

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月19日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K17784

研究課題名(和文)多層動的ネットワークによるパンデミック阻止に資するワクチン接種戦略の解明

研究課題名(英文)Effective vaccination strategies that prevent pandemic in multilayer networks

研究代表者

一ノ瀬 元喜 (Ichinose, Genki)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：70550276

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：1次元空間での個体群の一方向への移動が感染症の拡大・阻止に与える影響について、計算機シミュレーションによって調べた。その結果、個体の密度が閾値以下の場合には個体の接触が途絶え、感染が消滅すること、一方で閾値以上の場合には継続的な個体の接触に起因して、感染する個体が常に存在してしまうことが分かった。次に、ネットワーク間を個体がランダムに移動する時にネットワーク構造の違いによって感染規模にどのような影響が出るかを計算機シミュレーションによって調べた。その結果、ハブを持つ非均質なネットワークの場合、ハブが感染症の供給源となって感染が消滅しないことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

感染症の拡大は個体が接触することによって起こる。したがって、個体の移動が重要な影響を及ぼすが、これまでの研究では個体が満遍なく移動するという極端な数理モデルが主に考えられてきた。本研究では、よりミクロな視点から個体の偏りのある移動が感染症の拡大阻止に及ぼす影響を明らかにした。また従来の感染症モデルでは、静的なネットワーク構造での感染の広がりが研究対象となっていた。本研究では、ネットワーク間の個体の移動の影響が感染症の拡大阻止に与える影響について明らかにした。本研究は行政機関がどのような人にワクチンを優先的に摂取してもらって、感染症の拡大を効果的に阻止するかの対策を講じる上で極めて有用である。

研究成果の概要(英文)：We first investigated the effect of directional movements on the outspreading and prevention of disease in a one dimensional model. By extensive simulations, we found that when the density is lower than the critical limit, diseases finally become extinct because the interaction among individuals disappears in the meantime. In contrast, when the density is higher than the critical limit, diseases always exist due to continuous contacts among individuals.

We second investigated how network structures affect the final epidemic sizes when individuals randomly moves among patches. The results showed that diseases never go extinct in the case of heterogeneous networks which have hubs because the hubs become the source of the diseases.

研究分野：社会システム工学

キーワード：感染症モデル 自発的ワクチン接種 社会的ジレンマ 多層ネットワーク

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自発的ワクチン接種は感染症のパンデミック阻止に極めて有効な手段であるが、ワクチンの様々なコストや集団免疫によって、自分以外の他人に接種してほしいという社会的ジレンマを内包している。友人からのワクチン接種情報をうまく利用することでワクチンを普及させ、パンデミックを阻止できることを研究代表者は以前明らかにしたが、そのモデルでは人のつながり(ネットワーク)が単層で固定という制約があった。

### 2. 研究の目的

本研究では、現実社会の多層的なつながり(友人、会社等)やその時間的な変化をより正確に反映するため、多層ネットワークにおいて個体が移動するモデルを構築し、計算機シミュレーションにより、災害時など極端にネットワーク構造が変化してしまう状況に有効なワクチン接種戦略を明らかにする。

### 3. 研究の方法

これまでの研究で見過ごされてきた現実社会の2つの重要な特徴(多層ネットワークと個体の移動によるつながりの変化)を進化ワクチン接種ゲームモデルに組み込むことで、人々のネットワークが時々刻々と変化する状況の中で、とりわけ効果的なワクチン接種戦略を以下の2つの段階に分けて明らかにする。(1) 感染ネットワークと友人ネットワークの2つに分けた多層ネットワークモデルを構築する。ネットワークのつながり、感染可能範囲等を検討し、ワクチン普及に効果的な同調圧力の影響範囲と影響が大きい友人の特徴を明らかにする。(2) さらに個体の移動を導入し、移動方法や様々な移動イベントのシナリオを検討し、人のつながりが時間的に変化する状況で有効なワクチン接種戦略を明らかにする。

#### (1) 多層ネットワークモデルの構築

既存研究で仮定されていた単層ネットワークをより現実に即した多層ネットワークに拡張したエージェントベースモデルを構築し、シミュレーション実験を行って分析する。多層ネットワークを扱うにあたって、ベースとなるネットワーク構造やネットワーク間の連結方法を新たに考慮する必要がある。

