

## 1C02 有限高さ壁近傍での2枚ロータのコーナー効果の抑制

○大塚光, 赤羽峻瑛, 得竹浩（金沢大学）

Rotor thrust change prevention method in the corner effect near a finite height wall for side-by-side rotor

Hikaru Otsuka, Shunei Akaba, and Hiroshi Tokutake (Kanazawa University)

Key Words : Flow Visualization, Wake, Fluid Dynamics

### Abstract

Rotor thrust in a side-by-side configuration decreases when rotors approach a step structure horizontally. To maintain thrust around the step, we propose extending the top board of the step, which can prevent rotor wake recirculation. The thrust was evaluated in a variation of rotor position, shaft distance, rotor rotation direction, and length of board extension. Furthermore, the flow field around the step was visualized using the smoke and laser-light-sheet method. The experiment results showed that the proposed method could maintain the rotor thrust within the 3% hovering thrust, excluding limited conditions.

### 1. はじめに

無人小型マルチロータ機や、有人大型チルトロータ機、チルトウィング機など、複数のロータを備えた垂直離着陸機の開発が行われ、人員や物資の輸送への利用が広がっている。こうした機体を都市空間で利用するためには、大型有人機と小型無人機のいずれに対しても、既存のシングルヘリコプタの離着陸場に加えて、新たな発着場の設置が必要である。近年では、大型有人機向けにVertiportと呼ばれる発着場の整備が、各国で計画されている。

従来の垂直離着陸機の発着場は、周囲に障害物がなく着陸面高さが地面と同じ場所、または高層建築物の屋上などに設けられてきた。しかし、都市部で新たな発着場を設けられる空間は限られており、建物の近傍に発着拠点を整備することが検討されている。

垂直離着陸機のロータは、構造物に接近すると、地面効果やコーナー効果と呼ばれる周囲構造物とロータ後流の干渉によってロータ推力が変化することが知られている[1, 2]。通常のシングルロータヘリコプタの場合、離着陸場の周囲に構造物はなく、地面効果による推力変化のみが生じる。一方で、段差のある着陸パッドや、低い建物の屋上などでは、壁と地面が近づくことで、地面効果とコーナー効果によりロータ推力が変化する。特にロータが複数ある場合は、後流の逃げ場がシングルロータよりも制限されるため、ロータ後流とロータの干渉が強まり、ロータ推力がより変化すると考えられる。小型ロータに関する先行研究によれば、段差高さが低い場合に、隣り合う2枚のロータ(Side-by-side Rotor)が段差に接近するとロータ推力が低下することが報告されている[3]。段差接近時に推力低下が発生し、推力を補う操作が間に合わない場合には、着陸面や段差側面に機体が衝突

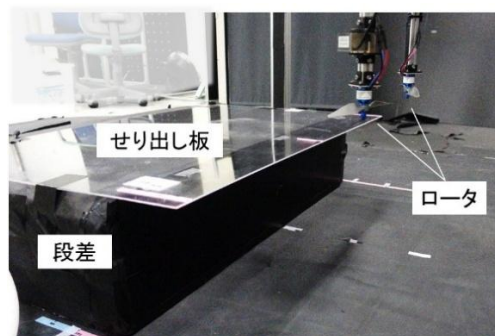


図1 推力変動を抑制するためのせり出し板

することが懸念される。

この状態は、機体の大きさを問わず生じることが予想される。特に、複数ロータを備える機体がやむを得ず段差のある離着陸場を整備する場合には、推力低下リスクの把握と、推力低下を起こさない機体形状や着陸場の設計が望まれる。

そこで本研究では、段差接近時にロータ推力の低下を防ぐため、着陸台座に図1に示すようなせり出し板を取りつけることを提案する。せり出し板を取り付けることで、ロータ後流とロータの干渉を弱め、推力低下量を抑制することを目指す。

本研究の目的は、段差近傍でのとなりあう2枚の小型ロータについて、せり出し板の設置による推力低下の抑制効果の評価と、そのメカニズムの解明である。本手法の有効性を示すことで、着陸時に衝突事故をより起こしにくい発着設備の設計が可能となる。

本稿では、まず先行研究の結果を踏まえて、提案手法の狙いをのべる。その後、推力抑制効果の評価のために行った推力計測結果と、流れ場把握のために行ったスモークとレーザーシートによる可視化実験結果を報告する。

