



第4回 直交格子ワークショップ

BCMを用いた熱流束計算の 精度改善に向けた取り組み

阿部薫平

(金沢工業大学)

吉田啓史郎 (金沢工業大学) 佐々木大輔 (大阪公立大学)
高橋俊 (東海大学 現JAXA)

1

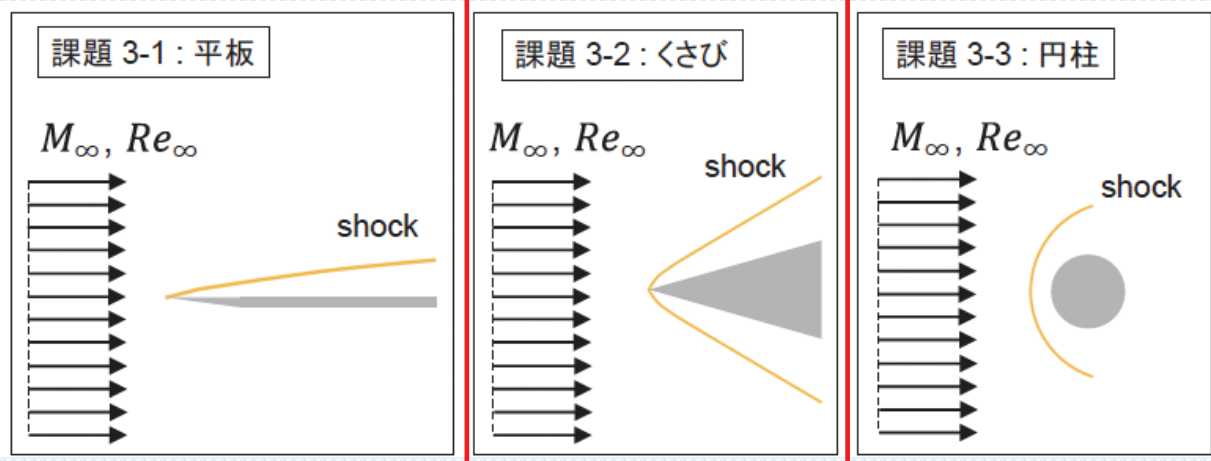
目次

- 解析手法
- これまでの結果
- 熱流束の計算精度の改善に向けた取り組み
- 今後の予定

2

解析課題について

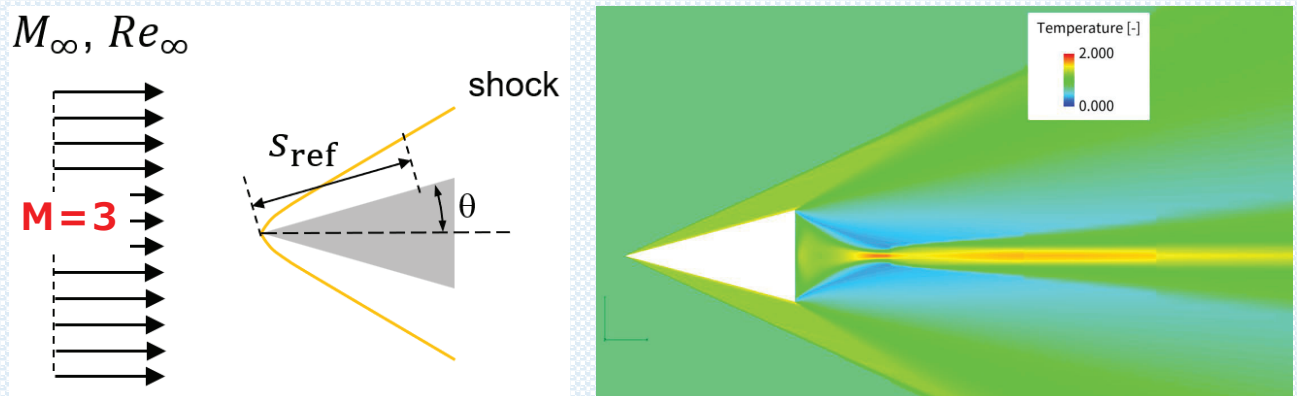
- 課題 2 : 超音速流れのくさびの熱流束評価



3

研究目的

- 埋め込み境界法を用いたソルバーで計算を行う
- 表面熱流束を計算することを目的とする



4

計算手法

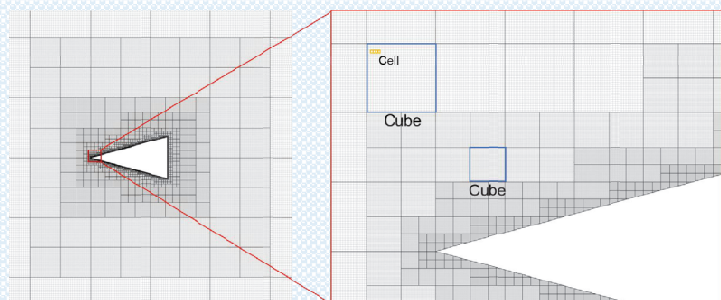
支配方程式	二次元圧縮性Navier-Stokes方程式
非粘性流束評価	HLLEW
高次精度化手法	三次精度MUSCL
粘性流束評価	二次精度中心差分
時間積分法	LU-SGS陰解法
乱流モデル	Spalart-Allmarasモデル
埋め込み境界法	ゴーストセル法

5

Building-Cube Method (BCM) [1]

