

# フロアフィールドモデルを用いた雑踏状態における 歩行者対向流の定量的解析

中井颯良, 磯部雅晴

名古屋工業大学 大学院工学研究科

## 概要

フロアフィールドモデルを用いた歩行者対向流において、雑踏状態でのレーン形成過程やグリッドロック (ジャミング状態) の発生条件を定量的・系統的に解析した先駆的モデル (S. Nowak and A. Schadschneider, *Phys. Rev. E*, **85**, 066128 (2012).) を基礎として、正方格子 (4方向移動) から移動方向の自由度がより高い三角格子 (6方向移動) モデルへと拡張し、両者の相図を比較した。さらに、これらのモデルを T 字路における歩行者交差流に適用し、二つの静的フロアフィールドを用い、雑踏状態に至るまでの過程の違いを考察した。

## Quantitative analysis of pedestrian counter-flow under congested conditions using floor field model

Sora Nakai and Masaharu Isobe

Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

## Abstract

Building upon the pioneering model by S. Nowak and A. Schadschneider (*Phys. Rev. E*, **85**, 066128 (2012)), which quantitatively and systematically analyzed lane formation processes and gridlock (jamming) conditions in pedestrian counter-flows using the floor field model, we extended the framework from a square lattice (4-directional movement) to a triangular lattice (6-directional movement) with greater directional freedom, and compared the phase diagrams of both systems. Furthermore, these models were applied to pedestrian crossing flows at T-junctions, using two static floor fields to examine differences in the progression toward congestion.

## 1 はじめに

統計物理学的観点から様々な場面で起こる渋滞を再現および解消しようとする学問として渋滞学が提唱されている [1]。雑踏高密度状態における大規模な群衆の動きは、現実の実験での再現や検証が困難であるため、適切なモデル化を行ったシミュレーションによる研究は有益である。渋滞学では人間の群集行動を表すためセルオートマトンを基にしたモンテカルロ法の一つとしてフロアフィールド (Floor Field:

以下 FF) モデルが提案されており、群衆の避難などのモデル系として研究が行われている [2, 3]。FF モデルの中には前方歩行者への追従効果や人間の視野角・向きなどの特性を考慮したモデルも提案されている。その中でも、雑踏状態における 2 方向流れのレーン形成や人流凍結は基本となるモデル系であり、FF モデルにおいてもレーン形成シミュレーションが行われてきた [4]。本研究では、2 方向流れのシミュレーションに対し、正方格子を用いた先駆的 FF モデル [5] を基礎に、動きの方向の自由度が大きい三

角格子を導入した FF モデルと比較し、モデル間の相図の違いを比較検討した。また、対向流を T 字路へ拡張し、2つの静的フロアフィールドを考え、雑踏状態に至るまでの過程の違いを調べた。

## 2 モデルと系の設定

### 2.1 シミュレーションモデル

本研究では、図 1 で示されるような正方格子と三角格子を用い、以下の FF モデルによって解析を行った。 $q_{ij} = \exp(k_s S_{ij} + k_d D_{ij} + k_a A_{ij})$ , (1)

$$p_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sum_{i,j} q_{ij}}. \quad (2)$$

移動ルールとして、現在のステップの近傍セル  $(i, j)$  の情報  $(S_{ij}, D_{ij}, A_{ij})$  を基に式 (1) より  $q_{ij}$  を計算し、式 (2) の移動確率  $p_{ij}$  に従い、移動させる。(なお移動方向セル  $(i, j)$  に人が既にある (衝突) の場合  $p_{ij} = 0$  とした。)  $S_{ij}, D_{ij}, A_{ij}$  はそれぞれ、進行方向へのバイアス、動的 FF (同方向の“通過痕”への引き寄せ)、予測 FF (逆方向の歩行者列による反発) の値を表している。また、 $k_s, k_d, k_a$  はそれぞれ  $S_{ij}, D_{ij}, A_{ij}$  の強度を表す。

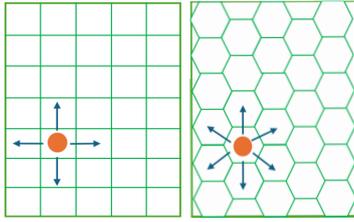


図 1: (左) 正方格子と (右) 三角格子を用いた FF モデル

### 2.2 系の設定

幅  $L = 10$  長さ  $H = 100$  の格子点数  $M = 1000$  の系内の様々な密度  $\rho = N/M$  ( $N$ : 系の人数) において、 $k_s = 2.5$  とし、様々な  $k_d, k_a$  の値を用いて、系の最終状態の違いを調べた。境界条件は、進行方向は周期境界条件と開放境界条件の 2 つを考え、側壁は剛体壁と設定した。開放境界条件では、周期境界条件とは異なり、目標の境界に達した場合、その系から完全に削除される。また、上下の境界からそれぞれ出現確率  $\beta$  で人が出現し、出現した人は、それぞれが出現した境界とは逆の境界に向かう。また、歩行者  $N$  人を初期条件として、系内にランダムに配置した。なお、開放境界条件では、シミュレーション開始後、系内の人数は  $N$  と異なる。

