

リアルタイム最適避難誘導システム構築に向けた基礎的研究

目黒公郎

正会員 工博 東京大学生産技術研究所 助教授 (〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1)

「安全な都市空間を設計する」ことの基本理念は、「なるべく災害が発生しない工夫を施した空間をつくることであり、万が一災害が発生したときには、その被害を最小限に抑える仕組みを持たせる」ことである。本研究では、このような条件を満足する「安全な都市空間」の実現のための第1ステップとして、個人特性や災害状況、避難誘導などの影響を考慮しうる避難行動シミュレーションモデルを開発し、空間配置や避難誘導条件の異なる避難シミュレーションを行い、いくつかの基礎的な検討を行った。その結果、内部配置の違いによって避難効率が大きく変わることを、避難誘導は災害の状況に応じて適切に行うことが重要であり、誤った誘導はかえって避難効率を低下させる可能性があることが示された。

Key Words : Human evacuation, real-time disaster mitigation system, evacuation guidance, potential model, space design, security

1. はじめに

安全な都市空間には、構造的に十分な強度を有することはもちろん、日常的に高い機能性を有しながら、非常時においてもその機能を低下することなく維持できる総合的な安全性が要求される。利用者の避難安全性は、このような総合的な安全性の検討では欠くことのできない最も重要な要素の一つと考えられる。特にデパート・地下街・大規模展示場などでは、利用者が施設内の地理に不案内であることも多く、避難しやすい内部構造であることが重要となる。また災害発生時に効率的な避難誘導を行うことも、被害を最小限にいとめるためには不可欠である。本研究は、都市空間や施設の安全性設計法と管理システムについて、上記のような利用者の安全性の視点からの新しいアプローチを示すものであり、同時に都市施設の総合的な安全性評価手法の確立と、安全性向上のための適切な施策を提案するものである。

ところで、ここで扱うような総合的な安全性の検討には、「ひと」の行動を適切に把握することが不可欠になるが、その分析はなかなか厄介であり、一筋縄ではいかない。従来この種の人間行動の研究は、大きく分類すると「過去の災害事例の調査」¹⁾「被験者実験」²⁾「コンピュータシミュレーション」³⁾の3つ手法を用いて行われてきた。

「過去の災害事例の調査」では、得られるデータが実際の災害時のデータである点が、他の2つの手法と決定的に違う重要な点である。しかしデータ数が少ないこと、防災上重要となる死者の行動が基本的に不明

であることなどの点で、十分な分析が行えない場合が多い。「被験者実験」については、被験者の安全性の問題から、災害時の環境を再現することが難しく、災害時の緊迫した状況下での実験データの収集は困難である。また大規模な都市空間や構造物全体を対象とするような実験の実施は困難である。「コンピュータシミュレーション」は、電算機の性能の向上を背景としてその可能性を高めてきているが、従来の手法ではモデルやパラメータが多く仮定に基づくし、個人特性や避難空間の細かな情報を考慮することができない、などの問題をそれぞれ抱えている。

