

Title	高高度SUAV運用に向けた高度変化に伴うプロペラの推力評価
Author(s)	安河内, 祐輔
Citation	
Date of issue	2018-03
URL	http://hdl.handle.net/10173/1957
Rights	
Text version	author



Kochi, JAPAN

<http://kutarr.lib.kochi-tech.ac.jp/dspace/>

卒業研究報告

高高度 SUAV 運用に向けた高度変化に伴うプロペラの推力評価

報告者

学籍番号： 1180170

氏名： 安河内 祐輔

指導教員

山本 真行 教授

平成 30 年 2 月 13 日

高知工科大学 システム工学群 航空宇宙工学専攻

目次

1	序論	
1.1	背景	1
1.1.1	プロペラについて	1
1.1.2	ドローンについて	1
1.2	目的	2
2	プロペラの推力実験手法	3
2.1	実験条件	3
2.2	推力測定装置	4
2.2.1	推力測定装置に使用した実験道具	4
2.2.2	推力測定装置の構成	5
2.3	ブラシレスモーター制御手法	7
2.3.1	制御手法の選択	7
2.3.2	パルス幅変調 (PWM) 制御	7
2.3.3	制御機構の仕組み	8
2.4	プロペラの推力解析手法	9
2.4.1	レイノルズ数	9
2.4.2	プロペラの推進原理と推進効率	9
2.4.3	プロペラのピッチ	11
2.4.4	プロペラの効率	11
2.4.5	進行率	12
2.4.6	先端速度	12
2.4.7	プロペラの推力理論式	12
2.4.8	大気密度計算	13
2.4.9	空気粘度について	13
2.5	プロペラの選定方法	14
3	推力測定実験	15
3.1	大気実験	15
3.1.1	大気圧実験目的	15
3.1.2	大気圧実験概要	15
3.1.3	大気圧実験結果	16
3.1.3.1	大気圧実験での各プロペラの比較結果	16
3.1.3.2	大気圧実験とチャンバー (大気圧) 実験との比較結果	17

3.2	真空チャンバー実験	20
3.2.1	真空チャンバー実験の目的	20
3.2.2	真空チャンバー実験準備	20
3.2.3	真空チャンバー実験内容	21
3.2.4	真空チャンバーの圧力計について	22
3.2.5	真空チャンバーの実験結果	24
3.2.5.1	プロペラ (6 inch) の実験結果	24
3.2.5.2	プロペラ (8 inch) の実験結果	27
3.2.5.3	プロペラ (11 inch) の実験結果	29
3.2.5.4	高度による消費電力の低下	33
4	考察	34
4.1	チャンバー実験での壁面の影響について	34
4.2	大気密度変化におけるプロペラの性能について	34
4.3	高度変化による電力変化	35
4.4	プロペラの直径変化による推力維持について	35
4.5	推力係数とレイノルズ数の 5000 rpm 高度変化	36
5	結論	40
	謝辞	41
	参考文献	42
	付録	43

第1章 序論

1.1 背景

1.1.1 プロペラについて

プロペラが現在の外観とほとんど同じになったのは、1800年代後半頃と考えられている。現在のプロペラは、様々なモノに利用されている。例えば、扇風機や飛行機で風や推進力を得る方法の一つとして利用されている。飛行機の推進力を得る方法には、プロペラ、ジェットエンジン、ロケットエンジンの3つがあり、その中でも回転翼が最もエネルギー効率が良い。しかし、回転翼の先端速度が 300 m/s (マッハ約 0.7) を超えると効率が悪くなるため、飛行速度 800 km/h 以下の飛行機に最も有効である。

プロペラは高度が高くなると推力が低くなる。また、回転翼のレイノルズ数 (Re) 帯域は低レイノルズ数域と呼ばれ、未だに分かっていない部分も多い。

1.1.2 ドローンについて

近年急速に発展、普及している UAV (Unmanned Aerial Vehicle : 以下“ドローン”と表記する) については、その歴史は古く、第二次世界大戦中の 1944 年にアメリカ軍が開発した「BQ-7」という無人飛行機といわれている。

ドローンの進化には、スマートフォンの普及、進化が影響している。これは、ドローンに必要な不可欠な加速度センサー、ジャイロセンサー、GPS などの小型高性能センサーが、スマートフォンに搭載されており、スマートフォンの普及に伴ってこれらのセンサーが大量に安く製造された[1]。これによりドローンが民間に普及した。最近では民間や研究機関でのドローンの利用が増えている。

ドローンは、人が遠隔操作しながら観測機器を搭載して飛行する能力がある。また、駆動機構がモーターの場合は高度による制約を受けない。近年ドローンを警備や観測などで利用する企業が増えた。本研究では、現在の回転翼型ドローンを高高度で運用するための研究を行う (図 1.1)。



図 1.1 回転翼型ドローン[2]

1.2 目的

現在、高層大気中や火星などで観測を行うための手法は限られている。そこで著者は回転翼型ドローンを用いた観測手法の確立を行いたいと考えた。しかし、現在ドローンが観測に用いられている高度は 5000 m 付近までであり、本研究ではさらに高高度でのドローンの運用を考えた基礎研究を行う。それによって、火星などの大気が希薄な星でドローンが運用可能になれば惑星の探査範囲が大きく広がる可能性がある。

著者の所属研究室では、高層大気などの大気密度が低い場所でもドローンの運用を可能とするシステムの基礎開発を考えている。そのためには、大気密度が低い条件でプロペラの推力がどれだけ得られるのか確認する必要がある。それによってドローンが高高度で運用可能なのか具体的に知ることができる点にも大きな意義がある。

本研究は、高高度と同等の条件下でドローン用プロペラの推力評価を行い、大気密度が低い条件で、プロペラの推力係数 C_t がどのように変化するのか確認しプロペラの推力評価を行うことを目的とする。

第2章 プロペラの推力実験手法

2.1 実験条件

本研究では、地上から高度 18 kmまでの大気を想定して実験を行った。地球上で最も高い山岳地域でも約 8000 mしかないので、それより上空での大気に関する地上実験は困難である。そのため、本実験では真空チャンバーを用いることで、より高高度を模擬した大気状態を作り出すことで 8000 m以上上空を想定した実験を行った。

本研究では大気圧中と真空チャンバー内で実験を行った。大気圧中の実験と真空チャンバー内実験は平均 25 °Cの室内で行った。地上から高度 18 kmの大気の気圧と密度の高度分布を表 2.1 に示す。

表 2.1 気圧、密度の高度分布（1976、U.S.標準大気） [3]

高度 $Z(\text{km})$	気圧 $P(\text{hPa})$	密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$
0	1013	1.225
1	898	1.111
2	795	1.006
3	701	0.909
4	616	0.819
5	540	0.736
6	472	0.660
7	411	0.590
8	356	0.525
9	308	0.467
10	264	0.413
11	226	0.364
12	193	0.311
13	165	0.266
14	141	0.227
15	121	0.194
16	103	0.166
17	88	0.142
18	75	0.121

2.2 推力測定装置

2.2.1 推力測定装置に使用した実験道具

推力実験装置に使用した道具は、ブラシレスモーター、ESC (Electric Speed Controller)、プロペラ、光学式回転数計、電子ばかり、モーターマウントである。その中でも今回実験で使用したブラシレスモーター、ESC、プロペラの仕様を以下に示す(表 2.2, 表 2.3, 表 2.4)。プロペラは APC 製 6×4E (6 inch), 8×6E (8 inch), 11×7E (11 inch) を用いた。

表 2.2 ブラシレスモーターの仕様

	製造社名:品名	
	E-MAX:GT2215/12	
	重量 (g)	68
	外径 (mm)	28.5
	全長 (mm)	33.2
	シャフト径 (mm)	4
	最大電流 (A)	18
	KV値 (rpm/V)	905

表 2.3 ESC の仕様


	製造社名:品名	
	HOBBYWING:FLYFUN-30A-V4.2-	
	通常電流 (A)	30
	瞬間最大電流 A(10秒)	40
	BECモード	リニア
	BEC出力	2A/5V
	対応セル数	2~4
	重量 (g)	26
	寸法 (mm)	55×25×9

表 2.4 プロペラの仕様



会社	ディスク直径 (inch)	ピッチ (inch)	75%スパン長 (mm)	75%スパン長でのコード長 (mm)	重量 (g)
APC	6	4	57.15	8	4.3
APC	8	6	76.2	13	14.2
APC	11	7	104.775	15	24.9

2.2.2 推力測定構成

開発した推力測定装置は、推力を発生させる駆動機構、駆動部をコントロールする制御機構、推力と回転数を測定する測定機構から成るものであり、プロペラを回転させることにより推力を発生させ、推力と回転数を定量的に測定可能な装置である（図 2.1）。測定部の推力(g)は電子ばかり（Angeno 製 Boomtek）で、回転数 (rpm)は光学式回転数計（FOCUSMART 製 DT-2234C+）で計測する。制御機構は 2.3 節に後述する。

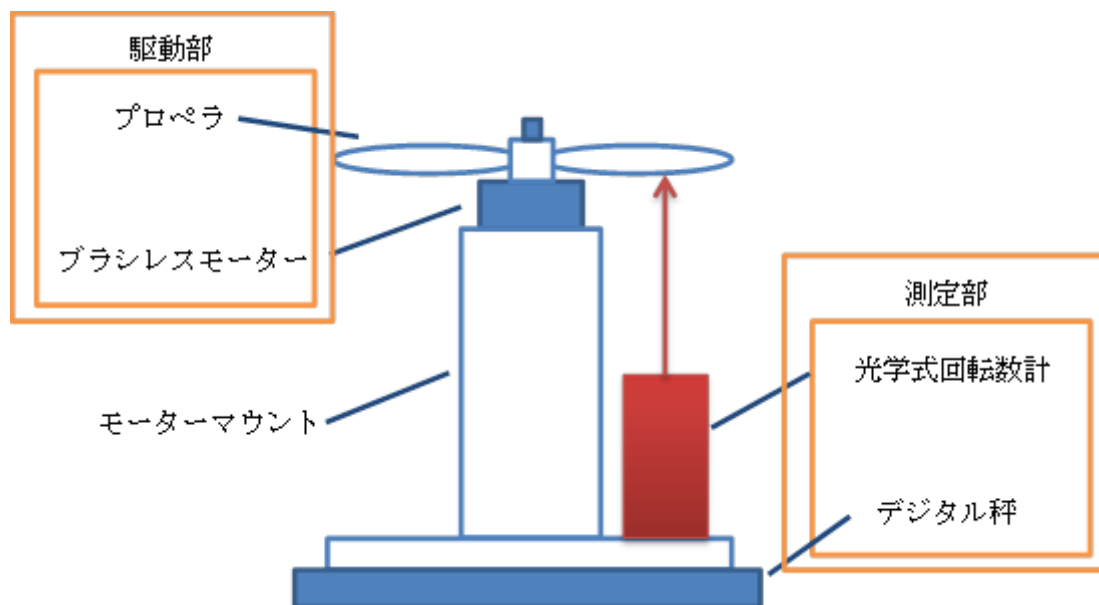


図 2.1 推力測定装置の模式図

本研究で推力測定装置が推力を発生させる向きは鉛直下向きとした。これによってロペラが電子秤を正の値に変化させる。推力測定装置の力の向き（図 2.2）及び実際の推力測定装置の外観（図 2.3）をそれぞれ示す。

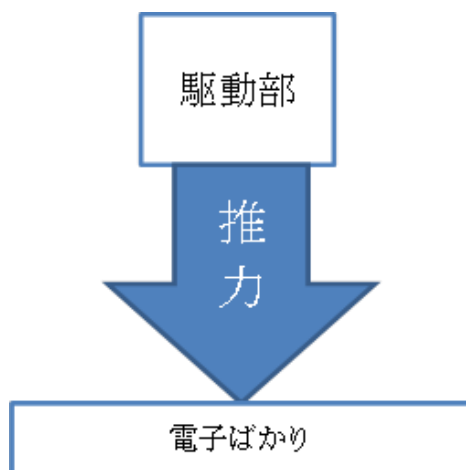


図 2.2 推力測定装置の力の向き



図 2.3 製作した推力測定装置の外観 (11 inch プロペラの場合)

2.3 ブラシレスモーター制御手法

2.3.1 制御手法の選択

ブラシレスモーターを制御する手法はいくつかあるが今回の実験は推力を測定するだけなので複雑な制御を必要としていない。よって、**function generator** を用いた **PWM** 制御を使って信号の振幅情報をアナログ的に変化させブラシレスモーターを制御した。

2.3.2 パルス幅変調 (PWM) 制御

パルス変調は、周期的なパルス列を搬送波に利用する。PWM 制御は、パルス幅に信号情報をを持たせる。

PWM 制御はモーターの制御に利用されることが多い (図 2.4)。T は PWM の一定周期であり、PWM 制御においてはパルスの高さは一定である。パルス幅 T_s のみ変化する。パルス幅 T_s が情報を持っているので、パルス幅 T_s が変化することによってモーターの回転数(rpm)も変化する。

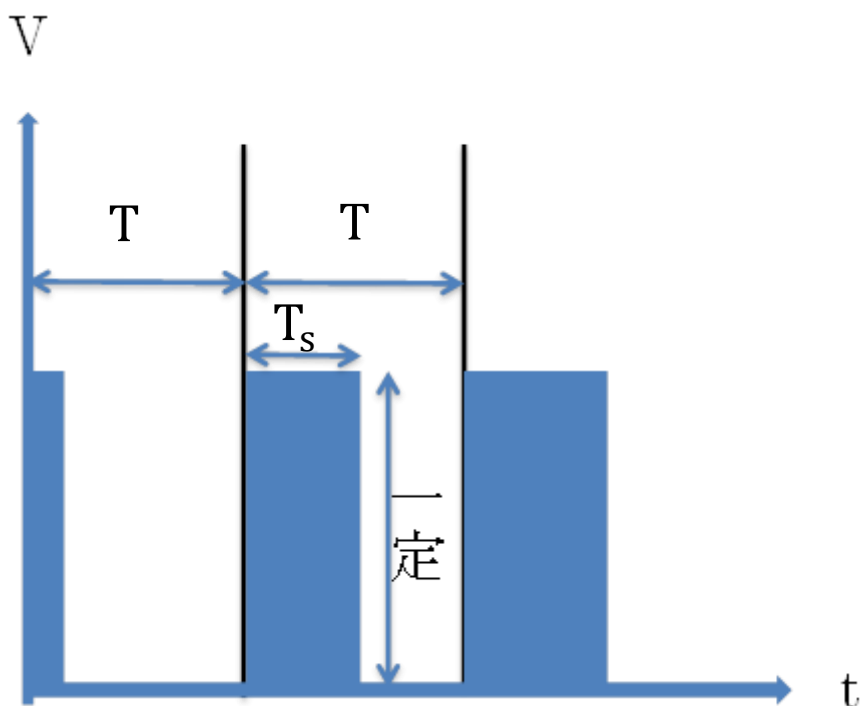


図 2.4 PWM 制御の特徴

今回の実験で利用したパルス幅変調の情報を示す（図 2.5）。

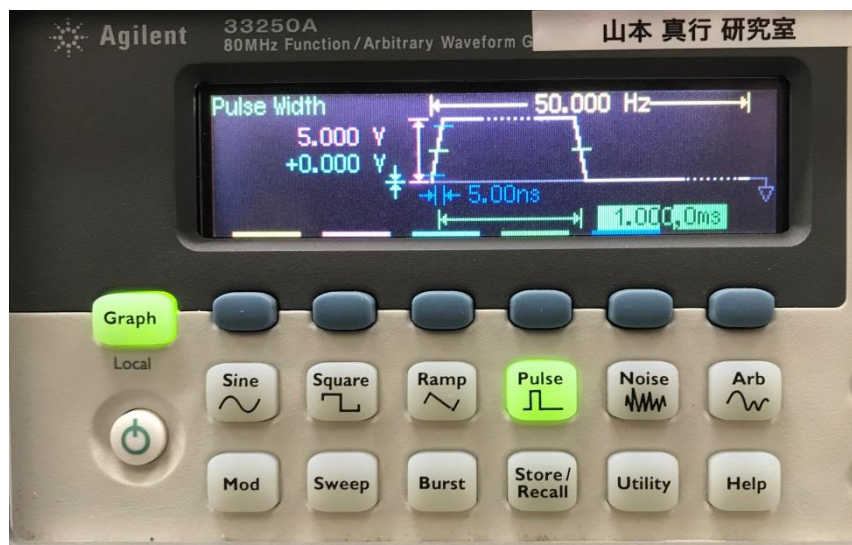


図 2.5 Function generator パルス変調の情報

2.3.3 制御機構の仕組み

ブラシレスモーターの制御機構として、ESC の信号線を function generator に接続し、ESC の電源の入出力線を電源装置に接続した。Function generator で Pulse Width を変化させることでモーターの回転数を変化させる（図 2.6）。

