

低レイノルズ数流れでの プロペラブレード面の圧力測定と推力・トルク特性 新井啓之*¹ , 平岡克己*²

Pressure Measurement on Propeller Blade Surface and Thrust-Torque Characteristics in Low Reynolds Number Flow Field

by

Nobuyuki ARAI and Katsumi HIRAOKA

(Received on March 31, 2004 & accepted on June 21, 2004)

Abstract

Since the propeller is one of the useful thrust devices even today, understanding the behaviors of a propeller and optimization of propeller geometry are important. By referring to the pressure distribution on a propeller blade surface, the geometry of the propeller was designed and optimized, and the suitable state of operation was determined. Four types of propellers were made and aerodynamic performances were investigated by the direct measurement of the surface pressure of a rotating blade in a wind tunnel experiment for a low Reynolds number flow field. In addition, in order to compare with the results of the pressure measurement, thrust and torque were measured using a six-component force balance and torque meter, respectively. The relationships between propeller efficiency, thrust coefficient, and torque coefficient were obtained for several propeller types.

Keywords: Propeller, Thrust, Torque, Pressure Distribution, Wind Tunnel Experiment

1. 諸言

航空機の推進機構の一つとして用いられているプロペラは、特にマッハ数 0.5 以下で飛行する場合には、非常に効率的であるうえ、メンテナンスの点でも他の推進機構より優れている。プロペラが人力飛行機や高高度プラットフォームとしての飛行船に用いられる場合、レイノルズ数が 5.0×10^5 以下という低い流れが想定される。このような低レイノルズ数流れでは、層流剥離などによる抵抗の増加などが考えられ、高効率のプロペラを設計する上で大きな障害になると考えられる。

また、プロペラブレードの設計や性能に関する研究はこれまで数多く行われてきたが、プロペラブレードの開発・設計の元となる詳細な圧力分布データは、ほとんどない。

そこで、低レイノルズ数流れでのプロペラ形状の最適化についての研究¹⁾を参考にして、ソリディティを一定とした形状の異なる複数のプロペラブレードを製作し、プロペラブレード表面の圧力分布を計測して推力・トルクを求め、6分力天秤で測定した推力やトルク計で測定したトルク、プロペラ後流の流速分布の測定値から求めた推力などと比較し、プロペラ表面の流れや効率について考察した。

2. プロペラの設計と製作

本研究では、4種類のプロペラを製作した。Fig.1-a)に示した

Prop00 ブレードは、4つのプロペラの中で最も性能を重視して設計した。このプロペラは、Adkins らによるプロペラの最適設計理論²⁾を用いて設計されている。この理論では、プロペラ後流の半径方向で一様な螺旋流を仮定しディスク面でのエネルギー損失を最小とさせる古典的な概念を用いて、プロペラ効率を高めている。この方法ではあらかじめ定めた断面形状に対して各半径位置での翼弦長と捻り角が Fig2 の通り決定される。Fig.1-b)で示した Prop01 ブレードは、ソリディティ、捻り角、およびスパン長は Prop00 と同一とし、平面形状を矩形にしたものである。Fig.1-c)に示した Prop02 は、Prop01 と同様に、Prop00 のソリディティ、捻り角、スパン長は同一とし、ブレード端とブレード根でそれぞれ Prop00 の最大と最小の翼弦長としたものである。Fig.1-d)に示した Prop03 は、Prop02 とは逆に、ブレード端とブレード根でそれぞれ Prop00 の最小と最大の翼弦長としたものである。

プロペラの設計にあたり以下の事項を考慮した。

- 1) 広範囲の迎え角において高揚力な翼型を用いる。このため抵抗もある程度大きい。
- 2) 圧力測定のためには十分な面積が必要であり、翼弦長を長くする。
- 3) 低レイノルズ数流れでの空力特性を調べるために、レイノルズ数はプロペラブレードの半径方向の 80%位置で 10^5 以上とする。

