

第53回流力講演会/第39回ANSS (2021/7/2)
講演番号: 3C05 (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(その2)

東京大学 大学院

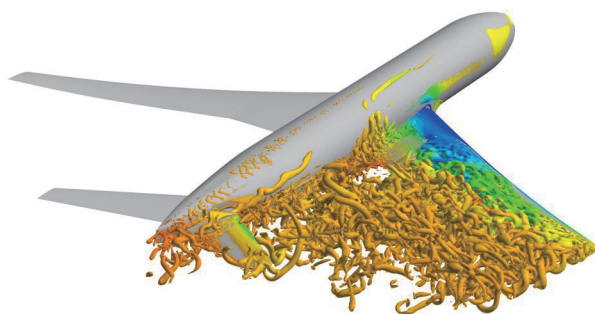
○ 菅谷 圭祐, 石橋 央基, 原 惇,
越智 秀次, 高橋 玲, 船田 雅也,
李家 賢一, 今村 太郎



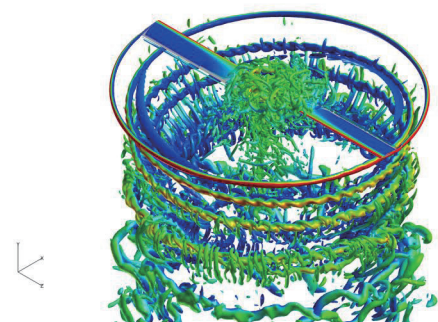
UTCart



- 直交格子流体ソルバ UTCart
 - the **U**niversity of **T**okyo **C**artesian-grid-based automatic flow solver
 - **格子生成 + 流体計算**
 - 埋め込み境界法 / 簡易的なカットセル法



菅谷, 原, 今村, 流力ANSS2021.



菅谷, 今村, 流力ANSS2021.



研究目的



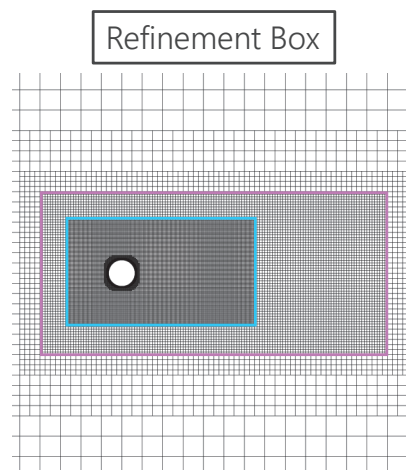
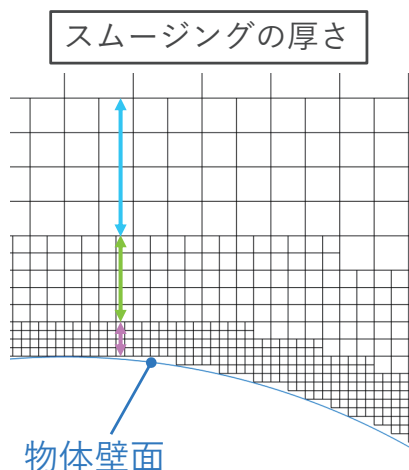
UTCart による基礎的な二次元流れの計算を通して 直交格子CFDの解析精度と課題を調査

- 課題1 円柱 (担当：原)
- 課題2 角柱 (担当：船田)
- 課題3 等温壁円柱 (担当：菅谷)
- 課題4 くさび-円柱，パラシュート-円柱，複数円柱
(担当：石橋，越智，高橋)

計算格子



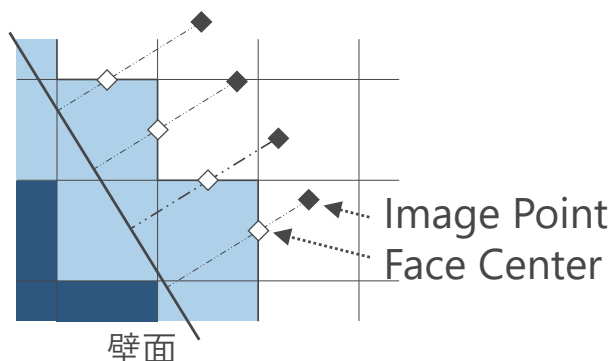
- セルベースの細分化・非構造格子
 - 格子幅の切り替わりは多面体として計算
- 計算領域・壁面での格子幅・スムージングの厚さを指定
- Refinement Box による細分化



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



計算結果の可視化

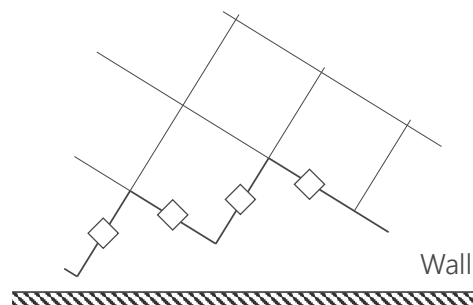
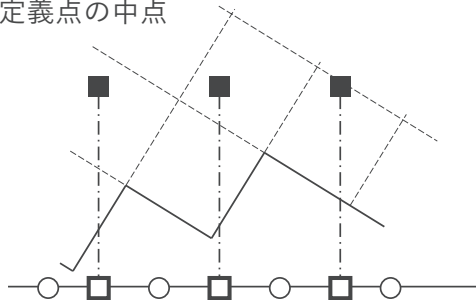


- 二種類の可視化手法を利用
 - 手法1：形状データ上で可視化 (課題1,2,3)
 - 物体壁面に沿ったデータを出力可能
 - 手法2：境界条件を与える階段状のセル境界で可視化 (課題1)
 - 計算に利用される情報 (粘性応力, 熱流束,...) を可視化

