

# 群集動力学の連結階層シミュレーション

西川 憲明<sup>1,a)</sup> 廣川 雄一<sup>1</sup> 浅野 俊幸<sup>1</sup>

受付日 2019年1月12日, 採録日 2019年7月3日

**概要:** 近年, マルチスケールの視点から, 異なるスケールにおいて記述されるモデルを連結することで構築される, 階層連結型のシミュレーションによるアプローチが広く注目されている. 群集シミュレーションの分野においても, 関心領域には詳細なマイクロ歩行者モデルを, それ以外の領域には簡略なマクロ歩行者モデルを適用することで, 効率的なシミュレーションを実現する取り組みが進展しつつあり, 連結階層シミュレーション手法のさらなる発展が期待される場所である. 本研究では, マイクロ歩行者モデルから算出される巨視的な情報に基づいてマクロ歩行者モデルを構築するというアプローチのもと, マイクロ歩行者モデルとマクロ歩行者モデルを有機的に連結するシミュレーションモデルを提案し, その有用性を明らかにした.

**キーワード:** 群集動力学, 連結階層モデル

## Micro-Macro Interlocked Simulation of Crowd Dynamics

NORIAKI NISHIKAWA<sup>1,a)</sup> YUICHI HIROKAWA<sup>1</sup> TOSHIYUKI ASANO<sup>1</sup>

Received: January 12, 2019, Accepted: July 3, 2019

**Abstract:** In recent years, multiscale approaches have received a surge in attention. The multiscale approaches combine different models to speed up simulation time and to improve the results of the simulation. This research proposes a micro-macro interlocked simulation model of crowd dynamics, based on the construction of macroscopic model through coarse-graining of microscopic model. It is clearly demonstrated by numerical analyses that the proposed approach is able to provide realistic and computationally efficient simulations.

**Keywords:** crowd dynamics, interlocked simulation

### 1. はじめに

近年, マルチスケールの視点から, 異なるスケールにおいて記述されるモデルを連結することで構築される, 階層連結型のシミュレーションによるアプローチが広く注目されている. 群集シミュレーションの分野においても, 関心領域には詳細なマイクロ歩行者モデルを, それ以外の領域には簡略なマクロ歩行者モデルを適用することで, 効率的なシミュレーションを実現する取り組みが進展しつつあり, 連結階層シミュレーション手法のさらなる発展が期待される場所である [1], [2], [3].

既往研究においては, 異なるスケールにおいて個別に開発された歩行者モデルを連結することで, 群集シミュレーション全体の高速化を実現しているが, 各歩行者モデルにより生成される巨視的な (マクロなスケールにおける) 歩行者流の振舞いについての整合性は必ずしも成り立つとは限らない. すなわち, マイクロ歩行者モデルとマクロ歩行者モデルをつなぎ合わせる接続部が, 各モデルが固有に持つ巨視的特性の差異に起因して, 歩行者流のなかに不自然な不連続性を持ち込む原因となりがねないと推察される. さらに, 接続部だけにその影響は止まらず, シミュレーション解全体の計算精度を著しく劣化させてしまう可能性もある.

本研究では, スケールをまたいだ複数モデルによる連結シミュレーションを実施する場合, 各モデルにより算出さ

<sup>1</sup> 国立研究開発法人海洋研究開発機構  
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,  
Yokohama, Kanagawa 236-0001, Japan  
<sup>a)</sup> nnishikawa@jamstec.go.jp

れる巨視的な振舞いの様相を一致させることが本質的に重要であるとの立場から、これを実現するために、マイクロ歩行者モデルから算出される巨視的な情報に基づいてマクロ歩行者モデルを構築するというアプローチのもと、マイクロ歩行者モデルとマクロ歩行者モデルを有機的に連結するシミュレーションモデルを提案し、その有用性を明らかにする。

具体的に述べると、マクロ歩行者モデルの構築に関しては2つの方法を提案する。1つは、マイクロ歩行者モデルによるシミュレーションを複数の計算条件下において事前に実行した後に、そこから算出される巨視的な情報に基づいて、マクロ歩行者モデルをオフライン的に構築するものである。もう1つは、マイクロ歩行者モデルによるシミュレーションを単一の計算条件下において実行しながら、そこから算出される巨視的な情報に基づいて、マクロ歩行者モデルをオンライン的に構築するものである。

そして、マイクロ歩行者モデルとオフライン（オンライン）構築によるマクロ歩行者モデルを空間的（時間的）に接続する連結階層シミュレーションの計算結果を分析評価することで、その有効性を実証する。

さらに、オンライン構築によるマクロ歩行者モデルについては、時間変動場に関するマクロ歩行者モデルの適応性の改善を目的として、マクロ歩行者モデルの拡張可能性を検討する。

なお、本論文では、マクロ歩行者モデルでもマイクロ歩行者モデルと同様に、流体的描像ではなく粒子的描像により歩行者を表現する。マイクロ歩行者モデル、マクロ歩行者モデルという用語は、エージェント同士の相互作用を記述する空間スケールの在り方を示すものとして使用されることに注意されたい。

本論文の構成は以下のとおりである。マイクロ歩行者モデルの概要を次節で述べる。3章ではオフライン構築によるマクロ歩行者モデルを、4章ではオンライン構築によるマクロ歩行者モデルを説明する。5章ではマイクロ歩行者モデルとマクロ歩行者モデルの連結手法を説明する。続いて、6章から7章にかけて、シミュレーション結果を議論する。6章では時間平均場、7章では時間変動場に注目して、提案する連結シミュレーションモデルの有用性を議論する。最後に、結論と展望を8章に述べる。

## 2. ミクロ歩行者モデル

周辺歩行者や壁などの障害物がある場合に、目的地および目的地までの経路が与えられた歩行者がどのように行動するかということを微視的観点から表現するマイクロ歩行者モデルにはヒューリスティックモデル [4] を踏襲した。以下にモデルを概説する。

対象歩行者  $i$  の振舞いは位置座標  $\mathbf{r}_i(t)$  と歩行速度  $\mathbf{v}_i(t)$  により記述されるとする。ここで、 $t$  は時間を表す。簡易

化のため、歩行者の人体は水平面上の半径  $R_i = m_i/\Psi$  の円で表現する。ここで、 $m_i$  は歩行者  $i$  の質量である。また、 $\Psi$  は歩行者の質量から半径を算出する変換係数である。さらに、歩行者  $i$  は自由歩行速度の大きさ  $v_i^0$  によって特徴づけられるとする。

歩行者の視野角は進行方向の左右  $\varphi^\circ$  とし、衝突回避行動のために歩行者により観測される視覚距離は  $d_{\max}$  とする。

歩行者は視覚によって得られた情報をヒューリスティックに処理することで、将来の歩行軌道を計画する。その後、歩行者は意図した軌道計画を実現すべく歩行者身体の運動特性を考慮して希望速度  $\mathbf{v}_{\text{des}}(t)$  を決定する。意思決定プロセスのモデル詳細については当該論文 [4] を参照されたい。

一方、群集が過密状態の場合、対象歩行者は周辺の歩行者や壁との衝突により、視覚情報によって決定されない意図しない動きとなる可能性がある。すなわち、歩行者の意思決定とは無関係な物理的な接触力を考慮する必要がある。

歩行者同士の接触力については、

$$\mathbf{f}_{ij} = Kg(R_i + R_j - d_{ij})\mathbf{n}_{ij}, \quad (1)$$

とする。ここで、 $g(x) = \max(x, 0)$  である。また、 $\mathbf{n}_{ij}$  は歩行者  $j$  から歩行者  $i$  の方向に向いた単位ベクトル、 $d_{ij}$  は歩行者の質量中心間の距離、 $K$  は定数である。

