

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03387

研究課題名（和文）複雑ネットワークにおける隣接行列の縮約的表現法の開発とその応用

研究課題名（英文）Development of a Reduced Representation of Adjacency Matrices in Complex Networks and Its Applications

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、巨大なネットワークの隣接行列が現実的に扱い難い大きさになる問題を、隣接行列を縮約して表現する方法で解決を目指すものである。ここでは、巨大なネットワークとして接触と移動からなる社会ネットワークをターゲットとして取り上げた。特に、社会ネットワーク上を伝播する感染症に注目し、数理疫学の分野で用いられる基本再生産数およびタイプ別再生産数を指標にネットワークの縮約を試み、その結果はそれぞれ論文となった。地域間移動も考慮して実データを用いた解析を論文とした。また最終年度の論文で次数相関を固有値分解で簡略に表現する方法を考案し、様々な社会ネットワークデータに適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の隣接行列の縮約的表現法は、巨大な隣接行列を現実的に扱うための一つの有効な手段を提供する。この方法論は、感染症の拡散モデルだけでなく、情報伝達ネットワークにも適用可能で、その応用範囲は非常に広い。特に固有値分解の手法が2部グラフでは特異値分解として適用される点が特徴的で、これにより二部グラフ構造を持つデータセットの解析に使える。また、本研究の成果は、現在注目されている推薦システムにも応用可能と期待でき、ユーザの嗜好に基づいたコンテンツ推薦やマーケットバスケット解析等、多岐にわたる分野での利用が期待できる。以上のように、本研究はネットワーク科学の発展に寄与し、社会的意義も非常に大きい。

研究成果の概要（英文）：This research aims to address the challenge of managing the adjacency matrices of extremely large networks by developing a reduced representation of these matrices. We focus on social networks involving contact and movement as our primary target. Specifically, we concentrate on the spread of infectious diseases within social networks and attempt to reduce the network based on the basic and type reproduction numbers used in mathematical epidemiology. These findings have been published in two papers. Additionally, an analysis incorporating inter-regional migration using real data was also published. In the final year of the project, we devised a simplified method for representing degree correlations through eigenvalue decomposition and applied it to various social network data.

研究分野：非線形物理学

キーワード：ネットワーク科学 社会ネットワーク 複雑ネットワーク 次数相関 隣接行列 クラスタ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

複雑なシステムを構成要素間の2対関係で表現して解析するネットワーク科学の手法は、幅広い学術分野にわたって応用され、学際的領域として大きく成長してきた。しかし、理論物理学の中で発展してきたネットワーク理論と、学際的なネットワーク科学が扱う諸問題の解決の間には、いままもギャップが存在している。たとえば、理論モデルでシステムサイズの無限大での漸近挙動を調べる統計物理学的方法論で、実際の有限なシステムの本質を捉えることができているかという問題が挙げられる。そこで巨大だが有限である実際のネットワークにたいして隣接行列を縮約的に低次元化する方法を開発し、ネットワーク理論の応用範囲を拡張することを目指すこととした。

2. 研究の目的

そこで本研究では、システムサイズの影響を受けやすい従来のネットワーク指標に代わる表現として、ネットワーク上の拡散ダイナミクスから導かれる隣接行列の縮約的表現法を開発し、多くの分野で応用できるネットワーク理論を構築する。端的に言えば、ネットワーク構造を誰にでも明らかな形式で書き下す手法の開発である。これにより実際のネットワークと理論の間に生じるギャップを解消していく。さらに、ネットワーク理論が発展途上にあるといえるリンクが密なネットワークや重み付きネットワーク、さらにノードやリンクの数が変動するような動的ネットワークに関して、提案手法の有効性を検証する。

