

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03279

研究課題名(和文)大自由度力学系のデータ駆動型縮約モデリング手法の確立とバイタルサインへの適用

研究課題名(英文) Development of data-driven reduced-order modeling framework for large dimensional dynamical systems and applications to vital sign signals

研究代表者

中尾 裕也 (Nakao, Hiroya)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：40344048

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：大自由度非線形力学系の縮約モデリング法を發展させた。各種の非線形力学系に関して、その本質的なダイナミクスを記述する少数個の主要な変数に関して閉じた縮約数理モデルを導出するための理論的枠組みを發展させ、またこれを数理モデルが未知の場合にデータ駆動型で行うためのモデリング法の開発も行なった。力学系の縮約理論、特に非線形振動に対する位相縮約理論を、多数のモードを持つ大自由度系や偏微分方程式に従う無限次元系に振幅を含める形で拡張した。力学系分野で注目されているKoopman作用素論に基づく現代的な観点からの解析を実施し、従来は扱われていなかった流体力学系や量子散逸力学系に関する理論も展開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実世界の様々な系は多様な非線形ダイナミクスを示し、それは時に重要な機能的役割を果たす。その典型例として、例えば生体における心臓の拍動や呼吸などのリズムが挙げられる。そのような系は、しばしば非常に高次元の数理モデルで記述されるため、その解析には、系の本質的な自由度に着目して次元縮約された低次元モデルを導くことが重要である。本研究では、様々な非線形力学系に対して、近年發展の著しい作用素論的な観点からの縮約モデリング手法を開発した。この手法は、実世界の様々な系の運動の解析や制御に役立つことが期待される。

研究成果の概要(英文)：Reduced-order modeling methods for nonlinear dynamical systems with large degrees of freedom have been developed. Theoretical frameworks for deriving reduced mathematical models for small sets of key variables representing the essential dynamics have been established for various types of nonlinear dynamical systems. Data-driven modeling methods for the phenomena whose mathematical models are unknown have also been considered. Dynamical reduction theories, in particular, the classical phase reduction theory for nonlinear oscillations, have been extended to phase-amplitude reduction theory for high-dimensional dynamical systems with many dynamical modes and also to infinite-dimensional systems described by partial differential equations. The study has been performed from the modern viewpoint of Koopman operator theory and also newly extended to fluid mechanical systems and to quantum dissipative systems.

研究分野：非線形ダイナミクス

キーワード：非線形ダイナミクス 力学系 縮約理論 非線形振動子 同期現象 Koopman作用素 生体リズム 動的モード分解

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

非線形力学分野では、主として順問題的な立場から現象が扱われていた。すなわち、実現象を理想化してシンプルな数理モデルを立て、そのダイナミクスや分岐構造を詳しく解析し、実現象の予言を試みることがなされていた。これは、物理学に代表される自然科学の伝統的な立場であり、注目すべき変数が少なく、対象となる系を精密に制御した実験が可能な状況では大変有効であった。一方、現代の社会においては、対象となる系の自由度が非常に大きく、制御が困難で、さらに、何が系の本質的な変数なのか、それらがどのように観測データに反映されるのかが明らかではない複雑な系から、多量の観測データが得られている現状があった。生体における呼吸や脈拍、脳波等のバイタルサインはその典型例である。そこで、大自由度非線形力学系の観測データから、系を記述する主要な変数を適切に抽出し、系の数理モデルを同定して挙動を予測するための数理的基盤を構築することが、本研究開始当初の背景であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、大自由度非線形力学系の縮約理論を発展させ、観測データから系を記述する少数個の主要変数を抽出して縮約数理モデルを同定する手法を確立することを主目的としていた。研究の鍵となるのは力学系の縮約理論であり、これを高次元の力学系や、ハイブリッド系のような非従来の系に拡張することを目指していた。さらに、力学系分野で近年発展している **Koopman** モード解析や動的モード分解と、統計科学分野のカーネル法や状態空間法等の非線形解析手法を組み合わせ、大自由度系のデータから主要な力学モードを抽出し、その縮約数理モデルを同定するためのデータ駆動型モデリング技法を構築することを目的としていた。提案手法を、生体リズムなどに代表される実現象の数理モデルのシミュレーションによって検証し、可能であれば実データに適用することを目指していた。

