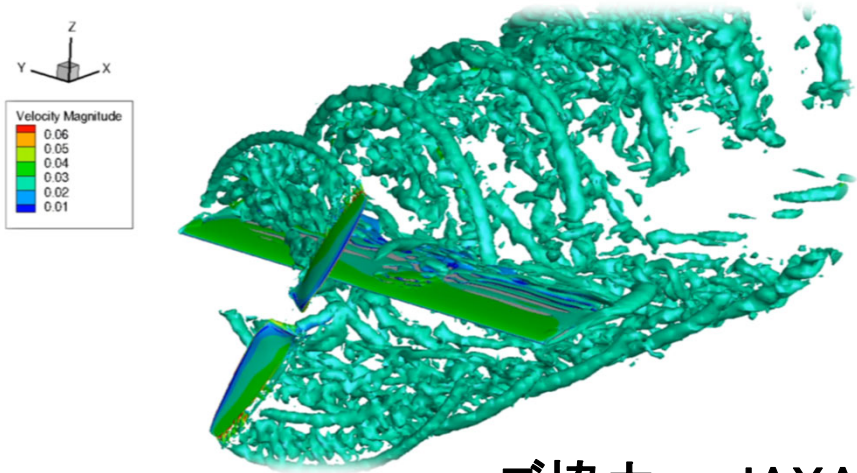


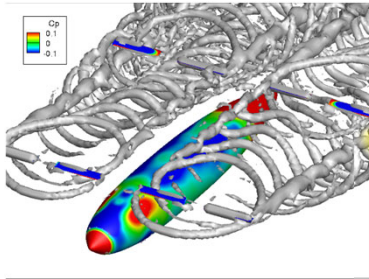
rFlow3Dの非定常数値解の再現性について

横浜国立大学 北村研究室 佐藤 颯斗, ○北村 圭一

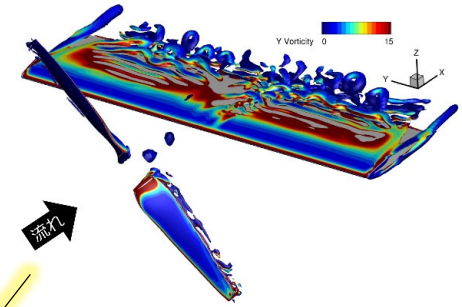


ご協力： JAXA 田辺 安忠 様, 菅原 瑛明 様

eVTOLの空力設計を支える 要素技術研究



回転翼・胴体
干渉

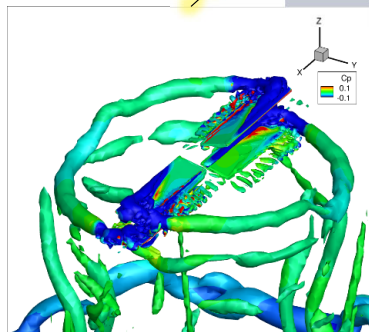


回転翼・固定翼
干渉

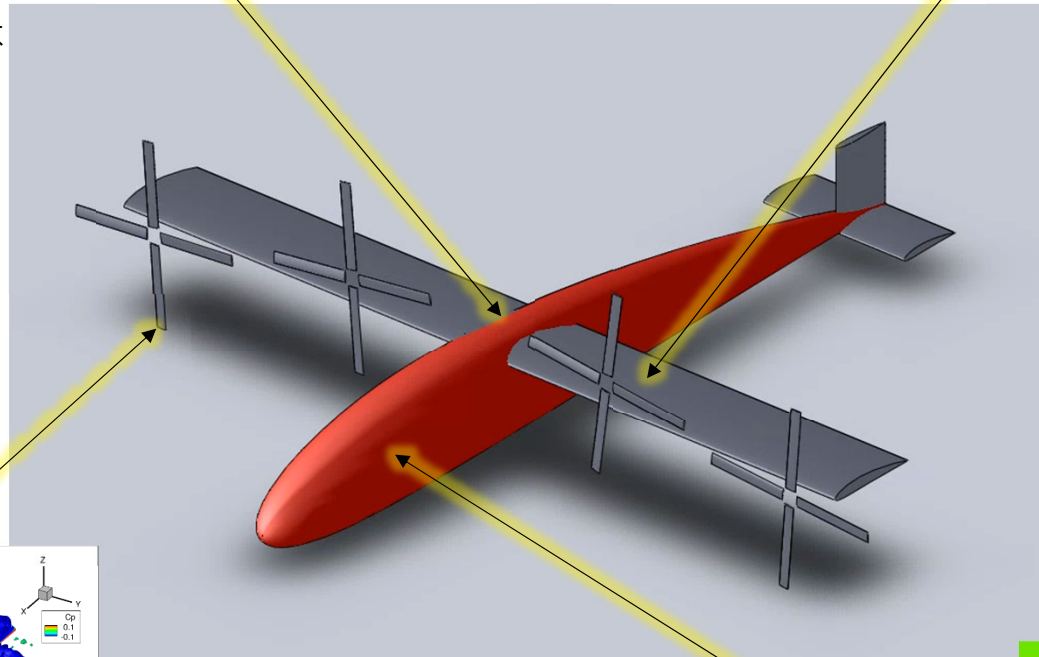
- ・ JAXA嶋博士
- ・ JAXA大山研
- ・ 東北大 永井研
等との共同研究

助成

- ・ NEDO (2021-22)
- ・ 東北大学流体研(2021-23)
- ・ JKA (2024)
- ・ S財団 (2025-26)