### 2.3 系の状態の判定条件

系の状態は [5] に従い、以下の (I)-(III) の条件を用い、判定した。

#### (I) グリッドロック状態

直近 50 ステップの全流量  $J$  (移動総量の積算) が  $1/2M$  以下の場合。なお、アンサンブル数  $N_s$  中  $N_g$  回グリッドロック状態となった場合、ジャミング確率を  $p_{jam} = N_g/N_s$  ( $0 \leq p_{jam} \leq 1$ ) とする。図 2(I) はグリッドロック状態の典型的な様子である。

#### (II) レーン形成状態

$N_{in}^A, N_{in}^B$  を進行方向に平行な同一セルに存在する対向方向 A、B に移動する各人数とし、式 (3) で定義される  $\Phi$  の直近 1000 ステップの最大値  $\Phi_{max}$  と最小値  $\Phi_{min}$  が以下の式 (4) の条件を満たす場合。図 2(II) はレーン形成状態の様子である。

$$\Phi = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( \frac{N_{in}^A - N_{in}^B}{N_{in}^A + N_{in}^B} \right)^2. \quad (3)$$

$$\frac{\Phi_{max} - \Phi_{min}}{\Phi_{max} + \Phi_{min}} < 0.1. \quad (4)$$

#### (III) 無秩序状態

(I) ならびに (II) の状態に判定されず、ステップ数  $T$  が  $20000\sqrt{\rho}$  を超えた場合。図 2(III) は無秩序状態の様子である。

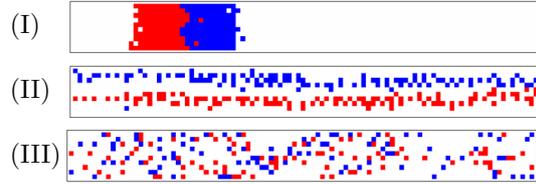


図 2: 歩行者対向流 (左向き: 青、右向き: 赤) の (I) グリッドロック状態, (II) レーン形成状態, (III) 無秩序状態

## 3 結果

### 3.1 周期境界条件における $p_{jam}$ の相図

#### 3.1.1 動的 FF の強度 $k_d$ の依存性

図 3 は密度  $\rho$  (横軸) と動的 FF の強度  $k_d$  (縦軸) によるジャミング確率  $p_{jam}$  の相図である。正方格子と三角格子の FF モデル間の結果に顕著な差は見られず、また、双方のモデルで  $k_d = 0$  において  $\rho = 0.2$  を境にジャミング確率が大きく変化し相転移 (ジャミング転移) が生じた。また、 $k_d$  を増大すると、ジャミング確率は減少し、相転移点が高密度側に緩やかにシフトした。今回シミュレーションを行った  $k_d \leq 7$  では、 $\rho > 0.3$  ではグリッドロック状態が必ず生じることがわかった。

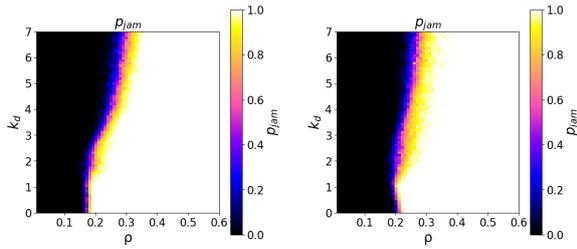


図3: 密度  $\rho$  と動的 FF の強度  $k_d$  による  $p_{jam}$  の相図 (左) 正方形格子, (右) 三角格子 ( $p_{jam} = 0$ : 黒,  $p_{jam} = 1$ : 白)

### 3.1.2 予測 FF の強度 $k_a$ の依存性

図4は密度  $\rho$  (横軸) と予測 FF の強度  $k_a$  (縦軸) によるジャミング確率の相図である。 $k_d$  を変化させたときと同様に、格子間による顕著な差は見られなかった。しかし、 $k_d$  の時と異なり  $k_a > 3$  では、 $\rho > 0.3$  においてもグリッドロック状態はすべて回避されていることがわかった。

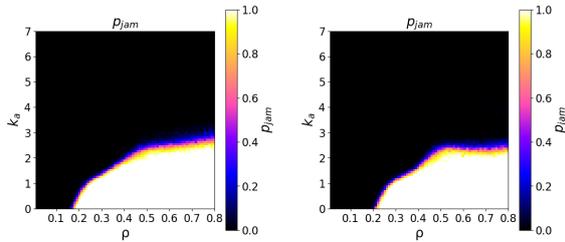


図4: 密度  $\rho$  と予測 FF の強度  $k_a$  による  $p_{jam}$  の相図 (図3と同様)

