

流力ANSS2020オンライン (2020/09/30)
講演番号: 3C06 (直交格子CFDワークショップ)



UTCart を用いた基礎的な 二次元物体周り流れの検証解析

東京大学 大学院

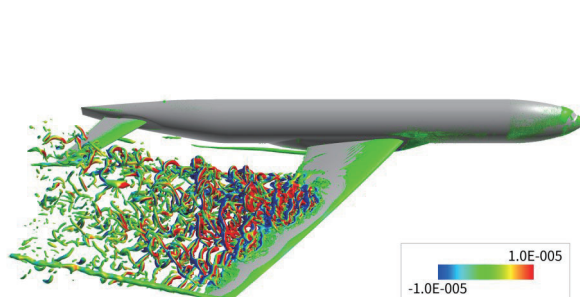
○ 菅谷 圭祐, 野木 一馬, 吉永 響,
原 惇, 前山 大貴, 今村 太郎



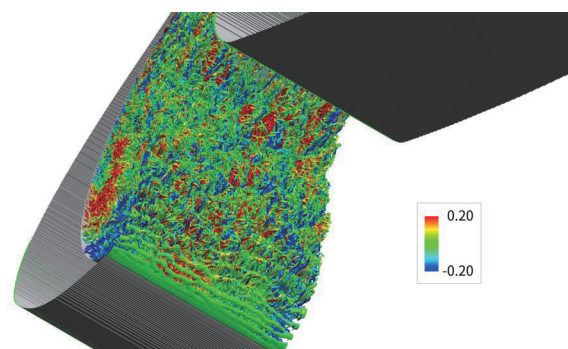
UTCart



- 直交格子流体ソルバ UTCart
 - the **U**niversity of **T**okyo **C**artesian-grid-based automatic flow solver
 - 圧縮性・非構造格子・セル中心有限体積法
 - **格子生成 + 流体計算**



吉永, 菅谷, and 今村, 流力ANSS2020.



菅谷, and 今村, 流力ANSS2020.



研究目的



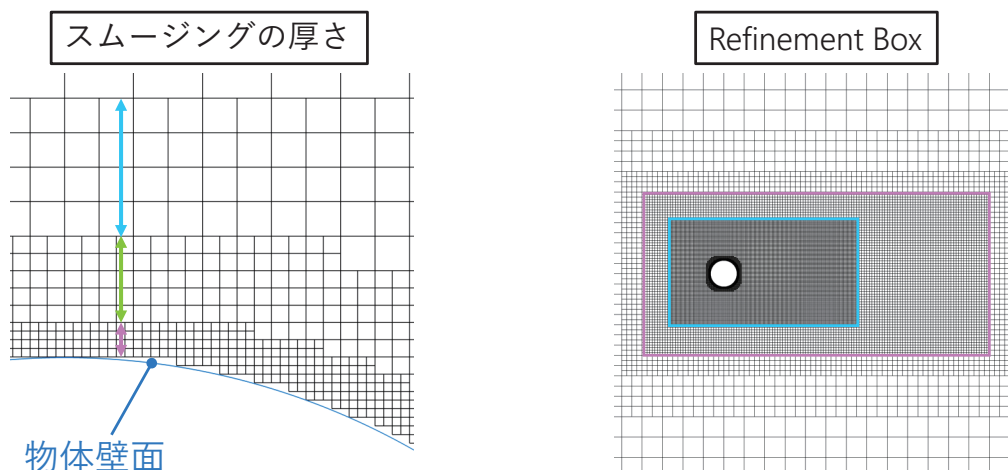
UTCart による基礎的な二次元流れの計算を通して 直交格子CFDの解析精度と課題を調査

