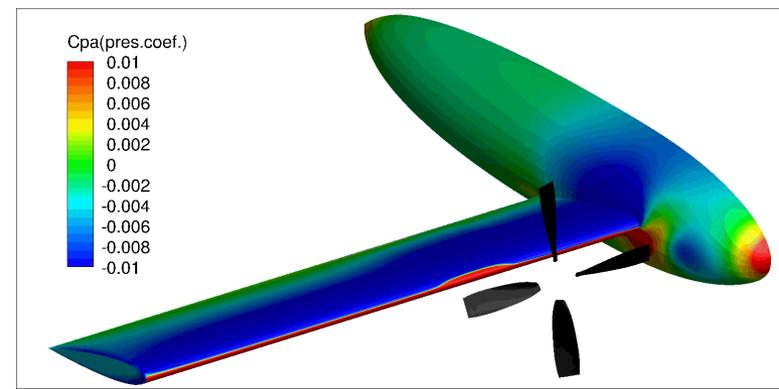


FaSTAR-Moveを用いた eVTOLの空力干渉の 数値解析

横浜国立大学 北村研究室

鈴木 恵太, 古澤善克, 坂爪竣哉, 原優花, 北村圭一

YNU 横浜国立大学
YOKOHAMA National University

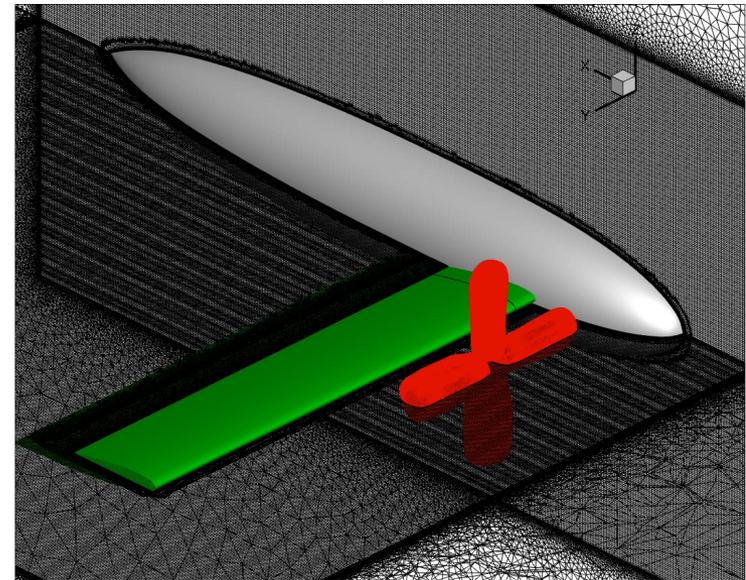


目次

- プロペラ・固定翼・胴体の空力干渉(eVTOL)
 - 背景・目的
 - 研究手法
 - 結果（時間平均場）
- 同一の回転翼計算における
rFolw3DとFaSTAR-Moveの比較
- 当研究室における
rFolw3D・FaSTAR-Moveの活用事例紹介

目次

- プロペラ・固定翼・胴体の空力干渉(eVTOL)
 - 背景・目的
 - 研究手法
 - 結果（時間平均場）
- 同一の回転翼計算における
rFolw3DとFaSTAR-Moveの比較
- 当研究室における
rFolw3D・FaSTAR-Moveの活用事例紹介



背景・目的

●プロペラ・固定翼間の空力干渉

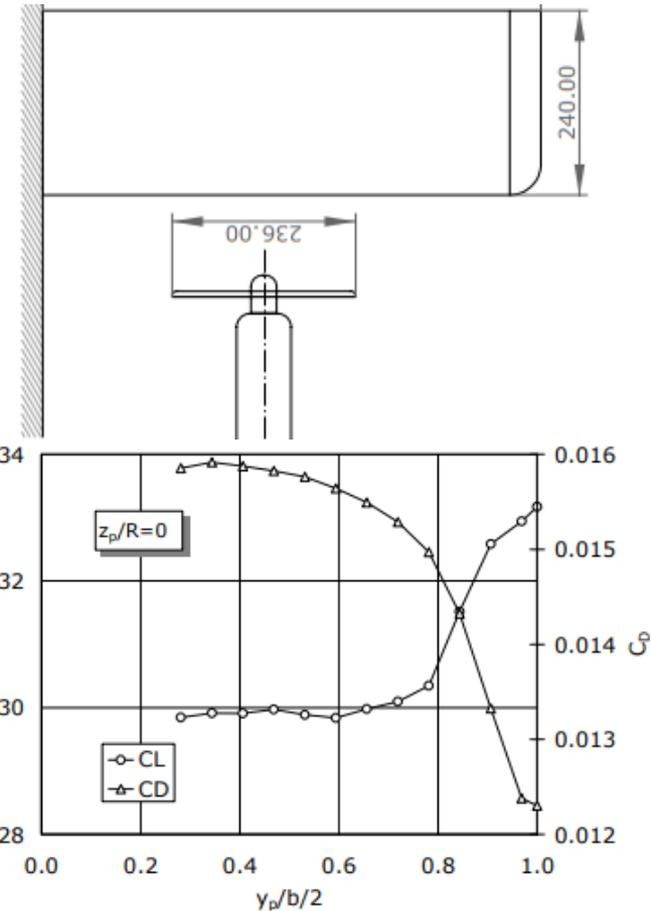
Veldhuisの研究 [3] によると

位置関係が**固定翼空力**に影響

結論

プロペラを翼端(**tip**)に配置したとき
固定翼は

揚力 C_L 最大



プロペラ位置と固定翼空力係数[3]

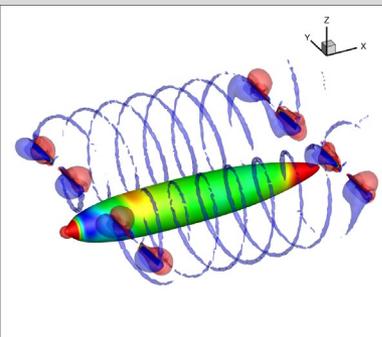
背景・目的

●プロペラ・固定翼間の空力干渉

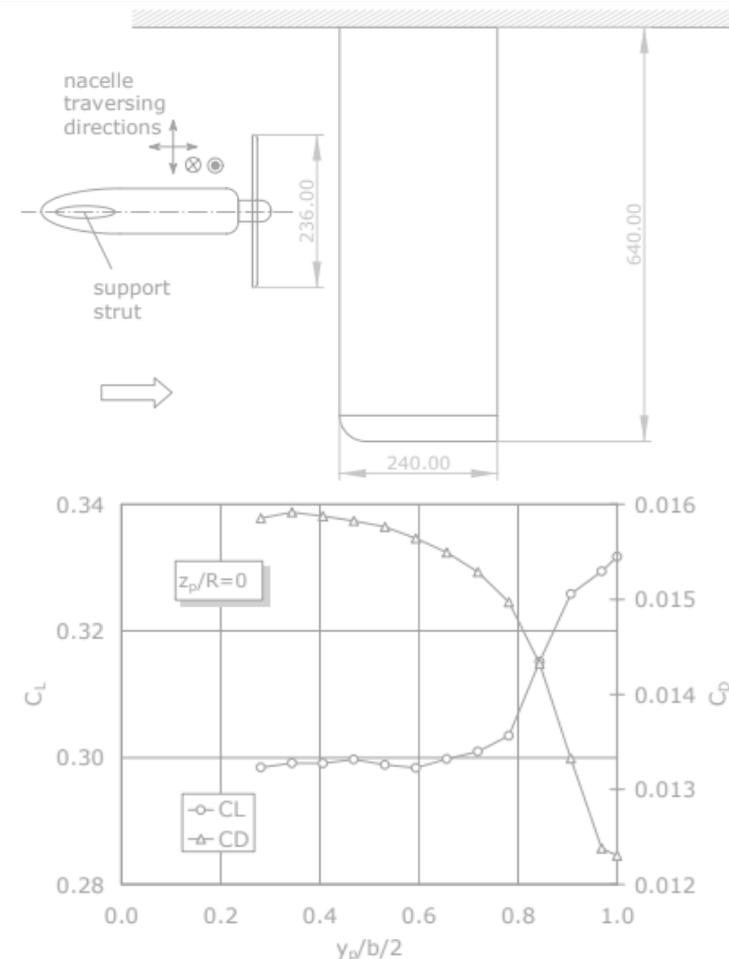
Veldhuisの研究 [3] によると
位置関係が固定翼空力に影響

●プロペラ・胴体間の空力干渉 [4]

