

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

A study on simulation of evacuation behavior considering human individual specificity and interaction
at Tenjin underground shopping street

松田泰治*・大塚久哲**・榎木武***・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 street by simulation of human behaviors during evacuation in a disaster. This study used Cellular automata(CA) as the technique analyzing evacuation behaviors. CA is interacting with neighbor cells in local. Evacuation behaviors is reproduced by comprehensively taking in various factors on evacuation behaviors using CA. Some improvements of the system was conducted to have considered the human movement speed, the human occupation, the influence of the human direction. And, this study simulates evacuation behaviors at Tenjin underground shopping.

key word : evacuation, Cellular automata, Tenjin underground shopping, human individual specificity and interaction

1. はじめに

現在、過密化が進む都市部においては、地下空間は天候に左右されず自動車等と隔離された安全で快適な空間として発達している。一方、地下空間では、死亡者が出た1999年6月の福岡豪雨での地下施設の浸水¹⁾、1995年の地下鉄サリン事件といった地下空間の閉鎖性が被害増大の一因となった災害・人災等が起こっている。これらは、地下空間を運用するうえで、独自の防災対策が必要不可欠であることを再認識する契機となった。また、地下空間等の閉鎖空間で災害が発生した場合、一般的に人間は混乱状態に陥りやすいと考えられる。したがって、地下空間の防災対策は、構造的補強等のハード面の対策のみならず、人間の災害時の行動を予測したソフト面の対策を講じる必要がある。

本研究で対象とした天神地下街は、南北に約360m、東西に約50m、地下3階からなり、昭和51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

キーワード：避難行動，セルオートマトン法，天神地下街，人間の個体差，相互作用

*	正会員	工博	九州大学大学院助教授	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	
****	学生会員		九州大学大学院工学府建設システム工学専攻	

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号線の駅の新たな建設等から更なる拡張が計画されている。それに伴い、地下街における群集の避難時の行動も大きく変化すると考えられる。そのため、地下街における防災システムは、地下街の変化に伴い、随時見直しを行う必要があると考えられる。図-1に天神地下街1階平面図を示す。

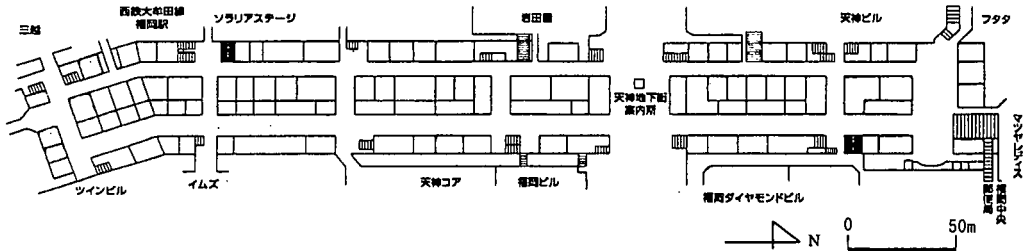


図-1 天神地下街地下1階平面図

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、ソフト面からの地下空間における防災対策の一助とすることを目的とし、天神地下街における群集の避難行動のシミュレーションを行った。

既往の研究^{2)~5)}では、個別要素法や微分方程式等で群集の避難行動の解析が行われている。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成り立っており、このような諸要因を微分方程式等で考慮する従来型の手法では対応しきれないと考えられる。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。これまでの検討^{6)~9)}では群集の避難行動の諸要因は、「出口までの距離」、「障害物」、「堂々巡り」、「環境」、「誘導灯」、「火災」の6つの要因を考慮してきた。本研究では、新たに人間の個別的要因である「人間の移動速度」、「人間の占有面積」、および人間の相互作用的要因である「他の人間の向きの影響」を加えた9つの要因を考慮して、群集の避難行動シミュレーションを行った。

2. セルオートマトン法^{10), 11)}

セルオートマトン法は、米国の数学者ノイマン(J. Neumann)によって考案された離散的な状態がある決まった規則に従い離散時間で変化する数理モデルである。今日では、物理・化学現象、材料・交通・電子回路特性、社会・経済現象などに幅広く適用されている。セルオートマトン法では、まず空間を一様に格子状に分割する。そして、それぞれの格子点に有限の状態量をもつセルを配置し、空間をモデル化する。各セルの次の状態量は、対象のセルに隣接するセルとそれ自身の状態量から決定される。

