

第29回  
交通流と自己駆動粒子系  
シンポジウム

講演概要集

*Proceedings  
of  
the 29 th Symposium  
on  
Traffic Flow and Self-driven Particles*

— 2023 —

本シンポジウムの開催には、  
室蘭工業大学大学院 工学研究科・しくみ解明系領域  
名古屋大学情報学部大学院情報学研究科  
から支援を受けています。

日時 : 2023年12月1日(金) 13:00 - 17:05  
2日(土) 10:00 - 16:25

場所 : オンライン開催 (Zoom Meeting)

主催 : 交通流数理研究会  
<http://traffic.phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~mstf/>

## 第 28 回 交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム・プログラム

主催: 交通流数理研究会 Zoom 会議

### 2023 年 12 月 1 日 (金)

13:00 - 13:05 あいさつ

13:05 - 13:55 招待講演 1-s1

混合交通のボトムアップ改善の先を目指して

—Seminar on Heterosocial Systems 開催のモチベーション—

長濱章仁

電気通信大学 情報学専攻

13:55 - 14:15 コーヒーブレイク

14:15 - 14:45 一般 1-1

神戸市中心部における徒歩帰宅シミュレーション

榎本大悟 1, 菊池麻衣子 2, 照井彩子 2, 安倍孝太郎 2, 土居菜々子 2, 小林実季 2,  
伊藤伸泰 1, 野田五十樹 1, 3

1 理化学研究所計算科学研究センター

2 株式会社NTTドコモ

3 北海道大学

14:45 - 15:15 一般 1-2

連続 OV モデルにおける安定・不安定平衡点の数値解析

石渡龍輔 1, 野村保之 2, 杉山雄規 3

1 東北大学東北メディカル・メガバンク機構ゲノム医科学情報学分野

2 福井工業高等専門学校

3 名古屋大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻

15:15 - 15:35 コーヒーブレイク

15:35 - 16:05 一般 1-3

直鎖状の走化性エージェントモデルの運動性と安定性

大澤智興 1

1 九州工業大学大学院情報工学研究院物理情報工学研究系

16:05 - 16:35 一般 1-4

交差点を含む8の字経路におけるニューラルネットワーク走行ロボットの対面自律走行

山形周 1, 古澤昂弥 1, 宮原捷伍 2, 佐々木良介 2, 世良田竜平 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専攻

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

16:35 - 17:05 一般 1-4

アクティブXYモデルにおけるトポロジカル欠陥の効果

井上駿, 湯川諭

大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

## 2019年12月2日(土)

10:00 - 10:50 招待講演 2-s2

Evaluating the gap between the physical and psychological congestion of pedestrian flow

JIA Xiaolu

東京大学大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻

10:50 - 11:10 コーヒーブレイク

11:10 - 11:40 一般 2-1

高速道路実測データの機械学習による分析

只木進一

佐賀大学理工学部

11:40 - 12:10 一般 2-2

鉄道車両内における吊り革およびポール配置の検討

校條大成 1, 川口寿裕 1

1 関西大学 社会安全学部 安全マネジメント学科

12:10 - 13:30 ランチブレイク

13:30 - 14:00 一般 2-3

数値くりこみによる時間遅れを含む 2 階微分方程式解の安定性解析

本田泰

室蘭工業大学しくみ解明系領域

14:00 - 14:30 一般 2-4

アリ分業の反応閾値モデルに導入すべき応閾値の個体差と時間変化について

松浦竜也, 島田尚

東京大学工学系研究科システム創成学専攻

14:30 - 15:00 一般 2-5

低い感受性下での細胞間接触が誘発する細胞集団運動

松下勝義, 新垣大幸, 藤本仰一

広島大学数理生命科学プログラム

15:00 - 15:20 コーヒーブレイク

15:20 - 15:50 一般 2-6

Bak-Sneppen 的板モデルによる株式市場の不安定性の分析

南雲将太<sup>1</sup>, 島田尚<sup>1,2</sup>

1 東京大学大学院工学6系研究科システム創成学専攻

2 東京大学数理・情報教育研究センター

15:50 - 16:20 一般 2-7

Newtonian Event-Chain モンテカルロ法を用いた 2 次元剛体多角粒子系の相転移

白井知樹, 麦田大悟, 磯部雅晴

名古屋工業大学大学院工学研究科

16:20

あいさつ



## 目次

神戸市中心部における徒歩帰宅シミュレーション .....	1
榎本大悟, 菊池麻衣子, 照井彩子, 安倍孝太郎, 土居菜々子, 小林実季, 伊藤伸泰, 野田五十樹	
鉄道車両内における吊り革およびポール配置の検討 .....	3
校條大成, 川口寿裕	
直鎖状の走化性エージェントモデルの運動性と安定性 .....	5
大澤智興	
交差点を含む 8 の字経路におけるニューラルネットワーク走行ロボットの 対面自律走行 .....	7
山形周, 古澤昂弥, 宮原捷伍, 佐々木良介, 世良田竜平, 本田泰	
アクティブ XY モデルにおけるトポロジカル欠陥の効果 .....	9
井上駿, 湯川諭	
高速道路実測データの機械学習による分析 .....	11
只木進一	
連続 OV モデルにおける安定・不安定平衡点の数値解析 .....	13
石渡龍輔, 野村保之, 杉山雄規	
数値くりこみによる時間遅れを含む 2 階微分方程式解の安定性解析 .....	15
本田泰	
アリ分業の反応閾値モデルに導入すべき応閾値の個体差と時間変化について .....	17
松浦竜也, 島田尚	
低い感受性下での細胞間接触が誘発する細胞集団運動 .....	19
松下勝義, 新垣大幸, 藤本仰一	

Bak-Sneppen 的板モデルによる株式市場の不安定性の分析 .....21

南雲将太, 島田尚

Newtonian Event-Chain モンテカルロ法を用いた 2 次元剛体多角粒子系の  
相転移 .....23

白井知樹, 麦田大悟, 磯部雅晴



# 神戸市中心部における徒歩帰宅シミュレーション

榎本大悟<sup>1</sup>, 菊池麻衣子<sup>2</sup>, 照井彩子<sup>2</sup>, 安倍孝太郎<sup>2</sup>,  
土居菜々子<sup>2</sup>, 小林実季<sup>2</sup>, 伊藤伸泰<sup>1</sup>, 野田五十樹<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> 理化学研究所 計算科学研究センター,

<sup>2</sup> 株式会社 NTT ドコモ, <sup>3</sup> 北海道大学

## 概要

2021 年度より理研・ドコモ・神戸市は共同で、神戸市中心部におけるデジタルツインを構築し、災害時の避難計画立案に役立てることを目指して、都市スケールの歩行者避難行動を予測することを試みてきた。本研究では NTT ドコモ提供の携帯電話情報によるメッシュ人口データ、デジタル地図 OpenStreetMap、オープンソースシミュレータ CrowdWalk を用いてデジタルツインを構築し、混雑箇所を予測した。合流部から混雑が広がっていく様子が観測され、これらの混雑は特に事業所が集中している旧居留地の帰宅を 6 時間遅らせることにより軽減され、混雑箇所の数が減少することが明らかとなった。

## Pedestrian return home simulation in Kobe City center

Daigo Umemoto<sup>1</sup>, Maiko Kikuchi<sup>2</sup>, Ayako Terui<sup>2</sup>, Koutarou Abe<sup>2</sup>,  
Nanako Doi<sup>2</sup>, Miki Kobayashi<sup>2</sup>, Nobuyasu Ito<sup>2</sup>, Itsuki Noda<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> RIKEN R-CCS, <sup>2</sup> NTT DOCOMO, INC.

<sup>3</sup> Hokkaido University

## Abstract

Since FY2021, RIKEN, Docomo, and the Kobe City Government have been attempting to construct a digital twin of the central region of Kobe City under a joint research, to estimate urban scale pedestrian evacuation behavior, with the aim of using it for evacuation planning in the event of a disaster. In this study, the construction was accomplished using population information from cell phones provided by NTT DOCOMO, INC., OpenStreetMap, and CrowdWalk, the open source pedestrian simulator, to estimate congestion locations. It was observed that congestion spread out from the merging roads, and it became clear that these congestion areas could be reduced by delaying the return home for 6 hours of the pedestrians from Old Settlement of Kobe City, where highly concentrated business district locates.

## 1 はじめに

災害時に都市に人が集中していると、避難行動に起因する混乱によって二次被害が生じることが懸念される。特に、都市そのものに災害が発生しなくても、その都市が労働の拠点となっている場合、近隣の都市や地域で災害が発生すると、多数の帰宅困難

者が発生する危険性がある。実際に東日本大震災の際には多くの勤労者が東京都内を徒歩で帰宅することを余儀なくされた。

2021 年度より神戸市、NTT ドコモ、理化学研究所の 3 者は共同で、実データに基づく神戸市のデジタルツインを構築し、避難シナリオの検討、あるいは再開発のシナリオを含めたより広範なまちづくり

の検討を進めている。本研究では、神戸市の外部で大規模災害が発生した場合を想定し、普段から神戸市中央部へ徒歩で通勤している人に加え、普段は電車で通勤する人が駅に集まり、電車が運休していることを知って徒歩での帰宅に切り替えるケースをシミュレーションすることを目標に、帰宅困難者によって生じる混雑が著しい箇所の推定を試みた。また、特定の箇所からの徒歩帰宅者の出発を遅延させれば、これらの混雑が避けられるか、その程度はどのくらいになるか調査した。

## 2 シミュレーション手法

シミュレーションフレームワークとして、オープンソースのエージェントベース歩行者シミュレータである CrowdWalk と、手作業で編集された OpenStreetMap、株式会社 NTT ドコモ (以降ドコモ) により提供された 1 時間分解能・500 m メッシュの人口データを用いた。シミュレーション領域を図 1 左の赤枠で示す。OSM には図 1 右に示すように、歩道・横断歩道が部分的に含まれ、歩行者信号の実装はない。車道・歩道両方のデータを抽出して横断歩道リンクに信号を実装することにした。そのさい図 1 右図青枠以外の領域のように、交差点内のリンクを手作業で削除することにより、赤信号の際でも車道を通して交差点を貫通してしまう歩行者を抑止し、機能する歩行者信号を実装し機能させた。



図 1: シミュレーション領域 (左赤枠) と歩道実装の様子 (右青枠)

## 3 歩行者数推定とシナリオ・結果

人口データでは昼間に神戸市中心部にいる人々がどのメッシュからやってきたか (正確な座標・時刻は不明であるものの) 遡って調べることができる。これにより、シミュレーション領域内から出勤してきた人、東西から出勤してきた人をメッシュごとに弁別し、全体で通常時の徒歩帰宅者は 53,310 人、うち

区内・東・西からの出勤がそれぞれ 14,856 人、16749 人、21,705 人と判明した。シミュレーションにはより細かいメッシュ単位人口を入力した。

神戸市の近隣で災害が発生し、この人数が一斉 (1 時間以内) に帰宅を開始した場合と、図 2 赤枠で代表する旧居留地の人々が帰宅を遅延した場合を比較した。結果、図 3 に示すように混雑箇所が顕著に減少した。避難時間は図 4 に示すように全体では約 5 時間から 8 時間に増大するが、これは遅延の効果がドミナントで、旧居留地以外・遅延させた旧居留地からの帰宅行動の完了時間はいずれも元の時間より短く、それぞれ要した時間は約 4 時間と約 2 時間となった。



図 2: 旧居留地の場所

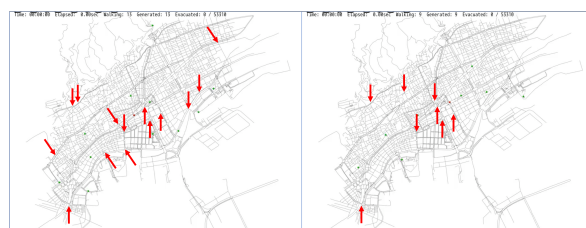


図 3: 遅延なし (左)・あり (右) による混雑箇所 (赤矢印) の比較

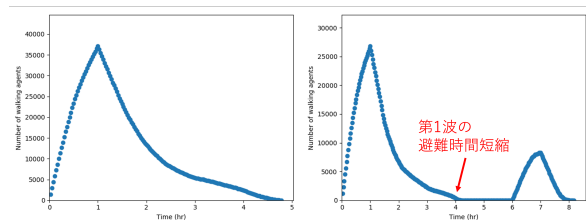


図 4: 遅延なし・ありによる歩行者人数の比較

# 鉄道車両内における吊り革およびポール配置の検討

校條大成<sup>1</sup>, 川口寿裕<sup>1</sup>

<sup>1</sup>関西大学 社会安全学部 安全マネジメント学科

## 概要

本研究では、満員電車（ロングシートタイプ）が急ブレーキをかけた際の乗客の状況をシミュレーションした。シミュレーションには離散要素法(DEM)を用いた。乗客が慣性力に耐えようとする様子は、粒子にバネの張力を加えることで表現した。シミュレーションの結果、吊り革やポールを配置することで乗客の負担を軽減できることがわかった。また、様々なポールの配置を比較することで、ポール配置が乗客にかかる負担への影響について調べた。

## Study on Arrangement of Straps and Poles in Train

Taisei Menjo<sup>1</sup>, Toshihiro Kawaguchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Safety Management, Faculty of sociated Safety Sciences, Kansai University

## Abstract

In this study, the condition of passengers in a crowded train when a train (long seat type) suddenly brakes was simulated. DEM(Discrete Element Method) was used for the simulation. The passengers' attempts to withstand the inertial forces were represented by adding spring tension to the particles. The simulation results showed that placing poles can reduce the load on passengers. Also, by comparing various pole arrangements, the effect of pole arrangement with the least load on the passengers was investigated.