【格子生成の流れ】

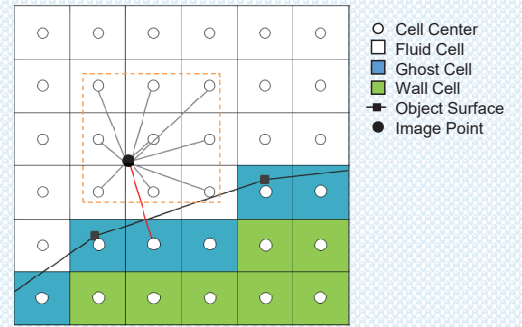
- 計算領域を立方体
- Cube内を等間隔直交格子(Cell)に分割
- 流体計算はCube毎に独立して実行
- Cube境界では隣接Cubeと物理情報交換



6

壁面境界条件 (IBM) [2]

1. 物体表面-流体間にGhost Cellを配置
2. Ghost Cell (GC) 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 (IP) 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. IPの物理量をGC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



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

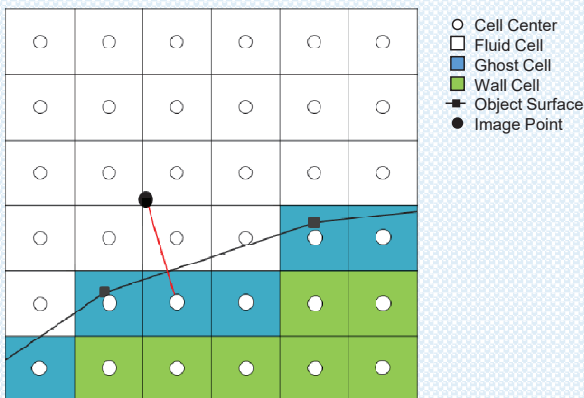
$$mask(i) = 0(wall), 1(fluid)$$

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

$h(h) = IP$ から各流体Cellまでの距離

等温壁面境界条件

IPとGCに温度勾配を持たせるためObject Surfaceに温度を与える
 → T_{IB} に固定値を与えてIPの密度, GCの密度を求める



Object Surfaceの密度を以下のように求める :

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

GCにIBの密度を代入する : $\rho_{GC} = \rho_{IB}$

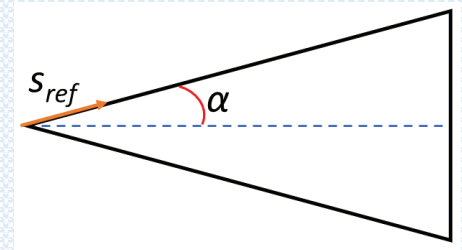
圧力 : $p_{GC} = p_{IP}$

熱流束 :

$$q_x \Big|_{GC-FC} = \kappa T_x = \kappa \frac{T_{IP} - T_{GC}}{0.5 * d_{IP}} = \kappa \frac{T_{IP} - T_{IB}}{0.5 * d_{IP}} \quad 8$$

解析条件

Mach number (M)	[-]	3.0
Reynolds number (Re)	[-]	100,000
Static Temperature (T_{inf})	[K]	536
Wall Temperature (T_w)	[K]	300
Static Pressure (P_{inf})	[Pa]	3,100
Specific heat ratio (γ)	[-]	1.4
Representative length (s_{ref})	[m]	0.1
Wedge angle (α)	[deg]	15



9

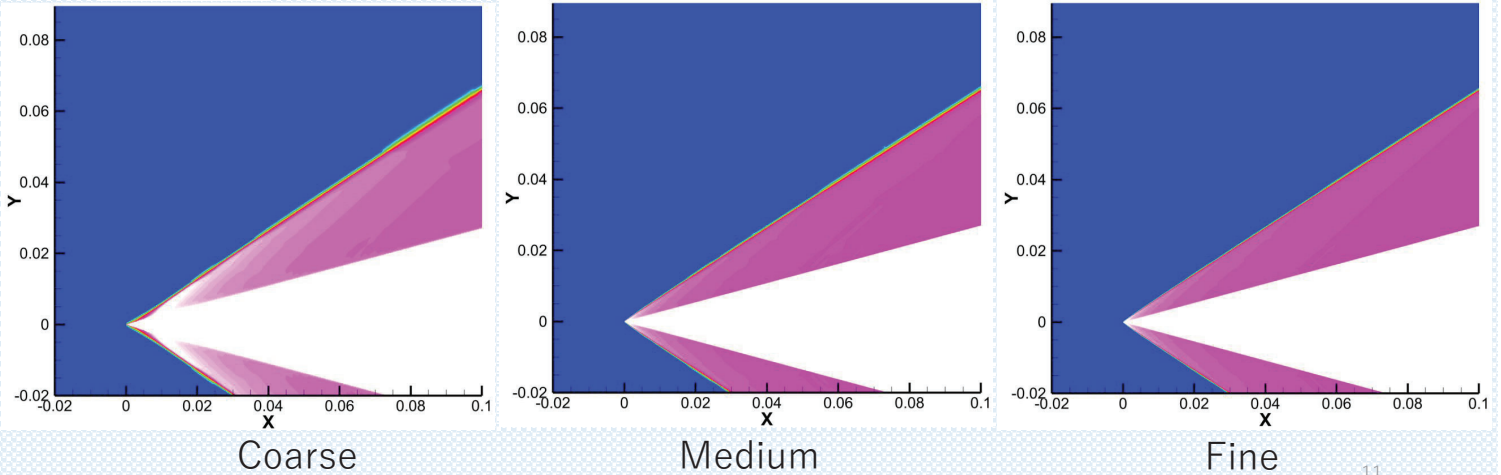
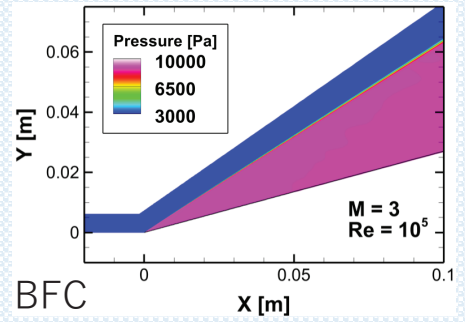
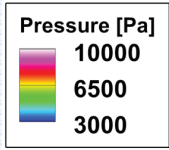
格子幅の設定

