

第28回
交通流と自己駆動粒子系
シンポジウム

概要集

*Proceedings
of
the 28 th Symposium
on
Traffic Flow and Self-driven Particles*

— 2022 —

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 : 2022年12月1日(木) 13:00 - 16:15

2日(金) 10:00 - 12:45

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

2022年12月1日（木）

13:00 – 13:05 あいさつ

13:05 – 13:55 招待講演 1-s1

斥力相互作用する自己駆動粒子モデルの相分離と長距離相関

足立景亮 1, 2

1 理化学研究所 生命機能科学研究センター

2 理化学研究所 数理創造プログラム

13:55 – 14:15 コーヒーブレイク

14:15 – 14:45 一般 1-1

細胞集団運動における分散凝集遷移

松下勝義, 新垣大幸, 鎌本直也, 須藤麻希, 藤本仰一

阪大院理 生物

14:45 – 15:15 一般 1-2

剛体円板を用いた自己駆動粒子系の相転移点シフト

村瀬信明 1, 磯部雅晴 1

1 名古屋工業大学大学院 工学研究科工学専攻

15:15 – 15:45 一般 1-3

ニューラルネットワークを用いたスキッドステアリング 2D ロボットの自律走行によるひも状走行

古澤昂弥 1, 本田泰 2

1 室蘭工業大学大学院 工学研究科 情報電子工学系

2 室蘭工業大学大学院 しくみ解明系領域

15:45 – 16:15 一般 1-4

MASによるshort-cut 動的繋ぎ替え Small-World 上の Lockdown 効果の評価

猪毛尾賢亮 1, 内海 忍 1, 立川 雄一 1, 2, 谷本 潤 1, 3

1 九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻

2 エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社

3 九州大学大学院 総合理工学研究院 環境理工学部門

2022年12月2日（金）

10:00 – 10:30 一般 2-1

歩道走行する自転車運転者の歩行者認識

川口寿裕 1, 世良司冴 1

1 関西大学 社会安全学部 安全マネジメント学科

10:30 – 11:00 一般 2-2

速度制限を導入したミクロ交通流モデルのシミュレーション

真坂順也 1, 末吉郁 1, 谷本 潤 1, 2

1 九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻

2 九州大学大学院 総合理工学研究院 環境理工学部門

11:00 – 11:30 一般 2-3

複雑ネットワーク上の感染伝搬に対するパーコレーション解析

立川雄一 1, 2 Md. Rajib Arefin 3 谷本 潤 1, 4

1 九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻

2 エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社

3 ダッカ大学 理学部 応用数学科

4 九州大学 院総合理工学研究院 環境理工学部

11:30 – 12:00 一般 2-4

免疫損失を考慮したワクチン接種ゲームにおける社会ジレンマの分析

西村樹 1 立川雄一 1, 2 内海忍 1 谷本潤 1, 3

1 九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻

2 エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社

3 九州大学 総合理工学研究院 環境工学部門

12:00 – 12:30 一般 2-5

スケールフリーネットワーク上で観察される Effectiveness model 適用 Vaccination Game
における感染率への additive ノイズがもたらす確率共鳴現象

沖田 航貴 1, 立川 雄一 1, 2 内海 忍 1 谷本 潤 3

1 九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻

2 エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社

3 九州大学 総合理工学研究院 環境理工学部門

12:30 – 12:45 あいさつ

目次

細胞集団運動における分散凝集遷移	5
松下勝義, 新垣大幸, 鎌本直也, 須藤麻希, 藤本仰一	
剛体円板を用いた自己駆動粒子系の相転移点シフト	7
村瀬信明, 磯部雅晴	
ニューラルネットワークを用いたスキッドステアリング 2D ロボットの自律走行によるひも状走行.....	9
古澤昂弥, 本田泰	
MAS による short-cut 動的繋ぎ替え Small-World 上の Lockdown 効果の評価	11
猪毛尾賢亮, 内海忍, 立川雄一, 谷本潤	
歩道走行する自転車運転者の歩行者認識.....	13
川口寿裕, 世良司冴	
速度制限を導入したミクロ交通流モデルのシミュレーション	15
真坂順也, 末吉郁, 谷本潤	
複雑ネットワーク上の感染伝搬に対するパーコレーション解析	17
立川雄一, Md. Rajib Arefin, 谷本潤	
免疫損失を考慮したワクチン接種ゲームにおける社会ジレンマの分析	19
西村樹, 立川雄一, 内海忍, 谷本潤	
スケールフリーネットワーク上で観察される Effectiveness model 適用 Vaccination Game における感染率への additive ノイズがもたらす確率共鳴現象	21
沖田航貴, 立川雄一, 内海忍, 谷本潤	

細胞集団運動における分散凝集遷移

松下勝義, 新垣大幸, 鎌本直也, 須藤麻希, 藤本仰一

阪大院理 生物

概要

我々は細胞の分散状態から凝集状態への遷移の集団運動への影響を調べた。その影響を調べるために細胞 Potts モデルで相互に運動を誘導する高濃度の細胞を考えた。そしてこの系の誘導方向の秩序変数を計算した。その結果として、分散から凝集への遷移で集団運動化が徐々に起きることを示した。これは平衡系でこの遷移が不連続に起きることと対照的である。この徐々に起きる秩序化は運動の誘導が有効的な表面張力として働いた効果だと考えられる。

Crossover of Collective Cell Movement from Suspended to Aggregated States

Katsuyoshi Matsushita, Taiko Arakaki, Naoya Kamamoto,
Maki Sudo, and Koichi Fujimoto

Department of Biological Science, Graduate School of Science, Osaka University.

Abstract

We investigate the effect of the transition between the suspended and aggregated states on collective cell movement. To examine this effect, we consider high-density cells in the cellular Potts model with mutual guiding. We calculate the ordering of the guiding direction of cells in this system. As a result, we show the crossover to the order from disorder occurs steadily, which is in contrast to the abrupt transition in the equilibrium. This effect reflects the effect of the guiding force in the collective cell movement.

細胞の集団運動は真核生物の発生で欠かすことのできない現象である [1–3]。集団運動の中で細胞は生物の発生ステージや器官、生物種に応じて凝集状態を探ることがある。そして凝集状態で細胞は接触により互いに運動を誘導する。特に細胞に自発運動が無ければ、集団運動にこの凝集が必須となる [4]。この凝集を実現するには細胞密度が高く、かつ細胞を取り巻く培地との表面張力が小さい必要がある。そのため相互誘導による集団運動には細胞密度や表面張力に対する条件が存在する。その制約の解明は相互誘導を行う細胞集団を理解する助けとなる。

平衡状態における細胞の凝縮条件は表面張力に対すする条件として以下のように書ける [5].

$$\gamma_E > \gamma_C/2, \quad (1)$$

ここで γ_E は細胞と周囲の培地の表面張力、 γ_C は細胞同士の界面の表面張力である。この条件は以下のように容易に理解できる。最初に接触している二つの細胞を考える。その細胞の界面には単位面積当たり γ_C の自由エネルギーコストがかかる。これら二つの細胞が離れる際、界面の間に培地の成分が侵入する。その侵入時には細胞と培地成分の間に二つの細胞/培地界面が形成される。従ってそれらができる自由エネルギーコストは元の界面の単位面積あたりで $2\gamma_E$ となる。この条件下で細胞が接触を維持するためには前者の自由エネルギーコストの方が低い

必要がある。従って上の(1)が凝集条件となる。先にも述べたように集団運動には凝集が必須である。そのため、この凝集条件が細胞運動でも正しければ $\gamma_E = \gamma_C/2$ が集団運動の転移点となる。

この平衡状態の条件が正しければ細胞が培地成分を排除して系全体を埋め尽くしていない限り、 $\gamma_E = \gamma_C/2$ で集団運動は突然表出ないし消失するはずである。ところが細胞の集団運動のような非平衡状態において先の平衡状態の議論が正しいとは限らない。とくに細胞の相互誘導は細胞の接触を通じて有効的な表面張力として働きこの条件を大きく変えうる。また胚のように細胞が高密度に存在する環境では、細胞間の接触が強制されるため先の条件が集団運動の決定要因とはなりえないかもしれない。本研究ではこの状況下での集団運動の条件を明らかにするため、表面張力に由来する細胞の分散、凝縮の遷移に対する集団運動の秩序依存性を調べた。

この調査では、二次元 Cellular Potts Model[6] を相互誘導[7]を行なう細胞に拡張し利用した。そして γ_E の運動秩序 P 依存性を計算した。この結果は自然な細胞密度に依存して異なると想定される。細胞密度の定義を細胞の面積弾性の自然面積 A に細胞数 N をかけ、その系全体の面積 L^2 との面積分率 $\phi = AN/L^2$ で決めるのは自然である。我々は胚のように細胞が高密度に存在する環境を考えるために $\phi = 1$ 付近を選んだ。この条件下では細胞はその自然な面積で系全体を埋め尽くすため常に細胞同士が接触すると想定される。ところがそのような想定にもかかわらず γ_E が小さい場合は秩序がそれほど発達しなかった。しかし $\gamma_E = \gamma_C/2$ から十分に小さい γ_E よりその秩序は徐々に成長し、 $\gamma_E = \gamma_C/2$ より少し小さい値でほぼ $P = 1$ の秩序化状態を取ることが判った。この結果は二つの示唆を含んでいる。

第1の示唆的結果は最初に述べた平衡状態からの予想と異なり集団運動においては $\gamma_E < \gamma_C/2$ から運動秩序は発達しうることである。 $\phi = 1$ ならばそもそも接触しやすく γ_E が小さい場合であっても運動秩序はある程度存在できる。しかし、 γ_E が大きくなるにつれて徐々に発達する秩序はその高密度の細胞の効果だけでは説明できない。これは細胞同士の駆動の効果が細胞同士を有効的に接触させるため起きたものだと考えられる。

