

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 4 月 24 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17769

研究課題名(和文) 進行振動解に対する位相縮約理論の構築による時空間的な同期現象の解明

研究課題名(英文) Elucidation of spatiotemporal synchronization phenomena by construction of phase reduction theory for traveling and oscillating solutions

研究代表者

河村 洋史 (KAWAMURA, Yoji)

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)・グループリーダー代理

研究者番号：90455494

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)：偏微分方程式の進行振動解に対する位相縮約法を定式化した。具体例として、非圧縮性の2次元流体方程式系における進行振動対流を考えた。まず、各空間点・各時刻に加えられた弱い摂動に対する進行振動対流の空間的・時間的な位相応答を定量化する位相感受関数を導出した。ここで、流体の非圧縮性を反映して、流体速度場だけでなくその位相感受関数もソレノイダル条件を満たすことを解明した。加えて、定式化した位相縮約法を用いて、熱的に相互作用する一対の進行振動対流の間の空間的・時間的な位相同期ダイナミクスを解析した。そして、弱く熱的に相互作用する場合、空間的・時間的に同相同期した解が大域的に安定であることを解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大気大循環の模型実験系として知られる回転水槽実験系は進行振動対流パターンを示す。近年、一対の回転水槽を熱的に結合させた系において、一対の進行振動対流の間の空間的・時間的な位相同期現象が観察されている。回転水槽実験系の進行振動対流(進行振動解)は、「空間に関する連続並進対称性の自発的な破れ」と「時間に関する連続並進対称性の自発的な破れ」という2つの位相を持つリミット・トーラス解である。本研究成果は、回転水槽実験系の進行振動対流に対する位相縮約法を定式化し、結合回転水槽における進行振動対流の空間的・時間的な位相同期ダイナミクスを位相縮約により解析するための基礎となる。

研究成果の概要(英文)：We formulated a theory for the phase reduction of traveling and oscillating solutions to partial differential equations. As a typical example, we considered traveling and oscillating thermal convection in a two-dimensional incompressible Navier-Stokes flow system. First, we derived phase sensitivity functions that quantify the spatiotemporal phase responses of the thermal convection under weak perturbations applied at each spatial point and at each time. Here, we demonstrated that the phase sensitivity functions of fluid velocity fields are divergence-free for incompressible Navier-Stokes flow systems. Further, we analyzed the spatiotemporal phase synchronization between a pair of thermally coupled systems exhibiting the thermal convection. Finally, the phase reduction theory enabled us to prove the global stability of the spatial and temporal in-phase synchronized state under the weak thermal coupling.

研究分野：非線形動力学

キーワード：数理科学 同期現象 振動現象 位相縮約 位相記述 振動対流 集団振動 進行振動解

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自然界にはさまざまな振動現象および同期現象が存在する。典型的には、各振動性素子はリミット・サイクル解を持つ常微分方程式によって記述される。そのような各リミット・サイクル振動子のダイナミクスを、位相と呼ばれるスカラー変数のみで記述する位相縮約法が、結合振動子系における同期現象の解析に成功裏に適用されている。一方、自然界には偏微分方程式のリミット・サイクル解で記述される振動現象やそれらの同期現象も存在する。そこで研究代表者はこれまでに、次のような偏微分方程式のリミット・サイクル解に対して位相縮約法を定式化してきた：ノイズを受けた大域結合振動子系の集団振動を記述する非線形 Fokker-Planck 方程式、通常の Hele-Shaw セルにおける振動対流を記述する流体方程式、化学系や生物系のリズムカルな時空間パターンを記述する反応拡散方程式。しかし、偏微分方程式は空間連続並進対称性を持つ場合も多く、そのような系におけるリズム現象はリミット・サイクル解では記述できない。例えば、回転円柱や回転球は連続回転対称性(回転方向への連続並進対称性)を持つ。そのため、このような系におけるリズムカルな時空間パターンの形成は2つの位相モード(「空間の位相」と「時間の位相」)を生じ、このようなリズム現象はリミット・トラス解によって記述される。最近、大気大循環の模型実験系である回転水槽実験系を用いて、2つの位相を持つ進行振動対流の同期現象が調べられている。それゆえ、偏微分方程式のリミット・トラス解に対する位相縮約法の定式化が必要とされていた。

