

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26730127

研究課題名(和文) ネットワークの機能回復に関する非線形力学的解析

研究課題名(英文) Nonlinear dynamical analysis of recovery of network function

研究代表者

森野 佳生 (Morino, Kai)

東京大学・生産技術研究所・特任助教

研究者番号：90712737

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：ネットワークの動的な構成要素における部分的な障害に対してネットワークが持つべき機能がどの様に保持されるかという動的頑健性やその機能の回復性に関する理解は、理論的にも実的にも重要な研究課題である。本研究では、様々な振動子や様々なネットワーク構造から成る結合振動子ネットワークにおける動的な頑健性・回復性を解析した。その結果、次数相関を持つネットワークや興奮性位相振動子ネットワークにおける動的頑健性・回復性の理解を深めることができた。また、動的頑健性・回復性の理解をより広い範囲に適用していくための土台となる基礎的研究を行った。

研究成果の概要(英文)：When components of networks, which show dynamical behavior, are partially damaged, how does the network function maintain and how can it be recovered? It is theoretically and practically important to understand dynamical robustness and dynamical resilience for these networks. In this study, we have analyzed dynamical robustness and resilience of networks which are composed of various types of oscillators and network structures. This analysis gives us wide and deep understanding of dynamical robustness and resilience of correlated networks and coupled-excitable-phase-oscillators networks. In addition, we show fundamental study to apply these understandings into wide fields.

研究分野：数理工学

キーワード：ネットワーク理論 非線形理論 数理工学 結合振動子系 非線形動力学

1. 研究開始当初の背景

ネットワークの構成要素における部分的な障害に対してネットワークが持つべき機能はどの様に保持されるのであろうか。このような頑健性の問題は、理論的にも実用的にも重要な研究課題である。その為、ネットワークの頑健性を理解する試みは、ネットワーク科学の分野でも広く研究されてきていたが、それらの研究の多くはネットワークの構造に着目した頑健性(構造的頑健性)に関する研究であった。近年、ネットワークの構成要素であるノードがダイナミクスを持つようなネットワーク、すなわち動的素子から成るネットワークの頑健性(動的頑健性)に関しても様々な研究が盛んに行われてきており、動的頑健性に関する広い理解が進みつつあった。更に、これらの動的頑健性の理解をベースにした、ネットワークが保持するべき動的な機能を一度失った場合における効率的な回復方法についての研究等も始まりつつあった。

2. 研究の目的

動的素子から成るネットワークの動的な頑健性・回復性の幅広い理論的な理解を深めること及びその理解の応用可能性を広く検討することが本研究の目的である。更に、これらの研究を遂行するために必要となる数理的な理論土台の構築も本研究の目的の一部である。

3. 研究の方法

主に数理理論的な解析に基づいて研究を行った。動的なネットワークとしては結合振動子ネットワークを対象としており、様々な振動子の種類や様々なネットワーク構造を持つ場合に対して、それらのネットワークにおける動的頑健性・回復性を議論した。またネットワークの実データを用いた解析も行っている。

4. 研究成果

ネットワークの動的な頑健性・回復性の幅広い理解を深めること及びその応用可能性を検討することを目的にして、結合振動子系や複雑ネットワークという数学モデルやネットワークの実データを用いて、様々な観点から研究を行った。

(1) まず、次数相関を持つ複雑ネットワークにおける動的頑健性を解析した。次数相関とはネットワークの次数の偏りを意味しており、正の次数相関を持つネットワークでは次数が高いノード同士が結合する傾向にある。様々な先行研究にて、次数相関を持つネットワークが示す特殊な性質について報告がされてきた。

