



ローター下の支持アームが推力に与える影響

信州大学 工学部 機械システム工学科 航空機システム共同研究講座 村上研究室

長谷川 岳

指導教員 村上 曜

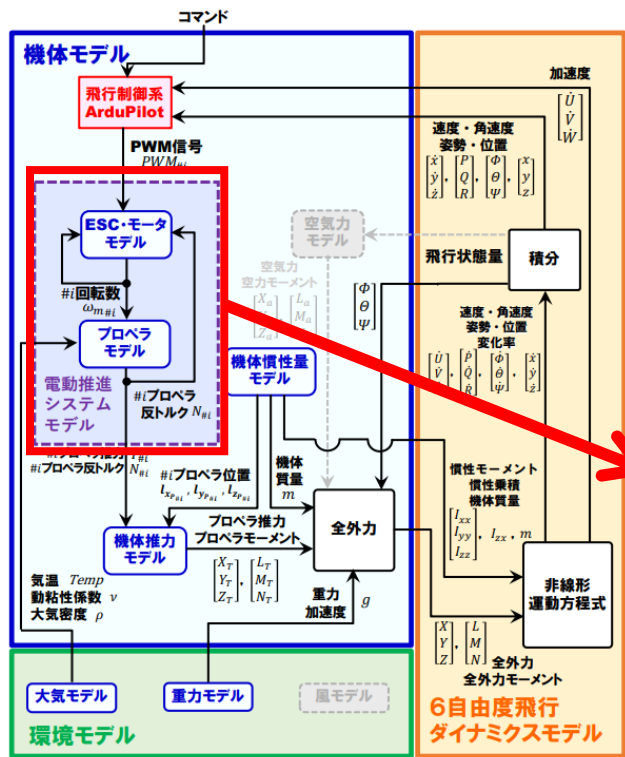


目次

1. 研究目的
2. 解析方法
3. 解析結果
4. 考察
5. 結論



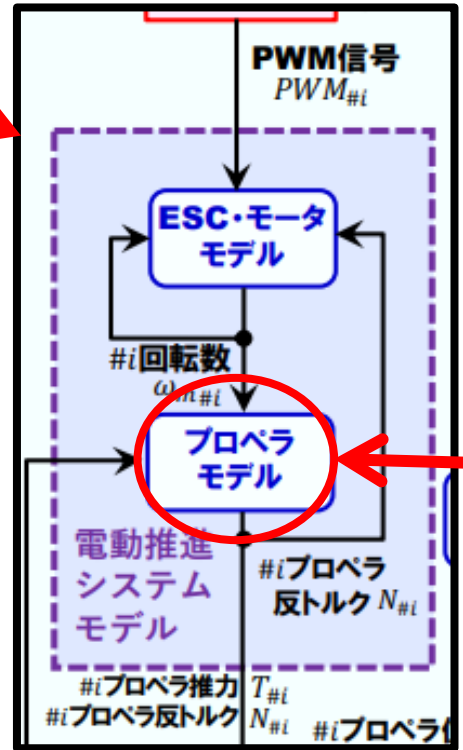
1. 研究目的



数学モデル (柳原研究室)



マルチコプター (福島ロボットテストフィールド)



プロペラ・モータのみのモデル
⇒ 支持アームの影響を考えたい (本研究)

電動推進システムモデル (柳原研究室)

2. 解析方法



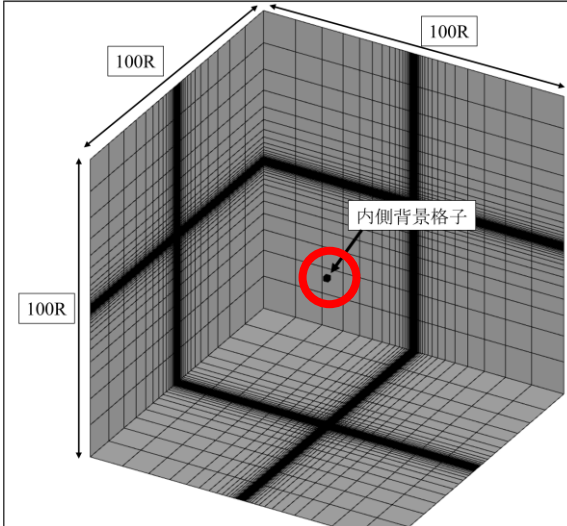
rFlow3D 数値計算手法

支配方程式	圧縮性N-S方程式
空間離散化	有限体積法
時間積分法	背景格子：4次元Runge-Kutta法
	物体格子：Dual time stepping/LU-SGS法
空間高次精度化	FCMT(Fourth Order Compact MUSCL TVD)
数値流速関数	mSLAU
乱流モデル	なし

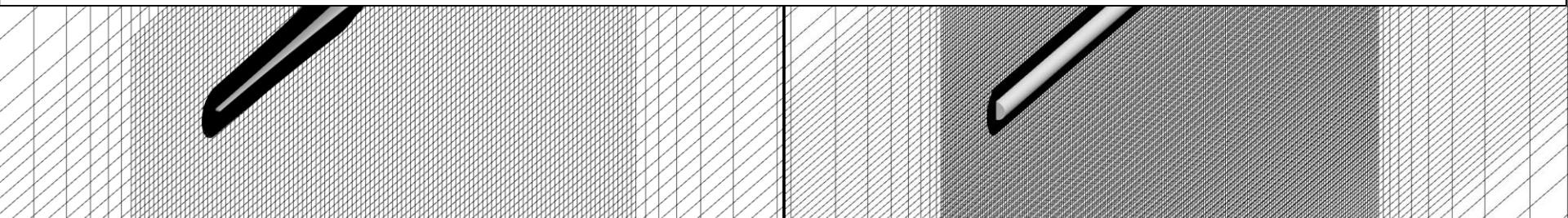
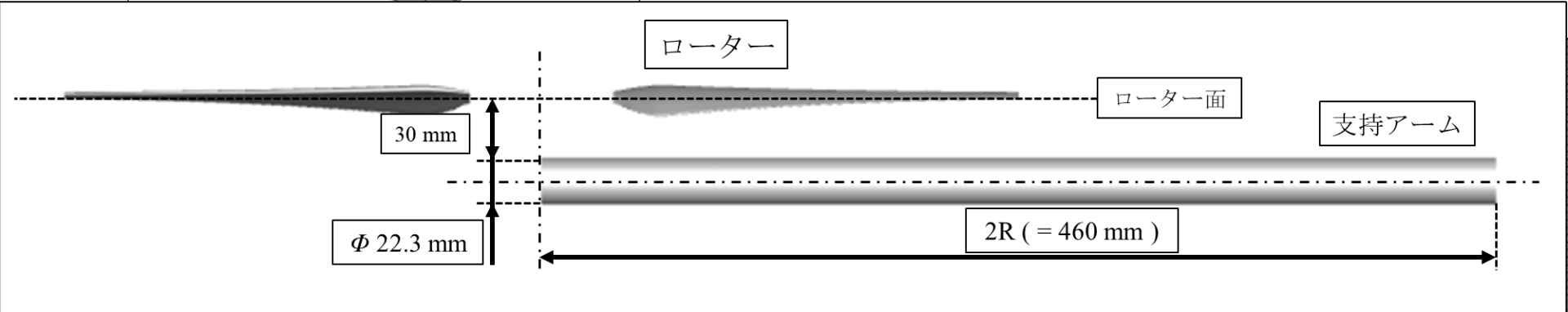
○ 移動重合格子法を使用

以下の4つの格子を作成

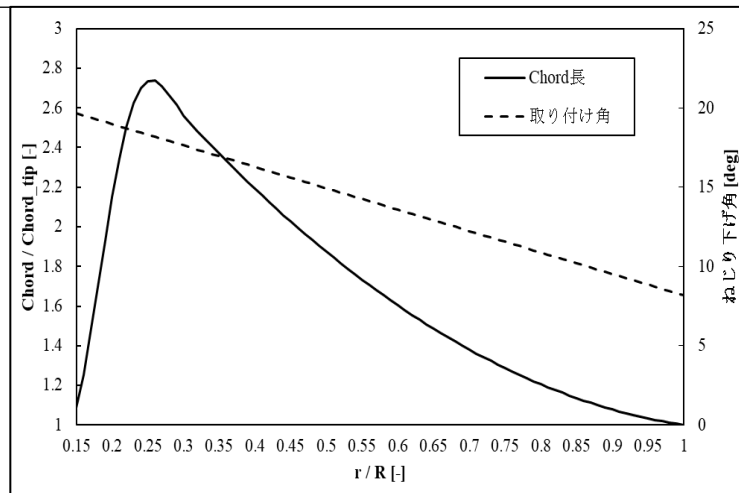
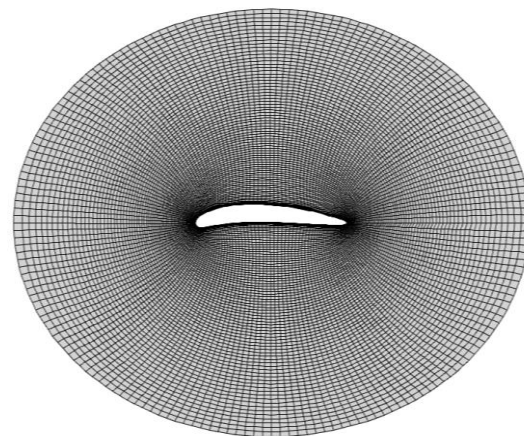
- 背景格子 { 内側背景格子
外側背景格子
- 物体格子 { ブレード格子
円柱格子 (支持アーム)



