

## 片方向のみが予測を行う群衆対向流の解析

須摩, 悠史  
東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻

西成, 活裕  
東京大学先端科学技術研究センター | 独立行政法人科学技術振興機構さきがけ

<https://doi.org/10.15017/18713>

---

出版情報: 応用力学研究所研究集会報告. 21ME-S7 (23), 2010-03. 九州大学応用力学研究所  
バージョン:  
権利関係:

応用力学研究所研究集会報告 No.21ME-S7

「非線形波動研究の現状と将来 — 次の10年への展望」 (研究代表者 矢嶋 徹)

共催 九州大学グローバル COE プログラム

「マス・フォア・インダストリ教育研究拠点」

Reports of RIAM Symposium No.21ME-S7

*Current and Future Research on Nonlinear Waves —  
Perspectives for the Next Decade*

Proceedings of a symposium held at Chikushi Campus, Kyushu University,  
Kasuga, Fukuoka, Japan, November 19 - 21, 2009

Co-organized by

*Kyushu University Global COE Program*

*Education and Research Hub for Mathematics - for - Industry*

Article No. 23 (pp. 156-161)

# 片方向のみが予測を行う群衆対向流の 解析

須摩 悠史 (SUMA Yushi), 西成 活裕 (NISHINARI Katsuhiko)

(Received February 1, 2010)



Research Institute for Applied Mechanics  
Kyushu University  
March, 2010

# 片方向のみが予測を行う群衆対向流の解析

東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 須摩悠史 (SUMA Yushi)  
東大先端研, (独) 科学技術振興機構さきがけ 西成活裕 (NISHINARI Katsuhiko)

**概要** 従来の群衆運動の研究では全員が同じ性質を持っていた。本研究ではこの均一性を取り除き、対向流において片方向のみが対向者の動きを予測する場合を対象に数値計算と実験を行った。数値計算には予測フロアフィールドを含むフロアフィールドモデルを使用した。数値計算と実験の両方の結果から、片方向のみが予測を行う場合は両方向が予測を行う場合よりも流れが滞りやすくなるが、予測を行わない場合と比べると大幅に改善されることが分かった。

## 1 はじめに

人を動き回る粒子としてとらえた場合、マクロに見ると密度の偏りがあり圧縮性流体と見ることが出来る。人の密度（単位面積当たりの人数）は空気や水のような一般の流体における密度となり、お互いが押し合う力が圧力に対応する。また、個々の人の運動方向のばらつき（分散）を温度と見ることが出来る。人が出口などで詰まっている状況は、急に密度が上昇している点から衝撃波が発生しているともいえる。また、停止している集団が動き始める時は、先頭から後方に向かって「歩き出す」という情報が伝播している（「発信波」が伝播すると呼ばれている）。一方で、人は周囲の状況を把握・勘案して自らの意思で動く方向や速度を決めるという点で一般の流体とは異なっている。このような粒子を自己駆動粒子（Self Driven Particles）と呼ばれており、自動車や動物、昆虫などが自己駆動粒子の例として挙げられる。自己駆動粒子から構成される流体では作用反作用の法則がはたらかないため、マクロな視点に加えてミクロな視点、すなわちで個々の粒子に注目するという手法が必要である。

本研究で使用したフロアフィールドモデル [1] は群衆運動の記述に用いられる主要なモデルのひとつであり、格子状のセルの上で人を確率的に動かすことで群衆運動をモデル化する。フロアフィールドモデルは群衆運動の重要な性質（レーン形成、Faster-Is-Slower Effect [2] など）の再現性が高く、拡張性が高く、計算量が少ないことを特徴とするモデルである。筆者らはこのフロアフィールドモデルの拡張として、新たに「予測と回避」という概念を導入した予測月フロアフィールドモデル [4] を提案した。本研究ではこのモデルを用いて、非対称な流れ（片方向の集団のみが予測を行う）を解析し、実験結果との比較を行った。

