

小型シュラウド付きロータのシュラウド取り付け位置が 推力性能へ及ぼす影響

○大塚光, 永谷圭司, 吉田和哉 (東北大・院)

Effect of Shroud Position on Thrust Performance of Small Shrouded Rotor
Hikaru Otsuka, Keiji Nagatani and Kazuya Yoshida (Tohoku univ.)

Key Words: Shrouded Rotor, UAV, Rotary Wing, Low Reynolds Number, Rotor Thrust

Abstract

Multi rotor UAVs have a good potential to exploration activities in restricted area like disaster site. However, their ability to carry heavy payload are limited and not applied to variable uses currently. To improve their performance, shrouded rotors (or ducted fans) are proposed and they were applied to multi rotor UAVs to increase their thrust. Nevertheless, optimum shape of shroud is under researching and aerodynamic effect of them is not clear. In this study, we evaluated a shrouded rotor performance with changing the shroud position from the plane of the rotor disk, to clarify the effect of them to the rotor thrust.

記号

A	rotor disk area, m^2
D	rotor diameter, m
R	rotor radius = $D/2$, m
ρ	atmospheric density, kg/m^3
Ω	rotor rotational speed, rad/s
P	power = torque $\times \Omega$, W
C_p	power coefficient = $P/\rho A(\Omega R)^3$
C_t	thrust coefficient = $Thrust/\rho A(\Omega R)^2$
FM_{shroud}	figure of merit for shrouded rotors
	$= \frac{C_t^3/\sqrt{2}}{C_p}$

1. 序論

現在、マルチロータ機と呼ばれる回転翼型小型 UAV(Unmanned aerial vehicle)が、利用できる用途の多様性と導入の容易さを理由に広く普及している。将来的に高所からの観測活動や大型構造物の点検への利用が期待されているが、現在普及しているマルチロータ機の機体性能は、こうした活動を行うには不足している。現在、一般的に普及している80cm程度の大きさを持つマルチロータ機の飛行時間は10分から15分であり、機体に搭載できるペイロードは1[kg]程度である。そのため、重い機材を搭載するには搭載可能ペイロード重量が不足しており、利用用途の拡大と利便性を向上させるためには、機体性能の改善が課題となっている。

マルチロータ機の飛行時間と搭載ペイロードはバッテリーの容量とロータの性能に依存しており、バッ

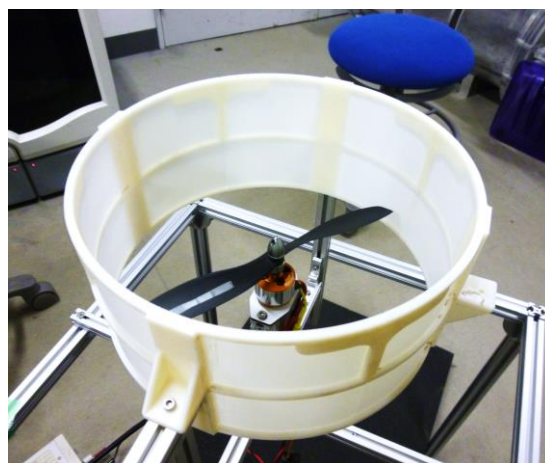


図1 シュラウド付きロータ

テリに関してはリチウム系電池の普及によって、大幅な性能改善が図られてきた。一方、ロータに関しては、空気力学的な立場から回転翼性能の向上を目指した試みが続けられている。性能向上のための手法の一つに、シュラウドと呼ばれる覆いを回転翼のまわりに取り付け、得られる推力の改善を図るものがある。これらはシュラウド付きロータやダクテッドファンと呼ばれており、大型の回転翼機や一部の小型 UAV では既に利用された前例がある。Hrishikeshavanら[1]によれば、シュラウドの取り付けによってロータの推力が30[%]向上したという報告がある。一方で、先行研究は行われているものの、小型のシュラウド付きロータについては性能評価が十分に行われていない部分が存在している。

