

# OV模型を援用したDEM型群衆避難行動モデルの提案

## PROPOSAL OF DEM-BASE CROWD REFUGE MODEL WITH THE OPTIMAL VELOCITY MODEL

原田英治<sup>1</sup>・後藤仁志<sup>2</sup>・丸山由太<sup>3</sup>

Eiji HARADA, Hitoshi GOTOH and Yuta MARUYAMA

<sup>1</sup> 正会員 工博 豊田工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒 471-8525 豊田市栄生町 2-1)  
<sup>2</sup> 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 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
<sup>3</sup> 学生会員 京都大学大学院修士課程 都市環境工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

A refuge plan against the inundation at underground shopping arcade is an urgent issue. To examine appropriate refuge route at underground shopping arcade at a time of inundation numerical simulation in consideration with an inundation and a crowd refuge is promising tool. From this point of view, we have been developed a crowd refuge simulator using the distinct element method (DEM). Because a description of a decision of moving direction of individual refugee is the key to reproduce an actual refuge process, to investigate that influence upon a simulation result is important. In this study, DEM-base refuge simulator introducing the optimal velocity model has been developed newly. That simulation result is compared with the refuge simulator simply based DEM.

**Key Words :** crowd refuge, distinct element method, optimal velocity model, urban inundation, refuge plan

### 1. はじめに

1999年6月の福岡市, 2000年9月の名古屋市の水害は, 集中豪雨による大規模都市型水害を社会問題として広く認識させた. 災害に強い都市創成には都市内水氾濫に対するハード・ソフト面の技術開発が必要であると考え. 都市水害の特徴の一つとして地下空間の存在が挙げられるが, 浸水時に地下空間から如何に迅速に安全な場所へ避難するかは人命に関わる問題である. 地下空間が浸水した場合に避難しようとする群衆がどのような行動をとるかを把握するためには, 氾濫水理と群衆行動の両者に関して適切な数理モデルによる推定が必要となる. 氾濫水理に関しては活発な研究が進められ(例えば, 戸田ら<sup>1)</sup>), 実スケールの予測も実施されるようになりつつある. 一方, 群衆行動モデルについては, 地下街からの避難過程では避難路の合流・分岐点で避難者間の衝突による渋滞が発生し易いため, 避難者間の衝突が評価でき, 個々の人間挙動が把握可能な離散的モデルを用いる必要が有る. この観点から, 清

野ら<sup>2)</sup>と同様に著者らも, 従来, 移動床モデルとして開発してきた個別要素法<sup>3)</sup>を基礎とした避難行動モデルを開発し, 京都市の地下街「ゼスト御池」を対象とした浸水時の群衆避難シミュレーションを実施した<sup>4)</sup>.

ところで, 従来著者らが使用してきた個別要素法型の数値シミュレーションによると, 個体が独立して歩行できる程度の群衆密度を対象とした避難過程においても, 個々の要素間の接触力は最大で100N程度の値を示していた. この値は, 他の要素との接触を回避できない高密度の群衆避難を対象とした(例えば, 2001年7月に兵庫県明石市の朝霧歩道橋で発生した見物客の将棋倒し事故のシミュレーション<sup>5)</sup>より得られる)平均的な要素間力と同程度であることから, 比較的低い群衆密度においても身動きならない程度の高密度状態の平均程度の要素間力(衝突)が生じることとなる. この種の要素間力の発生頻度は低いので群衆行動全体に対する再現性には大きな問題はないものの, ボトルネックで生じる渋滞状態の再現性には課題を残していると言える.

