

# 出口退出過程の粒子シミュレーション

川口寿裕<sup>1</sup>

<sup>1</sup>関西大学 社会安全学部 安全マネジメント学科

## 概要

単一出口からの退出過程に関して、粒子シミュレーションの1つである離散要素法を用いた数値解析を行った。肩幅と胸厚を持つ人の形状を表現するために、結合粒子モデルを適用した。アーチアクションの形成により、スムーズな退出が妨げられる様子を再現した。また、出口付近に設置した物体が退出効率に及ぼす効果を再現できることを示した。

## Particle Simulation of Egress Process

Toshihiro Kawaguchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Safety Management, Faculty of Safety Science, Kansai University

### Abstract

Numerical simulations on the egress process from an exit are performed. The inter-pedestrian forces are modeled with DEM (Discrete Element Method). The composite particle model is employed to express the pedestrians' shape. The present calculation successfully simulates the arching which prevents the smooth egress. Further, the effect of an obstacle placed in front of the exit on the egress process can be simulated.

## 1 はじめに

部屋や建物の中から多くの人が一斉に出口から退出する場面は実際にもよくある。スポーツ競技場や映画館などでは終了時に多くの人が一斉に出口に向かう。火災や地震発生時にはパニック状態に陥った人が押し寄せるため、群集事故が発生する危険性も高まる。部屋や建物の出口はボトルネック構造であり、避難過程の律速となるプロセスである。したがって、安全かつ迅速な退出を実現するために、出口退出過程の詳細を把握することが重要である。

出口退出過程に関しては、実験的研究[1,2]に加え、多くの数値的研究が行われてきた。歩行者の数値モデルはセルオートマトン[3]やマルチエージェントシミュレーション[4]に代表されるルールベースの手法と、ソーシャルフォースモデル[5]に代表される力学ベースの手法に分類できる。出口退出過程においては人同士の摩擦によるアーチアクションが発生し、避難効率に影響を及ぼすことが知られている。

したがって、このプロセスの本質的な理解には、力学ベースの手法が適していると考えられる。特に離散要素法 (DEM) [6]は人同士の接触力を解析できる手法であることから、高密度な群集の流れに適用されている[7,8]。

本研究では、DEM を用いて出口退出過程の数値シミュレーションを行った。人の形状を表現するため、複数の円形粒子を連結させた結合粒子モデルを用いた。

## 2 計算手法

### 2.1 離散要素法

離散要素法 (DEM) は相互作用を及ぼしながら移動する岩石の挙動を解析する目的で開発された手法で、主に土木工学の分野で発展してきた[9]。後に、粉体工学[10]や粒子系混相流[11]にも適用されるようになった。DEM では複数の粒子同士が接触状態を保ちながら運動する状態を模擬できる。したがって、群集事故が発生するような高密度な群集の

挙動を模擬するのに適した手法であると言える。

離散要素法では互いに接触した粒子同士の相互作用力をバネ、ダッシュポット、スライダで表現する(図 1)。バネは弾性反発力を表し、ダッシュポットは非弾性衝突を表現するための粘性減衰力を意味する。スライダはすべり摩擦(動摩擦)を表す。

DEM における法線方向および接線方向の接触力は次式で与えられる。

$$\bar{f}_n = (-k_n \delta_n - \eta_n \bar{V}_{ij} \cdot \bar{n}) \bar{n} \quad (1)$$

$$\bar{f}_t = \min[-k_t \bar{\delta}_t - \eta_t \bar{V}_{ij}, -\mu_f |\bar{f}_n|] \bar{t} \quad (2)$$

ここで、 $k$  はバネ定数、 $\delta$ は変形量、 $\eta$ は粘性減衰係数を表し、添字  $n, t$  はそれぞれ、法線方向、接線方向を意味する。 $\mu_f$  は摩擦係数、 $V_{ij}$  は粒子  $i$  と粒子  $j$  の相対速度、 $V_{ij}$  は粒子  $i$  と粒子  $j$  の接触点における接線方向相対表面速度である。 $\bar{n}$  は法線方向単位ベクトル、 $\bar{t}$  は接線方向単位ベクトルである。式(2)の記号  $\min[A, B]$  は  $A, B$  のうち絶対値の小さい方をとることを意味する。

