

# 群集避難に関する粒子シミュレーション

## Particle Simulation of Crowd Evacuation

関西大学 社会安全学部

川口 寿裕

Faculty of Safety Science,  
Kansai University

Toshihiro KAWAGUCHI

関西大学大学院 社会安全研究科修士

清水 貴史

Graduate School of Safety Science,  
Kansai University

Takashi SHIMIZU

### SUMMARY

It is too dangerous to perform experiments on serious crowd accidents by using living people. A numerical simulation is a useful tool to study the details of the crowd accidents safely. In the present paper, DEM (Discrete Element Method) is applied to the pedestrian motion in evacuating from a rectangular room. The effect of the exit width on the evacuation time is studied. An arching action causes a jamming at the bottleneck for the narrow exit case. A circular object is placed in front of the exit. When the object is placed at an appropriate position, it reduces the occurrence of the arching action to realize smoother evacuation as reported in the previous experiment.

### Key words

Particle Simulation, Evacuation, Crowd, Bottleneck, Arching Action

## 1. 緒言

多くの人が集まる場所では将棋倒しや群集なだれなどの群集事故が発生する可能性がある。これまでに国内外で発生した群集事故を整理してみると、宗教的行事、祭り等のイベント、スポーツ観戦での発生例が多い<sup>[1][2]</sup>。いずれも多くの人が集まり、興奮状態に陥りやすいイベントであると言える。また、群集事故が発生した場所としては、橋、階段、出入り口など、広い空間から幅が制限された領域に入るような、い

わゆるボトルネック構造になっているところが多い。ボトルネック構造のある場所では、人々の移動速度が急に遅くなることから、群集の滞留が容易に生じる。このため、群集密度が高くなり、群集事故へと発展しやすい。

学校の教室、映画館、デパートなど閉空間に多くの人がいるときに、地震や火災などが発生すると、人々が避難する際に入出口がボトルネックとなり、群集事故発生危険が懸念される。部屋からの避難時間短縮を目的に、Nishinari<sup>[3]</sup>は興味深い実験を行った。部屋に

40人の大人を入れ、50cmの幅の出口から避難させる。特に何もせずに避難させると、出口が狭いため、人同士が強く干渉し合うことでアーチアクションが生じるなど、避難時間が長くなる。この実験を6回行ったところ、避難時間の平均は35.73秒、標準偏差は0.45であった。次に、40人に番号を割り当て、番号順に脱出するように指示したところ、避難時間は平均30.55秒（標準偏差0.6）に短縮された。これは順番を決めたことにより、複数の人が同時に出口に押し掛けることで発生するアーチアクションを抑制できたからであると考えられる。最後に、出口から75cm離れた位置に物体を設置し、順番を決めずに避難させたところ、避難時間は平均33.70秒（標準偏差0.61）となった。直感的には出口の前に物体を置くと、避難時間が長くなるように感じられるが、物体を置かないときよりも短くなっている。これは、物体が群集の流れの方向を制限することで出口付近での人同士の干渉を緩和し、アーチアクションの発生を抑制していることが原因であると考えられる。

映画館やデパートなど、不特定多数の人が集まる場所では事前に避難の順番を決めておくことは難しいので、物体を設置するなどの方法で避難時間の短縮を実現できれば、群集事故の防止や被害の軽減に繋がるのが期待される。しかし、種々のケースに対して人を使った実験を繰り返すことは非効率であるだけでなく、危険も伴う。

人の流れをコンピュータ・シミュレーションで模擬し、事故原因の解析、建物等の設計、快適な空間設計などに用いる試みがなされている。それらは、セルオートマトン<sup>[4][5]</sup>やエージェントシミュレーション<sup>[6][7]</sup>といったルールベースの非力学的モデルと流体モデル<sup>[8][9]</sup>や粒子モデル<sup>[10]-[12]</sup>といった力学的モデルに大別できる。前述のような部屋からの避難時におけるボトル

ネックでのアーチアクションは、人同士の間に生じる摩擦力などを用いて力学的に説明できる現象である。したがって、このような現象を取り扱うには、力学的モデルである粒子モデルを用いるのが最適であると考えられる。

本論文では、部屋からの群集の避難問題に対して粒子モデルの1つである離散要素法（DEM: Discrete Element Method）<sup>[13]</sup>を用いた数値シミュレーションを行い、その適用可能性について検討した。

## 2. 粒子シミュレーション

### 2.1 離散要素法（DEM）

DEM<sup>[13]</sup>は、土木工学や粉体工学の分野で用いられている数値シミュレーション手法である。粒子同士の接触力をバネやダッシュポットといった力学的要素でモデル化し、個々の粒子運動を追跡する。計算負荷は大きいですが、多くのアプリケーションに対して、粒子流動を精度良く模擬できることが確認されている。本論文でも前報<sup>[14]</sup>と同様に、人同士および人と壁面が物理的に接触したときの相互作用をDEMで表現するモデルを用いた。DEMにおける接触力モデルを図1に示す。 $k_n$ は法線方向バネ定数、 $k_t$ は接線方向バネ定数であり、 $\eta_n$ は法線方向減衰係数、 $\eta_t$ は接線方向減衰係数である。また、 $\mu_f$ は摩擦係数である。接触力をもとに、以下の運動方程式を時間 $t$ に関して数値積分することで、並進および回転運動の時間発展を求めた。DEMの詳細については前報<sup>[14]</sup>を参照されたい。

$$\frac{d^2 \vec{x}_i}{dt^2} = \frac{\sum_j \vec{f}_{cij}}{m_i} \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \frac{\sum_j \vec{M}_{ij}}{I_i} \quad (2)$$