そこで本研究では、マルチロータ機へのシュラウ

ド付きロータの適用を念頭に、シュラウド付きロータの性能を調べ、特にシュラウドの取り付け位置が回転翼性能に及ぼす影響を評価する。

2. シュラウド付きロータの概要

2-1 シュラウドの取り付け目的

シュラウドを取り付ける目的は、主に衝突時の回転翼の保護、飛行中の騒音低減、回転翼性能の向上の3つである。現在、マルチロータ機やラジコン用固定翼機にシュラウドが採用されている理由には、回転翼の破損を防ぐ意味合いが強く含まれており、空力性能の改善はほとんど考慮されていない。今後、マルチロータ機は、運用時の安全面を考慮し、必然的にシュラウドが設けられると考えられる。よって、最適なマルチロータ機の機体設計を行うためには、シュラウドの取り付けによる空力性能への影響を明らかにする必要がある。

2-2 シュラウド形状の影響

Jason[2],[3]らは、シュラウドの形状のうち図2に示す4つの形状パラメータが、ロータの空力性能に影響することが指摘している。中でも、翼端とシュラウドの隙間(δ_{tip})が最も影響を及ぼすとされ、回転翼直径の1[%]以内に隙間を狭めることで推力性能が向上すると述べている。また、ロータ後流域の形状を決定するシュラウドの長さ L_d とシュラウドの入り口と出口径については、流れを拡大させる方が良い性能を得られるとしている。よって大きな推力を得るためには、単純な円筒形ではなく流路を拡大する形状が望ましい。

さらに取り入れ口の形状は、表面での境界層の発達により吸気量を左右するため、獲得推力に影響を与える。Vinodら[4]によれば、CFD(Computational Fluid Dynamics)の計算によって、最適な入口形状を用いることで従来のシュラウドよりも約50[%]推力を増加できると指摘している。

このようにシュラウドの形状に関しては、いくつかの研究が重ねられており、空力性能の影響解析と改善が試みられている。しかしながら、変化させる形状パラメータが多く、最適な形状についての議論は継続している。

2-3 実装への課題

シュラウドロータをマルチロータ機に搭載する際には、シュラウドの重量と回転翼とシュラウドの隙間の大きさが問題となる。シュラウドによって獲得推力が増加しても、シュラウドの重さによって機体重量が増せば、機体全体の性能が低下する可能性がある。そのため、シュラウドの形状次第では、回転翼

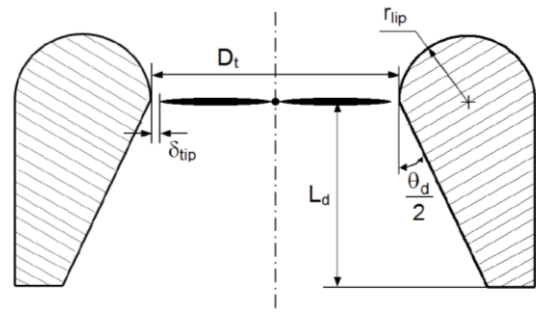


図2 指摘されているシュラウドの改善箇所[3]

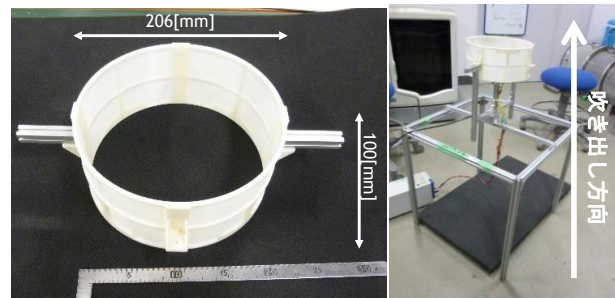


図3 推力実験で用いたシュラウド(左)と実験装置(右)

とシュラウドの間隔を極端に狭めて推力の増加を図っても、機体性能の改善が見込まれない場合もある。また、回転翼とシュラウドの隙間を狭めたことで衝突時の回転翼の保護が行われない可能性がある。

こうした設計上の難しさから、シュラウド形状と空力性能の関係を明確にして、機体設計に反映する必要性が生じている。

3. シュラウド取り付け位置による性能変化

3-1 実験目的

前章において、シュラウド付ロータの推力性能について解析が必要である背景を述べた。本実験では、円筒形状のシュラウドを用いて、取り付け位置が、シュラウドロータの推力へ及ぼす影響を検証する。

