

生き物の飛翔のリアリスティックな再現に向けて Toward a realistic simulation of living things in flight

中橋和博, 東北大学工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 01, E-mail:naka@ad.mech.tohoku.ac.jp
Kazuhiro Nakahashi, Tohoku University, Aoba 01, Sendai 980-8579

Flight is a very effective form of transport for insects and birds because it is fast and often safer than traveling upon the ground. However, flight is much more complicated movement than other forms so that it is very difficult to comprehend exactly how the flapping wings generate lift and thrust. In this study, an unstructured grid method is applied to realize a realistic flow simulation of an insect in flight. The flapping wings are treated by the overset unstructured grid method. In this paper, preliminary results are shown and the further research subjects are discussed.

1. はじめに

昆虫や鳥にとって飛行は非常に有効な移動方法である。実際、昆虫の多くは飛ぶことを主な移動手段としており、飛行は生存のための手段でもある。しかし、その飛行メカニズムは複雑であり、何万もの飛行機が常に空中を飛び交っている今日でも、昆虫や鳥が如何に効率よく揚力と推力を発生し、如何に飛行を制御しているかを解明するまでには至っていない[1-4]。

数値流体力学(CFD)は過去30年の間に飛躍的な進歩を遂げ、今日では航空関連のCFDについては成熟時期に近づきつつあるとも言われている。確かに、翼の性能解析、設計には不可欠な道具ともなっている。しかしながら、例えば鳥や昆虫等の周りの流れを‘リアリスティック’に再現するのは未だに困難である。形状の複雑さに加え、高速で動く翅、さらに羽ばたき運動に伴う翅の大きな変形などは、これまで固定翼機を主なターゲットとして発展してきた航空関連のCFDに新たなアルゴリズム開発を要求する。

筆者らのグループでは、非構造格子を用いた計算法を開発してきた。その更なる展開の一つの目標として飛翔昆虫周りの流れの再現を目指している。

昆虫や鳥の飛翔メカニズムの研究は古くから精力的に行われ、数値流体力学による解析も近年着手されて興味深い結果が示されている[5,6]。一般に羽ばたきメカニズム等の研究には、翅のみといった要素的な解析が効率的かつ有効である。しかしながら本研究では、できるだけ忠実に形状および流れを再現することにこだわる。

本研究の目的は、CFDでもって如何に‘リアリスティック’な再現ができるかのアルゴリズム展開を行うことである。形状複雑性、移動物体、流体-構造連成問題、非定常な渦の放出等、何れもが現在のCFDに対するチャレンジングなかつ興味深い課題である。また、計算科学が単に物理的解明手段としてだけでなく、今後より広く一般に受け入れられるためにはリアリスティックにこだわるのが重要と考える。もちろん飛翔メカニズムなり羽ばたきが誘起する非定常な流れの解明が、最も興味深い最終目標である。

ここでは、リアリスティックな再現のためのアルゴリズムの考察、非構造格子法でのアプローチ、現時点までの計算結果、および今後の課題について述べる。

2. アプローチ

近年、この種の生物周りの計算や他の非工学的な対象物まわりの流れをCFDで解こうとする研究が増えつつある。もちろん流れを調べることが最終目標であるが、そこに用いられる様々なアプローチは計算法として非常に興味深い[例えば7]。

昆虫や鳥の計算で要求される計算精度は航空機程ではな

いものの、粗い計算では全く意味がない。空気の流れを揚力と推力に変えて飛行しているため、航空機同様に揚力と抗力の比が重要となり、そのためには翅表面近くの流れを精度良く解く必要がある。一方、リアリスティックな再現には、脚や触覚なども計算空間で表現する必要がある。

航空機解析で一般的に用いられる構造格子は、計算精度の点で有利である。三次元複雑形状については、いくつかの構造格子を重ね合わせるoverset grid法が用いられ、昆虫等の実形状周りの計算にも適用できよう。しかしながら、構造格子を用いる限りその生成に要する労力は未だに大きい。航空機と違って様々な形態を持つ飛翔生物の計算に、何ヶ月もの労力を格子生成のためだけに費やすのは無意味である。

