

# 楕円形個別要素法を用いた 避難行動解析に関する基礎的研究

杉本太一<sup>1</sup>・目黒公郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中央大学大学院 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:sugimoto@prelude.iis.u-tokyo.ac.jp

<sup>2</sup>東京大学生産技術研究所助教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:meguro@iis.u-tokyo.ac.jp

2001年の明石市民夏祭り事故では、極度に混み合った歩道橋上で、利用者同士の圧迫により多数の死者・重軽傷者が発生した。このような出口に向かって多数の人々が殺到する状況下では、人間相互の力学的関係が群集の避難行動を支配する要因の中で相対的に大きなウェイトを占める。そこで本研究では、避難者間の物理的な接触関係が考慮できる個別要素法 (DEM) を用いて、様々な人間の行動特性を取り込んだ避難行動シミュレーションモデルを構築し、避難行動を分析する。その際、従来一般的に用いられる円形要素ではなく、より人間の断面形状に近いと考えられる楕円形要素を用いる。理由は、混み合った状況下での避難行動では形状の影響が大きいと考えられるためである。

**Key Words :** Human evacuation behavior, Distinct Element Method, Mass Psychology

## 1. はじめに

従来、都市施設や都市空間の安全性を議論する際には、主に構造物自体の強度を中心に議論されることが多かった。しかし、不特定多数の利用者が存在する空間では、施設の強度に加えて、利用者の避難安全性の観点からの議論が重要な意味を持つてくる。つまり、施設の幅・出入り口の数や位置など、空間の構成によって決まる「空間自身が潜在的に持つ避難安全性」である。しかし、多くの都市施設では商業的な制約条件により、安全に対する明確な根拠なしに設計が行われている事も多いと言わざるを得ない。この背景には、上記のような問題を定量的に議論するための手法が確立されていないことも理由として挙げられる。

これらの避難安全性の問題を議論するためには人間行動を扱わなくてはならないが、従来この種の研究は、「過去の災害事例調査」<sup>1)</sup>、「被験者実験」<sup>2)</sup>、「コンピュータシミュレーション」<sup>3)</sup>を用いて行われてきた。しかし最近では、被験者の安全性の問題、さらに計画段階から評価が可能であるなどの理由からコンピュータシミュレーションが用いられることが多くなっている。

ところで近年、都市の避難安全性確保の重要性がクローズアップされる事故が相次いで発生している。中でも2001年7月に兵庫県明石市朝霧駅上の歩道橋において、花火見物に来ていた観客が群集雪崩になるという事故では、避難者間の圧迫により11人が死

亡し、247人が重軽傷を負った<sup>4)</sup>。この例のように、多くの人々が避難のために出口に向かって殺到するような状況下では、互いが押し合ったりする人間相互の力学的関係が、群集の避難行動を支配する要因の中で相対的に大きなウェイトを占めると考えられる。

そこで本研究では上記のような避難状況を、各避難者の避難行動と避難の途中に受ける力の定量的な評価ができる個別要素法 (DEM) を用いて解析することを試みる。そして安全対策や避難経路の策定に生かすための基礎的な考察を行う。

従来の DEM を用いた人間行動の研究では、解析空間に存在する避難者を上方 (または下方) から見た 2 次元問題として考え、接触判定の簡便化のために円形として扱っている<sup>5)</sup>。しかし、実際の人間の断面形状は楕円形に近く、特に混み合った状況下での避難行動では、形状の影響が大きくなる。そこで本研究では、要素形状を楕円形としてモデル化し、実際に近い人間行動の解析を行うことにする。

## 2. 楕円形個別要素法の人間行動への適用

### (1) 楕円形要素を用いた個別要素法

DEMとは、媒質を非連続な粒状体の集合と考え、要素間の力の伝達は接触点におけるバネとダッシュポットで行われるものとして各個体の運動方程式を解き、これと前時間ステップでの位置関係を考慮して、現時間での各個体の位置を求める手法である<sup>6)</sup>。

