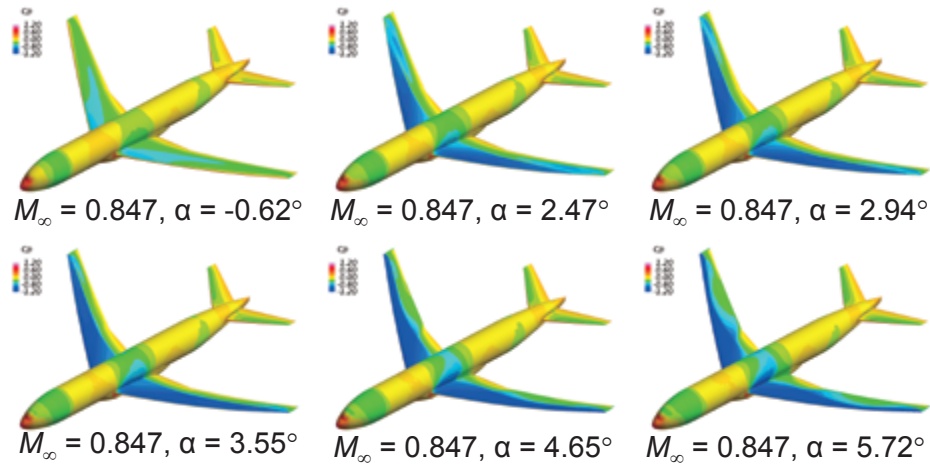




First Aerodynamics Prediction Challenge (APC-I)  
2015/7/3

## TAS・MEGG3D格子による解析



伊藤靖, 村山光宏, 山本一臣 (JAXA 航空技術部門)  
田中健太郎 (菱友システムズ)



## 概要

- 背景
  - AIAA Drag Prediction Workshop (DPW)への参加経験
  - 4<sup>th</sup> DPW 格子生成ガイドライン
- 目的
- 数値解析: TAS、UPACSでのQCRの影響を紹介
- 格子生成: MEGG3D
- 解析結果
  - 課題1-1: 風洞試験で計測された変形状を反映した解析
  - 課題1-2: 迎角2.94°での格子収束性
- まとめ



## AIAA DPWへの参加

- AIAA DPWでの役割
  - 発表者 (第2回以降)
  - 格子提供 (第3回以降)
    - マルチブロック構造格子 (Gridgen)
    - 非構造格子 (MEGG3D)
  - Committee member (第4回以降; 村山)
- 成果
  - 遷音速流れにおける解析コードの検証 (TAS・UPACS)
  - 翼胴結合部の剥離流れを捉えるためには、レイノルズ応力の非等方性を考慮した乱流モデルを適用する必要性を示した
  - 格子の質・格子点数が計算結果に及ぼす影響の確認
  - 新たな格子生成法提案のための着想を得た



## 4<sup>th</sup> DPW 格子生成ガイドライン (2008年11月)

- 等方的な非構造格子では厳格に従うのが非常に難しかった
    - 格子セル数・点数の指定
      - 表面での格子幅: Medium格子主翼・尾翼に対して
        - 前縁・後縁でのコード方向の格子幅:  $0.1\%c_{local}$
        - 翼根・翼端でのスパン方向の格子幅:  $0.1\%l_{local}$
      - 後縁に入れる要素数の指定 (Coarse格子で8以上)
  - 空間での最少格子幅は、 $y^+$ を基準に決められているので、流速が変われば格子生成し直した方がよい
    - Coarse:  $y^+ \sim 1.0$
    - Medium:  $y^+ \sim 2/3$
    - Fine:  $y^+ \sim 4/9$
    - Extra-fine:  $y^+ \sim 8/27$
  - MEGG3D新機能を用いて、新格子を作ることとした
    - バージョン3: Coarse (4.9M) Medium (11.2M) Fine (35.6M)
- 相反する要求
- 非常に粗く、それなりの格子でまとめるのが大変
- 前縁部解像度 $\leftrightarrow$ 衝撃波位置解像度、空間解像度
- 主翼後縁で高アスペクト比の要素を作る必要性



## 目的

- AIAA DPW参加を通して得られた知識をAPCに還元する
  - 解析ソルバー: TAS Code
  - 乱流モデル: SA-noft2-R ( $C_{rot} = 1$ )-QCR2000
    - Spalartの非等方性構成関係 (Quadratic Constitutive Relation) を考慮したSAモデル
  - MEGG3D非構造格子の提供
    - バージョン3: 新格子
    - バージョン2: DPW4で提供した格子 (フォーマット変換済み)



## 流体解析: TAS & UPACS

- 格子タイプは異なるが、同様の計算手法を用いる
  - 粘性項: 空間2次精度
  - 時間積分: Gauss-Seidel タイプの陰解法
- APC-1課題に対してはTASを使用
- 山本らの論文を元にしたSAモデルQCR on/off効果の紹介では、UPACSを使用

	TAS	UPACS
格子タイプ	非構造格子	マルチブロック構造格子
離散化	セル節点有限体積法	セル中心有限体積法
流束評価	HLLW 2 <sup>nd</sup> -order with Venkatakrisnan's limiter	Roe 2 <sup>nd</sup> -order with Van Albada's limiter
時間積分	LU-Symmetric Gauss-Seidel	Matrix-Free Gauss-Seidel
乱流モデル	SA-noft2-R ( $C_{rot} = 1$ )-QCR2000	SA-noft2-R ( $C_{rot} = 1$ )-QCR2000



# Spalartの簡易的非線形モデル

- 渦粘性近似が適用できない2次流れを伴うダクト流を扱うために、非等方性構成関係を考慮 (P.R. Spalart, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **21**, 252-263, 2000)

$$\tau_{ij} = \bar{\tau}_{ij} - c_{nl1} [O_{ik} \bar{\tau}_{jk} + O_{jk} \bar{\tau}_{ik}]$$

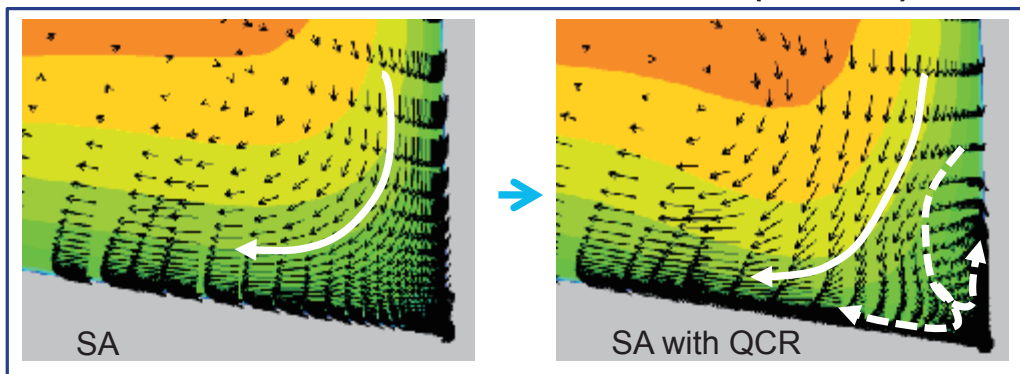
$\bar{\tau}_{ij}$ : Reynolds stress given by linear models

$$O_{ik} \equiv \frac{\partial_k U_i - \partial_i U_k}{\sqrt{\partial_n U_m \partial_n U_m}}, \quad c_{nl1} = 0.3$$

- 遷音速流れ翼胴形態に適用
  - 山本ら, “翼胴結合部における境界層剥離への乱流モデルの影響,” 第24回数値流体力学シンポジウム, 2010
  - Yamamoto *et al.*, AIAA Paper 2012-2895.



# 2次流れとマッハ数分布 (CRM)



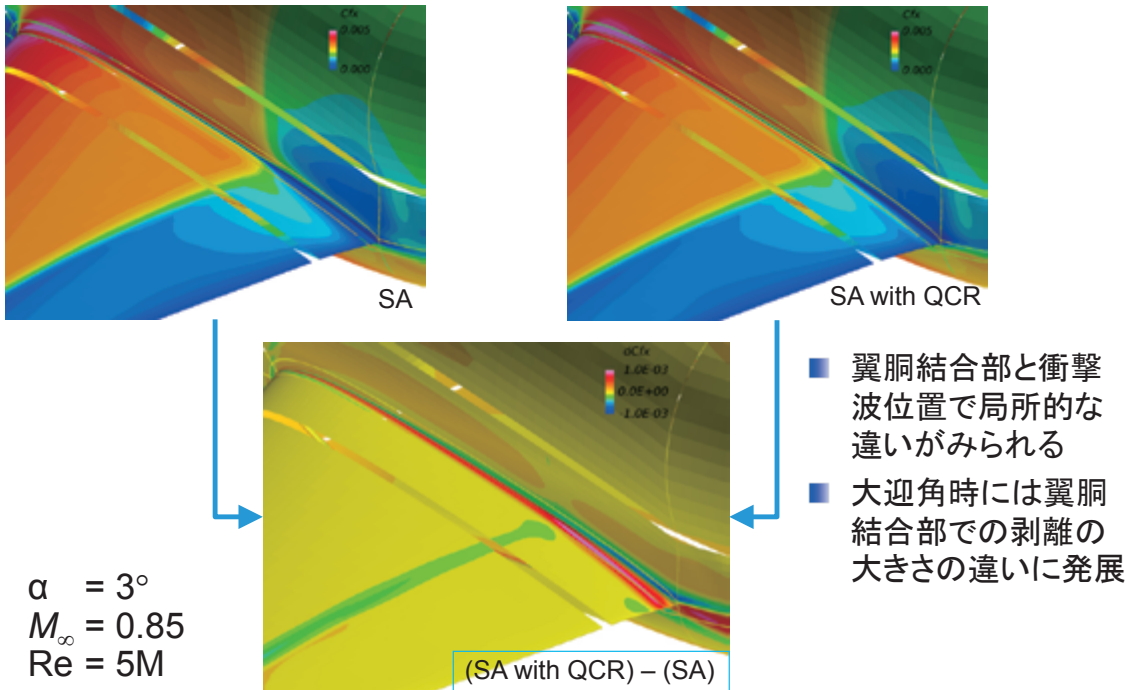
- マルチブロック構造格子 + UPACS
- $\alpha = 3^\circ, M_\infty = 0.85, Re = 5M$
- 主翼根50%断面
- ダクト流れ同様にレイノルズ応力の非等方性から2次流れが発生し、角部の境界層が薄くなる



Yamamoto *et al.*, AIAA Paper 2012-2895



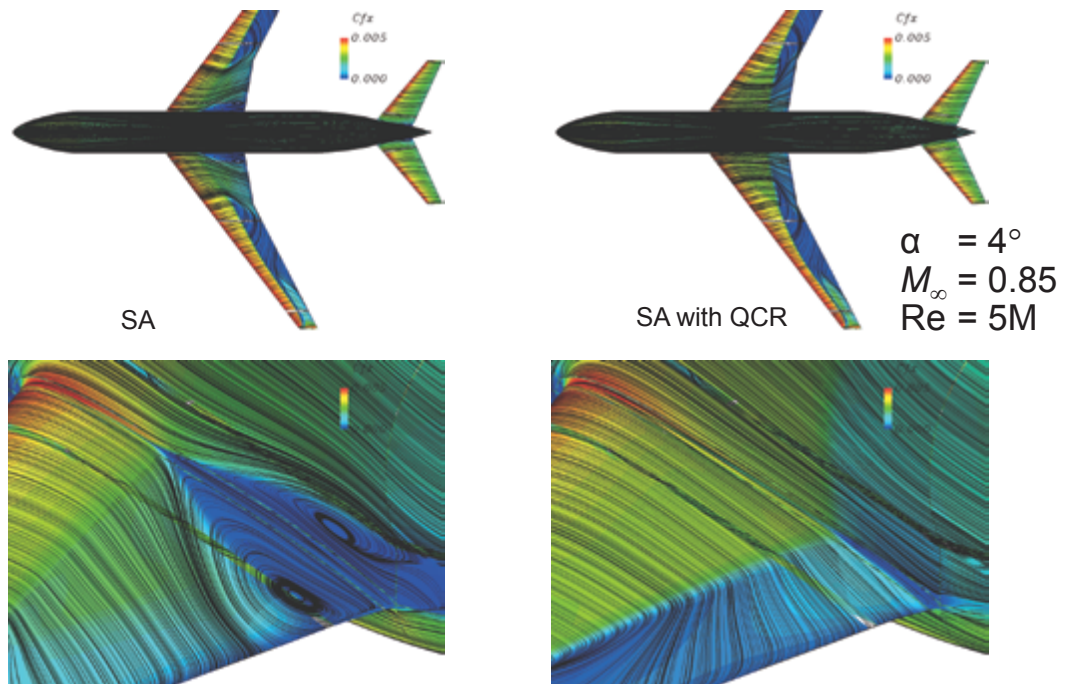
## 表面摩擦係数分布とその差



Yamamoto et al., AIAA Paper 2012-2895



## 表面摩擦係数分布とオイルフロー

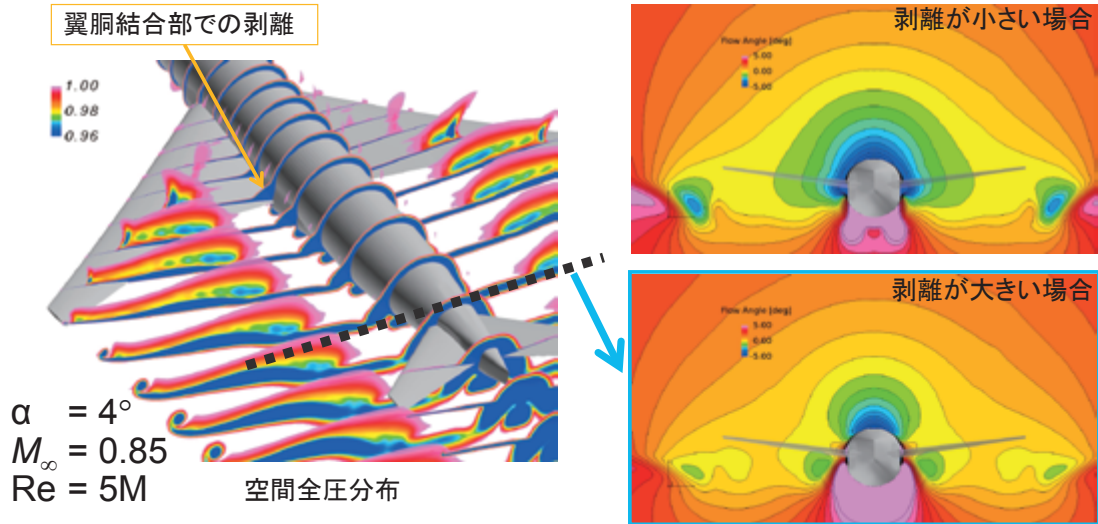


山本ら, “翼胴結合部における境界層剥離への乱流モデルの影響,” 第24回数値流体力学シンポジウム, 2010



## 水平尾翼に対する翼胴結合部剥離の影響

- 高迎角でのピッチングモーメントの変化は翼胴接合部の剥離によって水平尾翼の吹き下ろしが変わることが原因



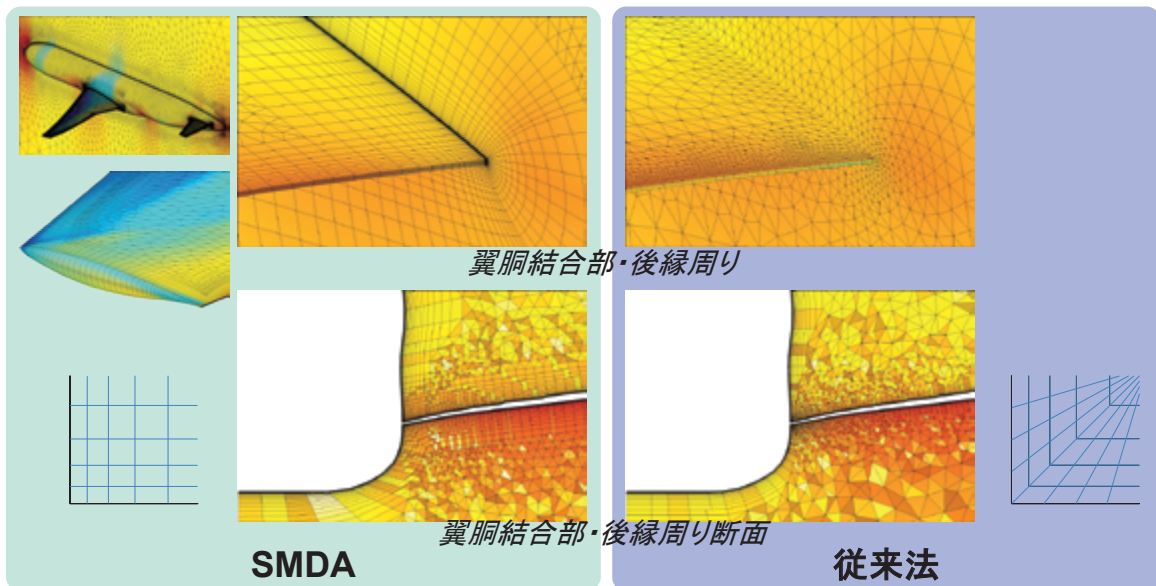
Yamamoto et al., AIAA Paper 2012-2895



MEGG3D改良点 (1)

## Suppressed Marching Direction Method提案

- 翼胴結合部での要素形状を改善し、格子密度制御を容易にした
- Ito et al., AIAA J, 51(6) 1450-1461, 2013, DOI: 10.2514/1.J052125.





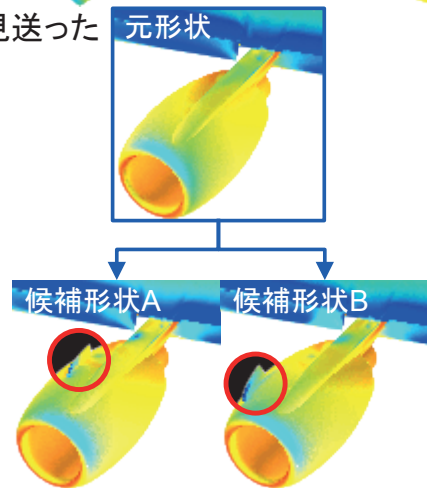
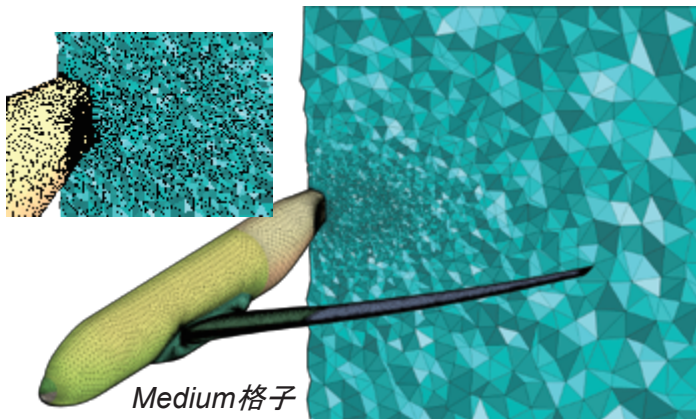
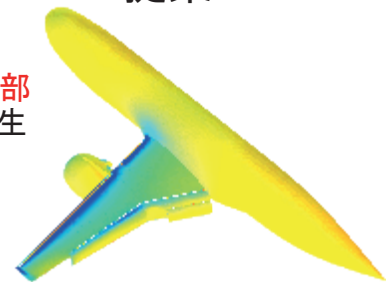
MEGG3D改良点 (2)

Automatic Local Remeshing Method提案

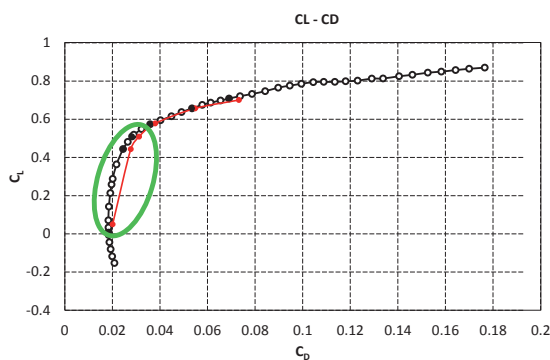
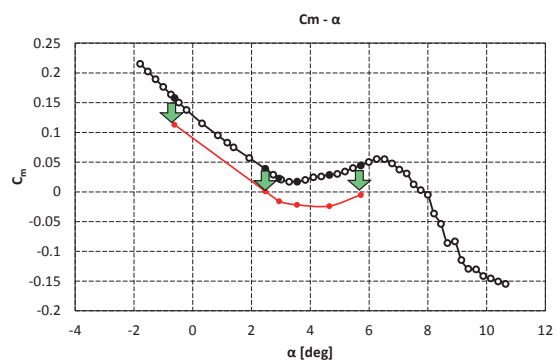
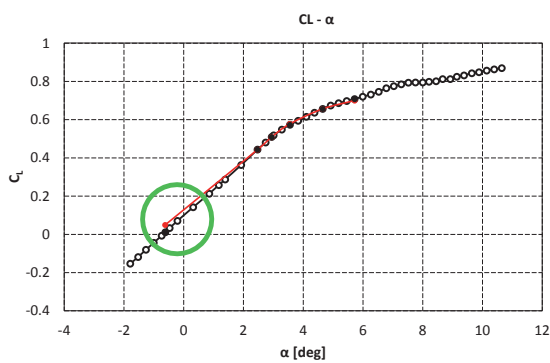
- 対象形状に小さな変化が生じた際、**変化が生じた部分だけ**要素を作成し直し、**簡単に**新たな格子を再生成可能とした

■ Ito et al., *AIAA J*, **47**(5):1270-1276, 2009, DOI: 10.2514/1.40875.

- CRM尾翼あり格子から、尾翼を取り除く際  
■ 空間解像度が不足気味のため、提供は今回見送った



課題1-1: 風洞試験で計測された変形状を反映した解析

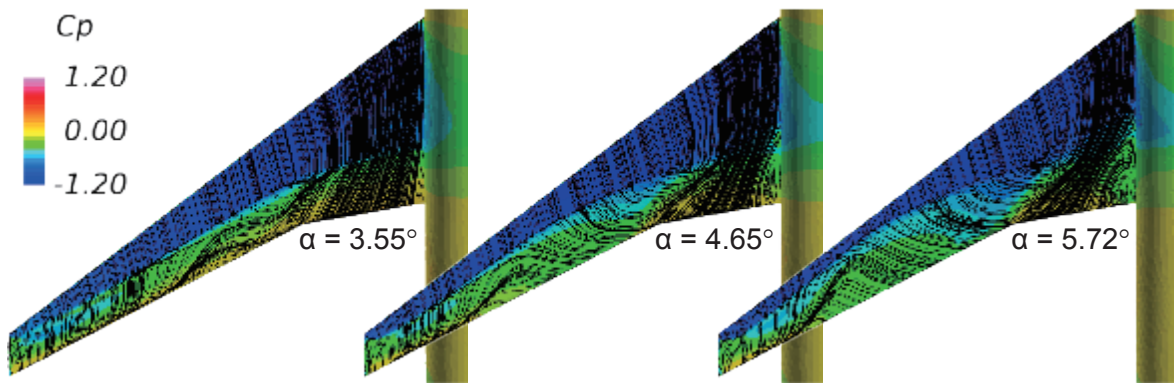


- 実験値とCFD結果を比較すると
  - 低迎角時の  $C_L$ ,  $C_D$  の不一致
  - $C_M$  のほぼ一様なシフト
- 支持装置の影響か?

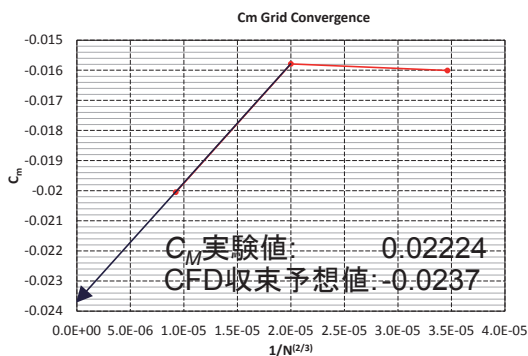
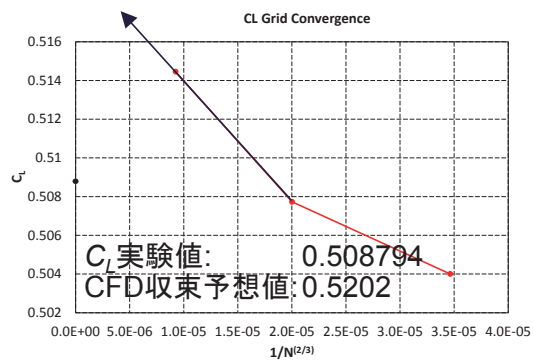
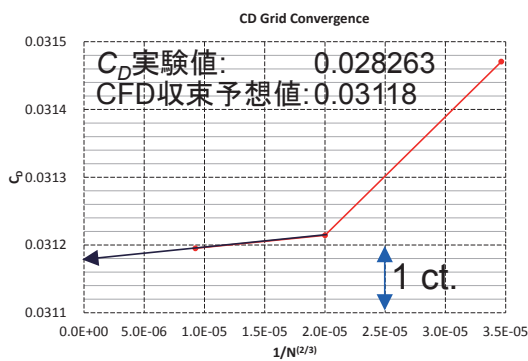


# 表面Cp分布とオイルフロー

- 高迎角時でも翼胴結合部における剥離は適度に保たれていると思われる
- Spalartの非等方性構成関係を考慮したSAモデルの効果



## 課題1-2: 迎角2.94°での格子収束性



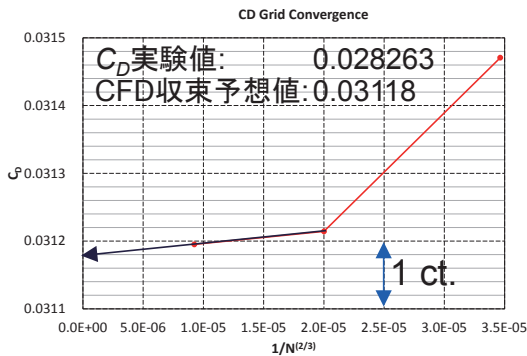
格子ファクター  $1/N^{(2/3)}$  に対して比例していない

- $C_D$  収束値を求める際に  $C_L$  一定でなく  $\alpha$  一定とした影響
- 格子変形したことによる影響?



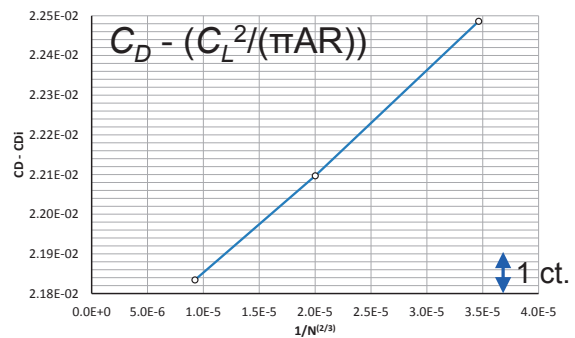
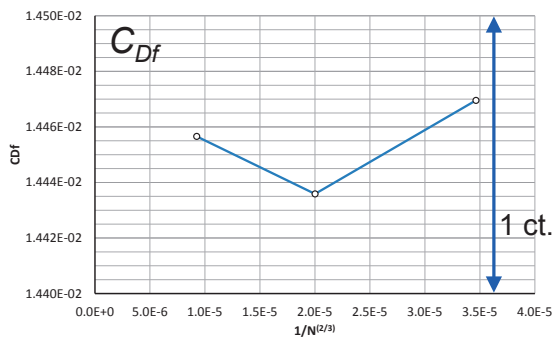


# 抵抗係数



$C_D$ は $C_L$ の関数のため、解析の妥当性を考えるために、もう少し整理

- 表面摩擦成分 $C_{Df}$ のみ
- 格子によらずほぼ一定
- 理想的な誘導抵抗分を除いた成分
- $1/N^{(2/3)}$ にほぼ比例

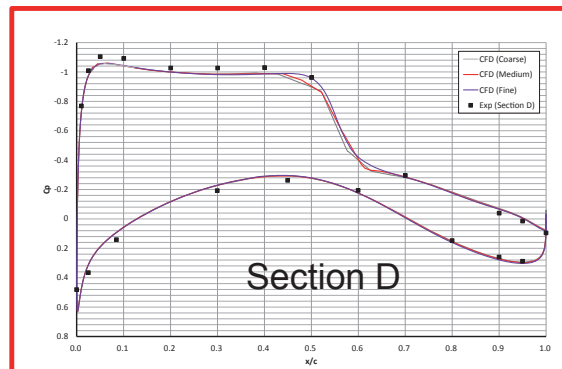
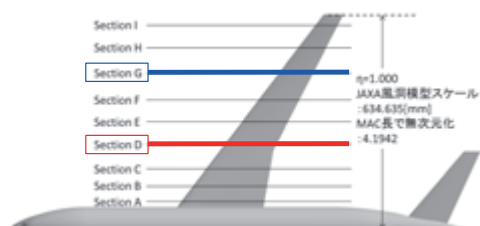
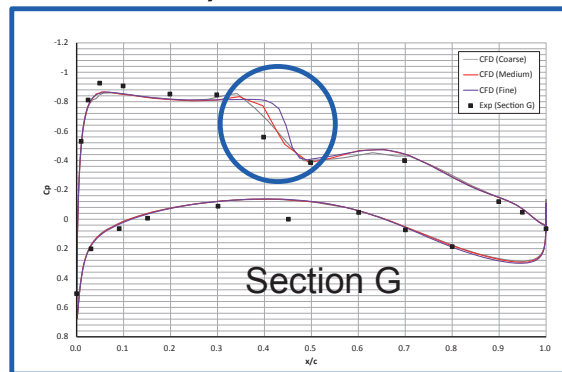


# Cp分布 ( $\alpha = 2.94^\circ$ )



- 格子密度が高いほど衝撃波を鋭くとらえている
- 外舷側ほど衝撃波位置で実験値と合わない
- 支持装置による影響と考えられる

■ AIAA Paper 2013-2711参照





## まとめ

- TAS Codeと、非構造格子生成ソフトウェアMEGG3Dで作成した格子を用いて解析を行った
    - SA乱流モデルでは、Spalartの非等方性構成関係を考慮
    - Suppressed marching direction method と automatic remeshing method を用いた格子生成
  - 抵抗係数
    - 表面摩擦成分は格子によらずほぼ一定
    - 理想的な誘導抵抗  $C_L^2/(\pi AR)$  分を除いた成分を考えれば、 $1/N^{(2/3)}$  に比例
  - Cp分布
    - 低迎角では衝撃波位置が外舷側ほど実験値と合わないが、AIAA Paper 2013-2711より、支持装置の影響と考えられる
  - 風洞試験の支持装置の影響を考慮すれば、妥当な解析結果ではないかと考えられる
-