第2の示唆的結果は $\phi = 1$ であっても必ずしも集団運動が安定化するわけではないことである。本来は $\phi = 1$ ならば表面張力に依らず細胞は培地成分を

排除して系全体を覆いつくし、細胞が良く接触するため運動秩序が発達することが期待される。しかし結果はそれに反している。これは $\gamma_E > 0$ では表面張力の効果で細胞サイズが小さくなり、細胞間に培地の成分が入るウェットフォーム[8]のような状況を取るためである。つまり細胞は実際には系全体を覆いつくせず、接触がある程度抑制されているのである。

本研究で我々は細胞の分散状態から凝集状態への遷移の集団運動への影響を調べた。その結果、先にも述べたように誘導の非平衡効果により徐々に集団運動が形成された。実際の細胞では凝集を操作するのが難しいためこの検証は難しい、実験的には細胞接着等の大きさを制御し凝集を変えることができる細胞性粘菌[9]を用いれば、この結果の検証も可能かもしれない。

References

- [1] C. J. Weijer, J. Cell Sci. **122**, 3215 (2015).
 - [2] P. Friedl and D. Gilmour, Nat. Rev. Mol. Cell Biol. **10**, 445 (2009).
 - [3] P. Rørth, Annu. Rev. Cell Dev. Biol. **25**, 407 (2009).
 - [4] K. Matsushita, Phys. Rev. E **97**, 042413 (2018).
 - [5] F. Graner, J. Theor. Biol. **164**, 455 (1993).
 - [6] A. R. A. Anderson, M. A. J. Chaplain, and K. A. Rejniak, *Single-Cell-Based Models in Biology and Medicine* (Birkhauser Verlag AG, Basel, 2007).
 - [7] K. Matsushita, Phys. Rev. E **95**, 032415 (2017).
 - [8] D. Weaire and S. Hutzler, *The Physics Of Foams* (Oxford University Press, U.S.A, 2001).
 - [9] H. Beug, F. E. Katz, and G. Gerisch, J. Cell Biol. **56**, 647 (1973).
- E-mail: kmatsu@bio.sci.osaka-u.ac.jp

剛体円板を用いた自己駆動粒子系の相転移点シフト

村瀬信明¹, 磯部雅晴¹

¹ 名古屋工業大学大学院工学研究科工学専攻

概要

本研究ではアクティブマター系の排除体積効果と相転移への影響を調べるため、Vicsek モデルにおける質点を剛体円板に変え、Event-Driven 型分子動力学法を実行し、固液相転移近傍における相図を作成した。素子間の衝突頻度と Vicsek モデルの相互作用の競合により、粒子占有率に相転移点シフトがみられた。また、アクティブマター度の増大と系の配向秩序度に非自明な関係が得られた。

Anomalous phase transition in self-propelled hard disk systems

Nobuaki Murase, Masaharu Isobe

Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

Abstract

In this study, we investigate the phase behavior of the self-propelled hard disk systems with the Vecsek-type interaction via event-driven molecular dynamics simulation systematically. In addition to the ordinal order-disorder transition of the collective velocity field known in the original point particle of the Viscek model, we observed the novel competition driven by the global positional order (so-called Alder transition), which cause anomalous phase transition and transition shifts.

1 はじめに

生物のように自ら動く素子（ユニット）は「自己駆動粒子（Self-propelled Particles）」と呼ばれ、これらを素子とした多体系で生じる巨視的な協調運動は、「アクティブマター（Active Matter）」として、精力的に研究が行われている [1]。自己駆動粒子系を研究する有名なモデルに、いわゆる Vicsek モデルがある [2]。Vicsek モデルは質点を素子とし、近傍素子の速度ベクトルの総和に素子の方向を揃えるモデルである。このモデルでは、ノイズパラメータの増大により粒子（質点）群が 1 方向に流れる秩序相から乱雑に動く無秩序相へと相転移を起こす [3]。近年では、素子間に様々な相互作用がある系での研究も行われている [4, 5]。本研究では Vicsek モデルにおける相互作用を基礎に、排除体積効果を導入し、

剛体円板系において、Event-Driven 型分子動力学法 (EDMD) [5] を実行した。特に、固液相転移（いわゆる Alder 転移）近傍に着目し、相転移点シフトと各相の特徴ならびに、素子間の衝突頻度と Vicsek モデルの相互作用の競合の影響を調べた。

2 シミュレーション手法

平衡系の剛体円板系に Vicsek モデルの相互作用を導入し、EDMD を実行した。2 次元剛体円板系（粒子数 $N = 4096$ ）において粒子占有率 ν を Alder 転移点近傍 ($\nu = 0.70 \sim 0.75$) で系統的に変え、Vicsek モデルのアクティブマター度として用いられるノイズパラメータ ($\eta = 0.1\pi \sim 1.9\pi$) を変化させた。 η が小さいと系内の粒子は一方向に流れ、 η が大きいと粒子は乱雑に動き平衡系に近くなる。また、Vicsek モデルの相互作用の更新間隔を平衡系での粒子の平

均衝突時間 τ で規格化した値 ($\Delta t/\tau = 1 \sim 100$) で変化させた。速度秩序変数、粒子毎の配向秩序変数 $\phi_6^j = 1/N_j \sum \exp(6i\theta)$ およびグローバル配向秩序変数 $\Phi_6^G = |1/N \sum \phi_6^j|$ を求め、相の特徴づけを行った。

3 結果と考察

図1は $\nu - \eta$ 上のグローバル配向秩序変数の等値線図を示す。これらより、 η の減少（アクティブマター一度の増大）により、等値線が占有率の高密度側にシフトする。これは系内の素子が一方向に流れ、固液転移近傍で非平衡流が生じ、結晶化が抑制されるためである。

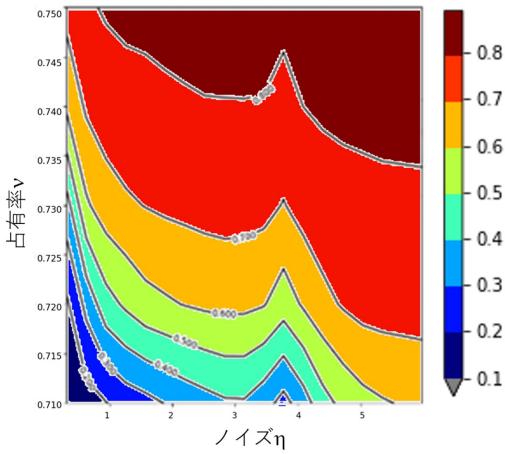


図1: $\nu - \eta$ 空間上のグローバル配向秩序変数と等値線。

図2は $\nu = 0.72$ におけるグローバル配向秩序変数のノイズ η と相互作用の更新間隔 Δt の依存性を示したものである。ノイズを大きくしていき平衡系に近づくとグローバル配向秩序変数が大きくなり、系全体としての結晶秩序が増大する。 $\eta = 0.1 \sim 1.4\pi$ 付近では更新間隔 Δt が短いほどグローバル配向秩序変数が小さくなっている。また $\eta = 1.2\pi$ 付近に非自明なカプスが見られる。

質点を用いる Vicsek モデルではノイズパラメータ η の増大により近傍粒子間の速度ベクトルを同一方向にする働きが弱くなる。その結果、速度秩序変数が小さくなり、系は秩序相から無秩序相に相転移を起こす。一方、剛体円板系では ν の増大により固液相転移 (Alder 転移) を起こすことが知られている [7]。ノイズが小さく系が秩序相つまり非平衡系であるほど固液相転移点が高占有率側にシフトしていく、相互作用の更新間隔 Δt が短い程、結晶状態か

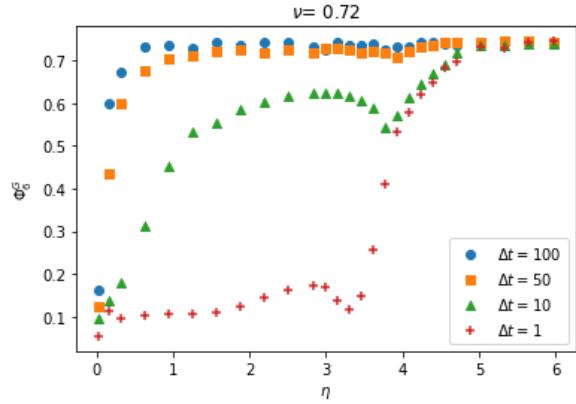


図2: 相互作用時間を変えたときのグローバル配向秩序変数のノイズ η 依存性 ($\nu = 0.72$)

ら流動化することが確認できた。また $\eta = 1.2\pi$ 附近に非自明なカプスが見られる。講演では、これらの特異な挙動を自由体積などの微視的解析を基に相転移点シフトなどについて考察する。

参考文献

- [1] T. Vicsek and A. Zafeiris, Phys. Rep., **517** (2012) 71.
- [2] T. Vicsek, A. Czirók, E. Ben-Jacob, I. Cohen and O. Shocher, Phys. Rev. Lett., **75** (1995) 6.
- [3] A. Czirók, H. E. Stanley, T. Vicsek, J. Phys. A. Math. Gen., **30** (1997) 1375.
- [4] J. Bialké, T. Speck, and H. Löwen, Phys. Rev. Lett., **108** (2012) 168301.
- [5] A. K. Omar, K. Klymko, T. GrandPre and P. L. Geissler, Phys. Rev. Lett. **126** (2021) 188002.
- [6] B. J. Alder and T. E. Wainwright, J. Chem. Phys., **31** (1959) 459.
- [7] E. P. Bernard and W. Krauth, Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 155704.; M. Engel, J.A. Anderson, S.C. Glotzer, M. Isobe, E.P. Bernard and W. Krauth, Phys. Rev. E, **87** (2013) 042134.

