

PRINT ISSN 2434-5474  
ONLINE ISSN 2434-5946

第27回  
交通流と自己駆動粒子系  
シンポジウム

論文集

*Proceedings  
of  
the 27 th Symposium  
on  
Traffic Flow and Self-driven Particles*

— 2021 —

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 : 2021年12月9日(木) 13:00 - 17:30  
10日(金) 10:00 - 16:30  
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 27 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

2021 年 12 月 9 日 (木)

13:00 – 13:05

あいさつ

13:05 – 13:55 特別講演 9-s1

相互予期によって促進される歩行者流の自己組織化

村上 久

(京都工芸繊維大学)

13:55 – 14:15 コーヒーブレイク

14:15 – 14:45 一般 9-1

交通流モデルとしての双安定性をもつ非線形差分方程式

岡本和也<sup>1</sup>, 友枝明保<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 武蔵野大学大学院工学研究科数理工学専攻, <sup>2</sup> 関西大学総合情報学部)

14:45 – 15:15 一般 9-2

高膨潤性ゲル粒子からなる粉体ベッド中への液体注入時のパターン遷移

乙黒康次郎<sup>1</sup>, 吉井究<sup>2</sup>, 住野豊<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup> 東京理科大学理学研究科応用物理学専攻, <sup>2</sup> 大阪大学基礎工学研究科機能創成専攻,

<sup>3</sup> 東京理科大学総合研究院ウォーターフロンティア研究センター/コロイド界面部門

15:15 – 15:45 一般 9-3

濡れた粉体の履歴に依存したレオロジー特性

吉井究, 大槻道夫

(大阪大学基礎工学研究科機能創成専攻)

15:45 – 16:00 コーヒーブレイク

16:00 – 16:30 一般 9-4

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

猪毛尾賢亮<sup>1</sup>, 内海 忍<sup>2</sup>, 立川 雄一<sup>2</sup>, 谷本 潤<sup>1,2,3</sup>

(<sup>1</sup> 九州大学工学部エネルギー科学科, <sup>2</sup> 九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻,

<sup>3</sup> 九州大学院総合理工学研究院環境理工学部門)

16:30 – 17:00 一般 9-5

症候性感染者の隔離・無症候性感染者の存在・発症から隔離までの時間遅れが

感染症伝搬ダイナミクスに与える影響

内海 忍<sup>1</sup>, 谷本 潤<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻, <sup>2</sup> 九州大学院総合理工学研究院環境理

工学部門 )

17:00 – 17:30 特別講演 9-s2

Active flow pedestrian crowds: from large-scale measurements to variational modeling

Alessandro Corbetta

(Eindhoven University of Technology, The Netherlands)

**2019年12月10日（金）**

10:00 – 10:30 一般 10-1

細胞の相互誘導での運動持続性への界面効果

松下勝義, 鎌本直也, 須藤麻希, 藤本仰一  
(大阪大学大学院理学研究科生物科学専攻)

10:30 – 11:00 一般 10-2

体内のウイルス進化を組み込んだ個体群感染症モデルの解析

立川雄一<sup>1</sup>, 谷本 潤<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻, <sup>2</sup> 九州大学総合理工学研究院  
環境理工学部門)

11:00 – 11:30 一般 10-3

粒子数が幕分布に従う多分散粉体ガスのレオロジー

山路大樹, 石川遙登, 高田智史  
(東京農工大学機械システム工学専攻)

11:30 – 13:00 ランチブレイク

13:00 – 13:30 一般 10-4

阪神高速ETCデータの時間的規則性

榎本大悟<sup>1,2</sup>, 上東貴志<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 神戸大学計算社会科学研究センター, <sup>2</sup> 理化学研究所計算化学研究センター)

13:30 – 14:00 一般 10-5

電車の形状が乗客の降車時間に与える影響

嘉幡聰至, 川口寿裕  
(関西大学社会安全学部安全マネジメント学科)

14:00 – 14:30 一般 10-6

PQ方式によって稼働するエレベーター3基の運用効率改善シミュレーション

川口隼平<sup>1</sup>, 金井政宏<sup>2</sup>, 田中基大<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 久留米工業大学大学院電子情報システム工学専攻, <sup>2</sup> 久留米工業大学大学院自動車システム工学専攻, <sup>3</sup> 久留米工业大学工学部教育創造工学科)

14:30 – 14:45 コーヒーブレイク

14:45 – 15:15 一般 10-7

最適速度旋回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

山田将司<sup>1</sup>, 李方正<sup>1</sup>, 本田泰<sup>2</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> 室蘭工業大学大学院しくみ  
解明系領域)

15:15 – 15:45 一般 10-8

あおり運転を考慮したミクロ交通流モデルの シミュレーション

末吉郁<sup>1</sup>, MD. Anowar Hossain<sup>1</sup>, 谷本 潤<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻, <sup>2</sup> 九州大学大学院総合理工学  
研究院環境理工学部門)

15:45 – 16:15 一般 10-9

ソーシャルフォースモデルを用いた避難シミュレーションにおける事前出口把握及び誘導  
の効果

杉山裕<sup>1</sup>, 宮川大樹<sup>1</sup>, 一ノ瀬元喜<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 静岡大学 大学院総合科学技術研究科工学専攻数理システム工学コース, <sup>2</sup> 静岡大学  
学術院工学領域数理システム工学系列)

16:15 – 16:20

あいさつ

## 目次

相互予期によって促進される歩行者流の自己組織化.....	1
村上 久	
交通流モデルとしての双安定性をもつ非線形差分方程式 .....	3
岡本和也, 友枝明保	
高膨潤性ゲル粒子からなる粉体ベッド中への液体注入時のパターン遷移 .....	7
乙黒康次郎, 吉井究, 住野豊	
濡れた粉体の履歴に依存したレオロジー特性 .....	11
吉井究, 大槻道夫	
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 .....	15
猪毛尾賢亮, 内海 忍, 立川 雄一, 谷本 潤	
症候性感染者の隔離・無症候性感染者の存在・発症から隔離までの時間遅れが 感染症伝搬ダイナミクスに与える影響.....	19
内海 忍, 谷本 潤	
細胞の相互誘導での運動持続性への界面効果 .....	23
松下勝義, 鎌本直也, 須藤麻希, 藤本仰一	
体内のウイルス進化を組み込んだ個体群感染症モデルの解析 .....	27
立川雄一, 谷本 潤	
粒子数が幂分布に従う多分散粉体ガスのレオロジー.....	31
山路大樹, 石川遥登, 高田智史	
阪神高速 ETC データの時間的規則性.....	35
榎本大悟, 上東貴志 1	

電車の形状が乗客の降車時間に与える影響 .....	39
嘉幡聰至, 川口寿裕 1	
PQ 方式によって稼働するエレベーター 3 基の .....	43
運用効率改善シミュレーション	
川口隼平, 金井政宏, 田中基大	
最適速度旋回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 .....	47
山田将司, 李方正, 本田泰	
あおり運転を考慮したミクロ交通流モデルの シミュレーション .....	51
末吉郁, MD. Anowar Hossain, 谷本 潤	
ソーシャルフォースモデルを用いた避難シミュレーションにおける 事前出口把握及び誘導の効果 .....	55
杉山裕, 宮川大樹, 一ノ瀬元喜	

タイトル：相互予期によって促進される歩行者流の自己組織化

発表者：村上久（京工織大）

概要：他の動物の群れ同様、歩行者流などに見られる人の群れは、さまざまな集団的秩序を自己組織化する。そこでは外的な制御がなくとも、集団としての振る舞いが個体間相互作用を通して創発する。これを記述するための古典的かつ現在も主流なモデルでは、物理的粒子群に着想を得た斥力ポテンシャルによる相互作用に基づく。しかし近年の画像解析技術の進歩から現実の歩行者流を実測・実験的に分析可能となり、従来モデルでは説明が困難な現象が複数見つかっている。特に、現実の歩行者は従来の距離に依存した斥力ではなく、本質的に予期に基づくことがわかりつつある。つまり歩行者は、近くにいる他個体の現在の位置だけでなく、その予期される未来の位置に影響を受けて衝突回避を行うことが、現実の社会空間に近い様々な条件で見られることがわかっている。このことは、歩行者は他個体に対して単に受動的に衝突回避行動を取るのではなく、能動的に経路を探索することを示唆する。しかしながら、こうした予期行動は歩行者集団現象を普遍的に説明する基盤的相互作用と期待されるものの、予期を行なっている、ということ以上の相互作用様態は多くが不明であった。これに対し演者らは、歩行者一人一人が具体的にどのような予期行動を行うか、またその集団形成における機能的意義とは何かを問う研究を進めつつある。本講演ではそのうちの二つの研究を紹介する。一つ目の研究は、予期を通して歩行者が集団の中で如何に経路探索を行っているかに関するものであり、いわば「人混みを縫って歩く」とはどういうことかを示そうとするものである。これは、歩行者集団の自己組織化の典型例として挙げられるレーン形成に関する実験の分析に基づく。レーン形成とは、横断歩道などで、二つの歩行者集団が対面して移動するとき、同じ方向を歩く歩行者のレーンが自発的に複数形成されるという現象である。結果として、レーンが形成される過程で、歩行者は目的地への最短経路から絶えず逸脱し、レビィ歩行と呼ばれる運動戦略を取ることが示された。レビィ歩行とは、多数の短いステップと稀な長距離ステップから構成され、ステップ長の分布がベキ則に従う、スケール不変な運動戦略である。通常レビィ歩行は、動物の探索行動に見られる運動戦略であり、予測が困難な仕方で分布したリソースの探索効率を最適化することが知られる。従ってこの結果は予期に基づく経路探索がレーン形成に寄与することを示唆する。そこで二つ目の研究では、予期がレーン形成と如何に関わるかを明らかにする実験研究を紹介する。こちらでは、歩行者の視覚的注意を逸らすことであえて予期の認知能力を妨害すると、レーン形成が遅延することが示された。さらに注意を逸らされた個体のみならず、彼らに向かっていく者や同じ方向に進む者でさえ、歩行中の衝突回避が困難になることが示された。これらの結果は、通常衝突回避戦略は協調的なプロセスであり、歩行者同士が相互に動きを予期し合うことが集団の自己組織化を促進していることを意味する。このような相互予期は、歩行者行動のみならず、人の他の集団的意思決定や、他の動物の群れの自己組織化においても重要であると考えられている。本研究で示される相互予期の重要性は、集団的な人間行動、生物集団現象、群ロボットなど他の様々な自己組織化システムの基盤となる知見を与えるものと考えられる。



# 交通流モデルとしての双安定性をもつ非線形差分方程式

岡本和也<sup>1</sup>, 友枝明保<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 武藏野大学大学院 工学研究科 数理工学専攻

<sup>2</sup> 関西大学 総合情報学部

## 概要

交通流を記述する数理モデルの中でも、巨視的モデルは、交通ネットワークシミュレーションなどの大規模な数値計算において、計算コストを低減できるという利点がある。本研究では、交通流に実験的に見られる一般的な特徴である「双安定性」に着目し、交通流を巨視的に記述する新しい非線形差分方程式を提案した。その結果、一様解の安定性という観点から、本モデルのパラメータが交通渋滞を解消する可能性があることがわかった。さらに、提案モデルと他の交通流モデルとの対応関係を調べるために超離散極限と連続極限の結果を示した。

## Nonlinear difference equation with bi-stability as a new traffic flow model

Kazuya Okamoto<sup>1</sup>, Akiyasu Tomoeda<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mathematical Engineering, Graduate School of Engineering, Musashino University

<sup>2</sup> Faculty of Informatics, Kansai University

## Abstract

Among mathematical traffic flow models, macroscopic models have the advantage of reducing computational costs in large-scale numerical calculations such as transportation network simulations. In this study, we focus on bi-stability, which is a general feature empirically observed in a traffic flow, and propose a new nonlinear difference equation that describes a traffic flow at the macroscopic level. We found that the parameters in our model have the potential to eliminate traffic jams from the perspective of stability of a homogeneous flow. Moreover, ultra-discrete and continuous limit results are presented to investigate the correspondence between the proposed model and other models.

## 1 Introduction

The dynamics of traffic flow includes instabilities as the average traffic density increases. In other words, a free flow is stable when the vehicle density is low, but becomes unstable when the vehicle density exceeds the critical density. In the latter case, the traffic flow transits from a free flow into another stable state, which corresponds to a jamming flow observed as a spontaneous traffic jam.

As an example, Gasser et al. [1] proved that the instability of a free flow is understood by Hopf bifurcation; they numerically showed the global bifurcation structure possessed by the optimal velocity (OV) model [2]. The OV model is a car-following model describing an adaptation to the optimal velocity that depends on the headway between two neighboring vehicles; it is well known for its successful explanation of the mechanism of

spontaneous traffic jams. The results of Gasser et al. show that the Hopf bifurcation behavior is locally supercritical, but macroscopically exhibits a subcritical structure. The optimal velocity model reproduces “bi-stability” at a certain density region, in which free and jamming flows coexist. It should be emphasized here that this bi-stability is a general feature empirically observed in traffic flows [3]. Many mathematical models have been proposed to reproduce traffic flow. These models can be approximately classified into three types: (i) density wave model/gas-kinetic models (partial differential equation), (ii) car-following models (ordinary differential equation), and (iii) cellular automaton models (max-plus algebra/master equation/rule-based algorithm). Our interest is in designing a precise traffic flow model and the relationship between these descriptions. For example, the cellular automaton model derived from partial differential equation with bi-stability. Furthermore, the correspondence also facilitate the development of a mathematical analysis method for a cellular automaton model for which analysis methods have not been developed. Clarifying the correspondence, and understanding the structure of the solution, are extremely significant from an algebraic point of view. Hence, the aim of this study is to propose and analyze a new nonlinear difference equation with bi-stability, and to then show both models obtained by continuous and ultradiscrete limits.

## 2 A new mathematical model considering past weights

### 2.1 Proposed model

We propose the following nonlinear difference equation as a new model:

$$\rho_x^{t+\Delta t} = \rho_x^t - \rho_x^t b_x^t + \rho_{x-\Delta x}^t b_{x-\Delta x}^t \quad (1a)$$

$$b_x^t = (1 - \rho_{x+\Delta x}^t) \times \left\{ 1 - \left( (1 - \alpha) \rho_x^{t-\Delta t} + \alpha \rho_{x+\Delta x}^{t-\Delta t} \right) \right\}, \quad (1b)$$

where  $\rho_x^t$  is the density at a lattice  $x$  and a time  $t$  and  $\alpha$  is the parameter takes the value  $(0, 1)$  and  $b_x^t$  is the transition rate of vehicles at a lattice  $x$  and a time  $t$ . In this model, one-dimensional road is divided into a lattice, and the conservation law of vehicles for each lattice is described. The effect of  $\left\{ 1 - \left( (1 - \alpha) \rho_x^{t-\Delta t} + \alpha \rho_{x+\Delta x}^{t-\Delta t} \right) \right\}$  is to decide whether to move to the lattice in front depending on the congestion in the vicinity. The effect of  $(1 - \rho_{x+\Delta x}^t)$  is to brake suddenly when there is a leading car  $\rho_{x+\Delta x}^t = 1$ .  $\alpha$  represents the strength of the dependence on congestion in the vicinity of the driver's own location.

### 2.2 Numerical experiments and linear stability analysis for the new model

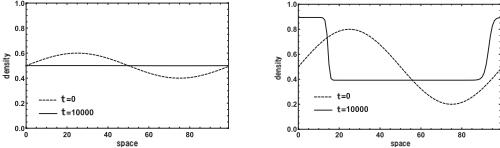
We focus on the bi-stability as the model to confirm the validity of the traffic flow model. First we numerically investigate a homogeneous flow with a perturbation. In our numerical experiments, we impose the periodic boundary condition, and then set  $\Delta x = 1, \Delta t = 1, x \in \{1, 2, 3, \dots, L\}$ , where  $L$  is the number of lattices. The initial value of  $\rho_x^0$  is set as follows:

$$\rho_x^0 = \rho_0 + A \sin \frac{2\pi x}{L}, \quad (2)$$

where  $\rho_0$  is the density at  $x \in \{1, 2, 3, \dots, L\}$ , and  $A$  is the amplitude of the perturbation. We assume that  $\rho_x^0 = \rho_x^1$  as the initial value.

We found that the model (1) shows bi-stability at least at  $\rho_0 = 0.5$ . It was found that, if the perturbation is small, the density wave converges to the homogeneous solution; However, if the perturbation is not small, the density wave converges to a traveling wave solution, which is expected to be another solution. In the latter case, as shown in Fig.1 (b), the initial perturbation grows into a traveling wave. This traveling wave solution is observed to propagate in the direction opposite to the direction in which the cars move. This feature is consistent with the fact that a jam cluster in a real traffic jam propagates backward [4].

Next, a linear stability analysis was performed on the model. The bi-stable region was investi-



(a)  $(\rho_0, A) = (0.5, 0.1)$  (b)  $(\rho_0, A) = (0.5, 0.3)$

Figure 1: Numerical solutions for two cases (a)  $A = 0.1$ , (b)  $A = 0.3$  with  $\rho_0 = 0.5, \alpha = 0.2$ . The dashed line is the initial value, and the solid line is the converging numerical solution plotted at  $t = 10,000$ .

gated numerically. The results are shown in Fig. 2. From these analyses, it was found that the unstable region of the homogeneous solution disappears for  $\alpha > 0.401$ . This suggests that by controlling the parameter  $\alpha$  in the real traffic flow, it is possible to always maintain the free flow.

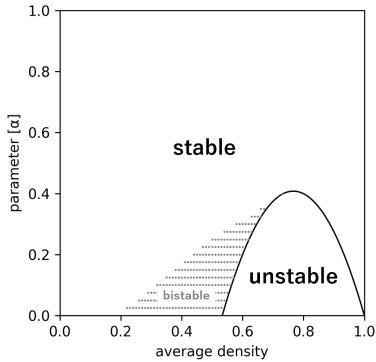


Figure 2: Graph with  $L = 100$ . The solid curve represents the neutral stability obtained by the linear stability analysis. The points represent the bi-stable region, which is obtained numerically.

### 3 Ultra-discrete and continuous limit

#### 3.1 Ultra-discrete limit

As one of our aims, we would like to see the correspondence between the ultra-discretized model and the cellular automaton model. Using the variable transformations  $\rho_x^t = e^{-U_j^n/\varepsilon}, 1 - \rho_x^t = e^{-V_j^n/\varepsilon}, \alpha = e^{-A/\varepsilon}, 1 - \alpha = e^{-B/\varepsilon}$ , and taking the limit  $\varepsilon \rightarrow +0$ ,

we obtain the following ultra-discrete equations:

$$\begin{aligned} U_j^{n+1} = \min & \left[ U_j^n + U_{j+1}^n, B + V_{j+1}^n + U_j^n + U_j^{n-1}, \right. \\ & A + V_{j+1}^n + U_j^n + U_{j+1}^{n-1}, \\ & A + U_{j-1}^n + V_j^n + V_j^{n-1}, \\ & \left. B + U_{j-1}^n + V_j^n + V_{j-1}^{n-1} \right], \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} V_j^{n+1} = \min & \left[ V_{j-1}^n + V_j^n, A + V_{j+1}^n + V_{j+1}^{n-1} + U_j^n, \right. \\ & B + V_{j+1}^n + V_j^{n-1} + U_j^n, \\ & B + V_j^n + U_{j-1}^n + U_{j-1}^{n-1}, \\ & \left. A + V_j^n + U_{j-1}^n + U_j^{n-1} \right], \end{aligned} \quad (3b)$$

$$0 = \min \left[ U_j^n, V_j^n \right], \quad (3c)$$

$$0 = \min \left[ A, B \right], \quad (3d)$$

where  $\{0, \infty\}$  in  $U_j^n$  and  $V_j^n$  correspond to  $\{1, 0\}$  in the cellular automaton models. Note that  $U_j^n, V_j^n, A, B \in \mathbb{R}_{\geq 0} \cup \{\infty\}$  owing to the inequality  $0 \leq \rho_x^t, \alpha \leq 1$ .

#### 3.2 Continuous limit

We are also interested in the correspondence between our model (1) and previous density wave models.

We perform the Taylor expansion for (1a) and take the terms of the second order. If we take the limit  $\Delta x \rightarrow 0, \Delta t \rightarrow 0$ , keeping the maximum velocity  $V_{\max} = \Delta x / \Delta t$  finite, we obtain

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -V_{\max} \frac{\partial(\rho b)}{\partial x} \quad (4)$$

where  $b = b(x, t)$  is the limit of  $b_x^t$ . Setting  $v(x, t) = V_{\max} b(x, t)$ , we obtain the continuous equation:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho v)}{\partial x}. \quad (5)$$

Substitution (1a) into (1b) gives

$$\begin{aligned} b_x^{t+\Delta t} = & \left\{ 1 - (\rho_x^t - \rho_x^t b_x^t + \rho_{x-\Delta x}^t b_{x-\Delta x}^t) \right\} \\ & \times \left\{ 1 - \left( (1 - \alpha) \rho_x^t + \alpha \rho_{x+\Delta x}^t \right) \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Adding  $-b_x^t + (b_{x+\Delta x}^t - b_{x-\Delta x}^t)/2$  to both sides of (6), performing a Taylor expansion, and setting

$1/\tau \stackrel{\text{def}}{=} \Delta x/\Delta t^2$ , we obtain

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} &= V_{\max}(1 - \rho) \\ &\times (v - 2V_{\max}\rho^2 - 3V_{\max} - \alpha V_{\max}) \frac{\partial \rho}{\partial x} \\ &+ V_{\max}\rho(1 - \rho) \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{V_{\max}} \frac{V(\rho) - v}{\tau}, \end{aligned} \quad (7)$$

where  $V(\rho) = V_{\max}(1 - \rho)^2$ , which is the optimal velocity in a homogeneous flow. Thus, the continuous limit of model (1) is

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} &= - \frac{\partial(\rho v)}{\partial x}, \quad (8a) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} &= V_{\max}(1 - \rho) \\ &\times (v - 2V_{\max}\rho^2 - 3V_{\max} - \alpha V_{\max}) \frac{\partial \rho}{\partial x} \\ &+ V_{\max}\rho(1 - \rho) \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{V_{\max}} \frac{V(\rho) - v}{\tau}. \end{aligned} \quad (8b)$$

Note that the third terms on the right-hand side correspond to the self-driven force (inner-force) term used in the models of previous studies [5, 6].

## 4 Conclusion

In this study, we proposed a new traffic flow model described by a nonlinear difference equation and investigated the model both numerically and analytically. As a result, we analytically obtained the linear stability condition and numerically clarified the existence of the bi-stability region, where the solutions converge to different flows depending on the magnitude of the initial perturbation. Moreover, the parameters in our model have the potential to eliminate traffic jams from the perspective of a homogeneous flow stability. We also investigated the correspondences of our model with other models by taking two limits, that is, the ultradiscrete limit and a continuous limit. However, the specific correspondence with other CA models and density wave models has yet to be confirmed. Future studies will include analytically finding the bi-stability region and confirming a more detailed correspondence between the ultradiscrete and continuous limits.

## References

- [1] I. Gasser, G. Sirito, and B. Werner, Physica D **197**, (2004), 222–241.
- [2] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shiba, and Y. Sugiyama, Phys. Rev. E, **51**, (1995), 1035–1042.
- [3] M. Treiber, and A. Kesting, Traffic flow dynamics: Data, Models and Simulations, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2013).
- [4] J. Treiterer, J. Myers, Transp. Traffic Theory, **6**, (1974), 13–38.
- [5] H. J. Payne, Mathematical Models of Public Systems **1**, (1971), 51–61.
- [6] B. S. Kerner and P. Konhauser, Phys. Rev. E, **48**, (1993), R2335–R2338.

# 高膨潤性ゲル粒子からなる粉体ベッド中への液体注入時のパターン遷移

乙黒康次郎<sup>1</sup>, 吉井究<sup>2</sup>, 住野豊<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> 東京理科大学 理学研究科 応用物理学専攻

<sup>2</sup> 大阪大学 基礎工学研究科 機能創成専攻

<sup>3</sup> 東京理科大学 総合研究院 ウォーターフロンティア研究センター/コロイド界面部門

## 概要

膨潤率の大きいゲル粒子を乾燥させ充填させた粉体ベッドを擬2次元セル内に封入した。この中に、塩濃度を調整した塩化ナトリウム水溶液を異なる注入速度で注入した。高注入速度では等方的な浸透様相が観察されたのに対して、低注入速度では粒子の膨潤に伴い非等方な指型構造が観察された。これらのパターンの遷移は粒子の膨潤速度と注入速度により決まる特徴的な時間スケールの比によって理解されることが分かった。

## Pattern transition of injected fluid into a granular bed of highly-swelling gel particles

Kojiro Otoguro<sup>1</sup>, Kiwamu Yoshii<sup>2</sup>, Yutaka Sumino<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Department of Applied Physics, Faculty of Science Division I, Tokyo University of Science,

<sup>2</sup> Department of Mechanical Science and Bioengineering, Graduate School of Engineering Science,  
Osaka University

<sup>3</sup> WaTUS and DCIS, Tokyo University of Science

## Abstract

Saline water of sodium chloride was injected with controlled injection rates into a granular bed in a quasi-two dimensional cell. The granular bed was made of dried highly-swelling gel particles whose swelling rate was controlled by the salinity of the injected fluid. For high injection rate, injected fluid percolated between gel particles isotropic manner. For low injection rate, the anistropic finger-like structures of injected fluid front was observed. The transition of the injection pattern can be understood by the ratio of characteristic timescale of swelling and injection.

## 1 はじめに

ヘレショウセルと呼ばれる空隙の小さな擬2次元セル中に満たした高粘性流体を低粘性流体で置換すると、界面が指状に波打つことが知られている[1]。このような界面変形は粘性突起と呼ばれ、Saffman-Taylor不安定性に起因して発生する。また、粉体ベッドへ流体を注入した際に流体が粉体を押しのけて形成される指状パターン形成現象も散逸構造の代表例

として盛んに研究されている[2]。これらの注入パターンは主に注入速度を大きくすると高波数の不安定化が生じることが知られている。また、こうしたダルシー則に支配されるような多孔質中の流体の移動プロセスは地盤中で盛んに発生している[3]。岩石は脆性的な振る舞いだけでなく、ひずみ速度によっては粘性的な振る舞いもするため、粘弾性体への流体注入も重要な研究対象である[4]。流体移動のダイナミクスを知ることは岩盤中の流体圧の時空構造を

ること、引いては注入誘起地震に見られる様な地震現象の予測にも有用であることも提唱されている[5]。特に、地盤中で流体が移動する際は岩石の間隙水に融解したシリカが析出することがあり、この化学反応に伴う透水性の変化が重要な役割と果たすことが知られている[6]。以上の状況を考えると、単純な粉体ベッドへの液体注入に止まらず、化学反応などにより透水率が変化するモデル実験系の構築との観察が必須な状況にある。

そこで本研究では、透水性の変化率が大きい荷電ゲル粒子から成る粉体ベッドに着目した。荷電性ゲルは溶媒中の塩濃度により膨潤速度を制御できる。そこで、乾燥したゲル粒子を擬2次元セル内に充填し粉体ベッドを構成した。このセル中に注入する溶液の塩濃度および注入速度をパラメータとして注入実験を行った。その結果、それぞれの塩濃度に対して注入速度が大きい場合は注入溶液の先端が等方に進展する様子が観察された。一方、注入速度が小さい場合は、注入先端が非等方になり指型構造の注入先端が観察された。本研究ではゲル粒子の膨潤速度を測定し、注入速度と定量的に比較することで、これらの注入パターンの遷移が、ゲル粒子の膨潤速度と注入速度の比によって決まるこことを示した。

## 2 実験設定

本研究で用いた実験系を図1(a)に示す。セルは厚さ5 mmの2枚のアクリル板を用い、1 mmの空隙をスペーサにより確保したものを用いた。セルの一端に注入口(ルアーフィッティング VPRF206、アイシス)を設け、内径2.5 mm、外径4 mm、長さ570 mmのナイロンチューブ(日本ピスコ)を接続し、もう一端をシリジポンプ(CXF1010、株式会社アイシス)に接続することで溶液を注入した。

試料としては、ポリアクリル酸ナトリウムからなる50%粒子径350  $\mu\text{m}$ で真球凝集状のゲル粒子(アクアキープ SA60S、住友精化)を用いた。塩化ナトリウムは富士フィルム和光純薬より購入した。注入溶液には塩化ナトリウム水溶液を25 °Cで質量ペーセント濃度 $C$ とし、パラメータとして制御した。

本研究で用いたゲル粒子はポリアクリル酸ナトリウムからなり荷電基を持つ。そのため、高分子鎖上の荷電基間の静電反発により高い膨潤能力を示す[7]。この膨潤能力は、添加する水溶液のイオン濃度によって変化し、高イオン濃度では静電反発が抑制される影響で低下する。本研究では塩化ナトリウム水溶液を用いることで、ゲル粒子の膨潤率および膨潤速度を変化させた。ゲル粒子は乾燥時には真球凝集状で

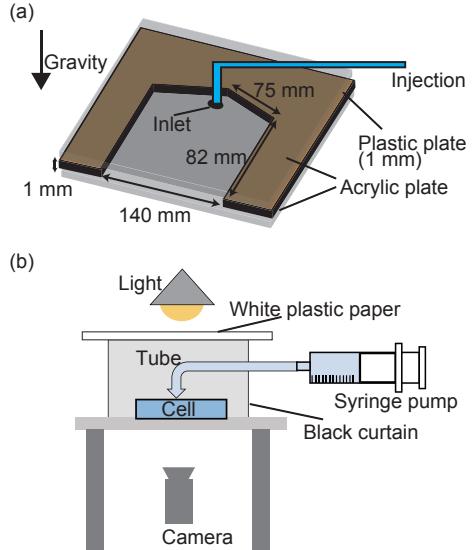


図1: 実験系の模式図。(a) 実験を行ったアクリル製のセル。1 mm の空隙をもつセル中にゲル粒子を上方の開口部より導入した。その後。もう一方の閉口された一端より溶液を注入した。(b) 観察時の実験設定。注入口からナイロンチューブでつなぎシリジポンプによって定速で液体を注入した。この際上方より光を当て、ゲル粒子と液体の振る舞いを下方より CMOS カメラで撮影した。

あるが、塩化ナトリウム水溶液により膨潤すると柔らかくなり系の空隙をみたすように変形する。

本実験では粉体ベッドをセル中に作成した。セルを開口部が上部になるように垂直に立て開口部よりゲル粒子を導入した。この際、ゲル粒子は摩擦や静電気により壁面に吸着するため、壁面の静電気除去を行った後、10回程度タッピングすることでゲル粒子を落下させ下部に充填した。以上のプロセスをセル中にゲル粒子が満たされるまで繰り返し粉体ベッドを作成した。注入口の内径は2.5 mmであり、この小さな流路の付近でゲル粒子が膨潤し流路閉塞が生じると溶液の注入に必要な圧力が著しく大きくなり、注入が困難になる。このため、液体注入を実現するために注入口付近には0.4 mmのガラスピーブを0.15 g程度ゲル粒子の代わりに設置している。ゲル粒子は11 g程度セルに導入した。

以上の手順でゲル粒子を封入したセルを水平に設置し、図1(b)に示す実験設定で注入溶液をシリジポンプにて等速で注入した。注入速度 $I$ はパラメータとし制御した。注入時のゲル粒子及び流体の振る舞いをCMOSカメラにより撮影した。

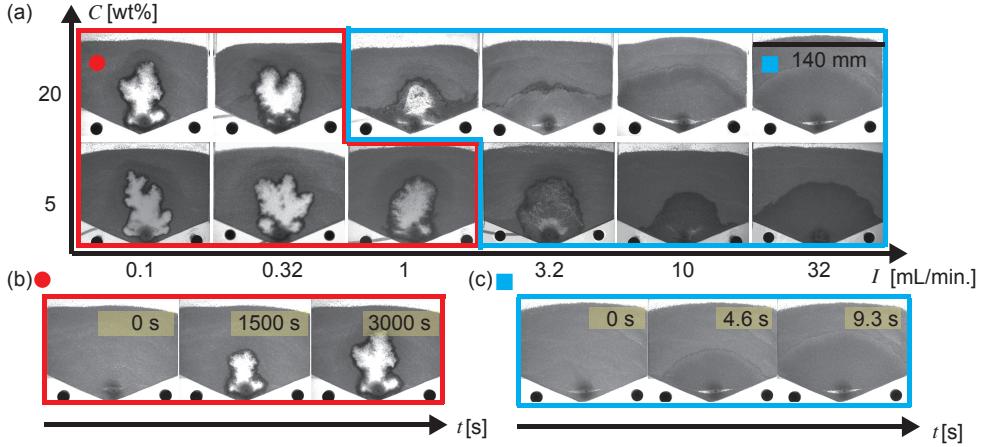


図 2: (a) 界面様相の注入速度  $I$  及び、濃度  $C$  依存性 (注入溶液が 5 mL 注入された時点の様子). スケールバー : 140 mm . (b)  $I = 0.1 \text{ mL}/\text{min}.$ ,  $C = 20 \text{ wt}\%$  (c)  $I = 32 \text{ mL}/\text{min}.$ ,  $C = 20 \text{ wt}\%$  の界面進展の様相を示す. 高速度の注入では等方的に流体が流れ、低速度注入では等方性が破れた. 注入速度  $I$  が大きい場合、注入溶液が等方的に広がる様子が観察された. 一方、注入速度  $I$  が小さい場合、注入先端で指型構造が観察された.

