

生物飛行のシミュレーションと小型飛翔体

Biological Flight Simulation and Micro Air Vehicle

劉 浩^{*, **}

*千葉大学工学部 ** (独) 科学技術振興機構

Hao Liu

*Chiba University ** JST/PRESTO

E-mail: hliu@faculty.chiba-u.jp

1. はじめに

生物飛行の運動メカニズムに関する研究は、90年代半ば頃から米国防省高等研究計画局 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) がスポンサーになり、戦場の兵士が情報収集のために使用する携帯可能な小型無人飛行体 (MAV: Micro Air Vehicle) の研究開発を目標とした、欧米では多くの産官学連携プロジェクトを発足してから急速に発展してきている。DARPA による超小型無人飛行体の定義は、長さ、幅、高さ共に 15 cm 以下の飛行体である。この程度のサイズのヘリコプタが開発された場合に飛行体質量が 50 g であると仮定すると、ロータ回転数は 1 分間に 3000 回転程度でロータ端での速度は 30 m/s と予想される。飛行体はサイズが小型化すると風の中で安定に飛行することが困難になるため、このサイズの飛行体に適合する揚力と推進力の発生だけではなく安定飛行の最適設計が大きな問題になり、研究者は我々の身のまわりの飛翔生物からその設計指針を見いだそうと昆虫羽ばたき飛行の原理解明を急いでいる。例えば、昆虫の静止飛行メカニズムの研究は最近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のが現状である。また急旋回のような自由飛行が殆ど研究されていない。そこで、もし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が構築できれば、今まで謎に包まれてきた昆虫の自由飛行メカニズムの解明がはじめて可能となり、例えば、鳥サイズの小型飛行体 (MAV) や昆虫サイズのマイクロマシンのための新しい設計指針を提供することが期待される。本稿では、生物飛行の力学シミュレーションとその小型飛翔体への応用について述べる。

2. 生物飛行の力学的研究

蛾やハエが空中で静止したり、急旋回したりするのはなぜなのか。どんな優れた安定性制御システムを備えた飛行機でも一旦失速すると直ちに墜落してしまうが、昆虫が突風の中を悠々と飛び抜けて決して墜ちないのはなぜなのか。我々は、空気力学のさまざま理論を蓄積し、ジャンボジェット機やステルス戦闘機を、統一された「定常理論」に基づいて、設計できるようになった。だが毎秒 20-600 回も羽ばたく昆虫の羽がなぜ自重の 2 倍も以上の揚力を発生できるかについては、いまだに多くの疑問が残っており、理路整然と説明できる理論がないと言っても過言ではない。

初期の飛行機翼の設計でよく使われる「定常空気力学理論」は、準定常仮定の下で昆虫飛行の解析に応用されたが、後ほどこの理論で静止飛行に必要な揚力を推定できないことが分かった。そこで羽ばたき運動により発生する「非定常渦流れ」がより大きく揚力を発生するという新しい仮説を検証するために、実物の拡大羽ばたき模型を作製し、実際の昆虫飛行流体现象を表すパラメータ、レイノルズ数 (慣性力と粘性力の比) と同一であるような相似模型羽まわりの流れ場の可視化や模型羽に働く力計測などの研究が行われてきた。その中に 2 つ代表的な研究がある。90年代半ば、ケンブリッジ大の Ellington 博士は、大型蛾の 3 次元模型 (flapper) を用いた煙可視化実験では、羽