2. 研究の目的

結合させた2つの進行振動対流の間の位相同期現象が、大気大循環の模型実験系である回転水槽実験系において観察されている。この系には回転方向に連続並進対称性が存在し、この系における進行振動対流(進行振動解)は「空間の連続並進対称性の自発的な破れ」と「時間の連続並進対称性の自発的な破れ」という2つの位相を持つリミット・トラス解である。本研究の目的は、進行振動解に対する位相縮約理論を構築することにより、時空間的な同期現象のメカニズムを解明することであった。

3. 研究の方法

研究代表者は、本研究を開始するより以前に、シリンダー形状の Hele-Shaw セルにおける振動対流の位相縮約法を定式化していた。この手法を一般化することにより、回転水槽実験系の進行振動対流に対する位相縮約法の定式化を試みた。回転水槽実験系における進行振動対流の位相縮約法を定式化する上で問題となるのは、回転水槽実験系を記述する方程式が非圧縮性の3次元回転流体方程式であり、拘束条件を持つ偏微分方程式であることである。つまり、回転水槽実験系の進行振動対流に位相縮約法を適用するためには、拘束条件を持つ偏微分方程式のリミット・トラス解に対する位相縮約法を定式化する必要があった。そこで、拘束条件を持つ偏微分方程式のシンプルな典型例として、Boussinesq 近似した熱対流方程式の2次元的な流れを考えた。特に、3次元系を見据えて、流線関数を導入せずに、速度・圧力変数で表示された非圧縮性の2次元流体方程式系を考えた。非圧縮条件を適切に処理することにより、速度・圧力変数で表示された進行振動対流の位相縮約法の定式化を試みた。そして、定式化した位相縮約法の応用として、熱的に相互作用する一対の進行振動対流の間の空間的・時間的な位相同期ダイナミクスの解析を試みた。

4. 研究成果

本研究の成果は次の通りである。第一に、拘束条件を持つ偏微分方程式の進行振動解に対する位相縮約法を定式化して、熱的に相互作用する一対の進行振動対流の間の時空間的な位相同期ダイナミクスを解析した(引用文献)。まず、各空間点・各時刻に加えられた弱い摂動に対する進行振動対流の空間的・時間的な位相応答を定量化する位相感受関数を導出した(図1参照)。ここで、流体の非圧縮性を反映して、流体速度場だけでなくその位相感受関数もソレノイダル条件を満たすことを解明した。加えて、定式化した位相縮約法を用いて、熱的に相互作用する一対の進行振動対流の間の空間的・時間的な位相同期ダイナミクスを解析した。そして、弱く熱的に相互作用する場合、空間的・時間的に同相同期した解が大域的に安定であることを解明した。ここにおいて、進行振動解は「空間の位相」と「時間の位相」という2つの位相を持つリミット・トラス解によって記述される(図2参照)。ゆえに、進行振動解に対する位相縮約法は従来の位相縮約法の大幅な一般化である。また、進行振動解の時空間的な同期現象に関する理論も、従来の位相同期概念の大幅な一般化である。そして、本研究成果は、回転水槽実験系の進行振動対流に対する位相縮約法を定式化し、結合回転水槽における進行振動対流の空間的・時間的な位相同期ダイナミクスを位相縮約により解析するための基礎となる。

