

# マルチコプターの空力特性 (2017 年度)

TA : 平林・山本

E-mail : hirabayashi@fluid.nuae.nagoya-u.ac.jp

## 記号の説明

記号	説明	単位
$M$ :	機体乾燥重量	kg
$S$ :	前方投影面積	$m^2$
$\alpha$ :	ピッチ角	rad
$\dot{m}$ :	空気質量流量	kg/s
$v_i$ :	誘起速度	m/s
$V_\infty$ :	一様流速度	m/s
$T$ :	推力	N
$L$ :	揚力	N
$D$ :	抗力	N
$P$ :	仕事率	W
$A$ :	ローターディスク面積	$m^2$
$C_T$ :	推力係数	-
$C_P$ :	パワー係数	-
$C_Q$ :	トルク係数	-
$C_D$ :	抗力係数	-
$FM$ :	ホバリング性能指数	-
$\eta$ :	ローター性能指数	-
$Q$ :	トルク	Nm
$\omega$ :	回転角速度	rad/s
$R$ :	ローター半径	m
$E$ :	出力電圧	V
$I$ :	出力電流	A
$g$ :	重力加速度	$m/s^2$
$\rho$ :	空気密度	$kg/m^3$
$q$ :	動圧	Pa

## 記号の定義

$$C_T \equiv \frac{T}{\rho A \omega^2 R^2}$$

$$C_P \equiv \frac{P}{\rho A \omega^3 R^3}$$

$$C_Q \equiv \frac{Q}{\rho A \omega^2 R^3}$$

## 1. 実験の目的

近年, 空撮を始め, 建築物検査や 3D マッピング, 運搬といった用途にマルチコプターが使用されるようになった. 現在主流のマルチコプターは高応答の電動モーターによって飛行し, 外乱に対して高い位置・姿勢安定性を実現している. こうした優れた飛行性能は高度な制御によって実現されており, 空力性能に着目されることは少ない. その為, 物理的な飛行限界を超えた環境でフライトを行い, 墜落する事故が相次いでいる. より安全なマルチコプターの利用の為にも, 物理的な飛行限界について理解することは重要である. 本実験では DJI 社製の Phantom4 (第 1 図) を用いて飛行試験を行い, 機体の姿勢角などを実測する. またピトー管を併用して対気速度を取得することで空力係数を測定する. さらにヘリコプターや固定翼機などと比較することで, マルチコプターの空力特性について理解を深める.



第 1 図 : DJI 社製 Phantom4 外観<sup>[1]</sup>

## 2. DJI Phantom4

Phantom4 は空撮に特化して開発されたドローンであり, 複数のセンサーを搭載し, 極めて高い安定性と冗長性を実現している. また飛行時に搭載したセンサーにより計測, 演算されたデータを機体内部のログに記録しており, これらの飛行ログを抽出することで空力特性の計算に必要な各種物理量を測定することができる.

## 2. 1 姿勢角

マルチコプターでは姿勢角の推定に加速度・ジャイロ・地磁気センサーを用いる。各センサーは機体に固定されており、それぞれ機体固定座標(X,Y,Z 軸)周りの加速度・角加速度・地磁気強度を測定する。このような方式はストラップダウン方式(重力加速度方向を参照する為)と呼ばれ、マルチコプターのような UAV や人工衛星、ロケットなどで用いられる。測定されたデータはカルマンフィルタなどにより統合され、複数個のデータにより姿勢角を計算する。

一方で旅客機や潜水艦などでは機械式ジャイロ(地球ゴマ)を用いて地球に平行な面(プラットフォーム)を作り出し、姿勢角を測定する。

ストラップダウン方式は小型軽量である反面、姿勢角推定のための計算量が多く、近年の電子計算機の発展とともに普及した。

本実験では Phantom4 内の AHRS(Attitude Heading Reference System, 第2図)によって計算された姿勢角を用いる。



第2図: Phantom4 内蔵 AHRS<sup>[2]</sup>

## 2. 2 モーター

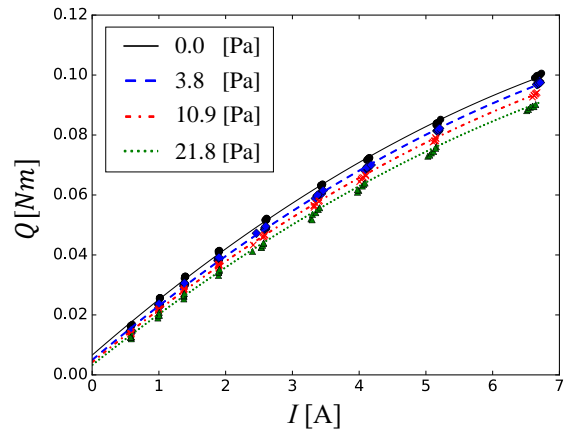
Phantom4 では飛行にブラシレスモーターを用いている。ブラシレスモーターは DC モーターと同様のモデル化が行える。