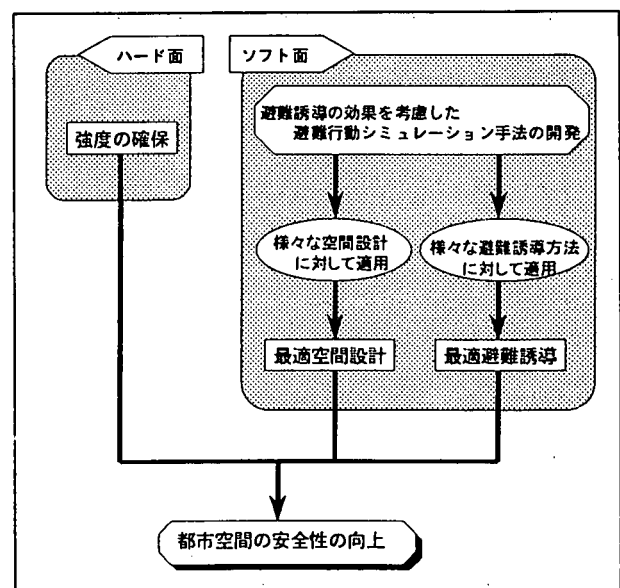


図-1 安全な都市空間や施設をめざして

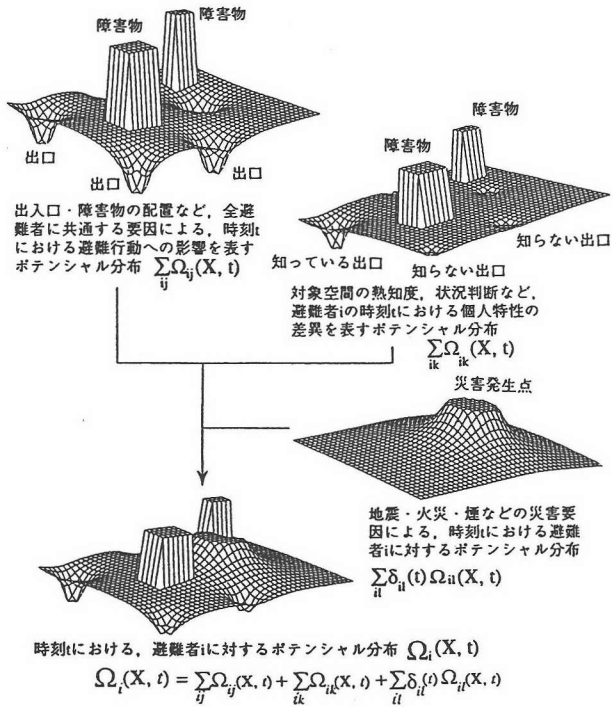


図-2 ポテンシャルモデルの考え方

このような状況下で、「より適切に人間行動を分析するにはどうすれば良いのか？」最近数年間、実験的・解析的な研究を進めながら、それぞれの手法の欠点を補い合って、長所をうまく組み合わせたような分析法はないものかと考えてきた^{4),5)}。本研究で用いる避難行動シミュレーションモデルは、上述のような問題点の解決を目的として開発した手法である。すなわち、「ポテンシャル」の概念を応用することによって、避難者の個人特性や避難空間の時間的・空間的な環境変化を考慮した人間行動の定量的解析を可能とする手法である。

2. 避難行動シミュレーションモデル

本研究で用いるポテンシャルモデル^{3),4)}について、その概略を2次元モデルを対象として説明する。ポテンシャルモデルでは、解析対象空間は大きさ(dx, dy)のメッシュに区切られており、個々のメッシュはその場の状況に応じたポテンシャルを持つ。例えば、出入口や避難誘導灯などは負のポテンシャル、壁や柱などの障害物は正のポテンシャルを持つ。さらに、利用者が「知っている出口」と「知らない出口」に与えるポテンシャルに差を付けたり、歩行速度や情報に対する反応に差を与えるなどによって、個人特性を考慮することもできる。また火災やそれによる煙などが発生すれば、それに応じて正のポテンシャルが発生する(図-2)。すなわちこのポテンシャル場は、避難者ごとに定義され、避難者の位置と時間が変わる

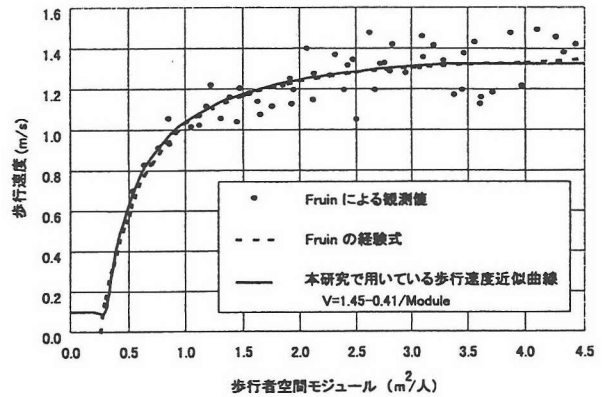
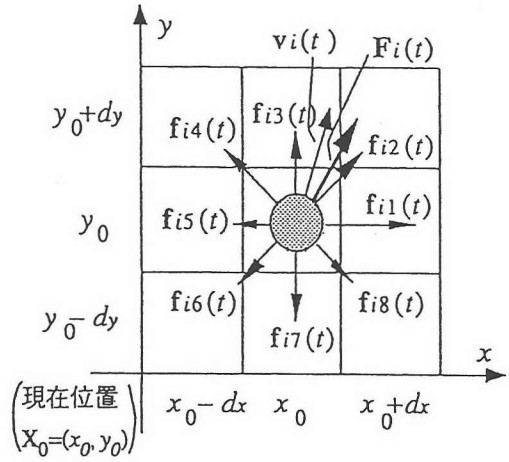


