

PRINT ISSN 2434-5474
ONLINE ISSN 2434-5946

第 30 回
交通流と自己駆動粒子系
シンポジウム

論文集

*Papers
of
the 30th Symposium
on
Traffic Flow and Self-driven Particles*

— 2024 —

日時　： 2024年12月 6日(金) 10:00 - 15:00
　　　　7日(土) 10:00 - 14:30

場所　： オンライン開催 (Zoom Meeting)

主催　： 交通流数理研究会

<https://mathematical-society-of-traffic-flow.github.io/symposium/>

招待講演論文

生体の神経計算における確率性：

線虫 *C. elegans* の温度感覚システムからの考察 1

松山裕典, 加納周, 中野俊詩, 森郁恵

一般講演論文

東京ドームからの帰宅シミュレーション 5

浦田桂一郎, 柳澤大地, 西成活裕

非弾性剛体円板系の自己組織化空間不均一性と最終凝縮状態 9

北川遼, 麦田大悟, 村瀬信明, 磯部雅晴

最適速度旋回アルゴリズムによるヘテロ群口ボットが創発する行動 13

世良田竜平, 北原颯一郎, 本田泰

接触感染の一考察 17

石橋善弘, 福井稔

生体の神経計算における確率性： 線虫 *C. elegans* の温度感覚システムからの考察

松山 裕典¹, 加納 周², 中野 俊詩², 森 郁恵^{1,3}

¹ 名古屋大学 大学院理学研究科 附属ニューロサイエンス研究センター,
² 名古屋大学 大学院理学研究科 理学専攻 生命理学領域, ³ 北京脳科学研究所

概要

脳は、感覚入力を知覚や行動に変換するある種のマシンと捉えられる。しかしながら、決定論的なロジックで作動するコンピュータとは異なり、生物の脳は確率性を内包している。脳における確率的計算の神経基盤を明らかにすることは、脳とコンピュータの相違点を浮き彫りにし、生体の神経計算に特有のロジックを理解する手がかりとなる。線虫 *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*) は、わずか 302 個のニューロンからなる神経系を持ち、シナプスを介したニューロン間のワイヤリングが明らかにされている有用な実験動物である。こうした well-defined な神経系をモデルとしてすることで、生物における神経計算の原型を、シングルニューロンからシステムレベルに至るまで包括的に理解できることが期待される。本講演では、我々がこれまでに線虫 *C. elegans* の神経系において見出した生体計算メカニズムを紹介する。まず、線虫の温度に対する知覚が、感覚受容と運動制御の間を仲介する介在ニューロンの活動にコードされており、その活動パターンが学習を通じて変化することで、「温度に対する好き嫌いの反転」に関与することを報告する。次に、温度感覚を処理する神経回路において、あるニューロンが「ノイズ生成因子」として機能することを報告する。最後に、自発的な神経活動の機能を明らかにするための現在進行中の研究を紹介する。自発的な神経活動は、感覚情報のプロセシングにある種の変動性をもたらし、生体計算における確率性の主要な原因となりうる。我々は現在、内因性の自発神経活動と外部感覚入力とのクロストークを明らかにするため、自発的な神経活動オシレーションが外部の感覚入力摂動によってどのように変化するかを計測する実験を行っている。

Stochasticity in Neural Computation: Insights from the *C. elegans* Thermosensory System

Hironori J. Matsuyama¹, Amane Kano², Shunji Nakano², Ikue Mori^{1,3}

¹ Neuroscience Institute, Graduate School of Science, Nagoya University, Nagoya, Japan

² Department of Biological Science, Graduate School of Science, Nagoya University, Nagoya, Japan

³ Chinese Institute for Brain Research, Beijing, China

Abstract

The animal brain can be regarded as a type of machine that converts sensory inputs into perceptual or behavioral outputs. However, unlike computers operating on deterministic logic, animal brains exhibit stochasticity. Identifying the neural basis of the stochasticity provides insights into the principles underlying biological computation. The nematode *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*) is an ideal model system for comprehensively investigating fundamental forms of biological computation at multiple levels, ranging from the single-cell to the systems level, due to its well-defined nervous system comprising 302 identifiable neurons with fully mapped synaptic wiring. In this presentation, we will introduce the computational

mechanisms we have identified in the *C. elegans* nervous system: First, we will report that temperature perception in *C. elegans* is encoded in the activity patterns of interneurons, which bridge sensory reception and motor control. The activity patterns of these interneurons change through learning and are involved in the reversal of temperature preference. Second, we will report that specific neurons function as noise generators in the temperature-processing circuitry. Finally, we will highlight our ongoing research on the role of endogenous spontaneous neural activity. Spontaneous neural activity is thought to introduce variability into sensory processing, potentially serving as a major source of neural stochasticity. To examine the crosstalk between the intrinsic spontaneous activity and external sensory input, we are currently investigating how the spontaneous neural oscillations are altered in response to external sensory perturbations.

1 線虫 *C. elegans* のシステム神経科学

生物の知覚、記憶、情動、行動、意識は、脳内の化學的あるいは電気的な信号によって生み出されている。脳の動作原理を理解するためには、情報の符号化と通信に特化した細胞である神経細胞（ニューロン）の機能から、それらが構成するネットワークのダイナミクスまでを包括的に理解することが求められる。しかしながら、神経系の構造の複雑さゆえに、高度に統合された情報処理の全貌を理解する「システム神経科学」の実践には一般に困難が伴う。

こうした課題に対し、線虫 *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*) は有用なモデルを提供する。*C. elegans* は、土壤中で細菌を主食として生息する線形動物の一種で、体長 1mm の透明な体を持つ。主に、雌雄同体による自家受精で繁殖し、さらに稀に生じるオスと雌雄同体の間でも交配が可能である。こうした性質から遺伝学との相性がきわめて良く、1963 年に生物学者 Sydney Brenner によって発生生物学と神経科学のモデル動物として採用されたことで知られる。

C. elegans は、わずか 302 個のニューロンから構成される小さな神経系を持ちながら、温度・匂い・味・機械刺激・光をはじめとするさまざまな感覚モダリティを受容することができる。神経系を構成するすべてのニューロンには固有の識別名が付けられ、区別することができる。さらに、それら 302 個のニューロンのセットには個体差がなく、シナプスを介したニューロン間の接続ダイアグラムが電子顕微鏡切片の解析から明らかにされているという強力な解剖学的基盤を有している [1, 2]。*C. elegans* の stereotyped で well-defined な神経系は、生物がもつ知性のプロトタイプとその神経基盤をシステムレベルで理解するための有望な概念実証 (proof of concept) モデルである。

2 連合学習を支える神経ダイナミクス

生物は、同一の感覚刺激に対しても、それに紐づけられた経験に応じて、その刺激に対する嗜好性（好き嫌い）を変化させることができる。連合学習とよばれるこの神経機能は、線虫 *C. elegans* においてもその原型を見出すことができる。線虫は、温度とエサを関連づけて学習することができ、学習によって形成される温度への誘引行動は温度走性 (thermotaxis) と呼ばれている [3, 4]。

たとえば、20°C で豊富なエサを与えられて飼育された線虫 (well-fed animals) を、エサのない温度勾配上に置くと、それらの線虫は飼育温度である 20°C に向けて移動し、20°C 付近の等温線上を運動し続ける行動 (isothermal tracking) を示す。一方、同じ温度で飢餓を経験した線虫 (starved animals) では、飼育温度への誘引行動は消失し [5, 6, 7, 8]、飼育温度を回避する行動がみられる。すなわち線虫は、過去の摂食経験に依存して、温度に対する好き嫌いを反転させていると考えられる。

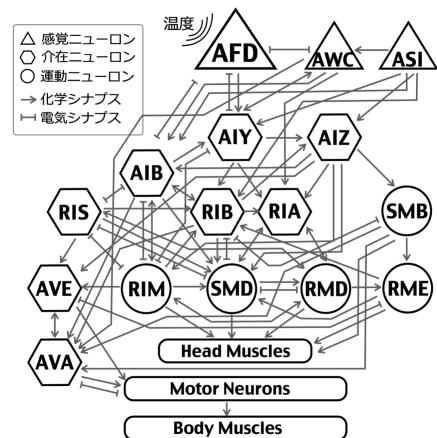


図 1: 温度感覚を処理する神経回路

先行研究により、温度走性行動を制御する神経回路 [4, 9, 10] (図 1) と、エサと温度の連合学習に関与する遺伝子/分子メカニズムが提案されている [5, 6, 7, 8, 11]。しかしながら、温度の嗜好性の反転がどのような神経ダイナミクスでコードされているかは明らかにされていなかった。

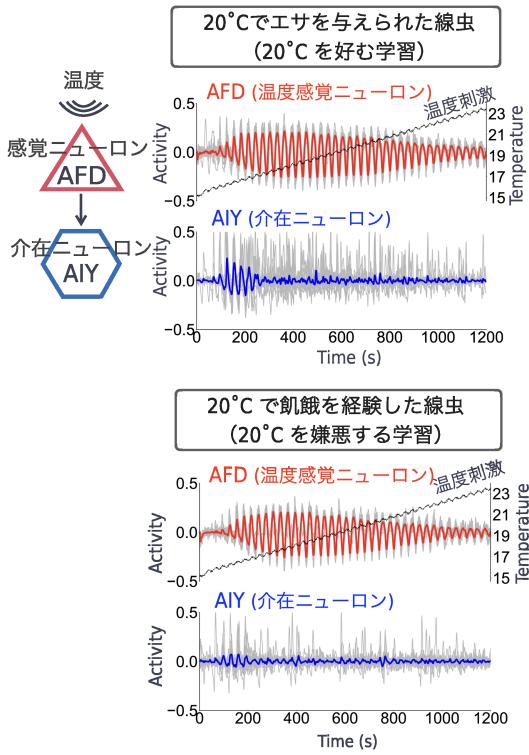


図 2: 線虫の「温度の好き嫌い」は、温度感覚ニューロン (AFD) と下流の介在ニューロン (AIY) の神経活動パターンによってエンコードされている。

我々は、温度を受容する感覚ニューロン AFD とその下流で直接シナプス入力を受ける介在ニューロン AIY の間の情報伝達に着目し、それらの神経活動を同時に計測する実験を行った。一般に、ニューロンが興奮性の入力を受けると、細胞内のカルシウムイオン濃度が上昇することから、カルシウムイオンの濃度変化を捉えることで神経活動の状態を知ることができる。我々は、カルシウムイオンの存在下で構造変化を起こして蛍光を発するタンパク質 (カルシウムプローブ) を用いて、その蛍光輝度の変化を捉えることにより神経活動の計測を行った (カルシウムイメージング)。温度感覚ニューロン AFD と介在ニューロン AIY に、それぞれ赤色カルシウムプローブ (R-CaMP2) と緑色カルシウムプローブ (GCaMP3) を遺伝学的に発現させた個体を用い、これらの個体に温度変化刺激を与えながらカルシウムイメージングを行った。その結果、20°Cを好むような学習条件 (well-fed animals: 20°Cでエサを与えた

条件) では、AFD と AIY の同期的な活動パターンがみられた (図 2 上)。一方、20°Cを嫌悪する学習条件 (starved animals: 20°Cで飢餓を経験させた条件) では、AFD と AIY の同期性が著しく減弱することがわかった (図 2 下)。すなわち、線虫の神経系においては、エサと温度の連合学習による温度の嗜好性の反転が、温度感覚ニューロン AFD と介在ニューロン AIY の通信パターンでエンコードされていることが示唆された [12, 13]。

