

【D01】羽ばたき翼の空気力測定と翼膜の画像解析システムの開発

03E1302 和田 康資
指導教員 河村 良行

04E2054 松雪公彦
指導院生 西本 怜史

1. 緒言

羽ばたき運動を用いて飛行する鳥や昆虫は固定翼の飛翔体とは異なり、自由度の高い飛行を行っている。そのような羽ばたき飛行を人工的に模擬することができれば、これまでの固定翼機とは違うより高効率な飛翔体を作ることができる可能性がある。

本研究室ではこれまで小型羽ばたき飛翔体の研究を行ってきており、その結果よく長 100 mm の羽ばたき飛翔体の開発に成功した。しかし異なる翼の形状や大きさによって得られる空気力や効率の違い、また翼膜の動きと空気力の関係もわかっていない。本研究では、平均揚力測定と動的揚力測定を行い、またその翼や翼膜の動きを解析するための高解像度ストロボ撮影装置を開発し、翼膜の動きの撮影を行った。

2. 実験装置と実験方法

2.1 実験装置

本研究室では、翼の形状を 2 枚翼機、交叉 4 枚翼機、翼長を 200 mm, 150 mm, 100mm の翼を用い研究を行った。

羽ばたき運動によって発生する空気力を測定するための装置の概要を図 1 に示す。計測装置はロードセル (VISHAY 社 MODEL 1004, 定格荷重 3 kgf)、動ひずみ測定器 (NEC 三栄, AS1503)、低速風洞、オシロスコープ、定電圧電源、パーソナルコンピュータによって構成される。2 個のロードセルを用い、水平力、垂直力を測定する。ギア部に反射型フォトインタラプタを搭載し、翼が特定の位置に来た瞬間をトリガとして用いた。2 枚翼機は翼が最も下にあるとき、4 枚翼機は翼が上下に完全に開いている状態をトリガとした。またジョイント部とギアボックスを一対にし各所に軽量化を施して測定時の機械振動を減少させるようにした。

2.2 飛行状態の再現

飛行中の羽ばたき翼が得る空気力を計測するために、低速風洞を用いて模擬的な飛行状態を再現した。低速風洞から一定の風速を送り、羽ばたき翼を一定周波数で羽ばたかせ、風による抗力と羽ばたき運動の推力が釣り合うことで飛行状態を再現できる。この際、風速の変化によって羽ばたき周波数も変化するため、設定周波数になるように入力電圧を操作し羽ばたき周波数を調節する。また同時に推力の平均値が 0 gf になるように風速も調節することで飛行状態を再現した。

2.3 デジタルフィルタリング

ロードセルからの信号には羽ばたき運動によって得られる空気力以外に、全体の機械振動による共振現象に起因する信号も含まれる。そこで、フーリエ解析の手法を用いデジタルフィルタリングを行った。まず羽ばたき運動 1 周期分のデータをフーリエ級数展開し、パワースペクトルを得る。得られたパワースペクトルからロードセルの固有振動成分を判断し、その後羽ばたき運動の空気力のみを逆フーリエ変換を用いて波形に復元した。これらの操作によりロードセルの固有振動成分を除いた羽ばたき運動の空気力成分のみを取り