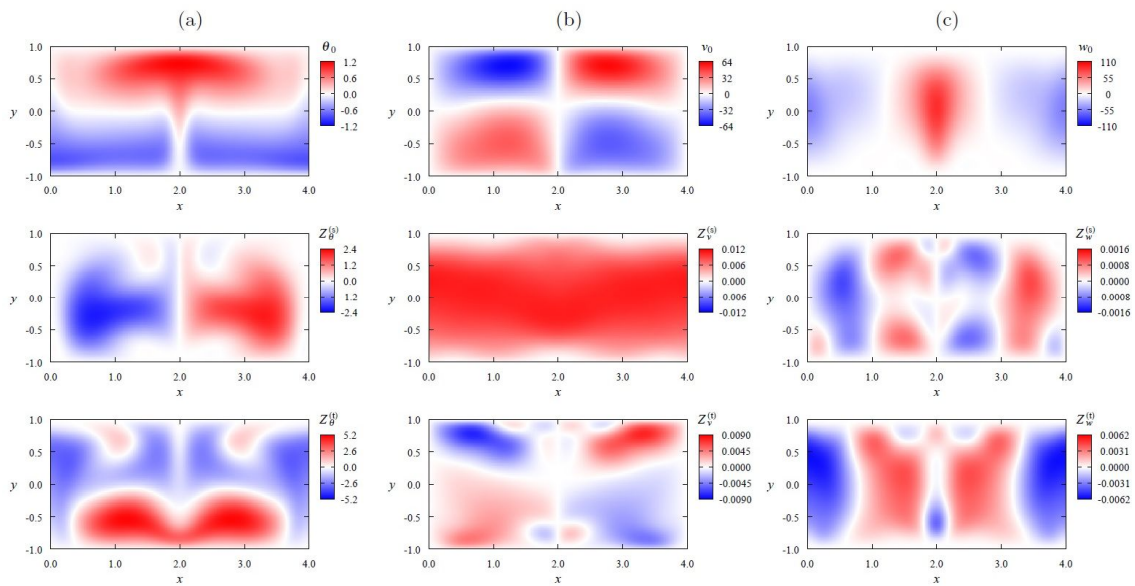
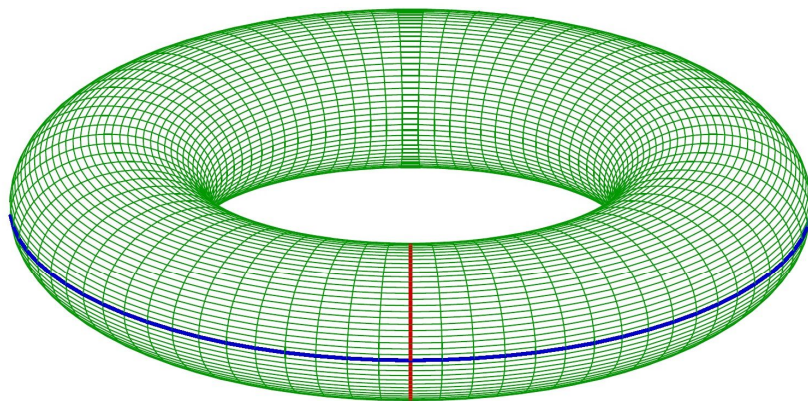


図 1：進行振動対流解（リミット・トーラス解）の各変数と対応する 2 つの位相感受性 (Z_s , Z_t) のスナップショット（引用文献 参照）。2 つの位相感受性は各空間点に加えられた弱い摂動に対する進行振動対流の空間的・時間的な位相応答を定量化する。(a) 温度場の対流成分。(b) 速度場の水平成分。(c) 速度場の鉛直成分。

Phase reduction of limit-torus

$$\mathbf{X}(x, y, t) = \mathbf{X}_0(x - \Phi(t), y, \Theta(t))$$



$$\mathbf{X}(x, y, t) \Rightarrow \Phi(t), \Theta(t)$$

図 2：偏微分方程式の進行振動解に対する位相縮約法の模式図（引用文献 参照）。進行振動解は「空間の位相」と「時間の位相」という 2 つの位相を持つリミット・トーラス解によって記述される。

