

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

SIMULATION OF REFUGE FROM INUNDATED UNDERGROUND SPACE
BY PARTICLE-SYSTEM MODEL OF CROWD BEHAVIOR

後藤仁志¹・原田英治²・久保有希³・酒井哲郎⁴

Hitoshi GOTOH, Eiji HARADA, Yuki KUBO and Tetsuo SAKAI

¹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)

²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 愛知県豊田市栄生町 2-1)

³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)

⁴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)

A flooding to an urban underground space may cause the serious damage on a life of human. The effective simulation that handles directly individual action of human being has not been applied to the refuge from inundated urban underground space, up to now. In this study, the distinct-element-method type human-action model is built and improved for the simulation of crowd behavior in the flow field, which is calculated by the shallow-water-flow analysis. In the human action model, an individual recognizes the situation of circumference, and actively moves based on self decision making. Interaction zone of individuals is set with assuming that individuals decide their moving direction based on the visual information of their circumference. The driving force of active motion of individuals is set by taking previous observation of moving speed of crowd into account.

Key Words: inundation, urban underground space, crowd behavior, distinct element method, individual based model

1. はじめに

高密度の利用が進んだ都市中心部における水害は、都市構造の複雑さ故に大変複雑となり、避難計画等の適切な策定には、現象の複雑性に十分に配慮したシミュレーションが不可欠である。都市域での大規模な水害は地下空間への浸水(例えば、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)を伴うので、人命に関わるような深刻な被害を誘発する危険が高いと言える。

被害予測にとって不可欠な情報は、氾濫規模の予測である。これに関しては、浅水流モデルを用いた数値解析が実施されており(例えば、高橋ら¹⁾、井上ら²⁾、戸田ら³⁾)、例えば、戸田ら³⁾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、地下街の街路形状

特性を反映させた取り扱いが可能であることを示している。

氾濫浸水の規模や時間的な進行過程が必要な精度で予測できるようになると、次に必要なのが、人間の避難行動の予測である。すなわち、予測された氾濫浸水に対して、地下空間で活動する人間がどのように対応するかを予測し、適切な避難誘導の方法など、ソフト面での防災計画のための基礎情報とする必要がある。避難行動モデルについては、地上での氾濫の際の広域の避難を対象として、検討が進められてきており(例えば、高棹ら⁴⁾、高橋ら⁵⁾)、人間個人を構成単位とした水害避難のシミュレーションは行われていない。しかし、地下街が閉鎖的な空間であることを考えると、ビル火災からの避難などと同様に、人間個人を構成単位としたモデル(例えば、平井・樽井⁶⁾、清野ら⁷⁾)の導入が必要であろう。

本研究では、清野ら⁷⁾による個別要素法を基礎とした避難行動モデルを参考に、著者らがこれまで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型モデル⁸⁾を基礎として、個体ベースの人間行動モデルを構築・改良し、浅水流解析により得られた流れ場中での群衆の挙動のシミュレーションを実施する。本研究が目標とするのは、戸田ら³⁾が行ったような大規模地下街全域を対象とするシミュレーションであるが、個体ベースのモデルは計算負荷が大きく、現時点で大規模地下街の実際の街路形状を反映させたシミュレーションを直ちに実施することができない。そこで、本研究では、地下街の構成単位の一つとして広場に注目し、浸水時の地下広場からの群衆避難を対象とする。

2. 群衆行動モデル

(1) モデルの構成

計算対象は、地上に通じる階段と繋がった地下広場内での群衆移動であるので、平面2次元場を対象とする。群衆行動モデルは、著者ら⁹⁾が津波避難階段の昇段過程の解析に用いた個別要素法を基礎としたモデルであるが、氾濫流の流体力の個体への作用を導入できるように拡張した。また、本研究では人間要素の能動的運動について、著者らの既往のモデル⁹⁾に大幅な改良を加えた(本章第2節参照)。

並進および回転に関する人間要素の運動方程式

$$M_{hi} \frac{du_{hi}}{dt} = F_{hnt} + F_{aw} + F_{flow} ; M_{hi} = \frac{\varepsilon_h \sigma_h \pi d_{hi}^2}{4} \quad (1)$$

