

D27 レーザーライトシート法による横風中における シュラウド付きロータ周り流れの可視化

○大塚光, 永谷圭司, 吉田和哉 (東北大学大学院)

Flow Visualization on a Shrouded Rotor in Cross Wind Using a Laser Light Sheet Technique
Hikaru Otsuka, Keiji Nagatani and Kazuya Yoshida (Tohoku Univ.)

Key Words: Aerodynamics, V/STOL, Shrouded Rotor, Flow Visualization, UAV

Abstract

Flow visualization experiments around a shrouded rotor in cross wind using a laser light sheet technique to analyze flow structures around it are described in this paper. Shrouded rotor is one of the rotors, which can increase static thrust and reduce energy consumption for generating thrust. Thus, shrouded rotor can improve performance of multi-rotor UAVs. However, shrouded rotor cause nose up pitching moment in crosswind and the moment hinders controlling UAV attitude in horizontal flight. To apply it to the UAVs, analyzing the aerodynamic phenomena around a shrouded rotor has been required. The flow visualization experiments clarified flow separation on an upwind inlet section and difference of flow direction between in crosswind and in windless condition on downwind inlet surface. These phenomena seem to increase nose up pinching moment. Addition that, effects of rotational speed of rotor and cross wind speeds to flow separation from upwind inlet were clarified.

1. 序論

小型UAV(Unmanned Aerial Vehicle)の一種である小型マルチロータ機が、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。マルチロータ機は、複数のロータを備えた垂直離着陸機(Vertical Take-Off and Landing, VTOL)で、滞空飛行が可能であり、固定翼機と比べて操縦性が良い。また、マルチロータ機は、従来の無人航空機と比較して、構成部品が安価であり、かつ簡易な構造をしているため、導入が容易である。マルチロータ機の応用案として、災害現場の観測、遠隔地への薬品輸送や高速道路の高架点検などの用途への利用が期待されており、活発に開発が行われている。一方で、マルチロータ機は、同じ機体重量の固定翼機と比べて継続飛行時間が短く、搭載可能ペイロードが少ない。最も普及している大きさの小型マルチロータ機では、80[cm]四方の機体の大きさに対して、飛行時間は15分未満であり、搭載できるペイロード重量は1[kg]程度である。そのため、現状のマルチロータ機の性能では、継続的な探索や観測活動への利用は難しい。このような背景から、機体の飛行時間の延長と搭載可能ペイロード量の改善が求められている。

マルチロータ機の性能を改善する手法の一つとして、シュラウド付きロータ(図1)を用いることが検討されている。シュラウド付きロータとは、ロータをシュラウドと呼ばれる円形の壁で覆ったもので、推力の増加、ロータの回転に必要な仕事の低下、さ

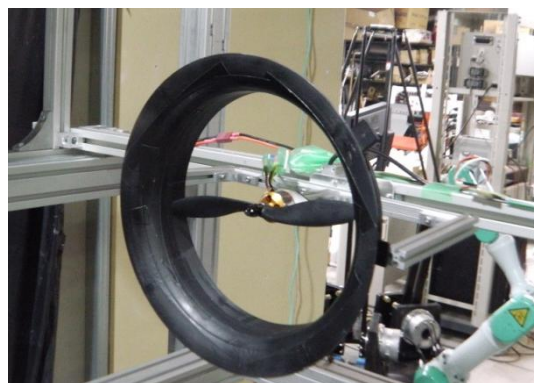


図1 シュラウド付きロータ



図2 機体を傾け水平飛行するマルチロータ機

らに高速で回転するロータを覆うことで、接触事故時の安全性を向上させることが可能である[1][2][3]。一方で、シュラウド付きロータの問題点として、通

常のロータに比べて重く、さらに、ロータ面に対して横風が吹き込んだ際に重心周りの頭上げピッチングモーメントを生じることが知られている。特に頭上げピッチングモーメントの発生は、水平飛行時(図2)の機体の制御性を悪化させるため、シュラウド付きロータを垂直離着陸機に適用する際の重要な技術課題となっている[4][5]。

そこで、ピッチングモーメントの発生原理について解明しモーメントの発生を抑えるため、これまでに横風中のシュラウドについて空気力計測や数値流体計算による解析が行われた。先行研究では、ピッチングモーメントの発生要因としてシュラウドインレット部分での流れの剥離が影響を与えていることが指摘されており、Martinらは実験により、シュラウドの風上側インレットから流れが剥離することを示した[6]。しかし、ピッチングモーメントが発生した際のシュラウド周りの流れについて、実験的に明らかにした例はなく、全体的な流体構造が解明されていない。

今後、マルチロータ機には高い飛行性能と市街地を飛行する際の安全性が求められており、シュラウド付きロータをマルチロータ機に適用することで、そのような要求を満たすことができる。しかし、シュラウド付きロータの実現には、ピッチングモーメントの発生を抑える手法の開発が課題となっており、モーメントの発生原理を詳細に解明することが求められている。よって、本研究ではシュラウド付きロータに発生するピッチングモーメントの発生原理を実験的に解明するため、横風中のシュラウド周り流れをレーザーライトシート法によって可視化し、シュラウド周りの流体構造の解析を行った。

2. シュラウド付きロータ

2-1 構造と機能

シュラウドは、主にインレット、スロート、ディフューザの3つから構成されており、それぞれの形状がロータの性能に影響する。図3に一般的なシュラウド付きロータの断面図を示す。

