マルチエージェントシステムによる歩行者行列の再現と 追従行動が及ぼす群集流動の分析

REPRODUCTION OF PEDESTRIAN MOVEMENT IN QUEUE BY USING MULTI-AGENT SYSTEM AND ANALYSIS OF CROWD FLOW AFFECTED BY FOLLOWING BEHAVIOR

安 福 健 祐*

Kensuke YASUFUKU

This study aims to reproduce pedestrian movements in high density queues and to clarify a mechanism of lane formation in contra-flow by using a multi-agent system. By dynamic control of the parameter values (a , b) involving the fundamental diagram, and the parameter values (C_i , D_i) involving line density during standing and walking, it is possible to reproduce the characteristic values of observation data, which are walking speed, line density, propagation speed of stop-and-go waves in queues. Moreover, the following behavior of the multi-agent system facilitates lane formation in the contra-flow with a density of over 1.0 people per square meter.

Keywords: Multi-Agent System, Pedestrian, Queue, Stop-and-Go Waves, Contra-Flow

マルチエージェントシステム, 歩行者, 行列, 発進波・停止波, 対向流

1. 序

不特定多数が利用する都市空間において、安全性、快適性を確保するためには、非常時以外にも平常時の群集事故対策は重要である。国内では戦後に初詣で発生した群集事故から 2001 年の明石花火大会歩道橋の群集事故に至るまで、群集事故はなくなることがなく、過去の事例から事故発生の原因とメカニズムを解明し、事故を防ぐための対策と手法を見出そうとしてきた¹⁾。近年は、このような調査研究にもとづき、コンピュータ上で群集流動をシミュレーションし、空間の適正規模の検討や、群集安全対策に関する情報共有を行うことも有効な手段の一つとなっている²⁾。

ここ数年開発されている群集流動シミュレーションの多くは、マルチエージェントシステムと呼ばれる手法が用いられており、個々の人間をエージェントとしてある一定のルールでモデル化し、エージェント同士の局所的な相互作用によって巨視的な群集流動特性を再現しようとするものである²⁾。筆者らもこれまで、マルチエージェントシステムを用いて、一つのシステム上で複数の群集流動モデルが取り扱えるフレームワークを構築し、異なる分野で開発されたモデルを比較分析している³⁾。また、従来モデルを改良して高密度状態の群集流動モデルの提案を行い⁴⁾、避難シミュレーションに適用する上での諸特性を分析してきた。これらは避難時の群集流動特性の再現を試みたものであるが、今後は平常時の行動と組み合わせることで、より汎用的な群集流動モデルが提案できると考える。

平常時に現れる群集行動の一つとして歩行者行列が挙げられる。従来、ある施設の待ち人数、待ち時間の算定には、待ち行列理論を用いて数量的に把握することが行われてきた。一方、松下は、歩行者一人一人の動きを画面に表示して、歩行者行列を視覚的に把握できるシステムを提案している⁵⁾。また近年は、学際的な研究分野において、歩行者行列を対象とした数理モデルが提案されている。特に、行列内で歩行中の人が停止したり、動き出したりすることで、行列全体が停止状態と歩行状態に分かれ、時間経過とともにその変化が後方に伝播していく停止波、発進波といった現象のメカニズムに着目し、実験とシミュレーションにより解明しようとしているものがあり^{6)~9)}。前方の歩行者を追従する行動をモデル化して、高い再現性が得られているものもある¹⁰⁾。しかしながら、実際の施設入口で見られる歩行者行列の再現性まで分析するには至っていない。追従行動を扱った歩行者モデルの研究として、高柳らは、最適速度保持行動を定義し、解析力学による歩行行動モデルにより、スクランブル交差点における群集対向流を再現している¹¹⁾。ただし、マルチエージェントモデルを使った歩行者行列を扱っているわけではない。群集対向流の研究として、加藤らは、歩行者が対向者との接触を避けるように同方向者同士で寄り合い、帯状のグループとなって交互に層を形づくる層化現象を取り上げ、その定量化が試みられている¹²⁾。このように、追従行動は、群集対向流において自発的にレーンが形成される現象と関連が深いといわれており⁹⁾、歩行者行列

* 大阪大学サイバーメディアセンター 講師・博士(工学)

Assoc. Prof., Cybermedia Center, Osaka Univ., Dr.Eng.