複雑形状を扱うという点では直交格子法が魅力的である。このアプローチの問題点としては、薄い翅の扱いであり、カットセル等の手法を用いる必要がある。また、羽ばたきの動きへの対応も、境界条件設定点の移動で可能とはなるが、境界の移動に伴うカットセルの処理、保存量の精度等、検討すべき課題が多く残されている。

ここでは非構造格子上でNavier-Stokes方程式を解くことを目指す。非構造格子では、格子点が物体面に固定され、羽ばたき等の移動壁でも格子は物体面とともに移動する。従って、直交格子法のようなカットセルのような問題もなく、境界近くの精度が良い。

3. 格子生成

四面体要素による非構造格子の生成法はいくつかの手法が開発され、今日では如何なる三次元形状でもほぼ自動的に生成が可能である[例えば8]。一方、非構造格子法で最も時間を費やさざるを得ない作業は形状定義と表面格子生成である。

今日、三次元形状定義にはCADが用いられる。例えばFig.1はスズメバチのCADデータである。このCADデータの周りに

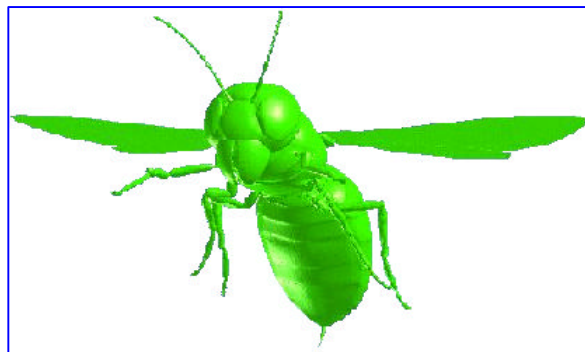


Fig.1 CAD model of a hornet.

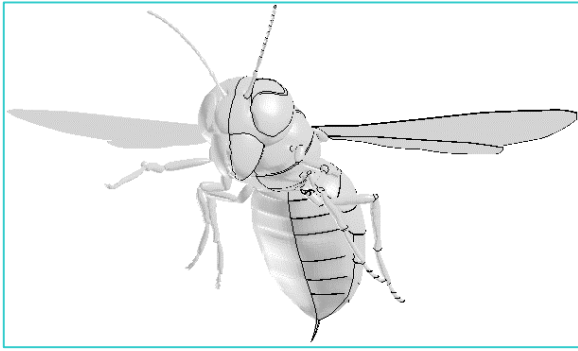


Fig.2 Geometrical feature lines extracted from the CAD data.

四面体格子を生成するには、まずその表面に三角形格子を生成しなくてはならない。この表面格子生成は、直交格子法では不要であり、非構造格子法のボトルネックともなっている。

一般に、CAD データは物体要素同士の接触、隙間、重なり等を持っている。表面格子生成にはこれらを総て除去し、水漏れのないような完全に閉じた一つの表面にする必要がある。CAD データの修正アルゴリズムはまだ改良の余地がある。