DC モーターでは電流  $I$  と出力トルク  $Q$  の間に以下の関係式が成り立つ。

$$Q = K_T I \quad (1)$$

理想的なモーターにおいては、 $K_T$  は一定値を取ることが現実にはモーター内での銅損・鉄損、ローターのトルク変動による進角のズレなどによってモーター効率が低下し、 $K_T$  は変化する。

本実験では第3図及び表1に示すように、Phantom4 と同じモーター・プロペラにて、事前に  $K_T$  を実測しておき、この実測値を用いて飛行中のモーターの出力トルクを推定する。



第3図: 各動圧における電流とトルクの関係

表1: 各動圧における電流とトルクの補完式

$q[\text{Pa}]$	補完式
0.0	$Q = -8.25 \cdot 10^{-4} \cdot I^2 + 1.94 \cdot 10^{-2} \cdot I + 6.59 \cdot 10^{-3}$
3.8	$Q = -7.63 \cdot 10^{-4} \cdot I^2 + 1.88 \cdot 10^{-2} \cdot I + 4.95 \cdot 10^{-3}$
10.9	$Q = -7.29 \cdot 10^{-4} \cdot I^2 + 1.83 \cdot 10^{-2} \cdot I + 4.20 \cdot 10^{-3}$
21.8	$Q = -6.87 \cdot 10^{-4} \cdot I^2 + 1.77 \cdot 10^{-2} \cdot I + 3.28 \cdot 10^{-3}$

## 2. 3 位置制御

ドローンの位置制御には GPS が広く用いられているが、本実験環境のように室内などの電波遮蔽が起きる環境では GPS による位置制御を行うことが出来ない。近年では GPS の代わりに WiFi の電波を用いた位置制御や、画像認識による位置制御が実用化されている。本実験で用いる Phantom4 は光学式マウスのように画像認識によって対地速度を取得するセンサー(オプティカルフローセンサー)を搭載しており、室内でも高度な位置制御が可能である。

### 3. ローター

運動量変化からローターの性能を概算できる(運動量理論)。運動量理論ではローター性能の理論的限界値を与える。

より詳細な解析ではローターのある部分における局所揚力・抗力を計算し、ローター全体で積分することで推力・パワーを計算する。(翼素解析)

#### 3. 1 ホバリング

ローター前後で運動量変化を考えると(2)式が導かれる。さらにローターの流体にした仕事を考えることで(3)式が導かれる。(別配布解説を参照)

$$v_i = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}} \quad (2)$$

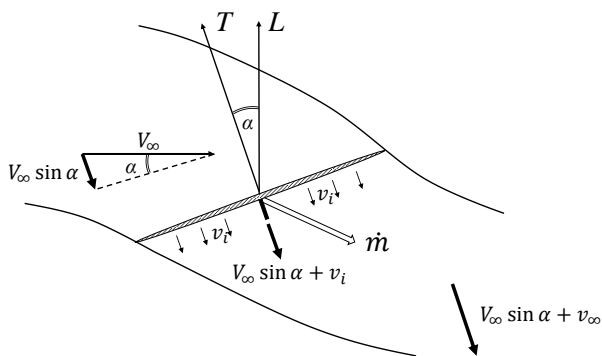
$$P = \sqrt{\frac{T^3}{2\rho A}} \quad (3)$$

(3)式はディスク面積  $A$  のローターにおいて  $T$  の推力を出す際の仕事の最小値を与える。現実のローターでは有害抗力などによって(3)式の値より必ず大きな仕事が必要となる。ホバリング時におけるローターの性能を評価する指標として FM(Figure of Merit)があり、(4)式のように定義される。

$$FM \equiv \frac{P_{ideal}}{P_{measure}} = \frac{1}{P} \sqrt{\frac{T^3}{2\rho A}} = \frac{C_T^{3/2}}{\sqrt{2}C_P} \quad (4)$$

#### 3. 2 前進飛行時

前進飛行時には第4図のようにローターに空気が流入する。



第4図：前進飛行時の運動量変化

ローターを通過する空気の質量流量は、

$$\dot{m} = \rho A \sqrt{(V_\infty \cos \alpha)^2 + (V_\infty \sin \alpha + v_i)^2} \quad (5)$$

となり、推力  $T$  はローターに鉛直方向の運動量保存を考えることで(6)式が成り立つ。

$$T = 2\rho A v_i \sqrt{(V_\infty \cos \alpha)^2 + (V_\infty \sin \alpha + v_i)^2} \quad (6)$$

