

昆虫羽ばたき時における非定常流体力計測 Measurements of unsteady aerodynamic forces for flapping insects

北川 一敬[†]
Kazutaka Kitagawa

Abstract Studies of flying insect have focused on low Reynolds number effect for biofluid behavior in unsteady regime. The research of atmospheric flight properties is of interest to explore biofluid mechanism by which process of the unsteady forces, wake and vortex the unsteady motions interact with flapping wing. In the present work, to simultaneous measuring of unsteady aerodynamic forces and flapping motion for flapping small beetle with sampling frequency 10 kHz. The live small beetle generated horizontal force by upstroke and feathering at T.D.C, while that generated maximum vertical force at mid-downstroke.

1. はじめに

無人飛行体は、自然災害によって倒壊した建物内部探索、国境警備、火山の活動や大気汚染された地区の観測やパイロットへの被害が懸念される地域など、極限環境での探査を行う事ができる。小型無人飛行体(MAV)の制御は、無線操作やコンピュータによる自立飛行による方法が考えられる。そのため、航空工学・空気力学に加え、電動化技術、カメラ情報収集技術、双方向性通信技術、混信回避技術などの組み合わせ技術の確立が必要である。

MAVの最適な飛行方法はまだ決定されておらず、小型ヘリコプター、羽ばたき翼及び固定翼など様々な方法が考えられている。その中でも、ホバリングや急旋回が可能である羽ばたき翼による飛行が注目されている^{(1)~(6)}。昆虫の翅は翅脈と非常に薄い膜を有し、羽ばたき運動においても折れないしなやかと強度を合わせ持つ。昆虫の翅を模擬した薄翼の低レイノルズ数環境($\sim 10^4$)における空気力学特性の研究も盛んに行われている^{(7)~(8)}。

本研究グループでは、コガネムシ科小型甲虫の羽ばたき飛行の特徴に注目し研究を進めている⁽⁹⁾。これは、MAVの製作を考えた場合、他昆虫と比べて胴体部分の容積が大きく、各種機器の搭載の際に有利であると考えたためである。開発を行うにあたり、羽ばたき飛行のデータ収集として、羽ばたき翼運動の機構、羽ばたき飛行時の流れ場の詳細、発生する流体力の計測は重要な項目である。本稿では、コガネムシ科昆虫羽ばたき時における流体力計測結果と羽ばたき運動の可視化結果を報告する。

2. 実験装置及び実験方法

Fig.1 は本研究室で製作した流体力計測装置の概略を示す。ひずみゲージを取り付けたカンチレバーの端部に昆虫を固定し、羽ばたき運動時に生じる流体力を計測する。カンチレバーには $\phi 2\text{mm}$ 、長さ 130mm のカーボンロッド、ひずみゲージには(株)共和電業製 半導体ひずみゲージ KSP-2-120-E3 (ゲージ率: 120)を用いた。ひずみゲージの回路には、測定感度向上の為に2アクティブゲージ法を用いており、2枚のひずみゲージを使用することで、カンチレバーに生じる曲げひずみを測定している。今回は、固定した昆虫の垂直方向に生じる流体力(F_v)と水平方向に生じる流体力(F_h)を同時計測する為に、2枚1組のひずみゲージを2箇所貼り付けた。水平方向のひずみゲージはカンチレバーの端部から 95mm、垂直方向のひずみゲージは端部から 105mm の位置に貼り付けた。昆虫固定方法として、カンチレバー先端部にカーボンパイプ(O.D. 3mm, I.D. 2mm)を取り付け、その端部に市販のシアノアクリレート系接着剤を用いて昆虫頭部を接着し、テザード状態で固定した。この装置全体の固有振動数は、約 155Hz となった。コガネムシ科昆虫の羽ばたき周波数は最大で約 100Hz 程度であり、測定時にカンチレバーの共振は発生しないと考えられる。

Fig.2 は実験装置全体の概略図を示す。羽ばたき運動時の流体力の測定方法は、ひずみ測定時にロガーから出力される信号を、ハイスピードカメラの入力トリガとし、流体力測定と同時に羽ばたき運動の可視化を行った。測定時には、定常的な羽ばたき運動を行わせ、2秒間のデータを測定した。ロガーには(株)共和電業製 EDX-100A、ブリッジボックスには(株)共和電業製 DB-120T M1、ハイ