手法1：形状データ上で可視化

手法2：階段状のセル境界で可視化

- ：物体形状の定義点
- ：定義点の中点



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



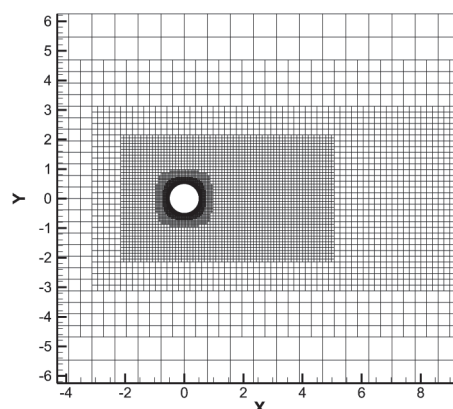
課題 1 円柱

計算条件・計算格子



壁面の格子幅及び円柱形状の要素数が C_f の予測に与える影響を調査

主流のマッハ数	0.1
円柱直径基準のレイノルズ数	10, 50 (定常解析)
主流の温度	293.15 [K]
最小格子幅 (セル数)	$dx/D =$ 1.22×10^{-2} (9,298), 3.05×10^{-3} (18,130), 7.63×10^{-4} (54,482)
円柱の要素数 (要素の長さと円柱直径の比)	225 (1.40×10^{-2}), 900 (3.49×10^{-3}), 3600 (8.73×10^{-4})

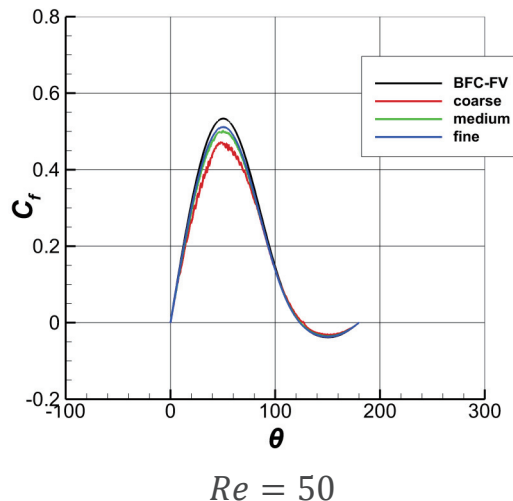
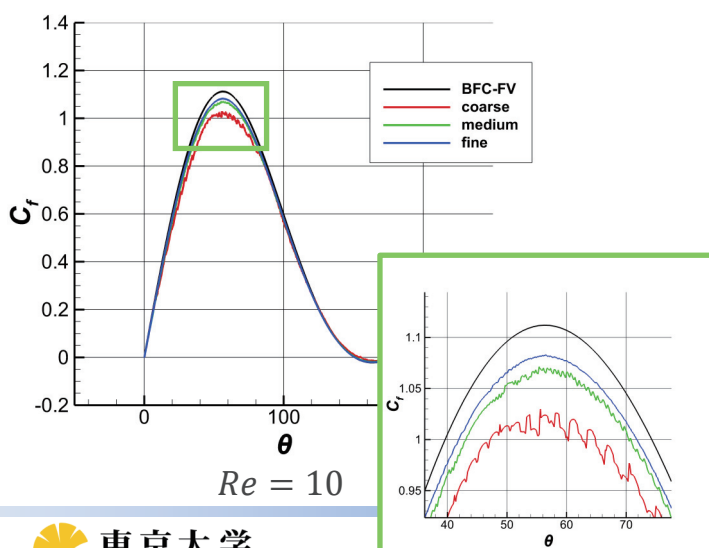


セル数 54,482 の計算格子 R.B. はどの格子幅でも同じ

形状データ上の C_f 分布



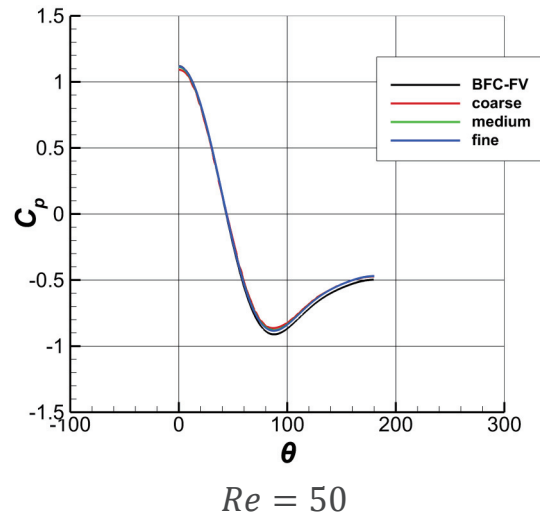
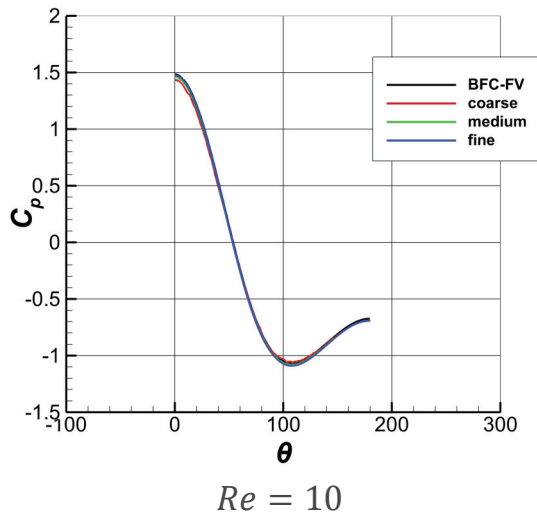
- 円柱形状の要素数を3600に固定し最小格子幅だけを変更
- 格子幅を小さくすると振動が減り、参照解に近づく