の打ち下ろしの間、前縁に付着している強い「前縁渦」と呼ばれる3次元性の強い渦を捕らえたことにより、昆虫飛行には失速遅れという揚力発生原理が働いていると発表した。後ほどカリフォルニア大のDickinson博士は、小型ハエの100倍拡大翼模型 (robofly) が鉍物油を満たしたタンクの中で前後に羽ばたき続けている際にPIV手法を用いて翼まわりの流れ及び翼に働く力を計測した結果、ハエの静止飛行原理には失速遅れ以外に回転循環と後流捕獲というメカニズムも存在すると指摘した。一方、我々はケンブリッジ大の協力を得ながらスズメ蛾の翼実形状の3次元幾何学的モデルと実際3次元羽ばたきの運動学的モデルを用いた計算流体力学的シミュレーションを行い、羽ばたき翼わりの非定常流体现象の数値解析を試みた。静止飛行する蛾の羽ばたき翼 (翼長:4.5cm、周波数:26Hz) 周りの流れの可視化結果を図1に示す。Fig. 1 a、b、c、dは、それぞれa打下ろし中 (downstroke)、b打下ろしから打上げに転じ、翼が翼スパン方向軸回りに大きく捻られる時 (supination)、c打上げ中 (upstroke)、d打上げから打下ろしに転じる時 (pronation) の、剥離渦の様子、翼面上、及び剥離渦の断層面における圧力分布 (濃い色が低圧を示す) を表している。先に述べた前縁剥離渦、この渦を安定させる前縁に沿った軸流れが捉えられている。打下ろし開始から発生した剥離渦は、翼が水平位置になる時に最も発達し、翼面上に大きな負圧領域を形成する。この負圧領域のために翼が発生する鉛直上向きの空気力が大きくなる。打下ろしから打上げに転じる時には、翼前縁翼端側の剥離渦は翼面から離れ、再び翼後縁で翼面に近づくため、翼端側には翼面から離れたフック状の渦が見られる。打上げ時にも、打下ろし時と同様に前縁剥離渦が形成され剥離渦に面した翼面に負圧領域が形成されるが、この時、翼面は水平方向を向いており翼が発生する空気力はおおまかに水平横向きで、打ち下ろし時に発生した鉛直上向きの空気力を打ち消すことはない。この前縁剥離渦メカニズムによって、蛾は自重を支えるだけの鉛直上向きの空気力を発生している。

