

浸水時の地下空間からの 避難行動に関する数値シミュレーション

NUMERICAL SIMULATION OF EVACUATION BEHAVIOR FROM THE INUNDATED UNDERGROUND SPACE

関根正人¹・本山量啓²・中村 淳²

Masato SEKINE¹, Kazuhiro MOTOYAMA² and Jun NAKAMURA²

¹ 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒 169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

² 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (同上)

Numerical model of evacuation behavior of people from the inundated underground space was investigated in this study. Information about a human behavior was taken into account as much as possible, a walking velocity, for example, was evaluated on the basis of relation between it and the congestion density of crowd. It was considered that the movement of each people was affected by both the movement by others and the approaching flow of water on the floor. Numerical simulation was conducted in the relatively large scale model of underground space. It can be concluded that the present model works well and the reasonable simulation of evacuation behavior is possible to be realized.

key word : *inundation, underground space, evacuation, numerical simulation.*

1. 序論

近年、都市では想定規模を超える集中豪雨に見舞われることが稀ではなくなってきた。こうした雨が都市を襲うと、付近に河川がなくても水害が発生することがある。内水氾濫と呼ばれる現象がこれであり、雨水を排除するために完備された下水道の処理能力を超えるほどの豪雨に対してまで氾濫を回避することは難しい状況にある。こうした場合に最も深刻な被害が予想されるのが地下空間であり、標高の低い地域の地表に連絡階段が口を開けている場合にはそこが水の進入経路となる。著者らは、東京を代表する繁華街である新宿や渋谷の駅に接続する地下街や、地下鉄が複数立体交差する溜池山王駅を対象として浸水被害の予測に関する研究を行ってきた。その結果、これらの地下空間に関する限り、水の浸入が予想される連絡階段は最大でも 2 箇所を過ぎず、それ以外の階段を使うことで避難経路を見出すことができるのではないかと結論を得た^{1), 2), 3)}。しかし、現時点では、群集としての利用者がその経路を安全かつスムーズに避難するだけの時間的余裕があるか否かは定かではない。地下空間における利用者の被害を最小化する上で重要なことは、いざと

いうときに迅速かつ整然とした避難が可能となるような準備を整えておくことにほかない。本研究では、浸水を受けた地下空間からの避難行動を数値的に再現する計算手法を新たに構築し、今後より精緻な避難行動シミュレーション手法を開発していくための足がかりとすることを目的としている。

本研究に関わるこれまでの研究をレビューすると概ね以下のようにまとめることができる。避難行動を対象とした数値シミュレーション手法に関する研究は、元々はその多くが火災や津波からの避難を想定してなされてきたものである。そして、最近になって、地下空間などの建物が浸水した場合の避難にもこの手法を応用しようとする研究も進んでいる。この手法の代表例がセルオートマトン法によるもの⁴⁾である。この手法は、空間をセルと呼ばれる小スペースの集合体と見なし、各セルに状態量を与え簡単なルールを決めることで、人の行動を再現しようとするものである。ただし、ルールが客観性に欠けるほか、人の運動能力との関係が希薄であるなどの問題がある。一方、個別要素法として知られる力学的な解析手法をこの避難行動に応用した研究も行われている^{5), 6)}。避難者の動きを運動方程式に基づいて解析し、その際に避難者相互の衝突を回避するなどの

配慮もなされている。個々の人の運動そのものに力点をおいたモデルと言えよう。しかし、人間科学的に見ると、人の避難行動を支配するとされる運動方程式が何を意味するのかが不明であり、行動を引き起こす各種の力に物理的な意味があるとは思われない。以上は数値シミュレーションに関する研究であるが、これと並行して実物大模型を用いた実験的研究も始まっており、興味深い知見が得られている。

このような研究を背景として、本研究ではこれまでとは異なる数値解析モデルの構築を目指し、その際に、個々の人間の歩行・視覚的認知・群集としての挙動などに関する人間科学的な知見をできるだけ多く取り入れるように留意した。

