

マルチエージェントシミュレーションを用いた歩行者流の解析*

石橋竹志*¹, 鈴木章彦*², 渋谷秀雄*³

A Study on Multiagent Simulation of Flow of People

Takeshi ISHIBASHI, Akihiko SUZUKI*⁴ and Hideo SHIBUTANI*⁴ Division of Mechanical Engineering and Science,
Graduate School of Science and Engineering, Saitama University,
255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

Congestion due to an irregular flow of people has been commonly observed at various spots. Congestion increases unpleasantness and may cause trouble. Moreover, it may lead to a serious accident such as a sudden collapse of the overcrowded structure of people. In order to understand the mechanism of congestion due to the irregular flow of people, we performed a multiagent simulation of the flow, which can be used to analyze various systems of complexity. First, we performed simulations between individuals and simulated the crowd as an application. We simulated lane formation that was a characteristic of the flow of people at a congested state. Then, we simulated the flow of people in the catwalk of a station. It was shown that features of congestion were changed by the positions of obstacles such as columns.

Key Words: Multiagent Simulation, Flow of People, Field Work, Lane Formation, Congestion in the Station

1. 緒 言

現在, 多くの場所で混雑が発生している。都心の交差点や駅での朝の通勤ラッシュ時はもちろんのこと, イベント会場, 休日のデパート内, アトラクション施設など人がたくさんいる場所ではいつも混雑は生じている。混雑してくるとさまざまな悪循環が起きることが予想される。例えば駅などで混雑が発生すると不快感が募り, 乗客どうしのトラブルが発生する恐れもある。またもっとひどい混雑になると, すし詰め状態や群集雪崩といった危険な現象につながる可能性もあり, その結果, 圧迫死など命にかかわる事故が発生してしまうかもしれない。

本研究はこのような重大な事故につながるのを防ぐため, どのようにすれば混雑を緩和することができ, 人の流れをスムーズにすることができるのか考察することを目的としてシミュレーションを行った。特に駅での混雑に注目し, 駅を設計する際の構築物の配置に

ついて検討した。

人の流れの解析には, その流れを連続体としてとらえる場合と離散粒子集合としてとらえる場合とがあり, 後者の解析方法としてはセル・オートマトン法⁽¹⁾を用いたものや, 人を粒子としてとらえる分子動力学法⁽²⁾を用いたものが知られている。本研究でも人の流れを離散粒子の流れとしてとらえるアプローチをとるが, 個々の粒子を自立したエージェントとして扱い, その相互作用により歩行者流を解析する Multi-Agent Simulation (MAS)⁽³⁾の手法を用いた。シミュレータとしては構造計画研究所(株)のKK-MAS⁽³⁾を利用した。

ここではまず個体間のシミュレーションを行い, 少人数での人の流れを再現した。次に個体間のシミュレーションの応用として群集のシミュレーションを行い, 多人数のときには人はどのような行動をとるのか調査した。さらに個体間のシミュレーション, 群集のシミュレーションの集大成として, 渋谷の井の頭線連絡口のモデルを作成し, 障害物(柱)の配置によってどのように混雑が変化するかシミュレーションを行った。さらに実際にフィールドワークを行うことによって人の流れを分析し, 作成したシミュレーションとの比較・検討を行った。

* 原稿受付 2008年4月3日。

¹ 埼玉大学工学部機械工学科(☎338-8570 さいたま市桜区下大久保255)。² 正員, フェロー, 埼玉大学大学院理工学研究科。³ 正員, 埼玉大学大学院理工学研究科。

E-mail: akihiko_suzuki@mech.saitama-u.ac.jp

MAS は系全体を微分方程式で書き下せないような“複雑系”⁽⁴⁾の解析に対する有望なアプローチの一つと考えられており、エージェントの相互作用の記述に柔軟性があることが特徴である。ここでは扱わないが、将来的には、エージェントの性格の違いを考慮した歩行者流の解析も可能であろう。

2. フィールドワーク

2.1 埼玉大学構内 埼玉大学総合研究棟の前の道を上から撮影した。時間帯は比較的人の多い12:30~13:30の間で行った。人の動きに特徴があった映像の画像を二つ紹介する。

