

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350485

研究課題名(和文) 群集事故解析のための粒子モデルシミュレーション手法の開発とその検証

研究課題名(英文) Development of Particle Model for Analysis of Crowd Accidents and Its Validation

研究代表者

川口 寿裕 (Kawaguchi, Toshihiro)

関西大学・社会安全学部・教授

研究者番号：80234045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：離散要素法(DEM)を歩行者間の相互作用力計算に適用し、高密度下の歩行者流れを解析できる数値シミュレーションコードを作成した。本コードを直線通路内歩行者流れ、出口からの退出、群集詰め込みなどの問題に適用したところ、既存の実験結果と定量的によく一致することが確認された。特に、高密度下での群集内作用力の不均一性について、有益な知見を得た。

一方、ビデオカメラを用いて実際の群集の流れを撮影し、PIV解析を行った。二次射影による平面補正を行うことで、斜め上からの撮影画像からも適正な歩行速度を計測できることが確認された。

研究成果の概要(英文)：A numerical simulation method was developed to analyze the pedestrian motion under the highly dense situations. Discrete Element Method (DEM) was employed to the calculation of inter-pedestrian forces. The present numerical method was applied to some problems, such as one-way and two-way flow of pedestrian, evacuation from an exit, packing of human being, and so on. It was found that the obtained results agree quantitatively with the previous experimental results. Especially, valuable information was obtained on the heterogeneity of the force acting on the dense crowd.

Pedestrian flows were recorded by a digital video camera, and were analyzed by the PIV. The walking velocity measured from a diagonal position was corrected by a 2D projection technique.

研究分野：安全工学

キーワード：シミュレーション工学 群集事故 避難 PIV 粒子モデル

1. 研究開始当初の背景

2001年7月に兵庫県明石市で開催された市民まつり花火大会において、会場の大蔵海岸とJR朝霧駅を結ぶ歩道橋内で群集事故が発生し、11人が死亡、247人が負傷した。海外では数百人が死亡するような大きな群集事故も少なくない。2020年には東京で夏季オリンピックが開催される予定であり、国内外から多くの人が集まることが予想される。これまでに発生した群集事故を分析することで、事故発生のメカニズム解明や危険箇所の特定制を行い、新たな群集事故発生への予防策を検討することが必要であるが、人を使った再現実験は安全性の観点から難しい。

そこで、コンピュータを用いた数値シミュレーションにより、数値実験を行うことで群集事故を詳細に調べることが有用である。群集事故が発生するような状況では、人同士が互いに接触し、力を及ぼし合っている。したがって、群集事故の定量的な解析には力学ベースの粒子モデルを用いたシミュレーションモデルが不可欠である。

2. 研究の目的

力学ベースの粒子モデルとして、土木工学や粉体工学の分野で実績のある、離散要素法 (DEM) を用いる。まずは DEM を用いた計算コードを開発し、比較的単純な流れに適用する。計算結果を既存の実験結果や PIV による計測結果と比較することで、精度検証を行う。本手法を実用レベルにし、建造物や会場における危険箇所の特定制や警備体制改善の提案を行えるレベルにまで発展させることを最終目標とし、本研究はモデル開発とその検証を主な目的とする。

3. 研究の方法

(1) 数値計算モデル

群集事故が発生するような高密度下では、人同士は互いに接触状態にあり、強い力で押し付けあっている。そのような状況を模擬し、作用力を定量的に評価するために、人を粒子で表現し、粒子間の作用力を図1に示す DEM で求める方法を用いる。

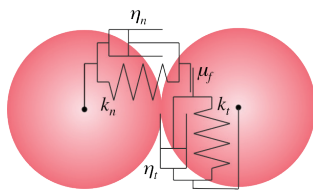


図1 離散要素法の接触力モデル

DEM 接触力モデルにより、接触力は次式で与えられる。

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

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

ここで、 k はバネ定数、 δ は変形量、 η 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。 μ_f は摩擦係数、 V_{ij} は粒子 i と粒子 j の相対速度、 V_{sij} は粒子 i と粒子 j の接線方向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。力が与えられれば、粒子の質量で除することにより加速度が求められる。適切な時間刻みで数値積分することで、速度、位置を順次求めることができる。

(2) PIV 計測

流体の速度計測で用いられる PIV を人の流れに適用し、群集の歩行速度を計測することを試みる。計測および解析の都合上、群集の真上にビデオカメラを設置することが望ましいが、街中では適切な設置場所が見当たらないことが多い。また、万一カメラ本体または部品が落下したときの安全性の観点からも、群集の真上にビデオカメラを設置することは困難である。

