

セルオートマトン法による確率的経路選択を考慮した 避難行動シミュレーション SIMULATION OF EVACUATION BEHAVIORS CONSIDERING STOCHASTIC ROUTE CHOICE BY CELLULAR AUTOMATE

藤見 俊夫¹・松田 泰治²・有岡 自然³
Toshio FUJIMI・Taiji MAZDA・Jinen ARIOKA

The purpose of this study is to support disaster prevention planning in underground mall by simulation of human behaviors during evacuation in a disaster. This study developed the simulation system of stochastic evacuation behavior with Cellular automate (CA) and logit model. In this study, applicability of the simulation system to the models of the underground mall in Fukuoka was confirmed.

Key Words : Cellular automate, Evacuation behaviors, Logit model, Underground mall

1. はじめに

地下空間の利用が多様化すると，それに伴いリスクも多様化・複雑化し，防災に関してもこれまで以上に慎重な対応が求められる．特に，地下空間は地上に比べて閉鎖性が高く，初めて通過する人々にとっては迷路のようにも感じられる．したがって，ひとたび災害が発生すると人間はパニック状態に陥りやすく，大惨事になりかねない．そのため，地下空間の防災対策には，構造的補強等のハード面からの対策のみならず，人間の災害時の行動を予測したソフト面からの対策が必要不可欠であると考えられる．

これまで筆者らが進めてきた研究^{1)~6)}では，セルオートマトン法を用いた避難行動シミュレーションシステムの構築を行い，それを用いて福岡市地下鉄駅群や熊本鶴屋百貨店の解析を行うことで，この方法が一般地下鉄駅・多層平面でも適用可能であることを示した．しかしながら，これらの研究では状態量が最小となるセルへ確定的に動くというルールをとっていたため，対象とする地下空間の形状によっては，壁や角などに妨げられて避難できない人が存在するという課題が残されていた．本研究では，既往のモデルを，不確実性下の意思決定理論の枠組みに基づき確率的に避難ルートを選択するモデルへと拡張することで，そうした不自然な結果を解消することをめざす．また，福岡市天神地下街を対象とした群衆の避難行動シミュレーション結果を，筆者らが使っていた既存のシステムと拡張した新システムとで比較検討することにより，その有効性の検証を試みる．

2. セルオートマトン法避難行動シミュレーション手法

人間の避難行動は様々な要因から成り立っている．本研究ではセルオートマトン法を用いて，避難行動に関わるいくつかの要因を総括的に取り込み，局所近傍則（局所的な相互作用）に基づく人間の避難行動の表現を行う．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⁷⁾．まず空間を一様に格子状に分割し，それぞれの格子点に有限の状態量を持つセルを配置して空間をモデル化する．各セルの次の状態量は，対

キーワード：セルオートマトン，避難行動，ロジットモデル，地下空間

¹ 正会員 熊本大学大学院助教 自然科学研究科

² 正会員 熊本大学大学院教授 自然科学研究科

³ 非会員 セブンイレブン・ジャパン

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。このような局所的な相互作用を積み重ね、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。以下では、セルオートマトン法に基づく対象空間のモデル化、人間の避難行動シミュレーション手法、人間の避難行動に影響する諸要因およびその表現方法について述べる。

100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	障害物
100	30	30	100	30	30	100	30	30	100	100	100	50 人間
100	30	30	100	30	30	100	30	30	100	100	100	30 店舗
100	35	35	100	35	35	100	35	35	100	100	100	35 店舗出口
100	10	10	10	150	10	10	10	10	10	100	100	10 通路
100	10	10	10	10	10	10	10	10	10	100	100	5 階段
100	10	50	10	10	10	10	10	50	100	100	100	0 出口
100	5	5	100	35	35	120	10	10	100	100	100	150 出火点
100	160	160	100	30	30	100	10	10	100	100	100	160 上の階からの入り口
100	100	100	100	100	100	100	0	0	100	100	100	120 誘導灯

図-1 セルの分類と状態量

3. 避難行動シミュレーション手法

(1) 対象空間のモデル化

セルオートマトン法では対象空間を格子状に分割する。セルは人間一人の占有面積等を考慮して、一辺 0.5m の正方形セルとする。セルの分類は、「障害物」、「人間」、「店舗」、「店舗出口」、「通路」、「階段」、「出口」、「出火点」、「上の階からの入り口」、「誘導灯」、「出口付近の誘導灯」の 11 個を定義し、それぞれ、「100」、「50」、「30」、「35」、「10」、「5」、「0」、「150」、「160」、「110, 120, 130, 140」、「210, 220, 230, 240」（誘導灯の種類により異なる）の状態量で表す（図-1）。これらの値は避難者の進みやすい場所の値が小さくなるように与えている。意思決定に結びつく段階でパラメータによって調整されるので絶対的な大きさには意味がない。