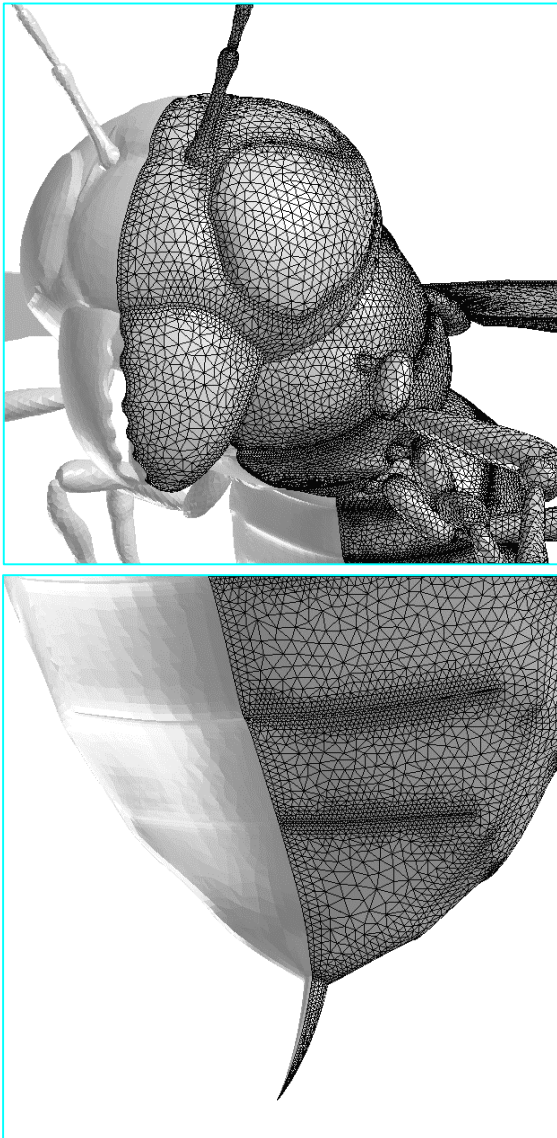


Fig.3 Surface grid on a hornet.

完全に一つの閉じた表面として定義された CAD データからの表面格子生成は、ここでは advancing front 法を三次元曲面に直接張り付ける方法を用いた[9]。この方法により、従来の二元面への写像を用いる方法に比べ作業量がかなり削減されたが、Advancing front 法の出発線の定義が必要となり、三次元複雑形状では煩雑な作業が要求された。それを改善するため、CAD データから角や折れ曲がり線等の形状特徴線を前もって抽出し、それを出発線に用い、かつ PC の GUI ツールとの組み合わせにより、作業効率を飛躍的に高める方法を開発した[10,11]。

Fig.2 は Fig.1 から抽出された形状特徴線であり、更に GUI にて特徴線を補強している。この特徴性を出発線として Advancing Front 法により生成した表面格子を Fig.3 に示す。約 13 万の三角形要素を用いている。そして空間格子のカット面を Fig.4 に示す。空間格子は約 400 万の四面体要素からなる。触覚や脚、針も含めた形状周りの格子生成も、CAD データさえ完全であれば半日程度の作業量で済むまでになっている。

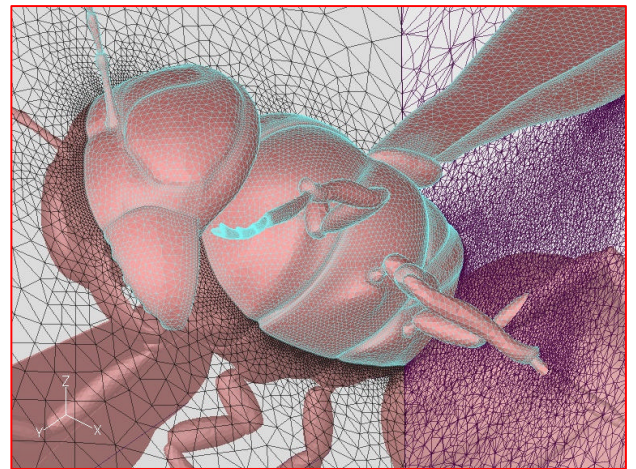


Fig.4 Cut view of tetrahedral grid.

4. スズメバチ周りの流れ（固定した翅）

四面体格子上で Navier-Stokes 解法は、圧縮性流れを対象として開発した節点中心法に基づく有限体積法を、擬似圧縮性手法により非圧縮流れへと拡張した[12,13]。ソルバーの検証は、元の圧縮性ソルバーについては航空機翼等で、また非圧縮ソルバーは 2 次元キャビティー等や三次元流路等で行っている。

翅を固定した場合の定常な流れは、固定翼航空機と同様であり比較的容易である。レイノルズ数 10^4 および翅の迎え角 0 度の条件で計算した圧力分布を Fig.5 に、また流線を Fig.6 に示す。レイノルズ数が低いことから乱流モデルは用いていない。

この種の計算では検証がほぼ不可能であるが、用いたソルバーは他の主に航空機関係で使いこなしていることから信頼性、および結果の妥当性から判断せざるを得ない。その意味で Fig.5, 6 の圧力分布や流線は定性的には妥当と思われる。

羽ばたきのないこの計算結果からスズメバチの飛行を議論するには無理がある。しかし、流線図を眺める限り、腹部の腹側から背側へと巻き上がる流れがあり、それが腹側と背側の圧力差を比較的大きくしているのに気が付く。これが大きな抵抗源になっているのは確かだが、この腹部の上下間の圧力差は前進飛行時の縦安定、姿勢維持に何らかの効果があるのかも知れない。

