

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03671

研究課題名（和文）位相自由度をもつはばたき翼の摂動応答特性の解明

研究課題名（英文）Phase-responses of flapping wing with phase degrees of freedom

研究代表者

飯間 信（Iima, Makoto）

広島大学・統合生命科学研究科（理）・教授

研究者番号：90312412

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：位相自由度をもつ飛翔・遊泳モデルを位相縮約法により解析するために、解析手法を改善し、また幾つかの数値モデルの解析を行った。流体系は大自由度であるため、位相縮約法を単純に適用すると計算時間が膨大となり、現実的な時間で解析が難しい。アジョイント方程式を変形することで方程式の時間発展アルゴリズムのみを使った手法を提案した。この手法を円柱後流のカルマン渦の解析、平板翼の解析に適用し、良好な結果を得た。更に飛翔・遊泳モデルとして、翼駆動系と流体系が結合したモデルを開発し、その系を解析した。単独翼の解析は上記解析手法を用いて解析し、複数翼の干渉については通常の時間発展計算により解析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果はリミットサイクル振動周辺の運動を解析する強力な方法である位相縮約法を流体力学、特に生物流体力学に適用することを目指すものである。本研究では物体後流や位相自由度を持つはばたき翼へ本方法を適用し、空間のどこへの摂動が位相変化に効いているかといった問題に答えることに成功した。位相縮約法では系の詳細に寄らずリミットサイクル振動周辺の運動を普遍的な視点から解析できるため、流体力学分野への適用方法が発展すれば、様々な応用分野での活用が期待出来るものである。

研究成果の概要（英文）：In order to analyze flight and swimming models with phase degrees of freedom by the phase reduction techniques, we improved the numerical method and applied the methods to several systems. Since fluid systems have large degrees of freedom, the simple application of the phase-reduction techniques costs a large amount of computation time, making it difficult to analyze in a realistic amount of time. First, we proposed a method using only the time evolution algorithm of the equation obtained by modifying the adjoint equation. These methods were applied to the analysis of the Karman vortex street and the flow past a flat plate to obtain reasonable results. Furthermore, we developed a model in which the wing driving system and the fluid system are coupled, and analyzed this system. The single wing was analyzed using the above analysis method, and the interaction between multiple wings was analyzed using time evolution analysis.

研究分野：流体力学

キーワード：生物流体力学 位相縮約

1. 研究開始当初の背景

生物の飛翔・遊泳機構は非定常流体運動を伴う理論上重要な問題であり、同時に小型飛翔体の開発等に繋がる応用上重要な問題でもある。本課題では飛翔・遊泳の問題のうち、特に生物の翼やヒレの駆動が及ぼす影響を問題とする。翼やヒレは筋肉などにより駆動され、周期運動を生み出すことにより飛翔・遊泳を行う。この際絶対時間は運動に関係しないため、突風などの外部摂動が与えられた場合、周期運動へ回復した時の収束先は、必ずしも無摂動状態が継続した場合の状態である必要はない(位相自由度)。しかし従来の大半の飛翔モデルはこうした位相自由度を持たない。位相自由度を考慮することで摂動への応答が変化し、安定性や操作性の向上が期待されるが、そのような特性は未だ解明されていない。こうした特性を位相縮約法を用いて解明するためには位相自由度を持つ駆動機構と流体運動が連成された系を解析する必要があるが、そのような手法は知られておらず、開発が期待されていた。

2. 研究の目的

本課題ではこれまで十分考慮されてこなかった駆動機構のモデル化に焦点を当て、位相自由度が生物の飛翔・遊泳の摂動応答特性に与える影響、具体的には渦を使った飛翔・遊泳モデルの駆動機構に位相自由度を導入した場合に飛翔・遊泳の安定性および制御に与える影響を数理および流体力学の両観点から明らかとすることを目的とする。同時に生物流体力学の問題に適応可能な位相縮約の手法をより発展させることも併せて目的とする。本研究は、非平衡系で用いられる位相縮約法を、位相自由度のある生物飛翔問題へ初めて応用するものであり、この分野へ全く新しい手法をもたらすという点で、小型飛翔体開発等の応用面だけでなく、生物流体力学の基礎面へも貢献する。