第二に、完全位相ロック状態にある振動子ネットワークの結合系におけるマクロな位相同期ダイナミクスを集団レベルでの位相縮約法により解析し、個々の振動子はすべて同相結合している状況においても集団間では逆相同期に成り得ることを理論だけでなく電気化学振動子を用いた実験でも示した(引用文献)。本研究成果は、アメリカ合衆国のセントルイス大学にある同期分野において世界をリードする実験グループとの共同研究の成果である。

第三に、強く相互作用する振動子ネットワークに対する集団レベルでの位相縮約法を定式化した(引用文献)。本手法は、振動子ネットワークの集団ダイナミクスを集団位相と呼ばれる一自由度で記述することを可能にする。加えて、本手法は、振動子ネットワークが集団振動している限り、相互作用が強くても適用可能である。本研究成果は、第二の研究成果および第八の研究成果において用いた集団レベルでの位相縮約法の一般化である。

第四に、鞭毛の振動運動を偏微分方程式のリミット・サイクル解として記述する数理モデルに対する位相縮約法を定式化して、流体力学的に相互作用する一対の鞭毛の間の位相同期ダイナミクスを解析した(引用文献)。特に、鞭毛の同期現象には鞭毛の根元付近が重要であることを数理的に示した(図3参照)。なお、本研究成果を一般化することで、海綿動物の襟細胞室における鞭毛集団を記述する位相方程式が導出可能であり、その導出された位相方程式は、海綿動物の水輸送機構を数理的に理解する上で本質的な貢献をすると期待される。加えて、本研究成果は、ゾウリムシなどで観察されるメタクロナル波の研究にも応用可能であり、大きな波及効果が期待できる。

第五に、偏微分方程式のリミット・サイクル解に対する位相縮約法を用いて、振動対流など偏微分方程式のリミット・サイクル解として記述されるリズム現象の相互同期に対する最適化手法を開発した(引用文献)。位相縮約法およびそれに基づく最適化手法は、振動現象・同期現象に関係している限り、適用対象には制限がなく、大きな波及効果が期待できる。実際、研究代表者自身らにより、振動対流を記述する流体方程式に加えて、化学系や生物系のリズミックな時空間パターンを記述する反応拡散方程式にも適用した。

第六に、常微分方程式のリミット・サイクル解に対する位相縮約法を用いて、常微分方程式のリミット・サイクル解として記述されるリズム現象の相互同期に対する最適化手法を開発した(引用文献)。位相縮約法およびそれに基づく最適化手法は、振動現象・同期現象に関係している限り、適用対象には制限がなく、大きな波及効果が期待できる。第五の研究成果は、本研究成果を偏微分方程式に一般化したものである。

第七に、ノイズを受けた強く相互作用する平均場結合振動子系に対する集団レベルでの位相縮約法を定式化した(引用文献)。まず、ノイズを受けた平均場結合振動子系を記述するLangevin型の方程式を非線形Fokker-Planck方程式に変換した。そして、非線形Fokker-Planck方程式のリミット・サイクル解に対する位相縮約法を定式化した。本手法は、ノイズを受けた平均場結合振動子系の集団ダイナミクスを集団位相と呼ばれる一自由度で記述することを可能にする。加えて、本手法は、振動子系が集団振動している限り、ノイズや相互作用が強くても適用可能である。本研究成果は、第三の研究成果と相補的な関係にある。

第八に、振動子ネットワークの共通ノイズ同期に対する最適化手法を開発した(引用文献)。まず、完全位相ロック状態にある振動子ネットワークを複数用意し、異なるネットワーク間には相互作用が存在しない状況において、各ネットワークに共通のノイズを加えると、各ネットワークの集団振動が互いに位相同期することを、集団レベルの位相縮約を用いて解析した。次に、共通ノイズ同期状態への緩和時間を特徴付けるLyapunov指数を導出し、この共通ノイズ同期に最適なノイズの重み付け方も理論的に決定した。そして、不均一結合系・大域結合系・局所結合系を用いて理論を例証し、その理論値を直接数値計算により検証した。

