

平成27年7月3日 東京大学生産技術研究所駒場リサーチキャンパスAn棟
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 (APC1)



SV法・UPACS格子による解析

澤木悠太, 澤田恵介 (東北大)

1

六面体に対する2次精度SV法

六面体セル (= Spectral Volume (SV))

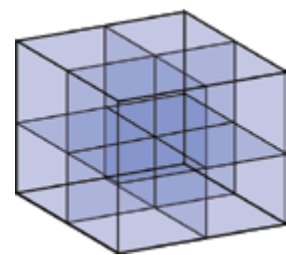
↓ 細分化

8 × 六面体セル (= Control Volume (CV))

- 各CVで保存変数の時間発展を解く
- SV内の分布はCVセル平均値 \bar{Q}_j と形状関数 L_j の線形和で記述

$$\text{再構築多項式} : \tilde{Q}(\xi, \eta, \zeta) = \sum_j^8 L_j(\xi, \eta, \zeta) \bar{Q}_j$$

$$\text{形状関数} : L_j(\xi, \eta, \zeta) = c_{j,1} + c_{j,2}\xi + c_{j,3}\eta + c_{j,4}\zeta \\ + c_{j,5}\xi\eta + c_{j,6}\eta\zeta + c_{j,7}\zeta\xi + c_{j,8}\xi\eta\zeta$$



六面体SVの2次精度分割

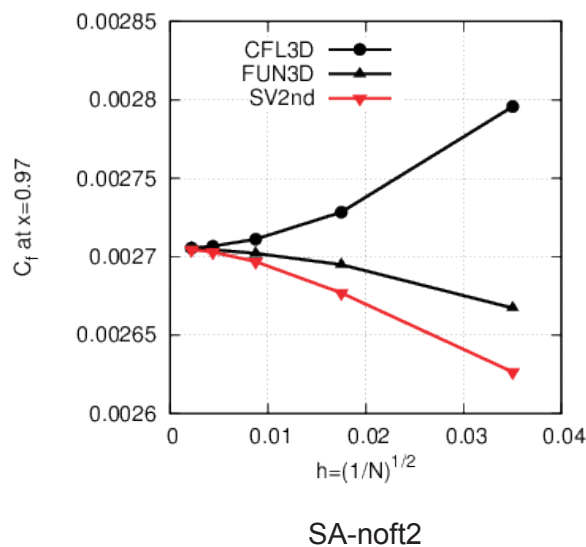
2

課題0-1: 平板乱流境界層

支配方程式 : 3次元圧縮性RANS方程式
 空間離散化 : 2次精度SV法
 数値流束 : SLAU
 粘性流束 : BR2
 乱流モデル : SA-noft2
 時間積分 : LU-SGS陰解法
 最大CFL数 : 10^4
 計算格子 : NASA提供の四角形格子を3次元方向に押し出し

