

地下街における避難開始時間のばらつき及び避難誘導者の影響を考慮した避難行動シミュレーションの高度化

A study on simulation of evacuation behavior considering beginning time of evacuation and the influence of a guide during evacuation at underground shopping street

松田泰治*・大塚久哲**・樗木 武***・大野 勝****

Taiji MAZDA, Hisanori OTSUKA, Takeshi CHISHAKI and Masaru OHNO

The purpose of this study is to support disaster prevention planning in underground shopping street by simulation of human behaviors during evacuation in a disaster. This study adopted Cellular automata(CA) as the technique analyzing evacuation behaviors. CA is interacting with neighbor cells in local. Evacuation behaviors are reproduced by comprehensively taking in various factors on evacuation behaviors using CA. Some improvements of the system were conducted considering beginning time of evacuation and the influence of a guide during evacuation. Developed program in this study can simulate evacuation behaviors caused by the fire occurred at a restaurant in Tenjin underground shopping street.

key word : evacuation, Cellular automata, underground shopping street

1. はじめに

現代社会における都市問題のひとつとして、都市の過密化が挙げられる。この都市の過密化問題を解消するには都市空間の効率的利用が肝要であり、その中でも地下空間の積極的な開発・利用は、問題解決手段のひとつとして期待されている。現在の地下空間の利用は、地下街、地下鉄駅、地下コンコース、業務ビル・商業ビルの地下階、地下駐車場等多岐にわたっている。また、地下空間は、地上空間に比べ天候に左右されない、交通強者である自動車と歩行者と同一空間に存在しないといった自然環境・社会環境から隔離された安全で快適な空間として発展してきた。

しかし、2003年2月18日午前9時55分、韓国南東部・大邱（テグ）市の地下鉄「中央路」駅構内で地下鉄車両への放火による地下鉄火災が発生し、死者が約130人に達する前例のない大被害をもたらした¹⁾。被害がこれほど大きくなった原因として、韓国で用いられている地下鉄車両が比較的燃えやすい車両であったこと、地下鉄駅構内の火災で発生した煙の拡散・充満により人間

キーワード：避難行動，セルオートマトン法，地下街

*	正会員	博（工）	熊本大学教授	工学部環境システム工学科
**	フェロー会員	工博	九州大学大学院教授	工学研究院建設デザイン部門
***	フェロー会員	工博	九州大学名誉教授	
****	正会員	修（工）	株式会社	フォーラムエイト

が判別可能な視界範囲が狭くなり、地下鉄駅構内からの脱出に支障があったこと、火が燃え移った対向列車の運転士が避難する際、無意識に列車の始動やドアの開閉等に用いるマスターキーを抜くなどの人為的ミスがあったことなどが挙げられる。このことから、地下鉄や地下街等の閉鎖空間における火災・地震等の災害に起因する避難行動への対策を講じる際には、構造的補強等のハード面の対策のみならず、地下鉄駅の駅員や地下街の店員が迅速かつ安全な避難誘導を行うなど人間の災害時の行動を予測したソフト面の対策も講じておく必要がある。

そこで、本研究では、地下街等における緊急時の群集の避難行動シミュレーションシステムの構築を行い、避難訓練等では予測不可能な様々な事象を解明的に評価・検討することにより、ソフト面における地下空間の防災対策の一助とすることを目的とした。

人間の避難行動は、人間の歩行速度や視界・判断能力・火災や浸水等の災害が及ぼす影響など様々な要因から構成される。これらの要因の中には、これまでの既往研究で取り扱われた手法^{2)~6)}だけでは十分に対応しきれないものも含まれると考えられる。以上の点を踏まえ本研究では、人工生命体の一つで簡易な法則のみを使用し複雑系を解明するのに有効なセルオートマトン法を採用した。本手法を用いると、群集の避難行動に関する諸要因を随時簡単な局所近傍則で総括的に取り込み、複雑な避難行動を再現することが可能と考えられる。

これまでの研究^{7)~10)}では、出口までの最短の経路に沿って行動する基本行動要因、誘導灯や火災の影響を表現した外的要因、避難時における人間の個体差に関する要因、そして、周囲の人間の影響を表す人的相互作用に関する要因を考慮してきた。本研究では、新たに避難行動の要因として人間の個体差に関する要因で人間の避難開始のばらつきを表した「避難開始時間の影響」および人的相互作用に関する要因で安全な避難を行う上で効果が期待される「避難誘導者の影響」を取り入れた。

