

ドローン設計・自作に関する研究 (はばたきドローン試作Ⅲ)

山本 淳二, 清水 浩順, 鈴木 壮太, 瀬戸口 諒

第一工科大学 航空工学部 航空工学科(〒899-4332 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 Ⅲ)

Junji Yamamoto, Kojun Shimizu, Sota Suzuki, Ryo Setoguchi

Department of Aeronautical Engineering, Daiichi Institute of Technology

Abstract: In recent years, drones have been increasingly developed and utilized to meet a variety of needs. Our laboratory has also been working on the research, design, building, and operation of a various type of drones, believing that such hands-on activities provide valuable practical education for students of aeronautical engineering. Since FY2022, we have been developing an ornithopter drone. This year, we continued our study with the “Habataki 2024” model and achieved satisfactory results. In this paper, we report on the development and activities related to “Habataki 2024.”

1. はじめに

近年、さまざまなニーズに対応したドローンの開発や活用がますます進んで来ているが、当研究室では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、学生たちに実際に種々ドローンを設計、自作、飛行させる卒業研究を実施している。その一環として、2022年度からは、はばたきドローンの設計・試作を行なっているが、昨年度までは、未だ継続して安定した飛行ができる機体を完成させるまでには至らなかった。図.1 に各年度に作成した機体の外観を示す。今年度(2024年度)は、これまでに得られた成果、経験を活かして「はばたき 2024」を良好に飛行させるべく研究に取り組んだ。



図.1 昨年度までの「はばたき」ドローン

結論として、本年度は一定の継続した飛行をすると言う目標を達成することができた。本論では、本「はばたき 2024」の試作状況につき紹介する。

2. 「Design Manual」および市販機の調査

昨年度まで、はばたき飛行の原理、種々はばたき機構の調査や検討の上、試行錯誤をかさね数種類の試作機の製作、風洞試験での揚力や推力の測定を実施し改善を図ってきたが、本年度は、まず参考文献(3)の「Design Manual」の調査および安定した飛行を実現している市販機の風洞試験による揚力や推力の調査を実施することとした。

2.1 「Design Manual」の調査

参考情報(4)のホームページには、これまでの「はばたき」機の歴史も含む、種々有益な情報が公開されているが、その中には、はばたき機を設計する上でのさまざまなノウハウが記述された、参考文献(3)の「Design Manual」も公開されている。

これを調査・検討したところ、「はばたき 2024」の検討を進める上で、以下(1)、(2)の情報が大きな参考となりそうなのことがわかった。

(1) 膜翼の有効性

はばたき飛行のメカニズムを考える際、主翼のアップストロークとダウンストロークでなぜ揚力は互いにキャンセルしないのかと言う問題は、抱きやすい素朴な疑問であるが、「Design Manual」では、膜翼の剛性の低さによる変形がこれに寄与すると説明している。すなわち、アップストローク時は翼膜の変形により、前進速とはばたきによる下向き空気力の合成方向が翼への迎角をゼロに近づけたため、揚力および抵抗が小さくなる。しかしながら機体全体としては正の迎角で前進飛行するため、ダウンストローク時は膜翼が変形してもアップストロークのように迎角はゼロとはならず正の迎角を維持し、揚力が発生するとともに、揚力の前方成分が推力を生み出す。これがアップストロークがダウンストロークの揚力や推力をキャンセルすることなく飛行できる原理である(図.2 参照)。この際、機体全体の姿勢は頭上げであることが重要である。参考文献(2)に示したように、昨年度は揚力、推力が良好に発生する主翼形態を探るため、試行錯誤的に比較的剛性の高いスチレンフォームの主翼形態①と剛性の低いフィルムにカーボンの補強を入れた主翼形態②の2形態を風洞試験で比較検討した。結果として、いずれも機体規模に対して十分な推力と揚力を発生できていないことがわかったが、一見単純で剛性の低い翼膜による主翼が、はばたき飛行には有効に作用していると言うことは、「はばたき 2024」の主翼形態を考える上で大きな参考となった。

