

歩行者の緊急避難行動シミュレーションに関する研究*

Simulation of pedestrian evacuation behavior in disasters*

今良太**・中辻隆***

By Ryota KON**・Takashi NAKATUJI***

1. 本研究の背景と目的

現在日本では多くの商業施設・娯楽施設等が存在しており、多くの人が集まる場所が多数存在している。

しかしこのような空間では、災害が起こった場合、屋外に比べ気象状況等の把握が困難であり、利用者が混乱状態に陥りやすい。避難や消防活動も制約されるため、短時間で多くの被害が出る事が予想される。

このような人命が損なわれる危険性を少しでも減らすため、防災計画及び防災訓練はより実用性の高いものでなければいけない。

本研究では近年開発された Social force model¹⁾ を避難時の状態を考慮して改良されたモデルを用いてシミュレーションを行い、実際の実験によって得られたデータと比較することで、パラメータを推定するとともに、モデルの再現性を検討する。またそのシミュレーションから歩行者の避難行動特性を把握し、歩行者がスムーズに避難が出来るような出口の形状や補助設備の設置の有無を検討していく。

2. 避難時の Social force model について

(1) Social force 理論

本研究で用いる Social force model について紹介する。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がある。この F は大きく分けて以下の 3 通りに分類することが出来る。

- (1) 目的地へ進むとする力
- (2) 他者、障害物から受ける反発力（避ける力）
- (3) パニック時に生じる特別項

これらの F から通常の Social force model²⁾ では（式 2）を用いる。

$$f_i = \frac{v_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum [f_{ij}^{soc}(t) + f_{ij}^{att}(t)] + \sum_b f_{ib}(t) + \sum_k f_{ik}^{att}(t) \quad (\text{式 2})$$

(2) 避難時における Social force model

本研究では上述した Social force 理論を、避難時における歩行者の状況を考慮して提示されたモデルを使用している。このモデルでは避難時の歩行者の特性を考慮し、通常モデルから以下の点に変更されている。

- ・通常時に考慮される位置関係による影響値を除去（通常時は向かってくる人の影響の方が大きい）
 - ・ディスプレイ等に引き付けられる力の除去
 - ・団体などの人と離れないようにする力の除去
 - ・直接接触した場合の圧力、摩擦力の追加
- これらの点を変更したモデルを（式 3～式 5）に示す。

$$f_i(t) = m_i \frac{v_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_W f_{iW} \quad (\text{式 3})$$

$$f_{iW} = \left\{ A_i \exp\left[\frac{(r_i - d_{iW})}{B_i}\right] + k\Theta(r_i - d_{iW}) \right\} n_{iW} + \kappa\Theta(r_i - d_{iW})(v_i \cdot t_{iW})t_{iW} \quad (\text{式 4})$$

$$f_{ij} = \left\{ A_i \exp\left[\frac{(r_{ij} - d_{ij})}{B_i}\right] + k\Theta(r_{ij} - d_{ij}) \right\} n_{ij} + \kappa\Theta(r_{ij} - d_{ij})\Delta v'_{ij}t_{ij} \quad (\text{式 5})$$

（式 4）は人から受ける影響力と圧力、摩擦力に関する式であり、（式 5）は壁からの力に関する式である。

ここで変数 Θ に関して、本研究では Θ を新たに図 1・2 のように、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。

(r : 歩行者の半径 d : 壁や歩行者との距離)

*キーワード：防災計画

**学生員、工修、北海道大学大学院工学研究科
(札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目)

***正員、工博、北海道大学大学院工学研究科

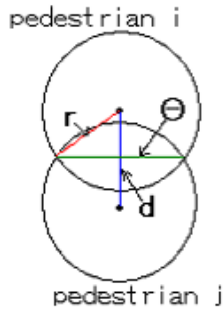


図1 歩行者同士

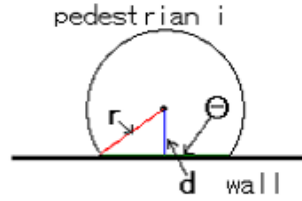


図2 歩行者と壁

3. 実験に関して

本研究では避難時の Social force model で用いるパラメータの推定と実際の歩行者の挙動を観察するために、歩行者の避難挙動に関する実験を行った。内容は以下の通りである。