3. 研究の方法

これまでのネットワーク上の感染症拡散モデルの研究で用いた隣接行列の縮約的な表現法の一般化を行う。次数相関を記述する方法についての既に論文 (Morita 2020a) としているアイデアの一般理論化に取り組む。1年目の末頃までに上記の仕事を完成させつつ、その妥当性や適用範囲を数理モデルで検証していく。2年目以降は動的ネットワークについて拡張していく予定である。提案手法をネットワーク上の感染症等の拡散現象と進化ゲーム理論に応用する。さらに感染症伝播モデルの医療現場への実用化を推し進める。従来のネットワーク理論は現場の医療従事者には難解と言わざるを得ず、ネットワーク理論が最も貢献できると期待される感染症対策へ提言が困難であった。一方、本研究で提案される縮約的表現法は、数理モデルに慣れていない医療関係者等にも理解しやすい簡易的な表現を提供し、これまで難しかった情報共有や共同研究の展開性も上がる。

4. 研究成果

(1) 本研究では、まず社会ネットワーク上を伝播していく感染症に特に注目し、数理疫学の分野で広く用いられている基本再生産数およびタイプ別再生産数を指標に、ネットワークの縮約を試みた。このアプローチにおいて注目しているのは、個体間の接触ネットワークであり、ここでは接触形式(すなわち人と人とのつながり)が静的に所与とされている単純なケースを扱う。これにより、感染症の伝播をより正確にモデル化し、理解するための基盤を提供する。基本再生産数およびタイプ別再生産数についての研究成果をそれぞれ S. Morita, *Physical Review E* 106, 034318 (2022) および S. Morita, *Physica A*, 587, 126514 (2022) にまとめた。前者では、従来使われてきた感染しきい値の式より正確な近似式を、後者で感染対策に必要なワクチンの量についての従来とは異なる表式を得るといった新しい成果がもたらされた。この結果は感染症伝播のみならず、社会ネットワークを通じて伝播する噂やイノベーションといった情報にも応用できると考えられる。

(2) 接触形式として、いつも近くにいる人同士の接触だけでなく、移動を介して生じる接触も非常に重要であると考えられる。ミクロスコピックな視点にたてば、ネットワークが時々刻々変化する動的ネットワークを考慮する必要があるが、メゾスコピックな視点にたちコミュニティ間の連続的な移動流としてみなしモデルを開発した。ここでは、時間スケールの異なる2通りの移動を考慮した(図1)。実際の移動がどうなっているかを調べるため、地域間移動のパーソントリップデータを取得し解析をおこない、人の移動が接触ネットワークに与える影響を明らかにした。この解析は、前述の研究と近年猛威を振るった新型コロナウイルス感染症に対する数理モデル研究を融合させたものである。この融合により、新型コロナウイルスの拡散メカニズムも深く理解し、今後の新規感染症に関して対策の提案に寄与できると期待できる。この研究成果は、S. Morita, K. Nakagawa, *Journal of Theoretical Biology* 558, 111367 (2023) に発表された。本論文では関西地区のデータに基づき解析をおこなっているが、継続して全国版での拡張が進展中である。

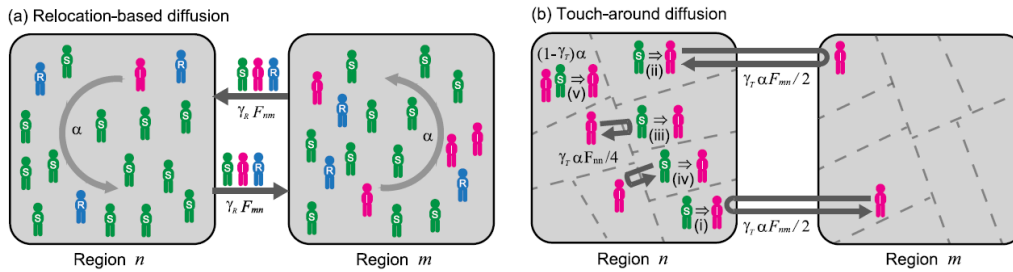


図1 異なる2つの時間スケールの移動の模式図 (Morita & Nakagawa 2023 より)

