

Social force model を基にした歩行者の 避難シミュレーションモデルに関する研究

Evaluation of Pedestrian evacuation Modeling based on social force concept

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 磯崎勝吾(Shogo Isozaki)

北海道大学大学院工学研究科 正 員 中辻 隆(Takashi Nakatsuji)

1. 研究の背景

現在都市内においては人口増加により街を上や地下などに伸ばしつつある。しかし都市部には人口が密集しており今後もさらに過密化することが予想されている。これにより、人口とその活動地域のスペースがすりあいを保てなくなりつつある。そして地下や、建物内には過密状態が生じる。そのような閉鎖的な空間において人口が過密状態にある場合には震災などは非常に危険なものとなる。というのも、閉鎖的であればあるほど地上などの開けた空間に避難する連絡路が限られ、そこに過密状態の人口が一斉に避難すれば混雑し避難が難航することは明らかである。

災害などの避難時における歩行者の行動に関するシミュレーションモデルは何種類も研究されておりその成果は証明されている。しかしそのシミュレーションの多くは広範囲的なもの、つまり歩行者をマクロ的にとらえ避難地への経路を追うものであったり、ミクロに扱ってはいても、どのような経路を通して避難するかといったようなものであった。そのため歩行者を一人一人の動きを細かく、かつ局所的な動きを再現できるシミュレーションモデルは少ない。地下街などの狭い閉鎖空間での安全性などを知るためには大まかに歩行者が通る経路を予測するシミュレーションではなく、ある状況下でどのような挙動を起こすかというシミュレーションが必要となってくる。

2. 研究の目的

本研究では近年提案された social force model を研究対象とする。これは歩行者の経路選択などといったことよりも、歩行者同士がいかに影響して挙動が変わるかということに主眼を置いたモデルであり、今後シミュレーションで活用されることが期待される。しかしさまざまな研究論文のなかで、いくつかの欠点が報告されている。本研究においてはこの Social force model をベースとしこのモデルで考慮されていること以外に歩行者の要素として考えられるものを新たに組み込み Social force model で避難シミュレーションを実施、そして既存のモデルであり、かつ研究例が多いマルチエージェントモデルと比較し、本モデルの利点や課題点を探し出す事を目的とする。

3. social force model

3-1 social force 理論

本研究で用いる social force model を紹介する。まずこのモデルでは歩行者は質量（歩行者の体重）を持った質点として表される。

$$F = ma \quad (\text{式 1})$$

その質点（歩行者）ごとに運動方程式（式 1）を当てはめることで、ある時刻の歩行者の位置から、次の時刻への進む方向、歩行速度などが算出されるというものである。つまり運動方程式で言うところの外力 F を他者や、障害物からの見かけ上の力として仮定することで算出するということになる。この F は大きく分けて以下の 2 通りに分類することが出来る。

(1) 目的地へ進もうとする力

図 1 に示すように歩行者が他の影響により当初考えているコース（基本は目的地への最短経路）からずれてしまった場合に目的地の方向へ進行方向と曲げるように発生する力。（式 2）のように表すことが出来る。シミュレーション内でまずこの項が働かなければ歩行者は目的地に進まない。

$$f_i(t) = \frac{v_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} \quad (\text{式 2})$$

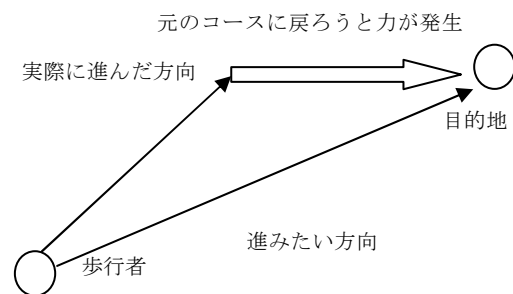


図 1 要因 1 模式図

($v_i^0(t)$: 希望歩行速度、 $e_i^0(t)$: 希望進行方向、 $v_i(t)$:

実際の歩行速度、 τ_i : 遷移時間)

(2) 他者、障害物から受ける反発力 (避ける力)

