築物の避難計画に関わる性能規定及び避難安全性能評価の仕組みは、国際的に見ても十分な水準であると言える。

2-2. 従来の避難時間の予測計算方法の概要

(1) 避難者モデル

現在、確立している避難時間の予測計算方法は、指針法、検証法に示されているが、その基本的な考え方は避難予測モデルの理論^[4]に基づいている。この避難予測モデルの理論では、前提として避難者が煙や火等に遭遇した時の反応行動モデルを導入したり、火災時の避難者の行動を推測したりすることについては、極限での避難者の性状は再現が困難でありその検証が殆ど不可能であるということ、またそれらの緊急事態における避難性状が解明されなくても避難安全設計は可能であるとして想定範囲から除外している。この前提に基づき避難予測モデルの理論の避難者モデルでは、避難性状が予測可能な範囲に収まるように適切な火災や煙の制御対策を講じることにより、避難者は設計者が策定した避難経路を整然と混乱なく避難することを原則としている。また避難者は全て自力避難可能、避難者特性は個々に区別せず、避難者は全員が同一の特性を有することとしている。一方で高齢者や障害者等の避難上不利な特性を有する避難者の扱いについては、現在までの避難に関する知見の範囲を超えているためモデルの予測対象から外している。

この避難者モデルの原則に基づき、指針法では避難行動について、①避難対象者は室内に均等に分布している。②避難は一斉に開始される。但し、出火室と非出火室では開始時間が異なる。③避難者はあらかじめ定められた経路を通して避難する。④歩行速度は一定で、追い越しや後戻りはしない。⑤避難者の流れは出入口等のネックによって規制される。⑥避難経路が複数ある場合には最寄りの経路を利用する。という

6つの仮定を設定している^[2]。

また検証法でも、この避難者モデルの原則に基づき、基本的に自力で避難できることを前提条件として、避難に要する時間の計算方法を設定している。従って、病院、診療所、児童福祉施設、救護施設、身体障害者更生援護施設、盲学校、老人保健施設、デイケアセンター等のように、自力で避難することが困難である建物用途の階又は建築物に対しては適用対象外としている。また歩行速度は、避難する人の能力、群集の密度の状況及び移動する空間の条件に応じて左右されるとして、建築物又は居室の用途（①劇場他、②百貨店、展示場等又は共同住宅、ホテル他、③学校、事務所他）、建築物の種類と避難の方向（水平路、客席部分、階段上り、階段下り）に応じて、避難者に対して一律の歩行速度を与えている^[5]。

尚、出口までの歩行経路については、避難予測モデルの理論では、室内に机等の什器がある事務室空間等ではL字型経路、室内に歩行の障害となるような収容物が無い集会場、運動場等では求心型経路の2つ取り方を用意しているが、指針法、検証法では安全側となるL字型経路を原則としている。

(2) 避難空間モデル

避難予測モデルの理論では、避難空間を、①火災時に避難者が発生する空間（居室等）、②避難者が移動する空間（廊下、ホール等）、③建物内あるいは建物外の最終避難場所に大別している。また更に具体的に、避難空間を表2-1、図2-1に示す8種の空間要素から構成するとしてモデリングしている。ここでの1～6は現実の空間に対応するものであるが、7及び8は計算概念上の仮想空間である。

防災計画上の指導的な側面を併せ持つ指針法では、具体的な空間モデルは明記していないが、図2-2に示す通り、居室避難以降の避難経路については、第一次安全区画として不燃壁と不燃扉によって区画された廊下、及び第二次安全区画として防火区画された付室及び階段室の設置を前提として計算方法を設定している。

また簡易計算法としての検証法でも同様に、出火室が直接階段室に面さないようにするため、図2-3に示す様な、できるだけ十分な滞留スペースのある準耐火構造（または不燃性）の間仕切り壁と開口部を防火設備で区画した廊下、付室等を介して階段室に通じる避難空間モデルを誘導させる計算条件を設定している。

表2-1 空間要素と特性^[4]

No	名 称	初 期 避難者	移動形態	開 口 数		実空間との 対応例	備 考
				入 口	出 口		
1	room	有	L型, 求心型, 定速 → 出口	0	1以上	居室, オフィス, 集会場, etc	出口が2以上のとき room unitに分割
1-2	room unit	有	L型, 求心型, 定速 → 出口	0	1	居室, オフィス, 集会場, etc	
2	path	無	直線, 定速 入口→出口	1	1	廊下	1計算ステップ間の移動距離 を長さとするunitに分割
3	vestibule	無	直線, 定速 入口→出口	1	1	階段前室	流入者数をカウントする 流入者は避難終了
4	stairs	無	直線, 定速 入口→出口	1	1	階段	垂直移動のためのpathと 考えてよい
5	hall	無	直線, 定速 入口→出口	1以上 合計3以上	1以上	ホール, ロビー, etc	各入口→各出口はそれぞれ 仮定のpathで連絡される
6	refuge	無	流入のみ	1	-	建物外最終避難場所 建物内保護空間	流入者数をカウントする 流入者は避難終了
7	link	無	移動時間なく 入口→出口	1以上	1以上	仮定	No1～6の接合部に仮定する
8	crowding	無	-	-	-	仮定	No1～6の接合部に仮定する

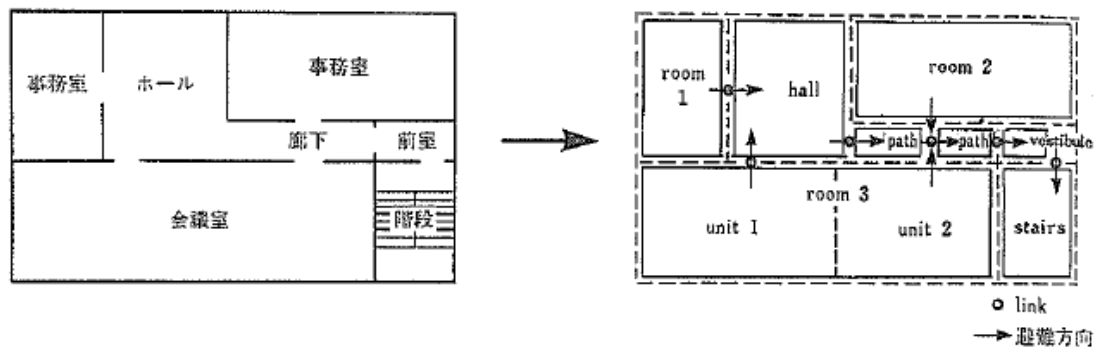


図2-1 避難空間の構成例^[4]

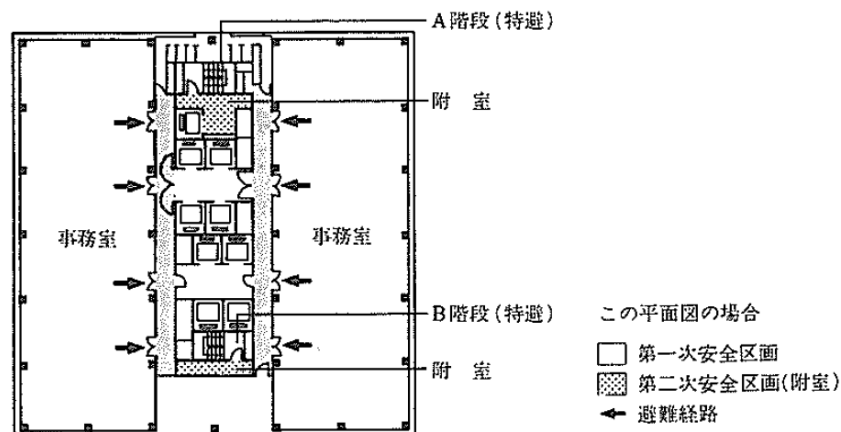


図2-2 安全区画の例^[2]

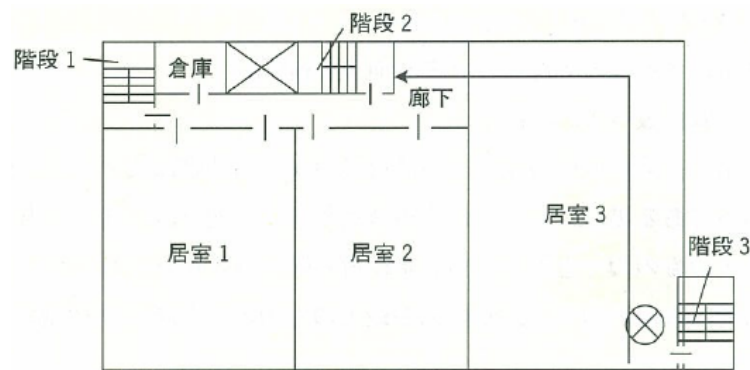


図2-3 直通階段までの歩行距離^[5]

(3) 避難開始時間

指針法，検証法における避難時間は，基本的に避難開始時間と避難行動時間の和により構成されている。これらの予測計算方法における避難開始時間は本研究の対象ではないが，避難時間を構成する重要な要素であるのでその内容について概説する。

まず図 2-4 に示す通り，避難開始時間 t_I は，出火してから在館者が避難を始めるまでの時間であり，覚知時間 t_{O-P} （出火してから危険に気付くまでの時間）と行動開始時間 t_{P-I} （危険に気付いてから避難行動を開始するまでの時間）により構成されている。従って避難開始時間は，火災情報伝達あるいは火災時の人間行動のモデル化を図ることによって推定し得ると考えられている。しかし覚知時間 t_{O-P} は，建物用途（在館者の特性，就寝施設か非就寝施設かの相違），建物規模，空間形状，火災感知・警報

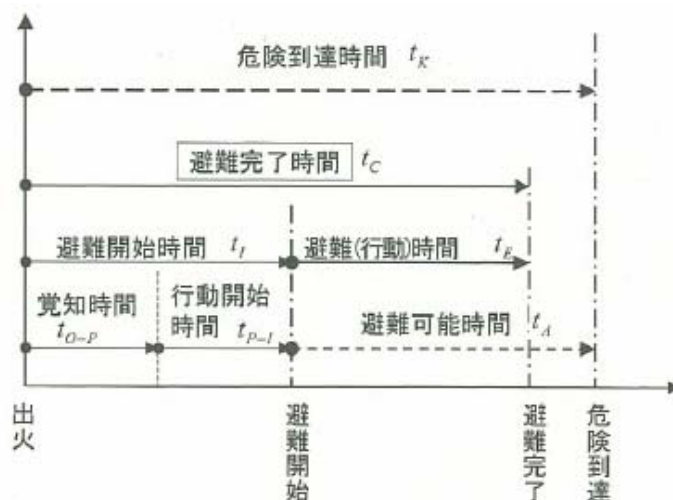


図 2-4 避難に関する時間の構成^[6]

システムの信頼性，防火管理の方法・レベル等によって左右され，行動開始時間 t_{p-I} も，物理的な危険度合いよりも個々の在館者が心理的にその危険をどの程度に認識するか，また他人の行動の影響によって発動する集団心理によって動機づけられるため，これらのモデル化は極めて困難である^{[4][6]}。避難開始時間の予測計算方法は，指針法，検証法により定められており，以下概説するが，明確な科学的根拠に基づいているものではない^{[4][5]}。

具体的な予測計算方法について，先ず指針法では居室避難における避難開始時間の設定は無いが，階避難では簡易的に出火室の避難開始時間 ${}_aT_0$ を式(1)として，非出火室の避難開始時間 ${}_bT_0$ を式(2)として設定している。出火室の避難開始時間は床面積に依じて決定されるが，非出火室の避難開始時間はその室の床面積に関係なく，出火室の2倍掛るとして設定している。

$${}_aT_0 = \max(2\sqrt{A}, 30) \quad (\text{秒}) \quad (1) \quad \because A: \text{出火室面積 (m}^2\text{)}$$

$${}_bT_0 = 2{}_aT_0 \quad (\text{秒}) \quad (2)$$

この指針法の出火室の避難開始時間の設定式(1)が，以下全ての避難開始時間設定の根源となっているが，この設定根拠は出火時の煙・臭気の拡散やざわめき・避難指示者による出火情報が，床面積 A の正方形室の周長の半分を情報伝達速度 1.0m/s で拡散・伝播することに基づいているとされている^[4]。

一方，検証法では出火の際の火災覚知時間と行動開始時間を区別するのは困難なため，火災覚知と同時に避難を開始するものとして，居室避難における避難開始時間 t_{start} については，従来の指針法における出火室の避難開始時間と整合するように式(3)として設定している。

$$t_{start} = \sqrt{\sum A_{area}} / 30 \quad (\text{分}) \quad (3)$$

$\because A_{area}$: 当該居室及び当該居室を通らなければ避難できない建築物の部分の各部分ごとの床面積(m^2)

検証法における階避難，全館避難の避難開始時間については，避難を判断するまでの

過程は複雑で個人差も大きく、非出火室、非出火階の避難開始時間を工学的な方法により予測することは困難なため、簡易的に建物用途と当該階の床面積に応じて、階避難については従来の指針法とできるだけ整合するように式(4)として、全館避難についても階避難開始時間と同様の考え方を採用し式(5)として設定している。

階避難開始時間：

$$\left. \begin{array}{ll} \text{(就寝用途)} & t_{start} = \sqrt{A_{floor}} / 30 + 5 \quad (\text{分}) \\ \text{(就寝用途以外)} & t_{start} = \sqrt{A_{floor}} / 30 + 3 \quad (\text{分}) \end{array} \right\} \quad (4)$$

∴ A_{floor} ：当該階の各室及び当該階に設けられた直通階段への出口を通らなければ避難することができない建築物の部分の床面積の合計(m²)

※階段, EV シャフト, 日常在館者が行き来する空間でない空調機械室, 設備シャフトを除く。

全館避難開始時間：

$$\left. \begin{array}{ll} \text{(就寝用途)} & t_{start} = 2\sqrt{A_{floor}} / 15 + 5 \quad (\text{分}) \\ \text{(就寝用途以外)} & t_{start} = 2\sqrt{A_{floor}} / 15 + 3 \quad (\text{分}) \end{array} \right\} \quad (5)$$

∴ A_{floor} ：当該階の各室及び当該階を通らなければ避難することができない建築物の部分の床面積の合計(m²)

※階段, EV シャフト, 日常在館者が行き来する空間でない空調機械室, 設備シャフトを除く。

また検証法では階避難は出火階避難, 全館避難は非出火階避難を前提としているため, 全館避難開始時間では, 右辺の第1項 $\sqrt{A_{floor}}$ の係数を階避難開始時間の場合の4倍として火災覚知の遅れを考慮している。出火階における全館避難開始時間は, 非出火階より早く且つ階避難開始時間と同じになる筈であるが, 検証法は安全側の簡易計算法としているため, 出火階と非出火階の区別はなく, 全館で非出火階の避難開始時間

を当て嵌め、出火階も含めた全階同時避難としている。また右辺の第 2 項は、階避難、全館避難ともに就寝用途では+5 分、それ以外の用途では+3 分の火災覚知の遅れを考慮しているが、いずれにしても出火室以外の居室にいる人、出火階以外の階にいる人が火災を覚知して避難開始するまでの時間を工学的な方法により予測することは困難であることが明記されている^{[4] [5]}。以上が従来の避難開始時間の予測計算方法であるが、前述の居室避難の避難開始時間と同様にいずれも科学的に裏付けられた方法ではない。

一方で火災時避難の人間行動の特徴として、日常生活の延長線上の行動が反映されることが指摘されている。ある事務所ビル火災後の調査^[7]では、火災を覚知した直後の第一行動について、直ぐに避難した人が全体の僅か 8.7%に対して、直ぐに避難しない人の合計が 91.3%とのデータが報告されている。その内訳は図 2-5 に示す通り、大事なものを持ち出したり、うろうろ考えたりして直ぐ避難しない人が 44.9%，消火したり，他人に知らせる等の責任行動をとる人が 30.5%，指示を待つ人，他人に盲従する人が 15.9%となっている。地震や洪水，火災等の災害に遭遇した際に，一人の場合では直ぐに行動を起こすことがあっても，集団の中では他者との関係において，うろたえたりせず沈着冷静であろうとする正常性バイアスが働くため，素早く避難行動ができる人は少なく，むしろパニックは容易には発生せず，逃げ遅れる傾向にあるとの指摘もある^[8]。実際に 2001 年 9 月のニューヨーク WTC における航空機衝突テロによる崩壊，2011 年 3 月の東日本大震災による津波災害，2014 年 4 月の韓国珍道島沖のセウォル号沈没事故では，いずれも直ぐに避難せずに避難指示を待ったための避

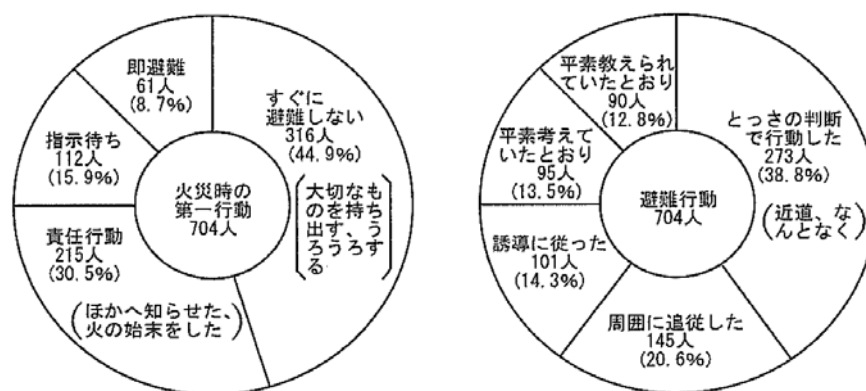


図 2-5 事務所ビル火災における第一行動とその後の避難行動^[7]

避難開始の遅れが被害の拡大に繋がったことが分かっている。それだけ実際の災害状況、情報伝達の良否、周囲の反応等の様々な条件下で、人々の心の判断の閾値が超え、避難行動開始の決意のトリガーが引かれる避難開始時間の予測及びそのコントロールは、人間個人や集団心理における意思決定に大きく関わるため、工学的分野だけでは解明・決定できない困難な課題である。

一方でひとたび避難行動を開始した以降の行動時間の予測については、先ず避難者が非常に少なく、慌てず、滞留することが無い場合は、一定の歩行速度で避難可能であるため、速度 v 、距離 l 、時間 t の関係式によって初等教育の算数でも予測することが可能となる。但しそのようなケースは滅多に無く、また有ったとしても避難行動上、危険な状態にはなりにくいケースである。通常では避難経路において徐々に避難者が集中するため滞留が発生し、一定の歩行速度での避難行動は困難な状態となる。このような状態は、例えば満員電車の中で個々人の力で意志通りに動くことはできないのと同様の状態である。更に何らかの事情で過密さが増すとパニックや将棋倒し等の事故発生が懸念されるが、そこまでの高密度にならない範囲においては、避難行動を機械的な群集流動として予測することは可能であると考えられる。従って、災害下における人間個人の多様な判断や群集心理を対象とする避難開始時間の予測と、機械的な群集流動等を対象とする避難行動時間の予測における研究範囲は根本的に異なる。それぞれが研究対象として重要なテーマであるが、避難開始時間の予測は工学分野の知見だけでは解明が困難であり、本研究範囲を遥かに超える。また本研究の広義的な到達目標とする建築物のハード側の工夫に基づく合理的で安全な新しい避難施設の計画方法の提案は、その建築物が具備している避難施設による避難行動時間のみの評価でも十分可能である。以上の理由により、本研究における避難時間では、避難開始時間を除く避難行動時間を対象としている。

(4) 居室避難行動時間

居室避難行動時間とは、避難開始後、居室から在室者全員が退出する時間である。避難予測モデルの理論では、避難者は避難開始以前には居室内空間に一様に分布して存在するものとしている。居室内に分散している在室者が居室から退出する際、在室者は出口へと集中するが、在室者が少なく出口前に滞留が発生する程ではない場合は、出口から最も遠い位置にいる在室者が出口に到着する歩行時間が避難行動時間を支配

することになる。但し在室者が多く出口前に滞留が発生する場合は、在室者は出口から出口幅に応じた一定の流量で退出するため、出口における通過時間が避難行動時間を支配することになる（図 2-6 参照）。そこで指針法における避難行動時間では、式 (6) に示す通り、歩行時間と出口通過時間の最大値を採用することになっている。一方、検証法における避難行動時間は指針法と異なり、式 (7) に示す通り、簡易的に歩行時間と出口通過時間の和を採用し、実際の避難行動時間よりも長い安全側の指標値を示している。この違いは検証法が安全側の簡易計算をその特徴としているためであるが、別の見方をすると、居室内における避難対象者の分布は均等ではなく、避難出口から最も遠い部分に避難者全員が集中している避難安全上の最も不利な状況を前提として計算式を設定しているからであるとも言える。

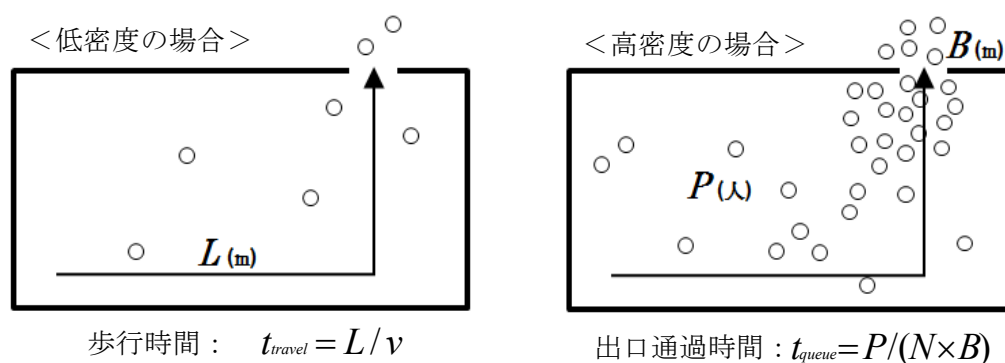


図 2-6 密度による避難行動時間

$$\text{指針法における避難行動時間: } t = \max(t_{travel}, t_{queue}) \quad (\text{秒}) \quad (6)$$

$$\text{検証法における避難行動時間: } t = t_{travel} + t_{queue} \quad (\text{分}) \quad (7)$$

ここでの最大歩行速度 v は指針法、検証法ともに 1.3m/s または 1.0m/s（検証法における劇場の客席及び指針法における密度 1.0 人/m²以上の用途部分は 0.5m/s）、流動係数 N は指針法、検証法ともに戸川式^[9]に基づき 1.5 人/m・s としてどちらも基本的に同等の値を設定している。但し検証法は安全側の簡易計算法であるため、避難安全上、不利な状況となる他の非出火室同時避難も考慮し、居室が面している廊下等の避難経路の必要滞留面積 a_n が十分でなく在室者全員を収容することができない場合（廊下・通路の場合は $a_n < 0.3 \text{ m}^2/\text{人}$ 、付室・バルコニーの場合は $a_n < 0.2 \text{ m}^2/\text{人}$ 、階段の

場合は $a_n < 0.25 \text{ m}^2/\text{人}$), その廊下等の避難経路において滞留が生じて居室出口通過の流量も制限を受けることを想定し, 流動係数 N を低減することとしている。その流動係数 N の設定については, 居室の出口を通過できる流量は滞留の原因となっている廊下等の避難経路出口における流量の影響を受けるが, 各居室出口の流量はこの廊下等の避難経路出口における流量を一定の比率で配分することとして, ①各居室の在室者人数に比例, ②各居室出口幅に比例の 2 つの方法を考え, 式(8)に示す通り, この 2 つの比例配分からなる有効流動係数 N_{eff} の低減式を設定している。

$$\text{有効流動係数 (人/分・m)} : N_{eff} = \max \left(\frac{80 B_{neck} \sum \frac{A_{co}}{a_n}}{B_{room} \sum p A_{load}}, \frac{80 B_{neck}}{B_{load}} \right) \quad (8)$$

A_{co} : 当該避難経路等の部分の各部分ごとの床面積 (m^2)

a_n : 避難経路等の部分の区分に応じて定める 1 人当たりの必要滞留面積 ($\text{m}^2/\text{人}$)

p : 在館者密度 (人/ m^2)

A_{load} : 避難経路等の部分を通らなければ避難することができない建築物の部分ごとの床面積 (m^2)

B_{neck} : 当該居室の出口の幅又は避難経路等の部分の出口 (直通階段又は地上に通ずるものに限る。) の幅のうちどちらか小さい方のもの (m)

B_{room} : 当該居室の出口の幅 (m)

B_{load} : 避難経路等の部分を通らなければ避難することができない建築物の部分の当該避難経路等の部分に面する出口の幅の合計 (m)

また検証法における出口幅 B は, 出口近傍に置かれる物品が出火元になった場合を想定し, 出口通過できる範囲は狭まることとしている。その有効出口幅 B_{eff} については, その火源からの放射熱流が人間の耐放射限界の $2\text{kW}/\text{m}^2$ 以上となった範囲が通過できない範囲として, 式(9)に示す通り, 出口到着までに掛る時間, 可燃物の発熱量, 内装防火等級の 3 つの条件によって最大扉幅の低減式を設定している。

$$\text{有効出口幅 (m)} : B_{eff} = \max \left\{ B_{room} - 7.2 \sqrt{\alpha_f + \alpha_m t_{reach}} + 1, 0 \right\} \quad (9)$$

α_f : 当該居室の積載可燃物の 1 m²当たりの発熱量に応じて定まる値（積載可燃物の火災成長率）

α_m : 当該居室の壁及び天井の室内に面する部分の仕上げの種類に応じて定まる値（内装の火災成長率）

t_{reach} : 在室者が当該居室の出口の一に至る時間（避難開始時間＋歩行時間）（分）

一方で指針法では、200 m²以下の小さい居室を除き出口は 2 ヶ所以上設けることを原則としており、出口近くで火災が発生したことを想定して、避難計算上、最大幅の扉の一つが使用できないこととしている。

(5) 階避難行動時間

指針法の階避難評価では、当該階において避難安全上、最も不利な状況を想定し、設計者が一つの居室を出火室と設定し、残りの全ての居室を非出火室として階全体の避難状況を予測する。また全ての避難対象者の階段（避難階の場合は外部）までの避難経路についても設計者が設定する。前述の通り、出火室と非出火室の避難開始時間は異なり、床面積 A の出火室の避難開始時間は $2\sqrt{A}$ ($\geq 30\text{sec}$)、非出火室の避難開始時間は出火室の避難開始時間の 2 倍としている。避難開始後、当該階全ての避難対象者に対して、避難経路上の各ネック（居室出口、廊下出口、階段入口等）における到着時間及び流出時間をバーチャート式の避難計算グラフ（図 2-7 参照）を用いて算定し、廊下避難、階避難時間を算出している。また防災計画上の指導的な側面を併せ持つ指針法では、廊下等の第一次安全区画は密度 0.3 m²/人まで、付室等の第二次安全区画は密度 0.2 m²/人まで滞留可能としており、避難計算グラフを用いて最大滞留人数（ mN_1 , mN_2 ）を算出し、廊下、付室等の必要面積を確保するための滞留面積の評価を行うこととしている。この滞留面積の評価は、検証法では前述の居室避難における居室出口の有効流動係数 N_{eff} の低減式によって、別の方法であるが同様の目的の評価がなされている。また指針法の階避難評価は、未だ他の非出火階が避難開始していない出火階避難のみを対象として、階段内での他の階の避難者との合流は考慮していないため階段内の滞留面積評価は行わず、また階段入口における流動係数は一定（1.5 人/m・s）としている。

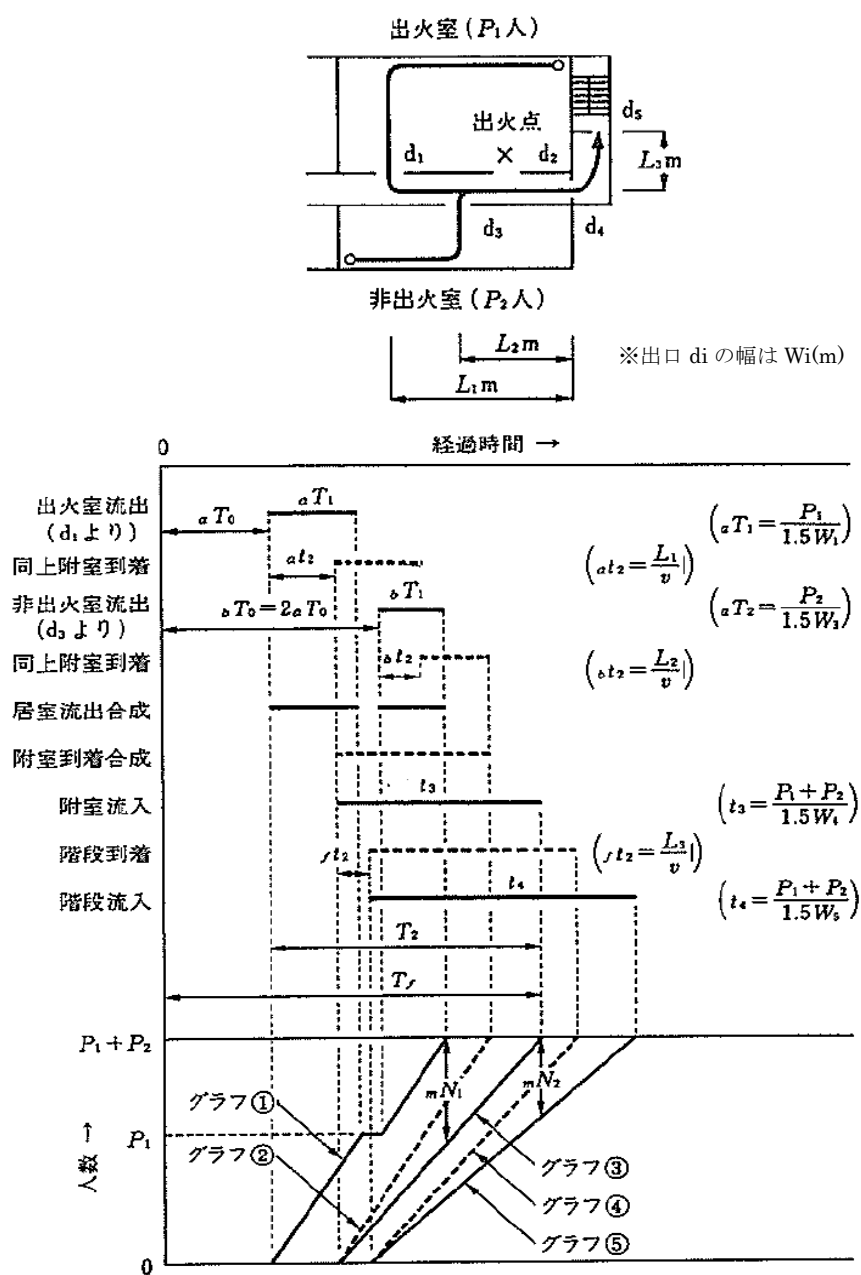


図 2-7 避難計算グラフの例^[2]

一方，検証法の階避難行動時間は，式(7)の居室避難行動時間と同様に，簡易的にその階における最大歩行時間と階段入口通過時間の和を採用し，実際の避難行動時間よりも長い安全側の指標値を示している。尚，避難開始時間についても指針法における出火室のみの床面積を基準にしたものとは異なり，前述の式(4)の通り日常在館者が行き来しない空調機械室，設備シャフトを除くその階全体の床面積を対象としており，更に火災覚知の遅れとして就寝施設では 5 分，非就寝施設では 3 分の定数を加算し，

簡易的に安全側の設定を行っている。また検証法の階避難では、原則として指針法と同様に未だ他の非出火階が避難開始していない時点における出火階の避難を対象としているが、一方で安全側の簡易検証法という特徴も併せ持つため、非出火階も同時避難した場合も想定し、階段内における他の階の避難者との合流の影響による階段入口通過の流量低下を考慮している。具体的には、階段入口の流動係数 80 人/㎡・分を基準として、直下階までの階段合計面積が十分でなく当該階の在館者全員を収容することができない場合（直下階までの階段合計面積(㎡)/階在館者数(人) < 0.25 ㎡/人）は、階段の入口通過に支障が生じるため、式(10)に示す通り、階段入口幅に対する避難経路上のネック部分の幅との比及び当該階の在館者人数と直下階までの階段室の収容可能人数との比を乗じた有効流動係数 N_{eff} の低減式を設定している。

$$\text{有効流動係数 (人/分・㎡)} : N_{eff} = 80 \times \frac{B_{neck}}{B_{st}} \times \frac{\sum \frac{A_{st}}{0.25}}{\sum p A_{load}} = \frac{320 B_{neck} \sum A_{st}}{B_{st} \sum p A_{load}} \quad (10)$$

