



## 第2回直交格子 CFD ワークショップ

### 【等間隔／不等間隔型直交格子法による熱流束の評価】

宮崎紗弥香

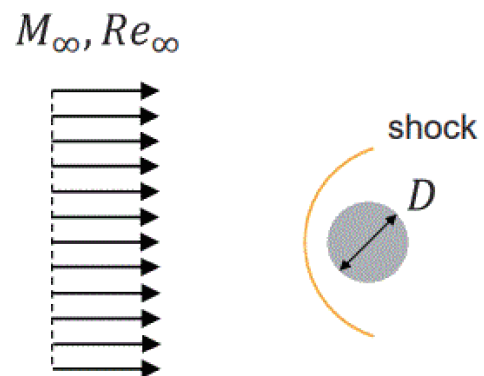
喜多琉歩 阿部薫平 佐々木大輔 (金沢工業大学)

高橋俊 山田剛治 (東海大学)

#### 解析課題について

##### 課題3：円柱熱流束に対する評価項目

- 可視化 (温度場)
- 表面圧力分布
- よどみ流線分布 (温度場)
- 熱流束分布



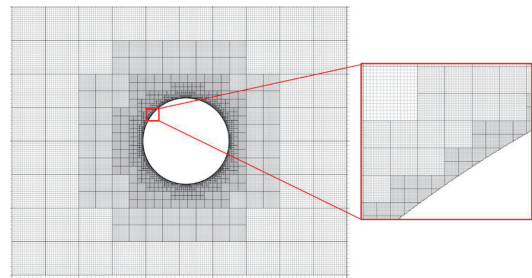
## 計算手法 (KIT)

	計算手法
支配方程式	2D Navier-Stokes方程式
離散化手法	セル中心有限体積法
非粘性流束評価	HLLW
高次精度化	3次精度MUSCL法
粘性流束評価	2次精度中心差分法
時間積分法	LUSGS陰解法
埋め込み境界法	ゴーストセル法

### [Building-Cube Method]

#### 【格子生成の流れ】

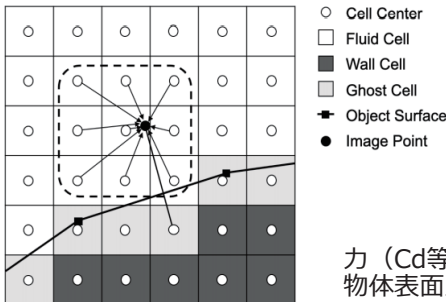
- 計算領域を立方体
- Cube内を等間隔直交格子(Cell)に分割
- 流体計算はCube毎に独立して実行
- Cube境界では隣接Cubeと物理情報交換



## 壁面境界条件 (IBM)

### 2次元BCM圧縮性壁面境界条件 (ゴーストセルベース)

1. 物体表面-流体間にGhost Cellを配置
2. Ghost Cellから物体表面の方向に最小格子幅の1.5倍の位置にImage Pointを作成する
3. Image Pointに対し、周囲9点から距離による重みづけをして物理量を与える
4. Image Pointの物理量をGhost Cellに圧力と密度はそのまま、速度は物体表面で0になるように与える



$$q_{IP} = \sum_{i=1}^9 w_i q_i * mask(i)$$

$$mask(i) = 0(wall), 1(fluid)$$

$$w_i = \frac{h_j^{-2}}{\sum_{j=1}^9 h_j^{-2}}$$

$$h(i) = distance\ from\ Image\ point\ to\ each\ fluid\ cell$$

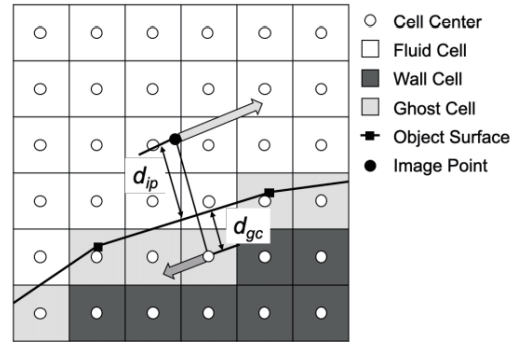
力 (Cd等) の算出は、物体形状の定義点列上で行う (Image Pointは使用しない)。物体表面上の点列2点間の座標の midpoint に対し、周囲9点から物理量を内挿し、その値を使って摩擦抵抗と圧力抵抗を算出する。

