

「生物型飛行の力学シミュレータの構築」

千葉大学工学部電子機械工学科 劉浩

1. 研究概要

近年、サイズ15cm以下の超小型飛行体(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いだそうと、昆虫や鳥の羽ばたき飛行の原理解明を急いでいる。これまで昆虫の静止飛行メカニズムの研究は昆虫羽ばたきロボットを用いて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、実際の昆虫飛行とは本質的な違いがある。また生物飛行の特技である急旋回のような自由飛行が殆ど研究されていない。本研究では、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再現できるシミュレータの構築を最大な目標とし、生物飛行における力発生メカニズムと安定性制御メカニズムを明らかにすることを旨とする。このシミュレータにより、生物飛行に潜んでいる全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り、今後鳥や昆虫サイズのマイクロ飛翔体のためのブレークスルーとなる設計指針の提供への応用が大いに期待される。

2. 研究実施内容(研究目的、方法、進捗状況、今後の予定などを記述)

(1) 昆虫飛行の幾何学・運動学モデルの開発

昆虫羽の能動的な羽ばたき運動、流体力及び慣性力による羽の受動的変形や胴体の運動姿勢等を再現できるリアリスティックな幾何学・運動学モデルを、実験計測やマルチボディ・ダイナミクス理論を用い研究・開発してきた。昆虫の形状と内部構造のモデリングについては、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、実際飼育した昆虫(蛾)の羽、胴体及び内部構造のデジタルモデリング、2次元断層画像処理や自動輪郭抽出、3次元幾何学形状モデリングや計算格子生成等の一貫性のある幾何学モデル構築システムを開発した。昆虫の運動学モデリングについては、昆虫自由飛行時における羽ばたき運動や胴体の運動姿勢(yaw, pitch, roll)を、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 エビガラスズメ蛾の形態、幾何学モデル及び運動学モデル

昆虫自由飛行時の2枚羽の対称羽ばたき運動や胴体の運動姿勢(yaw, pitch, roll)を、マルチボディ動力学理論を用いて運動量且つ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、昆虫の2枚又は4枚羽と胴体をマルチボディとして取り扱い、急旋回のような非対称な羽ばたきをなす自由飛行を模擬することができる。図2は自由飛行時の胴体姿勢と力モーメントが従来の胴体固定モデルとの顕著な相違を示す。

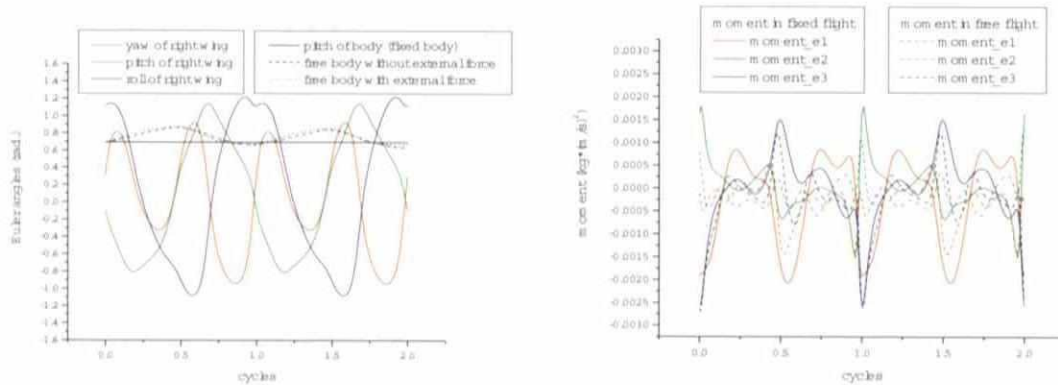


図2 自由飛行時の胴体姿勢と力モーメントが胴体固定モデルとの相違

(2) 3軸羽ばたき翼の力計測

東大先端研大型風洞の中で昆虫型羽ばたきロボットを用い、20種類の昆虫羽モデルと実測羽ばたき運動データを入力して、3軸羽ばたき運動による羽に働く5分力の計測と、自由飛行姿勢を考慮した時の胴体・羽に作用する6分力の計測を行い解析し本力学シミュレータの有効性を確かめた(図3)。

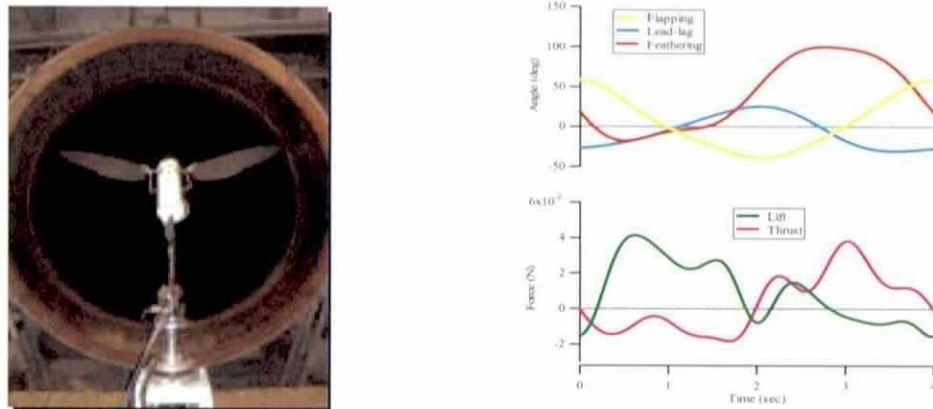


図3 風洞実験セットアップと静止飛行時の羽ばたき翼(蛾モデル)に働く揚力等の計測値

(3) 昆虫飛行の力学モデルの開発

昆虫自由飛行時の羽の変形、胴体の姿勢や移動軌跡、非定常渦流れの相互作用を考慮した大規模な連成問題の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等のカップリングにより構築し昆虫自由飛行における流体力と慣性力の働きを定量的に評価できるようになった。数種類の蛾と蝇の羽・胴体マルチボディモデルを構築し、静止と前進の自由飛行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。今回の結果より、昆虫飛行時の力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のメカニズムについて、多くの新しい知見を得ることが出来た(図4)。