## 1 はじめに

鉄道車両が急停止すると、乗客は進行方向に大きな慣性力を受ける。特に、混雑時にはそれによって多くの人が危険に晒されることになる。電車の本数を増やすなどの解決策が考えられるが、人件費や製造費の問題から、現実的に実現は難しい。こうした現状の中で、井原ら[1]は、吊り革の増設による被害軽減効果を示した。そこで、ポールの増設も吊り革と同様に、容易に行えるのではないかと考えた。

本研究では、電車の内部を再現し、急停止により乗客が慣性力を受ける様子を離散要素法(DEM)[2]を用いてシミュレーションする。そして、吊り革やポールの設置による効果やその配置による違いを検証し、電車の急停止の際に、乗客に作用する力の観点から安全性について検討する。

## 2 計算方法

本研究では、離散要素法(DEM)を用いてシミュレ

ーションを行う。その際の計算条件は、近畿日本鉄道より提供を受けた電車の設計図や急停止の際の加速度を参考にした。

本シミュレーションでは、人を円形粒子で簡略化して表現する。成人男性の肩幅が50cm、胸厚が20cm程度であることから、長径が0.5m、短径0.2mの楕円の面積円相当径として0.32mを粒子直径に設定した。質量は60kg、粒子数は、232人とした。

本シミュレーションに用いる車両を図1に示す。電車は、近畿日本鉄道の列車が走行中に非常ブレーキを使用して停車することを想定する。電車の進行方向を正とすると、非常ブレーキは加速度 $-4.0\text{km/h/s}$ を与える。吊り革、ポールを持つ乗客は、慣性力を受ける直前の座標へと戻るように張力を働かせることで表現する。また、何も持たない乗客や座席利用者も非常ブレーキがかかる際に、踏みとどまろうとする。その様子を再現するため、吊り革使用者と同様に張力を働かせる。粒子への作用力が大きくなり、限界を超えると張力を0にする。限界作用力は何も持たない乗客と座

席利用者に対して 50N、吊り革使用者とポール使用者に対して 500N に設定した。

### 3 結果と考察

本研究では、11 パターンの車両でシミュレーションを行う。図 2 は吊り革とポールの設置場所の例を示したものである。2 本の横線は吊り革、円は直径 5cm のポールを示す。車両 A は設置なし、B は吊り革と 5 本のポールを設置した車両である。急停止後、粒子が慣性力を受けてから、20 秒後の平均作用力を記録した。平均作用力とは、全粒子にかかる作用力の平均値である。シミュレーションは 100 回試行し、その平均をとっている。結果を図 3 に示す。また、車両 A、B における急停止から 10 秒後の粒子の分布例を図 4、粒子の色の区別を表 1 に示す。

図 3 を見ると、吊り革を設置すると、平均作用力が小さくなっていることがわかる。また、ポールが設置された場合も同様に小さくなっており、多く設置されるほど、小さくなっていることがわかる。これは、限界を超えて動いてきた粒子を、吊り革やポールを持つ粒子が支えることで、それより先の粒子にかかる力を抑制できるためである。また、図 4 の A を見ると、粒子のほとんどは黒になっているが、B では、ポールの周りには粒子の一部が白や黄色になっている。したがって、ポールを設置することで急停止時の乗客の負担を軽減できると推測する。また、ポールの設置数が 0 本から 5 本までは、1 本設置ごとに、平均作用力が約 5.4%低下し、5 本以降はグラフがほぼ横ばいになっている。よって、電車の急停止時の乗客の負担を軽減するには、5 本以上のポールを配置することが効果的であると言える。

### 4 まとめ

本論文では、急ブレーキ作動時の鉄道車両内の乗客の様子を再現し、通常の DEM 接触モデルに加えて、吊り革やポールを持つ粒子のモデルを導入したシミュレーションを行った。吊り革やポールを設置することによる効果や、その配置による違いを明らかにすることを目的として研究を行った。その結果から、吊り革やポールを配置すれば乗客の負荷の軽減ができること、5 本以上のポールを設置することで、効果的に急停止時の乗客の負担を減らすことができることがわかった。

### 参考文献

- [1] 井原毅、沼田宗純、目黒公郎、生産研究 62 巻 4 号、91、2010
- [2] 鈴木輝一、粒子個別要素法、森北出版株式会社、2014

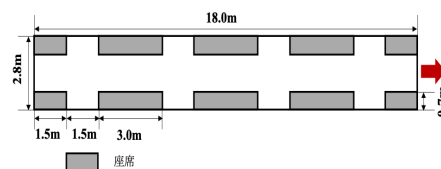


図 1 本シミュレーションにおける車両

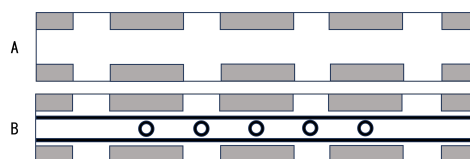


図 2 シミュレーションに用いるポールの配置例

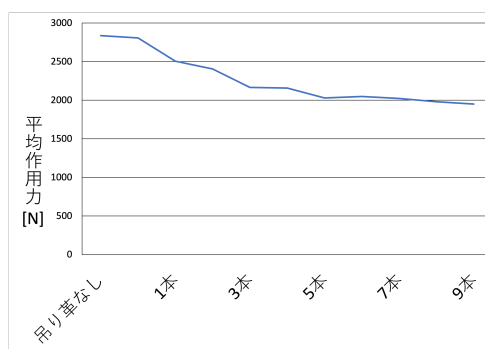
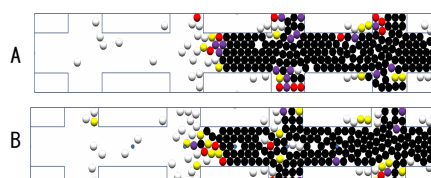


図 3 車両別平均作用力

表 1 作用力の大きさによる粒子の色の区別

作用力	粒子の色
~300N	白
300N~600N	黄色
600N~900N	赤色
900N~1200N	紫色
1200N~	黒



● ポール

図 4 急停止後 10s 経過粒子分布例

# 直鎖状の走化性エージェントモデルの運動性と安定性

大澤智興<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 九州工業大学大学院 情報工学研究院 物理情報工学研究系

## 概要

走化性エージェントが、非相互に作用することで直鎖状に連結したモデルについて提案し、その鎖の運動性と安定性について報告する。

## Motility and stability of chemotactic agents that chained linearly

Chikoo Oosawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

## Abstract

Here we propose a model that can form chained agents due to non-reciprocal chemotactic interactions. Motility and stability of the chains are discussed.

## 1 序論

自己駆動可能なエージェント集団が形成する時空構造は、複雑で多様でありその現象を再現するモデルも多数提案されている。ここでは、複数の走化性エージェント [1] が非相互に作用することで、エージェントが連なった鎖が形成できることを示すとともに、その鎖の運動性と安定性について報告する。

## 2 モデル

本モデルにおける各エージェントは、時間ステップごとに、2次元格子  $(x, y)$  を4方向に移動可能であるが、そのステップごとに、アリのように足跡である化学物質 (フェロモン) を放出 ( $f_P$ ) し、その強度  $I$  は、

$$I_{x,y}(t+1) = I_{x,y}(t) + f_P \quad (1)$$

$$I_{x,y}(t+1) = I_{x,y}(t)(1 - \delta) \quad (2)$$

$$I_{x,y}(t+1) = I_{x,y}(t)(1 - \alpha) - \frac{\alpha}{4}[I_{x+1,y}(t) + I_{x-1,y}(t) + I_{x,y+1}(t) + I_{x,y-1}(t)] \quad (3)$$

に従う。式 (2) は、足跡の分解 (昇華) を示し、式 (3) は、足跡の拡散を意味する。これらの作用により足

跡強度場 ( $I_{x,y}$ ) は、時間的に変化する。

エージェントは、形成された強度場に依存し移動する。その移動確率は、ソフトマックス関数を用いて表記されるが、 $N$  個のエージェントを直鎖状に行列させるために、 $i$  番目のエージェントと  $(i+1)$  番目のエージェントは、以下に示す式に従う、

$$p_i \propto \exp[k_{ii} \cdot I_i(x, y)] \cdot \exp[k_{ij} \cdot I_j(x, y)]. \quad (4)$$

ここで、各々エージェントは、異なる足跡物質を放出していることに注意されたい。式 (4) の  $k_{ii} < 0$  の条件では、自己の足跡に対して回避的に移動するため、これは自己駆動の成分となる。その一方で、 $k_{ij} > 0$  の条件は、 $j$  番目のエージェントは、 $i$  番目のエージェントからの足跡に追従する成分となる。ここで、 $j = i - 1$  に限定すると、エージェント間の非相互な作用を行列  $k_{ij}$  として表記でき、

$$k_{ij} = \begin{cases} k_{ii} < 0 \\ k_{ij} > 0 \text{ 但し, } j = i - 1 \\ k_{ij} = 0 \text{ 但し, 上記以外の } i \text{ と } j \end{cases} \quad (5)$$

となる。

### 3 計算条件、解析方法

$N = 1$  から 32 まで変化させると共に、 $|k_{ii}| = |k_{ij}| = 0, 1, 5, 10, 20,$  に設定し、ステップ数  $t = 0 \sim 1000$  まで計算した。初期位置は、ステップ数に対して十分広い平面を用意し、その中心に直鎖状に配置した。これら鎖状エージェントの運動性を評価するために、初期位置からの平均 2 乗変位を全てのエージェントから求め、運動性の指標とした。

### 4 結果と考察

$N = 1$  かつ  $k_{ii} = k_{ij} = 0$  では、エージェントの運動性はランダムウォークになることを確認した。 $|k_{ii}| = |k_{ij}|$  が大きいほど、自己駆動 (自己回避) する確率が増えるため、直進性が増大した (図 1)。また  $N$  が大きいほど、 $|k_{ii}| = |k_{ij}|$  が小さい程、分裂や融合が見られた。これは鎖の長さが伸びるため、分裂する確率も上がるためであるが、これら断片が移動中に融合することもあり、結果として時間的に、分裂と融合を繰り返す複雑な運動を示した。特に、分裂現象は、エージェント鎖が交差する時に生じやすかった、各エージェントの移動は、式 (4) に従って移動するが、同時に排除体積効果もあるため、同じ位置に複数のエージェントが共存することは許されていない。その一方で、エージェントは、走化性で移動するため鎖が交差することは許されている。従って、エージェント鎖が交差することで局所的な渋滞を引き起こされ、結果的に追従するエージェントが先行するエージェントの足跡を見失うことで分裂が生じやすくなると考えられる。