## 3. 研究の方法

本計画では生体リズムなどの複雑な現象を念頭に大自由度非線形力学系の縮約理論を発展させ、また観測データから系を記述する少数個の主要変数を抽出して縮約数理モデルを同定するデータ駆動型縮約モデリング手法の確立を行うことを当初の目的とした。非線形力学系の縮約理論を基礎として、**Koopman** モード解析や状態空間法をはじめとする現代的な力学系および統計科学の理論を融合・発展することにより、特に大自由度の非線形力学系を扱える手法を開発することを目指した。

伝統的な力学系理論においては、縮約という考え方が本質的である。多様な実現象を記述する数理モデルは、しばしば多くの変数を持つ大自由度非線形力学系であり、時に無限次元の力学系となる。しかし、多くの実現象は散逸を伴うため、そのダイナミクスは系の相空間（状態空間）内にある比較的低次元のアトラクター近傍で生じる。従って、アトラクター上の状態を表す少数個の変数を用いて元の高次元系を縮約記述することが原理的には可能であり、そのための手続きは一般に縮約理論と呼ばれる。数理モデルが既知の場合は、系の分岐点近傍における遅い中立モードの振幅変数のダイナミクスを抽出する中心多様体縮約や、リズム現象のような連続並進対称性に起因する遅い中立モードの位相変数のダイナミクスを抽出する位相縮約などの理論が整備されている。それらの遅い中立モードは、系の長時間挙動を支配するため、対応する力学変数は系のダイナミクスの本質を捉えた主要な変数となる。しかし、系の詳細な数理モデルが未知の状況で、系の観測データから系を記述する主要な力学変数を抽出する手法は、その重要性にもかかわらず未だに発展途上である。

この問題を解決するために、観測データから背後にある数理モデル自体を同定するための新しい数理的基盤が必要となる。実世界において観測される信号の多くは、複数の周期的な基本成分に揺らぎが重畳したリズムミックなものであり、強い非線形性、非定常性を持つ。観測データから数理モデルを同定する枠組みとして、統計的推定理論は古い歴史を持つが、主成分分析に代表される標準的な統計解析手法は、主として線形性や定常性を仮定しており、系の力学的性質を考慮していないため、非線形で動的な実現象を自然な形で記述する目的には不向きである。

近年、力学系分野においては、従来の幾何学的な観点に加え、**Koopman** 作用素に基づく作用素論的な観点や、動的モード分解などの非線形なダイナミクスを踏まえた系のモード分解手法が注目されるようになっており、また、統計科学では非線形性を扱うためのカーネル法や非定常観測時系列を解析するための状態空間法が発展してきていた。そのため、これらを融合させることにより、複雑な信号を生み出す実現象の縮約数理モデルを同定する手法を発展させ、現象の理解・予測・制御に適用することを目的として、理論的な立場から研究を行なった。

#### 4. 研究成果

本研究計画は、本来は2017年度から2020年度までの4年間の計画であったが、その間には新型コロナウイルスの世界的な蔓延があり、研究の遂行が大きく妨げられたため、最終的には2022年度まで期間を延長して実施した。以下にその間に実施した研究の概略を述べる。

2017(平成29)年度は本計画の初年次であり、主に以下に述べる内容について研究を実施して成果を得た。(i) 非線形振動現象を示す力学系の縮約理論を用いて、ふたつの非線形振動子間の同期状態の安定性を向上させるように拡散的相互作用を最適化する問題を扱った。各振動子の状態変数間に導入すべき最適な相互拡散係数行列を理論的に導出し、数値シミュレーションにより実際に同期状態の安定性が向上し、同期状態への緩和時間が短縮されることを確認した。また、多数の振動子の結合系においてもこの最適化により集団同期が促進される場合があることを数値シミュレーションにより示した。(ii) (i)の理論的結果を、大自由度非線形力学系である反応拡散系のリズム的なパターンに拡張した。反応拡散系のリミットサイクル振動に対する位相縮約理論を用いて、ふたつの反応拡散系を結ぶ相互作用関数に導入すべき最適な空間フィルタを導出し、実際にリズム的なパターン間の同期状態の安定性が大幅に向上されることを示した。(iii) 大自由度力学系の数理モデルに典型的に現れる大規模ランダムネットワークにおけるラプラシアン固有ベクトルの局在特性を解析した。ラプラシアン固有値とネットワークの次数分布に相関があること、各固有ベクトルは固有値に対応する次数のノードに局在する傾向があることを示し、その摂動法による理論的な説明を試みた。(iv) その他、大自由度興奮系の振動状態に対する位相方程式の導出、ラットの歩行データに関わるリズム的な神経活動を想定した時系列からの数理モデルの同定に関する解析、カーネル法に基づくKoopmanスペクトル解析に関する考察等も行なった。以上の成果について、学会や研究会および論文にて公表した。