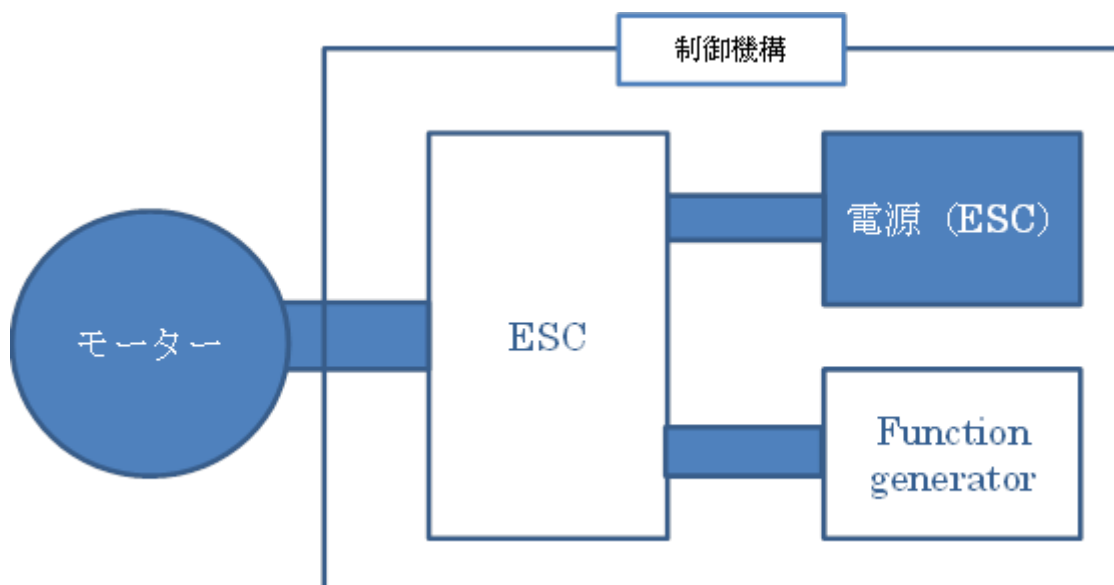


図 2.6 制御機構の簡略図

2.4 プロペラの推力解析手法

2.4.1 レイノルズ数

流体の重要な性質の 1 つに粘性があり、粘性で流体を分類できる。粘性がある流体(粘度 $\mu \neq 0$)を粘性流体、粘性がない流体(粘度 $\mu = 0$)を非粘性流体という。

物体まわりの流れでは、物体表面近くでは粘性の影響が大きく粘性流体として扱う。また、流体の粘性を表す物性値は動粘度であるが、流れに対する粘性の影響力を支配するのはレイノルズ数 Re という無次元量である。流体の動粘度(動粘性係数)を $\nu(\text{m}^2/\text{s})$ 、流れの代表速度を $V(\text{m/s})$ 、流れ場の代表長さを $L(\text{m})$ とすれば、レイノルズ数 Re は、

$$Re = \frac{V_t L}{\nu} \quad \dots \dots \dots (1)$$

で定義される。レイノルズ数は慣性力と粘性力との比であり、この値が大きくなるほど粘性の影響は小さくなる(図 2.7)。

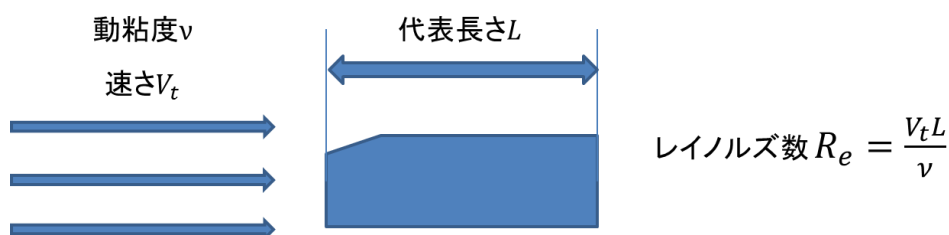


図 2.7 レイノルズ数について

2.4.2 プロペラの推進原理と推進効率

プロペラ推進では、エンジンの出力でプロペラを回転し空気に加速度を与えることで空気が反作用を受けて推力を得る。

プロペラが空気に及ぼす作用の大きさは、ニュートン第 2 法則より、運動量から求められる。第 2 法則より「任意方向の運動量変化の割合は、その方向の外力に等しい」。これより「空気に与えられた運動量の推力方向の変化の割合は、与えられた推力に等しい」と言い換えることができる[4]。

プロペラにより単位時間に作用を受けた空気の質量を $m(\text{kg})$ 、単位時間に空気が得た速度を $u(\text{m/s})$ とすれば単位時間で空気に与えられた運動量は mu となり、これは推力 $T(\text{N})$ に等しい(ここで u は単位時間当たり得られた速度 (m/s) の変化量なので加速度 (m/s^2) の単位としても表記できるためである[4])。

$$T = mu \quad \dots \dots \dots (2)$$

プロペラのエネルギーの大きさは、空気の運動エネルギー $E(\text{J})$ の増加から求める。

$$E = \frac{1}{2}mu^2 \quad \dots \dots \dots (3)$$

よって(2)、(3)式より、同じ推力でも大きな質量 $m(\text{kg})$ に小さな速度 u を与えた方が運動エネルギー E が小さくなる。

しかし、実際は機体の速度 V を考えていないので正確には上の理論は正しくない。これを考慮して考えると、機体が速度 $V(\text{m/s})$ で飛行しているとき、空気に余分な運動量 mV を与える必要がある。よって機体が空気に与えた運動量 $m(V + u) - mV = mu$ 、機体の行う有効仕事 $W(\text{J})$ は $T \times V = muV$ となる。機体が空気に運動量を与えたエネルギーは、空気が得た運動エネルギーの増加に等しいので、

$$E = \frac{1}{2}m\{(V + u)^2 - V^2\} = muV \left(1 + \frac{u}{2V}\right) \quad \dots \dots \dots (4)$$

である。プロペラの推進効率 η は、

$$\eta = \frac{W}{E} = \frac{T \times V}{\frac{1}{2}m\{(V + u)^2 - V^2\}} = \left(\frac{1}{1 + \frac{u}{2V}}\right) \quad \dots \dots \dots (5)$$

となる。よって高効率を得るには、 (u/V) の値が小さいほどよい[4]。プロペラ面の流れを図2.8に示す。

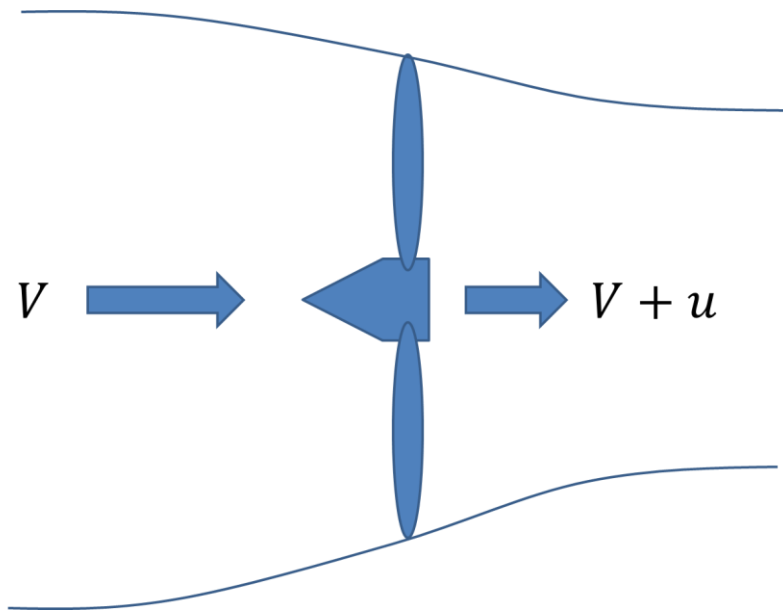


図 2.8 プロペラ面の流れ

2.4.3 プロペラのピッチ

プロペラのピッチとは、プロペラが1回転する間にプロペラが進む前進距離(m)である(図 2.9)。プロペラは、プロペラ回転面と角度 θ (ピッチ角) を成すラセン路に沿って進む。ある点で半径 r のプロペラ断面が n 回転すると、プロペラ断面は回転方向には $2\pi rn$ だけ回る。前進方向には $2\pi rn \tan \theta$ だけ進む。1回転だけ回転したものを有効ピッチと呼び、 $P(m)$ で表す(図 2.9)。

$$P = 2\pi r \tan \theta \quad \dots \dots \dots (6)$$

また1秒間に n 回転するプロペラの前進速度を V とすると、ピッチ P との関係は、

$$P = \frac{V}{n} \quad \dots \dots \dots (7)$$

となる。

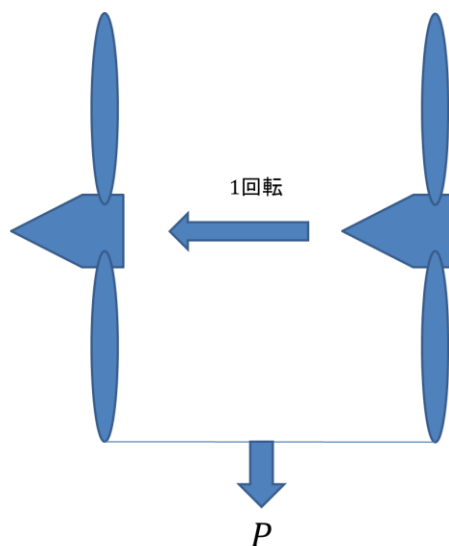


図 2.9 ピッチ

2.4.4 プロペラの効率

2.4.2 項では加速された空気からプロペラ効率を求めた。今回はエンジンの出力から考える。エンジンが発生する出力のほとんどはプロペラを回転させるためのトルクに変換され、有効仕事 W になる。しかし、一部のエンジン出力は熱などの別のエネルギーに変換され、無駄に消費されてしまう。よってエンジンが行った全仕事 W_t と有効仕事 W との比となる。

エンジンの出力をブレーキ馬力 $P [J]$ と呼ぶ。馬力はプロペラの回転するトルク $Q(N/m)$ と、プロペラの角速度 $\Omega(rad/s)$ との積で表す。よってプロペラの効率 η' は 2.4.2 項と同様に、

$$\eta' = \frac{W}{W_t} = \frac{T \times V}{P} = \frac{T \times V}{Q \times \Omega} \quad \dots \dots \dots (8)$$

で与えられる。

2.4.5 進行率

進行率は前進率ともいい、プロペラの作動状態を定義するための重要な関数である。進行率 J (無次元量)は、プロペラの回転数 $n(1/s^2)$ 、飛行機の前進速度 $V(m/s)$ 、プロペラ径 $D(m)$ で表すことができる。

$$J = \frac{V}{nD} \quad \dots \dots \dots (9)$$

と定義する。

2.4.6 先端速度

プロペラ先端速度 $V_t(m/s)$ はプロペラの回転数 n 、飛行機の前進速度 $V(m/s)$ 、プロペラ径 $D(m)$ の関数で表される。回転方向速度は $2\pi r n = \pi D n$ であり、進行速度は V である。先端速度 U_t は回転方向速度 $2\pi r n = \pi D n$ 、進行速度 U のベクトルの和から

$$V_t = \sqrt{V^2 + (\pi D n)^2} \quad \dots \dots \dots (10)$$

となる。この式に 2.4.5 項の進行率 J を代入すると、

$$V_t = V \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{J}\right)^2} \quad \dots \dots \dots (11)$$

となる。飛行に大きな障害となる現象であるフラッタ(はためき、回転むら)や振動は、プロペラ先端速度 V_t と密接な関係があり、先端速度 V_t が音速に近づくにつれて発生する。

2.4.7 プロペラの推力理論式

プロペラの推力 $T(N)$ (または文献[3]に従えば $T(kgf)$)は単位時間当たりの回転数 $n(1/s)$ 、直径 $D(m)$ 、空気密度 $\rho(kg/m^3)$ (同じく[3]に従い、ここでは $\rho\left(\frac{kg}{m^3}\right)$)の関数で表される。比例定数 C_t とすると、プロペラの推力実験式は

$$T = C_t \rho^x n^y D^z \quad \dots \dots \dots (12)$$

であり、 x, y, z は両辺の次元が等しいという関係から求められる[4]。

左辺の次元は kg (同じく文献[3]の表記に従い、ここでは kgf についてこのように記す)で右辺の次元は

$$\left(\frac{kg \cdot sec^2}{m^4}\right) \left(\frac{1}{sec}\right)^2 m^z = (kg)^x (sec)^{2x-y} (m)^{z-4x} \quad \dots \dots \dots (13)$$

であるから

$$\left. \begin{array}{l} kg : 1 = x \\ s : 0 = 2x - y \\ m : 0 = z - 4x \end{array} \right\} \dots \dots \dots (14)$$

となる。この連立方程式を解くと、 $x = 1, y = 2, z = 4$ となる。よって推力理論式は

$$T = C_t \cdot \rho n^2 D^4 \quad \dots \dots \dots (15)$$

となる。同様に計算すると、トルク Q は、比例定数 C_q を用いて、

$$T = C_t \cdot \rho n^2 D^4 \quad \dots \dots \dots (16)$$

となる。ここで C_t 、 C_q はプロペラの推力係数およびトルク係数と呼ばれ、進行率 J の関数として表せる無次元数である。

プロペラの推力理論式を推力係数 C_t の形に式変形すると、

$$C_t = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad \dots \dots \dots (17)$$

となる。トルク係数 C_q も同様に式変形すると、

$$C_q = \frac{T}{\rho n^2 D^5} \quad \dots \dots \dots (18)$$

また、プロペラの推力理論式 (15) は固定翼の揚力理論式

$$L = C_l \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 S \quad \dots \dots \dots (19)$$

と同様のもの（ここで揚力 L 、揚力係数 C_l 、密度 ρ 、流体速度 U 、物体面積 S と表す）であり、揚力係数 C_l を推力係数 C_t に変化させ、動圧 $\frac{1}{2} \rho U^2$ をプロペラに適用したものである。この式よりプロペラの推力は、動圧と推力係数 C_t の値によって決定される。また、レイノルズ数 $Re \geq 10^6$ における固定翼では、揚力係数 C_l は、迎角や翼の形状が一定の場合には大きく変化しない。よって、プロペラの推力係数 C_t もピッチ角が変化しない限り一定と考えられる。

2.4.8 大気密度計算

動圧の大きさは、プロペラの回転数 $n(1/s)$ と大気密度 $\rho(kg/m^3)$ に依存する。ここで大気密度 ρ の大きさについては、一般的に、理想気体の状態方程式と大気の組成から、気温 $t(^{\circ}C)$ と気圧 $P(Pa)$ によって決まる。厳密に計算する場合は湿度などの条件も必要になる。しかし、今回は湿度まで考慮しない大気密度 ρ の式を用いた。状態方程式は、

$$P = \rho R(t + 273.15) \quad \dots \dots \dots (20)$$

である。

ここで、気圧 P 、大気密度 ρ 、気体定数 R 、気温 t を用いて、この式を ρ について解くと、

$$\rho = \frac{P}{\{R(t + 273.15)\}} \quad \dots \dots \dots (21)$$

となる。これが大気密度を求める式である。

2.4.9 空気粘度について

本実験においては、空気粘度は温度に依存して気圧に依存しないので空気粘度 $1.83 \times 10^{-5} (Pa \cdot s)$ として扱った。理科年表より数気圧から数十 (hPa)までは気圧による空気粘度の変化はないと看做することができる。

2.5 プロペラの選定方法

今回研究で使用するプロペラは電動式ドローン用のプロペラである。

プロペラの選定を行うにあたって基準となるプロペラのディスク直径 D (m)を決める必要があった。今回実験ではプロペラの基準を 6 (inch)(1 inch \cong 0.025m)とした。

高度 0 (km)における大気密度を ρ とすると高度 10 (km) 及び 18 (km)での大気密度は 2.1 節の表 2.1 から 0.4ρ 、 0.1ρ である。推力理論式は

$$T = C_t \cdot \rho n^2 D^4 \quad \dots \dots \dots (22)$$

であり、例えば大気密度が 0.1ρ のとき推力は $0.1T$ となる。ここで高度 0 (km)と同様の推力を得るには回転数 n 、ディスク直径 D を変化させる必要がある。ここでは推力係数 C_t の変化については考えない。

例えば、大気密度が 0.1ρ のとき回転数 n を変化させて推力 T を維持するには回転数 n を $\sqrt{10}$ 倍すればよい、よって推力の理論式は

$$T = C_t \cdot (0.1\rho)(\sqrt{10}n)^2 D^4 \quad \dots \dots \dots (23)$$

となり、推力を維持することができる。しかし、仮に回転数 n が 5000 rpmとするなら $\sqrt{10}$ 倍だと約 15000 (rpm)となり現実的ではない。

次に、大気密度 0.1ρ のときディスク直径 D を変化させて推力 T を維持するには

ディスク直径 D を $\sqrt[4]{10}$ 倍すればよい、よって推力の理論式は

$$T = C_t \cdot (0.1\rho)n^2(\sqrt[4]{10}D)^4 \quad \dots \dots \dots (24)$$

となり、推力を維持することができる。例えば 6 inch のプロペラのときディスク直径 D を約 1.7 倍すると 11 (inch)となり現実的である。よってディスク直径 D を変化させて推力 T を維持することにした。大気密度 0.4ρ のときも同様にして考えるとディスク直径 D を $\sqrt{2}$ 倍すればよいのでプロペラのディスク直径 D は 8 (inch)となる。

よって本実験で用いるプロペラのディスク直径 D は 6 (inch), 8 (inch), 11 (inch)の 3 種類とした。なぜ 6 (inch) (内径152.4 mm) を基準とした理由は、真空チャンバー内で実験するため真空チャンバーの大きさ (内径 586cm \times 奥行き 966cm) による制限が生じたためである。また、大きなプロペラを使用するとチャンバー内の壁面の影響が大きくなると考えたのでプロペラの基準を 6 (inch)とした。

第3章 推力測定実験

3.1 大気圧実験

3.1.1 大気圧実験目的

大気圧中で各プロペラが発生させる推力を算出し、プロペラの性能の 1 つである推力係数 C_t を求める。

3.1.2 大気圧実験概要

温度 25 °Cの室内でプロペラ（6 inch, 8 inch, 11 inch）を用いて大気圧実験を行った。実験を行うにあたって以下の道具を用いた（表 3.1）。