図2に示すように歩行者が進む上で他の歩行者や障害物を避けるように動く。これを再現するのが2つ目の要因である (式3)。

$$f_i(t) = \sum_{j(i)} [f_{ij}^{soc}(t) + f_{ij}^{att}(t)] \quad (式3)$$

$$f_{ij} = \left\{ A_i \exp \left[\frac{(r_{ij} - d_{ij})}{B_i} \right] + k\Theta(r_{ij} - d_{ij}) \right\} n_{ij} + \kappa\Theta(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji} t_{ij} \quad (式4)$$

$$f_{iw} = \left\{ A_i \exp \left[\frac{(r_i - d_{iw})}{B_i} \right] + k\Theta(r_i - d_{iw}) \right\} n_{iw} + \kappa\Theta(r_i - d_{iw}) (v_i \cdot t_{iw}) t_{iw} \quad (式5)$$

(A_i, B_i, C_{ij} : パラメータ、 d_{ij} : i と j の距離、 r_{ij} : i

と j の影響範囲の和、 n_{ij} : i から j 方向の単位ベクトル、

λ_i : 位置関係により決まる値)

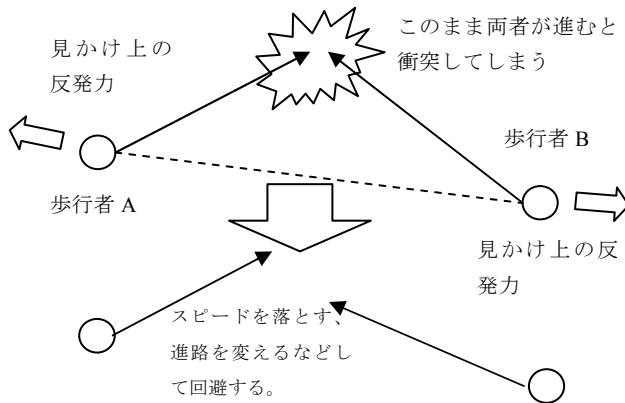


図2 要因2 模式図

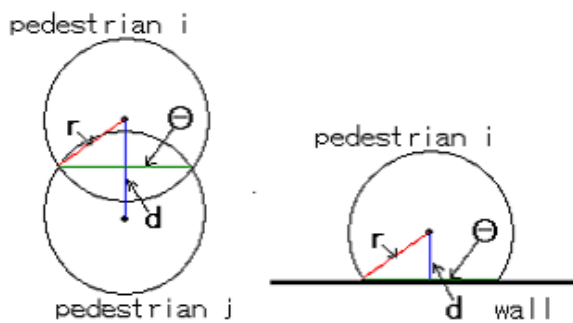


図3 接触時の模式図

(r : 歩行者の半径 d : 壁や歩行者との距離)

(式4)により歩行者同士の、(式5)により、歩行者と障害物(壁や柱)のお互いの受ける反発力が決定される。この値はパラメータとお互いの距離によってのみ決まる値である。

図3は式中の Θ の説明図である。本研究では Θ を人と

人や壁とが衝突したときの変移量として用いた。ここで Θ は衝突した場合のみを考えるので $(r-d)<0$ のときは Θ を考慮しないこととした。

なお、この Θ であらわされる要素は図からも分かるように実際に歩行者と歩行者、または歩行者を障害物が接触した場合にのみ生じ、それ以外では常に Θ は0となり考慮されない。つまりこれはそういうことが起こり得る状況、すなわち避難時などのパニック時にのみ作用するとされる。

3-2 歩行者の視野

前項の理論の説明部分からもわかるように、SFモデルは基本的にシミュレーション空間内部に存在する歩行者の総当たり計算で行われる。

その部分において本研究では歩行者の視野要素を導入することで計算対象となる歩行者、障害物の取捨選択を行っている。この取捨選択による利点と考えられるのは以下の点である。