2. 避難行動シミュレーション手法の概要

(1) 避難行動モデル

ここでは、避難行動モデルの骨格をなすいくつかの要素、すなわち、(a) 群集密度に応じた歩行速度の評価、(b) 密集を回避する移動方法の決定、(c) 他の避難者の行動の確認とこれとリンクした行動の決定、についての考え方を説明する。

人の行動を追跡する場合には、基本的には各瞬間における歩行（移動）速度ベクトルの大きさと移動方向とを決める必要がある。その際に重要な指標となるものとして「群集密度」 p_c (person/m²) を挙げることができる。群集密度とは、フロア上のあるエリアの単位面積あたりに存在する群集の人数を表す。この値は言うまでもなく混雑度を表し、エレベーターの定員はこの数値が5～6となるように設計されている。また、混雑度300%の鉄道車内のドア付近では時に悲鳴が上がることもないとされるが、この状態で群集密度は13である。人が避難する際の歩行速度 v_p はこの群集密度の影響を顕著に受けることは言うまでもない。歩行速度と群集密度との関係は文献⁹⁾に詳しく、次のように考えることができる。すなわち、群集密度 p_c が1以下であれば他の人の影響を受けることなく移動できる「自由歩行」の状態にあるとされ、個人の体力に応じてその歩行速度 v_p が定まる。たとえば、成人の健常者であれば1.3 m/s、高齢者であれば0.9 m/sであるとされる。一方、群集密度 p_c が1を超えると、「群集歩行」と呼ばれる移動形式となり、群集密度の値に応じて歩行速度が大きく変化することになる。ここでは、群集状態での歩行速度 v_p を実際に観測された結果を踏まえて次のように与えることにした。すなわち、速度の単位をm/sとして v_p を、 p_c が1～3の範囲で $1.3 - 0.4 p_c$ 、 p_c が3～7の範囲で0.1、 p_c が7以

上で0.05とする。ただし、通路の出口付近のいわゆる狭窄部のようなところでは、アーチ状の混雑状況となることがあり、一時的に群集密度 p_c が10を超えることがある。この場合には、時にパニックの状態になり先へ進もうとする者が現れる可能性もあるが、もはや正常な移動は不可能と判断されるため、移動を停止させその場に待機するよう取り扱うものとした。以上はフロア上の歩行を対象としたものであるが、階段における歩行速度は上記のものとは異なってくる。観察結果などによると、階段を歩行する際の速度の水平方向成分に関しては、勾配によらず一定（成人の場合0.5 m/s）の値をとるとの報告⁸⁾がある。ここではこの情報に基づき階段上の移動を再現する。上記に関連して参考までに記すと、歩行速度は、より厳密には、避難者の年齢層や季節（服装）、歩行環境、路面の材質と形状、勾配、すべりやすさ、明るさ、あるいは携行する荷物によって変化するとされる⁸⁾が、ここではこうしたことを考慮することまではしていない。また、浸水時の水中歩行については、水深や流向・流速によってその速度が変化することが知られている。しかし、次章で説明する解析例の場合には浸水深が比較的小さい大規模地下空間を対象としているため、現時点では水の流れに応じて歩行速度を変えることはしていない。

次に、移動方向については、原則として自分の現在位置から確認することのできる範囲内に置かれた目標点に向かうものとする。目標点としては、避難者が店舗などの半閉鎖空間にいる場合にはその出口の中央の位置に、またそれぞれの通路にいる場合にはこれと交わる通路と今いる通路との交差点の中央の位置にとるものとし、図の下側の階段に接続する通路にいる場合に限りこの階段の入口中央の位置を目指すものとした。ここでは、これら目標点の天井付近の見通しのよいところに方向を示す案内板が設置されているようなことを想定しており、店舗あるいは通路のいずれのエリアにいたとしても、避難すべき方向は視認することができるものとした。ただし、移動しようとする方向に大勢の人が密集している場合には、避難者はそれを回避した移動をとるはずである。これを「密集回避行動」と呼ぶことにする。本研究では、この回避行動を次のように取り扱う。ここでは、解析対象区域のフロアを有限の大きさ（1 m x 1 m）のセルに分割することにし、各瞬間における各セルの群集密度を算定する。そして、移動していく方向にあるセルならびにこれに隣接した左右ふたつのセルの間で最も群集密度の低いセルの方向に向かって移動方向を修正することにした。もし3つのセルのうち目標点方向にあるセルの群集密度