3. 研究の方法

数値解析による直接数値計算を行い、位相自由度をもつはばたきモデル周りの流れを計算し、生物流体力学の問題に適用可能な位相縮約法を適用する。解析対象としては、位相自由度をもつはばたきモデルの他、解析の際の基礎資料として平板あるいは円柱周りの流れに対する位相縮約法の解析や引き込み挙動をしらべ、直接数値計算と理論の比較を行う。本課題では流体計算・位相縮約の数値計算負荷と、剥離渦運動の本質は2次元でも十分解析可能であることを考慮して、2次元系を取り扱う。

4. 研究成果

まず、位相自由度をもつ飛翔・遊泳モデルを位相縮約法により解析するための理論・数値計算の整備を行った。流体系は大自由度であるため、位相縮約を直接法あるいはアジョイント法で計算すると計算時間が膨大となり現実的な時間で解析が難しい。そこで、まず解析手法の開発を行った。アジョイント方程式を変形することにより、方程式の時間発展アルゴリズムのみを使って位相感受関数を計算する手法を開発し、実際に円柱周りの位相感受関数を計算して直接法と比較した。物体周りの位相感受関数の情報はこれまで知られていなかったもので、円柱後方の渦構造の間に入り組むような強い応答領域があるほか、上流域にも強い応答領域が見られることがわかった。この領域への摂動は一様流の速度を変更すると解釈すると位相応答を説明できる。

次に、カルマン渦周囲の位相感受関数の特徴が、他のパラメータでどう変更されるかを、レイノルズ数および円柱の回転角速度を変えてしらべた。その結果、渦構造の変化に伴い位相応答の強い領域は変化するが、上記の特徴は保持されることがわかった。また流れの特性変化に伴う応答領域の変化についても考察を加えた。

研究を進めるにつれて、生物の飛翔や遊泳を含むより複雑な形状周りの流れに本手法を適用する場合、必要とされる自由度は更に増えることから、計算手法に更に改善が必要であることが判明。そこで、開発した手法で現れる同次連立方程式をゼロ固有値問題と捉え直し、レイリーリッツの手法と逆べき法を組み合わせた改善手法を開発した。

この手法では計算領域全体に対する解析は必要ではなく、位相感受関数が大きいと期待される領域に限定した計算が可能なものである。更に計算領域を限定した際の計算精度の評価も可能であるため、計算コストの削減が可能である。検証例として、反応拡散方程式におけるブリーザー解と一様流中に置かれた平板翼の後流の解析を行い、両者とも一部の領域に限定した計算で領域全体を用いた計算とほぼ変わらない結果を得ることができた。また、領域をどの程度狭め

ることが可能かという問題に対しても、定量的な指標を提案することができた。

平板翼に関しては複数の迎角について位相応答を調べ、その流体力学的な働きを調べた。更に位相縮約の応用として矩形領域内に一様周期摂動を加えた場合の引き込み挙動を調べ、摂動の方向に依存して最大の引き込み挙動を与える場所が異なることを明らかとした。さらに引き込み範囲について位相縮約理論の予想と時間発展計算により得た結果が概ね一致する結果を得た。これらは提案手法の有効性を示す結果である。以上の計算および解析手法は、直交格子系に埋め込み境界法を用いた系で計算した。こうした計算手法は適合格子に比べて格子数は多く要するが、複雑な形状や境界運動を取り扱うことが可能であるため、位相自由度をもつはばたきモデルを含む多くの飛翔・遊泳モデルの解析に直結する系である。

ここまでに関与された手法を適用するため、位相自由度を持つはばたき飛行モデルを構築した。このモデルは翼のはばたき運動が自励的なりミットサイクル振動をもつ非線形駆動系により記述されており、位相自由度を持つ。このモデルを一様流中においたときの流体運動を、翼のはばたき運動と連成させて解き、駆動系と流体系全体を一つの系としたモデルに対して位相縮約を行った。