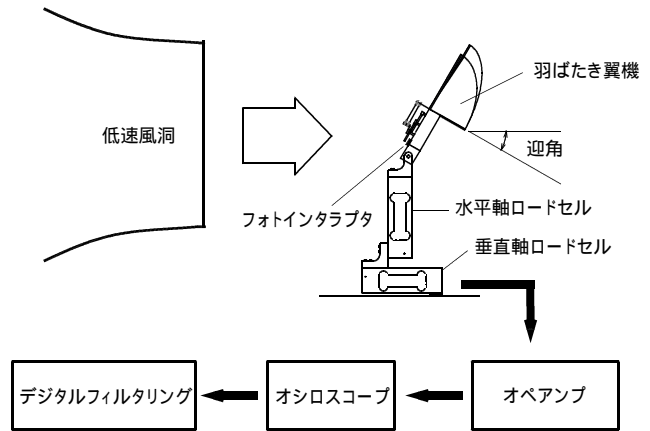


図 1 測定装置

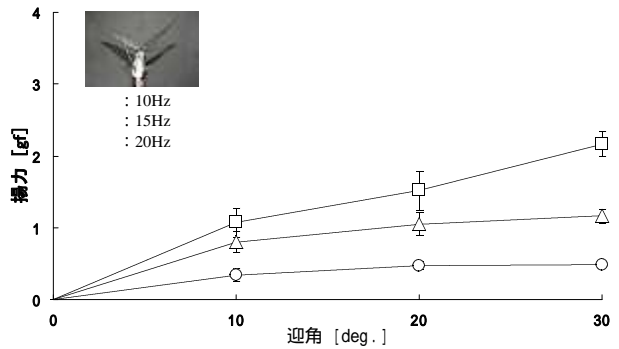


図 2 2枚翼平均揚力値

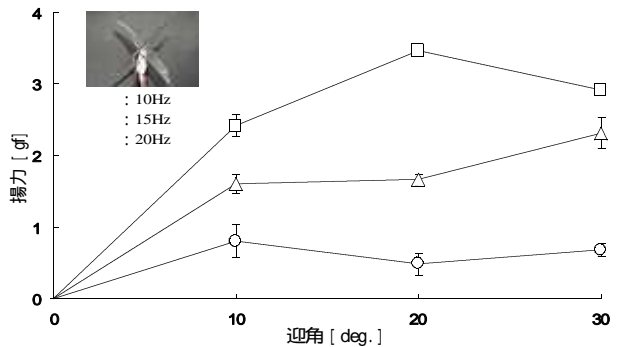


図 3 交叉4枚翼揚力平均値

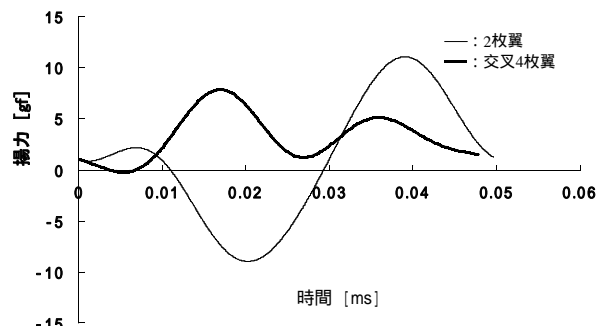


図 4 揚力測定値

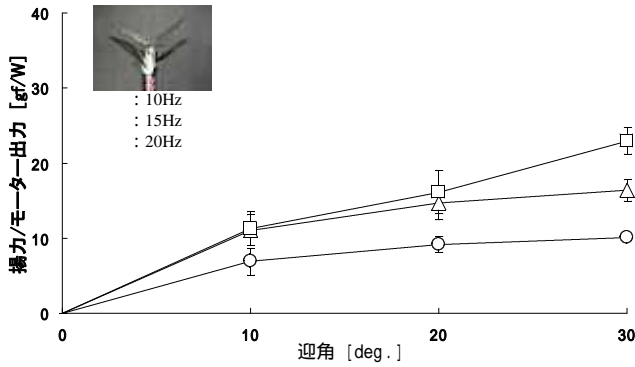


図5 2枚翼揚力効率

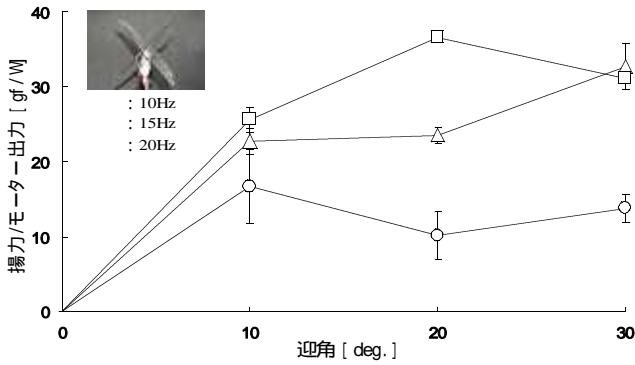


図6 4枚翼揚力効率

出すことができる。

2.4 測定用モータについて

実験機の動力にはモータ(DIDEL社, MK07-1.7)を用いた。モータ特性には電圧, 電流に比例する特徴がありその特徴からトルク計として用いることができる。

モータ特性の測定は停動トルクと無負荷時回転数を電圧パラメータで測定し近似式を求めた。この測定結果から, トルク (e,i) の算出式を作成した。

$$\tau_{(e,i)} = \frac{\tau_{m(e)} - \tau_{s(e)}}{I_{m(e)} - I_{s(e)}} i - \frac{\tau_{m(e)} - \tau_{s(e)}}{I_{m(e)} - I_{s(e)}} I_{s(e)} \quad (1)$$

$$W = 2 N \cdot \tau \quad (2)$$

式中の $\tau_{m(e)}$ は停動トルク, $\tau_{s(e)}$ は無負荷時トルク, $I_{m(e)}$ は停動電流, $I_{s(e)}$ は無負荷時電流である。この式(1)より求めたトルク (e,i) と測定した回転数 N から式(2)を用いてモータ出力を求め羽ばたき運動の効率を比較した。

