

人の交互退出の創発について

柳澤, 大地
日本学術振興会 | 東京大学先端科学技術研究センター

西, 遼佑
東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻

西成, 活裕
東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻 | 東京大学先端科学技術研究センター | (独) 科学技術振興機構 さきがけ

<https://doi.org/10.15017/23421>

出版情報: 応用力学研究所研究集会報告. 22A0-S8 (37), pp.236-241, 2011-03. 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.22AO-S8

「非線形波動研究の新たな展開 — 現象とモデル化 —」 (研究代表者 笥 三郎)

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.22AO-S8

Development in Nonlinear Wave: Phenomena and Modeling

Proceedings of a symposium held at Chikushi Campus, Kyushu University,
Kasuga, Fukuoka, Japan, October 28 - 30, 2010

Co-organized by

Kyushu University Global COE Program

Education and Research Hub for Mathematics - for - Industry

Article No. 37 (pp. 236 - 241)

人の交互退出の創発について

柳澤 大地 (YANAGISAWA Daichi), 西 遼佑 (NISHI
Ryousuke), 西成 活裕 (NISHINARI Katsuhiko)

(Received 16 January 2011)



Research Institute for Applied Mechanics
Kyushu University
March, 2011

人の交互退出の創発について

(独) 日本学術振興会 特別研究員 PD・東京大学 先端科学技術研究センター
柳澤大地 (YANAGISAWA Daichi)
東京大学 工学系研究科 航空宇宙工学専攻・(独) 日本学術振興会 特別研究員 DC2
西 遼佑 (NISHI Ryosuke)
東京大学 先端科学技術研究センター・(独) 科学技術振興機構 さきがけ
西成活裕 (NISHIANARI Katsuhiko)

概要 群集が一人の人しか通過できない狭い出口から退出するとき、二列に並んでいると交互に出口を通過することによって素早く退出できる。本研究では、この交互退出創発のための研究の第一歩として、セルオートマトンモデルから交互退出のメカニズムについて考察した。その結果、人は今自分が進むことができるかという目先のことでなく、早く退出するにはどうしたらよいかという未来のことを考えて行動していることが分かった。

1 はじめに

集団の歩行や避難といった群集運動は、心理学や建築・火災工学の分野だけでなく、物理学の分野においてもこの15年間活発に研究が行われてきた [1, 2, 3]。物理学分野の群集運動の研究は、群集を観察し、モデルを作成し、シミュレーションや理論解析を行い、新しい知見を得る、というスタイルが最も多い。そのため非常に数多くのモデルが提案され、拡張されてきた。物理学分野の群集運動のモデルは、大きく三つに分けることができる。一つ目はマクロモデルと呼ばれるものであり、人を空気や水のような流体と考え、その運動を拡張したナビエ・ストークス方程式によって記述する。流体力学のような成果を応用できるという利点はあるものの、計算負荷が大きく、複雑な構造の建築物のシミュレーションにはあまり適していない。二つ目は空間が連続なミクロモデルである。このモデルでは、人は他人との相互作用による力だけでなく自分の意思を駆動力として動く自己駆動粒子として表され、その運動は運動方程式によって記述される。Social Force Model [4] は、この種類の代表的なモデルであり、アーチ現象¹、レーン形成²、狭いドアにおける対向流の振動現象³、Freezing by Heating 現象⁴といった現実に観測される多くの群集運動特有の現象を再現することができる。またより現実的なモデルを目指し、Social Force Model を拡張した研究も行われている [7, 8]。三つ目は空間が離散なミクロモデルである。このモデルでは空間が格子状に区切られているため、連続空間のモデルと異なり人の細かい動きを表すことはできないが、離散空間であるため計算時間が短く、ルールベースのモデルを考え易いため様々なシミュレーションが行われてきた。代表的なモデルとしては、フロアフィールドモデル [9]、格子ガスモデル [10] などがある。

本論文では、フロアフィールドモデルの元となっている確率セルオートマトンを用い、狭い出口から人が退出する際の交互退出現象に着目した研究を行う。フロアフィールドモデルを用いた