また、実験を開始する前に Oscilloscope で function generator の信号が正しく出力されているのか確認した。Function generator の出力に問題がない場合に実験を行った。

実験では回転数 $n(\text{rpm})$ と推力 $T(\text{g})$ を記録した。また、大気圧実験において気圧は 1013 (hPa)として解析を行った。大気実験の模式図を示す（図 3.1）。

表 3.1 大気圧実験道具

実験道具
推力測定装置
Function generator
DC POWER SUPPLY (20 V、20 A)
DC POWER SUPPLY (35 V、0.8 A)
Oscilloscope
ESC

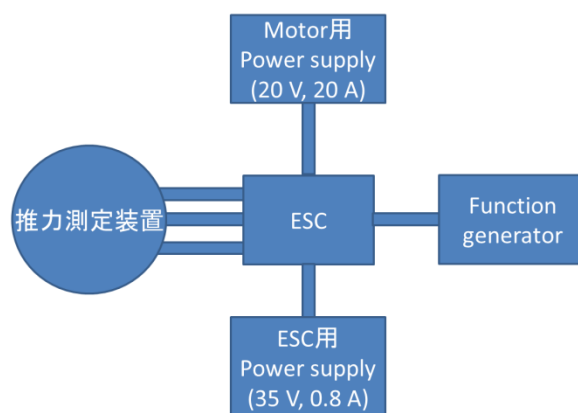


図 3.1 大気圧実験の模式図

3.1.3 大気圧実験結果

3.1.3.1 大気圧実験での各プロペラの比較結果

本実験は室温 25 °C、気圧は大気圧状態で実験を行った。解析した生データは付録に記載する。解析結果を図 3.2、図 3.3 に示す。

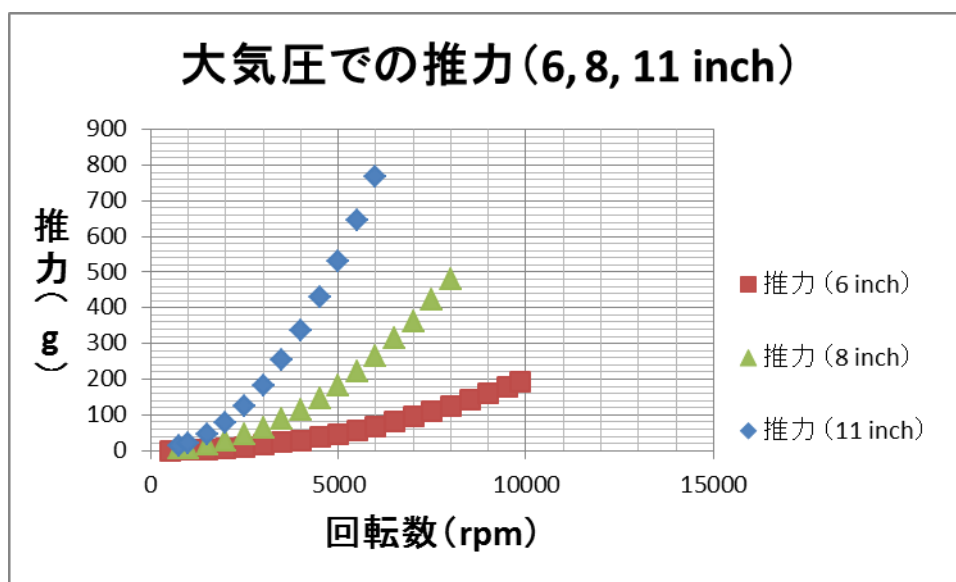


図 3.2 各プロペラの推力と回転数

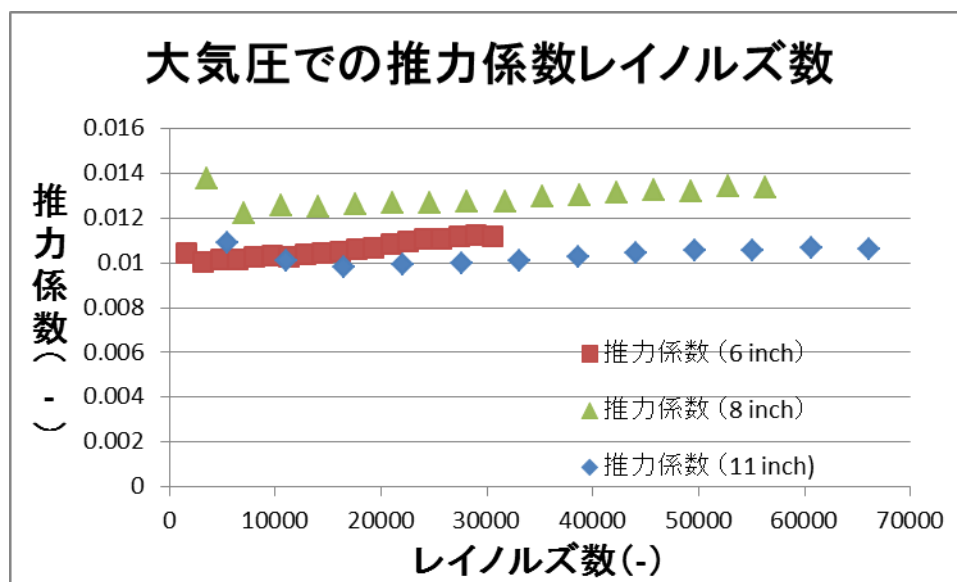


図 3.3 各プロペラの推力係数とレイノルズ数

3.1.3.2 大気圧実験とチャンバー（大気圧）実験との比較結果

本実験では大気圧実験とチャンバー内を大気圧状態にした時の比較結果を示す（図 3.4、図 3.5、図 3.6、図 3.7、図 3.8、図 3.9）。ここで、cc と pt は圧力計の種類を示す。（3.2.4 項に後述）。

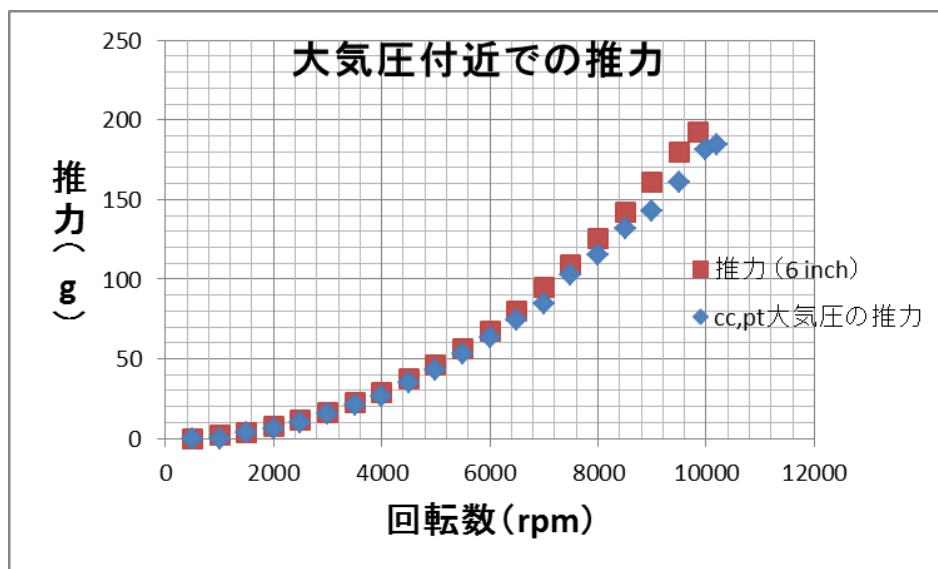


図 3.4 プロペラ（6 inch）でのチャンバー壁面の影響

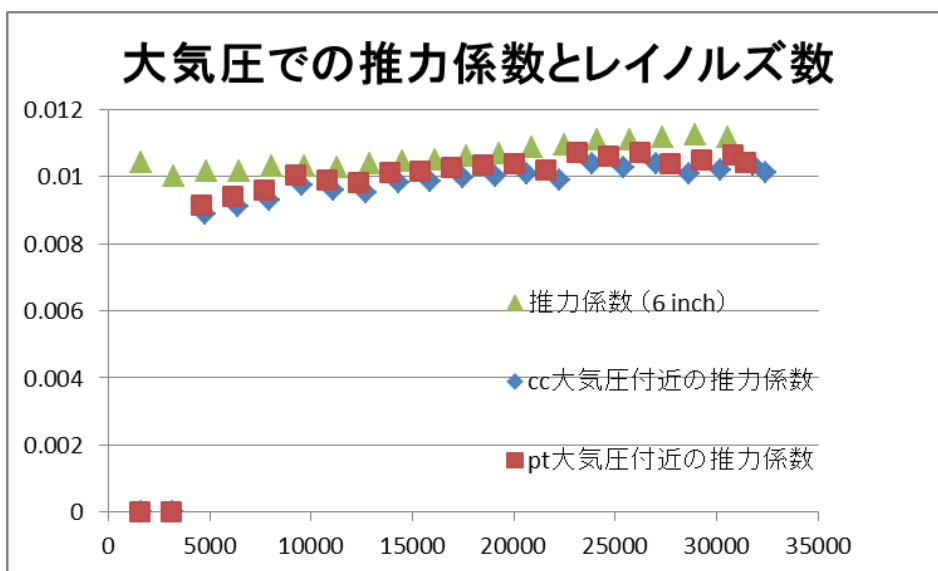


図 3.5 プロペラ（6 inch）でのチャンバー壁面の影響

グラフを見る限りでは、6 inch のプロペラでもチャンバー壁面の影響で推力が微小に低くなっていることが分かる。

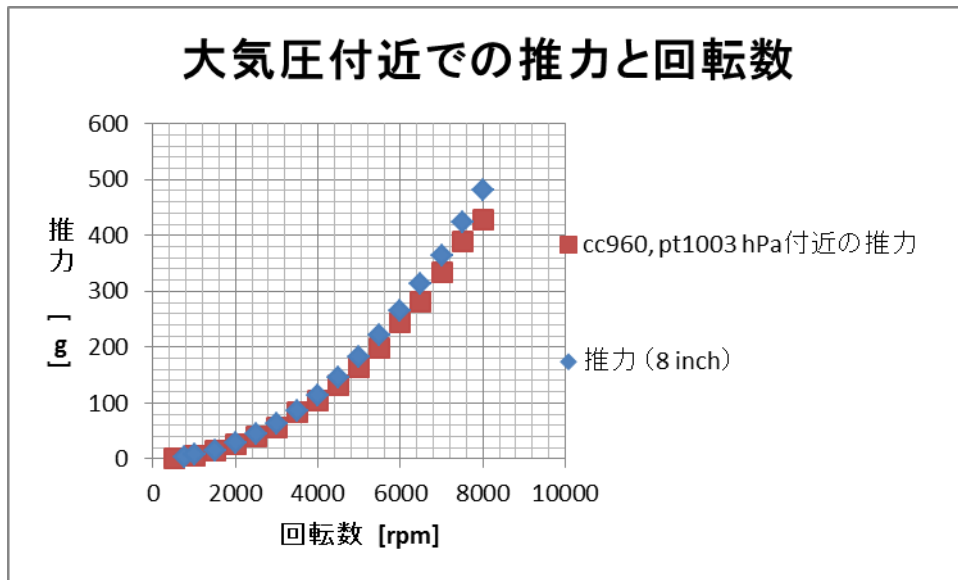


図 3.6 プロペラ (8 inch) でのチャンバー壁面の影響

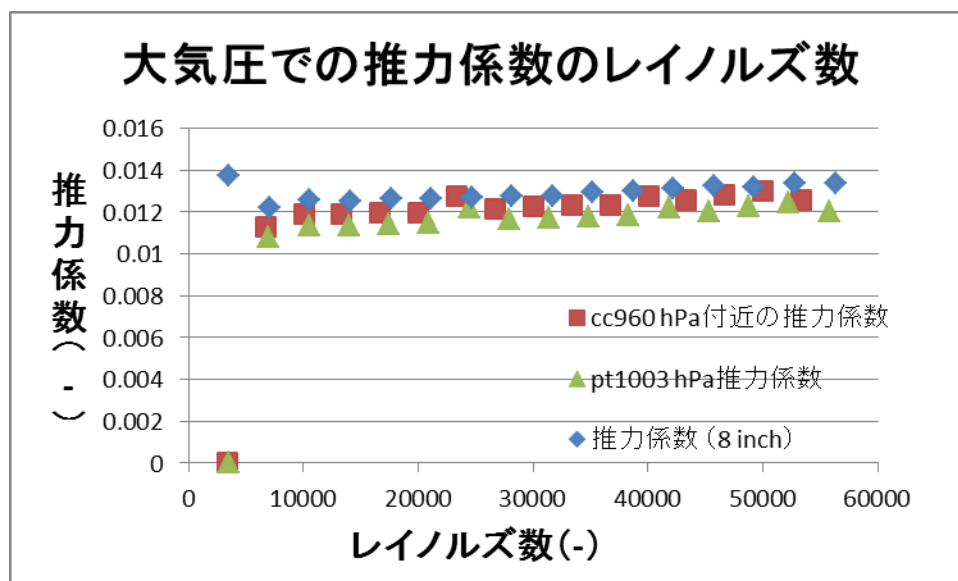


図 3.7 プロペラ (8 inch) でのチャンバー壁面の影響

グラフを見る限りでは、8 inch のプロペラでもチャンバー壁面の影響は見られる。

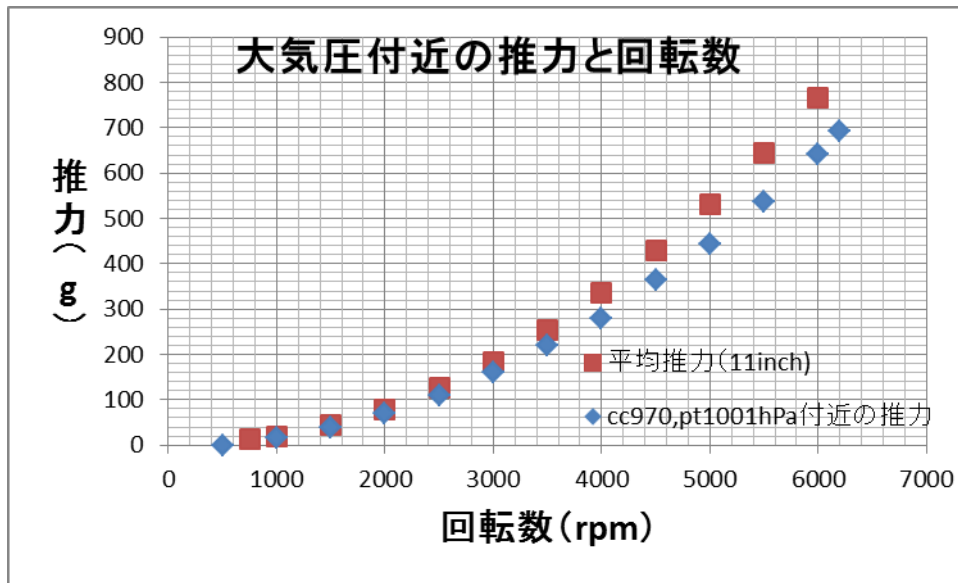


図 3.8 プロペラ (11 inch) でのチャンバー壁面の影響

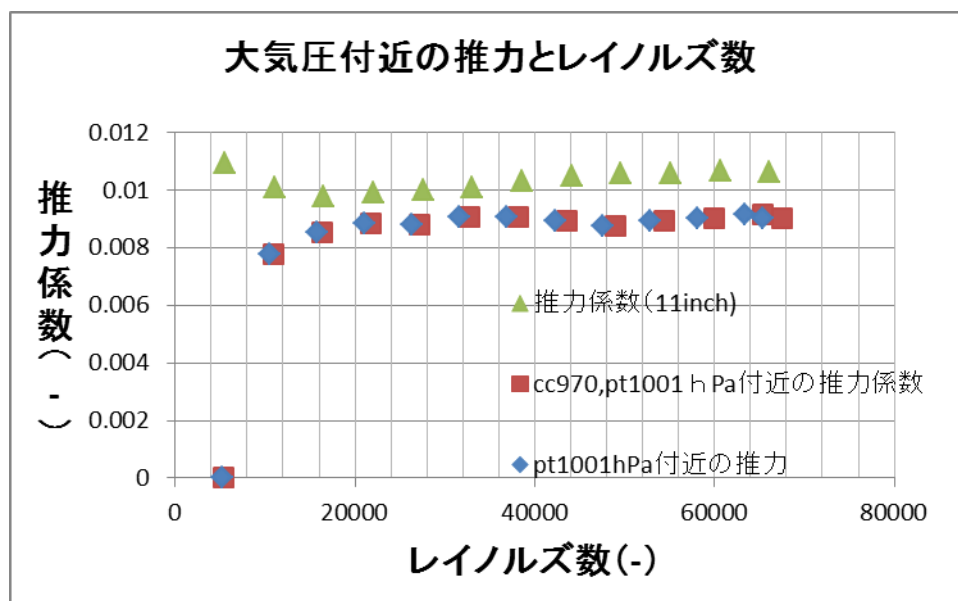


図 3.9 プロペラ (11 inch) でのチャンバー壁面の影響

グラフを見ると回転数が大きくなるにつれて、チャンバー内の推力が小さくなっている。また、推力係数もチャンバー内の方が低いので、11 inch プロペラでは壁面の影響が大きいと考えられる。

3.2 真空チャンバー内実験

3.2.1 真空チャンバー実験の目的

真空チャンバー実験において最も重要視したことは、高高度でプロペラがどのような性能を示すか検証し、高度変化によるプロペラの性能変化を知ることである。また、2.5節で示したようにディスク直径 D の変化による推力維持の可能性を検証することを真空チャンバー実験の目的とした。