ニューラルネットワークを用いたスキッドステアリング2D ロボットの自律走行によるひも状走行

古澤 昂弥¹, 本田 泰²

¹ 室蘭工業大学大学院 工学研究科 情報電子工学系

² 室蘭工業大学大学院 しくみ解明系領域

概要

我々は以前、カメラからの一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の開発をした。それを用いて円形コースを自律走行が可能なことを確認した。同時にスキッドステアによる4輪走行のための2次元最適速度旋回アルゴリズムを導出した。それを用いてひも状走行の創発を確認した。しかし、ひも状走を行なうためには理想環境でパラメータの調整が必要だった。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りひも状走行を観測することである。結果として、ひも状走行は観測された。

String-like traveling by autonomous traveling of skid-steering 2D robots using neural network

Takaya Furusawa¹, Yasushi Honda²

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

² College of Information and System, Muroran Institute of Technology, Japan

Abstract

We have developed autonomous traveling algorithm using neural network by camera one-dimensional data. We confirmed that autonomous traveling is possible on a circular course. At the same time we have developed 2D optimal velocity turning algorithm for four-wheels driving by skid steering. We observed emergence of string-like motion using 2D optimal velocity turning algorithm. However, it was necessary to adjust the parameters in an ideal environment in order to perform string-like motion. The purpose of this study was check if the string-like motion can be observed autonomous traveling algorithm using neural network. As a result, string-like motion was also observed.

1 はじめに

交通流は日常的に観測できる馴染み深い現象である。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って自己組織的に形成される動きである。だが、その自己組織化のメカニズムは完全に解明されていない。我々は集団行動の一つのひも状

走行に注目した。人間も複雑な交通流の中でひも状歩行利用し移動していることが確認されている。

先行研究 [1] では交通流モデルの一つである一次元最適速度モデルを2次元に拡張した2次元最適速度モデルを4輪のスキッドステアリングロボットに落とし込んだ2次元最適速度旋回アルゴリズムを導出した。これを用いた実験によりひも状走行が創発

されることを確認した。

また先行研究 [2] ではカメラからの一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を開発した。

本研究ではカメラからの一次元画像データを用いたニューラルネットワークを用いた自律走行により先行研究 [1] で観測されたひも状走行を観測できるか確かめることを目的とする。

2 走行実験

本研究では、半径 2[m] の円形コース (図 1), 走行ロボット 2 台で走行実験を行う。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 (図 2)。走行実験では、2 種類のアルゴリズムで走行させ相対角度を比較する。1 つ目のアルゴリズムは、2 次元最適速度旋回アルゴリズムである。他機体を発見した場合は近づいていき、それ以外の場合は進行方向正面に進み、感覚運動写像によって彈性散乱を行う。2 つ目のアルゴリズムはカメラからの一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。マウスによるラジコン操作で教師データの収集を行う。この際、ロボットは 2 台使用する。教師データを収集しているロボットの前に別なロボットを走行させ、そのロボットをカメラの中心に捉えるように走行する。収集したデータをニューラルネットワークを用いて学習し、自律走行を行う。

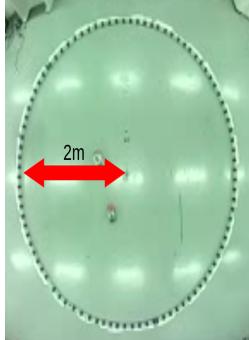


図 1: 実験コース

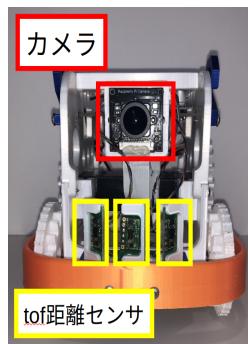


図 2: 走行ロボットを正面から見た写真

3 実験結果

2 次元最適速度旋回アルゴリズムと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の走行を行った。ひも状走行の観測として、先行するロボッ

トと追従するロボットの相対角度を表現したグラフを図 3、図 4 に示す。図 3、図 4 は走行ロボットの相対角度 $\cos \theta$ と時間の関係図である。横軸は時間 [秒]、縦軸は $\cos \theta$ である。

図 3 は 2 次元最適速度旋回アルゴリズムを用いた走行のグラフである。実験開始から約 40 秒以降 θ が 1 に近い状態が続いている。これはロボットがひも状走行している状態である。

図 4 はニューラルネットワークを用いた自律走行のグラフである。実験開始から約 60 秒以降 θ が 1 に近くひも状走行を行っている。

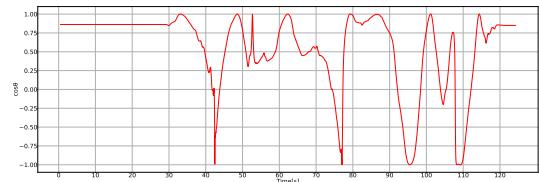


図 3: 走行中の時間変化における相対角度変化 (2dovr)

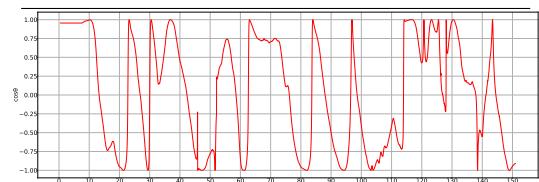


図 4: 走行中の時間変化における相対角度変化 (NN)

4 まとめと今後の課題

本研究は 2 種類のアルゴリズム (2 次元最適速度旋回アルゴリズム、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) で走行させ、走行ロボットの相対角度を観測した。結果として、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も、ひも状走行が創発された。今後は走行ロボットの台数を増やし、流量の比較を行っていきたい。

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] 李方正, 山田将司, 本田泰, 画像認識ニューラルネットワークによる複数ロボットの対面走行, 第 34 回自律分散システム・シンポジウム, (2021)

MAS による short-cut 動的繋ぎ替え Small-World 上の Lockdown 効果の評価

猪毛尾 賢亮¹, 内海 忍¹, 立川 雄一^{1,2}, 谷本 潤^{1,3}

¹九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻

²エム・アール・アイリサーチアソシエイツ株式会社

³九州大学大学院 総合理工学研究院 環境理工学部門

概要

既報で提示した short-cut リンクを毎日繋ぎ替える Small-world ネットワーク上で、所謂、lockdown の効果を、最終感染者サイズとピーク感染者サイズの低減率で評価することで検討した。Lockdown は、感染者数がある閾値に達すると、平均次数と short-cut 確率を夫々独立に低減することで模擬した。

Quantification of lockdown effect for a disease spreading on a Small-World network with time-varying its short-cut links

Kensuke Ikeo¹, Shinobu Utsumi¹, Yuichi Tatsukawa^{1,2}, Jun Tanimoto^{1,3}

¹ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

² MRI research Associates Inc.

² Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

Abstract

The diminishing final epidemic size and peak infected fraction brought by a lockdown is quantified by Multi Agent Simulation; MAS. We presume that a disease obeys a SIR process spread on a Small-world network with time-varying its short-cut links. Lockdown is emulated by sudden reductions of average degree and short-cut probability.

1. 緒言

著者らは既報[1]で short-cut リンクを動的に繋ぎ替える Small-world ネットワーク（以下、動的 SW）上の SIR プロセスを解析した。動的 SW は、遠隔地への移動が飛び火感染のトリガーになることを、固定 short-cut 確率 (p) で繋ぎ替えられるランダムリンクを日々差し替えることで模擬している。本報では、この topology 上で SIR プロセスに従う感染が、所謂、lockdown により、如何に封じ込め得るかを Multi Agent Simulation (MAS) により検討した。

2. モデル

動的 SW は、2 次元ラチスを基盤に、固定の short-cut 確率 p で繋ぎ替えた Watts &

Storgatz Small-world を多数生成しておき、日毎にこれを差し替えることで付与する。粒子数は 10^4 で、lockdown が適用される以前の default 状況は、平均次数 64 ($\langle k \rangle_{def} = 64$)、short-cut 確率 5% ($p_{def} = 0.5$) とした。

SIR プロセスでは、感染エージェントの I から R への遷移確率 $\gamma = 1/3[\text{day}^{-1}]$ 、基本再産生数 R_0 ($\equiv \beta/\gamma$) は 2.5 とした。あるリンクの他端に I エージェントをもつ S エージェントの I への遷移確率は、 $\beta_{eq} = R_0 \cdot \gamma / \langle k \rangle_{def}$ で与える。各エピソードは、初期感染者 5 エージェントをドメイン上にランダムに配置し、感染の時間発展を Gillespie 法で追跡する。

Lockdown は図 1 のように模擬した。ある

エピソードで、感染者数が総人口に対する比で定義する閾値（図中の $I_{threshold}$ ）を上回った時、平均次数を $\langle k \rangle_{def}$ から $\langle k \rangle_{LD}$ に、short-cut 確率を p_{def} から p_{LD} に削減する。評価は Default の最終感染者サイズ（Final Epidemic Size; FES）と最大感染者数（Peak Infected）が lockdown によってどれだけ削減されたかを 100 エピソードのアンサンブル平均を採って計量する。