(1) 場所

工学部エントランスホール

(2) 実験概要

A 棟へ向かう通路を出口とした 6m×6m の仮想空間を設け、最大 29 名の被験者が一斉に出口へ向かう様子をビデオカメラで撮影した。

(3) 各実験の条件

表1 実験の条件

実験	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
柱	なし				あり(出口から1m)				あり(出口から0.42m)			
壁幅	1m	1.5m			1.5m	1m		1.5m		1m		
密度	50%	80%	50%	80%	50%	80%	50%	80%	50%	80%	50%	80%

(4) 測定項目

今回の実験では3台のビデオカメラで撮影することで避難時間、1秒ごとの避難人数、人口密度の変移等を観測した。

4. 実験結果

(1) 避難時間

避難開始から避難終了までの時間を観測し、状況によってどのように避難時間が変化するかを調べた。

表2 避難時間

実験①	実験⑦	実験⑪	実験③	実験⑤	実験⑨
4.63	4.85	5.5	4.105	4.32	4.74
実験②	実験⑧	実験⑫	実験④	実験⑥	実験⑩
7.73	9.365	8.29	5.08	6.99	7.38

表2は各実験の避難時間を示したものである。

この結果から、一般的に予想できる通り、壁幅が広く、避難人数が少なく、障害物となるものがない場合が最も避難時間が早いという結果となった。人数が避難時間に最も影響し、次に壁の幅が影響を及ぼすことが本実

験ではわかる。

(2) 1秒ごとの避難人数

1秒ごとに出口を通過した人数を観測した。各実験の標本数が少ないため、値にばらつきが少ない。よって各実験避難終了人数の平均を取りグラフにすることで状況の変化による避難終了人数の変移を観測した。

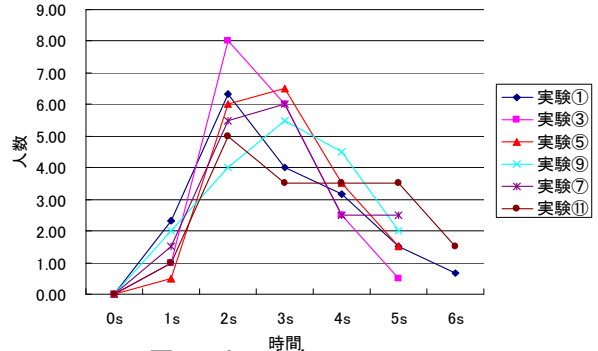


図3 人口密度50%

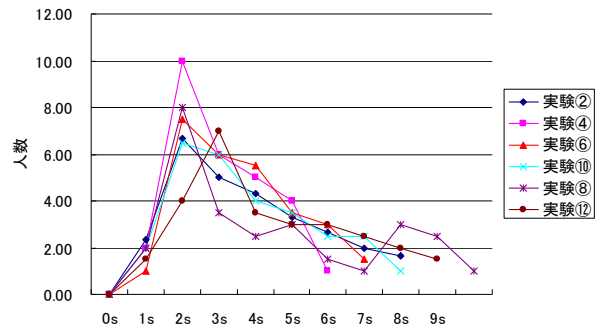


図4 人口密度80%

図3・4から、ほとんどの場合2~3秒後に避難終了人数がピークを迎え、そこから徐々に減少していくという傾向が見られた。

(3) 1秒ごとの避難者の密度分布

シミュレーションで用いるパラメータを推定するために1秒ごとの避難者の密度分布を観測した。実験範囲を図5のように1メッシュ126cmの正方形として区切り、メッシュ1から8までの実験空間における密度分布の変化を観測した。メッシュ9以降は実験の際に使用したカメラの角度が不十分だったため、測定できなかった。

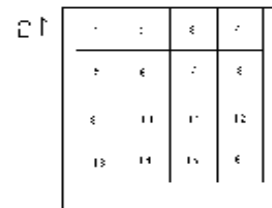


図5 メッシュの位置

(4) 歩行者の目詰まり

歩行者が狭い出口から出ようとするとき、避難時のように歩行速度が速くなると、歩行者同士が出口付近でぶつかり合い、目詰まりをおこすことがある。この現象は本研究の参考文献の著者である Helbing¹⁾らは歩行者の形状からアーチ現象と定義している。



