

# パニックにおける群集歩行シミュレーション

大阪大学大学院工学研究科

機械物理工学専攻

辻 裕

## 1. 緒言

2001年7月明石市 JR 朝霧駅の歩道橋における群集事故はまだ記憶に新しい。群集の密度がある限界を超えると、誘導や制御不可能に陥る。朝霧では幼児や年寄りなど身体的弱者が圧死する痛ましい結果になった。この種の事故は我が国だけでも数多く起こっており、その度に群集誘導の方法について責任が問われている。また海外ではメッカ巡礼者の群集事故がよく知られており、一度に数百から数千という凄まじい数の死亡数の事故が繰り返されている。その他、サッカー場のような大競技場において競技終了後、群集が一度に出口に向かう場合にも同様の惨劇が過去に幾度も繰り返されている。筆者はこのような高密度の群集歩行の予測を力学的なモデルに基づいて行うことを試み、その結果は2003年8月にロンドンで開催された2nd International Conference in Pedestrian and Evacuation Dynamics (文献1)において発表された。本稿はそこで発表された論文に基づいている。

力学モデルによる車や歩行者の予測は、古くから盛んで多くの報告がある。車の場合に比べて人間の場合は、心理的要素の影響が出やすいため、普遍性が得られにくいという特徴がある。一方、朝霧の事故に遭遇した人々の多くは、自分の意志で身体を動かすことは不可能であり、周囲から受ける力に身を任せるだけであったと証言している。このようになると人間は単なる無機質な物体に化すと言ってもよい。しかし人々が押し合う極端な高密度状態に対する計算例はまだ少ないように思われる。

筆者の専門である粒状体力学の分野では、互いに干渉し合う多数の粒子の運動の解析が扱われているが、粒状体の運動と歩行者や車の集団の挙動とのアナロジーに注目する研究も交通数理の分野では盛んと聞いている。本研究では、高密度の粒状体の運動解析で用いられている力学モデルに群集挙動特有の効果を考慮した。本稿では基本的な考え方やモデルについて説明し、ついで計算のアルゴリズムについて簡単に述べる。

## 2. 運動方程式

群集歩行のモデルを大雑把に分類すると流体モデルと粒子モデルに分類される。流体モデルでは群集を1つの流体と見なすモデルであり、歩行者の動きが比較的スムーズな平常時に適している。粒子モデルは個々の歩行者を粒子として扱うモデルである。心理的な要素や大人と子供の違いなど個々の歩行者の個性を考慮するに向いている。高密度の状態になると、大人の体の隙間に子供が入り込み、単位面積当たりの人の数で定義される群集密度が異常に高い値を持つ結果となる。このような状態を模擬するには粒子モデルを使わざるをえないと考えられる。人間を単なる物体と同一視して、運動方程式を立てるとすれば、ニュートンの第2法則

$$m \ddot{\vec{x}} = \vec{f} \quad (2.1)$$

が成り立つことになる。上式において  $m$  は歩行者の質量、 $\vec{x}$  は歩行者の位置ベクトル、 $\vec{f}$  は歩行者が受ける力のベクトルである。位置ベクトル  $\vec{r}$  の時間微分をドット “ $\cdot$ ” で示す。従って  $\ddot{\vec{x}}$  は加速度である。上式を単純に積分すると、

$$\dot{\vec{x}} = \vec{v}_0 + \vec{J}/m \quad (2. 2)$$

ここで  $v_0$  は積分定数で数値積分する場合、前の時間の速度になる。 $\vec{J}$  は力積であり、数値積分する場合、

$$\vec{J} = \vec{f}_0 \Delta t \quad (2. 3)$$

で与えるのが自然である。 $\vec{f}_0$  および  $\Delta t$  はそれぞれ前の時間に歩行者が受ける力および時間刻みである。歩行者は意志を持つため。以上の式が歩行者に適用することができないことは容易にわかる。接触力を受けている歩行者がその接触から開放されると、 $\vec{f} = 0$  となる。式 (2. 2) において力積が 0 となっても、歩行者は前の時間の速度で歩行することになる。前の時間の速度がどんなに遅くてもまたどんなに早くても、その速度で歩行を続けるとは考えにくい。なぜなら歩行者は他の歩行者からの力を受けない場合、歩行者は前の時間の速度にとらわれない速度で歩行しようとする。さらに力を受けていても、常に自分の進みたい速度に修正する意志が働く。

