

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

PARTICLE-SYSTEM MODEL OF CROWD REFUGE FROM INUNDATED UNDERGROUND SPACE

原田英治¹・後藤仁志²・酒井哲郎³・久保有希⁴

Eiji HARADA, Hitoshi GOTOH, Tetsuo SAKAI and Yuki KUBO

¹ 正会員 工博 豊田工業高等専門学校講師 環境都市工学科 (〒 471-8525 豊田市栄生町 2-1)

² 正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科都市環境工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³ フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴ 学生会員 京都大学大学院修士課程 都市環境工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

The decision of the refuge plan due to high density of the city and the complication of the city structure in recent years has been getting difficult. Simulation in consideration of the complexity of the phenomenon is indispensable to the decision of the proper refuge plan. An inundation process and the prediction of the human refuge behavior are necessary for the refuge plan. In the present simulation, the simulation of the crowd refuge in the inundation has been performed for the underground shopping center of the actual scale in consideration of the detailed layout by using the human behavior model based on the distinct element method. Furthermore, a refuge process under the condition of some inundation scenarios has been examined. It was shown that learning in advance such as a training for the refuge and an information indication was important for the prompt refuge.

Key Words: *particle-system, distinct element method, crowd refuge, inundation, underground space, learning in advance*

1. はじめに

大都市中心部では積極的な地下空間の利用が図られているが、ヒートアイランド化の進行に伴って局地的集中豪雨が頻繁に発生している昨今、1999年の福岡市の水害、2000年の東海豪雨の際の名古屋市の水害に見られるように、大都市地下空間の浸水被害のポテンシャルが急速に増大している。浸水被害の低減には適切な避難計画の策定が不可欠となるが、それには、氾濫・浸水の物理過程と浸水域からの群衆避難行動の両者に関して適切な数理モデルが必要となる。

前者に関しては、浸水域の拡大を時間発展的に追跡できるモデルが不可欠で、浅水流モデルを用いた数値解析が必要となる。例えば、戸田ら¹⁾は、淀川破堤時の梅田地下街全域を対象とした地上および地下街の氾濫解析を実施しており、地下街の複雑な街路形状を取り込んだ解析は実用段階にある。

後者に関しては、建築工学では従前から検討が行われてきた問題であり、建築防災計画の策定に際しても群衆を流体(連続体)アナロジーに基づいて解析する簡便な計算法²⁾が頻用されている。しかし、群衆を構成する個々の人間に注目すると、離散的な構造が果たす役割の重要性は明白であり、連続体近似ではなく、むしろ粒状体としての取り扱いが有効であると考えられる。例えば、平井・樽井³⁾、清野ら⁴⁾は、人間個人を構成単位としたモデルによって、群衆の離散的な流動特性を陽に取り扱うフレームワークを示している。著者ら⁵⁾も清野ら⁴⁾と同様のコンセプトで、従来から移動床水理学における砂移動の予測モデルとして開発を進めてきた個別要素法⁶⁾を基礎とした避難行動モデルを開発し、小規模地下広場からの浸水時避難行動のシミュレーションを試みた。

本研究では、実スケールの地下街における浸水時の群衆避難のシミュレーションに対する著者らのモ

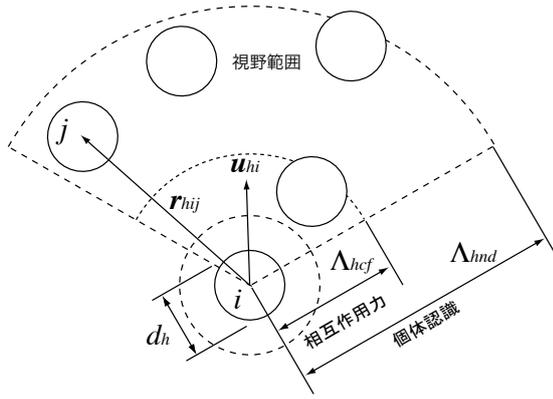


図-1 要素間作用力の発現領域

デルの適用性を明らかにするため、実在地下街の店舗隔壁、通路、広場等のレイアウトの詳細を考慮した境界条件下で、複数の浸水シナリオを想定して、避難シミュレーションを実施する。

