

# マルチロータの地面効果に関する数値解析

米澤 宏一

電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部  
気象・流体科学研究部門

2021年度将来回転翼機研究会／回転翼解析技術交流会

# 発表内容

- 背景と目的
- 解析方法
- 結果と考察
- まとめ
- 成果の活用・今後の展望



本資料は、【Yonezawa et al., “Numerical Investigations of Ground Effect of a Quadcopter,” Proc. APISAT2021】の内容を日本語で再構成したものです

# 研究の背景

マルチロータードローン(電動回転翼型垂直離着陸機)の発展と応用

産業用途の拡大  
設備点検、監視、観測、測量など

特殊環境下での自律飛行  
狭い空間、設備・建造物の至近距離飛行

Urban air mobility (UAM)  
人や物の輸送への応用

小型中心のUAVの大型化  
周辺環境への影響

空力干渉問題  
低空飛行時の地面効果、周囲構造物との空力干渉など

# 研究の背景

## 空力干渉問題に関する研究

### 側壁、天井とドローンの干渉

Tanabe, Y., et al., J. Robotics and Mechatronics, 30 (3), 2018

Yonezawa, K., et al., ARF 2018

### トンネル内のローター空力特性

Tanabe, Y., et al., 44<sup>th</sup> ERF, 2018

米澤、飛行機シンポジウム、2020

### 地面効果

Tanabe, Y., et al., J. Robotics and Mechatronics, 33 (2), 2021

### ローター配置と空力特性に関する研究

Li, Y. et al., J. Bio. Eng., 18 (4), 2021

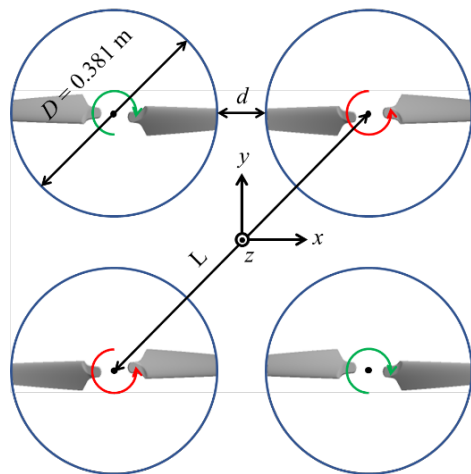
## 本研究の目的: 地面効果に及ぼすロータ配置の影響\*

- ✓ 可変ピッチロータ
- ✓ ロータ回転数、推力一定
- ✓ ロータ回転面の高度を変化
- ✓ トルクや流れパターンを比較



(\*Yonezawa et al., "Numerical Investigations of Ground Effect of a Quadcopter," Proc. APISAT2021)

# 4ロータドローンモデル



ロータレイアウト  
(胴体は解析に含まない)

## Specification of quadcopter

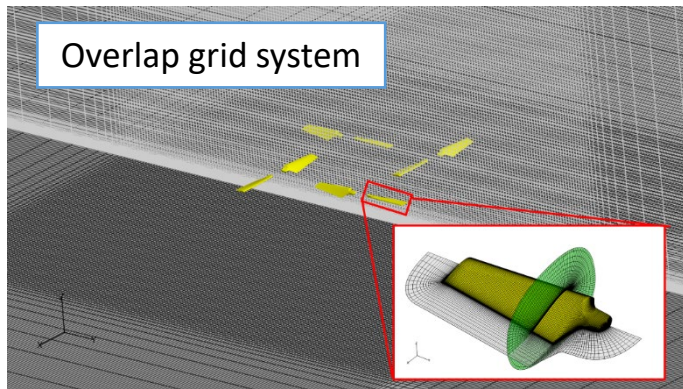
ロータの数	4
1ロータ当たりの翼数	2
回転周波数	90 Hz
ロータ直径	0.381 m
翼弦長(翼根)	0.0665 m
翼弦長(翼端)	0.0402 m
翼型	OAF117
ねじり角	-21° (スパン方向に線形分布)