形状データ上の C_p 分布

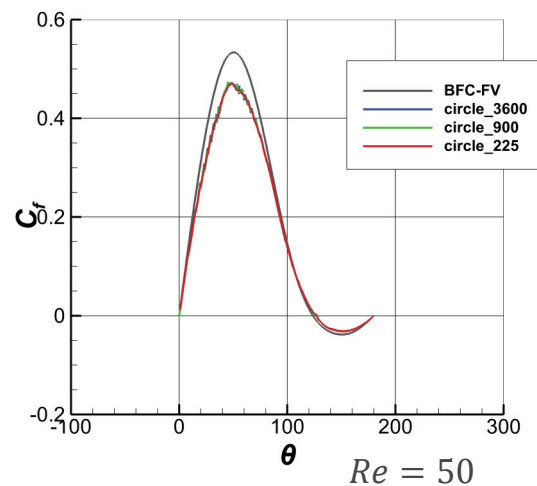
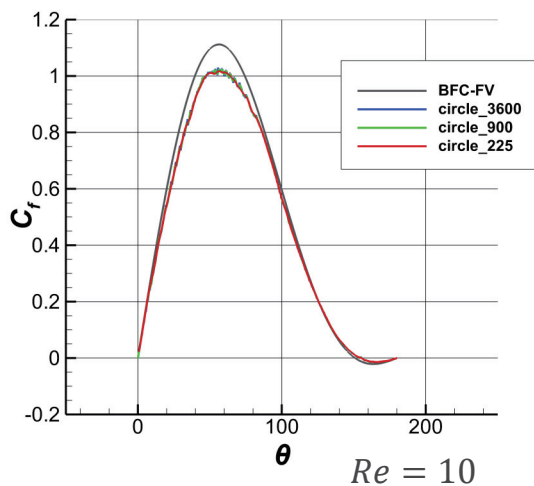
- 要素数を固定し格子幅を変更
- C_f に比べ振動は小さい



形状データ上の C_f 分布



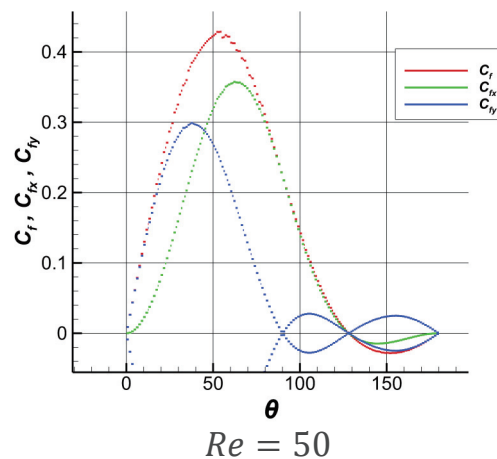
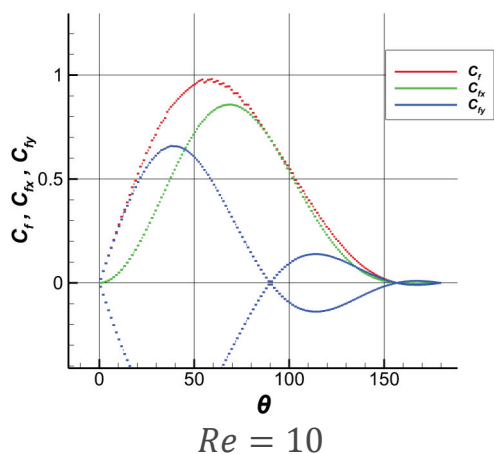
- 格子幅を固定し，円柱形状の要素数だけを変更
→要素数が多いほど振動が顕著
- 格子幅を要素の長さ以下にすることで振動が抑えられる



Face Center の C_f 分布



- 振動が顕著であったcoarse 格子・要素数3600の解析結果
- Face Center での C_f は滑らかな分布
→物体形状データに射影する際に振動が発生



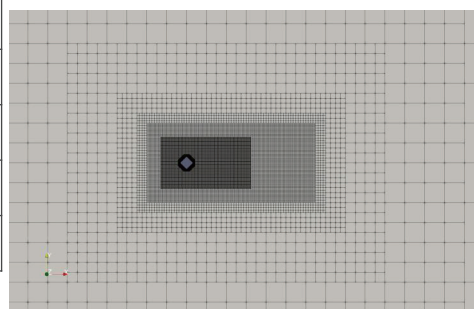
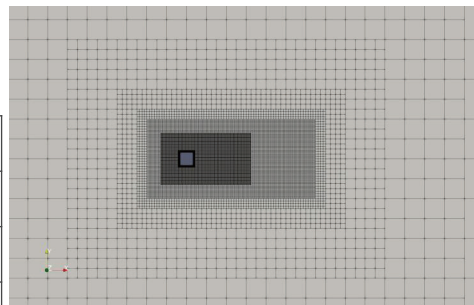
課題 2 角柱



計算条件・計算格子

- 表面の C_p, C_f 分布を参照解と比較
- 角柱の角度ごとに格子を生成

主流のマッハ数	0.1
レイノルズ数	100
主流の温度 [K]	293.15
円柱の角度 [deg]	$\theta = 0, 2.5, 15, 30, 45$
最小格子幅	$\Delta x/L_{ref} = 1/164$
セル数	24000
時間積分法	3段3次ルンゲクッタ
無次元時間刻み	4.0×10^{-3}
総ステップ数	1500000



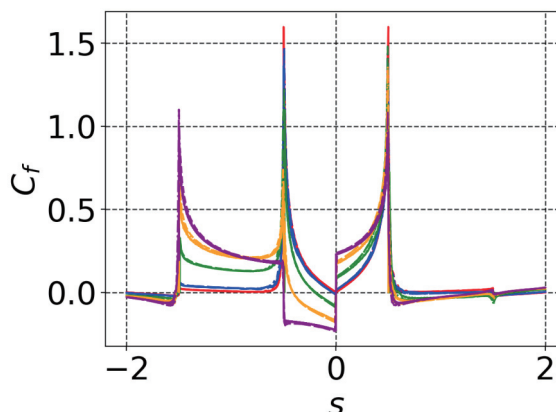
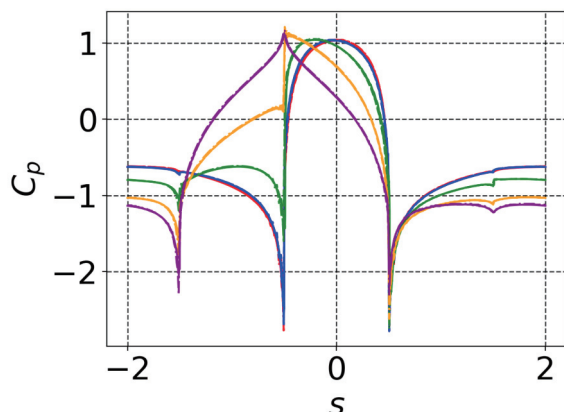
表面の C_p, C_f 分布