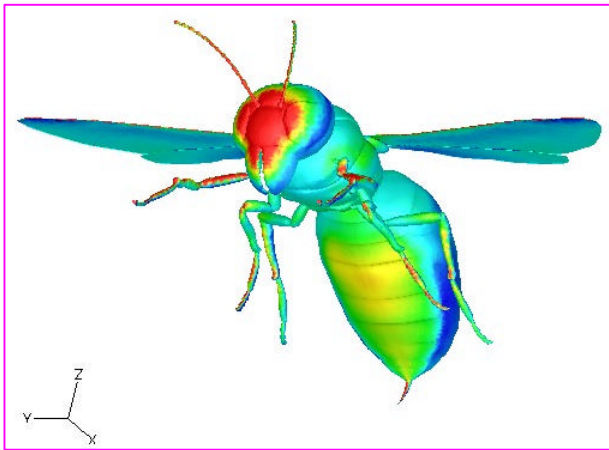


Fig.5 Computed pressure distribution around a hornet without flapping; $Re=10^4$.

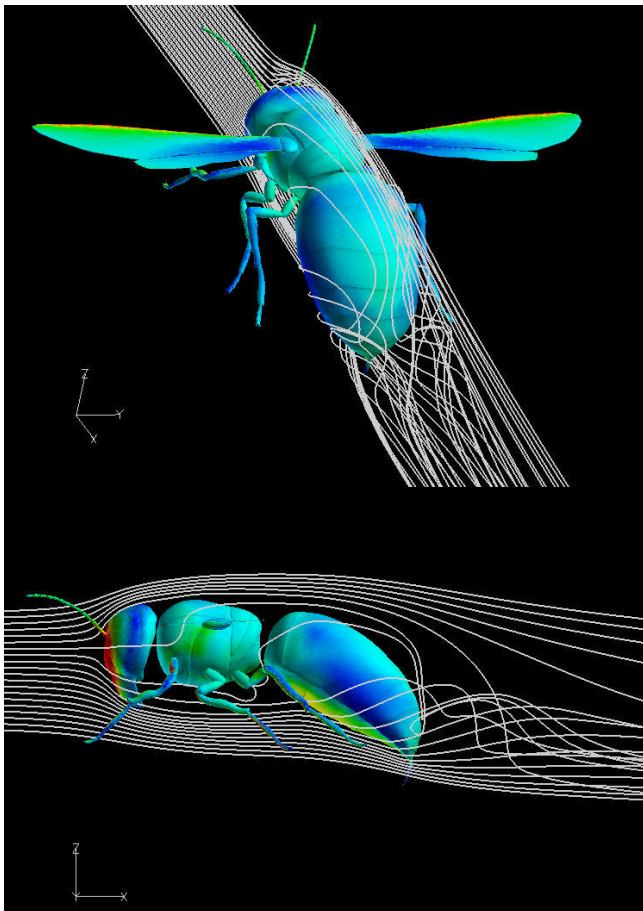


Fig.6 Computed streamlines around a hornet without flapping; $Re=10^4$.

5. 羽ばたきの再現

生物の飛翔で流体力学的に最も興味深いのは羽ばたきである。特に昆虫の羽ばたきによる揚力生成メカニズムについては古くから議論されてきた。また、羽ばたきの移動・変形物体問題はCFDアルゴリズムとしても興味深い課題である。更には、羽の構造と流体との連成問題はCFD研究のホットなトピックでもある。

羽ばたきシミュレーションの第一段階として、非構造格子によるオーバーセット法[14]を適用する。これは、従来の構造格子によるオーバーセット法に比べ、複雑形状に対しても

最小限の格子を重ね合わせるだけでよく、物体が相互に移動する問題に容易に適用できる[15]。

スズメバチの計算では、胴体部と翅に対して別々に格子を生成し、胴体部格子の中で翅格子を上下・ねじり運動させる。Fig.7では、翅周りの格子の胴体格子との境界面を白く表している。胴体格子と翅格子の間の情報交換を行う格子境界面は、物体面からの最短距離でもって判別している。そのため、翅の位置と角度により翅格子の境界面が変化している様子がえられる。