	L/D	d/D
Config. 1	1.41	0
Config. 2	1.76	0.243

# 解析手法

ソルバ: rFlow3D

	Background grid	Blade grid
支配方程式	3-D compressible Navier Stokes equations	
離散化手法	Cell-vertex FVM	Cell-centred FVM
時間進行法	4-stage Runge-Kutta method	Dual-time-stepping LU-SGS
対流項の数値流束	Modified SLAU with 4 <sup>th</sup> -order compact MUSCL TVD	
粘性項の数値流束	2 <sup>nd</sup> order central difference method	
乱流モデル	Not used	



Overlap grid system

ブレードメッシュ

121 (span) × 143 (chord) × 61 (normal) points

背景格子

449 (L) × 449 (W) × 333 (H) points

# 結果の評価方法

- 高度を変化させた
- $C_T$  は0.0106 で固定(ブレードピッチ角は変動)
- $C_Q$  は流れ場の影響で変化

推力係数  $C_T = \frac{\text{Thrust}}{\rho\pi R^2 V_{tip}^2}$

トルク係数  $C_Q = \frac{\text{Torque}}{\rho\pi R^3 V_{tip}^2}$

無次元加速度  $= \frac{\text{Velocity}}{v_i}$   $\left( v_i = \sqrt{\frac{\text{Thrust}}{2\rho\pi R^2}} \right)$   
 誘導速度

流れの可視化:

PLOT3D-FUNCTIONフォーマットに変換

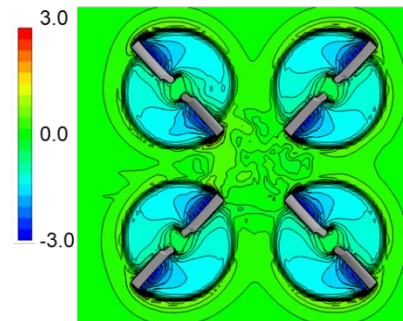
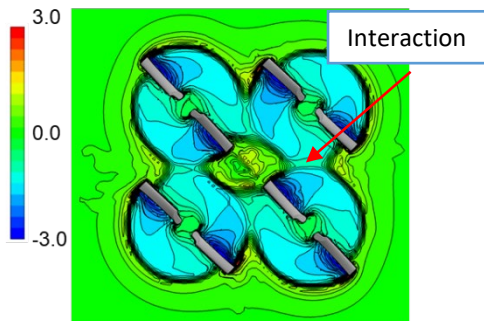
(セル中心に値がある場合はセル重心に格子点を配置して可視化用メッシュを生成)

→FieldView

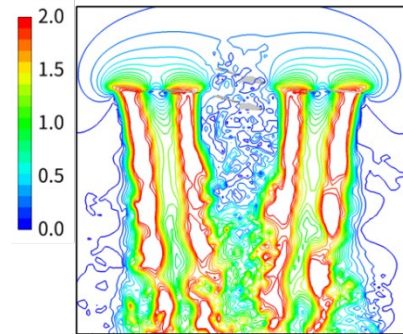
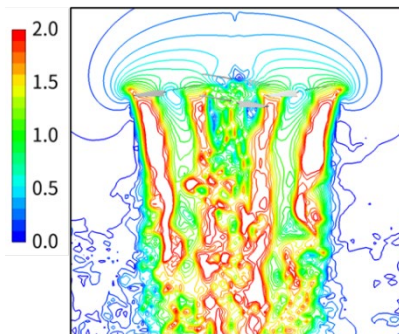
# 結果と考察: Out of ground effect (OGE)

$$C_T = 0.0106 \text{ (Const.)}$$

ロータ回転面における  
無次元化速度分布



対角上のロータ中心を通る断面上での  
無次元化速度分布



Configuration1 (L/D=1.41)