- 課題1 円柱
- 課題2 角柱
- 課題3 超音速条件での等温壁平板
 等温壁円柱

計算格子



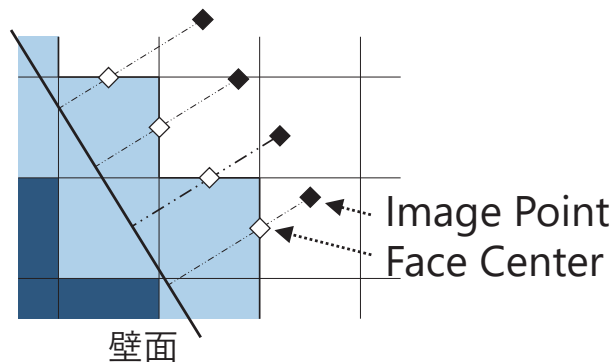
- セルベースの細分化・非構造格子
 - 格子幅の切り替わりは多面体として計算
- 計算領域・壁面での格子幅・スムージングの厚さを指定
- Refinement Box による細分化



埋め込み境界法



- Discrete Forcing 型の埋め込み境界法
- 壁面と交差するセルのセル境界 (Face Center, FC) に境界条件
 - ロバストな格子生成
- FCを通り壁面に垂直な線分上にImage Point (IP) を配置
- IP の基本変数はセル平均値と勾配から計算



断熱・非滑り壁条件



非粘性流束：近似リーマン解法

- 速度：IPと壁面で線形な速度分布を仮定

$$\mathbf{u}_{FC} = \mathbf{u}_{wall} + (\mathbf{u}_{IP} - \mathbf{u}_{wall}) \frac{d_{FC}}{d_{IP}} = \mathbf{u}_{IP} \frac{d_{FC}}{d_{IP}}$$

- 圧力・密度：IPの値をゼロ次補間

$$\rho_{FC} = \rho_{IP}, p_{FC} = p_{IP}$$

粘性流束：中心差分

- 速度勾配：FCに隣接する流体セルの速度勾配を利用

$$\nabla u_{FC} = \nabla u_{Fluid}, \nabla v_{FC} = \nabla v_{Fluid}$$

- 温度勾配：FCに隣接する流体セルの温度勾配 + 断熱条件

$$\nabla T_{FC} = \nabla T_{Fluid} - |\nabla T_{Fluid}| \mathbf{n}_{wall}$$

その他数値計算手法



- 空間高次精度化 MUSCL, 四次精度風上バイアスキーム
- 非粘性流束評価 SLAU, Roe
- 勾配評価 重み付き最小二乗法, グリーン・ガウス
- 時間積分 MFGS, LU-SGS (陰解法)
三段TVD ルンゲ・クッタ法 (陽解法)
- 力計算 壁面境界での数値流束から計算
- 表面の計算結果 形状データに射影
- 並列計算 METIS で領域分割 + Flat MPI