このモデルは連成系であるため、外部摂動としては流れに対する摂動の他、駆動系への摂動が考えられ、それぞれに対する位相応答が系の挙動に影響を与える。本モデルにおける駆動系としては、ヒーピング運動(迎角は0度で固定、翼の中心が流れに対して垂直に運動)とピッチング運動(翼の先端が固定され、迎角が運動)を設定した。位相縮約法に本モデルを解析した結果、位相応答が強い領域や翼駆動系への摂動に対する位相応答の特性、特に翼駆動形式の違いによる差異が明らかとなった。

なお、本課題の解析過程において、これまで用いてきた提案手法を更に改良した結果、複数位相における位相感受関数を同時に計算することが可能となり、計算効率をさらに向上させることに成功した。本改良により、より計算格子や計算領域の制約が緩まり、様々な系での位相縮約が可能となった。

更に、複数のはばたきモデル間の干渉を時間発展による数値解析により解析した。特に生物流体における前後翼の干渉などを想定した系を考案し、翼間距離が翼長や振動振幅と同程度の近距離相互作用を考えることとした。ここで、一つ目のモデルは位相自由度を持たずに一定の振動数ではばたき運動を行うものとし、もう一つは位相自由度をもつはばたきモデルとして、2つのはばたきモデルの相対位置を変えて同期条件を調べた。これは、位相縮約理論における周期外力を模した系であり、より一般的なモデルの解析結果の参考となるべき系である。

流れ方向に測ったモデル間距離を翼弦長の2倍に固定し、位相自由度をもつはばたきモデルを上流に配置した場合、下流に配置した場合の両方を解析した。その結果、位相自由度を持つはばたきモデルが上流側にある場合には、流れに垂直方向を z 軸とすると、モデル位置の z 座標が0(2つのはばたきモデルが流れに沿って並ぶ場合)に近いと同位相同期、それより離れると反位相同期、更に離れると同期が起こらないという結果を得た。また下流側にある場合は、 z が0に近いと反位相同期、それより離れると同期しないことが分かった。

円柱、固定翼および単独の位相自由度を持つはばたきモデルにたいする位相縮約に基づく解析結果では、上流で加えられた摂動は流れに乗って下流に流されるため、上流側において影響が及ぶ範囲が広いが、下流に対してはある程度距離が離れると影響が及ばないことが示唆されているため、この結果を解釈するにはもう一段の解析が必要であるとの結論に達した。弱結合を仮定した位相縮約理論をこうした強結合の系に適用する際には、摂動の種類や影響が及ぶ範囲範囲を見極める必要がある。また今回はモデル間距離を固定した系で解析を行ったが、振動周期と一様流の速度、モデル間距離の間により同期時の位相差は変化することが予想されるため、さらなる解析が必要である。

本課題における研究成果は、日本流体力学会、日本物理学会、米国物理学会流体力学分会など、国内外の学会やセミナーで発表している。また海外セミナー(オンライン)において発表も行った。このことから本研究課題が国内外の広い関心を得たことが分かる。学術誌への発表状況に関しては、位相縮約の解析手法に関する部分は学術誌に発表済みで、平板翼周りの流れに対する位相縮約と引き込みに関する研究成果、位相自由度を持つはばたきモデルの解析部分については投稿準備中である。

また、本課題研究に関連して、2019年度には”Mathematical Methods in Biofluid Mechanics”、2021年度には”Biofluid Symposium”というタイトルの国際研究集会を主催者として企画・開催し、いずれも成功させた。また2019年度、2020年度、2022年度には生物流体に関する国内研究集会を主催者として企画・開催した。また2021年度には生物流体力学に関するチュートリアルを企画・開催し、いずれも成功させた。これらの研究集会などでは国内外の研究者と研究課題について議論を行い、またその重要性和成果をアピールしてきた。