3 ノイズを生成するニューロン

神経系は、外部環境からの入力を処理し、適切な応答を生み出すために組織化されたシステムであるとされるが、その内部ではしばしば不規則な応答パターンが観察される。こうした神経ノイズは、神経系の制御を不安定化させる要因になりうるが、一方で、神経系のノイズやゆらぎが適応的な情報処理や応答を生み出す上で積極的な役割を持つ可能性を検討することは、脳を理解するための重要な試みである。

我々は、線虫 *C. elegans*において、温度/嗅覚ニューロンとして機能する AWC ニューロンが、温度感覚の情報処理において、ある種の「ノイズ生成因子」としてはたらいていることを示唆する結果を得た [14]。線虫の温度感覚を処理する神経回路 (図 1) には、2つの異なる温度感覚ニューロン AFD と AWC が共存し、それら2つの感覚ニューロンは共に下流の介在ニューロン AIY に接続している (図 3 左端の回路図)。興味深いことに、AFD と AWC はともに温度感覚ニューロンという属性でありながら、異なる応答特性を示すことが知られている。先行研究によると、AFD は温度変化に対してロバストな応答規則を示す [15, 16, 17, 18, 19]。一方で AWC は、温度に確率的に応答することが報告されている [20, 8]。我々は、温度に対して確率的な応答パターンを示す AWC が、温度感覚の情報処理においてどのような機能を持つのかを検討するため、AWC を遺伝学的に欠落させる実験を行った。具体的には、細胞死を誘導するタンパク質分解酵素 (カスパーゼ) を AWC に発現させることで [10]、発生の過程で AWC を欠落させた線虫系統を作出し、これを用いて神経回路のカルシウムイメージングを行った。

その結果、AWC が欠落した線虫では、温度感覚ニューロン AFD から介在ニューロン AIY への情報伝達の効率が上昇 (同期的な活動が上昇) することが明らかとなった (図 3)。すなわち、AWC は、神経回路内において温度情報の伝達にノイズをもたらす因子として機能している可能性が示唆された。

さらに線虫の蛇行運動パターンの解析から、AWCは線虫が「好ましい温度刺激」を感じた際の蛇行運動のばらつきを増加させる機能をもつ一方、AFDは逆に蛇行運動のばらつきを減少させる機能を持つこともわかった。以上の結果は、線虫の神経系が、ゆらぎを増大させる AWC ニューロンと、逆にゆらぎを減弱させる AFD ニューロンの両者を温度の情報処理回路に共存させ、そのバランスによって「好ましい温度」に対する応答を制御していることを示唆している。

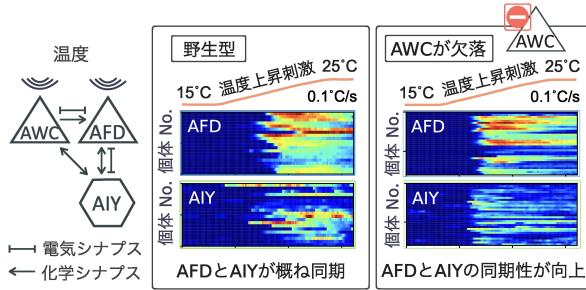


図 3: 温度感覚ニューロン AWC を欠落させると、温度感覚ニューロン AFD から下流の介在ニューロン AIY への情報伝達（同期性）が上昇する。

4 自発的神経活動の機能解明にむけて

本講演の最後のセクションでは、自発神経活動の機能解明に向けた我々の試みを紹介する。脳は、外部からの感覚入力とは独立に自発的な神経活動を示すことが知られているが、その機能は十分に理解されていない。我々の実験では、線虫 *C. elegans* の温度情報を処理する神経回路（図 1）において、主要な温度感覚ニューロンである AFD が活動しない状況でも、下流の介在ニューロン (RIA) と運動ニューロン (SMD) において自発的な神経活動のオシレーションが計測された。これらの自発活動ニューロン群では、細胞体¹と神経突起²で異なる振動パターンが観察された (RIA では先行報告がある [21, 22])。こうした内因性の神経リズムが、外部からの感覚入力とどのように相互作用しているかを明らかにするため、我々は現在、光遺伝学（光による神経活動の操作）とカルシウムイメージングを組み合わせた実験系を立ち上げ、内因性の神経リズムをモニターしながら感覚入力擾動を与える実験を行っている。

参考文献

- [1] White *et al.*, Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. **314**(1165):1-340 (1986).
- [2] Cook *et al.*, Nature **571**: 63-71 (2019).

- [3] Hedgecock & Russell, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **72**(10):4061–4065 (1975).
- [4] Mori & Ohshima, Nature **376**:344-348 (1995).
- [5] Mohri *et al.*, Genetics **169**(3):1437–1450 (2005).
- [6] Kodama *et al.*, Genes Dev. **20**(21):2955–2960 (2006).
- [7] Nishio *et al.*, Genes Cells **17**(5):365-86 (2012).
- [8] Takeishi *et al.*, eLife **9**:e61167 (2020).
- [9] Kuhara *et al.*, Science **320**(5877):803-807 (2008).
- [10] Ikeda *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **117**(11):6178–6188 (2020).
- [11] Nakano *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **117**(3):1638-1647 (2020).
- [12] Matsuyama & Mori, eNeuro **7**(3):ENEURO.0414-19.2020 (2020).
- [13] Aoki *et al.*, PLoS Genetics **18**(6):e1010219 (2022).
- [14] Kano *et al.*, Neurosci. Res. **188**:10-27 (2023).
- [15] Kimura *et al.*, Curr. Biol. **14**(14):1291-5 (2004).
- [16] Kobayashi *et al.*, Cell Rep. **14**(1):11-21 (2016).
- [17] Takeishi *et al.*, Neuron **90**(2):235-44 (2016).
- [18] Yu *et al.*, Neuron **84**(5):919-926 (2014).
- [19] Tsukada *et al.*, J. Neurosci. **36**(9):2571-2581 (2016).
- [20] Biron *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **105**(31):11002-11007 (2008).
- [21] Hendricks *et al.*, Nature **487**(7405):99-103 (2012).
- [22] Ouellette *et al.*, eNeuro **5**(6):ENEURO.0121-18.2018

¹細胞核などの細胞小器官が集中する細胞の本体

²他のニューロンとの入出力のために細胞体から伸びた突起構造

東京ドームからの帰宅シミュレーション

浦田桂一郎, 柳澤大地, 西成活裕
東京大学 工学部 航空宇宙工学科

概要

コロナ終息以降のイベントの開催数の増加に伴い、群集事故や電車の遅延といった「混雑リスク」への対策は、ますます重要性を増している。本研究では東京ドームを例に、イベント後に最寄駅へ向かう群集の混雑緩和を目的として、ドーム退出率・駅までの帰宅経路に存在する赤信号の時間に着目し、セルオートマトンモデルを用いてシミュレーションを行った。そして、コンサートやスポーツの試合といったイベントの種類に応じて、混雑指標を最小化するドーム退出率と赤信号時間の組み合わせを明らかにした。この結果は、東京ドームにおける各イベント後の規制退場などの群集マネジメントに役立つと考えられる。また、他の商業施設の混雑緩和や施設設計段階での混雑予想への応用も期待される。

Simulation of Returning Home from Tokyo Dome

Keichiro Urata, Daichi Yanagisawa, Katsuhiro Nishinari

Department of Aeronautics and Astronautics, Faculty of Engineering, The University of Tokyo

Abstract

With the increasing number of events following the end of the COVID-19 pandemic, addressing “congestion risks” such as crowd accidents and train delays has become increasingly important. This study focuses on Tokyo Dome and aims to mitigate crowd congestion when heading to the nearest station after an event. Using a cellular automaton model, we simulate scenarios considering the Dome Exit Rate and Red Light Time on the routes to the station. We identify the combination of Dome Exit Rates and Red Light Times that minimize congestion indices for different types of events, such as concerts and sports games. These results can contribute to crowd management strategies, including regulated departures after events at Tokyo Dome, and may also be applicable to congestion mitigation in other facilities or in predicting congestion during the design phase of new venues.

1 序論

コロナウイルスが第五類に移行し、イベントの開催数・参加人数ともに増加傾向にある現在、イベントにおける混雑の緩和は非常に大きな問題となっている。特にイベント後の最寄駅の混雑や、それによる電車の遅延はニュースでも取り上げられるほどである。[1]によれば、東京都内において満員電車による遅延が年間で数兆円規模の経済損失を引き起こしているとされ、その一部がこのようなイベント後の混雑に起因していることは否めず、解決優先度が高い課題であると言える。それと同時に、こうした密集した場所では群集事故が起きる可能性が高まるため、事故防止の観点からも混雑対策を考える必要がある。

これに対する「スタジアム内部」の観点からのアプローチとして、[2]は歩行者シミュレータを用いて接触回数を指標に、分散退場時における一般的な野球ドームやサッカー場の内部の様子を調べ、分散退場オペレーションの評価基準を示した。また、[3]は関門海峡花火大会を例に、実際のデータとシミュレーションのデータの同化を用いて、実際のデータから初期条件を定めた信号の開閉時間を制御し、花火大会の参加者の帰宅時間を含めた混雑指標を最小化する研究を行なった。

本研究は、スタジアムの出口から駅入口の信号までをシミュレーションに組み込むことで、スタジアムからの退出と、帰宅道中の信号時間の両方の有効な制御方法について調べた。従っ

て、イベントからの帰宅全体としての最適を考えることができるため、総合的な群集マネジメントに役立つと考えられる。イベントを大きく「コンサート型」、「スポーツ型」に分け、二つのイベントの性質に注目して解析しているのも新しい要素である。

2 シミュレーションモデルと設定

2.1 モデル概要

本研究では、図2.1(上)に示すような東京ドームから水道橋駅東口までの帰宅シミュレーションを、時間と空間がともに離散的なセルオートマトン・フロアフィールドモデル^{*1}(図2.1(下))を用いて行った。なお、本シミュレータは独自に実装したものを使っている。モデルの図の上段が1階、下段が2階に対応している。シミュレーションの入口はドームの出口である(図2.1の赤いピンのマーク)。ドームから退出した群集は、図2.1に矢印で示した経路を辿って駅に向かい、シミュレーションの出口である信号(図2.1の青いピンのマーク)を渡ると帰宅完了となる。(シミュレーションから消える)モデルの1セルは50 cm × 50 cmとする。人の歩く速度を1.25 m/s [7]とする

^{*1} 群集のモデルには、ソーシャルフォースモデルなど、人の細かい動きを表現できる連続時間・連続空間のものがある。しかし、本研究で行ったシミュレーションは広範囲・大人数の大規模なものであるため、計算時間を考慮してセルオートマトンモデルを選択した。

ため、モデル内での 1 ステップは 0.4 [s] とする。本研究ではムーア近傍を採用しているが、縦横方向と斜め方向の移動時間の違いは考慮していない。これは、本研究のシミュレーションは縦横方向の直線経路が多く、定常的な流れとなっている時間が長いため、移動方向による移動時間の違いの影響は少ないと考えたからである。また、本モデル上での移動は確率的であり、直線経路であっても斜め移動する場合があるため、縦横方向と斜め方向の移動時間を同等に扱った方が、直線経路においてはむしろ自然な移動を再現できる。