- 最終300000ステップで時間平均の C_p, C_f 分布を取得
- C_p, C_f 分布ともに参照解と良好な一致

_____ UTCart
 - - - - - BFC-FV(Baseline mesh)
 - - - - - BFC-FV (Coarse mesh)

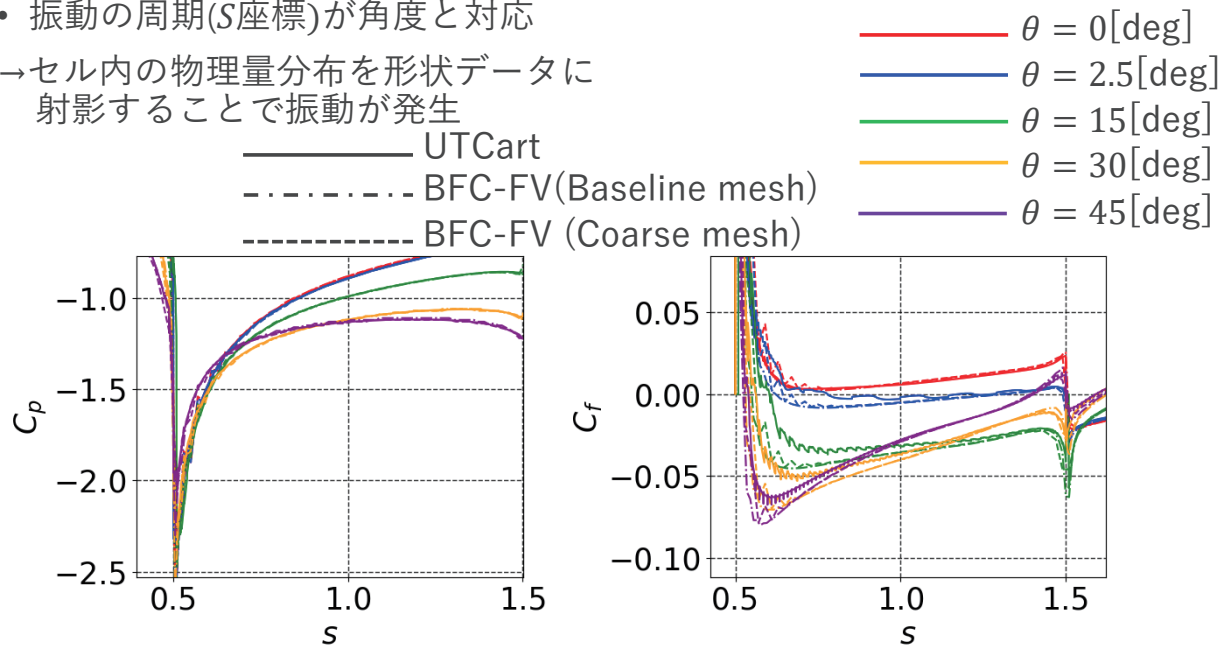
———— $\theta = 0$ [deg]
 ———— $\theta = 2.5$ [deg]
 ———— $\theta = 15$ [deg]
 ———— $\theta = 30$ [deg]
 ———— $\theta = 45$ [deg]



表面の C_p , C_f 分布の拡大図



- C_f 分布において細かな振動が顕著
 - 振動の周期(s 座標)が角度と対応
- セル内の物理量分布を形状データに射影することで振動が発生



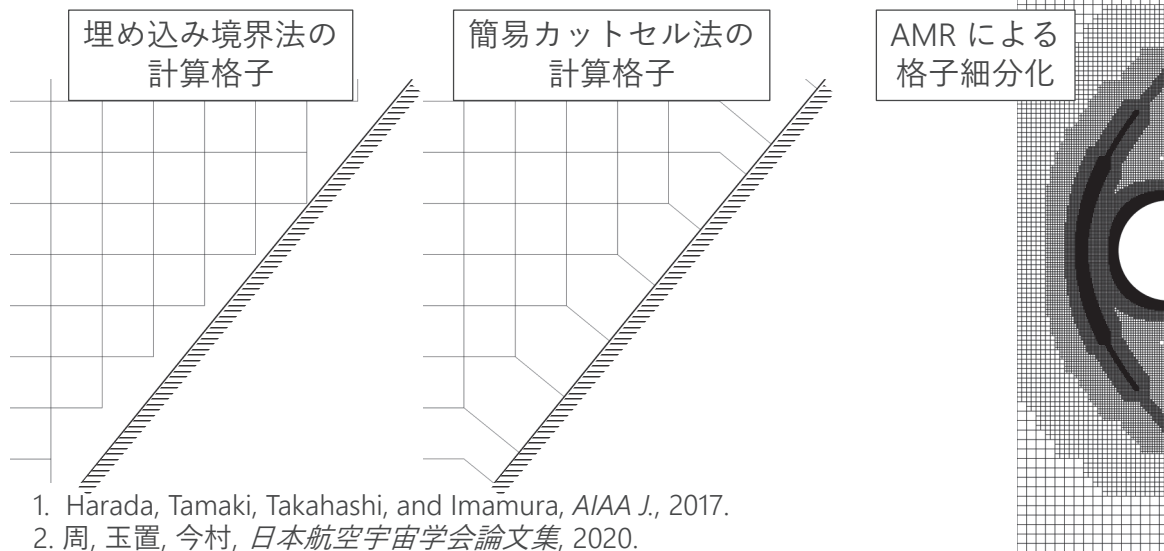
課題 3 等温壁円柱



課題3-3 円柱流れ

壁面での計算手法が温度・熱流束の予測に与える影響を調査

- 埋め込み境界法と簡易カットセル法¹で計算 → 保存則の影響を調査
- 解適合格子² (AMR) を利用



簡易カットセル法の可視化手法

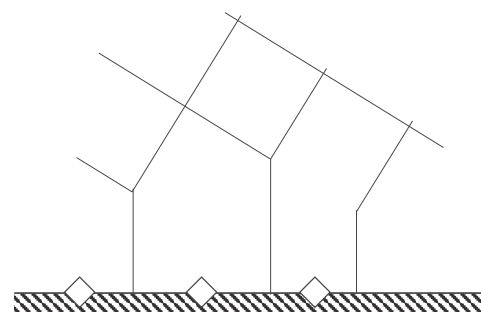
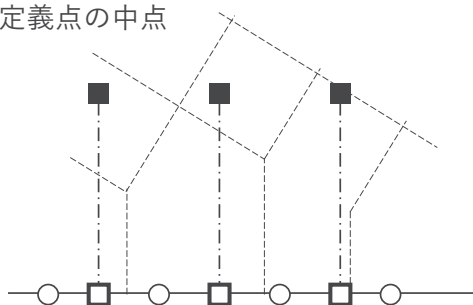