設計に用いた共通パラメータは以下の通りである。

一様流速 :	13m/s
回転数 :	550RPM

* 1 情報処理研究教育施設 非常勤助手
* 2 工学部航空宇宙学科 教授

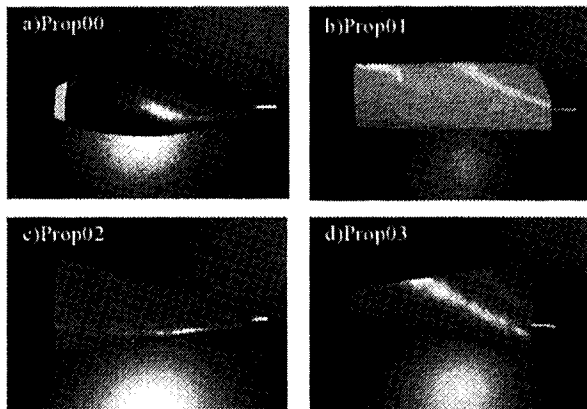


Fig.1 Propeller blades

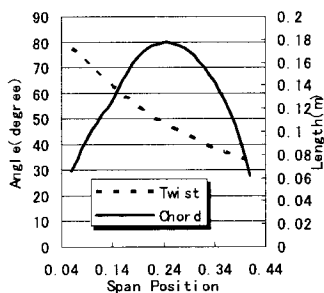


Fig.2 Twist angle and Chord length

- プロペラ枚数： 2 翅
 翼型断面： FX63-137
 プロペラ直径： 0.84m
 ハブ高さ： 0.060m
 最大翼弦長： 0.177m (Prop01 は 0.1353m)
 最小翼弦長： 0.061m (Prop01 は 0.1353m)

3. 実験装置

風洞内で回転中のプロペラブレード表面の圧力を測定するために、風洞の測定部内にプロペラ駆動装置を設置した。利用した風洞は航空宇宙学科のゲッチング型低速風洞装置である。

駆動部分と測定関連装置の構成は、以下に示した通りであり、これらは6分力天秤のストラット上に設置した。

- A) AC モーター： 4 極・出力 400W・最大回転数 1,440RPM
- B) 回転センサー： 赤外線 LED とフォトセンサーで構成、ローパスフィルター付き
- C) 圧力センサー： 小型シリコンセンサー
測定レンジ ±1kPa
- D) スリップリング： 40 チャンネル
- E) トルク計： 最大許容トルク 5.0Nm

Fig.3 に、記録関連の装置を含めた測定装置全体を表した。ブレード表面の圧力はプロペラ内部の真鍮管とシリコンチューブを通して回転軸上に置いた圧力センサーに伝わるようになっている。センサーはプロペラと共に回転するため、出力信号は、スリップリングを通して回転系から非回転系へと伝達されている。

プロペラの回転数は、回転軸脇の回転センサーからのパルス信号をユニバーサルカウンターで測定している。モーターの回

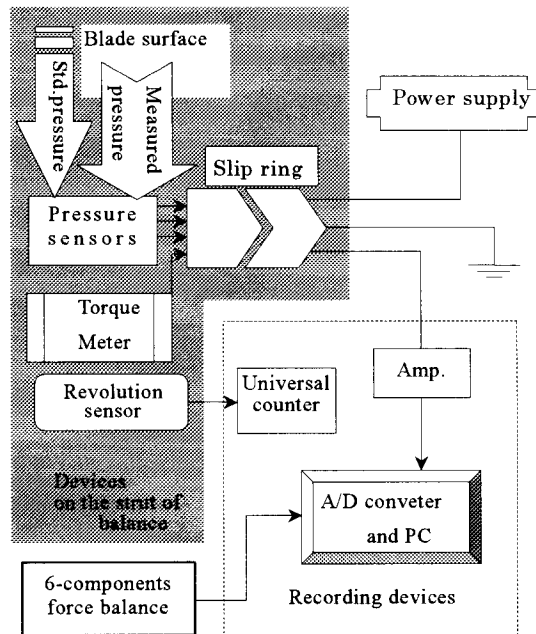


Fig.3 Measurement system

転数は手で調整している。

4. 実験方法

はじめに、使用する圧力センサーの較正について説明する。風上方向に向けた全圧管をセンサーに繋ぎ、測定された電圧値とアルコールマノメータとピトー管で測定した圧力を対応させた。圧力センサーは4つで、ノーズコーン直後に設置されている。プロペラブレード表面で測定される圧力は、Fig. 4 に示すように、プロペラ表面に挿入されたアルミニウム管とハブまで通されたシリコンチューブを通して圧力センサーの測定ポートに伝達される。アルミニウム管の外径は1.2mmで、内径は1.0mmである。センサーの出力はブレード表面圧力と標準圧力（大気圧）の差圧である。ブレード表面圧力はプロペラに埋めこんだ測定管から、標準圧力はノーズコーン先端からノーズコーンと共に回転する管を風洞外に延ばして、大気圧をセンサーの標準圧力ポートへと伝える機構を設けている。

