

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700222

研究課題名(和文) 複雑ネットワークの動的頑健性に関する数理的研究

研究課題名(英文) Mathematical Research on Dynamical Robustness of Complex Networks

研究代表者

田中 剛平 (Tanaka, Gouhei)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・特任准教授

研究者番号：90444075

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：電力網、インターネット、生体網、人の接触関係などは、複雑な構造をもつネットワークとみなすことができる。複雑ネットワークがネットワーク要素の故障に対してどの程度頑強であるかを調べることは、ネットワーク機能の破たんを回避するための予防策を考える上で重要である。本研究では、ネットワーク上の動的な振る舞いによって維持される機能に着目して、ネットワーク頑強性に関する理論的枠組みの発展および応用を行った。特に、従来はハブ要素が重要だと認識されてきたが、振動子ネットワークの解析においては、つながりの少ないネットワーク要素が頑強性にとって重要となり得ることを示した。また、提案手法を生体網等の解析に応用した。

研究成果の概要(英文)：Power networks, the Internet, biological networks, human contact networks are regarded as complex networks. In order to consider preventive measures for a breakdown of network functions, it is important to understand how the complex networks are robust against the failure of network elements. In this research, we have focused on the network function maintained by dynamical behavior on the network. We have developed the theoretical framework for network robustness analysis and performed applications. In particular, we have shown that the elements which have a small number of interactions can be important rather than hub elements in heterogeneously coupled oscillator networks. Further, we applied our method to the analysis of biological networks with complex structure and epidemic spreading in heterogeneously connected patches.

研究分野：複雑系力学

科研費の分科・細目：感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：複雑ネットワーク ロバスト性 振動子 相転移 分岐現象 同期現象 生体網 感染症伝播

1. 研究開始当初の背景

複雑ネットワークの故障耐性に関する多くの数値的研究では、故障によってネットワークのつながりがいかに保たれるかに注目し、静的な相互作用のみが考えられてきた。しかし、実際の現象では、ネットワーク要素間の相互作用はダイナミックであることが少なくない。こうした動的なネットワーク機能のロバスト性を調べるための数値的手法はまだ十分に発展していない。

2. 研究の目的

ネットワークダイナミクスによって維持されるネットワーク機能が、ネットワーク要素の故障や劣化に対してどの程度頑強であるかを調べるための数値的枠組みを進展させる。ネットワーク構造やネットワークダイナミクスによって、ネットワーク頑強性がどのような影響を受けるかを明らかにする。また、実際に動的活動によって機能していると思われる実際の複雑ネットワークシステムに数値的手法を応用し、実データを使った動的頑強性の解析を行う。さらに、機能停止したネットワークの効率的な回復方法についても検討する。

3. 研究の方法

力学系の観点から典型的な動的挙動である振動現象に着目し、複雑なつながりをもつ振動子ネットワークを対象として数理モデル研究を行った。ネットワーク要素である振動子は、通常状態では自律的に振動を示す活性状態、故障するとそれ自身では振動を起さなくなり不活性状態となる。ネットワークの一部の振動子が不活性になるとし、その割合を増加させていくと、ネットワーク全体の動的活動を評価する秩序変数が減少していき、ある臨界点ですべての振動子の振動が止まる相転移が生じる。この故障割合に関する臨界点が大きいほど、ネットワークが頑強であるといえる。そこで、この臨界値を指標として振動子ネットワークの頑強性を理論解析および数値シミュレーションによって調べた。また、生物網や感染症伝播の解析に応用した。

4. 研究成果

(1) つながりの均一なネットワークと不均一なネットワークで振動子ネットワークの動的頑強性を比較したところ、ランダムな故障に対しては、不均一ネットワークの方が頑強であることを理論的に明らかにした。この結果は、それぞれのタイプのネットワークに対して、適切な平均場近似を使って導出した臨界故障割合を比較することにより得られた。

(2) つながりの不均一な振動子ネットワークは、つながりを多くもつハブ要素の故障よりも、つながりの少ない要素の故障に対して脆弱となることを示した。逆に、これはハ

ブ要素が集中的にダメージを受けてもネットワーク機能を維持できるネットワークであると解釈できる。本結果は、ネットワーク構造に加えて、ネットワーク要素間のダイナミックな相互作用が、ネットワーク頑強性に関する性質に大きく影響することを意味する。

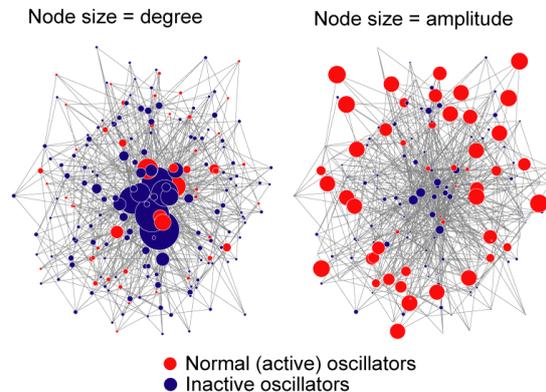


図1：振動子ネットワークの動的頑強性

(3) これまでに発展させた理論的手法を、ネットワーク要素の性質が不均一な場合にも適用できるように拡張した。不均一な活動度をもつ振動子ネットワークの動的頑強性解析を行い、振動子の性質がより不均一であるほど、ネットワーク全体の活動はより頑強となることを明らかにした。これは、生体システムにおける多様性が、機能を保つのに有利に働いている可能性を示す結果である。