## 速度u,v

Image Pointにおいて内挿された速度から物体表面での速度が0になるようにGhost Cellに速度を与える.

$$Image\ Point = 1.5\Delta x$$

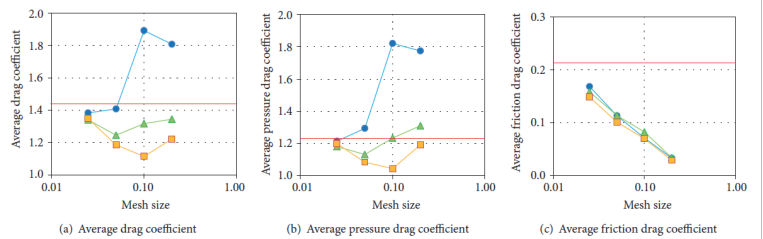
$$U_{GC} = -\frac{d_{GC}}{d_{IP}}U_{IP}$$



## 計算手法 (東海大)

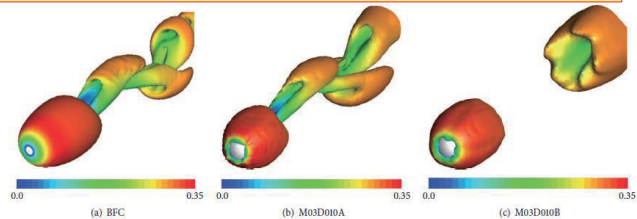
	計算手法
支配方程式	3D Navier-Stokes方程式
離散化手法	セル中心有限体積法
非粘性流束評価 (過去研究)	Skew-sym&Roe switching scheme
非粘性流束評価	HLLC
高次精度化	3次精度MUSCL
粘性流束評価	2次精度中心差分
時間積分法	3次精度TVD Runge-Kutta
埋め込み境界法	ゴーストセル法

### 2D/M0.2/Re300円柱周りにおけるLANS3Dとの比較



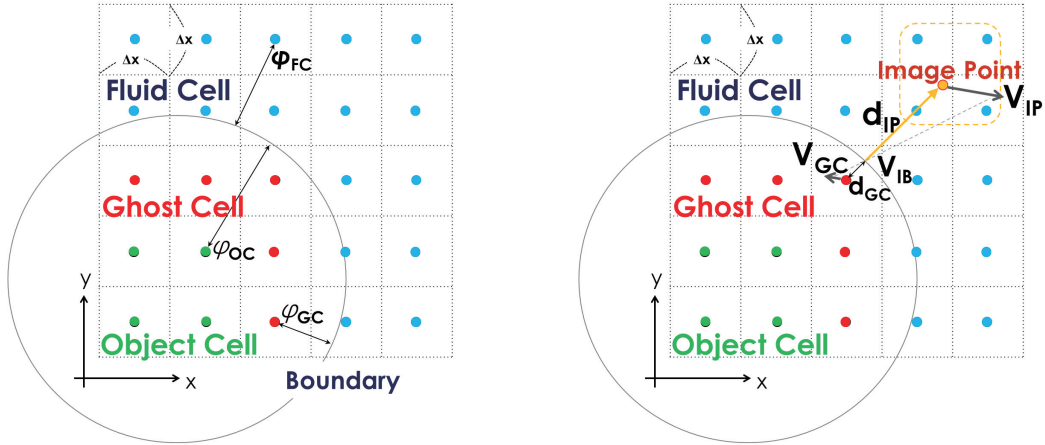
Takahashi, S., et al., J. Applied Mathematics 252478 2014

### 3D/M0.3/Re300球周りのLANS3Dとの比較



Mizuno, Y., et al., Mathematical Problems in Eng. 438086 2015

### 壁面境界条件 (IB法)



1. レベルセット関数φによるセル区分 (流体セルFC/物体セルOC/ゴーストセルGC)
  2. レベルセット関数φがゼロの界面から1.75Δxの位置のイメージポイントIPに値を線形内挿
  3. ゴーストセルの値を1次外挿 (速度) / 0次外挿 (圧力) により設定
- 上記3の手順において, 断熱壁面条件では密度も0次外挿, 等温壁条件ではディリクレ条件的に設定

