

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740054

研究課題名(和文) 複雑ネットワーク上の感染症ダイナミクスの解析と動的ワクチン接種法の提案

研究課題名(英文) Analysis of infectious diseases on complex networks and the proposal of a dynamical vaccination strategy

研究代表者

長谷川 雄央 (HASEGAWA, Takehisa)

東北大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：10528425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではいくつかのネットワーク上の感染症の数理モデルを調べた。具体的には相関のあるネットワーク上のSIRモデル、無相関なネットワーク上の拡張SIRモデル、成長ネットワーク、階層ネットワーク上のパーコレーションモデルを調べ、ネットワーク上のダイナミクスの様々な側面を明らかにした。感染症を防ぐ戦略に関して、本研究ではネットワーク中に配置したオブザーバーによるワクチン接種を提案した。オブザーバーの隣人が感染したとき、オブザーバーはそれを認知し、他の隣人を免疫化する。結果として、提案戦略はネットワーク上の感染症を抑えるのに効果的であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：I studied some mathematical models for infectious diseases on networks, such as the SIR model on correlated networks, an extended SIR model on uncorrelated networks, and percolation models on growing and hierarchical networks, to clarify various aspects of dynamics on networks. Concerning the strategy for preventing epidemics, I proposed a vaccination by observers, who are placed in a part of networks. When one neighbor of an observer node becomes infected, the observer immediately recognizes it and makes the rest of its neighbors immunize. As a result, I found that the proposed strategy is effective for suppressing epidemics in networks.

研究分野：数物系科学

キーワード：複雑ネットワーク 感染症モデル パーコレーション 相転移 臨界現象

1. 研究開始当初の背景

人間社会における感染症動態と有効な対策を知るために、ネットワーク上の感染症モデルは重要な研究対象である。感染症は人の繋がりを通じて広がる。人の繋がりのパターンは、複雑ネットワークとして研究されている。複雑ネットワークとは人間関係、WWW やインターネットの繋がり方に見られる、複雑に結合したネットワーク(グラフ)の総称である。90年代末以降、物理学、数学、生物学、工学、社会科学など様々な分野で複雑ネットワークに関する研究が行われてきた。そして現在までに様々なネットワーク上の感染症モデルの振舞いが数値的・解析的に調べられてきた。ただし研究開始当初において、以下の問題点があった：

(1) 複雑ネットワーク上の感染症ダイナミクスの定性的な理解は比較的単純なネットワークの場合に限られており、ネットワークを複雑化した場合感染症モデルの振舞いは定性的に変わることが予想されるものの、その理解には至っていない。また、複雑ネットワーク分野で用いられる感染症の数値モデルは単純なものに限られている。

(2) 複雑ネットワーク分野ではこれまで様々なワクチン配布方法の提案とその効果の検証が行われてきた。しかし、これまで提案されてきたワクチン配布の方法は「ワクチン配布は感染症が現れる“前”に行われる」ことを仮定していた。現実には感染症がネットワークに侵入した後に、如何に効果的なワクチン接種が行えるかもまた重要である。しかし、そのような問題を取り扱った研究はほとんどない。

2. 研究の目的

上記の問題に対し、本研究では、(i) 複雑な構造を持つネットワーク上の感染症モデルを詳細に解析する数値計算及び解析手法を開発し、(ii) 様々なネットワーク上の感染症の数値モデルのダイナミクスを調べ、構造がダイナミクスに及ぼす影響を明らかにすること、(iii) そして「ワクチンの事前配布」とは異なる新たな感染症対策を提案し、数値モデルを通じて検証すること、を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、感染症の基本モデルである susceptible-infected-removed(SIR)モデルを出発点とした。ネットワーク上の SIR モデルは次のようなルールに従う連続時間マルコフ過程である：(i) 各頂点は状態 susceptible (S)、infected (I)、removed (R)のいずれかを取る。(ii) 状態 I の頂点に隣接する状態 S の頂点は rate μ で状態 I に遷移する。(iii) 状