同様に、壁  $w$  との物理的相互作用を、

$$\mathbf{f}_{iw} = Kg(R_i - d_{iw})\mathbf{n}_{iw}, \quad (2)$$

とする。ここで、 $d_{iw}$  は壁  $w$  との距離、 $\mathbf{n}_{iw}$  は壁に垂直な方向の単位ベクトルである。

マイクロ歩行者モデルにおいて、歩行者行動を記述する基礎方程式は、

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \frac{\mathbf{v}_{\text{des}} - \mathbf{v}_i}{\tau} + \sum_j \frac{\mathbf{f}_{ij}}{m_i} + \sum_w \frac{\mathbf{f}_{iw}}{m_i}, \quad (3)$$

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v}_i, \quad (4)$$

と表現される。ここで、 $\tau$  は緩和時間である。

モデルパラメータの具体的な設定値については既往論文 [4] を参考に、自由歩行速度の大きさ  $v_i^0$  を平均 1.3 m/s、標準偏差 0.2 m/s の正規分布、歩行者の質量  $m_i$  を平均 60 kg、標準偏差 5 kg の正規分布、視覚距離  $d_{\max} = 10$  m、視野角  $\varphi = 100^\circ$ 、緩和時間  $\tau = 0.5$  秒、歩行者の質量から半径を算出する係数  $\Psi = 220$  kg/m とした。また、計算結果の収束性の観点から、マイクロ歩行者モデルの基礎方程式の時間積分における時間刻み幅は 0.1 秒とした。

## 3. オフライン構築によるマクロ歩行者モデル

マイクロ歩行者モデルによるシミュレーションを複数の計算条件下において事前に実行した後に、そこから算出され

る巨視的な情報に基づいて、マクロ歩行者モデルをオフライン的に構築する手法について説明する。

いま、ミクロ歩行者モデルの歩行速度を  $v_i^{\text{micro}}$ 、マクロ歩行者モデルの歩行速度を  $v_i^{\text{macro}}$ 、歩行者の総数を  $N$ 、歩行可能領域の面積を  $S$  と表記する。そして、ミクロ歩行者モデルのシミュレーションを実施することで算出される基本図、正確に述べると、歩行者の大局的な密度  $\rho_g = N/S$  が与えられた場合の歩行速度  $v_i^{\text{micro}}$  の大きさの平均値、

$$V^{\text{micro}}(\rho_g) = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |v_i^{\text{micro}}| \middle| \rho_g \right\rangle, \quad (5)$$

の振る舞いを近似的に再現できるようなマクロ歩行者モデルの構築を考える。表記  $\langle A | B \rangle$  は  $B$  の値を固定した条件のもとでの  $A$  の統計的な平均値を表す。

本論文では、マクロ歩行者モデルの歩行速度  $v_i^{\text{macro}}$  の大きさは歩行者の自由歩行速度の大きさ  $v_i^0$  に比例するとの仮定のもと、マクロ歩行者モデルの歩行速度を、

$$v_i^{\text{macro}}(\rho_i^f) = v_i^0 F(\rho_i^f) \hat{e}^{\text{macro}}, \quad (6)$$

とする。ここで、 $\hat{e}^{\text{macro}}$  はマクロ歩行者モデルの歩行方向を規定する単位ベクトルである。また、 $\rho_i^f$  は歩行者  $i$  の前方  $d^{\text{macro}}$  まで離れた領域における局所的な歩行者密度である。さらに、関数  $F$  の形状は、

$$F(\rho_g) = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|v_i^{\text{micro}}|}{v_i^0} \middle| \rho_g \right\rangle, \quad (7)$$

により算出されるものである。すなわち、歩行者の大局的な密度  $\rho_g$  を適切な離散化により表現し、ミクロ歩行者モデルによるシミュレーションを各離散値が与える条件のもとに実行することで、関数  $F$  は構築されることとなる。

以上、マクロ歩行者モデルにおいて、歩行者行動を記述する基礎方程式は、

$$v_i = v_i^{\text{macro}}(\rho_i^f), \quad (8)$$

と式 (4) により構成される。

続いて、マクロ歩行者モデルによって算出された基本図、

$$V^{\text{macro}}(\rho_g) = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |v_i^{\text{macro}}| \middle| \rho_g \right\rangle, \quad (9)$$

およびミクロ歩行者モデルによって算出された基本図  $V^{\text{micro}}(\rho_g)$  の比較結果を図 1 に示す。赤色は  $V^{\text{micro}}(\rho_g)$ 、緑色は  $V^{\text{macro}}(\rho_g)$ 、黒色は Weidmann の観測結果 [5] である。

シミュレーション結果は、進行方向の境界に周期境界条件を課した幅員 5 m、延長 20 m の直線通路 (図 2) における単方向流を対象に得られたものである。時間積分は  $t = 300$  秒まで実施した。また、両歩行者モデルの基本図は、擬似乱数のシードを変えて得られた 10 回のシミュレ

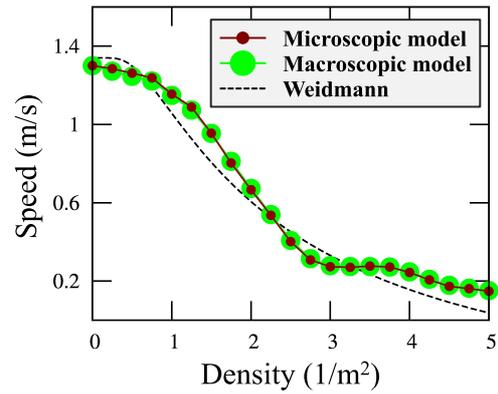


図 1 基本図

Fig. 1 Fundamental diagram.

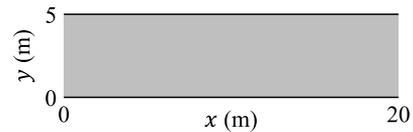


図 2 直線通路

Fig. 2 Straight corridor.

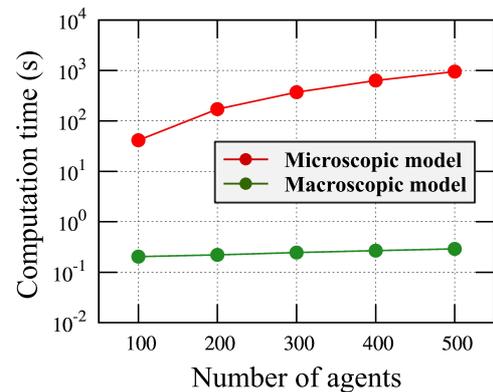


図 3 計算所要時間

Fig. 3 Computation time.