- 格子幅は以下の表のように設定する

	Coarse	Medium	Fine
Minimum Cell size	1.91×10^{-4}	4.77×10^{-5}	2.38×10^{-5}
Outer size	50×50		
Number of Cube	2,190	7,232	14,258
Division of Cube	16×16		
Number of Cell	560,640	1,851,392	3,650,048

10

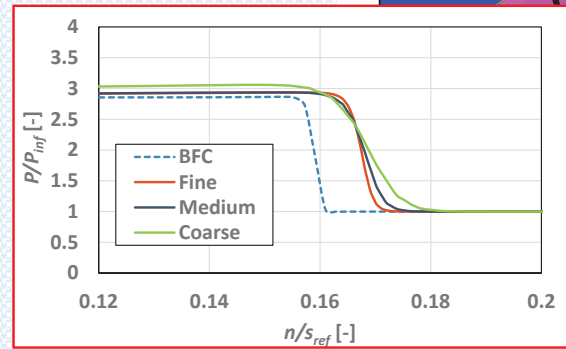
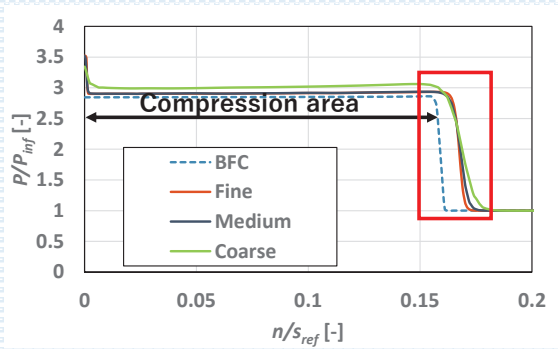
圧力係数のコンター図



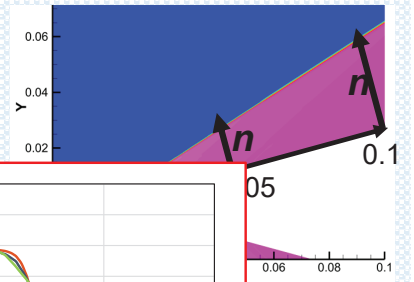
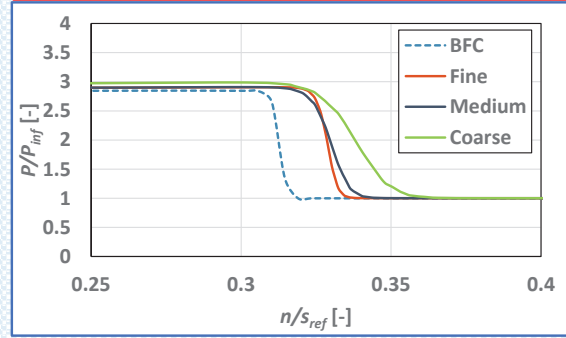
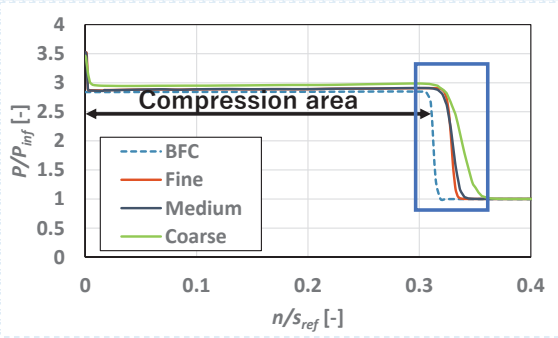
11

圧力分布

$s=0.05$

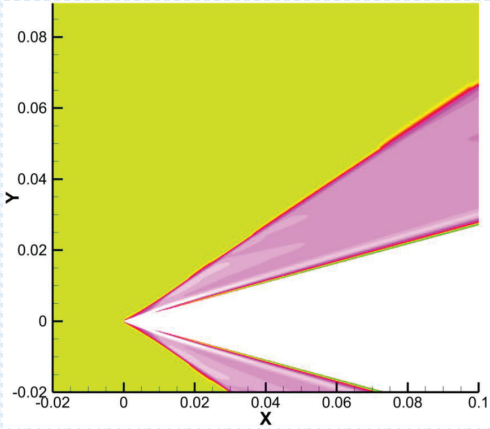
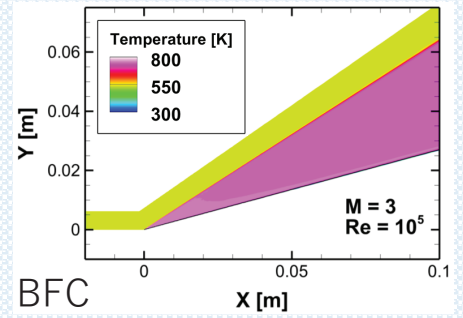
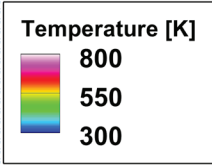