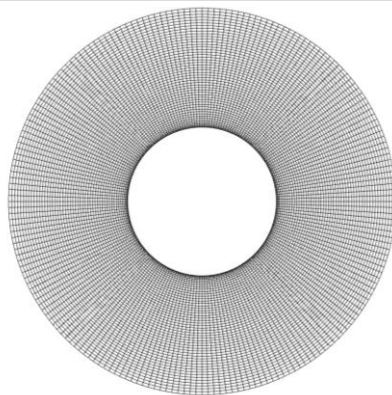
外側背景格子
R : ローター半径



重合格子箇所



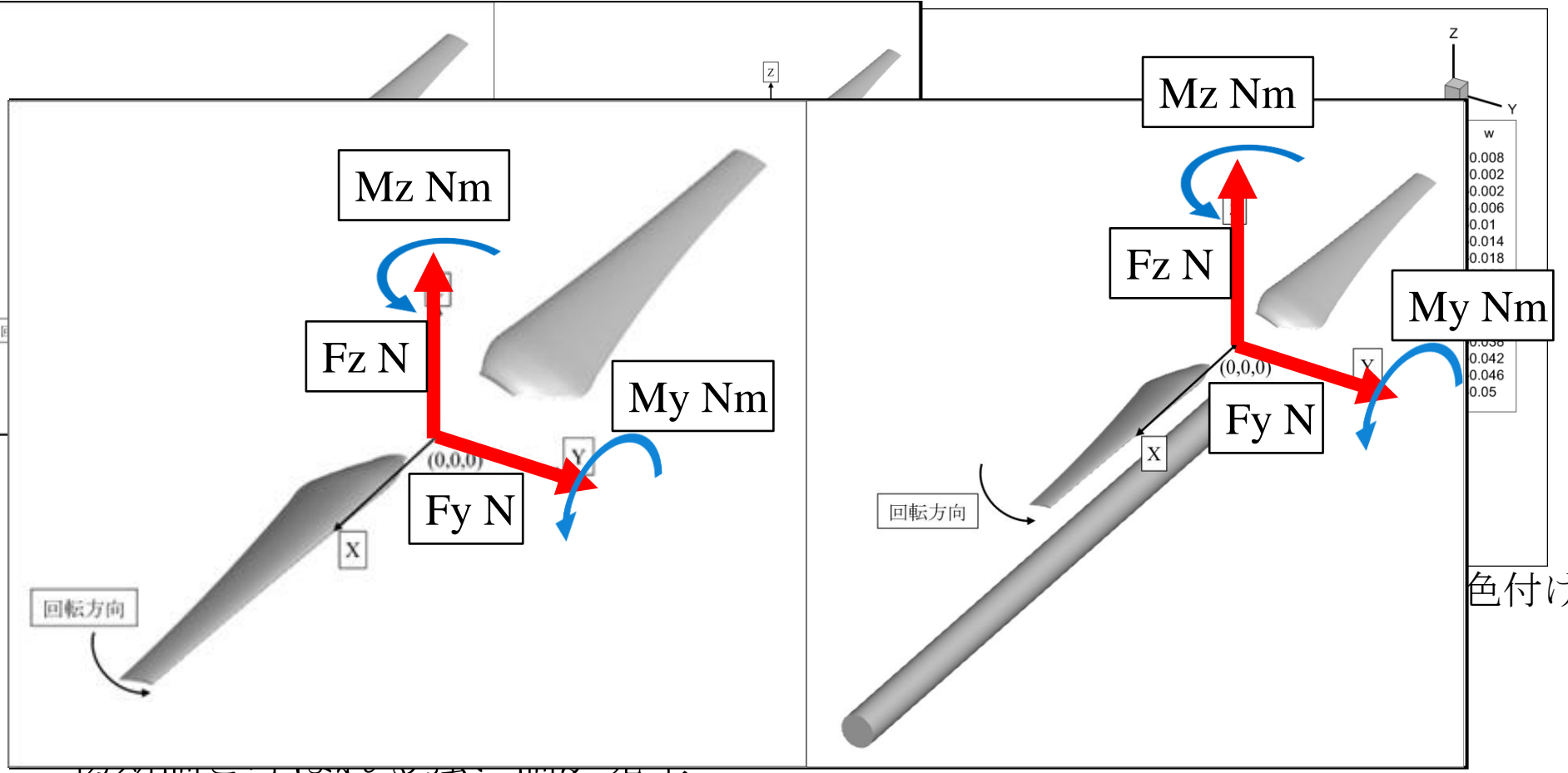
ブレード



支持アーム

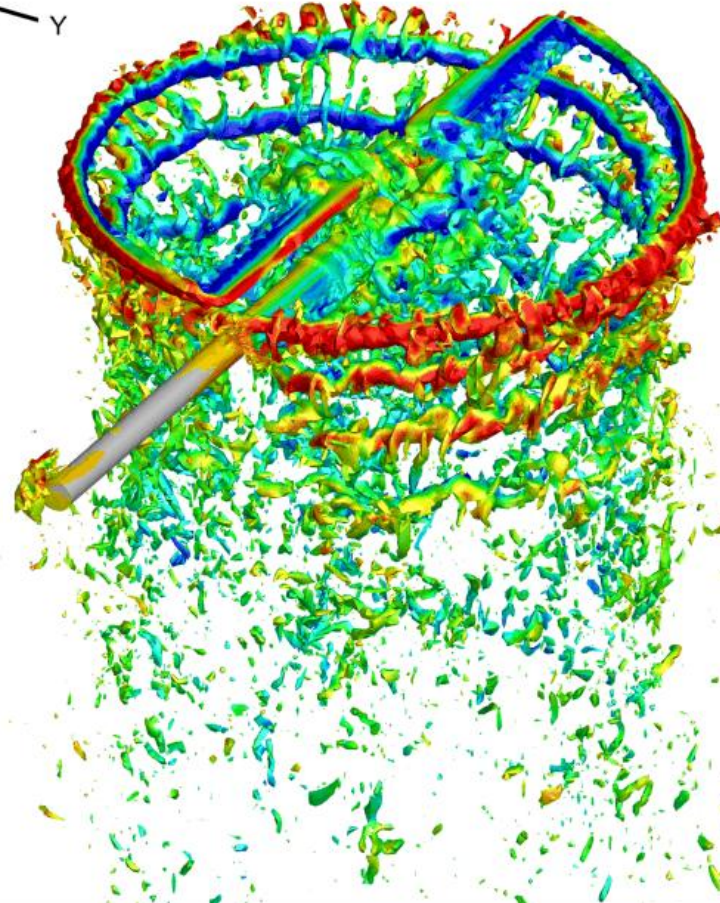
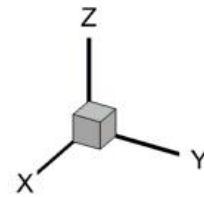
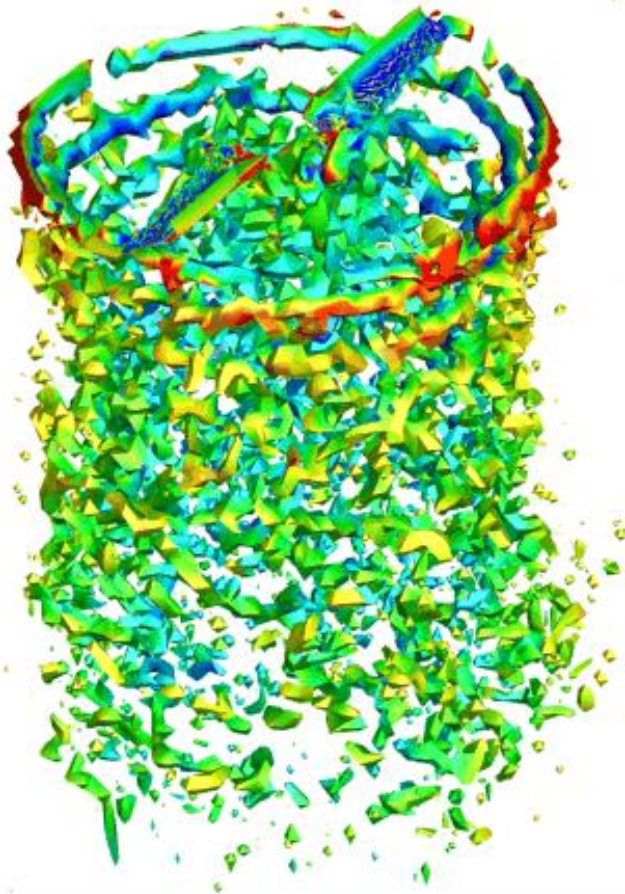
半径： R	0.23 m
ブレード数	2 枚
Root-Cut	15 %
翼端翼弦長	0.01531548 m
RPM	3400
翼端Mach数	0.24065
空気密度： ρ	1.225 kg/m ³
音速： a	340.29 m/s
境界条件	物体格子：2次外挿境界
	背景格子：遠方境界

3. 解析結果

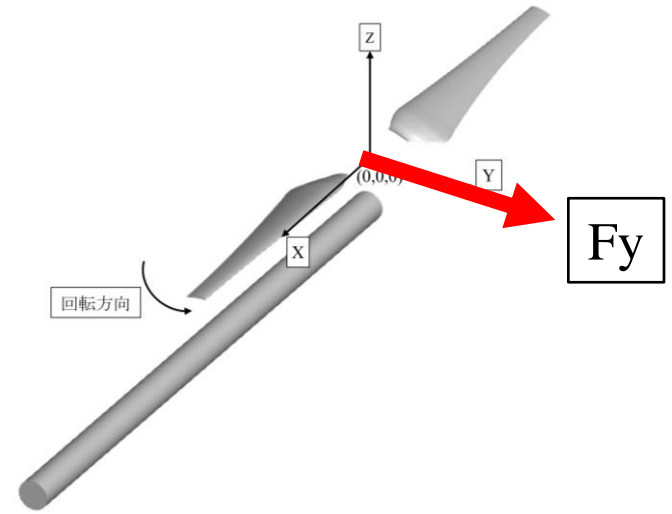
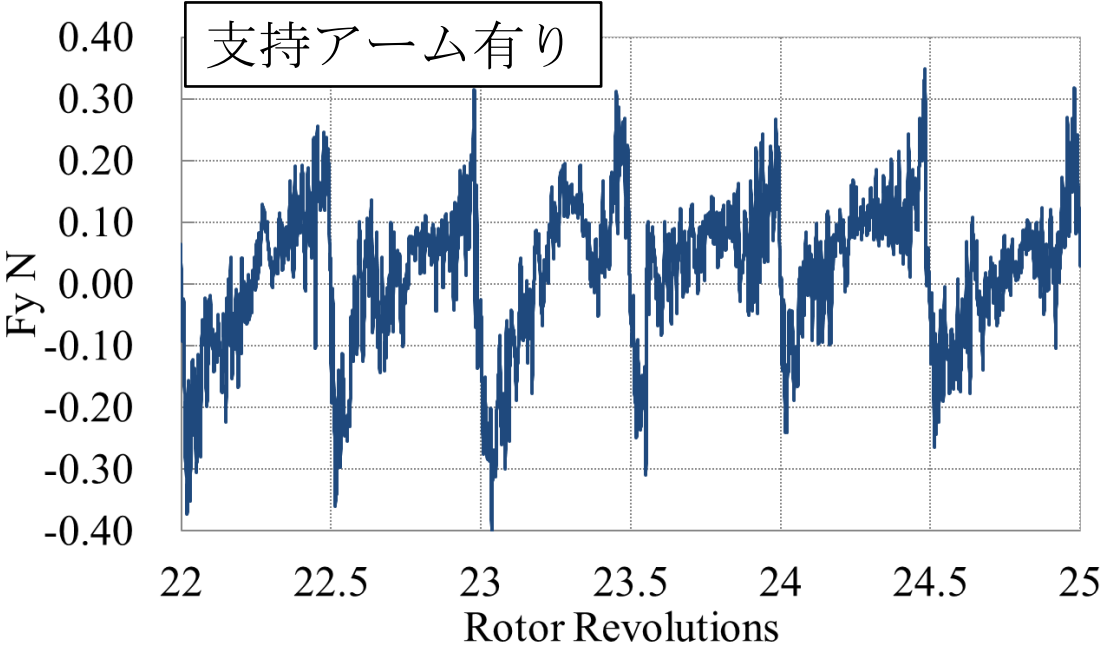
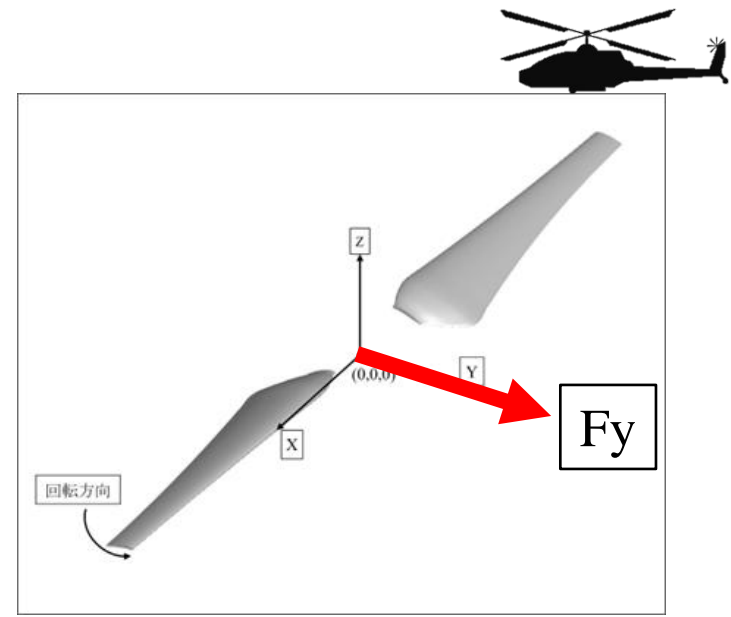
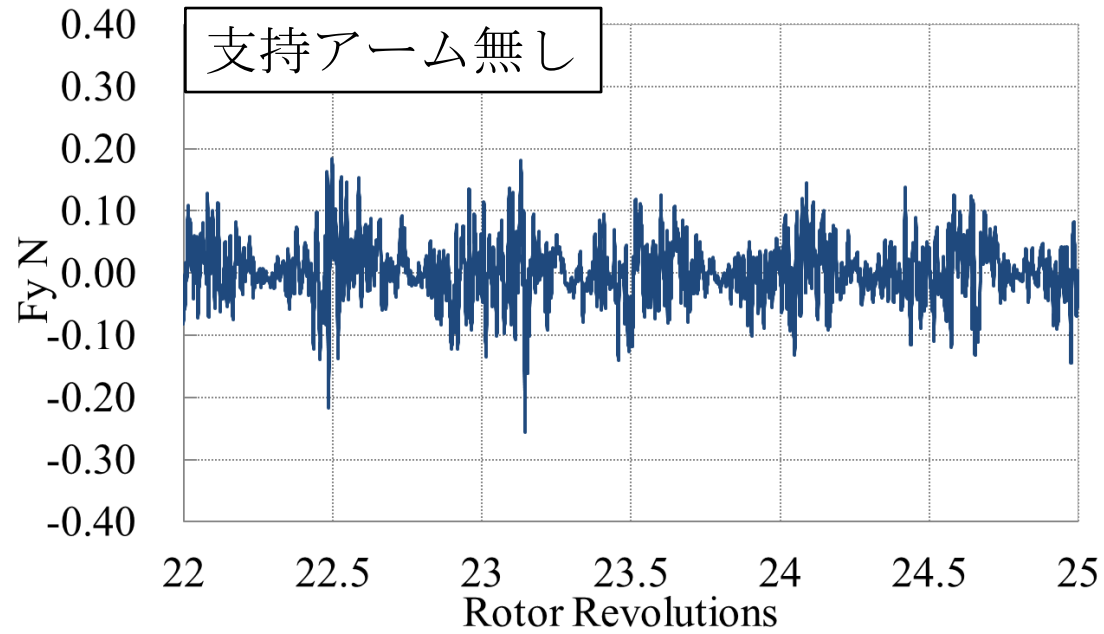


- 初期渦がローター後流 2.5R 以上押し出された後 (20周後) を定常状態と定義
- 特に横力 F_y , 推力 F_z , トルク M_z について注目して考察

