

## 非定常羽ばたき翼周りの流れの数値計算

稲田 喜信\*, 青山 剛史\*, 青野 光\*\*, 劉 浩\*\*\*

\*宇宙航空研究開発機構, \*\*千葉大院, \*\*\*千葉大

## Numerical Calculation of Flow around the Unsteady Flapping Wing

by

Yoshinobu Inada and Takashi Aoyama (JAXA)

Hikaru Aono (Graduate School of Chiba University) and Hao Liu (Chiba University)

### ABSTRACT

Aerodynamics around unsteady flapping wings is analyzed by using CFD techniques. Two types of flapping wing are modeled and analyzed referring to the hovering motion of hawkmoth and honeybee. Multi-block technique is used to make the suitable calculation grids for wing and body, and the grid-overset technique is used for the interpolation of physical values between those grids. CFD results show several vortices are generated at the leading edge, tip, and the trailing edge of flapping wings which comprise the complex flow fields around the wings and a body. The analysis also clarified the leading edge vortex significantly contributes to the generation of lift. Subsequent acoustic analysis is conducted referring to the CFD results to simulate flapping sound of honeybee. Directivity of sound propagation is recognized showing strong sound propagation in the front direction. Consequently, many features of complex flow around the flapping wing and its sound generation are clarified both qualitatively and quantitatively by using CFD and acoustic techniques.

### 1. はじめに

鳥や昆虫が行う羽ばたき飛行は、航空機のような固定した翼によって生成される空気力ではなく、非定常な往復運動を伴う翼によって生成される空気力を利用した飛行方法である。翼の周囲の流れ場は羽ばたき運動によって短時間の間に複雑に変動し、実験的手法によってその性質を詳細に把握することは非常に難しい。スズメガ(hawkmoth)やショウジョウバエ(fruit fly)といったいくつかの生物種については精力的な実験例があるが<sup>(1-6)</sup>、計測手法や装置性能の制約により流れの性質の一面が明らかにされたのみである。そこで、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)を用いて、羽ばたき運動時の流れの性質を詳細に解析する試みが行われている<sup>(7-12)</sup>。また、飛行中の昆虫から聞こえる羽ばたき音は、翼の運動によって生じる翼面上の圧力変動を音源として発生していると考えられるが、音の周波数や指向性などの特性と翼の運動との関係についての研究は過去に例がなく、その詳細は未だ明らかにされていない。一方で、防災や環境のモニタリングを目的とした小型飛翔体(MAV)の研究が進められているが<sup>(13, 14)</sup>、生物型の羽ばたき運動を応用したMAVが実現されれば、飛行中の音を制御する技術も必要になると考えられる。そこで本研究では、CFD技術を用いて昆虫の羽ばたき運動時に翼周辺に形成される流れ場や翼表面に生じる圧力変動を解析し、さらにそれを音源として発生する羽ばたき音の解析を行ったので報告する。

### 2. 解法

#### 2. 1 流体ソルバ、計算格子

流体解析ソルバは擬似圧縮性を用いたNavier-Stokes方程式を有限体積法により離散化したものである<sup>(7-10)</sup>。時間差分に対しては陰解法(Euler implicit scheme)を用い、高速化とメモリ節約のため因数分解による線形化(approximated factorization)を行っている。対流項は3次風上差分のMUSCL法を用い、粘性項は中心差分によって離散化している。

計算格子はO-O型で、昆虫の翼や胴体の形状の違いを考慮してそれぞれの形に応じた適合格子系を生成し、2枚の翼と胴体のブロックからなるマルチブロックを形成している。ブロックが重なり合う領域ではオーバーセット格子法を導入して物理量の補間を行う。Fig.1に計算

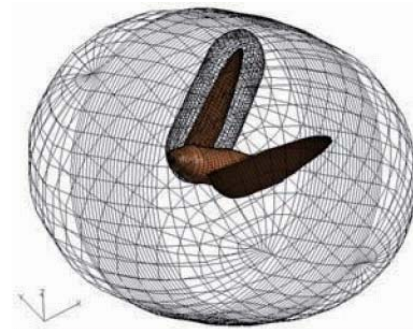


Fig. 1 Calculation grids (hawkmoth)

