

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2016

課題番号：25540108

研究課題名(和文) 複雑ネットワーク結合力学系における自己組織化機構の解明と制御

研究課題名(英文) Analysis and control of self-organization in coupled dynamical systems on complex networks

研究代表者

中尾 裕也 (Nakao, Hiroya)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：40344048

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複雑ネットワークを介して相互作用する自律ダイナミクスを持つ要素集団における自己組織化現象の探求とメカニズムの解明、またその最適化や制御手法について解析した。研究期間中、ネットワーク上の反応拡散系における Turing 不安定性およびパターン形成の解析とその種々の数理モデルへの一般化、ネットワーク結合振動子系の集団ダイナミクスの応答解析や外部ノイズによる同期の制御手法、ネットワーク上の拡散現象を記述する Laplacian 行列の固有ベクトルの局在性に関する研究などを行った。研究成果については、論文を国際学術誌に出版するとともに、国内外での学会や研究会で発表した。

研究成果の概要(英文)：In this research project, self-organization phenomena in systems of autonomous elements interacting over complex networks have been explored and analyzed, and methods to optimize and control such systems have been investigated. During the project period, Turing instability and pattern formation in reaction-diffusion systems on networks and their generalization to various mathematical models, response analysis of collective dynamics in coupled oscillators on networks and control of their synchronization by external noise, and localization properties of eigenvectors of the Laplacian matrix describing diffusion processes on networks, have been investigated. Results of the research have been published in international academic journals and reported in domestic and overseas conferences and workshops.

研究分野：非線形科学

キーワード：非線形ダイナミクス 複雑ネットワーク 自己組織化

1. 研究開始当初の背景

いわゆる複雑ネットワークという概念は、今世紀初頭に提唱されて以来、その驚くべき普遍性により、物理学・数理学の枠を超え、工学、生命科学、経済学、社会学まで広範な分野に多大な影響を与えてきていた [Strogatz 2001, Barabási 2002]。スモールワールド性やスケールフリー性に代表される簡潔な法則が、細胞内酵素反応、脳神経回路、インターネット、航空路線、企業間取引等の様々なネットワークに共通に成立することが膨大な数の研究によって明らかにされており、複雑ネットワークは我々の世界の基本構造のひとつであると考えられた。その機能的な意義については様々な議論が行われていたが、その解明には、ネットワークの静的構造のみならず、ネットワークを介して相互作用する要素集団の挙動、すなわちネットワーク結合力学系のダイナミクスを知る必要があった。しかし、従来の理論研究の多くは、ネットワーク上の完全同期状態に代表される系の全要素が同じダイナミクスに従う自明な一様状態に関するものに限られており [Boccaletti 2006, Vespignani 2008]、実現象の理解を目指すためには、ネットワーク結合力学系に生じ得る非一様なダイナミクスをさらに探求する必要があった。

これに関して、研究代表者は非平衡パターン形成機構のパラダイムである Turing 不安定性を示す活性・抑制因子反応拡散系を複雑ネットワーク上に拡張して解析し、古典的な連続媒質の場合と同様の拡散誘起不安定性により、複雑ネットワーク上に非自明な非一様パターンが自発的に生成されることを示していた [H. Nakao & A. S. Mikhailov, "Turing patterns in network-organized activator-inhibitor systems", Nature Physics 6, 544 (2010)]。これはネットワーク結合力学系における自己組織化という大きなテーマに対する一歩であったが、さらなる解析はその後の課題であった。

2. 研究の目的

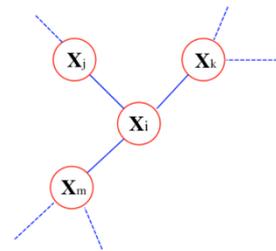
本研究の目的は、複雑ネットワークを介して相互作用する結合力学系における自己組織化現象の探求と解明、また、望ましいダイナミクスを自己組織化するようにネットワーク結合力学系を制御・設計する手法の開発である。期間内に扱う具体的な研究課題として、ネットワークの構成要素が活性・抑制系や自励振動系に代表される基本ダイナミクスを持つ場合や、それらをより一般化した場合にネットワークが発現し得る非一様な集団ダイナミクスの探求、異種の要素が混在するネットワーク結合力学系の解析、ネットワークの静的構造と集団ダイナミクスの関係の解析、望ましいダイナミクスを実現するためのネットワーク結合力学系の制御手法やネットワーク構造の最適化等の提案を行う。

