

閉じた空間における浸水時
避難行動シミュレーションに関する研究
STUDY ON SIMULATION FOR EVACUATION BEHAVIOR
OF INUNDATION IN CLOSED SPACE

坪郷浩一*・朝位孝二**・羽田野袈裟義***

Kouichi TUBOGOU, Koji ASAI and Kesayoshi HADANO

Underground facilities such as underground shopping center, subway station, and basement of building are utilized in urban cities. However, there is a possibility to make terrible disaster because these facilities are closed space. Recently, the disasters of inundation in underground space increase. It is important to make a simulation model of evacuation behavior of inundation in closed space.

In this paper, we propose a simulation model of the evacuation behavior of inundation for a crowd. The potential model is introduced to avoid inundation. The avoidance velocity between the evacuation persons is modeled to be inversely proportional to the distance between the evacuation persons. As a result from some model simulations, it is found that our model can simulate the evacuation behavior of inundation reasonably.

Key Words : *underground facility, inundation, evacuation behavior, potential model*

1. はじめに

地下街，地下駅，ビル・デパートの地下階など地下空間を利用した施設が数多く存在し，不特定多数の人々に利用されている．これらの施設は閉鎖的な空間であり，地震や火災，浸水害などが発生すれば，そこに居合わせた人々が混乱状態になり被害が大きくなる可能性が高い．したがって，被災者の避難行動を考慮に入れ，混乱を生じず迅速に避難できる経路を確保しておくことは防災計画上極めて重要な課題である．しかしながら，実際にどのように避難行動を行ったのかを調査することは困難である上，得られる情報にも限界がある．また地下空間を対象とした災害時の避難行動の再現実験は被験者の安全性や模擬施設の確保などの問題により実施が難しい．したがって，地下街など閉鎖的な空間における避難行動の予測および避難経路の選定を検討する上で計算機によるシミュレーションが重要な役割を果たす．

キーワード：地下空間，避難行動，浸水，ポテンシャルモデル

* 学生会員 修士（工学）山口大学大学院理工学研究科システム工学専攻

** 正会員 博士（工学）山口大学助教授 工学部社会建設工学科

*** 正会員 工学博士 山口大学教授 工学部社会建設工学科

避難シミュレーションは地震、大規模火災、洪水など都市全域など広い地域を対象とした広域型避難シミュレーションと建物内部など限定領域を対象とした局所型避難シミュレーションに分類される。局所型避難シミュレーションは構造系、土木計画系、建築系の研究者が活発に行っている。最近では個別要素法を用いたモデル^{1), 2)}や人工生命体の一つであるセルオートマトンに基づくモデル³⁾などが提案されている。いずれも火災や地震などの災害が念頭におかれている。水工水理学の分野では広域型避難シミュレーションに属する研究^{4), 5), 6)}あるいは避難行動に係わる意識や情報に関する研究^{7), 8)}が中心であり、局所型避難シミュレーションに関する研究は筆者らの知る限りでは行われていないようである。しかしながら、近年、閉鎖的な空間での浸水害が多発している。例えば1999年6月の福岡市における地下街・地下室への浸水では犠牲者が発生した。また2000年9月の東海豪雨では地下鉄の3駅が浸水し3路線が不通となった。このように地下利用の進展に伴い浸水による被害例が目立っている。したがって、地下街など閉鎖的な空間への浸水に対する避難行動シミュレーションモデルを確立しておくことは重要である。本研究は群集状態での閉鎖的な空間における浸水時の避難行動シミュレーションモデルの開発を目的とする。

2. 避難シミュレーションモデルの概要

2.1 場と人のモデル

本モデルでは場をセル分割し、人を半径 r の円でモデル化する。円の中心座標がその人の位置座標とする。個体要素としての人間を扱う場合、人体の厚さや肩幅などが重要な項目となるが、本研究では、20～25歳の成人男子12人の肩幅を測定した結果を用いた。肩幅の平均値は約0.45mとなり、この測定した値を用いて「人間」の半径 $r=0.225\text{m}$ と決定した。各セルは障害物（壁を含む）、通過可能な床、一度通過した床、出口のいずれかに対応する。これらに応じた状態量をセルに与えることで、その属性を表現する。本研究では、図-1のように「障害物セル」に100、「通過可能な床セル」および「出口セル」に0、「一度通過した床セル」に1の状態量を与えた。また、浸水し水が存在している床セルを浸水セルと呼ぶことにする。浸水セルは浸水状態を特徴づける状態量は特に与えない。