## 2. 段差近傍での2枚ロータの推力変動と推力変動抑制手法の提案

先行研究を踏まえ、段差近傍での2枚ロータの後流構造と推力変動について述べる。また、これらの成果を踏まえて、推力変動を抑制する提案手法について述べる。

### 2. 1 実験パラメータ

提案手法と周囲流れ場の説明に先立ち、段差とロータの位置関係、ロータ回転方向について定義する。本稿では寸法をロータ半径 $R$ を基準として示す。

図2に示すように、段差は地面からの高さを $h$ と定義する。ロータ面の地面からの高さを $z$ 、段差上面からロータ面までの高さを $\Delta z = z - h$ と定義する。ロータ軸の間隔は $l$ で定義する。段差上面の端から、ロータ軸までの距離を $x$ で定義する。なお、後述の提案手法により上面に設置する板がせり出す場合、板の端からロータ軸までの距離を $x$ と定義する。板が段差壁面からせり出す長さを $o$ と定義する。

2枚ロータが物体に接近する場合は、構造物に対してロータの回転方向を考慮する必要がある。本稿では、図3のように壁面に向かってロータが位置するとき、隣あうロータブレードが壁面側で、互いのロータに向かって回転する場合を内巻き(Bear-hug)、互いのロータの反対に回転する場合を外巻き(Breaststroke)と呼ぶこととする。なお英名での識別は先行研究に従っている[4]。

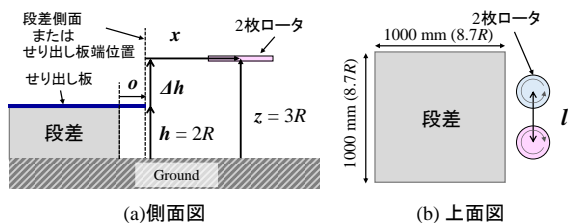


図2 ロータ位置と段差形状の定義

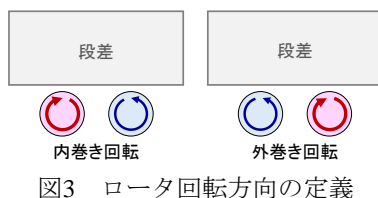


図3 ロータ回転方向の定義

### 2. 2 段差近傍での推力変動

図4に、先行研究で得られた $h = 2.0 R$ での段差近傍におけるシングルロータと、 $l = 3.0 R$ の2枚ロータの推力変動分布を示す[3]。図中の推力係数 $C_T$ は、推力 $T$ を次の式(1)に従って無次元化した値である。

$$C_T = \frac{T}{\rho A (R\Omega)^2} \quad (1)$$

$\rho$ は空気密度、 $\Omega$ はロータ回転速度、 $A$ はロータディスク面積である。また、 $C_{T, OGE}$ は地面の影響が及ばない位置でのロータ推力である。本稿では、各2枚ロータの形態が地面から $7R$ 以上離れたときの推力係数とする。なお、2枚ロータとシングルロータの $C_{T, OGE}$ は流れ干渉によって異なることに注意する。

先行研究では、シングルロータおよび2枚ロータについて、段差周りでの推力比 $C_T / C_{T, OGE}$ の分布が計測された。その結果、シングルロータと比べて、2枚ロータの場合には、ロータが段差より高く、かつ $x = 1.0 R$ 付近で推力比が0.95以下となる領域が現れることが示された。この領域は、2枚ロータが台座上方へ水平に接近する際に通過する。そのため、2枚ロータを備えた機体が段差に近づくと推力が小さくなり、機体が段差に衝突するリスクがある。

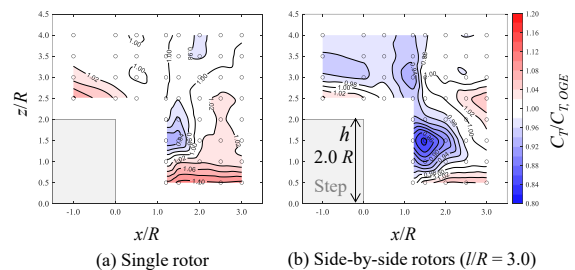


図4 段差近傍での2枚ロータの推力変動[3]

### 2. 3 流れ場構造

段差の手前にシングルロータがある場合、段差側壁と地面に囲まれた空間でロータの後流が逃げ場を失い、ロータと後流が再循環を起こすことが知られている。この再循環はロータ推力を下げることがある[1]。再循環が生じると、ロータブレードを通過する流れ垂直成分が速くなり、ブレードの有効迎角が小さくなる。その結果ロータス推力が低下する。この状況で推力が変化することをコーナー効果と呼ぶ。2枚ロータについても、図5に示すようにロータ後流が段差側壁に沿って移動し、上向きの噴流を生じることが、先行研究で明らかにされている[3]。

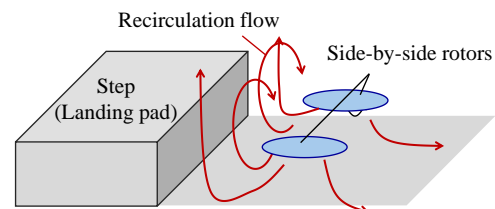


図5 段差近傍での2枚ロータ後流の模式図[3]