シュラウド付きロータでは、2つの現象の発生によってロータの性能が向上する[1][2][3]。1つ目は、インレット表面での低圧領域の成長である。ロータを通過する流れは、流れが加速されるために上流から下流にかけて収縮する。インレット表面では流れの収縮ともなっており、流れが加速するために低圧領域が発達する。この現象は、翼型表面での揚力の発生と似ており、インレット表面には上向きの揚力が生まれる。シュラウド付きロータでは、この揚力がロータの推力方向に働き、ロータの推力を増加させる。2つ目は、ディフューザによる流路の縮小の防

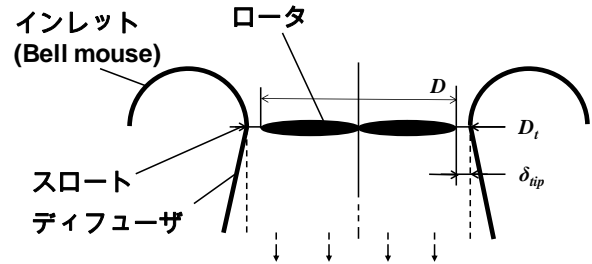


図3 一般的なシュラウド付きロータの構造(断面)

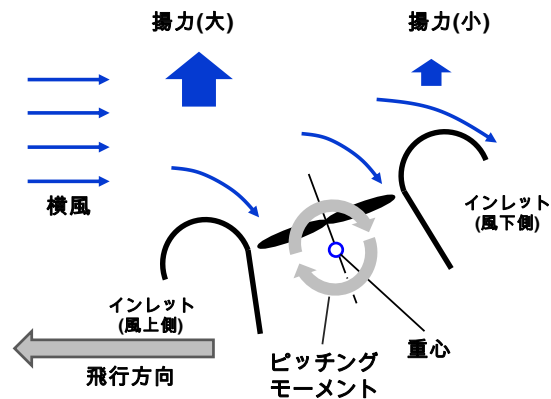


図4 ピッチングモーメントの発生の基本原理

止である。シュラウド付きロータの後流部分ではディフューザが存在することによって、オープンロータでは収縮する流路が、収縮せずに下流へと流れる。流路面積がオープンロータより大きくなることで、後流の終端速度が遅くなり、ロータの回転に必要な仕事の大きさは小さくなる。以上の2点に加えて、インレットは流体の捕獲面積を増やして通過する流量を増加し、スロートは、ロータの翼端からの流れの逆流を軽減するため、ロータの性能が向上する。

しかし、前述のとおり、シュラウド付きロータは、構造重量を増加させるとともに、横風中で頭上げピッチングモーメントを発生させる[4][5]。現状では、この2つの課題が、シュラウドを取り付ける弊害となっている。これまでに、シュラウド付きロータをVTOL機に取り付ける試みが行われているが、シュラウドの取り付けによる欠点が大きく、空力的な利点を狙っての利用例は少ない。

2-2 ピッチングモーメントの発生

横風中のシュラウド付きロータには、インレット周辺での流体現象により、頭上げピッチングモーメントが発生する。2-1節で述べた様に、インレット部分では低圧領域が発達し、シュラウドを上向きに持ち上げる力が働いている。しかし、横風中では、風上側と風下側のインレットでは、流れの向きや速さが異なる。風上側では、横風が流れを加速する向きに働き、風下側では流れを遅くする向きに働く。これに伴い、風上側のインレット表面で得られる揚



図5 開放式低速風洞(0.8m×0.8m)

力の方が大きくなり、重心周りに頭上げピッチングモーメントが生まれる(図4)[4]。

横風に起因した頭上げピッチングモーメントは、特に水平飛行の際に発生する。マルチロータ機を始めとしたVTOL機の多くは、ロータを進行方向に傾けることで水平飛行を行う。この時、シュラウドに働く頭上げピッチングモーメントは機体を傾ける力を打ち消す向きに働くため、シュラウド付きロータを装着した状態での水平飛行は、機体の制御により多くのモーメントを生み出さなければならない。こうした理由から、シュラウド付きロータ適用によって機体の制御性が悪化することが知られている。この問題に対処するため、シングルダクトドファン(UAV開発では、ピッチングモーメントの発生が対策課題となっており、Vaneと呼ばれる羽によってモーメントの発生を抑える試みが行われている[7])。

2-3 インレットでの流れの剥離現象

ピッチングモーメントの発生には、インレット表面で起こる流体现象が大きく関わっている。特に風上側のインレットでは、低圧領域の発達とともに流れの剥離が発生することが指摘されている。インレット表面で流れの剥離が発生すると、シュラウド内の流路を狭める。また、流れの剥離によってピッチングモーメントは増加する。Aliらは、数値流体計算とPIV(Particle Image Velocimetry)による流れ解析実験を行い、剥離が起こることでロータの推力が低下すると述べている[8]。また、Grafらは、インレットでの剥離が、急激な頭上げピッチングモーメントの増加を引き起こすことを報告している[5]。インレットでの流れの剥離は、横風の速さ、ロータ回転数、ロータの迎角違いによって発生の様子が変化する。実際に水平飛行を行うVTOL機では、飛行中に剥離に伴う急激なピッチングモーメントの増加が起り、制御性が悪化することが指摘されている。これまでシュラウド付きロータを用いた小型VTOL機の開発で

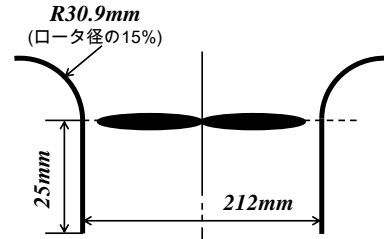


図6 実験で用いたシュラウド付きロータの形状

は、インレットでの剥離を抑えるために複数の手法が提案されている。具体例として、インレット形状の工夫[9]や、Aliらによって提案されたDouble Ducted Fanと呼ばれる2重のシュラウドを用いることで、インレットでの剥離を遅らせる試みが行われている。