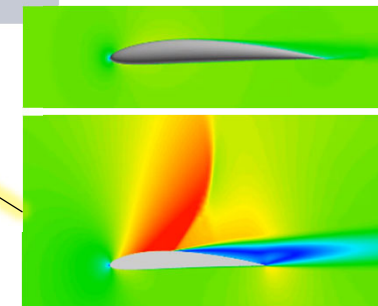


回転翼自体の空力

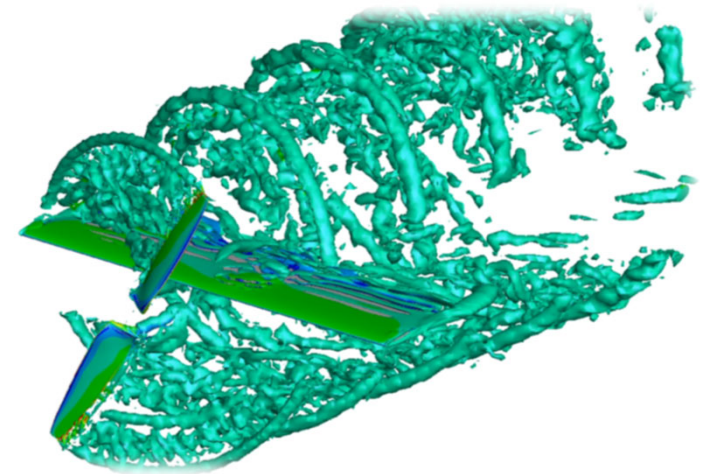
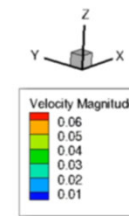


(解説記事) 北村圭一: [空飛ぶクルマに関する空気力学研究と欧州の近況について](#),
ながれ, Vol.43 (2024), pp.3-8.

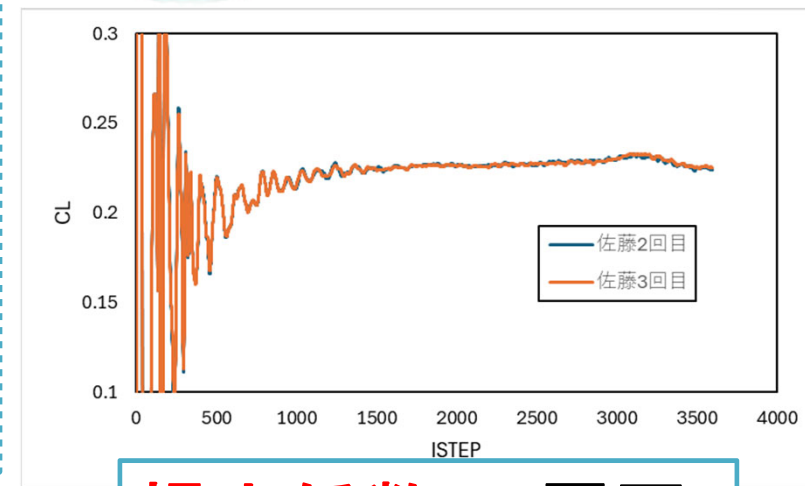
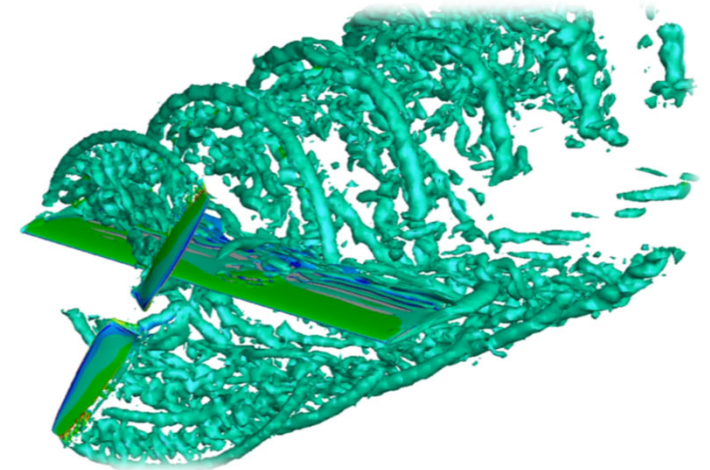
胴体形状



- 背景
- 計算方法
- 空力係数の比較について
 - ✓ 無回転
 - ✓ 完全乱流モデル
 - ✓ 時間刻み1/10
- 内部残差履歴
- ズレが生まれ始める値の気づき



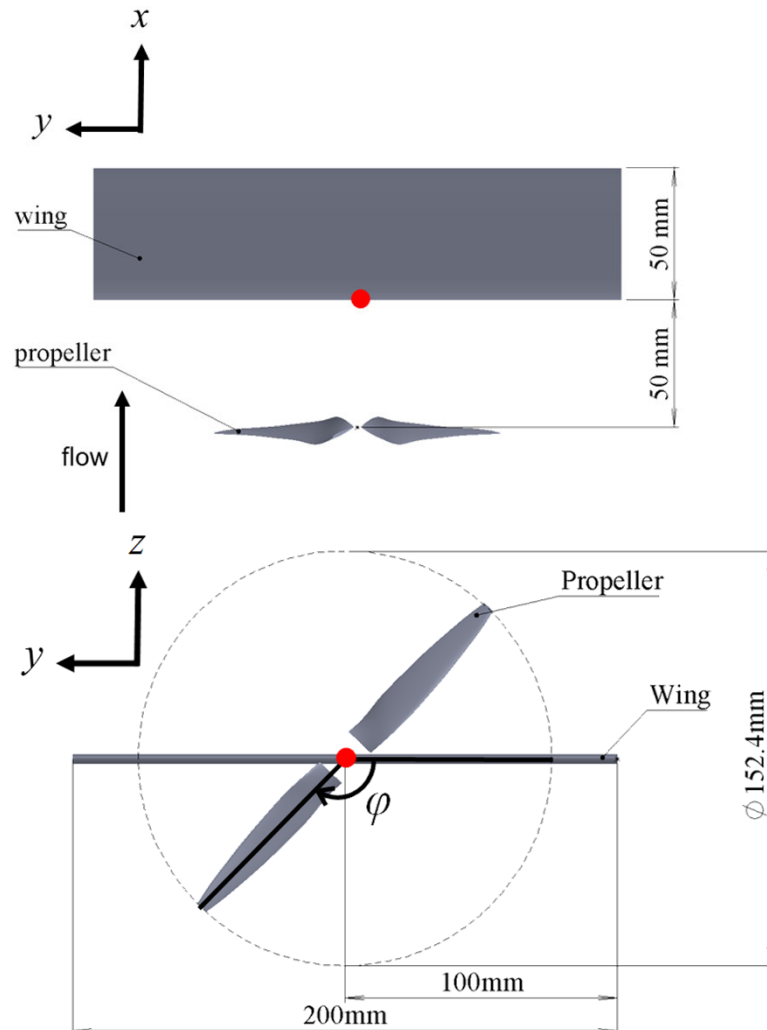
- 対象 「Tractor型の回転翼＋固定翼」
- 引継ぎの一環として、先行研究[1]の計算再現
- 似た結果は得られるが完全一致にいたらず原因調査
- 全く同じセットアップで2回計算⇒ズレが発生
- さらなる原因調査のため
 - 回転 ⇒ 無回転
 - 乱流モデル＋遷移モデル ⇒ 完全乱流モデル
 - 時間刻み1/10