### 5 展望

提案モデルのような現象は、ジャコウネズミのキャラバン行動や、ヤヌス粒子 [2] でみることができる。分裂や融合の現象の解析には、鳥の群れサイズ分布で示された解析方法 [3] が適用できるかもしれない。

本報告では、単一の鎖について述べたが、複数の直鎖を用意し、それら複数鎖により生じるレーン形成などの時空構造を調べることもできる。さらに、式 (5) について、 $k_{1N} > 0$  を導入すると、エージェント鎖の先頭と末端を連結させることができ環を形成させることもできる。また、Kano モデル [4] における、相互作用行列を参考にして、式 (5) を変更することで、本モデルにおいても人工生命のモデル [5] としての可能性を探究できる。

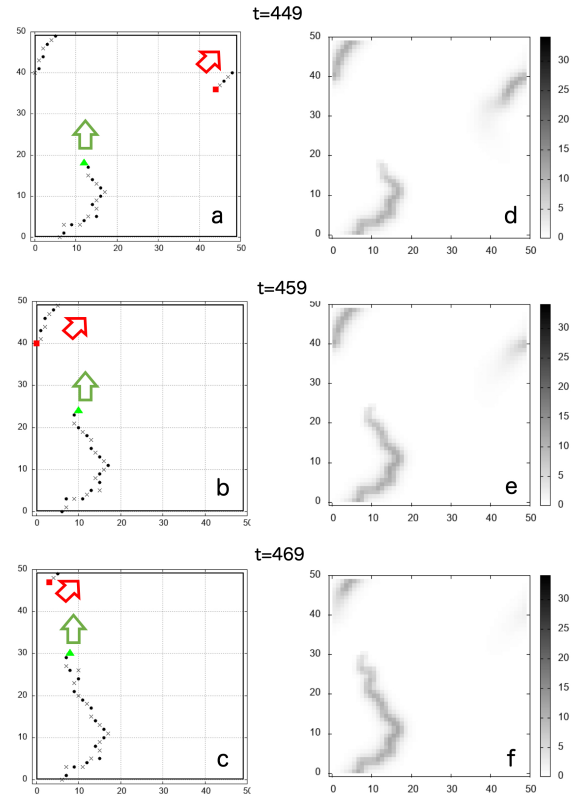


図 1: エージェント鎖の例: $\alpha = 0.5, \delta = 0.1, f_P = 5, N = 32, |k_{ii}| = |k_{ij}| = 10,$  周期境界条件下であるため足跡や鎖が境界を跨いでいる。左側の列は、鎖状の走化性エージェントの位置を示す。右側の列は、全てのエージェントからの足跡の総量を示し、一番右側のバーは足跡の強度表示である。上から時間経過を示しているおり、a と d、b と e、c と f は、それぞれ同じ  $t$  の状態を示している。緑三角と赤四角は、それぞれ鎖の先頭と末端を示す。●と×は、それぞれ偶数番目と奇数番目のエージェントであり、白抜き大きな矢印は、先頭 (緑) と末端 (赤) のエージェントの移動方向を示している。

### 参考文献

- [1] C. Oosawa, J. Robot. Mechatron., Vol.35 No.4, pp. 918-921, (2023)
- [2] D. Nishiguchi et al., New J. Phys. 20 015002 (2018)
- [3] Y. Hayakawa, S. Furuhashi, Phys. Rev. E 86, 031924 (2012)
- [4] T. Kano, et al., Proc. 14th Euro. Conf. Artif. Life (ECAL), 237 (2017)
- [5] 大澤智興, 森本雄祐, 第 31 回インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN2023), Fr-B4-1 (2023)

# 交差点を含む8の字経路におけるニューラルネットワーク走行ロボットの対面自律走行

山形 周<sup>1</sup>, 古澤 昂弥<sup>1</sup>, 宮原 捷伍<sup>2</sup>, 佐々木 良介<sup>2</sup>, 世良田 竜平<sup>2</sup>, 本田 泰<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 室蘭工業大学大学院 工学研究科 情報電子工学系専攻

<sup>2</sup> 室蘭工業大学 理工学部 システム理化学科

<sup>3</sup> 室蘭工業大学大学院 しくみ解明系領域

## 概要

本研究の目的はニューラルネットワークを用いた走行ロボットの自律走行による対面8の字自律走行を実現およびその観測を通じて行動のための知能の原理を探求することである。8の字コースの走行では、円形コースでは発生しないロボット同士の交差が観測できる。交差点においては、直線的な追い越しや行き違いとは異なる知的行動が要求される。実験の結果、対面8の字自律走行を観測することができた。交差点においては、例えば左側に相手を避けるというような形式的なルールがほとんど機能せず、そのときの状況に応じた行動判断が必要となることがわかった。ひとつめは、先に交差点に入っているロボットがあり、自身はあとから交差点に入った場合、どちらかに相手を避けるよりも速度を落とす方がスムーズな交通をもたらすということである。2つ目は自らが交差点に先に入っている場合には、速度を落としすぎず速やかに離脱する必要があることを見出した。

## Autonomous two-way traffic in a figure-eight route with an intersection by neural-network running robots

Shu Yamagata<sup>1</sup>, Takaya Furusawa<sup>1</sup>, Shogo Miyahara<sup>2</sup>, Ryosuke Sasaki<sup>2</sup>,  
Ryuhei Serata<sup>2</sup>, Yasushi Honda<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Division of Information and Electronic Engineering, Graduate school of Engineering, Muroran Institute of Technology, Japan

<sup>2</sup> Department of Sciences and Informatics, Faculty of Science and Engineering, Muroran Institute of Technology, Japan

<sup>3</sup> College of Information and System, Muroran Institute of Technology, Japan

## Abstract

The purpose of this study is to develop a autonomous running system by using simple neural network and to find principles which bring a smooth traffic in a figure-eight route. We were able to observe intersections which do not appear in a simple route of circumference. At the intersection, they need an intelligence which is different from that for linear passing. As a result of the experiment, we were able to observe the figure-eight autonomous running in a face-to-face manner. A formal rule like avoid a robot toward left side dose not function at the intersection. We found two factor to make smooth traffic at the intersection. One of them is that a robot has to slow down when the other robot is running in the intersection. And second factor is that a robot dose not have to slow down when itself is running before the other one.

# 1 はじめに

交通流は我々が日常的に観測することができる現象である。対面歩行や交通渋滞といった集団行動は各個体の相互作用により組織的に形成される動きであるが、そのメカニズムは完全には解明されていない。我々は集団行動の一つである対面走行に注目した。

本研究ではカメラから得られた二次元画像データを入力としたニューラルネットワークを用いた自律走行により、8の字コースで人間による操縦と自律走行で対面走行が可能か確かめることを目的とする。8の字にする理由は、円形コースでは観測できない90度の交差を観測できるためである。

## 2 走行実験

本研究では、図1のような8の字コースで走行実験を行う。内壁の直径は80[cm]、コースの幅は56[cm]である。外壁には青いテープ、内壁にはピンクと緑のテープを貼っている。これは教師データ収集と自律走行の際に外壁と内壁を認識しやすくするためである。また、走行実験で用いる走行ロボットは図2であり、カメラを1つ(図2の赤枠)、モータを2つ(図2の黄枠)搭載している。

走行実験では、2台の走行ロボットを用いて対面8の字自律走行を行う。自律走行を行う際は、片方の走行ロボットは人間が操縦する。自律走行に用いるアルゴリズムは、先行研究で開発された、カメラからの二次元画像データによるニューラルネットワークを用いた自律走行アルゴリズムである。二次元画像データとは、カメラから得られた画像のRGBそれぞれの値を縦方向に足したデータである。この二次元画像データを入力としてニューラルネットワークを用いて学習し、学習結果を用いて自律走行を行う。

教師データ収集の際はマウスを用いて走行ロボットを操縦する。マウスを動かした瞬間の画像とモータの出力を記録し教師データとする。また、本研究では壁より上下の範囲を取り除くために画像データを切り取っている。壁の上は人間や実験場所が映り、自律走行に意図しない影響を与える可能性があるためである。

## 3 実験結果

図4は人間が操縦した走行ロボットの軌道、とニューラルネットワークを用いて学習し自律走行した走行ロボットの軌道である。教師データ数は4000、

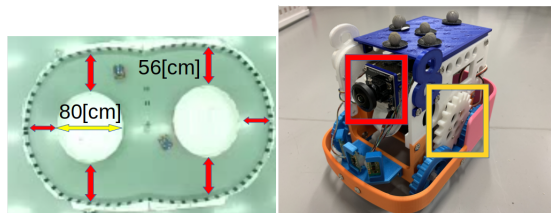


図1: 使用する8の字コース

図2: 使用する走行ロボット



図3: 切り取った画像データ

学習回数は20000回とした。緑の内壁で外側に近づいている箇所があるが、対面8の字自律走行を行っている。

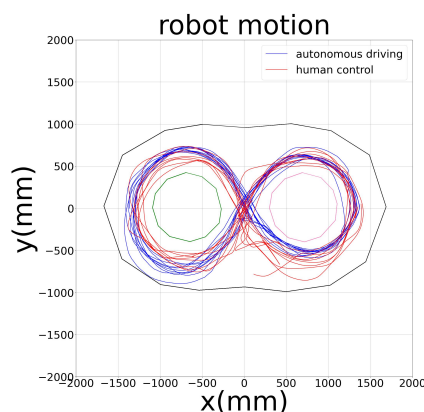


図4: 人間が操縦した走行ロボットの軌道(赤線)と自律走行した走行ロボットの軌道(青線)

## 4 まとめ

実験結果より、人間による操縦と自律走行での対面走行は可能であることが示された。成功の要因として、交差点でロボットと対面した時は速度を落とし、相手側を先に通過させた。また、自らが交差点に先に入っている状況では速度を落とさずにそのまま通行する方がスムーズな交差交通を実現できた。

交差点において、事前に回避ルールを一定に決めておいて、どちらかの方向に回避行動をとるとかえって衝突が起こる可能性が増加する現象を観測できた。



# アクティブ XY モデルにおけるトポロジカル欠陥の効果

井上 駿, 湯川 諭

大阪大学大学院 理学研究科 宇宙地球科学専攻

## 要旨

本研究では格子点上に固定された古典的な XY モデルと自由空間を動き回れる Vicsek モデルとの中間的モデルとしてスピンの向きに自らを駆動して格子点を動き回れるようにした「アクティブ XY モデル」について考える。古典 XY モデルではスピンの向きがトポロジカル欠陥を示すが、本研究ではアクティブ XY モデルを用いてトポロジカル欠陥と自己駆動力との関係性について調べる。その結果、自己駆動力を大きくすると粒子は +1 渦欠陥に凝集し、-1 渦欠陥は系に存在しにくいことが明らかとなった。

## Effect of Topological Defects in Active-XY Model

Shun Inoue, Satoshi Yukawa

Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

## Abstract

In this study, we introduce the active-XY model which is an intermediate model between the classical XY model with spins fixed on lattice points and the Vicsek model with spins traversing freely through space. This model allows spins to self-propel and navigate across lattice points according to their orientations. While the classical XY model is known for the emergence of topological defects, our research investigates the relations between topological defects and the self-propulsion mechanisms within the framework of the active-XY model. Our results show that as self-propulsion intensifies, particles increasingly aggregate at +1 vortex defects, while -1 vortex defects become less common in the system.