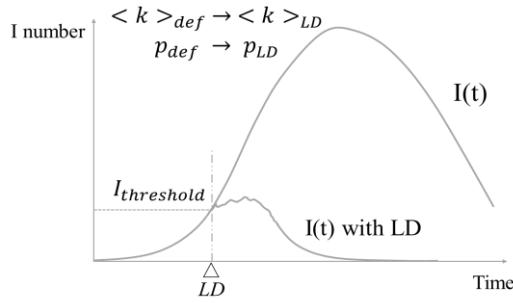


図 2 Lockdown のモデル化概要

3. 結果及び考察

図 2 に FES の削減率（左カラム）、ピーク感染者数の削減率（右カラム）を夫々、 $1 - p_{LD}/p_{def}$ と $1 - \langle k \rangle_{LD}/\langle k \rangle_{def}$ の 2 次元平面のヒートマップとして示した。パネル上から閾値 $I_{threshold}$ は総人口の 1%, 2%, 5%, 10% である。最も厳しい Lockdown (1% ケース) では、平均次数を 50% 以下に抑制すると ($(1 - \langle k \rangle_{LD}/\langle k \rangle_{def}) > 0.5$) FES はほぼ完封の状況になる。逆に、平均次数 30% 以下の抑制率では、ほとんど効果が挙がらなくなる。1% ケースでは効果有無は平均次数削減率に対して急激に変化するが、lockdown 導入閾値を緩和すると効果有（青色領域）境界が退潮し、効果無（赤色領域）境界が上方（より大きな平均次数削減率の方向）に押し上げられる。

4. 結言

COVID-19 のパンデミックでは、各国で lockdown が施行された。本邦では非常事態

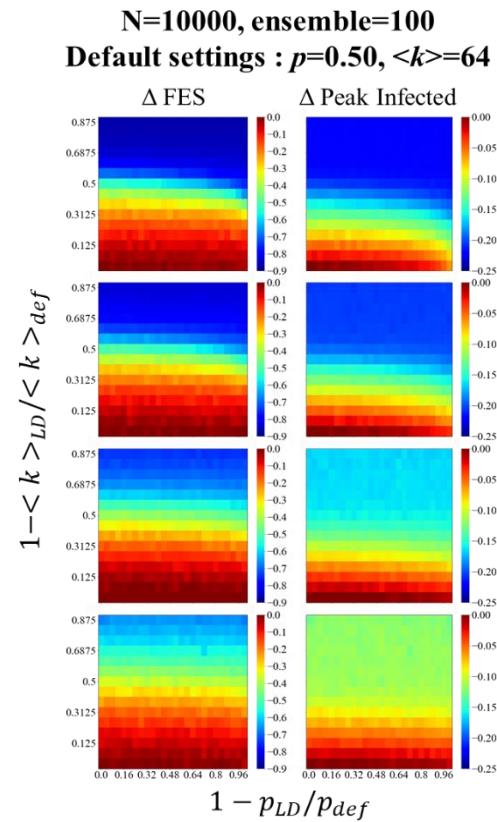


図 1 Lockdown による感染抑制効果

宣言下により人出、移動は劇的に削減された。厳しい lockdown が導入されても、現実に感染拡大が鈍化ないしは感染者数が減り始めるのには時間遅れが伴う。これらの実世界で行われた lockdown のスケール感、効果からすると、本報の予測結果は稍々過大評価傾向にあるのかも知れない。社会活動レベルを動的 SW の平均次数と short-cut 確率で表象する適否に加え、既往の MAS による感染症シミュレーションの多くは時不変ネットワークでエージェントの物理接触を表していることの妥当性を、向後、検討する必要があるだろう。

参考文献

- [1] 猪毛尾, 内海, 立川, 谷本 ; Short-cut を動的に繋ぎ変える small-world における最終感染者サイズへの影響とその評価, 第 27 回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム論文集, 2021.

歩道走行する自転車運転者の歩行者認識

川口寿裕¹, 世良司冴¹

¹関西大学 社会安全学部 安全マネジメント学科

概要

近年、自転車の危険運転が社会問題となっている。特にコロナ禍でデリバリーサービスの需要が高まり、自転車での宅配が増えってきた。自転車は車道を走行するのが原則であるが、歩道を走行することによる歩行者との接触事故も多い。本研究では歩道走行する自転車運転者に対して、歩行者の認識および回避に関して実地調査ならびにアイトラッカーを用いた実験を行い、データ収集した。得られたデータをもとに、仮想バネモデルを組み込んだ力学ベースモデルの数値シミュレーションを作成した。

Pedestrian Recognition of Cyclists on Sidewalk

Toshihiro Kawaguchi¹, Tsukasa Sera¹

¹ Department of Safety Management, Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University

Abstract

In recent years, dangerous bicycle driving becomes a social problem. In particular, the number of delivery services using bicycles increase under COVID-19. Though cyclists in principle should drive their bicycles on the roadway, they often drive on the sidewalk, which causes collision accidents with pedestrians. In this study, a field work and an experiment using an eye-tracker on pedestrian recognition and avoidance of cyclists are conducted. A dynamics-based numerical simulation with a virtual spring model was also performed.

1 はじめに

自転車は車道を走行することが原則である（道路交通法第17条1項）が、歩道を走行している自転車が多い。このため、歩道における自転車と歩行者の接触事故が少なくない。

長谷川ら[1]は歩道上における歩行者と自転車運転者がそれぞれ危険を感じる距離に関して実験および実地調査を行った。その結果、自転車運転者は歩行者と6 m以下に接近すれば避け始めるべきであるとの結論を得た。

本研究では、歩道上の自転車運転者が歩行者を回避し始める距離に関する実地調査を行った。また、歩道上を走行する自転車運転者の歩行者認識について、アイトラッカーを用いた実験を行った。さらに、離散要素法[2]を用いた力学ベースの歩行者シミュレーションに仮想バネを組み込んだモデル[3]により、歩道上において自転車と歩行者が混在した流れを再現することを試みた。

2 歩行者回避の実地調査

歩道走行する自転車運転者が歩行者を回避する挙動について実地調査を行った。大阪府高槻市のアル・プラザ高槻の2階から歩道を撮影し、その映像から自転車速度および自転車運転者が歩行者を回避し始めるときの歩行者までの距離を求めた。歩道に敷かれている一辺30 cmのタイルを目安として距離を求め、ストップウォッチによって計測した時間により速度を計算した。

自転車速度と回避開始距離の関係を図1に示す。ばらつきは大きいものの、自転車速度が速くなるにつれて回避開始距離が長くなる傾向があることがわかる。このことは直感的に妥当な結果であるとともに、長谷川ら[1]の計測結果とも定性的に一致している。

また、回避開始距離6 m未満のデータはすべて自転車と同方向の歩行者を追い越す際のものであり、対向する歩行者とすれ違う際には6 m以上の距離から回避行動を開始していた。対向者とすれ違うときの方が自

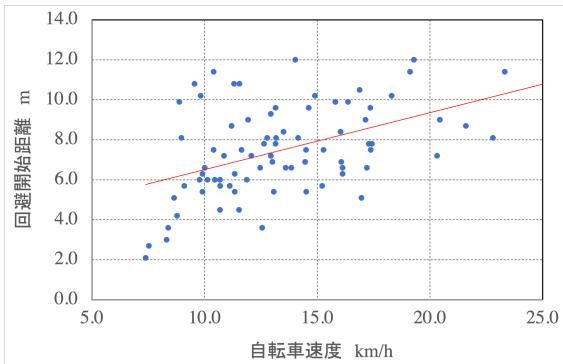


図 1：自転車速度と回避開始距離の関係

転車との相対速度が大きくなることが 1 つの要因であると考えられるが、相対速度だけでは統一的に整理できず、他の心理的要因があると考えられる。

3 アイトラッカーによる実験

アイトラッカー(トビー・テクノロジー製 Tobii Pro Glasses 2)を用いて、自転車運転者の歩行者認識に関する実験を行った。アイトラッカーを装着して歩道を自転車で実際に走行するのは安全上の問題があるので、あらかじめ撮影した映像を使って室内で計測を行った。歩道幅 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 10 m の 6 種類の歩道に対して、それぞれ 12 km/h, 18 km/h の 2 種類の自転車速度で走行する映像を用意した。どの映像においても 100 m の距離を走行する間に 10 名程度の歩行者が存在する。

関西大学社会安全学部の学部生 20 名の被験者に対して、歩行者の認識開始距離を求め、歩道幅に対してプロットしたものが図 2 である。歩道幅が広くなるにつれて遠くから歩行者を認識できるようになることがわかる。見通しが良い方が遠くの歩行者を認識できるのは妥当な結果であると言える。一方、自転車速度が違っても結果にほとんど差がないことがわかる。

2 節の実地調査で用いた歩道幅は 4 m であったことから、図 2 よりこの歩道では自転車運転者は 10 m 程度の距離から歩行者を認識すると考えられる。一方、図 1 より 12 km/h, 18 km/h の速度では回避開始距離がそれぞれ 7 m, 9 m 程度である。つまり、歩行者を認識してから自転車運転者が回避行動を取るまでにそれぞれ 3 m, 1 m の余裕しかない。自転車速度から時間求めると、それぞれ 0.9 秒, 0.2 秒であり、進路変更に際して十分な安全確認を行えない可能性があると考えられる。

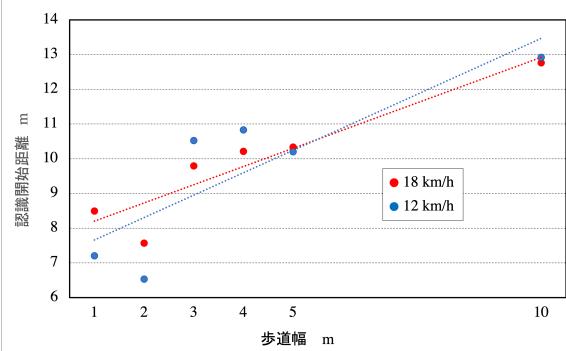


図 2：歩道幅と歩行者認識距離の関係

4 数値シミュレーション

離散要素法[2]に仮想バネを導入したモデル[3]を用いて自転車と歩行者が混在する流れに対する数値シミュレーションを行った。計算領域は幅 4 m、長さ 100 m の歩道を想定した。領域内に 1 台の自転車(赤色粒子)と 10 人の歩行者(青色粒子)を配置した。自転車速度を 12 km/h とし、歩行者には ±0.5~1.0 m/s のランダムな速度を与えた。長さ方向には周期境界条件を適用した。

仮想バネの適用範囲を 6 m としたときの自転車と歩行者の初期配置を図 3 に示す。緑色の点は自転車の軌跡を表す。歩行者を避けながら歩道上を走行している様子が表現されている。

5 まとめ

歩道上の自転車運転者の歩行者回避開始距離を実地調査したところ、対向者とのすれ違い時には 6 m 以上の距離を保っていたが、追い越し時にはより近い距離まで回避行動を開始しなかった。また、アイトラッカーによる実験を行った結果、自転車運転者の歩行者認識開始距離は自転車速度の影響を受けなかった。

参考文献

- [1] 長谷部知行, 島崎敏一, 下原祥平, 土木計画学研究論文集, 26-4 (2009) 791.
- [2] P.A.Cundall, O.D.L.Strack, Geotechnique 29-1 (1979) 47.
- [3] 川口寿裕, 第 20 回交通流のシミュレーションシンポジウム論文集 (2014) 83.