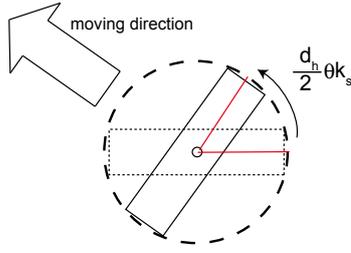


図-1 自律回転力モデル

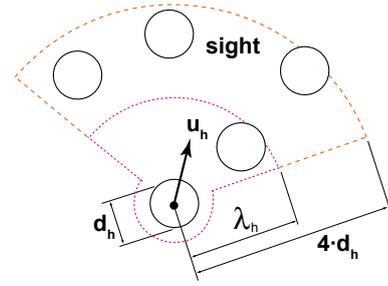


図-3 要素間相互作用力の発現領域および視野範囲

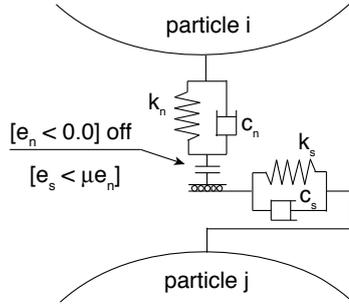


図-2 スプリング・ダッシュポットモデル

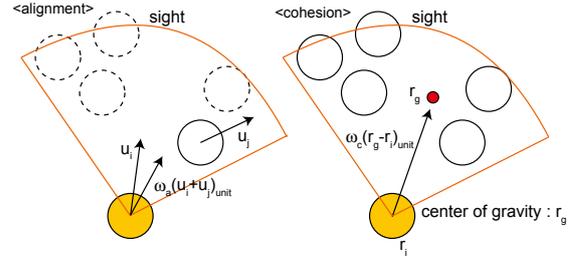


図-4 整列および向心ベクトル

そこで、本研究ではこれまでのシミュレーションで見られた要素間力の過大評価を改善するために、著者らが従来用いてきたモデルの自律歩行力の与え方に、交通流の研究で頻用される衝突回避モデルである最適速度模型 (Optimal Velocity Model) <sup>6)</sup> を援用したモデルを新たに開発し、要素間力の低減に対する効果を示した。さらに、避難方向決定モデルが避難過程に及ぼす影響についても検討した。

## 2. 群衆行動モデル

### (1) モデルの構成

人間行動は姿勢と加減速により構成される。ここでは、人間要素の運動は、並進および回転の運動方程式

$$M_h \frac{du_h}{dt} = F_{aw} + F_{int} + F_{flow} \quad (1)$$

$$I_h \frac{d\omega_h}{dt} = T_{aw} + T_{int} \quad (2)$$

$$T_{aw} = \frac{d_h}{2} \cdot \theta \cdot k_s \quad (3)$$

を陽的に追跡し評価した。ここに、 $M_h$ ：人間要素の質量 (本研究では 60.0kg とした)、 $u_h$ ：人間要素の移動速度ベクトル、 $t$ ：時間、 $F_{int}$ ：要素間の相互作用力ベクトル、 $F_{aw}$ ：人間要素の自律歩行力 (推進) ベクトル、 $F_{flow}$ ：汜濫流による流体力、 $I_h$ ：人間要素の慣性モーメント、 $\omega_h$ ：人間要素の回転速度、 $T_{int}$ ：要素間相互作用力に起因するトルク、 $T_{aw}$ ：避難方向へ姿勢を向けるためのトルク、 $\theta$ ：人間要素の進行方向と設定された避難方向の成す角 (図-1 参照)、

$d_h$ ：人間要素径である。人間要素は、シリンダー形状を仮定し、断面は、Fruin ら <sup>7)</sup> による人体楕円の断面積と等価な断面積を有する直径  $d_h=0.52m$  の円形断面とした。

### (2) 駆動力

人間要素の駆動力は、要素間相互作用力  $F_{int}$ 、自律歩行力  $F_{aw}$ 、汜濫流による流体力  $F_{flow}$  である。

要素間相互作用力  $F_{int}$  は、個別要素法型のモデルを用いてスプリング-ダッシュポット系で評価する (図-2 参照)。なお、人間は周辺状況を認識し、衝突を未然に回避するので図-3 に示すように、人間要素の正面から  $\pm \pi/3$  の視野を考慮した要素間相互作用力の発現領域を設定した (後藤ら <sup>8)</sup>)。また、人間要素の平衡距離  $\lambda_h$  は清野ら <sup>2)</sup> の観測結果より  $\lambda_h=0.976m$  を用いた。

