

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03453

研究課題名(和文) 動的ネットワークの汎用モデルの構築とその一般理論

研究課題名(英文) Construction of general purpose model of dynamical networks and its general theory

研究代表者

守田 智 (Morita, Satoru)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：20296750

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では社会に遍在するネットワーク上での拡散現象に着目している。この1年で、特に知られるようになった感染性拡散モデルに対する基本再生産数およびそれを拡張したタイプ別再生産数の定式化を行った。驚くべきことに従来から知られていた公式より正確なものが得られた。実在のネットワークではリンクのつながり具合に相関がみられるが、この相関を考慮した場合についても定式化に成功した。また、上記の研究をリアルな性感染症拡散モデルにも応用している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

興感染症の出現によって複雑ネットワーク上の感染症モデルの解析は、今日もっとも注目を浴びている分野の一つとなっている。本研究課題はその基盤となる知見を提供している。基本再生産数は感染症等が拡散する強さを測る重要な指標であるが、この基本再生産数がネットワークを変化によって(つまり人為的な感染症対策をおこなうことで)どのように変化するかを明らかにすることは、感染防御政策を決めるにあたって必要な知見を与える。今後ますます社会的意義の増していく基本研究であると言えるだろう。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we focus on the diffusion phenomenon on the ubiquitous network in society and nature. We formulated the basic reproduction number and its extension, the type-reproduction number, for the epidemic model that has become particularly well known because of covid-19. The results are more accurate than previously known formulas. We have also successfully formulated the formulas taking into account the degree correlation, which means the correlation between the links in the real network. We have also applied these researches to a more realistic model for sexually transmitted diseases.

研究分野：ネットワーク科学

キーワード：複雑ネットワーク 感染症モデル ネットワーク科学 確率モデル 社会ネットワーク 基本再生産数 生態系モデル 冪乗分布

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

複雑ネットワークという概念が物理学・生物学から社会科学に至る幅広い分野で注目されてきた。複雑ネットワークの考え方では、複雑なシステムをその構成要素間の2対関係として抽象化することでシステムの特性を鮮明化することを目指している。自然界や社会で見られる現実のネットワークには、従来の数理モデルで用いられたランダムグラフや格子と全く異なる様々な特徴を持っていることが広く知られるようになってきているが、ネットワークのリンクが動的に変化していく場合の理論についてはまだ確立したものはない。現実の問題として、たとえば社会的なネットワークを介して拡散する感染症に対してどのような感染対策が有効かという問いに答える理論が必要となっている。

2. 研究の目的

複雑ネットワークの理論研究は、統計物理学を中心に盛んに行われてきたが、その多くは繋がりが固定された静的ネットワークで、ネットワーク自体の時間変動を考慮したものは少なかった。たとえば、現実の感染症伝播であれば、感染者との交流は避けるというようにネットワークは時間変化していくと考えられる。このような現実的な状況をコンピュータ上でシミュレートした研究はあるが、動的ネットワーク一般の理論研究は不十分である。その理由の一つは、静的ネットワークには基準となるような汎用モデルが存在するが、動的ネットワークではそのようなモデルが確立されていないことである。今後発展していくと思われる動的ネットワークの研究分野で世界をリードすることを目指す。

3. 研究の方法

ランダム乗算過程をリンクダイナミクスに適用し、作成の動的ネットワークにおいて次数相関・クラスター性等の静的ネットワークで用いられる指標がどのように変化するかを解析する。ランダム乗算過程がネットワークを構成する要素(ノード)の状態に依存する現実的なモデルを考案する。そこで生じる動的ネットワークにおいて上記と同様に静的ネットワーク指標を調べ、さらにそれらを拡張した動的ネットワークの指標を確立する。さらに動的ネットワークモデル上で進化ゲーム、感染症伝播のモデルを展開し、ネットワークの時間変動の影響を明らかにする。

4. 研究成果

(1) ネットワーク上の感染症拡散モデルに関して従来の理論を見直し、感染対策にも使われる重要な指標である基本再生産数の定式化を再検討した。この分野で用いられている感染閾値の理論(たとえば Pastor-Satorras, et al Rev. Mod. Phys. 2015)から導かれる公式を厳密に更新する正確な公式を導出できた。この研究成果を記した論文は2020年6月に完成しNature系の学術誌に投稿したが、2021年6月にトランスファー先のScientific Reports誌からリジェクトの連絡がきた。研究期間中の出版に至らず残念であるが、現在別の専門誌に投稿中である[1]。