3

$x=0.97$ における C_f の格子収束



- C_f を計算するときの勾配評価にはセル内の分布を使う
- CFL3DとFUN3Dの収束値と概ね良い一致
- サイト内の方法で算出した空間精度は1.94

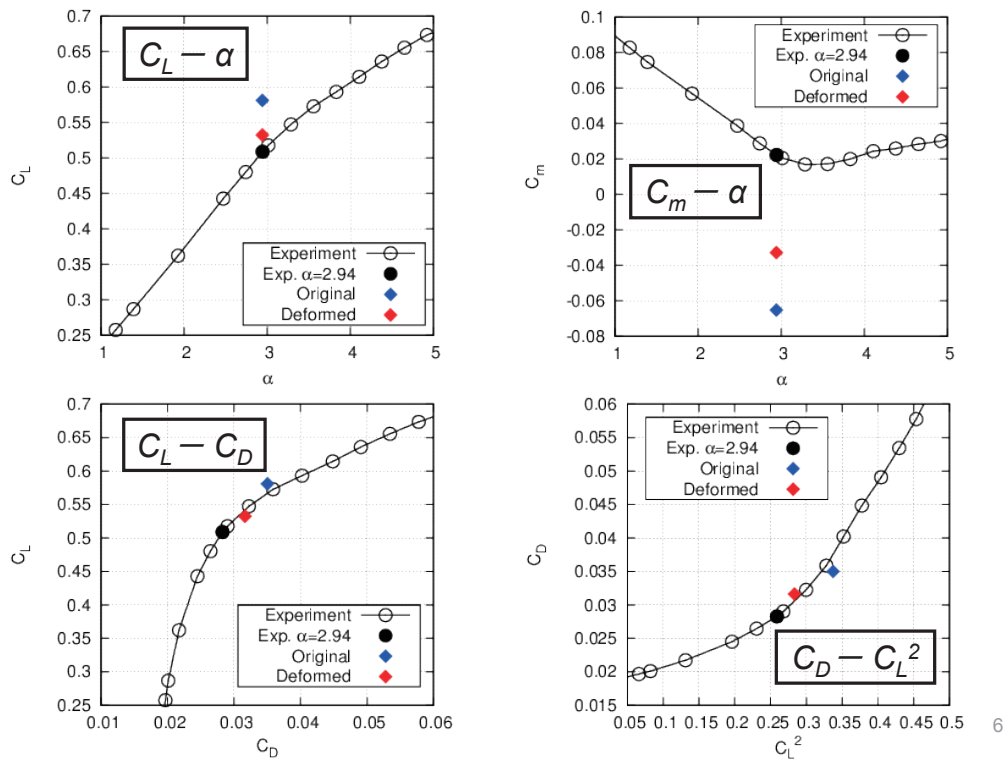
4

課題1: NASA-CRM空力予測

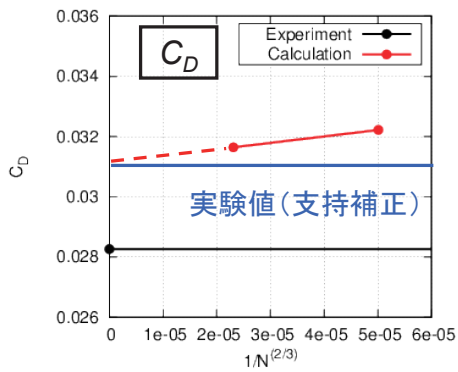
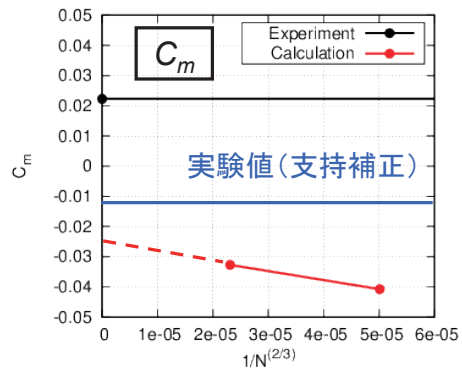
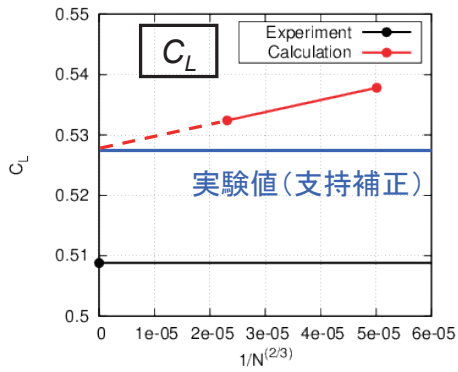
- 支配方程式 : 3次元圧縮性RANS方程式
- 空間離散化 : 2次精度SV法
- 数値流束 : SLAU
- 粘性流束 : BR2
- 乱流モデル : SA-noft2
- 時間積分 : 3点後退差分を用いたLU-SGS陰解法
- 最大CFL数 : 10^5 ($\Delta t = 0.01$)
- 計算格子 : UPACS格子
(Coarse: 300万セル, Medium: 900万セル)
- ケース : 迎角2.94deg, マッハ数0.847, レイノルズ数 2.26×10^6
(変形有Coarse, Medium, 変形無Medium)
- 計算時間 : FVMコードの収束解から始めると512PEで2日
主流条件から始めると512PEで7日
(東北大流体研スパコンphase1, Xeon X7560@2.27GHz)

5

空力係数(変形有無)



空力係数格子収束性



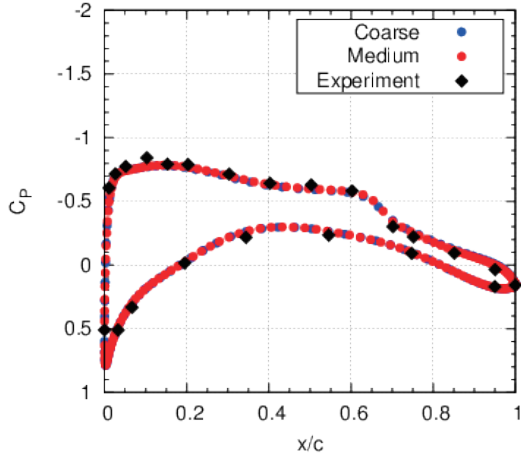
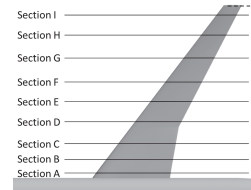
- C_L, C_D は支持補正した実験値に収束する傾向
- C_m は過小評価

7

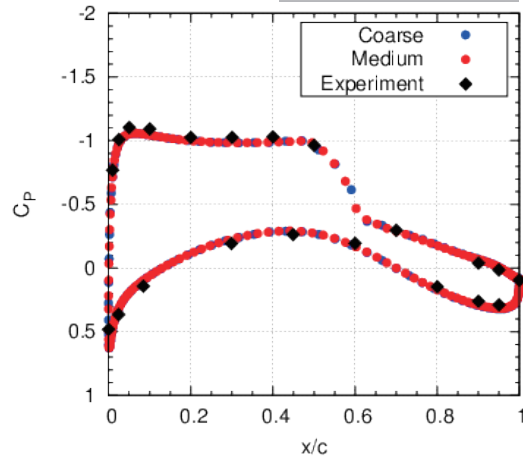
Medium格子とCoarse格子の比較

8

断面 C_p 分布



section A

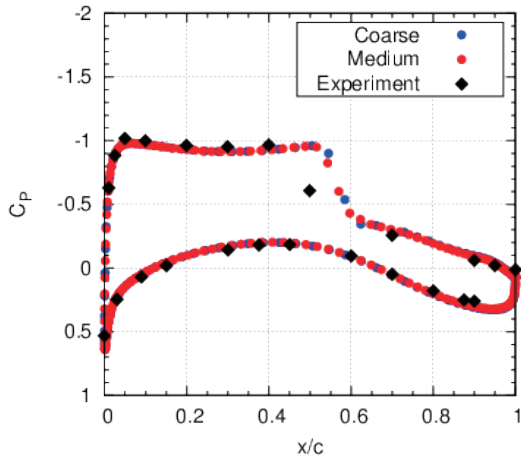
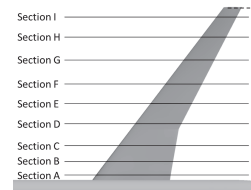


section D

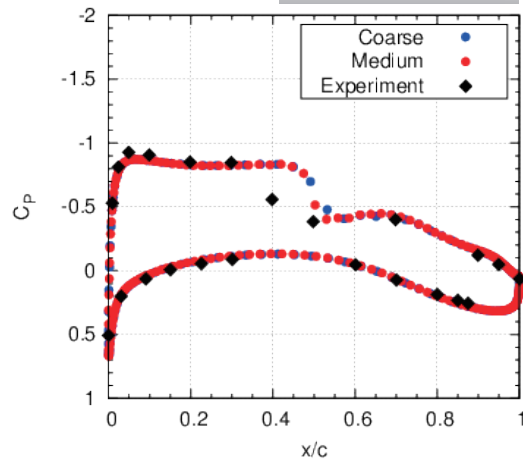
- section D までは, 実験値と良い一致
- Coarse格子でも良い一致

9

断面 C_p 分布



section E

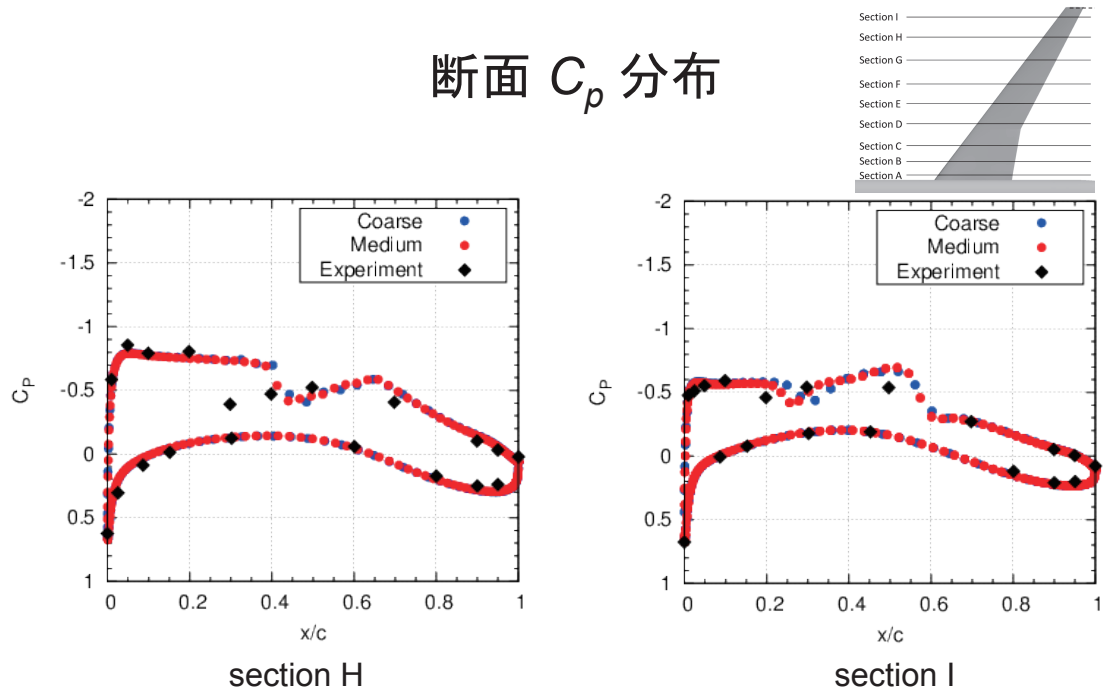


section G

- section E 以降は, 衝撃波位置を後方に予測
- 支持の影響を考慮していないことが原因か
- Medium格子の方が若干前方に予測

10

断面 C_p 分布

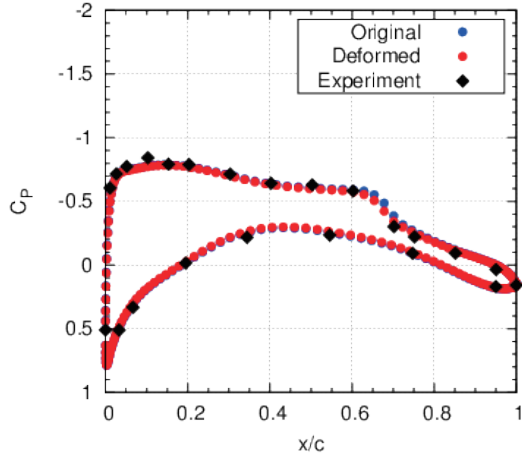
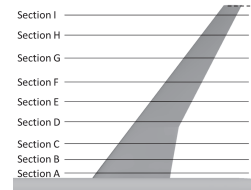


- 翼端付近では、さらに衝撃波を後方に予測
- Coarse, Medium格子で異なる分布のため
さらに細かい格子が必要
- section I で、二つのピークがあり、実験値の傾向に合っている