2018(平成30)年度は本計画の2年次であり、主に以下に述べる内容について研究を実施して成果を得た。(i) ネットワーク結合力学系の集団振動に対する縮約理論を発展させた。実世界には電力系統や神経回路網のように全系の同期した集団振動が重要な機能的役割を果たす例がある。その種の系の数理モデルとして高次元の常微分方程式系として表される複数の素子がネットワークを介して相互作用する系の集団振動を低次元の位相方程式に縮約するための理論を定式化した。この理論では各素子のダイナミクスやネットワーク結合は任意であり、個々の素子に与えられた摂動に対する集団振動の位相応答を一般的に定量化できる。これにより、例えばネットワークのどの素子に入力を与えれば系の集団振動を効率的に制御できるかを定量的に示すことができる。この理論の応用例として、ふたつの集団振動するネットワーク間の相互同期を詳細に解析した。(ii) 生体には様々なリズム現象があり、音波の入力に対して振動的応答を示す蝸牛の聴覚細胞はそのひとつの例で、人体における音の知覚の基本要素である。本研究では、聴覚細胞系の結合振動子モデルを用いて、ふたつの周波数の異なるサイン波動的な音信号が入力されたときの応答の二音抑圧の解析を行い、周波数の相対的な大小に応じて異なる抑圧特性が生じることを示し、その結果が実際の聴覚実験の結果と定性的に一致することを示した。(iii) 大自由度力学系である流体の振動現象に対して位相縮約理論を発展させた。円柱後流の渦の振動的な剥離現象をリミットサイクル振動とみなし、その位相応答特性を直接数値シミュレーションにより測定することで、数値データより系の位相方程式を求めた。その応用として、周期的な制御入力に対する同期特性を解析した。(iv) その他、バクテリアの鞭毛の弾性流体力学的な同期現象の解析などを行なった。以上の成果について、学会や研究会および論文にて公表した。

2019(平成31)年度は本計画の3年次であり、主に以下に述べる内容について研究を実施して成果を得た。(i) オプトメカニカル系などの量子効果が重要となる量子散逸非線形力学系の非線形振動現象に対する半古典的な位相縮約理論を発展させた。系の量子状態を表す密度行列のマスター方程式から半古典領域に着目して状態空間表示で量子Fokker-Planck方程式を導き、その決定論的部分に対して位相を導入することにより、系を記述する位相方程式を導出した。その応用として、周期外力への同期現象を議論した。(ii) (i)の結果を応用して、量子非線形振動子の半古典位相縮約理論に基づく注入同期の最適化に関する研究を行い、最適な周期外力の形状を導出して、同期特性の向上を数値シミュレーションにより確認した。(iii) Koopman作用素論に基づく解析により、大自由度力学系である反応拡散系の非線形リズムに対する位相振幅方程式を導出した。振動の基準状態からの偏差を表す振幅変数をKoopman作用素論に基づいて力学系として自然な形で導入し、振動系のダイナミクスの位相と振幅の両変数を用いた縮約記述法を発展させた。これにより、従来の位相応答に加え、過渡的な振幅応答の解析が可能となり、不安定なパターンのフィードバック制御等に應用できることを示した。(iv) その他の関連研究として、量子連続測定下での量子同期現象の解析や、脳神経系における集団同期により生じる異常なリズムの抑制に関する結合振動子モデルに基づく研究、ネットワーク結合力学系におけるパターン形成現象に関する研究、神経系における情報伝達に関する研究などを行なった。以上の成果について、学会や研究会および論文にて公表した。

