

## 8の字羽ばたき運動を行う羽ばたき飛行機の空気力学的特性

[研究代表者] 北川一敬 (工学部機械学科)

### 研究成果の概要

羽ばたき周波数約 15[Hz]の 8 の字運動を行う両翼羽ばたき飛行機の製作に成功した。上死点, 下死点付近における翼膜の弾性変形によるフェザリング運動を確認した。フラッピング運動による流体力の生成により, 設計計算の軌跡と比べ, 可視化結果は異なった軌跡をとった。PIV 可視化から, 両翼機の流れ場で生成される渦や流れの速度変化をとった。また, 両翼機では, アスペクト比 6(AR6)の翅の場合, 一周期の揚力  $Fh^*$  の平均値は最大 1.009[-]となったが, 飛翔に達しなかったため, 甲虫構造を模倣し, 地上では翅を保護し飛翔時に揚力の向上の機構を持つ鞘翼と呼ばれる固定翼を参考し, 4 枚翅仕様の羽ばたき飛行機の設計製作を行った。羽ばたき周波数約 12[Hz]で, 一周期の揚力  $Fh^*$  の平均値は最大 0.451[-]となり, 両翼機よりも低い値となった。PIV 可視化から渦を利用した羽ばたき運動を確認した。

研究分野：流体力学

キーワード：生物流体力学, 昆虫の飛翔, 羽ばたき飛行機, 生物模倣技術

### 1. 研究開始当初の背景

生物の羽ばたきはホバリング, 急降下, 急旋回や前進などの曲技飛行を行っている。鳥類の  $Re$  数  $\approx O(10^5)$  で, 粘性力と慣性力の両方が影響し, 航空機では  $Re$  数  $> O(10^6)$  で, 粘性よりも慣性力が支配的な領域になる。昆虫, ハチドリや羽ばたき飛行機は, 航空機と比べ  $\mu Re$  数範囲(粘性力が支配的な領域)で且つ粘性力を利用した羽ばたき飛行が可能となる。飛翔昆虫の研究はトンボ, 蝶, 蜂, 蝇, 蛾や甲虫に至る。研究対象の甲虫は他昆虫と比較して, 突風等の外乱に強い。また, 胴体部分の容積が大きく, 実機設計製作において, 各種機器の搭載が可能な大きな特徴がある。

### 2. 研究の目的

本研究では, 上下, 回転と捻りの羽ばたき運動状態を生物模倣し, 甲虫型小型無人飛行体の設計開発を目指す。特に, 8 の字運動時の羽ばたき翼周りの流れ場と流体力発生機構と空気力学的特性を解明し, 安定した羽ばたき飛行条件を導出することである。上記の関係を明らかにするために, 以下の方法で研究を遂行する。

(1)1 対 2 枚と 2 対 4 枚の羽ばたき運動の空気力学特性・性

能比較と飛行へのチャレンジ。

(2)羽ばたき時に発生する前縁剥離渦と翼端渦の生成効果と流体力発生機構との関係と特徴の調査。

### 3. 研究の方法

#### (1)羽ばたき飛行機の製作

3D プリンターを用いた機体部品の造形

#### (2)羽ばたき時の流れ場の可視化

スモークワイヤ法, 及び粒子画像流速測定法(PIV)により羽ばたき時の渦の可視化を行い, 羽ばたき時の流れ場の特徴を測定する。

#### (3)羽ばたき時非定常流体力の計測

ひずみゲージを用いた 2 ゲージ法の流体力測定器を製作し, 動ひずみ測定器, オシロスコープを用いて流体力を計測する。

### 4. 研究成果

図 1 は 2 対 4 枚の翅の羽ばたき機構を示す。羽ばたき機構はモータ及び伝達部を除いて左右対称になっており, 羽ばたき運動時左右の翅は同じ運動を行う。4 枚翅機はモータから出力した回転運動をモータに取り付けた歯数 18 のピ

ニオンギアから歯数 36 のスパークギア①を通して軸に伝達され、歯数 12 のピニオンギアから歯数 48 のスパークギア②に速度伝達比 8 で伝える。すべてのギアのモジュールは 0.3 となる。スパークギア②の回転運動をピストン・クランク機構により翅を 120[deg]に傾ける羽ばたき運動に変換する。胴体のカーボンロッドはφ0.7[mm]を使用した。

