

# マルチロータ間の空力干渉の数値シミュレーション

## Numerical simulation of the aerodynamic interference between multiple rotors

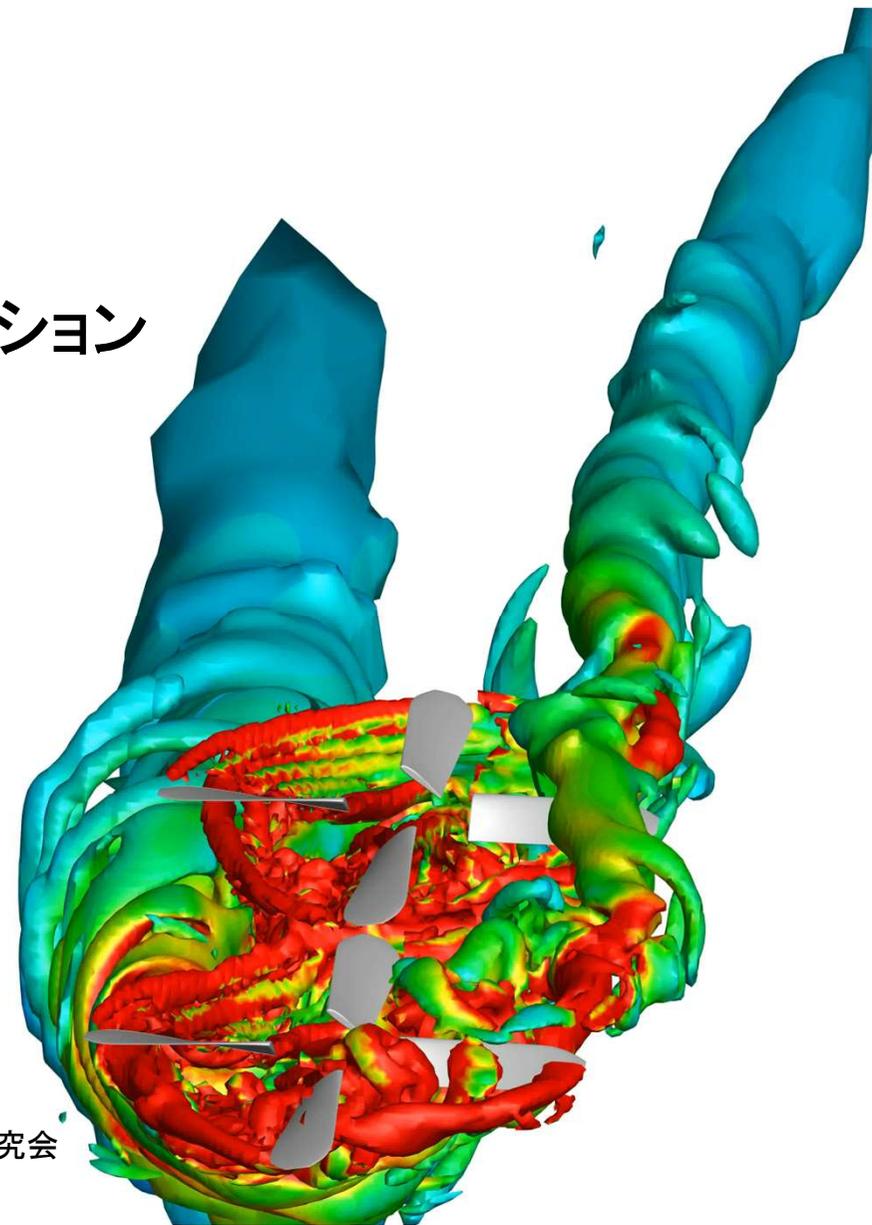
○ 齊藤光祐 Kosuke Saito\*<sup>1</sup>, 弓野拓海 Takumi Yumino\*<sup>1</sup>

菅原瑛明 Hideaki Sugawara\*<sup>2</sup>, 田辺安忠 Yasutada Tanabe\*<sup>2</sup>

亀田正治 Masaharu Kameda\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> 東京農工大学 Tokyo University of Agriculture and Technology

\*<sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構 Japan Aerospace Exploration Agency



# 電動垂直離着陸機 (eVTOL)



左上 : Joby Aviation "Joby S-4", 右上 : Volocopter "VoloCity"  
左下 : Vertical Aerospace "VX4", 右下 : SkyDrive "SD-05" (<https://evtol.news>)