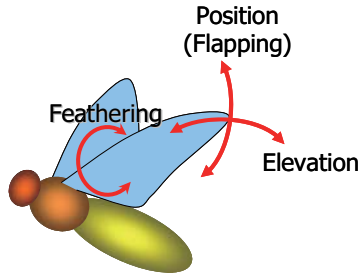


Fig. 2 Definition of wing motion

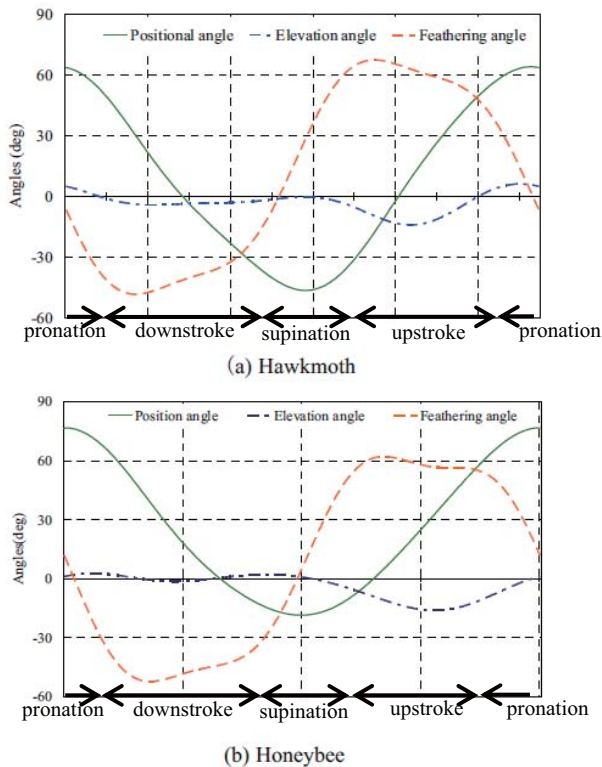


Fig. 3 Wing motion of hawkmoth and honeybee

格子の例を示す。その他の詳細については文献(7-10)を参照されたい。

## 2. 2 運動解析

本研究ではスズメガ(hawkmoth)とミツバチ(honeybee)の2種の昆虫を取り上げ、それぞれのホバリング飛行(空中静止飛行)時の翼の運動を解析対象としている。それぞれの運動は文献(2, 6)において飛行時の撮影画像をもとに解析されており、Fig.2に示すような翼の羽ばたき面内における打ち上げ、打ち下ろし運動の角度(position or flapping angle)、羽ばたき面に垂直な方向の運動の角度(elevation angle)、および翼のひねり運動の角度(feathering angle)という3つの角度の時間変動が計測されている。計測データは離散値であるため、3次の

Fourier級数近似を用いて連続値を作成したものがFig. 3である。

CFD計算では、得られた翼の運動データにもとづいて時間ステップごとに翼周りの計算格子を決定し、外側にある胴体の計算格子(Fig.1参照)との間で物理量の補間を行いながら、非定常羽ばたき運動の数値計算を行っている。これによって、翼と胴体周囲の流れ場、揚力、抗力、および翼表面の圧力分布などを得ている。