## 1 はじめに

自らを駆動する要素の集団はアクティブマターと呼ばれ、多様な協同現象を示す。近年では細胞集団がトポロジカル欠陥に集積する例 [1] など、アクティブマターの協同現象にはトポロジカル欠陥が重要な役割を果たしていることがわかっている。

本研究では格子点上に固定された古典的な XY モデル [2] と自由空間を動き回れる Vicsek モデル [3] の中間モデルとしてスピンの向きに自らを駆動して格子点を動き回れるようにしたアクティブ XY モ

デルについて考える。古典 XY モデルではトポロジカル欠陥が現れるが、Vicsek モデルではトポロジカル欠陥が与える影響が明らかではない。以上を踏まえ、アクティブ XY モデルでは排他性を仮定し、自己駆動力とトポロジカル欠陥の関係性を調べる。

## 2 アクティブ XY モデル

スピン系のモデルとして知られる古典 XY モデルをアクティブ系に拡張する事を考える。周囲と向きを揃える相互作用を反映したアクティブマターモデルとしては Vicsek モデルが有名であるが、古典 XY

モデルも同様の相互作用を持つ。

古典 XY モデルから更にスピンの格子点上を移動できるようにした単純なモデルを構築し、これをアクティブ XY モデルと呼ぶ。このモデルでは、粒子は各格子点上に存在し、前後左右 4 方向へと移動ができる。自己駆動力に対応する変数を  $\epsilon$  とし、その移動レートは自己駆動力  $\epsilon$  によって変化する (図 1)。さらに、斥力相互作用に対応する排他性を仮定し、複数の粒子が同一格子点上を占有できないとする。系の格子点の数  $m$  と粒子数  $n$  を用いて密度  $\rho = n/m$  と定義し、密度変化についても考える。以下では、トポロジカル欠陥の効果が現れやすい温度として  $T = 0.25$  と固定する。

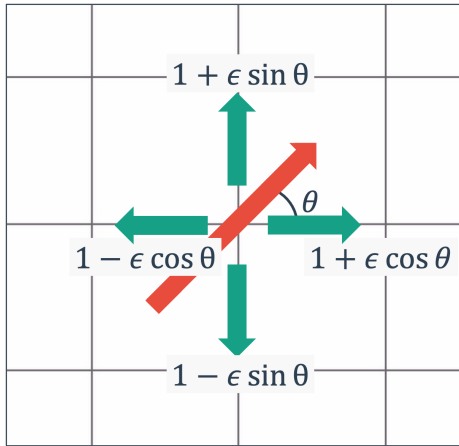


図 1: 粒子の移動レート

### 3 結果と考察

シミュレーションのスナップショットを図 2 にまとめる。自己駆動力  $\epsilon$  が大きくなると相分離が起こる。また、密度  $\rho$  が大きければより小さな  $\epsilon$  においても相分離する。相分離を引き起こすのは自己駆動力  $\epsilon$  と排他性の効果により、+1 渦欠陥が発生するとその欠陥部分に粒子が集積するためだと考えられる。 $\rho$  と  $\epsilon$  が大きければ大きいほど、より大きなクラスターサイズに成長することが確認できる。

系に出現する渦度の合計  $N$  と自己駆動力  $\epsilon$  の関係について定量化したものが図 3 である。自己駆動力  $\epsilon$  を大きくするにつれて +1 渦欠陥と -1 渦欠陥

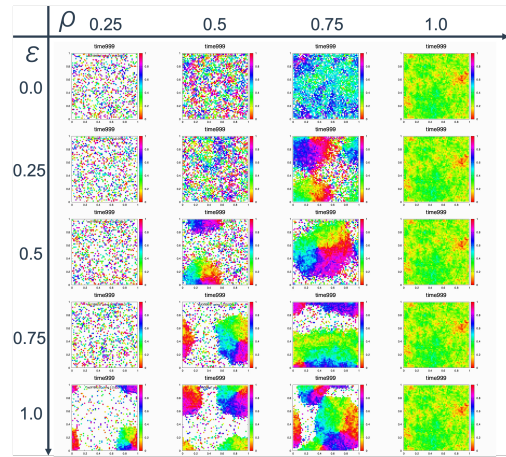


図 2:  $\rho$  と  $\epsilon$  を変化させた際のシミュレーションのスナップショット。  $\epsilon$  を大きくすると相分離する。

の対称性が崩れ、+1 渦欠陥が残りやすいことが定量的にも確認できた。

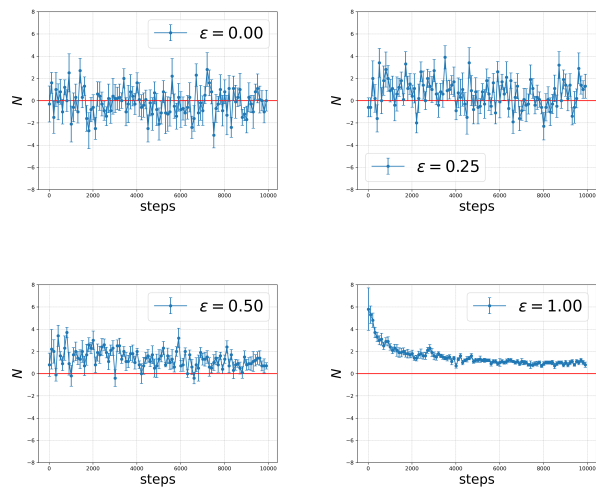


図 3: 自己駆動力  $\epsilon$  と渦度  $N$  の関係 ( $\rho = 0.5$ )

### 参考文献

- [1] K. Kawaguchi et al., Nature **545**, 327-331(2017).
- [2] H. E. Stanley, Phys. Rev. Lett. **20**, 589(1968).
- [3] T. Vicsek et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 1226(1995).

# 高速道路実測データの機械学習による分析

只木進一

佐賀大学理工学部

## 概要

日本の高速道路では、およそ 2km 毎にインダクションループ計測器が設置され、流量と速度が計測されている。これらのデータに対して機械学習を行うことで、自然に 3 つの状態への分類が行えることを示す。また、渋滞発生の前兆を捉えられる可能性についても議論する。

## Machine Learning Analyses of Observed Highway Traffic Data

Shin-ichi Tadaki

Department of Information Science, Saga University

### Abstract

On Japanese highways, induction loop devices are installed approximately every 2 kilometers to monitor traffic flow and speed. By applying machine learning to this data, it is possible to naturally classify the states of the traffic into three categories. Furthermore, the possibility for capturing early signs of congestion is discussed.

## 1 はじめに

日本の高速道路では、およそ 2km 毎に、インダクションループという計測器が埋設されている。ここでは、通過する車両の数と平均速度を計測している。筆者らは、東名高速道路を中心に、高速道路の車両の流れの全体像を把握するために、当該データの分析を行ってきた [1, 2, 3]。本研究では、機械学習を用いてデータ分析を行い、その特徴を抽出する。

今回用いるデータは、東名高速道路 172.65 キロポスト上り車線において、1996 年に取得されたものである。この地点は、日本坂 PA の西にあたり、2 車線の区間である。下流側に日本坂トンネルがある。データには、走行車線と追越車線の、5 分間の流量と平均速度が記録されている。

## 2 K 平均法

K 平均法 (K-means method) は、データを自動的にグループ (クラスター) 分けする機械学習の一種である。今回は、流量と速度が 2 車線分あるため、

4 次元のデータをクラスターに分ける。 $k$  個の中心に対して、データの距離に応じてクラスターへと分割する。中心がクラスターの重心と会うように自動的に調整する。データ点間の距離を用いるため、今回は 4 つの指標のそれぞれの平均値を用いて、規格化している。

なお、異なる  $k$  に対して、分割の質を評価し、適切な  $k$  を求めることができる。

## 3 分析結果

### 3.1 8月のデータ

8月のデータには、はっきりした渋滞が見られる。このデータを K 平均法で分析する。 $k=3$  とした場合の分析結果を、基本図の形で示したものが図 1 である。

紫の点は、流量が少ない自由流である。平均速度が高いことが、傾きの大きさとして現れている。流量の上限は、概ね 5 分間に 100 台である。青の点は、流量が多い自由流である。また、時系列を見ると、

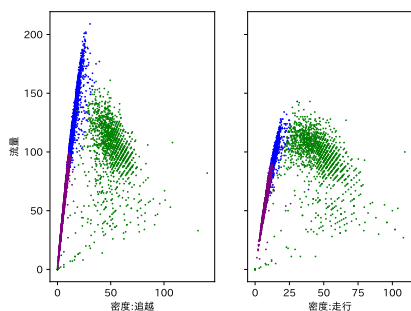


図 1: 8月データの基本図。左は追越車線、右は走行車線。3つのクラスタに分かれている。

時間とともに平均速度が低下し、渋滞へと至る場合が多いことが分かる。

緑の点は、渋滞流である。広い範囲にデータ点が分散しているが、一つのクラスタに分類される。また、追越車線では、青の点と緑の点の間は、きれいに分かれているように見える。一方、走行車線では、二つの領域は連続的になっている。

また、青と緑のデータ点のほとんどでは、追越車線の流量が走行車線のそれを上回る流量逆転が発生している。

### 3.2 他の月のデータ

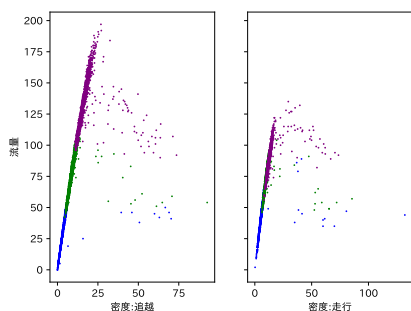


図 2: 2月データの基本図。左は追越車線、右は走行車線。3つのクラスタに分かれている。

当該観測点では、8月には毎日のように渋滞が発生している。一方、他の月ではそれほど渋滞は発生していない。例として2月のデータの分析を行った。 $k=2$ と $k=3$ では、分類の質はほぼ同質である。ここでは、 $k=3$ の場合を示す。図2中の紫の点が表すように、流量の多い自由流と渋滞流が一つのクラスタに分類される。

渋滞流に相当するデータ点が少なく、まとまりとして認識されていないと推測される。

## 4 予測

機械学習によるクラスタリングは、単にデータを分類するだけでなく、訓練されたモデルを使って、未知のデータをグループ分けすることができるのが重要である。

そこで、8月のデータで訓練したモデルが、2月のデータを分類する様子を確認する。図3に示すように、少ないデータ点である緑の点が、渋滞として分類することが出来た。

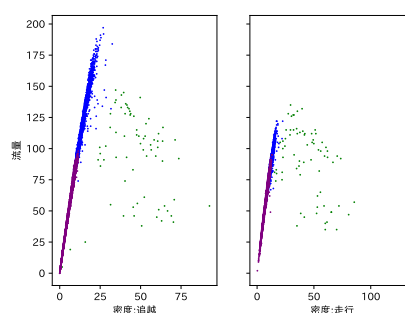


図 3: 8月のモデルを2月データに適用した基本図。左は追越車線、右は走行車線。3つのクラスタに分かれている。

## 5 議論

最も単純はクラスタリング手法であるK平均法を用いて、高速道路での実測データの分類を実施した。今回は、時系列としての分類を行っていないが、高流量の自由流として分類したデータと速度低下がほぼ一致している。このことから、渋滞発生の前兆も捉えられていると考えることができるのではないかな。

## 参考文献

- [1] 西成活佑, 林幹久 「東名高速道路における交通量資料集 I」, 交通流数理研究会 (1999).
- [2] S. Tadaki, K. Nishinari, M. Kikuchi, Y. Sugiyama, and S. Yukawa, J. Phys. Soc. Japan, **71** (2002) 2326.
- [3] S. Tadaki, K. Nishinari, M. Kikuchi, Y. Sugiyama, and S. Yukawa, Physica A **315** (2002) 156.

# 連続 OV モデルにおける安定・不安定平衡点の数値解析

石渡 龍輔<sup>1</sup>, 野村 保之<sup>2</sup>, 杉山 雄規<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学 東北メディカル・メガバンク機構 ゲノム医科学情報学分野,

<sup>2</sup> 福井工業高等専門学校, <sup>3</sup> 名古屋大学 大学院情報学研究科 複雑系科学専攻

## 概要

連続 OV モデルの解析計算で得られた安定・不安定平衡点が数値計算でも再現されることを検証する.

## Numerical analysis of stable and unstable fixed points in the continuous OV model

Ryosuke Ishiwata<sup>1</sup>, Yasuyuki Nomura<sup>2</sup>, Yuki Sugiyama<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Informatics for Genomic Medicine, Tohoku Medical Megabank Organization,

Tohoku University, <sup>2</sup> National Institute of Technology, Fukui College,

<sup>3</sup> Department of Complex Systems Science, Graduate School of Informatics, Nagoya University

## Abstract

We verify that the stable and unstable fixed points obtained from analytical calculations of the continuous OV model are reproduced in the numerical calculations.

## 1 はじめに

魚や鳥や昆虫の群れの移動, 自動車の交通流などは, 自己駆動する物体により創発される集団運動として研究されている. 自己駆動する物体は, 作用・反作用や運動量保存の法則を満たさない非対称相互作用によって駆動されることが多い. 非対称相互作用は, エネルギーの散逸とともに導入されておりそのような物理系は, 非対称散逸系 (Asymmetric Dissipative System) とよばれる [1]. 集団運動を特徴づける巨視的な物理量を調べることは, 非対称散逸系においても重要であると考えられる.

巨視的な物理量を発見する足がかりとして, 連続化された最適速度模型 (OV) モデルにおいて解析計算によって予見されている安定・不安定平衡点への収束ならびに発散が再現されることを確認する.

## 2 連続 OV モデル

OV モデルは交通流の数理モデルであり,  $j$  番目の粒子の位置  $x_j$  ( $1 \leq j \leq n$ ) の運動方程式が

$$\ddot{x}_j = a[V(\Delta x_j) - \dot{x}_j] \quad (1)$$

で与えられる [2]. ただし  $\Delta x_j = x_j - x_{j-1}$  であり周期境界を考える場合,  $x_0 = x_n - L$  および  $x_{n+1} = x_1 + L$  とする ( $L$  はシステムの大きさを表す定数). また  $V$  は  $\tanh$  型の OV 関数  $V(x) = v_0[\tanh \beta(x - b^*) + \Gamma]$ , とする, ただし  $\Gamma = \tanh \beta b^*$ .

ここで変数  $r_j = \Delta x_j - b$  を導入して方程式 (1) を書き換える (ただし  $b$  は平均車間).  $x_{j+1}$  と  $x_j$  の方程式の差を取れば  $r_j$  の運動方程式が得られる.

$$\dot{r}_j = a[V(r_{j+1} + b) - V(r_j + b) - \dot{r}_j]. \quad (2)$$

ただし  $V(x) = v_0 \tanh \beta(x - b^*)$  と置き換えて良い。ここで添字を  $r_j(t) \equiv r(t, j)$  と表現しても良いこと、さらに  $r(t, j)$  が  $j$  に関してべき級数展開できる関数で与えられる ( $r(t, j) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{r^{(k)}(t, 0)}{(k!)} j^k$ ) とし、シフトオペレーターを作用させると  $\exp\left(\frac{\partial}{\partial j}\right)r(t, j) = r(t, j+1)$  となる [3, 4]。シフトオペレーターを用いた表記にして平均車間を  $b = L/n$  と固定した上で、 $n$  について連続極限  $bj \rightarrow x, r(t, j) \rightarrow r(t, x), N \rightarrow \infty, L \rightarrow \infty$  をとると式 (2) は次のように書き換えられる。

$$\frac{\partial^2 r}{\partial t^2} = a \left[ \left( \exp\left(b \frac{\partial}{\partial x}\right) - 1 \right) V(r+b) - \frac{\partial r}{\partial t} \right].$$

このとき  $r$  が定常伝播解を持つと仮定して、 $r(t, x) = u(\xi), \xi = x - ct$  ( $c$  は伝播するクラスタの速度) とおいて、 $\exp\left(\pm b \frac{\partial}{\partial x}\right)$  の3次まで展開して、積分をおこない  $u = 0, \dot{u} = 0$  の解を持つように積分定数を設定し  $v := \frac{du}{d\xi}$  と変数を設定すれば、

$$\frac{du}{d\xi} = v, \quad (3a)$$

$$\frac{dv}{d\xi} = \frac{6}{ab^3 V'} [c^2 v - cau - abV] - \frac{3v}{b} - \frac{V''}{V'} v^2, \quad (3b)$$

となる。ただし  $V(r+b) = v_0 \tanh \beta(r+b-b^*) - v_0 \tanh \beta(b-b^*)$  である。

### 3 結果と考察

得られた式 (3) を4次ルンゲ=クッタ法を用いて数値計算をおこなった。先行研究 [3] にて解析計算で得られている  $b = b^*, a < a_c^*$  における不安定平衡点 (らせん状の発散) と  $b \neq b^*, a_c < a$  での安定平衡点 (1点へのらせん状の収束) を確認した。どちらも  $u_0 = v_0 = 1 \times 10^{-6}$  からのシミュレーション計算で、 $b^* = 1, v_0 = 1, \beta = 1$  と設定し、解析計算 [3] により得られている  $a_c^* = 2\beta v_0, c^* = -b^* \beta v_0$  ならびにクラスタ速度  $c(a)$  を用いた。

$b \neq b^*$  の場合に  $a$  が  $a_c$  と近すぎた場合数値が発散することがあったが、これは  $a$  の値が共存相に含まれてしまったことが原因だと考えられる。これを除いて、解析計算を再現する結果が得られたと言える。

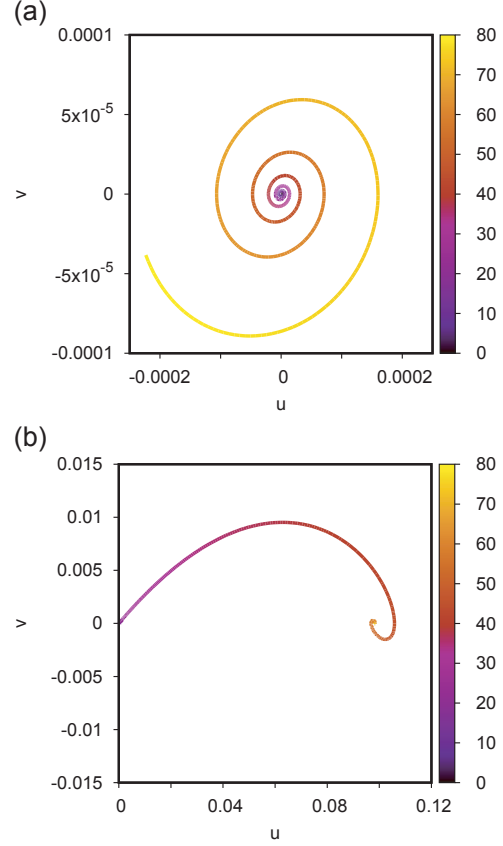


図 1: 色でタイムステップを表した。(a)  $b = b^* = 1, a = a_c^* - 0.2, c(a) = c^* \left(1 - \frac{a_c^* - a}{3a_c^*}\right) = -0.966667$ . (b)  $b = 0.8, a = a_c + 0.2, a_c = 2V'(b) = 1.92209, c(a_c) = -bV'(b), c(a) = c(a_c) \left[1 - \frac{a_c^* (a - a_c)^2}{12a_c^2 (a_c^* - a_c)}\right] = -0.781472$ .

### 参考文献

- [1] Y. Sugiyama, Asymmetric Interaction in Non-equilibrium Dissipative System towards Dynamics for Biological System, in Natural Computing 1 of Natural Computing 189 – 200, 2009.
- [2] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama, Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation, Physical Review E, 51, 2 1035 – 1042, 02, 1995.
- [3] Y. Nomura, S. Saito, R. Ishiwata, and Y. Sugiyama, Hopf bifurcation analysis for a dissipative system with asymmetric interaction: Analytical explanation of a specific property of highway traffic, Physical Review E, 93, 1 012215:1–12, 01, 2016.
- [4] Y. Sugiyama, Dynamics of Asymmetric Dissipative Systems: From Traffic Jam to Collective Motion, Springer, 2023.

# 数値くりこみによる時間遅れを含む2階微分方程式解の安定性解析

本田 泰

室蘭工業大学 しくみ解明系領域

## 概要

一般的に、物理系の運動方程式やフィードバック制御システムなどに時間遅れが含まれると、その挙動は予測困難な場合が多い。時間遅れがないと仮定すれば安定するシステムにおいても、不安定な挙動を示す場合がある。制御理論においては伝達関数のパデ近似などを用いて、それは回避されるが、物理的描像は不明確である。本研究では、時間遅れを含む2階微分方程式の解が、どのような性質をもつか、遷移行列の固有値を用いて、系の安定性解析を行った。時間遅れを考慮した遷移行列の固有値を用いて、微分方程式の係数を繰り込むことによって系が不安定になる領域の存在を示すことができた。不安定（あるいは安定）領域をシミュレーションによる結果と比較すると、相似した形状が得られた。

## Stability analysis of a second order differential equation with time delay by a numerical renormalization

Yasushi Honda

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

### Abstract

Generally speaking, in the case where a time delay is included in an equation of motion or a feedback control system, it is impossible to expect the behavior in a simple manner. There is a possibility that the time delay brings unstable state of the system which is stable without the time delay. In the control theory, the pade approximation for the transfer function is used to analyze a system with a time delay. However it does not depict physics.

In this study, we propose a renormalization for coefficients of a second order differential equation. Unstable region in coefficient space is exhibited by this renormalization method. The shape of stable or unstable region is similar to that obtained by simulations for the same differential equation with the time delay.

## 1 時間遅れのない2階微分方程式

時間遅れを含む微分方程式を扱うまえに、比較のために時間遅れを含まない次のような時間  $t$  に関する2階微分方程式があるとす。

$$\ddot{x}(t) = -a\dot{x}(t) - bx(t) \quad (1)$$

$x$  は単振り子の角度や電流など、どのような物理量でもよい。また、係数  $a$  の項は摩擦などの抵抗に対応する項である。一方  $b$  の項が重力やバネなどによる力に対応する項で

ある。 $a, b$  は実数係数 (ゲイン) である。

フィードバック系の制御においては、PD制御とみなすこともできる。 $a = 0$  であれば系は振動状態となるが、 $a > 0$  とすることによって、系は減衰振動すなわち安定化する。

## 2 時間遅れを含む場合に対するシミュレーション結果

時間遅れが無いのであれば、 $a > 0$  である限り状態が発散することはなく、かならず減衰振動する。

一般に見られるように時間遅れがある場合には、 $b$ の項による振動に加えて、ハンチングと呼ばれる振動現象が観測されることがある。ハンチング現象においては、 $a > 0$ であったとしても、振動が発散する場合もあり得る。つまり、時間遅れを無視した微分方程式の解では起こり得ない現象が現れる。

次のような時間遅れ  $\delta$  を含む 2 階微分方程式があるとする。

$$\ddot{x}(t) = -a\dot{x}(t - \delta) - bx(t - \delta) \quad (2)$$

図 1 にシミュレーションによって得られた  $a$ - $\delta$  空間における、相図を示した。いま、 $b = 1$  とする。したがって角振動数  $\omega = 1$  すなわち振動周期は  $2\pi$  である。

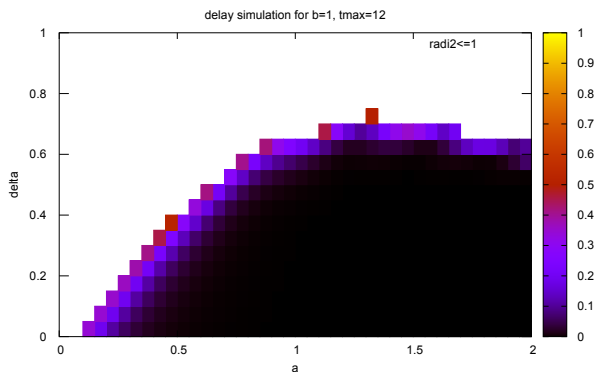


図 1: シミュレーションによる、 $a$ - $\delta$  空間の相図 ( $b = 1, dt = 10^{-4}$ ) 白い領域が不安定領域。色を付けた領域が安定領域。