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

に陽解法を適用する。ここに、 F_{hnt} :要素間(人間/人間および人間/壁)の作用力ベクトル、 F_{aw} :人間要素の歩行力(推進力)ベクトル、 F_{flow} :氾濫流による流体力ベクトル、 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。人間要素径を $d_h=0.52$ m(Fruin・長島¹⁰⁾の人体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 60 kg の成年男子)を想定すると、 $\varepsilon_h=0.178$ となる。

要素間作用力ベクトルおよびトルクについては個別要素法の標準的な取り扱いに従って、

$$F_{hnt} = \begin{bmatrix} \sum_j \{-f_{hn} \cos \alpha_{ij} + f_{hs} \sin \alpha_{ij}\}_j \\ \sum_j \{-f_{hn} \sin \alpha_{ij} + f_{hs} \cos \alpha_{ij}\}_j \end{bmatrix} \quad (3)$$

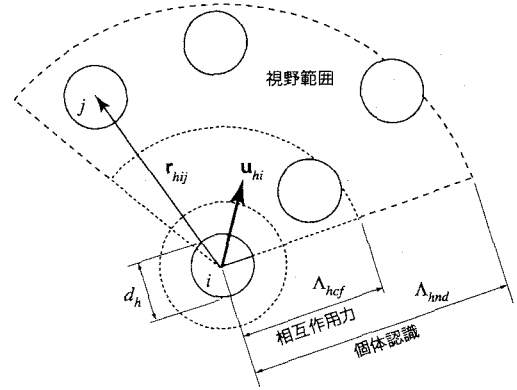


図-1 要素間作用力の発現領域

と記述する。ここに、 f_{hn}, f_{hs} :人間要素 i, j 間の法線(n)および接線(s)方向の作用力、 α_{ij} :人間要素 i, j の接触角(人間要素 i, j の共通接線の x 軸と成す角;反時計回り正)である。

要素間作用力の発現領域(図-1 参照)は、視野範囲(人間要素の正面から $\pm \pi/3$)を考慮して、

$$|r_{hij}| \leq \begin{cases} \Lambda_{hcf} & \left(-\frac{\pi}{3} \leq \theta_{dij} \leq \frac{\pi}{3}\right) \\ \frac{d_{hi} + d_{hj}}{2} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4)$$

$$r_{hij} = r_j - r_i ; |r_{hij}| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (5)$$

$$\cos \theta_{dij} = \frac{u_{hi} \cdot r_{hij}}{|u_{hi}| |r_{hij}|} \quad (6)$$

と設定した。ここに、 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。人間相互の心理的平衡距離 Λ_{hcf} については、清野ら⁷⁾による実測値 $\Lambda_{hcf}=0.976$ 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線方向に弾性スプリング(バネ定数 k_{hn}, k_{hs})および粘性ダッシュポット(粘性定数 c_{hn}, c_{hs})を配置して、

$$\left. \begin{aligned} f_{hn}(t) &= e_{hn}(t) + d_{hn}(t) \\ e_{hn}(t) &= e_{hn}(t - \Delta t) + \beta_{hk} k_{hn} \cdot \Delta \xi_{hi} \\ d_{hn}(t) &= c_{hn} \cdot \Delta \xi_{hi} / \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} f_{hs}(t) &= e_{hs}(t) + d_{hs}(t) \\ e_{hs}(t) &= e_{hs}(t - \Delta t) + \beta_{hk} k_{hs} \cdot \Delta \eta_{hi} \\ d_{hs}(t) &= c_{hs} \cdot \Delta \eta_{hi} / \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\beta_{hk} = \exp \left\{ -2.6 \left(\frac{|r_{hij}|}{d_{hi}} - 1 \right) \right\} \quad (9)$$

によって人間要素間の作用力を算定する。ここに、 e_{hn}, e_{hs} :法線および接線方向のバネによる抗力、 d_{hn}, d_{hs} :法線および接線方向のダッシュポットによる抗