シミュレーション結果の平均値として算出した。マクロ歩行者モデルのパラメータについては、 $d^{\text{macro}} = 5$  m、 $\hat{e}^{\text{macro}} = \hat{e}_x$  とした。特に言及がない限り、本論文ではこの設定値を用いる。 $\hat{e}_x$  は  $x$  軸方向の単位ベクトルである。なお、マクロ歩行者モデルの基礎方程式の時間積分における時間刻み幅は、ミクロ歩行者モデルと同様に 0.1 秒とした。

図 1 を観察することで、提案するマクロ歩行者モデルは、ミクロ歩行者モデルにより算出される基本図を精度良く再現できることが確認される。スケールをまたいだ複数モデルによる連結シミュレーションを実施する場合、各モデルにより算出される巨視的な振る舞いの様相の一致を確認しておくことは非常に重要である。また、シミュレーションモデルは Weidmann の基本図を定量的に良く再現することも確認される。

ミクロ歩行者モデルとマクロ歩行者モデルの計算所要時間を図 3 に示す。シミュレーションは図 2 に示された領域

における単方向流を対象とし、時間積分は  $t=300$  秒まで実施した。進行方向の境界には周期境界条件を課している。使用した計算機は、地球シミュレータ (NEC SX-ACE) であり、計算には1コアのみを利用した。

マイクロ歩行者モデルと比較して、マクロ歩行者モデルは圧倒的に高速であり、その優位性は歩行者総数が増加するに従い高くなることが確認される。歩行者総数が500人の場合、計算所要時間には数千倍もの開きが存在する。

#### 4. オンライン構築によるマクロ歩行者モデル

前節において提案されたオフライン的な構築によるマクロ歩行者モデルはマイクロ歩行者モデルによって算出される基本図を精緻に再現することができる (図1)。しかしながら、歩行者流の基本図とは決して普遍的なものではなく、通路空間の幾何形状や境界条件、または歩行者の属性分布などに依存して変容するものであることが指摘されている [6], [7]。

たとえば、進行方向の境界に周期境界条件を課した直線通路における単方向流を対象として、通路の延長と幅員を変化させた場合に歩行者流の基本図がどのように変化するかを調べた結果を図4に示す。通路延長に対する依存性を調べた図4(a)の計算では、通路幅員を10mに固定している。通路幅員に対する依存性を調べた図4(b)の計算では、通路延長を100mに固定している。また、歩行者属性は均質であるとし、自由歩行速度の大きさは、 $v_i^0 = 1.3$  m/s、歩行者の質量は、 $m_i = 60$  kgとした。そのほかパラメータ値は2章で記述するとおりである。時間積分は  $t = 600$  秒まで実施し、擬似乱数のシードを変えて得られた10回のシミュレーション結果の平均値として基本図を算出した。

通路延長を変化させた場合には、歩行者の大局的な密度  $\rho_g$  の値にかかわらず、歩行速度の大きさの平均値は変化しないことが分かる。一方、通路幅員を変化させた場合には、自由歩行速度に近い状態が実現される  $\rho_g = 1$  m<sup>-2</sup> のときには、歩行速度の大きさの平均値は通路幅員の値に依存しないが、歩行者密度を増大させた、 $\rho_g \geq 2$  m<sup>-2</sup> の状況では、歩行速度の大きさの平均値、つまり歩行者流の基本図は通路幅員に依存する様子が観察される。

つまり、マクロ歩行者モデルによってマイクロ歩行者モデルから算出される基本図を精度良く再現するためには、実態に即した環境に対して適用されたマイクロ歩行者モデルの計算結果に基づいて、マクロ歩行者モデルを適応的に構築することが望まれる。

以上の観点から、マイクロ歩行者モデルによるシミュレーションを実行しながら、そこから算出される巨視的な情報に基づいて、マクロ歩行者モデルをオンライン的に構築する方法を以下に提案する。

まず、マクロ歩行者モデルの歩行速度  $v_i^{\text{macro}}$  は、歩行者の大局的な密度  $\rho_g$  の値を固定した条件のもと、

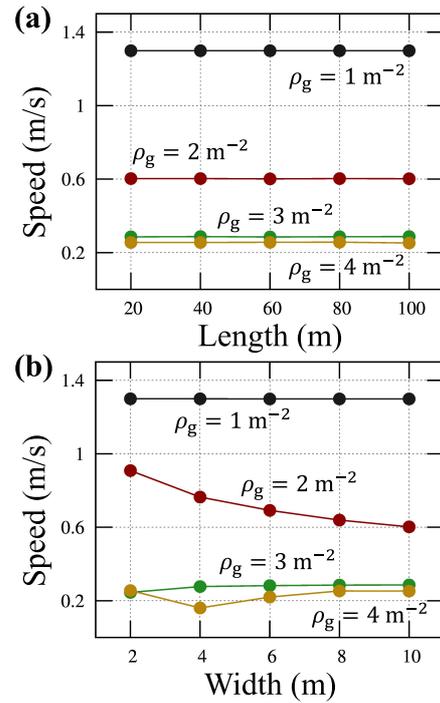


図4 通路形状に対する基本図の依存性  
Fig. 4 Corridor geometry dependence of fundamental diagram.

$$v_i^{\text{macro}}(\rho_i^f | \rho_g) = v_i^0 F(\rho_i^f | \rho_g) \hat{e}^{\text{macro}}, \quad (10)$$

により表現されるとする。ここで、表記  $C(A | B)$  は  $B$  の値を固定した条件のもとでの  $A$  の関数  $C$  を表す。また、関数  $F$  は、マイクロ歩行者モデルによる計算を実行しながら、

$$F(\rho_i^f | \rho_g) = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|v_i^{\text{micro}}|}{v_i^0} \middle| \rho_i^f, \rho_g \right\rangle, \quad (11)$$

として逐次的に評価する。ただし、歩行者密度  $\rho_i^f$  は適切な離散化により表現されるものとする。

オフライン的に構築されるマクロ歩行者モデルと同様に、オンライン的に構築されるマクロ歩行者モデルにより表現されるエージェントは前方密度  $\rho_i^f$  の情報を知覚して自身の行動を決定する。

加えて、本論文では、マイクロ歩行者モデルによって生成される歩行者の集団運動に対する再現性を高めることを目的に、マクロ歩行者モデルのエージェントによって知覚される情報を前方密度  $\rho_i^f$  のみとするのではなく、その行動の判断基準となる情報の種類を増やした、マクロ歩行者モデルの拡張を提案する。

具体的には、2つの拡張モデルを提案する。1つは、前方密度  $\rho_i^f$  に加えて、後方密度  $\rho_i^b$  の情報も考慮して歩行者は行動するとするものである。 $\rho_i^b$  は歩行者  $i$  の後方  $d^{\text{macro}}$  まで離れた領域における局所的な歩行者密度である。すなわち、マクロ歩行者モデルの歩行速度  $v_i^{\text{macro}}$  は、歩行者の大局的な密度  $\rho_g$  の値を固定した条件のもと、

$$v_i^{\text{macro}}(\rho_i^b, \rho_i^f | \rho_g) = v_i^0 F(\rho_i^b, \rho_i^f | \rho_g) \hat{e}^{\text{macro}}, \quad (12)$$

により表現されるとした。また、関数  $F$  は、

$$F(\rho_i^b, \rho_i^f | \rho_g) = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|v_i^{\text{micro}}|}{v_i^0} \middle| \rho_i^b, \rho_i^f, \rho_g \right\rangle, \quad (13)$$

により評価される。ただし、 $\rho_i^b, \rho_i^f$  は適切な離散化により表現されるものとする。

もう1つは、近傍領域における密度  $\rho_i^b, \rho_i^f$  に加えて、さらにその外側の領域における密度  $\rho_i^{\text{bb}}, \rho_i^{\text{ff}}$  の情報も考慮して歩行者は行動するとするものである。 $\rho_i^{\text{bb}}(\rho_i^{\text{ff}})$  は歩行者  $i$  の後方（前方） $d^{\text{macro}}$  から  $2d^{\text{macro}}$  まで離れた領域における局所的な歩行者密度を表す。すなわち、マクロ歩行者モデルの歩行速度  $v_i^{\text{macro}}$  は、歩行者の大局的な密度  $\rho_g$  の値を固定した条件のもと、

$$v_i^{\text{macro}}(\rho_i^{\text{bb}}, \rho_i^b, \rho_i^f, \rho_i^{\text{ff}} | \rho_g) = v_i^0 F(\rho_i^{\text{bb}}, \rho_i^b, \rho_i^f, \rho_i^{\text{ff}} | \rho_g) \hat{e}^{\text{macro}}, \quad (14)$$

