

## First Aerodynamics Prediction Challenge (APC1)

## Cflowによる各種格子の比較

○上野陽亮、永田卓、越智章生  
川崎重工業(株) 航空宇宙カンパニー

2015年7月3日(金)  
東京大学 駒場リサーチキャンパス

 **Kawasaki**  
Powering your potential

### APC1参加概要

**目的**

同一ソルバー(自社開発コード**Cflow**)による、  
**6種類の格子**(提供格子3種類+自作格子3種類)の比較を行う。

**課題番号**

1-1, 1-2, 1-3

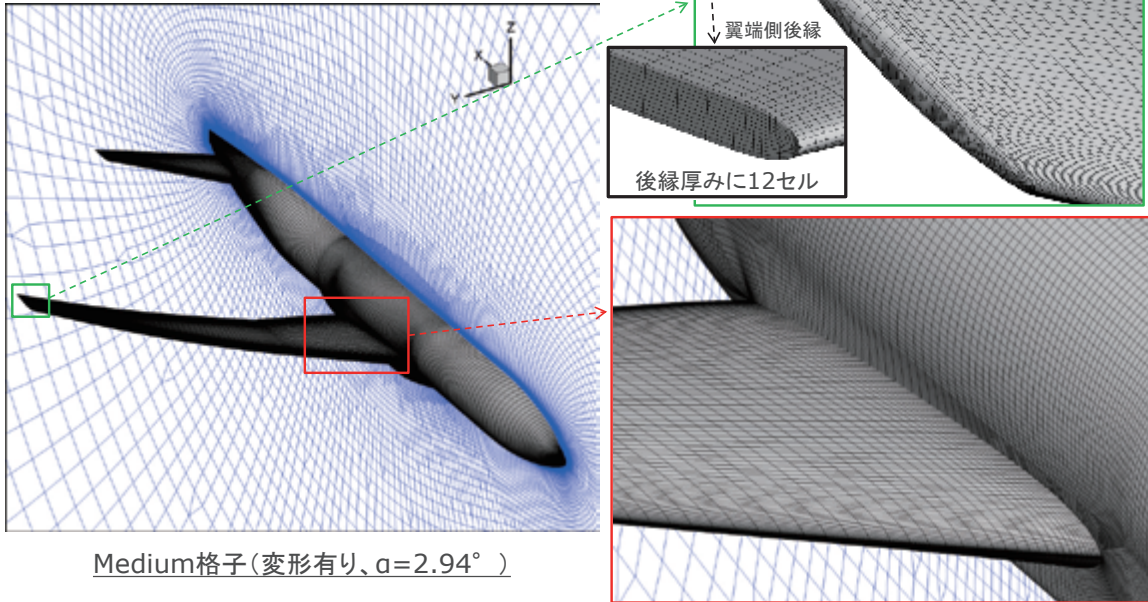
**格子一覧**

※下表の色は、以降に示すグラフの色に対応

格子		セル数 (Medium)	ソルバー / 乱流モデル	備考
HexaGrid	非構造	1500万	Cflow / SA	
MEGG3D	非構造	3000万	Cflow / SA	
UPACS	構造	900万	Cflow / SA	
PUFGG	非構造	600万	Cflow / SA	構造格子に近い (次頁参照)
Cflow(直交)	非構造	2000万	Cflow / SA	詳細は永田が発表
Cflow(非直交)	非構造	1300万	Cflow / SA	詳細は永田が発表

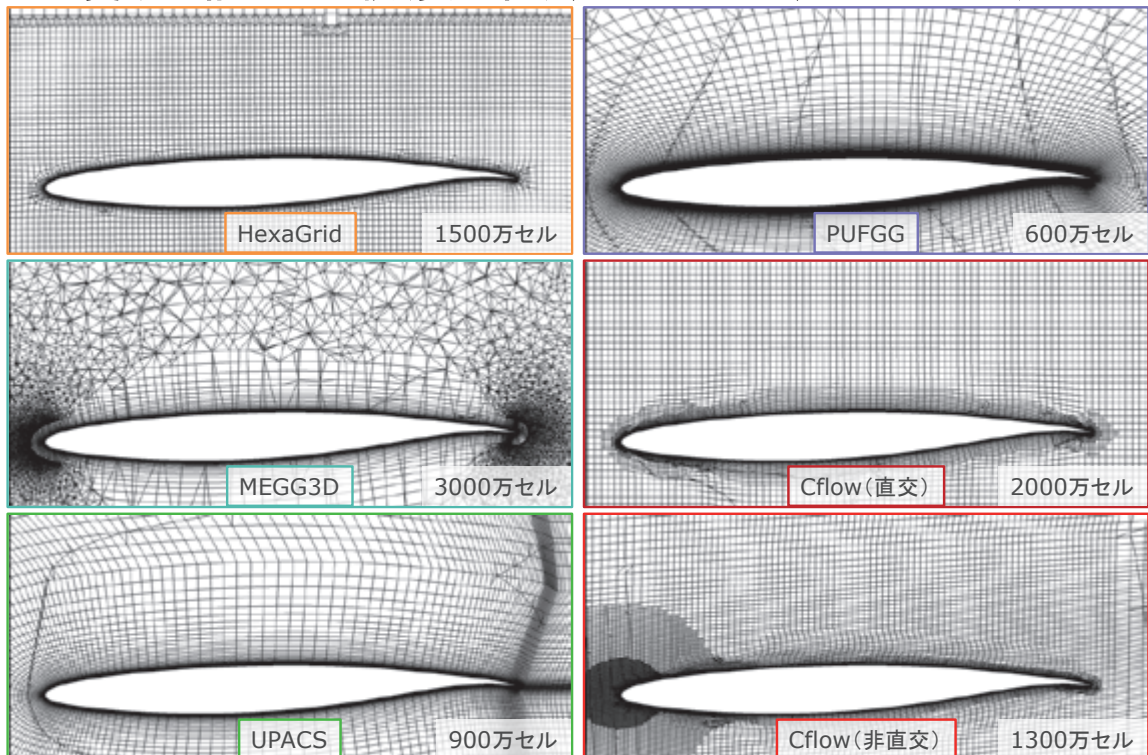
## 自作格子(PUFGG)の概要

- KHIの航空機開発で主に使用されてきた(2000年頃～)
- 表面格子: **手動作成** ⇒ **空間格子: 自動作成**

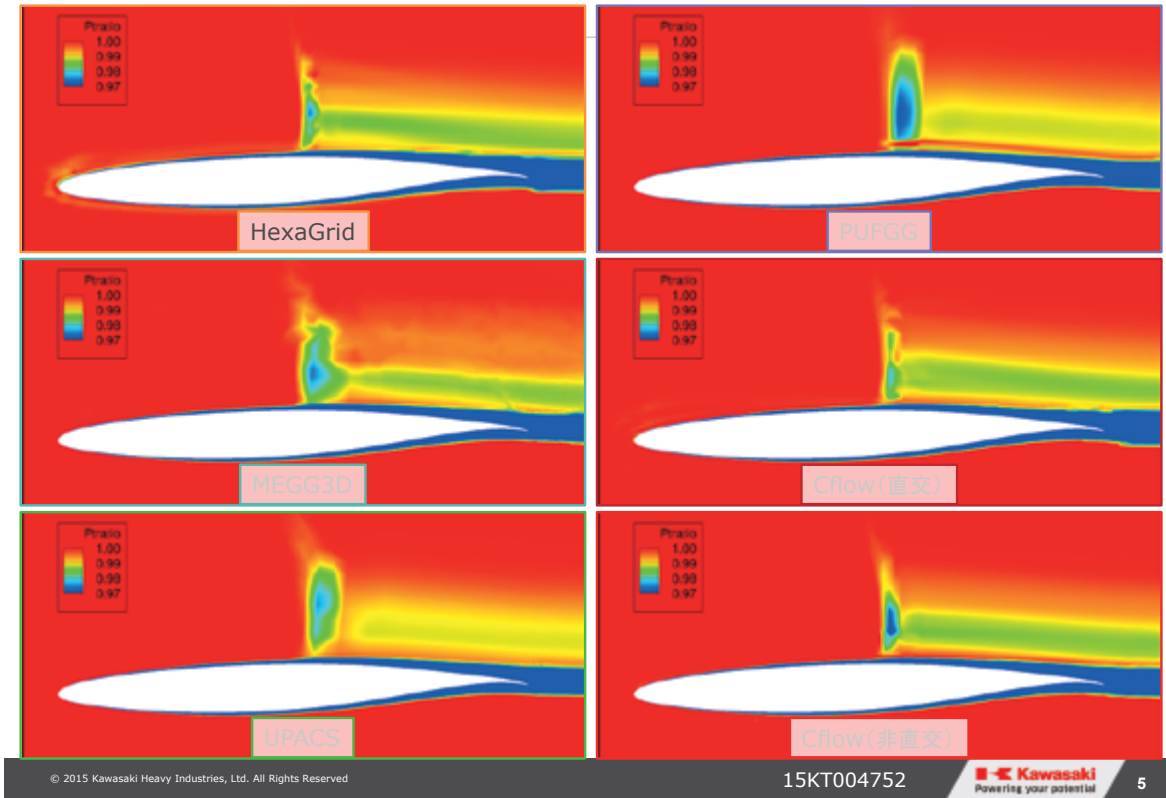


Medium格子(変形有り、 $\alpha=2.94^\circ$ )

## 主翼断面格子の比較(変形有り、 $\alpha=2.94^\circ$ 、Section E)

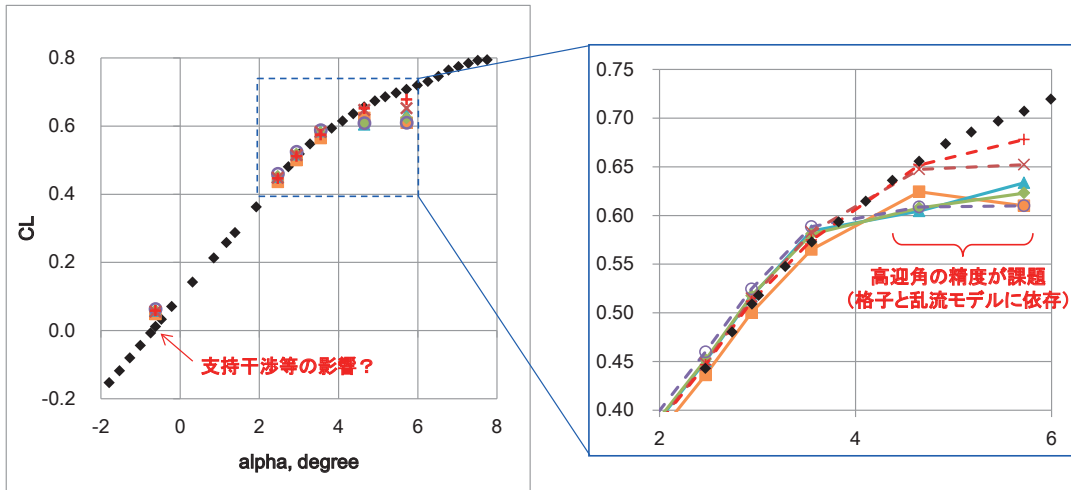
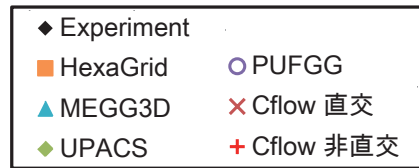


### 課題1-1 断面の総圧比分布 ( $\alpha=2.94^\circ$ 、Section E)



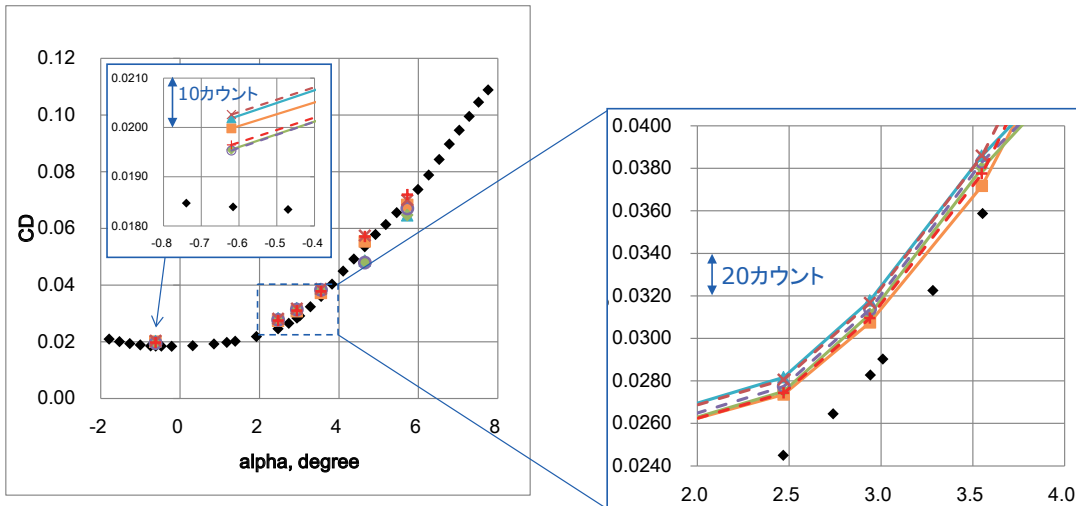
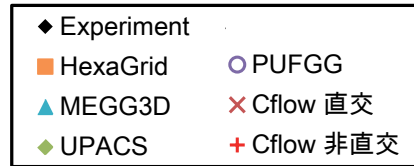
### 課題1-1 縦三分力の比較 (CL- $\alpha$ )

- 低迎角 (線形領域)  $\rightarrow$  0.02程度のはらつき
- 高迎角  $\rightarrow$  はらつきが大きい (格子と乱流モデルの影響?)
- $\alpha = -0.62^\circ$  で風試の揚力が小さいのは支持干渉の影響か?



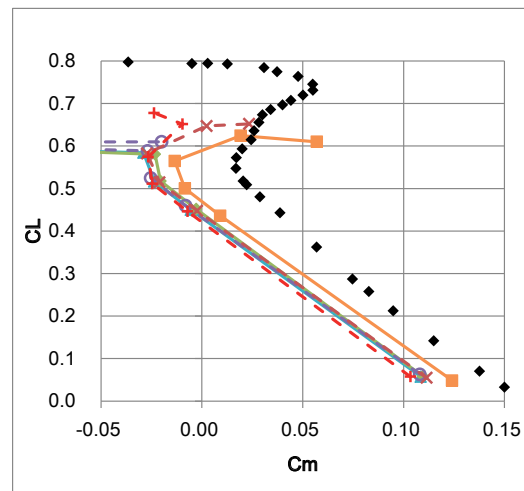
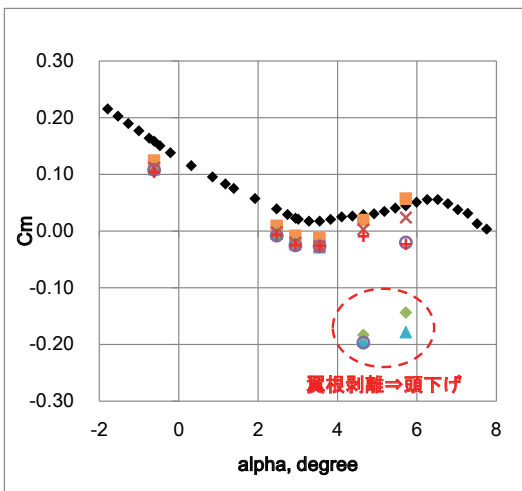
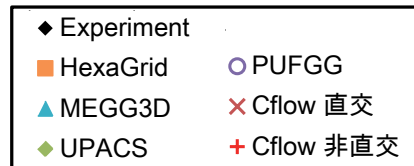
### 課題1-1 縦3分力の比較(CD-α)

- 低迎角→10カウント程度のばらつき
- 高迎角→100カウント程度のばらつき
- 風試の抗力が小さいのは支持干渉の影響か？

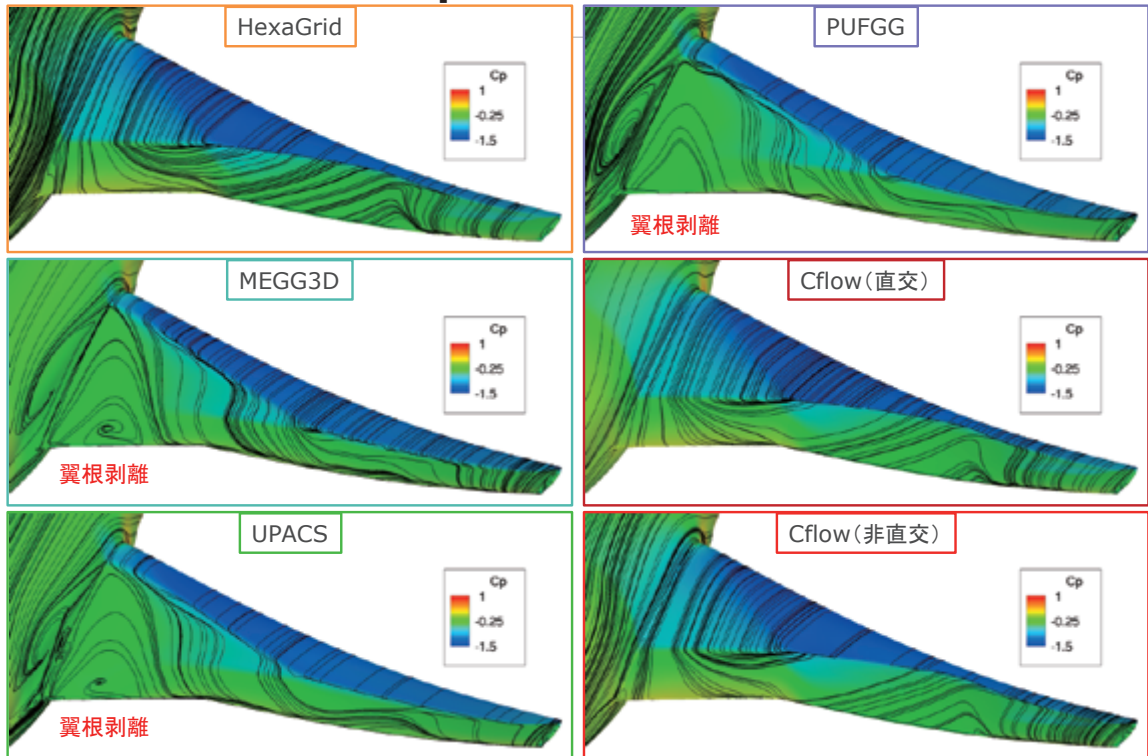


### 課題1-1 縦3分力の比較(Cm-α, CL-Cm)

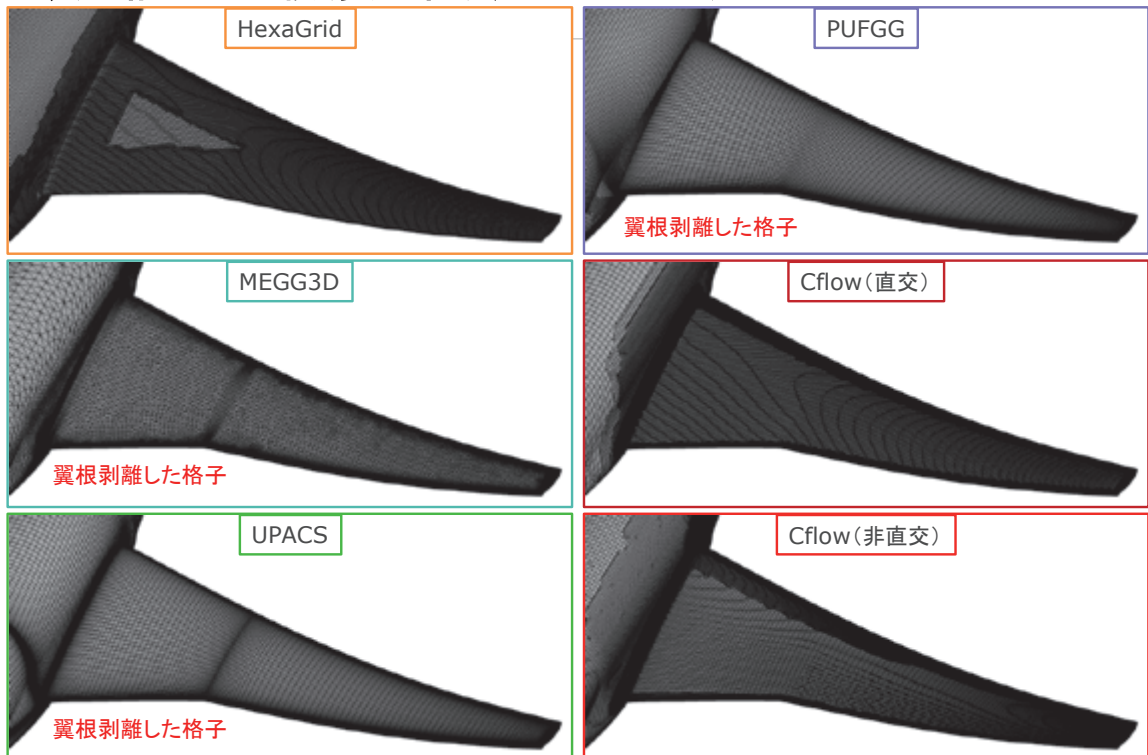
- 一部の格子では、高迎角で翼根側が剥離し、モーメントが減少(頭下げ)している



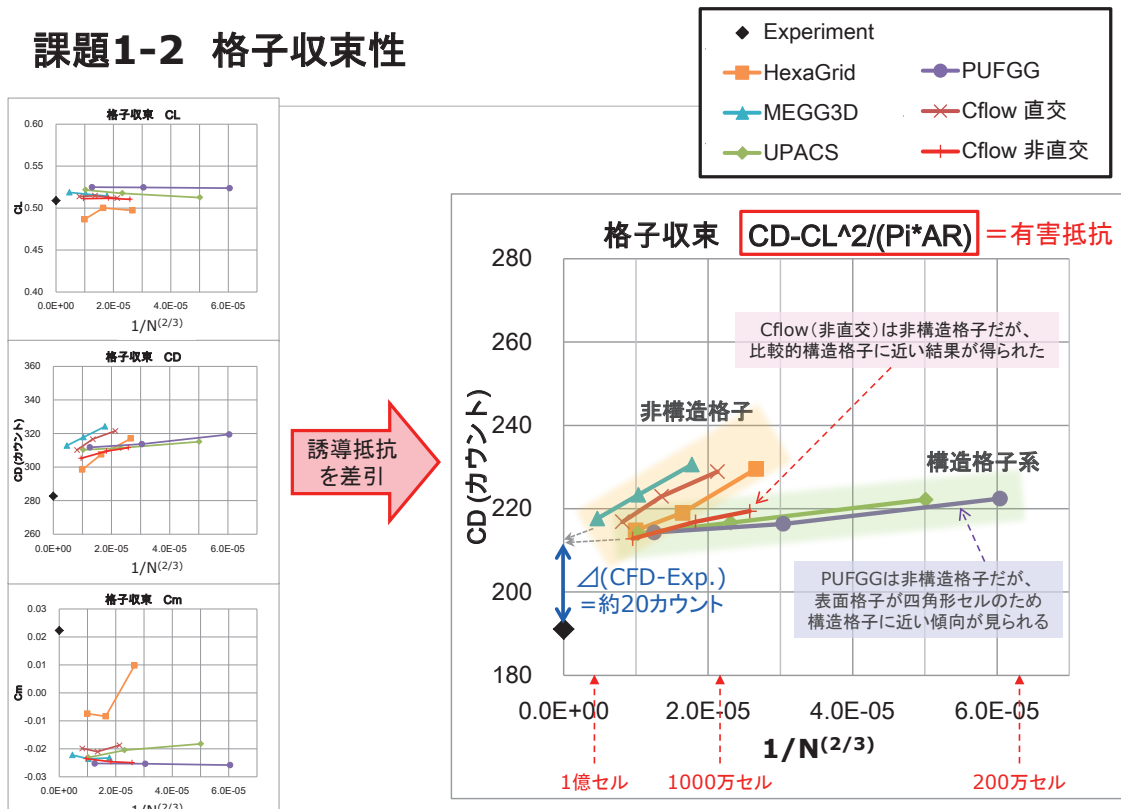
### 課題1-1 表面流線とCp分布 ( $\alpha=4.65^\circ$ )



### 表面格子の比較 (変形有り、 $\alpha=4.65^\circ$ )

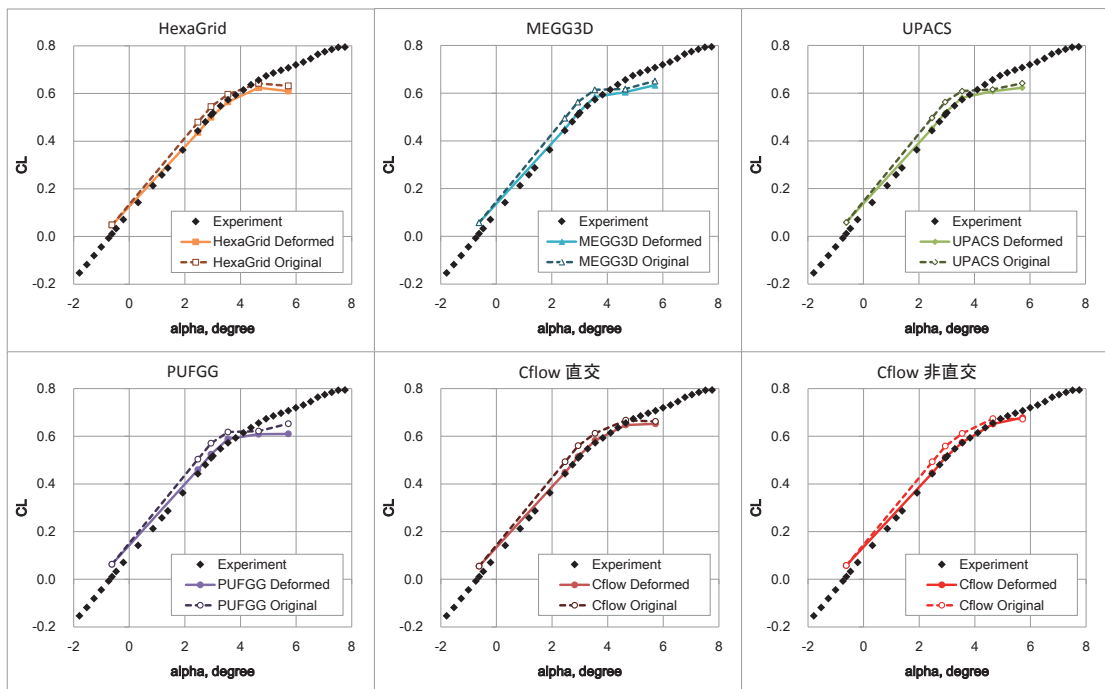


### 課題1-2 格子収束性



### 課題1-3 変形の効果 (CL- $\alpha$ )

- 変形によりCLは減少(振り下げの効果)  
 $\Rightarrow \alpha = 2 \sim 4^\circ$  で風試結果に合う方向
- $\alpha = -0.62^\circ$  は支持干渉等の影響?



## まとめ

- 同一ソルバー(自社開発コード**Cflow**)による、6種類の格子(提供格子3種類+自作格子3種類)の比較を行った。

### ■ 結果

- 課題1-1:空力特性
  - ✓ 高迎角側で格子の違いが顕著に現れた(縦3分力のばらつきが大きい)
- 課題1-2:格子収束性
  - ✓ 構造格子の方が、非構造格子に比べて格子収束性が良い
  - ✓ Cflow(非直交)は非構造格子でありながら、構造格子に近い格子収束性が得られた
- 課題1-3:変形の効果
  - ✓ 空弾効果(主翼変形)の考慮により、CLが減少し、風試結果に近づいた(全ての格子で同様の結果)

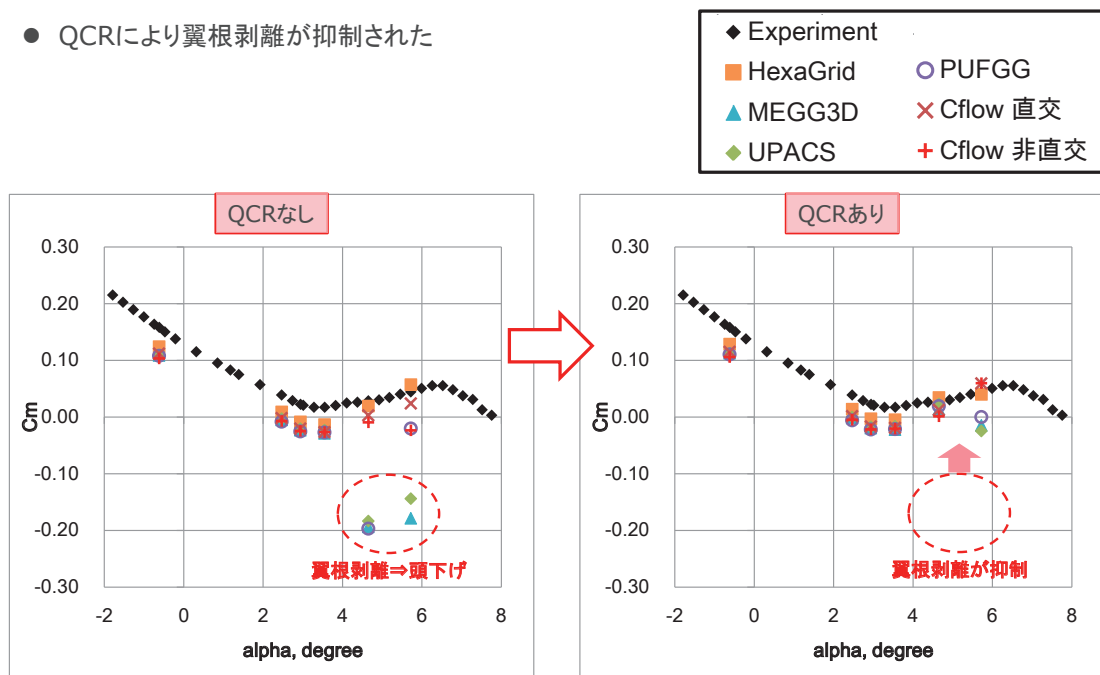
### ■ 課題

- 高迎角の予測精度向上(格子、乱流モデルに依存)

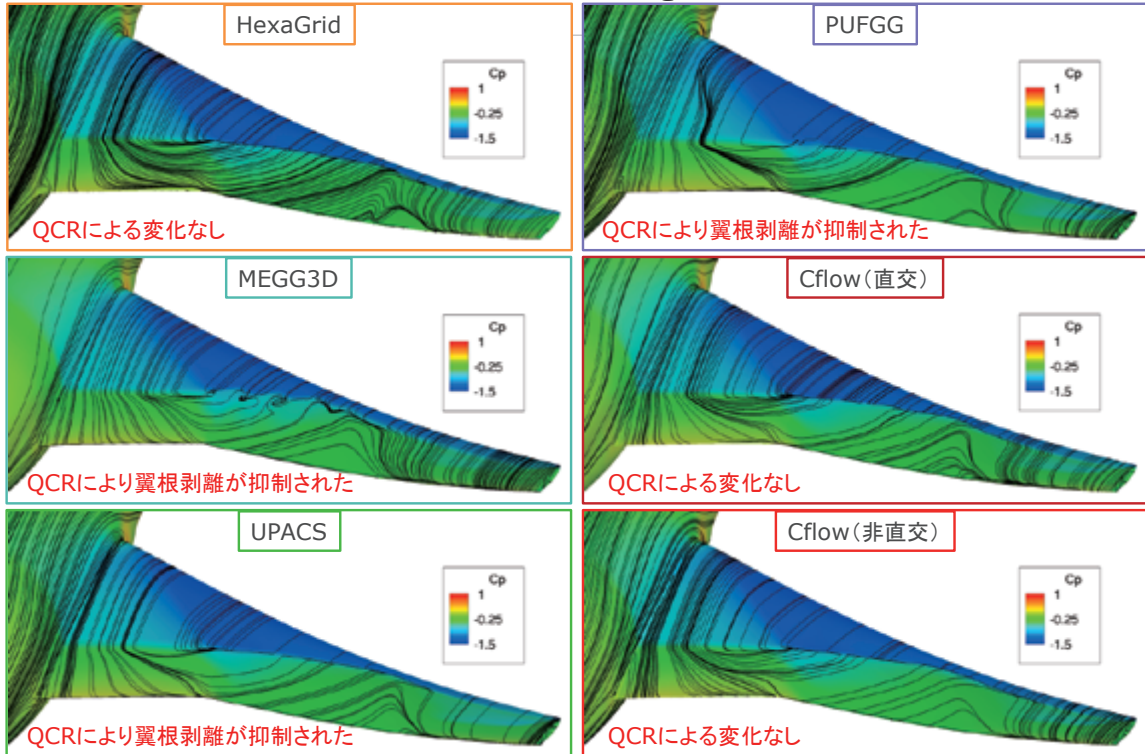
- 今後、KHIの結果をまとめて、飛行機シンポジウムで発表予定

## 【ワークショップ後】乱流モデルSA-QCRの効果(Cm- $\alpha$ )

- QCRにより翼根剥離が抑制された



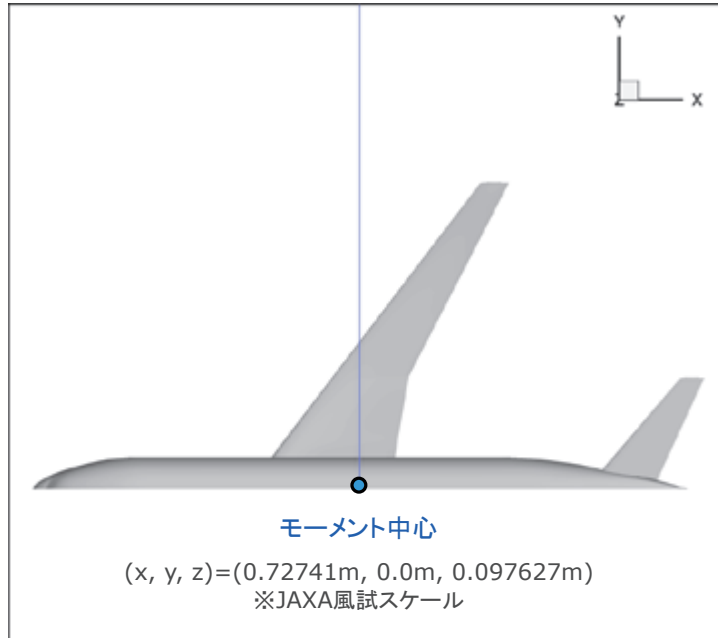
**【ワークショップ後】乱流モデルSA-QCRの効果( $\alpha=4.65^\circ$ )**



世界の人々の豊かな生活と地球環境の未来に貢献する  
**“Global Kawasaki”**

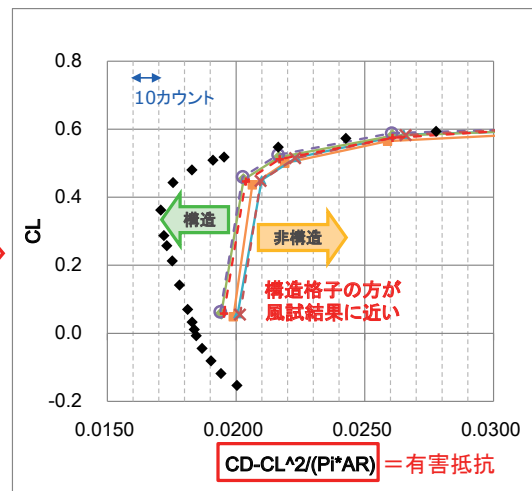
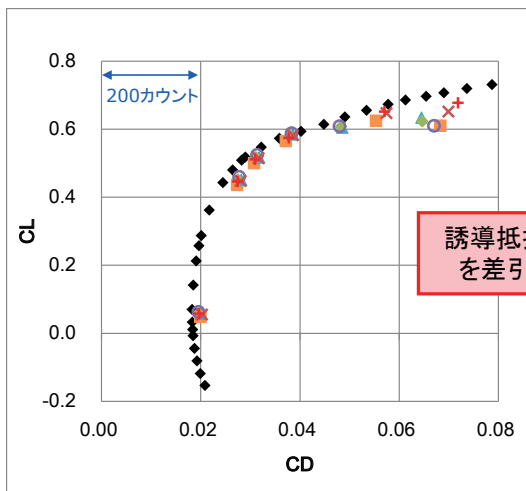
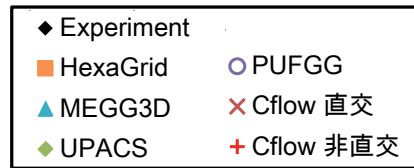


## モーメント中心

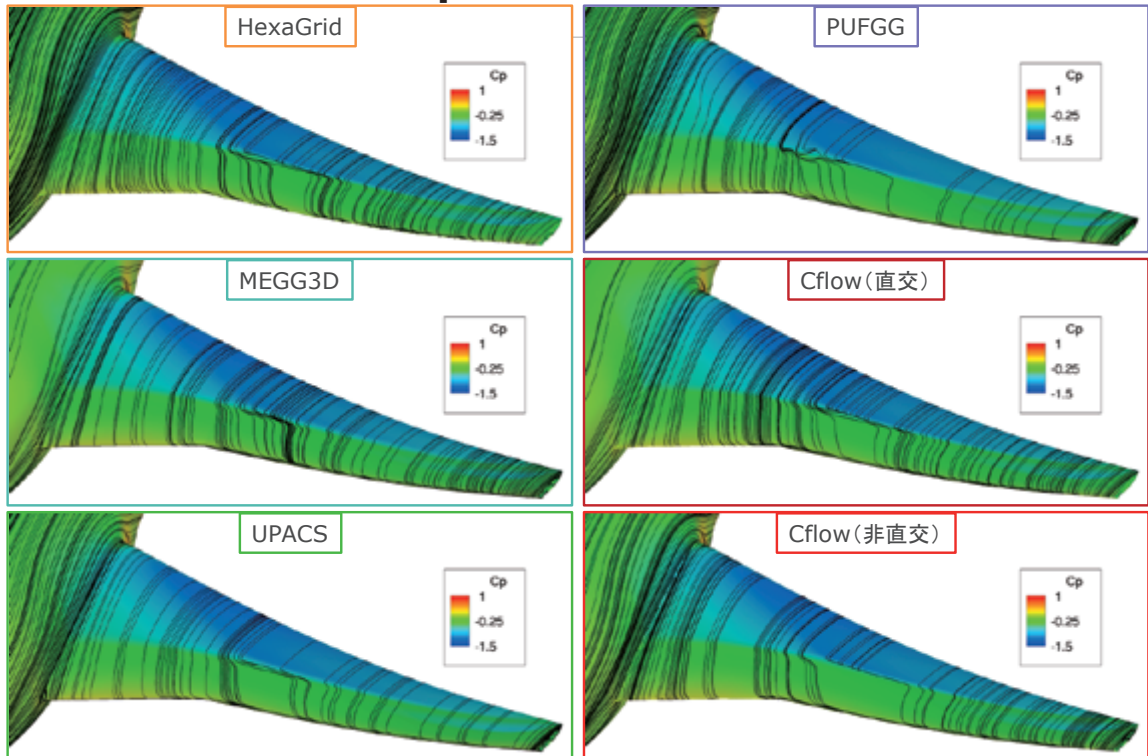


## 課題1-1 縦3分力の比較(CL-CD)

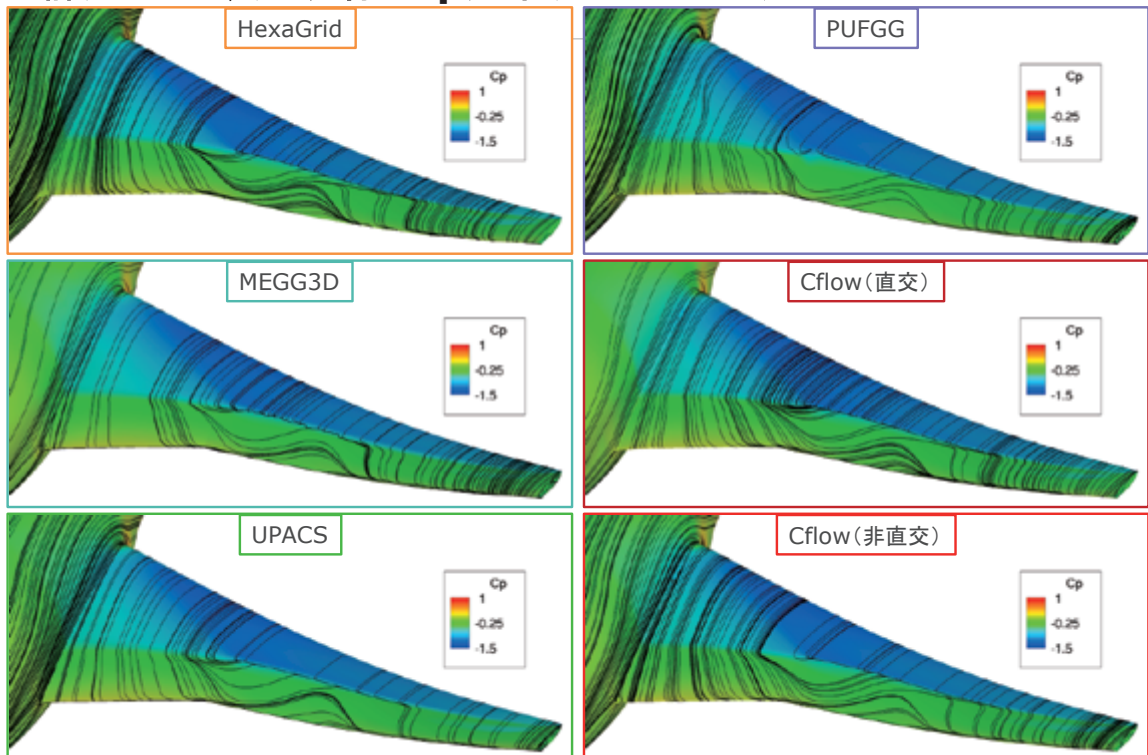
- 構造格子の方が、非構造格子に比べて風試結果に近い



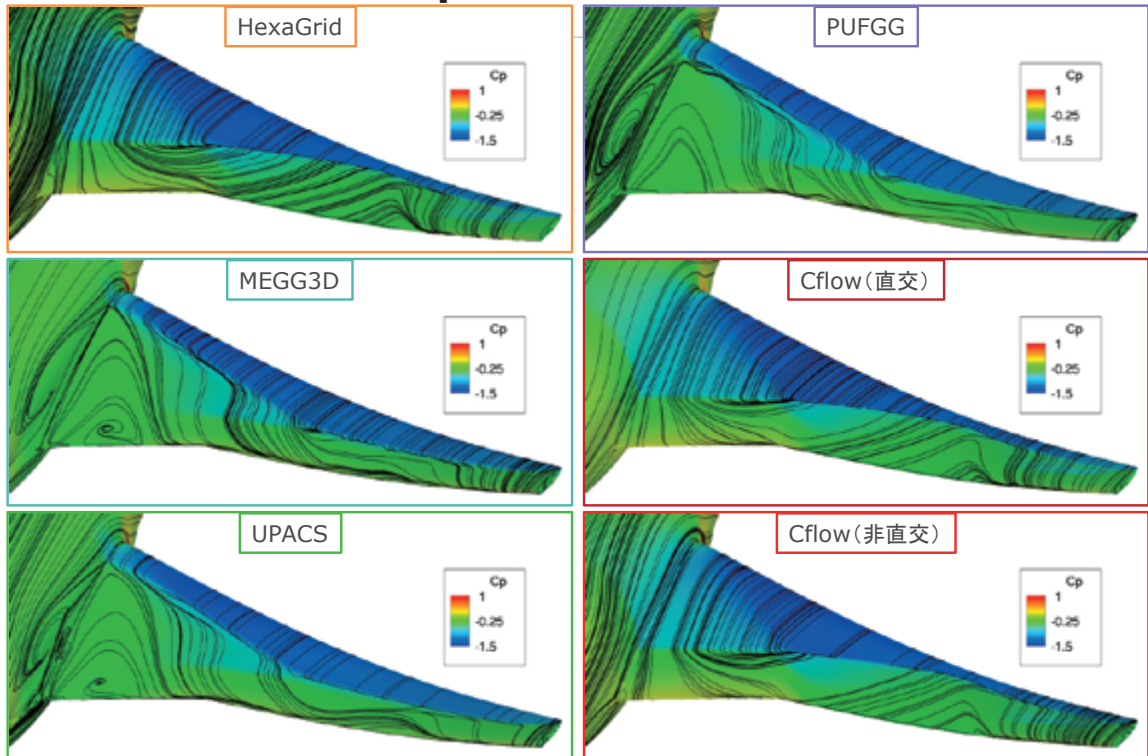
### 課題1-1 表面流線とCp分布( $\alpha=2.94^\circ$ )



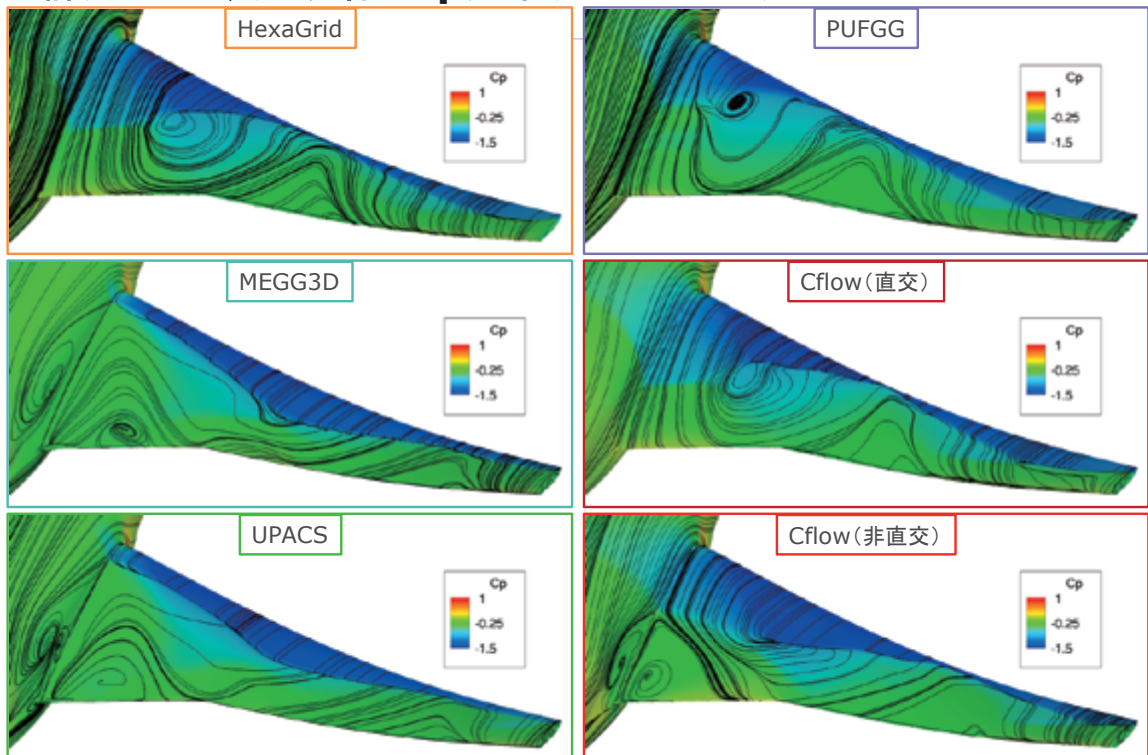
### 課題1-1 表面流線とCp分布( $\alpha=3.55^\circ$ )



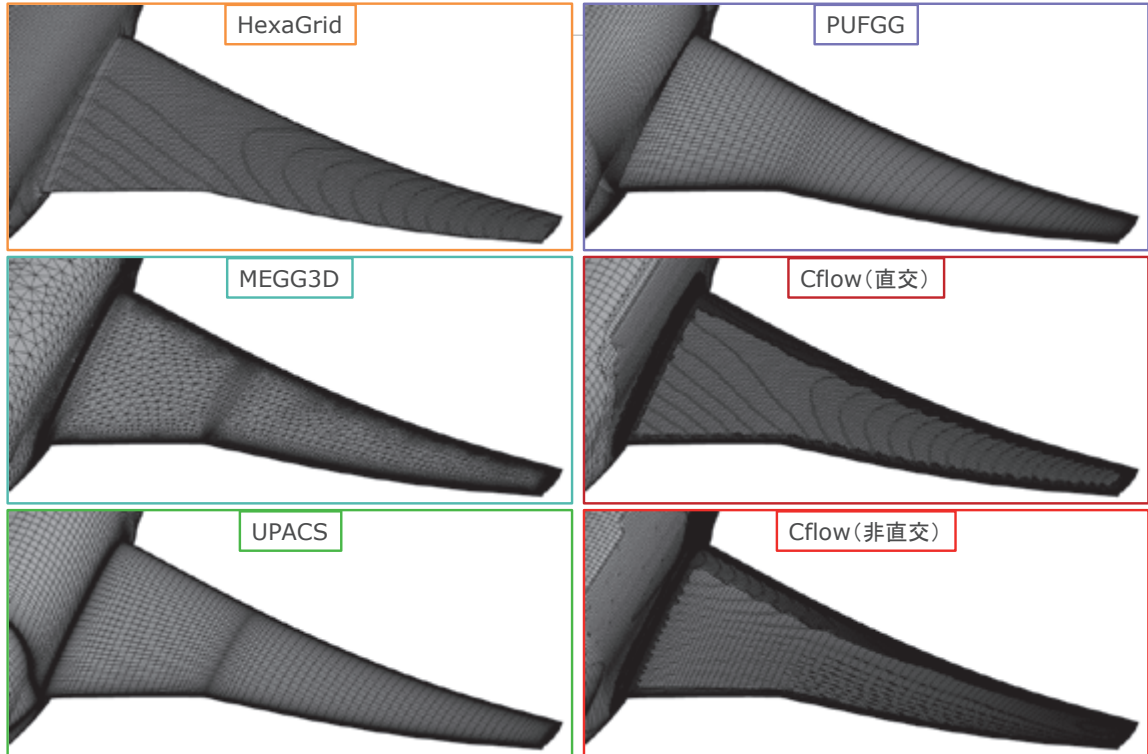
課題1-1 表面流線とCp分布( $\alpha=4.65^\circ$ )



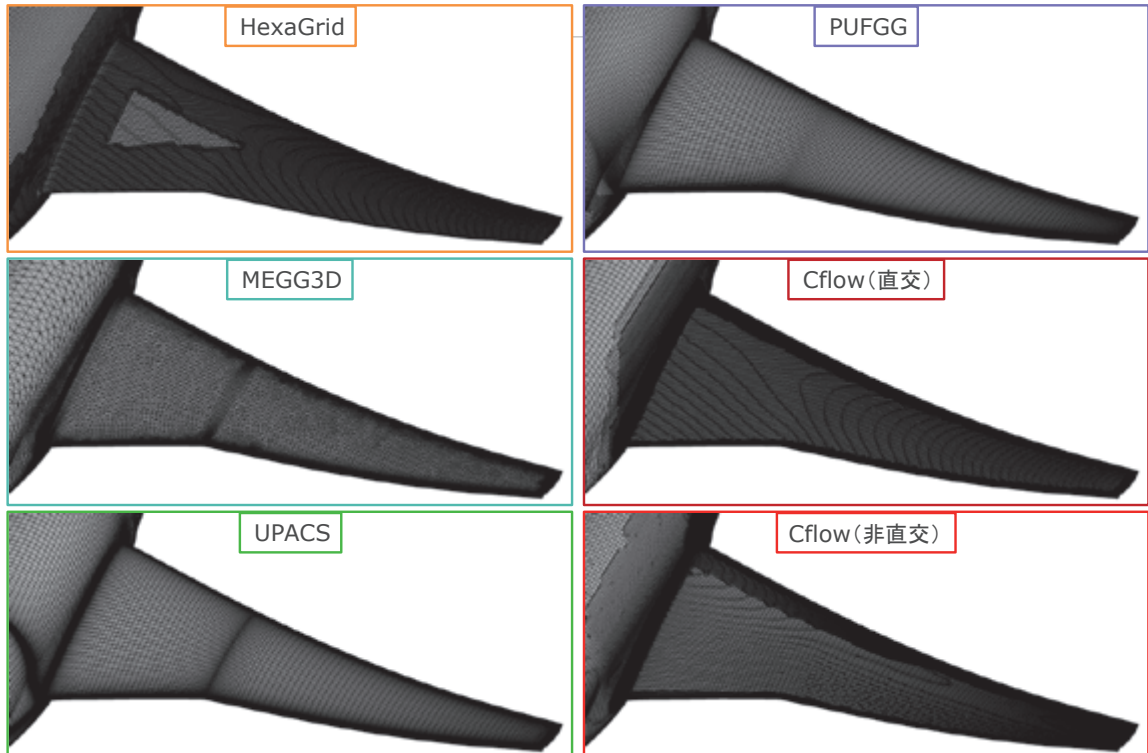
課題1-1 表面流線とCp分布( $\alpha=5.72^\circ$ )



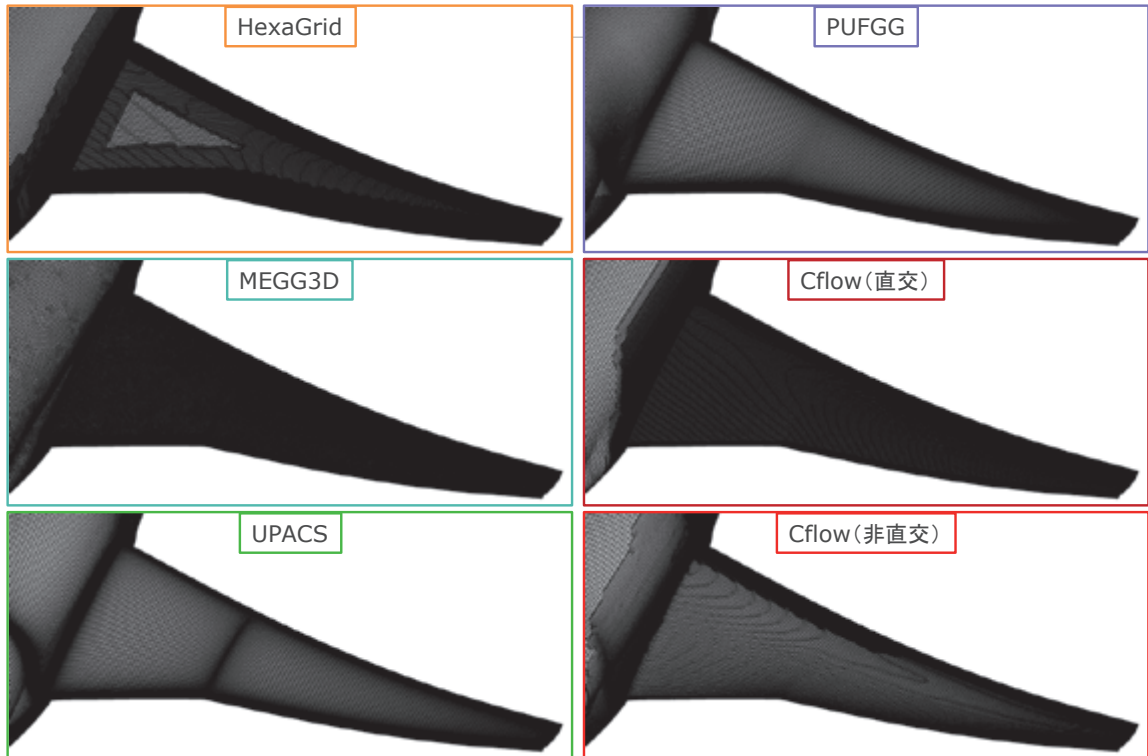
表面格子の比較(変形有り、 $\alpha=2.94^\circ$ ) Coarse格子



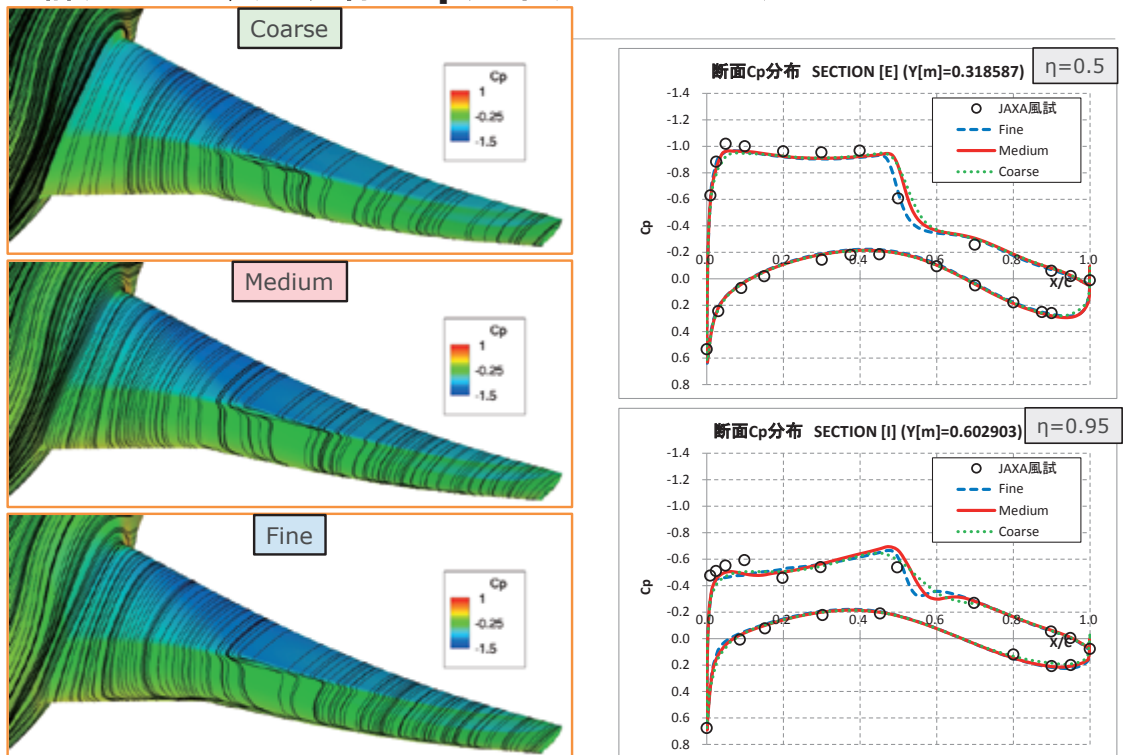
表面格子の比較(変形有り、 $\alpha=2.94^\circ$ ) Medium格子



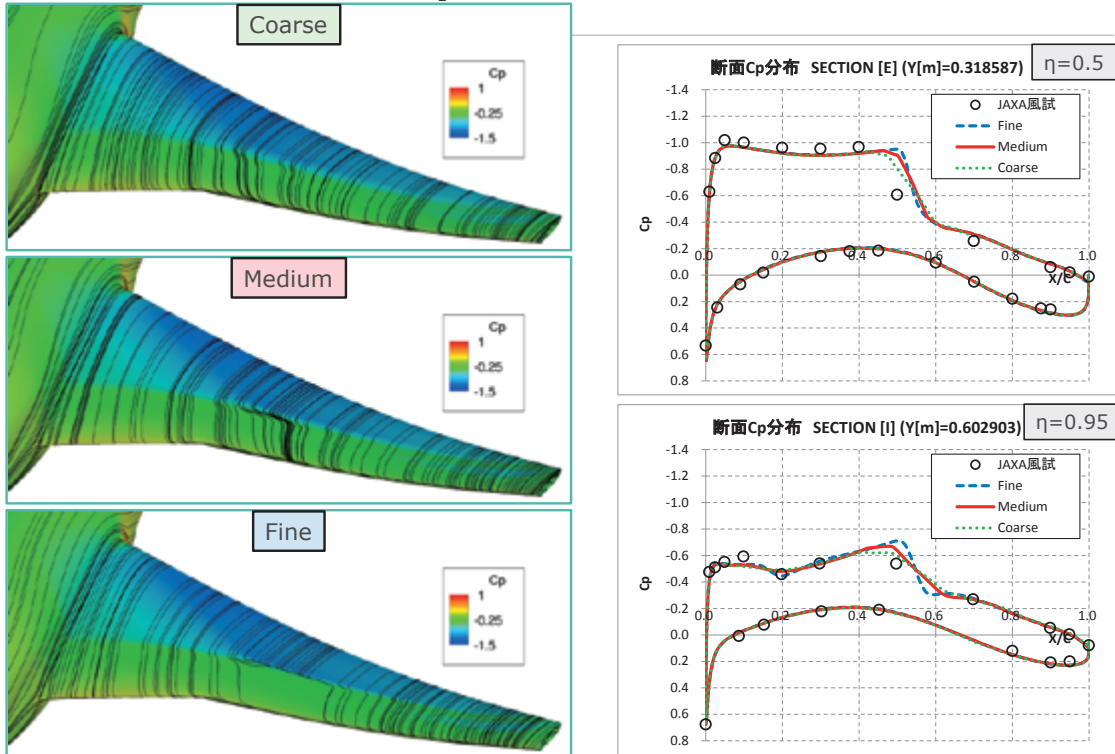
表面格子の比較(変形有り、 $\alpha=2.94^\circ$ ) Fine格子



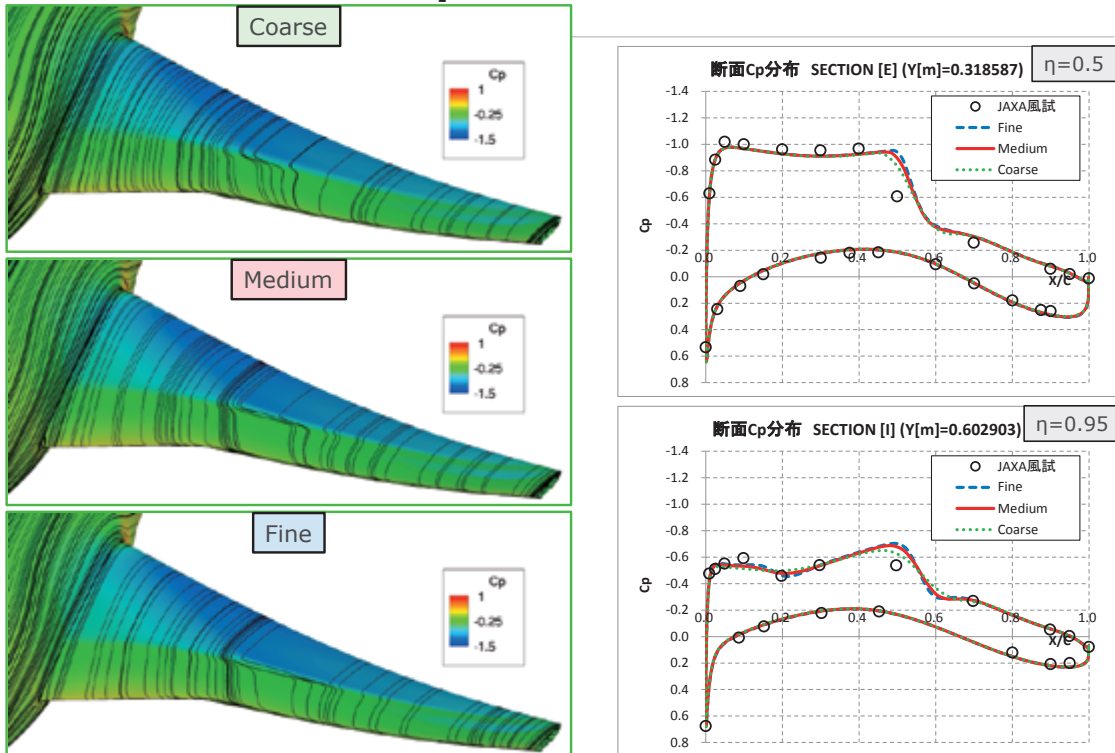
課題1-2 表面流線とCp分布( $\alpha=2.94^\circ$ ) HexaGrid



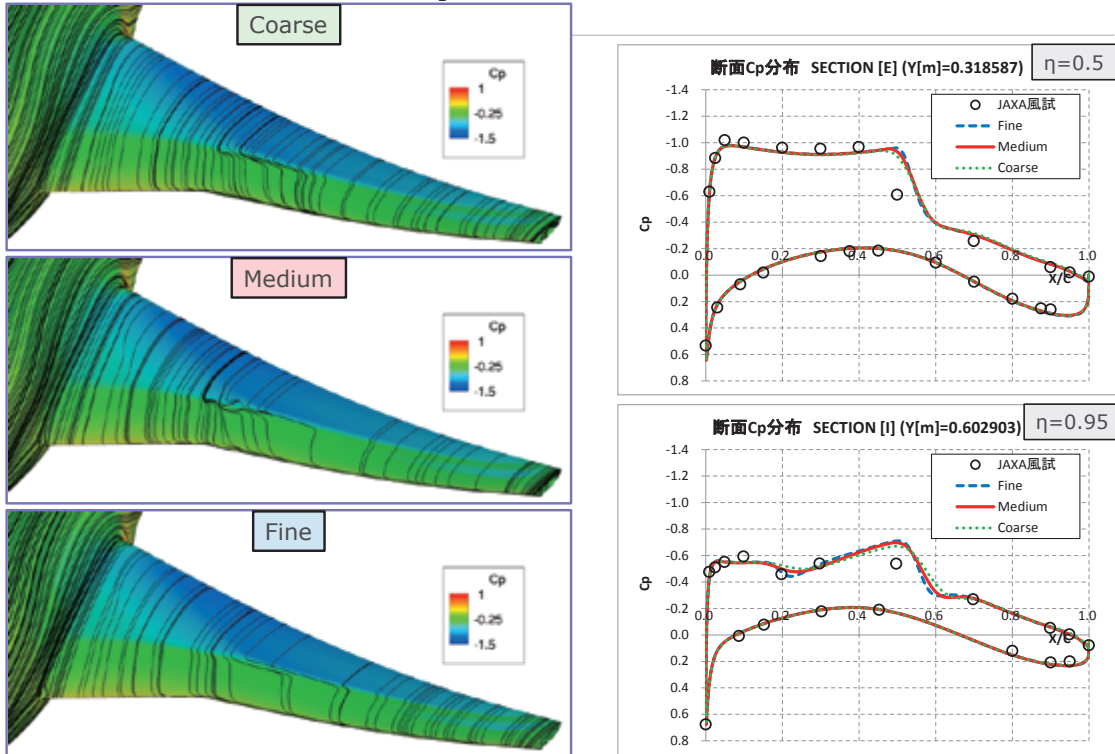
### 課題1-2 表面流線とCp分布( $\alpha=2.94^\circ$ ) MEGG3D



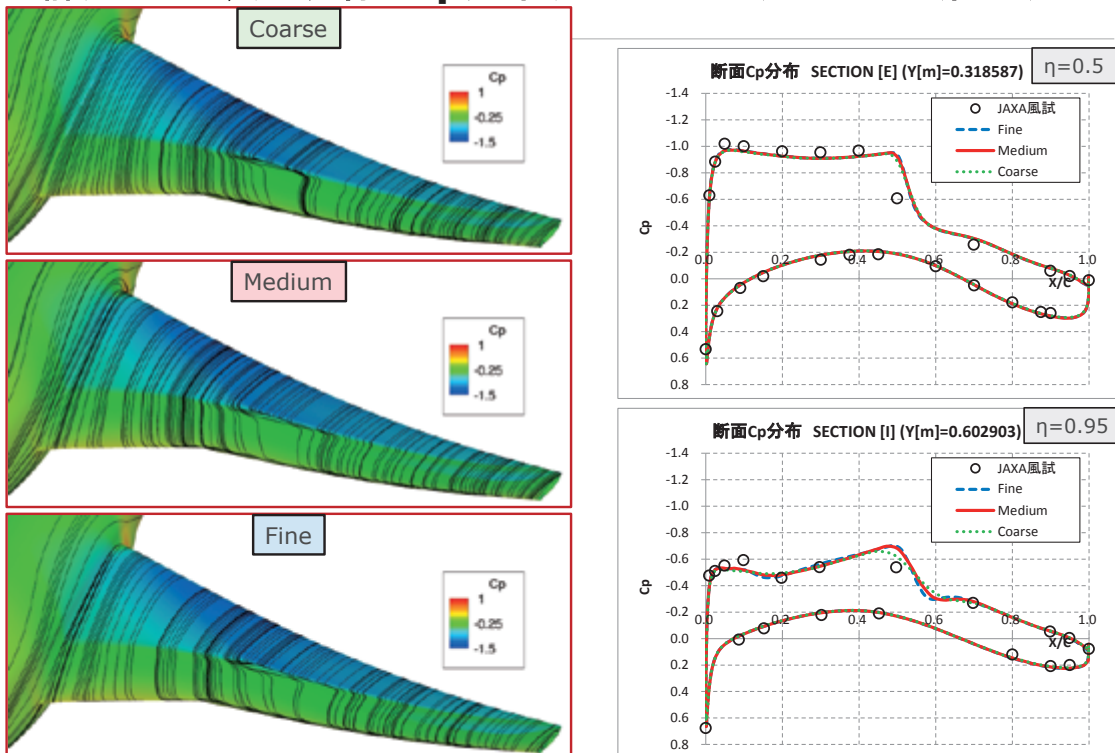
### 課題1-2 表面流線とCp分布( $\alpha=2.94^\circ$ ) UPACS



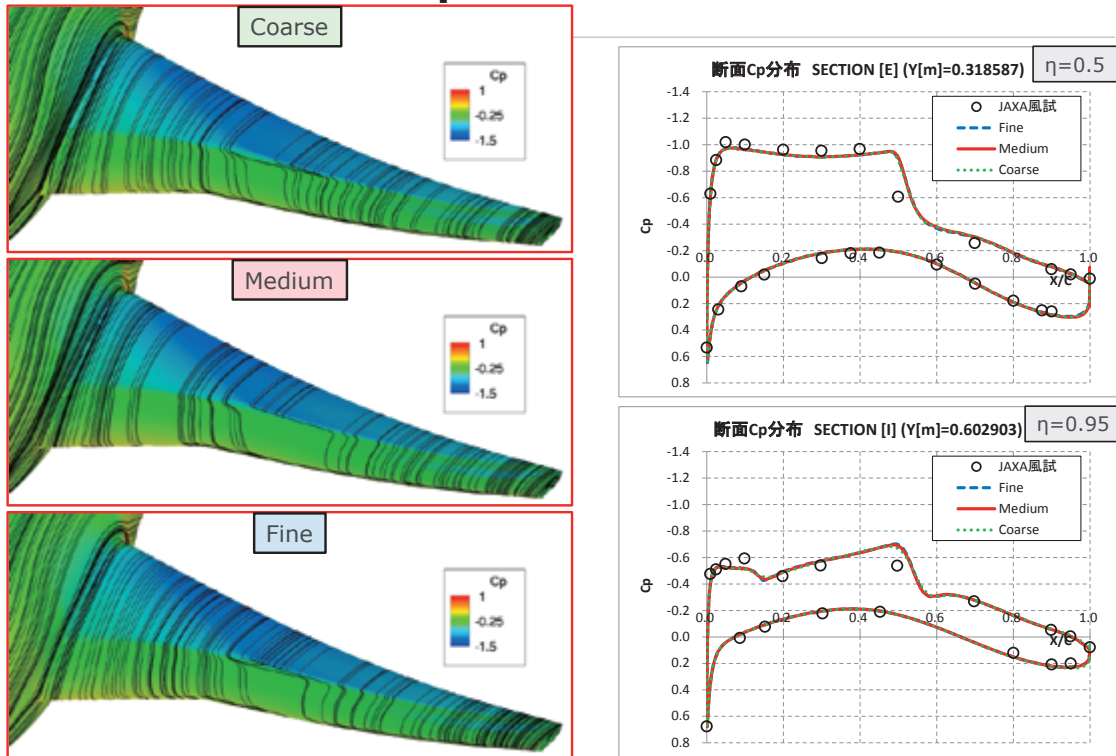
### 課題1-2 表面流線とCp分布( $\alpha=2.94^\circ$ ) PUFFGG



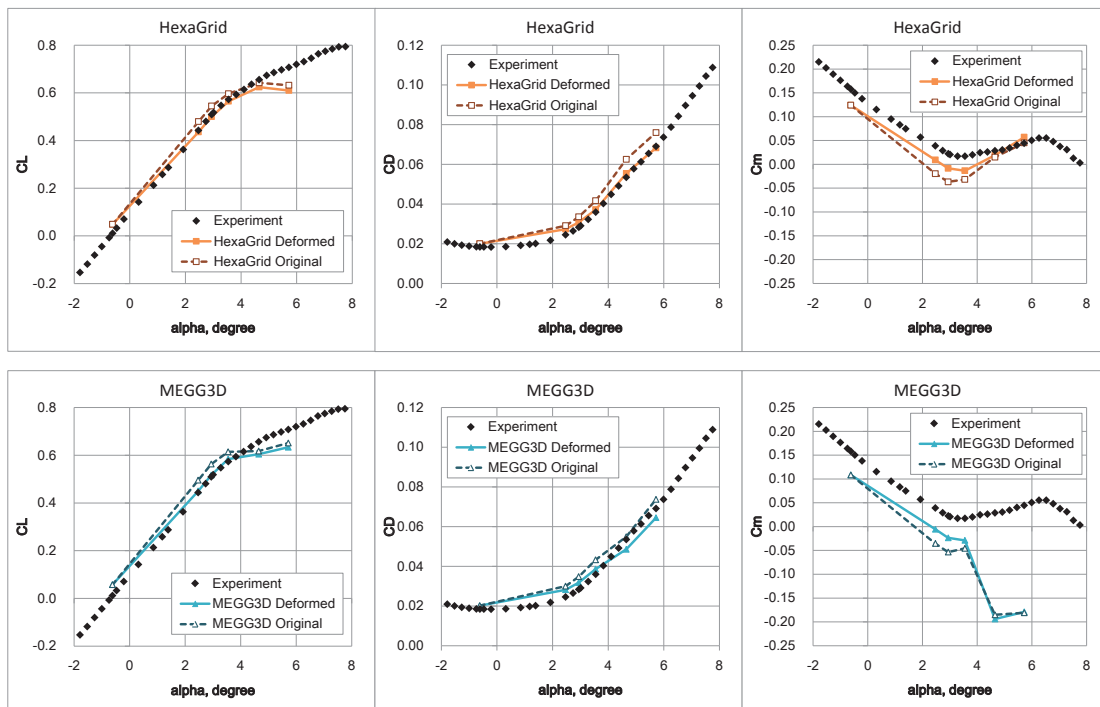
### 課題1-2 表面流線とCp分布( $\alpha=2.94^\circ$ ) Cflow(直交)



### 課題1-2 表面流線とCp分布( $\alpha=2.94^\circ$ ) Cflow(非直交)

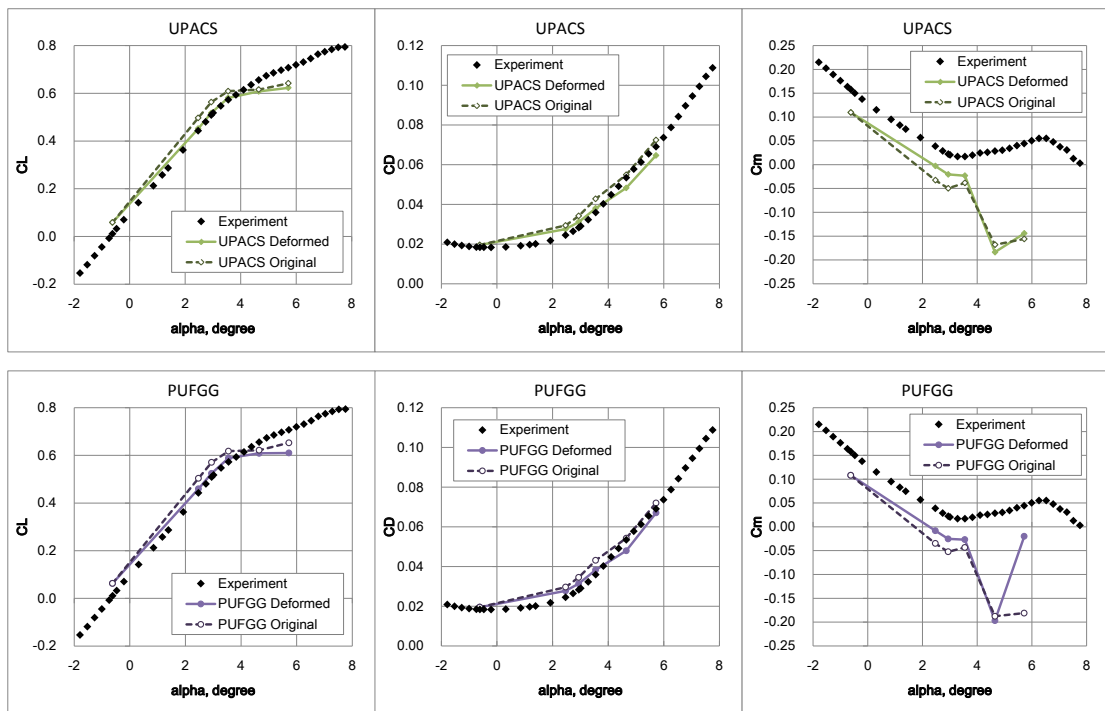


### 課題1-3 縦3分力 変形の効果 (HexaGrid, MEGG3D)

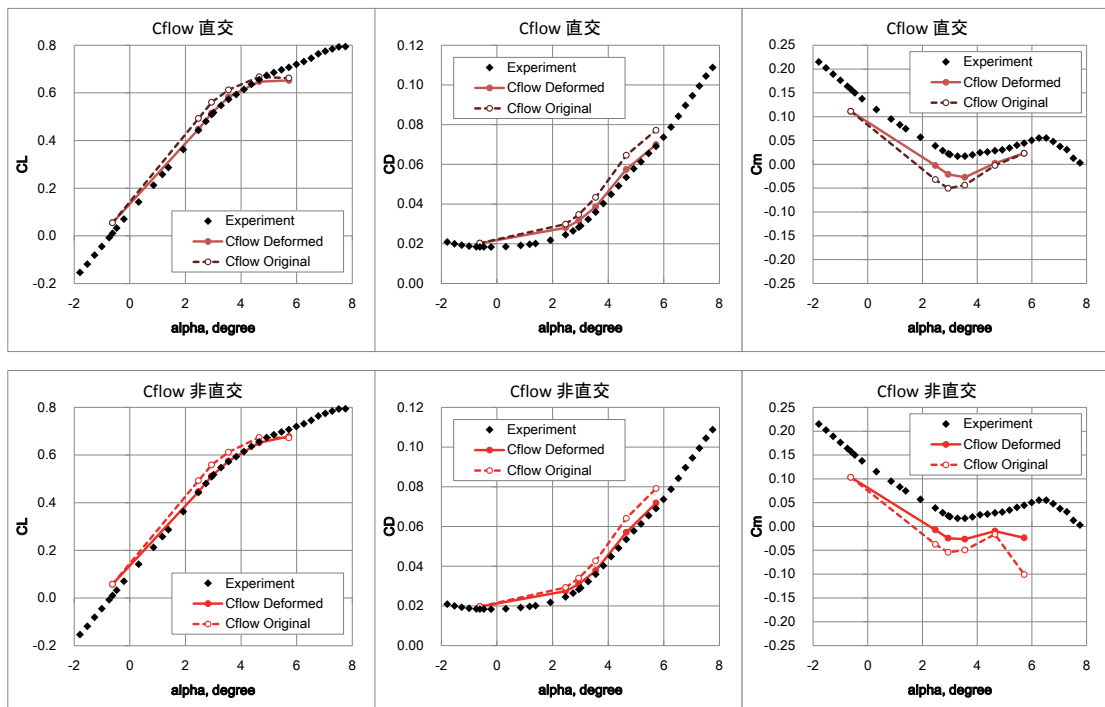




### 課題1-3 縦3分力 変形の効果 (UPACS, PUFGG)



### 課題1-3 縦3分力 変形の効果 (Cflow 直交, 非直交)

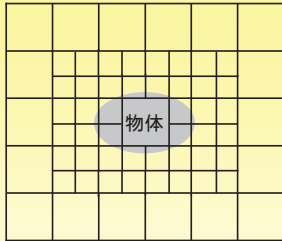
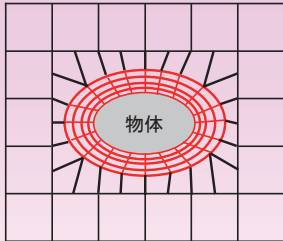
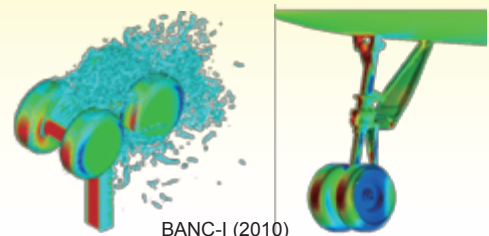
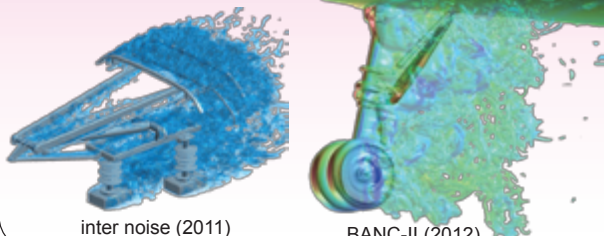


# 自社開発CFD解析ソフト「Cflow」

複雑形状

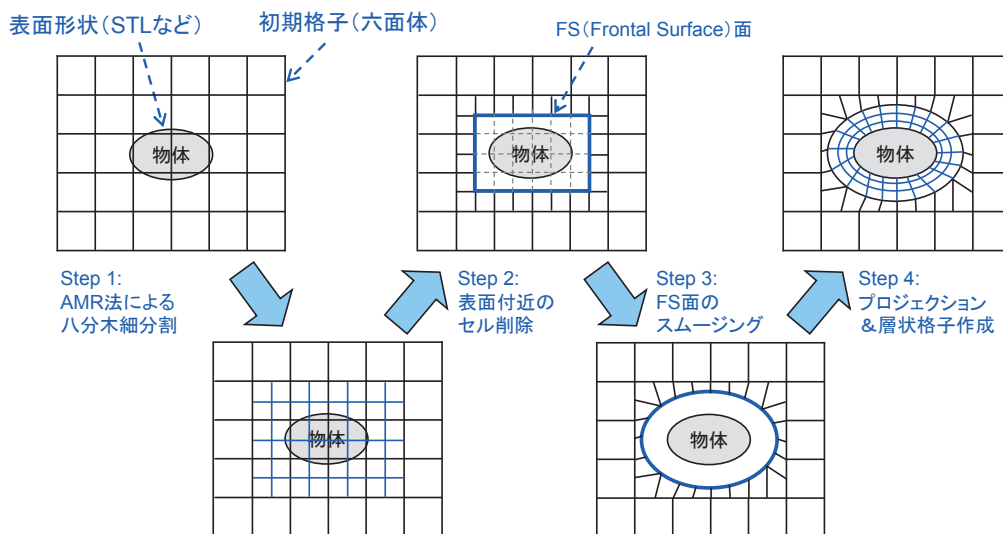
非定常流

Kawasaki独自で「Cflow」を開発;  $Cflow = \text{Grid Generator} + \text{Flow Solver}$

Cflow 旧バージョン(～2010年)	Cflow 新バージョン(2010年～)
 <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 直交格子</li> <li>✓ 境界層の解像なし (物体の曲率は境界条件で考慮)</li> <li>✓ 層流計算のみ (乱流モデル未実装)</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 直交/非直交格子 + 層状格子 (境界層用)</li> <li>✓ 乱流モデル実装 (SA, DES, DDES)</li> </ul>
 <p>BANC-I (2010)</p>	 <p>inter noise (2011)      BANC-II (2012)</p>

## 格子生成アルゴリズム

$Cflow = \text{Grid Generator} + \text{Flow Solver}$



## 計算スキーム

$$Cflow = \boxed{\text{Grid Generator}} + \boxed{\text{Flow Solver}}$$

1. 支配方程式
  - 三次元圧縮性オイラー/ナビエ-ストークス方程式
2. 時間積分
  - MFGS陰解法(1次精度/2次精度)
  - ルンゲクッタ陽解法
3. 空間離散化
  - セル中心有限体積法
  - 2次精度MUSCL法+数値流束関数SLAU/SHUS(非粘性項)
  - 2次精度中心差分(粘性項)
4. 乱流モデル
  - Spalart-Allmaras 1方程式モデル
  - Detached-Eddy Simulation (DES)
  - Delayed DES (DDES)
5. 並列計算
  - MPI

※ 青字:主に使用されているもの