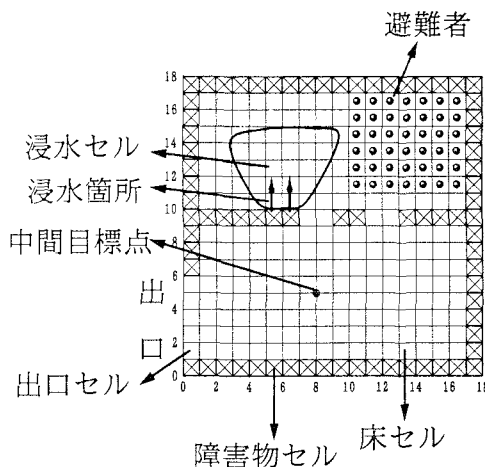


図-1 避難領域

避難者は、基本的には現在位置から最終目標点(出口)に向かう方向に直進する。現在位置の座標を (x_n, y_n) 、最終目標点の座標を (x_g, y_g) とすれば、移動方向の単位ベクトル $\vec{n}$ は次式で与えられる。

$$\vec{n} = \frac{(x_g - x_n, y_g - y_n)}{\sqrt{(x_g - x_n)^2 + (y_g - y_n)^2}} \quad (1)$$

避難者の歩行速度を v とすれば最終目標点に向かう直進成分は次式で表される。

$$\vec{V} = v \cdot \vec{n} \quad (2)$$

2.2 浸水セルの回避行動

浸水が発生した場合、人は危険を回避する行動をとる。この行動をシミュレートするために横山⁹⁾のポテンシャルモデルと類似の方法を導入した。このモデルでは、危険性の度合いに応じて場にポテンシャル値を与え、現在位置のポテンシャル値と周囲のポテンシャル値よりポテンシャル値の勾配を求めそれに応じた速度ベクトルを求めるものである。

浸水による災害の影響の度合いを表す浸水ポテンシャル Ω は時間と場所の関数である。ポテンシャルから導かれる速度ベクトルは次のように表される。

$$\vec{f}(X_n, t) = \sum_k \frac{(\Omega(X_n, t) - \Omega(P_k, t)) \cdot (P_k - X_n)}{|P_k - X_n|^2} \quad (3)$$

ここで、 $X_n = (x_n, y_n)$ は時刻 t における人の位置座標である。また P_k ($k=1 \sim 8$)は図-2に示すようにセルの中心座標である。本モデルでは、 Ω は水深に比例するものとして次式のように取り扱った。

$$\Omega = \alpha h \quad (4)$$

h は浸水セルにおける水深、 α は比例定数で速度の次元を持つ。

2.3 障害物セルの回避行動

移動途中で障害物セルがある場合はそれを回避させる必要がある。横山らは障害物にもポテンシャルモデルを与えて回避行動をさせているが、障害物ポテンシャルと災害ポテンシャルの対応は明確ではなく、適切なポテンシャル値の設定が難しい。そこで本研究では、以下の手順で障害物セルを回避させることにする。

- ・後述の式(9)を用いて数ステップ先の位置座標を計算する。
- ・位置座標が障害物セル内であれば、人のいるセルを中心として周囲8つのセルの中心座標 X_k と現在位置座標 X_n 間の距離 $xl(k)$ ($k=1 \sim 8$)を求める(図-3参照)。ただし周囲のセルが障害物セルの場合は、そのセルの中心との距離は非常に大きな値を与える。
- ・ $xl(k)$ の最小値を x_{min} とし、次式を計算する。

$$xm(k) = \left\lceil \frac{xl(k)}{x_{min}} \right\rceil + [\text{セル}k\text{の状態量}] \quad (5)$$

