

令和元年6月8日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K16061

研究課題名(和文) 複雑ネットワーク理論による感染症拡大解析と対策最適化

研究課題名(英文) Analysis of epidemic spreading and infection control with complex network theory

研究代表者

藤原 直哉 (Fujiwara, Naoya)

東北大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：00637449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、都市圏における人々の流動データ(人流データ)を用いて、接触ネットワークを構成し、そのネットワーク上で感染症シミュレーションを行うとともに、ネットワーク構造から感染最終規模を見積もる近似式を導出した。接触ネットワークを構成するさいにパラメータを変化させたところ、最大連結成分がパーコレーション転移およびスケーリングを示すことを示した。近似式では、少数個の接触ネットワークの固有値および固有ベクトルを用いてシミュレーション結果の本質を説明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実データ解析によってネットワークを構成するとともに、大規模な感染シミュレーション、そして理論を用いて感染拡大を見積もるとともに感染症対策への提言も視野に入れている点が本研究の大きな特徴である。現実のネットワークにおける知見を得ることが困難であった従来の近似手法を改善して、実データ解析にも耐えうる解析手法を整備、提供することができた。

研究成果の概要(英文)：In this research, we employed human mobility data in urban areas to construct time-dependent contact networks, performed simulations of spread of an infectious disease on the contact networks, and derived an approximated equation to estimate the final size of the infection. By varying a control parameter for the contact network, we found that the system shows the percolation transition and the scaling behavior. In the approximation, we can use small numbers of eigenvalues and eigenvectors of the contact networks, and found that the numerical solution of this equation well describes the simulation results with respect to the final size. Therefore, the relevant features of the spreading pattern can be captured by the eigenvectors of the connectivity matrices of the contact networks.

研究分野：複雑ネットワーク科学

キーワード：複雑ネットワーク 感染症 数理モデル 人流データ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

エボラ出血熱、デング熱、インフルエンザなどの感染症罹患による健康寿命の短縮は、今日も社会的・経済的に極めて重要な問題である。感染症は、今日でも主要な死因のひとつであると WHO の World Health Report においても議論されている。

そのため、様々な手法、データを用いて感染症の拡大を予測し、小さなコストで拡大を防止する対策を考えることは、非常に重要な課題である。近年、携帯電話が普及した結果、人々の都市圏における移動の詳細に関するデータ（人流データ）が利用可能になった。感染の拡大は感染者と感受性者の接触によって引き起こされるため、都市圏内外における人々の移動は感染拡大に非常に重要な役割を果たすと考えられる。それゆえ、人流データの発展は、感染症拡大予測および感染拡大対策にも貢献すると期待される。

感染症拡大予測のために重要であると考えられるもう一つの要素が、感染症拡大の数理モデルによる研究である。感染症の数理モデルの研究は、例えば Kermack-Mckendrick が 1927 年にいわゆる SIR モデルを提案していることからわかるように長い歴史を有し、多くの研究の蓄積がある。また、計算機の性能の進化により、大規模シミュレーションと実データに基づくモデリングが可能となりつつある。さらに、近年の展開として、ネットワーク科学の発展が挙げられる。感染症のモデリングでは、感染者と感受性者の接触を表現する必要があるが、各個人、あるいは特定の地域などをネットワークのノードとすると、接触はリンクとして表現することができる。接触パターンは非均一であるため、感染の拡大は非均一なネットワーク上で起こるとした数理モデルでの記述が必要である。興味深いことに、複雑ネットワーク科学の発展に伴い、ネットワーク構造の違いが感染症拡大に影響を及ぼすことが明らかになっている（Pastor-Satorras and Vespignani, Phys. Rev. Lett., 2001）。研究代表者は、先行研究（Fujiwara et al., Phys. Rev. E (2011)）において、モバイルエージェントが近隣にいるエージェントと相互作用する結合振動子モデルの解析を行い、パラメーターの値に応じて様々な同期に至る機構が存在することを明らかにした。

理論的にネットワーク構造が感染拡大に及ぼす効果を明らかにするためには、しばしばネットワーク構造について何らかの単純化を行い、構造と感染規模を特徴づける量との間の関係性を調べる。このようなアプローチにより、現象に対する定性的な理解が深まるとともに、感染症拡大を緩和するための政策の立案などにも有用であると考えられる。平均場近似（Heterogeneous mean field theory, Moreno et al., Eur. Phys. J. B, 2002）などの近似手法が良く使われるが、しばしば現実のネットワークでは成立しないと思われる近似に基づくことが多く、現実の系に対する深い洞察を得ることは困難である。

### 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では、人流の実データを用いて都市圏の住人の接触ネットワークを求めるとともに、ネットワーク上における感染症拡大を理論的に解析する枠組みを構築し、この枠組みを用いて、感染症拡大を抑制する最適な対策を立案するための手法を提案することを目的とする。データ解析によってネットワークを構成するとともに、大規模な感染シミュレーション、そして理論を用いて感染拡大を見積もる点が本研究の大きな特徴である。