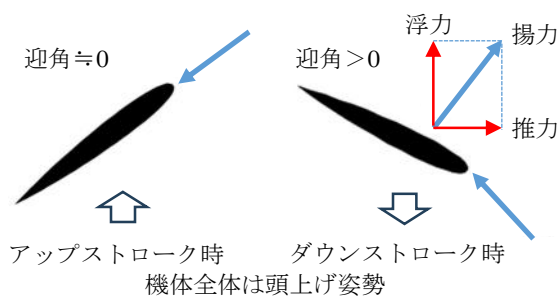


図.2 膜翼のメカニズム

(2) 複葉機の有効性

はばたき機構のもう一つの重要なポイントとして、死点の問題がある。すなわち、はばたき翼が上方または下方ではばたき方向を変える際、翼が動かない点“死点”が避けられないため、エネルギー効率が低下するという問題である。

参考文献(1)では、この死点問題を改善する手段の一つとして、翼の中間に関節を設け、鳥のはばたきのように動かす“市川式”と言う機構に着目し、その有効性を実験等により確認した上で「はばたき 2022」に採用した。ただし、メカニズムが複雑で、関節なしの単なる単葉機に比べスムーズにはばたかせるのが難しく、また重量的にも不利と言うデメリットもあった。

これに対し、「Design Manual」では、最も単純な複葉機のメカニズムとして、2枚の翼をクロスさせ、ハサミのように機能するXウイング(図.3 参照)を紹介し、これは依然死点の影響は受けるものの、翼間の180°の位相差により、単葉機よりも連続的な揚力とはるかに優れた効率が得られると述べている。また、Xウイングを駆動するためのコネクティング・ロッドは2つのみで成立し、単なる単葉機とメカニズム的には大きな違いはなく、先述の市川式よりもスムーズにはばたかせやすく、メカニズム上の重量デメリットも少ないと考えられた。この複葉機の有効性も「はばたき 2024」検討の大きなヒントとなった。

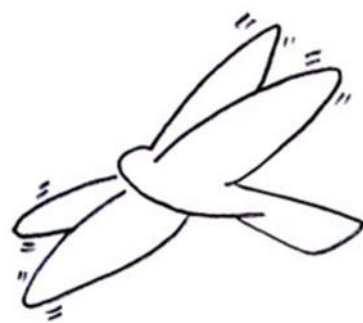


図.3 複葉機 (Xウイング)

2.2. 市販機風洞試験

「Design Manual」の調査に引き続き、実際に安定した飛行を実現している図.4に示すような複数の市販機について、風洞試験を実施し、揚力や推力について調査した。A, C, D はゴム動力機、B はモーター駆動の複葉機（X ウイング）である。

| | 名称 | 入手元 | 備考 |
|---|---------------|-------------|-----------|
| A | PataPata Bird | (株)ラングスジャパン | ゴム動力 |
| B | GoGoBird | (株)アベル | モーター駆動複葉機 |
| C | 翼神 | 中天模型 | ゴム動力 |
| D | パタパタ飛行機 | (株)池田工業社 | ゴム動力 |