そこで斜め上からの動画を撮影し、二次射影による平面補正を行うことで適正な歩行速度を計測できるシステムの開発を行う。撮影空間の実際の座標を (X_i, Y_i) 、画面上の座標を (x_i, y_i) として、二次射影は次式で与えられる。

$$X_i = \frac{a_1 x_i + a_2 y_i + a_3}{a_7 x_i + a_8 y_i + 1} \quad (3)$$

$$Y_i = \frac{a_4 x_i + a_5 y_i + a_6}{a_7 x_i + a_8 y_i + 1} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_1 x_1 & -X_1 y_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_2 x_2 & -X_2 y_2 \\ x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_3 x_3 & -X_3 y_3 \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_4 x_4 & -X_4 y_4 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -Y_1 y_1 & -Y_1 x_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -Y_2 y_2 & -Y_2 x_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 & -Y_3 y_3 & -Y_3 x_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & -Y_4 y_4 & -Y_4 x_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \end{pmatrix} \quad (5)$$

4. 研究成果

(1) 群集の圧力と密度の関係

群集事故発生時に群集に作用していた力の大きさを見積もることは難しい。当然ながら、実際の人を使った再現実験は安全性の観点から実施できない。前述の明石市民まつり花火大会における事故では、歩道橋の手すりの変形量から、群集に作用した力を推算している (明石市民夏まつり事故調査委員会, 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, 2002)。このような検討を行う際こそ、数値シミュレーションが有益なツールとなり得る。

そこで、既往の実験 (吉村, 生産と技術, 59-3(2007), 72) を参考に、幅 1.3 m、奥行き 5 m の領域内に 28 個の円形粒子をランダムに配置し、前面の可動壁を移動させる数値実験

を行った。群集密度は 10 人/m²から 0.5 人/m²刻みで 14 人/m²まで変化させた。可動壁を所定の位置まで移動させると、圧力は時間的に変動した後、一定値に落ち着く。このときの前面の壁に作用する単位長さあたりの力を正面圧として求めた。

既往の実験では被験者として 28 人の男子大学生を使っている。標準的な成人男性は肩幅が 50 cm、胸厚が 20 cm 程度であるので、これを長径 50 cm、短径 20 cm の楕円で近似し、これと同じ面積を持つ円で置き換えると、直径は 32 cm となる。そこで、本計算では円形粒子の直径を 32 cm とした。

Hertz の弾性理論によると、均質な 2 次元円柱において、荷重と変形量は線形関係にある。このため、2 次元 DEM では線形バネを用いた計算が一般的である。しかし、人体は骨格、筋肉、脂肪などで構成されており、均質ではない。硬い骨格の周りに、比較的柔らかい筋肉や脂肪が存在することから、人体は変形量が小さいときには弾性が小さく、変形量が大きくなるにつれて弾性が大きく作用すると考えられる。この特性を表現するため、荷重 f と変形量 δ の関係を次式のようなべき乗則で与えた。

$$f = k\delta^n \quad (6)$$

ここで、指数 $n \geq 1$ とする。 $n = 1$ は線形バネを表す。 n は必ずしも整数である必要はないが、本計算では $n = 1 \sim 4$ の整数で与えた。

式(6)の指数 n を 1 から 4 まで変化させ、上述の手続きにより正面圧と群集密度の関係に関する数値実験を行った。結果を図 2 に示す。図 2 には既往の実験結果も示している。

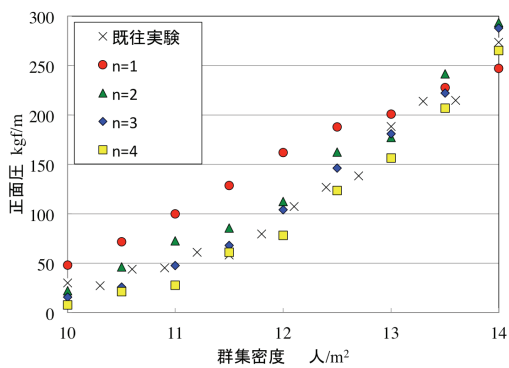


図 2 正面圧と群集密度の関係

既往の実験データを見ると、正面圧は群集密度に対して非線形な変化となっていることがわかる。これに対して本計算では、 $n = 1$ に対しては、正面圧が群集密度の増加に伴ってほぼ線形に増加していることが確認できる。指数 $n = 2, 3, 4$ に対しては既往の実験データと同様、両者が非線形の関係となっている。特に、 $n = 3$ および 4 に対しては、本モデルによって既往の実験データを定量的に再現できていることが確認できる。

