

## 研究課題別評価

### 1 研究課題名： 生物型飛行の力学シミュレータの構築

### 2 研究者氏名： 劉 浩

研究員： 稲田喜信（研究期間 H15.4.1 ～H17.3.31）

研究員： 王 浩（研究期間 H15.3.21～H17.10.31）

### 3 研究のねらい：

本研究は生物の羽ばたき飛行を厳密な幾何学、運動学及び力学のモデルに基づき、静止飛行、前進飛行及び急旋回のような自由飛行を計算機の中に再現できる力学シミュレータの構築を目指す。近年極限環境での応用が期待されているサイズ 15cm 以下の小型飛行体 (MAV: Micro Air Vehicle) の研究開発が盛んに行われているため、生物学や力学、計算工学や生物模擬工学等を専攻とする多くの研究者が飛翔生物からその設計指針を見出そうと、昆虫や鳥の羽ばたき飛行の原理解明を急いでいる。しかしながら、これまで昆虫飛行メカニズムの研究は昆虫羽ばたきロボットを用い模型翼まわりの流れ場と模型翼に働く力を計測したりして行われている傾向にあるが、実際昆虫飛行とは本質的な違いがある。また生物飛行の特技とも言うべきである急旋回のようなアクロバットの自由飛行については殆ど研究されていないのが現状である。本研究では、生物の羽ばたき飛行の厳密な力学シミュレーションにより、生物の自由飛行をコンピュータの中に再現し、その力発生メカニズムと安定飛行のメカニズムを明らかにすることを最終目標としている。昆虫の形状及び内部構造データは、理化学研究所・情報基盤センターで開発された3次元内部構造顕微鏡装置を用いて高精度に自動的に取得する。昆虫の自由飛行運動は、双方向高速ビデオ撮影とレーザーによる光学的手法を用いて測定された羽の運動学モデルと第一原理に基づいた加減速と胴体姿勢を考慮したダイナミクスモデルを構築する。大規模なシミュレーションやデータ処理等は理化学研究所・情報基盤センターのスパコンを利用して行う。また、シミュレーション技術開発において、羽・胴体の複雑な幾何形状、羽の能動的羽ばたき運動や受動的な弾性変形、羽・胴体の姿勢、そして強い非定常渦流れを包括する大規模な連成問題への挑戦的な解法も目指す。このシミュレータにより、生物飛行に潜んでいる新しい力学現象や生物の自由飛行メカニズムを明らかにすると同時に、鳥や昆虫サイズの小型飛翔体のためのブレークスルーとなる設計指針の創出をも目指す。

### 4 研究成果：

さきがけの3年間の研究では、生物羽ばたき飛行の力学現象をより厳密に実現するために、生物の羽・胴体の幾何学モデリング・運動学モデリング・力学モデリングを基盤技術として研究・開発しながら、更に融合させた生物型飛行の力学シミュレータを構築することを最大な目標とした。本力学シミュレータは概ね予定通り完成できており、以下先ず関連の主な研究成果について、1)幾何学モデルの開発；2)運動学モデルの開発；3)力学モデルの開発の3項目に重点をおいて紹介する。

#### 1)生物飛行の幾何学モデルの開発

生物の自由飛行を再現するため、羽・胴体の3次元形状だけでなく、慣性力や慣性モーメントの計算に必要な羽の厚みや翅脈分布などをも正確に計測できる手法を研究・開発してきた。便宜上昆虫(蛾)を対象に選んで飼育し理化学研究所・情報基盤センターの3次元内部構造顕微鏡装置を使用して蛾の羽・胴体及び内部構造のディジタイジング、2次元断層画像処理や自動輪郭抽出、リアリティックな3次元幾何学形状モデリングや計算力学格子生成等の諸手法や技術を開発し更にルーチン化した幾何学モデル構築の工程を効率化したシステムを開発した(図1)。