にみられる追従行動と他の群集流動特性との関連性を明らかにすることによって、汎用的な群集流動モデルとしての発展が期待できる。

本研究は、マルチエージェントシステムにより平常時の高密度な歩行者行列の再現および群集対向流におけるレーン形成の発生メカニズムを明らかにすることを目的としており、既存の群集流動モデルをベースに楕円形衝突判定とエージェント同士の追従行動を付加し、そのパラメータ特性を検証することで、汎用性の高い群集流動モデルを提案するものである。

2. 方法

本稿では、マルチエージェントシステムにより非常時および平常時にみられる群集流動特性を再現するため、非常時の群集流動が再現可能といわれる Social Force モデル¹³⁾をベースに、平常時にみられる高密度な歩行者行列を再現する。そのために、Social Force モデルに対し、楕円形衝突判定による高密度群集の再現と、前方の歩行者への追従行動を追加する。追従行動には、歩行者行列で現れる発進波と停止波の伝播速度を制御するパラメータを新たに導入し、実際の施設入口で観測された歩行者行列の再現性を検証する。さらに、追従行動による他の群集流動特性への影響として、群集対向流に生じるレーン形成についての影響を分析する。

2.1. Social Force モデル

Social Force モデルは、社会心理学的な要素に物理的な力を結びつけた動力学モデルであり、エージェントに対する (A) 移動目標に向かう推進力、(B) 他のエージェントから受ける反発力、(C) 壁などの障害物から受ける反発力の相互作用で運動方程式を解く^{注1)}ことにより、ある瞬間におけるエージェントの歩行速度が算出される (図1 参照)。移動目標に向かう推進力とは、式(1)から、エージェント i が、現在の速度 ($\mathbf{v}_i$) から移動目標のある方向 ($\mathbf{e}_i^0$) に目標速度 (v_i^0) で移動しようとする力である。ある時間内に目標速度に到達するための推進力を表すパラメータが τ_i である。他のエージェントから受ける力 ($\mathbf{f}_{ij}$) は、エージェント i がエージェント j に近寄りすぎたときに受ける反発力であり、心理的な要素と実際に衝突したときの物理的な力を結びつけた力学モデルである^{注2)}。(3) 壁などの障害物から受ける力 ($\mathbf{f}_{iW}$) も、(2) と同様の力学モデルであり、エージェント i が障害物 W に近寄りすぎたときに反発力を受ける^{注3)}。

図1 Social Force モデルのイメージ

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t)\mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(i \neq j)} \mathbf{f}_{ij} + \sum_W \mathbf{f}_{iW} \quad (1)$$

一方で、従来の Social Force モデルを使って高密度な歩行者行列を再現しようとした場合にいくつかの問題点がある。一つは、エージェントの形状を円形とした場合に、高密度の群集流動が表現できない点である。もう一つは、平常時の歩行者行列や群集行動にみら

れる前方のエージェントへの追従行動が考慮されていない点である。そこで、Social Force モデルをベースに、楕円形衝突判定と前方のエージェントへの追従行動モデルを導入し、平常時における高密度な歩行者行列の再現および群集流動特性の影響について検証する。

2.1.1. 楕円形衝突判定

Social Force モデルではエージェント同士の衝突判定を行い、衝突が起これば反発力と摩擦力が付加される。楕円形衝突判定では、エージェントの形状を従来の円形から楕円形に変更して、エージェント同士の衝突判定を行う。具体的には、Social Force モデルの計算に用いられるエージェント i の半径 r_i を相手のエージェント j のいる方向での楕円の半径として計算する (図2 参照)。この手法では、図2(3)にみられるような厳密には楕円同士の衝突判定ができないケースも生じる。しかしながら、もともと楕円は人間の衝突範囲を近似したものであること、衝突の厳密性よりもシミュレーションの計算負荷の低減と高密度な群集歩行の再現に重点を置いたモデルであることから、このような近似計算を採用する。本稿ではエージェントの長径を 30 cm、短径を 15 cm に設定する。また、それ以外の Social Force のパラメータについては、先行研究³⁾で設定した値を用いる。

図2 楕円形の近似衝突判定

2.1.2. 追従行動モデル

Social Force モデルをベースに、エージェントの前方近くに他のエージェントがいれば、そのエージェントへの追従行動を考慮する。追従行動によって再現する歩行者行列の指標の一つとしては、行列の線密度と歩行速度の関係が挙げられる。特に1列の行列の観測結果から、歩行速度 v と前方のエージェントとの距離 d には一定の関係があることが知られており、式(2)で示す Fundamental Diagram と呼ばれる回帰式が提案されている¹⁴⁾。追従行動モデルでは、前方にいるエージェントの距離から、式(2)を基に歩行速度を算出し、Social Force モデルにおける目標速度に設定できるようにする。目標速度とは、Social Force モデルにおける移動目標に向かう力を制御するためのパラメータの一つである。