### 3 結果および考察

典型的な実験結果を図 2 に示す. この図は 5 mL の注入溶液がセル中に導入された際の様子を示している. 注入溶液の到達していない領域では明るい影の領域として観察される. 注入速度  $I$  が大きい場合粒子の膨潤が顕著に見られず、注入溶液が到達し暗い影になった領域が等方的に広がる様子が観察された. 一方、注入速度  $I$  が小さい領域では注入先端部分は注入溶液の進行に伴い暗い影の領域として観察され、より内側の部分では光を透過する透明な領域が観察された. また、この透明な領域が観察される際には、等方的な注入先端の進展は阻害され、非等方的な指型構造が観察された.

以上の注入様相の詳細を明らかにするため、注入実験時に溶液進展領域の一部を拡大して観察した. この観察結果を、図 3 に示す. 図 3(a,b) はそれぞれ指型構造、等方進展が観察された際の溶液注入先端の様子に相当している. 図 3(a-1,b-1) に示すように、注入溶液が画像内の領域に侵入し始めた直後の画像で、未膨潤のゲル粒子の中から 6 つのゲル粒子を選択し (1 ~ 6) 追跡した. 注入溶液が撮影箇所を通過した画像が図 3(a-2,b-2) であり、各々溶液侵入直後の画像から 44 秒、10 秒後の様子を示している.

図 3(a) は、指型構造が観察される注入速度での透明な領域と暗い影の領域の境界に相当する. 透明な領域内にはゲル粒子が流される様子も観察され、この領域内のゲル粒子は概ね十分に膨潤しきった状態であると考えられる. 暗い影として観察された部分

は膨潤によりゲル粒子が流路を閉塞しているように見られる. このことから、指型構造の先端では、流路を閉塞している膨潤したゲル粒子を、流体および流体に分散した完全に膨潤したゲル粒子が押しのけて進展していると考えられる.

等方的な注入溶液の進展が観察された様子を拡大観察したものは図 3(b) となる. 全体の観察時 (図 2(c)) とは異なり、溶液通過により粒子近傍が明るくなる様子が観察された. また粉体の隙間を注入液体が浸透していく際、粒子はほとんど移動していなかった. これにより、等方的な溶液先端の進展が見られるには、注入液体が粒子の膨潤による流路閉塞に邪魔されることなく粒子の隙間を浸透することが必要であることが分かる.

以上の議論よりこれらの注入パターンの遷移を理解する上では、粒子の膨潤速度と注入速度の比が重要となることが示唆される. この議論を定量的に行うため、塩化ナトリウム水溶液によるゲル粒子の膨潤速度を光学顕微鏡による直接観察により測定した. この測定結果を図 4 に示す.  $l/l_0 = 2.5$  程度までの領域についてはいずれの濃度でも線形で膨潤することが観察され、この領域で線形近似を行った. この結果から、粉体の膨潤時間スケールとして粉体がセルの空隙程度 (1 mm) まで膨らむのに必要な時間  $t_s$  をそれぞれ 13 s ( $C = 0 \text{ wt}\%$ ), 96 s ( $C = 5 \text{ wt}\%$ ), 236 s ( $C = 20 \text{ wt}\%$ ) と得た.

こうして得られたゲル粒子の膨潤速度により決まる特徴的時間  $t_s$  に対して、流動の特徴的時間スケー

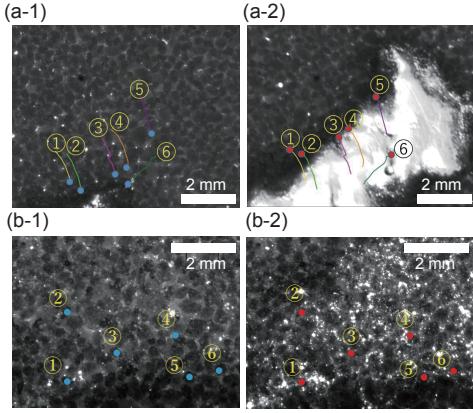


図3: 溶液進展様相の拡大図. (a)  $I = 0.1 \text{ mL/min.}$ ,  $C = 0 \text{ wt\%}$  (b)  $I = 3.2 \text{ mL/min.}$ ,  $C = 20 \text{ wt\%}$ に  
対応する. スケールバー: 2 mm. (a-1,b-1) は注入溶液が画像内の領域に侵入し始めた直後に相当する.  
青点で示した位置にある粒子を1から6と付番した.  
(a-2,b-2) は注入溶液通過後に相当する. それぞれ侵  
入直後の画像から, 44秒, 10秒後である. 赤点で  
示した位置にある粒子1から6は(a-1,b-1)で示  
した同じ番号の粒子と対応し, 線は各粒子の軌跡である.

ル  $t_i$  は, 実験終了までの注入量  $Q_t = 5 \text{ mL}$  と注入速  
度  $I$  を用いて,  $t_i = Q_t/I$  と表すことが出来る. 膨  
潤速度と流動速度の特徴的時間スケールの比による  
無次元量  $\alpha = t_s/t_i$  を導入すると, パターン遷移様  
相との強い相関が見られ,  $\alpha$  が1程度でパターンの  
遷移が見られることが分かった.  $\alpha$  が大きい場合は,  
等方的な界面進展が発生する一方で,  $\alpha$  が小さい場  
合は指型の非等方的な界面の進展が見られた. これ  
は, 粒子が膨潤することで流路の閉塞が起こった事  
が要因であると考えられる.

## 4 まとめ

本研究では, 透水性の時間・空間変化に伴う注入様  
相の変化を観察する擬2次元セルからなる実験系を  
構築した. 特に高膨潤性ゲル粒子かならる粉体ベッ  
ドに着目し, 注入溶液の塩濃度を変化させることで  
注入速度に加えて膨潤速度をパラメータとして注入  
実験を行った. 通常, こうした擬2次元セル中のパ  
ターンは, 高流量の際に不安定化が生じるが[1, 2],  
本系では注入速度が小さいと等方的な注入先端が不  
安定化した. この不安定化は, 膨潤性ゲル粒子の膨  
潤速度が起因となって生じていると考えられ, 注入  
速度と膨潤速度で定まる時間スケールの比  $\alpha$  により  
支配されると示された.

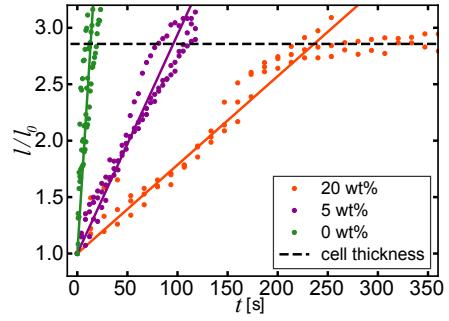


図4: ゲル粒子の直径  $l$  の  $t$  依存性. 膨潤前の直径  $l_0$   
を基準として,  $l/l_0$  の時間依存性を  $C = 0, 5, 20 \text{ wt\%}$   
に対して示した. それぞれの濃度に対して異なる  
3つの粒子に対して測定を行った. これらの結果に  
対して  $l/l_0 = 2.5$  となる領域で線形近似を用い, 無  
次元化したセルの空隙長  $l/l_0 \sim 2.9$  に膨潤するまで  
の時間  $t_s$  をそれぞれ 13 s ( $C = 0 \text{ wt\%}$ ), 96 s ( $C = 5 \text{ wt\%}$ ), 236 s ( $C = 20 \text{ wt\%}$ ) として得た.

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 16H06478, 21H01004,  
21H00409, 21J13720, 及びホソカワ粉体工学振興  
財団の支援を受けた.

## 参考文献

- [1] J. Nittmann, G. Daccord, H. E. Stanley *Nature*, **314**, 141-144 (1985).
- [2] Ø. Johnsen, R. Toussaint, K. J. Måløy, and E. G. Flekkøy, *Phys. Rev. E*, **74**, 011301 (2006).
- [3] D. M. Saffer, and H. J. Tobin, *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, **39**, 157-186 (2011).
- [4] T. Hirata, *Phys. Rev. E*, **57**, 1772-1779 (1998).
- [5] W. Ellsworth, *Science*, **341**, 1225942 (2013).
- [6] P. Audet, and R. Bürgmann, *Nature*, **510**, 389-392 (2005).
- [7] T. Tanaka, D. Fillmore, S.-T. Sun, I. Nishio,  
G. Swislow, and A. Shah, *Phys. Rev. E*, **45**,  
1636-1639 (1990).

# 濡れた粉体の履歴に依存したレオロジー特性

吉井究, 大槻道夫

大阪大学 基礎工学研究科 機能創成専攻

## 概要

摩擦のある濡れた粉体のレオロジー特性を離散要素法により調べた。せん断応力が非常に小さい低せん断速度の状態からせん断速度を段階的に上げると、せん断応力が急激に大きくなるシアシックニングが観測された。さらに、その応力が大きい状態からせん断速度を段階的に下げると、せん断速度0の極限においても有限の大きさのせん断応力が残る履歴に依存した応力変化が発生することを確認した。また、その状態変化が接触点数の変化と対応することを発見した。

## History-dependent rheological property of wet granular materials

Kiwamu Yoshii, Michio Otsuki

Department of Mechanical Science and Bioengineering,  
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

## Abstract

We numerically investigate the rheological property of wet granular materials. As the shear rate sequentially increases, the granular materials exhibit shear thickening, where the shear stress abruptly increases. As the shear rate sequentially decreases from the high shear rate state, the rheological property shows a hysteresis, where the shear stress remains even in the limit of  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ . It is also shown that the history-dependent shear stress corresponds to the change in the coordination number.

## 1 はじめに

粉や砂のような巨視的なサイズの粒子の集合体である粉体は、粒子の密度が閾値より高いと、剛性を有し固体的に振る舞う一方、その閾値より低い場合は剛性を示さず流体的に振る舞う。この力学的特性の変化はジャミング転移と呼ばれ、近年盛んに研究されている[1, 2]。特に、粒子間に接触による反発相互作用だけが働く乾いた粉体系の転移点近傍の振る舞いについては、多くのことが明らかになっている。例えば、粒子間摩擦がない場合、ジャミング密度より低い密度では、せん断応力 $\sigma_{xy}$ がせん断速度 $\dot{\gamma}$ の2乗に比例する流体的なバクノルド則が成立する[3]。一方、ジャミング密度より高密度の場合は、 $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ の極限においても有限のせん断応力が残る

固体的な振る舞いが発現する[4]。また、粒子間摩擦がある粉体系では低密度状態において、あるせん断速度でせん断応力が急激にジャンプする不連続シアシックニングが発生する[5, 6]。

ところが、現実の粉体は濡れを伴う場合が多く、そのような系で乾いた粉体の挙動がそのまま観測されるかは不明である。実際、粉体は少量の水を加えるだけで、応力ひずみ曲線などのレオロジー特性が大きく変化することが知られている[7]。これは粒子間に入り込んだ液体が表面張力によって架橋を形成し、実行的な引力相互作用を与えることに起因する[8, 9]。この引力は液体架橋が切れると、粒子同士が再び接触するまでは再び働かないという履歴依存性を示す。従来の濡れた粉体の研究では、そのような履歴効果がレオロジー特性にどのような影響を与える

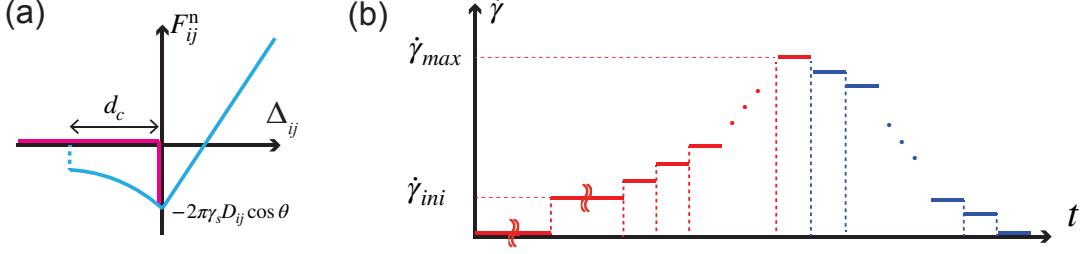


図 1: (a) 法線方向の相互作用力  $F_{ij}^n$ . 初め粒子同士が接触しておらず液体架橋がない場合、引力は働くかない(薄紅線). 粒子同士が接触すると液体架橋の形成によって引力が働き、粒子間距離が架橋が切れる距離  $d_c$  を超えて粒子が離れるまでは引力が働く(青線). (b) せん断の与え方のプロトコル.  $\dot{\gamma} = 0$  の静止状態から、せん断速度  $\dot{\gamma}_{ini}$  で十分歪みを加えた後、段階的にせん断速度を増加させる.  $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{max}$  に達した後、今度は段階的にせん断速度を  $\dot{\gamma} = 0$  まで下げる.

るかはほとんど調べられていない.

そこで、濡れた粉体のレオロジー特性を調べるために、濡れによる引力を取り入れた粒子シミュレーションを実施した. 具体的には、一定体積容器中に封入した粉体にせん断を加え、せん断速度を段階的に変化させた際の履歴に依存した力学的応答を調べた.

## 2 設定

本研究では、 $N$  個の濡れた摩擦のある 3 次元粉体粒子の離散要素法によるシミュレーションを行った [10]. 長さ  $L$  の立方体に充填率  $\phi$  で、直径  $1.0d_0$  と  $1.4d_0$  の粒子を 1:1 の比率で封入した. 各々の粒子の質量密度は一定とした.

粒子  $i, j$  間の法線方向の力  $F_{ij}^{n,tot}$  は、反発力  $F_{ij}^n$  と濡れによる引力  $F_{ij}^{cap}$  によって  $F_{ij}^{n,tot} = F_{ij}^n + F_{ij}^{cap}$  で与えられる.  $F_{ij}^n$  は弾性の寄与  $F_{ij}^{n,el} = k_n \Delta_{ij}$  と粘性の寄与  $F_{ij}^{n,diss} = -\eta_n (\mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ij})$  によって  $F_{ij}^n = (F_{ij}^{n,el} + F_{ij}^{n,diss}) \Theta(\Delta_{ij})$  で表される. ここで、法線方向の弾性定数を  $k_n$ 、粘性係数を  $\eta_n$  として、 $\Delta_{ij} = d_{ij} - r_{ij}$ ,  $d_{ij} \equiv (d_i + d_j)/2$ ,  $v_{ij} \equiv (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \cdot \mathbf{n}_{ij}$ ,  $\mathbf{n}_{ij} = \mathbf{r}_{ij}/|\mathbf{r}_{ij}|$ ,  $r_{ij} \equiv |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$ ,  $r_{ij} = |\mathbf{r}_{ij}|$  とした.  $d_i$ ,  $\mathbf{r}_i$ ,  $\mathbf{v}_i$  は粒子  $i$  の直径、位置、速度である.  $\Theta(x)$  は、ヘヴィサイドの階段関数であり、 $x \geq 0$  では  $\Theta(x) = 1$ 、それ以外では  $\Theta(x) = 0$  の値をとる. 液体架橋が形成されている場合の濡れによる引力  $F_{ij}^{cap}$  は

$$F_{ij}^{cap} = \begin{cases} -2\pi\gamma_s D_{ij} \cos\theta & (\Delta_{ij} \geq 0), \\ \frac{-2\pi\gamma_s D_{ij} \cos\theta}{1 + 1.05\hat{s}_{ij} + 2.5\hat{s}_{ij}^2} & (-d_c \leq \Delta_{ij} < 0), \\ 0 & (\Delta_{ij} > -d_c) \end{cases} \quad (1)$$

と表される [11]. ここで  $D_{ij} = 2d_i d_j / (d_i + d_j)$ ,  $\hat{s}_{ij} = s_{ij} \sqrt{D_{ij}/V_b}$ ,  $s_{ij} = -\Delta_{ij}$  とした. また  $\theta$  は液体架橋と粒子表面との接触角、 $\gamma_s$  は表面張力係数、 $d_c$  は液体架橋の切れる距離、 $V_b$  は粒子間に含まれている水分量とした. 粒子同士が十分に離れて接触していない時は、粒子間に液体架橋が形成されず  $F_{ij}^{cap} = 0$  とする. その状態から粒子間距離が狭まり、 $\Delta_{ij} > 0$  となって粒子同士が接触すると液体が粒子間に架橋を形成し、 $\Delta_{ij} < -d_c$  となって架橋が再び切れるまで  $F_{ij}^{cap}$  は式 (1) で与えられる. 図 1(a) に  $F_{ij}^n$  の振る舞いを示した. また、接線方向の摩擦力  $F_{ij}^t$  は、 $F_{ij}^t = \min(|\tilde{\mathbf{F}}_{ij}^t|, \mu F_{ij}^{n,tot}) \Theta(\Delta_{ij})$  で与えられる. ここで、 $\tilde{\mathbf{F}}_{ij}^t$  は、 $\tilde{\mathbf{F}}_{ij}^t = k_t \xi_{ij} - \eta_t \mathbf{v}_{ij}^t$  とした.  $\mu$  は粒子間の摩擦係数である.  $k_t$  は接線方向の弾性定数、 $\eta_t$  は接線方向の粘性係数である. 接線方向の変位  $\xi_{ij}$  は、接線方向の速度差  $\mathbf{v}_{ij}^t = \mathbf{v}_{ij} - \mathbf{n}_{ij}(\mathbf{n}_{ij} \cdot \mathbf{v}_{ij}) - 1/2(d_i \omega_i + d_j \omega_j) \times \mathbf{n}_{ij}$  を用いて、 $\xi_{ij}(t) = \int \mathbf{v}_{ij}^t(t') dt'$  で与えられる. この積分は  $|\tilde{\mathbf{F}}_{ij}^t| < \mu F_{ij}^{n,tot}$  が満たされている間実行される.  $\omega_i$  は粒子  $i$  の角速度ベクトルである. また、各々の時間ステップで  $\xi_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ij} = 0$  を満たすために、 $\xi_{ij}(t) - (\xi_{ij}(t) \cdot \mathbf{n}_{ij}) \mathbf{n}_{ij} \rightarrow \xi_{ij}(t)$  と更新した [10]. したがって、粒子  $i$  の運動方程式は

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i} (F_{ij}^{n,tot} \mathbf{n}_{ij} + F_{ij}^t \mathbf{t}_{ij}) \quad (2)$$

と書ける. ここで  $m_i$  は粒子の質量である. また接線方向ベクトルは  $\mathbf{t}_{ij} = \tilde{\mathbf{F}}_{ij}^t / |\tilde{\mathbf{F}}_{ij}^t|$  とした.

初期状態として、目標の充填率  $\phi$  より低い充填率  $\phi_{ini} = 0.40$  のランダムな粒子配置を用意した. その後、系の充填率を  $\Delta\phi$  ずつ段階的に増加させ、各段階で力学的に安定な状態に緩和させ、目標の充填率  $\phi = 0.48$  まで系を圧縮する. ここで粉体温度を  $T \equiv (\sum_i m_i |\mathbf{v}_i|^2 / 2) / N$  として、 $T < T_{th}$  を満たしたとき

を力学的安定状態と定義した。また、 $\Delta\phi = 0.00005$ ,  $T_{\text{th}} = 10^{-8}k_nd_0^2$ とした。Lees–Edwards 境界条件と SLLOD 法を用いることで、 $xy$  平面にせん断速度  $\dot{\gamma}$  で特徴づけられる一様せん断状態を実現する [12]。今回は履歴依存性を調べるためにせん断速度を図 1(b) に示すように段階的に変化させる。はじめ、 $\dot{\gamma} = 0$  の静止状態からせん断速度  $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{\text{ini}}$  として十分なせん断歪みを加え、その後、段階的にせん断速度を増加させる。 $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{\text{max}}$  に達した後、今度は段階的にせん断速度を  $\dot{\gamma} = 0$  まで下げる。この各々の過程をそれぞれ UP と DOWN と呼ぶ。各々のせん断速度で、せん断ひずみ  $\gamma$  は  $\gamma \simeq 10$  程度加えており、物理量の計測には後半の  $\gamma \geq 7$  のデータを用いた。粒子数  $N = 1000$ 、摩擦係数  $\mu = 1.0$  として、 $k_t = (2/7)k_n$ ,  $\eta_t = (2/7)\eta_n\sqrt{mk_n}$ ,  $\theta = \pi/9$ ,  $\gamma_s = 3.0 \times 10^{-2}/k_n$ ,  $d_c = 5.0 \times 10^{-6}d_0$ ,  $\dot{\gamma}_{\text{ini}} = 1.0 \times 10^{-6}(m/k_n)^{1/2}$ ,  $\dot{\gamma}_{\text{max}} = 4.47 \times 10^{-5}(m/k_n)^{1/2}$  と設定した。粒子の時間発展は、位置を速度アダムス・モルトン法の 2 段法、速度をアダムス・バッシュュホース法の 2 段法を用い、時間刻みは  $\Delta t = 0.005(m/k_n)^{1/2}$  を用い計算した。

### 3 結果

#### 3.1 せん断応力の履歴依存性

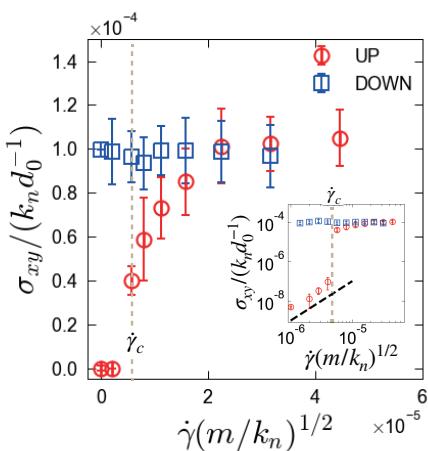


図 2: せん断応力  $\sigma_{xy}$  の  $\phi = 0.48$  における  $\dot{\gamma}$  依存性。赤のシンボルは UP、青のシンボルは DOWN のプロセスに各々対応する。せん断応力が急に増大する閾値  $\dot{\gamma}_c$  を点線で示す。内挿図は、両対数プロットでの振る舞いを示す。また破線は  $\dot{\gamma}^2$  の傾きを表す。

図 2 に、 $\phi = 0.48$  におけるせん断応力  $\sigma_{xy}$  のせん

断速度  $\dot{\gamma}$  依存性を示した。 $\phi$  の値は、せん断を加える前の濡れた粉体系で剛性が発生するジャミング転移点  $\phi_c \simeq 0.52$  より低く設定している。また、せん断応力  $\sigma_{xy}$  は以下の式

$$\sigma_{xy} = -\frac{1}{L^3} \sum_i \sum_{i < j} (r_{ij,x} F_{ij,y} + r_{ij,y} F_{ij,x}) \quad (3)$$

から求めた [13]。ただし、 $F_{ij} = F_{ij}^{\text{n,tot}} n_{ij} + F_{ij}^t t_{ij}$  とした。UP の過程で  $\dot{\gamma}$  が低い領域においては、せん断応力  $\sigma_{xy}$  が  $\dot{\gamma}^2$  に比例する流体的なバグノルド則が観測される。しかし、せん断速度を上げていくと、ある閾値  $\dot{\gamma}_c$  で応力が急激に増大し、その後、せん断速度を上げてもせん断応力はほとんど変化しないことが確認された。また、せん断速度をさらに上げ、 $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{\text{max}}$  に達した後、せん断速度を  $\dot{\gamma} = 0$  まで段階的に下げる DOWN の過程では  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  においても有限のせん断応力が残ることが確認された。この結果、同じせん断速度でも UP と DOWN の過程で応力が大きく異なる履歴依存性がみられる。乾いた摩擦のある粉体系でも類似の履歴依存性がみられるが、 $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  の極限ではせん断応力の残らない流体的な領域に戻るという点で、今回の濡れた粉体系での結果とは大きく異なる [6]。

#### 3.2 接触点数と応力鎖

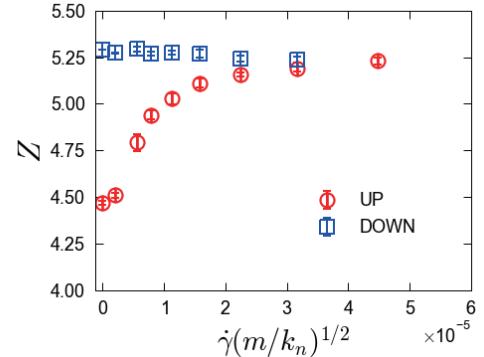


図 3: 接触点数  $Z$  のせん断速度  $\dot{\gamma}$  依存性。赤のシンボルは UP、青のシンボルは DOWN のプロセスに各々対応する。

図 3 の履歴依存性から、せん断によって系の構造も変化したと予想し、構造を反映する粒子の接触点数の変化を調べた。図 3 に  $\phi = 0.48$  における接触点数  $Z$  のせん断速度依存性を示す。接触点数は、 $\Delta_{ij} \geq -d_c$  かつ液体架橋が存在している粒子ペアを接触点とし

求めた。UP の過程において接触点数  $Z$  は増加し、その変化はせん断応力  $\sigma_{xy}$  の増加に対応しているように見える。また、DOWN の過程においては、一度増加した接触点数が  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  においても高せん断速度での接触点数と同程度に保たれている。この結果から、せん断によって誘起された構造変化が、せん断速度を下げていっても粒子間引力によって保持され、その結果  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  においてもせん断応力が残ると推察出来る。また、充填率を濡れた粉体系でのジャミング転移点  $\phi_c \simeq 0.52$  より低く設定したが、接触点数は理論的に剛性が発生するとされる下限値  $Z_{\text{iso}} = 4$  よりも大きい値を示す [2]。この結果は、引力の働く粒子系の先行研究と定性的に一致する [14, 15]。

同様に、構造の変化をみるため、図 4 に UP(a) と DOWN(b) のプロセスにおけるせん断速度  $\dot{\gamma} = 0$  での粒子配置と応力鎖の構造を示す。ここでは応力鎖として、接触粒子間の力の大きさに応じた色の線を接触粒子間に引いている。どちらの場合でも粒子の接触はあるものの、せん断を加える前後で、粒子間力の大きさが変化することがわかる。

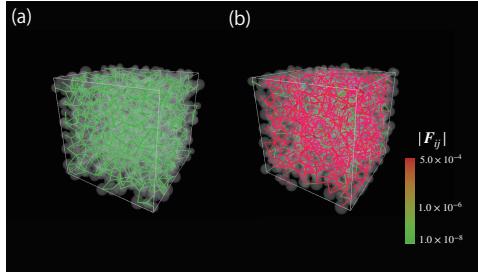


図 4:  $\phi = 0.48$  における粒子配置と応力鎖。(a) UP のプロセス中と (b) DOWN のプロセス中の  $\dot{\gamma} = 0$  の結果を示す。応力鎖の色が粒子間の力の大きさを表す。

## 4 まとめ

本研究では、摩擦のある濡れた粉体系におけるせん断応力の履歴依存性を示した。せん断速度を段階的に上げることで誘起された粒子間接触の変化が、せん断速度を下げた後も粒子間引力によって保持され、それに対応して  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  の極限において有限のせん断応力が残ることを示した。この結果は、濡れた粉体系の履歴依存性を系統的に理解するのに有効なプロトコルを提案した事を意味する。今後は、充填率の依存性や、せん断に誘起される構造についてより詳細を明らかにする必要がある。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K03670, 21H01006, 21J13720 及びホソカワ粉体工学振興財団の支援を受けた。また、本研究を行うにあたり京都大学基礎物理学研究所の計算機システムを利用した。

## 参考文献

- [1] A. J. Liu, and S. R. Nagel, *Nature* **396**, 21 (1998).
- [2] M. van Hecke, *J. Phys.: Condens. Matter* **22**, 033101 (2009).
- [3] N. Mitarai, and H. Nakanishi, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 128001 (2005).
- [4] T. Hatano, M. Otsuki, and S. Sasa, *J. Phys. Soc. Jpn.* **76**, 023001 (2007).
- [5] M. Grob, C. Heussinger, and A. Zippelius, *Phys. Rev. E* **89**, 050201 (2014).
- [6] M. Otsuki and H. Hayakawa, *Phys. Rev. E* **83**, 051301, (2011).
- [7] S. Herminghaus, *Wet granular matter: a truly complex fluid.* (World Scientific, Vol. 6. 2013).
- [8] G. Lian, C. Thornton, and M. J Adams, *J. Colloid Interface Sci.* **161**, 138, (1993).
- [9] C. D Willett, M. J Adams, S. A Johnson, and J. PK Seville, *Langmuir* **16**, 9396, (2000).
- [10] S. Luding, *Granular matter* **10**, 235, (2008).
- [11] S. Roy, S. Luding, and T. Weinhart, *Phys. Rev. E* **98**, 052906, (2018).
- [12] D.J Evans and G.P Morriss, *Statistical Mechanics of Nonequilibrium Liquids* 2nd ed. (Cambridge University Press, 2008).
- [13] M. Doi, and S.F. Edwards, *The Theory of Polymer Dynamics* (Oxford University Press, 1986).
- [14] E. Irani, P. Chaudhuri, and C. Heussinger, *Phys. Rev. E* **94**, 052608, (2016).
- [15] W. Zheng, H. Liu, and N. Xu, *Phys. Rev. E* **94**, 062608 (2016).

# Short-cut を動的に繋ぎ替える Small-world における 最終感染者サイズへの影響とその評価

猪毛尾 賢亮<sup>1</sup>, 内海 忍<sup>2</sup>, 立川 雄一<sup>2</sup>, 谷本 潤<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>九州大学 工学部 エネルギー科学科

<sup>2</sup>九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻

<sup>3</sup>九州大学大学院 総合理工学研究院 環境理工学部門

## 概要

Multi-Agent Simulation (MAS) を用いて感染症の拡大を評価していく場合、従来のシミュレーションでは、ある一つの固定されたネットワーク上で行うことが一般的である。しかしながら現実の世界を考えると、人々は毎日同じ人に会っているわけではなく、日によって関わる人間も様々である。それを実現するために、本稿では Small-World (SW) ネットワーク上で、一日ごとに short-cut リンクを切り替えながら感染症の伝搬を評価した。その結果、固定 short-cut リンク SW 上に比して、最終感染者サイズ、ピーク感染者サイズともに増加し、その差異は平均次数と short-cut 確率に依存することを明らかにした。また、その機構の詳細は、繋ぎ替えにより、感染拡大をもたらす I-S リンクがリフレッシュされるイベントによることを明らかにした。

## Quantification of final epidemic size on a Small-world network with time-varying its short-cut links

Kensuke Ikeo<sup>1</sup>, Shinobu Utsumi<sup>2</sup>, Yuichi Tatsukawa<sup>2</sup>, Jun Tanimoto<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Undergraduate School of Engineering, Kyushu University

<sup>2</sup> Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

<sup>3</sup> Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

## Abstract

Multi Agent Simulation; MAS, applied for epidemic spreading on a complex human network, usually premises a time-constant underlying network, although a human physical contact complexly time-varies in daily basis as the reality. We analyze a disease spreading obeying to SIR process on Small-world (SW) network of which short-cut links daily change. Our MAS result reveals that the Final Epidemic Size; FES, and peak epidemic size increase by presuming such a daily dynamic SW vis-à-vis the conventional SW, which depends on both short-cut probability and average degree. Which is brought by the mechanism that the daily dynamic SW refreshes I-S links working as a trigger to spread a disease, which makes containment difficult in a time-evolutionary process.

