

2E04 傾斜ロータをもつ小型クアドロータ機の 地面効果時における推力解析と PIV 計測

○河野将佳 (東北大)

PIV Measurements and Analysis on Thrust of a Small
Quadrotor UAV with Canted Rotors in Ground Effect

Masayoshi Kohno (Tohoku University)

Key Words: Quadrotor UAV, Ground Effect, PIV

Abstract

It is difficult that small quadrotor unmanned aerial vehicles (UAVs) land on accurate positions because of ground effect. In the ground effect, rotor thrust changes with height from the ground plane and is affected by upward flow in the center of the quadrotor UAVs. Therefore, it is expected that the change of rotor slant is effective measures for control of ground effect. To examine the effect on small quadrotor UAVs with canted rotors, we measured thrust of a quadrotor UAV model and visualized a flow by particle image velocimetry (PIV) measurement changing the rotor slant. In the thrust measurement, we verified that the thrust depended on the rotor slant. In PIV measurement, we confirmed that the height at which upward flow occurred in center of the quadrotor model and the presence or absence of collision of upward flow were different. Therefore, we deduced that the aircraft with rotor slant facing outwards was suitable for landing.

1. 緒言

無人航空機(Unmanned Aerial Vehicle : UAV)の中でも複数の小型ロータを持つ小型マルチロータ機は、ホバリングや、垂直離着陸が可能であるという特徴を持つ。小型マルチロータ機は、従来の固定翼 UAV と比較して小型で安価なことから、近年では地形計測や災害対応だけでなく、被災した建物内の屋内探査にも利用されている[1]。

一方で、小型マルチロータ機は、離着陸時に機体挙動が不安定となるという課題がある。これは地面付近で発生する地面効果により、ロータ推力が不規則に変化し、その結果機体がふらつくために、機体挙動が安定しなくなると考えられている[2]。着陸時の機体挙動が不安定になることで、目標とする位置への正確な着陸が困難になることに加え、機体が転倒し破損してしまう可能性がある。

この問題を解決するためには、まず、地面効果に関する理解が必要不可欠である。回転翼機の地面効果については、有人ヘリコプタに代表される単独ロータに関して多くの研究が行われてきた。Cheesemanらは、単独ロータに関して推力測定を行い、地面からロータまでの高さとの関係式を提案した[3]。また、Jhonsonらは、単独ロータに関して Particle Image Velocimetry (PIV)により流れの可視化を行い、単独ロータ後流の流れ構造を明らかにした[4]。一方で、小型マルチロータ機のような複数の小型ロータが近接して存在する場合の地面効果は、こ

れまで十分に研究されていない。そこで筆者は、小型マルチロータ機の中でも、4枚のロータをもつ小型クアドロータ機について地面効果の研究を進めてきた。

これまでの実験から、ロータ後流がロータ下面から上面に流れる上昇流となり機体中央部に発生し、この上昇流が推力を減少させることがわかった[5]。このことからロータ後流の方向が、地面効果時の推力に影響を与えられると予想される。そこで本研究では、ロータ後流の変化が期待されるロータの傾斜の向きが、推力およびロータ周囲の流れに及ぼす影響を解明することを目的として、推力測定と PIV による流れ場の可視化を行った。この実験により、ロータ傾斜の向きによってロータ推力、および機体中央部の上昇流により機体を受ける力が異なることを確かめると共に、PIV 計測より、その原因を確認することができる。この結果より、着陸安定化に適した機体構造を検討することが可能となると期待できる。

2. 地面付近における回転翼機に起きる現象

2.1 回転翼機の地面効果

単独ロータが地面に接近した場合、地面効果によりロータ推力が増加することが知られている。図 1 に地面効果を受けるロータ周囲の流れの模式図を示す。図 1 に示すようなロータと地面を考える場合、地面効果を受ける単独ロータの推力 T と、地面からロ