- 簡易カットセル法は二種類の熱流束の可視化手法を比較
- 埋め込み境界法は形状データ上で可視化

形状データ上で可視化

壁面境界での熱流束をプロット
(=流体計算に利用される熱流束)

- : 物体形状の定義点
- : 定義点の中点



計算条件



- 主流マッハ数：3
- 主流・壁面温度：215 [K]
- 円柱直径基準のレイノルズ数：1,000
- 円柱直径に対する壁面での格子幅：7.3E-03, 1.8E-03, 4.6E-05
 - 格子幅基準のレイノルズ数は $Re_{dx} \sim 1, 1/4, 1/16$

温度・x方向速度分布の比較

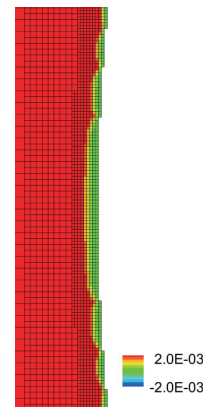
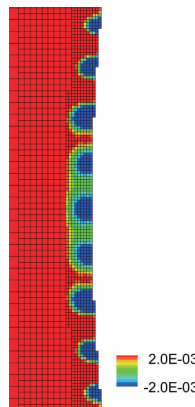
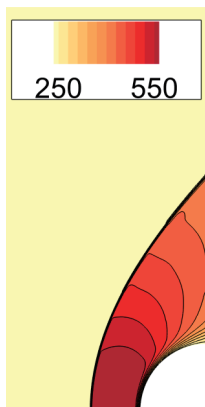
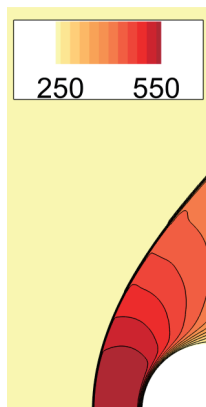


- 離脱衝撃波を再現
- 埋め込み境界法は壁面で流れに湧き出し／吸い込み

温度分布

よどみ点でのx方向速度分布

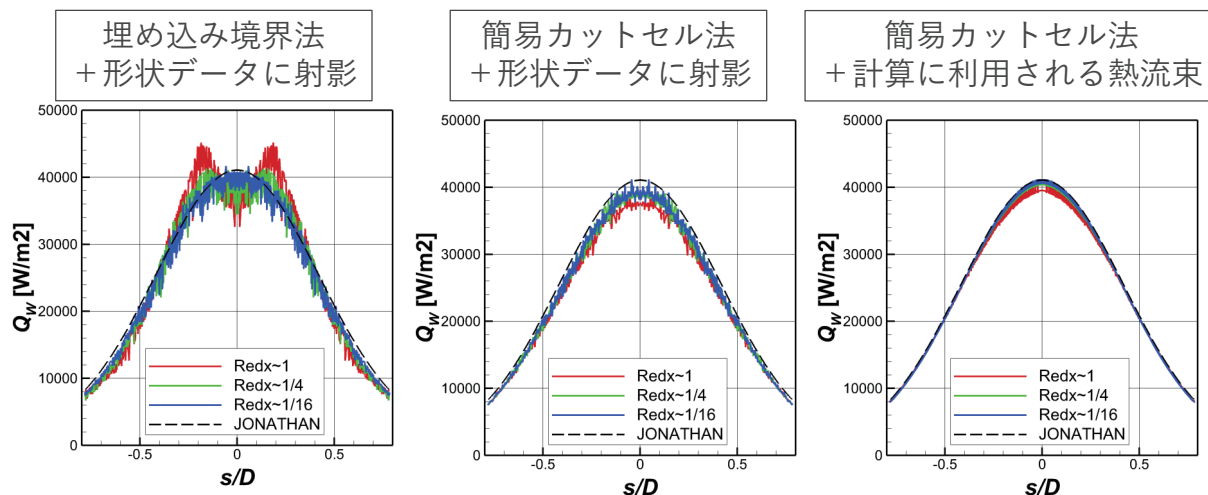
埋め込み境界法 簡易カットセル法 埋め込み境界法 簡易カットセル法





熱流束分布の比較

- 簡易カットセル法は埋め込み境界法よりも小さな振動
 - 壁面近傍で保存則を満足する／しないが結果に大きく影響
- “簡易カットセル法 + 計算に利用される熱流束”は参照解と良好な一致
 - 同じ計算結果でも可視化手法によっては細かな振動が発生



課題 4

複雑な問題に対する解析

くさびと円柱による衝撃波の干渉



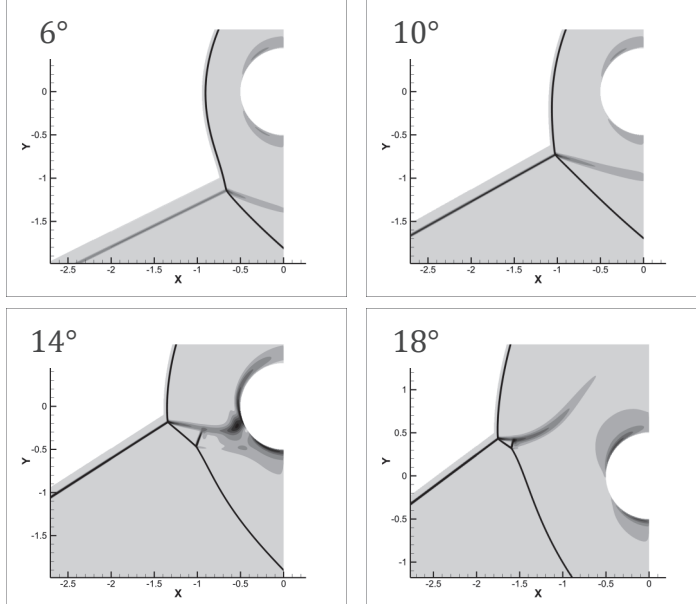
直交格子CFDにおいて衝撃波同士の干渉を捕える

- くさびの角度を変化させ、干渉形態を比較する

密度勾配



主流のマッハ数	3
円柱直径基準のレイノルズ数	1,000
主流の温度	298.15 [K]
壁面境界条件	滑り無し壁
くさびの角度	6, 10, 14, 18, 22 [deg]
最小格子幅	dx/D=0.005 (円柱) dx/D=0.01 (くさび)
セル数	2M程度