3. 研究の方法

本研究では、ネットワークを介して相互作用する自律ダイナミクスを持つ要素集団を考え、このネットワーク結合力学系の示し得る非自明なダイナミクスを探求し、その生成機構や成立条件等を明らかにする。また、得られた知見を基礎として、望ましいダイナミクスを生成するような制御・設計手法を開発する。主として理論的な立場から、現実の系を抽象して得たネットワーク結合力学系の数理モデルを、力学系、確率過程、非線形物理学、統計力学、グラフ理論、制御理論等の各種の数理的手法を用いて詳細に解析することにより、目的達成を目指す。具体的な研究課題は大きく3つに分けられる。これらは相互に関連している。

(A) ネットワーク上の Turing 型パターン形成の解析。自己増殖する活性因子とそれを抑える抑制因子の空間拡散の効果によって自発的に形成される Turing パターンは、非線形科学における自己組織化現象のパラダイムであり、化学反応や多細胞発生、動物の模様や植生の分布など、自然界の様々なパターンの生成メカニズムとして詳しく解析されてきた。前述したように、Turing 不安定性はネットワーク上の活性・抑制系においても生じ、ネットワーク上にそのトポロジーに強く依存した非一様パターンを自発的に形成する。この結果を一般化して、ネットワーク上の Turing 型自己組織化機構に関する詳しい解析を行い、非一様パターンの生成機構として確立する。

(B) ネットワーク結合振動子系の集団ダイナミクスの解析。自律的なリズムを示す非線形振動子の多体結合系は、化学反応や電気回路、心筋細胞や神経細胞の集団、ロボットや歩行者の群れなど、多くの現象を記述する。連続媒質や平均場結合系については過去の研究で多くの結果が得られており、振動子間のリズムの相互同期や、系が自発的に乱れて生じるカオス状態等が理論的に予言され、実験でも確認されている。複雑ネットワーク上の結合振動子系も盛んに調べられており、現状



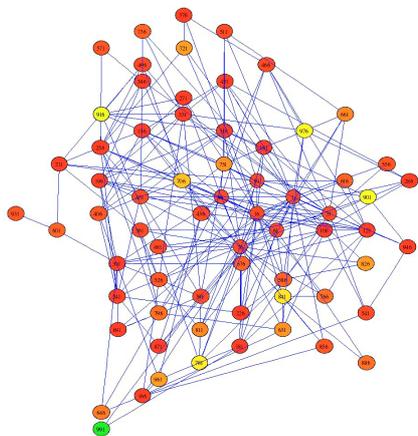
$$\dot{\mathbf{X}}_i(t) = \mathbf{F}(\mathbf{X}_i) + \mathbf{D} \sum_{j=1}^N L_{ij} \mathbf{X}_j$$

ネットワーク結合力学系

自律ダイナミクスを持つ要素群がネットワークを介した相互作用により集団ダイナミクスを自己組織化する。

ではその多くが系の自明な完全同期状態に関する研究だが、研究代表者はネットワーク上に非一様な集団カオス状態が生成され、その概形を近似的に説明できることをすでに示している。この結果をさらに一般化して、ネットワーク結合振動子系の非一様なダイナミクスを探索する。

(C) 望ましいダイナミクスを実現するネットワーク結合力学系の設計・制御法の開発。上記の (A), (B) は与えられたネットワーク結合力学系がどのような自己組織化現象を示すかという順方向の問題だが、応用的には、望ましいダイナミクスを示すようにネットワーク結合力学系を制御したり、ネットワーク構造を最適化したりする必要がある。課題(C)では、課題(A)(B)の研究で得られた知見を基礎として、系に目標とするダイナミクスを実現させるための適切な制御法やネットワーク構造の最適化手法を考察する。



ネットワーク上の結合振動子系の作るパターンの例.