本研究でも、次数相関の程度を示す統計量の値に応じて、動的頑健性がどのように変化するかを解明することを目的にして解析を

行った。その結果、次数相関が正の場合には動的頑健性は選択的攻撃に対して、より強靱になること等が、数理解析的アプローチ及び数値計算的アプローチにより明らかになった。更に、ある特定の場合において、動的頑健性の値も解析的に導出することができた。このように次数相関を持つ動的なネットワークの脆弱な部分を明らかにできたことは、更なる動的頑健性・回復性の理解へとつながることが期待できる。これらの研究成果の一部は、PLoS ONE の論文誌や国内研究会などで報告を行っている。

(2) 次に、興奮性を示す位相振動子から成るネットワークにおける、動的な頑健性・回復性の解析を行った。興奮性とは、外部から刺激が加えられない状況では自発的な振動を示さないが、外部から刺激が入ることによって興奮状態となって振動を示した後に、再び停止状態に戻る性質である。興奮性を示す細胞は生体においても多種多数観測できる為、興奮性の理解は重要な問題であり、様々な理論的研究が行われてきた。動的頑健性の観点からも、興奮性振動子から成るネットワークの頑健性に対して、いくつかの解析が行われてきた。

本研究では、興奮性位相振動子と周期性を示す位相振動子を結合したネットワークの動的頑健性を解析した。特に、興奮性位相振動子群の一部がヘテロ性を有する場合には、そのヘテロ性興奮性位相振動子の割合に応じて、従来の周期性位相振動子と興奮性位相振動子の結合系が示す振る舞いから大きく変化することを示した。これにより、複雑なベイスン構造が存在することなどの様々な特徴的な性質を見いだすことができた。

また、巨視的な振動が停止状態にある興奮性位相振動子ネットワークにおいても、上記のヘテロ性の程度と興奮性位相振動子間の結合強度の度合いに応じて、自発的な振動状態が生じうることを示し、その非線形力学的メカニズムを数理理論的解析及び数値計算的解析を用いて示した。この現象は位相振動子が持つヘテロ性によって振動停止状態から振動開始状態へと至るといった種の回復現象が起こることを示している。このとき、振動停止状態から振動回復状態に至るまでの力学的挙動の種類が複数に分けられることが判明しており、これらの背景を抑えることでより効率的な振動回復の理解へとつながることが期待される。これらの成果の一部は、Dynamics Days U.S.や Dynamics Days Europe などの複数の国際会議や日本物理学会年次大会などで報告を行っている。

(3) 最後に、ネットワーク中心性というネットワークの特徴量を用いたテンポラルネットワークの異常検知技術を、実データ及び様々な数理モデルを元にして開発した。この提案手法では複数のネットワーク中心性を

元にして得られた特徴量を効果的に統合する
で異常検知を行っており、人工データ及び
実データに対して、性能の良い異常検知を行
うことができることを示した。本研究で用い
たネットワーク中心性は様々な分野で用い
られる有名な指標であり、動的頑健性とも関
係することが過去の研究でわかってきていた。
ネットワークの構成要素の多くがその動的
機能を失うことで、ネットワーク全体の動
的な振る舞いが変化する現象は、ネットワ
ークの異常として捉えることもできるであ
ろう。テンポラルネットワークにおいて、ネ
ットワーク中心性を元にして異常なノードが
検出できるということは、ネットワークの障
害に対する頑健性の変化を検知することに
繋がる可能性があると考えられる。この意味
で、この研究で得られた知見は今後の動的
頑健性・回復性の応用研究において重要な土
台となると考えられる。これらの成果の一部
は、IEEE International Conference on Data
Science and Advanced Analytics (DSAA)や
国内ワークショップなどで報告を行っている。

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1件)

Takeyuki Sasai, Kai Morino, Gouhei
Tanaka, Juan A. Almendral, and Kazuyuki
Aihara, "Robustness of Oscillatory
Behavior in Correlated Networks", PLOS
ONE Vol. 10, No. 4, e0123722, 2015. (査読
有り). DOI:10.1371/journal.pone.0123722

[学会発表](計11件)

森野佳生, 田中剛平, 合原一幸, "興奮性
振動子結合系における自発的な振動現象",
日本物理学会 第72回年次大会, 2017年3
月20日発表, 大阪大学豊中キャンパス(大
阪府豊中市).