自律歩行力  $F_{aw}$  については、Reynolds の Boid 型群行動モデル <sup>9)</sup> の概念を取り入れる。Boid 型群行動モデルは 3 つの基本規則：1) 整列、2) 向心運動、3) 衝突回避で構成されるが、先の要素間相互作用力の評価によって 3) 衝突回避は考慮されているため、自律歩行力ベクトルの作用方向は、1) 整列および 2) 向心運動から

$$F_{aw} = r_{aw} \cdot F_{aw}' \quad (4)$$

$$r_{aw} = \frac{w_c r_c + w_a r_a + w_r r_r}{|w_c r_c + w_a r_a + w_r r_r|} \quad (5)$$

と表現した。ここに、 $r_{aw}$ ：自律歩行の単位方向ベクトル、 $r_a$ ：整列ベクトル、 $r_c$ ：向心ベクトル、 $r_r$ ：避難方向ベクトル (図-4 参照)、 $w_a, w_c, w_r$ ：重み、 $\alpha_h$ ：

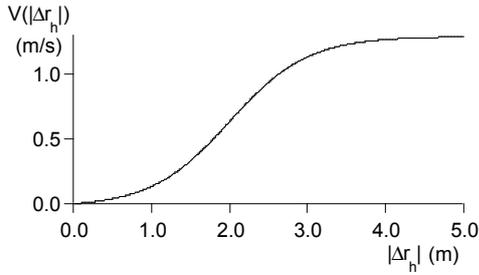


図-5 最適速度関数

加速能力パラメータである。

氾濫流による流体力  $F_{flow}$  について評価する場合には、抗力型の表式

$$F_{flow} = \frac{1}{2} \rho \epsilon_U C_D h d_h |U - u_h| (U - u_h) \quad (6)$$

を用いる<sup>10)</sup>。ここに、 $\rho$ :水の密度、 $C_D$ :抗力係数、 $h$ :水深、 $U$ :局所流速ベクトル(断面平均)、 $\epsilon_U$ :補正係数である。

### (3) 既往のモデルと OV 模型

後述するシミュレーションの case1 では加速パラメータ  $\alpha_h$  に著者らの既往のモデル<sup>10)</sup>を用いる。すなわち、上記の運動方程式に従い、人間要素は平衡歩行速度  $u_{limit}=1.3\text{m/s}$  に到達するまで等加速度運動 ( $\alpha_h=0.861\text{m/s}^2$ ) する。平衡歩行速度は人間の視野範囲内に存在する他の人間要素の数密度  $c_h$ <sup>10)</sup> に依存する表式として与え、自律歩行力を

$$|F_{aw}| = \begin{cases} M_h \cdot \alpha_h & \text{when } |u_h| \leq u_{limit} - \gamma_{dv} c_h \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

と与えた<sup>8)</sup>。式中の  $\gamma_{dv}$  は視野範囲の混雑状況と固体の減速効果に関するパラメータである。なお、図-3に示すように、視野範囲は要素間相互作用力と同様の視野角であり、対象要素との距離が要素径の4倍以内とした。

一方、case2 と case3 では、坂東ら<sup>6)</sup> が交通流に対して提案した OV 模型 (Optimal Velocity Model) を2次元に拡張し、人間要素の歩行速度を評価する。OV 模型の基礎式は以下のものである。

$$F_{aw}' = a [V(|\Delta r_h|) - |u_h|] \cdot M_h \quad (8)$$

ここに、 $r_h$ :人間の位置ベクトル、 $|\Delta r_h|$ :最近傍の人間要素との距離、 $V$ :最適速度関数、 $a$ :反応の機敏さを示すパラメータである ( $a=0.66$ )。このモデルでは要素間距離が縮まると減速し、逆に要素間の距離が開くと加速するように制御される。このため個体の速度は、要素間距離に応じて最適速度関数  $V$  で定められる速度に漸近する。最適速度関数には一般的に、

$$V(|\Delta r_h|) = \frac{u_{limit}}{1.97} [\tanh(|\Delta r_h| - 4.0 \cdot d_h) + \tanh(4.0 \cdot d_h)] \quad (9)$$

