

羽ばたき飛行体の製作研究

菊地 吉郎*¹, 秋元 麗*², 宮本 将志*³

A production study on ornithopters

Kichiro KIKUCHI, Rei AKIMOTO, Masashi MIYAMOTO

The authors have tried once to produce a dragonfly-type ornithopter using the power-type rubber, a flight could not be realized because of the difficulty in weight reduction. With recent advances in technology, ultra-compact and lightweight coreless motors, batteries, transmitter, receiver have been developed, now readily available. The authors, based on the results of previous studies, using parts that have been developed, we have attempted to make the production of a remote control ornithopter. This paper describes coreless motor with performance test results, design and production of a dragonfly-type and a butterfly-type ornithopter aiming to reduce the weight, and the current flight test results.

KEYWORDS: Insect, Flutter, Dragonfly, Butterfly, Ornithopter

1. はじめに

昆虫や鳥類など、羽ばたきによって飛行する生物は数多く存在する。これらの中には急加減速、急旋回、中にはホバリングを行うものもあり、餌を捕らえたり外敵を回避するなど、生きていくために巧みな飛行を行っている。身近を飛び回っている昆虫の中で、トンボやチョウは観察が容易で、飛行の姿も美しい。しかしながら、この二つに限ってみても、飛行の様子はまったく異なっており、いわゆるトンボはすいすい、チョウはひらひらと謂う表現は実に相応しい。これは、同じ羽ばたき飛行でありながら、必要な空気力の発生方法が異なるからであり、体の作りに応じた最適な運動形態をとっているためと考えられる。このため、多

くの羽ばたき飛行に関する研究がなされており、実際に飛行するモデルも作られている^{1) 2)}。しかし、著者らが知見する限りではいずれも羽ばたき翼周りの流れの解析に重きが置かれており、羽ばたき飛行体の実現を目的とした研究はあまり行われていない。著者らは、ゴム動力を利用するトンボ型羽ばたき飛行体の製作をかつて試みたが、軽量化が困難なために飛行を実現できなかった。近年の技術の進歩に伴い、超小型・軽量のコアレスモータ、バッテリー、送信機、受信機が開発され、容易に入手できるようになった。著者らは、これまでの研究の成果を基に、開発された部品を用いて、遠隔操作を行える羽ばたき飛行体の製作を試みてきた。本論文は、使用したコアレスモータの性能試験結果、軽量化を目指したトンボ型および

*1 機械工学科 (Dept. of Mechanical Engineering), E-mail:kikuchi@oyama-ct.ac.jp

*2 長岡技科大 (2009 年度卒業)

*3 自衛隊 (2009 年度卒業)

チョウ型羽ばたき飛行体の設計および製作、現状の飛行実験結果を記述する。

2. コアレスモータの性能試験

2. 1 試験の方法

今回羽ばたき飛行体に使用するモータは小型のコアレスモータ (MK07-2.3) である。しかし、その性能が不明だったため動力計を製作し性能試験を行った。試験装置の概略図を Fig.1 に示す。試験は、巻胴によっておもりを巻き上げ、その質量を変化させた時の巻胴の回転数を非接触式タコメータで計測することにより出力を算出した。モータは直流電源装置によって一定電圧を印加して駆動され、その動力は歯車によって減速し巻胴に伝達される。巻き取り時に糸が重なってもトルクの変化が最小限になるよう、糸は標準直径 0.235mm のものを採用した。以下にモータの出力 L 、回転数 N の計算式を示す。

$$L = T\omega \text{ [W]} \quad (1)$$

$$T = Fr \text{ [Nm]} \quad (2)$$

$$F = mg \text{ [N]} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ [rad/s]} \quad (4)$$

ここに、

n : 巻胴回転数 [rpm]

m : おもりの質量 [kg]

r : 巻胴半径 = 15×10^{-3} [m]

g : 重力加速度 = 9.81 [m/s²]