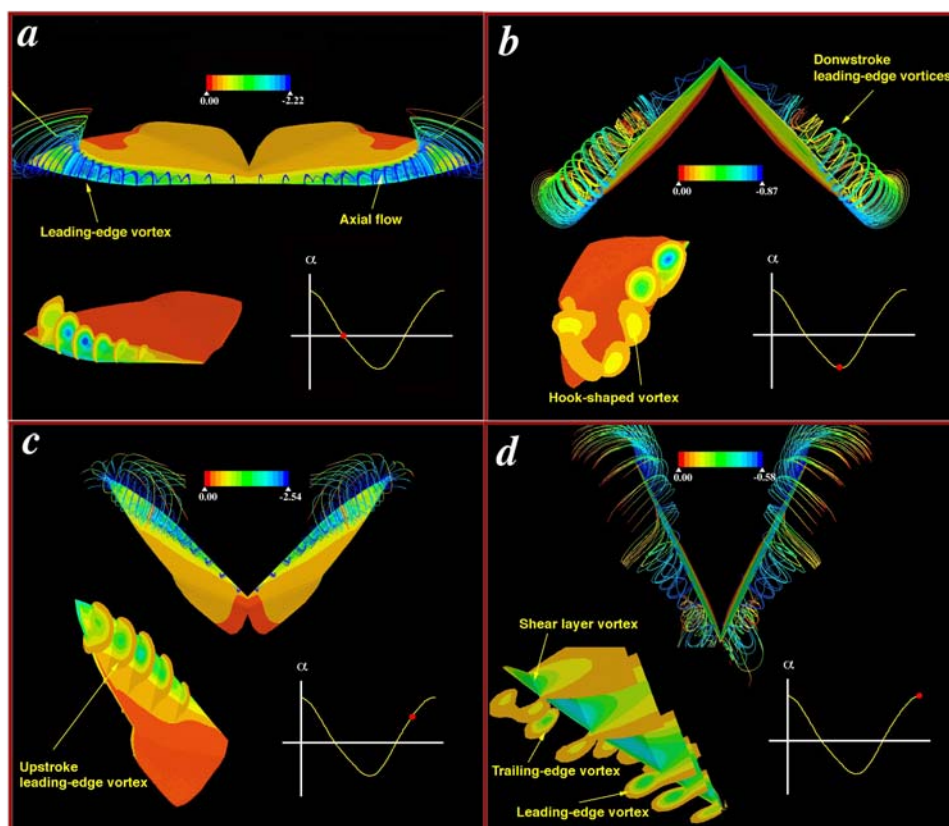


Fig.1 3D vortex structures around a flapping hawkmoth wing

3. 生物型飛行の力学シミュレータ

これまでの個別昆虫の拡大相似模型による静止飛行のみが研究されてきているが、生物飛行原理の全体図が見えてこない可能性があると思われる。また、昆虫羽の弾性変形や慣性力が完全に無視されていることや自由飛行を再現できないことなどから、もはや模型試験による研究が限界とな

っており、これから厳密な幾何学、運動学及び力学モデルに基づいた自由飛行を再現できるシミュレーションが有効且つ確実な手法となってくるであろうと思われる。我々は、現在科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業・さきがけ研究では、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「生物型飛行の力学シミュレータ」を構築している。このような厳密な力学的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自由飛行に関わる力発生のメカニズムと安定飛行のメカニズムをとともに解明することが可能となる。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連成問題への挑戦的な解法も期待される。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の解明が可能となり、近い将来鳥や昆虫サイズの小型飛翔体のためのブレイクスルーとなる設計指針の創出が期待されている。

本生物型飛行の力学シミュレータは、以下のように生物飛行の幾何学モデル、運動学モデル及び力学モデルからなっている。

1) 昆虫飛行の幾何学と運動学モデル

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・開発している。昆虫の形状と内部構造のモデリングについては、実際飼育した昆虫(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、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(ローリング、ピッチング、ヨーイング)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。

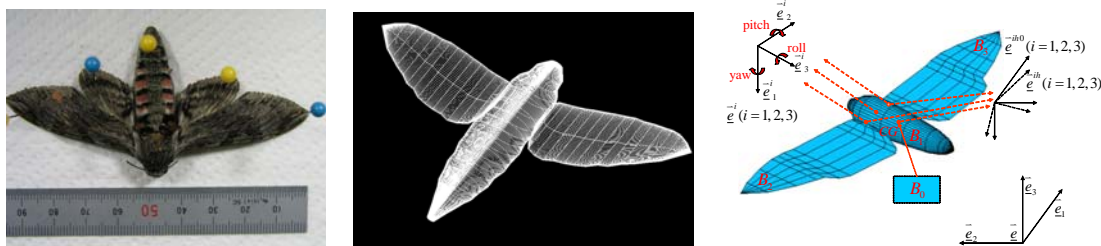
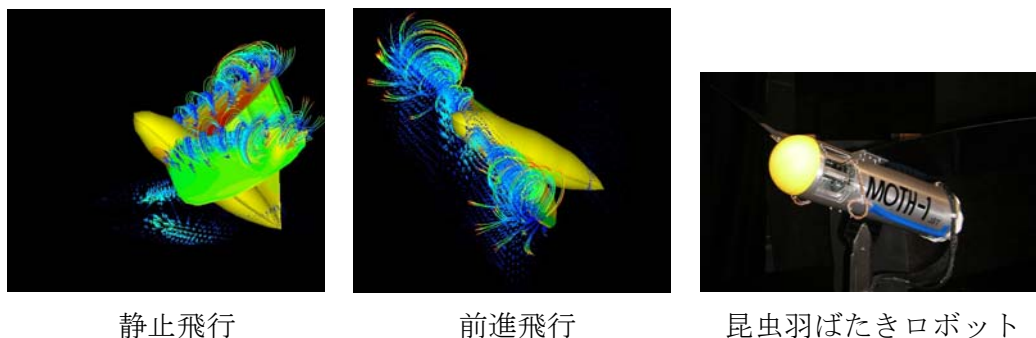