2.1.1 少人数の正面衝突 図1は正面衝突する

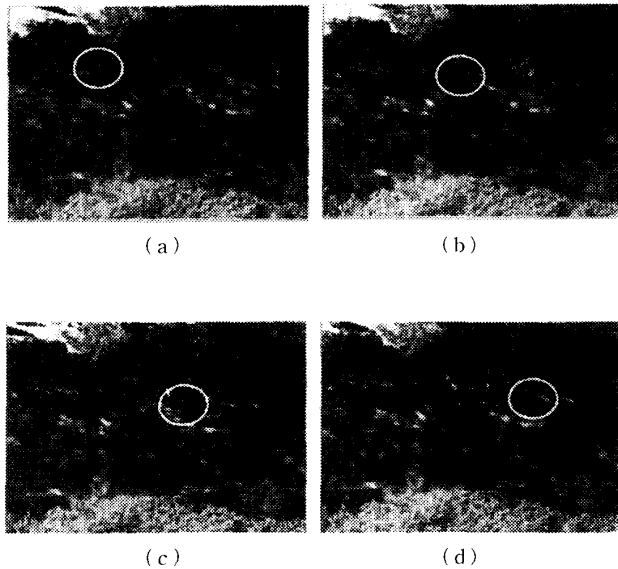


Fig. 1 Head-on collision during the flow of a few people

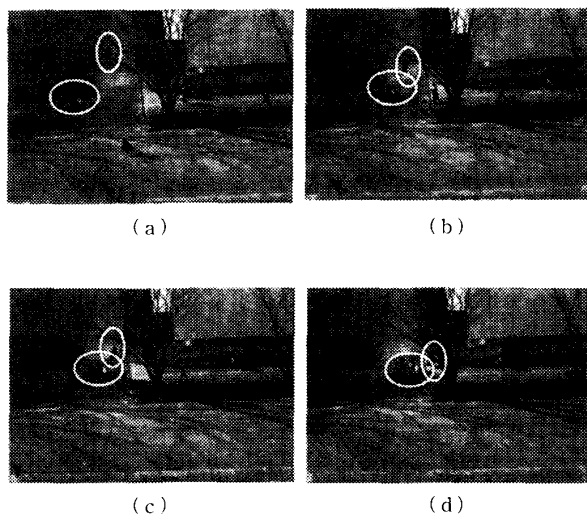


Fig. 2 Collision at 90° during the flow of a few people

人の流れの例である。画面左上の人に注目してみると、前方からの4人組を遠くにいる時点ですでに認識し、歩きながらぎりぎりの所(c)を通して避けているのがわかる。図には示していないが、その後また元にした側の道へ移動している。避けた後にまた元の位置に戻るの興味深い現象である。

2.1.2 少人数の90度衝突 図2より、画面上にいる人と画面左の4人組に注目してみると、上から来た人の速度が速かったため4人組の先頭の人は速度を下げて道を譲っている様子が見られる。また、前方や上から歩行者が来て混雑してくると、最初は横に並んで歩いていた4人組も縦に並んで歩くようになり、そして混雑が過ぎるとまた横に並んで歩いている。譲る人や譲らない人といった人の性格も歩行者流に少なからず影響しているようである。

2.2 渋谷スクランブル交差点 渋谷駅のスクランブル交差点の人の流れを撮影した。時間帯は16:00~17:00の間で行った。図3は群衆の正面衝突の例である。このような場合、レーン形成⁽⁵⁾という現象が見られる。レーン形成とは、左右から人が歩いてくるケースについて述べると、右に歩く集団と左に歩く集団がぶつかったとき、両集団の人数が極めて少なければ正面衝突もなく容易に避けることができる。しか

