



BCM-TASカップリングソルバーを用いた NASA CRM解析

○ 牧野 真弥, 福島 裕馬, 三坂 孝志, 大林 茂
(東北大学 流体科学研究所)

廣瀬 拓也, 佐々木 大輔
(金沢工業大学)

第48回 流体力学講演会/ANSS Aerodynamics Prediction Challenge II
2016年7月6日 金沢歌劇座

発表内容



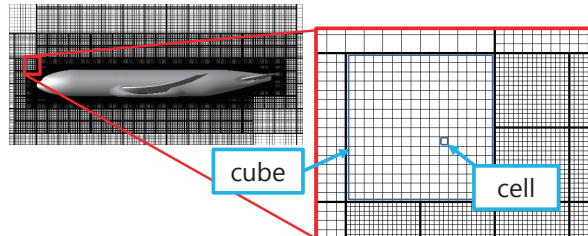
- ✈ BCM-TASカップリングソルバーの紹介
 - BCM, TAS
 - BCM-TASカップリングソルバー
- ✈ 巡航状態及び高迎角時の空力予測 (課題1-1)
 - 計算条件, 格子情報
 - 計算結果
- ✈ まとめ

BCM, TAS



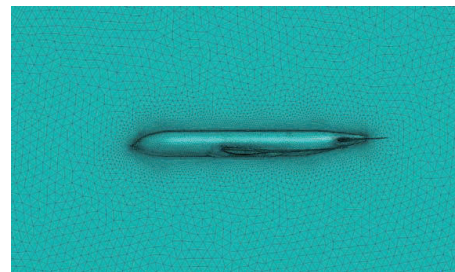
BCM (Building-Cube Method)

- ・ブロック型直交格子
- ・空間高次精度化が容易
- ・解適合格子細分化が可能
- ・境界層解像が困難



TAS (Tohoku university Aerodynamic Simulation)

- ・非構造格子
- ・空間高次精度化が困難
- ・境界層解像
⇒ 直交格子より容易



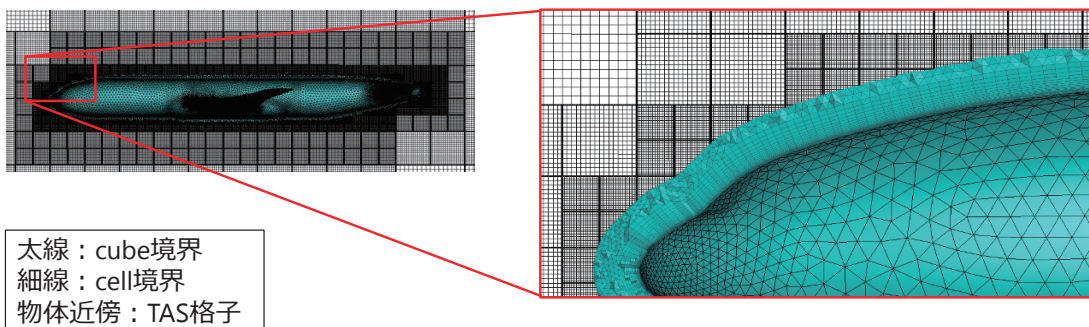
3 / 28

BCM-TAS カップリングソルバー



BCM-TASカップリングソルバー

- ・物体近傍領域を効率的に解析：TAS
- ・壁面近傍以外の空間での格子均一性，空間精度：BCM



太線：cube境界
細線：cell境界
物体近傍：TAS格子

BCM→TAS : Tri-Linear補間
TAS→BCM : 線形一次式による補間

CRM (Common Research Model)
カップリング格子の様子

4 / 28

課題1-1：巡航状態及び高迎角時の空力予測



✈ 課題1-1

- $M = 0.847$, $Re_c = 2.26 \times 10^6$
- 迎角： **-1.79**, -0.62, **0.32**, **1.39**, 2.47, 2.94, 3.55, 4.65, 5.72 deg
- 格子（尾翼有）：MEGG3D 物体近傍格子 + BCM格子
- 変形：-0.62 degのケースはオリジナル（変形無）

5 / 28

計算条件



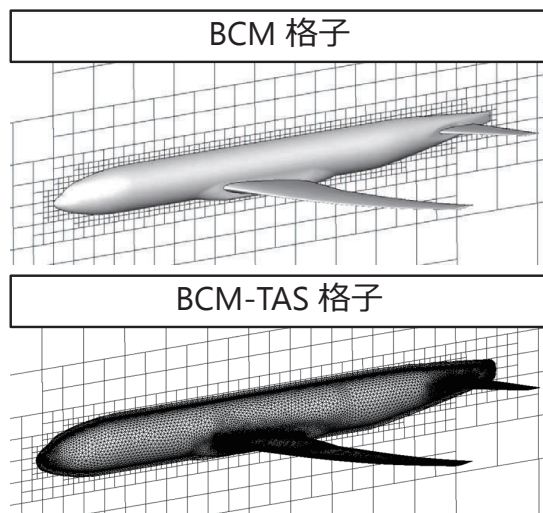
	非構造格子(TAS)	直交格子(BCM)
支配方程式	圧縮性NS方程式	圧縮性Euler方程式
乱流モデル	Spalart-Allmaras	なし
空間スキーム	HLLEW+ 線形再構築	HLLEW+ 3次精度MUSCL
時間スキーム	陰解法	陰解法
並列化	OpenMP	OpenMP