が最も小さければ、避難者はそのままの方向で目標点を目指すものとし、移動方向を修正することはない。しかし、もしたとえば移動方向にあるセルの左側に位置するセルにおける群集密度が最も小さい場合には、移動方向を以下のようにしてこの左側セルの方向に修正する。すなわち、 $x - y$ 軸からなる直交座標系上に空間を展開し、移動させる方向が x 軸となす角度を θ (反時計回りを正)、目標点に向かって最短距離で進むとした場合の方向角を θ_p とする。人の視野は進行方向に対して $\pm 60^\circ$ であることから、これを考慮して θ を群集密度に応じて以下のように評価することにした。

$$\theta = \theta_p + (\rho_o - \rho_{\min}) / \rho_o \times 60^\circ \quad (1)$$

ここに、 ρ_o は移動方向のセルの群集密度、 $\rho_{\min}$ は値が最小となった左側のセルの群集密度を表す。

次に、人が避難行動を開始する条件について説明する。避難者が周囲を見渡したとき、水の浸入状況や他の人の行動を視認できる距離には限りがある。これを視認距離と呼ぶことにすれば、ここでは、ある避難者が、(1) 視認距離以内に水が接近してきた場合、ならびに (2) 視認距離以内にいる既に避難行動を開始している人が自分を追い越すような行動をとり二人の間の距離が離れていく場合、に新たに避難を開始するものとした。後述するシミュレーションでは、すべての人が初期条件として "stay" の状態におかれているが、最初に浸入してきた水に気づいた人がまず避難を開始して "go" の状態となる。次に、この避難行動を確認した人が相次いで "go" の状態となり、連鎖的に群集の避難行動へと発展するとした。視認距離に関しては、本来は群集密度や避難者の視力、照度などの影響を受けて決まるものと予想される。しかし、著者の知る限りこうした知見は十分ではないため、ここでは一定値 (5 m) としている。具体的な数値については、解析モデルで導入している他の空間スケールなどとの関係でこの値に定めたが、これについては今後検討する余地がある。

(2) 数値シミュレーション手法

本研究では、図-1 に示すような模擬地下空間を対象に、ここからの避難行動を数値的に再現する。空間の規模は図中に示すとおりであり、新宿地下街などを参考に概略値を定めた。また、空間を店舗である半閉鎖空間、通路、交差点、出口、階段と名づけたゾーンに分け、それぞれのゾーン毎に避難目標点を与えることにする。一方、流れ場の計算には、前述のセルと同じ一辺が 1 m の正方形の計算格子を定義し、これによって空間を網羅することにした。