(3) 感染症モデルを扱ってきたが、そこで使用できる実データは限られている。そこで、性感染症に関して新たな社会ネットワークデータとして、インターネット上にある性風俗口コミサイトに注目し、性接触ネットワークの再構築した。具体的には、商用インターネットサイトでソープランドと呼ばれる業態について注目し、ハンドルネームで識別される男性顧客が特定の店舗の特定の女性スタッフについて投稿した口コミから、男性顧客と女性スタッフをノードとみなすネットワークを構築した。この方法により、従来から指摘されていた性接触ネットワークの構造特性 (スモールワールド性、スケールフリー性等) に加え、少数の顧客の地域間移動 (図2参照) がネットワークの構造に大きな影響を与えていることを示すことができた。この研究成果は、H. Ito, K. Shigeta, T. Yamamoto, S. Morita, PLOS ONE 17 e0276981 (2022) にまとめられ、その研究について日本語で伊東、守田、医学のあゆみ 288, 513-517 (2024) で紹介している。

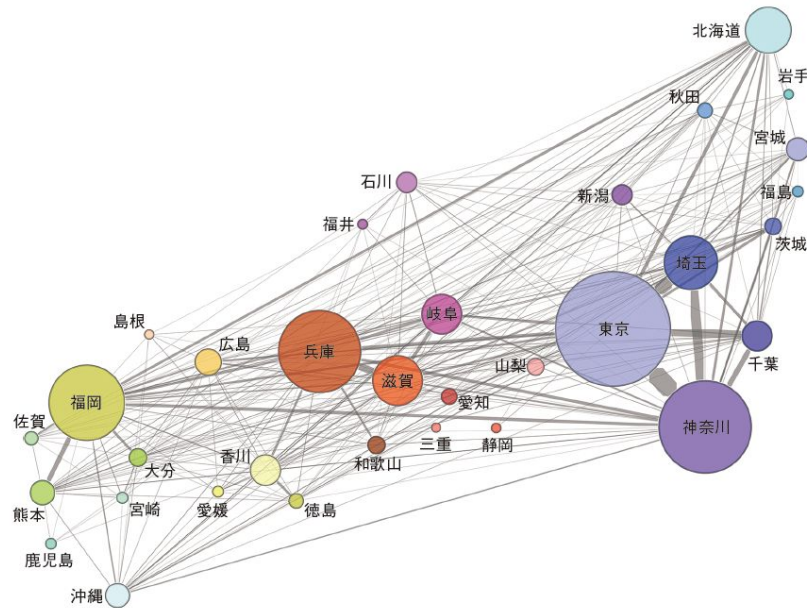


図2 男性顧客の移動を反映した都道府県のネットワーク (伊東、守田 2024 より)

(4) ゲーム理論への応用としては、社会ネットワークへの適用までは至らなかったが、多人数の公共財ゲームの一般化としての「荷物運びゲーム (weightlifting game) (図3) の解析も行った。その研究経過を D.C.N. Cuaresma et al., Scientific Reports 12, 8482 (2022) とし てまとめた。ここではゲームの構造と協力する人数のパターンについて詳細に検討している。