円柱-パラシュート流れ

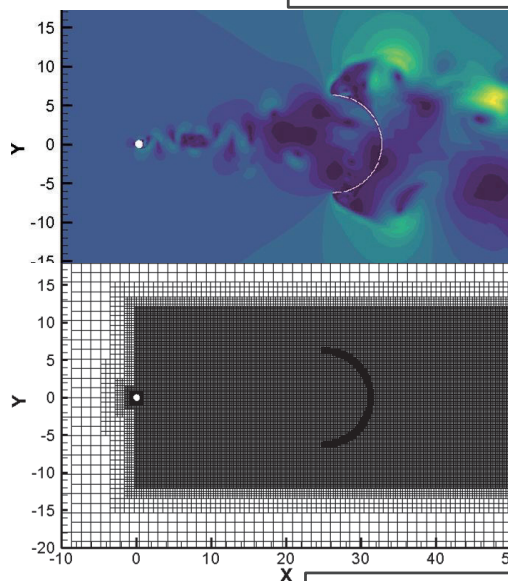


薄肉形状に対する直交格子CFDの計算能力の調査

- パラシュートは厚みなしの半円として定義

主流マッハ数	0.1
円柱直径基準のレイノルズ数	20000
パラシュート直径 (円柱直径=1)	12.5
最小格子幅 (円柱直径=1)	0.01 (円柱) 0.1 (パラシュート)
セル数	77,000
計算ステップ数	400,000

マッハ数分布



計算格子の配置





複数円柱ながれ

複数の円柱に対する流れの計算を実行

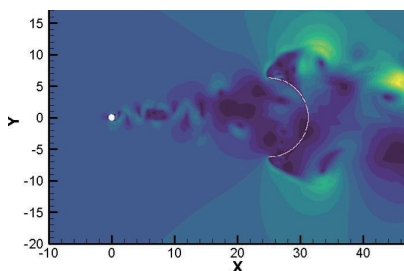
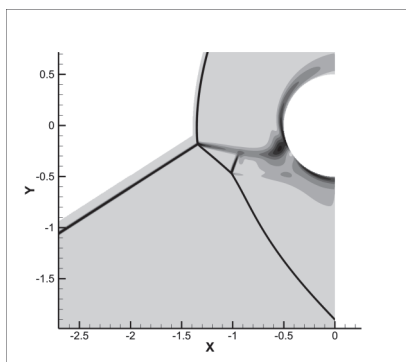
主流のマッハ数	0.2
レイノルズ数	1,000
主流の温度	293.15 [K]
円柱の数	10
最小格子幅	$dx/D=0.05$
時間刻み幅	0.025
セル数	257,920



複雑な問題に対する解析



- 完全自動の格子生成・流体解析が可能
 - 手動・自動での柔軟な格子細分化が可能
- 複雑な問題設定でも解析しやすい手法



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)

- 二種類の可視化手法を比較
- 形状データに射影する可視化方法では細かな振動が発生
- 階段状のセル境界での可視化では滑らかな分布

課題 3 (円柱)

- 埋め込み境界法では参照解と定性的に異なる熱流束予測
- カットセルの熱流束予測は参照解と良好な一致 → 保存則が重要

課題 4 (複雑な問題に対する解析)

- 直交格子CFDの複雑な問題設定に対応しやすいという利点を確認



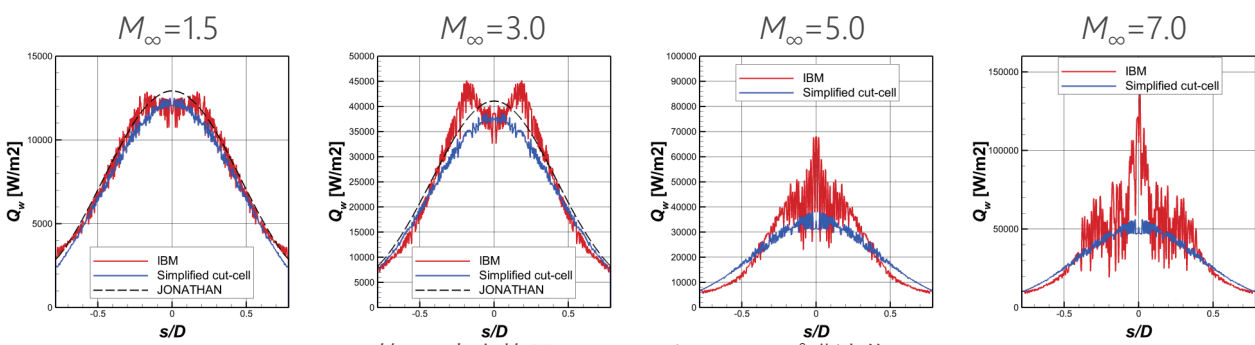
Appendix A 円柱 (超音速)



マッハ数を変更した計算

- 円柱の直径基準のレイノルズ数は 1,000
- 最小格子幅基準のレイノルズ数は $Re_{dx} \sim 1$
- 埋め込み境界法 (IBM) と簡易カットセル法 (simplified cut-cell) で計算
- 形状データを利用した可視化
- マッハ数の増加に伴い埋め込み境界法の結果には大きな振動が発生