白い領域は不安定領域である。 $\delta < 0.7$  の領域では、 $\delta$  の値が大きくなるに連れて不安定領域が拡大していることが分かる。いっぽう、 $\delta > 0.7$  の領域では、 $a$  の値を大きくしても運動は安定しない。 $b = 1$  の場合  $\delta_c \simeq 0.7$  である。

### 3 時間遅れの数値繰り込み

$\Delta t$  を微小時間として、 $\delta = \Delta t$  の場合、(2) 式を遷移行列を用いた漸化式の形で書くと、

$$\begin{pmatrix} \vec{s}_{i+1} \\ \vec{s}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{I} + \Delta t \hat{A}_0 & \Delta t \hat{A}_1 \\ \hat{I} & \hat{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{s}_i \\ \vec{s}_{i-1} \end{pmatrix} \quad (3)$$

と書ける。記号の詳細は本講演および講演論文で詳述するが、元の微分方程式は、遷移行列による状態ベクトル  $\vec{s}_i$  の漸化式で記述できることを示した。

最終的には、

$$\delta = n\Delta t \quad (n \rightarrow \infty, \Delta t \rightarrow 0) \quad (4)$$

の極限を取る必要があるので、遷移行列は無限次元となり、そのままでは取り扱うことができないという点だけを指摘しておく。

この遷移行列の特性方程式は、固有値を  $\eta$  とすると、

$$\det \begin{pmatrix} 1 - \eta & 0 & -\Delta t a & -\Delta t b \\ \Delta t & 1 - \eta & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -\eta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\eta \end{pmatrix} = 0 \quad (5)$$

となるので、余因子展開を 2 回行うと

$$(\eta - 1) \{ \eta(\eta - 1) + \Delta t a \} + \Delta t^2 b = 0 \quad (6)$$

という 3 次方程式になる。この (6) 式の解を、特に  $\eta_s$  と書くことにする。

$a_r, b_r$  を

$$a_r \equiv \frac{a}{\eta_s}, \quad b_r \equiv \frac{b}{\eta_s} \quad (7)$$

と定義すると、(6) 式は

$$(\eta_s - 1) \{ (\eta_s - 1) + \Delta t a_r \} + \Delta t^2 b_r = 0 \quad (8)$$

となる。このかたちは、時間遅れがない場合の特性方程式とまったく同じである。つまり、(7) 式のように係数  $a, b$  を修正（繰り込み）することによって、時間遅れがない場合と同様の形式で、時間遅れがある場合を定式化できた。

この繰り込まれた係数  $a_r, b_r$  を再び、(6) 式の係数として用いると、それは時間遅れ  $\delta = 2\Delta t$  の系の特性方程式と等価とみなすことができる。これを繰り返すことで、 $\delta = n\Delta t$  の特性方程式に対応する固有値を得ることができる。

この数値くりこみを実行して得られた  $a$ - $\delta$  空間の 2 次元相図を図 2 に示す。白い領域で系は不安定となり、振動は

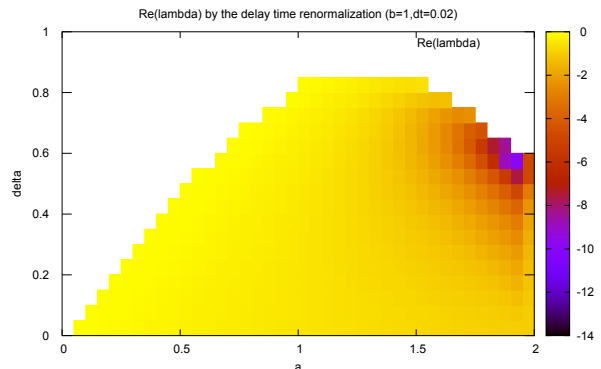


図 2: 数値繰り込みを用いて得られた相図。 ( $b = 1, \Delta t = 0.02$ ) 色付けされていない領域では系は不安定。色付けされている領域で、系は安定する

発散する。すなわち、時間遅れ  $\delta$  の存在によって、2 階微分方程式の解が不安定になる領域が存在することを係数の繰り込みによって理論的に示すことができた。



# アリ分業の反応閾値モデルに導入すべき 反応閾値の個体差と時間変化について

松浦竜也, 島田尚

東京大学 工学系研究科 システム創成学専攻

## 概要

真社会性昆虫は、効率的な分業により集団として高い適応度を見せる。その分業の記述のために、各個体が反応閾値と巢内のタスクに対応する刺激に応じてタスクに従事する、反応閾値モデルと呼ばれるモデルが提唱されている。しかしながら、大規模なデータを通じた検証の結果、反応閾値モデルを再考する必要性が示唆された。本研究では、反応閾値モデルに反応閾値の個体差と時間変化という二つの拡張を導入したシミュレーションによって、先行研究で得られたアリの労働に関する振る舞いを再現することができた。

## Necessary diversity and time variation of response threshold in response threshold model for division of labor of ants

Tatsuya Matsuura, Takashi Shimada

Department of Systems Innovation Graduate School of Engineering The University of Tokyo

## Abstract

One of the reasons of the success of eusocial insects is assumed to be their efficient division of labor. The system of their division of labor is thought to be described by a response threshold model. However, throughout a recent study to verify the model framework through a large set of activity data of ants showed the necessity to reconsider the simple modeling. We reproduced the empirical behavior through a response-threshold-model-based simulation, by introducing diversity and time-variation.

## 1 はじめに

アリやミツバチなどの真社会性昆虫は、不妊の階層を含む複数の階層をもち、階層ごとに分業を行っている。その効率的な分業は、彼らの繁栄の大きな理由の一つであると考えられている [1]。そのメカニズムを説明するため、固定反応閾値 (FRT) モデルというモデルが提唱された [2]。FRT モデルはシンプルかつ有力なモデルとして知られているが、Yamanaka らは大規模データによる検証を行い、FRT モデルを再考する必要性を主張した [3]。本研究では反応閾値モデルの閾値に個体差と時間変化を導入したシミュ

レーションによって先行研究の結果の再現を試みた。

## 2 先行研究

FRT モデルでは、休止状態と活動状態の二つの状態が存在すると仮定する。各状態間の遷移は、以下の式で与えられる活動を始める確率  $P_{Act}$  と休止する確率  $P_{Rest} = p$  (一定) によって記述される。

$$P_{Act} = \frac{s(t)^2}{s(t)^2 + \theta^2} \quad (1)$$

ここで、 $s(t)$  は時刻  $t$  におけるコロニーのストレスを、 $\theta$  は各アリの反応閾値を表している。FRT モデ

ルでは同じタスクを担当するアリの $\theta$ は同一で、時間変化しないと仮定する。

Yamanaka らは各個体が巣箱と餌場を繋いだチューブを通過した時刻を記録した大規模データによる FRT モデルの検証を試みた [3]。

まず、Yamanaka らは労働量の分布が正規分布に収束するという仮説を検証したが、観測の結果、労働量の分布は一般化ガンマ分布に収束していた。これは各個体の労働量には大きな偏りがあり、労働が個体間で均等に分配されていないことを意味している。

また、Yamanaka らは、任意の2日間の労働量が非常に弱くなるという仮説を、労働量のスピアマンの順位相関係数の観測期間平均：

$$S_d^W = \frac{1}{T-d} \sum_{m=1}^{T-d} S_{m,m+d}^W \quad (2)$$

によって検証した。ただし、 $S_{m,m+d}^W$  は  $m$  日目と  $m+d$  日目それぞれでの労働量間のスピアマンの順位相関係数、 $T$  は総観測期間である。この結果、 $S_1^W \simeq 0.7$  であることと、 $d \geq 2$  で  $S_d^W$  は半減期 30–45 日程度で緩やかに減衰することがわかった。

これらの結果が、従来の FRT モデルの通り反応閾値  $\theta$  が一様かつ時間変化しないものであれば観測されないものであったため、Yamanaka らは FRT モデルに拡張が必要だと主張した。そこで我々は、この結果を再現するため、反応閾値モデルの閾値に個体差と時間変化を導入したシミュレーションを行った。

### 3 シミュレーション

#### 3.1 反応閾値の個体差の効果

まずは、反応閾値に個体差を導入する。個体  $i$  の反応閾値  $\theta_i$  を  $\theta_i \sim N(10, \sigma^2)$  によって与える。ここで、 $\sigma$  は 0–5 で 0.5 刻みで変化させた。図 1 に得られた  $S_d^W$  を示す。 $\sigma$  が大きい時、 $S_d^W$  は、先行研究に近い 0.6 付近となることを再現できたが、 $S_d^W$  の減衰は観測できなかった。また、分布が 2 値分布、一様分布であるときも同様の結果となった。

#### 3.2 反応閾値の時間変化の効果

続いて、反応閾値に個体差と時間変化を導入する。個体  $i$  の反応閾値  $\theta_i$  を以下のように与える。

$$\theta_i(0) \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (3)$$

$$\theta_i(t + \Delta t) = \theta_i(t) + 0.1\xi - \beta(\theta_i(t) - \mu) \quad (4)$$

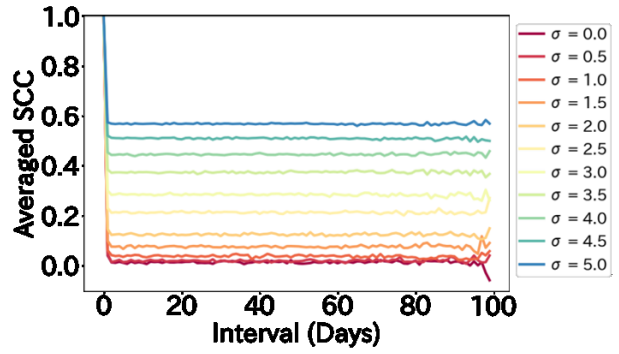


図 1: シミュレーションの結果得られた各時間間隔  $D$  のスピアマンの順位相関係数の平均  $S_d^W$

$\beta = \{2 \times 10^{-5}, 4 \times 10^{-5}, 6 \times 10^{-5}, 8 \times 10^{-5}, 10^{-4}\}$ 、 $\xi \sim U(-1, 1)$  であり、 $\mu = 10, \sigma = 4$  とした。

図 2 に得られた  $S_d^W$  を示す。反応閾値に時間変化を導入することで  $S_d^W$  の緩やかな減少が再現できた。また、異なる時間変化を導入した場合にも同様に  $S_d^W$  の緩やかな減少が観測された。

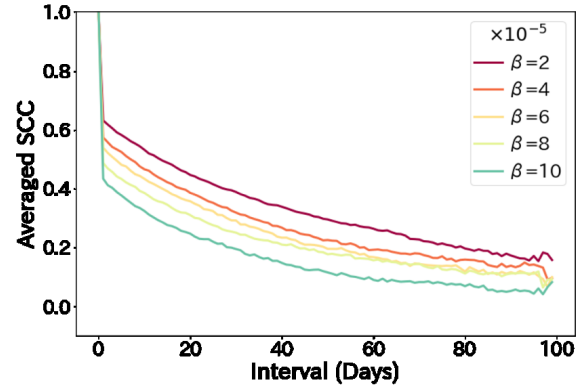


図 2: シミュレーションの結果得られた各時間間隔  $D$  のスピアマンの順位相関係数の平均  $S_d^W$

### 4 結論

シミュレーションの結果より、 $S(1) \simeq 0.7$  の再現には反応閾値が幅をもって分布する必要があること、 $S_d^W$  の緩やかな減少の再現には反応閾値の時間変化が必要であることがわかった。

### 参考文献

- [1] Gene E. Robinson, Annual review of entomology 37.1, 637-665 (1992).
- [2] E. Bonabeau et al., J. theor. Biol 215, 481-489 (2002).
- [3] O. Yamanaka et al., Scientific Reports, 9, 8845 (2019).