ここで、 $\vec{x}_i$ は粒子 $i$ の位置ベクトル、 $\vec{f}_{cij}$ は粒子 $i$ と粒子 $j$ の間に働く接触力ベクトルであり、 $m_i$

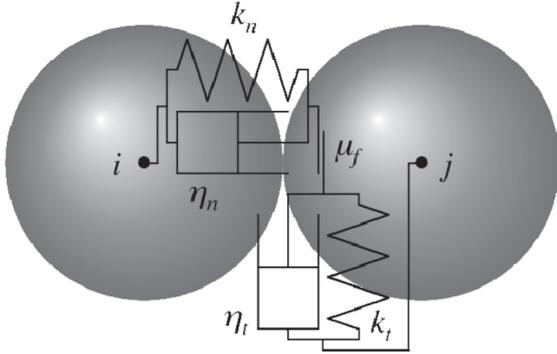


図1 離散要素法の接触力モデル

は粒子  $i$  の質量である。また、 $\vec{\omega}_i$  は粒子  $i$  の角速度ベクトル、 $\vec{M}_{ij}$  は粒子  $i$  が粒子  $j$  から受ける接線方向の力によるトルクを表すベクトルであり、 $I_i$  は粒子  $i$  の慣性モーメントである。下付き添字  $i$  および  $j$  は粒子または壁面を表すインデックスであり、粒子に対しては  $1 \leq i, j \leq N_p(t)$  の範囲の値を取る。ここで  $N_p(t)$  は時刻  $t$  において計算対象となる全粒子数である。後述するように、避難を完了した歩行者は計算対象から除外するので、 $N_p(t)$  は時間の経過とともに小さくなっていく。接触相手として壁面を考慮する際には、 $j$  は  $-1, -2, \dots$  といった負整数を取る。 $j$  の下限値は考慮すべき壁面の個数に依存する。また、式(1), (2)における総和は、粒子  $i$  が物理的に接触している全ての粒子または壁面  $j$  に対してのものである。

## 2.2 歩行者モデル

人の挙動を粒子運動で模擬するには、DEMに自己駆動性<sup>[15]</sup>を導入する必要がある。本論文では前報<sup>[14]</sup>と同様の歩行者モデルを用いた。すなわち、ある歩行者  $i$  が周囲の歩行者  $j$  と物理的に接触していないときには自由歩行速度  $\vec{V}_{Fi}$  で目的地に向かって直進する。一方、周囲の歩行者  $j$  と物理的に接触しているときには歩行意欲係数  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) を導入することにより、DEMで求められる速度と自由歩行速度の中間の速度

で歩行する。このことを式で表すと以下のようになる<sup>[14]</sup>。

$$\begin{aligned} \vec{V}_i &= \vec{V}_{Fi} \\ &\text{for } \sum_j \vec{f}_{Cij} = \vec{0} \\ \vec{V}_i &= \alpha \vec{V}_{Fi} + (1-\alpha) \left( \vec{V}_i^0 + \frac{d^2 \vec{x}_i}{dt^2} \Delta t \right) \\ &\text{for } \sum_j \vec{f}_{Cij} \neq \vec{0} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\vec{V}_i^0$  は前時刻における歩行者  $i$  の歩行速度である。

図2に示すように、目的地の座標を  $(x_D, y_D)$  とすると、位置  $(x_i, y_i)$  にいる歩行者  $i$  の自由歩行速度の  $x$  および  $y$  方向成分、 $V_{Fxi}$  および  $V_{Fyi}$  は次式で与えられる。

$$V_{Fxi} = \frac{x_D - x_i}{\sqrt{(x_D - x_i)^2 + (y_D - y_i)^2}} |\vec{V}_{Fi}| \quad (4)$$

$$V_{Fyi} = \frac{y_D - y_i}{\sqrt{(x_D - x_i)^2 + (y_D - y_i)^2}} |\vec{V}_{Fi}| \quad (5)$$

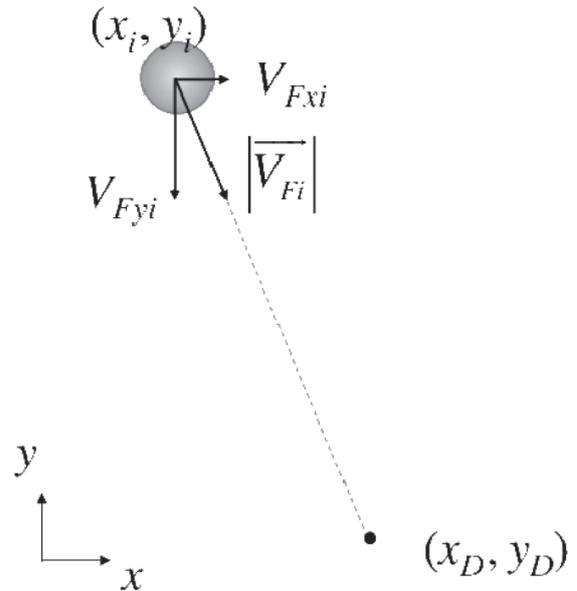


図2 自由歩行速度

### 2.3 計算条件

本計算における主な計算条件を表1にまとめた。全歩行者は直径  $d = 0.4\text{m}$  の円形粒子で模擬される。質量は  $m = 60\text{kg}$  とした。全歩行者に対して自由歩行速度の大きさを  $|\vec{V}_F| = 1\text{m/s}$  とし、歩行意欲係数  $\alpha = 0.2$  とした。なお、反発係数  $e_p$  はDEMのダッシュポットの減衰係数を決定するのに用いられる<sup>[14]</sup>。

