

羽ばたき運動中に生じる渦と空気力と空力音の発生に関する研究

青野 光, 吉川 晃平, 石川 仁 (東京理科大学)

Numerical Analysis of Generation of Sound, Aerodynamic Force, and Vortices Associated with Flapping Wing Motion

AONO Hikaru, KIKKAWA Kohei, ISHIKAWA Hitoshi (Tokyo University of Science)

ABSTRACT

Numerical simulations with a high-resolution computational scheme are conducted to investigate the three-dimensional flow around a plunging and pitching wing. The figure-eight wing motion is considered based on observations of the hovering flight of bumblebee *Bombus terrestris*. The Reynolds number is 8800 and Mach number is 0.0485 based on the chord length and the maximum translational velocity of the wing. Fluid dynamics, aerodynamic force generation, and sound generation are analyzed and discussed. Computed results indicate that most of the aerodynamic forces are generated in the transverse motion of the wing due to the downwash and the production of the leading-and trailing-edge vortices. It is found that the generation of the dipole-like vortical structure and the interaction between the leading- and trailing-edge separated shear layers seem to be main source of the sound generated from the plunging and pitching wing.

1. 緒言

小型の鳥類や昆虫は翼の羽ばたき運動を利用し飛行に必要な空気力を発生させ自在な飛行を行う。例えば、ハエ、ハチ、スズメガなどの小型の昆虫は高い運動性と安定性を有し、静止飛行や急旋回が可能である。また、簡単には墜落しないため、小型飛行体などの工学的応用対象として長年研究が進められている。その飛行メカニズムについては、これまでの研究により羽ばたき中に生じる剥離渦、羽の柔軟性、筋骨格筋などの様々な物理現象が関連することが明らかにされている¹⁻⁴⁾。その一方、羽ばたき音(羽音)の解析は限られた種の昆虫の羽音計測⁵⁾や片翼まわりの数値解析^{6,7)}によりその基礎特性が示されているが、音源を明確に特定した上での羽音の発生プロセスは未解明である。

このような背景から、著者らは生物の種類や飛行条件によりその羽ばたき運動が異なることに注目し、小型飛行昆虫の羽ばたき運動中の渦流れと空気力の発生および空力音の発生の関連性について研究を進めている。本研究では、中型昆虫のマルハナバチ(学名 *Bombus terrestris*)をモデルとした羽ばたき運動(8 の字軌跡)する 3 次元翼まわりの流れ場を数値的に解き、羽ばたき翼が作り出す非定常な流れ、非定常空気力、音響場について詳細な解析を行った。その結果について報告する。

2. 計算モデル

2.1. 計算条件

本研究では、マルハナバチを対象とし、翼弦長 $c=0.8\text{cm}$ 、翼スパン長 $b=1.7\text{cm}$ 、羽ばたき周波数 $f=170$

Hz と設定し、静止飛行を想定した。なお、本研究では羽ばたき運動を理想化したモデルとして一般的に使用される二次元な羽ばたき運動(プランジとピッチング運動)を考えている。翼の最大並進速度 U_{ref} を代表速度、翼弦長 c を代表長とし、空気の密度 ρ_{air} 、空気の粘性係数 μ_{air} 、空気の音速 a とし、定義し計算したレイノルズ数は $Re_c = \rho_{\text{air}} U_{\text{ref}} c / \mu_{\text{air}} = 8800$ 、無次元周波数 $k = \pi f c / U_{\text{ref}} = 0.251$ 、マッハ数 $M = U_{\text{ref}} / a = 0.0485$ である。

2.2. 計算対象

図 1 に本研究で用いた翼形状を示す。翼面形状は矩形、翼断面形状は過去の研究⁷⁾を参考にし、長軸に翼弦長 c 、短軸に厚さ $d=0.1c$ を持つ楕円形とした。なお、楕円翼は多数の研究⁷⁻⁹⁾で適用され、羽ばたき翼に関する研究で用いられる翼の一つである。