3.2.2 真空チャンバー実験準備

本実験で使用する真空チャンバーの壁面には外部から信号を入力できるように D-sub 9ピン、15ピンのコネクタが2個ずつ計4個ある。

真空チャンバーで実験を行うには推力測定装置をチャンバー内に入れるため、直接 ESC を接続できない。そのため、チャンバーに接続されている D-sub コネクタを使用した。D-sub コネクタを使用するために ESC の改造を行った (図 3.10)。

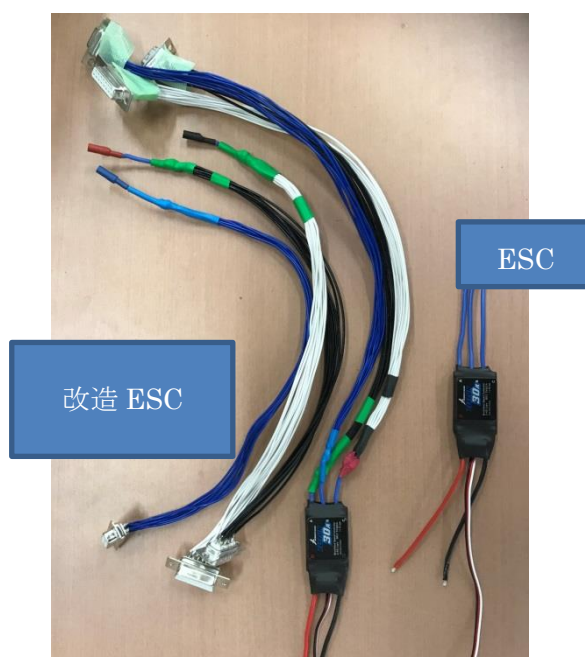


図 3.10 改造 ESC

改造した ESC と D-sub コネクタを接続している導線が電流 12(A) を流しても大丈夫なのか調べた。導線の安全を確認するために実際に電流を流した。実験内容としては、11 (inch) のプロペラを回す時にモーターが最も電力を消費するので最大出力で 360 秒間モーターを回転させた。この実験結果としては、特に導線に変化が見られなかった。

これによって、ESC に電流を 12 (A) 流しても問題ないことが分かった。よってチャンバ

一の外から制御可能となり、制御機構を用いたチャンバー実験が可能となった

プロペラの回転数を測定する回転数計も同様にチャンバー内で操作ができないので外部から信号を送るために回転数系を改造した(図 3.11)。回転数計の基板上的スイッチ部分を導線で回転数計の外に出すことでチャンバーの D-sub コネクタに接続可能となった。これによって推力測定装置の測定機構もチャンバー実験が可能となった。



図 3.11 改造回転数計

推力測定装置をチャンバーに接続しチャンバーと制御機構を接続することによってチャンバー実験を行うために必要な準備が完了した

3.2.3 真空チャンバー実験内容

本実験では、まずチャンバー内を高度 18 (km)付近の気圧である約(75hPa)まで下げた。高度 18 (km)付近の気圧で大気圧実験と同様に実験を行った。次にリークバルブからチャンバー内に空気を入れた。このとき次に実験する高度付近の気圧に上昇するまでリークバルブを開けておく、目標の高度付近の気圧になったらリークバルブを閉めた(図 3.12)。そして実験を再度行った。これを大気圧状態になるまで繰り返した。本実験で使用した高度は 18, 15, 12, 10, 6, 3, 0 (km)である。



図 3.12 リークバルブ

3.2.4 真空チャンバーの圧力計について

真空チャンバーは宇宙実験装置の開発用に設計されたもので高真空を再現して実験できる。チャンバーには2つの圧力計(コールドカソード・ピラニ(cc)真空計(図3.13(左))、デジタル(pt)圧力指示計(図3.13(右)))があり、本実験では両方の圧力計(cc, pt)を用いた。コールドカソード・ピラニ真空計の測定精度は $1E-7 \sim 1E-4$ (Pa): $\pm 30\%$ が保障されているが本実験の圧力条件である75(hPa)以上は信頼性を得られる範囲に対して高すぎると言える。しかしデジタル圧力指示計では100(hPa)以下で表示が得られないため100(hPa)以下の気圧調節ではコールドカソード・ピラニ真空計のみを用いた。またすべて室温(25°C)で実験を行った。

例えば、コールドカソード・ピラニ真空計で120(hPa)、デジタル圧力指示計で82(hPa)の値を示した場合、以降では[cc120, pt82 hPa]と表記する。実験で用いた実験条件を表3.2、表3.3にまとめて示す。



図 3.13 (左) コールドカソード・ピラニ真空計、(右) デジタル圧力計

表 3.2 cc 圧力計のプロペラ (6, 8, 11 inch) 実験条件

			6 inch	6 inch	8 inch	8 inch	11 inch	11 inch
条件1 [km]	条件2 [°C]	目標 [hPa]	cc [hPa]	pt [hPa]	cc [hPa]	pt [hPa]	cc [hPa]	pt [hPa]
1回目 18	25	75	75	/	73	/	74	/
2回目 18	25	75	73	/	73	/	75	/
3回目 18	25	75	74	/	73	/	74	/
15	25	121	120	82	120	86	120	/
12	25	193	190	132	190	136	180	/
10	25	264	260	155	260	161	260	120
6	25	472	470	246	460	248	470	/
3	25	701	700	443	700	473	700	519
0	25	1013	970	1001	960	1003	970	1001

表 3.3 pt 圧力計でのプロペラ (6, 8, 11 inch) 実験条件

条件1 [km]	条件2 [°C]	目標 [hPa]	6 inch		8 inch		11 inch	
			pt [hPa]	cc [hPa]	pt [hPa]	cc [hPa]	pt [hPa]	cc [hPa]
1回目 18	25	75		75		73		74
2回目 18	25	75		73		73		75
3回目 18	25	75		74		73		74
15	25	121	121	180	121	170	120	190
12	25	193	193	350	193	320	192	400
10	25	264	264	490	264	490	264	
6	25	472	472	700	472	690	471	
3	25	701	701	850	701	850	699	820
0	25	1013	1001	970	1003	960	1001	970

3.2.5 真空チャンバーの実験結果

本実験は、各プロペラを用いて 75 (hPa)付近はコールドカソード・ピラニ (cc) 真空計 cc の値を参考にして実験を行った。また高度 15, 12, 10, 6, 3, 0 (km)での推力と回転数の関係を 2つの各圧力計を用いて実験した。

3.2.5.1 プロペラ (6 inch) の実験結果

プロペラ (6 inch) のチャンバー内 (大気圧)、75 (hPa)付近 (地上 18 (km) 付近) でのプロペラの性能について比較結果を示す (図 3.14、図 3.15)。

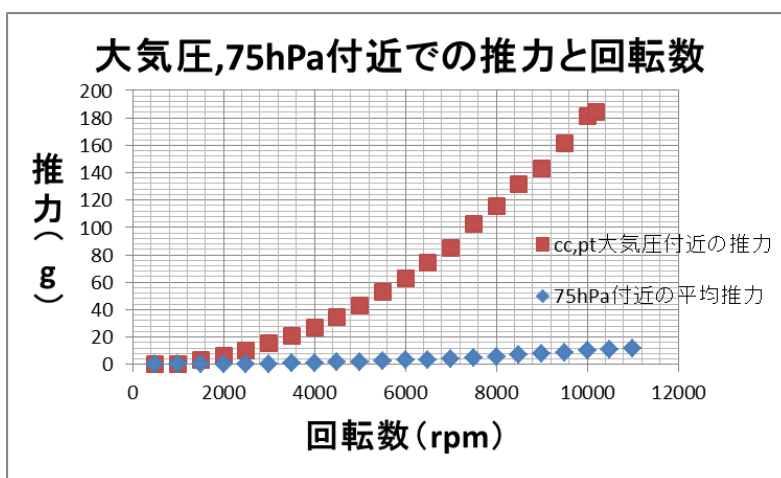


図 3.14 チャンバー内 (大気圧)、75 (hPa)での 6 (inch) プロペラの推力と回転数

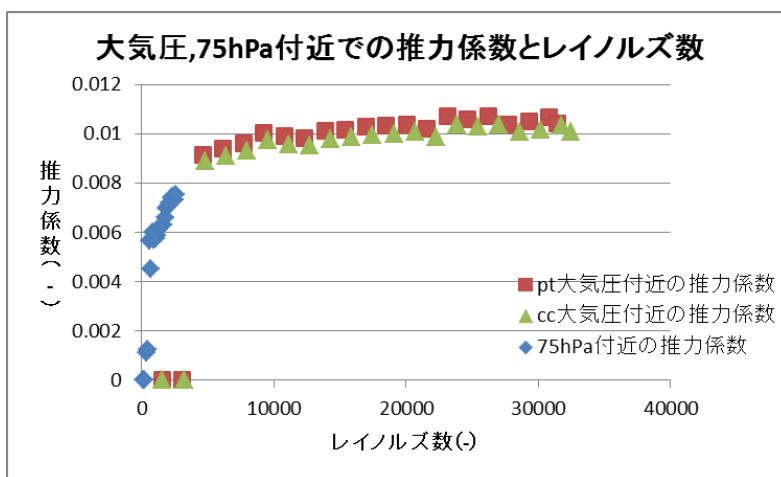


図 3.15 チャンバー内 (大気圧)、75 (hPa)での 6 (inch)プロペラの推力係数とレイノルズ数

実験結果から[cc 75 hPa]付近のとき推力係数が大気圧時と比べると大きく下がっていることが分かる。

プロペラ（6 inch）の圧力計 cc, pt のチャンバー内（大気圧）～高度 15 km でのプロペラの推力と回転数の関係についてのグラフと推力係数とレイノルズ数の関係についてのグラフを示す（図 3.16、図 3.17、図 3.18、図 3.19）。

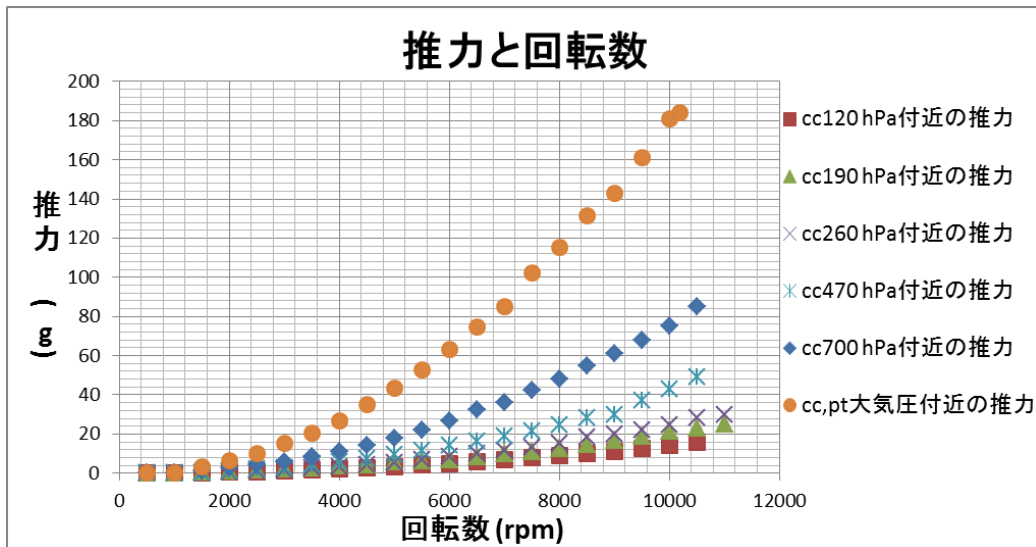


図 3.16 圧力計 cc での推力と回転数の関係

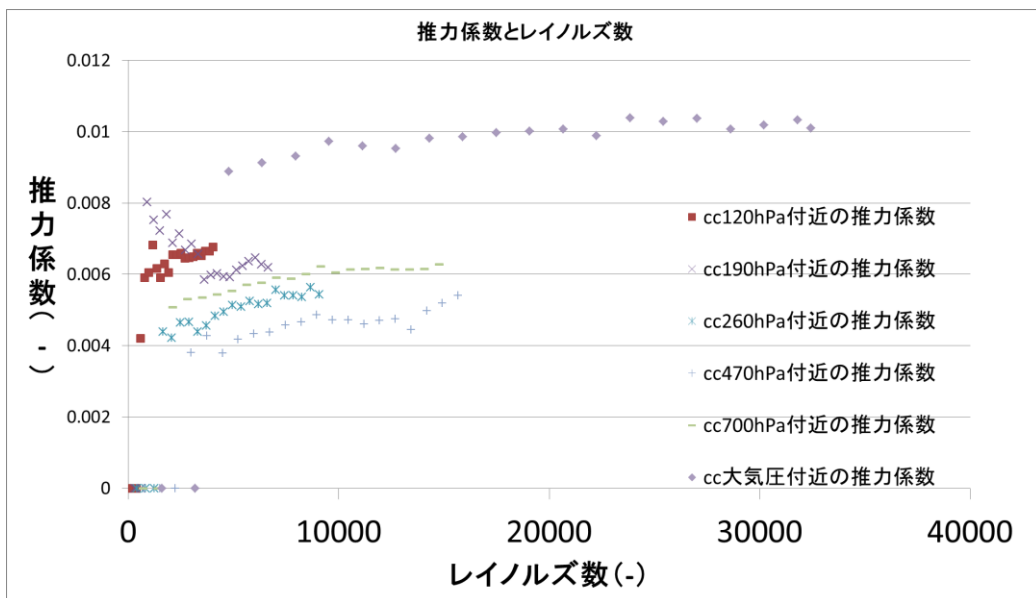


図 3.17 圧力計 cc での推力係数とレイノルズ数の関係

図 3.17 より高圧側では気圧が下がればレイノルズ数に関係なく推力係数が下がっているが低圧側では不思議な挙動を示している。

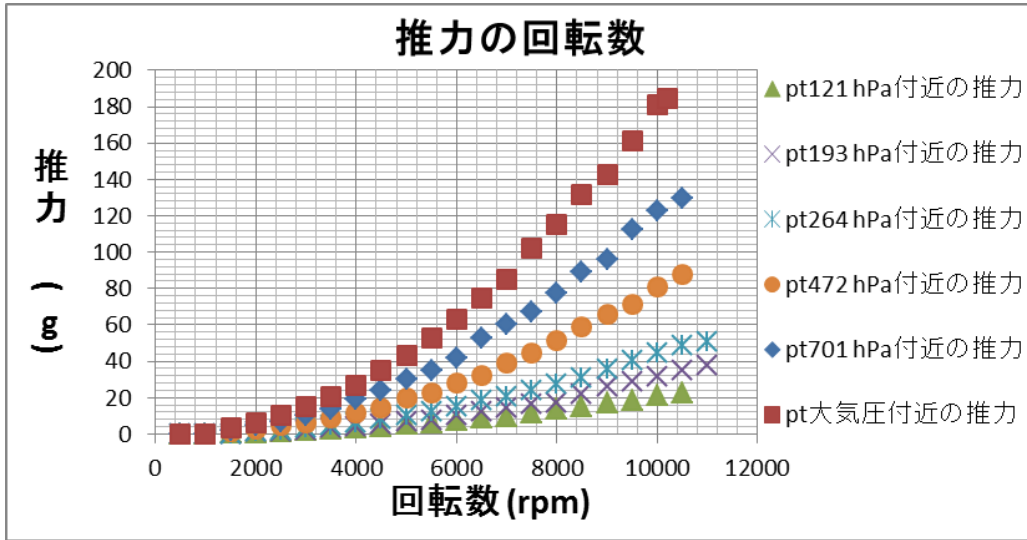


図 3.18 圧力計 pt での推力と回転数の関係

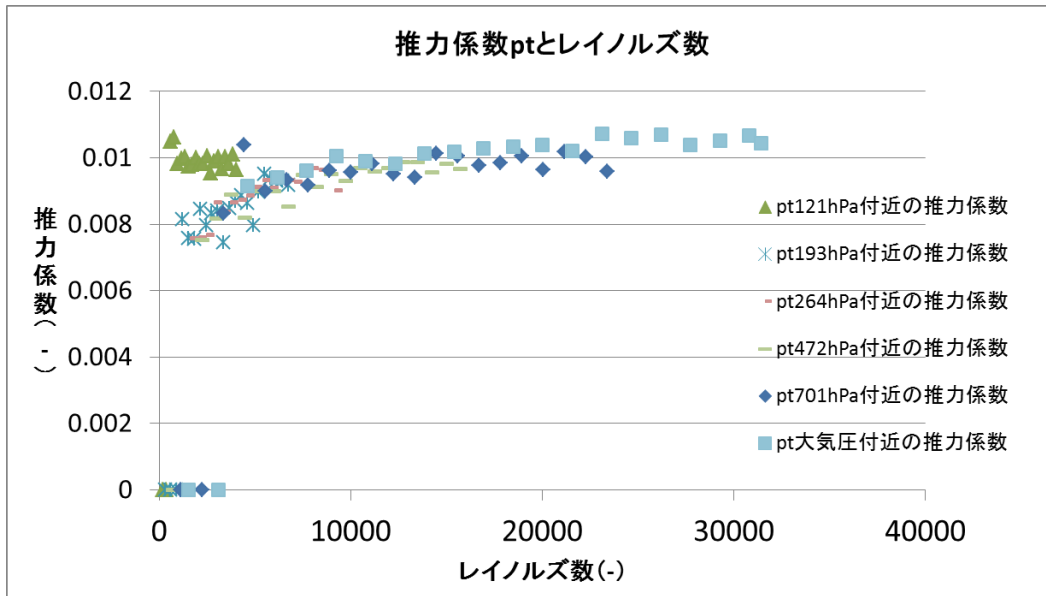


図 3.19 圧力計 pt での推力係数とレイノルズ数の関係

図 3.19 よりレイノルズ数と推力係数には[pt121 hPa]を除いて単調増加の関係がある。レイノルズ数が 10^4 以上では pt 圧力計の大気圧付近での推力係数とほぼ同じような値を示す。また、レイノルズ数が 10^4 以下ではレイノルズ数の低下にしたがって推力係数が低下している。