$$v = \frac{d - 0.36}{1.06} \quad (2)$$

次に、追従行動によって再現する歩行者行列の指標として、行列内でエージェントが止まったり、動き出したりする際に生じる停止波、発進波と呼ばれる現象を扱う。停止波は、行列内を歩行するエージェントが停止すると、後方エージェントは若干遅れて停止するため、高密度で停止している行列の状態が後方に伝播していく現象である。逆に発進波は、前方のエージェントが動き出すと、後方エージェントは若干遅れて動き出すため、停止状態よりも低密度で移動している行列の状態が後方に伝播していく現象である。Social Force モデルと前述の目標速度の制御のみでは、この停止波、

の人数から算出する。停止波と発進波の伝播速度については、グラフから各人の歩行速度の変化を読み取り、速度変化地点をプロットして、回帰直線（図5の点線）で近似した傾きから算出する。

図5 歩行者行列の観測データ

2.4. 群集対向流のシミュレーション設定

追従行動モデルは、歩行者行列を再現するために導入したが、平常時において、歩行者行列以外にも現れる人間の行動と考えられる。特に群集対向流においては、衝突を避けるため、前方の歩行者に追従することが知られている。既往研究¹⁵⁾では、セルオートマトンを用いて群集対向流を再現し、追従行動によって歩行者のレーンが形成されるという知見が得られている。その一方で、粒子系のモデルでは、追従行動を考慮しなくても、レーン形成が発生するという群集流動モデルの報告¹⁶⁾もある。ここでは、Social Force モデルをベースに、追従行動モデルの有無によって、群集対向流における群集密度とその流量の関係およびレーンの形成されやすさを測定し、追従行動モデルが群集対向流に与える影響について分析を行う。

群集対向流の設定としては、図6に示す幅4 m、長さ20 mの通路空間において、左右それぞれに移動目標をもつエージェントを同じ人数にランダムに配置する^{注4)}。群集密度としては、エージェントの数を20人から200人まで10人刻みで変化させ、流動係数を測定する。流動係数は、左右の計測線でそれぞれに到達したエージェント数を5分間測定し、幅1 mあたり、1秒あたりの通路の通過人数として表す。また、大きさの限られた空間において、ある一定時間、同一の群集密度での群集対向流の変化を測定するため、画面端に到達してエージェントがいなくなったとき、逆の画面端にエージェントが現れるように設定する。

図6 群集対向流の設定

3. 結果と考察

3.1. マルチエージェントシステムによる歩行者行列特性

3.1.1. 歩行速度と行列の線密度の関係

マルチエージェントシステムを用いて、行列内を全エージェント

が歩行している状態での歩行速度と線密度を測定した結果を図7に示す。グラフは、行列の先頭のエージェントの歩行速度を0.1 m/sから1.0 m/sまで0.1 m/s刻みで変化させたときの、全エージェントの平均歩行速度と行列の線密度がプロットされている。2.1.2.で述べた行列観測結果に基づくFundamental Diagramと呼ばれる回帰式（式2）と比較してその結果が一致している。これは、追従行動モデルのルールに当該回帰式を用いて、前方にいるエージェントとの距離から目標速度を設定しているためであり、想定された結果が得られた。また、エージェントの形状が半径30 cmの円形の場合、線密度が1.67 人/m以上の歩行者行列において前後のエージェントで衝突が起こるが、エージェントの形状を長径30 cm、短径15 cmの楕円形にしたことで、線密度2.1 人/mの歩行者行列を扱える。

図7 歩行速度と行列の線密度の関係

3.1.2. 停止波・発進波の伝播速度

マルチエージェントシステムにより線密度1.0 人/mの歩行者行列を再現して、先頭のエージェントを途中で停止させたときに起こる停止波の伝播速度および全エージェントが停止状態になったときのエージェント間の平均距離（行列間隔）を測定した結果を図8に示す。線密度1.0 人/mの歩行者行列は、2.1.2.の追従行動モデルにより、式(2)に示されるFundamental Diagramに基づいた目標速度として0.604 m/sに設定される。そこで、線密度1.0 人/mの歩行者行列を再現するため、追従行動をしない先頭のエージェントは歩行速度を0.604 m/sに設定している。

図8 パラメータ C_i と停止時線密度、停止波伝播速度の関係

図8のグラフは、パラメータ C_i を変化させたときの、行列間隔と伝播速度の変化を表している。パラメータ C_i は、歩行中のエージェント i の前方にいるエージェントが停止した状態で、かつ、その間隔が C_i m 以下になると、エージェント i にも停止する力が働くもの

である。エージェントが即座に停止できれば、 C_i と行列間隔は等しくなるが、停止する力は Social Force モデルの目標速度を 0 に設定することなので、停止するまでに時間を要し、行列間隔は C_i よりも 5% 程度小さくなる。停止波の伝播速度の特徴としては、エージェントは歩行中の速度が一定のため、停止する前方のエージェントとの距離 C_i が大きくなると伝播速度も大きくなる。グラフに示す推定値は、行列間隔 C_i で、エージェントが即座に停止した場合、計算により求めることができる値^{注5)}であり、ほぼ同じ変化傾向を示していることから、パラメータによる伝播速度の任意の制御が可能である。また、歩行間隔が 1.0 m であることから、 C_i の値が 1.0 m に近づくほど、伝播速度は測定値も推定値も指数関数的に大きくなる。これは C_i が歩行時のエージェント間の距離に近づく、前方のエージェントが停止したと同時に後方エージェントも停止するためであり、追従行動モデルのパラメータ特性の一つになっている。

図9 パラメータ C_i , D_i と発進波伝播速度の関係

次に、全エージェントが停止した状態から先頭のエージェントが歩行をはじめたときの発進波の伝播速度を測定した結果を図9に示す。グラフは、パラメータ C_i とパラメータ D_i を変化させたときの発進波の伝播速度を表している。 D_i は、行列内でエージェント i が停止していて、前方のエージェントが歩行するとき、その間隔が D_i m 以上になると、エージェント i にも歩行する力が働くものである。そのため、 D_i が大きくなれば、エージェントの動き出すまでの時間が長くなり、伝播速度は小さくなる。また、パラメータ C_i によっても発進波の伝播速度は変化する。これは、 C_i によって、停止時の行列間隔が異なってくるためであり、行列間隔が短いほど、伝播速度は小さくなる。さらに、動き出した先頭のエージェントの歩行速度は、初期設定により 0.604 m/s となっており、歩行者行列の線密度 1.0 人/m になるよう、 D_i の値に拘わらずエージェント間の距離は次第に 1.0 m に近づく。そのため、 D_i の値が 1.0 m よりも小さい場合、動き出してしばらくは歩行速度が 0.604 m/s よりも小さい状態から加速するため、 D_i の値が小さくなるほど伝播速度はより大きくなっている。一方、1.0 よりも大きい場合、動き出してしばらくは歩行速度が 0.6 m/s よりも大きい状態から減速するため、 D_i の値が大きくなるほど伝播速度はより小さくなっている。

以上のことから、パラメータ C_i と D_i による歩行者行列の影響について、歩行時の行列間隔(線密度)、停止時の行列間隔(線密度)、停止波の伝播速度、発進波の伝播速度の変化特性を明らかにした。次節は、実際の観測結果をもとにその再現を試みる。

3.2. 施設入口における歩行者行列の再現性

競技場入口(以下、ケース A) および複合商業施設入口(以下、ケース B) の行列を観測し、歩行速度、歩行時線密度、停止時線密度、停止波伝播速度、発進波伝播速度を測定した結果を表1にまとめる。

表1 観測における歩行者行列の特性

ケース	歩行速度 (m/s)	歩行時 線密度 (人/m)	停止時 線密度 (人/m)	停止波 伝播速度 (m/s)	発進波 伝播速度 (m/s)	歩行速度 (推定値) (m/s)
A1	0.68	0.86	1.57	0.98	0.70	0.76
A2	0.47	1.00	—	—	—	0.60
B1	0.31	1.17	1.89	0.63	0.58	0.46
B2	0.35	1.07	1.78	0.54	0.58	0.55
B3	0.31	1.16	1.82	0.57	0.67	0.47

A では、停止波と発進波を各 1 回(A-1)と、その後の歩行性状を測定した(A-2)。B では、発進波と停止波を各 3 回測定した(B-1, B-2, B-3)。その結果、B-1, B-2, B-3 の間で生じている歩行速度、伝播速度の差に比べて、A-1 との差が大きい。このように歩行者行列特性は、施設の種類や周囲の条件により変化しているため、シミュレーションではパラメータの値を行列ごとに調整して再現する。また、歩行速度と歩行時の線密度の関係をみると、Fundamental Diagram による歩行速度推定値との間に差がある。そのため、シミュレーションでは式(2)の定数を、 a , b のパラメータとして調整することとする(式3参照)。

