

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 22 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540376

研究課題名（和文） ネットワーク結合力学系の機能的設計とその普遍性

研究課題名（英文） Design of functional network dynamics and universality

研究代表者 柳田 達雄 (TATSUO YANAGITA)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：80242262

研究成果の概要（和文）：同期特性の優れた位相振動子ネットワークのデザインを中心に研究を行った。このモデルは力学的要素がネットワーク的に相互作用した集団（個体群）と見なせるため、細胞内での生化学反応や代謝反応などの複雑なシステムの最も抽象化したモデルと考えられる。マルコフ連鎖モンテカルロ法により同期特性の優れた機能的ネットワークが具体的に設計し、ネットワーク構造の統計的特徴付けを行った。振動数が異なる振動子集団が同期するために最適な結合ネットワーク、および同一な自然振動子集団が外部ノイズに晒されている場合、ノイズにたいして堅牢に同期するネットワークをそれぞれ設計した。異なる自然振動数を持つ場合とノイズに晒されている振動子集団では異なるネットワーク構造が同期最適である事を示した。また、リンク数の増加に伴い、同期最適ネットワークは構造転移する事が分かった。ノイズに抗した同期最適なネットワークはリンク数が少ない場合にはコアと周辺の振動子に分離した構造を持ち、各素子に共通なノイズによるに同期現象と強い関連があると予想され理論的発展が期待される、これらの成果は国内外の学会・研究集会などで口頭発表し、学術雑誌に掲載された。

研究成果の概要（英文）：We design the network of oscillators to improve synchronization properties through appropriate rewiring of its connections. We consider what are the optimal network architectures for a given total number of connections. Starting with an initial random network of oscillators, its autonomous synchronization ability can be largely improved by appropriately rewiring the links between the elements using the Markov chain Monte Carlo method. The architectures of such optimal networks strongly depend on the constraints, such as the total number of links available. Through the appropriate rewiring of a network, a strong gain in the synchronization signal can be achieved. It is also shown that the architectures leading to the improved synchronization of identical oscillators in the presence of noise are essentially different from the optimal synchronization architectures for heterogeneous oscillator populations without noise. Large ensembles of optimized networks are obtained and their statistical properties have been investigated. These results are published in Phys. Rev. E.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2009 年度	1300,000	390,000	1690,000
2010 年度	1100,000	330,000	1430,000
2011 年度	900,000	270,000	1170,000
年度			
年度			
総 計	3300,000	990,000	4290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 数理物理・物性基礎 (4304)

キーワード：結合振動子，ネットワーク，同期現象，マルコフ連鎖モンテカルロ法

1. 研究開始当初の背景

経験的に観測されるネットワークの多くは **Small-World** や **Scale-Free** などの特徴を持つ事が知られており，クラスター係数・**Degree** 分布・**Betweenness** などに代表される静的解析が欧米を中心として盛んに行われてきた．また，このような特徴を持つネットワークを生み出す成長ダイナミクスの研究が進んできている．それに対して，自然界に見られるネットワーク構造はある機能を持つように選択・形成されている．そこでは，ネットワークは力学的要素間を結びつける相互作用や入出力網を規定している．例えば，細胞内における生化学反応系は非常に複雑な応答特性を持ち環境の変化やノイズに対して安定に機能するよう設計されていると考えられる．メトロポリス法などの統計力学で用いられている動的モンテカルロ法が，複雑な位相空間構造を持つ力学系の不変部分集合の探索に有効であることが申請者らにより明らかにされつつある．これらの背景から，動的モンテカルロを用いた機能的な力学特性を持つネットワーク結合力学系の設計およびその普遍性を探求するという着想に至った．

2. 研究の目的

自然界には力学的要素が非一様に相互作用しているシステムが多く存在する．例えば，細胞内における生化学反応や代謝反応では多数の機能分子が関与しており複雑な応答特性を持っている．これらは，環境変化やノイズに対して安定に機能するよう進化してきたと考えられる．本研究は，機能的安定性をもつ相互作用網(ネットワーク)の設計原理とそれらネットワークがもつ普遍的構造の解明を目的とする．

3. 研究の方法

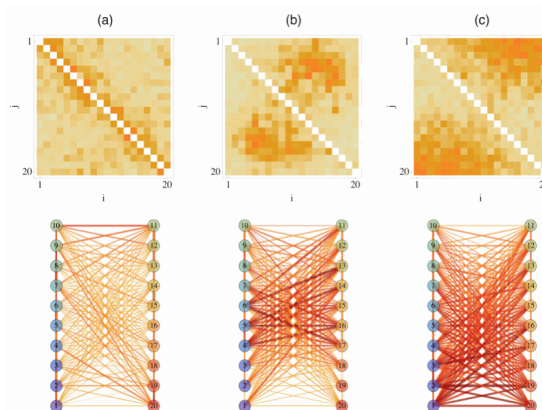
一般的に力学系の設計には無限の自由度がある．ここでは，要素力学系を固定し，それらの相互作用を規定するネットワークを設計することにより与えられた機能を満たす結合力学系の設計原理とそれら機能力学系の普遍性を探求する．要素力学のモデル選択や機能選択など様々なバリエーションがあり得るが，第一段階としては数理特性の解明が進んでいる位相振動子系を選び，機能として同期を選択する．この抽象モデルを用いて，具体的に機能的ネットワークの構成を試み，設計の基礎付けを与える．この知見を活

