

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
First Aerodynamics Prediction Challenge (APC-1)

CflowによるNASA-CRMの空力解析

永田 卓、上野 陽亮、越智 章生

川崎重工業株式会社 航空宇宙カンパニー
技術本部 研究部 空力技術課

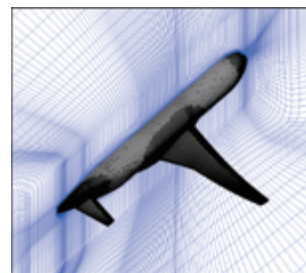
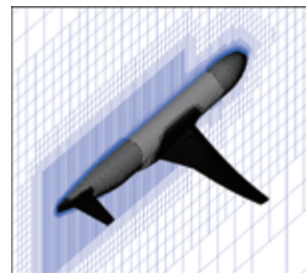
2015年7月3日（金）

15KT004797

 **Kawasaki**
Powering your potential

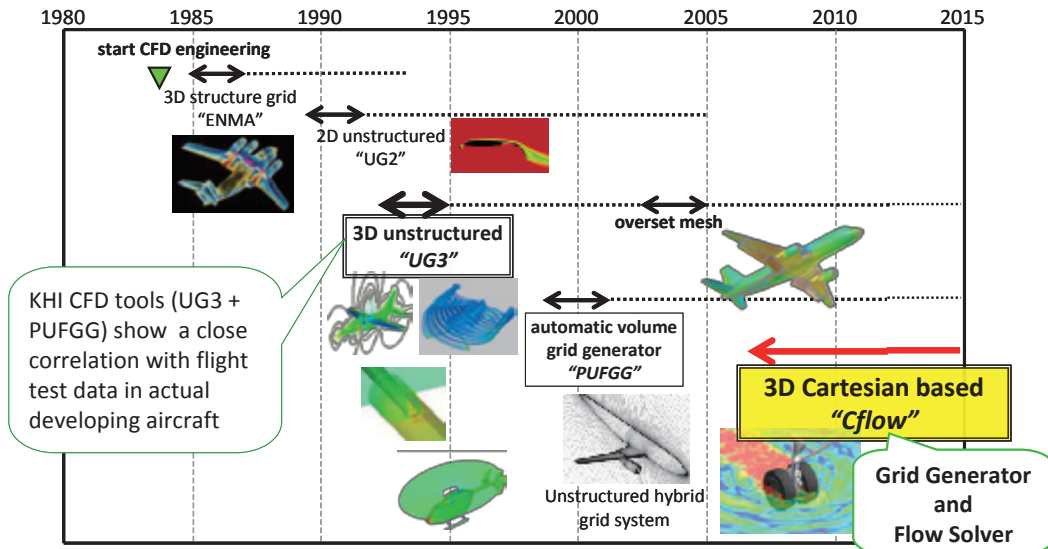
発表内容

- Cflowの概要
 - Cflowの特徴
 - 格子生成手順
 - 数値計算手法
- 参加課題
- NASA-CRMへの適用
 - Cflowによる格子生成
 - 解析結果
- まとめ



川崎重工におけるCFD解析技術

- 1980年代からCFD技術の研究・開発に取り組み、長年培ってきたCFD解析技術を駆使した空力設計・検討作業が実施されている



自社開発CFD解析ソフト「Cflow」

- **Kawasaki** 独自で「Cflow」を開発

複雑形状

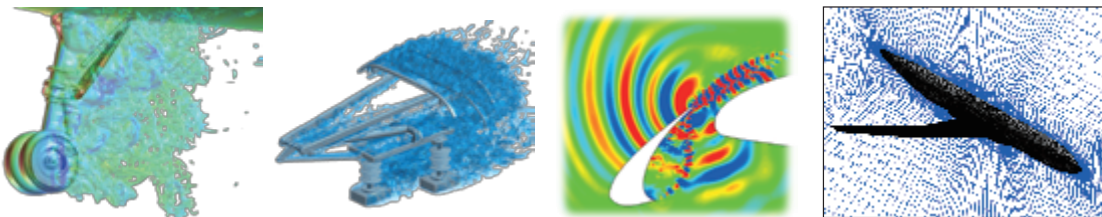
非定常流れ

大規模解析

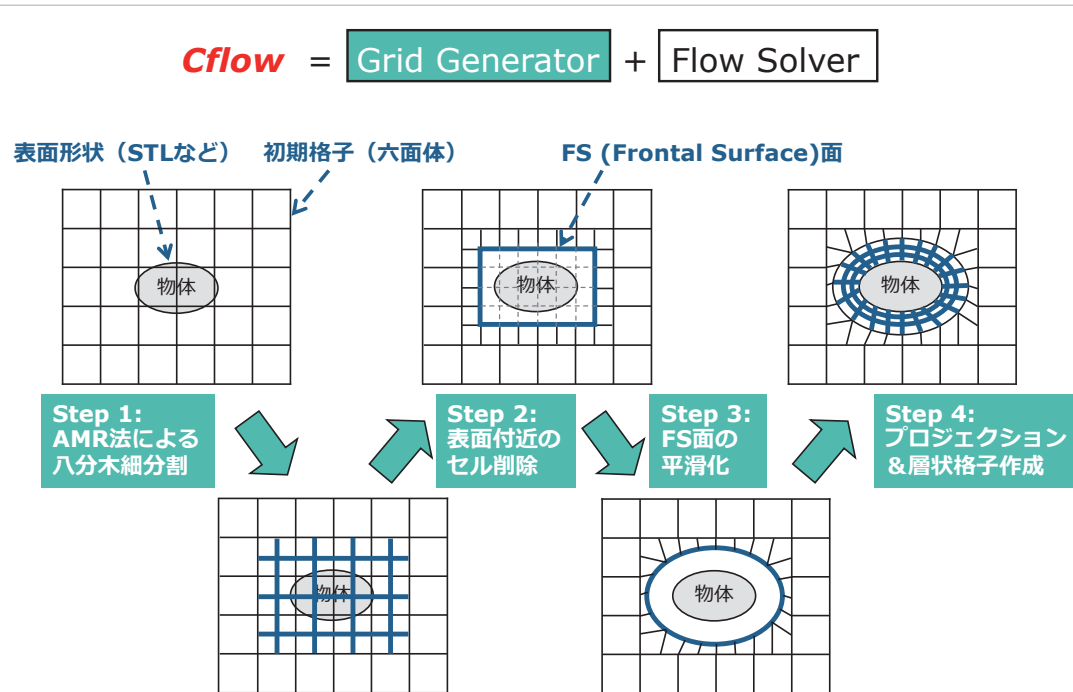
$$Cflow = \text{Grid Generator} + \text{Flow Solver}$$

直交・八分木格子
+ 層状格子

- 直交格子による複雑形状の非定常解析（騒音解析）において成果
- 航空機形状（高アスペクト比、後退角）の定常／非定常解析が次のターゲット



Cflowの格子生成手順

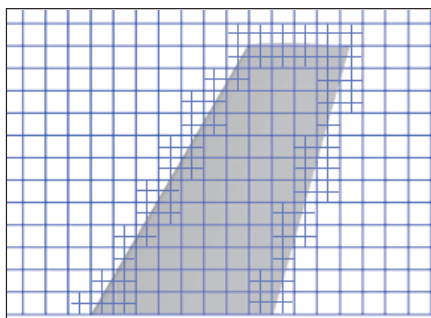


Cflowの格子の特徴 非直交八分木格子と境界適合格子

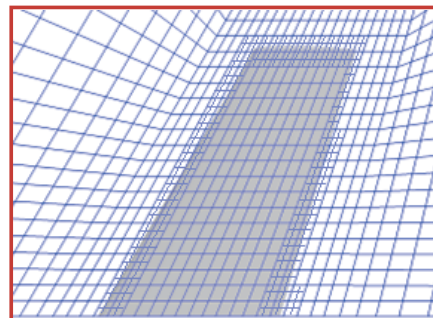
- 直交格子+境界適合格子をベースとし、セル形状の自由度を高めた格子を開発
 - 高アスペクト比や後退角付き形状の格子生成に有効

NOBLU Grid

(**N**on-orthogonal **O**ctree **B**oundary-fitted **L**ayer **U**nstructured)



従来型の直交格子



非直交格子

Cflowの最大の特徴

Cflowの数値計算手法

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

- 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
- 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
- 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)
- 乱流モデル
 - Spalart-Allmaras 1方程式モデル
 - Detached-Eddy Simulation (DES)
 - Delayed DES (DDES)
- 並列計算
 - MPI
 - OpenMP

※ 青字：今回の解析で使用されているもの

参加課題

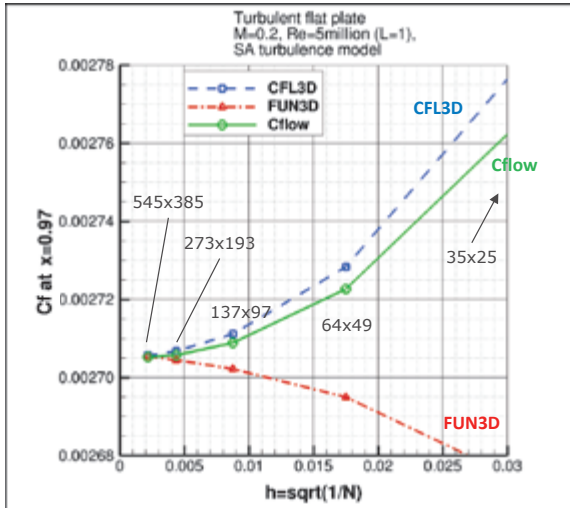
- Cflow自作格子 (直交/非直交) の検証
- 各種格子との比較

ソルバー	格子	参加課題							
		0-1	0-2	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2
Cflow	NASA提供格子(quad)	○	○						
	Cflow直交格子(自作)			○	○	○	永田が発表		
	Cflow非直交格子(自作)			○	○	○			
	HexaGrid			○	○	○		上野が発表	
	MEGG3D			○	○	○			
	UPACS			○	○	○			
	PUFGG(自作)			○	○	○			

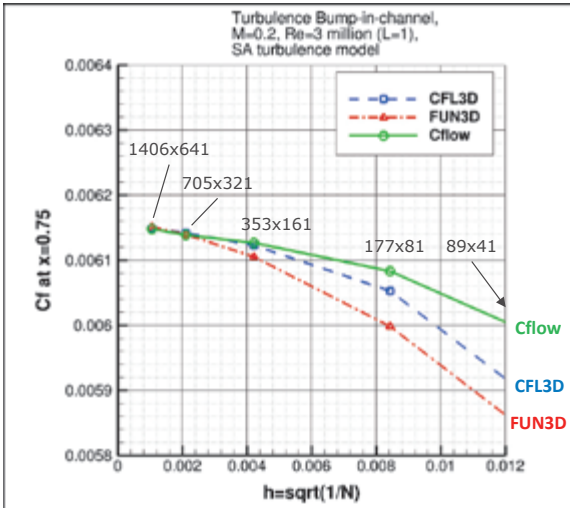
課題0 Verification

- 乱流モデル SA
- 格子 3-D unstructured quad version (CGNS)
- CflowソルバーはNASAコードと同等の精度を有する

(1) 平板

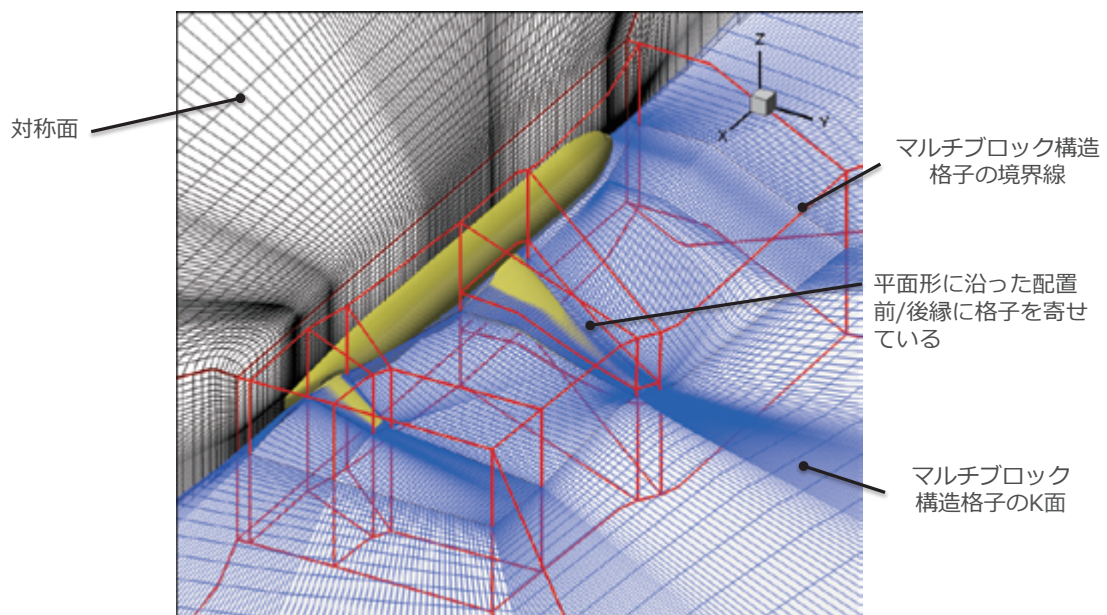


(2) Bump

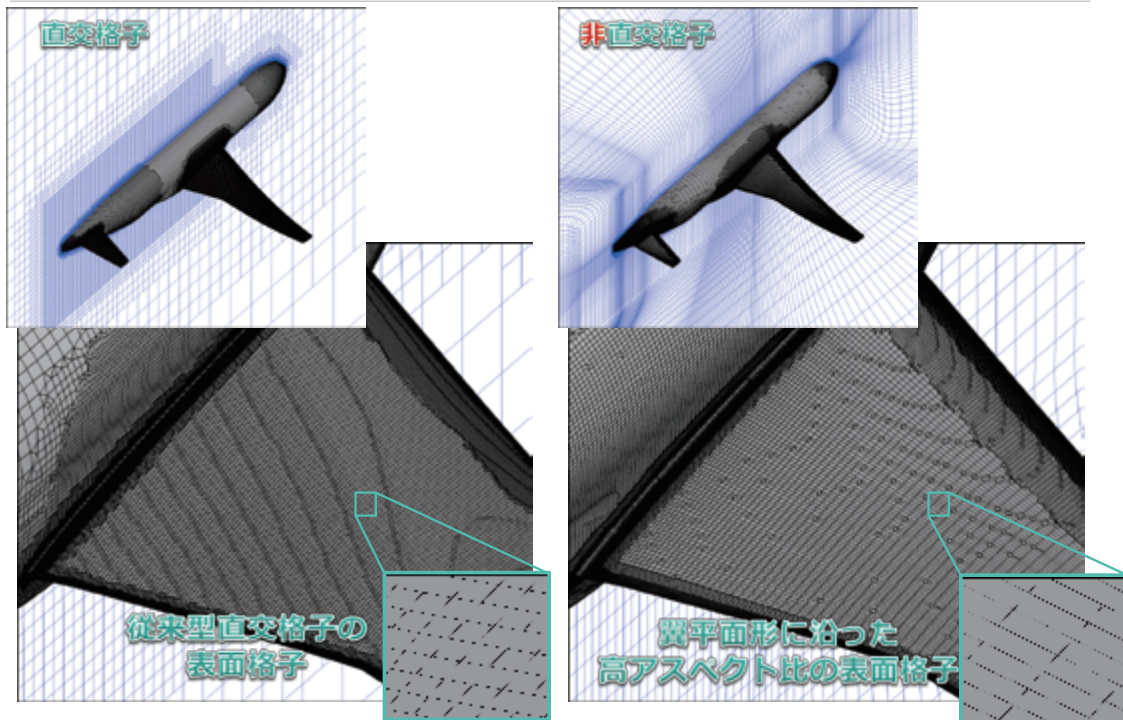


課題1 Cflowの非直交初期格子

- 機体形状に合わせて初期格子の密度やセルのアスペクト比を任意に設定



直交格子と非直交格子の比較



© 2015 Kawasaki Heavy Industries, Ltd. All Rights Reserved

15KT004797

Kawasaki
Powering your potential

11

計算格子の情報

Grid type	Cflow直交			Cflow非直交		
	Coarse	Medium	Fine	Coarse	Medium	Fine
Grid level	Coarse	Medium	Fine	Coarse	Medium	Fine
Number of total nodes	10 M	20 M	44 M	7.5 M	13 M	34 M
Number of total cells	10 M	20 M	43 M	7.6 M	13 M	34 M
Wall boundary faces	0.36 M	0.65 M	1.2 M	0.24 M	0.36 M	0.63 M
Number of BL layers	25	26	26	22	21	28
Initial spacing normal to all viscous walls	4.5e-6	3.0e-6	2.0e-6	4.5e-6	3.0e-6	2.0e-6

$C_{ref} = 0.15131$

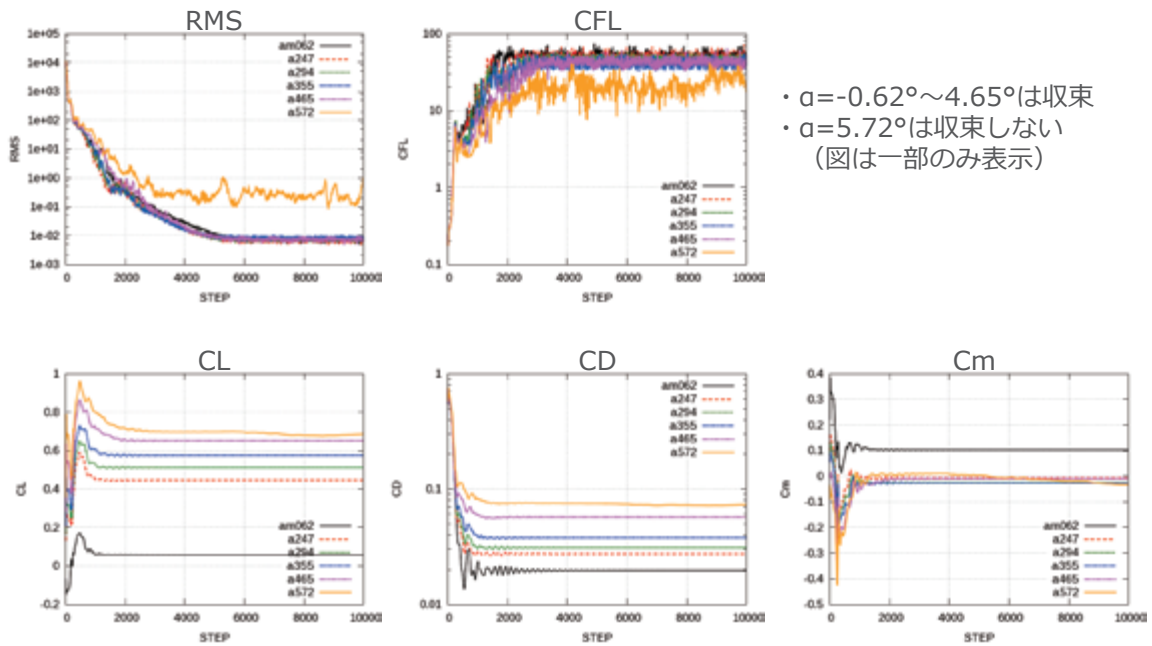
© 2015 Kawasaki Heavy Industries, Ltd. All Rights Reserved

15KT004797

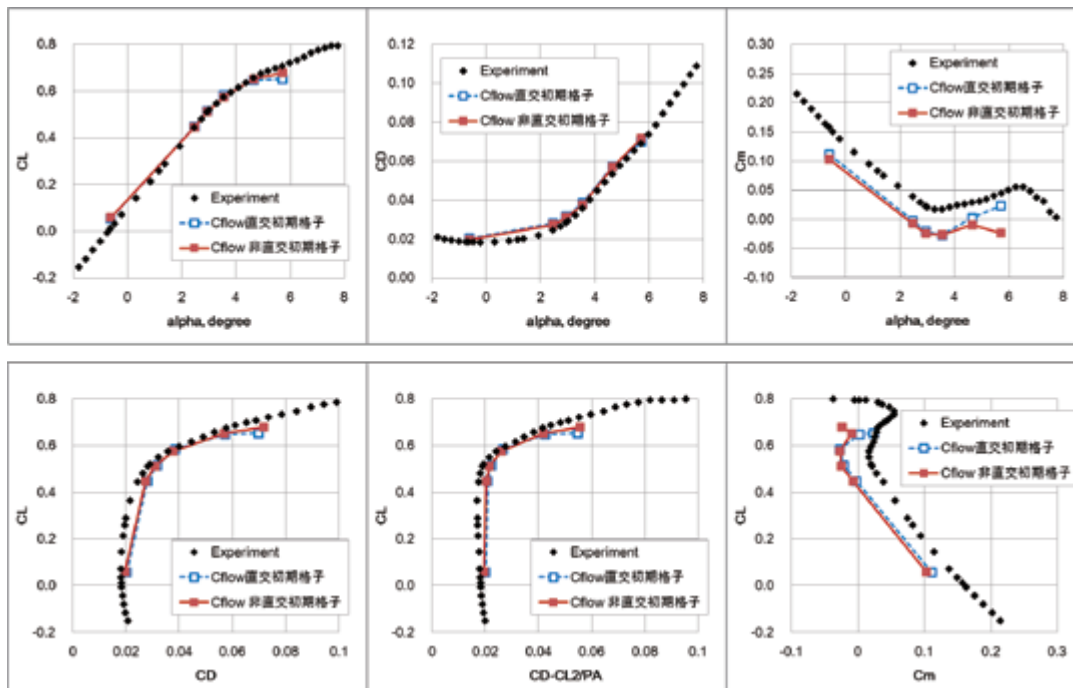
Kawasaki
Powering your potential

12

課題1-1 迎角スweep 収束履歴 非直交格子

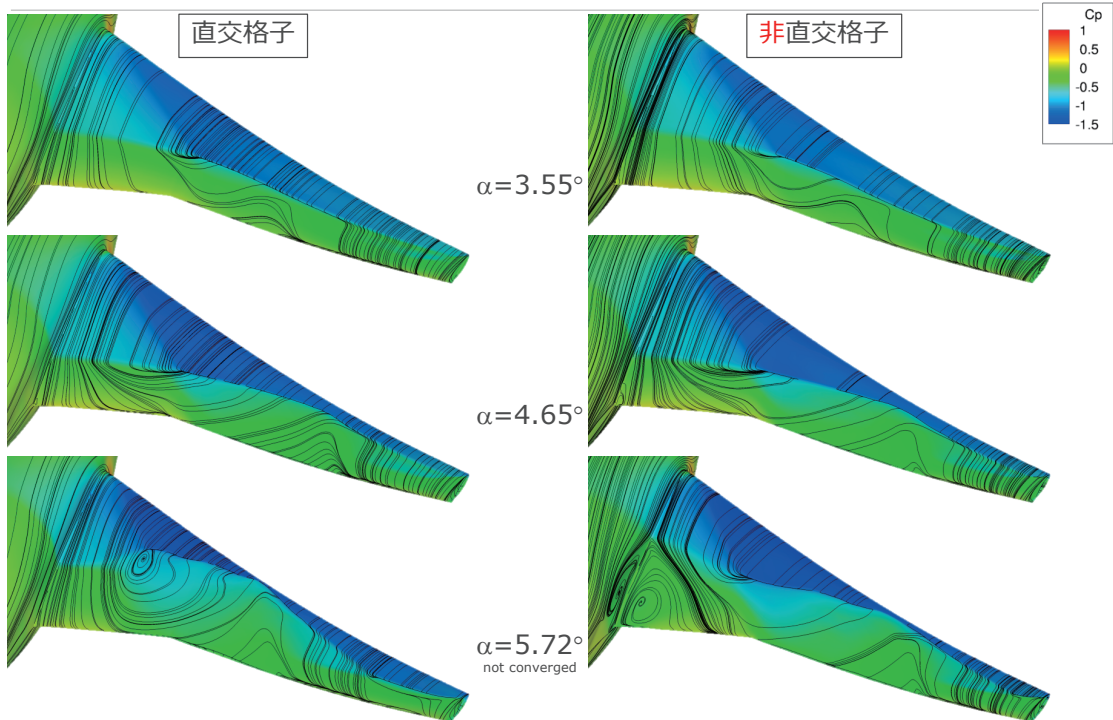


課題1-1 迎角スweep 縦三分力の比較

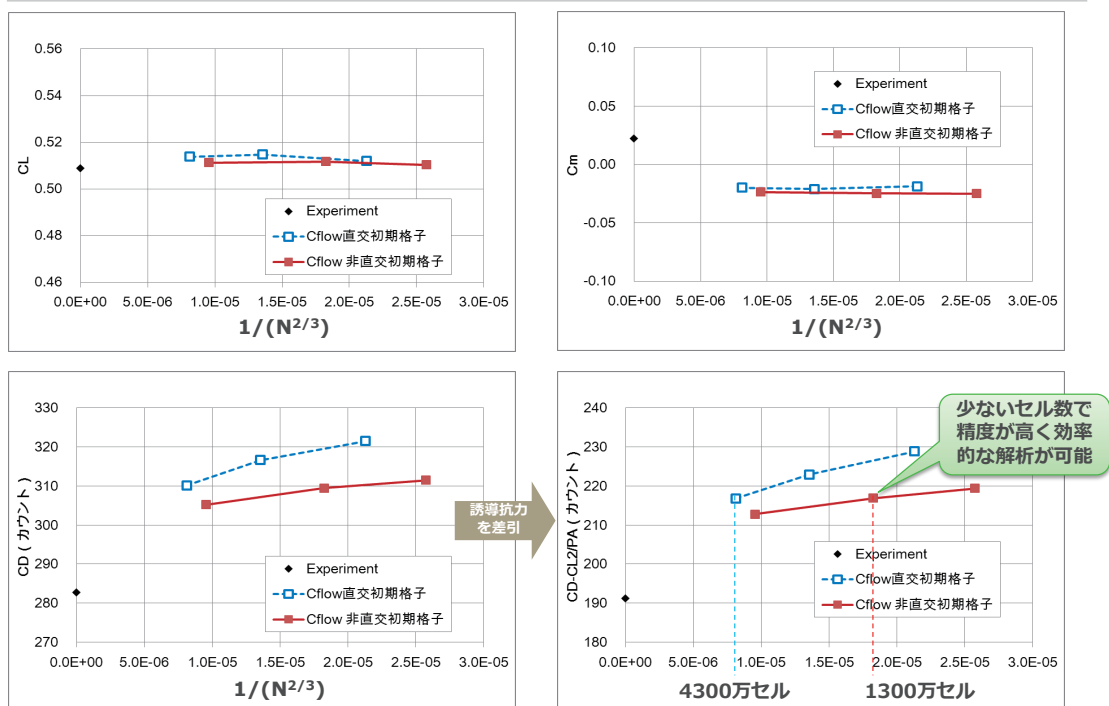


課題1-1 Cflow直交格子 表面流線とCp分布

変形有
Medium格子



課題1-2 格子収束性



まとめ

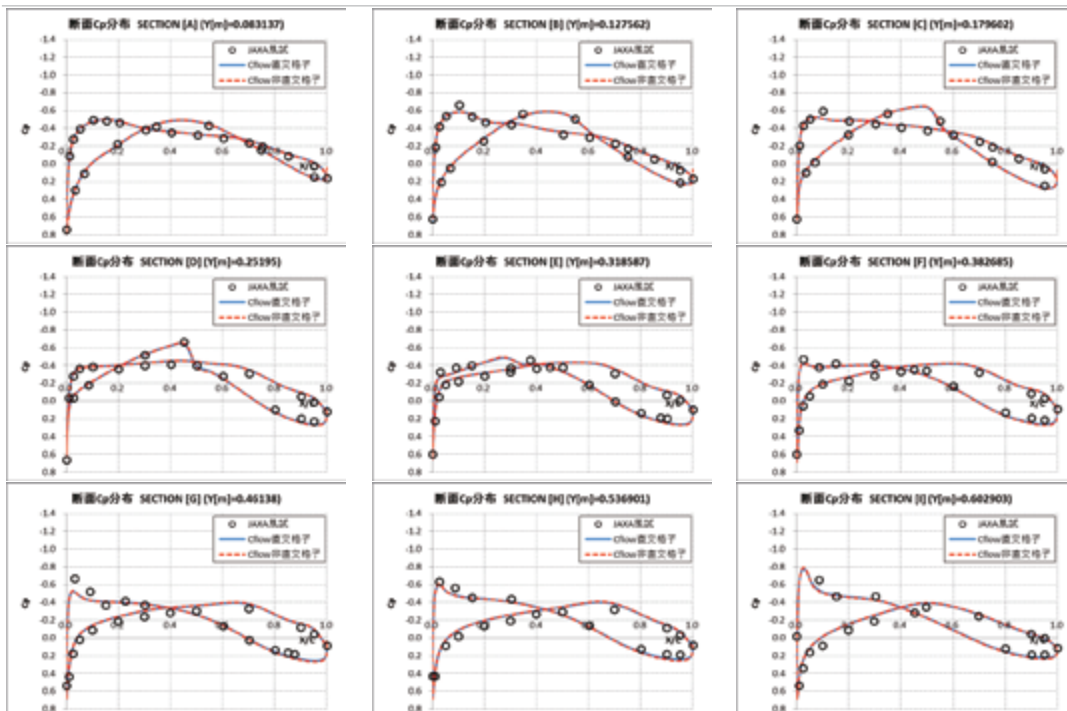
当社で開発しているCFD解析ソフト「**Cflow**」をNASA-CRM（翼胴尾形態）の定常空力解析に適用し、精度検証を行った

Cflow の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ■自動格子生成ツールと流れ場解析ソルバー ■直交格子+境界適合格子をベースとし、セル形状の自由度を高めた非直交初期格子（NOBLU Grid）
結果 概要	<ul style="list-style-type: none"> ■一般的な直交初期格子と形状を工夫した非直交初期格子を用いて、Cflowで格子生成、解析を実施 ■非直交格子のほうが少ないセル数で、精度が高く効率的な解析が可能

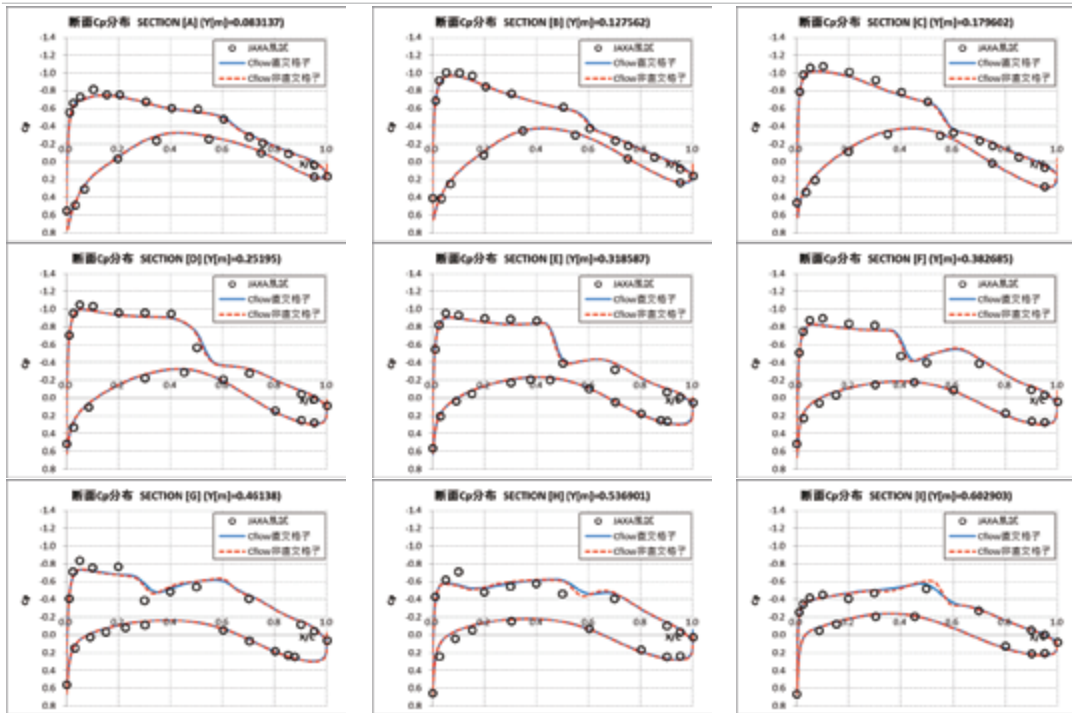
世界の人々の豊かな生活と地球環境の未来に貢献する
“Global Kawasaki”

データ集

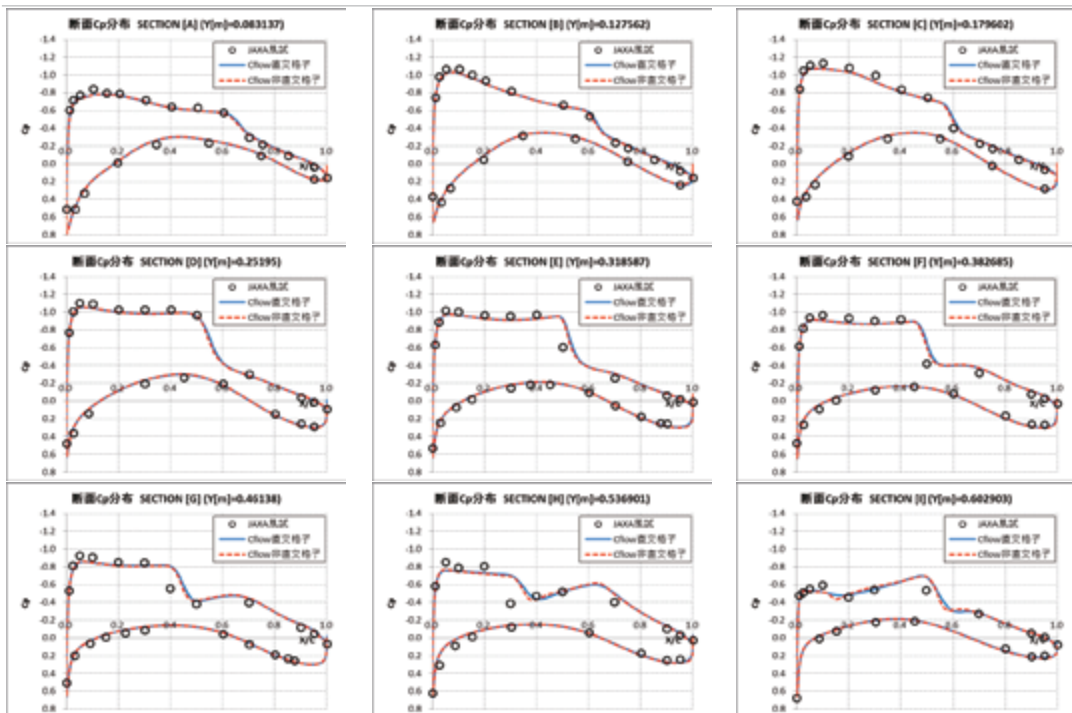
課題1-1 断面Cp分布 $\alpha = -0.62^\circ$



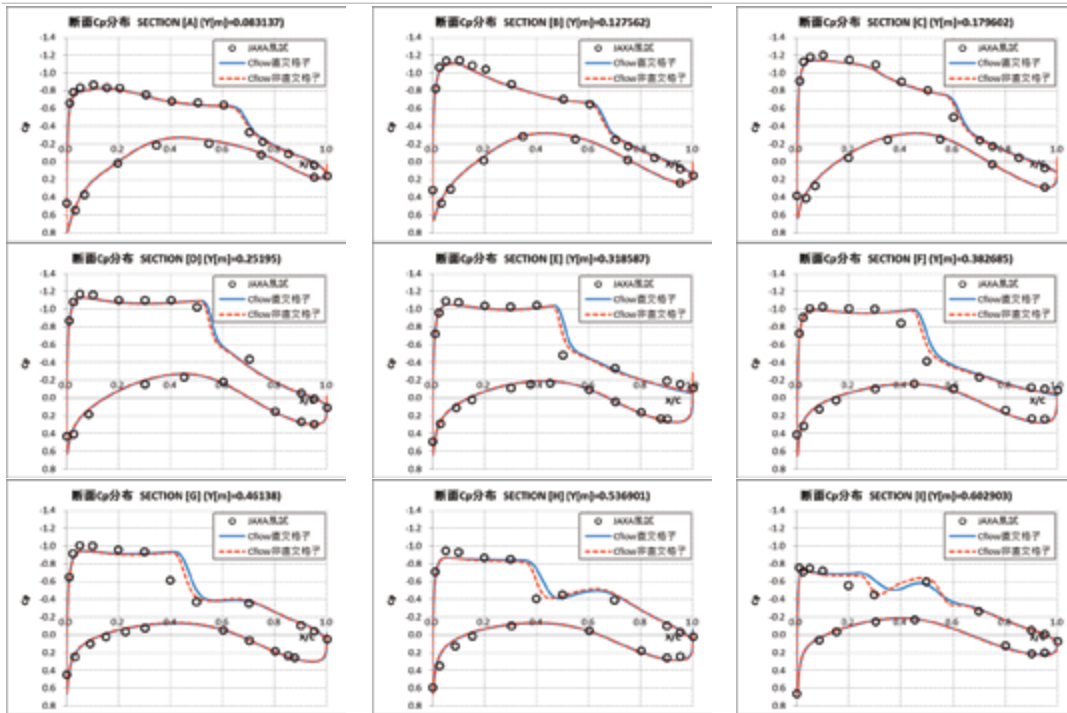
課題1-1 断面Cp分布 $\alpha=2.47^\circ$



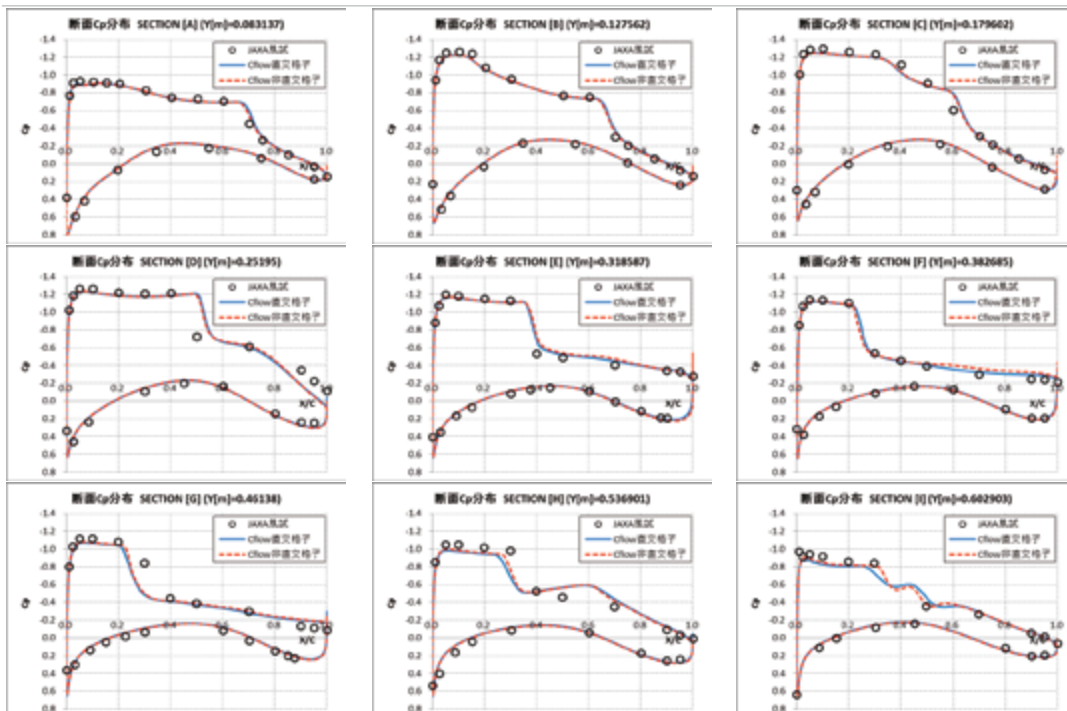
課題1-1 断面Cp分布 $\alpha=2.94^\circ$



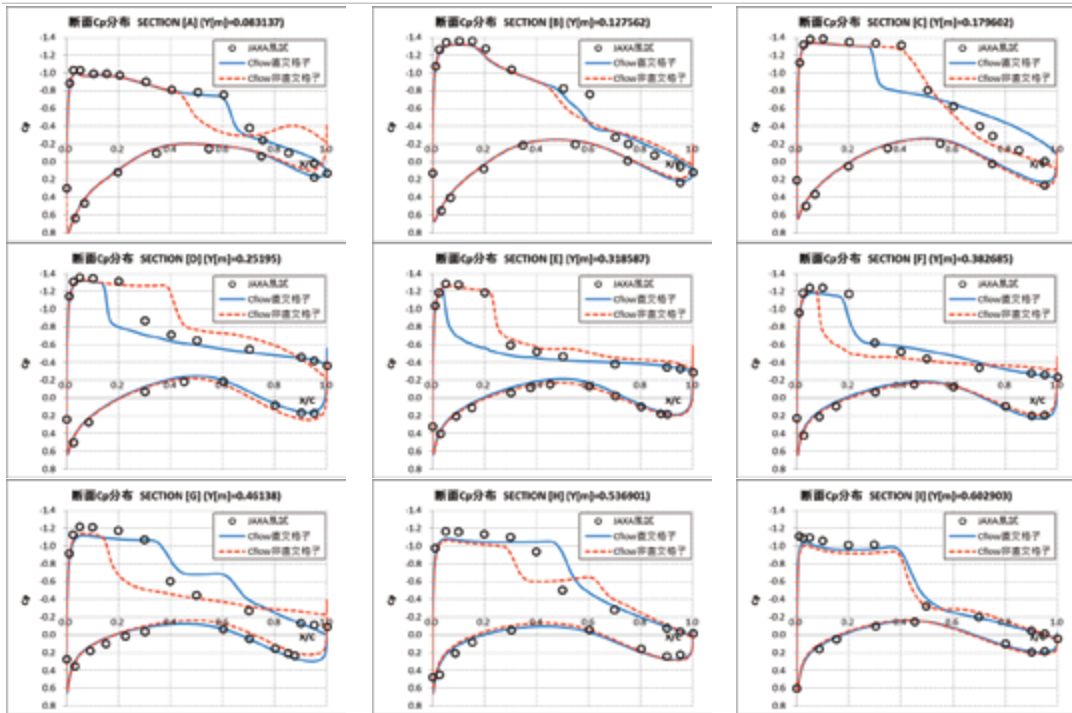
課題1-1 断面Cp分布 $\alpha=3.55^\circ$



課題1-1 断面Cp分布 $\alpha=4.65^\circ$

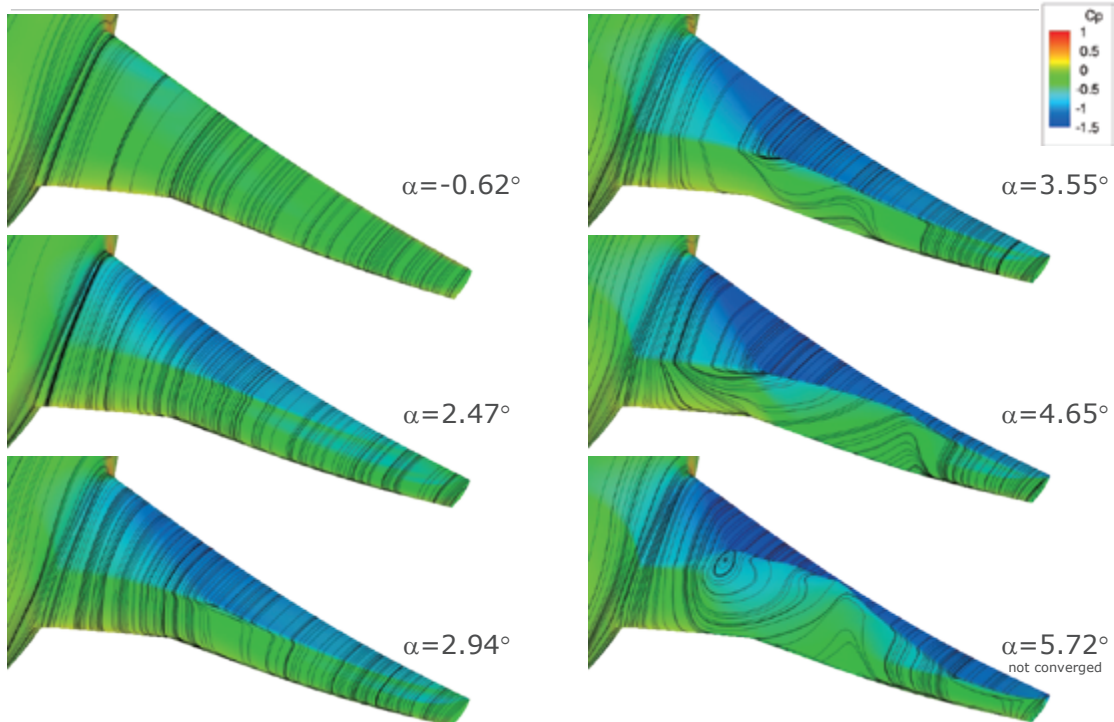


課題1-1 断面Cp分布 $\alpha=5.72^\circ$



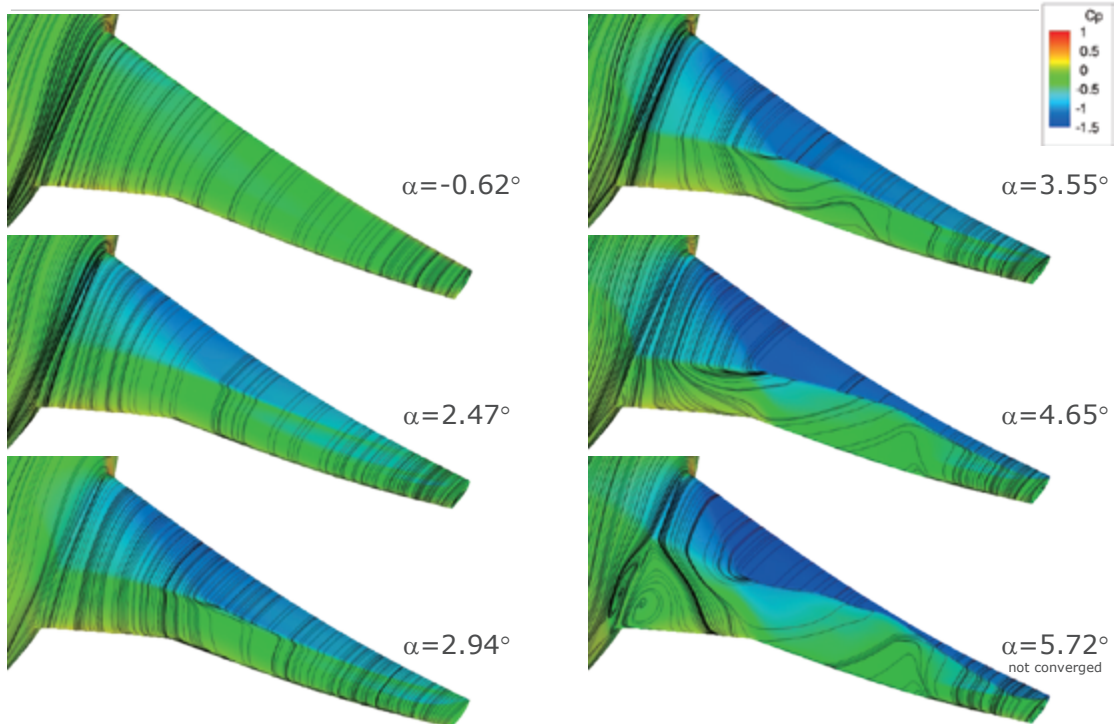
課題1-1 Cflow直交格子 表面流線とCp分布

変形有
Medium格子

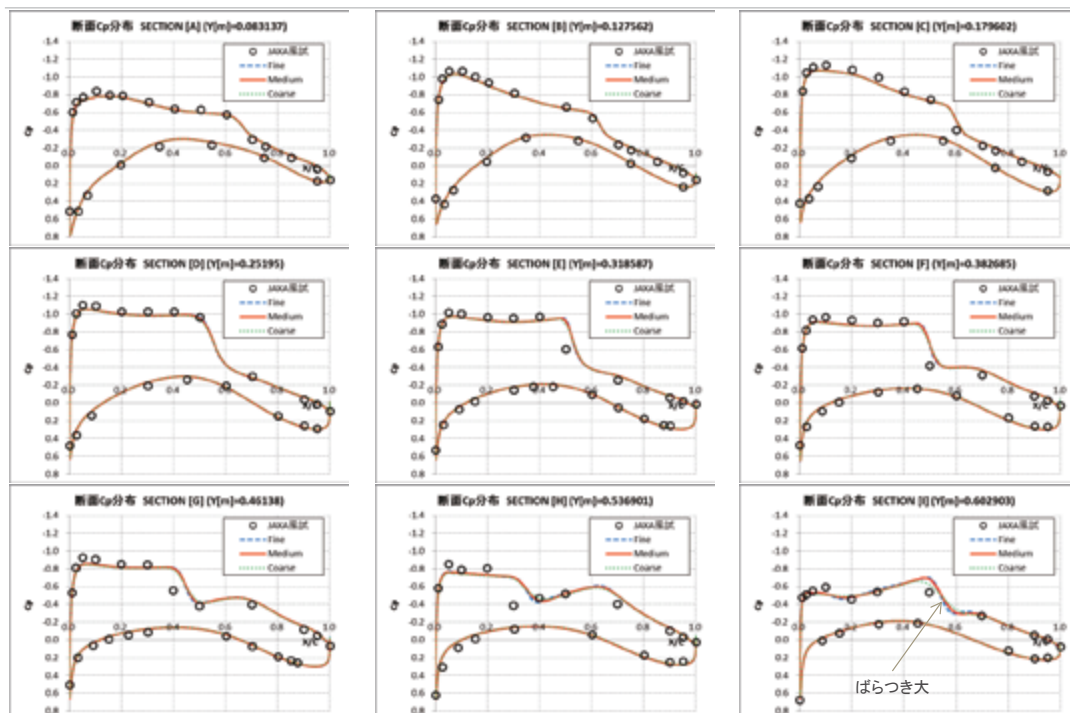


課題1-1 Cflow非直交格子 表面流線とCp分布

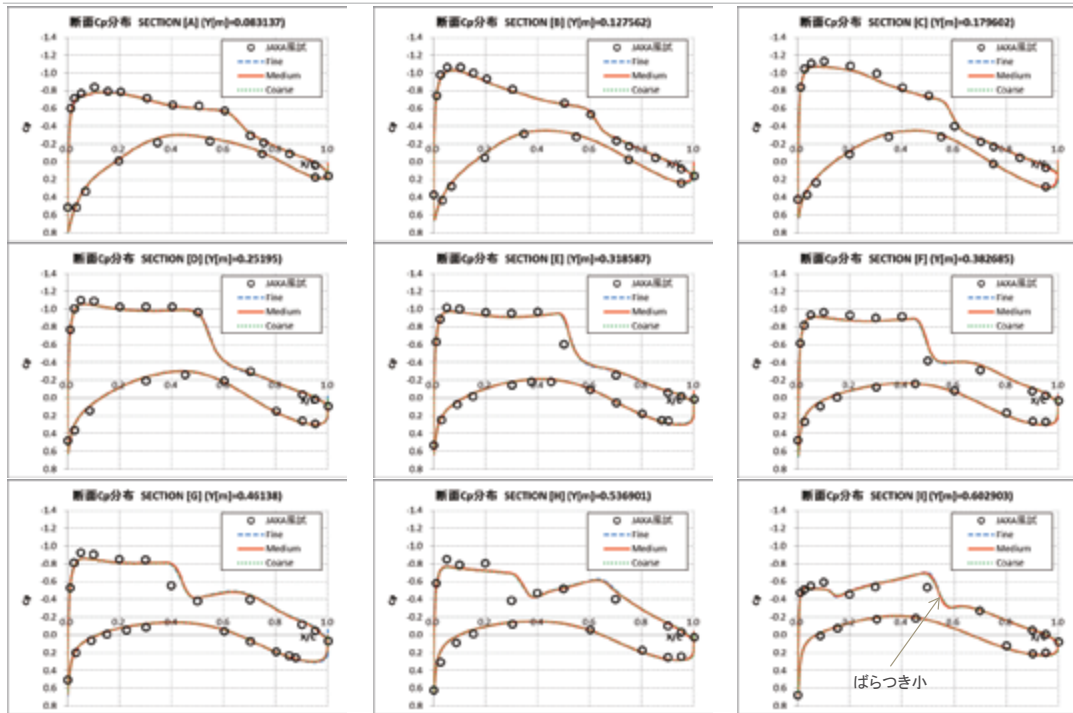
変形有
Medium格子



課題1-2 断面Cp分布 Cflow直交格子

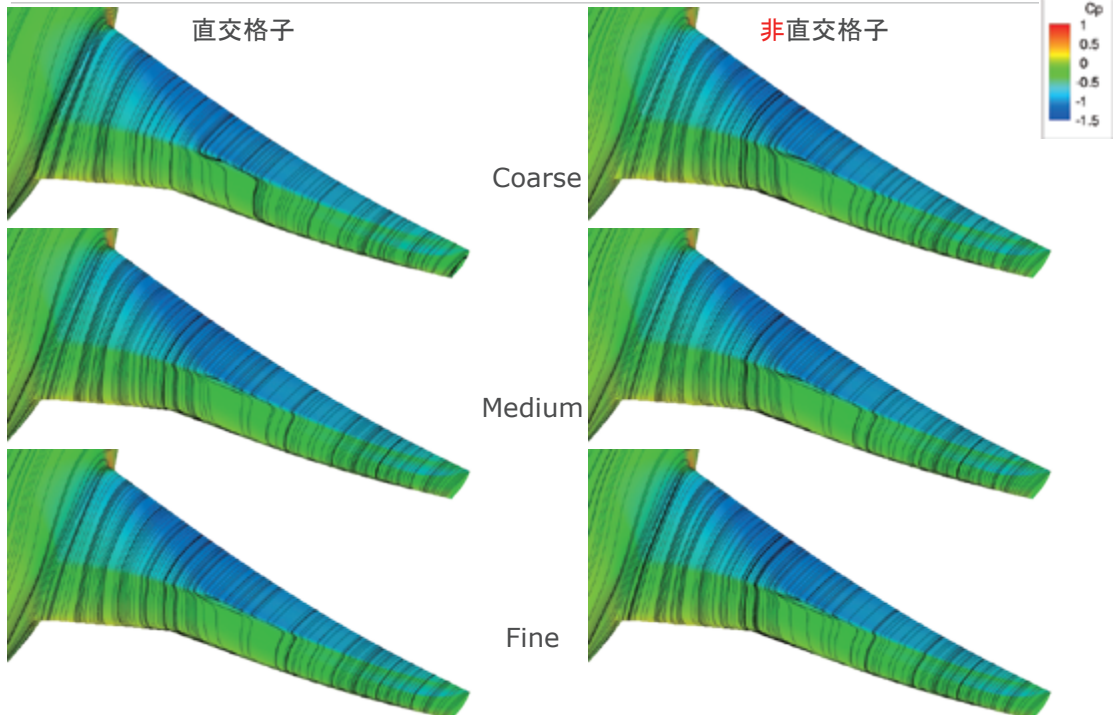


課題1-2 断面Cp分布 Cflow非直交格子

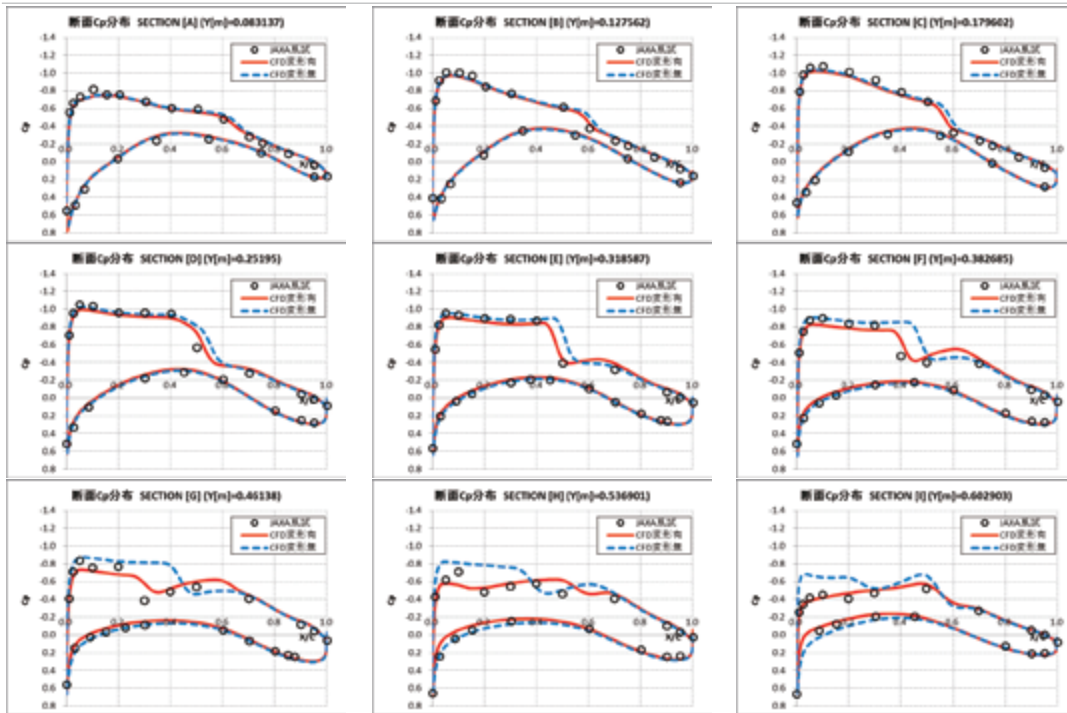


課題1-2 格子収束性 表面流線とCp分布

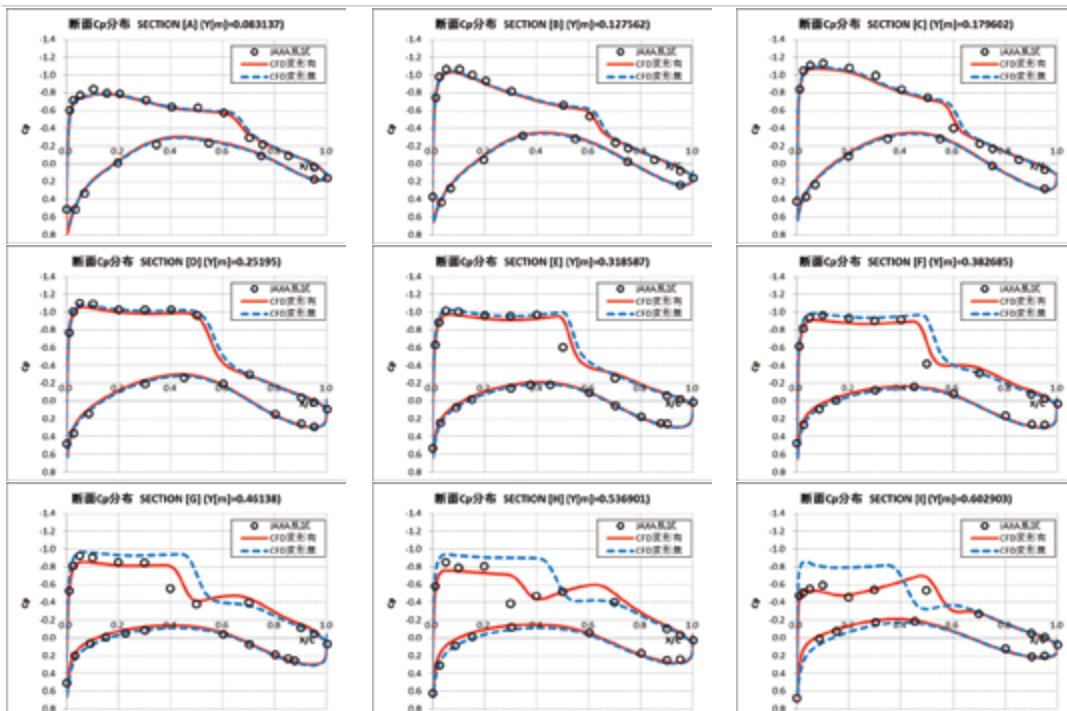
変形有
 $\alpha = 2.94^\circ$



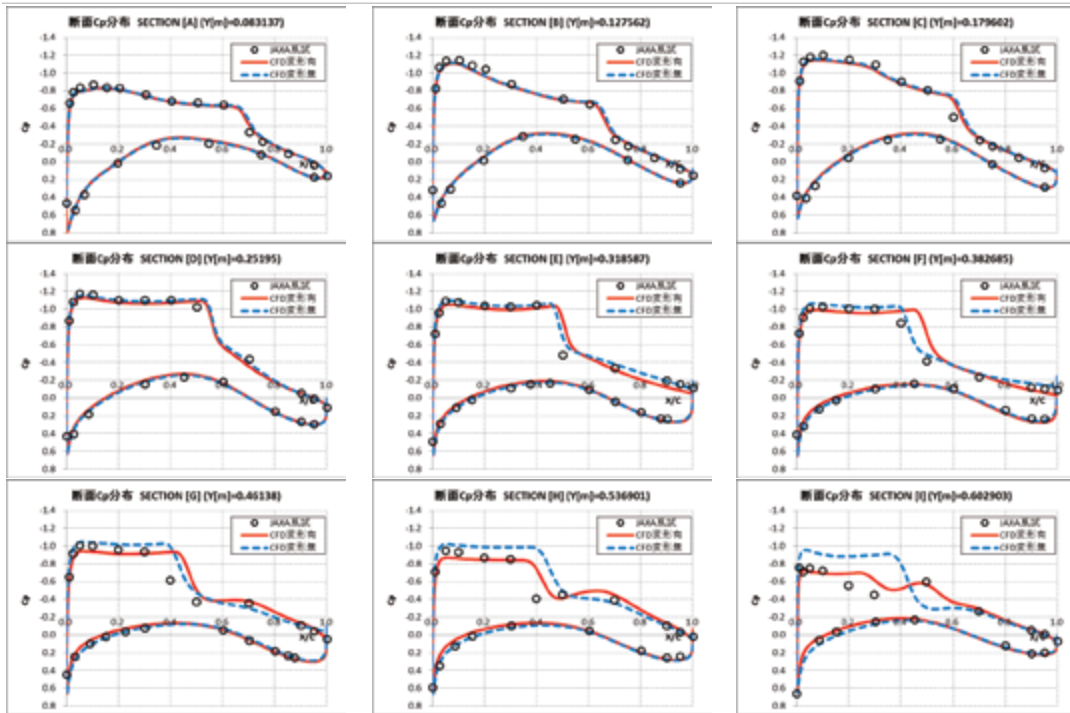
課題1-3 断面Cp分布 $\alpha=2.47^\circ$ Cflow直交格子



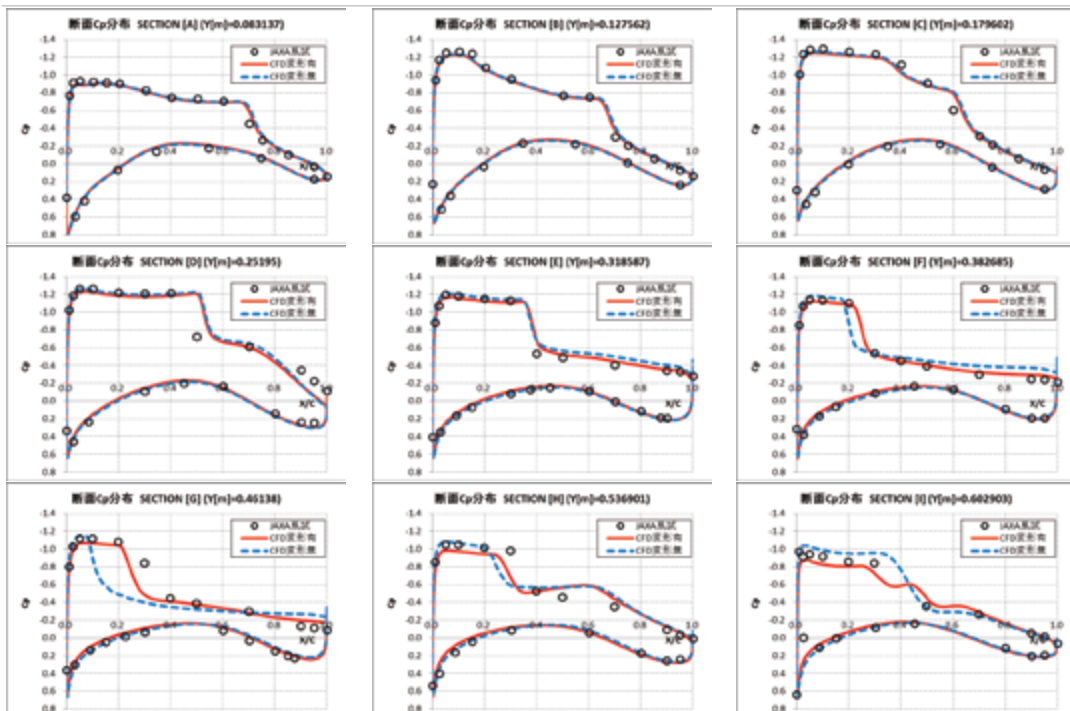
課題1-3 断面Cp分布 $\alpha=2.94^\circ$ Cflow直交格子



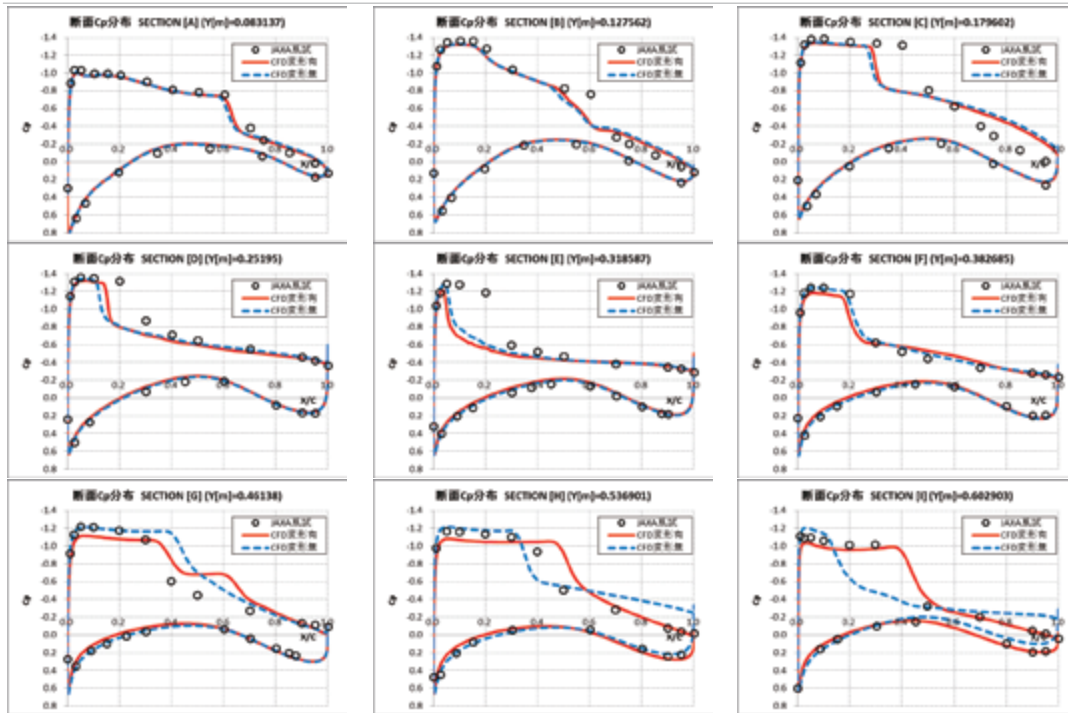
課題1-3 断面Cp分布 $\alpha=3.55^\circ$ Cflow直交格子



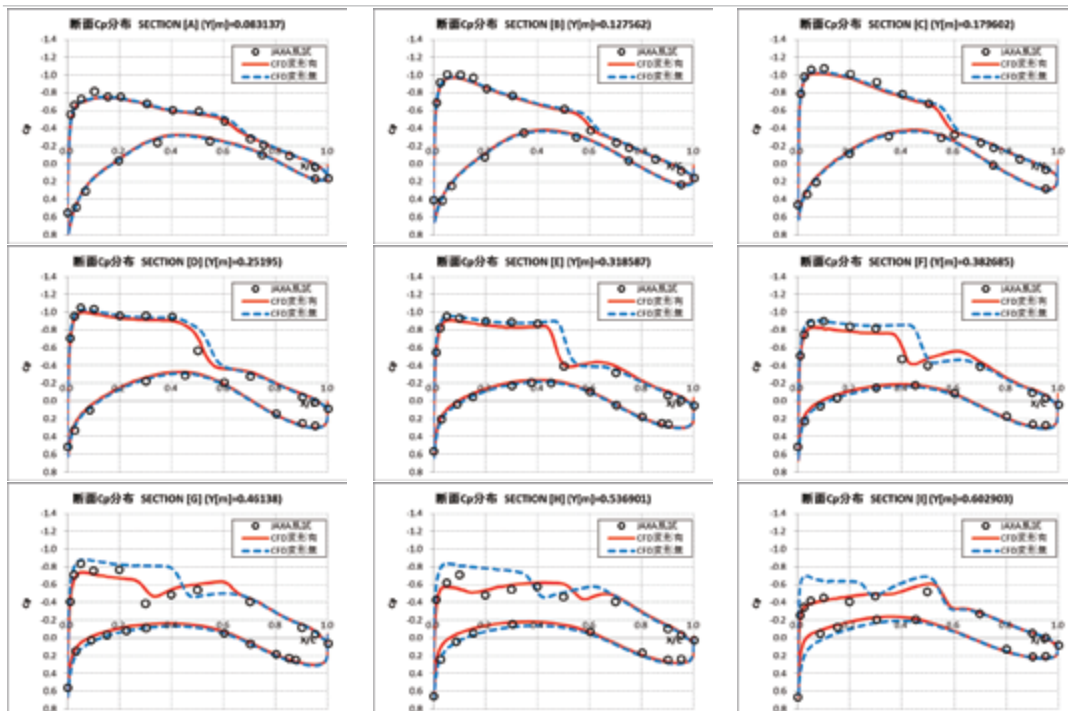
課題1-3 断面Cp分布 $\alpha=4.65^\circ$ Cflow直交格子



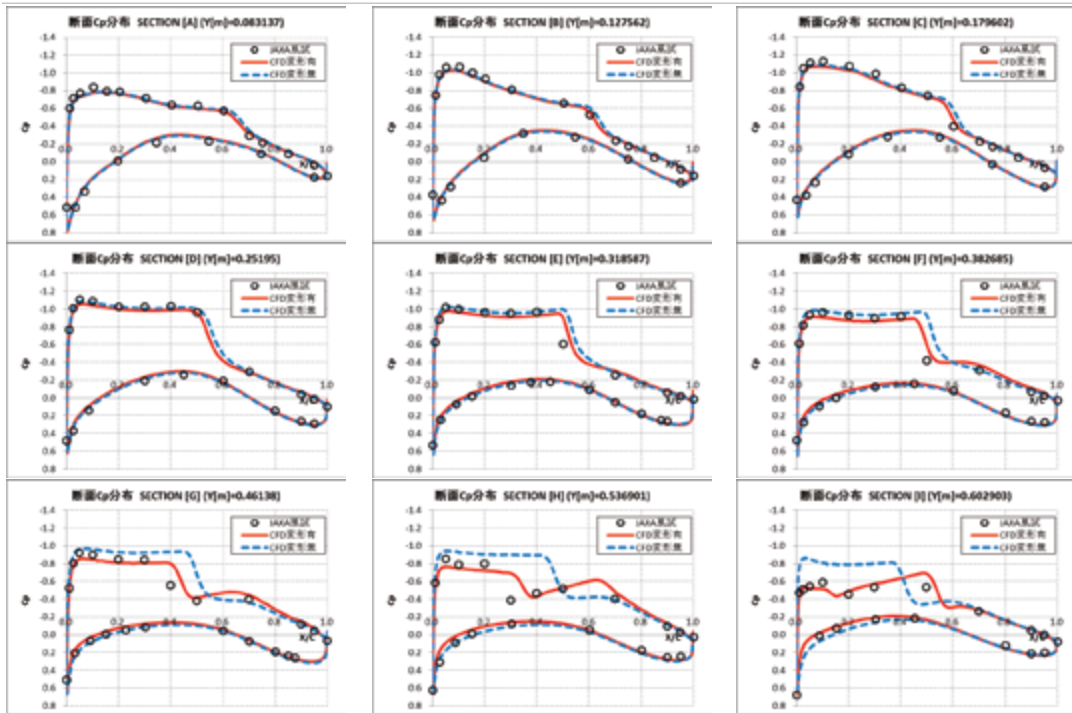
課題1-3 断面Cp分布 $\alpha=5.72^\circ$ Cflow直交格子



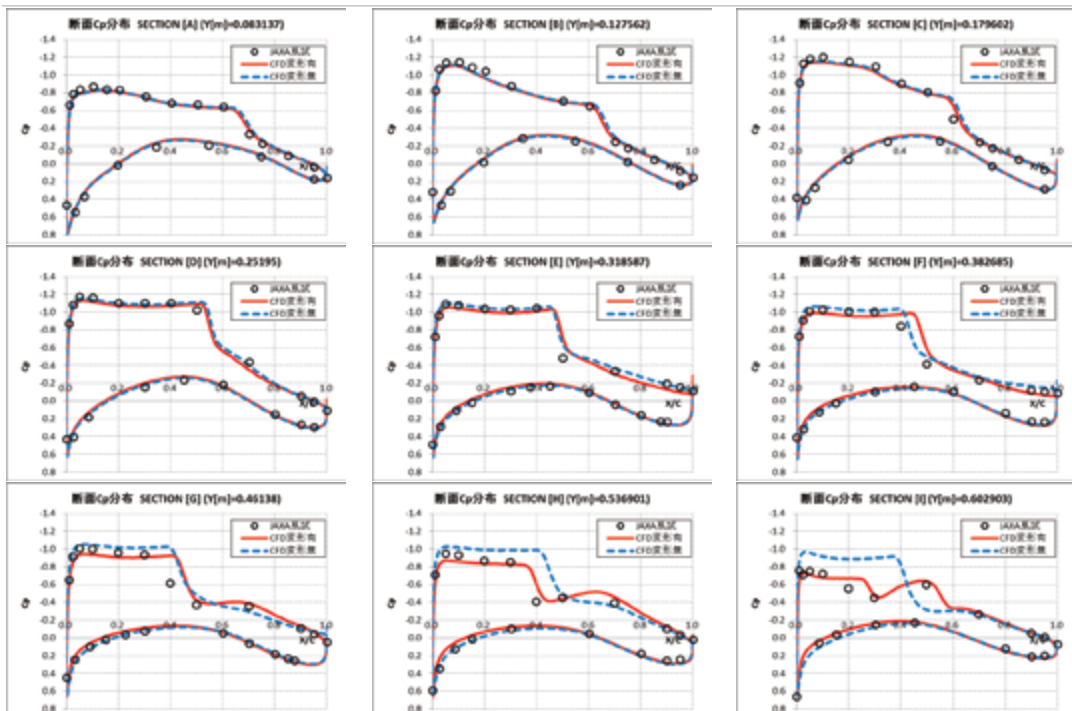
課題1-3 断面Cp分布 $\alpha=2.47^\circ$ Cflow非直交格子



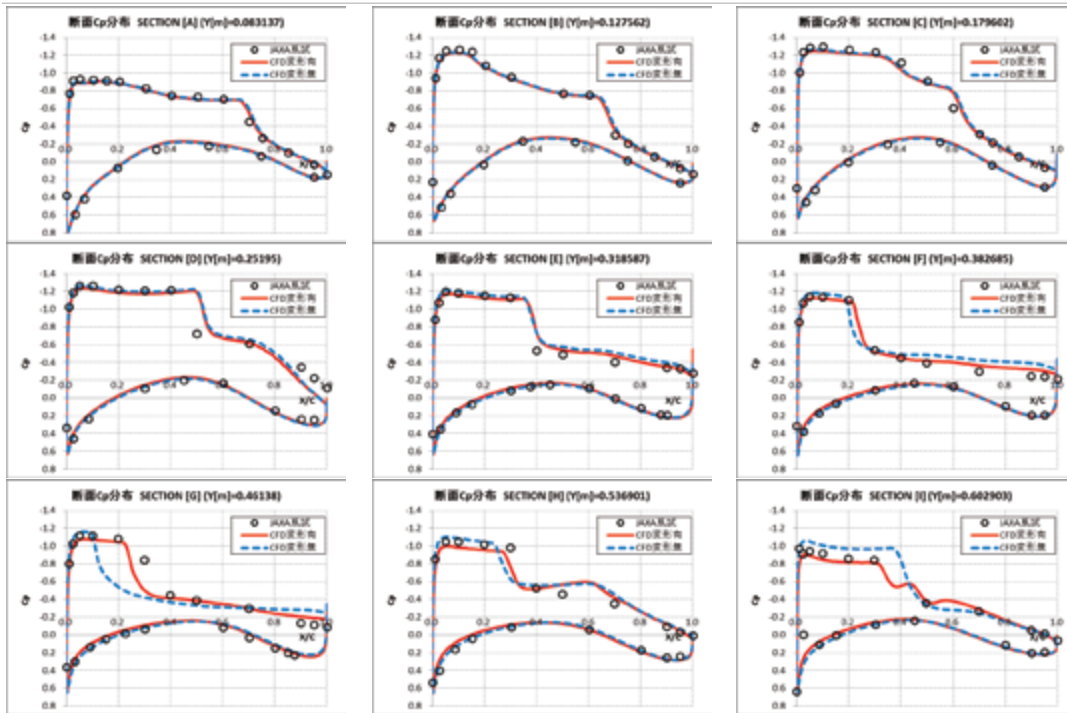
課題1-3 断面Cp分布 $\alpha=2.94^\circ$ Cflow非直交格子



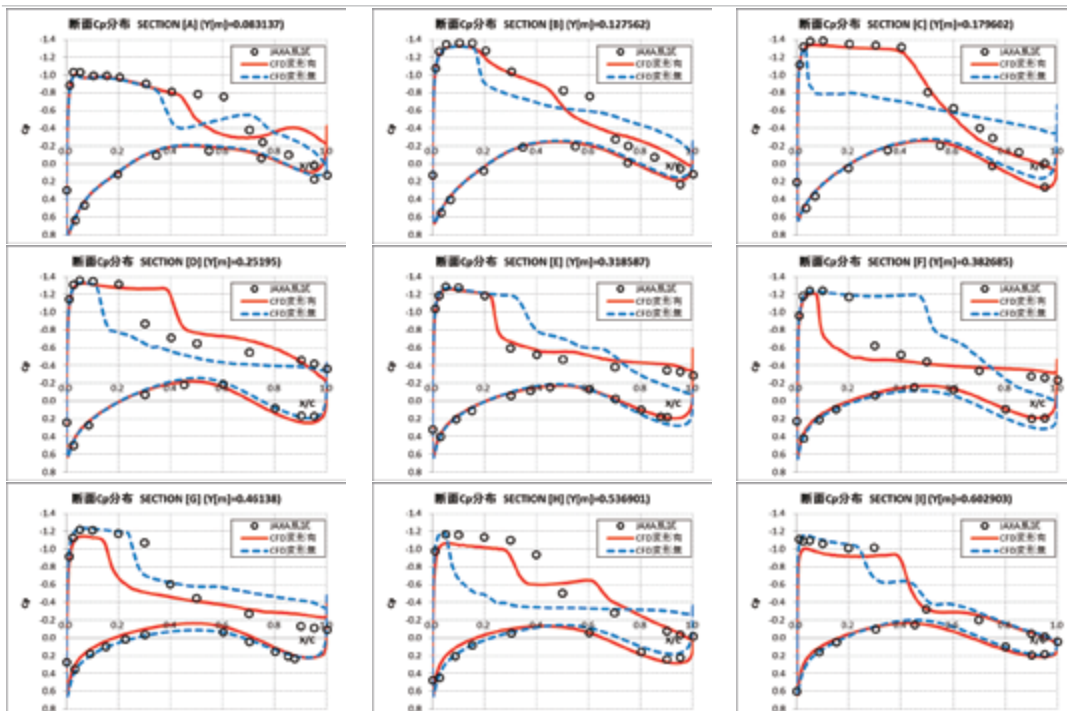
課題1-3 断面Cp分布 $\alpha=3.55^\circ$ Cflow非直交格子



課題1-3 断面Cp分布 $\alpha=4.65^\circ$ Cflow非直交格子

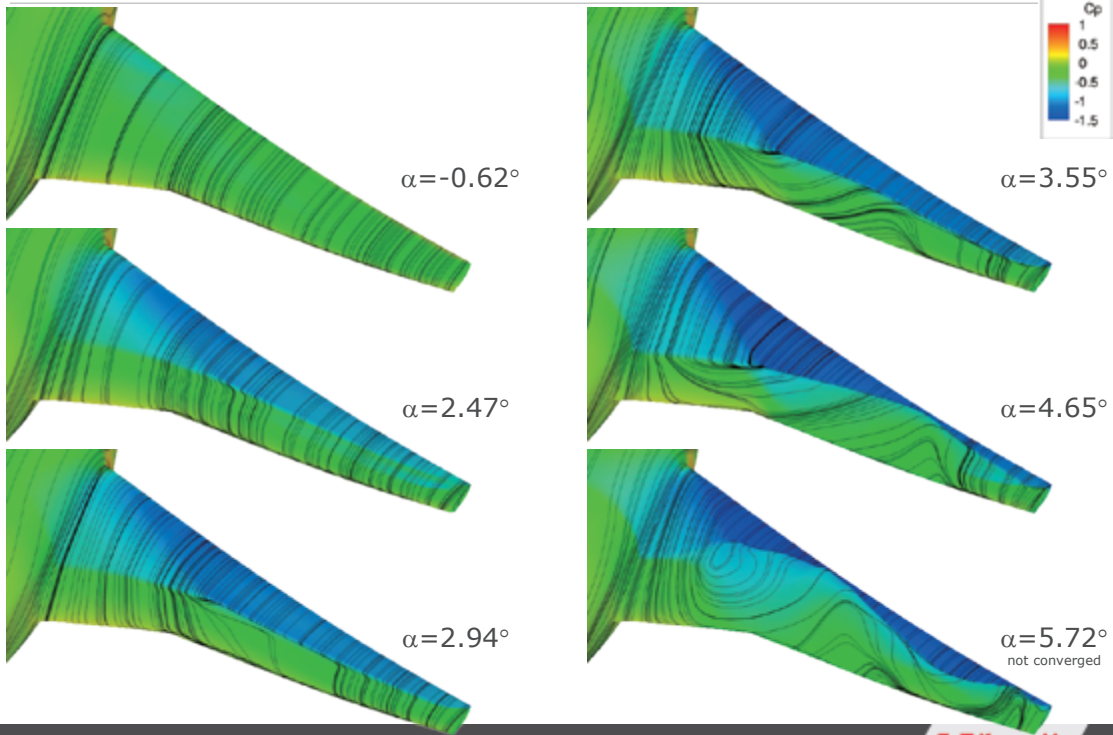


課題1-3 断面Cp分布 $\alpha=5.72^\circ$ Cflow非直交格子



課題1-3 Cflow直交格子 表面流線とCp分布

変形無
Medium格子



課題1-3 Cflow非直交格子 表面流線とCp分布

変形無
Medium格子

