

# ドローン設計・自作に関する研究 (はばたきドローン試作Ⅱ)

山本 淳二, 上西 太陽, 川原 拓斗, 立石 晟日彦

第一工科大学 航空工学部 航空工学科(〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2)

## Study for Designing and Self Making of Drones (Trial making of an ornithopter drone II)

Junji Yamamoto, Taiyo Kaminishi, Takuto Kawahara, Masahiko Tateishi

Department of Aeronautical Engineering, Daiichi Institute of Technology

**Abstract:** With the remarkable growth of the drone market in recent years, many institutions and companies are conducting various research and developments. In our laboratory, we are conducting research on making drones based on the belief that designing, making, and flying a drone by ourselves is a good practical education for students studying aeronautical engineering. This year, continuing from last year, we continued completing a ornithopter drone with quantitative evaluation in a wind tunnel. This paper reports the progress and results of this year.

### 1. はじめに

近年のドローン関連産業の発展に伴い、多くの企業や研究機関が、それぞれ特色のあるドローンの研究・開発、また活用方法の研究、実践に取り組んでいる。本航空工学科でもドローンに関連するさまざまな研究を実施しているが、当研究室では参考文献(1)で述べたように、航空工学を学ぶ学生に対する良い実践教育に成り得るとの考えから、学生たちに実際にドローン进行設計、自作、飛行させる卒業研究を実施しており、昨年度(2022年度)は、その一環として、はばたきドローンの設計・試作を行った(以降昨年度試作機を「はばたき 2022」と呼ぶ、図.1 参照)。その結果、短い距離ながらある程度はばたき飛行できるところまで進捗したと同時に、はばたきドローン自作に関するいろいろな知見も得られた。今年度は、さらに長時間安定した飛行のできるはばたきドローンを設計、製作することを目標に卒業研究に取り組んだ。



図.1 「はばたき 2022」ドローン

はばたきドローンには、プロペラ方式のドローンに対し静粛性や安全性の利点があるため、それを活かした活用も考えられ、種々研究も進められている。

以下、本論では本年度(2023年度)のはばたきドローンに関する検討・試作状況等について紹介、報告する。

### 2. 「はばたき 2022」風洞試験

「はばたき 2022」からの改善を検討するにあたり、まず「はばたき 2022」が発生している揚力、

推進力、抵抗を定量的に把握するため、本学の低速風洞試験装置を用いて風洞試験を行った。

### 2.1 風洞試験装置への供試体取付け

図.2 に示すように、風洞装置のインターフェースに合わせた取付け治具を設計、製作し「はばたき 2022」を治具にタイラップで固縛し、設置した。

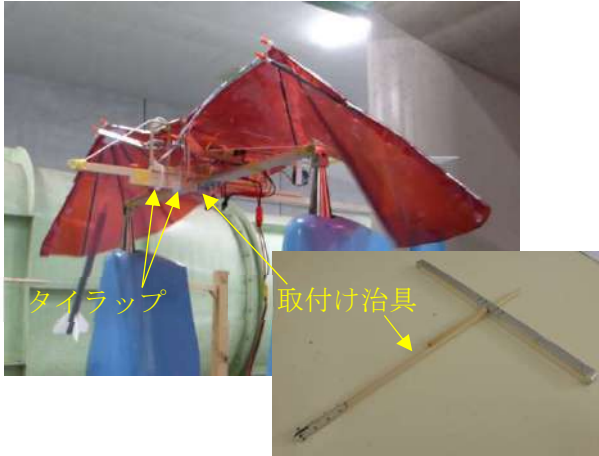


図.2 風洞試験装置への設置

### 2.2 試験ケース

試験は、滑空状態およびはばたき状態双方について実施した。滑空状態では、迎角や風速を変更して静的な計測を実施。はばたき状態では、静止推力を得るための風速なしの状態、および飛行中を模擬した風速あり (5m/s) の状態で動的な時歴計測を実施した。試験ケースを表.1 に示す。

表.1 試験ケース

No.	状態	尾翼角	風速	迎え角	計測器
①	滑空状態	0°	5m/s	-2° ~ 12°	デジタル計
②		30°	5m/s	-2° ~ 12°	
③		0°	5m/s~8m/s	0°	
④	はばたき状態	0°	0m/s	0°	データロガー
⑤		0°	5m/s	0°	

### 2.3 計測装置

滑空時等、静的状態での 6 分力 (Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz) は、風洞試験計測器のデジタル計で計測し、はばたき時の動的時歴は風洞試験計測器からの信号をデータロガーにて記録し計測した。図.3 に計測装置を示す。