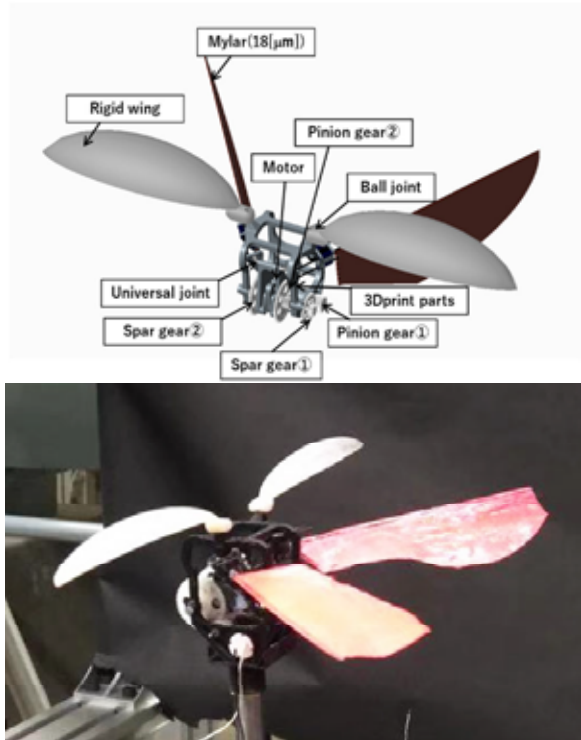
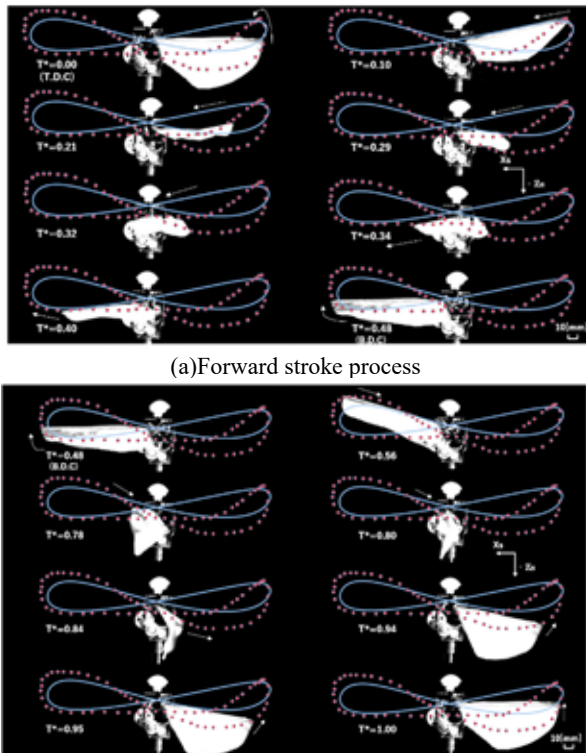


図1 2対4枚翅の羽ばたき機構



(a)Forward stroke process  
(b)Backward stroke process  
図2 羽ばたき運動の可視化

図2は4枚翅仕様が定常羽ばたき後の無風時軌跡の撮

影結果を示す。羽ばたき飛行機は  $T^*=0[-]$  の T.D.C からフォワードストロークを開始する。 $T^*=0.10[-]$ まで  $Z_s$  方向へ、リード・ラグ運動を行った後、 $T^*=0.10[-]$ から  $T^*=0.21[-]$ の間で翼膜の弾性変形によるフェザリング運動を行う。 $T^*=0.21[-]$ から  $T^*=0.34[-]$ において低迎角で縦方向ヘリード・ラグ運動を行う。 $T^*=0.40[-]$ で  $Z_s$  から  $Z_s$  方向へ回転運動を行い、リード・ラグ運動を行いながら翅は低迎角から高迎角へ変わる。 $T^*=0.48[-]$ において B.D.C となる。 $T^*=0.48[-]$ からバックワードストロークを開始し、 $T^*=1.0[-](=0.0[-])$ となる。 $T^*=0.56[-]$ から  $T^*=0.95[-]$ において高迎角で縦方向ヘリード・ラグ運動を行う。 $T^*=0.95[-]$ から後ろ方向へ回転運動を行いながら高迎角から低迎角に変わり始める。

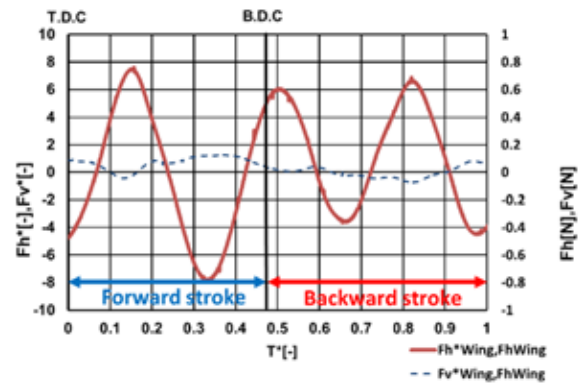


図3 流体力の時間変動

図3は4枚翅機初期迎角が  $20^\circ$  の時の羽ばたき運動による流体力の時間履歴を示す。横軸は羽ばたき運動の無次元周波数  $T^*$  を示す。今回の測定方法では、ハチドリホバリング運動に近い状態であるため、 $Fv^*$  の振幅が小さいが、発生していることがわかる。羽ばたき周波数は  $11.71[Hz]$  である。図3より  $Fh^*$  の羽ばたき中に山が3箇所あり、負の力を生成する谷は3箇所ある。 $T^*=0[-]$  は上死点(T.D.C),  $T^*=0.48[-]$  で下死点(B.D.C)となり、 $T^*=1[-]$  で T.D.C となる。バックワードストローク/フォワードストローク比は  $1.08[-]$  となった。 $Fh^*$  平均値  $=0.451[-]$  となった。フォワードストローク時の流体力の平均値  $=-0.321$  で、バックワードストローク時の流体力の平均値  $=1.176[-]$  となった。両翼機に比べ、流体力はかなり低い値になったが、はばたき運動は定常性が高くなっている事が分かる。1周期を通して正の流体力が生成されているため、安定して推力を得る羽ばたき運動を行っている。