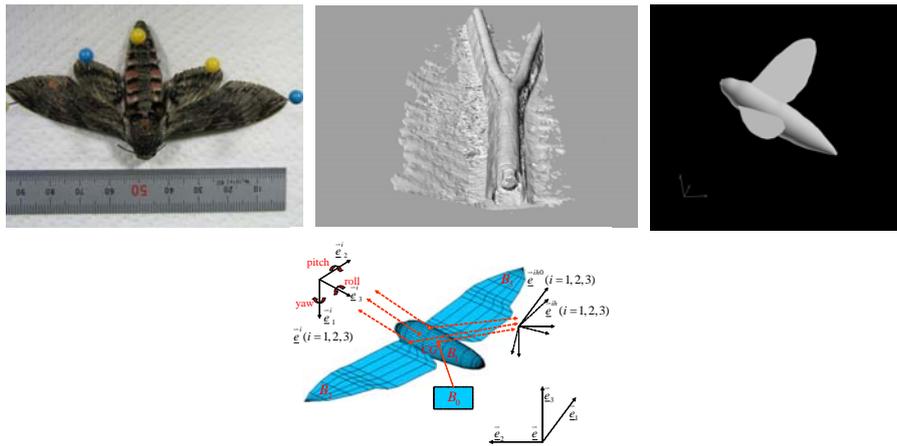


図1 蛾の形態、羽表面微細構造、計算力学格子及びダイナミクスモデル

## 2)生物飛行の運動学モデルの開発

生物の運動学モデリングについては、昆虫や鳥の自由飛行時における羽ばたき運動や胴体の運動姿勢(ローリング、ピッチング、ヨーイング)を、第一原理に基づいたマルチボディ・ダイナミクス理論を用い運動量と角運動量の保存性を考慮した数値解析手法とプログラムを開発した。本手法の特徴は、昆虫や鳥の2枚羽と胴体を弾性変形可能なマルチボディとして取り扱えることにより、急旋回のような非対称な羽ばたき運動をする自由飛行を模擬することができる(図1)。

## 3)生物飛行の力学モデルの開発

生物自由飛行時の羽の変形、胴体の姿勢や移動軌跡、非定常渦流れ等の相互作用を考慮した大規模な連成問題を取り扱う力学シミュレータを、マルチボディ・重合格子・有限体積法による流体解析ソルバーとダイナミクス解析ソルバーのカップリングにより構築し、生物自由飛行における流体力と慣性力の役割を定量的に評価できるシステムを開発した。数種類の昆虫(蛾、蠅、アザミウマ等)の羽・胴体マルチボディモデルを構築し、滑空飛行、静止飛行、前進飛行及び旋回飛行等に対して理化学研究所情報基盤センターのスパコンを利用し大規模な力学シミュレーションを行った(図2)。また昆虫羽の実形状を有し羽ばたきの3軸運動や胴体姿勢及び6分力計測を可能とする羽ばたきロボットを開発し、東京大学先端技術研究センターの大型風洞を用いた実測羽ばたき運動データによる実験を実施して本生物型の力学シミュレータの有効性を確かめた(図2)。

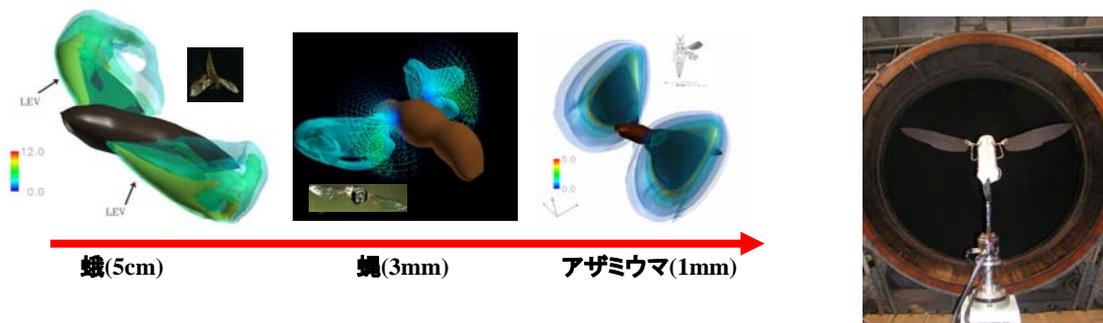


図2 蛾・蠅・アザミウマの静止飛行時の渦流れの様相と昆虫羽ばたきロボット

一方、これまで昆虫飛行の研究は昆虫羽の拡大模型を用いその周囲の流場と羽ばたく模型翼に働く力を計測・解析することに依存する所が多く、実際の昆虫飛行とは本質的な違いがあるため、昆虫自由飛行の研究が勿論のこと、静止飛行についても多くの謎が残されている。我々は本研究を通じて世界に先駆け生物の自由飛行を再現できる力学シミュレータ(図2)を構築したことによって、下記のように昆虫飛行における、ことに力発生メカニズムに関して新しい知見や発見が得られた。

#### 1)昆虫飛行における非定常渦

サイズ5cm(蛾)から1mm(アザミウマ)に至る昆虫の羽ばたき飛行に対して高精細な胴体・羽モデルを用いた静止・前進飛行の力学シミュレーションを行い解析した結果、初めて羽ばたき翼間及び胴体との相互干渉を考慮した生物羽ばたき飛行における渦構造及び渦と力発生の相関を解明した。また昆虫は羽ばたき運動を利用し巧みに非定常渦(図2)を発生させ大きな揚力及び推力を発生できるメカニズムが大半昆虫サイズや形状に依存しないことを明らかにした。