# 低い感受性下での細胞間接触が誘発する細胞集団運動

松下勝義, 新垣大幸, 藤本仰一

広島大学 数理生命科学プログラム

## 概要

細胞の集団運動では他の細胞を認識して運動することでその運動を秩序化する。その中に細胞が他の細胞と接触した際に応答して運動する様式があり、接触誘発と本稿では呼ぶ。この様式では別の様式である相互誘導において起きる運動秩序化を抑制する短距離秩序が現れる。本研究ではこの短距離秩序の理解ため、比較的小さいシステムサイズでその細胞認識の感受性や運動維持性への依存性を調べた。その結果、運動の秩序が空間的に生まれるものの時間的に向きが揺らぎ続ける状態が現れることが判った。

## Collective cell motion with contact trigger for low sensitivity

Katsuyoshi Matsushita, Taiko Arakaki, Koichi Fujimoto

Program of Mathematical and Life Sciences, Hiroshima University

## Abstract

Cells utilize cellular sensing to order their motion in their collective movement. Typical sensing is that the simple mechanical cell contact triggers the motion of the cell. We call this sensing contact trigger. This sensing for low sensitivity induces short-range order, which destabilizes the collective movement observed in the case of mutual guiding. We simulate the collective movement for the dependence on the sensitivity and persistence of cell motion for small system sizes to get insights into short-range order in the contact trigger. The simulation shows the emergence of a motion ordering state which highly fluctuates in the direction of motion.

細胞の集団運動は生物の構造物形成で細胞を適所に供給する現象である。この集団運動で細胞は互いに接触しながら運動の秩序を作る。この細胞間の接触は細胞表面の受容体とリガンドの結合を通して行われる [1]。この受容体とリガンドの細胞表面の空間分布が集団運動における秩序形成にかかわる可能性がある。実際、この分布は細胞の相互作用の対称性、極性、を変える。アクティブマター物理学の知見を踏まえれば対称性の違いは運動秩序形成に重要な役割を果たす [2]。従ってこのようなリガンド分布と運動秩序の間にある強い相関が自然と予想できる。

受容体分布は基本的には細胞のある方向の表面に局在し、細胞の運動を決める [3, 4]。一方でリガンドの分布は様々な可能性がある。たとえば同種接着分

子を受容体とリガンドに利用した場合は同種分子なので受容体と同じ分布になる [5]。一方でリガンドが受容体と同じではない場合は、一様分布を取る場合が想定される。前者を秩序化の相互作用として使う機構を相互誘導、後者を使う場合は接触誘発と呼ぶ。前者はリガンド局在の向きで、自身の受容体局在の向きを接触してきた細胞へ伝える。その情報をもとに相互に細胞運動の向きを揃えることが前者の呼び方の由来である [6]。後者の呼び方は向きの情報が無くただ接触に運動が機械的に誘発されるのみであることに由来する [7]。これら二つの相互作用の違いが先に述べた秩序形成にどのような影響を与えるか良くわかっていなかった。

我々は最近これら二つの場合をモデル化しその比較

を行った [8]. そして比較的接触誘発での秩序化が難しく、運動秩序形成のための感受性強度の閾値が高くなることを見出した. 接触誘発の場合には短距離秩序状態が低感受性の場合に観測される. この単距離秩序状態がおそらく運動の全体の秩序化を抑制しているものと考えられる. このような短距離秩序の性質がこの運動秩序化抑制を理解するカギとなる.

我々は Cellular Potts 模型 [9] によるシミュレーションでこの弱い受容体感受性での細胞運動の状態を調べた. これまで行ったシミュレーションでの大きなシステムサイズでは、この弱い感受性における明確な秩序ないし規則的運動を捉えるは強すぎる揺らぎのため困難であった. そこで比較的小さなシステムサイズで安定化した短距離秩序を調べた. その際、この受容体感受性の運動の秩序変数への影響を調べた. その結果、感受性の値に対して秩序変数が不規則に変動した. これは短距離で秩序化していたとしても不安定であるかたぐさんの準安定状態が存在することを意味する. そこでこの不規則性の原因をはっきりさせるため秩序変数の時間依存性を調べた. そして秩序変数の方向は大きく揺らいでいることが分かった. 従ってかたぐさんの準安定状態の寄与が秩序においてキャンセルしているのではなく、短距離秩序状態の内在的な不安定性が不規則な秩序変動の原因と推測できる.

このような短距離秩序の揺らぎはすでに自己駆動のある細胞の境界条件由来の固液転移で知られている [10]. その場合は、この短距離秩序の不安定性がシステムの (周期) 境界条件と運動の維持時間で決まる運動の維持距離 [11–13] との非整合性が不安定性の由来と考えられる. そこでその可能性を調べるため運動の維持時間依存性も調べた. しかし、運動の維持時間を変えても感受性依存性と大差ない結果が得られ、運動の維持時間に系統的に依存しなかった. 従って、この揺らぎは境界条件との非整合性では説明できない. つまりシステムサイズが大きく境界条件がきかない場合でもこの揺らぎは現れていると考えられる.

これらの結果から接触誘発での集団運動の不安定な短距離秩序状態は境界条件などではなく内在的な集団としての秩序の不安定性が背景にあると考えられる. これは自己駆動系や相互誘導では見られない現象で [6, 13–15], そこには相手にリガンドを通じて向きを伝えられないという性質が大きくかかわっている. 現状ではこのリガンドの性質が生み出す状

態や生み出す揺らぎの機構が何であるかはよくわかっていない. しかしよく分かっている相互誘導の秩序状態を踏まえればそれらを説明する予想を立てうる [6]. そこでこれらの結果と整合的になる予想をこれらの結果の紹介とともに本講演で議論する.

## References

- [1] U. S. Schwarz and S. A. Safran, *Rev. Mod. Phys.* **85**, 1327 (2013).
- [2] M. C. Marchetti, J. F. Joanny, S. Ramaswamy, T. B. Liverpool, J. Prost, M. Rao, and R. A. Simha, *Rev. Mod. Phys.* **85**, 1143 (2013).
- [3] J. C. Coates and A. J. Harwood, *J. Cell Sci.* **114**, 4349 (2001).
- [4] C.-H. Siu, T. J. C. Harris, and E. W. Jun Wang, *Semin. Cell. Dev. Biol.* **15**, 633 (2004).
- [5] M. Takeichi, *Nat. Rev. Mol. Cell. Biol.* **15**, 397 (2014).
- [6] K. Matsushita, *Phys. Rev. E* **97**, 042413 (2018).
- [7] K. Matsushita, T. Arakaki, N. Kamamoto, M. Sudo, and K. Fujimoto, *Sympo. Traffic Flow Self-driven Particles* **28**, 5 (2023).
- [8] K. Matsushita, T. Arakaki, M. Sudo, N. Kamamoto, and K. Fujimoto, in *Ann. Meeting of JPS* (2023) pp. 22pPSM–28.
- [9] F. Graner and J. A. Glazier, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 2031 (1992).
- [10] K. Matsushita, S. Yabunaka, and K. Fujimoto, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 054801 (2021).
- [11] B. Szabó, G. J. Szollosi, B. Gonci, Z. Juranyi, D. Selmeczi, and T. Vicsek, *Phys. Rev. E* **74**, 061908 (2006).
- [12] A. J. Kabla, *J. R. Soc. Interface* **9**, 3268 (2012).
- [13] K. Matsushita, K. Horibe, N. Kamamoto, and K. Fujimoto, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 103801 (2019).
- [14] K. Matsushita, *Phys. Rev. E* **101**, 052410 (2020).
- [15] K. Matsushita, H. Hashimura, H. Kuwayama, and K. Fujimoto, *J. Phys. Soc. Jpn* **91**, 054802 (2022).

# Bak-Sneppen 的板モデルによる株式市場の不安定性の分析

南雲将太<sup>1</sup>, 島田尚<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 大学院工学系研究科 システム創成学専攻

<sup>2</sup> 東京大学 数理・情報教育研究センター

## 概要

株式市場はどういった条件により不安定となるのか. 今回, 自己組織的臨界現象 (SOC) のモデルである Bak-Sneppen モデルをベースとして, 新たな指値板モデルを構築した. その結果, 注文のキャンセル率が小さい場合に, 指値板の注文分布が不安定な状態へと自発的に変化することが明らかになった.

## Analysis of stock market instability using Bak-Sneppen-like order book model

Shota Nagumo<sup>1</sup>, Takashi Shimada<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Department of Systems Innovation, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

<sup>2</sup> Mathematics and Informatics Center, The University of Tokyo

## Abstract

What conditions make the stock market unstable? In this study, a new limit order model was constructed based on the Bak-Sneppen model, which is a self-organized criticality (SOC) model. The results revealed that the order distribution of the limit book becomes spontaneously unstable when the cancellation rate of orders is small.

## 1 はじめに

株価の変動のべき乗則 [1] は, 指値板をモデル化した Maslov モデルによって再現されている [2]. Maslov モデルでは投資家に戦略や心理を仮定しておらず, 指値板の取引ルールそのものが不安定性を引き起こしうると示唆する. 他方, 指値注文の価格分布や売り買いの確率的選択, 成行注文と指値注文の確率的選択, 注文のキャンセルなど複数存在するモデルの要素のうち, どの要素が不安定性の起源になっているのかは, 必ずしも明らかでない. 本研究では, Maslov モデルをさらに簡略化したモデルを用い, 不安定性を引き起こす条件を特定する.

## 2 モデル

生物種の共進化系における SOC を説明した Bak-Sneppen モデル [3, 4] を指値板に応用することを考

える. Bak-Sneppen モデル [4] では環境への適応度が最も低い種とランダムに選んだ種を選択し, それらの種の適応度を確率的に振り直す. このルールを参考に, 指値板を以下のとおりにモデル化する.

1. 最も安い売り (最も高い買い) 注文を約定
2. 残った注文を確率  $p$  でランダムにキャンセル
3. 約定/キャンセルされた注文と同数の指値注文を追加し, 1 へ戻る

つまり本モデルでは, Maslov モデルにおける成行注文と指値注文の確率的選択という要素を排除し, 売り板・買い板ともに注文数が一定に保存された設定となっている.

## 3 結果

キャンセル率が 0 の場合には, 最も安い売り (最も高い買い) 注文が約定されるというルールにより,

売り注文と買い注文が一定のスピードでかい離していく。キャンセル率が一定程度大きい場合には、キャンセル後に新規に入れられる注文の存在により、売り板と買い板がかい離することなく注文が密に分布する。興味深いのはキャンセル率がそれらの間の場合で、図1のとおり、注文が密に分布する部分と疎に分布する部分が共存する。

注文分布のキャンセル率依存性を見るため、注文分布の情報論的エントロピーをプロットしたのが図2である。キャンセル率  $10^{-2}$  付近で転移が起きていることが観察される。この転移点は、売り板と買い板の価格幅の期待値が、約定・キャンセル・新規注文のサイクル後に保存されるという条件を解くことで見積もり可能である。キャンセル率が転移以上では売り板と買い板の価格幅が期待値が保存され、価格幅の理論と実測が一致する(図3)。

キャンセル率が転移以下の場合、価格変動は図4のように分布しており、非常に不安定な状態になっていることが分かる。

#### 4 まとめ

Bak-Sneppen モデルに準じた板モデルを構築した。キャンセル率が転移点よりも小さい場合、板上に注文が密に分布する部分と疎に分布する部分が共存する相が現れた。この相では価格変動が非常に不安定となった。

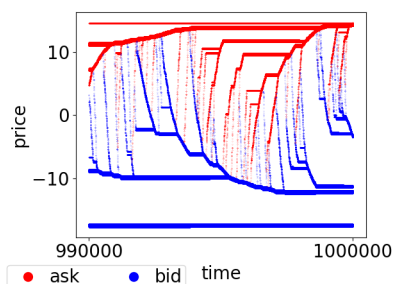


図1: キャンセル率  $10^{-4}$  における注文の分布。

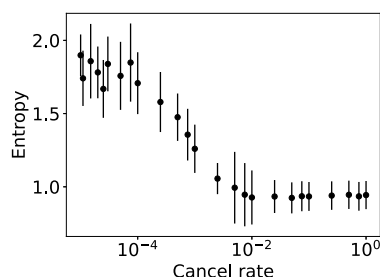


図2: 注文分布の情報論的エントロピー

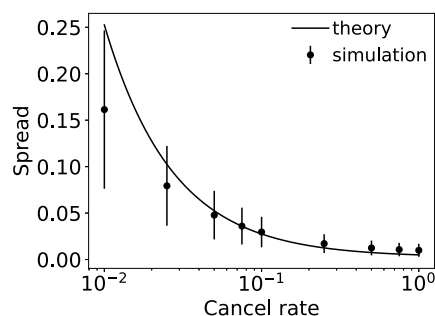


図3: 売り板と買い板の価格幅が期待値

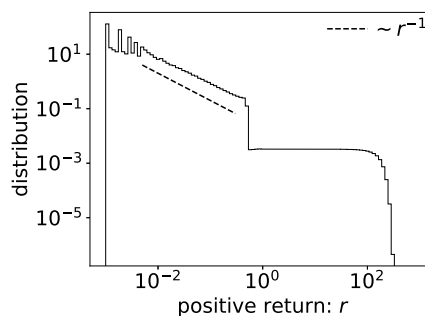


図4: キャンセル率  $10^{-4}$  における価格変動の分布

#### 参考文献

- [1] Rosario N Mantegna and H Eugene Stanley. Scaling behaviour in the dynamics of an economic index. *Nature*, Vol. 376, No. 6535, pp. 46–49, 1995.
- [2] Sergei Maslov. Simple model of a limit order-driven market. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 278, No. 3–4, pp. 571–578, 2000.
- [3] Per Bak and Kim Sneppen. Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution. *Physical review letters*, Vol. 71, No. 24, p. 4083, 1993.
- [4] Henrik Flyvbjerg, Kim Sneppen, and Per Bak. Mean field theory for a simple model of evolution. *Physical review letters*, Vol. 71, No. 24, p. 4087, 1993.