計算領域は図3に示すように横8m、縦9mの長方形の部屋とする。一方の壁の中央に幅  $W_E$  の出口があり、全歩行者はここから避難する。出口手前には物体を設置できるようにした。物体は直径0.8mの円形であり、その中心は壁面

表1 計算条件

直径	$d$	0.4 m
質量	$m$	60 kg
法線方向バネ定数	$k_n$	100000N/m
接線方向バネ定数	$k_t$	100000N/m
反発係数	$e_p$	0.8
摩擦係数	$\mu_f$	0.3
時間刻み幅	$\Delta t$	0.01s

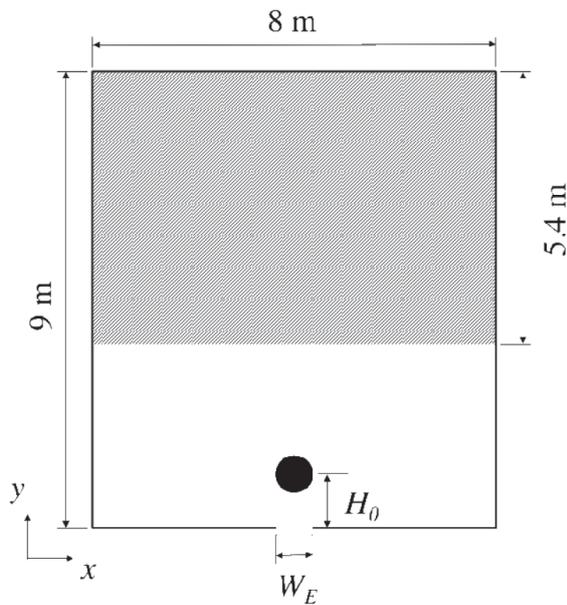


図3 計算領域

から  $H_0$  だけ離れている。初期状態では、物体を設置しない領域として、出口と反対側の壁から5.4m以内の領域内に  $N_p(0) = 150$  人の歩行者をランダムに配置した。全歩行者の目的地を出口中央外側に設定した。具体的には、図3における部屋の左下隅を座標の原点としたとき、目的地の座標を  $(4, -1.2)$  とした。目的地の座標を  $(4, 0)$  とすると、特に出口幅が広い場合に、歩行者が出口幅全体を使わず、中央部から優先的に避難するような不自然な挙動が見られることがあった。目的地を出口外側に設定したのはこれを避けるためである。

時刻  $t = 0$  において全ての歩行者が目的地に向かって動き始め、互いの接触を考慮しながら部屋から避難する。歩行者位置の  $y$  座標が負数となることをもって避難完了とし、避難を完了した歩行者は計算対象から除外した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 出口幅の影響

まず、物体を設置しない条件において、出口幅  $W_E$  を変化させた計算を行い、その影響について調べた。 $W_E$  は歩行者粒子の直径  $d$  に対して、1.8倍から2.5倍の範囲で変化させた。

図4に  $W_E = 2.5d$  に対する避難の様子を時系列で示す。150人の歩行者が一斉に出口に向かい、6秒後に出口付近のボトルネックでアーチアクションが発生しているが、すぐに解消される。その後はスムーズに避難が行われ、約33秒後に全歩行者が避難を完了していることが確認できる。図5に  $W_E = 2.0d$  に対する避難の様子を時系列で示す。この条件では、約24秒後に出口付近でアーチアクションが発生し、33秒後まで状態にほとんど変化が見られない。100秒後まで計算を継続したが、アーチアクションが解消されることはなく、完全に閉塞してしまうことが確認された。実際の歩行者はアーチアクシ

オンが発生しても、身体の向きを変えるなど自発的にそれを解消しようとするが、本計算においてはそのようなモデルを導入していないため、完全な閉塞が生じてしまっている。より現実的な避難挙動を模擬するためには、今後モデルを改良する必要がある。

結果の再現性を確認するため、各出口幅に対して、初期状態を変えた計算を5回繰り返した。各出口幅に対する避難経過図を図6に示す。縦軸は部屋に残っている歩行者の人数、横軸は経過時間を表す。いずれも初期状態では150人の歩行者が部屋に配置されている。4秒程度経過後に歩行者の数が減り始めている。これは歩行者が出口に到達し、部屋から避難し始めたことを意味する。また、グラフの傾きは避難速度(単位時間あたりの避難完了者の数)を表す。

