



# 流体工学分野における 環境＆エネルギー関連取り組み紹介

---

電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部  
米澤 宏一

日本機械学会2022年度年次大会 特別企画ワークショップ  
2022年9月12日

IR 電力中央研究所

# 目次

## 発電技術

- ◆ 火力発電(ガスタービン)
  - 1) 再生可能エネルギー増大に伴う問題の解決
  - 2) 非化石燃料利用のためのタービン内部の伝熱流動研究
- ◆ 水力発電～安定な再生可能エネルギーの最大限の活用のための保守

## 電力設備保守技術

- ◆ eVTOL/ドローン関連の研究
  - 1) 困難な状況における自律飛行と発電インフラ点検の実現
  - 2) 活用拡大のための環境適合のための技術開発

# 火力発電(ガスタービン)

# ガスタービン火力を取り巻く環境変化と研究トピックス①

## ガスタービンコンバインドサイクル(GTCC)の特徴

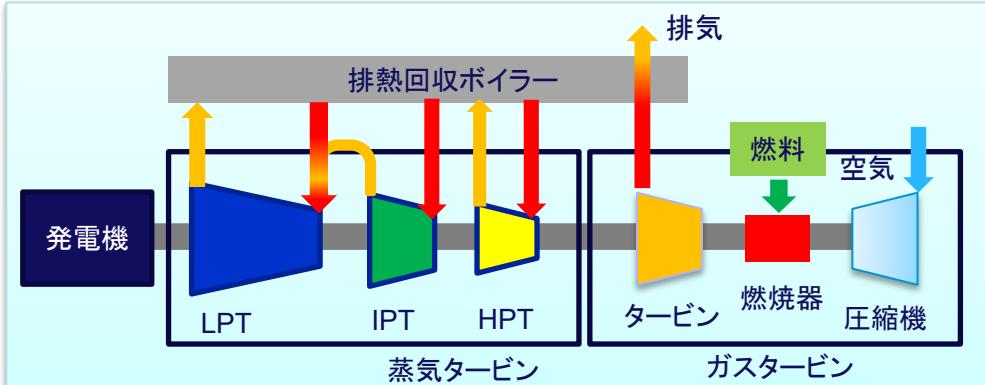
LNGを燃料とするとCO<sub>2</sub>排出が少ない  
火力発電では最も高効率(60%超)  
起動・停止に要する時間が短い

~2000年代  
原子力発電とならび、ベースロード電源

2010年代～  
基盤電源～全電源の70%以上  
再生可能エネルギー(PV、風力など)の増加

ガスタービン火力の役割の変化～需給バランスの調整

→ DSS(Daily Start / Stop)運用や部分負荷運転の常態化



# ガスタービン火力を取り巻く環境変化と研究トピックス②

2015年パリ協定 「2050年・カーボンニュートラル」



政策対応(経済産業省/資源エネルギー庁)

- ①再生可能エネルギーの主電源化
- ②原子力発電所の再稼働
- ③**火力発電:非化石燃料への置換・CCUS・カーボンリサイクル**
- ④水素・アンモニアのサプライチェーンの整備

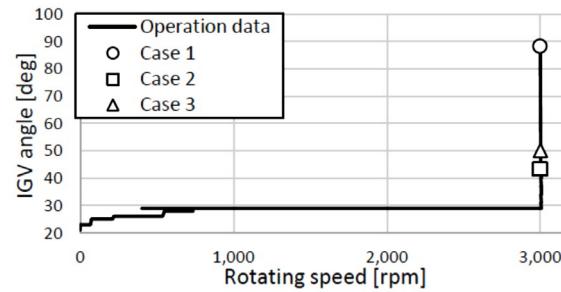
研究トピックス:

1. DSS・部分負荷運転時のGTコンプレッサにおける旋回失速と変動荷重
2. 既存ガスタービンのアンモニア燃料使用時の性能、内部伝熱の変化に関する研究

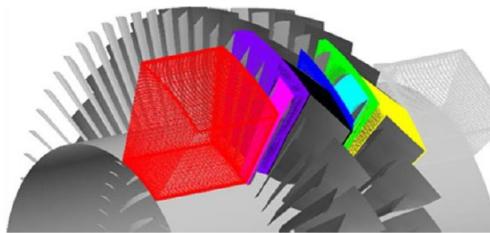
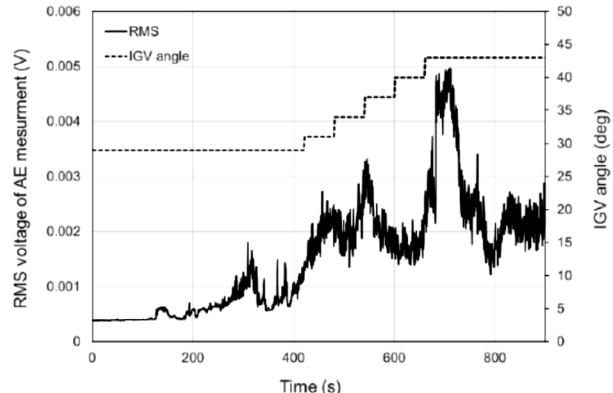
# DSS・部分負荷運転時のGTコンプレッサにおける旋回失速と変動荷重

出典: Hagita, Y., et al., 2022, "The Effect of Partial-Load Operation on a Gas Turbine Compressor of an Advanced Combined Cycle Power Plant, ASME Turbo expo, GT2022-80251 (東北大、東京電力、電中研)

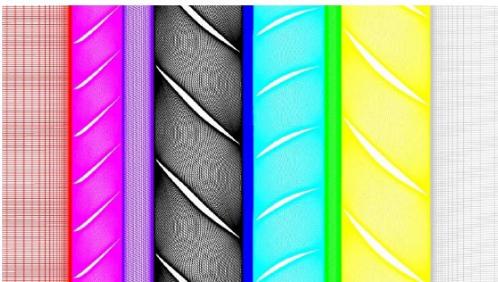
起動時の回転数と  
入口案内羽根開度



入口案内羽根開度  
とAE信号のRMS値



(a) A schematic diagram of IGV + the 1.5-stage rotor and stator blade rows and the computational block at each individual passage.

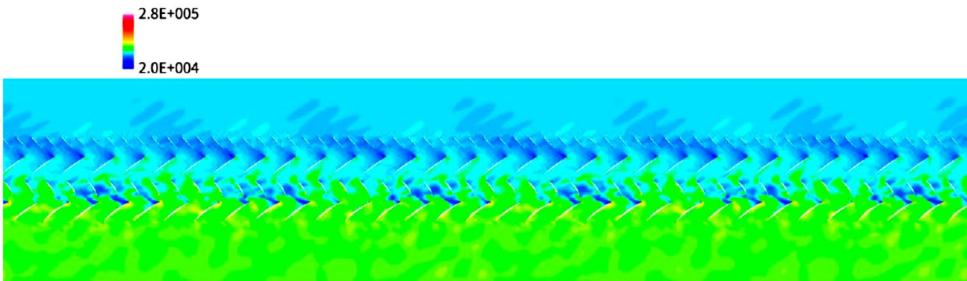


(b) The computational grids of the passages from the inlet to the outlet at a constant span.

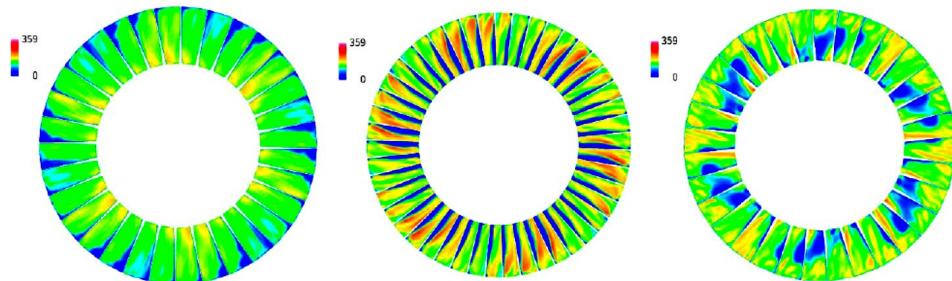
## 解析モデル

— (入口案内羽根: IGV～2段動翼)