# Newtonian Event-Chain モンテカルロ法を用いた 2次元剛体多角粒子系の相転移

白井知樹, 麦田大悟, 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、剛体多面体系を解析する高速な方法論として (i) 並進平衡緩和に Newtonian Event-Chain モンテカルロ法、(ii) 接触判定に XenoSweep 法を導入し、高密度 2 次元剛体多角粒子系の相図作成を目的とした。特に、排除体積と回転対称を持つ剛体多角粒子で剛体円板と対極の剛体正三角形に着目し、拡散特性に加え、粒子の異方性を考慮した配向秩序変数を新しく提案し、密度の変化に対する相転移ならびに各相の特徴づけを行った。

## Phase transition in dense hard polygon systems by Newtonian Event-Chain Monte Carlo

Tomoki Shirai, Daigo Mugita, Masaharu Isobe

Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

## Abstract

In this study, we investigate the phase transition of the hard polygon systems by increasing the packing fraction (density) by applying two novel algorithms: (i) Newtonian Event-Chain Monte Carlo, known as efficient translational diffusion in a hard sphere system, and (ii) XenoSweep for efficient contact detection between rigid objects. These algorithms enable the equilibration of the hard triangle particle system, which has the most different shape from a hard disk. To characterize the phase transition, we focus on diffusional characteristics and novel orientational order parameters for the hard triangle particle system proposed by our present study.

## 1 はじめに

高密度剛体球系では、結晶 - 流動相転移（いわゆる Alder 転移）が生じる [1]。近年、高速な Event-Chain モンテカルロ法 [2] が開発され大規模計算が可能となり、半世紀来の難問「2次元 Alder 転移問題」の解明に大きく貢献した。Event-Chain モンテカルロ法に粒子速度と衝突則を導入した Newtonian Event-Chain (NEC) モンテカルロ法 [3] は、平衡緩和（並進拡散）の効率がよいことが知られる。一方、剛体球（円板）系でなく剛体多面体（多角形）系では複雑な形状同士の衝突判定が必要となり、計算コス

トが増大する。しかし最近、「凸多面体同士のミンコフスキー差が原点を含む」=「接触している」を利用した Gilbert-Johnson-Keerthi(GJK) 法 (1988) を発展させ、多面体衝突と移動 (Sweep) 距離の高速計算ができる XenoSweep 法 [4] が開発された。CG、ロボット工学、複雑な形状を持つ粉体系の動力学など、広範な分野での今後の応用が期待される。本研究では、2次元多角剛体粒子（ポリゴン）系において、形状が剛体円板と対極の排除体積と回転対称性を持つ剛体三角形からなる多体粒子系において、並進の平衡緩和に NEC 法、接触判定に XenoSweep 法、の 2 つの高速アルゴリズムを導入した。特に、(I) NEC

法の効率性と最適パラメーター探索、(II) 剛体三角形粒子系形状の異方性を考慮した新しい配向秩序変数を導入し、粒子占有率の増大に対する拡散特性と配向秩序変数の変化から高密度剛体多角粒子系の相転移と各相の特徴づけを目的とし、研究を遂行した。

## 2 シミュレーション手法

高密度 2 次元剛体多角粒子系 (粒子数  $N = 512$ 、粒子占有率  $\nu = 0.65 \sim 0.8$ 、粒子の頂点数  $n = 3$ ) において、粒子間接触判定に Xenosweep、並進緩和に NEC、回転緩和にマルコフ鎖モンテカルロ法を用いシミュレーションを実行した。なお、NEC では並進パラメータ  $\tau = t_{\text{trans}}/t_{\text{mf}}$  を定義した。ここで、 $t_{\text{trans}}$  は NEC の Event-Chain(持続) 時間、 $t_{\text{mf}}$  は平均自由時間である。また、緩和効率として 2 次元拡散係数  $D$  に着目した。

$$D = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{4t} \langle |\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_i(0)|^2 \rangle \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{r}_i$  は粒子  $i$  の中心座標である。本研究では、 $t$  を CPU 時間 ( $t_{\text{cpu}}$ ) とした。

稠密剛体三角形系では剛体円板系と異なり、三角形の頂点は頂点を共有する最近接粒子の中心方向ベクトルが 6 回対称性を持つ (図 1)。この性質に着目し、剛体三角形系において、6 回対称配向秩序変数を新たに導入した。

$$\phi_6^k = \frac{1}{N_k} \sum_{\{j\}} e^{6i\alpha_{ij}^k} \quad (2)$$

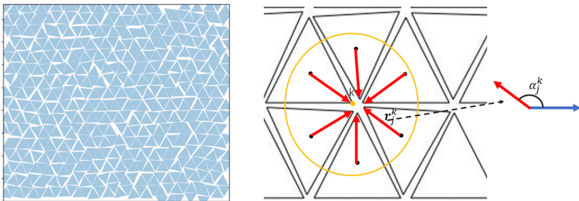


図 1: (左) 粒子占有率  $\nu = 0.80$  における高密剛体三角形系の平衡状態。(右) 近接粒子 (黄色円) 内の位置ベクトル (赤矢印) から配向秩序変数を計算した。

ここで、 $k$  は剛体三角形  $i$  の 3 つの頂点、 $\{j\}$  は  $k$  の位置から半径  $r_c$  内の最近接剛体三角形 ( $i$  を含む)、 $\alpha_{ij}^k$  は、任意の基準ベクトル (たとえば  $x$  軸) に対する  $i$  ならび近接粒子  $j$  の中心から頂点へ向かう位置ベクトル  $\mathbf{r}_{ij}^k$  の相対角度である。また、 $N_k$  は頂点  $k$  に対する最近接粒子数、 $i$  は虚数単位である。な

お、最近接粒子の判定に用いた  $r_c$  は、頂点を基準とした動径分布関数から決定した。

## 3 結果

図 2 は、 $\tau = 1$  の  $D_{\text{cpu}}^*$  を基準とした拡散係数  $D_{\text{cpu}}$  の  $\tau$  依存性である。 $\tau > 10$  で最大値をとり変化しないことがわかる。

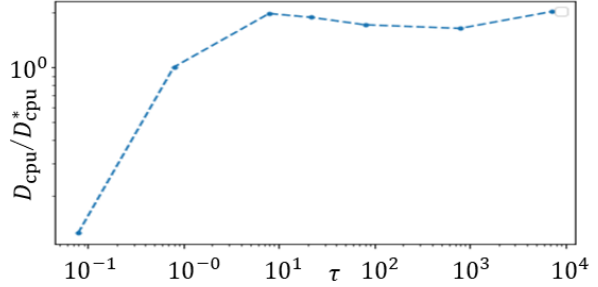


図 2: 拡散係数の並進パラメーター  $\tau$  依存性 ( $\nu = 0.65$ )

図 3 は、 $\nu = 0.65, 0.80$  での新しい配向秩序変数  $|\phi_6^k|$  の空間分布である。 $\nu$  の増加により配向 (結晶) 秩序が増大することが確認できる。

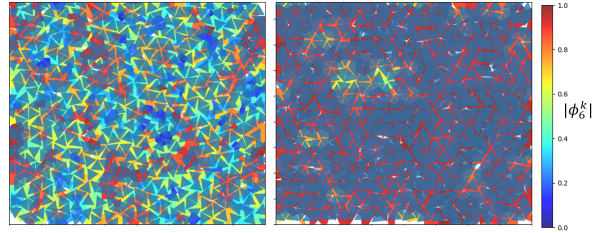


図 3: 配向秩序変数の空間分布 (左)  $\nu = 0.65$ 、(右)  $\nu = 0.80$ 。剛体三角形の頂点でポロノイ分割し、各頂点の  $|\phi_6^k|$  で可視化した。

講演では、これらの秩序変数の変化を相図にまとめ、詳細を報告する。

## 参考文献

- [1] B. J. Alder and T. E. Wainwright, Phys. Rev., **127** 359 (1962).
- [2] W. Krauth, Front. Phys., **9** 229 (2021).
- [3] M. Klement and M. Engel, J. Chem. Phys., **150** 174108 (2019).
- [4] M. Klement, S. Lee, A. Anderson, and M. Engel, J. Am. Chem. Soc., **143** 16163 (2021).



## Contents

“Pedestrian return home simulation in Kobe City center” .....	1
Daigo Umemoto, Maiko Kikuchi, Ayako Terui, Koutarou Abe, Nanako Doi, Miki Kobayashi, Nobuyasu Ito, Itsuki Noda	
“Study on Arrangement of Straps and Poles in Train” .....	3
Taisei Menjo, Toshihiro Kawaguchi	
“Motility and stability of chemotactic agents that chained linearly” .....	5
Chikoo Oosawa	
“Autonomous two-way traffic in a figure-eight route with an intersection by neural-network running robots” .....	7
Shu Yamagata, Takaya Furusawa, Shogo Miyahara, Ryosuke Sasaki, Ryuhei Serata, Yasushi Honda	
“Effect of Topological Defects in Active-XY Model” .....	9
Shun Inoue, Satoshi Yukawa	
“Machine Learning Analyses of Observed Highway Traffic Data” .....	11
Shin-ichi Tadaki	
“Numerical analysis of stable and unstable fixed points in the continuous OV model” Ryosuke Ishiwata, Yasuyuki Nomura, Yuki Sugiyama .....	13
“Stability analysis of a second order differential equation with time delay by a numerical renormalization” .....	15
Yasushi Honda	
“Necessary diversity and time variation of response threshold in response threshold model for division of labor of ants” .....	17
Tatsuya Matsuura, Takashi Shimada	

“Collective cell motion with contact trigger for low sensitivity” .....	19
Katsuyoshi Matsushita, Taiko Arakaki, Koichi Fujimoto	
“Analysis of stock market instability using Bak-Sneppen-like order book model” .....	21
Shota Nagumo, Takashi Shimada	
“Phase transition in dense hard polygon systems by Newtonian Event-Chain Monte Carlo” ..	23
Tomoki Shirai, Daigo Mugita , Masaharu Isobe	

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

〒464-8601 名古屋市千種区不老町  
名古屋大学 大学院情報学研究科 複雑系科学専攻  
多自由度システム講座 内

Email: [sugiyama.yuuki.w5@f.mail.nagoya-u.ac.jp](mailto:sugiyama.yuuki.w5@f.mail.nagoya-u.ac.jp)

Web: <http://traffic.phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~mstf/>