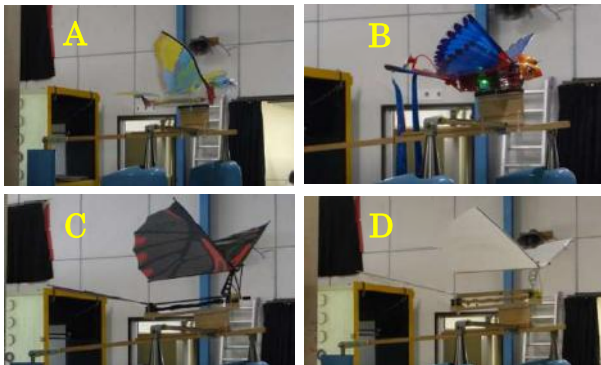


図.4 風洞試験供試体（市販機）

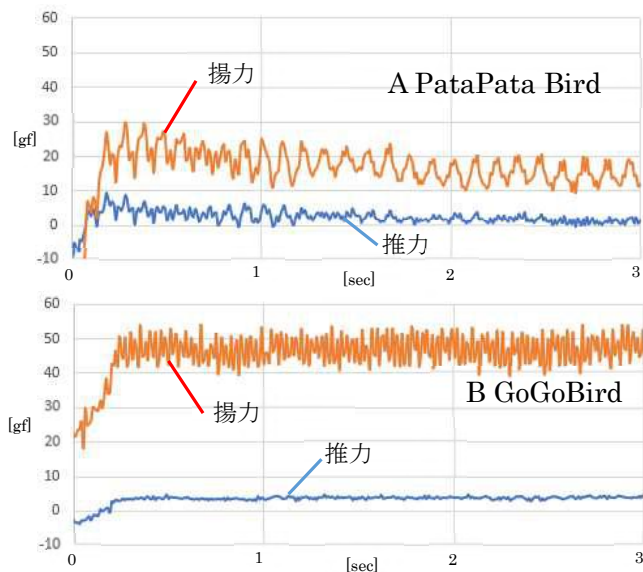


図.5 はばたき状態時歴データ例

図.5 に代表して A と B のはばたき時の揚力と推力を測定した時歴データを示す。表.1 に、はばたき 2022」および「はばたき 2023」の主翼形態①、②も含めて得られた結果の抜粋を示す。これらは、迎角 α は 10° 、風速はそれぞれの機体の平均的な速度として、はばたき状態で計測した値である。また、重量を翼面積で割った翼面荷重（自重を浮かせるための必要揚力）と風洞試験で実際に発生している平均揚力を翼面積で割った値（発生揚力）を比較したグラフを図.6、平均推力を示したグラフを図.7 にそれぞれ示す。風洞試験時設定の迎角や風速が実際の飛行時とは若干違うため定量的な誤差はあるが、定性的に以下のような傾向がつかめた。

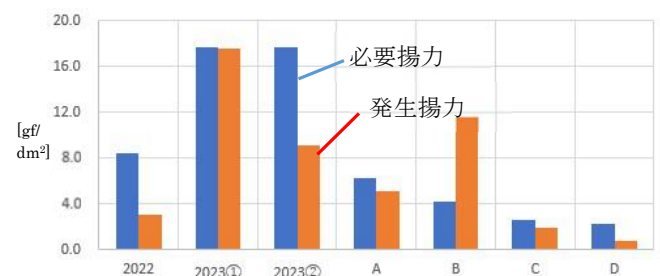


図.6 必要揚力と発生揚力の比較
(単位翼面積あたり)

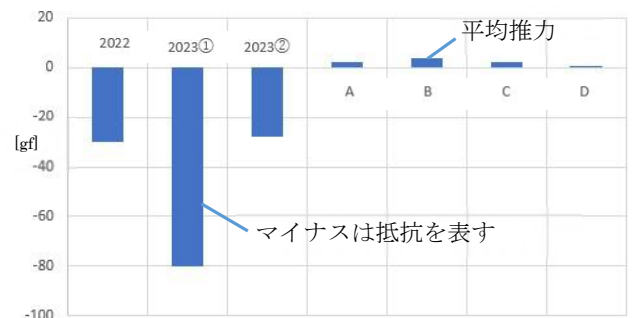


図.7 平均推力の比較

表.1 各種はばたき機の風洞試験結果抜粋

| | | | | | | 風洞試験結果 (α=10° 飛行時平均速度) | | | | | | | |
|----------------|-------|-----------------|---------------------|-------------|--------------------------|------------------------|-------------|---------------------|----------|---------------------------|-----------|--|--|
| | | | 翼面積 Sw [cm^2] | 重量W [gf] | 翼面荷重 W/S [gf/dm^2] | 周波数 [Hz] | 風速 [m/s] | 推力[gf] (マイナスは抵抗) | 揚力[gf] | 発生揚力 /翼面積 [gf/dm^2] | 飛行状況 | | |
| 2023年度 風洞試験 | 2022 | 「はばたき2022」 | 1314 | 110 | 8.4 | 3.6 | 5 | -30 ± 8 | 40 ± 15 | 3.0 ± 1.1 | 多少飛行可 | | |
| | 2023① | 「はばたき2023」主翼形態① | 1314 | 232 | 17.7 | 2.7 | 5 | -80 ± 20 | 230 ± 50 | 17.5 ± 3.8 | 飛行できず | | |
| | 2023② | 「はばたき2024」主翼形態② | 1314 | 232 | 17.7 | 6.3 | 5 | -28 ± 26 | 120 ± 50 | 9.1 ± 3.8 | 飛行できず | | |
| 2024年度 風洞試験 | A | PataPata Bird | 296 | 18.6 | 6.3 | 9.0 | 3 | 2 ± 1.5 | 15 ± 5 | 5.1 ± 1.7 | 安定して飛行可 | | |
| | B | GoGoBird | 412 | 17.1 | 4.2 | 20.0 | 3 | 4 ± 1 | 48 ± 5 | 11.7 ± 0.5 | 安定継続して飛行可 | | |
| | C | 翼神 | 520 | 13.7 | 2.6 | 6.8 | 2 | 2 ± 1.5 | 10 ± 8 | 1.9 ± 1.5 | 安定して飛行可 | | |
| | D | パタパタ飛行機 | 526 | 11.7 | 2.2 | 6.1 | 3 | 0.25 ± 1.3 | 4 ± 4 | 0.8 ± 0.8 | 安定して飛行可 | | |