Kai Morino, Gouhei Tanaka, and Kazuyuki
Aihara, "Spontaneous oscillation in
coupled heterogeneous excitable phase
oscillators", Dynamics Days U.S. 2017, Jan.
6, 2017発表, Sheraton Silver Spring Hotel,
Silver Spring(USA).

Yoshitaro Yonamoto, Kai Morino, Kenji
Yamanishi, "Roles of Network Centralities
in Temporal Network Change Detection",
Workshop "Interdisciplinary Applications
of Nonlinear Science", 2016年11月6日
発表, Faculty of Science, Kagoshima
University (鹿児島県鹿児島市).

Yoshitaro Yonamoto, Kai Morino, and
Kenji Yamanishi, "Temporal Network Change
Detection Using Network Centrality",
Proceedings of the 3rd IEEE International
Conference on Data Science and Advanced
Analytics (DSAA2016) on Research Track, pp.
51-60, 2016, 2016 Oct. 17 発表, the
Montreal Marriott Chateau Champlain,
Montreal(Canada).

Kai Morino, Gouhei Tanaka, and Kazuyuki
Aihara, "Bifurcation analysis of coupled
heterogeneous phase oscillators", XXXVI
Dynamics Days Europe 2016, June 7th, 2016
発表, Corfu Holiday Palace Hotel,
Corfu(Greece).

森野 佳生, "動的素子から成るネットワ
ークの頑強性と回復力", 拠点共同研究ワー
クショップ「微小生態系の構成原理 Wet/Dry
双方からのアプローチによる理解と制御の
試み」, 2016年2月15日発表, 岡山大学 資
源植物科学研究所(岡山県倉敷市)

森野 佳生, 田中 剛平, 合原 一幸, "ヘ
テロ性を持つ周期性・興奮性位相振動子結合
系の複雑な相図の構造について", 日本物理
学会 2015年秋季大会, 2015年9月17日
発表, 関西大学(大阪府吹田市).

Kai Morino, Gouhei Tanaka, and Kazuyuki
Aihara, "Complex Phase Diagram of Coupled
Heterogeneous Phase Oscillators",
Dynamics Days Europe 2015, Sep. 9-10, 2015
発表, Peter Chalk Centre, the University
of Exeter, Exeter(UK).

森野 佳生, 田中 剛平, 合原一幸, "ヘテ
ロ性を持つ周期性・興奮性位相振動子結合系
の頑強性", 日本物理学会 第70回年次大会,
2015年3月21日発表, 早稲田大学(東京都
新宿区).

Kai Morino, Gouhei Tanaka, and Kazuyuki
Aihara, "Robustness of Networks Composed
of Coupled Heterogeneous Excitable and
Oscillatory Units", 34th Dynamics Days U.S.
2015, 2015 Jan. 10 発表, Center for
Theoretical Biological Physics (CTBP),
Rice University, Houston(USA).

笹井 健行, 森野 佳生, 田中 剛平, 合
原一幸, "次数相関を持つ振動子ネットワ
ークの動的頑強性", 複雑ネットワーク・サマ
ースクール2014, 2014年8月19日発表, 東北
大学(宮城県仙台市).

[図書](計1件)

Gouhei Tanaka, Kai Morino, and Kazuyuki

Aihara, "Dynamical Robustness of Complex Biological Networks" in (Eds) Toru Ohira and Tohru Uzawa, "Mathematical Approaches to Biological Systems. Networks, Oscillations, and Collective Motions," Chapter 2, pp. 29-53, 2015 (Springer).

〔産業財産権〕

出願状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森野 佳生 (MORINO, Kai)
東京大学・生産技術研究所・特任助教
研究者番号：90712737