2. 群衆行動モデル

(1) モデルの構成

シミュレーション対象は、京都市のゼスト御池地下街の全領域である。地上に通じる階段およびエスカレータと繋がった御池地下街での群衆行動を検討する。群衆行動モデルは、著者らがこれまで開発を進めてきた個別要素法型群衆行動モデル⁵⁾を基礎としたモデルであるが、御池地下街の全領域を対象とすることによる計算領域の大規模化と境界条件の複雑化に伴う複雑な群衆の避難行動を良好に再現できるように、壁面の幾何的配置にカテゴリーを設けて、個体の局所的な移動方向の決定を効率化する改良を行った。詳細は後述する。

人間要素の運動は、並進および回転の運動方程式

$$M_{hi} \frac{d\mathbf{u}_{hi}}{dt} = \mathbf{F}_{himt} + \mathbf{F}_{aw} + \mathbf{F}_{flow} ; M_{hi} = \frac{\varepsilon_h \sigma_h \pi d_{hi}^2}{4} \quad (1)$$

$$I_{hi} \frac{d\omega_{hi}}{dt} = \frac{d_{hi}}{2} \cdot \sum_j \{f_{hs}\}_j ; I_{hi} = \frac{\varepsilon_h \sigma_h \pi d_{hi}^4}{32} \quad (2)$$

を陽的に追跡することで評価される。ここに、 \mathbf{F}_{himt} ：要素間（人間/人間および人間/壁）の作用力ベクトル、 \mathbf{F}_{aw} ：人間要素の歩行力（推進力）ベクトル、 \mathbf{F}_{flow} ：汜濫流による流体力ベクトル、 \mathbf{u}_h ：人間要素の移動速度ベクトル、 M_h ：人間要素（シリンダー形状を仮定）の質量、 σ_h ：人間要素の比重（=0.98）、 ε_h ：シリンダーの体積と人間の実質体積の差を表す係数、 d_h ：人間要素径、 ω_h ：人間要素の回転速度、 f_{hs} ：人間要素 i, j 間の接線方向の作用力、 I_h ：人間要素の慣性モーメントである。人間要素を $d_h=0.52\text{m}$ (Fruin・長島⁷⁾の人間楕円の断面積と等価な断面積を有する円の直径)と設定し、 $M_h=60$ (体重 60kg の

成年男子)を想定すると、 $\varepsilon_h=0.178$ となる。

要素間作用力の発現領域は、視野範囲（人間要素の正面から $\pm \pi/3$ ）を考慮して、

$$|\mathbf{r}_{hij}| \leq \begin{cases} L_{hcf} & \left(-\frac{\pi}{3} \leq \theta_{dij} \leq \frac{\pi}{3}\right) \\ \frac{d_{hi} + d_{hj}}{2} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{r}_{hij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i ; |\mathbf{r}_{hij}| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

$$\cos \theta_{dij} = \frac{\mathbf{u}_{hi} \cdot \mathbf{r}_{hij}}{|\mathbf{u}_{hi}| |\mathbf{r}_{hij}|} \quad (5)$$

と設定した。ここに、 \mathbf{r}_i ：人間要素 i の位置ベクトル、 θ_{dij} ：人間要素 i の進行方向と人間要素 j の存在方向の成す角である（図-1参照）。人間相互の心理的平衡距離 Λ_{hcf} については、清野ら⁴⁾による実測値 $\Lambda_{hcf}=0.976\text{m}$ を用いた。式(4)の条件が成立すると、要素間の法線および接戦方向に弾性スプリングおよび粘性ダッシュポットを配置して要素間作用力 \mathbf{F}_{himt} が算定される。

汜濫流による流体力 \mathbf{F}_{flow} は、抗力型の表式

$$\mathbf{F}_{flow} = \frac{1}{2} \rho \varepsilon_U C_D h d_h |\mathbf{U} - \mathbf{u}_{hi}| (\mathbf{U} - \mathbf{u}_{hi}) \quad (6)$$