## DSS・部分負荷運転時のGTコンプレッサにおける旋回失速と変動荷重

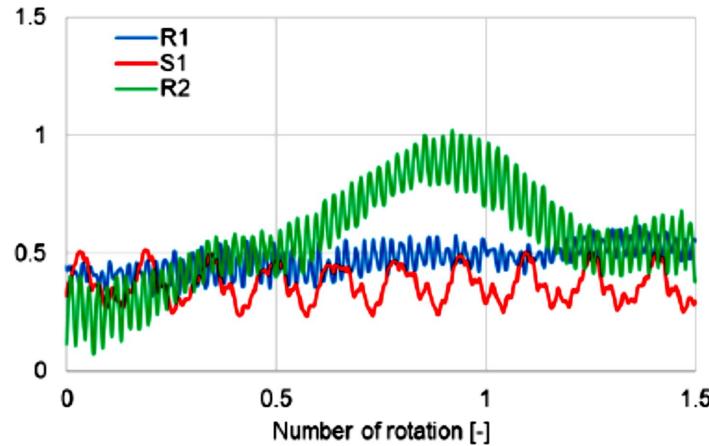


(a) The instantaneous pressure [Pa] at a 50% span.



(b) The instantaneous axial velocity [m/s] at S3-plane at half axial chord (left: R1, middle: S1, right: R2).

速度分布～旋回失速による非定常・非対称な流動様式



翼に作用する圧力荷重

# 既存ガスタービンのアンモニア燃料使用時の性能、内部伝熱の変化に関する研究

米澤・他, 2022, “燃焼ガス組成の変化を考慮したガスタービン内部の伝熱・流動評価に関する基礎検討,” 動力エネルギーシンポジウム  
(大阪大、東京電力、電中研)

## 作動流体の組成の比較

燃料	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
NH <sub>3</sub>	76.4	13.1	0.05	10.0
LNG	74.3	13.0	6.8	5.9

解析結果の一例(NH<sub>3</sub>使用時は燃料流量と出力が上昇)

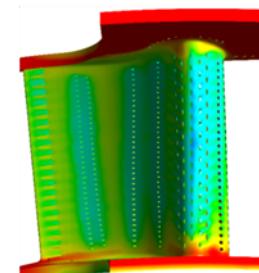
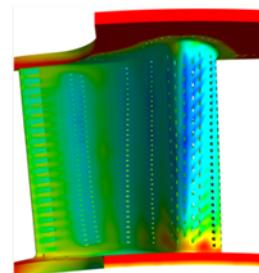
	LNG	NH <sub>3</sub>
タービン入口全圧 (MPa)	1.45	1.55
タービン入口全温 (K)	1490	1465
燃料流量(kg/s)	12.6	30.7
タービン軸出力(MW)	419	461
タービン断熱効率(%)	87.5	87.6
ガスタービン熱効率(%)	32.2	32.5

出力は増加するが燃料流量も増加→コスト削減のためにはさらなる高効率化が必要



LNG燃料で運用されたGTの1段静翼の劣化  
(高温酸化による減肉、亀裂などが発生)

Temperature, K  
720 1270



解析による翼温度の比較(左:LNG、右:NH<sub>3</sub>)

# 水力発電

# 安定な再生可能エネルギーの最大限の活用

## 再生可能エネルギーの主電源化への動き

水力発電の役割：

- ①安定な再生可能エネルギー
- ②需給バランスの調整弁(揚水発電所、一般水力の部分負荷運転)

水車の経年劣化

- ・キャビテーション壊食
- ・土砂摩耗



発電を停止して点検・保守作業が必要～溢水

水力エネルギーを最大限活用するためには、高効率な機器開発に加えて経年劣化を抑える手法、運用の改善の検討が重要

# 水車の土砂摩耗

Yonezawa, K., and Watamura, T., 2021, Experimental and Numerical Investigations of Erosion on Runner Seal of a Francis Turbine, Proc. AICFM2021. (大阪大、電中研)