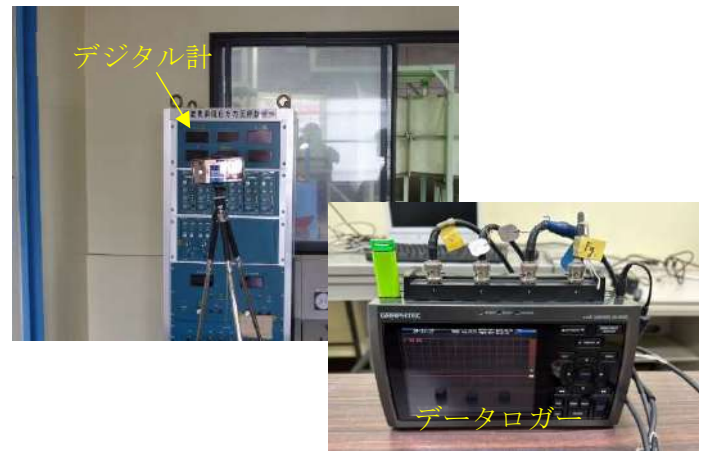


図.3 計測装置

### 2.4 試験結果

#### 2.4.1 滑空状態

滑空状態の静的計測結果の一例として、迎角を 0° に固定し、風速を 5m/s から 8m/s に変更した際の抵抗と主翼揚力の測定結果を図.4 に示す。データを 2 次曲線で近似しているが抵抗、揚力ともにほぼ風速の 2 乗に比例することが確認できる。また、風速 7m/s 程度で 100gf 強の主翼揚力が発生しており、ある程度の前進速度が得られれば「はばたき 2022」は自重 (約 100gf) を支えるだけの揚力は発生可能であることがわかった。

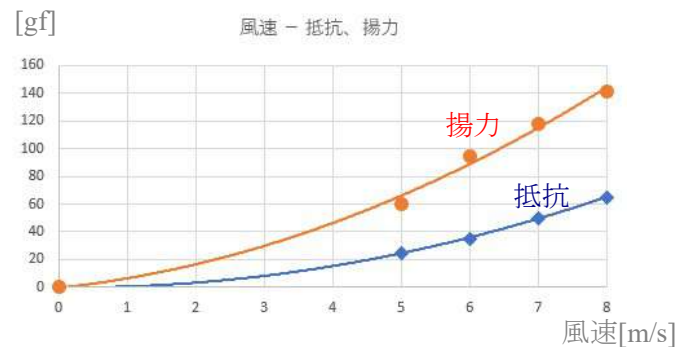


図.4 計測結果例 (滑空状態)

#### 2.4.2 はばたき状態

はばたき状態での動的な計測結果一例を図.5 に示す。上が風速なし、下が風速ありの状態での抵抗と主翼揚力の時歴である。風速なしの状態では、Fx はマイナスとなっており後方へ推力を発生していることがわかる (静止推力)。風速ありの状態では、揚力は風速なしの状態に対し風速による揚力が加えられ、プラス側にオフセットしているのがわかる。

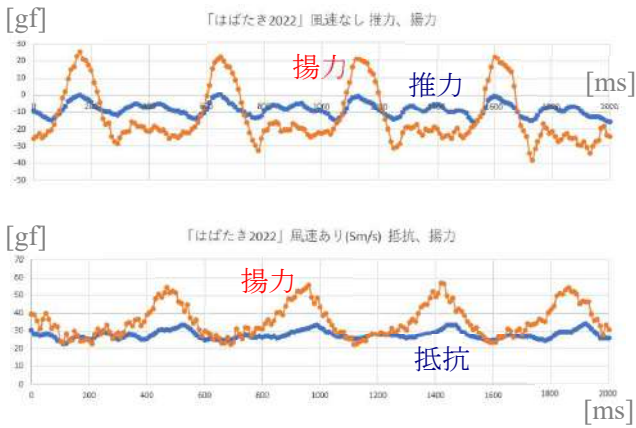


図.5 計測結果例（はばたき状態時歴）

### 2.4.3 考察

以上の風洞試験より「はばたき 2022」の特性について、以下のように考察した。

- ・はばたき機が受ける抵抗に対し、はばたきによる前進推力が小さい。よって手投げの初速を保てず継続した飛行ができない状態である。
- ・揚力も滑空状態では 7m/s 程度で自重を支えるだけの揚力は発生するが、5m/s のはばたき状態での平均揚力は自重を下回り、揚力は不足する。