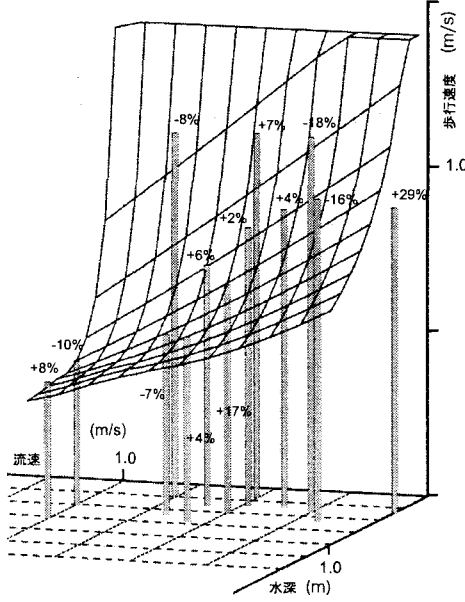


図-2 水中歩行実験との比較

力, $\Delta\xi_h, \Delta\eta_h$: 時間 Δt 間の法線および接線方向変位, β_{hk} : 要素間距離の増大に伴う反発力の低減効果を示す補正係数である。

汜濫流による流体力については, 抗力型の表式

$$F_{flow} = \frac{1}{2} \rho \varepsilon_U C_D h d_h |U - u_{hi}| (U - u_{hi}) \quad (10)$$

を導入した。ここに, ρ : 水の密度, C_D : 抗力係数, h : 水深, U : 流速ベクトルであり, 須賀ら¹¹⁾の水中歩行実験による歩行速度の流速・水深に対する依存性を良好に説明するため, 補正係数

$$\varepsilon_U = \exp\left(-0.015 \frac{|U|h}{\nu}\right) \quad (11)$$

を導入した (ν : 動粘性係数)。図-2 は, 本研究のモデルで算定した平衡歩行速度 (図中のワイヤフレーム) と須賀らの実験 (図中の棒グラフ) の対応を示したものである。各棒グラフの近傍に記入した数値は, 本研究のモデルの予測値と実測値の差を予測値で規格化した値である。一部を除いて, ほぼ良好な一致が確認され, 少なくとも実測値の存在する範囲では, 本モデルの予測値が妥当であることが確認できた。なお, 通常の群衆歩行に対するモデル定数に関しても, 既往の群衆歩行観測と比較して, 妥当性を確認済みである⁹⁾。地下広場内の汜濫流の流速・水深に関しては, 長田¹²⁾による Fortran コード (スタッガード格子; 有限体積法; 移流項に 1 次精度の風上差分, 時間積分に Adams-Bashforth 法を適用) に基づいて浅水流解析を実施して算定した。

(2) 人間要素の能動的運動のモデル化

人間要素は, 視野範囲にある情報を取得してその移動方向を主体的に決定する。汜濫時に停電した地

下街からの避難では出口に取り付けられた非常灯からの視覚情報が移動方向の決定に支配的であると考えた。視界内に非常灯がある場合には, 人間要素は直接出口に向かって運動し, 視界内に非常灯がない場合には, 最も近傍の他の人間要素と協調して (同じ方向に) 運動するとすれば, 能動的運動の駆動力の作用方向を示す単位ベクトルは,

$$\mathbf{r}_{aw} = \begin{cases} \frac{\mathbf{r}_{exit} - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_{exit} - \mathbf{r}_i|} & (|\mathbf{r}_{exit} - \mathbf{r}_i| \leq \Lambda_{exit}) \\ \frac{\mathbf{r}_{nei}}{|\mathbf{r}_{nei}|} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (12)$$

と書ける。ここに, $\mathbf{r}_{exit}$: 人間要素 i の最も近傍に存在する出口の位置ベクトル, $\mathbf{r}_{nei}$: 人間要素 i の最も近傍に存在する他の人間要素の位置ベクトル, Λ_{exit} : 出口までの距離の閾値 (=20.0 m) である。人間要素の歩行は, 平衡歩行速度 u_{limit} に達するまでは等加速度過程に従う (平井・樽井⁶⁾) と仮定して, 駆動力を,

$$\mathbf{F}_{aw} = \begin{cases} M_{hi} \alpha_h \mathbf{r}_{aw} & (|u_{hi}| \leq u_{limit} - r_{dv} c_h) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (13)$$