図-4 群衆密度と歩行速度の関係

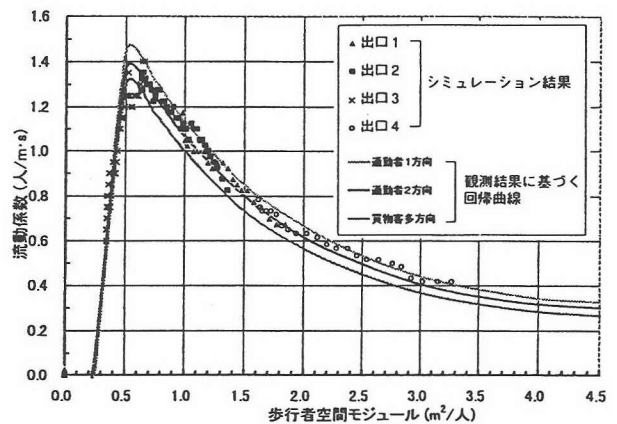


図-5 シミュレーション結果の信頼性の確認
(観測事実との比較)

ことにより変化するモデルとなっている。このようにして決められた対象空間において、それぞれの避難者は、各時間ステップ毎に、周囲の8メッシュの中からポテンシャル値の低い方向を選んで移動(図-3)し、最終的に出口にたどりつくようになっている。それぞれの避難者の歩行速度は、Fruinの式⁶⁾に従ってモデル化している(図-4)。すなわち混雑によって歩行空間に余裕がなくなると歩行動作が困難に

なり、歩行速度が減少する。

本モデルは、避難行動をとりまく複雑な環境をポテンシャルの概念を用いることで、統一的に簡便に扱うことを目的としたモデルである。図-5に本モデルで解析した人間行動特性の1例を示す。この解析は平常時における人間の集団(群衆)の行動特性を示している。横軸の歩行者空間モジュールとは、人口密度の逆数で、歩行者1人当たりが占有できる面積を示している。縦軸の流動係数とは、出口や通路1m当り1秒間で何人が通過できるかを表す指標である。図中の曲線は、観測データに基づいて回帰されたものである。歩行者空間モジュールの低下に伴って流動係数は高まるが、 $0.5\text{m}^2/\text{人}$ 付近になると歩行者同士の相互干渉が生じて急激に低下し、 $0.25\text{m}^2/\text{人}$ ではゼロ、すなわち移動ができなくなってしまうことを表して