Configuration2 (L/D = 1.76)

$$C_Q = 0.128$$

>

$$C_Q = 0.124$$

Lower efficiency

Higher efficiency

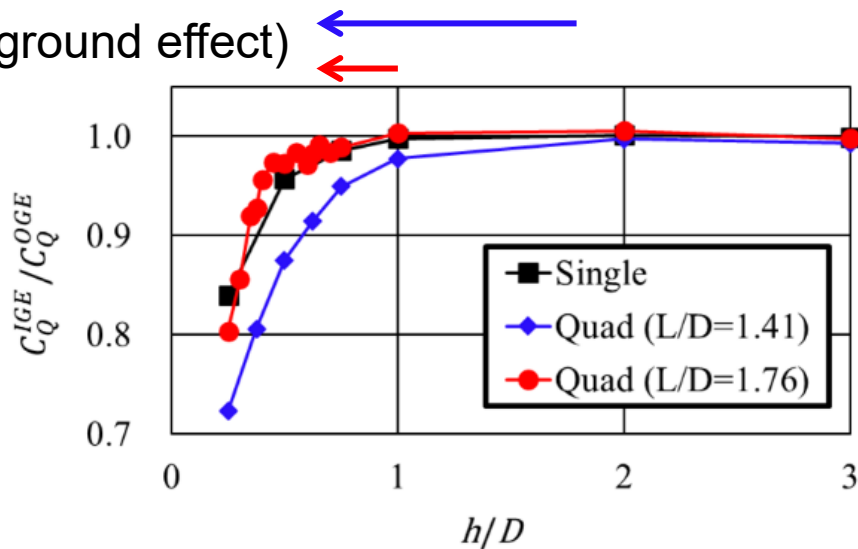


# 結果と考察: $C_Q$ vs 高度

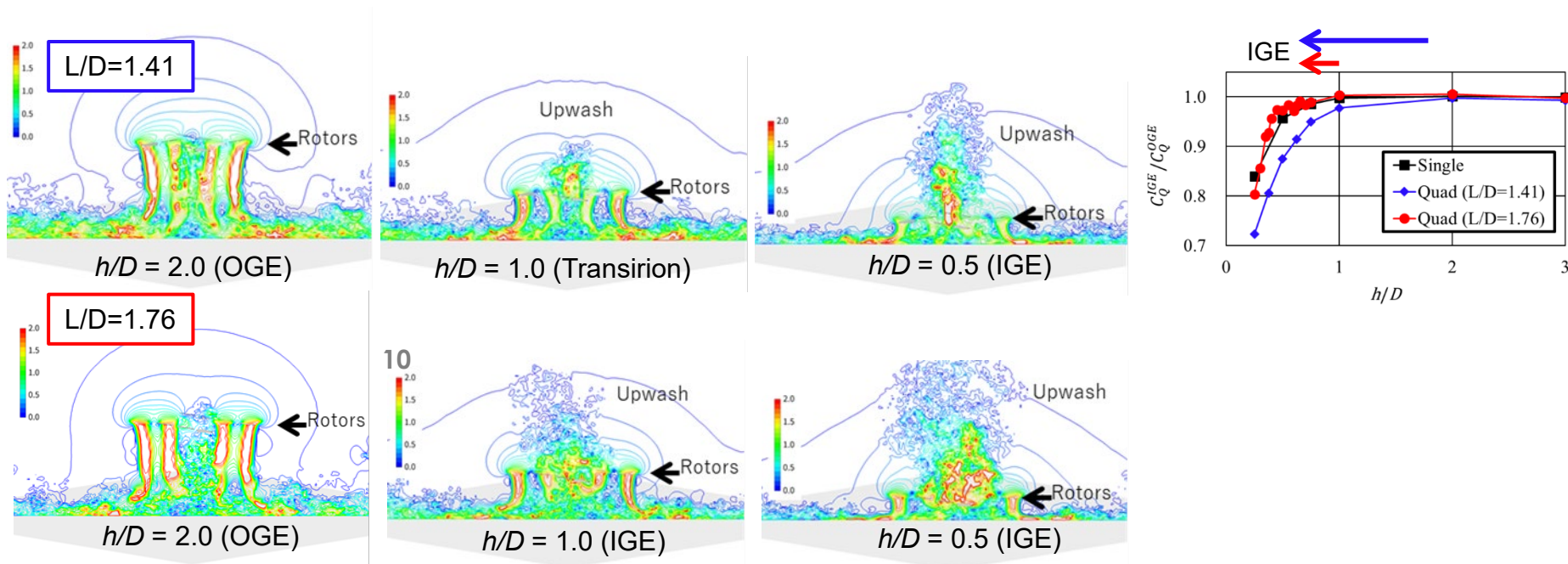
IGE (In ground effect) ←

地面効果により $C_Q$ は低下する  
 ロータ間距離が小さい方が $C_Q$ の低下量  
 が大きい

ロータ間距離を話すと、 $h/D$ で単一  
 ロータの場合よりも $C_Q$ は増加する。