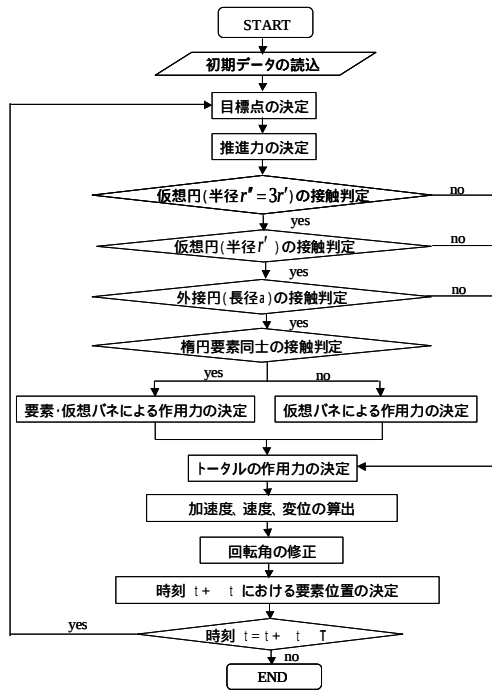


図 - 1 DEM による計算手順

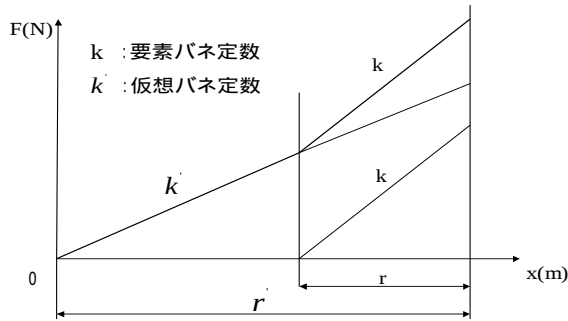


図 - 3 接触点から重心までの距離と力の関係

群集を構成する $i$ 番目の個体の質量を $m_i$ 、この個体の $x, y$ 方向の変位をそれぞれ $x_i, y_i$ 、回転方向の変位を $\theta_i$ とすると、運動方程式は以下ようになる。

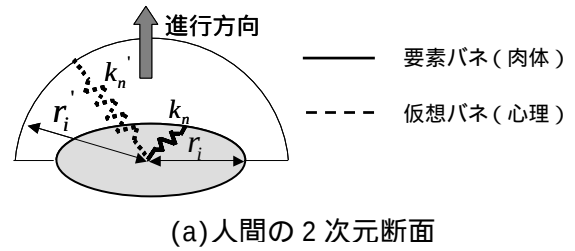
$$m_i \ddot{x}_i(t) = f_i^x(t) \quad (1)$$

$$m_i \ddot{y}_i(t) = f_i^y(t) \quad (2)$$

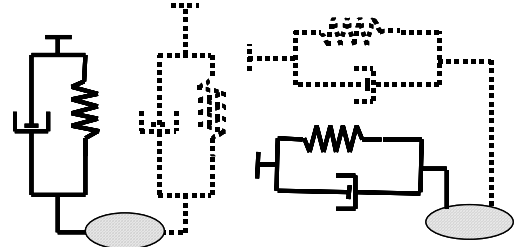
$$m_i \ddot{\theta}_i(t) = M_i(t) \quad (3)$$

ここで、 $f_i(t)$ 、 $M_i(t)$ はそれぞれ第 $i$ 要素に作用する合力、合モーメントである。

本研究では、人間のモデル化として、DEMにおける各楕円形要素を考える。楕円の接触判定は数的に実係数4次方程式の実数根の存在を判定することに帰着する<sup>7)</sup>。しかしこの手法は、接触判定に多くの時間を要するので、計算時間が著しく伸びることになる。そこで本研究では、4段階の接触判定を用いることで大幅なCPU時間の短縮を図っている。図-1は本研究におけるDEMによる計算手順である。



(a) 人間の2次元断面



(b) 法線方向

(c) 接線方向

図 - 2 要素バネと仮想バネの配置

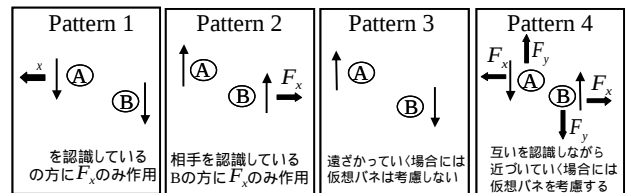


図 - 4 仮想バネの作用する条件

## (2) 仮想バネの導入

本研究では、「人間相互が物理的に接触する前に接触を避けようとする心理が働く」ことを表現するためのバネ（仮想バネ）を導入した。この心理的距離を仮想半径と定義すると、各要素は物理的な接触を示す要素半径に対応した要素バネと仮想半径に対応する仮想バネを有することになる。この関係を示したものが図-2である。また、この要素に働く力と変位の関係を示したものが図-3である。横軸は仮想バネ接触点から要素の重心に向かう距離をとったものであり、物理半径以内になると剛性が変化することがわかる。