そこで筆者は、歩行者の意志を考慮するために、加速度方程式 (2. 1) から出発するのではなく、式 (2. 2) の速度方程式の右辺第 1 項に修正を加える式から出発した。すなわち以下の式を運動を記述する式として採用した。

$$\dot{\vec{r}} = \alpha \vec{v}^* + \beta \vec{v}_0 + \vec{J}/m \quad (2. 4)$$

ここで、 $\alpha, \vec{v}^*, \beta$  を

$\alpha$  : 歩行意欲係数、 $\vec{v}^*$  : 歩行意欲速度、 $\beta$  : 減衰係数

と名付ける。右辺第 1 項  $\alpha \vec{v}^*$  の存在によって、 $\vec{f} = 0$  の状態において歩行者が然るべき速度で歩行することが可能になる。 $\vec{v}^*$  は歩行者が進みたいと思う速度であるが、本解析では周囲の状況の影響を受けると仮定した。例えば、歩行者の前に他の歩行者がいたら、接触していなくても歩行意欲は減退するという心理を表している。係数  $\alpha$  によって更に様々な状況の影響を与えた。例えば、歩行者が強引な性格が強引でないかもこの  $\alpha$  で与えられた。直前に他の歩行者がいてもその先に空いた空間があれば、強引に進もうとする心理もこの  $\alpha$  で考慮された。 $\beta$  は本解析では 1 以下の値を取るように設定される。その意味は、歩行者が前の速度の影響をなるべく受けない形の歩行を望むという心理を表すことにある。筆者の解析では簡単に以下のように仮定した。

$$\vec{f} = 0 \quad : \quad \beta = 0$$

$$\vec{f} \neq 0 : \beta = 0.5$$

$\alpha$ 、 $\beta$  のような調整パラメータによって、かなり自由に歩行者の動きを調整することができるが、加速度方程式を使わずに速度方程式に基づいているために、厳密には力学法則を破っていることになる。

### 3. 接触力

#### 3.1 減衰振動

粒子にせよ人間にせよ物体と物体が押し合ったり、摩擦力を及ぼし合う場合の運動を数学的に表現するために減衰振動のモデルが使われる。減衰振動のモデルは一般にバネ、ダッシュポット（粘性減衰力）、スライダー（摩擦）のような機械要素の概念に基づく。2つの物体が衝突したり接触する現象がどのようにして減衰振動と関係づけられるかについて述べてみよう。

物体が押し合って変形すると、その変形量に応じた反発力が働くが、その作用はバネの作用と同じである。つまりバネは縮む量に比例して反発力を生む。人間も同様に押される力に応じて変形し、その変形量に応じて反発力が生まれる。完全弾性反発であれば、運動エネルギーの散逸が起こらないが、実在の物体では必ず、変形の際に熱が発生しその熱は散逸する。散逸したエネルギーは回収されないため、物体から見れば衝突前の運動エネルギーの一部が失われることになる。人体の場合の運動エネルギーの散逸はもっと複雑であるが、衝突の際の運動エネルギーの一部が体内で消費されると考えてもよい。一般に物体が衝突する場合、反発係数は1以下の値を取るが、エネルギーの散逸がその理由である。エネルギーの散逸に相当する作用は一般に2つの物体の相対速度に比例する形で与えられる。ダッシュポットの作用は車やバイクの衝撃吸収装置が振動や衝撃を吸収するのと同じである。バネとダッシュポットで与えられる系の運動方程式を表すと

$$m\ddot{x} = -\eta\dot{x} - kx \quad (3.1)$$

となる。上式で表される系を図で示すと図3.1のようになる。

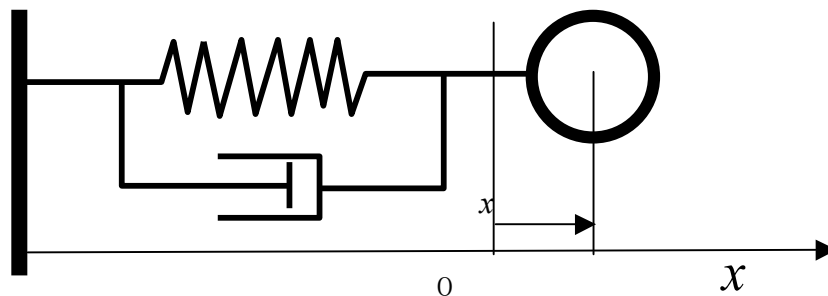


図 3.1 減衰振動系

上式では摩擦は無視されている。 $x$ は平衡点0からの移動量、 $m$ は物体の質量（本研究では人の質量）、 $\eta$ は減衰係数、 $k$ はバネ定数で、線形バネ（反発力が変位の1乗に比例）を仮定する。式(6.1)は言い換えれば、質量 $m \times$ 加速度 $\ddot{x} =$ 外力 という初等の物理で学ぶ式と同じであり、外力が $x$ や $\dot{x}$ の関数として与えられているだけである。