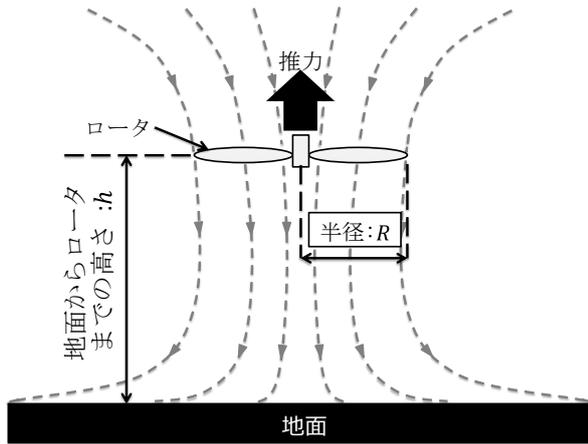


図1 地面効果を受けるロータ周囲の流れ[5]

ータまでの高さ h の関係は式1で示される[2].

$$\frac{T}{T_{OGE}} = \frac{1}{1 - (R/4h)^2} \quad (1)$$

T	: 任意の高さでの推力
T_{OGE}	: 地面効果を受けない状態での推力
R	: ロータ半径
h	: 地面からロータまでの高さ

式1は、ロータのパワーが一定の条件下で成り立つ式であり、地面効果を受けていない状態での推力 T_{OGE} を基準とした推力変化 T/T_{OGE} とロータ半径を基準とした高さ h/R の関係を表している。本稿では、これ以降この h をロータ高さと呼ぶ。式1によれば、ロータが地面に近づくにつれて推力 T が増加することがわかる。

2. 2 クアッドロータ機中央部の流れ

クアッドロータ機が地面効果の影響を受ける際、ロータ後流により機体中央部には図2のような上昇流が発生する。機体には、中央部にバッテリーやセンサ、コントローラを搭載するため、機体が上昇流の影響を受けると考えられる。

本研究では実際の機体を想定し、機体中央に機体部分を模擬したプレートを設置した条件で、ロータ推力だけでなく、上昇流によってプレートが受ける力 F についても測定を行うこととした。ロータを傾斜させた場合、傾斜角度によりロータ後流方向が変化し、プレート下部に向かう流れが異なると考えられる。このことから、上昇流によりプレートが受ける力 F に違いが生じることが予想される。

3. 地面効果時の推力測定実験

小型クアッドロータ機のロータを傾斜させる向きによるロータ推力と上昇流によりプレートが受ける力への影響を比較するため、推力測定実験を行った。

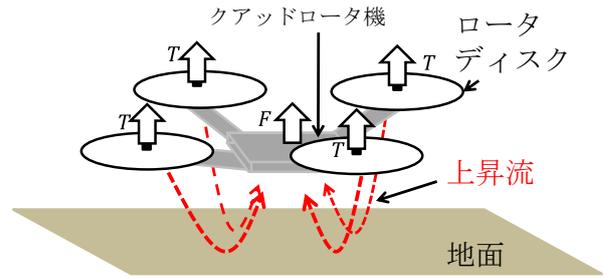


図2 上昇流の概形

3. 1 実験方法

実験装置を図3に示す。この実験装置は、断面積が $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ のアルミフレームを利用し、縦 1240 mm 、横 1240 mm で正方形形状のフレームを製作した。また、正方形形状のフレームの各端に、長さ 1230 mm の支柱を設置した。

実験では正方形形状フレームの中央部にロータを配置した。ただし、ロータを支えるフレームとロータ周りの流れが干渉することを避けるために、フレーム上部とロータの間にはロータ直径程度の長さである 260 mm の間隔を設けた。また、図3(a)に示すように、本実験では、対角の位置にあるロータを取り付けた間隔の距離を軸間距離と定義し、その長さを 450 mm とした。

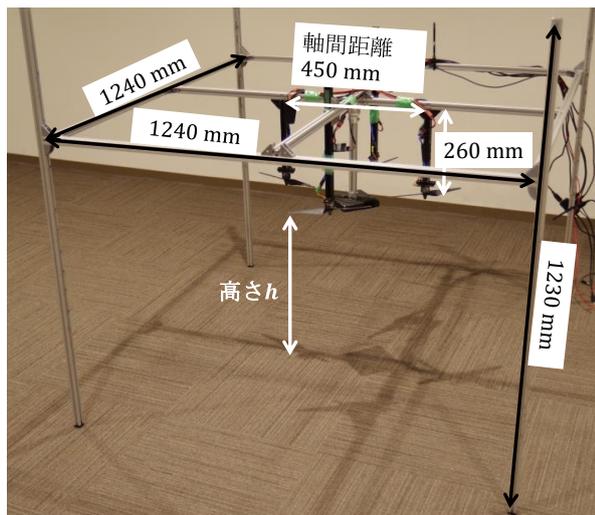
本実験における推力の測定にはLeprino社製6軸力覚センサSFS040F200M1ROU6を使用し、ロータ1枚にかかる推力を、サンプリング周波数 1.2 kHz で計測を行った。6軸力覚センサは、図3(b)-(c)に示すようにモータ上部およびプレート上部に取り付けた。なお、この6軸力覚センサの定格は 20 N であり、分解能は $1/4000$ である。