3. 揚力測定の結果

3.1 翼長 150 mm 機の揚力測定結果

150 mm 羽ばたき翼機の 2 枚翼, 4 枚翼羽ばたき機構それぞれの平均揚力測定の結果を図 2, 図 3 に示す。羽ばたき周波数を 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz の 3 種類に設定し, それぞれ迎角を 0 deg. から 30 deg. まで変化させ飛行状態を再現した。その結果, 平均揚力値では 15 Hz, 20 Hz においては 2 枚翼機よりも 4 枚翼機の方が 2 倍程度揚力に関して有利なことがわかった。

また, 測定値においては 2 枚翼機が上向き下向きの力が相殺するのに対し, 4 枚翼機の場合, 連続的に上向きの力が発生しており, 効率に関しても周波数の上昇に従い 4 枚翼の効率が有利であることが分かった。

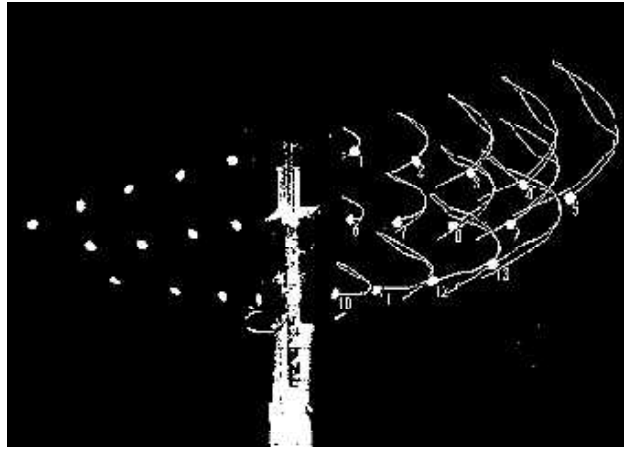


図7 羽ばたき運動の軌跡

4. 高速度ストロボ撮影装置の開発

4.1 撮影装置開発の目的

本研究に用いた羽ばたき機構は翼膜に柔軟性に非常に富むポリエチレンを用いているため, 翼膜が空気力によって複雑な変形をしている。羽ばたき機構における揚力の動的な変化は測定可能であるが 今回の測定結果から見られるような揚力の変化が翼の翼膜とどのような動きによってもたらされたものか知ることはできない。運動中の翼の動きを視覚的に正確に捉え, 定量的に解析することで揚力発生メカニズムをより深く理解する必要がある。そこで市販の 1000 万画素のデジタルカメラ(Canon社, EOSkiss)とキセノンストロボスコープ(ライン精機社, SS-2000)を組み合わせ高精密な連続ストロボ写真を撮り, その画像を元に翼の状態を観察することを目的として開発を行った。

4.2 撮影方法

反射型フォトインタラプタをギア部に搭載し, 翼が特定の位置に来た瞬間をトリガとして用い, パーソナルコンピュータで読み取る。トリガ信号に応じてデジタルカメラのシャッターを開け, 任意のタイミングでストロボを照射して撮影を行う。ただし, 各装置には個々にディレイ及びジッターが存在し全体で約 73 μ s となる。

4.3 撮影結果

翼長 150 mm の羽ばたき機構に対し, 周波数 20 Hz, 撮影間隔を 1 ms として撮影を行った。解析画像の結果を図 7 に示す。(自動トラッキングの様子は以下 <http://www.fit.ac.jp/~y-kawa/packages/images/movies/kaiseiki01.mpg>) 翼膜の動きの様子を高画質で捉え, 2 次元動画計測ソフトによって翼膜の軌跡を行うことに成功した。

5. 結言

2 枚翼機, 4 枚翼機の揚力測定を行い, 翼の形状やサイズ別の揚力を得た。この結果, 2 枚翼と 4 枚翼における揚力発生の特徴を測定した。またストロボ撮影装置開発により任意のタイミングでの翼の撮影に成功し, 2 次元画像解析を用い翼膜上の点を追うことができた。今後, 撮影した画像を 3 次元的に解析, 翼と翼膜の状態と空気力の関係を調べる必要がある。

参考文献

(1) 早田智史, 河村良行, 「ホバリング可能な小型羽ばたき飛行機の開発」, 日本機械学会流体力学部門講演会講演論文集, P149, 2006