また、動力計の減速比は 250:1 なのでモータ回転数 N は

$$N = 250n \text{ [rpm]} \quad (5)$$

となる。

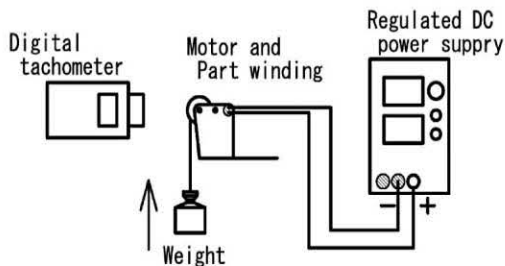


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

2. 2 試験の結果

Fig.2 は試験によって得られた結果をもとに式 (1) から (5) を用いて算出した性能曲線である。電源電圧は 4.2V、モータの回転方向は軸を正面に見

たとき時計回りである。横軸にトルク [Nm] を、縦軸にはモータ回転数 [rpm] と出力 [W] をそれぞれとっている。出力曲線のピークはトルクが 4×10^{-4} Nm 付近あり、その時の出力は約 1.1W、回転数は 25000rpm 前後となっている。

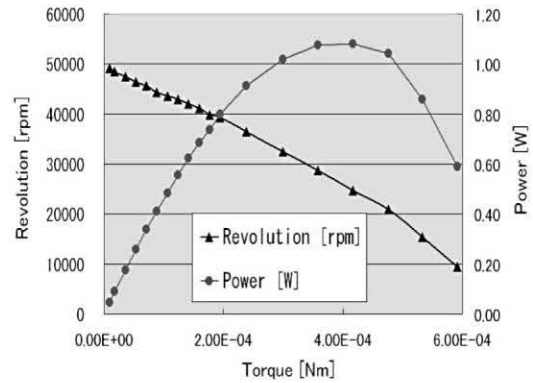


Fig.2 Motor performance curve measured

3. トンボ型羽ばたき飛行体の製作

および実験

3. 1 トンボの羽ばたき

これまでの研究より、トンボの羽ばたき飛行には以下の特徴があることがわかっている³⁾。

- 1) 羽ばたき周波数は 30 Hz 付近である。
- 2) 羽ばたき一周期でピッチ角と羽ばたき方向角が変化しており、打ち上げ時の抵抗を少なくし、打ち下ろし時は揚力を多く得ている。
- 3) 前翅と後翅はおおよそ 1/4 周期の位相差で羽ばたいている。
- 4) 羽ばたき角は $80^\circ \sim 90^\circ$ である。

3. 2 材料・部品の選定

Fig.3 に動力及び操作に用いた部品を示す。コアレスモータは直径 7 mm、全長 15mm、質量 2.75 g である。駆動用の Li-Po バッテリ (FR20) は公称電圧 3.7 V (実測 4.2 V)、容量 20 mAh、質量 0.8 g であり、送信機用バッテリーには大容量の FR130 を用いた。歯車はモジュール 0.3 のものを使用した。クランクシャフトにはねじれや曲げを考慮し、直径 1 mm のピアノ線を用いた。フレームの製作には強度や軽さや加工性を考慮し、アクリル板、カーボンロッド、パルサ板を用い、翅には厚さ $2 \mu\text{m}$ のフィルム、カーボンロッドを用いた。

Table1 に今回の製作で使用した部品一覧を示

す。なお、接合には瞬間接着剤、セロファンテープを用いた。

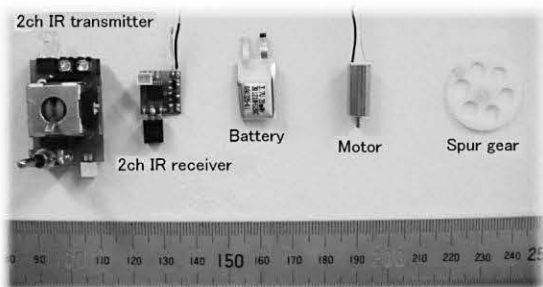


Fig. 3 Photograph of the major components

Table.1 Parts list

no.#	Part Name	Model	Quantity
1	2ch IR Transmitter	ITX2MINI	1
2	2ch IR Receiver	IRX2N	1
3	Li-Po Battery	FR20	1
4	Li-Po Battery	ER130	1
5	DC motor(ϕ 7mm)	MK07-2.3	1
6	M0.3 Pinon Gear	G309-097	1
7	M0.3 Spur Gear	G360L	1
7	M0.3 Spur Gear	G380L	1
8	Carbon rod ϕ 1mm		1
9	Carbon rod ϕ 0.7mm		1
10	Carbon rod ϕ 0.5mm		1
10	Carbon rod ϕ 0.3mm		1
11	2 μ m film	WC-FILM	1