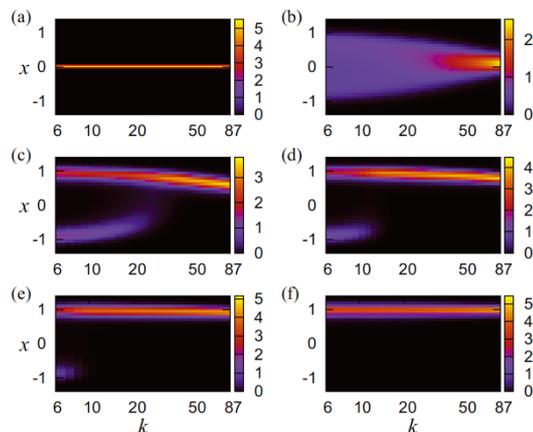
4. 研究成果

[平成 25 年度] ネットワーク結合力学系に関して以下の各テーマに関する研究を実施した。(i) 複雑ネットワーク上のノイズを受けた双安定素子集団の秩序化に関する解析。相互作用する双安定系は統計物理学の古典的な研究対象だが、相互作用が複雑ネットワークである場合の解析を行った。その結果、これまで大域結合の場合に知られていた秩序・無秩序転移がネットワーク上でも生じること、また、その転移の際の秩序化ダイナミクスが、複雑ネットワーク特有のノードの次数に強く依存するものであることを、平均場近似と非線形 Fokker-Planck 方程式を用いた解析により示した。(ii) 複雑ネットワーク上の 3 成分反応拡散系における振動的不安定性に関する研究。これまでの研究で 2 成分の活性因子・抑制因子の反応拡散系における Turing 不安定性を解析していたが、これを 3 成分からなる反応拡散系に拡張し、振動的な不安定性が生じることを示し、それによって生じるネットワーク上のパターンについて議論した。(iii) その他関連する研究として、ネットワーク上を

移流するパッシブスカラーに関する数理モデルを構築した。また、非線形振動子系に関する研究を行った。得られた結果は、国内外の学会および国際学術論文誌にて発表した。

[平成 26 年度] ネットワーク結合力学系および関連する非線形ダイナミクスに関する以下のようなトピックに関する研究を実施した。

(i) ネットワーク上の反応移流モデルにおける Turing 的な不安定性の解析を行った。ネットワーク上を移流する興奮性・抑制性因子系の数理モデルにおいて、一様状態が不安定化して非一様なパターンの自己組織化に至るプロセスに関して研究を進めた。その結果、従来の反応拡散系における Turing 不安定性とは定性的に異なるタイプの不安定性が生じることが分かった。(ii) ネットワーク結合力学系の示す集団振動に対する縮約理論の展開。自律的なダイナミクスを持つ非線形要素がネットワークを介して相互作用する結合力学系におけるマクロな集団リズム現象に対して、その位相応答特性を解析した。(iii) その他、単純な相互作用により生物の群れのような集団ダイナミクスを実現するアクティブな素子集団の数理モデルのパラメータ推定に関する研究や、関連のあるノイズを与えることにより自励振動子集団の同期パターンを制御する研究等を行った。得られた結果の一部は、国内外の学会および国際学術論文誌にて発表した。

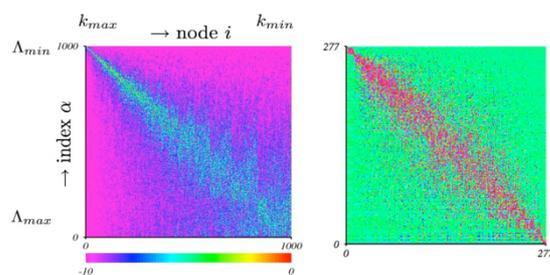


スケールフリーネットワーク上の双安定素子系の時間発展。非線形 Fokker-Planck 方程式により求めたノードの状態の確率密度を次数に対して表示。

[平成 27 年度] 本研究計画の 3 年目の最終年度であり、ネットワーク結合力学系および関連する非線形ダイナミクスに関する以下のようなトピックに関する研究を実施した。(i) ネットワーク上のダイナミクスを理解する上で重要となるネットワーク上の拡散過程を記述する Laplacian 行列の固有値と固有ベクトルの解析を行った。以前の研究で、スケールフリーネットワークに代表されるランダムネットワークにおいては、Laplacian 固有ベクトルの成分が特徴的な次数を持つノード群上に強く局在することを数値的に見出していた。これを理解するために、Laplacian 行列の摂動理論による解析を行い、縮退を考えた 2 次まで

の摂動理論を用いることで、固有値を予言し、固有ベクトルの局在性ある程度説明できることがわかった。(ii) ネットワーク結合力学系の示す集団ダイナミクスの安定性解析を行った。特に、四足歩行リズムを生成する結合振動子ネットワークについて、その共変 Lyapunov 指数・ベクトルと随伴共変 Lyapunov ベクトルを求めることにより、集団ダイナミクスの線形安定性や位相応答特性とネットワーク構造の関係を議論した。(iii) その他の関連する研究を行った。得られた結果の一部は、国内外の学会および国際学術論文誌にて発表した。

[平成 28 年度] 本計画は平成 27 年度で終了予定であったが、未公表の研究内容があったため、一部の研究を平成 28 年度に延長した。平成 28 年度には、前年度から解析していた複雑ネットワーク上において Laplacian 固有ベクトルが特徴的な次数を持つネットワークノード群上に強く局在する現象を摂動理論を用いて説明した論文を学術誌に投稿して採択され、また国際研究会等においても発表した。