### 等温壁面境界 (IB法 : 非粘性流束)

①状態方程式とエネルギーの関係式

$$\rho c_p T = e + p - \frac{1}{2} \rho |\mathbf{u}|^2$$

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho |\mathbf{u}|^2$$

②壁面上滑り無し条件

$$\mathbf{u}_{IB} = 0$$

③壁面IB点温度とエネルギー(①&②)

$$T_{IB} = \frac{e_{IB} + p_{IB}}{\rho_{IB} c_p}$$

$$e_{IB} = \frac{p_{IB}}{\gamma - 1}$$

④壁面圧力Neumann条件

$$p_{IB} = p_{IP}$$

⑤壁面密度(③&④)

$$\rho_{IB} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_{IP}}{T_{IB} c_p}$$

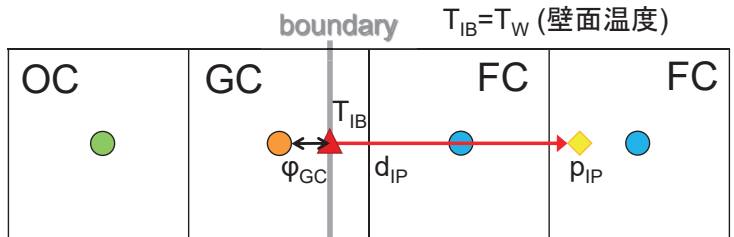
⑥等温壁用ゴーストセル(※変更点)

$$\rho_{GC} = \rho_{IB}$$

$$\mathbf{u}_{GC} = \mathbf{u}_{IB} - \frac{|\phi_{GC}|}{d_{IP}} (\mathbf{u}_{IP} - \mathbf{u}_{IB})$$

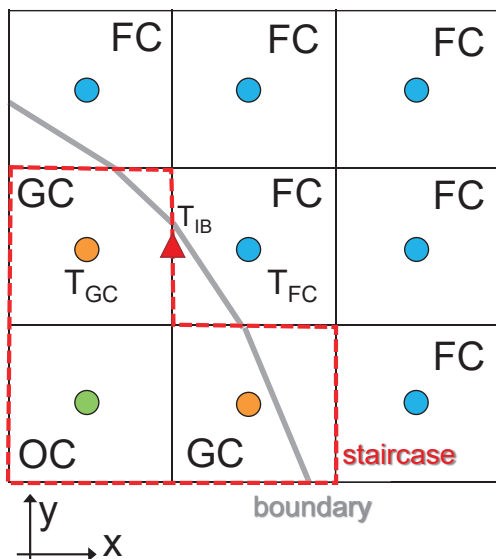
$$p_{GC} = p_{IP}$$

$$e_{GC} = \frac{p_{GC}}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho |\mathbf{u}_{GC}|^2$$



※ρ<sub>GC</sub>はスキーム毎にρ<sub>IB</sub>が壁面で満足されるように決定すべき

### 等温壁面境界（粘性流束）



$$q_x \Big|_{GC-FC} = \kappa T_x = \kappa \frac{T_{FC} - T_{GC}}{0.5\Delta x} = \kappa \frac{T_{FC} - T_{IB}}{0.5\Delta x}$$

粘性流束の熱流束計算時は階段状近似  
 ※高精度化の余地がある可能性

### 解析課題について

課題3：円柱熱流束に対する評価

【解析条件】

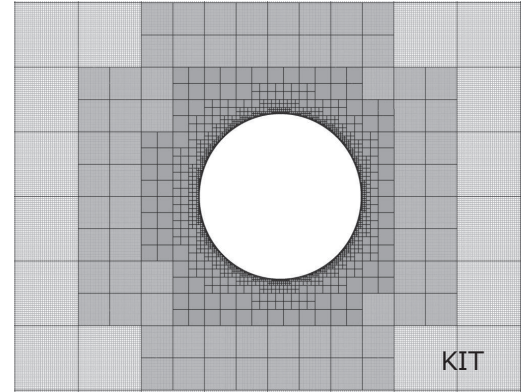
$M_\infty$	$Re_\infty$	$U_\infty$ [m/s]	$T_\infty$ [K]	$P_\infty$ [Pa]	$D$ [mm]	$T_w$ [K]
3	$10^3$	882.42	215	98.822	10	215
	$10^4$			988.22	10	
	$10^5$			9882.2	10	
7 (Tokai)	$10^3$	882.42	60	98.822	10	60