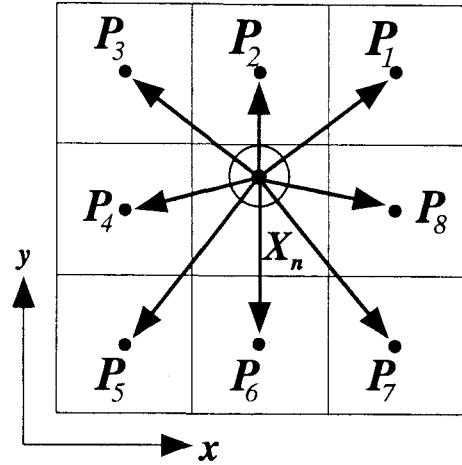


図-2 浸水セル中心位置と個体中心位置との関係

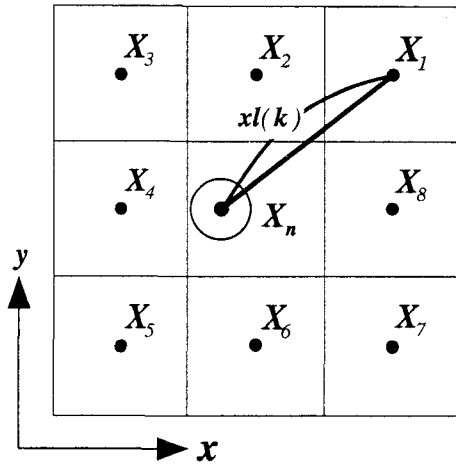


図-3 障害物セルの回避

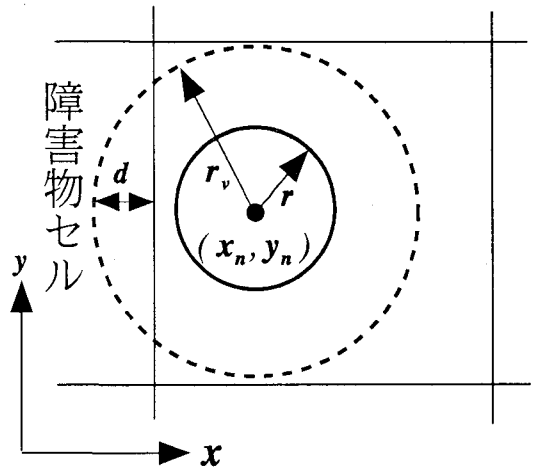


図-4 壁近傍の処理

- ・計算された $xm(k)$ の中から最小値を与えるセルの中心を新たな目標とする。
- ・目標とするセルの中心付近に到達後、再び出口を到達目標とする。

前述のように一度通過したセルには状態量を加えられ、堂々巡りが起こらないようにした。

2.4 体の一部が障害物セルに突入した場合の修正

人は半径 r の円でモデル化されているため、中心座標が床セルに位置していても、体の一部が障害物セルに突入してしまう場合がある。この場合は中心座標の修正を行う。

Hall¹⁰⁾ は、人間の間隔距離を公衆距離、社会距離、個体距離、密接距離の4つ、それぞれを遠方相と近接相の2つに、視覚、嗅覚、受熱感覚、聴覚、接触の可能性などを考え、個体距離の近接相(0.75~1.2m)から、密接距離までを人間が他の人間に物理的接触なしに接近できる最小距離とし、心理的距離と定義している。そこで、本研究においても、人の体の大きさを表す半径 r とは別に心理的領域を表す仮想半径 r_v を導入する。人は他者や障害物に対して最低でも半歩程度の間隔を保つものと仮定し、それを仮想半径とした。20~25歳の成人男子12人の半歩(ここでは、自然に直立している状態での足の開いている間隔を測定した)を測定し、その平均値約0.4mを採用した。図-4は仮想半径 r_v の円において、円の一部分が左側の障害物セルに突入している模式図である。障害物セルに突入している部分の最大突入深を d とする。図-4の例では d の分だけ中心座標を右側にずらすことで部分的な突入を修正する。他の面に突入した場合も同様の操作を行う。

2.5 群集状態における避難行動

群集状態では、障害物や災害領域の回避行動に加えて他の避難者との位置関係が重要となる。他者との衝突を回避する行動と周囲の動き合わせる行動をモデル化する。

a) 他の避難者との衝突の回避行動

群集状態における避難行動では、避難者は他者との衝突を回避しながら避難行動を行う。この行動のシミュレートを行うため避難者間の距離に反比例する排斥的速度(避難者間の衝突回避速度)を与えることにした。この衝突回避速度を以下の手順で求める。

1) 周辺の避難者との位置関係

図-5に示すように避難者 i の位置座標を $X_i=(x_i, y_i)$ 、他の避難者 m の位置座標を $X_m=(x_m, y_m)$ とする。このとき各避難者間の距離 l_{im} は以下になる。

$$l_{im} = \sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2} \quad (6)$$

式(6)によって避難者間の距離を算出する。

- 1)により算出された l_{im} を用いて避難者 i から任意半径 R 内に存在する避難者を把握する。
- 3) 任意半径内に存在する避難者を対象に避難者 i の衝突回避速度ベクトルは以下のように求める。 β は定数である。

$$\vec{g}(X_i, t) = \sum_m^i \left(-\frac{X_i - X_m}{l_{im}} \cdot \frac{\beta}{l_{im}} \right) (m \neq i) \quad (7)$$

