

# PIV 法を用いたカナブンの流れ場計測

[研究代表者] 北川一敬 (工学部機械学科)

## 研究成果の概要

災害現場における小型無人飛行体 (Micro Air Vehicle: MAV) の活用が年々、活発化してきている。このような事例で導入される機体は回転翼機であり、人に接触した場合、怪我の危険性がある。これに対し、昆虫が持つ羽ばたき翼は柔軟かつ回転翼機より翼速度が遅く、翼の静音性や安全性に優れ、急旋回、急降下等の性能に関しても良好な特性を併せ持つ。以上のことから世界各国では羽ばたき翼を用いた MAV の開発が試みられているが実用化をするためには小型飛翔生物の飛行特性解明を十分に行う必要がある。本研究グループではこれまでカナブン等 (93.9±1.5[Hz]) の 4 種類のコガネムシ科甲虫の羽ばたき運動に注目してきた。コガネムシ科甲虫は、胴体部分の容積が大きく、MAV への応用を考えた場合、カメラ等の機器の搭載が可能であると考えられる。本研究では、カナブンの飛行特性解明を最終目標とし、カナブンの羽ばたき時における流れ場計測を行う。ハイスピードカメラを用いた羽ばたき運動の可視化実験及び 3 次元 2 成分のトラバース粒子画像流速測定法を行い、羽ばたき軌跡及び三次元渦構造の調査を行った。本年度の研究から以下の結論を得た。カナブンの羽ばたき運動の可視化実験からカナブンは、カナブンの羽ばたき運動は、振り上げ運動 (高迎角)、フェザリング運動 (高迎角-低迎角)、振り下ろし運動 (低迎角)、フェザリング運動 (低迎角-高迎角) の 4 行程で構成される。PIV 法を用いた実験から前縁渦 (LEV) 及び後縁渦 (TEV) 間の距離は、10~50%間は増加、50~90%間は減少する傾向がある。このことから羽ばたき運動により生成された渦は翼端位置付近で繋がる渦構造をしており、カナブンは羽ばたき運動時に LEV、TEV、翼端渦で構成された渦輪を生成していることが示唆される。

## 研究分野：流体力学

キーワード：Flow Visualization、PIV、Biomimetics、Unsteady Flow、Vortex

### 1. 研究開始当初の背景

昆虫が持つ羽ばたき翼は柔軟かつ回転翼機より翼速度が遅く、翼の静音性や安全性に優れ、急旋回、急降下等の飛行性能に関しても良好な特性を併せ持つ。そのため、昆虫が持つ羽ばたき翼は小型無人飛行体 (Micro Air Vehicle: MAV) への応用が期待されている。以上のことから世界各国では羽ばたき翼を用いた MAV の開発が試みられているが実用化をするためには小型飛翔生物の飛行特性解明を十分に行う必要がある。本研究では、カナブンの飛行特性解明を最終目標とし、カナブンの羽ばたき時における流れ場計測を行う。

### 2. 研究の目的

本研究グループではこれまでカナブン等 (93.9±1.5[Hz]) の 4 種類のコガネムシ科甲虫の羽ばたき運動に注目して

きた。コガネムシ科甲虫は、胴体部分の容積が大きく、MAV への応用を考えた場合、カメラ等の機器の搭載が可能であると考えられる。本研究ではカナブンの飛行特性を調査するためにハイスピードカメラを用いて 3 次元 2 成分のトラバース粒子画像流速測定法を行った。

### 3. 研究の方法

Fig.1 及び Fig.2 は、PIV 実験装置の概略図及びレーザシートの照射面を示す。本実験では、シート光を作成するため CW-Nd:YAG (DPSS) レーザ (MGL-W-532A-10W) を使用し、45deg パウエルレンズでシート状にすることで厚み 2.0[mm]のシート光を製作した。翼が胴体の真横のある際の翼根を 0%、翼端を 100%とし、照射面は翼根から翼長の 10~100%を 10%間隔で区切り、計 10 面で可視化を行った。撮影条件は、撮影速度 10,000fps、シャッタ速度