と表現する (α_h : 加速能力に関するパラメータ (=0.837), r_{dv} : 減速効果に関するパラメータ (=0.426))。式 (13) 中には, 平衡速度が視野範囲の混雑状況に応じて低下することを表現するため, 視野範囲の人間要素の数密度

$$c_h = \frac{4}{21\pi d_h^2} \sum_j w_{ij}^{vf} \quad (14)$$

$$w_{ij}^{vf} = \begin{cases} 1 & (|\mathbf{r}_{hij}| \leq \Lambda_{hnd} \text{ and } -\frac{\pi}{3} \leq \theta_{dij} \leq \frac{\pi}{3}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (15)$$

を導入した (Λ_{hnd} : 混雑状況の認識限界 (=4 d_h))。

3. 地下広場における汜濫時の群衆避難

(1) 計算領域・計算条件

計算領域は, 図-3 に示す約 475m² の矩形のモデル地下広場であり, 広場内には合計 6 本の列柱が設けられている。広場には, 幅 3.12m の出口が 3 ケ所あり, 十分な広さの踊り場と地上へ通じる階段が備えられているものとする (避難する人々が踊り場に収容できない事態は想定しない)。言い換えると, 本シミュレーションにおける個々の人間要素の避難の完了は, 3 ケ所の出口の何れかを通過した時点とする。

汜濫の伝播は地下街路を通じて生じることを想定し, 幅 6.24 m の街路 2 本からの流入と幅 7.8 m の街路からの流出を想定する。浅水流解析においては, 広場の左端部から 5.2 m の地点を上流端として流量 $q=2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ を与え, 広場右端部から 15.6 m の地点を下流端として, 水位の境界条件を課した。上流端の

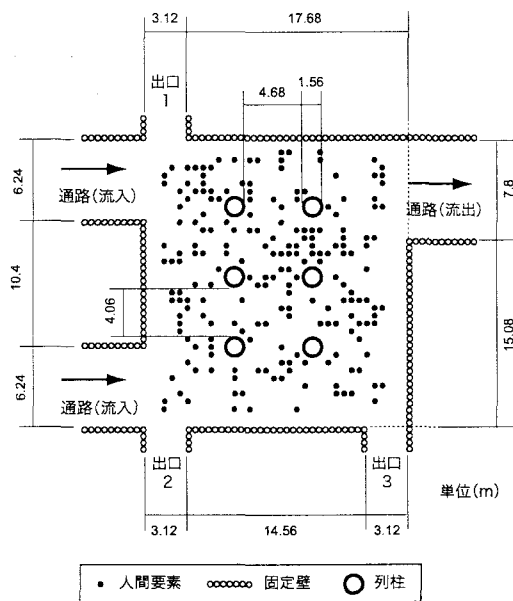


図-3 計算領域 (モデル地下広場)

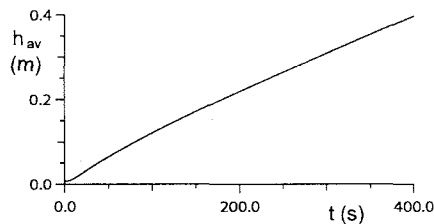


図-4 広場内平均水深の時間変化

流量および下流端の水位は、戸田ら¹³⁾の水理実験(京都御池地下街への氾濫；御池大橋付近から $100\text{m}^3/\text{s}$ の溢水が生じる状況を想定)を参考に、浸水開始から約 10 分間で水深 0.5m に達するように調整した。計算された広場内の平均水深 h_{av} の時間変化を図-4 に、流速ベクトルと水深分布を図-5 に示す。左上側の街路から流入した流れは、真横に主流部を形成して出口に向かい、一部は柱を避けて分派し、柱間を横向きに流れた後、主流と合流して流出している。一方、左下側の街路から流入した流れは、真横に向かった後 90 度向きを変えて上方に向かい、左上側の街路から流入した流れと合流して流出している。列柱に囲まれた広場中央には複数の循環セルが存在するが、流速は相対的に小さくなっている。また、中央の列柱部分では抵抗増加に伴う水深増大が生じている。