全体可視化GIF

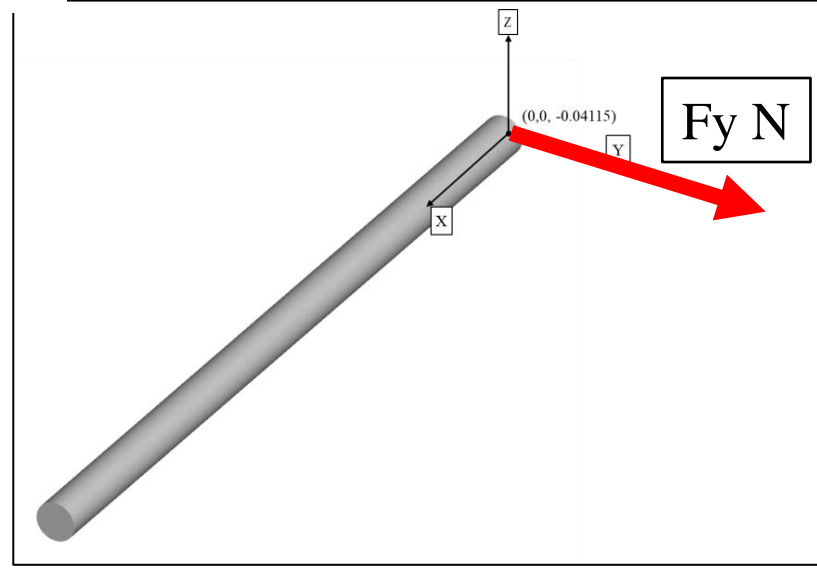


(A) F_y : 横力

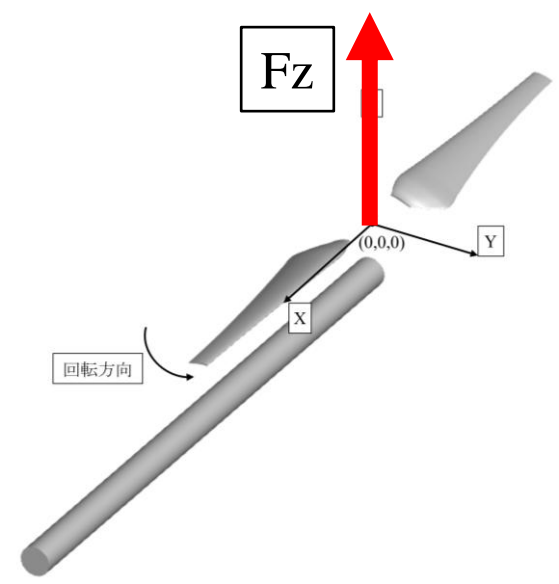
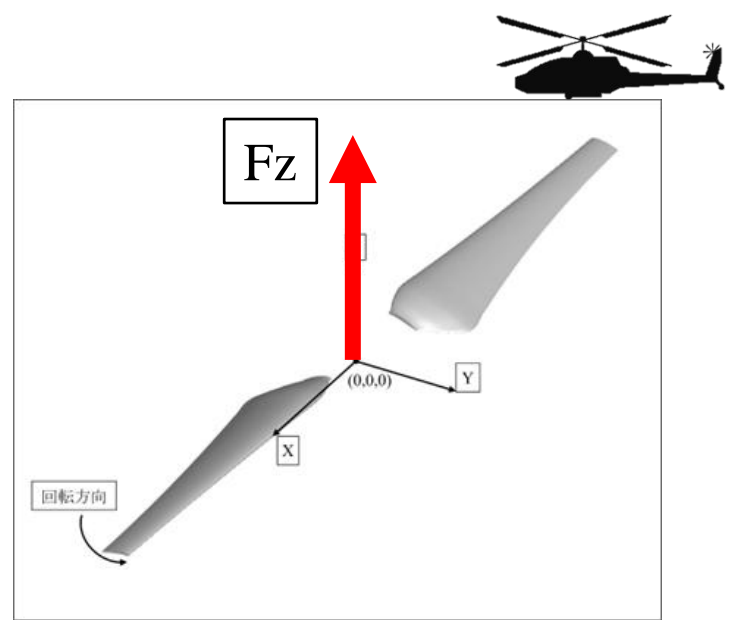
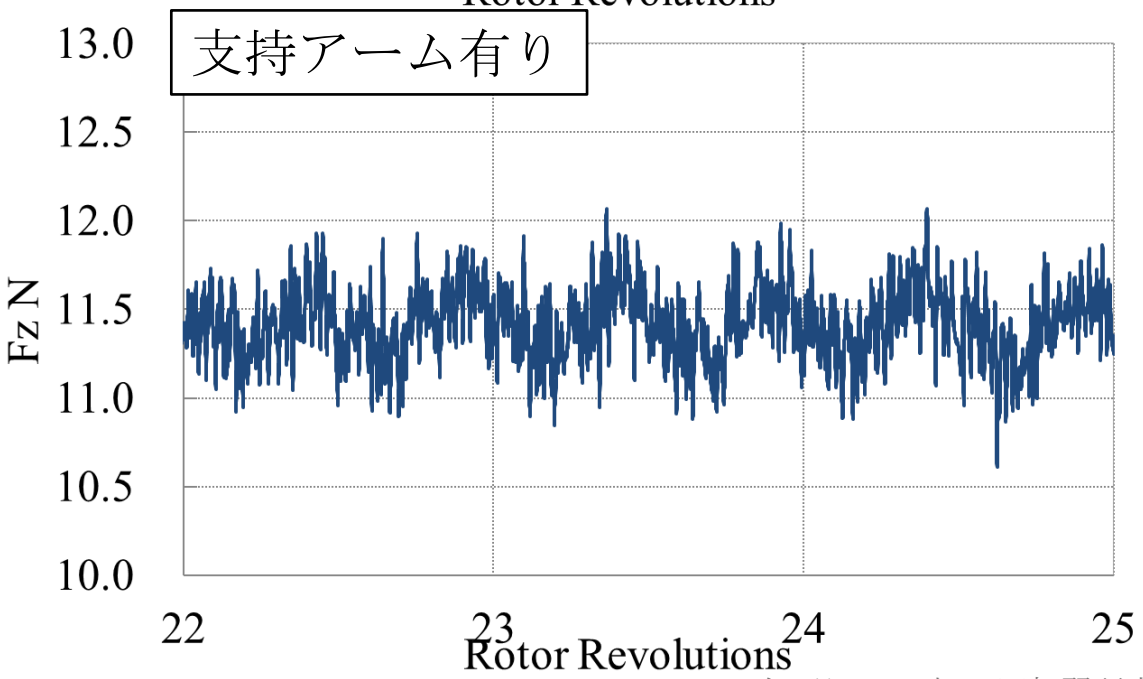
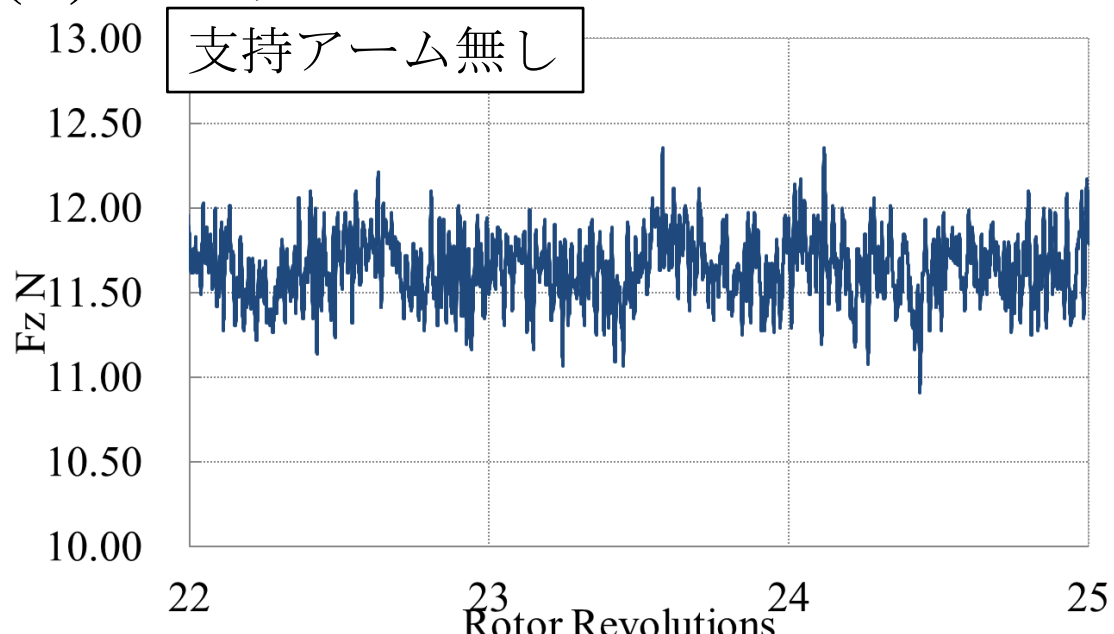




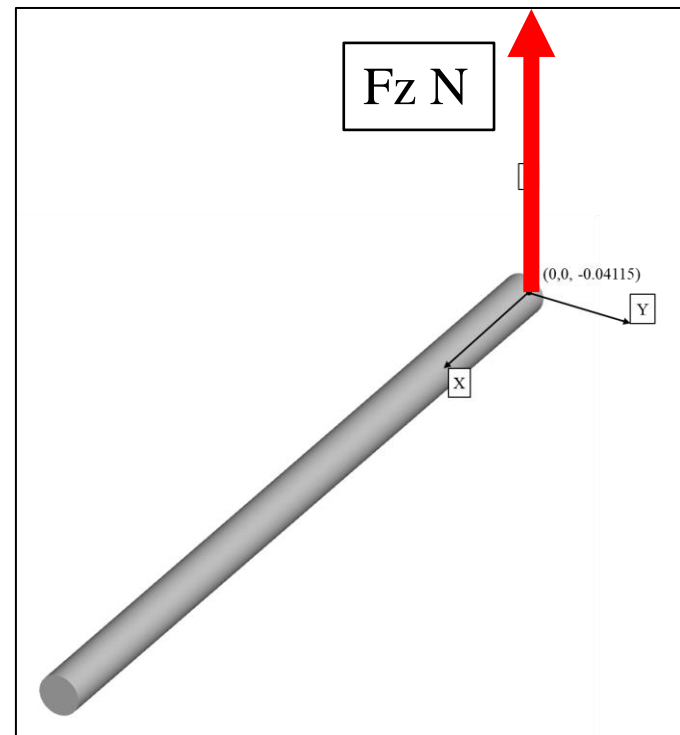
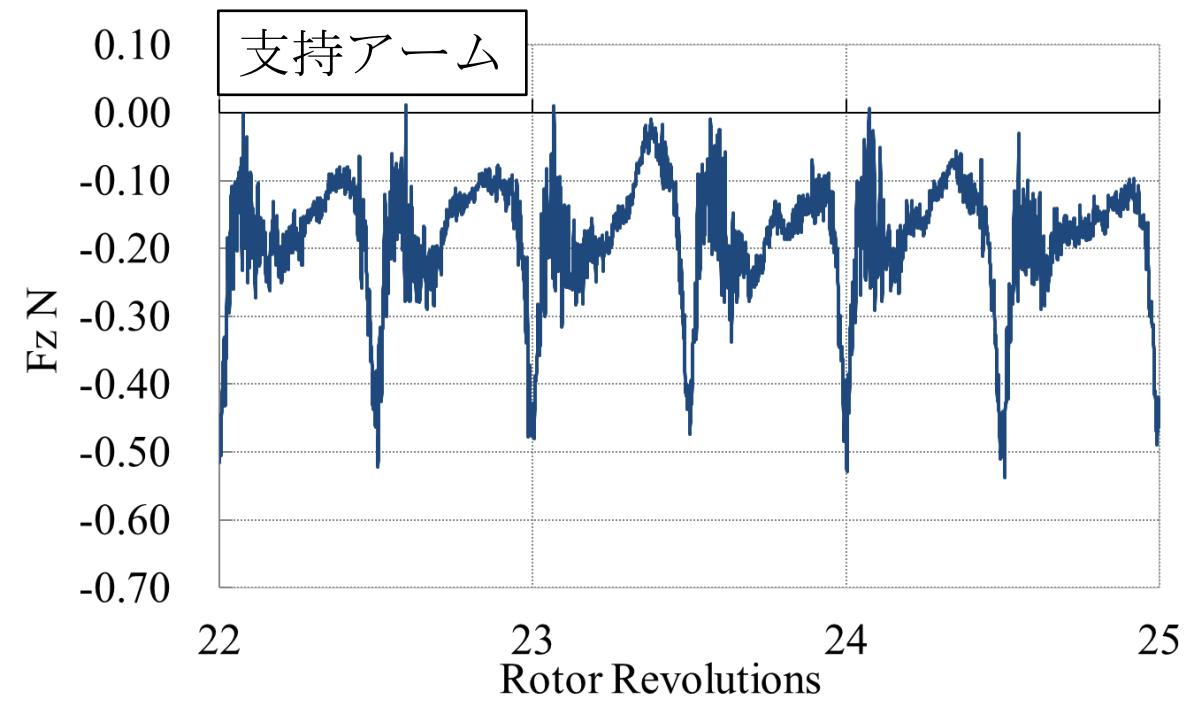
(A) F_y : 横力 (支持アーム)



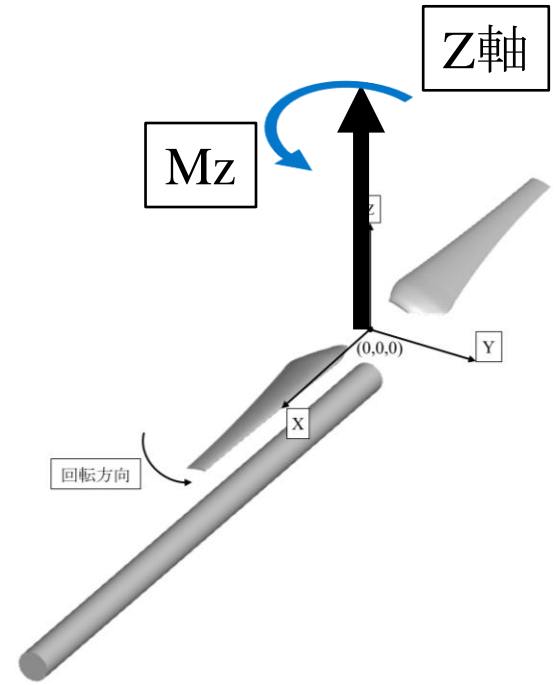
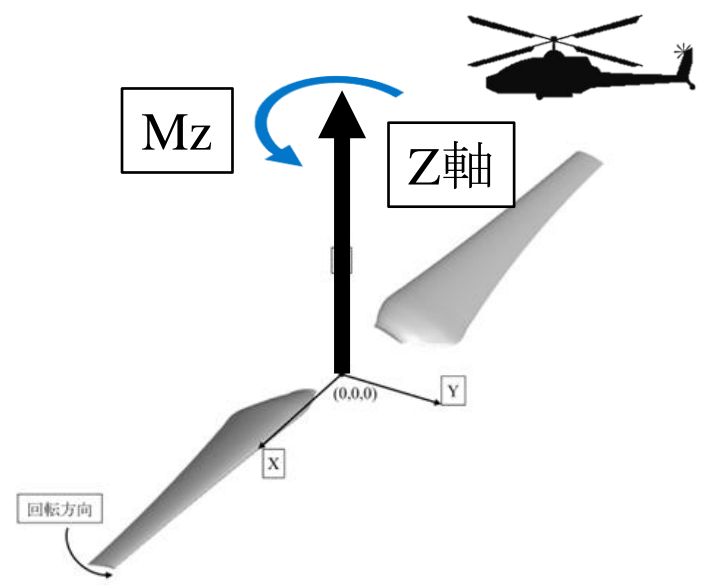
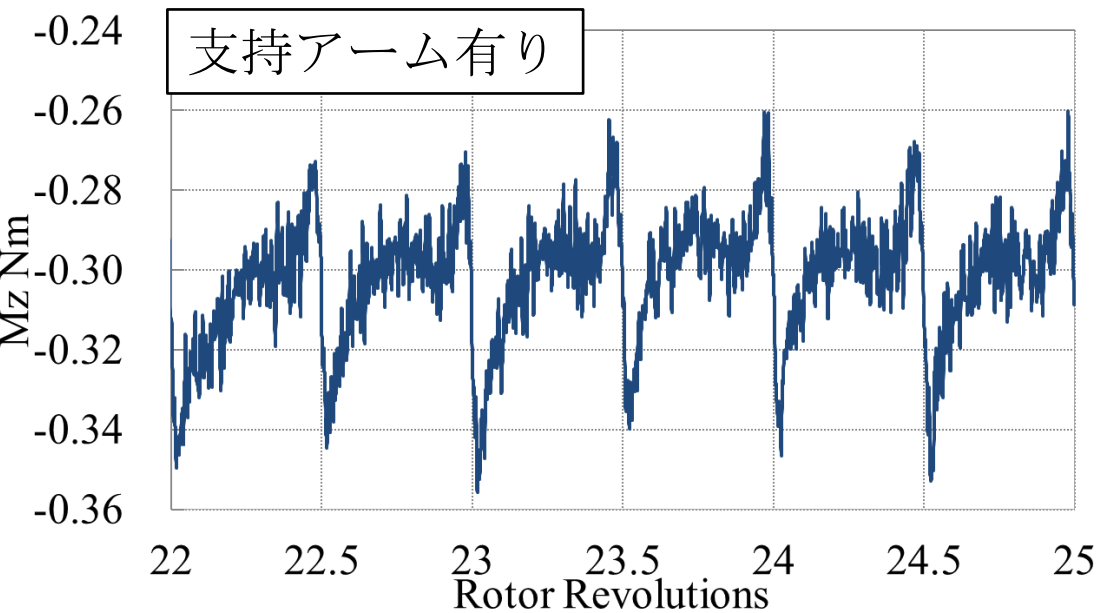
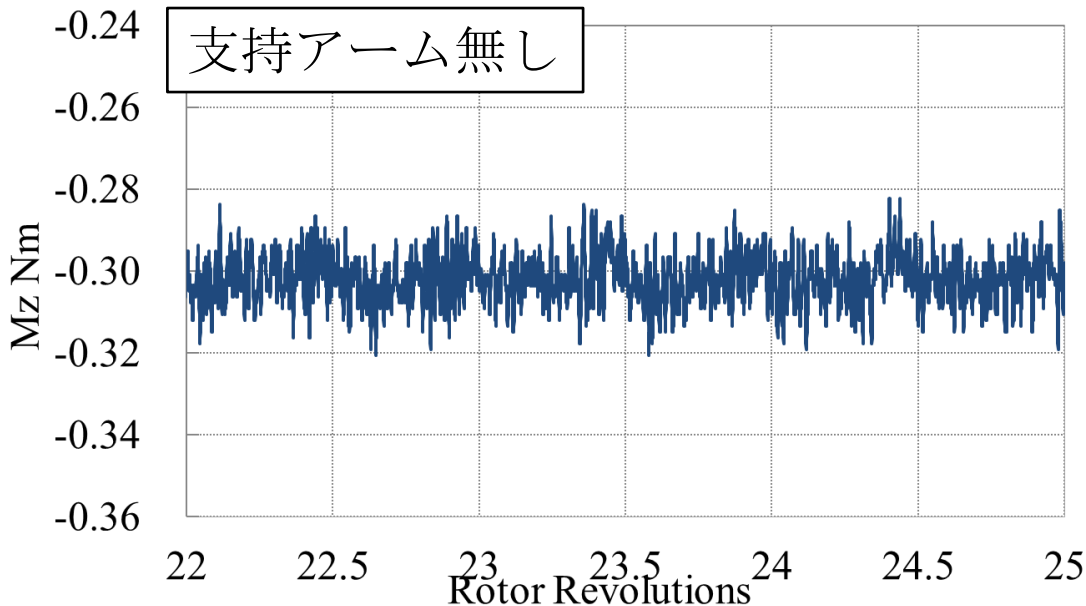
(C) Fz : 推力



