
階層型直交格子法と埋め込み境界法の組み合わせによる解析

○玉置義治、原田基至、高橋悠一、今村太郎（東京大学大学院）



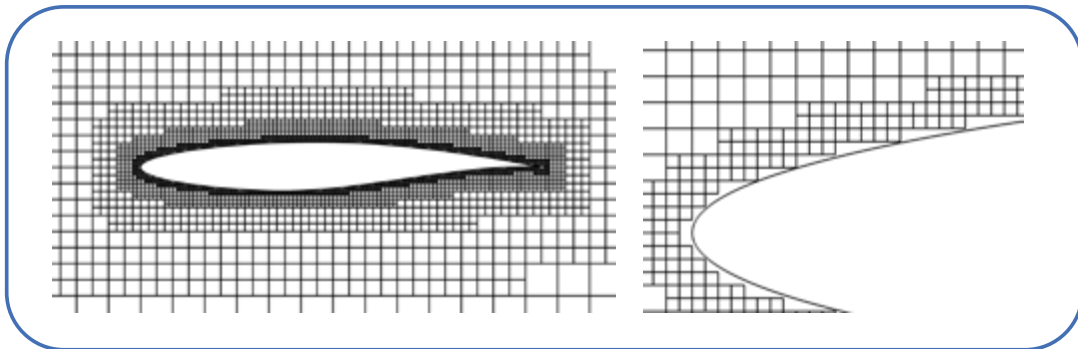
2015/07/03 First Aerodynamics Prediction Challenge (APC1), 東京大学 生産技術研究所 1/26

発表内容

- ソルバーの紹介
 - 直交格子／埋め込み境界法
- 平板乱流境界層(課題0-1)
- NASA-CRMの計算
 - 格子・条件設定
 - 非粘性解析
 - Medium格子における迎角スweep(課題1-1)
 - 格子収束の調査(課題1-2)
- まとめ・今後の展望

階層型直交格子

- 格子生成の**自動・高速化**が可能
 - 格子の歪みがなく, 三角形格子に比べ**空間精度・安定性**に優れる^[1]
 - **乱流境界層**の扱いに課題
- ⇒埋め込み境界法・乱流壁関数を用いた高レイノルズ数流れの解析手法を構築中

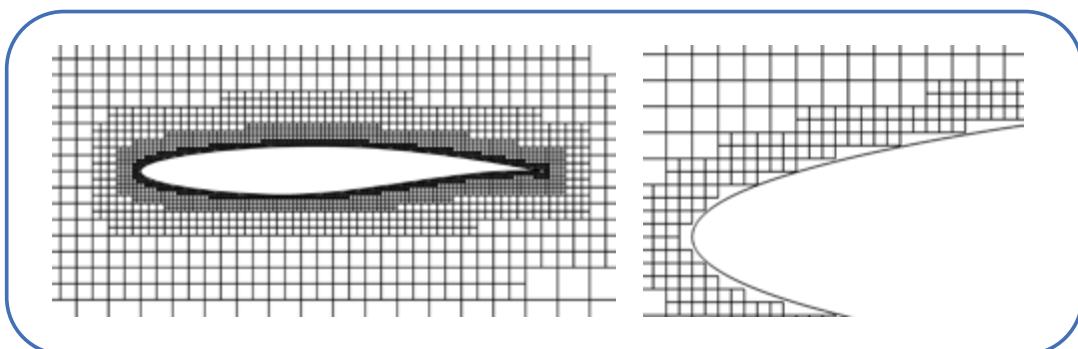


[1] F. Haider et al., Numer. Math. 2009.

3/26

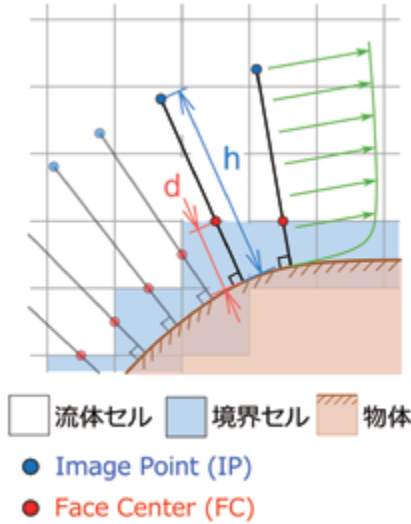
本解析の目的

- 埋め込み境界法・乱流壁関数を高レイノルズ数流れの解析手法を検証
 - 予備解析として, 2次元平板において壁関数の妥当性を調査 (課題0-1)
 - CRMの非粘性/乱流計算を行い, 物体適合格子 (HexaGrid/FaSTAR)の結果と比較



4/26

埋め込み境界法



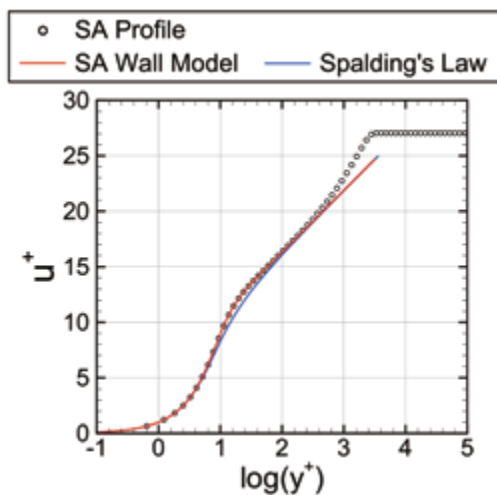
点FCに与える境界条件を埋め込み境界法^[2]により求める

- 速度
 $(h, u_{tan,ip})$ が SA Wall Model $u^+ = f(y^+)$ を満たすように摩擦速度 u_τ を計算 (Newton反復)
 ↓
 d, u_τ, SA Wall Modelから $u_{tan,FC}$ を算出
 ※ u_{tan} : 壁面接線方向速度
- 圧力
 点IPから点FCへ外挿 ($p_{FC} = p_{IP}$)
- 密度
 Crocco-Busemannの式, 状態方程式から算出
- 渦粘性係数
 減衰関数付き混合長モデルにより算出

[2] Takahashi, Y. and Imamura, T., AIAA 2014-0228.

埋め込み境界法

壁関数としてSA Wall Model^[3]を利用



SA Wall Model

$$u^+ = \bar{B} + c_1 \log \left((y^+ + a_1)^2 + b_1^2 \right) - c_2 \log \left((y^+ + a_2)^2 + b_2^2 \right) - c_3 \text{ArcTan}[y^+ + a_1, b_1] - c_4 \text{ArcTan}[y^+ + a_2, b_2]$$

SAを用いた場合の境界層速度分布に一致

Spalding's Law

$$y^+ = u^+ + \exp(-\kappa B) \left[\exp(\kappa u^+) - \sum_{n=0}^3 \frac{(\kappa u^+)^n}{n!} \right]$$

[3] Allmaras, S.R. et al., ICCFD7-1902, 2012.

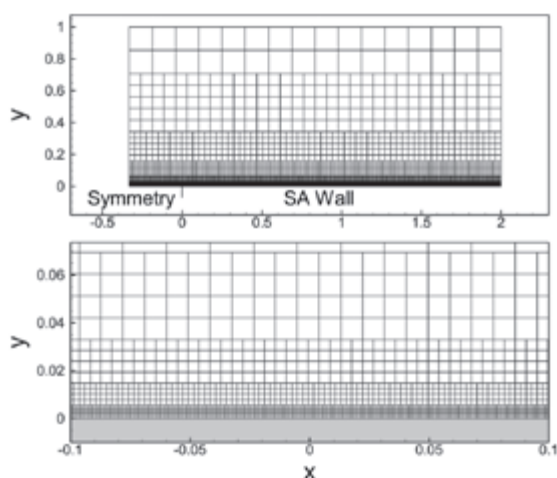
発表内容

- ソルバーの紹介
 - 直交格子／埋め込み境界法
- 平板乱流境界層(課題0-1)
- NASA-CRMの計算
 - 格子・条件設定
 - 非粘性解析
 - Medium格子における迎角スweep(課題1-1)
 - 格子収束の調査(課題1-2)
- まとめ・今後の展望

7/26

平板乱流境界層(課題0-1)

計算格子

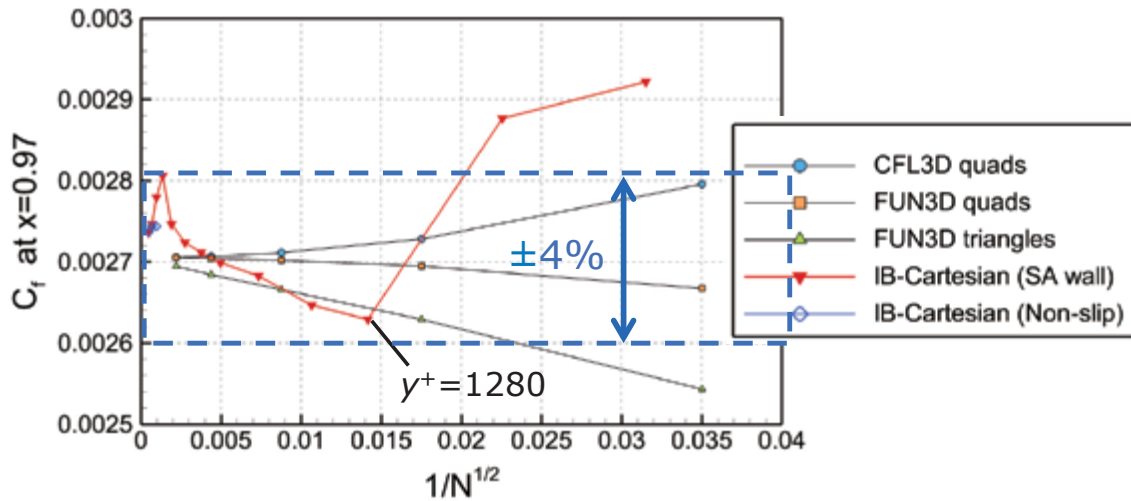


- 四分木直交格子(自作格子)
- x方向の計算領域は課題の設定通り
- y方向の計算領域は1程度
- 壁面上の格子は一様
- Image Point (IP)の位置
 $h = 1.5 \Delta x_{\min}$

8/26

平板乱流境界層(課題0-1)

摩擦係数 C_f の格子収束

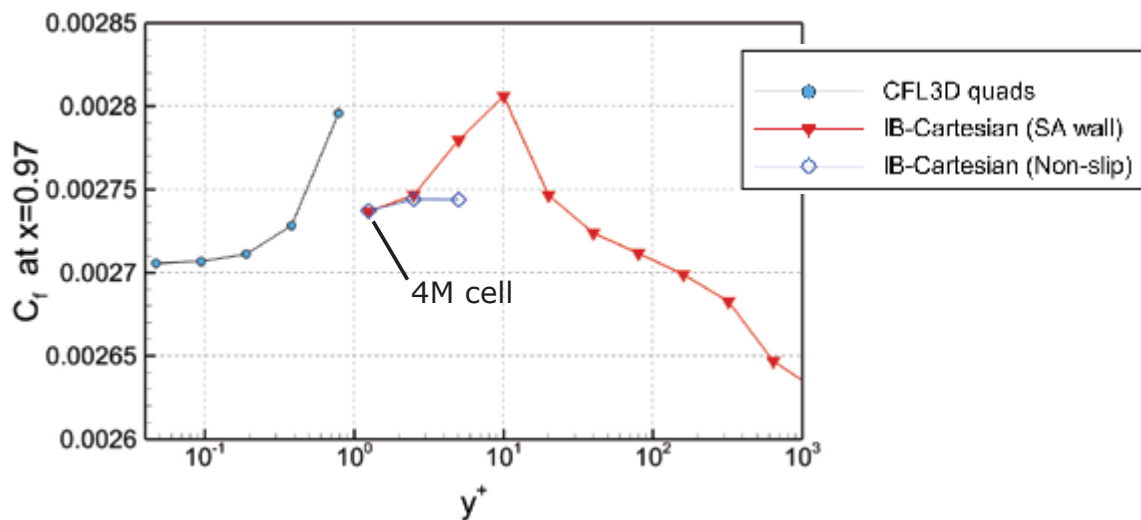


- IPが Log Layer($y^+ \sim 1000$) に位置する場合, 最も細かい格子の結果と $<4\%$ 程度の差

9/26

平板乱流境界層(課題0-1)

摩擦係数 C_f の格子収束



- 最も細かい格子でCFL3Dの結果より1~2%程度の差 (さらに収束?)

10/26

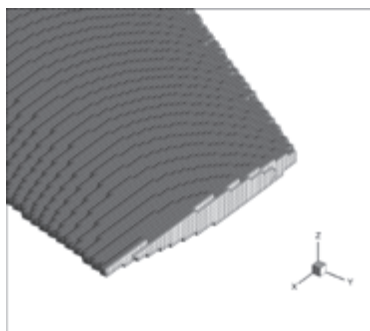
発表内容

- ソルバーの紹介
 - 直交格子／埋め込み境界法
- 平板乱流境界層(課題0-1)
- NASA-CRMの計算
 - 格子・条件設定
 - 非粘性解析
 - Medium格子における迎角スweep(課題1-1)
 - 格子収束の調査(課題1-2)
- まとめ・今後の展望

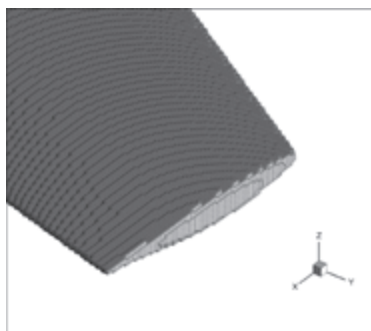
11/26

計算格子の設定(自作格子)

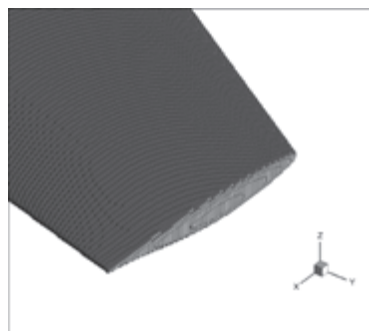
	最小格子幅 (in.)	ipにおけるy+	Tip chord/ 最小格子幅	セル数
Coarse	1.465	~1000	73.3	3.7~4.0M
Medium	0.9766	~500	110	8.1~8.5M
Fine	0.6104	~300	176	20.4M



Coarse



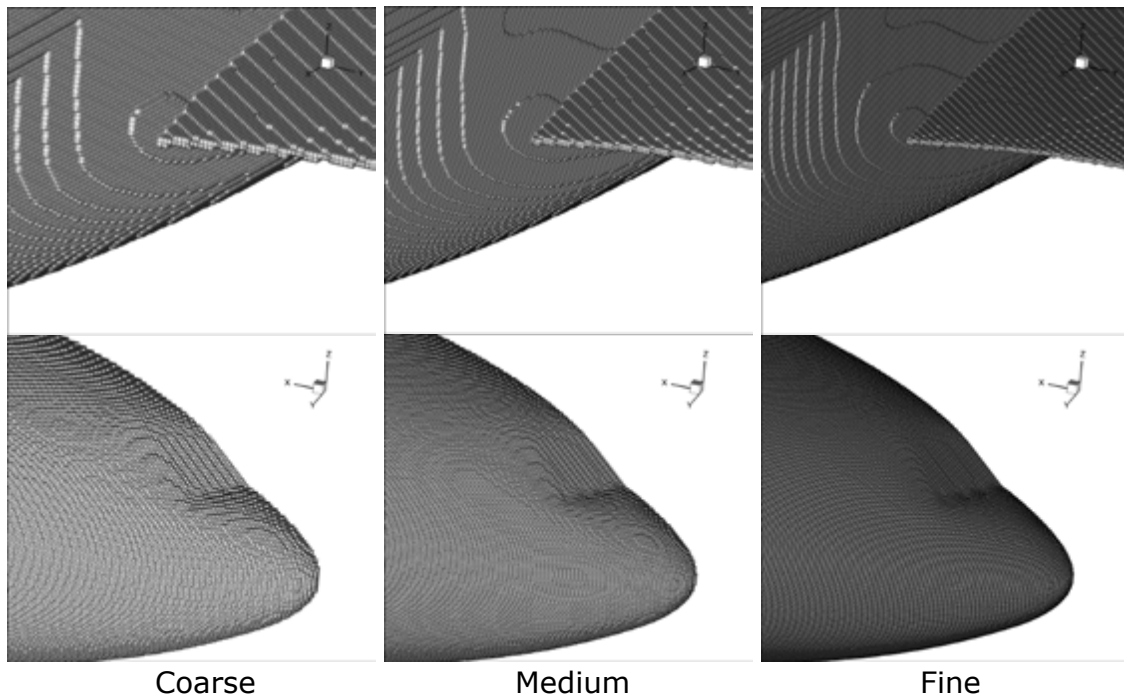
Medium



Fine

12/26

計算格子の設定



13/26

解析手法

□ Cartesian Solverの計算手法

支配方程式	RANS/Euler
乱流モデル	SA-noft2
空間スキーム (対流項)	3次精度MUSCL + van Albada limiter
空間スキーム (拡散項)	2次精度中心差分
勾配評価	WLSQ (G)
数値流束	SLAU
時間積分	LU-SGS (局所時間刻み), CFL=100
Image point距離	$2.0\Delta x_{\min}$

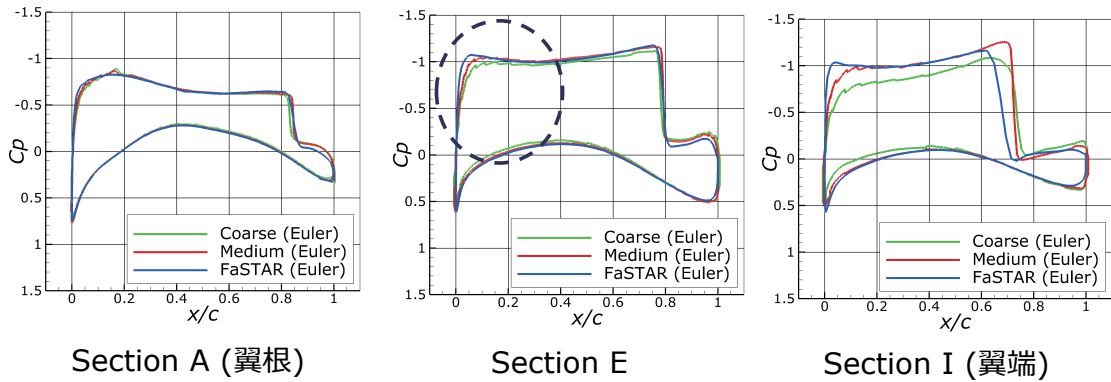
□ 比較としてFaSTARによる解析を実施(RANS/Euler)

- Euler: HexaGrid (4M)
- RANS: workshopのMedium格子(14M)

14/26

非粘性解析

- 予備解析として非粘性解析を実施
- AoA=2.94 [deg]

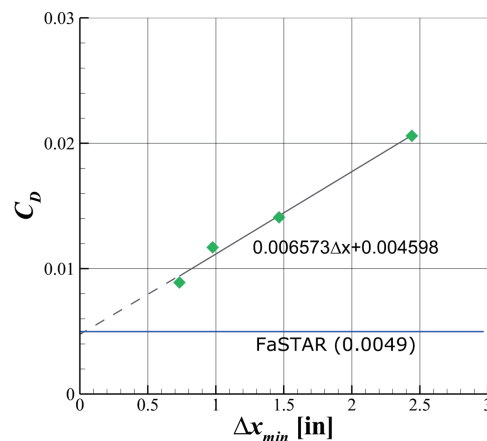


- Medium格子では前縁の立ち上がりを除いてよく一致
- 翼端は格子解像度が厳しい

15/26

非粘性解析

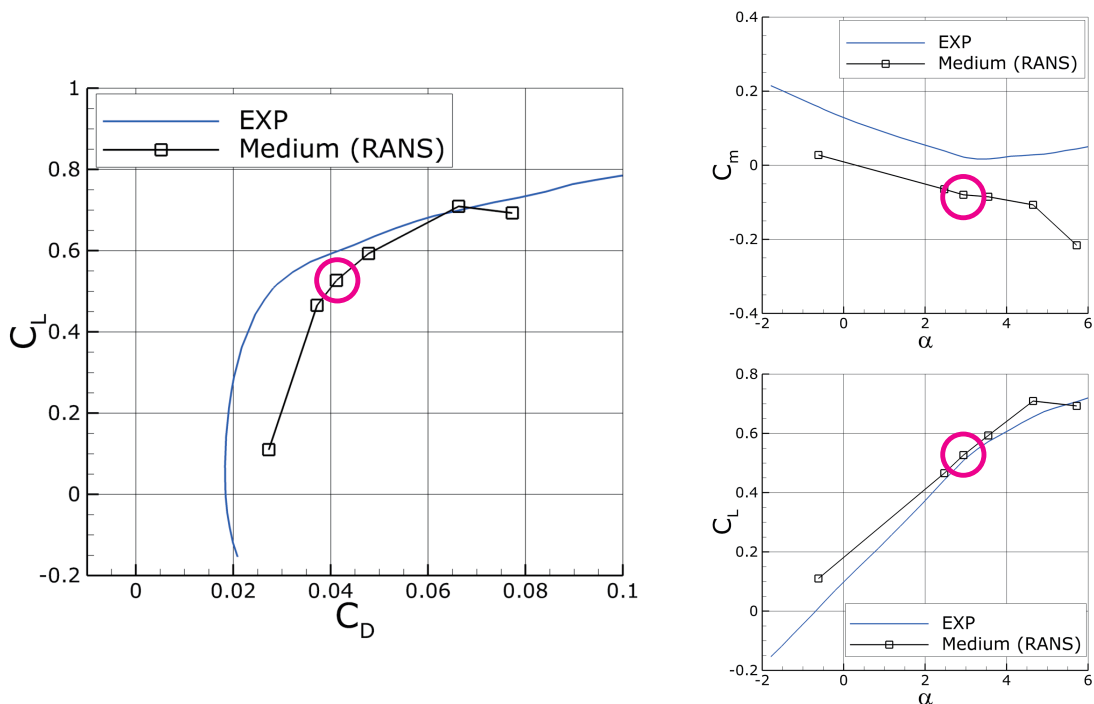
- 迎角-0.62[deg]における抗力係数の格子収束



- Medium格子で70 [count], Fine格子で40 [count]程度の誤差
- 前縁曲率の考慮が必要

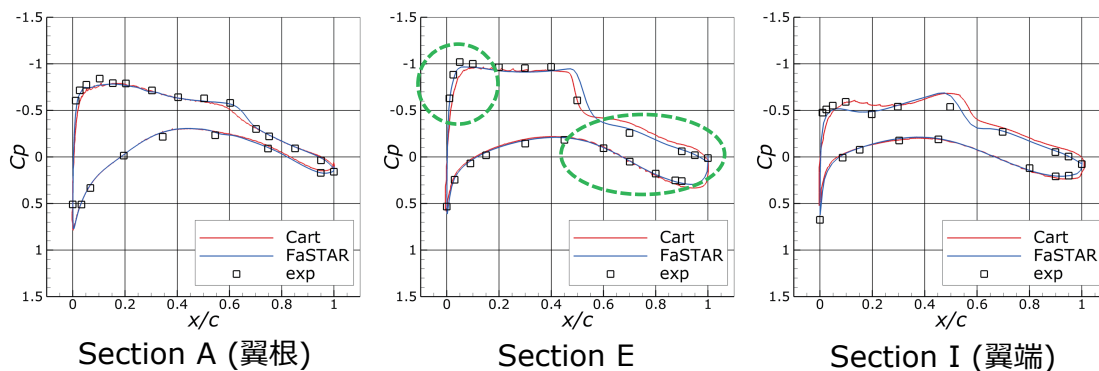
16/26

RANS解析(課題1-1) - 空力係数

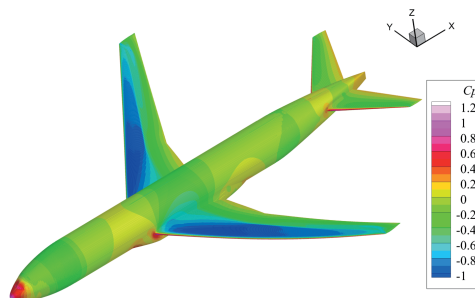


17/26

RANS解析(課題1-1) - AoA=2.94 [deg]

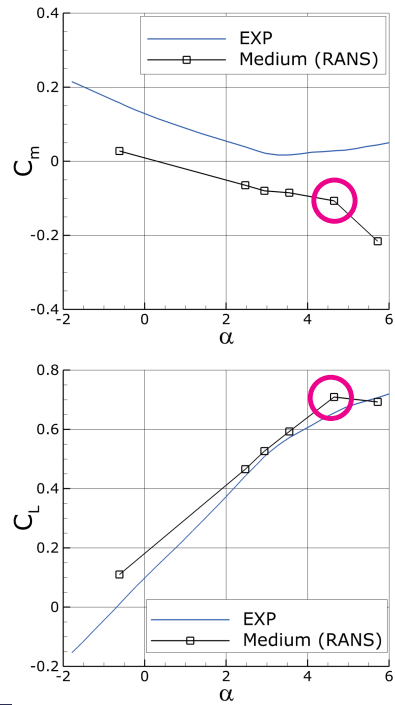
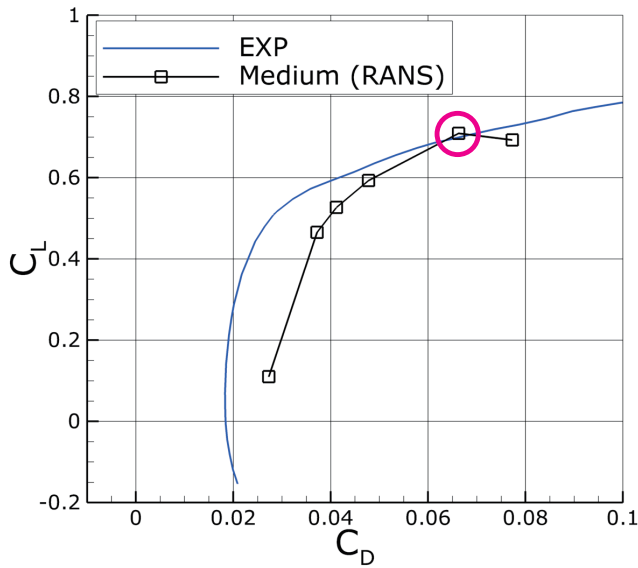


- 翼根ほどよく一致
 - 格子幅/コード長が小
- 前縁の C_p 立ち上がりが鈍い
 - 現状曲率・前縁への格子適合無し
- 衝撃波背後で C_p 低

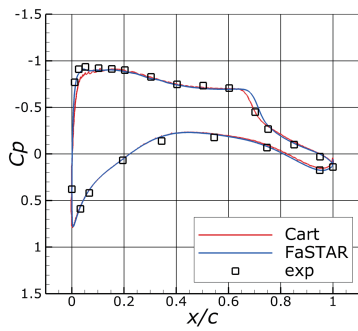


18/26

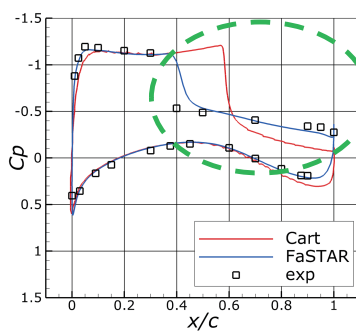
RANS解析(課題1-1)



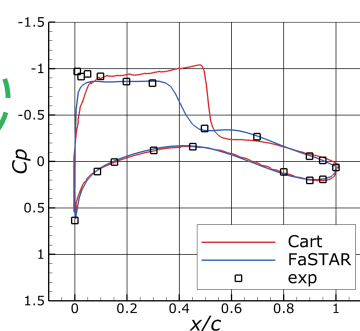
RANS解析(課題1-1) - AoA=4.65 [deg]



Section A (翼根)

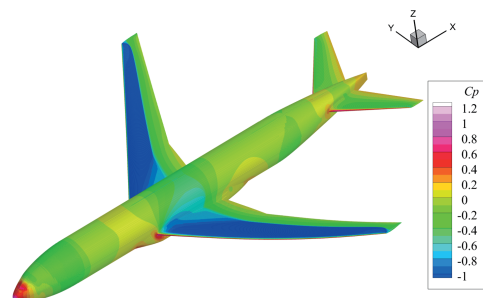


Section E

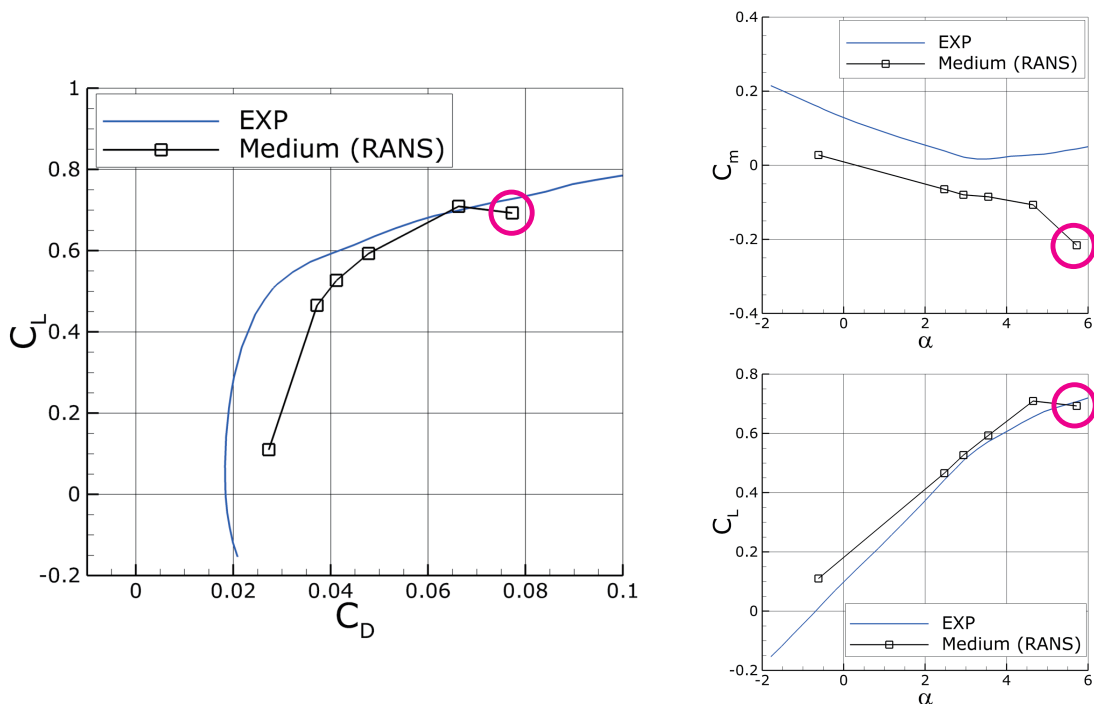


Section I (翼端)

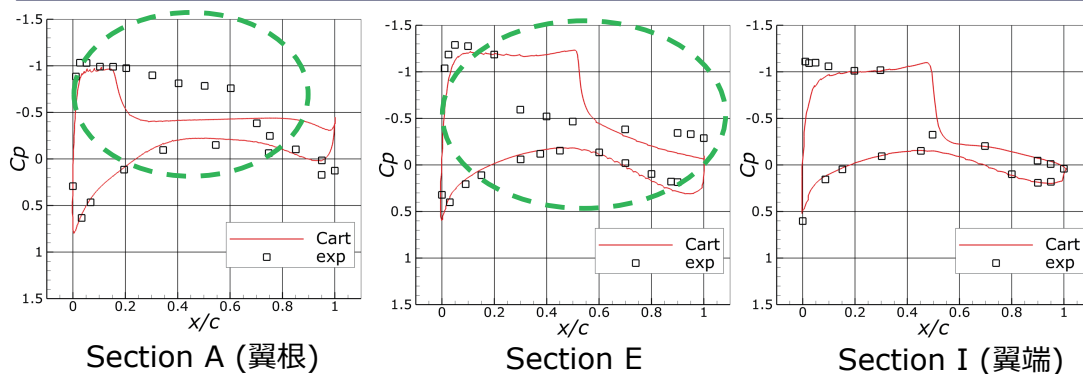
- 衝撃波を後方に予測
- 剥離なし



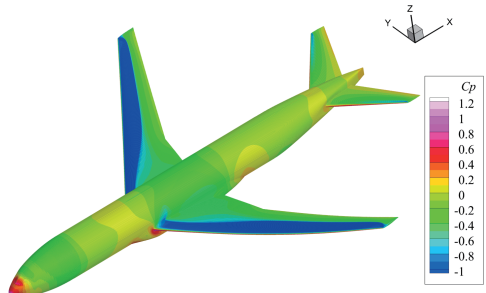
RANS解析(課題1-1)



RANS解析(課題1-1) - AoA=5.72 [deg]

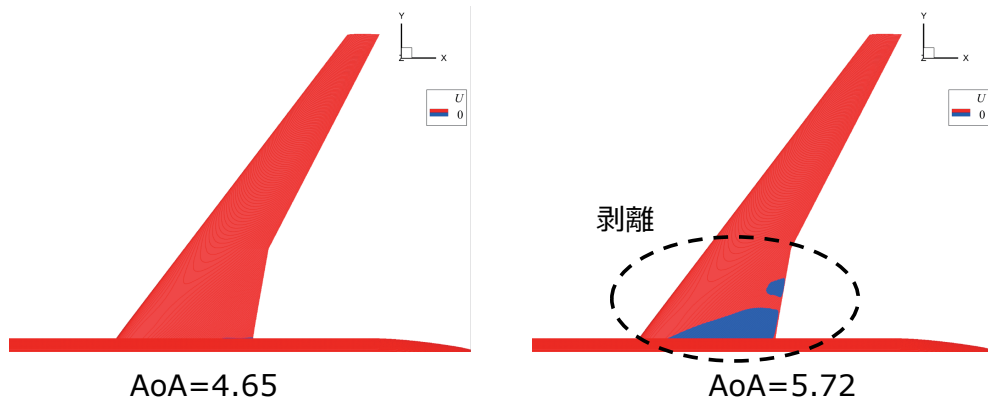


- 翼根で急激に剥離
- 翼端は剥離無し



剥離領域

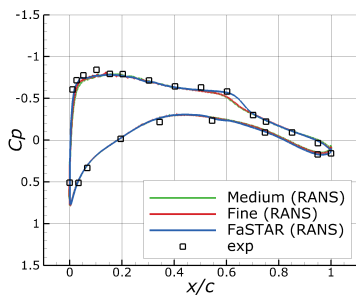
- 壁面近傍での機体軸方向流速の正負



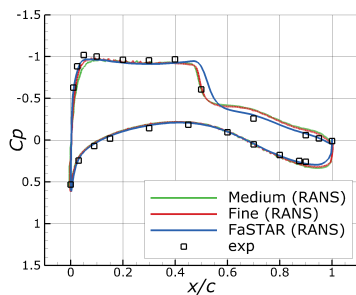
- 剥離開始迎角の予測は現状困難(圧力勾配を考慮すれば改善?)

格子収束の調査(課題1-2)

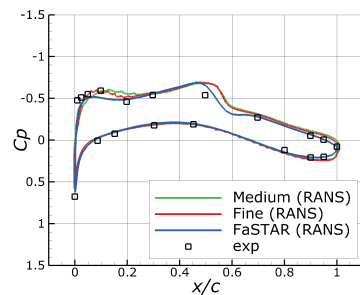
AoA=2.94 [deg]



Section A (翼根)



Section E



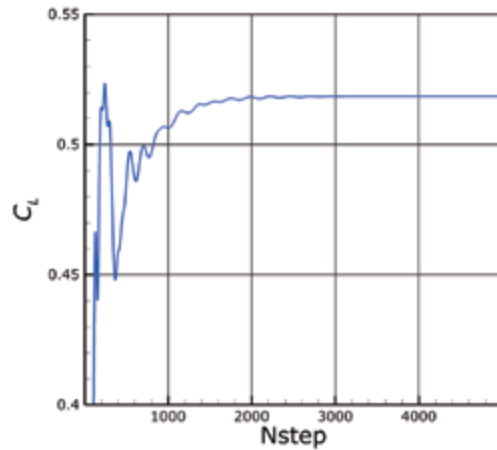
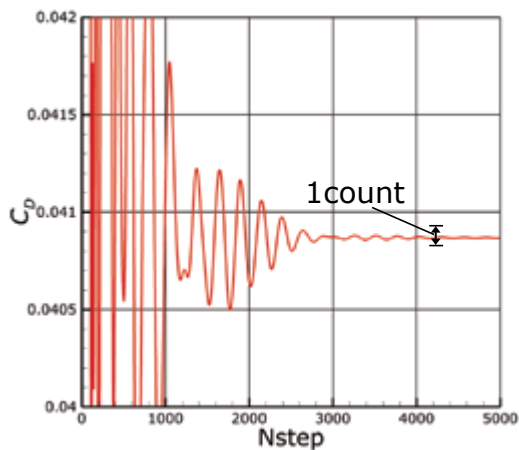
Section I (翼端)

- 前縁付近は改善傾向
- CD, Cmの差は依然大

	CD	CL	Cm
Medium	0.0406	0.5114	-0.0661
Fine	0.0369	0.5114	-0.0562
FaSTAR	0.0309	0.5053	-0.0078

計算の収束

- RANS(Medium格子)では5000step程度で収束
- 層状格子がないため Δt 大



25/26

まとめ・今後の展望

- 階層型直交格子および乱流壁モデルを応用した埋め込み境界法を用いて計算を実施
- $y^+ < 1000$ 程度で C_f の誤差4%以内
- 層状格子を含まないため収束良
- 翼根付近・低迎角では良く一致
- 剥離の予測・翼端付近の計算は難しい

- ◆ 表面曲率効果(遠心力)の実装
- ◆ 格子の(自動)最適化
- ◆ 圧力勾配を含む境界層モデルの採用

26/26