## 1.緒言

現在世界で爆発的な感染拡大を見せている COVID-19. ワクチン開発が進み、日本では約 7 割が接種を終え、感染も落ち着いてきた。だが、飲食業界や旅行産業に既に甚大な被害が

及んでいる。主な感染経路としては、家庭内や職場内などで生じる高密度な物理接触が媒介するケースの発生が挙げられる。加えて、「自粛」や「非常事態宣言」である程度の社会的

介入制御ができたとしても完全には禁じ得ない遠方への移動が、遠隔地への飛び火感染を惹起することが無視できない。

本論では Multi-Agent Simulation(以下 MAS)を SIR プロセスに適用し、複雑社会ネットワーク上での物理接触を模擬した解析により、この遠方への移動イベントによる感染動特性への影響を評価する。次数分布の scale-free 性と並んで人間社会システムの複雑ネットワークの大きな特徴である small-world (SW) 性に注目し、本論では 2 次元ラチスベースの SW を取り上げる。具体的には、ある short-cut 確率のもとで生成した SW グラフを、1 日ごとにそのランダム short-cut を繋ぎ替えることで、上記の現実世界における遠方への移動を模擬する。この short-cut の繋ぎ替えが、感染者サイズに及ぼす影響を系統的な数値実験により考察する。

## 2.モデル

### 2.1 Small-world ネットワーク

2 次元ラチスを基盤に、Watts & Strogatz による WS-SW モデル[1]に従い、平均次数、short-cut 確率を変えながら、粒子数  $10^4$  の SW を生成した。

### 2.2 感染症モデル

感染症伝搬におけるモデルは Kermack と McKendrick[2]による SIR モデルに依るとした。ここで S は感受性をもったエージェント、I は感染し他にウイルスを移し得るエージェント、R は感染し回復したことで完全免疫を獲得したエージェントである。季節性インフルエンザに則って基本再生産数  $R_0 = 2.5$ 、I から R への遷移確率は  $\gamma = 1/3[\text{day}^{-1}]$ とした。S から I への遷移確率  $\beta$  はそれぞれのリンクに対して  $\beta_{\text{eq}}$ [3]を定義する。

$$\beta_{\text{eq}} = \frac{R_0 \cdot \gamma}{\langle k \rangle} [\text{day}^{-1} \cdot \text{person}^{-1} \cdot \text{link}^{-1}]$$

### 2.3 時間の概念

MAS を用いる上で状態遷移を決める方法と

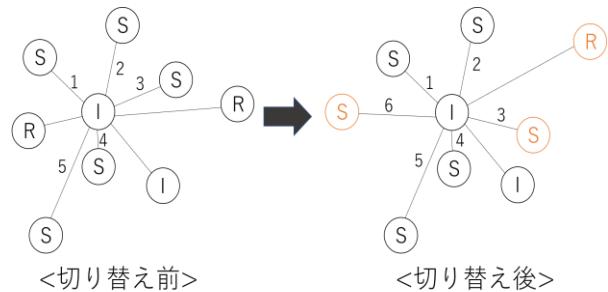
して Gillespie 法[4]を適用する。これによって 1 時間ステップごとに 1 人のエージェントが確率的に状態遷移を行う。ここでエージェント  $S_i$  の遷移確率はそのエージェントの隣人の感染者数  $NI(i)$  を用いて、 $p_i(t) = \beta \times NI(i)$  で表され、エージェント  $I_i$  の遷移確率は  $p_i(t) = \gamma$  で表されるので、遷移確率の総和を  $\lambda(t)$  とすると、 $\lambda(t) = \sum_i p_i(t)$  となる。Gillespie 法における時間は、感染の成長状況により不等間隔となり、1 時間ステップの時間変化  $\Delta t$  は

$$\Delta t = \frac{-\ln(1-u)}{\lambda(t)}$$

となる。 $u$  は  $0 \leq u < 1$  の一様乱数である。 $\Delta t$  を加算していくことで、24 時間ずなわち日の切り替わりを検出する。

### 2.4 Dynamic Small-world

本研究では、short-cut 確率で規定される SW のランダム short-cut リンクを 1 日ごとに切り替えるトポロジーを導入する。具体的には、初めに各々のトポロジーに対して 100 種類のネットワークを用意し、1 日が経過する度にその中からランダムに次のネットワークを選択しながら感染症を進めていった。本論では、これを Dynamic Small-world と呼ぶことにする。Fig.1 に Dynamic Small-world の特性を模式的に示している。パネルは Gillespie 法により、あるノード(図の範囲にはない)が(例えば) S から I に推移した状況前後、かつ、ちょ



**Fig.1** ネットワーク切り替え前後の感染し得る経路の数の変化

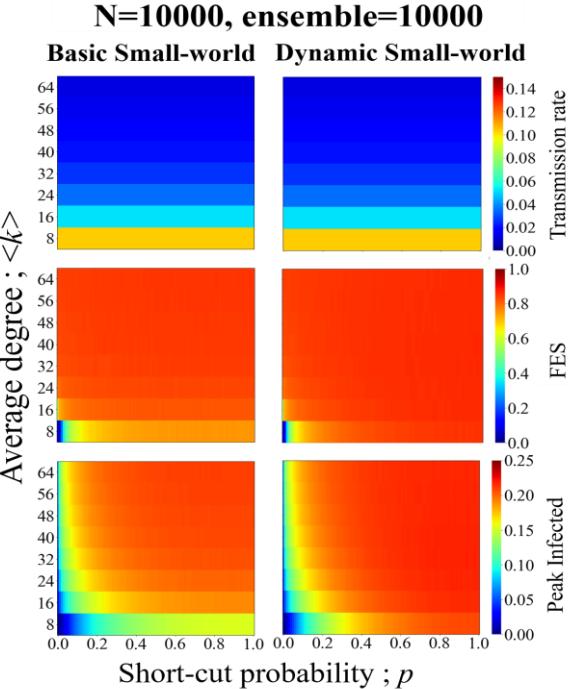
うど 1 日の切れ目で、short-cut リンクが繋ぎ替えられた状況前後を示している。中央の I ノードは、上記の状態推移したノードではない、ネットワーク上の他の場所の I ノードを意味する。この I ノードの short-cut が 3 本リフレッシュされ、切り替え間には I (focal ノード) -R, I-S, I-R リンクであったものが、夫々、I-S, I-R, I-S リンクになっている。 $I-R \Rightarrow I-S$  と  $I-R \Rightarrow I-S$  のリンク変化は、繋ぎ替えにより感染拡大リスクを押し上げる効果、 $I-S \Rightarrow I-R$  は逆に感染リスクを押し下げる効果をもたらす。本論では、これを Dynamic Effect として、押し上げプラス側+1、押し下げマイナス側-1 としてリンク数を数え上げて評価する。再言すると、この Dynamic Effect は Gillespie 法上、1 日の切り替わり時にしか発生しない。また、Dynamic Effect は short-cut を繋ぎ替えない従来の静的 SW ではゼロとなる (Fig.1 で示した範囲ではノードの状態変化は発生しない；後述 Fig.4 左パネル青プロット参照) から、この指標は、移動により感染の遠方拡大リスクを表意していることになる。

### 3.結果及び考察

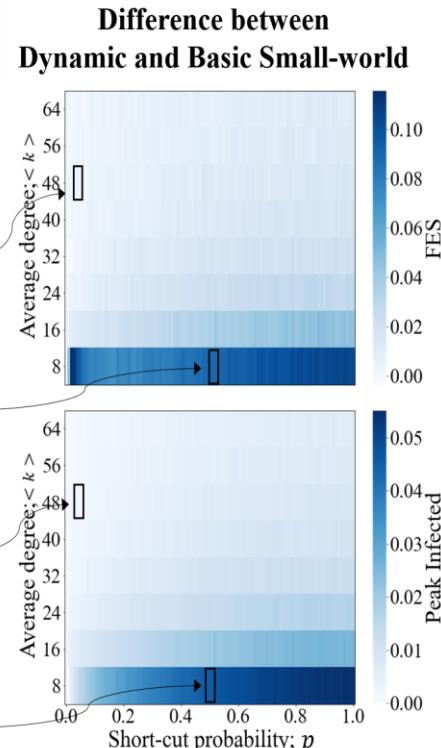
Fig.2 は平均次数 $\langle k \rangle$ と short-cut 確率  $p$ を変化させながら遷移確率  $\beta$ 、最終感染者サイズ (FES)、ピーク感染者サイズを静的 SW (basic SW) と Dynamic SW とで比較している。最上パネルには次数ごとに異なるが  $p$  への感度は持たず、両 SW で同一の値となる  $\beta_{eq}$  を参考のために示している。MAS の統計値はアンサンブル平均  $10^4$ 、既述の通りノード数は  $10^4$  である。初期感染者数 5 としてドメイン上にランダム配置したのちの SIR プロセスを Gillespie 法で追跡している。既報[3]同様、平均次数大ほど、 $p$  大ほど、FES もピーク感染者サイズも大きくなる。静的 SW と dynamic SW でこの傾向自体は同様だが、特に低次数では後者の感染拡大への脆弱性が見える。

Fig.3 は Fig.2 左右パネルの FES とピーク感染者サイズの差画像である。低次数ほど dynamic SW の FES、ピーク感染者サイズが大きくなることが明らかである。また、 $p$  大ほど

同様に dynamic SW の FES、ピーク感染者サイズが大きくなる。但し、FES の次数 8 (数値実

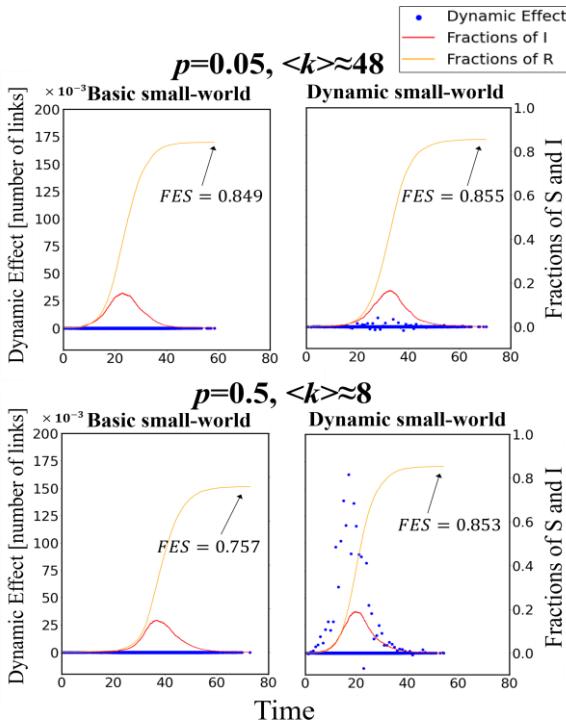


**Fig.2** MAS の結果。左列は通常の Small-world、右列は Dynamic Small-world。上段は使用した  $\beta$  の値。中段は最終感染者サイズ(FES)。下段はピーク感染者サイズ。



**Fig.3** Fig.2 の右列から左列を減じたもの。

験上の最低次数) では  $p$  がゼロに近い領域で中程度の  $p$  より FES は大きくなっている。これは、静的 SW においては、このパラメータ領域では、Disease Free (DF) もしくはそれに近い状態（統計的にはある試行では感染相となるが別の指向では DF となる等）となり得るのに対して、dynamic SW ではランダムリンク繋ぎ替えによりそれらが起き得ずに、 $p$  小の領域にも感染状況悪化が顕れることで DF とはならず感染相となるからである。



**Fig.4** Dynamic Effect(Dynamic Small-world にすることによる影響)。左縦軸は Dynamic Effect, 右縦軸は I と R が全ノードに占める割合をとっています, 横軸は時間をとる。上段は short-cut 確率 0.05 で平均次数 48, 下段は short-cut 確率 0.5 で平均次数 8 についてプロットしている。

さて、Fig.4 は先述した Dynamic Effect を平均次数 48,  $p=0.05$  (上パネル), および平均次数 8,  $p=0.5$  (下パネル) の代表的 1 試行について、その時系列を示した結果である。ただし平均次数による影響を排除するために、それぞれ全リンク数で割って正規化している。図中のラインは I と R の時間発展を併示しており、左パネルは静的 SW を比較のために示している。Dynamic SW の Dynamic Effect がプラス側に触れることが、感染を押し上げている

様子が看取できる。

#### 4.結言

Multi Agent Simulation により、ランダム short-cut を 1 日ごとに切り替える Dynamic Small-world 上の SIR プロセスを解析した。従来の静的 Small-world に対して、Dynamic SW は、現実社会における遠距離移動に依る影響を模擬した系になっている。この繋ぎ替えの効果を定量化するため、I-S リンクが日々リフレッシュされることによって遠方への感染拡大のトリガーになっていることを評価した Dynamic Effect を指標として定義し、低次数、short-cut 確率が大きい領域ほど、最終感染者サイズ、ピーク感染者サイズが押し上げられることを明らかにした。

今後の課題としては、Dynamic Effect の定義を足掛かりに、初期の short-cut 確率を与件として、なるべく初期 short-cut 確率から低下させずに（社会活動を封じる異なく）、時間方向に short-cut 確率をどのように低減制御すれば、感染サイズを効率的に小さくできるのか、その最適制御問題を考察することが考えられる。

#### 謝辞

本研究の一部は科研費（19KK0262, 20H02314, 20K21062）による。また、本研究は九州大学情報基盤研究開発センター研究用計算機システムを利用した。記して謝意を表す。

#### 参考文献

- [1] D. J. Watts, S. H. Strogatz,; Collective dynamics of ‘Small-World’ networks, *Nature*, **393(6684)**, 440–442, 1998.
- [2] Fu, F., Rosenbloom, D. I., Wang, L., Nowak, M. A.; Imitation dynamics of vaccination behaviour on social networks, *Proceedings of the Royal Society B*, **278**, 42–49, 2011.
- [3] 内海忍, 谷本潤; SIRダイナミクスにおける感染率の定義の違いが最終感染者サイズに及ぼす影響, 第26回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム, 2020.
- [4] Gillespie, D. T. J.; Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions, *Journal of physical chemistry*, **81(25)**, 2340–2361, 1977.

# 症候性感染者の隔離・無症候性感染者の存在・発症から隔離までの時間遅れが 感染症伝搬ダイナミクスに与える影響

内海 忍<sup>1</sup>, 谷本 潤<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学 大学院 総合理工学府 総合理工学専攻

<sup>2</sup>九州大学院 総合理工学研究院 環境理工学部門

## 概要

感染症の伝搬ダイナミクスにおいて次の 3 つの要因-i)症候性感染者の隔離 ii)無症候性感染者の存在 iii)発症から隔離に至るまでの時間遅れが及ぼす影響を, Multi Agent Simulation (MAS) により解析した. 1人の Susceptible agent が感染した場合に無症候性となる確率, また, 症候性であった場合に隔離が成功する確率を夫々定義し, 時間遅れについては隔離のプロセスを実行する頻度の操作によって, その再現を試みた. 無症候率, 隔離成功率を変えながら, 感染の伝搬ダイナミクスを比較したところ, 感染者の 6 割以上が無症候性となる場合は隔離の程度に依らず最終感染者サイズ等の特徴量が悪化する傾向が観察された. また, 高頻度の隔離プロセスの適用により, 一部領域では感染症の封じ込めが期待される一方, 特に無症候率が高い領域では, 最終感染者サイズは大して改善されないまま, 累計隔離感染者サイズのみが大幅に増加することが判明した. 最後に理論式による結果を導出し, MAS 結果の示す傾向とよく一致することを確認した.

## Impact of Quarantine, Asymptomatic infected, and its Time delay on Disease spreading in Small-world Networks

Shinobu Utsumi<sup>\*1</sup>, Jun Tanimoto<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

<sup>\*2</sup> Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

## Abstract

By means of Multi-Agent Simulations; MAS, we explored how each of the 3 significant factors controlling a pandemic (i.e., quarantining rate, asymptomatic rate and time-delay of monitoring infected individuals) quantitatively influencing on a disease breakout. We presumed Small-world graph as an underlying networks. To take into account above 3 factors, our model defines two probabilities; asymptomatic rate, quarantining rate. The results indicates that the case presuming asymptomatic-infectious being more than 60% goes serious situations irrespective to quarantining rate. Furthermore, even though a higher quarantine campaign is adopted, some parameter region significantly improved by reaching to disease-free though, other region cannot improve Final Epidemic Size, which brings an ironical situation where disease up-surges very much besides huge fraction of quarantined-infected people. Finally, we validated our MAS results by comparing with the theoretical results coming from quasi-analytical approach (Ordinary Differential Equations, ODE).

## 1.緒言

感染症の封じ込めには、ワクチンや抗ウイルス剤をはじめとする医療対処策や、手指消毒・マスクの着用・social distancing 等の感染予防策などが挙げられる[1]。しかし、未知の感染症については、伝搬初期にワクチンが開発途中である可能性が高い為、特に感染初期段階では、前述の感染予防策に加え、感染者を迅速に検知し適切に隔離する、感染経路予防策が

封じ込めの可否に大きく影響する[2]。

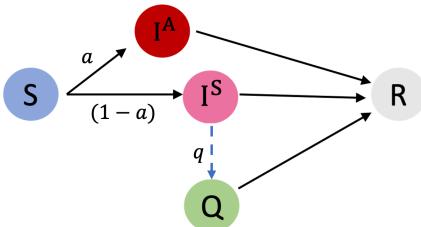
ここで、感染者の検知を困難にする要因の一つに無症候性感染者の存在が挙げられる。無症候性感染者とは、感染状態 (infected) であり、且つ、他人に感染させる能力を持つ (infectious) が、発熱等の兆候がなく回復するまでに自覚症状のない感染者のことを指す。今次の新型コロナウイルス感染症についても、

無症候性感染者がキャリアとなって感染拡大が起きた。加えて、当局に依る隔離実行にあたっては、PCR検査までの時間や再検査、医療機関の受け入れ体制などによって発症から隔離までの過程で時間遅れが生じ、その間は感染拡大のリスクを伴う。

本研究では、現実的隔離プロセスを想定し、上記の検査遅れ、更には隔離要請に従わないエージェントの影響を加味した MAS モデルを構築することを最終目的とし、本論ではその基本モデルを MAS 上に構築、その特性を平均場近似の ODE モデルと比較した結果を報告する。

## 2. モデル

本研究で扱うモデルの模式図を Fig.1 に示す。これは Kermack & McKendrick[3]による SIR (Susceptible-Infectious-Recovered) model に次の 3 点の拡張を加えたものである。まず 1 点目とし、無症候性感染者の影響を考慮する為に、感染性エージェント I<sup>A</sup>に対して、確率  $a$  で 2 つのコンパートメント—無症候性感染エージェント (Asymptomatic-Infected; I<sup>A</sup>)、及び症候性感染エージェント (Symptomatic-Infected; I<sup>S</sup>) —へ分岐をもたせる。ここで、 $a$  とは、1 人の感受性エージェント S が感染した場合に無症候性となる確率 (asymptomatic rate;  $a$ ) と定義する。2 点目は隔離を考慮する為に、症候性感染エージェント I<sup>S</sup> に対して、確率  $q$  で隔離感染エージェントのコンパートメント (Quarantined-Infected; Q) への推移を考慮する。ここで、 $q$  とは、1 人の症候性感染者が隔離の機会を得たときに、それが成功する確率 (quarantining rate;  $q$ ) と定義する。3 点目は感染から隔離までの時間遅れを考慮する。この際、I<sup>S</sup> から Q への状態遷移 (Fig.1 に破線で示す部分) を連続時間系の時間進行から独立させ、任意の離散時間間隔だけイベントが生じる枠組みを導入した。MAS の実装上は、前回の隔離の機会から Gillespie アルゴリズム上



**Fig.1** モデルの模式図。各コンパートメントは夫々、S; Susceptible, I<sup>A</sup>; Asymptomatic-Infected, I<sup>S</sup>; Symptomatic-Infected, Q; Quarantined-Infected, R; Recovered

の時間離散幅  $\Delta t$ [day]を積算していき、それがある時刻  $t$  で任意の時間間隔  $\tau$  (例えば、1 日に 4 回の隔離プロセスを実行するなら、 $\tau = 0.25$ [day]) を満たした時のみ、I<sup>S</sup> → Q への状態遷移を考慮する。MAS による数値実験において、その他の諸設定については[4]を踏襲する。すなわち、基本再生産数は季節性インフルエンザ相当の感染力を想定した  $R_0=2.5$  を、回復率は  $\gamma=1/3$ [day<sup>-1</sup>]を、感染率は次式で定義される相当感染率 (以下、 $\beta_{\text{eq}}$ ) を用いる。

$$\beta_{\text{eq}} = \frac{R_0 \cdot \gamma}{\langle k \rangle}$$

これは、[3]に代表されるような連立常微分方程式 (以下、ODE) で付与する一人当たりの感染率  $\beta = R_0 \cdot \gamma$  を、さらにリンク 1 本当たりに換算した、[day<sup>-1</sup>person<sup>-1</sup>link<sup>-1</sup>]を物理単位とする感染率を意味する。また、基盤グラフには、Watts と Strogatz による WS-SW モデル[5]を想定する。但し、ここで扱う Small-world ネットワークは short-cut 確率  $p = 0$  において二次元格子グラフを再現する。[4]に基づき、本研究では数ある short-cut 確率  $p$  (0 から 1 まで 0.01 刻みで実験)、平均次数  $\langle k \rangle$  (8 から 64 まで 8 刻みで実験) の組み合わせの中から特に特徴的な結果を示した 2 組の Small-world ネットワーク ( $\langle k \rangle \approx 16$ ,  $p = 0.15$  と,  $\langle k \rangle \approx 56$ ,  $p = 0.80$ ) に対して報告する。感染開始時はシステムサイズ  $N=10^4$  で構成される上記の空間構造内に、初期感染者数  $I_0=5$  をランダムに配置し、その後は Gillespie アルゴリズム[6]に基づいて伝搬が進行する。確率過程を含む数値計算の為、ある条件設定に対して 100 試行のアンサンブル平均をもって 1 つの計算結果とし、結果の統計的頑健性を保証する。なお、システムサイズの設定に際しても[4]の結果を踏まえ、 $N=10^4$  で系の有限性の影響が以下で報じる結果に有意でなくなることを確認した。本モデルは、一度隔離に失敗した I<sup>S</sup> エージェントも再度隔離の機会が巡ってくれれば隔離される可能性がある状況を模擬し、回復エージェント R については、二度目の感染が起きない完全免疫を仮定する。以上を ODE 系で表現するならば、各コンパートメントの時間推移は次式で記述される

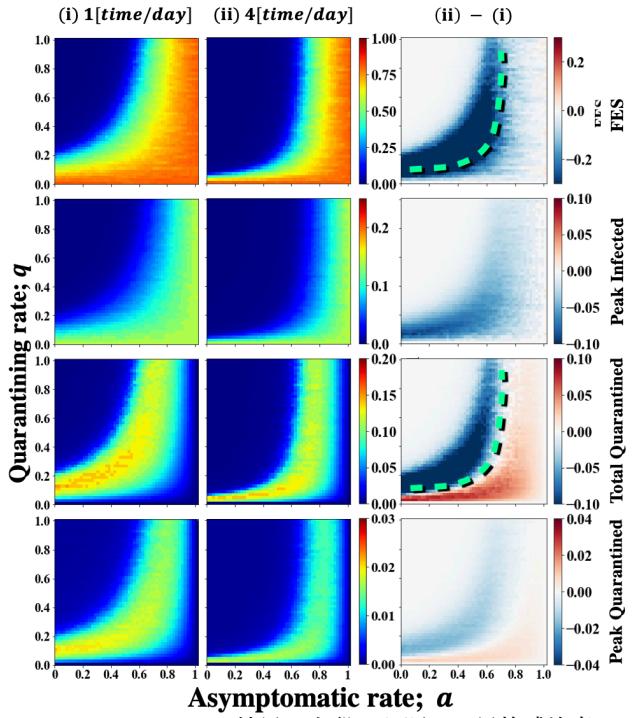
$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{S} = -\beta S \{ I^A + (I^S - \delta(t) \cdot q I^S) \} \\ \dot{I^A} = \beta S \{ I^A + (I^S - \delta(t) \cdot q I^S) \} \cdot a - \gamma I^A \\ \dot{I^S} = \beta S \{ I^A + (I^S - \delta(t) \cdot q I^S) \} \cdot (1-a) - \gamma (I^S - \delta(t) \cdot q I^S) \\ \dot{Q} = -\gamma (Q + \delta(t) \cdot q I^S) \\ \dot{R} = \gamma I^A + \gamma (I^S - \delta(t) \cdot q I^S) + \gamma (Q + \delta(t) \cdot q I^S) \end{array} \right. \quad (1)$$

ここで  $\beta[\text{day}^{-1}\text{person}^{-1}]$  は 1 日あたり 1 人あたりの感染率であり、MAS 上で付与する相当感染率の定義とは異なる。 $\delta(t)$  は、時刻  $t$  の値に応じて 0, 1 を返す関数であり、次式で定義する。

$$\delta(t) = \begin{cases} \text{if } t \bmod \tau = 0 & ; 1 \\ \text{otherwise} & ; 0 \end{cases} \quad (2)$$

### 3. 結果及び考察

まずはトポロジーを固定して、3 要因による一般的な傾向から見ていく。隔離プロセスの実行頻度が異なる 2 つの設定に対して、asymptomatic rate, quarantining rate を変えながら、感染症伝搬ダイナミクスにおける 4 つの特徴量を Fig.2 に示す。なお、数値は全てドメインサイズで規格化している。左カラム最上段、最終感染者サイズ（以下、FES）のパネルを見ると左上に濃いブルーの領域（FES がほぼ 0；これは封じ込め達成を意味する）が存在する。よって、左カラムのその他 3 パネルでも各パネル左上領域で濃青を示す。が、下段 2 つ、累計感染者サイズとピーク隔離感染者サイズでは、さらに各パネル右下領域に濃青が存在する。FES を見れば判るように、この領域では感染が蔓延している。つまり、感染者の 8 割以上が無症候性となる状況では、もはや隔離すらままならない、大感染により「処置なし」の状態となって、ピーク時、累積とともに隔離者数は僅少となる。では、時間遅れを小さくした場合はどうか。中央カラムには 4 倍の頻度で隔離のプロセスを実行した場合の結果を示した。左カラムと比べ disease-free の領域が低 quarantining rate の領域に対して拡がり、上記の「処置なし」領域も小さくなっている。が、依然として感染者の 6 割以上が無症候性となる領域からは quarantining rate の程度に依ら



**Fig. 2** MASによる結果。上段から順に、最終感染者サイズ、ピーク感染者サイズ、累計感染者サイズ、ピーク隔離感染者サイズ。左カラムは 1 日 1 回の隔離機会頻度であり、中央カラムは 1 日 4 回。右カラムは中央カラムと左カラムの差画像。ネットワークは全て  $(k) \approx 16$ ,  $p = 0.15$ ,  $N = 10^4$  の Small-world。

ず FES は悪化している。つまり、asymptomatic rate が 0.6 を超える領域から、隔離の効果が急激に低下する。より明確に時間遅れによる影響を考察するため、右カラムに両者の差画像を表示した。つまりこの差画像では、高頻度の隔離プロセスの適用により、各特性値が減少するか（青）増加するか（赤）を示している。3 段目、累計隔離感染者サイズでは赤色の領域が目立つが、これは高頻度の隔離プロセスの実行によって、多数の症候性感染者が隔離されるからである。対して、同じパネルで濃青の領域が存在するのは、左のパネルの比較から明らかなように、高頻度の隔離プロセスにより、このパラメータ領域では disease-free が達成され、累計感染者自体が大幅に減少するからである。ここで、右カラム累計隔離感染者サイズ差画像中に示した太緑破線は  $\pm 0$  境界を示している。以下、これを 1 段目 FES 差画像に転写していた結果に注目して考察する。まず、破線より上側の領域は高頻度の隔離プロセス適用により感染サイズの抑え込みが可能となる（ほぼ封じ込め可能）パラメータ域を意味し、結果として FES も累計隔離感染者サイズも大幅な減少を見込める。換言すれば、高頻度の隔離方策が意味のある領域である。一方

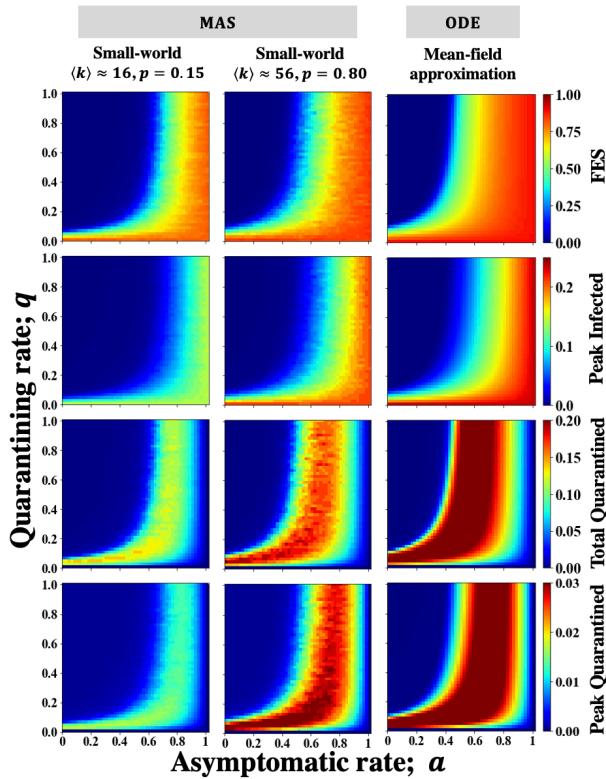
で、破線下側の領域では FES は減少するが感染封じ込めは出来ず、結局、累計隔離感染者サイズは増加してしまう。換言すると、無症候率が大きくなると、高頻度の隔離方策は、確かに FES の減少は見込めるが完封には至らず、却って大きな累計隔離感染者数となる領域である。隔離に要するコスト、検査を高頻度で供給するコストと疾病コストを総体で考えたとき、闇雲に検査強度を上げることに慎重を期すべき領域であることを示唆する。

最後に ODE を数値的に求解した結果との比較を行う。Fig.3 に 2通りの Small-world の結果と併せて ODE 結果を表した。全体的な 2軸パラメータに対する感度の傾向は MAS, ODE でよく一致していることが確認できる。MAS の両ケースを比較すると、高平均次数、高 short-cut 確率の Small-world で、当然、感染状況悪化となるが、ODE 結果はそれよりも悪い側の結果となる。ODE では well-mixed かつ無限集団を仮定した平均場近似を適用しているから、これを平均次数  $\langle k \rangle \approx \infty$  のネットワークと見做せば、MAS の結果に対照して妥当な結果となっていると考える。

#### 4.結言

感染症の伝搬ダイナミクスにおける、隔離・無症候性感染者・発症から隔離までの時間遅れの影響を、Multi Agent Simulation により解析した。1人の Susceptible agent が感染した場合に無症候性となる確率と、症候性であった場合に隔離が成功する確率とを変えながら、感染の伝搬ダイナミクスを比較したところ、感染者の 6 割以上が無症候性となる場合は隔離の効果が急激に低下する傾向が観察された。また高頻度の隔離プロセスの適用によって、一部の領域では感染症の封じ込めが期待される一方、最終感染者サイズは大して改善されないまま、累計隔離感染者サイズが大幅に増加する領域の存在が判明した。これは、ただ単純に隔離方策を可能な限り実行することが常に社会的最適とは限らないことを示唆している。最後に ODE による結果と比較し、両アプローチの妥当性を確認した。

緒言に述べたように、本研究では最終的にはエージェントが「隔離破り」をする影響を計量していく。その際、隔離要請されたエージェントがある確率でそれを無視する場合、全ての隔離要請されたエージェントがリンクをある確率で保持する（部分的に隔離要請に従わない）場合とで、系全体のダイナミクスに付与する影響を考察する予定である。



**Fig. 3** MAS と ODE による結果。左・中央カラムは MAS による結果、右カラムは理論式による導出。カラム毎のパネルのセットは Fig.2 と同様。なお隔離機会の頻度は 1 日 4 回。

#### 謝辞

本研究の一部は科研費 (19KK0262, 20H02314, 20K21062) による。また、本研究は九州大学情報基盤研究開発センター研究用計算機システムを利用した。記して謝意を表する。

#### 参考文献

- [1] Alam, M., Kabir, K. M. A., Tanimoto, J. Based on mathematical epidemiology and evolutionary game theory, which is more effective: quarantine or isolation policy?, *J. Stat. Mech. Theory Exp.*, **2020**(3), 033502, 2020,
- [2] C. Castillo-Chavez.; Mathematical Models of Isolation and Quarantine, *JAMA J. Am. Med. Assoc.*, **290**(21), 2876–2877, 2003
- [3] A. G. Kermack, W. O., 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, 1927,
- [4] 内海忍, 谷本潤; SIRダイナミクスにおける感染率の定義の違いが最終感染者サイズに及ぼす影響, 第26回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム, 2020.
- [5] D. J. Watts, S. H. Strogatz,; Collective dynamics of 'small-world' networks, *Nature*, **393**(6684), 440–442, 1998
- [6] Gillespie, D. T.; Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions, *J. Phys. Chem.*, **81**(25), 2340–2361, 1977

# 細胞の相互誘導での運動持続性への界面効果

松下勝義, 鎌本直也, 須藤麻希, 藤本仰一

阪大院理 生物

## 概要

我々は界面張力の相互誘導を行うモデル細胞の集団運動の持続性への効果を細胞のクラスターについて調べた。そのモデル細胞は比較的小さい界面張力下では持続的ランダムウォークを示した。対照的に、大きな張力ではその持続性は失われ細胞の集団回転運動が現れた。

## Interface Effect on Persistence of Cellular Mutually Guiding

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

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

## Abstract

In this study, we investigated the effects of interface tension on the persistence time of the collective movement of mutual guiding in a model cell cluster. The model cells based on the cellular Potts model reduce the persistence time of the collective movement as interface tension decreases. Finally, collective cell rotation appears for large values of interface tension.