(C) F_z : 抗力(支持アーム) 抗力 = 負の推力



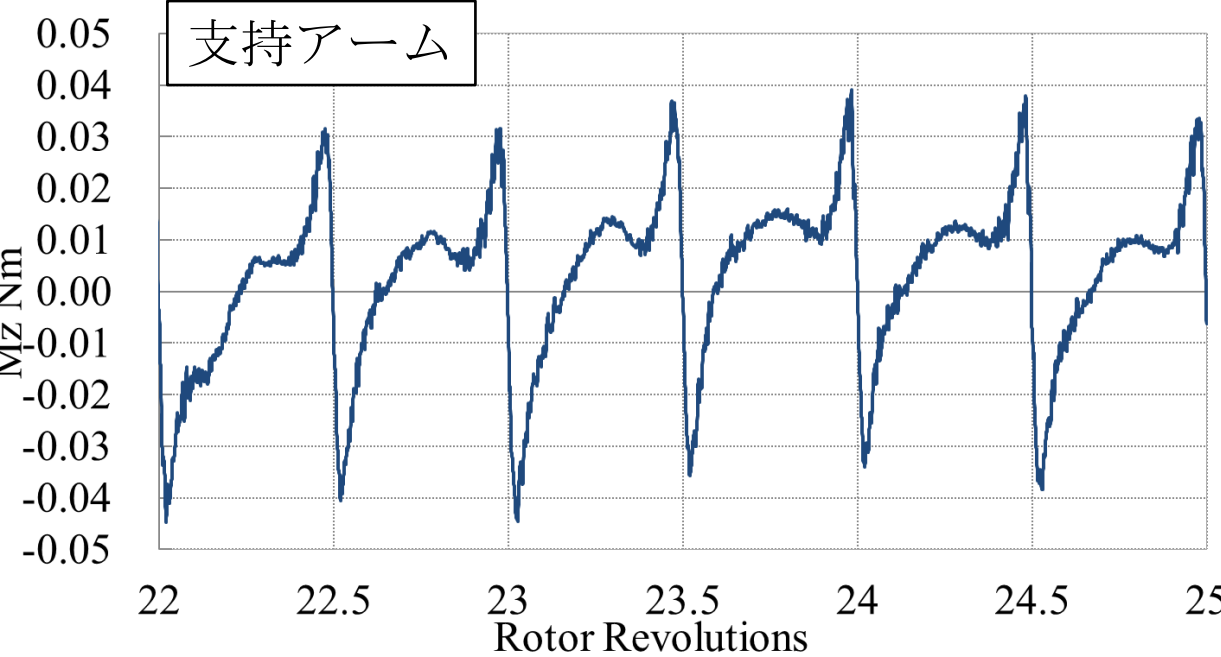
(B) Mz : トルク



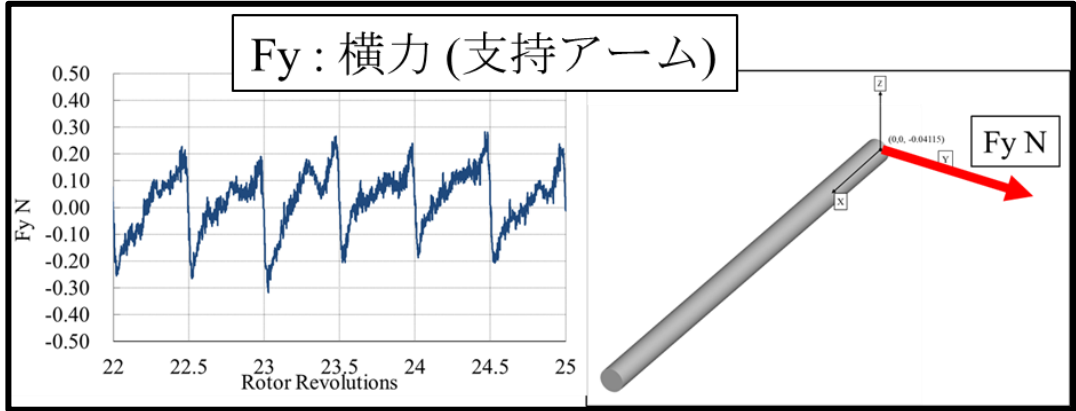
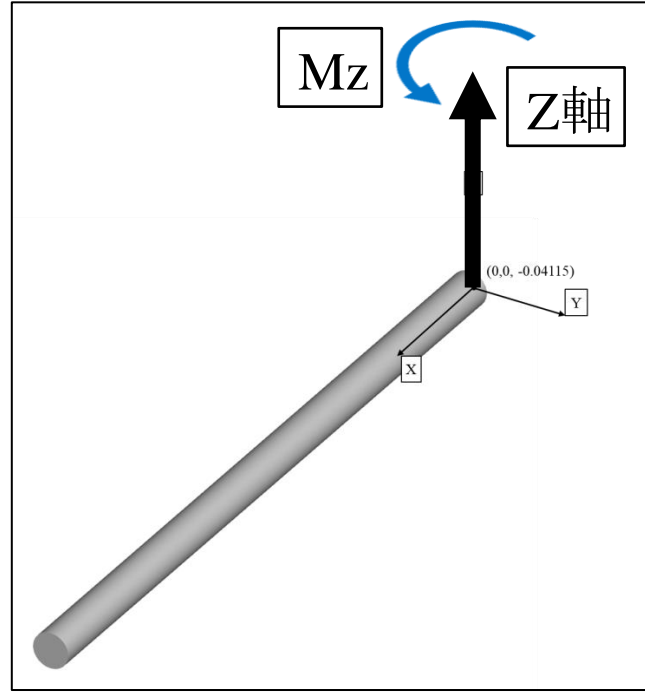
モーメント中心はローター中心 (0, 0, 0)



(B) Mz : トルク (支持アーム)



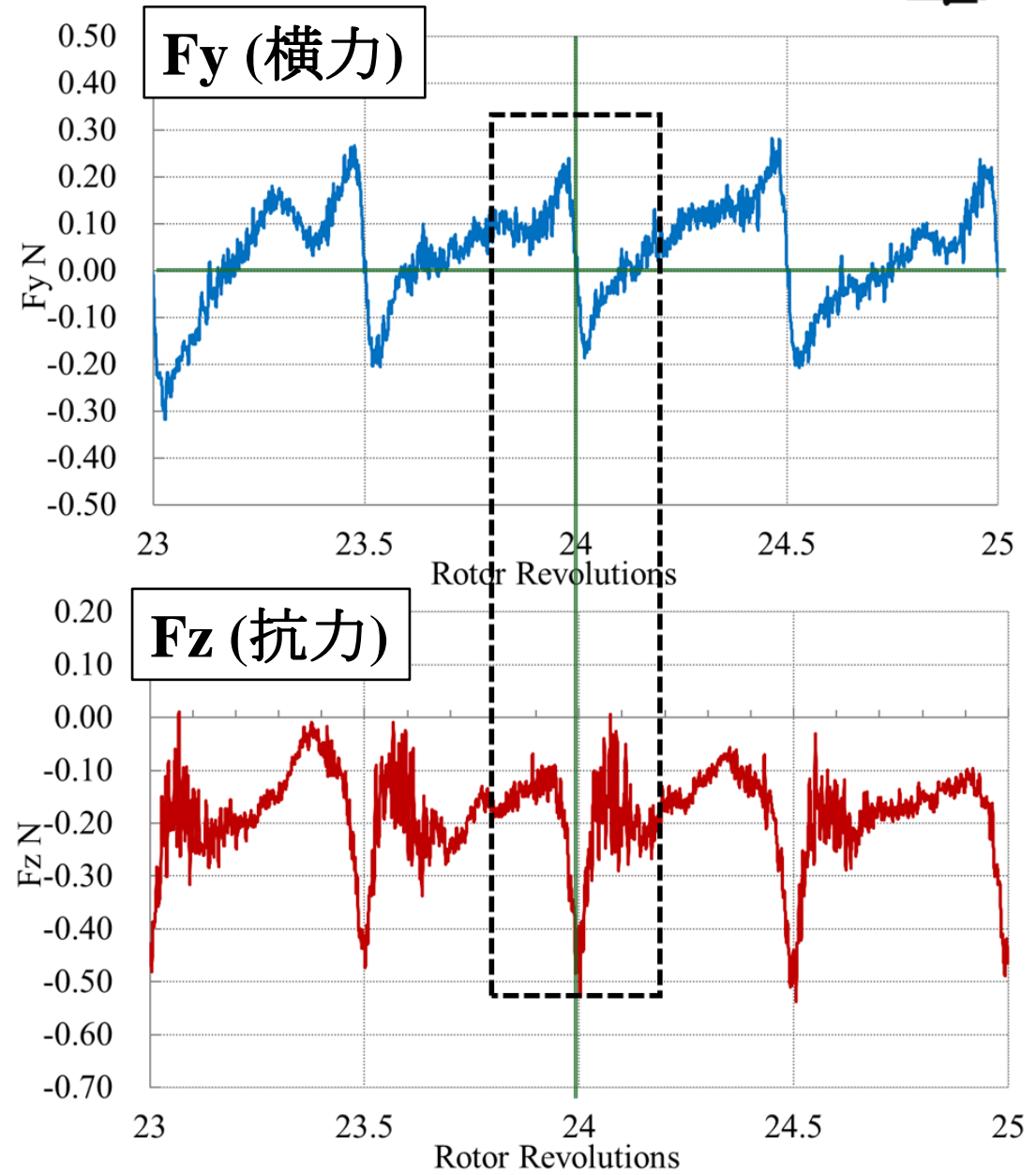
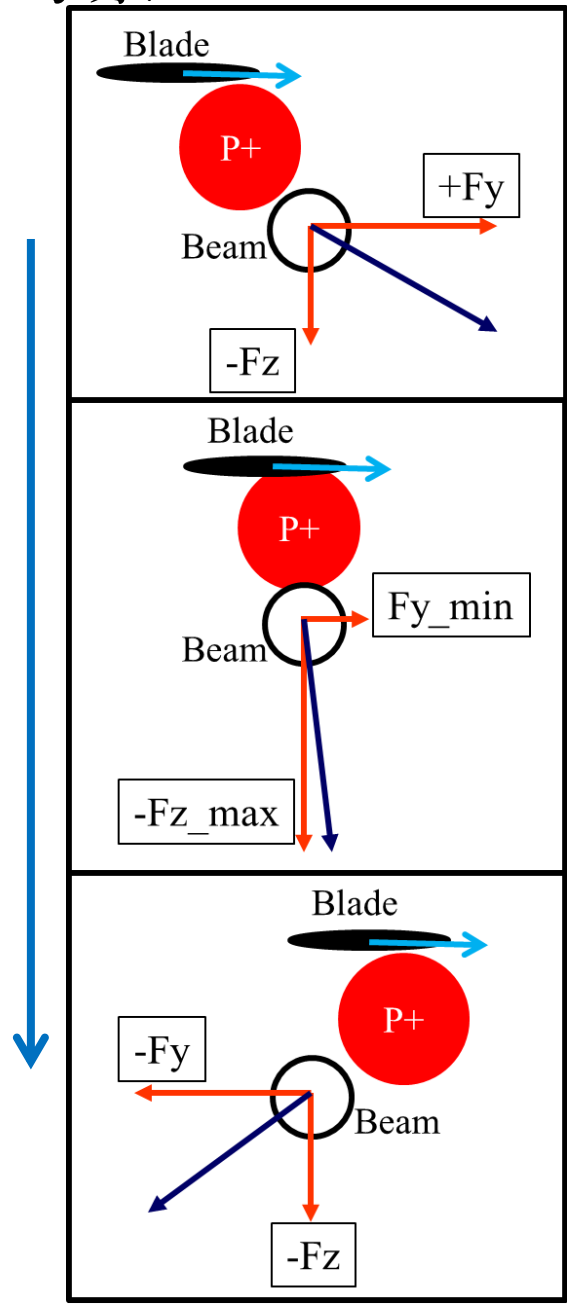
モーメント中心は円柱中心端(0, 0, -0.04115)



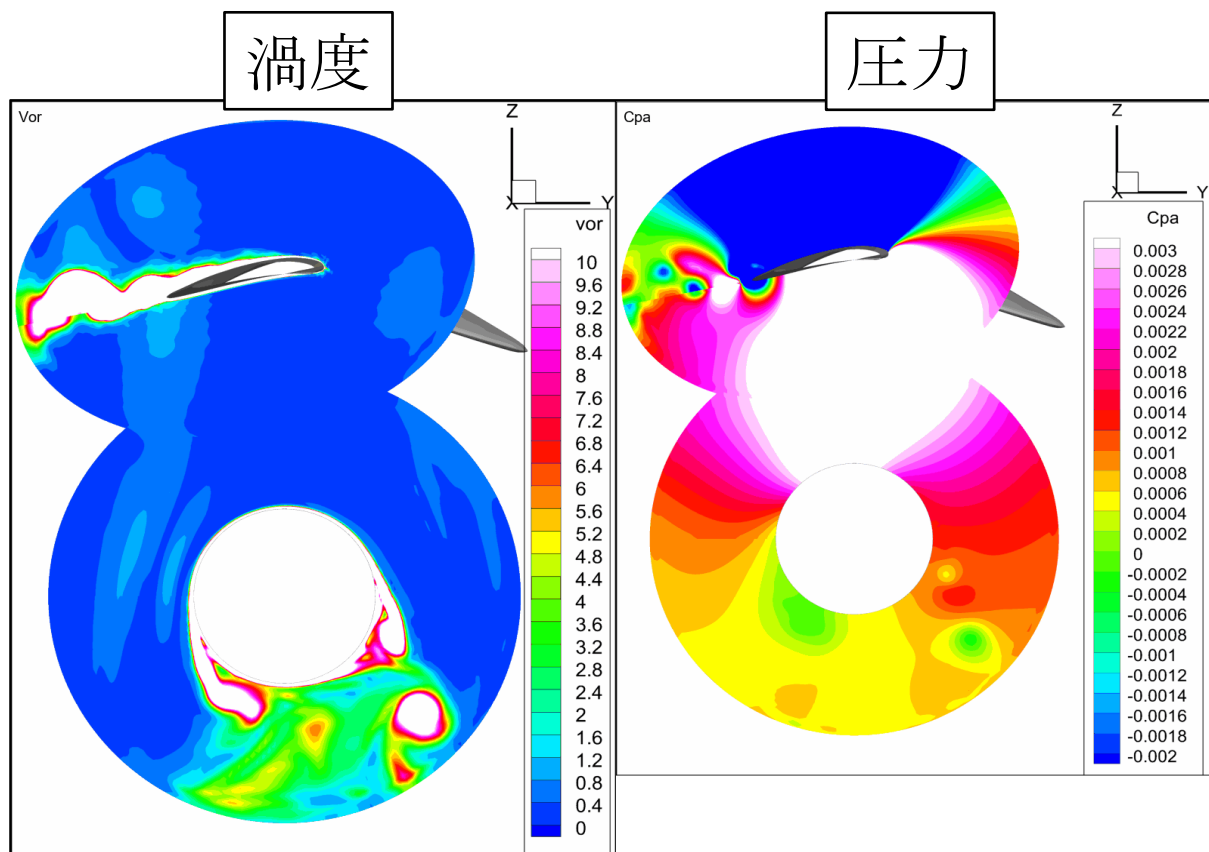
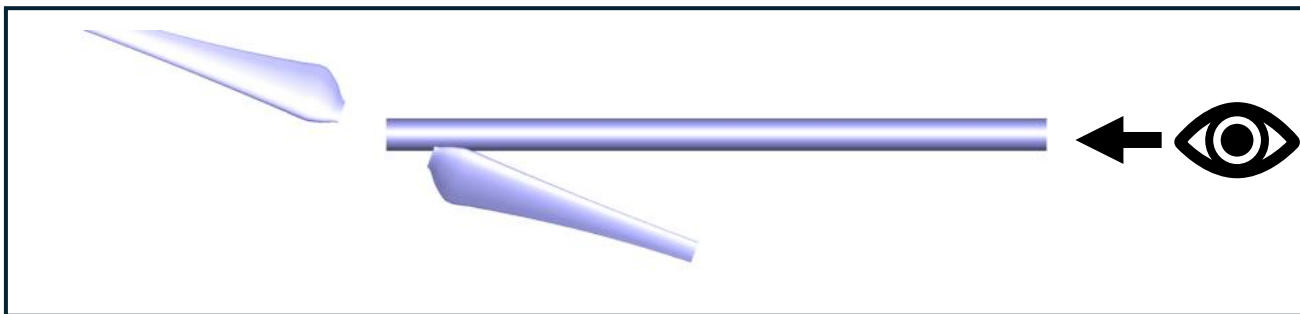
4. 考察