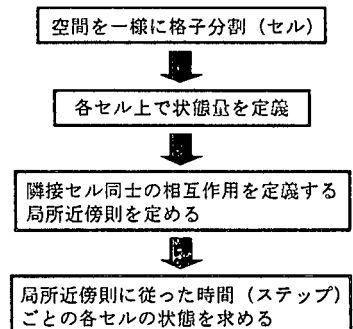


図-2 セルオートマトン法の解析手順

このような局所的な相互作用（局所近傍則）を積み重ね、空間全体の組織を形成していくことが、セルオートマトン法の計算手法である。セルオートマトン法による解析手順を図-2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である。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-3）。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。

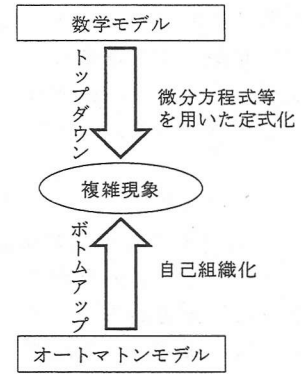


図-3 数学モデルとセルオートマトンモデル

3. 避難行動シミュレーション手法¹²⁾

セルオートマトン法に基づく本手法では、対象空間を格子状セルに分割する。セルは、人間一人の占有面積等を考慮して、一辺0.5mの正方形セルとし、その分類は、図-4に示すように、「障害物」「人間」「店舗」「店舗の出入り口」「通路」「出口」「炎」「誘導灯」の8つを定義し、それぞれ、「100」「50」「30」「35」「10」「0」「150」「110～140」（誘導灯の種類により異なる）の状態量を仮定した。これは状態量が大き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。次に人間の移動ルールは、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、避難時の人間の移動に影響する諸要因をそれぞれ状態量として計算し、その総和が最も小さいセルに移動することを基本としている。図-5は、状態量の総和の計算の一例を示したものである。状態量の総和とは、各種状態量に重みを考慮した係数をかけ、足し合わせたものである。人間は、その総和が最も小さいセルに移動を行う。この状態量を用いて表現した人間の避難行動の諸要因としては、「出口までの距離」、「障害物」、「堂々巡り」、「環境」、「誘導灯」、「火災」、「他の人間の向きの影響」である。「人間の移動速度」、「人間の占有面積」については、状態量では表現できないことから、個別に考慮した。ここで、通路にいる人間は出口に向かって避難を行うのに対して、店舗内にいる

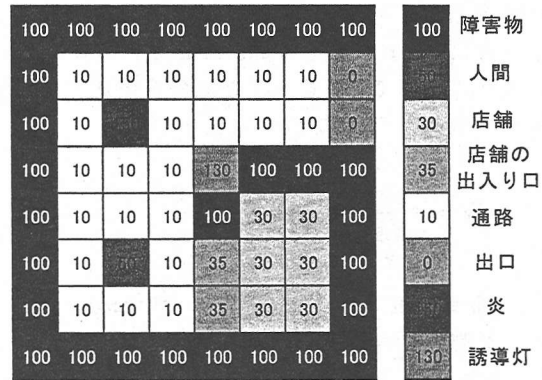


図-4 セルの分類と状態量

$$\alpha \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 7.4 & 8.9 & 10.5 \\ \hline 8.3 & \text{人} & 11.1 \\ \hline 9.4 & 10.6 & 11.9 \\ \hline \end{array} + \beta \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0.0 & 2.0 & 2.0 \\ \hline 0.0 & \text{人} & 0.0 \\ \hline 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ \hline \end{array} + \dots + \xi \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 2.1 & 1.6 & 1.0 \\ \hline 1.6 & \text{人} & 1.1 \\ \hline 1.2 & 1.1 & 1.0 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 3.9 & 8.2 & 9.0 \\ \hline 4.3 & \text{人} & 5.7 \\ \hline 4.8 & 5.4 & 6.1 \\ \hline \end{array}$$