$s=0.1$

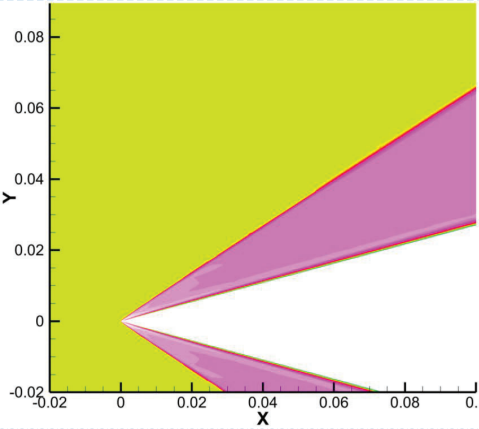


12

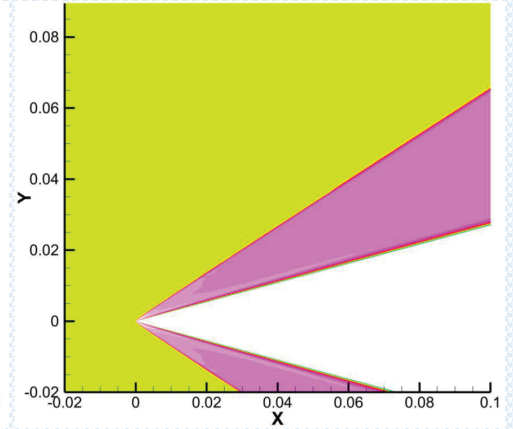
温度のコンター図



Coarse



Medium

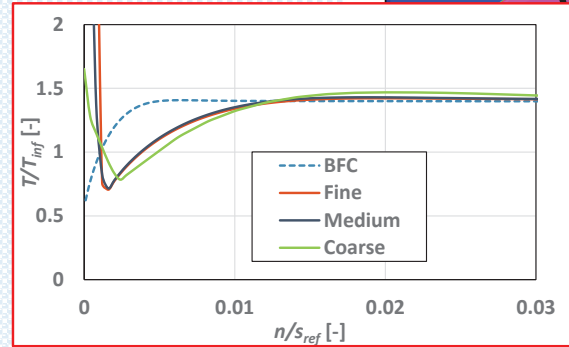
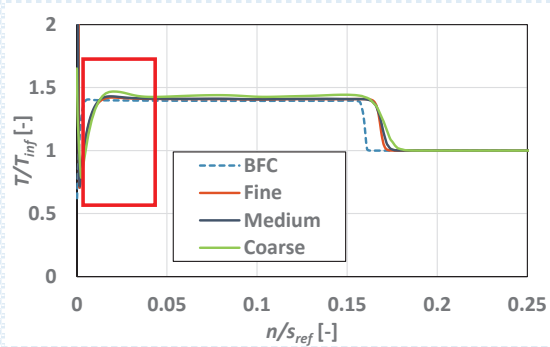


Fine

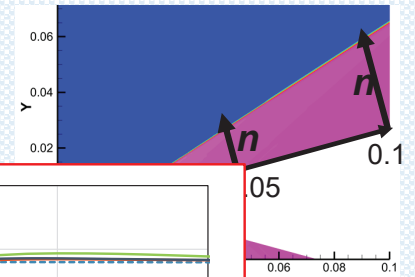
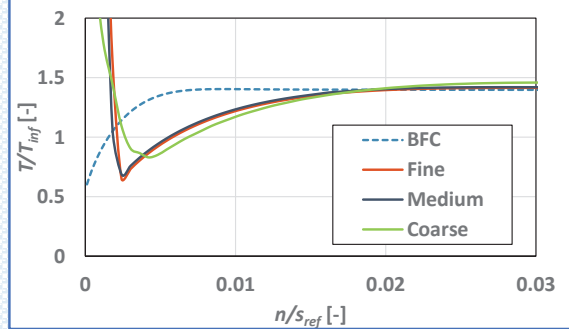
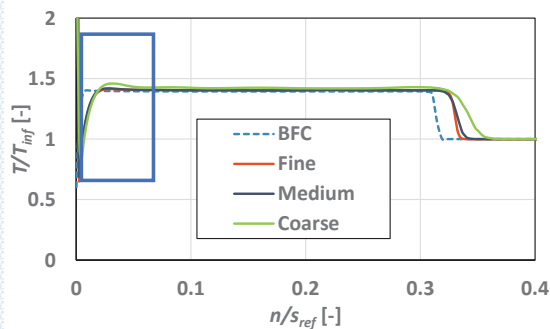
13

温度係数分布

$s=0.05$

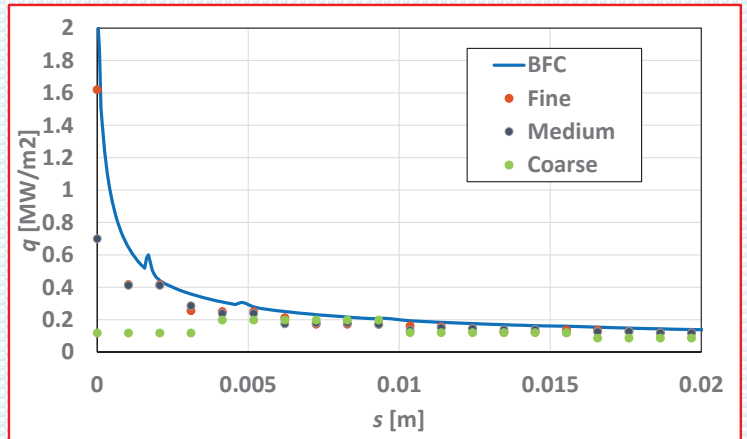
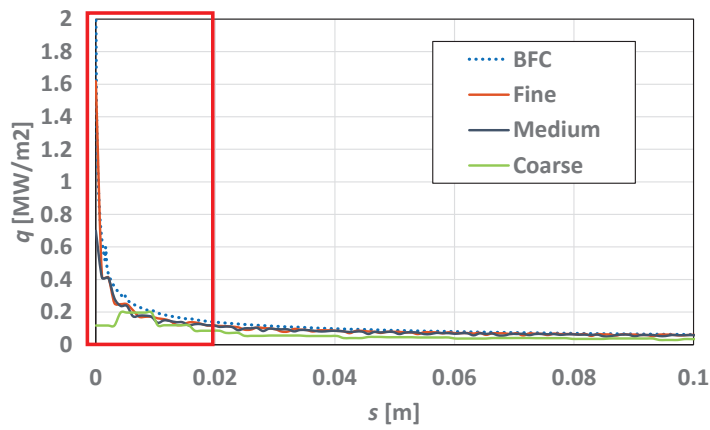
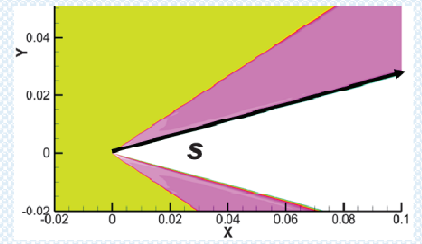