3. 3 設計および製作

既存の羽ばたき飛行機⁴⁾を参考に、いくつかの設計を行い、試作した機体の構造を Fig. 4, Fig. 5 に示す。

機構の簡略化・小型化が容易であるため、前後翅に位相差を持たせて、一本のクランクシャフトで動かす機構とした。厚さ 1.5mm のアクリル板で前後のフレームを作り、機体のねじれを防ぐために直径 1.0mm のカーボンロッドと厚さ 2.0mm のバルサ板で固定する構造とした。

モータの出力はピニオンギアとスパーギア 1 と 2 を介して減速し、クランクシャフトに伝達される。目標の羽ばたき周波数を 10 Hz とし、Fig. 2 のモータの性能曲線より出力が最大となる回転数 25000 rpm を使用するよう設計し、減速比を 44.4 : 1 とした。

クランクシャフトの両側にクランクを取り付け、コネクティングロッドにより翅を羽ばたかせた。羽ばたき角は 90° となるようにし、後翅を 1/4 周期先行して羽ばたかせるため、クランクは前後で 90° の位相差となるように設計した。翅は直径

0.7mm のカーボンロッドをアクリル板に固定した。なお、使用したクランクの機構上、左右に微小な位相差ができてしまうが、飛行に大きな影響はもたらさないという前提の基に今回は設計を進めることにした。

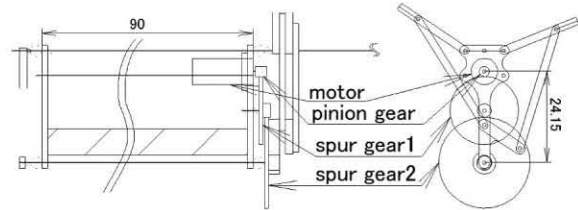


Fig. 4 Structure of the underwing

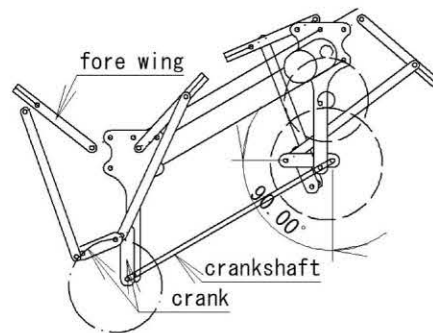


Fig. 5 Structure of the previous wing

Fig. 6 に翅脈パターンを示す。翅のカーボンロッドの前縁部に、厚さ 2 μ m のフィルムをセロファンテープで固定した。その表面に直径 0.5mm と 0.3mm のカーボンロッドを張り付けて翅脈を形成し、羽ばたきに合わせてピッチ角が変化するようにした。なお、翅脈の効果を確認する為に P1 と P2 の二種類を製作し、実験を行った。

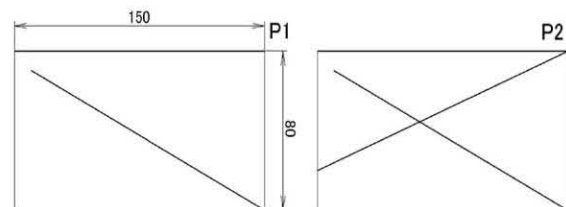


Fig. 6 Vein patterns

Fig. 7 に実際に製作した機体を示す。機体の全質量は 11.7 g であった。製作後の調整などが容易になるよう、2ch 赤外線受信機とバッテリーはセロファンテープによりフレームに固定した。また実験しながら、バッテリーの位置を変えることによって重心の位置を調整し、試行錯誤を繰り返しながら安定した飛行を目指した。