このように、VTOL無人機の開発において、ピッチングモーメントの発生による制御性の悪化は重要な技術課題であり、発生現象の解明と対策について多くの研究が行われてきた。一方で、剥離現象の実験的解析については、空気力の計測やタフトによる剥離位置の確認が行われているものの、現象を理解するための十分な解明が行われていない。また、ピッチングモーメントの発生とインレットでの剥離現象の関係について、先行研究では関連性が指摘されているが、直接的な影響については不明瞭な部分が多い。よって、シュラウド付きロータ周りでのピッチングモーメントの発生に関わる流体现象について、詳細に明らかにする必要がある。そこで、本研究ではシュラウド周りの流れ場を解明するために、レーザーライトシート法を用いた可視化実験を行った。

3. 可視化実験

3-1 実験方法

横風中のシュラウド周りの流体構造を解析するために、風洞を用いてシュラウド付きロータ周りの流れ場をレーザーライトシート法によって可視化し解析を行った。

実験には、東北大学流体科学研究所に設置された、開放式低速風洞を利用した(図5)。風洞のテストセクションの大きさは0.8[m]四方であり、シュラウド付きロータに対して十分な大きさを持っている。実験で用いたシュラウドの形状を図6に示す。

可視化実験用のトレーサには、スモークジェネレータ(JEM社、ZR12-AL)によって発生させた煙を用いた。煙は、風洞内部から発生させ、測定部へ到達する。測定部に到達したスモークは、テストセクション上部から照射されるアルゴンレーザーシートによって照らされ、シュラウド周りの流れ場を示す。可視化画像の撮像には、高速度カメラを使用し、30[FPS]の撮影速度で10秒間の撮像を行い、実験後

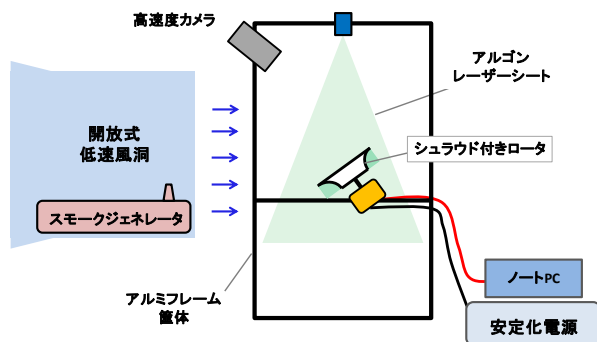


図7 実験装置概略図

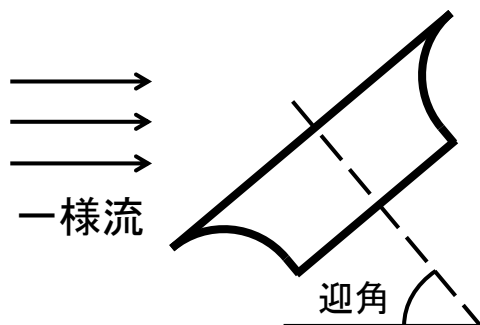


図8 迎角の定義

の解析によって、流れの特徴を確認できる瞬間の画像を抽出した。シュラウド付きロータは、風洞開口部から約1mの位置に取り付けた。また、飛行時のマルチロータ機の傾きを再現するため、ロータはピッチング方向に傾けることができる。ロータは、DCブラシレスモータによって回転させ、回転数はスピードコントローラによって制御する。回転数の指定は、ノートパソコンからの有線によるシリアル通信で回転数を指定し、スピードコントローラによって±5 [RPM]以内の精度で制御することが可能である。図7に実験装置の概略を示す。

実験では、横風中のシュラウド周り流れの全体構造を捉えるための全景の観測と、剥離現象を捉えるためにインレット表面の観測を実施した。全体像の観測では、実際のマルチロータ機の機体の傾きを考慮し、シュラウド付きロータの迎角を60, 90, 120 [deg]と変化させて流れ場を観測した。ロータの迎角は図8のように定義する。また、実験結果の比較のためにオープンロータでも、同様の条件の下で流れ場の可視化を行った。一方、インレットでの剥離現象の観測には、マルチロータ機の前進飛行を想定し、迎角を45, 60, 75, 90 [deg]として流れ場を可視化した。マルチロータ機の飛行状態を想定し、全景の観測では6[m/s]の風を流し、ロータ回転数を6000 [RPM]として実験を行った。また、剥離の観測では、風速とロータ回転数の違いの影響を捉えるため、風速を2, 6 [m/s]で変更し比較し、ロータ回転数2000, 6000 [RPM]で変更して実験を行った。表1に実験条件をまとめる。

表1 実験条件

	風速 [m/s]	回転数 [RPM]	迎角 [deg]
全景	6	6000	60, 90, 120
※比較のためオープンロータでの観測を実施			
前縁部	6	6000	45, 60, 75, 90
	6	2000	45, 60, 75, 90
	2	6000	45, 60, 75, 90

3-2 実験結果

a. 全景の可視化

図9にオープンロータとシュラウド付きロータ周りの可視化画像を示す。また、図10には6000[RPM]、風速6[m/s]の時に迎角を変化させた時の可視化画像を示す。さらに、図11には迎角を90[deg]の時に、風速と回転数が異なる場合のインレットでの剥離の様子を示す。