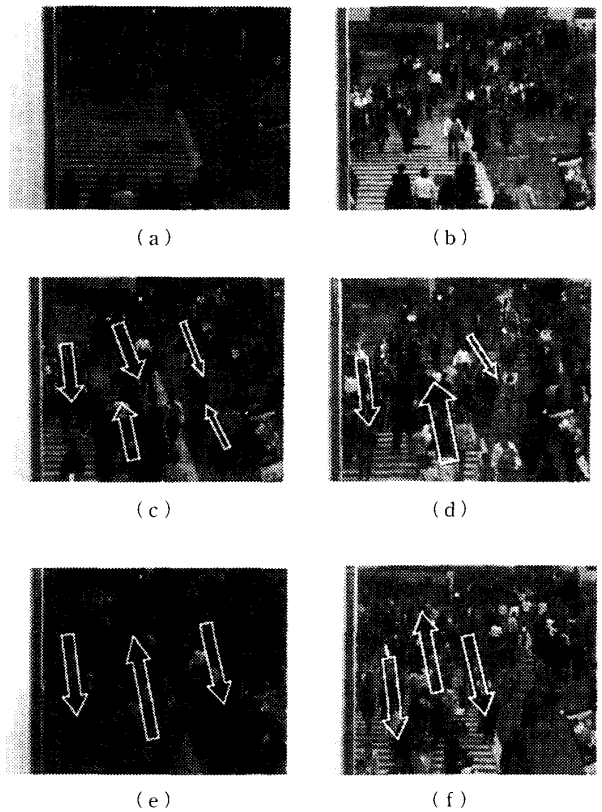


Fig. 3 Lane formation

し人数が増えてくると正面で出会う確率が高くなるため、いちいち避けるのが面倒になってくる。そうすると人は前の人に続いて歩こうとする意志が働く。反対側を歩く人も同様の戦略をとってくるので、しばらくすると図3の矢印のようなレーンが自然に形成される、これがレーン形成である。図3より、最初レーン形成は見られないが、正面衝突する少し前あたりから徐々に流れが形成している様子がわかる(c)。その後衝突するとレーン形成をはっきりと見ることができ、時間が経つにつれて流れの方向は微妙に変化するが、レーンが崩れることはなかった。人が少なくなるにつれてレーン形成も消滅していく様子も見られた。

2・3 渋谷井の頭線連絡口 渋谷の井の頭線とJRの間の連絡口で撮影を行った。時間帯は16:00~17:00の間で行った。図4より、ここでもまたレーン形成している様子が見てとれる。この井の頭線連絡口の面白いところは、写真中央左の柱を境に見事に流れが分断しているところである。写真手前から奥に向かう人は柱の右を歩き、写真奥から手前に向かう人は柱の左を歩いているのがわかる。奥に上りのエスカレータがあるため、奥から手前に来る人が柱の左に集中しているためと思われるが、非常に良い位置に柱が設置されているのがわかる。設計者がこれを意図して設計したのかはわからないが、興味深い結果が得られた。

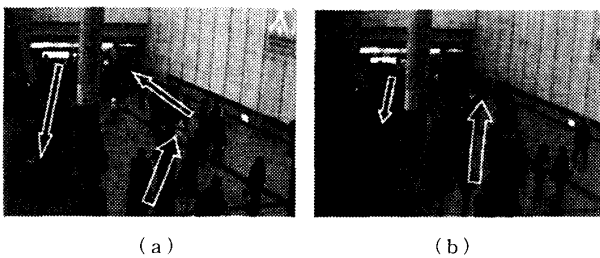


Fig. 4 Entrance and exit of Inogashira line

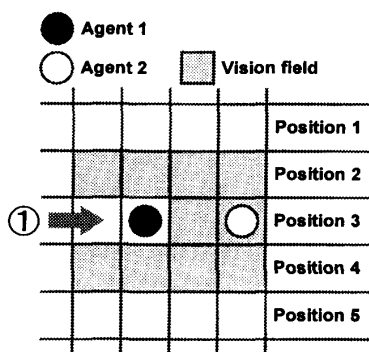


Fig. 5 Range of vision field of agent 1

3. 個体間のシミュレーション

3・1 シミュレーション方法 エージェントにある行動ルールを与え、そのエージェントが障害物に当たったときにどのような行動をとるのか分析した。エージェントは行動するエージェント1と障害物エージェント2の2種類であり、エージェント1は画面左①から直進し、エージェント2は静止している。そしてエージェント1の視野範囲内にエージェント2がいるとき、エージェント1はランダムに空いているスペースに移動するように設定してある。エージェント1がエージェント2を避けたときに Position 1~Position 5 のどこへ向かうのかを実験した。エージェント1の視野範囲と各 Position を図5に示す。

3・2 個体間(1対1)のシミュレーション 障害物が視野範囲にあるときのエージェントの行動ルールを図6に示す。エージェントは矢印の方向をランダムに選択し行動する。ただし、太線で示した矢印はその方向を選択する確率が他の矢印の方向より大きいことを示す。障害物を回避したエージェントが Position 1~Position 5 のどこへ向かったかを表すグラフを図7に示す。グラフの横軸は Position 1~Position 5 のどこへ向かったかを表し、縦軸はその場所へ向かったエー

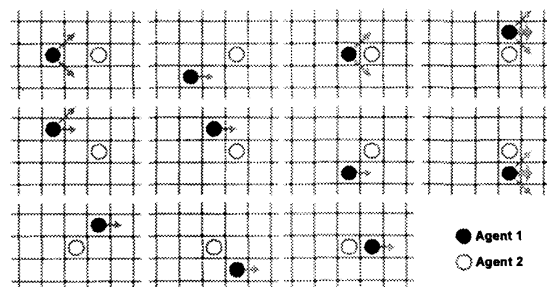


Fig. 6 Rules for avoiding obstacle (1)