[†] 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

スピードカメラには日本カノマックス(株)製 High-Speed-Star-6 を使用した。サンプリング周波数はロガー、カメラともに 10kHz とした。この時、羽ばたき周波数 100Hz の場合、一回の羽ばたきで 100 個のデータが取得できる事となる。また、ハイスピードカメラによる撮影の為、照明としてレフランプを使用した。実験時には、照明の放射熱による見かけひずみの発生を避ける為、ひずみゲージ周辺を断熱材で覆った。

Fig.3 は、実験方法の概略を示す。流体力計測では、一樣流速度 0m/s での実験(Tetherd1)と、昆虫を低速風洞出口付近に固定して、約 2m/s の気流を流し、飛行を模擬した状態で実験(Tetherd2)を行った。測定時には、Tetherd1 では昆虫を取り付けた状態、Tetherd2 では気流を流した状態で補正を行った。その為、測定値には昆虫の自重、気流による抵抗は含まれていない。

3. 実験結果

Fig.4、Fig.5 は Tetherd1、Fig.6、Fig.7 は Tetherd2 の実験結果を示す。供試体は、コガネムシ科昆虫 カナブン(学名: *Rhomborrhina japonica*) とした。供試体の質量 1.485g、体角 16deg、羽ばたき周波数は Tetherd1 で 84.5Hz、Tetherd2 で 83.5Hz である。

