

2021.7.2 第53回流体力学講演会／第39回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
直交格子CFDワークショップ

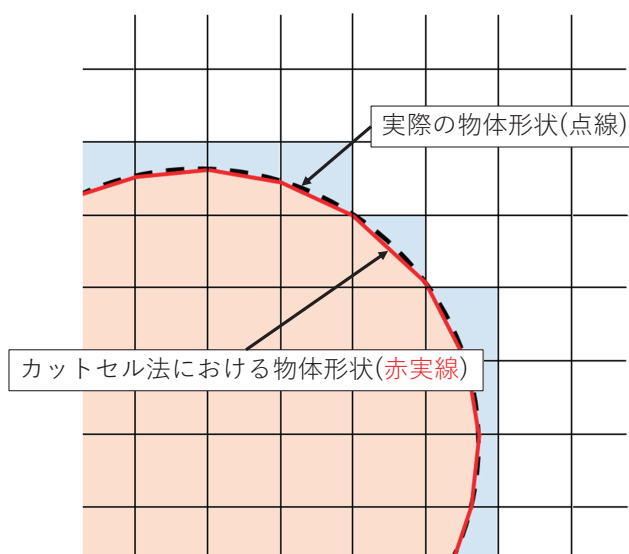
3C04

直交カットセル法による 圧縮性流れの解析結果

岩手大学工学部 機械科学コース 竹田裕貴
岩手大学大学院 機械・航空宇宙コース 松原夏鈴
岩手大学工学部 機械科学コース 上野和之

1

直交カットセル法



直交格子の特長である

- 格子生成の完全自動化
- ロバストな格子生成

物体の形状に応じて計算セルを**カット**

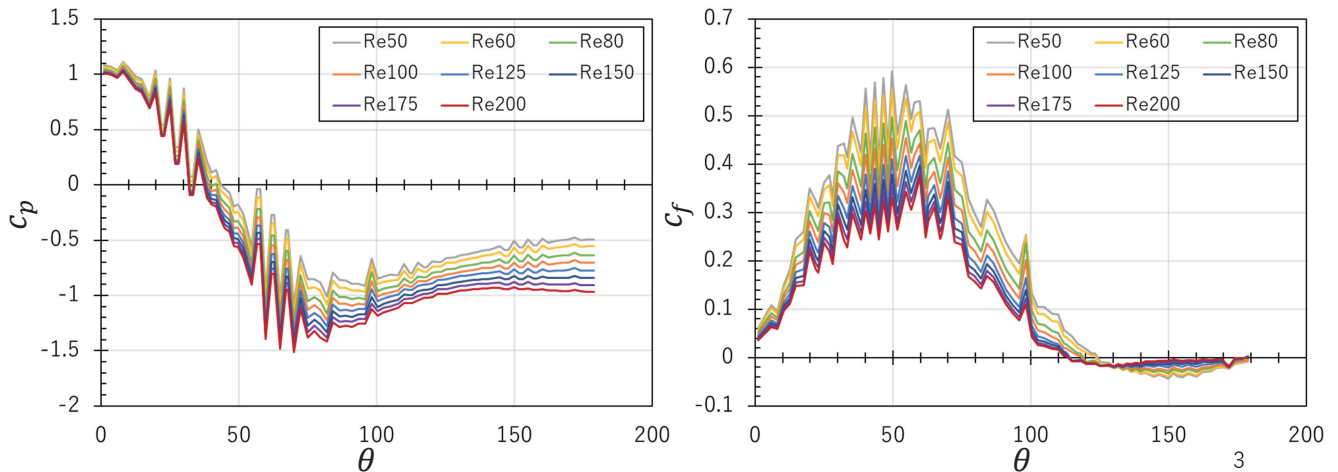
- ボクセル法に比べてなめらかな形状表現が可能
- IB法では満足しない
質量・エネルギー保存則を満足

