

1F16 地面効果を受ける小型クアドロータ機の 推力解析とロータ上流流れの可視化

○河野将佳（東北大）

Visualization of the Upstream Flow of Rotors and Analysis
on Thrust of a Small Quadrotor UAV in Ground Effect
Masayoshi Kohno (Tohoku University)

Key Words: Quadrotor UAV, Ground Effect, Flow Visualization

Abstract

Posture of small quadrotor unmanned aerial vehicles (UAVs) in landing motion is unstable because of ground effect. In the ground effect, rotor thrust changes with height from the ground plane and depends on the distance between rotors. However, it has been unclear why the distance between rotors changes thrust in the ground effect. To examine the factor affecting thrust changes, we measured thrust of a quadrotor UAV model and visualized an upstream flow of the rotor changing the rotors distance. Furthermore, effect of a plate to prevent upward flow was examined in the experiments. Thrust measurement results showed that thrust depended on both the distance between rotors and absence of the plate. In the visualization experiment, we verified that the upward flow in center of the quadrotor model developed in ground effect and the flow speed was changed by both the distance between rotors and absence of the plate. Therefore, we deduced that the distance between rotors affected the upstream development in rotor wake and it changed the thrust of a quadrotor.

1. 緒言

小型マルチロータ機は、垂直離着陸やホバリングが可能な回転翼機である。無人航空機の中でも、固定翼機と比較して小型で安価であることから、災害対応や地形計測などに利用されている。近年では、被災した建造物内の屋内探査に小型マルチロータ機が利用された[1]。

マルチロータ機は利用が盛んになる一方で、離着陸時に地面効果によって、機体挙動が不安定になるという課題がある。これは地面付近において、地面効果によってロータ推力が不規則に変化し、機体姿勢がふらつくために起こると考えられている。そのために、地面付近では機体が滑るように移動してしまい、目標位置に正確に着陸できなくなる可能性があることに加え、着陸姿勢が不安定になることで機体が転倒し、破損することが考えられる。

この問題を解決するためには、回転翼機の地面効果に関する研究が不可欠である。地面効果については、これまで有人ヘリコプタを対象として多くの研究が行われてきた[2]。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が行われていない。そこで筆者らは小型マルチロータ機の中でも、小型クアドロータ機の地面効果に関する研究を進めてきた。

これまでに筆者らは、地面効果時におけるクアッ

ドロータ機の推力変化を把握するために、推力測定実験を行った。ロータと地面の高さおよびロータ間距離を変化させ、推力の大きさを比較すると、単独ロータの地面効果とは異なり、地面効果がロータ半径の3倍程度以下の高さから現れること、さらにロータ間の距離により地面効果による推力変化の傾向に違いが生じることがわかった[3]。次に、クアドロータ機のロータ間距離による流れの違いを確認するため、スモークワイヤー法による流れの可視化試験を行った。この実験により、地面効果時において、ロータ間距離によって、ロータ間の流れに違いが生じ、特にロータ間距離が大きい場合、ロータ間にロータ下面から上面に流れる上昇流が顕著に現れるようになることがわかった。しかしスモークワイヤー法では、煙がすぐに拡散するため、詳細な流れの様子がわからなかった。

そこで本研究では、煙を長時間排出できる装置を使用して、地面効果時にロータ間に発生する上昇流と推力変化の関係を把握し、地面効果時におけるロータ間距離による推力変化の原因を推定することを目的とした2つの実験を行った。実験では、ロータ間距離の変化、および上昇流を防ぐための閉塞板を装着した条件で、推力測定と、ロータ上流の可視化試験を行った。この実験により、ロータ間距離の変化に伴うクアドロータ機の地面効果の影響と原因を把握することで、着陸挙動を安定化に適したロー

タ配置を検討することが可能となる。

2. 地面付近で回転翼に起きる現象

2. 1 回転翼機の地面効果

ロータが地面に接近した場合、地面効果によってロータ推力が上昇することが知られている。単独ロータのホバリング時に、地面効果を受けるロータ推力と地上からの高さの関係は、理論式として式 1 で示される[2].

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

T	: 任意の高さでの推力
T_{out}	: 地面効果を受けない状態での推力
R	: ロータ半径
h	: ロータと地面との間の距離(高さ)

式 1 中で、 T は単独ロータの推力を、 h はロータと地面との間の距離を表している。図 1 に地面効果を受けるロータ周り流れの模式図を示す。式 1 はロータのパワーが一定の条件下において成り立つ式であり、地面効果を受けていない状態での推力 T_{out} を基準とした推力変化 T/T_{out} と、地面とロータとの距離の関係を表している。式 1 から、ロータが地面に近づくにつれて、ロータ推力が上昇することがわかる。特に $h=2R$ 、すなわちロータ直径程度の高さから推力上昇は顕著になる。

2. 2 地面効果時に発生する上昇流の発達

1章で述べたように、スモークワイヤー法によって、地面効果時にクアドロータ機のロータの間に上昇流が発生することを確認した。上昇流はロータ間を通過していたことから、上流部に抜けると考えられる領域は、図 2(a)に示す赤い斜線で示された範

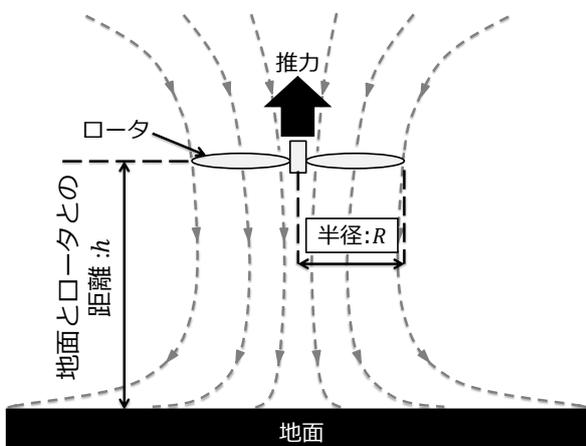


図 1 地面効果を受けるロータとその周囲の流れ[3]

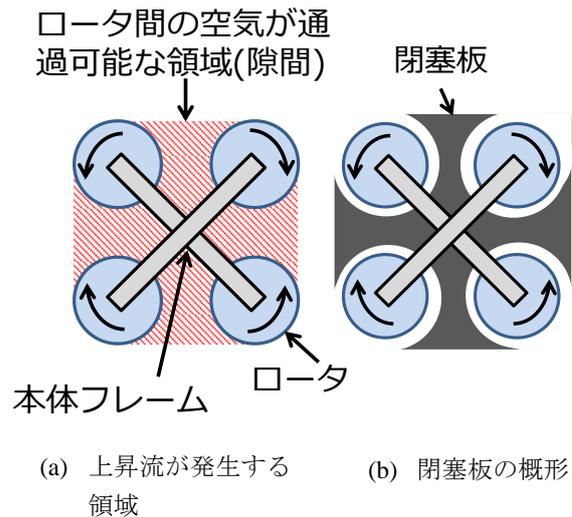


図 2 上昇流が発生する領域と閉塞板

囲であると考えられる。以降では、上昇流が通過可能な領域を、隙間と呼ぶ。

本研究では隙間の有無による推力変化の傾向を確認するため、隙間を塞ぐ閉塞板の有無による推力変化と上昇流の発達との比較を行った。閉塞板は図 2(b)に示すように、隙間に沿った形とした。

3. 地面効果時の推力測定実験

クアドロータ機が地面効果を受ける際に、ロータ間距離、および閉塞板の有無が推力変化に及ぼす影響を確認するために、推力測定実験を行った。

3. 1 実験方法

実験装置を図 3 に示す。実験装置は断面積が $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ のアルミフレームで製作し、その大きさは縦 1240 mm 、横 1240 mm 、高さ 1230 mm とした。

実験ではクアドロータ機の模型を用いて推力測定を行った。模型を図 4 に示す。模型は、断面積が $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ のアルミフレームで製作した。機体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、支柱によってロータ直径程度の長さである 260 mm の間隔を設けた。また、機体模型でのロータ間距離をロータとの最小距離で定義した。ロータ間距離の定義を図 5 に示す。

計測には Leprino 社製 6 軸力覚センサ CFS034CA101U を使用し、クアドロータ機模型全体にかかる推力を、サンプリング周波数 1.2 kHz で測定した。6 軸力覚センサは図 3 に示すように模型中央部に取り付けた。6 軸力覚センサの定格は 100 N であり、分解能は $1/4000$ である。

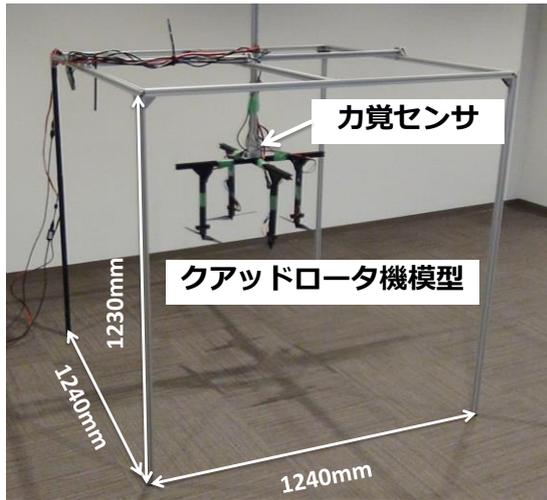


図3 推力測定の実験装置

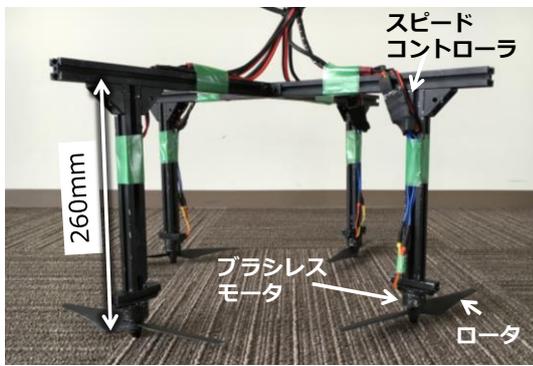


図4 実験で使ったクアドロータ機模型

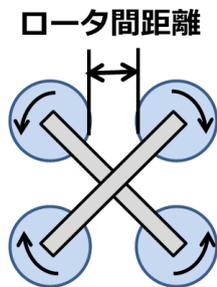


図5 ロータ間距離の定義

ロータの回転数はスピードコントローラを用いて制御した。スピードコントローラはロータを取り付けたブラシレスモータに接続されており、コンピュータからの指令値により、目標値でモータを回転させることができる。スピードコントローラには AutoQuad 製 ESC32ver2 を用いた。

本試験では、DJI Phantom2 に使用されている直径 239 mm(半径 $R = 119$ mm)のロータを使用した。図6に実験で使ったロータを示す。

ロータ間の隙間に発生する上昇流の影響を検証するため、閉塞板の有無による推力変化の比較を行った。閉塞板は図7のように、縦×横×厚さが 560 mm × 560 mm × 20 mm であり、ロータが入る位置を



図6 実験で使ったロータ

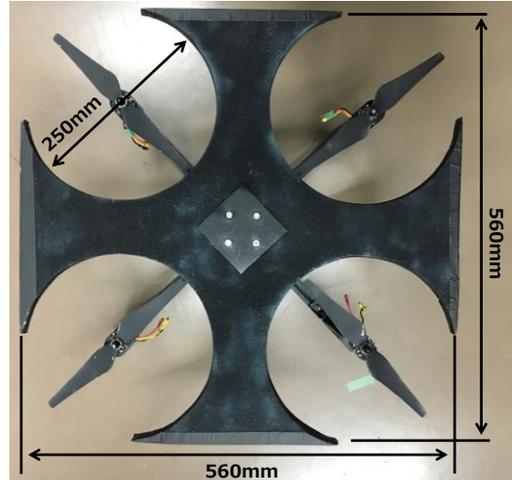


図7 閉塞板の形状

中心とした直径 250 mm の円形の穴が空いている。

本実験ではロータ間距離が $0.07R$, $0.31R$, $0.67R$ のときの推力を測定した。なお、ロータ間距離 $0.07R$ は、接触しない程度にロータを近づけた距離である、ロータ間距離 $0.31R$ と $0.67R$ は、クアドロータ機で実際に使用されているロータ間距離を参考に設定した。加えて、ロータ間距離 $0.67R$ については、閉塞板を付けた状態に関して推力測定を行った。

いずれの高さにおいてもロータ回転数は 6000 rpm とし、地面からの高さは $0.5R$ から $6R$ とした。以上の実験条件を表1に示す。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。

3. 2 実験結果

クアドロータ機模型全体にかかる推力と地面からの高さの関係を図8に示す。ただし T_{out} は、地面効果の影響を受けないと考えられる高さ $6R$ での推力とした。このとき、高さ $3R$ から $6R$ における T/T_{out} の変

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
高さ	$0.5R$ - $6R$
ロータ間距離	$0.07R$, $0.31R$, $0.67R$, $0.67R$ (閉塞板付属)

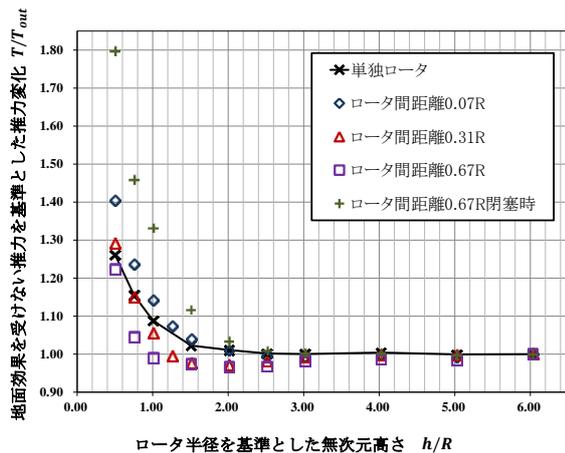


図 8 地面効果による推力と高さの関係

化が 2% 以内となるため、この高さの範囲では、地面効果による推力への影響が小さいと考えられる。なお、図 8 中の単独ロータの推力変化の値は、先行実験での計測結果[3]を参照した。

図 8 から、ロータ間距離 0.07R では単独ロータと同様に $h/R = 2.0$ よりも低い高さで T/T_{out} の変化が顕著になり、 T/T_{out} が 1.0 よりも大きく、推力が単調に増加していることがわかる。また $h/R = 0.5$ での T/T_{out} はロータ間距離 0.07R の方が単独ロータよりも 14% 大きかった。

ロータ間距離 0.31R では、模型の高さを低くしていくと、単独ロータよりも高い位置で推力変化が顕著になり、 $h/R = 3.0$ から T/T_{out} が変化した。高さ $h/R = 3.0$ からは推力が減少傾向を示し、 $h/R = 2.0$ の高さで極小値を示している。 $h/R = 2.0$ よりも低くなると、推力は上昇傾向を示した。このロータ間距離では、高さ 0.5R の場合を除き、単独ロータよりも T/T_{out} が低かった。

ロータ間距離 0.67R では、ロータ間距離 0.31R と同様に $h/R = 3.0$ から T/T_{out} 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、さらに低い高さでは推力は上昇しているが、ロータ間距離 0.31R よりも推力の上昇傾向は緩やかであった。

一方、ロータ間距離 0.67R で閉塞板を付けた状態では、高さを低くしていくと、閉塞板がない状態と同様に $h/R = 3.0$ から推力の変化が顕著になるが、その傾向は異なっていた。閉塞板がある場合、 $h/R = 3.0$ より低いとき、推力は減少することなく増加傾向を示すことがわかる。この状態での推力変化は、ロータ間距離 0.07R よりも大きかった。

ロータ間距離、および閉塞板の有無による T/T_{out}

の変化に着目する。高さ 0.5R から 3R の間での T/T_{out} はロータ間距離、および閉塞板の有無によって異なっていた。この高さの範囲で T/T_{out} を小さい順に並べると、ロータ間距離 0.67R、ロータ間距離 0.31R、ロータ間距離 0.07R、閉塞時のロータ間距離 0.67R の順番となった。

3. 3 考察

実験結果より、いずれのロータ間距離、および閉塞板を付けた状態においても $h/R = 3.0$ より低い高さで推力変化が顕著になっていることがわかる。したがってクアッドロータ機では、 $h/R = 3.0$ 付近の高さ以下で地面効果の影響が現れ、推力変化が顕著になることを確認した。

また、ロータ間距離によって地面効果による推力変化の傾向が異なること、および同一ロータ間距離でも閉塞板の有無でも推力変化の傾向が異なることを確認した。特にロータ間距離 0.07R と閉塞板を付けたロータ間距離 0.67R では、単独ロータと比較して、地面効果による推力増加の変化が大きくなっている。したがって、ロータ間の隙間の面積が小さくなるにつれて、推力変化量が大きくなることがわかった。以上のように、ロータ間の隙間の面積により、地面効果による推力変化の傾向が異なることを確認した。

4. ロータ上流流れの可視化実験

推力計測実験において、ロータ間距離、および閉塞板の有無によって地面効果による推力変化の傾向が変化し、ロータ間の隙間の面積が小さくなるほどに推力が大きくなることを確認した。そこで、推力変化とロータ間の隙間の面積による流れの違いを把握するために、スモークを用いた流れの可視化を行った。

4. 1 実験方法

実験装置を図 9 に示す。本実験では 3 章で使用したクアッドロータ機模型を用いて、その上部から可視化用スモークを流すことで、流れの観察を行った。

実験装置の床面は、複数の板材を並べて作製し、流れの観察が容易になるように黒く塗装した。床面の寸法は縦 3600 mm、横 3600 mm である。流れの可視化に使用するスモークはフォグジェネレータにより発生させ、模型上流から流した。スモークを流した状態でロータを回転させ、その際のスモークの流れをビデオカメラで撮影した。

ロータの回転数は 6000 rpm とし、高さを $h = 0.5R$, 1.5R, 4.5R に変化させて実験を行った。またロータ



図9 可視化実験装置

間距離は、推力測定で地面効果の影響に違いが見られた $0.07R$ と $0.67R$ とし、加えて $0.67R$ で閉塞板を付けた状態の3種類に関して実験を行った。ただし閉塞板を付けた状態に関しては、高さ $0.5R$ のみで観察を行った。以上の実験条件を表2に示す。

4. 2 実験結果

図10(a)-(g)に実験結果を示す。ただし、図10(a)-(c)はロータ間距離 $0.07R$ における高さがそれぞれ $4.5R$, $1.5R$, $0.5R$ の結果であり、図10(d)-(f)はロータ間距離 $0.67R$ における高さがそれぞれ $4.5R$, $1.5R$, $0.5R$ の結果であり、図10(g)はロータ間距離 $0.67R$ で閉塞板を付けた状態における高さ $0.5R$ の結果である。各図中にはスモークの流れの様子を破線の矢印で記載している。またロータを楕円で示している。

ロータ間距離 $0.07R$ について図10(a)-(c)を比較すると、高さ $4.5R$ では、スモークはロータに流れ込んだ後、地面に向かって流れていることがわかる。より地面に近い高さ $1.5R$ では、ロータを通過する流れに加えて、機体中央部において上昇流が存在していることがわかる。さらに地面に近い高さ $0.5R$ の状態では、上昇流が発達し、スモークの拡散がより顕著になった。また高さ $4.5R$ および $1.5R$ で観測されてい

表2 可視化試験の実験条件

ロータ半径	119 mm
ロータ回転数	6000 rpm
高さ	$0.5R$, $1.5R$, $4.5R$
ロータ間距離	$0.07R$, $0.67R$, $0.67R$ (閉塞板付属)

たロータに流れ込むスモークが、ほとんど見られなくなった。

またロータ間距離 $0.67R$ について図10(d)-(f)を比較すると、高さ $4.5R$ では、スモークの流れから、ロータを通過し地面に向かう流れと、機体模型中央部での上昇流の2つが発生していることがわかる。より地面に近い高さ $1.5R$ では、機体中央部における上昇流が発達し、上昇流に伴うスモークの量が増加した。さらに地面に近い高さ $0.5R$ の状態では、さらに強い上昇流の影響により、スモーク排出口よりも高い位置までスモークが巻き上がっていることがわかる。

一方、閉塞板を付けた図10(g)の状態では上昇流が観察されなかった。スモークはロータに流れ込み、上昇流を形成することなく、地面に沿って流れていることがわかる。

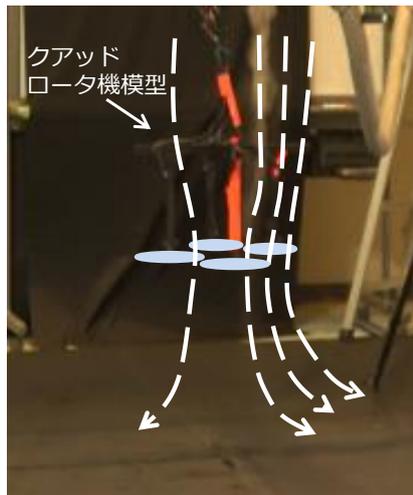
4. 3 考察

図10に示す実験結果より、閉塞板を付けていない状態では、機体模型が地面に近づくにつれて上昇流が発達し、スモークの拡散がより激しくなることがわかる。またロータ間距離が短い方が、機体模型の高さが同じ場合、上昇流の発達が小さく、スモークの拡散が穏やかであることがわかる。

閉塞板の有無の違いについて、図10(f)と(g)を比較すると、閉塞板がない場合には上昇流が確認された一方で、閉塞板がある場合には上昇流は観察されなかった。このことから、閉塞板によって上昇流の発生がなくなり、ロータは上昇流の影響を受けていない状態となっていると考えられる。

以上をまとめると、ロータ間の隙間の面積の大きさによって、上昇流の流れが変化することがわかった。特に上昇流の発達度合いが異なっていたことから、ロータ間の隙間が小さい方が、ロータが受ける上昇流の影響は小さいと推測される。

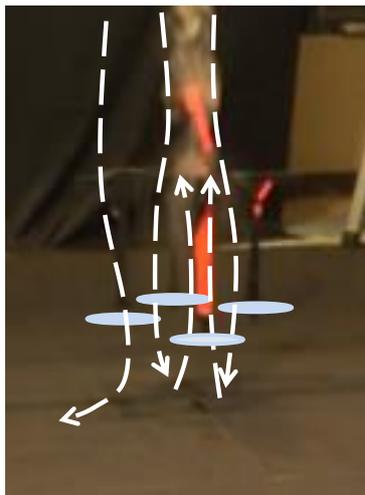
この上昇流の影響について、推力測定の結果を含めて考える。推力測定の考察において、地面効果時においてロータ間の隙間が小さくなるほど、推力変化が大きくなることを述べた。可視化試験結果と対応させた場合、地面効果時において、クアドロータ機では、ロータが受ける上昇流の影響が小さいとき、単独ロータよりも推力変化が大きくなると推測される。一方で、ロータが受ける上昇流の影響が大きいとき、単独ロータよりも推力変化が小さくなると考えられる。以上より、地面効果時におけるロータ間距離によって推力変化傾向が異なる原因の一つは、上昇流であると考えられる。



クアッド
ロータ機模型

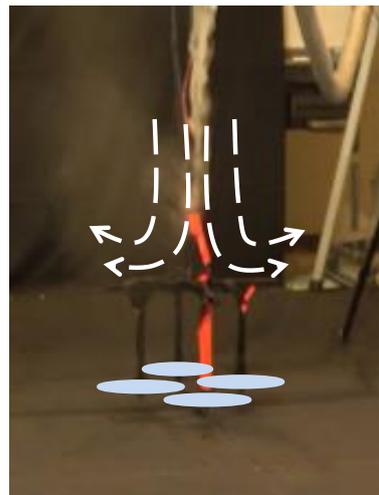
ロータ間距離 0.07R
高さ 4.5R

(a)



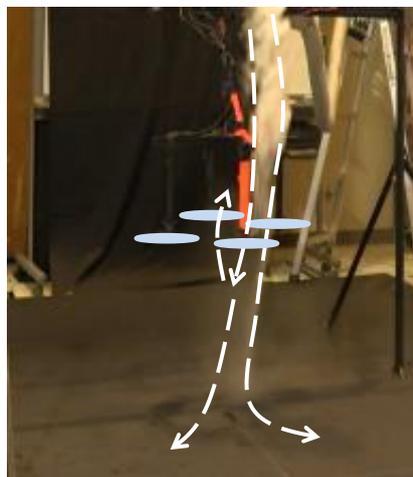
ロータ間距離 0.07R
高さ 1.5R

(b)



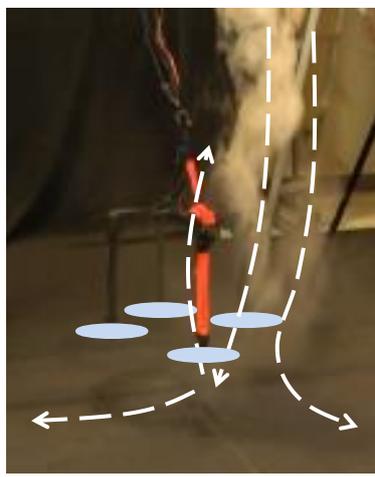
ロータ間距離 0.07R
高さ 1.5R

(c)



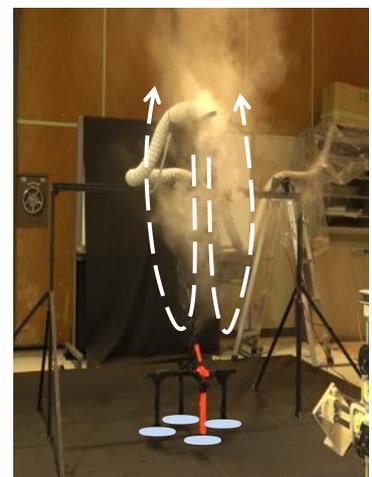
ロータ間距離 0.67R
高さ 4.5R

(d)



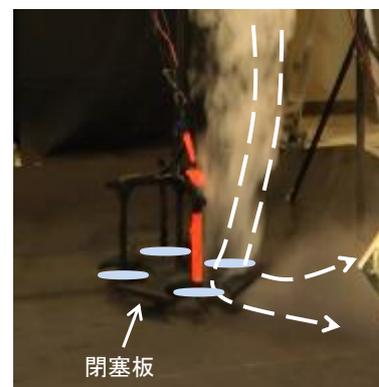
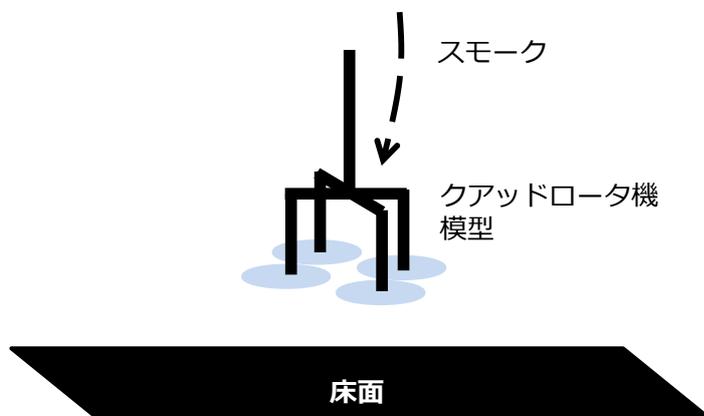
ロータ間距離 0.67R
高さ 1.5R

(e)



ロータ間距離 0.67R
高さ 0.5R

(f)



閉塞板

ロータ間距離 0.67R(閉塞時)
高さ 0.5R

(g)

図 10 スモークによる吸い込み流れの可視化結果

実際のクアッドロータ機はバッテリーなどを搭載するため、機体中央部におけるロータ間の隙間の面積は小さい。このため、実際の機体の地面効果を考える場合には、本実験で機体模型に閉塞板を付けた状態に近いと考えられる。したがって、実際の機体の着陸時を考える場合、ロータが受ける上昇流の影響は小さく、単独ロータよりも推力変化が大きくなると考えられる。このため、地面効果による推力変化を抑えるには T/T_{out} が1に近づくようにロータ間距離を長くし、隙間の面積を大きくすることが有効であると考えられる。このことから、小型クアッドロータ機の着陸を安定させたい場合は、ロータ間距離を大きくすることで、地面効果の影響を抑えることが効果的であると考えられる。

5. 結言

本研究では、地面効果を受けるクアッドロータ機の、ロータ間に発生する上昇流と推力変化の関係を把握し、地面効果時にロータ間距離によって推力傾向が変化する原因を推定することを目的として、推力測定実験とスモークを用いた流れの可視化実験を行った。

はじめに推力測定実験の結果から、ロータ間の隙間の面積が小さくなるにつれて、地面効果時に推力の増加傾向が大きくなることを示した。さらに、流れの可視化実験の結果から、地面に近づくにつれて上昇流がより発達すること、およびロータ間の隙間の面積が小さくなるほど、地面効果時における上昇流の発達が小さくなることを示した。以上から、ロータ間距離が狭いほど、上昇流の発達が小さく、地面効果時の推力は増加しやすくなることがわかった。これにより地面効果時にロータ間距離によって推力が変化する原因の一つが上昇流であることを推定した。

今回の可視化試験では、地面効果時に上昇流が発生することを示したが、特に上昇流が発達していたロータ間距離 $0.67 R$ では、ロータまでスモークが到達しなかったため、ロータ周りの詳細な流れ場の様子はわからなかった。今後は上昇流を含めたクアッドロータ機の周りの流れの速度分布を把握するため、Particle Image Velocimetry による計測を行う予定である。

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