2. 避難行動シミュレーション手法¹¹⁾

セルオートマトン法^{12)、13)}による解析手順を図-1に示す。セルオートマトン法の特徴は、この簡単なセル間の局所的相互作用から複雑な現象を再現できることにある。すなわち、セルオートマトン法は、従来の数学モデルを用いた現象を微分方程式等でマクロに捉えるトップダウン的な解明ではなく、ミクロの段階から局所的相互作用を積み重ね、ボトムアップ的に複雑現象を解明するものである(図-2)。この事は、セルオートマトン法が、様々な不規則・複雑な現象を自己組織化して再現できる利点を持つことを意味する。

セルオートマトン法に基づく本手法では、まず対象空間を格子状セルに均等分割する。セルは、人間の占有面積等を考慮して、一辺0.5mの正方形

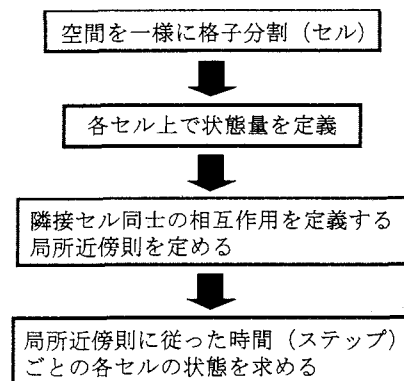


図-1 セルオートマトン法の解析手順

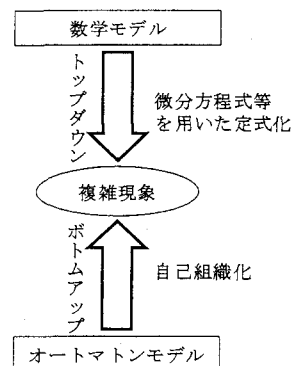


図-2 数学モデルとセルオートマトンモデル

セルとした。その分類は、図-3に示すように、「障害物」「人間」「避難誘導者」「店舗」「店舗の出入り口」「通路」「出口」「出火点」「誘導灯」の9種類で、それぞれ、「100」「50」「40」「30」「35」「10」「0」「150」「110～140」（誘導灯の種類により異なる）の状態量を与えた。これは状態量が多いセルに対して移動が困難となるという人間の移動ルールを考慮したものである。

本研究で用いた人間の避難行動を再現する方法は、人間の避難行動に影響する諸要因を状態量として考慮することで人間の避難行動を表現する方法と、諸要因に対応し人間の避難行動に関しであるルールに基づく制限を加えることで表現する2種類の方法である。

人間の避難行動に影響する諸要因を状態量として考慮することで人間の避難行動を表現する方法について説明する。人間が次のステップに移動するセルを、周囲と自身が位置するセルを含む9セルから選択する。そのセルの選択方法は、まず、人間の避難行動に影響する諸要因をそれぞれ状態量として計算し、その状態量に係数をかけたものを足し合わせた状態量の総和が最も小さいセルに移動するというものである（図-4）。ここで対象セルが通路にいる場合、その隣接する8セルの中で出

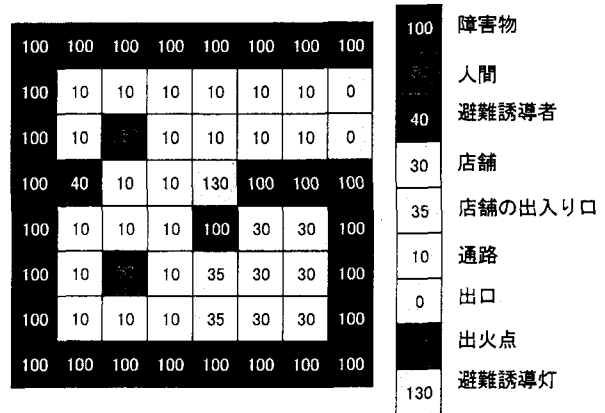


図-3 セルの分類と状態量

火点・店舗の出入り口・障害物があるセルの状態量の総和に1,000を与えることで、通路にいる人間は避難行動を開始した後は店舗に入らない事を表現した。

これまで状態量の総和による計算手法で考慮した要因は、基本行動要因である「出口までの距離の影響」、「障害物周りの影響」、「堂々巡りの影響」、「環境の影響」、外的要因である「誘導灯の影響」、「出火点の影響」、人的相互作用に関する要因である「他の人間の向きの影響」である。本研究では、さらに「避難誘導者の影響」を状態量として評価する要因として加えた。一方、人間の避難行動に対してあるルールに基づく制限を与えることで表現する方法で考慮した要因としては、人間の個体差に関する要因である「人間の移動速度の影響」、「人間の占有面積の影響」がある。本研究では、新たに「避難開始時間の影響」を加えた。これらの一連の要因を表現したシステムのフローチャートを図-5に示す。