課題 1 円柱

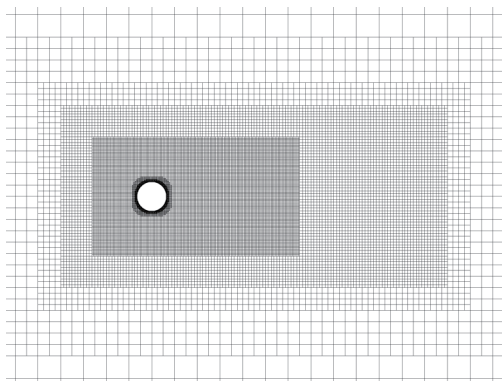
計算条件・計算格子



先行研究の物体適合格子の計算と比較し

抗力係数・後流長さの予測精度を検証

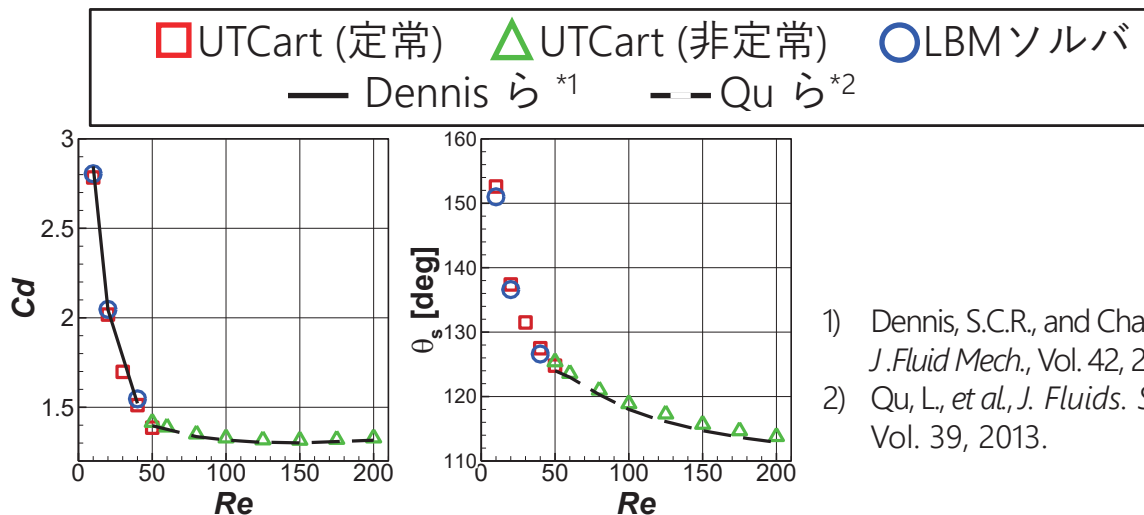
- レイノルズ数： $Re_{Lref} = 10\sim 50$ (定常), $50\sim 200$ (非定常)
- 円柱直径に対する最小格子幅： $\Delta x/L_{ref} = 1/164$
- IP 長さ：最小格子幅の三倍
- セル数：25,000
- LBMソルバでも計算しUTCartと比較



計算結果



- 他研究と定性的・定量的な一致
 - $Re = 150$ で Cd が最小
 - 本課題では境界層厚さに対し細かな格子を配置可能
- UTCart・LBMソルバで同じ Cd ・剥離位置を予測



1) Dennis, S.C.R., and Chang, G.Z., *J. Fluid Mech.*, Vol. 42, 2006.
 2) Qu, L., et al., *J. Fluids. Struct.*, Vol. 39, 2013.



課題 2

角柱

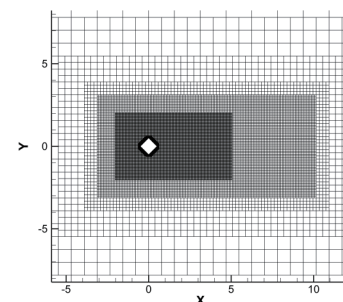
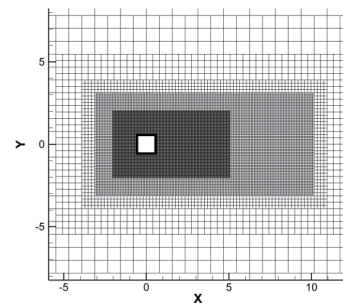


計算条件・計算格子



先行研究^{*1}で報告されている四種類の流れのパターンを
UTCart で再現可能であることを検証

- レイノルス数： $Re_{Lref} = 30, 60, 100, 150$
- 角柱の角度： $\theta = 0, 2.5, 15, 30, 45$ [deg]
- 最小格子幅： $\Delta x/L_{ref} = 1/164$
- セル数：24,000
- 角柱の角度ごとに格子を生成



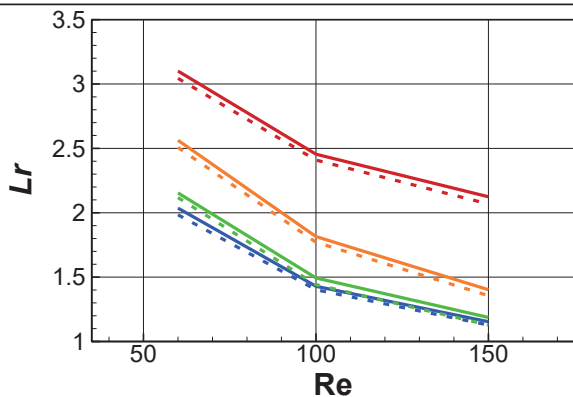
1) Yoon, D.H., et al., *Phys. Fluids*, Vol. 22, 2010.