従来の仮想バネの概念では、要素の移動する方向に依存せずに仮想バネが作用することになり、現実的でない運動をしてしまう。そこで本研究では、図-4に示すような2つの要素の位置と移動する関係（パターン）の中で、仮想バネによる力 $(F_x, F_y)$ が作用すると考えられるものに限り、仮想バネを考慮した。

## (3) 回転角と直進性の考慮

「歩行や走行時に、人間は進行方向に対して肩軸を直角にしようとする」という行動特性を表現するための回転角の補正を行う。すなわち、図-5(a)に示すように、対象となる要素の回転角と逆向きのモーメント $M$ を与える。 $M$ は回転角 $\theta$ が図-5(a)の $x$ 軸に達するまでの時間を設定することにより決定した。更に、 $x$ 軸に速やかに減衰するために、 $M$ と逆向きに減衰力（臨界減衰力）を与えた。

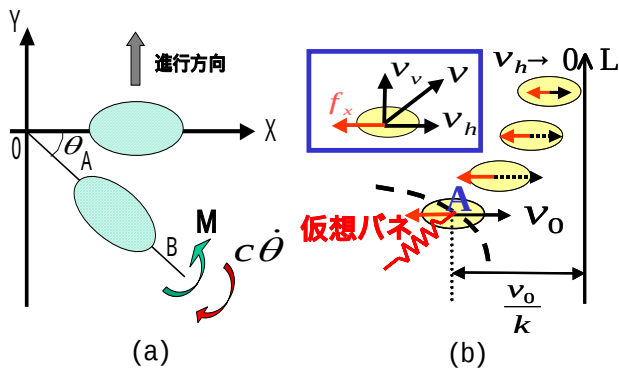


図 - 5 回転角と直進性の考慮

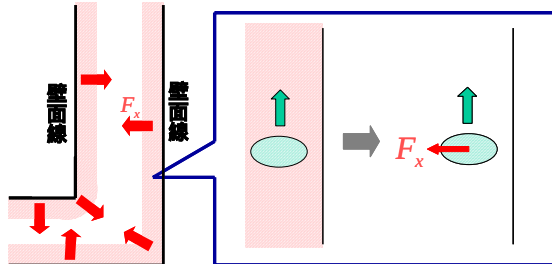


図 - 6 壁との接触を避けるための領域

次に、「人間は外力が作用しない限り直進しようとする」という行動特性を表現するために、本研究では要素バネ、仮想バネが共に作用しない場合、要素が直進するために接線方向の速度の減衰補正を行う。すなわち、図 - 5(b)に示すような要素の接線方向の進行方向と逆向きの力を速度の大きさに応じて与える。ここで図 - 5(b)の  $v_0$  とは仮想半径を半径としたエリアから抜け出した直後の要素の速度である。  $k$  とは  $v_0/k$  が漸近線  $L$  と点  $A$  との距離となることを考慮し、シミュレーションの結果から試行錯誤的に決定した値である。これにより、要素が外力を受けない場合、接線方向の力により接線方向の速度を補正し、人間が直進する行動特性を取り入れた。

#### (4) 壁との接触を避けるための領域の導入

「歩行・走行時に壁との接触を避けようとする」という行動特性を取り入れるため、本研究では図 - 6 のように対象空間の壁から一定距離の直線と壁面線に挟まれる領域では、常に通路の内側に向かって力を受けるものとした。

#### (5) 目標点に応じた個体推進力の設定

個体推進力とは、要素を目的地に向かわせるための力であり、本研究ではこの力の大きさを清野による実験結果で得られた  $55.1\text{N}$  として採用した<sup>5)</sup>。各要素は歩行速度が一定 ( $v = 1.30\text{m/s}$ ) になるまでこの個体推進力を受けることになる。

個体推進力の方向に関しては、従来は二次関数を仮定するモデルや等速円運動を仮定した向心力を与えるモデルが提案されている<sup>5),8)</sup>。しかし、空間の形状に応じた二次関数のパラメータを決定することが比較的複雑であることに加え、速度をコントロールするために空間を様々な領域に分割する必要があった。