A_{st} : 当該階から直下階（当該階が地階である場合にあっては、その直上階）までの階段室の床面積（㎡）

p : 在館者密度（人/㎡）

A_{load} : 当該直通階段への出口を通らなければ避難することができない建築物の各部分ごとの床面積（㎡）

B_{neck} : 当該直通階段への出口の幅、当該出口の通ずる直通階段の幅又は直通階段から地上若しくは避難階に通ずる出口の幅のうち最小のもの（m）

B_{st} : 当該直通階段への出口の幅（m）

(6) 全館避難行動時間

指針法では全館避難の評価方法は示していない。指針法に基づき多くの条件・出火シナリオで全館避難計算及び評価を行うのは実務上困難であるため、建築基準法では検証法において全館避難の簡易計算法を定めている。検証法的全館避難行動時間は、式(7)の居室・階避難行動時間と同様に、簡易的に建物全体における最大歩行時間と地上への出口の通過時間の和を採用し、実際の避難行動時間よりも長い安全側の指標値を示している。また階段合計面積が十分でなく建物内の在館者全員を収容することが

できない場合（階段合計面積(m²)/全館在館者数(人) < 0.25 m²/人）は、階段の移動に支障が生じると考え、式(11)に示す通り、地上への出口の通過時間算定において、出口の流量を流動係数 80 人/m・分を基準として、地上への出口へ通じる階段幅に対する避難経路上のネック部分の幅との比及び建物内の在館者人数と階段室の収容可能人数との比を乗じた有効流動係数 N_{eff} の低減式を設定している。

$$\text{有効流動係数 (人/分・m)} : N_{eff} = 80 \times \frac{B_{neck}}{B_{st}} \times \frac{\sum \frac{A_{st}}{0.25}}{\sum p A_{load}} = \frac{320 B_{neck} \sum A_{st}}{B_{st} \sum p A_{load}} \quad (11)$$

A_{st} : 階段室の床面積の合計 (m²)

p : 在館者密度 (人/m²)

A_{load} : 当該地上への出口を通らなければ避難することができない建築物の各部分ごとの床面積 (m²)

B_{neck} : 地上への出口に通ずる階段の幅又は地上若しくは避難階に通ずる出口の幅のうち最小のもの (m)

B_{st} : 地上への出口に通ずる階段の幅 (m)

2-3. 従来の避難行動時間の予測計算方法における問題点

前節(4)居室避難行動時間で示した通り、居室避難において在室者が出口へと集中する際に在室者が少なく出口前に滞留が発生する程でない場合は、出口から最も遠い位置にいる在室者の出口までの歩行時間が避難行動時間を支配することになる。これは前述の通り、速度 v 、距離 l 、時間 t の関係式となり、初等教育の算数でも算出可能である。また在室者が多く出口前に滞留が発生する場合は、出口における通過時間が避難行動時間を支配することとなる。この出口通過時間は、指針法、検証法における流動係数の設定根拠となっている戸川式 (1.5 人/m・s) ^[9] と出口幅によって算出可能である。居室避難における在室者の避難行動は、自由歩行状態または群集流動状態における単純な一方向流として扱えるため、この歩行時間と出口通過時間によって算出することが可能である。また階避難における出火室のみの避難で廊下等の避難経路において他の非出火室からの避難者との合流が発生しない場合や、全館避難における出火階のみの避難で階段等の避難経路において他の非出火階からの避難者との合流

が発生しない場合は、居室出口、階段入口等のネック部分での流量低下があるとしても、居室避難同様に単純な一方向流として扱えることに変わりがないため、この歩行時間と出口通過時間によって算出することが可能である。

しかし、居室避難において出火室の避難完了以前に他の非出火室が避難開始する場合や、階避難において出火階の避難完了以前に他の非出火階が避難開始する場合など避難先空間において既にいる在室者や他の空間からの避難者との合流により滞留が発生する場合は、その合流前後において時々刻々と変化する各歩行者の歩行速度及び流率を従来の計算方法により算出することはできない。そのため前述の通り、指針法では廊下、付室の必要滞留面積を制限して、階段入口までの避難経路において合流による流率低下の発生を抑制している。一方、検証法では廊下、付室、階段の設計面積が必要滞留面積を下回ること（空間側の自由度）を認めているが、その場合は出口通過における流動係数を低下させること（時間側の制約）で簡易的に安全側評価ができる工夫を行っている。

しかし指針法は、多くの出火シナリオに対して避難計算グラフを用いて行う滞留面積チェックに手間が掛る上、建築計画にも自由度の制限が発生する実用上の弱点を持っている。一方、検証法は滞留面積の制限は無く建築計画上の制約も少ないが、*Neff*（有効流動係数）を低下させる計算式は科学的に裏付けられたものではなく、単に避難安全性能の安全側の判定を行うことを優先した簡易的な設定となっている。そのため出口における極端な流動係数の低下が発生し避難時間が極端に長くなる問題や、実際に滞留や流率低下が起きないと考えられる部分において計算上の流動係数低下が発生するなどの問題が指摘されている。特に全館避難計算において、階段室内に建物全体の在館者全員を収容することができない場合について、階段面積が小さいほど避難階における出口通過の流動係数が極端に低下するという計算上の設定が、合理的な避難施設計画を行う上で大きな足枷となっている。以上が従来の避難行動時間予測方法によって生じている問題点である。

2-4. 解決方法の提案

以上の避難予測モデルの理論、指針法、検証法の基本的な考え方や、これらの予測計算方法がその根底で共有している動的な避難行動状態の想定に問題は無い。また指針法、検証法は、現在利用されているような建築計画が具備する避難安全性能の十分

条件を合否判定する上において、十分な機能を果たしていると言える。しかし指針法、検証法による支配方程式に基づく従来の静的な計算法では、他の空間からの避難者との合流前後に時々刻々と変化する各歩行者の歩行速度及び流率を詳しく解析することができない。そのため適正な避難行動時間を予測することができず、またそのことにより建築物が要求する安全な建築計画の必要十分条件を合理的に提示することもできない。従って、この指針法、検証法がその設定の前提としている動的な避難行動状態を具体的に再現し、その結果として適正な避難行動時間の解析を可能とすることが必要となるが、その解決にはここで問題となっている合流状態を別の数理モデルによって解析することが望まれる。本研究ではその解析のため、コンピュータシミュレーションによってその合流状態の再現を行うこととしているが、その合流状態を再現するには、先ず合流する以前の一方向流における精緻な歩行行動モデルをコンピュータシミュレーションによって構築することが必要である。そのため、先ず前述の二階層の複雑系における下位の複雑系としてこの一方向流モデルの再現を行うが、ここで再現目標とする行動状態は、様々な既往研究における多様な実測結果そのものではなく、それらを代表する妥当な一定の行動状態に一旦置き換えなければならない。

この一方向流モデルの再現目標設定については、建築計画において高度な方法により避難安全性能の検証を行い国土交通大臣の認定を受審するケースがあるが、その際の検証方法として各指定性能評価機関が示している「避難安全性能評価業務方法書(以下「業務方法書」)」^[10]に求めることができる。その業務方法書では、避難行動時間の予測方法と歩行速度と流動係数の設定方法について、以下に示す通り、それぞれ3通りずつの方法を例示している。

1. 避難行動時間の予測方法

- 1) 避難行動時間＝歩行時間＋出口通過時間（検証法）
- 2) 避難行動時間＝ \max [歩行時間，出口通過時間]（指針法）
- 3) 上記1,2同等以上の確かさで予測できる方法で信頼性が認知されているもの

2. 歩行速度と流動係数の設定方法

- 1) 一定（指針法，検証法）
- 2) 群集密度と歩行速度の関係式
- 3) その他群集流動の考え方に基づいた設定

本研究では、「1. 避難行動時間の予測方法」については、コンピュータシミュレーションによる解析とするため、1. 3) を目指し、「2. 歩行速度と流動係数の設定方法」については、2. 2) の群集密度と歩行速度の関係式を採用することとする。この群集密度と歩行速度の関係式は図 2-8 に示す通り、主要な既往研究における実測結果をまとめたものである^[11]。この関係式を理解するには、前章で示した群集密度による自由歩行状態、群集流動状態、滞留状態の 3 つの歩行状態の分類を理解する必要がある。まず自由歩行状態とは、歩行者の前方や周囲の密度が小さく他の歩行者の影響による行動制限が無いため、一定の歩行速度での歩行が可能な密度が概ね 1.0 人/m²程度までの歩行状態である。群集流動状態とは、歩行者の前方や周囲の密度が大きくなり、他の歩行者の影響による行動制限が発生し、密度の増加とともに歩行速度は低下するが、流率はほぼ一定となる密度が概ね 1.0 人/m²~4.0 人/m²程度までの歩行状態である。この群集密度と歩行速度の関係式に基づき、指針法、検証法の設定では水平路における自由歩行状態の最大歩行速度は 1.3m/s、群集流動状態の流動係数は 1.5 人/m・s としている。また階段における自由歩行状態の最大歩行速度は、検証法において下り $v=0.78\text{m/s}$ 、上り $v=0.58\text{m/s}$ としており、群集流動状態の流動係数は検証法では 1.33 人/m・s、指針法では 1.3 人/m・s としている。またこの関係式には表現されていないが、密度が概ね 4.0 人/m²程度以上となると、歩行者の前方や周囲の密度が更に大きくなり、足取りを頻繁に変えなければならず低速でも停止する可能性がある滞留状態となる。この状態は先を争って押し合うことによる「将棋倒し」等が発生する可能性があるといわれている^[12]。因みに 2001 年 7 月に兵庫県で発生した明石歩道橋の将棋倒し事故における密度は、13~15 人/m²程度であったと推定されている^[13]。

本研究では、コンピュータシミュレーションによる二階層の複雑系において従来の計算法では予測できない合流状態の再現を行うために、それに先立ち一方向流の群集流動において、この群集密度と歩行速度の関係式が適正に再現できる一方向流モデルを構築することを最初の達成目標とした。従って、本研究における避難シミュレーションとは、定性的には避難予測モデルの理論^[4]に基づき、定量的には群集密度と歩行速度の関係式^[11]に基づくものとなる。本研究では定量的な避難行動時間を解析するために、従来の計算法がその設定の前提としている動的な避難行動状態を再現すること、即ち従来の計算法の前提条件というフィルターを通して一旦抽象化した二次的な避難行動状態を再現することを目的としている。複雑で多様な条件下及び複雑で多

様な人間モデルにおける現実現象そのものの再現を目指すものではなく、実測結果に基づいた個性によらない本質的な流動の再現を目指すものであることをここで改めて明記しておく。尚、この群集密度と歩行速度の関係については、海外においても幾つかの研究がなされており、図 2-9 に示すような同様の傾向を示す実測結果が公表されている^[14]。本研究では以降で示すシミュレーションモデルの設定により、指針法、検証法の設定に基づき、国土交通省が推奨する群集密度と歩行速度の関係式を再現目標としてその再現を行ったが、図 2-8、図 2-9 における他の実測結果についても、本シミュレーションモデルのパラメータの微調整により、その各々の近似的な再現は十分可能となると考えている。

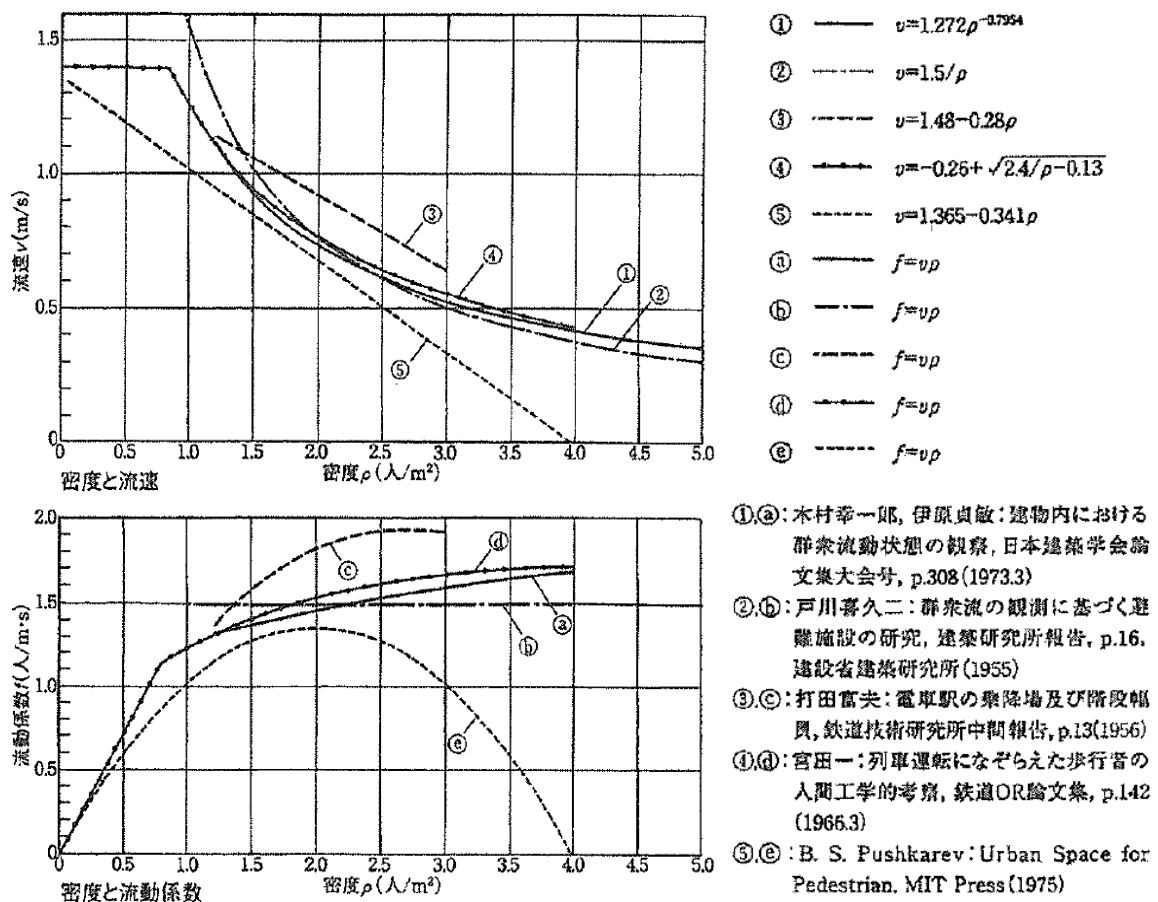


図 2-8 水平路一方向流における群集密度と歩行速度の関係式^[11]

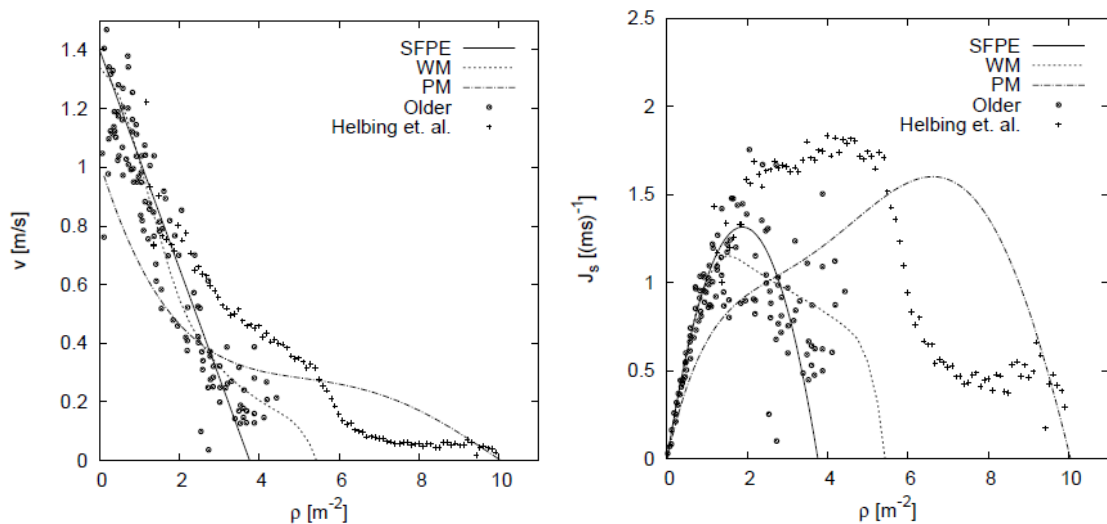


図 2-9 Fundamental diagrams for pedestrian movement in planar facilities^[14]

The lines refer to specifications according to planning guidelines (SFPE Handbook), Predtechenskii and Milinskii (PM), Weidmann (WM). Data points give the range of experimental measurements (Older and Helbing)

第3章 従来の避難シミュレーションモデルとセルオートマトンの概要

3-1. 従来の避難シミュレーションモデルの概要

災害時の避難行動については既往のデータが乏しく、また再現実験が困難であることもあり、その補完のために従来からコンピュータシステムを用いた避難シミュレーションモデルは数多く研究されている。それらの既往研究におけるシミュレーション方法は、前述の通り、人の動きをマクロ的に扱い全体の流動として導出した支配方程式により解析する「流体モデル」と、人の動きをミクロ的に扱い個体同士の相互作用から生じる創発現象により全体の状態をシステム論的に再現する「個体モデル」に概ね大別できる。ここでは、その流体モデル、個体モデルを構成する具体的な要素モデルの特徴を分類した上で、本研究における避難シミュレーションのモデル設定について概説する。またその要素モデルは、明確に区分できない事例もあるが、大きな分類としては図3-1に示す通り、概ね人間モデル、空間モデル、災害モデル、行動モデルの観点において特徴づけることができる。またこれらの4つのモデルは互いに関連するところが多い。

先ず人間モデルは、複数の人間を一塊として扱う群集型と、一人の人間を個別に扱う個人型に大別できる。群集型は全員が同じ避難者特性を有するが、個人型は全員が同じ避難者特性を有する場合と、個人毎に避難者特性を与える場合がある。

空間モデルは、空間を室単位で区分し複数の人間の移動を室同士の繋がりの中で表現するネットワーク型、空間をある一定領域の正方形等のメッシュで区分し複数の人間を配置するノード型、空間を小さなメッシュに区切り一つのメッシュに一人まで配置できるセル型、更にメッシュも無く個々人の自由な移動が可能な連続座標型の4つに大別できる。ネットワーク型またはノード型空間モデルにおける人間モデルは群集型にせざるを得ないが、これはある一定の空間に複数の人間が存在していると見做し個人個人の詳細な位置は問わない人間・空間モデルであり、前述の流体モデルに対応している。個人型人間モデルとしたい場合は、空間モデルをセル型または連続座標型にしなければならないが、これは一人一人に空間または座標を与え個々人の詳細な位置を明確に扱う人間・空間モデルであり、前述の個体モデルに対応している。

災害モデルは、冷静に混乱なく計画通りの避難が可能な危険度が低い状況を前提とした平常時型、災害に直面し避難者の行動が予測できない危険度が高い状況を前提と

した緊急時型に大別できる。平常時型は流体モデル、個体モデルのどちらでも可能であるが、緊急時型の場合は、回帰性（元に来た道を辿る）、追従性（他人に追従する）、日常指向性（慣れている経路を辿る）、安全指向性（安全と考える方へ向かう）、危険回避性（危険を回避する）、向光性（明るく開かれた方へ向かう）、易視経路選択性（目に付いた経路へ向かう）、至近距離選択性（近くの経路を選択する）、直進性（廊下の突き当たりまで直進する）等の避難行動特性^[1]を個別に設定しなければならないため個体モデルとしなければならない。

行動モデルは、更に方向モデル、遷移モデル、出口選択モデルの項目に大別できる。方向モデルについては、先ず方向とは避難方向であり、避難方向については居室出口、階段入口、建物出口等の避難目標出口に至るまでの“大局的な避難方向”と、他の避難者や障害物とのインタラクションによる一時的な接触回避のための“局所的な避難方向”が考えられるが、ここでは前者の“大局的な避難方向”を対象としている。その大局的な避難方向は、災害モデルが平常時型の場合、原則としてシミュレーション解析者の設定条件に従った大局的な避難方向を採る一方向型となるが、災害モデルが緊急時型の場合は、その災害の設定状況に基づく避難行動特性や移動確率により決定される多方向型となるケースが多い。遷移モデルは、ある空間から他の幾つかの隣接空間との間の移動を、出口幅やゾーニング等による配分や観察・計測から得たデータ

分類		特徴	流体モデル	個体モデル
人間モデル		群集型	○	
		個人型		○
空間モデル		ネットワーク型	○	
		ノード型(大きいメッシュ)	○	
		セル型(小さいメッシュ)		○
		連続座標型		○
災害モデル		平常時型	○	○
		緊急時型		○
行動モデル	方向	一方向型	○	○
		多方向型		○
	遷移	配分型	○	
		局所近傍則型		○
	出口選択	並列型	○	○
		並列鞍替え型		○
		フォーク型	○	

図 3-1 従来の避難シミュレーションの要素モデルの特徴による分類

及び空間毎のポテンシャルとして表現した移動遷移確率によってその流出入量を決定する配分型と、避難者の周囲近傍の状況と移動規則により時間ステップ毎に移動方向を決定する局所近傍則型に大別できる。一般的に流体モデルは配分型に、個体モデルは局所近傍則型に対応している。出口選択モデルについては、居室出口、階段入口、建物出口等の避難目標出口の手前で滞留待ちが発生する場合、一旦決定した避難出口を変更しない並列待ち型と、出口毎の流出状況により避難者を配分するフォーク待ち型または並列待ち鞍替え型に大別できる。また並列待ち型は、流体モデル、個体モデルのどちらでも対応可能であるが、フォーク待ち型は流体モデル、並列待ち鞍替え型は個体モデルに対応している。

以上これらのシミュレーションにおける特徴については、概ね 1990 年代以前と以降の研究において、異なる 2 つの傾向が見られる。1990 年代以前の大きな空間における複数の避難者の移動をマクロな流体として扱う流体モデルから、1990 年代以降の一人一人の避難者行動のミクロなモデル化から群集の避難行動を再現する個体モデルへの変化である。この変化は、コンピュータの計算処理能力とパーソナルコンピュータの普及の影響によるものであると言える。1970 年頃から鉄道技術研究所を中心に多くの人流シミュレーション研究が行われてきており、特に中祐一郎は個々の歩行者を単位とした交差流動のミクロ的な個体モデル化（SP-1）の基礎研究に基づき、歩行者群を単位とするマクロ的な流体モデル化（SP-2）を行ったが、これもコンピュータの計算処理能力の限度に起因している^[2]。更に 2000 年代に入ると、できるだけ詳細なエージェントの行動特性を組み込んだ精緻な避難者モデルを目指す研究も盛んに行われるようになった。ここでの流体モデルは、前提条件の範囲で正しい解析ができるトップダウン型の演繹型モデルとも言える。この流体モデルは、解析結果の信頼性が高く、計算の手間や時間が合理化できるが、単なる計算機であるので新しい知見や従来の計算法では解析不可能な結果を得ることは期待できないという特徴がある。一方、個体モデルは、解析者の予測を超えた創発現象が期待できるボトムアップ型の帰納型モデルとも言える。この個体モデルは、モデルや解析結果の妥当性の証明に課題があるが、新しい知見や従来の計算法では解析不可能な結果を得られる可能性があるという特徴がある。

この個体モデル型のシミュレーション手法として、セルオートマトン (Cellular Automata) とマルチエージェントシステム (Multi-Agent System) に代表される規則

ベースのシミュレーション手法が挙げられる。セルオートマトンもマルチエージェントシステムも従来の古典物理学における支配方程式に基づくマクロな現象説明に対して、現象を構成するミクロの要素間の相互作用から現象を再現し、その再現過程を通してマクロな現象を解明することの特徴としたシステム的手法である。人の流れの構成過程を考えれば、これらのシステム的手法は人の流れの再現に対して適した手法と言える。セルオートマトンとマルチエージェントシステムの手法の大きな違いは、セルオートマトンは物理的空間の概念を必要条件とし、近傍との相互作用により現象を再現する手法であることに対して、マルチエージェントシステムは物理的空間の概念が必要条件ではなく、また知的なエージェントの相互作用により自律的行動の再現が可能であることとされている。セルオートマトンは 1940 年代後半～1950 年代初めにフォン・ノイマン (John von Neumann) とスタニスワフ・ウラム (Stanisław Marcin Ulam) により提案され、情報工学の分野で発展してきた手法であり、マルチエージェントシステムは 1990 年代に人工知能の分野で提案された手法である。両者の実際の考え方に大きな違いは見られないが、その特徴の違いにより、他の物理現象とは異なり複雑で多様な人間行動のモデル化に対しては、従来からマルチエージェントシステムを採用した研究が多く見受けられ、近年ではスムーズな行動表現に適した連続座標系マルチエージェントシステムへとその主流は移行しつつある。しかし一方で、複雑で多様な人間行動のモデル化は難題であるため、より精緻な現実現象の再現を目的としたマルチエージェントシステムは、現段階では実用レベルの採用に対して未だ課題があると言える。

本研究では、避難予測モデルの理論を前提としているため、その人間モデルでは個々のエージェントの自律的判断や複雑で多様な人間行動特性は必要としていない。また本研究の目的は、個々の歩行者における現実との精緻な対応による細かな視覚的再現よりも、機械的な群集流動の解析に基づいた適正な避難行動時間の算出である。従って本研究における避難シミュレーションは、前述の分類に従うと、個体モデルを用いた流体モデルの再現と言える。この両者の長所を生かしたハイブリッドモデルの構築により、両者がそれぞれ持つ問題に対して弁証法的な解決を図ることができる。要素モデルとしては、人間モデルは全員同じ避難者特性とする個人型、空間モデルはセル型、災害モデルは平常時型、行動モデルにおける方向モデルは一方向型、遷移モデルは局所近傍則型、出口選択モデルは並列待ち鞍替え型を採用する。またセルオートマトンを用いて歩行行動モデルを構築し、そのモデルを避難シミュレーションとし

て適用する。次節において本避難シミュレーションで用いるセルオートマトンについて概説する。

3-2. セルオートマトンの概要

セルオートマトンでは、先ずシミュレーション空間において、解析領域を正方形等のセルという区分領域の集合に分割し、時間軸も空間と同様に連続量ではなく時間ステップ毎に離散化する。各セルは整数等の離散的な状態量を保持し、その状態量は時間ステップの進行とともに遷移する。各セルの次の時間ステップにおける状態遷移は、現在のセルの状態量と近傍セルの状態量の関係による規則（局所近傍則）に従って決定する一意的な更新規則（状態遷移則）によってなされ、離散時間毎の状態量の推移を表現する。本節では、避難シミュレーションの構築に先立ち、複雑系を取り扱う数理モデルとしてのセルオートマトンの基本について概説を行う。

(1) 1次元セルオートマトン

1次元セルオートマトンとは、図3-2に示すようにセルを横一列に配置し、時間的な更新を縦方向に配置し表現したものである。1980年代にステファン・ウルフラム（Stephen Wolfram）が系統的に調べ上げ、後の研究に対しての枠組みを作った。各セルは $0 \sim k-1$ までの k 個の値の内の一つを採り、セル i の時間ステップ t の状態量を a_t^i とすると、セル i の次の時間ステップ $t+1$ の状態量 a_{t+1}^i は、近傍セルの状態量によ

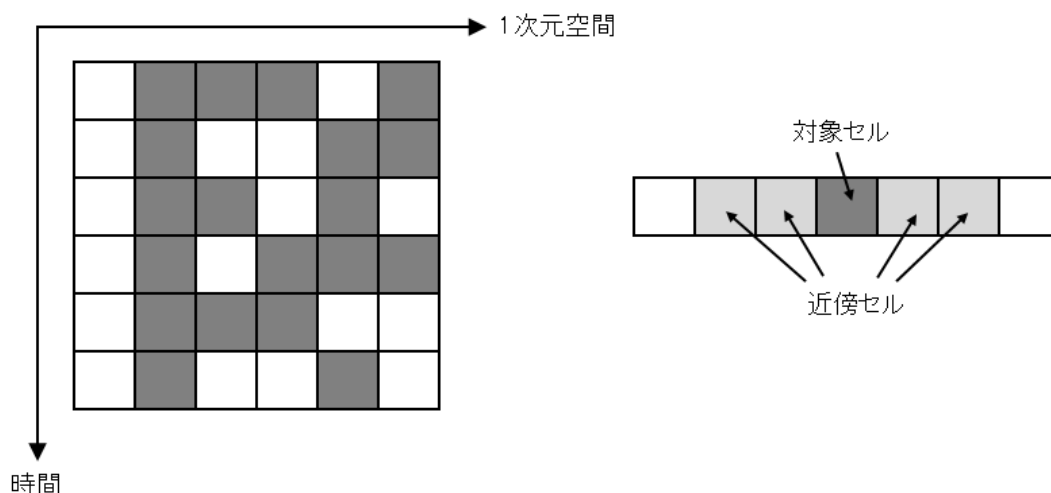


図 3-2 1次元セルオートマトン

る関数により決定される。近傍セルを対象セルの片側 r 個とすると（対象セルを含め両側 $2r+1$ 個）、 $a_{t+1}^i = f(a_t^{i-r}, a_t^{i-r+1}, \dots, a_t^i, \dots, a_t^{i+r-1}, a_t^{i+r})$ で表される。またここで横一列に配置された両端のセルでは近傍セルが片側だけとなるが、通常この場合は、両端セルは近傍セルが片側だけという規則を適用する「開放境界条件」、または両端セルを繋いだものと考え、左端セルを右端セルの右近傍セル、右端セルを左端セルの左近傍セルとする「周期境界条件」のどちらかの方法を採用する。

ここで最も単純なルールは、状態量を 0 と 1 の 2 個のみ、近傍セルを対象セルの両隣までとする「2 状態 3 近傍規則」であるが、 $r=1$ とおくと $a_{t+1}^i = f(a_t^{i-1}, a_t^i, a_t^{i+1})$ で表わされ、具体的には右辺は下記の通り $2^3=8$ 通りの組合せとなる。

$$f(0,0,0), f(0,0,1), f(0,1,0), f(0,1,1), f(1,0,0), f(1,0,1), f(1,1,0), f(1,1,1)$$

この 8 通りの組合せそれぞれが、次の時間ステップ $t+1$ における状態量として 0 か 1 を取り得るため、 $a_{t+1}^i = f(a_t^{i-1}, a_t^i, a_t^{i+1})$ の組合せは、 $2^8=256$ 通りとなるが、この最も単純なセルオートマトンを ECA (Elementary Cellular Automata) という。ここで例えば、 $a_{t+1}^i = f(a_t^{i-1}, a_t^i, a_t^{i+1}) = a_t^{i-1} + a_t^{i+1}$ とすると、右辺は下記の組合せを示す。

$$f(0,0,0)=0, f(0,0,1)=1, f(0,1,0)=0, f(0,1,1)=1, f(1,0,0)=1, f(1,0,1)=0, f(1,1,0)=1, f(1,1,1)=0$$

これを 1 次元セルオートマトンにおいて、0 を白セル、1 を黒セルに置換して示すと、シェルピンスキーのギャスケットと言われるフラクタル図形が描かれる^[3]。図 3-3 にその図形の一部を示す。

上記の ECA に対して、近傍セルを対象セルの両側 2 セルまでとする「2 状態 5 近傍規則」は、 $r=2$ とおくと、 $a_{t+1}^i = f(a_t^{i-2}, a_t^{i-1}, a_t^i, a_t^{i+1}, a_t^{i+2})$ で表わされ、右辺は $2^5=32$ 通りの組合せとなる。この 32 通りの組合せそれぞれが、ECA と同様に次の時間ステップ $t+1$ における状態量として 0 か 1 を取り得るため、 $a_{t+1}^i = f(a_t^{i-2}, a_t^{i-1}, a_t^i, a_t^{i+1}, a_t^{i+2})$ の組合せは 2^{32} 通り（約 43 億通り）にもなる。このようにセルオートマトンは極めて単純なルールで無数の組合せを生み出すことができる数理モデルである。

