

1. 群集運動のセルオートマトンモデル

柳澤大地 西成活裕（東京大学 先端科学技術研究センター）

混雑・渋滞と物理学

都市部での生活は混雑と渋滞に溢れている。通勤時間帯の電車はぎゅうぎゅう詰めであり、連休の始めと終わりの高速道路はよく大渋滞する。また忘年会・新年会シーズンの飲食店はどこも大盛況であるが、もし人がいっぱいの店内で地震や火事が起こったら、果たして冷静に避難できるかどうかときどき不安になる。このような都市部の混雑や渋滞は解決すべき大きな社会問題であり、特に人の集団（群集）を対象とした研究は、学際的な学問分野の一つとして、活発に研究が行われるようになってきている。

実はこの20年間、物理学の分野でも群集運動の研究が行われてきた。一見、物理学はまったく群集運動とは関係ないように思われるだろう。しかし「電車の乗り換えのために移動する」、「映画が終わったので映画館から退出する」などといった1人の人の単純な動きは、重力にしたがって落下する粒子と似たものと考えることができる。

物理学の分野の一つに統計力学というものがある。気体を構成する分子のミクロな相互作用と、圧力・温度といった気体のマクロな物理量の関係などを明らかにした学問である。群集運動はこの統計力学と非常に相性が良い。共通の目的地に向かって移動する人が非常に多く、互いに相互作用を及ぼし合っているとき、群集全体の流れがどのようなになるのか調べることは、まさに統計力学の考え方そのものである。

上記のようなモチベーションで、多くの物理学者が群集運動の研究に取り組み、数多くのモデルが作られた。ここで注意したいのは、物理学者が生み出

したモデルは、前述の統計力学的な観点に基づいているということである。すなわち、気体分子のように人の個性は無視され、すべての人が共通の目的地に移動するといった単純な動きをする。このようなモデルが果たして現実への応用に耐え得るのか、疑問に思う方も多いだろう。もちろん限界はあり、特に個人の好みや考えを反映させることは困難である。そのため、近年はよりリアルなモデルを目指してさまざまな拡張が行われている。一方で、通勤や退出・避難といった多くの人が決まった動きしかしないと考えられる状況も現実には多々あり、望ましくない混雑は往々にしてそのような場合に発生している。そのような状況のシミュレーションには、物理学生まれモデルは大きな威力を発揮する。また、物理学者が作るモデルはシンプルであるため、混雑や渋滞の原因を明確にすることも容易である。そのため、混雑緩和方法を考える際にも使いやすい。

本稿では、物理学者がセルオートマトンという数理モデルを基に作った群集運動のモデルの一つであるフロアフィールドモデル^{1) 2)} について紹介する。このモデルは非常に単純であるにもかかわらず、数多くの示唆を与えてくれる優れたものだといわれ続けている。

セルオートマトン

セルオートマトンは、Stanislaw Ulam（スタニスワフ・ウラム）と John von Neumann（ジョン・フォン・ノイマン）が発見し、Stephen Wolfram（スティーブン・ウルフラム）が体系的にまとめあげた時間・空間・状態量がすべて離散的な数理モデルである。ここで

は離散時間，離散空間の1単位をそれぞれステップ，セルと呼ぶことにする．状態量は1と0の2通りのみが考えられることが多い．

ローカルルールのみで状態が更新されるのも大きな特徴である．ローカルルールというのは，注目しているセルの近傍セルの状態だけを参照するルールである．たとえば，あるセルは重要なセルだから，そのセルの状態はすべてのセルから毎ステップ参照する，といったルールは，厳密なセルオートマトンでは許されない．2次元のセルオートマトンの近傍セルとしては，縦と横のセルを近傍と定めるノイマン近傍と斜めのセルも近傍と考えるムーア近傍の2つがよく用いられるが，必ずしも注目しているセルに接しているセルである必要はない．またアップデート方法としては，すべてのセルの状態を同時に更新するパラレルアップデートが採用されることが多い．