Fig.2 A moth and its geometric-and dynamic-model

2) 昆虫飛行の力学モデル

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。数種類の蛾と蠅の羽・胴体マルチボディモデルを構築し、滑空飛行、静止飛行及び前進飛行等に対して大規模な力学シミュレーションを行った。また昆虫羽の実形状を有する、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た。東大先端研大型風洞を用いた20数種類の羽モデルと実測羽ばたき運動データによる実験では、胴体・羽に作用する6分力を計測・解析し本力学シミュレータの有効性を確かめた。



静止飛行 前進飛行 昆虫羽ばたきロボット
Fig.3 Leading-edge vortices in a hovering-and forward-flight and a flapping robo-moth

5. おわりに

今後本生物型飛行の力学シミュレータを用い、センチメートルサイズの鳥からミリサイズの昆虫に至る幅広いサイズの飛翔生物に対して、リアリスティックな幾何学モデル、運動学モデルおよび力学モデルを構築し、静止飛行や前進飛行及び旋回飛行に関する大規模な力学シミュレーションを行う。本研究で得られる飛翔生物の形態学的データ、胴体・羽の3次元幾何学モデルと行動学的データ、羽の3次元羽ばたき運動学モデルと胴体・羽の力学的データ、胴体と羽のダイナミクス特性（慣性回転モーメント）、空気力学的特性（揚力や推力、消費パワーや効率）、安定飛行特性（自由飛行時の胴体のpitch, roll, yaw運動）を統括し、生物飛行の形態学データベースと生物飛行の力学データベースとの2つのデータベースを構築することにより、飛翔生物の形態学的多様性（胴体や羽の形態の相違）、運動学的多様性（羽ばたき周波数などの相違）そして力学的多様性（サイズや形状及び運動による揚力や推力発生や安定飛行のメカニズムの相違）などを解明することが可能となる。

一方、羽ばたき飛行原理の解明が遅れていることや羽ばたき機構の複雑さと模擬の困難さなどで、最近小型の固定翼飛行機やヘリコプタが盛んに研究・開発されている。このような固定翼や回転翼をもつ飛行体は通常サイズが小さくなると安定性が極端悪くなるため、それぞれの最適飛行の許容範囲、あるいは限界がどこにあるのか、または羽ばたき飛行に比べてどこが劣れているのか（もしかして勝っているのか）が、いまだに理路整然と説明されていないままである。そこで固定翼飛行機と回転翼を持つヘリのような小型飛行体についても、「生物型飛行の力学シミュレータ」に基づき幾何学モデル・運動学モデル・力学モデルを構築し、生物の羽ばたき飛行同様、自由飛行の力学シミュレーションを行う。得られる結果は、飛翔生物の結果と比較・検討し、羽ばたき飛行、回転翼による飛行及び固定翼による飛行の、それぞれの力学的メリットやデメリット、最適飛行の範囲や限界などの問題点を明らかにすることが期待されている。

参考文献

- 1) Ellington, C.P., Van Den berg, C., Willmott, A.P., and Thomas, A.L.R. (1998). Leading-edge vortices in insect flight, *Nature* **384**, 626.
- 2) Dickinson, M.H., Lehmann, F.O., and Sane, S.P. (1999). *Science* 284, 1954-1960.
- 3) H. Liu (2002), Computational biological fluid dynamics: digitizing and visualizing swimming and flying, *Intergrative and Comparative Biology (American Zoologist)*, Vol. 42, Iss. 5, pp. 42-51.
- 4) H. Liu (2004), Simulation-based Biological Fluid Dynamics, *ASME Applied Mechanics Reviews*. (in press)