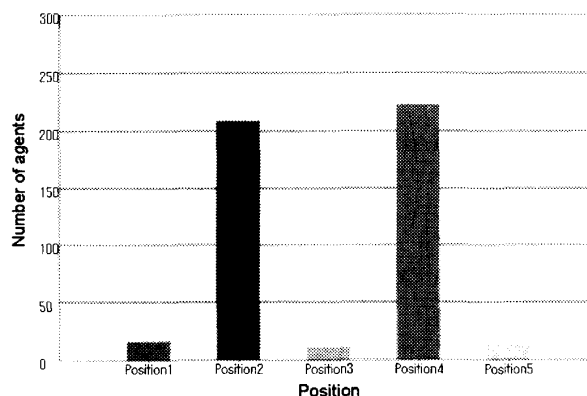


Fig. 7 Position of agent 1 after the passage of agent 2

エージェントの数を表している。シミュレーションはステップ数 1000 で行った。

次に、図 8 に示すように、エージェント 1 の出発点を ② に変えて同様に実験を行った。結果を図 9 に示す。図 7 より、① から出発させたエージェントは Position 2 と Position 4 に集中し、他の Position にはあまり移動しなかった。また図 9 より、② から出発させたエージェントは偏っている方向に多く移動することがわかり、反対側の Position には移動しないことがわかった。これは実際の人の行動において、目の前に障害物があればどちらかへ避けるし、なければあえて避けることもないということを表している。また、避けるときは必要最低限の動きで済むように、大きく移動することはないということも表している。

3.3 個体間(3対1)のシミュレーション ここで

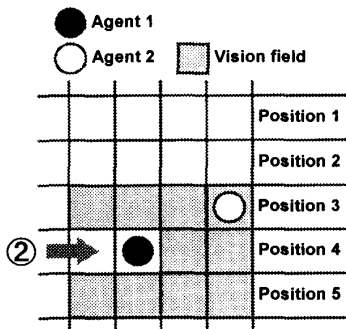


Fig. 8 Simulation model for starting point ②

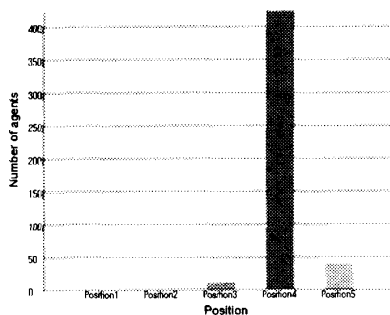


Fig. 9 Simulation result of agents that departed from ②

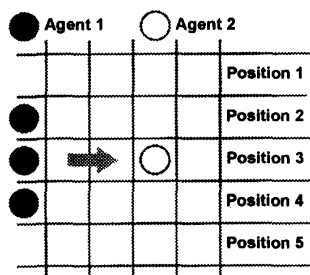


Fig. 10 3-to-1 simulation

は図 10 のように画面左から出現するエージェント 1 を 3 人に増やして実験を行った。この場合は、自分自身以外は障害物とみなすので、エージェントの数が增多ることにより、障害物を避けるパターンも多くなる。エージェントが障害物を回避するルールを全とおりを図 11 に示し、結果を図 12 に示す。今後、図 6 および図 11 を合わせた障害物を避けるルールを「障害物回避ルール」と呼ぶ。なお、図 11 中で、前方および左右に行くことができないような場合については、図に示した方向に後退する確率のほかにもどちらにも行けずその場にとどまる確率もあるように設定した。図 12 より、Position 2 と Position 4 に行く確率が高く、次いで Position 1, Position 5 の確率が高く、いちばん確率が低いのは Position 3 という結果になった。