$W_E = 2.5d$  および  $2.4d$  では5回すべてでグラフが単調な右下がりの線になっており、最終的に歩行者の数がゼロになっている。このことから、全歩行者がスムーズな避難を完了していることが確認できる。全歩行者の避難が完了するまでの時間を避難時間  $t_e$  と定義し、その平均を平均避難時間  $\langle t_e \rangle$  と定義する。 $W_E = 2.5d$  のときは  $\langle t_e \rangle = 29.93$  秒であり、 $W_E = 2.4d$  のときは  $\langle t_e \rangle = 31.64$  秒であった。

$W_E = 2.3d$  のときにはある程度まで右下がりの線だったものが、途中から水平に伸びているものがある。これは、アーチアクションの発生により歩行者の滞留が生じていることを表す。アーチアクションが解消され、再び避難が始まることもあるが、完全に閉塞してしまうこともある。今回行った5回の計算のうち2回は閉塞が起き、全歩行者が避難を完了したのは3回であった。全歩行者が避難を完了した3回の平均避難時間は  $\langle t_e \rangle = 33.55$  秒であった。以後、 $\langle t_e \rangle$  を全歩行者が避難を完了した場合の平均避難時間と再定義する<sup>(1)</sup>。 $W_E = 2.2d$  のときに

は5回中3回で閉塞が起き、全歩行者が避難を完了した2回の平均避難時間は  $\langle t_e \rangle = 39.30$  秒であった。 $W_E = 2.1d$  のときには5回中4回で閉塞が起き、全歩行者が避難を完了したのは1回だけであった。このときの避難時間は  $\langle t_e \rangle = 45.29$  秒であった。 $W_E = 2.3 \sim 2.1d$  のときには、全歩行者の避難が完了するときと閉塞するときが混在した。閉塞が生じる際、部屋に残っている歩行者の数は100人以上のときもあれば、十数人のときもあり、特に閉塞しやすい人数が存在するわけではないと考えられる。また、出口幅と平均避難時間の関係をまとめたものを図7に示す。アーチアクションの発生による閉塞が生じ始める出口幅  $W_E = 2.3d$  を境に避難時間の出口幅への依存性が明らかに変化していることがわかる。

図6に戻ると、 $W_E = 2.0 \sim 1.8d$  のときには今回行った5回の計算すべてで閉塞が起きることが確認された。

出口付近のボトルネックでアーチアクションが発生するのは、歩行者間および歩行者と壁面間の摩擦力によるものと考えられる。このことを確認するために、5回すべてで閉塞が起きた  $W_E = 2.0d$  の条件に対して、摩擦係数  $\mu_f$  を0とした計算を行った。図8に避難経過図を示す。予想されたとおり、アーチアクションの発生は見られず、5回すべてで全歩行者がスムーズな避難を完了した。また、平均避難時間も  $\langle t_e \rangle = 23.05$  秒とかなり短かった。このことから、本計算モデルにおけるアーチアクションの発生は歩行者間の摩擦力によるものであることが確認できたとと言える。種々の歩行者シミュレーションの中でこの現象のメカニズムを本質的に表現できるのは粒子モデルだけであると考えられる。