#### (2) 個体移動の導入

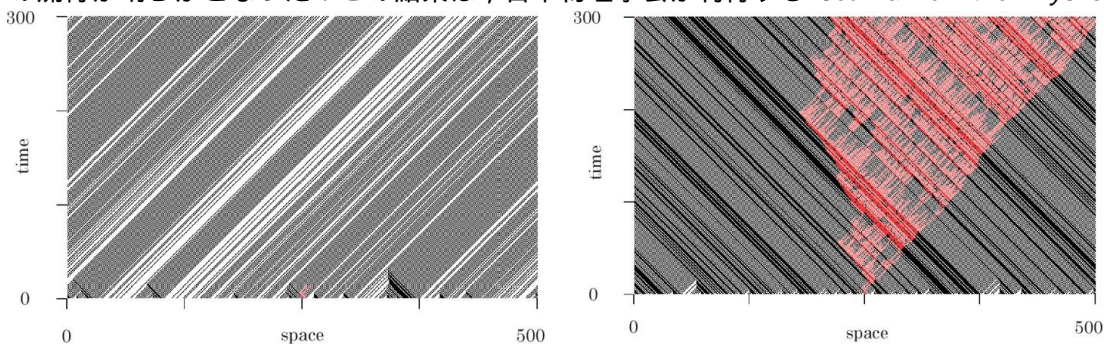
つながりが固定された静的ネットワークから個体を移動可能にすることで、より現実に即した動的ネットワークモデルに拡張する。この拡張にあたっては、ベースのネットワーク構造において移動を取り扱い可能にし、その方法(方向性や速度等)を検討する必要がある。最初から多層ネットワークで移動を考慮すると、モデルの自由度が高くなりすぎるので、まずは単層ネットワークのモデルから始め、その後、多層ネットワークへ適用する。

### 4. 研究成果

#### (1) 多層ネットワーク上での個体移動が感染症の拡大/阻止に与える影響

多層ネットワーク上で個体が移動するとき感染がどのように広がるか、特に個体の特定の方向への移動が感染の拡大にどう寄与するか、またその感染拡大を防ぐにはどのようなワクチン接種戦略が有効になるのかについてエージェントベースモデルを計算機上に構築し、多数のシミュレーション実験を行った。

具体的には以下の研究を行い、成果を上げることができた。1次元空間での個体群の一方への移動が感染症の拡大・阻止に与える影響について、エージェントベースモデルのシミュレーションによって調べた。その結果、個体の密度が閾値以下の場合には個体の接触が途絶え、感染が消滅すること(図1左)、一方で閾値以上の場合には継続的な個体の接触に起因して、感染する個体が常に存在してしまうことが分かった(図1右)。個体の移動を考慮せず、空間的な混雑効果もない平均場近似による予測と比較することで、移動と空間の混雑効果による感染症の流行が明らかとなった。この結果は、日本物理学会が刊行する *Journal of the Physical*



密度が閾値以下で感染が消滅する例

密度が閾値以上で感染が広がる例

図1 密度の違いによる感染症(赤)の拡大・消滅への影響

(2) メタポピュレーションネットワークでの個体移動が感染症の拡大/阻止に与える影響

次に、生態学のモデルでよく用いられるメタポピュレーションのネットワーク構造を用いて、パッチ（ネットワークのノード）間を個体がランダムに移動する時にネットワーク構造の違いによって感染規模にどのような影響が出るかを数値シミュレーションと数理解析によって調べた。ネットワーク構造は完全グラフ、サイクルグラフ、スターグラフの3種類を考えた。その結果、スターグラフのようなハブを持つ非均質なネットワークの場合、ハブが感染症の供給源となって消滅しにくいことが明らかとなった（図2）。この結果は、数理生物学の伝統的ジャーナルである *Journal of Theoretical Biology* 誌に掲載された。

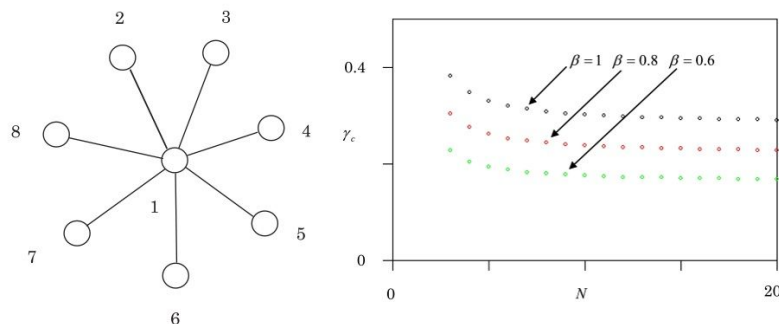


図2 スターグラフ（左）において感染が広がるかどうかの回復閾値（右）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 19 件)

Takashi Nagatani, Genki Ichinose, and Kei-ichi Tainaka, Metapopulation dynamics in the rock-paper-scissors game with mutation: Effects of time-varying migration paths, *Journal of Theoretical Biology*, 査読有, 462, 425-431, 2019.

doi:10.1016/j.jtbi.2018.11.030

Yuki Katsumata, Takashi Uehara, Hiromu Ito, Jin Yoshimura, Kei-ichi Tainaka, and Genki Ichinose, Density-dependent population model of effective release policy for Ayu fish, *Ecological Modelling*, 査読有, 388, 80-87, 2018.