後流の長さ



- Yoon らの計算結果と定性的・定量的に一致
 - レイノルズ数の増加に伴い後流の長さが減少
 - 回転角の増加に伴い後流の長さが減少

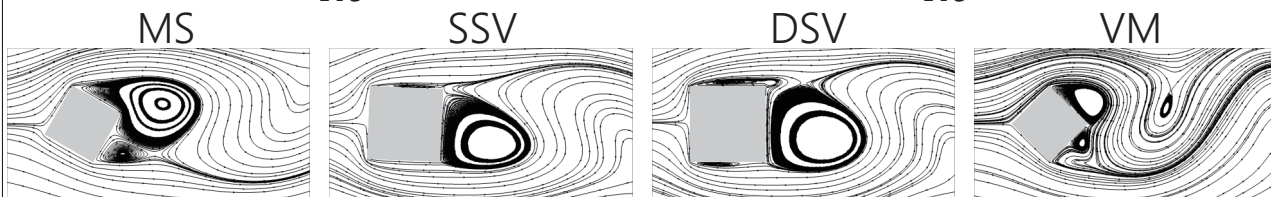
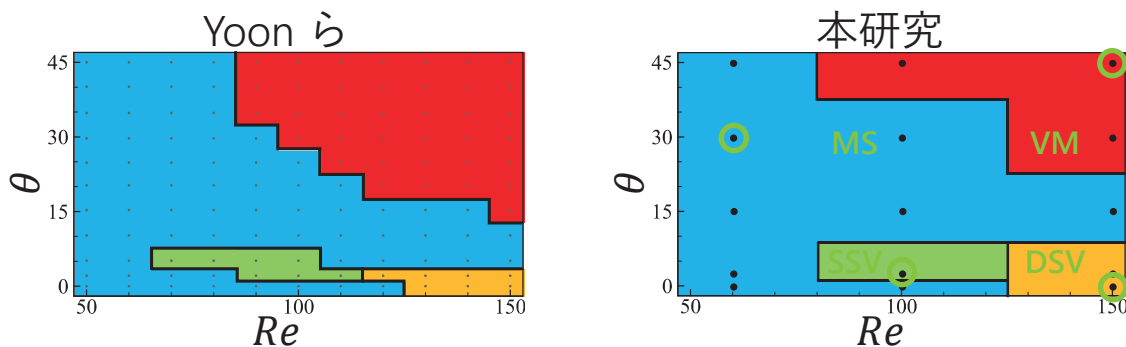
実線：UTCart 点線：Yoon ら
 — $\theta = 0$ [deg] — $\theta = 15$ [deg] — $\theta = 30$ [deg] — $\theta = 45$ [deg]