結論として、飛翔・遊泳において位相自由度をもつ系の解析を行うための位相縮約の方法は研究期間中に発展させることができ、位相自由度をもつはばたきモデルの解析も実行できた。この手法は方程式の時間発展部分のみを使うことで実行できることから、従来知られている問題に比べて応用範囲は広いと考えられる。一方で計算負荷については、低減させる工夫を様々な行うことで計算可能な問題を増やすことはできたものの、以前として大きい点は今後の課題といえる。研究期間中に提案された他の手法などを含め、取り扱う問題に応じた手法を適用することで更に解析を進めてゆきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Iima Makoto	4. 巻 103
2. 論文標題 Phase reduction technique on a target region	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 053303-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.103.053303	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 飯間信	4. 巻 2021
2. 論文標題 一様流中のはばたき駆動翼の位相応答	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本流体力学会年会2021講演論文集	6. 最初と最後の頁 1 ~ 3
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 飯間信	4. 巻 2020
2. 論文標題 非圧縮流れに対する部分領域の位相縮約	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本流体力学会年会2020講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-2
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 Iima Makoto	4. 巻 99
2. 論文標題 Jacobian-free algorithm to calculate the phase sensitivity function in the phase reduction theory and its applications to Karman's vortex street	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 062203 ~ 062203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.062203	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 Makoto Iima	4. 巻 2019
2. 論文標題 Phase responses and flow characteristics of a family of Karman's vortex streets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA 2019	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 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 Iima Makoto, Yokoyama Naoto, Senda Kei	4. 巻 99
2. 論文標題 Active lift inversion process of heaving wing in uniform flow by temporal change of wing kinematics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 043110 ~ 043110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.043110	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 飯間信	4. 巻 2019
2. 論文標題 振動翼の運動制御による揚力反転機構のパラメータ依存性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本流体力学会年会2019講演論文集	6. 最初と最後の頁 1--2
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 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 飯間信
2. 発表標題 平板翼周りの周期流れに対する最適位相制御
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯間信
2. 発表標題 一様流中のはばたき駆動翼の位相応答
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Iima
2. 発表標題 Phase reduction technique on oscillating flows towards to analysis of flapping flight
3. 学会等名 Biocomotion Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯間信
2. 発表標題 駆動はばたき翼の運動特性に応じた位相応答特性
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Iima
2. 発表標題 Phase reduction of Karman's vortex street
3. 学会等名 Tianyuan international workshop on modeling and analysis of dynamical systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯間信
2. 発表標題 カルマン渦の位相縮約：技術的な問題と流体力学的な解釈
3. 学会等名 千葉大学理学部物理学科談話会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯間信
2. 発表標題 大規模複雑系の位相縮約
3. 学会等名 Nonlinear Seminar(東大郡研)（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯間信
2. 発表標題 一様流中の平板翼後流における位相応答
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯間信
2. 発表標題 非圧縮流れに対する部分領域の位相縮約
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯間信
2. 発表標題 平板翼周りの流れに対する位相応答特性の空間分布
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Makoto Iima
2. 発表標題 Phase responses and flow characteristics of a family of Karman 's vortex streets
3. 学会等名 NOLTA2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makoto Iima
2. 発表標題 Phase reduction of flapping flight and swimming
3. 学会等名 Mathematical Methods in Biofluid Mechanics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯間信, 横山直人, 泉田啓
2. 発表標題 振動翼の運動制御による揚力反転機構のパラメータ依存性
3. 学会等名 流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯間信
2. 発表標題 ヤコビアンフリーな位相感受関数の計算法に基づくカルマン渦列の位相縮約
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 Makoto Iima
2. 発表標題 A Jacobian-free algorithm to calculate the phase sensitivity function of the phase reduction theory and its application to Karman's vortex street
3. 学会等名 Vortex dynamics in science, nature and technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯間信
2. 発表標題 飛翔と遊泳の流体力学
3. 学会等名 (広島大学)統合生命科学研究所ランチョンセミナー(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田雄介, 西森拓, 飯間信
2. 発表標題 直接数値計算による2次元砂丘群周りの流れ構造
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会(2019年)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	紅林 亘 (Kurebayashi Wataru) (70761211)	弘前大学・教育推進機構・助教 (11101)	

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2件

国際研究集会 Biofluids Symposium	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 Mathematical Methods in Biofluid Mechanics	開催年 2019年～2019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
---------	---------