$$\begin{aligned}
 & \alpha \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 7.4 & 8.9 & 10.5 \\ \hline 8.3 & \text{人} & 11.1 \\ \hline 9.4 & 10.6 & 11.9 \\ \hline \end{array} \quad \text{状態量A} \\
 & + \beta \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0.0 & 2.0 & 2.0 \\ \hline 0.0 & \text{人} & 0.0 \\ \hline 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ \hline \end{array} \quad \text{状態量B} \\
 & + \dots\dots\dots + \xi \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 2.1 & 1.6 & 1.0 \\ \hline 1.6 & \text{人} & 1.1 \\ \hline 1.2 & 1.1 & 1.0 \\ \hline \end{array} \quad \text{状態量N} \\
 & = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 3.0 & 8.2 & 9.0 \\ \hline 4.3 & \text{人} & 5.7 \\ \hline 4.8 & 5.4 & 6.1 \\ \hline \end{array} \quad \text{状態量の総和}
 \end{aligned}$$

図-4 状態量の総和の計算

2・1 個々の人間の避難開始時間の影響

本研究で対象とする災害は、地震・火災・水害等多岐にわたっている。特に火災は、地下街の災害事例として非常に多く、小規模の火災の場合でも地下街の閉鎖性等から影響は多大である。ここで、地震は、対象空間内の全ての人間へほぼ同時に影響を与える現象であるのに対して、火災は局所的に起こり時間の経過とともに広がる現象のため、対象空間内の人間への影響も時間の経過とともに広がるケースが考えられる。これまでのシステムでは、緊急時の群集の避難行動において対象空間内の全ての人間が同時に避難を開始するものと仮定した。これは地震時における群集の避難行動や閉鎖空間において避難開始のきっかけとなるアナウンスが行われた場合などを再現することが可能と考えられる。そこで、本研究では火災等の局所的に発生する災害における人間の危険認知の時間的差異を考慮した避難行動を再現するため、個々の人間の「避難開始時間の影響」の検討を行った。そのルールは、図-6に示すように、その人間を中心とする一辺 $(2v+1)$ セルの正方形範囲において、すでに避難している人間、もしくは「出火点」がある場合に、その人間は避難を開始すると仮定するものである。ここで、 v は人間の視界距離を表現するためのセルの数であり、この範囲で人間はある程度周囲の状況を把握することができる。ここではその距離を14セル（7.0m相当）¹⁴⁾と仮定した。

図-7にこれまでの研究で用いてきたシステムによるケース1と「避難開始時間の影響」を考慮したケース2に関して対象空間の左下の店舗からの火災に起因する群集の避難行動シミュレーション結果を示す。この図から、同時に避難を開始するケース1では、出火点から遠い右上の店舗周辺の人間が最初から避難行動を開始しているのに対し、「避難開始時間の影響」を考慮したケース2では、出火点に近い人間から順次避難を始め、その避難行動が出火点付近から同心円状に伝播しながら広がっていった。例えば、ケース2の6ステップでは右上の店舗周辺の人間は避難を開始しておらず、人間の避難行動開始の時間的ばらつきを表現している。