## 1 Introduction

Eukaryotic cells collectively move through biological processes [1–3]. During these movements, cells guide their motion through their cellular contacts, such as leader guiding [4] and mutual guiding [5] mechanisms. These guidings lead to an order in the directions of motion. In contrast to the leader guiding, our simulation for mutual guiding showed that confluent cells in the periodic boundary condition exhibit long persistent time beyond an observation time scale in movements [5]. The result does not directly explain natural collective movements because the interface of the leading edges shown in Fig. 1(a) may reduce the persistence time. In natural systems, cells form finite-size clusters accompanying the interface. Thus, the movement reflects the interface of the leading edges, which affects the guiding efficiency. For instance, leader guiding promotes interface fingering, which affects the movement [6, 7].

We consider two mutually guiding cells on the leading edge of the cluster to intuitively estimate this effect of the interface tension. On the interface, we assume that the two cells, 1 and 2, contact each other and they have a receptor on the leading edge and ligand on the membrane, as shown in Fig. 1(b). The leading edge of cell 2 extends along the surface of cell 1 by exerting tension when the receptor recognizes the ligand. During the movement due to the guiding, the interface tension  $\gamma_E$  and the intercellular tension  $\gamma_C$  also affect the motion of the leading edge as shown in Fig. 1(c) through Young's

law [8]. Assuming that the friction is proportional to the movement velocity  $v$ , it follows that

$$v \propto 2(\delta q + \gamma_E) \cos \theta - \gamma_C, \quad (1)$$

where  $\delta q$  is the guiding tension owing to mutual guiding [5, 9]. In this equation, we count both the tensions from cell 2 to cell 1 and cell 1 to cell 2.  $\delta$  is the tension per receptor,  $q$  is the receptor concentration, and  $\theta$  is the contact angle defined in the figure. This equation estimates that the interface tension affects the mutual guiding. This effect becomes complex in persistence because  $q$  is an active degree of freedom for cells with persistence [4, 5]. To elucidate this effect beyond this estimation, such as the dependence of the persistence time on  $\gamma_E$ , we should simulate the collective movement of the mutual guiding.

In this study, we theoretically investigate the effect of interface tension on the persistence time of the collective movement of a cell cluster. We used the cellular Potts model [10] by incorporating mutual guiding [5]. We observed a short persistent time [11, 12] for relatively small values of  $\gamma_E$ , in contrast to the long persistence time in the previous investigation. Additionally, we observed that the persistence of movement disappears with the motion transition to a collective rotation for large values of the interface tension.

## 2 Model

In this study, we focused on the surface tension of a cell cluster. One of the well-describable mod-

els for surface tension is the cellular Potts model, which reproduces cell sorting [13, 14] and adhesion-inducing developmental processes [15–18]. The model can reproduce the mutual guiding using cell-cell adhesion [5, 19]. This model considers the Potts state  $m(\mathbf{r})$  at site  $\mathbf{r}$  on a square lattice with linear size  $L$  and periodic boundary conditions.  $m(\mathbf{r})$  takes 0 for the case without cells. In contrast,  $m(\mathbf{r})$  takes a number in 1, 2 …  $N$ , corresponding to the cell index. Here,  $N$  is the number of cells, and it is constant in this simulation for simplicity. Each domain of Potts state  $m$  expresses the cell shape for the  $m$ th cell. In this interpretation, the Monte Carlo simulation of this configuration expresses the dynamics of the cells.

The Monte Carlo simulation is based on the Boltzmann weight  $w = \exp(-\beta\mathcal{H})$ , where  $\beta$  is a parameter of cell motility.  $\mathcal{H}$  is the Hamiltonian and it consists of three terms

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_S + \mathcal{H}_V + \mathcal{H}_G. \quad (2)$$

The first term denotes the surface tension [10]

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_S &= \gamma_C \sum_{\mathbf{rr}'} \eta_{m(\mathbf{r})m(\mathbf{r}')} \eta_{0m(\mathbf{r}')} \eta_{m(\mathbf{r})0} \\ &+ \gamma_E \sum_{\mathbf{rr}'} \eta_{m(\mathbf{r})m(\mathbf{r}')} [\delta_{0m(\mathbf{r}')} + \delta_{m(\mathbf{r})0}]. \end{aligned} \quad (3)$$

The summations of  $\mathbf{rr}'$  represent those over the nearest and next-nearest sites. The same symbol hereinafter is used in the same manner.  $\gamma_C$  and  $\gamma_E$  are the surface tensions.  $\eta_{nm}$  denotes  $1 - \delta_{nm}$ , where  $\delta_{nm}$  is the Kronecker's  $\delta$ . Herein, we focused on the  $\gamma_E$ -dependence of movement persistence.

The second term in Eq. (2) is the volume constraint,

$$\mathcal{H}_V = \kappa \sum_m (1 - \frac{\sum_r \delta_{mm(\mathbf{r})}}{A})^2, \quad (4)$$

where  $\kappa$  and  $A$  denote the volume stiffness and the reference area of cells, respectively.

The third term in Eq. (2) expresses the mutual guiding

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_G &= -\delta \sum_{\mathbf{rr}'} \eta_{m(\mathbf{r})m(\mathbf{r}')} \eta_{0m(\mathbf{r}')} \eta_{m(\mathbf{r})0} \\ &\times [q_{\mathbf{r}}^{m(\mathbf{r})} + q_{\mathbf{r}'}^{m(\mathbf{r}')}] . \end{aligned} \quad (5)$$

Here, the receptor concentration is given by  $q_{\mathbf{r}}^m = 1 + \mathbf{p}_m(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{e}_m(\mathbf{r})$ , where  $\mathbf{p}_m$  is a unit vector denoting the density gradient of receptor molecules,  $\mathbf{e}_m(\mathbf{r})$  is a unit vector from  $\mathbf{R}_m$  to  $\mathbf{r}$  and  $\mathbf{R}_m$  is the center of the  $m$ th cell. Additionally, the sensing occurs in the direction of  $\mathbf{p}_m$ , which represents the leading edge of cells. In this term, the receptor molecule reduces the surface tension by sensing with contacting cells. As a result, it aligns the moving direction

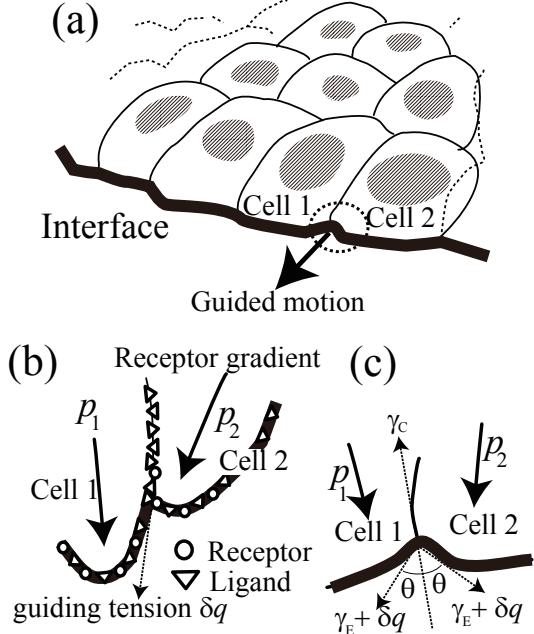


Fig. 1: (a) Cell cluster. (b) and (c) show the contact region of the leading edge between cells 1 and 2. (b) Motion guiding by cell 1 for cell 2 with their receptors and ligands.  $\delta q$  is the guiding tension, and  $\mathbf{p}_m$  is the direction of the receptor concentration gradient of the  $m$ th cell. (c) Interface tensions.  $\gamma_C$  and  $\gamma_E$  denote the tension between cells and between cells and unoccupied space, respectively.

of the cell in the direction of the sensed cells. The derivation of this equation is based on [20, 21].

Here, we consider that sensing occurs at the leading edge of the cells. To express this situation, we assume that  $\mathbf{p}_m$  obeys the equation of motion [22],

$$\frac{d\mathbf{p}_m}{dt} = \frac{1}{\tau} [\hat{I} - \mathbf{p}_m \otimes \mathbf{p}_m] \cdot \frac{d\mathbf{R}_m}{dt}, \quad (6)$$

where  $t$ ,  $\otimes$ ,  $\hat{I}$ , and  $\tau$  denote the time, the tensor product, the unit tensor, and the time scale ratio of  $d\mathbf{R}_m/dt$  to  $d\mathbf{p}_m/dt$ , respectively. The ratio determines the persistence of motion.

Based on  $\mathcal{H}$ , we consider the following conventional Monte Carlo simulations [10]: A single Monte Carlo step (MCS) consists of  $16L^2$  copy trials, and it is the unit of time. In the copy trial, the state at the randomly chosen site,  $\mathbf{r}$ , changes to the state of a randomly chosen neighboring site. The copy is accepted with the Metropolis probability,  $\min[1, w'/w]$ , where  $w'$  is the Boltzmann weight with the state copy.  $\mathbf{p}_m$  and  $\mathbf{R}_m$  are constant in these copies and they change once after the single Monte Carlo step, by according to Eq. (6) and  $\mathbf{R}_m = \sum_r \mathbf{r} \delta_{mm(\mathbf{r})} / \sum_r \delta_{mm(\mathbf{r})}$ , respectively. The Euler method is used with a time difference of  $1/\tau = 0.2$ .

For the examination, we set  $N = 64$ ,  $A = 64$ ,  $\kappa$

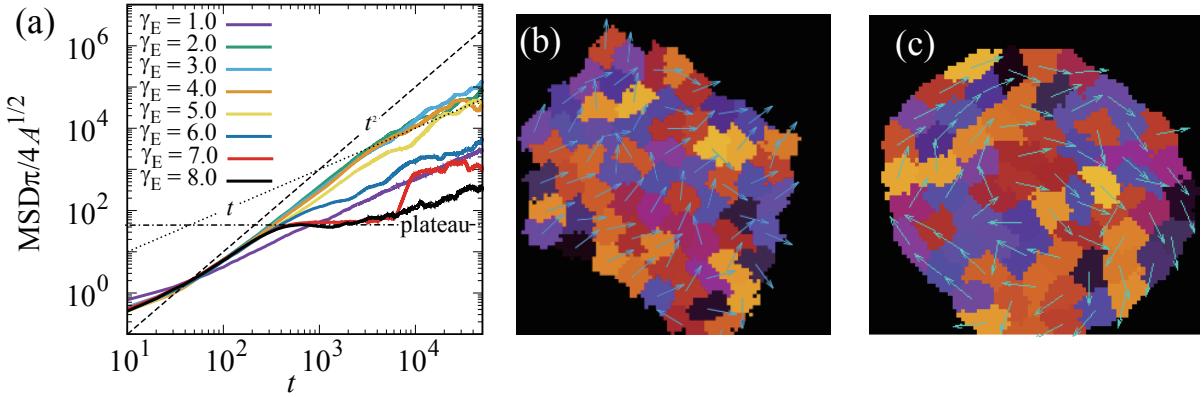


Fig. 2: (a) MSD as a function of  $t$  with  $\gamma_E$  sweeping. (b) Snapshot of cell configuration for  $\gamma_E = 2.0$ . (c) Snapshot of cell configuration for  $\gamma_E = 7.0$ . The black domain and other colored domains represent the unoccupied space and cells. The arrows from the center of the domains represent the  $\mathbf{p}_m$  for each cell.

$= 64^2$ ,  $\tau = 5.0$ ,  $\delta = 0.5$  and  $\beta = 0.2$  as empirically known parameters to observe the collective movement. We consider  $\gamma_C = 2.5$  to choose the transition point between the dispersing state of cells and the aggregating state around the range of  $\gamma_E$  from 1.0 to 2.0. Here, the dispersing state is the state where the cells do not form contacts and separately take an individual random walk. To investigate the effect of interface tension, we consider  $\gamma_E$  from 1.0 to 8.0 and observe the collective motion.

### 3 Results

To investigate the persistence time of the collective cell movement, we calculated the mean square displacement of the cluster as a function of MCS  $t$ ,

$$MSD(t) = \left\langle \left[ \int_{t_i}^{t+t_i} dt' \frac{1}{N} \sum \mathbf{d}_m(t') \right]^2 \right\rangle. \quad (7)$$

Here, we relax the state during  $t_0$  MCS and then calculate MSD from  $t = t_i$  to  $t = t_f$ . We take  $t_i = 10^4$  MCS and  $t_f = 5 \times 10^4$  MCS.  $\mathbf{d}_m$  is the displacement of the  $m$ th cell for 1 MCS. The angle bracket  $\langle \dots \rangle$  represents the average of the eight trajectories. The MSDs for various  $\gamma_E$  values are plotted in Fig. 2(a), where the diameter of the cells,  $2\sqrt{A/\pi}$ , is unity. At  $\gamma_E = 1.0$ , the cells were in a dispersing state. In this case, the MSD is proportional to the number of MCS  $t$  in the data. This behavior reflects individual random walks of cells.

For  $\gamma_E \geq 2.0$ , the cells take an aggregating state. At  $\gamma_E = 2.0$ , MSD behaves in the superdiffusive motion like a ballistic motion with  $MSD \simeq t^2$  up to  $t \sim 10^3$  MCS and then crossover to a random walk as  $MSD \sim t$ . The ballistic motion in a short time originates from the memory effect in Eq. (6) [5]. This behavior is the same up to  $\gamma_E = 6.0$ . For these data, the long persistence time previously observed is absent. This result indicates that the interface of the leading edges reduces the persistence time.

A distinctive observation is that the time scale of the superdiffusive motion steadily decreased with  $\gamma_E$  from 6.0. Additionally, a subdiffusive plateau was observed in MSD for  $\gamma_E \simeq 7.0$  in an intermediate time scale longer than that of the ballistic motion, like glassy liquid systems [23]. For  $\gamma_E > 7.0$ , the subdiffusive plateau also appears. This result indicates that a large interface tension suppresses the persistence time.

To elucidate this suppression, snapshots for  $\gamma_E = 2.0$  and  $\gamma_E = 7.0$  are shown in Fig. 2(b) and (c), respectively. The configurations of the arrows of  $\mathbf{p}_m$  largely differ in these snapshots. For  $\gamma_E = 2.0$ ,  $\mathbf{p}_m$  exhibits an ordered state and drives collective cell movement. In contrast,  $\mathbf{p}_m$  for  $\gamma_E = 7.0$  forms a vortex and drives a rotational motion similar to that of *Dictyostelium discoideum* in the mound stage [24]. The rotation direction exhibits persistence for large  $\gamma_E$  in our observation time and merely changes at  $\gamma_E = 7.0$  through stochastic transitions between a translational motion to the rotation, which is the origin of sudden changes in MSD in Fig. 2(a). The emergence of this rotational motion is an origin that suppresses the persistence of the collective cell movement.

### 4 Summary and Discussions

We investigated the effect of the interface tension of the leading edges of cell clusters on the persistence time of collective movement. The interface tension reduces the long persistence time previously that was observed even for relatively small interface tensions [5]. In contrast, the large interface tension inhibits the persistence. This suppression originates from the emergence of rotational motion.

Additionally, long-timescale persistence appears for excluding volume-interacting cells with periodic boundary and confluent conditions [25–27]. Therefore, the corresponding systems with the interface may change the results. However, these works as-

sume the repulsion in contrast to the case with mutual guiding; hence cannot realize the cell cluster. Therefore, another method that incorporates an interface is necessary for the examination.

Finally, we consider the emergence of rotational motion for a large interface tension. In our simulation, a large interface tension resulted in a large  $\theta$ . Here, large  $\theta$ 's values of near  $\pi/2$  correspond to the smooth interface shown in Fig. 2(c). The smooth interface aligns the force from tensions  $\gamma_E$  and  $\delta q$  in the tangential direction at the interface. Therefore, the guiding of  $\delta q$  induces torque on the interface around the center of the cell cluster. As a result, it leads to collective rotation.

Notably, this mechanism of rotation differs from those of already known cell rotations, which originate from chemotaxis [28, 29], flocking interactions [30], anisotropic apical constriction [31], contact following [32, 33], and minority control effect of leader cells [34]. The mechanism through mutual guiding is one of the collective rotations unknown so far in the sense that cells make good use of the surface tension.

We thank S. Yabunaka, H. Kuwayama, H. Hashimura, M. Sawada, and K. Sawamoto for providing various relative knowledge. We also thank M. Kikuchi and H. Yoshino for their support with the research resource. This work was supported by JSPS KAKENHI (Grant Number 19K03770) and by AMED (Grant Number JP19gm1210007).

## 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] A. J. Kabla, *J. R. Soc. Interface* **9**, 3268 (2012).
- [5] K. Matsushita, *Phys. Rev. E* **97**, 042413 (2018).
- [6] M. Poujade, E. Grasland-Mongrain, A. Hertzog, J. Jouanneau, P. Chavrier, B. Ladoux, A. Buguin, and P. Silberzan, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **104**, 15988 (2007).
- [7] S. Mark, R. Shlomovitz, N. S. Gov, M. Poujade, E. Grasland-Mongrain, and P. Silberzan, *Biophys. J.* (2010).
- [8] P.-G. de Gennes, F. Brochard-Wyart, and D. Quere, *Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves* (Springer, 2004).
- [9] S. Okuda and K. Sato, arXiv:2104.13059 (2021).
- [10] F. Graner and J. A. Glazier, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 2013 (1992).
- [11] L. Li, S. F. Nørrelykke, and E. C. Cox, *PLoS One* **3**, e2093 (2008).
- [12] H. Takagi, M. J. Sato, T. Yanagida, and M. Ueda, *PLoS One* **3**, e2648 (2008).
- [13] F. Graner, *J. Theor. Biol.* **164**, 455 (1993).
- [14] J. A. Glazier and F. Graner, *Phys. Rev. E* **47**, 2128 (1993).
- [15] A. F. M. Marée and P. Hogeweg, *Proc. Natl. Am. Sci. USA* **98**, 3879 (2001).
- [16] 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).
- [17] M. Scianna and L. Preziosi, *Cellular Potts Model* (CRC Press, UK, 2013).
- [18] T. Hirashima, E. G. Rens, and R. M. H. Merks, *Dev. Growth Differ.* **59**, 329 (2017).
- [19] K. Matsushita, *Phys. Rev. E* **95**, 032415 (2017).
- [20] K. Matsushita, *Phys. Rev. E* **101**, 052410 (2020).
- [21] K. Matsushita, H. Hashimura, H. Kuwayama, and K. Fujimoto, arxiv:2110.00235 (2021).
- [22] B. Szabó, G. J. Szollosi, B. Gonci, Z. Juranyi, D. Selmeczi, and T. Vicsek, *Phys. Rev. E* **74**, 061908 (2006).
- [23] R. Yamamoto and A. Onuki, *Phys. Rev. E* **58**, 3515 (1998).
- [24] J. T. Bonner, *The Social Amoebae: The Biology of Cellular Slime Molds* (Princeton University Press, Princeton, 2009).
- [25] K. Matsushita, K. Horibe, N. Kamamoto, and K. Fujimoto, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 103801 (2019).
- [26] K. Matsushita, K. Horibe, N. Kamamoto, S. Yabunaka, and K. Fujimoto, *Proc. Sympo. Traffic Flow Self-driven Particles* **25**, 21 (2019).
- [27] K. Matsushita, S. Yabunaka, and K. Fujimoto, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 054801 (2020).
- [28] F. Siegert and C. J. Weijer, *Curr. Biol.* **5**, 937.
- [29] B. Vasiev, F. Siegert, and C. J. Weller II, *J. Theor. Biol.* **184**, 441 (1997).
- [30] W.-J. Rappel, A. Nicol, A. Sarkissian, H. Levine, and W. F. Loomis, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1247 (1999).
- [31] K. Sato, T. Hiraiwa, E. Maekawa, A. Isomura, T. Shibata, and E. Kuranaga, *Nat. Commun.* **6**, 10074 (2015).
- [32] T. Umeda and K. Inouye, *J. Theor. Biol.* **219**, 301 (2002).
- [33] T. Hiraiwa, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 268104 (2020).
- [34] K. Matsushita, S. Yabunaka, H. Hashimura, H. Kuwayama, and K. Fujimoto, *Proc. Sympo. Traffic Flow Self-Driven Parti.* **26**, 38 (2020).

E-mail: kmatsu@bio.sci.osaka-u.ac.jp

# Erratum: 細胞の相互誘導での運動持続性への界面効果

松下勝義, 鎌本直也, 須藤麻希, 藤本仰一

阪大院理 生物

## Erratum: Interface Effect on Persistence of Cellular Mutually Guiding

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

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

---

In the paper[1], equation (1) and Fig. 1 are inconsistent with Eq. (5). Because Eq. (5) is correct as the mutual guiding [2, 3], Equation (1) and symbols in Fig. (1) should change as listed in Table 1. The paper is based only on Eq. (5). Hence, the results and conclusions in the paper are correct.

Table 1: lists of corrections

	Error	Correction
Eq. (1)	$v \propto 2(\gamma_E + \delta q) \cos \theta - \gamma_C$	$v \propto 2\gamma_E \cos \theta - (\gamma_C - 2\delta q)$
In Fig. (1)	$\gamma_E + \delta q$	$\gamma_E$
In Fig. (1)	$\gamma_C$	$\gamma_C - 2\delta q$

## References

- [1] K. Matsushita, N. Kamamoto, M. Sudo, and K. Fujimoto, Proceedings of the Symposium on Traffic Flow and Self-Driven Particles **27**, 23 (2021).
- [2] K. Matsushita, Phys. Rev. E **97**, 042413 (2018).
- [3] K. Matsushita, Phys. Rev. E **101**, 052410 (2020).

E-mail: kmatsu@bio.sci.osaka-u.ac.jp



# 体内のウイルス進化を組み込んだ個体群感染症モデルの解析

立川 雄一<sup>1</sup>, 谷本 潤<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>九州大学 大学院総合理工学府 環境エネルギー工学専攻

<sup>2</sup>九州大学 総合理工学研究院 環境理工学部門

## 概要

感染者の体内ウイルス量に応じて感染者が他者を罹患させる確率 ( $\beta$ ) が変動するネスティング型の感染症モデルを構築し, Multi Agent Simulation による数値解析を行った。その結果, 時間変動する  $\beta$  の影響で感染が拡大する/しないの 2 つの均衡点が観察された。また, 感染期間中の  $\beta$  の積分値を一定に拘束し,  $\beta$  の時間推移を様々変化させたところ, ピークを持たず低値一定の  $\beta$  とする場合に感染が最も拡大することがわかった。

## Analysis on a population-based epidemic model incorporating viral dynamics in a human body

Yuichi Tatsukawa<sup>1</sup>, Jun Tanimoto<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

<sup>2</sup> Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

## Abstract

We establish a nested epidemic model in which an infectiousness ( $\beta$ ) of infected individual is time-varying depending on the viral load in a human body, and conduct numerical analysis based on multi agent simulation. As a result, two equilibrium points are observed by the influence of time varying infectiousness: disease spreading phase, phase of disease going to extinction. Additionally, to optimize time-evolution form of  $\beta$  during infected period with preserving time-integral  $\beta$  so as to maximize disease spreading, it turns out that time-flat  $\beta$  having none of keen peak is best.

## 1. 緒言

本稿では、個々の粒子を介して感染が伝搬する様相について論ずる。自己の状態が周囲の粒子に影響を受け決定されるというのは、本研究会のテーマである自己駆動粒子に準えることができる。

昨今の COVID-19 による世界的感染拡大に伴い、感染拡大メカニズムの解明や有効な封じ込め政策を検討する研究が益々盛んに行われている。感染期間が日単位の感染症（例えば、インフルエンザ）を対象とした研究においては、個体間での SEIR, SIR 等の数理疫学モデル（以下、従来モデル）が用いられ、感染者が他者を罹患させる確率（以下、感染率： $\beta$ ）は時間変動の無い固定値で与えられている。

（無論、HIV 等を対象として感染齢を考慮し  $\beta$  が変化するモデル[1]も存在する。）これは、個々の人間に対して社会的（行動範囲や接触頻度）な、或いは生理学的（感染症に対する過敏性や性別、年齢など）なばらつきにより大きく異なり、その他様々な不確定性や時間変動性を有する基本再生産数を時々刻々と実測することが困難なためである。その点、実験系で観察できる個体内でのウイルスの動態は実測が可能であり、宿主の総ウイルス量が感染率に影響を与えることも明らかになっている[2]。が、夫々の感染症に対して異なる特性を示すと思われる、体内で生起するウイルス盛衰のダイナミクスと宿主が有する感染率との詳細な関係は未だ解明されていない。本稿

では、感染者の体内でのウイルスダイナミクスを個体間感染症伝搬ダイナミクスに組み込んだネスティング型モデルを構築し、個々人のウイルス量によって決定する、時間変動のある感染率がホスト（宿主）間の感染拡大にどのような影響を与えるのかを multi agent simulation（以下、MAS）により評価する。

## 2. モデル

### 2.1 Within-host

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\beta_v T(t)V(t) \quad (1)$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = \beta_v T(t)V(t) - \gamma_v E(t) \quad (2)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \gamma_v E(t) - \delta I(t) \quad (3)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = pI(t) - cV(t) \quad (4)$$

本稿では Baccam らの方法[3]に倣い、感染者の個体内感染ダイナミクスは式(1)~(4)で示される気道上皮の A 型インフルエンザ(H1N1 型)による急性感染を想定する。感染期間中に標的細胞  $T$  の補充や死亡がない ( $T$  の総量 :  $T_0 = 4 \times 10^8$ [cells]) とし、各パラメータは感染実験の結果から推定された値[3]とする。時間  $t_i = 0$  で個体  $i$  の体内に侵入したウイルス  $V_0 = 12.41$ [TCID<sub>50</sub>/ml] は確率  $\beta_v = 1.466 \times 10^{-5}$ [(TCID<sub>50</sub>/ml)<sup>-1</sup>day<sup>-1</sup>]で  $T$  に感染する。感染した  $T$  はウイルス非產生細胞  $E$  になり、その後確率  $\gamma_v = 3.274$ [day<sup>-1</sup>]でウイルス產生細胞  $I$  に遷移する。 $I$  は産出率  $p = 5.826 \times 10^{-2}$ [(TCID<sub>50</sub>/ml) day<sup>-1</sup>]で新たなウイルス  $V$  を生産し続けるが、確率  $\delta = 3.934$ [day<sup>-1</sup>]で死滅する。また  $V$  も同様に除去率  $c = 9.575$ [day<sup>-1</sup>]で排除される。

### 2.2 Between-host

平均次数  $\langle k \rangle = 8$ 、ノード数  $N = 10^4$  の Barabási-Albert Scale Free[4] グラフ上を SIR プロセス[5]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。感染はトポロジー上のリンクで繋がる個体間でのみ発生するとし、SIR プロセスを時間離散化した MAS

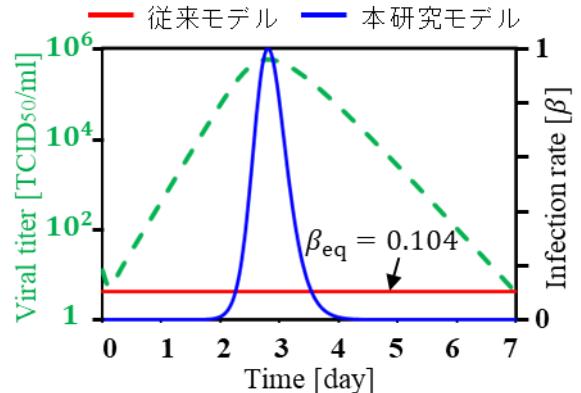


Fig. 1 感染期間中のウイルス量の推移（緑線）とそれに対応する感染率を示す。赤線は従来モデルの  $\beta_{eq} (= 0.104)$ 、青線は本研究モデルの  $\beta(t)$  ( $\beta_{max} = 1.0$ ,  $\alpha = 1.96$ )。

で実装するために Gillespie 法[6]を用いる。1 イベント中に 1 個体が状態遷移するとし、イベントの発生時間及び状態遷移個体は系内の全状態遷移確率に応じて動的に変化する。各個体の状態遷移確率に関して、感受性個体  $S$  は隣接する感染個体  $I$  が有する  $\beta(t)$ [person<sup>-1</sup>day<sup>-1</sup>]の総和  $\sum \beta_j(t)$ ,  $I$  は回復率  $\gamma (= 1/3)$ [day<sup>-1</sup>]となる。

個体  $i$  が  $S$  から  $I$  に遷移した時間を  $t_i = 0$  とし、以後式(1)~(4)に従って体内系を計算する。 $I_i$  が有する  $\beta_i(t)$  は体内のウイルス量  $\bar{V}_i(t)$ （最大ウイルス量  $V_{max}$  で規格化:  $\bar{V}_i(t) = V_i(t)/V_{max}$ ）に比例するとし、式(5)で示されると仮定した[7].

$$\beta_i(t) = \beta_{max} \bar{V}_i(t)^\alpha \quad (5)$$

ここで、 $V_{max}$  時の感染率を  $\beta_{max}$ ,  $\alpha$  は非負の実数と定義した。ただし、 $\beta_{max}$  及び  $\alpha$  は本モデルの time- $\beta$  相図 (Fig. 1) の曲線下面積が従来モデルのそれ（数理疫学モデル解析で仮定される infectious 期間中一定の  $\beta$  (図 1 中の青線; 下記式(6)で付与) が縦軸値、幅 days=7 とした面積）と一致するような値をとると仮定する。これは、days=7 でみた  $R_0$  を保存した上で、異なる  $\beta_{max}$  すなわち異なる  $\alpha$  に対して (5) 式は時々刻々異なる  $\beta_i(t)$  を付与することを意味している。比較対象とする従来モデルの  $\beta$  は、式(6)で示される基本再生産数  $R_0 (= 2.5)$  を元に定義されたトポロジー上のリンク 1 本当に相当の感染率  $\beta_{eq}$  とする。

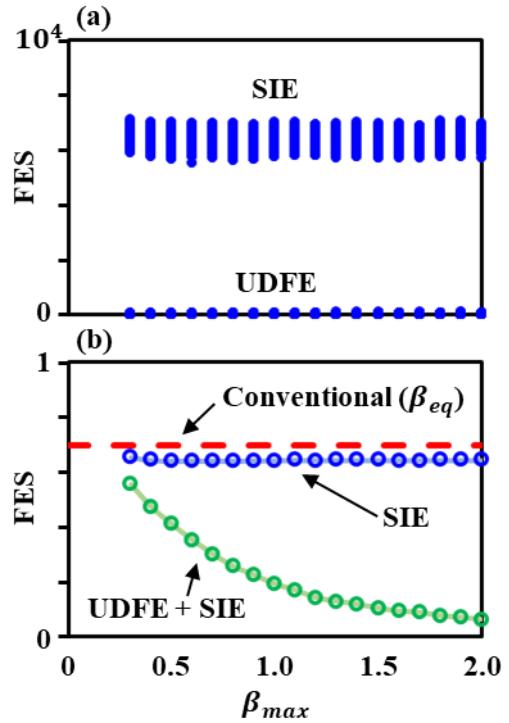
$$\beta_{eq} = \frac{R_0 \cdot \gamma}{\langle k \rangle} \quad (6)$$

また  $I$  が回復状態  $R$  に遷移すると体内のウイルスは消滅し  $\beta_i(t) = 0$  となる。

MAS での数値実験では  $t = 0$  で初期感染者 ( $I_0 = 5$ ) をランダムにトポロジー上に配置してから系内に感染者がいなくなる ( $I = 0$ ) 時点までを 1 エピソードとし、 $\beta_{max}$  を 0.1 ずつ変化させながら夫々につき独立に  $10^4$  エピソードをとった結果を解析対象とする。評価パラメータは最終感染者サイズ（以下、FES ≡  $R/N$  (Final Epidemic Size)、ただし  $R$  は均衡時回復者数）。