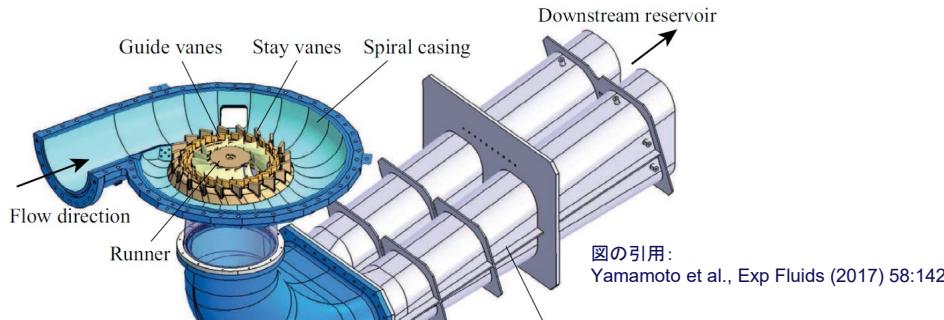
降雨に伴う濁水の流入  
→水中浮遊土砂が水車各部の摩耗の原因

発生メカニズム、侵食特性の解明

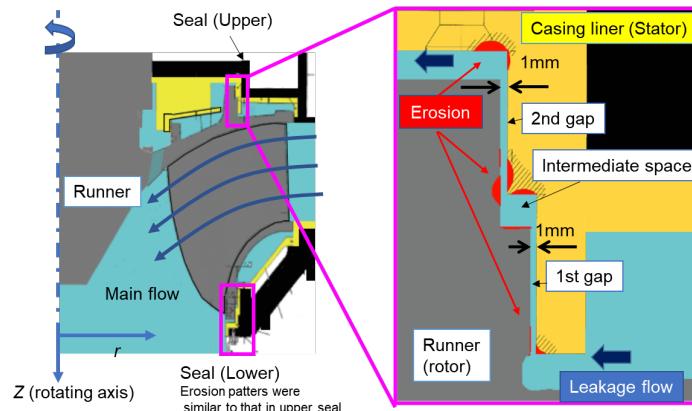
対策の検討

- ・流路形状変更による侵食抑制
- ・発生条件の解明による運用の最適化

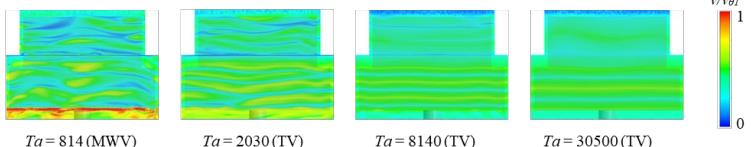
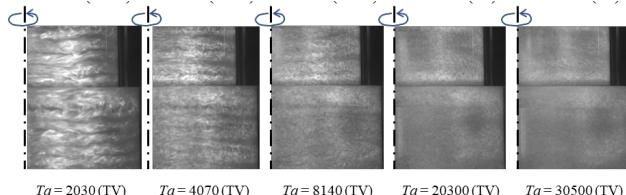
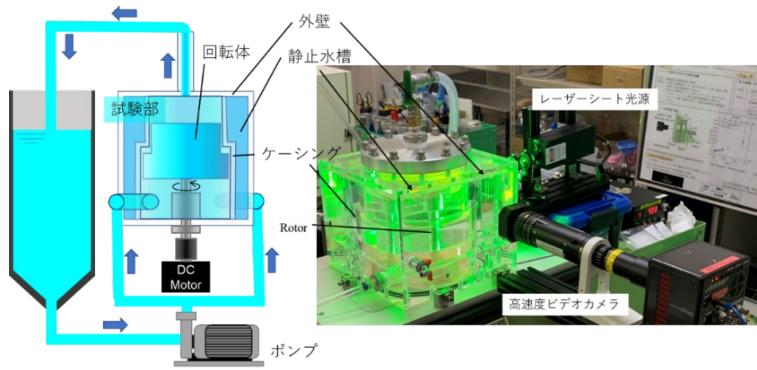
例) 水車背面のシールの土砂摩耗に関する研究  
土砂摩耗による弊害  
・漏れ流量増加による損失増加  
・振動との関連(ローターダイナミクス流体力)  
→摩耗量の管理値を定め定期的に補修が必要