(2) 避難行動の諸要因

避難者は、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。その選択は、避難行動に影響する諸要因を状態量として考慮して決定される。そうした要因として、「出口までの距離」、「障害物周り」、「堂々巡りを防ぐ」、「周囲の環境を表す」、「位置高さを表す」、「速度制限」の 6 つを考える。

a) 出口までの距離の状態量

出口の選定方法は、まず、対象空間のすべ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番目に近い出口までの距離と2番目に近い出口までの距離の差が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障害率Wの計算を行う。障害率Wは下式で定義される。その障害率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。

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

一方、1番目に近い出口までの距離と2番目に近い出口までの距離の差が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。

さらに、2階以上の階の通路にいる人間は出口に向かう前に階段の入口に向かって避難するようにした。これは、迷路性の高い閉鎖空間においては、人間が直線的に出口を認識しているために、迂回するのに時間を要し、最悪の場合、出口に到達できない恐れがあるからで

					+5	
		+2	+2	+2	+5	
		+2		+2	+5	
		+5		+5	+5	

図-2 障害物周りの状態量

ある。

b) 障害物周りの状態量

一般的に、人間は災害発生時に避難する場合、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」として、図-2に示すように障害物の回りに+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、この表現を行うため「堂々巡りを防ぐ状態量」は、その人間が通過したセルに+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) 周囲の環境を表す状態量

人間は、周囲の状況を見て、障害物の多い方向へは移動しないと考えられる。そこで「周囲の環境を表す状態量」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、その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「周囲の環境を表す状態量」である。状態量の総和には、正の係数 δ を乗じて加える(図-3)。

e) 位置高さを表す状態量

地下空間内部の人間は階段部分において上下方向を認識し、上方向に向かって避難すると考えられる。そこで、「位置高さを表す状態量」を考慮した。その方法は、まず対象空間における通路・階段・店舗内などの人間が移動可能なセル全てに各階の基準高さからの相対高さを認識させる。階段部分において上り方向に1セル進むごとにセルに+1を与え、下り方向に1セル進むごとにセルに-1を与えるものとする。次に、人間のいるセル自身を含む周囲9セルの状態量の総和に、位置高さを表す状態量に負の係数 ϵ を乗じたものを加える。この結果、人間を含む周囲9セルが同じ高さであった場合はこの状態量の影響は現れないが、周囲9セルの中に位置高さが異なるセルがある場合には位置高さが高い方へと移動しやすくなる。

f) 速度制限

一般的には階段部分において移動速度は低下するものと考えられる。そこで、階段における移動速度の低下を表現するため「速度制限セル」を導入した。通常のセル上では人間は1セルの移動を1ステップで行う。速度制限セル上では移動速度が通常セルの半分となるように1セル移動するのに2ステップを要するものとする。そして、階段部分のように通路の幅が狭く人間の移動方向がほぼ一定となる場所に速度制限セルを用いることで移動速度の低下を表現した。

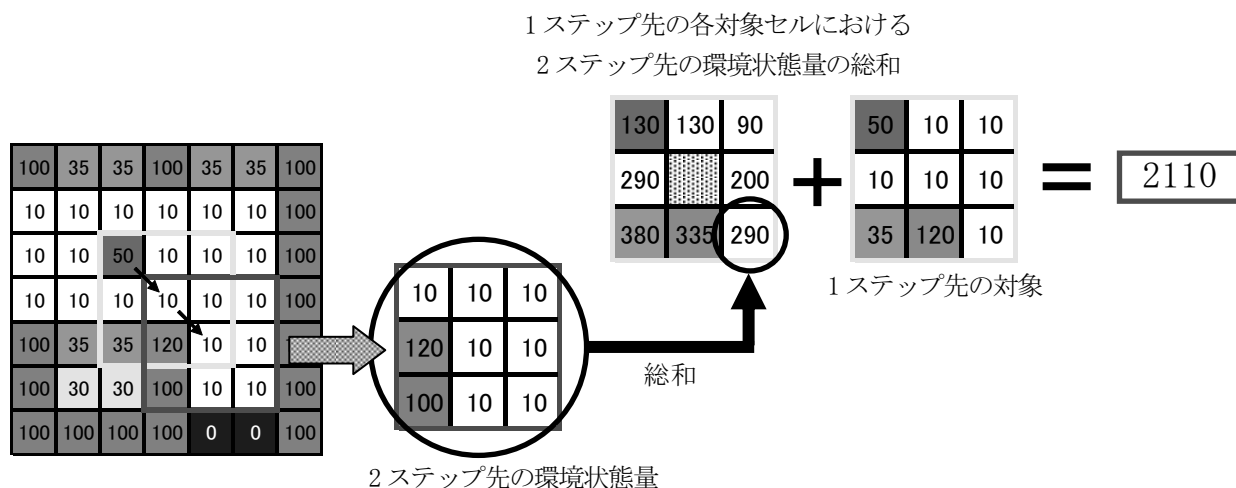


図-3 「周囲の環境を表す状態量」の計算手順

(3) 外的要因

火災や地震等の災害は、避難の要因となることに加えて、火災から発生する炎・煙、地震による構造物の倒壊からの瓦礫等によって避難中の人間に大きく影響を与える。また、避難を迅速に安全に行えるよう、地下鉄駅や地下街などの地下空間には避難誘導灯が多数設置されており、避難者にとってその影響は大きいものと考えられる。そこで、避難している人間へ影響を与える外的要因として避難誘導灯の効果を表現した「誘導灯の状態量」、火災の影響を表現した「出火点の状態量」を考慮している。