### 3.結果と考察

まず、全感染者の  $\beta_{max}$ （および  $\alpha$ ）が同一 ( $\beta(t)$  が Fig. 1 の青線に従う) の場合を考える (Fig. 2)。パネル(a)は各  $\beta_{max}$  で計算した全エピソードの FES を示すが、結果を見ると同じ  $\beta_{max}$  であっても感染が拡大するエピソード（以下、SIE (Stable Infected Equilibrium)）と感染が拡大しないまま収束するエピソード（以下、UDFE (Unstable Disease Free Equilibrium)）の両方が存在している。これは、流行初期の感染者が隣人を感染させる前に回復状態へ遷移して感染が拡がらないケースと、その前に 2 次感染者を生み感染連鎖を惹起させられるケースとにダイナミクスが分岐するため、感染拡大にはばらつきがあるからである。パネル(b)は各  $\beta_{max}$  における FES の平均を示している。パネル(a) の SIE における FES が  $\beta_{max}$  の感度を持たないにも関わらず、 $\beta_{max}$  が大きくなると(b)の全エピソード平均（緑線）が減少していることから、 $\beta_{max}$  の増加に伴い UDFE となるエピソードの割合が増加していくことが理解される（図では示さないが  $10^4$  エピソード中の生起頻度により確認している）。また SIE のみのエピソード平均（青線）は従来モデルの FES（赤破線）に近似する。ことから、以下の考察が導き出される。within-host と between-host をネスティングした本モデルでは、体内のウイルスダイナミクスを考慮する



**Fig. 2**  $\beta_{max}$  が同質性時の(a)全エピソードの FES 及び(b)平均をとった FES を示す。赤色：従来モデル ( $R_0 = 2.5$ ) の平均 FES、青色：本研究モデルの SIE 平均、緑色：本研究モデルの全エピソード平均。

ため、個々の体内のウイルス産生量ピークがずれることで感染力にもずれが生じ、ピーク時の感染力が強くともこのラグが因となって、初期感染者からの感染連鎖が絶たれてしまうエピソードが再現される。このような未然の感染爆発エピソードを除いた統計を取ると、その最終感染者サイズは time- $\beta$  相図の曲線下面積を一定とした従来の数理疫学モデルによるそれをほぼ一致する。

次に個々エージェントで time- $\beta$  相図の形が異なる、すなわち個々人毎に  $\beta_{max}$ （および  $\alpha$ ）が異なる場合を考察する。S 状態の個体  $i$  が I 状態の個体  $j$  から感染させられた時、 $i$  が有する  $\beta_{max}$  は式(7)で決定するとする。

$$\beta_{max}^i = \beta_{max}^j + \delta \quad (7)$$

ここで、 $\delta$  は  $\delta \in [-\sigma, \sigma]$ （今回は  $\sigma = 0.3$  に固定）の一様乱数であり  $\beta_{max}$  の変動幅を示す。 $\beta_{max}$  が決まれば、time- $\beta$  相図における 7 日間の時

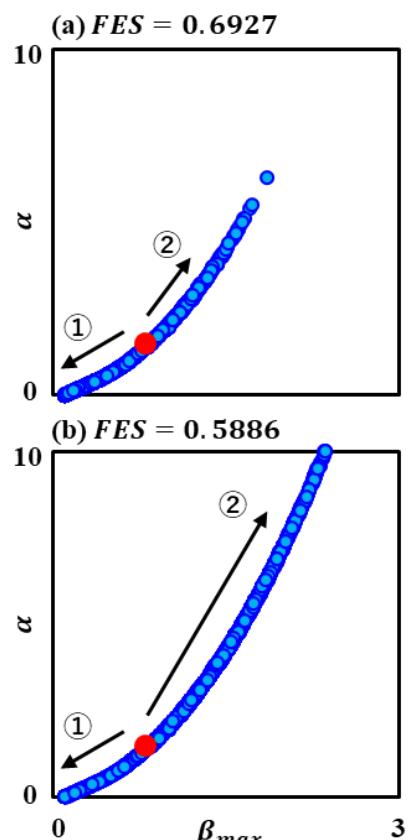
間積分値を一致させる条件から $\alpha$ は一意に定まる。この条件下でウイルス側の戦略としては、①長期間だが小さい $\beta$ （極限は従来モデルの固定 $\beta_{eq}$ ）、②短期間だがピーク $\beta$ が大きくなる 2 方向（後述 Fig.3 中の①と②参照）への進化が考えられる。Fig.3 は全 $10^4$ エピソードのうち SEI に収束した中から最大 FES（パネル(a)）と最小 FES（パネル(b)）のエピソードにおける全感染者数の ( $\beta_{max}$ ,  $\alpha$ ) をプロットしたものである。両者を比較すると、最小 FES の方が最大 FES より②の方向に進化している。また、既述のように最も感染が広がった(a)のケースであっても、その FES は従来モデルの FES と同程度（而して稍小さな値）であったことから、ウイルスにとっての最適戦略は、①すなわち $\beta$  はピークがない平坦な感染力が長期間にわたり続く「細く長く」の方向であると言える。

## 結言

体内的ウイルス量に応じて宿主の感染力が変動する体内ウイルスダイナミクス (within-host) と between-host ダイナミクスをネスティングした感染症モデルを構築した。MAS による解析により、本モデルでは、初期感染者からの感染連鎖が初期に絶たれる未然の感染エピソードが再現され、感染拡大となるエピソードの最終感染者サイズは従来の数理疫学モデル SIR による結果とほぼ同等となる。 $R_0$ から求まる $\beta$ を Infectious 期間中に定値で与えるマクロな考え方が従来の数理疫学モデルでは前提にされているが、これはウイルス側からミクロに見ると最も感染拡大が生じ易い極限であることを意味する。

## 謝辞

本研究の一部は科研費（19KK0262, 20H02314, 20K21062）による。また、本研究は九州大学情報基盤研究開発センター研究用計算機システムを利用した。記して謝意を表す。



**Fig. 3** SIE の(a)最大 FES と(b)最小 FES エピソードの全感染者について  $\beta_{max}$  及び  $\alpha$  をプロットした図。赤点は初期感染者を示す。

## 参考文献

- [1] K. Dietz, J. A. P. Heesterbeek, and D. W. Tudor,; The basic reproduction ratio for sexually transmitted diseases part 2. Effects of variable HIV infectivity, *Math. Biosci.*, **117**, 1–2, 35–47, Sep. 1993
- [2] A. Handel and P. Rohani,; Crossing the scale from within-host infection dynamics to between-host transmission fitness: a discussion of current assumptions and knowledge, *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, **370**, 1675, 20140302, Aug. 2015
- [3] P. Baccam, C. Beauchemin, C. A. Macken, F. G. Hayden, and A. S. Perelson,; Kinetics of Influenza A Virus Infection in Humans, *J. Virol.*, **80**, 15, 7590–7599, Aug. 2006
- [4] A.-L. Barabási and R. Albert,; Emergence of Scaling in Random Networks, *Science (80-.)*, **286**, 5439, 509–512, Oct. 1999
- [5] William Ogilvy Kermack 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
- [6] D. T. Gillespie,; Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions, *J. Phys. Chem.*, **81**, 25, 2340–2361, Dec. 1977
- [7] C. M. Saad-Roy, A. B. McDermott, and B. T. Grenfell,; Dynamic Perspectives on the Search for a Universal Influenza Vaccine, *J. Infect. Dis.*, **219**, Supplement\_1, S46–S56, Apr. 2019

# 粒子数が幕分布に従う多分散粉体ガスのレオロジー

山路大樹, 石川遙登, 高田智史

東京農工大学 機械システム工学専攻

## 概要

粒子数が幕分布に従う多分散粉体ガスのレオロジーを運動論により記述する。粒子サイズの種類やサイズ比に対して系の粘性率がどのように変化するかを調べる。その結果、粒子サイズの種類を増やすと系全体の粘性率がある値に漸近していくこと、さらにサイズ比が大きくなると粘性率が単分散のものに漸近することを示す。また分子動力学シミュレーションにより、得られた結果の妥当性についても議論する。

## Rheology of polydisperse granular mixtures whose size distribution follows a power distribution

Taiki Yamaji, Haruto Ishikawa, Satoshi Takada

Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

## Abstract

The rheology of polydisperse granular mixtures whose number of particles follows the power distribution is described by the kinetic theory. We investigate how the viscosity of the system depends on the distribution. We find that the viscosity converges to a constant when the number of species of particles increases. We also show that the viscosity also converges to that of a monodisperse system when the size ratio becomes sufficiently large. These results are validated by performing the molecular dynamics simulations of the corresponding system.

## 1 はじめに

密度があまり高くない单分散の粉体ガスのレオロジーについては運動論による記述が有効であり [1, 2]、粒子シミュレーションの結果をよく再現できることが知られている [3, 4]。一方、現実の系は多かれ少なかれ異なるサイズの粒子から成る。このような系を記述するためには多分散に対応した運動論を構築することが必要となる。幸い、この場合においても理論の構築は進んでいるものの [2, 5]、粒子の分散が大規模に渡る系での議論は筆者らが知る限りあまりない。しかしこのような系、特に粒子分布が幕乗則に従う系は自然界においてはしばしば見られる [6, 7]。そこで本研究においては、多分散系の理論について復習するとともに、具体的に系が幕分布に従う場合

のレオロジーを議論する。

## 2 モデル

図 1 のように、3 次元系において質量  $m_i$ 、直径  $\sigma_i$  で決まる粒子が  $M (> 1)$  種類あると考える。ここで、 $\sigma_1 (\equiv \sigma) > \sigma_2 (= \alpha\sigma) > \dots > \sigma_M (= \alpha^{M-1}\sigma)$  および  $m_1 (\equiv m) > m_2 (= \alpha^d m) > \dots > m_M (= \alpha^{M-1}m)$  であると仮定する ( $\alpha < 1$ )。<sup>1</sup> また、これらの粒子が直径の  $-\beta$  乗 ( $\beta > 0$ ) に比例した数密度比  $\nu_i \sim (\sigma_i/\sigma)^{-\beta} = \alpha^{-(i-1)\beta}$  で存在しているとする。また系全体の粒子の充填率を  $\varphi$  と置くことにする。

<sup>1</sup> 本来、多分散系の連続極限を取るとこの  $\alpha$  は不要となる。しかしここでは議論を簡単にするためサイズを有限の種類に離散化させたときにサイズを特徴づける量として導入している。

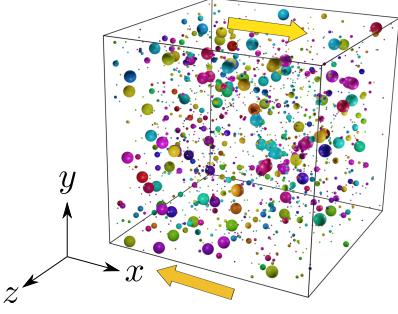


図 1: サイズ比  $\alpha = 1/2$  で  $M = 4$  種類の粒子が分散している場合の系の典型的なスナップショット。矢印は剪断の方向を示す。

種類 “ $i$ ” と “ $j$ ” の粒子が衝突する際のはねかえり係数を  $e_{ij}$  とすると、衝突後の粒子 1 (種類 “ $i$ ”) と粒子 2 (種類 “ $j$ ”) の速度  $v_1^{(i)\prime}$  および  $v_2^{(j)\prime}$  は衝突前の速度  $v_1^{(i)}$  および  $v_2^{(j)}$  を用いて、 $v_1^{(i)\prime} = v_1^{(i)} - \mu_{ji}(1 + e_{ij})(v_{12}^{(ij)} \cdot \hat{\sigma})\hat{\sigma}$  および  $v_2^{(j)\prime} = v_2^{(j)} + \mu_{ij}(1 + e_{ij})(v_{12}^{(ij)} \cdot \hat{\sigma})\hat{\sigma}$  と記述される。ここで  $v_{12}^{(ij)} \equiv v_1^{(i)} - v_2^{(j)}$ 、 $\mu_{ij} \equiv m_i/(m_i + m_j)$  であり、 $\hat{\sigma} = (\mathbf{r}_2^{(j)} - \mathbf{r}_1^{(i)})/|\mathbf{r}_2^{(j)} - \mathbf{r}_1^{(i)}|$  は粒子 1 と 2 を結ぶ単位法線ベクトルである ( $\mathbf{r}_1^{(i)}$  と  $\mathbf{r}_2^{(j)}$  は粒子 1 と 2 の位置ベクトル)。

これらの条件の下で、各粒子は運動方程式

$$\frac{d\mathbf{r}_k^{(i)}}{dt} = \frac{\mathbf{p}_k^{(i)}}{m_i} + \dot{\gamma}y_k^{(i)}\hat{\mathbf{e}}_x, \quad (1a)$$

$$\frac{d\mathbf{p}_k^{(i)}}{dt} = \mathbf{F}_k^{\text{imp}} - \dot{\gamma}p_{k,y}^{(i)}\hat{\mathbf{e}}_x, \quad (1b)$$

に従って運動する。ここで、 $\mathbf{p}_k^{(i)} \equiv m_i\mathbf{V}_k^{(i)} = m_i(\mathbf{v}_k^{(i)} - \dot{\gamma}y_k^{(i)}\hat{\mathbf{e}}_x)$ 、 $\dot{\gamma}$  は剪断率であり、 $\mathbf{F}_k^{\text{imp}}$  は番号  $k$  の粒子に作用する衝突由来の衝撃力、 $\hat{\mathbf{e}}_x$  は  $x$  軸方向の単位ベクトルである。また、運動論の結果の妥当性を調べるためにシミュレーションも行った(付録 A)。ここで、パラメータとしては  $d = 3$  次元、粒子数  $N = 1000$  個、充填率  $\varphi = 0.01$  を選び、無次元剪断率については  $\dot{\gamma}^* (\equiv \dot{\gamma}\sqrt{m/k}) = 1.0 \times 10^{-3}$  ( $k$  は粒子のバネ定数) を用いている。

### 3 運動論

運動方程式は以下の Boltzmann 方程式

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} - \dot{\gamma}V_{1,y} \frac{\partial}{\partial V_{1,x}} \right) f_i(\mathbf{V}_1, t) = \sum_j J_{ij}[\mathbf{V}_1 | f_i, f_j], \quad (2)$$

にマップできることが知られている [2, 8, 9, 10, 11]。以下では  $d = 3$  次元を考え、表記を簡単にするため

粒子の種類を表す上付き文字は省略し、 $f_i(\mathbf{V}, t)$  は種類 “ $i$ ” の粒子の速度分布関数とする。また、右辺の衝突項は

$$J_{ij}[\mathbf{V}_1 | f_i, f_j] = \sigma_{ij}^2 \int d\mathbf{V}_2 \int d\hat{\sigma} \Theta(\hat{\sigma} \cdot \mathbf{V}_{12})(\hat{\sigma} \cdot \mathbf{V}_{12}) \times \left[ \frac{f_i(\mathbf{V}_1'', t)f_j(\mathbf{V}_2'', t)}{e_{ij}^2} - f_i(\mathbf{V}_1, t)f_j(\mathbf{V}_2, t) \right], \quad (3)$$

で与えられる。ここで  $\mathbf{V}_1''$ 、 $\mathbf{V}_2''$  は衝突後に速度が  $\mathbf{V}_1$ 、 $\mathbf{V}_2$  となる場合の衝突前の速度である。Boltzmann 方程式 (2) の両辺に  $m_i V_\alpha V_\beta$  をかけ、それを速度で積分することにより、以下の応力テンソルの時間発展方程式を得る [8, 11] :

$$\frac{\partial}{\partial t} P_{\alpha\beta}^{(i)} + \dot{\gamma} \left( \delta_{\alpha x} P_{y\beta}^{(i)} + \delta_{\beta x} P_{y\alpha}^{(i)} \right) = - \sum_{j=1}^M \Lambda_{\alpha\beta}^{(ij)}. \quad (4)$$

ここで  $P_{\alpha\beta}^{(i)} \equiv \int d\mathbf{V} m_i V_\alpha V_\beta f_i(\mathbf{V}, t)$  は種類 “ $i$ ” の粒子についての応力テンソル、 $\Lambda_{\alpha\beta}^{(ij)} \equiv - \int d\mathbf{V} m_i V_\alpha V_\beta J_{ij}[\mathbf{V} | f_i, f_j]$  は衝突モーメントである。なお、(4) 式はこのままでは閉じていない方程式となっているため、Grad 展開を用いることで式を閉じさせることにする [2, 8, 9, 10, 11]。この系においては (Bagnold 則に従い) 無次元化された温度  $\theta_i \equiv T_i / (m\sigma^2 \dot{\gamma}^2)$ 、異方温度  $\Delta\theta_i \equiv (P_{xx}^{(i)} - P_{yy}^{(i)}) / (n_i m \sigma^2 \dot{\gamma}^2)$ 、および剪断応力  $\Pi_{xy}^{(i)*} \equiv P_{xy}^{(i)} / (n_i m \sigma^2 \dot{\gamma}^2)$  ( $n_i$  は種類 “ $i$ ” の数密度) の時間発展を考えれば十分である [8, 11]。ここで  $\tau \equiv \dot{\gamma}t$  によって無次元化した時間を導入することにより、系のレオロジーは  $3M$  個の連立方程式 [8, 11]

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \theta_i = -\frac{2}{3} \Pi_{xy}^{(i)*} - \sum_{j=1}^M C_{ij} \tilde{\Lambda}_{\alpha\alpha}^{(ij)} \theta^{3/2}, \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} \Delta\theta_i &= -2\Pi_{xy}^{(i)*} \\ &- 2 \sum_{j=1}^M C_{ij} \theta^{3/2} \left( \tilde{\Lambda}_{xy}^{(ij)} \Delta\theta_i - \tilde{\Lambda}'_{xy}^{(ij)} \Delta\theta_j \right), \end{aligned} \quad (5b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} \Pi_{xy}^{(i)*} &= - \left( \theta_i - \frac{1}{3} \Delta\theta_i \right) \\ &- 2 \sum_{j=1}^M C_{ij} \theta^{3/2} \left( \tilde{\Lambda}_{xy}^{(ij)} \Pi_{xy}^{(i)*} - \tilde{\Lambda}'_{xy}^{(ij)} \Pi_{xy}^{(j)} \right), \end{aligned} \quad (5c)$$

により記述される。ここで、 $\theta \equiv \sum_i \nu_i \theta_i$  は系全体の温度であり、 $C_{ij}$  は  $m_{ij} \equiv m_i m_j / (m_i + m_j)$  および  $\sigma_{ij} \equiv (\sigma_i + \sigma_j)/2$  を用いて

$$C_{ij} \equiv 8 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\nu_j}{\sum_\ell \nu_\ell (\sigma_\ell / \sigma)^3} \frac{m_{ij}}{m} \left( \frac{\sigma_{ij}}{\sigma} \right)^2 \varphi (1 + e_{ij}), \quad (6)$$

で与えられる。また、 $\tilde{\Lambda}_{\alpha\alpha}^{(ij)}$ 、 $\tilde{\Lambda}_{xy}^{(ij)}$ 、 $\tilde{\Lambda}_{xy}^{\prime(ij)}$  は  $\epsilon_i \equiv m_i\theta/(m\theta_i)$  および  $\lambda_{ij} \equiv 2(\mu_{ij}\epsilon_j - \mu_{ji}\epsilon_i)/(\epsilon_i + \epsilon_j) + (\mu_{ji}/2)(3 - e_{ij})$  を用いて、

$$\tilde{\Lambda}_{\alpha\alpha}^{(ij)} \equiv \left( \frac{\epsilon_i + \epsilon_j}{\epsilon_i \epsilon_j} \right)^{3/2} \left[ \lambda_{ij} - \frac{\mu_{ji}}{2}(1 + e_{ij}) \right], \quad (7a)$$

$$\tilde{\Lambda}_{xy}^{(ij)} \equiv \frac{\theta_i^{-1}}{\sqrt{\epsilon_i \epsilon_j (\epsilon_i + \epsilon_j)}} \left( 1 + \frac{3}{5} \frac{\epsilon_i + \epsilon_j}{\epsilon_i} \lambda_{ij} \right), \quad (7b)$$

$$\tilde{\Lambda}_{xy}^{\prime(ij)} \equiv \frac{\theta_j^{-1}}{\sqrt{\epsilon_i \epsilon_j (\epsilon_i + \epsilon_j)}} \left( 1 - \frac{3}{5} \frac{\epsilon_i + \epsilon_j}{\epsilon_j} \lambda_{ij} \right), \quad (7c)$$

と書ける [8, 11]。以下では、(5) 式の定常解を求ることにより系のレオロジーを決定する。なお、この系においては常に Bagnold 則が成立している。

## 4 レオロジー

本章では前章の枠組みから決定される定常値から得られるレオロジーについて調べていく。以下では、充填率  $\varphi = 0.01$  とし、はねかえり係数が  $e_{ij} (\equiv e) = 0.9$  ( $i, j = 1, 2, \dots, M$ ) の場合を考える。

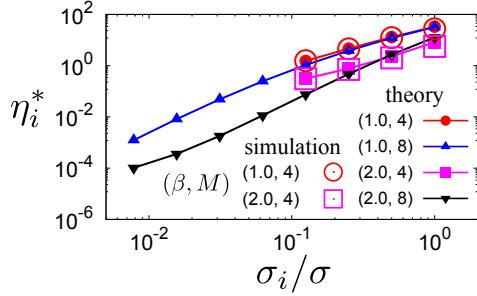


図 2:  $\alpha = 1/2$  のときにいくつかの  $(\beta, M)$  に対する各サイズ  $\sigma_i$  の粒子の粘性率  $\eta_i$  ( $\eta_i^* \equiv \eta_i / (n_i m \sigma^2 \dot{\gamma})$  は無次元粘性率) は無次元粘性率)。塗りつぶしおよび白抜きのマークはそれぞれ理論 (5) およびシミュレーションから得られた結果を示す。

まずは各サイズの粘性率  $\eta_i \equiv -P_{xy}^{(i)} / \dot{\gamma}$  に着目してみる。図 2 は  $M$  および  $\beta$  を変化させたときの粘性率のサイズ依存性である ( $\eta_i^* \equiv \eta_i / (n_i m \sigma^2 \dot{\gamma}) = -\Pi_{xy}^{(i)*}$  は無次元粘性率)。この結果は付録 A で説明するシミュレーションの結果ともよく一致している。

さて、ここで系全体の粘性率

$$\eta^{(M)} = \sum_{i=1}^M \eta_i, \quad (8)$$

を考えていく。図 3 を見ると、粒子の種類  $M$  が十分多くなると粘性率の値は一定の値  $\eta^{(\infty)}$  に収束し、

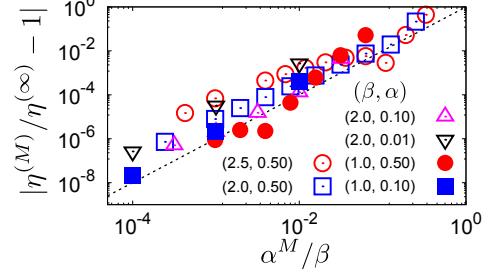


図 3: いくつかの  $(\beta, \alpha)$  の組み合わせに対する、種類数  $M$  を変化させた際の粘性率  $\eta^{(M)}$  の変化。ここで破線は  $(\alpha^M/\beta)^2$  を示す。

その際の収束の様子が近似的に

$$\left| \frac{\eta^{(M)}}{\eta^{(\infty)}} - 1 \right| \sim \left( \frac{\alpha^M}{\beta} \right)^2, \quad (9)$$

で与えられることがわかる。これより、サイズ分散の比が大きい ( $\alpha$  が小さい) ほど、また分布の幕  $\beta$  が小さいほどより少ない種類で一定値に収束していることがわかる。

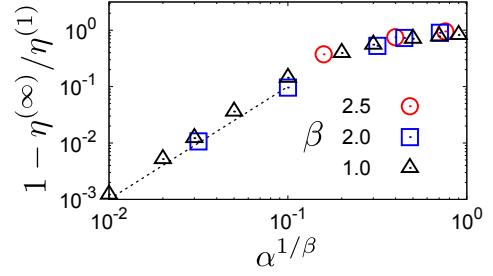


図 4: 分布の幕  $\beta$  をいくつか選んだ時の粘性率  $\eta^{(\infty)}$  のサイズ比  $\alpha$  依存性。破線は  $\alpha^{2/\beta}$  を示す。

図 4 は、サイズ比  $\alpha$  を変化させた際の粘性率の収束値  $\eta^{(\infty)}$  と单分散系の粘性率  $\eta^{(1)}$  との差をプロットしたものである。ここで、单分散系の粘性率  $\eta^{(1)}$  は

$$\eta^{(1)} = \frac{5(2+e)}{72(1+e)^2(3-e)^3} \sqrt{\frac{5(2+e)}{3(1-e)}} \frac{1}{\varphi} \frac{m}{\sigma} \dot{\gamma}, \quad (10)$$

で与えられる [9]。図 4 により、サイズ比  $\alpha$  が 0 に近づくほど、つまり隣り合ったサイズの比が大きくなるほど粘性率は单分散の結果に漸近していく。 $\alpha$  が十分小さくなると  $\eta^{(1)}$  との間の相対誤差が

$$1 - \frac{\eta^{(\infty)}}{\eta^{(1)}} \simeq \alpha^{2/\beta}, \quad (11)$$

の形で小さくなっている、ユニバーサルカーブの存在を示唆している。この傾向は、系全体の粘性率の

うち、大きな粒子の影響が支配的になっており [11]、隣り合ったサイズの比が大きくなる極限ではほぼ单一の最大サイズの粒子から粘性率が決まってしまうためであると考えられる。一方、多分散系の連続極限 ( $\alpha \rightarrow 1$ )においては  $\eta^{(\infty)} / \eta^{(1)} \rightarrow 0$  という結果になり、小さな粒子が存在したほうが系の粘性率が減少するということを示している。ただし、この場合の詳細については今後のさらなる研究が必要である。

## 5 まとめ

本研究では粒子数が幕分布に従う場合の多分散粉体ガスのレオロジーを運動論を用いて記述した。運動論により求めた、各サイズの粒子の粘性率の分布がシミュレーション結果をよく再現すること、系全体の粘性率は粒子の種類を増やすと一定値に収束していくこと、さらにその収束値はサイズ比が大きくなるにしたがって单分散系の結果に収束する一方、連続極限においては粘性率が小さくなるという結果を得た。一方、これらの結果は系の連立方程式を数值的に解くことにより得られたもので、結果を完全には理論的に証明できたわけではない。今後は本研究で得られた知見を基に、それらの方程式を満たす定常解を解析的に求めることを試みたい。

本稿では稀薄系にのみ着目した議論を行った。今後の方向性として、まずは有限濃度の系への理論の拡張などが考えられる。これについては单分散有限濃度系の解析 [12] を適用できることが期待される。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20K14428 および JP21H01006 の助成を受けたものです。

## A 粒子シミュレーション

本付録では、運動論の結果の妥当性を調べるために実行した粒子シミュレーションの概要について述べる。シミュレーションにおいてはバネとダッシュポットで与えられるソフトコア系の相互作用を考え、これを考慮した運動方程式 (1) を時間刻み  $\Delta t$  で積分することで各時刻の粒子の位置および速度を計算していく。また、充填率を  $\varphi = 0.01$  に固定し、全粒子数を  $N = \sum_i N_i = 10^3$  (種類 “ $i$ ” の粒子数を  $N_i$  と置いた) とした。さらにシステムサイズについては  $L = [\sum_i N_i \pi \sigma_i^3 / (6\varphi)]^{1/3}$  で決定した。

図 2 にシミュレーションにより求めたサイズに依

存した各種類の粒子の粘性率をプロットしている。これらの結果は運動論の結果をよく正当化していることがわかる。しかしながら現実の系のように多分散の連続極限を再現するためには  $M \rightarrow \infty$  とする必要があり、今回行った  $M = 4$  のシミュレーションでは不十分である。ただし、粒子サイズが多岐にわたる ( $M \gg 1$ ) と、それに対応して粒子数  $N$  を多く用意する必要があり、計算時間が増大する。これについて手法についての改良が今後必要となる。

## 参考文献

- [1] N. V. Brilliantov and T. Pöschel, *Kinetic Theory of Granular Gases* (Oxford University Press, New York, 2004).
- [2] V. Garzó, *Granular Gaseous Flows —A Kinetic Theory Approach to Granular Gaseous Flows—* (Springer Nature, Cham, 2019).
- [3] N. Mitarai and H. Nakanishi, Phys. Rev. E **75**, 031305 (2007).
- [4] S. Chialvo and S. Sundaresan, Phys. Fluids **25**, 070603 (2013).
- [5] V. Garzó, J. W. Dufty, and C. M. Hrenya, Phys. Rev. E **76**, 031303 (2007).
- [6] N. Brilliantov, P. L. Krapivsky, A. Bodrova, F. Spahn, H. Hayakawa, V. Stadnichuk, and J. Schmidt, Proc. Natl. Acad. Sci. **112**, 9536 (2015).
- [7] H. Stünitz, N. Keulen, T. Hirose, and R. Heilbronner, J. Struct. Geol. **32**, 59 (2010).
- [8] J. M. Montanero and V. Garzó, Physica A **310**, 17 (2002), Mol. Sim. **29**, 357 (2003).
- [9] A. Santos, V. Garzó, and J. W. Dufty, Phys. Rev. E **69**, 061303 (2004).
- [10] H. Hayakawa and S. Takada, Prog. Theor. Exp. Phys. **2019**, 083J01 (2019).
- [11] S. Takada, H. Hayakawa, and V. Garzó, arXiv:2107.10522.
- [12] S. Takada, H. Hayakawa, A. Santos, and V. Garzó, Phys. Rev. E **102**, 022907 (2020).

# 阪神高速ETC統計データの時間的規則性

榎本大悟<sup>1,2</sup>, 上東貴志<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学 計算社会科学研究センター

<sup>2</sup> 理化学研究所 計算科学研究センター

## 概要

マルチケース並列交通シミュレーションに使用できる現実的な典型的OD(Origin-Destination)需要を得ることを目的に、阪神高速道路(株)により提供された、2013–2020年におけるETC統計データを解析した。その結果、データには強い規則性があり、平日ピーク時の利用台数は約4.5万台/hrで、午前と午後、週半ばと週末の間で周期的に増減していることが判明した。各料金所を出入口として利用する車両数は、日付、曜日によって典型的な値を持つことが判明し、現実的なODセットを生成することが可能であることが判明した。また、災害時においては大阪北部地震による利用者数の急激な変化や、COVID-19による利用者数の減少と回復が確認された。

## Temporal regularity of Hanshin Expressway ETC statistics

Daigo Umemoto<sup>1,2</sup>, Takashi Kamihigashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Center for Computational Social Science, Kobe University

<sup>2</sup> R-CCS, RIKEN

## Abstract

We analyzed the ETC statistics provided by Hanshin Expressway Co., Ltd. for the period 2013–2020 in order to obtain realistic typical OD(Origin–Destination) demand that can be used for multi-case parallel traffic simulation. The results show that there is a strong regularity in the data, with a peak weekday usage rate of around 45,000 vehicles/hr, with periodic increases and decreases between morning and afternoon, midweek and weekend. The number of vehicles using each toll gate as an entrance and exit was found to have typical values for different dates and days of the week. This allows to generate realistic OD sets. In the case of disasters, a sharp change in the number of users due to the Northern Osaka Earthquake and a decrease and recovery in the number of users due to COVID-19 were identified.