2

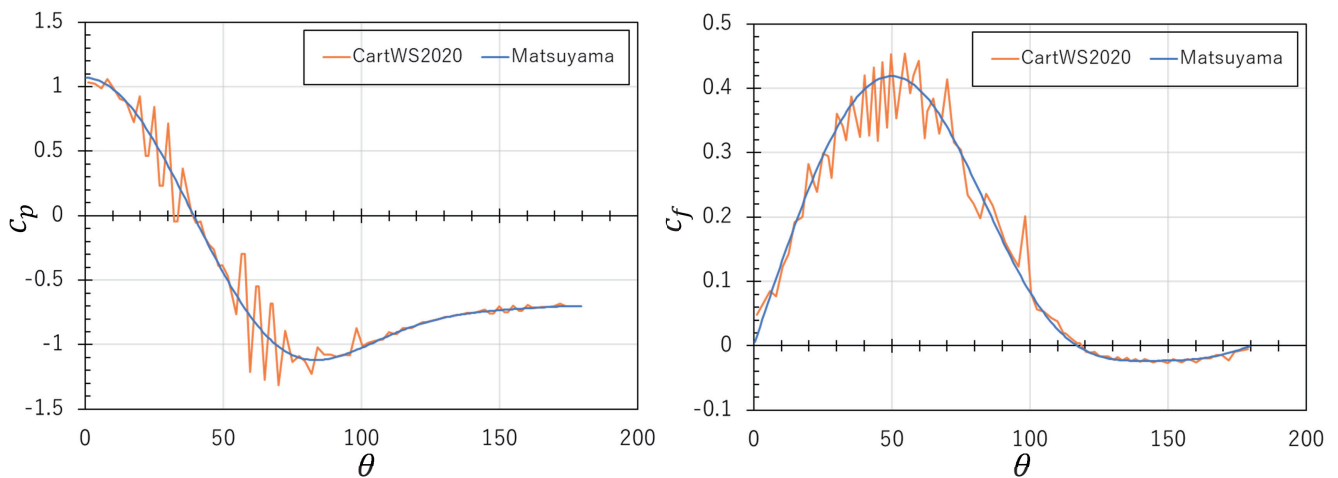
第1回直交格子CFDワークショップでの課題点

課題1：円柱周り流れを実施

- 空力係数，剥離点，循環域長さ等はおおむねよく一致
- c_p, c_f の分布に振動



$Re = 100$ における c_p, c_f 分布の比較



本研究の目的と今回取り扱った課題

カットセル法における壁面流束の算出方法が計算結果に及ぼす影響を調査する

課題1 円柱周り流れ

$Re = 50, 100, 200$

$M = 0.1$

$T_0 = 800K$

課題2 角柱周り流れ

• $Re = 100 : \theta = 2.5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$

$M = 0.1$

$T_0 = 800K$

5

計算手法

解析手法	セル中心有限体積法
物体表面の取り扱い	レベルセットベース直交カットセル法
保存方程式	圧縮性オイラー方程式
数値流束	SLAU法
計算精度	5次精度MUSCL+Thornberらによる修正
粘性流束	二次精度中心差分
時間発展方式	2次精度TVD Runge-Kutta
計算格子	直交等間隔格子+不等間隔格子

6

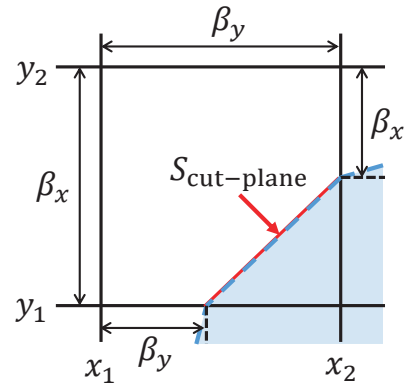
直交カットセル法の基礎方程式と壁面流束

$$\frac{d(\alpha Q)}{dt} + \frac{[\beta_x(\bar{E}_a - \bar{E}_d)]_{x_1}^{x_2}}{x_2 - x_1} + \frac{[\beta_y(\bar{F}_a - \bar{F}_d)]_{y_1}^{y_2}}{y_2 - y_1} = \frac{S_{\text{cut-plane}}}{V} \sigma$$

$$\sigma = \begin{Bmatrix} 0 \\ pn_x - \tau_{wx} \\ pn_y - \tau_{wy} \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad S_{\text{cut-plane}} = \sqrt{([\beta_x]_{x_1}^{x_2} S_x)^2 + ([\beta_y]_{y_1}^{y_2} S_y)^2}$$

$$n_x = \frac{[\beta_x]_{x_1}^{x_2} S_x}{S_{\text{cut-plane}}}, \quad n_y = \frac{[\beta_y]_{y_1}^{y_2} S_y}{S_{\text{cut-plane}}}$$