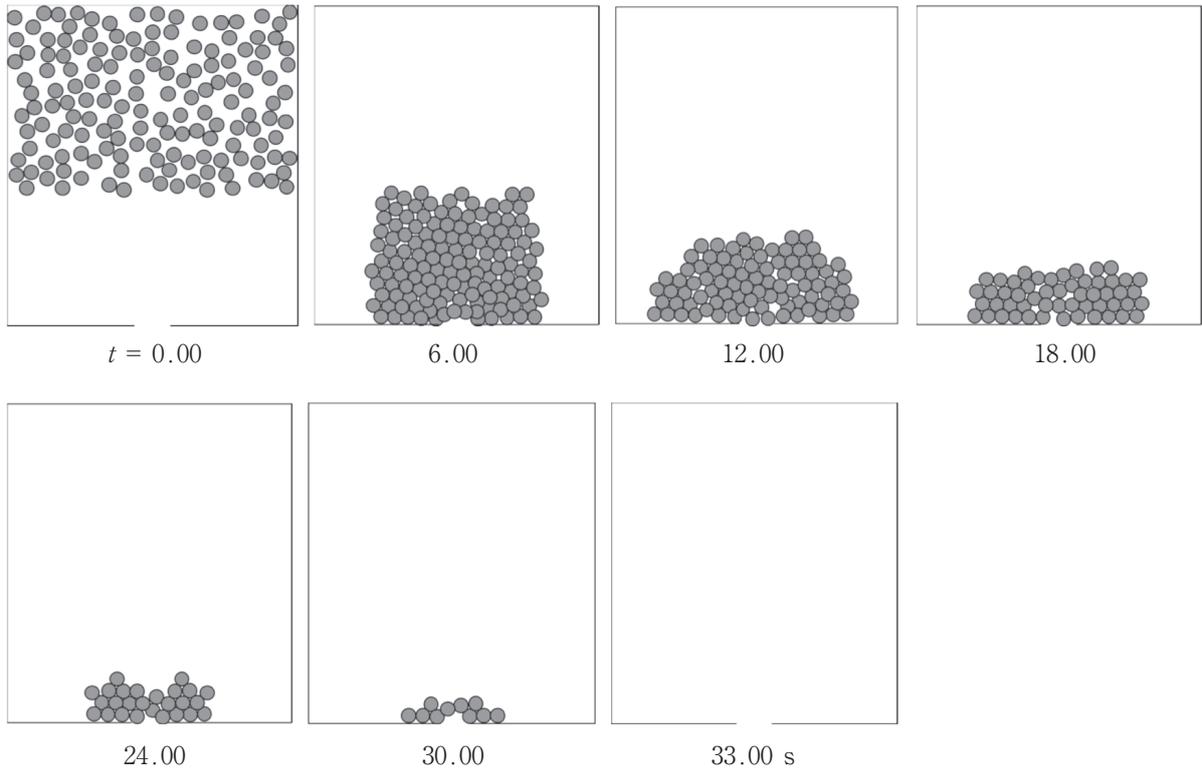


図4 避難の様子 (物体なし:  $W_e = 2.5d$ )

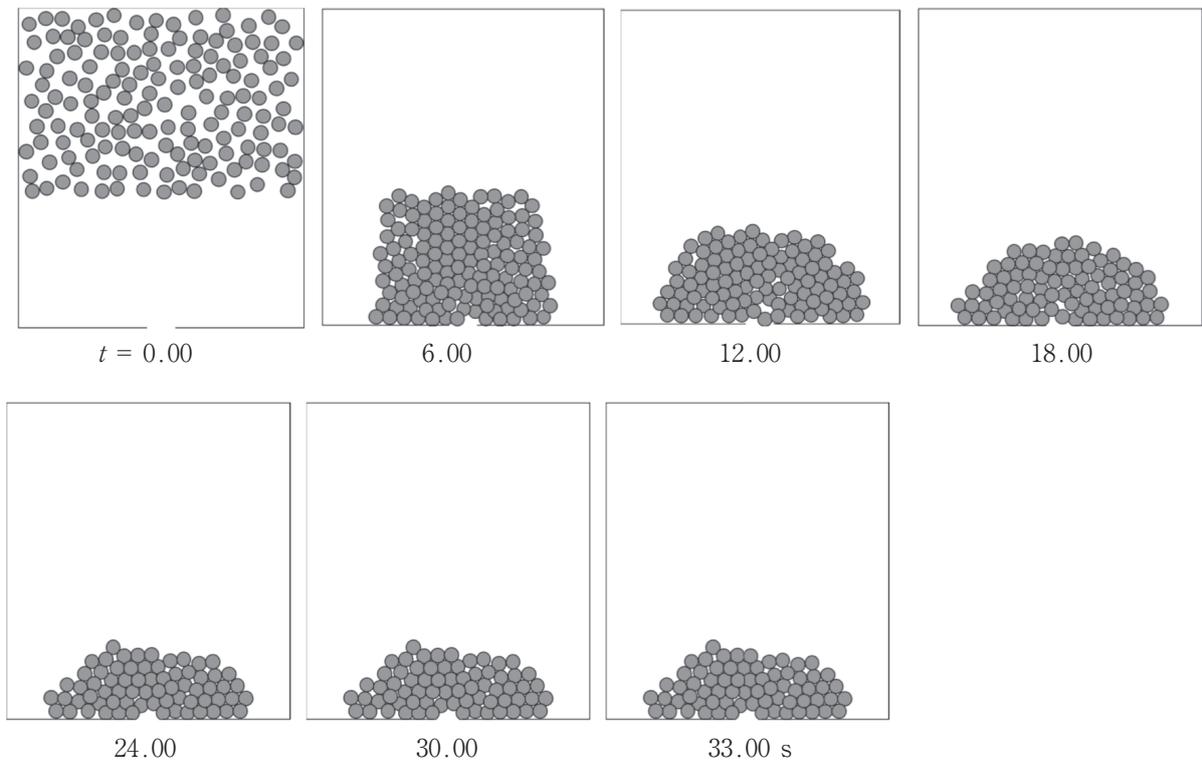


図5 避難の様子 (物体なし:  $W_e = 2.0d$ )

