

# 楕円形個別要素法を用いた人間の避難行動解析に関する基礎的研究

中央大学大学院 学生会員 杉本 太一  
 東京大学生産技術研究所 正会員 目黒 公郎

## 1. はじめに

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。2001年の明石市民夏祭り事故や新宿区雑居ビル火災などがその典型である。このような避難のために出口に向かって人々が殺到するような状況では、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と考えられる。

このような観点から、本研究では避難のために出口に向かって人々が殺到するような状況における人間の避難行動の把握を楕円形要素を用いた個別要素法 (DEM) を用いた解析から試みる。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、要素形状を円形としていた。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、形状の影響が大きい。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

### 2.1 楕円形要素を用いた個別要素法

DEM の計算手順は要素間の接触判定を行いながら、要素そのものの運動を差分法で追跡していくものである<sup>1)</sup>。楕円の接触判定は数理的に実係数4次方程式の実数根の存在を判定することに帰着する。本研究では解析的な判定の可能な Ferrari の方法を用いた。なおこの手法は、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。そこで本研究では接触判定を2段階とし、最初に楕円に外接する円同士の接触判定を行うことにより大幅な CPU 時間の短縮を図っている<sup>2)</sup>。

#### 2.2.1 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1である。

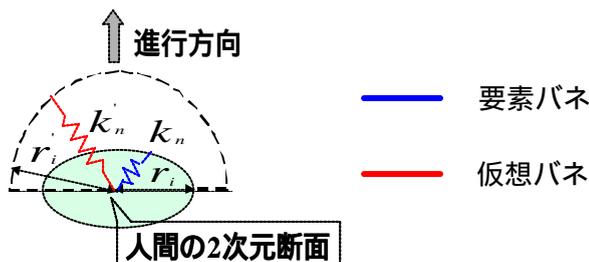


図1 要素バネと仮想バネの配置

また、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2つの要素の移動する関係（パターン）が仮想バネによる力が作用すると考えられるものに限り、仮想バネを作用させた。図2に仮想バネが作用する条件を示す。

#### 2.2.2 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に、回転角の補正を行う。すなわち、図3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  $q$  が図3(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。

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補正を行う。すなわち、図3(b)に示すような要素の接線方向の進行方向と逆向きで速度の大きさに応じた力を与える。ここで図3の  $v_0$  とは仮想半径を半径とした円から抜け出した直後の要素の速度であり、 $k$  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。

#### 2.2.3 壁との接触を避けるための領域の導入

「人間が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4のような直線通路が解析対象空間の場合、壁から一定距離をとった直線を考え、直線と壁面線に挟まれる領域では、要素が仮想バネによる力を受ける時、常に通路側に力を受けるような領域を導入した。

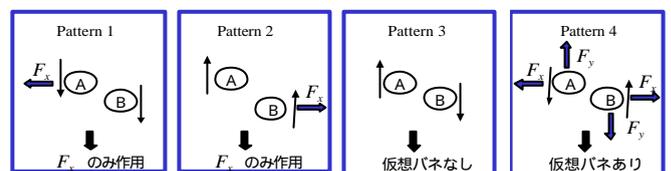


図2 仮想バネの作用する条件

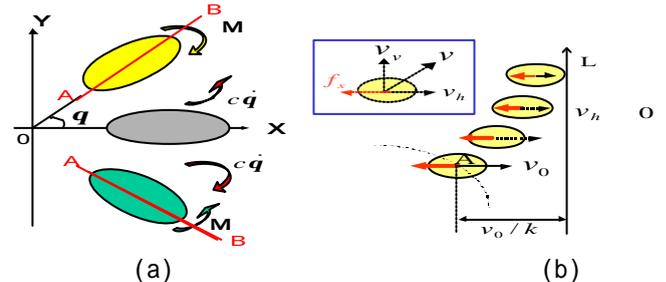


図3 回転角と直進性の考慮

キーワード：避難行動、個別要素法、非連続体、数値解析、人間行動

〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 東京大学生産技術研究所 B棟 目黒研究室 Tel: 03-5452-6436, Fax: 03-5452-6438

2.2.4 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>3)</sup>を参考にパラメータを決定した。表1は個体パラメータをまとめたものである。また個体推進力とは、要素を目的地に向かわせるための力であり、ここでは清野による実験結果で得られた 55.1N を採用した。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。

3. 解析結果

解析による検討項目は次の2つである。

- 1) 仮想ばね導入、回転角・直進性の考慮による効果
- 2) 壁との接触を避けるための領域の導入による効果

図5に対象空間と初期条件を示す。

図6は検討項目1)を検証するために仮想バネを導入した場合と要素バネのみが作用する場合との比較である。回転角・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をしている。