かし，より複雑な要素力学系へ発展させ，具体的な問題への応用を試みる．

4. 研究成果

同期特性の優れた位相振動子ネットワークのデザインを中心に研究を行った．このモデルは力学的要素がネットワーク的に相互作用した集団(個体群)と見なせるため，細胞内での生化学反応や代謝反応などの複雑なシステムの最も抽象化したモデルと考えられる．

マルコフ連鎖モンテカルロ法により同期特性の優れた機能的ネットワークが具体的に設計し，ネットワーク構造の統計的特徴付



図：マルコフ連鎖モンテカルロ法に降り設計された最適同期ネットワーク構造．(上) 隣接行列表示 (下) グラフ表示．リンク数の増加と共に最適同期ネットワーク構造が転移する．

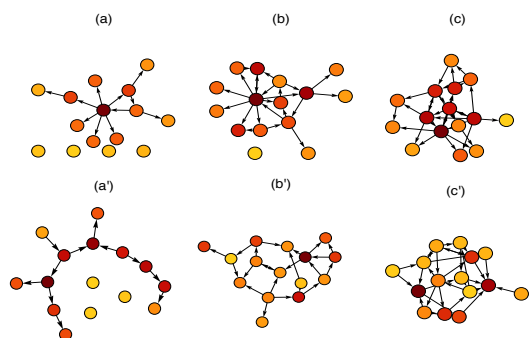
けを行った．これにより，異なる自然振動数を持つ振動子間では同期最適なネットワーク構造が結合リンク数により転移することが解った．結合リンク数が少ない場合は，振動数が隣接する振動子間の結合が優位であるが，結合リンク数の増加に伴い振動数の大きく異なる振動子間の結合が優位となる．

これらの成果は複数の国際会議などで発表すると共に，Tatsuo Yanagita and Alexander S. Mikhailov, Design of easily synchronizable oscillator networks using Monte Carlo Optimization method, Physical Review E. 81, 056204-1054 (2010)として掲載された．

さらに，同一な自然振動子集団が外部ノイズに晒されている場合に，ノイズにたいして堅牢に同期するネットワークを設計した．これにより，異なる自然振動数を持つ場合とは

異なるネットワーク構造が同期最適である事が分かった。特にリンク数が少ない場合にはコアと周辺の振動子に分離した構造がノイズに耐性を持ち、各素子に共通なノイズによる同期現象と強い関連があると予想され理論的發展が期待される、これらの成果は口頭発表し、最新の結果は現在 Physical Review E 誌で印刷中である。

現段階では比較的単純な機能特性を持つネットワークの設計であるが、動的な力学要素の相互作用し自己組織的に機能を発現するシステムの設計は生体反応、代謝反応、流通など様々な複雑ネットワーク設計の指針を与え、その応用範囲は多岐に渡り意義は大きいと考える。



図：同一振動子が外部ノイズに抗して同期するときのネットワーク構造。上段がマルコフ連鎖モンテカルロ法により設計されたネットワーク。下段はランダム結合ネットワーク。同期最適ネットワークは星形構造をもつ。

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10件)

- ① Shigefumi Hata, Kensuke Arai, Roberto F. Galán, and Hiroya Nakao, Optimal phase response curves for stochastic synchronization of limit-cycle oscillators by common Poisson noise, Phys. Rev. E, 84 (2011) 016229-016239 (査読有り)
- ② Yoji Kawamura, Hiroya Nakao, and Yoshiki Kuramoto, Collective phase description of globally coupled excitable elements, Phys. Rev. E, 84 (2011) 046211—046223 (査読有り)
- ③ Tatsuo Yanagita and Alexander S. Mikhailov, Design of easily synchronizable oscillator networks using Monte Carlo Optimization method, Physical Review E. 81, 056204-1054 (2010) (査読有り)
- ④ T. Konishi and T. Yanagita, Slow

relaxation to equipartition in spring-chain systems, Journal of Statistical Mechanics, 9, P09001-P09010 (2010) (査読有り)