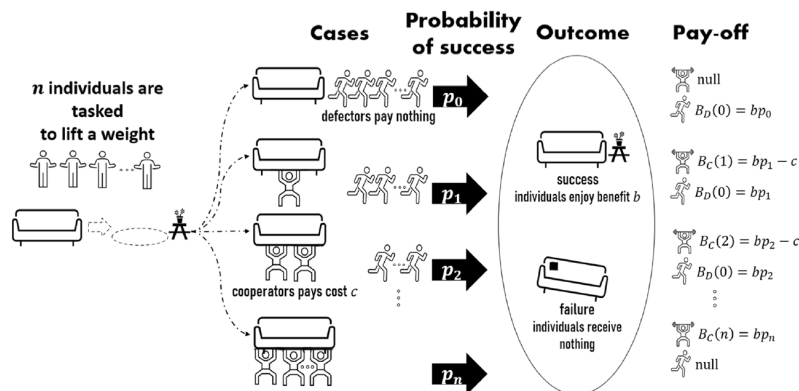


図3 n人荷物運びゲーム

(5) 本研究課題の集大成として次数相関に注目した隣接行列縮約法の理論を様々な社会ネットワークデータに適応して有用性を比較したものを S. Morita, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2023, 111J01 (2023) にまとめた. 次数相関を持つようにバイアスのかけたランダムな張替えによって人為的に作ったネットワーク(図4(i)(j))では縮約はあまりうまくいかない. それに比べて, 実際の社会ネットワークが低次元化できるような構造特性を持つことを示唆するものである. さらに一般化した方法の研究を継続中である.

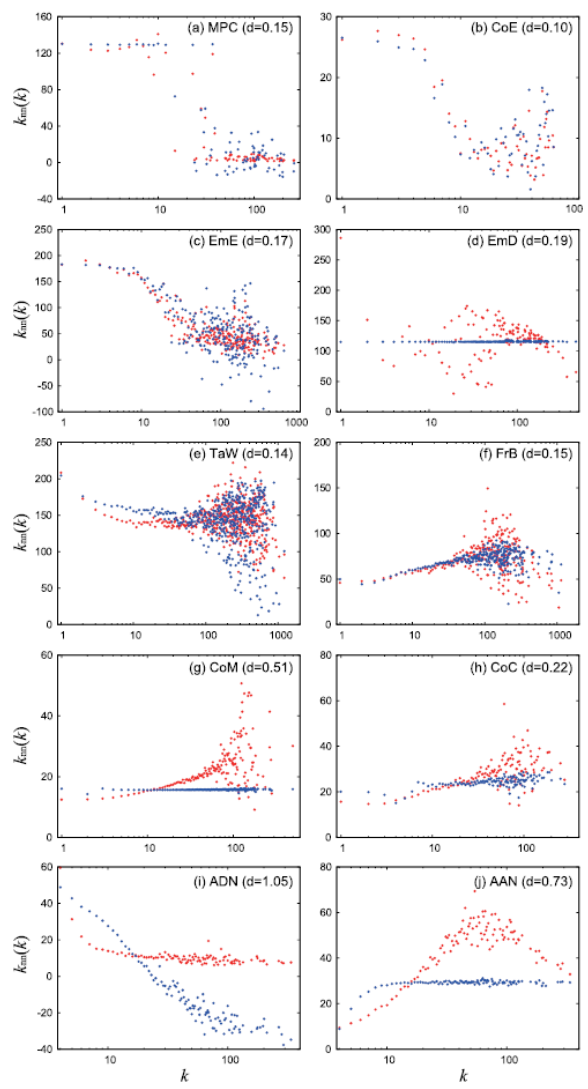


図4：次数相関：赤が実データ，青が縮約モデル（Morita 2023 より）

表1：8個の実データと2個の人工ネットワーク（Morita 2023 より）

ネットワーク	ノード	リンク	$\langle k \rangle$	k_{max}	r	C	λ_1	λ_2
MPC 携帯電話	6809	7680	2.3	261	-0.68	0.02	-0.175	0.004
CoE 共著(Erdős)	5094	5715	3.0	61	-0.44	0.07	-0.071	-0.004
EmE 電子メール(EU)	32430	54397	3.4	623	-0.38	0.11	-0.062	0.002
EmD 電子メール(DNC)	906	12085	26.6	462	-0.09	0.61	0.022	0.014
TaW ウィキペディア	92117	92117	7.8	1220	-0.03	0.06	-0.006	0.001
FrB 交友関係(SNS)	58228	58228	7.4	1134	0.01	0.17	0.006	-0.003
CoM 共著(MathSciNet)	391529	873775	4.5	496	0.12	0.40	0.016	0.013
CoC 共著(cond-mat)	21363	91286	8.5	279	0.13	0.63	0.008	0.008
ADN モデル(非同類性)	10000	39990	8.0	337	-0.13	0.01	-0.037	0.016
AAN モデル(同類性)	10000	39990	8.0	337	0.17	0.01	0.061	0.201