図7は検討項目2)を検証するために壁との接触を避

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)	N(m)	$1.76 \times 10^2$
仮想バネ定数 (法線方向)	N(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)	N(m)	$3.39 \times 10^0$
仮想減衰定数 (接線方向)	N(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)		$2.97 \times 10^0$
歩行速度 v (m/s)		$1.30 \times 10^0$
加速度 (m/s <sup>2</sup> )		$8.61 \times 10^{-1}$
個体推進力 (N)		$5.51 \times 10^1$
計算時間間隔 (s)		$1.00 \times 10^{-2}$

表1 個体要素パラメータ

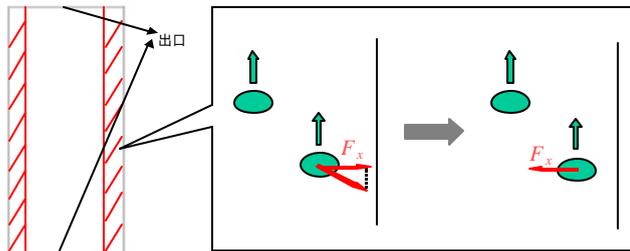


図4 壁との接触を避けるための領域

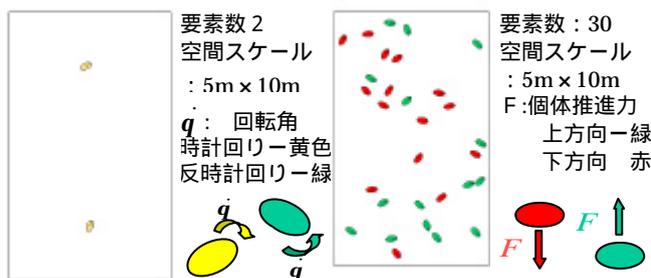


図5 対象空間と初期配置

けるための領域を導入した場合と領域を導入しない場合を比較したものである。領域を導入していない場合、要素が壁側によると通路側への力が作用しないことになり、要素が壁によってしまっている。それに対して、領域導入後は導入前と比べ、壁に寄っていく傾向が無くなっている。

4. まとめ

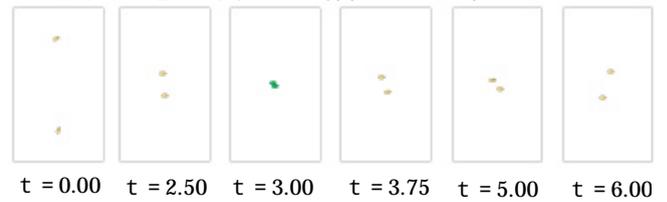
本研究によって、個別要素法を次のような人間の行動特性に適用することができた。

- 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
- 人間は壁との接触を避けようとする

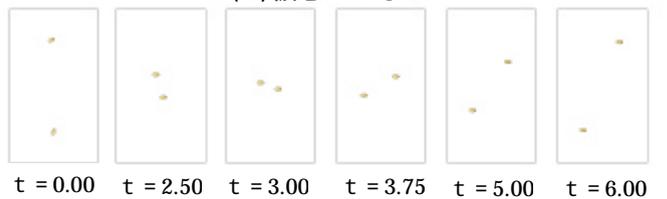
今後、実例を通し、パラメータ等の精度を高めていくことにより再現性のあるモデルを構築し、実大構造物に適用してシミュレーションを行う予定である。

【参考文献】

- 1) 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
- 2) 松島巨史 :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、東京大学修士論文、1992
- 3) 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, pp233-244 ,1996

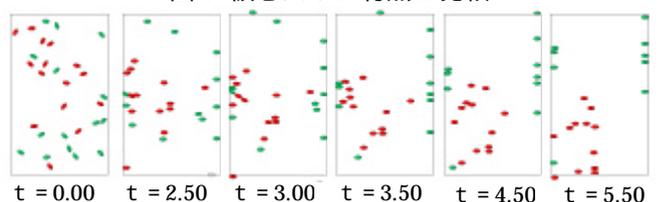


(a) 仮想バネなし

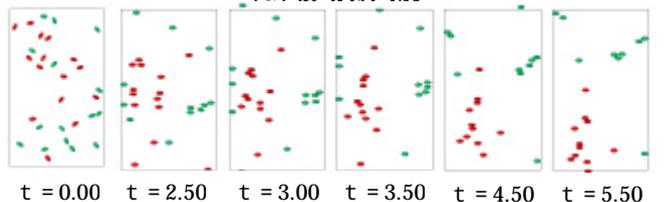


(b) 仮想バネあり

図6 仮想バネの有無の比較



(a) 領域導入前



(b) 領域導入後

図7 領域導入による効果