

# 出口周りの群集運動の シミュレーションと平均場近似による解析

柳澤 大地<sup>1</sup>, 西成 活裕<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 工学系研究科 航空宇宙工学専攻

<sup>2</sup> 東京大学 工学系研究科 航空宇宙工学専攻

## 概要

フロアフィールドモデルは、アーチ現象やレーン形成などの群集行動を再現することができるセルオートマトンモデルである。人が避難する際の総避難時間は、多くの場合出口周り（ボトルネック）の構造とその付近での群集の振る舞いによって決まると考えられる。本研究ではフロアフィールドモデルに出口周りの影響を加えて拡張し、シミュレーションと平均場近似による解析を行った。その結果、全ての人が真っ直ぐ出口に向かう場合の出口流量の式を導き、競争と協力、壁の効果が流量に与える影響を見積もることができた。

## Simulation and Mean Field Analysis on Crowd Dynamics around Exit

Daichi Yanagisawa<sup>1</sup>, Katsuhiro Nishinari<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Aeronautics and Astronautics, School of Engineering, The University of Tokyo

<sup>2</sup> Department of Aeronautics and Astronautics, School of Engineering, The University of Tokyo

## Abstract

Floor Field Model is a cellular automata model which can reproduce typical crowd dynamics such as arch phenomenon and lane formation. Structures and crowd behaviors around exits have a great influence on a total evacuation time when people evacuate from a room. We extended Floor Field Model by introducing crowd behaviors near exits, and studied them by simulation and mean field analysis. As a result, we obtained an expression of a flow of people from exits when they move to exits directly, and discovered how a competitive and a noncompetitive behavior and an effect of wall influenced on the flow.

## 1 はじめに

群集運動がかかわる駅のホームの設計や避難設計は直感と経験によるところが大きい。また群集運動の研究は社会心理学などの分野で行われていたが、これらは実験が中心であり、モデルをつくり解析するといったことはほとんど行われていない。

群集運動の研究が数学や物理の分野で行われたのは Helbing らが "Social Force Model" [1] を提案したの

が最初になる。このモデルは全ての人の間に "Social Force" という力を考え、人の間の相互作用を微分方程式で記述する。このモデルに対して我々はセルオートマトンを用いた "Floor Field Model" (FF モデル) で群集運動の研究を行っている [2]。

今回の研究ではボトルネックである出口の周りでの人の行動を考慮して FF モデルを拡張し、同時に平均場近似による解析も行った。その結果全ての人が真っ直ぐ出口に向かう状況での出口流量の式を導

くことができた。

## 2 フロアフィールドモデル

今回の考える状況は図1のように全ての人が共通の目的のセル(出口)に向かって移動する場合である。人型のシルエットは人を表し、アルファベットの”E”は出口を”O”は障害物を表す。FFモデルは2種類のFFにより人を出口に移動させる。一つ目は静的FF( $S$ )であり、これにより人は最短距離で出口に向かおうとする。具体的には図2のように各セルに出口までの距離を持たせ、人を静的FFが減少するセルに移動しやすくする。二つ目は動的FF( $D$ )であり、これは人の足跡を表す。蟻がフェロモンを介して相互作用するように、人は足跡を介して相互作用をするとする。同じ目的地に向かっている場合は、人は他人に追従すると考えられるので、図3のように青色の人が足跡を残すと、赤色の方は矢印の向きに動こうとする。(説明のため足跡を出す青の人と影響を受ける赤の人を分けたが、実際は区別なく相互に影響し合っている。) 動的FFはパラメータのとり方により、人と人が反発するようにもできる。また足跡はフェロモンのように時間とともに拡散・減衰する。FFによりセル*i*からセル*j*に移動する確率を、

$$p_{i \rightarrow j} = N \exp(k_s \Delta S + k_d \Delta D) \quad (1)$$

と定める。 $N$ は規格化定数、 $k_s, k_d$ はそれぞれ静的FF・動的FFの調節パラメータである。また、複数の人をパラレルアップデートで移動させていると、同じセルに二人以上の人が入ろうとし衝突が起こることがある。そこで衝突パラメータ $\mu$ を導入し、図4のように確率 $1-\mu$ でどちらか一方を移動させ、確率 $\mu$ でどちらも移動させないという方法で衝突を解消する。