b) 周囲の動きを考慮する

群集状態においては、周囲の避難者の行動に合わせて避難行動を行う場合がある。前項と同様に避難者 i

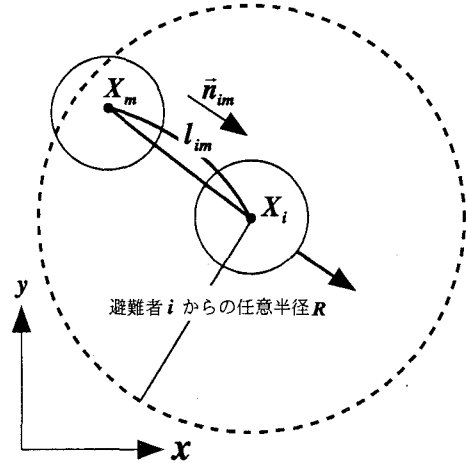


図-5 避難者間の間隔

の中心から任意半径 R 内にいる周囲の避難者を把握する。任意半径内に存在する避難者の避難速度の平均値を求める。式に表すと以下のようになる。

$$\bar{h}(X_i, t) = \frac{1}{j} \sum_m \bar{v}_m^{(t-1)} \quad (m \neq i) \quad (8)$$

式(8)中の $t-1$ は1ステップ前の時刻を表す。式(8)が周囲の行動に従う速度成分である。

2.6 避難シミュレーションの計算アルゴリズム

避難者 i の移動速度ベクトル $\bar{V}_i$ は最終的に以下のように表される。

$$\bar{V}_i = \alpha_{1i} \cdot v_i \cdot \bar{n}_i + \alpha_{2i} \cdot \bar{f}_i + \alpha_{3i} \cdot \bar{g}_i + \alpha_{4i} \cdot \bar{h}_i \quad (9)$$

右辺第1項は出口に向かって直進する成分、右辺第2項は危険に応じて方向を変える成分、第3項は群衆状態時に避難者同士の衝突を回避する成分、第4項は周囲の動きに呼応する成分である。 α_{1i} , α_{2i} , α_{3i} , α_{4i} は各項の重み係数である。この係数を個体ごとに調整すること

で個体差を表すことができるが、本論文のモデル計算では簡単のためすべて1とした。

避難シミュレーションのアルゴリズムは次のようになる。式(9)から避難者の移動速度ベクトルを算定する。この速度ベクトルを用いて数ステップ先の位置を求める。この位置が障害物セル内かどうかを判断する。障害物セルならばそのセルを回避するため2.3で示した方法で目標点を変更する。避難者を新たな目標点へ向かわせるために式(9)の $\bar{n}_i$ を変更する。次に1ステップ先の位置を求める。その位置において避難者の体の一部が障害物セルに侵入していないか判定する。侵入していれば位置を修正する。次に変更目標に到達したか判定する。到達していれば本来の目標に切り替える。最終目標に到達したか判断し、到達していなければ時間ステップを進める。図-6に計算アルゴリズムのフローを示す。

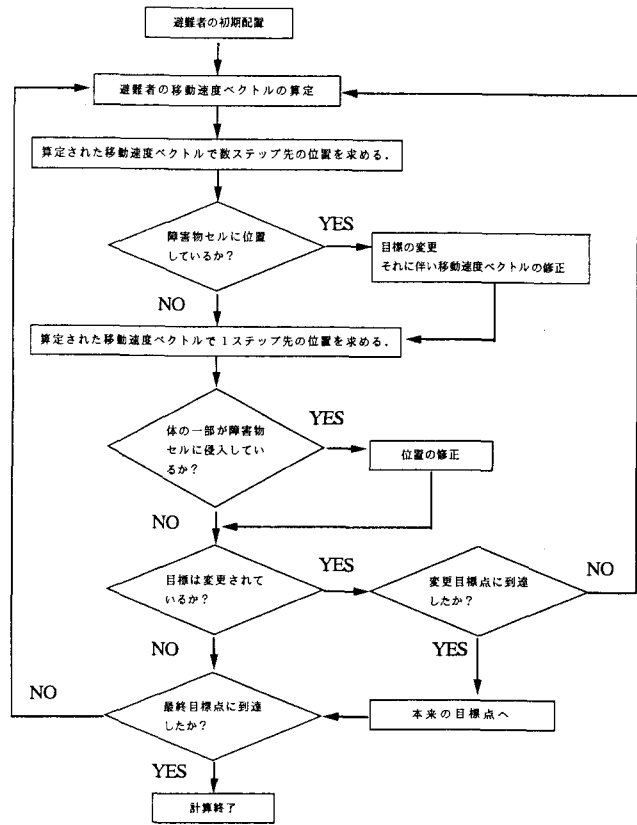


図-6 避難シミュレーションの計算アルゴリズム

3. モデル計算

3.1 部屋から通路への避難行動

清野らのモデル計算¹⁾にならい、部屋から通路への避難行動の問題に本モデルの適用を試みる。避難場は9m×8mの領域を考える。セルは1m×1mの正方形とし、避難場を72分割した。個体の半径(個体半径 r)は0.225m, 個体の歩行速度 v は1m/secとした。計算時間間隔は0.01secである。また、式(7)中のパラメータ β は $\beta=1.0\text{m}^2/\text{sec}$ とした。障害物セル察知のためのステップ数は3ステップとした。図-5の任意半径 R は $2r_v$ とした。さらに個体の移動速度に上限値を設け、2.0m/secを越える場合はすべて2.0m/secとした。個体の人数、初期配置および避難場の形状は清野らの論文と同様である。図-7(a)は個体人数70名の初期配