$$v = \frac{d - b}{a} \quad (3)$$

具体的には、 b の値を式(2)と同じ 0.36 に固定し、観測結果の歩行速度と歩行時線密度に近づくように a 初期値を設定する。また、前項 3.1.2 において、追従行動モデルのパラメータ C_i , D_i を変化させたときの歩行者行列特性の変化傾向を明らかにしたので、観測された停止波および発進波の伝播速度から、 C_i , D_i の初期値を設定する。ただし、表1の歩行速度と歩行時線密度は、ある測定範囲の平均値をとっており、実際には、各歩行者によって歩行速度や行列間隔にばらつきがあるため、上記の初期値で、観測とシミュレーションの歩行者行列特性(歩行時の行列間隔、停止時の行列間隔、停止波の伝播速度、発進波の伝播速度)を一致させるには至らなかった。そのため、各パラメータの初期値の前後の値で繰り返しシミュレーションを行い、上記の歩行者行列特性の4指標の総合評価で、観測とシミュレーションの差がより小さくなる値に決定した^{注6)}。パラメータ設定以外にも、行列の初期線密度、先頭のエージェントの歩行時間および停止時間を観測結果に合わせている。観測された歩行者行列をシミュレーションで再現するためのパラメータ値とその結果を表2に示す。

表2 シミュレーションにおける歩行者行列の特性

ケース	歩行速度 (m/s)	歩行時 線密度 (人/m)	停止時 線密度 (人/m)	停止波 伝播速度 (m/s)	発進波 伝播速度 (m/s)	a	b	C_i (m)	D_i (m)
A1	0.77	0.86	1.58	0.98	0.69	0.98	0.36	0.64	0.96
A2	0.46	0.96	—	—	—	1.48	0.36	0.64	0.96
B1	0.31	1.15	1.89	0.63	0.58	1.33	0.36	0.55	0.80
B2	0.32	1.15	1.83	0.63	0.63	1.33	0.36	0.55	0.80
B3	0.34	1.13	1.83	0.65	0.63	1.33	0.36	0.55	0.80

観測とシミュレーションで、ある行列範囲の各エージェントの座標を時系列でプロットした結果^{注7)}および観測写真とシミュレーション画面を比較したものを図10および図11に示している。グラフは、図5と同様の方法で作成されており、歩行速度、歩行時線密度、停止時線密度、停止波伝播速度、発進波伝播速度を読み取ることができる。尚、シミュレーションのほうは、1/60秒おきに各エージェントの位置座標をプロットしている。観測結果は、人の頭の位置をプロットしているため、歩行を伴わないわずかな頭の動きによって、グラフに細かな変化がみられるが、全体の変化傾向は、観測結果とシミュレーションとでほぼ一致している。

図10 ケースAにおける歩行者行列特性の再現

ケースAにおける観測結果の特徴として、A1よりもA2のほうがエージェントの歩行速度が小さくなっていることが挙げられる。この状況をシミュレーションで再現するためには、パラメータ a を調整する必要があった。それでもA1の歩行速度でシミュレーションと観測結果に差があるのは、観測結果では平均値をとっているが、歩行速度のばらつきが大きいため、図10のグラフの傾向と一致するように調整したためである。その結果、停止波・発進波の伝播速度をほぼ一致させることができた。

ケースBにおける観測結果の特徴として、約1分間に3回の発進

波・停止波(B1~B3)が起こっていることが挙げられる。B1~B3すべて観測結果と一致させるには、ケースAのように発進波と停止波ごとにパラメータを動的に調整することで可能である。一方、シミュレーションを用いて歩行者行列性状を予測する上で、静的なパラメータにおける再現性を検証することも重要である。そこで図11は、最初の発進波および停止波(B1)は、歩行速度、歩行時および停止時に線密度、発進波および停止波の伝播速度を一致させるように調整し、その後はパラメータを一定にして測定した。その結果、B2とB3において、観測結果との相対誤差は、B2の停止波伝播速度で約14%、B3の停止波伝播速度で約12%、B2の歩行速度で約11%、B3の歩行速度で約10%になった。時系列グラフで比較すると、歩行者行列における停止波と発進波の傾向として、歩行者行列性状を予測する上で問題となるような大きな差はみられない。

図11 ケースBにおける歩行者行列特性の再現

以上のことから、観測された歩行者行列の特性である歩行時の線密度、停止時の線密度、停止波の伝播速度、発進波の伝播速度をマルチエージェントシステムにより再現するためには、歩行時の線密度と歩行速度の関係を表すパラメータ a 、 b および停止時の線密度と歩行時の線密度を表すパラメータ C_i と D_i を調整することで、高い精度が得られることを示した。また、静的なパラメータ設定とした場合、複数回の発進波・停止波の伝播速度を完全に一致させること