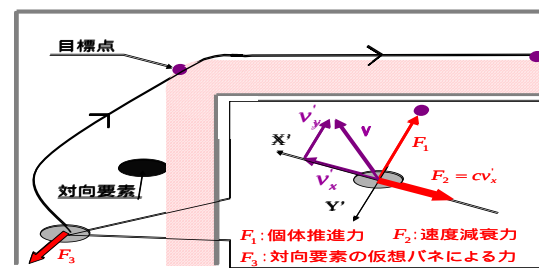
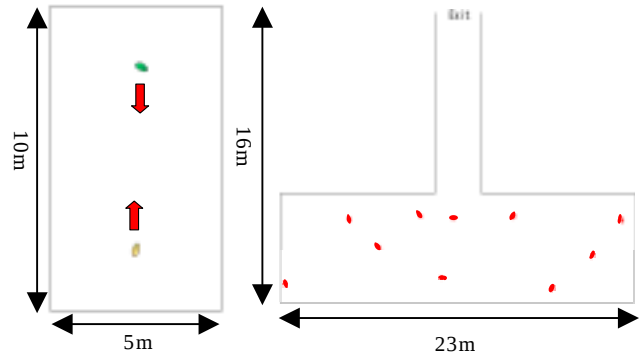


図 - 7 目標点に応じた個体推進力の設定



(a) simulation 1,2

(b) simulation 3

図 - 8 対象空間と初期配置

表 - 1 個体要素パラメータ

|               |          |                                            |
|---------------|----------|--------------------------------------------|
| 要素バネ定数 (法線方向) | (N/m)    | $3.30 \times 10^4$                         |
| 要素バネ定数 (接線方向) | (N/m)    | $1.22 \times 10^4$                         |
| 要素減衰定数 (法線方向) | (N/m)    | $2.90 \times 10^3$                         |
| 要素減衰定数 (接線方向) | (Ns/m)   | $1.76 \times 10^2$                         |
| 仮想バネ定数 (法線方向) | (Ns/m)   | $4.50 \times 10^2$                         |
| 仮想バネ定数 (接線方向) | (N/m)    | $2.71 \times 10^0$                         |
| 仮想減衰定数 (法線方向) | (Ns/m)   | $3.39 \times 10^0$                         |
| 仮想減衰定数 (接線方向) | (Ns/m)   | $2.63 \times 10^1$                         |
| 要素半径 (長軸, 短軸) | a, b (m) | $2.19 \times 10^{-1}, 1.15 \times 10^{-1}$ |
| 仮想半径          | r' (m)   | 周辺密度により変化                                  |
| 歩行速度          | v (m/s)  | $1.30 \times 10^0$                         |
| 加速度           | (m/s)    | $8.61 \times 10^{-1}$                      |
| 個体推進力         | (N)      | $5.51 \times 10^1$                         |
| 計算時間間隔        | (s)      | $1.00 \times 10^{-2}$                      |

そこで本研究では対象空間内に各個体にそれぞれ最短距離となる目標点を設定し、その目標点の方向に個体推進力を与える。その際、目標点に移動中に障害物や他の要素の影響を受けて最短経路から逸れた場合には、(3)で説明した接線方向の速度減衰力により軌道修正を図る。この関係を示したものが図 - 7である。

#### (6) 個体要素パラメータの決定

人間をDEM要素に置き換えるためには、要素の各種パラメータを決定しなければならない。本研究では清野(1996)による実験結果<sup>5)</sup>を参考にパラメータを決定した。

なお、心理的距離を表す仮想半径の値は要素周辺の密度によって変化すると考えられるため、本研究では、密度に応じた仮想半径を与えることにする。

### 3. 解析結果

解析による検討項目は次の2つである。

1) 仮想バネの導入、回転角と直進性を考慮したことによる効果

2) 目標点に応じた個体推進力の設定による効果

図 - 8に対象空間と避難者の初期配置を示す。図 - 9は

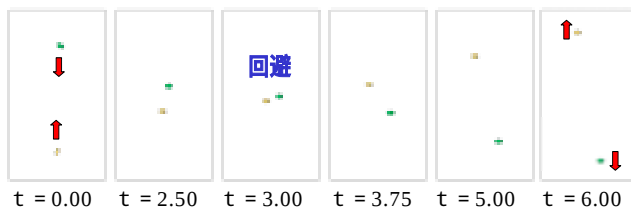
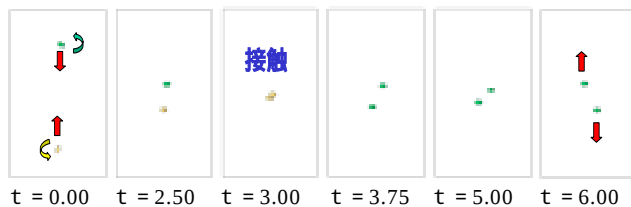