状態量A 状態量B 状態量N 状態量の総和

図-5 状態量の総和の計算

人間は店舗からの脱出が優先となるため、まず店舗の出入り口に向かって避難を行い、その後、出口に向かって避難を行うものとした⁹⁾。図-6に、本手法による人間の移動のフローチャートを示す。

3・1 状態量

(a) 出口までの距離の状態量

本手法では、避難する際の目標とする出口は、その人間にとって、障害が少なく近い出口を選定するものとした。選定方法は、まず、対象空間の全ての出口とその人間までの距離を計算し、1番目に近い出口と2番目に近い出口を選定する。次に、1番目に近い出口と2番目に近い出口との距離の差が2割以下の場合、それぞれの出口に対して、人間の通過領域の障害物の割合から移動の困難さを表す壁率 W の計算を行う。その壁率 W が小さい出口をその人間が目標とする出口と決定する。式(1)に壁率 W を示す。ここで通過領域とは、図-7に示すように人間(状態量50)と対象とする出口(状態量0)を対角とする長方形領域である。

$$W = \frac{\text{通過領域にある障害物セルの数}}{\text{通過領域にあるセルの総数}} \quad (1)$$

一方、1番目に近い出口と2番目に近い出口との距離の差が2割より大きい場合は、人間が目標とする出口は、1番目に近い出口とする。「出口までの距離の状態量」は、その人間の目標とする出口と人間の周囲8セルからの距離を対象空間の縦・横の長さの長い値で除して無次元化したものである。これは、人間が避難時において、出口に向かって最短の方向を選択しながら移動することを表現したものである。そして、この状態量に正の係数 α を乗じて状態量の総和に加える。

(b) 障害物周りの状態量

一般的に、人間は災害発生後の避難の場合、壁等の障害物の多い空間からより広い空間に向かって移動すると考えられる。そこで、このようなことを表現するために、「障害物周りの状態量」は、障害物の周りに5、角(コーナー)には2の値を与え、その人間の周囲8セルが障害物周りの場合、正の係数 β を乗じて状態量の総和に加える。これにより、障害物に近いセルは、状態量が大きくなり、人間が近づきにくくなる。

(c) 堂々巡りを防ぐ状態量

一般的に、人間は一度通過した場所は記憶に残るため、必要がなければ再度通過しないと考えられる。そこで、その表現を行うため、「堂々巡りを防ぐ状態量」は、その人間が通過したセ

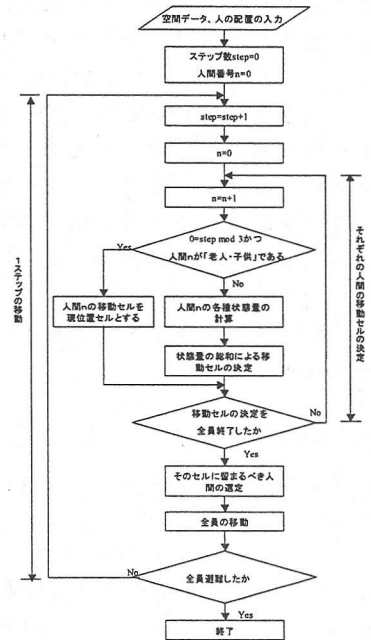


図-6 人間の移動フローチャート

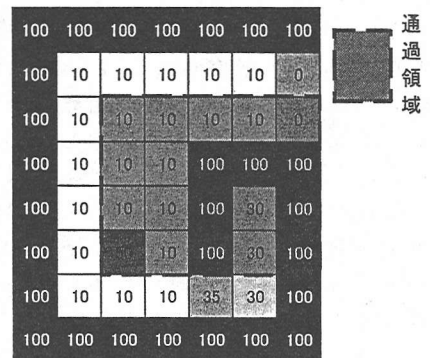


図-7 通過領域(出口の選定)