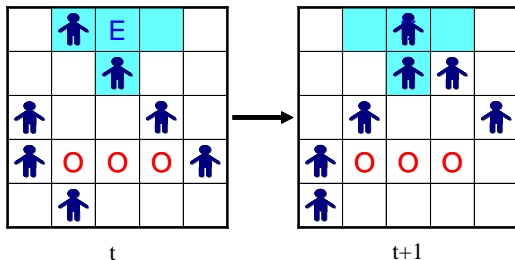


図1: フロアフィールドモデルの人の移動の例

|               |               |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| s=2           | 1             | E0            | 1             | 2             |
| $\sqrt{5}$    | $\sqrt{2}$    | 1             | $\sqrt{2}$    | $\sqrt{5}$    |
| $2\sqrt{2}$   | $\sqrt{5}$    | 2             | $\sqrt{5}$    | $2\sqrt{2}$   |
| $2\sqrt{2}+1$ | O             | O             | O             | $2\sqrt{2}+1$ |
| $2\sqrt{2}+2$ | $2\sqrt{2}+3$ | $2\sqrt{2}+4$ | $2\sqrt{2}+3$ | $2\sqrt{2}+2$ |

図2: 静的フロアフィールド

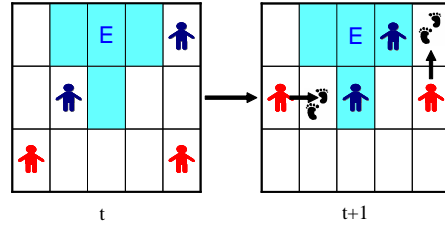


図3: 動的フロアフィールド

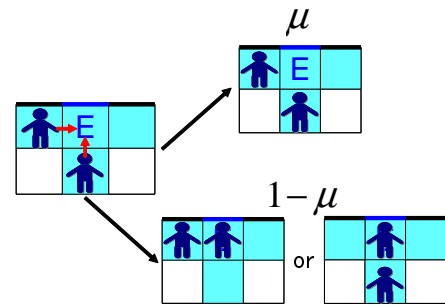


図4: 衝突の解消

## 3 出口周りの影響の導入

出口の周りには多くの人が集まるので、衝突が頻繁に起こると考えられる。人はそれを経験的に分かって、実際狭い出口の周りに集まった人々は歩幅を小さくしてゆっくりと進んでいる。そこでこの現象をモデルに取り入れるために出口に近いセルでは移動確率を小さくするという効果を入れる。具体的には図1,2,3,4の水色に塗りつぶされた出口以外のセルにいる人の移動確率を、パラメータ $\beta$  ( $0 \leq \beta \leq 1$ )をかけて小さくする。

## 4 出口流量の式の導出

ここで水色の4セルで4クラスター近似を行い、出口流量の式を導出する。まず「出口の周りには人

が十分に集まっている」・「人は出口に向かって最短距離で移動しようとする」ということを仮定する。この二つの仮定により、水色の4セルの間の移動確率は図5のように考えることができる。

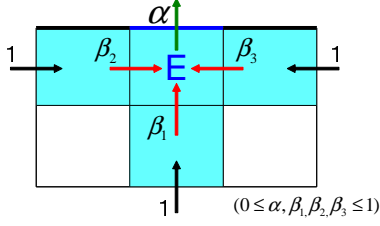


図5: 出口周りの4クラスター近似

1セルの状態としては人がいるかいないかの2通りの状態が考えられるので、4セルのクラスターでは全部で16の状態が考えられる。これらの間の状態遷移図を考え、1ステップあたり人が出口から何人出られるか、すなわち出口における人の流量  $\langle N \rangle$  を計算すると、

$$\begin{aligned} \langle N(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \alpha, \mu) \rangle &= \alpha \left[ 1 - \frac{\alpha}{\alpha - a_2 - a_1 - a_0 - \mu(a_1 + 2a_0)} \right] \quad (2) \\ \begin{cases} a_0 = -\beta_1\beta_2\beta_3 \\ a_1 = \beta_1\beta_2 + \beta_2\beta_3 + \beta_3\beta_1 \\ a_2 = -(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3) \end{cases} \quad (3) \end{aligned}$$