表-1 シミュレーション条件

	OV 模型	避難ポテンシャル
case1	なし	A
case2	あり	B
case3	あり	A

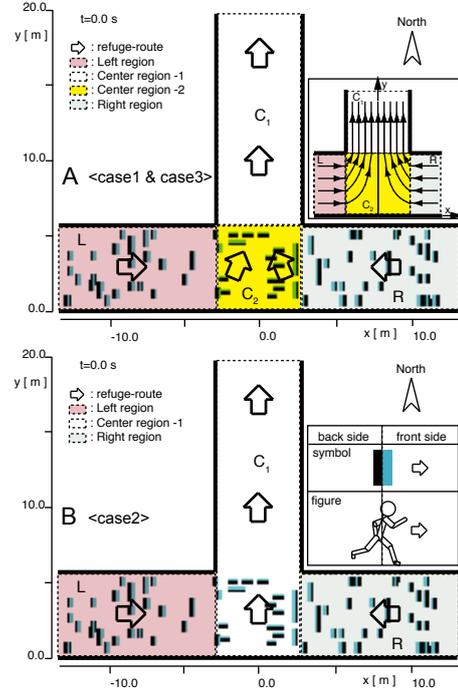


図-6 計算領域および避難ルート

のような変曲点型の関数を用いられる (図-5 参照)。

## 3. 三叉路における群衆避難

### (1) 計算領域・計算条件

表-1に示すシミュレーションを実施した。計算領域は、モデルの違いによる特性を明瞭に示すために図-6のような数十メートル規模の単純な三叉路を対象とした。計算領域上には一様運動能力の人間要素84人をランダムに配置し、個々の要素は配置された領域に予め指定された方向へ避難する。避難方向はA、Bの2種類であるが、それぞれの領域の避難方向は複素速度ポテンシャル  $W=f(z)$  の流線方向に従うと仮定して、

$$W = \begin{cases} z & \dots \text{ left region} \\ -z & \dots \text{ right region} \\ ze^{i(\frac{\pi}{2})} & \dots \text{ center region -1} \\ -z^2 & \dots \text{ center region -2} \end{cases} \quad (10)$$

と与える。ここに、 $W$ :複素速度ポテンシャル、 $z$ :複素数である。なお、スプリングおよびダッシュポットのモデル定数は清野ら<sup>2)</sup>の値を使用しそれぞれ  $k_n=8.18 \times 10^3 \text{N/s}$ ,  $k_s=4.09 \times 10^2 \text{N/m}$ ,  $c_n=1.10 \times 10^3 \text{Ns/m}$ ,

$c_s=2.47 \times 10^3 \text{Ns/m}$  と与えた。ただし、本研究では OV 模型と既往のモデルの違いに注目し流体力については扱っていない。

## (2) 避難過程の検討

図-7 にシミュレーション結果の速度ベクトルの瞬間像を示す。case1 と case3 の比較をすると、case1 では速い速度で避難する過程が時刻  $t=1.0\text{s}$  より確認できる。時刻  $t=5.0\text{s}$  では北上避難ルート（領域  $C_1$ ,  $C_2$ ）へと避難方向を転じるが、領域  $C_2$  へ領域 R, L からの避難者の流入による集中が確認できる。case1 は case3 と比較して  $x=0.0\text{m}$  付近の密度が高く、しかも、避難速度も大きい。また、北上避難ルート（領域  $C_1$ ,  $C_2$ ）へ領域 R, L から流入する避難者の速度についても case1 は case3 と比較して高いことが明瞭に示されている。case1 では、時刻  $t=9.0\text{s}$  になると領域 R, L に存在する避難者数が順調に減少し、時刻  $t=13.0\text{s}$  では大多数の避難者が北上避難ルート（領域  $C_1$ ,  $C_2$ ）に存在する。一方、case3 では北上ルートへの接合領域  $C_2$  における避難者の高密度化によって、避難速度が低下し、渋滞がスムーズに解消され難い状況にあることが分かる。また、領域  $C_1$  と領域  $C_2$  の接合境界付近の避難者が少しずつ領域  $C_1$  へと進行し、加速しつつ北上する避難過程が時刻  $t=9.0\text{s}$  以降の図から見て取れる。従来モデルでは、視野範囲内に存在する避難者の密度に応じて平衡歩行速度が定義され、個体は平衡歩行速度に到達するまでは一定の加速度で加速するが、OV 模型を導入した場合、加速度は一定ではなく、前方避難者との相対速度に応じて加速度が変化する。このような加速度調整の効果として個体は密集状態に突入するまでに予め減速し、衝突を回避するように運動することとなり、case1 とは大きな相違が生じる。避難時の加速については実際の観測から検討する必要がある。