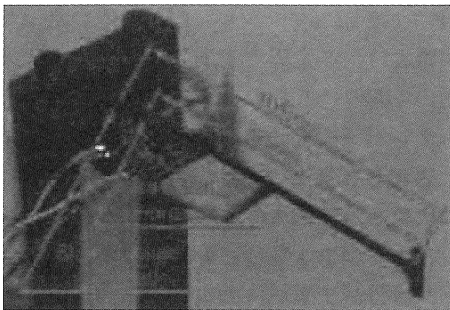


Fig.1 Measurement system of unsteady aerodynamic forces

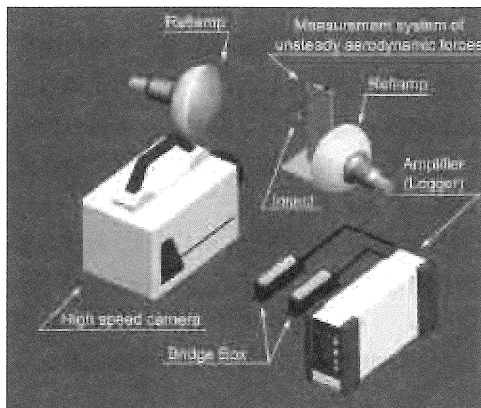


Fig.2 Overall view of experimental system

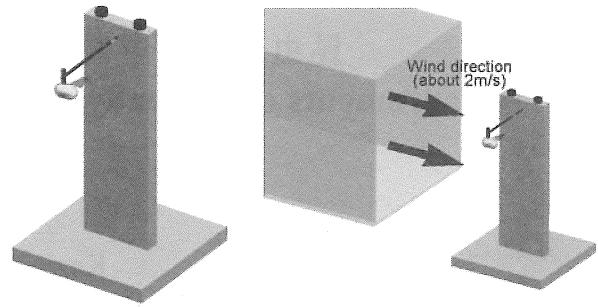


Fig.3 Schematic description of Tetherd1 and Tetherd2

ここで、体角は水平軸と昆虫腹部のなす角として定義した。結果は、同時刻における羽ばたき運動の可視化結果と、流体力の測定結果のグラフを表している。可視化結果は、羽ばたき下死点から 1 周期分を表している。横軸は、1 周期の羽ばたきに要する時間で無次元化した無次元時間 T^* 、縦軸は、測定した各方向の流体力をカナブンの自重 (W) で無次元化した流体力 $Fv^*(Fv/W)$ 、 $Fh^*(Fh/W)$ を表す。羽ばたき 1 周期の実時間は、Tetherd1 で 12.1 ms、Tetherd2 で 12.2 ms となった。グラフ中の赤線が Fv^* 、緑線が Fh^* を表し、 Fv^* は供試体上方向を正、 Fh^* は供試体正面方向を正とした。グラフは流体力の変動を示し、ある時刻における流体力を点としてプロットした。Fig.4、Fig.5 において、 $T^*=0.000\sim 0.375$ が振り上げ過程、 $T^*=0.500$ が T.D.C、 $T^*=0.625\sim 0.875$ が振り下ろし過程、 $T^*=1.000$ が B.D.C である。 $T^*=0.000\sim 0.375$ の振り上げ過程において、 Fh^* は常に正の値となっており、翅前方に前縁剥離渦が生じ、推力が発生していると考えられる。振り上げ中間付近で Fh^* の最大値が発生しており、値は 1.81 である。振り上げ中間付近で、羽ばたき速度が最大となった為と考えられる。また、振り上げ中間を過ぎた後、 Fh^* は減少していくが、 $T^*=0.375$ から Fh^* の減少が緩和されている。T.D.C 付近でのフェザリングにより、翅前方の前縁剥離渦が後方へと流れ、噴流の様な流れが生じていると考えられる。また、 $T^*=0.375\sim 0.500$ にかけて、 Fv^* は急激に増加している。 $T^*=0.500$ において、値は 0.799 となっていることから、後方へと流れた前縁剥離渦により、後方下向きに噴流が発生していると考えられる。 $T^*=0.625\sim 0.875$ の振り下ろし過程において、 Fv^* は常に正の値となっている。振り下ろし中間付近で Fv^* の最大値が発生しており、値は 2.18 である。 Fv^* は自重の 2 倍以上が発生しており、翅上面の前縁剥離渦と、羽ばたき速度が最大となった為と考えられる。また、 $T^*=0.875\sim 1.000$ にかけて、 Fh^* は急激に増加しており、翅前方に負圧が生じていると考えられる。このことから、B.D.C でのフェザリングによっても、翅前方に負圧が発生していると考えられる。

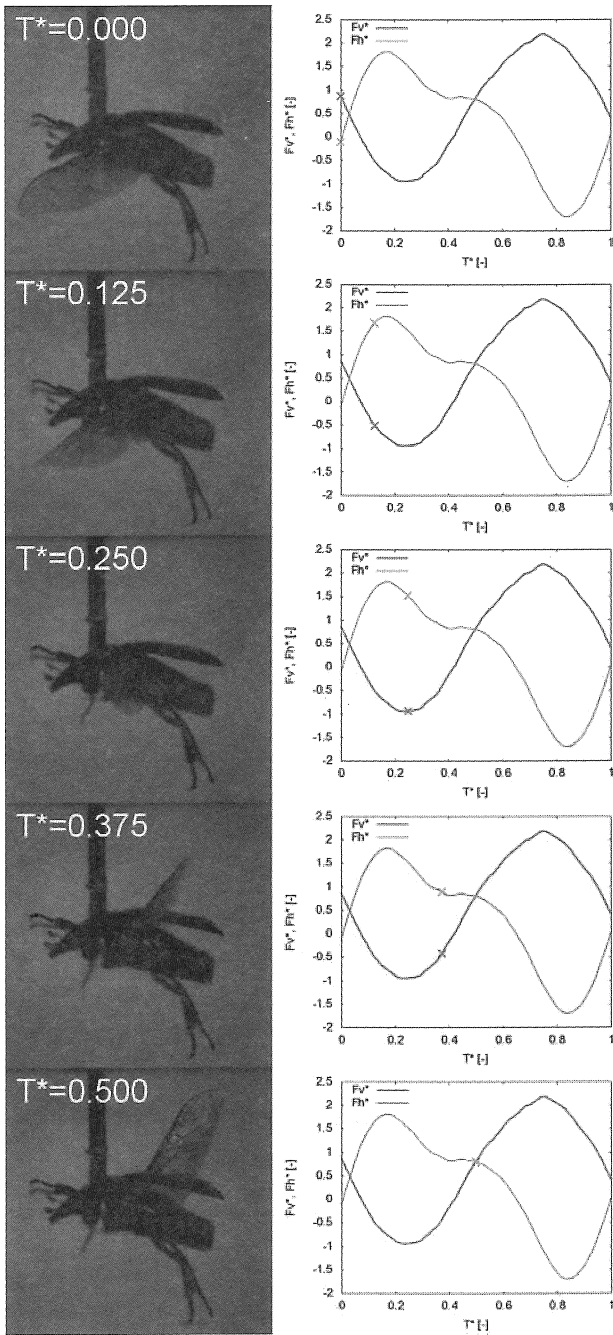


Fig.4 Experimental result of Tetherd1 flight condition at the upstroke process

Fig.6, Fig.7 において、 $T^*=0.000\sim 0.372$ が振り上げ過程、 $T^*=0.496$ が T.D.C、 $T^*=0.620\sim 0.868$ が振り下ろし過程、 $T^*=1.000$ が B.D.C である。流体力変動の傾向は、Tetherd1 と同様である。振り上げ過程で F_h^* 、振り下ろし過程で F_v^* が正の値をとっている。しかし、 F_v^* と F_h^* の最大値発生時期は変化しており、それぞれ B.D.C、T.D.C 付近、値は 1.58、1.04 となった。このことから、羽ばたきによる流れ方向変更の慣性力の反作用は、弱まっていると考えられる。慣性力の反作用が弱まった分、気流の影響により、B.D.C、