図 - 9 仮想バネの有無の比較

1)の検証のために仮想バネ導入前と仮想バネ導入後の2つの解析を行った結果である。回転角と直進性の考慮により「歩行や走行時に人間は進行方向に対して肩軸を直角にしようとする」、「人間は外力を受けない限り直進しようとする」という行動特性を表現できている。また、仮想バネの導入により、要素が物理的な接触を避ける様子が見られ、要素バネのみが作用している時よりも現実的な挙動となっている。

図 - 10 は2)の検証のためにT字路において全要素がひとつの出口に避難することを想定した解析結果である。目標点の設定により各々の要素がその位置に応じた最短経路を決定して避難する軌跡を見ることができる。

以上の結果から、本研究によって、楕円形要素を用いた個別要素法によって次のような人間の行動特性をシミュレーションすることができた。

人間相互が物理的に接触する前に接触を避けようとする

歩行や走行時に人間が進行方向に対して肩軸を直角にしようとする

人間は外力を受けない限り直進しようとする

歩行・走行時に人間は壁との接触を避けようとする

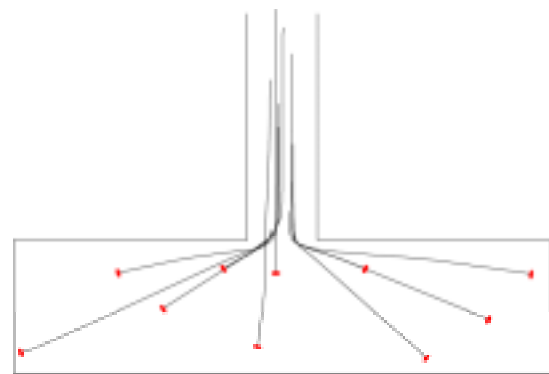


図 - 10 目標点の設定による効果

#### 4. 今後の展望

今後は観測や調査を通じてパラメータ等の精度を高めていくとともに、極度に混み合った空間での解析を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 室崎益輝：明石花火大会における群集雪崩，2002予防時報208，pp8-13，2002.
- 2) 山崎文雄，永田茂，横山秀史，大槻明：避難行動の迷路実験結果，土木学会論文集，No.441,pp 203-206, 1992.
- 3) 原田雅也，目黒公郎：ポテンシャルモデルを用いた最適避難誘導のための基礎的研究，東京大学修士論文，1998.
- 4) 明石市民夏祭り事故調査委員会：第32回市民夏祭りにおける花火大会事故調査報告，2002.
- 5) 清野純氏，三浦房紀，滝本浩一：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，No.537,pp 233-244, 1996.
- 6) 目黒公郎：個別要素法による動的破壊解析に関する研究，東京大学博士論文，1991.
- 7) 松島亘志：離散楕円要素法による粒状体構造の動的破壊過程の検討，1992.
- 8) 滝本浩一：個別要素法を用いたシミュレーションによる避難時の車椅子使用者と他の避難者との影響に関する一考察，日本建築学会環境系論文集，No.566,pp 9-15, 2003.

(2003.10.10受付)

## Study for Evacuation using Distinct Element Method with Elliptical Shaped Element

Taichi Sugimoto and Kimiro Meguro

Accidents in recent years highlighted the importance of securing a safe evacuation. During a fireworks exhibition at Akashi city in 2001, eleven people were killed and 247 people are injured due to a large concentration of people on an overpass. In situations like this, the dynamic interaction between people is one of the most important factors controlling the evacuation behavior. To study this phenomenon, the authors have developed an evacuation computational model using the Distinct Element Method (DEM). The model considers the physical contact between people. In this study, human beings are modeled not as circular but as elliptical shaped elements because a human body section resembles more an ellipse than a circle and the shape of section greatly influences the evacuation behavior in a people crowded space.