6 / 28

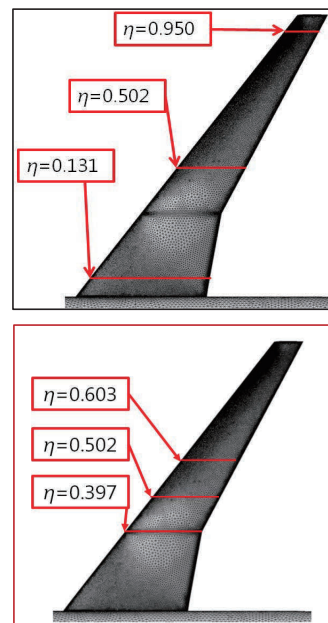
格子情報



	node数(TAS)	cell数(BCM)
空力予測解析	約 1.20×10^7	約 4.10×10^7



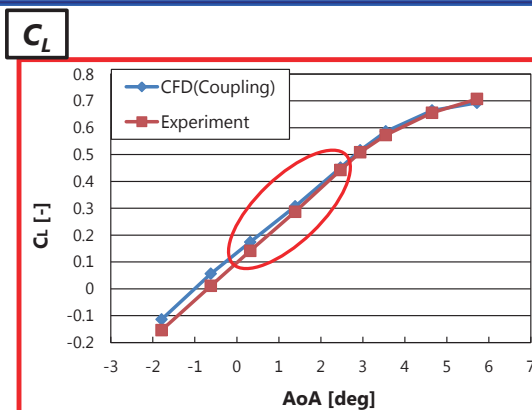
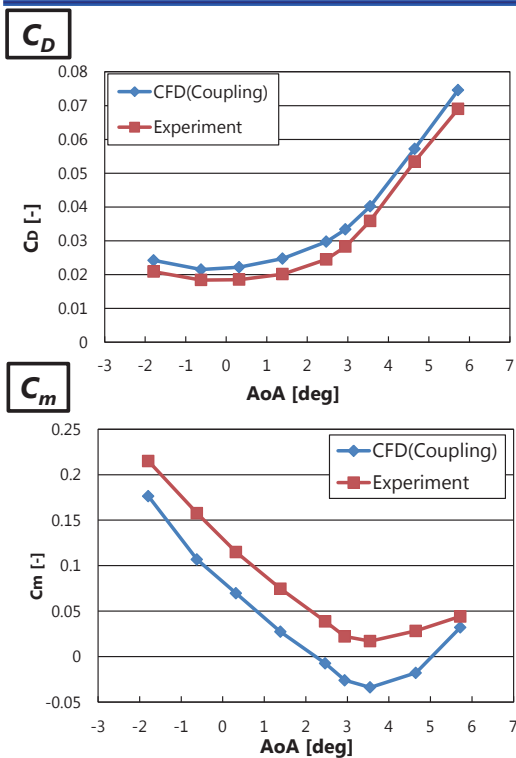
圧力分布取得断面



格子の様子 (左：主翼上面TAS格子, 右：各解析格子)

7 / 28

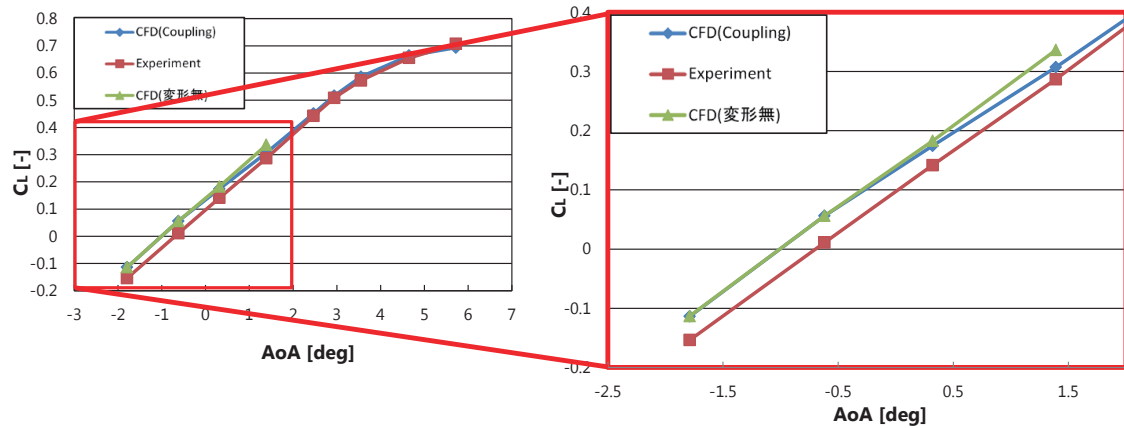
空力係数 1 (C_D, C_L, C_M)



C_D : 実験値と同傾向, 全体的に値が大きい
 C_L : 0から2度付近で揚力傾斜が合わない
 C_m : APC1の結果と傾向は同じ

8 / 28

空力係数 2 (C_D, C_L, C_M)

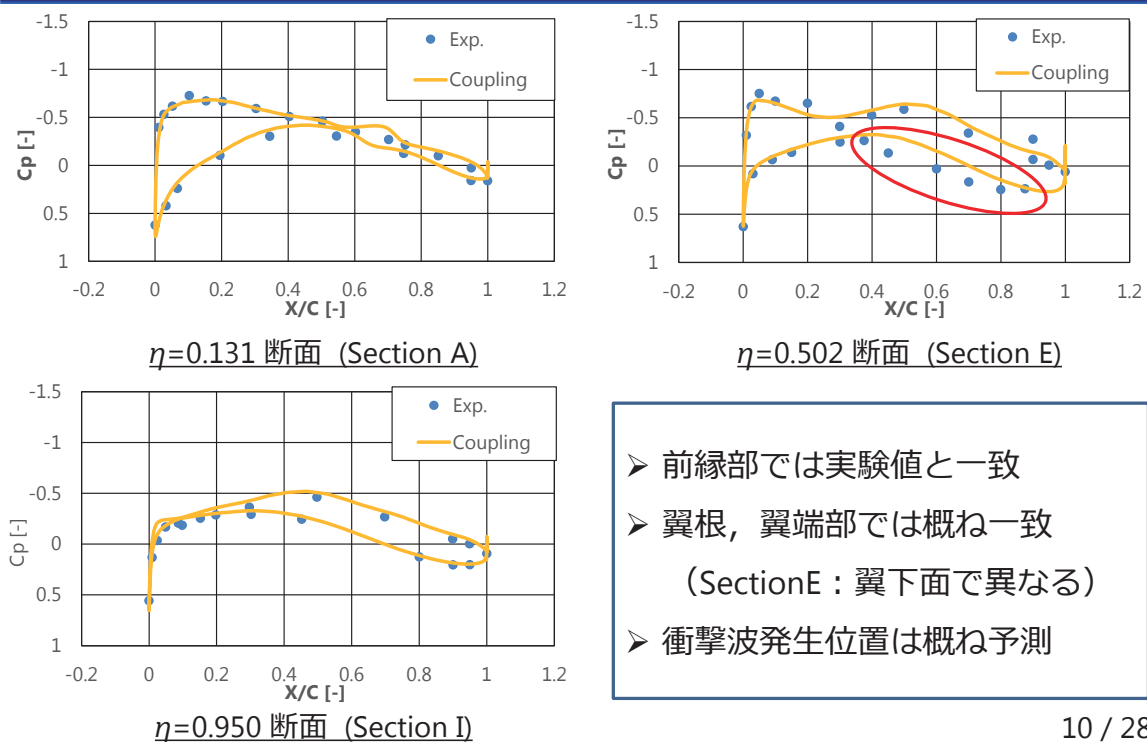


負の迎角 { 翼変形 有り ⇒ 圧力係数分布はほぼ同じ
翼変形 無し

(※ 変形無し : C_L 値は異なるが、揚力傾斜は実験値に近い)