## 3. はばたき機改善検討

「はばたき 2022」についての考察より、はばたき機ドローン 2023 年度版（以降「はばたき 2023」と呼ぶ）の改善を検討した。はばたきによる推力が抵抗に比較して小さいため、まずは、これを改善する必要があることから、材質の違う 2 種の主翼形態を作成し、それらの推力、揚力等を風洞試験にて比較検討することとした。

### 3.1 主翼形態

#### 主翼形態①

図.6 に 1 種目の主翼形態①を示す。厚さ 1mm のスチレンフォームを使用した主翼である。

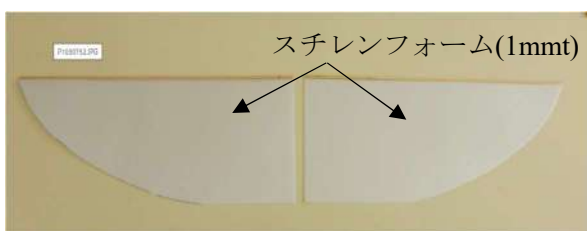


図.6 主翼形態①

#### 主翼形態②

図.7 に 2 種目の主翼形態②を示す。「はばたき 2022」と同じフィルムを使用したのが、剛性を上げるためガセット部を強固にし、カーボン材の補強パターンを変更した。



図.7 主翼形態②

## 3.2 はばたき機構の改善

### 3.2.1 飛行確認

主翼形態の比較が目的のため、主翼は途中で関節のないシンプルな形態とし、モーターは当初「はばたき 2022」に使用したのと同等の Akozon ロングシャフトモーター 2 個を用いギアボックスにて出力を 1 本に合わせた（図.8 参照）。主翼形態①、②での風洞試験を実施する前に、定性的な傾向をみるために飛行確認したところ、特に主翼形態①では、良好に滑空するものの、はばたかせた状態で飛行させると主翼に発生する揚力によりモータートルクが打ち勝てず、はばたきが止まる結果となり、モータートルクの不足が判明した（図.9 参照）。

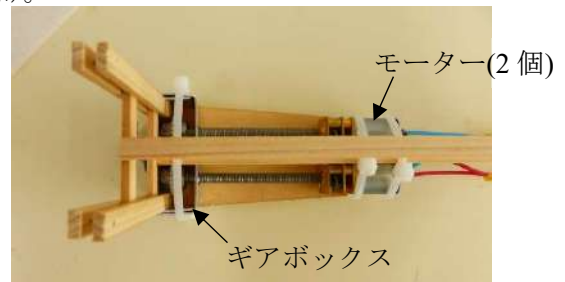


図.8 当初モーター/ギアボックス



図.9 飛行確認



### 3.2.2 モーター/ギアの改善

モータートルクが不足しているため、風洞試験を行っても風速ありの状態でははばたかないことは明白なため、モーター及び減速用ギアの機構を改善した。改善にあたっては、良好にはばたき飛行している参考情報(2)のはばたき機を参考にした。モーターはコスモテック CT2211-1700 を用い、ギアは AXON ギアを組み合わせ使用した(図.10 参照)。

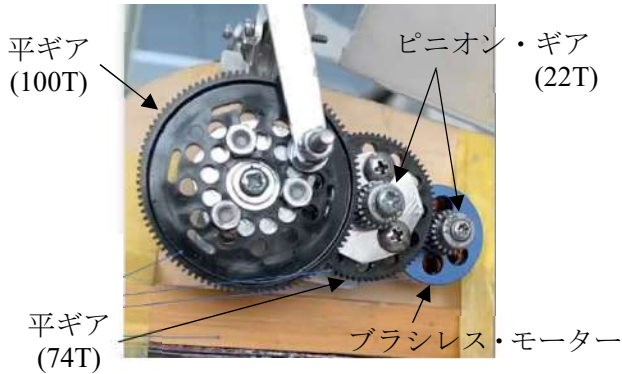


図.10 モーター/ギアの改善

### 3.2.3 「はばたき 2023」製作

以上の改善を実施したはばたきドローンを設計、製作し「はばたき 2023」とした。主翼や尾翼のサイジングは「はばたき 2022」と比較しやすくするため同じ形状、大きさとした。組立て状況、完成状態を図.11 に示す。完成重量は想定よりも重く 210gf と「はばたき 2022」の 2 倍程度となった。