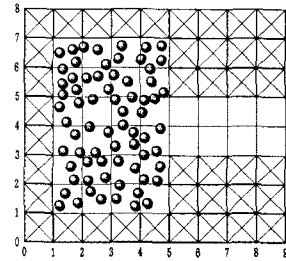
置を示したものである。このモデル計算では、仮想半径 r_v を 0.4m とした場合と仮想半径 r_v を 0.225m (個体半径 r と一致) とした場合の比較を行った。それぞれの結果を図-7(b),(c)に示す。図-7(b)では避難者が部屋一杯に分散している。一方、図-7(c)では部屋の出口付近に人が集まっている。仮想半径を操作することで個体の密集具合を調整することができる。

清野らのモデルは個別要素法に基づくモデルであり個体間のバネが重要である。彼らは要素バネに加えて仮想バネがある場合の方が現実的な結果を再現することを示した。図-7(c)は仮想バネを考慮した清野らの結果に近いものであった。結果的には仮想半径はその影響が個別要素法の仮想バネモデルよりも強くでしてしまう傾向があることが分かった。しかしながら、個別要素法モデルでは同定すべきパラメータが多いが本モデルでは仮想半径 r_v 、任意半径 R 、 β のみであり非常に簡便である。

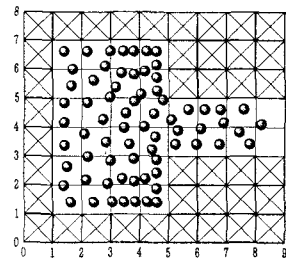
3.2 浸水時の避難行動

この節では本モデルによる浸水時の避難行動のモデル計算を示す。個体 42 人を配置して一斉に避難させる。避難場は $18\text{m} \times 18\text{m}$ の領域を考える。セルは $1\text{m} \times 1\text{m}$ の正方形とし、避難場を 324 分割した。計算条件は前節と同様である。ただし、仮想半径 $r_v = 0.400\text{m}$ とする場合のみを示す。図-1 に示すような場において座標(5,10)~(7,10)の範囲から単位幅流量 $0.9\text{m}^2/\text{sec}$ の浸水が有る場合を考える。浸水状況は氾濫解析で通常よく用いられる平面 2 次元浅水方程式と連続の式を数値的に解くことで求めた。流出流量は連続の式にのみ組み込んだ。氾濫解析においては避難行動シミュレーションで用いている $1\text{m} \times 1\text{m}$ のセルでは計算格子が粗すぎるので、 $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ の小さなセルで場を分割し、有限体積法で数値解析を行った。計算された水深は $1\text{m} \times 1\text{m}$ の大きなセルごとに平均し、それを避難シミュレーションに用いた。ところで図-1の形状では浸水の有無に関わらず出口に到達できない個体が存在した。そこで全ての個体に中間目標点(座標(8,5))を与えた。初めに中間目標点を目指し、その後出口に向かうようにした。これにより全ての個体が出口に到達できた。中間目標点は避難経路の指示と見なすことができる。

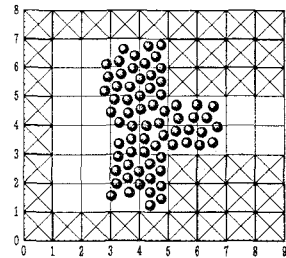
浸水発生と同時に避難行動を開始するものとしてシミュレーションを行った。比例定数 α を $1\text{m}/\text{sec}$ 、 $5\text{m}/\text{sec}$ の二種類として浸水ポテンシャル Ω を評価した。それぞれ case-1, case-2 とする。シミュレーションの結果を図-8 に示す。図-8(a)~(c)は浸水の無い場合の避難行動の結果である。中央部 2 カ所の開口を均等に通過して出口に向かっている。図-8(d)~(f)は case-1 の結果である。この場合も中央 2 カ所の開口を通過しているが、10 秒後に浸水を避け右側に移動している避難者が確認できる。図-8(g)~(i)は case-2 の結果である。この場合は危険を回避する速度成分が卓越するため避難者は全体的に浸水の無い右側へ移動する。やがて中央右側の開口を通過し出口に向かう。浸水に阻まれ出口に到達できなかった個体数は case-1 で 17 名、case-2 で 31 名であった。比例定数 α は浸水の回避行動を規定する重要なパラメータであるが、今のところは試行錯誤的に与えている。



