

甲虫羽ばたき翼周りにおける流れ場の可視化

野瀬 優太，長谷川 純大（愛知工業大学大学院），北川 一敬（愛知工業大学）

Visualization of Flow Field around the Flapping Wing of Beetles

NOSE Yuta and HASEGAWA Junta (Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering,
Aichi Institute of Technology),

KITAGAWA Kazutaka (Dept. of Mechanical Engineering, Aichi Institute of Technology)

ABSTRACT

The insect flight is given by flapping flight properties necessary for micro-air-vehicle (MAV). Therefore, studies of insect flight are important to be developed MAV. This study is aimed to investigate the flapping flight properties of the scarab beetle. The velocity field around the flapping wing of the scarab beetle and the generation mechanism of vortex formation were visualized with smoke-wire method and particle-image-velocimetry (PIV). The flapping flight of the scarab beetle can be divided into 4 phases: upstroke, feathering (high angle of attack-low angle of attack), downstroke and feathering (low angle of attack-high angle of attack). Measured frequency in this experiment is of 92.4 ± 2.8 Hz. Streamlines show that the vortexes are generated during the upstroke and downstroke process. PIV shows that the velocity of downstroke process is larger than upstroke ones. These results indicate that the scarab beetle is produced substantial lift and thrust forces during the downstroke.

1. はじめに

2004年の新潟中越沖地震後に災害時の初動対応における被災地情報収集の在り方が検討され，その手段の一つとして無人機の活用が提言された¹⁾．実際に2016年熊本地震や2017年九州北部豪雨では無人飛行体による行方不明者の探索及び被害状況の確認等が行われた²⁾．この様に近年，地震や洪水等の災害現場の被害状況の確認及び被災者の探索など人間の活動が不可能な環境下において活動を行うことができる小型無人飛行体(Micro Air Vehicle : MAV)の研究開発が世界各国で行われている．MAVに必要な飛行特性は小型かつ軽量，外乱に対する安定性，ホバリング性能，急旋回等の飛行性能である．これらの飛行性能を満たす飛行方法は，鳥や昆虫などの飛翔方法が挙げられる．本研究では，コガネムシ科甲虫(92.4 ± 2.8 Hz)の羽ばたき運動による飛翔に注目した．コガネムシ科甲虫の形状は，他の昆虫と比較して，重量に対して胴体部分の容積が大きく，各種機器の搭載を目的としたMAVに適している．本稿ではシロテンハナムグリの飛行特性を調査するために，羽ばたき周波数及び翅の軌道等のデータを取得し，スモークワイヤー法及びPIVによる流れ場の可視化より，羽ばたき運動による流れ場への影響を調査した．

2. 実験装置及び実験方法

2-1 実験装置

Fig.1は，本実験で使用した吹出式エッフェル型風洞とハイスピードカメラの配置の概略図を示す．風

洞内形状は，断面150mm×150mm，全長は2,200mm，風洞の助走区間及び供試体固定位置が送風機の吹出口から1,730mm，下流部は大気開放とした．整流装置として，金属メッシュ及び昭和飛行機工業株式会社製のアルミニウムハニカムを送風機の吹出口から310mmの間に設置した．Fig.2は，スモークワイヤー発生装置を示す．スモークワイヤー発生装置は送風機の吹き出し口から下流1,550mmの位置に設置した．Fig.3は，本実験で使用したワイヤーの拡大図を示す．本実験におけるワイヤー径に対するレイノルズ数は48.1である．このワイヤーに流動パラフィン(粘度：150mm²/s)を塗布し，電流を加えることでスモークワイヤーを発生させた．風洞横からの撮影はHigh speed camera : A(以下A点)，風洞後方からの撮影はHigh speed camera : B(以下B点)の位置にカメラを設置した．A点からの撮影では羽ばたき運動時の2次的に生じる流れ場への影響，B点からの撮影では3次的に生じる流れ場への影響を観察することを目的とする．

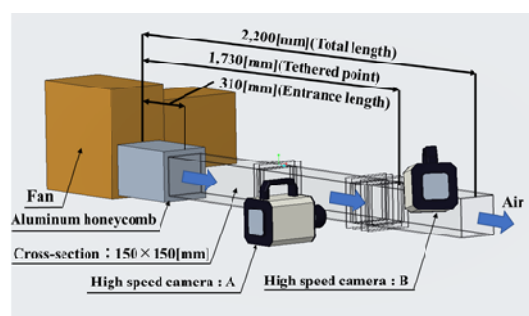


Fig.1 Low speed blow-down wind tunnel

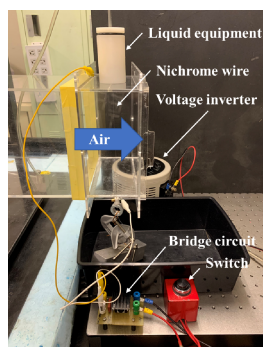


Fig.2 Photograph of smoke wire generator



Fig.3 Photograph of wire generator

2-2 供試体固定方法

Fig.4は、シロテンハナムグリの固定方法を示す。固定方法は、 $\phi 0.6\text{mm}$ のナイロン糸を外径 $\phi 3.0\text{mm}$ 、内径 $\phi 2.0\text{mm}$ のカーボンパイプ内に通し、供試体の胸部と腹部の間で結び、ナイロン糸を張ることで固定した。