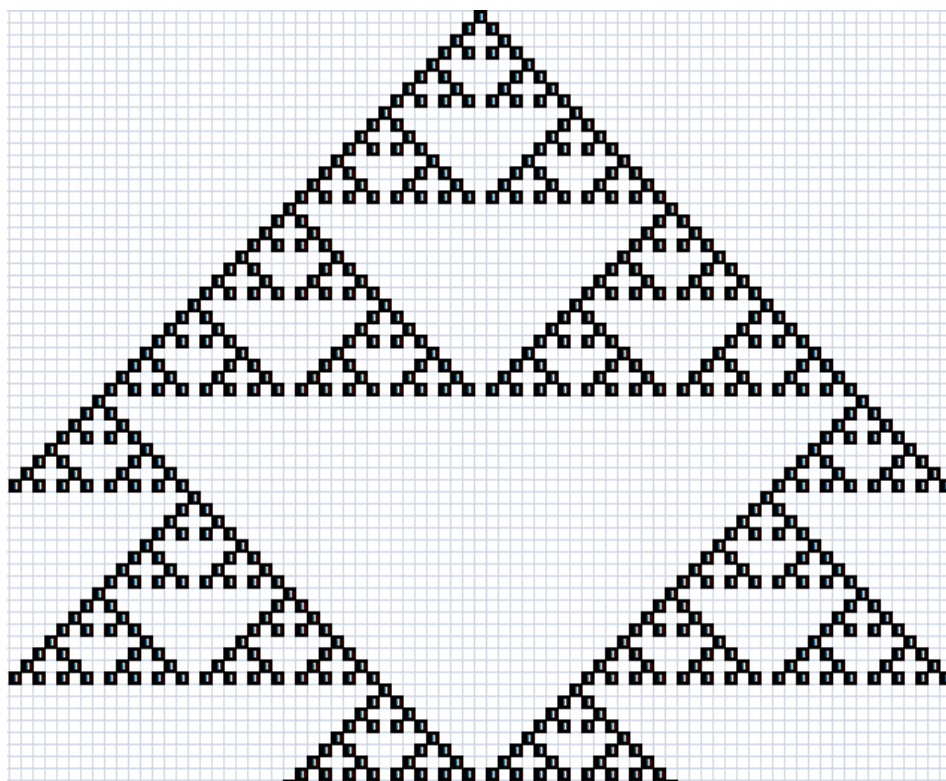


図 3-3 シェルピンスキーのギヤスケット

この 1 次元セルオートマトンは、基本的な一車線の交通流のモデル化に適しており利用されることが多い。一車線の交通流では、後方の車は前方の車の速度が遅ければ、同じ時間・同じ場所に 2 台の車は存在できない排除体積効果により前方の車の速度の影響を受けるが、前方の車は後方の車の速度の影響を全く受けない。複数車線において車線変更を行う際は、後方の車両の動きの確認が不可欠であるため、後方の車の動きの影響を受けることもあるが、相対的にはやはり前方と後方の車同士の相互作用は対称とはならない。このように交通流モデルの大きな特徴は、車同士の相互作用が非対称相互作用となることである。この排除体積効果と非対称相互作用を考慮した交通流セルオートマトンモデルの基本的なルールにスロースタートルールがある^[4]。これは前方の車の停止によって一旦停止した車が、前方の車の発車によって再スタートする際に前方に n セルの空きスペースができてからスタートするルールである。また停止する場合もこれらの動きを逆にしたスローストップルールも可能となる。図 3-4

に示す通り，このスロースタートルールにより交差点等の停止・発車表現や車間距離が詰まった場合，広がった場合の速度低減・加速表現が可能となる。

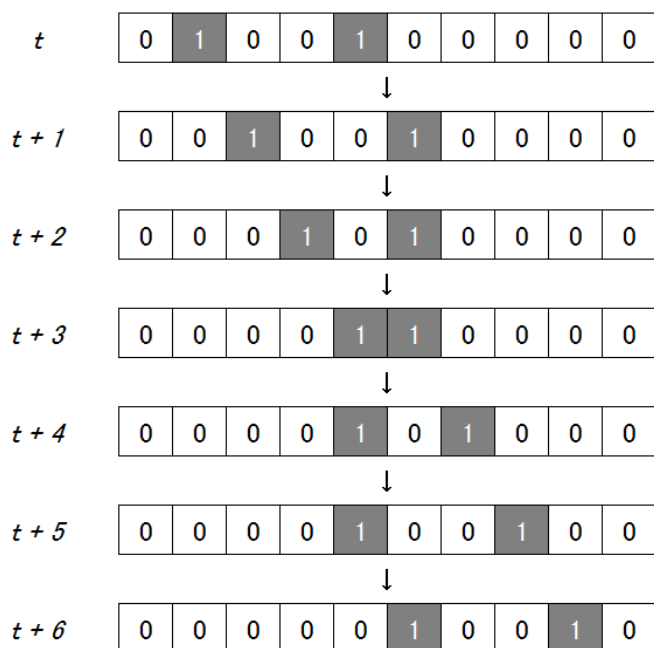


図 3-4 スロースタートルールの例

但しセルオートマトンにおける時空間は離散的な値（自然数）であるため，現実の現象に即した細かな調整を行う場合には問題がある。この問題に対して交通流セルオートマトンモデルでは，次の時間ステップにおける動きを決定論的モデルではなく，確率モデル（Asymmetric Simple Exclusion Process: ASEP）を導入することにより対処している。本研究における避難シミュレーションでは，群集密度の増加に応じて歩行速度を低減することにより流率を概ね一定にするチューニングが不可欠であるが，先ずこのスロースタート・スローストップルールと確率モデルの導入によりその現象再現が可能になるのではないかと考えた。しかし歩行行動には走行車線等による明確な空間制限がある訳ではなく，また人流における方向変更の場合，走行車両の車線変更ほどの注意深さは必要では無く，歩行者の瞬時の判断により左右の流れへの進路変更は頻繁に行われるため，交通流モデルとは条件が異なる。またそもそも建築物は平面プランによって構成されているので，1次元セルオートマトンのままでは避難シミュレーションへの適用について課題がある。

(2) 2次元セルオートマトン

1次元セルオートマトンでは、セルを横一列に配置し、セルの状態量の時間的な更新を縦方向に配置し表現したが、2次元セルオートマトンではセルを縦横2次元で配置する。2次元セルオートマトンにおける最も単純な近傍則は、図3-5に示す通り碁盤目上のセル分割において対象セルの上下左右の4セルのみを近傍セルとするノイマン近傍、または対象セルの上下左右以外の斜め方向のセルも含め8セルを近傍セルとするムーア近傍がある。しかし2次元セルオートマトンでは、状態量を0と1の2個のみとした場合でも、ノイマン近傍における近傍セルの状態量の組合せは $2^4=16$ 通りとなり、この近傍セルの状態量の組合せに基づく次の時間ステップ $t+1$ における状態量の規則の組合せは 2^{16} 通り（約43億通り）となる。更にムーア近傍における近傍セルの状態量の組合せは $2^8=256$ 通りとなり、この近傍セルの状態量の組合せに基づく次の時間ステップ $t+1$ における状態量の規則の組合せは 2^{256} 通り（約 1.3408×10^{154} 通り）と膨大となる。このように2次元セルオートマトンは、極めて単純なルールによって1次元セルオートマトンよりも遥かに複雑で無数の組合せを生み出すことができる数理モデルである。他にもペトリネット、Lシステム、格子ガスオートマトン（正方格子、三角格子、六角格子）等の様々な手法が提案されているが、本論文では関係性が低いためこれらの説明は割愛する^[3]。

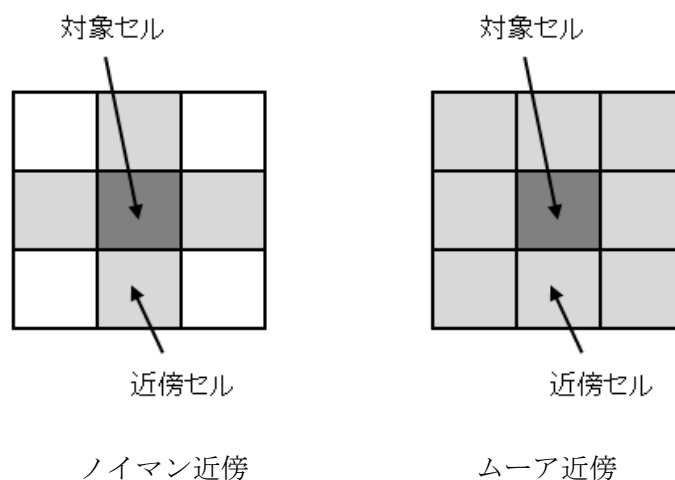
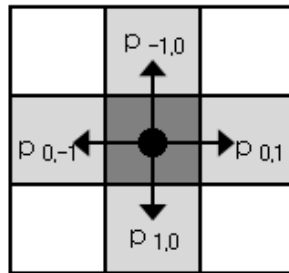


図3-5 2次元セルオートマトンにおける近傍セル

人流における2次元セルオートマトンモデルとしては、2次元格子状のASEPモデルを基本としたフロアフィールドモデルがある。フロアフィールドモデルは、図3-6に示す通り1つのセルに最大1人を配置し、既に人がいるセルには排除体積効果によって移動できないとして、時間ステップ毎に東西南北方向のいずれかに1セル移動することとしている。移動ルールについては、式(12)に示す通り、避難者は冷静な場合は出口までの最短ルートを選択するが、冷静さを欠いてくると周囲の行動に追従するとして、各セルに避難セルまでの最短距離による情報とそのセルの足跡数の情報を書き込み、それらの情報に基づく移動確率により移動方向を決定している。



$$p_{i,j} \approx \exp(k_D D_{i,j}) \exp(-k_S S_{i,j}) \quad (12)$$

$S_{i,j}$: セル(i, j)から避難セルまでの距離

$D_{i,j}$: セル(i, j)の足跡数

図3-6 フロアフィールドモデルにおけるセル内の移動確率と移動方向

前者（最短距離）の情報は時間経過に関わらず不変であるため静的フロアフィールドと称し、後者（足跡数）の情報は時間経過と共に変化するため動的フロアフィールドと称して、それぞれの重みづけ係数に基づき時間経過と共に変化するパニック度（ k_D/k_S ）に応じて、2つの情報の比重を変化させ移動確率を決定している。

このようにフロアフィールドモデルは、1次元セルオートマトンの交通流モデルに比べて建築物の平面プランにおける避難行動への対応が可能である。しかし本研究では、災害時におけるパニック等を抑制・回避するための避難安全の研究は目的としておらず、予め設定した避難経路を避難者が整然と混乱なく避難することを前提として

いるため、フロアフィールドモデルにおける避難モデルとは根本的に考え方が異なる。また本避難シミュレーションでは、先ず前章「2-4. 解決方法の提案」で示した一方向流モデルの再現を目指しており、そのため移動先セル及び移動先セルの決定に影響を与える近傍セルは、フロアフィールドモデルとは異なり、予め避難計画により定められた進行方向に限定されることとなる。従って、本避難シミュレーションではフロアフィールドモデルの活用はできず、交通流モデルのような進行方向に対しての非対称相互作用を前提としたスロースタート・スローストップの移動確率ルールを、2次元空間において一から設定することが必要になると考えられる。更に言うと、歩行行動では大局的な進行方向は変えずとも瞬時の判断により左右の流れへの微小な進路変更は頻繁に行われる。そのため、進行方向に対して左右1セル程度を含めた近傍セルの状態によって、次の時間ステップにおける進行方向と歩行速度（移動確率）を決定するルールが必要になると考えられる。セルオートマトンによる解析法の特徴は、解析対象の支配方程式を求める必要が無く、局所近傍則と状態遷移則をシミュレーション設計者が自由に決定できるところにある。またその決定手順には明確なルールがある訳ではなく、コンピュータが得意とする無数のケーススタディにより、現象を上手に表現できるルールを試行錯誤の上で求めることが必要となる^[3]。次章では、本研究において最初の目標となる一方向流を再現するために、試行錯誤の上で決定した本避難シミュレーションモデルの基本設定について詳述する。

第4章 セルオートマトンによる一方向流モデルの構築

4-1. 本章の目的

本章では、セルオートマトンを用いて下位の複雑系となる水平路一方向流モデルを構築するために、セルサイズ、方向ベクトル、歩行速度等の基本設定を示した上で、4方向の通路の流動シミュレーションによってパーソナルスペースと局所近傍則の設定を行った。またその水平路一方向流モデルの移動確率を調整することにより、階段一方向流モデルの設定を行った。

4-2. セルの設定

前掲の図 2-8 に示した群集密度と歩行速度の関係式が再現できる水平路一方向流モデルを、指針法、検証法の設定に基づき構築するにあたり、先ずセルオートマトンにおいて空間と時間の離散量の設定が必要となる。本避難シミュレーションでは最大自由歩行速度 $v=1.3\text{m/s}$ を再現すればよいため、空間か時間のどちらか一方の離散量を決定すればよい。1 時間ステップの離散量には特に制約はないが、人間の身体寸法、群集密度、建築モジュール等の空間的な要因には制約があるため、セルサイズ設定には配慮が必要である。

建築設計では、古くからモジュールと言われる身体サイズを基本とした伝統的に用いられている基準寸法があり、日本では中国を起源とする尺貫法、欧米ではヤード・ポンド法がそのモジュールの基本となっている。尺貫法における 1 尺は 30.303cm、ヤード・ポンド法における 1ft は 30.48cm であり、どちらも共通して、約 30cm を基準寸法としている。因みに旧来からの日本家屋における京間、中京間、江戸間の畳寸法は、それぞれ 95.5cm×191cm、91cm×182cm、88cm×176cm となっている。メートル法が国際標準となっている現在でも、構造柱間のスパン寸法、室形状、通路幅、出入口幅等の寸法を 30cm の倍数とするケースは多く、法的な避難規定における避難通路、避難階段、出口幅員、また既製品の建築材料等においても、30cm の倍数を基準寸法としている規定は多い。従って、30cm 単位は身体寸法に基づく建築設計の基本モジュールであること、また研究段階におけるシミュレーションモデルでは、現実の建築設計において頻繁に登場する寸法がそのまま設定できるセルサイズが望ましいことを勘案すると、セルサイズとしての 30cm 単位は有力な候補であると考えられる。

また一方で、群集は図面上では最大密度 17 人/㎡まで詰め込めるが、10 人/㎡辺りから圧力が生じ群集雪崩が発生する可能性がある指摘されており、密度 12~13 人/㎡では壁際での圧力が 200~450kg/m 程度に達するため、10 人/㎡程度以上は計画密度として設定するレベルでないとされている^[1]。前掲の図 2-9 においても密度の最大値は 10 人/㎡となっている。セルサイズを 30cm×30cm と設定した場合、密度の最大値は 11.1 人/㎡となるため、この観点から考慮しても 30cm×30cm よりも細かなサイズ設定は不要と考えられる。

以上の検討に基づき、セルは矩形、1 セルの大きさを 30cm×30cm、1 セル内には歩行者 1 人までが存在できると設定した。セルの形状は実際の身体寸法とは一致しないが、本モデルは離散的計算法であるセルオートマトンを用いて、できるだけ簡便な方法で各歩行者が局所空間における密度と歩行者同士の位置に基づき速度を決定することにより、マクロな避難行動状態の再現を目指すものであるため、実際の身体寸法等との精緻な関係については、セルの形状の制約の中で抽象的に捉えてモデル化することとした。各セルの状態は、①歩行者が存在する状態（歩行者セル）、②歩行者が存在しない移動可能な空間の状態（空間セル）、③柱、壁、什器等の固定物があり歩行者が移動不可能な空間の状態（障害物セル）の 3 通りを定義した。また本論文では、自由歩行状態、群集流動状態の再現を主目的としており、滞留状態における追い抜き、パニック、アーチ現象、将棋倒し、群集雪崩等の極限状態の再現は対象としていない。従って、将来的には本避難シミュレーションモデルにおいて最大密度を約 11 人/㎡までとする細かな検討が可能となるようにセルサイズを設定したが、本論文における計画密度は最大でその半分の約 5.5 人/㎡までとして、歩行者同士はセルの並びに対して直交方向に隣接するセルには入れず、1 セル以上の空きセルを置くことを原則としてモデル化を行った。

4-3. 方向ベクトル

避難方向は、居室出口、廊下出口、階段入口、建物出口等の避難目標出口に至るまでの“大局的な避難方向”と、他の避難者や障害物とのインタラクションによる一時的な接触回避のための“局所的な避難方向”がある。先ず本モデル設定における“大局的な避難方向”については、歩行者は障害物セル以外のセルのうち、設計者が出口等に設定した目的地セルの中から現地点より最も近いセルを目指して移動し、目的地セル到達後

も最終目的地セル到達までは次の目的地セルを選択して移動することとした。次に“局所的な避難方向”となる方向ベクトルは、セルの並びに対して直交方向及び 45° 方向の 2 種類とし、歩行者セル毎に設定した。従って、セルに配置した歩行者が時間ステップ毎に移動可能な隣接セルの方向は、4 方向の直交方向及び 4 方向の 45° 方向の計 8 方向とした。歩行者が“大局的な避難方向”として移動目標とする方向は、この 8 方向とは一致しない場合があるが、図 4-1、図 4-2 に基づき、式(13)により算出される確率による優先順位で移動方向を選択することとした。また第 1 候補方向のセルへ移動できない場合は第 2 候補の方向へ選択を変更することとした。

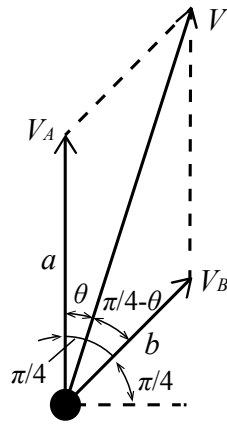


図 4-1 方向ベクトル

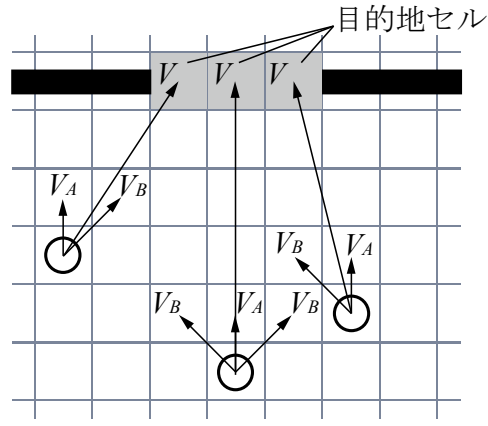


図 4-2 方向の選択

$$\left. \begin{array}{ll} \text{直交方向ベクトル } V_A \text{ を選択する確率} & : a/(a+b) \\ 45^\circ \text{ 方向ベクトル } V_B \text{ を選択する確率} & : b/(a+b) \end{array} \right\} \quad (13)$$

$$\therefore a = \sqrt{2}|V|\cos(\pi/4 + \theta), \quad b = \sqrt{2}|V|\cos(\pi/2 - \theta)$$

4-4. 自由歩行速度

歩行者の前方や周囲の密度が小さく、他の歩行者の影響による行動制限が無い自由歩行状態における自由歩行速度 v は、指針法、検証法における設定に基づき 1.3m/s を上限とした。そのため、1 離散時間ステップの実時間は、直交方向ベクトルにおける自由歩行速度が 1.3m/s となるように $0.3\text{m} \div 1.3 \text{ m/s} (\approx 0.23\text{s})$ と設定した。自由歩行速度 v が 1.3m/s 未満の場合は、移動確率を $v/1.3$ として速度調整を行い、また 45°

方向ベクトルに対しては，移動確率を $1/\sqrt{2}$ として自由歩行速度が等しくなるように設定した。

しかし現実的な人間の歩行行動との対応を考慮すると，移動方向がセルに対して直交方向及び 45° 方向のみとするのは，歩行行動を再現する上で拘束が強く，不自然になることが危惧される。以降の詳細な設定を展開する前に，格子状の空間区分を持つセルオートマトン特有の問題である斜め方向の歩行問題の解決策を示すことが必要である。この問題については，セルオートマトンにおける 1 離散時間ステップと歩行者の 1 歩単位を分けて捉えることにより解決が可能となる。先ず本モデルの基本設定では，セルサイズを $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ ，1 離散時間ステップを 0.23s としたが，通常の成人男性の平均 1 歩幅は $75 \sim 80\text{cm}$ 程度であり，その場合の 1 歩当りの時間は 0.6s 程度であるので，本モデルにおける 2～3 離散時間ステップが通常の歩行者の 1 歩単位に相当することになる^[1]。これらの 1 離散時間ステップの動きと歩行者の 1 歩単位の関係を図 4-3 に示す。この図 4-3 で示す通り，直交方向及び 45° 方向における自由歩行速度 1.3m/s に対して，斜め方向の 1 歩単位における自由歩行速度は， 1.21m/s となり若干減少するが，本モデル設定では歩行者の 1 歩単位として，この 24 方向の自然な歩行状態再現が十分可能な範囲であると考えて，この斜め方向の歩行問題を解決している。またこの設定によって，本モデルでは 360° 全方向に対して，大局的な目的地に向けた自由な歩行を可能としている。

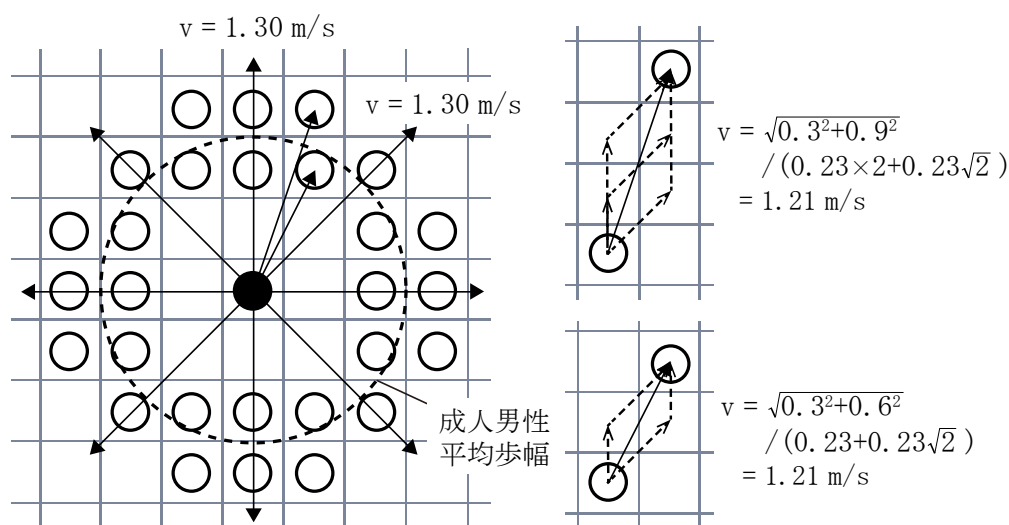


図 4-3 歩行者 1 歩単位における移動可能方向と自由歩行速度

4-5. 水平路一方向流モデル

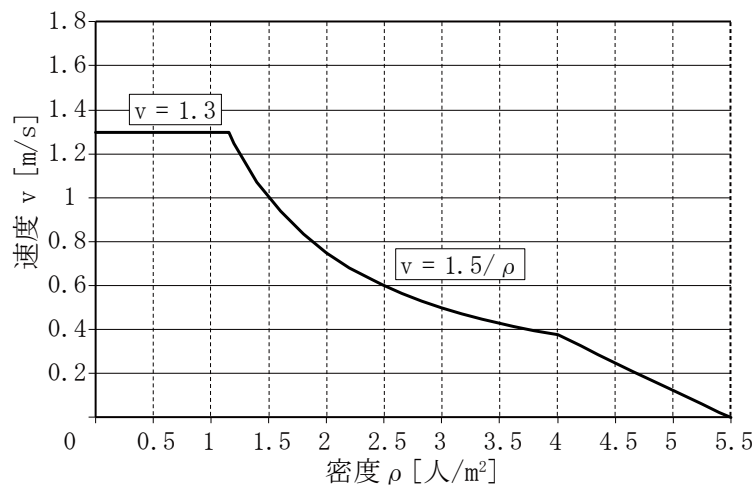
(1) 群集流動及び再現目標とする歩行行動状態

歩行者の前方や周囲の混雑により密度が大きくなり、他の歩行者の影響による行動制限が発生する群集流動状態では、密度の増加とともに歩行速度は低下する^[2]。前掲の図2-8で示した群集密度と歩行速度の関係式では、密度が1.0人/m²程度を超えると自由歩行状態から群集流動状態への状態変化が見られる。群集流動状態は密度 ρ (人/m²)、速度 v (m/s)、流率 f (人/m・s)の3つの指標により概ね4.0人/m²までの範囲において $f \approx \rho \cdot v$ の関係が成立し、その流率は戸川式では1.5人/m・s程度が示され、また出口等の狭まった部分でも同様に1.5人/m・s程度となることが示されている^[3]。この流率は指針法の流動係数=1.5人/m・s、及び検証法の有効流動係数の90人/m・分の設定根拠となっている。一方向流モデルの構築においては、これらの研究及び現在の基準に従い、密度が概ね1.0～4.0人/m²程度までの範囲において、流率が $\rho \cdot v \approx 1.5$ 人/m・sとなる群集流動状態の再現を行う必要がある。また、4.0人/m²以上では足取りを頻繁に変えなければならず低速でも停止する可能性がある滞留状態へ状態変化するが^[1]、この状態は先を争って押し合うことによる将棋倒し等が発生する可能性があるといわれている^[4]。指針法や検証法においては、避難経路内の密度が3.3～5.0人/m²以上になることを制限しているが、本モデルもその考えに基づき、主として自由歩行状態及び群集流動状態を取り扱うこととした。また再現が困難な密度4.0人/m²以上の滞留状態となる場合は、密度の増加に伴い流率を低減させ、最大計画密度5.5人/m²で完全停止することとした。ここで再現目標とする自由歩行状態、群集流動状態及び滞留状態の密度 ρ (人/m²)、速度 v (m/s)、流率 f (人/m・s)の関係をまとめると図4-4のようになる。この歩行行動状態をシミュレーションにより再現するために、次項(2)に示すパーソナルスペース及び局所近傍則を設定し、本避難シミュレーションの基本となる水平路一方向流モデルを構築した。

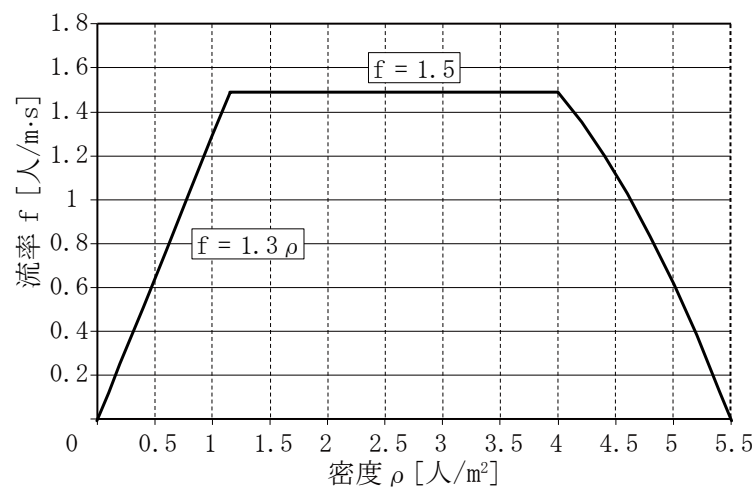
(2) パーソナルスペースと局所近傍則の設定

人間のまわりにはパーソナルスペースと呼ばれる一種の「縄張り」が形成されていて、混み合い等でこれが侵されると気詰まり・不快感により他人から離れたいと感じることが指摘されている。また歩行時のスペースに関しては、歩行動作をスムーズに行うために必要な余裕を見込んだ幅70cm×長さ100～200cm程度の歩行帯や、群集流において各歩行者と前後左右の人との間の概ね左右1.0m、前方1.5m程度の離隔距離を表した歩行

者間の相互間隔が既往研究により示されている^[1]。本モデルでは、図4-4に示す歩行行動状態を再現するために、火災や煙等の緊急状態に遭遇したときの反応行動モデルは導入せずに、できるだけ簡単なパーソナルスペース及び局所近傍則を設定することとした。パーソナルスペースについては、上記の既往研究を参考にした上で、図4-4に示す通り密度が概ね1.0人/㎡以上から臨界密度の達し、他の歩行者の影響を受ける群集流動状態への状態変化が始まること、「4-3. 方向ベクトル」で示した2種類の方向ベクトルにそれぞれ対応させること、また前章「3-2. (2) 2次元セルオートマトン」で示した通り、歩行者の進行方向に対して左右1セル程度を含めた近傍セルの状態の影響を受けること



(a) 密度と速度の関係



(b) 密度と流率の関係

図 4-4 再現目標とする密度・速度・流率の関係(水平路)

を勘案して、先ず進行方向の左右を含めた 3 セルに対して、 1 m^2 程度の直交方向型、 45° 方向型の 2 種類のパーソナルスペースを用意した。局所近傍則については、パーソナルスペースに他の歩行者が存在する場合のスロースタート・スローストップとなる移動確率のみを設定し、歩行者は方向ベクトルに対応したパーソナルスペースを選択して局所近傍則に基づく行動判断を行うこととした。ここでの移動確率とは、選択したパーソナルスペース内で、移動後に他の歩行者と共存することなく、かつ他の歩行者とも隣接せずに移動可能なセルが存在する場合に、歩行者がそのセルに移動する確率である。移動可能なセルが存在しない場合には、歩行者は選択したパーソナルスペース内での移動は行わない。以上を踏まえ、シミュレーションによる試行錯誤を通してパーソナルスペースと局所近傍則の設定を行った。設定に至るまでの試行錯誤の経緯は割愛するが、最終的に決定したパーソナルスペースを図 4-5 に、局所近傍則として設定した移動確率を式(14)及び表 4-1、表 4-2 に示す。またそれらの設定検討を行った水平路一方向流におけるシミュレーション方法とそのシミュレーション結果を次項 (3) に示す。本モデルのパーソナルスペースは、上記の既往研究^[1]で提示されたパーソナルスペースと精緻な一致はしていないが、前述の通り本モデルはできるだけ簡便な方法によりマクロな避難行動状態の再現を目指すものであるため、セル形状の制約の中で抽象的に捉えてモデル化することとした。

移動確率を示す式(14)については、 P_{stop} は停止する確率（停止確率）、 C_{dens} はパーソナルスペースにいる他の歩行者の人数によって決める係数（密度係数）、 C_{dir} は移動方向によって決める係数（方向係数）である。これらの確率及び係数は表 4-1、表 4-2 のように設定した。また方向係数 C_{dir} については直交方向に進む場合は 1.0 とし、 45° 方向に進む場合は $1/\sqrt{2}$ とした。

ここで式(14)及び表 4-1、表 4-2 によれば、 C_{dens} により密度が高くなるほど移動確率が増加する設定となっている。この C_{dens} は当初想定していなかった設定であり、通常は密度が高くなるほど移動確率が減少すると考えられるため、この設定は一見するとおそらく誰もが考える歩行行動モデルに反する設定ではないかと思われる。これは検討の過程で密度 $2.5 \sim 3.0 \text{ 人/m}^2$ 程度以上になると、移動可能なセルが少ない状況となり、流率が急激に低下するシミュレーション現象が発生したため、目標流率 $1.5 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$ を維持するために導入した係数である。この流率が急激に低下するシミュレーション現象は他の研究においても指摘されており、概ね密度が $2.5 \text{ 人/m}^2 \sim 3.0 \text{ 人/m}^2$ 以上となる場合、

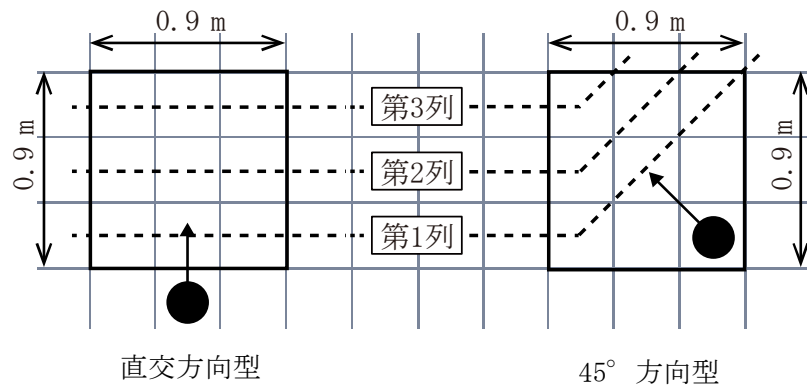


図 4-5 パーソナルスペース

$$\text{移動確率} = (1.0 - P_{\text{stop}} \times C_{\text{dens}}) \times C_{\text{dir}} \quad (14)$$

表 4-1 停止確率 P_{stop} の設定値

停止 確率	PS内での最近接 歩行者の位置
1.0	1列目
0.4	2列目
0.2	3列目
0	誰もいない

表 4-2 密度係数 C_{dens} の設定値

密度 係数	PS内での 他の歩行者の数
1.0	0～2人
0.6	3人
0.3	4人
0	5人以上

*PS:パーソナルスペース

どんなに歩行者を送り込んでもそれ以上の密度にならず停止する事例、または急激な流率低下が発生する事例が報告されている^{[5][6]}。本章では詳述は避けるが、 C_{dens} が示す意味は、密度増加という周囲のストレスの高まりに対して歩行者が発現する無意識の抵抗反応の類ではないかと考えられる。