— 埋め込み境界法 — 簡易カットセル法 - - - 参照解*

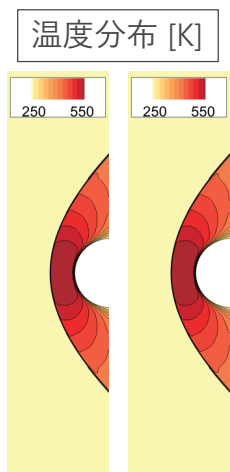
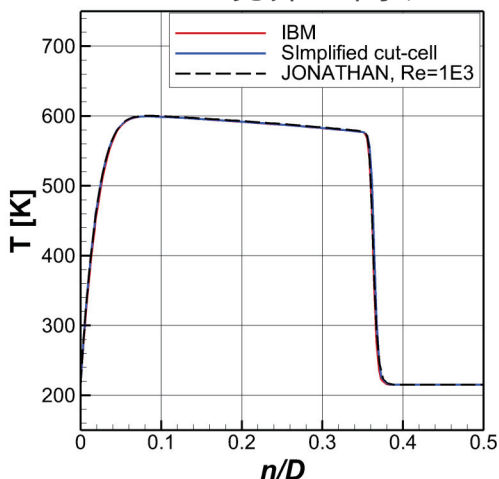


* 第1回直交格子CFDワークショップ講演集, JAXA-SP-20-006.

衝撃波の位置



- 主流マッハ数 $M_\infty = 3.0$, 円柱の直径基準のレイノルズ数 = 1000
- 格子幅基準のレイノルズ数 ~ 1
- AMRを用いた離脱衝撃波周りの格子細分化
- 埋め込み境界・簡易カットセル法のどちらも参照解と一致



左：埋め込み境界法
右：簡易カットセル法



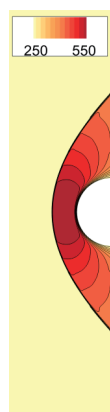
簡易カットセル法の計算結果

- 主流マッハ数 $M_\infty=3.0$, 円柱の直径基準のレイノルズ数=1000
- 格子幅基準のレイノルズ数~1
- AMRを用いた離脱衝撃波周りの格子細分化
- 形状データを用いた熱流束評価には比較的大きな振動

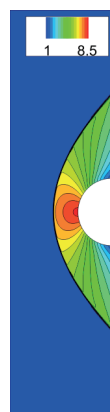
計算格子



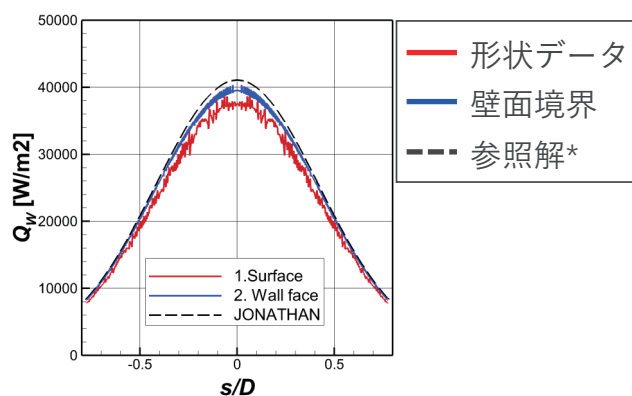
温度分布 [K]



圧力分布



物体表面の熱流束分布



* 第1回直交格子CFDワークショップ講演集,JAXA-SP-20-006.