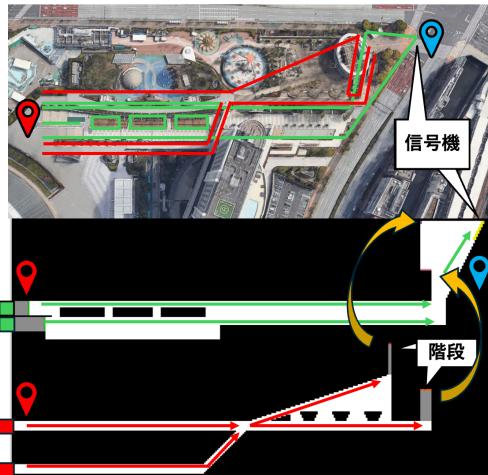


図 2.1: 実際のルート (Google Earth(上) とモデル(下))

上段に Google Earth 上で示したシミュレーション領域と、下段の上・下段の下で再現した歩行可能領域の輪郭を赤・緑で示した。下段の上・下段の下ではそれぞれ、1 階・2 階の歩行可能領域と、人の流れを緑・赤矢印で示した。またオレンジ色の矢印は階段の移動先を示している。

2.2 ドームからの退出について

1 ステップあたりに群衆が東京ドームから退出する人数の期待値をドーム退出率と定義する。1 回で退出する人数は 0~最大人数のランダムな値を採用している。最大人数とは、モデルの入り口の最大幅に相当し、1 階は 22 人 (図 2.1(下) の緑の四角形)、2 階は 35 人 (図 2.1(下) の赤い四角形) である。また、イベントを「コンサート型」と「スポーツ型」に分けた。スポーツ型イベントの場合、イベントの特徴上、試合終了後に観客は勝利した側の全観客 (以下、勝者) と敗北した側の観客 (以下、敗者) で分かれることになる。勝者の割合を勝者率と定義する。例えば野球の試合の場合、試合後には勝者のチームでヒーローインタビュー等が行われ、勝者はこれを見てから帰ると考えられることから、両者で帰り始めるタイミングが異なると考えられる。そこで、勝者は退出開始から 15 分後に退場を開始するものとした。

2.3 信号について

図 2.1 を見るとわかる通り、青のマーカー部分には水道橋駅東口への信号がある。そこで、本モデルでは出口部分を一定時間ごとに開閉する。青信号時間は現実のデータである 40 [s] に設定し、赤信号時間をパラメータとして変化させることとする。

2.4 混雑指標について

本研究における混雑指標 (Congestion Index, 以下 CI) を以下のように定義する。

$$CI = a \times (\text{全体帰宅時間}) + b \times (\text{個人帰宅時間}) \\ + c \times \frac{1}{(\text{信号効率})} + d \times (\text{出口の最高密度})$$

a, b, c, d はそれぞれの指標の重み付けである。信号効率とは「青信号一定時間あたりに通過した人数」であり、これによって車道側の効率も考えられているため、常に青信号の状況が最適とはならない。以下では表記を簡単にするためドーム退出率・赤信号時間・全体帰宅時間・個人帰宅時間・信号効率・密度の最大値をそれぞれ $\lambda, \tau, T, I, S, D$ と表記することにする。また T, I, S, D のオーダーが揃うように、今回は $(a, b, c, d) = (1, 1, 10000, 10000)$ とした。

3 近似計算

CI を構成する 4 つの指標の近似式の導出について述べる。

3.1 I について

I は以下のように分解できる。

$$I = (\text{信号機まで歩いてかかる時間}) \\ + (\text{信号機付近で待たされる時間})$$

前者はシミュレーションデータから 900 ステップ (6 [min]) 程度と考えられる。そこで後者について考える。ドーム退出口から信号機手前までにいる人数は $\lambda \times 900$ で計算でき、シミュレーションデータから青信号 100 ステップ (40 [s]) で渡ることができる人数は 240 人程度と考えられる。そのため、信号の一周期 ($100 + \tau$) を用いると、 I は、

$$I = 900 + k_I \times \frac{\lambda \times 900}{240} \times (100 + \tau)$$

という式で表される。ドームから退出した人が信号機に到達するまでにすでに信号を通過している人もいると考えられる。 k_I はこの効果を表すパラメータであり、シミュレーションデータを用いて τ の関数として求められる。

3.2 T, S について

T は次の様に分解できる。

$$T = (\text{全観客がドームから退出するまでの時間}) \\ + (\text{最後の一人が帰宅にかかる時間})$$

前者は全観客数 (5000 人) をドーム退出率で割ることで得られ、後者は個人帰宅時間を用いることで計算できるので、

$$T = \frac{(\text{全観客数})}{\lambda} + k_T I$$

という式で表される。ただし k_T はシミュレーションデータを用いて τ の関数として求められるパラメータである。信号効率 S は T と τ を用いて

$$S = \frac{(\text{全観客数})}{T \times \frac{(\text{青信号時間})}{(\text{青信号時間}) + \tau}}$$

という式で計算される。

3.3 D について

密度が最大になるのは流入量と流出量が等しくなるときである。今、流入量はドーム退出率であり、流出量は信号機付近の人数、つまり密度に比例すると考えられるから、 D は

$$D = k_D \lambda$$

という式で表される。 k_D は τ の関数であり、シミュレーションデータを用いて求めることで計算できる。

4 コンサート型イベントの場合の結果

図 4.1(左) は実際にコンサートが行われた日時の信号機付近の群集密度の時間変化と、そこから推算される条件でシミュレーションした結果である。このシミュレーションでは、ドーム退出率を決定するために JST 未来社会創造プロジェクトで AI カメラを用いて計測されたデータを用いている。しかし、実際よりかなり小さい値となってしまうことが分かっているため、このプロットでは流入の観測データを 5 倍と 6 倍した条件でシミュレーションした結果を影付きプロットで載せている。これを見ると、シミュレーションによって実際のデータと同様の増減のタイミング、帰宅時間を再現できていることが分かる。データとシミュレーションの誤差原因としては 2 つ考えられる。1 つは本モデルではドーム退出率が常に一定であるが、現実ではドーム退出率は変化している可能性がある。2 つ目は、モデル内のエージェントは現実の人の挙動である他人と距離を取るために止まるという動作を行わないことが挙げられる。これらは今後の課題である。

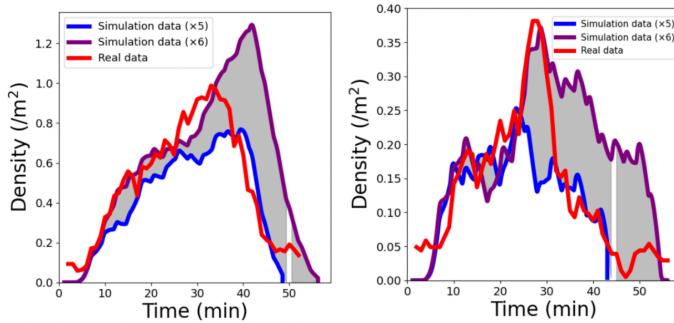


図 4.1: 信号機前の密度の時間変化 (コンサート型 (左), スポーツ型 (右))

図 4.2 は、シミュレーションから得られた赤信号時間とドーム退出率に対する CI のヒートマップである。赤の点は同ヒートマップにおいてドーム退出率を固定した断面における最小点、オレンジの点は同ヒートマップにおいて赤信号時間を固定した断面における最小点である。(すなわち、赤の点群とオレンジの点群が交わっている場所が、赤信号時間とドーム退出率の両方が可変であった場合に CI が最小となる条件である) また赤とオレンジの曲線はそれぞれ、3 節の近似関数を用いてシミュレーションとは無関係に CI の関数を求め、それをドーム退出率、赤信号時間いずれかを固定した 1 変数関数と見て CI を極小化するもう一方の値を連続的にプロットしたものである。

これを見ると、どちらの曲線もドーム退出率が小さく赤信号時間が大きい領域において、最小値の点群とずれが生じていることが分かる。この理由について考察する。

まずは赤信号時間固定の曲線がその領域においてデータと差がある原因を考察する。これは T の近似関数に原因があると考えられる。3.2 節で述べたように、 T は次式の様に近似した。

$$T = \frac{\text{(全体会員)}}{\lambda} + k_T I$$

I に入りに比例する項が含まれることから λ の増加に伴って第

一項が減少、第二項が増加するため T の近似曲線は下に凸となり、極小値を取るドーム退出率が存在してしまう。それゆえあるドーム退出率以上で一定となる実際のデータとの誤差が生じ、この傾向が赤信号時間が大きくなるにつれて顕著になるため、固定する赤信号時間が大きい領域ではドーム退出率がデータよりも大きい点で CI の近似曲線が極小値をとっていると考えられる。

次にドーム退出率固定の曲線がデータと差がある原因を考察する。これは D の近似関数に問題がある。3.3 節で述べたように、今回は密度を一次関数で近似した。しかし、赤信号時間が大きい領域ではドーム退出率がある一定値を超えると D はほぼ一定値を取る。これを一次関数で近似すると、図 4.3 のようにその影響で近似曲線の傾きが小さくなり、ドーム退出率が小さい領域ではデータより大きい値を近似値として計算してしまう。このため、固定するドーム退出率が小さいときは実際よりも小さい赤信号時間で CI が最小になっていると考えられる。

しかしある程度の精度はあり、この曲線を用いることで、例えばコンサート型イベントの際にドーム退出率が 3.56 [人/s] 附近になれば、赤信号時間は 80 [s] に調整すると良いとわかる。

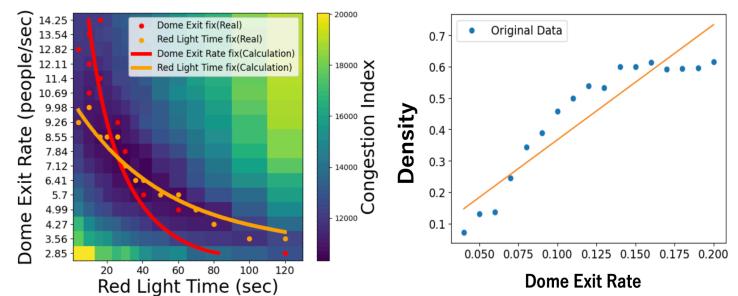


図 4.2: 混雑指標 CI のヒートマップ (コンサート型)

図 4.3: ドーム退出率と最高密度の関係 ($\tau=100$)

5 スポーツ型イベントの場合の結果

図 4.1(右) に実際に野球の試合が行われた際の信号機付近密度の時間変化と、そこから推算される条件でシミュレーションした結果を載せる。この図を見ると、シミュレーションによって、敗者と勝者のファンでピークが二つある特徴、密度の増減のタイミング、帰宅終了時間などを再現できていることが分かる。

スポーツ型では、ドーム退出率と赤信号時間に加えて、三つのパラメータとして勝者率を考える必要がある。図 5.1 は、現実的に当てはまる場合が多いと考えられる 2 通りの勝者率についてコンサート型と同様のデータプロットを行った結果である。左が勝者率が 0.4、右が勝者率 0.6 の場合である。多少ばらつきはあるものの近似曲線はヒートマップの特性を捉えている。これを見ると、コンサート型と比べて特にドーム退出率、赤信号時間が中程度のところではばらつきが大きいことが分かる。これはスポーツ型というイベントの特性が一番影響を与えるのが、この領域であるからであると考えられる。赤信号時間が短いところでは多くの人が信号を渡ることができるためドーム

ム退出率のばらつきの影響は小さく、また赤信号時間が長いところではドーム退出率にばらつきがあっても結局信号機付近で混雑するので影響は少ない。それに対し、15分というインターバルがある状況でドーム退出率、赤信号時間が中程度だと信号機前の群集密度がドーム退出率の影響を受けやすい。つまり、後から退出てくる勝者のドーム退出率のばらつきによって密度の時間変化の仕方もばらついてしまう。実際にシミュレーションデータを確認したところスポーツ型の密度のグラフはこの領域でばらつきが大きい傾向にあることがわかった。またこれによって近似曲線の精度も悪くなるためこの様な結果になったと考えられる。