## 2 フロアフィールドモデル

フロアフィールドモデルは、床を正方形のセルに区切り、そのセル上で人を確率に従って動かすことで人の流れを再現するモデルである。1セルには2人以上入ることはできない。各セルには「フロアフィールド」という情報が埋め込まれている。移動確率は近隣のセルに埋め込まれたフロアフィールドをもとに決定され、フロアフィールドの設定方法によって人の移動に様々な性質を付加することができる。今回は図1のように上・下・左・右とその場（ノイマン近傍という）のセルを参照することにする。移動先となるセルも同じくノイマン近傍のセルとし、1ステップでの最大移動距離は1セルとした。

以下、本研究で使用したフロアフィールドについて述べる。

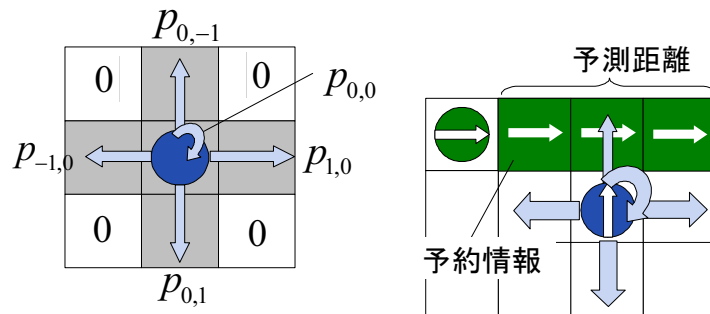


図 1: 進行方向は上・下・左・右・その場の 5 セルである．また，移動確率を決める際にも同じ 5 セルを参照する（左）人の進行方向に「予約情報」が投げられる．予約情報が投げられる距離が予測距離となる．予約情報があるセルへの移動確率を小さくすることで，人間の予測行動を取り入れる（右）

## 2.1 以前からあるフロアフィールド

静的フロアフィールド (*Static Floor Field*): 目的地までのステップ数 [3] を格納している．静的フロアフィールドの値が小さい方に向かうことで目的地に向かう性質を持たせる．

動的フロアフィールド (*Dynamic Floor Field*): 人がセルを通過した際に残していく「足跡」という情報を格納している．足跡の多い方に向かうことで前の人についていく性質を持たせる [1]．

## 2.2 予測フロアフィールド

(*Anticipation Floor Field; AFF*)

筆者が導入したフロアフィールドで，将来そのセルに人がやってくるという「予約情報」の値を格納している．予約情報の少ない方に向かわせることで他の人の動きを予測し回避する性質を持たせる．予約情報については以下で詳しく述べる．

### 予約情報

毎時間ステップごとに各々の人の過去の動きをもとにして予測される進行方向 (停止・上・下・左・右) を決定し，その進行方向の一定数のセルの方向つき予約情報の値を 1 増やす．1 セルには 5 種類の予約情報の値が存在することになる．例えばある人の進行方向が右向きならば，その右方向の直線状の一定数のセルの「右向きの予約情報」の値が増加する．人は基本的に直進するため，予測される進行方向も直線状とした．予約情報を書き込むセル数を「予測距離」と呼び， $d_A$  と表す (図 1)．

人間は自分の後方を見ることはできない．これを実現するため自分の後方セルの全ての予約情報の影響を受けなくするというルールを設定する．可視な予約情報の値の和が多いほど移動確率が小さくなるということにして予測と回避を実現する．

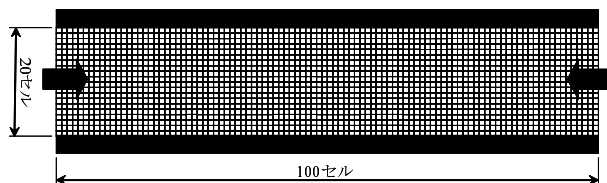


図 2: 1 ステップごとに両端の全てのセル (計 40 セル) それぞれに対して流入確率  $\alpha$  で新しい人が入ってくる。左端に入場した人は右端を目的地とした静的フロアフィールドに、右端に入場した人はその逆に従う。目的地の反対端のセルに着いた人は消え、退出したことになる。