さらに、一般的な情報伝播過程に対しても適用可能な人々の流動解析手法の提案および人流の空間構造の可視化を行い、情報伝播が人流によってどのように起こるかを直観的にも理解できる枠組みを整備する。

### 3. 研究の方法

ここでは、本研究の方法の概略を解説する。

#### (1) 人流データから接触ネットワークの構築

本研究の第 1 段階として、人流データから、以下のようにして接触ネットワークを構築する。人流データには、各エージェントがある時刻に滞在する点の経緯度情報が記録されている。飛沫感染などにより、感染者から感受性者へ感染する状況を考えると、この 2 人の距離が互いに近いときに感染が伝播する可能性があることがわかる。そこで、距離に閾値  $D$  を設定し、エージェント間の距離が  $D$  より近いときに、このエージェントは接触しており、感染の可能性があると解釈する。このようにして得られた接触をネットワークのノードと見なすと、感染症拡大の元となる接触のネットワークを構成することができる。なお、人の滞り場所は時々刻々変化するので、この接触ネットワークは時間的に変動することに注意する。

#### (2) 使用する人流データ

本研究では、国土交通省の「パーソントリップ調査」をもとに東京大学空間情報科学研究センターが整備・配布している「人の流れデータ」(<http://pflow.csis.u-tokyo.ac.jp/getflow.php>) などを用いて研究を行った。このデータは、日本における主要な都市圏における 1 日分の人流データである。各人は自宅から朝出発して夜自宅に戻るよう調整されており、そのために接触ネットワークは時間的に周期的である。

### (3) ネットワーク上における感染症数理モデル

得られた接触ネットワーク上で、感染症拡大モデルの数値シミュレーションを実行する。本研究では、シンプルな SIR モデルを採用する。SIR モデルというのは、感染症拡大の機構を表現する簡単なモデルであり、各エージェントが Susceptible (S), Infected (I), Recovered (Removed, R) の各状態をとり、S 状態と I 状態のエージェントが接触するとき、ある感染確率で感染が成立し、S 状態のエージェントが I 状態に変化する。また、I 状態のエージェントは一定の確率で R 状態へと変化する。上で述べたように、本研究で得られる接触ネットワークは 24 時間周期をもつ時間依存ネットワークであり、このネットワーク上でシミュレーションを実行する。

### (4) ネットワーク上における感染症拡大を見積もる理論

ネットワーク科学としては、与えられたネットワーク構造から感染がどのように拡大するかを見積もることが重要である。感染初期においては感染者数が時間とともに指数関数的に変化するが、変化を特徴づける指数は、ネットワークの接続行列の最大固有値と関係があることが知られている。最終的な平均感染者数（最終規模）も重要な指標である。感染症数理モデルが持つ非線形性のために、最終規模は固有値分解では捉えられないと考えられていたが、本研究によって、感染最終規模を特徴づける方程式を固有値、固有ベクトルを用いて閉じた式として表現することが可能であることが明らかとなった。すなわち、限られた隣接行列の固有モードのみを用いて自由度を削減した最終規模方程式を導出することが可能となった。

### (5) ネットワーク上における感染症拡大対策の効果を見積もる理論

感染規模を見積もることができると、感染症拡大対策の効果を見積もるシミュレーションおよび理論によって見積もることができる。ワクチンを接種することは、モデルにおいては、接種を受けたエージェントの感染率などのモデルパラメータを変化させることに対応する。しかし、ワクチンの数は限られているという状況では接種する人を選ぶことによって感染規模を最小化する必要がある。そこで、接種する対象に応じて最終規模をシミュレーションで求めることによって効果の違いを評価することができる。理論的には、上記の通減方程式を用いることで、最も重要な役割を果たす固有モードを示唆することが可能である。

### (6) 一般の情報伝播過程への応用

公衆衛生学など他分野においては、都市圏において人流によってもたらされる情報がどのように有用であるかが必ずしも明確ではない。そのような状況では、人流によって得られる情報伝播がどの範囲に及ぶかを直観的に示すことは有用である。そこで、本研究では、ネットワークのコミュニティ検出手法を用いてこの問題を扱うこととする。すなわち、人流を地域メッシュ単位で集計し、メッシュ間の Origin-Destination 行列を構成する。この行列がネットワークを特徴づけていると考え、ネットワークコミュニティ検出手法である Map Equation を用いて、階層的なコミュニティを検出する。得られたコミュニティが、人流による情報伝播の単位を表していると解釈する。

また、感染症以外の一般的な情報伝播過程において、例えば局所的に流動が少し変化した時の全体に与える影響などを、摂動論的枠組みで検討する。

## 4. 研究成果

以下に、本研究で得られた主な成果をまとめる。特に、以下の (1) および (2) の成果は、プレプリント (arXiv:1512.01901) にまとめられている。