プロペラブレードを回転させた場合、ブレード表面の測定管と圧力センサーまで繋ぐシリコンチューブ内の空気が遠心力の影響を受け、センサー出力値が実際のブレード表面での圧力と異なったものとなる。そこで次のように遠心力補正を行う。

回転中心からの半径方向の座標を z とし、半径 $L(m)$ の管が ω (rad/s) で回転するとき、微小部分 dz に働く遠心力による圧力変化は、 $dp = \rho \alpha dz$ となる。この式に $\alpha = \omega^2 z$ 、 $\rho = p/RT$ を代入して積分し、回転中心での圧力を P_c とすると、位置 $L(m)$ での遠心力の影響を受けた圧力 P は、

$$P = P_c \cdot e^{\frac{\omega^2 L^2}{2RT}}, \quad (1)$$

となる。この式を用いると、Fig.4 に示す本実験装置についての圧力補正式は次のようになる。

$$P_n = P_m \cdot e^{\frac{\omega^2(L^2 - s^2)}{2RT}} + P_s \cdot e^{\frac{\omega^2 L^2}{2RT}}. \quad (2)$$

ここで、 P_m は圧力センサー出力から得られる圧力値、 P_s は標準圧力（風洞外部の大気圧）である。また P_n は遠心力による影響を除去したブレード表面での実際の圧力である。 ω 、 R 、 T 、 L 、 s は、それぞれプロペラの回転角速度、空気の気体定数、大気の絶対温度、中心から測定管までの距離、中心から圧力センサーまでの距離である。

圧力測定を行ったプロペラブレードは Prop00, Prop01, および Prop03 である。ブレード表面上の圧力測定点は、ブレードの翼弦方向には前縁から翼弦長の 5, 10, 15, 25, 35, 42.5, 50, 57.5, 65, 72.5, 80%位置であり、スパン方向には中心から 0.105m から 0.385m の位置まで 1cm 間隔で 29 点である。従って片面での圧力測定点の合計は 319 点である。2 翅のプロペラの片方には負圧面の圧力分布を測定するための孔が開けてあり、他方には正圧面の圧力分布を測定するための孔が開けてある。80%翼弦長点より後縁には、プロペラの強度が弱くなるため、圧力測定用の孔は開けていない。圧力センサーは 4 個であるので、同時に計測できる測定点は 4 点である。測定毎に測定管を移動させ、測定に使用しない穴は、その都度塞いでいる。圧力は、サンプリング周波数 10kHz で測定し、1 点のデータは 2.5 秒間の平均値である。

トルクは、ストラット上のトルク計を用いて測定し、推力は 6 分力天秤で測定した。

プロペラ後流の流速を 1 次元熱線流速計で測定し、運動量理論を用いて推力を求めた。流速はプロペラブレードの最大後縁位置から 1cm, 0.2m, 0.4m の位置で、プロペラの回転中心から半径方向に、0.05m から 0.74m までの位置を 1cm 間隔で計測した。なお、後述の“プロペラ直後”とは、プロペラブレードの最大後縁位置から 1cm 後方位置である。

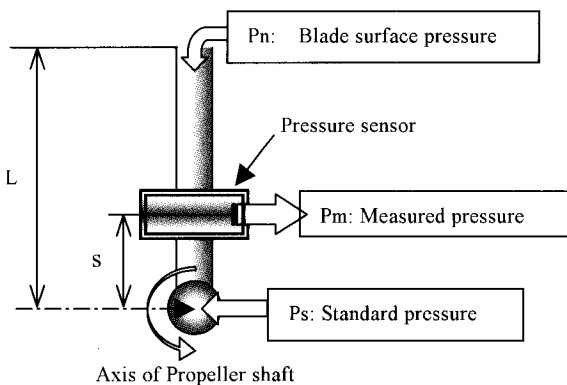


Fig.4 Parameters for centrifugal force correction

5. 実験結果と考察

5.1 圧力測定

5.1.1 圧力測定

一様流速 13m/s、回転数 550RPM で、Prop00 のブレード表面圧力を測定した結果を圧力係数で表した図が Fig.5-a) である。この圧力係数(cp)分布はブレード全面で一様流速 13m/s を基準としたものである。ブレードの取り付け角は Adkins らの理論により求められた最適状態であり、Fig.2 で示した捻り角を基準の 0° としている。風速や回転数と併せて、以後この状態を本論文ではプロペラの最適状態と呼ぶことにする。また、図に示され