(a) 避難者の初期配置

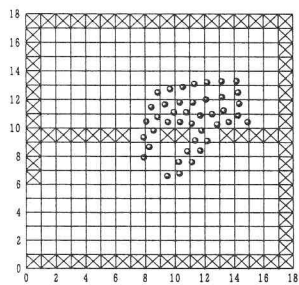


(b) 仮想半径 $r_v = 0.4\text{m}$ の場合 (時刻 2.0 秒)

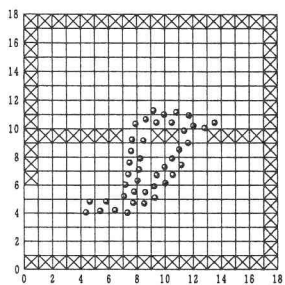


(c) 仮想半径 $r_v = \text{個体半径 } r$ の場合
(時刻 2.0 秒)

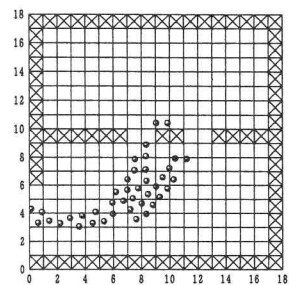
図-7 部屋から通路への避難シミュレーション



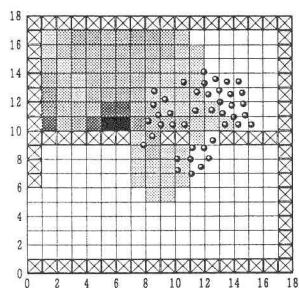
(a) 5 秒後(浸水なし)



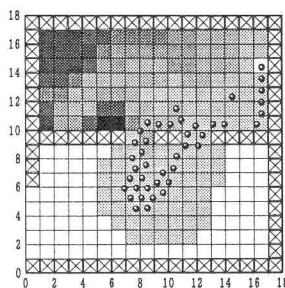
(b) 10 秒後(浸水なし)



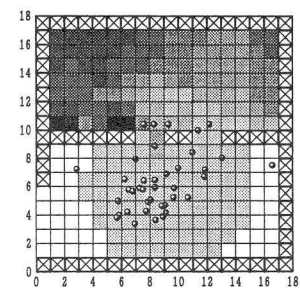
(c) 15 秒後(浸水なし)



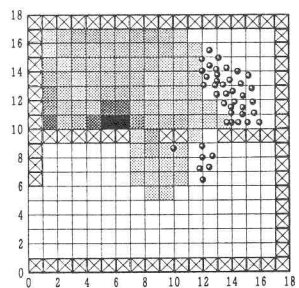
(d) 5 秒後(case-1)



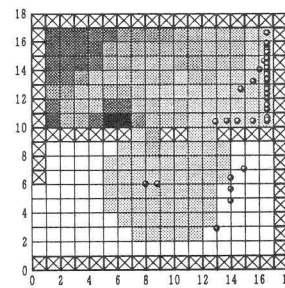
(e) 10 秒後(case-1)



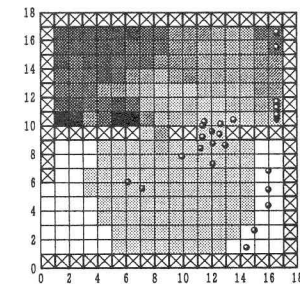
(f) 15 秒後(case-1)



(g) 5 秒後(case-2)



(h) 10 秒後(case-2)



(i) 15 秒後(case-2)

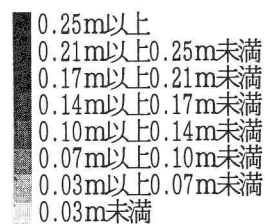


図-8 避難行動シミュレーション

4. 博多駅地下街1階の避難行動シミュレーション¹¹⁾

1999年6月28日夜から29日にかけて九州北部に停滞した梅雨前線は活動が活発化し、九州北部に豪雨をもたらし、各地で土砂崩れや浸水などの被害を発生させた。

このため、都市機能の集中した博多駅周辺において、ビルの地下、

地下街、地下鉄駅構内などに多量の氾濫水が進入し、都市機能を麻痺させた。本研究では、甚大な被害があった博多駅1階商店街をモデル化し浸水時避難行動の検討を行った。

この節では本モデルによる浸水時の避難行動のモデル計算を示す。図-9の○印が避難者であり、個体51人を配置して一斉に避難させる。避難場として50m×205mの領域を考える。セルは1m×1mの正方形とし、避難場を10250分割した。計算条件は前節と同様である。氾濫シミュレーションは0.5m×0.5mのメッシュで行われた。図-9の浸水発生箇所から単位幅流量0.017m²/secと0.113m³/secの浸水が有る場合を考える。それぞれcase-2とcase-3とする。なお、浸水がない場合をcase-1とする。避難完了率を以下の式で定義する。