によって評価した。ここに、 ρ ：水の密度、 C_D ：抗力係数、 h ：水深、 \mathbf{U} ：流速ベクトル、 ε_U ：補正係数である。なお、本研究のモデルで算定した平衡歩行速度は須賀ら⁸⁾の水中歩行実験結果を良好に再現することは別途確認している。

人間要素の歩行力ベクトル \mathbf{F}_{aw} は、視野範囲の混雑状況および標識等からの各種情報によって決定される。本稿で対象とする地下街浸水時では、停電を前提とし、非常用電源による避難誘導灯からの視覚情報が個体の移動方向の決定に対して主たる支配要因になると考えた。そこで、視界内に誘導灯がある場合には、人間要素は直接誘導灯がある出口方向に向かって運動し、視界内に誘導灯が無い場合には人間要素が存在する各領域（図-4参照）に指定された方向に運動するとすれば、歩行力ベクトルの作用方向を示す単位ベクトルは、

$$\mathbf{r}_{aw} = \begin{cases} \frac{\mathbf{r}_{exit} - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_{exit} - \mathbf{r}_i|} & (|\mathbf{r}_{exit} - \mathbf{r}_i| \leq L_{exit}) \\ \mathbf{r}_{unit} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (7)$$

と記述できる。ここに、 \mathbf{r}_{exit} ：人間要素が存在する領域内の出口の位置ベクトル、 \mathbf{r}_{unit} ：各領域に指定された単位方向ベクトル、 L_{exit} ：出口までの距離の閾値（=20.0m）である。人間要素の歩行は、平井・樽井³⁾に倣い平衡歩行速度 u_{limit} に達するまでは等加速度運動すると仮定して、駆動力を

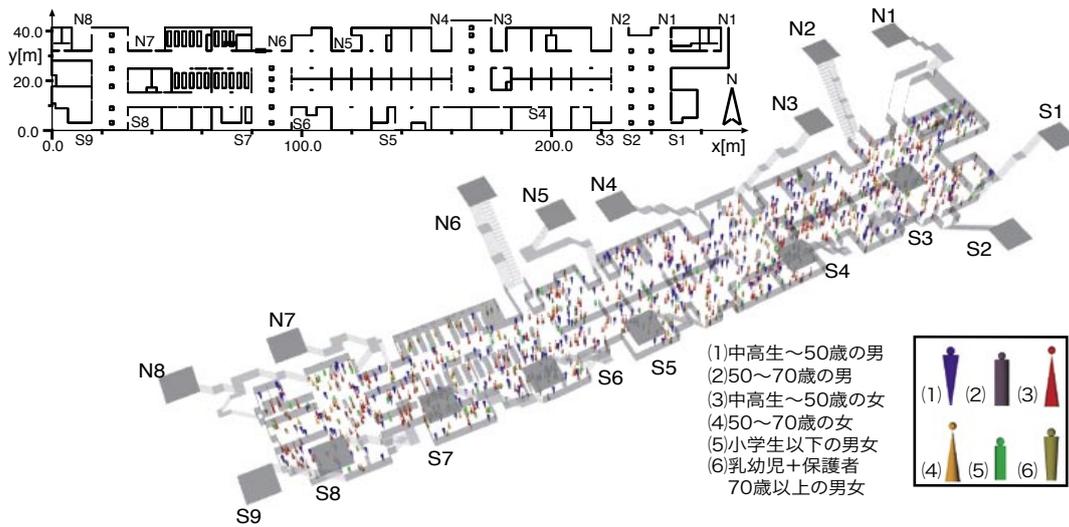


図-2 計算領域： a) 平面図（上）， b) 鳥瞰図＜初期要素配置を含む＞（下）

表-1 各属性の諸元

属性	存在比率(%)	歩行速度(m/s)	マーク
中高生～50歳の男	27.5	1.45	
50～70歳の男	5.0	1.19	
中高生～50歳の女	40.9	1.23	
50～70歳の女	5.8	1.04	
小学生の男	1.9	1.02	
小学生の女	6.5	1.09	
乳幼児+保護者	9.2	0.88	
70歳以上の男	1.4	0.99	
70歳以上の女	1.8	0.89	