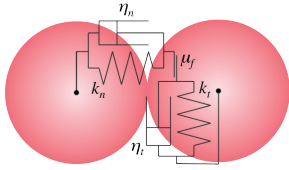


図 1: 離散要素法の接触力モデル

## 2.2 結合粒子モデル

本研究では 2 次元面内での人の動きを計算する。通常の DEM では円形粒子が用いられるが、人は胸厚に比べて肩幅の方が大きく、その形状を円で模擬するのは不自然である。ただ、楕円や長方形など、円以外の形状の粒子を用いる場合、粒子同士の接触判定が複雑になり、計算負荷も大きくなる。

そこで本研究では、3 つの円形粒子を少しずつ重ねながら一直線に並べた結合粒子を用いて 1 人の人を表現した(図 2)。各円形粒子は剛体接続されているものとした。結合粒子を用いると、円形粒子で計算するのに比べて 3 倍の数の粒子の運動を計算しなければならない。しかし、基本要素が円形粒子であるため、接触判定はシンプルなままである。

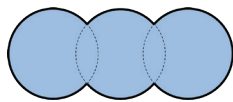


図 2: 結合粒子モデル

## 2.3 仮想バネモデル

通常、前方に別の人がいることに気付くと、人は速度を緩めたり、方向を変えることで衝突を避けようとする。このことを表現するために、仮想バネモデルを導入する。

図 3 に示すように、歩行者が前方に別の歩行者を認識した場合、両者の距離に比例した弾性力を作用させる。このことで、速度を緩める動作と前方の歩行者を回り込む動作の両方を表現できることになる。他の歩行者の影響を受けて仮想バネを作用させるのは、

- (i) 自分から一定の距離内にいる
- (ii) 一定の視野の範囲内にいる

の両条件を満たしたときのみとする。したがって、歩行者 A は歩行者 B を認識して仮想バネによる力を受けるが、歩行者 C や D は一定の距離外にいるため影響を受けず、歩行者 E や F は視野外にいるため影響を受けない。また、歩行者 B から見ると歩行者 A は視野外にいるため影響を受けない。つまり、仮想バネによる力については作用・反作用の法則は成り立たず、一方通行の力になる場合もある。

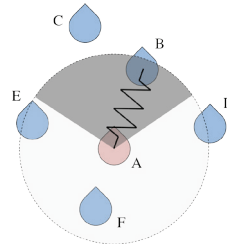


図 3: 仮想バネモデル

## 2.4 反モーメントモデル

通常、人は目標方向に正対しながら歩行する。狭いところを通る際などに身体を捻ることがあっても、また元の向きに戻して歩く。このような動作を表現するために、反モーメントモデルを導入する。

図 4 に示すように、歩行者の向きが目標方向からずれた場合、ずれを修正する方向にトルクを作用させる。本計算では、反モーメント  $T_r$  をずれ角  $\theta$  に比例するように与えた。ただし、ずれ角に比例するトルクだけでは回転の振動が生じるため、図 1 におけるダッシュポットと同様に角速度に比例する減衰項も加えた。したがって、反モーメント  $T_r$  は次式で与えられる。

$$T_r = -k_r \theta - \eta_r \omega \quad (3)$$

ここで、 $k_r, \eta_r$  は比例定数であり、 $\omega$  は回転角速度である。

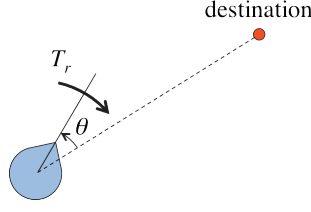


図 4: 反モーメントモデル

## 2.5 運動の基礎式

DEM による接触力  $f_{c_n}, f_{c_t}$  およびトルク  $T_c$ 、仮想バネモデルによる力  $f_c$ 、反モーメントモデルによるトルク  $T_r$  を考慮して、以下の並進および回転に関する Newton の運動方程式を数値積分することで粒子運動を求める。

$$\frac{d^2 \bar{x}_i}{dt^2} = \frac{\sum_j (\bar{f}_{c_{ni}} + \bar{f}_{c_{ti}} + \bar{f}_{c_{ij}})}{m_i} \quad (4)$$

$$\frac{d^2 \theta_i}{dt^2} = \frac{\sum_j (T_{c_{ij}} + T_{r_{ij}})}{I_i} \quad (5)$$