ロータの回転数はAutoQuad製スピードコントローラESC32ver2を用いて制御した。

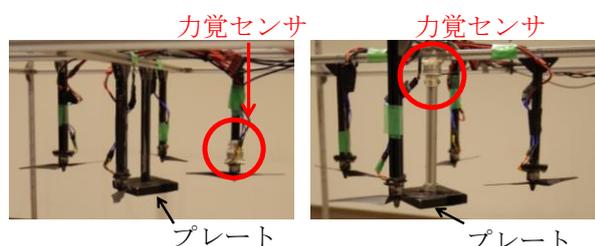
本試験では、DJI Phantom2に使用されている半径 $R = 119\text{ mm}$ のロータを使用した。図4にロータを示す。

本実験では外向き傾斜、傾斜なし、内向き傾斜の3つの条件について、ロータ推力とプレートが受ける力を計測した。側面から見たロータの状態を図5に示す。傾斜ロータの傾斜角度 θ は、図5で定義する向きを正とし、外向き傾斜では $\theta = +20^\circ$ 、傾斜なしでは $\theta = 0$ 、内向き傾斜では $\theta = -20^\circ$ である。

また、本実験では、実際の機体を想定し、図6(a)に示すような機体を模擬した正方形のプレートを、図6(b)のように機体の中心に設置した。プレートは、それぞれ縦×横×厚さが $120\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ である。また図5に示すように、いずれの傾斜にお



(a) 実験装置の全体図



(b) ロータ推力測定時の (c) プレートが受ける力測定
力覚センサの配置 力覚センサの配置

図3 推力測定の実験装置



図4 実験に使用したロータ[5]

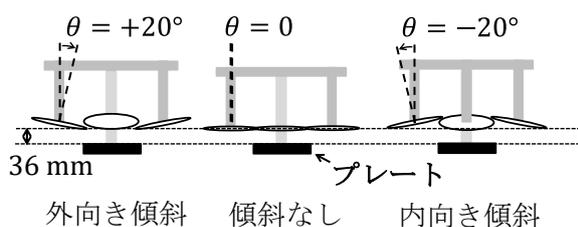
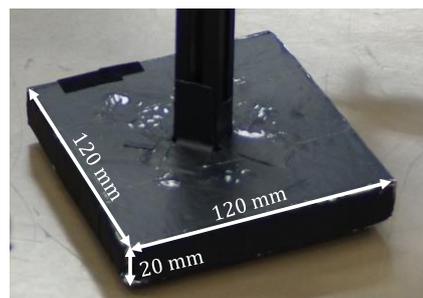


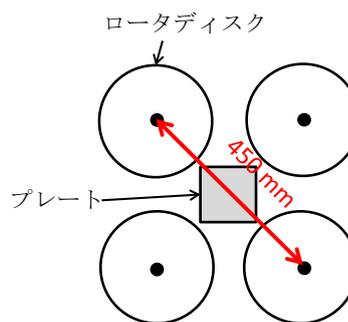
図5 側面から見たロータの傾斜状態

いてもロータの下端とプレート上部の距離が 36 mm となるように取り付けた。

測定において、いずれのロータ高さにおいてもロータ回転数は 6000 rpm に固定し、ロータ高さは 0.5R から 6R とした。以上の実験条件を表 1 にまとめる。なお、推力の計測値は、6 軸力覚センサから 5000 回分の値をサンプリングし、その平均値をとることで算出した。以上の方法の推力計測を各条件で 3 回行い、その平均値を最終的な推力の計測値とした。