σ : 壁面流束(壁-空間相互作用)
 α : セル内気相体積分率 ($0 \leq \alpha \leq 1$),
 β : セルインターフェース気相面積分率 ($0 \leq \beta \leq 1$),
 $V = \Delta x \Delta y \Delta z, \quad S_x = \Delta y \Delta z, \quad S_y = \Delta x \Delta z$



- 格子解像で表面積は正しい表面積に収束する
- 面が閉じる ($\sum n S_{\text{cut-plane}} = 0$)

イメージポイントを用いた壁面上の粘性応力の算出

壁面剪断応力の算出

- 壁面から一定の距離に設定したイメージポイント (IP) に流速・温度の値を隣接4セルから逆距離加重補完で内挿
- IPにおける内挿値と壁面での粘着条件を考慮して壁面剪断応力を算出

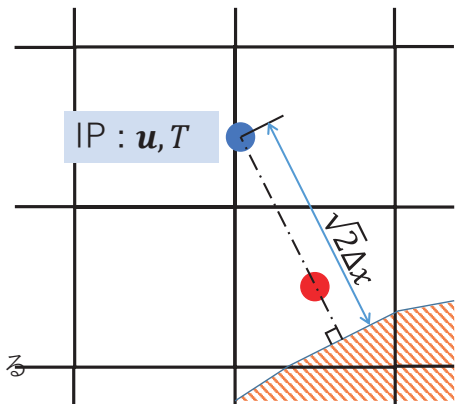
壁面上の圧力の評価

- 壁面上の圧力は壁面を含んだセルの代表値を使用

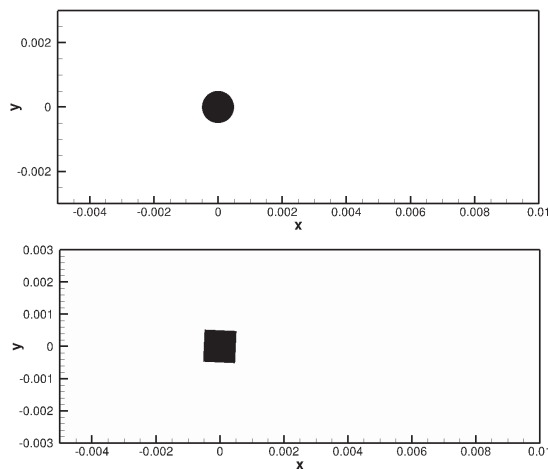
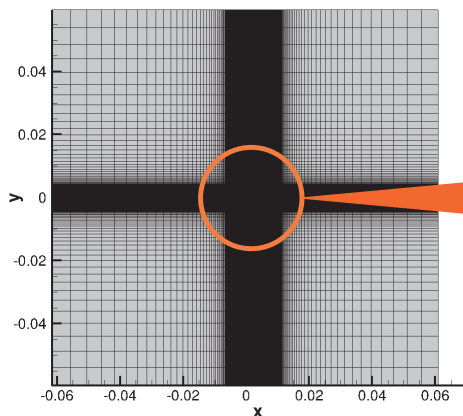
壁面剪断応力の表面積分

- 壁面剪断応力とカット面の面積との積の総和をとることで得る

$$D_f = \sum_{\text{cut-cell}} -\tau_{wx} S_{\text{cut-plane}}$$



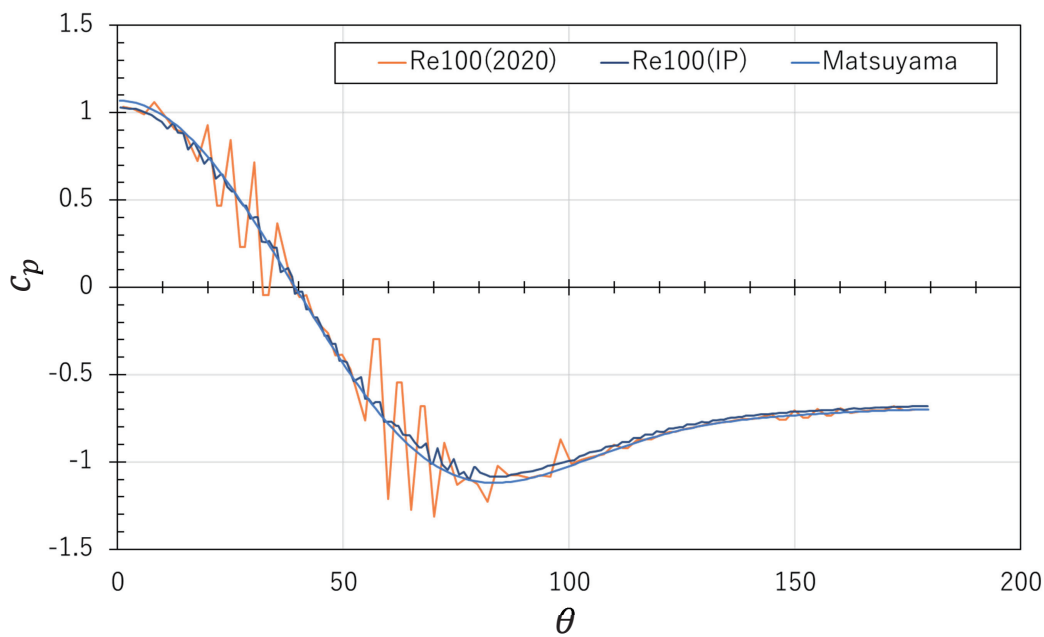
計算領域



計算領域全体	$-60 \leq x/D \leq 60$	$-60 \leq y/D \leq 60$
等間隔領域	$-5 \leq x/D \leq 10$	$-3 \leq y/D \leq 3$
格子幅	0.01D	