いる。図中にプロットされた点は、提案モデルによるシミュレーション結果である。本モデルが日常の人間行動を精度良く再現していることがわかる。

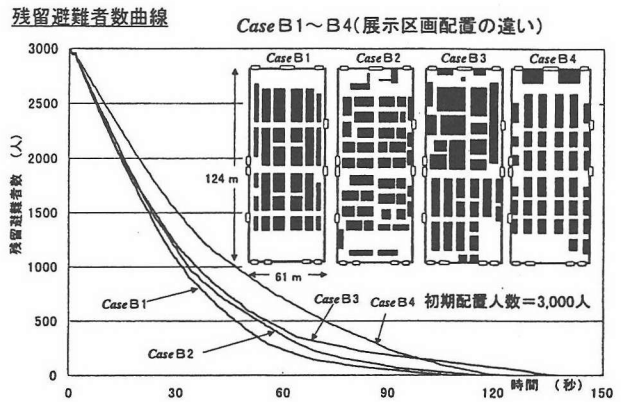


図-6 空間配置の違いによる避難効率の差

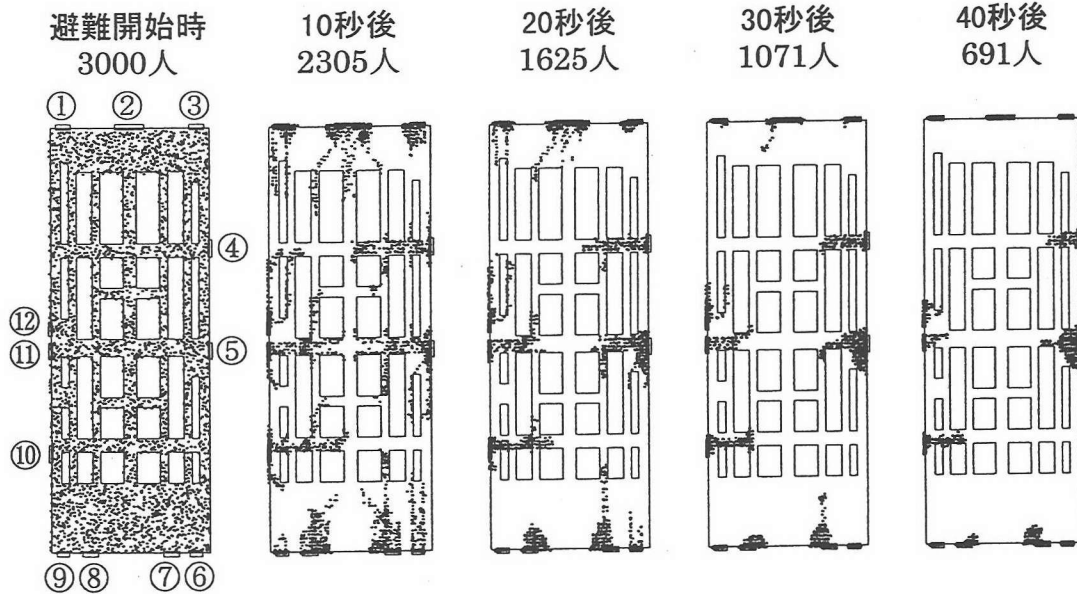


図-7 時間の経過に伴う対象空間内の避難者の分布 (Case B1)

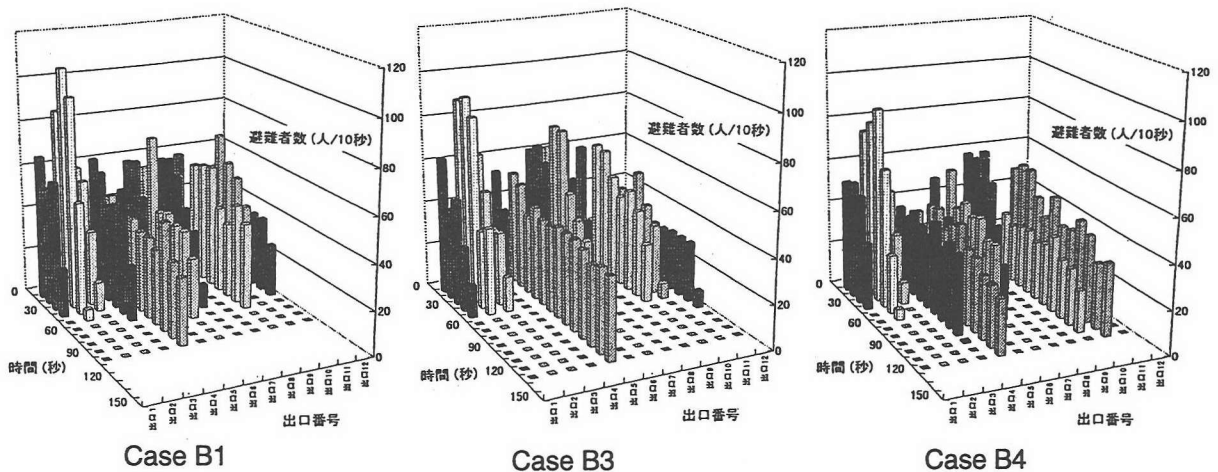


図-8 各出口の避難者数の時間変化

(出口や通路などが避難安全性上どのような役割を持つか?)