## 解析課題について

### 課題3：円柱熱流束に対する評価

#### 【格子情報：KIT】

	KIT Mesh
Min cell size	$1.9 \times 10^{-4}D$
Divide of Cube	32×32
Outer size	100×100

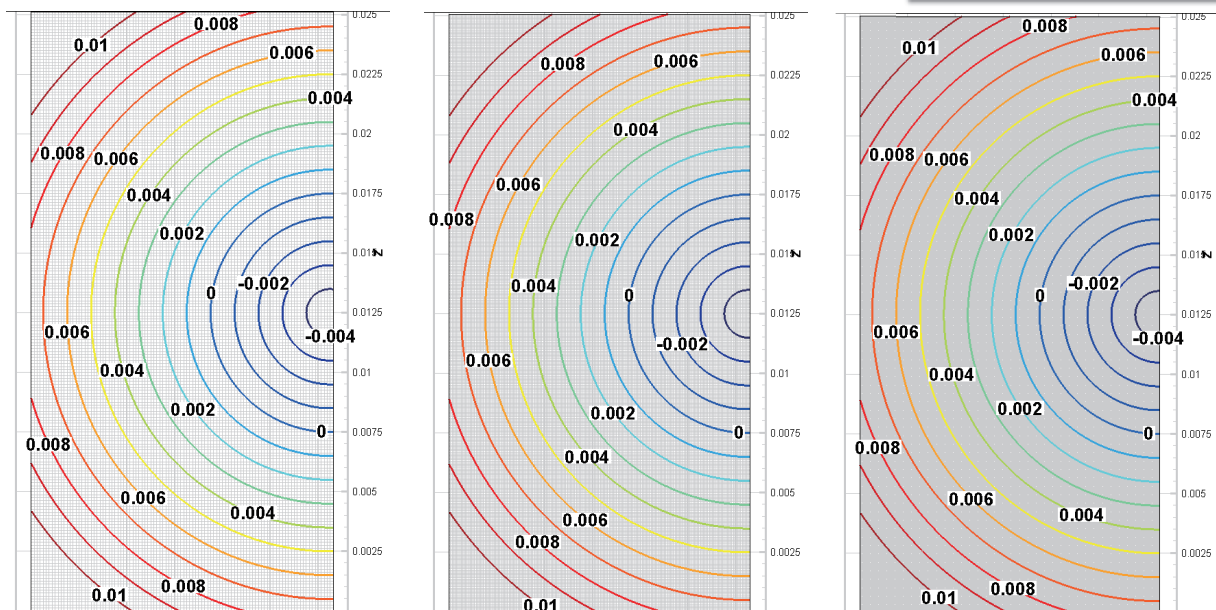


#### 【格子情報：東海大】

	Coarse	Medium	Fine
Total number of cell	40,000	160,000	640,000
Min cell size	$1.25 \times 10^{-2}D$	$6.25 \times 10^{-3}D$	$3.125 \times 10^{-3}D$
IJK max	100×2×200	200×2×400	400×2×800

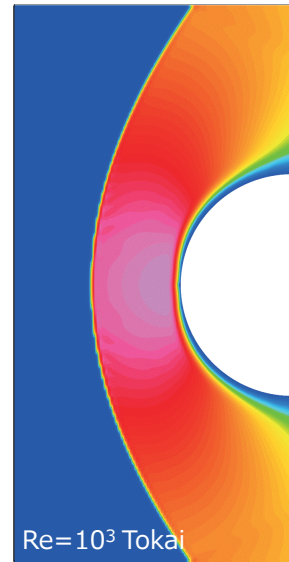
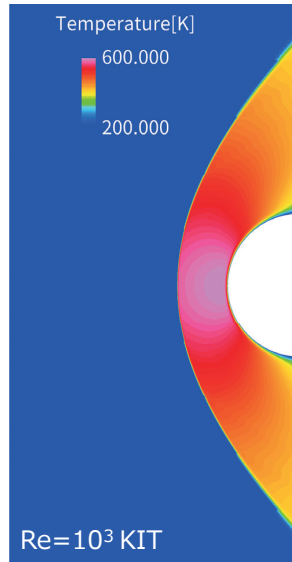
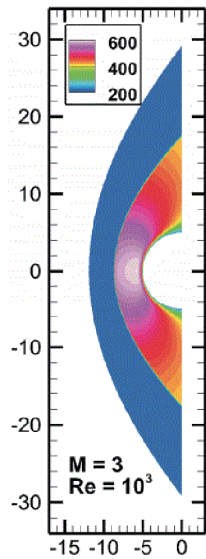
## 計算格子（東海大）