### 2. 4 提案する推力変動の抑制手法

先行研究で示されているように、段差近傍での2枚ロータの推力変化は、ロータと段差壁面との間の空間を噴流が通過し、ロータと噴流が再循環流れを形成するために生じると考えられる。

そこで、噴流を抑制するため、図1に示すように段差上面にせり出し板を設置することを提案する。噴流は、ロータ後流が逃げ場を失うこと生じる。せり出し板と上面に取り付けることで、段差側面とロータの間に空間を確保し、ロータ後流を壁面に沿って逃がすことを狙う。噴流の発生を減らし、再循環が弱まることで、2枚ロータが接近した際の推力変動の抑制が期待できる。

### 3. 実験方法

せり出し板による推力変動の抑制効果を評価する。また、可視化実験を行い、推力変動量と流れ場の対応を比較し、意図したメカニズムによって、推力変動が抑制されていることを確かめる。

なお、本実験では2枚のロータ軸を結ぶ線が段差と並行になる状態で計測を行う。

#### 3. 1 ロータ形状

図6に実験で用いたロータを示す。ロータはAPC9×6E(反時計回り)とAPC9×6EP(時計回り)で、半径は114 mm, 75%半径位置でのコード長さは16 mmである。



図6 実験に用いたロータ (APC 9×6EP)

#### 3. 2 実験装置

図7に実験装置を示す。2枚のロータは、直流ブラシレスモータ(X2212-12KV980III, Sunny Sky)によって回転する。ロータ回転数は、Electric speed controller (X-Drone 20A, T-motor)によってクローズドループ制御を行い、負荷が変動しても回転数を一定に保つ。実験時のではロータ回転数は5000 rpmで、75%半径位置でのレイノルズ数は、 $4.7 \times 10^4$ である。

#### 3. 3 推力計測

ロータ推力 $T$ を、モータ上部に取り付けた6軸力覚センサ(SFS055YA500U6, Leprino)によって計測する。サンプリング周波数は1.2kHzで、5秒間計測した値の平均値を1回の計測値とする。各条件で計測を3回行い、実験結果には3回分の平均値に対して、95%信頼度区間を示すエラーバーを記す。実験結果は、推力係数 $C_T$ を用いて整理し、実験日と時間による空気密度変化の影響をキャンセルしている。

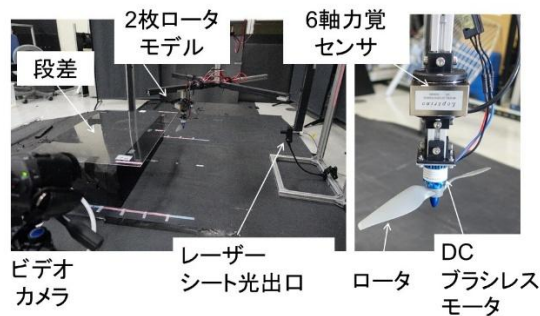


図7 実験装置(左:装置全景, 右:推力計測部拡大)

#### 3. 4 スモークによる可視化

各実験条件で推力比較で特徴が現れた条件に対し、スモークによる可視化を行った。スモークジェネレータで発生させた煙を、2枚のロータに吸い込ませ、周囲流れ場の構造をビデオカメラ(Sony, FDR-AX700)で撮影した。撮影時のフレームレートは120 FPS, F値は2.8, 露光時間は1/500 s, ゲインは24 dBとした。撮影後に、可視化動画からロータと壁の間の噴流を捉えた画像を抽出した。なお、スモークの可視性を改善するため、グレースケール画像の色相反転と色相スペクトル調整を加えた。

#### 3. 5 レーザーライトシート法による可視化

スモークによって流れ場の3次元構造を大まかに把握できるが、特定箇所の流れの細かい様子は把握しづらい。そこで、図8に示す2枚ロータの間を通り段差に垂直な面を、レーザーライトシート法で可視化した。

レーザー光源にはダイオード励起個体532 nmグリーンレーザー (Changchun New Industries Optoelectronics Technology, MGL-N-532)を用いた。レーザーライトシートは光ファイバーケーブルを介して、可視化面に照射される。光ファイバー通過後のレーザー出力はおよそ3Wである。スモークによる可視化と同様に、可視化領域をビデオカメラで動画を撮影し、特徴を捉えた画像を抽出した。この実験での撮影設定は、480 FPS, F値は2.8, 露光時間は1/500 s, ゲインは21 dBとした。