(C) 支持アーム

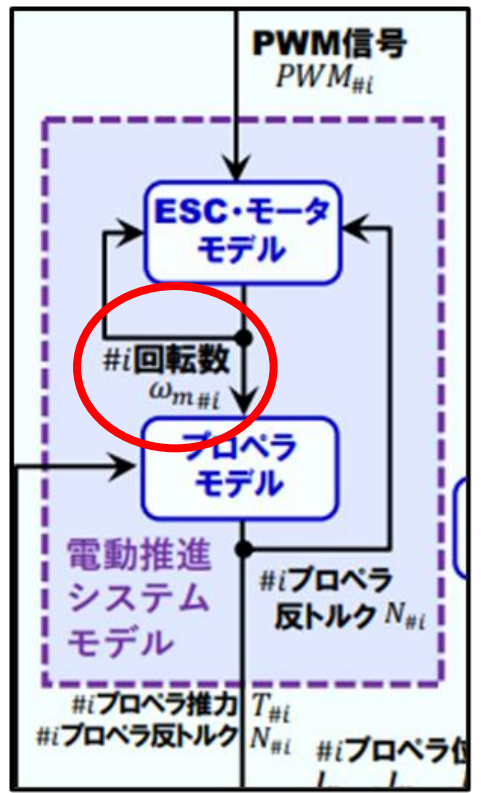
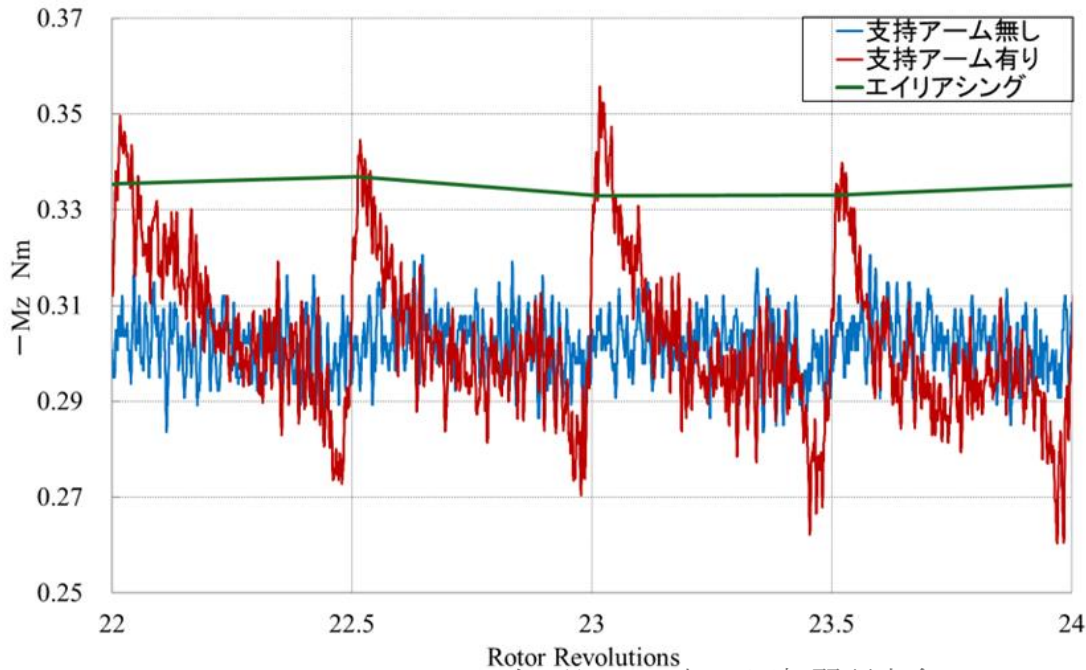
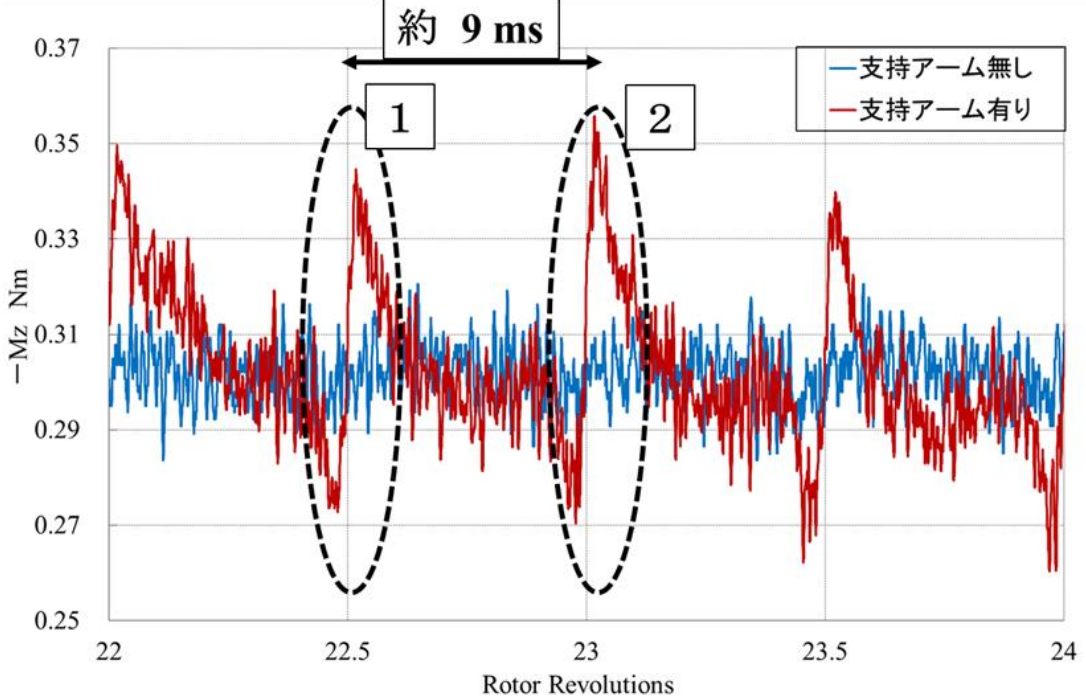


4. 考察



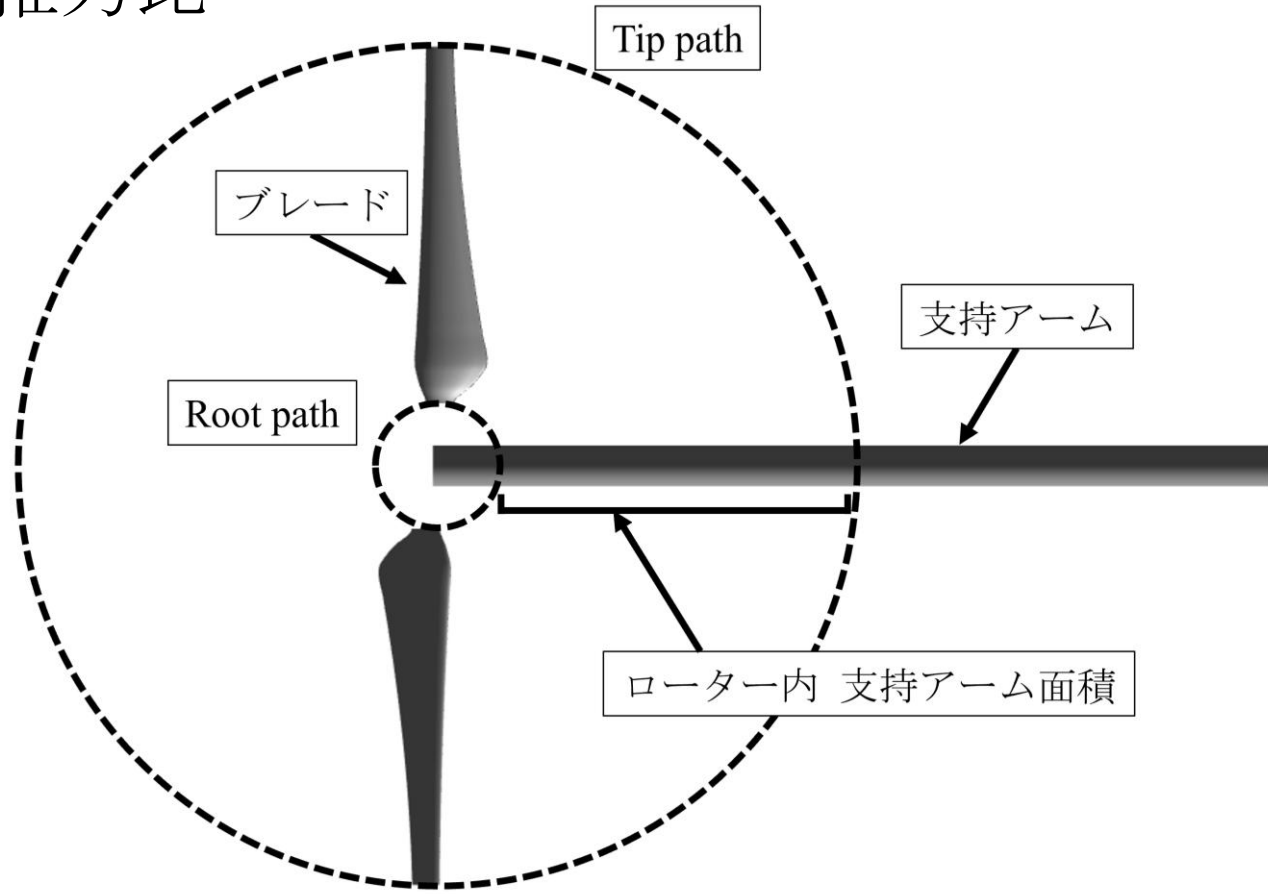
4. 考察

Mz
トルク





4. 考察：推力比



支持アーム無し	約 11.646 N
支持アーム有り	約 11.429 N
比率	約 98.137%

$$\frac{(\text{支持アームの有りの平均値})}{(\text{支持アームの無しの平均値})} \times 100 \%$$

5. 結論



○福島ロボットテストフィールドで運用している6発マルチコプターにおける支持アームの影響を解析ツールの rFlor3D で調査したところ、平均的に推力が2%程度減衰することを確認した。

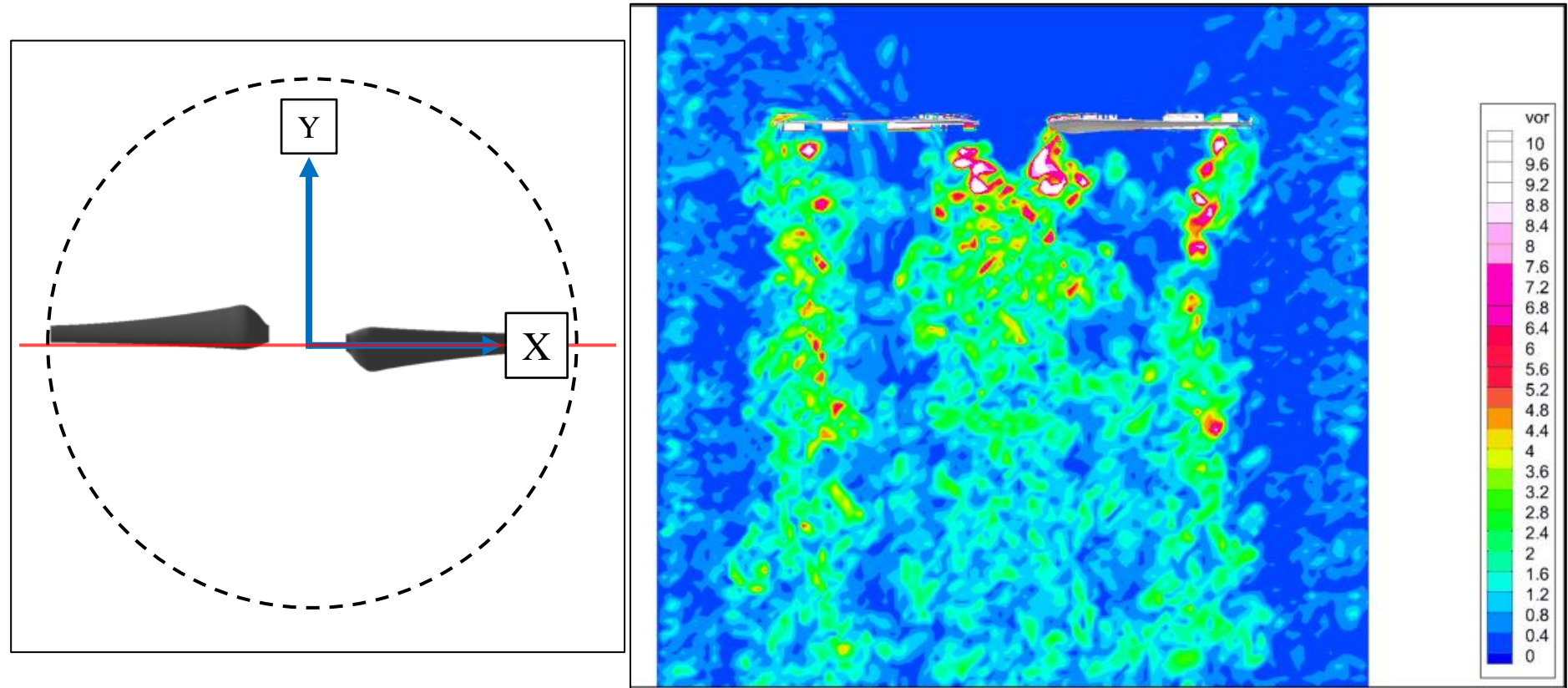
【田辺の論文 [マルチコプタを用いた農薬散布の数値シミュレーション (2003)] と減衰比がほぼ一致】

- ・ 推力の減衰比としてプロペラモデル (柳原研究室) に組み込まれる。

○支持アームに半周期ごとに正負へと急激に変化する横力とそれに付随して、トルクの振動が発生することを確認した。

- ・ 支持アームの影響を詳細にシミュレーションに組み込むならば、制御信号の間隔や、フィードバック信号にフィルタをかけることに注意しなければならない。

付録 1 : M_x と M_y の 0.25rev 周期の振動



Y平面を渦度で可視化

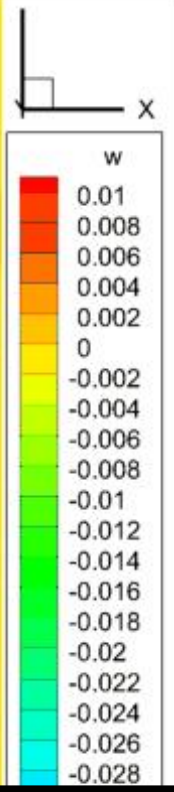
流れ場は左右非対称である \Rightarrow 反対のブレードが同じ力を生み出すとは限らない