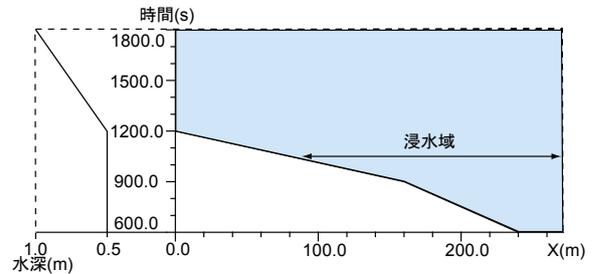


図-3 地下街の浸水過程

程度を実状にあわせたレイアウトとし、東西・南北におよそ280m・40mの計算領域とした。また、地上に通じる出口は、北側(N1~N8)および南側(S1~S9)に計17箇所設置されている。このような地下街領域に、性別・年齢等によって9種類の属性に分類された人間要素(表-1参照)をランダムに配置し、氾濫時に想定される様々な条件下での群衆避難行動をシミュレートする。また、それぞれの属性の存在割合は、清野ら⁹⁾が実測したデータを使用し、浸水していないドライベッド上の平衡歩行速度 u_{limit} を基準値(仙田ら¹⁰⁾および吉岡¹¹⁾の研究成果を援用)として各条件のシミュレーションを実施した。なお、浸水によって地下街が停電した場合、浸水時の地下街という悪条件を考慮して、基準平衡歩行速度の70%、階段部および停止したエスカレータ部ではその50%とした。

氾濫水は、戸田ら¹²⁾の水理実験を参考に、ゼスト御池の東側から流入し、浸水開始から約10分間で水深0.5mに達するように設定した。その後は図-3に示す浸水域の拡大と水深上昇で推移させ、浸水開始後15分には流入流量の増大による東側の地上

$$F_{aw} = \begin{cases} M_{hi} \alpha_h r_{aw} & (|u_{hi}| \leq u_{limit} - \gamma_{dv} c_h) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (8)$$

と表現する。ここに、 α_h ：加速能力に関するパラメータ(=0.837)、 γ_{dv} ：減速効果に関するパラメータ(=0.426)、 c_h ：混雑状況を表現する視野範囲の人間要素の数密度である。また、混雑状況の認識限界 Λ_{hd} は $4d_h$ とした⁵⁾。

3. 地下街における氾濫時の群衆避難

(1) 計算領域・計算条件

対象計算領域を図-2に示す。三次元的構造を把握し易くするためにa)鳥瞰図およびb)平面図を併示した。ゼスト御池地下街はb)平面図に示すように、地下街に存在する各種店舗の開口部分の開放の

表-2 計算条件と避難時間

	避難開始時間	人数	停電	速度・加速度	浸水	迷い(乱数)	学習効果	50%避難時間(s)	90%避難時間(s)	100%避難時間(s)
case0	0分	1980	—	2倍	×	×	×	—	—	—
case1	0分	1000	—	1倍	×	×	×	129	204	290
case2	10分	1000	—	1倍	○	×	×	129	205	291
case3-1	15分	1000	—	1倍	○	×	×	163	362	651
case3'	15分	1000	最初から	0.7倍	○	×	×	203	542	1015
case3-2	15分	1000	途中から	1倍/0.7倍	○	×	×	186	534	942
case3-3	15分	1000	途中から	1倍/0.7倍	○	○	×	181	482	879
case4-1	15分	1000	—	1倍	○	×	○	163	277	419
case4-2	15分	1000	途中から	1倍/0.7倍	○	×	○	185	339	512
case4-3	15分	1000	途中から	1倍/0.7倍	○	○	○	181	335	545