前進飛行時にはローターは流体に  $(V_\infty \sin \alpha + v_i)T$  の仕事をする。このためローターの性能評価には(7)式で定義される  $\eta$  を用いる。

$$\eta \equiv \frac{(V_\infty \sin \alpha + v_i)T}{P} \quad (7)$$

(7)式における  $v_i$  は(6)式から導かれる値であり、(2)式と異なることに注意する。

### 4. 実験方法

#### 4. 1 実験準備

##### 1. ドローンの重心測定試験

前進飛行時には機体を斜めに傾ける必要があるが、重心と風圧中心が一致しないため、モーメントが生じる。モーメント係数  $C_M$  を計算する為に、重心位置を測定する。

以下に重心の測定手順を示す。

- 1) Phantom4 を異なる位置にて紐で吊り下げ、写真を撮影する。
- 2) 重心は紐の延長線上にある為、異なる吊り下げ位置における画像を重ね合わせ、重心を算出する。
- 3) ローター間距離など、既知の値を参照することで、重心位置を算出する。

#### 4. 2 飛行試験

飛行試験は1. ホバリング試験と2. 前進飛行試験の2種類に分けて行う。

##### 1. ホバリング試験

ホバリング試験ではドローンを空中約 1.5m 程度でホバリングさせる。

搭載するペイロードをメモしておき、各種ペイロードを搭載した際のデータを取得する。

以下に実験手順を示す。

- 1) 飛行を行う場所の半径 5m以内に障害物がないか、人がいないかを確認する。
- 2) 指定のペイロードを搭載する。
- 3) Phantom4, コントローラーの電源を入れる。
- 4) 飛行したのち, 1.5m 程度の高さにて 10 秒以上ホバリングさせる。
- 5) Phantom4 から飛行データを抽出する。

## 2. 前進飛行試験

ホバリング試験ではドローンを低速風洞の下流にてホバリングさせ, 前進飛行時を模擬する。

風洞の動圧を 3.8Pa, 10.9Pa, 21.8Pa とした時のデータを取得する。動圧はピトー管にて取得する。

ピトー管は総圧と静圧の差圧を計測する装置である。動圧と流速の関係は Bernoulli の定理より, (9)式のようになる。

$$q = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 \quad (9)$$

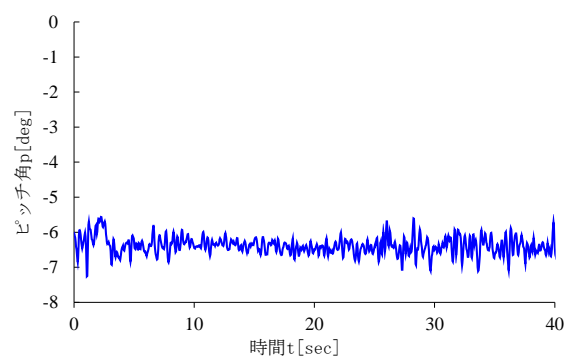
以下に実験手順を示す。

- 1) 飛行を行う場所の半径 5m以内に障害物がないか、人がいないかを確認する。
- 2) 指定の動圧になるように風洞の動圧を調整する。
- 3) Phantom4, コントローラーの電源を入れる。
- 4) 飛行した後, 風洞下流に飛行させ, 10 秒以上ホバリングさせる。
- 5) Phantom4 から飛行データを抽出する。

## 5. 実験結果の整理

### 1. データの選択

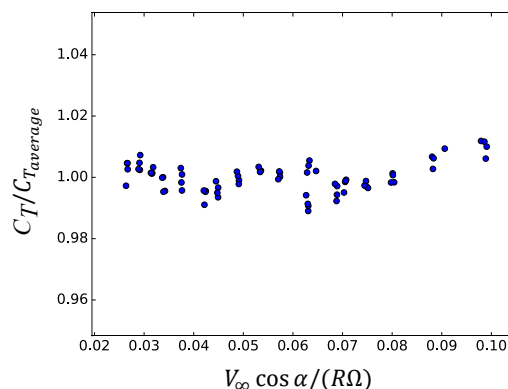
Phantom4 から抽出したデータは電源を入れてから切るまでの間の全てのデータが記録される。本実験では使用しないデータも多数記録されるため, 使用するデータと使用しないデータを選別する。また本実験では定常飛行時についてのみ, 考察をするため, 各種データの時間履歴を参照して定常性の高い部分の平均値とり, その平均値を用いて解析を行う。(第7図参照)