¹狭い出口から退出の際に、出口の端から端を結ぶの人のアーチが形成され出口詰まってしまう現象 [5]。

²通路における対向流において、後の人が同じ向きに歩いている前の人についていくことにより、人の流れのレーンが形成される現象 [4]。

³狭いドアの両側に群集がいるとき、どちらか片方の群集がドアを通過すると、その後に別の人が続くため、しばらく片方の群集が連続してドアを通過する。しかし時間が経つと今度は逆側の群集がドアを通過し始める。このようにドアを通過する流れの向きが振動する現象 [4]。

⁴人が急げば急ぐほど出口で衝突し、凍ったように動けなくなってしまう現象 [6]。

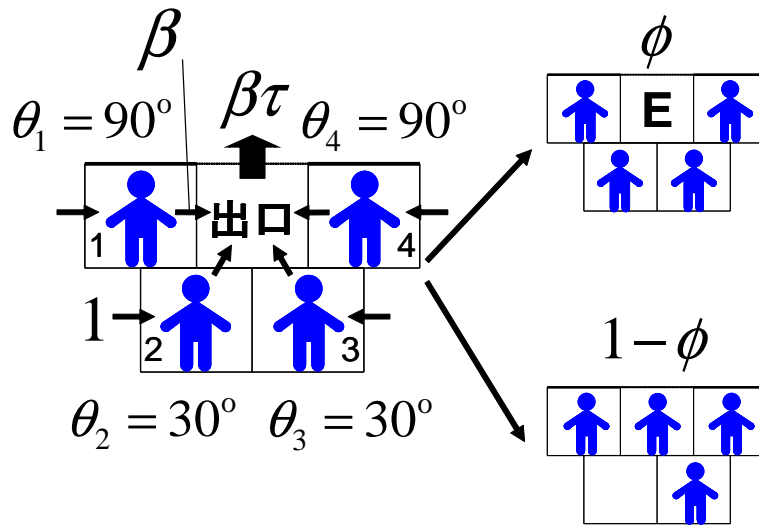


図 1: 確率セルオートマトンを用いた退出モデル。

退出・避難の研究は数多くあり、それを単純化した確率セルオートマトンモデルで流動係数⁵の理論的な解析も行われている [12]。また出口付近に障害物が設置された場合についても考察されているが [13, 14]、交互退出という退出方法に焦点を当てた研究はほとんど見られない。

交互退出が行われると二つの大きな利点がある。一つは、交互に退出することにより退出順序が定まるため、出口での衝突が減少し、それに伴って総退出時間が減少すると考えられることである。もう一つは人の精神的なストレスと関わっているという点である。出口付近に形成された人のクラスターの中を進み、ようやく退出しようとしたら、後の人に割って入れられ抜かされた場合などは非常に不快である。従って、交互退出により退出順序が決定されていると精神的なストレスを減少できると考えられる。

本研究の最終的な目標は、交互退出を創発できるシステムを提案することにある⁶。そこで今回はその第一歩として、二列に整列した人が退出する場合に交互退出が実現され、総退出時間が短くなる仕組みについてゲーム理論を用いて分析する。

2 モデル

この節では、参考文献 [13] で導入された確率セルオートマトンを用いた退出モデル (図 1) について簡単に説明する。居室の出口周りの人の振り舞いに着目したモデルであるため、空間は出口セルと出口セルに隣接した四つの出口近傍セル (1, 2, 3, 4) のみで表される。一つのセルには一人の人しか入ることができない。また人の動きは確率的であり、パラレルアップデートにより更新を行う。混雑した退出過程を考えているため、出口近傍セルにはそれらのセルが空いていれば確率 1 で人が入ってくる。出口近傍セルの人は確率 β で出口セルに移動しようとする。このとき二人以上の人と同時に出口セルに移動しようとした場合、確率 ϕ で誰も移動できず、確率 $1 - \phi$ で誰かしら一人が移動できる。出口セルにいる人は確率 $\beta\tau$ で居室外に退出する。