### 2.3 移動

近傍セル (ノイマン近傍) のフロアフィールドの値を元に、それぞれの人について次の式により移動確率を決定する。ただし、進入不可能なセルへの移動確率は 0 である。

$$p_{ij} = N \exp(-k_A A_{ij}) \exp(-k_S S_{ij}) \exp(k_D D_{ij})$$

$(i, j)$	$(0, 0), (0, 1), (0, -1), (1, 0), (-1, 0)$
$N$	規格化定数
$A_{ij}$	セル $[0, 0]$ から可視なセル $[i, j]$ における予約情報の値の和
$S_{ij}$	セル $[i, j]$ における出口までの距離
$D_{ij}$	セル $[i, j]$ における足跡の値
$k_A$	予測フロアフィールドの強度 ( $\geq 0$ )
$k_S$	静的フロアフィールドの強度 ( $> 0$ )
$k_D$	動的フロアフィールドの強度 ( $\geq 0$ )

移動確率に従って進行方向を決定し、同じセルに 2 人以上の人が入ろうとした場合はランダムで 1 人を選び進ませる。残りの人は現在のセルに引き戻される。また、既に人がいるセルに進もうとした場合は無条件に現在のセルに留まることとする。

### 3 シミュレーション

上記のモデルを用いて図 2 のような長さ 100 セル幅 20 セルの通路での対向流のシミュレーションを行った。  $k_S = 3.0$ ,  $k_D = 2.0$  は固定し、流入確率  $\alpha$  は 0.003 から 0.063 まで 0.005 ごとに、予測強度  $k_A$  は 0 から 5 まで 1 ごとに、予測距離  $d_A$  は 0 から 6 まで 1 ごとに变化させた。各パラメタの組み合わせに対して両方向が予約情報を出す場合 (両側 AFF) と片方向のみが予約情報を出す場合 (片側 AFF) のそれぞれを 100 回試行した。通路内に人がいない状態からシミュレーションを開始し、300 ステップ以降に入場してきて 3250 ステップまでに退場した人の通過に要したステップ数を全て計測しその平均値を記録した。100 回の試行の各回ごとに得られるこの値を平均して平均旅行時間とした。

同一パラメタ条件における片側 AFF と両側 AFF の平均旅行時間を 1 つの点としてプロットしたものを図 3 に示す。同一パラメタ条件では両側 AFF の方が平均旅行時間が短いケースが多いといえる。点が  $y = x$  の上側にあるときのパラメタ条件は (i) 高密度 ( $\alpha$  大) 予測なし (ii) 低密度 ( $\alpha$  小) 強予測の 2 つに大別できる。大きく上にずれているものは全て前者だが、高密度ではかち合いの影響でデータの分散が大きいため生じたもので本質的なものではない。後者を考えるために同

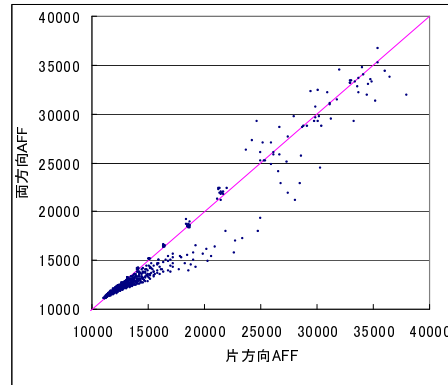


図 3: 同一パラメタ条件における片側 AFF と両方向 AFF の平均旅行時間をそれぞれ  $x$  座標,  $y$  座標としてプロットした。およそ  $x \geq 25000$  または  $y \geq 25000$  にある点は高密度状態で, 待ち合い(通路の幅方向全体で両方向のが向かい合い止ってしまうこと)が頻発していた。

一パラメタ条件での片側 AFF と両側 AFF の平均旅行時間の差がどの程度かを図 4 に示した。 $k_A$  が大きくなるにつれて片側 AFF と両側 AFF の差が小さくなり, 低密度時(およそ  $\alpha < 0.025$ )には片側 AFF の方が平均旅行時間が短いという逆転にまで至っている。一般には両側 AFF の方が片側 AFF より避ける確率が高いため平均旅行時間が短くなっている。しかし予測強度が大きくなると片側だけでも避ける効果が十分発揮されてくるので差が小さくなり, 密度が低い状態では両者が避けるために横に動くよりも片方だけが横にそれたほうが全体の時間のロスが少ないため逆転が起きている。次に予測がない場合(各密度での  $k_A = 0$  かつ  $d_A = 0$  の計測値を使用した)と片側 AFF を比較し図 5 に示した。たとえ片側だけであっても予測を行うことで平均旅行時間が短くなることがわかる。上記の片側 AFF と両側 AFF の差と比べると, 予測なしと片側 AFF の差の方が明らかに大きい。