揚力係数CL履歴

計算方法(標準計算)

5/29



翼型

固定翼 : NACA0012翼

プロペラ : APCプロペラ 6×4E

計算条件

レイノルズ数 Re : 3.0×10^4

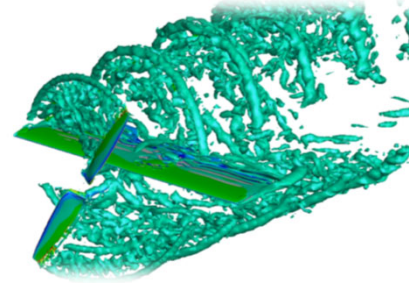
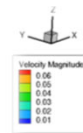
一様流速 V [m/s] : 9.0

迎角 α [deg.] : 4

プロペラ回転数 n [rpm] : 4500

プロペラ進行率 J : 0.8

弱 → 推力 → 強



進行率 J : プロペラの作動状態を表す

$$J = \frac{V}{nD}$$

n : プロペラ回転数
 D : プロペラ直径

計算方法(標準計算)

6/29

✓ 計算手法

ソルバ : rFlow3D

支配方程式 : 圧縮性NS方程式

数値流束 : mSLAU (modified SLAU)

乱流モデル : **SST-2003** , 遷移モデル : $\gamma - Re_{\theta t}$

時間積分 : (背景格子)4次精度4段階ルンゲクッタ陽解法

: (物体格子)2次精度Dual Time Stepping/LU-SGS陰解法

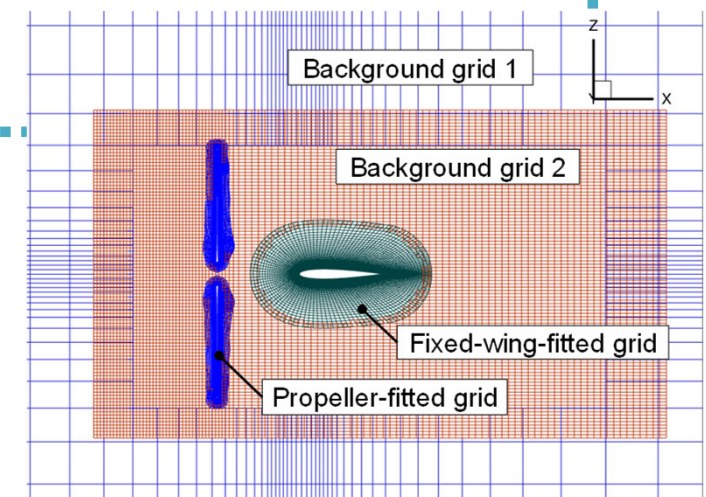
制限関数 : minmod

空間精度 : Fourth Order Compact MUSCL TVD

✓ 計算格子

移動重合格子法 : 計4種類の格子を重合

Medium : 約2,300万セル



計算結果

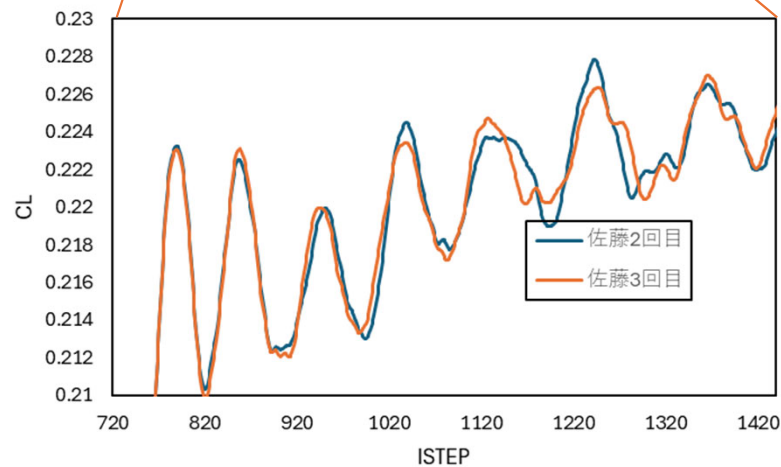
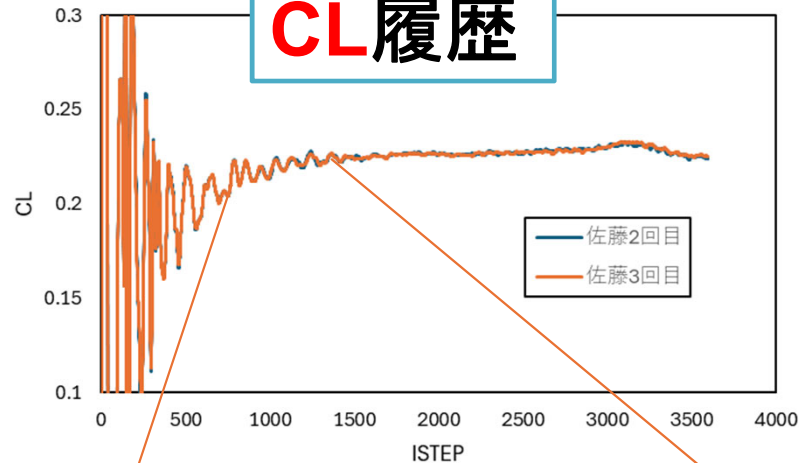
- 標準計算
- 無回転
- 完全乱流モデル(遷移モデルなし)
- 時間刻み1/10