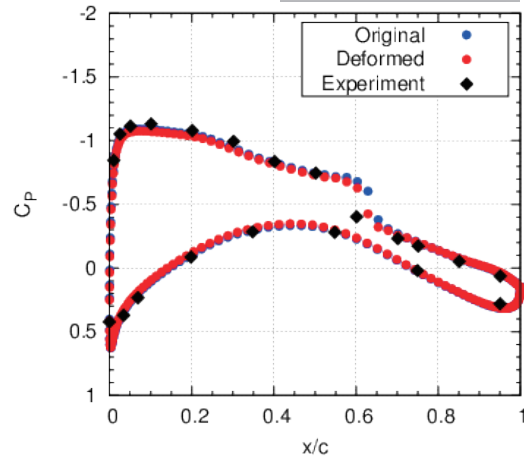
11

変形の効果

断面 C_p 分布



section A

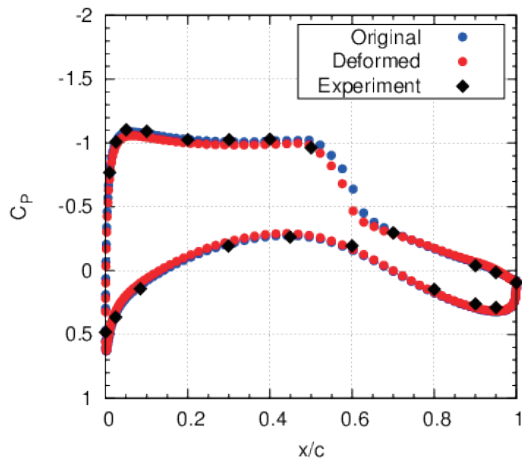
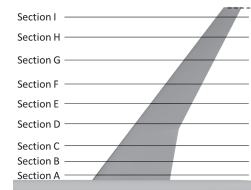


section C

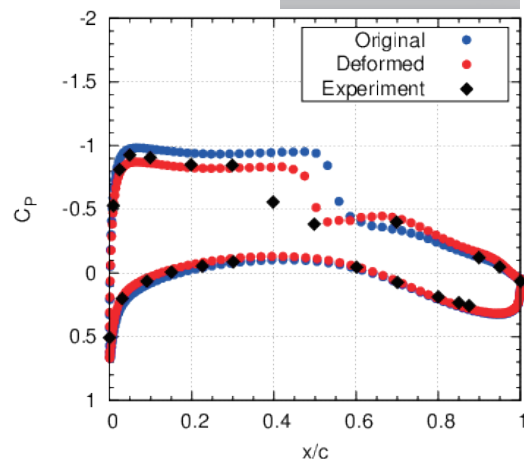
- section C までは, 変形の効果はあまり大きくない

13

断面 C_p 分布



section D

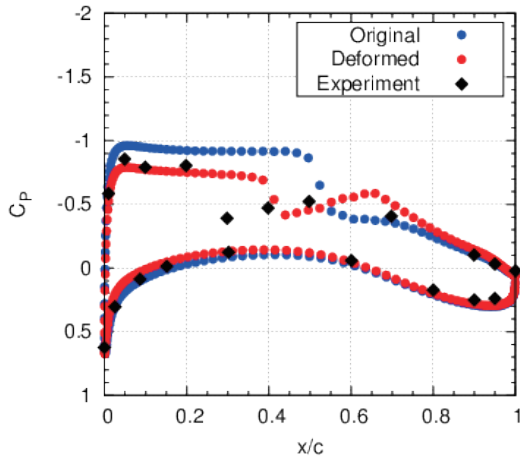
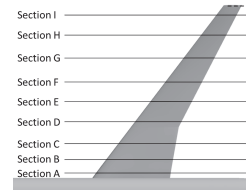


section G

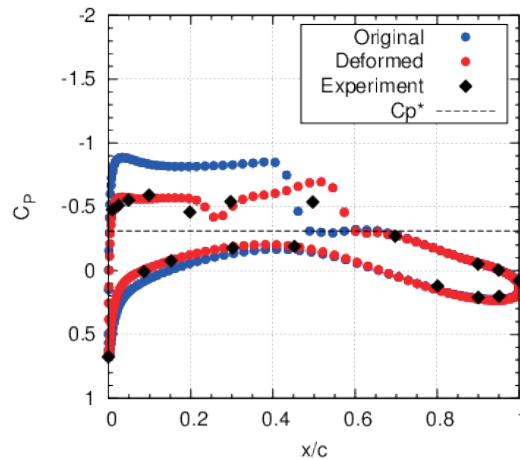
- section D 以降は, ねじり下げの影響で断面迎角が減少し前縁の膨張が抑えられ, 衝撃波は前方に予測される
- section G の上面 $x/c = 0.7$ 付近で C_p の山が見え始める

14

断面 C_p 分布



section H

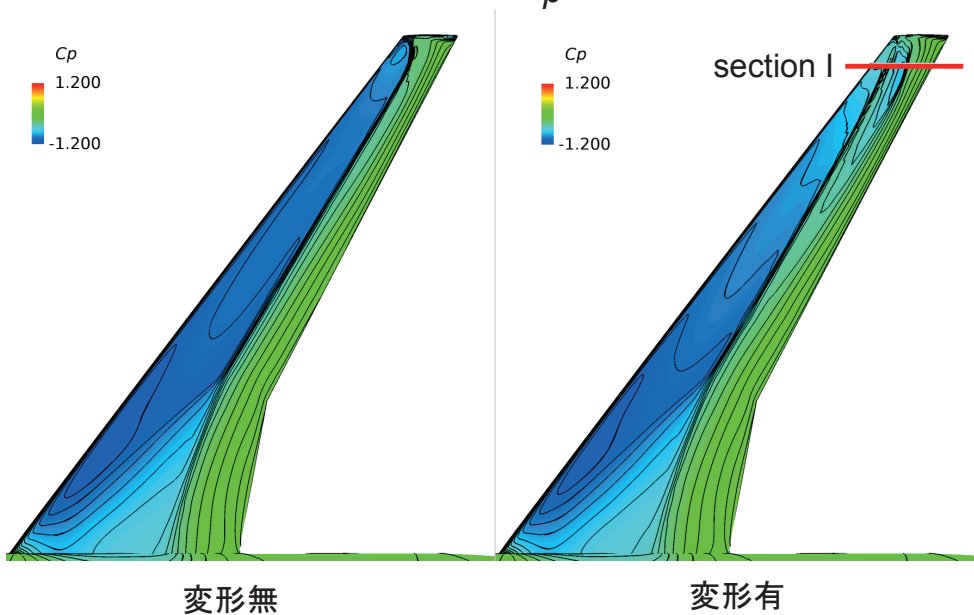


section I

- 翼端では約 -1.37deg の迎角減少があるため変形の効果が大きい
- section I で前縁よりも負圧が大きい領域が現れる
- section I の1段目の圧縮は音速を下回るまでには達していない

15

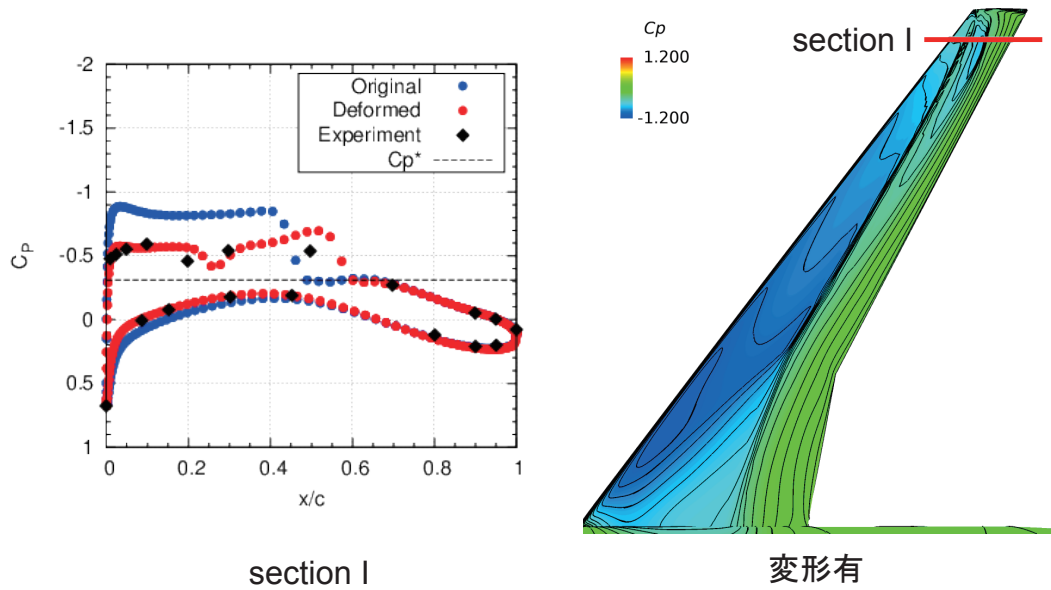
翼上面 C_p 分布



- 翼端 section I 付近で負圧のピークとなる領域が現れる

16

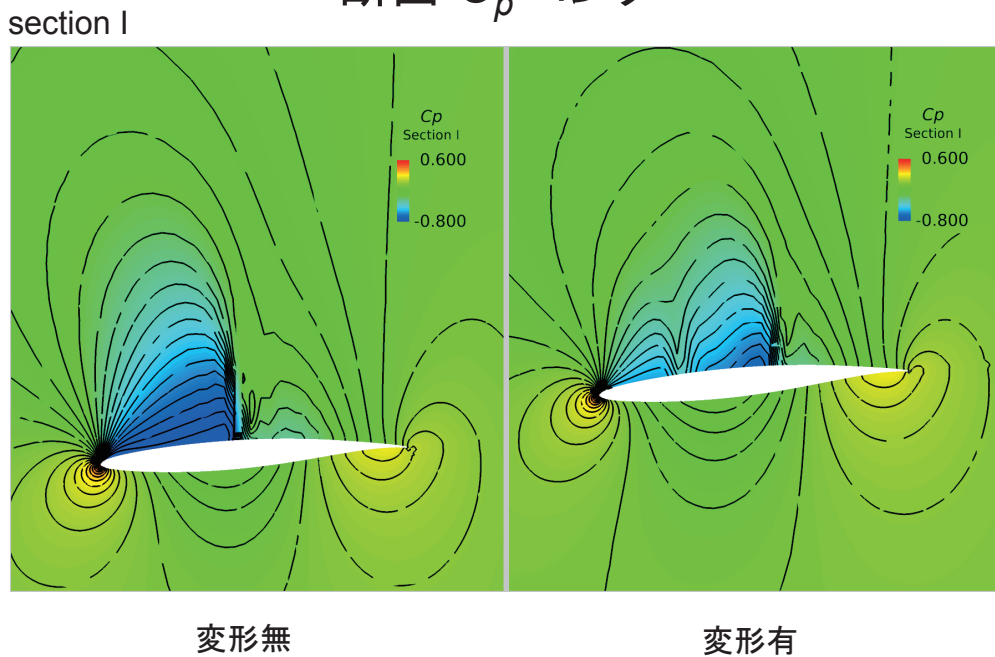
翼上面 C_p 分布



- 翼端 section I 付近で負圧のピークとなる領域が現れる

17

断面 C_p コンター



- 頭下げで前縁の加速が弱まるが、中腹で加速が強められる

18

まとめ

- 平板境界層
 - C_f の予測について, CFL3DやFUN3Dの収束値と概ね良い一致を示した
- NASA-CRM空力予測
 - 空力係数について, 特に C_m を過小予測したが, C_L , C_D は実験値に近い値
 - C_L , C_D は支持補正した実験値に格子収束する傾向
 - 翼根ではCoarse格子でも実験の C_p と良い一致を示したが, 翼端側ほど衝撃波を後方に予測した
 - 変形の効果により, ねじり下げが生じ, 特に翼端では後縁側に C_p のピークが移動した