図9(a, c, e)のシュラウド付きロータ周りの可視化画像からは、流れ場の全体構造の様子と、迎角によって周囲の流れ場の様子が変化していることが分かる。シュラウド付きロータの場合、特にインレットの風上側と風下側で特徴が見られる。風上側インレットでは、シュラウドに入り込む流れがインレットにそって盛り上がっている。図9aの迎角60[deg]では、流れがインレットに沿ってロータ面に到達するが、図9cの90 [deg]では剥離を起こし、流れがシュラウド壁面から離れてロータ径の風上から約25 [%]の位置でロータ面へと流れ込んでいた。剥離した位置から下側の領域では、ほとんど流れが無く、剥離泡のような状態になっている。図9eの迎角120 [deg]では、更に剥離した領域が大きくなり、剥離した流れは、ロータ軸付近でロータ面へと到達していた。さらに、風上側インレット周りでは、ロータ内部、下面側から流れが吹き出し、インレット周囲を流れが循環している様子が確認できた。一方、風下側インレットでは、いずれの迎角に対してもインレット表面にそって流れが分岐し、ロータ外側からの流れの吹き込みは見られなかった。風下側インレットの上側を通過する流れは、インレットの縁で剥離を起こし風下へと流れ去っていた。ロータの面へ入り込む流れは、インレットにそってロータ面へと到達していた。風下側のインレット周りの流れは、迎角が変化してもロータ面へ到達する流れの向きの変化を除いて、特徴的な流体構造の違いは見られなかった。

図9(b, d, f)のオープンロータ周りの可視化画像

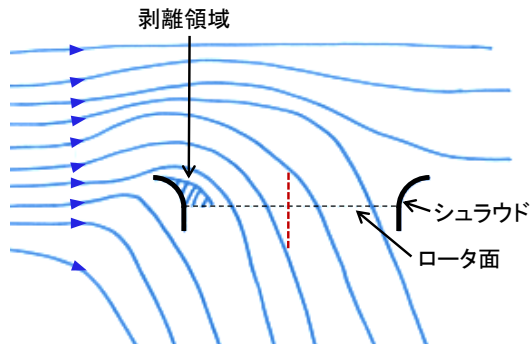


図12 シュラウド付きロータ周りの流れの概略

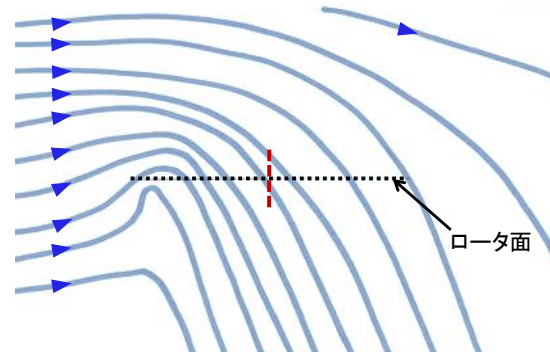


図13 オープンロータの周り流れの概略

からは、いずれの迎角においても、流れが横向きの速度を持ってロータ面に向かって流れ込む様子と、風上側翼端において流れの向きが大きく変化する様子が確認できた。図9bの迎角60 [deg]では、風上から来た流れがロータに向かって流れ込み、流れの方向が変化していた。また、風上側翼端ではロータ面に引き寄せられるように、流れが上向きに膨らんでいる。図9dの迎角90 [deg]では、迎角60 [deg]よりも、ロータへ吹き込む流れが下向きに曲げられていた。風上側翼端では、流れが上向きに盛り上がりロータに吹き込んでいた。この時、風上翼端直上を通過する流れは、ただちにロータ面を通過せず、ロータ上面に膨れ上がった後に翼端からスパン方向に約70 [%]の位置でロータ面を通過していた。図9fの迎角120 [deg]では、ロータに吹き込む流れは、迎角90 [deg]よりも曲げられ、風下側で確認できる後流の向きは、ほぼ鉛直下向きに流れていた。風上側翼端では、翼端に向かって鉛直上向きに流れが吸い込まれ、上向きに大きく流れが膨らんでいた。この時、翼端直上を通過する流れは、翼端からスパン方向に約90 [%]の位置でロータ面を通過しており、流れが通過した地点より風上側では、ロータ面を下から上向きに通過する流れが見られた。さらに、風下側翼端では後流に向かって流れが乱れていた。

シュラウド付きロータとオープンロータは、いずれのロータも風上側で流れが盛り上がっていた。この時、シュラウド付きロータでは、オープンロータよりも風上側翼端の流れが上向きに曲げられて剥離を起こし、ロータに向かって流れが吹き込まない領域が大きくなっていた。この領域において、シュラウド付きロータでは流れがほとんど確認できないのに対して、オープンロータでは上向きの流れが発生していた。

b. 風上側インレットでの剥離の可視化

図10 (a, b, c, d)の6000 [RPM]、風速6 [m/s]の時のインレットでの剥離の様子からは、迎角が大きくな

るにつれて、流れが剥離する位置がインレットの端に向かって遷移していることがわかった。剥離した流れがロータに吹き込む位置は、迎角の増加にともなってシュラウド壁面から遠ざかり、流れがほとんど無い領域が拡大していることが確認できた。

また、図11の風速とロータ回転数の違いによる比較からは、剥離の様子に違いが確認できた。風速による比較のため、図11のaとbに着目すると、図11aの風速2 [m/s]では流れがほぼインレット表面に沿ってロータに到達するのに対して、図11bの風速6[m/s]では流れが完全に剥離し、流れがほとんど無い領域を作り出していることが分かる。一方、ロータ回転数による比較より、図11のbとcに着目すると、いずれもインレットの端から流れが剥離し、流れがほとんどない領域を形成していることが分かる。図11cの回転数2000 [RPM]では、図11bの6000 [RPM]よりも剥離領域が大きくなり、剥離した流れがロータに吹き込む位置がシュラウド壁面から遠ざかることがわかった。この時の流れが吹き込む位置は、図11bの6000 [RPM]では、翼端からスパン方向に約40[%]であったのに対して、図11cの2000 [RPM]では、ロータ軸の反対側でロータ面を通過した。