避難シミュレーションの初期条件は図-3 に示すように、広場内に 200 人がランダムに位置する状態とする。最も基礎的なケースとして、一定の運動能力を有する均質個体群の場合についての計算を行う。平衡歩行速度については、成年男子の平坦部・屋光下での歩行観測¹⁴⁾を本モデルのドライベッド上の歩行計算で再現するには、 $u_{limit}=1.39\text{ m/s}$ 、 $\alpha_h=0.837$ と設

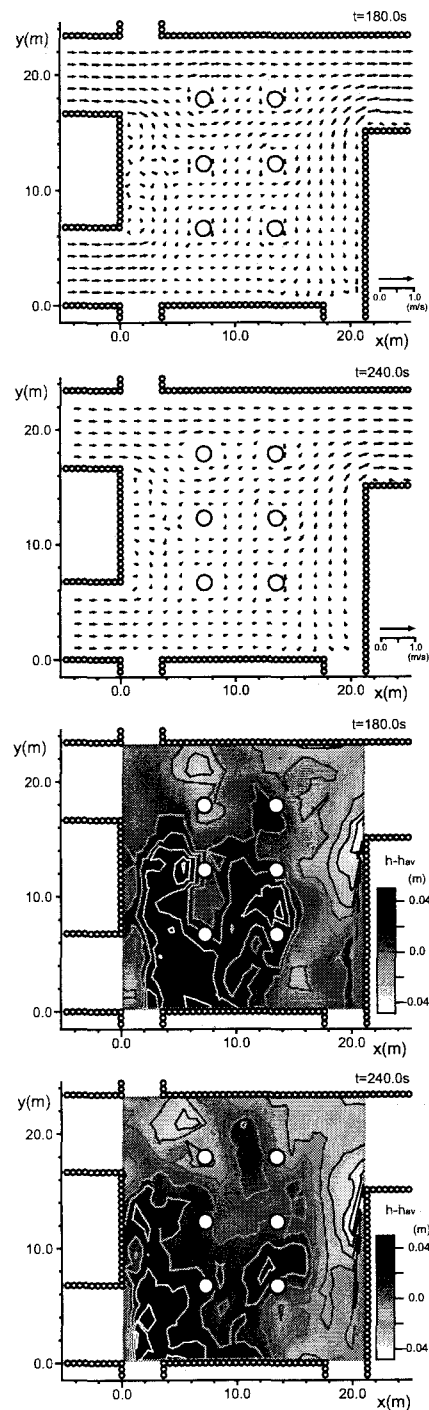


図-5 広場内の流速ベクトルと水位分布

定する必要がある⁹⁾。ここでは、浸水時の地下街という悪条件を考慮し、非常灯による照明しか得られず、水面の揺動と反射により足下の見通しが極端に低下した状態を想定し、 u_{limit} を平坦部・屋光下での $1/2$ の値に、 α_h を平坦部・屋光下での $1/4$ の値に設定した。

以下では、(A) 非定常流場における避難のケースと (B) 一定水深下における避難のケース(ケース (A) の簡易版)の 2 者を比較する。ケース (A) では、先に示した浅水流解析から得られた流れ場で、浸水開始から 3 分後に避難を開始することを想定し、水位

上昇と流速場の変化が個体の歩行に与える影響を考慮する。一方、ケース (B) では、一定水深 (ケース (A) の避難開始時と終了時の水深の平均) で流れなしとして、静水中の個体の歩行を想定する。浅水流計算を省略して、浸水の程度を水深のみで与えた簡易な推定を実施する場合がケース (B) に相当する。

(2) 避難過程の検討

上記のケース (A),(B) について、避難の進行状況を図-6 に示す。避難開始後 20 s 経過した $t=200.0$ s

を見ると、紙面上方に出口が 1 ヶ所しかないことから、出口 1 に向かう人の割合が多くなり、出口付近の通路に多くの人が集まっている様子がシミュレーションされている。一方、紙面下方側では、人々が 2 ヶ所の出口に分散して避難しているが、出口 1 からの距離が遠い出口 3 を通じて避難する人の割合が、出口 2 と比較して多くなっている。以上のような避難人数の相違から、出口 2 を通じての避難が始めに完了し、続いて出口 3 を通じての避難が、最後に $t=260.0$ s を過ぎて出口 1 を通じての避難が完了す