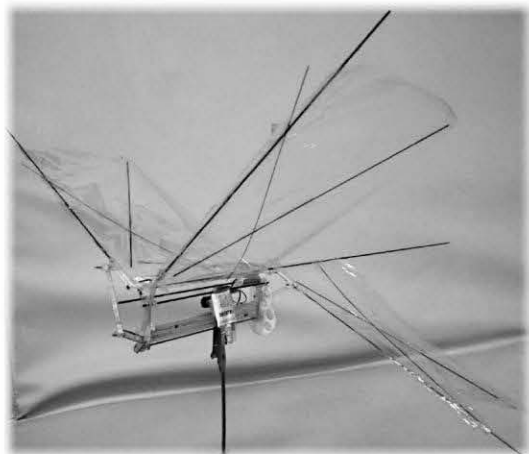


Fig. 7 Appearance of a dragonfly-type ornithopter produced

3. 4 実験結果と考察

翅にフィルムを張っていない状態と張った状態とで、非接触式タコメータを用いて羽ばたき周波数を計測した。フィルムを張っていない状態では 10 Hz 前後で羽ばたいたが、張った状態では 4 Hz 前後であった。羽ばたきの空気力や翅の慣性力などにより、トルクが不足して羽ばたき周波数が低下したものと考えられる。

飛行実験の方法は、製作した機体を肩の高さで手に持ち、モータのスロットルを最大にした状態で手を離れた。翅脈の違いにより次の結果が得られた。

P1 の場合：緩やかに落下した。

P2 の場合：安定して飛行した。

P1 の翅ではピッチ角の変化が大きすぎ、揚力が不足したと考えられる。

また今回の実験では進行方向に対し左に曲がって飛行した。原因としては、クランク機構の左右の位相差、機体のねじれなどが考えられ、今後の課題の一つである。

4. チョウ型羽ばたき飛行体の製作

および実験

4. 1 チョウの羽ばたき

これまでの研究より、チョウの羽ばたき飛行には以下の特徴があることがわかっている⁵⁾。

- 1) 羽ばたき周波数は 10Hz 前後である。
- 2) 前後翅がほぼ同位相で羽ばたく。

3) 進行方向に対して、体軸の角度が大きく変化する。

4) 羽ばたき角は 130° 以上で、打ち上げは上方で翅を閉じるまで行われる。

チョウの羽ばたきのストロークは体軸に対してほぼ直角なので、そのままでは打ち上げと打ち下ろしで揚力は打ち消されてしまう。このため、チョウはなんらかの方法で体のピッチング運動を行い、効率よく揚力と推力を得ていると考えられる。その方法として、腹を上下に振る能動的動作、および羽ばたきで発生する空気力による重心まわりのモーメントの変化による受動的動作などが考えられるが、著者の知る限りでは受動的という報告²⁾がある。また翅には翅脈といわれるリブが通っており、これによって薄い翅を支持しつつ、羽ばたき時に適度な弾性変形をもたらしている。

4. 2 材料・部品の選定

使用する部品は小型・軽量なものとしてインドアプレーン用を採用した。動力源として Li-Po (リチウムポリマ) バッテリーとコアレスモータを用い、その出力を赤外線送信機と受信機によって制御した。動力用コアレスモータ、駆動用バッテリー、送信機用バッテリーの詳細は 3. 2 で記したものと同じである。歯車はモジュール 0.3 のものを使用した。フレームは厚さ 3.5mm のアクリル板および直径 1.0mm のカーボンロッドで構成し、接着剤によって接合した。翅の材料には厚さ $2 \mu\text{m}$ のフィルムを用いた。Table 2 に今回の製作で使用した部品一覧を示す。

Table 2 Parts list

no.#	Part Name	Model	Quantity
1	2ch IR receiver	ITX2MINI	1
2	2ch IR transmitter	IRX2N	1
3	Li-Po Battery	FR130	1
4	Li-Po Battery	FR20	1
5	DC moter($\phi 7\text{mm}$)	MK07-2.3	1
6	m0.3 Pinon Gear	G309-097	1
7	m0.3 Spur Gear	G336L	4
8	Carbon rod $\phi 1\text{mm}$		1
9	Carbon rod $\phi 0.7\text{mm}$		1
10	Carbon rod $\phi 0.5\text{mm}$		1
11	$2\mu\text{m}$ film	WC-FILM	1

4. 3 設計および製作

チョウは 4 枚の羽根を有するが、前後の翅が同

時に羽ばたくこと、左右対称に羽ばたくことをふまえ、羽ばたき飛行体の翅は一枚のフィルムで製作することにした。翅の形状はチョウを参考にしつつ、効率よく揚力を発生させられるものを試行錯誤した。