$s=0.1$



14

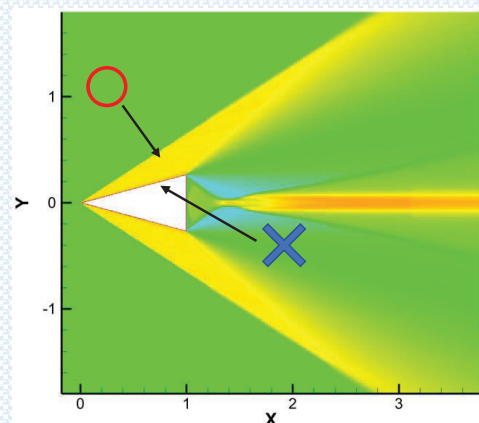
表面熱流束分布



15

まとめ

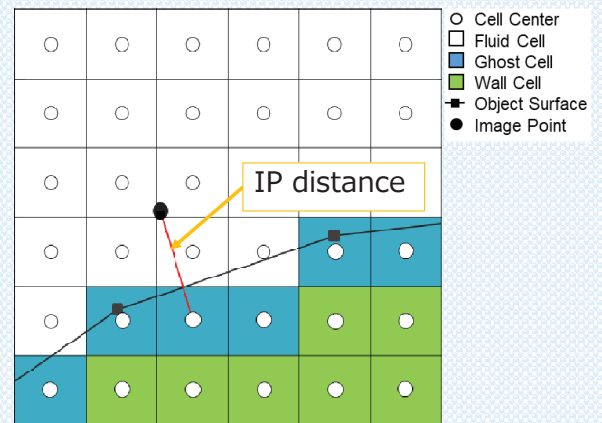
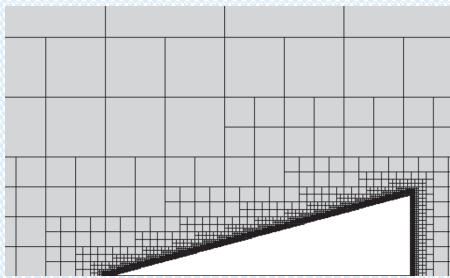
- 流れ場において、圧力分布や温度分布はBFCと似た結果を示す
- 物体近傍の現象である熱流束は、傾向は捉えられているが、先端付近は改善する必要がある。