(3) 水平路一方向流におけるシミュレーション方法とシミュレーション結果

一方向流モデルのパーソナルスペース及び局所近傍則の設定を検討するために、図 4-6 に示すような(a)直交方向、(b)斜め 1/3 方向、(c)斜め 1/2 方向、(d)45°方向の 4 方向の通路モデルにおける一方向流の歩行行動状態をシミュレーションにより再現した。通路モデルをこの 4 方向に設定した理由は、前述の図 4-3 に示した 24 方向に対して自然な歩行状態の再現が可能であることを検証するためである。各モデルに灰色で

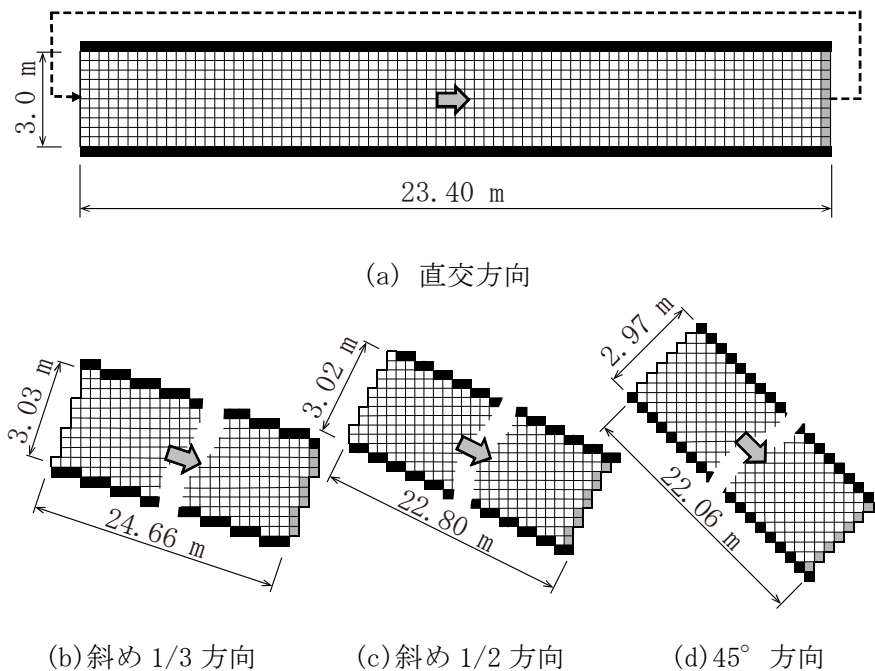
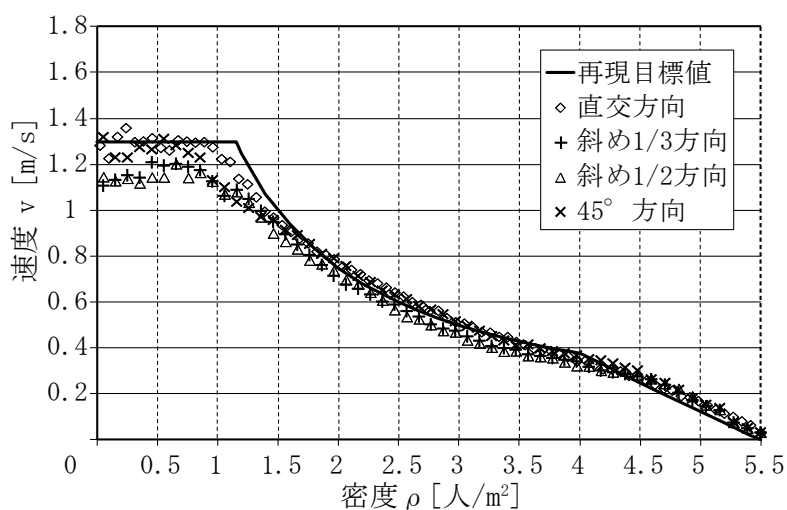


図 4-6 一方向流における歩行行動シミュレーションモデル

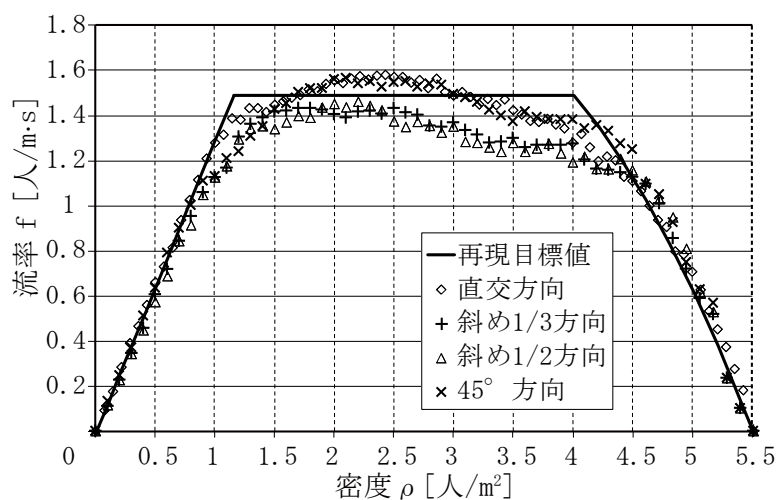
示したセルは歩行者が目指す目的地セルを示している。それぞれの通路において、密度 $0.1 \sim 5.5$ 人/ m^2 の範囲で歩行者をランダムに配置し、自由歩行速度 $v=1.3\text{m/s}$ として矢印の方向へ移動させ、自由歩行状態、群集流動状態及び滞留状態を再現して、各密度における流率を計測した。計算の手順としては、シミュレーション空間上にいる歩行者をランダムに選定し、各歩行者が次の時間ステップに進む場所を確保して、ある時間ステップでの全歩行者の計算が終わった時点で一齐に移動を行うこととした。流率は任意の 260 時間ステップ（実時間 60 秒相当）における流出人数に基づき計測した。また周期境界条件を適用して、流出した歩行者は再び流入させ、通路内は常に一定の密度となるように設定した。また歩行者の平均速度 v は流率 f / 密度 ρ として算出した。

前項(2)で示したパーソナルスペースと局所近傍則の設定に基づく計測結果を図 4-7 に示す。計測結果では、先ず密度 $0.1 \sim 1.0$ 人/ m^2 程度の自由歩行状態について、4 方向とも再現目標値とほぼ一致した結果が示された。また概ね密度 1.0 人/ m^2 を超える辺りから 4 方向とも密度の増加に従い速度が減少することが示されて群集流動状態に近い現象が再現できていることが確認できた。流率は直交方向、45°方向においては狙い通り概ね 1.5 人/ $\text{m} \cdot \text{s}$ 近傍の値を示しているが、斜め 1/3 方向及び斜め 1/2 方向においては、

直交方向や 45° 方向に比べ流率が若干低くなる傾向が見られた。これは元々設定上の自由歩行速度は 1.21 m/s であり、直交方向、 45° 方向に対して約 7% 低下することにもよるが、壁際セルにおいて通路方向が 2 種類の方角ベクトル（直交方向、 45° 方向）と一致しないことにより、幅員の狭い通路型モデルでは、壁際に直交方向への移動可能なセルが減少する影響が無視できなくなるためである。その結果、平均の自由歩行速度は最小で約 1.1 m/s となり、また群集流動状態においても密度 $2 \sim 4 \text{ 人/m}^2$ 程度の範囲において、直交方向、 45° 方向に対して流率が約 10% 程度低下する傾向が見られた。また 4 方向とも密度 2.5 人/m^2 を超える辺りから密度が高くなるに従い流率が微減し、密度 4.0 人/m^2 を超える辺りから急激に減少していく傾向が示された。



(a) 密度と速度の関係



(b) 密度と流率の関係

図 4-7 再現目標とシミュレーション結果の関係（水平路）

以上に示すように 4 方向の通路モデルの計測結果は、直交方向、 45° 方向については、再現目標としている図 4-4 に示す歩行行動状態と概ね近似しており、水平路における一方向流の歩行状態において、良好な現象再現が得られることが確認できた。斜め $1/3$ 方向及び斜め $1/2$ 方向における歩行速度及び流率の低下については、避難行動状態を可視化して大局的な避難計画の問題を把握する場合や、安全側の避難時間を算出する場合では特に問題にはならないが、精緻な避難時間計算を行う上での影響においては無視できない。従って限定的ではあるが、幅員の狭い斜め $1/3$ 方向及び斜め $1/2$ 方向の通路への適用がある場合は、その避難時間計算結果の扱いについて十分留意する必要があると考える。

4-6. 階段一方向流モデル

(1) 再現目標とする歩行行動状態

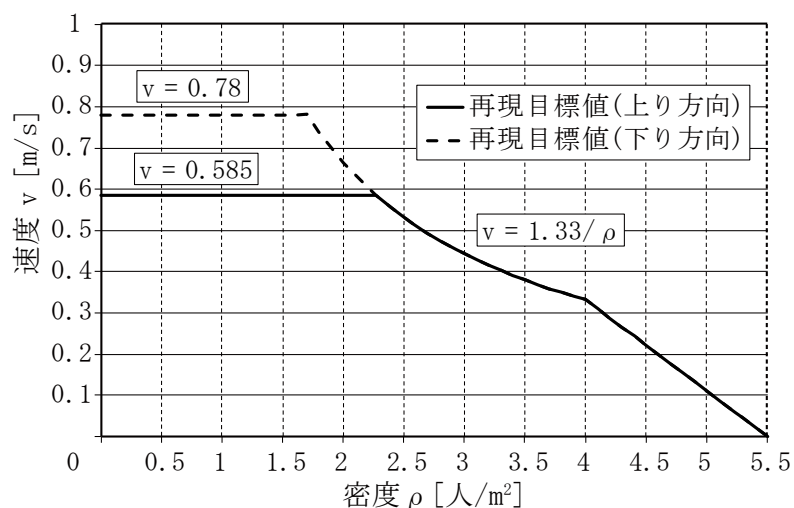
階段の歩行速度は、水平歩行時のピッチを維持したまま昇降するため、水平歩行時の単位時間当たりの歩数によって規定され^[2]、標準的な蹴上げと踏み面の場合、階段の水平投影の歩行速度は水平廊下の半分程度になると指摘されている^[7]。本モデルにおける階段の自由歩行速度は、検証法における階段の歩行速度設定に基づき、上り歩行速度は $v=0.58\text{m/s}$ 、下り歩行速度は $v=0.78\text{m/s}$ を上限とした。

また階段においても、水平部と同様に密度が高くなるに従い歩行速度が減少する群集流動状態になることが指摘されており^[2]、その流率は戸川式では $1.3 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$ 程度になることが示されている^[3]。実務的な避難計算における階段の流動係数については、指針法では $1.3 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$ 、検証法の有効流動係数 N_{eff} では密度が 4.0 人/m^2 までの範囲で $80 \text{ 人/m}\cdot\text{分}$ ($1.33 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$) としてほぼ同様の値が設定されている。本モデルにおける階段の群集流動の流率については、検証法に従い $1.33 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$ を基準とした。ここで階段における再現目標とする自由歩行状態、群集流動状態及び滞留状態の密度 $\rho(\text{人/m}^2)$ 、速度 $v(\text{m/s})$ 、流率 $f(\text{人/m}\cdot\text{s})$ の関係をまとめると図 4-8 のようになる。この歩行行動状態をシミュレーションにより再現するために、次項 (2) に示すパーソナルスペース及び局所近傍則を設定し、階段一方向流モデルを構築した。

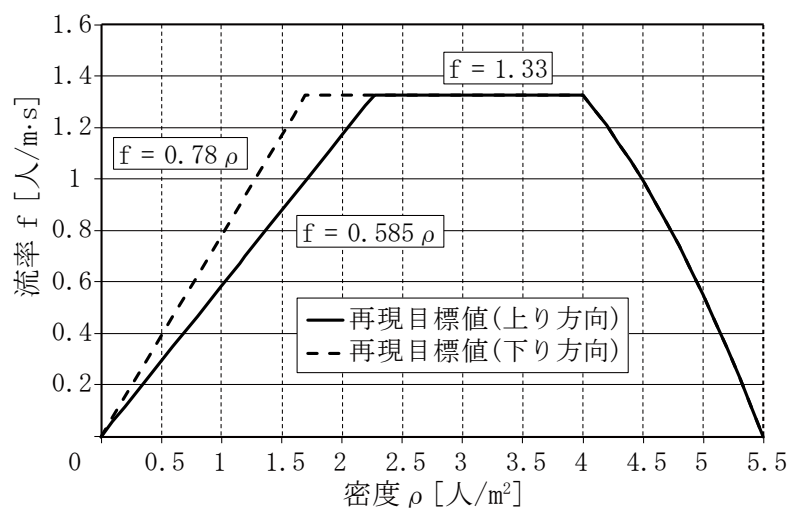
(2) パーソナルスペースと局所近傍則の設定

本モデルにおける水平路と階段における歩行行動状態の違いは、自由歩行速度と群集

流動の流率のみであるため、パーソナルスペースと局所近傍則の基本的な考え方は水平路と同様とした。階段の自由歩行速度は、検証法における階段の歩行速度設定に基づくこととしたため、上り歩行速度は水平部歩行速度の 0.45 倍、下り歩行速度は水平部歩行速度の 0.6 倍の移動確率を乗じて設定した。また階段の群集流動の流率については、検証法における流動係数 (1.33 人/ $\text{m}\cdot\text{s}$) に基づくこととしたため、水平部で設定した群集流動状態の局所近傍則に対して $1.33/1.5$ の移動確率を乗じて設定した。これらの設定の確認及び確認に用いた階段一方向流におけるシミュレーション方法とそのシミュレーション結果を次項 (3) に示す。



(a) 密度と速度の関係



(b) 密度と流率の関係

図 4-8 再現標とする密度・速度・流率の関係(階段)

(3) 階段一方向流におけるシミュレーション方法とシミュレーション結果

階段での歩行行動シミュレーションが可能なことを示すために、図 4-6(a)(d)と同じ平面の直交方向、45°方向における一方向流の階段モデル、及び図 4-9 で示す内法寸法 2.7m×5.4m、1～3 階の折返し階段モデルを設定して検証した。各モデルに灰色で示したセルは歩行者が目指す目的地セルを示している。折返し階段モデルでは図中に灰色で示したセルを中間の目的地セルとしている。それぞれのモデルにおいて、密度 0.1～5.5 人/m²の範囲で歩行者をランダムに配置し、自由歩行速度を下り方向は 0.78m/s、上り方向は 0.58m/s として、自由歩行状態、群集流動状態及び滞留状態を再現して、各密度における流率を計測した。流率は任意の 260 時間ステップ (60 秒) における流出人数に基づき計測した。水平路一方向流と同様に周期境界条件を適用し、流出した歩行者は再び流入させ階段内は常に一定の密度となるように設定した。また歩行者の平均速度は流率／密度として算出した。尚、折返し階段については 2 階からは流入させないこととした。

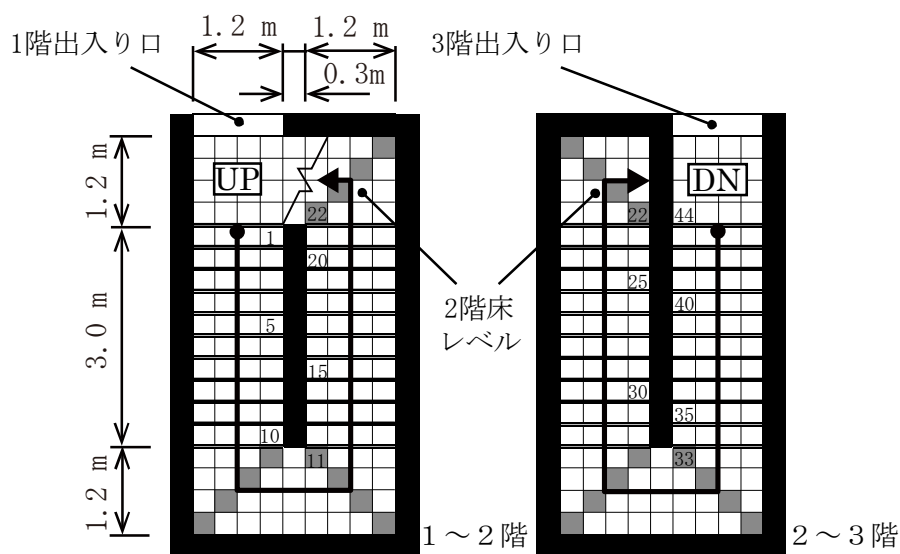
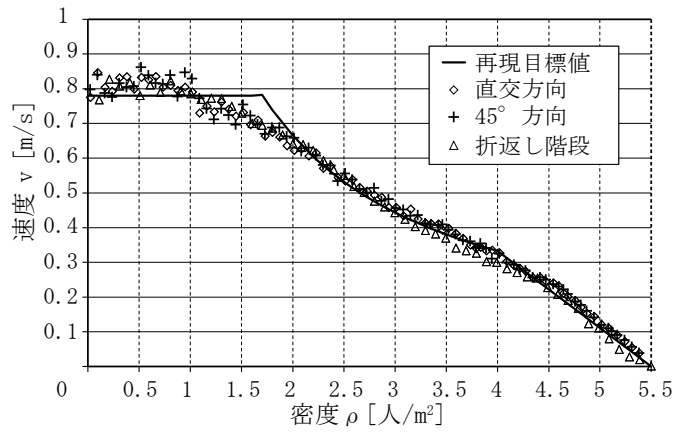
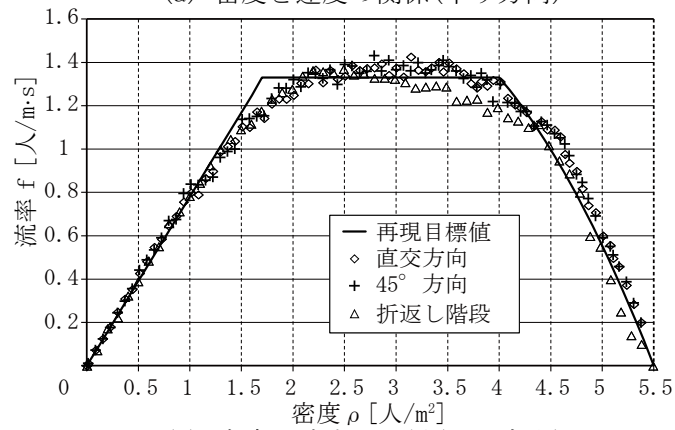


図 4-9 折返し階段における歩行行動シミュレーションモデル

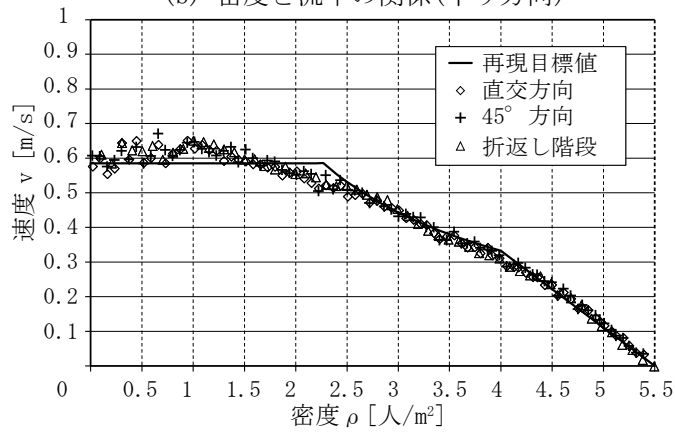
前項(2)で示したパーソナルスペースと局所近傍則の設定に基づく計測結果を図 4-10 に示す。計測結果では、下り方向、上り方向とも再現目標としている図 4-8 に示す歩行行動状態とほぼ一致した結果が示され、直交方向、45°方向、及び直交方向の折返し階段における一方向流の歩行状態において、良好な現象再現が得られることが確認できた。



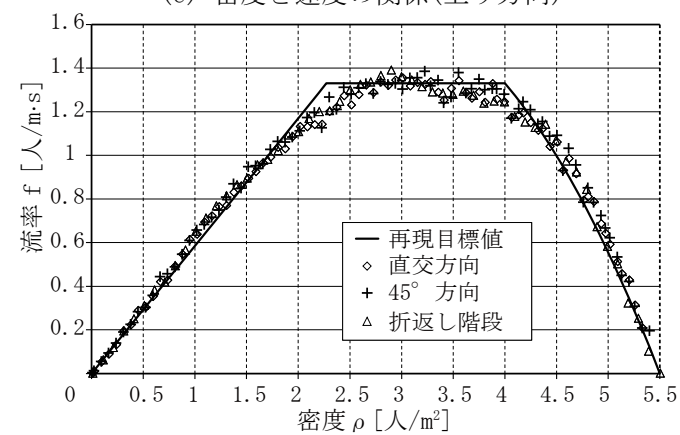
(a) 密度と速度の関係(下り方向)



(b) 密度と流率の関係(下り方向)



(c) 密度と速度の関係(上り方向)



(d) 密度と流率の関係(上り方向)

図 4-10 再現目標とシミュレーション結果の関係 (階段)

4-7. 小括

本章では、セルオートマトンを用いて下位の複雑系となる水平路一方向流モデルを構築するために、セルサイズ、方向ベクトル、歩行速度等の基本設定を示した上で、4 方向の通路の流動シミュレーションによってパーソナルスペースと局所近傍則の設定を行った。またその水平路一方向流モデルの自由歩行状態及び群集流動状態における移動確率を調整することにより、階段における一方向流モデルの設定を行った。その結果、水平路及び階段一方向流モデルにおいて、以下の性状を確認した。

- 1) 水平路の直交方向及び 45° 方向の一方向流の検証結果は、再現目標の自由歩行状態 ($v=1.3\text{m/s}$) 及び群集流動状態 ($f=1.5 \text{ 人}/\text{m}\cdot\text{s}$) とほぼ一致した。斜め $1/3$ 方向及び斜め $1/2$ 方向の通路型モデルでは壁際セルで直交方向の移動に制限が生じるため、歩行速度、流率が再現目標に対して若干低下することが確認できた。
- 2) 階段の直交方向、 45° 方向及び折返し階段の一方向流の検証結果は、再現目標の自由歩行状態 (下り $v=0.78\text{m/s}$, 上り $v=0.58\text{m/s}$) 及び群集流動状態 ($f=1.33 \text{ 人}/\text{m}\cdot\text{s}$) とほぼ一致した。

第5章 一方向流モデルの歩行行動シミュレーション適用化検証

5-1. 本章の目的

前章では、本避難シミュレーションの下位の複雑系モデルとなる水平路及び階段における一方向流モデルを構築した。具体的な建築物の避難シミュレーションに適用するためには、その基本的な歩行行動モデルとして、出口等のネック部分において目標流率が適切に再現されること、また水平路及び階段において上位の複雑系モデルとなる一方向流モデル同士の合流が適切に再現されることが必要である。本章では、建築物の避難シミュレーションへの適用に先立ち、これらの基本的な歩行行動の再現性について検証を行った。

5-2. 水平路のネック部における歩行行動シミュレーション

(1) 平面モデルと設定条件

実際の建築計画において、居室から廊下、廊下から階段への出入口がボトルネックとなる場合は出入口前に滞留が生じる。指針法、検証法ではこのような出入口部における歩行者の流動係数も $1.5 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$ の値が用いられている。ここでは、図 5-1 に示すような幅 1.5m と 0.9m の 2 つのネック部を設置した直交方向通路モデルを設定し、出入口における歩行者の流率の時間的变化を検証した。歩行者は初期配置せず、左端より流率 $1.5 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$ の歩行者を一定に流入し、自由歩行速度を 1.3m/s として矢印の方向へ移動させ、各ネック部における流率を計測した。灰色で示したセルが歩行者が目指す目的地セルである。流率は任意の 260 時間ステップ(60 秒)における通過人数の基づき計測した。

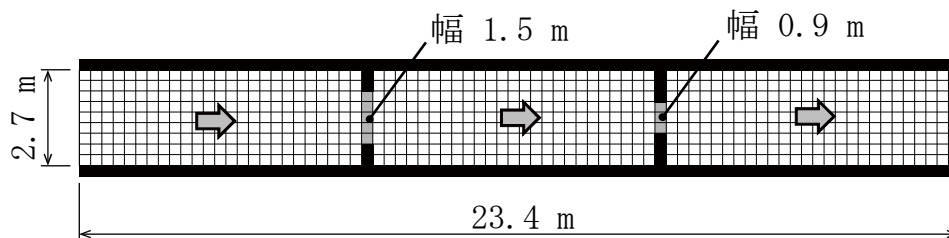


図 5-1 ネック部における歩行行動シミュレーションモデル

(2) シミュレーション結果と考察

ネック部における歩行行動シミュレーション結果を図 5-2, 各ネック部における流率の時間的变化を図 5-3 に示す。図 5-2(a)に示すように, 歩行者は計測開始後 13 秒程で幅 0.9m ネック部に到着し, その後図 5-3 に示すように概ね 25~90 秒の間, いずれのネック部でも流率は, ほぼ再現目標の 1.5 人/m・s で定常的に通過していることが確認できた。一方で, 図 5-2(b) (c)に示すようにネック部を通過できなかった歩行者により各ネック部手前に滞留が発生し, 時間経過に伴い滞留は移動方向とは反対の方向へ伝播した。幅 0.9m ネック部での滞留が幅 1.5m ネック部に到達すると, 図 5-3 に示すように幅 1.5m ネック部での流率は徐々に低下し続け, 0.9~0.95 人/m・s (流量 1.35~1.42 人/s) 程度で一定となった。幅 0.9m ネック部の流量は $1.5 \times 0.9 = 1.35$ 人/s であり, 幅 1.5m ネック部での流量とほぼ一致していることにより, 通路上の流量が最も狭いボトルネック部の流量によって制限される状況が確認できた。

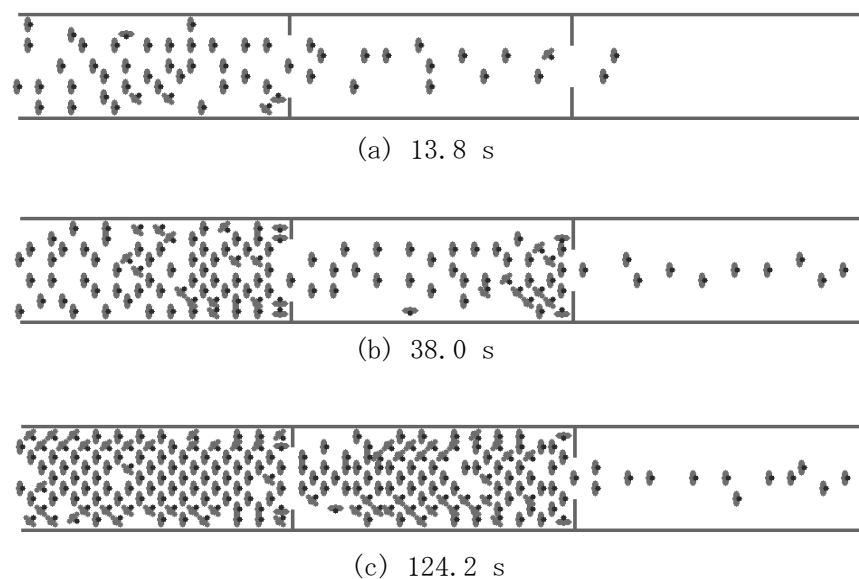


図 5-2 ネック部における歩行行動シミュレーション結果

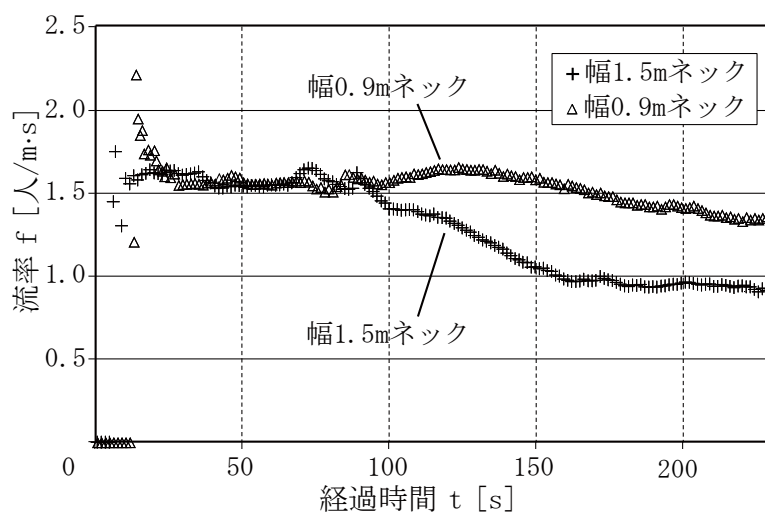


図 5-3 各ネック部における流率の時間的变化

5-3. 水平路の合流における歩行行動シミュレーション

(1) 平面モデルと設定条件

前章で示した直交方向の一方向流モデル同士が合流するシミュレーションについて、適切な現象再現が可能なことを示すために、図 5-4 に示すような T 字路における合流を設定して検証した。初期条件として歩行者をランダムに配置して図中の矢印の方向へ移動させ、C 部において合流後、D 部方向へ移動させた。B 部の歩行者は B 部下端、B 部以外の歩行者は D 部右端の灰色セルを目的地セルとして設定した。移動開始前の各部分の歩行者は同じ密度であり、移動開始後は滞留がない場合に同じ一定の密度が維持される流率の歩行者を A1 部及び B1 部にそれぞれ流入させた。シミュレーションは初期密度 0.3 人/m^2 及び 0.7 人/m^2 の 2 通りで実施し、A1 部、B1 部の流入量は、初期密度 0.3 人/m^2 では $0.39 \text{ 人/m} \cdot \text{s}$ 、初期密度 0.7 人/m^2 では $0.91 \text{ 人/m} \cdot \text{s}$ とし、自由歩行速度を 1.3 m/s とした。前掲の図 4-4 に示す再現目標によると、概ね密度 1.0 人/m^2 で歩行状態が自由歩行状態から群集流動状態へ遷移することから、初期密度 0.3 人/m^2 では、C 部における合流後の密度は $0.3+0.3=0.6 \text{ 人/m}^2$ と増加するが、 1.0 人/m^2 より密度が低いため A 部及び B 部からの流量を受容でき、歩行状態は自由歩行状態のまま歩行速度に変化が発生しないことが予測された。また合流後の流率は $0.39+0.39=0.78 \text{ 人/m} \cdot \text{s}$ 程度になることが予測された。一方、初期密度 0.7 人/m^2 では、C 部における合流後の密度は $0.7+0.7=1.4 \text{ 人/m}^2$ となり、 1.0 人/m^2 より大きくなるため、C 部において A 部及び B 部からの流量を受容できずに時間経過とともに A2 部→A1

部，B2 部→B1 部へと流出人数の減少が発生すること，また合流後は群集流動状態になることが予測された。以上を本合流モデルの再現目標として，各初期密度におけるシミュレーションについて，通路各部の流出人数 N_t 及びその密度 ρ ，流率 f ，速度 v を 0～260 時間ステップ（0～60 秒），260～520 時間ステップ（60～120 秒），及び 520～780 時間ステップ（120～180 秒）において計測した。

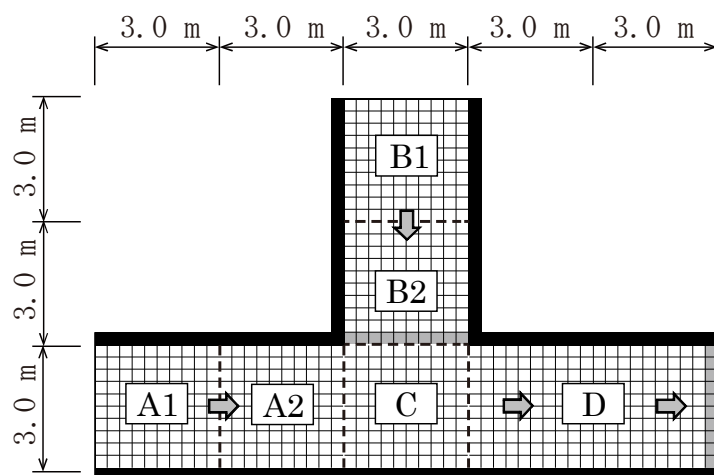


図 5-4 T 字路の合流における歩行行動シミュレーションモデル

(2) シミュレーション結果と考察

初期密度 0.3 人/ m^2 でのシミュレーション結果を図 5-5(a) (b)，計測結果を表 5-1 に示す。計測結果では，合流前後において予測通りの流率が維持されているが，特に合流部 B2 部において，密度の上昇と速度の低下，また C，D 部においても速度の低下がみられた。これは合流部において，B 部からの歩行者が C 部への進入の際に A 部からの歩行者の妨害を受けているため，また C，D 部において局所的な密度に偏りが生じ，偏りを分散させるために一時的に歩行速度を低減させる歩行者が発生しているためである。D 部よりもさらに移動方向前方では，歩行者が徐々に分散し，自由歩行速度 1.3m/s がほぼ維持されることが確認できた。