プロペラ後流による干渉で胴体に**揚力**が発生



多くの研究では
考慮されず



プロペラ位置と固定翼空力係数[3]

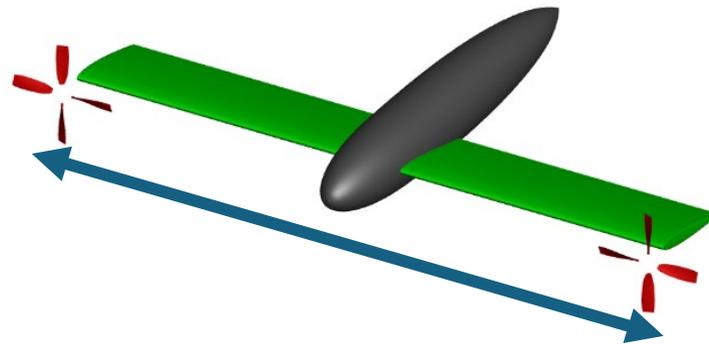
背景・目的

① 胴体を含めたプロペラ空力干渉メカニズム

対象：胴体・固定翼・プロペラの3者モデル

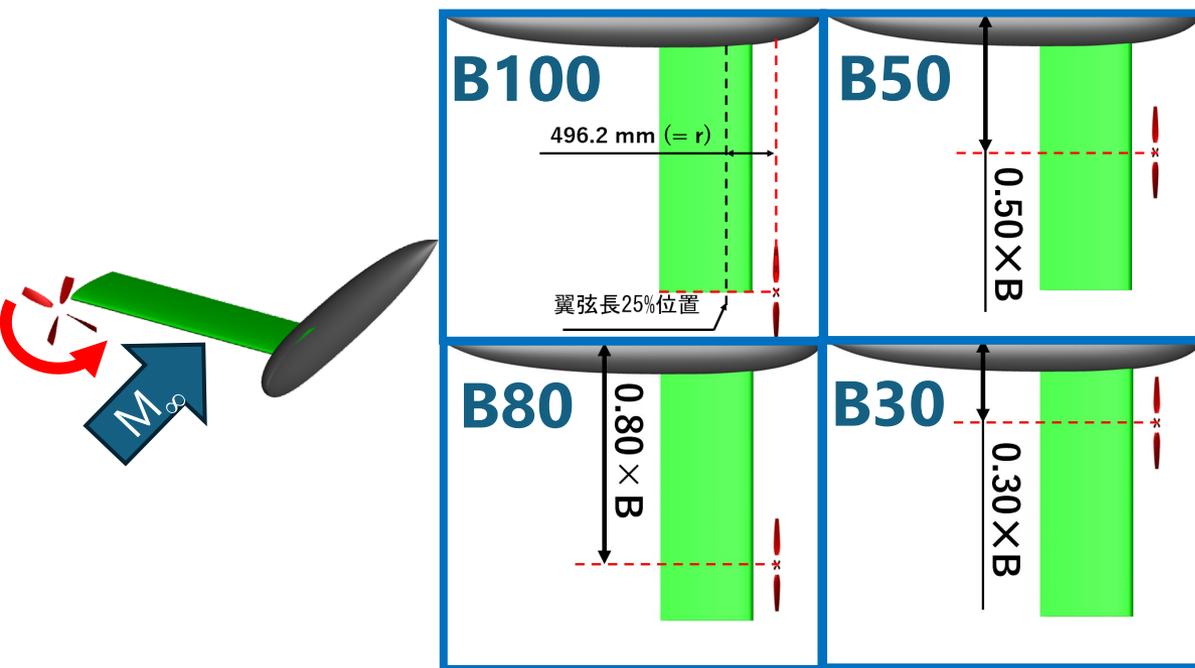
② プロペラ位置が機体全体空力に及ぼす影響

プロペラのスパン(水平横)方向位置に着目



研究手法 | 計算対象, 条件

計算対象 / 半裁モデル



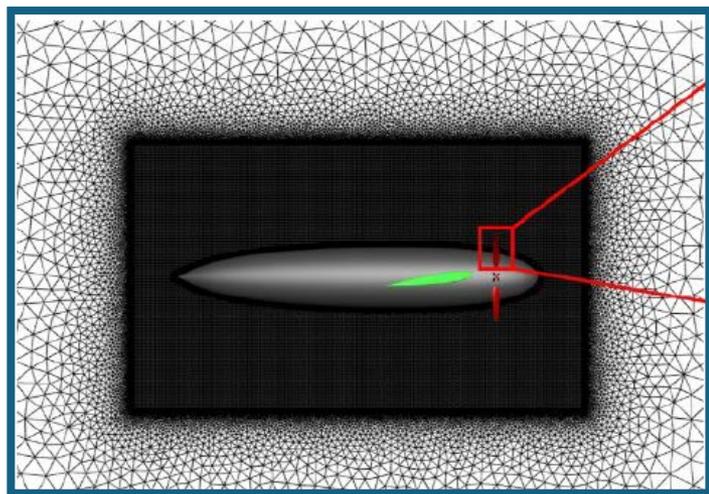
固定翼スパン長 B の

100%, 80%, 50%, 30%
のプロペラ位置をそれぞれ調査

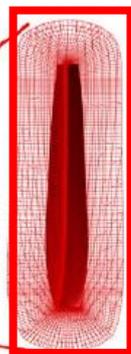
一様流マッハ数	0.137
Re数(固定翼C基準)	3.1×10^6
胴体	
全長 L	4000 mm
最大直径 D	682.7 mm
固定翼 (NACA0012)	
スパン長 2B	5954.2 mm
コード長 C	992.4 mm
取り付け迎角	8 deg.
プロペラ	
ブレード枚数	4枚
プロペラ半径 r	496.2 mm
コード長 c_{75}	118.2 mm

研究手法 | ソルバ

FaSTAR-Moveを用いた数値計算

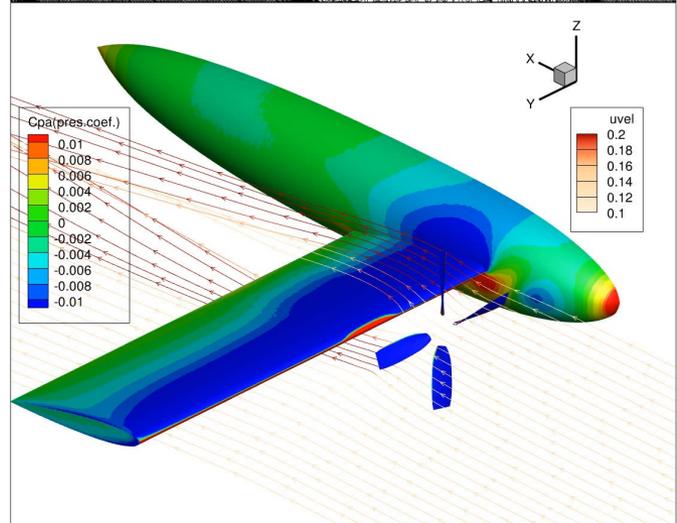
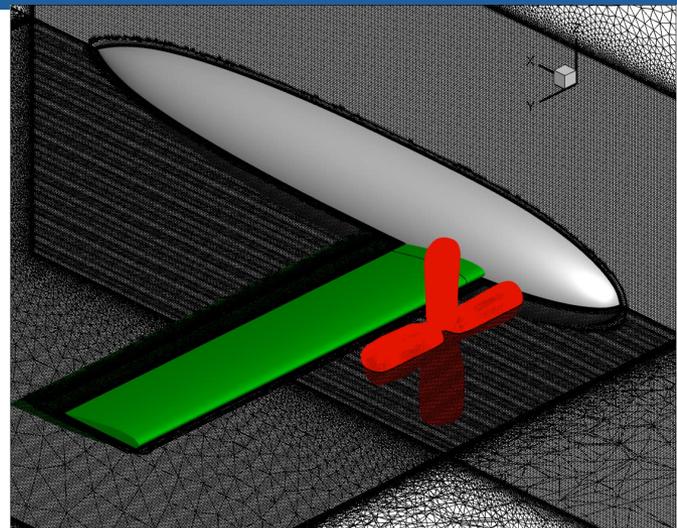


背景格子 (約6000万点)