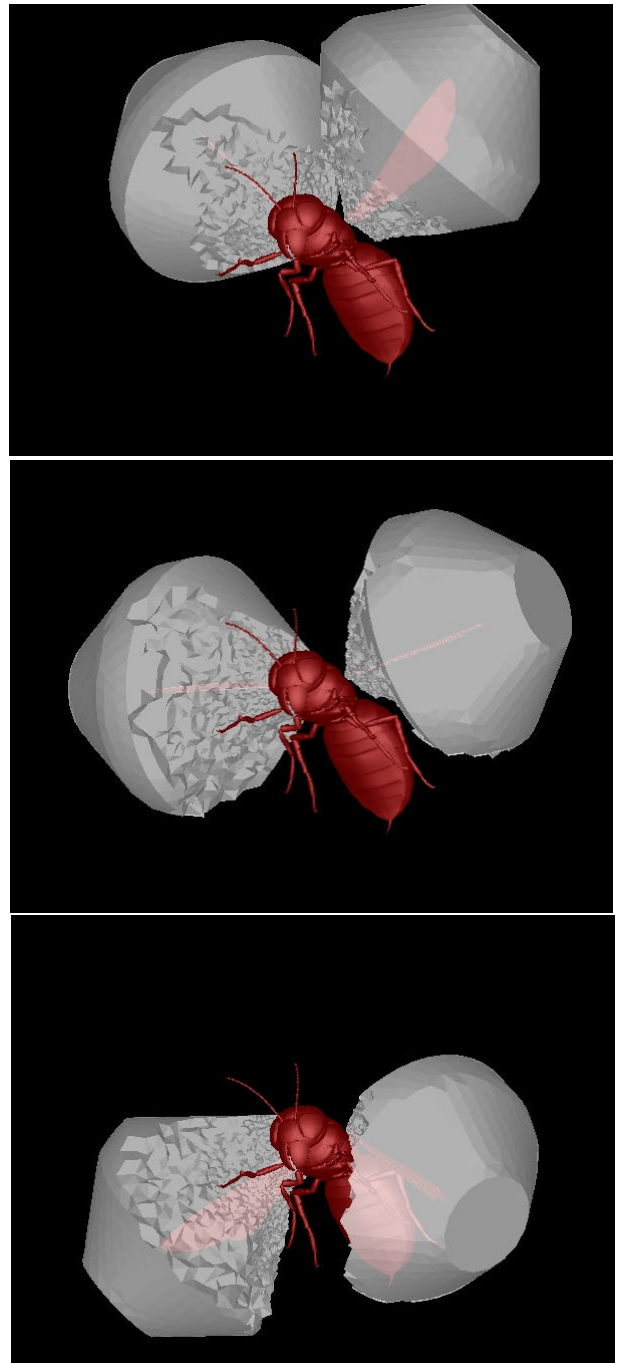


Fig.7 Wing-grid boundaries of the Overset unstructured grids around a hornet flapping wing.

非構造格子オーバーセット法による格子間情報の受け渡しをチェックするため、羽ばたきの計算は圧縮性Euler方程式で行った。移動格子に対しての流束の補正項を追加しているが、時間精度を付けるために必要な内部反復は多大なCPU

時間を要するために用いなかった。

Fig.8 は、翅の上下動および回転の動きを sin 関数で指定してオーバーセット法の確認を行った途中結果である。格子間の情報受け渡しは良好に行われているが、翅の動きの指定に問題があるため、揚力や推力の確認はまだ出来ていない。