付録 2: 推力減衰比について



ローター

支持アーム



Y平面をZ方向の流速で色付け

減衰比が支持アームの占有面積比2.7%を超えない理由

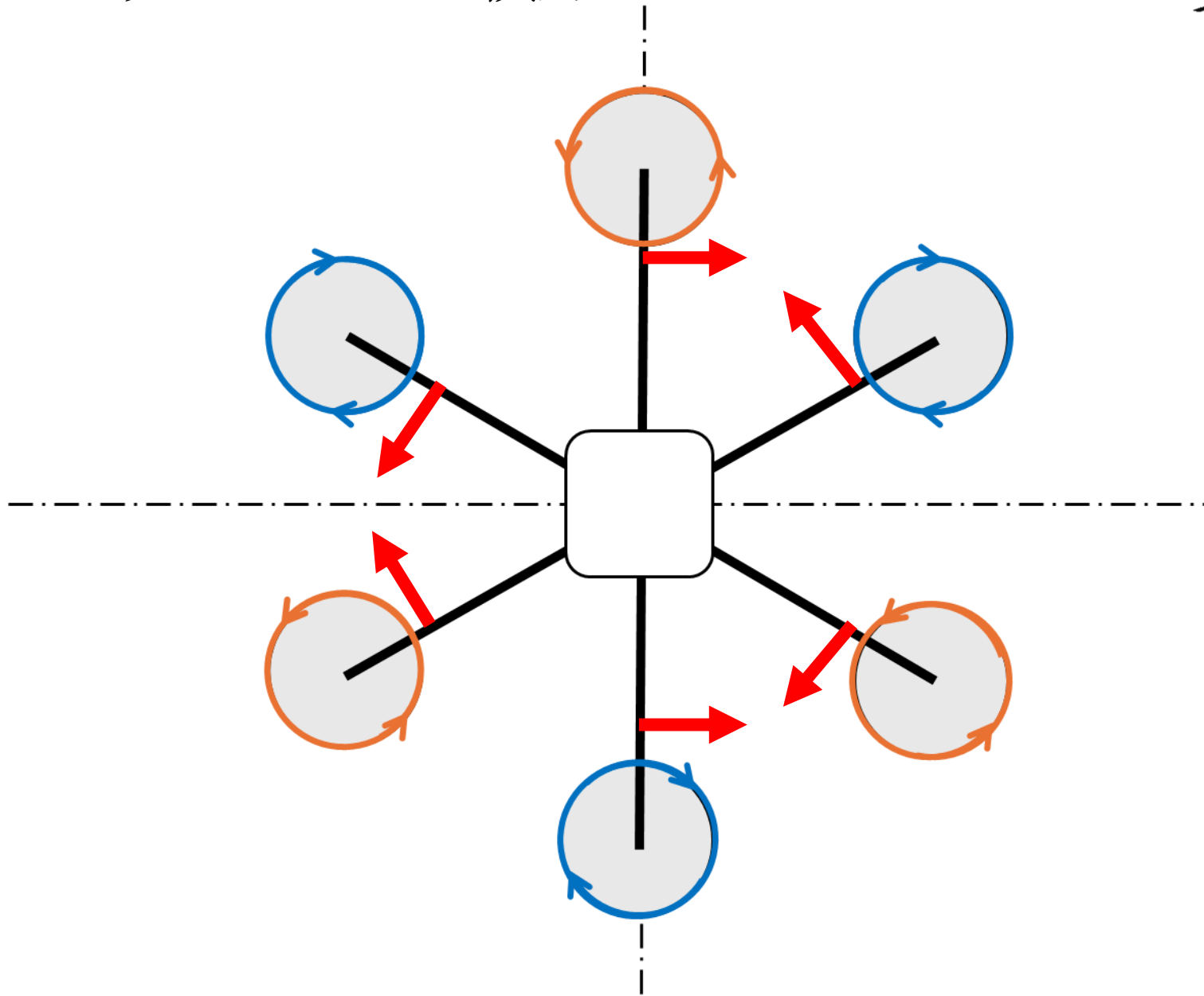
支持アームがローター面積内で占める面積比率：2.7%
推力の減衰比率：1.9%

点線部の質量流束に注目

支持アームが完璧に後流をさえぎるなら
⇒ 面積比率 = 減衰比

実際はアーム周りの流体流れで、アーム下に流体が運動量をもって流れる
⇒ 面積比率 > 減衰比

付録3：6発ドローンで横力が0になる





付録4：一様流と仮定して抗力を求める

- ・円柱の抗力定数 $C_d = 1$ として抗力を求める

$$\begin{aligned} F_D &= \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 1.225 \cdot 5.35^2 \cdot (0.0223 \cdot 0.23) \\ &\simeq 0.0899 \text{ N} \end{aligned}$$

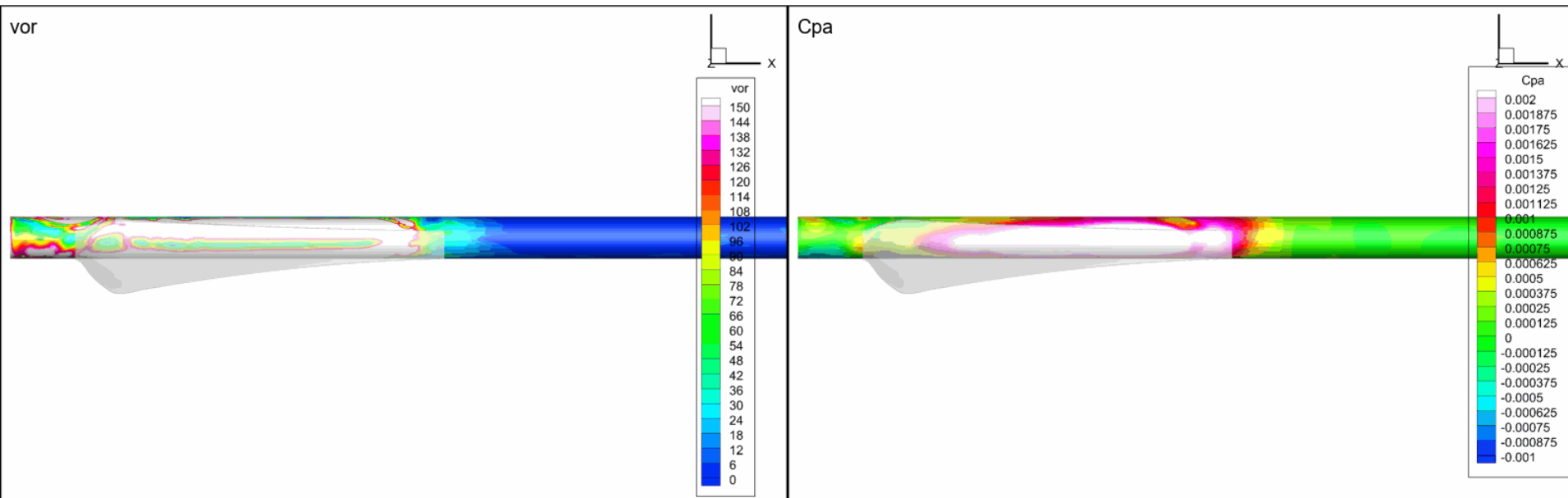
- ・支持アームの抗力の平均値 (定常状態)

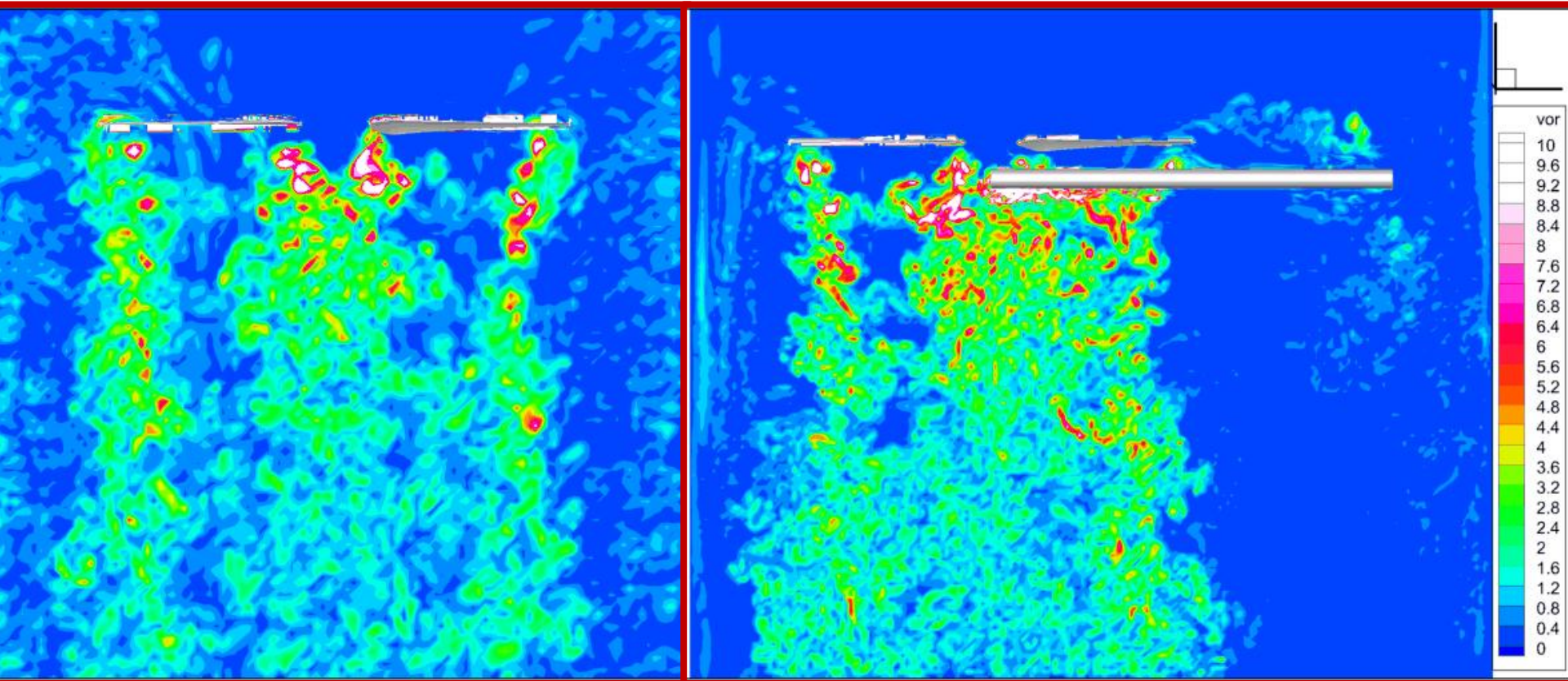
$$F_{D_AVE} \simeq 0.1827 \text{ N}$$

運動量理論を用いて誘導速度を求める

$$v_i = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}}$$

付録：その他可視化GIF

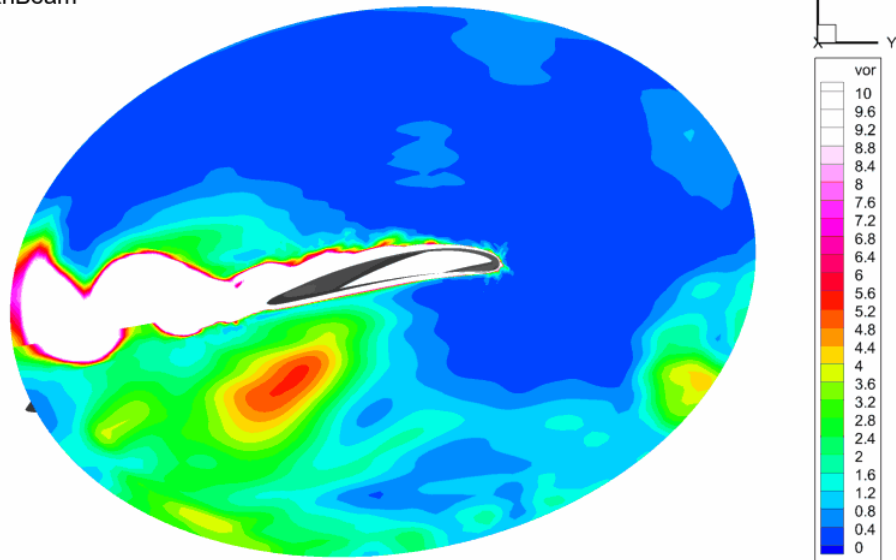




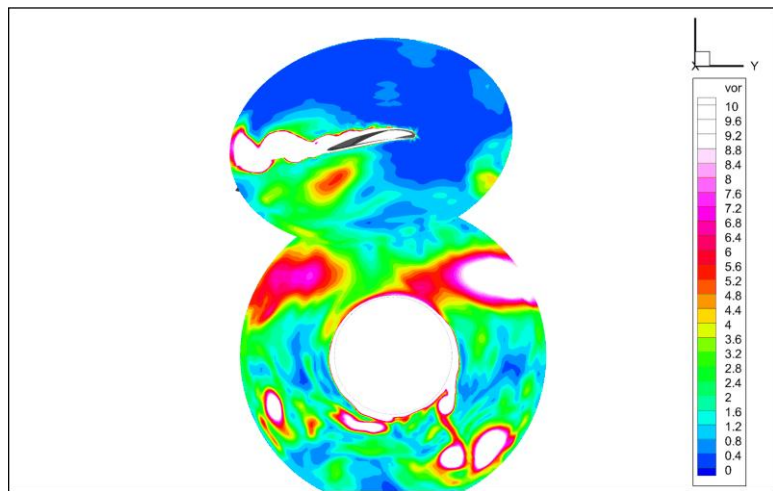
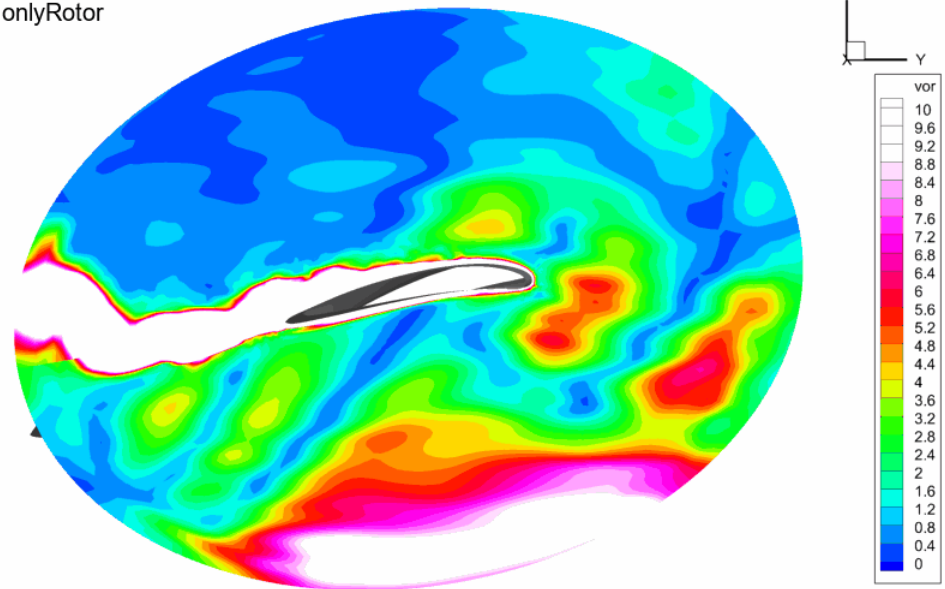
付録：その他可視化GIF