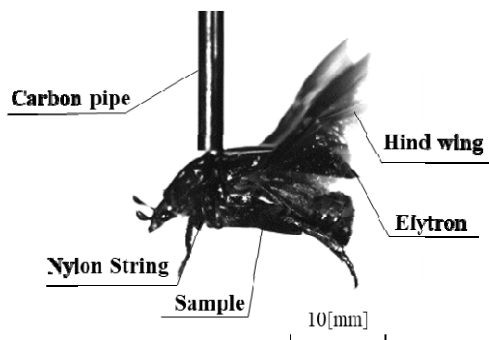


Fig.4 Tethering method of insects

2-3 実験条件

Table1は、本実験で実施したバックライト法によるモーション撮影、スモークワイヤー法及びPIVによる流れ場の可視化における実験条件及びカメラと供試体の距離を示す。本実験においてモーション撮影及びスモークワイヤー法では株式会社フォトロン製FASTCAM Mini AX100, PIVでは株式会社ナックイメージテクノロジー製MEMRECAM ACS-1 M60を使用した。

Table1 Experimental conditions

Experiment	Wing motion	Smoke wire method	PIV
Camera position	A	A, B	B
Distance[mm]	478	A: 478, B: 642	305
Frame rate[fps]	10,000	←	←
Shutter speed[sec]	1/10,000	←	←
Resolution[pixel]	768×528 (87[mm]×60[mm])	←	768×768 (67[mm]×67[mm])
Lenz[mm]	60Macro	←	←
Aperture	2.8	←	←
Velocity[m/s]	No wind	2.50	1.12

2-4 迎角の定義

Fig.5は、振り上げ運動及び振り下ろし運動時にお

ける迎角の定義を示す。ストローク面と翼弦長の間の角度を迎角とする。このとき、ストローク面を基準とし、時計回りを正とする。以降、 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ を低迎角、 $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ を高迎角とする。

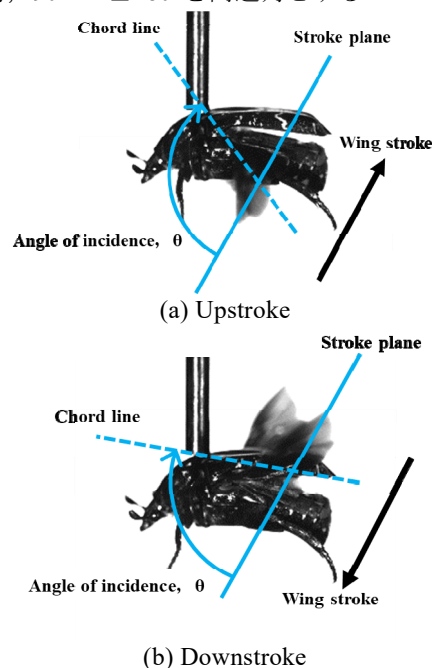


Fig.5 Definitions of angle of incidence

3. 結果及び考察

3-1 羽ばたきモーションの可視化

Fig.6は、シロテンハナムグリのバックライト法による羽ばたきモーション撮影の可視化画像を示す。このとき、シロテンハナムグリは定常羽ばたき運動状態であり、羽ばたき運動開始時の可視化画像ではない。スモークワイヤー法及びPIV共、同様である。 T^* は1周期を無次元化した値を示し $T^*=0.00, 1.00$ を下死点(Bottom Dead Center: 以下B.D.C), $T^*=0.37-0.46$ を上死点(Top Dead Center: 以下T.D.C)とする。このときの羽ばたき周波数は $89.3 \pm 0.3\text{Hz}$ である。シロテンハナムグリの翅は翅鞘(Elytron)と呼ばれる前翅と後翅(Hind wing)に分類される。同じコガネムシ科甲虫であるドウガネやカブトムシは翅鞘でも羽ばたき運動を行っているが、シロテンハナムグリやカナブンの翅鞘は羽ばたき運動を行わないのが特徴である。後翅の羽ばたき運動は、 $T^*=0.00-0.37$ の振り上げ運動(高迎角), $T^*=0.37-0.46$ のフェザリング運動(高迎角-低迎角), $T^*=0.46-0.91$ の振り下ろし運動(低迎角), $T^*=0.91-1.00$ のフェザリング運動(低迎角-高迎角)の4行程で構成されている。振り上げ運動及び振り下ろし運動は、左右に移動するリード・ラグ運動、上下に移動するフラッピング運動を合わせた運動であり、フェザリング運動は、翅先端方向への軸に対して回転する運動である。