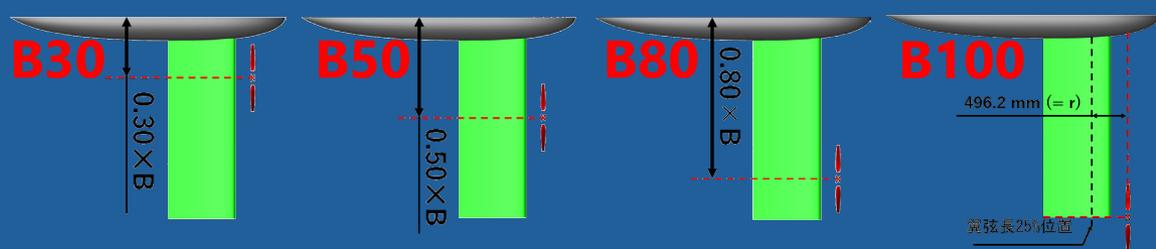


プロペラ格子
(約100万点)

背景格子にプロペラ格子を“重合”



結果

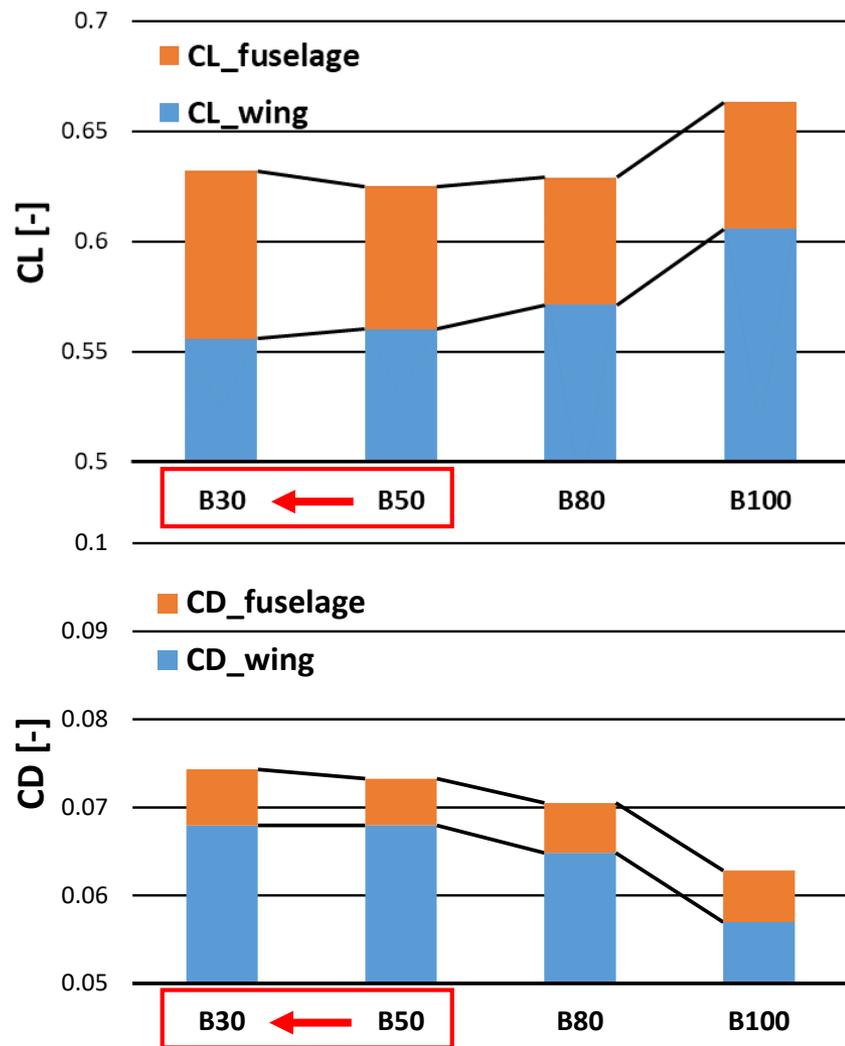


●機体全体 | 固定翼+胴体

●揚力 C_L

胴体は増加

●抗力 C_D



目次

- プロペラ・固定翼・胴体の空力干渉(eVTOL)

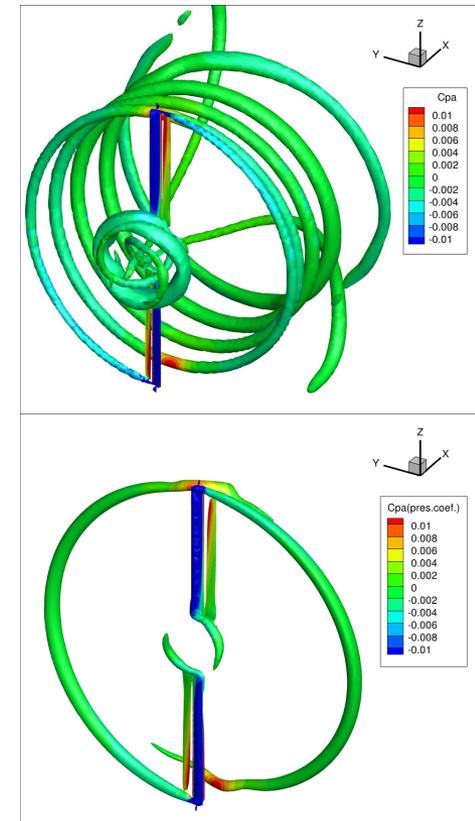
- 背景・目的

- 研究手法

- 結果（時間平均場）

- 同一の回転翼計算における
rFolw3DとFaSTAR-Moveの比較

- 当研究室における
rFolw3D・FaSTAR-Moveの活用事例紹介



計算対象, 条件

一様流あり回転翼計算

回転翼形状

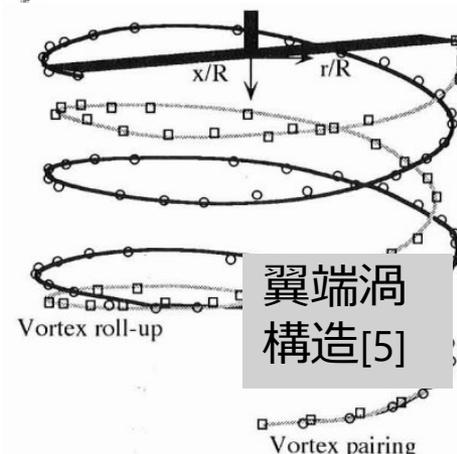
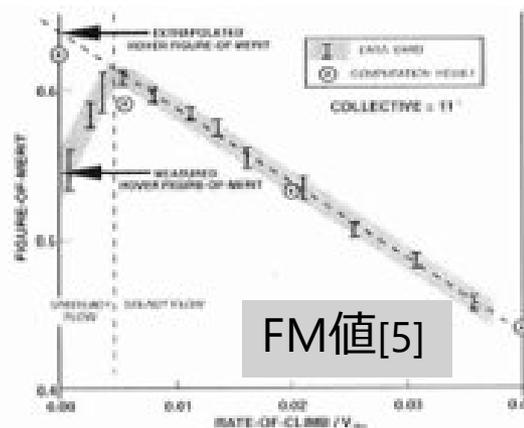
- 翼型 NACA0012
- 取り付け角 11°
- 夕半径 1041.4 mm
- 翼弦長 76.2 mm