16

熱流束の計算の改善に向けて

1. IPの距離を変更
2. 解析モデルの変更



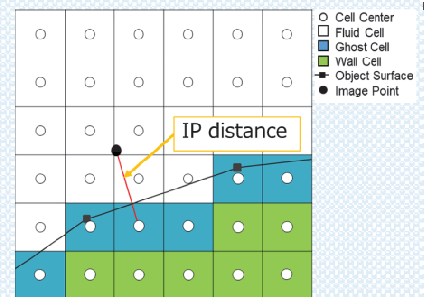
IPの距離の変更

- IPによる影響を調べるために、長さを変更した

$$d_{IP} = \beta \times \Delta x$$

d_{IP} : IP距離 β : 定数 Δx : 最小格子幅

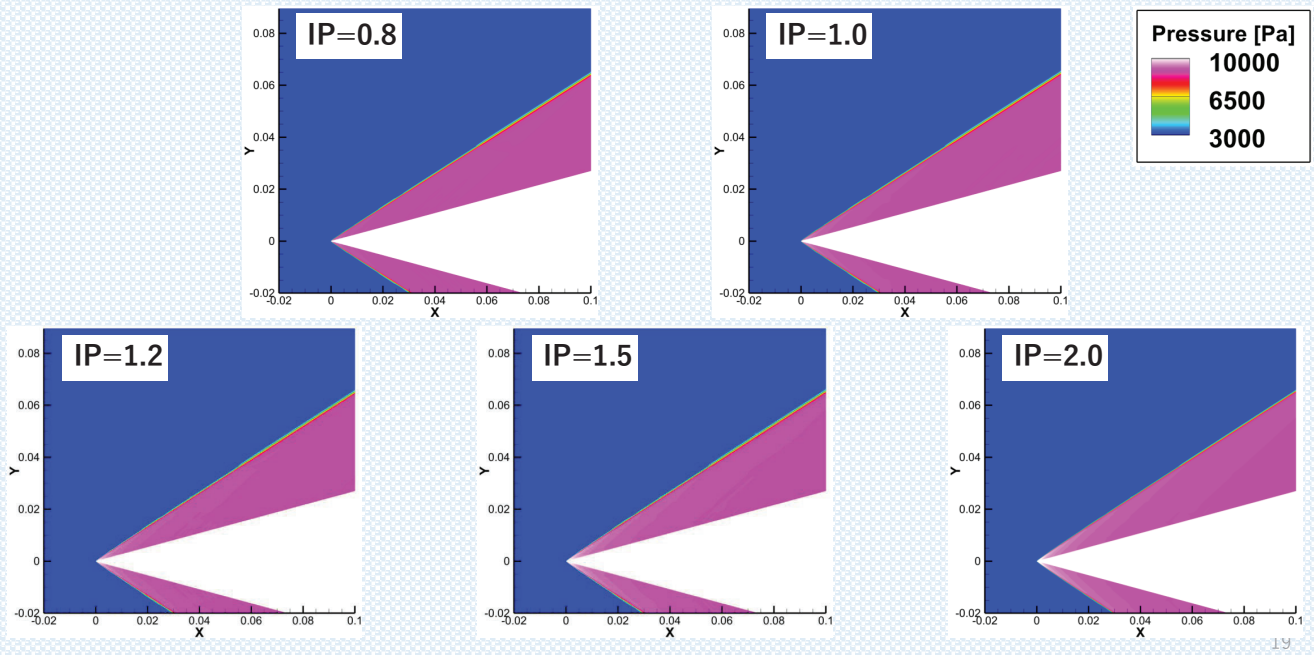
- β : 2.0, 1.5, 1.2, 1.0, 0.8と設定して計算を実施した
通常



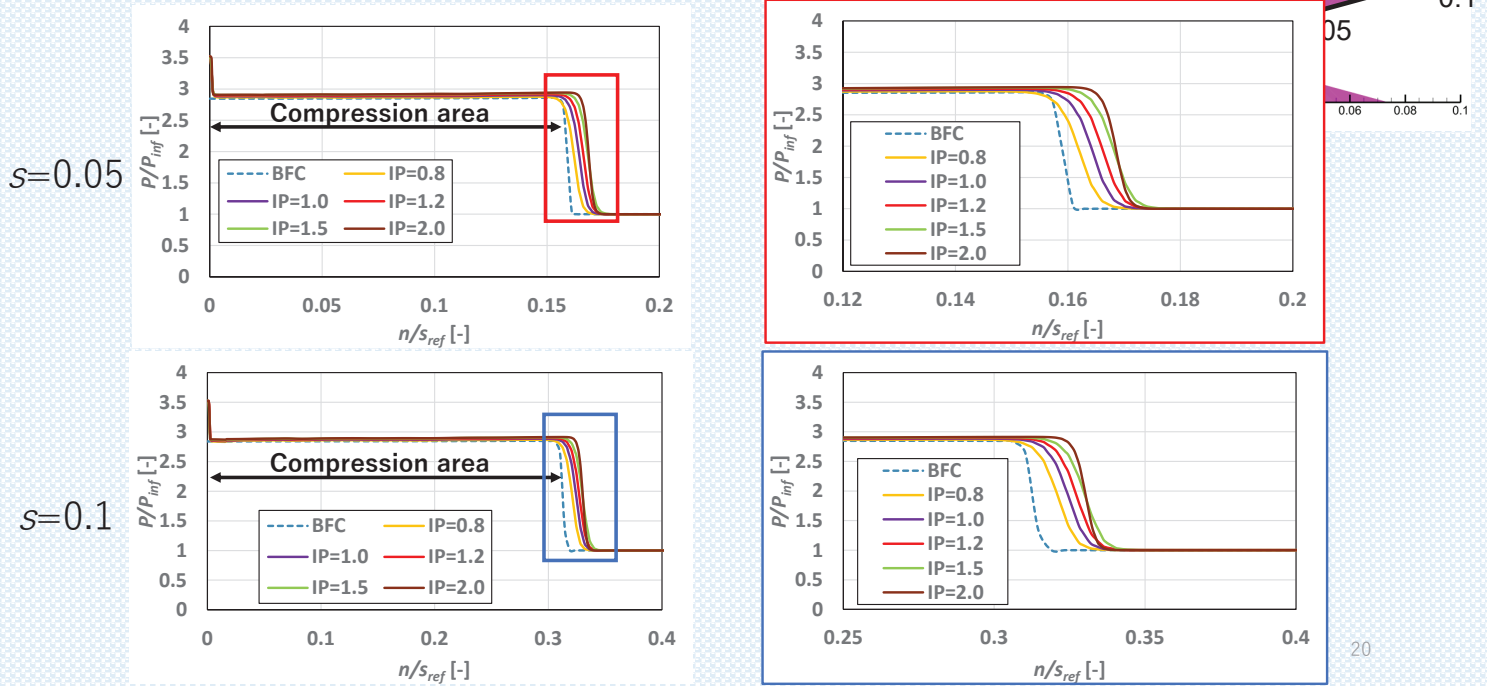
Medium格子と同じメッシュ

Mach number (M)	3.0
Reynolds number (Re)	100,000
Minimum Cell size	4.77×10^{-5}
Number of Cell	1,851,392