レベルセット関数の等高線  
ゼロの線が物体表面

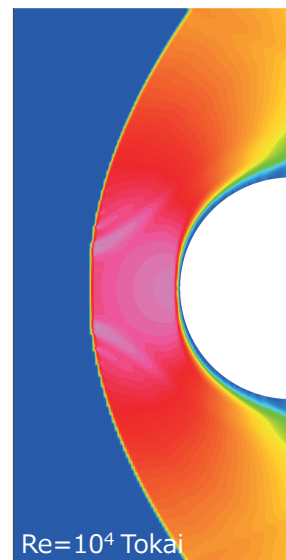
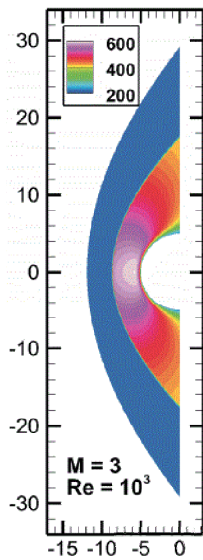


左から  $\Delta x = 1.25 \times 10^{-2}D$  (直径80分割),  $\Delta x = 6.25 \times 10^{-3}D$  (直径160分割),  $\Delta x = 3.125 \times 10^{-3}D$  (直径320分割)

## 課題3 円柱熱流束

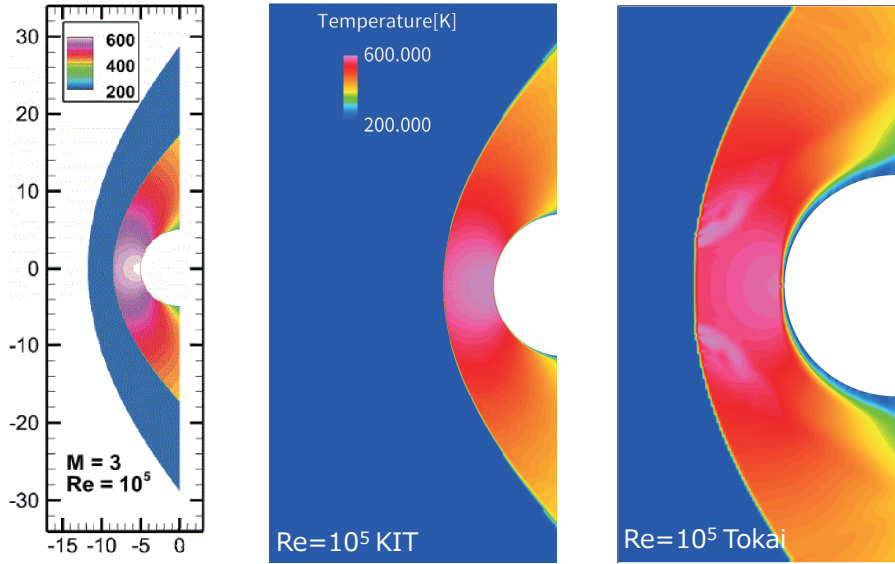
可視化 :  $Re=10^3$ 

## 課題3 円柱熱流束

可視化 :  $Re=10^4$ 

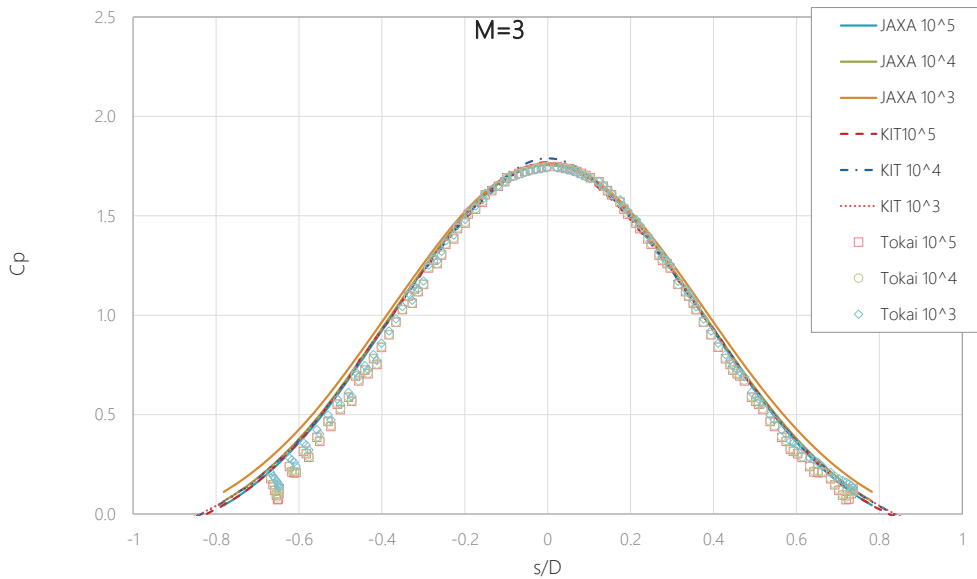
### 課題3 円柱熱流束

可視化:  $Re=10^5$



### 課題3 円柱熱流束

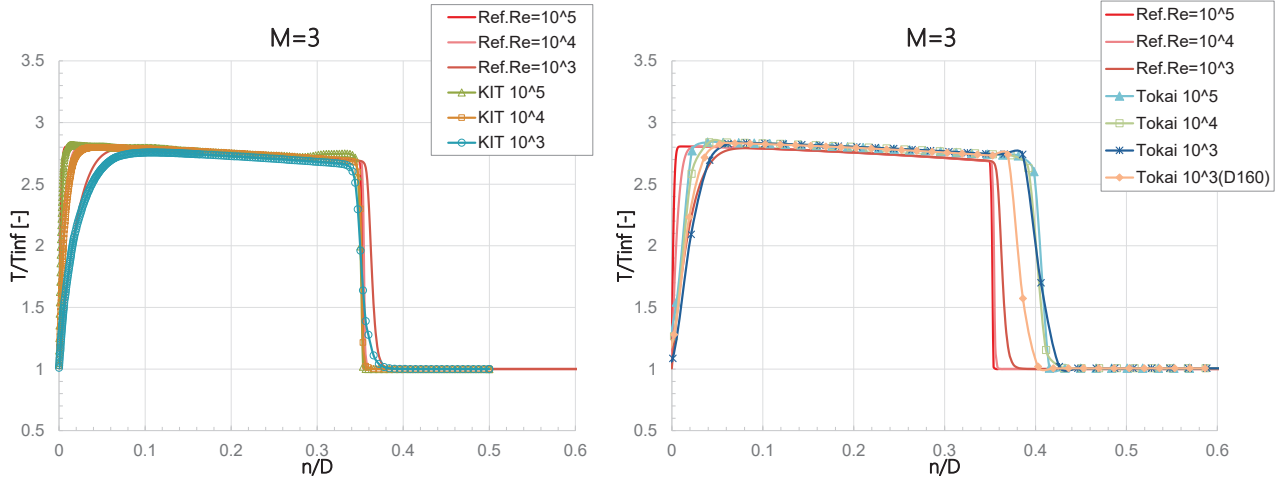
表面圧力分布





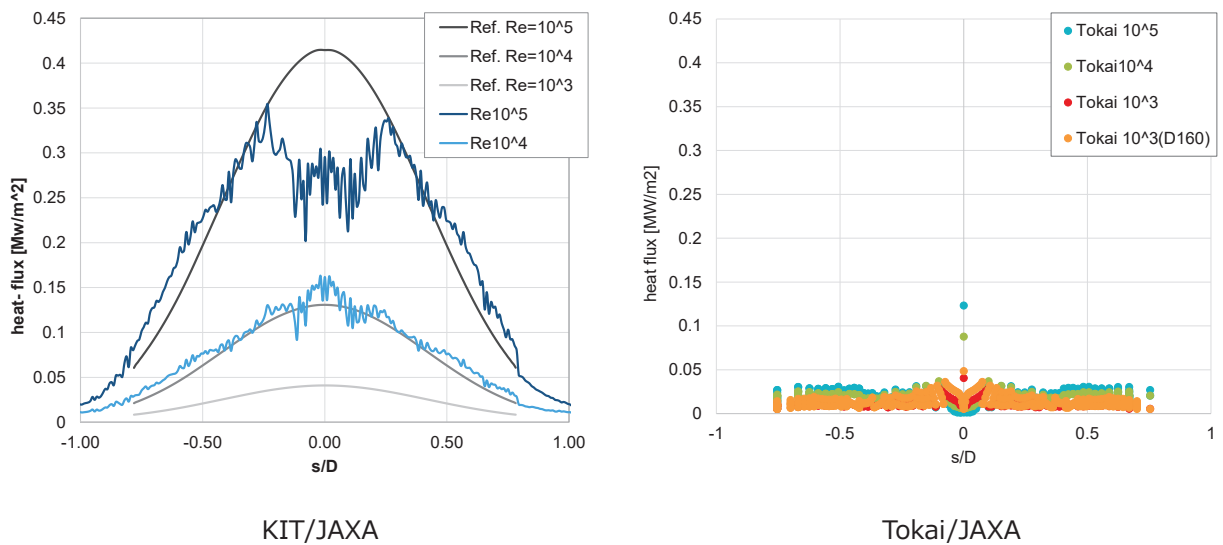
課題3 円柱熱流束

よどみ流線分布



課題3 円柱熱流束

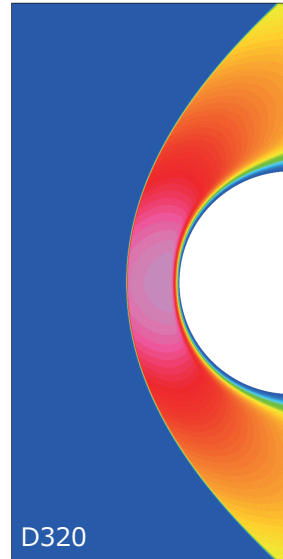
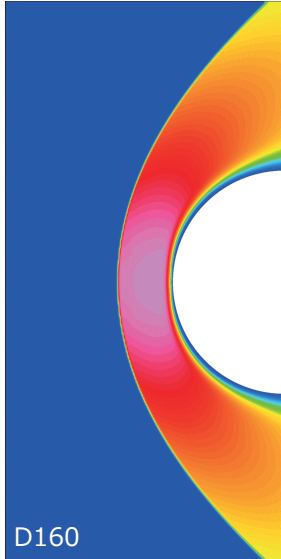
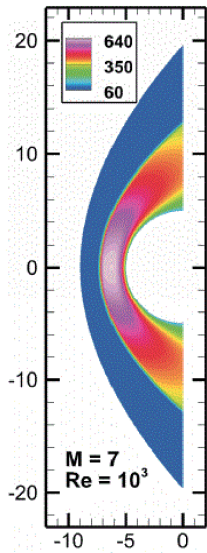
熱流束分布