は困難であるが、歩行者行列性状を予測する上においては有効であることを示した。

3.3. 追従行動モデルの有無による群集対向流の比較

群集対向流を設定し、群集密度を変化させたときの流動係数の変化を図 12 に示す。群集流動モデルには、追従行動をしないモデルと追従行動をするモデルの 2 種類で比較を行っている。追従行動をするモデルのパラメータ設定は、3.2. のケース B と同様とする。

図 12 群集対向流における群集密度と流動係数の関係

図 13 追従行動モデルのない群集対向流

図 14 追従行動モデルのある群集対向流

追従行動をしないモデルにおいて、群集密度が 0.2 人/㎡から 1.0 人/㎡までの間、ほぼ一定の割合で流動係数が増加している。これは、群集密度が上昇し、エージェントの数が増えて流量が増加したためであり、対向するエージェントの交錯による顕著な流動係数の

低下はみられない。図 13 の一つ目の図は、群集密度 1.0 人/㎡の場合で、シミュレーション開始 5 分後の画面を示しており、追従行動をしないモデルにおいても、低密度であれば群集対向流のレーン形成が生じていることがわかる。一方、群集密度が 1.0 人/㎡を超えると、流動係数が急激な低下がみられるようになり、一時的に上昇する場合はあるが、不安定な値を示す。また、図 13 の二つ目は、群集密度 2.5 人/㎡で、シミュレーション開始 5 分後の画面を表し、三つ目は開始 4 分から 5 分間のエージェントの歩行軌跡を示している。これらの図から、流動係数が低下する要因として、群集密度の上昇に伴い、群集対向流においてエージェント同士が交錯し、閉塞状態が起こりやすくなり、その状態が長く続いたことが挙げられる。

次に、追従行動をするモデルに着目すると、群集密度が 1.5 人/㎡より小さいときは、追従行動をしないモデルと比較して、流動係数は低い傾向を示す。その原因は、エージェントが前方のエージェントに追従するとき、その距離によって歩行速度が低下しているためである。しかしながら、群集密度が 1.5 人/㎡より大きくなると、追従行動をしないモデルと比較して、流動係数は高い傾向を示す。図 14 は、群集密度 2.5 人/㎡で、シミュレーション開始 5 分後の画面と、開始 4 分から 5 分間のエージェントの歩行軌跡を示している。これらの図から、追従行動をすることで、高密度な群集対向流においてもレーンが形成されやすく、対向するエージェント同士の交錯や閉塞が発生しにくくなり、流動係数が相対的に高い傾向を示したことが推察される。特に、群集密度 2.5 人/㎡の場合で、追従行動をしないモデルと比較すると、追従行動をしないモデルのほうも流動係数は高い値を示したため、それほど大きな差はみられない。しかしながら、図 13 と図 14 を比較すると、歩行軌跡は大きく異なっており、追従行動をするモデルのほうでレーンは形成されやすく、対向するエージェント同士の交錯、閉塞が少なくなる。

以上のことから、低密度な群集対向流においては、エージェントが前方にいるエージェントと歩行速度を合わせる追従行動がなくてもレーンが形成されたが、1.0 人/㎡より高密度な群集対向流になると、追従行動によってレーンが形成されやすくなるため、高密度な群集対向流において前方の歩行者に追従することが、交錯、閉塞を少なくする行動の一つであることが示唆された。

4. 結論

本研究は、マルチエージェントシステムにより平常時の高密度な歩行者行列の再現および群集対向流におけるレーン形成の発生メカニズムを明らかにすることを目的としており、Social Force モデルをベースに楕円形衝突判定とエージェント同士の追従行動を付加し、そのパラメータ特性を検証することで、以下の結果が得られた。

- 1) マルチエージェントシステムにおいて、エージェントの形状が半径 30 cm の円形の場合、線密度が 1.67 人/m 以上の歩行者行列では前後のエージェントで衝突が起こるが、エージェントの形状を長径 30 cm、短径 15 cm の楕円形にしたことで、線密度 2.1 人/m の歩行者行列を扱える。
- 2) 観測された歩行者行列の歩行時の線密度、停止時の線密度、停止波の伝播速度、発進波の伝播速度をマルチエージェントシステムにより再現するためには、歩行時の線密度と歩行速度の関係を表すパラメータ a 、 b および停止時の線密度と歩行