減衰係数が

$$\eta^2 > 4km \quad (3.2)$$

を満たす場合、過減衰となり変形は戻ることがない。減衰係数が

$$\eta^2 < 4km \quad (3.3)$$

を満たす場合、変形は回復し、減衰しながら振動を繰り返す。通常の粒状体の場合、衝突した後、反発し合って復元するので過減衰は起こらない。人間についても人体を単なる物体と見なすと過減衰が起こるとは考えにくい。しかし相対する人間が押し合う場合、押し合う状態を維持するので、過減衰に似た現象が起こる。

### 3.2 個別要素法

上に述べた減衰振動が粒子モデルの基本であるが、さらに実際的な運動状態を扱うには次の要素を加味する必要がある。

- (a) 運動には法線方向と接線方向の成分がある
- (b) 物体が滑る場合には接線方向に摩擦を考える必要がある。
- (c) 衝突後、2つの物体が離れる場合、物体同士は力を及ぼし合うことはない。

以上を考慮して2つの物体の接触力のモデルを図示すると図3.2のようになる。

バネ、ダッシュポットの作用は上の減衰振動で述べた通りである。法線方向、接線方向の運動とともにバネ、ダッシュポットが配置されている。スライダは滑り摩擦を考慮するために導入されている。カップリングを導入することによって、物体が離れることが可能になる。

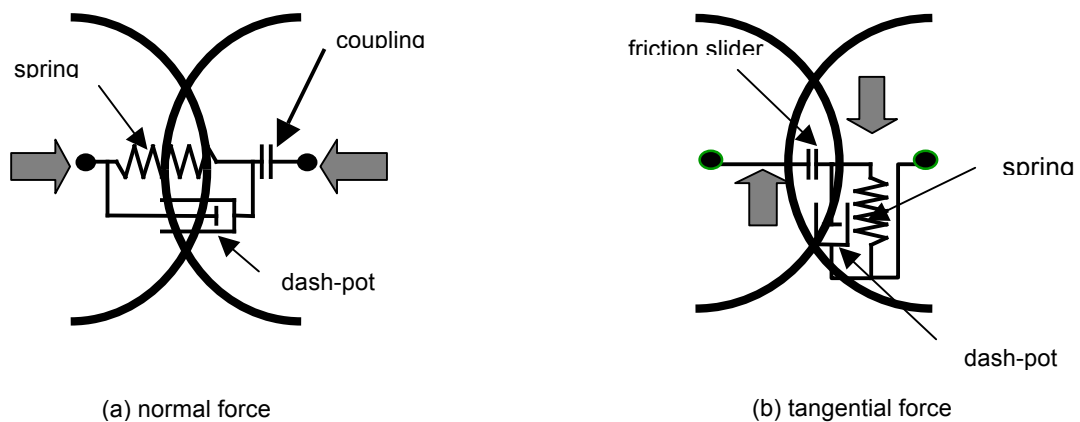


図 3.2 接触力のモデル

以下では添え字  $n$  により粒子間の接触面に対して法線方向の値、 $t$  により接線方向の値を示すことにする。法線方向および接線方向の外力は、押し合う物体の変形量の関数であるが、変形量を考える代わりに、図3.2に表すように、押し合う物体が形を変えずに食い込むと仮定し、その食い込みの深さ（オーバラップの深さ）の関数と考えるのである。オーバラップの深さはバネの変位量に対応する。線形バネを仮定し、粘性減衰力が物体間の相対速度に比例すると仮定すれば、外力は次式で与えられる。

$$f_n = -k\delta_n - \eta v_n \quad (3.4)$$

$$f_t = -k\delta_t - \eta v_t \quad (3.5)$$

上の  $\delta_n$  は法線方向の変位、つまりオーバラップの深さに等しい。 $\delta_t$  は接触部での接線方向の変位である。式 (3.5) は滑りが発生していない場合の式である。式 (3.5) の  $f_t$  が滑り摩擦より大きな値を取ると、滑りが接触部で発生する。摩擦力が法線方向の力に比例するクーロン摩擦を仮定すると  $f_t$  は次の条件に従う。

$$|f_t| > \mu |f_n| : f_t = -\mu |f_n| \quad (3.6)$$

$\mu$  は動摩擦係数である。トルク  $T$  は粒子中心回りのモーメント

$$T = r \times f_t \quad (3.7)$$

で与えられる。

一般に1つの粒子(人間)は図3.3に示すように複数の周囲の粒子と接触するので、それらの粒子からの寄与を全て考慮しなければならない。厳密には互いの接触を通じて離れた粒子とも力を及ぼし合うが、1つの粒子に着目した場合、その粒子が接触している粒子との相互作用のみが考慮される。この単純化は計算効率の面からきわめて効果的である。とくに実際問題に有用な結果を得ようとすれば多くの粒子に対し計算を実行する必要があるので、この単純化がなければ計算は事実上不可能に近い。