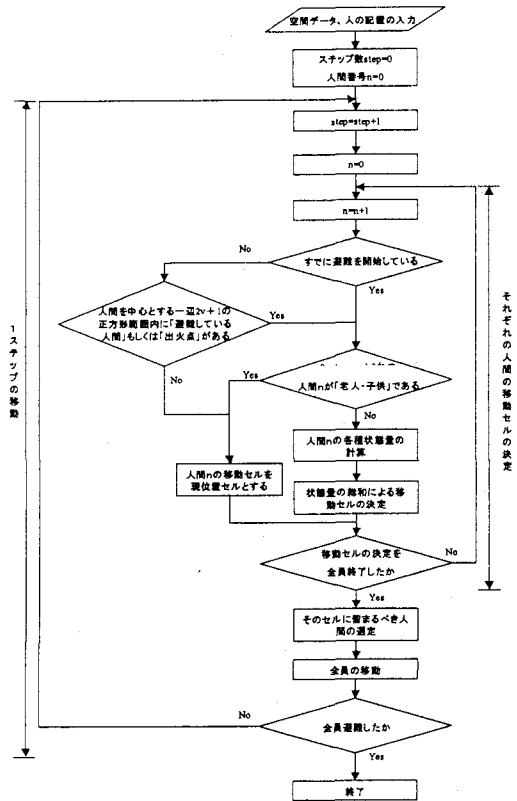


図-5 人間の移動フローチャート

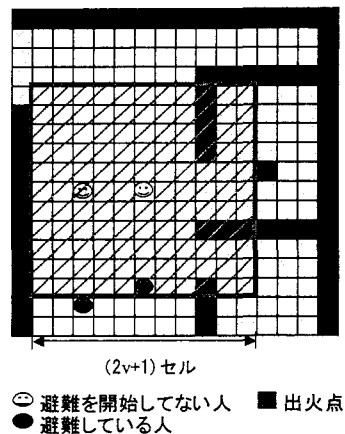


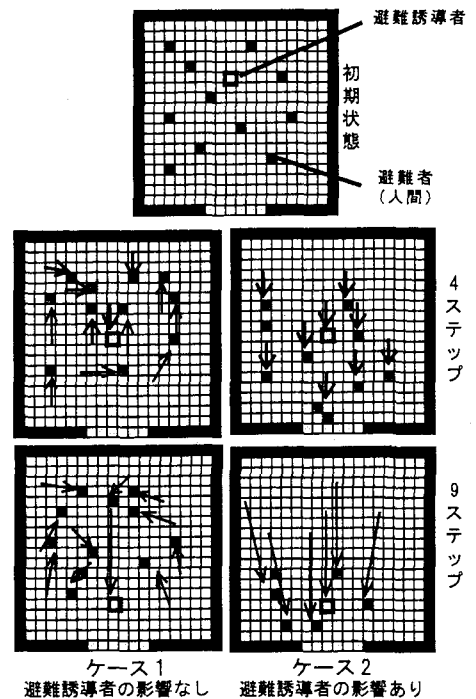
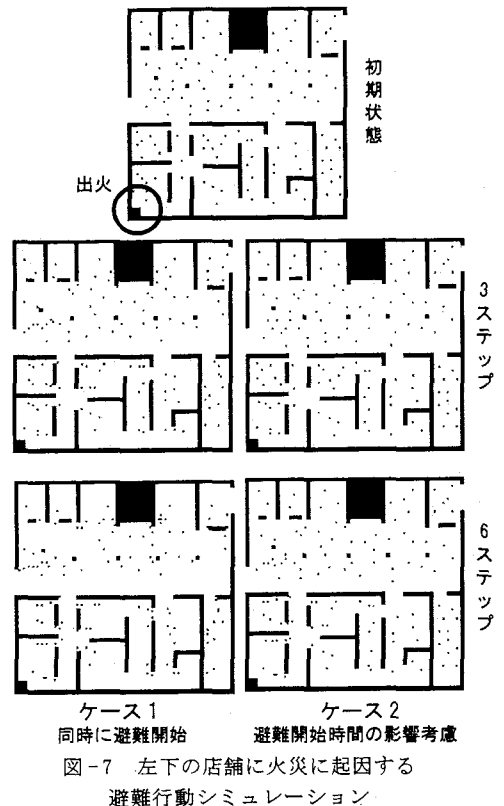
図-6 人間の視界範囲($v=5$ セルの例)

2.2 避難誘導者の影響

一般的に緊急時の避難を迅速かつ安全に実施するための大きな要因の一つとして、避難誘導者の存在が挙げられる¹⁵⁾。そのため、天神地下街では、出店している約100店舗全てに少なくとも1人ずつの避難誘導者を確保しておくことが義務付けられている。この避難誘導者の働きは、大きく2つに分けることができる。それは、避難中の人間に向かうべき方向を指示することと、声をかける等を行い、パニックに陥っている人の情緒を安定させる働きである。本研究では、避難中の人間に向かうべき方向を指示する避難誘導者の働きを表現するため、「避難誘導者の影響」を状態量の総和に追加した。その方法は以下のとおりである。まず、対象となる人間を中心とする一辺 $(2v+1)$ セルの正方形範囲内に避難誘導者がいた場合、その避難誘導者が向いている方向に従い、人間の周囲3セル（例えば、避難誘導者の向きが上を示している場合は、左上と上と右上のセル）に20を加える。そして、この状態量に負の係数 ω をかけたものを状態量の総和に加える。これにより避難中の人間が避難誘導者の向かう方向に移動する行為を表現可能となる。ここで、避難誘導者は目的の出口へ最短経路で移動するものと仮定した。図-8は、避難者がパニックに陥り、出口を認識できない場合の避難誘導者の影響の有無を示したシミュレーション結果である。ケース1は避難誘導者の影響がない場合、ケース2は避難誘導者の影響がある場合を示す。この図が示すように、ケース1では人間がまとまりのない行動をとるのに対して、避難誘導者の影響があるケース2は、避難誘導者が向かう方向に従うように周囲の避難者が行動をとっている。