フロアフィールドモデル

セルの状態1を「人がいる（黒粒子）」に，0を「人がいない（空白セル）」に対応させると，**図-1**のようにセルオートマトンを群集運動のモデルとして用いることができる．この2状態のみを考えることにより，1つのセルには1人の人しか入れないことになり，人の大きさ（排除体積効果）が自然に考慮される．また，ここではノイマン近傍を採用するので，人は毎ステップその場にとどまるか上下左右のセルに動くことができる．

静的フロアフィールド

目的地までの距離を各セルに記述したものが静的フロアフィールドである．退出シミュレーションにおける静的フロアフィールドの例を**図-2** (a) (マンハッタン距離 (L^1 ノルム)) および (b) (ユークリッド距離 (L^2 ノルム)) に示す．この静的フロアフィールドを使って「人は，他の人がいない近傍セルの中で，静的フロアフィールドが小さくなるセルに大きな確率で（大きくなるセルに小さな確率で）移動する」というルールを定めることによって，人

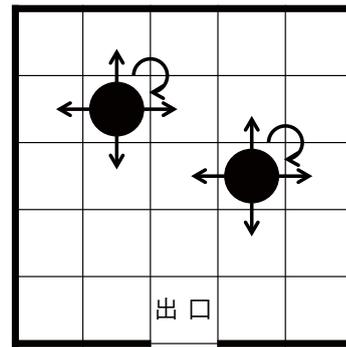


図-1 フロアフィールドモデルのイメージ

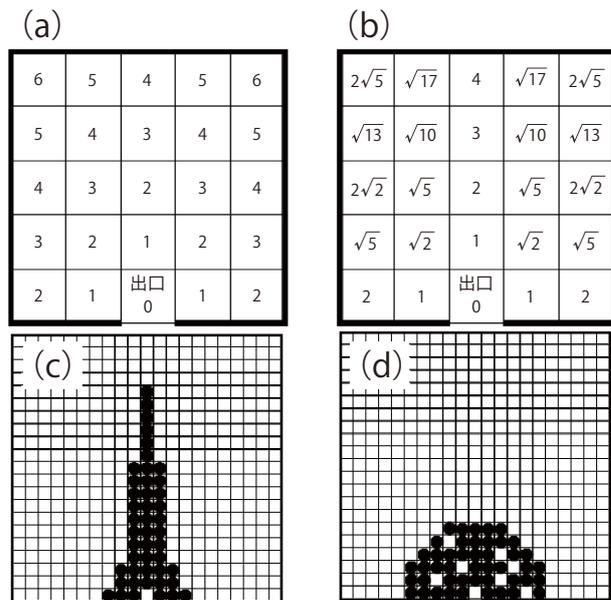


図-2 静的フロアフィールドと出口前に形成されるクラスタのイメージ

が出口に向かって移動していくシミュレーションが可能になる．静的フロアフィールドの計算は事前に行っておくことができるため，静的フロアフィールドを用いたシミュレーションは非常に高速である．

また静的フロアフィールドの計算方法を変えることによって人の振舞いを変えることもできる．**図-2** (c) (d) は，静的フロアフィールドとしてマンハッタン距離 (**図-2** (a)) とユークリッド距離 (**図-2** (b)) を採用した場合の出口前に形成される人のクラスタのイメージである．多くの論文で，避難においては**図-2** (d) のような半円上のクラスタが現実的だと報告されている．しかし，緊急でない場合，日本など横入りをする人が少ない国では，**図-2** (c) のような縦に伸びるクラスタが観測されることが多い．ユークリッド距離は2次元平面の最短距離を表すの