により表現されるとした。また、関数  $F$  は、

$$F(\rho_i^{\text{bb}}, \rho_i^b, \rho_i^f, \rho_i^{\text{ff}} | \rho_g) = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|v_i^{\text{micro}}|}{v_i^0} \middle| \rho_i^{\text{bb}}, \rho_i^b, \rho_i^f, \rho_i^{\text{ff}}, \rho_g \right\rangle, \quad (15)$$

により評価される。ただし、 $\rho_i^{\text{bb}}, \rho_i^b, \rho_i^f, \rho_i^{\text{ff}}$  は適切な離散化により表現されるものとする。また、当該モデルでは、 $d^{\text{macro}} = 2.5 \text{ m}$  とする。

以上、本論文で提案するマクロ歩行者モデルは、オフライン的、オンライン的な構築方法にかかわらず、ミクロ歩行者モデルによるシミュレーションを事前に実行していなければ利用できないものである。計算負荷の観点からは、マクロ歩行者モデルのみで閉じないことはデメリットである。前方の歩行者密度に基づいて移動速度を決定し、歩行者が1次元的に移動するモデルとして、たとえば Yamashita らの Expected Density Model [8] などがある。しかしながら、マクロ歩行者モデルと比較して、ミクロ歩行者モデルは歩行者の精緻な行動の表現が可能という意味において計算精度が高いとすると、ミクロ歩行者モデルによる計算結果を利用することによって、ミクロ歩行者モデルにより算出される巨視的特性（基本図）を精度良く再現可能な、また歩行者が2次元的に移動するミクロ歩行者モデルと連続的に連結可能なマクロ歩行者モデルを構築できるのであれば、これはデメリットを超えるメリットであると考えられる。

## 5. モデル連結インタフェース

ミクロ歩行者モデルとマクロ歩行者モデルを適用する領域が接続している場合に、その接続部を通過する歩行者の行動をどのように取り扱うかについて説明する。

まずは、マクロ歩行者モデルによって記述される領域からミクロ歩行者モデルによって記述される領域に移行する

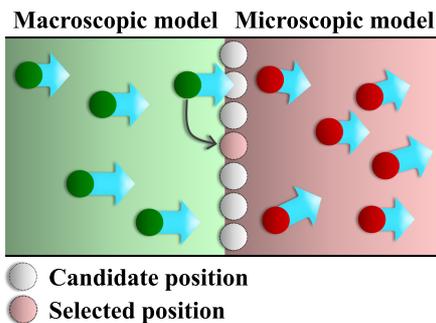


図5 連結インタフェース

Fig. 5 Interlocked interface.

歩行者について注目する。マクロ歩行者モデルでは、周囲の障害物との物理的接触力は直接的には存在しないため、接続部を通過してミクロ歩行者モデルになった途端に、場合によっては、接触している歩行者に大きく弾かれるような事態が起こりうる。本研究では、エージェントが接続部を通過する瞬間に、最近傍の障害物との距離が最大となるような接続部上の位置に、エージェントを再配置させる対処策をとる（図5）。なお、2人以上の歩行者が同時にマクロ歩行者モデルからミクロ歩行者モデルに切り替わる場合には、逐次的な処理により、最近傍の障害物との距離が最大となるように1人ずつ再配置させる。

一方、ミクロ歩行者モデルによって記述される領域からマクロ歩行者モデルによって記述される領域に移行する歩行者については、接続部での特段の処置は必要ないとした。

## 6. ミクロ・マクロ連結モデルによる時間平均場に関するシミュレーション結果

ミクロ歩行者モデルとマクロ歩行者モデルを空間的に連結する群集流動シミュレーションモデルの有用性を明らかにするために、いくつかの仮想的な条件下における歩行者流の時間平均場に関する比較検討を行った。

また、本節の計算結果は、周期境界条件を課した直線通路の単方向流というシミュレーションシナリオのもとにオフライン的に構築された、3章のマクロ歩行者モデルを適用することで得られたものである。なお、同シナリオに対して、オンライン的に構築されたマクロ歩行者モデルを適用しても同様の計算結果となることを付記する。

### 6.1 開口部を有する直線通路

直線通路に開口部が存在する状況下での単方向流を対象として、時間平均場の空間分布を調べた（図6）。通路幅員は5m、延長は60mである。開口幅は3mである。また、進行方向の境界は周期境界条件とした。歩行者総数は、 $N = 300$  である。

時間平均する場としては、歩行者の密度場  $\rho(\mathbf{r}, t)$  および速度場  $v(\mathbf{r}, t)$  とする。ここで、 $\mathbf{r}$  は位置座標を表す。密度場  $\rho(\mathbf{r}, t)$  および速度場  $v(\mathbf{r}, t)$  は、既往論文 [9] を参考に、

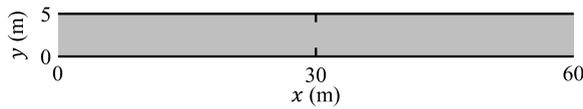


図 6 開口部を有する直線通路  
Fig. 6 Corridor with a bottleneck.

$$\rho(\mathbf{r}, t) = \sum_i W(d_{ir}), \quad (16)$$

$$v(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\rho(\mathbf{r}, t)} \sum_i |v_i| W(d_{ir}), \quad (17)$$

$$W(d_{ir}) = \frac{1}{\pi D^2} \exp\left(-\frac{d_{ir}^2}{D^2}\right), \quad (18)$$

により算出した。ここで、 $d_{ir} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}|$ 、 $D = 0.7\text{m}$ である。また、時間積分は  $t = 3,000$  秒まで実施し、時間平均場を算出した。

マクロ歩行者モデル、ミクロ歩行者モデルおよび連結モデルによって算出された密度場  $\rho(\mathbf{r}, t)$  と速度場  $v(\mathbf{r}, t)$  の時間平均場をそれぞれ図 7、図 8 に示す。連結モデルでは、 $15\text{m} \leq x \leq 45\text{m}$  の領域についてはミクロ歩行者モデルが、それ以外の領域ではマクロ歩行者モデルが適用された。

ミクロ歩行者モデルの結果を観察すると、開口部の手前で歩行者の滞留が発生していることが確認できる。逆に、マクロ歩行者モデルでは、エージェントは前方の歩行者密度のみを知覚して行動することから、無限小の厚さの壁で構成される開口部の存在が分からずに、その結果、滞留現象は再現されない。他方、連結モデルはミクロ歩行者モデルの時間平均場を精度良く再現できていることが確認できる。

通路全体における歩行速度の大きさの平均値は、ミクロ歩行者モデルでは  $1.111\text{m/s}$ 、連結モデルでは  $1.112\text{m/s}$ 、マクロ歩行者モデルでは  $1.149\text{m/s}$  である。歩行速度の大きさは、マクロ歩行者モデルで過大に評価される結果となる。このことは、マクロ歩行者モデルにより記述されるエージェントは、通路中心線寄りに集まる歩行者の  $y$  方向の局在性を認知できずに、一様な分布であるとするために、前方の歩行者密度が過少に評価されてしまうことが原因であると推察される。

計算所要時間について述べると、連結モデルはミクロ歩行者モデルの約 2 倍高速となる。連結モデルにおいてミクロ歩行者モデルとマクロ歩行者モデルに割り当てられた領域面積は等しいことから、この結果は妥当である。

## 6.2 幅員が複数ある直線通路

続いて、幅員が場所で変化する直線通路での単方向流を対象として、時間平均場の空間分布を調べた (図 9)。通路幅員は  $5\text{m}$  と  $15\text{m}$ 、延長は  $90\text{m}$  である。また、進行方向の境界は周期境界条件とした。歩行者総数は、 $N = 450$  で

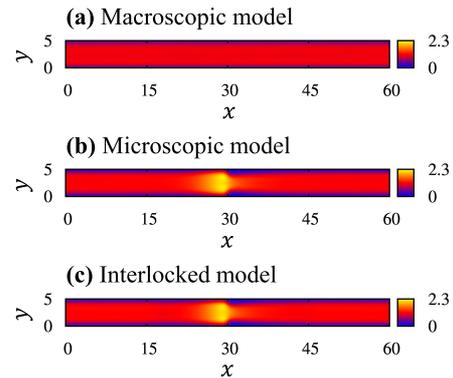


図 7 開口部を有する直線通路における密度分布  
Fig. 7 Density distribution in corridor with a bottleneck.