しかしある程度の精度はあるため、この曲線から最適なパラメータを求めることができる。具体的には、現実では勝者率は席の予約状況から事前に推定できるため、ドーム退出率と赤信号時間の片方が定まればもう片方の最適な値を推算することができる。例えば、A 対 B の試合でファン数が 6:4 であるときに A が勝ち、赤信号時間が 100 [s] であるとすると、ドーム退出率は 4.27 [人/s] になるよう規制退場させるのが良いとわかる。

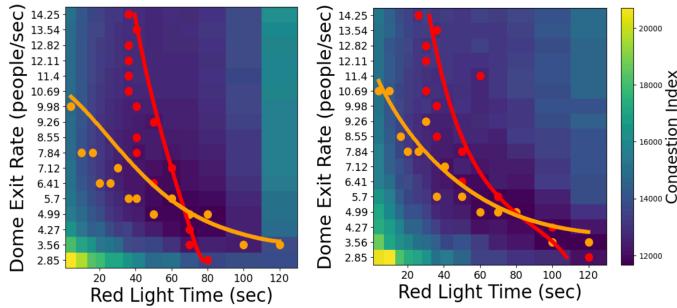


図 5.1: 混雑指標 CI のヒートマップ (スポーツ型)

6 コンサート型とスポーツ型の比較

最後に、コンサート型とスポーツ型の比較を行う。東京ドームは巨人のホーム球場であるので、巨人が勝利した時と敗北した時、つまり勝者率が 0.6 と 0.4 の 2 通りをスポーツ型では想定する。図 6.1 は 3 節で求めた近似式を用いて、CI をコンサート型とスポーツ型（勝者率 0.4, 0.6）の 3 通りについて計算して値を比較し、最小値がコンサート型の場合は青色、勝者率が 0.4 の時は白色、0.6 の時は赤色に色付けしたヒートマップである。これを見ればどの領域でどの場合が混雑が少ないかが分かる。例えば赤信号時間が現在実際に設定されている 120 [s] で固定されているとすると、巨人が勝利した時がドーム退出率に関わらず混雑が少ないということがわかる。この結果は、信号時間が長い時は信号機前で混雑が発生しやすいので、全体の 6 割の人数が時間を置いて退場する場合が一番混雑が少なそうであるという直感にも沿う結果である。

またこの図を用いれば、そのイベント会場がどのイベントに向いているのかを判定することができる。その会場の設計等からある程度の精度でドーム退出率は予測でき、その周辺の赤信号時間も同様に得ることができる。そのため、この二つの量から定まる点の図 6.1 における色を見れば、どのイベントで最も混雑が少ないのかを知ることができる。

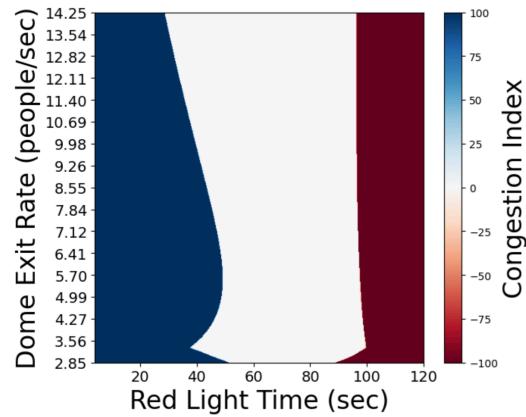


図 6.1: コンサート型とスポーツ型 (勝者率 0.4, 0.6) の CI の比較

7 まとめと今後の課題

本研究では、東京ドームのイベントから帰宅する群集のシミュレーションを行い、その結果を実際に観測された群集密度と比較することにより、シミュレーションの妥当性を検証した。そして、全員が同時に帰宅するコンサート型と、ファンによってドーム退出のタイミングが異なるスポーツ型という二つのイベント様式の場合に、混雑指標を最小化するドーム退出率と駅前の赤信号時間の組み合わせを明らかにした。従って、本研究成果を用いれば、赤信号時間に応じて、最適な規制退場を実施することができる。またドーム退出率の制御が困難な場合には、逆に赤信号時間の適切な設定により混雑を緩和できる。さらに近似式を用いることでそのイベント会場がどのイベントに適しているかを判定する手法を示した。

将来的にはドーム退出率・赤信号時間を時間変化させるようにし、実際にリアルタイムで東京ドームの混雑緩和に寄与できることを目指す。また他人と距離を取るようなモデルをセルオートマトン上で考案し、よりモデルの精度を高めていきたい。東京ドームの場合、併設施設への誘導や、空いている分かれ道への誘導も混雑を緩和する上で大きな対策となりうるので、こうした視点からも今後研究を進めていきたい。

本研究は、JSPS 科研費 JP23K21019, JP23K20947 の助成及び JST 未来社会創造事業 JPMJMI20D1 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 佐藤信之：通勤列車のはなし 東京・大阪、快適通勤のために、中央公論新社, 2017.
- [2] 丹羽了, 鷹見竣希, 重中秀介, 大西正輝 ”スタジアムにおける分散退場オペレーションの効果分析”, 第 14 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM 2022), A33-3, 2015.
- [3] 大西正輝, 重中秀介, 山下倫央 ”大規模イベントにおける群集制御”, 特集:「人間と相互理解できる次世代人工知能技術: 第 1 部『基盤技術編』」, 人工知能学会誌, Vol.34, No.6, p768-773, 2019.
- [4] 紙野桂人：人の動きと街のデザイン, 彰國社, 1980.

非弾性剛体円板系の自己組織化空間不均一性と最終凝縮状態

北川遼, 麦田大悟, 村瀬信明, 磯部雅晴

名古屋工業大学 大学院工学研究科

概要

本研究では、非弾性剛体円板系の反発係数の変化により生じる自己組織化空間不均一性と最終凝縮状態を、大規模分子動力学シミュレーションにより系統的に調べた。流動相一固相 (Alder) 転移点近傍において、非自明な協働運動や結晶化を伴う自己組織化パターンが生じた。

Self-organized spatial inhomogeneity and final condensed states in self-propelled quasi-elastic hard disk systems

Ryo Kitagawa, Daigo Mugita, Nobuaki Murase, Masaharu Isobe

Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

Abstract

We investigated self-organized spatial inhomogeneities in a quasi elastic hard disk system via large-scale molecular dynamics simulations. By changing packing fractions around the Alder transition point systematically, we elucidated non-trivial comparative dynamics including crystallization and found the fascinating self-organized spatial patterns.

1 はじめに

非弾性剛体球を用いた自由冷却過程の粉体気体 (Granular Gas) 系 [1, 2, 3] では、粒子数 N 、粒子占有率 ν 、反発係数 r により一般に、初期 (平衡) 状態から一様冷却状態 [4] を経て、速度場 (Shearing Regime)、密度場 (Clustering Regime) の順に不安定化し、非平衡定常状態に到達する。反発係数が 1 に近い準弾性極限、熱力学極限においては流体乱流と顕著な類似点が存在する [5, 6]。非弾性剛体円板の先駆的研究 [3] では、粒子数 $N = 1024$ の小規模系で、アルダー転移点 [7] より高密度の平衡系を初期条件とすると、粉体気体系の最終凝縮状態として、シアバンド流以外にも双極渦構造 (正負の渦が 2 つずつ対向流として循環) の状態が存在することが報告されている。

本研究では、高密度系の非弾性剛体円板系に着目し、先行研究 [3] の約 1000 倍の約 100 万粒子系 ($N = 1024^2$) において、大規模 Event-Driven 分子動力学

シミュレーション (EDMD) [8] を遂行した。EDMD とは、粒子の衝突というイベントに基づいて時間発展させる方法である。特に、アルダー転移点付近の高密度系に着目し、反発係数が $r \neq 1$ で生じる非自明なパターン形成と最終凝縮 (アトラクター) 状態について系統的に調べた。

2 シミュレーション手法

長方形 ($L_y/L_x = \sqrt{3}/2$) と正方形 ($L_y/L_x = 1$) の系内 (面積 $A (= L_x \times L_y)$) に配置した半径 σ の剛体円板からなる单成分粒子系 ($N = 1024^2$) (周期境界条件) を考え、様々な粒子占有率 $\nu = N\pi\sigma^2/A$ において、弾性系 ($r = 1$) にて十分に長時間 EDMD[8] を実行し、平衡状態まで緩和させた。次に、得られた平衡状態を初期状態とし、反発係数を $r < 1$ (Granular Gas における Inelastic Hard Sphere (IHS) モデル) および $r > 1$ (先行研究は文献 [9]) の両方の場合を考え、 r の値を変えて EDMD を実行し、定常状態

への緩和過程を調べた。EDMD シミュレーションでは、系のエネルギーを一定にするため、(i) 全粒子に対する速度スケーリング（大局速度スケーリング）、(ii) 衝突粒子対のみに対する速度スケーリング（局所速度スケーリング）、という 2 つの手法を適用した。緩和過程の解析には、空間不均一性を定量化するため、以下の物理量の場を用い可視化した：密度場 $D(\mathbf{r}) = \sum_i \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$ 、速度場 $\mathbf{V}(\mathbf{r}) = \sum_i \mathbf{v}_i \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$ 、および配向秩序場 $\Phi^*(\mathbf{r}) = \sum_i \varphi_i^* \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$ 。ここで、 \mathbf{r} は任意の位置座標、 \mathbf{r}_i は粒子 i の位置、 \mathbf{v}_i は粒子 i の速度、そして φ_i は粒子 i の配向秩序パラメータである： $\varphi_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \exp(6i\theta_j^i)$ 。ただし、 i は虚数単位、 j は粒子 i の最近接粒子、 N_i は最近接粒子の総数、 θ_j^i は粒子 j から i への位置ベクトルと任意の基準軸（例えば x 軸）のなす角度である。なお、最近接粒子の特定には、2D-SANNex 法 [10] を用いた。また、物理量の空間場は、グリッドに分けたセル内で平均し、密度場 D_{CG} については、ガウシアンフィルターで粗視化（スマージング）した。粗視化された速度場 \mathbf{V}_{CG} と配向秩序場 Φ_{CG}^* については、それぞれ角度と偏角 ($\arg(\Phi_{CG}^*)$) の値のみを可視化した。可視化には HSV カラー モデルを使用した。なお、明度は各物理的特性の絶対値に対応し、色相は $\mathbf{V}(\mathbf{r})$ の方向と $\Phi^*(\mathbf{r})$ の偏角に対応する。

3 シミュレーション結果

3.1 大局速度スケーリング

本節では、系のエネルギーを一定にするため、(i) 全粒子に対する速度スケーリング、の操作をした IHS モデルの時間発展ならびに最終状態の結果をまとめた。本モデルでは、系の全体の運動エネルギー、運動量が共に保存され、粒子軌道は速度スケーリング前と同じ（時間スケールのみ変化）となる。

3.1.1 反発係数 $r > 1$ の場合

図 1 は、準弾性剛体円板系（長方形）(N, ν, r) = $(1024^2, 0.698, 1.0041)$ における時間発展を示す。最終凝縮状態は、系の形に依存せず、先行研究 [8] での低密度系 ($\nu = 0.25$) の結果と同様に、円弧上に広がり伝播する密度波が生じることが確認された。しかし高密度系では、時間発展に伴い、まず微結晶クラスターが誘起され成長するステージを経て、次に円弧上の密度波伝播に励起された高温状態の結晶化が