## 2. 3 音響解析

羽ばたき運動に伴う流体现象の一つとして、羽ばたき音の解析を行う。羽ばたき音は翼表面上の圧力変動を音源として発生していると考えられ、CFDによって得られた圧力変動の計算結果を用いて音響解析を行う。解析に用いる方法はLighthillの音響アナログにもとづくFfowcs Williams and Hawkings(FW-H)方程式<sup>(15)</sup>を用いた音響コードである。音源としては双極子音源までを考慮することとし、以下に示したFarassat Formulation 1<sup>(16)</sup>に従うFW-H式を用いる。

$$p(x,t) = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{\partial}{\partial t} \int \frac{\rho_0 v_n}{r\Lambda} d\Sigma + \right.$$

$$\left. \frac{1}{c_0} \frac{\partial}{\partial t} \int \frac{p_b \cos \theta}{r\Lambda} d\Sigma + \int \frac{p_b \cos \theta}{r^2 \Lambda} d\Sigma \right) \quad (1)$$

$$\Lambda \equiv (1 + M_n^2 - 2M_n \cos \theta)^{1/2} \quad (2)$$

$p(x,t)$ : 音圧,  $\rho_0$ : 空気密度,  $v_n$ : 翼面の法線方向の流速,  $c_0$ : 音速,  $p_b$ : 翼面の圧力,  $\theta$ : 翼面の法線方向から見た観測点の角度,  $r$ : 翼面の音源と観測点との距離,  $\Sigma$ : 影響面,  $M_n$ : 翼面の法線方向の速度のMach数

(1)式右辺の第1項は厚みを持つ翼が空気を押し分けながら移動する際に生じる音で「翼厚音(thickness noise)」と呼ばれ、第2、第3項は翼表面の荷重(圧力)の変化によって生じる音で「荷重音(load noise)」と呼ばれる。昆虫の場合は翼の厚みが非常に小さいため、後者の荷重音が支配的と考えられる。

## 3. 結果および考察

### 3. 1 CFDの解析結果

Fig.4にCFD計算によって得られた翼表面上の圧力変動を示す。また、計算に用いた昆虫の諸元はTable 1の通りである。Fig.4は打ち下ろし(downstroke)時の翼上面の圧力分布であるが、スズメガ、ミツバチともに翼の打ち下ろしに伴って翼の前縁に負圧領域が広がっていることがわかる。Fig.5はこの時の翼の周囲の渦の様子を等渦度面表示したものである。この図によれば、打ち下ろ