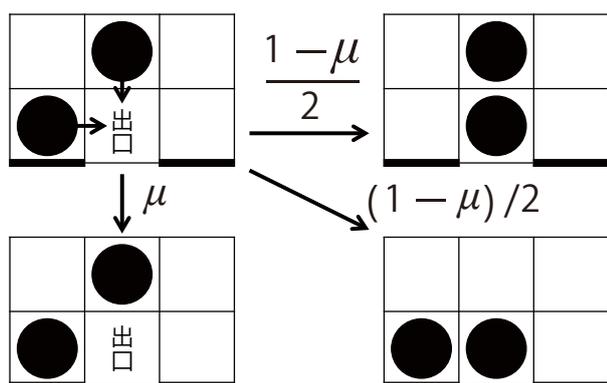


図-3 衝突（摩擦）パラメータ

で、人は少しでも出口に近付こうとしてクラスタは半円上になる。一方マンハッタン距離では、出口の正面のセルにいる人たちは横にずれると静的フロアフィールドが大きく増加してしまうので、そのまま今いるセルにとどまる傾向が強くなる。したがって、静的フロアフィールドを適切に設定することで、実際の状況に対応したクラスタを再現できる。

衝突（摩擦）パラメータ

フロアフィールドモデルはパラレルアップデートで更新される。そのため、図-3のように2人以上の人が同時に1つのセルに移動しようとする場合がある。このような状況で用いられるのが衝突（摩擦）パラメータ μ である。図-3のような状況では、確率 μ で衝突が起こり2人とも移動しようとしたセルに移動できず、確率 $1 - \mu$ でランダムに選ばれた1人が移動することができる。

衝突パラメータを用いて出口の手前に障害物（人が移動できない）セルを設けたシミュレーションを行うと、驚くべきことに、障害物がない場合よりも退出時間が早くなるという結果が得られることがある。これは障害物によって、人と人との衝突が抑制されることが原因と考えられ、実際の人による実験でも確認されている。このように衝突の効果を簡単な確率のパラメータでモデル化することにより、日常生活では考えられない逆説的な現象を発見することができる。

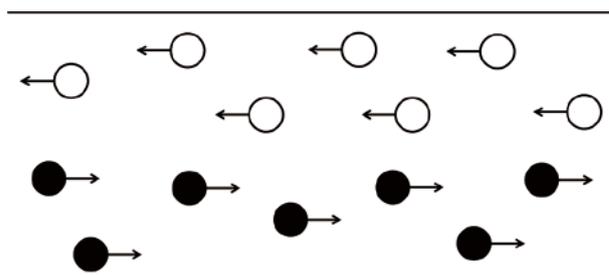


図-4 双方交流におけるレーンのイメージ

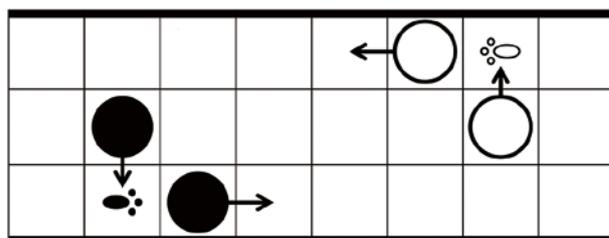


図-5 動的フロアフィールドのイメージ

動的フロアフィールド

ここまでで述べたルールは、すべて近接的で物理的な相互作用をモデル化したものであった。しかし現実の人は、主に視覚により周辺の人々とさまざまな遠距離相互作用を行っている。その相互作用による現象の一つが、図-4のような双方交流におけるレーン形成である。1本の道を左から右に移動する人たちと右から左に移動する人たちがいると、人は反対向きに移動している人とぶつかることを避けるために、同じ向きに移動している人の後をついて行くようになり、レーンが形成される。

このレーン形成は、近接的で物理的な相互作用しか考慮されていないモデルでは再現することができない。そこで考え出されたのが動的フロアフィールドである。動的フロアフィールドは蟻のフェロモンをヒントに生み出された。蟻は移動中にフェロモンを地面に残し、餌場までのフェロモンの道を作る。そして後から来る蟻は、そのフェロモンを頼りに餌場まで早く移動することができる。