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Satoru Morita, Kuninori Nakagawa	4. 巻 558
2. 論文標題 Evaluating the impact of human flow on the spread of infectious diseases	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Theoretical Biology	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) 10.1016/j.jtbi.2022.111367	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 Hiromu Ito, Takayuki Wada, Genki Ichinose, Jun Tanimoto, Jin Yoshimura, Taro Yamamoto, Satoru Morita	4. 巻 12
2. 論文標題 Social dilemma in the excess use of antimicrobials incurring antimicrobial resistance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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) 10.1038/s41598-022-25632-1	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 -
1. 著者名 Morita Satoru	4. 巻 106
2. 論文標題 Basic reproduction number of epidemic models on sparse networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	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) 10.1103/PhysRevE.106.034318	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 Ito Hiromu, Shigeta Keiko, Yamamoto Taro, Morita Satoru	4. 巻 17
2. 論文標題 Exploring sexual contact networks by analyzing a nationwide commercial-sex review website	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PLOS ONE	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) 10.1371/journal.pone.0276981	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 Cuaresma Diane Carmeliza N., Chiba Erika, Tubay Jerrold M., Rabajante Jomar F., Gavina Maica Krizna A., Yoshimura Jin, Ito Hiromu, Okabe Takuya, Morita Satoru	4. 巻 12
2. 論文標題 Optimal strategies and cost-benefit analysis of the n -player weightlifting game	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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) 10.1038/s41598-022-12394-z	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 Satoru Morita	4. 巻 587
2. 論文標題 Type reproduction number for epidemic models on heterogeneous networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physica A	6. 最初と最後の頁 126514, 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physa.2021.126514	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 守田 智	4. 巻 67
2. 論文標題 感染症コンパートメントモデルのメカニズム	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 オペレーションズ・リサーチ : 経営の科学	6. 最初と最後の頁 179-186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 伊東啓, 守田智	4. 巻 288
2. 論文標題 なぜ性感染症はなくなるのか 性接触ネットワークの探求	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 医学のあゆみ	6. 最初と最後の頁 513-517
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Morita Satoru	4. 巻 2023
2. 論文標題 Representation of degree correlation using eigenvalue decomposition and its application to epidemic models	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 111J01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad132	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27件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 伊東啓, 重田桂子, 山本太郎, 守田智
2. 発表標題 性風俗情報サイトの口 コミ投稿から再構築する全国規模の性接触ネットワーク
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2023年春季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊東啓, 重田桂子, 山本太郎, 守田智
2. 発表標題 性風俗店のオンラインレビューから再構築する全国規模の性接触ネットワーク
3. 学会等名 第18回 ネットワーク生態学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 守田智
2. 発表標題 ネットワーク上の感染症拡散モデルに対して基本再生産数を慎重に計算する
3. 学会等名 第18回 ネットワーク生態学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉山尚, 守田智
2. 発表標題 SIRモデルを用いた道路網上での渋滞の表現
3. 学会等名 第18回 ネットワーク生態学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊東啓, 重田桂子, 山本太郎, 守田智
2. 発表標題 オンラインレビュー(口コミ)サイト分析による全国規模の性接触ネットワークの再構築
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 守田 智, 中川訓範
2. 発表標題 都市圏内における市区町村間移動が感染症拡大に与える影響