計算条件

- 翼端速度 196.2 m/s
- 一様流速 (進行率 0.015) 2.9 m/s
- 翼端Re 約 1.0×10^6

□-夕半径 r : 1041.4 mm

回転数: 1800 rpm



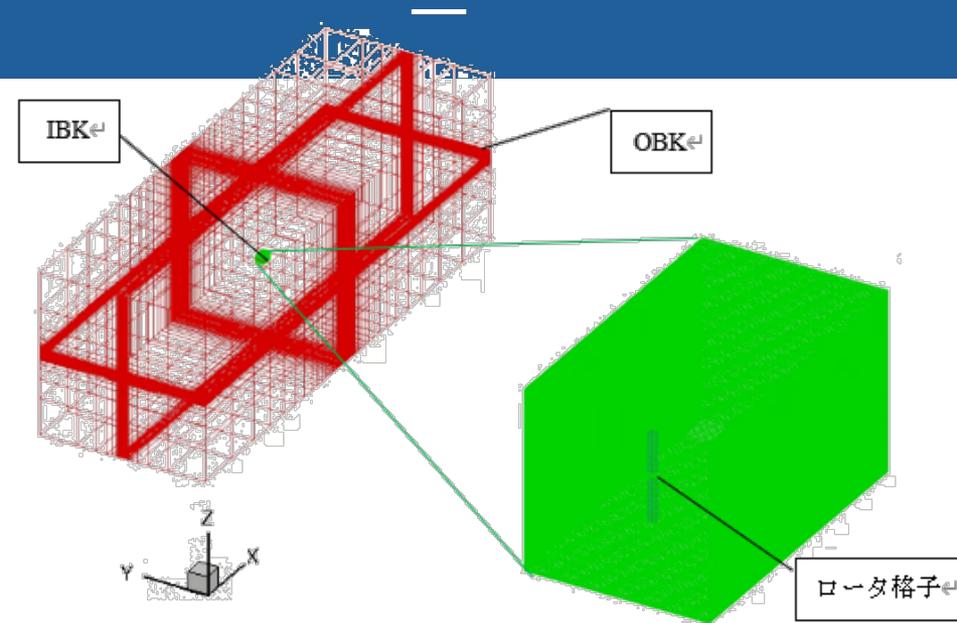
計算格子

計算格子

rFlow3Dのマニュアルに
則り作成した

格子点数

- ・ブレード格子
- ・背景格子 (OBK+IBK)
- ・IBK(内側背景格子)セルサイズ $0.15 \times c$ (c :ブレード翼弦長)



約 100×2 万点

約 1 億点

rFlow3Dにて、十分に格子収束性が取れていることを確認済み
同じ格子データにて、FaSTAR-Moveで同様の計算を行った

計算手法

可能な限り同一の手法を選択した

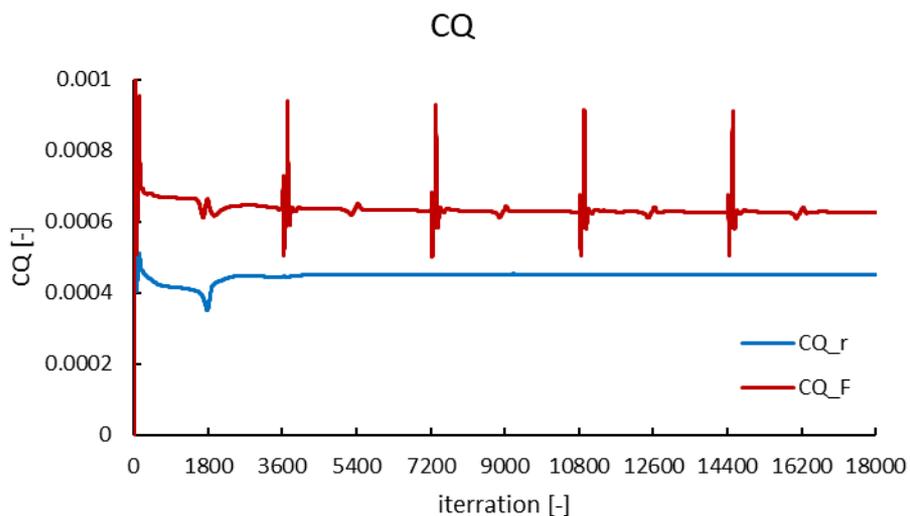
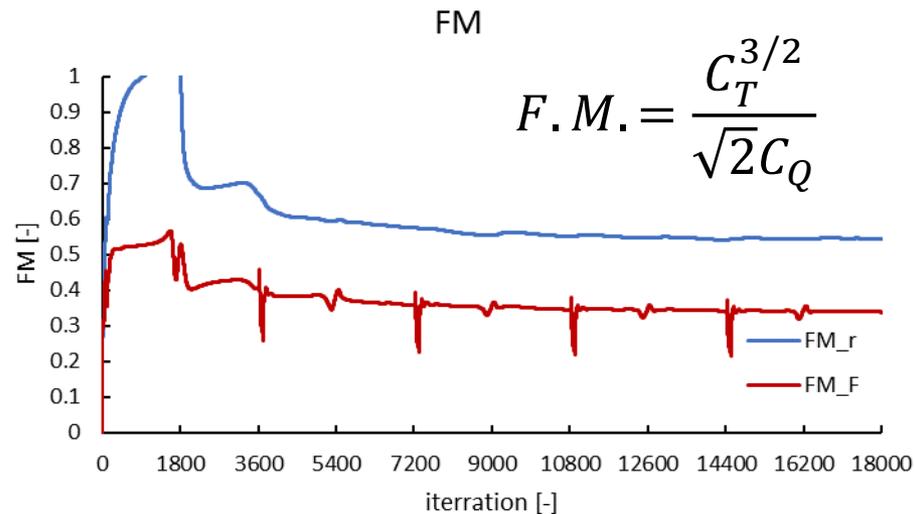
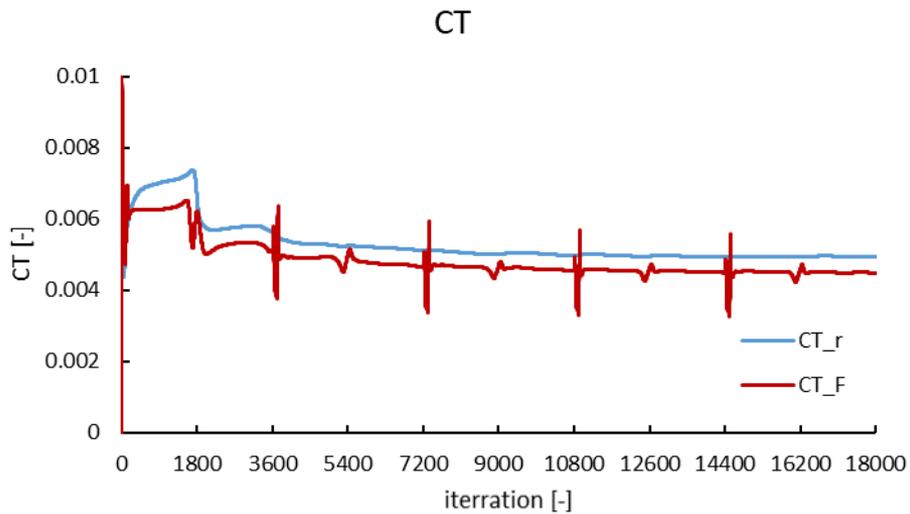
手法	rFlow3D	FaSTAR-Move
数値流束スキーム	SLAU	SLAU
空間高次精度化	物体格子 : MUSCL (2nd) 背景格子 : MUSCL FCMT (4th)	MUSCL (2nd)
勾配計算法	-	Weighted-GG
勾配制限関数	minmod	minmod
粘性流束	2次精度中心差分	2次精度中心差分
時間積分法	物体格子 : LU-SGS(Dual-time stepping, 2nd) 背景格子 : 2段ルンゲクッタ法	LU-SGS(Dual-time stepping, 2nd)
乱流モデル	SA-noft2	SA-noft2

計算手法

可能な限り同一の手法を選択した

手法	rFlow3D	FaSTAR-Move
数値流束スキーム	SLAU	SLAU
空間高次精度化	物体格子 : MUSCL (2nd) 背景格子 : MUSCL FCMT (4th)	MUSCL (2nd)
勾配計算法	-	Weighted-GG
勾配制限関数	minmod	minmod
粘性流束	2次精度中心差分	2次精度中心差分
時間積分法	物体格子 : LU-SGS(Dual-time stepping, 2nd) 背景格子 : 2段ルンゲクッタ法	LU-SGS(Dual-time stepping, 2nd)
乱流モデル	SA-noft2	SA-noft2