最後に、同期現象の数理科学に関する共著書を改訂した(引用文献)。そして、「蔵本由紀・河村洋史, 同期現象の科学: 位相記述によるアプローチ(京都大学学術出版会, 2017)」が「蔵本由紀・河村洋史, 同期現象の数理: 位相記述によるアプローチ(培風館, 2010)」の改訂版として出版された。

以上のように、本研究の主要な成果である、拘束条件を持つ偏微分方程式のリミット・トーラス解に対する位相縮約法の定式化および熱的に相互作用する一対の進行振動対流の間の時空間的な位相同期ダイナミクスの解析は、当初の計画を達成するものである(引用文献)。さらに、位相縮約法の様々な拡張・応用も研究することで、当初の計画以上の成果を得ることができた(引用文献 ~)。

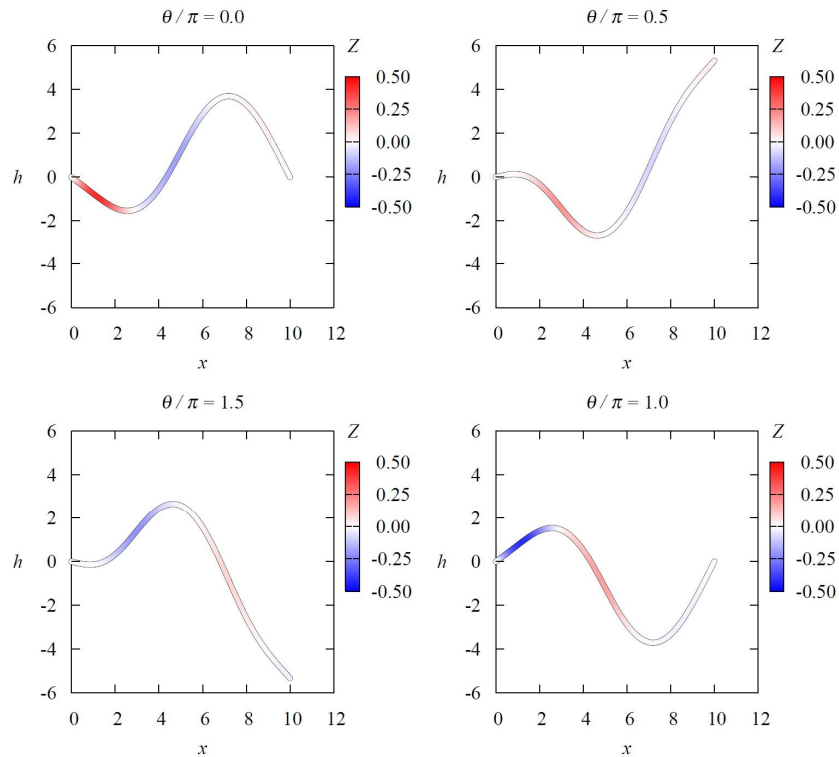


図3：鞭毛の振動運動の波形(h)と位相感受性(Z)のスナップショット(引用文献 参照)。位相感受性は各点・各時刻に加えられた弱い摂動に対する鞭毛の位相応答を定量化する。鞭毛の位相感受性の絶対値は鞭毛の左側の方が右側よりも大きい。つまり鞭毛の同期現象には鞭毛の根元付近が重要である。