3. 天神地下街における飲食店から発生した火災に起因する群集の避難行動シミュレーション

本研究では、対象空間として天神地下街を用いた。天神地下街は、南北に約360m、東西に約50m、地下3階からなり、1976年9月のオープン時から今日まで拡張工事が行われ、現在は、西鉄大牟田線福岡駅、地下鉄天神駅、西鉄天神バスセンターおよび隣接ビル等と連絡し、多数の買い物客、通勤者で混雑する大規模な地下空間となっている。今後は、



地下鉄3号線の新駅の建設等から更なる拡張が計画されている。現在天神地下街には、約100店舗が出店しており、飲食店としては14店舗が出店している。地下街の災害事例としてダクトや飲食店から発生する火災は非常に多い。そこで、本研究では、天神地下街の飲食店14店舗から出火した場合を想定し、人間が危険認知により避難を開始する群集の避難行動シミュレーションを行った。その際、対象空間に点在する人間約1500人は、健康な大人のみと仮定し、配置は通路や店舗にランダムに与えたケースⅠ、ケースⅡ、ケースⅢの3ケースとした。火災については図-9に示す14店舗の各飲食店から出火した14ケースを検討した。また、解析実行中の人間の流入はないものと仮定する。本シミュレーションにおける避難行動は、火災を避け出口までの最短経路を通るように移動するものとし、図-10に示す「出口までの距離」、「障害物周り」、「堂々巡りを防ぐ」、「環境を表す」、「出火点」の状態量を用いる。それらに用いる係数は、 $\alpha = 1200$ 、 $\beta = 0.1$ 、 $\gamma = 1.8$ 、 $\eta = 0.001$ 、 $\phi = -100$ とした。図-11に人間の初期状態の配置がケースⅠにおける群集が同時に避難開始する場合(避難0-I)と店舗番号8から出火した場合

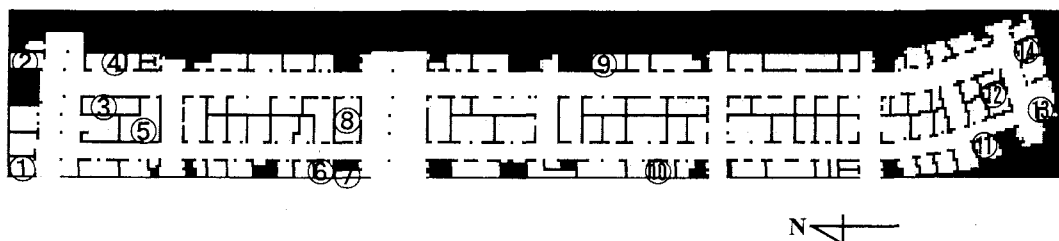


図-9 天神地下街飲食店配置図

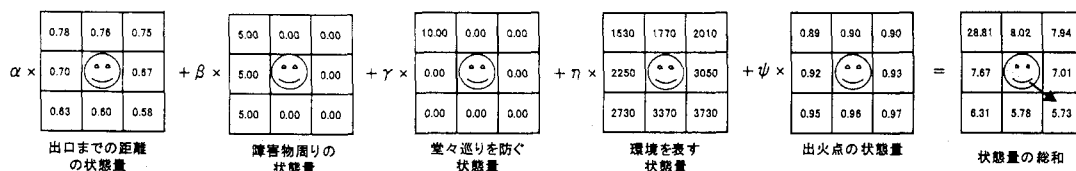


図-10 本シミュレーションにおける状態量の総和の計算

(避難8-I)の群集の避難行動シミュレーション結果を示す。

これらの結果から、図-11で示した店舗番号8の店舗からの火災に起因する避難行動(避難8-I)は、人間の避難が出火している店舗を中心にして同心円状に広がる傾向を示している。そのため、出火している店舗付近では、同時に避難を開始する避難0-Iと避難8-Iではそれ程大きな避難傾向の違いは認められないが、例えば天神地下街モデルの南北両端付近のような出火している店舗から離れた地点では、避難0-Iの場合は、15ステップで大部分の人間が目標とする出口付近で避難行動をとっているのに対して、避難8-Iでは、多くの人間が初期状態のまま避難を開始しておらず、最終的に42ステップで全員が避難開始以降の状態になる。また、避難0-Iではほぼ避難が完了する80ステップにおいて、避難8-Iでは約200人の人間が避難を継続中である。