3.2.5.2 プロペラ（8 inch）の実験結果

チャンバー内（大気圧）、[cc120, pt86 hPa]付近でのプロペラの性能について実験結果を示す（図 3.20、図 3.21）。

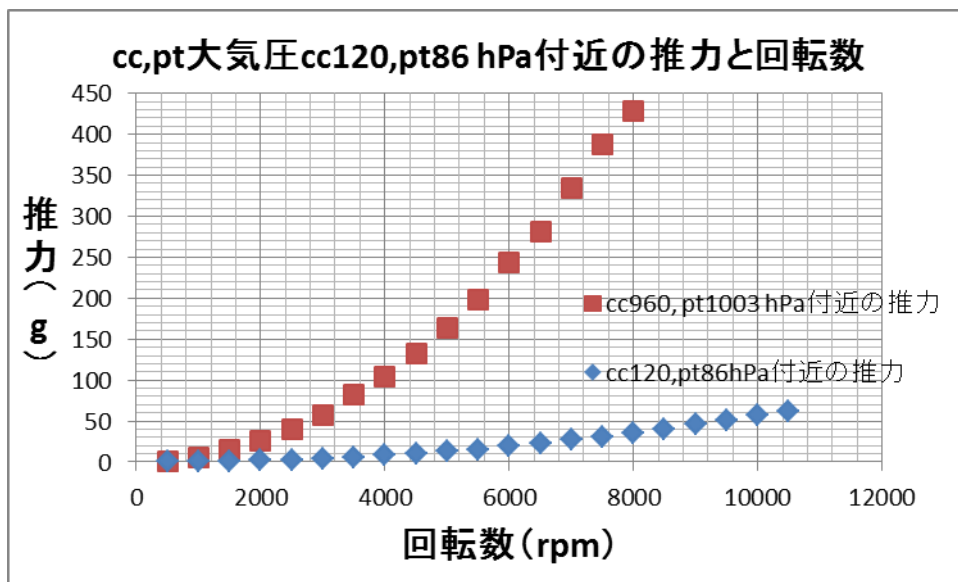


図 3.20 チャンバー内（大気圧）、[cc120, pt82 hPa]での 8 (inch) プロペラの推力と回転数

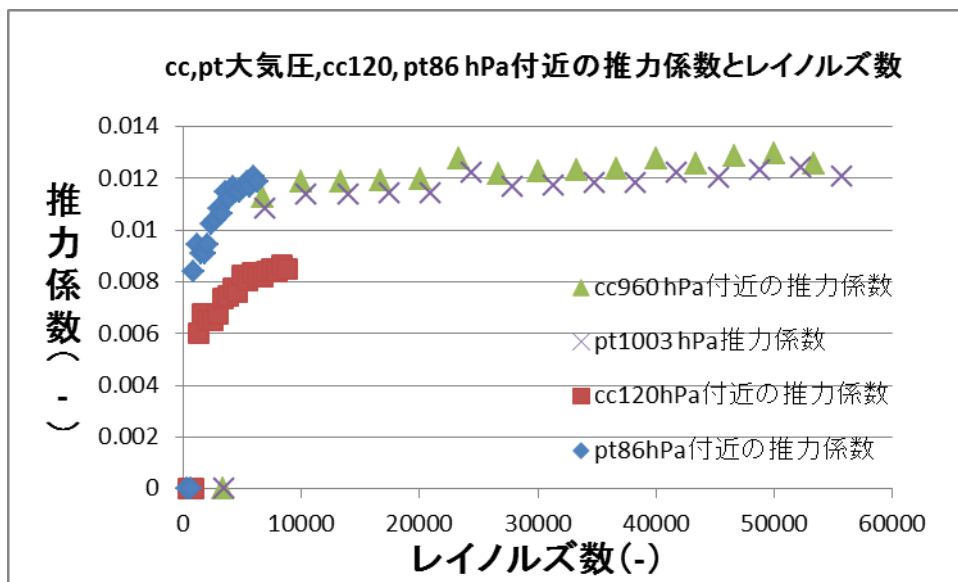


図 3.21 チャンバー内（大気圧）、[cc120, pt86 hPa]での 8 (inch) プロペラの推力係数とレイノルズ数

プロペラ（8 inch）の圧力計 cc, pt のチャンバー内（大気圧）～高度 15 km でのプロペラの推力と回転数の関係についてのグラフと推力係数とレイノルズ数の関係についてのグラフを示す（図 3.22、図 3.23、図 3.24、図 3.25）。

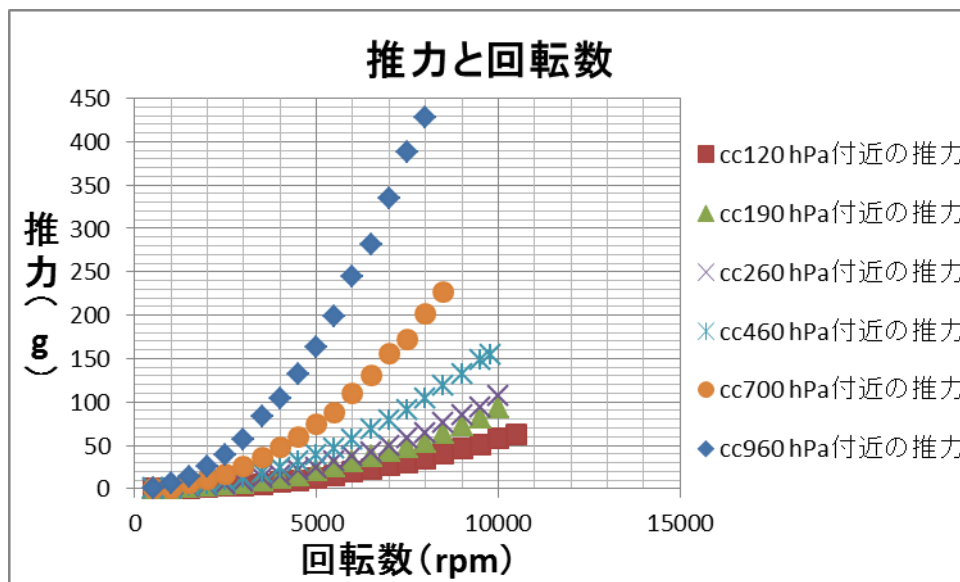


図 3.22 圧力計 cc での推力と回転数の関係

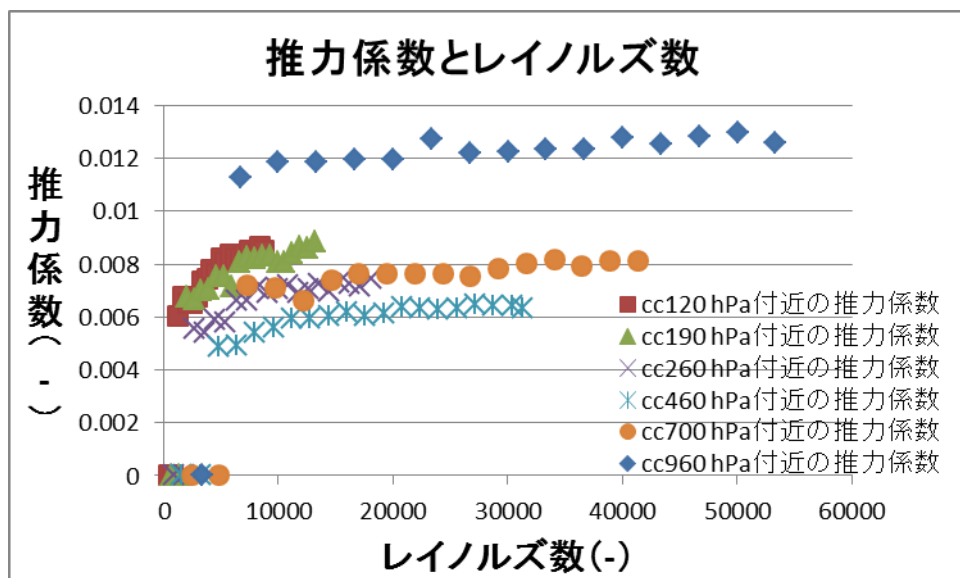


図 3.23 圧力計 cc での推力係数とレイノルズ数の関係

図 3.23 より高圧側では気圧が下がればレイノルズ数に関係なく推力係数が下がっているが低圧側では逆に変化しているように見える。

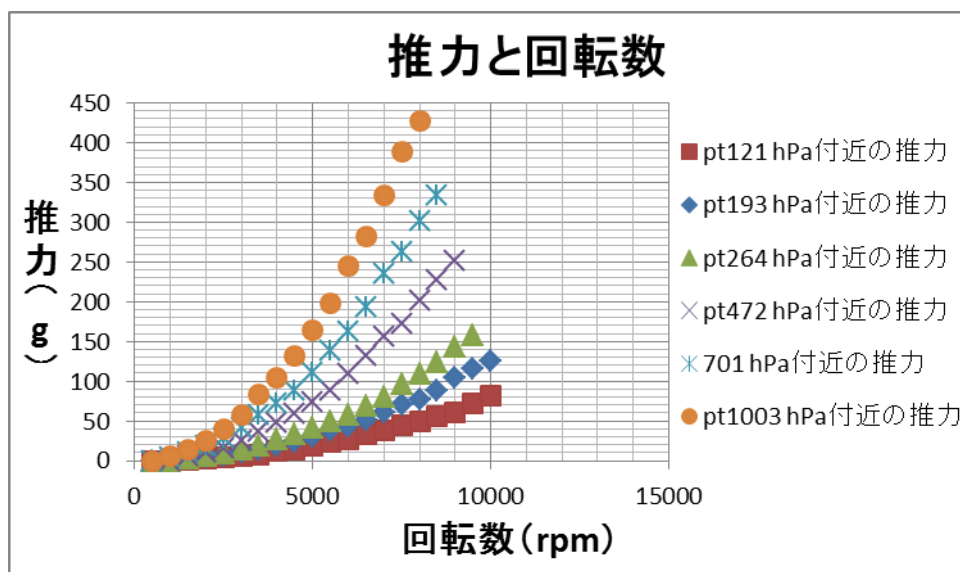


図 3.24 圧力計 pt での推力と回転数の関係

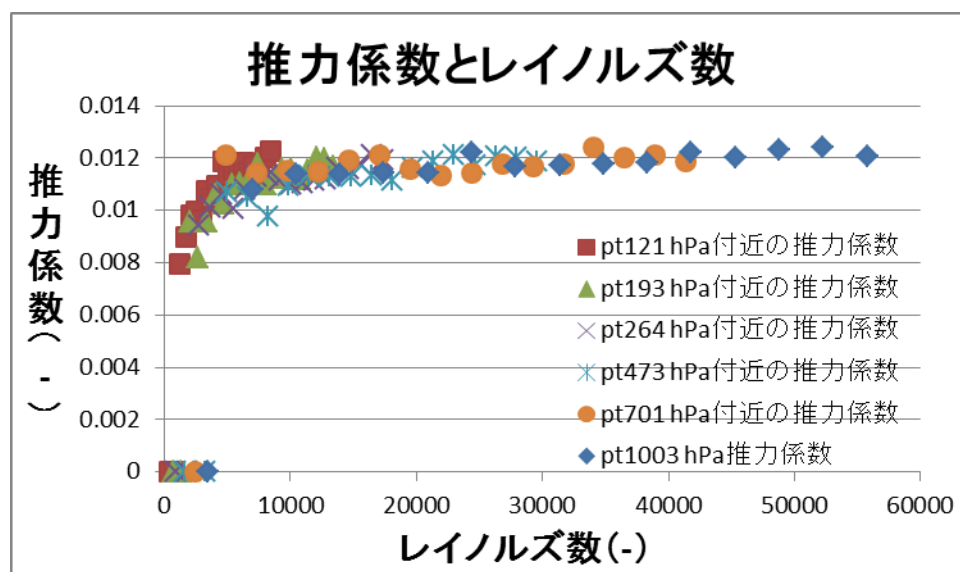


図 3.25 圧力計 pt での推力係数とレイノルズ数の関係

図 3.25 よりレイノルズ数と推力係数は単調増加の関係がある。レイノルズ数が 10^4 以上では pt 圧力計の大気圧付近での推力係数とほぼ同じような値を示す。また、レイノルズ数が 10^4 以下ではレイノルズ数の低下にしたがって推力係数が急激に低下している。

3.2.5.3 プロペラ（11 inch）の実験結果

チャンバー内（大気圧）、[cc120 hPa]付近でのプロペラの性能について実験結果を示す（図 3.26、図 3.27）。

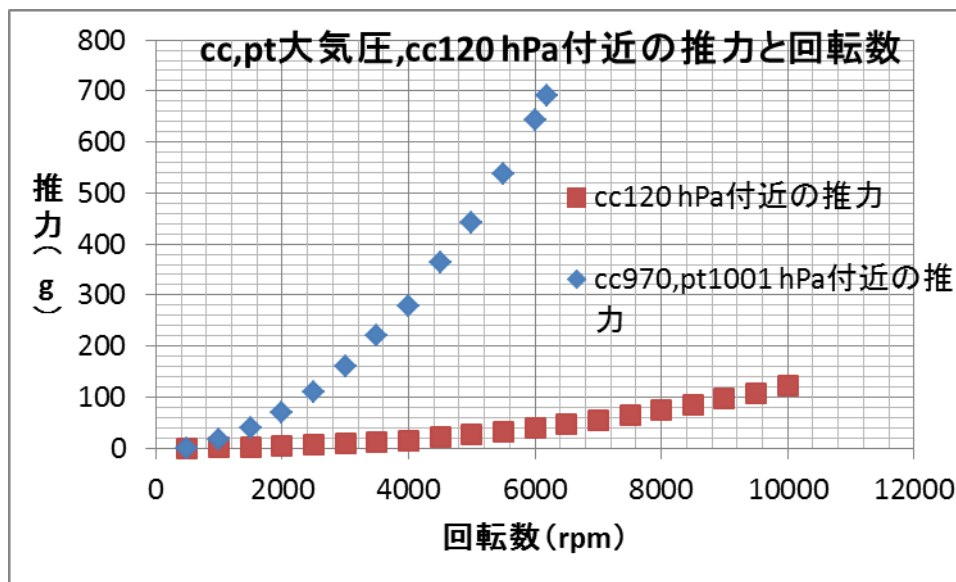


図 3.26 チャンバー内（大気圧）、[cc120 hPa]での 11（inch）プロペラの推力と回転数

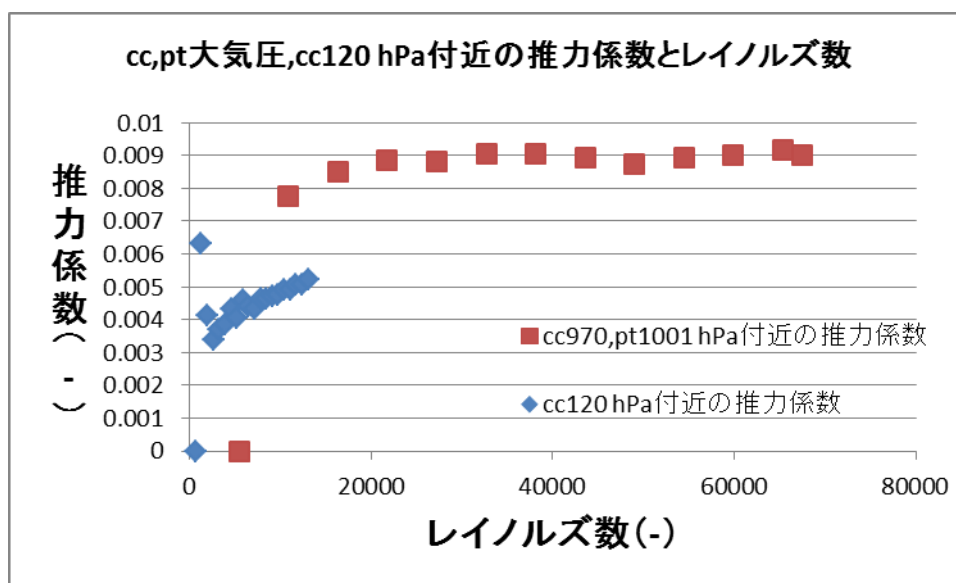


図 3.27 チャンバー内（大気圧）、[cc120 hPa]での 11（inch）プロペラの推力係数とレイノルズ数

プロペラ（11 inch）の圧力計 cc, pt のチャンバー内（大気圧）～高度 15 km でのプロペラの推力と回転数の関係についてのグラフと推力係数とレイノルズ数の関係についてのグラフを示す（図 3.28、図 3.29、図 3.30、図 3.31）。