と表すことができる。

次に式(2)の  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  に0や  $\beta$  を代入して、図6,7,8のような場合の流量を表すように簡略化する。これらの場合の流量の式は、

$$\langle N_3(\beta, \alpha, \mu) \rangle = \langle N(\beta, \beta, \beta, \alpha, \mu) \rangle = \alpha \left[ 1 - \frac{\alpha}{\alpha + 3\beta - 3(1 + \mu)\beta^2 + (1 + 2\mu)\beta^3} \right] \quad (4)$$

$$\langle N_2(\beta, \alpha, \mu) \rangle = \langle N(\beta, \beta, 0, \alpha, \mu) \rangle = \alpha \left[ 1 - \frac{\alpha}{\alpha + 2\beta - (1 + \mu)\beta^2} \right] \quad (5)$$

$$\langle N_1(\beta, \alpha) \rangle = \langle N(\beta, 0, 0, \alpha, \mu) \rangle = \frac{\alpha\beta}{\alpha + \beta} \quad (6)$$

最後にこれら  $\langle N_3 \rangle, \langle N_2 \rangle, \langle N_1 \rangle$  を用いて出口幅が  $n$  セルの出口流量の式を導く。仮定により人は最短

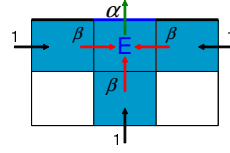


図6:  $N_3$

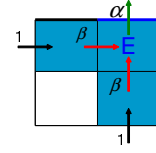


図7:  $N_2$

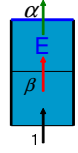


図8:  $N_1$

離で出口に向かおうとするので、出口からの距離が1以下の水色のセルにおいてはわざわざ隣の出口セルに回り込んで行くようなことはしない。したがって図9のような3セルの出口の場合、3セルの出口流量は3つの1セルの出口流量の線形和と考えることができる。よって出口が部屋の壁の真ん中にある場合(以下 Center)の流量  $\langle N_{center,n} \rangle$  は、

$$\langle N_{center,n} \rangle = \begin{cases} \langle N_3 \rangle & (n=1) \\ 2\langle N_2 \rangle + (n-2)\langle N_1 \rangle & (n \geq 2) \end{cases} \quad (7)$$

と書け、同様の考え方で出口が部屋の角にある場合(以下 Corner)の流量  $\langle N_{corner,n} \rangle$  は、

$$\langle N_{corner,n} \rangle = \langle N_2 \rangle + (n-1)\langle N_1 \rangle \quad (n \geq 1) \quad (8)$$

と表せる。

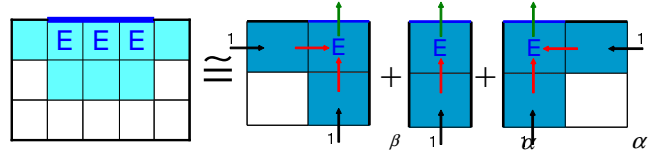


図9: 出口幅  $n=3$ (真ん中) の場合の出口の分解

## 5 式とシミュレーションとの比較

出口流量の式(7)とシミュレーションによる Center 場合の  $\beta$  に対する流量  $\langle N \rangle$  を比較する。フロアフィールドの調節パラメータは平均場近似のときの仮定を満たすように  $k_s = 20, k_d = 0$  とした。図10を見ると、出口流量の式(線)とシミュレーション(点)はよく合っていることが分かる。また  $\mu = 0.5, 0.9$  のときは、流量  $\langle N \rangle$  が極大値をとる  $\beta$  が存在することが分かる。

## 6 競争と協力

競争状態は人が積極的に出口に向かおうとし衝突で先に進めないことが多い状態、協力状態は出口に向か

うことにあまり積極的になく衝突が起こっても譲り合  
って誰かしら一人進むことができる状態である。競争  
と協力による総避難時間の違いは Kirchner らの研究  
[2] で行われている。ここでは Kirchner らの研究のパ  
ラメータを換算し、競争状態を  $\beta = 0.975, \mu = 0.6$ 、  
協力状態を  $\beta = 0.375, \mu = 0$  で表す。出口幅  $n$  に  
対する競争状態と協力状態の流量  $\langle N \rangle$  の変化を図  
11 に示す。グラフを見ると、出口幅が小さいときは  
協力状態の方が流量が大きく、式から導かれる交点  
 $n = 2.71$  を超えると競争状態の方が流量が大きい。  
Kirchner らのシミュレーションでは  $n \approx 2.5$  で逆転  
が起っており、非常に近い結果となった。これは  
出口が狭い場合は協力した方がよいが、広い出口で  
は人のことに気を遣うよりも積極的に出口に向かう  
ほうが、全体として早く避難できることを示唆して  
いる。