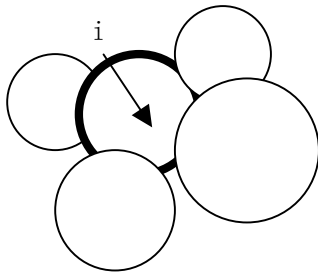


図 3.3 複数の粒子と接触する粒子

注目する粒子が複数の粒子と接触する場合には、注目する粒子  $i$  と接触する全ての粒子  $j$  について、力の総和、 $\sum_j (f_{nij})$ 、 $\sum_j (f_{tij})$  およびモーメントの総和  $\sum_j (r \times f_{tij})$  を取り、運動方程式(ここでは速度方程式)に代入に代入すればよい。

### 3.3 計算プログラム

式 (2.4) を使って歩行者の速度を求め、その結果を使って新しい位置を計算するという点では、計算のアルゴリズムはある意味では単純である。個別要素法のように個々の物体間の接触力を考慮しながら物体の運動を求める計算では、いかにして効率よく接触判別を行うかが計算プログラムを作成する上で重要となる。接触判別は基本的には物体間(ここでは歩行者間)の距離に基づいてなされるが、注目する歩行者がどの歩行者と接触するかの判別を行う際、領域内の全ての歩行者との距離を求めて接触判別を行ったら膨大な時間がかかることになる。そこで図3.4に示すように、通常は計算領域を格子状に区切り、注目する歩行者が存在する格子を常に記憶し、接触判定はその格子内およびその格子の周りの格子内に存在する歩行者だけに限る。このように格子を使って接触判定をことによって計算時間が大幅に短縮される。格子を用いる計算法は、本鑑定のように、注目する歩行者とその近くにいる歩行者の間の心理的な作用について種々

のルールを作成する場合にはきわめて有効であった。

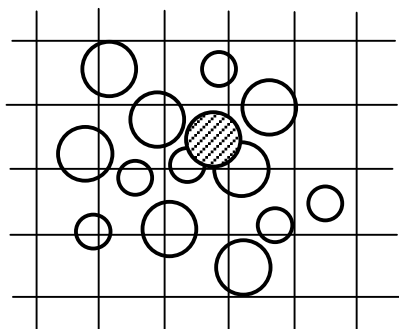
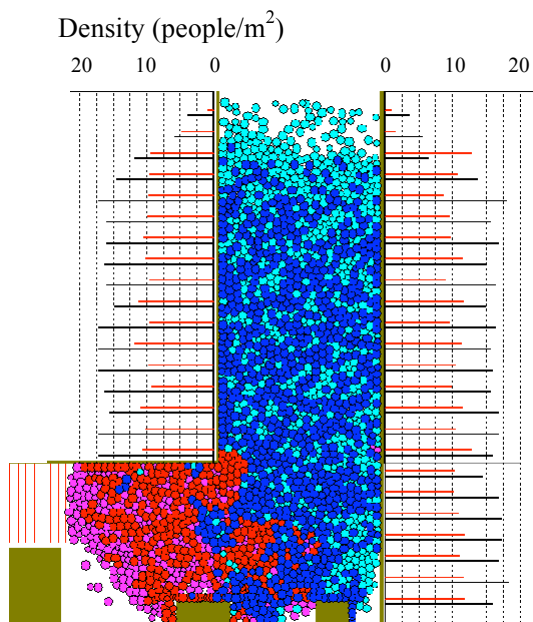


図 3.4 計算格子

#### 4. 計算例

図 4.1 に計算例を示す。朝霧駅の歩道橋を想定したものである。上部が北、下部が南に相当する。歩道橋の幾何学的な形は若干簡略化されている。ぎっしりと詰まった状態のスナップショットである。大人と子供が入り交じっていることに対応させて、大きさや重さの異なる2種類の粒子を用いて計算がなされた。空色と紺色は北から南に進む歩行者、ピンクと赤は左側から入って北の方向へ進もうとする歩行者である。紺と赤は歩行者にかかる接触力が比較的大きいことを意味する。歩道橋の外側に引かれている棒線は歩行者の密度と接触力を示す。詳しくは参考文献1を参照されたい。



#### 文献

1. Yutaka Tsuji : Numerical Simulation of Pedestrian flow at high densities, Proc. 2nd International Conference in Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED), pp.27-38, 2003