態 I の頂点は rate μ ($\mu=1$)で状態 R になる。

また、複雑ネットワーク上の感染症ダイナミクスの定性的な性質を知るため、SIR モデルの近似モデルで解析が容易なパーコレーションを扱った。確率 p のボンド(サイト)・パーコレーションとは、ネットワークを構成している各枝(各頂点)を p の確率で残し、 $1-p$ の確率で除去する確率過程である。なおサイト・パーコレーションの最大連結成分は、ランダムなワクチン配布における感染可能な領域に対応している。サイト・パーコレーションの解析からランダムワクチン配布の効果を知ることができる。

本研究では、上記の数値モデル及びその拡張モデルを様々な複雑ネットワーク上に配置し、ダイナミクスを調べた。また、感染症対策として「オブザーバー」の設置を提案し、その効果を調べた。

4. 研究成果

本研究で得られた成果は以下の通りである：

(1) 次数相関をコントロールできるネットワーク上の SIR モデルを考え、次数相関と感染症の拡がりやすさ、ネットワークの頑健性(非感染状態の頂点で構成されるネットワークの大域的な繋がりを保つ度合い)の関係について、数値計算から検証した。結果、次数相関が正であるほど感染症の拡がりやすいこと、一方で正負どちらの次数相関であっても相関があるほどネットワークは頑健になることを明らかにした。

(2) SIR モデルは健康状態 S の頂点に一度感染イベントが起これば感染状態 I になると仮定している。SIR モデルと異なり、頂点が感染状態になるまでに多段階の健康状態をとりうる感染症モデルを考え、そのダイナミクスを調べた。無相関なネットワーク(コンフィグレーション・モデル)上の離散時間拡張 SIR モデルをツリー近似によって解析した結果、感染状態になるまでに要する感染イベント数が 2 を越えると、感染者が爆発的に増加する転移(不連続転移)が起こること、爆発的な増加の前に「感染者のパーコレーション(状態 R の頂点の大域的つながり)」が見られることが明らかとなった。また数値計算から、連続時間の場合でも同様の結論が得られた。

(3) 複雑ネットワーク上のパーコレーションの相転移を調べ、次の結果を得た：(i) 階層的なネットワーク(non-planar Hanoi network)上のボンド・パーコレーションについて繰り込み群のアプローチによる解析を行った。その結果、この階層ネットワークは無秩序相を持たないこと、局所的な秩序化が起こる点と大域的な秩序化が起こる点は異なり、臨界相(臨界点の集合)が存在すること

が明らかとなった。(ii) 複雑ネットワーク上のボンド・パーコレーションの転移点、臨界指数を数値的に評価するために、従来の有限サイズスケーリング手法を拡張したスケーリング解析手法を提案した。提案手法は局所的秩序化と大域的秩序化で臨界点が分かれる(臨界相が存在する)場合でも解析することができる。実際に成長ネットワーク上のボンド・パーコレーションをモンテカルロシミュレーションし、臨界点と臨界指数を特定した。(iii) 階層的なネットワーク(DGM ネットワーク)上のサイト・パーコレーションを計算し、パーコレーション閾値が1であることを証明した。これはグラフが完全に階層的に構成されている場合、ランダムにワクチンを配分すれば感染症が大域的に拡がることを抑えることができることを意味する。

(4) 効果的な感染症対策として、ネットワークのノード(人に相当)の一部にオブザーバーの役割を与えることを提案し、その効果を調べた。ここでオブザーバーは自分の隣人を監視し、隣人に感染がみられる場合は他の隣人にワクチンを手配し、感染しないようにする。オブザーバーをネットワーク中に配置する戦略は、事前ワクチン配分の場合と比べてどの程度効率的に感染症を抑える効果があるかを、数値計算によって調べた。SIR モデルに対して効果を検証した結果、概ねの状況において事前配布に比べて少ないワクチン数で感染症を抑えることができることを明らかにした。また、効果的なオブザーバーの配置はどのようなものかを数値的に調べた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

{ 雑誌論文 } (計 11 件)