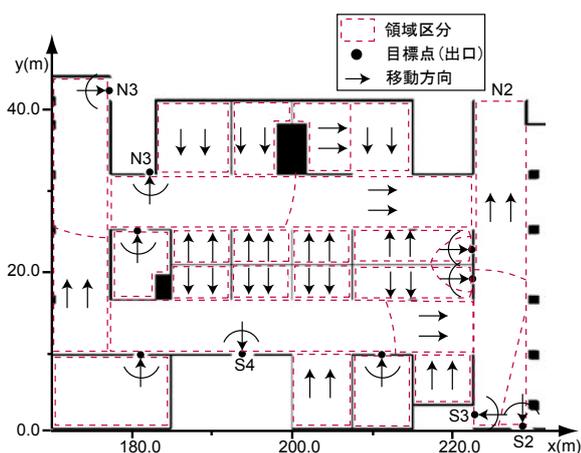


図-4 領域区分と避難方向

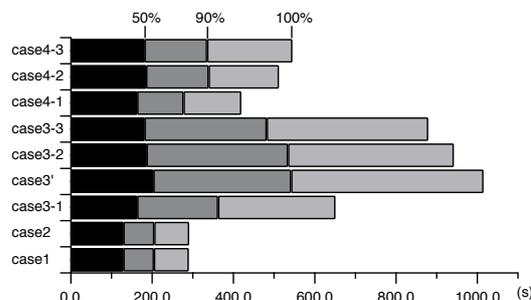


図-5 避難完了時間

に向かう出口(S1,S2,S3,S4,S5)が使用不可能になるという戸田らの水理実験結果を反映させた。

個々の要素の避難経路選択は、図-4に示すように要素の視野範囲を考慮に入れて、地下街を複数の領域に分割し、各領域に指定された移動方向に従って避難する仕組みになっている。なお、図中の矢印に円弧を重ねた記号は、対象領域で個体がある存在位置から直線的に目標点(出口)を目指すことを示している。

(2) 避難過程の検討

表-2に本稿で実施したケースの条件をまとめて示した。現実の氾濫水による被災で様々な状況下での群衆の避難過程が想定されるが、本稿で取り扱う主な状況要因として、i) 浸水によって停電が発生した場合、ii) 氾濫を想定した避難訓練によって氾濫時に使用不可能になる階段位置の情報が十分に避難者に周知され、事前学習が施されている場合を考えた。停電については、地下街中央部付近に電気室を想定し、停電は浸水が地下中央部に達した時に発生するとした。また、浸水開始後15分で南側出口のS1~S5が使用不可能になるとしているが、表-2の欄内で学習効果に丸印があるケースでは、領域区分における避難方向の設定を変えることで、使用不可能になる出口S1~S5に向かわず、北側出口に避難する

ように事前学習させた。

まず、本稿で用いた群衆避難行動モデルが適切な水準で機能するか判断するため、清野ら⁹⁾と同一条件によるシミュレーション(case0)を実施し、避難の進行状況がほぼ一致することを確認した。

以下にcase2(氾濫発生10分後に群衆が一斉避難する場合)、case3-2(氾濫発生15分後の避難開始であり、南側出口(S1,S2,S3,S4,S5)が使用不可能になる場合)、case4-2(case3-2と同様の南側出口が使用できないことが、事前学習されている場合)を代表例として詳細に検討する。図-5に各ケースの50%、90%、100%避難完了時間を示す。全ての出口が使用可能なcase2は南側出口(S1~S5)が使用できないcase3-2と比較しておよそ1/3の時間で避難が完了しており、氾濫後の速やかな避難勧告による迅速な避難行動が重要であるかが分かる。case3-2およびcase4-2の100%避難完了時間はそれぞれ942s、512sであり、事前学習が如何に避難時間の短縮に有効であるかが両ケースの比較から明らかになった。さらに、事前学習がされてると、避難過程の前半で避難完了する人の割合が増加する傾向も確認できる。