#### 4 実験

シミュレーションの結果を確かめるため実際に人による実験を行った。片側 25 人の集団を 2 集団組成し, 長さ 5m 横幅 3m の通路の外の両側に配置した。各被験者は指示に従って通路の反対側に向かって歩きだし通路に入場, 反対側に向かって進み通路を退場後も反対の集団を通り抜けるまで直進するよう指示をした。以下「入場」とは通路の端のラインをまたいで通路内に進入すること, 「退場」とは反対側の端のラインをまたいで通路内からいなくなることにする。入場方法は以下のとおりである。(1) 片側 25 人の被験者を 3 人ずつのグループに分け, グループ 1 からグループ 9(グループ 9 は 1 人)とした。(2) 通路端のラインとラインから外に 1.5m のラインの間にグループ 1,2,3 の人間を配置した。同様に, 通路端のラインから外に 1.5m のラインと同 3.0m のラインの間にグループ 4,5,6 の人間を, 同 3.0m のラインと 4.5m のラインの間にグループ 7,8,9 の人間を配置した。指示された範囲内なら前後左右どこでもいいという指示を出しそれぞれの範囲内ではランダムに配置されるようにした。(3) 1.5 秒ごとに 1, 2, 3 と 4(同時に読み上げ), 5, 6 と 7(同時に読み上げ), 8, 9 のように数字を読み上げ, 読み上げられた番号と一致するグループの人間は歩き出すように指示をした。以上の方法により, 行進のようにきっちりそろってはならず適度にばらけておりかつ先頭から最後尾まで密度がほぼ一樣な集団を実現した。また, この通路サイズと入場方法下では各集団の先頭が反対側のスタートラインに達した時点でほぼ全員が動き出して止まっ

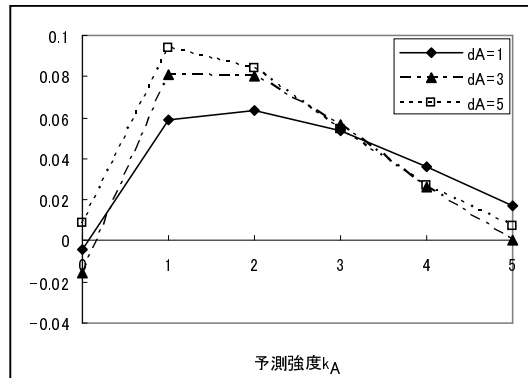


図 4: 流入確率  $\alpha = 0.033$  での「(片側 AFF の平均旅行時間 – 両側 AFF の平均旅行時間)/両側 AFF の平均旅行時間」の値、つまり片側 AFF がどれだけ両側 AFF に対して平均旅行時間が長いを示している。  $k_A$  の変化に対する算出値の変化量が予測距離  $d_A$  によって異なり、  $d_A$  が大きいほど弱予測領域での値が大きく強予測領域での値が小さくなっている。これは相手を検知するのが早く予測の効果が出やすいからである。

ている人間を避けるということは発生せず、全長 13.5m の集団同士がすり抜けることと同等になる。歩行速度を 1.0m/s とすると通路内の人間の密度は両方向合わせて 1.33 人/m<sup>2</sup> となる。

実験の条件として (a) 特に指示をせず通常の意識で歩いてもらう (b) 一方の集団に対して携帯電話の画面を見て操作しながら歩いてもらう (c) 両方が携帯電話を操作しながらあるいてもらうの合計 3 つの条件で実験を行った。携帯電話を操作することはシミュレーションでの  $k_A=0$  の状態を想定している。計測は各被験者が持ったストップウォッチで行い、通路入場から退場までの時間を全員分計測した。また、集団の組成が影響する可能性を考慮して集団を組み替えて上記の 3 つの条件に対して 1 回ずつ計測を行った。同様に密度の影響も考慮して、密度が低い場合も同様に 3 つの条件に対して 1 回ずつ計測を行った。密度が低い場合は片側 18 人の集団とし被験者を 2 人ずつのグループに分けグループ 9 としたことが異なっている。歩行速度が 1.0m/s のとき密度は 0.89 人/m<sup>2</sup> である。