(2) 社会ネットワークでは社会的繋がりの多い人が繋がりの多い人と、繋がりの少ない人が繋がりの少ない人と交際する傾向があること(正の次数相関)が知られている。もちろん繋がりの種類(学校、仕事、趣味、SNS、セックスなど)によってその傾向は異なるし、情報工学的な繋がりは逆に負の次数相関があると言われている。次数相関が拡散に与える影響についても上記の感染閾値の理論を拡張して定式化を行った。この研究成果を記した論文は2021年2月に公開されている[2]。

(3) もっと現実的な対象として性感染症についてのモデルに応用した。ここでは「子供」と「成人女性」と「成人男性」の3つのコンパートメントによる障害・死亡を考慮し、性活動の相違も考慮したモデルを構築することで、感染防御のため重要な指標であるタイプ別再生産数を定式化した[3]。タイプ別再生産数は、集団内の人をいくつかのタイプに分けた場合の基本再生産数を拡張した指標であり、そのタイプの感染者が同じタイプの感染者を何人生むかという量である。基本再生産数と同様、この量が1より大きいなら感染拡大の可能性はある。本研究で用いたモデルは一般的な性感染症を表現できる汎用モデルであり、様々な性感染症の防止策提案のための基盤となる。蔓延している性感染症に対して効果的な予防ワクチンが存在する場合は、男性ではなく女性にワクチン接種を集中させるのが効率的であるという知見が数学的に導かれた[3]。

(4) (3)のモデルをさらに拡張して解析を行っている。従来のモデルでは性別を無視して同性間のみ性接触を考慮するものが異性間の性接触に注目するものがほとんどであったが、異性間と男性間の性接触を考慮しつつ性接触のスケールフリー的なネットワークに着目した包括的なモ

デルを構築した .母子感染も含んだ世代に渡るモデルはこれまでにない新しいモデルである .複雑化したモデルは数値計算のみ行われ ,解析的な議論はできないことが多いが ,我々は数理モデルから感染閾値を表現する解析的な公式を導出した .単に数学的な式を導出したのみならず ,この公式をネットワーク図としてビジュアル化することにも成功している .この研究成果を記した論文は現在投稿中である [4] .

<引用文献>

[1] Satoru Morita “ Solvable epidemic model on degree-correlated networks ” 投稿中 (arXiv:2006.03278).

[2] Satoru Morita “ Solvable epidemic model on degree-correlated networks ” Physica A 5673, 1125419, 2021 (doi.org/10.1016/j.physa.2020.125419).

[3] Hiromu Ito, Taro Yamamoto, Satoru Morita, “ The type-reproduction number of sexually transmitted infections through heterosexual and vertical transmission ” Scientific Reports 9: 17408, 2019 (doi.org/10.1038/s41598-019-53841-8).

[4] Hiromu Ito, Taro Yamamoto, Satoru Morita, “ The effect of men who have sex with men (MSM) on the spread of sexually transmitted infections ” 投稿中