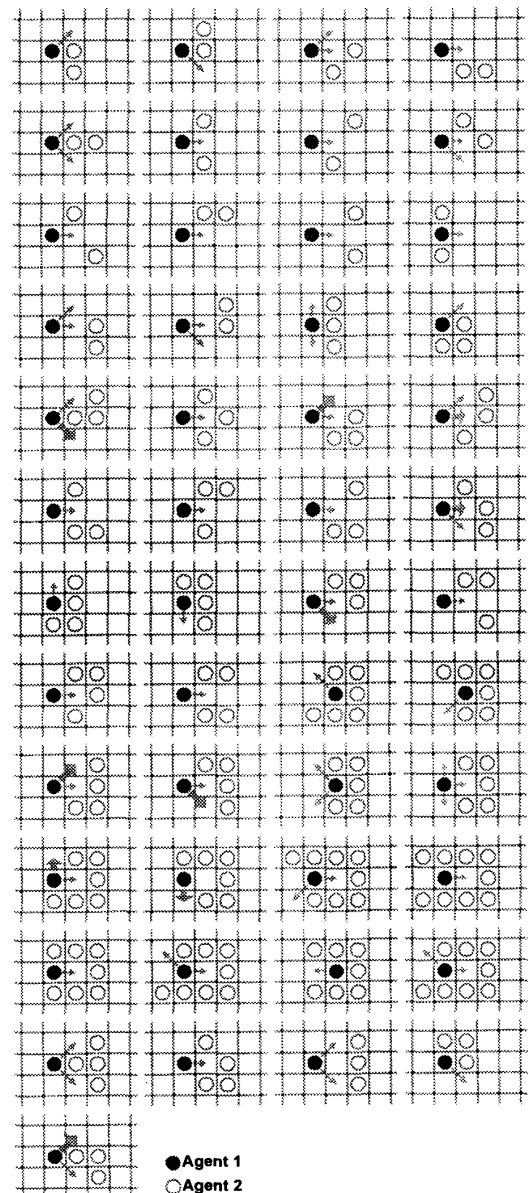


Fig. 11 Rules for avoiding obstacles (2)

前述の1対1のシミュレーションの結果と比べて Position 1 と Position 5 の両端に行く確率が上がっているのがわかる。これはエージェント1を3人に増やしたことによって、一人が動くとその周りの2人のエージェントも連動して動くためである。真ん中のエージェントが上に動けばもともと上にいたエージェントはその動きを認識して上に行くし、その逆も考えられる。これは実際の人の行動においても周りの人の動きに影響を受けながら進んでいくのは当然のことであるので、妥当な結果であるということがいえる。

4. 群集のシミュレーション

4.1 シミュレーション方法 個体間のシミュレーションを基にして、今度はエージェントどうしが群集でぶつかったときにどのような行動をとるのか分析した。エージェントはエージェント1とエージェント2、壁エージェントの3種類である。

4.2 群集のシミュレーション エージェント1は画面左のセルからある確率に従ってランダムに出現し、エージェント2は画面右のセルからランダムに出現する。壁エージェントは静止しているエージェントである。まずエージェント1とエージェント2を正面衝突させ前述の障害物回避ルールを適用したらどのような行動をとるのか実験した。シミュレーションモデルを図13に示し、シミュレーションにより得られた人の流れの様子を図14に示す。各エージェントの発生率は0%~100%の間で設定可能である。

図14より、エージェント1とエージェント2が入り乱れている様子が見てとれる。しかし実際の人の流れとして、右に歩く集団と左に歩く集団が一つの通路に入ってきたら、フィールドワークでも説明したとおり、レーンというものが形成されることがわかっている。図14に示すように「障害物回避ルール」だけではレーン形成されないので、フィールドワークを基に

して「足跡ルール」という新たなルールを導入した。

4.2.1 足跡ルール エージェント1, エージェント2, それぞれが通った後に足跡を残すように設定し、足跡の多い方向にエージェントが移動するように設定した。エージェント1はエージェント1の足跡を認識し、エージェント2はエージェント2の足跡を認識する。また、つねに足跡を認識すると現実の行動と離れてしまうため、各エージェントの前方の任意の範囲に自分以外のエージェントがいる場合のみ「足跡ルール」が発動するようにしてある。これは実際の人の行動と同じであり、前方から向かってくる人がいないのに足跡を追うような人はいないはずである。

4.2.2 足跡ルール発動条件 エージェント1が画面左から、エージェント2が画面右から向かってくる。エージェントはそれぞれ足跡を付けて移動する。前方の視野範囲に自分と異質のエージェントが入ったとき「足跡ルール」が発動する。「足跡ルール」が発動すると自分の周りの足跡を認識し、足跡が多い方向へ移動する。また、足跡は一定期間たつと消えるようにしてあり、その期間を足跡残存ステップ数とする。足跡残存ステップ数は1~50の間で設定可能である。

4.2.3 レーン形成のシミュレーション 足跡ルールを導入して群集のシミュレーション(正面衝突)を行った。各エージェントの発生率は80%とし足跡残存ステップ数は20とした。シミュレーションの様子を図15に示す。図15よりレーン形成をしている様子が見える。上のレーンから順にエージェント1, エージェント2, エージェント1, エージェント2のレーンができている。「障害物回避ルール」と「足跡ルール」の二つのルールのみで現実にかかるレーン形成を再現することができた。