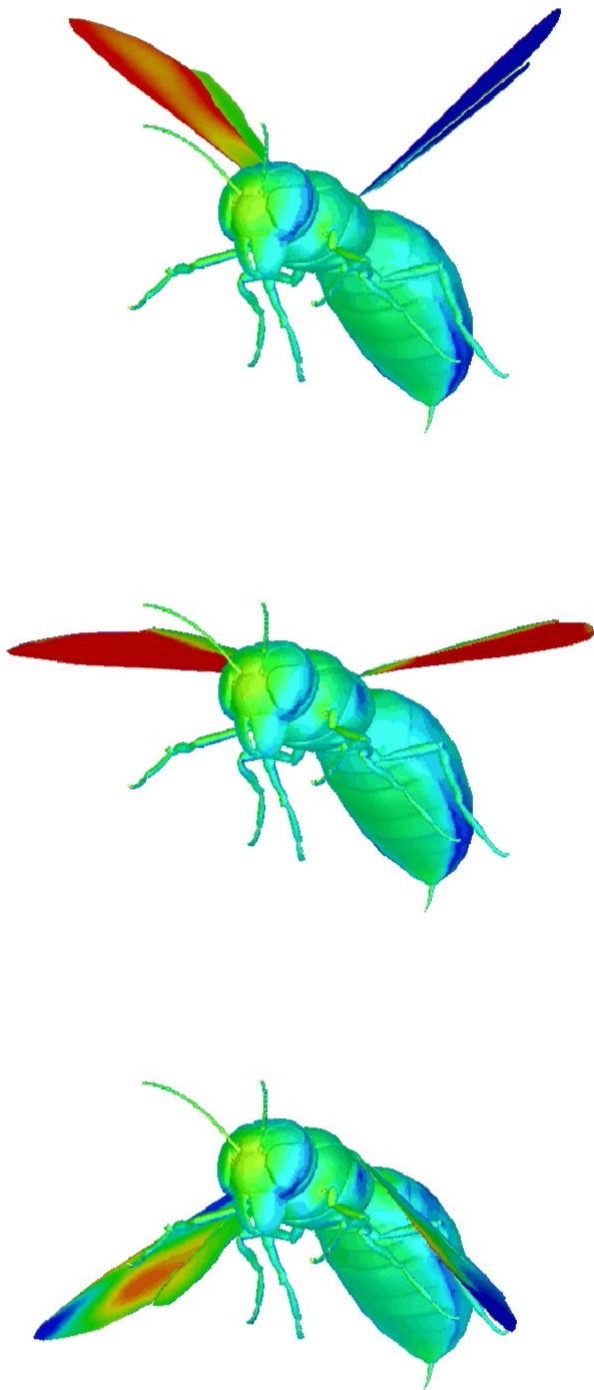


Fig.8 Computed pressure distribution around a hornet with flapping (preliminary result).

6. 翅の変形

羽ばたき飛行する昆虫の忠実な再現において最も重要な課題は翅の変形であろう。昆虫は鳥ほどには頭脳的に羽ばたきをしているとは思えない。むしろ、単純な上下動から、翅の

変形を利用して局所的な流れに対する適切な迎え角を保ち揚力と推力を発生しているのではと推測される。この変形は、翅に見られる‘翅脈’構造(Fig.9a [16])が羽ばたきにつれての変形をうまく制御しているのであろう[16,17]。

この推測を証明するには、翅の変形と空力との連成解析が必要となる。Fig.9(b)は変形解析のための格子である。翅脈を曲げに抗するビームとして、残りは圧力を受けるパネルとして模擬しようとしている。しかし、流体と構造の連成解析の難しさの他に、翅脈部分およびそれ以外の部分の材料データ等の入手も別の大きな課題である。

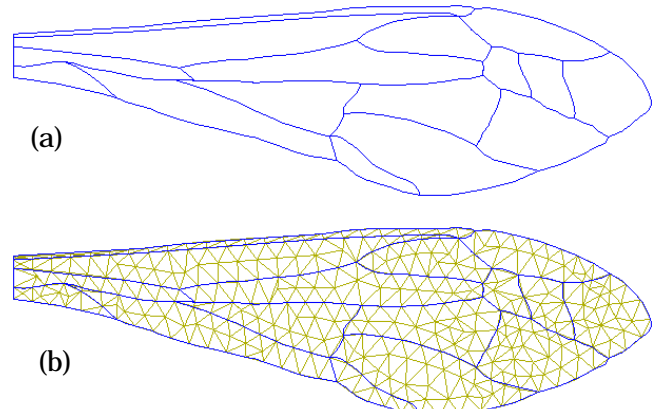


Fig.9 (a) Veins of main wing of a hornet [17] and (b) FEM mesh for deformation analysis.