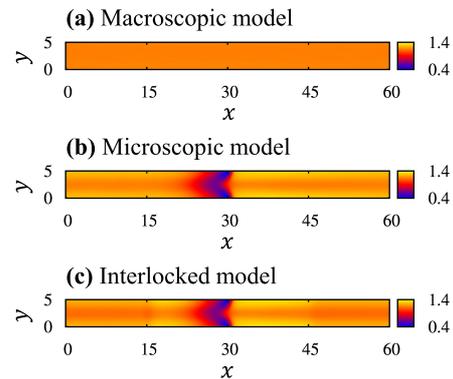


図 8 開口部を有する直線通路における速度分布  
Fig. 8 Velocity distribution in corridor with a bottleneck.

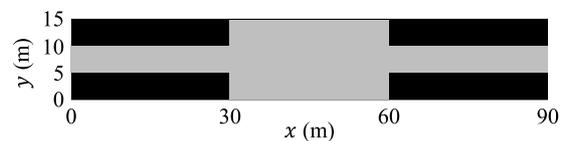


図 9 幅員が複数ある直線通路  
Fig. 9 Corridor with different widths.

ある。

マクロ歩行者モデル、ミクロ歩行者モデルおよび連結モデルによって算出された密度場  $\rho(\mathbf{r}, t)$  と速度場  $v(\mathbf{r}, t)$  の時間平均場をそれぞれ図 10、図 11 に示す。時間平均場の算出方法は前節と同様である。連結モデルでは、 $20\text{m} \leq x \leq 70\text{m}$  の領域についてはミクロ歩行者モデルが、それ以外の領域ではマクロ歩行者モデルが適用された。

ミクロ歩行者モデルの結果を観察すると、通路幅員の増減に応じて、歩行者流の横幅が膨張・収縮の様子が確認できる。逆に、マクロ歩行者モデルでは、当然のことではあるが、このような歩行者流の横幅の変化を表現することはできない。他方、連結モデルはミクロ歩行者モデルで観察される時間平均場を定性的にも定量的にも良好に表現できることが確かめられる。

通路全体における歩行速度の大きさの平均値は、ミクロ歩行者モデルでは  $1.197\text{m/s}$ 、連結モデルでは  $1.197\text{m/s}$ 、

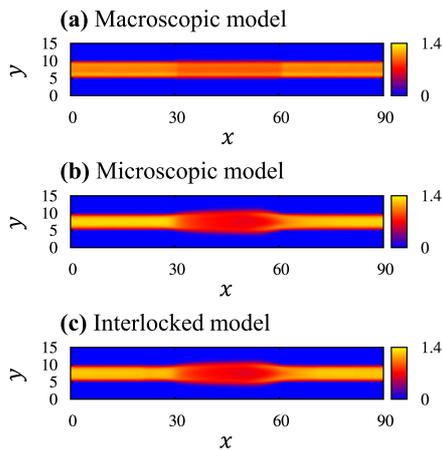


図 10 幅員が複数ある直線通路における密度分布

Fig. 10 Density distribution in corridor with different widths.

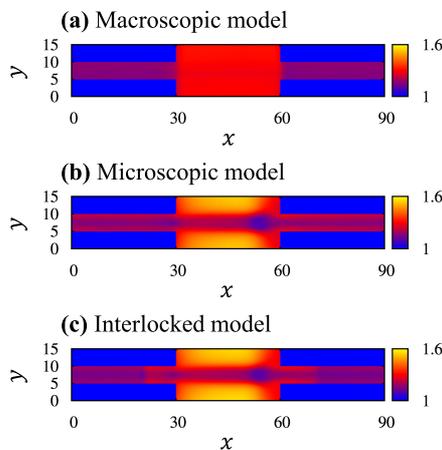


図 11 幅員が複数ある直線通路における速度分布

Fig. 11 Velocity distribution in corridor with different widths.

マクロ歩行者モデルでは 1.199 m/s である。6.1 節のケースと同様に、歩行速度の大きさは、マクロ歩行者モデルで過大に評価されることになる。

計算所要時間について述べると、連結モデルはマイクロ歩行者モデルの約 2 倍高速である。

## 7. ミクロ・マクロ連結モデルによる時間変動場に関するシミュレーション結果

マイクロ歩行者モデルとマクロ歩行者モデルを時間方向に連結する群集流動シミュレーションモデルの有用性を明らかにするために、いくつかの仮想的な条件下における歩行者流の時間変動場に関する比較検討を行った。

本論文で提案するマクロ歩行者モデルにおける評価対象要素の観点から述べれば、4 章で説明したマクロ歩行者モデルのオンライン構築とエージェントの知覚情報の種類を増やした拡張モデルの有効性評価となる。

### 7.1 マクロ歩行者モデルのオンライン構築の有効性

本節では、周期境界条件を課した直線通路の単方向流と

いうシミュレーションシナリオのもとにオフライン的に構築された、3 章のマクロ歩行者モデルを、相異なるシミュレーションシナリオに適用し、その適用性を検討するとともに、オンライン的にマクロ歩行者モデルを構築することの有効性を明らかにする。また、マクロ歩行者モデルのオンライン構築には式 (10) を利用することとする。

シミュレーションシナリオとしては、ウォーキング大会を模した状況を設定し、幅員 5m、延長 700m の直線通路の単方向流を対象とする。進行方向の境界は開放境界条件とする。座標系については、通路に沿った方向に  $x$  軸、通路を横切る方向に  $y$  軸をとる。歩行者の初期位置は、 $0\text{m} \leq x \leq 100\text{m}$  の領域でランダムに決定した。歩行者の総数は、 $N = 1,000$  である。さらに、歩行者属性は均質であるとし、自由歩行速度の大きさは、 $v_i^0 = 1.3\text{m/s}$ 、歩行者の質量は、 $m_i = 60\text{kg}$  とした。その他パラメータ値は 2 章で記述するとおりである。また、時間積分は  $t = 400$  秒まで実施することとし、シミュレーション領域からの歩行者の流入・流出は発生しない。

3 章のシミュレーションシナリオとの本質的な差異は、進行方向の境界条件の種類と歩行者属性の均質性の有無である。

マイクロ歩行者モデルおよび連結モデルによって得られた、 $y$  方向に平均化した速度場  $\bar{v}(x, t)$  についての計算結果を図 12 に示す。連結モデルでは、時間方向にマイクロ歩行者モデルとオフラインまたはオンライン的に構築されたマクロ歩行者モデルを接続するものとし、計算開始後  $t = 200$  秒まではマイクロ歩行者モデルが、それ以降はマクロ歩行者モデルが適用される。

マイクロ歩行者モデルの結果を観察すると、歩行者の移動開始とともに、まずは膨張波が後方に伝播していく。その後は、歩行者属性値の均質性により、大局的には単調な歩行者流が形成されることになるが、間欠的に発生する群集疎密波の存在も確認できる (図 12(b))。

また、オフライン的に構築されたマクロ歩行者モデルによる連結モデルでは、マイクロ歩行者モデルにより表現される歩行者の流動特性をまったく再現できないことが確認できる (図 12(a))。一方、オンライン的に構築されたマクロ歩行者モデルによる連結モデルでは、マイクロ歩行者モデルによる歩行者の振舞いを大局的に再現できることが確認できる (図 12(c))。しかしながら、 $t = 200$  秒以降に見られる歩行者の波状的な遅滞現象については再現できていないことに注意されたい。