時の線密度を表すパラメータ C_i と D_i を動的に調整することで、高い精度が得られた。

- 3) マルチエージェントシステムにおいて、静的なパラメータ設定で歩行者行列を扱う場合、複数回の発進波・停止波の伝播速度を完全に一致させることは困難であるが、歩行者行列性状を予測する上においては有効である。
- 4) マルチエージェントシステムによる群集対向流の特性は、低密度な群集対向流においては、エージェントが前方にいるエージェントと歩行速度を合わせる追従行動がなくてもレーンが形成されたが、1.0 人/m²より高密度な群集対向流になると、追従行動によってレーンが形成されやすくなり、交錯、閉塞を少なくする行動の一つであることが示唆された。

以上のことから、非常時を想定した避難行動モデルとして用いられている既存の群集流動モデルをベースに、平常時における歩行者行列の再現と、群集対向流を分析するための汎用的なマルチエージェントシステムを開発した。より多様な状況下での歩行者行列を再現するために、さらに多くの歩行者行列観測データを整理することが今後の課題である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金（若手研究 B No. 24760490）の助成を受けたものである。記して感謝の意を表す。

注

注1) 運動方程式の数値計算は陽解法で行い、タイムステップは 1/60 秒とする。

注2) 他のエージェントから受ける力は式(4)のように表される。エージェント i は、エージェント j のいる方向とは逆の方向 ($\mathbf{n}_{ij}$) に距離 ($r_{ij} - d_{ij}$) を指数とした大きさの力を受ける。 d_{ij} は、エージェント i と j の中心間距離を表し、 r_{ij} は、エージェント i の半径 (r_i) と、エージェント j の半径 (r_j) の和 ($r_{ij} = r_i + r_j$) とする。また A_i 、 B_i 、 k 、 κ はそれぞれパラメータを表す。 g はエージェント同士が接触したとき ($r_{ij} - d_{ij} \geq 0$)、値が 1.0 となり、それ以外るとき ($r_{ij} - d_{ij} < 0$)、値が 0 となる変数と定義している。これにより、エージェント同士が接触した場合は、反発力がさらに加わるとともに、接線方向 ($\mathbf{t}_{ij}$) に摩擦力も働く。

$$\mathbf{f}_{ij} = \{A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] + kg(r_{ij} - d_{ij})\} \mathbf{n}_{ij} + \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) A_j \mathbf{t}_{ij} \quad (4)$$

注3) 壁などの障害物から受ける力は式(5)のように表される。エージェント i が、壁 W から受ける力は、衝突面の法線方向 ($\mathbf{n}_{iW}$) に距離 ($r_i - d_{iW}$) を指数とした大きさの力を受ける。それ以外のパラメータについては、他のエージェントから受ける力^{注2)}と同様とする。

$$\mathbf{f}_{iW} = \{A_i \exp[(r_i - d_{iW})/B_i] + kg(r_i - d_{iW})\} \mathbf{n}_{iW} - \kappa g(r_i - d_{iW})(\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{t}_{iW}) \mathbf{t}_{iW} \quad (5)$$

注4) ランダムに配置する方法は、通路内の x 座標、y 座標を擬似乱数によってランダムに設定している。エージェント同士が接触する場合は、再配置を行う。

注5) 全エージェントの歩行速度 v_i 、歩行間隔 D_i が変化せず一定で、歩行中のエージェントの行列間隔が C_i になれば即座に停止すると仮定すると、停止波の伝播速度は式(6)によって計算できる。これを推定値とする。