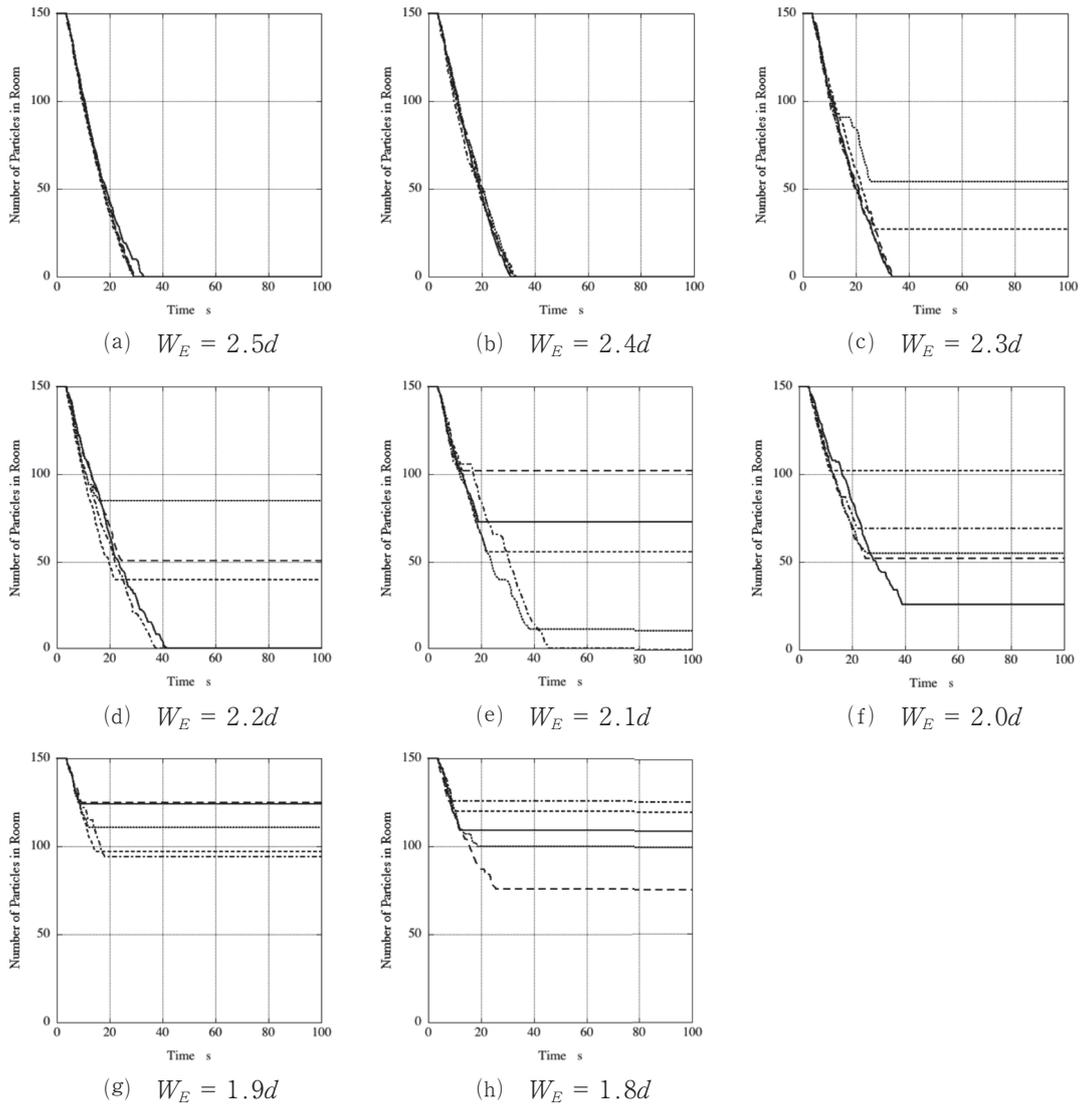


図6 避難経過図 (出口幅の影響)

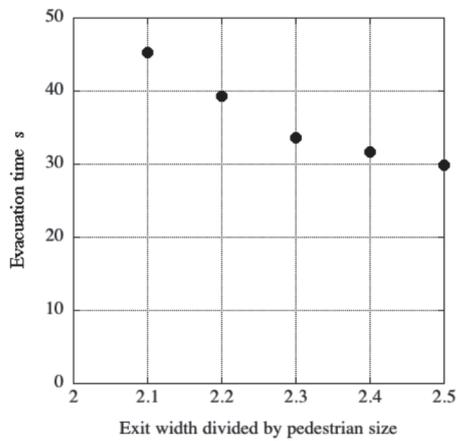


図7 出口幅と避難時間の関係

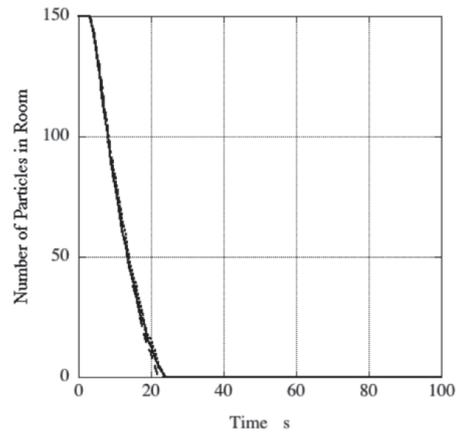
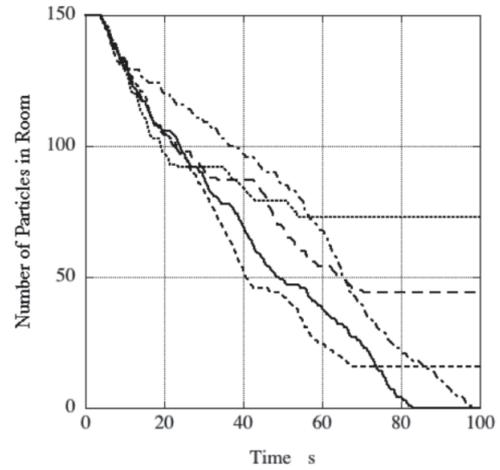


図8 避難経過図 (摩擦なし)

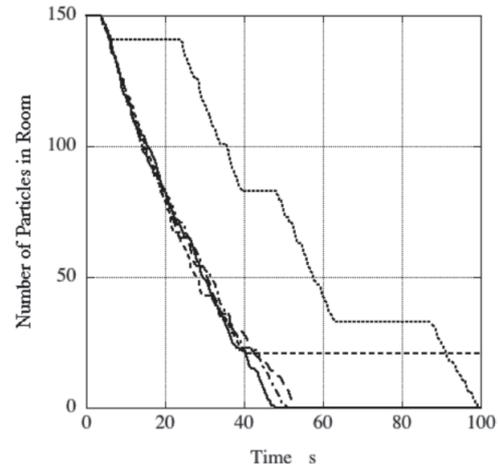
### 3.2 物体設置の影響

Nishinari ら<sup>[3]</sup>の実験結果を参考にして、部屋の出口付近に物体を置き、群集避難に及ぼす影響について本モデルで調べた。本モデルでは物体を壁面の1つとして取扱い、歩行者と物体の接触力を図1のDEMで与えた。3.1節において5回の計算すべてで閉塞が起きた  $W_E = 2.0d$  の出口幅条件に対して出口手前に物体を設置した。物体は出口幅と同じ0.8mの直径を持つ円形とした。物体の中心と出口側の壁面との距離を  $H_0$  とし、 $H_0$  を変化させてその影響を調べた。3.1節と同様の避難経過図を図9に示す。

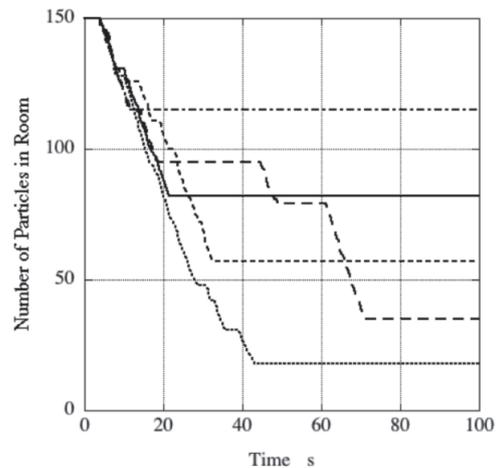
$H_0 = 2d$  のときには、5回中3回で閉塞が発生しているが、残りの2回は全歩行者が避難を完了した。この出口幅に対しては、物体を設置しない場合には5回すべてで閉塞が発生した(図6(f))ことを考えると、物体設置の影響があると言える。しかし、グラフの傾きから、物体を設置することによる避難速度の低下が確認できる。具体的には、図6(f)では、20秒経過時に70~80人が避難を完了しているのに対して、図9(a)では20秒経過時に30~50人程度が避難を完了しているに過ぎない。また、図9(a)で全歩行者が避難を完了した2回の平均避難時間は  $\langle t_e \rangle = 90.58$  秒となっている。今回の計算では、 $W_E = 2.0d$  に対して物体を設置しなければ5回すべてで閉塞が発生した。ただし、試行回数を多くすることで全歩行者が避難を完了することもあるかもしれない。図6を見ると、 $W_E = 2.1 \sim 2.3d$  に対して、閉塞が発生している場合でもグラフの右下がり部分を外挿することで、そのまま全歩行者が避難を完了したときの仮想的な避難時間を見積もることができる。このことから、図6(f)や図7のグラフを外挿することで  $W_E = 2.0d$  に対する仮想避難時間を見積もると50秒強程度となる。すなわち、物体の設置が避難速度の低下に繋がっているこ



(a)  $H_0 = 2d$



(b)  $H_0 = 3d$



(c)  $H_0 = 4d$

図9 避難経過図 (物体の影響)

とがわかる. 図10に示す幾何学的関係から,  $H_0 = 2d$  に対しては, 物体と出口の隙間の最狭幅は  $\ell = (\sqrt{5}-1)d \approx 1.24d$  となる. 図7の  $W_E \leq 2.3d$  の3点を線型補間し,  $W_E = 1.24d$  に対する避難時間を求めると,  $t_e = 95.73$  秒となり, 上記の2回の平均避難時間はこの値に近いものとなっていることがわかる.

$H_0 = 3d$  のときには, 5回中1回のみ閉塞し, 4回は全歩行者が避難を完了した. ただし, 避難完了の4回のうち1回はアーチアクションの発生と解消を繰り返し, 避難完了までに99.24秒を要した. 残りの3回はスムーズな避難となっており, その3回の平均避難時間は  $\langle t_e \rangle = 50.62$  秒であった. これは図6(f)や図7から見積もられる  $W_E = 2.0d$  に対する仮想避難時間とほぼ一致している. このことから,  $H_0 = 3d$  の位置に物体を設置することで, 避難速度を低下させることなく全歩行者の避難完了の回数を増やすことができている. 物体の設置が部屋からの避難時に有効であることが本計算でも示された. 物体の設置は, 出口への経路を限定し, 歩行者の流れを整理する効果があると考えられる. このことがアーチアクションの発生を緩和し, 歩行者の避難に効果を現したものと解釈できる. この条件における物体と出口の隙間の最狭幅は  $\ell = (\sqrt{10}-1)d \approx 2.16d$  である.