$n = 4$ に対して、群集密度 14 人/m² のときの群集に作用する力の分布の例を図 3 に示す。

接触している粒子同士あるいは粒子と壁面には線を描き、線の太さで力の大きさを表している。また、粒子を塗りつぶす色の濃さは各粒子に作用する法線方向合力の大きさを表している。

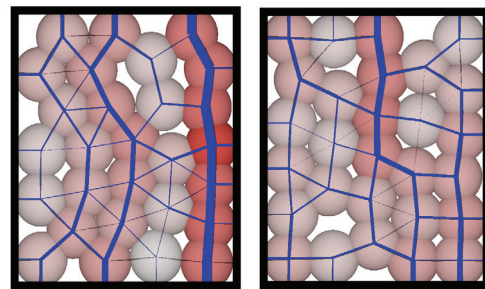


図 3 群集に作用する力の分布

図 3(a)では右側の壁に沿って大きな力を受ける粒子が一行に並んでいることがわかる。大きな力を受ける粒子が並ぶ位置は左や中央になることもあるが、多くの場合、このように一部の粒子に大きな力が作用する分布となっていた。

一方、それほど数は多くないが、図 3(b)のように全粒子にほぼ均一に力が作用する場合もあった。正面圧は図 3(a)が 289 kg/m、図 3(b)が 205 kg/m であり、力が全体に均一に作用する方が正面圧は小さくなっていた。

これらのことから、群集事故が発生するような高密度下において、多くの場合群集圧は不均一に作用することがわかる。したがって、1 m あたり 289 kg の力がかかっているときに、成人男性の肩幅が約 50 cm であることを考慮して、1 人あたりに作用する力は 145 kg 程度であると推定するのは必ずしも正しくないと言える。実際には一部の人により大きな力が作用している可能性があることを理解しておく必要がある。

(2) 出口からの避難

災害発生時には不特定多数の群集が部屋から一斉に避難することが考えられる。その際、出口や階段などは「ボトルネック」と呼ばれ、避難プロセスの律速になりやすい。時には群集の滞留により群集密度が高くなるため、群集事故発生の危険も高まる。このため、安全・迅速な緊急避難を目指すには、ボトルネックにおける避難者の行動を理解することが重要である。

そこで、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。ここでは、図 4 に示すような 3 つの円形粒子を少しずつ重ねて一行に並べた結合粒子モデルを用いた。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。

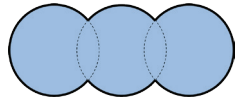


図4 結合粒子モデル

また、人が常に目標方向に正対しようとする動きを表現するために、図5に示す反モーメントモデルを導入した。

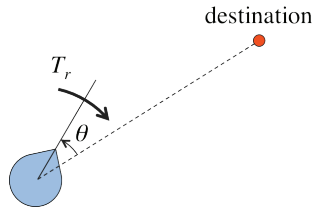
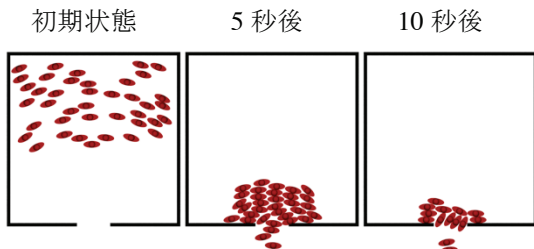


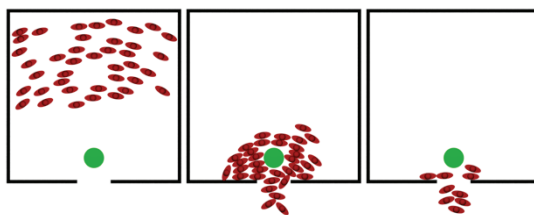
図5 反モーメントモデル

5×5 m の正方形の部屋に、40 人の人をランダムに配置し、幅 90 cm の出口から退出する過程のシミュレーションを行った。また、出口前に設置した半径 30 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。

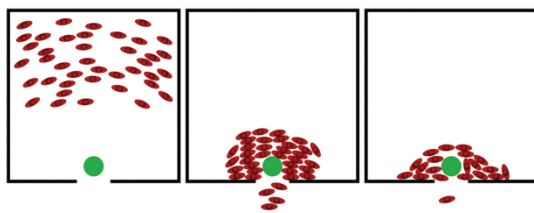
図6に出口退出過程の時系列スナップショットを示す。物体を設置しない場合(図6(a))、出口付近でアーチアクションが形成されることにより、スムーズな退出が妨げられる様子が見られた。40 人の初期配置を変えた計算を複数回行ったところ、平均退出完了時間は 14.32 秒であった。