る 2 枚のブレードにおいて、左側がブレードの負圧面、右側が正圧面を示している。また 1 枚のブレードでは、上側がブレード端、下側がブレード根側を示しており、右側、左側がそれぞれ前縁、後縁となっている。図で示された領域は実際に計測された領域のみであり、前縁から翼弦長の 5%~80%位置までである。

負圧面での圧力分布は、スパン方向ではブレード端ほど負圧の度合いが高く、一方でブレード端からブレード根まで前縁と後縁付近の圧力分布はあまり変化がない。従って、ブレード端ほど翼弦長方向の圧力変化が大きいのが分かる。また、ブレード端の後縁付近では、一部に急激な圧力勾配が見られるが、これは剥離した流れが再付着しているためと考えられる。負圧面ブレード端での最小 cp 値は -3.78 である。

これに対して、ブレードのハブへの取り付けを迎角が 3° 増加するように取り付けた場合の cp 分布が Fig.5-b)、迎角が 3° 減少するように取り付けた場合の cp 分布が Fig.5-c) である。それぞれ分布の傾向に大きな変化はないものの、迎角 3° 増の状態での負圧面の最小 cp 値が -4.45 であり、最適状態よりも高い負圧が得られている。この差は後縁部分を除くブレード全体でも同じ傾向である。迎角 3° 減では、負圧面の最小 cp 値は -2.66 となっており、ブレード全面においても最適状態に比べ負圧は低い。これら 3 種類のブレードでは、ブレード端後縁付近で流れの剥離と再付着を示すと考えられる急激な圧力勾配が確認された。

Prop01 に対する測定結果は Fig.6-a)~c) である。図は、それぞれ最適状態、最適状態+迎角 3°、最適状態-迎角 3° の場合を示している。Fig.6-a) では、同じ状態の Prop00 に対して、最小 cp の位置がややブレード端から離れているのが特徴的である。最小 cp 値は -3.03 である。最適状態+迎角 3°、最適状態-迎角 3° での圧力分布は、最小 cp 位置が前後に移動する点は Prop00 と同様で、また最小 cp 値がそれぞれ -3.40, -2.50 である。それぞれの cp 値を Prop00 と 01 で比較すると、前者の方がより高い負圧が得られていることが分かる。その反面、推力を生み出すより高い負圧の領域は、ブレード形状の点からその部分の面積が大きい後者の方が有利であることが分かる。また、Prop01 においてもブレード端後縁に、流れの剥離と再付着の発生と考えられる圧力の急勾配が確認される。ただ、Prop00 と比較すると、翼厚や翼弦長といった形状による要因に加えて、より高い負圧が発生した後方で剥離と再付着が発生していると考えられる。

Prop02 に対する測定結果は Fig.7-a)~c) である。これらの図も、それぞれ最適状態、最適状態+迎角 3°、最適状態-3° の場合を示している。高い負圧の発生傾向はこれまでのブレードと同様である。最小 cp 値は、各状態でそれぞれ -4.82, -5.53, -4.04 であった。負圧傾向は Prop00, Prop01 に比べ最も高いものの、ブレード形状から他のプロペラに比べて十分な面積領域が得られていないので推力は大きくはない。

5.1.2 局所圧力係数分布

局所圧力係数は、通常の圧力係数にプロペラの半径方向位置での周速度の違いを反映させたもので、一様流速と周速度の合成速度による動圧を基にした圧力係数である。これにより、各スパン位置での異なる流入速度を考慮した状態での圧力分布の比較が行える。