< 引用文献 >

- Yoji Kawamura, Phase reduction of limit-torus solutions to partial differential algebraic equations, *Physical Review Research* **1**, 033130 (2019) [23 pages].
- Michael Sebek, Yoji Kawamura, Ashley M. Nott, and Istvan Z. Kiss, Anti-phase collective synchronization with intrinsic in-phase coupling of two groups of electrochemical oscillators, *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **377**, 20190095 (2019) [15 pages].
- Hiroya Nakao, Sho Yasui, Masashi Ota, Kensuke Arai, and Yoji Kawamura, Phase reduction and synchronization of a network of coupled dynamical elements exhibiting collective oscillations, *Chaos* **28**, 045103 (2018) [10 pages].
- Yoji Kawamura and Remi Tsubaki, Phase reduction approach to elasto-hydrodynamic synchronization of beating flagella, *Physical Review E* **97**, 022212 (2018) [10 pages].
- Yoji Kawamura, Sho Shirasaka, Tatsuo Yanagita, and Hiroya Nakao, Optimizing mutual synchronization of rhythmic spatiotemporal patterns in reaction-diffusion systems, *Physical Review E* **96**, 012224 (2017) [12 pages].
- Sho Shirasaka, Nobuhiro Watanabe, Yoji Kawamura, and Hiroya Nakao, Optimizing stability of mutual synchronization between a pair of limit-cycle oscillators with weak cross coupling, *Physical Review E* **96**, 012223 (2017) [12 pages].
- Yoji Kawamura, Collective phase reduction of globally coupled noisy dynamical elements, *Physical Review E* **95**, 032225 (2017) [19 pages].
- Yoji Kawamura and Hiroya Nakao, Optimization of noise-induced synchronization of oscillator networks, *Physical Review E* **94**, 032201 (2016) [14 pages].
- 蔵本由紀・河村洋史, 京都大学学術出版会, 同期現象の科学: 位相記述によるアプローチ, 2017, 362.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Michael Sebek, Yoji Kawamura, Ashley M. Nott, and Istvan Z. Kiss	4. 巻 377
2. 論文標題 Anti-phase collective synchronization with intrinsic in-phase coupling of two groups of electrochemical oscillators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsta.2019.0095	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 Yoji Kawamura	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 -
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 Yoji Kawamura	4. 巻 119
2. 論文標題 Phase reduction approach to spatiotemporal synchronization of traveling and oscillating convection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Technical Report	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Yoji Kawamura and Remi Tsubaki	4. 巻 118
2. 論文標題 Phase reduction approach to hydrodynamic synchronization of beating flagella	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Technical Report	6. 最初と最後の頁 41-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Sho Shirasaka, Nobuhiro Watanabe, Yoji Kawamura, and Hiroya Nakao	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 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoji Kawamura, Sho Shirasaka, Tatsuo Yanagita, and Hiroya Nakao	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 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoji Kawamura and Remi Tsubaki	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 -
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 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 Hiroya Nakao, Sho Yasui, Masashi Ota, Kensuke Arai, and Yoji Kawamura	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	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoji Kawamura and Hiroya Nakao	4. 巻 117
2. 論文標題 Mutual synchronization of oscillatory convection and its optimization	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEICE Technical Report	6. 最初と最後の頁 29-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Yoji Kawamura and Hiroya Nakao	4. 巻 94