3. 学会等名 第2回計算社会科学学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊東啓, 重田桂子, 山本太郎, 守田智
2. 発表標題 ソーブランドの顧客レビュー(口コミ)から再構築する性接触の社会ネットワーク
3. 学会等名 第2回計算社会科学学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊東啓, 重田桂子, 山本太郎, 守田智
2. 発表標題 性風俗情報サイトのレビュー(口コミ)投稿から再構築する全国規模の性接触ネットワーク
3. 学会等名 日本ソーシャルデータサイエンス学会2023シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 守田 智, 中川訓範
2. 発表標題 パーソントリップ調査データから見る市町村間ネットワーク上の拡散現象のモデル
3. 学会等名 日本ソーシャルデータサイエンス学会2023シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 守田 智, 中川訓範
2. 発表標題 市区町村間人流ネットワークと感染症拡散モデル
3. 学会等名 2022年度 MIMS 現象数理学研究拠点 共同研究集会「社会物理学とその周辺」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Diane Carmeliza N. Cuaresma, Erika Chiba, Jerrold M. Tubay, Jomar F. Rabajante, Maica Krizna A. Gavina, Jin Yoshimura, Hiromu Ito, Takuya Okabe and Satoru Morita
2. 発表標題 Application of equilibrium conditions of the n-player weightlifting game to micro-credit insurance
3. 学会等名 The Operations Research Society of the Philippines (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 守田 智
2. 発表標題 2人2戦略対称ゲームのネットワーク効果分析
3. 学会等名 日本応用数学会2022年度会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoru Morita
2. 発表標題 Basic and type reproduction numbers for epidemic models on complex networks
3. 学会等名 The Eighth International Workshop on Biomathematics Modelling and Its Dynamical Analysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 守田 智
2. 発表標題 地域間人流ネットワークと感染症拡散モデル
3. 学会等名 第171回地域科学ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 守田 智
2. 発表標題 複雑ネットワーク上の感染モデルの基本再生産数の計算
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 守田 智, 中川 訓範, 大澤 実
2. 発表標題 地域間人流ネットワークが感染症拡散に与える影響を評価するモデルの一考察
3. 学会等名 ゲーム理論ワークショップ2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 守田 智, 中川 訓範
2. 発表標題 人流による空間的伝
3. 学会等名 日本応用数理学会2021年度年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 守田 智
2. 発表標題 複雑ネットワークの次数相関を固有値分解を用いて表現する
3. 学会等名 情報処理学会 第86回全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 守田 智
2. 発表標題 全国規模の性接触ネットワーク：性風俗商用サイトの口コミネットワークの解析
3. 学会等名 日本性感染症学会 第36回学術大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 守田 智
2. 発表標題 性感染症モデルと性接触ネットワーク
3. 学会等名 ネットワーク科学研究会2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 守田 智
2. 発表標題 感染症伝播に対する ネットワーク構造の影響
3. 学会等名 2023年度数理生物学会年
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊東 啓, 重田 桂子, 山本 太郎, 守田 智
2. 発表標題 性風俗情報サイトの分析による性接触ネットワークの可視化
3. 学会等名 第22回情報科学技術フォーラム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Taro Kanatani, Nakagawa Kuninori, Satoru Morita
2. 発表標題 Daily Surveillance of an Infectious isease in Large Metropolitan Areas
3. 学会等名 ERSA 2023 congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 守田 智
2. 発表標題 ネットワーク上の感染拡散モデルの基本再生産数
3. 学会等名 日本人口学会第75回大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoru Morita
2. 発表標題 Calculation of basic reproduction number for epidemic models on static networks
3. 学会等名 The 8th CIJK Conference on Mathematical and Theoretical Biology（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuhiro Tamura
2. 発表標題 On the behavior of repeated public goods games using AI
3. 学会等名 The 8th CIJK Conference on Mathematical and Theoretical Biology（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田村和広、守田 智
2. 発表標題 公共財ゲームにおける合理的な選択と強化学習の関係について
3. 学会等名 2023年度数理生物学会年会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本応用数学会 監修・大山 達雄編	4. 発行年 2022年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 352
3. 書名 選挙・投票・公共選択の数理	

〔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	岡部 拓也 (Okabe Takuya) (10324336)	静岡大学・工学部・准教授 (13801)	
研究 分担者	伊東 啓 (Ito Hiromu) (80780692)	長崎大学・熱帯医学研究所・准教授 (17301)	

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
---------	---------