図の引用:  
Yamamoto et al., Exp Fluids (2017) 58:142



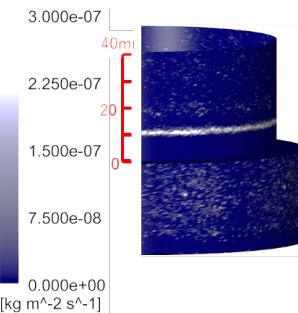
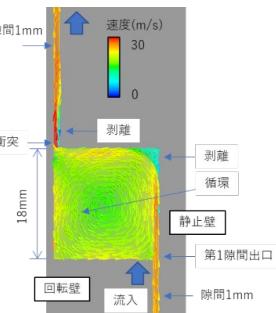
# 水車の土砂摩耗



シール隙間流れの可視化と数値解析



土砂摩耗加速試験



固液二相流れ解析による摩耗の再現

# eVTOL/ドローン関連の研究

※eVTOL: 電動垂直離着陸航空機

# 困難な状況における自律飛行と発電インフラ点検の実現

## 水力発電所導水路トンネル点検

大規模地震発生後の抜水点検  
→余震などによる作業員の二次災害リスク



マルチロータUAVによる無人化・自動化



米澤・他2名、2022、“トンネル点検用マルチロータUAVの開発,”  
第60回飛行機シンポジウム(電中研)

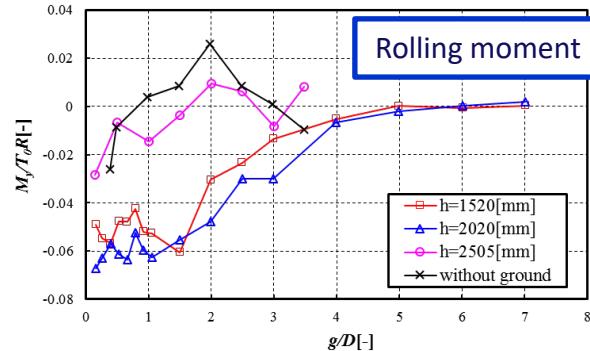
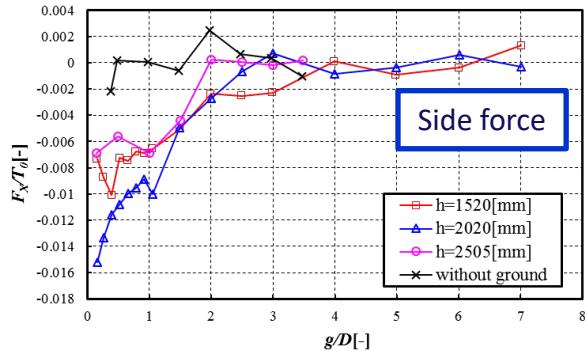
## 技術課題と解決策

- (1) 非GPS環境での自律飛行
  - ・Visual-SLAMによる速度計測
  - ・LiDAR、レーザ距離センサ
- (2) 狹小空間における安定飛行
  - ・壁や天井に起因する空力擾乱
  - ・自律飛行制御に応えられる機体の高い操作性
- (3) 様々な外乱に対するロバストなシステム
  - ・センサー、ナビゲーションシステムの冗長性
  - ・防塵・防水



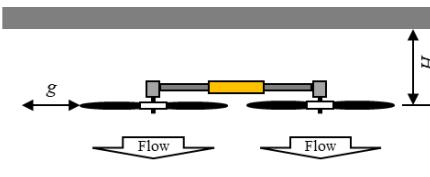
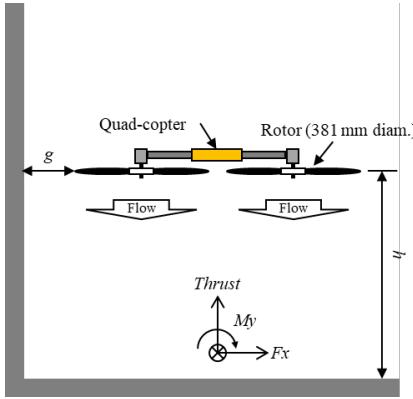
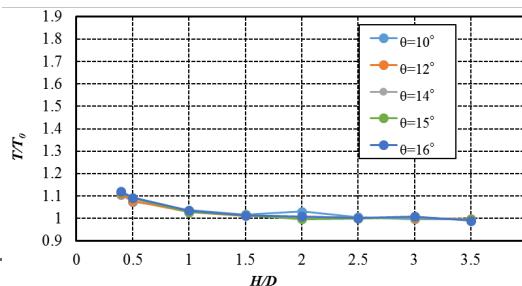
# 壁や天井に起因する空力擾乱