さらに物体の設置位置を出口から遠ざけ,  $H_0 = 4d$  にすると, 物体がない場合と同様, 5回す

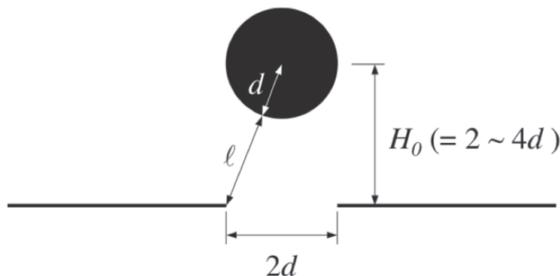


図10 物体と出口の隙間

べてで閉塞が起きた. 避難速度も物体を設置しない場合とほぼ同程度となっている. これは, この位置に物体を設置してもほとんど意味を持たないことを表している. この条件における物体と出口の隙間の最狭幅は  $\ell = (\sqrt{17}-1)d \approx 3.12d$  である.

以上の結果から, 本シミュレーションにより, アーチアクションが発生しやすい条件に対して出口の手前に物体を設置することが, アーチアクション発生を緩和し, 群集避難に有効であるという結果が得られた. ただし, 物体の設置位置が出口に近すぎると避難速度の低下を招き, 逆に遠すぎると物体設置の効果がなくなることから, 最適な設置位置が存在することが示唆された. 本計算で得られた結果はNishinariら<sup>[3]</sup>の実験結果と定性的に一致しており, DEMを用いた粒子モデルシミュレーションを群集の避難問題に適用できる可能性が示されたと言える.

#### 4. 結 言

歩行者シミュレーションにおける粒子モデルの1つとしてDEMを群集の避難問題に適用し, その適用可能性を検討した. ボトルネックにおけるアーチアクション発生が力学的に表現され, 出口幅によりその効果が大きく変化することが示された. アーチアクション発生による閉塞が起きる条件に対して, 物体設置の効果を調べたところ, 出口手前の適切な位置に物体を設置することで, 5回中3回で閉塞を起こさずに全歩行者がスムーズに避難を完了した. このことから, 出口付近への物体の設置が群集避難に大きな効果を持つことが示された. この結果は既往の実験結果を定性的に再現しており, 本計算モデルの群集避難問題への適用可能性が示唆された.

今後は本計算モデルをより実現象に近づける

ことが課題となる。粒子形状を楕円などの非円形とすることがその1つである。また、アーチアクションを自発的に解消するなど、歩行者の意志を表現するモデルにも多くの改良点が考えられる。

注

(1) 平均避難時間の定義に関して、査読者より「全歩行者が避難を完了した場合だけを取り出して平均を取るの是不適切である」との指摘があった。閉塞が発生すると避難時間が無限大となる。これを平均に加えると、一度でも閉塞が発生したすべての場合で平均避難時間が無限大となり、平均避難時間の議論ができなくなる。3.1節で指摘したように、実際の歩行者はアーチアクションが発生しても自発的にそれを解消するため、完全に閉塞するような状況にはならない。つまり、本計算において閉塞が発生するのは、現時点でのモデルの不備によるものである。このことから、本論文では全歩行者が避難を完了した場合のみについての平均避難時間で議論した。ただし、査読者の指摘はもっともであり、平均避難時間の定義をより適切なものにするためにも、結言で記したように、歩行者の意志を表現するモデルの改良を急ぐ必要があると考える。

参考文献

[1] 岡田光正 (2011). 群集安全工学 鹿島出版会.  
 [2] 明石市民夏まつり事故調査委員会 (2002). 第32回明石市民夏まつりにおける花火大会事故調査報告書 明石市.  
 [3] K. Nishinari, Y. Suma, D. Yanagisawa, A. Tomoeda, A. Kimura and R. Nishi (2008). *Toward smooth movement of crowds*. Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008, pp.293-307.  
 [4] G. P. Gipps & B. Marksjo (1985). *A micro-simulation model for pedestrian flows*. Mathematics and Computers in Simulation

27, pp.95-105.  
 [5] V. J. Blue & J. L. Adler (2000). *Cellular automata microsimulation of bi-directional pedestrian flows*. Journal of the Transportation Research Board 1678, pp.135-141.  
 [6] B. Hillier, A. Penn, J. Hanson & T. Grajewski (1993). *Natural movement; or configuration and attraction in urban space use*. Environment and Planning B: Planning and Design 20, pp.29-66.  
 [7] 兼田敏之 (2010). artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション 構造計画研究所.  
 [8] L. F. Henderson (1974). *On the fluid mechanics of human crowd motion*. Transportation Research 8, pp.509-515.  
 [9] D. Helbing (1992). *A fluid dynamic model for the movement of pedestrian*. Complex Systems 6, pp.391-415.  
 [10] 清野純史, 三浦房紀, 瀧本浩一 (1996). 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 土木学会論文集 537/I-35 pp.233-244.  
 [11] D. Helbing, I. Farkas and T. Vicsek (2000). *Simulating dynamical features of escape panic*. Nature 407, pp.487-490.  
 [12] Y. Tsuji (2003). *Numerical simulation of pedestrian flow at high densities*. Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003, pp.27-38.  
 [13] P. A. Cundall & O. D. L. Strack (1979). *Discrete numerical model for granular assemblies*. Géotechnique 29-1, pp.47-65.  
 [14] 川口寿裕 (2010). 歩行者流れへの離散要素法の適用 (直線通路におけるレーン形成) 社会安全学研究 1 pp.3-11.  
 [15] 西成活裕 (2006). 渋滞学 新潮選書.

(原稿受付日: 2012年12月25日)

(掲載決定日: 2013年1月31日)