¹ Takehisa Hasegawa, Koji Nemoto. Discontinuous transition of a multistage independent cascade model on networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, Vol. 2014, (2014), P11024; 1-15. (査読有)
DOI:10.1088/1742-5468/2014/11/P11024

Takehisa Hasegawa, Tomoaki Nogawa, Koji Nemoto. Critical Phase in Complex Networks: a Numerical Study. Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity, Vol. 3 (2014) pp.319-346. (査読有)
DOI:10.5890/DNC.2014.09.008

Taro Takaguchi, Takehisa Hasegawa, Yuichi Yoshida. Suppressing epidemics on networks by exploiting observer nodes. *Physical Review E*, Vol. 90 (2014)

012807;1-6. (査読有)
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.90.012807

Tomoaki Nogawa, Takehisa Hasegawa. Transition-type change between an inverted Berezinskii-Kosterlitz-Thouless transition and an abrupt transition in bond percolation on a random hierarchical small-world network. *Physical Review E*, Vol. 89 (2014) 042803;1-5. (査読有)
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.89.042803

⁵ Takehisa Hasegawa, Koji Nemoto. Hierarchical scale-free network is fragile against random failure. *Physical Review E*, Vol. 88 (2013) 062807;1-5. (査読有)
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.88.062807

⁶ Takehisa Hasegawa, Tomoaki Nogawa, Koji Nemoto. Profile and scaling of the fractal exponent of percolations in complex networks. *Europhysics Letters*, Vol. 104 (2013) 16006;p1-p6. (査読有)
DOI:10.1209/0295-5075/104/16006

⁷ Takehisa Hasegawa, Taro Takaguchi, Naoki Masuda. Observability transitions in correlated networks. *Physical Review E*, Vol. 88 (2013) 042809;1-11. (査読有)
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.88.042809

⁸ Takehisa Hasegawa, Tomoaki Nogawa. Absence of the non-percolating phase for percolation on the non-planar Hanoi network. *Physical Review E*, Vol. 87 (2013) 032810;1-4. (査読有)
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.87.032810

⁹ Tomoaki Nogawa, Takehisa Hasegawa, Koji Nemoto. Criticality governed by the stable renormalization fixed point of the Ising model in the hierarchical small-world network. *Physical Review E*, Vol. 86 (2012) 030102(R);1-4. (査読有)
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.86.030102

¹⁰ Takehisa Hasegawa, Keita Konno, Koji Nemoto. Robustness of correlated networks against propagating attacks. *The European Physical Journal B - Condensed Matter And Complex Systems*, Vol. 85 (2012) 262;1-6. (査読有)
DOI:10.1140/epjb/e2012-30290-0

¹¹ Tomoaki Nogawa, Takehisa Hasegawa, Koji Nemoto. Generalized Scaling Theory for Critical Phenomena Including Essential Singularities and Infinite Dimensionality. Physical Review Letters, Vol. 108 (2012) 255703:1-5. (査読有)
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.255703

〔学会発表〕(計 2 4 件)

長谷川雄央, 能川知昭, 近藤剛史, 根本幸児. 階層ネットワークのランダム故障に対する脆弱性 II. 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学(愛知県), 2014 年 9 月 10 日.

能川知昭, 長谷川雄央, 根本幸児. Bethe lattice のパーコレーションにおける無限大クラスターの個数. 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学(愛知県), 2014 年 9 月 10 日.

長谷川雄央, 高口太郎, 増田直紀. 次数相関のあるネットワークにおける observability 転移. 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学(神奈川県), 2014 年 3 月 29 日.

能川知昭, 長谷川雄央. ランダム階層スモールワールドネットワーク上のパーコレーションにおけるメタ転移. 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学(神奈川県), 2014 年 3 月 29 日.

長谷川雄央, 能川知昭, 近藤剛史, 根本幸児. 階層ネットワークのランダム故障に対する脆弱性. 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学(神奈川県), 2014 年 3 月 29 日.