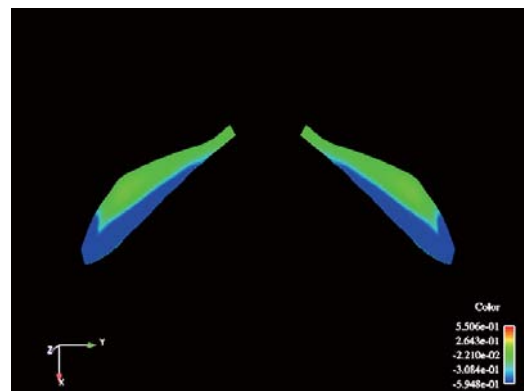
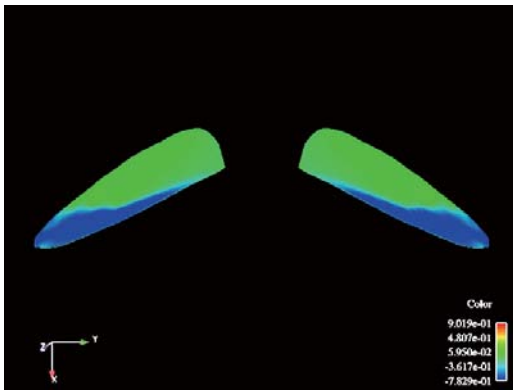
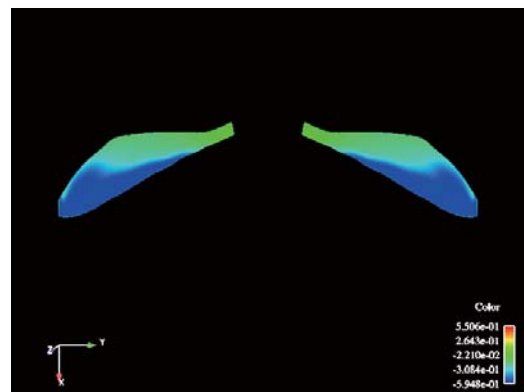
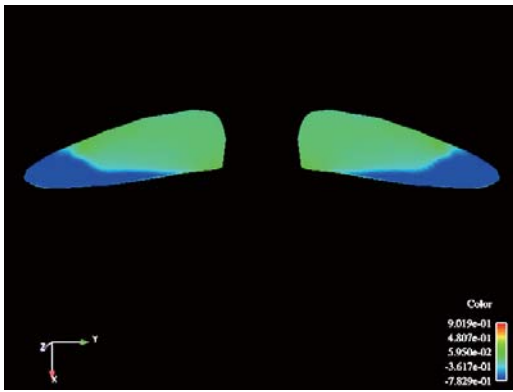
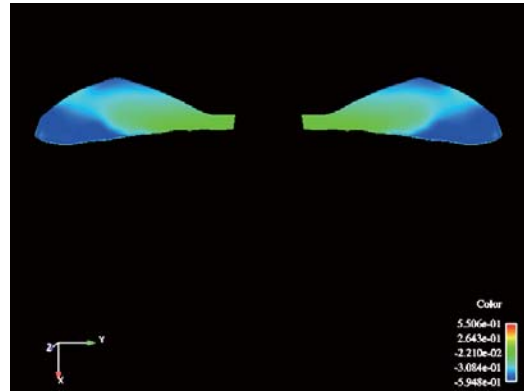
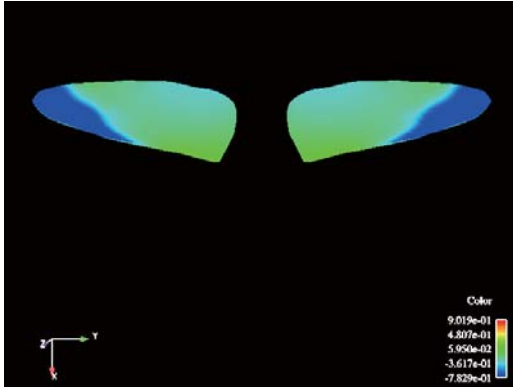


Fig.4a Pressure distribution on upper surface of hawkmoth wing during downstroke.

Fig.4b Pressure distribution on upper surface of honeybee wing during downstroke.

Table 1 Wing size and motion parameters of hawkmoth and honeybee

Name	Span length, $R$ (mm)	Chord length, $c_m$ (mm)	$Re$
Hawkmoth	50.0	18.30	6300
Honeybee	9.7	2.39	1123
Name	Body angle (deg)	Stroke plane angle (deg)	$K$
Hawkmoth	39.8	15.0	0.298
Honeybee	50.0	0.0	0.244

$Re$ : Reynolds number ( $=c_m U_{ref}/\nu$ ),  $K$ : reduced frequency ( $=\pi f c_m/U_{ref}$ ),  $U_{ref}$ : Mean wing tip speed,  $f$ : wing beating frequency,  $\nu$ : kinematic viscosity of air

しの際に翼の前縁から前縁剥離渦(Leading Edge Vortex: LEV)が生成されており、それがFig.4の前縁付近の負圧領域の分布と対応していることがわかる。羽ばたきの一周期の計算結果では、LEVは打ち下ろし、あるいは打ち上げの開始直後から終了まで安定に維持されていることが示されており、この間翼上面の広い範囲に負圧領域、反対側に正圧領域が形成されて翼を押し上げていることから、これが昆虫の重量を支える主要な揚力を担っていると考えられる。また、Fig.5ではLEVだけではなく先端付近に翼端渦(Wing Tip Vortex: WTV)、後縁付近に後縁剥離渦(Trailing Edge Vortex: TEV)が発生し、また打ち下ろしの後半で翼端付近のLEVの形が崩れるbreak-down