$$v_{stop} = \frac{v_i C_i}{D_i - C_i} \quad (6)$$

注6) 歩行時の行列間隔、停止時の行列間隔、停止波の伝播速度、発進波の伝播速度の 4 指標の差を最小化するような統計量の検討は今後の課題とする。

注7) 競技場で観測された行列は、列数を制限するようなロープ等がないため、同伴者が横にいる場合、その同伴者はカウントしていない。

参考文献

- 1) 岡田光正：群集安全工学，鹿島出版会，2011
- 2) 兼田敏之編集代表，構造計画研究所創造工学部，名古屋大学兼田研究室:artiscで始める歩行者エージェントシミュレーション 原理・方法論から安全・賑わい空間のデザイン・マネジメントまで，構造計画研究所，2010
- 3) 安福健祐:避難行動フレームワークを用いた群集歩行モデルの比較分析と避難安全検証への適用性, 日本建築学会計画系論文集 第 655 号, pp. 2081-2088, 2010. 9
- 4) 安福健祐:楕円型 RVO モデルを用いた高密度群集流動の再現, 日本建築学会技術報告集, 第 17 巻, 第 35 号, pp. 187-190, 2011. 2
- 5) 松下聡:待ち行動を含む群集歩行シミュレーションモデルの研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 432 号, pp. 79-88, 1992. 2
- 6) Portz, A., Seyfried, A.: Analyzing Stop-and-Go Waves by Experiment and Modeling, Pedestrian and Evacuation Dynamics, pp. 577-586, 2011
- 7) Tomoeda, A., Yanagisawa, D., Imamura, T., Nishinari, K.: Propagation speed of a starting wave in a queue of pedestrians, Phys. Rev. E 86, 2012
- 8) Appert-Rolland, C., Jelic, A., Degond, P., et al.:Experimental Study of the Following Dynamics of Pedestrians, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012, pp. 305-315, 2014
- 9) Helbing, D., Molnár, P., Farkas, I. J., Bolay, K.: Self-organizing pedestrian movement, Environment and Planning B: Planning and Design 28(3), pp. 361-383, 2001
- 10) Lemerrier, S., Jelic, A., Kulpa, R., et al.: Realistic following behaviors for crowd simulation, Computer Graphics Forum, Vol. 31, No. 2, pp. 489-498, 2012. 5
- 11) 高柳英明, 長山淳一, 渡辺 仁史: 歩行者の最適速度保持行動を考慮した歩行行動モデルー群衆の小集団形成に見られる追跡-追従相転移現象に基づく解析数理一, 日本建築学会計画系論文集 第 606 号, pp. 63-70, 2006. 8
- 12) 加藤邦夫, 上原孝雄, 中村和男, 吉岡松太郎: 群集対向流動の解析, 日本建築学会論文報告集 第 289 号, pp. 119-129, 1980. 3
- 13) Helbing, D., Farkas, I., Vicsek, T.: Simulating Dynamical Features of Escape Panic, Nature. 407, pp. 487-490, 2000
- 14) Seyfried, A., Steffen, B., Klingsch, W., Lippert, T., Boltes, M.:The Fundamental Diagram of Pedestrian Movement Revisited – Empirical Results and Modelling, Traffic and Granular Flow’ 05, pp. 305-314, 2007
- 15) 西成活裕: 渋滞学, 新潮選書, 2006
- 16) 川口寿裕: 歩行者流れへの離散要素法の適用 (直線通路におけるレーン形成), 関西大学社会安全学部社会安全学研究創刊号, pp. 3-11, 2011. 3

REPRODUCTION OF PEDESTRIAN MOVEMENT IN QUEUE BY USING MULTI-AGENT SYSTEM AND ANALYSIS OF CROWD FLOW AFFECTED BY FOLLOWING BEHAVIOR

*Kensuke YASUFUKU**

* Assoc. Prof., Cybermedia Center, Osaka Univ., Dr.Eng.

A pedestrian simulation is one of effective means to verify the size of space and share the information of a crowd safety measure in an urban area that a large number of unspecified people visit. This study aims to reproduce pedestrian movements in high density queues and to clarify a mechanism of lane formation in contra-flow by using a multi-agent system. The crowd flow is based on the social force model, which is said that crowd dynamics at a state of emergency can be reproduced. To apply this model to pedestrian movements in a high density queue at ordinary times, we add new functions, which are ellipse-based collision detection and following behavior after an agent ahead. The following behavior includes the parameters to control propagation speed of stop-and-go waves in a queue. To confirm the reproducibility, we compare observation data of pedestrian movements in queues at urban facilities. In addition, we simulate a contra-flow and the lane formation phenomena to analyze the influence of the following behavior on crowd dynamics. The results are as follows.

If the shape of an agent is a circle of the radius 30 cm, the collision between agents is detected at the line density of 1.67 people per meter. On the other hand, the system represents a pedestrian movement having the line density of 2.1 people per meter by making the shape of an agent an ellipse 30 cm in the major axis and 15 cm in the minor axis. In addition, by dynamic control of the parameter values (a , b) involving the fundamental diagram for pedestrians, and the parameter values (C , D) involving line density during standing and walking, it is possible to reproduce the characteristic values of observation data, which are line density, propagation speed of stop-and-go waves. If the static parameter values are set, it is hard to agree with propagation speed of several stop-and-go waves accurately. However, it is useful to predict the characteristics of pedestrian movements in a queue. As a result of an application to contra-flows by using the multi-agent system, the lanes are formed regardless of the following behavior when the crowd density is low. On the other hand, the following behavior facilitates lane formation in the contra-flow with a density of over 1.0 people per square meter. It is an important point to enhance crowd safety. From the above results, we developed the general-purpose multi-agent system which enables to reproduce pedestrian movements in a queue and lane formation of contra-flow by extending an existing crowd dynamics model at a state of emergency.

(2015年6月5日原稿受理, 2016年1月8日採用決定)