(4) 昆虫飛行メカニズムの解明

「昆虫飛行における非定常渦」

サイズが5 cmから1 mmに至る昆虫羽ばたき飛行については、昆虫は羽ばたき運動を利用し

て巧みに非定常渦を発生させ、大きな揚力と推力を作り出せるメカニズムを明らかにした。特に羽ばたき翼が打下しと打上げの間の回転では殆ど力が発生しなく筋肉パワーの出力が最小限に抑えられることがわかった。

「昆虫の羽ばたき飛行の限界」

昆虫体長2～3mmまでは、羽と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原理が働いていることを明らかにしたが、サイズが2mm前後では力学的遷移領域が存在することを明らかにし、例えば1mmぐらいの昆虫は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が分かった。

「羽の弾性変形と流体力及び慣性力の相関」

羽ばたき翼に見られる弾性変形や胴体の振動が昆虫サイズにより流体力と慣性力両方にも依存することを明らかにした。

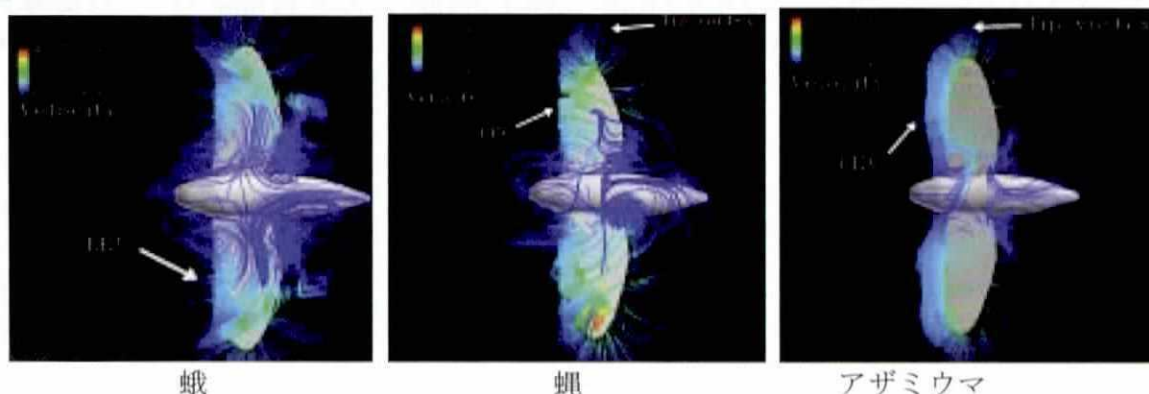


図4 蛾、虻及びアザミウマの静止飛行時の渦流れ（昆虫飛行のサイズ効果）

(5) 今後の予定

昆虫自由飛行時の、胴体と羽の姿勢及び振動、まわりの非定常流れの相互作用を考慮した大規模な連成問題の解析手法の開発を目指し以下の諸研究項目を実施する予定である。

1) 昆虫飛行の力発生メカニズムの解明について

- ・静止飛行と前進飛行におけるサイズ効果, 運動効果の解明, 空気力と慣性力の評価, パワー消費及び効率の評価
- ・羽ばたき飛行メカニズムを統一できる力学理論の研究

2) 昆虫飛行の動的安定飛行および操縦性メカニズムの解明

- ・静止・前進自由飛行における胴体姿勢の評価, 外乱を受けたときの胴体姿勢の評価
- ・羽ばたき安定飛行メカニズムを統一できる制御理論の研究

3. 主な研究成果（代表的なもの10編）

(1) 論文発表

- 1) H. Liu, Simulation-based biological fluid dynamics in animal locomotion, *ASME Applied Mechanics Reviews*, **58**, pp. 269-282, 2005. (invited)
- 2) H. Wang, Y. Inada, and H. Liu, Dynamics and inertia forces in the maneuverability of insect flight, *JSME International*, Series C Bioengineering, **47**, 2005. (in press)
- 3) Y. Inada, K. Kawachi, and H. Liu, Experimental and analytical study of schooling motion of fish based on two observed individual motions: approaching motion and parallel orientating motion, *Biomechanics in Swimming and Flying*, Springer-Verlag Tokyo, 2005.
- 4) H. Liu and N. Kato, A numerical study of unsteady hydrodynamics of a mechanical pectoral fin, *Journal of Bionetic Engineering*, **1** (2), pp.108-120, 2004.
- 5) 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.

(2) 口頭発表

- 1) H. Liu, An integrated approach on free flight mechanisms in insects and birds, to be presented at Annual meeting of *American Physical Society*, Chicago, USA, 2005.11. (invited)
- 2) H. Liu, Novel mechanisms in biological flight and applications to Micro Air Vehicle, *Proc. Smart Material System, JSME annual meeting*, Tokyo, 2005.9. (invited)
- 3) H. Liu, H. Wang and Y. Inada, Integrated modeling and simulation of free flight in realistic insect, *Proc. Annual Meeting of the Society for Experimental Biology*, Barcelona, Spain, 2005.7.
- 4) H. Liu, Recent developments in computational biological fluid dynamics, *Proc. Annual Meeting of the Society for Experimental Biology*, Edingburgh, UK, 2004.4. (invited keynote lecture)
- 5) H. Liu, Simulation-based biological fluid dynamics in fish swimming, *Proc. 7th International Conference on Vertebrate Morphology*, Florida, USA, 2004.7. (invited)