平均旅行時間の計測結果を図 6 に示す。平均旅行時間は上記方法で計測した各被験者の入場から退場までの時間の平均値である。(a), (b), (c) の順に平均旅行時間が短かったことがわかる。これは定性的にはシミュレーションと一致する。ただし、(b) と (c) の差が (a) と (b) の差と同じ程度である点はことなる。これは、「携帯電話の画面を見て操作しながら歩く」という行為は厳密に予測がない状態ではなく前方の狭い範囲については予測を(無意識に)していることと、携帯電話操作時はいったん止まってしまうと動き出しが遅いことが原因と考えられる。

## 5 結論と今後の課題

本研究では予測フロアフィールドを含むフロアフィールドモデル及び実験により片方向のみが予測をおこなう群集対向流を解析し、両方向が予測を行う場合、片方方向のみが予測を行う場合、予測を行わない場合の順に流れが滞りにくいことがわかった。たとえ予測をするのが片方向のみでも予測なしのときと比べて平均旅行時間は大幅に改善した。また、シミュレーションと実験の結果の差異から現実の人間には予測がない状況は考えにくいことが示唆されたので、人の流れのモデル化に予測という要素が必要といえるのではないだろうか。今後は、予測強度が微小な場合のシミュレーションを行い実験結果と合致するかどうかを確かめていきたい。

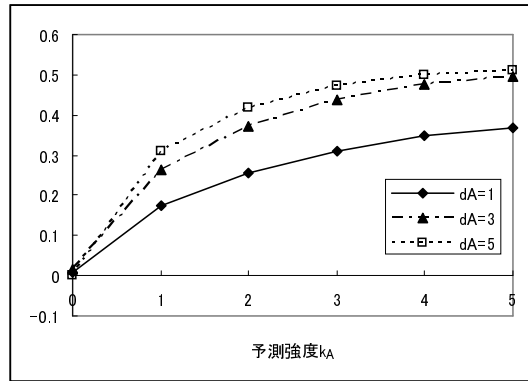


図 5: 流入確率  $\alpha = 0.033$  での「(予測なしの平均旅行時間 – 片側 AFF の平均旅行時間)/片側 AFF の平均旅行時間」の値, つまり予測なしがどれだけ片側 AFF に対して平均旅行時間が長いを示している. 予測距離  $d_A$  が大きいほど算出値も大きくなり, 遠くまで予測することでより流れがスムーズになるといえる.

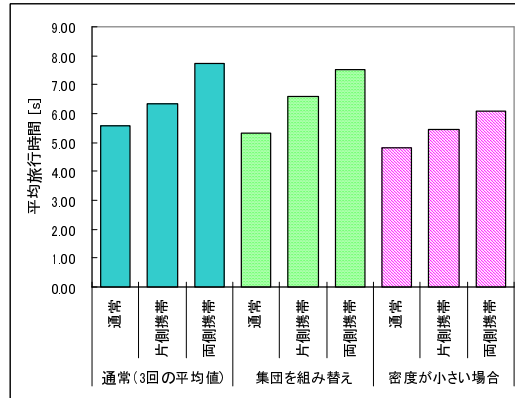


図 6: 被験者全員が計測した通路の通貨時間の平均値を示した. いずれの場合も定性的に同じ結果となった.

#### 参考文献

- [1] C. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider, and J. Zittartz. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A*, Vol. 295, p. 507, 2001.
- [2] Dirk Helbing, Illés Farkas, and Tamás Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, Vol. 407, pp. 487–490, 2000.
- [3] Katsuhiko Nishinari, Ansgar Kirchner, Alireza Namazi, Andreas Schadschneider, and Nonmembers. Extended floor field ca model for evacuation dynamics. *IEICE Trans. Inf. Syst.*, Vol. E87-D, p. 726, 2004.
- [4] 須摩悠史, 西成活裕. 予測つきフロアフィールドモデルによる曲がり角での群集運動の解析. *Reports of RIAM Symposium No.20ME-S7 Mathematics and Physics in Nonlinear waves*, No. 22, 2009.