3-3 考察

a. 全景の可視化

図12及び、図13にシュラウド付きロータとオープンロータの可視化結果に基づいたロータ周り流れの概略を示す。

実験結果から、横風中のシュラウド付きロータにおいて、風上側インレットでは流れの剥離が起り、風下側インレットでは、流れの分岐が起こることが分かった。

まず、横風中のシュラウド付きロータの風上側インレットでは、ロータへ向かう流れの吸い込みにより流れが鉛直上向きの速度を持ってインレット端を通過する。その後、インレットの先端から流れが剥離し、シュラウド壁面から離れた位置でロータ面へ到達する。

この時、流れがほとんど無い剥離泡のような領域が生まれ、この領域に接するロータ面では、ロータを通過する流れが速度を持っていないと推定する。そのため、ロータ面の風上側では、誘導速度の減少によって、発生する推力が増加していると考えられる。また、迎角の増加によって剥離領域は拡大するため、迎角が多くなるとロータ面で得られる推力が増加すると考えられる。また、風上側インレットでの剥離はインレットに働く揚力を増加させると考えられる。以上より、ロータ面上の風上側における推力増加は、ロータに働くピッチングモーメントを増加させる方向に働くと考えられる。さらに、高迎角時の風上側シュラウド壁面は、横風からの抵抗を受けることでピッチングモーメントを強める向きに力が働く。以上のように、風上側インレット周りでは複数の流体現象が起こっているため、剥離に着目するだけではピッチングモーメントに対する力の発生を説明することは難しいと考えられる。

一方で、風下側インレットでは、ロータ外側からの流れの吹き込みはなく、風上からの流れが吹き込み、インレットを境目として、ロータ外側と内側に流れが分岐していた。風上側インレットと異なり、インレットに沿った流れがほとんど無いために、低圧領域はほとんど発達せず、風下側インレットでの上向きの揚力は発生していないと考えられる。よって、風下側インレットでの揚力の減少は、風上側インレットよりも上向きの力が小さくなるために、頭上げピッチングモーメントを増加させると推定される。

オープンロータでは、可視化結果から、風上側翼端において流れが上向きの速度を持つことを確認した。特に迎角90, 120 [deg]では、翼端付近でロータを通過する流れが上向きの速度を持っていると推定される。ロータを通過する流れが上向きであると、ロータ面を通過する質量流量が低下する一方で、ロータの有効迎角が増加するために発生する推力は増加すると考えられる。そのため、横風中のオープンロータでも頭上げピッチングモーメントが増加することが推測される。

以上のように、可視化結果に基づく考察から、ロータの風上側の流体構造が、ピッチングモーメントの発生に複雑に影響していることが推測される。また、シュラウド付きロータの風上側インレットとオープンロータの風上側翼端では、ロータを通過する流れ速度の低下あるいは逆流が起こっていることが推定された。ロータを通過する流速の違いにより、ロータの風上側で発生する推力が増加し、頭上げピッチングモーメントが増加していることが推測される。さらに、シュラウド付きロータでは、風上側インレットでの剥離によってシュラウドに働く揚力が大きくなり、ピッチングモーメントが増加する向きに作用していると推測される。今後それぞれの現象が、ピッチングモーメントに

どのように作用するのか、詳細な検証が必要である。

b. 風上側インレットでの剥離の可視化

実験結果より、風速6[m/s]、ロータ回転数6000 [RPM]では、風上側インレットにおいて流れが剥離し、迎角の増加によって、剥離位置がインレット表面で風下側から風上側に遷移することを確認した。マルチロータ機は、水平飛行の際に機体を最大で30 [deg]以上傾けており、ロータの迎角は60 [deg]から120 [deg]程度となる。滞空状態から水平飛行に移ると、機体が傾いて迎角が小さくなり、と流れの剥離位置はロータの内側へと移動すると推定される。また、90 [deg]では流れがインレット先端から剥離を起こしており、マルチロータ機が6[m/s]以上で水平飛行を行う際には、シュラウド内部で剥離を起こしていると考えられる。

また、風速の違いによる比較からは、低速(2 [m/s])では流れが剥離せずにインレット表面にそって流れることを確認した。このことから、低速の横風に対しては流れの剥離が発生しないため、滞空時と水平飛行時ではシュラウドに働くピッチングモーメントは大きく変化することが推察される。

ロータ回転数の違いによる比較からは、6000 [RPM]における剥離領域は、2000 [RPM]での剥離領域よりも小さくなることを確認した。これは、ロータが高回転数であるほうが、横風に対する誘導速度が相対的に速くなるため、剥離した流れがよりロータ面の風上側へ到達するためだと推定される。剥離領域を小さくするためには、横風に対して誘導速度を速くする必要がある。

以上のように、風上インレットでの流れの剥離を捉えることで、迎角、風速、ロータ回転数に対する剥離現象の振る舞いを検証することができた。剥離を抑制するには、迎角を小さく押さえ、横風を低減し、ロータの回転数を増加させて誘導速度を加速させることが有効であると考えられる。

4. 結論

本研究では、小型マルチロータ機へシュラウド付きロータを装着し、水平飛行の際に発生する頭上げピッチングモーメントについて、現象の理解を深めるために、シュラウド付きロータ周り流れの可視化を行い、流体構造を検証した。

