

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540417

研究課題名(和文)ノイズや環境変化に頑健で機能的なネットワーク型力学系の設計と熱力学的特性

研究課題名(英文)Design of robust network dynamics against noises and its thermodynamical characterization

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：自然界には動的要素が非一様に相互作用して外乱に対して安定に機能す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遺伝子発現では多数の機能分子が関与しているながら安定なダイナミクスが創出されている。また、神経網も特別な結合構造を形成して安定に情報処理を行っている。本研究は、ネットワーク型力学系がノイズや環境変動に抗して頑健に所与された機能を実現するダイナミクスの数理構造を探求した。ノイズ抗し頑健に機能創発するネットワーク型力学系(同期特性の優れたネットワーク位相振動子)をマルコフ連鎖モンテカルロ法により具体的に設計しその熱力学的特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：There are many functional systems with robust against noises in nature, e.g., chemical reactions in cells and neural networks. We have designed network dynamics having given function with robust against noises through the Markov chain Monte Carlo method. We have considered networks of phase oscillators and designed its connection networks to show better synchronization performance against noises. To do this, we have used the inverse of the sum of eigenvalues of the Laplacian matrix for network as a "synchronization performance" for the Markov chain method. Our designed networks showed a structural transition from core-periphery to interlaced network with increasing number of nodes. The method enabled us to characterize network thermodynamically. For smaller number of nodes, we found that the heat capacity had a peak called the Shottky anomaly in statistical mechanics, which comes from energy (corresponding to the synchronization performance) gap between highly optimization networks.

研究分野：非線形数理科学

キーワード：ネットワーク 同期 熱力学的特性 マルコフ連鎖モンテカルロ法 振動子 比熱異常 Shottky anomaly

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スモールワールド性やスケールフリー性を持つ事が知られており、クラスター係数・次数分布・媒介値中心性などに代表される解析が欧米を中心として盛んに行われている。近年の研究動向は、このようなネットワークの静的特徴付けから要素力学系が不均一に相互作用した、いわゆるネットワーク型力学系研究に変化しつつある。

一方で、自然界に見られる動的ネットワーク構造は機能が発現するように選択・形成されていると考えられる。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変化やノイズに対して安定に機能するよう進化したと考えられる。本研究は、このような頑健な力学系を具体的に設計し、結合網構造と熱力学的特性との関係性からノイズや環境変動に抗して頑健に機能する力学システムの数理構造の解明を目指す。

2. 研究の目的

自然界には動的素子が非一様に相互作用して外乱に対して安定に機能す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遺伝子発現では多数の機能分子が関与しながら安定なダイナミクスが創出されている。また、神経網も特別な結合構造を形成して安定に情報処理を行っている。本研究は、所与された機能を実現するようにネットワーク型力学系の設計を行い、結合網構造と熱力学的特性の関係性からノイズや環境変動に抗して頑健なダイナミクスを出現させる数理構造を解明し、これらの知見を交通網、輸送網・電力網などの社会的インフラストラクチャの安定運用実現に向けての数理的解析の基盤を与える。

3. 研究の方法

メトロポリス法などの統計力学で広く用いられている動的モンテカルロ法が、力学系の不変多様体の探索や振動子ネットワークの設計に有効であることが申請者らにより示されてきた [T. Yanagita and Yukito Iba, J. of Stat. Mech., P02043-P02058 (2009)], [T. Yanagita and A. Mikhailov, Phys. Rev. E, 81, p. 056204-056212 (2010)]. これらの背景から、同等なアルゴリズムにより頑健な機能力学系の設計して、結合構造と熱力学的特性から頑健な力学システムの数理構造を探索した。また、申請者らの興奮要素結合系の一連の研究 [T. Yanagita, H. Suetani and K. Aihara, Phys. Rev. E, 78, p.05628-056039 (2008)], [T. Yanagita et.al, Int. J. of Bif. and Chaos, 18(2008)], [T. Yanagita Phys.Rev. E, 76(2007)] によって得られた数理的方法・知見を複雑で機能的な神経網設計に応用した。

一般的に力学系の設計には無限の自由度がある。第一段階として、要素力学系を固定して相互作用網を設計することにより、ノイズや環境変化にたいして頑健に与えられた機能を創発するネットワーク型力学系のアルゴリズムと設計原理を探求した。要素力学系としては数理特性の解明が進んでいる位相振動子を選び、外部ノイズに抗して頑健に同期する結合網を具体的に設計して数理的基礎付けを与えた。設計には動的モンテカルロ法(マルコフ連鎖モンテカルロ法)を用い、その特徴を活かし有限温度での熱力学的特性を解析し、結合網構造と機能力学系の普遍性を探求した。この知見を基にして、神経回路網や遺伝子発現ネットワークなどの複雑で安定に機能するダイナミクスの解明に向けて発展させた。