図.11 「はばたき 2023」

## 4. 「はばたき 2023」風洞試験

主として、主翼形態①と主翼形態②および「はばたき 2022」の推力、揚力、抵抗を比較するため、それぞれの形態で風洞試験を実施した。試験装置への取付けや計測要領は「はばたき 2022」と同等である。図.12 に主翼形態①および②のセットアップ状況を示す。



図.12 風洞セットアップ

### 4.1 試験ケース

主翼形態①および②について、「はばたき 2022」と同等のデータを取得すべく、表.2 に示す試験ケースの風洞試験を実施した。

表.2 試験ケース

No.	主翼形態	状態	尾翼角	風速	迎え角	計測器
①	①スチレンフォーム	滑空状態	0°	5m/s~10m/s	0°	デジタル計
②			0°	7m/s	-2° ~12°	
③		30°	7m/s	0°	データロガー	
④		はばたき状態	0°	0m/s		0°
⑤	②フィルム+補強	滑空状態	0°	5m/s~10m/s	0°	デジタル計
⑥			0°	7m/s	-2° ~12°	
⑦		30°	7m/s	0°	データロガー	
⑧		はばたき状態	0°	0m/s		0°
⑨		はばたき状態	0°	0m/s	0°	データロガー
⑩			0°	7m/s	0°	

### 4.2 試験結果

#### 4.2.1 滑空状態

滑空状態における試験結果を主翼形態①、②および「はばたき 2022」について比較した。図.13 に風速に対する抵抗、揚力を各形態比較して示す。

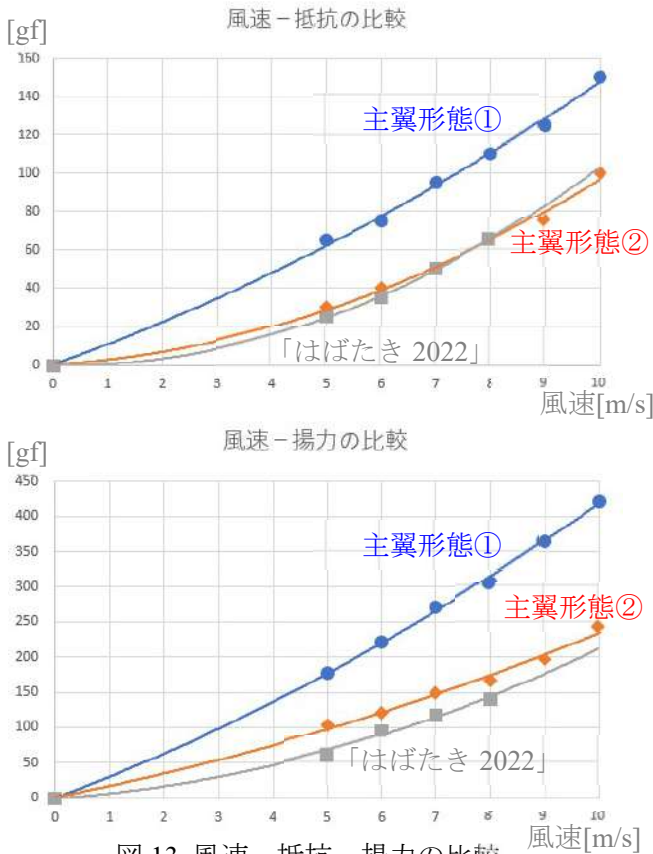


図.13 風速－抵抗、揚力の比較

これより、材質が”フィルム+補強”であり近い形態である主翼形態②と「はばたき 2022」では、抵抗、揚力ともにほぼ同等であるのに対し、主翼形態①はそれぞれ2倍程度となることがわかった。

#### 4.2.2 はばたき状態

主翼形態①、②のはばたき状態についても、図.5 に示した「はばたき 2022」と同様に推力（抵抗）および揚力の時歴を、データロガーで計測した。表.3 に主翼形態①、②の計測結果を「はばたき 2022」も含めて滑空時の値とも比較した結果を示す。いずれも迎角は  $0^\circ$  の場合の値である。

表.3 推力（抵抗）、揚力の比較

	風速 (m/s)	推力/抵抗 (gf) (+:抵抗, -:推力)		揚力 (gf) (+:上向き, -:下向き)		周波数 (Hz)
		滑空状態	はばたき状態	滑空状態	はばたき状態	
主翼形態①	風速なし	0	-	-	-	2.5
主翼形態②		-	-90 ± 20	-	-215 ± 85	6.0
「はばたき 2022」		-	-13 ± 8	-	-5 ± 25	2.0
主翼形態①	7	95	80 ± 20	270	230 ± 50	3.9
主翼形態②	7	40	28 ± 16	150	120 ± 50	5.6
「はばたき 2022」	5	25	30 ± 8	70	40 ± 15	2.0