2. 論文標題 Optimization of noise-induced synchronization of oscillator networks	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.94.032201	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 Yoji Kawamura	4. 巻 95
2. 論文標題 Collective phase reduction of globally coupled noisy dynamical elements	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.95.032225	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19件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 河村洋史
2. 発表標題 偏微分代数方程式におけるリミット・トラス解の位相縮約法
3. 学会等名 RIMS共同研究(公開型)「力学系：新たな理論と応用に向けて」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河村洋史
2. 発表標題 偏微分方程式のリミット・トーラス解に対する位相縮約法
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 河村洋史
2. 発表標題 非圧縮性流体方程式における進行振動対流解の位相縮約法
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河村洋史
2. 発表標題 非圧縮性流体方程式における進行振動対流解の位相記述法
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河村洋史
2. 発表標題 進行振動対流の時空間的な同期現象に対する位相縮約によるアプローチ
3. 学会等名 2019年度第3回複雑コミュニケーションサイエンス(CCS)研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河村洋史
2. 発表標題 進行振動対流の時空間的な同期現象に対する位相縮約によるアプローチ
3. 学会等名 京都大学 非線形科学とその周辺セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河村洋史, Ettore Barbieri
2. 発表標題 非局所結合位相振動子系における安定な平面波
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河村洋史, 椿玲未
2. 発表標題 鞭毛の流体力学的同期現象に対する位相縮約によるアプローチ
3. 学会等名 2018年度第1回複雑コミュニケーションサイエンス(CCS)研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河村洋史, 椿玲未
2. 発表標題 鞭毛の流体力学的同期現象に対する位相縮約によるアプローチ
3. 学会等名 2018年度RIMS研究集会「生物流体力学の展望」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河村洋史
2. 発表標題 鞭毛の同期現象に対する位相縮約によるアプローチ
3. 学会等名 研究集会「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」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河村洋史
2. 発表標題 鞭毛の同期現象に対する位相縮約によるアプローチ
3. 学会等名 奈良女子大学 非線形・情報統計力学研究室セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河村洋史
2. 発表標題 鞭毛の同期現象に対する位相縮約によるアプローチ
3. 学会等名 千葉大学 生命情報物理学研究室セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河村洋史
2. 発表標題 鞭毛の同期現象に対する位相縮約によるアプローチ
3. 学会等名 兵庫県立大学大学院シミュレーション学研究科セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河村洋史, 椿玲未
2. 発表標題 鞭毛の同期現象に対する位相記述によるアプローチ
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 河村洋史, 椿玲未
2. 発表標題 鞭毛の同期現象に対する位相縮約によるアプローチ
3. 学会等名 日本応用数理学会 2017年度年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 河村洋史, 椿玲未
2. 発表標題 鞭毛の振動運動の位相縮約とその応用
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 河村洋史, 中尾裕也
2. 発表標題 振動対流の相互同期とその最適化
3. 学会等名 2017年度第3回複雑コミュニケーションサイエンス研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 河村洋史, 中尾裕也
2. 発表標題 振動対流の相互同期の最適化
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河村洋史
2. 発表標題 振動対流の同期現象とその最適化: 位相縮約によるアプローチ
3. 学会等名 日本応用数理学会 2018年研究部会連合発表会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 蔵本由紀・河村洋史	4. 発行年 2017年
2. 出版社 京都大学学術出版会	5. 総ページ数 362
3. 書名 同期現象の科学: 位相記述によるアプローチ	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>JAMSTEC MAT (Yoji Kawamura) http://www.jamstec.go.jp/mat/j/members/yoji_kawamura/ JAMSTEC Researchers Database (Yoji Kawamura) http://www.jamstec.go.jp/souran/html/Yoji_Kawamura_ea617-j.html ORCID (Yoji Kawamura) https://orcid.org/0000-0002-5931-5512 Publons (Yoji Kawamura) https://publons.com/researcher/2541059/yoji-kawamura/ Scopus (Yoji Kawamura) https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7401574852 Mendeley profile (Yoji Kawamura) https://www.mendeley.com/profiles/yoji-kawamura/ Microsoft Academic (Yoji Kawamura) https://academic.microsoft.com/#/profile/YojiKawamura ResearchGate (Yoji Kawamura) https://www.researchgate.net/profile/Yoji_Kawamura Google Scholar Citations (Yoji Kawamura) https://scholar.google.com/citations?user=GAZsla0AAAAJ KAKEN (Yoji Kawamura) https://nrid.nii.ac.jp/nrid/1000090455494/ researchmap (Yoji Kawamura) https://researchmap.jp/read0201481/ 『同期現象の科学』参考文献 https://sites.google.com/site/scienceofsynchronization/</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
--	---------------------------	-----------------------	----