0.1ms、解像度 1、280×896pixels (95×67mm) とした。PIV 解析アルゴリズムには、FFT 相互相関法を用い、計算格子の 50%オーバーラップさせた。また、再帰的相関法を用いて複数回解析を行った。速度場の解析は、空間解像度 64 pixel×64 pixel、空間分解能 4.75mm、速度ベクトルピッチ 2.38mm で 1 回解析後、空間解像度 32pixel×32pixel、空間分解能 2.38mm、速度ベクトルピッチ 2.19mm で 2 回解析し、計 3 回行い、結果の処理を実施した。取得した 9 周期分の解析データを txt ファイル形式で保存し、平均化処理を施した後、株式会社 KGT の MicroAVS 11.0 によりカラーマップ化を実施した。

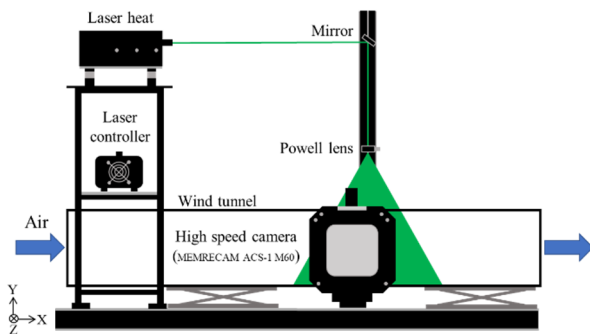


Fig.1 Experimental setup for PIV (X-Y plane)

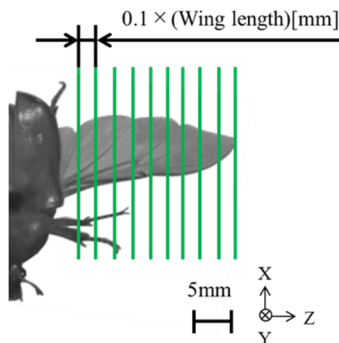


Fig.2 Test section of PIV

#### 4. 研究成果

Fig.3～Fig.5 は、PIV 法を用いたカナブンの羽ばたき運動時における翼周りの流れ場の可視化画像を示し、それぞれ翼長の 20%、60%、100%における画像である。Fig.3～Fig.5 中の  $T^*$  は羽ばたき運動 1 周期を無次元化した値を示す。無次元周期  $T^*$  は以下の式 (1) により算出した。

$$T^* = t/T \quad (1)$$

カラーバーは速度分布を表し、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.3～Fig.5 における一様流の速度は 2.0m/s で風向きは X 方向である。また、実線の白丸は羽ばたき運動時に生成される渦を示し、点線の白丸は二次元可視化画像から予測される渦の三次元構造を示す。Table1 は、各可視化断面における渦間距離を示す。