以下では、上述の β , ϕ , τ についてまとめる。 β はボトルネックパラメータであり、出口などのボトルネック付近の人の移動速度を表す。

⁵単位時間あたりに単位幅の出口を通過できる人の人数。建築基準法の避難設計 [11] で用いられる指標である。

⁶交通流の分野では、交互合流を創発するシステムが提案されている [15]。

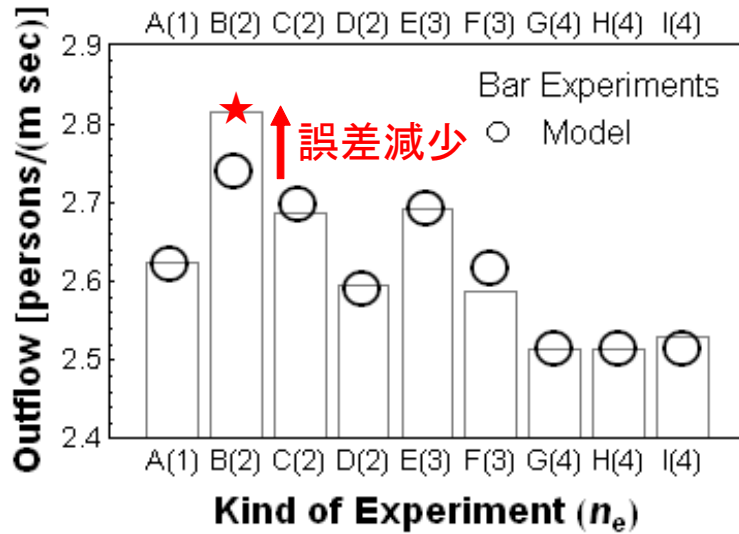


図 2: モデルと実験の流動係数の比較。横軸のアルファベットは図 3 に描かれた実験条件を表し、括弧付きの数字は退出時の列数を表す。

ϕ は衝突して誰も出口セルに移動できない確率を表す衝突関数であり、以下のような式で表される。

$$\phi(k) = 1 - (1 - \zeta)^k - k\zeta(1 - \zeta)^{k-1} \quad (2.1)$$

ここで、 k は同時に出口セルに移動しようとした人数であり、今回の図 1 のモデル場合 $0 \leq k \leq 4$ である。また $\zeta \in [0, 1]$ は、人のずうずうしさを表す実数パラメータである。衝突関数 ϕ は、 k 、 ζ に対して単調に増加し、最小値 0、最大値 1 をとる。つまり、同時に出口セルに移動しようとした人数が多く、かつ人がずうずうしくあまり譲り合いの行為をとらない場合に、衝突して動けなくなる確率が大きくなることを表している。

τ は出口での方向転換による歩行速度の減少率を表す方向転換関数であり、以下のような式で表される。

$$\tau(\theta) = \exp(-\eta\theta) \quad (2.2)$$

ここで、 θ は出口での方向転換の角度を表し、今回のモデルの場合は、図 1 のようにセル 1, 4 から移動した場合は 90° の回転、セル 2, 3 から移動した場合は 30° の回転が必要と考える⁷。また $\eta \in [0, \infty]$ は、人の方向転換に関する慣性を表す実数パラメータである。方向転換関数 τ は最大値 1 をとり、 θ 、 η に対して単調に減少し 0 に漸近する。つまり、出口での回転角が大きく、かつ人の回転に対する慣性が大きい場合に、移動速度の減少率が大きくなることを表している。

図 1 のモデルに対してマスター方程式を考え定常状態における解析を行うと、流動係数の理論的な式を導くことができる [13]。

3 交互退出の創発

図 2 は、2 節で導入したモデルで計算した流動係数と、実験による流動係数を比較したグラフである。アルファベット A-H の実験条件は図 3 に描かれているように、退出時の列数 (出口に同時に移動しようとする人数) と、出口で回転する必要のある角度が異なる。実験 A から β を決定し、