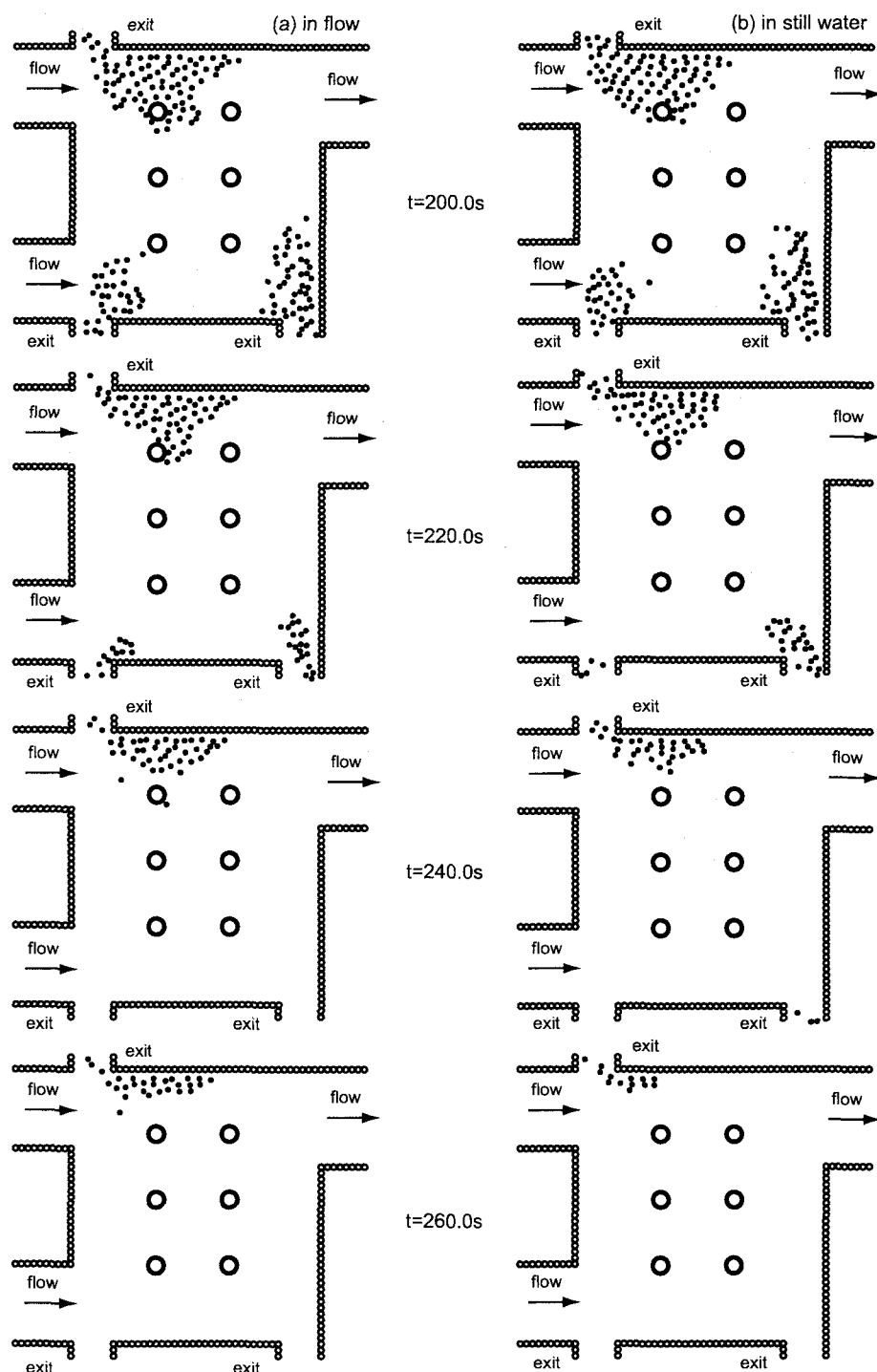


図-6 避難過程の瞬間像

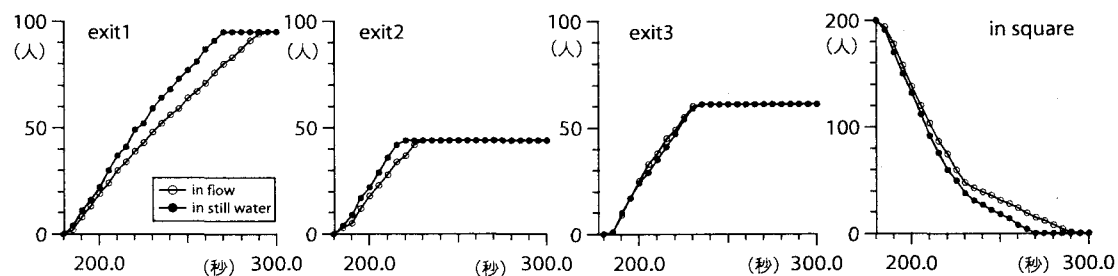


図-7 出口到着者数の変化

る。以上のような避難状況は、(A) 非定常流場における避難のケースと (B) 一定水深下における避難のケースの両者に共通しているが、水流に逆らう向きに移動を要する出口 1 においては、水流の押し戻し効果を考慮したケース (A) が、静水中の避難のケース (B) より顕著に避難が遅れている ($t=260.0$ s における広場内残留員数の相違に注目)。一方、出口近傍で流れに沿う向きに移動して出口に近づくことのできる出口 3 については、僅かではあるが水流の影響を考慮したケース (A) において、静水中の避難のケース (B) より避難が早く完了する ($t=240.0$ s 参照)。このような相違を定量的に把握するために、各出口を介しての避難完了者数の累積値を図-7 に示す。図中には、広場内の残留人数も併示した。避難過程の瞬間像からも推測できたように、ケース (A)、(B) の差が顕著な順に、出口 1、出口 2 (出口 1 同様に水流に逆らう向きに移動を要する出口であるが、避難対象人数の合計が出口 1 の半数弱) となり、出口 3 では 2 つのケースにほとんど差が見られない。

4. おわりに

本研究では、個別要素法を基礎として個体ベースの人間行動モデルを構築し、浅水流解析により得られた流れ場中での群衆挙動のシミュレーションを実施した。広場、街路といった地下街の構成要素を対象に、出口や柱といった固定構造物のレイアウトの防災面からの妥当性を検討するには、この種の方法が有効であろう。

今後は、モデルに含まれるパラメータの妥当性の検証のための人間行動データの収集とともに、広域の地下街の直接シミュレーションを実施するため、大規模計算のための並列化等の計算技術面での進歩に努力を続けたい。

参考文献

- 1) 高橋 保・中川 一・野村 出：洪水氾濫に伴う地下街浸水のシミュレーション，京都大学防災研究所年報 第 33 号，B-2，pp.427-442，1990.