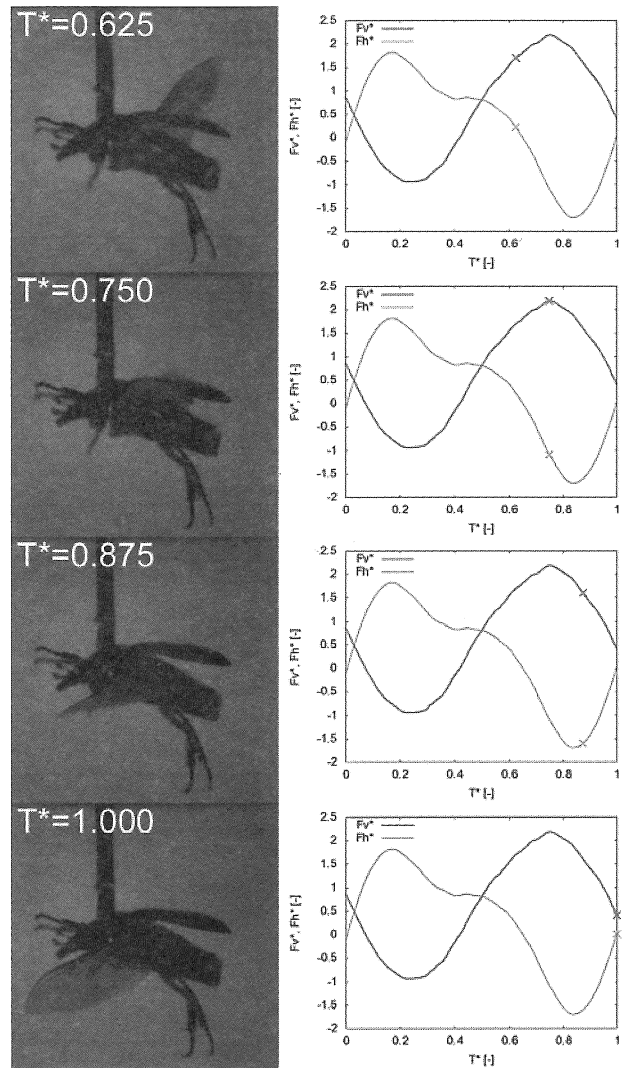


Fig.5 Experimental result of Tetherd1 flight condition at the downstroke process

T.D.C 付近で前縁剥離渦の生成が促されたと考えられる。

Fig.8 はカナブンの体角と流体力の関係を示す。横軸は昆虫の体角、縦軸は無次元流体力を表す。無次元流体力は、数十回～数百回の羽ばたきで発生した値の平均値である。実験は、体角を変更し、複数の供試体で行った。図中にプロットした点は、赤が F_v^* 、緑が F_h^* を表しており、■は Tetherd1、○は Tetherd2 の結果である。Tetherd1 の F_v^* について、体角が増加する程、流体力が増加する傾向が見られる。しかし、 50deg 付近で傾向からはずれ、値が低くなっている。これは、航空機のように失速を起し、 F_v^* が低下していると考えられる。Tetherd1 の F_h^* についても、体角が増加する程、流体力が減少する傾向が見られる。体角が増加する程、前方に進む力が減少し、上方に上がる力が増加している為、物理現象に沿った変化を示している。両結果とも、データ数が 30 個と十分でない為、更なる測定が必要である。