次に、case2 と case3 を比較に複素速度ポテンシャルの与え方の違いが避難過程に与える影響を検討する。case2 の領域  $C_1$  と case3 の領域  $C_1$ ,  $C_2$  に注目する。case2 の複素速度ポテンシャルで与えられる  $C_1$  領域の流線は  $y$  軸に平行であるので、周囲の避難者からの影響がなければ真直ぐ北上する（図中の時刻  $t=1.0\text{s}, 5.0\text{s}, 9.0\text{s}$  の破線楕円参照）。一方、case3 では、領域  $C_2$  の流線が直角双曲線で与えられるため、避難動線が領域  $C_1$  中央部へ偏る傾向にある（図中の時刻  $t=1.0\text{s}, 5.0\text{s}, 9.0\text{s}$  の破線楕円内参照）。時刻  $t=5.0\text{s}$  以降、東西の領域 R, L からの避難者の流入によって、case2 では  $y \leq 6.5\text{m}$  付近の領域  $C_1$ 、case3 では領域  $C_2$  に避難者密度の増加に伴う避難速度の顕著な減少が確認できる。時刻  $t=13.0\text{s}$  以降について、case2 で

は  $y > 6.5\text{m}$  付近の領域  $C_1$ 、case3 では領域  $C_1$  に注目すると、case3 では領域  $C_1$  を避難路中央（ $x=0.0\text{m}$  付近）を中心に疎らに避難者が分布して北上しているが、case2 では避難者が領域  $C_1$  の左側に偏って北上している。この結果から、個体の避難方向の設定が避難動線に影響することが確認できる。

図-8 に各 case における全避難者の避難開始後 20 秒間の避難動線を示す。case1 および 3 では東西領域 R, L からの避難者が合流する領域での避難の方向が直角双曲線で与えられており、大略的には緩やかな弧を描く避難動線が多い。一方、case2 での合流領域では、真北（ $y$  軸に平行）に向かう避難方向が設定されるが、東西領域 R, L での避難方向（ $x$  軸に平行）から接合部領域  $C_1$  に入ると  $y$  軸平行方向へと急激に避難方向が変化するため、不規則な動線の割合が高い。なお、図-7,8 では領域  $C_1$  の左側に偏った避難過程が示されているが、領域 R から流入する避難者が領域 L のそれより初期状態で多いためである。

図-9 に case1, 3 における避難者間の平均相互作用力の時系列を示す。 $y$  軸は避難開始から 20 秒間に観測された最大平均相互作用力の大きさ  $f_{int\ max}$  を用いて、任意時刻の平均相互作用力の大きさ  $f_{int}$  を規格化して表示した。case1 は避難序盤から大きな相互作用力の伴って推移する。本シミュレーションでは比較的 low 密度の群衆避難を対象としているにも関わらず、最大平均相互作用力の大きさは  $f_{int\ max}=106.6\text{N}$  を示し、2001 年 7 月に兵庫県明石市の朝霧歩道橋で発生した見物客の将棋倒し事故を対象とした高密度群衆行動シミュレーション<sup>5)</sup>の平均的な要素間力と同程度の値となった。ここから、case1 では要素間力を過大評価する従来モデルの特徴が読み取れる。一方、OV 模型を導入した case3 の要素間力は僅かなレベルの相互作用力の継続が確認でき、OV 模型が要素間力の低減に対して有効に機能していることが示された。

以上のように、case1 は避難者間にレベルの高い衝突・反発力が発生する混乱した避難状況であり、case3 は case1 と比較して秩序のある避難状況に対応していると考えられる。ところで、避難者間の衝突の発生は単に群衆密度にのみ依存するのではない。例えば暗所における避難状況を考えれば衝突の頻発は明らかであるように、避難者が他者を含む周囲の状況をどの程度認識できるかが衝突の発生に大きく関与している。また、氾濫水が突発的にしかも短時間で地下街に浸水するような場合には、群衆がパニック状態に陥り易く case1 と類似した傾向を示すと推察される。