流れのパターン



- レイノルズ数・角度の変化に伴う流れパターンの変化
 - 四通りのパターンを再現
 - Yoon らの計算結果を概ね再現





課題3

等温壁平板



計算条件・比較の計算



IB法での等温壁境界条件の計算方法が

速度・温度の予測精度に与える影響を調査

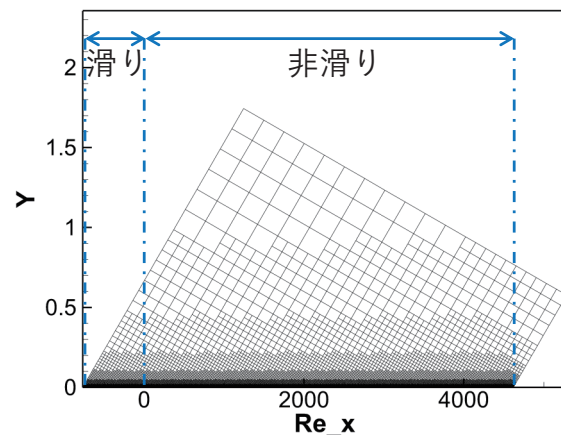
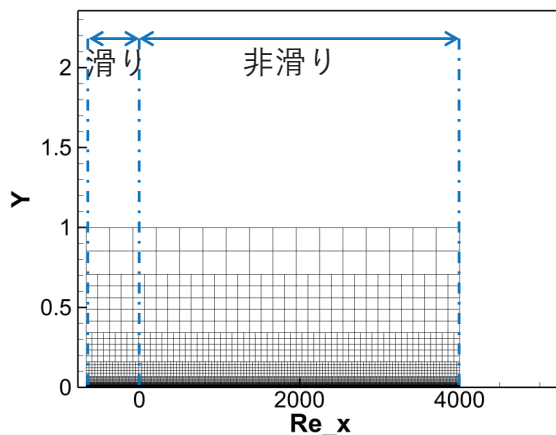
- 主流マッハ数 : $M_\infty = 1.5$
- 主流温度 : $T_\infty = 690$ [K]
- 壁面温度 : $T_\infty = 500$ [K]
- レイノルズ数 : $Re_\infty = 500$
- 境界条件を変更し物体適合格子としても計算
 - Image Point 無しで計算
 - 壁面での非粘性流束は $\mathbf{F} = [0, p_{wall}\mathbf{n}_{ij}, 0]$
 - 最小格子幅は $\delta \sim 5/\sqrt{Re_{Lref}}$ に対し 1/1570



計算格子



- 平板の角度は 0, 30 [deg]
- 外部境界は遠方境界条件・流入部に滑り壁を配置
- 最小格子幅は $\delta \sim 5/\sqrt{Re_{Lref}}$ に対し1/50
- セル数は20,000 (0 [deg]) / 30,000 (30 [deg])



等温壁・非滑り壁条件 (手法1)



Image Point の基本変数のみを利用しFCの情報を決定

非粘性流束：近似リーマン解法

- 速度：IPと壁面で線形な速度分布を仮定
- 圧力：IPの圧力をゼロ次補間

$$p_{FC} = p_{IP}$$

- 温度：IPと壁面で線形な温度分布を仮定

粘性流束：FCでの勾配から直接計算

- 速度勾配：IPと壁面で線形な速度分布を仮定

$$(\partial u_t / \partial n)_{FC} = u_{t,IP} / d_{IP}$$

- 温度勾配：IPと壁面で線形な温度分布を仮定

等温壁・非滑り壁条件 (手法2)



基本変数に応じIPと流体セルを切り替えてFCに補間

非粘性流束：近似リーマン解法

- 速度：IPと壁面で線形な速度分布を仮定
- 圧力：壁面に隣接するセルの圧力をゼロ次補間

$$p_{FC} = p_{Fluid\ cell}$$

- 温度：IPと壁面で線形な温度分布を仮定

粘性流束：FCでの勾配から直接計算

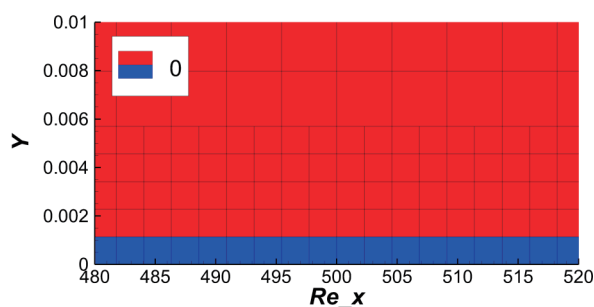
- 速度勾配：壁面に隣接するセルの速度から計算

$$(\partial u_t / \partial n)_{FC} = u_{t, Fluid\ cell} / d_{Fluid\ cell}$$
- 温度勾配：IPと壁面で線形な温度分布を仮定