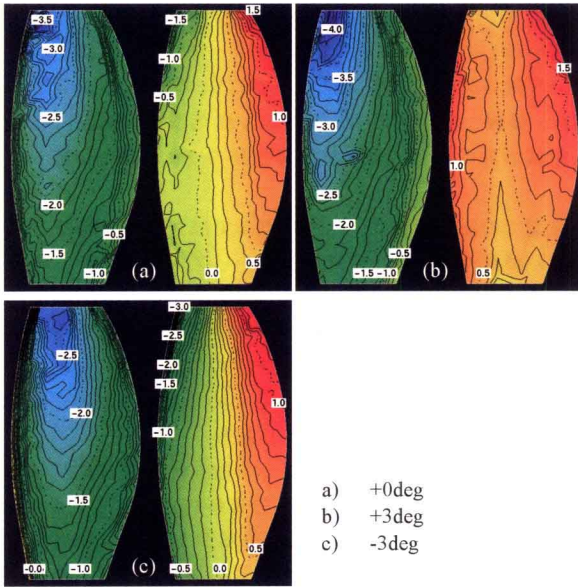


Fig. 5 c_p distribution (Prop00)

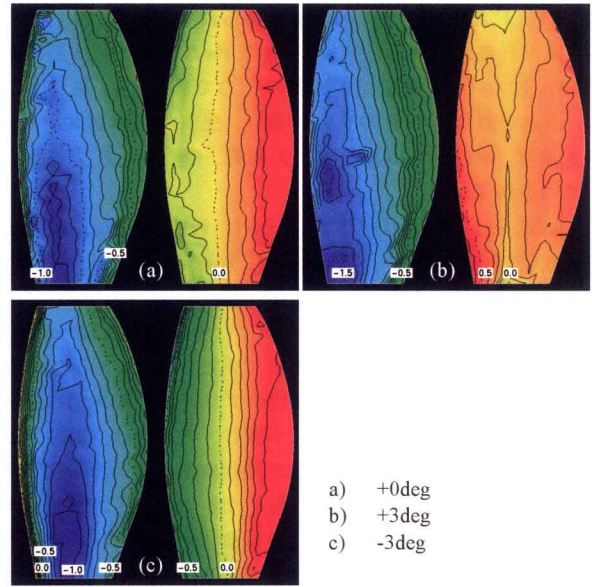


Fig. 8 Local c_p distribution (Prop00)

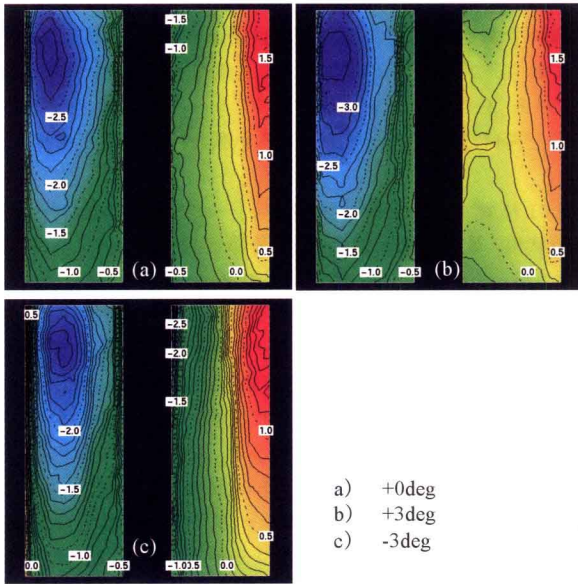


Fig. 6 c_p distribution (Prop01)

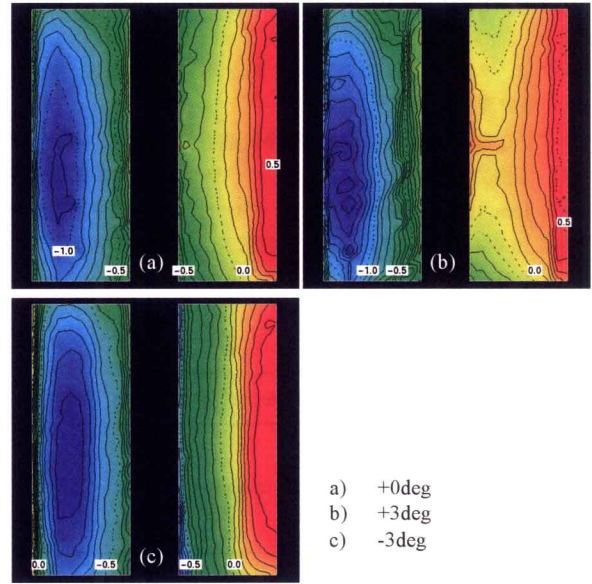


Fig. 9 Local c_p distribution (Prop01)