下記の3課題を中心に取り組んだ。

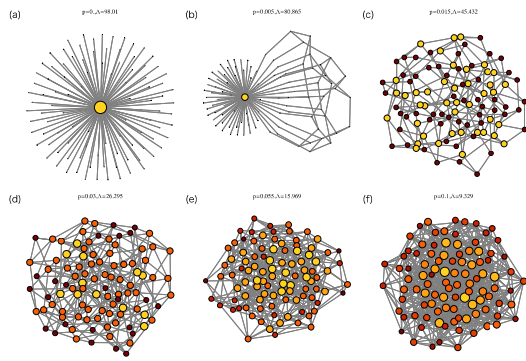
(1) 頑健に機能するネットワーク型力学系の設計原理とアルゴリズムの探求。

(2) ノイズや環境変化に対して機能的に安定なネットワーク型力学系の構造と熱力学的特性の解明。

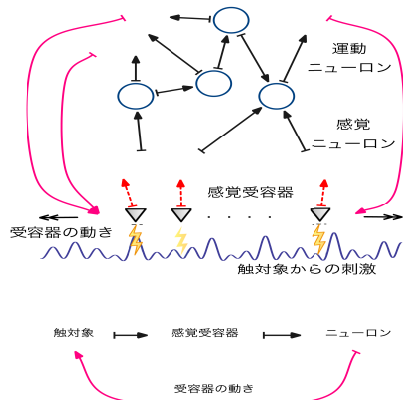
(3) 生体、遺伝子発現、神経網など複雑で頑健な機能的力学系への応用と解析。

4. 研究成果

(1) 機能的に安定なネットワーク型力学系の構造と熱力学的特性: 細胞内の生化学反応や代謝反応などの複雑なシステムがノイズや環境変化にたいして如何に安定に機能するかを解明するために、外部ノイズに抗して安定に同期する結合振動子集団の結合網を設計し、その構造を次数分布などにより特徴付けた。設計にはこれまでの研究成果を活かして動的モンテカルロ法(パラレルテンパリング法)を用いた。また、温度の異なるモンテカルロ法(レプリカ)を複数、並列に処理する特徴を活かして、結合構造の温度依存性を詳細に解析し、構造転移やエントロピー変化などの熱力学量と機能性・頑健性の関係を明らかにし、これらの成果を国際会議や学術論文として発表した。特に、ここで得られた、機能的なネットワークはリンク数のどうかによって構造転移がみられ(下図を参照)、これらの特徴付けを行った。また、モンテカルロ法によりネットワークをサンプルしているので、この特徴を活かし有限温度の解析を行ったところ比熱異常が観測された。詳細な解析の結果、この比熱以上は統計力学の知られた Shottky 比熱異常と考えられ、低エネルギー間のギャップ(ここでは、同期最適なネットワークと第二最適なネットワークの性能ギャップ)に起因していることが明らかし、学術論文として公表した。



(2) 興奮性素子結合系の設計とその応用：
 神経網などへの応用として、要素力学系が興奮性素子であるシステムの解析した。さらに、外部環境を検知する能力を機能とし、そのような機能が発現するように興奮素子結合網を設計した。具体的に所与した機能として、職人が微細な凹凸を認知することを意識して外部対象に与えた小さな凸の位置を検知し、その場所でセンサーを停止させるタスクと与えた(下図を参照)。このような興奮素子結合系の機能的ネットワーク設計とその構造解析は神経システムを理解する上で重要な意義があると考えられる。しかしながら、モンテカルロ法による設計には膨大な計算量が必要であり、現有する計算機設備で常微分方程式を基礎とするモデリングでは設計が困難であることが明らかになった。この問題を回避するため、興奮性力学素子モデルとしてセルオートマトン・モデル(素子の状態と時間発展を離散化したモデル)を選択し、最適化に必要な計算量を大幅に低減に成功した。これにより高次機能を持つネットワークの設計が可能となった。素子のモデルを大胆に簡素化することで、所与された高次機能をもつ力学系を具体的に構成し、外部対象を検知するときの運動形態の分類とそのアルゴリズムを解析して国際会議や論文誌などで発表した。



(3) パルス波の同期特性(エントレインメント)の理論的解明：同期現象は主に結合常微分方程式による理論的解析が行われている。ここでは、パルス波が周期的に伝播している興奮性媒体(偏微分方程式)の結合系の同期特性の理論的解析を共同研究者の中尾(東京