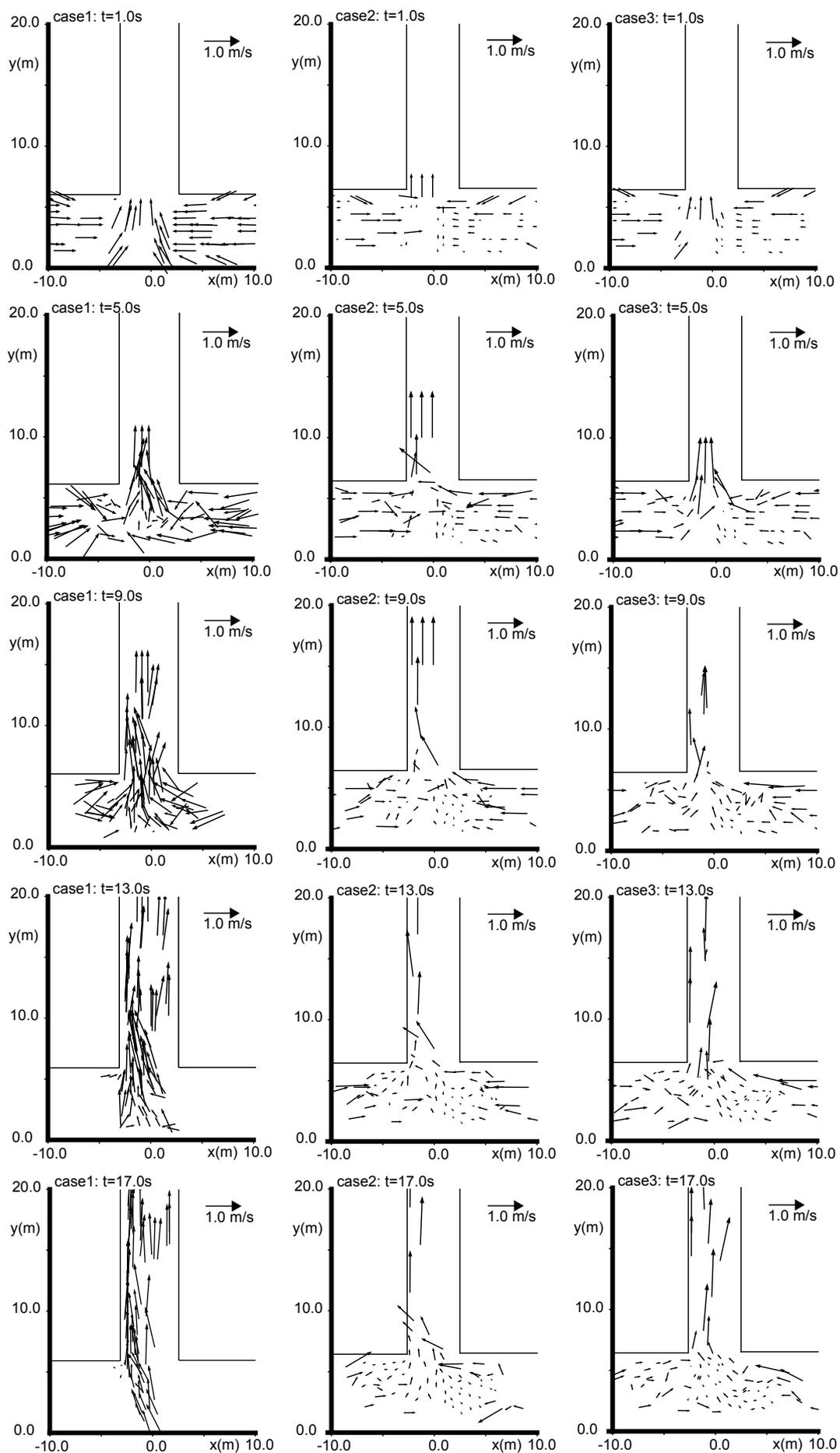


図-7 移動速度ベクトル図 (左 :case1, 中 :case2, 右 :case3)