# 結果と考察: 低高度飛行時の速度分布



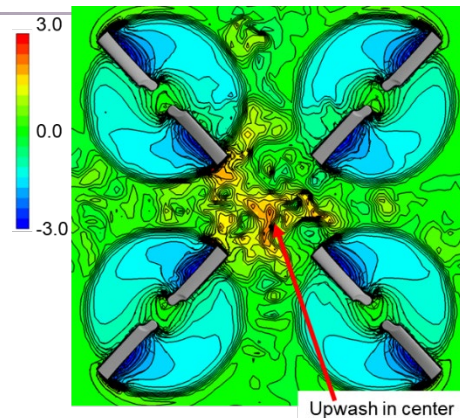
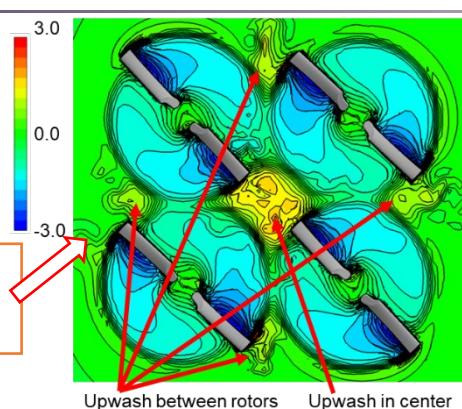
対角上のロータ中心を通る断面上での無次元化速度分布

OGE: ロータ後流は地面に当たると外側に流出する。  
IGE: 4つのロータの中心で上昇気流が発生する。

# 結果と考察: 地面効果発生時の流れ

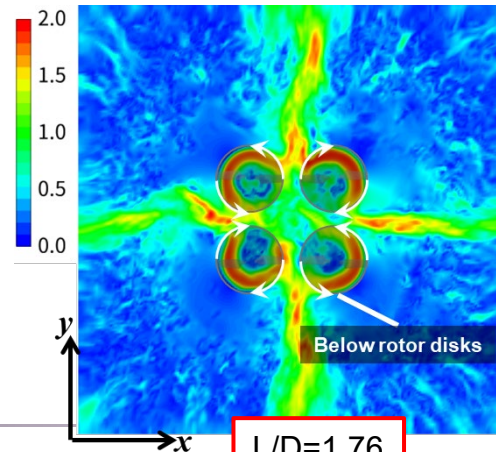
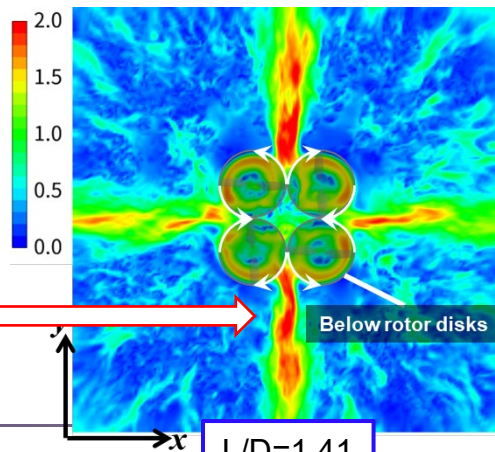
ロータ回転面における  
無次元化軸方向速度分布  
 $h/D = 1.0$

