

第47回流体力学講演会／第33回航空宇宙
数値シミュレーション技術シンポジウム

CRADLE

First Aerodynamics Prediction Challenge (APC1)

SCRYU/Tetra・HexaGrid格子及びオリジナルの非構造格子による解析

2015年7月3日(金)

○中島 吉隆, 入江 智洋

(株)ソフトウェアクレイドル

1

使用ソフトウェアと目的

CRADLE

● 使用ソフトウェア

– SCRYU/Tetra V12

- ・ 非構造格子系の熱流体解析ソフトウェア(1998～)



- SCTpre : 格子生成, 条件設定
- SCTsolver : 熱流体解析ソルバー
 - » 圧力ベースソルバー
 - » 密度ベースソルバー ←
- SCTpost : 可視化, 結果処理

● APC1参加の目的

– 精密な実測との比較

- ・ 商用ソフトの立場からCFDの解法や実用性の課題抽出
- ・ SCRYU/Tetraにおける課題の解決

2

計算手法



- **SCRYU/Tetraの密度ベースソルバーにおける計算手法**
 - 解法
 - 節点ベース有限体積法
 - 移流フラックス
 - **Rotated-RHLL法**(Nishikawa and Kitamura 2008)
 - Rotated-Riemann solverの一種
 - 高解像度なRoe法と安定性の優れたHLLC法を結合した手法
 - 移流項精度
 - 2次精度, Venkatakrisnanの制限関数(1995)
 - 拡散フラックス
 - **Alphaダンピングスキーム**(Nishikawa 2010,2011)
 - CV面での勾配評価を節点の算術平均だけでなく, パラメータAlphaを係数とするダンピング項を付与する
 - 歪んだメッシュでも安定で精度の良い手法(Jalaliら 2014)

計算手法



- **SCRYU/Tetraの密度ベースソルバーにおける計算手法**
 - 勾配計算法
 - Weighted least-squares法
 - 定常解析における非線形ソルバー
 - **Defect correction法**
 - 移流フラックスは1次精度, 拡散フラックスはダンピング項のみを考慮してヤコビアンを構築
- Nakashima, Y., Watanabe, N., and Nishikawa, H., "Development of an Effective Implicit Solver for General-Purpose Unstructured CFD Software," The 28th Computational Fluid Dynamics Symposium, 2014.
- 乱流計算
 - 乱流モデル : **SST**(SST-V, Menterら 1992)
 - 解析型壁関数(Craftら 2002)



課題0-1. 平板

● 計算概要

- 粘性項や乱流モデルの確認
- 主流マッハ数0.20, レイノルズ数 5×10^6 の平板流れ

● 計算格子

- 提供の格子“(3-D) unstructured quad version”を使用

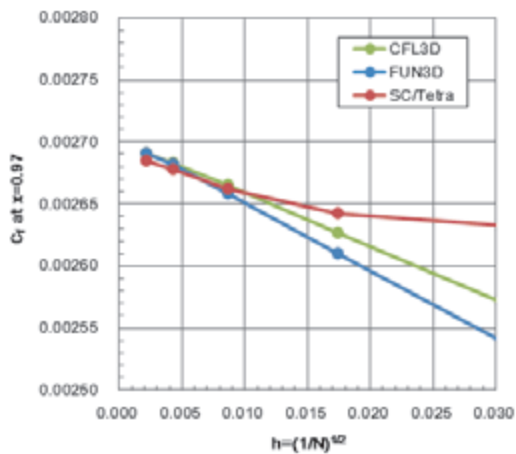
要素数				総数	総節点数
X方向	Y方向	Z方向			
544	384	1	208,896	419,650	
272	192	1	52,224	105,378	
136	96	1	13,056	26,578	
68	48	1	3,264	6,762	
34	24	1	816	1,750	



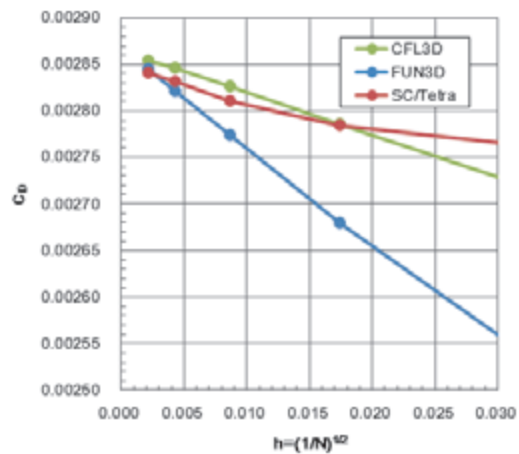
課題0-1. 平板

● 格子収束性

- X=0.97における壁面摩擦係数



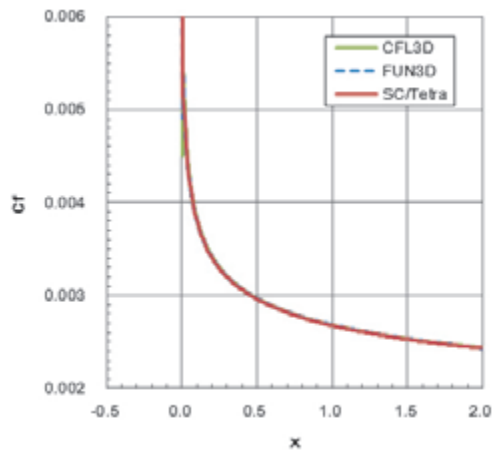
- 板に働く抵抗係数



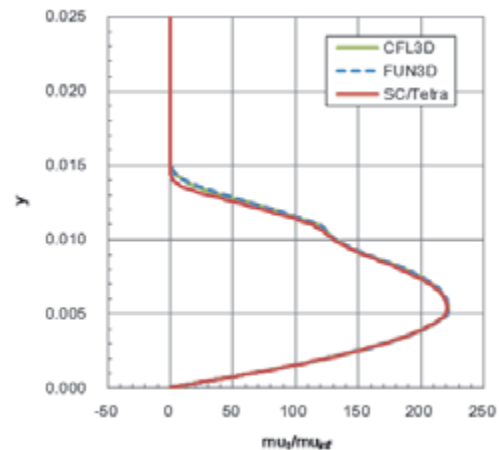
課題0-1. 平板

● 最も細かい格子の結果

- 壁面摩擦係数のX方向分布



- X=0.97における渦粘性係数分布



7

課題0-1. 平板

● 計算時間及び使用メモリ

- 使用ハードウェア
 - CPU : Intel Xeon X5680(3.33GHz)
- 48並列計算時の収束サイクル及び計算時間
 - 収束サイクル数
 - 1,364サイクル
 - 計算時間
 - 1時間58分
 - 使用メモリ
 - 4128.42[Mb]



8

課題1. NASA-CRM空力予測



● 計算概要

- $M=0.847$, $Re=2.26 \times 10^6$ のNASA-CRM形状まわりの流れを解析, 風洞試験で計測された変形状を用いる
- 2種類のメッシュを用いて課題1-1,1-2に取り組む

● 計算格子

- **HexaGrid**
 - HexaGridで生成, 提供の非構造格子
 - 要素タイプ: ハイブリッド(ヘキサ要素を主)
- **SCRYU/Tetra-mesh**
 - SCRYU/Tetra - SCTpre(付属のプリプロセッサ)で生成の非構造格子
 - 要素タイプ: ハイブリッド(テトラ要素を主, 壁面近傍はプリズム要素)



課題1. 計算メッシュ



● SCRYU/Tetra-mesh

- 解析領域
 - HexaGridと同一(184[m] x 184[m] x 184[m])
- 格子サイズ
 - 空間格子(要素サイズはオクタントにより定義)
 - "coarse" : $3.15 \times 10^{-3} \sim 12.9$ [m]
 - "medium" : $2.5 \times 10^{-3} \sim 10.2$ [m]
 - "fine" : $1.98 \times 10^{-3} \sim 8.13$ [m]
 - 壁面近傍(境界層要素)
 - 壁面第1層 : 3.57×10^{-6} [m]
 - 増加率 : 1.3
 - 層数 : 30

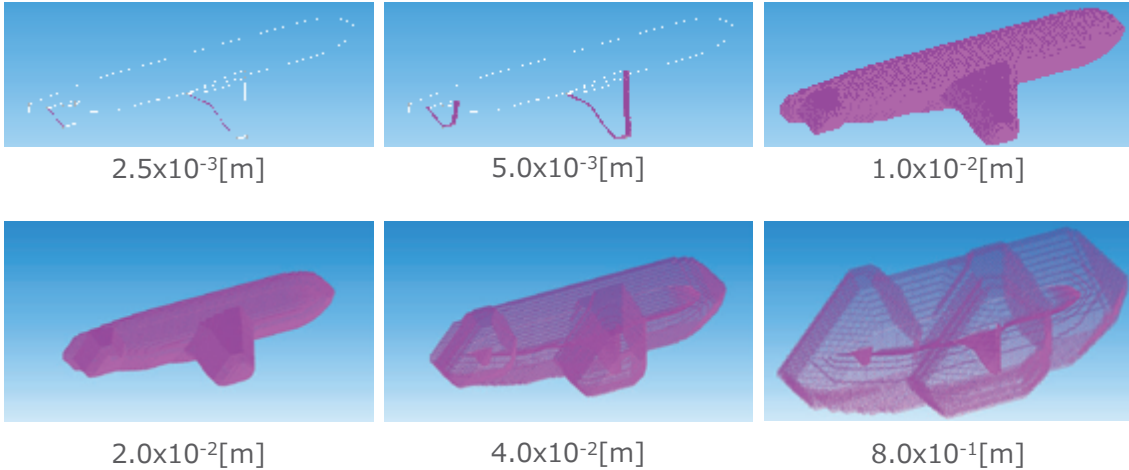
粗密の付け方は同じで、サイズのみ制御



課題1. 計算メッシュ

- **SCRYU/Tetra-mesh "medium"**

- オクタントによる空間格子の要素サイズの定義



課題1. 計算メッシュ

- **要素数及び節点数**

- HexaGrid

解像度	要素数	節点数	
		総数	機体表面
"coarse"	7,269,294	6,418,324	54,957
"medium"	14,992,926	13,329,362	148,858
"fine"	31,836,671	28,373,121	389,411

- SCRYU/Tetra-mesh

解像度	要素数	節点数	
		総数	機体表面
"coarse"	26,555,283	7,597,796	298,029
"medium"*	48,765,080	12,377,382	437,519
"fine"	98,906,732	24,021,310	695,631

* 迎角 $\alpha_c=2.94$ 度のメッシュについての値、迎角によってモデル形状が異なるためデータ点数は多少異なるが、基本的に同じパラメータで作成

同程度

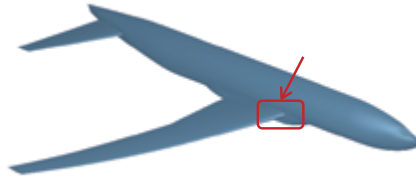


課題1. 計算メッシュ

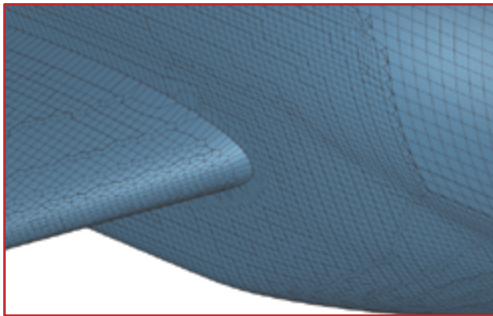
CRADLE

● 表面メッシュの比較 "medium"

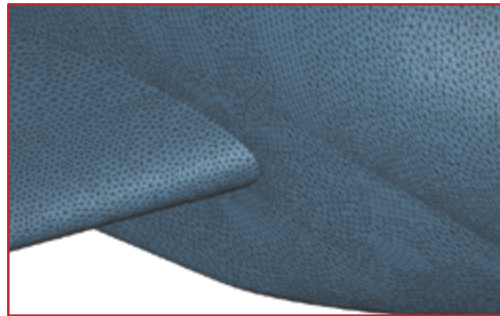
– 主翼付け根の前縁部



• HexaGrid



• SCRYU/Tetra-mesh



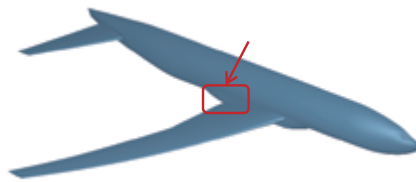
13

課題1. 計算メッシュ

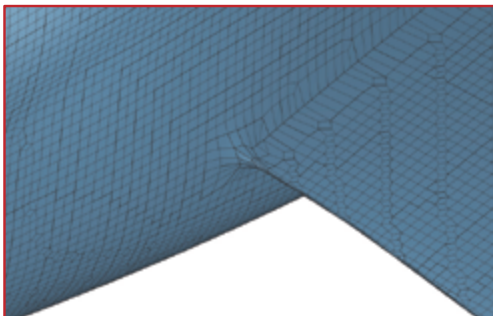
CRADLE

● 表面メッシュの比較 "medium"

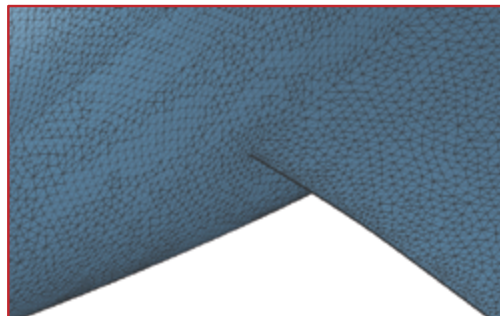
– 主翼付け根の後縁部



• HexaGrid



• SCRYU/Tetra-mesh

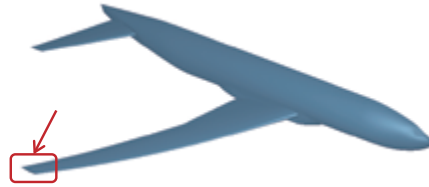


14

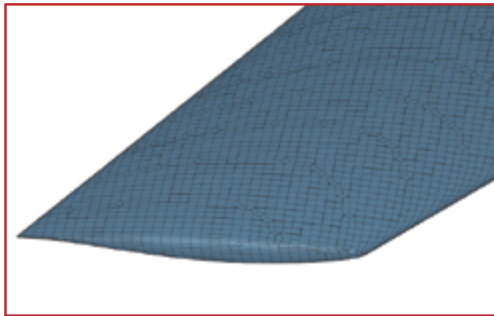
課題1. 計算メッシュ

- 表面メッシュの比較 "medium"

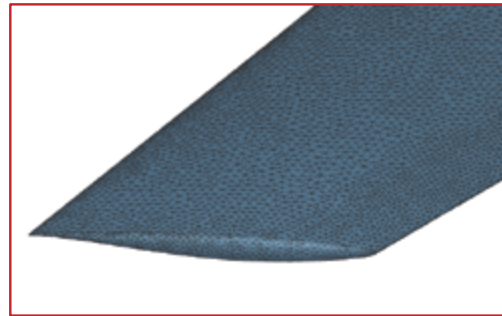
- 主翼端部



- HexaGrid



- SCRYU/Tetra-mesh



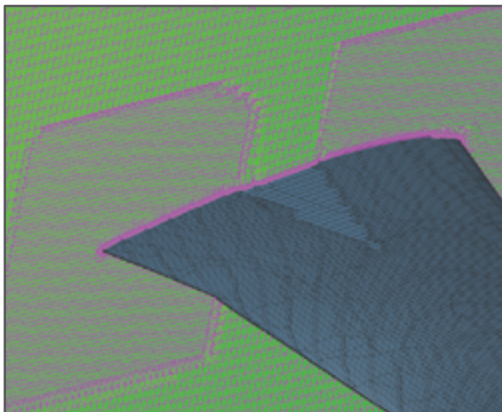
| 15

課題1. 計算メッシュ

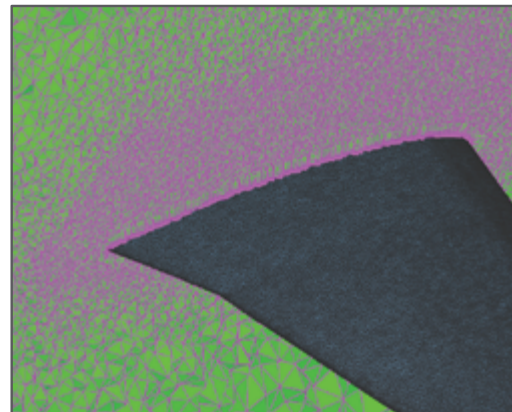
- 空間メッシュの比較 "medium"

- 主翼断面

- HexaGrid



- SCRYU/Tetra-mesh



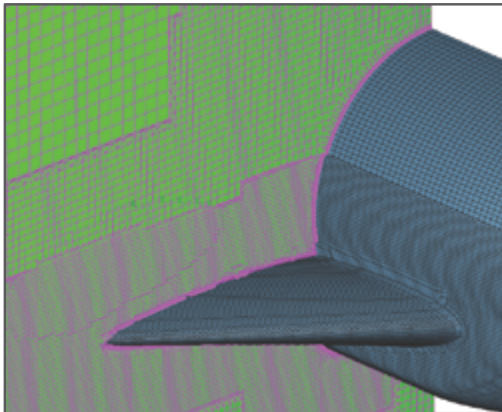
| 16

課題1. 計算メッシュ

● 空間メッシュの比較 "medium"

– 翼胴接合部断面

• HexaGrid



• SCRYU/Tetra-mesh



課題1. 計算時間

● 要計算時間及び使用メモリ

– 使用ハードウェア

• CPU : Intel Xeon X5680(3.33GHz)

– 収束サイクル及び計算時間

• HexaGrid

*"medium"は全迎角での平均値

解像度	収束サイクル	並列数	計算時間[時間]	使用メモリ[Mb]
"coarse"	350	48	2.3	32,699
"medium"*	426	48	5.1	64,256
"fine"	461	96	6.7	137,301

• SCRYU/Tetra-mesh

解像度	収束サイクル	並列数	計算時間[時間]	使用メモリ[Mb]
"coarse"	375	48	3.1	50,842
"medium"*	471	48	7.0	86,478
"fine"	387	96	5.8	170,654

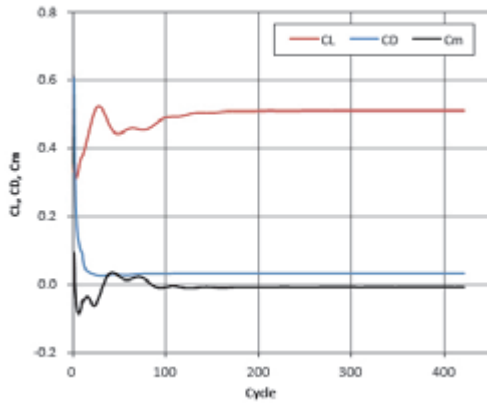


課題1. 定常解析

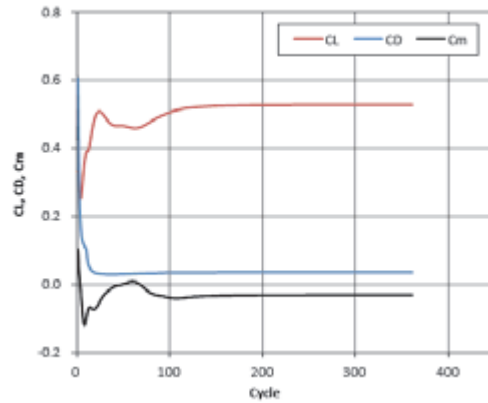
- 空力係数の履歴

- 迎角 $\alpha_c=2.94$ 度(no312)

- HexaGrid



- SCRYU/Tetra-mesh

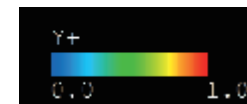
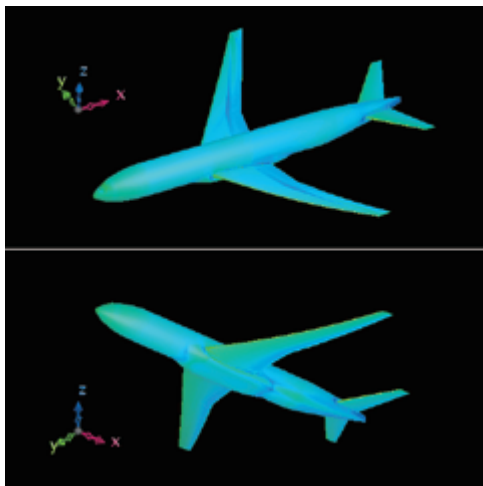


課題1. Y+分布

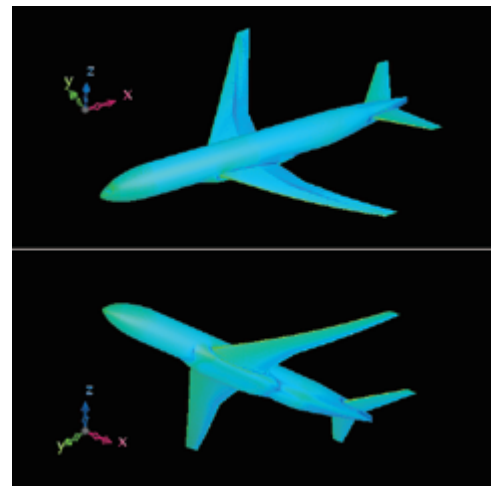
- 壁面上Y+分布

- 迎角 $\alpha_c=2.94$ 度(no312)

- HexaGrid



- SCRYU/Tetra-mesh



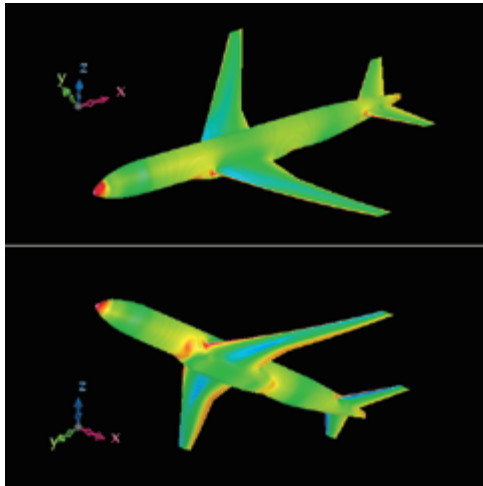
課題1-1. 迎角に対する変化

CRADLE

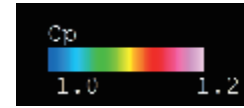
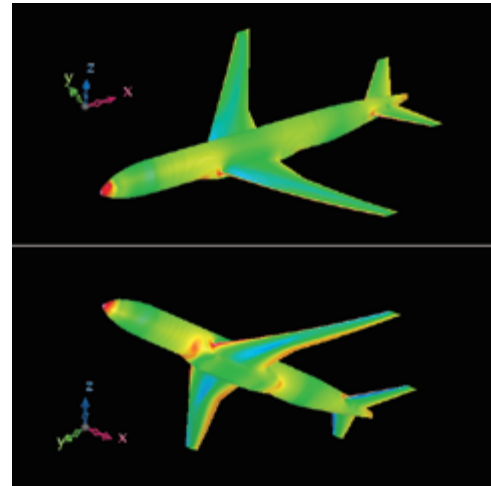
● 表面圧力分布

– 迎角 $\alpha_c = -0.62$ 度(no302)

• HexaGrid



• SCRYU/Tetra-mesh



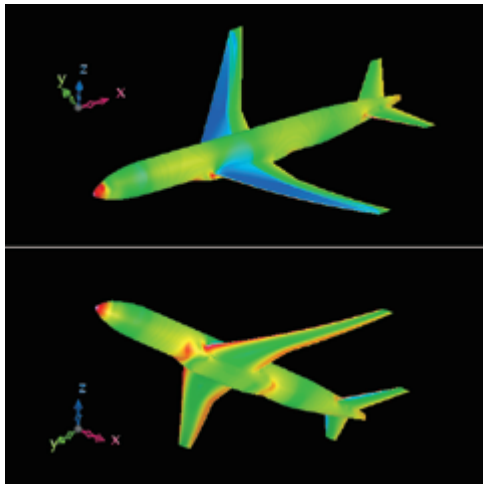
課題1-1. 迎角に対する変化

CRADLE

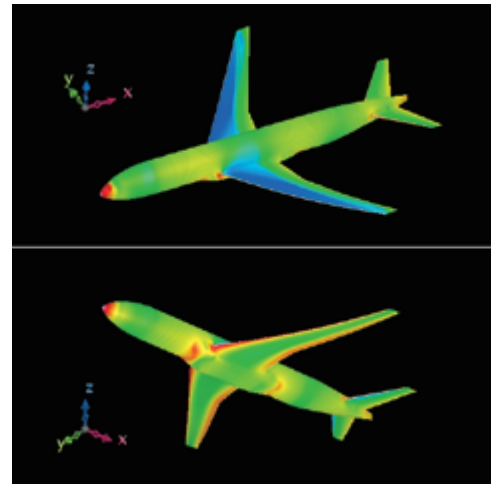
● 表面圧力分布

– 迎角 $\alpha_c = 2.94$ 度(no312)

• HexaGrid



• SCRYU/Tetra-mesh

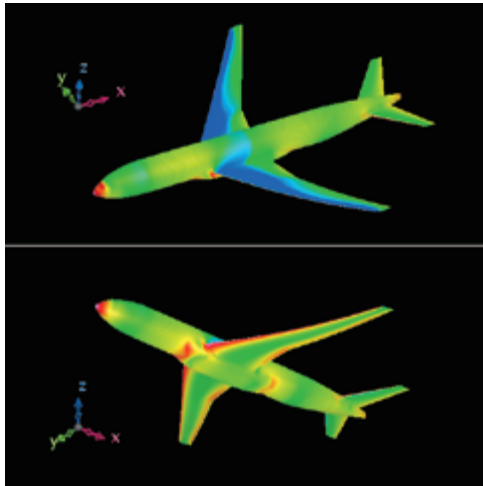


課題1-1. 迎角に対する変化

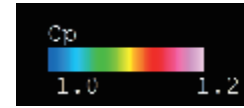
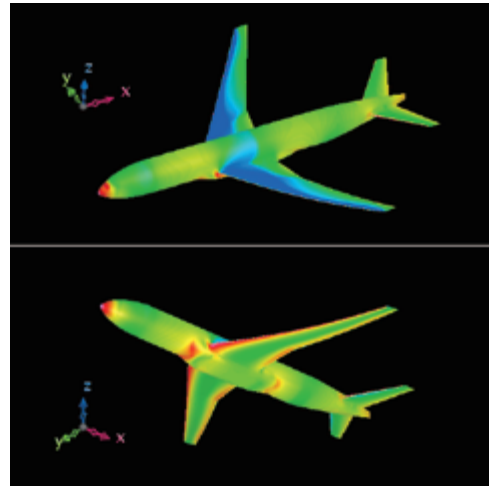
● 表面圧力分布

– 迎角 $\alpha_c=5.72$ 度(no323)

• HexaGrid



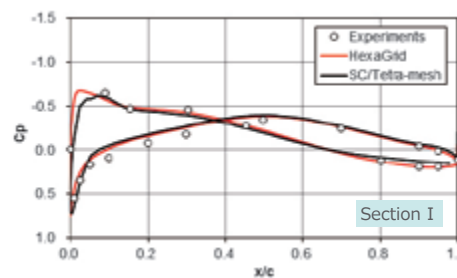
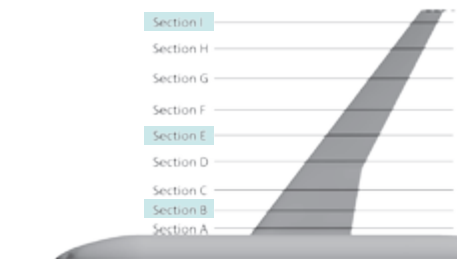
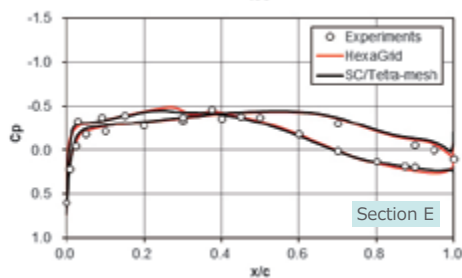
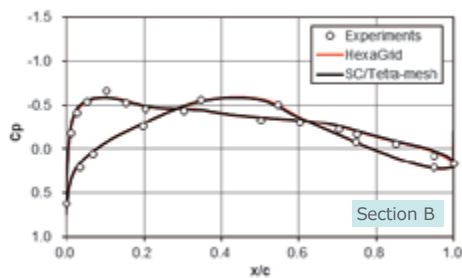
• SCRYU/Tetra-mesh



課題1-1. 迎角に対する変化

● 表面Cp分布

– 迎角 $\alpha_c=-0.62$ 度(no302)

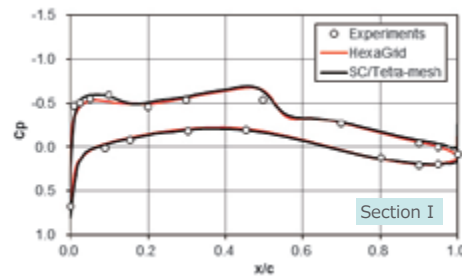
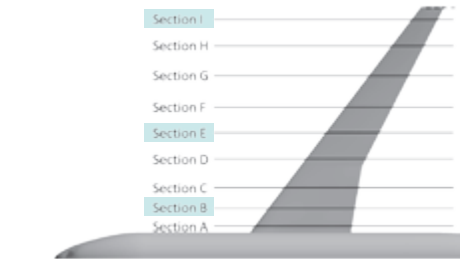
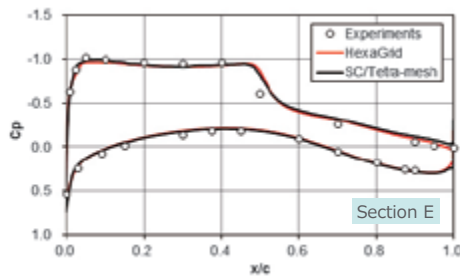
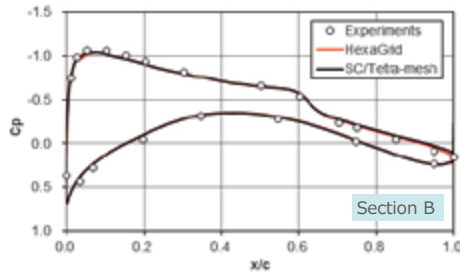


課題1-1. 迎角に対する変化

CRADLE

● 表面Cp分布

– 迎角 $\alpha_c=2.94$ 度(no312)

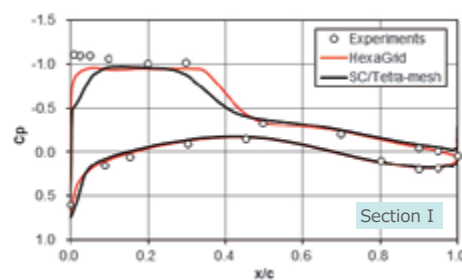
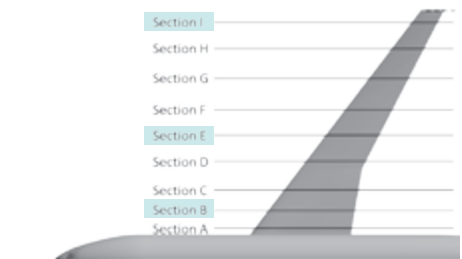
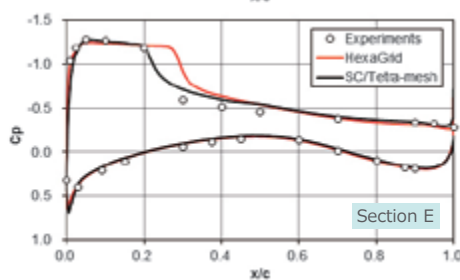
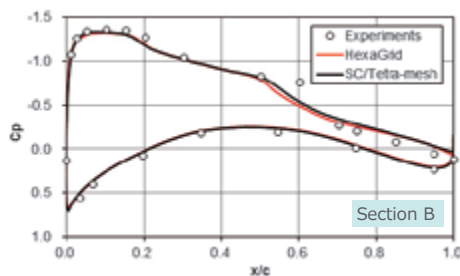


課題1-1. 迎角に対する変化

CRADLE

● 表面Cp分布

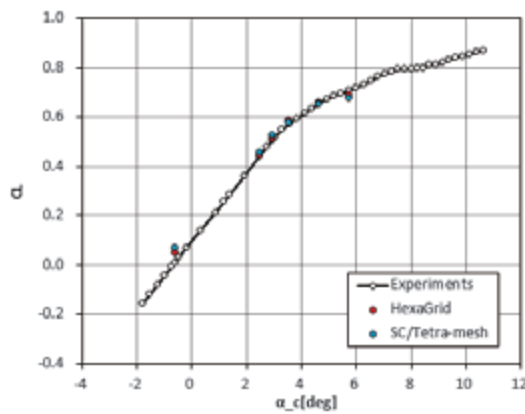
– 迎角 $\alpha_c=5.72$ 度(no323)



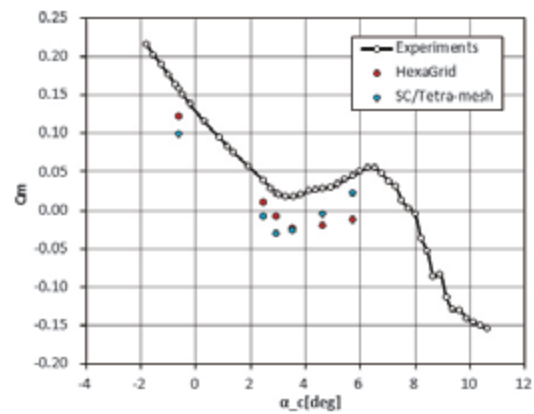
課題1-1. 迎角に対する変化

● 空力係数

- 迎角に対する揚力係数



- 迎角に対するモーメント係数

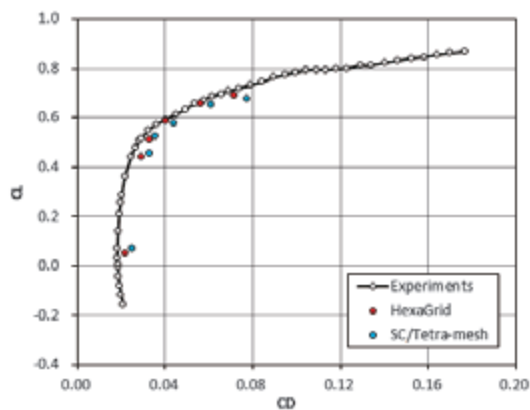


27

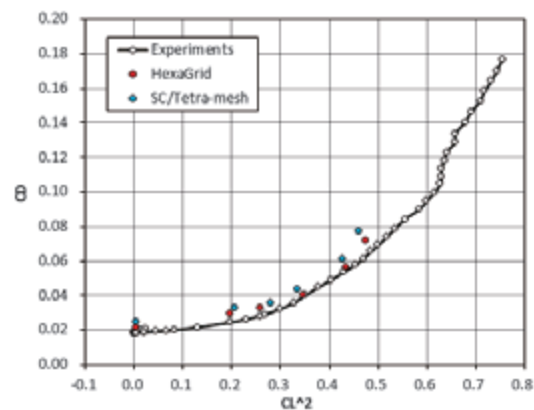
課題1-1. 迎角に対する変化

● 空力係数

- 抵抗係数に対する揚力係数



- 揚力係数の2乗に対する抵抗係数



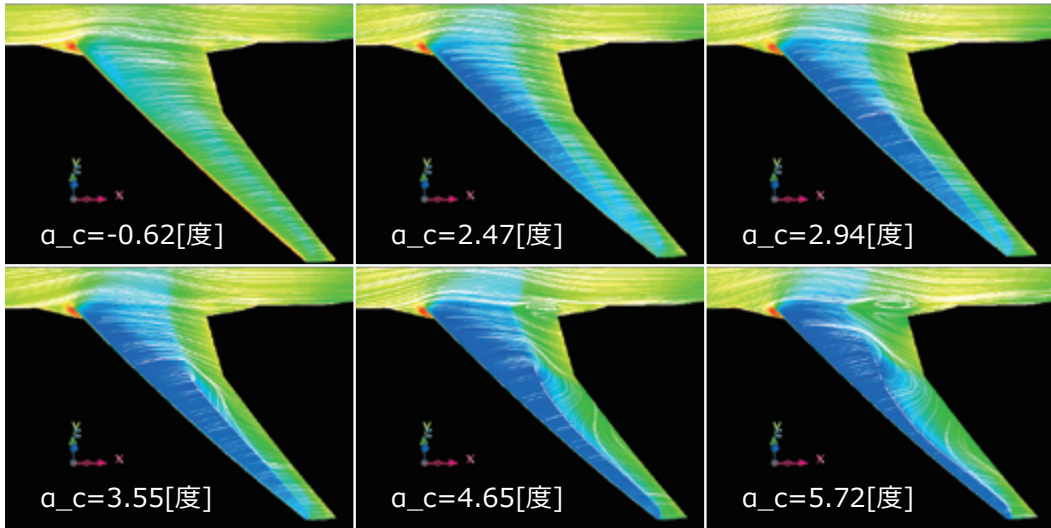
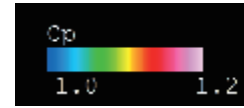
28

課題1-1. 迎角に対する変化

CRADLE

- 表面圧力とオイルフロー

- HexaGrid

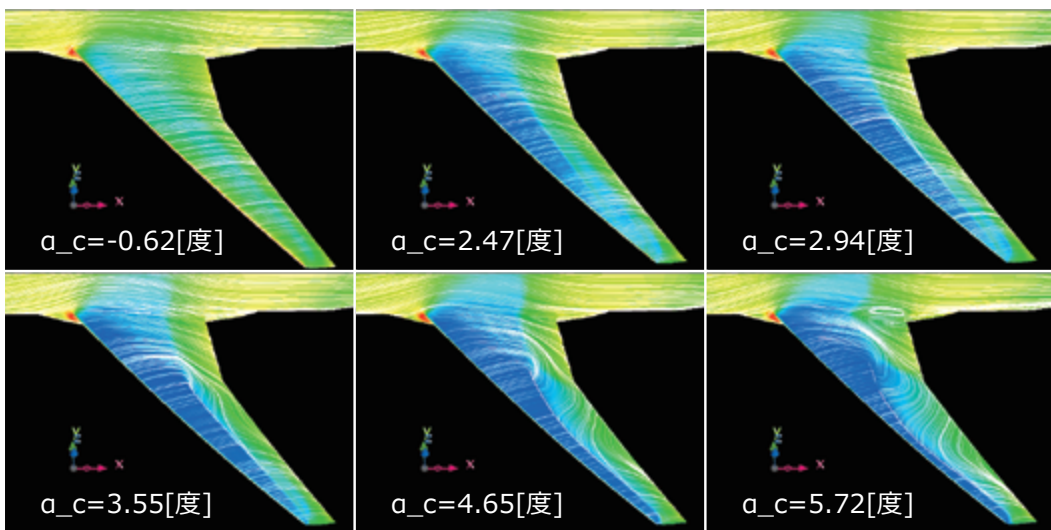


課題1-1. 迎角に対する変化

CRADLE

- 表面圧力とオイルフロー

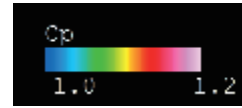
- SCRYU/Tetra-mesh



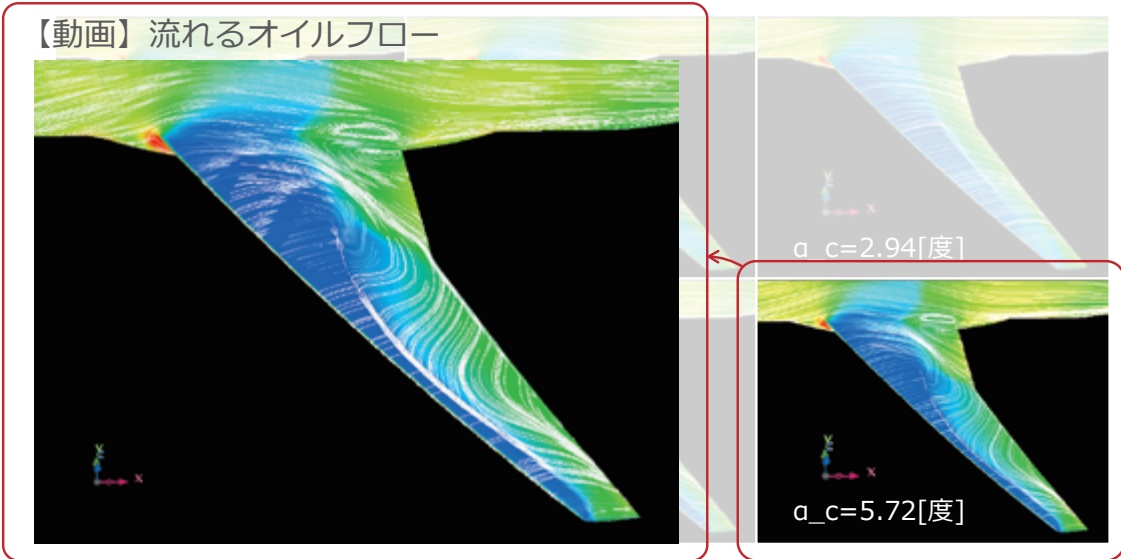
課題1-1. 迎角に対する変化

- 表面圧力とオイルフロー

– SCRYU/Tetra-mesh



【動画】 流れるオイルフロー

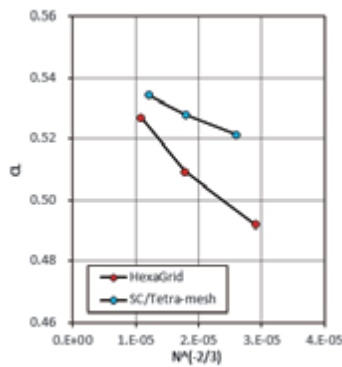


課題1-2. メッシュ依存性

- 空力特性のメッシュ依存性

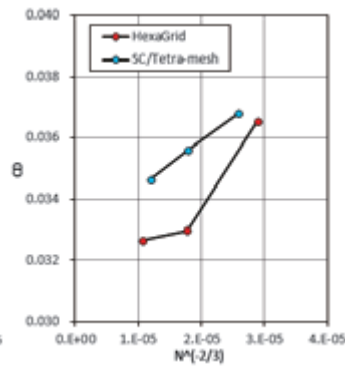
– 迎角 $\alpha_c = 2.94$ 度(no312)

- 揚力係数



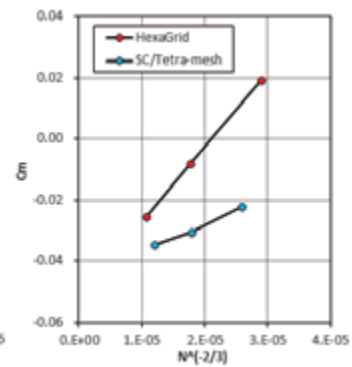
(Experiments) 0.5088

- 抵抗係数



(Experiments) 0.0283

- モーメント係数



(Experiments) 0.0222

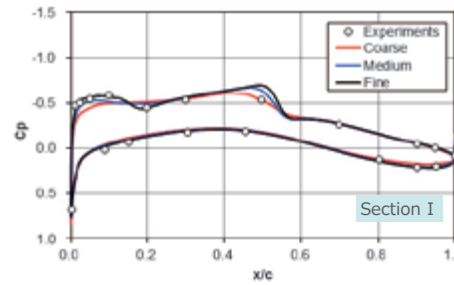
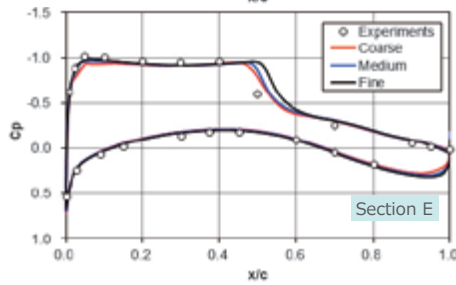
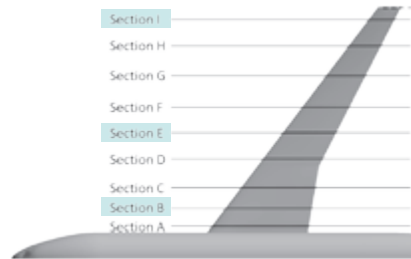
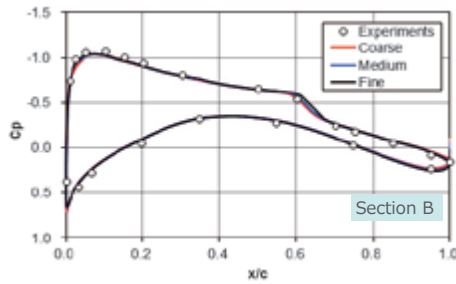


課題1-2. メッシュ依存性

CRADLE

- 表面Cp分布, 迎角 $\alpha_c=2.94$ 度(no312)

– HexaGrid

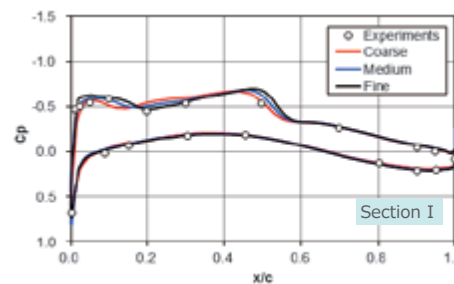
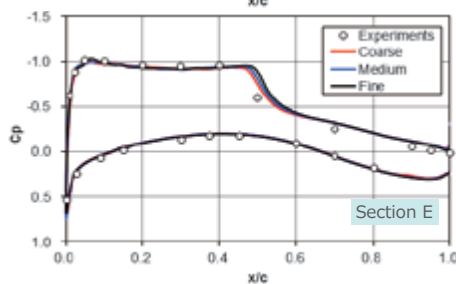
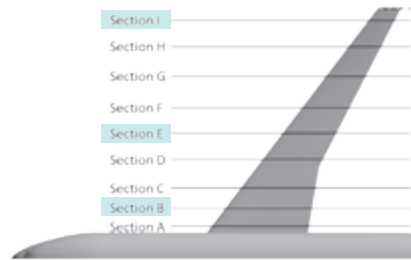
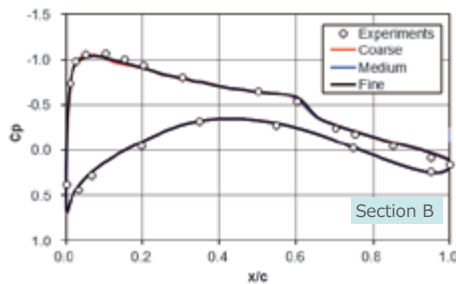


課題1-2. メッシュ依存性

CRADLE

- 表面Cp分布, 迎角 $\alpha_c=2.94$ 度(no312)

– SCRYU/Tetra-mesh



まとめ



- **まとめ**

- 非構造格子系の熱流体解析ソフトウェアであるSCRYU/Tetraの密度ベースソルバーを用いてAPC1の課題に取り組んだ
- 粘性項や乱流モデルを確認する平板の課題(課題0)では良好な結果が得られた
- NASA-CRMの空力特性予測(課題1)については、SCRYU/Tetraのプリプロセッサにより生成したテトラ要素主体の非構造格子においても、ワークショップで提供されたHexaGridと同等な結果が得られた



| 35

ご清聴ありがとうございました。



| 36