- 2) 井上和也・中川 一・戸田圭一・溝田敏夫：地下空

- 間への氾濫浸水の解析，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 2 巻，土木学会地下空間研究委員会，pp.95-102，1997.
- 3) 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.
- 4) 高埴琢馬・椎葉充晴・堀 智晴：住民意識の変化過程を考慮した水害避難行動モデルの設計，水工学論文集，第 37 巻，pp.239-244，1993.
- 5) 高橋 保・中川 一・東山 基：洪水氾濫解析とリンクした避難のシミュレーション，第 33 回水理講演会論文集，pp.355-360，1989.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 後藤仁志：数値流砂水理学，森北出版，223 p.，2004.
- 9) 後藤仁志・原田英治・久保有希・酒井哲郎：個別要素法型群衆行動モデルによる津波時の避難シミュレーション，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 1261-1265，2004.
- 10) Fruin J.・長島正充：歩行者の空間，鹿島出版社，206 p.，1974.
- 11) 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，829-832，1994.
- 12) 長田信寿：一般座標系を用いた平面 2 次元非定常流れの数値解析，水工学における計算機利用の講習会，土木学会水理委員会基礎水理部会，pp.61-76，1999.
- 13) 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.
- 14) 小関憲章・渡部貞清：群衆旅客流の交差，日本建築学会論文報告集号外，p.762，1967.

(2004.9.30 受付)