3-2 実験方法

実験に用いる小型回転翼は、実際のマルチロータ機に使用されている直径206[mm]のenroute8045プロペラを使用した。また、この小型回転翼に合わせ、直径212[mm]、高さ100[mm]の円筒形状のシュラウドを作成した(図3左)。シュラウドを実験装置(図3右)に取り付け、翼の回転面からの高さを変化させた際に回転翼から発生する推力と反トルクを計測する。

推力とロータ軸周りに発生する反トルクを同時に測定するため、6軸力覚センサ(レプトリノ、CFS034CA、表1)を利用した。力覚センサの計測値は

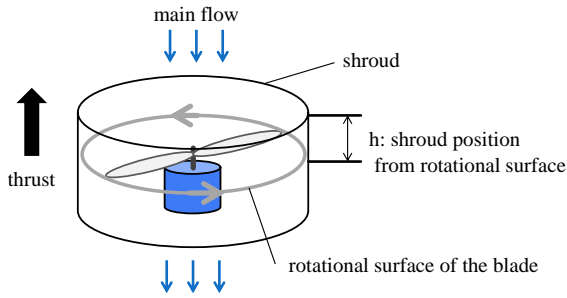


図4 シュラウド取り付け位置の定義

パーソナルコンピュータに送られ、約620Hzで、8秒間のサンプリングを行うものとする。同一の実験条件で計5回のサンプリングを行い、それぞれにフィルタリング処理を施して得られたデータを平均化することで計測結果を処理する。

実験では、シュラウドの取り付け位置を翼の回転面からシュラウドの入り口までと定義する(図4)。取り付け位置は、-25[mm]から100[mm]までを25mm間隔として6箇所とした。各取り付け高さにおいて、ロータ回転数を2,000, 4,000, 6,000[rpm]の3段階に変更し計測を行った。さらに、シュラウドがない場合との比較のために、シュラウドを取り外して同様の計測を実施した。

実験時には、雰囲気気密度計算のために、気温、気圧、相対湿度を計測した。大気密度計算については、先行研究に従うものとする[5]。加えて、実験中の消費電力を記録した。

回転翼の試験の際には、後流と構造物との干渉が実験結果に影響を及ぼすことが指摘されている。よって実験の際には、上向きに風を発生させることで、後流が干渉しない2mほどの空間を確保した。なお、予備試験を行い、この大きさの空間によって後流の干渉を無視できることを確認している。

3-3 実験結果

図5にトルクと消費電力の関係を示す。また、図6,7に推力とトルクの計測結果を示す。図6の推力とシュラウド取り付け位置の関係からは、シュラウドの取り付けによって、シュラウドが存在しない場合よりも得られる推力が減少することが分かる。特にシュ

表1 6軸力覚センサの仕様

定格容量		
Fz	±100	[N]
Mz	±2	[Nm]
非直線性	±1.5	[%R.O.]
他軸干渉	±2.0	[%R.O.]
分解能	1/2000	[-]
出力周波数	1.2	[kHz]

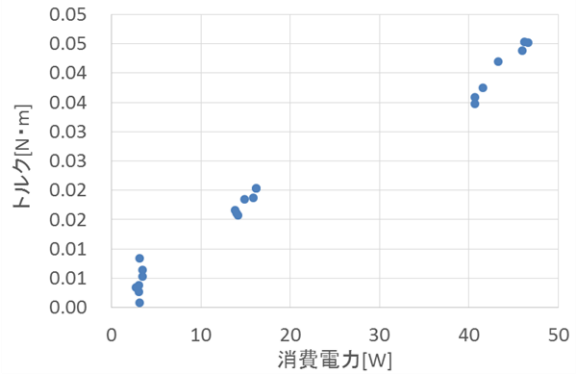


図5 ロータの消費電力と発生トルク

ラウドの高さ中心にあたる50[mm]の位置に翼の回転面がある時、ロータから得られる推力は最も小さくなった。また、シュラウドの高さ中心を基準に、取り付け位置が高い時の方が、低い時と比べて推力が減少した。