⁷このため、図 1 では簡単のためにセルが正方形で描かれているが、実際は六角格子を考えていることになる。

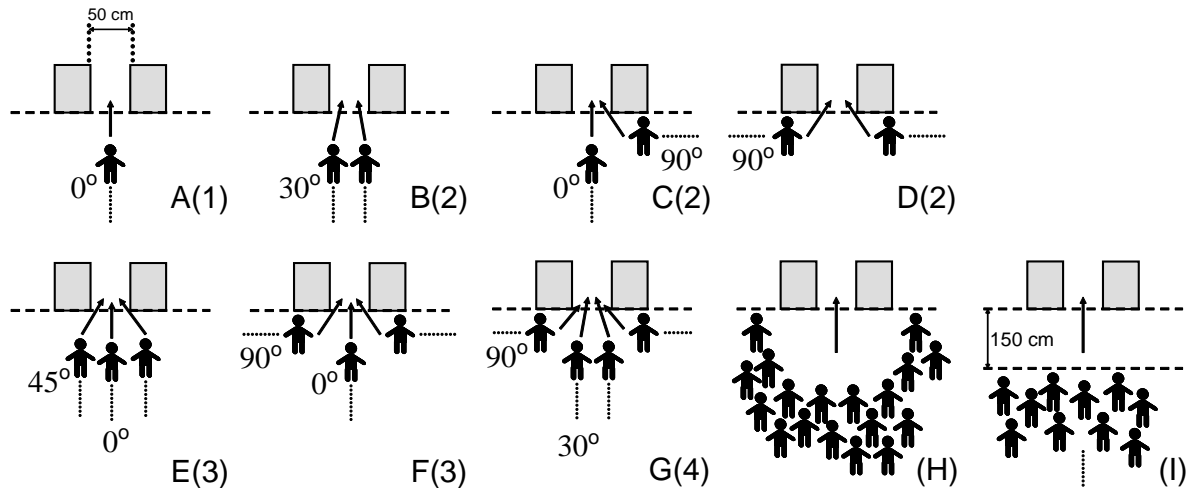


図 3: 実験の概略図。括弧付きの数字は退出時の列数を表す。実験 A-G における回転角が 0° 及び 30° の人は、出口から 150 [cm] 離れた位置から退出を開始する。実験 H と I は自由な通常の退出である。

最小二乗法により ζ , η を求め、モデルによる計算結果と実験結果を比較すると非常によく合っていることが分かる。これは衝突関数と方向転換関数の導入による成果であるが、実験 B の結果だけはモデルによる理論計算とかなり値が異なることも見て取れる。

ビデオによる画像を調べると、実験 B では二列で退出を始めた人が出口付近に到着する前に交互になって出口の中心に近い位置を歩いており、出口での回転角は 0° に近いと考えられる。そこで実験 B の条件で $\theta = 0$ とすると、流動係数は図 2 の星印まで増加し、実験結果に非常に近い値をとるようになる。

4 ゲーム理論による考察

前節での実験と理論の比較から、人は出口に到着するまでに交互合流を行うことにより出口での大きな方向転換を防ぎ、素早い退出を達成していると考えられる。では、なぜ人はそのような事前の交互合流が可能であるのだろうか。本節では、人が事前の交互合流を行うメカニズムをゲーム理論を用いて考える。

表 1 (左) には、出口から離れた位置で二列に並んでいる人達が次の時間ステップで前に進める確率が、二人の人が「直進」と「合流」という戦略をとった場合にどう変化するかがまとめられている。二人の人が共に直進しようとするれば衝突は起こらないため、 $\beta = 1$ の場合確率 1 で前に進むことができる。しかし少なくともどちらか一方の人が合流を試みると、衝突が確率 ϕ で起こるため前に進める確率は 1 より小さくなる。この前に進める確率を利得と考えると、この場合は二人の人が共に直進を選んだ場合に二人の利得が一番大きくなる。従って、この場合は人に出口から離れた位置で合流するというインセンティブはないということになる。

表 1 (右) は、出口から離れた位置からの退出時間を表 1 (左) と同様にまとめたものである。退出時間は、出口までの歩行時間 T 、合流にかかる時間 $1/\phi$ 、方向転換によりかかる時間 $1/\tau$ の和と考えた。退出時間を利得と考え表 1 (右) を見ると、二人が共に合流戦略をとったときのみ方向転換の影響が解消されるため、退出時間が短くなっていることが分かる。 $(\tau(0^\circ) > \tau(30^\circ))$ である。) そのためこの利得表を用いて人がとるべき戦略を考えると、二人とも合流戦略をとり退出時間を