Yonezawa, K., 2018, "An Experimental Investigation of Aerodynamic Characteristics of a Quad-Rotor-Drone Hovering near a Side Wall and a Ceiling," ARF2018.  
(名古屋大、JAXA、金沢大、大阪大、電中研)



側壁に近づくと引き寄せる力と機体上面が側壁に倒れる向きにモーメントが発生  
(低高度の方が大きな力)

天井に近づくと吸い付く→  
( $\theta$ :プロペラピッチ角)

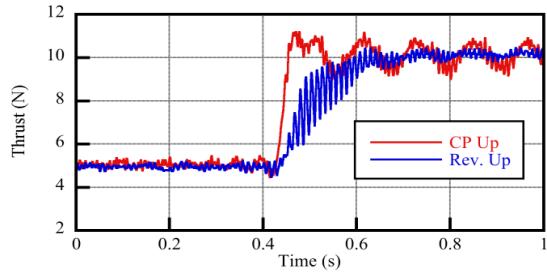


# 可変ピッチロータによる操作性の向上

Yonezawa, K., 2016, "Development of a Multicopter with Ducted and Variable Pitch Rotors," ARF2016. (名古屋大、JAXA、金沢大、大阪大)



可変ピッチプロペラ  
プロペラ回転数を維持  
→瞬時に推力を調整  
(制御周波数が高くなる。)  
→急降下時などのVortex Ring State  
が起こりにくい  
→推力が小さくなる離着陸時にも  
姿勢制御が効く



Collective pitch制御と回転数制御  
の推力変化の時間変化の比較  
(赤:ピッチ制御、青:回転数制御)



# 活用拡大のための環境適合のための技術開発

## 背景

- ・ 小型マルチコプタ → 大型化～物流用eVTOL, 空飛ぶクルマ
- ・ 都市部、住宅地など、人々の生活空間への距離が縮まっている



環境への配慮の重要性が高まってきた

## 流体工学分野での検討事例

### プロペラ騒音

低空飛行、離着陸スペース(ヘリポート)周辺環境～気流、安全性

# プロペラ騒音

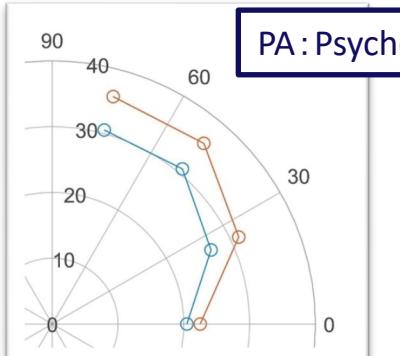
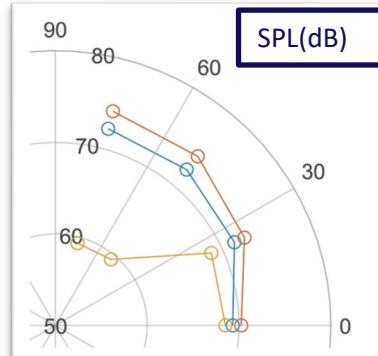
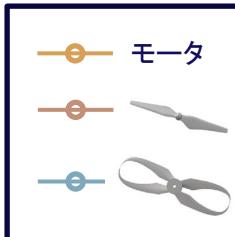
Sun, J., et al., 2021 "Experimental Investigations on Aerodynamic and Psychoacoustic Characteristics of Loop-Type Propeller," APISAT2021 (千葉大、JAXA、電中研)

従来のプロペラ騒音対策: 翼型、平面形の改良により騒音レベル(dB)を下げる。

↓  
本研究: 新しいコンセプトで設計されたプロペラと、心理音響学的評価



Looprop/ループプロペラ  
嶋英志・他2名, 特許第6979205号, 2021, (JAXA)