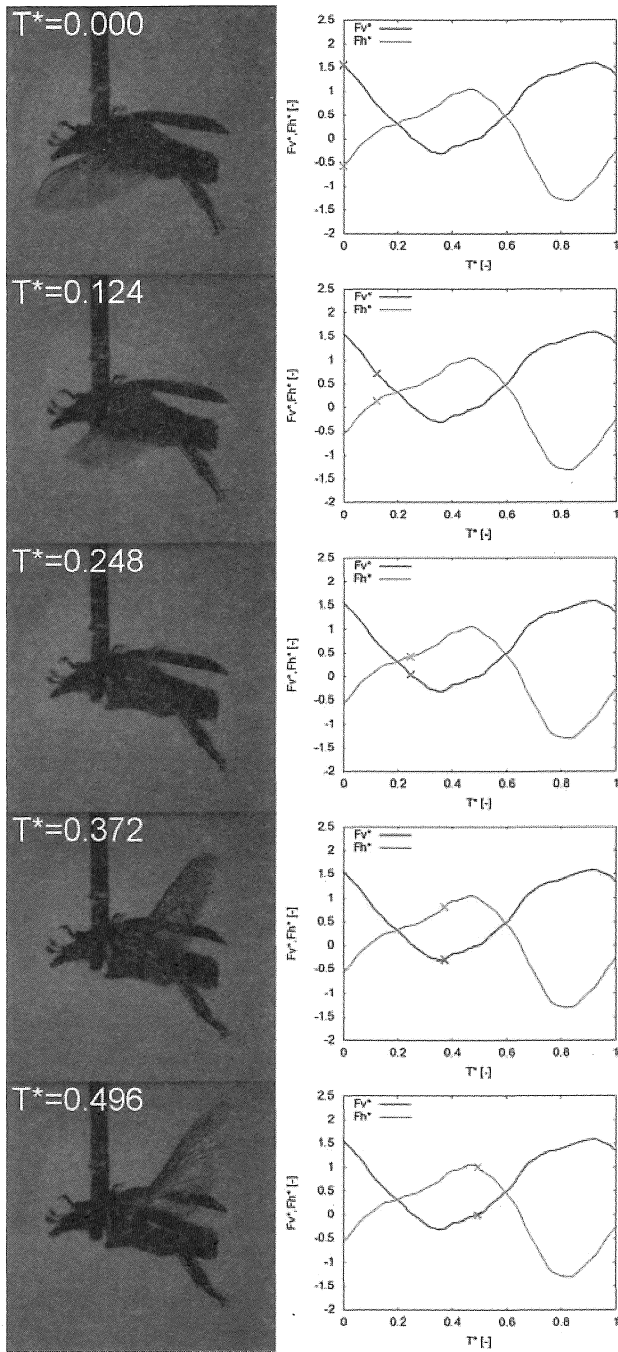


Fig.6 Experimental result of Tetherd2 flight condition at the upstroke process

次に、Tetherd2 の F_v^* について、Tetherd1 と同様に、体角が増加する程、流体力が増加する傾向が見られる。 F_v^* の値については、Tetherd1 と同程度の値となった。Tetherd2 の F_h^* についても、体角が増加する程、流体力が減少する傾向が見られ、流体力の値は、同体角の Tetherd1 より減少した。カナブンを気流中に置いたことにより、前方に進む力が減少したと考えられる。両結果とも、データ数が 28 個と少なく、結果の依存性を向上させるため、測定回数を増やす必要がある。