a) 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空間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の値を与える。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、人間が誘導灯の指す方向に進みやすくなる。

b) 出火点までの距離の状態量

本研究では、災害の一つである火災による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、「出火点までの距離の状態量」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、「出火点までの距離の状態量」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。

(4) 人間の空間占有ルール

人間は約40cm×60cmの幅を持つ。また、本研究では、対象空間を一辺0.5mの正方形セルで表現している。このことから、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。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する。ここで、1つのセルに1人の人間のみが占有する表現を行った。

- ・優先順位第1位 そのセルに元々留まっていた人間
- ・優先順位第2位 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
- ・優先順位第3位 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

(5) 状態量の係数の設定

本研究で用いた状態量の係数は、 α (出口までの距離)=800, β (障害物周り)=0.5, γ (堂々巡りを防ぐ)=14, δ (周囲の環境)=0.001, ϕ (出火点までの距離)=-770, θ (誘導灯までの距離)=730, ϕ (誘導灯の方向)=-0.5, ι (位置高さ)=-10 とした。これらの係数の値は、これまでの数年間の研究の中で行った数ケースのシミュレーション結果に基づき、避難行動として不自然な動きをしないことを前提に、工学的に判断したものである。すなわち、次のステップに移動するセルを決定する状態量の和 V_i' は次式で表されることになる。

$$V_i' = \alpha X_1 + \beta X_2 + \cdots + \iota X_8 \quad (2)$$

(6) 多項ロジットモデルの設定

これまでの研究では上記の状態量の総和が最も小さいセルに確定的に移動するとしていた。しかし、多くの人は勘違い等により確率的に行動することもあると考えたほうが自然である。そのため、状態量の低

いセルに移動するほど得られる効用が高いと解釈し、効用が高いセルを中心に確率的にルートを選択するというモデルを構築する。このとき、確率的な意思決定を多項ロジットモデルに基づいて表現する。

多項ロジットモデルはランダム効用理論に基づく。それは、効用を確定的な項と確率的な項から構成され、その確率項に特定の分布(ガンベル分布)を仮定することで導出される⁸⁾。個人 n が選択可能な選択肢集合を A_n とし、その中に含まれている選択肢 j を選択することによって得られる効用を U_{jn} とすると、個人 n が A_n の中から選択肢 i を選ぶ条件は式(3)で表される。

$$U_{in} > U_{jn}, i \neq j, j \in A_n \quad (3)$$

U_{in} を確率変数とし、これを確率的に変動する部分(確率項) ε_{in} と、変動しない部分(確定項) V_{in} に分け、その線形性を仮定して式(4)のように表す。

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} \quad (4)$$

このとき、効用最大化理論によると、個人 n が選択肢 i を選択する確率 P_{in} は式(5)のようになる。

$$P_{in} = \text{Prob}(V_{in} + \varepsilon_{in} > V_{jn} + \varepsilon_{jn}; i \neq j, j \in A_n) \quad (5)$$

ここで、確率項 ε にガンベル分布を仮定すると、多項ロジットモデル(式(6))が導出される。

$$P_{in} = e^{V_{in}} / \sum_{j=1}^{J_n} e^{V_{jn}} \quad (6)$$

つまり、図-4に示すように、上式で算出される確率の大きさに従って確率的に次のセルが選択される。

本研究の枠組みでは、次のステップで移動可能なセルが選択肢である。状態量の和 V_i' が小さいセルほど、避難者にとってより良い移動先、つまり、より高い効用が得られるセルであると解釈できる。この関係を表現するため、セル i に移動することで得られる効用の確定項 V_i はその状態量の和 V_i' の逆数に比例するとモデル化した。それを下式に示す。

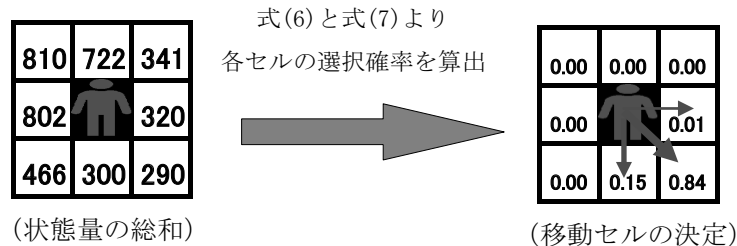
$$V_i = \lambda / V_i' = \lambda / (\alpha X_1 + \beta X_2 + \dots + \iota X_8) \quad (7)$$