滑走路が不要  
ホバリングが可能



市街地での人や物の輸送  
災害救援

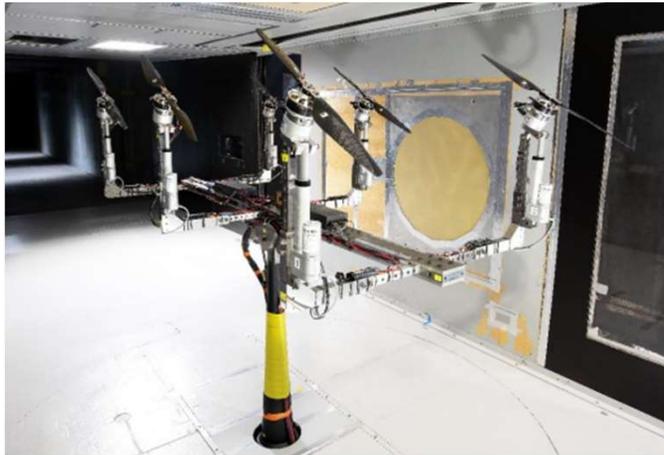
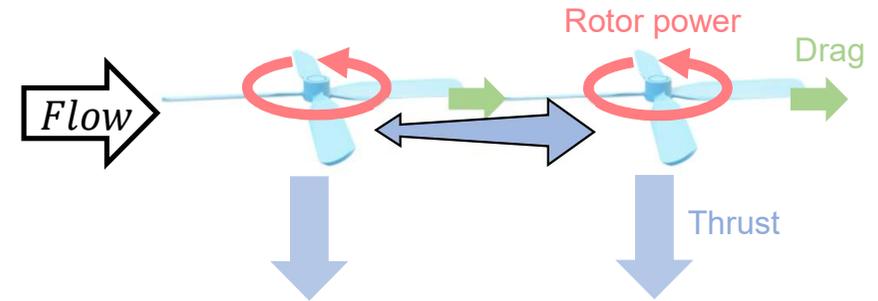
ロータを複数搭載している形態  
が多くみられる

# ロータ間空力干渉課題

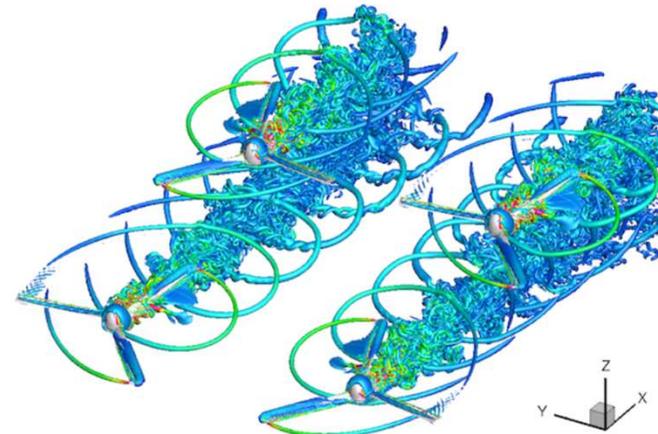


## ◆ロータ間空力干渉

- 流れ場が複雑化
  - ロータ性能が変化
  - 特に後方ロータ付近では前方ロータで生じた後流の影響が大きい
- ➡ 干渉現象がロータ性能に与える影響の把握が不可欠
- Russellらはマルチロータの性能変化を測定するためにテストベッドを開発
  - Diazらは前傾飛行条件で数値解析を実施。妥当性の確認はできていない。



Russell et.al., 76<sup>th</sup> VFS, 2020.

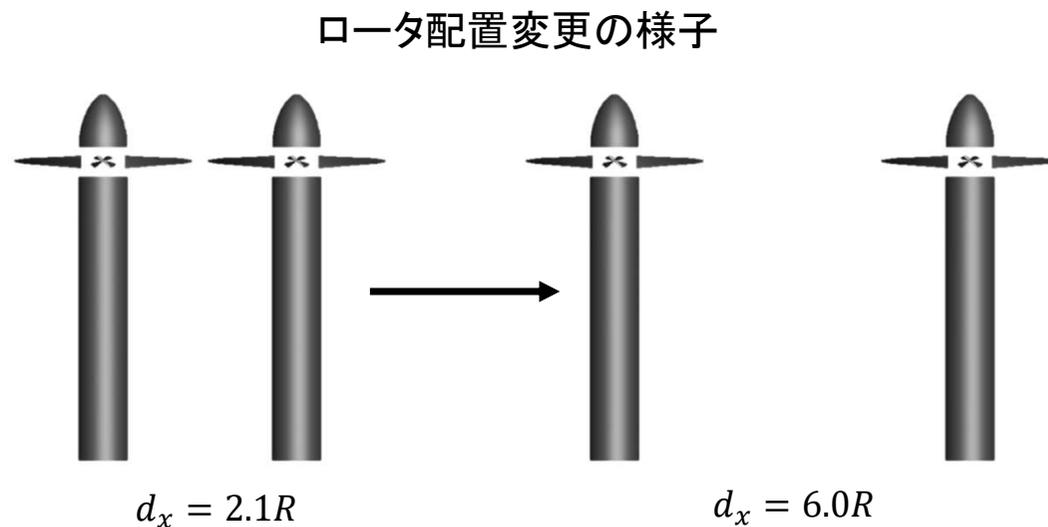
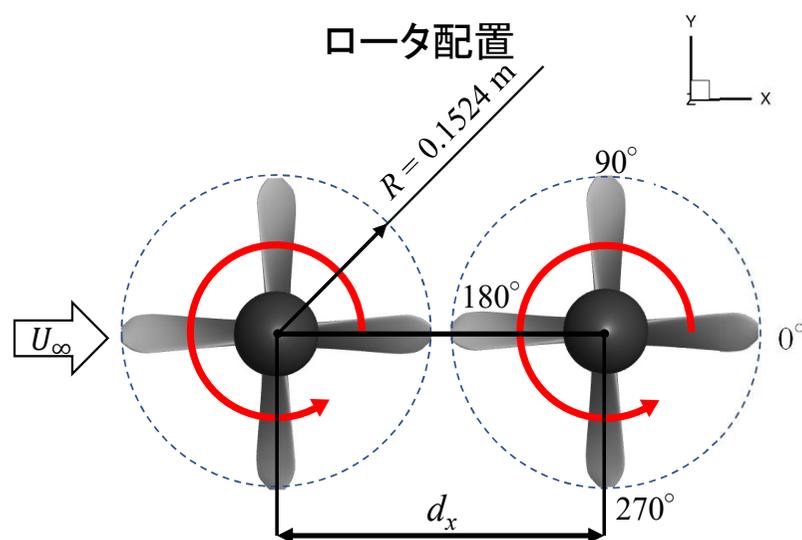