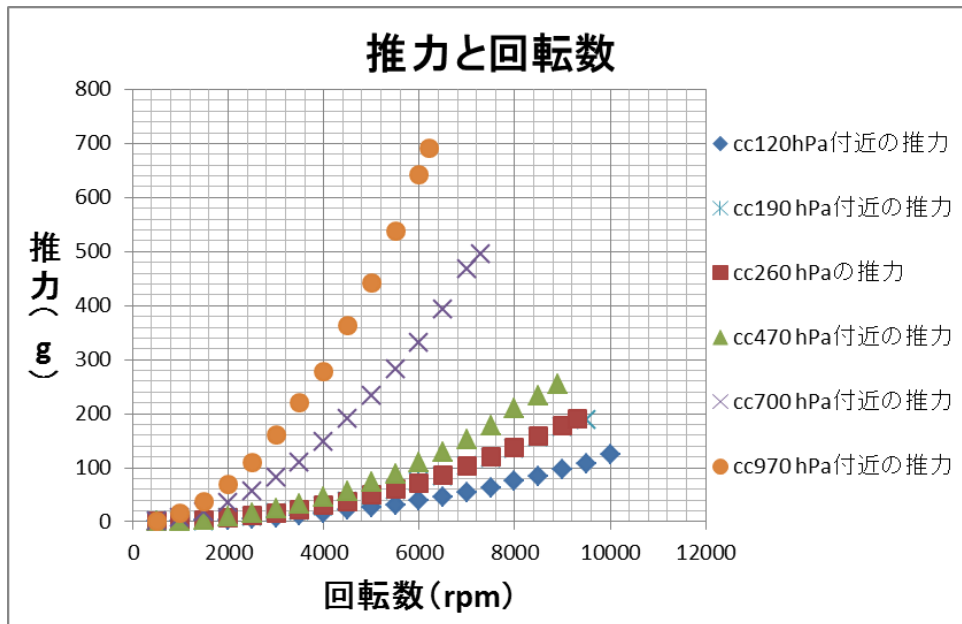


図 3.28 圧力計 cc での推力と回転数の関係

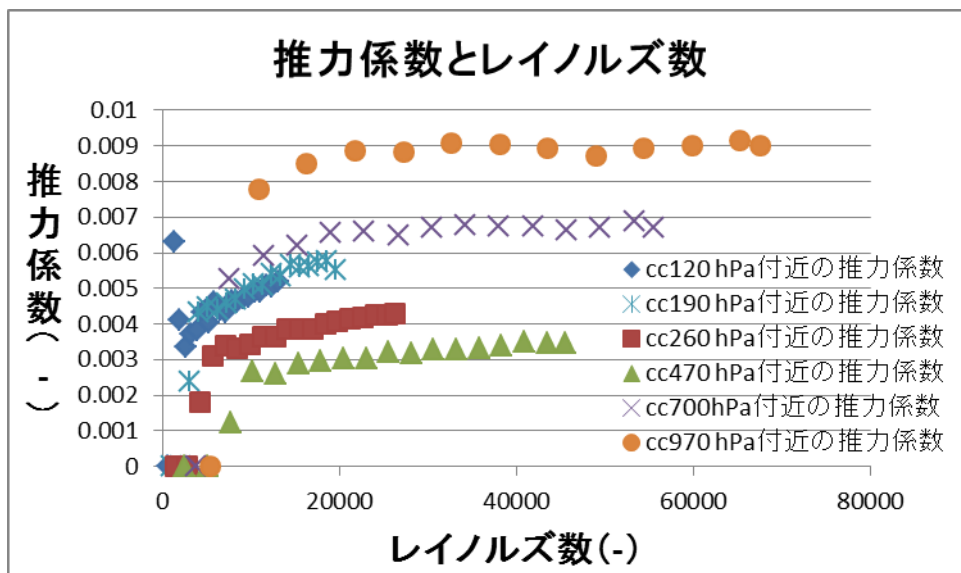


図 3.29 圧力計 cc での推力係数とレイノルズ数の関係

図 3.29 より高圧側では気圧が下がればレイノルズ数に関係なく推力係数が下がっているが、低圧側では逆の変化となっている。

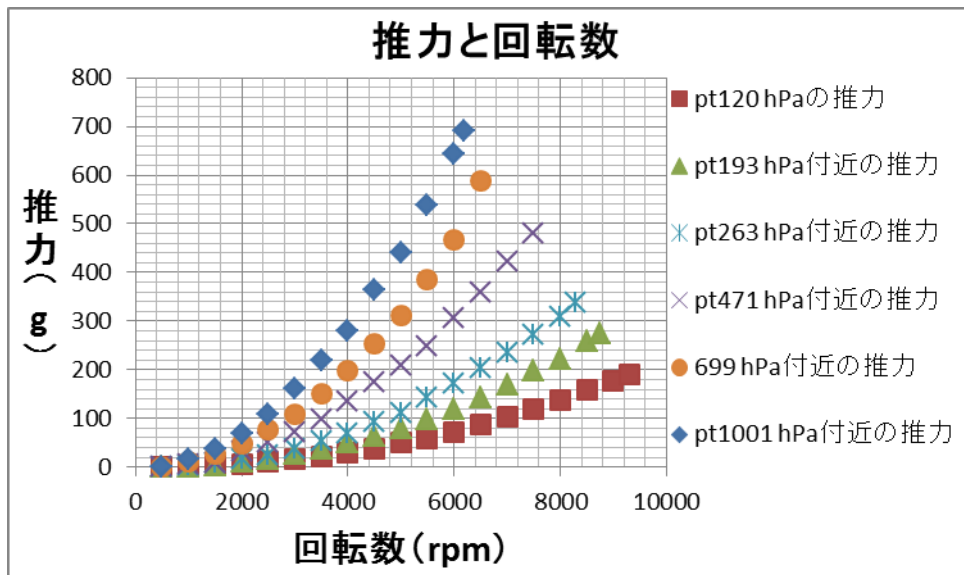


図 3.30 圧力計 pt での推力と回転数の関係

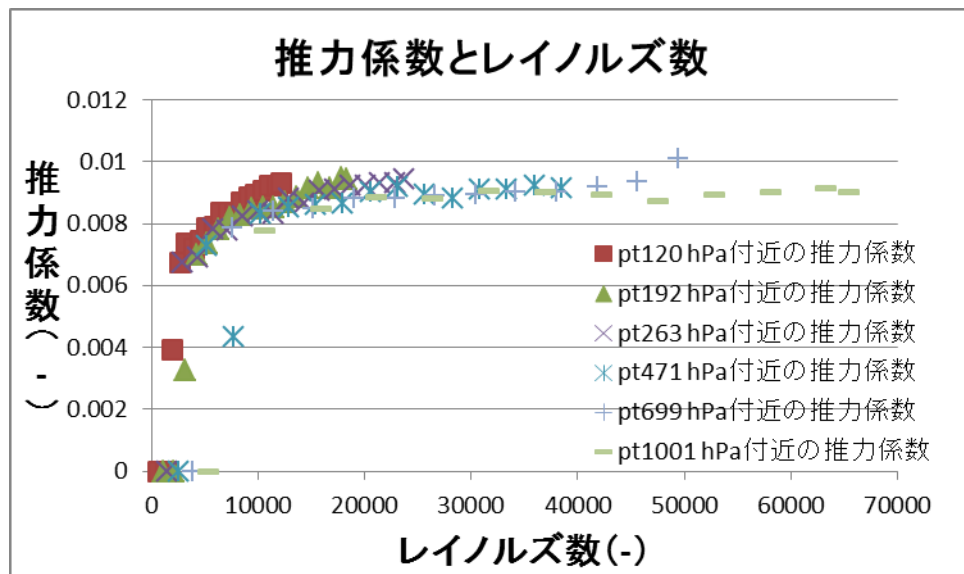


図 3.31 圧力計 pt での推力係数とレイノルズ数の関係

図 3.31 よりレイノルズ数と推力係数は単調増加の関係がある。レイノルズ数が 10^4 以上では pt 圧力計の大気圧付近での推力係数とほぼ同じような値を示す。また、レイノルズ数が 10^4 以下より低いレイノルズ数では推力係数は急激に減少する。

3.2.5.4 高度による消費電力の低下

本実験においてのプロペラ別電力消費量を示す（表 3.4）。

表 3.4 各プロペラの高度別電流

6 inch							
高度 [km]	0.0	3.0	6.0	10.0	12.0	15.0	18.0
電流 [A]	2.4	2.0	1.6	1.1	0.09	0.08	0.06
8 inch							
高度 [km]	0.0	3.0	6.0	10.0	12.0	15.0	18.0
電流 [A]	7.6	6.4	5.1	3.6	2.9	2.1	1.5
11 inch							
高度 [km]	0.0	3.0	6.0	10.0	12.0	15.0	18.0
電流 [A]	12.1	9.2	9.0	6.9	5.9	4.5	3.1

表 3.4 を見て分かるよう高度が上昇するにつれて消費電流も減少している。6 (inch) のプロペラは 18 (km) では、地上の 0.025 倍であり、8 (inch) のプロペラは 18 (km) では、0.2 倍であり、11 (inch) のプロペラは 18 (km) では、0.26 倍である。

第4章 考察

4.1 チャンバー実験での壁面の影響について

最も大きい 11 (inch) プロペラを用いた場合の大気圧実験とチャンバー実験（大気圧）での推力比を示す（表 4.1）。

表 4.1 プロペラ（11 inch）の推力比

回転数	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
室内	20.2	44.1167	79.45	125.367	182.017	252.683	335.683	429.05	529.75	645.2	767.217
チャンバー内	15.4	37.9	70.1	109.05	161.65	219.4	283.25	350.1	442.55	539.85	653.25
比	0.76238	0.85909	0.88232	0.86985	0.88811	0.86828	0.8438	0.81599	0.83539	0.83672	0.85145

表 4.1 の室内とチャンバー内の推力の比を見ても分かるように、11 (inch) プロペラでは比が常に 1 でないので壁面の影響を受けており、室内実験での推力より低い値が出ている。これは、チャンバー内実験ではプロペラが密閉空間の空気を循環させている影響によりプロペラの上面と下面での圧力差が小さくなったため推力が低いと考えられる。よって、この実験で求まる推力係数は、壁面の影響によって室内実験の推力係数より低いく算出された可能性があり、実際のプロペラの性能より低い値となっている。

4.2 大気密度変化におけるプロペラの性能について

プロペラの性能を示す指標の 1 つである推力係数は圧力計 cc の表示が正しいと仮定して考えると推力係数とレイノルズ数の間に明瞭な関係が見られない。また、大気密度の変化が推力係数に影響を与えていると考えられる（図 4.1）。

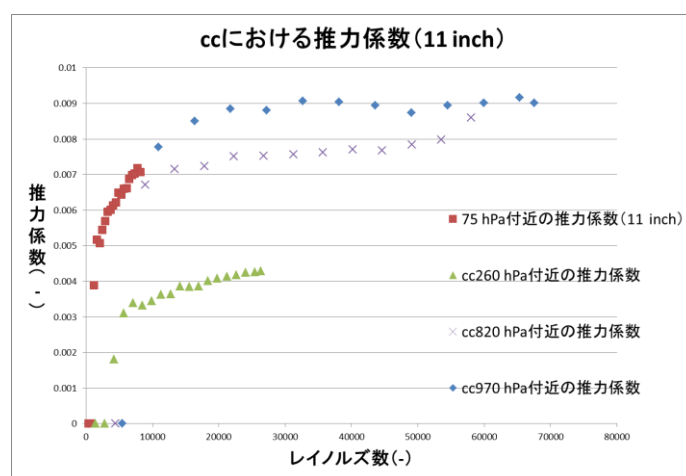


図 4.1 プロペラ（11 inch）の cc における推力係数とレイノルズ数

一方、圧力計 **pt** が正しいと仮定すると、推力係数とレイノルズ数の関係は明瞭で、依存して変化していることになる。また、レイノルズ数 $\sim 10^4$ 以下では推力係数低下が顕著になっている（図 4.2）。以上より、本実験条件の範囲内では、**pt** 圧力計が傾向を正しくとらえていると結論する。

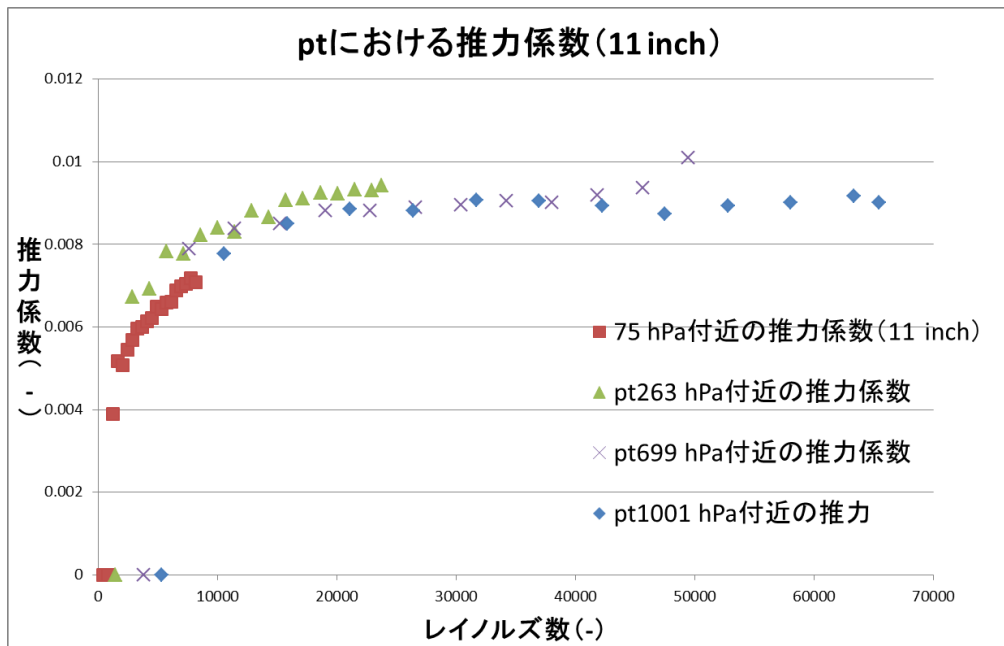


図 4.2 プロペラ（11 inch）の **pt** における推力係数とレイノルズ数

4.3 高度変化による電力変化

高度が上昇すれば空気密度が減少するので空気抵抗が減少する。よってモーターのトルクが小さくなり電力が小さくて済む。これより空気密度が低い場所でのみ飛行させる場合はバッテリーの小型化が可能である。また、プロペラを大きくさせてもバッテリーを変えなくてよい。

4.4 プロペラの直径変化による推力維持について

プロペラの推力維持としてはディスク直径を変化させるだけでは推力維持ができないことになる。それは、チャンバー実験より明らかである。

4.2 節のように、**pt** 圧力計が正確であると考えてよいならレイノルズ数減少が推力係数低下を引き起こしている。よって推力係数を維持するにはプロペラのラセン速度を上げればよい。そのためにはプロペラの仰角を上げるか、回転数を上げることでこの問題を解決することが可能である。

4.5 推力係数とレイノルズ数の 5000 rpm高度変化

本実験において各プロペラの回転数を 5000 (rpm)に固定した場合、各プロペラのサイズに対しての推力係数とレイノルズ数の高度(気圧)条件依存性を以下に示す(図 4.3、図 4.4、図 4.5、図 4.6、図 4.7、図 4.8)。

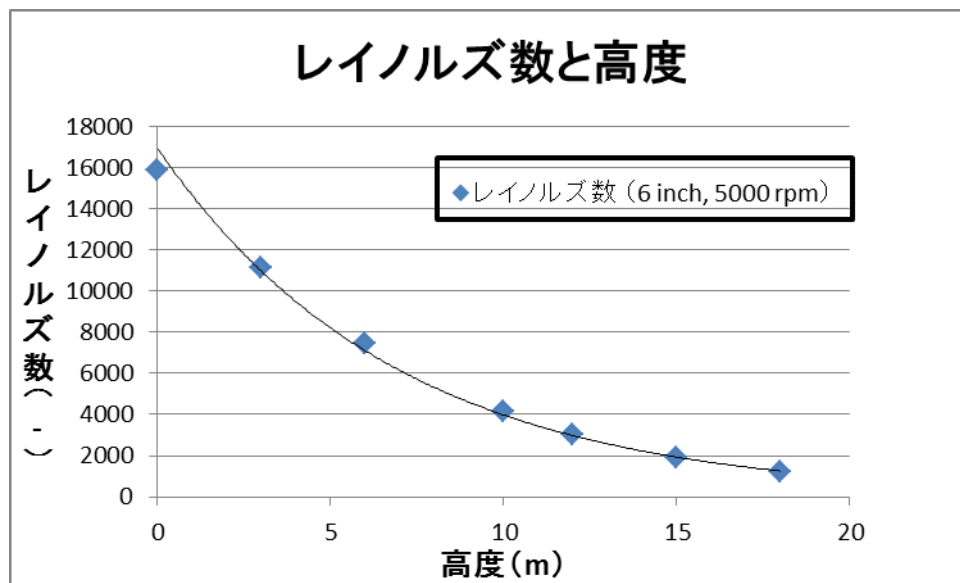


図 4.3 高度変化とレイノルズ数の関係(6 inch)