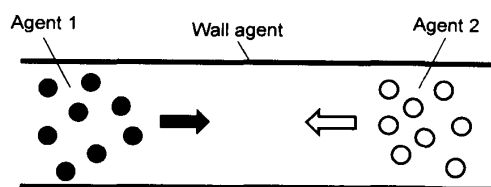


Fig. 13 Simulation model of head-on collision

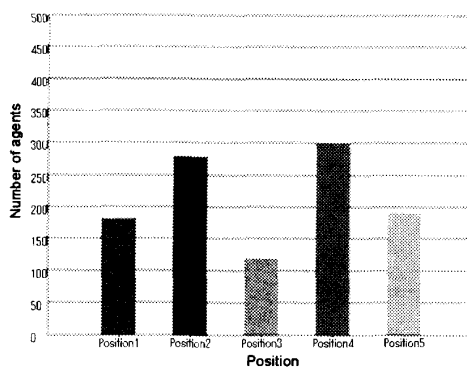


Fig. 12 Results of 3-to-1 simulation

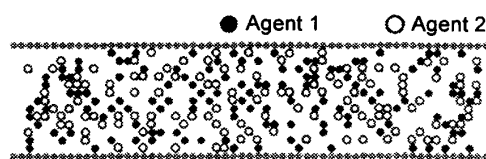


Fig. 14 Simulation of flow of people during head-on collision using no footprint rule

また、人が少ない場合レーン形成はしないということが知られているが、これを示したのが図16である。各エージェントの発生率を20%とし、足跡残存ステップ数は20とした。この場合にはレーン形成しないことが確認できる。

4.3 レーン形成のメリット レーン形成する場合としない場合とでは人の流れにどのような違いがあるのか検証してみた。今回は人の流れを「混雑」という指標によって比べることにする。ここで「混雑」とは、「渋滞にはまった人の累積値」と定義することにする。渋滞にはまった人とは、入り口を通過し、到達できるはずのステップ数以内に出口に到達できなかった人のことである。逆に渋滞にはまっていない人とは、入り口を通過し決められたステップ数以内で出口に到達できた人のことである。

レーン形成する場合のグラフを図17に、レーン形成しない場合のグラフを図18に示す。ともにエージェントの発生率は80%、ステップ数は200でシミュレーションを行った。グラフの縦軸が「混雑」であり、横軸はMAS上の時間軸であるステップ数となっている。また、2本の線はエージェント1およびエージェント2の「混雑」の累積値を表している。エージェント1とエージェント2で混雑の累積の様子が異なるのは、シミュレーション上の計算順序によるもので、各ステップにおいてエージェント1が先に回避行動するように設定されているからである。図17、18より、レーン形成をしない場合のほうがする場合と比べて圧倒的に混雑が大きいのが見てとれる。

5. 井の頭線連絡口モデル

5.1 モデル概要 実際に渋谷の井の頭線連絡口のモデルを作成しシミュレーションを行った。井の頭

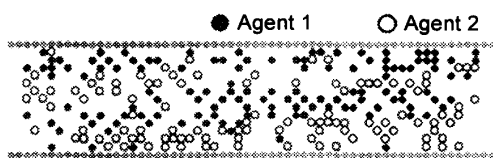


Fig. 15 Simulation of flow of people during head-on collision using a footprint rule



Fig. 16 Simulation of flow of few people

線連絡口の画像を図19に示し、MASのシミュレーションフィールドを図20に示す。画面上側(①)からエージェント1、画面下側(②)からエージェント2をランダムに出現させる。エージェント1は②、③側を目的地とし、エージェント2は①、④側を目的地としており、それぞれ②、①側に多く向かうようにしてある。これは実際のフィールドワークの映像を基に設定した。また、各エージェントともにスピードを3種類(fast, normal, slow)設定してある。

5.2 障害物の位置による混雑の違い フィールドワークを参考にし、障害物(柱)の位置を変化させて混雑の違いを調べる。エージェントの発生率は10%、足跡残存ステップ数は20、シミュレーションステップ数は500とする。シミュレーションは、

- (I) 障害物を中央に配置(現実同様)
- (II) 障害物を上側に配置
- (III) 障害物を下側に配置
- (IV) 障害物を中央右側に配置
- (V) 障害物を中央に横長配置