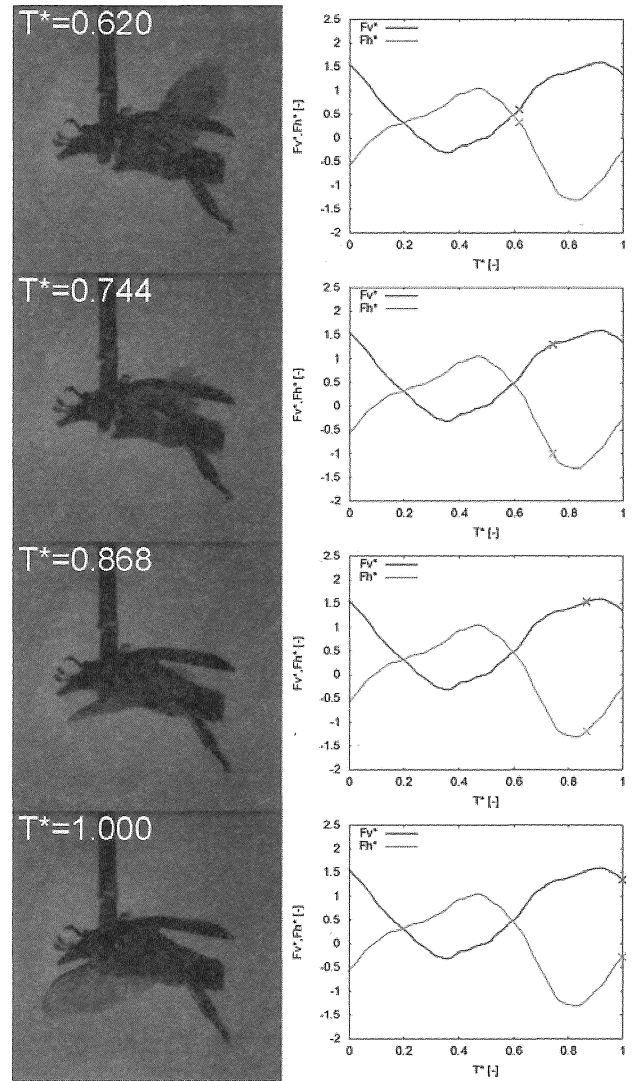


Fig.7 Experimental result of Tetherd2 flight condition at the downstroke process

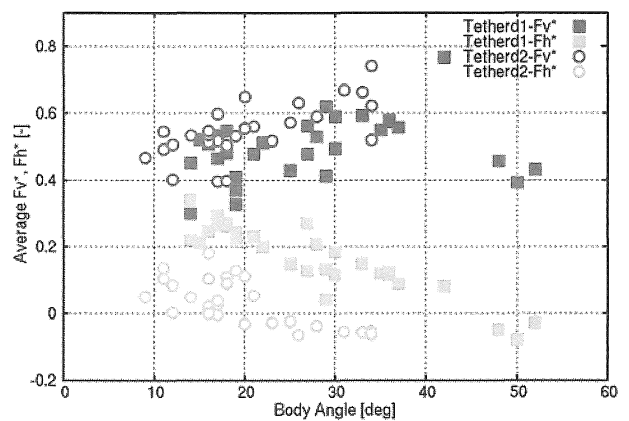


Fig.8 Relation between Body angle and Average F_v^* , F_h^*

4. 結論

カンチレバーを用いてコガネムシ科昆虫羽ばたき時における流体力計測と羽ばたき運動の可視化を行い、以下の結果を得た。

- ・ コガネムシ科昆虫は、1 周期の羽ばたき運動において、主に振り上げ過程で水平流体力、振り下ろし過程で垂直流体力を発生させている。
- ・ 推力の最大値を振り上げ過程の中間、揚力の最大値を振り下ろし過程の中間で発生させている。前縁剥離渦を、振り下ろし過程では翅の上面、振り上げ過程では翅の前方に発生させ、揚力、推力を生成している。
- ・ 気流中における飛翔では、フラッピングと比較して、揚力は変化せず、推力は減少した。気流により、流れ場が変動し、前方に進む力が減少している。

drone beetle", J. Visualization, Vol. 12, No. 4, 393-400 (2009)

謝辞

本研究の一部は財団法人 市原国際奨学財団助成金の助成を受けた。本研究で使用した機器は、日本カノマックス(株)様の御協力により高速度カメラ(High-Speed-Star-6)を、(株)共和電業様の御協力によりデータロガー(EDX-100A)をお借りさせて頂いた。ここに付記し、感謝の意を表す。

参考文献

- (1) Sir J. Lighthill, "Mathematical Biofluid dynamics", SIAM (1975)
- (2) C. P. Ellington, "The aerodynamics of hovering insect flight, III. Kinematics", Phi. Trans. of the R. Soc. of London, Vol. 305, No. 1122, 41-78 (1984)
- (3) R. Dudley, "The Biomechanics of Insect Flight", Princeton Univ. Press (2000)
- (4) M. Azhar, et al, "Mimicking unfolding motion of a beetle hind wing", Chinese Science Bulletin, Vol. 54, No. 14, 2416-2424 (2009)
- (5) A. J. Burton, "Directional Change in a Flying Beetle", J. Exp. Bio, 54, 575-585 (1971)
- (6) A. J. Burton, "Nervous control of flight orientation in a beetle", Nature, Land. 204, 1333(1964)
- (7) M. Okamoto, et al, "Aerodynamic characteristics of the wings and body of a dragonfly", J. Exp. Bio., 199, 281-294 (1996)
- (8) S. Sunada, et al, "Airfoil characteristics at a low reynolds number", J. Flow Visualization & Image Processing, Vol. 7, 207-215 (2000)
- (9) K. Kitagawa, et al, "Visualization of flapping wing of the