結果 | 空力係数



CT

値の大きさ自体はやや一致

CQ

比較的大きな差

FaSTAR-Move

一周 (3600step) ごとに値が振動

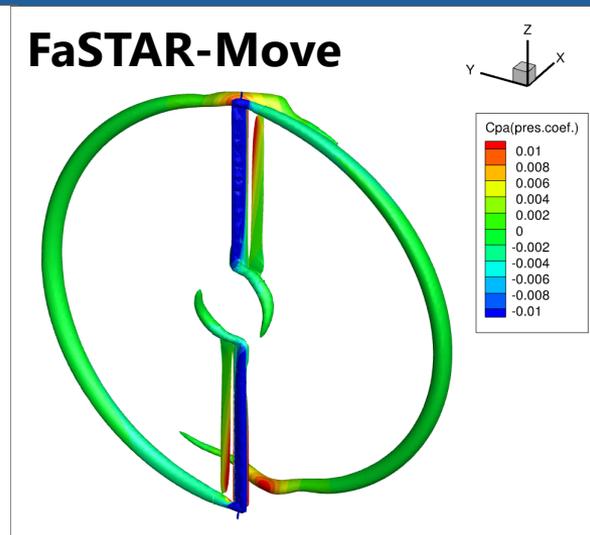
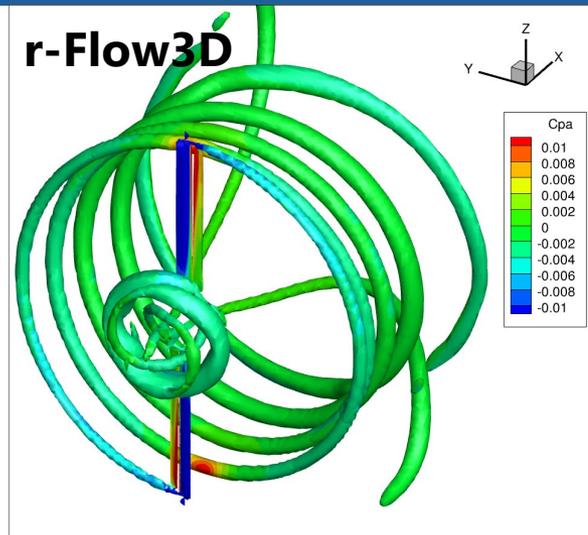
結果 | 渦構造

Q値 (Q=0.01等値面)

FaSTAR-Move

Q値を過小に評価

→空間精度の差,
非構造格子が原因か

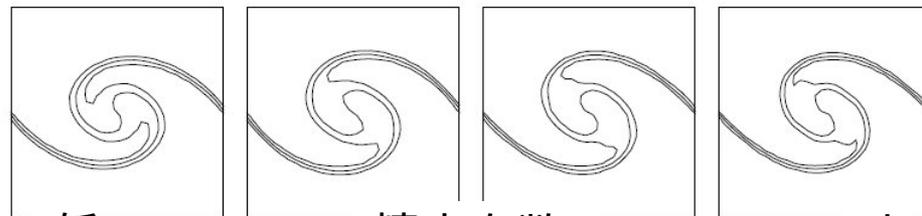


解を正確に解くために
必要な格子点数

非構造格子 > **構造**格子

渦ペアリング問題における
格子法による影響 [6] →

構造格子



非構造格子



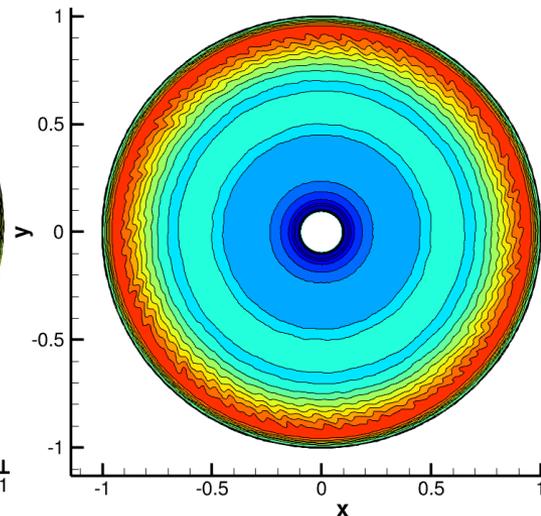
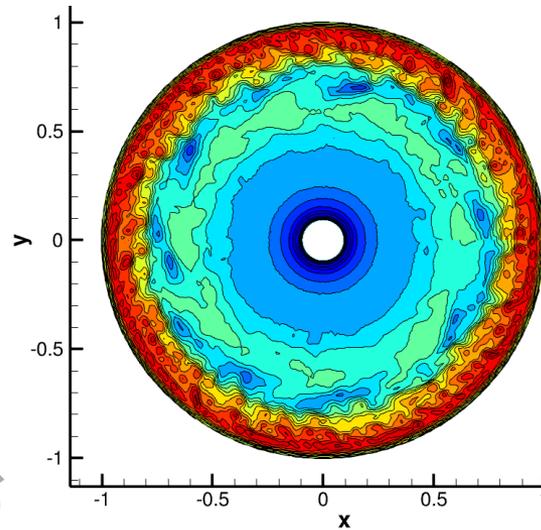
目次

● プロペラ・固定翼・胴体の空力干渉(eVTOL)

- 背景・目的

- 研究手法

- 結果（時間平均場）

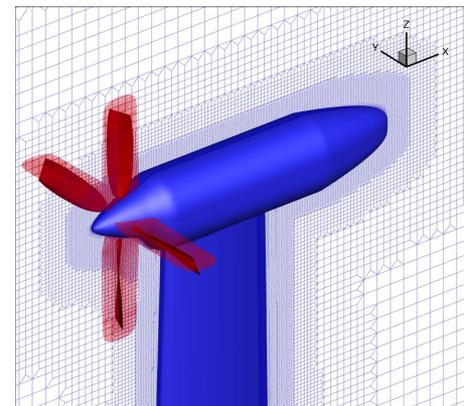


● 同一の回転翼計算にお

rFolw3DとFaSTAR-Moveの比較

● 当研究室における

rFolw3D・FaSTAR-Moveの活用事例紹介



事例 | 同軸反転ロータの振動

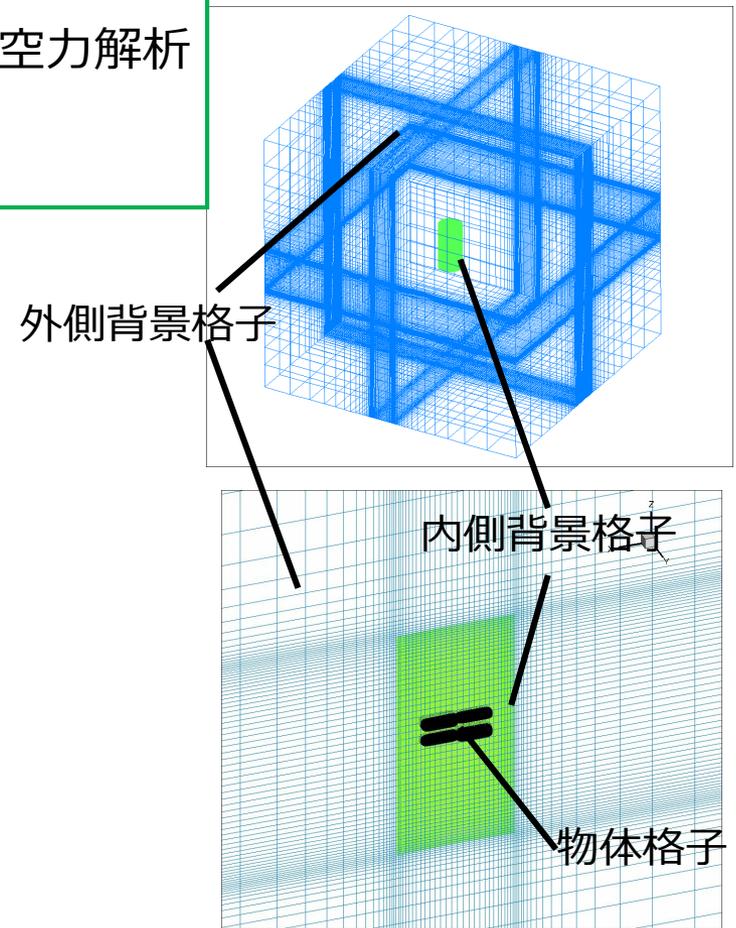
目的

低レイノルズ数領域における同軸反転ロータの空力解析

- ・空力干渉が振動に与える影響
- ・ロータ間距離による振動の変化

条件

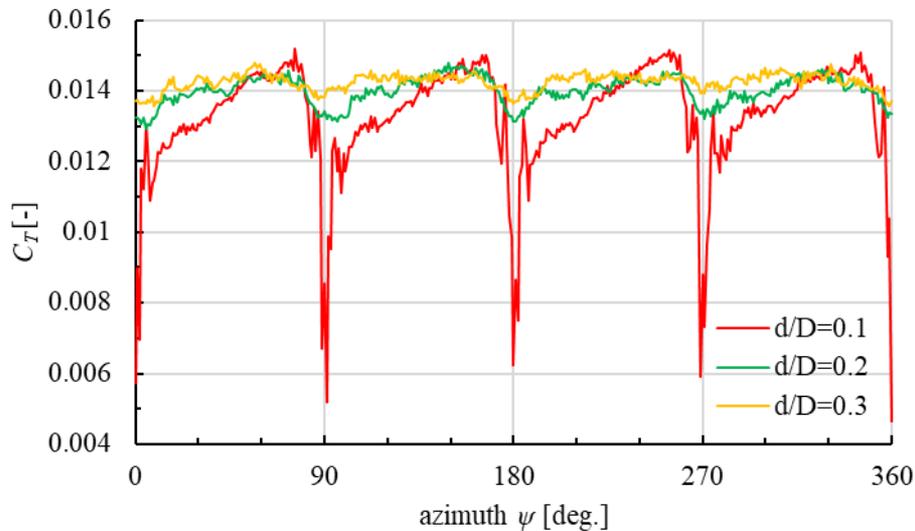
翼型	平板翼
ロータ半径R [m]	0.137
ロータ直径D [m]	0.274
ロータ間距離d [m]	0.1D,0.2D,0.3D
回転速度 [rpm]	500
レイノルズ数(75%位置)	1.1×10^4
ピッチ角[deg.]	15
翼端マッハ数	0.02108



