群衆の歩行シミュレーションモデルの研究

飽本研究室　116241　村山 了規

1.研究の背景と目的

劇場や百貨店、駅構内など、多くの人が集まる空間では、緊急時には全員がいかに迅速に避難を完了させるかが重要となる。特定の出入り口に人々が一斉に押しかけることで、出入り口がボトルネックとなり、群集事故発生の危険が懸念される。

1.1.群集事故

国内における大規模な群集事故に、2001 年 7 月 21 日に発生した、明石花火大会歩道橋事故がある。この事故は西日本旅客鉄道山陽本線朝霧駅に隣接する歩道橋で発生した(Fig.1.1) 。

Fig.1.1 事故発生直前の花火会場と歩道橋(左上) [1.1)]

事故当日の歩道橋内では花火会場に向かう人と駅に向かう人の双方向の流れができ、1m² あたり 13 人から 15 人という超過密状態となり、転倒現象である「群衆なだれ」が発生した。結果として、死者 11 名と重軽傷者 247 名を出す大惨事となった。

世界的には 1990 年 7 月 2 日、サウジアラビアの聖地メッカで発生した群衆事故が最大で、死者数は 1426 名であった。この事故は巡礼者を通す歩行者用トンネル内(長さ 500m、幅 20m) で将棋倒しが発生したもので、トンネル内が停電したためエアコンと照明切れでパニック状態になり、酸素不足と高温が犠牲者を増やす原因となった [1.2)] [1.3)] 。

最近の群集事故には、2014 年 12 月 31 日に発生した、上海外灘雑踏事故がある。中国上海市内を流れる黄浦江沿いの遊歩道において、新年のカウントダウンをしようとする市民や観光客約 30 万人が集まった。階段で数人が倒れ込んだのをきっかけに群衆なだれが発生し、36 名が死亡、47 名が負傷した(Fig.1.2) 。

Fig.1.2 事故発生現場付近の様子 [1.4)]

これらの事故の共通点は、局所的に高密度の場所で発生している点、遊歩道、階段といった逃げ場のない閉所空間で発生している点である。

このような事故を防ぐためには、群集事故リスクの予測と対策の事前検討が必要である。シミュレーションは、災害時の人間行動や建築空間のレイアウトの安全性の検証など、実際に実験を行うことが困難、または危険である場合や、多岐にわたる選択条件を事前に検証する必要がある場合に有用とされている。本稿におけるシミュレーションとはコンピュータシミュレーションを指す。

1.2.歩行シミュレーションモデルの空間表現

典型的な歩行シミュレーションの空間モデルは 3 種類に大別される(Fig.1.3) 。

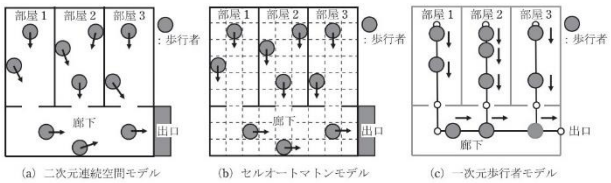

Fig.1.3　空間モデルの種類 [1.5)]

Fig.1.3 (a) のモデル [1.6)] [1.7)] では、ポテンシャルモデルにもとづく避難行動をモデル化しているが、曲がり角を考慮していない。Fig.1.3 (b) のモデル [1.8)] では、格子空間を移動するため、斜め方向への移動ができない。Fig.1.3 (c) のモデル [1.9)] では、歩行者の初期配置位置をシミュレーション毎に変える、などの柔軟性に欠ける。

本研究では、様々な建物に適用できるシミュレーションモデルの提案を目的とする。本研究ではセルベースの空間を構築し、Fig.1.3(a) の二次元連続空間上空間モデルと、Fig.1.3(c) の一次元歩行者モデルを組み合わせて歩行行動の特徴を表現する群集歩行シミュレーションモデルを作成した。具体的には、Fig.1.3(a) を各歩行者の挙動表現に、Fig.1.3(c) を歩行者の目的地設定に採用した。

2.シミュレータ「artisoc」

マルチエージェントシミュレータ「artisoc」を用いて本研究のモデルを構築した。artisoc(artificial societies) は、株式会社構造計画研究所が開発したソフトウェアである。コントロールパネルによる動的なパラメータ操作や、マップやグラフを用いて群衆の様子を視覚的に捉えることが可能である。プログラミングには、Microsoft 社の"Visual Basic"の文法に準拠した言語を使用する。

3.歩行者モデルの概要

3.1.歩行者の移動規則

基本的に人間は、他人との距離をある程度維持しようと努めている。近くには寄るが、必要以上にあまり近づくのはお互い避けようとする。この領域はパーソナルスペースという名前で呼ばれている [3.1)]。これに加え、移動時には情報処理空間(視野) を持って行動していると考えられる。パーソナルスペース(内側の灰色の円) と情報処理空間(外側の円) を Fig.3.1 に示す。