計算開始後  $t = 400$  秒までの歩行速度の大きさの平均値は、マイクロ歩行者モデルでは 1.266 m/s、オンライン的に構築されたマクロ歩行者モデルによる連結モデルでは 1.265 m/s、オフライン的に構築されたマクロ歩行者モデルによる連結モデルでは 1.158 m/s である。また、 $x = 400\text{m}$  のラインに到着した先頭の歩行者のタイムは、歩行者モデ

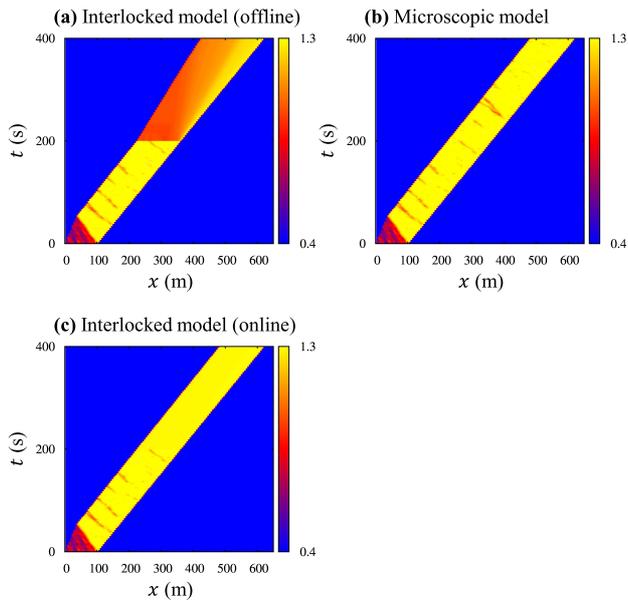


図 12 ウォーキング大会における一様な歩行者により算出された速度場の時間発展

Fig. 12 Homogeneous crowd flow in a walking event.

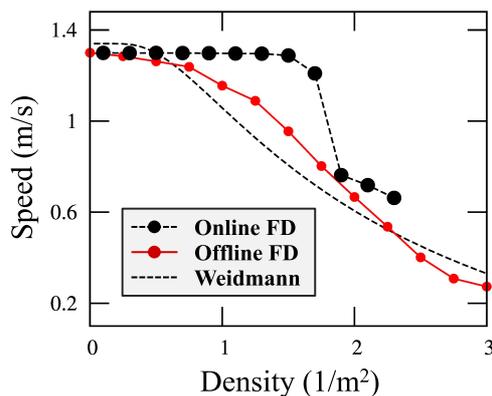


図 13 ウォーキング大会における歩行者の基本図

Fig. 13 Fundamental diagram in a walking event.

ルの違いによらずに  $t = 226$  秒であるが、最後尾の歩行者の到着タイムは、マイクロ歩行者モデルでは  $t = 340$  秒、オンライン的に構築されたマクロ歩行者モデルによる連結モデルでも  $t = 340$  秒、しかしオフライン的に構築されたマクロ歩行者モデルによる連結モデルでは  $t = 381$  秒となる。

オンライン的に構築されたマクロ歩行者モデルの歩行速度の大きさ  $v_i^{\text{macro}}(\rho_i^f | \rho_g)$  の  $\rho_i^f$  依存性を図 13 に示す。また、オフライン的に構築されたマクロ歩行者モデルの対応する情報として、図 1 で表される基本図  $V^{\text{micro}}(\rho_g)$  の計算結果もあわせて示してある。シミュレーションシナリオの違いが、群集流の歩行特性に多大な影響を与えうることが理解される。

以上により、時間方向に関するマイクロ・マクロ連結モデル、すなわち、多種多様な環境下に対して歩行者流の基本特性を適応的に評価することで、実態に合ったマクロ歩行者モデルを構築するアプローチの有効性が示唆された。

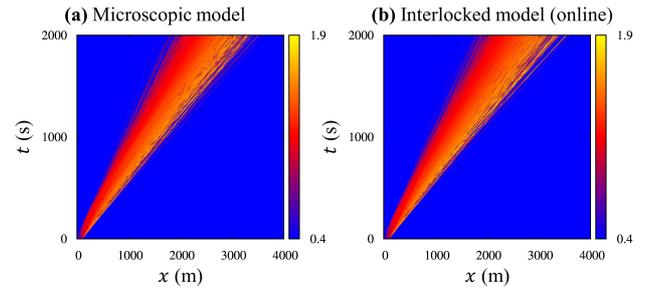


図 14 ウォーキング大会における多様な歩行者により算出された速度場の時間発展

Fig. 14 Heterogeneous crowd flow in a walking event.

なお、当該アプローチは、均質な歩行者集団のみを対象としたものではないことに注意されたい。歩行者のモデルパラメータを 2 章で記述されるとおりに不均質な属性値に変更した場合に、マイクロ歩行者モデルおよび連結モデルによって算出された、 $y$  方向に平均化した速度場  $\bar{v}(x, t)$  についての計算結果を図 14 に示す。ただし、時間積分は  $t = 2,000$  秒まで実施した。また、これに対応して、通路の延長は  $5,000$  m とした。

連結モデルでは、計算開始後  $t = 200$  秒まではマイクロ歩行者モデルが、それ以降はオンライン的に構築されたマクロ歩行者モデルが適用される。

マイクロ歩行者モデルの計算結果を観察すると、歩行者属性の不均質性に起因して、時間の経過とともに、歩行者集団の領域は前後方向に拡散、分裂していき、微細な構造が徐々に形成されていく様子が確認される。

また、連結モデルはマイクロ歩行者モデルによる歩行者集団の振舞いを良好に再現できることが確認される。なお、連結モデルはマイクロ歩行者モデルの約 10 倍高速である。

## 7.2 拡張マクロ歩行者モデルの有効性

本論文で提案するマクロ歩行者モデルは、マイクロ歩行者モデルによる歩行者流の基本特性を統計的に評価することで構築されるものである。

本節では、このようなアプローチのもと構築されるマクロ歩行者モデルの動力学特性とその問題点を明らかにし、拡張マクロ歩行者モデルの有効性を検討する。

マクロ歩行者モデルの動力学特性を評価する対象としては、直線通路の単方向流において発生する群集疎密波（ストップ・アンド・ゴー・ウェーブ）とする。直線通路は幅員 5 m、延長 100 m とし、進行方向の境界は周期境界条件とする。座標系については、通路に沿った方向に  $x$  軸、通路を横切る方向に  $y$  軸をとる。

歩行者総数は、 $N = 800$  とした。また、歩行者属性は均質とし、自由歩行速度の大きさは、 $v_i^0 = 1.3$  m/s、歩行者の質量は、 $m_i = 60$  kg とした。その他パラメータ値は 2 章で記述するとおりである。

マイクロ歩行者モデルおよび連結モデルによって算出され

た、 $y$  方向に平均化した速度場  $\bar{v}(x, t)$  についての計算結果を図 15 に示す。時間積分は  $t = 600$  秒まで実施した。連結モデルでは、計算開始後  $t = 300$  秒まではマイクロ歩行者モデルが、それ以降は前方密度  $\rho_i^f$  の情報のみを考慮して行動するオンライン的に構築されたマクロ歩行者モデル、式 (10) が適用される。

マイクロ歩行者モデルでは、群集疎密波が後方に伝播していく様子が確認される。一方、連結モデルでは、マクロ歩行者モデルに接続される  $t = 300$  秒を境に、群集疎密波は急激に減衰し、一様な歩行者流が維持される結果となる。確かに、マクロ歩行者モデルは基本図を代表とする歩行者流の統計的な平均量を精度良く再現できるが、その動力学特性の再現までは期待できないということである。