- ・複葉機 (X ウイング) である B GoGoBird は揚力、推力ともに変動が小さい。
- ・揚力について、市販機 A~D は自重を浮かすだけに必要な揚力をほぼ風洞試験で発生している。特に B GoGoBird は発生揚力が突出して大きいことがわかる。それに対して、昨年度までののはばたき機では、「はばたき 2023」主翼形態①以外は、発生揚力がかなり不足しているのがわかる。
- ・推力についても市販機においては、いずれも正の推力を発生している。また B GoGoBird は推力の点でもすぐれていることがわかる。一方、継続した飛行ができなかった昨年度までののはばたき機はいずれも抵抗に打ち勝つだけの推力を発生していないことがわかる。

2.1 項で「Design Manual」において複葉機の有効性が示されていることを述べたが、以上の風洞試験の考察からも、揚力や推力の点から複葉機である B GoGoBird がすぐれていることが裏付けられる結果となった。また、風洞試験を行った市販機のはばたき翼はいずれも補強のないフィルムを使用しており、同じく「Design Manual」で、その有効性が示されている膜翼を採用することにより適切、十分な揚力、推力を発生しているものと考えられた。

3. 「はばたき 2024」検討

2 項での「Design Manual」の調査および「市販機風洞試験」の考察より、「はばたき 2024」として、複葉機 (X ウイング) の自作を試みることにした。

3.1 複葉機 (X ウイング) 機構の検討

X ウイングを自作するにあたり、「Design Manual」で紹介されているゴム動力式単葉機 FreeBird (図.8 参照) をベースにモーター式の複葉機化を検討した。主翼は図.9 のように 2 本のクロスするバルサ材の桁に両舷にわたる紙を 2 枚貼り構成した。駆動系は、いずれも市販のモーターとピニオンギアと 2 段の平ギアをバルサとプラスチック板に固定して制作した (図.10 参照)。

この駆動系の左右の平ギアを 2 本の主翼の桁にコネクティング・ロッドで連結し、減速されたモーターの回転が 2 本の桁を上下に動かし、ちょうどハサミのように 2 枚の複葉がはばたく仕組みである (図.11 参照)。これを駆動させたところ、多少の調整を要したものの良好にはばたくことが確認できた。「はばたき 2022」では、間接のある市川式を自作して良好にはばたかせるまで、メカニズムの複雑さから少なからずの苦勞を伴ったが、X ウイングでは比較的簡単に良好なはばたきを実現することができた。

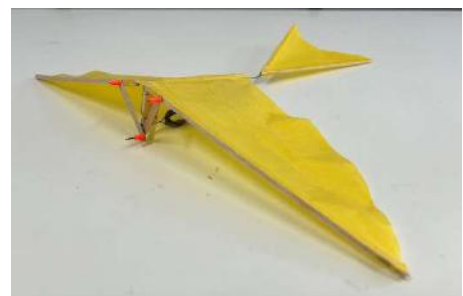


図.8 ゴム動力式単葉機 FreeBird

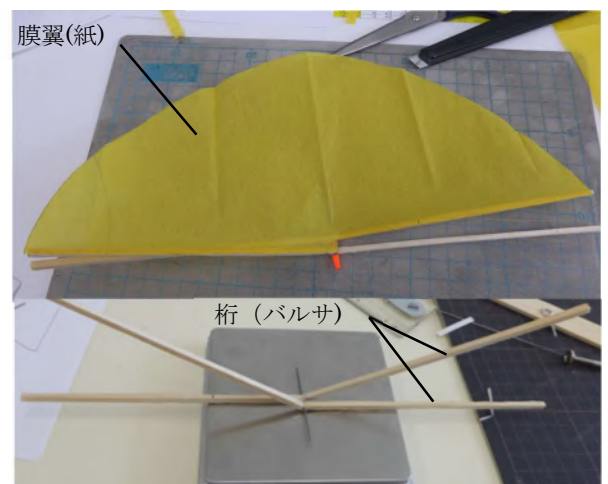


図.9 X ウイング主翼の構成

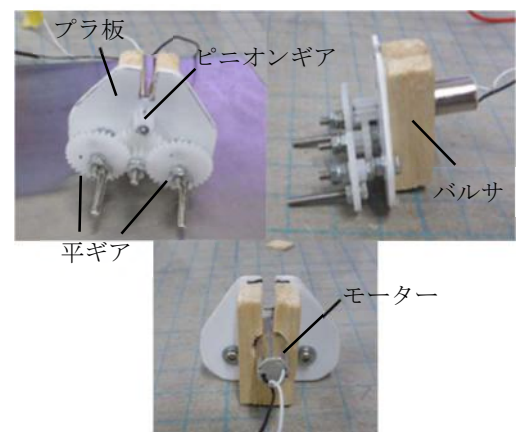


図.10 駆動系

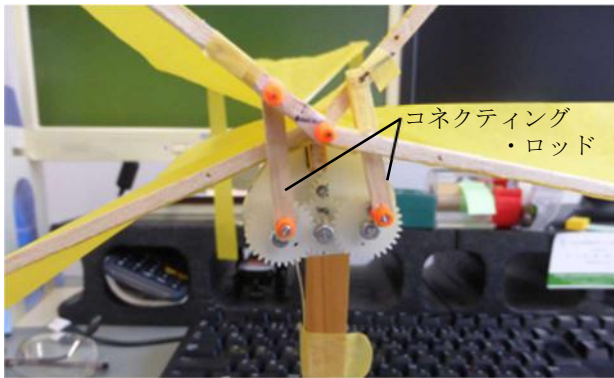


図.11 コネクティング・ロッド

3.2 「はばたき 2024」制作・

3.1 で確認した X ウイングのはばたき機構をベースに「はばたき 2024」を製作することとした。結果として以下に示すように、はばたき 2024#1 号機、#2 号機、#3 号機と段階的に改善を重ね、良好に飛行のできる機体を完成することができた。

3.2.1 「はばたき 2024#1 号機」

まず、「はばたき 2024」の諸元を以下のように設定した。

・重量推定

およその機体規模や形状は FreeBird 程度とし、使用する材料やモーター等の駆動系、受信機、バッテリー、ESC 等の構成部品の積み上げから、重量は約 50gf と推定した。バッテリーは極力軽量なものを選んでも約 10gf 程度は必要となり、最も重量に影響した。

・主翼面積設定

平均的な飛行速度 v は、2.1 項で風洞試験を実施した市販機などから約 3m/s と仮定し、はばたいていない滑空状態でも自重を浮かせる揚力が得られるように主翼面積を設定した。

$$\text{揚力 } L = \frac{1}{2} \rho v^2 C_L S$$

$$\therefore \text{主翼面積 } S = \frac{2L}{\rho v^2 C_L} = 907 \text{ cm}^2$$

ここで、密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ とし C_L は 1 と仮定した。これより、主翼面積は複葉 2 枚分の合計が約 1000cm² となるように設定した。

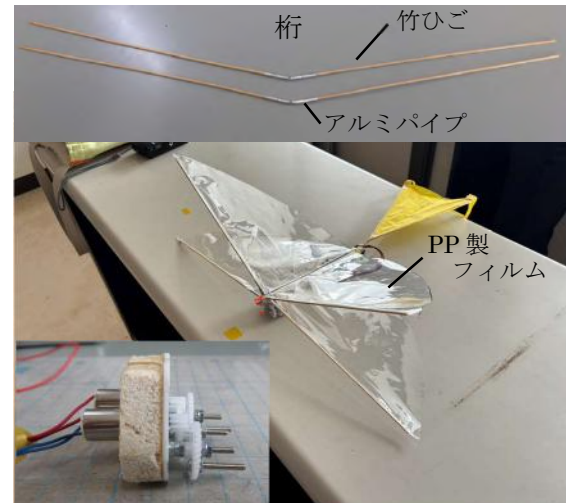
・主翼はばたき角

風洞試験を実施した各種市販機の値を参考に、最上角 55°、最下角 35° とした。コネクティング・ロッドの平ギア、主桁への取付け位置は、この羽ばたき角が得られるように設定した。