空力係数比較

佐藤2回目 36並列

佐藤3回目 36並列

CL履歴

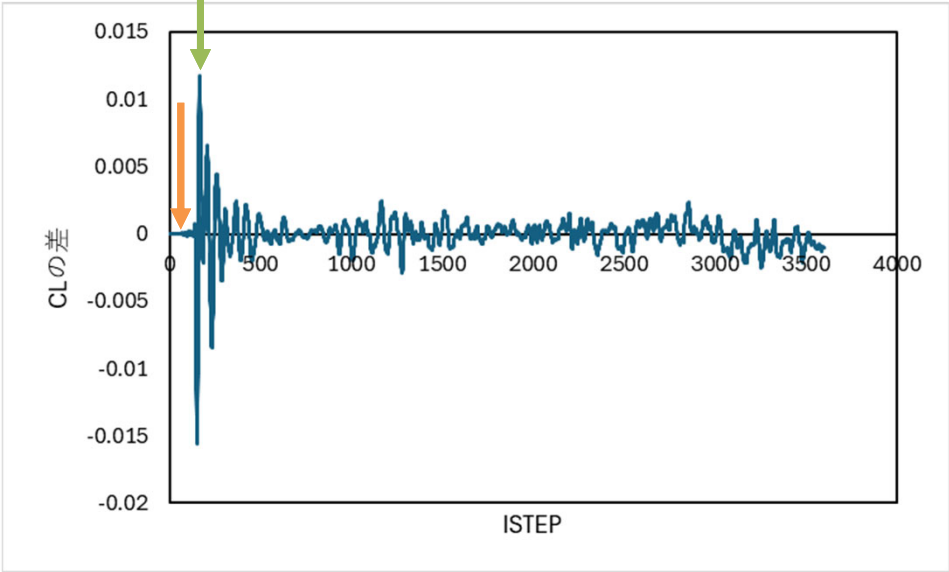


- ✓ 佐藤2回目と佐藤3回目で条件を全く揃えたにもかかわらず異なる結果となった.
- ✓ PC, 並列数, 格子, インプットファイル等同じ. (コピー)

➤ 概ねの傾向は合っているものの計算する度に異なる結果を得ることとなる.

空力係数比較佐藤2と佐藤3

2		佐藤2回目	佐藤3回目	佐藤2-佐藤3	
3	ISTEP	L05_36並列	L05_36並列	差	差の絶対値
4	0	0	0	0	0
5	1	9.995304513	9.995304513	0	0
6	2	9.708969045	9.708969045	0	0
7	3	9.413526759	9.413526759	0	0
8	4	9.112498118	9.112498118	0	0
9	5	8.812257645	8.812257645	0	0
10	6	8.512211656	8.512211656	0	0
11	7	8.212124629	8.212124629	0	0
12	8	7.913517343	7.913517343	0	0
13	9	7.616964981	7.616964981	0	0
14	10	7.322520681	7.322520681	0	0
15	11	7.030297257	7.030297257	0	0
16	12	6.740680153	6.740680153	0	0
17	13	6.454092601	6.454092601	0	0
18	14	6.170457717	6.170457717	0	0
19	15	5.889759292	5.889759292	0	0
20	16	5.612080369	5.612080369	0	0
21	17	5.337321612	5.337321612	0	0
22	18	5.065552653	5.065552653	0	0
23	19	4.796957153	4.796957153	0	0
24	20	4.531363882	4.531363882	0	0
25	21	4.26893102	4.26893102	0	0
26	22	4.009521768	4.009521768	0	0
27	23	3.753282654	3.753282654	-2.03241E-10	2.03241E-10
28	24	3.500405939	3.50040594	-2.03241E-10	2.03241E-10
29	25	3.250812983	3.250812983	2.03241E-10	2.03241E-10

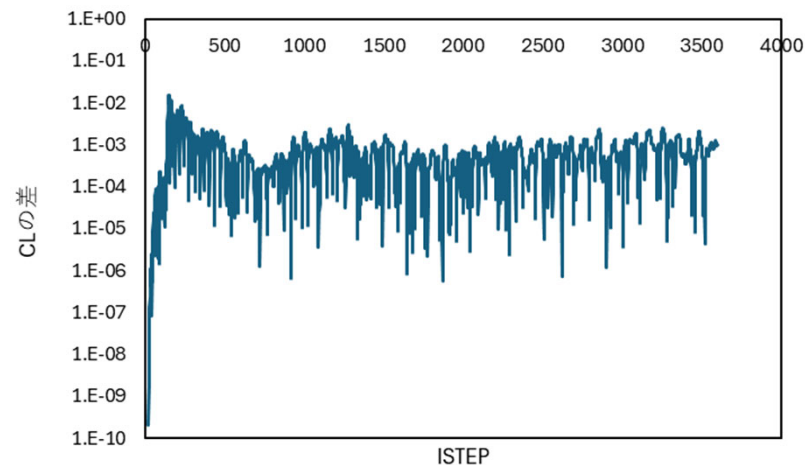
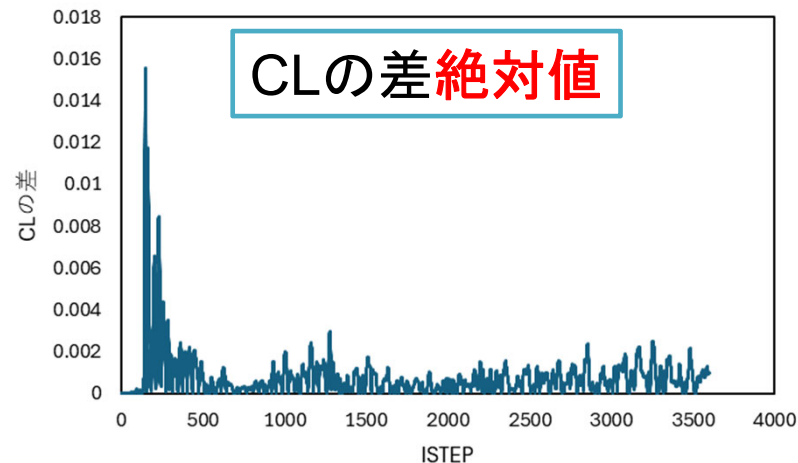


- ✓ 23ステップ目で 10^{-10} のズレが出始めている.
- ✓ 160ステップ目では 10^{-2} ほどのズレ

Excel出力最初の25ステップ

空力係数比較佐藤2と佐藤3

10/29



✓ 全く同じ条件でこれだけのズレが生まれてしまった.