繰り返し生じるステージに移行することがわかった。

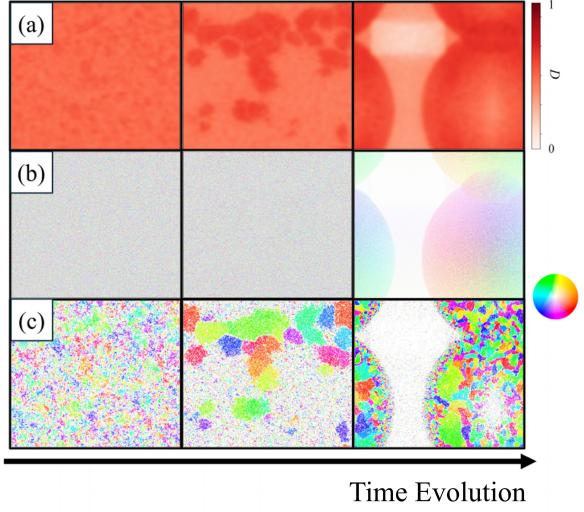


図 1：準弾性剛体円板系（長方形）(N, ν, r) = $(1024^2, 0.75, 1.0041)$ における時間発展。(a) 密度場 D_{CG} 、(b) 速度場 \mathbf{V}_{CG} の方向、および (c) 配向秩序の偏角場 $\arg(\Phi_{CG}^*)$ 。(b)(c) は、ベクトル場を HSV カラー モデルを用い、可視化した。(左) 一様加熱状態、(中央) 結晶クラスター領域の出現、(右) 最終凝縮状態（円形密度波）

3.1.2 反発係数 $r < 1$ の場合

図 2、3 は、準弾性剛体円板系（正方形）(N, ν, r) = $(1024^2, 0.698, 0.996)$ と固定したときの最終凝縮状態の密度場、速度場、配向秩序場の典型例である。図 2 では、粒子流が対方向に流れるシアリング状態（シアバンド構造）を形成している。この時、系はシアバンド幅を最大化させるように発展する。このため、シア流の方向は最終的に系の境界線に垂直または平行となる。また、低密度系とは異なり、高密度系特有の現象として、シアバンド内に微結晶クラスターが存在し、結晶構造を維持しながら、流れしていく様子が確認できた。一方、同じパラメーターであるにも関わらずシアバンド構造以外に、渦中心が円形状の空隙となる正負 2 つの双極渦構造の循環流に加え、渦中心が三角形状や楕円形状といった空隙を伴う新しい循環流の存在も確認できた。図 3 は、空隙が三角形状の典型的な最終凝縮状態である。空隙周りの配向秩序場は、結晶クラスター構造を伴い、2 つの循環流の合流地点で結晶クラスターの生成消滅が生じている。また、密度場と速度場から、空隙境界付

近の少数の粒子が循環流に沿って激しく動き回転流を形成している様子がみてとれる。図 4 は、さらに高密度系 $\nu = 0.750$ とした際の、最終凝縮状態である。図 3 と異なり、1 つの空隙が生じ、大半の粒子が大きな結晶クラスターを形成し循環流が発生せず静止している。また、空隙周りの少数の粒子が空隙に沿って激しく流れていることが確認できる。

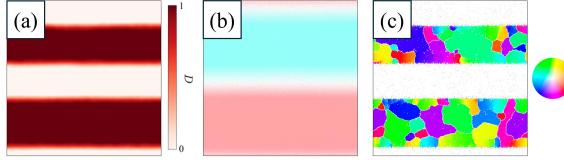


図 2: 準弾性剛体円板系 (正方形) $(N, \nu, r) = (1024^2, 0.698, 0.996)$ における最終凝縮状態。(a) 密度場 D_{CG} 、(b) 速度場 \mathbf{V}_{CG} の方向、および(c) 配向秩序の偏角場 $\arg(\Phi_{\text{CG}}^*)$ 。

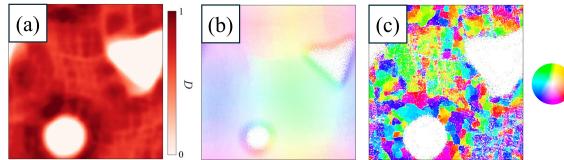


図 3: 図 2 と同様。

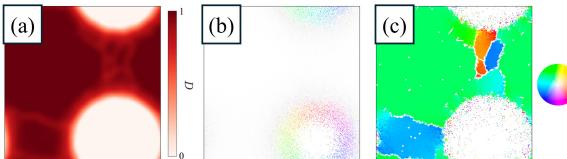


図 4: 準弾性剛体円板系 (正方形) $(N, \nu, r) = (1024^2, 0.750, 0.998)$ における最終凝縮状態。(a)(b)(c) は図 2 と同様。

これらの状態は同じパラメーターにおいても最終凝縮状態が異なる。そこで、広範なパラメータ空間において、それぞれ、10 個の独立な等配置アンサンブル (同じ初期配置で速度分布が異なるアンサンブル) を用い、各最終凝縮状態への出現確率 P を計算した。図 5 に、 (N, ν) において最頻出の最終凝縮状態で分類し相図にまとめた。シアバンド構造 (図 2) は、 $\nu < 0.65$ (平衡系では低密度の液相に対応) ならびに $N \leq 10^3$ の小規模系で出現した。しかし、高密

度の液相では、アルダー転移点 ($\nu \sim 0.70$) 付近で、 $N = 64^2 \sim 256^2$ で円形上の空隙を伴う 2 重渦構造が頻繁に生じ、大規模系 $N \geq 512^2$ では、円形以外の空隙を伴う渦構造が出現した (図 3)。このとき、三角形状と楕円形状は、ほぼ同確率で生じた。また、このパラメータ領域以外では出現はしなかった。最後に、結晶と 1 つの渦構造 (図 4) は、 $\nu > 0.76$ 以上の高密度系でのみ生じることが判明した。

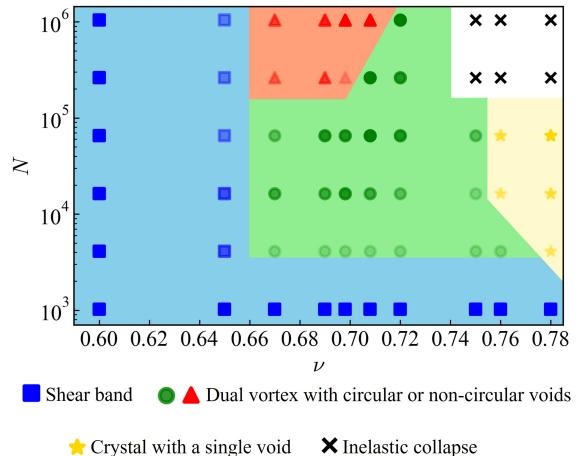


図 5: (N, ν) 空間ににおける最終アトラクター状態の相図。図中の点は、出現確率 P により濃淡をつけた。

3.2 局所速度スケーリング

本節では、系のエネルギーを一定にするため、(ii) 衝突粒子対の速度のみをスケールした結果をまとめる。本モデルでは、系全体の運動エネルギーは保存されるが、運動量は非保存となる。そのため、時間発展により系全体の運動量が変化し、最終状態では全系が一様に流れる速度秩序が生じた。アクティブマター系で活発に研究されている Vicsek モデル [11] との類似性 (アナロジー) に着目し、以下の (1) 式で定義される速度秩序変数 ψ の時間発展の様子に関して、本モデルとの比較を行った。ここで \mathbf{v}_i は、各粒子 i の速度ベクトルである。

$$\psi = \frac{|\sum_i \mathbf{v}_i|}{\sum_i |\mathbf{v}_i|} \quad (1)$$

図 6 は、(ii) の局所速度スケーリングを行った IHS モデル (図 6(a)) と Vicsek 相互作用を導入した剛体円板系 (図 6(b)) において、最終状態が速度秩序変数が 1 に漸近する代表的なパラメーター $(N, \nu, r) =$

$(64^2, 0.250, 0.70)$ を用いて、シミュレーションを実行した際の時間発展 [12] の様子である。また、図 7 は、速度秩序変数の時間発展を示す。両者は、初期のひも状のクラスター形成や速度秩序変数の増加の様子は酷似しており、微視的な粒子レベルの相互作用の詳細によらず、速度秩序の初期形成に関しては普遍性があることが確認された。

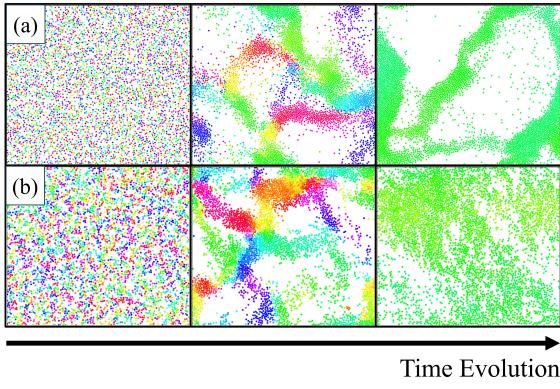


図 6: (a) 局所速度スケーリングを用いた IHS モデル $(N, \nu, r) = (64^2, 0.250, 0.70)$ と (b)Vicsek 相互作用を取り入れた剛体円板系 $(N, \nu, \eta) = (64^2, 0.250, 0.1\pi)$ の時間発展 [12]。

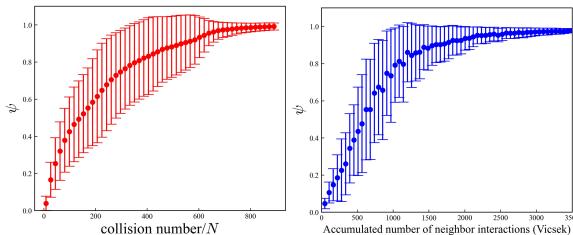


図 7: 図 6 に対応する速度秩序変数の時間発展 [12]。横軸は、(a) (IHS モデル) 一粒子あたりの衝突回数、(b)(剛体円板 Vicsek モデル) 近接粒子の累積相互作用回数、とした。

4 まとめ

本研究では、非弾性剛体円板系における反発係数の変化が引き起こす自己組織化空間不均一性と最終凝縮状態を、大規模分子動力学シミュレーションにより系統的に調査した。非弾性衝突する剛体円板系の運動エネルギーを一定に保つ 2 つの速度スケーリング（運動量保存および非保存）を導入した。特に平衡系での流動相一固相転移が生じる Alder 転移点近傍において、非自明な協働運動や結晶化を伴う自己組

織化パターンの形成を観察し、相図を作成した。大局速度スケーリング（運動量保存）において、 $r > 1$ では時間発展過程で微結晶クラスターが生成され、最終的に円形状の密度波伝播状態へと発展することが判明した。波の伝搬は、デトネーション波との類似性が指摘される。一方、 $r < 1$ では、最終凝縮状態として初期パラメータに依存した結晶化を伴う 4 つの異なる状態が存在することを発見した。これらの状態は大規模系かつ高密度条件下でのみ出現する現象であり、本研究の大規模計算により初めて確認された。また、局所速度スケーリング（運動量非保存）では、アクティブマター系の Vicsek モデルとの類似性が確認された。今後の課題として、これらの現象のパラメーター依存性と物理的な起源についてより詳細な研究を行う予定である。

参考文献

- [1] I. Goldhirsch and G. Zanetti, Phys. Rev. Lett., **70** 1619 (1993).
- [2] I. Goldhirsch, Annual Review of Fluid Mechanics **35**, 267 (2003).
- [3] S. McNamara and W. R. Young, Phys. Rev. E, **53** 5089 (1996).
- [4] P.K. Haff, J. Fluid Mech. **134**, 401 (1983).
- [5] M. Isobe, Phys. Rev. E, **68** 040301(R) (2003).
- [6] M. Isobe, Int. J. of Mod. Phys. C **23**, 1250032 (2012).
- [7] M. Engel et al., Phys. Rev. E **87**, 042134 (2013).
- [8] M. Isobe, Int. J. Mod. Phys. C **10**, 1281 (1999).
- [9] M. Isobe, AIP Conf. Proc. (USA), **708** 158 (2004).
- [10] D. Mugita et al., J. Chem. Phys. **160**, 174104 (2024).
- [11] T. Vicsek et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 1226 (1995).
- [12] 村瀬信明, 磯部雅晴, 第 28 回 交通流と自己駆動粒子系 シンポジウム 論文集 **28**, pp.9 - 12 2023 年 03 月.