ここで説明する解析例の場合には、図の上方に配置された地上からの連絡階段を通じて水が流入

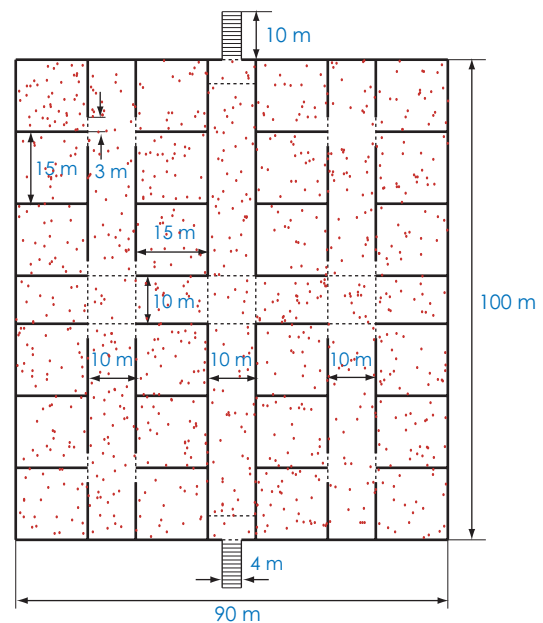


図-1 模擬地下空間の概要

図中の実線は空間を仕切る隔壁を、破線はゾーンの境界をそれぞれ表している。また、赤の点は避難者の初期位置を表す。

するものとし、図の下方の階段を通じて人が避難するものとする。流入した水が空間内を広がっていくプロセスに関しては、著者らのこれまでの解析³⁾と同様の方法に従って評価するものとし、階段からフロアーに向かって一定量 ($0.04 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$) の水が流入するとして取り扱った。ここでの数値解析は、地下空間への浸水開始をもってスタートし、そこに居合わせたすべての人が避難を完了するまでを対象とする。具体的には、流れ場を 0.01 秒毎に更新した上で、避難者の行動を 1 秒毎に追跡した。避難者としては、成人 (健康者) 800 人に高齢者 200 人を加えた合計 1000 人を対象とし、これらを乱数を用いて一様に配置することで初期位置を設定した。図-1 中に示した赤点がそれを表し、後掲の図-3 および 4 中の赤点も各時刻における避難者の位置を表している。

避難行動解析の具体的な手順は以下の通りである。ただし、この計算と連動して流れ場の更新を行うことになる。

- (1) 各セルにおける群集密度を算定する。
- (2) 個々の避難者が位置するセルを判別し、その群集密度に基づき歩行速度を定める。ただし、この際に浸水深が大きい場合には浸水深等の数値に応じて歩行速度を補正することが望ましい。
- (3) 避難者 1000 人の移動に関しては、これを並列的に計算する代わりに、乱数を用いて移動させる順番を決定した上で一人ずつ順に計算する。
- (4) 避難者が位置するゾーンに対して設定された避難目標点を確認し、密集回避の修正を加えた後、移

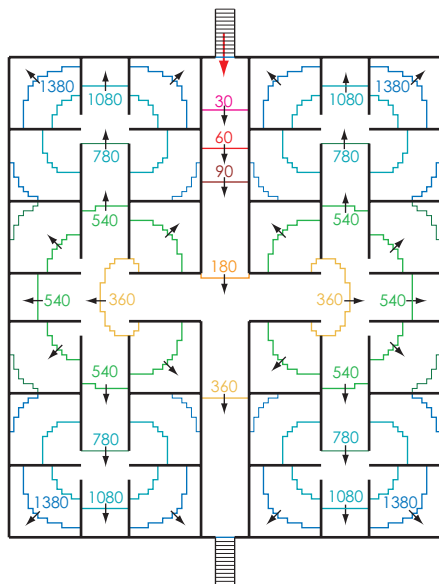


図-2 地下空間内の浸水フロントの進行状況

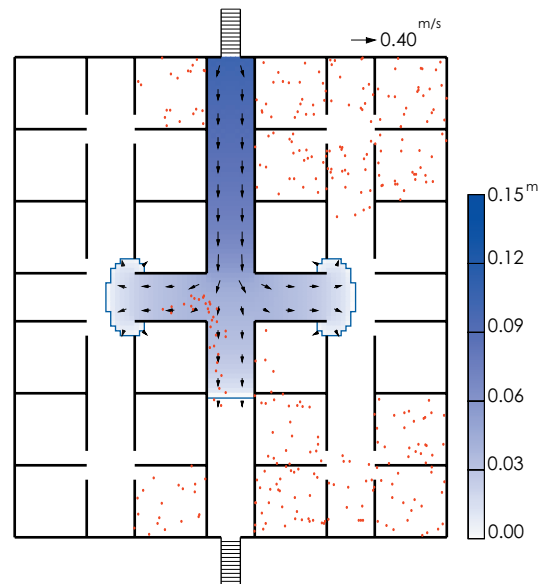


図-3 地下空間内の流れ場の解析結果の一例

動方向を定める。

(5) 計算時間刻みを Δt として、以下の式に基づき個々の避難者の新たな座標を計算する。

$$\begin{aligned} x^{n+1} &= x^n + v \sin \theta \times \Delta t \\ y^{n+1} &= y^n + v \cos \theta \times \Delta t \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 n は計算時間ステップ数を表す。