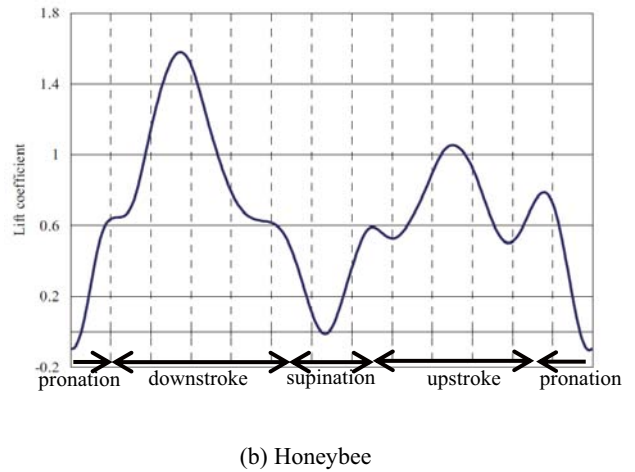
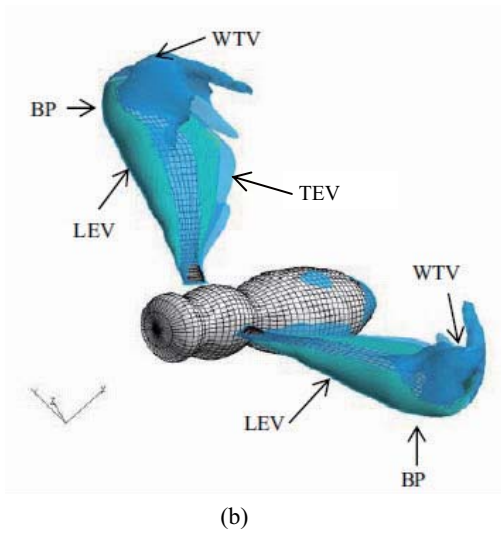
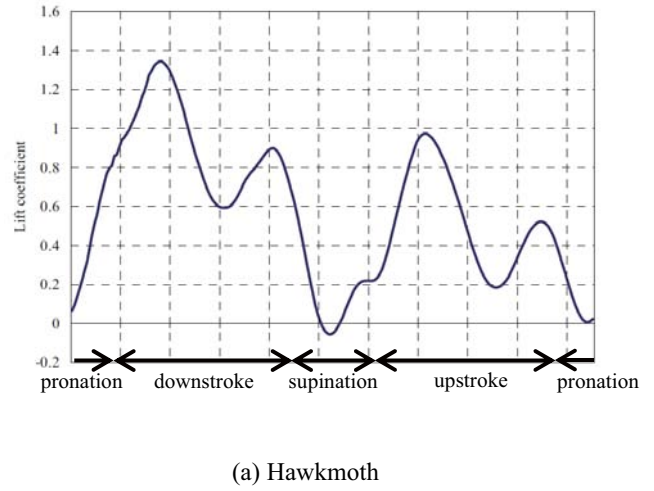
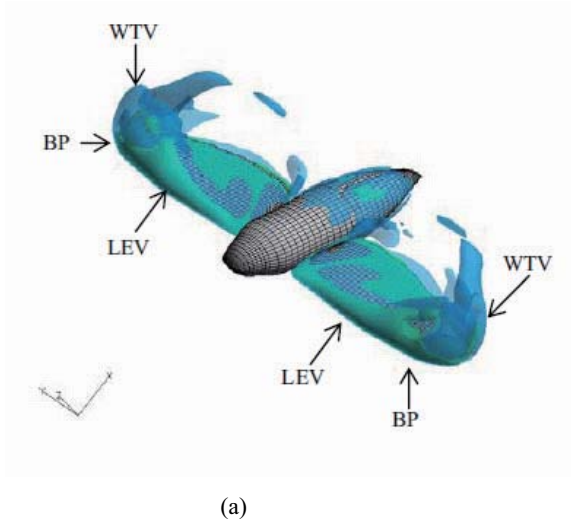


Fig.5 Iso-vorticity surface around flapping wings at mid-downstroke: (a) hawkmoth, (b) honeybee.