流れの逆流



- 手法1, 0 degの計算では壁面近傍で流れが逆流
 - 壁に隣接するセルの情報を利用されない
 - 非物理的な状態で流束がバランス
- 手法2の計算では流れの逆流が観察されない



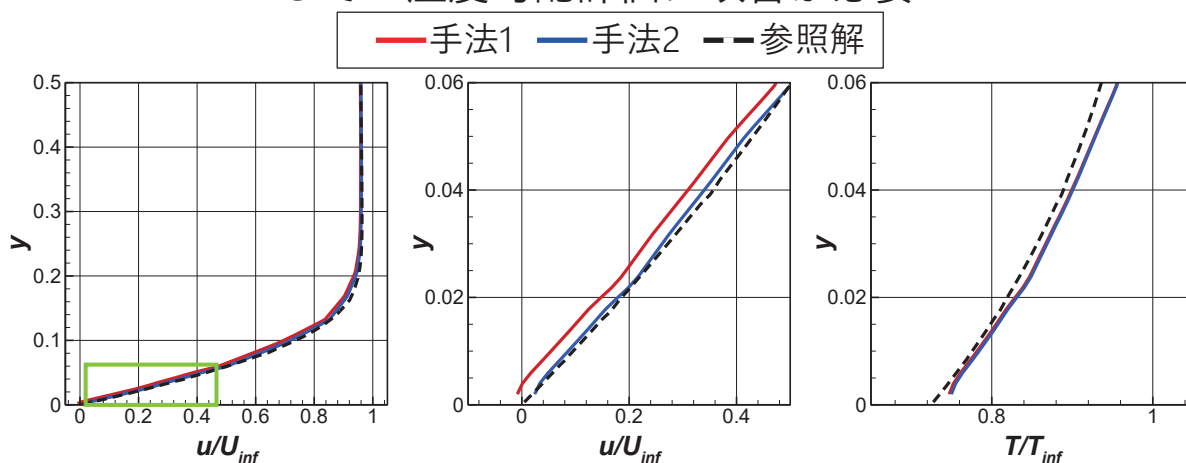
主流方向速度の分布
赤：主流方向
青：逆流

鉛直方向の速度・温度分布 (0deg)



- 速度分布**
- 手法1は壁面近傍で速度が負・過小評価
 - 手法2は参照解と概ね一致

- 温度分布**
- 手法1・2は参照解に対し過大評価
 - FC での温度勾配評価に改善が必要

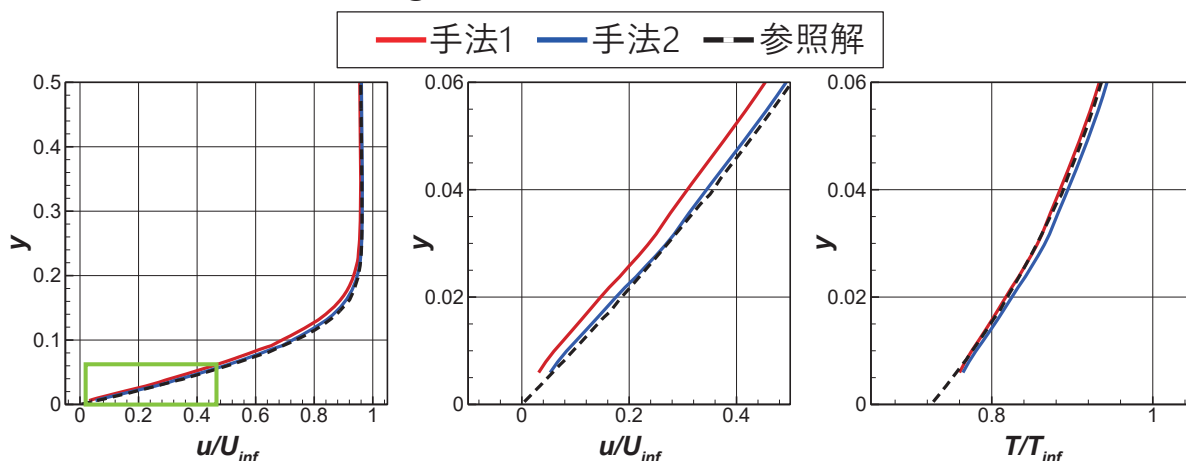


鉛直方向の速度・温度分布 (30deg)