ここで、 $m$  は粒子の質量、 $I$  は慣性モーメントである。添字  $i$  は粒子  $i$  の量を表し、添字  $ij$  は粒子  $i$  と粒子  $j$  との間の量を意味する。

式(4)、(5)を時間  $t$  で数値積分することで並進および回転運動を求めることができる。ただし、並進速度に関しては以下の式で与えた。

$$\begin{cases} \bar{V}_i = \bar{V}_{Fi} \\ \text{for } \sum_j (\bar{f}_{c_{ni}} + \bar{f}_{c_{ti}} + \bar{f}_{c_{ij}}) = 0 \\ \bar{V}_i = \alpha \bar{V}_{Fi} + (1 - \alpha) \left( \bar{V}_i^0 + \frac{d^2 \bar{x}_i}{dt^2} \Delta t \right) \\ \text{for } \sum_j (\bar{f}_{c_{ni}} + \bar{f}_{c_{ti}} + \bar{f}_{c_{ij}}) \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $V_F$  は自由歩行速度であり、 $V^0$  は前時刻における速度である。また、 $\alpha$  は歩行意欲係数である。式(6)は他の歩行者からの影響がない場合には自分の好きな速度で歩くことができ、他の歩行者からの影響がある場合には、Newton の運動方程式を積分して得られる速度と自由歩行速度の中間的な速度で歩くことを意味する。 $\alpha = 0$  を与えた場合、他の歩行者の影響があると自分の自由意志を全く持たず、単なる粒子のように振る舞うことになる。一方、 $\alpha = 1$  を与えると他の歩行者の存在とは無関係に、自分の好きな速度で歩こうとする強引な歩行者を表すことになる。

## 3 計算結果

### 3.1 計算条件

本モデルを用いて、部屋にいる 40 人が単一の出口から退出する過程の数値シミュレーションを行った。結合粒子が成人男性の標準的な体型(肩幅×胸厚 = 50×20 cm 程度)になるように、円形要素の直径を 20 cm、重なりを 5 cm に設定した。部屋は 5×5 m の正方形とし、初期状態で部屋の奥側 3 m の領域内に歩行者をランダムに配置した。出口は幅 90 cm とし、手前の面の中央に設置した。また、出口前に設置した直径 60 cm の円形物体が退出現象に及ぼす影響についても調べた。その他の主な計算条件を表 1 にまとめる。表中、物理バネ定数は 10 kg の物体を乗せたときに 1 mm 変形する程度の値である。人体の弾性係数として、正確ではないが、極端に不適切な値ではないと思われる。仮想バネ定数や反モーメント係数については、現段階では歩行者の挙動が不自然にならないように、試行錯誤的に与えている。

歩行者質量	60	kg
物理バネ定数	$1.0 \times 10^5$	N/m
仮想バネ定数	$1.0 \times 10^4$	N/m
仮想半径	0.4	m
粘性減衰係数	350	Ns/m
視野角	120	°
反モーメント係数	500	Nm

表 1: 主な計算条件

### 3.2 出口退出シミュレーション

図 5 に出口退出過程の時系列スナップショットを示す。物体を設置しない場合(図 5(a))、出口付近でアーチアクションが形成されることにより、スムーズな退出が妨げられる様子が見られた。40 人の初期配置を変えた計算を複数回行ったところ、平均退出完了時間は 14.32 秒であった。

手前から 66 cm の位置に円形の物体を設置したところ(図 5(b))、物体を設置しない場合に比べて退出時の動きはスムーズになることが観察された。このとき、平均退出完了時間は 13.03 秒であった。これは、物体を設置しない場合に比べて、約 9% の時間短縮となっている。本計算とは条件が異なるが、Nishinari ら[12]の実験では物体の設置により、約 6% の時間短縮が報告されている。このことから、本モデルは出

口退出過程における人の挙動をよく表すことができていると言える。

次に物体を手前から 40 cm の位置に設置したところ(図 5(c))、手前壁と物体の間で人のスムーズな動きが大きく妨げられるようになった。その結果、平均退出完了時間は 19.74 秒となり、物体を設置しない場合よりも長くなった。