2020(令和2)年度は、当初予定では本研究計画の最終年次であり、主に以下に述べる内容について研究を実施して成果を得た。(i) 偏微分方程式で記述される力学系に対する Koopman 作用素論を展開した。安定な定常状態に緩和する場のダイナミクスを記述する一般の偏微分方程式系に関する Koopman 作用素のスペクトル解析を形式的に定式化した。場の量の観測関数の時間発展を記述する Koopman 作用素とその無限小生成作用素、およびそれらの Koopman 固有汎関数の概念を導入した。拡散方程式のような線形系においては、Koopman 固有汎関数を場の変数の線形関数として表現できること、Koopman 固有汎関数を用いて慣性多様体を定義できること、最も遅く減衰する Koopman 固有汎関数を用いて定常状態からの距離を表すアイソステイブルを定義できることなどを議論し、線形拡散方程式およびこれに共役な非線形 Burgers 方程式と非線形位相拡散方程式を例として解析した。(ii) 時間遅れにより生じる自励振動に対する非線形位相振幅縮約理論を展開した。時間遅れ微分方程式の安定な自励振動解に対する Floquet 理論に基づいて、系の無限次元のダイナミクスを近似的に低次元の位相振幅方程式で近似するための位相振幅縮約理論を定式化した。具体例として遺伝子制御系の振動モデルを用い、概日リズム睡眠障害のような生理現象と関連する可能性のある摂動下での複雑な振動ダイナミクスを解析した。(iii) 細胞集団等における形態形成の数値モデルとして考案された Turing パターンをランダムネットワーク上に FitzHugh-南雲型の活性-抑制系が置かれた場合について解析した。(iv) その他、流体と構造の連成系の非線形振動現象に関する研究、蔵本タイプの多体結合振動子系の位相振幅記述等に関する研究も実施した。以上の成果について、学会や研究会および論文にて公表した。

本計画は、当初は4年計画であったが、新型コロナウイルスの蔓延により研究遂行に大きな支障があったため、最終的には2022(令和4)年度まで延長した。その間の研究として、さらに(i) 集団振動するネットワークの位相縮約理論に基づく複数のネットワーク間の相互同期のスパース最適化、(ii) 時空間パターン形成の最もシンプルな離散モデルである基本セルオートマトンに関する Koopman 作用素論の展開、(iii) 非線形振動子の Floquet 理論に基づく位相振幅縮約を用いた注入同期の高速化、(iv) 非線形振動子の位相縮約理論に基づく大域同期の非線形最適化、(v) 半古典量子興奮系におけるコヒーレンス共鳴現象の解析、(vi) 量子連続測定とフィードバック制御による量子非線形振動子の同期の向上、(vii) ノイズによって興奮性の神経細胞のモデルに生じる確率的な振動現象の近似的な理論解析、(viii) Koopman 作用素論に基づく一般の量子散逸系の非線形振動子に対する漸近位相の定義、(ix) 非線形振動子系のデータからの漸近位相関数および振幅関数の推定による位相振幅モデルのデータ駆動型の推定、(x) 量子活性-抑制モデルにおける Turing 不安定性の解析、などに関する研究を実施した。これらの成果についても、2021年度から2022年度にかけて実施された学会や研究会および論文にて公表した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計34件（うち査読付論文 33件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Kuramoto Yoshiki, Nakao Hiroya	4. 巻 377
2. 論文標題 On the concept of dynamical reduction: the case of coupled oscillators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 20190041, 1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsta.2019.0041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Carletti Timoteo, Nakao Hiroya	4. 巻 101
2. 論文標題 Turing patterns in a network-reduced FitzHugh-Nagumo model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 022203, 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.101.022203	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kato Yuzuru, Nakao Hiroya	4. 巻 101
2. 論文標題 Semiclassical optimization of entrainment stability and phase coherence in weakly forced quantum limit-cycle oscillators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 012210, 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.101.012210	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kato Yuzuru, Yamamoto Naoki, Nakao Hiroya	4. 巻 1
2. 論文標題 Semiclassical phase reduction theory for quantum synchronization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033012, 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.1.033012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Nobuhiro, Kato Yuzuru, Shirasaka Sho, Nakao Hiroya	4. 巻 100
2. 論文標題 Optimization of linear and nonlinear interaction schemes for stable synchronization of weakly coupled limit-cycle oscillators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 042205, 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.100.042205	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamaguchi Ikuhiro, Isomura Takuya, Nakao Hiroya, Ogawa Yutaro, Jimbo Yasuhiko, Kotani Kiyoshi	4. 巻 88