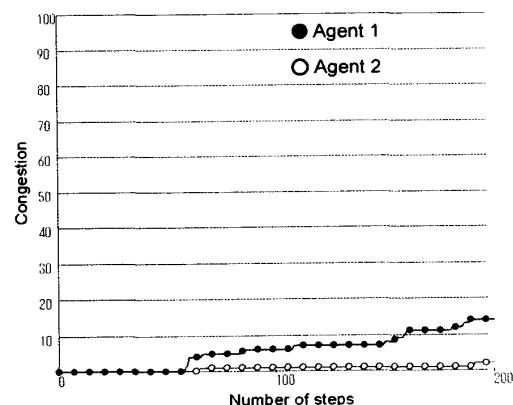


Fig. 17 Increase in congestion with the number of steps (lane formation)

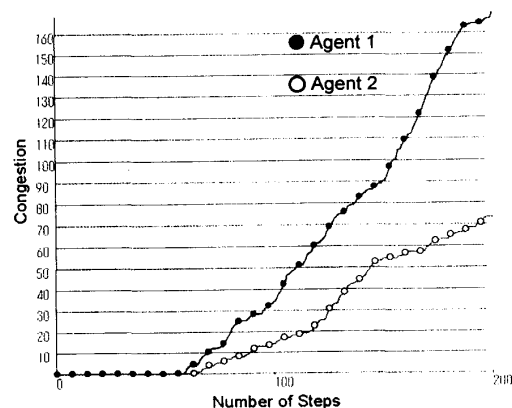


Fig. 18 Increase in congestion with the number of steps (no lane formation)

(VI) 障害物を中央に縦長配置
 の6パターンで行った。ここでも「混雑」の指標を用いて各シミュレーション結果を考察する。結果を図21~26に示す。図21~26より、エージェント1、エージェント2ともに「混雑」が少なかったのは(III)の障害物の下側に配置したときと(VI)の障害物を中央に縦に配置したときとなった。次に「混雑」が少なかった

のは(II)の障害物を上側に配置したときであった。(I)障害物を中央に配置したときと(IV)障害物を中央右側に配置したときは両方ともエージェント1のほうがエージェント2より「混雑」しているのがわかる。エージェント1のほうが混雑した原因について、エージェント1のほうがエージェント2よりも障害物を設



Fig. 19 Entrance and exit of Inogashira line

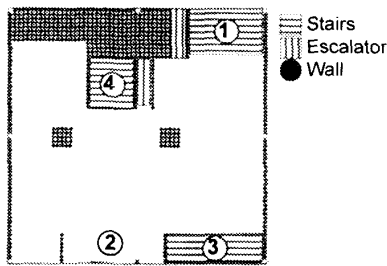


Fig. 20 MAS field

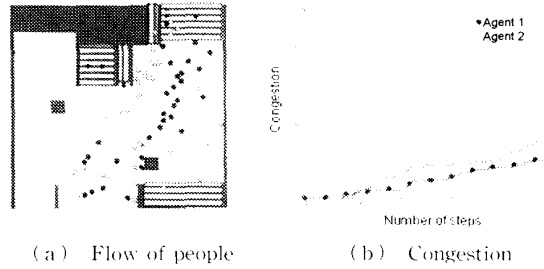


Fig. 23 Flow of people when an obstacle is placed at the bottom (III)

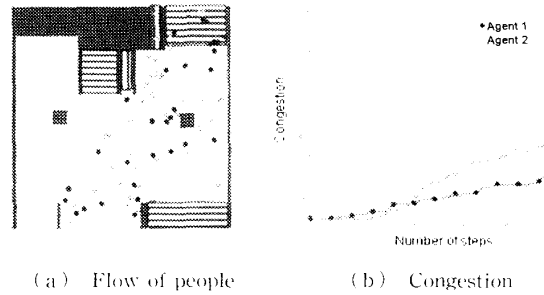


Fig. 24 Flow of people when an obstacle is placed at the center on the right side (IV)

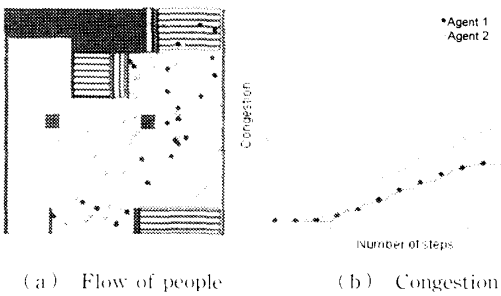


Fig. 21 Flow of people when an obstacle is placed at the center (I)

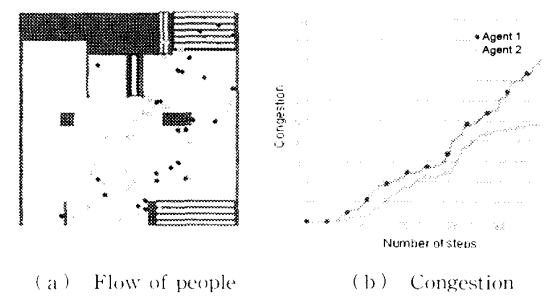


Fig. 25 Flow of people when an obstacle is placed horizontally at the center (V)