図-6に流入流量の増大のため出口S1~S5が使用不可能になり、群衆がその他の出口を避難経路として選択するcase3-2とcase4-2のスナップショットを示す。事前学習のあるcase4-2では、時刻 $t=100$ sのスナップショットから北側出口へ向かう群衆避難の様子が確認できる。また、事前学習の無いcase3-2の同時刻 $t=100$ sのスナップショットからは西側へ向かう群衆の様子が確認できる。また、事前学習の有

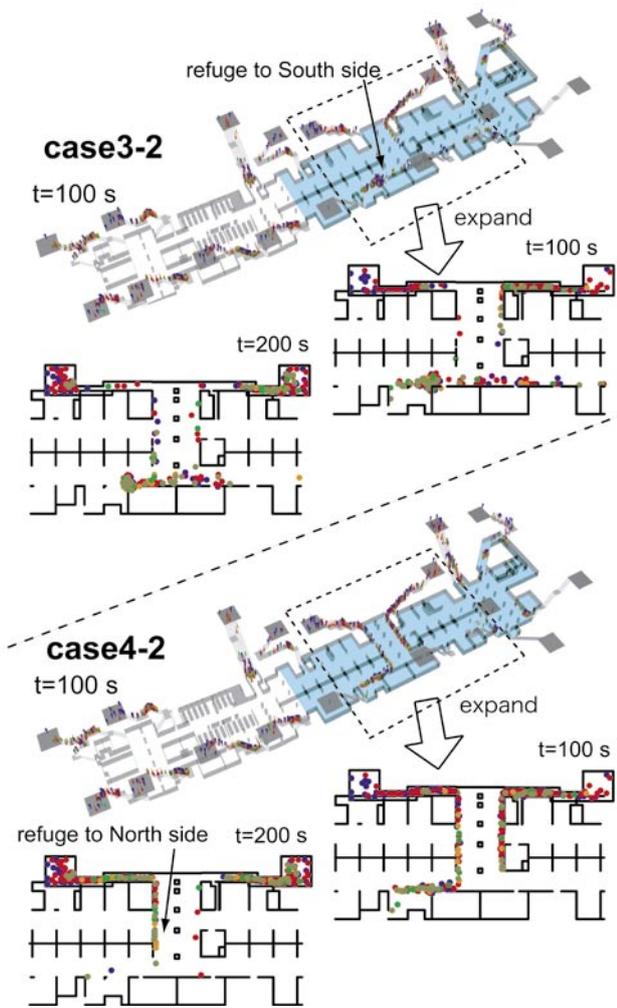


図-6 避難過程のスナップショット

無による各出口の利用避難者数とその構成および各出口の最終避難完了時刻を図-7に示すが、case2で出口S1~S5を使用していた群衆が、それぞれcase3-2では出口N2,N3,N4,S6に、case4-2では出口N1~N4に分散して避難する様子が理解でき、このことによる出口S1~S5以外の負担増大が避難完了時間の遅延に繋がると考えられる。事前学習の無いcase3-2では出口N3およびS6に群衆が集中しているが、避難者数密度の増加および避難動線距離の長い出口S6の選択が避難完了時間の増大の原因になったことが窺える。代表的な一人の要素の避難動線を図-8に示す。case2は近傍の出口に直接避難の様子が示され、case4-2は北出口に、case3-2は西側に避難し長距離の動線を描いて避難の様子が明瞭に確認でき、学習効果の有無による経路選択の違いが分かる。避難開始時の個体の位置による避難出口使用状況を図-9に示す。図は避難行動開始時の個体の座標とその個体が使用した出口の関係をもとめたものである。case2では各領域の最近傍の出口を使用し