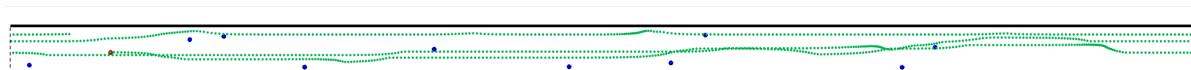


図 3：計算結果例

速度制限を導入したミクロ交通流モデルのシミュレーション

真坂 順也¹, 末吉郁¹, 谷本 潤^{1,2}

¹九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻

²九州大学大学院 総合理工学研究院 環境理工学部門

概要

Cellular automata(CA)モデルにより、渋滞部の流れ方向手前側に段階的な速度制限領域を設けることの渋滞緩和策としての有効性を検討した。その結果、流量の改善効果は見られなかったが、平均渋滞長、渋滞数、最大渋滞長が減少し、速度制限の有効性を示すことが出来た。

Microscopic Traffic Flow Simulation With Velocity Restriction

Junya Masaka¹, Jun Tanimoto^{1,2}

¹ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

² Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

Abstract

We built a specific cellular automata (CA) model so as to explore the effectiveness of putting gradual max-velocity reducing areas prior to a jam region. Numerical result reveals that the average jam length, number of emerging jams and maximal jam length are all ameliorated despite none of significant improvement of flux.

1.緒言

高速道路における渋滞緩和策として、時空間変動する渋滞発生ポイントを検出し、その手前側に最高速度を段階的に引き下げることで後続車両の流入を制限する方策がある[1]。本報では、Cellular automata(CA)モデルを構築して、その有効性を検討した。

2.CA モデルと速度制限ルール

周期境界(1周 3000 セル)を適用した Revised S-NFS[1] モデルをベースに、渋滞発生個所の流れ方向に向かつて手前側に一定のエリアを設け速度制限ルールを適用する。

2.1 Revised S-NFS モデル

Revised S-NFS モデルは Sasaki, Nishinari ら[2]によって提示された S-NFS モデルに、ランダムブレーキの車間距離依存性を考慮すること、NaSch(Nagel-Schreckenberg)系モデル[3]では再現できない Kerner の 3 相理論[4]で云う Synchronized 流を高精度に再現する CA モデルである[5]。Revised S-NFS モデルは以下に記される 4 つのルールに従って 1 time step ごとに目標速度を決定し、これを最大限維持するように各車両が移動する。

Rule 1. “Acceleration”

$$v_i^{(1)} = \min[V_i^{\max}, v_i^{(0)} + 1] \quad (1)$$

(Rule 1 is applied only if $g_i \geq G \vee v_i(0) \leq v_i - 1(0)$)

Rule 2. “Slow-to-start”

$$v_i^{(2)} = \min[v_i^{(1)}, x_i - S_i t^{-1} - x_i t^{-1} - S_i] \quad (2)$$

(Rule 2 is applied only if $\text{random}[0, 1] \leq q$.)

Rule 3. “Quick start”

$$v_i^{(3)} = \min[v_i^{(2)}, x_{t-S_i} - x_i t - S_i] \quad (3)$$

(In Rule 2 and 3, If $\text{random}[0, 1] \leq r$, $S_i = S$; otherwise, $S_i = 1$.)

Rule 4. “Random brake”

$$v_i^{(4)} = \max[1, v_i^{(3)} - 1] \quad (4)$$

(if $\text{random}[0, 1] \leq 1 - p_i$, Rule 4 is applied)

Rule 5. “Avoid collision”

$$v_i^{(5)} = \min[v_i^{(4)}, x_{t-1}^t - x_i^t - 1 + v_{i-1}^{(5)}] \quad (5)$$

2.2 速度制限の機構

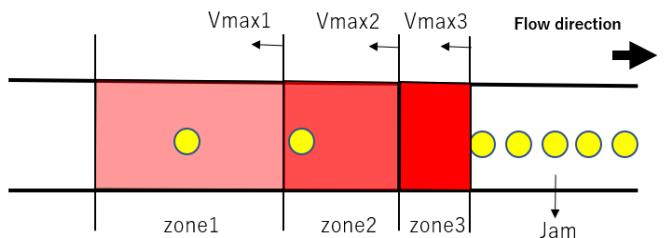


図1 速度制限の機構

ドメイン内で、速度ゼロとなる車両クラスター(そのようなクラスターが間隔を空げずにつななり、かつ、5台以上連結している場合は全体を1つの渋滞クラスターとする)を全て検出し、その手前側に図1に示す速度制限域を3段階に

わたって設定する。Revised S-NFS モデルにおける最大速度を 5、最小速度を 1 とし、 $1 \leq V_{max3} \leq V_{max2} \leq V_{max1} < 5$ を課す。以下のシミュレーションでは、Zone1, Zone2, Zone3 のセル長を夫々、200 セル、100 セル、50 セルに固定した(次節にしめす V_{max1} , V_{max2} , V_{max3} の設定による最適な各 zone 長の組み合わせに大きな感度がないことを確認している)。

3. シミュレーション結果と考察

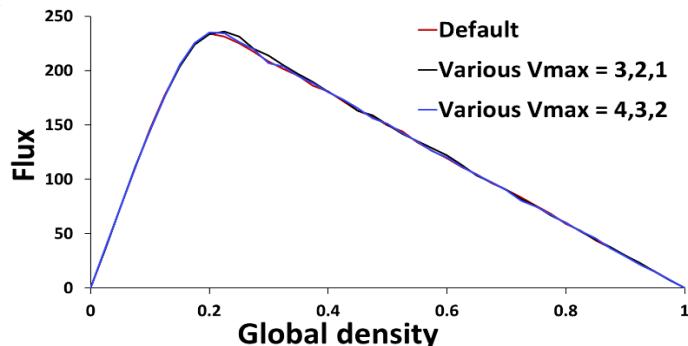


図2 流量

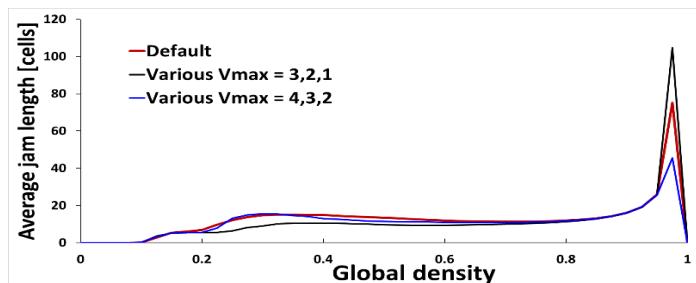


図3 平均渋滞長

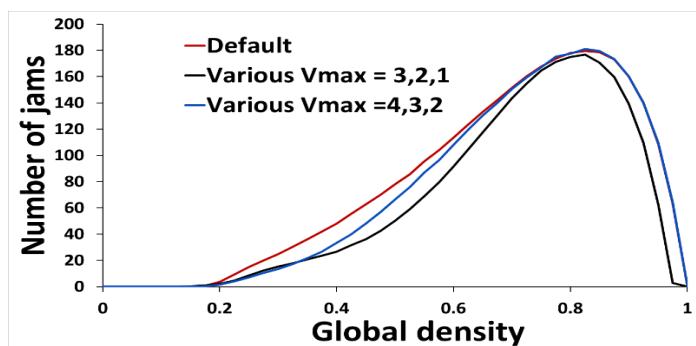


図4 渋滞数

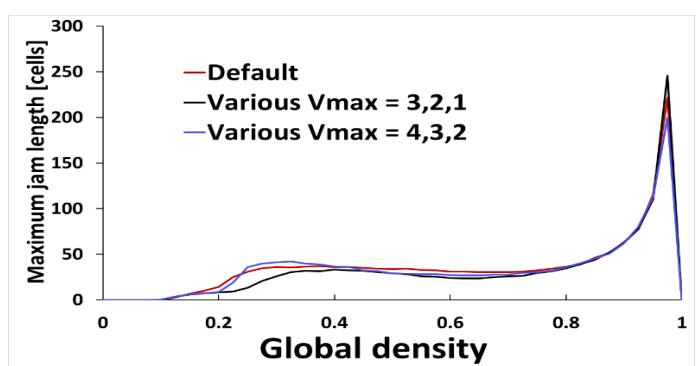


図5 最大渋滞長

図2から図5に(V_{max1} , V_{max2} , V_{max3})=(3,2,1)と(4,3,2)としたケースの流量、平均渋滞長(検出された渋滞クラスターの平均セル長)、渋滞数(ドメイン内で検出された渋滞クラスターの総数)、最大渋滞長(検出された渋滞クラスターの最大値)を示す。各図には比較対象として、このような時空間動的速度制限エリアを導入しないケース(Default)を示している。