## 1 はじめに

近年、1次元の交通流は物理現象としてもよく理解されるようになった一方で[1]、複雑に結合した道路の上で成り立つ都市規模の交通はよく理解されたとはいえない。都市規模の交通現象を理解するにあたり、シミュレーションを用いた試みがなされてきたが[2, 3]、長期的・普遍的な交通計画を目的としたシナリオベースのシミュレーションが主流であり

[4]、日変動などの特徴を捉えた現実的かつ予測誤差の導出も視野に入れた中期的なタイムスケールに合致したシミュレーションの試みは例に乏しい。

都市交通全体の再現を目的とする場合、現実のOD需要の大半を含む典型的ODが必要である。都市スケールの実交通を分析対象とした研究としてETC統計データの分析が過去に試みられた例[5, 6, 7]が存在するが、分析対象を全交通量の20–30%程度しか代表しない上位50位のODに絞るなどの手法が

用いられており、新たに独自の分析が必要である。

本研究では、阪神高速から提供を受けた ETC 統計データを分析することにより、シミュレーションの入力として利用可能な典型的 OD の生成を試みる。また、大阪北部地震や、新型コロナ感染症および緊急事態宣言により生じた道路の使用状況における変動を提示し、災害時の交通予測についても考察する。

## 2 ETC 統計データの特徴

### 2.1 ETC 統計データの概略

阪神高速は料金収取のため、ETC 料金所を通過した自動車の車種・ID を収集している。特定の個人を識別不可能な状態とするため、時間分解能を 1 時間に粗くし、各時間 (9:00-10:00 等) の間に、各料金所から特定の料金所を目的地として入場した自動車の台数および車種 (普通車またはトラック) が記録された、2013/9/1 から 2020/10/31 までの 8 年分にわたる ETC 統計データの提供を受けた。阪神高速道路は総延長約 300 km、212 種の入口料金所、236 種の出口料金所があり、ETC 統計データは計  $212 \times 236 =$  約 50 万通りの OD ペアの情報を含む。

図 1 に、24 時間の時間分解能で、2017/1/1 -- 2020/10/31 までの全利用台数の総和を示す。1 日を均した需要はほぼ 3 万台/hr であることが読み取れる。2020 年中頃には急激な現象が見られるが、これは後述する通り COVID-19 の影響である。

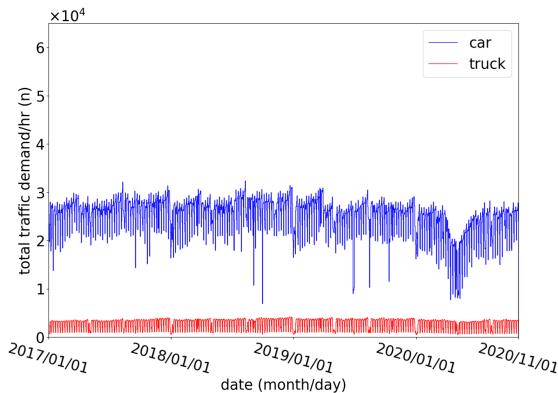


図 1: 24 時間の時間分解能で示した、2017/1/1 から 2020/10/31 までの全 OD 需要台数の変動。青・赤はそれぞれ普通車・トラック

図 2 に示す通り、週スケールに着目すると、際立つて周期的な変動が見られる。5 日間の平日の間はピーク時に 4.5 万台の水準であり、続く土曜日には 3.5 万台の水準、日曜日には 3 万台程度のピーク水準となる。朝昼の総交通需要にも周期的な増減が見られ、典型的な日変動の存在が示唆される。

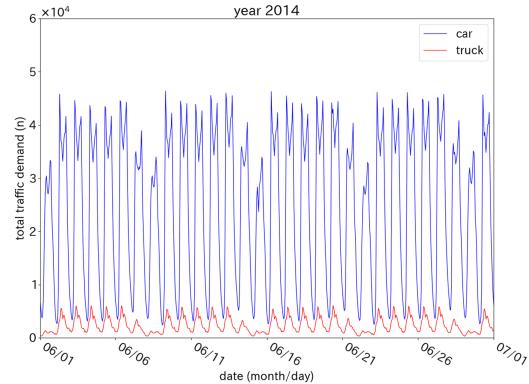


図 2: 1 時間の時間分解能で示した、2014/6/1 から 2014/7/1 までの全 OD 需要台数の変動

### 2.2 日変動

日変動が日によってどの程度異なるか観察するため、2013 年における日変動を重ねて描いたものを図 3 に示した。図 2 においても見られたように、土日と平日で変動が異なることが読み取れる。各時間の通行台数を成分とした 24 次元のベクトルは k-Means 法により平日・土曜日と日曜・祝日の 2 つのクラスタに分類できることが判明した。

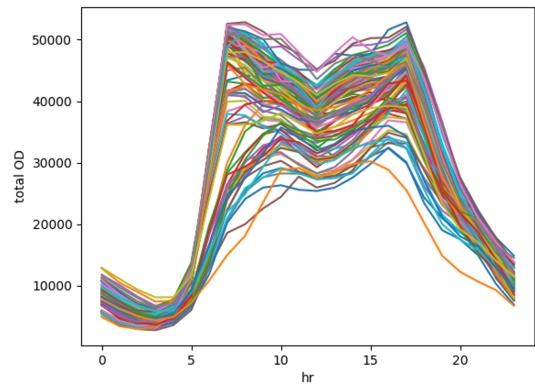


図 3: 2013 年における、各 1 日の 24 時間にわたる OD 需要の変動

実用上において、深夜から早朝の全 OD 需要から、その日の 24 時間にわたる通行台数が予測できると有用である。特に需要の多い平日・土曜における交通

需要の時間変動を 0:00–6:00 の全需要の総和で割ってスケールしたものが図 4 である。平日の時間変動はさらに月曜・土曜・それ以外の曜日の三つに分類可能であることが確認できる。

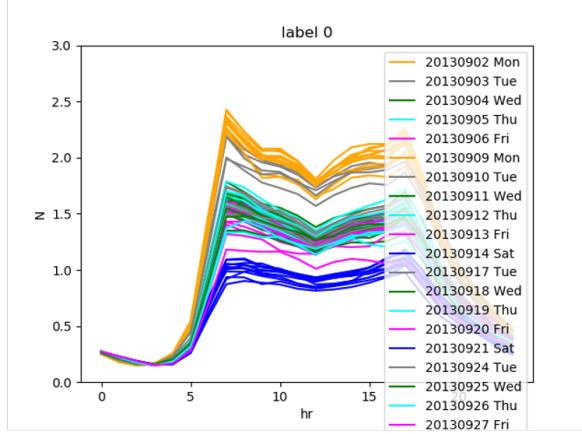


図 4: 0:00 – 6:00 の総需要で土・月曜に分類された日変動をスケールしたもの。オレンジ・青・それ以外の色はそれぞれ月曜・土曜・土・月曜以外の曜日

各分類の各時刻における平均値を代表値として用いると、およそ ±10% 程度のゆらぎを生じている。このゆらぎの範囲内において、交通需要が正規分布することが [5] 等によって指摘されているため、平均値の 10% 程度の幅を持つ正規分布による乱数を加えれば全 OD にゆらぎを付加した出力誤差を含むシミュレーションの実装が可能である。

### 2.3 OD 需要の傾向

シミュレーションの入力として利用可能な OD を生成するには、以上で論じた総需要に加え、各 OD が全需要と同様に、曜日と時間帯によって代表的な値を持つことを示す必要がある。図 5 では、最も需要が大きかった上位二つの OD ペア (安治川 → 北津守 と 北津守 → 安治川) を例にとり、OD 需要を縦軸・横軸座標とし、各時間帯を 1 点として描いた。4 年分のデータであるため 4 年 × 約 365 日 × 24 時間個の点が打たれている。図 10 は明確に複数のクラスタに分かれているため各クラスタに含まれるデータをひとつずつ調べたところ、特定の曜日・時刻に対応していた。図 5 では一例として、7:00 台の交通需要を予め曜日によって色を変えて示した。

各クラスタ内部での相関は弱く、互いに独立な確率変数として扱えることが示唆される。各クラスタ

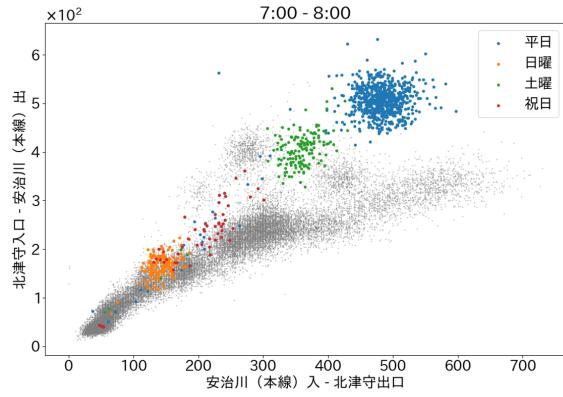


図 5: 需要が上位 2 位だった二つの OD ペア (安治川 → 北津守 および 北津守 → 安治川) に対し、1 時間あたりの需要台数を横軸・縦軸にとって描いたスキャッタープロット。一つの点がある日のある時間に対応。7 時台の需要について、平日・土曜・日曜・祝日をそれぞれ青・緑・オレンジ・赤で表示

の分布の幅は、平均値の 10% 程度であり、時刻と曜日を指定すれば典型的な値を持つ様子が確認できる。他の OD ペアについても分析したところ、同様の振る舞いが確認できた。

## 3 災害に対する交通需要の応答

図 6 に 2018/6/18 日付近の全 OD 需要台数の変動を示した。地震直後に大幅な需要台数の減少が観察され、翌日の午前中の需要ピークが 10% 程度高まっている。さらに翌日の需要はその前の週の同じ曜日と比較して、5% ほど低い水準に留まっている。

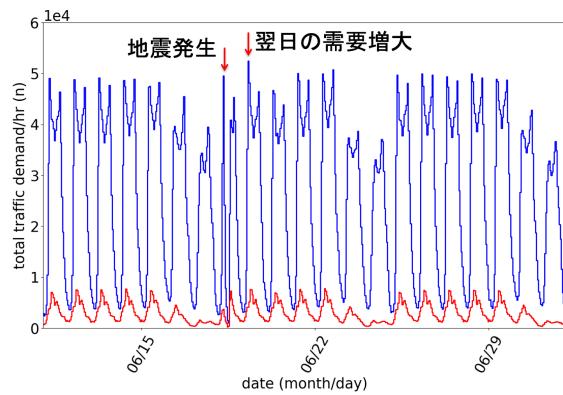


図 6: 大阪北部地震発生時における全 OD 需要の変動

図 7 には 2020 年の変動を通年にわたりデータが取得できた箇所まで細い青線 (普通車)・赤線 (トラッ

ク)で示した。COVID-19の感染拡大に伴う需要減少が確認できる。黒い垂線により阪神地域における緊急事態宣言の発令(4/7)・解除(5/21)、および厚生労働省が公開しているCOVID-19のPCR陽性者数を太い青線で示した。交通需要の減少ピークは陽性者数のピークに先んじ、2ヶ月ほどで回復している。第2波に相当する交通需要減少は見られない。需要の減少は緊急事態宣言の発出にも先んじている。

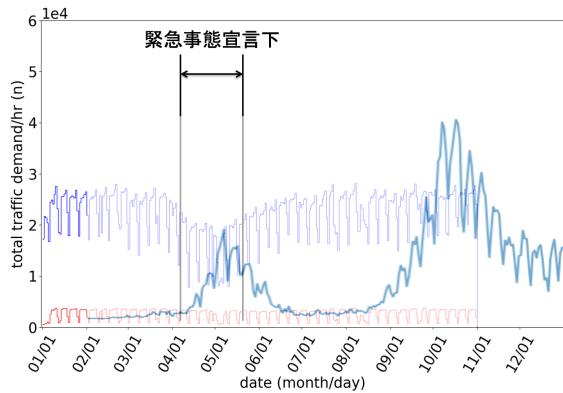


図7: 2020年における全OD需要の変動を細い青線(普通車)と赤線(トラック)で示した。右端の空白の箇所はデータ未取得区間。阪神地区における緊急事態宣言の開始・終了時を黒い垂線で、COVID-19陽性者数の推移を太い青線で示した

## 4 まとめと考察

阪神高速から提供された2013年9月1日から2020年10月31日までのETC統計データを分析し、規則的な日変動・週変動があることを確認した。総需要の日変動は曜日によって分類することができ、各時刻における実際の利用台数は、平均値に対し±10%程度の変動を持つことが判明した。また、ODペア台数には曜日と時間帯によって典型的な値があり、ゆらぎは平均値に対して±10%程度であることが判明した。これらの結果から、シミュレーションの入力として実データの他に、典型的な利用パターンの存在を仮定できると考えられる。実際にODを生成する際には、曜日と時刻を固定した上で実交通を測定し、該当するODの平均値を求め、それらに対し独立な乱数によってゆらぎを与えることによって、現実的なデータを生成できると考えられる。

災害発生について、大阪北部地震発生時には発生直後に利用台数が急減し、翌日の台数が増え、さらに翌日に減少する様子が確認された。これは地震

発生当日に満たせなかった需要を翌日の増加によって補ったものと解釈できる。さらにCOVID-19の感染拡大に伴って需要が減少した。大阪においては陽性者数のピークはさらに遅く8月であったという別の事実もあり、需要の減少は緊急事態宣言発出にも先んじていたため、交通需要と感染者数の増減や緊急事態宣言そのものとの強い関連性は認められず、事前に自主的な外出自粛が生じたことが示唆される。

上記の結果によれば、平常時においては典型値を用いることができるが、災害発生時には全く異なる需要が実現することが明らかである。災害時の交通予測を試みる場合、本研究に類する多数の事例を含む知見に基づいた、災害時における人の行動に関する深い洞察が必要であると考えられる。

## 5 謝辞

本研究で用いたデータは阪神高速道路株式会社と神戸大学の共同研究「大規模計算機及びAI技術を用いた交通・防災に関する応用研究」に基づいて提供され、遂行にあたりJST、未来社会創造事業、JP-MJMI20B4の支援を受けた。記して謝意を表する。

## 参考文献

- [1] Schadschneider, A., Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 313(1-2), 153-187, (2002).
- [2] 内種岳詞 & 伊藤伸泰, 計測自動制御学会論文集, 52(10), 545-554, (2016).
- [3] Y. Asano et.al., In Proceedings of the International Conference on Social Modeling and Simulation, plus Econophysics Colloquium 2014, 255-264, (2015).
- [4] 坂本邦宏 & 久保田尚, 電気学会誌 128.10: 684-687, (2008).
- [5] 飯田恭敬 & 高山純一, 高速道路と自動車, Vol.24, No.12, pp22-32, (1981).
- [6] 西内裕晶, 吉井稔雄, 桑原雅夫, & 割田博, 土木計画学研究・論文集, 27, 941-950, (2010).
- [7] 横田孝義, 玉川大, 谷口栄一, & 河本一郎, 第40回土木計画学研究・講演集, (2009)
- [8] D. Umemoto & N. Ito, Journal of Computational Social Science, 1, 493-500, (2018).

# 電車の形状が乗客の降車時間に与える影響

嘉幡聰至<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

ボトルネック部における歩行者の挙動は複雑である。このことから、満員の鉄道車両から乗客が一斉に降車する際、扉付近の車両形状が乗客の降車効率に影響を与えると考えられる。本研究では、セル・オートマトンを用いた数値シミュレーションにより、鉄道車両から乗客が降車する挙動を計算した。特に扉と座席の間のスペースの有無について検討した。その結果、扉と座席の間にスペースの無い車両の方が、スペースのある車両よりも、乗客の降車時間が短くなった。

## Effects of Train Shape on Passenger Egress

Satoshi Kabata<sup>1</sup>, Toshihiro Kawaguchi<sup>1</sup>

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

## Abstract

Behavior of pedestrians around a bottleneck is complicated. Thus, the shape of railway vehicle can affect the passenger egress at a terminal station. The behavior of the passenger egress is numerically simulated by using the Cellular Automaton in this study. The effect of clearance between the door and the seat on the egress time is investigated. As a result, the egress time from the vehicle without clearance between the door and the seat was shorter.

---

## 1 緒言

### 通勤ラッシュ時の電車に乗ると、大勢の人が一気に

降車しようとして、降りるのが遅れることがある。電車の車両の出口のようなボトルネックにおいては障害物が現する。

歩行者の流れをスムーズにすることはよく知られており、車両の中に乗客をランダムに配置した後、扉が開いたそれを裏付ける歩行者のボトルネックの脱出に関する実験も行われている。電車の車両において、扉周辺の構造を変更すれば、乗客の降車がスムーズになる可能性がある。

本研究では、終着駅で混雑した車両から全乗客が一斉に降車する様子について数値シミュレーションを行った。そのシミュレーションが実際の事象を再現して向に進行するがないようにしている。

いるかどうかを確かめるため、シミュレーションの検証を行った後、特に、扉と座席の間のスペースの有無に着目し、現行の車両と新たに提案する車両で降車にかかる時間を比較した。

## 2 シミュレーションモデル

### 2.1 基本モデル

本研究では歩行者の動きをセル・オートマトンで表す。

乗客の移動については、ムーア近傍による静的プロセスを用いて、各セルの状態を更新する。まず、各セルの状態を初期化する。次に、各セルの状態を更新する。最後に、各セルの状態を表示する。

アフィールドを適用した。ただし、座席角や戸袋部などを考慮して、一部のセルにおいては斜め方向に進行する。

以後、今回使用したシミュレーションの特徴的な点を説明する。

### 2.2 拡張クイックスタートモデル

通常のセル・オートマトンでは進行先のセルにす

に歩行者がいると進行できず、前を歩く人と常に 1 セル 間(時間刻み幅)は、セルのサイズと歩行者の歩行速度の間隔をあけて歩くことになる。広い場所においては、この挙動は合理的かも知れないが、混雑した車両からはもっと間隔を詰めて降車するのが普通であると考えられる。

そこで本研究では、歩行者が間隔を空けずに移動できるようにモデルの改良を行った。

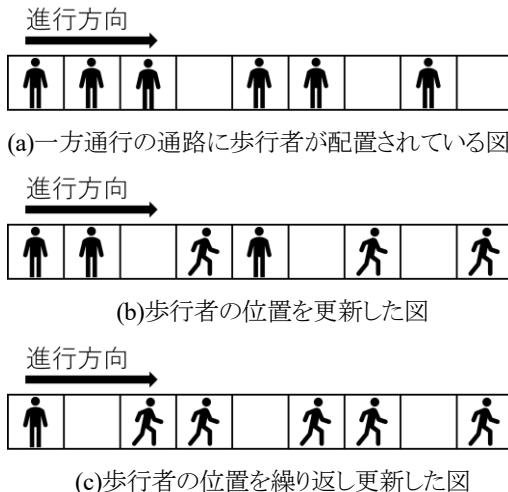


図 1: クイックスタートモデル

例えば、図 1(a)に示すように歩行者が一方通行の通路に配置された場合、通常のセル・オートマトンであれば、前方のセルが空いている歩行者(図 1(a)の左から 3, 6, 8 番目)のみが進行し、図 1(b)の状態になる。ここで、時間進行せずに前方が空いた歩行者(図 1(b)の左から 2, 5 番目)を移動させる。ただし、すでに移動した歩行者(図 1(b)の左から 4, 7, 9 番目)は前方が空いていても移動しない(図 1(c))。

ここまで得た結果はクイックスタートモデルで時間進行させたものと同様である。2 次元モデルになると、複数の歩行者が特定のセルに進行しようとすることがあるが、通常の 2 次元平面内の移動ルールと同様に一様乱数を用いて進行する歩行者を決定している。本研究では時間進行せずに移動させる操作を繰り返すことにより、一部の歩行者が進めないようにすること以外に複雑なルールを追加することなく、3 人以上の歩行者が間隔を空けずに移動できるようクイックスタートモデルを拡張した。本計算においては、車両の出口から最も遠い歩行者が出口に向かうまでに必要とする最小位置更新回数が 10 回であることから、最大 10 人までが間隔を空けずに移動できるように設定した。

## 2.3 乗客の歩行速度

シミュレーション上の位置更新 1 回当たりの経過時

間(時間刻み幅)は、セルのサイズと歩行者の歩行速度から決定される。鉄道車両内における実際の乗客の歩行速度を計測した。

鉄道車両内での歩行速度は一般的な平面歩行速度よりも小さいと考えられる。そこで、実際に JR 京都線大阪駅に停車している車両内を標準的な速度で歩行している乗客の歩行速度をストップウォッチで実測したところ、1.16[m/s]であった。本研究において、セルは一辺 0.45[m] の正方形としたため、この速度に対しての位置更新 1 回当たりの経過時間は 0.38[s]となる。

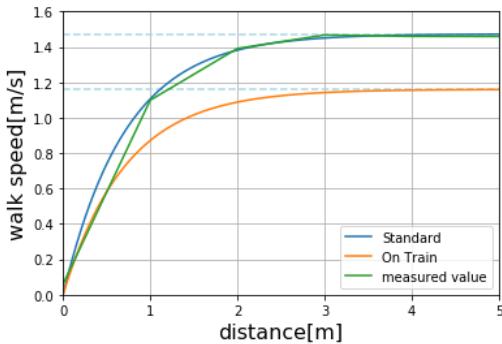


図 2:歩行距離による歩行速度の変化

人間健康工学研究センター[1]によると、歩行速度が最大になるまでに 2~3m の距離が必要である。歩行距離ごとの歩行速度の変化のデータ[1]から、20~70 歳の男女の平均歩行速度を歩行距離に対してプロットすると、図 2 の緑色の折れ線のようになる。

この変化が指数関数の形をとると仮定して近似する(図 2 の青色の曲線)と、式(1)が得られる。

$$V = V_{Max} \left(1 - e^{-\frac{x}{0.72}}\right) \quad (1)$$

ここで、 $x$  は停止位置からの歩行距離、 $V$  は距離  $x$  における歩行速度、 $V_{Max}$  は最大歩行速度である。図 2 の橙色の曲線は  $V_{Max}$  として上記の 1.16[m/s] を適用した曲線である。本研究では、乗客が移動する際の加速についても考慮した。

## 2.4 位置更新1回当たりの秒数

歩行速度の異なる歩行者が混在する場合、前方セルが空いているときの進行確率を歩行者ごとに設定することで表現することができる。

しかし、本計算のように歩行者の進行回数が最大 10 回程度と少ない場合、統計平均としての歩行速度をうまく表現できない。加えて、車両内に密集している状況では、前方の歩行者が進行するかどうかが大きく影響するため、1 人の歩行者の進行確率のプレによって計算結果が大きく左右されることになる。

実際に、進行確率によって歩行速度を表現する手法を用いて混雑した鉄道車両からの降車シミュレーションを実施したところ、実測値の2倍以上の降車時間がかかったことから、この手法を用いることは適切ではないと考えられる。

そこで、本研究では位置更新1回ごとに、すべての歩行者に対して、停止していた状態から何連続で進行している状態かを表す連続進行数を歩行者ごとに取得して、車両内での歩行速度の変化の近似曲線の関数をもとに、位置更新内で動いた歩行者の歩行速度の平均値と、セルのサイズから位置更新1回当たりの時間刻み幅を計算することとした。

また、後方を歩行する歩行者aが前方を歩行する歩行者bよりも歩行速度が大きいのに後ろについて歩くということは現実的ではないので、歩行者aの連続進行数を歩行者bの連続進行数以下の値にしている。

この手法は個々の歩行者が加速しながら移動する挙動を正確に表現できるものではないが、加速しながら移動する歩行者を含む集団の全体的な挙動を定量的に模擬できるものと考えられ、混雑した鉄道車両からの降車時間について精度向上につながると期待できる。

## 2.5 衝突閾数の導入

全ての歩行者が進行方向を決定した後、複数の歩行者の進行するセルが、重複することがある。本研究では柳澤[3]を参考に、衝突閾数を導入した。

衝突が起こっても無理矢理進もうとする確率は、柳澤ら[4]を参考に、衝突を発生させている人数と衝突係数から与えた。

## 2.6 歩行者の初動

人は歩行速度が最大になるまでにだけでなく、動き出すまでにもある程度時間がかかる。

人間健康工学研究センター[1]によると、音と光による合図を受けてから動き出すのにかかる時間は、満員電車をよく利用すると考えられる20~70歳の男女で平均値をとると、0.88秒であった。

前方の歩行者が動き出す瞬間を多少予測できとはいえる、乗客全員が停止した状態から一斉に動き出すことは現実的ではないため、本計算は、乗客の歩行速度を求めるのに必要となる連続進行数が0回目である歩行者については、位置更新の繰り返しを2回までとした。

## 3 シミュレーション検証

JR京都線大阪駅において、大阪駅を終着駅とする

快速列車に対して、乗客全員が降車し終えるのにかかる時間、合計人数、5秒ごとの降車人数をビデオカメラの映像を用いて個人で測定した。

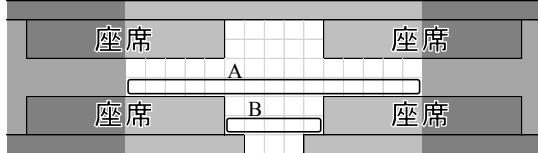


図3:JR京都線の快速急行列車の形状

現状の快速列車車両を模した領域(図3)から乗客が降車する様子をシミュレーションし測定結果と比較した。経過時間に対して車両から降車した乗客の累積人数をプロットした結果を図4に示す。計測した車両からの降車人数が44人であったため、シミュレーション上にも乗客を44人配置した。計算は初期状態を変化させ、5回行なったものをプロットしている。初期状態において乗客をランダムに配置しているため、5回の計算における降車挙動にはばらつきが見られる。

5秒、10秒において、本計算結果は実測値とよく一致していることがわかる。しかし、時間の経過とともに、本計算における降車人数は実測値を上回っていくことがわかる。つまり、本計算における乗客は実際の乗客よりも早く降車していることになる。

この違いについては、実際の乗客の降車挙動に原因があると考えられる。つまり、扉が開いてしばらくは普通に乗客が降車するが、急がない乗客は混雑を避けゆっくり降車しようとするため、時間の経過とともに降車のペースが落ちる。本シミュレーションではこれを考慮しておらず、全乗客が同じペースで降車しようとするため、前述の計測結果との差が生じたものと考えられる。

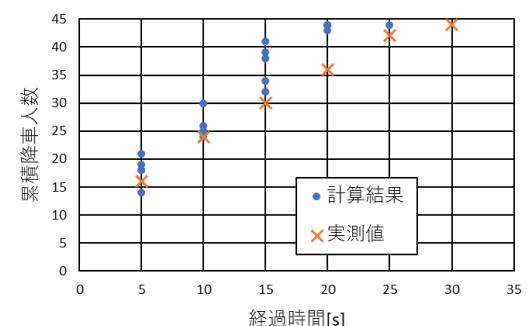


図4:降車人数の推移の実測値と計算結果の比較

## 4 結果と考察

現状の車両形状(図3)に対して、図5のように扉と座席の間のスペースがない車両を考え、乗客の降車の様子をシミュレーションした。2つの車両に対する計

算結果を比較することで、鉄道車両の扉付近の形状が乗客の降車挙動に与える影響について調べた。乗客の合計人数はどちらも座席に座っている人も合わせて60人とし、座席に座る人数も片側に10人ずつ、両側を合わせて20人と統一した。

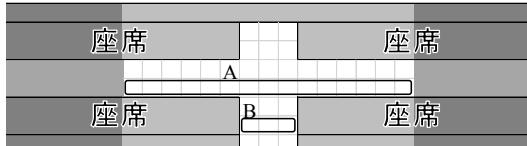


図 5:扉と座席の間にスペースがない車両モデル

それぞれの車両に対して10回ずつ計算を行い、降車にかかる時間を求めた。さらに、車両中央付近(図3、図5のA部分)、車両扉付近(図3、図5のB部分)、車両全体における乗客の衝突回数を計算した。結果を図6にまとめる。

ここで衝突回数とは、複数の乗客が同じセルに進行しようとした回数のことを意味し、位置更新ごとに、すべてのセルにおいて、乗客がそのセルに進行するかどうかにかかわらず、衝突閾数によって進行する確率が計算されるごとに回数を加算していく。衝突の発生によりアーチアクションが発生し、降車時間の遅れへと繋がる。

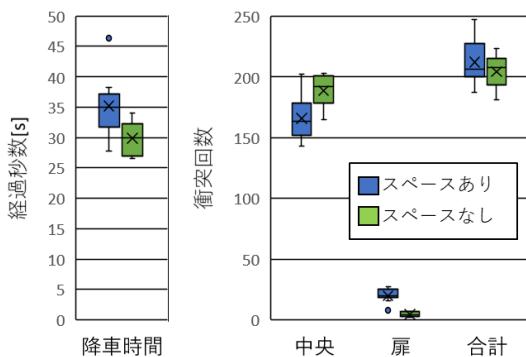


図 6:それぞれの場合の降車時間と衝突回数

降車時間に着目すると、扉と座席の間にスペースがある車両(以後、スペースがある車両と記す)よりも、扉と座席の間にスペースがない車両(以後、スペースがない車両と記す)の方が平均で約5.3秒(約15%)短くなった。これは現状の車両形状をスペースがない車両に変更することで乗客の降車時間を短縮できる可能性があることを示唆している。

衝突回数に着目すると、スペースがない車両の場合、中央付近のA部分ではスペースがある車両よりも多くなっているが、扉付近のB部分では少なくなっている、車両全体での衝突回数は4%程度少なくなっている。

乗客の衝突については車両内の全てのセルにおいて同様に発生するように設定しているが、衝突の90%前後がボトルネック部を含むA部分やB部分で発生していることがわかる。特に扉付近のB部分でのアーチアクションの発生は降車時間の遅れに繋がりやすいと考えられる。スペースがある車両では乗客はA部分とB部分の2段階でボトルネックを通過することになるが、スペースがない車両ではB部分のボトルネックが消滅している。このことによりB部分での衝突回数が少なくなり、スペースがない車両での降車時間の短縮に繋がったと考えられる。

## 5 結言

加速している歩行者を含む、混雑した鉄道車両からの降車挙動を表現するためのシミュレーション手法を提案した。扉と座席の間のスペースがない車両形状に変更することで、扉付近におけるアーチアクションが抑制され、降車時間を短縮できる可能性があることが示唆された。

## 謝辞

本研究はJSPS科学研究費補助金基盤研究(C)(課題番号:19K04936)の支援を受けた。記して謝意を表する。

## 参考文献

- [1] 一般社団法人人間生活工学研究センターHQL データベースサイト, 2001, 高齢者対応基盤整備計画研究開発 第2編データベース整備(動態・視聴覚特性), 32-34, 54-60, 203-209, 222-229.
- [2] 通商産業省工業技術院生命工学工業技術研究所, 1996, 設計のための人体寸法データ集.
- [3] 柳澤大地, 2014, 群集の一方向流・双方向流・退出過程とセルオートマトンモデル, 混相流, 28-3, 312-320.
- [4] 柳澤大地, 友枝明保, 西成活祐, 2008, 拡張プロアフレードモデルによるボトルネック周りの群集運動の解析, 応用力学研究所研究集会報告, No.19ME-S2.
- [5] Nishinari, K., Suma, Y., Yanagisawa, D., Tomoeda, A., Kimura, A. and Nishi, R., 2008, Toward Smooth Movement of Crowds, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008, 293-308.

# PQ方式によって稼働するエレベーター3基の運用効率改善シミュレーション

川口隼平<sup>1</sup>, 金井政宏<sup>1,3</sup>, 田中基大<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 久留米工業大学大学院電子情報システム工学専攻 <sup>2</sup> 久留米工業大学大学院自動車システム工学専攻

<sup>3</sup> 久留米工業大学工学部教育創造工学科

## 概要

久留米工業大学100号館にある3基のエレベーターは講義前後、講義に向かう人講義から帰る人によって非常に混雑する。そこで本研究では運用効率改善のため、キューイング方式の中でも優先度クラスを用いたPQ (Priority Queuing) 方式を用いることで、シミュレーションによって待ち行列の改善について調査した。その結果、各エレベーターが移動する階を指定することで運用効率の改善を行うことができると分かった。

## Operation efficiency improvement simulation of 3 elevators operated by Priority Queuing

Shumpei Kawaguchi<sup>1</sup>, Masahiro Kanai<sup>1,3</sup>, Motohiro Tanaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronics and Information System Engineering, Kurume Institute of Technology

<sup>2</sup> Department of Automotive System Engineering, Kurume Institute of Technology

<sup>3</sup> Department of Education and Creation Engineering, Kurume Institute of Technology

## Abstract

The three elevators in Kurume Institute of Technology Building 100 are very crowded before and after the lecture, depending on who goes to the lecture and who returns from the lecture. Therefore, in this study, in order to improve operational efficiency, we investigated the improvement of the queue by simulation by using the PQ (Priority Queuing) method that uses the priority class among the queuing methods. As a result, it was found that the operational efficiency can be improved by designating the floor on which each elevator moves.

