

【D19】超小型モータの特性評価と二枚翼羽ばたき飛行機の製作

05E1006 内尾 暢孝

指導教員 河村 良行 教授

1. 緒言

本研究では羽ばたき飛行機製作の技術習得と設計的な見解による製作を大きな目的としており、目的にあわせた機体を製作できるように計測、考察、改良をおこなっていく。計測で得た値から羽ばたき飛行機の飛行状態やモータなどの状態を求め、それら値を設計や製作に役立てる。そのためモータの特性調査など計測計算及び機体製作を中心におこなった。

2. 実験による計測

羽ばたき飛行機の製作にあたり、まず着手したことがゴム動力による羽ばたき飛行機の製作である。ゴム動力の羽ばたき飛行機は工房赤とんぼの製作キットの機体を組み立て、この機体を電動化することを目標にデータ採取をおこなった。採取した内容は下記ようになる。機体重量、全翼長、羽ばたき周波数、軸に発生する初期状態のトルク。これらの値を機体完成時の目標数値と設定し、機体を同サイズで重量が近くなるように製作する。機体の電動化に使用するためにモータ及びリチウムイオンポリマー電池（以後 Lipo）の特性を調査する必要があったため、これらの調査実験をおこなった。

2.1 データ採取方法

羽ばたき周波数は高速度カメラによる測定と羽ばたき音をパソコンに取り込み音の波より導き出す方法の2種類の方法から計測し導き出した値とする。トルクは図 2.1 左図のようにして $F[\text{gf}]$ を計測し、以下の式によってトルク $T[\text{Nm}]$ を導き出す。得られた機体データは以下ようになった。

二枚翼ゴム動力羽ばたき機 重量：5.8[g] 全翼長：36[cm]
20 回巻き飛行時の羽ばたき周波数：4.5[hz]

$$\begin{aligned} \text{トルク } T[\text{mNm}] &= r[\text{m}] \times F[\text{gf}] \quad (1) \\ &= (r[\text{cm}] / 100) \times 9.806 \times F[\text{g}] \end{aligned}$$

$$\text{機体のトルク } T = 0.012[\text{m}] \times 9.806 \times 59[\text{g}] = 6.94[\text{mNm}]$$

ここで得られた値を目標数値として電動化する。

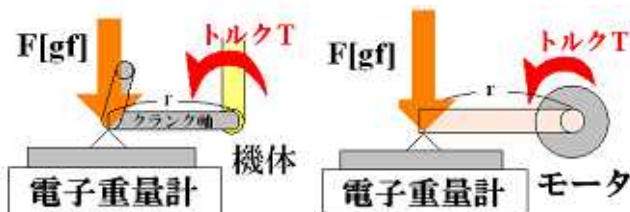


図 2.1 トルク測定法概要図

2.2 Lipo 電池性能特性調査

性能特性調査に使用した Lipo 電池は 1 セル 50mAh のもので起電力 4[V] になるように充電し、10[]と 20[]抵抗を直列につなぎそれぞれの電流をテスターで測定した。

表 2.1 Lipo 性能特性調査結果

	電圧[V]	電流[mA]
	4.00	0
20Ω	3.85	170
10Ω	3.70	300

2.3 モータ性能特性調査

製作時に使用するモータを羽ばたき機のサイズや搭載可能な重量など考慮したうえで MK06-4.5Ω(φ6mm 1.32g)という小型モータをもちいることにしたため、このモータの特性を実験によって調査した。特性を調べるためモータの電圧[V]と回転数の関係を調査することにした。ストロボを用いてモータの先端にピニオンギアをつけマーカーなどでピニオンギアに印をつける。ストロボを発光させ印がみえたところの電圧[V]と回転数[rpm]を記録する。ここで得られた記録をまとめたグラフが図 2.2 である。図 2.2 の結果よりモータは無付加時に電圧と回転数はほぼ比例関係にあることがわかる。よって、この結果より下記のような式を導き出し得られる値を回転数定数 K_n とする。

$$40400[\text{rpm}] - 13690[\text{rpm}] = (3[\text{V}] - 1[\text{V}]) \times K_n \quad (2)$$

$$K_n = 13355 [\text{rpm} / \text{V}]$$

次に同モータで電流と発生するトルクの間関係を調査した。図 2.1 の右図の手法で電源から電力を供給しテスターを用いて 0[V] から 0.5[V] ごとに電流を記録し $F[\text{gf}]$ を測定した。また、起電力 4[V] になるように充電した Lipo を用いて同実験をおこない、これらの実験で得られた結果をグラフ化したものを図 2.3 にて表し、図 2.3 より計測値 4[V] から 3[V] 間において比例関係を示しているためトルク定数 K_m を導きだした。