ルに通過する度に10を与え、その人間の周囲8セルが一度以上通過したセルであった場合、正の係数 γ を乗じて状態量の総和に加える。

(d) 環境を表す状態量

人間は、周囲の状況を見て、障害物の方向へは移動しないと考えられる。そこで、「環境を表す状態量」を考慮した。まず、その人間が2ステップで移動可能なセルに対して、セル自身を含む周囲9セルの状態量の総和を求め、それを2ステップ先のセルの環境の状態量とする。そして、人間から1ステップ先の対象セルに対して、2ステップ先のセルの環境の状態量と1ステップ先の自身を含む周囲9セルの状態量の総和を求める。この総和が「環境を表す状態量」である。状態量の総和には、正の係数 η を乗じて加える。

(e) 誘導灯の状態量

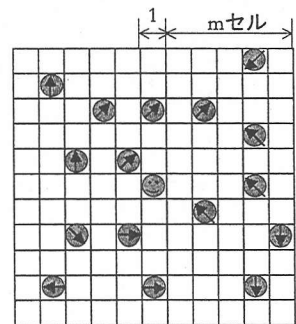
一般的に災害時に人間は心理状態が不安定となり、通常時には容易であった袋小路等からの脱出が困難になると考えられる。そのため、出口への道のりを示す役割と出口の場所を示す役割を持つ避難誘導灯が地下街には多数設置されている。この避難誘導灯を表現するため、「誘導灯の状態量」では、対象となる人間と直線距離が人間の目視距離を仮定した20m(40セル)以内にある最も近い誘導灯を選出し、その誘導灯が指す方向(誘導灯が右を指している場合は、右上・右・右下)に20を与える。そして、その状態量に負の係数 ϕ を乗じて状態量の総和に加える。こうすることで、誘導灯の指す方向の状態量の総和が小さくなり、人間が誘導灯が指す方向に進みやすくなる。

(f) 出火点の状態量

ここでは、災害の一つである火災に対して人間の避難行動への影響の表現を行った。一般的に、人間は火が存在するとそこを避けるようにして避難行動をとると考えられる。そこで、「出火点の状態量」は、その人間に最も近い出火している地点(出火点)を考慮して、人間の周囲8セルから出火点までの距離を対象空間の縦・横の長さの長い値で除して無次元化した値である。状態量の総和には、この値に負の係数 ϕ を乗じたものを加える。負の係数を乗ずることで、「出火点の状態量」が大きい値、つまり、出火点から遠いセルの状態量の総和が小さくなり、人間が出火点を避けるように行動する。

(g) 他の人間の向きの状態量

一般的に避難時の人間の行動は、周囲の人間が動いている方向に影響を受けると考えられる。そこで、避難行動時は、自己で判断し目標とした出口に向かう傾向以外に、周囲の人間が移動する方向へ向かう傾向を示すと考えられる。この他の人間の向きの影響を考慮するため、「他の人間の向きの状態量」は、対象範囲内の他の人間の向きを調べ、その向きの人数を使用して、式(2)から算出される値に正の係数 ε を乗じて状態量の総和に加える。ここで、対象範囲とは、対象とする人間を中心とする一辺 $2m+1$ の正方形範囲である。 m は、人間の視界距離であり、40セル(20m)と仮定した。



● 対象とする人間

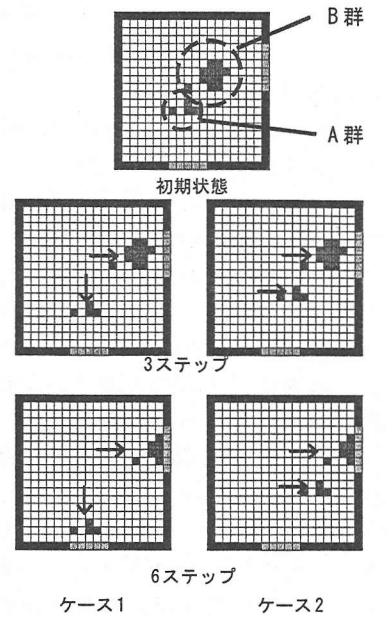
● 周りの人間(矢印は向きを示す)