✓ 小さい桁から徐々に大きくなっている.

✓ $1\text{E}-3 \sim 1\text{E}-4$ あたりで停滞

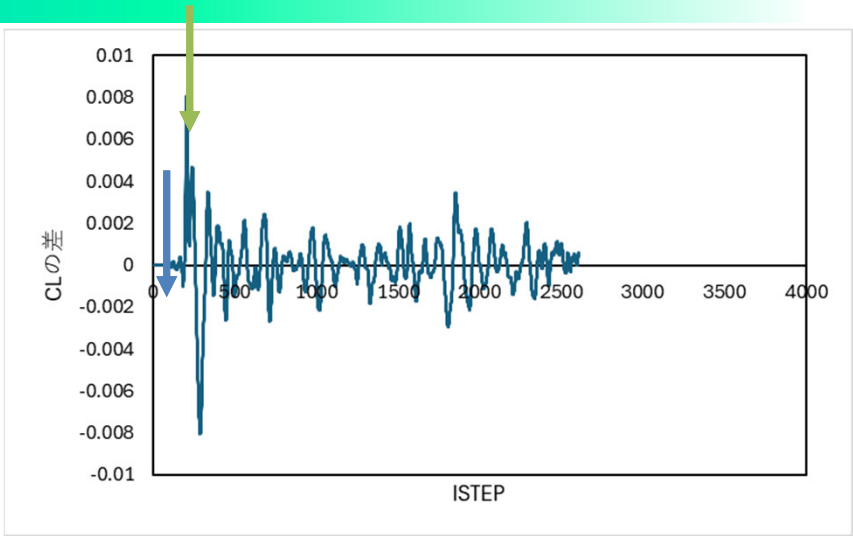
計算結果

- 標準計算
- 無回転
- 完全乱流モデル(遷移モデルなし)
- 時間刻み1/10

空力係数比較無回転

12/29

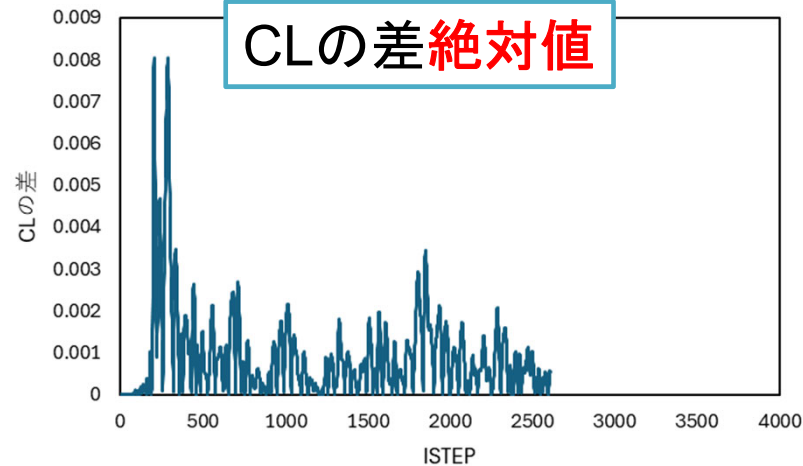
2		佐藤0回転1回目	佐藤0回転2回目	佐藤2-佐藤3		
3	ISTEP	L05_36並列	L05_36並列	差	差の絶対値	
4	0	0	0	0	0	
5	1	10.06197456	10.06197456	0	0	
6	2	9.833296471	9.833296471	0	0	
7	3	9.606536428	9.606536428	0	0	
8	4	9.372097962	9.372097962	0	0	
9	5	9.135744642	9.135744642	0	0	
10	6	8.899920085	8.899920085	0	0	
11	7	8.664313636	8.664313636	0	0	
12	8	8.428900508	8.428900508	0	0	
13	9	8.193297429	8.193297429	0	0	
14	10	7.958652381	7.958652381	0	0	
15	11	7.725320951	7.725320951	0	0	
16	12	7.493367565	7.493367565	0	0	
17	13	7.262697538	7.262697538	0	0	
18	14	7.033403698	7.033403698	0	0	
19	15	6.805689132	6.805689132	0	0	
20	16	6.579821119	6.579821119	0	0	
21	17	6.355778359	6.355778359	0	0	
22	18	6.133570651	6.133570651	0	0	
23	19	5.913102532	5.913102532	0	0	
24	20	5.694559839	5.694559839	0	0	
25	21	5.477823343	5.477823343	0	0	
26	22	5.26287344	5.26287344	0	0	
27	23	5.049835534	5.049835534	0	0	
28	24	4.838731312	4.838731312	0	0	
29	25	4.629470265	4.629470265	0	0	
30	26	4.422130024	4.422130024	-2.03241E-10	2.03241E-10	
31	27	4.216659899	4.216659899	-2.03242E-10	2.03242E-10	
32	28	4.0131073	4.0131073	0	0	