- ・歩行者数を増やせば増やすほど増大する計算負荷の減少。
- ・後方からの歩行者への反応現象の解消。後方から実際の接触による押し合い現象の表現。

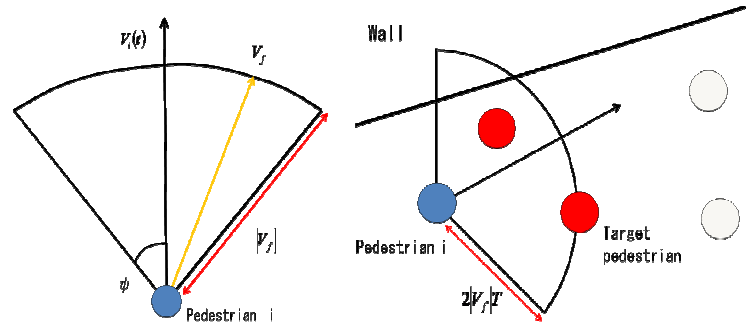


図4 歩行者の視野

図5 抽出対象になる周辺歩行者

4.比較対象モデル

本研究で用いた比較対象モデルのマルチエージェントモデルにおけるエージェント移動のルールを示す。歩行者が存在する空間は1セル1エージェントが入るセルで考える。

- ①希望進行方向に近いほうのから順に正の優先度を付与する。
- ②候補進行方向別に混雑度を算出し混雑している順に負の優先度を付与する。
- ③優先度が大きい順に希望進行方向とし、隣接するセルが空いていればそこへ移動する。

なお、周囲がすべて埋まってしまっている場合や、進行方向に対してエージェントの前面の周囲を囲まれてしまっている場合、つまり進行方向逆側の3マスが空いている場合はストップするものとして定義している。

セル1つの大きさは歩行者エージェント1人がきっちり入る0.4m(文献より人間の肩幅の平均が0.4m)とし、歩行速度平均が1m/s程度であることからシミュレーション内の2.5stepで1秒と換算している。

5.比較検証

比較検証するに当たってまず 8m×8m の正方形空間に出口 1 つ(出口幅は 1m, 1.5m で変動)の仮想空間を想定し検証を行った。パターンは 4 パターン。出口幅 1m と 1.5m の違い、初期の歩行者密度 50%(18 人)と 80%(28 人)による総当たりのパターンにて行っている。

また、この空間においては昨年度に実験を行っておりそのデータとも比較することでどちらのモデルによる結果が実際の歩行者の動きに近いのかを探ることとした。

5-1 避難完了時間

まず 1 つ目の比較項目として全歩行者の避難完了までに要する時間を比較した。

図 6 に実験によって得られたデータ、図 7 に SF モデルによるシミュレーションの結果、図 8 に MA モデルによるシミュレーションの結果をそれぞれ示す。

総所要時間の結果に関して実験と SF モデルについてほぼ同様といえる結果が得られたといえる。時間ごとによる避難完了人数の推移の形状もおおよそ同じであり、密度による差、出口幅による差も似た結果となった。これは SF モデルによるシミュレーションが避難時に密集する歩行者の挙動特性を良く表せている結果であると考えられる。

次に、MA モデルと、実験、SF モデルとの比較だが、MA モデルの特徴として密度の変化や、出口幅の変化による結果の差が小さいことがあげられる。この原因としてまず、セルでエージェントを定義したことがあげられると考えられる。基本的に定常状態において歩行者は好んで他の歩行者を近付くことは無いため、そのような状況下においてはこの定義の仕方は効果を発揮するかもしれないが、避難時のような異常事態においてはやはり 1 セル 1 人の定義のいわゆるセルオートマトンのようなルールでは無理があったのかと考える。

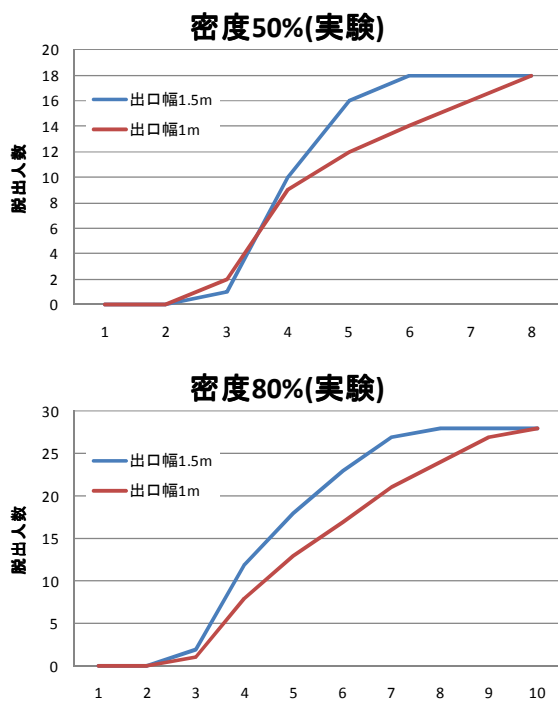


図 6 脱出人数の推移(実験)