## 3.2 開放境界条件における相図

次に、系の境界条件を開放境界条件に変更して同様のシミュレーションを行った。なお、人の入退出により密度  $\rho$  は時間的に変化し最大値は1であるため、文献 [5] と同様に無秩序流れの判定条件を、 $T$  が20000を超えた場合に変更した。また、正方形格子モデルと三角格子モデルの双方で、 $k_d$  と  $k_a$  の組み合わせとして  $(k_d, k_a) = (0, 0), (2, 0), (2, 2), (0, 2), (0, 4)$  の5セット用意し、それぞれ、 $N_s = 100$  として、 $p_{jam}$  を計算した。図5は横軸  $\beta$  を変化させた際の縦軸  $p_{jam}$  の変化の様子である。全体的な傾向として  $\beta$  の増大とともに  $p_{jam}$  が1に近づくことがわかる。また、図3, 図4と同様に、予測 FF の強度  $k_a$  の変化が特に  $p_{jam}$  の変化に影響を与えていることが確認できる。 $(k_d, k_a) = (0, 0)$  と  $(2, 0)$  を比較すると、動的 FF の強さ  $k_d$  が若干ではあるがグリッドロックの発生に影響している。周期境界条件 (3.1 節) の結果と異なり、三角格子では正方形格子に比べ、同一の  $\beta$  における  $p_{jam}$  が全体的に減少しており、 $k_a$  の増

大に伴いその傾向が顕著となった。

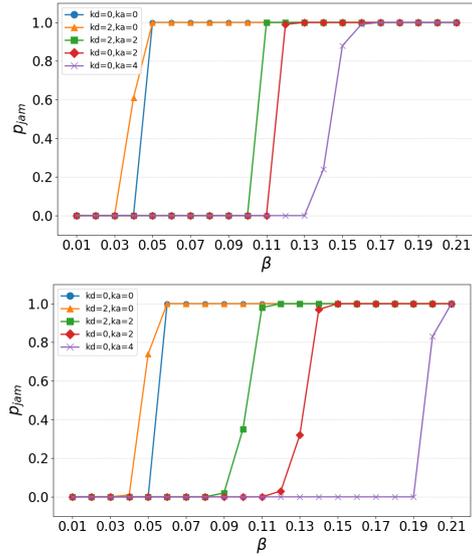


図5: (上) 正方形格子ならびに (下) 三角格子を用いた  $p_{jam}$  の出現確率  $\beta$  依存性 ( $(k_d, k_a) = (0, 0)$  (青),  $(2, 0)$  (橙),  $(2, 2)$  (緑),  $(0, 2)$  (赤),  $(0, 4)$  (紫))

図6は  $(k_d, k_a) = (0, 4), \beta = 0.17$  の正方形格子と三角格子の系の最終状態のスナップショットである。正方形格子では境界付近で出現した人が、グリッドロックしているが、三角格子ではそれが見られない。つまり、三角格子のほうが移動方向の選択肢が多く、境界付近で人との衝突を避けやすいことが原因として考えられる。

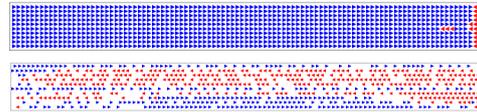


図6:  $(k_d, k_a) = (0, 4), \beta = 0.17$  における系の最終状態. (上) 正方形格子 ( $p_{jam} = 1$ ), (下) 三角格子 ( $p_{jam} = 0$ )

## 3.3 T字路への拡張

最後に開放境界条件のモデルを用い、系の形状を直線からT字路に拡張し、シミュレーションを行った。具体的には、従来の直線通路の中央から垂直に交差する新たな通路を設け、その先端を第3の出入口とした (図7)。歩行者の出現確率としては、図7においてAの境界と接するセルから確率  $\beta$  で歩行者が出現し、そのうちの半分がB、もう半分がCを目指す。また、CとBの境界と接するセルからは確率  $\beta/2$  でAを目指す人が出現する。人はそれぞれ、同じ出口を目指す人ごと動的 FF をもち、自身が進む方向と逆方向に進む歩行者から予測 FF の影響を受ける。また、静的 FF は以下の2つを設定を考え

た。SFF1: 目標とする境界まで最短距離で進むバイアスの設定、SFF2: 出現した位置 C からまずは交差点 D に最短で進み、D からは A、B の境界に向け最短で進むバイアスの設定。図 7 は SFF1 と SFF2 において A に進む人の静的 FF のカラーマップである。SFF1 は、T 字路付近であっても連続的に静的 FF が変化しているのに対し、SFF2 では T 字路に入った瞬間に縦方向の静的 FF のバイアスにスイッチする。