第7図：定常飛行時の例（ピッチ角）

### 2. 前進飛行時の $C_T$ の取り扱い

前進飛行時の解析においては前後のローターの推力比を与える必要がある。実際は前進飛行時はローターに沿う流れが生じる為, ローターの位置によって動圧, 迎角が変化し, ローターの回転速度に $C_T$ が依存する。ただし本実験のように前進速度がローター回転速度に比べて十分に小さい場合は $C_T$ の変動は小さく, 無視できるとし,  $C_T$ がローター回転速度に依存しないと仮定して $C_T$ を算出する。(参考：第8図)



第8図：本実験条件における $C_T$ の変動測定値<sup>[3]</sup>

## 6. 課題・考察

### 課題1 空力係数に関する考察

#### 1. ホバリング試験

1) (5), (6)式を導出せよ。また(3)式は固定翼においてはなに相当するか考察せよ。

2) モーターの特性データ(第3図, 表1), 及び Phantom4 から抽出したデータ (HP からダウンロード) を用いて  $C_T, C_P$  を計算せよ。また  $C_T, C_P$  から FM を計算し, 結果について考察せよ。

3) ペイロードを搭載した場合についても2)と同様の解析を行い, 結果について考察せよ。

#### 2. 前進飛行試験

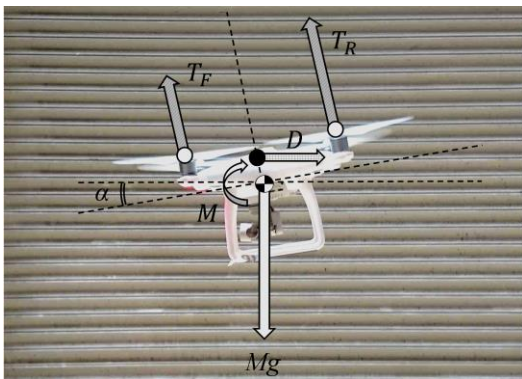
4) 鉛直方向の力の釣り合いを考えることで  $C_T$  を計算せよ。また  $C_P$  を計算せよ。

5) 各動圧について  $\eta$  を計算し, プロットせよ。また計算された  $\eta$  について考察せよ。

6) 定常飛行時における, 力・モーメントの釣り合いを考えることで各風速にて  $C_D, C_M$  を計算し, プロットせよ。代表面積  $S$  は迎角  $0^\circ$  時の前方投影面積を, 代表長  $L$  はプロペラ間距離を用いる。

$$C_D = \frac{D}{qS} \quad (10)$$

$$C_M = \frac{M}{qSL} \quad (11)$$



第9図：前進飛行時に働く力とモーメント

### 課題2 マルチコプター性能に関する考察

7) 一般的なヘリコプターとドローンにおいて推力変更方法の違いについて述べよ。またその長所短所について各種文献を調査しまとめよ。

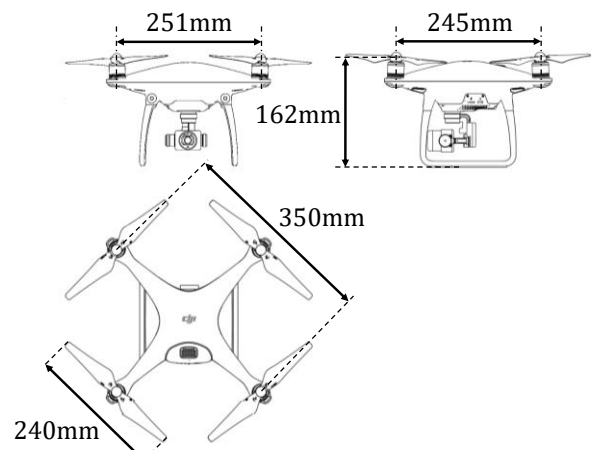
8) Phantom4 の最大飛行速度を推定せよ。ただし  $C_D, C_M, \eta$  は課題1で計算した値を用いよ。その他計算に用いた値には根拠・仮定を示すこと。

9) Phantom4 に最適なバッテリー重量について考察し, Phantom4 のバッテリーを変更することで, ホバリング時間をどれほど向上させられるか検討せよ。

## 7. 参考資料

表2：Phantom4 諸元

本体重量[g]	918
ローター半径[m]	0.12
ディスク面積[m <sup>2</sup> ]	0.04524
前方投影面積[m <sup>2</sup> ]	0.185
モーター最大出力[W]	80
バッテリー重量[g]	462
バッテリーエネルギー密度[kJ/kg]	633



第10図：Phantom4 寸法

## 8. 注釈

[1],[2] DJI 社 HP([www.dji.com/phantom-4/](http://www.dji.com/phantom-4/))

[3]  $\alpha = [0, 3, 6, 9, 12]$  (単位:deg),  $q = [0.3, 8, 10.9, 21.8]$  (単位:Pa)での測定結果