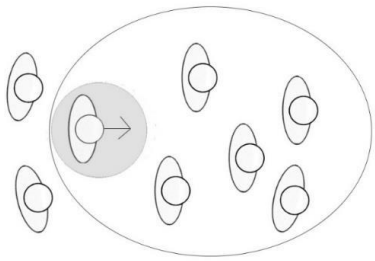

Fig.3.1 歩行者の挙動のイメージ図

3.2.歩行者の経路選択

歩行者は前節の移動規則に基づき行動する。しかし、曲がり角が多い等の複雑な構造の空間では、最短経路の探索が困難となる。複雑な構造においても最短経路での退室を可能にするため、歩行者の最短経路選択にネットワークモデルを導入する。ネットワークモデルの例を Fig.3.2 に示す。

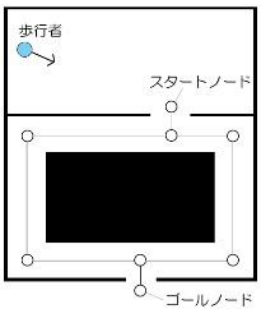

Fig.3.2 ネットワークモデルのイメージ図

歩行者は最初にスタートノード(最寄りの室内出口) とゴールノード(目的地) を決定する。歩行者は最短経路(コストが最も低い経路) を通るものとする。ここでは、2 ノード間の距離をコストとする。スタートノードからゴールノードまでの最短経路は、グラフ理論における最短経路問題の探索アルゴリズムの一つであるダイクストラ法により決定する。

3.3.歩行者モデルの詳細設定

文献 [3.1)] [3.2)] を参考に、パーソナルスペースを直径 0.6[m]の円、情報処理空間を進行方向に対して前方 6.0[m]、側方 0.8[m]とする。また、周囲に障害物が存在しない場合の最大歩行速度を V = 1.40 [m/sec]とする。歩行者は、前方の滞留によって減速や回避行動をとるものとする。
artisoc 上における 2step を現実世界の 1 秒であると定義する。

4.群集流の再現

本研究のシミュレーションにより、いくつかの歩行流の再現を行い、その特徴について調べた。

4.1.通路における群集流

(a) 一方向流

歩行速度と群集密度の関係性、集群化について調べ、実測による既存研究と比較した。本研究の一方向流再現モデルを Fig.4.1 Fig.4.2 に示す。

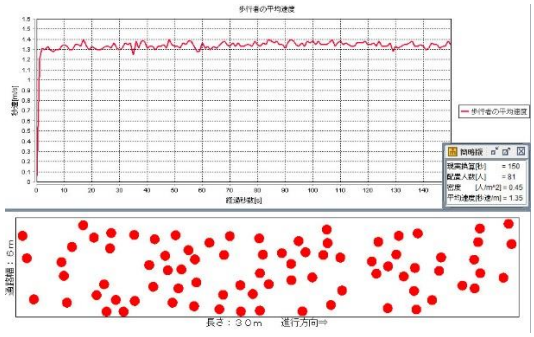

Fig.4.1 一方向流の再現(密度 0.45 人/m²)

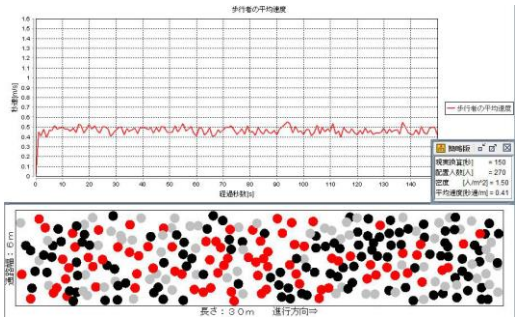

Fig.4.2 一方向流の再現(密度 1.50 人/m²)

(b) 対向流

2 つの方向の群集流が向き合う状態では、同じ方向に向かう人のレーンが形成され(レーン現象) 、これを確認した(Fig.4.3) 。また、歩行速度が極端に遅い人が存在する場合に、群集全体に与える速度影響について調べた。

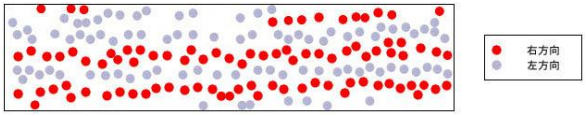

Fig.4.3 対向流の再現

4.2.室内における群集流

(a) アーチング現象

特定の出口に人が一斉に殺到すると、出口がボトルネックとなり、アーチ形の滞留が発生することがある。これをアーチング現象と呼ぶ。アーチング現象を再現し、出口の位置や幅、整流目的で出口付近に柱を設置した場合 [4.1] (Fig.4.4) の退室時間に与える影響の検証を行った。

現在の消防法において、出口付近への柱等の障害物の設置は禁止されているが、適切な位置に障害物を設置すると、退室時間が短縮されるという実験結果が報告されている [3.1] [4.1] 。本モデルでもこの効果を簡易的に確認した。