ここで λ は比例係数である。この λ の値は、人間の目視距離である20mという距離に着目し、対象空間において出口から20mの距離にいる人間が確実に出口に向かうことを条件として設定した。

以下、ここでは、状態量の総和による確定的な移動セルの選択方法を「既存システム」、ロジットモデルによる確率的な移動セルの選択方法を「新システム」と呼ぶ。

$$\alpha \times \begin{bmatrix} 3 & 4 & 4 \\ 4 & \text{人} & 7 \\ 6 & 8 & 8 \end{bmatrix} + \beta \times \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 \\ 0 & \text{人} & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \dots + \xi \times \begin{bmatrix} 9 & 8 & 6 \\ 9 & \text{人} & 7 \\ 10 & 9 & 9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 810 & 722 & 341 \\ 802 & \text{人} & 320 \\ 466 & 300 & 290 \end{bmatrix}$$

(a) 状態量の総和の計算手法(既存のシステム)



(b) ロジットモデルによる移動セルの選択手法(新システム)

図-4 移動セルの決定

4. 検証用簡易モデルにおける避難行動シミュレーション

以下では、検証用簡易モデルを用いて、既存のシステムと新システムの比較検討を行う。

周囲と自身が位置するセルを含む 9 セルのうち、状態量の総和が最も小さなセルに移動するとした既存のシステムと、ロジットモデルより割り当てられた確率に応じて移動する新システムの特性の差異を確認するために、2 つの検証用簡易モデルを作成し、そのモデルにおける避難行動シミュレーションを行う。それらのモデルを図-5 に示す。Case1 は出口が目視できる位置にいる人間がどのような経路を通して出口へ向かうかを確認するためのモデルである。Case2 は滞留現象と、対象空間内にいる人間がどの出口を選択するかを確認するためのモデルである。

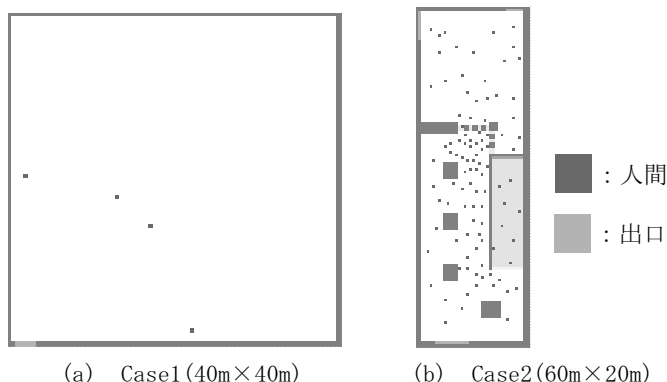


図-5 検証用簡易モデル

(1) Case1 におけるシミュレーション結果

作成した簡易モデルにおいて、既存のシステムと新システムによる避難行動シミュレーションをそれぞれ行い、両システムの特性の差異を検証した。以下に、各ケースにおけるシミュレーション結果とそれによって得られた知見についてそれぞれ記述する。

出口が目視できる位置にいる人間がどのような経路を通して出口へ向かうかを確認するために、Case1 における 4 人の人間のうち、1 人に着目し出口までの動きを追跡した(図-6)。既存のシステムでは避難が完了するまでに 38 ステップ(12.7 秒)、新システムでは 39 ステップ(13 秒)要している。両システムにおいて避難時間に大きな差は見られないが、人間が通過した経路に大きな差が出ていることが図より確認できる。

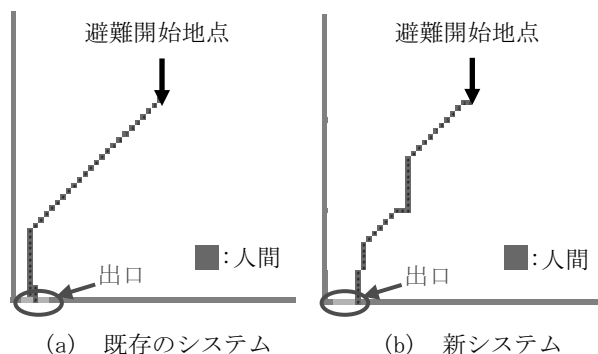


図-6 Case1 における人間の動き

(2) Case2 におけるシミュレーション結果

群集の滞留現象と、対象空間内にいる人間がどの出口を選択するかを確認するために、Case2 モデルにおいてシミュレーションを実施した。図-7 は Case2 モデルを既存のシステム、新システムでそれぞれ解析した際の避難率とステップ数の関係を表したものである。なお、ここで用いられている避難率とは、そのステップ数までに出口に到達して避難を完了した累積人数を対象空間に初期状態で存在する人間の総数で割って百分率で表示したものである。新システムの結果は 100 回のシミュレーション結果の平均である。また、各試行で得られた曲線はほぼ一致していた。