### 課題3 円柱熱流束

※ $U_\infty : 884.2[m/s]$

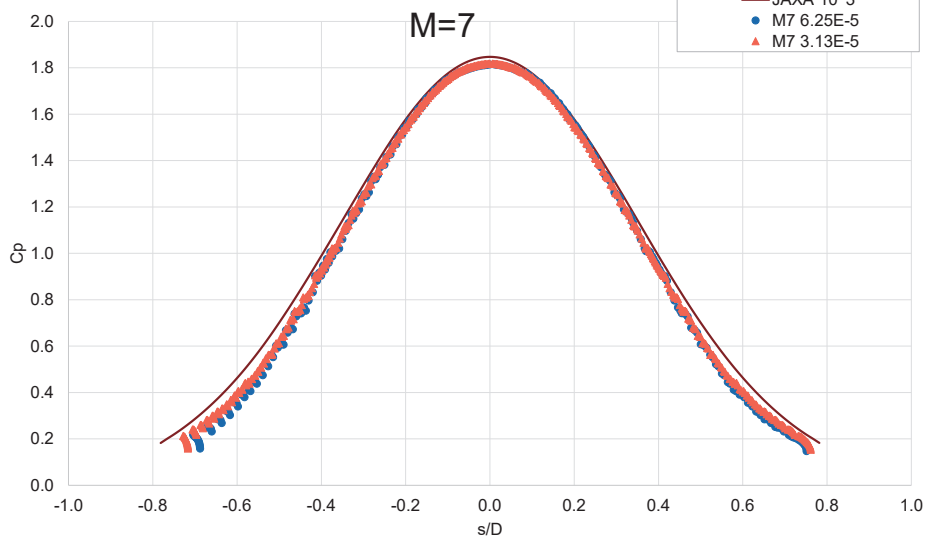
可視化:  $Re 10^3 (M7)$



### 課題3 円柱熱流束

※ $U_\infty : 884.2[m/s]$

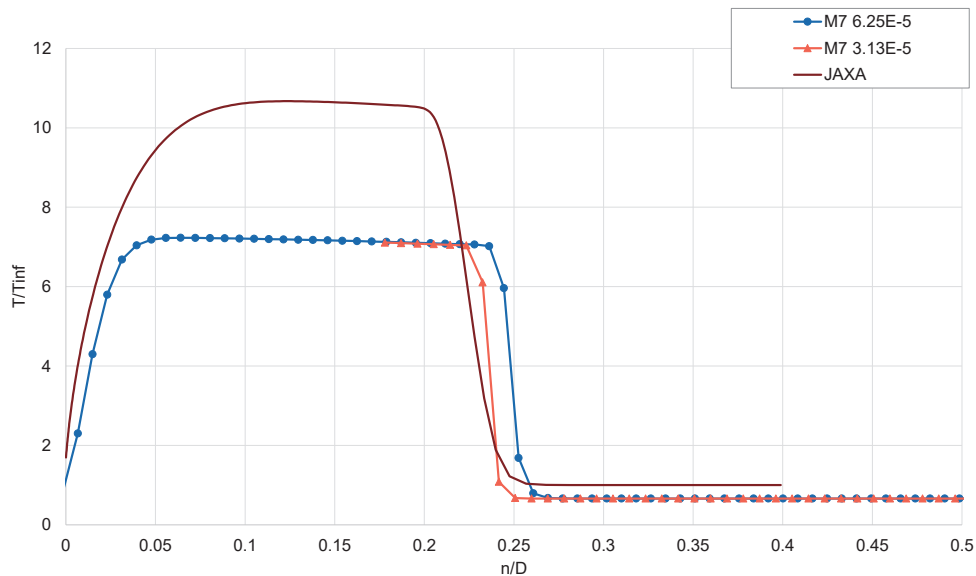
表面圧力分布



### 課題3 円柱熱流束

#### よどみ流線分布

※ $U_{\infty} : 884.2[\text{m/s}]$



### まとめ

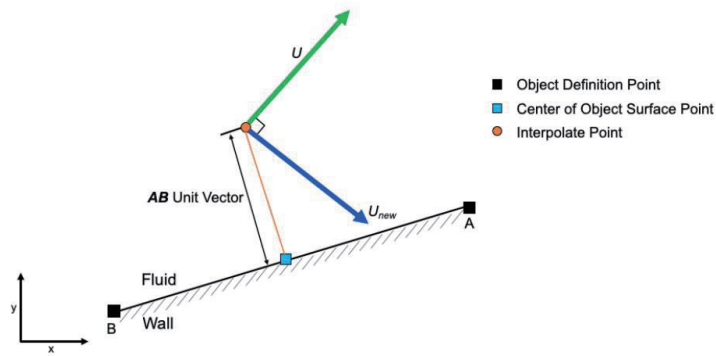
等間隔直交格子及び不等間隔直交格子を用いた解析を行い、以下の事がわかった。

- 表面圧力分布においてはどのRe帯においてもどの手法でも十分に一致する
- よどみ流線分布においてはM3ではKIT, 東海大共に構造格子とおおむね一致する
- M7での不等間隔直交と構造格子では淀み流線に違いが生じる
- 熱流束分布においてはおおむね分布傾向を捉える事はできているが、 $Re10^5$ では最大値を捉える事ができていない

## せん断力 $\tau$

$$\tau = \mu \frac{U_{new}}{\min(\Delta x)} \frac{1}{L}$$

物体表面を定義する点列状の2点を用いてせん断力 $\tau$ を算出する。表面点列状2点の中心から2点間の距離分（法線方向）離れた位置に隣接する周囲9点から物理量の内挿を行う。



## 圧力係数 $C_p$

### ➤ 圧力

物体形状を定義する点列状の2点間の中心に、隣接する周囲9点のうちの流体Cellが持つ値を用いることで圧力の計算を行い距離に応じた内挿を行う。

$$p = (\gamma - 1) \left[ e - \frac{1}{2} \rho (u_i^2 + v_i^2) \right]$$

### ➤ 表面圧力係数

$$C_p = \frac{p_w - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2}$$