3. 人間行動シミュレーションに基づく空間の安全性評価

3-1 対象空間の内部配置の違いによる影響

図-6に示す実在の大規模展示場を対象空間として、内部配置の違いによる避難効率の差を調査した。解析の初期条件として3,000人の避難者をランダムに配置している(図-7)。図-6に示された4つのブース配置例は、いずれも過去において実際に使用された(安全管理者が許可した)配置であるが、シミュレーション結果を見ると、避難安全性には違いがあったことが分かる(図-6)。時間経過に伴う避難者の分布(図-7)を見ると、避難口に向かって移動する人々が、通路の合流点や出口付近で滞留したりしている様子が伺われる。図-8は時間経過に伴う出口ごとの利用者数の変化を表している。この図より、出口の位置や数が同じであっても、内部空間の配置が変化することによって、各出口の役割や重要性が変化することがわかる。すなわちそれぞれの出口や通路が利用者にとってどのように使われているのか、「最終的な利用者数

は?」「利用される時間は長いのか短いのか?」「どのような経路で避難した人が多いのか?」など、様々な角度から空間の理解を深めることができる。このような検討を進めることで、それぞれの空間の有する避難安全性の定量的評価が可能となり、利用者の避難安全性から見て有利な空間設計が可能となる。

3-2 避難誘導の違いによる影響

設計時に安全性に配慮した空間とは言え、一たび事故などが起こった場合、対象空間がどのような状況になるかを事前に予測することは難しい。例えば、我が国では避難誘導灯は停電対策としてバックアップ電源を持つことが義務付けられており、これが通常の火災では役に立っている。ところが地震災害など、構造体の被害を伴う場合や途中の通路が転倒物などで閉塞したり、出口やその周辺の安全環境が確保されない場合などでは、このシステムが逆に問題を生じる可能性も高い。特に停電で空間内の照明が消え、避難誘導灯のみが点灯しているような状況では、避難者が誤って誘導される問題が生じる。このような点を考えると、避難誘導は発災時の内部状況や利用者の分布状況などを踏まえて適切に行うことが重要になることがわかる。

そこで本研究では、避難誘導の違いによって生じる避難効率の変化について、基礎的な検討を行った。避難誘導の影響は、誘導の行われる出口に与えるポテンシャルを、他の出口よりも低くすることで表現した。これは、出口にとりつけられたスピーカや避難誘導員により、「こちらへ避難して下さい」という音声を用いた誘導が行われた状況を想定したものである。避難誘導のケースでは「地震や事故でいくつか