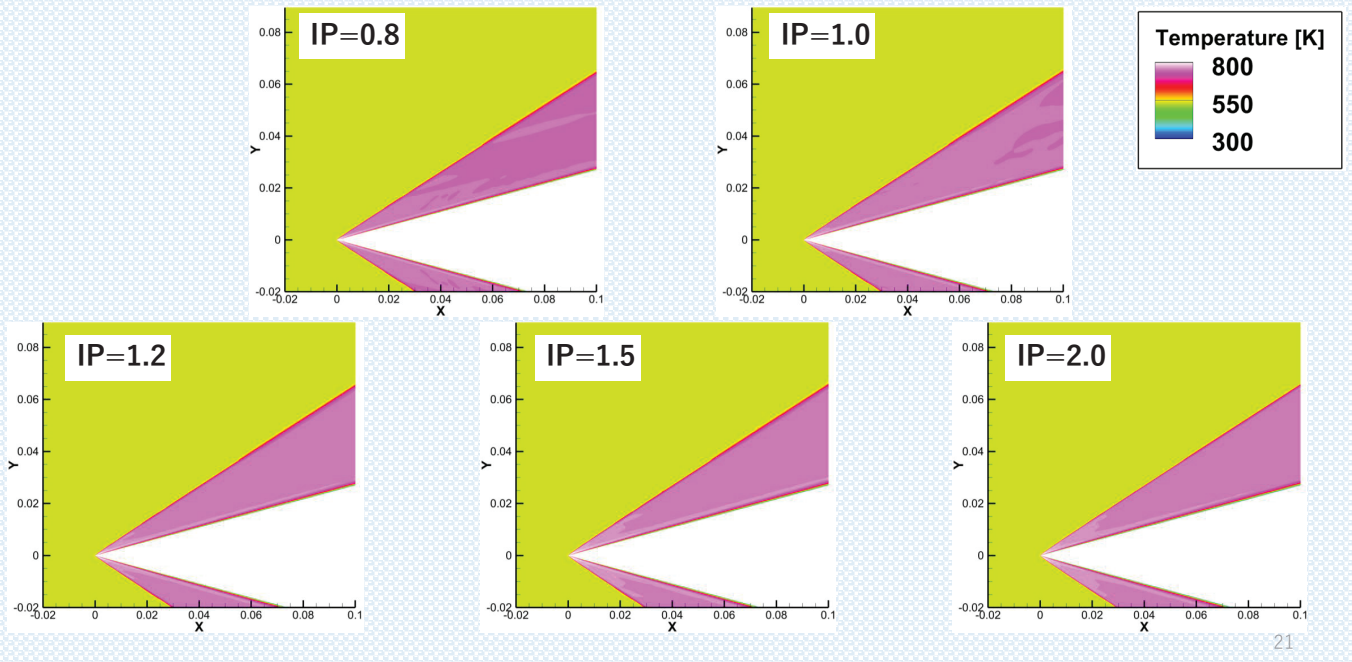
圧力コンター図



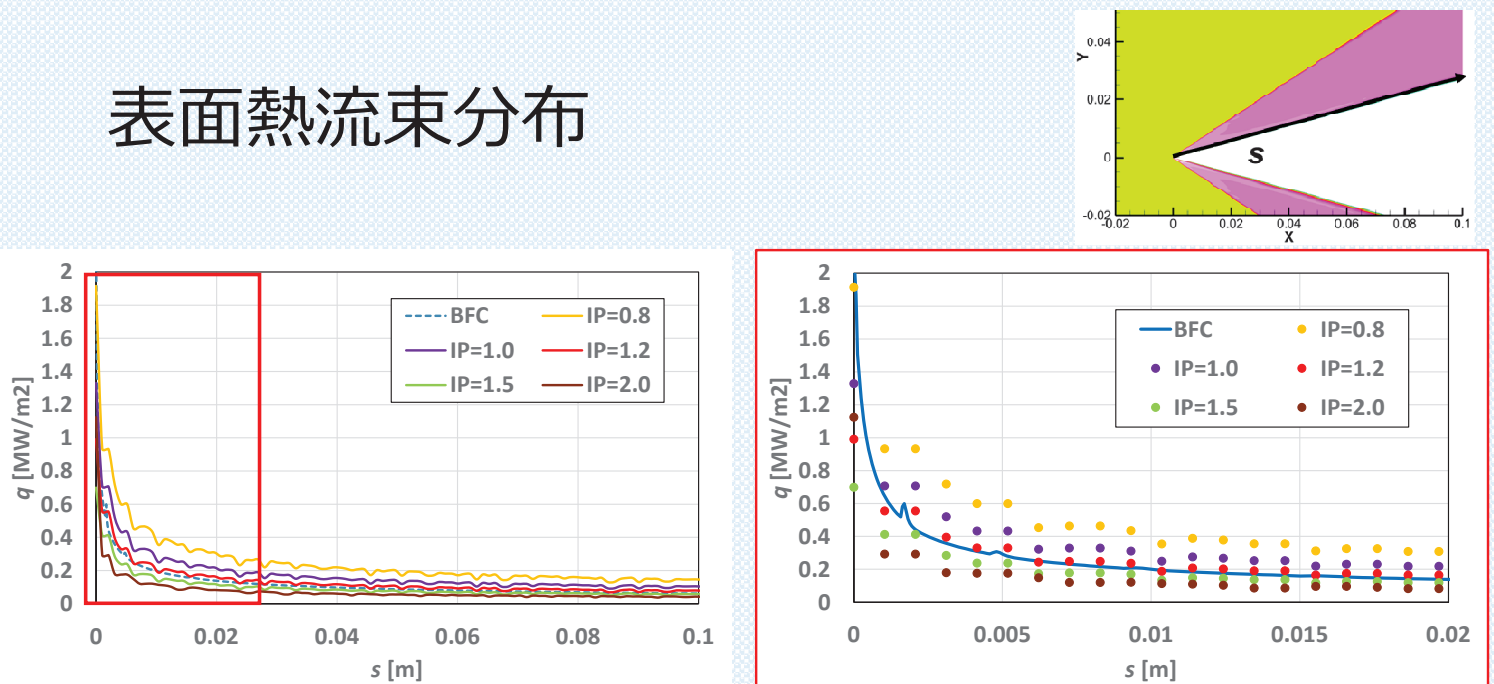
圧力分布



温度コンター図



表面熱流束分布



熱流束の値はIP距離に依存する。
IP距離が短いほど熱流束は高くなる傾向がある。

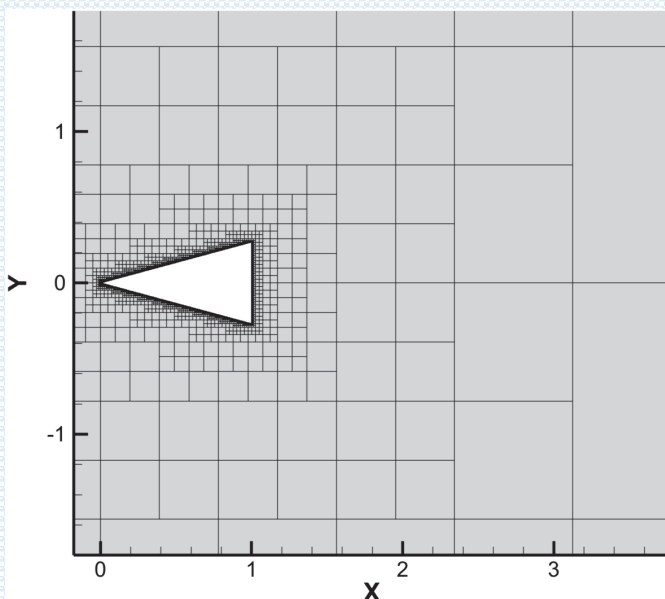
まとめ（IP距離の変更）

- くさび先端部付近において、圧力が一番高くなる場所が変化する
- IP距離によって熱流束の結果は変化し、IP距離が短いと表面熱流束は高くなる傾向がある

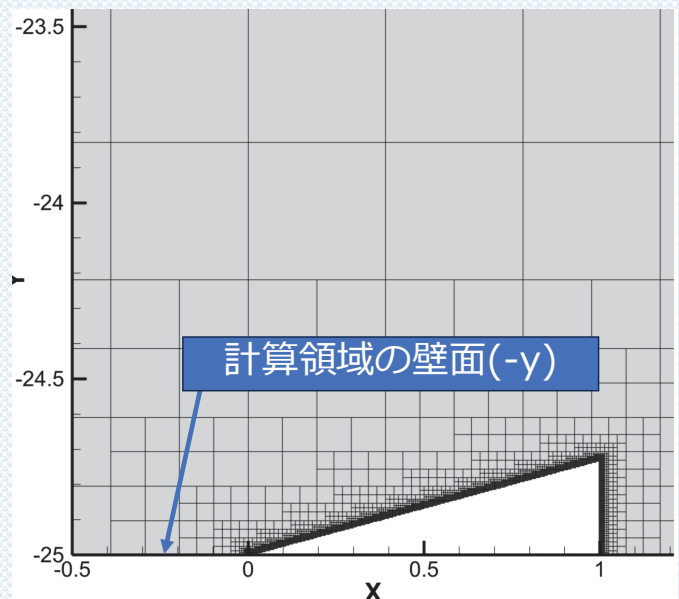
23

モデルの変更

解析領域 : X, Y: 25 ~ -25



変更前（計算領域の中心に配置）

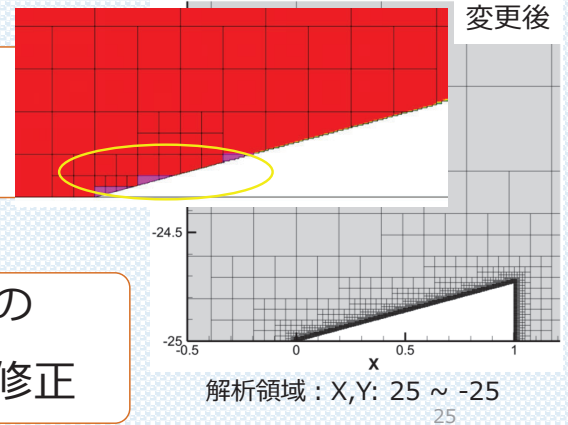
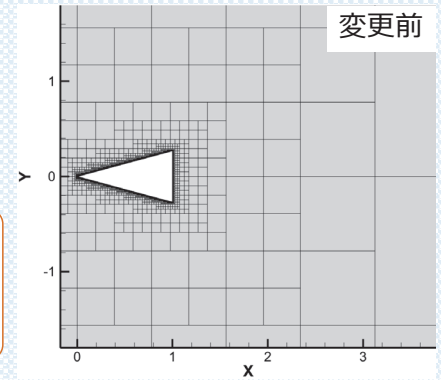
変更後（計算領域の壁面上に配置）²⁴

モデルの変更

流れ中に物体を置くのではなく、
解析領域の壁面に沿わせたモデルに変更

くさびの先端と解析領域の壁面の
接点部分で計算が破綻している

物体近傍の最小Cubeだけ、初期条件の
流速を0[m/s]にするようにソルバーを修正



結論と今後の研究予定

- 現在の金沢工大のBCMソルバーは、流れ場の計算は比較的实施できているが、物体近傍では改善が必要と考える。
- 熱流束の値は、IP距離に依存しているため、適切な長さを定義する必要がある。
- 引き続き、熱流束の改善に向けて取り組む。
✓くさび先端部の取り扱い方など