既存のシステムでは避難が 50%完了するまでに 39 ステップ(13 秒)、避難が 90%完了するまでに 70 ステップ(23.3 秒)要している。新システムでは避難が 50%完了するまでに 46 ステップ(15.3 秒)、避難が 90%完了するまでに 90 ステップ(30 秒)要している。新システムでは既存のシステムに比べ、避難にやや多くの時間を要している。理由として、既存のシステムでは人間は出口に向かって直線的に動いているが、新システムでは人間は必ずしも直線的に出口を目指さないため、出口から遠い位置にいる人間が出口に向かう場合、既存のシステムと新システムでは移動

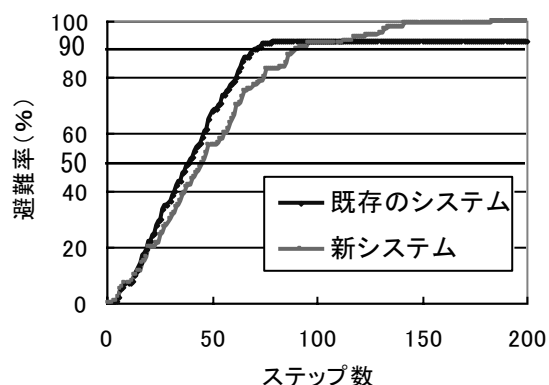


図-7 Case2 における避難率

距離に大きな差が出ているためであると考えられる。この傾向は、モデルの大きさが大きくなるにつれて顕著になると考えられる。次に、150 ステップ(50 秒)後の避難率に着目すると、既存のシステムでは 93%，新システムでは 100%となっている。既存のシステムでは、人間が袋小路に来た場合、壁の向こう側の出口を目標とすべき出口として認識してしまい、人間がその場所から移動しなくなる現象がたびたび見受けられる。これは、既存のシステムでは人間は状態量に従って確定的に動くからである。新システムではこの点が改良され、避難が滞ることなく行われるようになった。

さらに、Case2 モデルを図-8 のように A から E の 5 つのエリアに分割する。既存のシステムと新システムによる Case2 の各ステップにおける避難状況をそれぞれ図-9 に示す。既存のシステムではエリア A の群集は左上の出口、エリア B, C, D の群集は右上の出口、エリア E の群集は下の出口に向かって避難している。それに対して、新システムではエリア C の群集は左上もしくは右上の出口、エリア D の群集は左上もしくは下の出口に向かって避難している。このように新システムでは、人間が混雑を避ける動きを表現することが可能となった。

既存のシステムに比べ、新システムではエリア C 付近における群集の滞留が緩和されているのが確認できる。また、エリア D を見ると、前述した既存のシステムにおける不具合が、新システムでは解消されていることもわかる。新システムでは、壁を回りこむなど、人間の避難行動としてより自然な動きを表現することが可能となった。

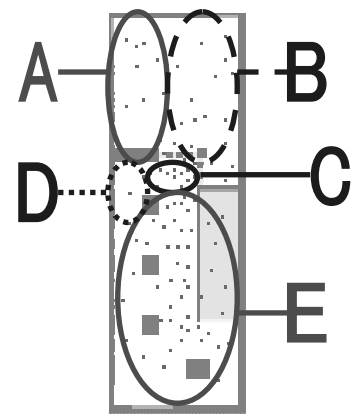


図-8 Case2 モデルのエリア分け

5. 天神地下街における避難行動シミュレーション

ここでは、既存のシステムと新システムとの比較を、天神地下街を対象とした避難行動シミュレーションにより行う。

(1) 天神地下街の概要

天神地下街は福岡市中央区天神にある地下街である。1976 年のオープン時から現在まで拡張工事が行われ、現在では、南北に約 600m、東西に約 50m、地下 3 階からなり、地下 1 階部分の延床面積は約 28,000 m²、テナント数 153 を持つ大規模な商業施設である(表-1)。現在は、西鉄福岡(天神)駅、西鉄天神バスセンター、地下鉄天神駅、地下鉄南天神駅および隣接ビル等と連絡し、多数の買い物客・通勤者で混雑している。