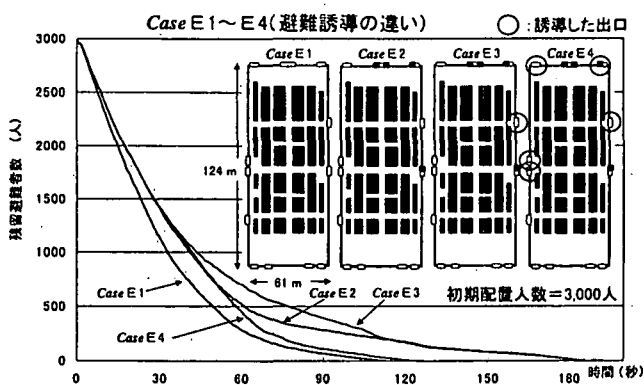


図-9 避難誘導の違いによる避難効率の差

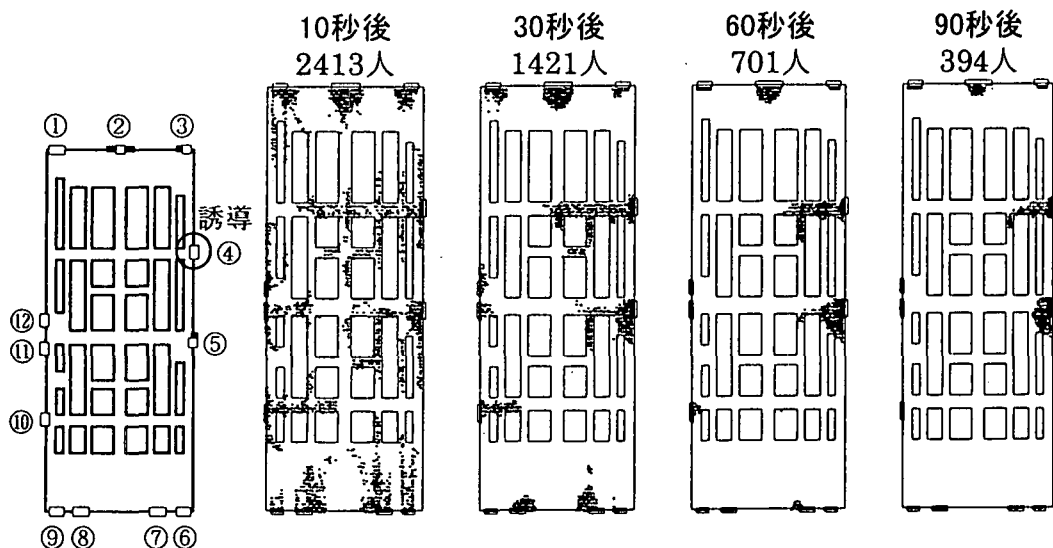
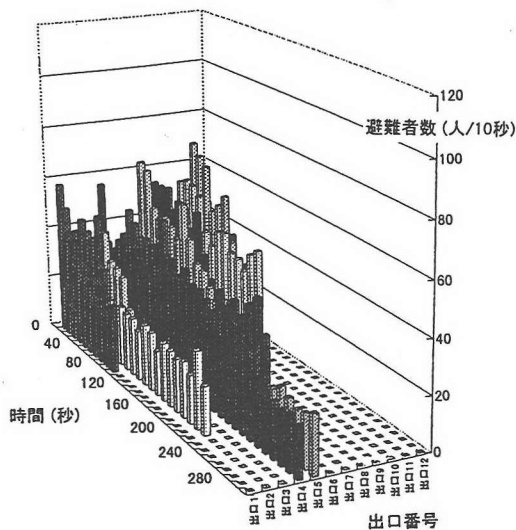
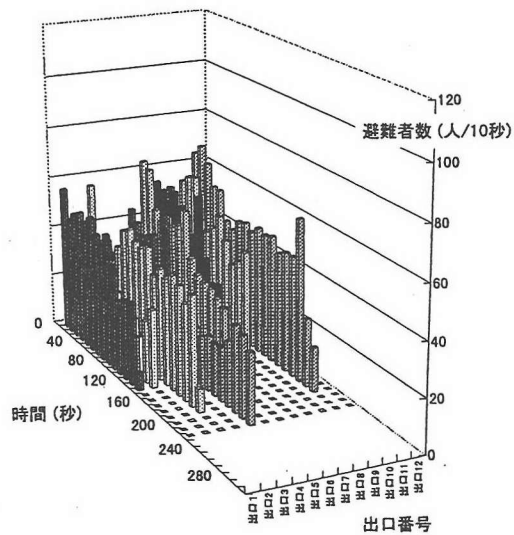


図-10 時間の経過に伴う対象空間内の避難者の分布 (Case E3)



Case E3



Case E4

図-11 各出口の避難者数の時間変化（避難誘導の違いによる影響）
（避難誘導の違いによって、出口や通路などの使われ方がどう変化するのか？）

の出口において、その一部が使用不能になった」状況を想定した。すなわち、出口2, 3, 5の一部が使用不能になった状態を想定した(図-9, 10)。この条件下で、様々な出口への避難誘導を行うことにより最適な避難誘導方法を探った。ここで紹介するのは次の4ケースである。