(6) 移動後、避難方向の階段の上端に達していれば避難が完了したものとし、そうでない場合には手順(1)に戻って計算を継続する。

3. 解析結果と考察

(1) 地下空間における浸水状況

ここでは、対象とした模擬地下空間内の浸水過程に関する解析結果について見ておくことにする。図-2は、各時刻における浸水フロントの形状を色を変えた折線で描いた結果である。ここで、「浸水フロント」とは浸入した水が各時刻に到達できる限界の位置を連ねた線である。ここで対象とした流入流量は前報^{1), 2), 3)}の結果などを踏まえて設定したが、結果としてこの模擬地下空間の全域に水が到達するのに浸水開始から30分程度の時間を要することになった。また、図-3には、浸水開始から360秒後の浸水深のコンター図と流速ベクトル図を一例として示した。実際の解析では1m間隔に設定した計算格子上的流速二成分が計算されているが、図が煩雑になることを避けるため、ここでは5m間隔でベクトルを描いている。水深は最大でも0.15m程度であり、フロントの進行速度は階段から直進して中央の交差点に達するまでは0.25 m/s程度、その後左右方向の通路にも分かれて広がるようになってからは

0.12 m/s程度である。そのため、避難者の歩行速度を左右するほどの流れとは言えないと判断される。

(2) 避難行動シミュレーション結果

ここでは、図-1に示された地下空間の中の赤点(●)の位置に配置された合計1000人の避難者が、浸水に見舞われた直後にどのような避難行動をとるかに注目しており、ここでは解析結果の一例を見ながら考察を加えることにする。図-4には、避難者の位置を明示した各時刻における浸水深のコンター図と群集密度のコンター図を上下に並べて示し、合計6時刻の結果をまとめてある。図-4に見られる避難行動のパターンは以下の通りである。

(1) 図の上側の階段付近にいた人のうち、この階段から水が浸入してきたことに気づくような位置にいた者が、図の中央の交差点に向けて移動を開始した。また、この動きに気づいた人も順次同じ方向に避難を始めた。たとえば30秒後がこの状態に当たる。

(2) 先行して避難行動に入った人々が中央の交差点を通り過ぎる時刻になると、この通路に直交する通路にいた人々の中にこの動きに気づく者が現れ、連鎖的に多くの人が中央の交差点に向かって避難を開始するようになる。また、このような動きを見た半閉鎖空間に留まっている人々もその出口に向かって行動を開始している。60秒後がこの状態である。

(3) 避難者の初期位置の不均一さや個々の移動の順番などの影響により、結果的に左半分の空間からの避難が活発であるのに対し、右半分では他者の避難行動に気づかずに取り残されることになった。180秒を過ぎると、図の下方に位置する階段の入口ならびに階段上に人が密集するようになり、局所的に大きな群集密度となっている。特に階段の入口では



図-4 避難行動解析の結果：各々上段が避難者の位置（●）と水深のコンター図，下段が群集密度のコンター図
 浸水開始後それぞれの時刻での結果を表す。凡例は左が浸水深，右が群集密度の値をそれぞれ表す。青の折線は浸水フロントを表す。

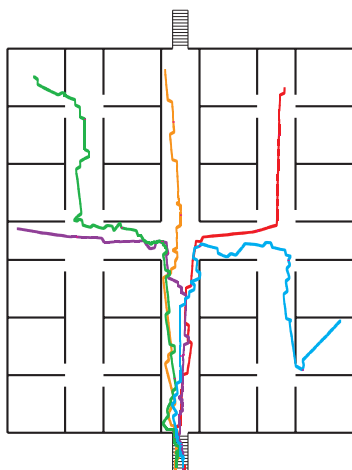


図-5 避難者の移動軌跡の一例

アーチ状に人が密集した状態となっており，万一理性を欠いた行動をとる者が現れると，将棋倒しのよう事態に発展する恐れもある。

(4) 奥まった空間にいたために先行して避難した人々の動きに気づかなかった人にとっては，水が付近に到達するまでは避難行動を起こすきっかけがないため，しばらくは元の位置に取り残されることになる。そして，360 秒後になってようやく中央左下の半閉鎖空間からの避難が進み，420 秒後には右上奥の空間からの避難が始まっていることがわかる。