(LEV: leading edge vortex, WTV: wing tip vortex, TEV: trailing edge vortex, BP: break-down position of LEV)

Fig.6 Time course of lift coefficient during one flapping cycle: (a) hawkmoth, (b) honeybee.

が生じていることが示されており、全体として複雑な流れ場が形成されていることがわかる。

Fig.6は羽ばたきの一周期での揚力変化を示しているが、打ち下ろし、あるいは打ち上げの開始直後から大きなピークが生じており、これがFig.4, Fig.5で示したLEVによる揚力に相当すると考えられる。他にもいくつかの小さなピークが存在しているが、その原因として翼の運動が羽ばたき面内のFlapping運動に加えてElevationやFeathering運動という複数の回転運動が重なり合ったものであり、これが翼の位置や向きを細かく変えて力の上向き成分を変化させること、あるいはこれによって渦と翼との位置関係が変化したり、渦同士の相互作用や渦のbreak-downによって翼に作用する空気力が複雑に変動したりすることが原因となって生じていると考えられ

る。また、Fig.6では羽ばたきの上端あるいは下端において翼を切り返す時のひねり運動(pronation or supination)を行っている間は揚力が小さくなることが示されており、主要な揚力は打ち上げ、あるいは打ち下ろし運動中に発生していることがわかる。

### 3. 2 音響解析結果

前節で示したように、翼の打ち下ろし時には翼の上面、下面にそれぞれ負圧領域、正圧領域が広がり、打ち上げ時にはこの関係が上下に反転した状態が生じる。さらに羽ばたき運動によってこの反転が周期的に繰り返される。これが特徴的な羽ばたき音を発生させる音源になると考えられるが、音源としては典型的な双極子音源であり、(1)および(2)式で示したFarassat Formulation 1にもと



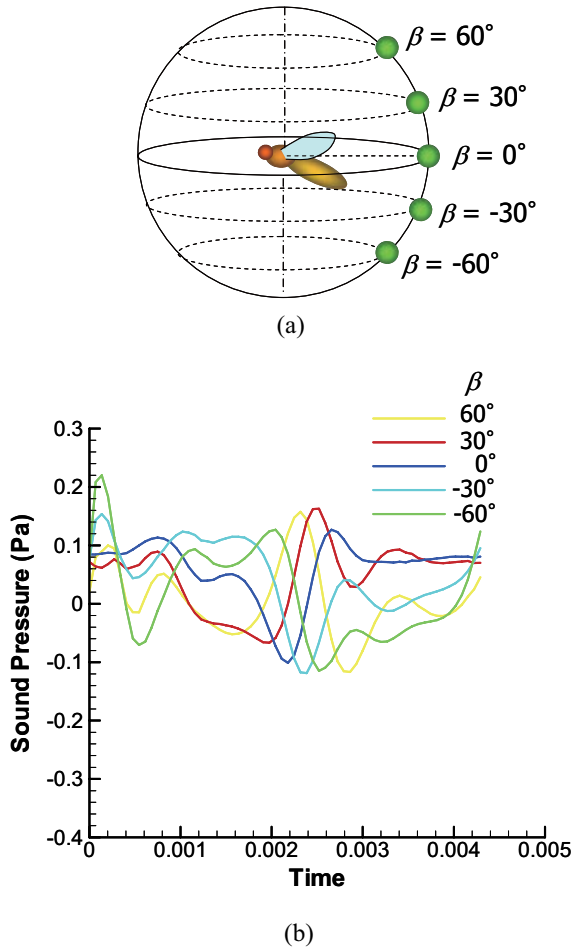


Fig.7 Time course of sound pressure observed at different elevation angles of observer point in the rear of honeybee: (a) observer points, (b) sound pressure at each observer point during one flapping cycle.