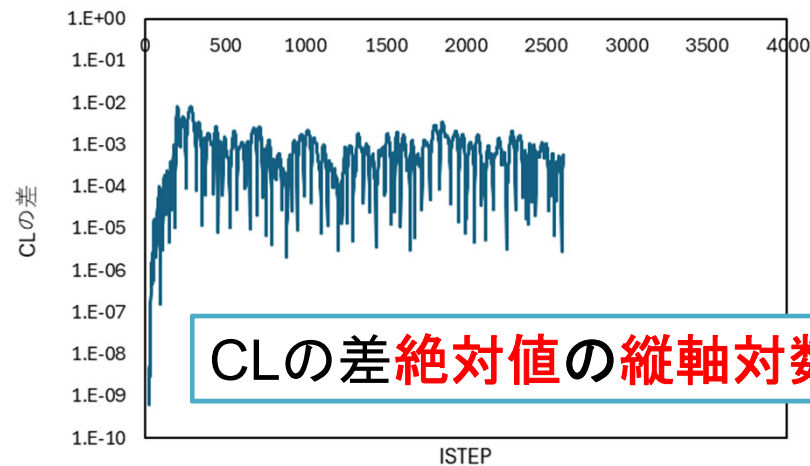
✓ 26ステップ目で 10^{-10} のズレが出始めている。
207ステップ目では 10^{-2} ほどのズレ

➤ ズレが出ることに変わりなかった。
出始めるステップ数もランダム

Excel出力最初の30ステップ



- ✓ 無回転でも同様に
- ✓ 小さい桁から徐々に大きくなっていることを確認.
- ✓ ここでも $1\text{E}-3 \sim 1\text{E}-4$ あたりで停滞していることを確認.



- 無回転でもズレが出てしまっていることから、回転する物体格子と背景格子のセル間での値の受け渡しの影響ではないことが考えられる.

計算結果

- 標準計算
- 無回転
- 完全乱流モデル(遷移モデルなし)
- 時間刻み1/10

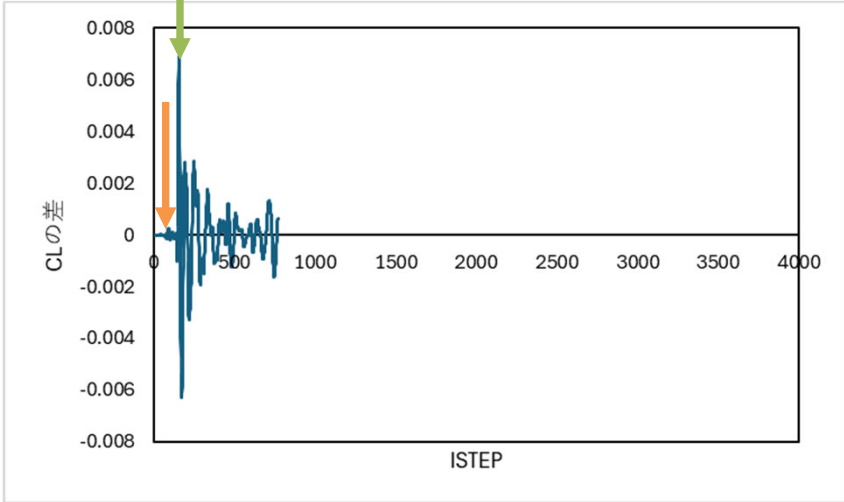
空力係数比較遷移モデル無し

最初の30ステップ

15/29

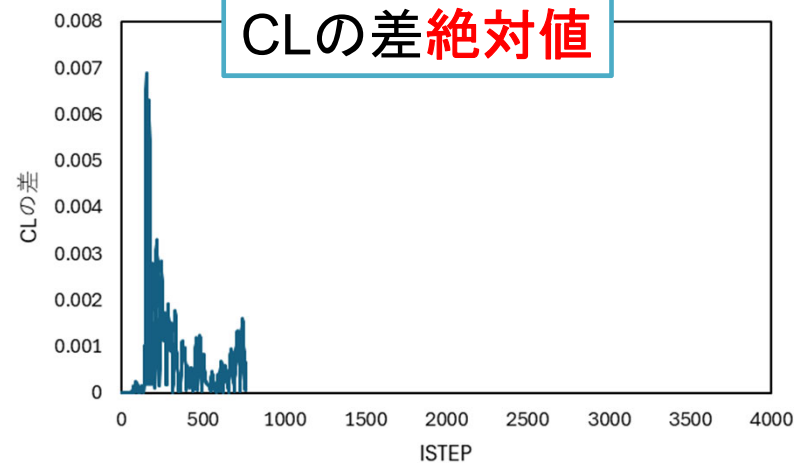
NO_trans1		NO_trans2		1-2	
1回目		2回目		1-2	
ISTEP	L05_36並列	L05_36並列	差	差の絶対値	
0	0	0	0	0	0
1	9.995304484	9.995304484	0	0	0
2	9.708969045	9.708969045	0	0	0
3	9.41352679	9.41352679	0	0	0
4	9.112498121	9.112498121	0	0	0
5	8.81225762	8.81225762	0	0	0
6	8.512211632	8.512211632	0	0	0
7	8.212124636	8.212124636	0	0	0
8	7.913517323	7.913517323	0	0	0
9	7.616964963	7.616964963	0	0	0
10	7.322520693	7.322520693	0	0	0
11	7.030297272	7.030297272	0	0	0
12	6.74068014	6.74068014	0	0	0
13	6.45409259	6.45409259	0	0	0
14	6.170457708	6.170457708	0	0	0
15	5.889759314	5.889759314	0	0	0
16	5.612080391	5.612080391	0	0	0
17	5.337321667	5.337321667	0	0	0
18	5.065552651	5.065552651	0	0	0
19	4.796957151	4.796957151	0	0	0
20	4.531363853	4.531363853	0	0	0
21	4.268931091	4.268931091	0	0	0
22	4.009521817	4.009521817	0	0	0
23	3.753282603	3.753282603	2.03241E-10	2.03241E-10	
24	3.500405768	3.500405768	4.06482E-10	4.06482E-10	
25	3.250812517	3.250812517	4.06482E-10	4.06482E-10	
26	3.004634076	3.004634076	1.21945E-10	1.21945E-10	
27	2.762048122	2.762048121	1.54477E-09	1.54477E-09	
28			E-08	1.57318E-08	
29			E-08	4.51425E-08	
30			E-08	7.685E-08	