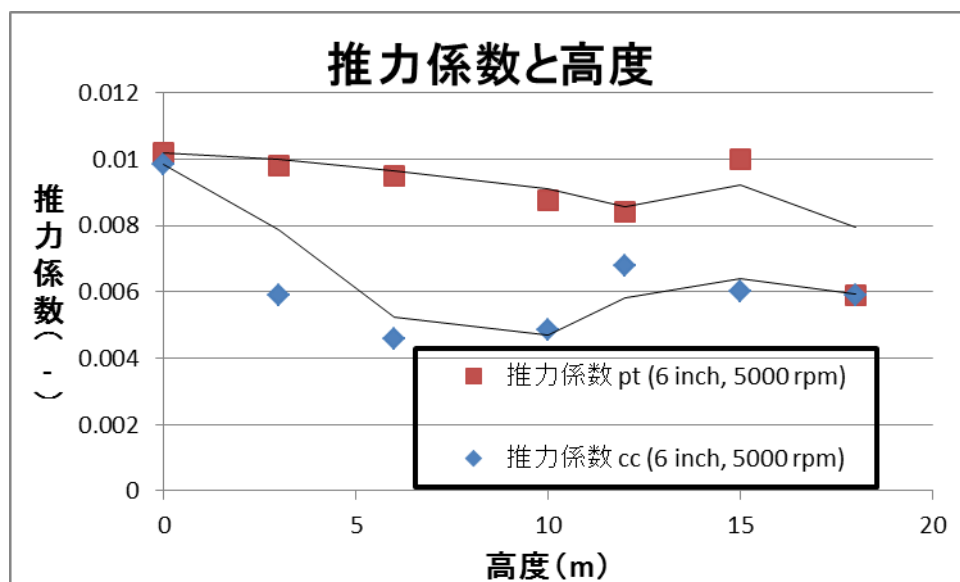


図 4.4 高度変化と推力係数の関係(6 inch)

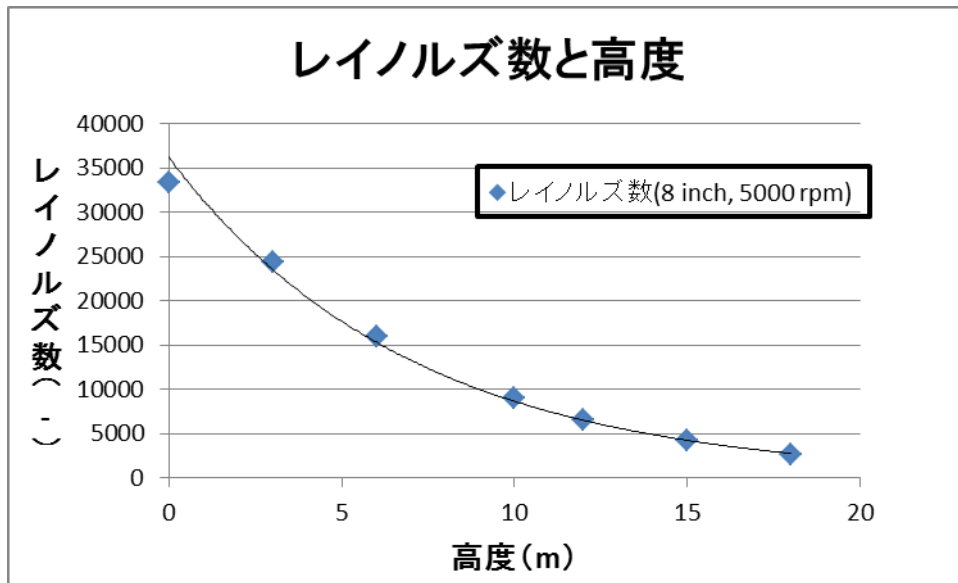


図 4.5 高度変化とレイノルズ数の関係 (8 inch)

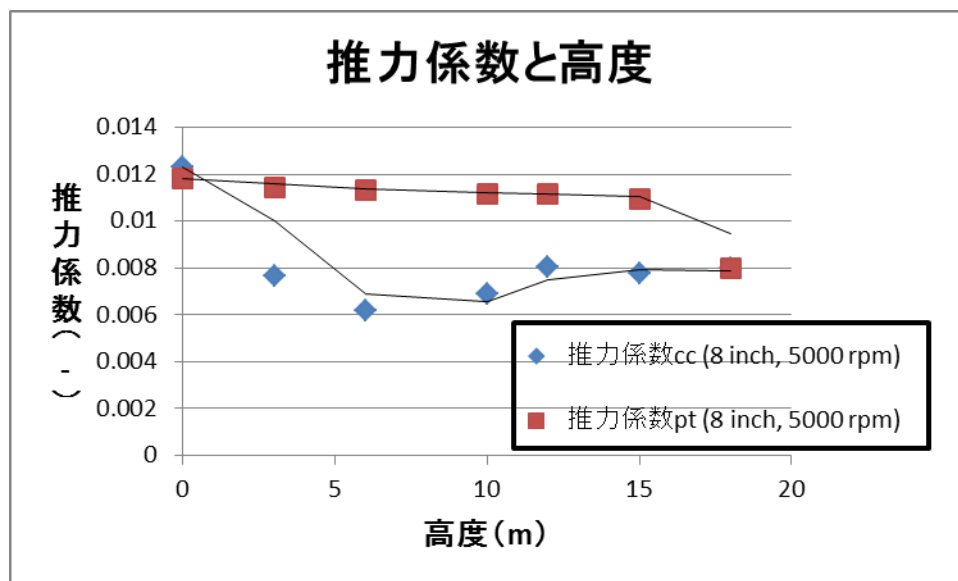


図 4.6 高度変化と推力係数の関係 (8 inch)

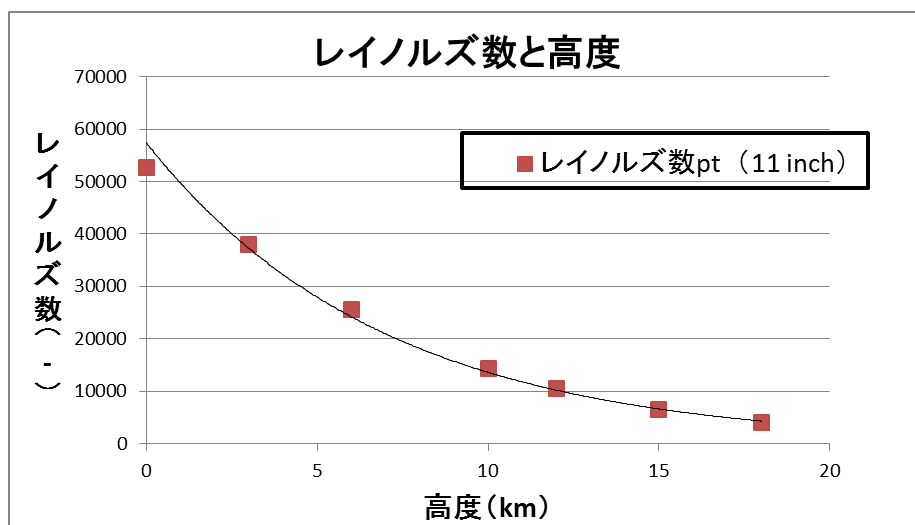


図 4.7 高度変化とレイノルズ数の関係(11 inch)

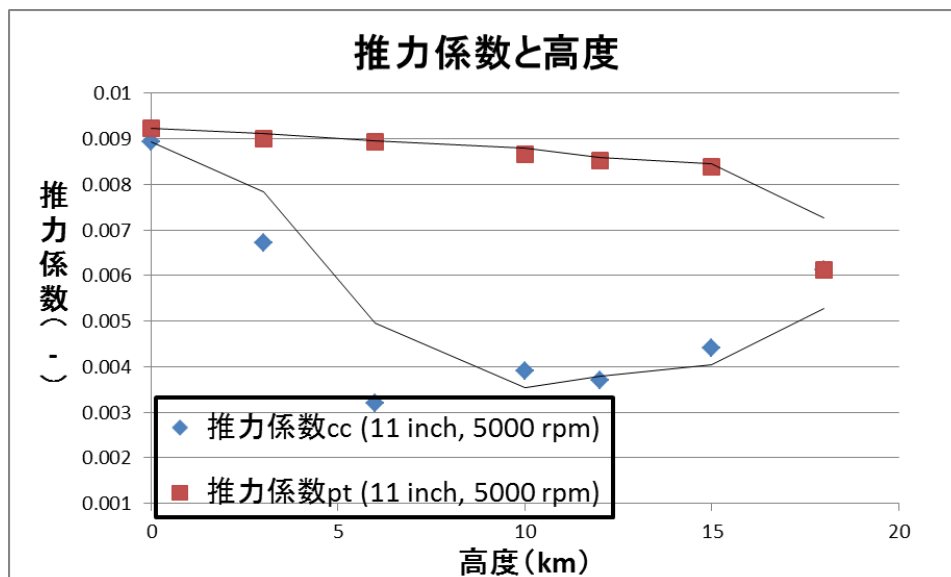


図 4.8 高度変化と推力係数の関係(11 inch)

図 4.4 と図 4.6, 図 4.8 で推力係数 pt の変化が異なる理由は、図 4.4 はプロペラのディスク直径が 6 inch と小さいので推力を電子ばかりが正確に測定できなかったと考えられる。

これらの結果より高度が上がれば大気密度は下がるので動粘性係数の式 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ より動粘性

係数(ν)が大きくなる。レイノルズ数の式 $Re = \frac{V_t L}{\nu}$ に動粘性係数 ν の式を代入すると、 $Re = \frac{\rho V_t L}{\mu}$

となる。粘性係数 μ は理科年表[3]より大気圧より数十 Pa 付近まで一定である。よってレイノルズ数 Re 変化は大気密度 ρ の変化に依存する。また、大気密度と高度の関係式は $\rho = \rho_0 e^{-\frac{Z}{H}}$ (ρ_0 : 大気圧の密度, Z : 高度, H : スケールハイト)なのでレイノルズ数 Re の式に代入すると、

$Re = \frac{\rho_0 V_t L}{\mu} e^{-\frac{z}{H}}$ となる。よってレイノルズ数 Re は高度変化に伴い指数関数的に変化する。こ

れよりラセン速度一定のとき、各プロペラでの高度変化によるレイノルズ数 Re 変化は理論式から求めることができる。よって、どの高度でレイノルズ数 $Re = 10000$ を下回るのかを理論的に考えることができ、それにより推力係数を維持できる高度がほぼ求まる。

圧力計は図 4.6, 図 4.8 より圧力計 cc では高度変化に伴い推力係数変化は桶型に変化しておりレイノルズ数 Re が減少しているが推力係数が増加する奇妙な変化をしている。圧力計 pt では高度上昇に伴い推力係数 pt は単調減少している。よって 4.2 節のように圧力計 pt の方が正確であると考え妥当性がある。

6 inch より 11 inch の方が推力係数 pt と高度のグラフの値が顕著なのは、ディスク直径 D が大きいことが考えられる。それは、プロペラのラセン速度の式 $V_t = \sqrt{V^2 + (2\pi r n)^2}$ より 11 inch の方が r (75%のスパン長 r) が大きいので速度が速くなる。また、回転数 $n(1/s)$ 、あるいはプロペラの弦長 (幅) を 2 倍するとレイノルズ数 Re は 2 倍になる。しかし、高度 18 (km) で 5000 (rpm) のときレイノルズ数(Re) = 5000 程度であり、たとえ回転数を 2 倍しても 10000 (rpm) でレイノルズ数 $Re = 10000$ 程度にしかならない。よって、高度 18 (km) 以上または火星で使用する場合には本実験で用いたプロペラでは飛行に必要な推力を得ることは不可能であり、それ専用のプロペラを作る必要がある。

第5章 結論

本研究は、高高度や火星での SUAV 運用に向けたプロペラの推力評価を目的として、プロペラについての理論を調査し推力と回転数を計測可能なように専用の推力測定装置を製作した。チャンバーを用いて高度 0 (km)から18 (km)まで 3 (km) 刻みの圧力条件を模擬し、直径 6 (inch), 8 (inch), 11 (inch)のドローン用市販プロペラを用いて推力測定を実施した。今回の実験で図 4.2 より推力係数は指数関数的に変化している。また、大気圧を変化させた実験から、ラセン速度が一定のときのレイノルズ数変化はチャンバー実験を行う前に予想することが可能である。また、 $Re < 10000$ を下回ると推力係数の急激な減少を招くことが実験より得られた。本実験に用いた宇宙実験用の高真空対応の圧力計では大気圧から数十 hPaの低真空域を正確に測定できているのか疑問であり、大気圧から数十 hPaの帯域が得意な圧力計を製作システム内に加える必要がある。

謝辞

本研究に取り組むにあたり、高知工科大学 山本 真行 教授には筆者が新規提案した研究テーマにも関わらず、ご理解くださり実験に際して適切なお助言、ご指摘を頂いたことに感謝いたします。

高知工科大学 システム工学群 齊藤 大晶 助教 修士2年 反町 玲聖 氏には大気圧時の実験に際してお手伝いいただき大変助かりました。また理論やデータ解析で適切なアドバイスを頂き感謝申し上げます。修士1年 平塚 丘将 氏にはモーターの制御手法のアドバイスやチャンバーの使用法の指導や実験に際しての指導をしていただき感謝しております。修士2年 齊藤 耕 氏には中間発表練習、論文執筆時に適切なアドバイスを頂き、感謝しています。同輩の大塚 祐樹 氏には実験を手伝っていただき感謝申し上げます。山本研究室のメンバーにはご迷惑をかけた部分もあると思いますが心よく接して頂きありがとうございました。最後に、大学生活を支えてくれた両親、家族、親せきの皆さんに感謝申し上げます。

参考文献

Web サイト :

[1] ドローン専門ページ, ドローン (無人飛行機) の歴史

<https://recreation.pintoru.com/dro-ne/the-history-of-the-drone/>, 2018 年 1 月 27 日閲覧

[2] dji spreading wings s1000

<https://www.dji.com/spreading-wings-s1000>, 2018/02/06 日閲覧

論文 :

・大塚光, 中村拓磨, 桐林星河, 永谷圭司, 吉田和哉, 高度変化に伴う回転翼型小型 UAV 用プロペラの推力低下の評価, 2013-JSASS-OTK, 2013.

・三輪善裕, 災害用無人テイルローター機の研究, 高知工科大学, 修士論文 2011 .

・大山聖, 永井大樹, 得竹浩, 藤田昂志, 安養寺正之, 豊田裕之, 宮澤優, 米本浩一, 岡本正人, 野々村拓, 元田敏和, 竹内伸介, 鎌田幸男, 大槻正嗣, 浅井圭介, 藤井孝蔵, 高高度飛行試験による火星飛行機の空力データ取得, JAXA Research and Development Report, JAXA-RR-16-008, pp.69-80, 2017/03/14.

書籍 :

・東 昭, 航空工学 (I) , 機械工学選書, pp139-212, 1989.

[3] 国立天文台, 理科年表, pp332-335, pp385-397, 2018.

[4] 公益社団法人 日本航空技術協会, 航空工学講座 6 プロペラ, pp1-20, 2014.

付録

6, 8, 11 inch プロペラの推力と回転数の計測データを、表 1 から 9 に記載する。回転数の単位は(rpm)、高度の単位は(km)、推力の単位はである(g)(gf)。

表 1 大気圧実験 (6 inch)

高度	回転数	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	9850
0	推力	0	1.8	3.8	7.4	11.1	17.3	23.6	30.5	38.8	48.4	60.1	71.2	84.6	98.5	113	130	145	166	184	198
0	推力	0	1.7	4.1	7.3	11.2	16.2	22.5	29.8	36.8	44.7	54.4	66.1	79.4	95.5	111	128	145	160	181	196.5
0	推力	0	1.9	3.9	7.1	11.2	15.9	22.6	29.7	37.6	46.1	55.3	67.5	78.8	94.9	112	127	145	160	181	195.6
0	推力	0	2.0	4.4	7	11.2	16.2	22.2	28.5	37.1	45.8	55.5	66.5	79.1	92.6	107	124	140	160	178	189.9
0	推力	0	2.0	3.9	7.4	11.5	16.7	22.0	28.7	36.9	47.2	56.3	68.5	80.4	92.7	107	123	140	157	175	187.4
0	推力	0	1.7	3.9	7.1	11.3	16.5	21.7	27.9	36.6	45.8	55.6	66.0	77.7	92.7	106	123	139	160	181	186.6

表 2 チャンバー実験 (6 inch, cc)

高度	回転数	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000
0	推力	0	0	3.4	6.5	10.2	15.3	19.7	27.2	34.2	43.4	52.9	63.7	73.7	85.5	100	116	130	141	158	177.7		
0	推力	0	0	3.6	6.3	10.2	15.4	21.5	26.2	35.4	43	52.8	62.6	75.5	84.2	104	115	133	145	164	184.5		
3	推力	0	0	1.4	2.6	4.1	6	8.3	11.2	14.3	18.1	21.8	26.5	32.2	36.3	42.3	48.2	54.7	60.9	67.8	75.3	84.9	
6	推力	0	0	0	1.25	2.2	2.8	4.2	5.7	7.3	9.4	11.6	14.4	16.4	19	21.3	24.8	28.2	29.6	37	42.7	49	
10	推力	0	0	0	0.8	1.2	1.9	2.6	3.2	4.2	5.5	6.8	8.4	9.8	11.7	13.2	15.1	18.3	19.9	22.2	24.4	28.3	29.9
12	推力	0	0	0.6	1	1.5	2.3	2.8	3.8	4.5	5.7	6.6	7	8.4	9.8	11.1	12.6	14.7	16.8	19.1	21.5	23	24.9
15	推力	0	0	0.2	0.5	0.8	1.3	1.6	2	2.7	3.2	4.2	5	5.9	6.7	7.7	8.8	10.1	11.2	12.7	14.1	15.8	
18	推力	0	0	0	0	0.5	0.6	1.1	1.2	1.6	2	2.6	3	3.4	4.1	5	6.1	6.9	8	9.1	10.1	10.9	12.3
18	推力	0	0	0	0	0.5	0.4	0.9	1.2	1.6	1.9	2.4	3.1	3.7	4.2	4.9	5.8	6.6	7.7	9	9.8	10.5	12.2
18	推力	0	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	1.2	1.4	1.9	2.3	2.7	3.4	3.9	4.7	5.7	6.6	7.2	8.2	9.4	10.4	11.5

表 3 チャンバー実験 (6 inch, pt)