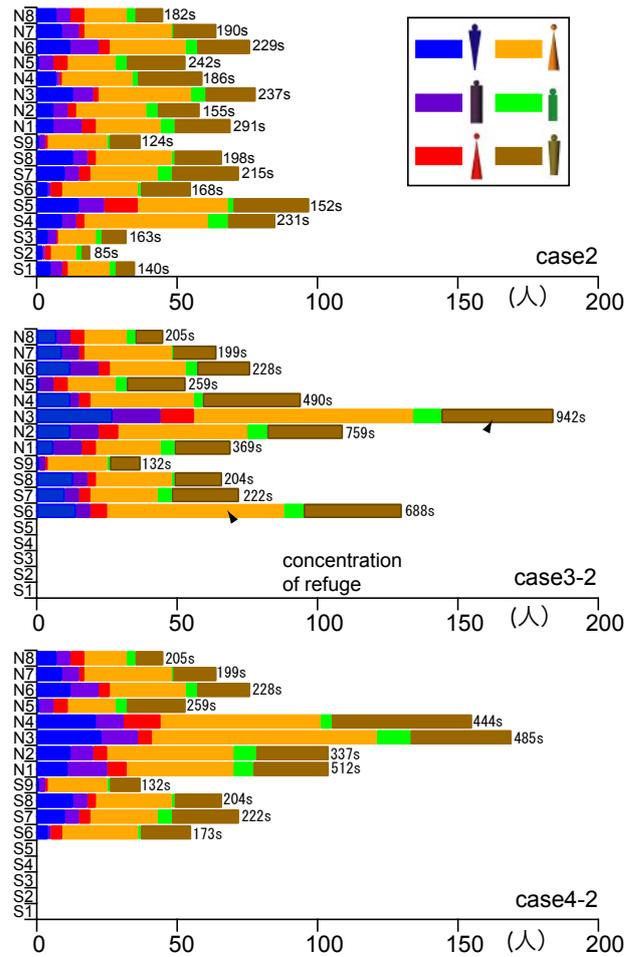


図-7 各出口の構成人数

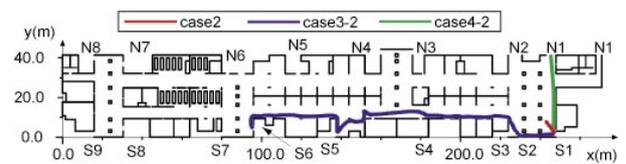


図-8 避難動線の比較

て避難の様子が明瞭に示され、効率の良い避難状況であることが窺える。また、事前学習されていないcase3-2では、出口S6よりも東側の、さらにその南側半分の領域において異なる出口を選択する避難者の混在が顕著である。さらに、出口S1近傍の避難者が西へ100m以上離れた出口S6を使用している等から、混雑した避難状況が想像できる。一方、case4-2では、事前学習の効果によってcase3-2に見られたような遠方の出口を使用する避難者の混在状況が一変し、各領域ごとに近傍の出口を使用する分布が確認できる。この図からも、事前学習が速やかな避難に対して重要であるか再認識できる。また、速やかな避難には、避難者の混雑を低減するルール作りが肝要であることが言える。