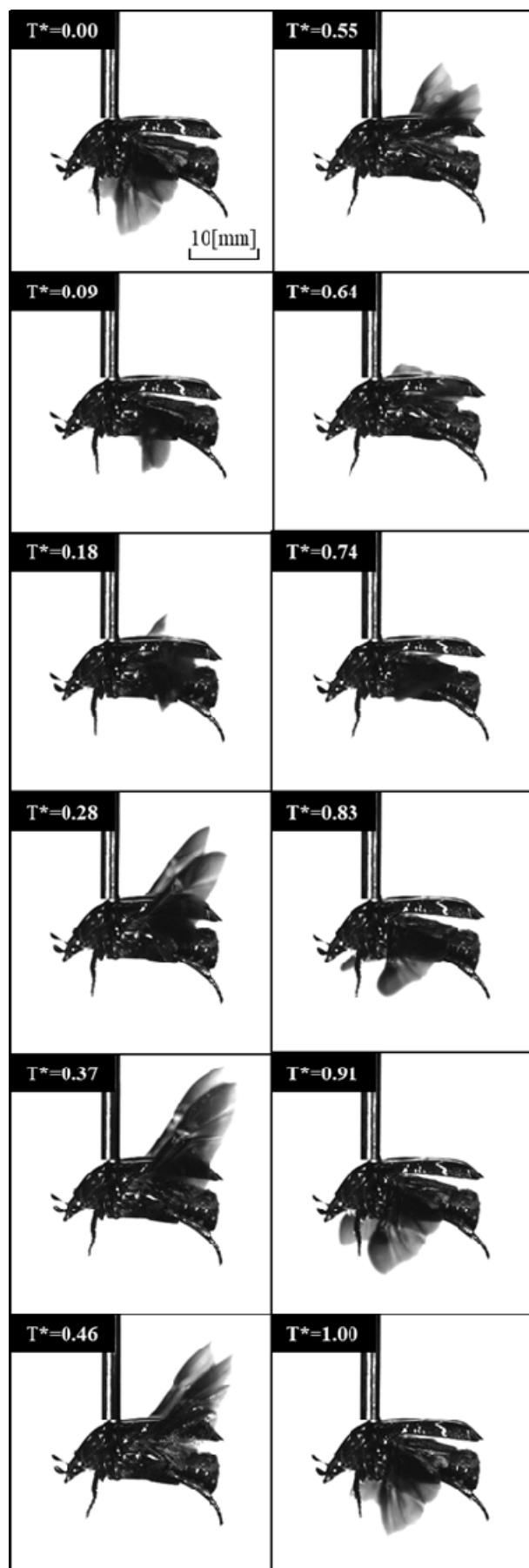


Fig.6 The wing motion of *Protalaria orientalis submarmorea*

Fig.7は、羽ばたき運動画像から得られた翼端軌道である。x方向は翼端から前方へ2mm程度、後方へ14mm程度の範囲で羽ばたき運動をし、y方向は翼根から上方へ15mm程度、下方へ13mm程度の範囲で羽ばたき運動をしている。また、同個体のシロテンハナムグリではどの周期も同じような翼端軌道を描いており、上死点付近で8の字に近い形をしていることが分かる。翅は翼根のみで支えられており、1つの支点周りの運動である。後翅の羽ばたき運動は弾性変形を伴っており、一般的に昆虫の翅の曲げ剛性は数GPa程度である³⁾。また、Fig.7におけるストローク比(Upstroke/Downstroke)は0.69である。振り下ろし運動時は低迎角であり、翅に空気抵抗を多く受けると考えられる。このため振り下ろし運動時間の方が長くなると考えられる。

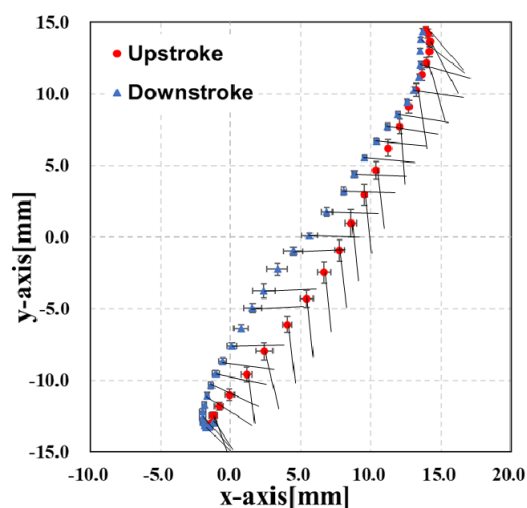


Fig.7 Trajectory of wingtip of *Protalaria orientalis submarmorea* at x-y plane

3-2 スモークワイヤー法

Fig.8及びFig.9は、羽ばたき運動時における流れ場の変化をA点から撮影した場合の翼中央及び翼端位置付近における可視化画像を示す。このときの羽ばたき周波数は $87.4 \pm 0.5\text{Hz}$ 、 $86.5 \pm 0.4\text{Hz}$ である。空気の流れは左から右側方向、Tip Vortex(以下TV)は反時計回りの翼端渦、Upstroke Starting Vortex(以下USV)は時計回りの渦、Leading Edge Vortex(以下LEV)は前縁剥離渦を示す。Fig.8(b)とFig.9(b)Upstroke($T^*=0.27$)においてフェザリング運動(低迎角-高迎角)により生成されたUSVが確認でき、(d)Downstroke($T^*=0.91$)においてフェザリング運動(高迎角-低迎角)により生成されたTVが確認できる。また、Fig.9(a)B.D.C($T^*=0.00$)において実線のLEVとTVの混合渦が確認できる。正面からの一様流はUSV、TV、LEVとTVの混合渦に巻き込まれ後方下向きへと変化している。