Diaz et.al., AIAA SciTech, 2020.

## マルチロータにおけるロータ間干渉の影響を把握し、高性能化を実現することを目的とする

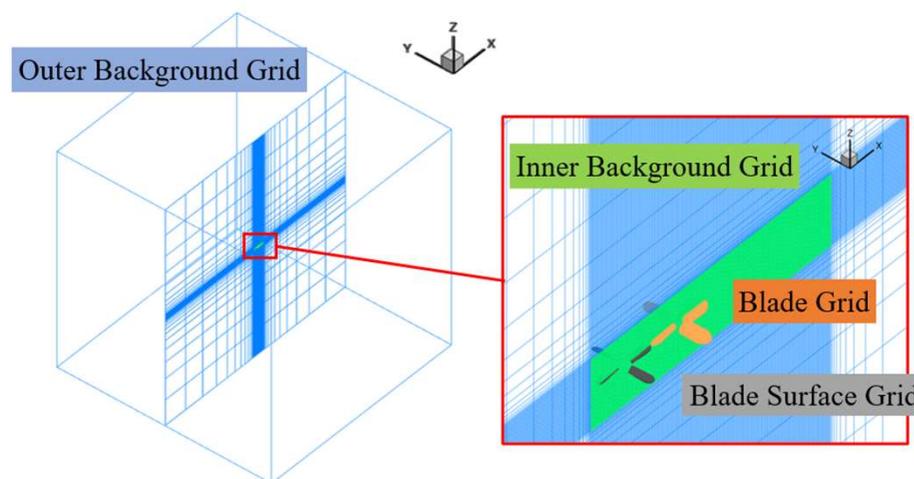
本発表の目的

マルチロータにおける数値解析手法の妥当性検証



## ◆rFlow3D

- 回転翼CFDツール
- 3次元圧縮性流体ソルバ
- 移動重合格子法



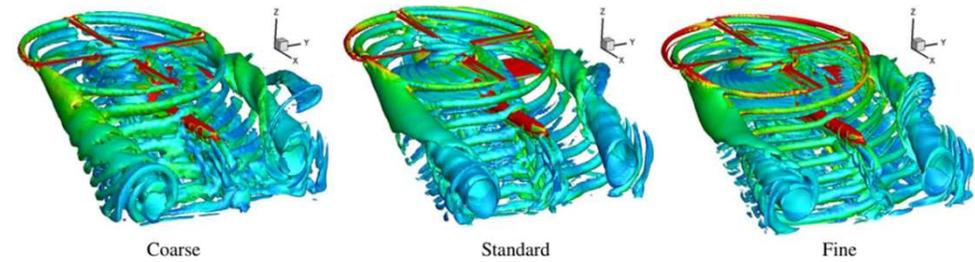
	背景格子	ブレード格子
支配方程式	3次元圧縮性Navier–Stokes方程式	
空間離散化	セル節点 FVM	セル中心 FVM
時間積分	4次Runge-Kutta陽解法	DTS / LU-SGS 陰解法
数値流束関数	mSLAU (Modified SLAU)	
空間高次精度化	FCMT (Fourth Order Compact MUSCL TVD)	
粘性流束	2次中心差分	
乱流モデル	Menter k- $\omega$ SST model from 2003 (SST-2003)	

# rFlow3Dの妥当性検証



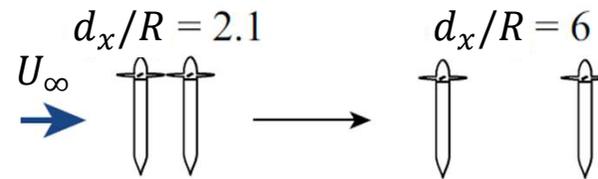
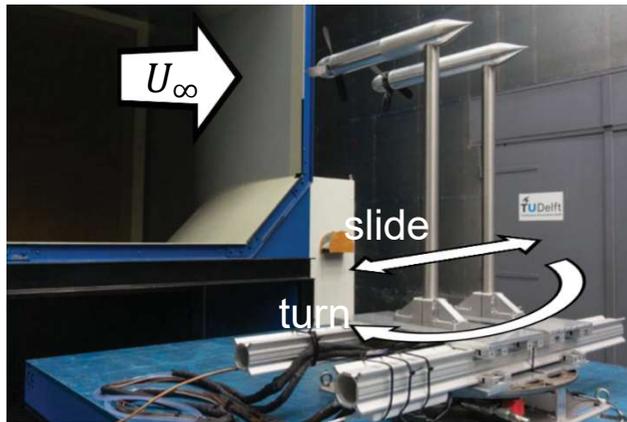
菅原ら[1]