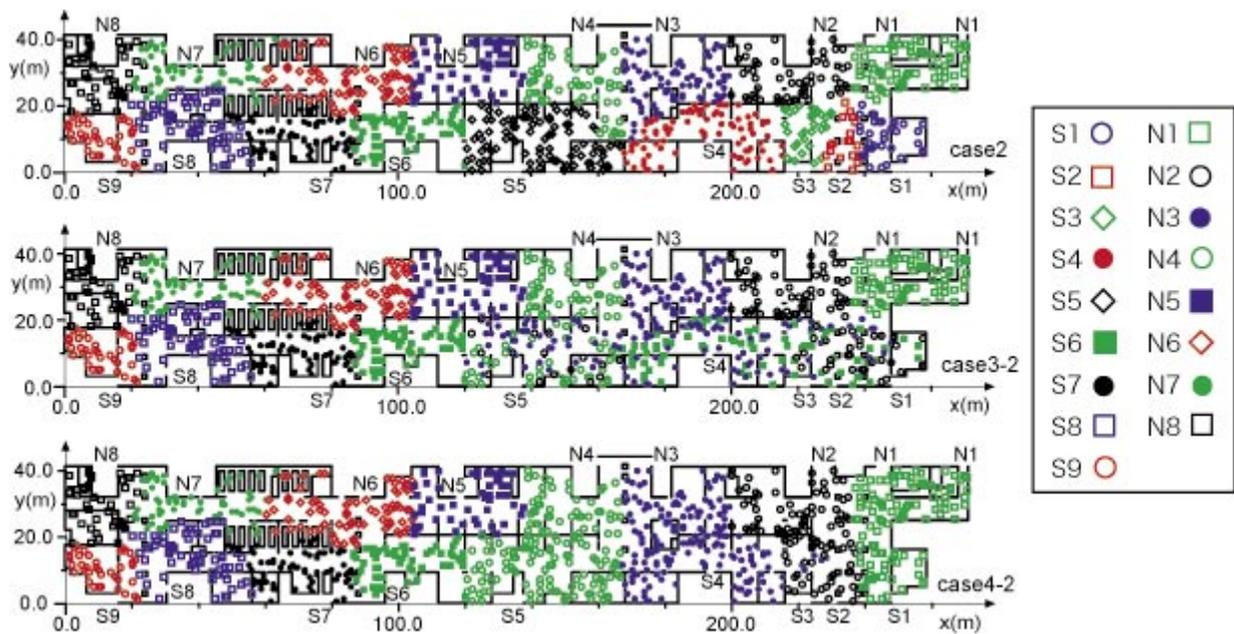


図-9 避難出口の選択状況

5. 結 語

本研究では、実スケールの地下街における浸水時の群衆避難について、著者らが開発を進めてきた個別要素法を基礎とした群衆行動モデルを用いて、人間スケールレベルから詳細に検討した。また、実在地下街の店舗隔壁、通路、広場等のレイアウトのディテールを考慮した境界条件下で、複数の浸水シナリオを想定して、避難シミュレーションを実施し、適正な避難ルールに関する事前学習の重要性を明らかにした。

今後は複雑な境界条件を速やかに作成できる支援システム並びにインターフェイスの構築を検討したい。

謝辞：本研究は、内藤科学技術振興財団研究助成（代表者：原田英治）の補助を受けて行われた。また、本研究に際して、京都大学防災研究所・戸田圭一教授から頂戴した地下街氾濫に関する種々のコメントが大変有用であった。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 戸田圭一・井上和也・前田 修・谷野知伸：大都市地下空間の氾濫浸水解析，水工学論文集，第 43 巻，pp.539-544，1999.
- 2) 建設省監修：新・建築防災計画指針 1985 年度版，日本建築センター，1985.
- 3) 平井一正・樽井賢治：パニック時の群衆の行動とそのシミュレーション，システムと制御，Vol. 21, No. 6, pp. 331-338, 1977.

- 4) 清野純史・三浦房紀・瀧本浩一：被災時の群衆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, pp.233-244, 1996.
- 5) 後藤仁志・原田英治・久保有希・酒井哲郎：DEM型群衆行動モデルによる浸水地下街からの避難シミュレーション，水工学論文集，第 49 巻，pp.607-612，2005.
- 6) 後藤仁志：数値流砂水理学，森北出版，223p., 2004.
- 7) Fruin J.・長島正充：歩行者の空間，鹿島出版社，206p., 1974.
- 8) 須賀堯三・上坂恒雄・白井勝二・高木茂知・浜口憲一郎・陳 志軒：避難時の水中歩行に関する実験，水工学論文集，第 38 巻，pp.829-832，1994.
- 9) 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評価，土木学会論文集，No.689/I-57, pp.31-43, 2001.
- 10) 仙田 満・矢田 努・富田昌志・原 博：歩行線形による通路空間の形状に関する研究 小学校廊下の実態調査および実物大模型による歩行実験にもとづく曲がり角隅切処理の提案，日本建築学会計画系論文報告集，No.455, pp.109-118, 1994.
- 11) 吉岡昭雄：歩行者交通と歩行空間 (II)，交通工学 Vol.13, No.5, 1978.
- 12) 戸田圭一・井上和也・大八木亮・中井勉・竹村典久：複雑な地下空間の浸水実験，水工学論文集，第 48 巻，pp.583-588，2004.

(2005.9.30 受付)