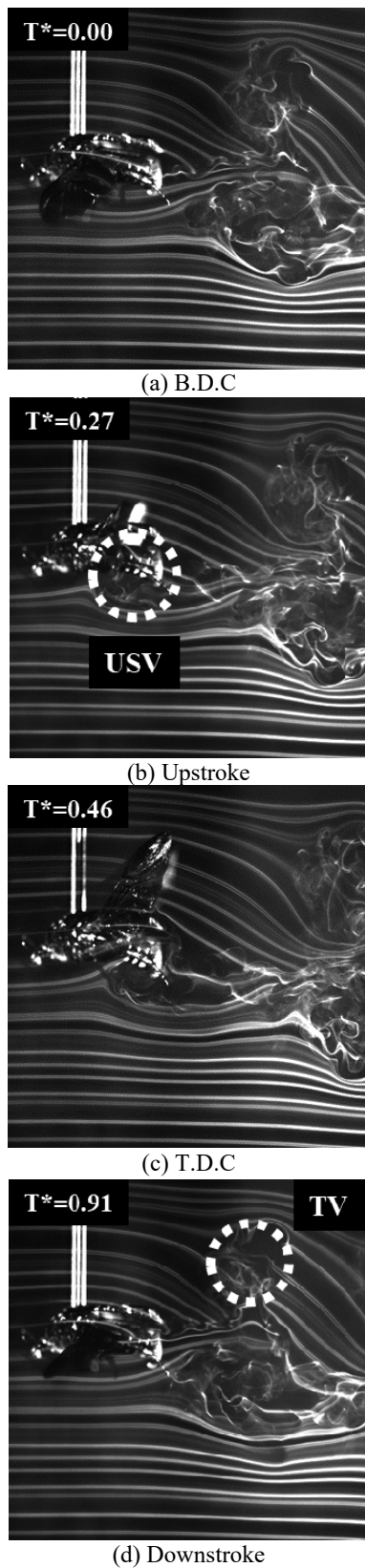


Fig.9 Smoke wire visualization of airflow around a flapping wing of *Protalaria orientalis submarmorea* at wing center

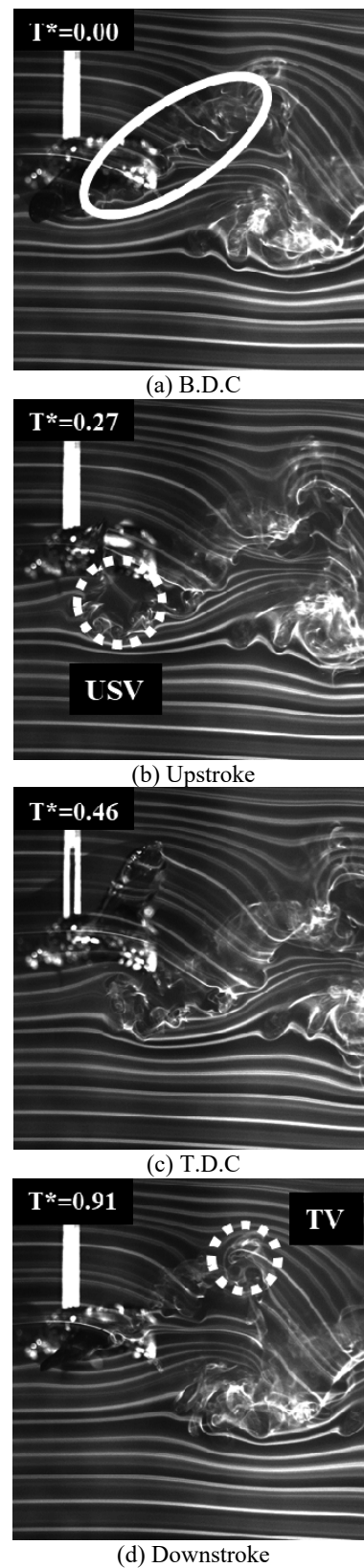
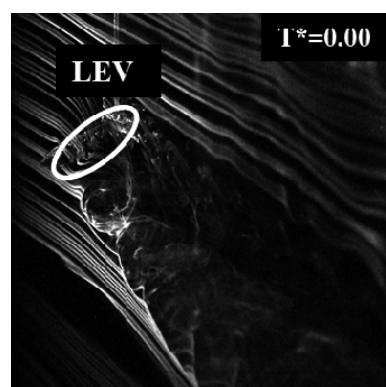
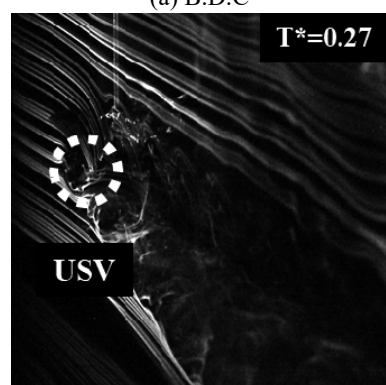