- ロータと固定翼の空力干渉流れ場を  
実験結果と比較することで妥当性を検証
- 前進飛行時のマルチロータの検証は不十分  
➔ rFlow3Dを前進飛行時のマルチロータに  
適用した際の妥当性を検証

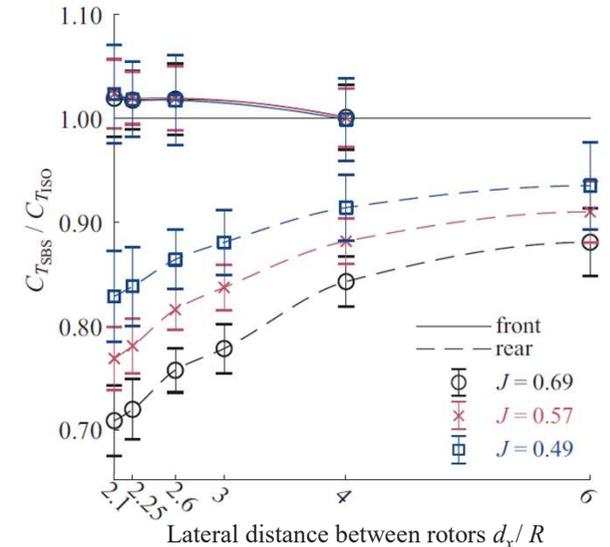


Stokkermansら[2]

- ロータ間干渉によるロータ性能の変化に着目
- 様々な構成と前進率で風洞試験を実施 ➔ 妥当性評価の指標とした



格子解像度による流れ場の変化の様子[1]



ロータ間距離に対する揚力変化の様子[2]

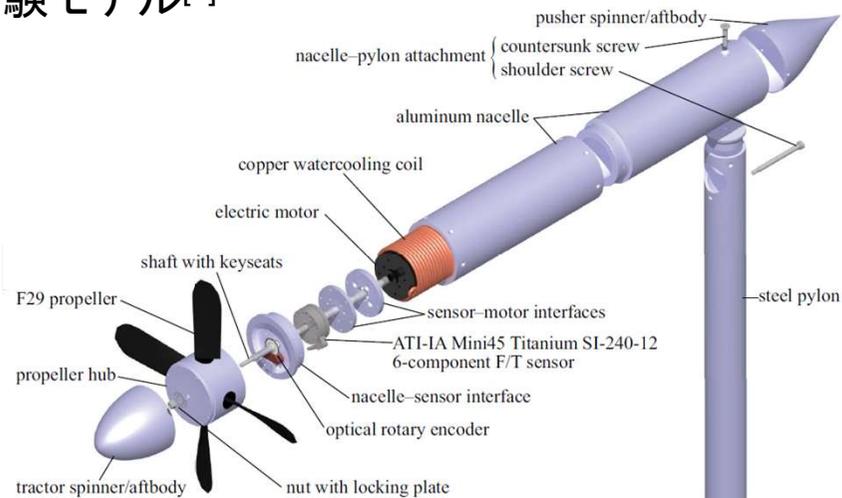
[1] Sugawara et al., "Effect of Lift-Share Ratio on Aerodynamic Performance of Winged Compound Helicopter," 2021.

[2] Stokkermans et al., "Aerodynamic Interaction Effects Between Propellers in Typical eVTOL Vehicle Configurations," 2021.

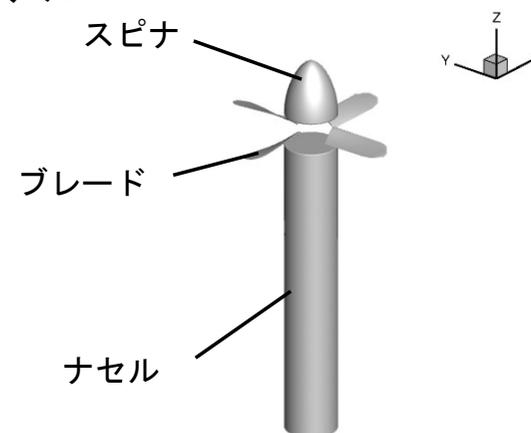
# 計算モデル



## 実験モデル<sup>[1]</sup>



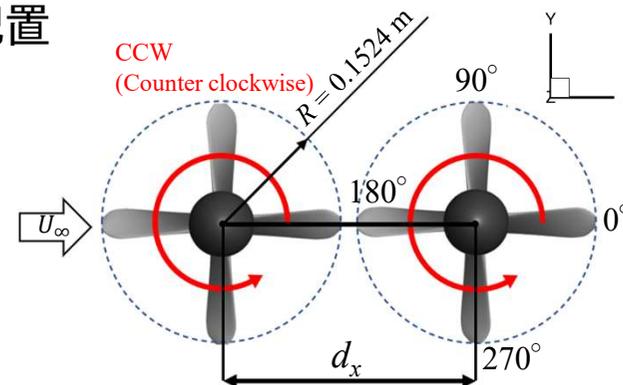
## 計算モデル



### ロータ緒元

ロータ半径	0.1524 m
ロータ枚数	4枚
ブレードねじり下げ	-27 deg.
ブレードアスペクト比	3.25
ブレードテーパ比	0.48

## モデル配置



[1]Stokkermans et al., 2021.