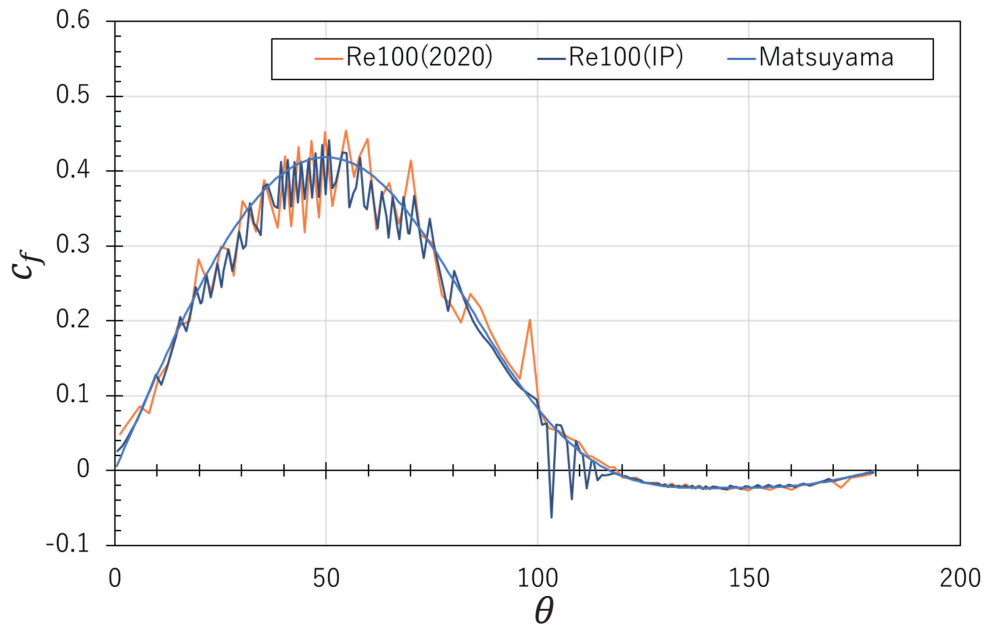
9

課題1：円柱周り流れの c_p 分布



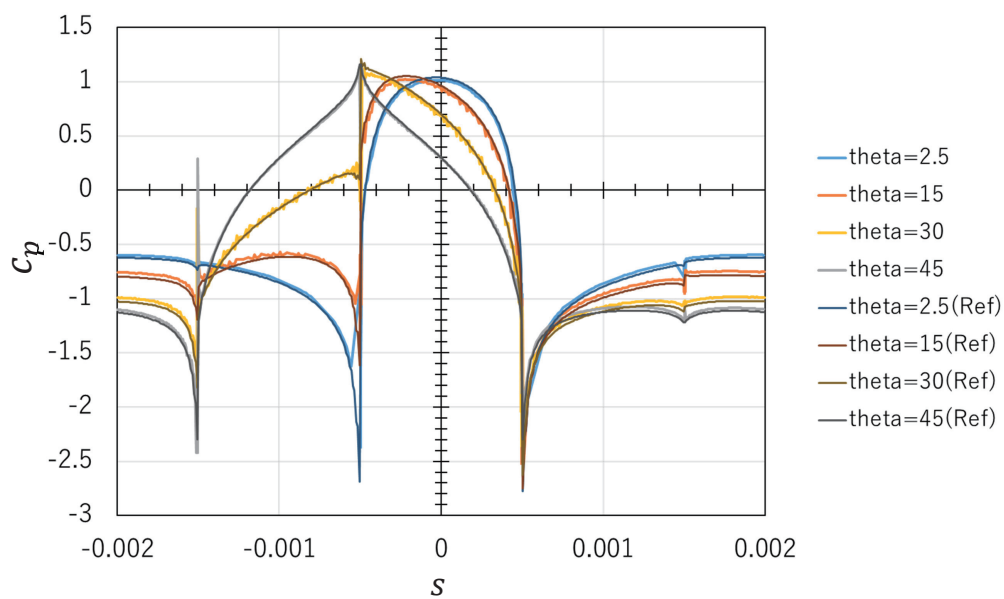
10

課題 1 : 円柱周り流れの c_f 分布



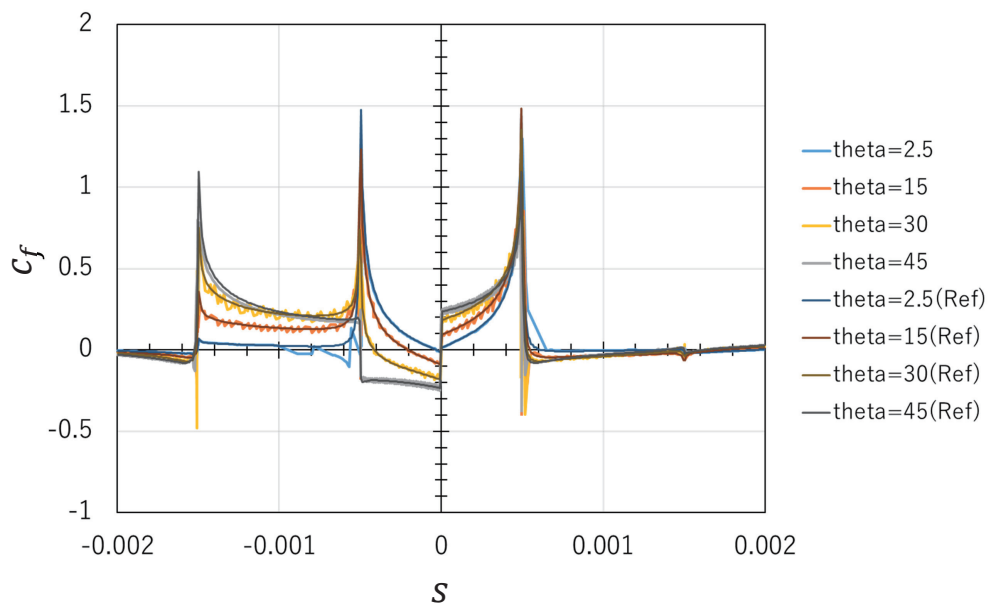
11

課題 2 : 角柱まわり流れの c_p 分布



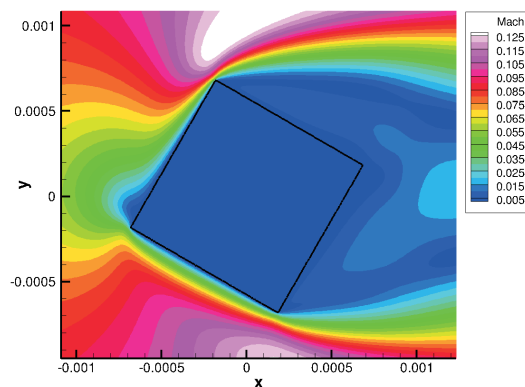
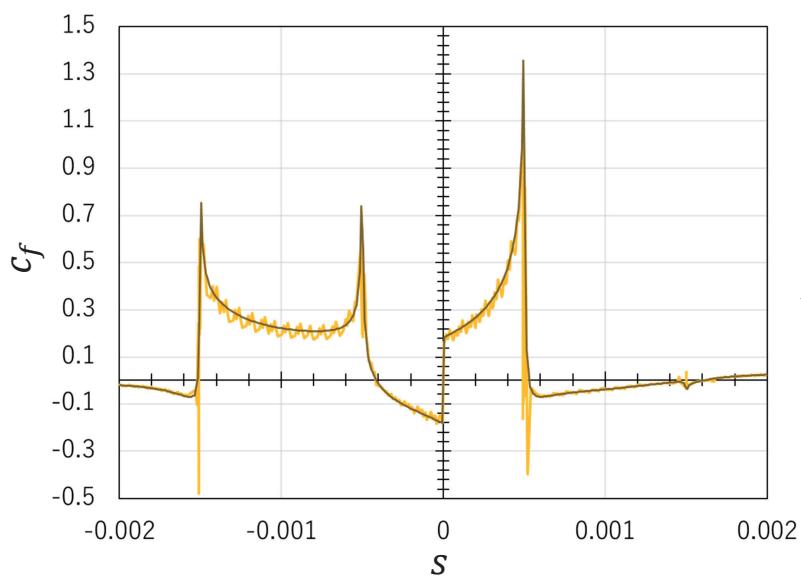
12

課題2：角柱まわり流れの c_p 分布



13

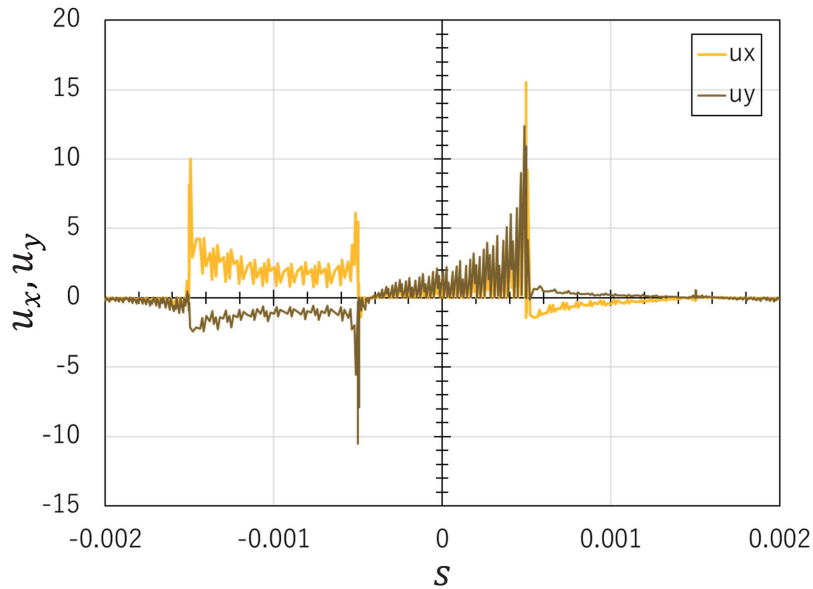
$\theta = 30^\circ$ における c_f およびマッハ数分布



マッハ数の高い地点で c_f の振動大

14

カット面を含んだセルにおける u_x, u_y の分布



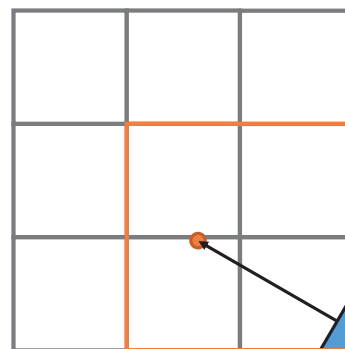
15

C_p, C_f の振動の原因 (?)

IPの値はIPの周辺4セルから内挿

- IPに値を内挿する際にカットされたセル自身の値が用いられる場合がある
 - カットセルの値が参照される場合、逆距離加重補完に用いられる距離も怪しい
- IPに値を内挿する際にセルマージの対象となったセルの値が用いられる

IPの長さを長くすれば解決の余地ありか？



16

まとめ

直交カットセル法における壁面流束算出法の検討を行った

課題1：円柱周り流れ

- イメージポイントを用いることで表面分布が改善
 - 表面圧力分布には顕著な改善
 - 摩擦係数分布は改善したものの、値の分布に振動

課題2：角柱まわり流れ

- c_p, c_f ともに境界適合格子の解析結果とおおむね一致
- 流速が早い部分で振動が比較的大

今後IPの長さの検討を行う