可視化実験の実施により、シュラウド付きロータの風上側インレットでは流れが剥離し、ロータ面上の風上側に剥離泡のような構造を形成することがわかった。さらにオープンロータにおいても、風上側翼端において、ロータ面を上向きに通過する流れが発生していることがわかった。これらの現象は、ロータを通過する流れを減速、または逆流させ、ロータの有効迎角が増大することによって推力が増加し、ピッチングモーメ

ントを増加させると考えられる。さらに、シュラウド付きロータでの流れの剥離は、インレット表面に生じる揚力を増加させるため、ピッチングモーメントを増大させると考えられる。以上のように、シュラウド周り全体の流れの可視化を行うことで、ピッチングモーメントの発生には複数の流体现象が影響を与えていることが推察された。

また、風上側インレット表面での剥離の比較では、迎角の増大によって剥離位置がインレット表面の風上に移動することが確認された。マルチロータ機の水平飛行は、迎角が90[deg]前後の状態になるため、マルチロータ機に搭載されたシュラウド内部では剥離が発生していると推定できた。さらに、風速、ロータ回転数の比較によって、剥離の程度が変化し、より低い風速、高い回転数であれば剥離の影響が小さくなることを確認した。

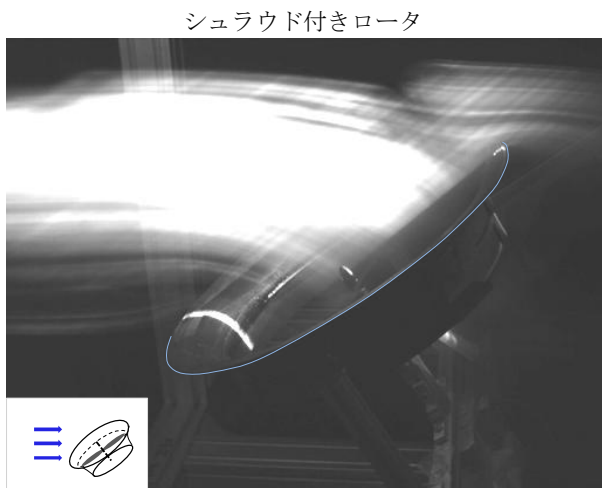
今後は、数値流体力学を交えながら実験を進め、3次元的な流体構造の解析を行い、流れの特徴を精査する必要がある。加えて、空気力の計測結果と照らしあわせて、インレットでの剥離を始めとした、シュラウドに働くピッチングモーメントに影響していると考えられる現象とピッチングモーメント関係を明確にし、モーメント発生を防ぐ手法の検討を行う。

謝辞

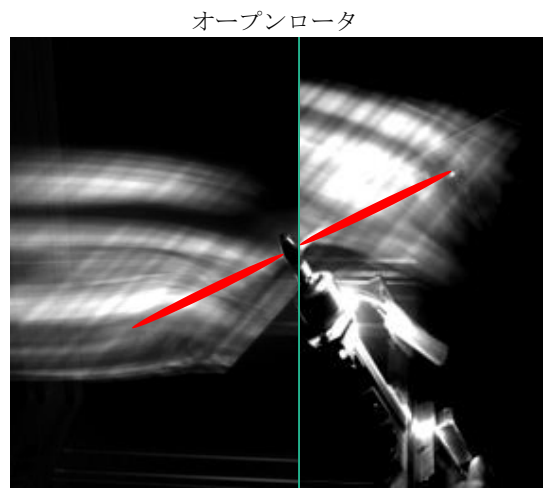
本研究は、東北大学浅井研究室の協力のもとに行われました。可視化実験用の実験設備の提供と、実験時の補助をしていただいた、同研究室千崎貴大氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] J. L. Pereira and I. Chopra, "Hover Test of Micro Aerial Vehicle-Scale Shrouded Rotors, Part I: Performance Characteristics", *Journal of American Helicopter Society*, 54, pp. 012001-1 - 012001-28, 2009.
- [2] J. L. Pereira and I. Chopra, "Hover Test of Micro Aerial Vehicle-Scale Shrouded Rotors, Part II: Flow Field Measurements", *Journal of American Helicopter Society*, 54, pp. 012002-1 - 012002-26, 2009.
- [3] H. Otsuka, K. Nagatani and K. Yoshida, "Evaluation of Hovering Thrust Performance of Shrouded Rotors for Multi-rotor UAVs to Reduce Weight", *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*, AIAA, Kissimmee, Florida, 2015, also AIAA Paper 2015-13.
- [4] R. J. Weir, "Aerodynamic Design Consideration for a Free-Flying ducted Propeller", *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*, AIAA, 1988, also AIAA Paper 1988-4377.
- [5] W. Graf, J. Fleming and W. Ng, "Improving Ducted Fan UAV Aerodynamics in Forward Flight", *AIAA 46th Aerospace Science Meeting and Exhibit*, AIAA, Reno, Nevada, 2008, also AIAA Paper 2008-430.
- [6] P. Martin and C. Tung, "Performance and Flowfield Measurements on a 10-inch Ducted Rotor VTOL UAV", *Proceedings of 60th Annual Forum of the American Helicopter Society*, AHS, Baltimore, MD, 2004.
- [7] J. Fleming, T. Jones and Wing. Ng, "Improvement Control system Effectiveness for Ducted Fan VTOL UAVs Operating in Crosswinds", *2nd AIAA "Unmanned Unlimited" Conference and Workshop & Exhibit*, AIAA, San Diego, California, 2003, also AIAA Paper 2003-6514.
- [8] A. Akturk and C. Camci, "Experimental and Computational Assessment of a Ducted -Fan Rotor Flow Model", *Journal of Aircraft*, Vol.49n No. 3, pp.885-897, 2012.
- [9] V. Hrishikeshavan and I. Chopra, "Performance, Flight Testing of Shrouded Rotor Micro Air Vehicle in Edgewise Gusts", *Journal of Aircraft*, Vol.49, No. 1, pp. 193-205, 2012.
- [10] A. Akturk and C. Camci, "Double Ducted Fan (DDF) as a Novel Ducted Fan Inlet Lip Separation Control Device", *International Powered Lift Conference*, Philadelphia, PA, 2010.