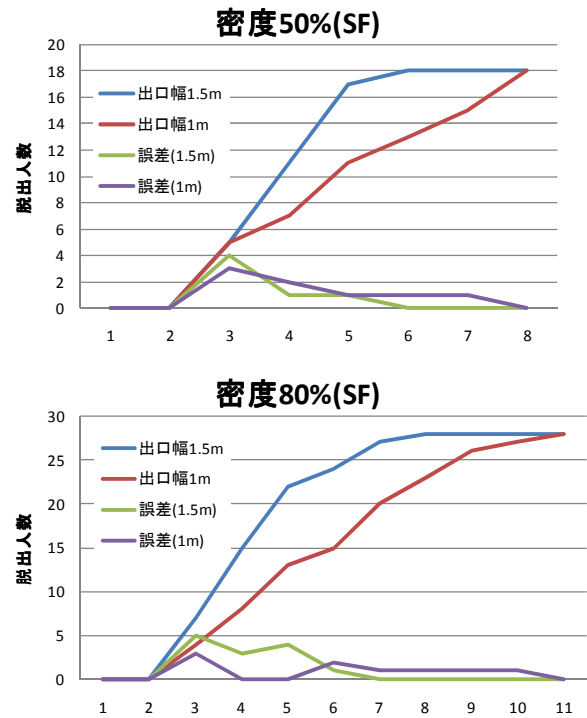


図 7 脱出人数の推移(SF)

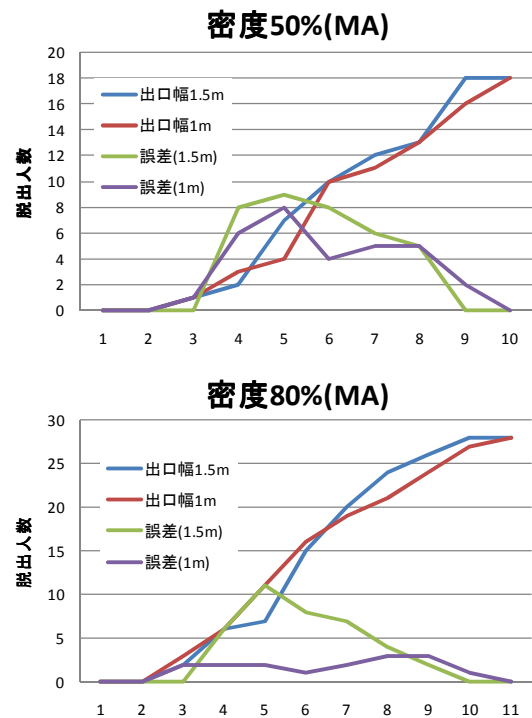


図 8 脱出人数の推移(MA)

5-2 滞留形状

次に実際にシミュレーションを動かしてみたときの歩行者の密集具合、つまり滞留形状について比較を行う。避難時において、一度に歩行者が集まった時に出口のキャパシティをオーバーしてしまい、処理しきれずに生じる「滞留」が避難難航の一番の要因であると考えられるため、データの比較検証ではないが、比較項目の一つとして取り上げることとした。



図 9 避難者の滞留(実験風)

図 9 が実際に実験で観測された滞留の様子である。避難者が増えれば増えるほど、また出口幅が狭くなればなるほど出口から扇状に広がるように滞留は大きくなる様子が観測された。