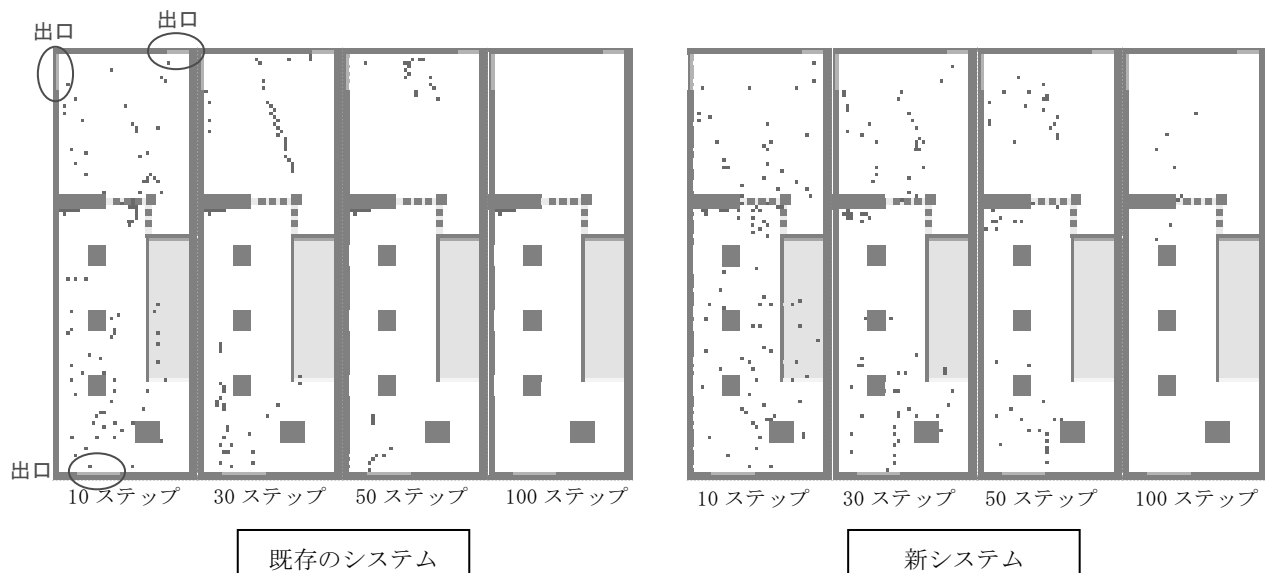


図-9 Case2 における避難状況

(2) 天神地下街のモデル化

本研究では新システムの有効性を検証することを目的として、2005 年の拡張以前の地下街を対象としてモデル化を行った。対象空間の大きさは南北に 363m、東西に 56mであり、1500 人の人間を配置した。これは、天神地下街の一日あたりの歩行者数(約 40 万人)に、対象区間と全体の長さの比(約 1/2)を乗じ、通行可能時間が 17 時間であること、ピーク時(休日の午前 11 時～午後 2 時ごろ)はそれ以外の時間の倍の人数となるとの仮定のもと、その 5 分間あたりの人数として算出した。配置した人間は健常な大人のみと仮定している。本研究で用いた検証モデルを図-10 に示す。また、シミュレーションの初期状態を図 12 に示す。