- 速度分布**
- 0 deg と定性的・定量的に同じ結果

- 温度分布**
- 手法1・2は参照解と概ね一致
 - 0 deg と異なる結果



まとめ



UTCart による基礎的な二次元流れの計算を通して 直交格子CFDの解析精度と課題を調査

課題 1・2 (円柱・角柱)

- 他研究と定性的・定量的に一致

課題 3 (平板境界層)

- IPの情報だけで境界条件を計算すると壁面近傍で流れが逆流
- FC への補間に利用する点を変数に応じて変更することで
速度分布が参照解と一致
- FC での温度勾配評価に改善が必要

課題1 定常計算



UTCart

Re	St	Lr	θ [deg]	Cd	Cd,RMS	Cl	Cl,RMS
10	-	0.73	153	2.78	-	-1.81E-12	-
20	-	1.40	137	2.02	-	-2.29E-12	-
30	-	2.08	132	1.70	-	-2.35E-12	-
40	-	2.75	127	1.51	-	-2.24E-12	-
50	-	3.42	125	1.39	-	-2.05E-12	-

物体適合格子*1

Re	θ [deg]	Cd,ave
10	-	2.85
20	-	2.05
40	-	1.52

1) Dennis, S.C.R., and Chang, G.Z.,
J. Fluid Mech., Vol. 42, 2006.

課題1 非定常計算



UTCart

Re	St	Lr	θ [deg]	Cd,ave	Cd,RMS	Cl,ave	Cl,RMS
50	0.123	3.03	125	1.42	7.82E-5	-3.29E-4	3.46E-2
60	0.135	2.63	124	1.39	6.67E-4	2.47E-4	8.88E-2
80	0.153	2.18	121	1.35	2.93E-3	-1.13E-3	1.64E-1
100	0.162	1.93	119	1.33	6.27E-3	2.01E-3	2.26E-1
125	0.175	1.72	117	1.32	1.16E-2	3.98E-4	2.95E-1
150	0.182	1.57	116	1.32	1.77E-2	-3.84E-4	3.59E-1
175	0.190	1.46	115	1.32	2.41E-2	9.50E-5	4.18E-1
200	0.195	1.37	114	1.33	3.06E-2	-1.42E-3	4.70E-1

物体適合格子*1

1) Qu, L., et al., *J. Fluids. Struct.*, Vol. 39, 2013.

Re	θ [deg]	Cd,ave	Re	θ [deg]	Cd,ave
50	124	1.40	150	115	1.30
100	118	1.32	200	113	1.32



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

流力ANSS2020オンライン

25

課題1 格子収束



- Re = 10
- 最小格子幅を変更し感度を調査
- $\Delta x/L_{ref} = 1/164$ が基準の格子

$\Delta x/L_{ref}$	St	Lr	θ [deg]	Cd,ave	Cd,RMS	Cl,ave	Cl,RMS
1/82	-	0.724	154	2.782	-	1.83E-12	-
1/164	-	0.726	153	2.784	-	-1.81E-12	-
1/328	-	0.736	152	2.785	-	2.09E-13	-



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

流力ANSS2020オンライン

26

課題1 IP長さの影響



- $Re = 10$
- 壁面からImage Point の距離を変更し感度を調査

dIP	St	Lr	θ [deg]	Cd,ave	Cd,RMS	Cl,ave	Cl,RMS
2dx	-	0.726	152	2.784	-	-1.81E-12	-
3dx	-	0.726	153	2.784	-	-1.81E-12	-
4dx	-	0.725	154	2.784	-	-1.81E-12	-

