

機関番号：10101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21740278

研究課題名（和文） 生物における飛翔・推進の流体力学理論の新展開

研究課題名（英文） Hydrodynamic theory of flying and swimming of animals

研究代表者

飯間 信（IIMA MAKOTO）

北海道大学・電子科学研究所・助教

研究者番号：90312412

研究成果の概要（和文）：

ナビエ=ストークス方程式に基づく生物の飛翔や泳ぎの理論を3次元空間の場合に拡張した。2次元理論の構築に用いた手法を3次元空間の場合に適用することに成功した。応用例として、平均飛行速度をゼロに持っていった場合の挙動を調べ、2次元の場合と異なる結果を得た。空中停止飛行の安定性についての理論解析を試みた。低レイノルズ数における推進問題に関して、構造変化により液体中を推進する分子機械の流体力学モデルを作り、その特性について調べた。

研究成果の概要（英文）：

The theory of animals' flying and swimming based on the Navier-Stokes equations in two-dimensional space was extended to the three-dimensional case. The procedure to construct the two-dimensional theory was applied to the three-dimensional case. It was shown that the paradox of hovering insect in two-dimensional space is resolved in the three-dimensional case. The stability of the hovering was analyzed for some cases. For the propulsion at low Reynolds numbers, a hydrodynamic model which imitates protein machine was developed. This model has been analyzed in terms of controlling period, increment in a period, and energy efficiency.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：物理学（数理物理・物性基礎）

キーワード：流体力学, 生物物理, 応用数学

## 1. 研究開始当初の背景

生物の飛翔や泳ぎでは境界運動が作る渦構造の動力学が重要である。これまで観測、模型

実験、数値計算等の手段で飛翔・推進機構が調べられてきたが、理論研究は流れを大幅に

単純化したものに留まり、基礎方程式に基づく飛翔・推進の理論は申請者が提案したもの(M. Iima, J. Fluid Mech. (2008))を除き提案されていないが2次元の場合に限定されている。

## 2. 研究の目的

生物の流体力学的推進機構を理論的・数値的観点から明らかにする。具体的には申請者が発案した2次元はばたき飛翔理論を3次元に拡張すること、昆虫飛翔における渦運動の役割と、微生物や分子機械の推進機構における境界運動の役割の関連を理論的に明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

理論および数値計算を用いる。3次元はばたき飛翔理論に関しては2次元理論で使った手法を、Imai (1974)により与えられた3次元空間を運動する物体に働く力の公式に適用する。微生物や分子機械の推進機構に関しては粘性が大きい場合に適用可能な定常ストークス流を仮定し、これまでに開発したモデルを拡張した。具体的には以前のモデルでは運動の詳細を与える必要があり、その結果として駆動効率を計算してきたが、ここでは内部駆動機構を組み込むことで推進可能な運動を生成するという意味でより現実に近いモデルを構築した。このモデルをもとに推進過程を微分方程式の形で導出し、その挙動を解析した。

## 4. 研究成果

ナビエ=ストークス方程式に基づく生物の飛翔や泳ぎの2次元理論を3次元に拡張をおこなった。Imai (1974)により提案された3次元流体中を運動する物体に働く力の公式では物体に働く力は流れが時間周期的である場

合遠方場のみで表される。遠方場の方程式は線形方程式で記述できるため時間周期的な流れの漸近挙動の表式を一般的に求めることができる。はばたき飛行する生物に働く力の時間平均を求めると、その力は遠方場の時間平均流のみで表されることを示すことができた。3次元空間における力の公式は2次元のものとは全く異なるが、この点については2次元と同様の結果であることを確認した。次に、2次元理論で見られた空中停止のパラドックスが3次元空間で成立するかどうかを、平均飛行速度をゼロに持っていった場合の力の時間平均の極限を調べることで考察した。3次元の場合、この極限は2次元理論と異なり、力の時間平均の極限はゼロとはならない。つまり2次元理論におけるパラドックス(平均飛行速度がゼロになる極限で力の時間平均がゼロとなる)は起きない。この原因については、2次元理論を発表した論文(M. Iima, J. Fluid Mech. (2008))で指摘した、パラドックスの本質、すなわち平均速度ゼロの極限におけるストークスのパラドックスとの関連により説明が可能である。

次に空中停止飛行の安定性について理論解析を行った。そのためにはばたき自由飛翔における重心運動を支配する運動方程式の外力項を、重心速度の関数として求める。具体的には、Imai (1974)の公式と遠方場の流れ場の表式を活用し、重心速度(昆虫を固定した座標系で見ると一様流の大きさとなる)の関数として求める。その関数の性質と運動方程式から重心運動の力学的安定性を判定することができる。この手法は、数値計算の解析において行われた手法(M. Iima, J. Theor. Biol. (2007))を理論解析に応用したものである。この手法により遠方場の流れ場の一般的な性質と安定性の関係を明らかにすることに成

功し、幾つかの具体例を用いて安定性の判定を行った。

低レイノルズ数における推進問題に関しては、対象となる流れの性質が粘性に支配されるためストークス方程式で記述される。このため The scallop theorem と呼ばれる定理の条件を満たさなければ推進ができないことが知られている。この条件を満たす運動を成立させるため、具体的な運動を与えるのではなく、内部ダイナミクスを組み込むことで分子機械の流体力学モデルを構築した。ここでは、分子機械の変形過程を模して、簡単な内部構造を入れそれが状態に応じて切り替わるというダイナミクスを組み込むことにより、状態依存する平衡点への連続する緩和過程として実質的な遊泳を生み出すような運動を起こさせることに成功した。内部構造の機構を工夫することで、切り替わるそれぞれの状態における平衡点と内部構造の関係が数学的に単純となり、挙動の制御がより簡単になっている。このモデルの性質を調べ、一周あたりでの移動距離を相空間上で定義されるあるベクトル場の性質と関係付けることに成功した。またエネルギー効率についても考察を行った。

#### 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 5 件)

1. 飯間 信, 3次元空間における空中停止飛行の理論解析, 日本流体力学会年会 2010拡張要旨集、査読無、(2010)1-2
2. Y. Tasaka and M. Iima, Flow transitions in the surface switching of rotating fluid, J. Fluid Mech.、査読有、(2009) 636, 475-484.
3. M. Iima, An application of generalized Blasius formula to

insect's flapping flight, Proceedings of ISABMEC 2009, 査読無、(2009), S17

4. 飯間 信, 飛翔と泳ぎの数理解析, 日本応用数理学会2009年度年会講演予稿集, 査読無、(2009) 213-214.
5. 飯間 信、平井 規央、泉田 啓, アサギマダラ飛行の2次元モデルにおける大摂動からの回復過程に関する数値的研究, 日本流体力学会年会2009講演論文集, 査読無、(2009) 36013.

[学会発表] (計 11 件)

1. M. Iima, Numerical simulation and mathematical analysis of flapping flight problem, International Symposium on Computational Science 2011(invited), 2011年2月15日, Kanazawa
2. M. Iima and A. Mikhailov, Analytical model of a butterfly micro-swimmer, APS 63<sup>rd</sup> Annual DFD Meeting, 2010年11月21日, Long Beach, USA
3. 飯間 信, はばたき飛翔と遊泳の数理解析, 日本機械学会第88期流体工学部門講演会(invited), 2010年10月30日, 山形大学米沢キャンパス (米沢市)
4. 飯間 信, 3次元空間における空中停止飛行の理論解析, 日本流体力学会年会 2010, 2010年9月9日, 北海道大学高等教育機能開発センター (札幌市)
5. 飯間 信, 蝶はなぜ飛ぶか -- 渦を用いた飛翔の数理解析 --, 研究部会数理設計 第10回研究集会, 2009年12月21日, 名古屋
6. 飯間 信, 3次元空間における空中停止飛行の理論解析, 2009年度応用数学合同研究集会, 2009年12月17日, 瀬田

7. M. Iima, A paradox of hovering insects in two-dimensional space, 62th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, 2009 年 11月22日, ミネアポリス
8. 飯間 信, 飛翔と泳ぎの数理解析, 日本応用数理学会2009年度年会, 2009 年 9月30日, 大阪
9. 飯間 信, A. Mikhailov, 連続する緩和過程で駆動される微小推進体の流体力学的推進機構, 日本物理学会2009年秋季大会, 2009 年 9月26日, 熊本
10. M. Iima, An application of generalized Blasius formula to insect's flapping flight, ISABMEC2009, 2009 年 9月21日, 上海.
11. M. Iima, Hydrodynamical study of flapping models, "Complex Nonlinear Processes in Chemistry and Biology", 2009 年 7月17日, Berlin

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

飯間 信 (IIMA MAKOTO)

北海道大学・電子科学研究所・助教

研究者番号 : 90312412

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし