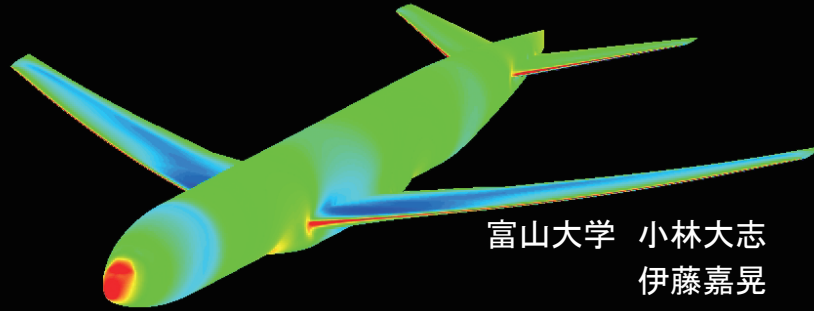
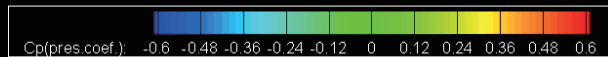


PCでのFaSTAR並列計算による 航空機クリーン形態シミュレーション



富山大学 小林大志
伊藤嘉晃
松島紀佐



2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge
(APC-II)

1/25

アウトライン

- ・目的
- ・計算条件
- ・計算環境
- ・計算結果 主翼+胴体+尾翼(圧力+摩擦)
 - 風洞実験との空力係数の比較
 - 主翼表面 C_p 分布
 - 発散した高迎角への対応(5.72deg)
 - 表面 C_p 分布
 - 表面 C_p コンター図
 - 尾翼表面 C_p 分布
- ・結論

2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge
(APC-II)

2/25

目的

課題1-1: 巡航状態及び高迎角時のNASA-CRM空力予測
(尾翼有、変形計測データを反映)

目的

FaSTARを利用したNASA-CRMの解析を通して
デスクトップPCによるCFD解析の有用性や、
解析上工夫した点や得た知見を示す

2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge
(APC-II)

3/25

計算条件

ソルバコード	FaSTAR
離散化手法	有限体積法 セル中心法
非粘性流束	HLLEW
粘性流束	空間2次精度
勾配評価	GLSQ
勾配制限関数	Van Lee型オリジナル制限関数
時間積分	LU-SGS(Local Time Stepping)
乱流モデル	SA-noft2-R

2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge
(APC-II)

4/25

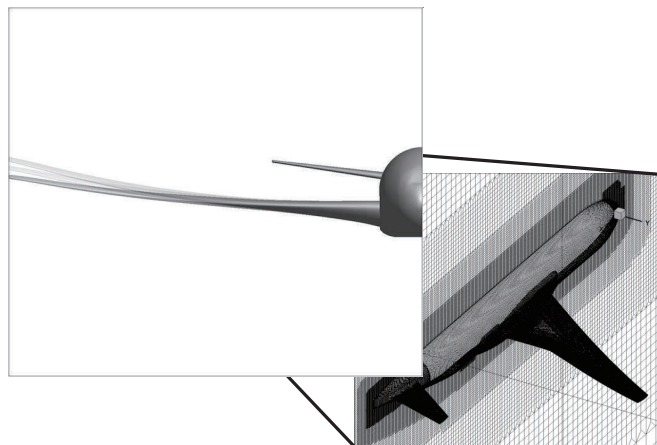
計算条件

マッハ数:0.847[-]

迎角 : -1.79, -0.62, 0.32, 1.39, 2.47, 2.94, 3.55, 4.65, 5.72[deg]

計算格子:JAXA提供格子(HexaGrid格子)(尾翼有、変形有、支持無)

AoA[deg]	Grid Num
-1.79	14,733,215
-0.62	14,889,272
0.32	14,596,804
1.39	14,875,239
2.47	14,726,808
2.94	14,732,210
3.55	14,727,087
4.65	14,881,239
5.72	14,881,152



計算条件

形状 : NASA-CRM(尾翼有、変形有、支持無)

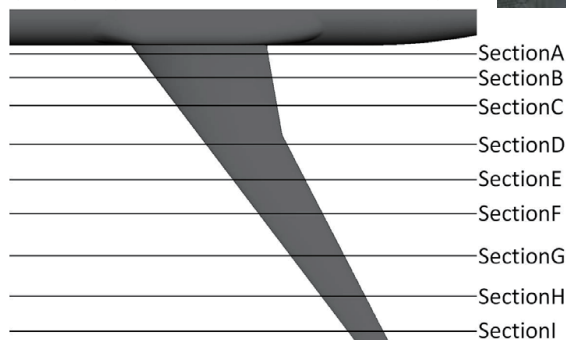
実機スケール

基準面積 $S_{ref} = 594,720.0 \text{ in}^2$

基準縦長さ $C_{ref} = 275.80 \text{ in}$ (= 平均空力翼弦長)

基準横長さ $b_{ref} = 2,313.50 \text{ in}$ (= スパン)

モーメント中心 : (X,Y,Z) = (1,325.90in, 0.0in, 177.95in)



計算環境

PC1

OS Linux(OS:CentOS6.3 64bit)
 CPU intel Xeon E5-2687W 3.1GHz
 CPUコア数 16コア(8コア×2)
 計算メモリ 62.9GB(使用メモリ:18.8GB)



PC2

OS Linux(CentOS6.6 64bit)
 CPU intel Xeon E5-2687W 3.4GHz
 CPUコア数 16コア(8コア×2)
 計算メモリ 62.9GB (使用メモリ:19.1GB)



2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge
(APC-II)

7/25

計算結果 主翼+胴体+尾翼(圧力+摩擦)

AoA[deg]	C_D	C_L	C_m
-1.79	0.02195	-0.11207	0.18856
-0.62	0.02015	0.04943	0.12533
0.32	0.02085	0.16694	0.08768
1.39	0.02315	0.29892	0.04422
2.47	0.02775	0.43964	0.01088
2.94	0.03126	0.50512	-0.00707
3.55	0.03792	0.57669	-0.01716
4.65*	0.05533	0.65920	-0.00473
5.72*	0.07322	0.70422	-0.00165

*

・AoA=4.65deg
 1 ~10000回まで $\alpha=3.55^\circ$
 10001~30000回まで $\alpha=4.65^\circ$ で計算

・AoA=5.72deg
 1 ~10000回まで $\alpha=3.55^\circ$
 10001~20000回まで $\alpha=4.65^\circ$
 20001~90000回まで $\alpha=5.72^\circ$
 20001~90000回のみ流体方程式移流項を
 HLLW→SLAUに変更

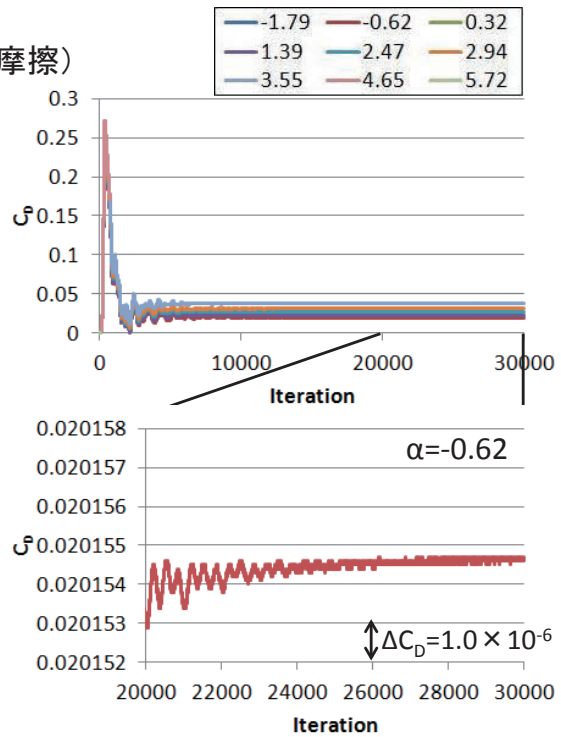
2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge
(APC-II)

8/25

計算結果 主翼+胴体+尾翼(圧力+摩擦)

AoA[deg]	C _D	C _L	C _m
-1.79	0.02195	-0.11207	0.18856
-0.62	0.02015	0.04943	0.12533
0.32	0.02085	0.16694	0.08768
1.39	0.02315	0.29892	0.04422
2.47	0.02775	0.43964	0.01088
2.94	0.03126	0.50512	-0.00707
3.55	0.03792	0.57669	-0.01716
4.65*	0.05533	0.65920	-0.00473
5.72*	0.07322	0.70422	-0.00165



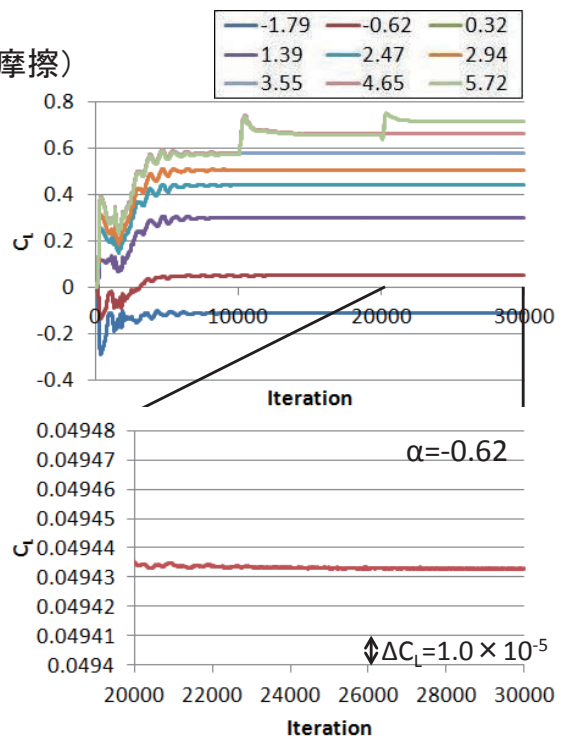
2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II)

9/25

計算結果 主翼+胴体+尾翼(圧力+摩擦)

AoA[deg]	C _D	C _L	C _m
-1.79	0.02195	-0.11207	0.18856
-0.62	0.02015	0.04943	0.12533
0.32	0.02085	0.16694	0.08768
1.39	0.02315	0.29892	0.04422
2.47	0.02775	0.43964	0.01088
2.94	0.03126	0.50512	-0.00707
3.55	0.03792	0.57669	-0.01716
4.65*	0.05533	0.65920	-0.00473
5.72*	0.07322	0.70422	-0.00165



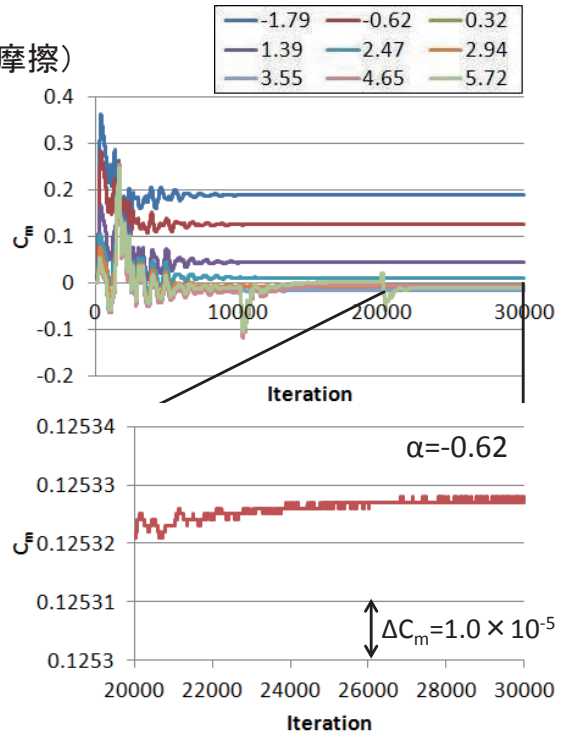
2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II)

10/25

計算結果 主翼+胴体+尾翼(圧力+摩擦)

AoA[deg]	C_D	C_L	C_m
-1.79	0.02195	-0.11207	0.18856
-0.62	0.02015	0.04943	0.12533
0.32	0.02085	0.16694	0.08768
1.39	0.02315	0.29892	0.04422
2.47	0.02775	0.43964	0.01088
2.94	0.03126	0.50512	-0.00707
3.55	0.03792	0.57669	-0.01716
4.65*	0.05533	0.65920	-0.00473
5.72*	0.07322	0.70422	-0.00165

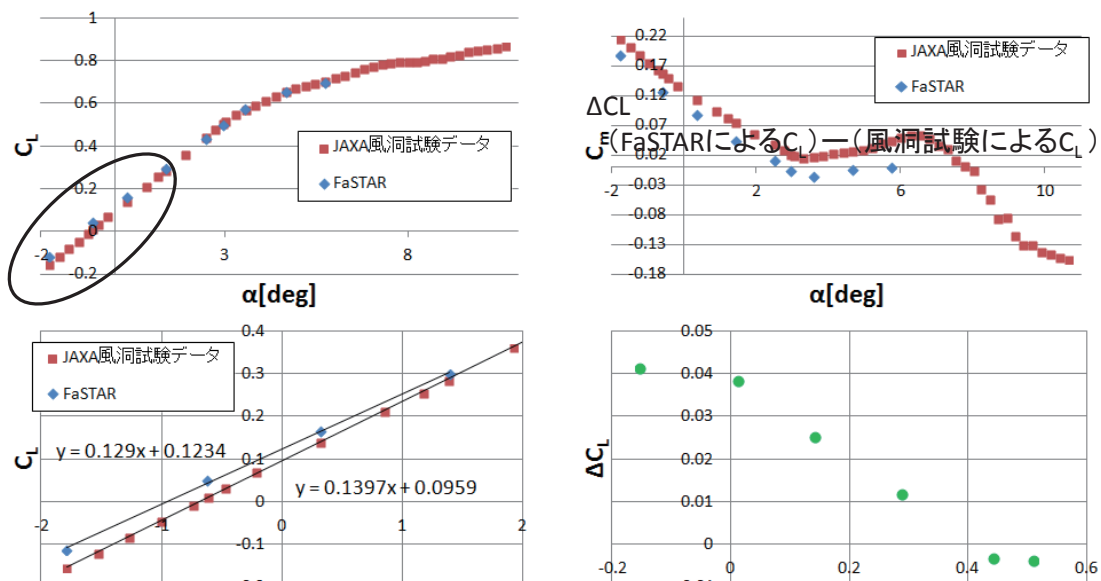


2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II)

11/25

計算結果 風洞実験との空力係数の比較



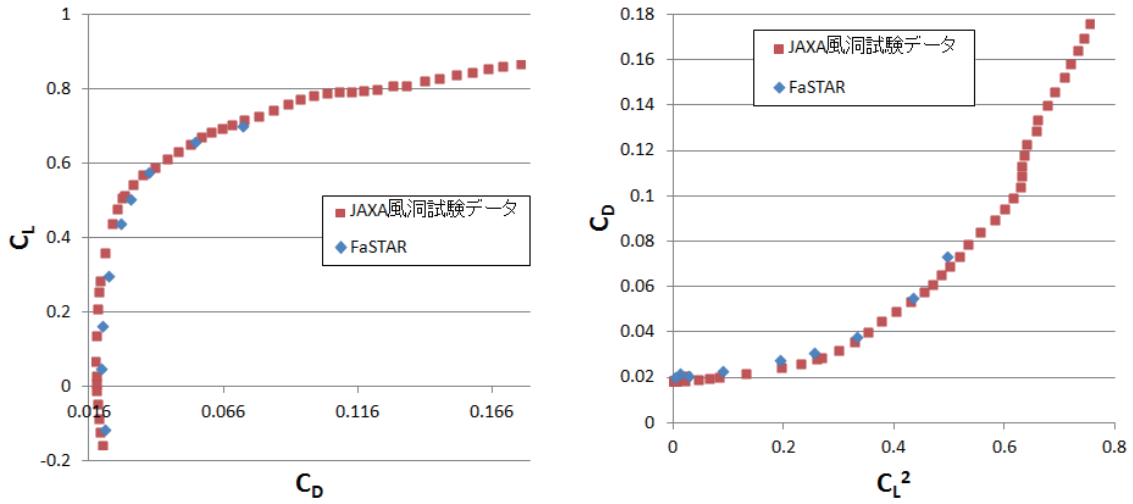
低迎角のとき風洞試験と解析の C_L に差が生じた

2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II)

12/25

計算結果 風洞実験との空力係数の比較



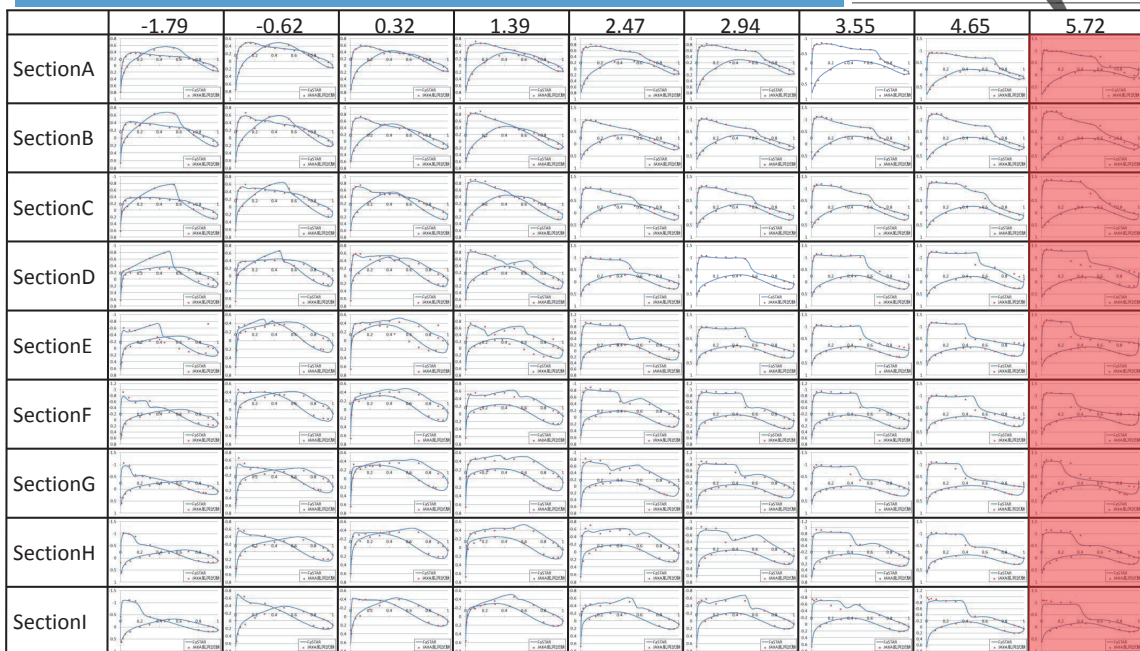
$C_l/C_D, C_D/C_l^2$ ともに風洞試験と解析の結果にわずかに差が生じた

2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II)

13/25

計算結果 主翼表面 C_p 分布



2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II)

14/25

計算結果 発散した高迎角への対応 $\alpha=5.72^\circ$

$\alpha=5.72^\circ$ の場合

- 1 ~10000回 : $\alpha=3.55^\circ$ で計算
- 10001~20000回 : $\alpha=4.65^\circ$ で計算 ⇒20965回で発散
- 20001~30000回 : $\alpha=5.72^\circ$ で計算

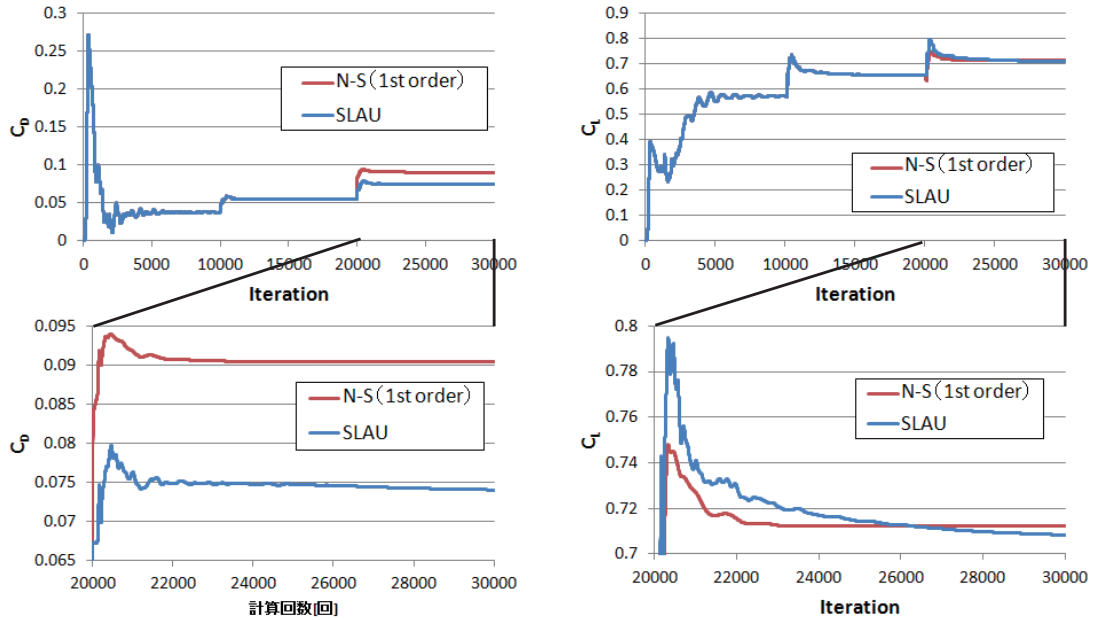
20001~30000回で迎角以外に別の計算条件も変更し、
計算結果にどう影響するのかを調べた

計算結果 発散した高迎角への対応 $\alpha=5.72^\circ$

迎角以外に変化させた計算条件(それぞれ別に計算している)

- 1. ナビエ・ストークス方程式の空間精度 + 乱流方程式の空間精度
二次精度 → 一次精度
- 2. ナビエ・ストークス方程式の空間精度
二次精度 → 一次精度
- 3. 乱流方程式の空間精度
二次精度 → 一次精度 20771回で発散
- 4. 流体方程式移流項
HLLWスキーム → SLAUスキーム
- 5. 低品質格子に対する空間勾配計算法の選択
計算にセル中心及びフェイス中心を使う → 計算に法線ベクトル情報を使う
→ MUSCL外挿を使わず一次精度に落とす 20970回で発散
- 6. 空間勾配計算法
GLSQ法 → Green-Gauss法 25840回で発散
→ 重みつきGreen-Gauss法 21433回

計算結果 発散した高迎角への対応 $\alpha=5.72^\circ$

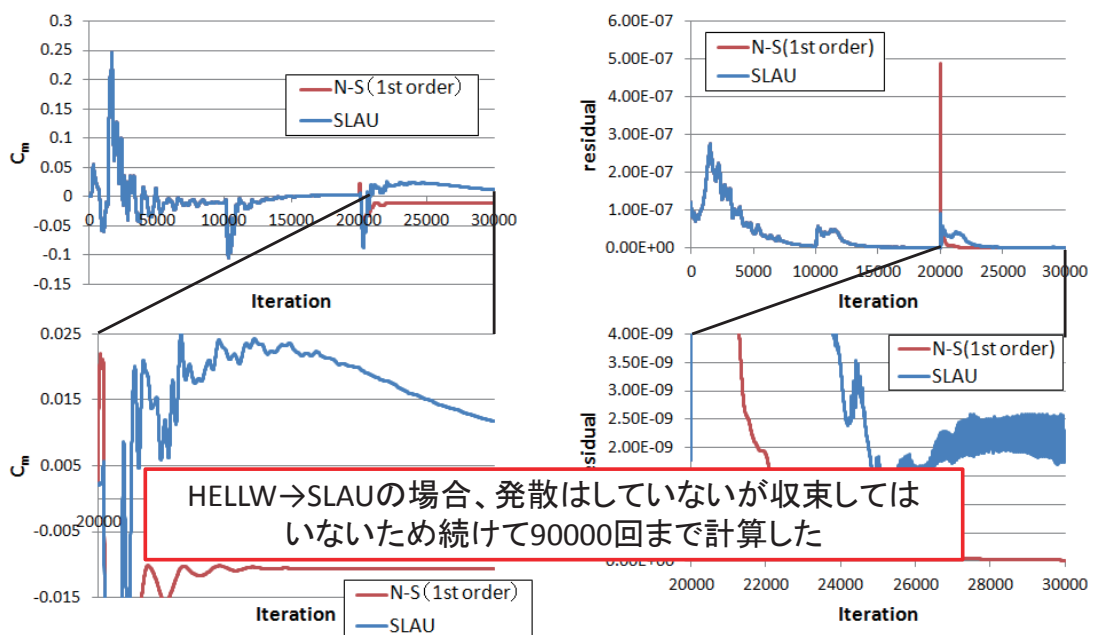


2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II)

17/25

計算結果 発散した高迎角への対応 $\alpha=5.72^\circ$

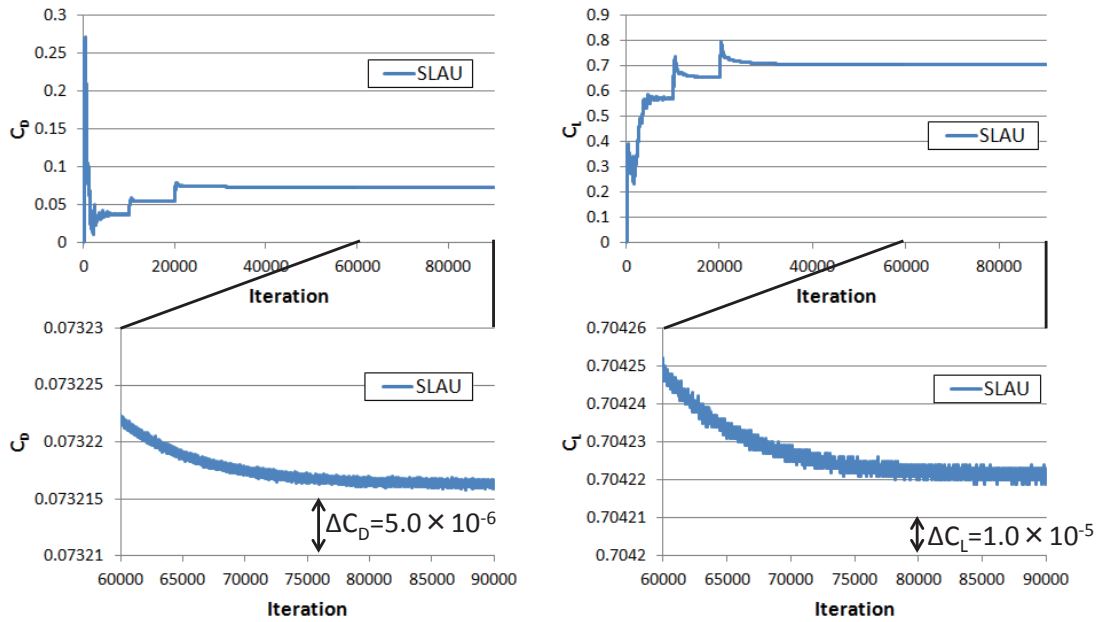


2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II)

18/25

計算結果 発散した高迎角への対応 $\alpha=5.72^\circ$

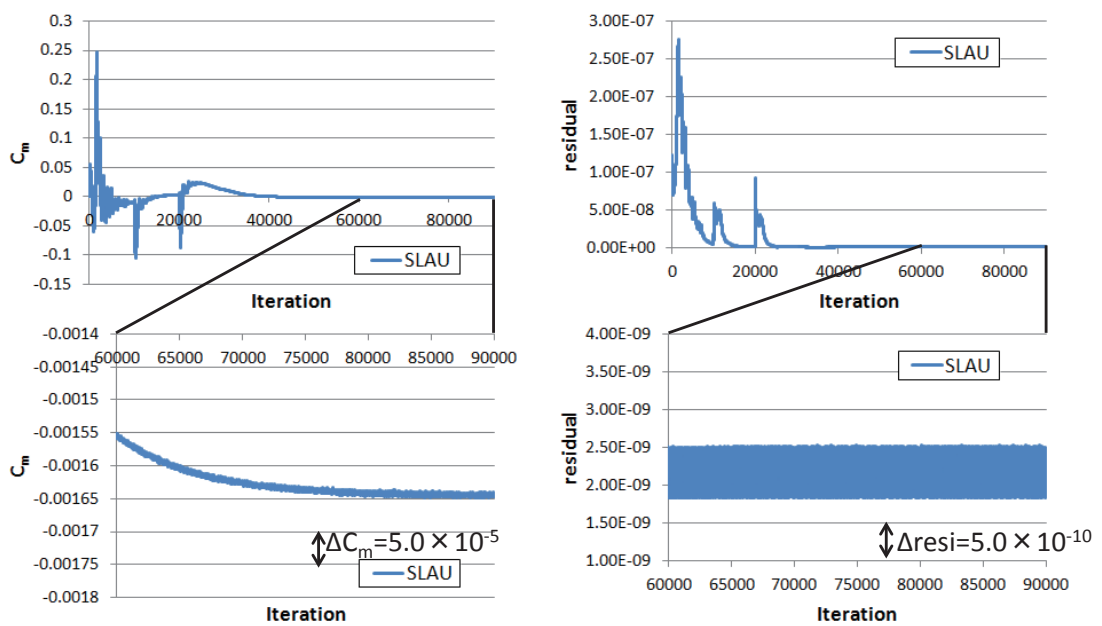


2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II)

19/25

計算結果 発散した高迎角への対応 $\alpha=5.72^\circ$

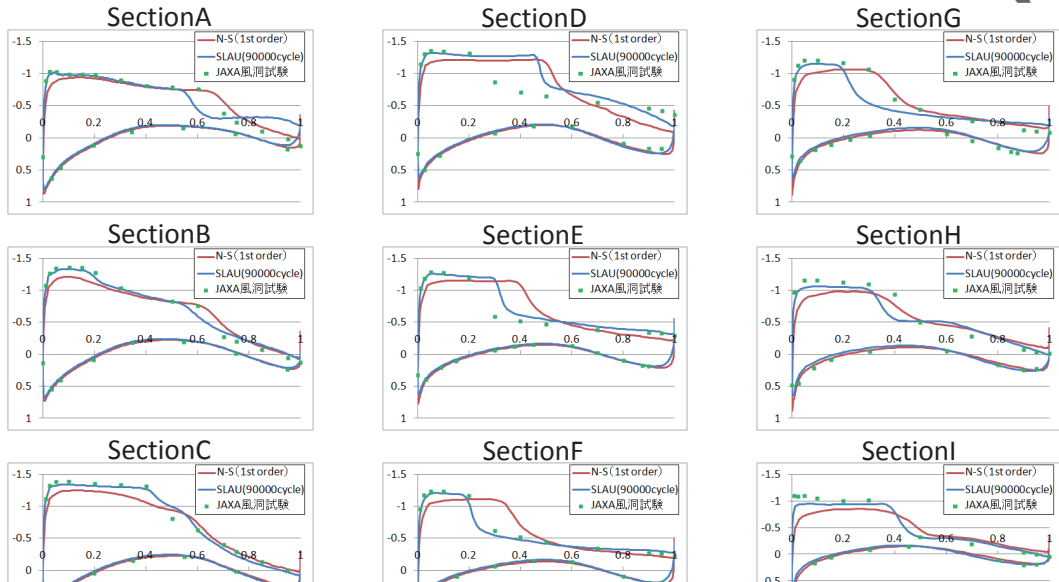
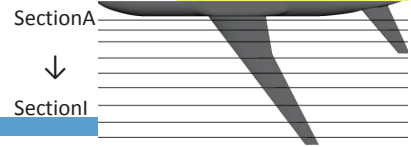


2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II)

20/25

計算結果 表面 C_p 分布(5.72deg)



下面の C_p 分布は一致しているが上面ではSLAUスキームの方が現象を捉えている

2016/7/6

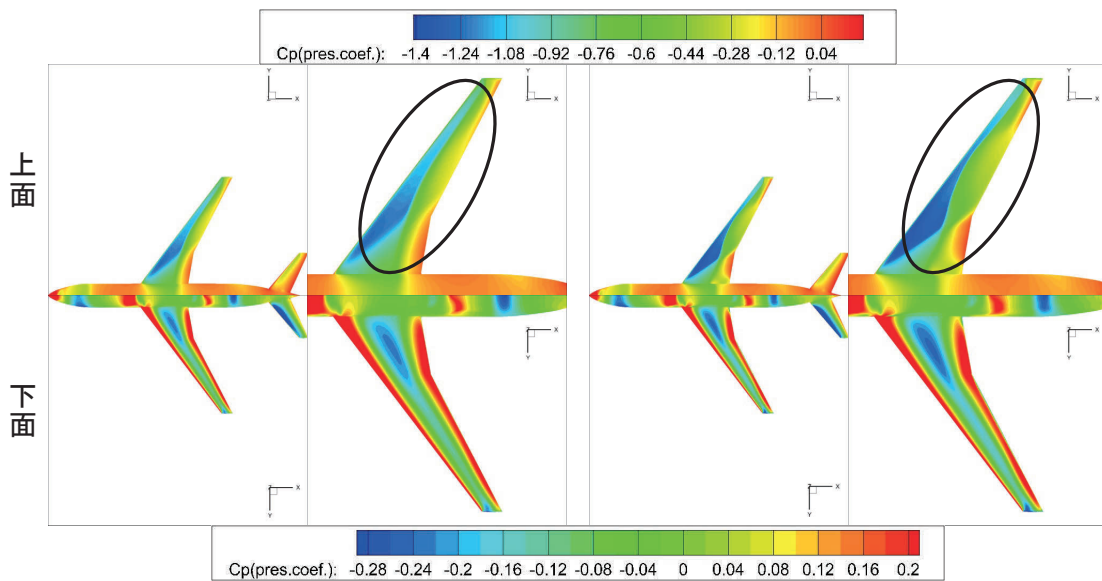
Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II)