$$K_m = (0.249 - 0.154) [\text{mNm}] / (0.415 - 0.269) [\text{A}] = 0.65 [\text{mNm} / \text{A}]$$

$$T = I[\text{A}] / K_m [\text{mNm}] + 0.03 \quad (3)$$

式 3 のトルク定数から図 2.3 にて表記し先のグラフと比較すると電流が小さい時はこの値にあてはまらないため別のトルク係数 K_m' を求めた。 $K_m' = 0.5$ $T' = I[\text{A}] / K_m' [\text{mNm}]$ (4)
式 4 の結果を図 2.3 にて表記し先のグラフと比較すると電流 0[A] ~ 0.15[A] においてこの式が有効であることがわかる。

また、別の手法である逆起電圧定数の式により求めた回転数定数 K_n からトルク定数 K_m'' を求めることができる。

$$K_n \times K_m'' = 30000 / \pi \quad (5)$$

よって式 6 のように T'' を求める。

$$K_m'' = (30000 / \pi) / 13355 = 0.715 [\text{mNm} / \text{A}]$$

$$T'' = I[\text{A}] / K_m'' [\text{mNm}] \quad (6)$$

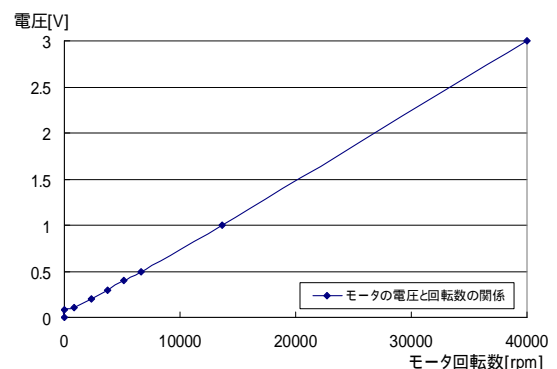


図 2.2 MK06-4.5 の電圧と回転数の関係図

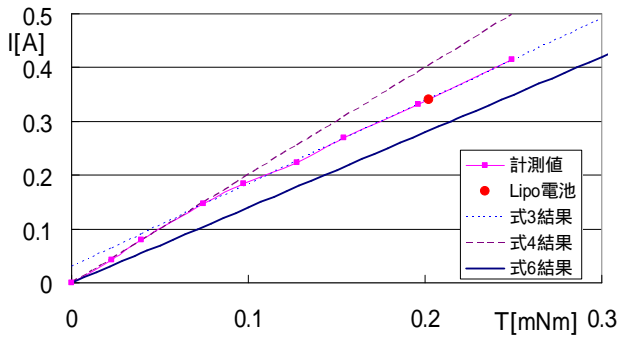


図 2.3 電流とトルクの計算値関係図

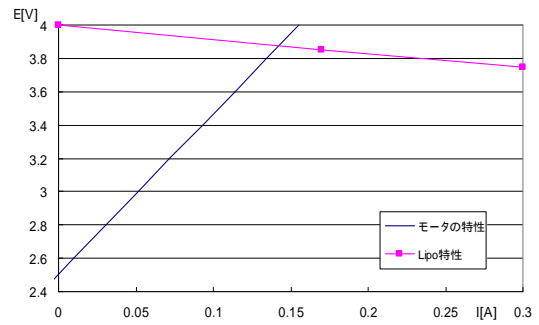


図 3.1 モータと Lipo の特性図

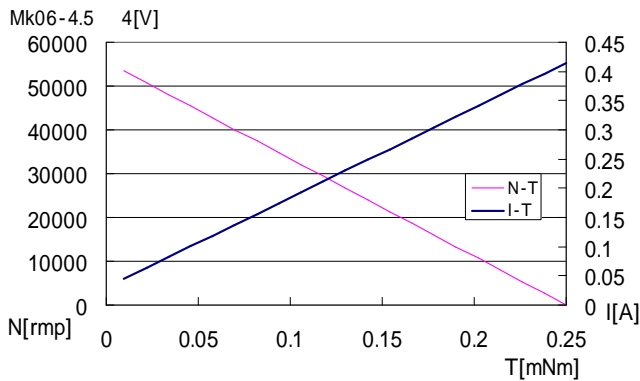


図 2.4 MK06-4.5 の特性グラフ

計測結果より求めた式 3 のグラフと計算結果の式 6 が一致しないのは計測上の問題としてピニオンや測定用の棒をつけることによる要因と熱損や風損の発生や初動に必要なトルクなどが考えられる。補正されている式 3 はより計測値にちかい。K_m=0.65 K_m'=0.715 のため傾きは近い。起電力 4[V]でのモータ特性をあらわしたグラフが図 2.4 である。

3. 飛行時のデータの算出

目標のスペックに近い形で電動の二枚翼機を作成した。この機体のスペックは以下になった。

二枚翼電動羽ばたき機 重量：5.25[g]+Lipo1.69[g]
全翼長：36[cm] 羽ばたき周波数：5[hz]

モータ減速比：125 図 2.3 より推測されるトルクを T_e とし T_e=0.20×125=25[mNm]より目標トルク 6.94[mNm]より大きい。この機体の飛行性状態が水平飛行できないため状態を調べることにした。逆算するとモータ回転数が 37500[rpm]のため計算によって電流と電圧の関係をもとめ表 2.1 Lipo の性能特性と比較するために作成したグラフが図 3.1 である。この結果より、この機体は飛行時約 3.85[V]で飛んでいることが分かった。さらに飛行時 3.85[V]という結果から効率と仕事を下記の記事から導きグラフ化したものが図 3.2 と図 3.3 である

$$\eta = \frac{\text{排出した力}}{\text{入力した電力}} = \frac{\text{排出回転数} \times \text{排出トルク}}{\text{入力電圧} \times \text{入力電流}}$$

$$= \frac{\pi}{30000} \times N [\text{rpm}] \times T [\text{mNm}] / (E_0 [\text{V}] \times I [\text{A}]) \quad (6)$$

N：基準となる回転数[rpm] T：基準時のトルク[mNm]

$$P = T \times \omega = T \times (N / 20) \times 2\pi \quad (7)$$

ω：角速度[rad/s] P：仕事量[W] T：トルク[mNm]

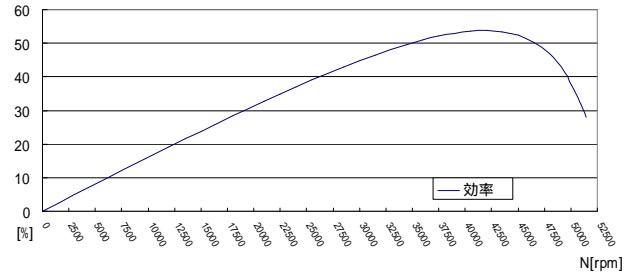


図 3.2 3.85V 時の効率

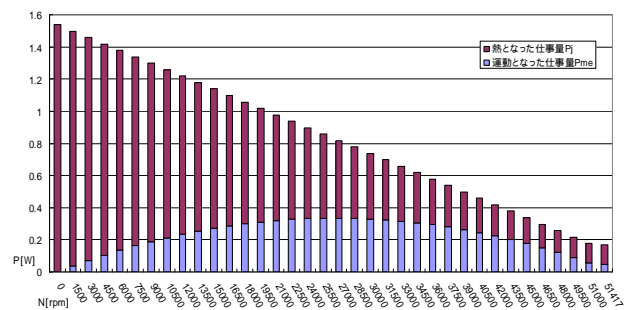


図 3.3 3.85V 時の仕事量

4. 結言

本実験及び計算結果より制作した二枚翼電動の羽ばたき飛行機は飛行状態の時以上のことが分かった。

モータ回転数 37500[rpm]、Lipo 起電圧 3.85[V]、電流 0.14[A]、入力電力 0.54[W]、仕事量 0.28[W]、熱となった仕事量 0.26[W]、モータ効率 52.1%、3.85[V]時最大出力回転数約 27000[rpm]、3.85[V]時最大効率回転数約 42000[rpm]、滑空飛行する。これらの結果よりこの機体を上昇飛行させるためには減速比を下げてモータの回転数をおとしてパワーを出させるとより揚力を得る必要があることがわかった。

課題点として製作にあたり技術的な問題として、ギアのかみ合わせによってモータへの負荷が大きく変わってしまうため手作業での製作は非常に困難である。モータ、ギア周辺の製作には精密な製作がおこなえる設備が必要と考察する。

5. 参考文献

みんなで作るウインドア・プレーン 田中光一著

マクソン技術資料 コアレスモータの構造ブラシ寿命

http://www.maxonjapan.co.jp/tech_doc.htm

Exploring the Bio fluid dynamics of swimming and Flight

David Lentink(2008) 著