(4) 故障割合が臨界値を超えると、振動子ネットワークは大域的振動を示さなくなる。このような機能停止したネットワークに、活性な振動子を付け加えて、効率的に振動挙動を回復させる方法を検討した。その結果、故障した振動子よりも故障していない振動子をサポートした方が、効率的に回復できることを理論的・数値的解析により明らかにした。

(5) 発展させた手法を、神経ネットワークモデルの頑強性解析に応用した。神経ネットワークにおいては、パルス信号による情報伝達が行われていると考えられている。そこで、シナプス結合によってネットワークを構成する神経モデルにおいて、動的頑強性解析を行い、一部の神経モデルが劣化したときに神経発火活動がどの程度維持されるかを調べた。そして、神経ネットワークの情報伝達機能にとって重要な神経細胞を特定することができることを示した。

(6) 動的頑強性解析の枠組みを、メタ個体群における感染症伝播モデルの解析に応用した。一部の地域で感染症抑制のための疫学介入を行って実質的感染率を下げることできたと仮定し、感染拡大を回避するために、どのような順番で、またどのくらいの割合の

地域に介入を行うことが必要であるかを調べた。その結果、人の移動経路を多く持つ地域から順番に対策を行うことがもっとも有効であることが分かった。また、優先的に介入すべき地域を特定できることを例証した。

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 3件)

(1)Gouhei Tanaka, Kai Morino, Kazuyuki Aihara, Dynamical robustness of coupled heterogeneous oscillators, *Physical Review E*, 査読有, Vol. 89, Issue 5, 052906, 2014.

DOI:

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.89.052906>

(2)Kai Morino, Gouhei Tanaka, Kazuyuki Aihara, Efficient recovery of dynamic behavior in coupled oscillator networks, *Physical Review E*, 査読有, Vol. 88, 032909, 2013.

DOI:

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.88.032909>

(3)Gouhei Tanaka, Kai Morino, Kazuyuki Aihara, Dynamical robustness in complex networks: the crucial role of low-degree nodes, *Scientific Reports*, 査読有, Vol. 2, 232, 2012.

DOI: 10.1038/srep00232

[学会発表] (計 2 1件)

(1)Gouhei Tanaka, Kai Morino, Kazuyuki Aihara, Dynamical Robustness of Complex Oscillator Networks, The 33rd Dynamics Days Europe, 2013年6月3日, マドリード (スペイン) .

(2)Kai Morino, Gouhei Tanaka, Kazuyuki Aihara, Failure recovery in complex networks composed of active and inactive oscillators, Network Frontier Workshop 2013, 2013年12月6日, エバンストン(USA).

(3)Gouhei Tanaka, Chiyori Urabe, Kazuyuki Aihara, Epidemic spreading in metapopulation networks with heterogeneous infection risks, EPIDEMICS 4, 2013年11月21日, アムステルダム (オランダ) .

(4)Gouhei Tanaka, Epidemic spreading in metapopulation networks and its control, The 3rd International Symposium on Innovative Mathematical Modelling, 2013

年11月14日, 東京 (依頼講演).

(5)田中 剛平, 占部 千由, 合原 一幸, メタポピュレーションネットワークモデルに基づく感染症対策戦略の有効性の評価, 文科省ワークショップ, 感染症流行モデリング: 理論、実践とシミュレーションのギャップを埋める, 2013年10月23日, 東京.

(6)Takeyuki Sasai, Kai Morino, Gouhei Tanaka, Kazuyuki Aihara, Effect of assortativity on dynamical robustness of oscillator networks, JSPS Core-to-Core Program and Specially Promoted Research Joint Symposium, 2013年3月27日, 東京.

(7)竹内 大樹, 田中 剛平, 藤江 遼, 合原 一幸, 鈴木 秀幸, 意見形成モデルにおける一極集中現象と中立者の影響, 日本数理生物学会第23回年会, 2013年9月12日, 静岡.

(8)Gouhei Tanaka, Robustness and fragility of dynamics on complex networks, International Conference on Towards Mathematical Foundations of Complex Networks Theory, 2012年9月16日, 京都 (招待講演) .

(9)Gouhei Tanaka, Chiyori, Urabe, Kazuyuki Aihara, Spreading in heterogeneous metapopulation networks composed of high-risk and low-risk patches, Workshop of Epidemics on Networks: Current Trends and Challenges, 2012年9月6日, ジローナ (スペイン) .

(10)田中 剛平, 森野 佳生, 合原 一幸, 生命ネットワークにおける動的ロバスト性の数理解析, 日本生物物理学会第50回年会, 2012年9月22日, 名古屋 (依頼講演) .

(11) Gouhei Tanaka, Towards Understanding Robustness of Dynamics and Function in Neural Networks, The 2nd International Workshop on Brain Inspired Computing, 2012年6月4日, 筑波 (招待講演) .

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1件)

名称: 感染症対策プログラム、感染症対策装置および感染症対策方法

発明者: 合原一幸, 田中剛平, 占部千由

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2013-169914

出願年月日: 2013年8月19日

国内外の別: 国内

○取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sat.t.u-tokyo.ac.jp/~gouhei/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 剛平 (TANAKA GOUHEI)

東京大学・大学院工学系研究科・特任准教授

研究者番号：90444075

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：