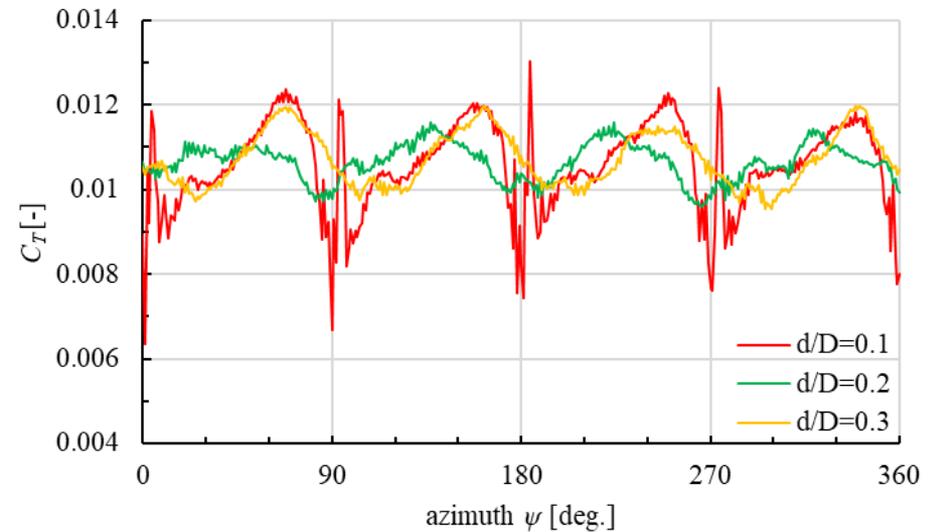
事例 | 同軸反転ロータの振動

結果

- ・ 上側ロータではロータ間距離が大きくなるにつれて振動が減少
- ・ 下側ロータでは振動が単調に減少する傾向は確認されなかった
- ・ 圧力場の干渉による影響、後流の干渉による影響を確認



Upperロータ



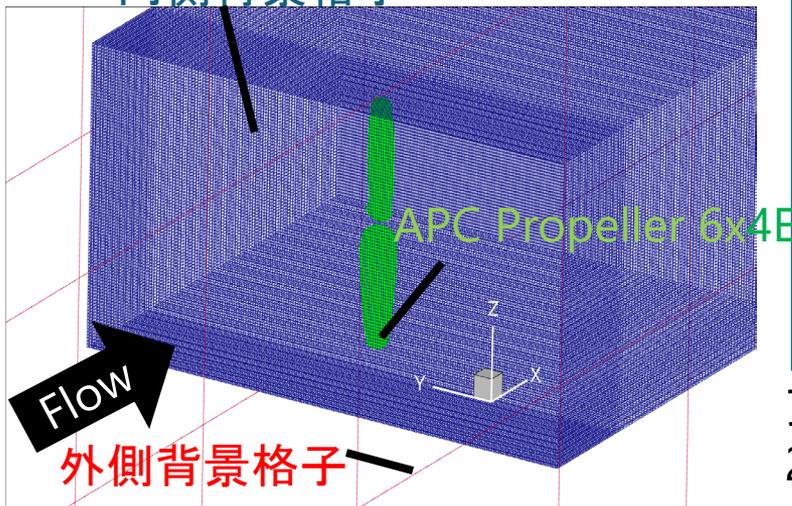
Lowerロータ

事例 | 回転翼の圧縮性効果

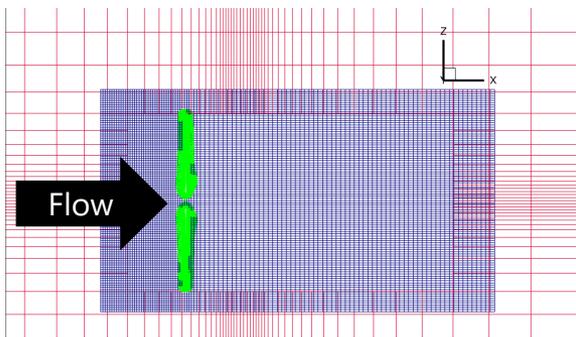
風洞スケール・実機スケールを比較し、プロペラ翼端付近の圧縮性の影響を調査

計算対象

内側背景格子



外側背景格子



側面図

計算条件

レイノルズ数 Re_c	: 1.8×10^4 (@75% span)
一様流速[m/s]	: 9.0 (45)
迎角 α [deg.]	: 0
プロペラ回転数 n [rpm]	: 4500
プロペラ進行率 J	: 0.8
プロペラ翼端マッハ数	: 0.10 (0.52)

ブレード2枚のプロペラ +
2つの背景格子

(括弧内は実機スケール)

風洞実験スケールの数値計算と

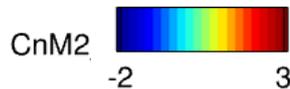
- 物体のスケール変更 (5倍, 実機スケール)
- 一様流密度・速度をそれぞれ $1/25 \cdot 5$ 倍の計算を比較.

→実機スケールでは翼端付近は高マッハ数

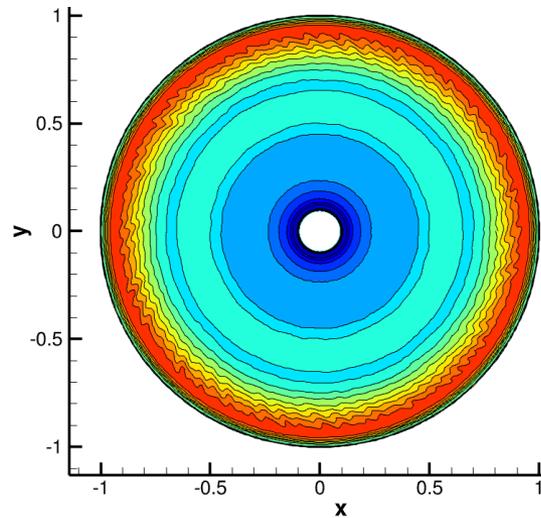
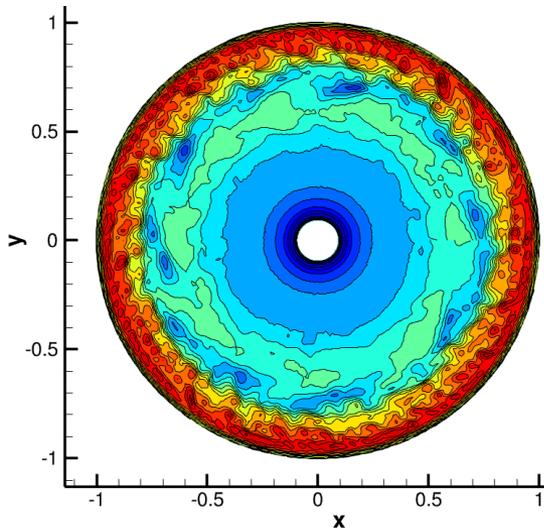
事例 | 回転翼の圧縮性効果