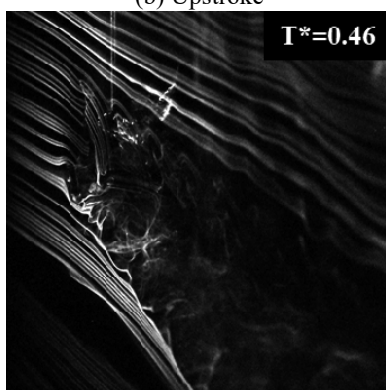
Fig.10 Smoke wire visualization of airflow around a flapping wing of *Protalaria orientalis submarmorea* at wing tip



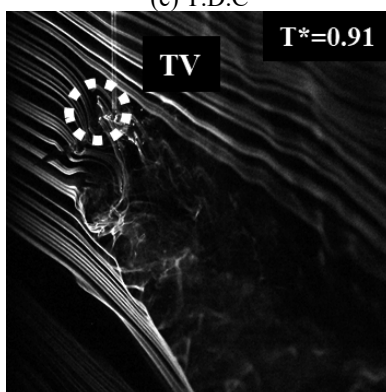
(a) B.D.C



(b) Upstroke

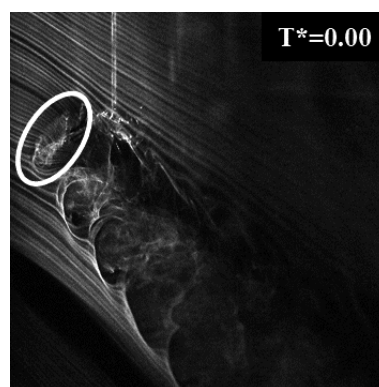


(c) T.D.C

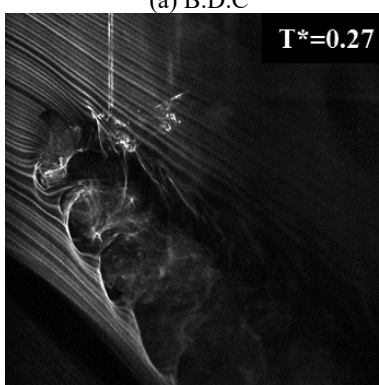


(d) Downstroke

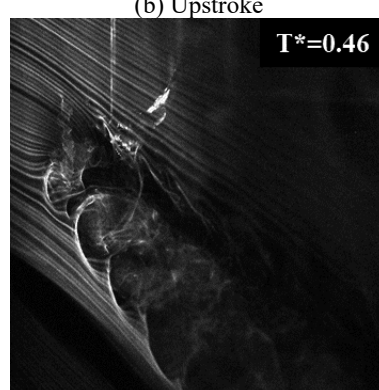
Fig.11 Smoke wire visualization of airflow around a flapping wing of *Protaeria orientalis submarmorea* at wing center



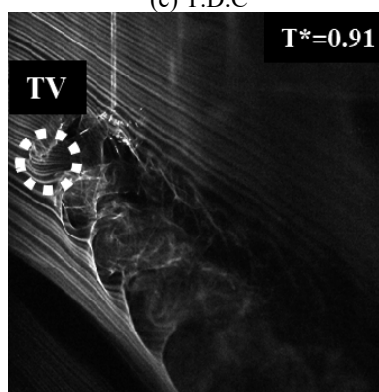
(a) B.D.C



(b) Upstroke



(c) T.D.C



(d) Downstroke

Fig.12 Smoke wire visualization of airflow around a flapping wing of *Protaeria orientalis submarmorea* at wing tip

Table2 Type and size of insects and dimensionless parameters

	<i>Agrius convolvuli</i>	<i>Apis mellifera</i>	<i>Protaetia orientalis submarmorea</i>
Body length[mm]	37 ~ 43	15 ~ 16	19 ~ 25
Wingtip length[mm]	45 ~ 52	9.3 ~ 9.8	23 ~ 25
Mass[mg]	1800 ± 200	94.5 ± 7.35	800 ± 200
Flapping frequency [Hz]	23 ± 5	230 ± 10	92.4 ± 2.8
Stroke amplitude[deg]	113 ± 2.0	90.8 ± 8.6	90 ± 4
Reynolds number for flapping speed [-]	6,000 ± 1,000	1123 ± 81.3	3680 ± 420
Reduced frequency [-]	0.29 ± 0.02	0.25 ± 0.02	0.34 ± 0.05