人間の配置をランダムに与えたケースⅠ、Ⅱ、Ⅲの避難シミュレーションでは、同時に避難開始、各店舗からの火災に起因する避難を行う全14ケースにおいて、ほぼ同じ傾向を示し、人間の配置による全体的な避難傾向の変化に大きな差異は認められなかった。

各店舗別の火災発生個所の相違に基づく避難傾向の比較を行うと、図-12で表すA~Eの5グループ

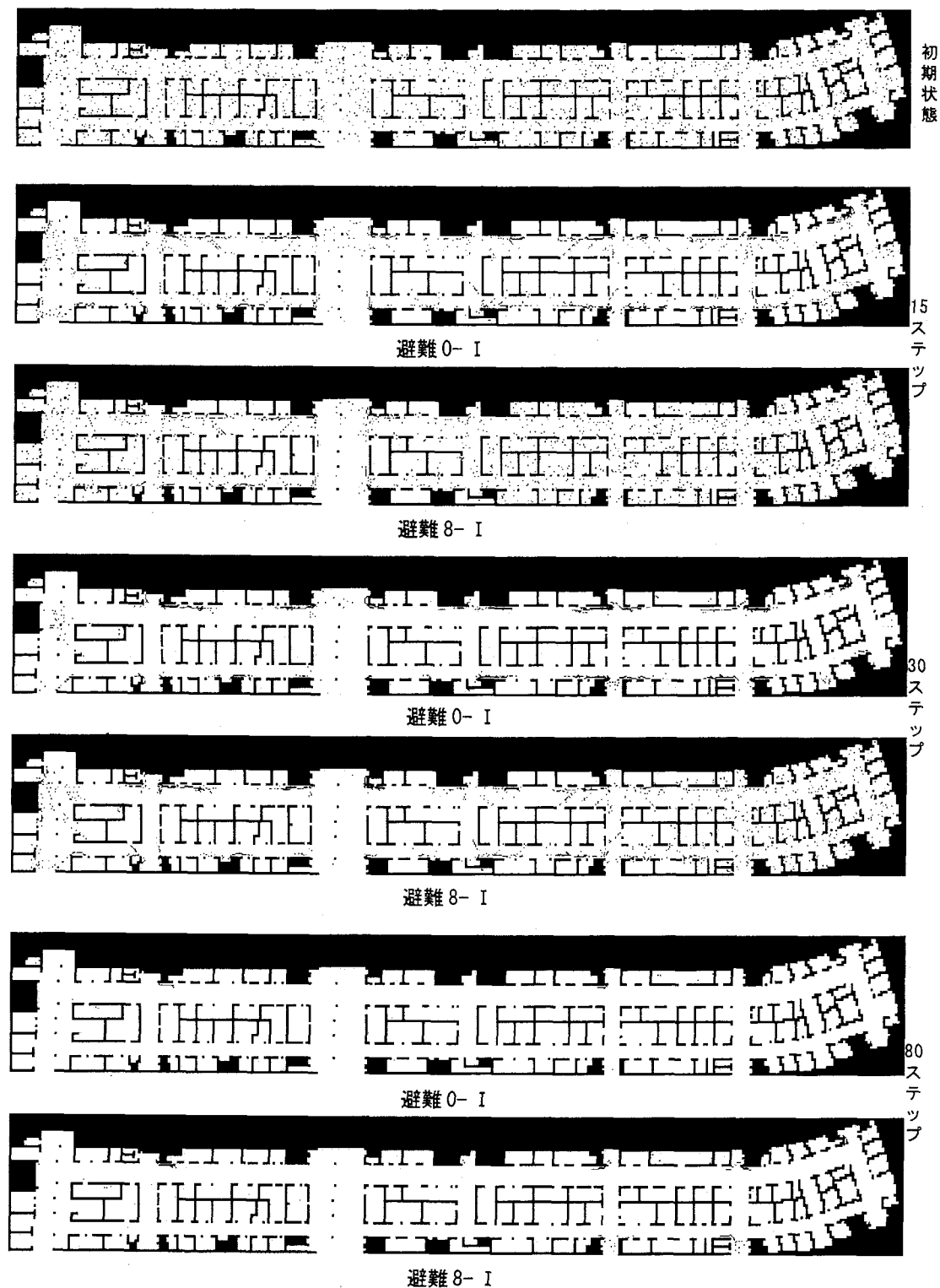


図-11 同時に避難（避難0-I）と店舗番号8の火災に起因する避難（避難8-I）のシミュレーション結果

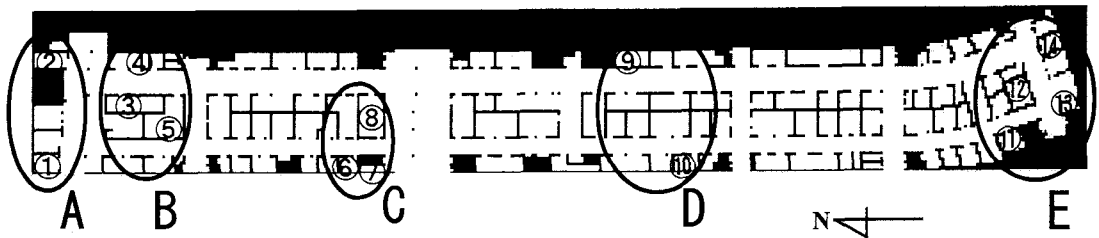


図-12 避難傾向別グループ分け

に分けることができた. 図-13 に人間の配置をケース I とした場合について, 全員が同時に避難を開始した場合と A ~E の5グループの避難傾向を横軸をステップ数, 縦軸を避難率としたグラフで示す.

このグラフより天神地下街に点在する飲食店14店舗から出火した場合の人間が危険認知により避難を開始する群集の避難行動は, 同時に避難を開始するものに比べて, 初期状態から30ステップ程度までは避難傾向が鈍化しているが, その後は同様の避難傾向を示していることが確認できる. また, グループA, Eのような出火している飲食店が天神地下街の南北端にある場合, その他の飲食

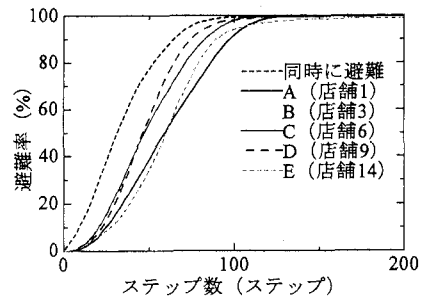


図-13 避難傾向別避難率の変化

店からの出火の場合に比べて避難が遅れている. これらは, 同時に避難する場合, 天神地下街の出口付近にいる人間が避難の初期段階で速やかに避難を終えるのに対して, 店舗で火災が発生した場合, 避難の初期段階では出火している店舗付近にいる少数の人間以外は危険を認知していないため初期の避難傾向が鈍化することと, 出火している店舗が地下街の端にある場合は人間が危険を認知するまでの時間が長くなるためと考えられる. 