以上のことから、出口手前への物体設置は退出完了時間を短縮する効果があるが、設置場所が適切でなければ逆効果になり得ることがわかる。つまり、最適な物体設置位置があることが示唆される。

物体の設置位置を変えたときの平均退出完了時間を調べた結果を図 6 に示す。設置位置が出口に近すぎると、退出を妨げてしまうが、ある程度離れた位置に設置すれば、物体を設置しないときよりも退出時間が短縮されることがわかる。設置位置には最適値があり、それよりも離れてしまうと時間短縮の効果は薄れ、最終的には物体を設置しない場合に漸近していくことがわかる。

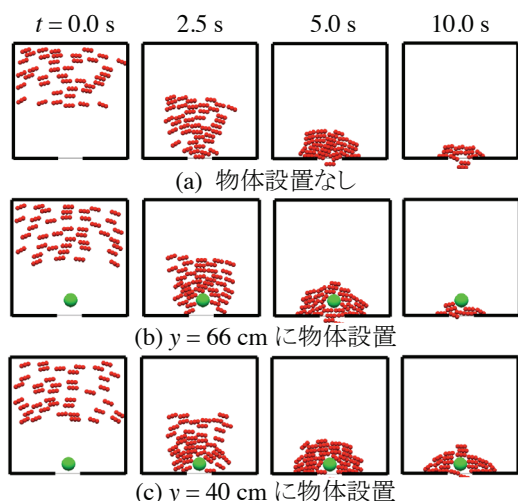


図 5: 出口退出過程の時系列スナップショット

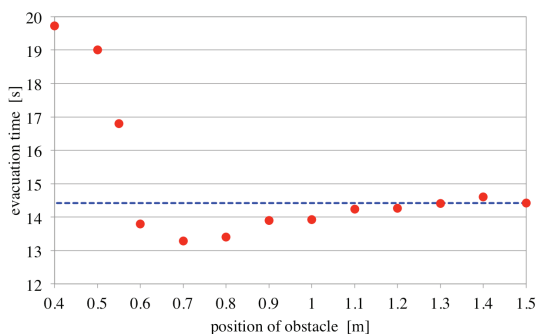


図 6: 物体設置位置と平均退出完了時間の関係

## 4 まとめ

結合粒子を用いた力学ベース粒子モデルにより、出口退出過程の数値シミュレーションを行った。アーチアクションや物体設置による退出時間の短縮といった現象を再現することができた。

## 謝辞

本研究は JSPS 科学研究費補助金基盤研究(C)(No.25350485)の支援を受けた。また、本計算の多くは関西大学 社会安全学部 4 年生 増田翔太君によって行われた。記して謝意を表する。

## 参考文献

- [1] S.P.Hoogendoorn, W.Daamen, P.H.L.Bovy, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003(2003) 89.
- [2] D.Helbing, A.Johansson, H.Z.Al-Abideen, Physical Review E **75** (2007) 046109.
- [3] D.Yanagisawa, A.Kimura, A.Tomoeda, R.Nishi, Y.Suma, K.Ohtsuka, K.Nishinari, Physical Review E **80** (2009) 036110.
- [4] T.Kaneda, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005 (2005) 273.
- [5] D.Helbing, I.Farkas, T.Vicsek, Nature **407** (2000) 487.
- [6] P.A.Cundall, O.D.L.Strack, Geotechnique **29-1** (1979) 47.
- [7] 清野純史, 三浦房紀, 瀧本浩一, 土木学会論文集 **537** (1996) 233.
- [8] Y.Tsuji, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003 (2003) 27.
- [9] 木山英郎, 藤村尚, 土木学会論文報告集 **333** (1983) 137.
- [10] 日高重助, 金星直彦, 三輪茂雄, 粉体工学会誌 **26-2** (1989) 77.
- [11] 川口寿裕, 田中敏嗣, 辻裕, 日本機械学会論文集 (B 編) **58-551** (1992) 2119.
- [12] K.Nishinari, Y.Suma, D.Yanagisawa, A.Tomoeda, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008 (2008) 293.