Case E1：全ての出口が使える場合

Case E2：避難誘導が全く行われなかった場合

Case E3：出口4で誘導が行われた場合

Case E4：出口1, 3, 4, 11, 12で誘導が行われた場合

Case E1～E4の各時刻における会場内の残留避難者数の変化を図-9に示す。Case E2では、出口が一部使用不能になったため、Case E1に比べて避難効率が著しく悪化している。Case E3では、出口2, 3, 5の障害の影響で、これらの出口の付近に避難者の滞留が予測されることから、位置的にその中間にある出口4への避難誘導を行い、滞留する人々をスムーズに避難させることを試みた。しかし結果は、この誘導がかえって避難効率を悪化させてしまった。これは避難誘導によって、出口4にその容量を越える多くの避難者が集中したために、出口付近でアーチアクションを起こしてしまい、流量が低下してしまったためである。この様子は図-10の避難者の分布からもわかる。一方Case E4は、今回の検討により求められた最適避難誘導方法であるが、Case E2やCase E3に比べてかなり避難効率を改善できていることがわかる(図-11)。

上記の結果のように、避難誘導を行う際は状況に応じた最適な誘導を行う必要があり、間違った誘導はかえって避難効率を低下させ、被害を拡大してし

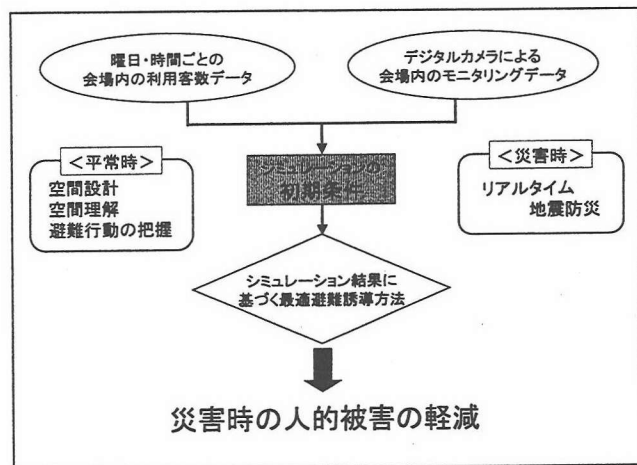


図-12 実システムへの展開

まう可能性があることがわかる。

3-3 実システムへの展開

これまで説明してきたような人間行動シミュレーションモデルを実システムに応用していくために、首都圏のある大規模地下街(面積約27,000m²)を対象に、施設利用者の行動分析のためのモニタリングを実施している。これは災害を起こさない努力はもちろんすべきであるが、不幸にして災害が起こってしまった際には、その状況を克明に記録し、これを貴重な経験として、今後の災害軽減に向けた資料としなくて最大限に活用すべきであるとの判断に基づいている。図-5でも示したように、日常的な人間行動は現在のモデルでも十分表現できていると考えられる。しかし非常時に人間がどのように行動するかの具体

的な行動データ(移動速度や経路選択など)が乏しいため、非常時の人間行動については具体的な行動モデルの構築が難しい。しかしポテンシャルモデルは、複雑な災害状況や判断も統一的に扱えることから、被災時の十分なデータが整備されれば、それをモデルに反映することは十分可能と考えられる。