(a) 機体中央部を模擬したプレート



(b) プレートとロータの配置

図6 機体中央部を模擬したプレートと配置

3. 2 実験結果

3. 2. 1 ロータ 1 枚の推力 T の測定結果

1 枚のロータにかかる推力とロータ高さの関係について実験結果を図 7 に示す。なお、図 7 中の単独ロータの推力の値は、先行実験での測定結果[6]を参照した。

ロータ傾斜が外向きの条件については、ロータ高さ $6R$ から $4R$ まで、推力は 2.51 N でほとんど変化がなかった。 $3R$ よりも小さくなると推力が減少傾向を示すことがわかった。また、ロータ高さ $1R$ で推力 2.38 N となり、それよりロータ高さが小さい $0.5R$ では 2.46 N と推力が増加した。

一方、ロータ傾斜がない条件については、ロータ高さ $6R$ から $4R$ までは推力は 2.65 N からほとんど変化がなかった。これに対しロータ高さが $3R$ よりも小さくなると、ロータ高さ $2R$ となるまで推力が減少傾向を示し、2.42 N となった。ロータ高さ $2R$ よりも小さい高さでは、推力が上昇に転じ、ロータ高さ $0.5R$ では推力は 3.27 N となった。

一方、ロータ傾斜が内向きの条件については、傾斜なしの条件と同様にロータ高さ $6R$ から $4R$ まで、推力は 2.50 N からほとんど変化がなかった。一方でロータ高さが $3R$ よりも小さくなると、ロータ高さ $1.5R$ となるまで推力が減少傾向を示し、2.37 N となった。ロータ高さ $1.5R$ よりも小さい高さでは、推力が上昇に転じ、ロータ高さ $0.5R$ では推力は 2.68 N と

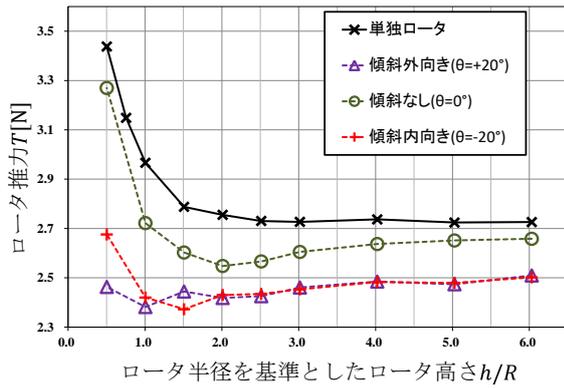


図7 ロータ推力とロータ高さの関係

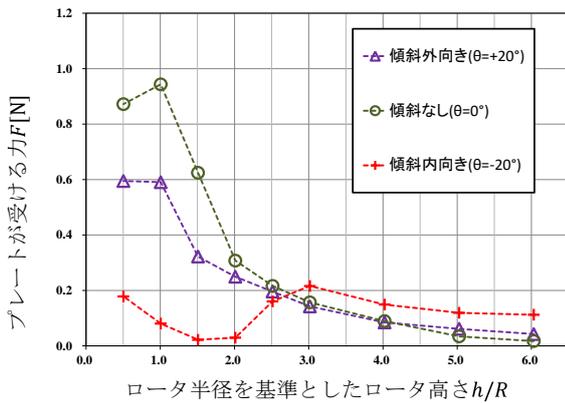


図8 プレートが受ける力とロータ高さの関係

なった。

3. 2. 2 プレートが受ける力Fの測定結果

次にプレートが受ける力とロータ高さの関係を図8に示す。

ロータ傾斜が外向きの条件では、ロータ高さ6RでFが0.043Nであり、ロータ高さが1RでFが0.59Nであった。このことから、地面に近づくにつれてFが大きくなっていることがわかる。一方で、ロータ高さ0.5RでのFは0.59Nであり、ロータ高さ1RでのFとほとんど同じ値をとっていた。

ロータ傾斜がない条件では、ロータ高さ6RでFが0.017Nであり、ロータ高さが1RでFが0.94Nであった。このことから、外側傾斜の条件と同様、地面に近づくにつれてFが大きくなっていることがわかる。一方で、ロータ高さ0.5RでのFは、ロータ高さ1RでのFよりも小さくなり0.87Nであった。