2. 論文標題 Suppression of Macroscopic Oscillations in Mixed Populations of Active and Inactive Oscillators Coupled through Lattice Laplacian	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054004, 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.054004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawamura Yoji	4. 巻 1
2. 論文標題 Phase reduction of limit-torus solutions to partial differential algebraic equations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033130, 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.1.033130	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kostal Lubomir, Kobayashi Ryota	4. 巻 100
2. 論文標題 Critical size of neural population for reliable information transmission	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 050401, 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.100.050401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sakoda K., Hata H., Hata S.	4. 巻 65
2. 論文標題 Chaotic Encryption for Belief Propagation Decoding in Massive MIMO Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Communications Technology and Electronics	6. 最初と最後の頁 172 ~ 178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1134/S1064226920020175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shirasaka Sho, Kurebayashi Wataru, Nakao Hiroya	4. 巻 484
2. 論文標題 Phase-Amplitude Reduction of Limit Cycling Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Control and Information Sciences	6. 最初と最後の頁 383 ~ 417
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-35713-9_15	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakao Hiroya, Yasui Sho, Ota Masashi, Arai Kensuke, Kawamura Yoji	4. 巻 28
2. 論文標題 Phase reduction and synchronization of a network of coupled dynamical elements exhibiting collective oscillations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	6. 最初と最後の頁 045103 ~ 045103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5009669	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taira Kunihiko, Nakao Hiroya	4. 巻 846
2. 論文標題 Phase-response analysis of synchronization for periodic flows	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 R2(1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2018.327	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ouchi Masanori, Nakao Hiroya	4. 巻 10
2. 論文標題 Modeling cochlear two-tone suppression using a system of nonlinear oscillators with feed-forward coupling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 90 ~ 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.10.90	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shirasaka Sho, Watanabe Nobuhiro, Kawamura Yoji, Nakao Hiroya	4. 巻 96
2. 論文標題 Optimizing stability of mutual synchronization between a pair of limit-cycle oscillators with weak cross coupling	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 012223(1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.96.012223	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawamura Yoji, Shirasaka Sho, Yanagita Tatsuo, Nakao Hiroya	4. 巻 96
2. 論文標題 Optimizing mutual synchronization of rhythmic spatiotemporal patterns in reaction-diffusion systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 012224(1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.96.012224	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hata Shigefumi, Nakao Hiroya	4. 巻 7
2. 論文標題 Localization of Laplacian eigenvectors on random networks	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1121(1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-01010-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -



1. 著者名 Kawamura Yoji, Tsubaki Remi	4. 巻 97
2. 論文標題 Phase reduction approach to elastohydrodynamic synchronization of beating flagella	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 022212(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.97.022212	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakao Hiroya, Mezic Igor	4. 巻 30
2. 論文標題 Spectral analysis of the Koopman operator for partial differential equations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	6. 最初と最後の頁 113131 ~ 113131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0011470	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kotani Kiyoshi, Ogawa Yutaro, Shirasaka Sho, Akao Akihiko, Jimbo Yasuhiko, Nakao Hiroya	4. 巻 2
2. 論文標題 Nonlinear phase-amplitude reduction of delay-induced oscillations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 1 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakao Hiroya, Yamaguchi Katsunori, Katayama Shingo, Yanagita Tatsuo	4. 巻 31
2. 論文標題 Sparse optimization of mutual synchronization in collectively oscillating networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	6. 最初と最後の頁 063113 ~ 063113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0049091	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taga Keisuke, Kato Yuzuru, Kawahara Yoshinobu, Yamazaki Yoshihiro, Nakao Hiroya	4. 巻 31
2. 論文標題 Koopman spectral analysis of elementary cellular automata	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	6. 最初と最後の頁 103121 ~ 103121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0059202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takata Shohei, Kato Yuzuru, Nakao Hiroya	4. 巻 31
2. 論文標題 Fast optimal entrainment of limit-cycle oscillators by strong periodic inputs via phase-amplitude reduction and Floquet theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	6. 最初と最後の頁 093124 ~ 093124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0054603	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Loe Innocentio A., Nakao Hiroya, Jimbo Yasuhiko, Kotani Kiyoshi	4. 巻 911
2. 論文標題 Phase-reduction for synchronization of oscillating flow by perturbation on surrounding structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2020.1110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kato Yuzuru, Zlotnik Anatoly, Li Jr-Shin, Nakao Hiroya	4. 巻 105
2. 論文標題 Optimization of periodic input waveforms for global entrainment of weakly forced limit-cycle oscillators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nonlinear Dynamics	6. 最初と最後の頁 2247 ~ 2263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11071-021-06703-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kato Yuzuru, Zhu Jinjie, Kurebayashi Wataru, Nakao Hiroya	4. 巻 9
2. 論文標題 Asymptotic Phase and Amplitude for Classical and Semiclassical Stochastic Oscillators via Koopman Operator Theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mathematics	6. 最初と最後の頁 2188 ~ 2188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/math9182188	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kato Yuzuru, Nakao Hiroya	4. 巻 23
2. 論文標題 Quantum coherence resonance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 043018 ~ 043018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/abf1d7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kato Yuzuru, Nakao Hiroya	4. 巻 23
2. 論文標題 Enhancement of quantum synchronization via continuous measurement and feedback control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 013007 ~ 013007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/abd7be	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kato Yuzuru, Nakao Hiroya	4. 巻 3
2. 論文標題 Instantaneous phase synchronization of two decoupled quantum limit-cycle oscillators induced by conditional photon detection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.013085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Zhu Jinjie, Nakao Hiroya	4. 巻 3
2. 論文標題 Stochastic periodic orbits in fast-slow systems with self-induced stochastic resonance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.033070	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakao Hiroya	4. 巻 1
2. 論文標題 Phase and Amplitude Description of Complex Oscillatory Patterns in Reaction-Diffusion Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Biological Oscillators, Understanding Complex Systems	6. 最初と最後の頁 11~27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-59805-1_2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kato Yuzuru, Nakao Hiroya	4. 巻 32
2. 論文標題 A definition of the asymptotic phase for quantum nonlinear oscillators from the Koopman operator viewpoint	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	6. 最初と最後の頁 063133~063133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0088559	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhu Jinjie, Nakao Hiroya	4. 巻 16
2. 論文標題 Noise-tuned bursting in a Hedgehog burster	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Computational Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fncom.2022.970643	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Namura Norihisa, Takata Shohei, Yamaguchi Katsunori, Kobayashi Ryota, Nakao Hiroya	4. 巻 106
2. 論文標題 Estimating asymptotic phase and amplitude functions of limit-cycle oscillators from time series data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.106.014204	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kato Yuzuru, Nakao Hiroya	4. 巻 12
2. 論文標題 Turing instability in quantum activator-inhibitor systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1~17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-19010-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 Yuzuru Kato, Hiroya Nakao
2. 発表標題 Data-driven spectral analysis of quantum spin networks with limited access using Hankel dynamic mode decomposition
3. 学会等名 CDC, Cancun, Mexico, December, 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keisuke Taga, Hiroya Nakao
2. 発表標題 Dynamic Mode Decomposition for Elementary Cellular Automata
3. 学会等名 NOLTA2022 (Online), Dec 12, 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuzuru Kato, Hiroya Nakao