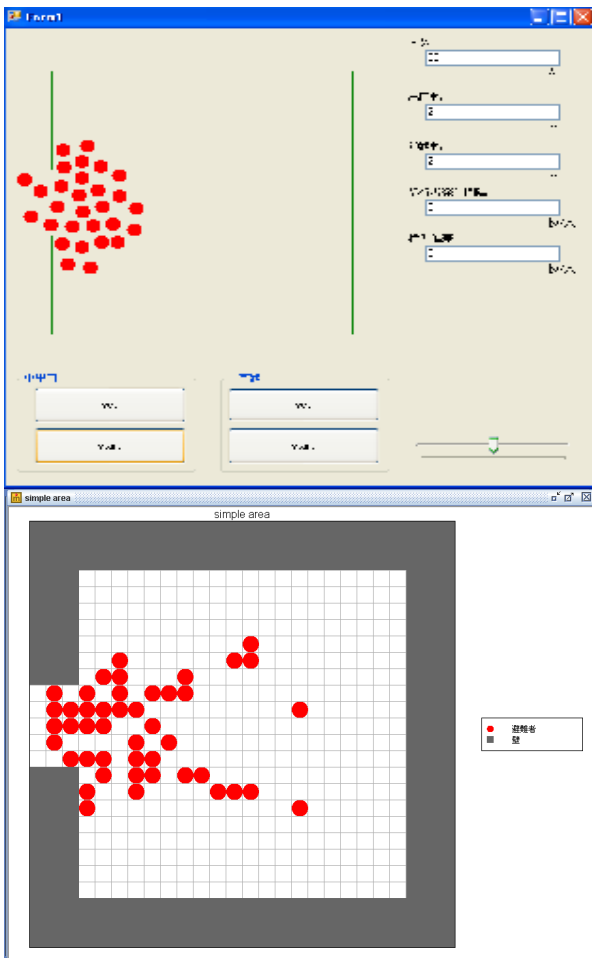


図 10 滞留形状の違い

図 10 において上が SF モデルで観測された滞留形状、下が MA モデルで観測された滞留形状である。

SF モデルと実験での様子を比較すると形状が似ていることが分かる。出口付近での密集による押し合い挙動により出口幅の余裕があるのにもかかわらず目詰まりを

起こす現象が再現されている。SF モデルの既存研究においてはこの現象をアーチ現象と呼称し滞留が起きる要因とされている。

MA モデルに関しては密集による滞留が一切観測されなかったわけではなかったが、図 10 に示すようにその形状が、実験や SF モデルの結果とは明らかに異なっていた。歩行者が狭い出口に密集してアーチ現象を起こしてしまう事への対策として整流化が考えられている。つまりきれいに並んで通過しさえすれば目詰まり現象は起きえないのであるが、その役割をセル分割というルールが担っていることがこの滞留が観測されなかった最も大きな要因であると考えられる。

以上からわかるように局所的かつ歩行者密集という状況下において SF モデルの再現性はかなり高精度であると考えられる。逆に MA モデルは検証は行っていないが、これとは逆のシチュエーション、つまり定常状態の歩行者の動きや、もっと広範囲、例えば家から小学校の体育館などの避難場所に避難するというようなマクロ流に近いような避難挙動を再現するシミュレーションに適しているモデルなのではないかという予測が立つ。

6. おわりに

本研究において昨年度行った実験データに合わせた SF モデル、MA モデルによるシミュレーションを行い「避難時」という状況下でのそれぞれのモデルの再現性を比較した。

避難、という歩行者の密集時において SF モデルは物理力モデルであるために見かけ上の力だけでなく押し合いの挙動を再現する上で必要な実際に働いている力も含むために高い再現性を持つことが分かったと同時に、さまざまな場面での避難シミュレーションに用いることができるという可能性を示す事が出来たと考えられる。今後の研究として SF モデルの適する用途を探るためにいくつかの状況を設定したシミュレーションを行っていく予定である。

またモデルの使い分けという観点で言及するならば、歩行者の密度、シミュレーションエリアの広さ、避難・定常の状況などを踏まえたうえで欲しい結果に応じて使用モデルを使い分けことが歩行者シミュレーションを行う上で最も重要であることがわかった。今後はそのモデルの使い分けの境界を探る党の研究が求められるのではないかと考えられる。

7. 参考文献

- Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situation: Dirk Helbing, Illes J. Farkas, Peter Molnar, and Tamas Vicsek
- マルチエージェントモデルを用いた避難行動のシミュレーション: 押野麻由子
- A Pedestrian Model Considering Anticipatory Behaviour for Capacity Evaluation: 浅野美帆、桑原雅夫
- 先読み行動を考慮した歩行者交通流シミュレーション: 浅野美帆、桑原雅夫