図6 アーチ現象

本実験においても図6のようにアーチ現象が見られた。

また出口が狭く、人数が多いほど長く観測されたので、本実験ではこのアーチ現象が避難時間を遅らせる原因であると考え、出口付近に柱を置き、歩行者の避難の経路をあらかじめ制限することでアーチ現象を解消しようと試みた。

しかし結果としては表1で示したとおり、柱による避難時間の減少は見られなかった。原因としては柱の半径や柱の位置が考えられる、そこで本研究では後述するシミュレーションを用いて柱の半径や位置を変え、避難時間に変化が出るかを観測した。

(5) 歩行者の避難挙動

これらの結果から本実験における歩行者の避難挙動の特性を以下に示す。

- ・避難時間は壁の幅や避難人数によって変化し、特に避難人数は避難時間に大きな影響を与える。
- ・出口を通過する歩行者の人数はどの状況においても避難開始から2~3秒後にピークを迎え、そこから徐々に減少する。
- ・歩行者は出口付近でアーチ現象をおこす。

5. シミュレーションに関して

(1) シミュレーションの目的

本研究では歩行者の動きの再現ということを目的にし、視覚的にわかりやすく表現するために、VB.NETを用いてアニメーションを行った。最初シミュレーションは実験と同じように6m×6mの仮想空間からの避難を想定し、壁の柱の幅や柱の位置、歩行者の人数を設定できるようにし、それぞれ実験①~⑧まで行った。以下にその結果を示す。

また実験⑨以降に関しては柱と壁の幅が狭すぎたため本シミュレーションの都合上再現することが出来なかった。

(2) 避難時間

表3 避難時間

	50%,1m	柱	80%,1m	柱
real	4.63	4.85	7.73	9.365
sim	6.9	6.4	7.9	9
	50%1.5m	柱	80%1.5m	柱
real	4.105	4.32	5.08	6.99
sim	4.3	6.2	6.6	8.1

シミュレーションの結果、実測値とズレが生じるパターンも出たが、壁幅が広く避難人数が少ない方が避難時間が短いという結果が得られた。

(3) パラメータの設定

本研究で使用する災害時の Social force model に使用されるパラメータを以下に示す。

A : 他人から受ける影響力 B : 影響力の範囲

k : 接触時の圧力に関する定数

κ : 接触時の摩擦力に関する定数

Helbing¹⁾らの研究ではこれらのパラメータを理論値として式に代入している。しかしこの理論値は欧米のサッカー観戦者の平均体重等から推定されているため、日本人の体型には当てはまらないと考えた。