doi:10.1016/j.ecolmodel.2018.09.021

Takashi Nagatani, Kei-ichi Tainaka, and Genki Ichinose, Metapopulation model of rock-scissors-paper game with subpopulation-specific victory rates stabilized by heterogeneity, *Journal of Theoretical Biology*, 査読有, 458, 103-110, 2018.

doi:10.1016/j.jtbi.2018.09.009

Genki Ichinose, Yoshiki Satotani, and Hiroki Sayama, How mutation alters the evolutionary dynamics of cooperation on networks, *New Journal of Physics*, 査読有, 20, 053049, 2018.

doi:10.1088/1367-2630/aac2a7

Maica Krizna Areja Gavina, Kotaro Aoki, Genki Ichinose, Jomar F. Rabajante, Hiromu Ito, Satoru Morita, Vincent A.A. Jansen, and Jin Yoshimura, Long-term persistence of agricultural pest insects by risk-spreading dispersal, *Ecological Research*, 査読有, 33, 1031-1037, 2018.

Takashi Nagatani, Genki Ichinose, and Kei-ichi Tainaka, Epidemics of random walkers in metapopulation model for complete, cycle, and star graphs, *Journal of Theoretical Biology*, 査読有, 450, 66-75, 2018.

doi:10.1016/j.jtbi.2018.04.029

Takashi Nagatani, Genki Ichinose, and Kei-ichi Tainaka, Metapopulation model for rock-paper-scissors game: mutation affects paradoxical impacts, *Journal of Theoretical Biology*, 査読有, 450, 22-29, 2018.

doi:10.1016/j.jtbi.2018.04.005

Takashi Nagatani, Genki Ichinose, and Kei-ichi Tainaka, Heterogeneous network promotes species coexistence: metapopulation model for rock-paper-scissors game, *Scientific Reports*, 査読有, 8, 7094, 2018.

doi:10.1038/s41598-018-25353-4

Takeru Tahara, Maica Krizna Gavina, Takenori Kawano, Jerrold Tubay, Jomar Rabajante, Hiromu Ito, Satoru Morita, Genki Ichinose, Takuya Okabe, Tatsuya Togashi, Kei-ichi Tainaka, Akira Shimizu, Takashi Nagatani, and Jin Yoshimura, Asymptotic stability of a

modified Lotka-Volterra model with small immigrations, *Scientific Reports*, 査読有, 8, 7029, 2018.

doi:10.1038/s41598-018-25436-2

Genki Ichinose, Yoshiki Satotani, and Takashi Nagatani, Network flow of mobile agents enhances the evolution of cooperation, *EPL*, 査読有, 121, 28001, 2018.

doi:10.1209/0295-5075/121/28001

Takashi Nagatani, Genki Ichinose, and Kei-ichi Tainaka, Traffic jams induce dynamical phase transition in spatial rock-paper-scissors game, *Physica A*, 査読有, 492, 1081-1087, 2018.

doi:10.1016/j.physa.2017.11.038

Genki Ichinose and Naoki Masuda, Zero-determinant strategies in finitely repeated games, *Journal of Theoretical Biology*, 査読有, 438, 61-77, 2018.

doi:10.1016/j.jtbi.2017.11.002

Masanori Takano and Genki Ichinose, Evolution of human-like social grooming strategies regarding richness and group size, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 査読有, 6, 8, 2018.

doi:10.3389/fevo.2018.00008

Maica Krizna Gavina, Takeru Tahara, Kei-ichi Tainaka, Hiromu Ito, Satoru Morita, Genki Ichinose, Takuya Okabe, Tatsuya Togashi, Takashi Nagatani, and Jin Yoshimura, Multi-species coexistence in Lotka-Volterra competitive systems with crowding effects, *Scientific Reports*, 査読有, 8, 1198, 2018.

doi:10.1038/s41598-017-19044-9

Tsuyoshi Hashimoto, Kazunori Sato, Genki Ichinose, Rinko Miyazaki, and Kei-ichi Tainaka, Clustering effect on the dynamics in a spatial rock-paper-scissors system, *Journal of the Physical Society of Japan*, 査読有, 87, 014801, 2018.

doi:10.7566/JPSJ.87.014801

Yuki Katsumata, Takashi Uehara, Hiromu Ito, Jin Yoshimura, Kei-ichi Tainaka, and Genki Ichinose, Territory holders and non-territory holders in Ayu fish coexist only in the population growth process due to hysteresis, *Scientific Reports*, 査読有, 7, 16777, 2017.

doi:10.1038/s41598-017-16859-4

Takashi Nagatani, Kei-ichi Tainaka, and Genki Ichinose, Effect of directional migration on Lotka-Volterra system with desert, *BioSystems*, 査読有, 162, 75-80, 2017.