21/25

計算結果 表面 C_p コンター図(5.72deg)

N-S(2nd → 1st order)

HLEW → SLAU



2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II)

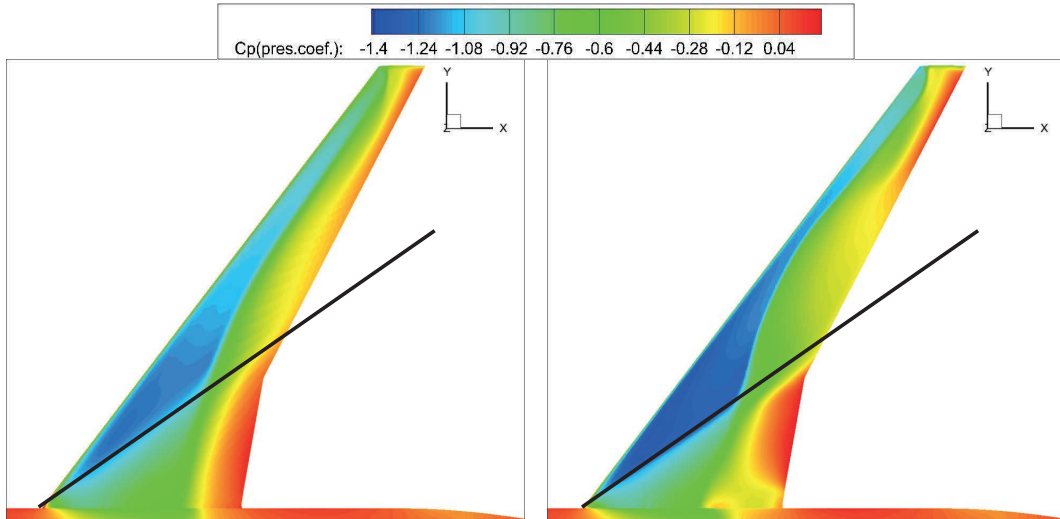
22/25

計算結果 表面 C_p コンター図(5.72deg)

N-S(2nd → 1st order)

主翼上面

HLLEW→SLAU



主翼前縁では数値粘性の違いが、後縁では胴体から受ける影響の違いがみられる

2016/7/6

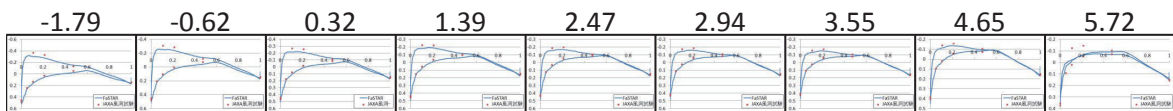
Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II)

23/25

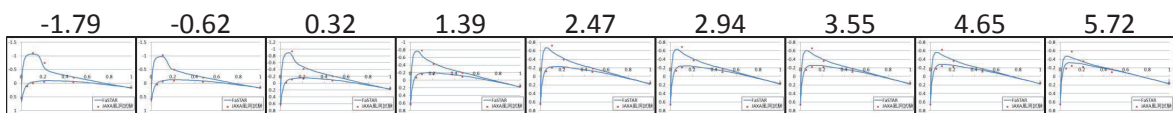
計算結果 尾翼表面 C_p 分布



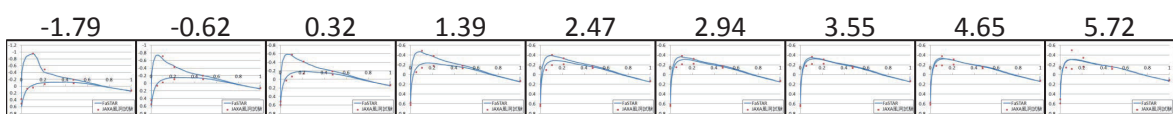
SectionSA



SectionSB



SectionSC



SectionSAでは支持の影響により差が大きくなり、また高迎角になると差が大きくなる

2016/7/6

Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II)

24/25

結論

デスクトップPC上でFaSTARを利用しNASA-CRMをCFD解析したことから次のことが得られた。

デスクトップPCに限った事ではないが、

- α - C_D は風洞試験結果と一致した
- C_L は低迎角において風洞試験結果よりわずかに大きい値となった
- C_m は迎角によらず風洞試験結果よりほぼ一定に小さい値となった
- C_L/C_D 、 C_L^2/C_D はどちらも風洞試験結果と解析結果とでわずかに差が生じた
- $AoA=5.72\text{deg}$ ではCycleの途中で段階的に迎角を大きくすると共に、他のパラメータ(N-S方程式の空間精度や流体方程式移流項etc)を変更することで発散を抑制することが出来た
- 尾翼では翼根付近で支持干渉の影響により風洞試験結果と解析結果に差が生じた
また、高迎角になると差が大きくなった
- 今回使用したPCではコア数(16core)と同並列数のとき最も高速(35h)で計算できたが場合により数時間の誤差(3h)が見られた