2.3. 計算手法

本研究では、LANS3D¹⁰⁾を基にした圧縮性流体解析プログラムを利用した 3 次元非定常流体解析を行った。支配方程式は、音速と翼弦長により無次元化した 3 次元圧縮性ナビエ・ストークス方程式を用い、それらを一般曲線座標系に変換したものを有限差分法で離散化し数値的に解いた。空間差分には、6 次精度コンパクト差分^{11,12)}を、数値安定性のため 10 次精度 3 重対角フィルタ^{11,13)}(フィルタ係数 0.495)と合わせて用いた。なお、境界では 2 次精度の陽的差分スキームを適用した。乱流解析には、この 3 重対角フィルタが最小格子幅以下での乱流エネルギー散逸を模擬できるとし、陽的なサブグリッドスケールを用いない陰的ラージ・エディ・シミュレーション(iLES)¹⁴⁾を行った。時間積分には 2

次精度後退差分を ADI-SGS 陰解法¹⁵⁾で解き、時間方向の精度を保つために内部反復¹⁶⁾を 5 回行った。翼まわりの初期流れ場は無風とした。境界条件は、翼の壁面には断熱・滑りなし条件、スパン方向には 10 点重ねた周期境界、外部境界には自由流入流出条件を与えた。翼には後述する羽ばたき運動を計算格子全体の剛体運動として陽的に与えた。なお、境界での音波の反射を最小限に抑えるために外部境界近傍領域(計算領域の中心から半径 $350c$ 以降の領域)にスポンジ領域¹⁷⁾を設けた。計算は羽ばたき運動 5 周期を行い、空気力の時間変化の周期性を確認した上で、最後 3 周期分を用いて、周期平均値を算出した。また羽ばたき運動 1 周期に要する時間ステップ数は 10 万で、局所最大クラーン数は 8 である。

2.4. 計算格子

図 1 に翼まわりの O 型構造格子を示す。遠方境界の影響を十分に小さくするため、計算領域を十分に大きくした(半径 $500c$)。スパン方向には、マルハナバチの翼スパン長と等しい $2.125c$ の長さをとった。総格子点数は 17978445 点である(周方向に 201 点、スパン方向に 445 点、半径方向に 201 点)。翼面から垂直方向に離れる方向の最小格子幅は $3.2 \times 10^{-4} c$ とした。なお、格子収束性は確認済みである。また、羽ばたき周波数の 10 倍までの羽ばたき音の周波数を捕えるために必要な格子サイズが凡そ $1c$ であり、計算領域の中心より約 $30c$ の領域まではそれ以下である。

2.5. 羽ばたき運動

本研究では、羽ばたき運動の理想化モデルとして一般的に用いられるプランジとピッチング運動を適用した。具体的には、過去の研究^{7,18)}と実際に飛翔する昆虫の観察に基づき、翼の中心点の軌跡(プランジ運動)を式(1-a)、(1-b)、翼の迎え角(ピッチング角)の時間変化を式(1-c)、(1-d)としてモデル化を行った。

$$X_w = A_x c \cos(2\pi t/T) \quad (1-a)$$

$$Z_w = A_z c \sin(4\pi t/T + \phi) \quad (1-b)$$

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_a \tanh(1.6/|4t/T - 1.0| - 1.6|4t/T - 1.0|) \quad (1-c)$$

$$\alpha = \alpha_0 - \alpha_a \tanh(1.6/|4t/T - 3.0| - 1.6|4t/T - 3.0|) \quad (1-d)$$

ここで、翼の中心点の座標 $[X_w, Y_w]$ 、振幅 $A_x=2, A_z=0.5$ 、時間 t 、羽ばたき運動の周期 $T=1/f$ 、位相差 $\phi=120^\circ$ 、迎角の中心 $\alpha_0=90^\circ$ 、振幅 $\alpha_a=60^\circ$ とした。迎角(ピッチング角) α は図 2 のように x 軸の正方向から楕円翼の長軸へ反時計回りに至る角を表し、翼は 8 の字型の軌跡を取り、 $0 \leq t/T < 0.5$ を打ち下ろし(式(1-c))と $0.5 \leq t/T < 1.0$ を打ち上げと呼ぶ。翼に作用する空気力の x 軸の正方向成分を抗力 F_D 、 z 軸の正方向成分を揚力 F_L とし、抗力係数 $C_D=F_D/(0.5\rho_{\text{air}}U_{\text{ref}}^2S)$ 、揚力係数 $C_L=F_L/(0.5\rho_{\text{air}}U_{\text{ref}}^2S)$ と定義する。ただし、 S は翼投影面積 $S=cb$ である。