図-8 対象範囲(他の人間の向きの影響の表現)

$$q_d = 1 - \frac{\text{対象範囲内のd方向へ向かう人間の総数}}{\text{対象範囲内の人間の総数}} \quad (2)$$

q_d は、 d 方向の「他の人間の向きの状態量」、 d は、人間の周囲8方向を示す。図-9は、「他の

人間の向きの影響」の表現についてシミュレーション結果を示したものである。左側のケース1は、これまでのシステムによる結果、右側のケース2は、本研究で改良したシステムを用いた結果である。ケース1は、これまでのシステムが出口に向かうことを基本とした避難行動であるため、それぞれの人間にとって最も近い出口に向かう単純な避難行動を行っている。一方、ケース2では、A群の人数が4人であるのに対してB群の人数が12人であるため、A群の人間は、B群の人間が向かう方向の影響を受け、B群の人間と同じ方向へ移動している。



(他の人間の向き非考慮) (他の人間の向き考慮)

図-9 他の人間の向きの影響の表現

3. 2 その他の表現

(a) 人間の移動速度の表現

一般的に人間の行動には、人間の歩行速度や視界範囲等、それぞれの人間が持っている能力の個体差が大きく影響する。ここでは、人間の個体差の一つである移動速度の表現を行った。避難時における人間の移動速度を「大人」、「老人・子供」の2種類に分け、それぞれの移動速度を「大人」を1.5m/s、「老人・子供」を1.0m/sと仮定した。また、対象空間を一边0.5mの正方形セルで表現していることから、人間の次のセルに移動する1ステップの移動の距離は0.5mであり、「大人」の1秒間の移動のステップ数は3ステップとなる。一方、「老人・子供」の移動速度は1.0m/sであることから、1秒間に2ステップしか移動しない。そこで、図-10に示すように「大人」が3ステップ移動を行う際、「老人・子供」は、2ステップの移動を行い、1ステップそのセルに留まるとすることで移動速度の表現を行った。

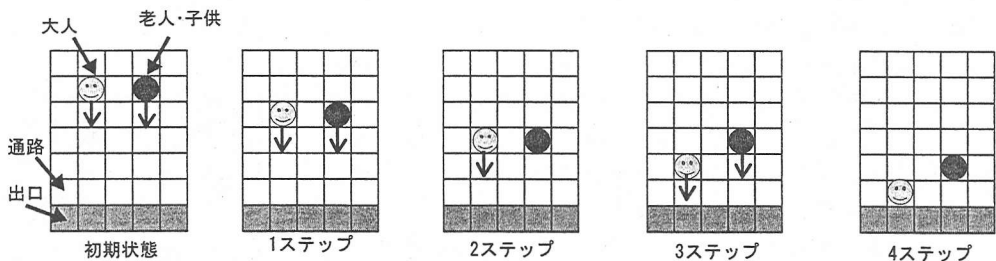


図-10 人間の移動速度の表現

(b) 人間の占有面積の表現

本研究では、対象空間を一边0.5mの正方形セルで表現していることから、1つのセルには、1人の人間が占有することでほぼ限度となる。しかし、従来の研究^{6)~8)}では、一边1mの正方形セルを使用していたため、1つのセルに複数の人間が入ることを許容していた。そこで、状態量の総和による移動セルの決定で1つのセルに複数の人間が移動しようとしてきた場合、以下に述べる優先順位からそのセルに移動することができる人間を選出し、それ以外の人間は、現ステップのセルに留まるものとした。その優先順位とは、第1位としてそのセルに元々留まっていた人

間、第2位として、そのセルに移動しようとするそれぞれの人間が用いた状態量の総和の比較を行い、その値が最も小さい人間、第3位に第1位、第2位の優先順位でも複数の人間がいる場合、それぞれの人間が現ステップにいるセルからその人間が目標とする出口までの距離を算出し、その値が最も小さい人間とした。図-11に、一辺20セルの正方形の対象空間において、出口付近での120人の人間の避難行動シミュレーションを行った結果を示す。左側のケース1は既往のシステム、右側のケース2は「人間の占有面積の表現」を加えたシステムによるシミュレーション結果である。ケース1は、1つのセルに複数の人間が留まることができるため、周りの人間の移動にほぼ無関係に移動を行い、多いところでは一辺0.5mの正方形セル1つに10人の人間が重複して留まる状態を引き起こしている。そのため、本来あるべき、出口付近での人間の滞留の現象が発生することなく、10ステップで避難が終了している。一方、ケース2では、「人間の占有面積の表現」を行っているため、1つのセルに1人の人間が留まる処理が行われ、出口付近での人間の滞留が起こり、避難が18ステップを要している。