9 / 28

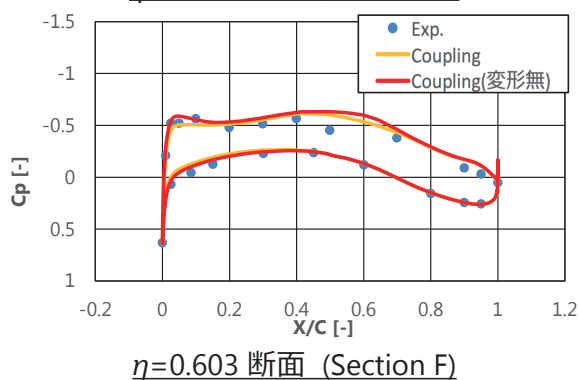
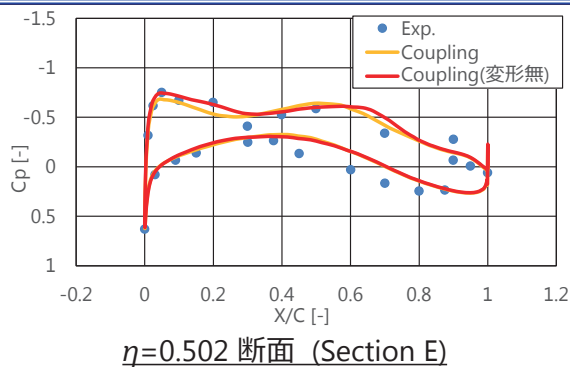
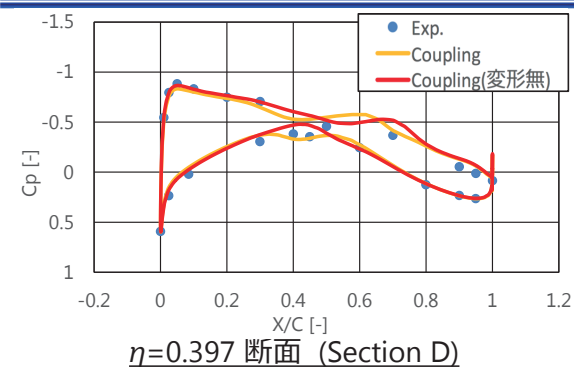
圧力係数分布 (1) 1.39[deg]



- 前縁部では実験値と一致
- 翼根、翼端部では概ね一致
(Section E : 翼下面で異なる)
- 衝撃波発生位置は概ね予測

10 / 28

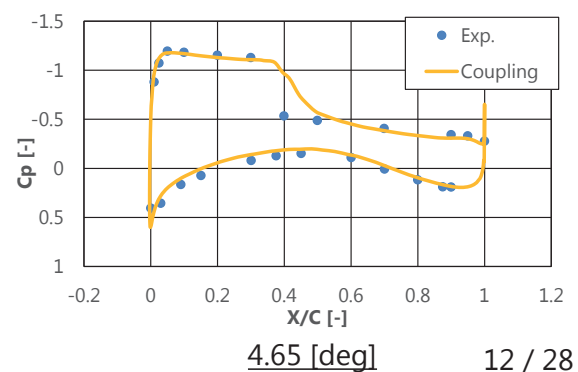
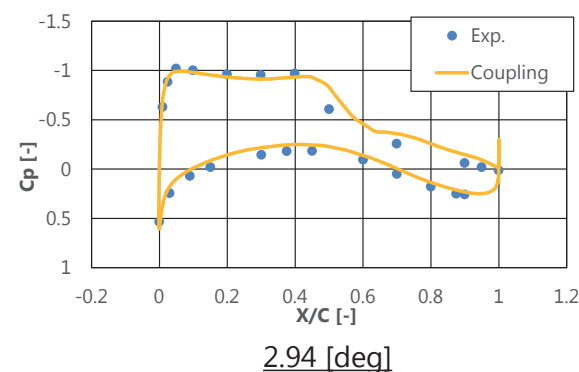
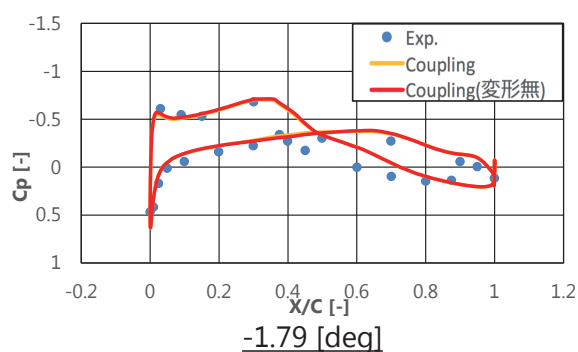
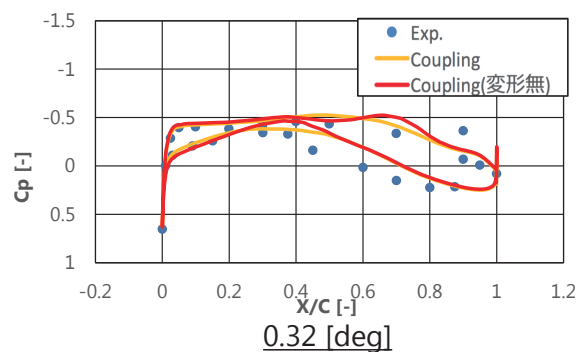
圧力係数分布 (2) 1.39[deg]



$\eta=0.502$ 断面のみ翼下面で
圧力分布が異なる

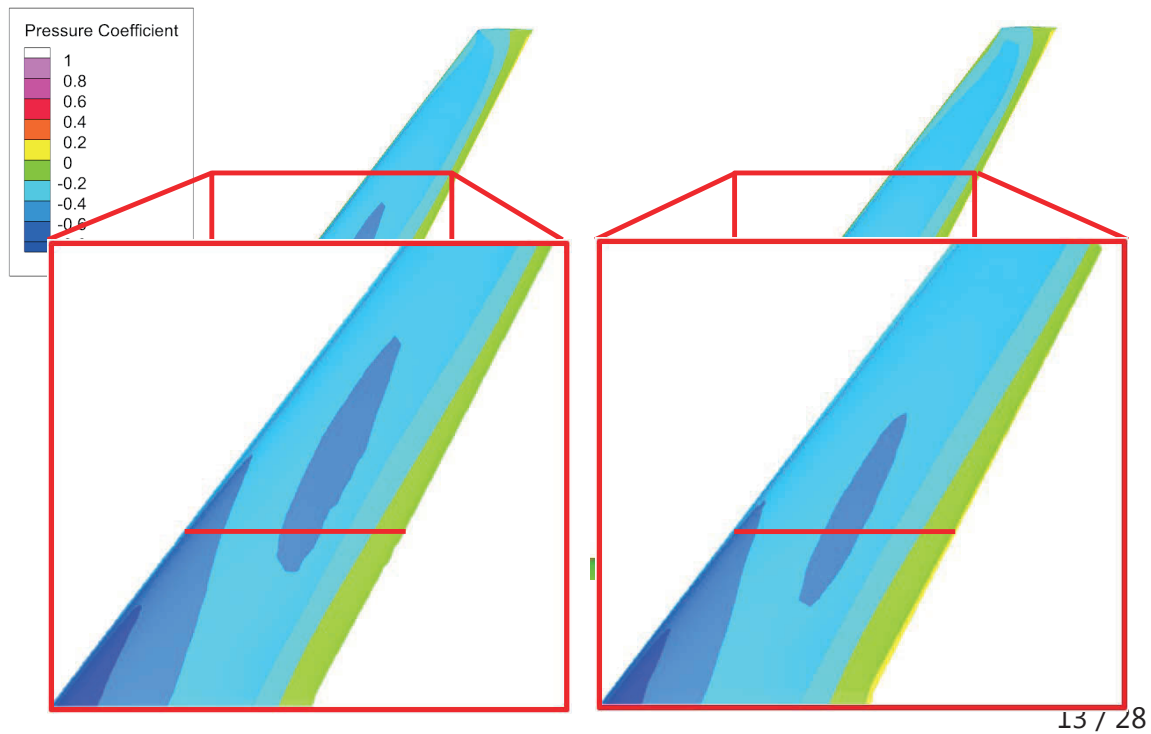
11 / 28

SectionEでの圧力係数分布

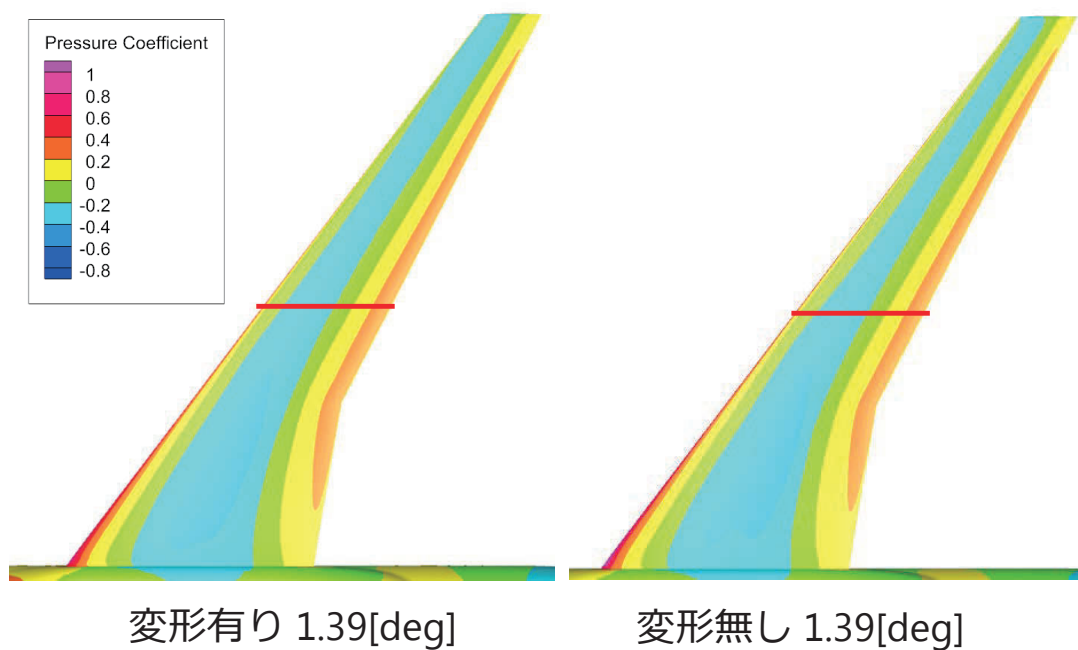


12 / 28

圧力コンター図（翼上面）



圧力コンター図（翼下面）



まとめ



- ✚ BCM-TASカップリングソルバーを用いてCRMの空力予測解析を行った（追加迎角分）
- C_D , C_m は実験値と同傾向（値のずれは有り）, C_L は低迎角で揚力傾斜が異なる
 - ⇒ 翼変形無しでは翼変形有りよりも1.39[deg]の C_L が大きくなり, 実験に近い揚力傾斜になる
- 負の迎角では翼変形有りと無しで圧力分布はほぼ同じ（ C_L もほぼ同じ）
 - ⇒ 1.39[deg]では変形を考慮することで圧力係数が実験値に若干近づいた（ C_L の微増）
- 低迎角では変形の有無に関わらずSectionE下面 C_p が合わない
 - ⇒ 隣のSectionD,F では C_p が合っている（1.39[deg]）

15 / 28

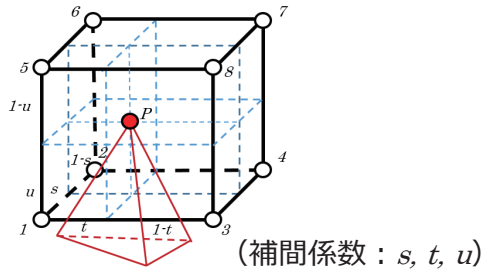
補足スライド

16 / 28

補間法



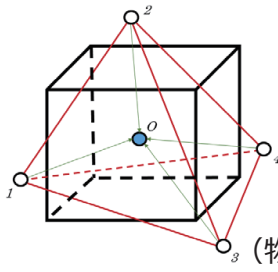
Tri-Linear補間法 (BCM→TAS)



(補間係数: s, t, u)

$$Q_p = (1-u)[(1-t)\{(1-s)Q_1 + sQ_2\} + t\{(1-s)Q_3 + sQ_4\}] + u[(1-t)\{(1-s)Q_5 + sQ_6\} + t\{(1-s)Q_7 + sQ_8\}]$$

線形一次式による補間法 (TAS→BCM)



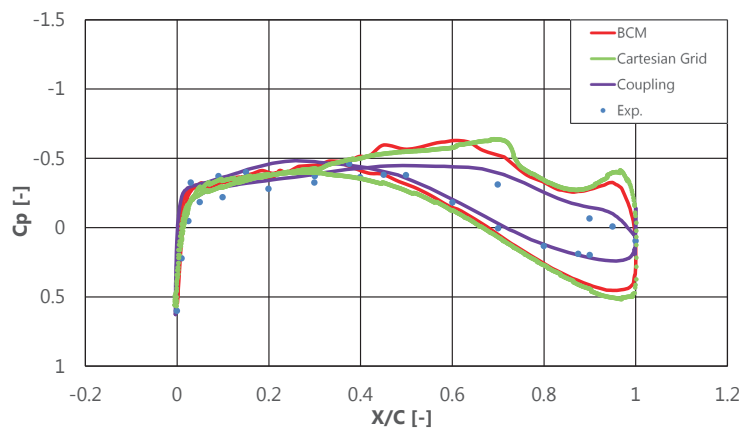
(物理量勾配: Q_x, Q_y, Q_z)

$$Q_o = Q_{AVE} + Q_x x + Q_y y + Q_z z$$

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{AVE} \\ Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{bmatrix}$$

17 / 28

検証計算 -0.62[deg]



SectionE 断面における圧力係数分布

	BCM	Cartesian Grid
格子点数	250,060,352	8,401,323

BCM

BCM単体 非粘性計算

Cartesian Grid

玉置, 今村らの非粘性計算 (直交格子)

Coupling

BCM-TAS カップリングソルバー

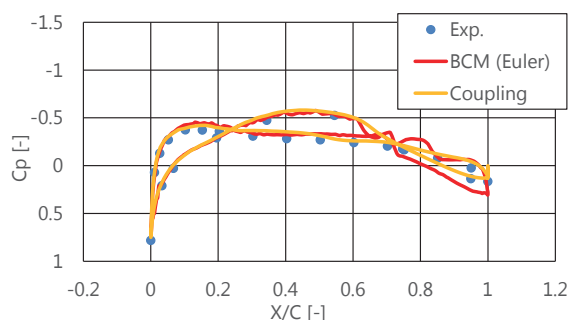
出典: 玉置義治, 原田基至, 高橋悠一, 今村太郎, 階層型直交格子によるNASA-CRM の遷音速空力予測, 第53回飛行機シンポジウム, 2015

- 前縁部では Coupling, 実験値と良く一致
 - 衝撃波発生位置では乖離
 - 翼下面 (後縁部) では実験値と乖離
- 玉置, 今村らの非粘性計算と同傾向

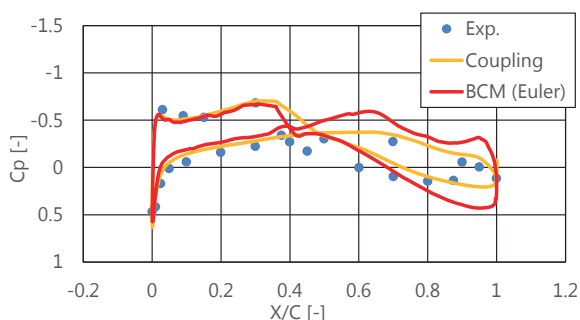
18 / 28



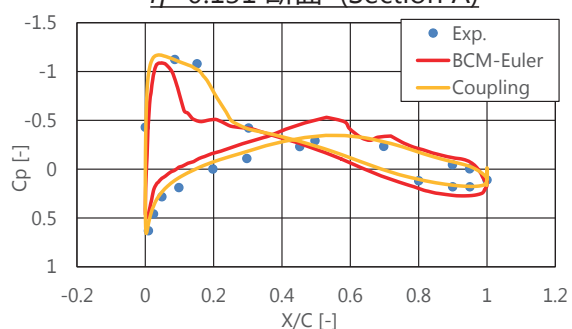
-1.79[deg]



$\eta=0.131$ 断面 (Section A)



$\eta=0.502$ 断面 (Section E)



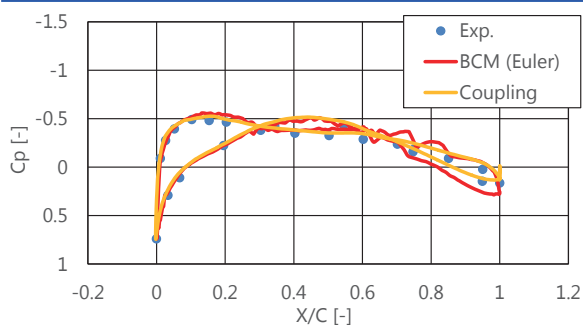
$\eta=0.950$ 断面 (Section I)

Exp. : 実験値
 BCM (Euler) : BCM単体 非粘性計算
 Coupling : BCM-TAS カップリングソルバー

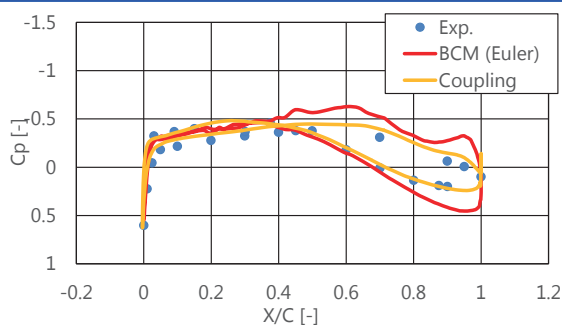
19 / 28



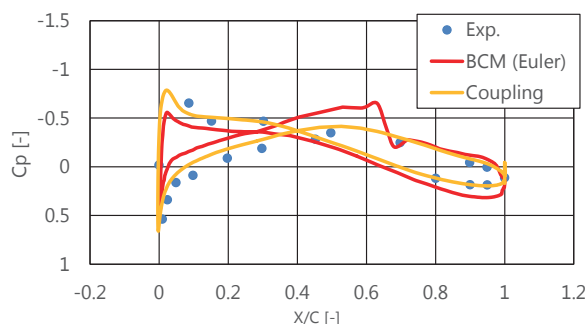
-0.62[deg]



$\eta=0.131$ 断面 (Section A)



$\eta=0.502$ 断面 (Section E)

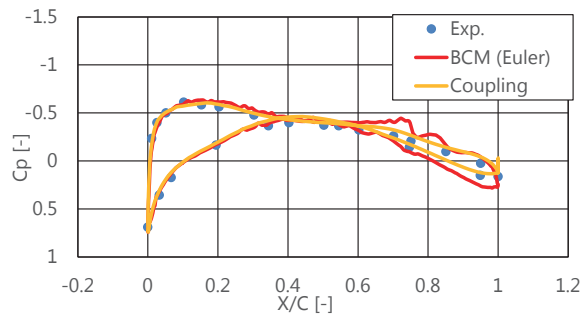
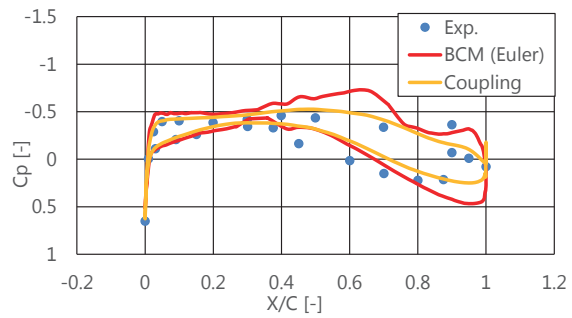
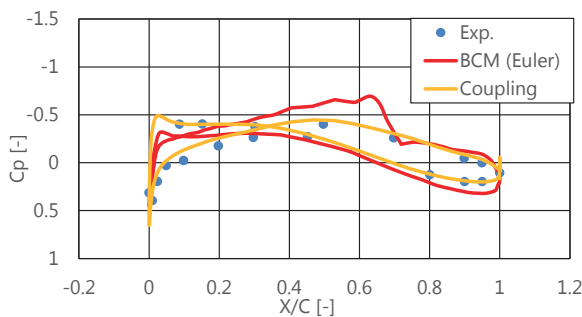


$\eta=0.950$ 断面 (Section I)

Exp. : 実験値
 BCM (Euler) : BCM単体 非粘性計算
 Coupling : BCM-TAS カップリングソルバー

20 / 28

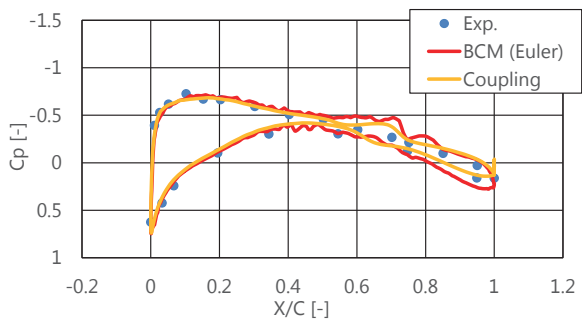
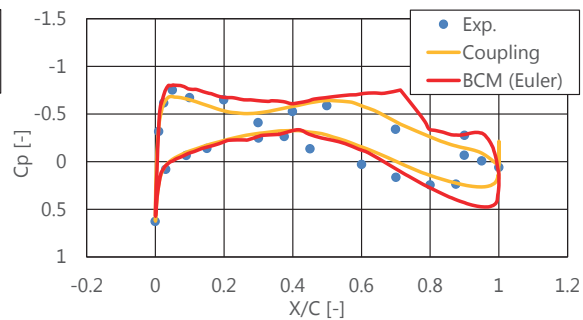
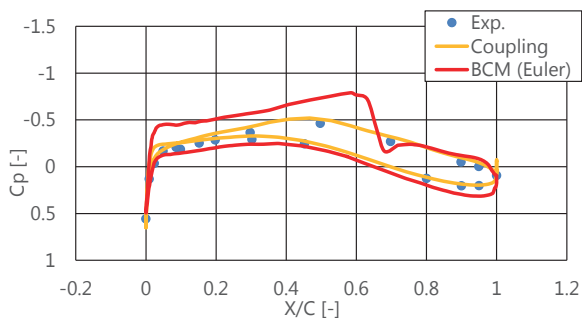
0.32[deg]

 $\eta=0.131$ 断面 (Section A) $\eta=0.502$ 断面 (Section E) $\eta=0.950$ 断面 (Section I)

Exp. : 実験値
 BCM (Euler) : BCM単体 非粘性計算
 Coupling : BCM-TAS カップリングソルバー

21 / 28

1.39[deg]

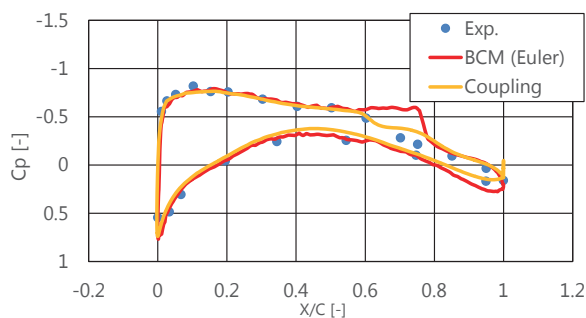
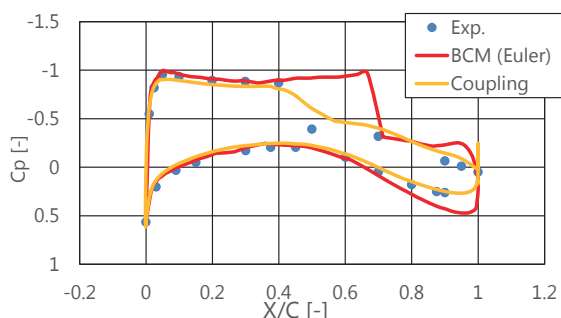
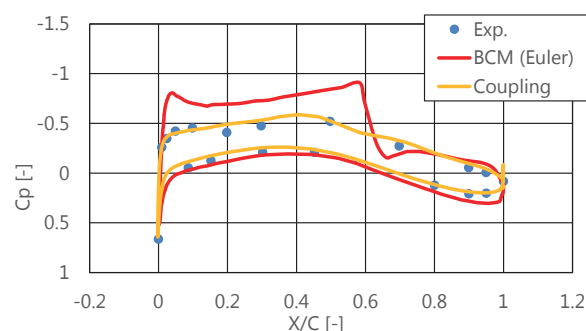
 $\eta=0.131$ 断面 (Section A) $\eta=0.502$ 断面 (Section E) $\eta=0.950$ 断面 (Section I)

Exp. : 実験値
 BCM (Euler) : BCM単体 非粘性計算
 Coupling : BCM-TAS カップリングソルバー

22 / 28



2.47[deg]

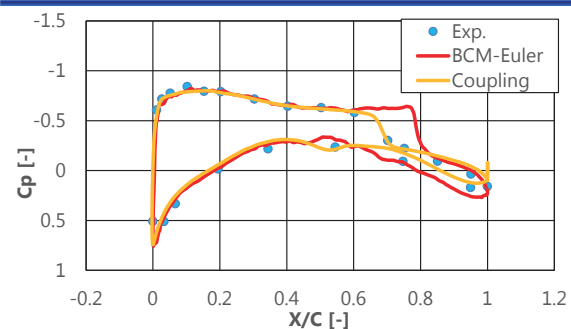
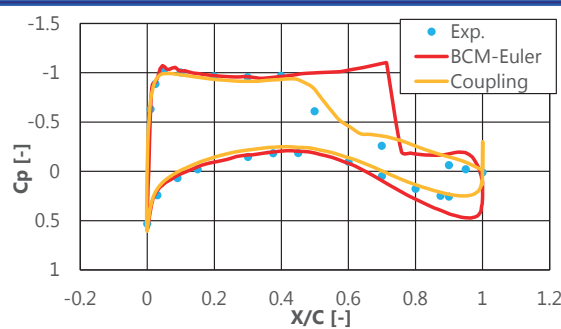
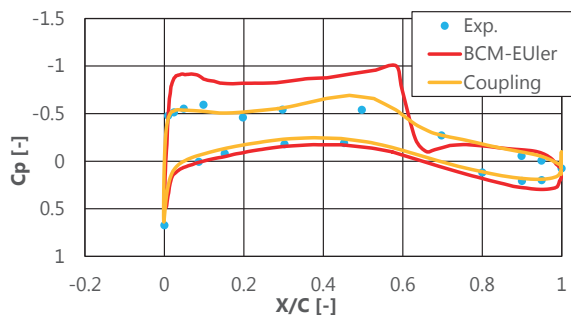
 $\eta=0.131$ 断面 (Section A) $\eta=0.502$ 断面 (Section E) $\eta=0.950$ 断面 (Section I)

Exp. : 実験値
 BCM (Euler) : BCM単体 非粘性計算
 Coupling : BCM-TAS カップリングソルバー

23 / 28



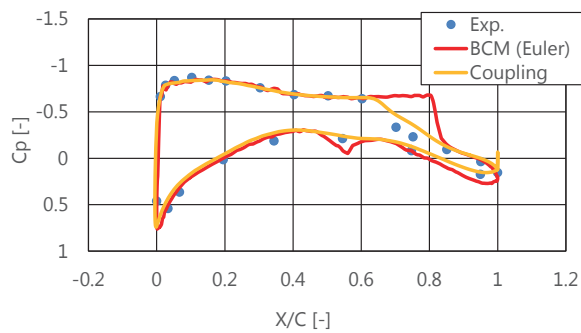
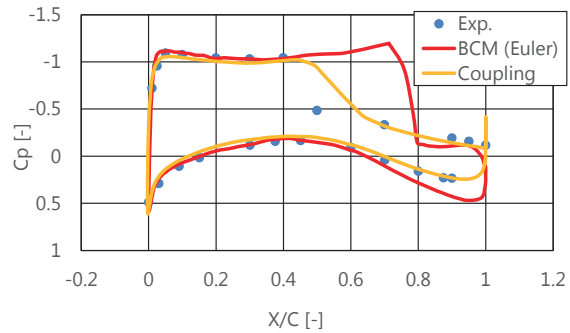
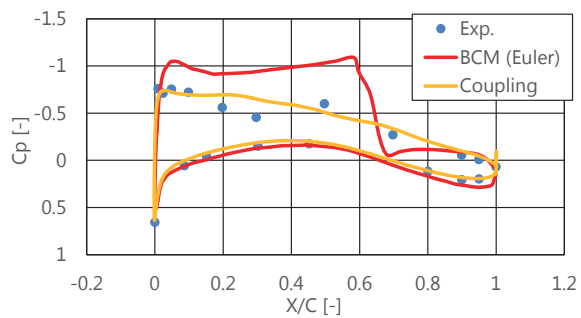
2.94[deg]

 $\eta=0.131$ 断面 (Section A) $\eta=0.502$ 断面 (Section E) $\eta=0.950$ 断面 (Section I)

Exp. : 実験値
 BCM (Euler) : BCM単体 非粘性計算
 Coupling : BCM-TAS カップリングソルバー

24 / 28

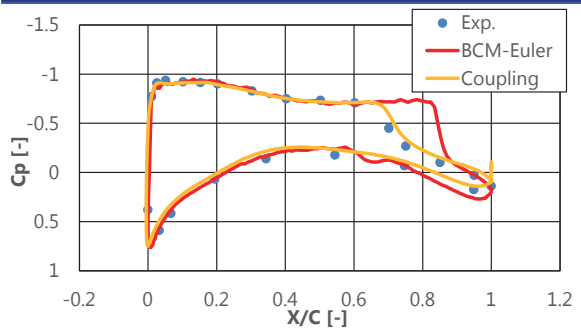
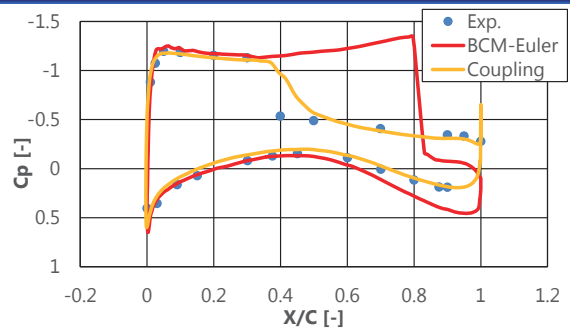
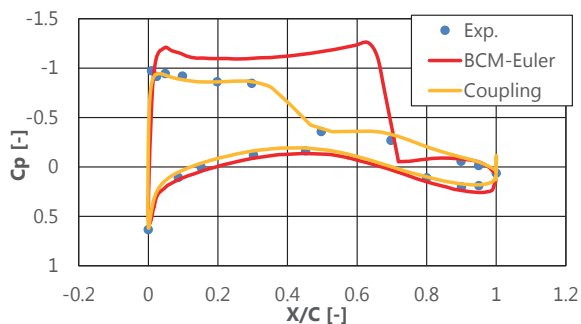
3.55[deg]

 $\eta=0.131$ 断面 (Section A) $\eta=0.502$ 断面 (Section E) $\eta=0.950$ 断面 (Section I)

Exp. : 実験値
 BCM (Euler) : BCM単体 非粘性計算
 Coupling : BCM-TAS カップリングソルバー

25 / 28

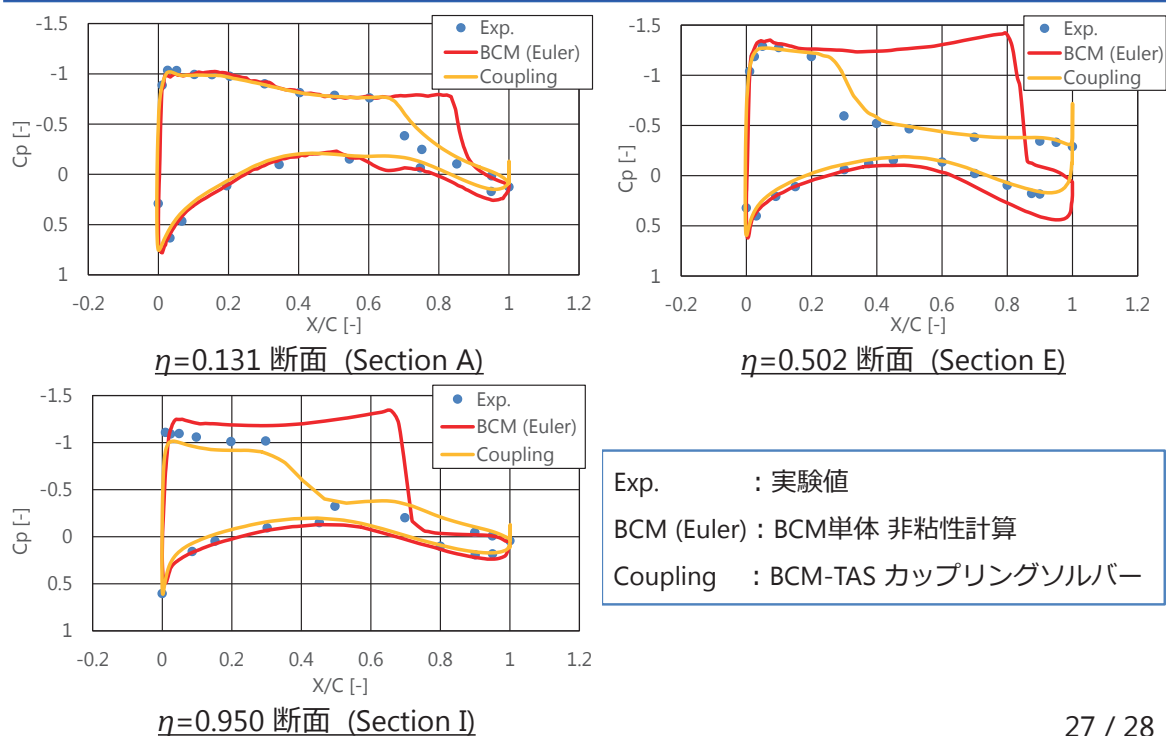
4.65[deg]

 $\eta=0.131$ 断面 (Section A) $\eta=0.502$ 断面 (Section E) $\eta=0.950$ 断面 (Section I)

Exp. : 実験値
 BCM (Euler) : BCM単体 非粘性計算
 Coupling : BCM-TAS カップリングソルバー

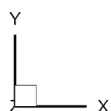
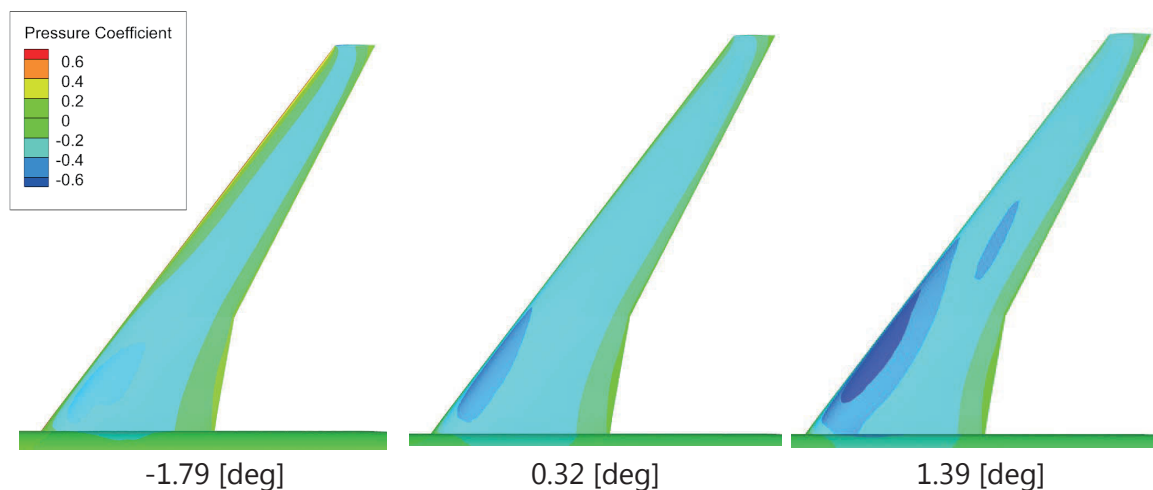
26 / 28

5.72[deg]



27 / 28

圧力コンター図



28 / 28