3. 結果と考察

空力係数と羽ばたき運動の時間変化を図 3 に示す。ここでは計算した最終 1 周期分のみをプロットした。周期平均の抗力係数と揚力係数は 0.018 と 0.433 である。

翼を 2 枚とし周期平均の揚力値を見積もると約 $2 \times 10^{-2} [\text{N}]$ であり、本研究では理想化された羽ばたき運動を適用しているが、マルハナバチの自重¹⁹⁾ ($8.63 \times 10^{-3} [\text{N}]$)を支えるに十分な揚力が発生できていることが分かった。

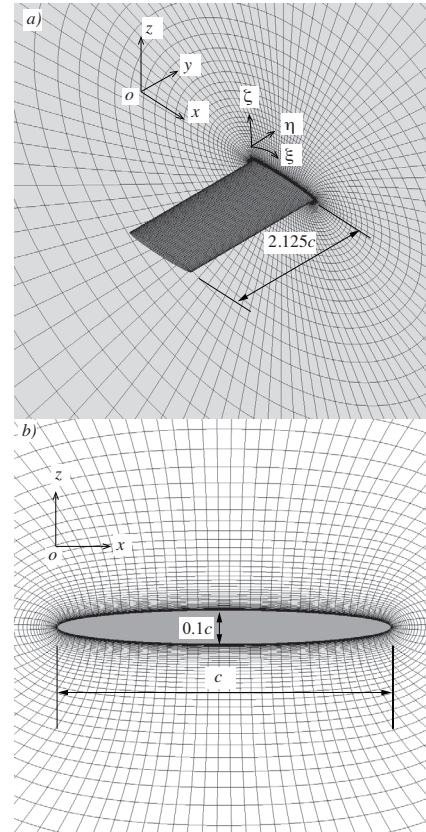


図 1 計算格子：(a)全体図、(b)翼断面拡大図

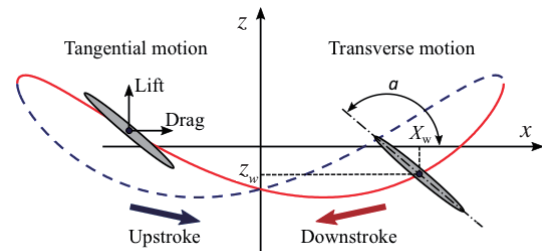


図 2 羽ばたき運動の説明と軌跡：打ち下ろし(実線)、打ち上げ(破線)

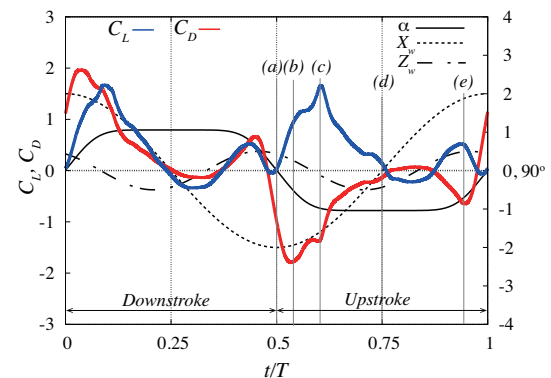


図 3 空力係数(C_L, C_D)と羽ばたき運動の時間変化

はじめに、揚力係数 C_L と抗力係数 C_D の時間変化を考察する。どちらの係数も打ち下ろしと打ち上げの期間中に二つのピークを有する。また、 x 方向の力は常に羽ばたき運動と反対方向の向きを示す。 C_L 、 C_D ともに打ち下ろしと打ち上げでほぼ対称な時系列変化を示す。この考察より、本稿では以後 $t/T=0.5-1.0$ の打ち上げ期間について注目し、議論を進める。