# 計算条件

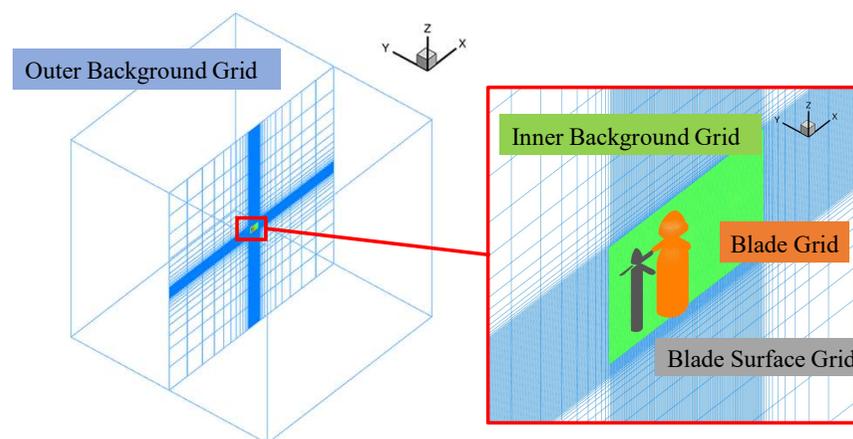
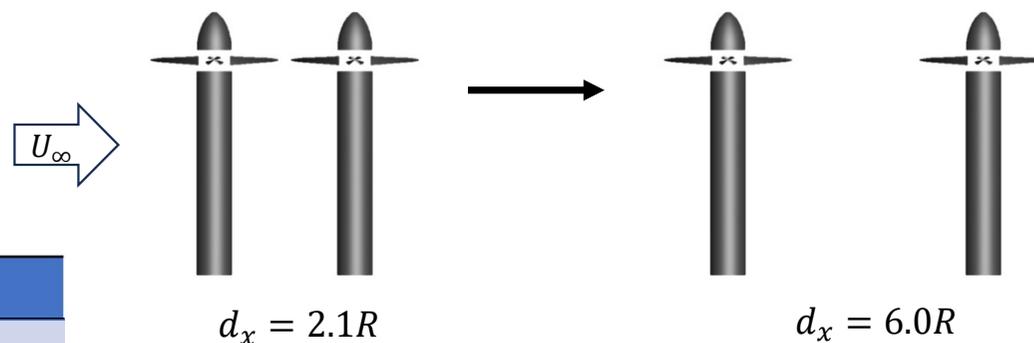


- 前進飛行条件
- 前進速度一定
- ロータ間距離とロータ回転数を変更

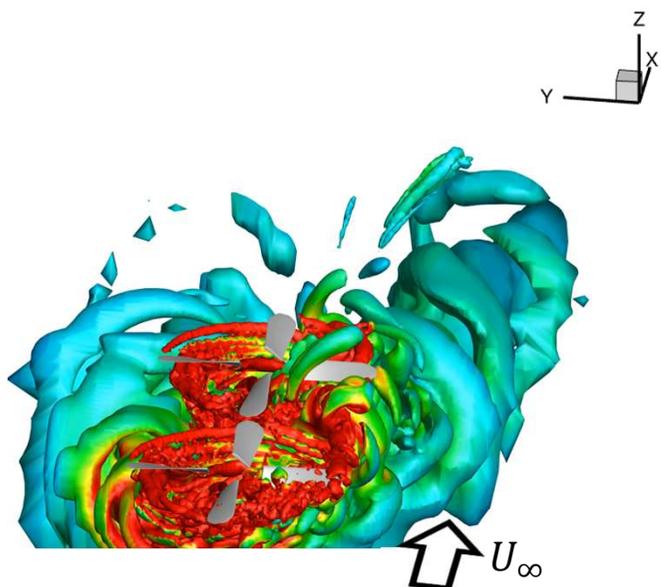
計算条件	
飛行条件	前進飛行
一様流速度(飛行速度) $V_\infty$	20 m/s
ロータ配置	シングル (ISO) 前後に2つ(tandem)
一様流流入角	0 deg.
ロータ間距離 $d_x/R$	2.1, 2.6, 4.0, 6.0
ロータ回転数 (前進率* $\mu$ )	8100, 5100 RPM (0.155, 0.246)

※前進率  $\mu = V_\infty \cos i / \Omega R$  ;  $V_\infty$ : 一様流速度,  $i$ : 一様流流入速度  
 $\Omega$ : ロータ角速度,  $R$ : ロータ半径