Excel出力

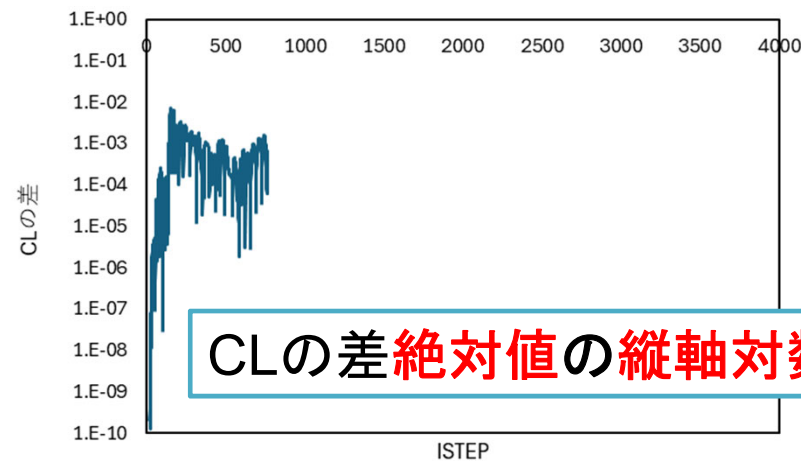


- ✓ 23ステップ目で 10^{-10} のズレが出始めている。
- ✓ 170ステップ目では 10^{-3} ほどのズレ

➤ ズレが出ることに変わりなかった. 出始めるステップ数もランダム(20~30stepあたり)



- ✓ 遷移モデル無しでも同様に
- ✓ 小さい桁から徐々に大きくなっていることがわかる。
- ✓ $1\text{E}-3 \sim 1\text{E}-4$ あたりで停滞し始めていることがわかる。



➤ 遷移モデルの有無も関係ない

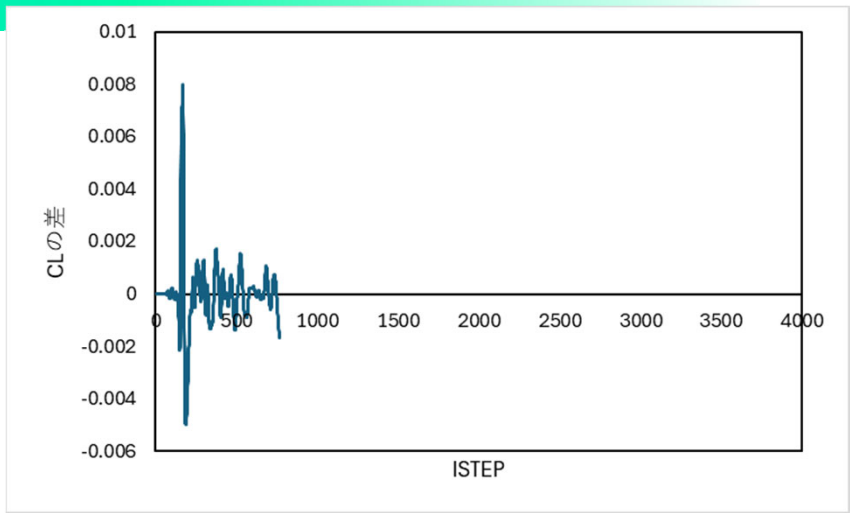
計算結果

- 標準計算
- 無回転
- 完全乱流モデル(遷移モデルなし)
- 時間刻み1/10

空力係数比較時間刻み1/10

1回目		2回目	1-2	
IST	縦(値) 軸目盛線並列	L05_36並列	差	差の絶対値
0	0	0	0	0
1	9.995304513	9.995304513	0	0
2	9.708969045	9.708969045	0	0
3	9.413526759	9.413526759	0	0
4	9.112498118	9.112498118	0	0
5	8.812257645	8.812257645	0	0
6	8.512211656	8.512211656	0	0
7	8.212124629	8.212124629	0	0
8	7.913517343	7.913517343	0	0
9	7.616964981	7.616964981	0	0
10	7.322520681	7.322520681	0	0
11	7.030297257	7.030297257	0	0
12	6.740680153	6.740680153	0	0
13	6.454092601	6.454092601	0	0
14	6.170457717	6.170457717	0	0
15	5.889759292	5.889759292	0	0
16	5.612080369	5.612080369	0	0
17	5.337321612	5.337321612	0	0
18	5.065552653	5.065552653	0	0
19	4.796957153	4.796957153	0	0
20	4.531363882	4.531363882	0	0
21	4.26893102	4.26893102	0	0
22	4.009521768	4.009521768	0	0
23	3.753282654	3.753282654	-2.03241E-10	2.03241E-10
24	3.50040594	3.50040594	0	0
25	3.250	3.250	10	2.03242E-10

Excel出力



- ✓ 時間刻みを1/10にしてもズレが出始めるステップ数が10倍 (20～30stepあたりから200～300step) とはならなかった.
 - ✓ 23ステップ目で 10^{-10} のズレが出始めていることに変わりなかった。
- ただ気付いた点としてすべて 2.03241E-10からズレが始まっている

その他

- 内部反復残差履歴
- ズレが生まれる値の気づき

20/29

内部反復の残差は下がってることを確認



ズレが生まれる値の気づき

✓ すべて±2.03241E-10からズレが始まっている

26	22	4.009521768	4.009521768	0	0
27	23	3.753282654	3.753282654	-2.03241E-10	2.03241E-10
28	24	3.500405939	3.50040594	-2.03241E-10	2.03241E-10
29	25	3.250812983	3.250812983	2.03241E-10	2.03241E-10

佐藤2回目3回目。23stepから
-2.0324142369077E-10

26	22	5.26287344	5.26287344	0	0
27	23	5.049835534	5.049835534	0	0
28	24	4.838731312	4.838731312	0	0
29	25	4.629470265	4.629470265	0	0
30	26	4.422130024	4.422130024	-2.03241E-10	2.03241E-10
31	27	4.216659899	4.216659899	-2.03242E-10	2.03242E-10
32	28	4.0131073	4.0131073	0	0
33	29	3.811570381	3.811570381	6.09724E-10	6.09724E-10