間口 9m、奥行き 10m、出口幅 0.9m の障害物が存在しない仮想室内空間を用意し、50 人を一斉退室させた場合の退室完了時間の計測実験を行った。障害物を設置しない場合の平均は約 51 秒であったのに対し、整流目的で障害物を設置した場合の平均は約 46 秒と 5 秒の短縮が認められた。これは、出口に対して加わっていた圧力が障害物の設置により分散され、退室時間に影響を与えたものと考えられる(Fig.4.4) 。

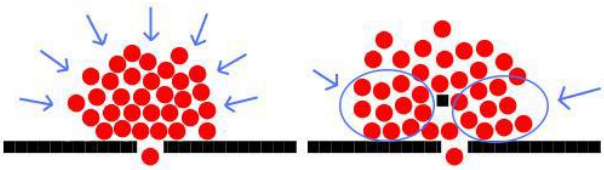

Fig.4.4 アーチング現象の再現

5.まとめ

本研究では、複数の空間モデルを組み合わせ、群集の歩行シミュレーションモデルを作成した。作成した歩行者モデルが既存研究に従っているかを数量的に評価するため、歩行速度と群集密度の関係式やサービス水準との比較、レーン現象の確認を行った。

本モデルは、単純な形状の領域だけでなく、曲がり角や分岐点といった複雑な領域においても適用が可能である。また、パラメータ操作により、歩行者の人数や配置位置、出口幅が容易に変更可能であるため、これまで複雑であったモデル空間の構築に優れている。

本モデルではコストにノード間の距離を割り当て、最短距離を歩行可能なモデルとしたが、火災時の煙充満具合や群衆密度のサービス水準を割り当てるなど応用が利く。ダイクストラ法の経路探索により、すべての経路に対してのコストが算出されるため、迂回動作も可能となる。

今後の展望として、本モデルを応用し、特に室内における退室動作の検証に取り組みたい。

障害物の設置は、位置によっては退室時間が延長されてしまう場合もあるが、これまで明確な位置は明らかにされていない。障害物を複数した場合や大きさなど、今後の検証が必要とされる。

出口においては位置や幅のみならず、形状にも注目することで、退室時間の短縮に繋がる可能性があるため検討したい。例えばギリシア・ローマ文明で用いられた水時計を応用した「水時計型出口」を提案する。その際の計算には流体力学のベルヌイの定理 [5.1] が適用可能であり、3 次元から 2 次元に変換する必要がある。

集群現象は歩行者のみならず、物理学の電子ビーム [5.2] [5.3] においても確認されているため、それらの結果も参照しつつ、検証していきたい。

参考文献

1.1) 明石市：『明石市民夏まつりにおける花火大会事故調査報告書』, 2002.

1.2) Los Angeles Times “Mecca Tunnel Deaths Blamed on 7 Who Fell: Saudi Arabia: The interior minister puts the death toll at 1, 426. He says overcrowding contributed to the panic. ”July 04, 1990.
http://articles.latimes.com/1990-07-04/news/mn-85_1_death-toll
(最終アクセス日2015年2月10日)

1.3) The Guardian “A history of hajj tragedies” January 13, 2006.
http://www.theguardian.com/world/2006/jan/13/saudiarabia
(最終アクセス日2015年2月10日)

1.4) CCTV America “36 dead, 47 injured in New Year’s stampede in Shanghai.” December 31, 2014
http://www.cctv-america.com/2014/12/31/stampede-in-shanghai-during-new-years-celebration
(最終アクセス日2015年2月10日)

1.5) 山下倫央・副田俊介・大西正輝・依田育士・野田五十樹：「センサデータマイニングを活用した安全安心な避難誘導への取組み」, 電子情報通信学会誌, Vol.94, No.4, pp.294-298, 2011.

1.6) 横山秀史, 目黒公郎, 片山恒雄：避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用 ; 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.225-232, 1995

1.7) Franck F. Simulating the Collision Avoidance Behavior of Pedestrians. University of Tokyo; 2000. Thesis.

1.8) 柳澤大地, 西成活裕：群集の集団運動と拡張フロアフィールドモデル ; 応用力学研究所研究集会報告, No.17, ME-S2, 2006

1.9) 山下倫央, 野田五十樹：屋外大規模イベントにおける群集規制モデルの構築 ; 人工知能学会全国大会2014 (JSAI2014) 予稿集, 1C4-OS-13a-4, pp.1–2, 2014

3.1) 西成活裕：『渋滞学』, 新潮選書, 2006.

3.2) 劉建宏・大枝良直・角知憲：「パーソナルスペースを用いた障害物を回避する歩行者の群集流動」, 土木学会論文集D Vol.64 No.4, 513-524, 2008.

4.1) 西成活裕：『図解雑学よくわかる渋滞学』, ナツメ社, 2009.

5.1) 飽本一裕：『今日から使える微分方程式』, 講談社, 2006.

5.2) T. Kobayashi et al: “SINGLE BUNCHED BEAM TESTING FOR SPRING-8 LINAC", Proceedings of the XIX InternationalLinac Conference, Chicago,1998.

5.3) O. Chorniy.: “Measurement and interpretation of the bunched beam transfer function in SIS 18 with space charge”, Ph.D. Thesis, TU Darmstadt,2008.