SPLに加えて、人の感覚的な不快感を  
定量化

↓  
様々な評価軸からeVTOLの環境や社会  
への適合性高め、発展させる

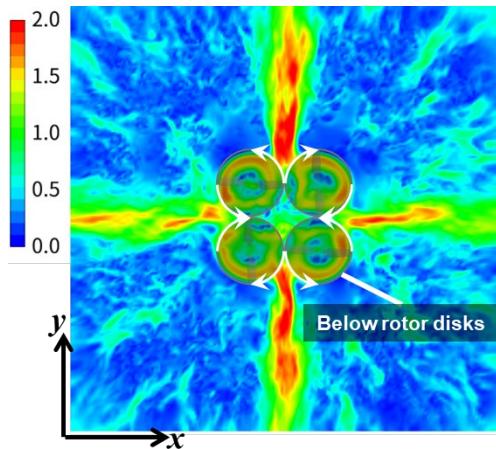
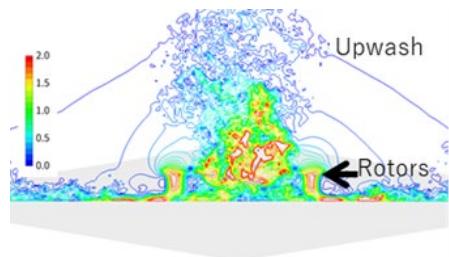
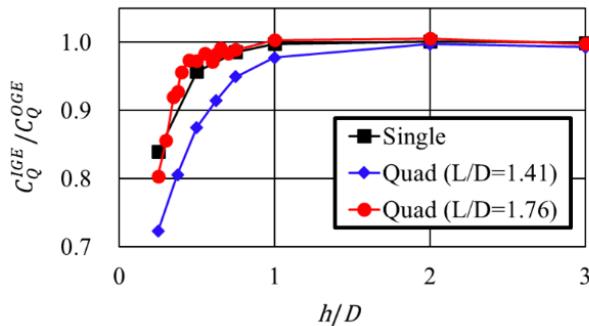
# 低空飛行、離着陸時の周辺気流環境

Yonezawa, K., et al., 2021, "Numerical Investigations of Ground Effect of a Quadcopter," APISAT2021 (名古屋大、千葉大、JAXA、金沢大、電中研)

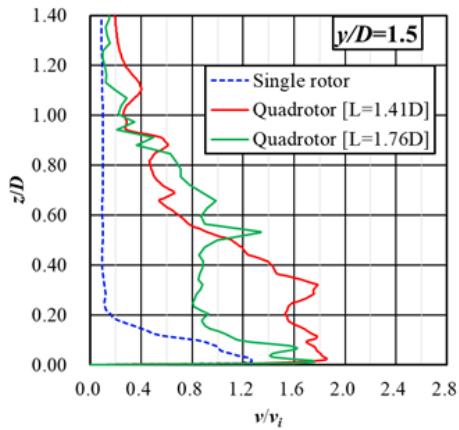
物流、人輸送用の大型マルチコプタ  
→地面効果、周囲の気流環境



従来のヘリコプターとの比較  
安全性、周辺環境への影響を解明



低空飛行時の機体  
周辺の気流速度



# まとめ

# 流体工学分野における環境＆エネルギー関連取り組み

## 発電分野

- 火力、水力に関する研究をご紹介した。
- カーボンニュートラル政策により、大きな変化に直面している。
- 火力は燃料の調達コストを吸収するために、これまで以上に高効率化のための技術開発が必要となる。
- 信頼性維持、稼働率の向上のための保守・運用に関する技術革新も引き続き重要である。
- 流体工学分野においては、流れ・熱の物理を基礎として、新たな技術を取り込み、生活を支える重要な基盤技術として活発な活動が広くなされることが期待される。

## 電力設備保守・環境分野

- eVTOL / ドローンに関する研究をご紹介した。
- VTOLは成長産業の一つで、様々な分野で普及が進むと期待される。
- 小型のUAVでは許容された騒音や振動は、人や物の輸送を行う場合には高いレベルでの抑制が必要となる。
- 従来、主に制御工学の分野でマルチコプタは進化をしてきたが、今後は、流体力学、機械力学、材料力学、など基盤技術を取り込みが進み、「航空機」として進化していくと予想される。