オンライン的に構築されたマクロ歩行者モデルの歩行速度の大きさ  $v_i^{\text{macro}}(\rho_i^f | \rho_g)$  の  $\rho_i^f$  依存性を図 16 に示す。また、当該シミュレーションシナリオに対して、オフライン的に算出された基本図  $V^{\text{micro}}(\rho_g)$  の計算結果もあわせて示す。両者の間には定量的な差異が認められる。しかしながら、オフライン的に構築されたマクロ歩行者モデルについても、動力学特性の再現能力は、オンライン的に構築されたマクロ歩行者モデルと同様の結論となる。

本論文では、時間変動場に関するマクロ歩行者モデルの適応性の改善という目的に対して、エージェントの知覚情報の種類を増やした、式 (12) および式 (14) により提案される拡張マクロ歩行者モデルの有効性を検討していくこととする。

拡張マクロ歩行者モデルによって算出された、 $y$  方向に平均化した速度場  $\bar{v}(x, t)$  についての計算結果を図 17 に示す。時間積分は  $t = 600$  秒まで実施した。計算開始後  $t = 300$  秒まではマイクロ歩行者モデルが、それ以降はオンライン的に構築された拡張マクロ歩行者モデルが適用される。

図 15(b) で示される  $v_i^{\text{macro}}(\rho_i^f | \rho_g)$  の結果と比較すると、マクロ歩行者モデルの拡張により時間変動場に関する適応性が大きく改善されることが確認される。拡張モデルどうしの比較については、今後の検証を必要とするが、歩行者エージェントに認知される情報の種類の数が増える現象の再現能力に有意な影響を及ぼすことは観察できる。

最後に、構築された2つの拡張マクロ歩行者モデルにおける歩行速度の大きさの密度依存性について考察する。まずは、 $v_i^{\text{macro}}(\rho_i^b, \rho_i^f | \rho_g)$  の  $\rho_i^b, \rho_i^f$  依存性を図 18 に示す。 $\rho_i^b$  は  $1.1 \text{ m}^{-2}$  から  $2.1 \text{ m}^{-2}$  まで  $0.2 \text{ m}^{-2}$  刻みで変化させた。また、黒線は  $v_i^{\text{macro}}(\rho_i^f | \rho_g)$  の結果を表す。歩行速度の大きさ  $v_i^{\text{macro}}(\rho_i^b, \rho_i^f | \rho_g)$  は  $\rho_i^b, \rho_i^f$  に対する単調減少関数であることが観察できる。続いて、4種類の知覚情報を持つ拡張モデルにおける  $v_i^{\text{macro}}(\rho_i^{\text{bb}}, \rho_i^b, \rho_i^f, \rho_i^{\text{ff}} | \rho_g)$  の  $\rho_i^{\text{bb}}, \rho_i^b, \rho_i^f, \rho_i^{\text{ff}}$  依存性を図 19 に示す。4変数関数の概観表示として、 $\rho_i^{\text{ff}}, \rho_i^{\text{bb}}$  空間に  $\rho_i^f, \rho_i^b$  空間のヒートマップを埋め込んだ形

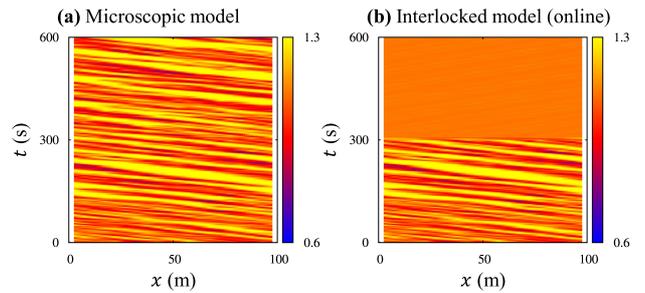


図 15 群集疎密波の時間発展  
Fig. 15 Stop-and-go waves.

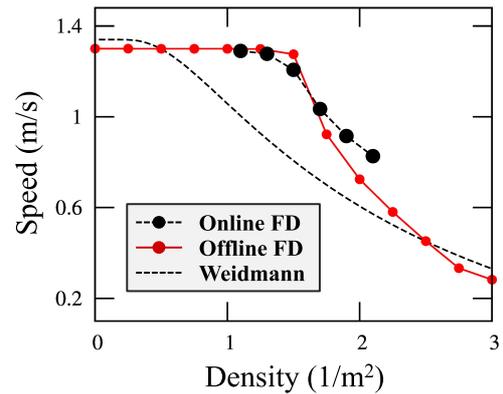


図 16 マクロ歩行者モデルの基本図  
Fig. 16 Fundamental diagram of macroscopic models.

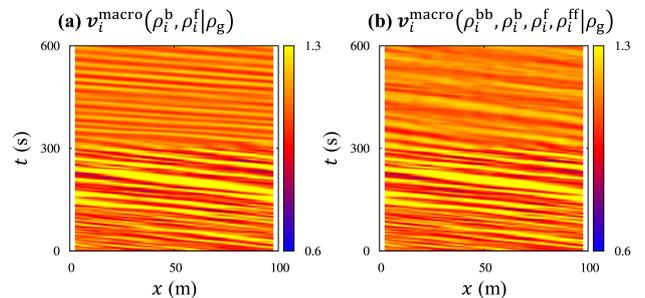


図 17 拡張マクロ歩行者モデルによる群集疎密波  
Fig. 17 Stop-and-go waves of extended macroscopic models.

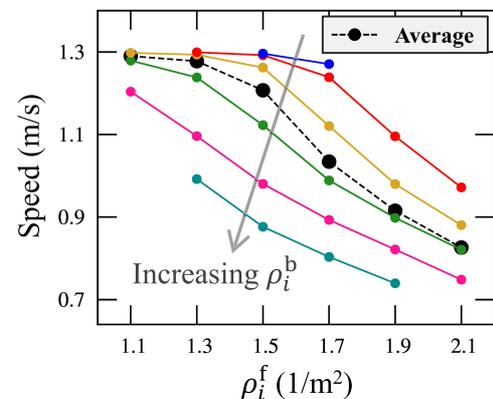


図 18 拡張マクロ歩行者モデル  $v_i^{\text{macro}}(\rho_i^b, \rho_i^f | \rho_g)$  の基本図  
Fig. 18 Fundamental diagram of extended macroscopic model  $v_i^{\text{macro}}(\rho_i^b, \rho_i^f | \rho_g)$ .

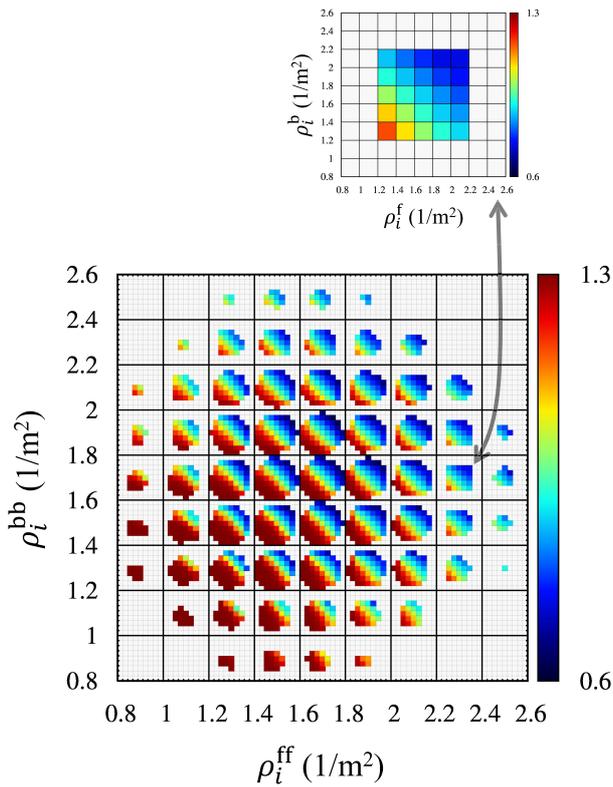


図 19 拡張マクロ歩行者モデル  $\mathbf{v}_i^{\text{macro}}(\rho_i^{\text{bb}}, \rho_i^{\text{b}}, \rho_i^{\text{f}}, \rho_i^{\text{ff}} | \rho_g)$  の基本図

Fig. 19 Fundamental diagram of extended macroscopic model  $\mathbf{v}_i^{\text{macro}}(\rho_i^{\text{bb}}, \rho_i^{\text{b}}, \rho_i^{\text{f}}, \rho_i^{\text{ff}} | \rho_g)$ .