ロータ傾斜が内向きの条件では、ロータ高さ6RでFが0.11Nであり、ロータ高さが3RでFが0.22Nであった。このことから、ロータ高さ6Rから3Rまでは、地面に近づくにつれてFは大きくなることがわかった。一方ロータ高さが3Rよりも小さくなるとFは減少傾向を示し、ロータ高さ1.5Rからは再度増加し

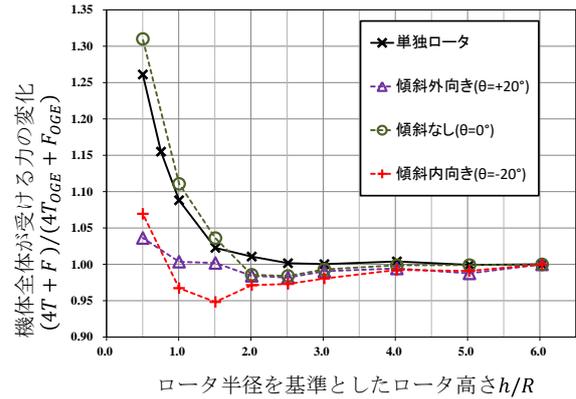


図9 機体全体が受ける力の変化とロータ高さの関係

て、ロータ高さ0.5RではFは0.18Nとなった。

3. 3 考察

実験結果より、ロータ傾斜の向きにより、ロータ推力が異なること、および中央部のプレートが受ける力が異なることを確認した。特に、プレートが受ける力に関して、ロータ傾斜がない条件においてFが最も大きく、ロータ傾斜が内向きの条件では、Fが最も小さいことがわかった。

また、図7と図8に関し、地面効果による機体全体が受ける力Lを正規化した結果を図9に示す。ただし、Lは

$$L = 4T + F \quad (2)$$

で算出し、

$$\frac{L}{L_{OGE}} = \frac{4T + F}{4T_{OGE} + F_{OGE}} = \frac{1}{1 - (R/4h)^2} \quad (3)$$

として図9を算出した。ここで、 T_{OGE} および F_{OGE} は地面効果の影響を受けないと考えられるロータ高さ6RでのTおよびFとした。

図9より、ロータ傾斜が外向きの条件では、 $h/R = 2.5$ から T/T_{OGE} の変化が顕著になり、一度推力が減少した。一方 $h/R = 2.5$ よりも低い場合、推力は上昇に転じ、 $h/R = 0.5$ の高さでは $T/T_{OGE} = 1.03$ となった。

一方、ロータ傾斜がない条件では、 $h/R = 2.5$ から

表1 推力測定の実験条件

ロータ半径	119 mm
ロータ回転数	6000 rpm
ロータ高さ	0.5R-6R
ロータの傾斜	外向き(+20°), 傾斜なし(0°), 内向き(-20°)

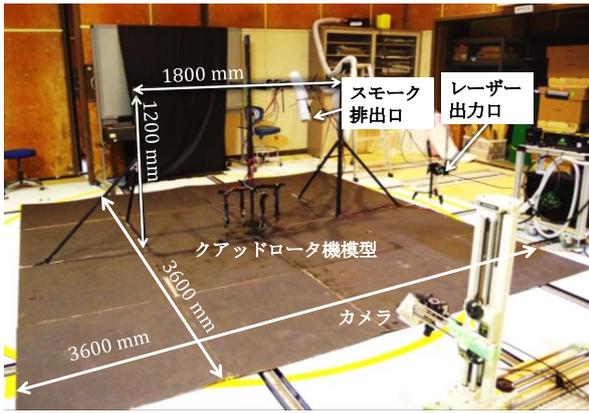


図 10 PIV 計測の実験装置

T/T_{OGE} の変化が顕著になり、推力が減少傾向を示した。 $h/R=2.0$ の高さで極小値を示した後、さらに低い高さで推力は上昇し、 $h/R=0.5$ では $T/T_{OGE}=1.31$ となった。

ロータ傾斜が内向きの条件では、 $h/R=3.0$ から T/T_{OGE} の変化が顕著になり、一度推力が減少した。 $h/R=1.5$ の高さで極小値を示した後、さらに低い高さで推力は上昇し、 $h/R=0.5$ では $T/T_{OGE}=1.07$ となった。