- ⑤ Hiroya Nakao and Alexander S. Mikhailov, Turing patterns in network-organized activator-inhibitor systems, Nature Physics, 6, pp.544-550 (2010) (査読有り)
- ⑥ Shigefumi Hata, Takeaki Shimokawa, Kensuke Arai, and Hiroya Nakao, Synchronization of uncoupled oscillators by common gamma impulses: from phase locking to noise-induced synchronization, Phys. Rev. E, 82, 036206 (1-12)(2010) (査読有り)
- ⑦ T. Yanagita, T. Onozaki: "Dynamics of Market Structure Driven by the Degree of Consumer's Rationality" Physica A 389, 1041-1054 (2010) (査読有り)
- ⑧ T. Konishi, T. Yanagita: "Energetic motion of end-particles in constrained dynamical systems" Journal of Statistical Mechanics L09, L09001 (2009) (査読有り)
- ⑨ Jun-nosuke Teramae, Hiroya Nakao, G. Bard Ermentrout: "Stochastic phase reduction for a general class of noisy limit cycle oscillators" Phys. Rev. Lett. 102, 1941021-1941024 (2009) (査読有り)
- ⑩ Hiroshi Kori, Yoji Kawamura, Hiroya Nakao, Kensuke Arai, Yoshiki Kuramoto: "Collective dynamical response of coupled oscillators with any network structure" Phys. Rev. E 180, 0362071-0362079 (2009) (査読有り)

〔学会発表〕(計16件)

- ① 小西哲郎, 柳田達雄, 強束縛も状態系のエネルギー分配：溶媒の効果, 日本物理学会, 関西学院大学(2012年3月24日)
- ② 柳田達雄, 協働の数理モデル, 日本物理学会, 関西学院大学(2012年3月24日)
- ③ Hiroya Nakao, Spatiotemporal pattern formation in reaction-diffusion systems on complex networks, SMART Workshop: Exploring Collaborative Mathematics, Tohoku University, Japan(2012年3月14日)
- ④ Hiroya Nakao, Phase Description of Periodic Solutions in Reaction-diffusion Systems, IUTAM Symposium on 50 Years of Chaos: Applied and Theoretical, Kyoto University, Japan(2011年12月2日)
- ⑤ Tatsuo Yanagita, Design and Statistical Properties of Easily Synchronizable Oscillator Networks, Emergence and Desi

- gn of Robustness, IFISC, Palma de Mallorca, Spain (2010年9月22日)
- ⑥ Tatsuo Yanagita, Statistical Characters of Synchronization-Optimized Oscillator Networks, International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2010) Krakow, Poland (2010年9月8日)
- ⑦ Hiroya Nakao, Localization of Laplacian eigenvectors on complex networks, Dynamics Days Europe 2010, (2010/9/6) University of Bristol
- ⑧ Tatsuo Yanagita and S. A. Mikhailov, Design and Statistical Properties of Easily Synchronizable Oscillator Networks, Unwinding Complexity, Port Douglas, Australia (2010年7月25日)
- ⑨ Tatsuo Yanagita, Design and Thermodynamic Properties of Easily Synchronizable Oscillator Networks, New Frontiers in Complex Networks, Seoul National University, Korea (2010年7月13日)
- ⑩ 中尾裕也: “複雑ネットワークにおけるラプラス固有ベクトルの局在性” 日本物理学会第65回年次大会. (2010/03/25). 岡山大学(岡山市)
- ⑪ 柳田達雄, Alexander Mikhailov: “マルコフ連鎖モンテカルロ法による位相振動子網の設計と解析” 日本物理学会第65回年次大会. (2010/3/22). 岡山大学(岡山市)
- ⑫ 中尾裕也: “スケールフリーネットワーク上の結合振動子系のダイナミクス” ネットワークダイナミクス研究会(電子情報通信学会非線形問題研究会). (2010/03/09). 上智大学(東京都)
- ⑬ 中尾裕也: “Self-organization of non-uniform dynamical patterns in complex networks of diffusively coupled oscillators” Workshop: Fluctuation and noise in living organisms II. (2010/02/02). 理化学研究所(和光市)
- ⑭ 柳田達雄, Alexander Mikhailov: “Statistical Properties of Synchrony Designed Network” Frontiers in network science-advances and applications. (2009/09/22). Harnack-House, Berlin, German
- ⑮ 柳田達雄, Alexander Mikhailov: “Statistical Properties of Synchrony Designed Network” Dynamics Days Europe. (2009/08/31). Max Planck Institute, Gottingen, Germany
- ⑯ 柳田達雄, Yukito Iba: “Extracting Rare Trajectories in Chaos and

Designing Network Synchrony by MCMC” Research Innovation Center Advanced Monte Carlo Algorithm Research Group 1st Workshop. (2009/06/08). Institute of Statistical Mathematics (Tokyo)

〔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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳田 達雄 (YANAGITA TATSUO)
大阪電気通信大学・工学部・教授
研究者番号: 80242262

(2) 研究分担者

中尾 裕也 (NAKAO HIROYA)
研究者番号: 40344048

(3) 連携研究者

なし