Upwash regions take place  
between neighboring rotors



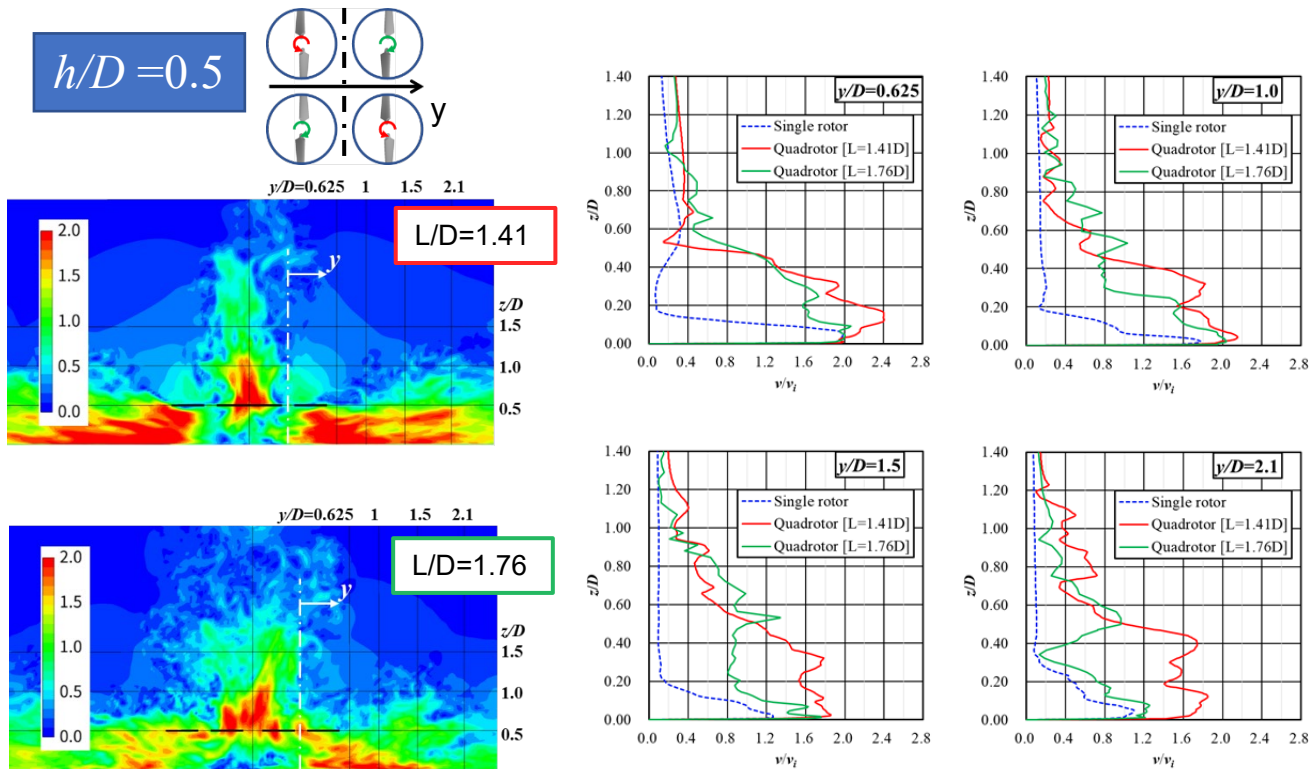
ロータ回転面高度:  $h/D = 0.5$   
地面とロータ回転面の間断面 ( $z/D = 0.25$ )  
における速度分布