### (1) 人流データから接触ネットワークの構築

関東都市圏における「人の流れデータ」を用いて、接触ネットワークを構築した。構成に用いたエージェント数は、1,000 人から 20,000 人まで変化させ、さらに閾値  $D$  も変化させたところ、最大連結成分がパーコレーション転移を示すことがわかった。すなわち、 $D$  がある臨界値  $D_c(N)$  より小さい場合には最大連結成分の大きさはほぼ 0、すなわちネットワークは小さな非連結成分に細分されていることになり、感染は拡大しないことがわかった。一方、臨界値より大きな  $D$  では大きな最大連結成分が出現し、感染拡大が可能となることがわかった。

臨界値はエージェントの数  $N$  に依存するため、現実には 1,000 万人オーダーの人口がある大都市圏において数万人程度のエージェントの接触ネットワークを用いることには困難があるが、本研究では、最大クラスターサイズにスケールリング則が成り立つことがわかった。このスケールリング則を用いると、臨界値  $D_c(N)$  が実人口においてどの程度の大きさになるかを外挿して見積もることができ、その値は、1 日分の人流を用いた本研究の解析では数メートルという結果を得た。

### (2) ネットワーク上における感染症数理モデルと理論解析

このようにして構成されたネットワーク上で、感染症拡大シミュレーションを行った。その結果、感染最終規模の 2 次転移が観測された。また、感染確率の空間分布は一様ではなく、接触が多い都心付近で高いことが明らかになった。

さらに、接続ネットワークの接続行列の固有値分解を用いて最終規模方程式を数値的に解いたところ、エージェント数よりは十分小さい数の固有モードを用いることで、感染最終規模の振

る舞いをよく再現することができた。さらに、得られた方程式において、ある条件のもとに最大固有値に対応するモードのみを用いると、従来良く知られた **heterogeneous mean field** 近似による結果を再現することを示した。すなわち、提案手法は従来手法の拡張となっていることがわかった。**Heterogeneous mean field** による結果は最終規模に関する数値計算の結果を再現することはできておらず、提案手法は従来手法に比較的少数の自由度を追加することによって数値計算を従来手法より精度よく再現することに成功したと言える。

### (3) ネットワーク上における感染症拡大対策の効果を見積もる理論

上記のようにして得られた最終規模方程式を用いることで、感染症拡大対策を行うことが可能となる。すなわち、最終規模への寄与が大きな固有ベクトルの成分が大きなエージェントに優先的に接種や外出制限などの対策を施すことで効果を大きくできると考えられる。また、最終規模への寄与は、直観に反して、大きな固有値に対応するモードほど大きいとは限らないことが明らかになった。

### (4) 一般の情報伝播過程への応用

人流データから得られた **Origin-Destination** 行列に **Map Equation** を適用したところ、地理的に連結したコミュニティ構造を得ることができた。それらのコミュニティは、日本の大都市圏においては、川や山などの自然地形、さらには鉄道網などによって特徴づけられていることがわかった。また、このような結果はさまざまな人流データにおいても観測されることがわかった。

さらに、流動ネットワークに微小な摂動が加えられたときの応答を調べる手法を考案し、カオス力学系のほか、流れ場などの簡単な系に対して例を示しつつ適用の可能性を検討した。

### (5) 今後の展望

以上のように、本研究では、人流データからネットワークを構成し、感染症拡大および拡大対策をデータ解析、数値シミュレーション、理論解析の各方面から検討した。今後は、本研究で開発された手法をさらに発展させ、より長期にわたる人流データの解析、および感染拡大の実データとの比較などを行う予定であり、人流が都市圏における情報伝播に与える影響について、多方面から検討を行っていく。本研究で主に対象とした 1 日分の人流データでは、ネットワーク変動の時間スケールが感染症拡大の時間スケールより十分短く、時間変化するネットワークをその時間平均で置き換える近似が精度よく用いられた。しかし、より長期のデータを考えると、感染症拡大と同程度の時間スケールのネットワーク変動を考慮する必要が生じる。このような状況への拡張は今後の重要な課題である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

[1] N. Fujiwara, K. Kirchen, J.F. Donges, and R.V. Donner, “A perturbation-theoretic approach to Lagrangian flow networks,” *Chaos*, vol. 27, 35813, 2017 (査読有) .

[2] N. Fujiwara, J. Kurths, and A. Diaz-Guilera, “Synchronization of mobile chaotic oscillator networks,” *Chaos*, vol. 26, 94824, 2016 (査読有) .

[学会発表] (計 8 件)

[3] N. Fujiwara, “Dynamical processes on periodic temporal networks and their applications,” *International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2018)*, 2018 (査読有) .

[4] 藤原 直哉, 桜町 律, 秋山 祐樹, 藤嶋 翔太, 金田 穂高, 柴崎 亮介, 「人流ネットワークのクラスタリングによる圏域検出と感染症拡大モデル」、CCS/NetSci 合同ワークショップ in 北海道、2016 (査読無) .

※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。