

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540433

研究課題名(和文)自己駆動する境界運動と流れの相互作用による推進・輸送現象の解明

研究課題名(英文) Analysis of propulsion and transport by the interaction between self-driven boundary motion and associated flow

研究代表者

飯間 信 (Iima, Makoto)

広島大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90312412

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：複数のバネ支持円柱を一様流中に置いた場合、渦剥離を伴う場合でも同期が発生することを示し、その条件について数値的に調べた。剥離渦によるバネ支持円柱の振動を一つの振動子と捉え、2つの振動子間の相互作用の結合関数を位相差の関数として計算データから得た。また粘菌の微小変形体の蠕動運動の発生要因として化学物質の輸送と振動が結合したモデルと境界での位相勾配を与えた位相振動子モデルを検討し、微小変形体に特有の蠕動運動パターンを再現することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Synchronization of spring-loaded cylinders in uniform flow was analyzed numerically. In the regime of Reynolds number where vortex separation is observed, synchronization of two cylinders with different natural frequencies was observed. The coupling function of phase model of this system was obtained by the data of the motions of the center of mass. Peristaltic pumping of true slime mold was also analyzed. Model consisting of chemical transport and boundary motion and model consisting of simple phase equation with Neumann boundary condition with non-zero gradient were analyzed. Characteristic spatio-temporal pumping pattern was reproduced.

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：物理学，数理物理・物性基礎論

キーワード：生物流体力学

1. 研究開始当初の背景

生物流体は外部流(飛翔や遊泳)及び内部流(血流や原形質流動)に大別される。これらの流れは多くの場合境界の周期的な形状変化(はばたき翼や管の蠕動運動)で駆動される。生物はこうして生成された流れにより揚力生成や物質輸送等、生物にとって重要な機能を実現している。上記の研究を含む既存の研究の多くは境界運動を時間(及び場所)の関数として与えているが、実際は、境界運動はそれを駆動する力学と発生した外場(流れ場)からのフィードバック(相互作用)で決まるため、外場の影響で振動パターンが変化する。こういった境界運動の動力学と流体相互作用の機構についてはよくわかっていなかった。

2. 研究の目的

昆虫の翼、粘菌の境界等を内在する振動素子(の集合)と捉え、流れとの相互作用による振動挙動の変化及びその時生成される流れの特性を、生物の飛翔・遊泳や生物内部の輸送という観点から調べる。

3. 研究の方法

自己駆動する境界運動と流れの相互作用が飛行・推進・輸送に果たす役割を明らかにするため、幾つかの系の解析とそれらの比較を行う。解析対象は 1) 中レイノルズ数領域における同期特性、2) 粘菌を想定した内部流動による物質輸送、とする。理論および数値計算を用いる。

4. 研究成果

(1) 中レイノルズ数領域における同期特性
剥離渦の干渉による流体力学的同期を調べるために複数のバネ支持円柱を一様流中に置いた場合の同期条件について調べた。有限体積法とキメラ格子を用いた数値コードを開発することで境界変動に伴う領域の形の変化を取

り扱えるようにした。このコードを用いてバネの固有振動数と円柱間の距離を変えて同期が起こる条件を調べた。すると、渦剥離が起きるようなレイノルズ数領域においても、固有振動数が異なっても同期が起こることがわかった。特に、同期を起こすパラメータ領域は円柱間の距離が近くなり渦どうしの相互作用が強くなると複雑になる。

次に同期を引き起こす振動子間相互作用を数値計算データから定量的に推定した。この手法では剥離渦によるバネ支持円柱の振動を一つの振動子と捉え、2つの振動子間の相互作用の結合関数を位相差の関数として得ることが出来る。この系では流体部分の自由度により一般に円柱振動の挙動は複雑になりうるため、このような記述が可能かどうかの検証が必要である。本モデルの場合、ある位相差領域を除いて結合関数を得ることができ、同期を説明出来るが、得られた関数はすべての位相差においては連続一価でなく、特定の位相差においては関数の不連続性が見られたり、多価関数になっていることがわかった。このような位相記述が破綻している箇所においては2つの円柱振動が作る渦パターンが遷移を起こして変化している。すなわち、剥離渦の時空間パターンが円柱間相互作用を支配する帰結としてこのような関数の特異性が表れることがわかった。

(2) 粘菌を想定した内部流動による物質輸送

粘菌の微小変形体と呼ばれるおたまじゃくし状の状態では自発的な蠕動運動が発生し、尾から頭にむかって波が進む。この場合に拡散だけの場合に比べて物質輸送効率が增大することを理論的に示した論文を出版した。