高度	回転数	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10200	11000
0	推力	0	0	3.4	6.5	10.2	15.3	19.7	27.2	34.2	43.4	52.9	63.7	73.7	85.5	100	116	130	141	158	177.7	181.4	
0	推力	0	0	3.4	6.5	10.2	15.3	19.7	27.2	34.2	43.4	52.9	63.7	73.7	85.5	100	116	130	141	158	177.7	181.4	
3	推力	0	0	2.3	5.1	6.9	10.3	13.8	18.9	23.8	30.1	35.3	41.6	52.5	60.4	67.5	77.4	89.2	95.8	113	123	129.8	
6	推力	0	0	1.4	2.7	4.6	6.1	9.1	11.9	14.3	19.6	22.8	28.3	32.5	39.2	44.6	51.2	58.9	66.1	71.3	81.1	88	
10	推力	0	0	0	1.4	2.2	3.2	4.9	6.2	8.1	10.1	12.4	15.2	18.2	20.6	24.3	27.6	31	35.5	40.4	44.6	48.5	50.4
12	推力	0	0	0	1.1	1.6	2.3	3.5	4.3	5.7	7.1	7.6	10.3	12.4	14.7	16.4	17.2	21.9	26	28.6	31.4	34.7	37.5
15	推力	0	0	0.5	0.9	1.3	1.9	2.6	3.3	4.2	5.3	6.3	7.5	9	9.9	11.8	13.6	14.8	17.2	18.8	21.4	22.5	
18	推力	0	0	0	0	0.5	0.6	1.1	1.2	1.6	2	2.6	3	3.4	4.1	5	6.1	6.9	8	9.1	10.1	10.9	12.3
18	推力	0	0	0	0	0.5	0.4	0.9	1.2	1.6	1.9	2.4	3.1	3.7	4.2	4.9	5.8	6.6	7.7	9	9.8	10.5	12.2
18	推力	0	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	1.2	1.4	1.9	2.3	2.7	3.4	3.9	4.7	5.7	6.6	7.2	8.2	9.4	10.4	11.5

表 4 大気圧実験 (8 inch)

高度	回転数	750	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000
0	推力	4.4	6.1	16	28	43.9	65.5	90.9	122	152	188	236	281	328	380	455	505
0	推力	4.1	6.5	16.5	28.8	45.4	63.9	87.4	114	144	184	220	263	310	364	414	481
0	推力	4.2	7.4	16.8	28.7	45.6	63.4	87	114	144	184	220	263	311	359	422	478
0	推力	4.8	7.5	15.1	27.1	43.7	64	86.2	111	143	179	217	262	308	359	417	476
0	推力	4.2	6.8	15	27.5	42.6	62.6	83.7	110	141	175	209	254	310	354	406	463
0	推力	4.34	6.86	15.9	28	44.2	63.9	87	114	145	182	220	265	313	363	423	481

表 5 チャンバー実験 (8 inch, cc)

高度	回転数	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500
0	推力	0	6	14	25.2	41	58.3	86.5	103	133	162	195	245	283	330	394	422					
0	推力	0	6	14.4	25.3	38.3	56.1	79.4	104	131	166	202	243	281	339	382	434					
3	推力	0	0	6.3	11	16	25.8	36.3	47.3	59.8	74.1	88.3	109	131	155	173	202	227	252			
6	推力	0	0	2.8	5	8.6	12.8	18.6	24.2	31.1	39.4	46.5	56.2	68.6	78.9	90.3	103	119	133	148	155	
10	推力	0	0	1.8	3.1	5.3	7.5	11.7	15.2	20.7	24.8	30.8	37.4	42	49.6	58.8	64.1	75.7	84.7	93	107	
12	推力	0	0	1.6	2.8	4.6	6.7	9.7	12.7	15.2	21.2	26.3	31.1	36.9	42.8	47.8	54.4	64	73.6	81.5	93.2	
15	推力	0	0	0.9	1.8	2.7	3.9	5.5	7.8	10	12.9	15.3	19.7	22.6	27.2	30.7	34.9	40.2	45.8	50.2	57.5	62.3
18	推力	0	0	0.7	1.1	2	2.7	3.5	5.1	6.8	8.5	10.4	12.6	14.3	17.4	20.5	23.6	26.5	31.1	34.9	38.5	43.3
18	推力	0	0	0.7	1.1	1.9	2.7	4.2	5.2	6.5	8.1	10.3	12.9	15.1	17.5	20.6	23.5	27	30.3	35.3	38.7	43.6
18	推力	0	0	0.7	1	1.8	2.7	4.2	5.1	6.8	8.2	10.4	12.6	15.2	17.2	21.1	23.5	26.9	31.2	34.8	39.5	44.8

表 6 チャンバー実験 (8 inch, pt)

高度	回転数	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500
0	推力	0	6	14	25.2	41	58.3	86.5	103	133	162	195	245	283	330	394	422					
0	推力	0	6	14.4	25.3	38.3	56.1	79.4	104	131	166	202	243	281	339	382	434					
3	推力	0	4.7	10	17.9	27.9	41.7	57.7	71.9	88.9	111	138	163	193	236	262	301	333				
6	推力	0	0	6.3	11	16	25.8	36.3	47.3	59.8	74.1	88.3	109	131	155	173	202	227	252			
10	推力	0	0	3.1	5.9	9.7	13.2	19.3	26.4	33.5	40.7	48.6	58.2	68.8	80.1	95.6	108	124	143	158		
12	推力	0	0	2.3	3.5	6.4	10.2	13.4	18.8	23.9	29.8	38.1	42.2	50.7	60.7	69.6	76.4	88.9	104	116	124.6	
15	推力	0	0	1.2	2.4	4.1	6	7.9	11.5	14.2	18.3	24.1	27.3	32.7	38.7	44.5	48.9	56.5	61.4	72.6	82	
18	推力	0	0	0.7	1.1	2	2.7	3.5	5.1	6.8	8.5	10.4	12.6	14.3	17.4	20.5	23.6	26.5	31.1	34.9	38.5	43.3
18	推力	0	0	0.7	1.1	1.9	2.7	4.2	5.2	6.5	8.1	10.3	12.9	15.1	17.5	20.6	23.5	27	30.3	35.3	38.7	43.6
18	推力	0	0	0.7	1	1.8	2.7	4.2	5.1	6.8	8.2	10.4	12.6	15.2	17.2	21.1	23.5	26.9	31.2	34.8	39.5	44.8

表 7 大気圧実験 (11 inch)

高度	回転数	750	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
0	推力	14.7	21.2	46.6	82.7	126	184	259	338	422	514	624	730
0	推力		21.2	45.4	81.9	126	185	256	342	433	535	656	770
0	推力	15.1	19.2	43.7	78.6	125	182	255	337	432	538	652	780
0	推力	10.3	20.6	45.7	82.1	129	187	258	337	438	538	660	785
0	推力	10.2	19	42.6	78.8	126	182	251	332	430	529	644	780
0	推力	11.3	20	40.7	72.6	121	173	237	327	420	525	635	758

表 8 チャンバー実験 (11 inch, cc)

高度	回転数	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	
0	推力	0	14.1	37.6	70.5	108	163	218	288	336	443	542	664	681								
0	推力	0	16.7	38.2	69.7	110	160	221	279	364	442	538	642	692								
3	推力	0	7.3	18.4	34.4	56.7	82.3	110	148	190	233	282	331	393	468	495						
6	推力	0	0	2.6	9.9	15.2	24.1	33.7	45	57.4	74.3	88.9	109	130	152	177	209	233	255			
10	推力	0	0	2.1	6.4	10.9	15.4	21.7	29.9	37.9	49.7	59.9	71.4	87.3	103	120	137	158	178	191		
12	推力	0	0	2	6.5	10.5	14.9	21.1	28.1	37.9	48	57.9	73.3	84.8	104	118	135	156	175	188		
15	推力	0	1.5	2.2	3.2	5.5	8.2	12.6	15.4	22.1	26.1	31	39.7	46.3	55	63.7	74.7	83.9	97.7	108	123.6	
18	推力	0	0	1.3	3.3	4.9	7.6	10.8	14.4	18.2	22.9	28.4	35.6	40.8	49.4	55	65.6	76.3	87.4	99.1	108.6	
18	推力	0	0	1.3	3.1	4.7	7.4	10.5	14.7	18.8	24	29.2	35.4	42	49.7	58.1	68.3	78.4	86.1	98.4	106.8	
18	推力	0	0	1.3	2.8	4.5	6.8	9.7	13.3	17.1	21.3	26	32.9	38.2	44.7	52.4	61.9	69.9	80	90.9	99.4	

表 9 チャンバー実験 (11 inch, pt)

高度	回転数	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	
0	推力	0	14.1	37.6	70.5	108	163	218	288	336	443	542	664	681								
0	推力	0	16.7	38.2	69.7	110	160	221	279	364	442	538	642	692								
3	推力	0	10.9	26.1	47	76.2	110	151	198	253	311	385	466	589								
6	推力	0	6.8	9.1	31.1	49.8	72.4	98.9	135	174	208	249	306	360	423	481						
10	推力	0	3.5	8.1	16.3	25.3	38.5	53.5	69.2	92.8	113	143	171	203	235	273	310	338				
12	推力	0	0	2.8	10.6	17.5	26.8	38.1	50.2	65.2	81	98.2	119	143	170	199	223	260	275			
15	推力	0	0	2	6.5	10.5	14.9	21.1	28.1	37.9	48	57.9	73.3	84.8	104	118	135	156	175	188		
18	推力	0	0	1.3	3.3	4.9	7.6	10.8	14.4	18.2	22.9	28.4	35.6	40.8	49.4	55	65.6	76.3	87.4	99.1	108.6	
18	推力	0	0	1.3	3.1	4.7	7.4	10.5	14.7	18.8	24	29.2	35.4	42	49.7	58.1	68.3	78.4	86.1	98.4	106.8	
18	推力	0	0	1.3	2.8	4.5	6.8	9.7	13.3	17.1	21.3	26	32.9	38.2	44.7	52.4	61.9	69.9	80	90.9	99.4	

宇宙実験用真空装置の図面とエレキ系統図を図 1, 2 に示す。

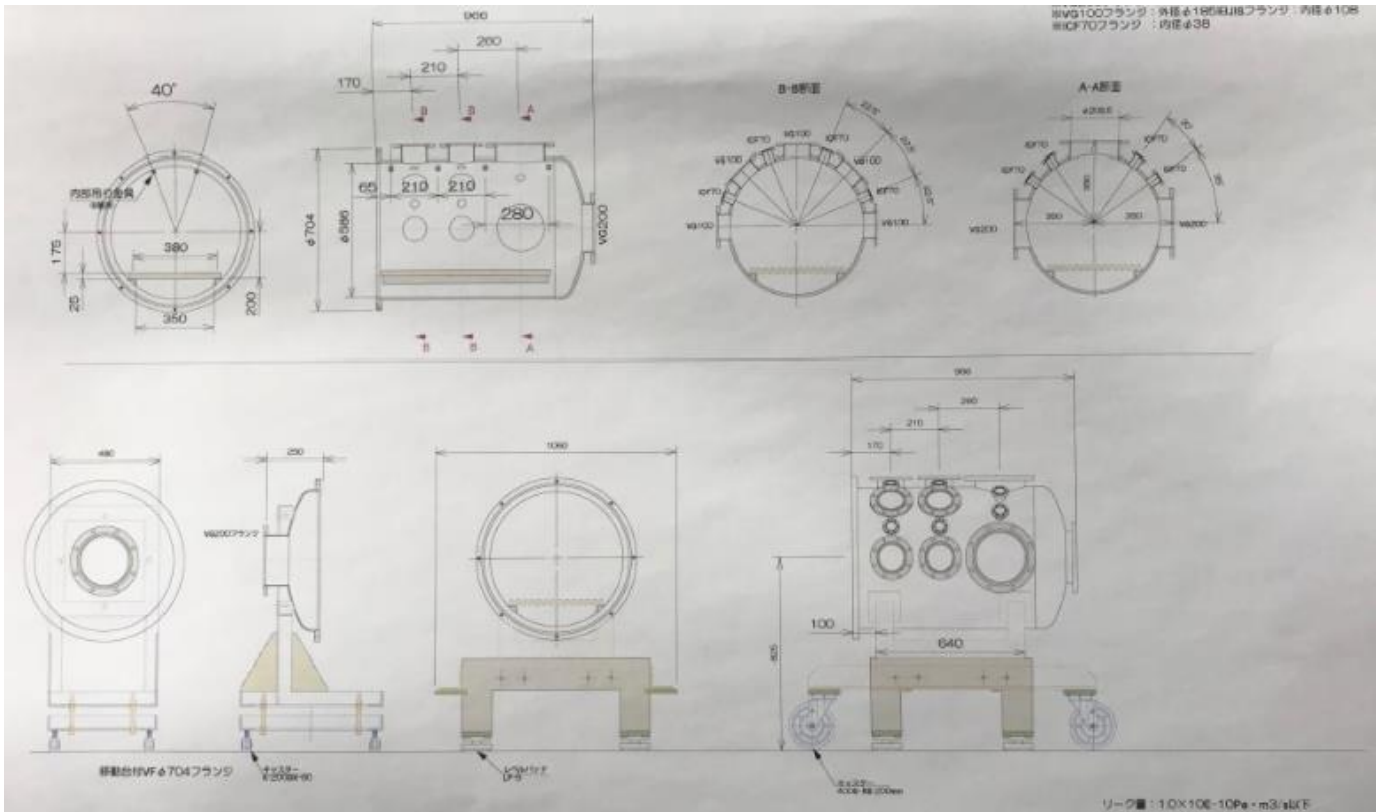


図 1 宇宙実験用真空装置の図面

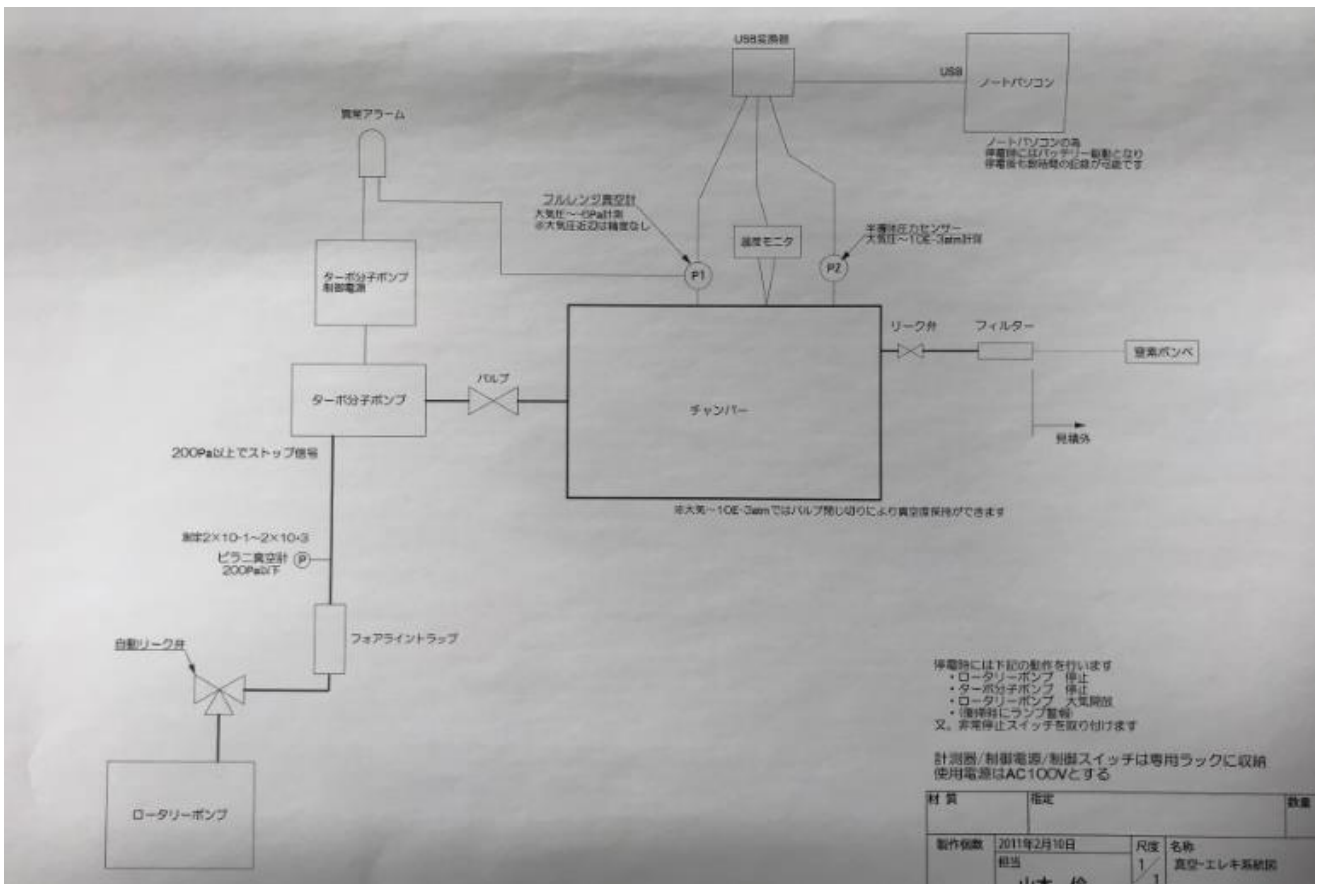


図 2 宇宙実験用真空装置のエレキ系統図

実験に使用した圧力計を表 10 に示す。

表 10 実験に用いた圧力計

圧力計	型式
コールドカソード・ピラニゲージ	M-360CP
デジタル圧力指示計	MODEL PZ-200