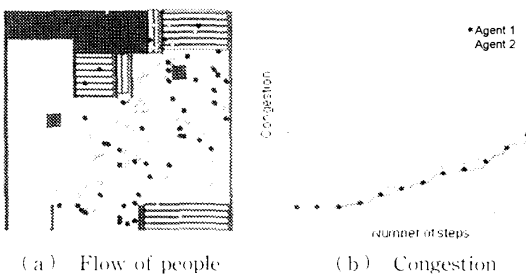


Fig. 22 Flow of people when an obstacle is placed at the top (II)

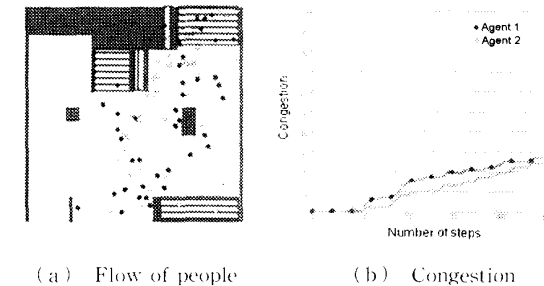


Fig. 26 Flow of people when an obstacle is placed vertically at the center (VI)

置した位置の通過率が高いということが挙げられる。つまりここから、最短距離を妨げる位置には障害物を置かないほうが良いという結果が得られる。エージェント1とエージェント2が直接ぶつかるときは、シミュレーション構成上、エージェント1が先に回避行動をとるように設定してあり、これにより、4・3節で述べたように、エージェント1の混雑が見掛け上大きくなるのが考えられるが、今回のシミュレーションではエージェントの数が少なく、その効果は大きくないものと考えられる。さらに、(V)障害物を中央に横長配置と(VI)障害物を中央に縦長配置のシミュレーションを比べてみると、前者のほうが圧倒的に混雑しているのがわかる。これは当然のことであるが、人の流れの進行方向に対して垂直に障害物が配置されていると避ける幅が広くなり、逆に平行に障害物が配置されていれば少し避けるだけでよいためこのような結果が得られたと考える。

6. 結 言

本研究はMASを用いて歩行者流を再現することを目的とした。まず、個体間のシミュレーションを行い、少人数での人の流れを再現した。次に個体間のシミュレーションの応用として群集のシミュレーションを行い、大人数のときには人はどのような行動をとるのか調査した。さらに個体間のシミュレーション、群集のシミュレーションの集大成として、渋谷の井の頭線連絡口のモデルを作成し、障害物の配置によってどのように混雑が変化するのかをシミュレーションした。さらに、実際にフィールドワークを行うことによって人の流れを分析し、作成したシミュレーションとの比較・検討を行った。以下に得られた結果を示す。

(1) フィールドワークより少人数歩行者の挙動として、

- ・いったん避けてまた元の位置に戻る行動
- ・譲る人と譲らない人の存在

また群集の挙動として、

- ・レーン形成

を確認することができた。

(2) 障害物回避ルールにより人は最小限の動きで障害物を避け、周りに人がいればその人の動きに影響を受けて行動するというをシミュレーションで表現することができた。

(3) 足跡ルールによりレーン形成を再現することができた。さらにレーン形成は混雑を緩和することがシミュレーションにより証明された。

(4) 井の頭線連絡口シミュレーション結果により、

- ・目的地に向かう最短距離に障害物を配置してはいけない
- ・人の流れの進行方向に対して、障害物を垂直に配置するより平行に配置したほうが流れはスムーズになる

ということが確認できた。また今回のモデルではエージェントの性格の違いは考慮していない。今後の課題とする。

文 献

- (1) Hori, M., Study of Developing Simulation method for prediction of evacuation processes after earthquake, *Transaction of the Japan Society of Social Technical*, Vol.3 (2005), pp.138-145.
- (2) Hirahara, Y., Numerical Simulation of Intellectual Particle Flows Based on a Molecular Dynamics Method, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.68, No.667 (2002), pp.658-665.
- (3) Yamagake, S. and Hattori, S., *Artificial society in the computer*, (2002), p.231, Kyoritsu Shuppan Co. Ltd.
- (4) Worldrop, M. M., *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*, (1992), p.7, Simon & Schuster.
- (5) Nishinari, K., *Theory of Congestion*, (2006), p.111, Shincho-sha.