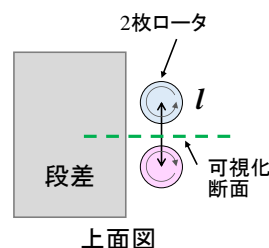


図8 レーザーライトシート法の可視化断面位置

#### 3. 6 実験条件

推力計測と可視化実験の条件を表1- 3に示す。推

力計測は実験条件1と2に分けられる．実験条件1では，2枚ロータが，段差上面から $1.0R$ の高さで水平に段差に侵入する状況を想定し，同じ $z$ でのロータ回転方向，軸間距離，せり出し板の長さを変化させて， $x$ に対する推力変化を計測した．実験条件2はせり出し板による推力変化を評価するため，実験条件1でせり出し板の効果が見込まれた，ロータが内巻き回転で $l=3.0R$ の場合について， $o=1.0R$ と板のない状態での段差周辺での推力分布を調べた．さらに，流れ場を比較するため，実験条件3で流れ場の可視化を行った．

表1 実験条件1(推力計測)

ロータ 回転方向	$l/R$	$o/R$	$x/R$	$h/R$	$z/R$
内巻き	3.0	0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00	-1.0~1.5	2.0	3.0
	4.0				
外巻き	3.0	0, 1			
	4.0				

表2 実験条件2(推力分布マップ作成)

ロータ 回転方向	$l/R$	$o/R$	$x/R^{*1}$	$h/R$	$z/R^{*1}$
内巻き	3.0	0.0, 1.0	-1.0~3.0	2.0	3.0

\*1 せり出し板及び段差に，ロータブレードが干渉する条件を除く．

表3 実験条件3(流れ場の可視化)

ロータ 回転方向	$l/R$	$o/R$	スモーク	レーザー ライト シート法
内巻き	3.0	0.0	○	○
		1.0	○	○
	4.0	0.0	○	○
		1.0	○	○
外巻き	3.0	0.0	○	-
		1.0	○	-
	4.0	0.0	○	-
		1.0	○	-

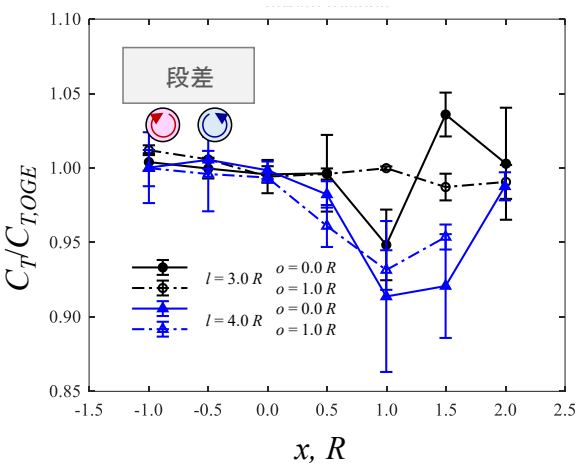
可視化実験を通して他パラメータは次の通りとした． $x/R=1.0$ ,  $h/R=2.0$ ,  $z/R=3.0$

4. 実験結果および考察

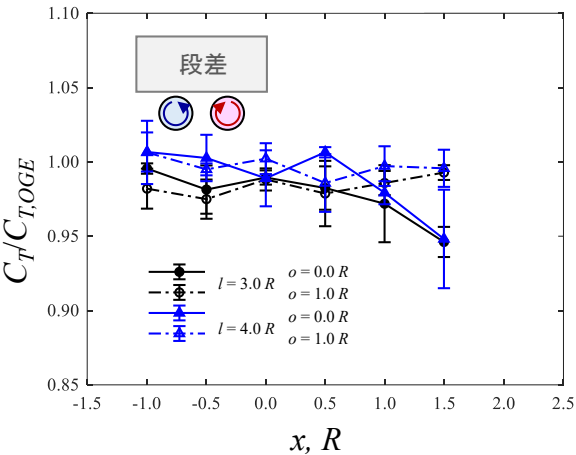
4. 1 推力計測

4. 1. 1 水平移動比較

図9に回転方向，軸間距離及びせり出し板の長さを変えたときの， $z=3.0R$ での推力変化を示す．また，図10に， $l=3.0R$ で内巻き回転時にせり出し板の長さを変えたときの推力比 $C_T/C_{T,0GE}$ の変化を示す．



(a) 内巻き回転



(b) 外巻き回転

図9  $z=3.0R$ での2枚ロータの推力変化(回転方向，ロータ軸間距離，せり出し板の比較)

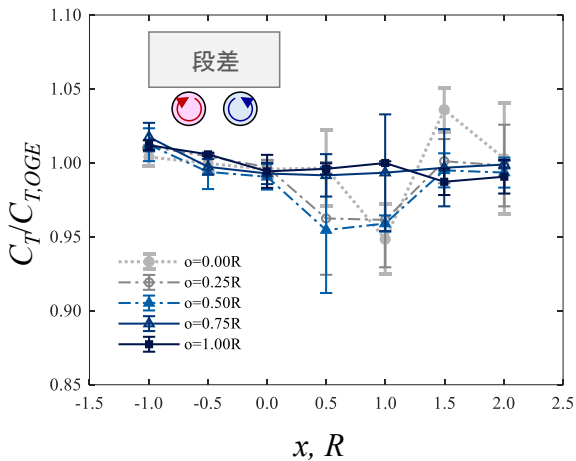


図10  $z=3.0R$ での2枚ロータの推力変化(せり出し板長さによる比較)

図9に実線で示す，せり出し板を取り付けない条件に着目する．  
(回転方向比較) 内巻き回転の場合，軸間距離 $l=3.0$ ,  $4.0R$  いずれのケースでも， $x=1.0R$  付近に極小値が



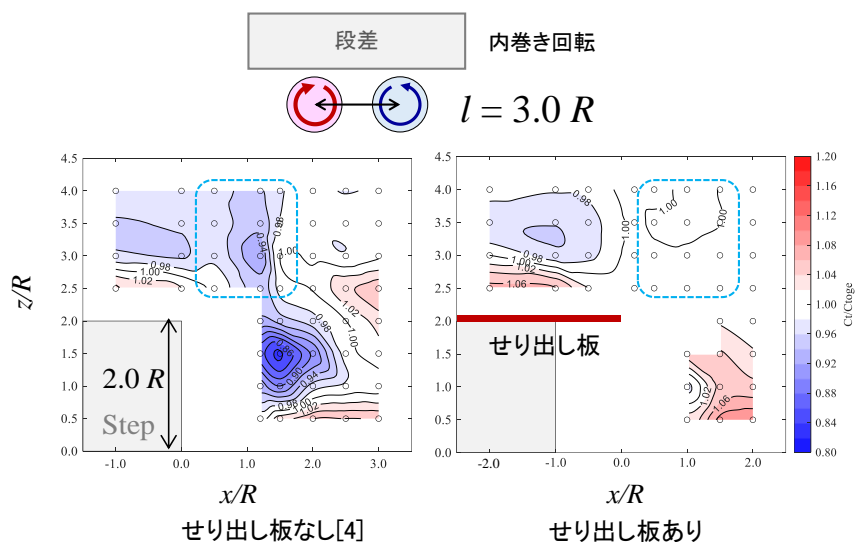


図11 段差近傍の推力比分布の比較

ある．極小の推力比は、 $l=3.0R$ で0.95、 $l=4.0R$ で0.92である．一方、外巻き回転の場合は、いずれの $l$ についても、 $x=0.5R$ 以上で、 $x$ の増加に伴って推力比が減少する．どちらの $l$ に対しても、計測範囲で最小の推力比は、 $x=1.5R$ で0.95である．

(軸間距離 $l$ による比較) 内巻き回転のときには、 $l$ が $3.0R$ から $4.0R$ へと広がると、推力比の極小値が減少する．一方、外巻き回転のときには、 $x$ の変化に対してほぼ同じ推力比を示す．

(せり出し板による比較)

次に図9に破線で示す、せり出し板の長さ $o$ が $1.0R$ の条件に着目する．

内巻き回転かつ $l=3.0R$ の場合、長さ $1.0R$ のせり出し板を取り付けることで、推力比の減少がほとんど生じなくなる．一方、 $l=4.0R$ の場合、長さ $1.0R$ のせり出し板により極小値が0.92から0.94へと、僅かに増加した．

外巻き回転の場合、いずれの軸間距離でも、 $1.0R$ のせり出し板を取り付けることで、 $x$ の変化に対して推力比がほぼ一定となる．

次に、図10のせり出し板の長さを変化させた場合の推力変化に着目する． $o=0-0.50R$ では、 $x=0.5R$ または $1.0R$ において、推力比が極小値を示す． $o=0.75R$ 以上では、極小値領域は現れない．

以上の結果から、内巻きかつ $l=4.0R$ の場合を除いて $1.0R$ 以上のせり出し板を設けることで、ロータ高さ $z=3.0R$ での2枚ロータの推力減少を抑制できることがわかった．

一方で、せり出し板の長さ $o=0.75R$ 以上で、推力低下を抑制できると考えられるが、 $h$ 、 $z$ 、 $l$ 、回転方向やブレードローディングの影響を受ける可能性があ

る．推力低化の抑制に有効なせり出し板長さの把握には、追加計測が必要である．

図9に示した8条件の比較では、せり出しがなく、内巻き回転のときに $x=1.0R$ 付近で推力比が極小値を示した．この条件では、先行研究で述べられるように、ロータ後流で逃げ場を失った流れが、ロータ間と段差側面の間の空間を噴流として通過していると考えられる．そのため、ロータと噴流の間で流れが再循環し、ブレードの有効迎角が局所的に下がることで、ロータ推力が低下していると考えられる．

複数の条件で推力比が極小となる $x=1.0R$ での流れ構造を把握するため、4.2節で可視化結果に基づいて流れ場を比較する．

#### 4. 1. 2 せり出し板の有無に対する推力分布比較

4.1.1節では、 $z=3.0R$ に固定して、せり出し板によって推力変化が抑制されることを確認した．しかし、せり出し板を取り付けることで、 $x$ - $z$ 平面内で違う位置に噴流が移動し、ロータ推力が変化することが懸念される．そこで、 $l=3.0R$ かつ内巻き回転の条件で、段差周りの $x$ - $z$ 平面内での推力分布を、 $1.0R$ のせり出し板の有無によって比較し、2枚ロータの接近時に推力低下領域が意図しない位置に生じないことを確認する．

図11に、せり出し板の有無による推力比分布の比較を示す．左側のせり出し板のない条件では、破線で示す段差高さより上かつ、段差より右の位置に推力低下領域が存在する．一方で、せり出し板を取り付けると、破線領域の位置にあった推力の低い領域が消失する．

また、段差より高く段差の上に位置しない位置では推力低下領域は見られない．この結果は、せり出し

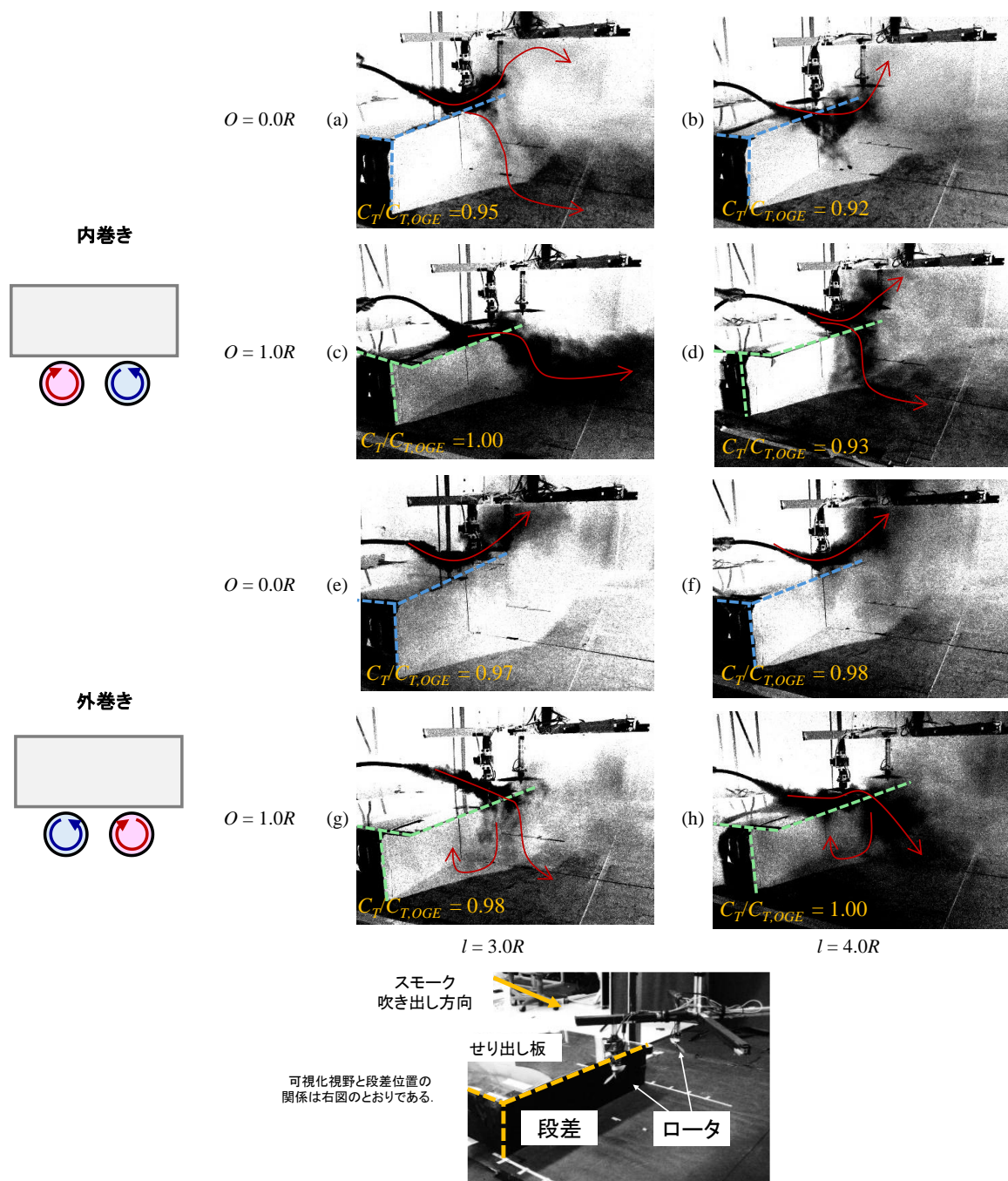


図 12 スモークによる  $x = 1.0 R$  での段差近傍での流れ場の様子

板を取り付けることで、2枚ロータが接近時に、段差上面の領域を除いて推力低下が生じないことが示している。

なお、段差上面の推力低下は、台座上面と2枚ロータによる通常の地面効果によって生じるものであり、先行研究により推力低下領域が存在することが報告されている[5, 6]。本稿は、2枚ロータが段差に水平に接近する状態に着目しているため、地面効果による段差上面での推力低下については扱わない。

また、推力低下を抑制する効果は、 $h$ 、 $z$ 、 $l$ やブレードローディングの影響を受ける可能性があるため、

有効なせり出し板長さの評価には、追加計測が必要である。

#### 4. 2 可視化実験

##### 4. 2. 1 スモークによる可視化結果

可視化実験により  $x = 1.0 R$  での推力比と、流れ場の関係を調べる。

図12にスモークによる可視化結果を示す。なお、図12には、 $x = 1.0 R$ での推力比を併記している。8つの条件でスモークを段差上面からロータ間へ吸い込めると、流れ場を下方に流れ去る場合と、一部またはす

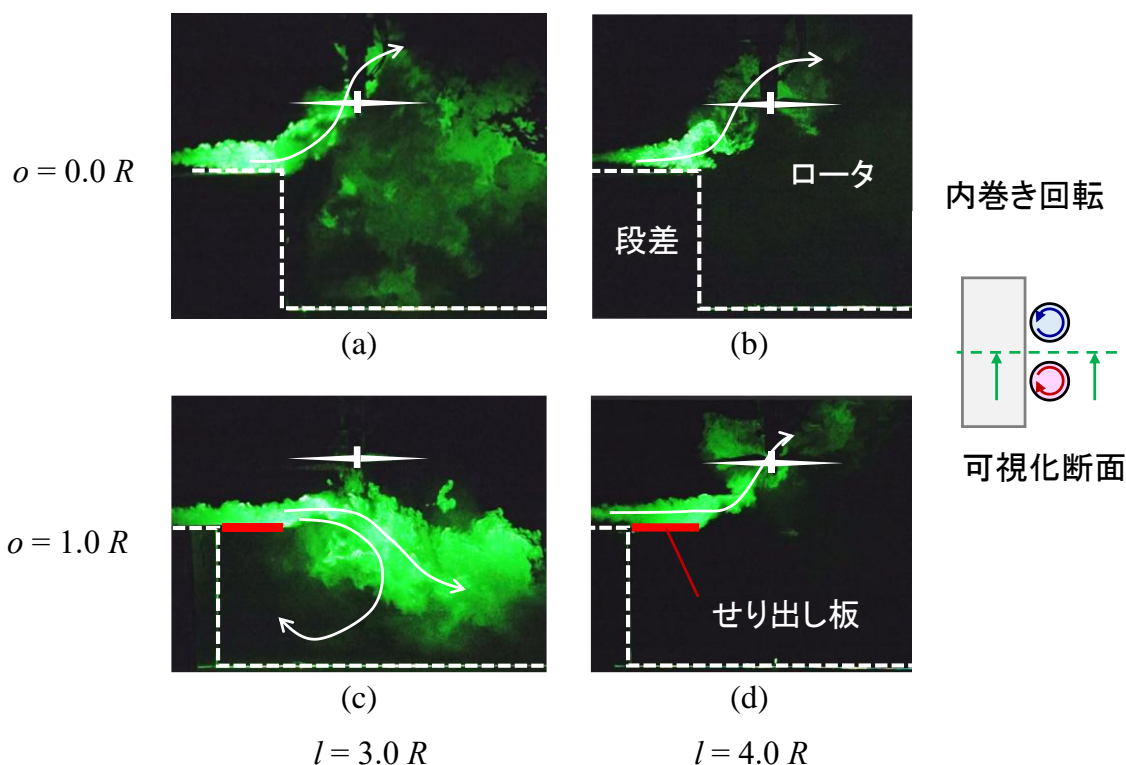


図13 レーザーシート法による段差近傍での噴流の可視化

べてがロータよりも上方に流れ去る場合の二通りに分けることができる。

推力比が0.97以下となるケースa, b, d, eでは、スモークが上方に流れ去っている。これは段差側面とロータの間に生じる噴流によって、スモークが上向きに流れ去っていると考えられる。推力比が小さい条件と位置することから、噴流の発生によって、ロータ推力が低下していると考えられる。

外巻き回転の場合には、せり出し板をつけない状態のケースe, fでもスモークが上方に流れる。しかし、このときの推力比は0.97または0.98で、明確な推力低下は生じていない。

せり出し板を取り付けたケースc, d, g, hについては、内巻き回転でロータ間隔が $4.0 R$ となるケースdを除いて、スモークはロータよりも下に流れ去っている。また、抽出した静止画像からの判別は難しいが、動画を観察するとケースc, g, hでは、せり出し板の下に旋回する流れが生じ、台座側壁に沿ってスモークが流れ出す様子がわかる。このときの推力比は0.98以上で、推力低下が抑制されている。

以上のように、せり出し板を取り付けることで、噴流の発生が抑えられていることを可視化画像から確認した。同条件での推力比が0.98以上であることから、提案したせり出し板が噴流の発生を防ぎ、推力低下を抑制していると考えられる。

しかし、4.1.1節で述べたように $l = 4.0 R$ かつ内巻き回転では噴流の発生を防ぐことができず、推力低下

が生じる。噴流が生じやすいロータ間隔が広く、ロータ回転方向が内巻き回転の条件では、せり出し板による推力変化の抑制効果が期待できない場合がある。

#### 4. 2. 2 レーザーシート法による可視化結果

噴流の様子を詳細に捉えるため、2枚ロータの間を通る断面内の流れ場をレーザーシート法で可視化した。図13に、ロータを内巻き回転させた時の $x = 1.0 R$ かつ、 $l = 3.0 R$ と $4.0 R$ で、 $1.0 R$ のせり出し板の有無による可視化結果を示す。可視化した4条件では、 $l = 3.0 R$ でせり出し板を付けた条件cを除いて、スモークがロータの上方に流れ去っている。これは、ロータ後流がコーナーによって偏向され、段差側壁とロータの間に上向きの噴流が生じているためだと考えられる。条件cでは、ロータ後流がせり出し板の下で旋回し、可視化面から消え去っている。これは、4.2.1節で述べたように、せり出し板の下空間に沿って、ロータ後流が流れ去っているためだと考えられる。

レーザーによる可視化により、せり出し板の下にロータ後流の排出経路ができ、噴流の形成を防いでいることを確認した。

#### 5. 結論

本研究では、2枚ロータが隣り合う形態の機体が、段差近傍で引き起こす推力低下を抑制するため、せり出し板の取り付けを提案した。提案手法の有効性

を示すため、推力計測を行うことで提案手法による推力低下の抑制効果を評価し、可視化実験による推力変化時の流れ場の把握を行った。推力計測実験からは、内巻き回転かつロータ軸間距離が $4.0 R$ 以上の場合を除いて、 $1.0 R$ のせり出し板を取り付けることで、段差近傍での推力低下を抑制できることがわかった。可視化実験からは、せり出し板により、せり出し板の下で後流の一部が排出され、ロータと段差壁面の間を通過する噴流がなくなることを確認した。すべての2枚ロータの配置に対して有効ではないものの、せり出し板の取り付けにより、2枚ロータを有する機体が、着陸台座に接近する際に推力低下を引き起こすリスクを軽減することが期待できる。

今後は、 $l$ ,  $z$ ,  $h$ 等の他のパラメータの影響を考慮しつつ、推力低下防止に有効なせり出し板の長さを明らかにする予定である。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、2023年度から2年間にわたり渋谷学術文化スポーツ振興財団より「大学の新技术、研究活動への奨励金」の支援を受けた。ここに謝意を表する。

#### 参考文献

- [1] Zagaglia, D., Giuni, M., and Green, R. B., "Investigation of the Rotor-Obstacle Aerodynamic Interaction in Hovering Flight," *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 63, No. 3, 2018, pp. 1–12. DOI: 10.4050/JAHS.63.032007
- [2] Otsuka, H., Akaba, S., Hara, T., Nagai, H., and Tokutake, H., "Thrust variations in small rotors due to corner and vertex effects on the ground side," *The Aeronautical Journal*, Vol. 129 No. 1334, 2025. DOI: 10.1017/aer.2024.148
- [3] Otsuka, H., Akaba, S., and Tokutake, H., "Side-by-Side Rotor Thrust Change During Horizontal Approach to Rectangle Step," AIAA SCITECH 2025 Forum, AIAA 2025-1269, Orlando, FL, USA, 1/8, 2025. DOI: 10.2514/6.2025-1269
- [4] Barcelos, D., Kolaei, A., and Bramesfeld, G., "Aerodynamic Interactions of Quadrotor Configurations," *Journal of Aircraft* 2020 57:6, 1074-1090. DOI: 10.2514/1.C035614
- [5] Ramasamy, M., and Yamauchi, G. K., "Using Model-Scale Tandem-Rotor Measurements in Ground Effect to Understand Full-Scale CH-47D Outwash," *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 62, No. 1, 2017, pp. 1–14. DOI: 10.4050/JAHS.62.012004
- [6] Dekker, H. N. J., Ragni, D., Baars, W. J., Scarano, F., and Tuinstra, M., "Aerodynamic Interactions of Side-by-Side Rotors in Ground Proximity," *AIAA Journal*, Vol. 60, No. 7, 2022, pp. 4267–4277. DOI: 10.2514/1.J061105