---

## 1 はじめに

シチズン時計株式会社が行ったビジネスパーソンの待ち時間意識調査 [2] によると「“30秒まで”で半数近く（47.7%）が、“1分”経つと4人に3人強（76.7%）がイライラを感じます。」とあり、30秒から1分以上の待ち時間が発生する場合において、待ち時間を短縮することはエレベーターの快適さ改善において重要な課題であると考える。本研究では久留米工業大学9階建のビルにある3基のエレベー

ターをモデルにシミュレーションを作成し、現実では検証しにくい事象を再現することでエレベーターにおける最適化について解くことを目標とする。

## 2 シミュレーションについて

シミュレーションでは講義前の時間において、客が講義の教室に向かうため1階のメインターミナルから各講義室へ上向きのトラフィックが発生するパターン Up-peak traffic をモデルにする。

## 2.1 仮説

先行研究 [1] によると、学生がエレベーターに到着した順で搭乗することで複数の目的階に停止することになり、停止する階を振り分けることができれば停止する階を減らすことが出来るとある。このことから客全体の目的階に合わせエレベーターに乗る人の階数を指定することで効率化が可能であると考えた。

## 2.2 モデル化

久留米工業大学100号館にある3基のエレベーターに対し授業前に発生する待ち行列に、本研究では以下の条件を加えることモデル化をした。

1. 客は到着順にサービスを受けようとする。
2. かごに乗る人数は常に一定である。

これによって、到着する客が複数人であっても微小時間で考えることで1人ずつ到着するため、本学エレベーターは1階をメインターミナルとして3基のエレベーターに1列の行列ができるモデルはケンドール記号でM/M/3として表すことができる。

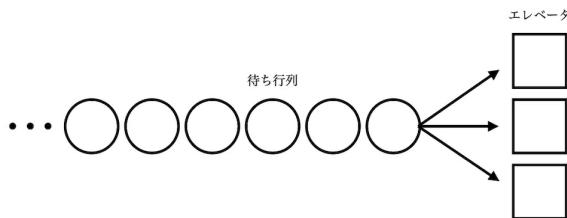


図1: モデル M/M/3 のイメージ

## 2.3 解析

ケンドール記号 M/M/s で表すことのできるモデルでは、システムの効率を平均稼働率  $\rho$  として表すことが出来る。また平均稼働率は平均到着率  $\lambda$  と平均サービス率  $\mu$  から算出することができ、平均到着率は以下のようになる。

$$C = \text{エレベーターを利用するクラス数}$$

$$n_p = 1 \text{ クラスの人数}$$

$$t = \text{エレベーターの総稼働時間}$$

$$\lambda = \frac{C \times n_p}{t}$$

また平均サービス率は平均サービス時間の逆数となるため、平均サービス時間  $T_s$  を算出

$$x_i = i \text{ 階への平均サービス時間}$$

$$n = \text{総利用客数}$$

$$T_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

この平均サービス時間は確率によってランダムに発生するため、シミュレーション内で収束するまで繰り返す。このとき分散は次のように計算でき、

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2$$

こうして収束した平均サービス時間から平均サービス率  $\mu$  を算出できる。

$$\mu = \frac{1}{T_s}$$

しかし、平均サービス率に関してはエレベーターの性質上そのまま利用することができない。なぜならエレベーターは客の全員送り切るまでがサービスとなるが、サービスが終わってから次のサービスを開始するためにメインターミナルに戻ってくる必要があるからである。そこで、エレベーターがサービスを開始しメインターミナルに戻ってくるまでの時間をサービス時間  $T_b$  とし同じように計算すると次のようにになる。

$$n_b = \text{かご内の人数}$$

$$\mu = \frac{n_b}{T_b}$$

## 2.4 構成

以上より、本研究で作成したシミュレーションの構成は次のようになる。また移動時間は実際に計測を行なった値(図2)を用いる。

1. あらかじめ設定した人数がポアソン到着をする。
2. ランダムな目的階を持った客にサービスを行う。
3. 往復時間をもとに平均サービス率を算出。
4. 平均到着率と平均サービス率より、平均稼働率の算出。
5. 同じ条件で繰り返し、平均稼働率の収束も行う。

## 2.5 優先度

仮説を検証するため、待ち行列に対して行き先階によって次に乗る客を決定するアルゴリズムを作成した。仮説では到着階を減らすことで効率化することができるため、目的階が同じ客を優先して同じか

	移動時間	1階あたり
2階	12.2秒	12.2秒
3階	15.3秒	7.6秒
4階	18.4秒	6.1秒
5階	20.7秒	5.2秒
6階	22.7秒	4.5秒
7階	24.9秒	4.2秒
8階	27.1秒	3.9秒
9階	29.3秒	3.7秒

図2: 1階から各階への移動時間

ごに載せることで到着階数を減らすことができると思った。

しかし、同じ階に行く人がおらず最後まで優先度が低くなることで長時間待たされる客がいる可能性がある。そこで到着も考慮した評価を行なった。つまり到着時刻が早いほど優先順位は高くなり、さらに同じ階に行く人が多いほど優先順位は高くなる。

優先順位  $P$  は次の式で求める。また優先順位は値が小さいほど高い。

$$r = \text{同一目的階人数優先度}$$

$$N_d = \text{階数 } d \text{ を目的階とする人数}$$

$$T_a = \text{到着時刻}$$

$$t = \text{乗り込み時刻}$$

$$P = \frac{r}{N_d} + \frac{T_a}{t}$$

また同一目的階人数優先度  $r$  とは、同じ階に行く人が多いグループを優先するか、到着時刻を優先するかの比率を決める値である。

### 3 結果及び考察

結果では前述の優先度  $r$  について 1・10・50 で行い、最も平均待ち時間が減った割合が高かったものについて考察する。

またビジネスパーソンの待ち時間意識調査 [2] より、イライラする待ち時間の基準を 30 秒・60 秒と考え、構成における 2 番目でサービスを行う際に優先度をつけない状態で行なったシミュレーションを実験 1、優先度をつけかごの載せる客を振り分けたシミュレーションを実験 2 とし、それぞれの各人数パターンにおける平均待ち時間の全データをもとにヒストグラムで比較し考察した。

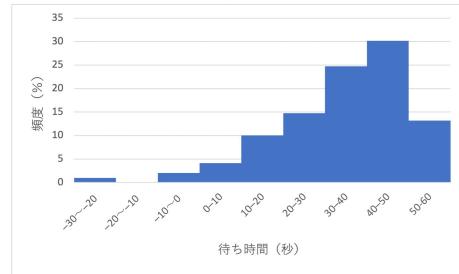


図3: 6クラス実験1

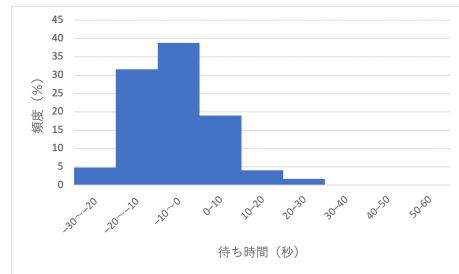


図4: 6クラス実験2

### 3.1 結果

ひとクラス 30 人、6 クラスが利用したパターンでは基準は 30 秒だけとなり、実験 1 で 30 秒を超えたパターンが全体のおよそ 68% あったことに対して実験 2 では 1 パターンもなく、大幅な改善が見られた。

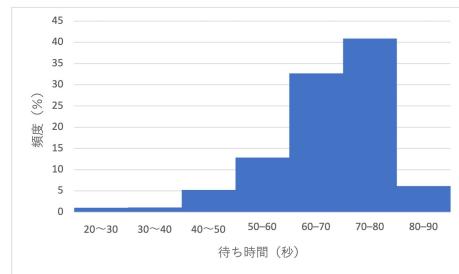


図5: 7クラス実験1

7 クラスのパターンでは 60 秒を超えたパターンもあり、実験 1 で 30 秒以上・60 秒以内であったパターンが全体のおよそ 19%、60 秒以上となったパターンはおよそ 79% であったことに対し、実験 2 では 30 秒以上・60 秒以内であったパターンが全体のおよそ 52%、60 秒以上となったパターンはおよそ 0.2% となった。

また 30 秒以上全てのパターンに関して実験 1 では 99% であったが、実験 2 では 52% となり 6 クラス

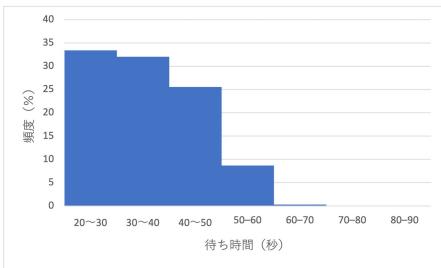


図 6: 7 クラス実験 2

のパターンと同様に改善が見られた。

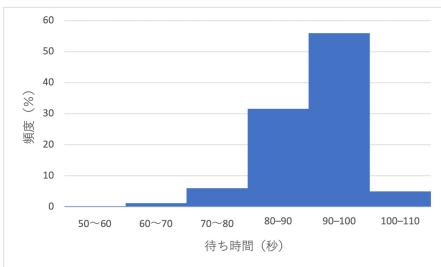


図 7: 8 クラス実験 1

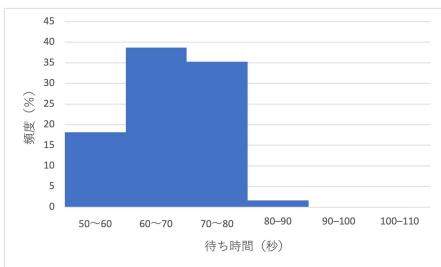


図 8: 8 クラス実験 2

8 クラスのパターンでは実験 1 で 60 秒以上のパターンが約 99% となりほぼ全てとなつたが、実験 2 では約 75% となった。また 30 秒以上 60 秒以内となつたパターンは約 24% となり同様に改善が見られた。

### 3.2 考察

平均稼働率  $\rho$  が改善されると、必然的に平均待ち時間も改善されるため、各階の利用人数に変動がないエレベーター・システムであれば、各エレベーターの目的階による利用制限をすることで十分な効率化が見込めることがわかった。

またこの効率化をするにあたり重要なことは、各エレベーターの平均稼働率  $\rho$  ができるだけ均等になるように設定することであると考える。エレベーター

を 1 つのサービスと考えたとき、どれか 1 つでも偏りがあれば偏ったエレベーターを利用している客が不満を感じるきっかけになる可能性がある。

以上から、各階の利用人数とエレベーターの移動時間がわかれば、利用制限による最適化が可能であることが分かった。

## 4 まとめ

本研究ではエレベーターを外部から支援することで運用効率の改善を行うシステムについて、シミュレーションをもとに解析を行なった。

また待ち行列理論において平均サービス率  $\mu$  は平均サービス時間の逆数となるが、サービス時間ではなくかごがメインターミナルに戻りサービスが可能となるまでの時間の逆数とすることで、シミュレーション結果をより現実に近いものにできた。

最後に利用制限による振り分けからわかるように、本学エレベーターやオフィスビルのエレベーターを最適化するには各エレベーターが移動する階を指定するだけで十分な効率化ができる。

例えばオフィスビルのような常に各階の利用人数が一定になる場所では、メインターミナルで各エレベーターが移動できる階を示すだけで効率化でき、本学エレベーターでは授業によって客の目的階が変わるために、教務システムと連携することで時間ごとに各エレベーターの目的階を示すことで効率化が可能である。

今後の課題として本研究の結果はあくまでシミュレーションによるため、実証実験を行う必要があると考える。

また、本研究ではネットワークのキューイング方式の中で PQ 方式を用いた制御を行なったが、その他 WFQ(Weighted Fair Queuing)、LLQ(Low Latency Queuing) などについてもエレベーターのモデルに当てはめて最適解について引き続き研究を行う。

## 参考文献

- [1] 宇都薰乃, 金井政宏, “イライラしないエレベーター～エレベーター 3 基の乗降人数の計測と分析”, 交通流と自動駆動粒子系シンポジウム論文集, (2018).
- [2] シチズン時計株式会社, “ビジネスパーソンの「待ち時間」意識調査”, (2018).

# 最適速度旋回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

山田 将司<sup>1</sup>, 李 方正<sup>1</sup>, 本田 泰<sup>2</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> 室蘭工業大学大学院 しくみ解明系領域

## 概要

我々は以前、二次元最適速度モデルという自己駆動モデルを知能として組み込んだ2次元最適速度ロボットを開発した。今回新たに、スキッドステアリングにより4輪で走行するロボットを開発した。以前の2輪走行アルゴリズムをもとに、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。また、接触センサから距離センサに変更することで、障害物に衝突する前に方向転換を行うようにアルゴリズムを変更した。本研究の目的は2輪の走行ロボットで観測されたひも状走行が4輪のロボットでも観測できるか実験を行った。結果として、4輪の走行ロボットでもひも状走行は観測された。

## String-like traveling of skid-steering 2D robots by Optimal Velocity Turning Algorithm

Masashi Yamada<sup>1</sup>, Li Fangzheng<sup>1</sup>, Yasushi Honda<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> College of Information and System, Muroran Institute of Technology, Japan

## Abstract

We have developed the 2D optimal velocity robot which is made by incorporating a self-driven model which is named the 2D optimal velocity model previously. And recently, we also developed a robot that run by four whells with skid steering. Then, we derived a 2D optimal velocity turning algorithm for four-wheels driving by skid steering based on the two-wheel driving algorithm previously. In addition, by changing from the contact sensor to the distance sensor, the algorithm also is changed to another algorithm which operates as robot's direction change before colliding with obstacles. The purpose of this study was to check if the string-like motion can be observed by the four-wheels land-moving robot as same as two-wheels land-moving robot. As a result, string-like motion was also observed with a four-wheel land-moving robots.

## 1 はじめに

歩行者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。我々はその中で交通流モデルである一次元最適速度モデルを2次元に拡張した2次元最適速度ロボットを開発した[1]。

環境と走行ロボットが相互作用することで行動を

創発する。本研究では、スキッドステアリングで走行するロボットを使用して実験を行った。スキッドステアリングとは、スキッド(滑る)とステアリング(操舵)という旋回方法であり、左右のタイヤを滑らせながら旋回する。走行ロボットの身体性が変化しても先行研究[1]と同じひも状走行が観測されるか確かめることを本研究の目的とする。

## 2 二次元最適速度モデル

二次元最適速度モデルは以下の運動方程式(1)式で表される[2]。自己のロボットの速度と最適速度の差から、加速度を求めるモデルである。

$$\ddot{\mathbf{r}}_j = a \left[ \sum_k \mathbf{V}(\mathbf{r}_{kj}, \dot{\mathbf{r}}_j) - \dot{\mathbf{r}}_j \right] \quad (1)$$

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}_{kj}, \dot{\mathbf{r}}_j) = (1 + \cos \theta_{kj}) f(r_{kj}) \mathbf{n}_{kj} \quad (2)$$

$$f(r_{kj}) = \alpha [\tanh \beta (r_{kj} - b) + c] \quad (3)$$

$\mathbf{V}(\mathbf{r}_{kj}, \dot{\mathbf{r}}_j)$  は  $j$  番目のロボットが  $k$  番目のロボットから受ける相互作用項である。 $\mathbf{n}_{kj}$  は  $\mathbf{r}_{kj}$  の単位ベクトルを表す。 $\theta_{kj}$  は  $j$  番目のロボットの速度ベクトル  $\dot{\mathbf{x}}_j$  と相対位置  $\mathbf{r}_{kj}$  のなす角であり、 $(1 + \cos \theta_{kj})$  は異方性を表す項である((2)式参照)。モデル上では、 $\mathbf{n}_{kj}$  は  $\mathbf{r}_{kj}$  の単位ベクトルだが、ロボットに組み込む際に、 $\mathbf{n}_{kj} = (\sin(\theta_{kj}), \cos(\theta_{kj}))$  と近似した。 $f(r_{kj})$  は最適速度関数であり、ロボットとの距離  $r_{kj}$  に応じて引力または斥力を決定する関数である((3)式参照)。

本研究ではこのモデルを離散化し、走行ロボットの速度ベクトルを走行ロボットの前進する速度と旋回する速度に変換する必要がある。 $\Delta t$  秒後の  $\dot{\mathbf{r}}_j$  を離散化して求めると(4)式となる。(2)式内の  $\theta_{kj}$  は  $360^\circ$  反応できる範囲があるが、ロボットに搭載されているカメラの画角は約  $104^\circ$  である。よって、 $-52^\circ < \theta_{kj} < 52^\circ$  でなければ、カメラで他機体を認識できない。

4輪の接地面での速度  $v_L$ ,  $v_R$  を(7), (8)式で求める。ここでの  $v_L$  は進行方向左側の車輪の速度、同様に  $v_R$  は右の車輪の速度を表す。

先行研究[1]では角加速度を用いて計算していたが、本研究では角速度  $\omega$  を用いることとした((6)式参照)。角加速度を用いて計算した場合、走行ロボットはスキッドステアで旋回するため、アルゴリズム上の旋回角度とロボットが旋回した角度にずれが生じてしまう。旋回方法の変更により(7), (8)式内の  $d$  は車輪とロボットの中心との間の距離(図1参照)

だが、 $d$  を実際の値よりも大きくすることでより強い旋回力を得られるように変更した。先行研究[1]では  $d = 0.065[\text{m}]$  としていたが、本研究では、 $d$  を旋回力を調整するゲインとして扱うことにして、 $d = 5$  に調整した。

$$\dot{\mathbf{r}}_j(t + \Delta t) = \dot{\mathbf{r}}_j(t) + \Delta t \ddot{\mathbf{r}}_j(t) \quad (4)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_j(t + \Delta t) = (\dot{x}_j(t + \Delta t), \dot{y}_j(t + \Delta t)) \quad (5)$$

$$\omega = \arctan\left(\frac{\dot{x}_j(t + \Delta t)}{\dot{y}_j(t + \Delta t)}\right) \quad (6)$$

$$v_L(t + \Delta t) = \dot{r}_j(t + \Delta t) + d \cdot \omega \quad (7)$$

$$v_R(t + \Delta t) = \dot{r}_j(t + \Delta t) - d \cdot \omega \quad (8)$$

## 3 2次元最適速度ロボットの身体性

本研究では4輪駆動の走行ロボットで実験を行う(図1参照)。先行研究[1]では2輪とポールキャスターで走行するロボットであったが、本研究ではスキッドステアリングにより4輪で走行するロボットを使用する。左右の車輪はそれぞれ中央のギヤに繋がっていて、2つのサーボモータを用いて独立に回転させる。2輪から4輪へと変更した理由としては、2輪とポールキャスターでは地面に段差や凹凸がある場合ポールキャスターが引っかかるてしまう。4輪の場合だと走破性が高く、段差や凹凸がある場合でも2輪走行と比べ、比較的安定して走行が可能である。

本研究で使用するロボットにはtof距離センサとカメラ、2つのモータを用いる。カメラはRaspberry Pi Cameraというカメラで、他のロボットの方角と距離を検出している。tof距離センサは走行ロボットと壁や他機体との間の距離を測定している。進行方向正面に1つ、進行方向正面から左右  $45^\circ$  外側に向けたセンサを左右に1つずつ、合計3つ装着している。tof距離センサとカメラから得られた情報を利用して走行ロボットは2つのサーボモーターを動かし走行する。

### 3.1 他機体認識

本研究では複数の走行ロボットの集団行動を観測する。そのため、自己のロボットとは別のロボットの相対角度と位置を認識しなければならない。他機体認識に使用するカメラはRaspberry Pi Cameraである。本研究ではこのカメラを用いてロボット上部に取り付けられたピンク色のカップから、他機体との相対角度と距離を認識している。距離を求める際

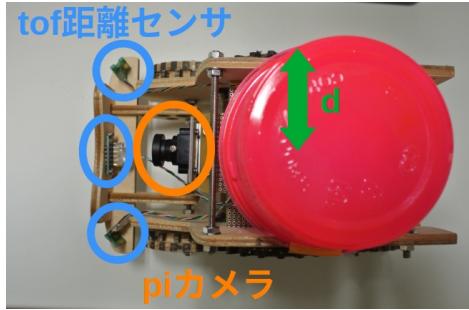


図 1: 使用する走行ロボットを真上から見た写真

に、カメラに写ったピンク色のカップの幅から最小二乗法を用いてフィッティングを行った。

### 3.2 相乗平均距離と疑似的弹性散乱

本研究では、弹性境界を考慮する必要性があるため、ロボットは壁や他機体を検出して反射する必要がある。壁や他機体に近づいた際には、弹性散乱を行うために tof 距離センサから得られる距離データの相乗平均を (9), (10) 式で求める。ここで  $\gamma = 0.33$  とし、3 つの tof 距離センサから得られる距離データを等加重で計算を行う [3]。相乗平均距離を使用する理由としては、障害物に近づいた際に、より反応しやすくするために用いる。

$d_C$  は中央の距離センサの距離データ、 $d_L$  は左の距離センサの距離データ、 $d_R$  は右の距離センサの距離データである。tof 距離センサから得られる距離データの単位は [m] である。

$$\bar{d}_L = d_C^\gamma \times d_L^{1-\gamma} \quad (9)$$

$$\bar{d}_R = d_C^\gamma \times d_R^{1-\gamma} \quad (10)$$

本研究では、 $\bar{d}_L$  または  $\bar{d}_R$  が 0.2 以下になった場合はその場で  $\bar{d}_L$  と  $\bar{d}_R$  の値が大きい方へ 0.3 秒間、出力 100[%] で方向転換する。この方向転換を疑似的弹性散乱とみなす。

## 4 走行実験

本研究では、図 2 のドーナツ型コース、走行ロボット 8 台を用いて走行実験を行う。外側の壁は半径 2[m] の円、内側の壁は半径 1[m] の円である。初期状態として、コース上に 4 台を時計回りに配置、残りの 4 台を半時計回りに配置して実験を行う。走行実験では、2 種類のアルゴリズムで走行させ流量を比較する。1 つ目のアルゴリズムは、弹性散乱のみで走行す

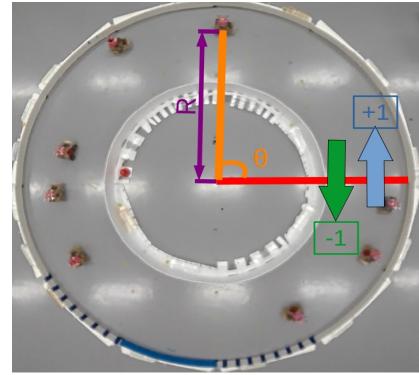


図 2: 実験コースをコース中心真上から見た写真  
(ひも状走行になっている状態)

るアルゴリズムである。 $\bar{d}_L < 0.2$  もしくは  $\bar{d}_R < 0.2$  であれば、弹性散乱を行う。それ以外の場合には進行方向正面に走行する。

2 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、相乗平均距離で弹性散乱も行う。パラメータは  $a = 3.0[1/s]$ ,  $\alpha = 0.15[m/s]$ ,  $\beta = 8.0[1/m]$ ,  $b = 0.3[m]$ ,  $c = 1.0$  で実験を行う。

### 4.1 評価方法

走行実験は流量という観測量を用いて定量的に評価する ((11) 式参照)。(11) 式内のパラメータは  $l$ :全走行ロボットの通過回数,  $t[min]$ : 計測時間,  $w[m]$ : 使用したコースの道幅である。

$$f_{rate} = \frac{l}{tw} \quad (11)$$

実験コース (図 2) の右側にある赤色の直線を基準線とする。その基準線を時計回り (緑矢印) に通過すると通過回数を -1 回、反時計回り (水色矢印) に通過すると通過回数を +1 回する。

## 5 実験結果

弹性散乱のみと 2 次元最適速度旋回アルゴリズムでの走行を行った。走行状態を表すグラフを図 3~図 6 に示す。

図 3、図 4 のグラフは走行ロボットの  $\theta$  と時間の関係図である。横軸は時間 [秒], 縦軸は角度  $\theta[\text{rad}]$  である。図 5、図 6 のグラフは走行ロボットの時間変化におけるコース中心からの直線距離を表している (以下  $R$  と表記する)。

図3のグラフでは、実験開始から約80秒までは $\theta$ のグラフが途中で折れ曲がっている。これはロボットが方向転換している状態である。約80秒以降は $\theta$ の変化が一定であることから、このロボットは時計回りに走行している。

弾性散乱のみで走行した場合のグラフである図4を見ると、実験終了まで $\theta$ のグラフが折れ曲がっている。2次元最適速度旋回アルゴリズムでの走行に比べると不安定な走行状態である。

図3から、2次元最適速度旋回アルゴリズムでは、約80秒以降で時計回りに走行している。図5をみると、実験開始から約80秒まではコース内を約60cm移動していることがわかる。これは、対面走行時に他のロボットと衝突しないよう回避行動をとっているため、 $R$ の値が大きく変動している。約80秒以降だと、 $R$ の変化が減少傾向にあることから、他のロボットを回避する行動が少ない走行状態だと言える。約230秒以降はひも状走行が形成された。

弾性散乱のみで走行した場合には2次元最適速度旋回アルゴリズムと比べて、実験終了時まで $R$ の値が大きく変動している。本研究で使用するコースは図2の円形コースであり、比較的密度が低いことから走行時には、コースの内側や外側に接近する。すなわち、全ロボットが一方向で走行しているのではなく、対面走行状態になっている可能性が高いと言える。このように、 $\theta$ と $R$ のグラフ両方から、走行ロボットの走行状態を予測することが可能である。

合計8回の走行実験の平均流量は、弾性散乱のみで走行した場合は6.9、2次元最適速度旋回アルゴリズムで走行した場合は8.2となった。ひも状走行が形成されるため、2次元最適速度旋回アルゴリズムの方が弾性散乱のみと比べて流量が増加する。

## 6 まとめと今後の課題

本研究は先行研究との相違点として、センサとカメラの画角を変更した。走行ロボットはスキッドステアで旋回することから、2次元最適速度旋回アルゴリズムを開発した。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、弾性散乱のみを行うアルゴリズム)で走行させ、流量という観測量で比較を行った。結果として、2次元最適速度旋回アルゴリズムでは、ひも状走行が創発されるため弾性散乱のみの場合と比較して流量が増加する。本研究で扱う2次元最適速度旋回アルゴリズムのパラメータは種類が多く、他のパラメータを使用し実験を行って

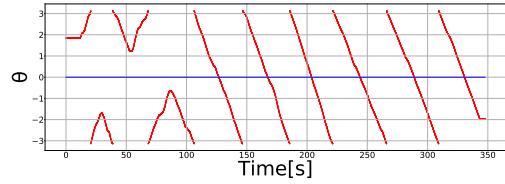


図3: 走行中の時間変化における角度変化 (2dovr)

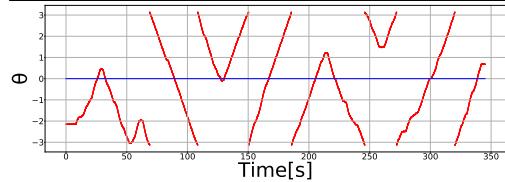


図4: 走行中の時間変化における角度変化 (弾性散乱)

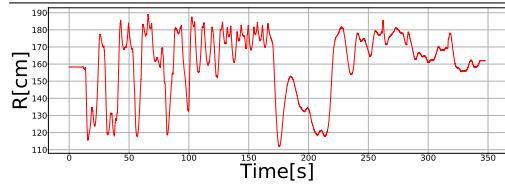


図5: 走行中の時間変化における半径の変化 (2dovr)

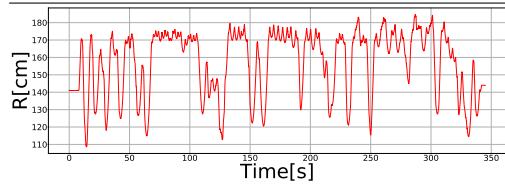


図6: 走行中の時間変化における半径の変化 (弾性散乱)

いきたい。

## 参考文献

- [1] 川野多佳也, 宮島高志, 本田泰, 二次元最適速度ロボットの開発と集団走行実験, 第23回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム論文集, p63-p66, (2018)
- [2] 石渡龍輔, 衣川亮太, 杉山雄規, Kantorovich-metric を用いた2次元OV粒子の集団流の感応度依存性の解析, 第22回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, P41-44, (2016)
- [3] 李方正, 橋爪晋平, 本田泰, 非線形感覚運動写像ロボットの対面流-1方向走行流への転移と流量のコース幅依存性-, 第26回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム, (2020)

# あおり運転を考慮したミクロ交通流モデルのシミュレーション

末吉 郁<sup>1</sup>, MD. Anowar Hossain<sup>1</sup>, 谷本 潤<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 九州大学大学院 総合理工学府 環境エネルギー工学専攻

<sup>2</sup> 九州大学大学院 総合理工学研究院 環境理工学部門

## 概要

あおり運転を考慮したエージェントベースのセルオートマトン交通流モデルを,Revised S-NFS モデルを基に構築した.あおり運転を“走行速度の遅い前方車両に対し,強制的に車線変更を行わせる行為”と定義し,この定義に従い車間距離と前方車両との速度差によって与えられる情報からあおり運転の有無を決定するアルゴリズムを導入した.このアルゴリズムを従来の車線変更アルゴリズム, 両方を組み合わせた場合を検討した結果, いかなる場合であってもあおり運転を考慮したケースでは時間平均速度及び流量が低下することが分かった.

## Microscopic Traffic Flow Simulation Considering Threaten Driving Behavior

Fumi Sueyoshi<sup>1</sup>, MD. Anowar Hossain<sup>1</sup>, Jun Tanimoto<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

<sup>2</sup> Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

## Abstract

We establish a new microscopic traffic flow model considering threaten driving behavior based on Revised S-NFS model, one of the Cellular Automata models. We define “threaten driving” as forcing a preceding vehicle, which hampers the focal vehicle to accelerate, to change to a neighboring lane. This action, to the focal vehicle, is triggered by the preceding distance and the relative velocity to the preceding vehicle. This model is simulated to compare with two cases; the conventional lane changing strategy that is spired so-called ‘incentive criterion’ and the case simultaneously considering ‘threaten driving behavior’ and ‘incentive criterion’. As the result, the cases considering threaten driving show lower time-averaged velocity and flux than the conventional case. Therefore, we conclude such a driving behavior can be said as anti-social on the meaning that the entire social efficiency is pulled down.

## 1. 緒言

近年,いわゆる「あおり運転」に対する世間の関心が高まっている.2020 年に改正道交法が施行され,あおり運転に対しては「妨害運転罪」が適用されるようになった.しかしながら,あおり運転の危険性や厳罰化が周知された現状にあっても,検挙者は後を絶たない.一方で,あおり運転車両が存在しているような系において,あおり運転を行う車両自体が系全体に与える影響については明らかにされていない.

そこで,本研究では,各車両エージェントにあおり運転や車線変更を行う・行わないといった属性を与えた Cellular automata (CA) モデルを構築し,工

学的観点からみたあおり運転の特質について検討を行う.

## 2. シミュレーションモデル

本研究では,Kokubo ら[1]によって考案された Revised S-NFS モデルに,あおり運転を模擬したエージェントの行動原理を導入した.

### 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で, NaSch (Nagel-Schreckenberg ; [3]) 系モデルでは再現できない, Kerner の 3 相理論で云う

Synchronized 流[4]を高精度に再現する CA モデルである。

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、その目標速度を最大限維持するように各車両が移動を行う。

#### Rule 1. “Acceleration”

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

(Rule 1 is applied only if  $g_i \geq G \vee v_i^{(0)} \leq v_{i-1}^{(0)}$ )

#### Rule 2. “Slow-to-start”

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

(Rule 2 is applied only if random[0, 1] ≤ q.)

#### Rule 3. “Quick start”

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

(In Rule 2 and 3, If random[0, 1] ≤ r,  $S_i = S$ ; otherwise,  $S_i = 1$ .)