$$\text{避難完了率} = \frac{m}{N} \times 100(\%) \quad (10)$$

ここで、mは任意時刻において出口に到達した累積人数、Nは総人数である。図-10に各時間の避難完了率を表す。表-1は各ケースの50秒、100秒後の避難完了率を示している。case-1では、ほとんど滞留が生じずに避難が行われる。出口付近で滞留が発生するが多くの避難者はスムーズに避難行動を行い、157秒程で避難を完了する。また、case-2は若干浸水の影響を受けているためcase-1よりも20秒程遅れて避難を完了する。一方、case-3では、浸水の影響で避難の完了が遅れることが分かる。最終的には、270秒後に全避難が完了した。case-1とcase-3では、初期段階ではそれほど避難者の挙動に変化が見受けられない。しかし、case-3では60秒前後から浸水の影響を受け始め出口への避難行動がスムーズに行われなくなり避難完了時刻が遅くなる。

図-11にcase-1、case-3のシミュレーション結果を示す。case-3では浸水により出口付近に避難者が滞留している様子が分かる。

5. おわりに

地下街やビルなどの閉じた空間への浸水に対する避難行動シミュレーションの適用の可能性を検討し、そ

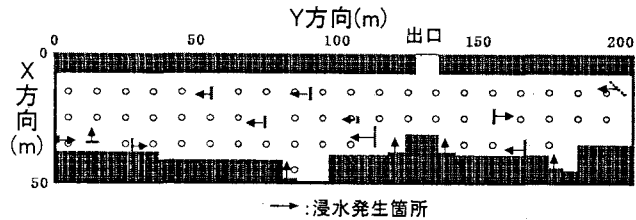


図-9 初期配置

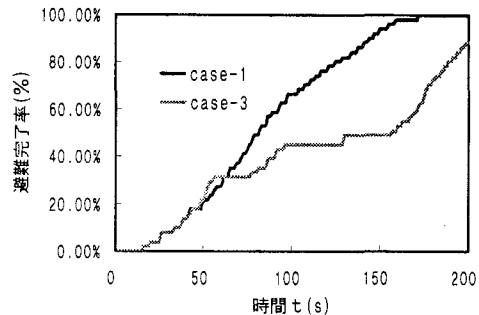


図-10 各時間の避難完了率

表-1 各ケースの避難完了率

	50秒後	100秒後	避難完了時刻
	避難完了率	避難完了率	
case-1	21.57%	68.63%	157秒
case-2	21.57%	66.67%	177秒
case-3	21.57%	45.10%	270秒