4. 天神地下街全体モデルを用いた解析結果

本研究では、天神地下街の群集の避難行動シミュレーションにおける「人間の移動速度の表現」の影響の検討を行うため、天神地下街1階全体を対象空間とし、ランダムで配置した人間1500人に「大人」と「老人・子供」を表-1に示す4ケースのように与えた避難行動シミュレーションを行った。対象空間のモデル化は、726×112のセルに分割した。また、本シミュレーションの実行中に新たな人間の流入はないものと仮定した。出口は、地上に脱出できる出口と地下鉄駅に繋がる通路40ヶ所である。本シミュレーションにおける避難行動を災害・避難誘導システム等の人間以外の外的要因に拘わらず、それぞれの人間が目標とする出口に向かう行動とその人間の周りにいる人間が及ぼす影響を考慮に入れた避難行動とするために、図-12に示すように「出口までの距離」、「障害物周り」、「堂々巡りを防ぐ」、「環境を表す」、「他の人間の向きの影響」の状態量を用い、それらに用いる係数は、 α

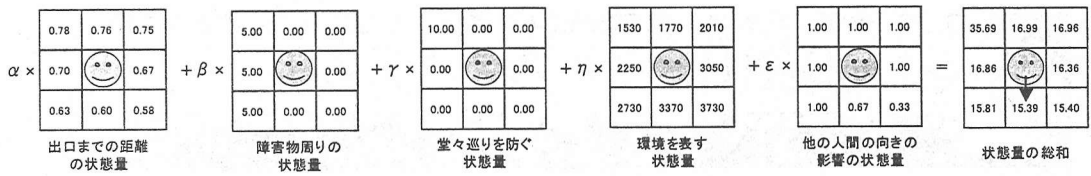


図-12 本シミュレーションにおける状態量の総和の計算

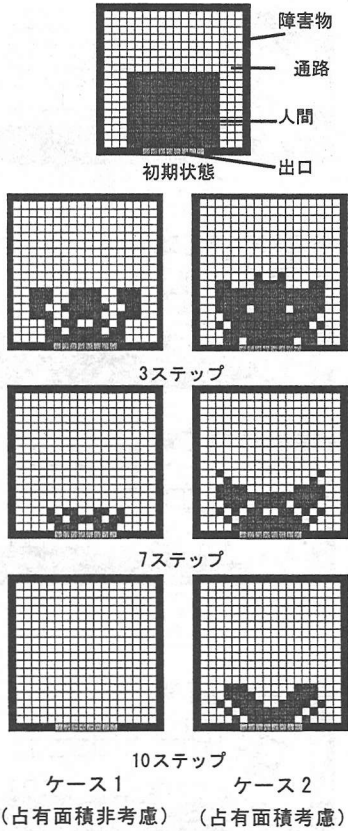
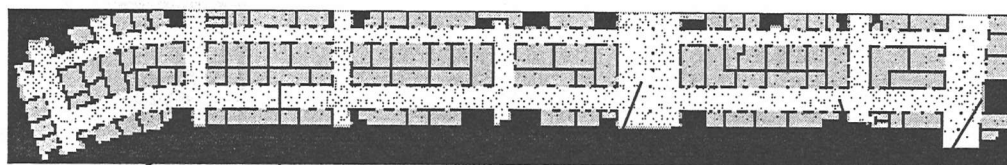