次に, 地下街の両端の店舗が出火するグループAとEの避難傾向を比較すると, 60ステップまでは, Eの避難傾向がAに比べて鈍化しているが, その後は, Aの方がEに比べて避難傾向が鈍化している. これは, グループA周辺の空間は, 通路が広く出口も広いことから, A周辺の人間の避難が容易な空間であるのに対して, グループE周辺の空間は, 通路が狭くほとんどの出口が狭いことから, E周辺の人間の避難が困難な空間となっている. そのため, グループAの飲食店からの火災に起因する避難は, 初期段階では, 避難が容易な人間が, 後半では避難が困難であるE付近の人間が避難をとる. 一方, グループEの飲食店からの火災に起因する避難は, 初期段階では避難が困難なE付近の人間が避難をとる, 後半では避難が容易なA付近の人間が避難をとることとなる. その結果, 図-13に示す避難傾向をとると考えられる. また, その他のグループについても出火している店舗の周辺に広い空間があり, 大きい出口があるB, Cは, 初期に避難が進み, 後半は避難が鈍る傾向を示す. 一方, A, B, Cに比べて近くに広い空間, 大きい出口がないDは, 初期の避難が鈍り, 後半避難が進む傾向を示している. このように, 「避難開始時間の影響」を考慮することで, 通路などの避難に関わる平面配置が異なる飲食店から出火した場合に人間が危険認知に基づき避難を開始する際の群集の避難行動の差異を示す事ができた.

4. まとめ

大規模閉鎖空間における群集の災害時の安全な避難を実現する目的で, 群集の避難行動シミュレーションシステムの高度化を図った. 本研究より得られた知見をまとめて以下に示す.