人の場合は、このフェロモンを足跡に置き換えて考えると分かりやすい。右向きに移動する人と左向きに移動する人が異なる種類の足跡を残すようにする。すると、後続の人たちは足跡を見て、図-5の

ように自分と同じ向きの人たちがたくさん通っている領域を選ぶようになる。その結果、現実を観測されるレーンを再現することができる。

シミュレーションにおける動的フロアフィールドは連続値をとり、時間とともに拡散・減衰する。そのため、長い時間その効果が残らないようになっている。また双方向流のシミュレーションにおいても静的フロアフィールドは必要であり、実際に移動するセルは、静的と動的2つのフロアフィールドにより確率的に決まる。

動的フロアフィールドは、視野という遠距離相互作用を足跡の参照という近距離相互作用に置き換えたところに大きな意味がある。もし遠距離相互作用が入ってしまえば、モデルの更新ルールはローカルルールのみで構成できなくなり、空間を領域に区切って並列計算を行う場合に、領域の間で通信が頻繁に発生して効率が下がってしまう。

足跡の参照という人どうしのマイクロな相互作用から、双方交流のレーン形成というマクロな流れの現象が生み出されるメカニズムは、統計力学的に面白い。また、足跡参照のルールは右向きに移動する人と左向きに移動する人で差はなく、完全に対称であるにもかかわらず、レーンが形成されると右向きに移動する人と左向きに移動する人が多い領域は分断され、流れは対称でなくなる。これは物性物理学や素粒子物理学で見られる自発的対称性の破れに相当しており、非常に興味深い。

現象とモデルの相性

フロアフィールドモデルは拡張性が高く、多くの発展的なモデルが作られてきた。しかし、近年「リアルさ」を第一目的にした拡張が多いことはいささか気になる点である。第1章で述べたように、フロアフィールドモデルは統計力学的な発想から生まれたモデルであり、人の複雑な思考をそのまま導入するのに適したモデルではない。また、セルオートマトンの離散的な空間は人の細かい動きを表すのに向いていない。そのため、単に「リアルさ」を追及す

る場合には、ほかのモデルが相応しい場合も多々ある。

フロアフィールドモデルの特徴の1つは、離散時間・離散空間・ローカルルールによる高速なシミュレーションである。したがってモデルを拡張する場合はこれらのメリットを保つべきであると考えられる。特にローカルルールに収まるようルールを工夫することは研究者の腕の見せ所である。また、総避難時間などを一定の精度で定量的に再現し定性的な傾向を明らかにすることは、フロアフィールドモデルの最も得意とするところである。現実にはさまざまな擾乱があり、ある状況をきっちり再現できるモデルを、少し変化した別の状況に適用できないことはよくある。そう考えると、現実への応用で役に立つのは、ある程度定量的であり、ある程度普遍的シミュレーションが可能なモデルであり、フロアフィールドモデルはまさにそのようなモデルであると思われる。

フロアフィールドモデルに限らず、多くのモデルには長所と短所がある。したがって、研究を行う際は、注目している現象と選んだモデルの相性をよく考えたい。そのような考察がきちんと行われていれば、あえて相性の悪い組合せの研究に挑戦することにも大きな意味が生まれると思われる。

参考文献

- 1) 西成活裕：図解雑学 よくわかる渋滞学，ナツメ社 (2009).
- 2) Schadschneider, A., Chowdhury, D. and Nishinari, K.: Stochastic Transport in Complex Systems, Elsevier, Amsterdam/Oxford (2010).

(2017年3月31日受付)

柳澤大地 ■ tDaichi@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

2010年東京大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻博士課程修了，博士（工学）。茨城大学助教，東大航空宇宙准教授を経て，現在同大学先端科学技術研究センター准教授。群集運動の数理モデルおよび実験研究に従事。

西成活裕 ■ tknishi@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

1995年東京大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻博士課程修了，博士（工学）。山形大学，龍谷大学，東大航空宇宙を経て，現在同大学先端科学技術研究センター教授。非線形力学および渋滞学の研究に従事。