#### 2)昆虫の羽ばたき飛行の限界

2枚羽の昆虫モデルを用いた静止・前進飛行の力学シミュレーションにより体長1mm 前後までは、羽・胴体の形態や羽ばたき運動とは関係なく、似たような力発生のメカニズムが働いていることと、1mm 以下となると力学的遷移領域が存在し、例えば1mm ぐらいの昆虫が膜翼にてすでに飛べなくなりその替わり毛翼が有効であることを明らかにした(図2)。

#### 3)羽ばたき飛行における空気力と慣性力

羽ばたき翼に見られる弾性変形や旋回時に発生する回転モーメント等が流体力によるものと考えられたが、本力学シミュレータを用いた解析では、昆虫飛行の世界ではサイズや運動等の諸条件によって慣性力と空気力が主役を争うことがあることを明らかにした。

#### 4)小型飛行体開発へのヒント

本力学シミュレータを利用した応用研究として、鳥や昆虫サイズの固定翼飛行体、回転翼を有するヘリ及び羽ばたき飛翔体の、それぞれの最適飛行の指針を見出すことを視野に入れながら大型昆虫(5cmの蛾)モデルを用いた羽ばたき翼と回転翼の空力性能の比較を施し、昆虫サイズにおいては羽ばたき翼がより優れた性能を有することを示唆する重要な結果を得た。

### 5 自己評価:

さきがけ研究の3年間の研究では、昆虫や鳥の羽ばたき飛行を厳密な幾何学、運動学及び力学のモデルに基づき、静止飛行、前進飛行及び急旋回のような自由飛行を計算機の中に再現できる力学シミュレータの構築を最大な目標として研究開発を進めてきた。研究開始当時取り上げた問題点や数値目標などは、ほぼ計画通り解決、または完成できたと思う。本「生物型飛行の力学シミュレータの構築」のための新しい手法や基盤技術として、1)生物の内部構造や形状のディジタイジング、断層画像処理や形状輪郭抽出、3次元形状モデリングや計算力学用の格子生成を包括できる幾何学モデリングと、羽ばたき翼の能動的運動や受動的変形を一般化された数理モデルで再現できる運動学モデルを融合させ一体化した幾何学・運動学モデリングシステム; 2)羽ばたき翼と胴体の運動姿勢をマルチボディ・ダイナミクス理論による解析する新しい計算手法と、低レイノルズ数における特異な大規模渦流れを精度良く解析できる流体ソルバー、4枚又は多数羽を有する飛行体まで簡単に拡張できるマルチボディ・適合オーバーセット格子を基にした計算モデル、将来構造—流体解析を見込んだ羽・胴体の計算格子トポロジーや移動境界に伴う効率的に格子再生技術などを統合した流体力学モデルを連成させた統合力学モデリングシステムなどが完成できたことにより、更に計算システムのベクトル化や並列化などを行えば地球シミュレータを使用しより効率的に超大規模なシミュレーションを施す基盤ができていると思う。現在研究室レベルのワークステーションと理化学研究所情報基盤センターのソパコンを併用したシミュレーションにより特定の生物飛行に対して力発生原理に関わる現象解明を進めているが、今後例えば鳥から昆虫までの広範囲の生物飛行にわたり、飛翔生物の厳密な幾何学モデル、運動学モデル及び力学モデルと、静止飛行、前進飛行及び急旋回のような自由飛行における力学特性や安定飛行特性を統括できる、いわゆる生物飛行のバイオインフォマティクス・データベースの構築まで発展させていく研究を進めていきたい。これにより生物飛行に潜んでいる普遍的なメカニズムや最適原理の多様性乃至進化の過程などの、生物学や動物行動学、力学や工学などの幅広い分野において新しい知見や発見をできるのではないかと期待している。

近年盛んに行われている、サイズ15cm以下、総重量50g以下の小型無人飛翔体(MAV: Micro Air Vehicle; つい最近米国ではNAV: Nano Air Vehicleという超小型次世代飛翔体の構想が公表された)の研究では、ものづくりが先行しており、いわゆる低レイノルズ数領域( $Re=10-10^4$ )における空気力学や飛行制御の理論などが殆ど確立されていない。昆虫や鳥をも含めた小型飛翔体に関