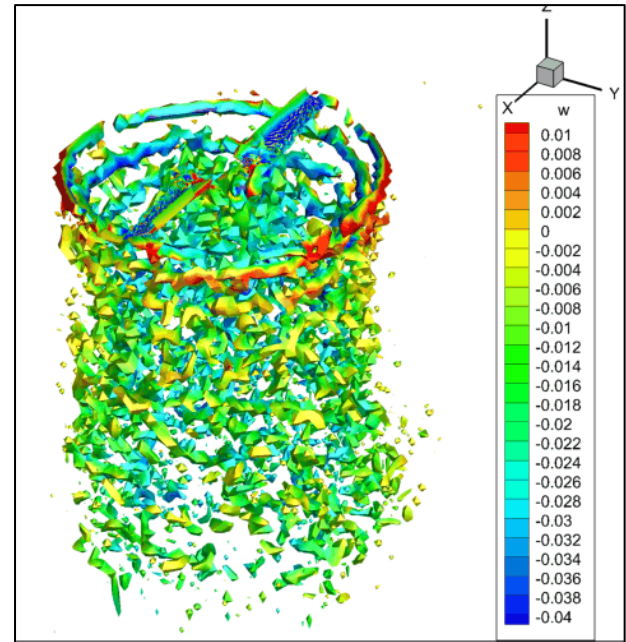
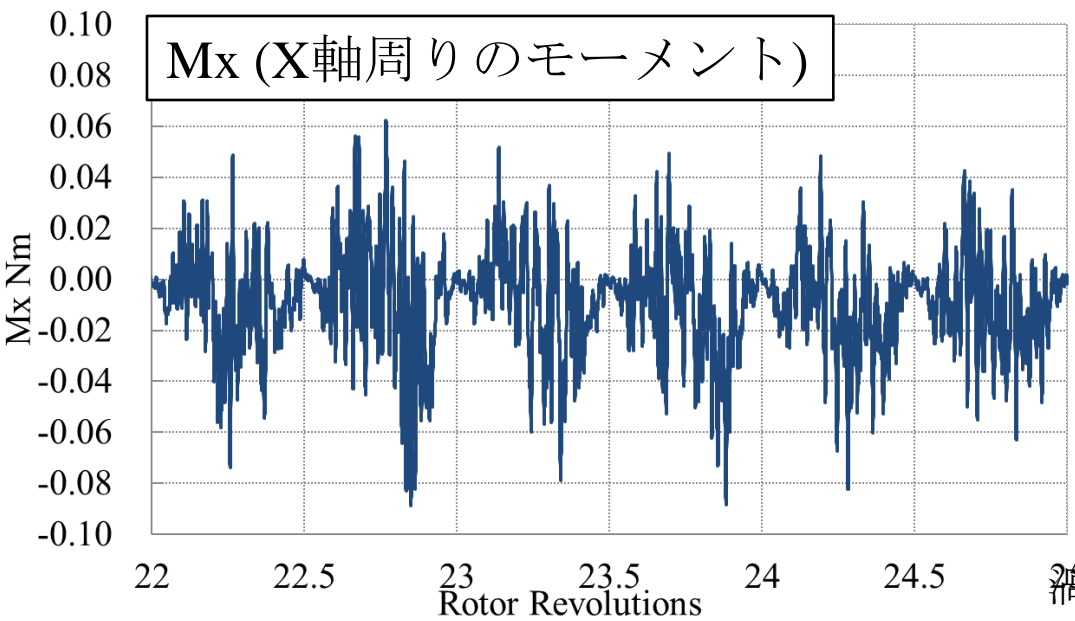
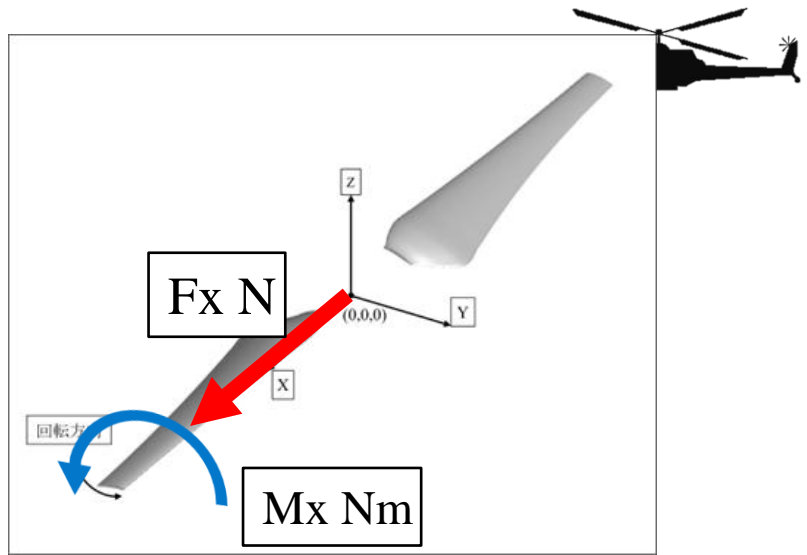
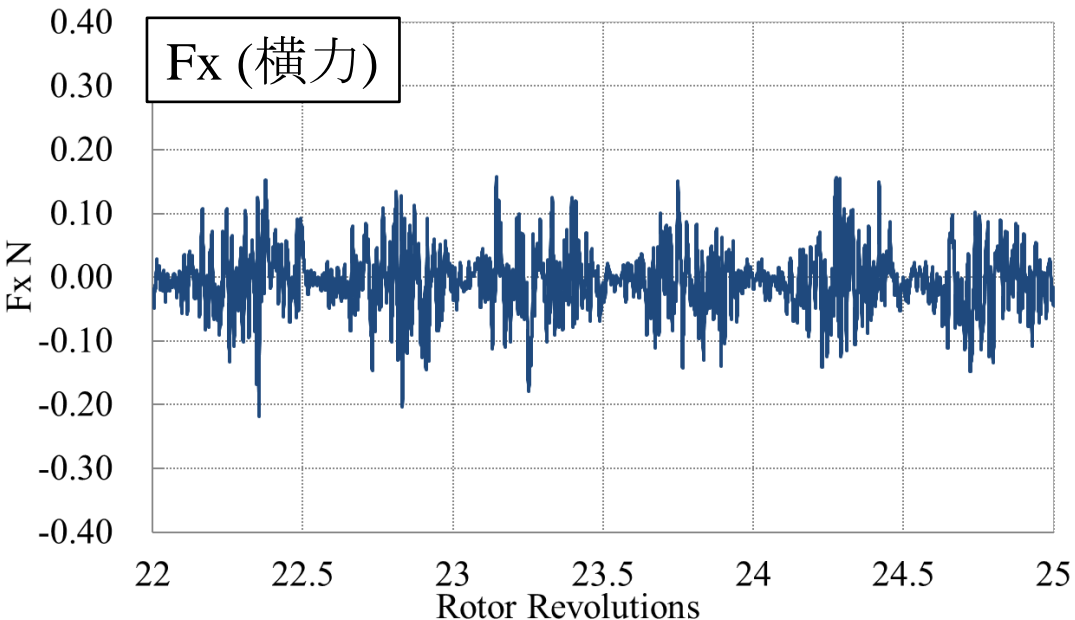
withBeam



onlyRotor



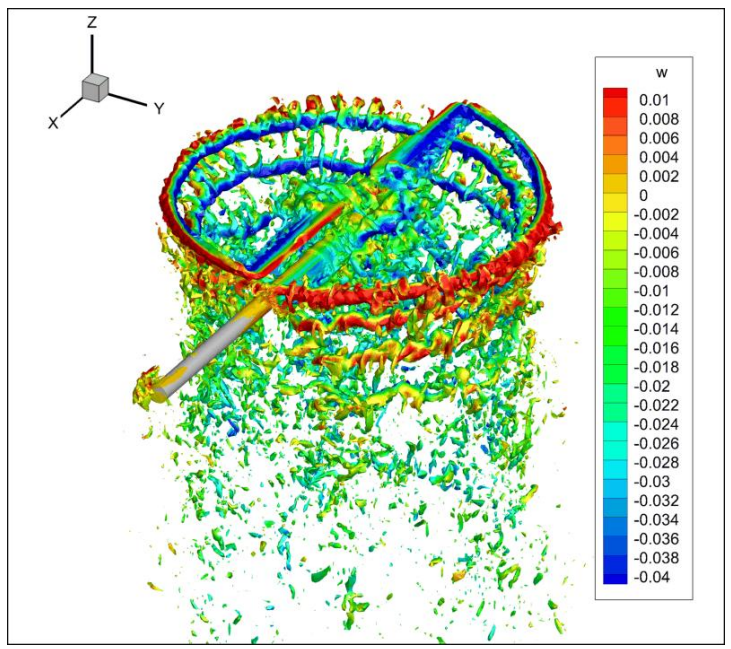
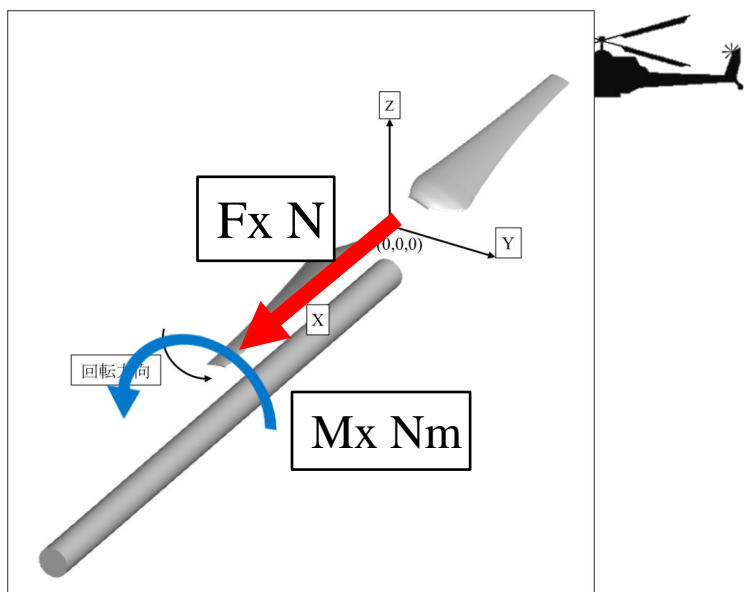
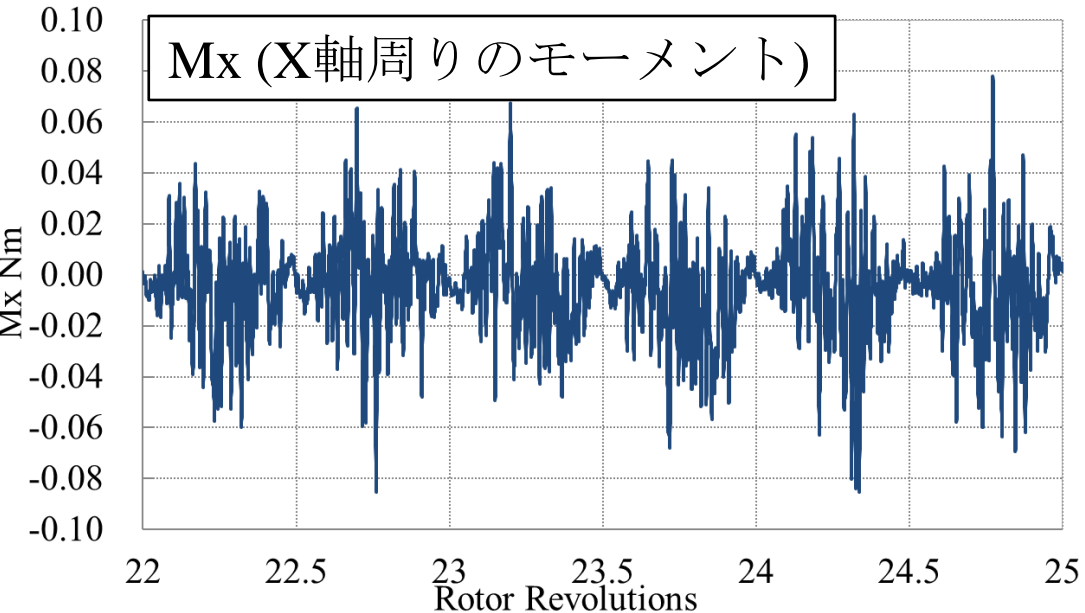
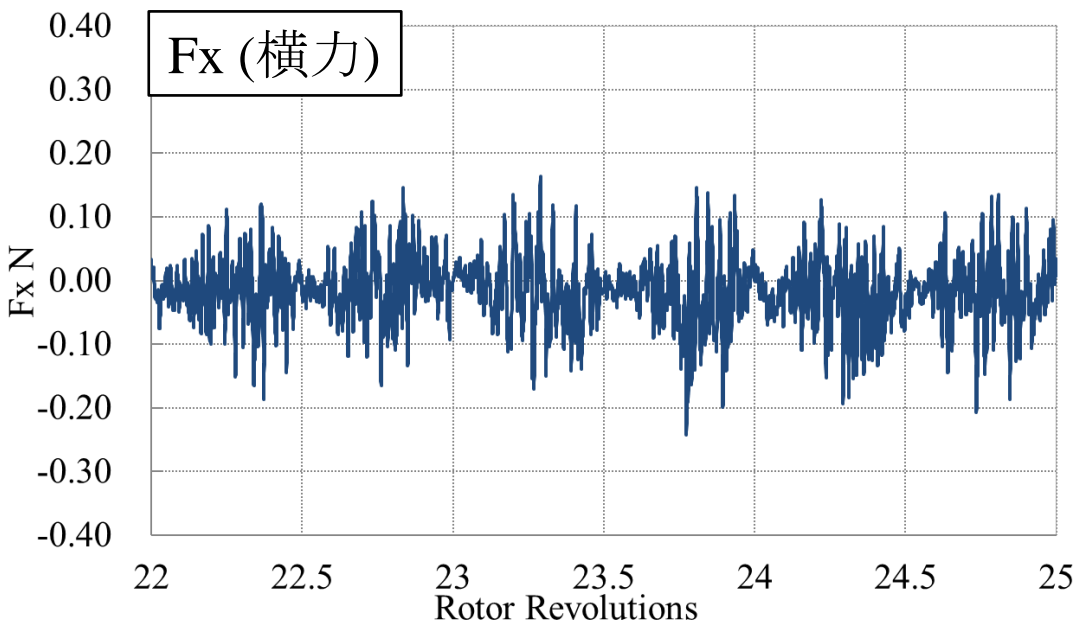
(A) 支持アーム無し



渦度一定の箇所をZ方向の流速で色付け

モーメント中心はローター中心 (0, 0, 0)