(a) 物体設置なし



(b) 出口から 66 cm の位置に物体設置



(c) 出口から 40 cm の位置に物体設置

図6 出口退出過程の時系列画像

手前から 66 cm の位置に円形の物体を設置したところ(図6(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、既往の実験(Nishinari, K. et al., Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008(2008), 293)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6(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、設置位置が不適切であ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7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。

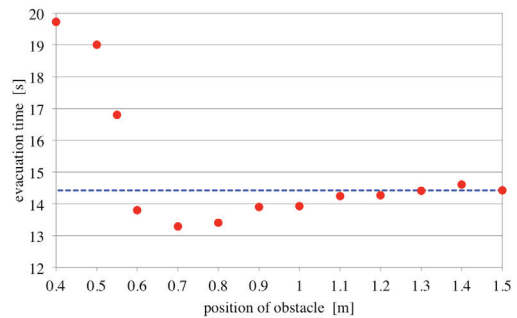


図7 物体設置位置と平均退出完了時間

(3) PIV 計測

大阪天満宮の初詣における行列の移動を動画撮影し、PIV 解析を試みた。スナップショットの一例(2015 年 1 月 1 日撮影)を図8に示す。図8は斜め上から撮影した画像なので、画面手前側の方は大きく写り、奥側の方は小さく写っている。したがって、このまま PIV 解析を行うと、同じ速度で歩いている、手前側の方が奥側の人よりも歩行速度が大きく出てしまう。



図8 大阪天満宮の行列

そこで、図8の赤丸で示した4点の実際の座標および画面上での座標を求め、二次射影による平面補正を行った。図9に補正後の画像を示す。図9の画像に対してPIV解析を行うことにより、手前側、奥側とも適正な歩行速度を計測できるものと期待できる。



図9 平面補正後の画像

平面補正処理を通してPIV解析を行った結果を図10に示す。矢印は歩行速度ベクトルである。矢印の色は歩行速度の絶対値を表している。

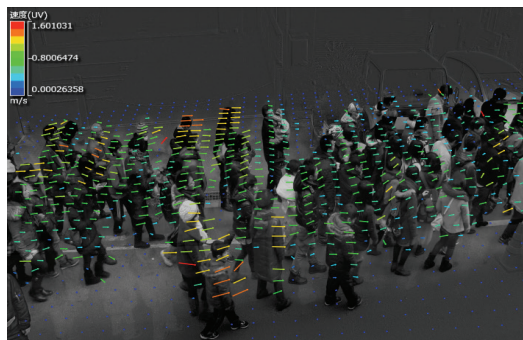


図10 PIV解析画像

図10より、手前側と奥側の歩行者の平均歩行速度をそれぞれ求めたところ、手前側が0.52 m/s、奥側が0.54 m/sとなり、両者がほぼ一致した。このことから、二次射影による平面補正の結果、斜め上からの撮影画像であってもPIV解析により適正な歩行速度を求めることが可能であることが確認された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① Kawaguchi, T., Discrete Particle Simulation for High-Density Crowd, Transport Research Procedia, 査読有, Vol.2, 2014, pp.418-423, <http://www.journals.elsevier.com/transportation-research-procedia/>

② Kobayashi, T., Tanaka, T., Shimanda, N., Kawaguchi, T., DEM-CFD Analysis of Fluidization Behavior of Geldart Group A Particles Using a Dynamic Adhesion Model, Powder Technology, 査読有, Vol.248, 2013, pp.143-152, <http://www.journals.elsevier.com/powder-technology/>

[学会発表] (計3件)

① 川口寿裕, 群集の圧力と密度に関する数値実験、第21回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム、2015年12月11日、名古屋大学(愛知)

② 川口寿裕, 出口退出過程の粒子シミュレーション、第20回交通流のシミュレーションシンポジウム、2014年12月5日、名古屋大学(愛知)

③ Kawaguchi, T., Discrete Particle Simulation for High-Density Crowd, 7th Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, 2014年10月23日、Hotel Den Haag(オランダ)

[図書] (計1件)

① 関西大学社会安全学部 編、リスク管理のための社会安全学、ミネルヴァ書房、2015、(執筆担当箇所：川口寿裕、第6章 安全・迅速な出口退出のシミュレーション、pp.107-127)

[その他]

ホームページ等

http://www.kansai-u.ac.jp/Fc_ss/staff/t_kawaguchi.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

川口 寿裕 (KAWAGUCHI, TOSHIHIRO)

関西大学・社会安全学部・教授

研究者番号：80234045