図7に示すトルクに関しても、推力と同様の傾向が得られており、取り付け位置が50[mm]の時に最も小さくなることが分かった。

また図5の消費電力と発生トルクの関係より、両者がほぼ比例関係にあることが確認できた。

3-4 考察

結果の定性的な考察の前に、計測結果の信頼性を議論する。力覚センサより出力される値には、ロータの回転や試験装置筐体の共振に伴うノイズが含まれる。実験データを処理するために、ローパスフィルタをかけ、平均値を算出している。実験条件によって、最大最少誤差が大きく出るものはあるが、平均値はほぼ一致することを確認しており、センサノイズが実験結果の比較に及ぼす影響は小さい。なお、推力とトルクの実験結果には、平均値と1サンプルごとの平均値の最大値と最小値を示している。

実験結果によれば、シュラウドの内部、特に中心高さ位置である50[mm]の位置に翼の回転面がある時に、推力が減少していた。よって、実験に用いたシュラウドの利用では、ロータの推力を増加させられないという結果を得た。このシュラウドは推奨されている形状を適用していないことに加え、ブレードとシュ

表2 実験時の雰囲気状態

	3章実験	4章実験	
気温	18.6	21.8	[deg]
気圧	998.1	1001.7	[hPa]
相対湿度	44.6	44.7	[%]
大気密度	1.19	1.18	[kg/m ³]

ラウド間の隙間を狭める余地があることから、先行研究と大きく矛盾するものではない。シュラウドを取り付けない場合と比べて大きな推力を得るためには、単純な円筒形状では不十分なことが確認できた。

また、シュラウド取り付け位置に対し、翼の回転面より高い位置にシュラウドがある場合のほうが、低い場合に比べて推力が小さくなった。これはロータを通過する流れに対し、シュラウド内の上流の状態が、後流よりも推力に対して強い影響を与えていると考えられる。

さらに、実験結果に回転翼の空気力学で用いられる推力係数(C_t)とFM値を適用してシュラウドロータの分析を行った。推力の無次元パラメータである C_t については図8に、ロータのホバー効率を示すFM値を図9に示す。

C_t に関しては、おおむね高回転数であるほど大きい値が出ており動圧の変化以上に推力が増加していることが分かる。シュラウドの取り付け位置との関係では、推力と同様の傾向を示しており、50[mm]で最小の大きさとなった。また、この位置を挟んでブレード面上にシュラウドがある時のほうが、低い値を示した。

さらにFMに関しては、取り付け位置が50[mm]よりも高い位置にあると効率が悪くなっている。その傾向は、 C_t や推力に比べて強く表れている。

以上より、本実験によって円筒形状シュラウドを回転翼に取り付けた場合、推力とホバー効率が悪化することを確認した。さらに、シュラウド内部の流れについて、ブレード面上流側の状態が推力に対して影響を与えやすいことが分かった。

4. シュラウド内流れ場の推力への影響の検証

4-1 実験目的

円筒形のシュラウドを用いた実験により、シュラウドが回転翼の性能に影響を及ぼすことを確認した。その過程でシュラウド内の流れが重要であると指摘したが、3章の実験のみでは検証が不十分である。よって、次に示す実験を行い、シュラウド内の流れ場の重要性を検証することとした。

4-2 実験方法

3章の実験で使用した円筒形のシュラウドと同じ径の丸穴を持つ平板をロータに取り付け、その位置によるロータ性能の変化を検証する。ロータの推力性能が変化すれば、シュラウド内の流れ場以外にも、推力を左右する因子があることを示すことができる。図11に実験装置と丸穴の空いた平板を示す。丸穴の大きさは、直径206[mm]であり、実験で使用