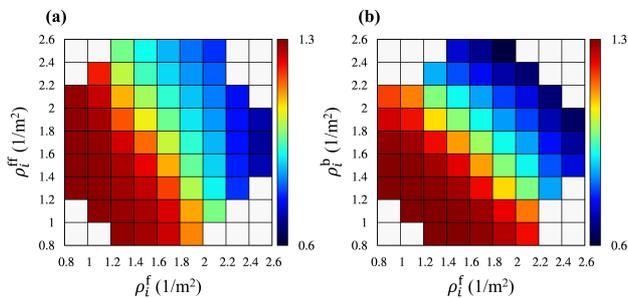


図 20 拡張マクロ歩行者モデル  $\mathbf{v}_i^{\text{macro}}(\rho_i^{\text{bb}}, \rho_i^{\text{b}}, \rho_i^{\text{f}}, \rho_i^{\text{ff}} | \rho_g)$  の基本図の縮約表現

Fig. 20 Aggregated representation of fundamental diagram of extended macroscopic model  $\mathbf{v}_i^{\text{macro}}(\rho_i^{\text{bb}}, \rho_i^{\text{b}}, \rho_i^{\text{f}}, \rho_i^{\text{ff}} | \rho_g)$ .

での視覚表現を用いている。なお、埋め込まれたヒートマップの一例として、 $2.2(1.6) \text{ m}^{-2} \leq \rho_i^{\text{ff}}(\rho_i^{\text{bb}}) < 2.4(1.8) \text{ m}^{-2}$  の条件に対応する拡大図を图中右上に表示している。加えて、図 20 には、 $\mathbf{v}_i^{\text{macro}}(\rho_i^{\text{bb}}, \rho_i^{\text{b}}, \rho_i^{\text{f}}, \rho_i^{\text{ff}} | \rho_g)$  を 2次元空間に縮約して得られた平均値のヒートマップを示している。 $\rho_i^{\text{f}}, \rho_i^{\text{ff}}$  空間で表現された図 20 (a) の結果を観察すると、歩行速度の大きさは直前の密度  $\rho_i^{\text{f}}$  だけではなくさらに前方の密度  $\rho_i^{\text{ff}}$  にも依存していることが確認できる。同様に、 $\rho_i^{\text{f}}, \rho_i^{\text{b}}$  空間で表現された図 20 (b) の結果からは、歩行速度の大きさは前方密度  $\rho_i^{\text{f}}$  だけではなく後方密度  $\rho_i^{\text{b}}$  にも依存

し、対角線方向に沿った特徴的な分布構造を形成していることが観察できる。これらの結果は、拡張マクロ歩行者モデルのさらなる改善に向けた説明変数の選択の在り方について示唆を与えるものであるが、その具現化については今後の検討課題としたい。

## 8. おわりに

本論文では、ミクロ歩行者モデルから算出される巨視的な情報に基づいてマクロ歩行者モデルを構築するアプローチのもと、ミクロ歩行者モデルとマクロ歩行者モデルを有機的に連結するシミュレーションモデルを提案し、その有用性を明らかにした。

提案モデルの適用限界についての考察を述べると、本論文では、対象とする系に含まれる歩行者総数を一定とした条件のもと、提案モデルの有効性を示したものであることに注意されたい。開放境界条件を課した 7.1 節の実験シナリオは、対象とする系のとらえ方によっては、歩行者の流入・流出が存在する状況とも考えられるが、歩行者総数が時間的に変動する場合における提案モデルの有効性についてはさらなる検討が必要である。また、双方向の歩行者流への適用可能性に関しては、歩行者密度を順方向と逆方向の 2 種類に分離し、それらの関数として基本図を構築してあげれば、双方向の歩行者流へのマクロ歩行者モデルの拡張は容易であろうと推察する。

今後は、ミクロ・マクロ連結シミュレーションモデルの高精度化・高効率化をさらに進めるとともに、複雑な実在都市空間に対して、連結階層シミュレーションをどのように活用していくかを具体的に検討していきたい。

謝辞 本研究は、文部科学省ポスト「京」萌芽的課題 2 「複数の社会経済現象の相互作用のモデル構築とその応用研究 (多層マルチ時空間スケール社会・経済シミュレーション技術の研究・開発)」の元で実施したものです。

## 参考文献

- [1] Xiong, M., Lees, M., Cai, W., Zhou, S. and Low, M.Y.H.: Hybrid modelling of crowd simulation, *Procedia Computer Science*, Vol.1, No.1, pp.57–65 (2010).
- [2] Nguyen, T.N.A., Zucker, J.D., Nguyen, H.D., Drogoul, A. and Vo, D.A.: A hybrid macro-micro pedestrian evacuation model to speed up simulation in road networks, *Advanced Agent Technology*, pp.371–383 (2012).
- [3] Lämmel, G., Seyfried, A. and Steffan, B.: Large-scale and microscopic: A fast simulation approach for urban areas, *Annual Meeting Preprint 14-3890*, Transportation Research Board, Washington, DC (2014).
- [4] 西川憲明, 廣川雄一, 山田武志, 印南潤二, 浅野俊幸: 意思決定プロセスモデルによる群集流動シミュレーション, *人工知能学会論文誌*, Vol.32, No.5, AG16-H, pp.1–11 (2017).
- [5] Weidmann, U.: *Transporttechnik der Fussgänger*, Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zürich (1993).
- [6] Zhang, J. and Seyfried, A.: Experimental studies of pedes-

trian flows under different boundary conditions, *ITSC IEEE Conference*, pp.542–547 (2014).

- [7] Tordeux, A., Chraïbi, M., Seyfried, A. and Schadschneider, A.: Prediction of Pedestrian Speed with Artificial Neural Networks, eprint arXiv:1801.09782 (2018).
- [8] Yamashita, T., Okada, T. and Noda, I.: Implementation of Simulation Environment for Exhaustive Analysis of Huge-Scale Pedestrian Flow, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol.6, No.2, pp.137–146 (2013).
- [9] Johansson, A.F.: Data-driven modeling of pedestrian crowds, PhD thesis, Technische Universität Dresden (2008).



西川 憲明

2005年広島大学大学院先端物質科学研究科量子物質科学専攻博士課程後期修了。博士（理学）。現在、国立研究開発法人海洋研究開発機構地球情報基盤センター研究員。



廣川 雄一（正会員）

2005年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。博士（情報科学）。現在、国立研究開発法人海洋研究開発機構地球情報基盤センター研究員。



浅野 俊幸（正会員）

2008年横浜国立大学大学院環境情報学府リスクマネジメント専攻修了。博士（工学）。2007年独立行政法人防災科学技術研究所主幹研究員，現在、国立研究開発法人海洋研究開発機構技術主幹。