同様に初期密度 0.7 人/ m^2 でのシミュレーション結果を図 5-5 (c)～(f)，計測結果を表 5-2 に示す。計測結果では B1，B2 部において，時間が経過するに従い流出人数が減少し，予測通りの結果が示されたが，A1，A2 部においては 180 秒までにおいて流出人数の大きな変化は見られなかった。これは初期密度 0.3 人/ m^2 の場合と同様に B 部からの歩行者が，合流の際に全ての部分において A 部からの歩行者の影響を受け

ている一方で、A 部では図の下側（B 部と反対側）を歩行する歩行者が B 部からの歩行者の影響を殆ど受けずに C 部へ流入していることによるものである。但し、密度と速度においては、A 部、B 部ともに時間経過に伴い密度は上昇し、速度が低下する傾向が示され、C 部へ流入できない歩行者が C 部手前で滞留して移動方向に対して後方へと滞留状態が伝播し、A 部及び B 部の歩行者の流れに影響を及ぼしている状況がシミュレーションにより確認できた。また、合流後の流率においては C 部、D 部ともに概ね $1.5 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$ を定常的に維持しており、合流後の群集流動状態の良好な再現ができていることが計測結果により確認できた。

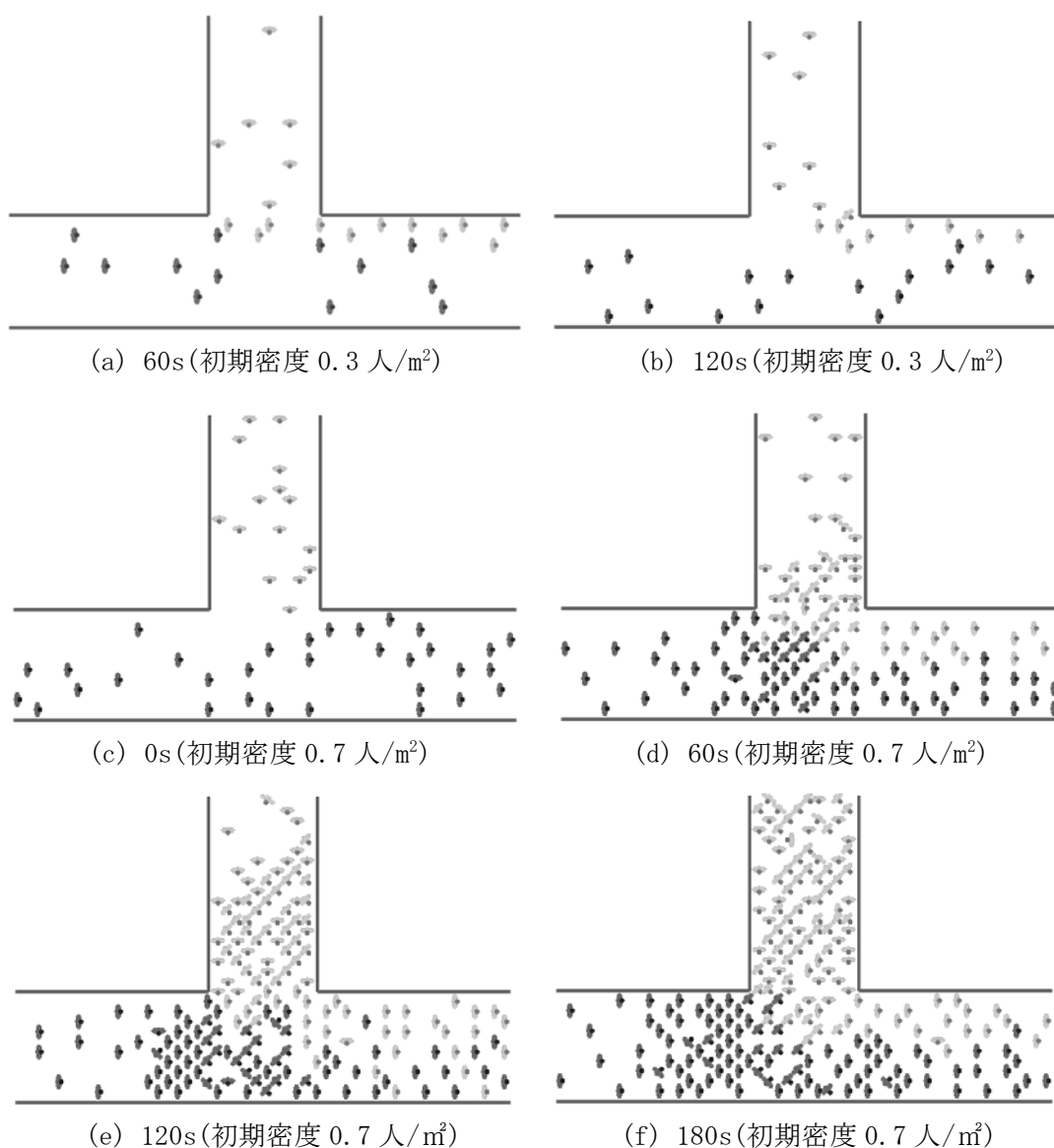


図 5-5 T 字路の合流における歩行行動シミュレーション結果

表 5-1 各部における流出人数・密度・流率・速度

[初期密度 0.3 人/m², 流入流率 0.39 人/m・s]

	計測区間	A1	A2	B1	B2	C	D
N _t	0～60s	74	74	73	76	145	134
	60～120s	73	73	74	78	146	149
ρ	0～60s	0.32	0.32	0.31	0.40	0.71	0.67
	60～120s	0.31	0.32	0.32	0.44	0.72	0.71
f	0～60s	0.41	0.41	0.41	0.42	0.80	0.74
	60～120s	0.41	0.41	0.41	0.43	0.81	0.83
v	0～60s	1.28	1.29	1.29	1.05	1.13	1.11
	60～120s	1.31	1.28	1.29	0.99	1.13	1.16

N_t:流出人数(人), ρ :密度(人/m²), f:流率(人/m・s), v:速度(m/s)

表 5-2 各部における流出人数・密度・流率・速度

[初期密度 0.7 人/m², 流入流率 0.91 人/m・s]

	計測区間	A1	A2	B1	B2	C	D
N _t	0～60s	163	155	163	157	273	249
	60～120s	161	150	147	140	277	275
	120～180s	157	151	124	137	273	271
ρ	0～60s	0.70	1.21	0.72	1.92	2.69	1.55
	60～120s	0.78	2.58	1.22	3.79	3.58	2.16
	120～180s	1.05	3.69	3.71	4.63	3.69	2.27
f	0～60s	0.90	0.86	0.91	0.87	1.52	1.38
	60～120s	0.89	0.83	0.82	0.78	1.54	1.53
	120～180s	0.87	0.84	0.69	0.76	1.52	1.51
v	0～60s	1.28	0.72	1.25	0.46	0.57	0.89
	60～120s	1.15	0.32	0.67	0.21	0.43	0.71
	120～180s	0.84	0.23	0.19	0.16	0.41	0.66

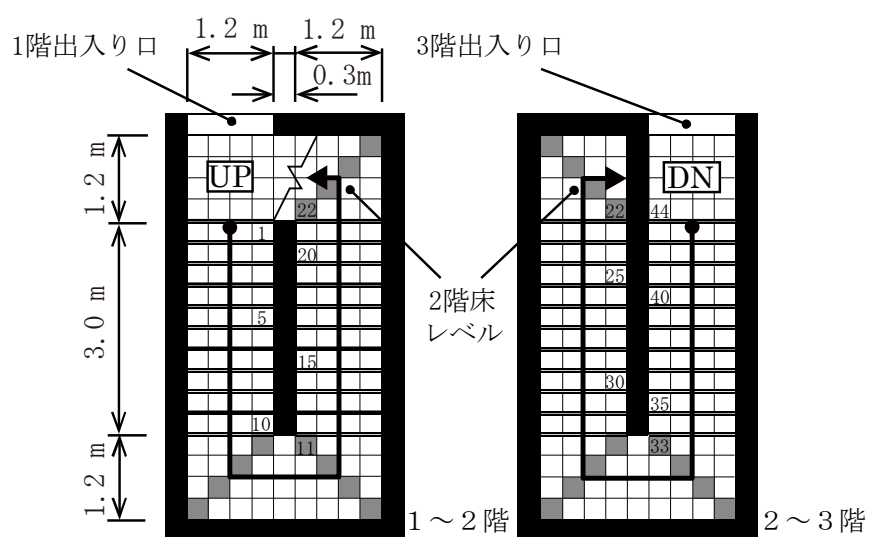
N_t:流出人数(人), ρ :密度(人/m²), f:流率(人/m・s), v:速度(m/s)

5-4. 水平路と階段の合流における歩行行動シミュレーション

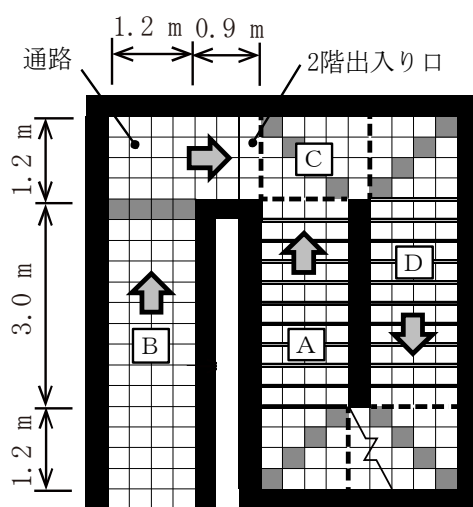
(1) 水平路と階段モデルと設定条件

水平路と階段の一方向流モデル同士が合流するシミュレーションについて、適切な現象再現が可能なことを示すために、階段での降下群集に通路群集が合流するケースを設定してシミュレーションを行った。通路+階段モデルは前章の階段一方向流シミュレーションで設定した図 5-6(a)に示す 1～3 階の折返し階段に対して、図 5-6 (b)

に示す 2 階階段入口から通路群集を流入させる階段モデルを追加設定して検証した。モデルの灰色セルは歩行者が目指す目的地セルを示している。初期条件として歩行者を階段、通路にランダムに配置し、階段内を下降させると同時に、2 階入口から通路群集を流入し、合流した 2 群集を下降させ 1 階出口から退出させた。移動開始前の階段、通路の歩行者は同じ密度であり、移動開始後は滞留がない場合に同じ一定の密度が維持される流率の歩行者を 3 階入口及び 2 階通路入口部からそれぞれ流入させた。シミュレーションは初期密度 0.5 人/m^2 及び 1.0 人/m^2 の 2 通りで実施し、流入量は、



(a) 1～3 階折返し階段



(b) 2 階通路＋階段

図 5-6 通路と階段の合流における歩行行動シミュレーションモデル

初期密度 0.5 人/m^2 では 3 階階段入口は $0.39 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$, 2 階通路 B 部へは $0.65 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$, 初期密度 1.0 人/m^2 では 3 階階段入口は $0.78 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$, 2 階通路 B 部へは $1.3 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$ とし, 自由歩行速度を階段は 0.78 m/s , 通路は 1.3 m/s とした。前掲の図 4-8 に示す再現目標によると, 階段においては概ね密度 1.7 人/m^2 で歩行状態が自由歩行状態から群集流動状態へ遷移することから, 初期密度 0.5 人/m^2 では, C 部における合流後の密度は $0.5+0.5=1.0 \text{ 人/m}^2$ と増加するが, 1.7 人/m^2 より密度が低いため A 部及び B 部からの流量を受容でき, 合流後の歩行状態は自由歩行状態のまま歩行速度に大きな変化が発生しないと予測された。また合流後の流率は, $0.39+0.65=1.04 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$ 程度となることが予測された。一方, 初期密度 1.0 人/m^2 では, C 部における合流後の密度は $1.0+1.0=2.0 \text{ 人/m}^2$ となり, 1.7 人/m^2 より大きくなるため, A 部の流量 ($0.78 \times 1.2 \times 60 = 56.2 \text{ 人/分}$) 及び B 部の流量 ($1.3 \times 1.2 \times 60 = 93.6 \text{ 人/分}$) を受容できずに流出人数の減少が発生すること, また合流後は群集流動状態となることが予測された。以上を本合流モデルの再現目標として, 各初期密度におけるシミュレーションについて, 各部の流出人数 N_t 及びその密度 ρ , 流率 f , 速度 v を 0~260 時間ステップ (0~60 秒), 260~520 時間ステップ (60~120 秒), 及び 520~780 時間ステップ (120~180 秒) において計測した。更に初期密度 1.0 人/m^2 について, C 部 (合流区画) の密度, 階段降下群集, 通路群集の流入人数を計測し, 流入比率 (通路群集の流入人数/2 群集合計流入人数) 及び流率合流比率 (通路群集の流率/2 群集合計流率) を算出し, 既往研究における北後らの実験的再現^[1]との比較検証を行った。

(2) シミュレーション結果と考察

初期密度 0.5 人/m^2 での計測結果を表 5-3 に示す。計測結果では, 合流後の C 部, D 部の歩行速度は $0.60 \sim 0.69 \text{ m/s}$ となり, 若干の低下が確認された。流率については合流前後において概ね予測通りの流率が維持されていることが確認できた。密度については, 全ての区間で予測値以上の上昇が見られ, 特に C 部において著しい密度の上昇が見られた。これは通路群集の歩行速度が C 部への流入前後で, $v=1.3 \text{ m/s}$ から $v=0.78 \text{ m/s}$ に低下することによるものであり, C 部, D 部の歩行速度の低下もこの密度上昇によるものと考えている。急激な密度の上昇は D 部において徐々に解消されるが, 移動方向とは反対側の A 部, B 部に対しても, 若干の密度の上昇とそれに伴う歩行速度の低下を発生させていることが確認できた。

同様に初期密度 1.0 人/m^2 での計測結果を表 5-4 に示す。初期密度 0.5 人/m^2 での計測結果を考慮すると、前述の再現目標に加えて、C 部における著しい密度の上昇と D 部における若干の密度低下、及び反対側の A 部、B 部に対する密度の上昇とそれに伴う歩行速度の低下が予測された。計測結果では、A 部、B 部とも流出人数が減少し、予測通りの結果が示された。また C 部における著しい密度の上昇と D 部における若干の密度低下、及び反対側の A 部、B 部に対する密度の上昇とそれに伴う歩行速度の低下についても予測通りの結果が示された。合流後の流率については、C 部、D 部とも概ね $1.33 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$ 前後を定常的に維持しており、合流後の群集流動状態の良好な再現ができていたことが、計測結果により確認できた。

更に初期密度 1.0 人/m^2 の場合の C 部（合流区画）における 2 群集の密度、流入人数、流入比率の時間的推移を図 5-7 に、合流後の 2 群集の流入状態を表 5-5 に示す。表 5-5 において階段降下群集についての単位時間当たり流入人数を $Na[\text{人/s}]$ 、流率を $Fa[\text{人/m}\cdot\text{s}]$ 、通路群集についての単位時間当たり流入人数を $Nb[\text{人/s}]$ 、流率を $Fb[\text{人/m}\cdot\text{s}]$ で示した。この通路+階段モデルでは合流部への通路出入口幅及び階段幅が等しいため、単位時間当たりの流入比率（ $Nb/Na+Nb$ ）と流率合流比率（ $Fb/Fa+Fb$ ）は等しくなっている。

本モデルにおける流率合流比率のシミュレーション結果は約 66~69%であり、北後らの実験的再現^[1]における流率合流比率 60%前後に対して、やや高めの値を示していることが確認できた。この流率合流比率の差異については、両者の階段部の流率の違いによるものと考えている。先ず本モデルにおける階段部の群集流動状態における流率は、前述の通り、検証法の有効流動係数（ $80 \text{ 人/m}\cdot\text{分}$ ）に従い $f=1.33 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$ を再現目標として設定している。一方、本シミュレーションが比較対照とした北後らの実験的再現における第 3 条件の結果では、73 秒の間に合計 140 人の通路群集と階段降下群集が幅 1.2m の階段内の合流区画に流入しており、ここでの流率は単純計算で約 $1.6 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$ となっている。従って、階段部の流率が相対的に低い設定となっている本モデルにおけるシミュレーションにおいて、通路群集の流入割合が相対的に高くなったことが上記の差異の原因であると考えている。

表 5-3 各部における流出人数・密度・流率・速度

[初期密度 0.5 人/m², 流入流率: 階段 0.39 人/m・s, 通路 0.65 人/m・s]

	計測区間	A	B	C	D
N _t	0～60s	27.9	46.8	73.0	68.2
	60～120s	28.1	47.6	75.2	74.9
ρ	0～60s	0.62	0.59	1.70	1.43
	60～120s	0.59	0.59	1.75	1.54
f	0～60s	0.40	0.66	1.04	0.98
	60～120s	0.39	0.67	1.05	1.05
v	0～60s	0.65	1.12	0.61	0.69
	60～120s	0.67	1.13	0.60	0.68

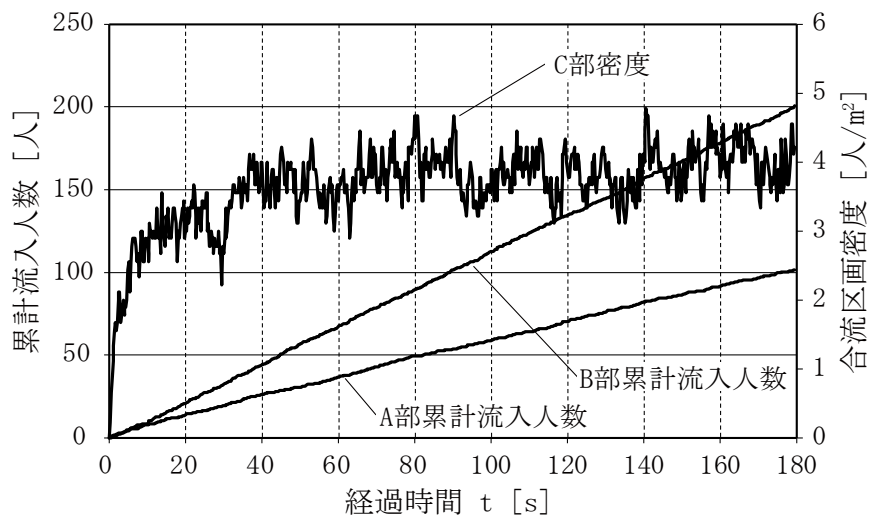
N_t:流出人数(人), ρ :密度(人/m²), f:流率(人/m・s), v:速度(m/s)

表 5-4 各部における流出人数・密度・流率・速度

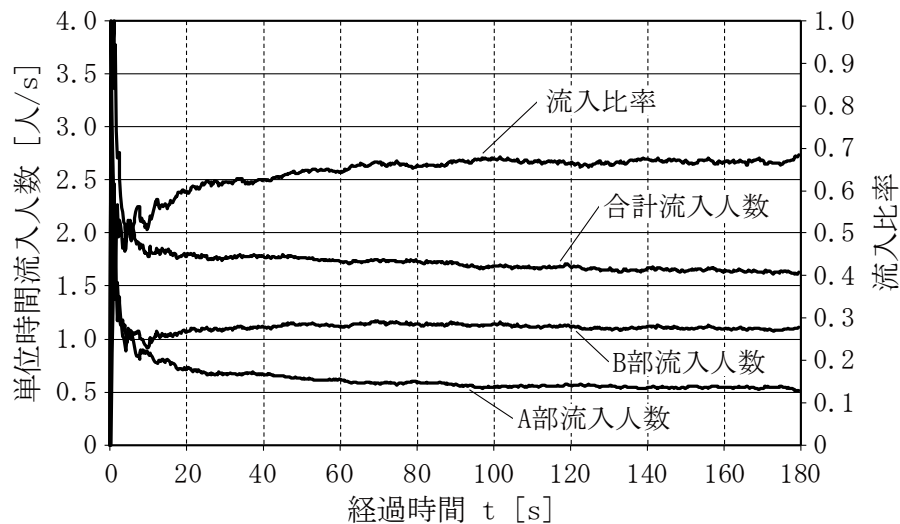
[初期密度 1.0 人/m², 流入流率: 階段 0.78 人/m・s, 通路 1.3 人/m・s]

	計測区間	A	B	C	D
N _t	0～60s	34.7	68.5	98.5	87.7
	60～120s	31.1	68.4	99.2	96.9
	120～180s	29.9	67.0	96.5	96.8
ρ	0～60s	2.73	2.52	3.29	2.49
	60～120s	4.99	3.99	3.83	3.50
	120～180s	5.02	4.00	3.86	3.67
f	0～60s	0.49	0.97	1.39	1.24
	60～120s	0.44	0.96	1.39	1.35
	120～180s	0.42	0.94	1.35	1.35
v	0～60s	0.18	0.29	0.42	0.50
	60～120s	0.09	0.18	0.36	0.39
	120～180s	0.08	0.18	0.35	0.37

N_t:流出人数(人), ρ :密度(人/m²), f:流率(人/m・s), v:速度(m/s)



(a) 各部の累計流入人数と合流区画密度



(b) 単位時間当たりの各部の流入人数と流入比

図 5-7 階段降下群集と通路群集の流入状態の時間的推移

表 5-5 合流後の 2 群集の流入状態

計測区間	階段降下群集 (A部)		通路群集 (B部)		2群集合計 流入群集		流入比率 流率合流比率
	Na	Fa	Nb	Fb	Na+Nb	Fa+Fb	$\frac{Nb}{Na+Nb}$ $\frac{Fb}{Fa+Fb}$
0~60s	0.578	0.482	1.142	0.951	1.720	1.433	0.664
60~120s	0.518	0.432	1.140	0.950	1.658	1.382	0.687
120~180s	0.498	0.415	1.117	0.931	1.615	1.346	0.691

Na,Nb:単位時間当たりの流入人数(人/s), Fa,Fb:流率(人/m・s)

5-5. 小括

本章では、下位の複雑系モデルとなる水平路及び階段における一方向流モデルを、具体的な建築物の避難シミュレーションに適用するに先立ち、基本的な歩行行動モデルとして、出口等のネック部分において目標流率が適切に再現されること、また水平路及び階段において上位の複雑系モデルとなる一方向流モデル同士の合流が適切に再現されることについて検証を行った。シミュレーションの結果、以下の再現性を確認した。

- 1) 水平路の直交方向の出口流出の検証結果は、再現目標の流率（ $f=1.5$ 人/㎡・s）とほぼ一致した。
- 2) 水平路の直交方向（T字路）の合流前後の人流の検証結果は、再現目標に基づく自由歩行状態、群集流動状態及び滞留状態の再現予測とほぼ一致し、良好な再現結果が確認できた。
- 3) 階段降下群集と通路群集との合流前後の人流の検証結果は、再現目標に基づく自由歩行状態、群集流動状態及び滞留状態の再現予測とほぼ一致し、良好な再現結果が確認できた。
- 4) 階段降下群集と通路群集との流率合流比率については、北後らの実験結果の約60%に対して、約66～69%となることが確認できた。この両者の流率合流比率の差異は、階段部の流率の違いによるものと考えている。

第 6 章 一方向流モデルによる歩行行動モデルの避難シミュレーション適用化検証

6-1. 本章の目的

第 4 章で構築した一方向流モデルの基本的な歩行行動の再現性を確認するために、前章では、出口等のネック部分における目標流率の再現、水平路及び階段における一方向流モデル同士の合流の再現について検証した。本章では前章で検証した歩行行動モデルを具体的な建築計画の避難シミュレーションとして適用し、指針法、検証法が前提としている避難行動状態の再現性についての検証を行った。

6-2. 本避難シミュレーションにおける避難行動モデル

(1) 避難行動モデル

建築計画の避難シミュレーションとして適用するに先立ち、本避難シミュレーションが再現目的とする“指針法、検証法が前提としている避難行動状態”，即ち本避難シミュレーションにおける避難行動モデルの具体的な再現条件を改めて整理して以下に示す。また複数の出口がある場合に、選択した避難出口の変更を可能とする避難行動ルールを追加設定した。その内容を次項に示す。

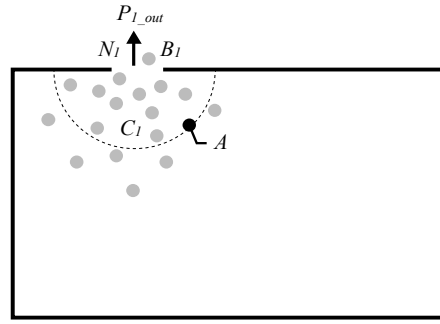
- 1) 避難者は全て自力避難可能、全員が同一の避難者特性を有し、原則として設計者が計画した避難路を整然と混乱なく避難する^[1]。
- 2) 水平部、階段部ともに自由歩行状態（速度一定）及び群集流動状態（流率一定）の再現を行う。
- 3) 自由歩行速度は、水平部では $v=1.3\text{m/s}$ または $v=1.0\text{m/s}$ 、階段部下りでは $v=0.78\text{m/s}$ 、階段部上りでは $v=0.58\text{m/s}$ を上限とする^{[2][3]}。
- 4) 群集流動状態における密度 ρ 、速度 v 、流率 f の関係及び出口流率 f は、水平部では $f=\rho v=1.5$ 人/ $\text{m}\cdot\text{s}$ 、階段部では $f=\rho v=1.33$ 人/ $\text{m}\cdot\text{s}$ を基準とする^{[2][3][4]}。
- 5) 水平部、階段部ともに、密度が 4 人/ m^2 程度以上となる場合は流率は低下し^{[2][5]}、密度 5.5 人/ m^2 で完全停止する。
- 6) 出口までの歩行経路は、原則として最短距離となる求心型経路とする^[1]。
- 7) 複数の出口があり各出口における避難時間に著しい差が生じる場合、選択した避難出口の変更を可能とする^[1]。（次項参照）

(2) 複数の出口がある場合の避難行動ルール

本モデル設定では、原則として避難者は最も近い出口へと避難するが、複数の避難出口がある場合、各出口の幅や配置等の条件により各出口における避難時間に著しい差が生じる場合がある。避難者は緊急の事態下においてはできるだけ早く安全な場所へ避難したいと考えるため^[1]、本モデルでは、複数の出口がある場合に、各出口の流出速度、及び各出口前の滞留人数を考慮して、最も早く避難できると予測する出口へ避難出口を変更する避難行動ルールを追加設定した。

図 6-1(a)の通り、任意の避難者 A を設定し、最も近い出口への避難を選択するとして、その選択出口幅を $B_l(m)$ 、出口流動係数を $N_l(人/m \cdot s)$ 、選択出口から流出した人数を $P_{l_out}(人)$ 、避難者 A より選択出口に近い位置にいる他の避難者人数を $C_l(人)$ とすると、避難者 A の任意の時間ステップ $t(s)$ における残りの避難終了予想時間 $T_l(s)$ は式(15)の通りとなる。一方で、図 6-1(b)の通り、初期在室者人数を $P(人)$ 、 n 個の出口がある室を設定し、その選択出口幅を $B_i(m)$ 、出口流動係数を $N_i(人/m \cdot s)$ 、選択出口から流出した人数を $P_{i_out}(人)$ とすると、室全体の任意の時間ステップ $t(s)$ における残りの最短避難終了予想時間 $Tmin(s)$ は、全ての出口から同時に全員が避難終了する場合の時間であるため、式(16)の通りとなる。

ここで避難者はできるだけ早く避難したいため、避難出口を選択した直後からこの T_l と $Tmin$ を逐次比較すると考える。但し避難者は精密な計算機ではないので、当初の選択出口からの避難予想時間が、他の出口に比べて直感的に“明らか”に遅いと感じた時点（ T_l と $Tmin$ の差が十分大きくなった時点）で選択出口の変更を開始すると考える。まず、 $D=(T_l-Tmin)/Tmin$ とおくと、この D は経過する時間ステップ毎にその割合を大きくしていくこととなる。この D が一定値（本章では 10% に設定）に達した時点“明らか”に他の出口より遅いと感じて、選択出口の変更を判断する時点と設定する。当初の選択出口の変更後は、図 6-1(c)の通り、各出口の中で最も早く避難できると予想する出口を選択して移動を開始する。ここで各出口前の滞留人数を $C_i(人)$ 、各出口までの距離を $L_i(m)$ 、自由歩行速度を $v(m/s)$ とすると、各出口の避難終了予想時間 $T_i(s)$ は式(17)の通りとなる。尚、本論文における「複数の出口がある場合の避難行動ルール」の適用は居室避難シミュレーションまでとしており、居室避難以降の階避難、全館避難シミュレーションでは、予め計画した避難経路に変化がないことを前提とした。

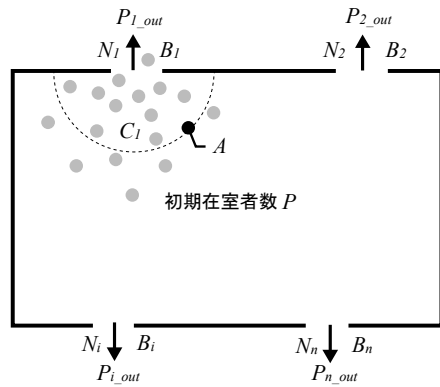


$$T_l = \frac{C_l}{N_l \times B_l}$$

$$N_l = \frac{P_{l,out}}{B_l \times t}$$

$$T_l = \frac{C_l}{P_{l,out}} \times t \quad (15)$$

(a) 避難者 A の避難終了予想時間 T_l

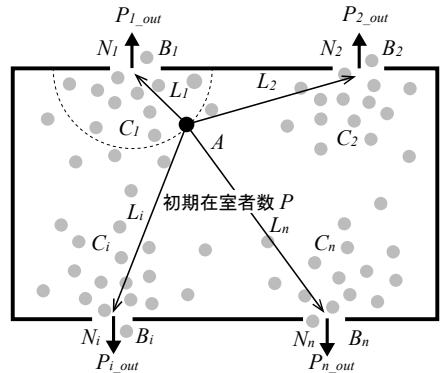


$$T_{min} = \frac{P - \sum P_{i,out}}{\sum (N_i \times B_i)}$$

$$N_i = \frac{P_{i,out}}{B_i \times t}$$

$$T_{min} = \frac{P - \sum P_{i,out}}{\sum P_{i,out}} \times t \quad (16)$$

(b) 室全体の最短避難終了予想時間 T_{min}



$$T_i = \frac{L_i}{v} + \frac{C_i}{N_i \times B_i}$$

$$N_i = \frac{P_{i,out}}{B_i \times t}$$

$$T_i = \frac{L_i}{v} + \frac{C_i}{P_{i,out}} \times t \quad (17)$$

(c) 各出口の避難終了予想時間 T_i

図 6-1 複数の出口がある場合の避難行動

6-3. 居室避難シミュレーション

(1) 平面モデルと設定条件

居室避難シミュレーションが本モデルにより可能なことを示すために、図 6-2 に示すような A 室（出口 1 箇所）と B 室（出口 2 箇所）の 2 つの単純な矩形居室を設定して検証した。在室者人数は A 室では 1~81 人の 81 通り、B 室では 1~162 人の 162 通りとして、最大在室者密度 1.5 人/m²までのシミュレーションを行った。在室者

は出口から最も遠い位置に 1 人配置し、残りの在室者は室内に一様に分布するように任意に配置し、避難開始後、在室者を一齐に自由歩行速度 $v=1.3\text{m/s}$ で最も近い出口へ向かい移動させ、避難開始から最終退出者が出口を通過するまでの避難行動時間を計測した。また B 室においては、前節の「複数の出口がある場合の避難行動ルール」を適用して、避難者は最も早く避難できると予測する出口へ避難出口を変更できるものとした。シミュレーションはそれぞれ 10 回ずつ行いその平均値を算出し、シミュレーション結果の妥当性を確認するために、予測計算による避難行動時間と比較した。平均値については、試行回数を増やすことによってそのばらつきは小さくなると考えられるが、一方でできる限り少ない試行回数で妥当なシミュレーション結果が再現できることによって、シミュレーションの実用性を示すことも本研究の目的であるため、本論文における以降のシミュレーションでは試行回数は 10 回と設定した。比較対照とする予測計算方法は、歩行時間 t_1 と出口通過時間 t_2 の最大値 $\max(t_1, t_2)$ を避難行動時間とする指針法と、歩行時間 t_1 と出口通過時間 t_2 の和 (t_1+t_2) を避難行動時間とする検証法とした。尚、本シミュレーションでは居室を退出した先の空間には面積制限が無く、避難者の収容が十分にできることを前提とした。