1) 「避難開始時間の影響」を状態量として考慮することで、火災等に起因する避難時に現れる避難行動開始のばらつきを考慮可能であることを確認した。

2) 「避難誘導者の影響」を状態量としてを考慮することで、人間が避難誘導者に従う避難行動を考慮可能であることを確認した。

今後は、本システムを用いて現実により近い避難行動を表現するために必要なこととして、避難行動時に陥りやすい人間のパニック状態を考慮した心理的要因や人間の判別可能な視界範囲を表す物理的要因を状態量で総括的に取り込むこと、避難の原因である火災の時間的变化・それに伴う人間の避難行動の変化を表現すること等が考えられる。さらに、防災対策の一助とするためには、シミュレーション結果の可視化が重要な課題であり、今後、GIS等を用いた時系列的現象の再現、その際のシステム開発も急務である。

群集の避難行動に関する研究はこれまでハード・ソフトの両面から様々な取り組みが行われている。本研究はその中でソフト面からの群集のより安全な避難のあり方に対する貢献を目指したものである。従来型の研究的アプローチにおいてはこのようなシミュレーション手法は、実験的検証に基づき実用化されることになる。しかし、こと避難シミュレーションに関しては実験的に検証することは不可能である。なぜなら検証に足りうる実験データを取得するためには被験者に実験であることを告知せず実験を行う必要があるからである。未告知で実験を実施すれば当然負傷者の発生が予想され、現実的な判断として実験は実施不可能となる。唯一実施可能な実験は、迷路等を利用した間接的なもののみであるが、それらの結果のシミュレーションにより適用性を判断するのは困難である。このような現状に立ち、本研究は実験的な検証に重点を置かず、シミュレーションにより得られた結果に非現実的な事象が包含されることを許容して評価を行うことにより、防災担当者では予測不可能な複雑で危険な事象をパラメトリックに検討することにより、事前に最悪の事象の発生を抑制することを目的とするものである。このような活用法はこれまであまり試みられて来なかったものであると考えられるが、現象が複雑で予測が困難であり、実験的検証が不可能な群集の避難行動等に対しては、このような新たなアプローチの積極的活用は意義あるものと考えられる。

5. 参考文献

- 1) 日経新聞夕刊：地下鉄放火5人死亡：pp.1, 2003.2.18
- 2) 清野純史・三浦房紀・瀧本浩一：被災時の群集避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について、土木学会論文集No.537, I-35, pp233～244, 1996.4.
- 3) 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避難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.
- 4) 清野純史・土岐憲三・犬飼信広・竹内 徹：避難行動シミュレーションに基づく地下街の安全性評価、土木学会論文集No.689, I-57, pp31～43, 2001.10.
- 5) 清野純史・土岐憲三・竹内 徹：避難シミュレーションによる地下街の安全性評価について、第55回年次学術講演会, CS-109, pp.218～219, 2000.
- 6) 瀧本浩一・三浦房紀・清野純史：防災要員と避難者の間の情報の伝達を考慮に入れた避難行動シミュ

- レーション, 土木学会論文集 No. 537, I-35, pp257～266, 1996. 4.
- 7) 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, 2000.
 - 8) 内田広明・松田泰治・大塚久哲・樗木 武: セルオートマトン法を用いた天神地下街の避難行動シミュレーションに関する研究, 土木学会第56回学術講演会, CS4-001, pp. 200～201, 2001.
 - 9) 松田泰治・大塚久哲・大野 勝・磯辺淳志: 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研究, 土木学会第57回学術講演会, CS1-021, 2002.
 - 10) 松田泰治・大塚 久哲・樗木 武・大野 勝: 天神地下街における人間の個体差及び相互作用を考慮した群集の避難行動シミュレーションに関する研究, 地下空間シンポジウム論文・報告集第8巻, pp. 19～28, 2003.
 - 11) 土木学会構造工学委員会, 計算機高度利用研究小委員会: 土木工学におけるコンピュータの高度利用技術, 1998.
 - 12) R. J. ゲイロード他: MATHEMATICA 複雑系のシミュレーション, シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社, 1998.
 - 13) 加藤恭義他: セルオートマトン法-複雑系の自己組織化と超並列処理-, 森北出版, 1998.
 - 14) 加藤孝義: 空間のエコロジー 空間の認知とイメージ, (株) 新曜社, 1986.
 - 15) 釘原直樹: パニック実験-危機事態の社会心理学, (株) ナカニシヤ出版, 1995.