・尾翼面積、尾翼角

尾翼面積は当面ベースとした FreeBird のままとした。尾翼角は飛行時の頭下げを防ぐ目的で上向きとするが、その角度の初期設定値は 20° とし、これらは飛行確認後の調整代と考えた。

これらの諸元に従い、完成した「はばたき 2024#1 号機」を図.12 に示す。主翼の桁には、φ 0.8mm の竹ひごを用い、中間はアルミパイプで結合、V の字形状とした。膜翼は、安価で軽量かつ伸縮も少なく張りがある市販のポリプロピレン製のフィルムを使用した。モーターの必要トルク等の計測より、モーター 1 個ではトルクが足りないことが予想されたため、モーターは 2 個使用した。



全長 35 cm、全幅 46 cm、翼面積 1053 cm²、重量 49.5 gf、翼面荷重 4.7 gf/dm²、アスペクト比 4.1、尾翼面積 108 cm²、ルート・コード 50%、MAC 13 cm、はばたき周波数 16Hz

図.12 「はばたき 2024#1 号機」

本#1 号機を飛行させたところ、長時間の飛行はできなかったものの、飛行するための推力と揚力が明確に発生しており、継続した飛行ができる兆しを確認できた。

3.2.2 「はばたき 2024#2 号機」

#1 号機に対して、さらに十分な推力、揚力を得るために、以下の改善を実施した。

- ・モーターの変更

トルクを上げるため、1 ㄐ(3.7V)電池対応から 2 ㄐ(7.4V)電池対応のものに変更した。

- ・駆動系剛性の改善

#2 号機では、駆動系からはばたき主翼へ荷重を伝達する際の振動が大きく、荷重伝達の効率を下げている問題点があったため、図.14 のように駆動系およびはばたき主翼取付け部の剛性を上げ、伝達効率の改善を図った。

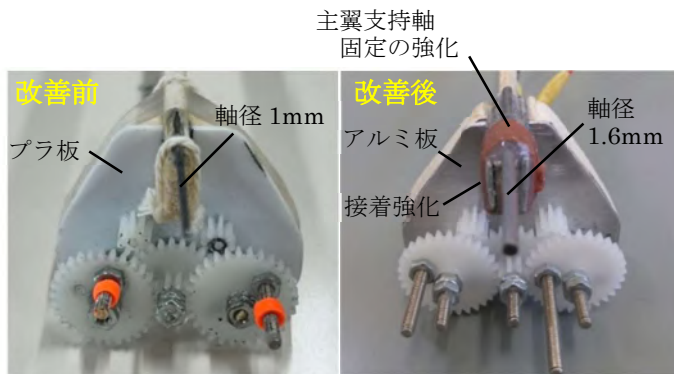


図.14 駆動系剛性の改善

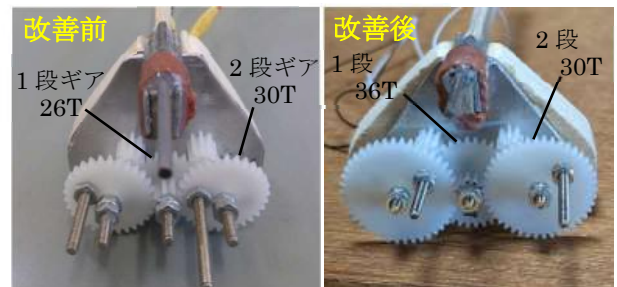
これらの改善を施した「はばたき 2024#2 号機」の初飛行では、対空時間 4 秒程度と長くはないものの、これまで当研究室で試作して来たはばたきドローンの中では一番安定した飛行をすることができた（図.15 参照）。飛行は右旋回傾向しながらの飛行であったが、これは主にバッテリー等の備品配置による左右の重量差の影響である。



図.15 「はばたき 2024#2 号機」初飛行

3.2.2 「はばたき 2024#3 号機」

#2号機では、無負荷時のギア減速後回転数に対する、はばたき周波数の比はかなり小さくなっていた。これは駆動系他の抵抗によるモーターパワーのロスが大きいことを示す。よってギア減速比を大きくし、無負荷時の回転数を下げ、はばたき周波数との比を大きくした（図.16 参照：24%から 38%に増加）。この結果、#3 号機では、よりスムーズにはばたくことが可能となり、パワーロスも減少したことが伺えた。



| | #2号機 | #3号機 |
|--------------------|------|------|
| モーター回転数 A [Hz] | 805 | |
| ギア減速比 B | 12.2 | 18.9 |
| 無負荷時回転数 C=A/B [Hz] | 66 | 43 |
| はばたき周波数 [Hz] D | 16 | 16 |
| はばたき周波数比 [%] D/C | 24% | 38% |