Fig.10及びFig.11は、羽ばたき運動時における流れ場の変化をB点から撮影した場合の翼中央及び翼端位置付近における可視化画像を示す。このときの羽ばたき周波数は $92.7 \pm 0.5\text{Hz}$, $93.2 \pm 0.4\text{Hz}$, 空気の流れは左上から右下方向である。羽ばたき運動による流れ場の挙動はA点から撮影した場合と同様であるが、B点から撮影した場合は奥行き方向に移動する渦など3次元的に生じる流れ場への影響を観察できる。Fig.10(a)B.D.C($T^*=0.00$)においてLEVが確認できる。(b)Upstroke($T^*=0.27$)においてフェザリング運動(低迎角-高迎角)により生成されたUSVは剥離後、流れの方向を軸とし供試体後方から観察した場合、時計回りに回転している。 $T^*=0.27$ 以降は後方に移動し、崩壊している。また、(d)Downstroke($T^*=0.91$)においてフェザリング運動(高迎角-低迎角)により生成された反時計回りのTVは剥離後、流れの方向を軸とし供試体後方から観察した場合、反時計回りに回転している。 $T^*=0.91$ 以降は後方に移動し、崩壊している。このとき、一様流は生成されたLEV, USV, TVに巻き込まれ、下向きへと変化している。Fig.11(a)B.D.C($T^*=0.00$)において実線で示すLEVとTVの混合渦が確認できる。また、 $T^*=0.91$ 以降において混合渦の端は時計回りに回転し、後方へと移動している。このとき、一様流は生成された混合渦に巻き込まれ、下向きへと変化している。この様にLEV, USV, TV, LEVとTVの混合渦などの渦を発生させ、空気の流れを変化させることで揚力及び推力を発生させていると考えられる。

スズメガ(Hawkmoth : *Agrius convolvuli*)及びミツバチ(Honeybee : *Apis mellifera*)は、羽ばたき運動時において翅の前縁から体の後方にかけて1つのドーナツ型渦輪と呼ばれる大きな渦輪を生成することがH-Liu教授[2009]とH-Aono教授[2009]によって示された⁴⁾。この渦輪は、前縁剥離渦(LEV), 翼端渦(TV)及び後縁渦(TEV)で形成されており、揚力及び推力を生み出す重要な役割を担っている。シロテンハナムグリにおいても同様にドーナツ型渦輪を発生させると仮定する。Table2は、昆虫の種類及び大きさと無次元パラメータを示す⁵⁾。シロテンハナムグリの各値はスズメガ及びミツバチの各値の間もしくは近い値である。無次元周波数の値が0.1を超えると非定常性

が現れる⁶⁾。Table2よりシロテンハナムグリ、スズメガ、ミツバチの無次元周波数は0.1を超えており、非定常性があると考えられる。また、Fig.11より前縁剥離渦(LEV)及び翼端渦(TV)は一連の渦となっている。以上のことからシロテンハナムグリはスズメガ及びミツバチと同様にドーナツ型渦輪を発生させていると考えられる。しかし、これは本実験で得た結果及び先行研究から考えられることであり実際にドーナツ型渦輪を観察していない。そのため今後は、3次元CFD解析や3CPIVを行う必要があると考えられる。

3-3 PIV

Fig.12及びFig.13は翼中央位置付近及び翼端位置付近における時間平均の速度分布結果を示す。このときの羽ばたき周波数は $92.1 \pm 1.0\text{Hz}$, $93.7 \pm 0.4\text{Hz}$ である。空気の流れは左から右側方向、流速は 1.12m/s である。カラーバーは速度分布図を示し、0.0-5.0m/sの範囲で速度ベクトルの色に対応している。Fig.12(a)B.D.Cにおいて、1周期前に生成されたUSV1及びTV1, 2周期前に生成されたUSV2及びTV2が存在している。また、Fig.12(b)Upstrokeにおいて、フェザリング運動(低迎角-高迎角)により生成されたUSV3が確認できる。USV3と翅間において一様流は加速され、流速は最大で3.5倍程度(約 3.91m/s)である。Fig.12(d)Downstrokeにおいて、フェザリング運動(高迎角-低迎角)により生成されたTV3が確認できる。TV3と翅間の流速は最大で一様流の4.2倍程度(約 4.74m/s)である。正面からの一様流は生成されたUSV3, TV3に巻き込まれ、振り上げ運動時に14deg程度、振り下ろし運動時に39deg程度後方下向きへと変化する。Fig.13(a)B.D.Cにおいて、1周期前に生成されたUSV1及びTV1, 2周期前に生成されたTV2が存在している。また、Fig.13(b)Upstrokeにおいて、フェザリング運動(低迎角-高迎角)によりUSV3が生成され、USV3と翅間の流速は最大で一様流の3.0倍程度(約 3.38m/s)である。Fig.13(d)Downstrokeにおいて、フェザリング運動(高迎角-低迎角)により生成されたTV3が確認できる。TV3と翅間の流速は最大で一様流の3.4倍程度(約 3.86m/s)である。正面からの一様流は生成されたUSV3, TV3に巻き込まれ振り上げ運動時に15deg程度、振り下ろし