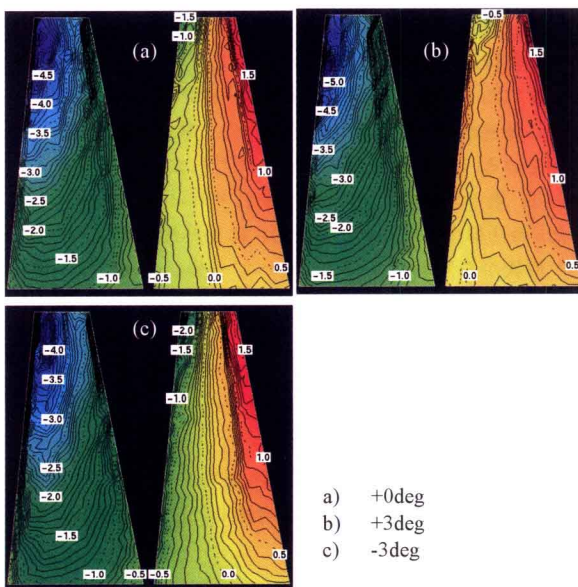


Fig. 7 c_p distribution (Prop03)

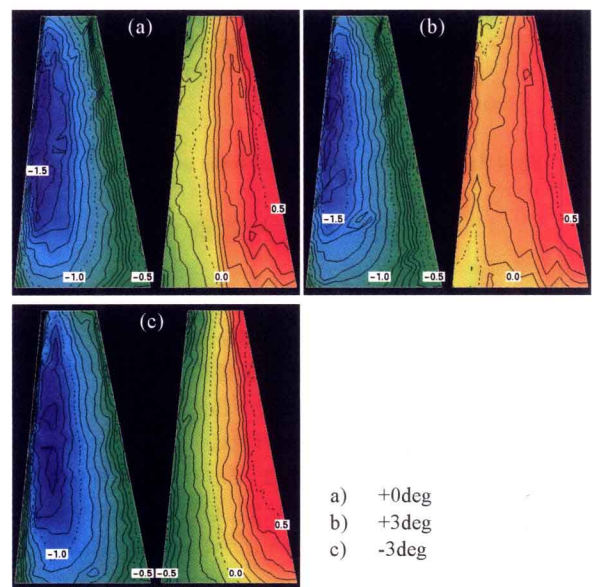


Fig. 10 Local c_p distribution (Prop03)

Fig.8-a)~c)は、それぞれ最適状態、最適状態+迎角3°、最適状態-迎角3°でのProp00での局所圧力係数分布が示されている。3つの状態全てにおいて高い負圧の位置がブレード根に偏っているのが分かり、ブレード端での負圧の発生状況が若干悪い。ただ、この分の推力は減少するものの、ブレード端で発生する抵抗、すなわちトルクの発生も抑えられていることも考えられる。最小局所cp値はそれぞれ、-1.26, -1.57, -1.01である。

Fig.9-a)~c)は、Prop01での局所圧力係数分布である。取り付け角の変化による圧力分布の違いはProp00の場合と変わらない。ただ、ブレード端付近まで一様に高い負圧の領域が分布しており、その発生状態はProp00と大きく異なっている。最小局所cp値はそれぞれ、-1.15, -1.36, -0.91であり、ブレード面全体でもProp00に比べてその値は小さい。

Fig.10-a)~c)は、Prop03での局所圧力係数分布である。このブレードでは、半径方向での圧力係数分布において、ブレード根部分で様ではなく、他の部分に比べて負圧の発生が抑えられていることが分かる。この部分では流入流速が遅い割にはブレード厚が厚く、これが影響している。最小局所cp値はそれぞれ、-1.60, -1.80, -1.31となっており、最も低い値となっている。

5.1.3 圧力測定を基にした推力・トルク、プロペラ効率

これまでのブレード表面の圧力の値と各測定点での表面の法線ベクトルの成分と面積との積により、発生する力を求め推力、トルク、遠心方向力を求める。

Fig.11-a)~c)に、それぞれ圧力測定を基にして求めた各ブレードの推力、トルク、効率の分布を示した。前縁または後縁付近の値は線形補間を行うことで未測定部分を補った。