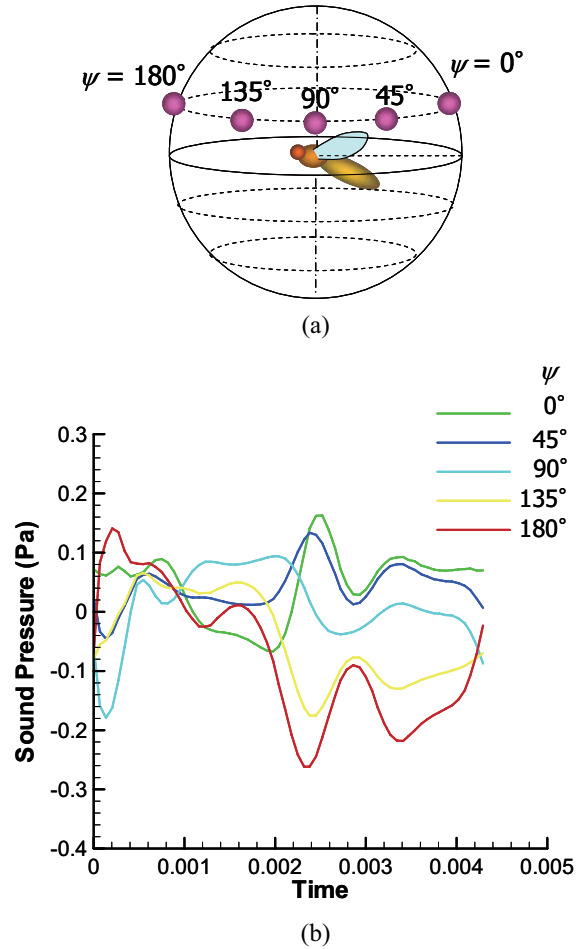


Fig.8 Time course of sound pressure observed at different bearing angles of observer point in honeybee: (a) observer points, (b) sound pressure at each observer point during one flapping cycle.

づいたFW-H式によって解析が可能と考えられる。この解析はCFD計算によって得られたミツバチの翼表面上の圧力変動の結果を入力値として、FW-H方程式にもとづく音響解析コードを用いて行われ、その結果をFig.7、およびFig.8に示す。

羽ばたき音はミツバチの翼基部を中心とした翼長の10倍の半径を持つ球面上で計算され、Fig.7では後方の上下方向に並んだ数箇所の点における音圧(sound pressure)の計算結果を示している。音圧の波形は揚力の変動と同様に高次の成分を含んでおり、音の発生が打ち上げと打ち下ろしという基本周波数の運動のみによって行われているのではないことを示している。この理由として、前節でも述べたように羽ばたき運動はFlapping運動以外にもElevationやFeathering運動を含み、これらが位相差を伴いながら重なり合うことによって、高次の波形成分が生成されていると考えられる。図における音圧の振幅は音の大きさを表しているが、Fig.7に示した上下方向の5箇所の点では振幅の変化は少なく、上下方向には音の指

向性があまり無いことを示している。一方で、Fig.8では前後方向の数箇所における音圧の計算結果が示されているが、前方の点ほど波形の振幅が大きく、音の大きさに指向性があることを示している。即ち、ミツバチが飛行する際、進行方向に羽ばたき音が大きく、後方になるにつれて小さくなることを示す。

#### 4. 結論

本研究ではCFDと音響解析コードを用いて昆虫の羽ばたき運動時の翼周りの流れの詳細な解析と、羽ばたき音の解析を行った。その結果、以下のような項目を指摘することができた。

- (1) 昆虫の羽ばたき運動に伴って翼の周辺には前縁剥離渦(Leading Edge Vortex: LEV)を始めとして、翼端渦(Wing Tip Vortex: WTV)、後縁剥離渦(Trailing Edge Vortex: TEV)などの各種の渦が発生し、複雑な流れ場を形成している。
- (2) 上記の渦のうちLEVは打ち下ろし時、および打ち

上げ時の翼の上面の前縁に沿って発達し、広い範囲で翼の上面に負圧領域を形成する。同時に翼の下面側には正圧領域が形成されることから、両者によって上向きに大きな力(=揚力)が発生している。