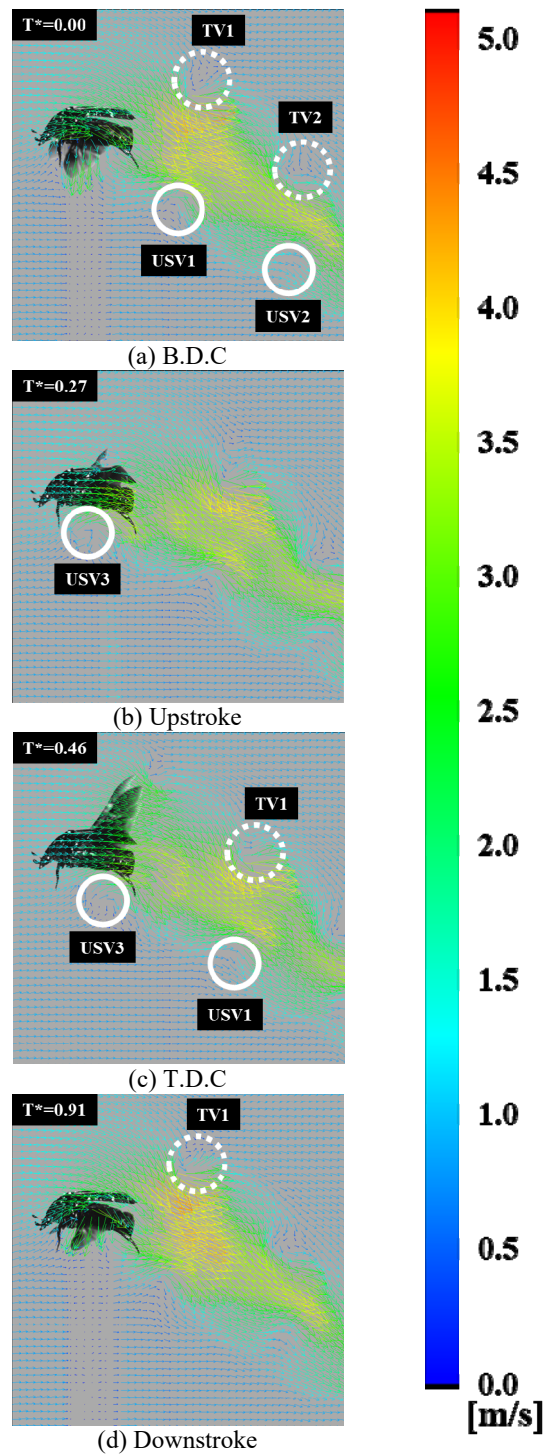


Fig.12 Velocity distribution of flow around the flapping wing of *Protalaria orientalis submarmorea* at wing center

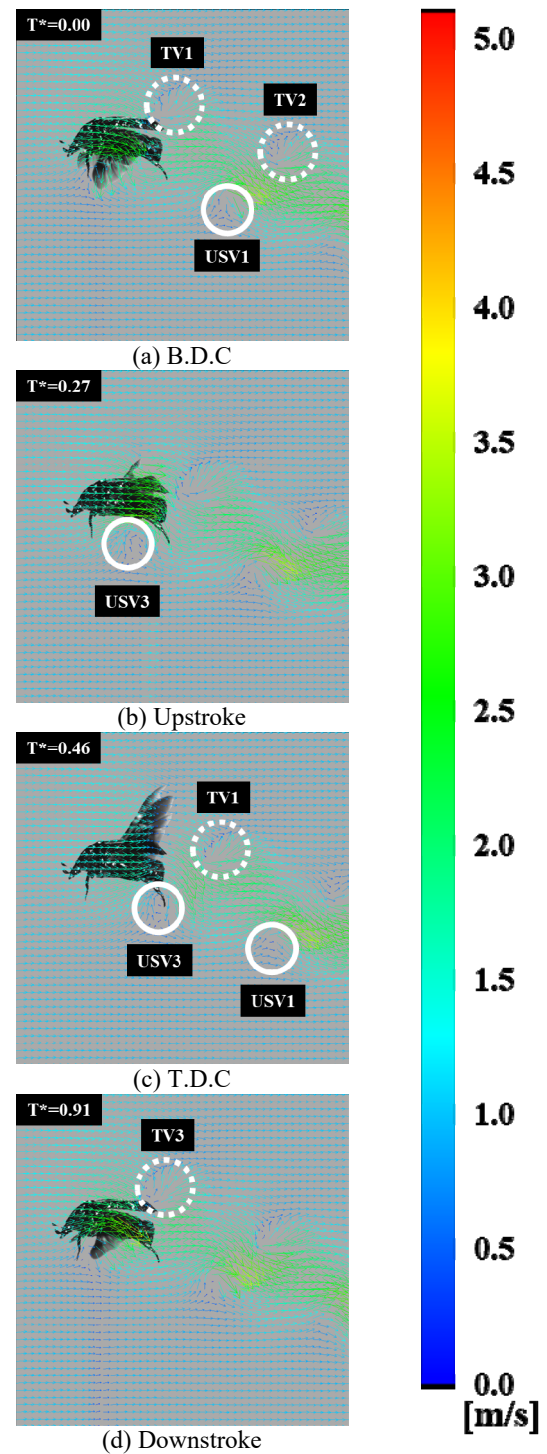


Fig.13 Velocity distribution of flow around the flapping wing of *Protalaria orientalis submarmorea* at wing tip

Table2 Result of calculation

parameter	<i>Protalaria orientalis submarmorea</i>	
	Upstroke	Downstroke
Angle of downwash[deg]	14 ± 9	39 ± 14
Downwash velocity[m/s]	2.46 ± 0.38	2.56 ± 0.81
Vertical velocity [m/s]	0.57 ± 0.39	1.62 ± 0.73
Horizontal velocity [m/s]	2.36 ± 0.39	1.91 ± 0.67