本体のピッチング運動を再現するのは難しいと判断し、羽ばたき運動のみの機構とした。また、翅のフィルムに直径0.5mmのカーボンロッドを張り付けることで翅脈とした。翅は前縁の直径0.7mmのカーボンロッドを基点に駆動するので、翅脈の慣性力によって翅のピッチ角が受動的に変化することを狙った。このピッチ角の変化を、チョウの体軸のピッチング運動の代わりとして考えた。

いくつかの試作を行い、質量と駆動トルクのバランスから羽ばたき飛行体の目標周波数を4Hz、減速比を108:1に設定した。羽ばたき角は水平面より上方に80°、下方に40°の合計120°とした。製作した羽ばたき機構と設計図を対比してFig. 8に示す。

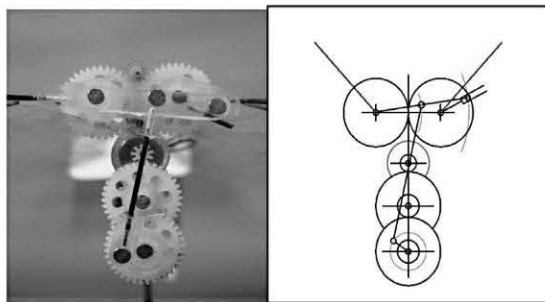


Fig. 8 Flap mechanism

4. 4 実験結果と考察

飛行試験は、羽ばたき飛行体にバッテリー・受信機・モータを搭載し、遠隔操作が可能な状態でを行った。羽ばたき飛行体を手に持ち、送信機のスロットルを全開にし、適度な初速を与えて発進させた。飛行が可能になるまで翅の形状や翅脈の張り方、翼面積などに改良を加えた。

その結果、翼面積が約 $3.1 \times 10^4 \text{ mm}^2$ の時に飛行可能となった。このときの羽ばたき周波数は約4Hz、質量は8.35gであった。最終的な翅の形状と翅脈の張り方を外観図としてFig. 9に示す。また、飛行の安定のため後部に紙製の尾翼を取り付けている。

翅脈にあたるカーボンロッドは翅の前縁、中央部から翅の角部に向かって張り付けた。これ以外の翅の形状・翅脈では飛行できなかった。また尾

翼を外した状態では、発進させた直後に前方から墜落してしまい飛行できなかった。フレームを延長しバッテリーを後部に取り付けるなどして重心を後方に移動したが、姿勢が安定しなかった。製作した羽ばたき飛行体では、チョウのような体軸のピッチ角の変化を行うような工夫はされておらず、安定した飛行の実現のために最も重要な課題であると思われる。

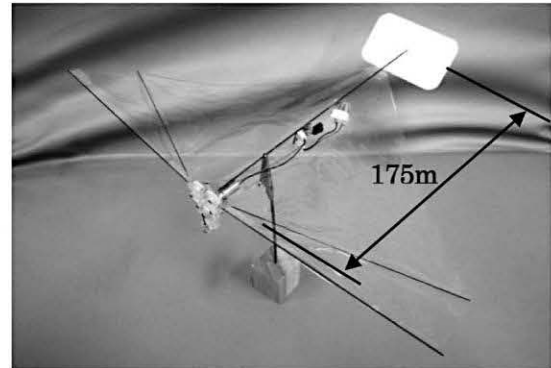


Fig. 9 Appearance of a butterfly-type ornisopter produced

5. まとめ

- 1) 本研究で用いたコアレスモータの性能を計測し、設計に供した。
- 2) トンボ型飛行体を製作し、飛行を確認し、安定した飛行のためには翅脈の形状が重要であるとの知見を得た。また、今回明らかになった欠点を改良することにより、飛行能力を改善できる
- 3) チョウ型飛行体を製作し、翅脈の形状や張り方および尾翼の取り付けなどの試行錯誤を行ったが、安定な飛行を確認出来なかった。体のピッチ角の変化を行う工夫が重要と思われる。

参考文献

- 1) 劉、機学誌、Vol. 109, No. 1049 (2006), 265.
- 2) 下山他、機学論集、72 巻、718 号 (2006), 106.
- 3) 菊地他、小山高専紀要、第 41 号 (2009), 39.
- 4) 羽ばたき飛行機製作工房
(<http://blog.goo.ne.jp/flapping/>)
- 5) 東、生物の動きの辞典、朝倉書店 (1997), 126.

【受理年月日 2011年 9月30日】