表 1: (左) 次のステップに動ける確率。(右) 出口から離れた位置からの退出時間。

	直進	合流		直進	合流
直進	1	$1 - \phi (< 1)$	直進	$T + 1/\phi + 1/\tau(30^\circ)$	$T + 1/\phi + 1/\tau(30^\circ)$
合流	$1 - \phi (< 1)$	$1 - \phi (< 1)$	合流	$T + 1/\phi + 1/\tau(30^\circ)$	$T + 1/\phi + 1/\tau(0^\circ)$

短くすべきことが分かる。

以上の考察から、人は退出時間を考慮することにより事前合流という選択をしていると考えられる。今回の場合、次のステップに動ける確率は目先の利得であり、退出時間は未来のことを考えた利得である。従って、人にはすぐ目の前のことだけでなく、先のことまで考えて行動する能力があると考えられる。

5 まとめ

本論文では、群集の交互退出を創発させるための基礎研究として、二列に並んだ人が出口から離れた位置で交互合流を行う原因について考察した。その結果、人は今自分が進むことができるかという目先のことだけでなく、最終的に早く退出するためにはどうしたらよいかということを考えて行動していることが分かった。

6 謝辞

本研究は、(独)日本学術振興会、及び(独)科学技術振興機構の援助を受けた。

参考文献

- [1] Dirk Helbing. Traffic and related self-driven many-particle systems. *Rev. Mod. Phys.*, 73(4):1067–1141, 2001.
- [2] Takashi Nagatani. The physics of traffic jams. *Rep. Prog. Phys.*, 65:1331–1386, 2002.
- [3] Andreas Schadschneider, Debashish Chowdhury, and Katsuhiro Nishinari. *Stochastic Transport in Complex Systems*. ELSEVIER, 2010.
- [4] Dirk Helbing and Péter Molnár. Social force model for pedestrian dynamics. *Phys. Rev. E*, 51(5):4282–4286, 1995.
- [5] Dirk Helbing, Illés Farkas, and Tamás Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407:487–490, 2000.
- [6] Dirk Helbing, Illés J. Farkas, and Tamás Vicsek. Freezing by heating in a driven mesoscopic system. *Phys. Rev. Lett.*, 84(6):1240–1243, 2000.
- [7] Armin Seyfried, Bernhard Steffen, and Thomas Lippert. Basics of modelling the pedestrian flow. *Physica A*, 368:232–238, 2006.

- [8] Daniel R. Parisi, Marcelo Gilman, and Herman Moldovan. A modification of the social force model can reproduce experimental data of pedestrian flows in normal conditions. *Physica A*, 388:3600–3608, 2009.
- [9] C. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider, and J. Zittartz. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A*, 295:507–525, 2001.
- [10] Masakuni Muramatsu, Tunemasa Irie, and Takashi Nagatani. Jamming transition in pedestrian counter flow. *Physica A*, 267:487–498, 1999.
- [11] 2001年版避難安全検証法の解説及び計算例とその解説. 国土交通省住宅局建築指導課, 国土交通省建築研究所, 日本建築主事会議, 財団法人日本建築センター, 株式会社井上書院, 2001.
- [12] Daichi Yanagisawa and Katsuhiro Nishinari. Mean-field theory for pedestrian outflow through an exit. *Phys. Rev. E*, 76(6):061117, 2007.
- [13] Daichi Yanagisawa, Ayako Kimura, Akiyasu Tomoeda, Ryosuke Nishi, Yushi Suma, Kazumichi Ohtsuka, and Katsuhiro Nishinari. Introduction of frictional and turning function for pedestrian outflow with an obstacle. *Phys. Rev. E*, 80(3):036110, 2009.
- [14] Daichi Yanagisawa, Ryosuke Nishi, Akiyasu Tomoeda, Kazumichi Ohtsuka, Ayako Kimura, Yushi Suma, and Katsuhiro Nishinari. Study on efficiency of evacuation with an obstacle on hexagonal cell space. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 3(6):395–401, 2010.
- [15] Ryosuke Nishi, Hiroshi Miki, Akiyasu Tomoeda, and Katsuhiro Nishinari. Achievement of alternative configurations of vehicles on multiple lanes. *Phys. Rev. E*, 79(6):066119, 2009.