運動時に42deg程度後方下向きへと変化する。

Table2は、振り上げ運動時及び振り下ろし運動時の流速を水平方向及び垂直方向に分解した値を示す。算出するにあたって、翼中央付近でのPIV計測結果を参考にし、振り上げ運動時の各値はT.D.C($T^*=0.46$)、振り下ろし運動時の各値はB.D.C($T^*=0.00$)の結果を使用した。振り上げ運動時の流速は約2.46m/s、振り下ろし運動時の流速は約2.56m/sで振り下ろし運動時は振り上げ運動時の約1.04倍である。一様流れは振り上げ運動時の場合、14deg程度、振り下ろし運動時の場合、39deg程度後方下向きに流れている。流速は水平方向の場合、振り上げ運動時は振り下ろし運動時の1.2倍程度、垂直方向の場合、振り下ろし運動時は振り上げ運動時の2.8倍程度であった。このことからシロテンハナムグリは振り上げ運動時及び振り下ろし運動において大きな推力を発生させ、振り下ろし運動時に大きな揚力を発生させていると考えられる。

4.まとめ

本研究では、コガネムシ科甲虫であるシロテンハナムグリがどのような羽ばたき運動のメカニズムで揚力及び推力を発生させているのかを調査目的とした。ハイスピードカメラを用いた羽ばたきモーションの可視化実験、スモークワイヤー法及びPIVによる流れ場の可視化実験より以下の結果を得た。

- (1) 振り下ろし運動時は低迎角であり、翅に空気抵抗を多く受ける。このため振り下ろし運動時間の方が長くなる。
- (2) シロテンハナムグリは振り上げ運動開始時にUSV、振り下ろし運動開始時に反時計回りのTV、振り下ろし運動時にLEV及び時計回りのTV、LEVとTVの混合渦などの渦を周期的に発生させる。発生させた渦により空気の流れを変化させることで揚力及び推力を発生させている。
- (3) 正面からの一様流は振り上げ運動時に最大で3.5倍程度、振り下ろし運動時に最大で4.2倍程度まで加速される。
- (4) 加速された一様流の流速は水平方向の場合、振り上げ運動時は振り下ろし運動時の1.04倍程度、垂直方向の場合、振り下ろし運動時は振り上げ運動時の2.8倍程度であった。このことからシロテンハナムグリは振り上げ運動時及び振り下ろし運動において大きな推力を発生させ、振り下ろし運動時に大きな揚力を発生させている。

スモークワイヤー法の結果からシロテンハナムグリはスズメガ及びミツバチと同様にドーナツ型渦輪を発生させていると考えられる。しかしこれは、本実験で得た結果及び先行研究から考えられることで

あり、実際にドーナツ型渦輪を観察していない。そのため今後は、3次元CFD解析や3CPIVを行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究で使用したハイスピードカメラであるMEMRECAM ACS-1 M60は、(株)ナックイメージテクノロジー様から惜しみなく貸していただいたものである。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 原田賢哉 et al, “JAXAにおける小型無人機の研究開発”, 日本ロボット学会誌Vol.34 No.2, 2016, pp.86-87
- (2) 総務省消防庁, “消防防災分野における無人航空機の活用の手引き”, 消防消13号, 2018年1月30日, pp.1
- (3) S. A. Combes and T. L. Daniel, “Flexural Stiffness in Insect Wings : Effect of Wing Venation and Stiffness Distribution on Passive Bending”, American Entomologist, Vol.51, Spring 2005, pp.42-44
- (4) H Liu, H Aono, “Size effects on insect hovering aerodynamics: an integrated computational study”, Bioinspiration & Biomimetics, Vol.4, 2009, pp.7
- (5) 下澤楯夫, 針山孝彦, “昆虫ミメティックス～昆虫の設計に学ぶ～”, 株式会社エヌ・ティー・エス, 2008, pp.685-695
- (6) 東昭, “流体力学”, 株式会社朝倉書店, 2003, pp.20-21, pp.102-103, pp.167-174
- (7) 榊原光利, “コガネムシ羽ばたき翼周りの流れ”, 平成20年度愛知工業大学大学院修士論文, 2009, pp.1-103
- (8) 深瀬雅央, “昆虫羽ばたき翼周りの非定常流体力計測及び流れ場の数値解析”, 平成22年度愛知工業大学大学院修士論文, 2011, pp.1-102
- (9) 高木直樹, “コガネムシ科甲虫飛翔時における流れ場の可視化”, 平成23年度愛知工業大学大学院修士論文, 2012, pp.1-87
- (10) 北川一敬, “生物模倣技術と新材料・新製品開発への応用”, 技術情報協会, 2014, pp.58-67,
- (11) K. Kitagawa et al, “Visualization of flapping wing of the drone beetle”, J. Visualization, Vol.12, No.4, 2009, pp.393-400
- (12) M. Maeda et al, “Quantifying the dynamic wing morphing of hovering hummingbird”, R. Soc. open Sci, Vol.4, 2017, pp.9-10