7. おわりに

スズメバチ周りの流れを CFD でもって再現する試みについて議論し、昆虫等の複雑形状でも、非構造格子を用いることによりさほど難しくなく行えることを示した。しかしながら、羽ばたきを含めた‘リアリスティックな再現’には、構造と流体の連成をも含めた解析技術、および大規模計算の計算負荷を削減するアルゴリズム、あるいは実世界の情報等、様々な課題が残されている。

MEMS 技術によるマイクロ飛行機の研究から昆虫飛翔への興味も増えていると聞く。この種の研究も近い将来には工学的な意味を持つであろう。しかしそれ以前に、生き物の巧みさには感心させられ、好奇心を大いにくすぐられる。また、このような昆虫や鳥の計算科学研究が、次世代を担う子供達の興味を科学技術なり生物に引きつけるのに役立てば、荒唐無稽な計算も少しは意味を持つであろう。

8. 謝辞

この研究は著者の研究室スタッフ、学生によって行われている。複雑形状に対する表面格子生成法は院生の伊藤靖が開発した。ソルバーの改良、非圧縮ソルバー開発と計算の実行は助手の加藤琢真、院生の村山光宏が担当、オーバーセット法と羽ばたきシミュレーションは院生の富樫史弥が行った。そして院生の藤田健は三次元 CAD ソフトである CATIA を使いこなしている。また今後の展開として、翅変形解析では東北大の福永教授、胡助教授に協力を仰いでいる。MEMS 分野で活躍されている東北大の江刺教授には昆虫に関する文献情報を頂いた。またこの研究に対する旭硝子財団からの援助に感謝する。

参考文献

- [1] R. M. アレキサンダー著、東昭訳「生物と運動」、日経サイエンス社、1992。
- [2] 東昭著「生物の動きの事典」、朝倉書店、1997。

- [3] 河内啓二, “ 虫の飛行メカニズム ”, 可視化情報, Vol.20 Suppl. No.1, 2000.
- [4] M. S. Triantafyllou, G. S. Triantafyllou, and D. K. P. Yue, “Hydrodynamics of Fishlike Swimming”, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 32;33-53, 2000.
- [5] H. Liu, C. P. Ellington, K. Kawachi, van den Berg, A. P. Wilmlmott, “A Computational Fluid Dynamics Study of Hawkmoth Hovering”, *J. Exp. Biol.*, 201, pp.461-477, 1998.
- [6] 磯貝紘二, 新本康久, 宇塚智, 「静止流体中で振動する2枚の平板翼まわりの非定常剥離流の解析」第32回流体力学講演会講演論文集 pp.13-16, 2000.
- [7] 第13回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 1999.
- [8] D. Sharov and K. Nakahashi, “A Boundary Recovery Algorithm for Delaunay Tetrahedral Meshing”. *5th Int. Conf. on Numerical Grid Generation in Computational Field Simulations*, pp.229-238, 1996.
- [9] K. Nakahashi and D. Sharov, “Direct Surface Triangulation Using the Advancing Front Method,” *AIAA Paper* 95-1686-CP, pp.442-451, 1995.
- [10] Y. Ito and K. Nakahashi, “Direct Surface Triangulation Using Stereolithography (STL) Data”, *AIAA Paper* 2000-0924, 2000.
- [11] Y. Ito, K. Nakahashi, “Surface Triangulation for Complex Geometries”, *Proc. 7th International Conference on Numerical Grid Generation in Computational Field Simulations*, Ed. B. K. Soni, et. al., pp.709-718, 2000.
- [12] D. Sharov, K. Nakahashi, “Reordering of Hybrid Unstructured Grids for Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel Computations”, *AIAA J.*, Vol.36, No.3, pp.484-486, 1998.
- [13] 加藤琢真, 村山光宏, 伊藤靖, 中橋和博, “非構造格子における非定常非圧縮流れの計算”, 日本機械学会論文集(B編), 66(641), pp.4-10, 2000.
- [14] K. Nakahashi, F. Togashi, D. Sharov, “An Intergrid-Boundary Definition Method for Overset Unstructured Grid Approach”, *AIAA J.*, Vol. 38, No.11, pp.2077-2084, 2000.
- [15] F. Togashi, K. Nakahashi, Y. Ito, Y. Shinbo, T. Iwamiya, “Flow Simulation of NAL Experimental Supersonic Airplane/Booster Separation”, *AIAA Paper* 2000-1007, 2000.
- [16] A. K. Brodsky 著, 小山ら訳, 「昆虫飛翔のメカニズムと進化」, 築地書館, 1997.
- [17] J. Brackenbury, *INSECTS IN FLIGHT*, Blanford, 1992.