Side jets take place



# 隣接ロータ間を通る断面内の速度分布

外向き流れはローター間距離が小さいほど速度が大きく、影響範囲が広い

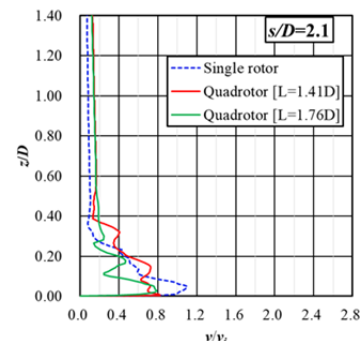
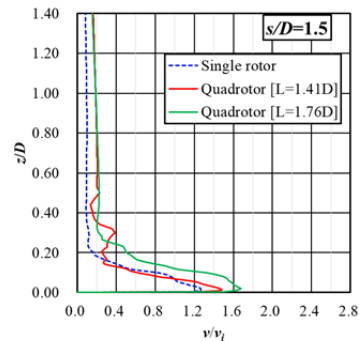
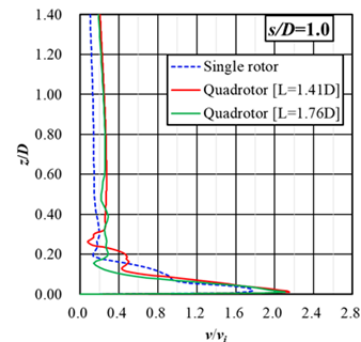
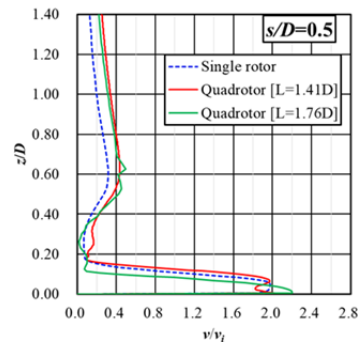
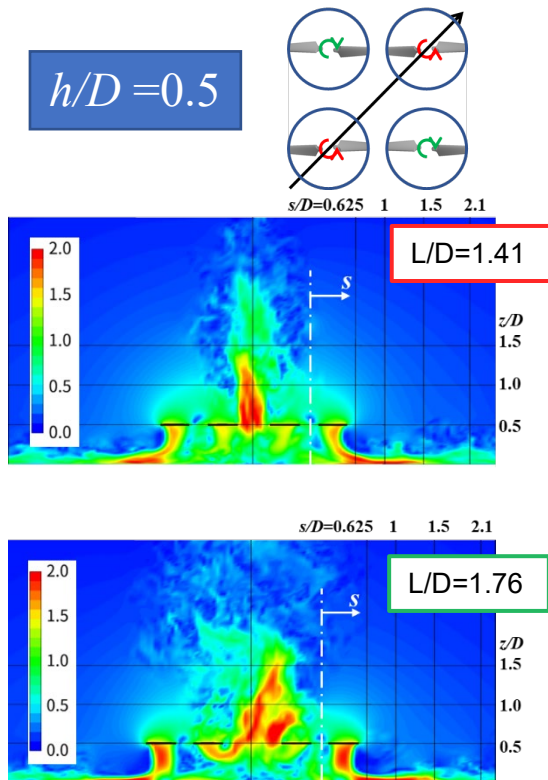


Time-mean velocity magnitude distribution

# 対角するロータの中心を通る断面内の速度分布

マルチロータの速度分布は  
シングルロータと同様

ロータ間の距離は速度分布  
に影響しない。



Time-mean velocity magnitude distribution

# まとめ

推力を一定に保ったホバリング状態において、マルチロータ(4ロータ)ドローンのロータ間距離が地面効果に及ぼす影響を調べた。

- ロータ間距離が小さいほど、低高度でのトルク減少は顕著になる。一方で、ロータ間距離が大きいと高高度飛行よりもトルクが大きくなる高度範囲が存在する。
- マルチロータの地面効果による流れの特色は3つに分けられる。
  - 1) 地面効果が表れると、中央付近で上昇気流が生じる
  - 2) 隣接ロータの間から、機体中心より外向きの噴流が生じる
  - 3) マルチロータ機の対角線上の速度分布はシングルロータ機の周囲の速度分布と同様上記1)はロータ間隔が大きい方が顕著であり、
  - 2)はロータ間隔が小さいほど顕著であり、
  - 3)はロータ間隔の影響は小さい。