ネットワークラプラス行列の固有ベクトルの局在性

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 8 件)

(※) 依頼原稿の 3 を除き全て査読有。

1. Shigefumi Hata and Hiroya Nakao, "Localization of Laplacian eigenvectors in random networks", *Scientific Reports* **7**, Article number 1121 [11 pages] (2017), DOI:10.1038/s41598-017-01010-0
2. Hiroya Nakao, "Phase reduction approach to synchronization of nonlinear oscillators" (review), *Contemporary Physics* **57**, 188-214 [27 pages] (2016), DOI: 10.1080/00107514.2015.1094987
3. 中尾裕也, 秦重史, 「複雑ネットワーク上の反応拡散系における Turing 不安定性とパターン形成」, 日本流体力学会誌「ながれ」 **33**, 29-36 (2014).
4. Hiroya Nakao, "Complex Ginzburg-Landau equation on networks and its non-uniform dynamics", *European Physical Journal Special Topics* **223**, 2411-2421 (2014),

5. DOI: 10.1140/epjst/e2014-02220-1
Shigefumi Hata, Hiroya Nakao, and Alexander S. Mikhailov, "Advection of passive particles over flow networks", *Physical Review E (American Physical Society)* **89**, 020801(R) [4 pages] (2014), DOI: 10.1103/PhysRevE.89.020801
6. Shigefumi Hata, Hiroya Nakao, and Alexander S. Mikhailov, "Dispersal-induced destabilization of metapopulations and oscillatory Turing patterns in ecological networks", *Scientific Reports (Nature Publishing Group)* **4**, 3585 [9 pages], (2014), DOI: 10.1038/srep03585
7. Shigefumi Hata, Hiroya Nakao, and Alexander S. Mikhailov, "Sufficient conditions for wave instability in three-component reaction-diffusion systems", *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 013A01 (2014) [17 pages], DOI: 10.1093/ptep/ptt102
8. Yu Atsumi, Shigefumi Hata, and Hiroya Nakao, "Phase ordering in coupled noisy bistable systems on scale-free networks", *Physical Review E (American Physical Society)* **88**, 052806 [15 pages] (2013), DOI: 10.1103/PhysRevE.88.052806

[学会発表] (計 8 件)

(※) 国際会議発表のみ記載。

1. Hiroya Nakao, "Pattern formation in reaction-diffusion systems on random networks", *Interdisciplinary Applications of Nonlinear Science*, Kagoshima University, November 3-6, 2016.
2. Hiroya Nakao, "Pattern formation and collective dynamics in reaction-diffusion systems on networks", *Self-Organized Patterns on Complex Networks 2016* (a satellite workshop of the 2016 Conference on Complex Systems), Amsterdam, the Netherlands, September 21, 2016.
3. Masashi Ota, Sho Yasui, Sho Shirasaka, and Hiroya Nakao, "Stability and sensitivity of synchronized states in a network of symmetrically coupled nonlinear oscillators for generating gait patterns", 2015 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA), Kowloon, Hong Kong, China, December 1-4, 2015.
4. Hiroya Nakao, "Phase reduction analysis of rhythmic spatiotemporal patterns and network dynamics", *Dynamics of Coupled Oscillators: 40 years of the Kuramoto Model*, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Dresden, Germany, July 27 - 31, 2015.

5. Hiroya Nakao, "Synchronization of rhythmic spatiotemporal patterns and network dynamics", 8th International Conference Engineering of Chemical Complexity, Institute for Advanced Study, Technische Universität München, June 22-26, 2015.
6. Hiroya Nakao, "Phase Reduction Approach to Synchronization of Coupled Oscillator Networks", International Symposium on Photonics and Electronics Science and Engineering 2015, Katsura-Hall, Katsura-Campus, Kyoto University, Kyoto, Japan, March 9, 2015.
7. Yu Atsumi, Shigefumi Hata and Hiroya Nakao, "Stochastic Dynamics of Coupled Bistable Systems on Scale-Free Networks", 5th International Workshop on Complex Networks, University of Bologna, Italy, March 12-14, 2014.
8. Hiroya Nakao, "Synchronization and instability in coupled oscillator networks", REPOWGEE (Workshop on Resilient Power Grids and Extreme Events), Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany, 7-9 October 2013.

〔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://www.k.sc.e.titech.ac.jp/members/nakao/papers.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中尾 裕也 (NAKAO, Hiroya)
東京工業大学・工学院・准教授
研究者番号：40344048