表-1 天神地下街概要

項目	スケール
B1F延床面積	約28,000㎡
階層	地下3階
テナント数	153
歩行者数(1日あたり)	約40万人

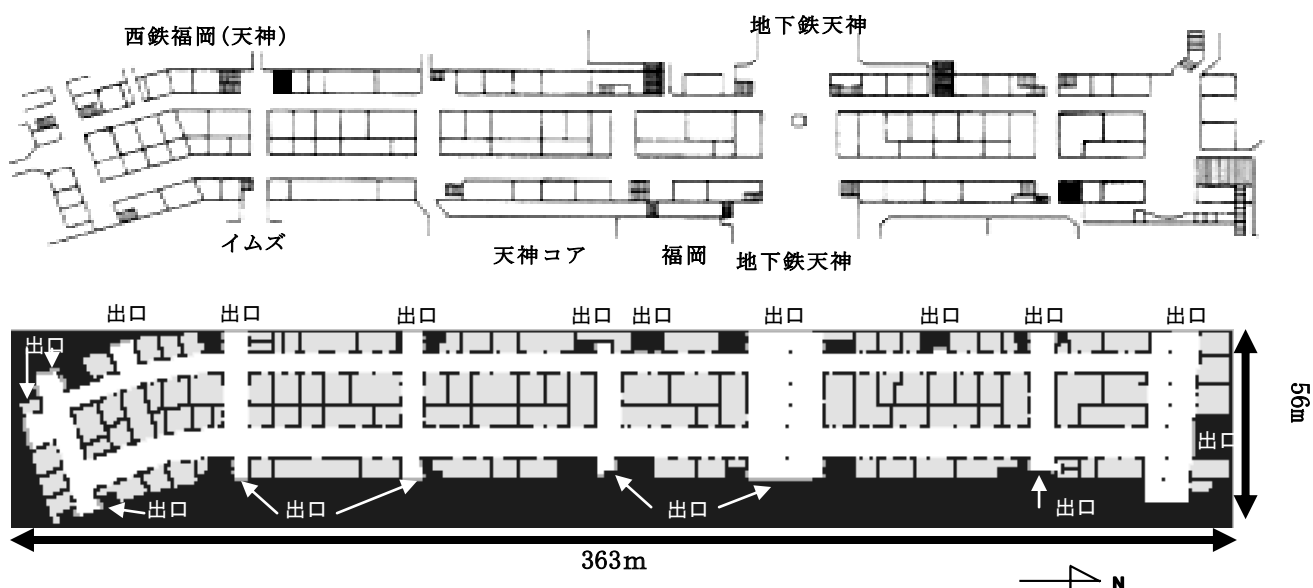


図-10 天神地下街地下 1 階平面図および検証モデル

(3) 火災の避難行動シミュレーション

火災による避難への影響を評価するために、同天神地下街モデルにおいて、モデル中央付近の店舗 1 ヶ所に出火点を設置し、避難行動シミュレーションを行った。既往の研究により人間の基本的な歩行速度が 1.0m/s～2.0m/s であることがわかっている⁹⁾。本研究では平均値である 1.5m/s と仮定した。今回の研究では、対象空間を一辺 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 ステップの移動距離は 0.5mであり、1 秒間で移動するステップ数は 3 ステップとなる。図-11 は天神地下街における避難行動を、既存のシステム、新システムでそれぞれ解析した際の避難率とステップ数の関係を表したものである。新システムの結果は 100 回のシミュレーション結果の平均である。また、各試行で得られた曲線はほぼ一致していた。出火点は図-12 に示している。

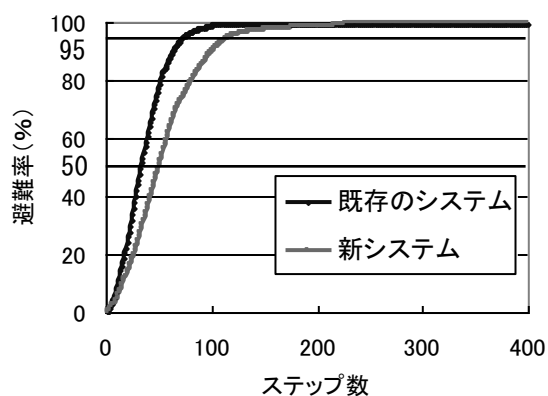


図-11 天神地下街における避難率

人間が避難行動を行わなくなった。これは、人間が袋小路にきた場合、壁の向こう側の出口を目標とすべき出口として認識してしまい、確定的に移動するため、人

間がその場所から移動しなくなる現象が生じたためである。新システムでは避難が 232 ステップ(77.3 秒)後に 100%完了しており、この問題点が解消されている。次に、既存システムと新システムの違いが最も顕著に現れた 50 ステップ(16.7 秒)後における群集の避難の状況を図-12 に示す。この時点での避難率は既存システムで 80%，新システムで 58%

である。既存のシステムでは、歩行者が壁伝いに列を成して避難をしている様子が見受けられるが、新システムでは、歩行者の避難経路選択に直線的でない動きが含まれ、避難行動としてより自然な動きを表現できていることがわかる。また、人間が混雑を避ける動きを表現することが可能となった。最後に、「新・建築防災計画指針」¹⁰⁾ で用いられている予測式により算出された避難時間（居室避難時間）と比較する。天神地下街のモデルを対象に算出した居室避難時間 T_1 と比べると、新システムではより多くの避難時間を要している(表-2)。これは、対象空間が巨大かつ複雑であり、出口付近で群集の滞留が起きているからであると考えられる(図-12)。「新・建築防災計画指針」における計算手法では、このような群集の滞留による影響を計算することができない。このことより、セルオートマトン法による避難行動シミュレーションに多項ロジットモデルを取り入れた新システムが有効であると考えられる。なお、シミュレーション結果から、新システムでは「新・建築防災計画指針」における居室許容避難時間は満たしており、天神地下街における 1500 人程度の群集避難に関しては、安全に避難を行うことが可能であることが確認された。

表-2 避難時間の計算結果

	避難時間
既存のシステム(99%避難完了)	101ステップ(33.7秒)
新システム(100%避難完了)	232ステップ(77.3秒)
居室避難時間(T_1)	140ステップ(46.5秒)
居室許容避難時間(tT_1)	669ステップ(223秒)