最適速度旋回アルゴリズムによるヘテロ群ロボットが創発する行動

世良田 竜平¹, 北原 颯一郎², 本田 泰³

¹ 室蘭工業大学大学院 工学研究科 情報電子工学系

² 室蘭工業大学 理工学部 システム理化学科

³ 室蘭工業大学大学院 しくみ解明系領域

概要

我々は以前、2次元最適速度旋回アルゴリズムを用いた複数台走行ロボットでのひも状走行に成功した。本研究では2次元最適速度旋回アルゴリズムのパラメータを変化させることで、ロボットに4つの性格を持たせて、それらの様々な組み合わせを用いて走行実験を試みる。結果として、異なる性格を混ぜた走行の中には、全てのロボットを同じ性格で統一した走行よりも、よりひも状走行になりやすい組み合わせが存在した。また特定の組み合わせ方をすると、先頭と末尾が繋がったひも状走行(ウロボロス走行)が創発された。

Behavior generated by heterogeneous group robots using the optimal speed turning algorithm

Ryuhei Serata¹, Soichiro Kitahara², Yasushi Honda³

¹ Division of Information and Electronic Engineering, Graduate school of Engineering, Muroran Institute of Technology, Japan

² Department of Sciences and Informatics, Faculty of Science and Engineering, Muroran Institute of Technology, Japan

³ College of Information and System, Muroran Institute of Technology, Japan

Abstract

We have previously succeeded in string running with multiple robots using a 2D optimal velocity turning algorithm. In this study, we have given the robots four personalities by changing the parameters of the 2D optimal velocity turning algorithm and attempted running experiments using various combinations of these personalities. As a result, some combinations of different personalities were more prone to string running than the same personality for all the robots. In addition, certain combinations resulted in a string-running condition in which the first and last robots were connected.

1 はじめに

行動のための知能に対する最小限のモデル化を現実世界の中でロボットを用いて実験的に評価することが、我々の研究動機である。行動体を自己駆動粒

子とみなした場合、行動のための知能はその数理モデルに対応する。自己駆動粒子に関する数理モデルを直接現実世界のなかで試すことのできる方法として、ロボット実験の方法が有効であると考えられる。人間の対面歩行や交通渋滞といった集団行動のメ

カニズムは完全に解明されているとは言えない。そこで我々は集団行動の中でも、ひも状走行について着目した。

先行研究 [1] では、2次元最適速度旋回アルゴリズムを用いた複数台ロボットでのひも状走行に成功していた。その研究では全てのロボットを統一したパラメータで動かしていた。つまり全てのロボットが全く同じ性格で走行していたと言える。しかし、現実世界では千差万別の性格を持った人間が集団行動を行っている。そのため、本研究では最適速度関数のパラメータを変化させ、ロボットに異なる性格をもたせて走行実験を行う。より現実世界に近い環境で、ロボットが創発する行動が、どのように変化するのか観測することを本研究の目的とする。

2 2次元最適速度旋回アルゴリズム

2次元最適速度モデルは以下の運動方程式 (1) で表される。最適速度 \vec{V} と速度 \vec{v} の差によって、速度の変化率(加速度) $\dot{\vec{v}}$ を求めるモデルである。

$$\dot{\vec{v}} = a(\vec{V} - \vec{v}) \quad (1)$$

ここでの a は感応度を表しており、 a は最適速度への反応の強さを決めるパラメータになっている。

ロボット自身の進行方向と、自分以外のロボットとの相対角度を θ とすると、最適速度ベクトル \vec{V} は、以下のように表される。

$$\vec{V} = V \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

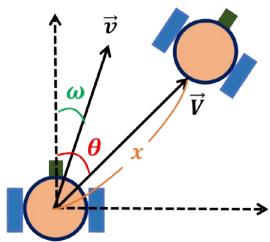


図 1: 進行方向と相対角度のイメージ図

そして、最適速度ベクトルの大きさ V は、ロボット間の距離 x を用いて、以下のように表される。

$$V = \alpha(\tanh \beta(x - b) + c) \cos \theta \quad (3)$$

ここで、パラメータ α, β, b, c について説明する。 α は、最適速度関数の変化範囲を決めるパラメータ。 β は、最適速度関数の滑らかさを決めるパラメータ。

b は、ロボット間の安全距離を決めるパラメータ。 c は、ロボット間の相互作用タイプを決めるパラメータ。

また、走行ロボットがこの関数を使用するためには、正規化が必要である。そのため実際は (式 3) の $\alpha(\tanh \beta(x - b) + c)$ を $\alpha(1 + c)$ で割った V を使用している。

速度ベクトル \vec{v} は

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v \sin \omega \\ v \cos \omega \end{pmatrix} \quad (4)$$

と表される。また、 $v \neq 0$ のとき、

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} V \cos(\theta - \omega) - v \\ (V/v) \sin(\theta - \omega) \end{pmatrix} \quad (5)$$

のようになり、これは v と ω を用いた OV モデルである。

$\theta \sim \omega, V \sim v$ のとき、左右のモーター出力 v_L, v_R を求めるアルゴリズムをまとめると、最適速度関数(式 3)と、式 (6-9) より v_L, v_R を更新する。

$$v' = v + a(V - v)\Delta t \quad (6)$$

$$\omega' = \omega + a(\theta - \omega)\Delta t \quad (7)$$

$$v_L = (v' + rg\omega') * \text{MaxSpeed} \quad (8)$$

$$v_R = (v' - rg\omega') * \text{MaxSpeed} \quad (9)$$

r はロボットの有効半径、また g はホイールのスリップを考慮したゲイン、MaxSpeed は走行ロボットの最大速度で 0 から 100% の値をとる。

3 性格分類

本研究では、最適速度関数のパラメータを性格に基づいて分類する(表 1)。

表 1: 各種パラメータの分類

	MaxSpeed	a	α	β	b	c
同調性性格	80	5	1	16	0.3	0.9
顯示性性格	100	5	1	16	0.2	5
過敏性性格	60	0.3	1	16	0.4	0.9
粘着性性格	80	1	1	16	0.3	0.3

性格は同調性性格(tun)、顯示性性格(dis)、過敏性性格(sen)、粘着性性格(adh)の4種類である。同調性性格は常識的で素直な性格である。これは先行研究 [1] を参照したパラメータで、他の性格の基準としている。顯示性性格は派手好きでわがままな性

格である。これは基準と比較して c が大きく、速度を落としにくい走行になる。過敏性性格は弱気で悲観的な性格である。これは基準と比較して a が小さく、周囲より一步遅れる走行になる。粘着性性格は生真面目で几帳面な性格である。これは基準と比較して c が小さく、決められた車間距離を厳正に守ろうとする。

これらの性格は、運転者行動と性格についての論文 [2] で用いられた分類より引用している。そして、これらの性格に基づいて分類されたロボット群を「ヘテロ群ロボット」と呼称する。また、正規化後の最適速度関数は以下のグラフのようになる。

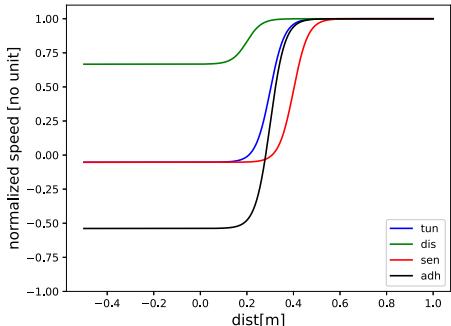


図 2: 最適速度関数の比較 (正規化後)

4 走行実験

床に半径 2[m] の円状壁を設置し、その壁の中で走行実験を行う。走行ロボットにはカメラ 1 つ、距離センサ 3 つ、モータを 2 つ搭載している。コースの中に 4 台の走行ロボットを連なるように並べ、同時に走行を開始する。ロボットは 2 次元最適速度旋回アルゴリズムに基づいて走行する。約 2m 以内に他機体を発見した場合は近づき、発見していない場合は進行方向正面に進む。そして、壁に近づいた場合は、感覚運動写像によって弾性散乱を行う。

本研究では走行ロボットのパラメータを先述の 4 種類に分類し、様々な組み合わせで走行実験を行う。そして各走行で、ひも状走行へのなりやすさ及び、走行中のロボットが 1 箇所に集まって進まなくなる状態（以下、クラスターと呼称する）へのなりやすさを評価する。評価には各ロボットが収集した、前方の車両との相対角度 $[\theta]$ と車間距離 $[dist]$ の値を用いる。（図 3）

また、6 台の走行ロボットを使用した実験も行った。この実験では、ロボットの走行開始位置と向きがランダムで、全ての性格の MaxSpeed を一律 80% に設定している。他機体を認識する距離も約 4m に

伸びている。

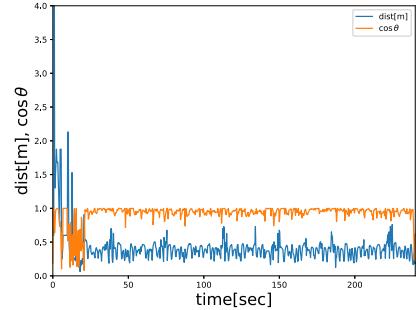


図 3: 走行ロボットが収集したデータの一例

5 実験結果

それぞれの走行で、ひも状走行へのなりやすさとクラスターへのなりやすさを比較すると、以下の図 4 のような傾向が見られた。

まず、異なる性格を混ぜた走行の中には、全てのロボットを同じ性格で統一した走行よりも、よりひも状走行になりやすい組み合わせが存在した。

そして、同じ性格のロボットによる走行でも、一緒に走る他の機体の性格が変わることで、ひも状走行及びクラスター状態へのなりやすさが大きく変わることが分かった。

また、6 台の走行実験では、顕示性性格 6 台で走行した際に、ひも状走行の先頭ロボットが最後尾のロボットに追従し、円状の走行が創発されることがあった（以下、ウロボロス走行と呼称する）。ウロボロス走行は、先行研究 [1] では創発されなかった新たな行動である。同調性性格 6 台ではウロボロス走行が創発されなかつたため、顕示性と同調性の割合を変えて実験してみたところ、以下の表 2 の結果が得られた。