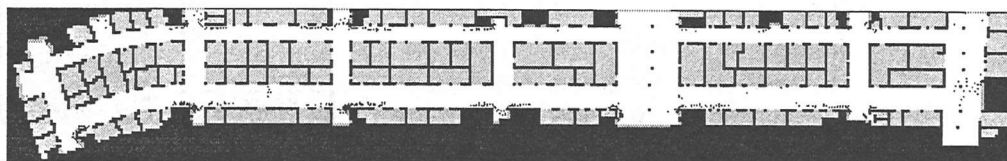
図-11 人間の占有面積による滞留の表現

表-1 検討ケース

	大人(人)	老人・子供(人)
ケース1	1500	0
ケース2	1300	200
ケース3	750	750
ケース4	0	1500

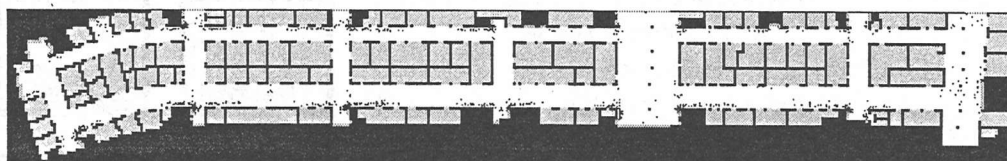


初期状態

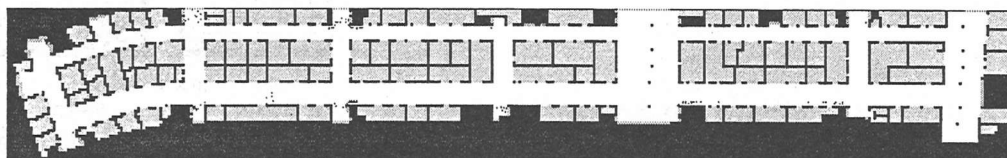


ケース 1

30
ステップ

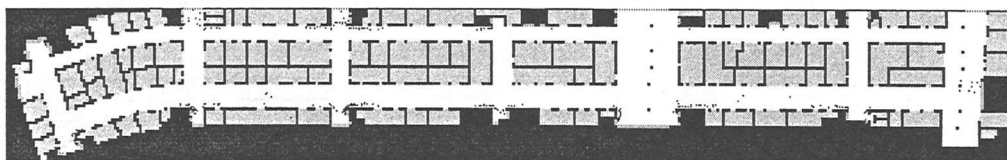


ケース 3

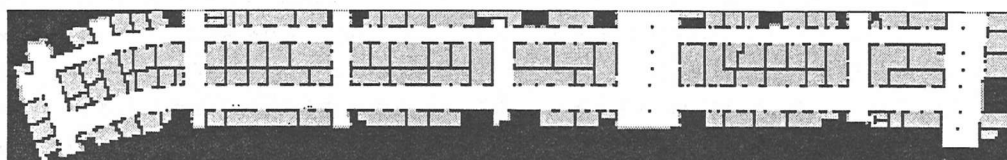


ケース 1

50
ステップ

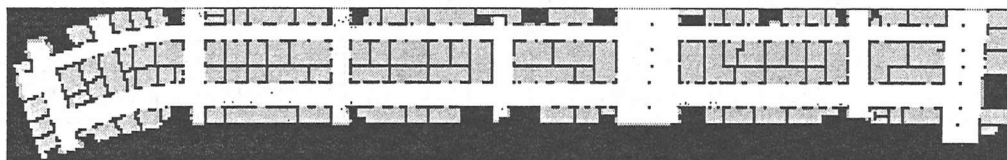


ケース 3



ケース 1

80
ステップ



ケース 3

図-13 ケース1 およびケース3 のシミュレーション結果

$=1200, \beta = 0.1, \gamma = 1.8, \eta = 0.001,$
 $\varepsilon = 0.001$ とした。図-13にケース1、
 ケース3のシミュレーションの結果を示す。
 また、図-14に今回のシミュレーション
 における各ステップで人間が出口に到達
 した累積人数を総人数1500人で割った
 避難率を、表-2にはそれぞれのケース
 におけるそのステップで避難した人数お
 よび避難率を示す。

これらの結果から、全ケースにおける
 人間の全体的避難行動の傾向として、
 図-13の30ステップの図が示すように、
 それぞれの人間にとって最も近い出口に
 近づく行動、通路での中央より出口に近
 い壁側に沿って移動する行動および限定