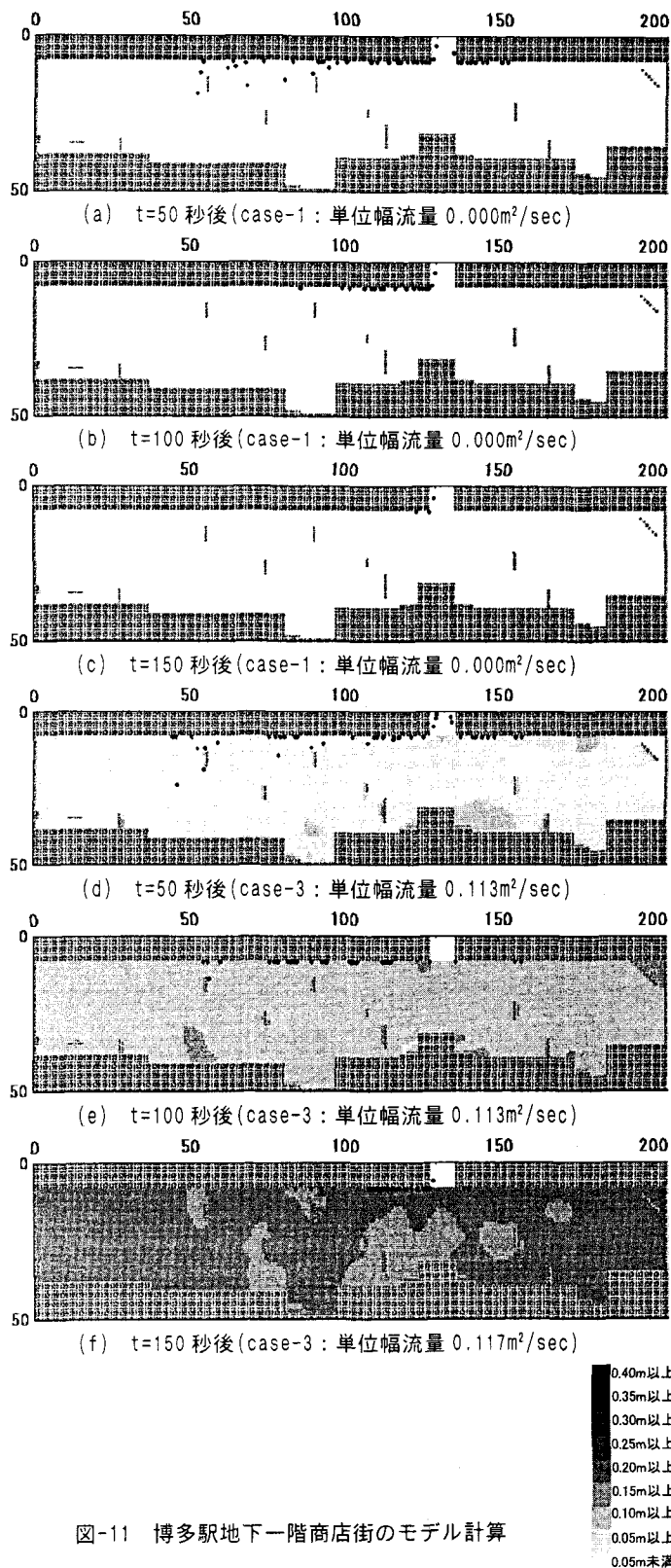


図-11 博多駅地下一階商店街のモデル計算

のモデル計算として清野らの計算結果との比較、モデルケースおよび博多駅地下1階を対象とした浸水時避難行動の検討を行ったものである。本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 浸水を回避する行動を再現するためにポテンシャルモデルを適用した。ポテンシャル値は水深に比例した量を与えた。浸水の危険度を表すポテンシャルは水深に比例するものとした。適切な比例定数を与えることで、安全な経路を辿って目標点に到達する行動を再現することができた。
- 2) 壁などの障害物の回避はポテンシャルモデルではなく、現在位置と周囲セルの中心までの距離およびセルの状態量を用いて進むべき方向を評価する手法を用いた。また体の一部が障害物に突入した場合の位置座標の修正を行うアルゴリズムも組み込んだ。
- 3) 複数の避難者が存在する場合、避難者同士の衝突を回避するためにポテンシャルモデルを導入した。また、周囲の動きの影響をモデルとして取り組んだ。群集の場合でも浸水を回避することが可能となった。
- 4) 出入口の形状変化による避難所要時間の差や、出入口に群集が殺到する際に発生する滞留を検証することにより空間形状の変化による避難者の挙動の変化や避難時間の時系列的検証を行うことが可能である。

冠水した床を移動する場合、実際には歩行が困難になり歩行速度が遅くなる。本論文ではこのことが考慮できていない。またモデルの検証実験は困難であるがやはり必要不可欠である。今後は、この点に着目して研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 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，土木学会論集，No.537/I-35，pp.233-244，1996。
- 2) 田中正，杉山崇，西淳二，奥山健二：個体差を考慮した歩行者行動シミュレーションの研究，地下空間シンポジウム論文・報告集，第7巻，pp.11-20，2002。
- 3) 松田泰治，大塚久哲，樽木 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) 高橋保，中川一，東山基：洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムの評価に関する研究，京都大学防災研究所年報，第32号B-2，pp.757-780，1989。
- 5) 伴勇二，長尾正志，森田徹：名古屋市南部における浸水位変化を考慮した水害避難のシミュレーション研究，土木学会第43回年次学術講演会概要集，pp.236-237，1988。
- 6) 中川一，高橋保，澤田豊明，石橋晃睦：豪雨性表層崩壊に起因する土石流の規模予測とGISを用いた避難行動の解析，水工学論文集，第42巻，pp.325-330，1998。
- 7) 高埴琢馬，椎葉充晴，堀智晴：水害避難行動のミクロモデルシミュレーションと制御に関する研究，土木学会論文集No.509/II-30，pp.15-25，1995。
- 8) 浅田純作，片田敏孝，岡島大介，小葉竹重機：洪水避難に関わる情報提供とその住民理解に関する研究，水工学論文集，第45巻，pp.37-42，2001。
- 9) 横山秀史，目黒公郎，片山恒雄：避難行動解析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。
- 10) E.T.Hall 著 日高・佐藤訳：かくれた次元，みすず書房，pp.160-181，1970。
- 11) 橋本晴行：1999年6月福岡都市水害，河川災害シンポジウム，pp.15-24，2000。