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 9件）

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 Ito Hiromu, Yamamoto Taro, Morita Satoru | 4. 巻 9 (17408) |
| 2. 論文標題 The type-reproduction number of sexually transmitted infections through heterosexual and vertical transmission | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 1~13 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-53841-8 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Ito Hiromu, Tamura Kazuhiro, Wada Takayuki, Yamamoto Taro, Morita Satoru | 4. 巻 14 (e0221520) |
| 2. 論文標題 Is the network of heterosexual contact in Japan scale free? | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 PLOS ONE | 6. 最初と最後の頁 1~12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0221520 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Ito Hiromu, Yamamoto Taro, Morita Satoru | 4. 巻 348 |
| 2. 論文標題 Demography of sexually transmitted infections with vertical transmission | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Applied Mathematics and Computation | 6. 最初と最後の頁 363~370 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.amc.2018.12.002 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Yamamoto Tatsuki, Ito Hiromu, Nii Momoka, Okabe Takuya, Morita Satoru, Yoshimura Jin | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 A single 'weight-lifting' game covers all kinds of games | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Royal Society Open Science | 6. 最初と最後の頁 191602~191602 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsos.191602 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 Nii Momoka, Okabe Takuya, Ito Hiromu, Morita Satoru, Yasuda Yosuke, Yoshimura Jin | 4. 巻 9 (13745) |
| 2. 論文標題 Bankruptcy is an inevitable fate of repeated investments with leverage | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 1~5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-50237-6 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 Pulungan Muhammad Almaududi, Suzuki Shota, Gavina Maica Krizna Areja, Tubay Jerrold M., Ito Hiromu, Nii Momoka, Ichinose Genki, Okabe Takuya, Ishida Atsushi, Shiyomi Masae, Togashi Tatsuya, Yoshimura Jin, Morita Satoru | 4. 巻 9 (11201) |
| 2. 論文標題 Grazing enhances species diversity in grassland communities | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 1~8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-47635-1 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 Otsuki Takahiro, Uka Daisuke, Ito Hiromu, Ichinose Genki, Nii Momoka, Morita Satoru, Sakamoto Takuma, Nishiko Maaya, Tabunoki Hiroko, Kobayashi Kazuya, Matsuura Kenji, Iwabuchi Kikuo, Yoshimura Jin | 4. 巻 9 (7357) |
| 2. 論文標題 Mass killing by female soldier larvae is adaptive for the killed male larvae in a polyembryonic wasp | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 1~7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-43643-3 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 Satoru Morita | 4. 巻 87 |
| 2. 論文標題 Power-law Exponent in Multiplicative Langevin Equation with Temporally Correlated Noise | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn. 87, 053801 (2018) | 6. 最初と最後の頁 1-4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.053801 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Maica Krizna Areja Gavina, Kotaro Aoki, Genki Ichinose, Jomar Fajardo Rabajante, Hiromu Ito, Satoru Morita, Vincent A. A. Jansen, Jin Yoshimura | 4. 巻 33 |
| 2. 論文標題 Long-term persistence of agricultural pest insects by risk-spreading dispersal | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Ecological Research | 6. 最初と最後の頁 1031-1037 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11284-018-1615-z | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Morita Satoru | 4. 巻 563 |
| 2. 論文標題 Solvable epidemic model on degree-correlated networks | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physica A: Statistical Mechanics and its Applications | 6. 最初と最後の頁 125419 ~ 125419 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physa.2020.125419 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Areja Gavina Maica Krizna D., Torres Monica C., Gamilla Gimelle B., Sakaguchi Tomohiko, Ito Hiromu, Rabajante Jomar F., Tubay Jerrold M., Yoshimura Jin, Morita Satoru | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Exaggerated evolution of male armaments via male-male competition | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Ecology and Evolution | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ece3.7546 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 Chiba Erika, Cuaresma Diane Carmeliza N., Rabajante Jomar F., Tubay Jerrold M., Areja Gavina Maica Krizna, Yamamoto Tatsuki, Yoshimura Jin, Morita Satoru, Ito Hiromu, Okabe Takuya | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 Improving environment drives dynamical change in social game structure | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Royal Society Open Science | 6. 最初と最後の頁 1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsos.201166 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Satoru Morita, Hiromu Ito, Taro Yamamoto |
| 2. 発表標題 Basic Reproduction Number of Sexually Transmitted Infections with Mother-to-Child Infection |
| 3. 学会等名 International school and Conference on Network Science (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 伊東啓, 山本太郎, 守田智 |
| 2. 発表標題 母子感染と性ネットワークを考慮した性感染症拡散モデル |
| 3. 学会等名 第35回個体群生態学会大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 守田智, 伊東啓, 山本太郎 |
| 2. 発表標題 母子感染を考慮した性感染ネットワーク拡散モデル |
| 3. 学会等名 2019年度日本数理生物学会大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 守田智, 伊東啓, 山本太郎 |
| 2. 発表標題 直感染を含む性感染伝播のネットワーク拡散モデル |
| 3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------|
| 1. 発表者名 守田智 |
| 2. 発表標題 複雑ネットワーク上の伝播現象について |
| 3. 学会等名 第2回数理生物学夏の学校(招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Satoru Morita |
| 2. 発表標題 Sexually transmitted infection models with mother-to-child infection |
| 3. 学会等名 The 7th China-India-Japan-Korea International Conference on Mathematical Biology(招待講演)(国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 伊東啓 |
| 2. 発表標題 数理モデルから考察する性感染症の存続性とヒト社会への適応 |
| 3. 学会等名 第16回ネットワーク生態学シンポジウム(招待講演) |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------|---|--------------------------------|----|
| 研究 分担 者 | 吉村 仁 (Yoshimura Jin) (10291957) | 静岡大学・工学部・教授 (13801) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 伊東 啓 (Ito Hiromu) (80780692) | 長崎大学・熱帯医学研究所・助教 (17301) | |
| 研究分担者 | 泰中 啓一 (Tainaka Kei-ich) (30142227) | 静岡大学・創造科学技術大学院・客員教授 (13801) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |