

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007 年度～2008 年度

課題番号：19740228

研究課題名 (和文) 渦を用いたはばたき飛行の流体力学に基づく理論的・数値的手法による解明

研究課題名 (英文) Theoretical and numerical study based on fluid mechanics for flapping flight using vortex

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：

昆虫の飛翔では、渦の生成や動力学を伴うはばたき飛行と考えられるが、その流体力学に基づく理論はまだ提案されていなかった。本課題では、今井(1974)により導かれた一般化されたブラジウスの公式を用いて渦を用いたはばたき飛行の理論を構築し、動力学の解析に有用であることをしめした。またこの理論より2次元空中停止飛行についてのパラドックスを導いた。また重力を変えたときの臨界点に着目することではばたき方に依存する飛行性能の評価をおこなった。

交付額

(金額単位：円)

|         | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2007 年度 | 1,800,000 | 0       | 1,800,000 |
| 2008 年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 総計      | 3,200,000 | 420,000 | 3,620,000 |

研究分野：物理学・応用数学

科研費の分科・細目：数理物理・物性基礎

キーワード：流体力学・非線型物理

## 1. 研究開始当初の背景

昆虫の飛翔では、翼の運動により渦を作り、運動に必要な力を得る場合が多い。しかし渦を用いた飛行の流体力学に基づく理論はまだ提案されていなかった。その理由は、定常翼の理論とは異なり、はばたき運動に伴う非定常な渦運動が生成する力

の特性を理論的に見積もることは難しいからである。同時にはばたき自由飛行についての数値的研究も十分ではない状況であった。

## 2. 研究の目的

渦を用いたはばたき飛行を理論的、数値的観点から明らかにする。具体的には、1. はばたき運動により生成される力の性質や特徴を、流体力学の基礎方程式に基づいて理論的に理解する。2. はばたきモデルの数値計算により、具体的な翼の運動と

1. で求めた力の性質や特徴の関係を明らかにする。

### 3. 研究の方法

理論的には今井(1974)の導出した公式に渦有り、時間周期流の流れの漸近形を代入し、発生する力の特徴を調べる。数値的にはCIP法をもちいてNavier-Stokes方程式を直接計算する。

### 4. 研究成果

Navier-Stokes方程式に従う流体中で運動する物体に働く力を記述する、2次元空間における拡張されたBlasiusの公式を用いて外力下ではばたき飛行のモデルを解析し以下の結果を得た。まず、はばたきを開始してから有限時間だけ経った場合の状態を解析し、渦度場の双極子成分の時間変化と翼の境界部分からの積分が力の生成に大きな寄与をしていることを明らかにした。次に申請者が開発、研究を続けている水平はばたきモデルにおいて、渦パターンを単純化した理論モデルを作り、発生する力を渦パターンの時間変化と結びつける式を導いた。更に空中停止飛行がもつ理論的特異性のあるパラドックスの形で表現した。これは外力下で定常飛行を行う昆虫に働く力が、定常飛行の速度がゼロの場合にはばたき運動および発生する渦構造の詳細にかかわらずゼロになるというものである。この結果は、定常飛行がゼロになる極限でも、最初からゼロである場合でも同様に成り立つ。ただし、定常飛行速度を $U$ とすると、 $U$ がゼロになる極限で昆虫に働く力の時間平均 $F$ のゼロへの収束は非常に遅い。これらの結果は論文にまとめられ、専門誌

*Journal of Fluid Mechanics* に掲載された。

この結果は水平はばたきモデルや、対称はばたきモデル等の数値モデルに見られる特徴的な分岐構造の理解につながる結果と考えられる。

水平はばたきモデルの数値計算を行い、はばたき飛行のロバストネスに関して以下の結果を得た。Normal hovering と呼ばれる飛行のロバストネスを調べるため、はばたき運動中の翼の迎角を制御する関数を変え、速度制御の可能性について調べた。その結果 normal hovering は広いパラメータ範囲で速度制御が可能であり、ロバストであることが分かった。

なお2007年度に、はばたき飛行の流体力学の研究成果に対して第一回日本物理学会若手奨励賞を受賞し、受賞記念講演を行った。

### 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. M. Iima and A. S. Mikhailov : “Propulsion hydrodynamics of a butterfly micro-swimmer”, *Europhys. Lett.*, 85 : 44001 (2009) 査読有
- ②. M. Iima : “A paradox of hovering insect in two-dimensional space”, *J. Fluid Mech.*, 617 : 207-229 (2008) 査読有
- ③. 飯間 信 : 「はばたき飛翔の流体力学」、日本物理学会誌, 63 : 629-633 (2008) 査読有
- ④. 飯間 信 : 「蝶の飛翔に潜む数理構造」、日本応用数理学会誌, 18(4) : 39-51 (2008) 査読有
- ⑤. M. Iima : “A two-dimensional aerodynamic model of freely flying insects”, *J. Theor. Biol.*, 247(4) : 657-671 (2007) 査読有

[学会発表] (計 24 件)

- ①. 飯間 信 : 「ナノバタフライ: 単一接点モデルにおける推進の流体力学」、日本物理学会第64回年次大会、東京 (2009-03-31 発表)
- ②. 飯間 信 : 「昆虫のはばたき飛行における漸近渦構造の役割」、非線形現象の数値シミュレーションと解析 2009、札幌 (2009-03-06 発表)
- ③. M. Iima : “Theory of flapping flight using vortices”, Sapporo Winter School Part II. Nonequilibrium Pattern Formation in Chemical and Biological Systems, Sapporo (2009-02-13 発表)
- ④. M. Iima : “Numerical and theoretical analysis of freely flying insects - stability, vortex patterns, and far-field structure - ”, The 10th RIES-Hokudai International Symposium on AYA, 札幌 (2008-12-09 発表)
- ⑤. 飯間 信 : 「姿勢制御による大摂動からの安定性回復について」、第3回蝶の移動知セミナー、大阪 (2008-12-16 発表)
- ⑥. 飯間 信 : 「2次元はばたき飛行の理論」、NSCセミナー、札幌 (2008-12-05 発表)
- ⑦. 飯間 信 : 「渦構造からみた昆虫飛翔とその安定性 - 近接場と遠方場からみた飛行力学 -」、非線形解析セミナー、横浜 (2008-11-19 発表)
- ⑧. 飯間 信 : 「昆虫飛翔の数値モデルと理論モデル」、『偏微分方程式と現象: PDEs and Phenomena in Miyazaki 2008 (略称: PPM2008)』、宮崎 (2008-11-15 発表)
- ⑨. M. Iima : “Robustness of insect’s free-flight in terms of flapping motion and vortex patterns”, 150 Years of Vortex Dynamics, Copenhagen, Denmark (2008-10-14 発表)
- ⑩. 飯間 信 : 「2次元流体中で周期運動する翼に働く力の表式とその昆虫飛翔への応用」、日本流体力学会年会 2008、神戸 (2008-09-06 発表)
- ⑪. M. Iima : “Robustness of an insect’s hovering: how vortex patterns determine flight performance”, Dynamics Days Asia-Pacific 5, Nara (2008-09-12 発表)
- ⑫. M. Iima : “Robustness of an insect’s hovering: a transition of flapping free-flight”, ICTAM 2008, Adelaide, Australia (2008-08-28 発表)
- ⑬. 飯間 信 : 「Numerical models of freely flying insects and their universal structure」、複雑系セミナー、和光 (2008-08-04 発表)
- ⑭. M. Iima : “Analysis of hovering insect in two-dimensional space”, 流体と気体の数学解析、京都 (2008-07-10 発表)
- ⑮. M. Iima : “A stability of free-flight using vortex: a universal mathematical structure”, Analytical and Computational Fluid Dynamics 2008, Seoul, Korea (2008-06-25 発表)
- ⑯. 飯間 信 : 「分岐解析による昆虫飛翔制御機構解明の試み」、第2回蝶の移動知セミナー、大阪 (2008-06-17 発表)
- ⑰. 飯間 信 : 「2次元昆虫飛翔の理論的解析」、日本物理学会第63回年次大会、大阪 (2008-03-23 発表)
- ⑱. 飯間 信 : 「Navier-Stokes 方程式に基づく2次元昆虫飛翔の理論」、語ろう数理解析、大阪 (2008-02-21 発表)
- ⑲. 飯間 信 : 「拡張された Blasius の公式による昆虫飛翔の理論」、応用数学合同研究集会、瀬田 (2007-12-17 発表)
- ⑳. M. Iima : “Theoretical evaluation of the force acting on the flapping wing in two-dimensional fluid”, 60th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (APS meeting), Salt Lake City, USA (2007-11-19 発表)
21. M. Iima : “Role of vortex in free-flight of insects”, Vortex dynamics from

quantum to geophysical scales, Exeter, UK  
(2007-09-12 発表)

22. 飯間 信、柳田 達雄、西浦 廉政：「流体中における生物の推進機構の理解に向けた数理科学的アプローチ」、ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス発足記念シンポジウム、東京 (2007-06-06 発表)
23. 飯間 信：「蝶々に学ぶ流体力学 — 物理的な観点から —」、日本物理学会 2007 年秋季大会、札幌 (2007-09-22 発表)
24. M. Iima： “Mathematical analysis on freely flying insects” , NSC Spring Workshop 2007: Complex Dynamics in Physics, Chemistry and Biology, 札幌 (2007-05-08 発表)

[図書] (計 1 件)

- ①. 飯間 信：「羽ばたき飛翔の数理」、昆虫ミメティクス -- 昆虫の設計に学ぶ --、エヌ・ティー・エス、下澤楯夫、針山孝彦編、分担執筆：672—677 (2008) 査読有

[その他]

## 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