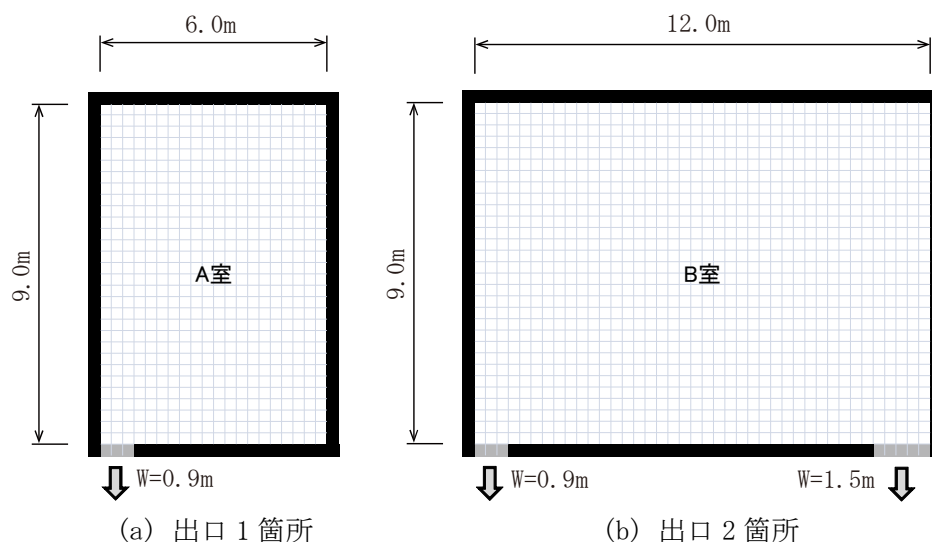
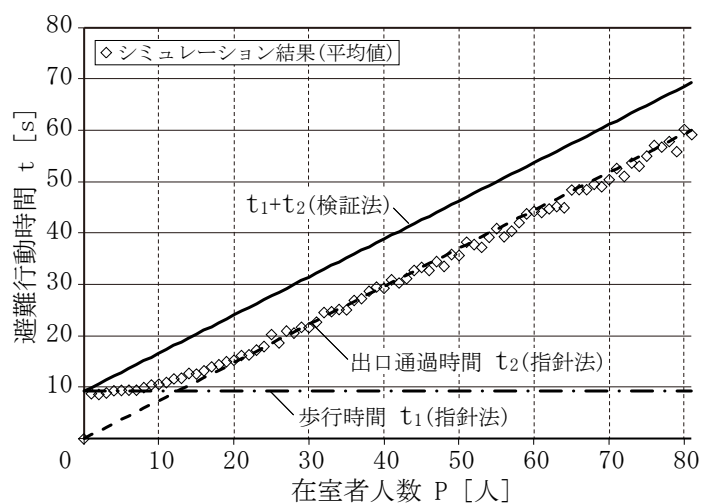


図 6-2 居室避難シミュレーションモデル

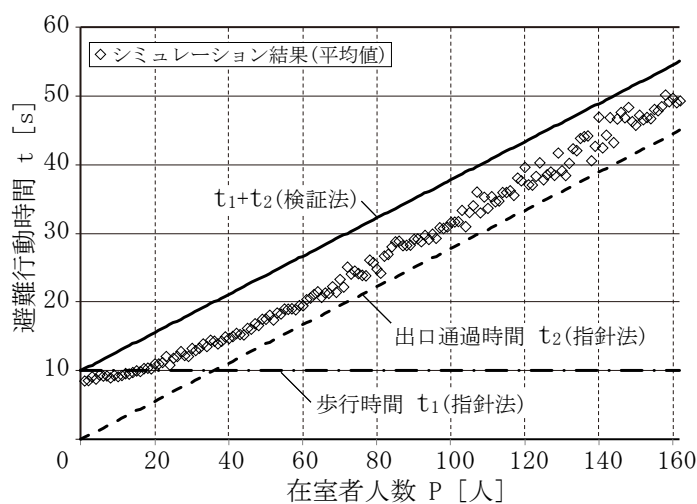
(2) シミュレーション結果と考察

A 室、B 室の避難行動時間のシミュレーション結果を図 6-3 に示す。シミュレーション結果は、A 室については指針法による予測計算値とほぼ一致した結果が得られた。

一方、B室については、全般的に指針法による予測計算値より一定程度遅い結果となった。これは予測計算における出口通過時間は、各出口幅に応じて避難者人数を按分した理想的な最小値を算出するが、複数の出口があるシミュレーションの場合は、前節の「複数の出口がある場合の避難行動ルール」により各出口の通過時間の差を縮小しているとはいえ、各出口の出口通過時間には差があるため、最終退出時間が予測計算における理想的な最小値よりも長くなることにより発生した。また在室者人数が多くなるに従いばらつきが大きくなる傾向を示した。但し全体的にはA室、B室とも、全てのケースで指針法の予測計算値と近似した値を示し、また安全側の指標である検証法の予測計算値以下となり、妥当なシミュレーション結果が確認できた。



(a) A室 (出口1箇所)



(b) B室 (出口2箇所)

図 6-3 居室避難シミュレーション結果

6-4. 居室避難を含めた階避難シミュレーション

(1) 平面モデルと設定条件

居室避難を含めた階避難シミュレーションが、本モデルにより可能なことを示すために、図 6-4 に示すような 3 つの同一の居室と廊下と階段からなる簡単なフロア平面を設定して検証した。在室者人数は A 室, B 室, C 室それぞれ 1~30 人(階合計 3~90 人)の 30 通りとしてシミュレーションを行った。在室者は各居室出口及び階段入口から最も遠い位置に 1 人配置し, 残りの在室者は各居室内に一樣に分布するように任意に配置した。避難開始は全室同時とし, 避難開始後, 在室者を一斉に自由歩行速度 $v=1.3\text{m/s}$ で居室出口へ向かい移動させた。居室出口を通過した後は, 廊下を通り階段へ向かい避難させ, 避難開始から最終退出者が各居室出口及び階段入口を通過するまでの避難行動時間を計測した。シミュレーションはそれぞれ 10 回ずつ行いその平均値を算出し, シミュレーション結果の妥当性を確認するために, 予測計算による避難行動時間と比較した。比較対照とする予測計算方法は, 居室については前節で示した方法と同様とした。階についてはバーチャート式の避難計算グラフを用いて算出する指針法と, 歩行時間 t_1 と出口通過時間 t_2 の和(t_1+t_2)を避難行動時間とする検証法とした。また, 指針法における廊下の歩行速度は $v=1.0\text{m/s}$ であるが, 本計算では検証法における設定値に統一して, 滞留がない状態における廊下の自由歩行速度を居室避難と同等の $v=1.3\text{m/s}$ とした。尚, 本シミュレーションでは階段空間に面積制限は無く, 避難者の収容が十分にできることを前提とした。

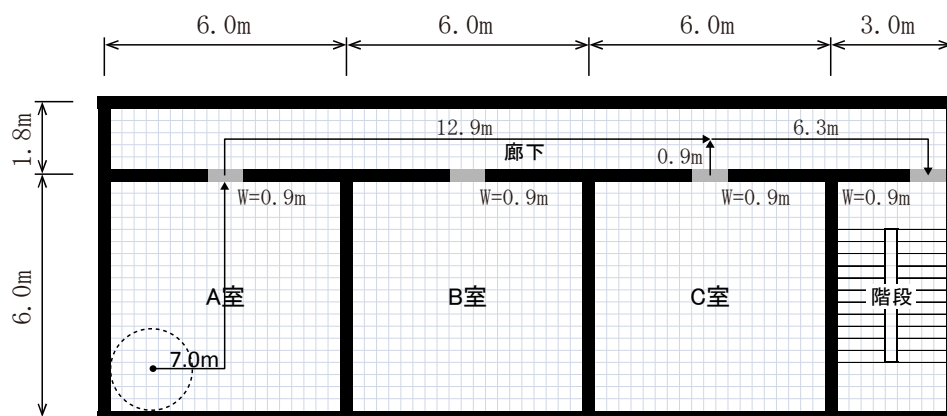


図 6-4 居室避難を含めた階避難シミュレーションモデル

(2) シミュレーション結果と考察

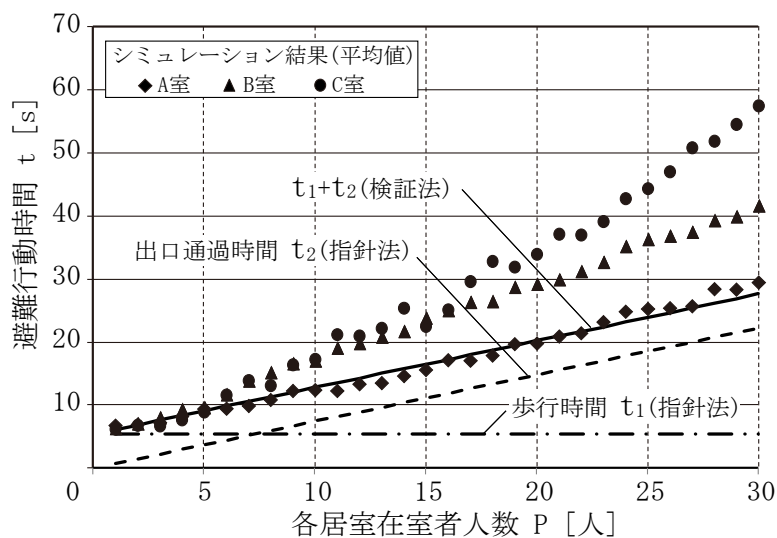
i) 居室避難

各居室における避難行動時間のシミュレーション結果を図 6-5(a)に、階在館者 90 人（A～C 各室 30 人）における避難行動状態を図 6-6 に示す。シミュレーション結果は、B 室、C 室において、指針法及び検証法の予測計算値を大幅に上回る結果を示した。これは先ず居室出口先の廊下部分において、他の室からの避難者と合流が発生することにより、居室出口における流率が低下するためである。図 6-6(a)～(c)に示す通り、A 室からの避難者との合流の影響しか受けない B 室に対し、A 室、B 室からの避難者との合流の影響を受ける C 室の方が大きな避難行動時間の遅れを示した。またこの遅れは初期在室者人数が 5 人程度以下の極少人数の場合を除き、ほぼ全てのケースで発生していることが確認できた。もう一つの原因は、この合流による廊下部分の避難者の滞留の最後尾が避難方向とは逆方向に伝播し、隣室の出口先付近の空間にまで及ぶことで、隣室出口の流率が低下するためである。初期在室者人数が概ね 20 人以上の場合では、A 室においても避難行動時間の遅れを示した。これらの各居室出口における流率低下の差異の発生については、城らの実験的再現^[6]において、廊下部分における避難者偏在による密度差の発生と、廊下出口方向に近い居室出口ほど避難時間を要するという同様の傾向が確認できた。但し本シミュレーションでは、廊下面積は 37.8 m^2 （実質的な内法有効面積でも $18\text{m} \times 1.5\text{m} = 27 \text{ m}^2$ ）あり、階最大人数 90 人の場合でも「階避難者人数 $\times 0.3 \text{ m}^2/\text{人} \leq$ 廊下面積」となり、指針法における必要な廊下面積は満たしており、また検証法においても出口の *Neff*（有効流動係数）は低下しないことになっている。指針法及び検証法では、図 6-6(b)～(d)に示すような同一空間内において逐次的に偏在する密度の差異の計算はできないため、簡易的に避難経路部分の滞留面積チェックを行っているが、出口位置や廊下幅等の具体的な平面プランによっては、指針法及び検証法における静的な予測計算法では把握できない避難行動状態が発生する可能性があることが、シミュレーションにより確認できた。

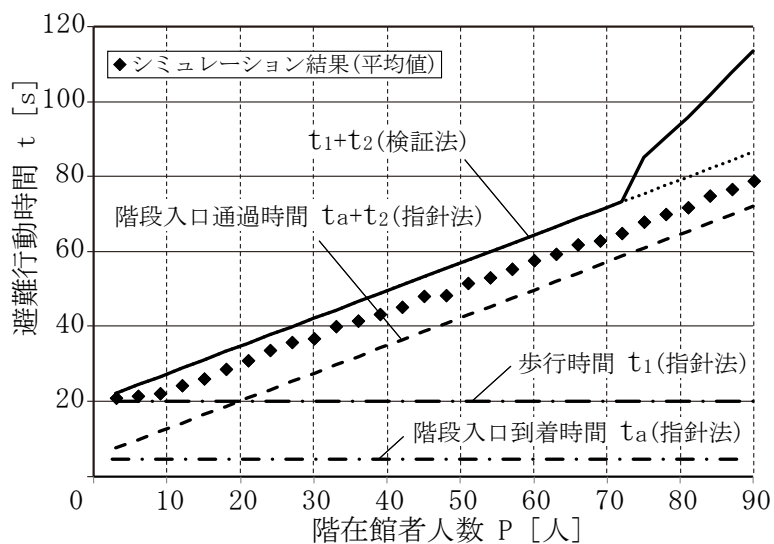
ii) 階避難

階における避難行動時間のシミュレーション結果を図 6-5(b)に示す。シミュレーション結果は、全てのケースにおいて、指針法の予測計算値以上、且つ検証法の予測計算値以下となり、妥当なシミュレーション結果が確認できた。階段入口の流率については、

設定条件上、階の合計人数が 72 人を超えると「階避難者人数 $\times 0.25 \text{ m}^2/\text{人}$ >直下階までの階段面積」となり、検証法では階段入口の N_{eff} が低下することになっているが、流率の低下は発生しなかった。

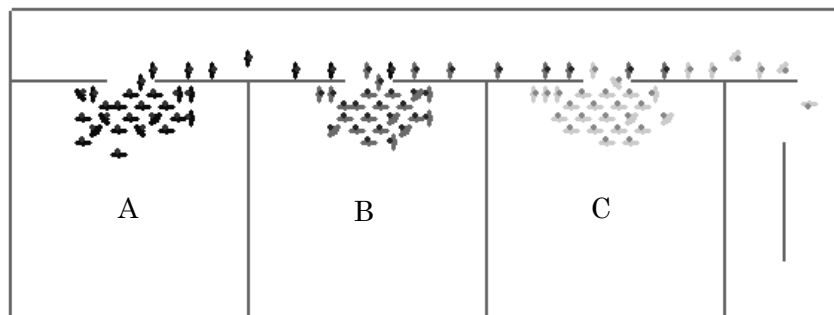


(a) 居室避難

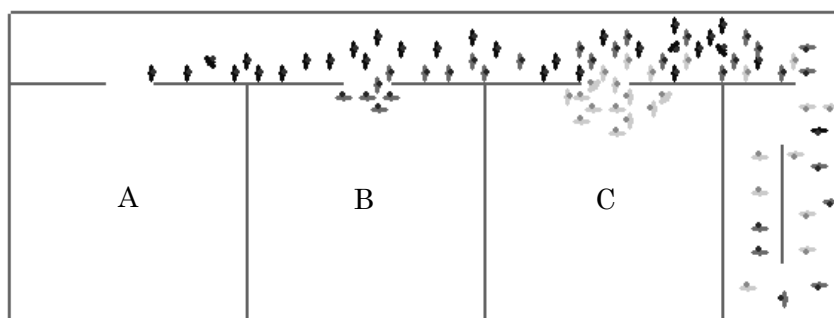


(b) 階避難

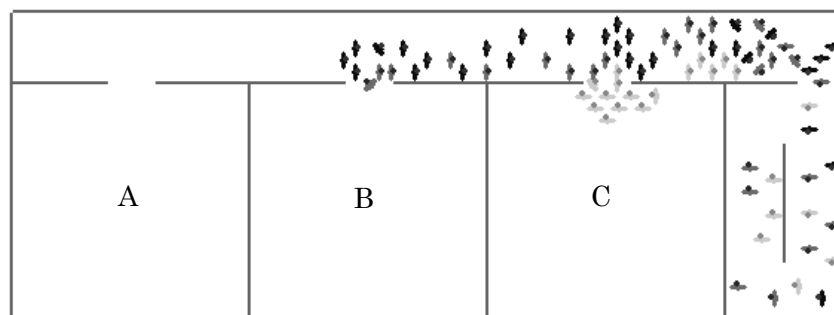
図 6-5 居室避難を含めた階避難シミュレーション結果



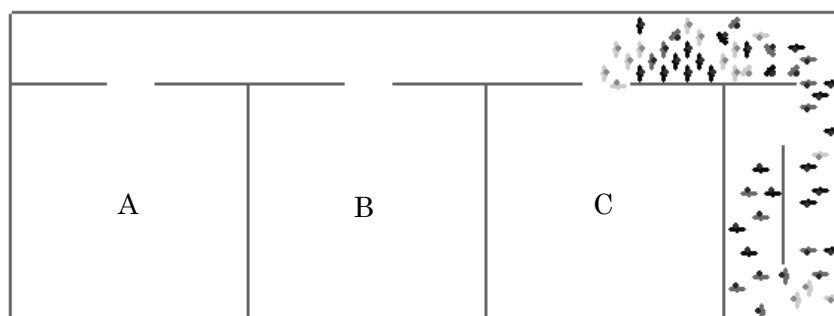
(a) 7.6s



(b) 26.8s



(c) 33.5s



(d) 54.7s

図 6-6 階在館者 90 人における避難行動状態

6-5. 居室避難, 階避難を含めた全館避難シミュレーション

(1) 建物モデルと設定条件

居室避難, 階避難を含めた全館避難シミュレーションが, 本モデルにより可能なことを示すために, 図 6-7 に示す前節で使用したフロア平面を持つ 5 階建の建築物を設定して検証した。但し 1 階における避難は階段を使用しないため検証から除外した。在室者人数は各階の A 室, B 室, C 室それぞれ 1~30 人(階合計 3~90 人, 全館合計 12~360 人)の 30 通りとしてシミュレーションを行った。在室者は各居室出口及び階段入口から最も遠い位置に 1 人配置し, 残りの在室者は各居室内に一様に分布するように任意に配置した。避難開始は全階・全室同時とし, 避難開始後, 在室者を一斉に自由歩行速度 $v=1.3\text{m/s}$ で居室出口へ向かい移動させ, 居室出口を通過した後は同じ歩行速度で廊下を通り階段へ向かい避難させた。階段流入後は 1 階の階段出口へ向かい避難させ, 避難開始から最終退出者が各居室出口, 各階階段入口及び 1 階階段出口を通過するまでの避難行動時間を計測した。また階段部下り方向の歩行速度は $v=0.78\text{m/s}$, 流動係数は $f=1.33$ 人/ $\text{m}\cdot\text{s}$ とした。シミュレーションはそれぞれ 10 回ずつ行いその平均値を算出し, シミュレーション結果の妥当性を確認するために, 予測計算による避難行動時間と比較した。比較対照とする予測計算方法は, 居室, 階及び全館とも前節で示した指針法及び検証法とした。但し指針法では階段における計算方法を示していないため比較対照とする予測計算方法は, 図 6-8 に示す階段部を廊下と同様に平面上に展開した建物プランを想定した上で, バーチャート式の避難計算グラフを用いて算出する指針法に基づく方法とした。尚, 本シミュレーションでは階段出口先の空間に面積制限は無く, 避難者の収容が十分にできることを前提とした。

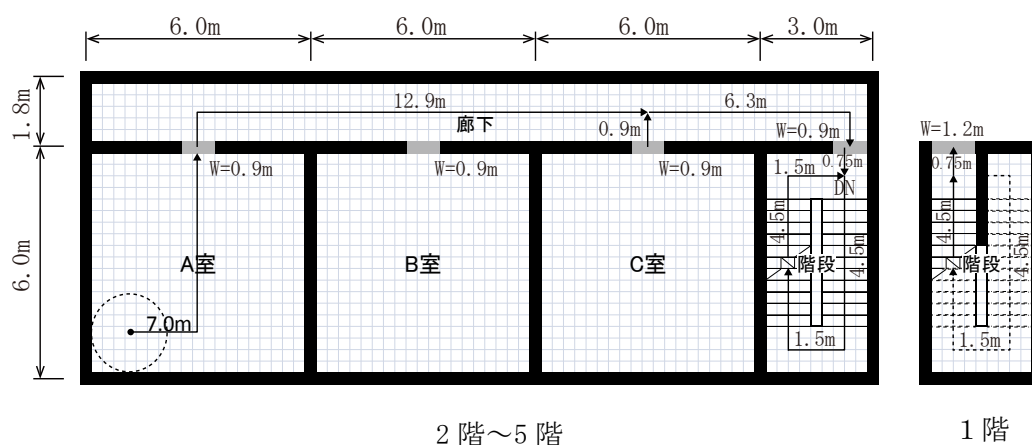


図 6-7 居室避難, 階避難を含めた全館避難シミュレーションモデル

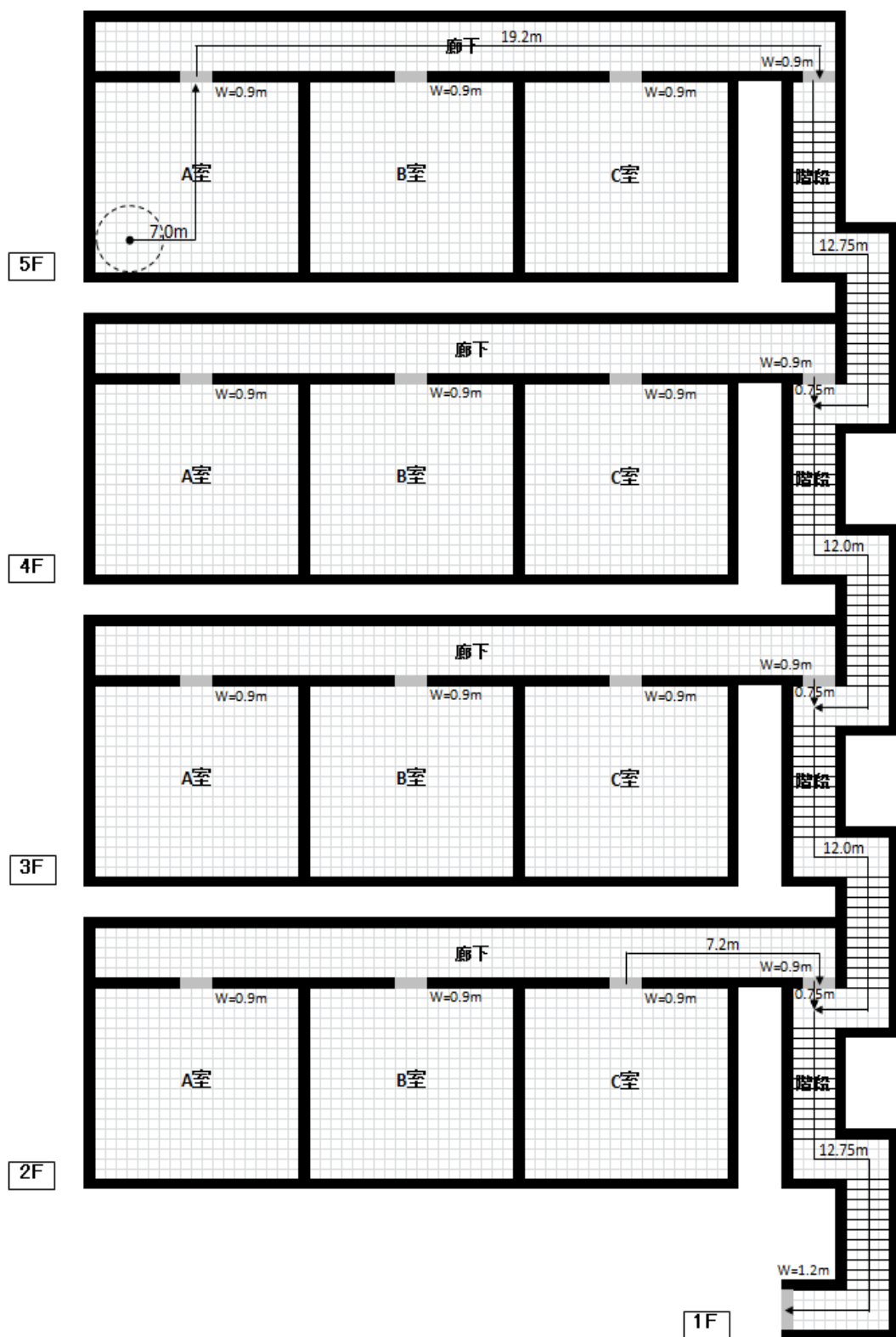


図 6-8 階段部を平面上に展開した想定建物プラン

(2) シミュレーション結果と考察

i) 居室避難

各居室における避難行動時間のシミュレーション結果を図 6-9(a)に、全館在館者 360 人（各階 90 人）における避難行動状態を図 6-10 に示す。シミュレーション結果及び図 6-10(a)～(c)に示す避難行動状態は、各階においてほぼ同様の結果を示し、また前節の図 6-5(a)に示す階避難シミュレーションにおける居室避難のシミュレーション結果ともほぼ一致した結果を示した。但し細かな点を述べると、図 6-9 (a) の各室 30 人において、僅かの差ではあるが C 室の避難行動時間は 2 階が最も遅く、以下 3 階、4・5 階（4 階と 5 階はほぼ同時）の順で早くなる傾向が確認できた。これは図 6-10 (c) に示す通り、階段内において下階から発生した流率低下が徐々に上階へと伝搬し、その階段内の流率低下の影響が、階段入口に最も近い各階の C 室出口前まで時間差で伝播したことによるものである。

ii) 階避難

階における避難行動時間のシミュレーション結果を図 6-9(b)に示す。シミュレーション結果は、5 階においては前節の図 6-5(b)に示す階避難シミュレーションと同様のシミュレーション結果が確認できた。また 2～4 階においては、72 人前後を境に避難行動時間が長くなり、検証法における N_{eff} 低下と類似した創発現象が再現された。この部分を考察すると、先ず検証法では直下階までの階段 1 層分の床面積に対して、密度 4 人/㎡までは階段入口の流動係数は一定（ $f=1.5$ 人/㎡・s）であるが、密度 4 人/㎡を超える場合は、密度の増加に伴い階段入口の流動係数は低下することとしている。一方、本シミュレーションにおいて階の避難者が占有する階段面積は、当該階避難者が直下階避難者との合流後に直下階避難者が持ち分とする階段面積に侵入する領域と、当該階避難者が直上階避難者と合流後に当該階避難者が持ち分とする階段面積に侵入される領域が、時間の経過とともに変化するが、全階同時避難かつ全階の平面プラン及び避難者人数を同一の設定条件としているため、これらの変化は相殺されることとなる。従って、当該階避難者が占有する階段面積は、理論上では時間の経過に関わらず、直下階までの 1 層分の床面積 18 ㎡同等のまま一定となる。ここで本モデルでは、密度 4 人/㎡程度までは群集流動状態の流率が一定となることを再現目標として設定しているため、当該階避難者が占有する階段面積が 18 ㎡のまま一定であるならば、

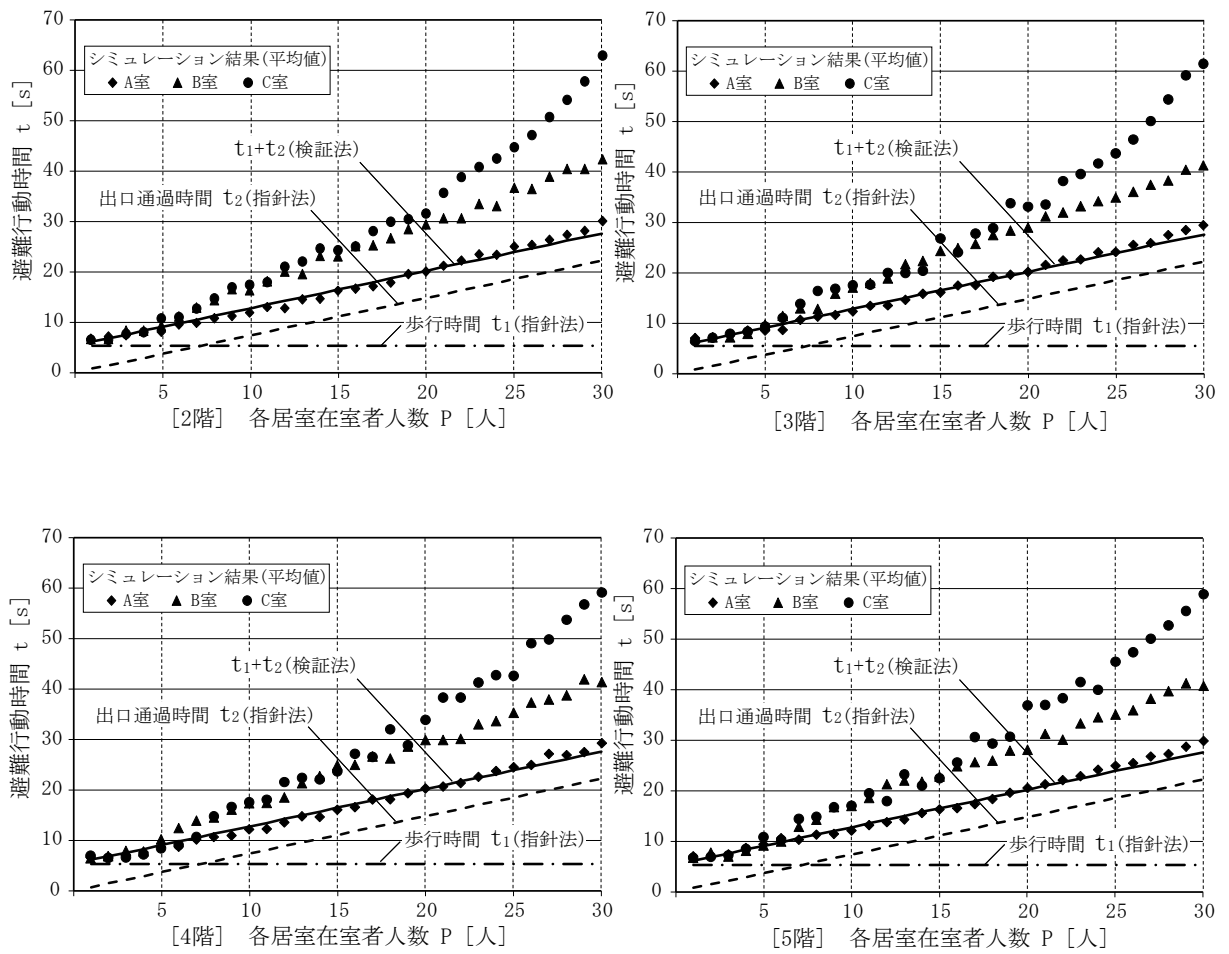
検証法と同様、避難者人数（階段面積 $18 \text{ m}^2 \times 4 \text{ 人/m}^2 = 72 \text{ 人}$ ）までは階段入口の流率に変化が無く、72 人を超える場合は階段内の合流における密度に応じて、階段入口の流率が低下することとなる。以上が 72 人前後を境に避難行動時間が長くなった原因であり、特に 3 階において検証法の予測計算値とほぼ一致した結果が確認できた。3 階よりも 4 階において更に避難行動時間が長くなるのは、先ず 72 人前後から発生する 3 階の階段入口の流率低下は 4 階避難者との合流により発生しているため、一方の 4 階避難者側の流れにも同様に流率低下が発生する。図 6-10(d)に示す通り、その流率低下は階段内で上階へ伝播し、4 階避難者は既に流率が低下した流れに合流することになり、その結果として 4 階では 3 階以上の流率低下が発生するためである。2 階は 3,4 階と異なり下階での合流による流率低下は無く、また 1 階の階段出口幅は階段幅と同じ 1.2m であるためネック部分による滞留も無く、階段入口の流率低下は専ら上階からの避難者との合流によるため、避難行動時間の変化は 3,4 階ほど急激ではなかった。5 階で流率低下が発生しないのは、図 6-10(b)～(d)に示す通り、5 階避難者は上階からの避難者との合流が無い一方で、直下階避難者との合流後に直下階避難者が持ち分とする階段領域に侵入することにより、階最大人数 90 人のケースに対しても、動的な階段面積が十分な余裕を保てたためである。これらの階毎の避難行動時間の差異については、掛川らの全館避難のケーススタディ^[7]において、各階在館者人数は 200 人であるが、本シミュレーションと同様の 5 階建、階段 1 箇所（3×6m）の全館同時避難のケーススタディが行われている。このケーススタディでは上階ほど階段内の流率が低下することが指摘されているが、1 階を除く各階避難人数 90 人までの避難完了時間との比較では、上階ほど階避難に時間を要するが、5 階については 2 階よりも早く階避難が完了する本シミュレーションと同様の傾向が確認できた。

更に以上の考察を、前述の居室避難における C 室 30 人の各階の避難行動時間の差異と重ね合わせると、各階の階段入口での流率低下は先ず下階側で先行して発生し、上階へ行くほどその流率低下は遅れて発生するが、ひとたび流率低下が発生した後は、上階からの避難者との合流が無い最上階を除くと下階へ行くほど流率低下が少なく、上階へ行くほど流率低下が著しくなること、即ち滞留状態の発生と伝播には時間差と増幅があることが確認できたと言える。

iii) 全館避難

全館における避難行動時間のシミュレーション結果を図 6-9(c)に示す。シミュレーション結果は、ほぼ全てのケースにおいて、指針法に基づく方法の予測計算値以上、且つ検証法の予測計算値以下となり、妥当なシミュレーション結果が確認できた。また細かな点であるが、全館合計 24 人以下の場合において、指針法に基づく方法による予測計算値を下回るシミュレーション結果となった。これは予測計算による歩行距離の採り方が図 6-7、図 6-8 に示す通り階段幅員の中央における歩行ルートを採用することに対して、シミュレーションでは低密度の場合は、ほぼ全ての歩行者が階段内側に偏った歩行ルートを移動できることによって発生した違いによるものである。

階段出口の流率については、設定条件上、全館の合計人数が 288 人（各階 72 人）を超えると「全館避難者人数 $\times 0.25 \text{ m}^2/\text{人} > \text{階段合計面積}$ 」となり、検証法では階段出口の *Neff* が低下することになっているが、流率の低下は発生しなかった。居室避難、階避難における出口流率低下は、それぞれの避難先空間である廊下や階段における滞留面積の不足や、他の空間からの避難者との合流により発生することが確認できた。従って、検証法における全館避難の *Neff* 低下も避難者人数に対する階段面積の割合によって発生するのではなく、階段出口先の空間における滞留面積の不足や、当該階段以外からの避難者との合流により発生すると考えられる。



(a) 居室避難

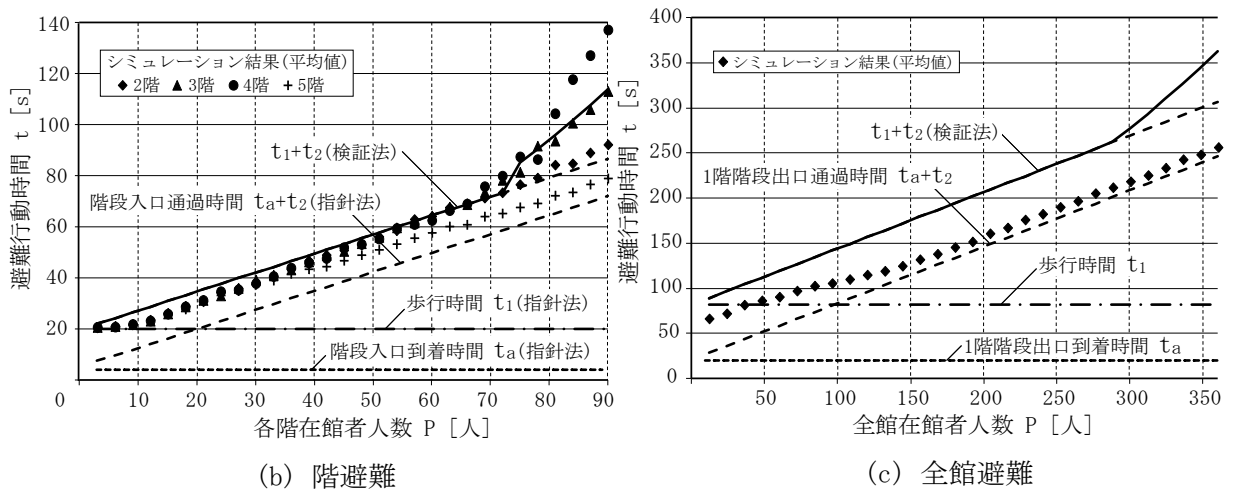


図 6-9 居室避難，階避難を含めた全館避難シミュレーション結果

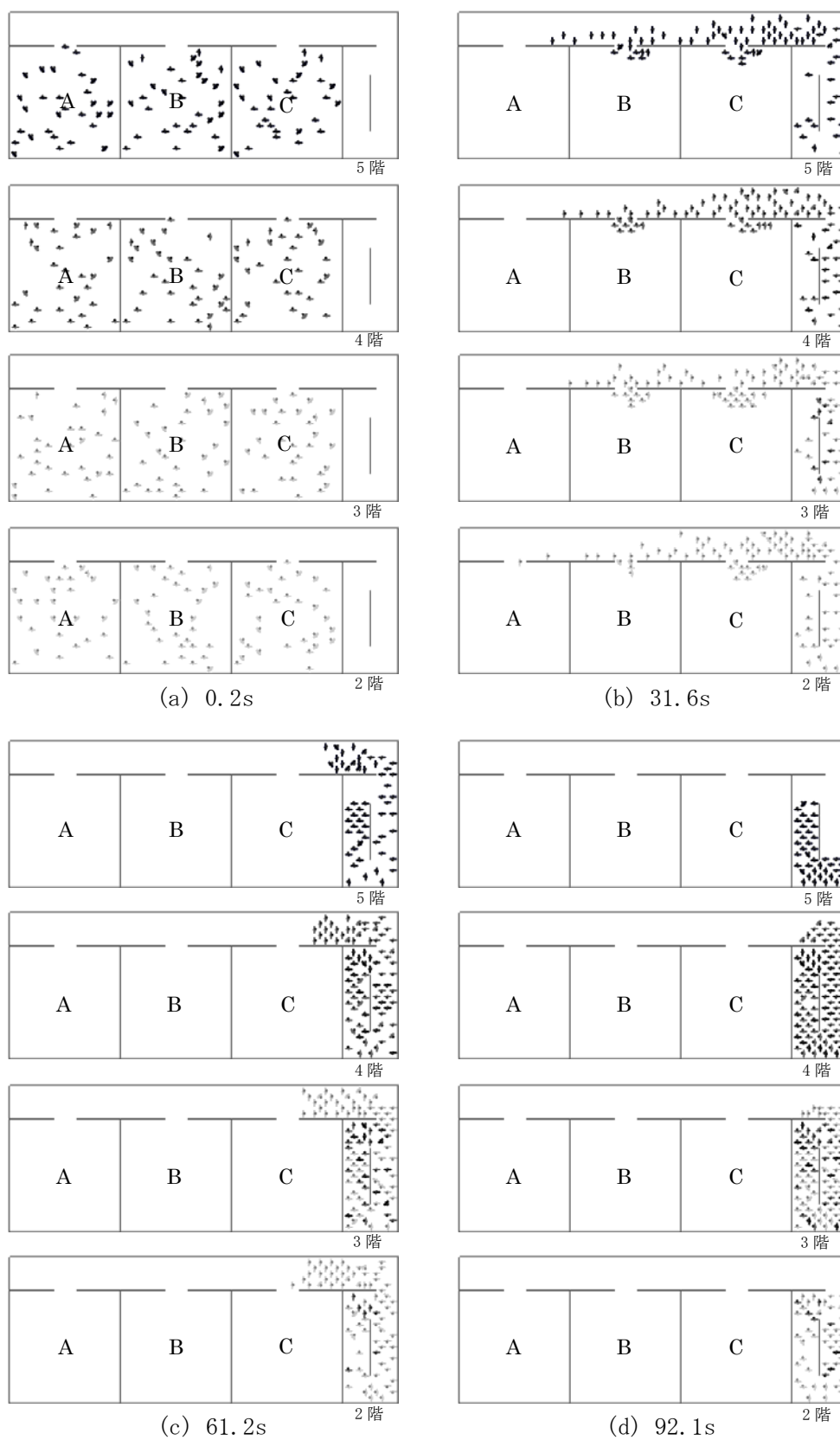


図 6-10 全館在館者 360 人における避難行動状態

6-6. 小括

本章では、前章までに構築した歩行行動モデルに複数の出口がある場合の避難行動ルールを追加設定した上で、具体的な建築計画の避難シミュレーションとして適用し、指針法、検証法が前提としている避難行動状態の再現性について検証を行った。シミュレーションの結果、以下の再現性を確認した。

- 1) 居室避難、階避難、全館避難における避難行動時間は、全てのケースで指針法の予測計算値以上、且つ検証法の予測計算値以下となり、再現目標通りのシミュレーション結果が確認できた。また検証法における *Neff* (有効流動係数) が低下する現象は確認できなかった。
- 2) 階避難、全館避難における居室避難では、検証法において出口の *Neff* が低下しないことになっている「避難者人数 $\times 0.3 \text{ m}^2/\text{人} \leq$ 廊下面積」のケースにおいても、出口流率が低下する現象が確認できた。
- 3) 全館避難における階避難では、検証法において階段入口の *Neff* が低下することになっている「階避難者人数 $\times 0.25 \text{ m}^2/\text{人} >$ 直下階までの階段面積」となるケースにおいて、階段入口流率が低下する現象が確認できた。
- 4) 全館避難では、検証法において階段出口の *Neff* が低下することになっている「全館避難者人数 $\times 0.25 \text{ m}^2/\text{人} >$ 階段合計面積」のケースにおいて、出口流率が低下する現象は確認できなかった。

上記 1), 4) の結果は、単純な一方向流の避難行動状態においては、全てのケースで指針法の予測計算値以上、且つ検証法の予測計算値以下となり、適正な避難行動時間の算出が本避難シミュレーションにより可能であることを示した。上記 2), 3) の結果は、合流状態を含む避難行動状態においては、従来の検証法における *Neff* (有効流動係数) の算定式では解析できなかった避難行動時間の適正な算出が本避難シミュレーションにより可能であることを示した。更に言えば、従来の指針法における最大滞留人数が収容できるために必要な滞留面積の評価、及び検証法における *Neff* (有効流動係数) の低減式が、必ずしも安全側の設定になっていないケースがあることがシミュレーション結果により確認できた。

以上の結果により、本避難シミュレーションでは、指針法、検証法がその設定の前

提としている動的な避難行動状態を再現した上で、指針法、検証法では算出できない適正な避難行動時間の算出がなされていることが確認できた。

第7章 本避難シミュレーションを用いた建築物の避難計画における実用有効性の検証

7-1. 本章の目的

前章では、本避難シミュレーションが指針法、検証法がその設定の前提としている動的な避難行動状態を再現し、従来の検証法における *Neff* (有効流動係数) の算定式では解析できなかった避難行動時間の適正な算出が本避難シミュレーションにより可能であることが確認できた。本章では、次節で述べるような課題を持つ高層事務所ビルにおける所与の避難階段配置計画に本避難シミュレーションを適用し、その避難安全性能の定量的な比較評価を通して、本避難シミュレーションの実用有効性についての検証を行った。

7-2. 高層建築物の階段配置計画における課題

現在、日本の建築基準法の仕様規定では、一定規模以上の建築物では原則として2箇所以上の直通階段が必要となり、その位置と数は居室の各点から直通階段までの歩行距離によって決定される。また建物用途にもよるが、原則として5階建て以上の建築物の場合は避難階段、15階建て以上の場合は階段出入口に付室（またはバルコニー）を設置した特別避難階段の構造が必要となる。また15階以上の階における階段に対しては、付室（またはバルコニー）を加えた面積について、事務所ビル等ではその階の居室床面積の3/100以上、物販店舗等では8/100以上の面積が必要となる。更に15階以上の階に設置する階段配置は、各居室の各点からの歩行距離制限が14階以下の階に対して10m減じた規定となっており、避難階段の設置が強化されている。但し、近年高層化する超高層建築物に対して、これら以外に階数、面積等の建物規模に応じた避難施設を更に厳格に要求する規定は特に無いため、例えば15階建て事務所ビルと同じ基準階プランで100階建ての超高層建築物を計画することも可能となっている。

一方、建築基準法では任意選択ではあるが、性能規定として火災時の避難安全性能の検証を行う避難安全検証法（検証法）^[1]があり、これにより超高層建築物等の避難安全性能の確認が可能となっている。但し検証法は自由度のある建築計画を行うことを可能とし、前述の防火・避難に関する仕様規定の一部を適用除外しても良いこととしているため、火災時の避難安全性能の安全側の評価方法として十分な機能を果たしているが、必ずしも建物規模に応じた適切な避難施設を要求できる設計方法とはなっ

ていない。特に超高層事務所ビルや大規模商業施設等の巨大かつ多数の在館者を収容する建築物ほどリスクもコストも大きいため、避難安全性と経済的効率性のぎりぎりの最適バランスが求められるが、検証法に基づく設計法では、避難安全性が経済的効率性へと過剰に転化される可能性が指摘されている。そのため 2005 年頃から国土交通大臣認定における審査基準では、不文律ではあるが避難階段幅の最低限度についての制限（従来の仕様規定の 2/3 以上）が加えられるようになり、検証法を活用した極端な避難階段等の削減には、避難計画の慎重な検討が求められるようになっている^[2]。

本章では以上の問題に対する解決方法の提案のために、仕様規定を満足させた階段配置計画を有した高層事務所ビルに対して、2 つの異なる階段配置計画を提案し、それぞれの避難施設面積（付室＋階段面積）と避難安全性（階・全館避難行動時間）の定量的な比較評価を、検証法、シミュレーションのそれぞれにおいて行い、本避難シミュレーションの実用有効性の一例についての検証を行った。

7-3. 高層事務所ビルにおけるケーススタディ

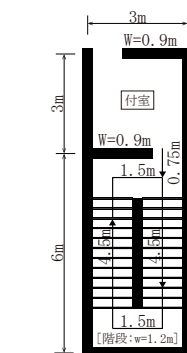
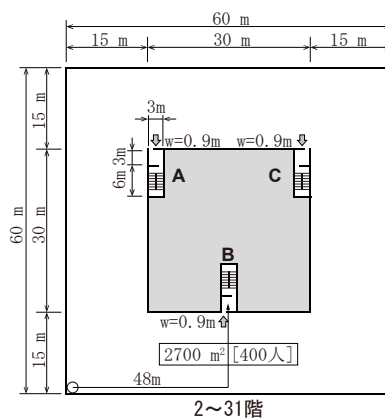
(1) 建物モデルと設定条件

図 7-1 に示す CASE-1～3 の 3 通りの 31 階建ての高層事務所ビルを設定して検証した。但し 1 階における避難は階段を使用しないため検証から除外した。本ケーススタディは、所与の階段配置計画についての比較検証を主眼としているため、コア計画や廊下等の二次的な要素は、階段配置決定以降の基本～実施設計段階において、ネック部分等の本シミュレーション結果を阻害する要因を設けないことを前提として簡略化している。CASE-1 は、仕様規定をぎりぎり満足させており、仕様設計において最も効率的な階段配置計画とした。それに対して CASE-2 では性能規定を採用し、建物を低層、中層、高層の 3 層に分け、それぞれの層において CASE-1 における 3 つの階段を 2 つずつ組み合わせた階段配置計画とした。CASE-3 でも性能規定を採用し、18 階を中間階として建物を低層、高層の 2 層に分け、それぞれの層から単独に避難階に通じる 2 つずつの階段を設置した。全てのケースにおいて、各階の在室者人数は 400 人（全館合計 12,000 人）として、在室者は各居室出口から最も遠い位置に 1 人配置した上で、残りの在室者は各居室内に一様に分布するように任意に配置した。

CASE-1 における各階段の負担人数は平均すると（12000 人/3＝）4000 人前後と想定されるが、それに対して CASE-2 における各階段の負担人数も大雑把であるが

同様に 4000 人前後と想定されるため、歩行時間を無視すれば両者の全館避難行動時間はほぼ同等になると想定される。一方で避難施設面積は、CASE-1 に対して CASE-2 では B 階段において 23～31 階の 9 層分を設置していないため、CASE-2 の方が面積は小さくなる。従って CASE-2 は CASE-1 に対して「避難施設面積削減かつ避難安全性維持」となると想定して用意した建物モデルである。一方で CASE-3 における各階段の負担人数は大雑把であるが（12000 人/4＝）3000 人と想定されるため、CASE-1 よりも CASE-3 の全館避難行動時間の方が短くなると想定される。一方で CASE-3 の避難施設面積は、階段 B・C が中間階までしか達していないため実質的には約 3 本分相当であり CASE-1 と同等になっている。従って CASE-3 は CASE-1 に対して「避難施設面積維持かつ避難安全性向上」となると想定して用意した建物モデルである。また CASE-1 は一般的な階段配置計画であるが、CASE-2、CASE-3 は、従来には無い新しい階段配置計画の提案として用意した建物モデルでもある。

避難開始後、先ず在室者を一齐に自由歩行速度 $v=1.3\text{m/s}$ で求心型の歩行経路で最も近い居室出口（幅 $w=0.9\text{m}$ ）へ向かい移動させた。各居室出口は離れていて互いに視認できないケースもあるため、前述した「複数の出口がある場合の避難行動ルール」は適用しないこととした。居室出口を通過した後は付室を通り階段入口（幅 $w=0.9\text{m}$ ）へ向かい、幅員 $w=1.2\text{m}$ の階段に流入させた。階段流入後は 1 階の階段出口（幅 $w=1.2\text{m}$ ）へ向かい避難させ、避難開始から最終退出者が各階階段入口を通過するまでの階避難行動時間、及び 1 階階段出口を通過するまでの全館避難行動時間を計測した。尚、本シミュレーションでは 1 階の階段出口流出にて避難完了とし、また階段出口先の空間に面積制限は無く、避難者の収容が十分にできることを前提とした。階避難におけるシミュレーションは、出火階のみを先行して避難させる時間差避難と、出火階と非出火階を同時に避難させる一齐避難の 2 通りとした。また時間差避難を想定した階避難シミュレーションにおいて、階段位置・個数が他の階と同一となる場合では全てのシミュレーション条件が同一となるため、シミュレーションは各階で行わず 1 フロアのみを代表して行い、各階のシミュレーション結果はその代表値を採用した。シミュレーションはそれぞれ 10 回ずつ行いその平均値を算出し、検証法による予測計算値（以下「予測計算値」）との比較検討、及び各シミュレーション結果による予測計算値（以下「シミュレーション結果」）における比較検討を行った。

[illegible]

1. 直通階段までの歩行距離（建築基準法施行令第120条）：

2. 付室+階段面積（建築基準法施行令第 123 条第 3 項第 11 号）：

付室+階段面積 $27 \text{ m}^2 \times 3 \leq \text{居室 } 2,700 \text{ m}^2 \times 3/100$ (15階以上, 事務所) $\therefore \text{OK}$

図 7-1 高層事務所ビルの平面プランと断面模式図 (1/2)

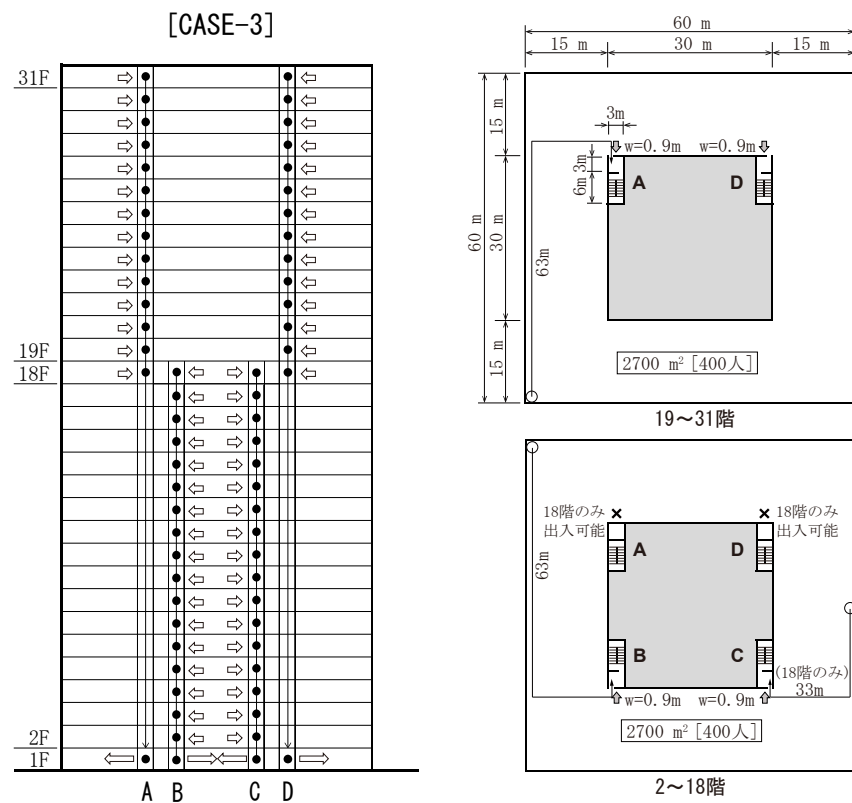
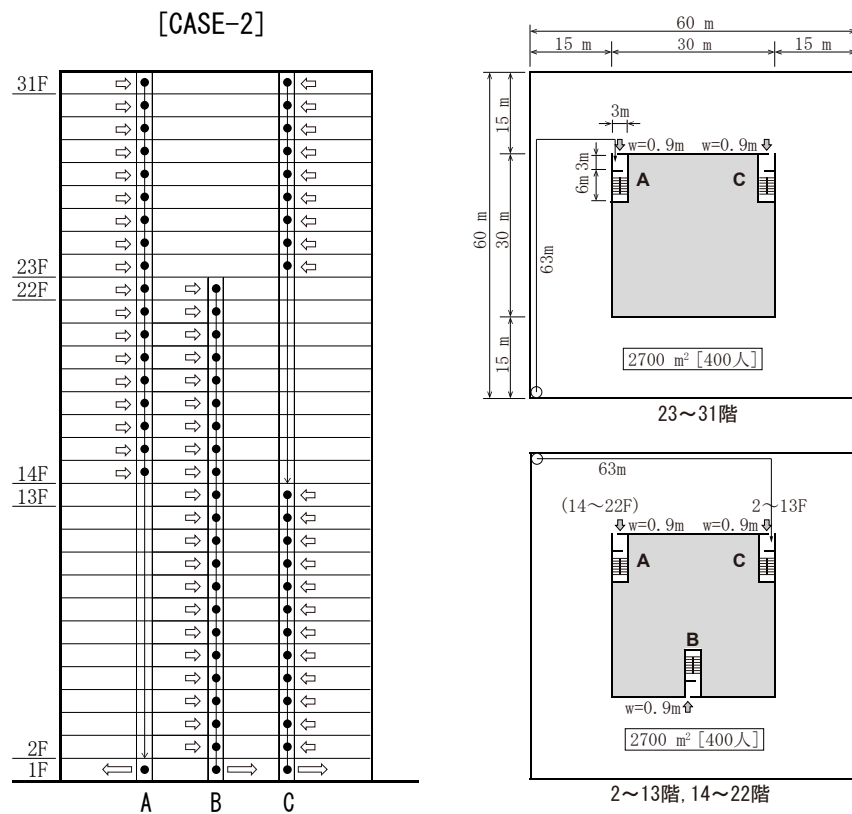


図 7-1 高層事務所ビルの平面プランと断面模式図 (2/2)

(2) シミュレーション結果と考察

i) 階避難

階における避難行動時間のシミュレーション結果を図7-2及び表7-1に示す。時間差避難に対しては、比較対照として検証法による予測計算値も併せて示す。先ず各階の時間差避難については、CASE-1では予測計算値4.04分に対してシミュレーション結果は1.61～2.12分、CASE-2では予測計算値8.52分（14階、23階は3.28分）に対してシミュレーション結果は2.28～3.17分（14階、23階も2.28～3.17分）、CASE-3では予測計算値8.52分（18階は2.35分）に対してシミュレーション結果は2.94～3.11分（18階は1.49～1.50分）となり、予測計算値に対してシミュレーションでは大幅に早く避難完了できる結果を示した。この時間の差異は、前章「6-4. (2) ii) 階避難」で示した通り、設定条件上、「階避難者人数 $\times 0.25 \text{ m}^2/\text{人}$ >直下階までの階段面積」となり、検証法では階段入口の N_{eff} が低下することになっている一方で、シミュレーションでは時間差避難としたため他の階からの避難者との合流は発生せず、流率が低下しなかったことによるものである。

一方、他の階からの避難者との合流が発生する一斉避難については、流率低下により階段入口前で滞留が発生した。階避難行動時間は概ね全てのケースにおいて上階になるに従い一定の割合で増加する傾向を示し、また各階段の最上階の直下階で最大となり、CASE-1では28.64分、CASE-2では34.10分、CASE-3では27.71分となった。

ii) 全館避難

全館における避難行動時間のシミュレーション結果を表7-2に示す。また比較対照として検証法による予測計算値も併せて示す。先ず、CASE-1では予測計算値85.44分に対してシミュレーション結果は42.88分、CASE-2では予測計算値94.20分に対してシミュレーション結果は44.28分、CASE-3では予測計算値63.88分に対してシミュレーション結果は35.49分となり、予測計算値に対してシミュレーションでは大幅に早く避難完了できる結果を示した。この時間の差異は、設定条件上、「全館避難者人数 $\times 0.25 \text{ m}^2/\text{人}$ >階段合計面積」となり、検証法では1階階段出口の N_{eff} が低下することになっている一方で、シミュレーションでは階段出口先の空間に面積制限は無く、避難者の収容が十分にできることを前提としたため、前章「6-5. (2) iii) 全館避難」にて示した同様の理由により、1階階段出口の流率が低下しなかったことによるものである。

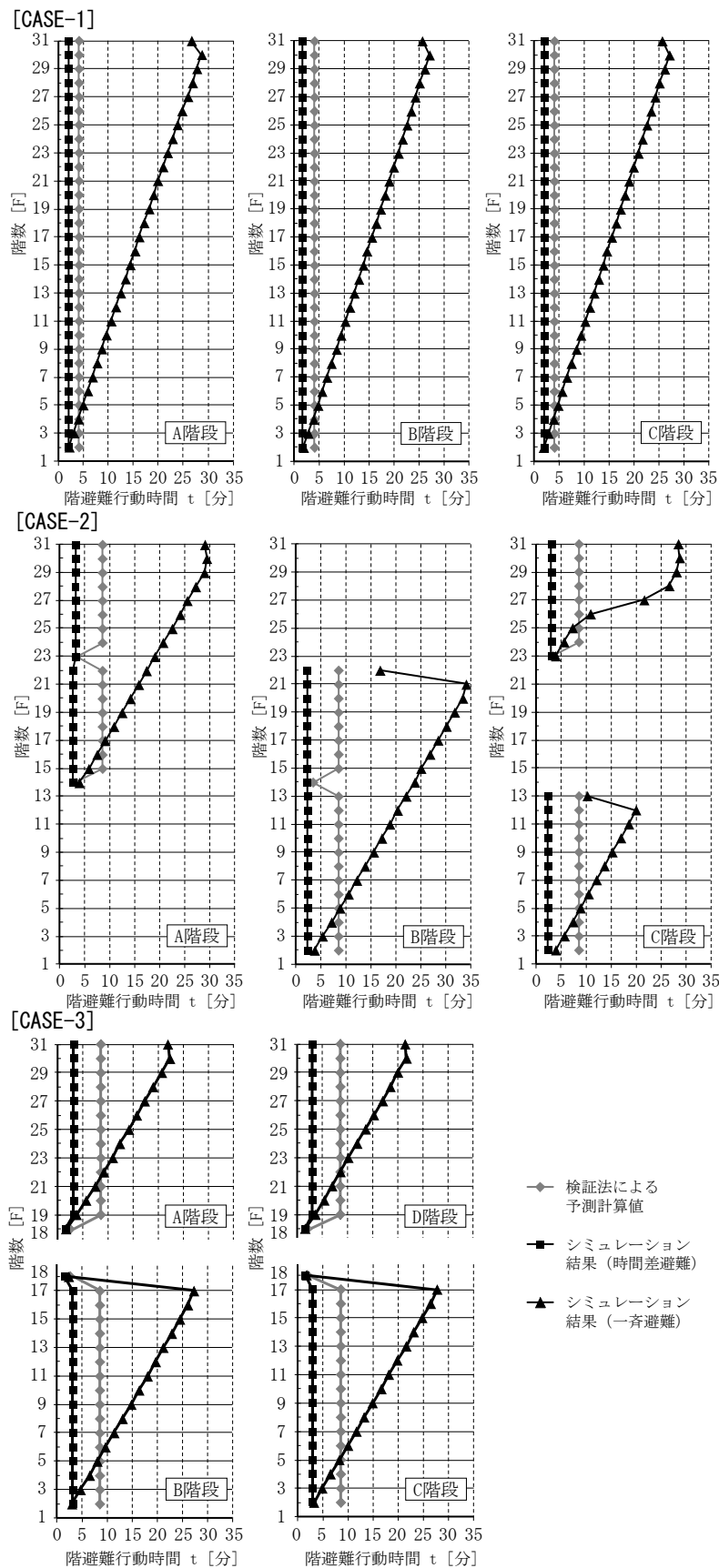


図7-2 階避難行動時間のシミュレーション結果

表7-1 階避難行動時間のシミュレーション結果のまとめ

CASE No.	CASE-1			CASE-2			CASE-3			
階段名称	A階段	B階段	C階段	A階段	B階段	C階段	A階段	B階段	C階段	D階段
検証法による予測計算値	2~31F : 4.04分			2~31F, 15~22F, 24~31F : 8.52分 14F, 23F : 3.28分			2~17F, 19~31F : 8.52分 18F : 2.35分			
シミュレーション結果 (時間差避難)	2~31F : 2.04分	2~31F : 1.61分	2~31F : 2.12分	23~31F : 3.17分 14~22F : 2.55分	14~22F : 2.28分 2~13F : 2.39分	23~31F : 2.96分 2~13F : 2.41分	19~31F : 3.10分 18F : 1.50分	2~17F : 3.11分 18F : 1.49分	2~17F : 2.94分 18F : 1.49分	19~31F : 2.97分 18F : 1.50分
シミュレーション結果 (一斉避難の場合の最大値)	30F : 28.64分	30F : 27.10分	30F : 27.38分	30F : 29.43分	21F : 34.10分	30F : 28.72分	30F : 22.30分	16F : 27.26分	16F : 27.71分	30F : 21.72分

表7-2 全館避難行動時間のシミュレーション結果のまとめ

CASE No.	CASE-1			CASE-2			CASE-3			
階段名称	A階段	B階段	C階段	A階段	B階段	C階段	A階段	B階段	C階段	D階段
検証法による予測計算値	85.44分			94.20分			63.88分			
シミュレーション結果	42.88分	41.73分	42.07分	43.17分	44.12分	44.28分	35.49分	34.75分	35.01分	35.30分

iii) 検証法と本避難シミュレーションの比較検討

以上のケーススタディにおけるCASE-1を基準とした避難施設面積（付室＋階段面積）と避難安全性（階・全館避難行動時間）について、検証法の予測計算値に基づく定量的比較を表7-3に、シミュレーション結果に基づく定量的比較を表7-4に、またそれらの定量的比較のまとめを図7-3に示す。

まず、表7-3に示す検証法の予測計算値に基づく比較検討において、CASE-1に対してCASE-2は、避難施設面積の432㎡減(17%減)に対して、階避難行動時間は4.48分増(111%増)、全館避難行動時間は8.76分増(10%増)となり、避難施設面積の大幅な削減と避難安全性の低下が示された。CASE-1に対してCASE-3は、避難施設面積の153㎡減(6%減)に対して、階避難行動時間は4.48分増(111%増)、全館避難行動時間は21.56分減(25%減)となり、避難施設面積の削減はCASE-2より少なかったが、避難安全性については、全館避難行動時間の大幅な短縮が示された。

一方、表7-4に示すシミュレーション結果に基づく比較検討において、CASE-1に対してCASE-2は、避難施設面積の432㎡減(17%減)に対して、階避難行動時間は1.05分増(50%増)、全館避難行動時間は1.4分増(3%増)となったが、階・全館避難行動時間とも1分程度の増加に留まり、避難施設面積を削減した上で、CASE-1と同程度の避難安全性が維持できることが示された。またCASE-1に対してCASE-3は、避難施設面積の153㎡減(6%減)に対して、階避難行動時間は0.99分増(47%増)、全館避難行動時間は7.39分減(17%減)となった。避難施設面積の削減はCASE-2より少なかった

が、避難安全性については、階避難行動時間は1分程度の増加に留まり、全館避難行動時間は大幅な短縮が示され、避難施設面積を削減した上で、CASE-1以上の避難安全性を有することが確認できた。また一斉避難の階避難行動時間の最大値もCASE-1に対して0.93分減(3%減)となった。

表 7-3 CASE-1 を基準とした検証法による定量的比較

CASE No.	CASE-1	CASE-2	CASE-3
付室+階段面積	2,511m ² (1.00)	2,079m ² (0.83)	2,358m ² (0.94)
階避難行動時間	4.04分 (1.00)	8.52分 (2.11)	8.52分 (2.11)
全館避難行動時間	85.44分 (1.00)	94.20分 (1.10)	63.88分 (0.75)