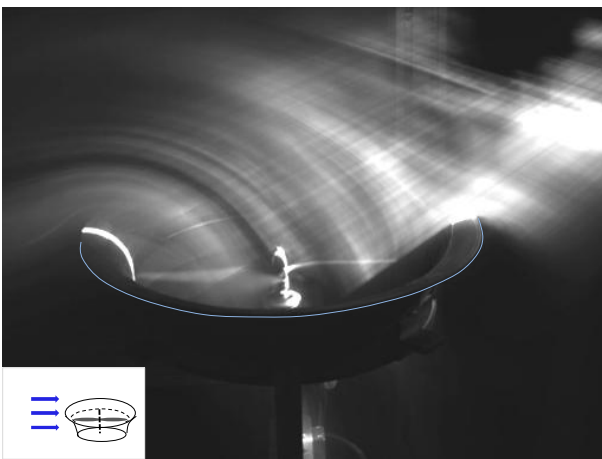


a

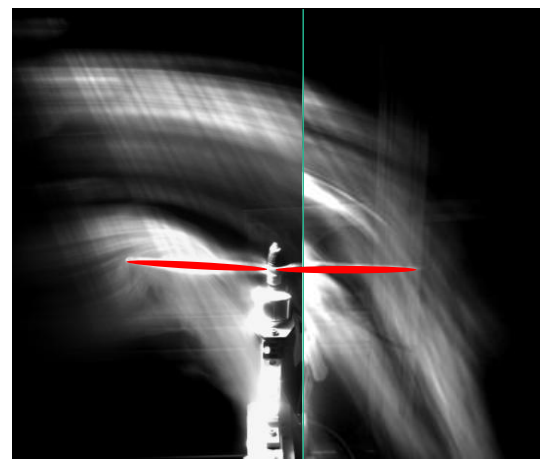


b

迎角 60[deg]



c

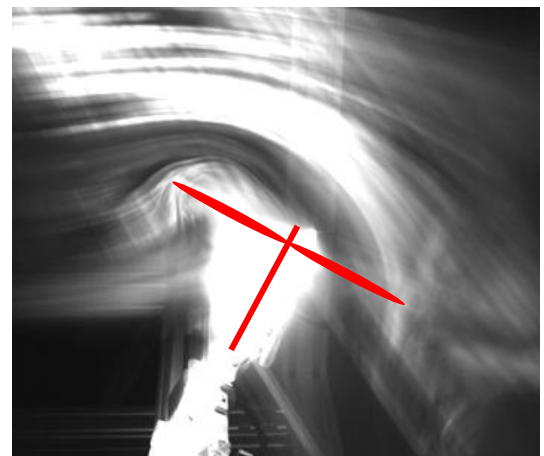


d

迎角 90[deg]



e

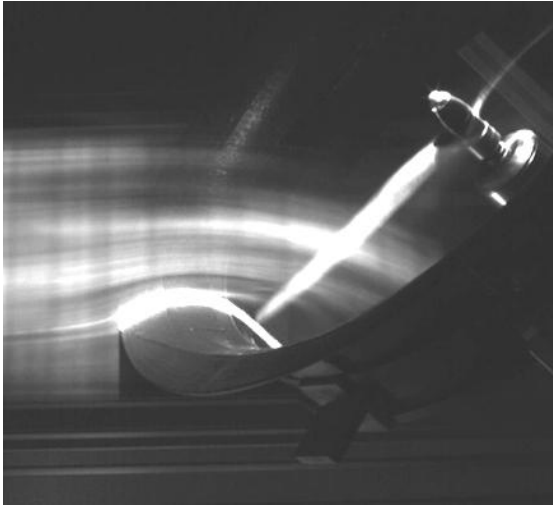


f

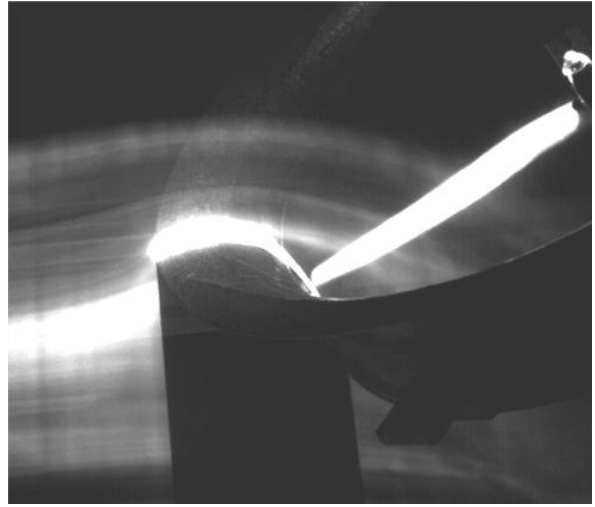
迎角 120[deg]

図9 シュラウド付きロータとオープンロータ周り流れ(迎角60, 90, 120[deg])