doi:10.1016/j.biosystems.2017.09.015

Takashi Nagatani, Genki Ichinose, and Kei-ichi Tainaka, Epidemic spreading in unidirectional mobile agents, *Journal of the Physical Society of Japan*, 査読有, 86, 113001, 2017.

doi: 10.7566/JPSJ.86.113001

Takashi Nagatani, Kazunori Sato, Genki Ichinose, and Kei-ichi Tainaka, Space promotes the coexistence of species: Effective medium approximation for rock-paper-scissors system, *Ecological Modelling*, 査読有, 359, 240-245, 2017.

doi: 10.1016/j.ecolmodel.2017.06.001

#### [学会発表](計 17 件)

間宮安曇, 一ノ瀬元喜, 観測エラー付き繰り返し囚人のジレンマゲームにおける利得の線形関係を強いる戦略の数理解析, 第 5 回数理論生物学交流発表会, 2019.

宮川大樹, 一ノ瀬元喜, 長谷隆, 体の回転挙動を考慮した群衆避難セルオートマトンモデル, 第 5 回数理論生物学交流発表会, 2019.

間宮安曇, 一ノ瀬元喜, 観測エラー付き繰り返し囚人のジレンマゲームにおける利得の線形関係を強いる戦略, ゲーム理論ワークショップ 2019, 2019.

勝又雄基, 上原隆司, 伊東啓, 吉村仁, 泰中啓一, 一ノ瀬元喜, 縄張り競争の個体群動態モデルによるアユの効果的な放流方策の検討, 第 34 回個体群生態学会大会, P49, 2018.

間宮安曇, 一ノ瀬元喜, 繰り返しゲームにおける高エラー率に対する代表的な戦略の性質, FIT 2018 第 17 回情報科学技術フォーラム講演論文集, F-036, 2018.

宮川大樹, 一ノ瀬元喜, 長谷隆, 体の回転挙動を考慮した避難群集のセルオートマトンモデル, 第 24 回創発システム・シンポジウム, 41, 2018.

間宮安曇, 一ノ瀬元喜, 繰り返しゲームにおける高エラー率に対する代表的な戦略の性質, 第 24 回創発システム・シンポジウム, 39, 2018.

Genki Ichinose and Naoki Masuda, Zero-determinant strategies in repeated prisoner's dilemma games, *Proceedings of the 2018 Conference on Artificial Life (ALIFE 2018)*, 284-285, 2018.

藤澤隆介, 一ノ瀬元喜, 土畑重人, 進化する群ロボットにおける「調節メカニズム」の役割, 第 62 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'18), 2018.

土畑重人, 一ノ瀬元喜, 藤澤隆介, 神は細部に宿る: フェロモンを用いたロボット群の採

餌効率を左右する行動規則, 第 65 回日本生態学会大会, 2018.

二ノ瀬元喜, 増田直紀, Zero-determinant strategies in finitely repeated games, ゲーム理論ワークショップ 2018, 2018.

二ノ瀬元喜, How mutation alters fitness of cooperation in networked evolutionary games, 第 1 回松江数理生物学・現象数理学ワークショップ, 2017.

三好星慧, 泰中啓一, 二ノ瀬元喜, 捕食者回避のための被食者の群れ行動ネットワークの進化, 第 27 回日本数理生物学会年会, 2017.

Genki Ichinose, Yoshiki Satotani, and Hiroki Sayama, How mutation alters fitness of cooperation in networked evolutionary games, *Proceedings of the 14th European Conference on Artificial Life (ECAL 2017)*, 208-213, 2017.

Genki Ichinose, Yoshiki Satotani, and Hiroki Sayama, Mutation differently affects cooperation depending on social network structures, *Conference on Complex Systems 2017 (CCS 2017)*, 2017.

二ノ瀬元喜, How mutation alters fitness of cooperation in networked evolutionary games, ネットワーク科学セミナー2017, 2017.

三好星慧, 二ノ瀬元喜, 捕食者回避のための被食者の群れ行動ネットワークの進化, 第 14 回ネットワーク生態学シンポジウム, 2017.

〔その他〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/igenki/publications>

## 6 . 研究組織

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：吉村 仁

ローマ字氏名：(YOSHIMURA, Jin)

研究協力者氏名：泰中 啓一

ローマ字氏名：(TAINAKA, Kei-ichi)

研究協力者氏名：伊東 啓

ローマ字氏名：(ITO, Hiromu)

研究協力者氏名：佐山 弘樹

ローマ字氏名：(SAYAMA, Hiroki)

研究協力者氏名：里谷 佳紀

ローマ字氏名：(SATOTANI, Yoshiki)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。