表7-4 CASE-1を基準としたシミュレーションによる定量的比較

CASE No.	CASE-1	CASE-2	CASE-3
付室+階段面積	2,511m ² (1.00)	2,079m ² (0.83)	2,358m ² (0.94)
階避難行動時間 (時間差避難)	2.12分 (1.00)	3.17分 (1.50)	3.11分 (1.47)
階避難行動時間 (一斉避難の場合の最大値)	28.64分 (1.00)	34.10分 (1.19)	27.71分 (0.97)
全館避難行動時間	42.88分 (1.00)	44.28分 (1.03)	35.49分 (0.83)

※注：表7-3，表7-4共に()内数値はCASE-1を1.00とした場合の比率を示す。

以上，表7-3，表7-4及び図7-3に示す通り，検証法と本避難シミュレーションの両者を比較すると，先ず検証法では階避難及び全館避難ともに，本避難シミュレーション結果に比べ概ね2倍程度の避難行動時間となり，検証法の目的の通り安全側の値となっているが，適正な避難行動時間の算出のための計算方法としては活用できないことが示された。また検証法では本避難シミュレーションに比べ，CASE-1に対するCASE-2，CASE-3の避難安全性(階避難・全館避難行動時間)が適正に評価できず，またCASE-1に対するCASE-3の全館避難行動時間においては，むしろ危険側となる極端な時間短縮が示された。

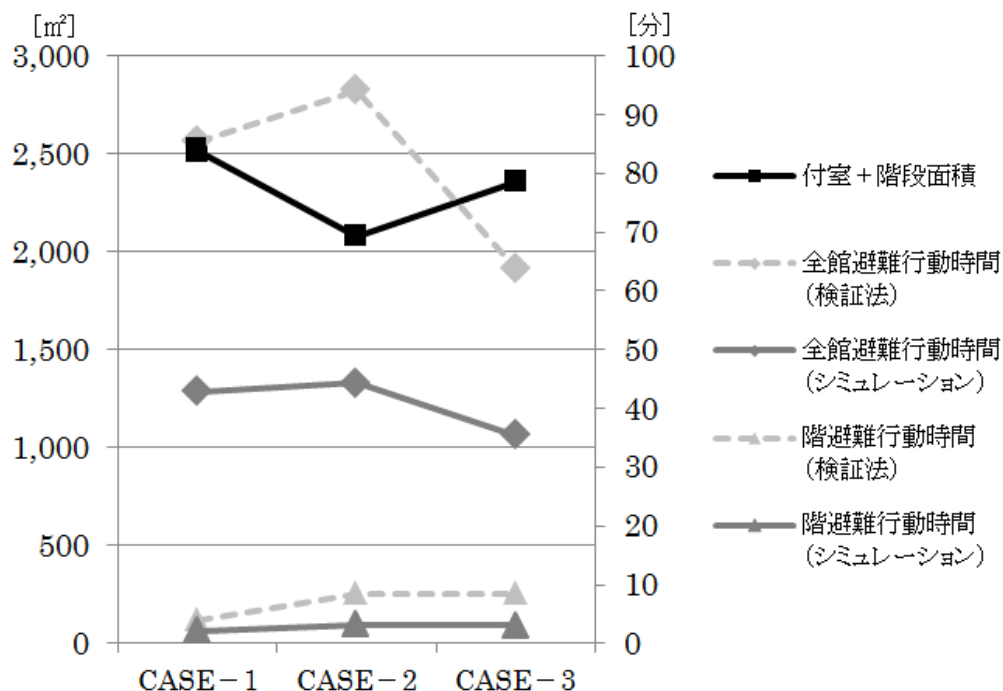


図7-3 避難施設面積と避難行動時間の定量的比較

一方、本避難シミュレーションでは、CASE-1に対するCASE-2、CASE-3の避難安全性が適正に比較評価でき、また検証法では把握できない一斉避難における各階避難行動時間も具体的に提示できた。また当初の狙いでは、CASE-2は「避難施設面積削減かつ避難安全性維持」、CASE-3は「避難施設面積維持かつ避難安全性向上」として用意した階段配置計画であったが、シミュレーションによりほぼ狙い通りの結果を得ることができた。特に当初の狙いでは避難施設面積維持であったCASE-3では、避難施設面積は6%の削減となり、より効率的な階段配置計画となった。これは特別避難階段の出入口前に設置が必要となる付室が、出入口の無い階では不要になるため、CASE-1に対してCASE-3では概ね2/3の設置数で済んだことによるものである。検証法は前述の通り、適正な避難時間の算出よりも避難安全性能の合否判定のための安全側の指標値を簡易的に示すことを優先した計算法であるため、本ケーススタディのような所与の避難階段配置計画における比較検討に対しては、本避難シミュレーションによる定量的な比較評価がより有効であることが確認できた。

7-4. 小括

本章では、前章までに構築した避難シミュレーションモデルを高層事務所ビルにおける所与の避難階段配置計画に適用し、その避難安全性能の定量的な比較評価を通して、本避難シミュレーションの実用有効性の一例についての検証を行った。その結果、以下の内容を確認した。

- 1) 本避難シミュレーションは、検証法よりも階避難及び全館避難行動時間が適正に算出でき、定量的な避難安全性の比較評価が可能であることが確認できた。
- 2) 本避難シミュレーションは、検証法では算出できない一斉避難における各階避難行動時間の解析が可能であることが確認できた。
- 3) 本避難シミュレーションによるケーススタディにより、避難施設面積を削減させても避難安全性を維持または向上させることが、建築設計におけるハード面の工夫により可能であることの一例が確認できた。

以上の結果、本避難シミュレーションは建築計画が具備している避難安全性能の定量的な解析が可能であること、またその定量的な比較評価により、建築物の避難計画の最適化に対して、本避難シミュレーションが従来の方法では代替できない実用有効性を有していることが確認できた。

第8章 結論

8-1. まとめ

本研究では、建築物の避難施設の新たな計画方法を提案するために、セルオートマトンによる歩行行動のモデル化を行い、そのモデルに基づく避難シミュレーションの研究開発を行った。またその避難シミュレーションを高層事務所ビルにおける3つ階段配置計画におけるケーススタディに適用し、各階段配置計画が具備している避難安全性能の理論値を避難行動時間により算出し、各階段配置計画同士の比較評価、及び検証法との比較評価を行った。その結果、本避難シミュレーションにより建築物が具備している避難安全性能の定量的な解析が可能であること、またその避難安全性能の理論値を解析により従来相反する（概ね反比例する）と考えられていた建築物の避難行動時間と避難施設面積（別の言い方をすると避難安全性と経済的効率性）について、建築計画におけるハード面の工夫により避難施設面積を削減させても避難行動時間を維持または短縮できることが確認できた。更にその定量的な理論値の比較評価により、建築物の避難計画の最適化に対して本避難シミュレーションが従来の方法では代替できない実用有効性を有していることが確認できた。

更に序論でも触れたが、上記の結論を支える本研究の方法論について、ここで別の観点からももう少し詳しく触れることとする。本研究では建築物が具備している避難安全性能の理論値を提示するために、その方法論として二階層の複雑系（下位の複雑系を要素とする上位の複雑系）モデルを提案した。この方法論については、第1章で詳述した通りである。しかしこの二階層の複雑系モデルの導入及び本研究の結論を導くにあたり、併せて前後の方法論の整理も必要であった。

先ずシミュレーションという手法は、工学的な知識がなくても現象を理解する上で馴染み易い手法であるが、一方で誤った先入観、思い込みを招き易い手法でもあるとも言える。本研究ではこの馴染み易い手法に翻弄されないために、先ずシミュレーションが併せ持つ視覚化(visualization)と解析(analyzation)の両義的な機能の理解とその位置付けが重要であると考えた。避難シミュレーションにおける視覚化機能とは複雑で多様な人間行動を含めた精緻な現実現象のイメージの再現のことであり、解析機能とは避難時間等の精緻な定量値の算出のことである。この視覚化機能は序論で述

べた“観察対象を多様で複雑な人間モデル分析”とする研究にとっての必須機能であり、また解析機能は“観察対象を合理的な空間モデル分析”とする研究にとっての必須機能であるが、少なくとも現時点では両方の機能を満足に併せ持つことは未だ困難であり、おそらく全ての避難シミュレーションでは、どちらか一方を主目的として、もう一方を副産物としているのが実状である。またこれらの 2 つの両義的な機能は、例えて言うところのロールシャッハテストの図柄と似た特殊な性質を持っており、我々はシミュレーション結果を評価するとき、知らず知らずにどちらか一方の機能を注視し、もう一方の機能を見逃しがちである。シミュレーションという手法には、このような先入観が入り込む可能性があることを先ず自覚することが必要である。

近年、コンピュータ性能の向上により多様な解析条件の処理が可能となっているが、一部の専門家でなければ理解できない解析機能よりも直観に訴える視覚化の方が、圧倒的に訴求力が高いため、マルチエージェントシステムに代表される自律的な行動モデルや連続座標系によるスムーズな動きを取り入れた複雑な現実イメージの再現競争が、近年のシミュレーション研究の主役となる傾向にあると言える。しかしこのようなより現実に近い視覚化を主目的としたシミュレーションでは、如何に複雑な現実現象を精緻に再現したとしても、避難時間等の定量値の精緻な算出ができる保証は無く、またむしろ序論で示したようにシミュレーション結果の妥当性の証明が困難であるため、何年もかけて行った研究が成果に結び付かない可能性が十分にある。従って、限られた予算と期間の中で成果を求められる研究過程の前半において、ある程度の保険を掛けたいというバイアスが働くためか、本来仮説である筈の当初のモデル設定を権威付けするなどの方法により強固にすることで、予めある程度の妥当性の根拠を当初のモデル設定に負担させようとする傾向が見受けられる。また一方で、複雑系研究の名に値するような予期せぬ創発現象再現への期待が高い程、予め行うモデル設定も複雑なものになりがちである。もしかすると古典的な西洋哲学（イデア論）をベースとした“良いモデル設定がきっと正しい現象を再現する筈である”というモデル中心主義の根底意識が、このようなモデル設定における暗黙の前提にあるのではないかと考えられる。一方、シミュレーション研究では、シミュレーション結果と実測結果との差異に対して、モデルの設定を見直しすることにより現象の成り立ちを解明し、またその再現精度を高めていく作業が必要であるが、このように当初のモデル設定を権威付けするなどの方法により、予め妥当性の根拠を負担させている場合、そのモデ

ル設定を容易に修正することができないことになる。またシミュレーション結果と実測結果との差異を分析してモデル修正を試みようとしても、前述の類のシミュレーションが特徴とする複雑な条件設定が、その差異の原因のとなるパラメータの特定を困難にさせ、これもモデル設定を容易に修正することができない原因となっている。更にシミュレーションでは、誰でも同じ結果が確認できる再現性を持つことが必要であるが、解析条件の設定が多様で複雑になればなるほど、再現方法の説明・公開は困難になるため、このようなより現実に近い視覚化を主目的としたシミュレーションでは、プログラム内容がブラックボックスになりがちである。これだけの困難な課題を乗り越えたとしても、漸く出来上がった避難シミュレーションを用いて出来ることと言えば、防災教育・啓蒙を除き、既に出来上がっている建築計画を追認するか、局所的な問題点を発見してその改善策を提案するぐらいである。既に出来上がっている建築計画に対する追認は、建築設計者にとっては有り難いかもしれないが、シミュレーションの実用有効性としては然程の意味を持つものではない。一方で既に出来上がっている建築計画に対する問題発見とその改善策の提案についてはある程度の意味があるかもしれないが、実のところでは、設計の段階（未着工の段階）で部分的に安全性に欠陥があることが露呈され、新築にも関わらず対処療法的な補修設計が施されることとなるため、建築設計者にとっても建築主にとっても気まずいもの、有難くないものとなる。このように避難シミュレーションが建築計画における補助的な位置付けである限り、手遅れになってから呼び付けられる“バンドエイド・ソリューション”としての立場から逃れることはできず、その存在意義は極めて限定的なものになると言わざるを得ない。

このような省察から、本シミュレーションでは、現実に近い精緻な視覚化や複雑で多様な条件設定ではなく、一定条件下における定量的な避難行動時間の解析による適正な避難安全性能の理論値の提示を研究目的として、シミュレーション開発の位置付けを明確にした。また再現目標も複雑で多様な現実現象ではなく、過去の実測結果に基づき従来の避難時間の予測計算方法設定の前提となっている普遍的な避難行動状態とした。良いモデルが良い現象を再現するのではなく、良い現象を再現するのが良いモデルと考え、シミュレーション結果に基づきモデル設定がブラッシュアップできるようにするため、またモデル設定がブラックボックス化しないようにするために、出来る限りモデル設定条件を簡便化した。その上で、本シミュレーションは、既に存在

する建築計画における部分的な“改善策”の提案のための道具ではなく、これから創り出そうとする建築計画における全体的な“最善策”が先導できる必要不可欠な道具となることを目的とした。第4章で提示したパーソナルスペースと移動確率は本研究における不可欠な基礎となっているが、これは数ヵ月に渡る試行錯誤により決定した設定である。本論でも触れたがこの移動確率における密度係数 *Cdens* は当初の暫定的な設定時点では全く考えていなかった設定であり、再現目標をシミュレーションにより再現する過程において導出された係数である。通常の複雑系におけるモデル中心主義的な方法では、決して見出せなかった特性であり、研究前半のモデル設定における最大の成果であったと言える。一つ目は、複雑系の数理モデル、シミュレーションという方法を採用するに当たり、その前提となる方法論を以上のように整理し、本研究のターゲットを明確にしたことである。

二つ目は、二階層の複雑系モデルが解析した帰納的で非決定論的な結果がどのように扱えるかということである。この解析結果は、従来の科学的方法における絶対的な真ではない。この点については、知見と経験を兼ね備えた専門家の推察・判断や、数少ない先行事例として示されている実測結果との照合により、絶対的な真でなくとも実用するにあたり相当程度妥当と推察し、判断することは可能であると考えた。このようなヒューリスティックなシミュレーション結果の活用は、実用的なエンジニアリングの世界では頻繁に行われている。また本研究ではその推察・判断をできる限り可能とするために、妥当なモデルとしての下位の複雑系を要素とする二階層の複雑系を構築し、従来からの演繹・帰納問題について両者の長所を生かした弁証法的な解決を試み、知識の飛躍の範囲をできるかぎり限定している。このような知識の飛躍の範囲を含めた複雑系モデルの推定結果がその実用を通して認知されると、今度はその認知された上位モデルを礎として新たな知識の飛躍の付加や他の妥当なモデルとの結合により、更なる上位モデルを構築することが可能となる。この手順を繰り返して多階層の複雑系を構築することにより、徐々に適用範囲が拡大され、将来的にはシミュレーションにより広範囲な現実現象の精緻な予測解析が可能になることが考えられる。実はこれは新しい方法ではなく従来の科学的方法の仮説演繹法と全く同様の方法である。以上の方法論の構成も本研究を支える大きな要因であり、他の既往研究には見られない独自の着眼であったのではないかと考えている。

8-2. 今後の課題と発展可能性

本研究のまとめは以上であるが、本研究の今後の課題と発展可能性について述べておきたい。

先ず論文の冒頭で述べたように、本研究の広義的な到達目標は、急速に巨大化、高層化する建築物の高度な安全性要求に対応するための合理的で安全な新しい避難施設の計画方法を提案することである。しかし本研究の成果では、個別の建築計画に対して、所与の避難施設計画の最適化を行うための道具を提示しただけであり、未だ新しい避難計画方法論を提案するレベルには達していない。しかし、従来の他の避難シミュレーションでは、既に存在している建築計画に対するプロセスチェックのための補助的な活用に留まっているが、本避難シミュレーションでは避難安全性能の定量的な理論値の提示に基づき、想定し得る多数のケーススタディの比較を通して、その相互の反証により所与の避難計画の最適解が見出せる筈である。また本論で例示した高層事務所ビルのケーススタディのように、従来からの常識でありモダニズムの基本原則でもある基準階設計に対しても、その常識や原則に捕らわれない新しい避難計画が可能となることが期待できる。例えば、第6章の居室避難、階避難を含めた全館避難シミュレーションにおいて、避難行動状態は定常状態にはならず滞留状態の発生と伝播には各階において時間差と増幅があることを示したが、このような現象が避難施設計画に与える影響を検討することはこれからの課題である。また第6章、第7章のシミュレーションにおける避難方向は、一貫して予め決めた一つの階段のみ対象とした。もう少し詳しく述べると、複数の階段がある場合の居室避難以降の避難経路選択について、①各階段の収容力に応じて負担する避難人数の格差が小さく他の階段への選択変更の必要性が低い場合、または各階段が互いに離れていて状況確認ができず選択変更が困難な場合、②各階段の収容力に応じて負担する避難人数に格差が大きく、かつ各階段の互いの状況確認でき選択変更が容易な場合、という2通りに大別すると、第6章、第7章のシミュレーションでは①のケースを前提として避難経路は変化しないこととしている。特に第6章の階避難、全館避難シミュレーションでは、各居室から一つの階段を目指して避難することまでを最低限必要な検証としてまとめている。これは、本避難シミュレーションにおける避難行動モデルの考え方の礎とした避難予測モデルの理論（避難者は設計者が策定した避難経路を整然と混乱なく避難すること）に基づく設定であり問題はないが、一方で第6章において示した「複数の出口がある

場合の避難行動ルール」を階避難、全館避難でも適用した場合に予測不可能な避難行動状態の動的な変化が起きることの確認、またそのような現象が避難施設計画に与える影響を検討することもこれからの課題であると言える。一例を挙げると、第7章の高層事務所ビルのケーススタディにおける図7-2において、CASE-1のA~C階段とCASE-3のA~D階段は各階において対称であるため、上記の①及び②のどちらのケースを前提としても変化がないと考えられるが、CASE-2のA~C階段では、13階~27階においてそれぞれ非対称であるため、上記①の設定の拘束を解き②のケースを前提とした場合、予測不可能な複雑な変化が生じることが考えられる。本研究ではできるかぎり簡便な方法で避難行動モデルを構築したが、そのような簡便な避難行動モデルでも以上のような予測不可能で複雑な創発現象が発生することが十分に推察できる。今までは方法・道具が無いためにこのような避難行動状態の動的な変化、及びその影響による避難方向選択の動的な変化を踏まえた避難施設計画についての検討への道が閉ざされていたが、本避難シミュレーションによって誰も手を付けていない未開の分野に向けての第一歩が踏み出したことは有意義であると考えている。そのための今後の課題は、本避難シミュレーションにより少しでも多くのケーススタディを行い、新しい知見を集めることである。また新しい避難計画論への発展させるためには、例えば、商業施設、競技場、公共交通機関、公共通路等の不特定多数が集まる建物用途や、お祭り・フェスティバル等のイベント時の避難、建物単体でない複合的避難、広域避難計画等のケーススタディを地道に進め、本避難シミュレーションの再現精度の向上、適用範囲の拡大を図ることも必要である。

最後に、本研究を進める過程において新たに見出した課題について述べておきたい。本避難シミュレーションでは全てのケースで10回という試行回数を設定し、その平均値を算出したが、そのばらつき度合いに若干の差異が見られたことである。10回という試行回数は、現実的に行える試行回数で妥当なシミュレーション結果が再現できることが、本研究が目的とするシミュレーションの実用性を示すことであると考え設定した回数である。本研究におけるシミュレーションでは、合流による滞留が起きる場合や第6章で示した「複数の出口がある場合の避難行動ルール」を適用した場合において、それ以外の場合と比較してばらつき度合いが若干大きくなる傾向が見受けられた。このばらつきについては念のため回帰分析を行い、0.1%水準でも有意であり、

シミュレーション結果のばらつきには全く問題が無いことを確認しているが、一方でこのばらつき度合いは、もしかすると避難経路の流動性や避難方向の分かり易さ等の定性的な特性を示す何らかの指標になるのではないかと考えている。しかしこのばらつきについては、現実現象において比較評価可能なデータの取得が困難であること、またこのことを詳細に吟味することは、上述の今後の課題と同様に少々テーマが大きいこと等の理由により、本論文では詳しく分析することは行わなかった。本研究では避難安全性能の定量的な理論値として、適正な避難行動時間の解析に主眼を置いたが、今後の課題として、このばらつき度合いから解析されるかもしれない避難経路の流動性や避難方向の分かり易さ等の定性的な特性の定量的評価についても、検討する価値があるのではないかと考えている。

参考文献リスト

第1章 序論

- [1] http://skyscrapercenter.com/research/CTBUH_ResearchReport_2014YearInReview.pdf
- [2] S. Giedion 著, 太田實 訳: 空間 時間 建築 1, 丸善, 1969
- [3] 萩原一郎, 田中哮義: 避難安全規定の国際比較, 日本建築学会計画系論文集 第 470 号, pp. 1-10, 1995. 4
- [4] 建築基準法施行令第 129 条の 2, 第 129 条の 2 の 2, 平成 12 年建設省告示第 1441 号, 第 1442 号
- [5] 日本建築学会編: 建築物の煙制御計画指針, 日本建築学会, 2014
- [6] 日本建築学会編: アルゴリズム・デザイン 建築・都市の新しい設計手法, 鹿島出版会, 2009
- [7] 東京消防庁優良防火対象物認定表示制度に関する規程(平成 18 年東京消防庁告示第 12 号)
- [8] 朝日新聞 GLOBE 2012 年 04 月 15 日: 巨大建築 「高さ 1000 メートル」時代へ
- [9] 鹿島編: 図解 超高層ビルのしくみ 建設から解体までの全技術, 講談社, 2010
- [10] 建築基準法施行令第二章第三節(第 23 条～第 27 条), 第五章第二節(第 117 条～第 126 条)
- [11] 大宮喜文, 堀内厚直, 山仲秀利, 萩原一郎, 田中哮義, 若松孝旺: 避難安全規定に関する研究 その 7 英国における避難容量規定に対する米国の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp1321-1322, 1992. 8
- [12] 国土開発技術研究センター監修: 建築物の総合防火設計法 第 3 巻 避難安全設計法, 日本建築センター, pp. 111-154, 1989
- [13] 建設省住宅局建築指導課ほか監修: 新・建築防災計画指針ー建築物の防火・避難計画の解説書, 日本建築センター, 第 5 章, 1995
- [14] D. Helbing, P. Molnar: Social force model for pedestrian dynamics, Physical Review E Vol. 51 No. 5, pp4282-4286, 1995. 5
- [15] 松田泰治, 大塚久哲, 樗木武, 内田広明: セルオートマトン法を用いた地下街の避難行動シミュレーションに関する一考察, 地域安全学会論文集, No. 2, pp. 95-100, 2000. 11

- [16] K.Nishinari : Extended floor field CA model for evacuation dynamics, IEICE TRANS. INF.&SYST., VOL.E87-D, pp726-732, 2004
- [17] 大鑄史男, 小野木基裕:セルオートマトン法による避難流動のシミュレーション, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌 51 巻, pp94-111, 2008
- [18] 近田康夫, 濱政洋, 城戸隆良:マルチエージェントを用いた避難行動シミュレーション, 土木情報利用技術論文集 vol.17, pp29-38, 2008
- [19] 小久保聡, 山本和弘, 山下博史:セルオートマトンによる火災時の避難行動のシミュレーション, 日本機械学会論文集(B編), 第 74 巻, 第 748 号, pp2724-2730, 2008.12
- [20] 木村謙, 佐野友紀, 林田和人, 竹市尚広, 峯岸良和, 吉田克之, 渡辺仁史:マルチエージェントモデルによる群集歩行性状の表現—歩行者シミュレーションシステム SimTread の構築—, 日本建築学会計画系論文集 第 74 巻 第 636 号, pp371-377, 2009.2
- [21] 安福健祐:楕円型 RVO モデルを用いた高密度群集流動の再現, 日本建築学会技術報告集 第 17 巻 第 35 号, pp187-190, 2011.2
- [22] 橋本佳代子, 大町達夫, 井上修作, 瓜井治郎:実避難訓練と避難シミュレーションの比較に基づく集団避難行動の特徴, 日本地震工学シンポジウム論文集 Vol.12, pp1390-1393, 2006.11
- [23] 城明秀, 峯岸良和, 竹市尚広, 吉田克之, 木村謙, 佐野友紀:マルチエージェントモデルと群集実験との比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集. A-2, pp205-206, 2011.8
- [24] 清野純史, 三浦房紀, 八木宏晃:個別要素法を用いた被災時の群集行動シミュレーション, 土木学会論文集No.591/I-43, pp365-378, 1998.4
- [25] 犬飼洋平, 小国健二, 堀宗朗:計測に基づく避難行動マルチエージェントシミュレータの開発, 土木学会 応用力学論文集 Vol.8, pp629-636, 2005.8
- [26] 峯岸良和, 吉田克之, 竹市尚広, 佐野友紀, 木村謙:通路上における群集流の密度と流動係数の関係の考察—マルチエージェント歩行者シミュレーターSimTread を用いて—, 日本建築学会大会学術講演梗概集. A-2, pp311-314, 2010.9
- [27] 吉田克之, 峯岸良和, 竹市尚広, 佐野友紀, 木村謙:マルチエージェント歩行者シミュレーターSimTread の妥当性の検証—流動係数の実測値との比較およびモ

- デルプランへの適用を通じてー，日本建築学会大会学術講演梗概集．A-2，pp315-318，2010.9
- [28] 高柳英明，佐野友紀，渡辺仁史：群集交差流動における歩行領域確保に関する研究ー歩行領域モデルを用いた解析，日本建築学会計画系論文集 第 549 号，pp. 185-191，2001. 11
- [29] 戸川喜久二：群衆流の観測に基づく避難施設の研究，学位論文，1963
- [30] 森下信：セルオートマトン 複雑系の具象化，養賢堂，2003
- [31] Nobuhiko Shinozaki, Shigeyuki Koyama, Shin Morishita : Evacuation Simulation from Rooms through a Pathway and a Stairway by Cellular Automata Based on the Public Guideline, Proceedings of the International Conference on Cellular Automata (pp743-751), 2012.9
- [32] 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 第 78 巻 691 号，pp669-677，2013. 9
- [33] 篠崎喜彦，小山維之，森下信：セルオートマトンによる歩行行動モデルの避難シミュレーション適用化検証 避難行動シミュレーションの開発 その 2，日本建築学会環境系論文集 第 79 巻 700 号，pp479-487，2014. 6

第 2 章 従来の避難行動時間の予測計算方法における問題点と解決方法の提案

- [1] 日本建築センター：建築新技術レポート 性能評価・評定／審査証明 2000. 6 - 2009. 3， 2010. 6
- [2] 建設省住宅局建築指導課ほか監修：新・建築防災計画指針ー建築物の防火・避難計画の解説書，日本建築センター，第 5 章，1995
- [3] 建築基準法施行令第 129 条の 2，第 129 条の 2 の 2，平成 12 年建設省告示第 1441 号，第 1442 号
- [4] 国土開発技術研究センター監修：建築物の総合防火設計法 第 3 巻 避難安全設計法，日本建築センター，pp. 111-154，1989
- [5] 国土交通省住宅局建築指導課ほか編：2001年版避難安全検証法の解説及び計算例とその解説，井上書院，2001
- [6] 田中哮義：改訂版 建築火災安全工学入門，日本建築センター，2002

- [7] 小林正美, 堀内三郎: オフィスビルにおける火災時の人間行動の分析 その 2. 行動パターンの抽出, 日本建築学会論文報告集 第 284 号, pp119-125, 1979. 10
- [8] 広瀬弘忠: 人はなぜ逃げおくれるのかー災害の心理学, 集英社新書, 2004. 1
- [9] 戸川喜久二: 群衆流の観測に基づく避難施設の研究, 学位論文, 1963
- [10] 日本建築センター: http://www.bcj.or.jp/file_data/c12/70/file.pdf
- [11] 日本建築学会編: 建築設計資料集成 [人間], 丸善, 2003
- [12] 日本建築学会編: 建築物の煙制御計画指針, 日本建築学会, 2014
- [13] 明石市民夏まつり事故調査委員会: 第 32 回明石市民夏まつりにおける花火大会事故報告書 (概要版), 明石市, 2002. 1
- [14] Andreas Schadschneider, Wolfram Klingsch, Hubert Klüpfel, Tobias Kretz, Christian Rogsch, Armin Seyfried: Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications, Encyclopedia of Complexity and Systems Science, 2009, pp3142-3176

第 3 章 従来の避難シミュレーションモデルとセルオートマトンの概要

- [1] 室崎益輝: 建築防災・安全(現代建築学), 鹿島出版会, 1993
- [2] 中祐一郎: 鉄道駅における旅客の交錯流動に関する研究, 鉄道技術研究報告 1079, 1978
- [3] 森下信: セルオートマトン 複雑系の具象化, 養賢堂, 2003
- [4] 西成活裕: 新潮選書 渋滞学, 新潮社, 2006

第 4 章 セルオートマトンによる一方向流モデルの構築

- [1] 日本建築学会編: 建築設計資料集成 [人間], 丸善, 2003
- [2] 田中哮義: 改訂版 建築火災安全工学入門, 日本建築センター, 2002
- [3] 戸川喜久二: 群衆流の観測に基づく避難施設の研究, 学位論文, 1963
- [4] 日本建築学会編: 建築物の煙制御計画指針, 日本建築学会, 2014
- [5] 峯岸良和, 吉田 克之, 竹市 尚広, 佐野 友紀, 木村 謙: 通路上における群集流の密度と流動係数の関係の考察ーマルチエージェント歩行者シミュレーター Sim Tread を用いてー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 311-314, 2010. 9
- [6] 江田敏男: ファジィを利用したマルチエージェントシミュレーション, 日本建築

学会・情報システム技術委員会，第 36 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集 pp.305-308，2013.12

- [7] 国土交通省住宅局建築指導課ほか編：2001年版避難安全検証法の解説及び計算例とその解説，井上書院，2001

第 5 章 一方向流モデルの歩行行動シミュレーション適用化検証

- [1] 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 第 358 号，pp.37-43，1985.12

第 6 章 一方向流モデルによる歩行行動モデルの避難シミュレーション適用化検証

- [1] 国土開発技術研究センター監修：建築物の総合防火設計法 第 3 巻 避難安全設計法，日本建築センター，pp.111-154，1989
- [2] 建築基準法施行令第 129 条の 2，第 129 条の 2 の 2，平成 12 年建設省告示第 1441 号，第 1442 号
- [3] 建設省住宅局建築指導課ほか監修：新・建築防災計画指針－建築物の防火・避難計画の解説書，日本建築センター，第 5 章，1995
- [4] 戸川喜久二：群衆流の観測に基づく避難施設の研究，学位論文，1963
- [5] 日本建築学会編：建築設計資料集成 [人間]，丸善，2003
- [6] 城明秀，峯岸良和，竹市尚広，吉田克之，木村謙，佐野友紀：マルチエージェン トモデルと群集実験との比較，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.205-206，2011.8
- [7] 掛川秀史，海老原学，関沢愛，野竹宏彰：階段内歩行モデル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 8－，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.293-294，2006.9

第 7 章 本避難シミュレーションを用いた建築物の避難計画における実用有効性の検証

- [1] 建築基準法施行令第 129 条の 2，第 129 条の 2 の 2，平成 12 年建設省告示第 1441 号，第 1442 号
- [2] 日本建築センター：建築新技術レポート 性能評価・評定／審査証明 2000.6 - 2009.3，2010.6

謝辞

企業に勤める私にとって学術的な研究は不慣れであったため、学位論文をまとめるに当たり、本当に多くの皆さんの協力を得た。最後にこれまでお世話になった方々へ謝辞を述べたい。

先ず、長年培ってきたセルオートマトンの知見を惜しみなく研究に提供して戴き、更に研究の進め方や特許の手続きに至るまでの多大なるご指導、ご支援をして戴いた、指導教官の 森下 信 教授 に深く感謝いたします。

プログラミングとシミュレーション検証について、献身的にご協力をして戴いた、森下研究室の修士課程の学生だった 小山 維之 君 にも心から感謝いたします。

またご多忙の中、審査委員として貴重なご指摘、ご助言を戴いた、山田 貴博 教授、長尾 智晴 教授、中野 健 准教授、白石 俊彦 准教授 にも心から感謝いたします。

また初めての経験となった国際会議発表にご同行して戴き、緊張する私を叱咤激励して戴いた、金沢大学の 小松崎 俊彦 准教授 にもお礼を申し上げたい。夏の終りのサントリーニ島の絶景とともに生涯忘れ得ぬ経験となっている。

最後に私を支え、数年に及ぶ研究、論文執筆の時間を私に与えてくれた妻と娘には本当に感謝している。最大の感謝を贈りたい。