図 3 より羽ばたき運動と空力係数の時間変化との関係を考察する。ここでは、空力係数の特徴的な変化がみられた 5 つの時間(t/T)に注目し考察する。(a) $t/T=0.5$ 時は、迎角(ピッチング角)が 90° となるため、揚力は発生せず、抗力が大きくなる。(b) $t/T=0.535$ 時は、並進運動の加速度が大きくかつピッチング運動の角加速度が小さくなり、抗力は最大となる(1 回目のピーク)。(c) $t/T=0.6$ 時は、並進運動の加速度が大きくかつピッチング運動の加速度も大きくなり、揚力が最大値となる(1 回目のピーク)。(d) $t/T=0.75$ 時は、移動速度が最大値となり、ピッチング角(60°)が一定でありピッチング運動の角速度、角加速度ともに 0 となり、僅かな揚力と抗力が発生する。(e) $t/T=0.935$ 時は、並進運動の加速度とピッチング運動の角加速度が共に大きい。揚力と抗力が発生する(2 回目のピーク)。

続いて、翼まわりの流れ場構造を同じ時間 t/T について考察する。図 4 に翼まわりの瞬間流れ場の可視化結果を示す。等値面は速度勾配テンソルの第二不変量 Q を示し、背景のコンターは y 方向の渦度の大きさを表す。(a) $t/T=0.5$ 時は、打ち下ろし時に発生した前縁渦と後縁渦が正圧面側に確認できる、この時、前縁渦と後縁渦ともに 3 次元的な乱流渦になっていることも確認できる。(b) $t/T=0.535$ 時は、翼が前の打ち下ろし中に生成した複雑な渦流れ中にぶつかっていき、さらに前縁から剥離せん断層が生じる。(c) $t/T=0.6$ 時は、前縁の剥離せん断層からスパン方向に軸を持った渦が放出され、前の打ち下ろし中に生じた後流渦とピッチング運動により生じた後縁渦が干渉し、複雑な渦構造が生じている。(d) $t/T=0.75$ 時は、大規模な前縁剥離渦と後縁剥離渦が翼の背圧面側に生じている。(e) $t/T=0.935$ 時は、前縁剥離渦と後縁剥離渦が後流に移流し、前縁から生じた剥離せん断層と後縁剥離せん断層が干渉し、複雑な後流を形成している。

続いて、音響場に関連性の高い圧力変動場を同じ時間 t/T について考察する。図 5 に翼まわりの瞬間圧力変動分布を示す。(a) $t/T=0.5$ 時、正圧面側に存在し打ち下ろし時に発生し剥離した前縁渦と剥離した後流渦の近傍で強い圧力変動が生じ、翼の正圧・負圧面側で正負符号が異なる大きな圧力変動が生じている。(b,c) $t/T=0.535, 0.6$ 時は、翼の正圧・負圧面側に生じている正負符号が異なる圧力変動領域が拡大していき、(d) $t/T=0.75$ 時に、(b,c) で発達した大きな圧力変動領域が翼から遠方場に伝搬していく様子が確認できる。このときの圧力伝搬の向きは翼の迎角(ピッチング角度)とほぼ一致している。また、翼近傍場で大きな圧力変動が生じている領域は翼から剥離した渦と下向き流れ場が存在する領域である。(e) $t/T=0.935$ 時、再び翼の正圧・負圧面側で符号が異なる圧力変動が生じ、後流より大きさは小さいが圧力変動が遠方場に伝搬してい