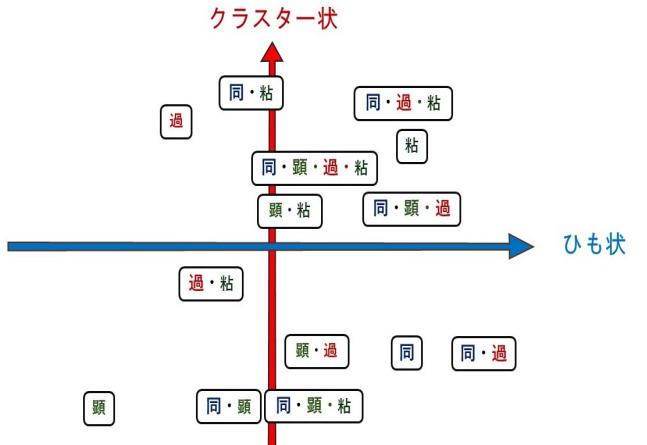


図 4: 全ての組み合わせパターンの傾向比較

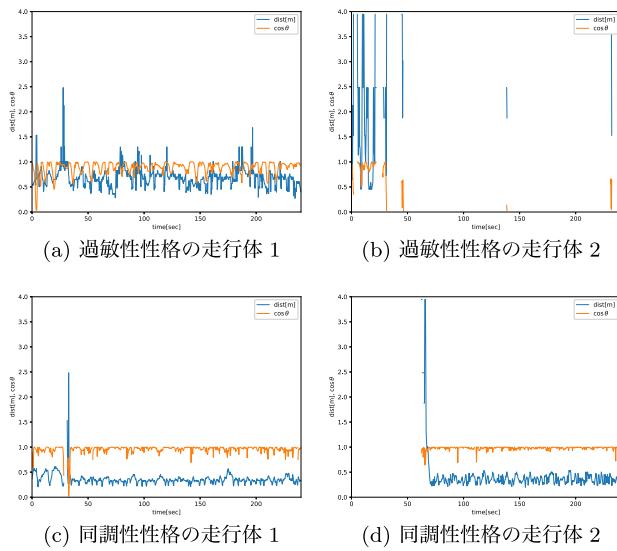


図 5: tun2 台, sen2 台の組み合わせの実験結果

表 2: ウロボロス走行になった回数

	dis3:tun3	dis4:tun2	dis5:tun1	dis6:tun0
回数	0/7	1/7	5/7	5/7

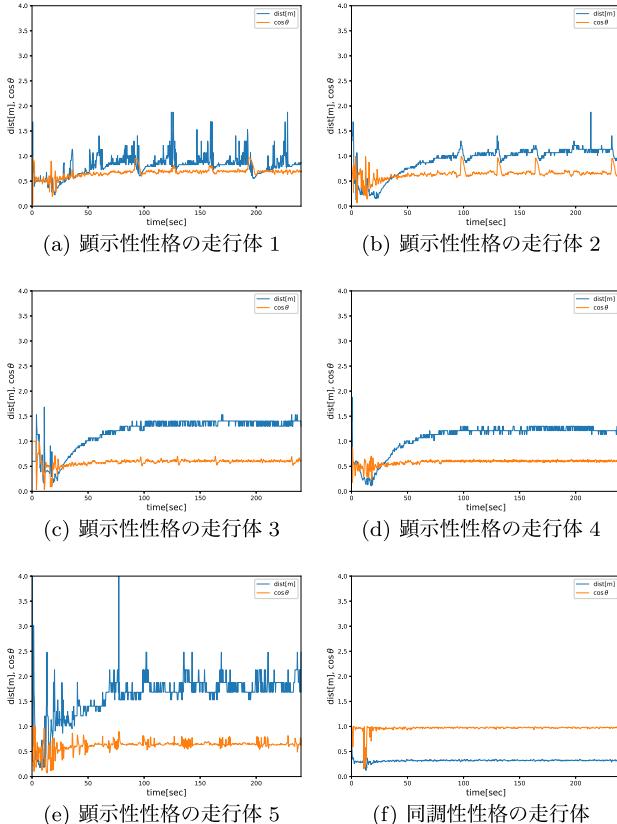


図 6: dis5 台, tun1 台の組み合わせの実験結果

6 考察

まず、異なる性格を混ぜた方がよりひも状走行になりやすい理由について、走行ロボットは車間距離が狭いと安定したひも状走行になるが、同じ性格のロボットだけだと車間距離は広くなりがちなので、そこに原因があると考える。次に、ウロボロス走行が創発される理由について、単純に車間距離が広いとウロボロス走行が創発される可能性がある。つまり、例え全て同調性性格でも車間距離を意図的に広げれば創発されると考える。

次に、ウロボロス走行が創発されるか否かの違いをもたらす要因について考察する。ウロボロス走行創発には2種類のパターンが存在した。1つ目はクラスター状態からウロボロス走行になるパターン。これは車間距離が狭くなった際に、顕示性はある程度速度を出しが、同調性は速度を大きく落とすため、そこで差が生じるのだと考える。2つ目はひも状走行からウロボロス走行になるパターン。顕示性はひも状になってしまって速度をほぼ落とさないので車間距離が広がっていく。それに対して、同調性はひも状になって目の前に走行体が来ると速度を落とし車間距離が狭くなるため、差が生じるのだと考える。

7 まとめと今後の課題

本研究では、2次元最適速度旋回アルゴリズムを用いたロボットのパラメーターが変化することで、走行ロボットが創発する行動がどのように変化するかを調べた。結果として、異なる性格を混ぜた走行の中には、全てのロボットを同じ性格で統一した走行よりも、よりひも状走行になりやすい組み合わせが存在した。また、特定の組み合わせ方をすると、ウロボロス走行が創発された。今後は更に走行ロボットの台数を増やし、創発される行動にどのような変化が起こるかを観測していきたい。またウロボロス走行に関しても、性格の組み合わせを更に増やして実験することで、創発されるための具体的な条件を絞り込んで行きたい。

参考文献

- [1] 山田将司, 李方正, 本田泰, 最適速度アルゴリズムによるスキッドステアリング 2D ロボットのひも状走行, 第 27 回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム論文集, p47-p50, (2021)
- [2] 詫摩武俊, 運転者行動と性格, IATSS Review, Vol.2, No.3, (1976)

接触感染の一考察

石橋善弘¹

福井稔²

¹名古屋大学

²中日本自動車短期大学

概要

1次元系における接触感染について、蔓延状態から感染率がさがるときの感染消滅に至る過程をセル・オートマトン模型を用いて調べた。感染率 λ (λ は単位時間 1 の間に感染事象が何回発生するかを示す。たとえば $\lambda=1.65$) のかわりに感染確率 $r=1-\exp(-\lambda)$ を用いた (r は単位時間 1 の間に感染事象が 1 回以上生じる確率)。感染確率 r が 1 より小さいとき感染濃度 Q の平衡感染状態がえられるが、特定の感染確率 r_c よりも小さくなると感染が消滅する (この r_c を臨界感染確率とよぶ)。治癒期間 V を 1 ではなく、2, 3, 4, 5, 10 としたときの平衡感染状態も調べた。平衡感染濃度 Q および感染確率 r を規格化することにより、両者の関係に一種の universality が見られる事がわかった。

Consideration on the Contact Infection

Yoshihiro Ishibashi¹ · Minoru Fukui²

¹Nagoya University ²Nakanihon Automotive College

Abstract

By means of a cell automaton (CA) model the contact infection processes in the one-dimensional system have been studied. Instead of the infection rate λ , which implies how many times the event of infection takes place in the unit time 1, the infection probability $r=1-\exp(-\lambda)$ is adopted, which implies the probability that the event of infection takes place more than once in the unit time 1. When r is less than 1, the equilibrium infection states of the density Q are attained, while r is less than a certain r_c , defined as the critical infection probability, the infection states disappear. Not only the case of the healing period 1, but also those of the healing period 2, 3, 4, 5, 10 were studied. By normalizing properly the equilibrium infection density Q and the infection probability r a sort of universality is found.

1. まえがき

接触感染について、1個の感染源から感染が広がるための臨界感染率 λ_c を求めた研究は多く、自然治癒率を1としたとき、臨界感染率 λ_c は1次元、2次元でそれぞれ、 $\lambda_c=1.65, 0.4119$ と知られている。^{1, 2)} 他方、蔓延状態から感染率がさがるときの感染消滅に至る過程の研究は少ないらしい。そこで、我々は computer simulation により、改めて1次元系における感染消滅や平衡感染状態を調べてみた。その際、空間・時間とも離散化し、一種のセル・オートマトン模型を用いた。本稿は得られた結果の報告である。

2. 感染率と感染確率

いま、感染率（期間1の間に感染事象が何回発生するか）を λ （たとえば $\lambda=1.65$ ）とする（この事象は滅多に起こらない事象であり、ポアソン分布に従う）。すると期間1を経過したときに、この事象が1回以上起こる確率 r は $r = 1 - \exp(-\lambda)$ で与えられる。本稿ではこの r を感染確率とよび、simulation の簡便化のため、感染確率 r を用いる。

3. Simulation

いま、1次元系を考え、治癒期間（感染後治癒するまでの期間） $V=1$ とする。 $r=1$ のとき、感染濃度 $Q=1/2 (=V/(V+1))$ の平衡状態が得られる（図1a）。

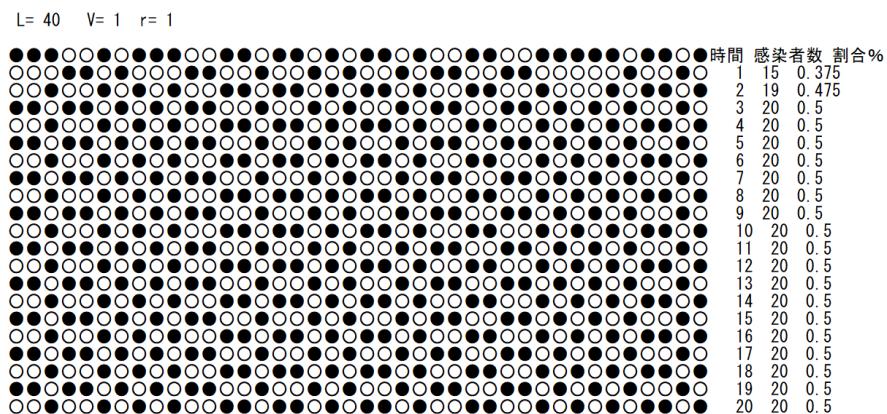


図1a. $V=1, r=1$ のときの平衡状態。平衡感染濃度は 0.5.

黒丸は感染状態、白丸は治癒(非感染)状態をあらわす。

この状態から感染確率 r を小さくすると、各 r に依存した平衡濃度がえられる。また、臨界感染確率 r_c 以下では、感染が消滅した濃度0の状態に相転移する。これは2次相転移である。 $r=0.5$ の場合、感染が消滅する過程を図1bに示す。

次に、治癒に時間がかかるケース、すなわち $V=1$ ではなく、 $V=2, 3, 4, 5, 10$ について同様の simulation を行った。 $V=3, r=0.5$ で平衡状態に近づく例を図2に示す。これ

らをまとめると図3がえられた(横軸は感染確率 r 、縦軸は平衡濃度 Q)。

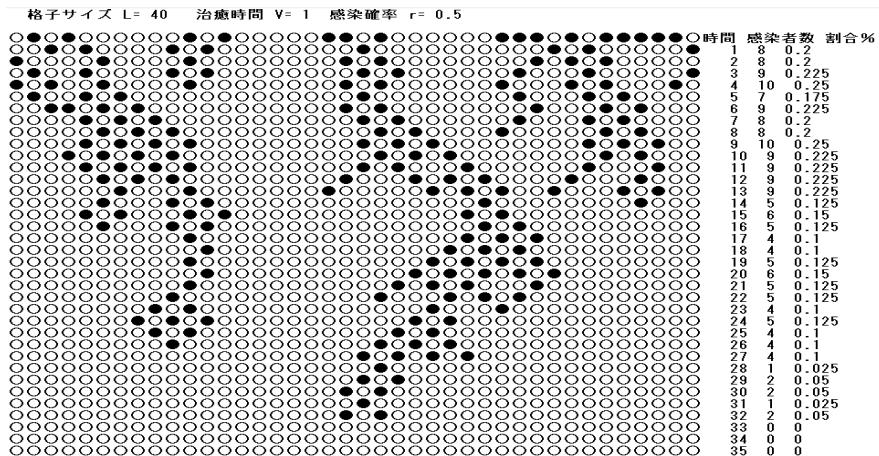


図 1b. $V=1, r=0.5$ のときの感染消滅過程.