以上より、機体全体にかかる力に関しても、ロータ傾斜の向きにより、その変化の傾向が異なることを確認した。特にロータ傾斜がある条件では、傾斜がない条件と比較し、 $h/R=0.5$ での $(4T+F)/(4T_{OGE}+F_{OGE})$ は、小さいことがわかった。また、ロータ高さによる推力変化が最も小さい条件は、外向き傾斜であることがわかった。

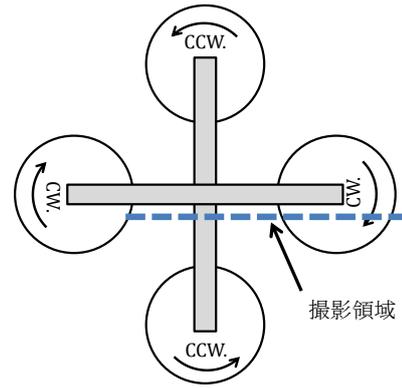
4. PIV 計測によるロータ周囲の流れ場の可視化

推力計測実験において、ロータの傾斜向きによってロータ推力やプレートが受ける力が異なることを確認した。そこで、ロータの傾斜向きによる流れ場の比較を行うために、PIV 計測を行い、流れ場の可視化を行った。

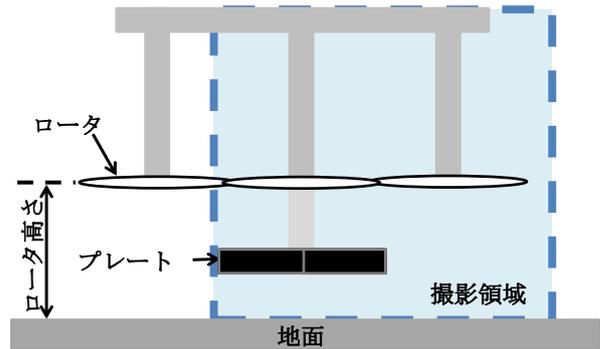
4. 1 実験方法

PIV とは、流体中に分散した粒子を撮影し、連続する 2 枚の画像の粒子の変位から速度ベクトル場を算出する手法である。

実験装置を図 10 に示す。実験装置は縦×横が 900 mm × 900 mm の板材 16 枚床に配置し、全体で縦×横が 3600 mm × 3600 mm となるように実験領域を確保した。実験装置中央部には、長さ 1200 mm の 2 本のアルミフレームの上に、断面積が 40 mm × 40 mm、長さ 1800 mm のアルミフレームを設置した。



(b) 模型上部から見た撮影領域



(a) 模型側面から見た撮影領域

図 11 PIV 計測の撮影領域

本実験では、図 10 に示す小型クアドロータ機の模型に、レーザーシート光を入射させ、模型上部から可視化用スモークを供給し、ハイスピードカメラでスモークの流れを撮影した。その際、連続する 2 枚の画像は 100 μ s の間隔で撮影した。この測定を 10 Hz で 1000 回行い、これらの画像から平均速度場の算出を行った。なお、測定には Nd : Yttrium Aluminium Garnet (YAG) レーザーを用いた。

可視化する領域を図 11 に示す。レーザーシートは機体模型の対角の位置にあるロータを通る断面に入射させた。ロータの回転数は 6000 回転とし、ロータ高さは 1.5 R とした。模型の軸間距離は推力測定実験と同様に 450 mm とし、ロータの傾斜も外向き、傾斜なし、内向きの 3 つに関して測定を行った。実験条件を表 2 にまとめる。

表 2 PIV 計測の実験条件

ロータ半径	119 mm
ロータ回転数	6000 rpm
ロータ高さ	1.5 R
ロータの傾斜	外向き(+20°), 傾斜なし(0°), 内向き(-20°)

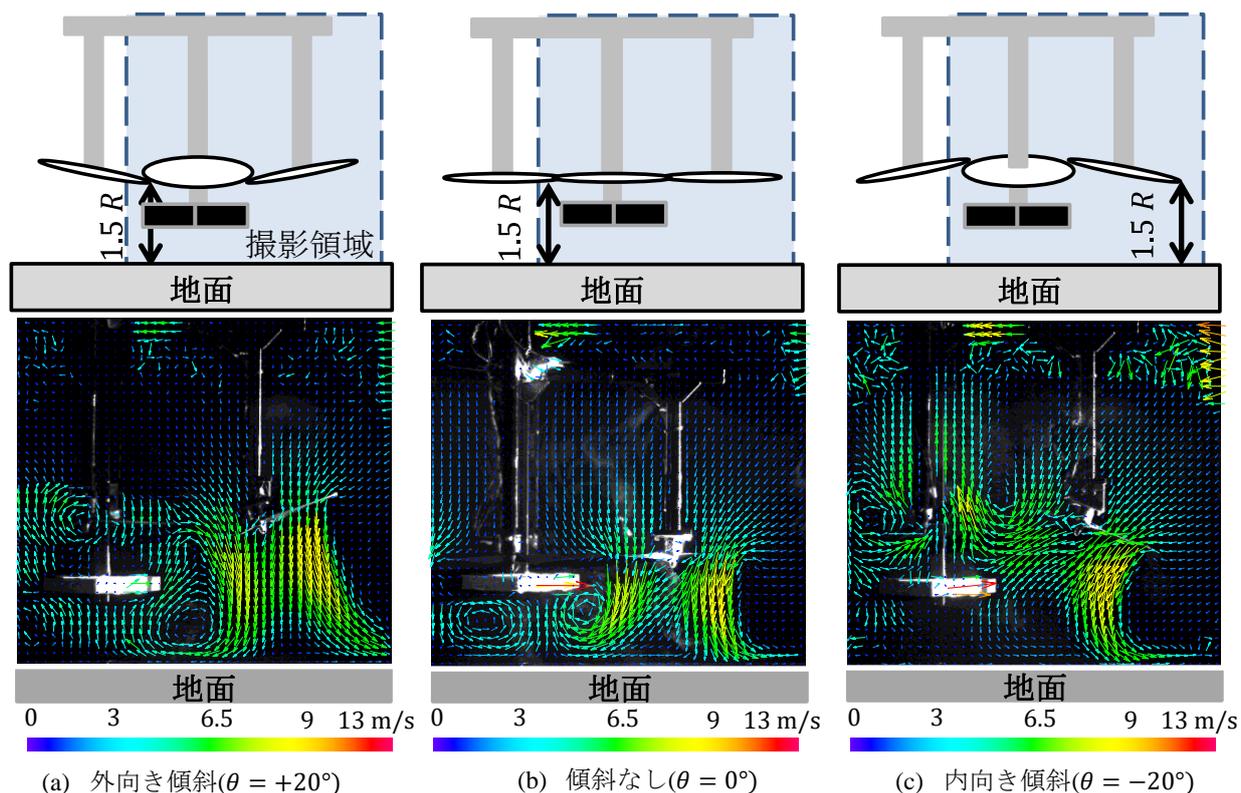


図 12 PIV 計測による流れの可視化結果

4. 2 実験結果

図 12 にそれぞれのロータ傾斜状態における平均速度場を示す。ただし、図 12(a)はロータ傾斜が外向きの条件、図 12(b)はロータ傾斜がない条件、図 12(c)はロータ傾斜が内向きの条件である。図中には流速の向きを矢印で表しており、流速の大きさを色と矢印の長さで示している。

図 12(a)より、ロータ傾斜が外向きの場合、図中右側のロータ後流に、機体中央部への流れが存在していることがわかる。その流れは機体中央部で上昇とし、プレートに衝突している。

また図 12(b)より、傾斜がない条件では、外側傾斜と同様、図中右側のロータ後流は、機体中央部に流れ、その後、上昇流となりプレートに衝突している。

また、図 12(c)より、ロータ傾斜が内向きの条件では、図中右側のロータ後流に関しても、機体中央部への流れがある。その流れは、プレート上部で上昇流となっており、プレート下部での流速は 0 に近いことがわかる。

4. 3 考察

図 12 に示す実験結果より、ロータ傾斜の向きによって、ロータ後流の流れ場、特に上昇する流れの様子が変化することがわかった。特に、ロータ傾斜が

外向きの条件と傾斜がない条件では、機体中央部のプレート下部で上昇流が発生し、プレートを押し上げる向きに力が発生していると考えられる。一方で、内向き傾斜ではプレートの上部で上昇流が発生しており、プレートを押し上げる向きに力が働いていないと考えられる。

この上昇流がプレートに及ぼす力について、推力測定実験の結果を含めて考える。第 3 章において、内向き傾斜ではプレートが受ける力は小さく、外向き傾斜と傾斜なしの条件ではプレートが受ける力は大きいことを述べた。このことから、プレートに発生した力の原因の一つは上昇流であると考えられる。以上より、上昇流はプレートが受ける力および機体全体にかかる力に影響を及ぼすことがわかった。

これらの結果を踏まえて、着陸に適した機体構造を考える。推力制御の観点から、ロータ高さによる機体全体にかかる力の変化が少ない方が機体構造としてはよいと考えられる。第 3 章と本章の考察から、傾斜なしの条件では、ロータ高さが小さくなった際の機体全体が受ける力の変化は大きく、プレートは上昇流から力を受けていた。また、内向き傾斜では、プレートが受ける上昇流から受ける力は小さい一方で、機体全体が受ける力はロータ高さによって減少傾向と増加傾向があり、その変化は大きいと考えら

れる。一方、外向き傾斜では、プレートは上昇流から力を受けているが、機体全体にかかる力の変化は小さかった。したがって、着陸に適した機体構造はロータを外向きに傾斜した機体であると考えられる。

5. 結言

本研究では、地面効果時における小型クアッドロータ機のロータ傾斜の向きによる、推力とロータ周囲の流れへの影響の把握を目的として、推力測定実験と PIV 計測による流れの可視化試験を行った。

推力測定実験から、ロータ傾斜の向きによってロータ推力、および機体中央部の上昇流により受ける力が異なることを示した。特に、機体中央部が受ける力は、ロータ傾斜がない条件が最も大きく、ロータ傾斜が内向きの条件が最も小さいことがわかった。さらに、機体全体にかかる力の変化は、外向きのロータ傾斜の条件が最も小さいことがわかった。また PIV 計測から、ロータ傾斜によってロータ後流が変化すること、特に機体中央部に向かう流れが異なり、上昇流が機体部分へ及ぼす力が変化することを確認した。クアッドロータ機の着陸を考えた場合、地面付近では地面効果の影響を受けるためロータ推力は高さによって変化するが、制御の観点から機体にかかる力は高さによらずに一定となることが望ましいと考えられる。本研究での実験結果を考慮すると、ロータ傾斜を外向きとすることで、より安定した着陸が可能なクアッドロータ機を実現できると考えられる。

本研究では小型クアッドロータ機の地面効果時における推力変化に着目して実験を行った。一方で、クアッドロータ機は水平方向に移動する際機体を傾けるため、機体全体にかかるモーメントが、着陸安定性を評価する上では重要となると考えられる。今後は地面効果時に機体が傾いた際のモーメントの測定を行う予定である。

参考文献

[1] Michael, N ,Shen, S ,Mohta, K, Mulgaonkar, Y , Kumar, V, "Collaborative Mapping of an Earthquake-Damaged Building via Ground and Aerial Robots" Journal of Field Robotics Volume 29, Issue 5 September/October 2012 Pages 832-841.

[2]幸尾治朗, 岡遠一, "地面近くでホバリングするヘリコプタ・ロータに関する実験", 航空宇宙技術研究所報告 113(1966):1-17.

[3]Cheeseman, I. C. and Bennet, W. E, "The Effect of Ground on a Helicopter Rotor in Forward Flight" ARC R & M 3021,1955.

[4]Johnson, Bradley, Leishman, J. Gordon, Sydney, Anish, "Investigation of Sediment Entrainment Using Dual-Phase, High-Speed Particle Image Velocimetry", Journal of the American Helicopter Society, Volume 55, Number 4, 1 October 2010, pp. 42003.

[5]河野将佳, "地面効果を受ける小型クアッドロータ機の推力解析とロータ上流流れの可視化", 日本航空宇宙学会第 55 回飛行機シンポジウム, 1F16, 2017. .

[6]河野将佳, 大塚光, 桐林星河, 永谷圭司, "小型クアッドロータ機のロータ軸間距離と地面効果の関係の検証", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 1P2-F02, 2017.