このように，ここで数値模擬された避難行動は実際に起こると予想されるパターンに近いと判断される。また，図-4 中に示された各時刻の群集密度のコンター図を見ると，群集密度が 10 を超えるような過密状況となる時間帯は限られることがわかる。これは避難行動が水の接近や他者の動きに伴い連鎖的に開始される取り扱いをとっているためであり，避難を一斉に開始させるとした場合とはこの点において異なる。図-5 には，任意に選んだ 5 人の避難者の避難行動軌跡を一例として示した。また，図-6 は各時刻までに避難を完了した人の人数を全人数（1000 人）で除して求めた避難完了率の時間変化を示したものである。この空間からの避難には 1300 秒を要する結果となった。最後に，本解析では成人（健常者）に高齢者が加わることの影響も調べているが，本解析結果を見る限り特筆すべき差異が現れることはなかった。

4. 結論

本研究では，浸水時における地下空間からの避難行動を数値的に模擬する解析手法を構築することを目的として行われ，その適用性を調べるために模擬地下空間を対象とした数値シミュレーションを実施

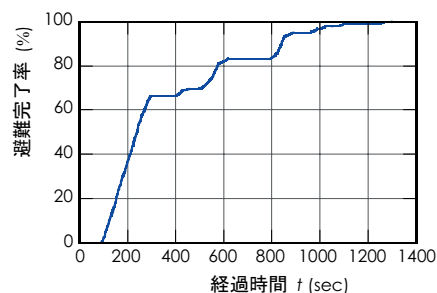


図-6 避難完了率の時間変化

した。避難行動のモデル化に当たっては，人間行動に関わるできるだけ多くの知見を取り入れることに留意し，他者の移動を認識して避難行動を開始するなど，より実情に近い行動が再現できるようになったと考える。しかし，現時点でのモデルは，この空間の構造を熟知した避難者の行動を再現したに過ぎず，初来者の動きにはほど遠く，避難完了に要する時間は実際を下回るものと予想される。今後はさらにモデルの精緻化を進めるとともに，これまでに検討を行ってきた実在の地下空間への適用も考えていく予定である。

参考文献

- 1) 関根正人，河上展久：地下街を抱える高度に都市化された地域の内水氾濫に関する数値解析，土木学会論文集，No. 789/II-71，47-58，2005。
- 2) 関根正人，河上展久：都市域における内水氾濫と地下鉄に接続する地下空間の浸水に関する数値解析，水工学論文集，第 49 巻，595-600，2005。
- 3) 関根正人，中村 淳：地下鉄駅が立体的に接続する地下空間における浸水過程に関する数値解析，水工学論文集，第 50 巻，667-772，2006。
- 4) たとえば，坪郷浩一，朝位孝二，羽田野袈裟義：閉じた地下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，地下空間シンポジウム論文・報告集，土木学会，第 9 巻，29-38，2004。
- 5) 清野純史，三浦房紀，滝本浩一：被災地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-35，233-244，1996。
- 6) 原田英治，後藤仁志，酒井哲郎，久保有希：地下街浸水時の群衆避難の個体ベースシミュレーション，水工学論文集，第 50 巻，589-594，2006。
- 7) 石垣泰輔，戸田圭一，馬場康之，井上和也，中川 一：実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する実験的検討，水工学論文集，第 50 巻，583-588，2006。
- 8) 岡田光正，吉川勝行，柏原士郎，辻 正矩：建築と都市の人間工学，鹿島出版会，1977。

(2006. 9. 30 受付)