#### (i) 振り上げ運動 (Upstroke : $T^*=0.00 \sim T^*=0.46$ )

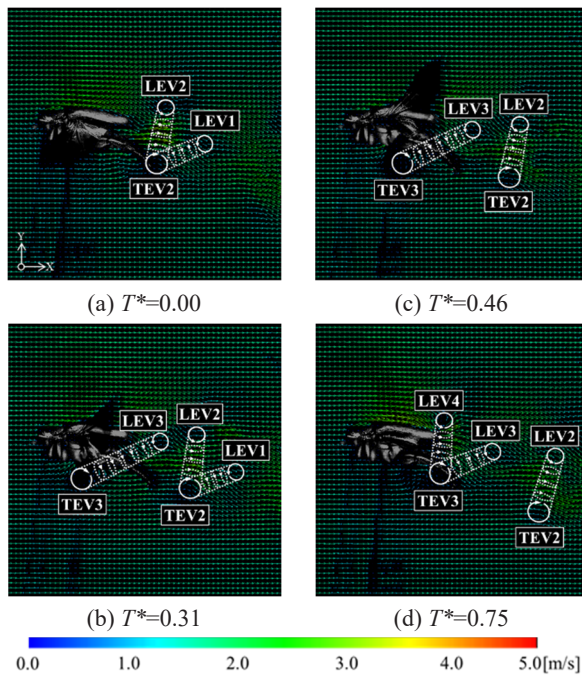
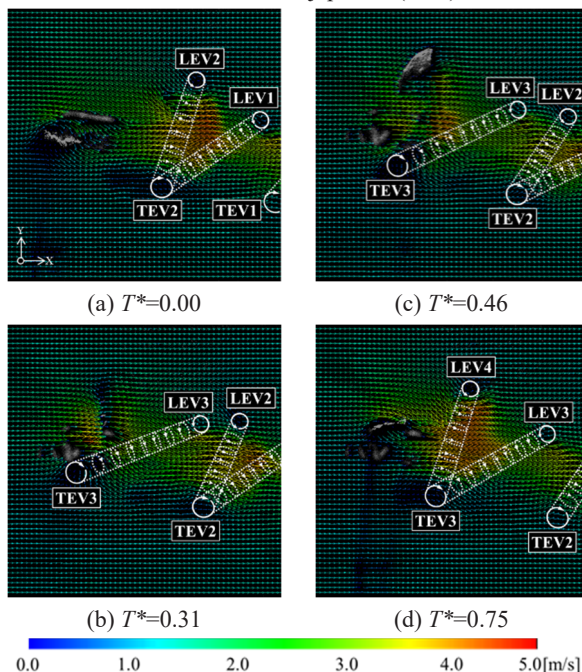
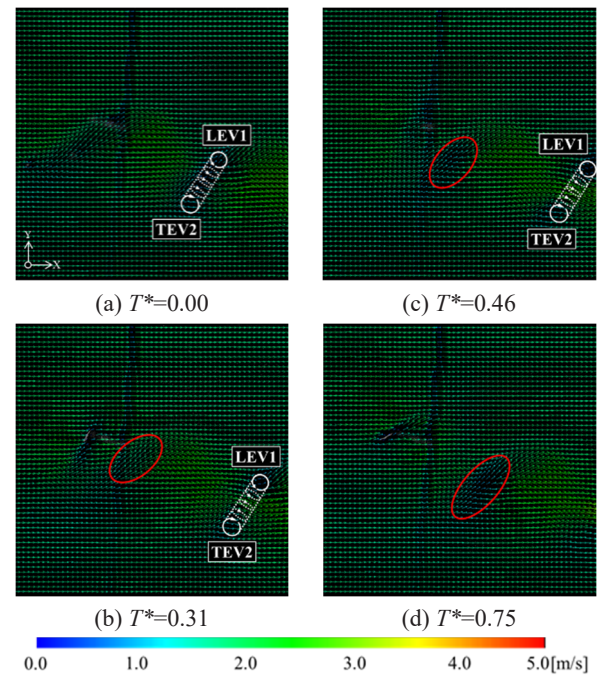
$T^*=0.00$  は、下死点である。20%及び 60%位置の  $T^*=0.00$  において、2 周期前の羽ばたき運動時に生成された反時計回りの渦である LEV1 (Leading Edge Vortex)、1 周期前において生成された LEV2 及び LEV3 と時計回りの渦である TEV2 (Trailing Edge Vortex) が確認できる。100%位置において、LEV2 及び LEV3 は確認できなかった。 $T^*=0.16 \sim T^*=0.31$  間において、フェザリング運動 (低迎角～高迎角) により TEV3 が生成・剥離し、 $T^*=0.31$  以降、X 方向下向き (14deg 程度) へと移動している。 $T^*=0.31$  において、実線の赤丸で示した場所で X 方向上向き (40deg 程度) の流れの変化が生じている。これは、翼端渦の一部であると考えられる。また、Table1 より  $T^*=0.31$  における LEV3 及び TEV3 間の距離は、10%～50%間では増加し、50%～90%間では減少する傾向が確認できる。このことから羽ばたき運動により生成された渦は翼端位置付近により繋がる渦構造をしており、羽ばたき運動時に前縁渦 (LEV) 及び後縁渦 (TEV)、翼端渦で構成された渦輪が生成されると考えられる。LEV3 及び TEV3 間で一様流は加速されており、80%位置において最大 1.9 倍程度 (約 3.8m/s) である。また、LEV3 と翼間においても一様流は加速されており、同様に 80%位置において最大 2.1 倍程度 (約 4.2m/s) である。