する空力性能の研究では、大型飛行機の場合と相当異なり、強い非定常性を示す渦流れが如何に効率よく揚力を発生できるかと、外乱を受けたときの安定飛行を如何に実現できるか、という2つ大きな問題が存在しており、未だに解明されていないままである。とくに小型飛翔体の安定性・操縦性に関する研究は世界的に見ても殆ど例が無く、すでに確立されている高レイノルズ数領域 ( $Re > 10^6$ ) におけるジャンボ機の空力理論やPID飛行制御と全く違う理論の構築が期待されている。さらに昆虫のような毎秒20回から数百回に至るまで高速羽ばたきする飛行になると、新しい理論体系やパラダイムを構築しない限り、解明が困難であろうと思われる。今後超小型飛翔体の“ダウンサイジングと共に低下する飛行安定性能や操縦性能”という大きな問題の解明及び設計指針の創出を目指して、生物羽ばたき飛行の安定性・操縦性の研究に本生物型飛行の力学シミュレータを適応し、昆虫型飛翔体の空力特性や安定飛行制御を定量的に評価できるプロトタイプモデルの構築及び新しいパラダイムや理論の体系化の研究をも積極的に進めていきたい。

本研究はポストドク型で2名の研究員をそれぞれおよそ3年間雇用し研究の推進を図った。本研究プロジェクトの関わる専門分野はシミュレーション以外にも生物学や工学などが数多く存在し他分野の研究者を入れたことにより幅のある(昆虫羽ばたきロボットや昆虫飼育など)研究ができたと思う。最後に3年間のさきがけ研究による多大な支援に感謝するとともに、今後も本研究で築いた基盤を基に更に研究を発展させていきたいと考えている。

## 6 研究総括の見解:

劉研究者は生物の羽ばたき飛行を厳密な幾何学、運動学および力学のモデルに基づき、静止飛行、前進飛行および急旋回のような自由飛行をコンピュータの中に再現できるシミュレータを構築した。その結果、生物の羽ばたき飛行における力の発生メカニズムが明らかになり、特に昆虫飛行時の力の発生メカニズムに関わる前縁渦の効果、回転効果、および後流捕獲など、生物飛行に潜んでいるまったく斬新な力学現象や生物の自由飛行メカニズムの解明がはじめて可能となった。今後、鳥や昆虫サイズのマイクロ飛翔体の開発等に、画期的な設計方針を提供できることが大いに期待される。

## 7 主な論文等:

「ジャーナル論文」(代表的な5件)

- 1) H. Liu, Simulation-based biological fluid dynamics in animal locomotion, *ASME Applied Mechanics Reviews*, **58**, 269–282, 2005.
- 2) D. Viieru, J. Tang, Y. S. Lian, H. Liu, and W. Shyy, Flapping and Flexible Wing Aerodynamics of Low Reynolds Number Flight Vehicles, *AIAA Paper 2006-0503*.
- 3) H. Wang, Y. Inada, and H. Liu, Dynamics and inertia forces in the maneuverability of insect flight, *JSME International, Series C Bioengineering*, **47**, 499–512, 2005.
- 4) H. Liu, Computational biological fluid dynamics: digitizing and visualizing swimming and flying, Special issue on Dynamics and Energetics of Animal Swimming and Flying, *Integrative and Comparative biology (American Zoologist)*, **42** (5), pp. 42–51, 2003.
- 5) H. Wang, L. J. Zeng, H. Liu, and C.Y. Jin, Measuring the body position, attitude and wing deformation of a free-flight dragonfly by combining a comb fringe pattern with sign points on the wing, *Journal of Experimental Biology*, **206**, 745–757, 2003.

「招待講演」(代表的な5件)

- 1) H. Liu, An integrated approach on free flight mechanisms in insects and birds, *Proc. Annual meeting of American Physical Society*, Chicago, USA, 2005.11.
- 2) H. Liu, Novel mechanisms in biological flight and applications to Micro Air Vehicle, *Proc. Smart Material System, JSME annual meeting*, Tokyo, 2005.9. (keynote)
- 3) H. Liu, Recent developments in computational biological fluid dynamics, *Proc. Annual Meeting of the Society for Experimental Biology*, Edingburgh, UK, 2004.4. (keynote)
- 4) H. Liu, Simulation-based biological fluid dynamics in fish swimming, *Proc. 7<sup>th</sup> International Conference on*

*Vertebrate Morphology*, Florida, USA, 2004.7.

5) H. Liu, Computational Biological Fluid Dynamics: towards the digitizing animal swimming and flying, *Proc. The Second International Symposium on Aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC2003)*, 2003. (**keynote**)