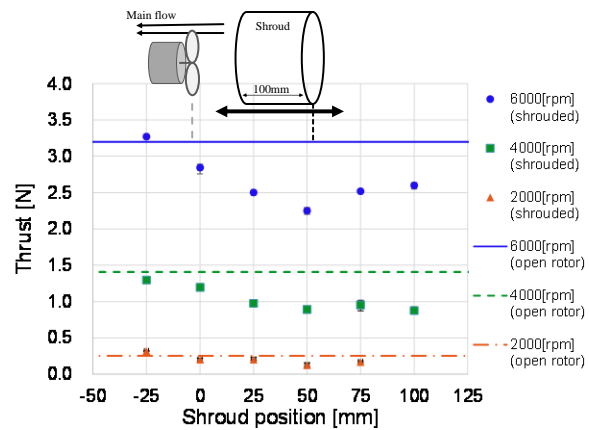


図6 シュラウド取り付け位置と推力

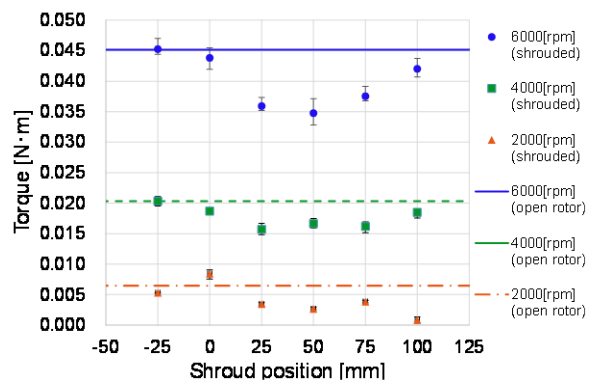


図7 シュラウド取り付け位置とトルク

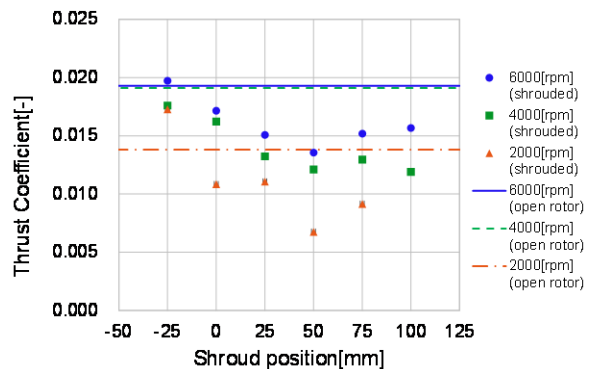


図8 シュラウド取り付け位置と推力係数

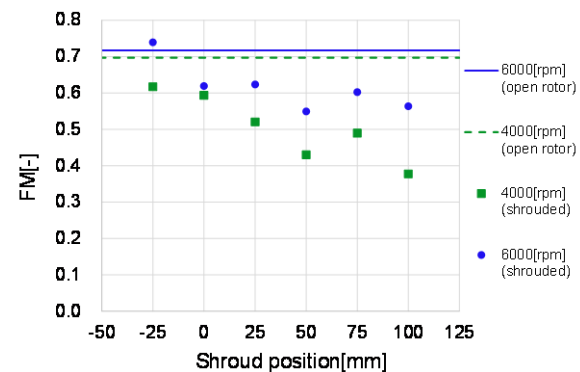


図9 シュラウド取り付け位置とFM

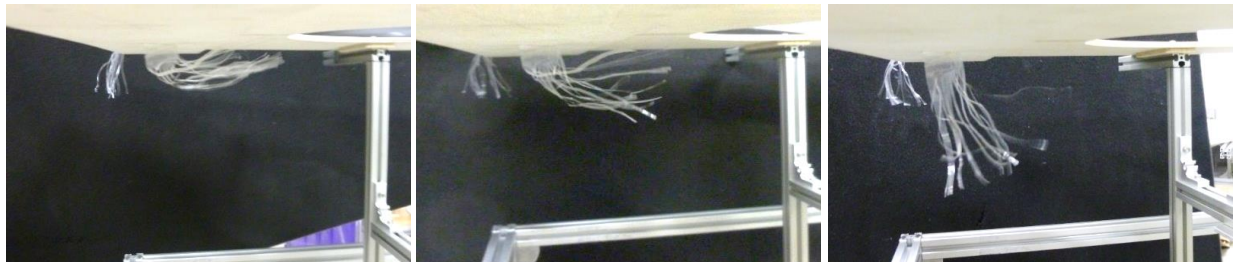


図10 回転翼上流側のタブの様子 (左:0[mm], 中央:25[mm], 右:50[mm])