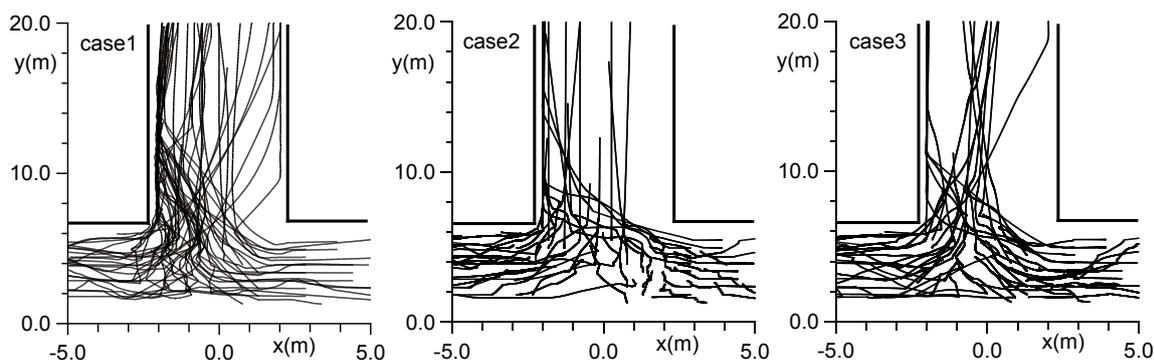


図-8 避難者の動線 (左 :case1, 中 :case2, 右 :case3)

#### 4. おわりに

本研究では、著者らが従来用いてきた個別要素法型の群衆避難行動モデルにOVモデルの個体加速度の評価法とBoidの移動方向選択モデルを導入した改良を実施し、従来のモデルの問題点であった要素間力の過大評価を改善した。また、従来モデルとの比較から、OVモデル導入による個体の移動方向ベクトルの推定モデルの相違が移動速度ベクトル、避難動線、避難者接触力に顕著な相違をもたらすことを明らかにした。

標準的なOVモデルの導入は、個体間の衝突の大幅な抑制に効果を有し、比較的低密度状態の群衆避難を対象とする場合、個体が衝突を避けるように譲り合ってルート選択するようになる。しかし災害時のパニック避難では、必ずしも譲り合いが保証されず、OVモデルの適切なチューニングが必要となるはずである。さらに、個体の周辺状況を十分に認識不可能な暗所では衝突回避行動は機能せず、頻繁な個体間衝突が発生する。つまり、想定シナリオに応じて、衝突回避行動の影響を調整する必要がある。今後は、実際の群衆行動の計測結果の再現性の面から、これらの点を検討し、実在地下街の避難シミュレーションのサブモデルとして活用する予定である。

#### 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) 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，No537/I-35，pp.233-244，1996.
- 3) 後藤仁志：数値流砂水理学，森北出版，p.223，2004.

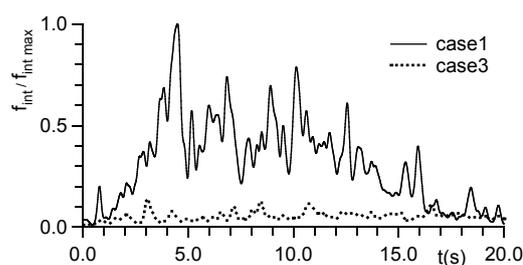


図-9 避難者間の相互作用力の時系列

- 4) 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，pp.589-594，2006.
- 5) 東山寛之：個別要素法による朝霧歩道橋事故の検証に関する研究，京都大学修士論文，29p.，2002.
- 6) M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, Y. Sugiyama：Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation, *Phys. Rev. E*51, pp.1035-1042, 1995.
- 7) Fruin J.・長島正充：歩行者の空間，鹿島出版社，206p.，1974.
- 8) 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.
- 9) Reynolds, C. W.：Flocks, Herds, and Schools, A Distributed Behavioral Model, *the proceedings of SIGGRAPH*, Vol.21(4), pp.25-34, 1987.
- 10) 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.

(2006.9.30 受付)