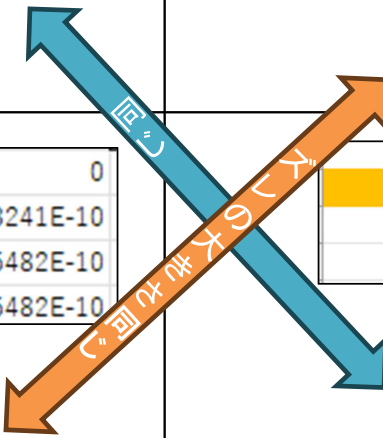
無回転。26stepから
-2.0324097960156E-10

22	4.009521817	4.009521817	0	0
23	3.753282603	3.753282603	2.03241E-10	2.03241E-10
24	3.500405768	3.500405768	4.06482E-10	4.06482E-10
25	3.250812517	3.250812517	4.06482E-10	4.06482E-10

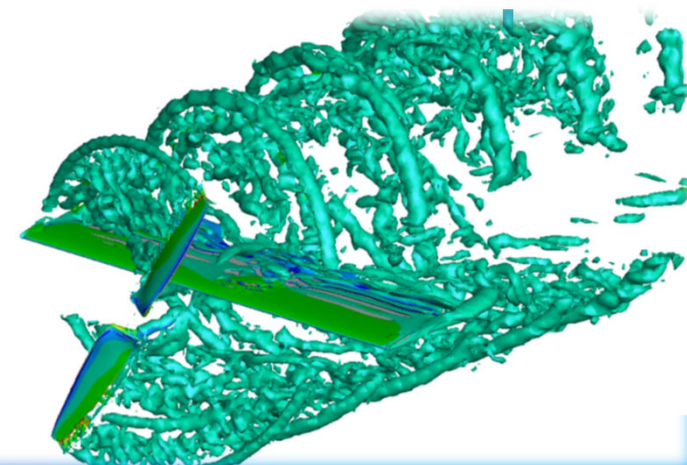
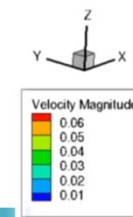
遷移モデル無し。23stepから
2.0324097960156E-10

22	4.009521768	4.009521768	0	0
23	3.753282654	3.753282654	-2.03241E-10	2.03241E-10
24	3.50040594	3.50040594	0	0
25	3.250812984	3.250812983	2.03242E-10	2.03242E-10

時間刻み1/10。23stepから
-2.0324142369077E-10



- 計算条件を全く同じにしても、計算する度に数値結果にズレが生まれる $10^{-3} \sim 10^{-4}$ のズレは毎回出てしまうもの.
- 無回転でもズレ. 物体格子と背景格子の値の受け渡しが要因ではない.
- 完全乱流モデル(遷移モデルなし)でも同様にずれ.
- 時間刻み1/10にしてもズレが生まれるタイミングに変化なし.
- 20数stepから 2.3241×10^{-10} ほどのズレから始まる.



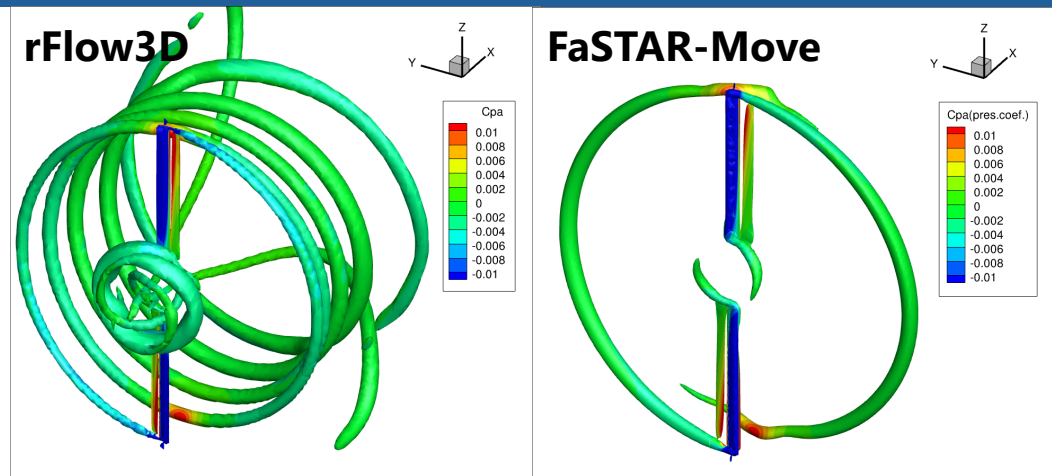
(2023年度の発表内容)

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



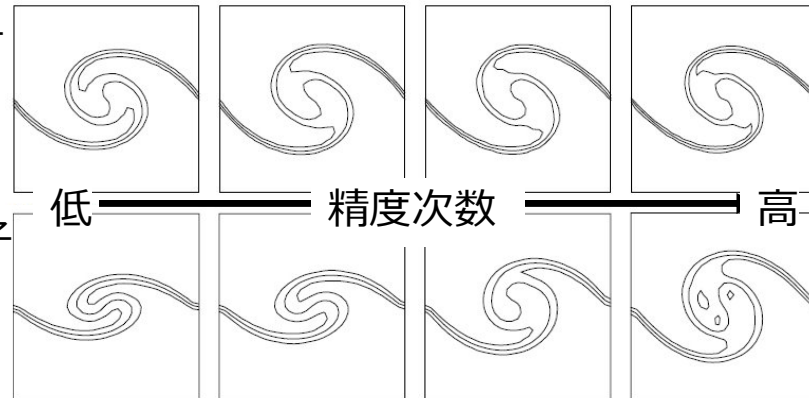
解を正確に解くために
必要な格子点数

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



[6] Tsoutsanis, Panagiotis, et al. "Comparison of structured-and unstructured-grid, compressible and incompressible methods using the vortex pairing problem." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 293 (2015): 207-231.