長谷川雄央. 複雑ネットワーク上の相転移と臨界現象. 統計物理の新展開 2014, 北海道大学(北海道), 2014 年 3 月 5 日.

Takehisa Hasegawa. Bond percolation and site percolation in complex networks. International Joint Research Week on Non-Commutative Stochastic Systems: Analysis, Modeling, and Applications, Sendai, February 7, 2014.

Takehisa Hasegawa, Taro Takaguchi, and Naoki Masuda. Impact of Correlated Structure on Network Observability Transition. The 3rd International Symposium on Innovative Mathematical Modeling Institute of Industrial Science, Tokyo, November 14, 2013.

Takehisa Hasegawa. Classification of Phase Transitions in Complex Networks: a Monte-Carlo study. International

Conference on Stochastic Analysis and Applications 2013, Hammamet (Tunisia), October 17, 2013.

¹⁰ Takehisa Hasegawa. Origin of the critical phase in complex networks. Mathematics of Complex Systems, Bielefeld (Germany), October 7, 2013.

¹¹ Takehisa Hasegawa. Origin of the critical phase in complex networks. Phase Transition, Critical Phenomena and Related Topics in Complex Networks, Sapporo, September 9, 2013.

¹² 長谷川雄央. グラフの双曲性から見る相転移. 文科省共催 SMART 研究会「応用現代幾何学」, 東北大学(宮城県), 2013 年 9 月 5 日.

¹³ 長谷川雄央, 能川知昭. ネットワークにおける臨界点の一意性 II. 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学(広島県), 2013 年 3 月 28 日.

¹⁴ Takehisa Hasegawa. Classification of Phase Transitions in Complex Networks. Statistical Physics of Disordered Systems and its Applications 2013, Sendai, March 21, 2013.

¹⁵ 長谷川雄央. ネットワーク上の噂の拡がりの数理モデル. SMART-CREST WORKSHOP「数学と諸分野との連携研究の探索」, 東北大学(宮城県), 2013 年 3 月 19 日.

¹⁶ 長谷川雄央. Percolation on nonamenable graphs and complex networks: a Monte-Carlo study. 研究集会「無限粒子系, 確率場の諸問題 VIII」, 奈良女子大学(奈良県), 2012 年 10 月 20 日.

¹⁷ 長谷川雄央, 根本幸児. ネットワーク上における拡張 SIR モデルの不連続転移. 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学(神奈川県), 2012 年 9 月 21 日.

¹⁸ 能川知昭, 長谷川雄央, 根本幸児. 一般化スケールリング理論による真性特異点を持つ無限次元系の相転移の記述. 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学(神奈川県), 2012 年 9 月 20 日.

¹⁹ 長谷川雄央, 能川知昭. ネットワークにおける臨界点の一意性. 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学(神奈川県), 2012 年 9 月 20 日.

²⁰ 木下直人, 長谷川雄央, 根本幸児. ネットワーク上の fad model における相転移の数値

解析. 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学(神奈川県), 2012 年 9 月 19 日.

21 木下直人, 長谷川雄央, 根本幸児. ネットワーク上の fad model における相転移の数値解析. CMRU 研究会「ネットワーク科学の数理と展開」, 東北大学(宮城県), 2012 年 9 月 13 日.

22 長谷川雄央. 複雑ネットワーク上の数理モデルの臨界点の単一性/非単一性. CMRU 研究会「ネットワーク科学の数理と展開」, 東北大学(宮城県), 2012 年 9 月 13 日.

23 Takehisa Hasegawa. Phase transition of bond percolation on nonamenable graphs and complex networks: a Monte-Carlo study. CREST "Kotani Team" Workshop "Random Media II", Sendai, September 4, 2012.

24 Takehisa Hasegawa. Percolation on complex networks and nonamenable graphs. ECT* Workshop "Spectral Properties of Complex Networks", Trento (Italy), July 25, 2012.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://takehisahasegawa.sci.ibaraki.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 雄央

(HASEGAWA, TAKEHISA)

東北大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号: 10528425

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: