

## 2E13 一様流中で小型クアッドロータ機に働く空気力の解析

○大塚光、河野将佳、永谷圭司（東北大学）

Analysis on Aerodynamic Force on a Small Quad-rotor UAV in Uniform Flow  
Hikaru Otsuka, and Keiji Nagatani (Tohoku University)

Key Words: Multirotor UAV, Wind Tunnel, Flow Interaction

### Abstract

Multi-rotor unmanned aerial vehicles (UAVs) are applied to various applications such as observation and topographic survey because they can hover, take off and land vertically. Although they are useful for civilian applications, their cruise flight speeds are limited owing to the generation of a pitching moment in a uniform flow. However, aerodynamic forces acting on multi-rotor UAVs have not been precisely examined. The effects of body yaw, body-pitching angle, and distance between rotors on generation of the pitching moment and thrust in a uniform flow are important for design of the UAVs. Furthermore, rotor flow interaction can affect the rotor performance in horizontal flight. The objective of the study is an examination of the thrust, and pitching moment of a quad-rotor in a uniform flow under different configurations. First, the rotor thrust and pitching moment on two rotors were measured when changing the relative rotor positions in a wind tunnel. Second, the thrust and moment of a quad-rotor UAVs were measured at different yaw directions, pitching angles, and rotors distances. Experimental results clarify that pitching moment decreases as expanding rotor distance. Furthermore, we verified that maintaining yaw direction in a plus configuration with regard to flow direction can degrade the pitching moment compared to an X configuration.

### 1. 緒言

近年、複数のロータを備えた垂直離着陸機であるマルチロータ機が、小型無人機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)として普及し、産業利用が進められている。小型マルチロータ機は従来の UAV よりも安価で、滞空飛行が可能のため、UAV の利用目的がより多様になった。近年では、風力発電機や橋梁の点検作業、地形測量などに利用が試みられている。

小型マルチロータ機は、産業利用が期待される一方で、飛行可能な最大風速や水平飛行時の移動速度が、固定翼機に比べて低く、水平飛行時の機体性能の改善が求められている。現在普及しているマルチロータ機は水平飛行の際に、機体を進行方向へ傾けることで、ロータ推力の水平成分から推進力を生み出し水平飛行を実現している。また、機体姿勢はロータ間の推力差によって制御される。水平飛行時には、鉛直方向に機体を支える力を維持しつつ、水平方向の推進力を発生させるために、ホバリング時よりもロータの回転数が上昇する。加えて、機体を傾けて水平飛行を行う際には、迎え風によって機体には機首上げ方向にピッチングモーメントが働く[1]。機体は、水平飛行を維持するために進行方向に対して前後のロータ間で推力差を発生させてモーメントを打ち消す。そのため、下流側ロータは、無風で滞空しているときよりも回転数が上昇する。ロータの回転数には上限があるため、水平飛行速度、または風速が早くなると、下流側ロータの回転数が上限に達

し、機体が飛行状態を維持できなくなる。すなわち、ピッチングモーメントの発生が、水平飛行状態を維持できる最大風速を制限する要因の1つとなっている。よって、機体に働くピッチングモーメントの抑制が可能になれば、飛行可能な最大風速を改善できると考えられる。

流れ中でのピッチングモーメントの発生は、ロータ間の流れ干渉が一因となっていると考えられる。しかし、複数のロータが近接して売の状態、ロータ配置や機体姿勢が流れ干渉に与える影響について、小型ロータを扱った検証例は少ない。大型機のロータ間流れ干渉については、研究が進められており、大型タンデムロータ機では流れ干渉を避けるために、機体の前後ロータの取り付け高さに差を設けている[2]。一様流中で小型マルチロータ機に働く空気力について、Russelらは、複数の市販のマルチロータ機と大型低速風洞を用いて、機体に加わる空気力の測定を行った[1]。しかし、風向きに対する機首のヨー角やロータ間隔が、抵抗やピッチングモーメントに与える影響については言及されておらず、小型マルチロータ機のロータ配置の検討には、さらに詳細な検証が求められる。

本研究では、ロータ配置が、一様流中で機体に働く空気力、特にピッチングモーメントに及ぼす影響を明らかにし、飛行中のピッチングモーメントを抑制するために機体設計に必要な知見を得ることを研究目的とする。本稿では、マルチロータ機の中から

クアッドロータ機を取り上げ、実施した2つの風洞実験の結果について報告する。1つ目の実験では、ロータ間流れ干渉がロータ推力に与える影響を明らかにするため、2枚のロータ間における流れ干渉の影響について検証した。2つ目の実験では、クアッドロータ機を用いて、ロータ間隔、ヨー角、迎角を変化させた際の、機体に加わる空気力の比較を行った。これらの実験結果について考察を行い、ロータ間流れ干渉がピッチングモーメント与える影響とピッチングモーメントを低減するための設計指針について述べる。

## 2. 2枚ロータ間での流れ干渉

流れ中で2枚のロータが近接した際に、ロータ間での流れ干渉が、ロータ性能に与える影響を明らかにするため、風洞実験を行った。実験では、2枚のロータの位置関係に対するロータ推力とピッチングモーメントの変化を計測し、ロータの相対位置がそれぞれの力に与える影響を検証した。また、流れ干渉しているロータと比較するため、流れ中で迎角を変えた際の単独ロータの推力とピッチングモーメントの計測を行った。これらの実験結果を踏まえて、水平飛行中のクアッドロータ機のロータに、ロータ間流れ干渉が与える影響を検討した。

### 2. 1 実験方法

風洞内に、位置を固定したロータと、位置が可変なロータの2枚のロータを配置し、同一のロータ回転数において下流側ロータからの1)流れ方向のロータ間距離(Rotor distance), 2)流れに対して垂直方向の距離(Depth), 3)相対高さ(Height)の3つの位置をそれぞれ変化させ、ロータ推力とピッチングモーメント( $M_y$ )を計測した。加えて、1)ロータ間距離の実験では、飛行中の機体が傾いた状態での流れ干渉の影響を検討するために、ロータ取付面の迎角を変化させた。それぞれの計測では、下流側ロータの位置を固定し、上流側ロータの位置を変化させた。ロータの相対位置の関係を図1に示す。空気力の計測は、一部の条件を除いて、下流側ロータを中心に行った。単独ロータの計測も、同様の試験装置で計測を行った。試験条件を表1に示す。条件の変化幅は、市販されているクアッドロータ機の機体寸法を参考に設定した。

実験には、東北大学流体科学研究所の低乱熱伝達風洞を使用した。図2に風洞テストセクションに設置した実験装置を示す。風洞は回流式であり、風上側出口形状は対辺との間隔が1010mmの正八角形断

面である。テストセクションは、自由壁型である。空気力の測定には、6軸力覚センサを用いた。表2にセンサの仕様を示す。図4にセンサの取付位置と、ロータ迎角の定義を示す。ロータの迎角は、主流方向に対して垂直な状態を90°と定義する。各条件において3回計測を行い、平均値を計測結果とした。センサデータは1.2kHzのサンプリング周期に対して、10Hzのローパスフィルタをかけ、1回の測定で5000回のサンプリングを行い、平均値を記録した。

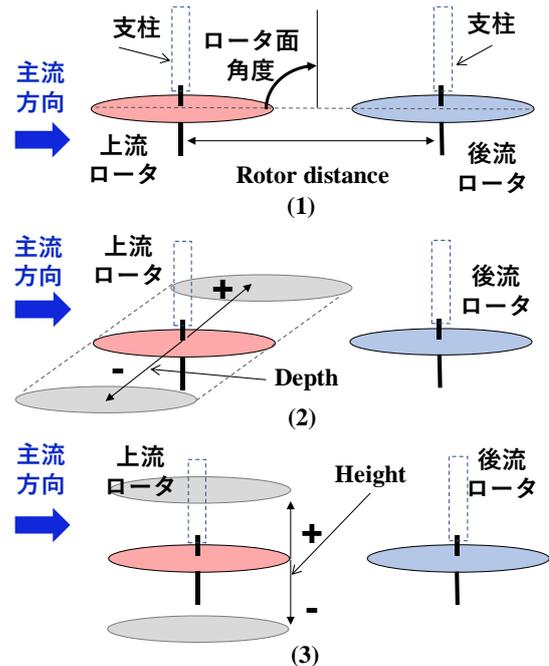


図1 各実験条件でのロータの位置関係

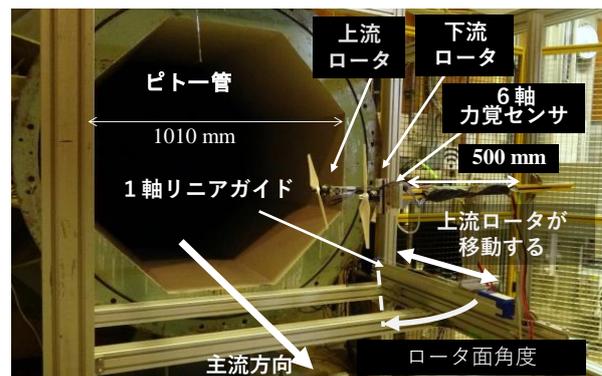


図2 風洞と実験装置



図3 実験に使用したロータ

実験には、図3に示す市販されているクアッドロータ機のロータ(DJI, Z-blade)を用いた。ロータ回転数は電子式スピードコントローラによって制御し、すべての試験条件において6000 rpmで一定とした。ロータ半径(R)は120 mmで、ディスク面積は0.044 m<sup>2</sup>である。無風でのロータのレイノルズ数は、ロータブレードの75%スパン長におけるコード長に対して $5.4 \times 10^3$ である。5日間の測定期間中の大気密度は平均で1.16 kg/m<sup>3</sup>であった。また、気温は25.6°C、気圧は1004.4 hPa、相対湿度は62.5%であった。

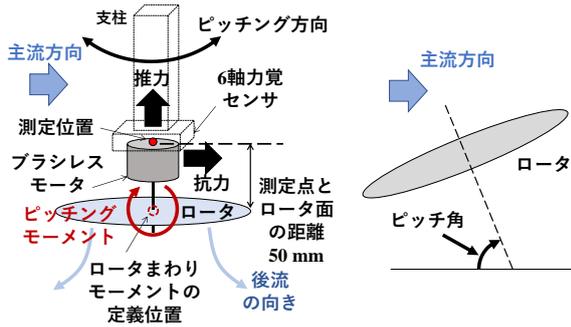


図4 センサの取り付け位置とロータ迎角の定義

表1 ロータ干渉評価時の試験条件

| 変更条件等    | 主流速度<br>m/s | ロータ回転数<br>RPM | ロータ距離<br>R (Radius : 119 mm) | 奥行き位置  | 相対高さ    | ピッチ角度<br>° | 計測ロータ    |
|----------|-------------|---------------|------------------------------|--------|---------|------------|----------|
| 1. ロータ距離 | 8           | 6000          | 2.1, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0      | 0      | 0       | 60 - 90    | 上流<br>下流 |
| 2. 奥行き位置 | 8           | 6000          | 3                            | -3 - 3 | 0, 1, 2 | 90         | 下流       |
| 3. 相対高さ  | 8           | 6000          | 3, 5                         | 0      | -2 - 2  | 90         | 下流       |
| 4. 単独ロータ | 8           | 6000          | -                            | -      | -       | 60 - 90    | -        |

\*上から見た際のロータの回転方向は、上流側ロータが反時計回り、下流側が時計回りで表す

表2 力覚センサの仕様

|            | 製品番号                  | 計測レンジ<br>(力)<br>N | 計測レンジ<br>(モーメント)<br>(Nm) | 分解能    | サンプリング<br>周波数<br>Hz |
|------------|-----------------------|-------------------|--------------------------|--------|---------------------|
| 単独ロータ計測    | SFS0017F100<br>MOR5U6 | ±10               | ±0.5                     | 1/1000 | 1200                |
| クアッドロータ機計測 | CFS034CA101           | ±100              | ±2.0                     | 1/2000 | 1200                |

## 2. 2 実験結果

### 1) 距離, 迎角

図5-8に、軸間距離と迎角を変化させた際のy上流と下流のロータの、それぞれの推力とピッチングモーメントを示す。図中の破線は、単独ロータの推力とピッチングモーメントを示している。またピッチングモーメントには、ロータが受ける抵抗に伴うモーメントが含まれるため、センサとロータ中心までの距離を考慮して、式1を用いてロータ中心に働くモーメントを算出し、比較を行った。

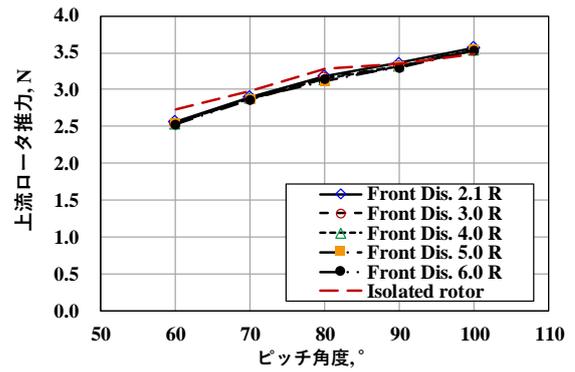


図5 距離に対する上流側ロータ推力の変化

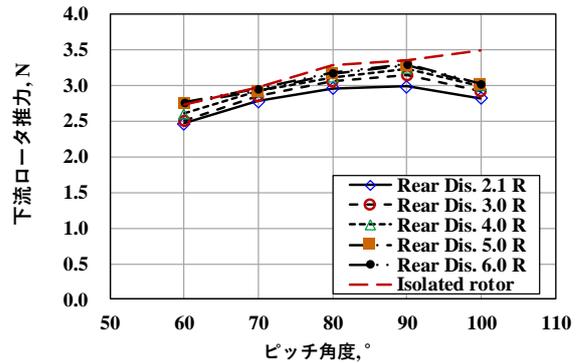


図6 距離に対する下流側ロータ推力の変化

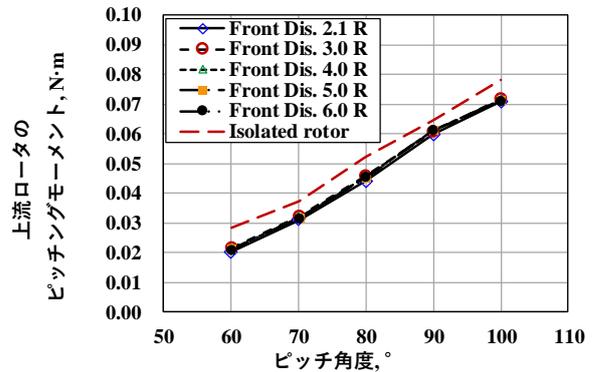


図7 距離に対する上流側ロータピッチングモーメント

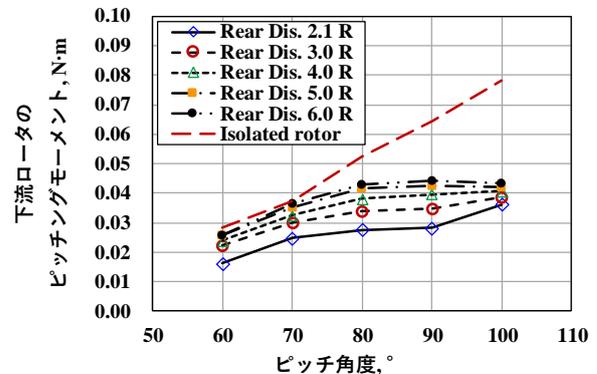


図8 距離に対する下流側ロータピッチングモーメント

$$M_y = \text{Measured } M_y - \text{drag force} \times \text{sensor offset} \quad (1)$$

図5, 図7の上流側ロータについては, いずれの迎角においても, 推力とピッチングモーメントは単独ロータと同程度であった. また, ロータ間隔に対して, 推力とピッチングモーメントは変化しなかった. 一方, 下流側ロータについては, ロータ間隔が近づくに従って, 推力とピッチングモーメントが減少した. ロータ間隔 2.1 R, 迎角 90°では下流側ロータの推力は, 単独ロータから 8.3%(3.3 N→3.0 N)低下した. また, ピッチングモーメントは 57%低下した.

## 2)高さ

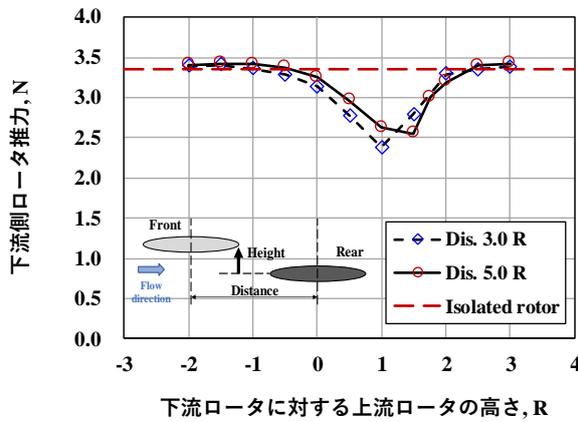


図9 高さに対する下流側ロータの推力

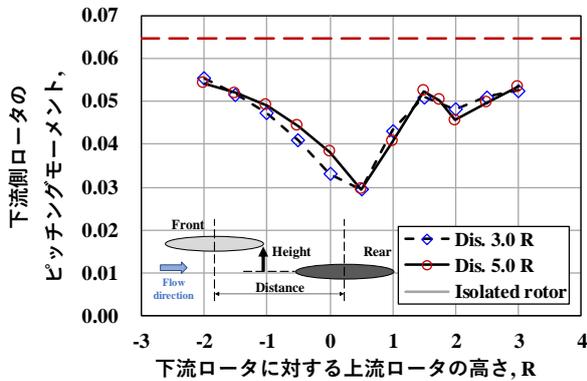


図10 高さに対する下流側ロータのピッチングモーメント

図9と図10に, 高さを変化させた際の推力とピッチングモーメントの変化をそれぞれ示す. 下流側ロータについては, 上流側ロータが高さ-2.0 R 以下, 2.0 R 以上であれば, 下流側ロータの推力は, 単独ロータの推力と同程度になり, 約 3.4 N であった. 推力は, 1.0 R から 1.5 R において, 極小値を示し, ロータ間隔 3.0 R では 30% (3.4 N→2.4 N), 5.0 R では 23% (3.4 N→2.6 N) 推力が低下した. ピッチングモーメント

は, いずれのロータ間隔においても高さ 0.5 R と 2.0 R で極小値を示した. 高さ 0.5 R では単独ロータの 0.065 N·m に比べて, ピッチングモーメントは 55%, 2.0 R では 30%減少した. ピッチングモーメントについては, ロータ間隔 3.0 R, 5.0 R の間でピッチングモーメントに有意な差は確認できなかった.

## 3)奥行き方向

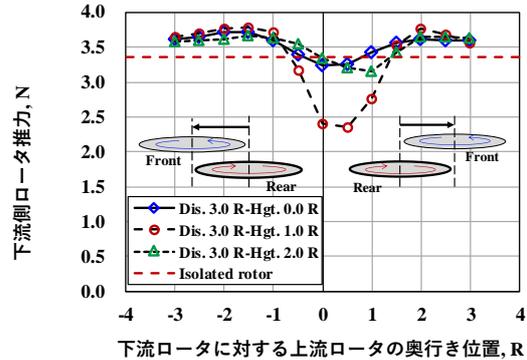


図11 奥行距離に対する下流側ロータの推力

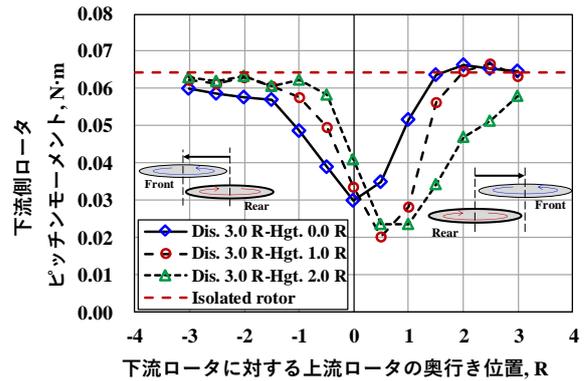


図12 奥行距離に対する下流側ロータのピッチングモーメント

3 つ目に, 下流側ロータを基準とした上流側ロータの奥行方向の相対位置と, 推力およびピッチングモーメントの関係を図11と図12にそれぞれ示す. 推力は 0.5 R 付近で最も低下した. 0.5 R は, 時計回りに回転している下流側ロータから見て, 反時計回りに回転している上流側ロータが右側にずれた状態である. 高さ方向の影響については, 比較した 3 つの高さの中で, 1.0 R のときの推力減少量が最も大きかった. この結果は前節の高さ比較の結果と一致した. また, いずれの高さにおいても -2.0 R 以下, 2.0 R 以上では推力が約 3.6 N となり, 単独ロータよりも大きくなった. また, 奥行き 0.5 R において, 高さ 0 R と 2.0 R での推力減少は 0.3 N 以下であり, 1.0 R では 1.2 N 低下した. ピッチングモーメントは, ロータ

高さが大きくなるにつれて、極小値を示す上流側ロータの奥行き位置が右側に移動した。推力と異なり、3つの高さの中で、高さが高くなるにつれてピッチングモーメントは低下した。また前後のロータ高さが同じとき、極小値を示す奥行き位置は0Rであり、奥行き方向に対して前後ロータの位置は一致していた。

## 2. 3 考察

### 1) 距離, 迎角

2枚のロータ流れ干渉では、上流側ロータの流れが下流側ロータに影響していると考えられる。上流ロータ後流があることによって、後流ロータに入り込む流れが曲げられる、または上流側ロータの後流が直接入り込むことで、ロータ推力が低下すると考えられる。ロータにキリュが入り込むと、ロータを通過する誘導速度が低下しロータ推力が低下することが、文献で述べられている[3]。よって、流れ中では、上流ロータ後流が干渉することで、下流側のロータは影響を強く受けると考える。一方で、上流側ロータは流れ干渉の影響を受けにくいと考えられる。実験結果では、上流側ロータの推力、ピッチングモーメントの大きさがロータ間隔を変化させてもほとんど変化しなかったことから、上流側ロータは流れ干渉の影響を受けていないことがわかった。

下流側ロータについて、ロータ間隔を狭めることで、ロータにかかるピッチングモーメントは低下した。流れ干渉によってロータごとのモーメントは変化した。機体全体に作用するモーメントに与える影響は小さいと考えられる。よって、流れ干渉によって発生する前後ロータの推力差が、機体に作用するピッチングモーメントに大きく影響すると考えられる。

クアドロータ機の飛行姿勢を考慮すると、飛行中の機体迎角は、90°以下となる。よって、高速飛行になるほど、機体迎角は小さくなるため、ロータ流れ干渉の影響は小さくなると考えられる。

実験結果からは、ロータ間隔が5.0R以上であれば、推力変化は無視できると考えられる。

以上よりロータ間隔を狭めることで、ロータ流れ干渉が強まり、後流側ロータの推力が低下すると推定される。流れ干渉の影響を避け、推力低下を避けるためには、ロータ間隔を空けることが有効だと考えられる。

### 2) 高さ

上流ロータの後流が下流側ロータに流れ込んだことにより、高さ1Rから1.5R付近で、最も推力が低

下したと考えられる。また、ロータ間隔3.0Rよりも5.0Rで推力が極小値を示すロータ高さが、高くなっている。この変化は、ロータ間隔が広がるにつれて上流ロータの後流が、下に移動するために発生したと考えられる。よって、更にロータ間隔が広がると推力低下が大きくなるロータ高さは高くなると考えられる。また、上流側ロータ高さが、下流側ロータより低い場合には、高さが低くなるにつれてロータ推力は僅かに増加した。上流ロータが高く位置する場合に比べて、低い場合にはロータ流れ干渉の影響は小さいと考えられる。

以上のように、実験により、下流側ロータに対して、上流側ロータを高さ下げることで、ロータ流れ干渉の影響を抑えられることを確認した。機体が水平飛行時に前傾した場合には、上流側ロータが下流側ロータよりも下に位置するため、流れ干渉の影響は小さくなると考えられる。

### 3) 奥行き方向

実験結果から、奥行き方向に対しては、上流側ロータが-1.0Rから2.0Rの位置で、下流側ロータの推力低下が顕著になった。奥行き方向に対しては、この移動範囲で、ロータ流れ干渉の影響が顕著になると考えられる。よって、マルチロータ機のロータ配置を検討する場合、奥行き方向にロータの距離を、2.0R以上離すことでロータ干渉の影響を抑制できると考えられる。ピッチングモーメントは、時計回りに回転する下流側ロータに対して、上流側ロータが右側に位置するときに低下することがわかった。ピッチングモーメントについては、ロータ高さが一致している場合に、奥行き方向に2.0R以上間隔を空けることで、流れ干渉の影響を軽減できると考えられる。ただし、ロータ高さが高くなるにつれて、影響を受ける範囲が右側に移動する。

### 4) クアドロータ機のロータ配置と流れ干渉

3つの位置関係を比較することで、高さ、流れ方向距離間隔、奥行き方向の推力とピッチングモーメントへの影響度合いを確認した。クアドロータ機の配置を検討した場合、通常はロータ面の高さは一定であるため、奥行きと距離が影響すると考えられる。特に流れ方向のロータ間隔が3.0R以下では、推力への影響が顕著になると考えられる。以上の議論により、下流側ロータの推力が低下することで機体まわりのピッチングモーメントは増加するため、ロータ間隔が狭い場合、奥行き方向に近い場合に機首上げピッチングモーメントが大きくなると考えられる。

実験結果を基にクアドロータ機のロータ配置を検討した場合、ロータ間流れ干渉を避けることでピッチングモーメントを抑制できると考えられる。水平飛行状態のクアドロータ機では、図 13 に示すように、向かい風に対して X 型と+型の 2 つのロータ配置が考えられる。2 つの形態を比較した場合、+型の方が、上流側ロータの後ろに位置するロータの数を減らし、流れ方向のロータ間隔を広げることができるため、ピッチングモーメントが低減できると考えられる。2 つのロータ配置については、Hwang らによって数値計算解析が行われており、+型であることでピッチングモーメントが減少することが予測されている[4]。

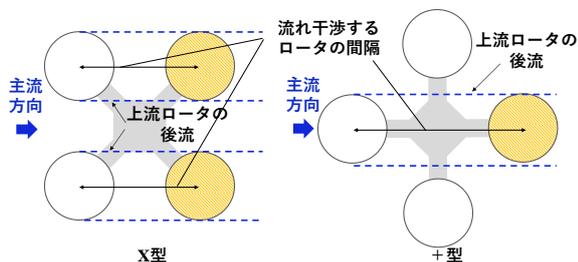


図 13 ヨー角に対するロータ間流れ干渉の違い

### 3. クアドロータ機の計測

一様流中で機体を受ける空気力、特にピッチングモーメントとロータ配置の関係を検証するため、クアドロータ機の模型を用いて風洞実験を行った。実験では、迎角を変えた際の機体の 3 軸方向に対する力とモーメントの変化を計測した。また、ロータ間隔や機体をヨー方向に回転させた際の、空気力の変化を計測した。

#### 3. 1 実験方法

図 14 に風洞内に設置した模型と計測センサの位置関係を示す。また、表 3 に計測条件を示す。ロータ間隔 2.1, 2.5, 3R について計測を行った。さらにロータ間隔 2.0R については、機体ヨー角を 0, 45, 90°での計測を行い、機首のヨー方向変化に対しての、推力、ピッチングモーメント、 $F_x$  の計測を行った。機首方向を 90 度回転させると、一見、風向きに対しての機体形状は形状が同じになる。しかし、ロータの回転方向によって、流れ方向に対して 4 つのロータ位置関係が異なっているため、0°と 90°で計測を行った。機体迎角は、60—90°で変化させ計測を行った。計測に用いたセンサの仕様を表 2 に示す。空気力の計測方法は、単独ロータ試験と同じである。図 15 に機体寸法の比較、図 16 に空気力の定義方向、図 17 に各条件での機体の向きを示す。

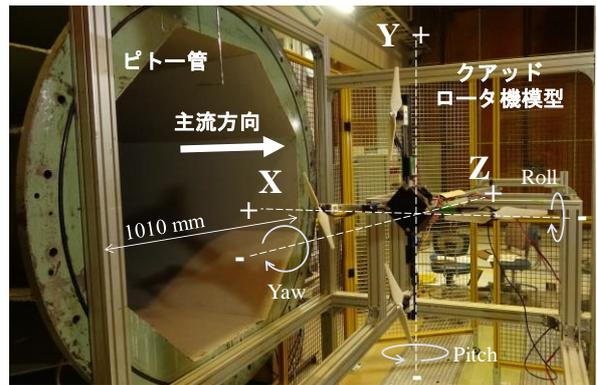


図 14 クアドロータ機模型(ヨー角 45°)

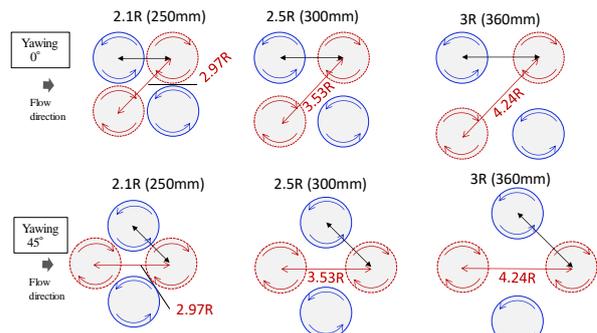


図 15 各試験条件での機体ロータ配置の上面図

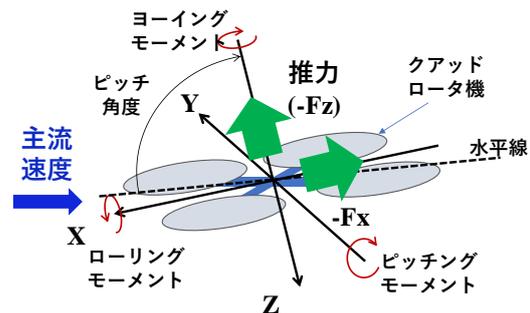


図 16 空気力作用方向と機体迎角の定義方向

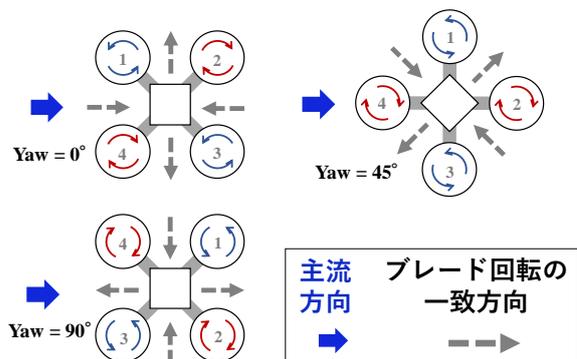


図 17 各ヨー角での機体上面図

表 3 クアドロータ機計測での試験条件

|                | 主流速度<br>m/s | ロータ<br>回転数<br>rpm | ロータ間隔<br>R(radius:119mm) | ピッチ<br>角度<br>°    | ヨー角度<br>°    |
|----------------|-------------|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------|
| クアドロー<br>ータ機測定 | 8           | 6000              | 2.1, 2.5, 3.0            | 60, 70,<br>80, 90 | 0, 45,<br>90 |

注意点として、機体と機体重心のオフセットについて述べる。計測装置の都合により、センサの計測位置と重心位置から 117 mm 離れている。機体にかかるピッチングモーメントは過大に求められていることが考えられるため、比較に当たっては、注意が必要である。

### 3. 2 実験結果

#### 1) 機首方向による比較

ロータ間隔 2.5R のときの、ヨー角度 0, 45, 90° での推力,  $F_x$ , ピッチングモーメント, の3つについて計測結果を図 18 から 20 にそれぞれ示す。

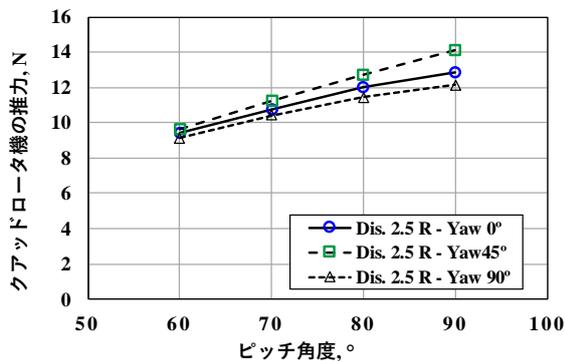


図 18 機首方向による機体推力の比較

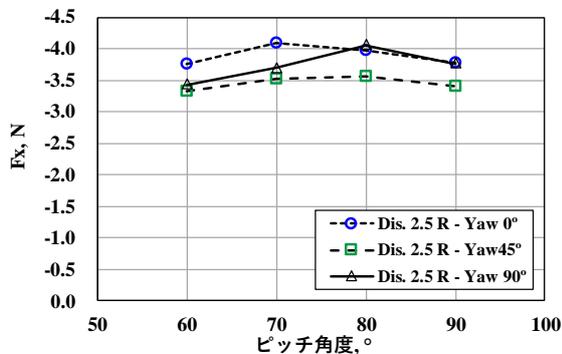


図 19 機首方向による  $F_x$  の比較

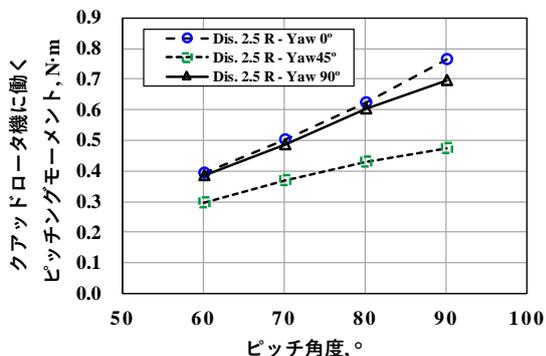


図 20 機首方向によるピッチングモーメントの比較

まず、図 18 に推力の機首方向による比較を示す。この図から、いずれのヨー角についても、迎角の増加に伴って推力は増加した。3つのヨー角の中で、45°のときの推力は最も大きく、迎角 90°で 14.1 N だった。他のヨー角では、ヨー角 0°で 12.9 N, ヨー角 90°では 12.1 N の推力が発生した。また、ヨー角に対する推力差は迎角 60°では、迎角 90°よりも小さくなった。迎角 60°において、ヨー角 45°では 9.6 N, ヨー角 90°では 9.1 N の推力が発生し、推力差は 0.5 N となった。

図 19 に示すように、機体には、ピッチングモーメントを増加する向きに  $F_x$  の力が加わっていた。 $F_x$  の迎角に対する変化量は 0.5 N 以下であった

図 20 に示すように、ピッチングモーメントは3つのヨー角の中で、45°のときに最も小さくなり、0, 90°の間では大きな差は見られなかった。機体迎角 90°で比較すると、ヨー角 45°でのピッチングモーメントは 0.48 N·m, ヨー角 0°では 0.76 N·m であった。よって、主流方向に対して+型の姿勢にすることで、ピッチングモーメントは、X型よりも 37%低下した。

#### 2) ロータ間隔による比較

機体ヨー角 0°で、ロータ間隔を変化させた際の推力とピッチングモーメントを図 21 と 22 にそれぞれ示す。

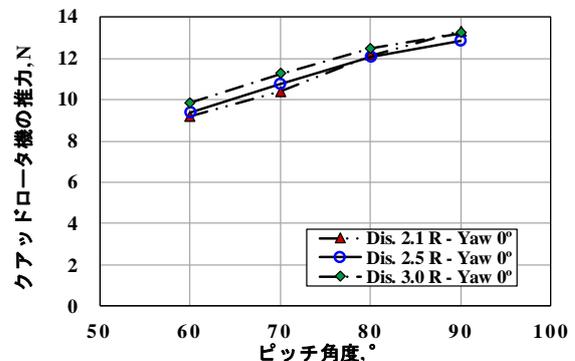


図 21 ロータ間隔による推力比較

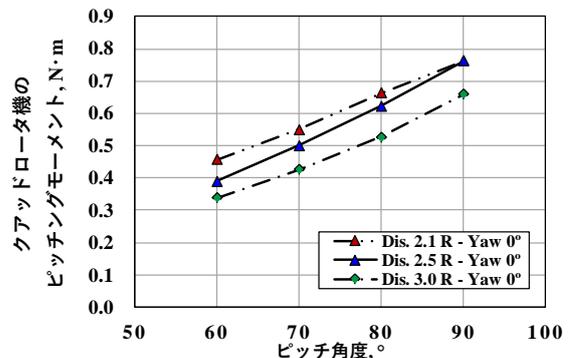


図 22 ロータ間隔によるピッチングモーメント比較

図 21 の推力の比較からは、迎角  $60^\circ$  から  $80^\circ$  ではロータ間隔 3.0 R で推力が最も大きくなった。迎角  $90^\circ$  では、ロータ間隔 2.1 R で推力が最も大きくなった。推力の大きさを比較した場合、ロータ間隔 2.1 R が迎角  $90^\circ$  付近で、最も大きな推力を示すものの、2.5 R と 3.0 R を比較した場合、すべての迎角で 3.0 R のほうが大きい推力を示した。

図 22 のピッチングモーメントについて比較した場合、ロータ間隔 3.0 R で最もピッチングモーメントが小さくなった。迎角  $90^\circ$  では、2.1 R で  $0.76 \text{ N}\cdot\text{m}$  に対して、3.0 R で  $0.66 \text{ N}\cdot\text{m}$  となり、1R ロータ間隔を広げることでピッチングモーメントが 13%低下した。

### 3. 3 考察

#### 1) 機体方位の影響

推力については、機首ヨー角  $45^\circ$  のときに、他の 2 つの機首方向と比べて大きい傾向を示した。機体が流れに対して十字になることで、ロータの流れ干渉部分が、最下流側ロータ一つのみとなり、機体全体での推力低下を抑制したと考えられる。ヨー角の違いによる推力差は、迎角が小さくなることで小さくなった。前傾している際には、流れ干渉による推力への影響は小さくなると考えられる。

図 19 に示した  $F_x$  については、ヨー角  $0^\circ$  のほうが  $45^\circ$  よりも  $0.5 \text{ N}$  大きくなった。ただし、センサの定格  $100 \text{ N}$  に比べて小さい値であるため、ヨー角による差については、結論付けられない。機体には  $3.5 \text{ N}$  から  $4 \text{ N}$  の  $F_x$  が働くことが確認できた。

ピッチングモーメントは、ヨー角  $45^\circ$  で最も小さくなった。流れ干渉による後流側ロータの推力減少が抑制されたため、前後ロータの推力差によって生じるピッチングモーメントが減少したと考えられる。ヨー角  $0^\circ, 90^\circ$  では、2 枚のロータが近い状態で流れ干渉を起こすため、ピッチングモーメントが  $45^\circ$  よりも大きくなったと考えられる。

また、 $0^\circ$  と  $90^\circ$  の比較から、ロータの回転方向による機体が受ける空気力への影響は小さいと考えられる。

以上の議論から、機首の向きで比較すると、+型よりも X 型において、前後ロータの流れ干渉が顕著になり、ピッチングモーメントが大きくなると推察される。また、2 枚ロータでの実験結果から、ロータの流れ方向距離が離れるほど後流側ロータの性能は単独ロータに近づくことがわかっている。よって、+型の場合には、干渉するロータの数が減少し、流れ方向のロータ感覚が広がることで、ロータ間の流れ干渉が低減されていると考えられる。一様流中で、

ピッチングモーメントを抑えるためには、風向きに対して+型に機体を維持することが望ましい。

#### 2) ロータ間隔の影響

軸間距離を広げることでピッチングモーメントが減少した。2 枚ロータの試験では、ロータ間隔が 4R 以下の場合に、ロータ間隔を広げることで推力低下が抑制されることを確認した。クアッドロータ上で、ロータ間隔を 2.0 R から 3.0 R 広げたことによって、下流側ロータの推力低下は抑えられると考えられる。その結果、機体全体でみると、前後ロータの推力差によって生じるピッチングモーメントが減少したと考えられる。

一方で、今回の実験では、風洞のテストセクションの大きさから、1.0R 程度の小さい変化幅での比較のみとなった。さらにロータ間隔が広い場合については、大型の風洞での計測、または小型な機体模型による計測が必要である。

また、推力について着目し、ロータ間隔の影響を比較すると、ロータ間隔 3.0 R で最も大きな推力が発生する。ロータ間隔が広がることで、推力低下を低減したと考えられる。

実験結果を踏まえ、ロータ間隔の比較によって、ロータ間隔を大きくすることで、機体に生じるピッチングモーメントを低減できると考えられる。

#### 3) クアッドロータ機計測のまとめ

ロータ流れ干渉の影響は、機体を傾けるほど抑えられる。よって、クアッドロータ機が水平飛行をする際には、干渉効果は小さくなると考えられる。一方で、無風状態で、突風が吹いた際の応答性に強く影響すると考えられる。また、前方への傾斜が浅い状態で飛行する場合、ロータ流れ干渉によるピッチングモーメントの変化は大きくなると考えられる。

さらに、ロータ間隔を広げることでピッチングモーメントが低減できることを確認した。また機体のヨ-方位  $45^\circ$  として、機体姿勢を風向きに対して+型にすることで、ロータ後流の干渉を抑え、ピッチングモーメントを低減できることを確認した。水平飛行時のピッチングモーメントの発生を抑制するためには、ロータ間流れ干渉を避けるために、ロータ間隔を広げ、機体姿勢を十字型とすることが有効だと考えられる。

機体にかかる発生する推力は、迎角が高い場合ヨー角に対して変化し、 $45^\circ$  で最も推力が大きくなった。ロータ間隔の推力の影響については、結論付けることができなかった。

#### 4. 結言

水平飛行する小型クアッドロータ機に働く空気力、特にピッチングモーメントについて検証するため、風洞を用いて、2枚のロータ間流れ干渉時のロータの推力とピッチングモーメントを計測した。また、一様流中でクアッドロータ機に作用する空気力を明らかにするため、ロータ間隔と機首のヨー方向について、機体に加わる推力とピッチングモーメントを計測した。

2枚のロータを用いた試験では、高さ、奥行き位置、流れ方向距離を変化させた際のロータ性能の変化を比較した。流れ中では、上流側ロータの性能は変化せず、下流側ロータの性能が流れ干渉の影響を受けることを確認した。流れ中ではロータ間の流れ干渉によって、下流側ロータの推力が低下し、前後ロータ間で推力さが生じることで、機首上げのモーメントの発生要因の一つになっていると考えられる。またロータ軸間距離が半径の5倍以上であれば、下流側ロータの推力が独立ロータと同程度に保たれ、干渉による推力低下がほとんど見られなくなることを確認した。

クアッドロータ機の計測では、迎角が高くなるにつれてピッチングモーメントが増加することを確認した。また、機首の流れ方向に対するヨー角を変化させ、ロータ配置をX型から+型にすることで、機体に加わるピッチングモーメントが37%減少することを確認した。機首方向によって、機体姿勢がX型のときには前後のロータ間隔が狭まり、干渉を受けるロータが2枚になるため、+型よりもピッチングモーメントが増加したと考えられる。また、ロータの軸間距離を2.1Rから3.0Rに広げることでピッチングモーメントを13%低減できることを確認した。

クアッドロータ機が飛行する際には、機体が風上に前傾しているため、迎角が90°よりも小さくなる。よって、ロータ間流れ干渉の影響は低減されるとみられる。しかし、今回の実験では迎角60°でもロータ間隔や、機体方位によって機体に働くピッチングモーメントが変化している。一様流中を飛行する機体のロータの配置を検討した場合、機体の向きを+型にし、ロータ間隔を広げ、流れ干渉を避けることで、機体に働くピッチングモーメントが低減できると考えられる。今後、飛行試験によって、ヨ～角の違いによって最大の水平飛行速度に違いが現れるか、検証が必要である。

#### 謝辞

本研究はJSPS特別研究員奨励費16J02686の助成を受けたものです。また、本研究での風洞実験は東

北大学流体科学研究所低乱風洞実験室にて、職員の皆様、ならびに永谷研究室学生の協力で行われました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Russell, C. R., Jung, J., Willink, G., and Glasner, B., "Wind Tunnel and Hover Performance Test Results for Multicopter UAS Vehicles," American Helicopter Society, *72nd American Helicopter Society International Annual Forum and Technology Display*, West Palm Beach, FL, USA, 2016.
- 2) Stepniewski, W. Z., "A Simplified Approach to the Aerodynamic Rotor Interference of Tandem Helicopters," *Proc. of West Coast American Helicopter Society Meeting*, pp. 71-89, 1955.
- 3) Leishman, J. G., *Principles of helicopter aerodynamics*, Cambridge University Press, 2006, pp. 95-100.
- 4) Hwang, J. Y., Jung, M. K., and Kwon, O. J., "Numerical Study of Aerodynamic Performance of a Multirotor Unmanned-Aerial-Vehicle Configuration," *J. Aircraft.*, vol.52, 2015, pp. 839-846.