#### (ii) 振り下ろし運動 (Downstroke : $T^*=0.46 \sim T^*=1.00$ )

$T^*=0.46$  は、上死点である。20%及び 60%位置の  $T^*=0.46$  において、1 周期前の羽ばたき運動時に生成された LEV2 及び LEV3 と TEV2、フェザリング運動 (低迎角～高迎角) により生成された TEV3 が確認できる。振り上げ運動時と同様に 100%位置において、LEV2 及び LEV3 は確認できなかった。 $T^*=0.46 \sim T^*=0.60$  間において、フェザリング運動 (高迎角～低迎角) により LEV4 が生成され、 $T^*=0.60 \sim T^*=0.75$  間で剥離する。 $T^*=0.75$  以降は、X 方向下向き (17deg 程度) へと移動している。 $T^*=0.75$  において、Table1 より LEV4 及び TEV3 間の距離は、10%～60%間では増加し、60%～90%間では減少する傾向が確認できる。このことから振り上げ運動時と同様に振り下ろし運動時に渦輪が生成されると考えられる。LEV4 及び TEV3 間において、一様流は加速されており、60%位置において最大 2.3 倍程度 (約 4.5m/s) である。

Table1 Distance between vortexes of PIV [mm]

	$T^*=0.31$		$T^*=0.46$		$T^*=0.75$		$T^*=1.00$	
	LEV3-TEV3	LEV4-TEV3	LEV3-TEV3	LEV4-TEV3	LEV3-TEV3	LEV4-TEV3	LEV3-TEV3	LEV4-TEV3
10%	16.8	-	15.5	-	11.0	13.5	11.1	13.7
20%	20.0	-	17.7	-	17.9	14.2	11.3	13.3
30%	21.0	-	18.6	-	18.6	16.4	19.0	18.5
40%	28.1	-	33.4	-	34.8	20.4	27.9	24.7
50%	33.3	-	33.9	-	31.0	20.5	31.2	20.1
60%	24.9	-	25.0	-	24.3	21.2	24.0	17.2
70%	26.6	-	25.6	-	25.8	21.6	22.6	18.9
80%	19.7	-	18.4	-	18.5	17.2	17.5	15.1
90%	17.3	-	13.1	-	12.7	19.8	15.1	19.4
100%	-	-	-	-	-	-	5.8	-

Fig.3 Velocity distribution of flow around the flapping wing of *Rhomborrhina japonica* (20%)Fig.4 Velocity distribution of flow around the flapping wing of *Rhomborrhina japonica* (60%)Fig.5 Velocity distribution of flow around the flapping wing of *Rhomborrhina japonica* (100%)

本研究では、カナブンの飛行特性調査を目的として羽ばたき時において PIV 法を用いた流れ場の可視化実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) カナブンは羽ばたき運動時に前縁渦 (LEV) 及び後縁渦 (TEV) の渦を周期的に発生させる。一樣流は LEV-TEV 間で振り上げ運動時には最大 1.9 倍程度、振り下ろし運動時には最大 2.3 倍程度まで加速される。
- (2)  $T^*=0.31$  における LEV3 及び TEV3 間の距離は、10%～50%間では増加、50%～90%間では減少する。また、 $T^*=0.75$  において、LEV4 及び TEV3 間の距離は、10%～60%間では増加、60%～90%間では減少する傾向が確認できる。このことから羽ばたき運動により生成された渦は翼端位置付近により繋がる渦構造をし、カナブンは羽ばたき運動時に LEV 及び TEV、翼端渦で構成された渦輪を生成していることが示唆される。