- (3) 揚力の変動に見られるピークの位置はLEVの発生のタイミングと相関があり、LEVが強い揚力を発生させていることを裏付けている。
- (4) 羽ばたきに伴う翼表面上の圧力変動は、羽ばたき音を発生させる音源となっており、翼の運動と音の波形や指向性などの特性が相互に関係している。
- (5) ミツバチの羽ばたき音では、上下方向には音の指向性は弱く、前後方向には前方ほど音が強くなっており、飛行中の羽ばたき音は進行方向に対して大きくなることを示している。

これらの結果は、将来的に羽ばたき翼型の小型飛翔体(MAV)が開発される際の翼形状の設計や運動制御、あるいは騒音対策などの基礎データとなり得るものである。また今後は、計算結果を実際の昆虫の音の計測結果と比較することによって計算の妥当性の検証等を行う予定である。

#### 参考文献

- (1) Ellington, C. P., vandenBerg, C., Willmott, A. P. and Thomas, A. L. R., Leading-edge vortices in insect flight. *Nature* 384, 626-630, 1996.
- (2) Willmott A. P. and Ellington C. P., The mechanics of flight in the hawkmoth *MANDUCA SEXTA*. *J. Exp. Biol.* 200 2705-2722, 1997.
- (3) Ellington, C. P., vandenBerg, C., Willmott, A. P. and Thomas, A. L. R., Leading-edge vortices in insect flight. *Nature* 384, 626-630, 1996.
- (4) Dickinson, M. H. and Gotz, K. G., The wake dynamics and flight forces of the fruit fly *Drosophila melanogaster*. *J. Exp. Biol.* 199, 2085-2104, 1996.
- (5) Dickinson, M. H., Lehmann, F. O. and Sane, S. P., Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight. *Science* 284, 1954-1960, 1999.
- (6) Dickinson, M. H., et al, Short-amplitude high-frequency wing strokes determine the aerodynamics of honeybee flight. *PNAS*; vol.102; no.50; 18213-18218. 2005.
- (7) Liu, H., and Kawachi, K., A Numerical Study of Insect Flight, *J. Comp. Phys.*, 146, 124-156, 1998.
- (8) Liu H., Simulation-based Biological Fluid Dynamics in Animal Locomotion, Transactions of the ASME, *Applied Mechanics Reviews*, 58 No.4, 269-282, 2005.
- (9) Aono, H., and Liu, H., Vortical Structure and Aerodynamics of Hawkmoth Hovering, *J. Biomech. Sci. Eng.*, 1(1), 234-245, 2006.
- (10) 青野, 劉, シミュレーションベースによる昆虫飛行の研究, 第44回飛行機シンポジウム講演予稿集, 342-348, 2006.
- (11) Isogai, K., Fujishiro, S., Saito, T., Yamamoto, M., Yamasaki, M., and Matsubara, M., Unsteady Three-Dimensional Viscous Flow Simulation of a Dragonfly Hovering, *AIAA Journal*, 42 no.10. 2053-2059, 2004.
- (12) Sun, M. and Tang, H., Unsteady aerodynamic force generation by a model fruit fly wing in flapping motion. *J. Exp. Biol.* 205, 55-70, 2002.
- (13) Viieru, D., Tnag, J., Lian, Y., Liu, H., and Shyy, W., Flapping and Flexible Wing Aerodynamics of Low Reynolds Number Flight Vehicles, 44<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9-12 January, Reno, Nevada, 2006.
- (14) Muellor, T. J.(Ed.), Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications (Progress in Astronautics and Aeronautics), American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), p586, 2002.
- (15) Ffowcs Williams, J. E., Hawkings, D. L., Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A 264, 321-342, 1969.
- (16) Farassat, F., Theory of Noise Generation from Moving Bodies with an Application to Helicopter Rotors, NASA TR R-451, Dec. 1975.