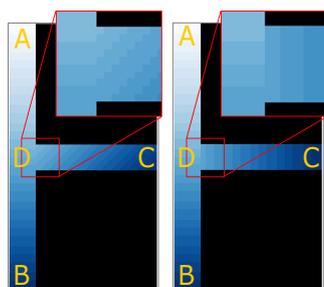


図 7: 静的 FF のバイアスを青の濃淡で示したカラーマップ (左)SFF1 と (右)SFF2

図 8 は 3.2 節で用いた  $(k_d, k_a)$  のセットを用い、SFF1 と SFF2 を適用して、グリッドロック発生確率  $p_{jam}$  を調べた結果である。3.2 節と比較すると低い  $\beta$  でもグリッドロック状態の発生が見られた。また、予測 FF の強度  $k_a$  を増大させても SFF1 と SFF2 でグリッドロック発生確率の大きな違いは見られなかった。

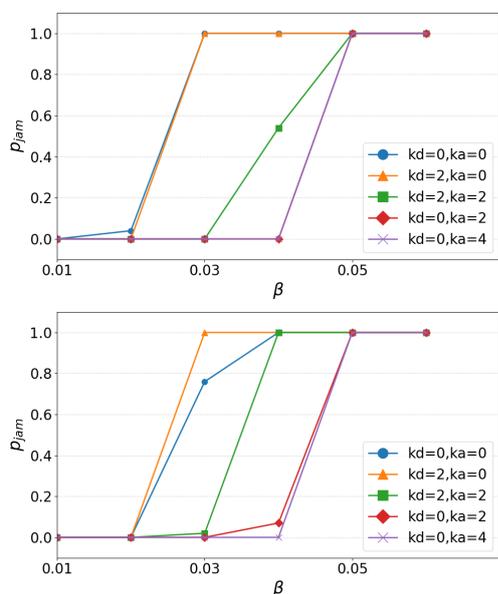


図 8: T 字路における  $p_{jam}$  の出現確率  $\beta$  依存性。(上)SFF1 と (下)SFF2

次に、最終状態に到達するまでの過程の違いを調べた。図 9 では  $T = 330$  における SFF1 と SFF2 を

用いた際の系のスナップショットである。SFF1 では A と C から発生した人が側壁に沿って移動しているのに対し、SFF2 では交差点の入口を塞ぐように人が密集していることがわかる。このような SFF1 と SFF2 とのわずかな違いで、グリッドロックに至る過程に大きな違いが生じることがわかった。

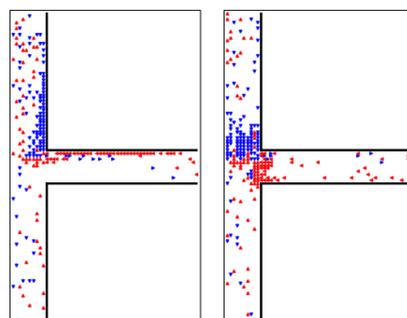


図 9:  $(k_d, k_a) = (0, 4), \beta = 0.7$  における系の状態。(左)SFF1, (右)SFF2 ( $T = 330$ )

## 4 まとめと今後の展望

本研究では文献 [5] を基に正方格子と三角格子の FF モデルを用いて、歩行者対向流を再現し、系の状態とグリッドロック確率の比較検討を行った。その結果、両モデルで動的 FF の強度  $k_d$  よりも予測 FF の強度  $k_a$  のほうがグリッドロックを回避する効果が大きいことがわかった。また、境界条件が周期境界条件では両モデルにほとんど差は見られなかったが、開放境界条件で、三角格子においてグリッドロックをより回避できる傾向があることがわかった。T 字路においては、静的 FF モデルのわずかな差によって、グリッドロックに至る形成過程が大きく異なることがわかった。今後は三角格子を T 字路に拡張し、直交する T 字路以外の角度付き T 字路の対向流形成過程を系統的に調べていきたい。また、現実の道路や駅のプラットフォームなどの問題にも適用し、FF モデルの有効性を検証したい。

## 参考文献

- [1] 西成 活裕: 渋滞学, 新潮社, (2006).
- [2] 西成 活裕: 図解雑学 よくわかる渋滞学, ナツメ社, (2009).
- [3] C. Burstedde, K. Klauack, A. Schadschneider, and J. Zittartz, *Physica A*, **295**, 507 (2001).
- [4] 柳澤 大地, *Japanese J. Multiphase Flow*, **28**, 312 (2014). (in Japanese)
- [5] S. Nowak and A. Schadschneider, *Phys. Rev. E*, **85**, 066128 (2012).