く様子も確認できる。

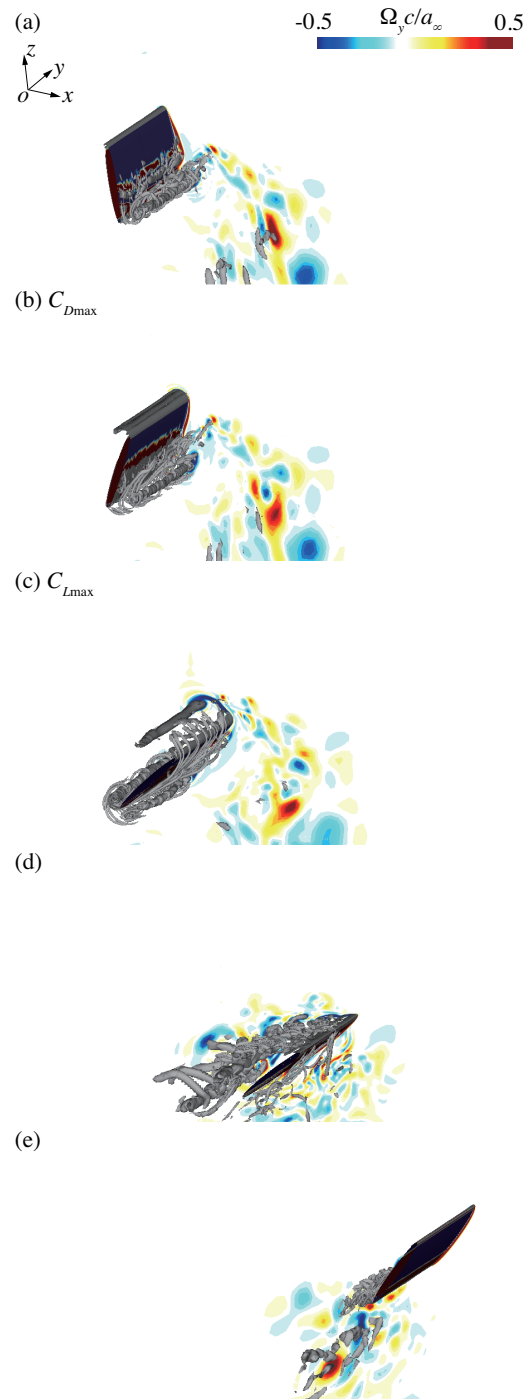


図4 瞬間流れ場の可視化: 倒置面(速度勾配テンソルの第二不変量 Q), 色(スパン方向渦度 w_y)。

最後に、ピッチング運動面内の翼まわりの圧力変動と渦流れのより詳細な考察を行うために、同じ時間 t/T の翼スパン方向に平均した流れ場を考察する。図 6 に翼の遠方圧力変動分布と翼まわりのスパン方向の渦度分布を示し、一番右側の列には翼まわり流れの拡大図を示す。(a) $t/T=0.5$ 時、翼から x 方向に約 $75c$ 程度の位置に強い圧力変動領域が確認できる。翼まわりの渦構造は、図 4 で見られた前縁剥離渦と後縁剥離渦が翼の正圧面側に生じていることが分かる。(b) $t/T=0.535$ 時、

翼近傍での圧力変動領域が拡大している。このとき、前縁から剥離が生じ、正圧面側に前の打ち下ろし中に生じた後縁渦が確認できる。(c) $t/T=0.6$ 時、翼の背圧面側で前縁渦が放出され、後縁では剥離せん断層がロールアップしている様子が捉えられ、総合して背圧面側では双極子のような渦構造になっている。翼近傍場の強い圧力変動領域も拡大していることから、この渦構造が音源になっている可能性は高く、過去の2次元解析⁶⁾でも同様な点についての報告がされている。(d) $t/T=0.75$ 時、(c)でみられた双子渦は翼から完全に剥離し、後流へ移流していく。この時、強い圧力変動が遠方場に伝搬していることが確認できる。(e) $t/T=0.935$ 時、前縁より発生したせん断層と後縁から生じたせん断層が干渉した後流が形成され、この後流せん断層が揺れることによる圧力変動が遠方場に伝搬していることも確認できる。