風洞スケール・実機スケールを比較し、プロペラ翼端付近の圧縮性の影響を調査

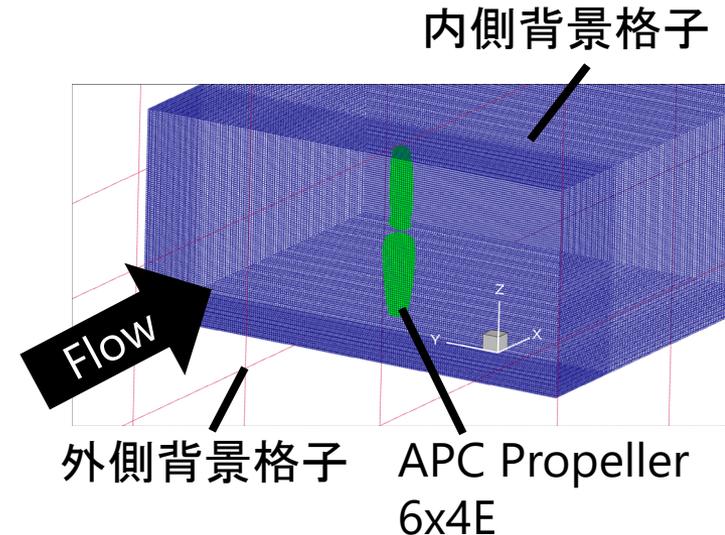
風洞スケール



実機スケール



プロペラ回転面の法線力係数分布



- ✓ 実機スケールでは圧縮性が剥離せん断層を安定化させ、プロペラの振動が弱まることを明らかにした。

事例 | プロペラ・固定翼干渉

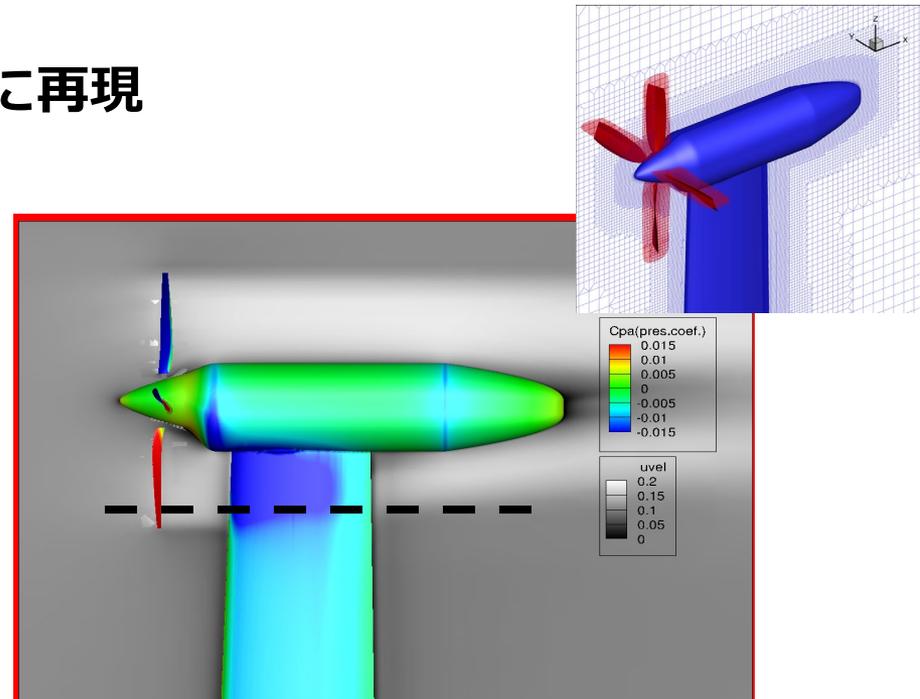
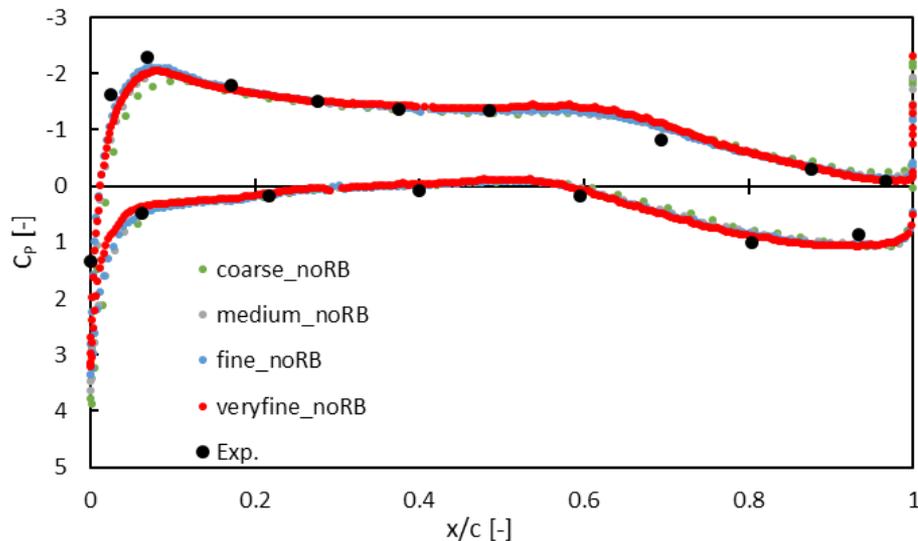
- プロペラ・固定翼統合モデルにおける空力干渉の数値解析

ソルバ : Fastar-Move

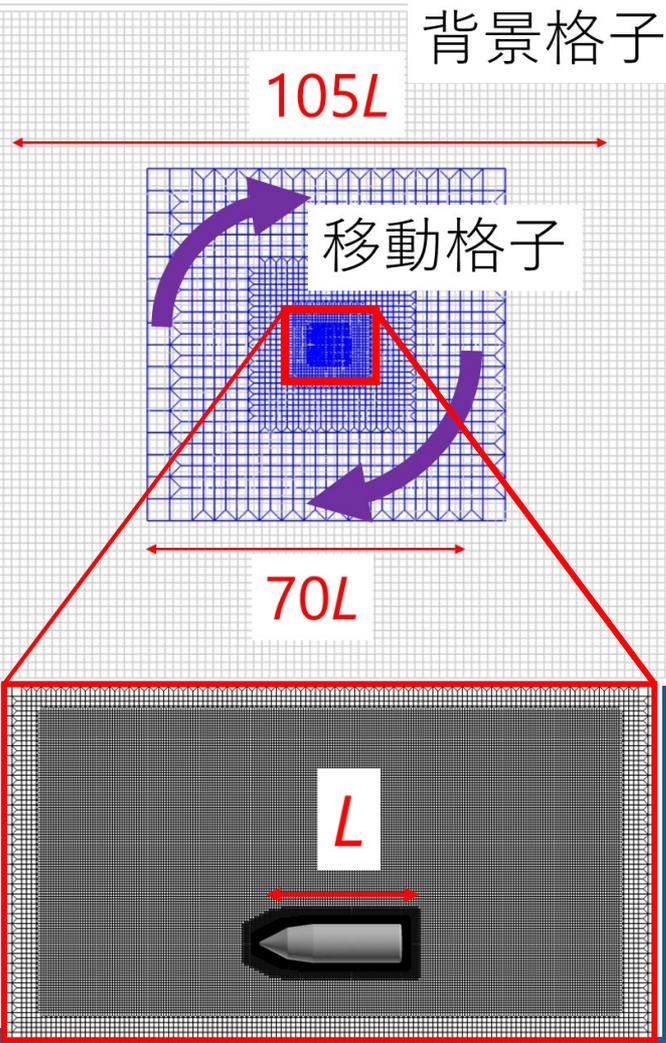
AIAA workshopで取り上げられた、プロペラ・固定翼における空力干渉を計算

(Hooker, J et al.: Overview of Low Speed Wind Tunnel Testing Conducted on a Wingtip Mounted Propeller for the Workshop for Integrated Propeller Prediction, AIAA Paper 2020-2673, 2020.)