Fig.11-a)の推力分布では、Prop01以外のブレードでは迎角の増加に比例して推力の増加が見られる。特にProp00が最も高い推力を出している。一方、Fig.11-b)のトルクでは、Prop01以外が迎角とトルクが比例関係にあることに加えて、0°まではProp00ブレードが最も低いトルクを示している。Prop01が推力、トルク共に3degで大きく落ち込む点の特徴的だが、前述の圧力係数分布からも分かるように、負圧の度合いが他に比べて低いのが原因であり、ブレード形状による特性であると考えられる。

Fig.11-c)ではこれらから求められたプロペラ効率が示されている。Prop00に関しては3°でのトルクの増加が原因のため、効率も大きく低下しているが、0°までは他のブレードより10%以上も高い効率となっている。また、Prop03が推力・トルク・効率の点で総合的に見て安定していると思われる。

5.2 推力・トルク測定

6分力天秤により推力を、回転軸に組み込まれたトルク計によりトルクを測定した。Fig.12-a), b)は、4種類のプロペラブレードの推力とトルクを表している。

推力に関しては、Prop02の値が最も大きい。ブレード端でも翼弦長が長いためと考えられる。続いて矩形形状のProp01、最適化形状のProp00、そしてProp03という順で推力が大きくなっているのが分かるが、これは、主にプロペラ平面形状とそれに伴うブレード厚さの影響であると考えられる。

トルクに関しては、推力が最も大きかったProp02がやはり最も大きい。続いてProp02となり、Prop00とProp03はほぼ同じトルクを発生させているのが分かる。結局、推力が生み出された

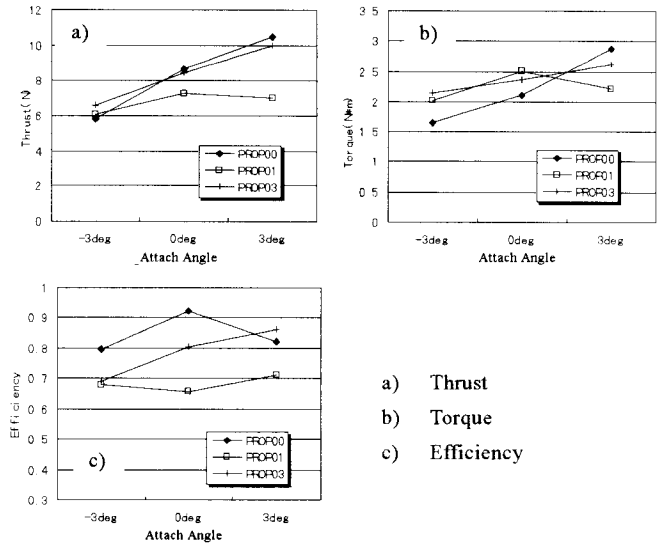
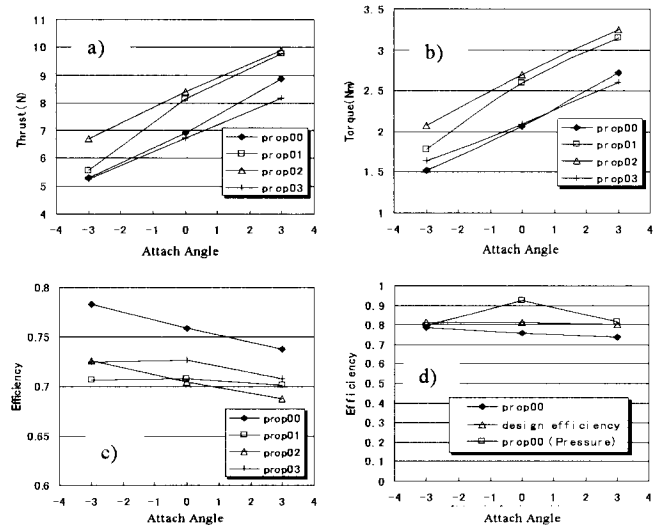


Fig.11 Results by pressure measurement



a)Thrust b)Torque c)Efficiency d)Comparison of Efficiency
 Fig.12 Results by 6-components balance

分、抵抗も生じる結果となっており、推力発生順位と同様に、主要因は外径部の形状抵抗の大きさであることは明らかである。

これら推力とトルクの結果から、それぞれのプロペラの効率を示したものがFig.12-c)である。最適化形状ブレードのProp00が4つのブレードの中で、最も高効率であるという結果を得た。続いてProp03, Prop01と続く。最も推力を発生させていたProp02に関しては、取り付け迎角が増加すると共に効率が低下し、+3°では最も効率が悪くなった。これは、トルクが大きかったことが原因である。