このような蠕動運動の発生要因は不明であるので、化学物質の流体力学的による輸送と蠕動運動の関係を調べるために局所的な振動の位相の運動方程式と連続の式を移流方程式と結びつけた数理モデルを作り、数値計算に

より調べた。その結果局所的な振動数変化が濃度にどう依存するかにより拡散を強める場合と弱める場合があることがわかった。しかしモデルがやや複雑にであることや、原形質の空間分布が偏るなどの問題は未解決のまま残った。

そこで、より単純なモデルで微小変形体に見られる蠕動運動が発生しうるかどうかを調べるため、位相拡散運動の境界条件を調べ、1次元系で境界条件として位相勾配を与えた場合の挙動を分類した。その中には粘菌の微小変形体で見られる非一様な蠕動運動に近い挙動も含まれる。また、オタマジャクシ型の2次元モデルを作って数値計算すると、境界での位相勾配により粘菌の微小変形体に近い挙動が再現された。

研究期間中に以下の研究会を開催し、得られた知見の共有と関係研究者との議論を行った。

1. 「生物のロコモーションと同期」
(2011.8.16-20, 北海道)
2. 「生物流体における同期および関連する現象」(2012.5.21-23, 京都)
3. 「生物流体における流れ構造の解析と役割」(2013.11.11-13, 京都)

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)

1. E. Shoji, H. Nishimori, A. Awazu, S. Izumi and M. Iima, "Localized bioconvection patterns and their initial state dependency in *Euglena gracilis* in an annular container", *J. Phys. Soc. Jpn.*, 83, (2014) 043001, 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.043001>
2. M. Iima, N. Yokoyama, N. Hirai and K. Senda, "Controlling flow structures by wing motion in a flapping-flight model", *Advances in Science and Technology*, 84, (2013) 59-65, 査読有,
3. 飯間 信, 中筋真生, "渦を介した振動円

柱間同期の位相記述の試み", 数理解析研究所講義録, 1808, (2012) 35-47, 査読有,

4. M. Nakasuji and M. Iima, "Synchronization of spring-loaded cylinders in a uniform flow", *Theor. Appl. Mech. Jpn.*, 61, (2012) 51-56, 査読有,
5. 飯間 信, 中筋真生, "一様流中に置かれた振動円柱間同期の位相記述の試み", 日本流体力学会年会 2012 講演論文集, (2012) 093, 査読有.
6. M. Iima, T. Nakagaki, "Peristaltic transport and mixing of cytosol through the whole body of *Physarum plasmodium*", *Math. Med. Biol.*, 29, (2012) 263-281, 査読有,

〔学会発表〕(計 32 件)

1. 飯間 信, 庄司江梨花, 粟津暁紀, 西森拓, 泉俊輔, "生物対流における局在構造ダイナミクスとその形成機構", 第 23 回非線形反応と協同現象, 札幌, 2013/12/7, 12/7 発表,
2. M. Iima, E. Shoji, A. Awazu, H. Nishimori, and S. Izumi, "Localized structure of *Euglena* bioconvection", 66th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (APS meeting), Pittsburgh, 2013/11/24-26, USA, 11/24 発表
3. 飯間 信, 郡宏, 中垣 俊之, "収縮ダイナミクスをもつ1次元粘菌モデルにおける輸送機能の発現", 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島, 2013/9/25-28, 9/26 発表
4. 飯間 信, "流体力学における安定性入門", 広島大学数理分子生命理学専攻合宿, 広島, 2013/8/26-27, 8/26 発表
5. 飯間 信, "可視化情報と流体力学的力", 可視化情報シンポジウム 2013, 東京, 2013/7/16-2013/7/17
6. M. Iima, "Dynamics of localized structures in convections", Joint US-Japan Conference for Young Researchers on Interactions among Localized Patterns in Dissipative Systems, Minneapolis, 2013/6/3-7, 米国, 6/3 発表
7. 飯間 信, 横山直人, 平井 規央, 泉田 啓, "2次元はばたきモデルにおける不安定飛行状態を用いた制御", 日本物理学会第 68 回年次大会, 東広島, 2013/3/26-29, 3/27 発表
8. 飯間 信, "生物の飛翔・遊泳ダイナミクスの数理構造に基づく解析", 日本機械学会 第 25 回バイオエンジニアリング講演会, つくば, 2013/1/9-11, 1/9 発表
9. M. Iima, N. Yokoyama, N. Hirai and K. Senda, "A flight control through unstable flapping flight", 65th Annual