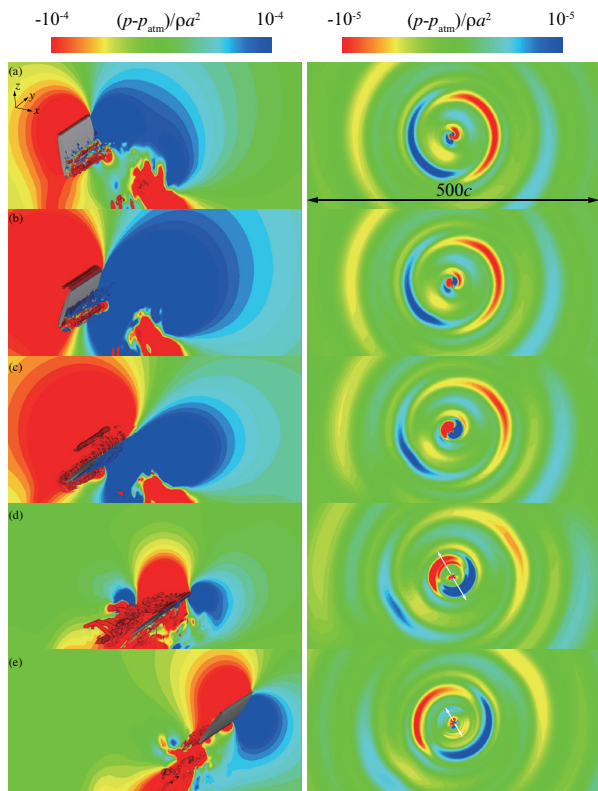


図5 瞬間圧力変動分布の可視化: 翼近傍場(左図), 遠方場(右図).

4. 結言

本研究では、羽ばたき飛行中に生じる羽音の発生プロセスを解明するために、中型昆虫のマルハナバチの静止飛行を対象とし、2次元的な羽ばたき運動中の渦流れ、空気力、音響場の発生に関する数値解析を実施した。本研究で得た知見は以下の通りである。

渦流れと空気力の関係について

揚力と抗力ともに羽ばたきの半周期間に2回ピークがある。どちらも並進移動加速度とピッチングの回転角加速度が大きいタイミングであった。特に、1回目のピークでは、翼と後流渦との干渉、前縁剥離渦の発生、翼の回転運動による循環増加により打ち下ろし

と打ち上げの最後で生じるピークより大きくなる。

渦流れ、空気力、音響場の関係について

翼まわりの領域と翼面上に強い圧力変動が生じていることから、空気力がピーク時に発生した双子の渦が音源となっている可能性が高い。さらに、打ち下ろしと打ち上げの後半では、前縁と後縁のせん断層の干渉によって後流の揺れが音源になっている可能性が高いことも明らかにした。

今後は非定常解析と音源の可視化に加えて、翼端を考慮した3次元羽ばたき運動に関する解析を行い渦流れ、空気力、音響場の関係を明らかにする。それらの結果を基に羽ばたき音の発生プロセスを解明したい。

謝辞

本研究はJSPS科研費 JP18K03955の助成を受けたものです。

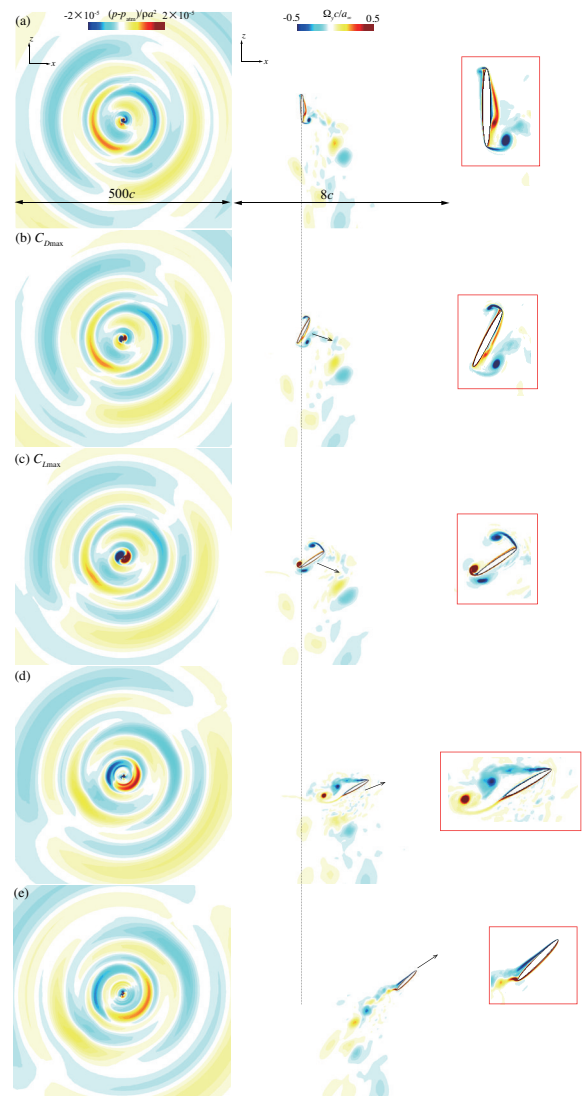


図6 スパン平均瞬間流れ場の可視化: 圧力変動分布(左図), 渦度分布(中図), 近傍渦度分布(右図).