ここで、Fig.11-a), b)で示した圧力測定を基にした推力とトルクの分布と比較すると、推力に関してはProp01の傾向と大きさが大きく異なることが分かる。Prop00とProp03に関しては増加傾向であるが、その値は天秤による測定値の方がおよそ1N低い。トルクに関してProp01と03では若干傾向と大きさの違いはあるものの、ほぼ同傾向と言える(ただし、Prop01の3°の場合は大きく異なる)。またProp00では、傾向と大きさ共にほぼ等しくなった。

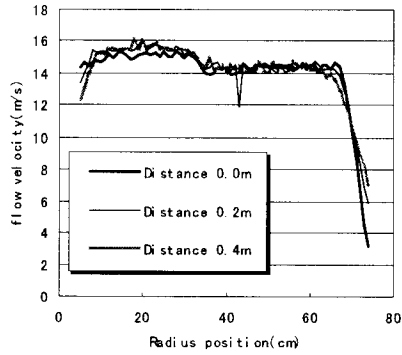


Fig.13 Wake Velocity distribution (Prop00 0deg)

Fig.12-d)に、Prop00の6分力天秤とトルク計による測定で得られた効率、設計効率、圧力測定によって得られた効率の比較を示した。圧力測定での 0° での効率が大きく0.1以上高い他は、概ね設計効率と同じ値であることが分かり、効率から評価する場合、ブレード表面の圧力測定で得られた圧力分布が妥当なものであると考えられる。

5.3 後流流速測定による推力

プロペラ後流の流速を計測し、ランキンの運動量理論³⁾を用いることでプロペラが発生させた推力を求めるとともに、プロペラ後流の縮流の様子を捕らえる。測定は中心から風洞外までを、半径方向に1cm間隔で行った。1次元熱線プローブを用いて、その向きを変え、風洞一様流方向、プロペラ回転の放射方向・円周方向の3成分を測定した。今回はProp00ブレードを用い最適状態での計測を行った。

Fig.13に、プロペラ直後、0.2、0.4mの位置での後流の一様流方向の流速分布を示す。中心から0.33m付近でプロペラの後流と風洞の一様流との境界が存在していることが分かる。また、プロペラ直後の後流流速よりも0.2、0.4mでの後流流速が増加しており、縮流による後流の増速が確認できる。さらに、ブレードの半径方向長さが0.42mであるのに対し、後流と外部流の境界が0.33mである点を考慮すると、プロペラの直後で急速な

縮流が発生していることが考えられる。

得られたプロペラ直後の流速分布のうち、風洞流速方向の成分から算出した推力は8.26N(Prop00最適状態)であった。これはFig.10-a)に示した圧力測定による推力での同条件での値、8.66Nに極めて近い値となっている。しかしながら6分力天秤による同条件での推力の測定値は6.94Nであり、1.5N程度の差が生じている。6分力天秤での推力測定では、天秤のストラット上に設置したスリップリングやトルク計、モーターに対する空気抵抗をなくすために専用の風防を被せているが、風防がプロペラ後流に対して影響を与え、推力に差が現れたと考えられる。異なった実験手法間での、得られたデータの整合性は今後の課題である。

6. 結言

独自に作成した4種類のプロペラブレードに対して、3つの異なる手法で推力とトルクを計測した結果、最適化形状ブレードProp00に関しては、設計で求めた効率を概ね達成しうることが分かった。また、その他の形状のブレードに関しても形状の相違による推力・トルク特性の違いが明らかになった。

本研究で工夫したプロペラブレードの直接圧力測定方法を用いると、他の2つの測定方法から得られた推力・トルクとの比較から、正確な圧力値を得ることができる。また、流れの剥離や再付着などの流体现象を含む詳細な圧力分布が得られた。

参考文献

- 1) N. Kogiso, T. Utsumi, and Y. Murotshu, Shape Optimum Design of Propeller Blade Operating in Low Reynolds Number Range, J. JSASS, 50 (2003), No. 586, pp.458-465.
- 2) C.N. Adkins and R.H. Liebeck, Design of Optimum Propellers, AIAA Paper 83-0190 (1983).
- 3) B.W. McCormick, "Aerodynamics Aeronautics and Flight Mechanics," John Wiley & Sons, (1995).