- Meeting of the Division of Fluid Dynamics(APS meeting), San Diego, 2012/11/18-20, USA, 11/18 発表
10. M. Iima, "Bifurcation structures in flapping flight problems", Ninth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, 2012/9/19-21, Japan, 9/20 発表
 11. 飯間 信、中筋真生, "一様流中におかれた振動円柱間同期の位相記述の試み", 日本流体力学会年会 2012, 高知, 2012/9/16-18, 9/26 発表
 12. 飯間 信, "飛翔・輸送における流れと境界運動の協働", 第 6 回自己組織化討論会, つくば, 2012/7/28-2012/7/29, 7/29 発表
 13. M. Iima, "Controlling flow structures by wing motion in a flapping-flight model", CIMTEC 2012 - 4th International Conference on Smart Materials, Structures and Systems, Montecatini Terme, 2012/6/10-14, Italy, 6/12 発表
 14. 飯間 信, 中筋真生, "渦を介した振動円柱間同期の位相記述の試み", 研究集会『生物流体力学における同期および関連する現象』, 京都, 2012/5/21-23, 日本, 5/21 発表
 15. 中筋真生, 飯間 信, "一様流中に置かれた自己駆動振動物体間の同期条件", 日本物理学会第 67 会年次大会, 西宮, 2012/3/24-2012/3/27
 16. 飯間 信、郡宏、中垣 俊之, "収縮ダイナミクスをもつ 1 次元粘菌モデルにおける輸送機能の発現", 日本物理学会第 67 会年次大会, 西宮, 2012/3/24-27, 日本, 3/27 発表
 17. 中筋真生, 飯間 信, "流れの相互作用によるバネ支持円柱間同期の直接数値計算及びその位相記述の試み", 千葉大学劉研究室セミナー, 千葉, 2012/3/8
 18. 中筋真生, 飯間 信, "流れの相互作用によるバネ支持円柱間同期の直接数値計算及びその位相記述の試み", お茶大非線形セミナー, 東京, 2012/3/7
 19. 中筋真生, 飯間 信, "中レイノルズ数領域における振動物体間同期の数値解析", 第 61 回理論応用力学講演会, 東京, 2012/3/7-9, 3/9 発表
 20. 飯間 信, "昆虫飛翔モデルの解析", Mathematical Sciences based on Modeling, Analysis and Simulation Seminar, 広島, 2011/12/21
 21. 中筋真生, 飯間 信, "流体力学的相互作用による振動円柱間の同期", 第 21 回非線形反応と協同現象研究会, 西条, 2011/12/17
 22. M. Iima, "A Control Using Unstable Flight in a Flapping Model", Vortex Dynamics, Biofluids and Related Fields, Daejeong, 2011/12/12-14, 韓国, 12/12 発

表

23. M. Iima, "Unstable flapping state and flapping control in a flight model", CCS Symposium Autumn 2011, Nagoya, 2011/11/1, Japan
24. 飯間 信, "微生物の内部流動におけるぜん動運動の役割について", 第 19 回数理分子生命理学セミナー, 広島, 2011/10/19
25. 飯間 信、中垣 俊之, "真性粘菌内流動における蠕動運動の役割について", 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山, 2011/9/21-24, 9/21 発表
26. M. Iima, "Functions generated by the structural change and the associated flow", 第 49 回日本生物物理学会大会, 姫路, 2011/9/16-18, 9/16 発表
27. 飯間 信、横山直人、平井 規央、泉田 啓, "飛翔モデルにおけるはばたき運動制御と不安定飛翔の役割", 日本流体力学会年会 2011, 東京, 2011/9/7-9
28. 飯間 信, 中筋真生, "流体力学的同期と生物流体に関する幾つかの話題", 生物ロコモーションと同期現象, 大沼, 2011/8/16-20, 日本, 8/17 発表
29. M. Iima, Y. Yokoyama, N. Hirai and K. Senda, "An Analysis of Maneuvourability of Insects Flight using Steady and Unsteady Flights", Fourth International Symposium: Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics, Barcelona, 2011/7/18-21, Spain, 7/20 発表
30. 飯間 信, "はばたき飛翔における動的渦構造", 広島大学数学教室談話会, 広島, 2011/7/5
31. 飯間 信, "流れの大域構造の数理解析", NLPM コロキウム, 広島, 2011/6/23
32. M. Iima and T. Nakagaki, "Transport and mixing of cytosol through the whole body of Physarum Plasmodium", SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, 2011/5/22-26, USA, 5/25 講演

〔図書〕(計 1 件)

1. 飯間信(編), 「RIMS 共同研究『生物流体および関連する問題の研究』」, 数理解析研究所講義録, 1808, (2012)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯間 信 (IIMA MAKOTO)
 広島大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号: 90312412

(2) 研究分担者

中垣 俊之 (NAKAGAKI TOSHIYUKI)
 北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号： 70300887

郡 宏 (KORI HIROSHI)

お茶の水女子大学・人間文化創成科学研究
科・准教授

研究者番号： 80435974