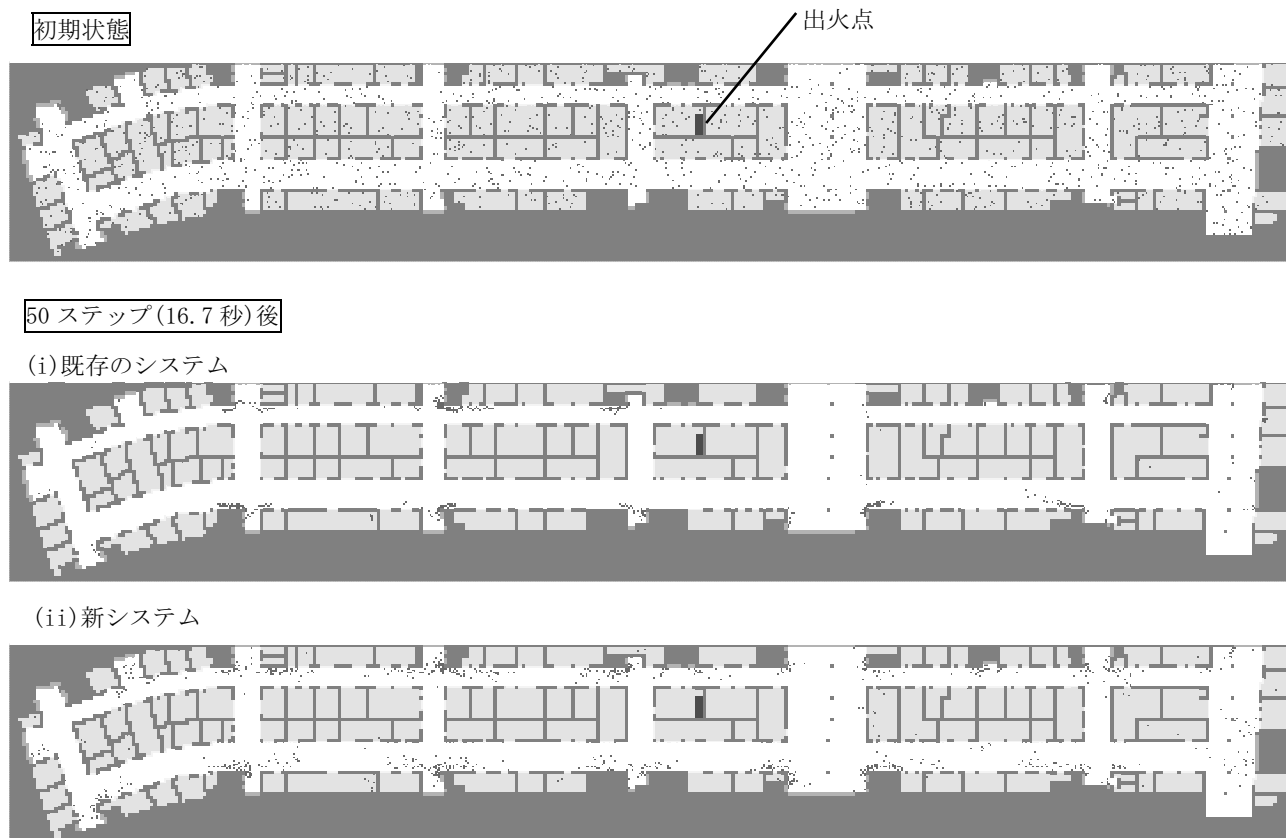


図-12 天神地下街における避難状況

6. 結論

本研究では、セルオートマトン法を用いた避難行動シミュレーションシステム(既存のシステム)に、新たにロジットモデルを採用した新システムの構築を行い、天神地下街を対象として避難行動シミュレーションを行うことで、新システムの有効性を検証し、防災対策の一助とすることを目的としたものである。以下に今回得られた知見について示す。

- ①既存の避難行動シミュレーションシステムでは避難経路選択を確定的に扱っていたが、そこに確率的な意思決定を扱えるロジットモデルを取り入れることで、混雑を避けたり、壁を回り込むなど、より人間の自然な避難行動に近づけることが可能となった。
- ②人間の避難行動に直線的でない動きを表現することが可能になったことにより、既存のシステムで問題となっていた不自然な滞留が解消された。

今後の課題としては、身体障害者・子供などの個人差を考慮することで災害時に不利な立場に置かれる避難者に立った避難支援策を検討すること、また、正常化バイアスやパニックなど心理的な要因を組み込むことなどで災害時の不合理な行動を抑制する政策を検討することなどが挙げられる。また、極めて難しいが、実際の避難行動データに基づく本研究の避難行動シミュレーションシステムの検証も取り組むべき課題である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 松田泰治・大塚久哲・山田昌平：セルオートマトン法による地下鉄箱崎駅を対象とした避難行動シミュレーションに関する一考察，土木学会西部支部研究発表会，第2分冊 pp.336-337，2004.
- 5) 松田泰治，後藤辰徳：地下鉄駅の類型化に基づく避難行動シミュレーション，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，2005.
- 6) 松田泰治，後藤辰徳，有岡自然：地下鉄駅の類型化に基づく避難行動シミュレーション，地下空間シンポジウム論文・報告集第12巻，pp.29-38，2007.
- 7) 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.
- 8) 社団法人土木学会：非集計行動モデルの理論と実際 - 非集計モデルに関する解説書 - ，1995.
- 9) 伊東永樹，中山晴幸：歩行者の歩行挙動とその分析，土木学会第47回学術講演会，IV-272，pp.588-589，1992.
- 10) 財団法人日本建築センター：新建築防災計画指針 - 建築物の防火，避難計画の解説書 - ，1995.