#### Rule 4. “Random brake”

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

(if random[0, 1] ≤ 1 -  $p_i$ , Rule 4 is applied)

なお、通常の NaSch 系モデルでは、等しきみに

**Rule 5 “Avoid Collision”**が仮定されているが、本モデルによるシミュレーション上では、同意の制約を異なる方法で実装している。また、式中の固有パラメータについては 2.4 節にて後述する。

## 2.2 車線変更アルゴリズム

今回提案するモデルでは、2.1 節の速度決定ルールに加え、Kukida らが考案した車間によって車線変更を試みるサブモデル[5]を導入した。車線変更を試みることが許可されている車両は、以下に示すような 2 条件を満たした場合にのみ車線変更を行う。

### i) インセンティブ条件

$$\begin{aligned} gap_p^f &\leq v_i^p - v_{i-1}^p \wedge gap_n^f > v_i^p - v_{i-1}^n \\ &\wedge gap_n^f > 0 \end{aligned} \quad (5)$$

### ii) 安全条件

$$gap_n^b \geq v_{i+1}^n - v_i^p \quad (6)$$

ただし、 $v_i^p$  は現在走行している車線  $p$  における自車両の速度、 $v_{i-1}^p$  は車線  $p$  における前方車の速度、 $v_{i-1}^n$  は隣接車線  $n$  (車線変更) における前方車両の速度、 $v_{i+1}^n$  は車線  $n$  における後方車の速度、 $gap_p^f$  は車線  $p$  における前方車両との車間距離、 $gap_n^f$  は車線  $n$  における前方車両車間距離、 $gap_n^b$  は車線  $n$

における後方車との車間距離を示す。端的に述べると、車線変更を行うことで速度を維持できそうか、かつ車線変更後に後続車両に追突されないかという 2 つの条件で車線変更実施の有無を決定している。

## 2.3 あおり運転の導入

本研究においては、“走行速度の遅い前方車両に対し、強制的に車線変更を行わせる”ような行動を“あおり運転”と定義する。具体的には、 $i$  番目の車両が以下の条件を満たした場合、車線変更パートにおいて前方車両 ( $i-1$ ) の排除 ( $i-1$  車両は隣接車線に移る) を試みる。

### i) あおり運転条件

$$gap_i^p \leq v_i^{(0)} - v_{i-1}^{(0)} \wedge v_i^{(0)} - v_{i-1}^{(0)} > 0 \quad (7)$$

ただし、排除しようとした車両 ( $i-1$ ) がすでに先述のインセンティブ条件によって車線を移動していた場合は、あおり運転に該当しない。

## 2.4 車線変更プロセス

2.2 及び 2.3 節で述べた車線変更を促すルールに則り、以下の順序で車線変更が行われる。

- (i) インセンティブ条件による車線変更車両の選出
- (ii) あおられた車両の選出
- (iii) 選出された車両のうち、式(6)の安全条件を満たした車両のみが車線を移る。中央車線から車線変更を行う際、左右両方の車線ともに移動可能な場合には、より車間距離の大きな車線へ車線変更する。

## 2.5 シミュレーション環境

本研究のシミュレーションにおけるパラメータは、次の表 1 に記載の通りである。

## 3. シミュレーション結果

今回課したエージェントの設定については下記の Case 1~3 の通りである。今後の説明についてもこの分類に従う。また、全ての統計量は流れ場が十分に発達するまで 1800ts 待機し、その後 300ts (実時間で 5 分間に相当) の間で記録された積算量もしくは平均値を用いる。

### i) Case 1

全車両はインセンティブ条件をトリガーとする車線変更を行う／行わないで 2 グループに分類、あおり運転は行わない。

表 1 シミュレーションで用いたパラメータ一覧

パラメータ	文字	物理量(単位)
1セルあたりの長さ	-	7.5[m]
車線長	$L$	3000[cell]
車線数	-	3[本]
車両数	$N$	75～3000[台]
加速判定距離	$G$	15[cell]
Rule 2,3 見通し台数	$S$	2[台]
Rule 2 発生確率	$q$	0.99
Rule 2,3 S変化確率	$r$	0.98
ランダムブレーキ 発生確率 $p_i$	$p_1$	0.999
	$p_2$	0.99
	$p_3$	0.98
	$p_4$	0.01

### ii) Case 2

全車両はあおり運転を行う/行わないで 2 グループに分類, インセンティブ条件による車線変更は行わない.

### iii) Case 3

全車両はインセンティブ条件をトリガーとする車線変更を行う/行わないで 2 グループに分類, 車線変更が可能なグループに属する車両は, まずインセンティブ条件による車線変更を試み, この試みに失敗した場合にあおり運転を行う.

以後, 車線変更もしくはあおり運転が許可されている車両を Defector, されていない車両を Cooperator と呼称する.

### 3.1 基本図

まず初めに, シミュレーションによって得られた基本図を図 1(a),(b)に示す.

これから分かるように, 今回の 3 ケースではいずれの設定においても, Case 1 が最も良い流量を示した.

### 3.2 時間平均速度及び車線変更回数の比較

次に, これらのケースのうち, Defector の存在割合が 10% の場合について, 時間平均速度及び車線変更回数を比較したものを図 2 (a),(b),(c)に示す. なお, 車線変更回数については, 計測された車線変更回数を車両数と計測時間の積で除した値を用いている.

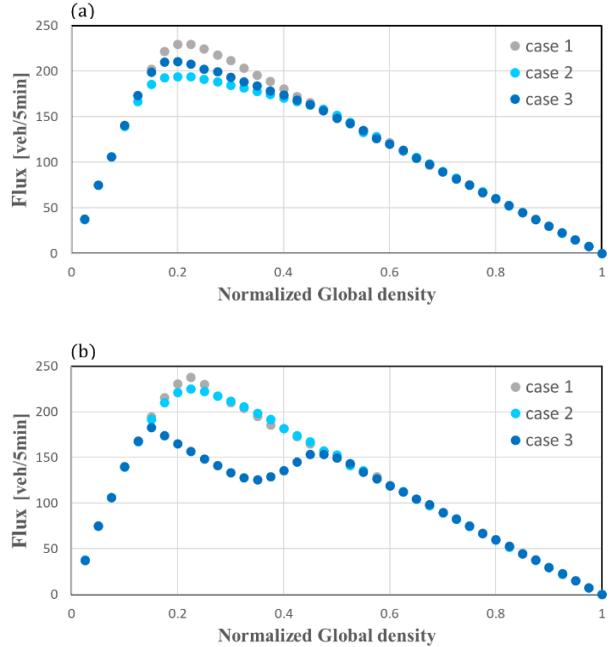


図 1(a) Defector 存在割合 80%

(b) Defector 存在割合 10%

### 4. 考察

今回のシミュレーションでは, Case 1 が最も高い流量を示した. Case 1 が Case 2 に比して流量大となつたのは, 生起した車線変更回数により説明される. あおり運転により他律的に起きる点で Case 2 は Case 1 とは車線変更のメカニズムは異なるが, Case 2 は相対的に高頻度で車線変更が生じている. このことが流れ場に乱れを印加し, Case 2 では流量が悪化した.これに対して, Case 3 は他ケースに比して殆どと云ってよいほど車線変更が生じていないのに, 中密度域で著しく流量が悪化する(図 1(b))の. Case 3 プロットは凹状に低下傾向を示している. これは図 2(c)の Defector と Cooperator の速度差により説明される. 既述したように, 結果の統計量は密度に応じた初期ランダム配置状態から 1800ts 後の 300ts の時間平均である. 図には示していないが, Case 3 では初期配置から full-fledged な流れ場となる 1800ts 後に至る過渡状態の間に, あおりにより他人を排除し, かつ自らの力で車線変更する Defector が 3 つの車線のうち中央車線以外に偏在し, 彼ら以外のマジョリティ(人口比 90%)の Cooperator のうちそのほとんどが中央車線に犇めき合う状態が現出する. Defector は余った 2 車線をたった 10% の車両とわずかな Cooperator で占有するから, この状況が一度現出すると以降は車線変更

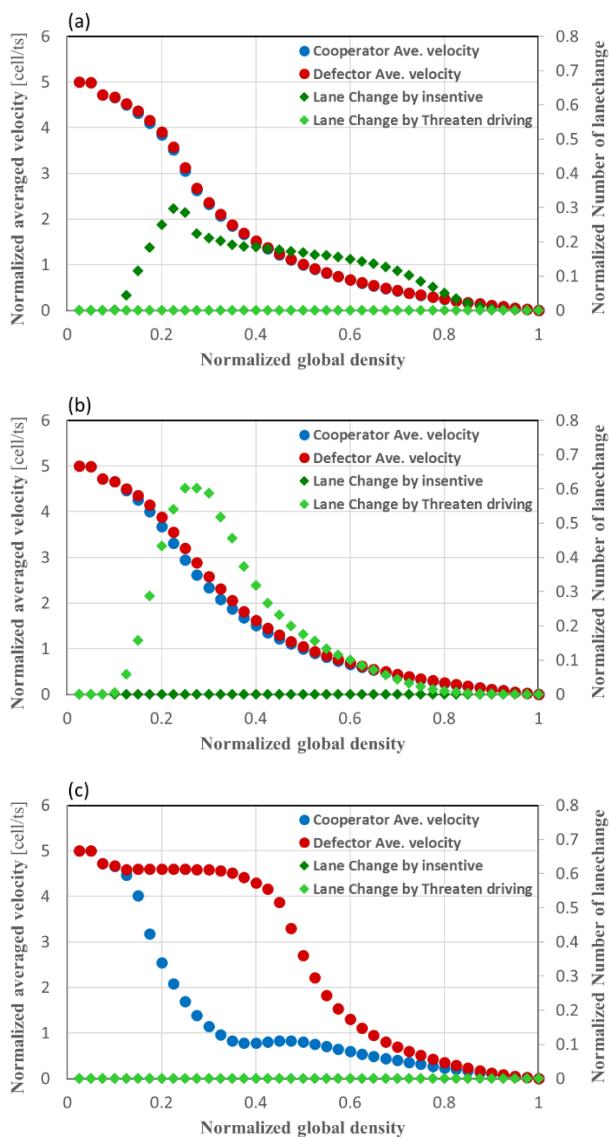


図2 時間平均速度及び車線変更回数

(a)Case 1, (b)Case 2, (c)Case 3

が生じなくなる(中央車線以外にいるCooperatorは十分な速度で走行しているのでDefectorに排除されることもなく、Defectorに追い抜かれることもない)。この疑似定常状態だけを見れば、車線変更が起きていないのに系全体の効率が低い、と物理的には珍妙な状況が出現しているわけだが、これを車線変更の低頻度さだけをもって社会的に望ましいすることは出来ないだろう。Defectorだけが一方的にCooperatorを貪る「格差社会」となっているのに加え、社会全体の効率性は低下しているのが明らかであるからだ。

## 5. 結言

本研究では、「あおり運転」が系全体にもたらす影響を工学的観点から評価することを目的に Revised S-NSF モデルを基盤にした新たな CA モ

デルを構築した。あおり運転により他車を車線変更せしめる状況を模した系では、従来のインセンティブをトリガーに自律的に車線変更する系よりも効率は低下する。特に、あおり運転をし、かつ自発的車線変更を行う定義の Defector が系内に少數だけ存在し、その他のマジョリティは斜線へ項をしない Cooperator である系では、Defector の平均速度が Cooperator のそれより著しく大きく、同時に社会全体の効率が押し下げられた状況が現出することになる。これは、所謂、社会的ジレンマである。社会ジレンマは、数理的には「自らの利得最大化をはかると社会全体の利得最大化を達成することが出来なくなる」と定義される。向後は、この多人数ゲームの数理構造、ジレンマ存否と交通密度との関係を明らかにすることが課題である。

## 6. 謝辞

本研究の一部は科研費(19KK0262, 20H02314, 20K21062)による。また、本研究は九州大学情報基盤研究開発センター研究用計算機システムを利用した。記して謝意を表する。

## 参考文献

- [1] Kokubo, S., Tanimoto, J., & Hagishima, A. (2011). A new Cellular Automata Model including a decelerating damping effect to reproduce Kerner's three-phase theory. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 390(4).
- [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] Kukida, S., Tanimoto, J., & Hagishima, A. (2011). Analysis of the influence of lane changing on traffic-flow dynamics based on the cellular automaton model. *International Journal of Modern Physics C*, 22(3). <https://doi.org/10.1142/S012918311101621X>

# ソーシャルフォースモデルを用いた避難シミュレーションにおける事前出口把握及び誘導の効果

杉山裕<sup>1</sup>, 宮川大樹<sup>1</sup>, 一ノ瀬元喜<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学 大学院総合科学技術研究科 工学専攻 数理システム工学コース,

<sup>2</sup> 静岡大学 学術院工学領域 数理システム工学系列

## 概要

避難において、複数の出口を効率的に使うことは避難時間を短縮するために効果的な手段である。先行研究では、避難エージェントが出口の情報伝達を行うソーシャルフォースモデルによって、各出口の密度が均一化され、避難時間が短縮できることが明らかにされた。しかし実際には、互いに出口の情報を共有するだけでなく、出口の情報を事前に知っておくことも避難に効果的である。加えて、出口を把握している人が避難誘導を行えば、情報を持たない他の人たちも素早く避難することができる。そこで本研究では、ソーシャルフォースモデルによる避難シミュレーションを拡張して、事前出口把握と避難誘導が避難時間に与える影響を検証した。その結果、事前出口把握によって出口利用がより効率化し、避難時間が短縮した。更に、避難誘導は事前に出口を把握している人の割合が少ないときに最も効果が発揮されることがわかった。

## Effects of preliminary knowledge for exits and guidance on evacuation in a social force model

Yu Sugiyama<sup>1</sup>, Daiki Miyagawa<sup>1</sup>, Genki Ichinose<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mathematical and Systems Engineering, Shizuoka University

## Abstract

In evacuation, efficient use of multiple exits is an effective way to shorten the evacuation time. A previous study used a social force model where the information of exits among agents is shared. It showed that the density of each exit becomes uniformed, and then the evacuation time decreases. However, in a real situation, it is necessary for people to know the information of exits in advance as well as to share the information with each other. Also, if people who know the information in advance guide the evacuation, the whole people can evacuate quickly. In this study, we examined the effects of preliminary knowledge for exits and evacuation guidance on evacuation simulations using a social force model. The results showed that such knowledge improved the efficiency of exit use and shortened the evacuation time. Moreover, the evacuation guidance was most effective when the fraction of people who has preliminary knowledge of exits is small.

## 1 はじめに

避難シミュレーションにおいて、複数の出口をいかに効率的に使うかは重要な問題である [1]。ソーシャルフォース (SF) モデル [2-4] を用いた研究では、周囲の人間と出口の情報を伝達し合うことで複数の出口をより効率的に利用できることが明らかになっている [5]。

もし情報伝達だけでなく事前に出口の場所と幅を

把握できている人がいれば、その人達は最適な避難ができるだろう。更にはその人たちが誘導することによって、全体の避難時間の短縮も期待できる。しかし、そのような影響についてはまだ研究されていない。そこで本研究では、情報伝達を行う SF モデルを拡張して事前出口把握と避難誘導を導入し、避難シミュレーションにより避難時間への影響を検証する。

## 2 モデル

本研究では、情報伝達を行う SF モデル [5] に事前出口把握と避難誘導を導入した避難モデルを構築しシミュレーションを行う。事前出口把握とは、避難開始時点で既に正確な出口の情報（位置と幅）を持っている事を表し、避難誘導は事前に出口を把握している避難エージェントが他のエージェントに対して適切な出口を示すことを表す。本モデルでは、エージェントは目指す方向へ向かう力、他エージェントからの反発力、壁から受ける反発力の 3 つの力に基づいた運動方程式に従って避難を行う。事前出口把握と避難誘導は 1 つ目の目指す方向へ向かう力に反映される。以下ではそれぞれの力について説明する。

### 2.1 目指す方向へ向かう力

目指す方向へ向かう力とは、エージェントが避難するために向かわなければならない方向に自分の進行方向を修正しようとする力  $\vec{F}_{d'}$  のことであり、以下の式を用いて表す。

$$\vec{F}_{d'} = e^{-\alpha_i} \vec{F}_d + (1 - e^{-\alpha_i}) \vec{F}_d^{ik} \quad (1)$$

ここで、 $\vec{F}_d$  はエージェントが出口に向かうために働く修正力であり以下の式を用いて表す。

$$\vec{F}_d = m_i \frac{1}{\tau_i} (v_i^0 \vec{e}_i - \vec{v}_i) \quad (2)$$

$m_i$  はエージェント  $i$  の体重、 $\tau_i$  はエージェント  $i$  に力が加わる時間、 $v_i^0$  はエージェント  $i$  の理想の速度、 $\vec{e}_i$  はエージェント  $i$  の理想の進行方向、 $\vec{v}_i$  は現在の速度を表す。理想の速度は、エージェントの初期設定の時点での速度  $v^0$  を平均とした標準偏差  $\sigma$  の乱数で決定される [5]。理想の進行方向は、現在位置から選択した出口位置への方向ベクトルである。この力によって、エージェントは選択した出口の方向へ自分の進行方向を修正しようとする。

また、 $\vec{F}_d^{ik}$  はエージェント  $i$  が近傍のエージェント  $k$  を追従しようとする力であり、以下の式を用いて表す。

$$\vec{F}_d^{ik} = m_i \frac{1}{\tau_i} (v_i^0 \vec{e}_{ik} - \vec{v}_i) \quad (3)$$

ここで  $\vec{e}_{ik}$  は現在におけるエージェント  $i$  から近傍のエージェント  $k$  への単位方向ベクトルである。近傍のエージェントをどのように選択するかは後述する。

式 (1)において  $\alpha_i$  はエージェント  $i$  の情報の伝達回数を表している。エージェント  $i$  が出口を直接認識している場合を  $\alpha_i = 0$  とする。出口を認識していない場合は近傍のエージェント  $k$  から情報伝達によって出口の情報と共に近傍のエージェント  $k$  の  $\alpha_k$  を受け取り、その値に 1 加算した数値がエージェ

ント  $i$  の  $\alpha_i$  となる。 $\alpha_i$  が大きい時、エージェントが持っている情報は多くの人を経由したものであり不確かなものになっている可能性が高い。このため、そのようなエージェントは近傍のエージェントとして選択されにくくなる。

事前出口把握はこの  $\alpha_i$  に関わる。事前に出口を把握しているエージェントは初期状態でどの位置にいても最初から各出口までの距離と幅を考慮して以下の式で出口を選択することが出来るものとする。

$$E_i = \arg \min_x (d_{ix}^D w_x^C) \quad (4)$$

ここで、 $E_i$  はエージェント  $i$  が選択する出口、 $d_{ix}$  はエージェント  $i$  から出口  $x$  までの距離、 $w_x$  は出口  $x$  の大きさとする。 $D, C$  はそれぞれ出口までの距離と出口の大きさを評価するパラメータである。できるだけ最適な出口選択ができるよう  $D, C$  を設定するため、事前に予備的な実験をした結果、本研究では  $D = 1, C = -\frac{1}{2}$  とした。ここで選択した出口の情報は正確なものとして扱い、事前に出口を把握しているエージェントが現在どこに位置していたとしても式 (1) と式 (5) において  $\alpha_i = 0$  とする。したがって事前に出口を把握しているエージェントは式 (1) において近傍のエージェントの影響は受けず  $\vec{F}_{d'} = \vec{F}_d$  となる。

事前に出口を把握しているエージェントは自分を中心とした一定範囲内のエージェントに対して避難誘導を行うことができる。避難誘導されるエージェントは、誘導を受けて以降は、式 (4) を用いて出口を決定し、事前に出口を把握したエージェントと同様に  $\vec{F}_{d'} = \vec{F}_d$  で力を受ける。

一方で、事前に出口を把握しているエージェントと誘導されたエージェント以外は近傍のエージェントからの影響を受ける。このようなエージェントは近傍のエージェントを選択するために、限定された視界内から以下に示す式で表されるエージェント  $i$  が目指している出口  $x$  の情報量  $S_i$  を元に判断する。

$$S_i = e^{-\alpha_i} \frac{k_1 e^{-d_{ix}} + k_2 e^{-\rho_x} + k_3 (1 - e^{-w_x})}{k_1 + k_2 + k_3} \quad (5)$$

$$\rho_x = \frac{Nr_i^2}{0.5(1.5w_x)^2} \quad (6)$$

ここで、 $\rho_x$  は出口  $x$  周辺の人口密度、 $r_i$  はエージェント  $i$  の半径、 $N$  は出口  $x$  を中心とした半径  $1.5w_x$  の範囲内にいるエージェントの数、 $k_1, k_2, k_3$  は重みを表している ([5] を参考に設定)。エージェントは周囲の中で最も  $S_i$  が大きいエージェントを近傍のエージェントとして選択し、近傍のエージェントと同じ出口から脱出しようと行動する。

## 2.2 他エージェントからの反発力

他エージェントからの反発力  $\vec{F}_{ij}$  を以下の式で表す。

$$\begin{aligned}\vec{F}_{ij} = & Ae^{[(r_{ij}-d_{ij})/B]}\vec{n}_{ij} + \gamma g(r_{ij}-d_{ij})\vec{n}_{ij} \\ & + \kappa g(r_{ij}-d_{ij})\Delta v_{ij}^t \vec{t}_{ij}\end{aligned}\quad (7)$$

ここで、 $A, B, \gamma, \kappa$  は定数、 $d_{ij}$  はエージェント  $i$  と  $j$  の距離、 $\vec{n}_{ij}$  はエージェント  $j$  から  $i$  に向かう単位ベクトル、 $r_{ij}$  はエージェント  $i$  エージェント  $j$  の半径の合計、 $g(y)$  は  $y$  が正ならばそのまま返し負ならば 0 を返す関数である。 $\vec{t}_{ij}$  はエージェント  $i$  と  $j$  の中心を結んだ線に対して垂直な方向の単位ベクトル、 $\Delta v_{ij}^t = (\vec{v}_j - \vec{v}_i)\vec{t}_{ij}$  は時刻  $t$  におけるエージェント  $i$  と  $j$  の  $\vec{t}_{ij}$  方向の速度差である。この力によって、エージェントは他のエージェントと距離を取りパーソナルスペースを保とうとする。

## 2.3 壁から受ける反発力

壁から受ける反発力  $\vec{F}_{io}$  は以下の式で表す。

$$\begin{aligned}\vec{F}_{io} = & Ae^{[(r_i-d_{io})/B]}\vec{n}_{io} + \gamma g(r_i-d_{io})\vec{n}_{io} \\ & + \kappa g(r_i-d_{io})(\vec{v}_i \vec{t}_{io})\vec{t}_{io}\end{aligned}\quad (8)$$

ここで、 $d_{io}$  はエージェント  $i$  から壁  $o$  までの距離、 $\vec{n}_{io}$  は壁  $o$  からエージェント  $i$  に向かう単位ベクトル、 $\vec{t}_{io}$  は壁  $o$  とエージェント  $i$  の接線方向ベクトルである。

## 2.4 位置更新

前節までの力の合力をエージェントが受ける力として以下のように表す。

$$\vec{F}_i = \vec{F}_{d'} + \sum \vec{F}_{ij} + \sum \vec{F}_{io} \quad (9)$$

エージェント  $i$  は出口から脱出するために式 (9) の力  $\vec{F}_i$  を受け、そこから新しい速度  $\vec{v}'_i$  や位置  $\vec{P}'_i$  を求める。

$$\vec{v}'_i = \vec{v}_i + \frac{\vec{F}_i}{m_i} \tau_i \quad (10)$$

$$\vec{P}'_i = \vec{P}_i^0 + \vec{v}'_i \tau_i \quad (11)$$

ここで、 $\vec{v}_i, \vec{P}_i^0$  はそれぞれエージェント  $i$  の現在の速度と位置である。

## 3 シミュレーション

### 3.1 設定

避難する空間は四方に出口があり、出口の広さは下の出口が上左右の出口に比べて 2 倍の幅を持つ部屋を想定する(図 1)<sup>1</sup>。また、避難モデル内のパラメー

<sup>1</sup> 方向とも出口サイズが同じ避難空間でのシミュレーション結果は、先行研究 [5] から、各出口が均等に利用されることが明らかになっている。

タに関しては [5] を参考に設定した。 $m_i = 80$  [kg],  $\tau_i = 0.02$  [s],  $r_i = 0.25$  [m],  $A = 200$ ,  $B = 0.1$ ,  $\gamma = 2.4 \times 10^3$ ,  $\kappa = 4.8 \times 10^3$ ,  $v^0 = 2.5$  [m/s],  $\sigma = 0.26$  である。避難シミュレーションは以下の順序で行われる。

1. 避難エージェントの人数を設定し、各エージェントが事前に出口を把握しているか否かを事前出口把握者の割合に従って決定する。各エージェントの初期位置と速度ベクトルをランダムに決定する。
2. 全出口周辺の密度を式 (6) で求め、全エージェントの持つ情報量を式 (5) で計算する。
3. 全てのエージェントが式 (5) に基づいて近傍のエージェントを選択した後、事前に出口を把握しているエージェントが避難誘導を行う。
4. 各エージェントの合力、速度、位置を式 (9)～式 (11) に基づいて計算し、部屋から出ていたら取り除く。
5. 各パラメータを更新する。
6. エージェントが部屋に残っている場合、2 に戻る。
7. 避難完了とし、シミュレーションを終了する。

事前に出口を把握しているエージェントの割合を 0~1.0 の間で 0.1 刻み毎にシミュレーションを行い、避難エージェント数は 200 として 1000 回の試行結果を平均したものを結果として採用する。

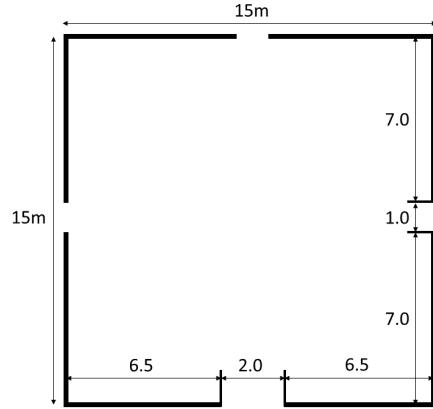


図 1: 避難空間。上左右の出口は 1m 幅、下が 2m の出口幅。全ての出口は各壁面の中央に位置している。

### 3.2 結果

初めに事前出口把握が及ぼす影響について注目する。図 2 は事前に出口を把握している人の割合を変化させた際の避難時間の変化を避難誘導がある場合(橙線)とない場合(青線)に分けてプロットしたものである。図 2 の青線と橙線を見ると、事前把握者の割合が増加するにつれて、どちらの場合も避難時

間が減少している。割合が 0.0 と 1.0 の時を比較すると約 20% 避難時間が短縮されている。

この理由を調べるために、事前に出口を把握しているエージェントの割合を変化させた際の各出口の利用エージェント数を調査した(図 3)。まず、避難誘導なしに相当する図 3a を見ると、1.0 未満では全員が出口に近づいた場合を除いて正しい情報を持っていないエージェントが必ず存在するため、出口利用は 1.0 に向かって、「下」は減り続け、「上」は増え続ける。また、事前出口把握者が増加するにつれて出口利用の偏りが減少し、出口の利用が効率化されていることが分かる。このようにエージェントが効率的に避難を行うことによって避難時間が短縮されていると言える。

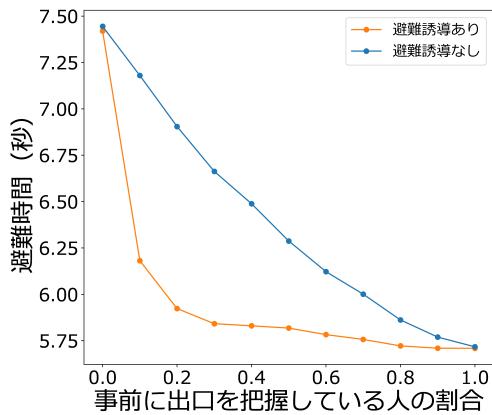


図 2: 事前出口把握による避難時間の変化。

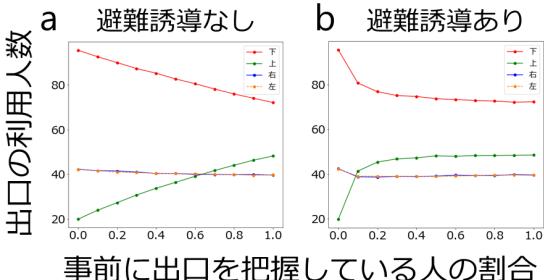


図 3: 避難誘導がない時 (a) とある時 (b) の出口の利用人数の推移。凡例は図 1 の位置に対応。

次に、避難誘導が及ぼす影響について注目する。図 2 の青線と橙線を比較すると、橙線は事前出口把握者の割合が 0.1 付近でより急激に避難時間が減少し、1.0 に向かうにつれて青線に近い避難時間になっている。また、図 3 の a と b を比較すると、図 3b は横軸の値が 0.1 付近になるとより急激に出口利用の偏りが減少し、1.0 に向かうにつれて図 3a に近い値に落ちている。以上のことから、事前に出口を把握している人が避難誘導を行い正確な情報を拡散することによって避難誘導を行わない場合に比べて

事前出口把握の効果が増進されることがわかる。また、事前に出口を把握している人の割合が高くなると避難誘導がある場合もない場合も大きな差が見られないことから、避難誘導はあくまで事前出口把握の効果を全体に拡散するだけであると考えられる。

図 3について、出口幅が同じ「上」と「右・左」を比較すると、事前に出口を把握している人の割合が 1.0 においても、「上」の出口の利用人数が多く均一になっていない。これは、「上」は「下」までの距離が「右・左」に比べて遠いので、「下」に誘引されるエージェントの人数が少ないと考えられる。

## 4 結論

本研究では、情報伝達を行う SF モデルを拡張して避難シミュレーションを行い、事前出口把握と避難誘導が避難時間に及ぼす影響を調査した。その結果、事前出口把握によって出口利用が効率化され避難時間が短縮した。また、避難誘導がある場合には、事前に出口を把握している人の割合が少ない時に最も効果が発揮されることが分かった。

また、部屋のサイズが異なる場合についてはシミュレーションを行わなかったが、出口の大きさが同じであれば本研究のエージェントは理想の速度を保とうとするため、出口を抜ける際の速度は変化しない。そのため最大流量は変わらないため定性的な結果は変わらないと考察する。

## 参考文献

- [1] Y. Xu, H. Huang, Simulation of exit choosing in pedestrian evacuation with consideration of the direction visual field. *Physica A* **391** (2012) 991–1000.
- [2] D. Helbing, P. Molnár, Social force model for pedestrian dynamics. *Phys. Rev. E* **51** (1995) 4282–4286.
- [3] D. Helbing, I. Farkas, T. Vicsek, Simulating dynamical features of escape panic. *Nature* **407** (2000) 487–490.
- [4] Y. Qu, Z. Gao, Y. Xiao, X. Li, Modeling the pedestrian's movement and simulating evacuation dynamics on stairs. *Saf. Sci.* **70** (2014) 189–201.
- [5] Y. Han, H. Liu, Modified social force model based on information transmission toward crowd evacuation simulation. *Physica A* **469** (2017) 499–509.

# 交通流数理研究会 投稿規程

第14回より論文の査読制を導入しています。そのぶん〆切が早くなりますのでご注意ください。査読制の趣旨は、お寄せいただいている質の高い論文をオーサライズし、特に若手の方への業績となるように本シンポジウムが貢献したい、というものであります。

講演申し込みの方は、従来どおり、まず論文投稿という形で申し込んでいただきます。投稿された論文は査読後、その採択を決定した論文について、講演していただきます。奮って申し込みください。

## 1. 査読

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

## 2. 投稿手続き

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

## 3. 掲載料・別刷

掲載料は無料とする。別刷は用意しない。

## 4. 著作権

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



“Effects of Train Shape on Passenger Egress” .....	39
Satoshi Kabata, Toshihiro Kawaguchi	
“Operation efficiency improvement simulation of 3 elevators operated by Priority Queuing”.	43
Shumpei Kawaguchi, Masahiro Kanai, Motohiro Tanaka	
“String-like traveling of skid-steering 2D robots by Optimal Velocity Turning Algorithm”.....	47
Masashi Yamada, Li Fangzheng, Yasushi Honda	
“Microscopic Traffic Flow Simulation Considering Threaten Driving Behavior” .....	51
Fumi Sueyoshi, MD. Anowar Hossain, Jun Tanimoto	
“Effects of preliminary knowledge for exits and guidance on evacuation in a social force model”	
.....	55
Yu Sugiyama, Daiki Miyagawa, Genki Ichinose	

## Contents

“Self-organization in pedestrian crowds facilitated by mutual anticipation”.....	1
Hisashi Murakami	
“Nonlinear difference equation with bi-stability as a new traffic flow model” .....	3
Kazuya Okamoto, Akiyasu Tomoeda	
“Pattern transition of injected fluid into a granular bed of highly-swelling gel particles” .....	7
Kojiro Otoguro, Kiwamu Yoshii, Yutaka Sumino	
“History-dependent rheological property of wet granular materials” .....	11
Kiwamu Yoshii, Michio Otsuki	
“Quantification of final epidemic size on a Small-world network with time-varying its short-cut links” .....	15
Kensuke Ikeo, Shinobu Utsumi, Yuichi Tatsukawa, Jun Tanimoto	
“Impact of Quarantine, Asymptomatic infected, and its Time delay on Disease spreading in Small-world Networks” .....	19
Shinobu Utsumi, Jun Tanimoto	
“Interface Effect on Persistence of Cellular Mutually Guiding”	
Katsuyoshi Matsushita, Naoya Kamamoto, Maki Sudo, and Koichi Fujimoto .....	23
“Analysis on a population-based epidemic model incorporating viral dynamics in a human body”	
.....	27
Yuichi Tatsukawa, Jun Tanimoto	
“Rheology of polydisperse granular mixtures whose size distribution follows a power distribution”	
.....	31
Taiki Yamaji, Haruto Ishikawa, Satoshi Takada	
“Temporal regularity of Hanshin Expressway ETC statistics” .....	35
Daigo Umemoto, Takashi Kamihigashi	

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@phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp

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