## 7 壁の効果

最後に出口が Center と Corner の場合について流  
量を比較し、壁の効果について検証する。それぞれの  
流量の差を計算し、 $\langle N_{center} \rangle = \langle N_{corner} \rangle$  となる  
 $\beta$  を  $\beta_{wall}$  とすると、

$$\beta_{wall} = \begin{cases} \frac{1}{1+2\mu} & (n = 1) \\ \frac{1}{1+\mu} & (n \geq 2) \end{cases} \quad (9)$$

となる。 $n = 1, \alpha = 1, \mu = 0.9$  のとき、Center と  
Corner の場合の  $\beta$  に対する流量  $\langle N \rangle$  の変化をグラ  
フにすると図 12 のようになる。このグラフを見ると、  
確かに流量の式から導かれる  $\beta_{wall} = 0.36$  で、  
シミュレーションでも流量が逆転していることが分  
かる。また  $\beta$  が小さいときは Center の方が流量が  
大きく、 $\beta$  が大きいときは Corner の方が流量が大  
きいことから、人がゆっくりと出口に向かうような状  
況では出口は壁の真ん中にある方がよいが、人が急  
いで出口に向かう状況では出口は部屋の角にあった  
方がよいと言える。

## 8 まとめ

今回の研究では FF モデルに出口周りの影響を加  
え拡張してシミュレーションを行い、同時に出口周  
りの 4 セルで平均場近似により出口流量の式を導い  
て、二つの結果が一致すること確認した。また競争  
状態や協力状態、壁の効果によって流量がどのよう  
に変化するかを、シミュレーションと出口流量の式  
を用いて調べた。

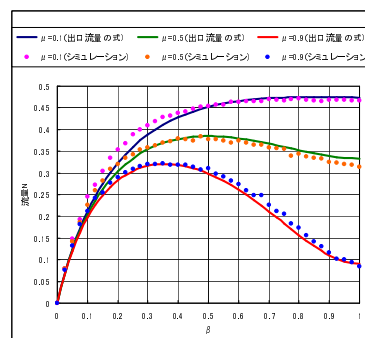


図 10:  $\beta$  に対する流量  $\langle N \rangle$  の変化 ( $n = 1, \alpha = 1$ )

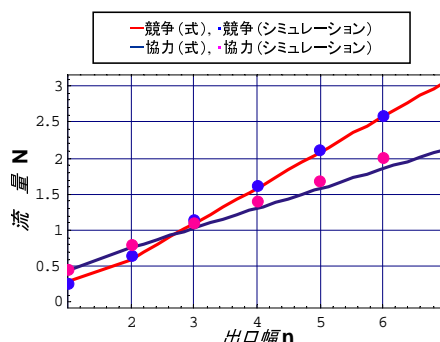


図 11: 出口幅  $n$  に対する流量  $\langle N \rangle$  の変化 ( $\alpha = 1$ )

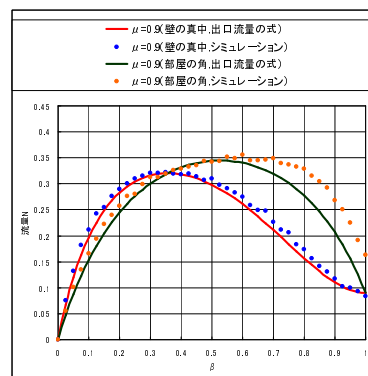


図 12: 出口が真ん中の場合と角の場合の流量の比較

## 参考文献

- [1] Dirk Helbing, Illés Farkas, Tamás Vicsek, nature 28 September 2000.
- [2] Ansgar Kirchner, Hubert Klupfel, Katsuhiro Nishinari, Andreas Schadschneider, Michael Schreckenberg, Physica A 324 689 (2003).