図.16 駆動系ギア比の改善

また、#2 号機での右旋回傾向を制御可能とするため、図.17 のようなサーボ・モータを取付け、尾翼が機軸に対して回転しヨーコントロールできるような機能を追加した。

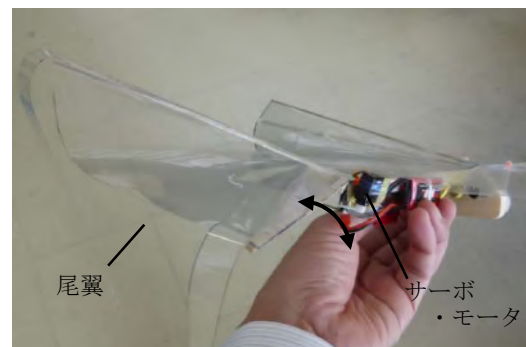


図.17 ヨーコントロール機能の追加

以上の改善を施した「はばたき 2024#3 号機」を飛行させたところ、対空時間 20 秒を超える飛行を安定して繰り返すことができた。ただし、追加したヨーコントロール機能にて、尾翼を動かし横方向のコントロールを試みたが、上手くコントロールはできず、右旋回での飛行となった。図.18 に #3 号機の飛行状態を示す。



図.18 はばたき 2024#3 号機 飛行状態

4. 「はばたき 2024」風洞試験

3 項で述べたように、「はばたき 2024」は、#1 号機、#2 号機、#3 号機と段階的に改善し、当初の目標であった、一定の継続した飛行のできるはばたきドローンを完成させることができた。これらの改善状況を定量的に把握する目的で、それぞれの機体の風洞試験を実施し、市販の複葉機である、GoGoBird も含めて、発生推力および揚力を比較した。図.19 は、迎角 α は 10° 、風速は 3m/s で測定した値から、平均推力および平均揚力を 4 種の機体で比較した図であるが、これより、#1 号機、#2 号機、#3 号機の順で、推力、揚力ともに良好に改善していることがわかる。特に#3 号機では風速の抵抗に打ち勝つだけの十分な推力と自重をかなり上回る揚力が発生していることが確認できた。

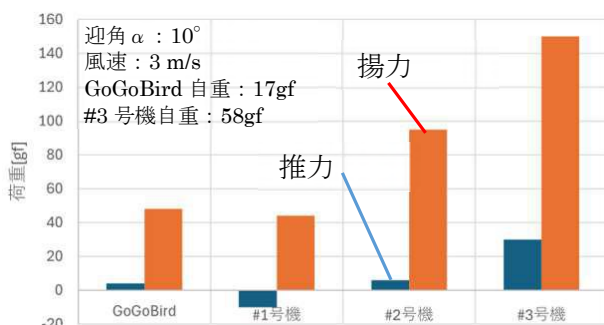


図.19 「はばたき 2024」推力，揚力の比較

5. まとめ

本年度は視点を変え複葉機 (X ウイング) に着目し、それを前年までの種々ノウハウを活用して自作できたことにより、一定の飛行のできるはばたきドローンを実現することができた。「はばたき 2022」、「はばたき 2023」、「はばたき 2024」とそれぞれの年度の卒研生ともに、はばたきドローンを上手く飛ばすことの難しさを痛感しながらも、個々の課題に対してあらたなアイデアを試し解決してゆく面白さなども共有しながら研究を進めてくれた。

今後、はばたきドローンを含めた、これまでの自作ドローンのノウハウを活かし、卒研生たちにとってもチャレンジングでありながらも面白く達成感の得られる自作ドローンの研究を継続したい。

参考文献および情報

- (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) 山本淳二，上西 太陽，川原 拓斗，立石 晟日彦：“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. 5-10，(2024)
- (3) Nathan Chronister, “The Ornithopter Design Manual Fifth Edition”, Published by the Ornithopter Zone, www.ornithopter.org (2008)
- (4) The Ornithopter Society
<https://www.ornithopter.org/about.shtml>