撮像した瞬間の都合により、b, dでは同一条件での撮像画像を合わせている。



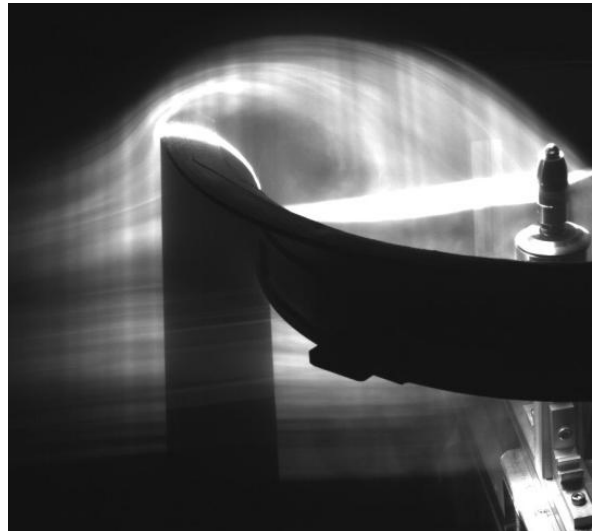
a. 45 [deg]



b. 60 [deg]



c. 75 [deg]



d. 90 [deg]

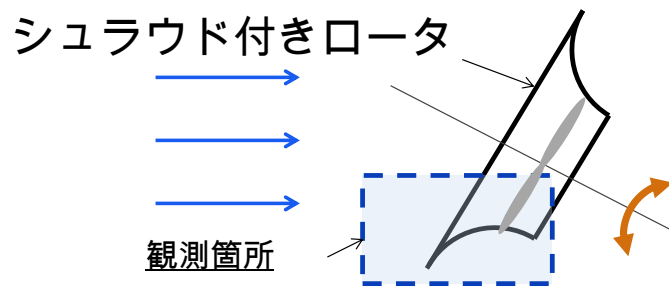
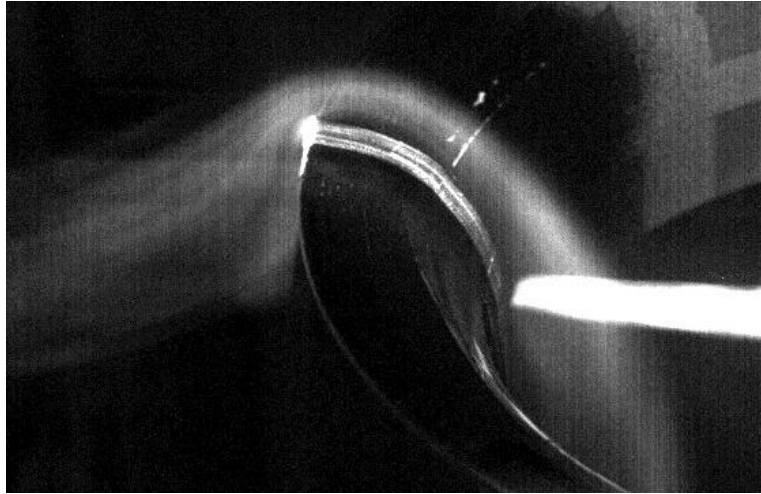
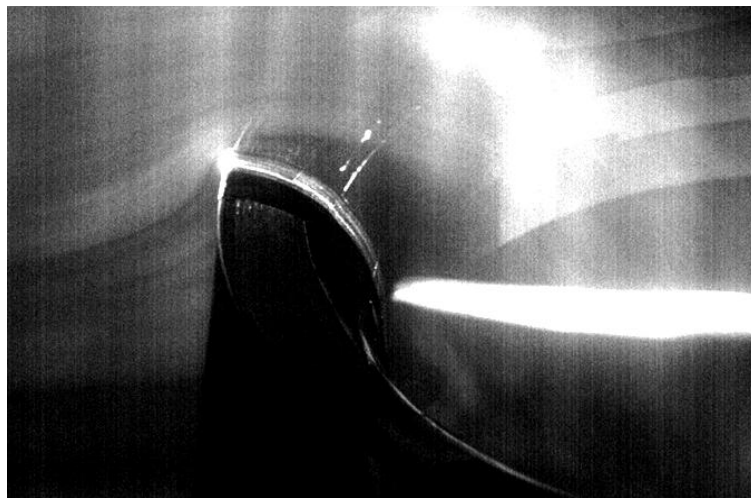


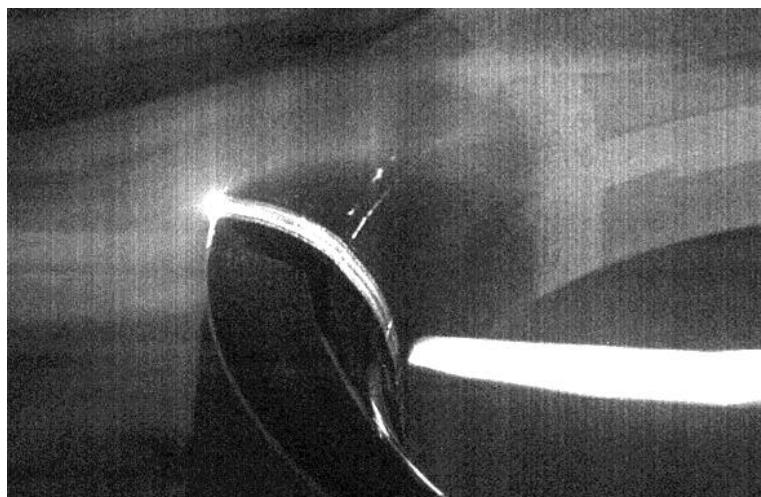
図10 インレットでの迎角に対する剥離位置の変化



a. 2[m/s], 6000[RPM]



b. 6[m/s], 6000[RPM]



c. 6[m/s], 2000[RPM]

図11 風速及び回転数を変化させた時の風上側インレットでの剥離の様子