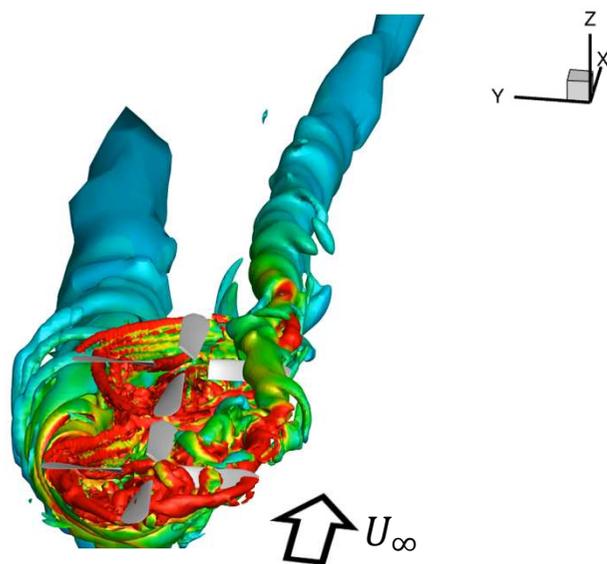
ロータ間距離変更の様子



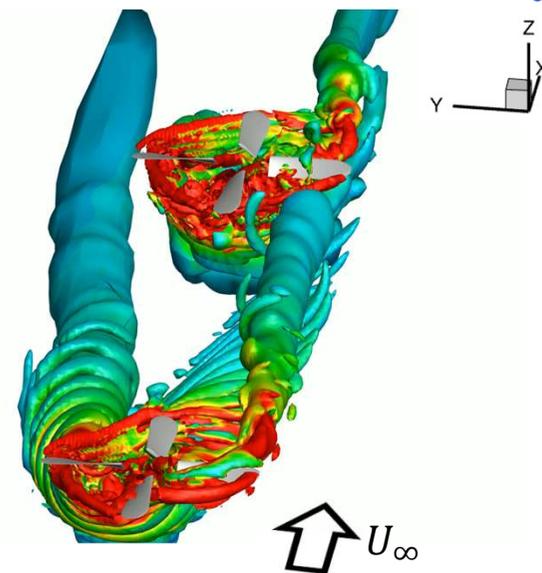
# 翼端渦流れ場



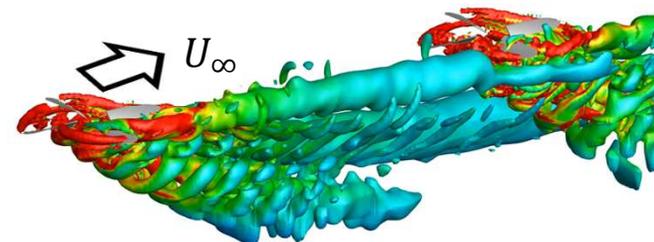
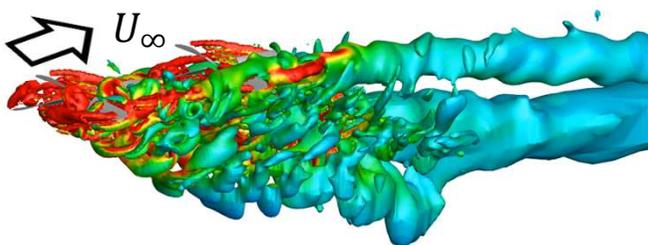
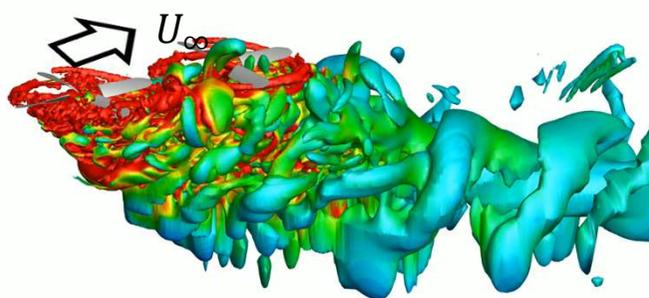
$\mu = 0.155, d_x = 2.1R$



$\mu = 0.246, d_x = 2.1R$



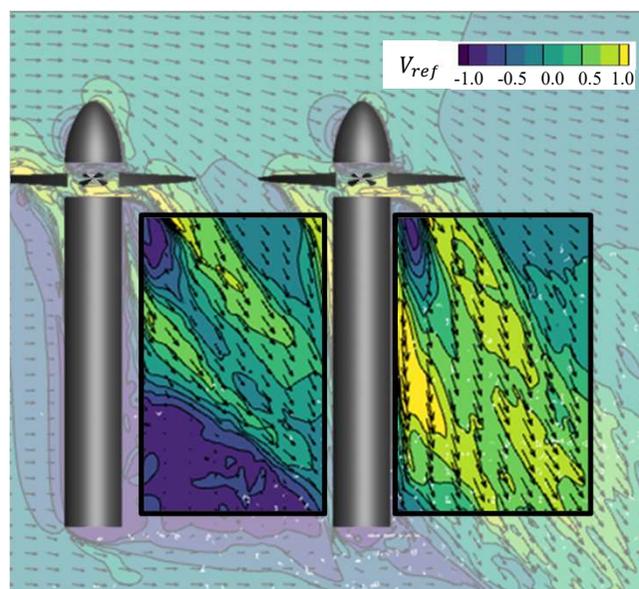
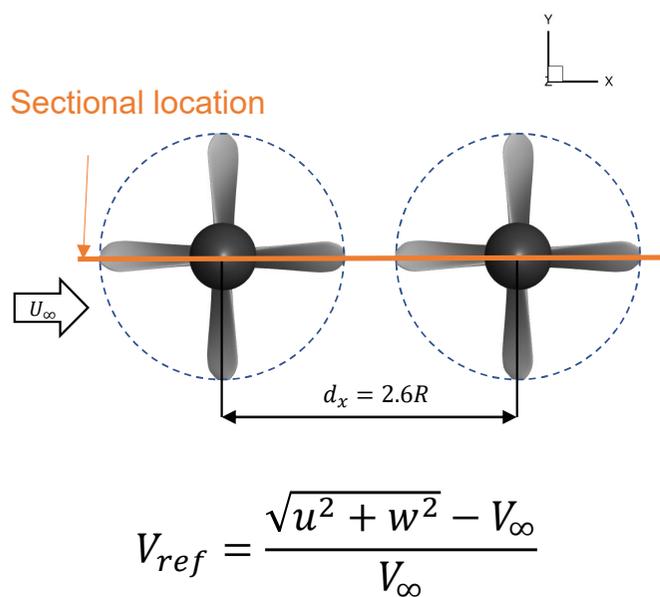
$\mu = 0.246, d_x = 6.0R$



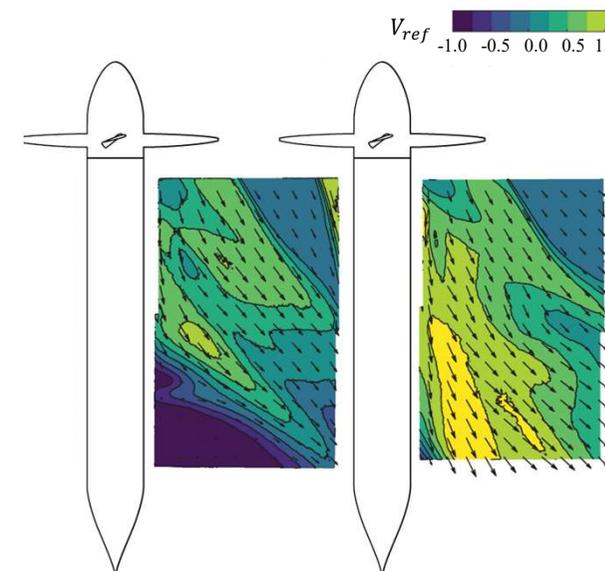
# 妥当性検証(1)



## PIV計測結果との比較



計算結果



PIV計測結果[1]

速度分布・ベクトルの向きはおおよそ一致

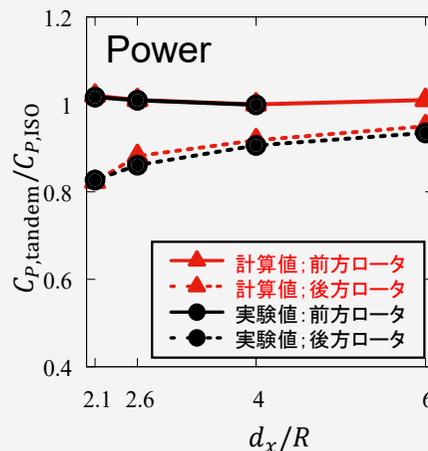
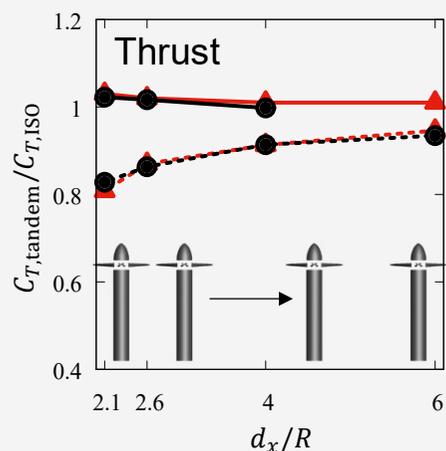
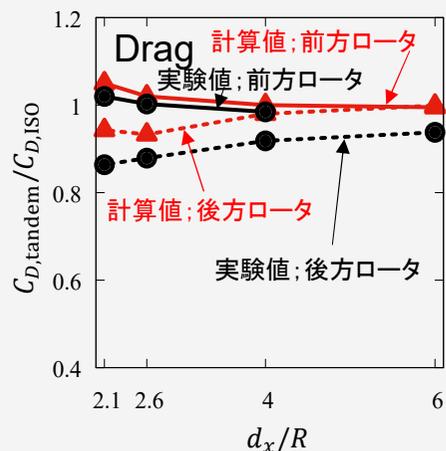
[1] Stokkermans et al., 2021.

# 妥当性検証(2)



## ◆ 抵抗係数, 推力係数, パワー係数の比較(/ISO)

$\mu = 0.155$



$$C_D = D / \rho \pi R^2 (\Omega R)^2$$

$$C_T = T / \rho \pi R^2 (\Omega R)^2$$

$$C_P = P / \rho \pi R^2 (\Omega R)^3$$

$$C_{D,w/spinner} = C_{D,Rotor} + C_{D,Spinner} + C_{D,Hub}$$

$$C_{T,w/spinner} = C_{T,Rotor} + C_{T,Spinner}$$

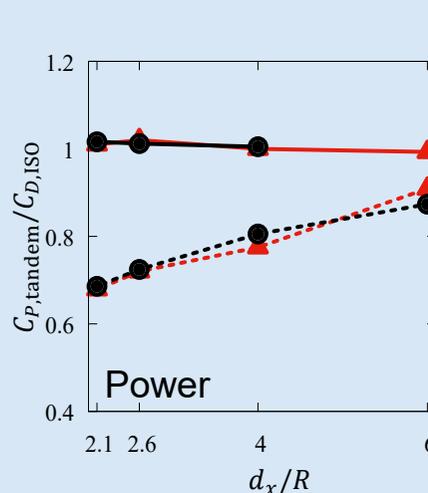
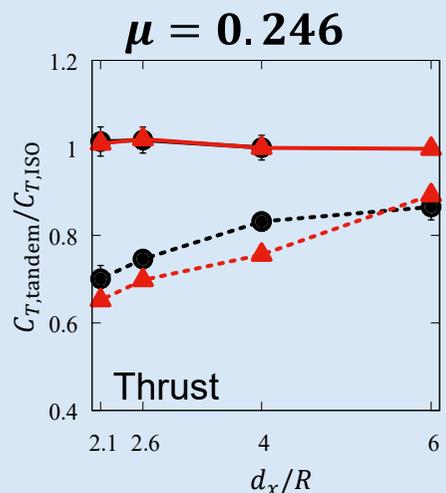
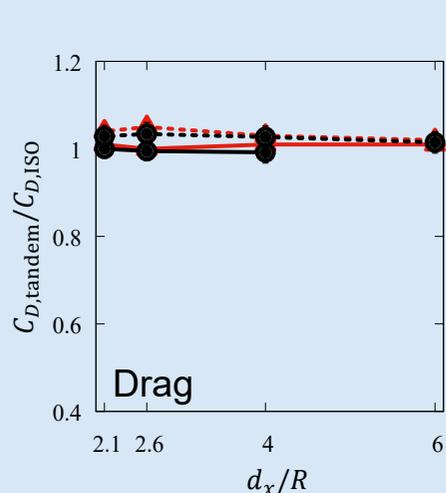
$$C_{P,w/spinner} = C_{P,Rotor} + C_{P,Spinner}$$

### 実験&数値計算

- ロータ間距離が小さいほど前後の性能差が大きい
- 前進率が高いほど前後差が大きい

➤ 本計算はロータ間干渉によるロータ性能変化の様子を捉えられている

➤ **本計算の妥当性を確認**



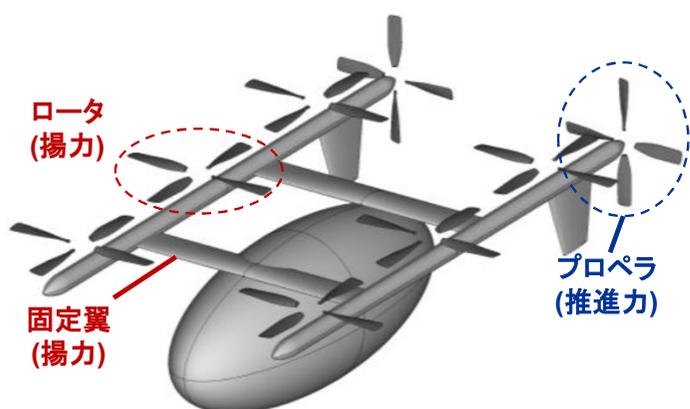
## 目的

- ロータ間干渉によるロータの性能変化の把握
- 前進飛行時のマルチロータにおけるrFlow3Dの妥当性検証

## 結論

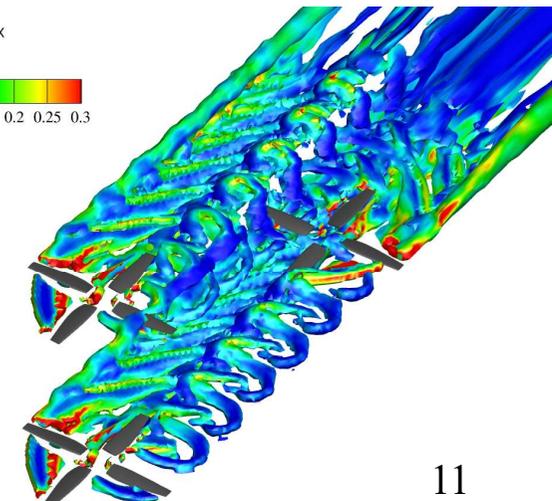
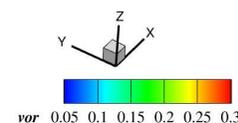
1. **計算結果と実験結果はおおむね一致**. 計算の妥当性が確認できた.
  - ロータ間干渉現象を捉えられていることを確認
2. **前進率が高く, ロータ間が近いほど前後ロータの性能差が大きくなる**様子を確認した.
  - 後方ロータへの吹き下ろし量が増加し, 有効迎角が減少することに起因

## 今後の展望



- Lift&Cruise型eVTOL概念機体への適用
- 飛行条件・ロータ配置etc.を変化させ解析
- 理想的な機体形態を考案

Sugawara, et al., 61st Aircraft symposium, (2023).



11  
Yumino, et al., 61st Aircraft symposium, (2023).