プロペラ後流中の固定翼表面圧力を良好に再現

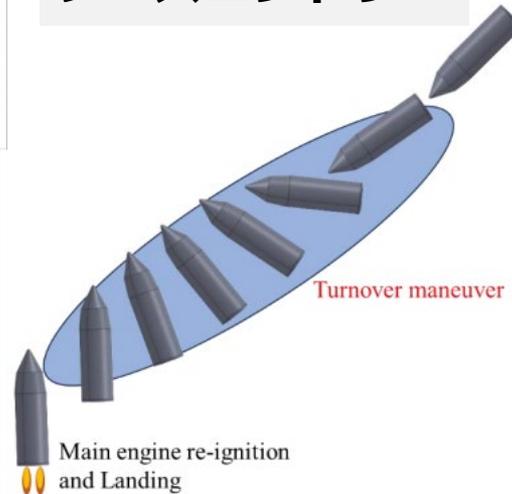


事例 | ロケットの帰還飛行



計算条件	静的計算	動的計算
マッハ数	0.032	
レイノルズ数	4.3×10^5	
迎角	0~180度の範囲にて10度刻み	0~180度の連続変化
転回速度	0[deg/sec] $k=0[-]$	16.7[deg/sec] $k=0.007[-]$

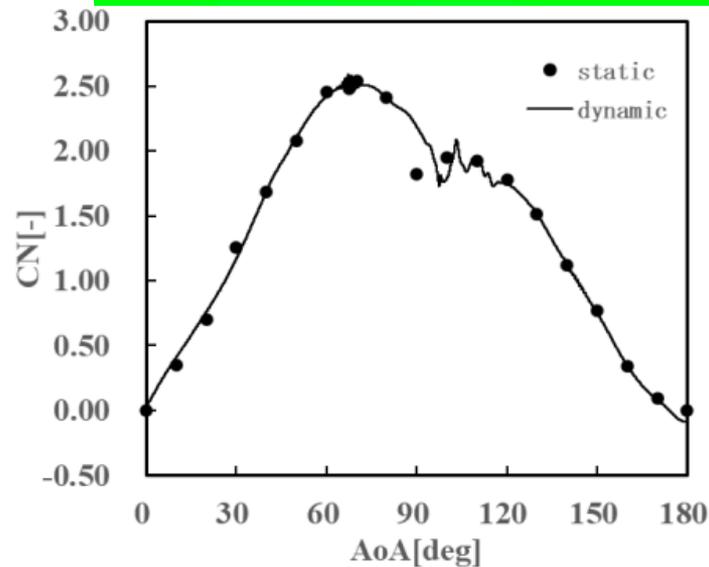
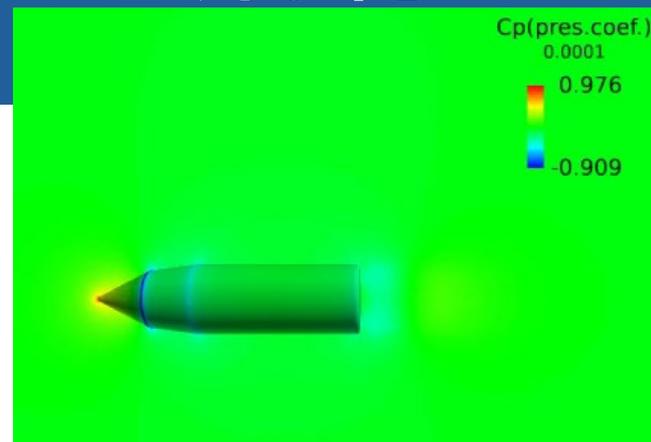
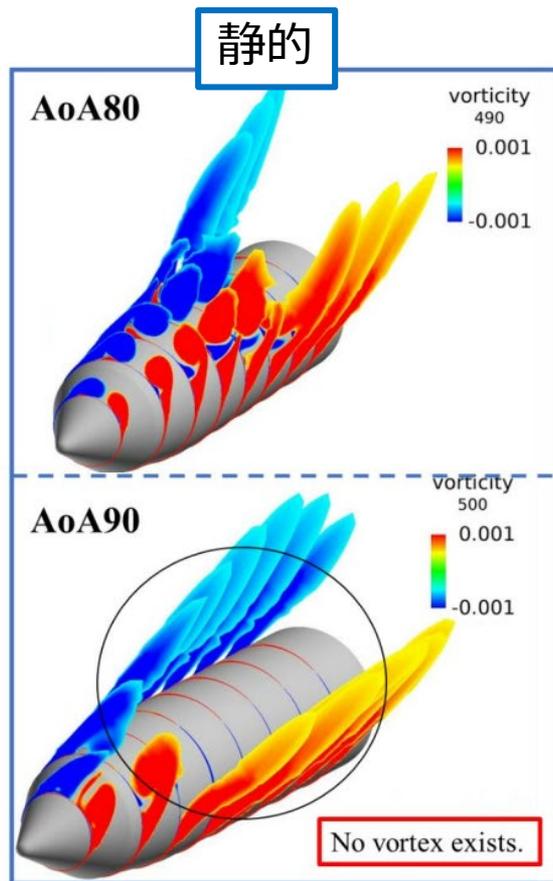
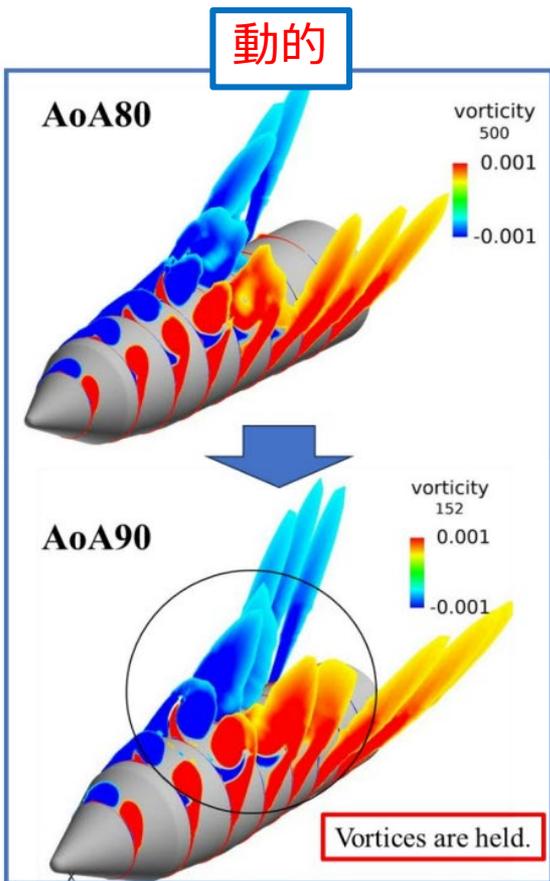
ノーズエントリー



機体全長 L : 570[mm]
 転回中心位置 : $0.6L$
 解析ソルバ : FaSTAR-Move

k : 一様流速に対する転回速度
 本研究における転回速度は
 一様流速の0.7%にあたる

事例 | ロケットの帰還飛行



迎角90度において動的のみ双子渦が保持される
→ 転回により前の迎角の流れ場の影響を受ける

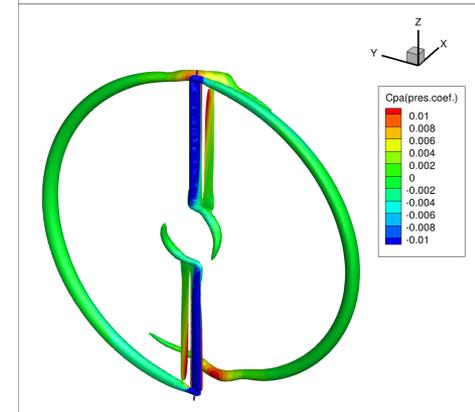
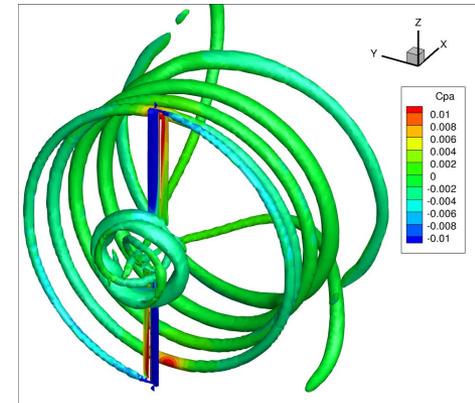
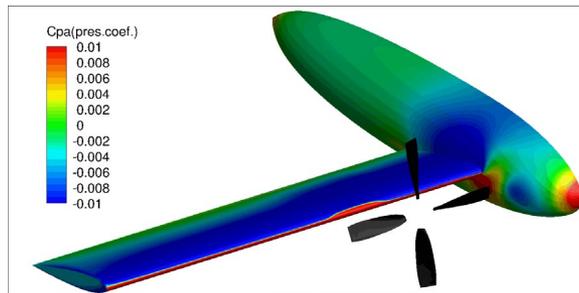
目次

● プロペラ・固定翼・胴体の空力干渉(eVTOL)

- 背景・目的

- 研究手法

- 結果（時間平均場）



- 同一の回転翼計算における
rFolw3DとFaSTAR-Moveの比較

- 当研究室における
rFolw3D・FaSTAR-Moveの活用事例紹介