各値を分析し、以下のような考察を得た。

- 風速のない静止推力の大きさは、形態②、「はばたき 2022」、形態①の順となり、他の2つの形態に比較すると形態②が突出した。これは、形態②での周波数が他に比べて大きいことも関連する。
- 周波数については、回転系メカニズムの精度が上がらず精密なコントロールが難しかったため、今回周波数をパラメータとした計測ができなかったが、以降周波数と推力の関係を実験によっても明らかにする必要がある。
- 風速がある場合、いずれの形態でもはばたきによる推力よりも抵抗が上回り、飛行中は現状の3形態の主翼では前進のための推力が得られないことが判明した。
- 揚力については、風速がない場合、はばたきによる揚力はいずれも上向きよりも下向きの力の方が上回る結果となった。
- 風速のある場合の抵抗について、形態①、②では滑空時よりもはばたき時の平均値の方が小さいが、「はばたき 2022」では、はばたき時の方が大きい結果となった。間接型の翼であることと関連がある可能性がある。
- 風速のある場合の揚力について、いずれの形態においても滑空時よりもはばたき時の平均値の方が小さくなり、同じ風速では滑空時と同等までの揚力は得られないことがわかった。
- はばたき時の揚力の変動値については、いずれのケースでも風速がある場合の方が風速がない場合よりも小さくなることがわかった。

#### 5. 「はばたき 2023」飛行確認

4 項の風洞試験結果より、今年度考案した主翼形態①および②でも、前進飛行時の推力が十分発生しないことや、形態①でははばたき時の揚力は自重(210gf)を支える程度は発生するものの、形態②では、速度、迎角ともにある程度大きくしないと十分な揚力が発生しないことが予想された。しかしながら滑空状態およびはばたき状態での飛行確認を実施することにした。

なお、はばたき機構のモーターやギアなどの重量物が機体前方に位置し前方重心となり頭下げ傾向が強いため極力重量ロスは減らしつつ重心を後方に下げするため、後方にカーボンロッドを伸ばしその先に 10gf 程度のダミーウエイトを搭載し重心を調整した。

その結果、滑空状態では主要形態①および②ともに比較的安定した飛行が確認できた (図.14 参照)。ただし、はばたき状態では、主翼形態①および②とも風洞試験結果から予想されたように上手く継続した飛行はできない結果となった。



図.14 主翼形態② 滑空飛行

## 6. まとめ

### 6.1 今年度成果

「はばたき 2022」を改善し、安定した飛行を目指して取り組んだ「はばたき 2023」であったが、結果として、今年度はうまく飛ばすところまで行けなかった。しかしながら風洞試験によるはばたき中の動的な推力や揚力の定量的な特性などを把握でき、また新しいはばたき機構を実際に製作することにより、はばたきドローンを設計、製作する上での実践的なノウハウや知見を積み重ねることができた。また、本年度卒研生の大学生活はコロナ禍とともに始まったが、4年次ではその制限も緩み仲間と毎週対面で卒業研究を進めることができ、以下のような感想も得た。

- ▶ 実際に飛行するものを作りあげる難しさを痛感した。
- ▶ 仲間といろいろ考え目標に向かって研究を進める楽しさを知った。
- ▶ 自分で結果を予測することや、試験結果からどう改善したらより良くなるのかを考えながら研究を進める大切さを学んだ。

### 6.2 今後の予定

今年度までの知見を活かし、自作「はばたきドローン」を完成させるために、以下のようなアプローチで検討を継続するとともに、これまでの本研究室での自作ドローン設計・製作から得られた経験も活かし、ユニークな第一工大オリジナルドローンの開発を目指したい。

- ・他機例も参考に推力、揚力ともに良好な主翼形態を検討し、風洞試験でデータを取得する。
- ・はばたき周波数と動的推力、揚力の関係も明確化する。
- ・より軽量でスムーズなはばたき機構を調査・検討し採用する。
- ・重量・重心・主翼、尾翼面積等サイジングを見直し、設計・製作する。

### 参考文献及び情報

- (1) 山本淳二：”ドローン設計・自作に関する研究 (はばたきドローン試作)”，第一工科大学研究報告，第 35 号，pp. 6-11，(2023)
- (2) y.takemura：”鳥型羽ばたき機「patapata4 Ver1」 First flight test”  
<https://www.youtube.com/watch?v=sq126k6aTBA>