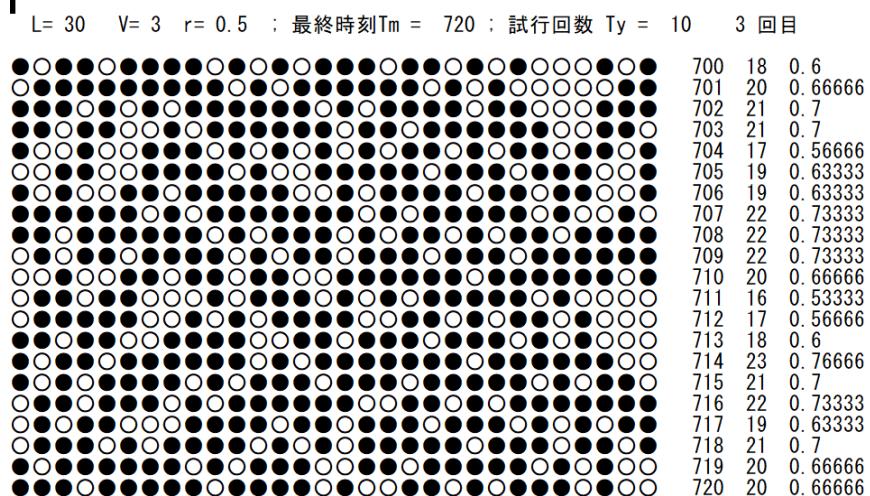


図 2. $V=3, r=0.5$ のときの平衡状態。平衡感染濃度は約 $2/3$

黒丸は感染状態、白丸は健常者状態をあらわす。 $V=3$ に対応して黒丸が縦に 3 個つながっている。

4. 結果と考察

図3からもわかるように、ここで考察したモデルは期せずして相転移のモデルになっているようだ。しかし、臨界感染確率 r_c の導出法は未だ不明である。

他方、図3から読み取られる r_c と V の関係は、

$$1/r_c = 0.6474 V + 0.8468$$

となっている(図4)。 $1/r_c$ がきれいな直線にのるが、直線の表式にあらわれる数値の意味は不明である。

また、感染濃度 Q を $(V+1)/V$ 倍し、感染確率 r を $r^* = (r - r_c)/(1 - r_c)$ と規格化

すると、図 5 が与えられる。何らかの universality がみられるが、今後検討すべき課題が数多く残されている。

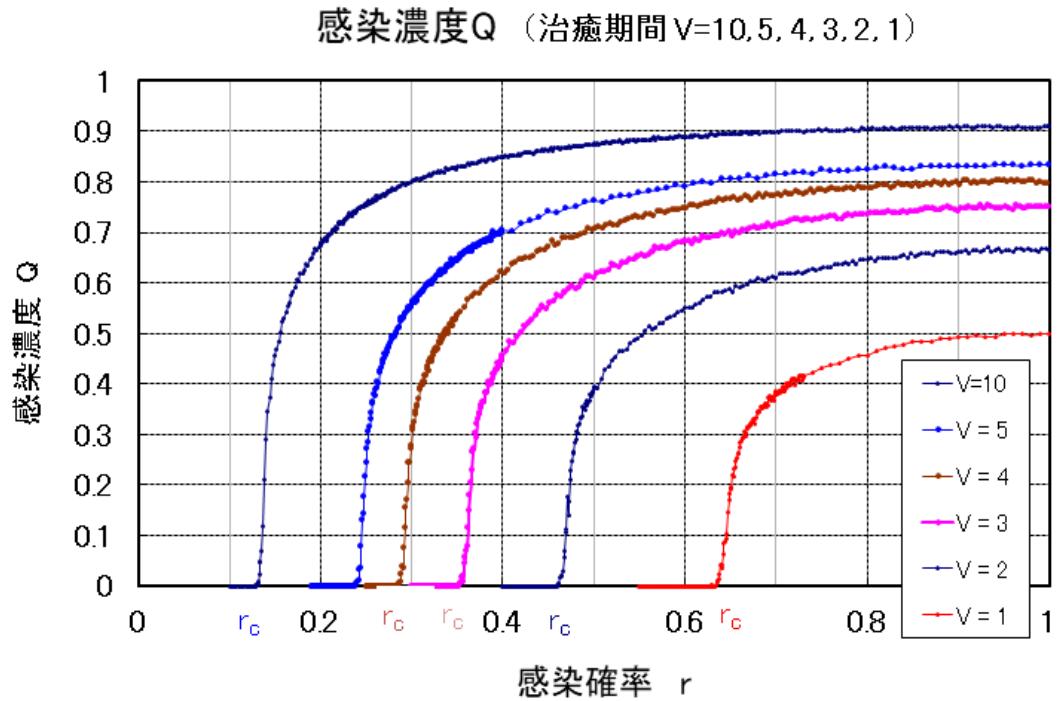


図 3. 感染確率 r と平衡感染濃度 Q の関係 ($r=1$ では, $Q=V/(V+1)$)

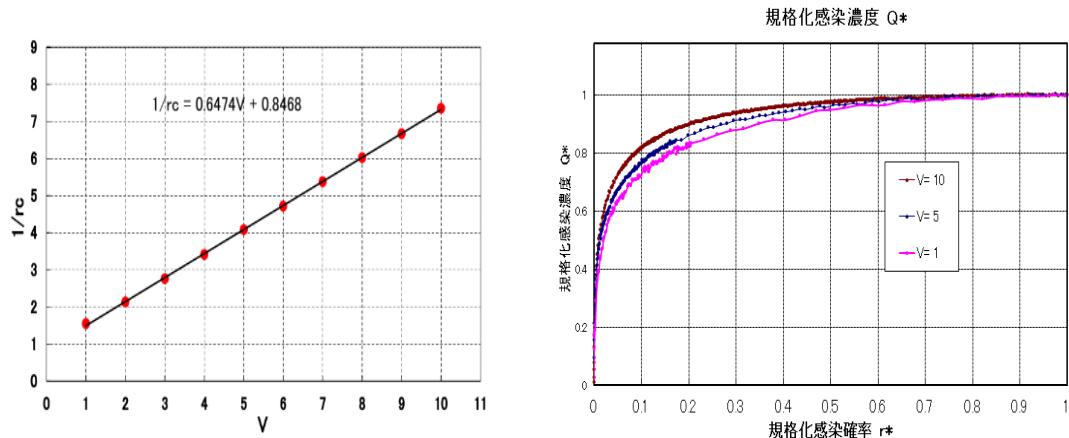


図 4. $1/r_c$ と治癒期間 V との関係

図 5. 規格化感染確率 r^* と規格化平衡感染濃度 Q^*
の関係

参考文献

- [1] 今野紀雄, “確率モデルって何だろう”, ダイヤモンド社, (1995).
- [2] 香取眞理, “複雑系を解く確率モデル”, Blue Backs, 講談社,(1997).

交通流数理研究会 講演申し込み・論文投稿規程

◆ 講演申し込み

1. 講演申し込み概要

講演申し込みの方は、概要原稿の投稿という形で申し込んでいただきます。エディターがチェックし、特に問題が無い限り基本的に講演を許可し、その旨連絡します。概要原稿は講演概要集として Web に掲載されます。

2. 投稿手続き

- ・投稿論文の形式（A4, 最大 2 ページ以内）で、日本語または英語で記述する。
- ・投稿原稿フォーマットは、原則として当研究会で用意した LaTeX スタイルファイルを使用する。そのまま写真製版できる PDF ファイルを email によりエディタに送付する。ただし WORD ファイルを用いる場合は当研究会配布のスタイルファイルの体裁にできる限り合わせること。
- ・送り先：エディタ（毎年の開催案内、Web に掲載する。）
- ・メールのタイトルに「交通流・自己駆動粒子系シンポジウム講演申し込み」とお書きください。メールの本文には、著者、著者所属、論文タイトルを記入してください。
- ・採否にかかわらず原稿は返却しない。
- ・修正を要請された原稿は、指定期間内に改訂しなければならない。
- ・投稿された原稿を概要集として、シンポジウム開催時に配布する。

◆ 掲載論文投稿手続き

1. 掲載論文投稿の概要

講演後に講演内容を論文集として発刊し Web に掲載いたします。掲載希望者（エディターの推薦の場合もある）は、決められた期日までに（A4 で最大 4 ページ）の原稿を送付してください。

2. 査読

本論文集に掲載される論文は、査読を経る。投稿者は、シンポジウム開催前の指定された期日までに投稿する。期限までに投稿された論文は、査読者の報告に基づいて論文集編集委員会において採否が決定される。

3. 投稿手続き

- ・投稿論文の形式（A4、最大 4 ページ以内）で、日本語または英語で記述する。
- ・投稿原稿フォーマットは、原則として当研究会で用意した LaTeX スタイルファイルを使用する。そのまま写真製版できる PDF ファイルを email によりエディタに送付する。ただし WORD ファイルを用いる場合は当研究会配布のスタイルファイルの体裁にできる限り合わせること。
- ・送り先：エディタ（毎年の開催案内、Web に掲載する。）
- ・メールのタイトルに「交通流・自己駆動粒子系シンポジウム講演申し込み」とお書きください。メールの本文には、著者、著者所属、論文タイトルを記入してください。
- ・採否にかかわらず原稿は返却しない。
- ・修正を要請された原稿は、指定期間に改訂しなければならない。
- ・投稿論文の論文集として、シンポジウム開催後に配布する。

3. 掲載料・別刷

掲載料は無料とする。別刷は用意しない。

4. 著作権

投稿論文の著作権は著者にある。論文は、印刷形式及び電子的形式での配布を、交通流数理研究会に許諾されたものとして、取り扱う。論文集掲載記事内容の責任は著者が負うものとする。

Invited papers

Stochasticity in Neural Computation:

 Insights from the *C. elegans* Thermosensory System.....1

 Hironori J. Matsuyama, Amane Kano, Shunji Nakano, Ikue Mori

Refereed papers

Simulation of Returning Home from Tokyo Dome.....5

 Keiichiro Urata, Daichi Yanagisawa, Katsuhiro Nishinari

Self-organized spatial inhomogeneity and final condensed states in

self-propelled quasi-elastic hard disk systems.....9

 Ryo Kitagawa, Daigo Mugita, Nobuaki Murase, Masaharu Isobe

Behavior generated by heterogeneous group robots using the optimal

speed turning algorithm13

 Ryuhei Serata, Soichiro Kitahara, Yasushi Honda

Consideration on the Contact Infection17

 Yoshihiro Ishibashi, Minoru Fukui

シンポジウムについてのお問い合わせは、下記までお願いします。

交通流数理研究会

世話人： 杉山雄規

Email: sugiyama.yuuki.w5@mail.nagoya-u.ac.jp

Web: <https://mathematical-society-of-traffic-flow.github.io/>