参考文献

- (1) Ellington, C.P., Van den Berg, C., Willmott, A.P., and Thomas, A.L.R., "Leading-edge Vortices in Insect Flight", *Nature*, Vol. 384 (1996), pp. 626-630.

- (2) Dickinson, M.H., Lehmann, F-O., and Sane, S.P., “Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight”, *Science*, Vol. 284, No. 5422 (1999), pp. 1954-1960.
- (3) Shyy, W., Aono, H., Kang, C., and Liu, H., “An Introduction to Flapping Wing Aerodynamics”, *Cambridge University Press*, (2013).
- (4) Liu, H., Ravi, S., Kolomenskiy, D., and Tanaka, H., “Biomechanics and Biomimetics in Insect-inspired Flight Systems”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 371, No.1704 (2016), p. 2015-0390.
- (5) Sueur, J., Tuck, E.J., and Robert, D., “Sound Radiation around a Flying Fly”, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 118, No. 1 (2005), pp. 530-538.
- (6) Bae, Y., and Moon, Y.J., “Aerodynamic Sound Generation of Flapping Wing”, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 124, No. 1 (2008), pp. 72-81.
- (7) Geng, B., Xue, Q., Zheng, X., Liu, G., Ren, Y., and Dong, H., “The Effect of Wing Flexibility on Sound Generation of Flapping Wings”, *Bioinspiration and Biomimetics*, Vol. 13 (2018), pp. 016010-1-016010-12.
- (8) Wang, Z.J., “Dissecting Insect Flight”, *Annual Reviews in Fluid Mechanics*, Vol. 37 (2005), pp. 183-210.
- (9) Alben, S., and Shelley, M., “Coherent Locomotion as an Attracting State for a Free Flapping Body”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 102 (2005), pp. 11163-11166.
- (10) Fujii, K., and Obayashi, S., “High-resolution Upwind Scheme for Vortical-flow Simulations”, *Journal of Aircraft*, Vol. 26 (1989), pp. 1123-1130.
- (11) Lele, S.K., “Compact Finite Difference Schemes with Spectral-like Resolution”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 103, No. 1 (1992), pp. 16-42.
- (12) Abe, Y., Nonomura, T., Iizuka, N., and Fujii, K., “Geometric Interpretations and Spatial Symmetry Property of Metrics in the Conservative Form for High-order Finite-difference Schemes”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 260 (2014), pp. 163-203.
- (13) Gaitonde, D.V., Visbal, M.R., “Pade Type Higher-order Boundary Filters for Navier-Stokes Equations”, *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 11 (2000), pp. 2103-2112.
- (14) Grinstein, F.F., Margolin, L.G., and Rider, W.J., “Implicit Large Eddy Simulation”, *Cambridge University Press*, (2007), pp. 9-60.
- (15) Fujii, K., “Simple Ideas for the Accuracy and Efficiency Improvement of the Compressible Flow Simulation Methods”, *JAXA-SP06029E*, (2007), pp.25-28.
- (16) Chakravathy, S., “Relaxation Methods for Unfactored Implicit Upwind Schemes”, *AIAA paper* (1984), 1984-0165.
- (17) Bodony, D.J., “Analysis of Sponge Zones for Computational Fluid Mechanics”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 212 (2005), pp.681-702.
- (18) Yang, S., Liu, C., and Wu, J., “Effect of motion trajectory on the aerodynamic performance of flapping airfoil”, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 75 (2017), pp. 213-232
- (19) Weis-Fogh, T., “Quick Estimates of Flight Fitness in Hovering Animals, including Novel Mechanism for Lift Production”, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 59 (1973), pp. 169-230