したシュラウドの内径と同じである。

シュラウド内部の流れ以外に推力に影響するものとして、シュラウドの外側における風の回り込みが挙げられる。平板は、周辺での空気の回り込みを抑え、循環を小さくすることを意図している。よって平板面積の大きさによって、実験結果が変化する可能性がある。実験で用いた平板(450[mm]×450[mm])は、循環を弱めることを目的とすれば、適当な大きさであると考えられる。

計測は、3章の実験と同様に行うものとし、平板の取り付け位置も図4の定義に準じる。なお、回転数による比較は、本実験の趣旨とは直接関係しないため、計測は4,000[rpm]と6,000[rpm]のみで行う。また、平板の取り付け高さは、-50[mm]から50[mm]までを25[mm]間隔で変更し、計測を行った。

これに加えて、流れの特徴をとらえて考慮するため、平板の上流側(試験装置下面)にナイロンテープで作成したタブを装置に取り付けて、様子を観察した。

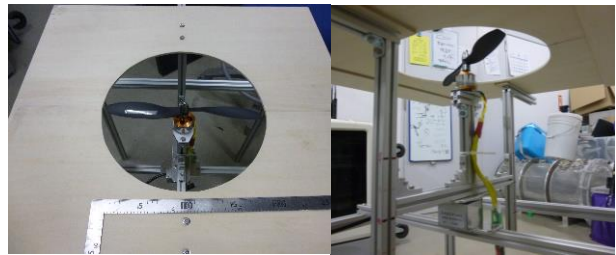


図11 丸穴付平板(左)と試験装置(右)

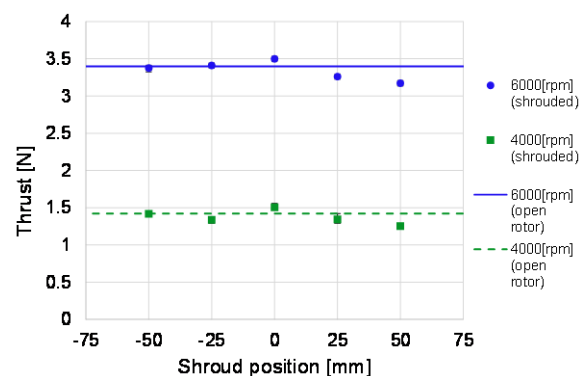


図12 平板の取り付け位置と推力

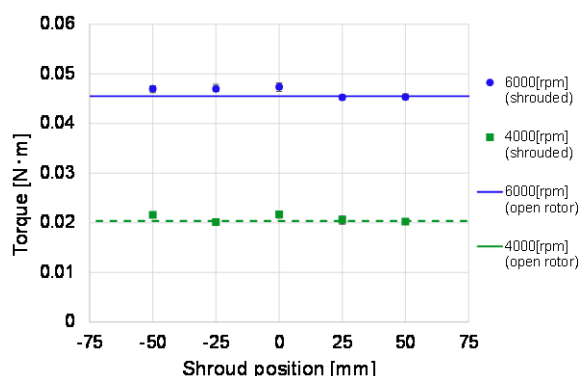


図18 平板の取り付け位置とトルク

4-3 実験結果

図12に推力の大きさの変化を、図13にはトルクの計測結果を示す。また、図10には平板の取り付け位置に対するタブの様子を示す。実験結果からは、推力、トルクともに平板の取り付け位置による推力の大きな変化は見られなかった。シュラウドや平板を取り付けない場合の推力やトルクと比べても、平板の存在による変化はほとんどない。ただし、翼の回転面と取り付け位置が一致している0[mm]において、他の取り付け位置の場合よりも推力とトルクがわずかに大きくなった。

また、タブの動きは、0[mm]の取り付け位置で大きく横になびき、取り付け位置が0[mm]から離れるにつれて横向きにたなびかなくなった。また、取り付け位置が負の値をとる場合は、ロータからの流れの引き込みの影響を直接受けるため、考慮の対象とはならなかった。