そこで本研究では実験によって得られた1秒ごとのメッシュの人口密度から遺伝的アルゴリズムを用いてこれらのパラメータの最適解を求めた。

表4 最適解

A	2626.409	k	15540.45
B	0.141137	κ	21700.59

本研究においてはこのパラメータの値を用いてシミュレーションを行った。

(4) 1秒ごとの避難人数

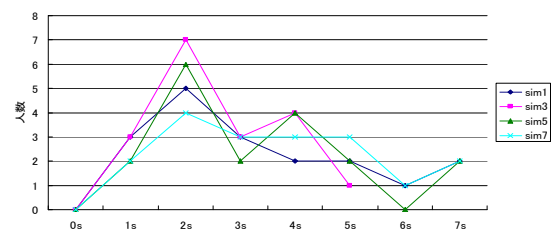


図7 人口密度 50%

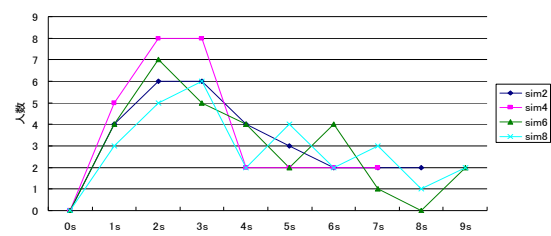


図8 人口密度 80%

どのシミュレーションにおいても図7・8で示すように避難開始2~3秒後にピークを迎えており、避難人数の推移は概ね再現することが出来たといえる。

(5) アーチ現象

図 9 のようにシミュレーションでは明確なアーチ現象は観測できなかった。

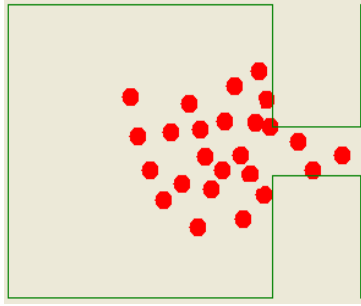


図 9 シミュレーション

(6) シミュレーションの再現性

本研究で行った実験から得られた歩行者の避難挙動特性は4. (5) に示した通りである。

本研究のシミュレーションにおいても、避難時間に多少のズレは生じたが、これらの歩行者の避難挙動の特性を再現することが出来た。アーチ現象の再現に関しては、細かなプログラムの改善が必要である。

6. 柱を導入した際のシミュレーション

本研究では前述の通り、実験においてアーチ現象を緩和させ、避難時間を減少させることが出来なかった。そこで出来上がったシミュレーションを用いて、柱を導入した際の歩行者の避難行動の変化を観測した。

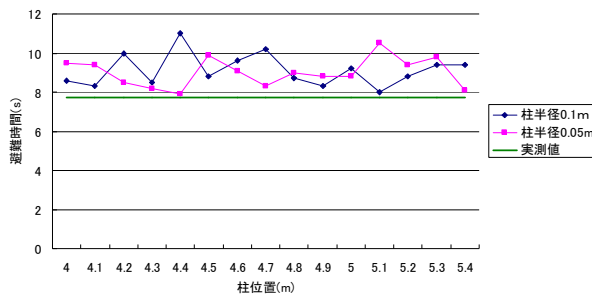


図 10 柱導入時の避難時間

図 10 は実験②と同じ状況で、柱の位置、及び半径を変化させた場合の避難時間をグラフにしたものである。直線は実験②、つまり柱がない場合の避難時間で、この直線より下に行けば柱の導入により避難時間が減少したことになる。

シミュレーションでは図 11・12 のように歩行者の密度の分散が見られたが、避難時間の減少にはつながらなかった。

避難時間の減少が見られなかったことの原因としては、避難人数が少ないことが挙げられる。実験及び、シミュレーションにおいて、ピークの人数が避難した直後、つまり 3~4 秒の間でアーチ現象が起こっているのだが、避難できていない人数が少ないため、すぐに解消してい

る。人数が多ければその分アーチ現象が起きている時間が長くなるため、アーチ現象の緩和が避難時間の減少に影響してくるはずである。

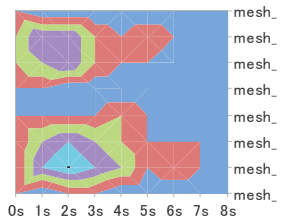


図 11 柱なし 密度分布

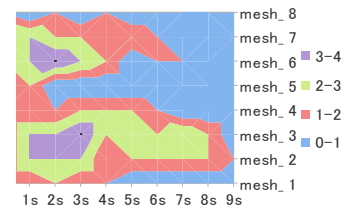


図 12 柱あり 密度分布

7. おわりに

本研究では、実験の範囲内であれば災害時の Social force model を用いることで再現性の高いシミュレーションを行うことが可能となった。またそれによって、幅が広く、障害物のない出口が最も避難しやすいという結果が得られた。

今後はプログラムを改良することにより、出口の形式を変えることが避難時間に影響を与えるのか、与えるのであればどう影響するかを考えていきたい。

また本研究ではパラメータの推定の際に 1 秒ごとのメッシュの人口密度を用いた。さらに実験では避難人数が最大でも 29 名と少なかった。この点は改善可能であるといえる。

アーチ現象の緩和による避難時間減少の有無を観測するためには、シミュレーションの再現性や、対応できる人数を広げることが必要である。精密なパラメータを求めるためには速度や歩行者にかかる圧力等の正確なデータ計測をしたり、大人数での実験を行うことが必要となる。これらの点が今後の実験での課題となる。

8. 参考文献

- 1) Dirk Helbing, Illes J Farkas, Peter Molnar, Tamas Vicsek : simulating dynamical features of escape panic,2000
- 2) 磯崎勝吾 : Social force model を用いた歩行者挙動の再現に関する研究、平成 19 年度北海道大学卒業論文, 2007