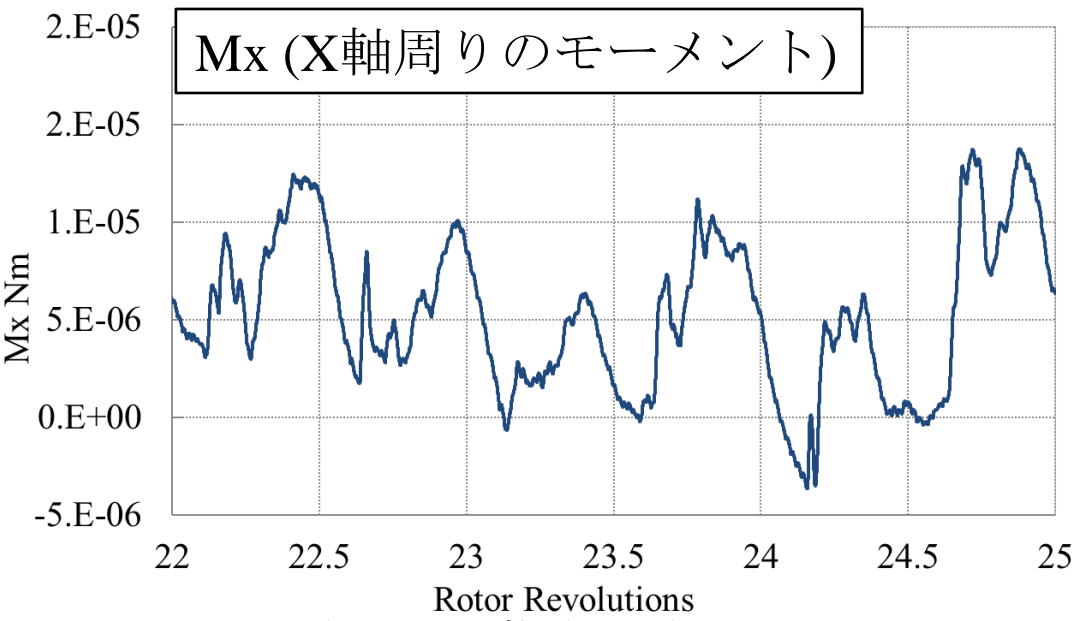
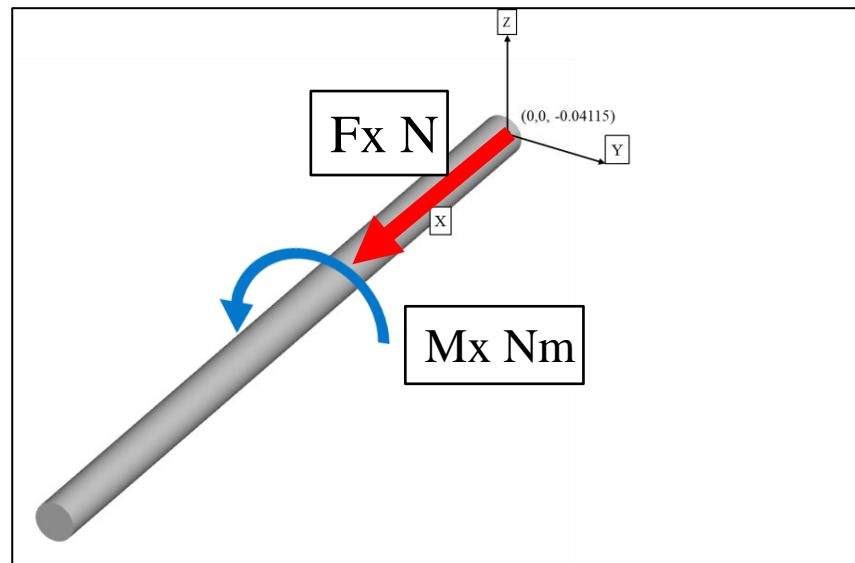
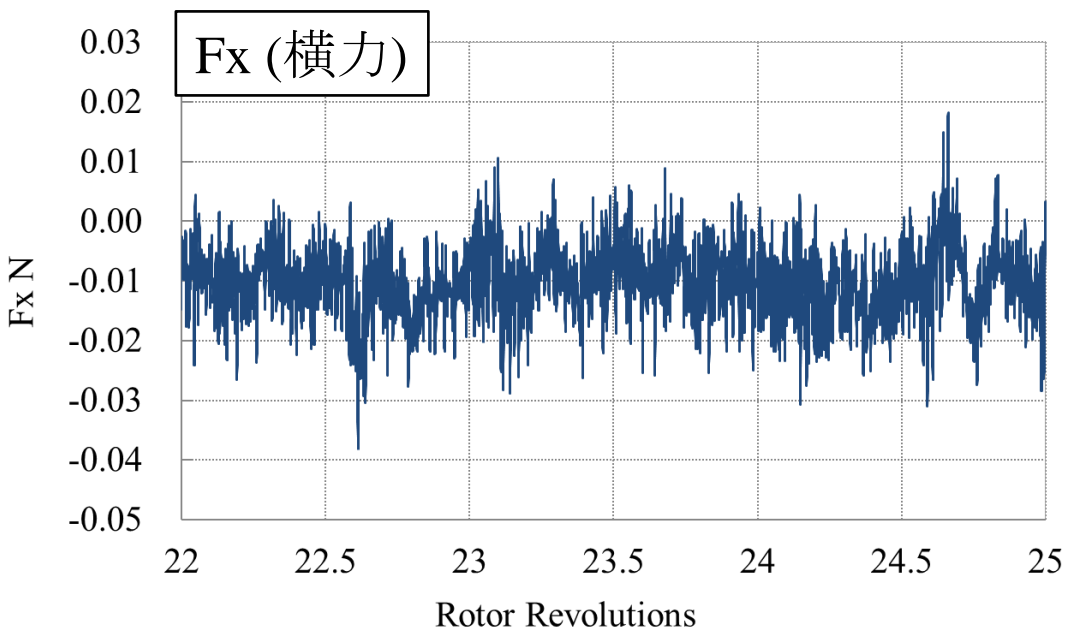
(B) 支持アーム有り



モーメント中心はローター中心 (0, 0, 0)

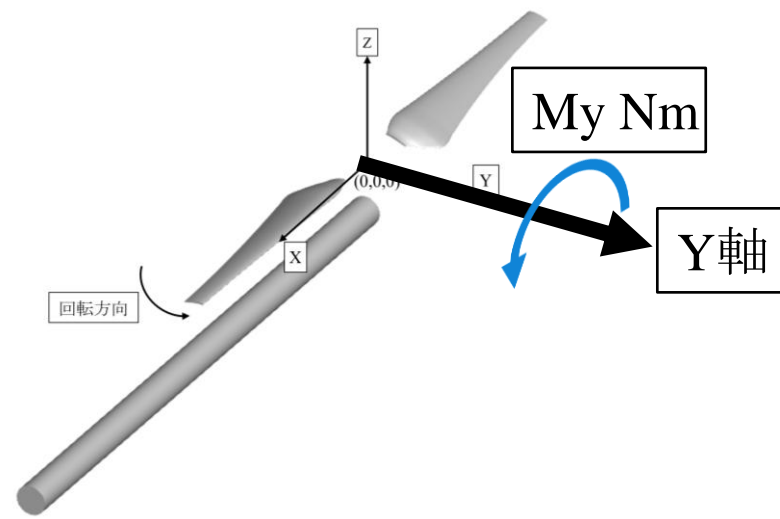
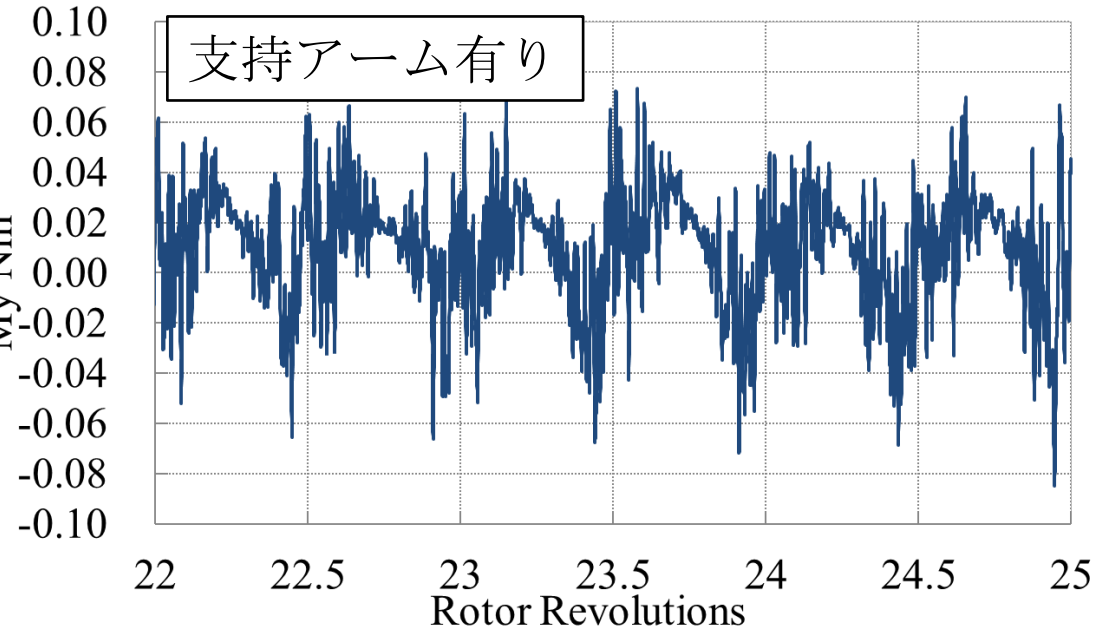
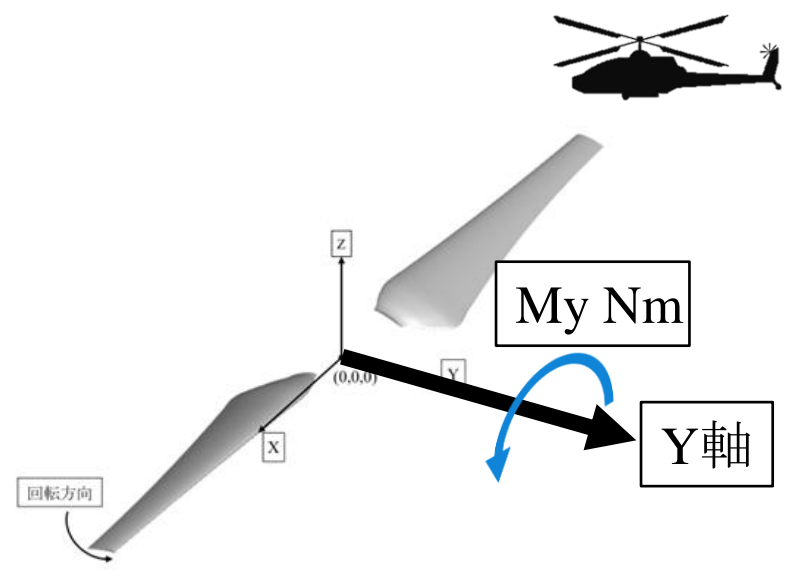
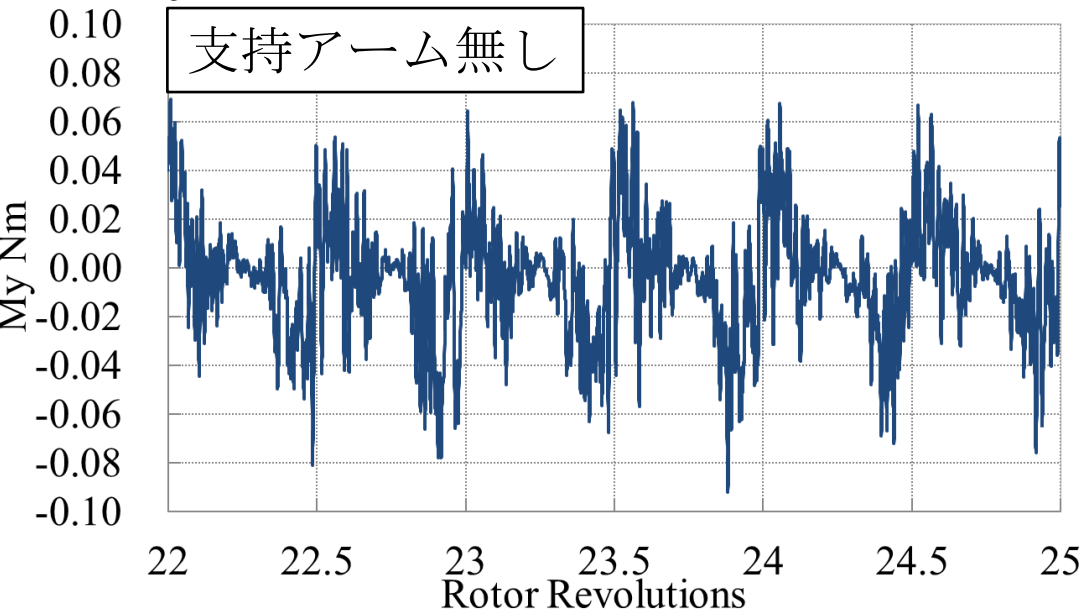
渦度一定の箇所をZ方向の流速で色付け

(C) 支持アーム



モーメント中心は円柱中心端(0, 0, -0.04115)

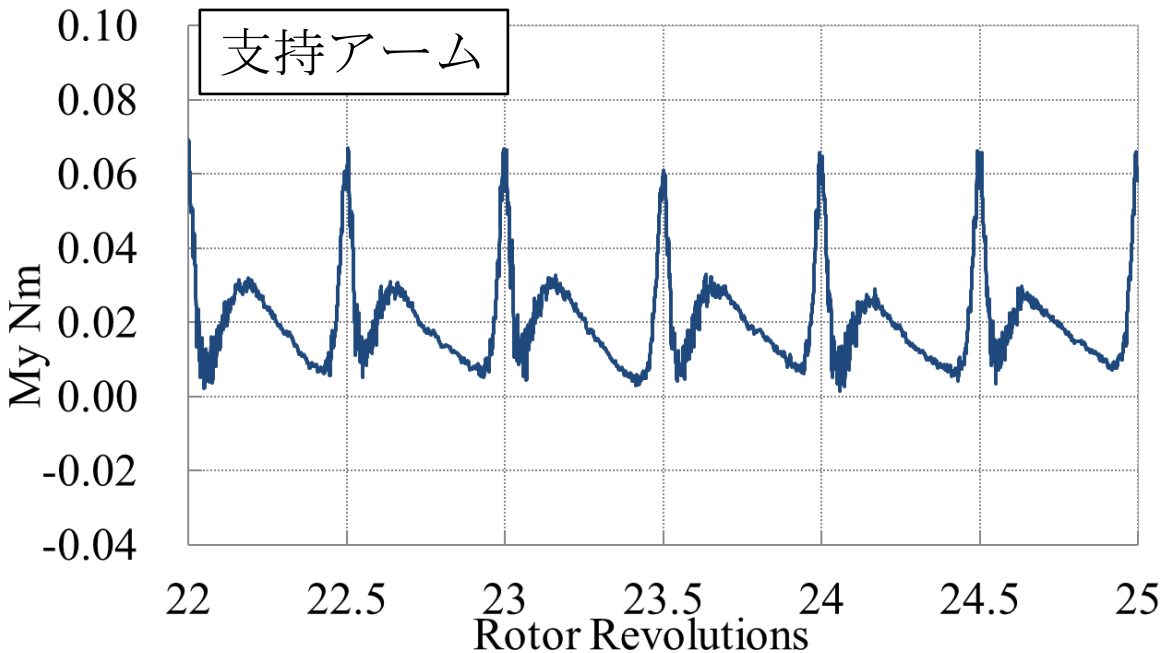
(D) My : Y軸周りのモーメント



モーメント中心はローター中心 (0, 0, 0)



(D) M_y : Y軸周りのモーメント (支持アーム)



モーメント中心は円柱中心端(0, 0, -0.04115)