4-4 考察

平板の取り付け位置によって推力の大きさはほとんど変化しないことが分かった。これにより、シュラウド内部での流れ場が、ロータの推力へ影響していることが示された。

また、0[mm]位置で確認された微小な推力とトルク

の増加は、翼端からの吹きおろしを平板が障害し、翼端から発生する循環を弱めたことによって引き起こされたと考えられる。詳細に調べるためには、翼端と丸穴の隙間を狭めた際の推力の変化について確認する必要がある。その効果が確認できれば、シュラウド径を狭めることで推力を増加させられる理由を説明することができる。よって今後の検討事項とする。

一方、タフトの観察結果からは、平板がブレード面の上流側にある状態で、ロータ中心に向かって流れが形成されている様子が観察された。流れは取り付け位置が0[mm]に近づくにつれて強くなり、上流側では、丸穴の径よりも広い面積から空気を取り入れられていることが確認できた。この結果はロータ上流の流れが、ロータ性能に影響することを示唆している。

さらに、平板を配置してもロータの推力性能が大きく変化しないことが示された。よって、最適形状のシュラウドを用いた推力の増加を意図せず、回転翼の保護を目的としてシュラウドを利用する場合には、シュラウドの形状は高さを低くし、ロータへの空気の流れを遮ることないもので、取り付け位置を翼の回転面と同じ高さとする設計が適していると考えられる。

5. 結論

円筒形のシュラウドを用いて、その取り付け位置がロータ推力及びホバー効率に与える影響を検証した。実験の結果、ロータがシュラウド内部にある時、特にシュラウドの中心高さにある時に、推力が33[%]低下することが分かった。ホバー効率も推力と同様に、シュラウド内部にロータ回転面位置すると低下していた。また、ロータ上流側の流れ場にシュラウドが設けられることで、推力に影響を及ぼすことが分かった。この実験結果により、単純な円筒形のシュラウドでは推力の増加を見込むことは難しいことを確認した。

さらに、シュラウド内の流れ場による影響を確認するため、比較実験として平板を用いたロータへの影響評価試験を同一の装置を用いて行った。その結果シュラウド内部の流れ場が、推力の大きさに影響していることを確認した。

今後は、ロータとシュラウドの隙間を狭めることにより得られるシュラウドの推力への影響を検証し、先行研究の再現と分析を行う。また、検証が不足している形状パラメータについて分析を進め、最適なシュラウド形状を探る。シュラウド設計に不足している空力的性質の検証を重ねることで、将来的なマルチロータ機用シュラウドロータの性能向上を目指す。

参考文献

- [1] Hrishikeshavan. Vikram, James. Black and Inderjit. Chopra, “Design and Testing of a Quad Shrouded Rotor micro Air Vehicle in Hover”, 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 20th AI 23 - 26 April 2012, Honolulu, Hawaii.
- [2] Jason.L. Pereira, Inderjit Chopra, “Hover Test of Micro Aerial Vehicle-Scale Shrouded Rotors, PartI: Performance Characteristics”, Journal of the American helicopter society 54, 012001, 2009.
- [3] Jason.L. Pereira, Inderjit Chopra, “Hover Test of Micro Aerial Vehicle-Scale Shrouded Rotors, PartII: Flow Field Measurements”, Journal of the American helicopter society 54, 012001, 2009.
- [4] Vinod.K.Lakshminarayan, and James.D.Baeder, “Technical Note Improved Shroud Design for Rotary Wing MAV Applications Based on Computational Analysis”, Journal of the American helicopter society 57, 045001, 2012.
- [5] 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”, 日本航空宇宙学会北部支部2013年講演会, JSASS-2013-H028, 2013.
- [6] Preston. Martin and Chee Tung, “Performance and Flowfield Measurements on a 10-inch Ducted Rotor VTOL UAV”, 60th Annual Forum of the American Helicopter Society, Baltimore, MD, June7-10, 2004.
- [7] J. Gordon Leishman: Principles of Helicopter Aerodynamics, Cambridge Aerospace Series, Cambridge University Press, 2006.