2. 発表標題 Asymptotic Phase for Stochastic and Quantum Nonlinear Oscillators Based on Koopman Operator Theory
3. 学会等名 NOLTA2022 (Online), Dec 12, 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Norihisa Namura, Tsubasa Ishii, and Hiroya Nakao,
2. 発表標題 Designing Two-Dimensional Limit-Cycle Oscillators with Prescribed Orbits and Phase Response Characteristics
3. 学会等名 2022 SICE Annual Conference (SICE), Kumamoto, Japan, Sept 6-9, 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shohei Takata, Yuzuru Kato, Hiroya Nakao
2. 発表標題 Reconstruction of Asymptotic Phase and Amplitude Functions from Time Series of Stochastic Oscillatory Systems by Extended Dynamic Mode Decomposition
3. 学会等名 2022 SICE Annual Conference (SICE), Kumamoto, Japan, Sept 6-9, 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuzuru Kato and Hiroya Nakao
2. 発表標題 Optimization of Periodic Input Waveforms for Phase Distribution Control of Weakly Forced Limit-Cycle Oscillators
3. 学会等名 2021 SICE Annual Conference (SICE), Tokyo, Japan, Sept. 8-10, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuzuru Kato and Hiroya Nakao
2. 発表標題 Continuous Measurement and Feedback Control for Enhancement of Quantum Synchronization
3. 学会等名 Proceedings of the 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Jeju Island, Republic of Korea (Virtual) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroya Nakao
2. 発表標題 Reduced Dynamical Description of Collective Oscillations in Populations of Coupled Dynamical Elements
3. 学会等名 IFAC 2020 Berlin pre-conference workshop "Analysis, Control, and Learning of Dynamic Ensemble and Population Systems" (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuzuru Kato and Hiroya Nakao
2. 発表標題 Optimal Waveform for Fast Entrainment of Weakly Forced Quantum Nonlinear Dissipative Oscillators
3. 学会等名 58th IEEE Conference on Decision and Control, Nice, France, December 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroya Nakao
2. 発表標題 Collective oscillations and synchronization in networks of coupled dynamical elements
3. 学会等名 Workshop on dynamical processes on networks, University of Namur, Namur, Belgium, September 5, 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroya Nakao
2. 発表標題 Phase-amplitude reduction of rhythmic patterns in reaction-diffusion systems
3. 学会等名 Conference on Applications of Dynamical Systems (SIAMDS19), Snowbird Ski and Summer Resort, Snowbird, Utah, USA, May 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤 謙, 中尾裕也
2. 発表標題 時間連続測定を用いた量子同期現象における振動子の位相コヒーレンスの向上
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 岐阜大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤 謙, 中尾裕也
2. 発表標題 半古典位相縮約理論による量子同期現象の解析
3. 学会等名 日本応用数理学会 2019年度 年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroya Nakao
2. 発表標題 Phase-Amplitude Reduction, Synchronization and Control of Collective Oscillations in Networks of Dynamical Systems
3. 学会等名 2018 Gordon Research Conference on Oscillations and Dynamic Instabilities in Chemical Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Hiroya Nakao and I. Mezic
2. 発表標題 Koopman eigenfunctionals and phase-amplitude reduction of rhythmic reaction-diffusion systems
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Nakao
2. 発表標題 Phase and amplitude description of complex oscillatory systems
3. 学会等名 Physics of Biological Oscillators: New Insights into Non- Equilibrium and Non-Autonomous Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Nakao
2. 発表標題 Koopman eigenfunctionals and reduced description of partial differential equations
3. 学会等名 IPAM workshop on Operator Theoretic Methods in Dynamic Data Analysis and Control, Institute for pure and applied mathematics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigefumi Hata and Hiroya Nakao
2. 発表標題 Turing Patterns in Reaction-diffusion Systems on Random Networks
3. 学会等名 SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (SIAMDS17) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Wataru Kurebayashi, Sho Shirasaka and Hiroya Nakao
2. 発表標題 Optimal Parameter Selection for Extended Dynamic Mode Decomposition
3. 学会等名 SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (SIAMDS17) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sho Shirasaka, Wataru Kurebayashi and Hiroya Nakao
2. 発表標題 Isostable Reduction for Stable Limit-Cycling Systems
3. 学会等名 SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (SIAMDS17) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Wataru Kurebayashi, Sho Shirasaka and Hiroya Nakao
2. 発表標題 Optimal Model Selection for Estimating Stochastic Koopman Modes
3. 学会等名 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroya Nakao
2. 発表標題 Phase Reduction and Synchronization of Rhythmic Spatiotemporal Patterns
3. 学会等名 Conference and Tutorial on Analysis and Modelling of Complex Oscillatory Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 中尾裕也, 長谷川幹雄, 合原一幸	4. 発行年 2018年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 262
3. 書名 (情報ネットワーク科学シリーズ 4) ネットワーク・カオス - 非線形ダイナミクス, 複雑系と情報ネットワーク -	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Hiroya Nakao Papers  <a href="http://www.k.mei.titech.ac.jp/members_personal/nakao/papers.html">http://www.k.mei.titech.ac.jp/members_personal/nakao/papers.html</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小林 亮太 (Kobayashi Ryota) (70549237)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授  (12601)	
研究分担者	秦 重史 (Hata Shigefumi) (70735927)	鹿児島大学・理工学域理学系・准教授  (17701)	
研究分担者	紅林 亘 (Kurebayashi Wataru) (70761211)	弘前大学・教育推進機構・助教  (11101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	河村 洋史  (Kawamura Yoji)  (90455494)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 (数理科学・先端技術研究開発センター)・グループリーダー    (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 Workshop on dynamical processes on networks	開催年 2018年～2018年
---	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ベルギー	University of Namur			
チェコ	Czech Academy of Sciences			
中国	Nanjing Univ. of Science and Technology			
米国	Los Alamos National Laboratory	Washington University in St. Louis		
米国	University of California, Santa Barbara			
米国	Florida State University			