された出口への集中がみられる。また、出口付近では、多くの人間が一つの出口に向かう傾向から生じる滞留が発生している。これらの現象は、本シミュレーションの状態量の総和が目標とする出口へ最も近い方向へ移動を行わせる「出口までの距離の状態量」の働きを主として、それ以外の周囲の環境に合わせて行動させる各種状態量の働きを加えた相互作用の基づく複雑系としての行動になっていることと、「人間の占有面積の表現」によると考えられる。これから、本システを用いることで、それぞれの人間が目標とする出口に向かう行動と人間の周りにいる人間が及ぼす影響を考慮した避難行動として起こりうる一例を示すことが可能となった。次に、「大人」のみのケース1では、出口付近での「人間の占有面積の表現」による効果から滞留が生じるもののほとんどの人間はスムーズに避難を行い、80ステップでは避難をほぼ終えており、時間にして30秒程度を要している。最終的には242ステップで避難完了となった。避難完了が遅くれる原因としては、店舗内の人間が的確な店舗の出入り口の認識を行っていないため、店舗内で堂々巡りを起こしたことが挙げられる。このような現象は、全てのケースで発生している。一方、「老人・子供」しか存在しないケース4では、「老人・子供」の移動速度が「大人」の2/3であるため、ケース1に比べて、避難率も一様に低下し、避難完了は361ステップとなっている。「大人」が1300人、「老人・子供」が200人のケース2、「大人」と「老人・子供」の割合が同じケース3では、ケース1とケース4の間で避難率が変化している。また、「大人」の比率が高いケース1、ケース2、ケース3、ケース4の順で避難率が低下している。これにより、人間の個体差の避難時間に与える影響が表現可能となった。

5. まとめ

人間の移動速度・人間の占有・周りの人間の影響を考慮した群集の避難行動シミュレーションシステムを構築した。今回のシステムでは、従来の状態量に新たな状態量を追加することだけでなく、状態量では取り扱うことができない人間の個体差や占有空間をより厳密に考慮することで、現実に近い人間の避難行動の表現を可能とした。今後は、本システムによる人間の行動が、スムーズに最も近い出口に向かう行動をとる傾向が強いことなどから、避難行動時に

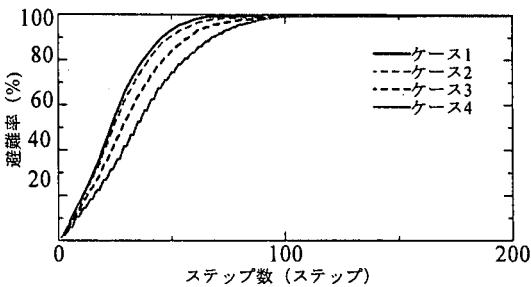


図-14 避難率

表-2 避難率および避難人数

	20ステップ		40ステップ		60ステップ		終了ステップ
	避難人数(人)	避難率(%)	避難人数(人)	避難率(%)	避難人数(人)	避難率(%)	
ケース1	624	41.60	1250	83.33	1492	99.47	241
ケース2	591	39.40	1204	80.27	1486	99.07	241
ケース3	501	33.40	1073	71.53	1468	97.87	241
ケース4	403	26.87	902	60.13	1436	95.73	361

陥りやすい人間のパニック状態を考慮した心理的要因を状態量で総括的に取り込むことや、人間の視界等の物理的要因を取り込むことが必要と考えられる。

また、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を用いた時系列的現象の再現、それを用いる際のシステム開発に取り組んでいきたい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、磯部淳氏（現山口県庁）の多大のご協力を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

6. 参考文献

- 1) 楠田哲也：1999. 6. 29 福岡豪雨，土木学会誌，vol. 84, pp42, 1999.
- 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) 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.
- 7) 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，土木学会西部支部研究発表会，第2分冊，pp. 328～329, 2001.
- 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) 大野 勝・松田泰治・大塚久哲・樗木 武・磯部淳志：天神地下街における群集の避難行動シミュレーションに関する研究 地域安全学会論文集，2002（投稿中）。
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.