ポテンシャルモデルはアルゴリズムが簡単であることから、ここで取り上げたような避難シミュレーションは、現在ではパソコンレベル(DEC ALPHA, 300-500MHz程度)の電算機で、実時間の数十分の1~数百分の1の計算時間でシミュレーションが可能である。このような状況下では、災害時に大規模空間内の様子をモニタリングし、その結果をインプットとしてシミュレーションを行えば、どうすれば内部の人々を適切に避難誘導できるかの情報を実時間を越えて得ることができる。すなわちリアルタイムにモニタリングされた発災時の避難者分布と避難空間状況を初期条件とする避難シミュレーションから、実条件に基づいた最適避難誘導が可能になる。これは実時間を越えて得られる近未来の情報に基づいた避難誘導であり、最近盛んに叫ばれている「リアルタイム防災工学」⁷⁾の究極的な姿の1つと考えられる。このシステムの実用化には解決すべき問題もまだ多いが、その前段階のシステムとしては次のようなものが考えられる。上記のような施設では、曜日や時間による利用者の数や流動特性がかなり類似しており、事前の調査に基づいていくつかのパターンに分類することも多い。したがって、曜日や時間帯ごとに分類した利用者分布の各パターンについて、あらかじめ最適な避難誘導方法を準備できれば、施設の管理者が災害時に効率のよい避難誘導を実施することが可能になるであろうし、平時には従業員等に対する最適な避難誘導訓練にも利用できる(図-12)。

4. おわりに

「安全な都市空間を設計する」ことの基本理念は、「なるべく災害が発生しない工夫を施した空間をつくることであり、万が一災害が発生したときには、その被害を最小限に抑える仕組みを持たせる」ことである。

最近では、耐震設計や施工技術、建設材料の進歩によって、都市施設の物理的な強度は向上し、構造体としては災害が発生しにくい環境になっている。しかし施設利用者の避難安全性の観点からの空間設計は、まだ十分とは言えない。このような状況を踏まえると、「安全な都市空間」を実現するためには、後者の「利用者の安全性」から見た検討が今後益々重要になってくると思われる。すなわち、「避難しやすい空間としての都市空間設計」であり、災害発生時に、そ

の影響を最小限に押さえる仕組としての「災害状況を踏まえた最適避難誘導」である。

本研究では、上述のような条件を満足する「安全な都市空間」の実現のための第1ステップとして、個人特性や災害状況、避難誘導などの影響を考慮しうる避難行動シミュレーションモデルを開発し、空間配置や避難誘導条件の異なる避難シミュレーションを行い、いくつかの基礎的な検討を行った。その結果、内部配置の違いによって避難効率が大きく変化すること、避難誘導は災害の状況に応じて適切に行うことが重要であり、誤った誘導はかえって避難効率を低下させる可能性があることが示された。

本研究で紹介した避難行動シミュレーションは、計画段階の構造物に対しては、通路幅や柱・出口の数や位置の決め方など、安全な空間設計を実現するためのツールとして利用することができる。また、既設の構造物に対しては、災害発生時の人的被害を最小限に抑えるための、効果的な避難誘導方法の検討、空間の構成や役割に対する理解を深めるための有力なツールとして利用できるものである。

今回は施設空間内の避難安全性を対象としたが、同様の方法で街区レベルの避難安全性や避難誘導の検討にも利用できることも付け加えておく。

<参考文献>

- 1) 例えば、森田耕一：プレイタウンにいた53名の人たち(大阪千日デパート火災より)、火災、Vol. 23, No.1, pp. 28-34, 1973.
- 2) 例えば、横山秀史・永田茂・山崎文雄・海老原学：実迷路による緊急時の人間行動特性、土木学会年論文集, No.441/I-18, pp. 107-115, 1992.
- 3) 例えば、横山秀史・目黒公郎・片山恒雄：避難行動へのポテンシャルモデルの応用、土木学会論文集 No.513/I-31, pp. 225-232, 1995.4.
- 4) 目黒公郎・原田雅也：最適避難誘導のための基礎研究、地域安全学会論文報告集, No. 7, pp. 354-359, 1997.11
- 5) 目黒公郎・芳賀安則・山崎文雄・片山恒雄：バーチャルリアリティの避難行動シミュレータへの応用、土木学会論文集, No.556/I-38, pp. 197-207, 1997.1.
- 6) Fruin・J, 長島正充訳：歩行者の空間、鹿島出版会, 1974.
- 7) 野田茂, 目黒公郎:リアルタイム地震工学をめざして、第22回日本建築学会地盤震動シンポジウム, pp. 95-112, 1994.10.