課題2 格子収束



- $Re = 30$
- 角柱の角度はゼロ度

$\Delta x/L_{ref}$	Cd,ave	Cl,ave	Lr
1/82	1.85	-1.89E-14	2.54
1/164	1.85	-5.31E-14	2.54
1/328	1.86	3.38E-11	2.56

課題2 計算結果



回転角 [deg]	Re	Lr	St	パターン	Cd, ave	Cd, RMS	Cl, ave	Cl, RMS
0	60	3.101	0.12	MS	1.52E+0	6.98E-4	7.65E-4	8.11E-2
0	100	2.455	0.14	MS	1.43E+0	4.89E-3	1.51E-3	1.78E-1
0	150	2.124	0.15	DSV	1.42E+0	1.46E-2	-2.77E-3	2.76E-1
2.5	60	3.037	0.12	MS	1.48E+0	2.00E-3	7.04E-3	7.29E-2
2.5	100	2.379	0.145	SSV	1.39E+0	8.13E-3	-1.71E-2	1.71E-1
2.5	150	2.045	0.155	DSV	1.38E+0	2.03E-2	-6.38E-2	2.68E-1
15	60	2.563	0.135	MS	1.43E+0	1.01E-2	4.43E-2	9.84E-2
15	100	1.815	0.16	MS	1.44E+0	4.12E-2	1.30E-2	2.73E-1
15	150	1.402	0.18	MS	1.53E+0	1.02E-1	-8.12E-3	4.86E-1
30	60	2.154	0.145	MS	1.52E+0	1.35E-2	5.27E-2	1.73E-1
30	100	1.494	0.175	MS	1.62E+0	4.71E-2	4.97E-2	4.11E-1
30	150	1.187	0.19	VM	1.77E+0	9.81E-2	2.48E-2	6.24E-1
45	60	2.036	0.145	MS	1.57E+0	4.34E-3	-1.28E-3	2.05E-1
45	100	1.429	0.185	VM	1.69E+0	2.61E-2	-1.68E-3	4.51E-1
45	150	1.154	0.195	VM	1.84E+0	5.92E-2	1.16E-3	6.38E-1

課題3 等温壁円柱



- 一様流マッハ数 1.5, 円柱直径基準のレイノルズ数 1,000
- 一様流温度 310 K, 壁面温度 310K
- 壁面の格子幅を変更した三種類の格子で計算

- Coarse : $Re_{\Delta x} = \frac{\Delta x U_{\infty}}{\nu} \sim 4$

セル数 118,000

- Medium : $Re_{\Delta x} \sim 2$

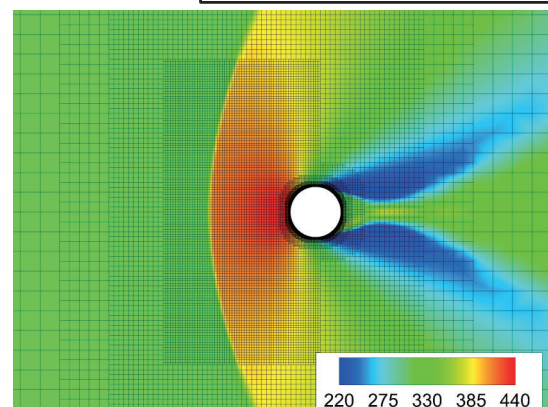
セル数 213,000

- Fine : $Re_{\Delta x} \sim 1$

セル数 401,000

- 円柱の上流側にRefinement Boxを配置
- 提供データの物体適合格子と比較

Fine 格子の計算結果
(温度分布)





課題3 等温壁円柱

- 表面 C_p 分布は物体適合格子と一致
- Fine 格子の熱流束は概ね物体適合格子と一致
 - Coarse格子の結果はは $s/D \sim 0.3$ で物体適合格子と異なる傾向
- 平板流れと同様に壁面での温度勾配に改善が必要