工業大学)と行った。常微分方程式系との大きな違いは、偏微分方程式系でのパルス波の周期的運動は無限自由度空間での周期解となる点である。詳細な解析の結果、周期発火する無限自由度系の同期特性を理論的に解明した。これらの共同研究結果は国際会議や学術論文での成果発表として結実した。

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6件)

Tatsuo Yanagita and Takashi Ichinomiya, "Thermodynamic characterization of synchronization-optimized oscillator networks", *Physical Review E*, **90**, 062914-062924 (2014) (査読有)

Hiroya Nakao, Tatsuo Yanagita and Yoji Kawamura, "Phase-Reduction Approach to Synchronization of Spatiotemporal Rhythms in Reaction-Diffusion Systems", *Physical Review X*, **4**, 021032-021055 (2014) (査読有)

Kaneko Kuniyuki and Tatsuo Yanagita, "Coupled Maps", *Scholarpedia*, **9(5)**, 4085(2014), doi:10.4249/scholarpedia.4085 (査読有)

Tatsuo Yanagita, "Design and Dynamics of Active-Touch Sensory Model", *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, 583--589 (2013) (査読有)

Hiroya Nakao, Tatsuo Yanagita and Yoji Kawamura, "Phase description of stable limit-cycle solutions in reaction-diffusion systems", *Procedia IUTAM* **5** (2012) 227 - 233 (査読有)

Tatsuo Yanagita and Alexander S. Mikhailov, "Design of oscillator networks with enhanced synchronization tolerance against noise", *Physical Review E*, **85**, 056206--056213 (2012) (査読有)

[学会発表](計12件)

柳田達雄：「カオスの性質を持つ振動子ネットワークのモンテカルロ法による設計」、日本物理学会 第70回年次大会、早稲田大学(東京都・新宿区)(2015/03/22)

柳田達雄、小野崎保「エージェントベース・モデルによる市場構造のダイナミクス」RIMS 共同研究「マクロ経済動学の非線形数理」京都大学数理解研究所(京都府・左京区)(2014/09/17)

Hiroya Nakao*, Tatsuo Yanagita, and

Yoji Kawamura, "Optimal entrainment of rhythmic patterns in reaction-diffusion systems by periodic spatiotemporal forcing", Gordon Research Conference: Oscillations & Dynamic Instabilities in Chemical Systems, 07/13/2014, Melia Golf Vichy Catalan Business and Convention Center, Girona, Spain (Poster)

T. Yanagita, "The Schottky Anomaly In Easily Synchronizable Oscillator-Networks", International Conference on Statistical Physics, Rhodes, Greek July 10, 2014

小西 哲郎、柳田達雄: 「**星型 freely jointed chain におけるエネルギー分配**」, 日本物理学会 第 69 回年次大会、東海大学 (神奈川県・平塚市) (2014/03/24)

Hiroya Nakao*, Tatsuo Yanagita, Yoji Kawamura, "Phase Reduction Analysis of Oscillatory Patterns in Reaction-Diffusion Systems", SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, Utah, USA, May 20, 2013.

中尾裕也、柳田達雄, 河村洋史: 「**反応拡散系の時間周期パターンの位相記述とその応用**」, 日本物理学会 第 68 回年次大会、広島大学 (広島県・東広島市) (2013/03/27)

小西 哲郎、柳田達雄: 「強束縛ひも状態系のダイナミクス: 末端部の運動性」, 日本物理学会 第 68 回年次大会、広島大学 (広島県・東広島市) (2013/03/26)

柳田達雄: 「ネットワーク結合振動子のマルコフ連鎖モンテカルロ法による設計」, 日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学 (神奈川県・横浜市) (2012/09/20)

小西 哲郎、柳田達雄: 「溶媒中の強束縛ひも状態におけるエネルギー不均一性の形成、維持、そして緩和」, 日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学 (神奈川県・横浜市) (2012/09/20)

Hiroya Nakao, Tatsuo Yanagita, and Yoji Kawamura, "Phase-reduction analysis of coupled spirals in reaction-diffusion systems", XXXII Dynamics Days Europe, 5 September 2012, Gothenburg, Sweden

Tatsuo Yanagita, "Design of Oscillator Networks with Enhanced Synchronization and their Thermodynamic Properties Using the Monte Carlo Method", The European Conference on Complex Systems 2012, Brussels, Belgium (2012/09/06)

〔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://phenomath.osakac.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

中尾裕也 (Hiroya NAKAO)
東京工業大学・情報理工学 (系) 研究科・准教授
研究者番号: 40344048

(3) 研究協力者

Alexander Mikhailov
Friz Haber Institute of the Max Plank Society

〔図書〕(計 0 件)