動的速度制限により、Default に比して交通流量が改善される傾向はみられない。本論では示していないが、2 車線系の固定ポイントに 1 車線となる bottleneck を設定した系にあっても、有意なフロックス改善効果は観察されなかった。渋滞数については、いずれのケースにも改善が觀られる。平均渋滞長に関しては、(4,3,2)ケースで、特に高密度域における大きな緩和効果が觀られる。が、一方で(3,2,1)ケースは中密度(0.2 から 0.4 にかけて)では効果的だが、高密度域では Default より成績は悪化する。この傾向は、最大渋滞長に関しても観察される。高密度域は、そもそも全ドメインで大渋滞が生じている流れ場であるから、上記の中密度域での改善効果に着目すべきだろう。その観点からは、(3,2,1)ケースが、(4,3,2)ケースより良好な渋滞緩和効果をしめしている。

4. 結言

時空間変動する渋滞発生個所の手前側に速度制限エリアを段階的に導入することは、平均および最大渋滞長、渋滞数と云った統計量の改善には効果があることが示唆された。

参考文献

- [1] Han, Y., Yu, H., Li, Z., Xu, C., Ji, Y., Liu, P. (2021). An optimal control-based vehicle speed guidance strategy to improve traffic safety and efficiency against freeway jam waves, Accident Analysis & Prevention 163, 106429, 2921.
- [2] Sakai, S., Nishinari, K., & Iida, S. (2006). A new stochastic cellular automaton model on traffic flow and its jamming phase transition. Journal of Physics A: Mathematical and General, 39(50).
- [3] Nagel, K., & Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. Journal de Physique I, 2(12). <https://doi.org/10.1051/jp1:1992277>
- [4] Kerner, B. S. (2004). The Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory (Understanding Complex Systems). In Journal of Physical Oceanography (Vol. 26).
- [5] Tanimoto, J.; undamentals of Evolutionary Game Theory and its Applications, Springer, 2015.

複雑ネットワーク上の感染伝搬に対するパーコレーション解析

立川 雄一^{1,2}, Md. Rajib Arefin³, 谷本 潤^{1,4}

¹九州大学 大学院総合理工学府 総合理工学専攻

²エム・アール・アイリサーチアソシエイツ株式会社

³ダッカ大学 理学部 応用数学科

⁴九州大学 総合理工学研究院 環境理工学部門

概要

複雑ネットワーク上の感染症伝搬ダイナミクスをパーコレーションによる理論モデルで解析し、2つの介入行為 - i)感染者の隣人へのワクチン接種、ii)感染者の隔離 - による感染抑制効果を検討した。理論モデルの解析解を Multi-Agent Simulation で検証したところ、解析解は一定の水準まで拡大せずに収束する試行を除いて平均化したシミュレーション解に近似することがわかった。また、介入行為による感染抑制効果は、i)と ii)を同時に実施した場合に高くなり、特にワクチンの有効度が高いほど感染拡大に転じにくい結果となつた。

Percolation analysis for epidemics on a complex network

Yuichi Tatsukawa^{1,2}, Md. Rajib Arefin³, Jun Tanimoto^{1,4}

¹ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

² MRI research Associates Inc.

³ Department of Applied Mathematics, University of Dhaka, Bangladesh

⁴ Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

Abstract

We analyze how two kinds of interventions; i) letting neighbors of an infectious individual vaccinate, ii) putting them to quarantine, suppress a disease spreading on a complex network by means of a link percolation-based analytic approach. Our results show that simultaneous implementation of the two interventions bolsters preventing epidemic outbreaks, and the vaccine efficacy enhances the effect of confining a disease spreading.

1.緒言

本稿では、感染者の隣人へのワクチン接種と感染者の隔離による感染抑制効果をパーコレーションによる理論モデル[1]で解析する。

2.モデル

2.1 Multi-Agent Simulation

MAS の枠組みは、離散的確率モデルである Rejection Sampling Algorithm[2]に従う。ノード数 $N = 10^4$ 、平均次数 $\langle k \rangle = 8$ の Barabási-Albert Scale Free グラフ[3]上を SIR プロセス[4]に従って感染症が伝搬する 1 シ

ーズンのダイナミクスを想定する。感染はリンクで繋がったノード間でのみ伝達されるとし、感受性個体 S は隣接する全感染者の感染率 $\beta[\text{person}^{-1}\text{day}^{-1}]$ の総和で感染し、感染個体 I は回復率 $\gamma[\text{day}^{-1}]$ で回復する。

MAS による数値計算では、流行初期 ($t = 0$) に初期感染者 $I_0 = 1$ をランダムに配置し、系内に感染者が存在しなくなる迄を 1 エピソードとする。簡略化のため $\gamma = 1$ とし、 β を変化させたときの最終感染者サイズ（以下、FES = R/N (Final Epidemic Size) ただし、 R は均衡時の回復個体数）を夫々 10^4 エピソードで平均をとり比較対象とする。

$$T_\beta = \beta(1 - \omega e)(1 - q) \sum_{t=1}^{t_r} [(1 - \beta)(1 - \omega e)(1 - q)]^{t-1}. \quad (1)$$

$$T_\omega = (1 - q)\omega \sum_{t=1}^{t_r} [(1 - \beta)(1 - \omega)(1 - q)]^{t-1}. \quad (2)$$

2.2 パーコレーション

ネットワーク上の任意の I が感染期間内に隣接する S を感染させる確率を考える。各時間ステップでは、隣接した S のうち ω がワクチン接種をし、ワクチン有効度 e に応じて完全免疫（二度と感染しない状態）を獲得する（つまり、免疫獲得者の割合は ωe ）。また、感染者は確率 q で隔離され、隣接者とのリンクを断つ。以上の設定で、回復日数 t_r を経過するまでに I が感染を伝達する確率 T_β は式(1)で表記され、同期間に隣人がワクチン接種を完了する確率 T_ω は式(2)で表記される。

SIR プロセスをパーコレーションモデルの枠組みに対応させると、各 I がネットワーク全体に感染を拡大させる確率 f は、

$$f = 1 - G_1(1 - T_\beta f), \quad (3)$$

の超越方程式を満たす。ここで、 $G_1(x) = \sum_k k P_k x^{k-1}/\langle k \rangle$ 。式(1)～(3)より FES は、

$$FES = \frac{T_\beta}{T_\beta + e T_\omega} [1 - G_0(1 - T_\beta f)], \quad (4)$$

となる。ここで、 $G_0(x) = \sum_k P_k x^k$ 。また、 G_0 と G_1 中の P_k は解析対象とするネットワークの次数分布を意味し、本稿では Scale Free グラフの次数分布を用いた。

3.結果と考察

まず、介入行為がない場合の FES をパーコレーションモデルと MAS で比較する。ここで、感染が global outbreak に達する水準を $FES \geq S_C/N$ と定義する。Fig.1(a)を見ると、全エピソードの平均をとった FES ($S_C = 0$) は理論解析解と大きく乖離している。一方、local outbreak のエピソードを除いて平均をとった FES ($S_C = 10$) は理論解析解と類似している。

次に、集団で感染が拡大に転じる感染率を β_c とし、ワクチン接種と隔離による介入行為による感染予防効果が β_c に及ぼす影響を確認する。結果を見ると、 ω と q の両方が

大きくなるにつれて β_c も大きくなっている。

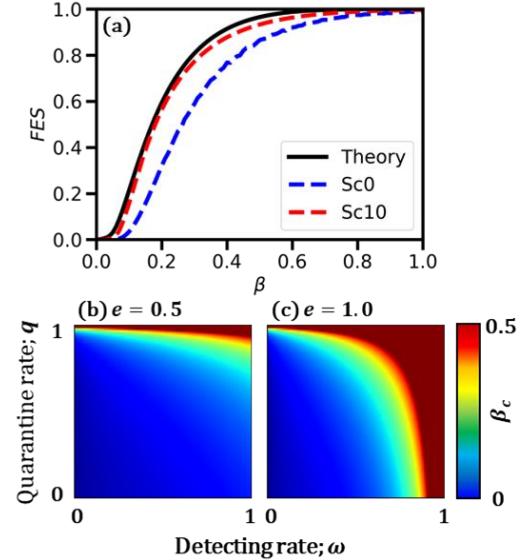


Fig.1 (a)介入行為がない場合 ($\omega = q = 0$) の FES を示す。黒線：パーコレーションによる解析解、青破線： $S_c = 0$ での MAS、赤破線： $S_c = 10$ での MAS。(b) $e = 0.5$ 、(c) $e = 1.0$ での $\omega - q$ 相図で感染拡大に転じる感染率 (β_c) を示す。図中で、赤色に近いほど感染が拡大しにくい状況を表す。

また、 e が高くなるほど介入行為の相乗効果が高くなることも確認される。

4.結言

複雑ネットワーク上の感染症伝搬ダイナミクスをパーコレーションによる理論モデルで解析した。結局、感染抑制に最も寄与するのは、被感染者と感染者への介入行為を同時に実施するケースであることが理論解析により確認された。

参考文献

- [1]M. E. J. Newman,; Spread of epidemic disease on networks, Phys. Rev. E., **66**, 1, 016128, Jul. 2002
- [2]N. Masuda and C. L. Vestergaard,; Gillespie algorithms for stochastic multiagent dynamics in populations and network, 2021.
- [3]A.-L. Barabási and R. Albert,; Emergence of Scaling in Random Networks, Science, **286**, 5439, 509–512, Oct. 1999.
- [4]W. O. K. and A. G. McKendrick,; A contribution to the mathematical theory of epidemics, Proc. R. Soc. London. Ser. A, Contain. Pap. a Math. Phys. Character, **115**, 772, 700–721, Aug. 1927

免疫損失を考慮したワクチン接種ゲームにおける社会ジレンマの分析

西村樹¹, 立川雄一^{1,2}, 内海忍¹, 谷本潤^{1,3}

¹九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻

²エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ(株)

³九州大学 総合理工学研究院 環境工学部門

概要

SEIRS を基に無症候と有症候状態に加え、入院と免疫状態を導入したコンパートメントモデルを定式化し、これに Bauch の Behavior モデルに基づくワクチン接種ダイナミクスを加味した Vaccination Game を構築した。Social Efficiency Deficit; SED を解析することでモデルダイナミクスの背後に社会的ジレンマが生じるかを定量的に同定した。その結果、無症候性感染者の割合やその感染力の割引率に伴い無駄なワクチン接種や不足なワクチン接種に起因する内訳の異なる社会的ジレンマが確認された。

Social dilemma analysis on a vaccination game based on SIERS process plus Behavior model

Itsuki Nishimura¹, Yuichi Tatsukawa^{1,2}, Shinobu Utsumi¹, Jun Tanimoto^{1,3}

¹Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

²MRI Research Associates Inc.

³Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

Abstract

A new SEIRS-base ODE (Ordinary Differential Equation) model is built, where asymptomatic and symptomatic infectious compartments, hospitalized state and immune state are additionally introduced, which is dovetailed with a behavior model that defines the vaccination rate as time-variable. We also apply Social Efficiency Deficit; SED, and quantitatively identify whether or not social dilemma taking place behind the model dynamics. As a result, SED with different breakdowns resulting from wasteful or insufficient vaccination due to the rate of asymptomatic people and their discounted rate of infectivity is confirmed.

1. 緒言

免疫消失を考慮した SEIRS プロセスにワクチン接種意思決定ダイナミクスを Bauch の Behavior モデル[1]で考慮した Vaccination Game ([2])を構築し、社会ダイナミクスの背後に潜在するジレンマの構造を解析した結果を報告する。

2. モデル

S:感受性, E:曝露, IA:無症候性感染, Is:

有症候性感染, H:入院, IM:免疫の 6 状態から構成されるプロセスに Behavior モデルに従うワクチン接種率 x を融合したモデル(図 1)を構築した(表式を図 2 に示す)。本報では、無症候性感染の生起率 p と有症候感染の感染率に対する無症候感染の比 q を主なパラメータとする。ダイナミクスは、各コンパートメントおよび変数 x が Disease Free もしくは Endemic

相になるまで追跡し、総感染者数、総ワクチン接種者数を同定。感染コストに対して正規化したワクチン接種コストを仮定することで、該エピソードの諸パラメータ設定に対する社会総コスト(Average Social Payoff; ASP)を求め、これを ASP^{NE} とする。一方、諸パラメータ設定そのままに x を変動させ、ASP 最大(社会コスト最小)となる社会最適となる ASP^{SO} を求める。両者のギャップが Social Efficiency Deficit (SED)^[2]である。SED はジレンマの存否を示し、正値は Behavior モデルによる均衡が社会最適に対して劣位で改善可能であることを表意するから、すなわち社会ジレンマの大きさを意味する。

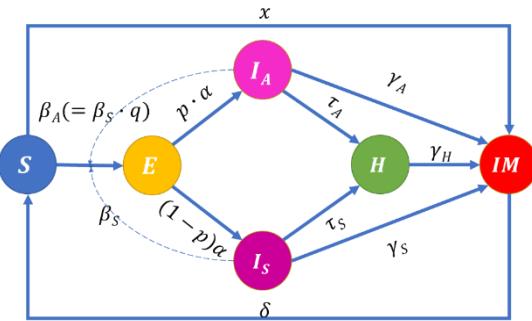


図 1 モデルの概略

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \delta \cdot IM - (\beta_S \cdot q \cdot I_A + \beta_S \cdot I_S + x) \cdot S \\ \dot{E} &= (\beta_S \cdot q \cdot I_A + \beta_S \cdot I_S) \cdot S - p \cdot \alpha \cdot E - (1-p) \cdot \alpha \cdot E \\ \dot{I}_S &= (1-p) \cdot \alpha \cdot E - \tau_S \cdot I_S - \gamma_S \cdot I_S \\ \dot{I}_A &= p \cdot \alpha \cdot E - \tau_A \cdot I_A - \gamma_A \cdot I_A \\ \dot{H} &= \tau_A \cdot I_A + \tau_S \cdot I_S - \gamma_H \cdot H \\ \dot{IM} &= \gamma_A \cdot I_A + \gamma_S \cdot I_S + \gamma_H \cdot H - \delta \cdot IM + x \cdot S \\ \dot{x} &= \omega \cdot x \cdot (1-x) \cdot (I_S - \kappa \cdot C_v) \end{aligned}$$

β_S : 無症候性感染の生起率 q : 有症候性感染率に対する無症候性感染比
 β_A : 感染率($S \rightarrow I_A$) $\beta_S = \beta_S \cdot q$ β_S : 感染率($S \rightarrow I_S$)
 τ_A : 入院率($I_A \rightarrow H$) τ_S : 入院率($I_S \rightarrow H$)
 γ_A : 回復率($I_A \rightarrow IM$) γ_S : 回復率($I_S \rightarrow IM$)
 κ : ワクチン接種に対する感度 α : E から H への変移率
 C_v : 相対的ワクチン接種コスト δ : 免疫損失率

図 2 表式と用語

3. 結果および考察

図 3 は SED と ASP^{NE} , ASP^{SO} を p - q パラメータ平面に描いた結果である。SED パネルに社会ジレンマのある領域 1 と領域 2, ジレンマのない領域 3 を示した。領域 1 は、ワクチン接種

をすることが社会最適となるのに、Behavior モデルに委ねた結果はそこまでの接種率には至らずジレンマとなっていることを意味する。無症候感染者割合が大きく($p \approx 1$), 無症候感染が有症候感染と同等の感染力を持つ($q \approx 1$)エリアでよりジレンマが大きくなるのは、「見えない」無症候感染者よりもたらされる感染拡大に接種行動が適応出来ない(本来接種すべきなのにそこまで接種率が上がらない(a))ことによる。領域 3 と 2 の境界に示す赤線は $R_0=1$ を意味する。 $R_0=1$ より下方にある領域 2 では、社会最適はワクチン接種しないことで達成されるのに、流行初期でワクチン接種するなど過剰なワクチン接種により社会ジレンマが生じてしまうことを示唆している(感染力からしてワクチン接種の必要がないのに、Behavior モデルが過剰な接種行動を生んでいる)。領域 3 では、仮定した Behavior モデルが社会最適と一致するような行動ダイナミクスをもたらしたことにより、SED のギャップがなくなる。

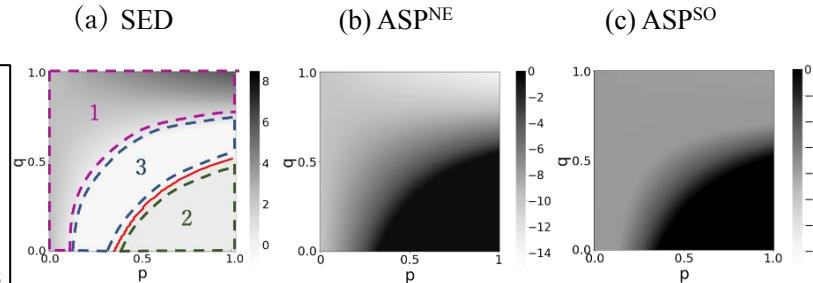


図 3 SED と ASP^{NE} の p - q ヒートマップ $I_{initial} = 0.0005$, $R_0 = 2.5$, $\alpha = 0.4$, $\gamma_A = 0.3$, $\gamma_S = 0.3$, $\gamma_H = 0.5$, $\beta_S = \gamma_S \cdot R_0$, $\beta_A = \beta_S \cdot q$, $\tau_A = 0.1$, $\tau_S = 0.2$, $\omega = 0.1$, $C_v = 0.5$, $\kappa = 0.1$, $\delta = 0.01$

参考文献

- [1] Bauch, C. T., Bhattacharyya, S.; Evolutionary game theory and social learning can determine how vaccine scares unfold, PLoS Computational Biology 8, e1002452, 2012.
- [2] Tanimoto, J.; Sociophysics Approach to Epidemics, Springer, 2021.

スケールフリーネットワーク上で観察される Effectiveness model 適用 Vaccination Game における感染率への additive ノイズがもたらす確率共鳴現象

沖田 航貴¹,立川 雄一^{1,2} 内海 忍¹ 谷本 潤³

¹ 九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻

² エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社

³ 九州大学 総合理工学研究院 環境理工学部門

要旨

SIR プロセスに従う感染症伝搬と意思決定ダイナミクスとを統合した Vaccination Game において、ワクチンによる免疫獲得の確率性を Effectiveness model とした枠組みを、Multi Agent Simulation (MAS) 上に構築し、感染率 β に平均ゼロの additive ノイズを印加することで発現する確率共鳴現象を考究した。接種コストが高く、かつ Effectiveness が低い条件において、社会全体のワクチン接種率 (Vaccination Coverage; VC) は変化せず、最終感染者サイズ (Final Epidemic Size; FES) は減少した。一方で、接種コストが低く、かつ Effectiveness が高い条件においては、ワクチン接種率は減少し、最終感染者サイズが増加し、感染症封じ込めの観点からは逆効果となる傾向が創発することを明らかにした。

Stochastic resonance effect observed an Vaccination game with Effectiveness framework for vaccination presuming a scale-free network as underlying network

Kouki Okita¹,Yuichi Tatsukawa^{1,2}, Shinobu Utsumi¹, Jun Tanimoto²

¹ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences,Kyushu University

² MRI Research Associates Inc.

³ Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

Abstract

We explored whether an additive noise to the transmission rate brings an advantageous stochastic resonance effect to confine a disease spreading in the effectiveness model with Multi Agent Simulation. We found that, with a higher vaccination cost and/or a lower vaccine efficacy, the stochastic noise has no gap of vaccination coverage with the default without-noise case, but brings a less level of final epidemic size. In contrast, when a lower vaccination cost and a higher vaccine efficacy would be imposed, the additive stochastic noise brings a smaller VC that consequently results in a larger FES than the default without-noise case.

1.序論

COVID-19 パンデミックに同期して社会物理学では数理疫学と（例えば、有償ワクチン接種に関する）人間意思決定ダイナミクスとを統合した枠組み Vaccination Game (VG) への関心が高まっている[1], [2]。確率共鳴は統計物理学上のテーマだが、数理疫学モデルにこれを適用し、様々な変数やパラメータへの additive ノイズがダイナミクスに如何なる確率特性をもたらすかを巡って関心が高まっている[3]。確率共鳴の本義を考えると、エージェントが複雑ネットワークで接続される状況下を前提にすること、更には Perc[4] や Tanimoto[5] が発見した空間型囚人ジレンマ

ゲームの利得行列への additive ノイズがネットワーク互恵を強化する現象とのアナロジーから想起して、背後に、所謂、ワクチン接種ジレンマが埋め込まれた VG に適用することは、興味ある研究課題である。本研究は、これに Multi Agent Simulation (MAS) を用いてアプローチする。

2.モデル

2.1.Vaccination Game (VG)

[2]の基本形を踏襲した[1]の VG を用いる。ワクチンの確率性は Effectiveness[1]に従う。すなわちワクチン接種イベントにおいてワクチン接種を行うエージェントは

Effectiveness; E により完全免疫を獲得する。1 流行期は 2 ステージからなり、ステージ 1 で各エージェントは前流行期の自己利得とランダム選択した隣人利得との差異に基づく確率戦略更新 (PW-Fermi に基づく IB-RA[1]) をし、ステージ 2 で初期感染者 $I_0 (=5)$ を粒子数 10^4 、平均次数 ($\langle k \rangle$) 8 の BA-SF[6] 上にランダム配置して当該流行期の SIR 感染ダイナミクスを感染者 I がいなくなるまで Gillespie 法により追跡する。ワクチン接種率 (VC) と最終感染者サイズ (FES) が社会均衡に達するまで流行期を繰り返し、MAS の結果としては 100 アンサンブル平均を採る。

2.2. 感染率に印加するノイズ

基本再生産数 $R_0 = 2.5$ 、回復率 $\gamma = 1/3[\text{day}^{-1}]$ として求まるリンクベース感染率 $\beta_{eq} = \beta/\langle k \rangle = R_0 \cdot \gamma/\langle k \rangle$ [7]に対し、各時間ステップ各リンクで上下限 $\pm \delta$ の一様乱数を付加する ($\beta_{eq} \pm \delta$)。

3. 結果及び考察

数値実験では感染時の疾病総コスト 1 に対する相対ワクチン接種コスト C_r ($0 \leq C_r \leq 1$) とワクチンの確率的有効性 E ($0 \leq E \leq 1$) を変えながら VC と FES を求める。 $\delta = 0$ のデフォルト設定に対して δ の影響を考察する。Fig.1 に結果を示す。1 行目左パネルが VC、右パネルが FES のデフォルト設定の絶対値であり、これらは既往研究で報告されている結果[1]と一致する。2 および 3 行目は、夫々、大小のノイズを印加したときのデフォルト設定との差画像で、赤がプラス、青がマイナス偏差を意味する。SF グラフ上のワクチン接種がない単純な SIR プロセスに対して、感染率に additive ノイズを印加すると、感染力（基本再生産数）の強さに依存への依存性が観察されるが、確率揺らぎがパーコレーション経路の連続性を棄損することで、最終感染サイズが小さくなる側へ deflate する（結果は示していない）。このことは揺らぎ幅が小さい範囲では VG にあっては有意な差異とはならない (Fig.1 の 2 行目)。而して、ノイズ幅が大きくなると (3 行目)、確率共鳴効果は大きく 2 相のパラメータ領域に分かれて発現する。ワクチンの信頼性が低く、コストが高い領域では、元々、デフォルト設定で $VC=0$ であるから、VC に差異は現れない。が、FES は小さい側に歪む (右下パネル)。一方、ワクチンが低コストで信頼性が比較的高い領域では、確率共鳴により感染リスクが低減されることが、エージェントをミスリードし、VC は低い側に歪み (3 行目左パネル)、これに依り FES は高い側に歪んでしまう (3 行目右パネル)。

4. 結論

スケールフリー上のエージェントが Effectiveness によりワクチン接種確率特性を考

慮した VG を繰り広げる系を前提に、感染率に additive ノイズを印加した際の確率共鳴効果を MAS により検討した。ワクチンコストとワクチン信頼性の 2 次元パラメータ領域で、2 相の異なる効果が現われ、コスト低、信頼性高の領域では、確率共鳴で感染力が弱められる効果が、却って VC を低下させ、FES が増加させる方向に歪ませる結果となることがわかった。

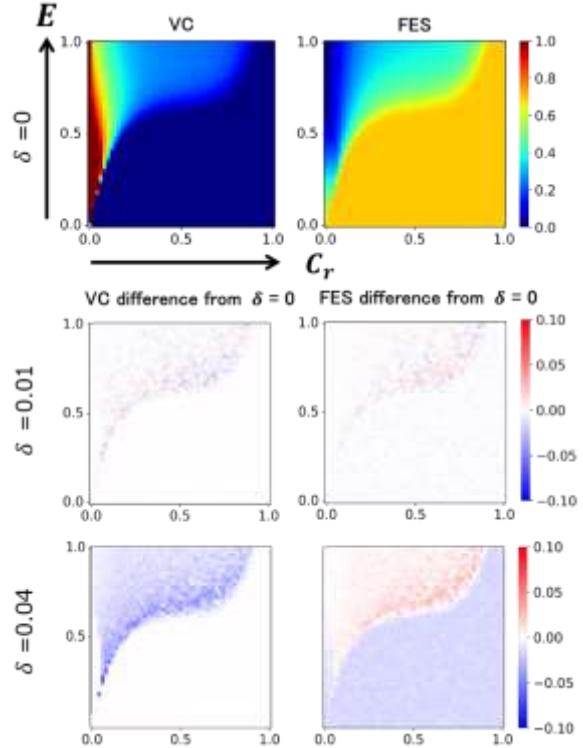


Fig.1 $\delta = 0$ の行にて、左図からワクチン接種率(VC)、最終感染者サイズ(FES)を示す。 $\delta = 0.01$ 、 0.04 の各行は、左図から、 $\delta = 0$ と比較した時の VC、FES の変化量を示す。

参考文献

- [1] Tanimoto, J.; Sociophysics Approach to Epidemics, Springer, 2021.
- [2] Fu, F., Rosenbloom, D. O., Wang, L., Nowak, M. A.; Imitation dynamics of vaccination behaviour on social networks, Proceedings of Royal Society B **278**, 42–49, 2011.
- [3] Nino-Torres, D., Rios-Gutierrez, A., Arunachalam, V., Ohajunwa, C., Seshaiyer, P.; Stochastic modeling, analysis, and simulation of the COVID-19 pandemic with explicit behavioral changes in Bogota: A case study, Infectious Disease Modeling **7**, 199-211, 2022.
- [4] Perc, M.; Coherence resonance in a spatial prisoner's dilemma game, New Journal of Physics **(8)**, 22, 2006.
- [5] Tanimoto, J.; Promotion of cooperation by payoff noise in a 2×2 game, Physical Review E **76**, 041130, 2007.
- [6] Barabási, A. L., Albert, R.; Emergence of Scaling in Random Networks, Science **286** (80), 509-512, 1999.
- [7] Utsumi, S., Arefin, Md. R., Tatsukawa, Y., Tanimoto, J.; How and to what extent does the anti-social behavior of violating self-quarantine measures increase the spread of disease?, Chaos, Solitons & Fractals **159**, 112178, 2022.

Contents

“Crossover of Collective Cell Movement from Suspended to Aggregated States”	5
Katsuyoshi Matsushita, Taiko Arakaki, Naoya Kamamoto, Maki Sudo, Koichi Fujimoto	
“Anomalous phase transition in self-propelled hard disk systems”	7
Nobuaki Murase, Masaharu Isobe	
“String-like traveling by autonomous traveling of skid-steering 2D robots using neural network”	9
Takaya Furusawa, Yasushi Honda	
“Quantification of lockdown effect for a disease spreading on a Small-World network with time-varying its short-cut links”	11
Kensuke Ikeo, Shinobu Utsumi, Yuichi Tatsukawa, Jun Tanimoto	
“Pedestrian Recognition of Cyclists on Sidewalk”	13
Toshihiro Kawaguchi, Tsukasa Sera	
“Microscopic Traffic Flow Simulation With Velocity Restriction”	
Junya Masaka, Jun Tanimoto	15
“Percolation analysis for epidemics on a complex network”	17
Yuichi Tatsukawa, Md. Rajib Arefin, Jun Tanimoto	
“Social dilemma analysis on a vaccination game based on SIERS process plus Behavior model”	19
Itsuki Nishimura, Yuichi Tatsukawa, Shinobu Utsumi, Jun Tanimoto	
“Stochastic resonance effect observed an Vaccination game with Effectiveness framework for vaccination presuming a scale-free network as underlying network”	21
Kouki Okita, Yuichi Tatsukawa, Shinobu Utsumi, Jun Tanimoto	

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

司会者： 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@phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp

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