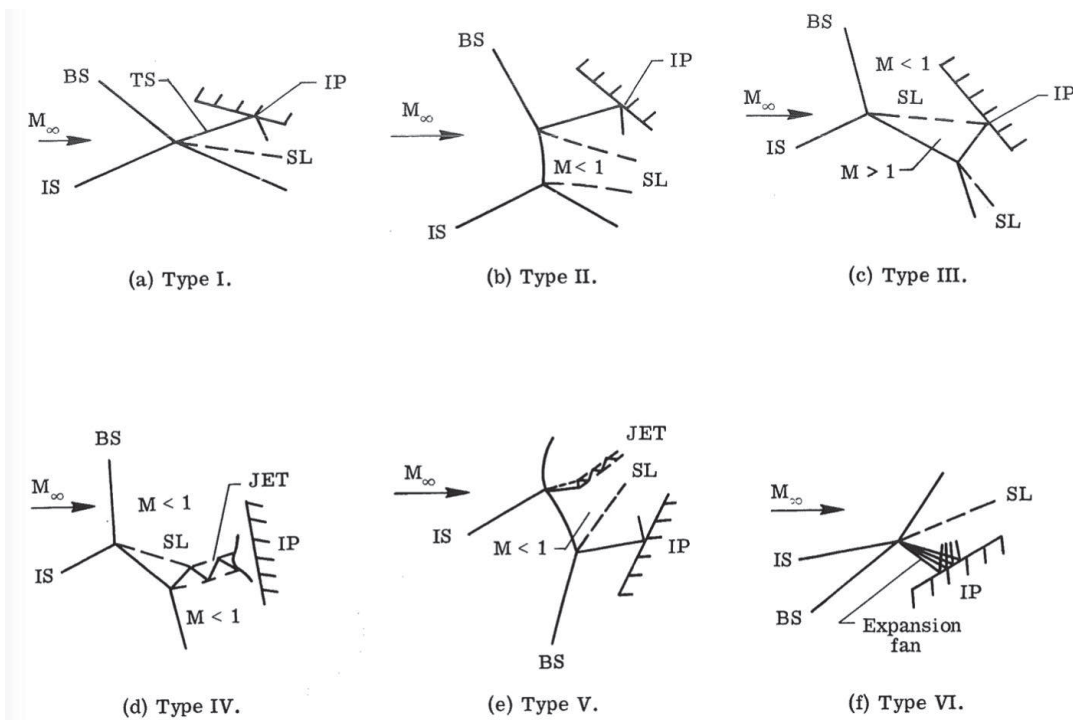


Appendix B

円柱-くさび流れ

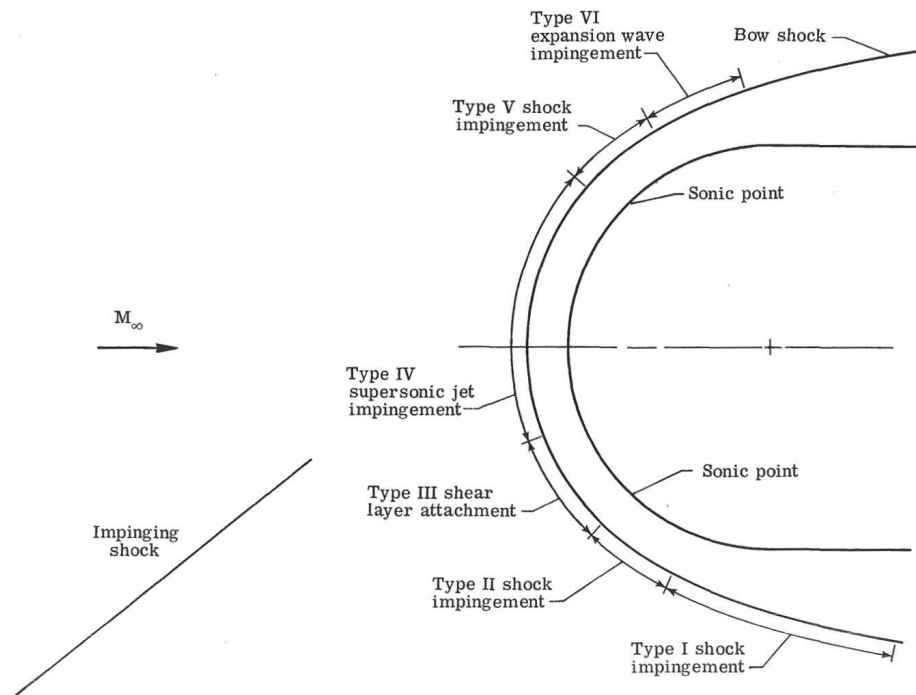


衝撃波干渉形態の分類



Keyes, J. W., Hains, F. D., "Analytical and Experimental Studies of Shock Interference Heating in Hypersonic Flows," NASA TN D-7139, 1973.

干渉位置におけるTypeの違い

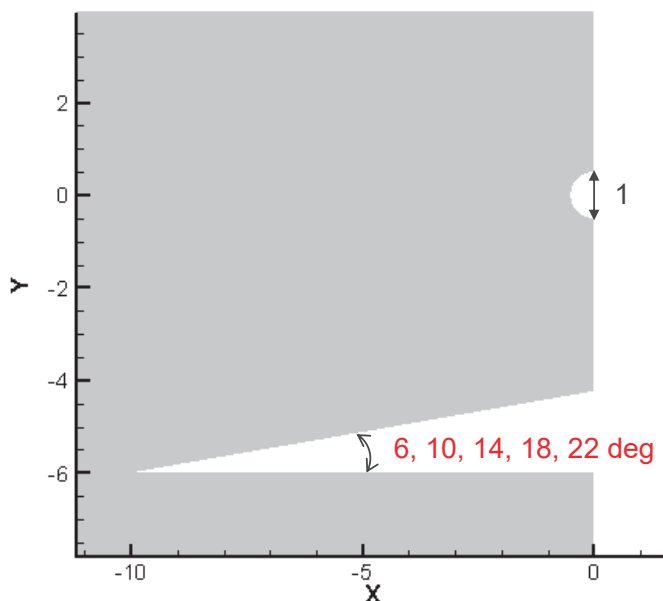


Keyes, J. W., Hains, F. D., "Analytical and Experimental Studies of Shock Interference Heating in Hypersonic Flows," NASA TN D-7139, 1973.

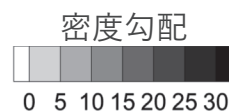
数値解析手法・計算条件



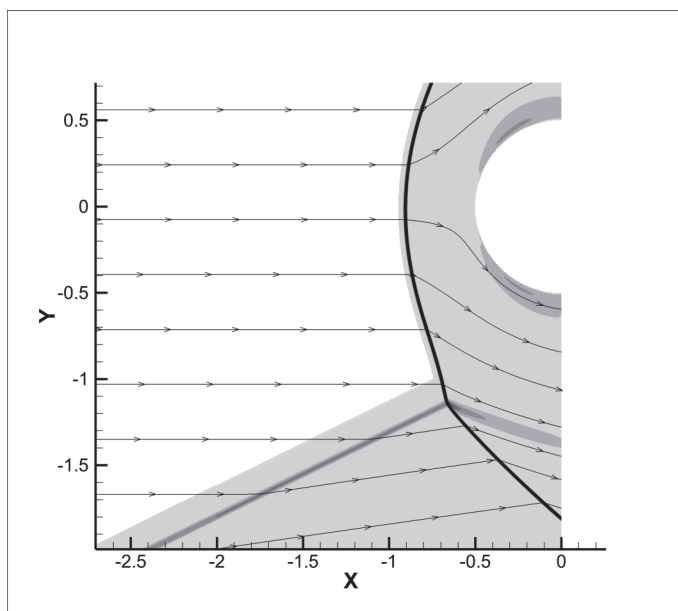
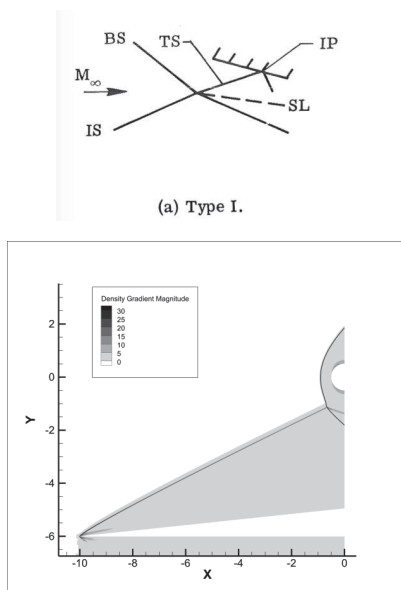
- Governing equation
二次元Navier-Stokes
- Wall boundary condition
非滑り壁
- Inviscid flux
SLAU + 3rd-order MUSCL
- Time integration
LU-SGS陰解法 (局所時間刻み)
- Cfl condition
courant number = 5
- Flow condition
 $Re = 1 \times 10^3$, $Ma = 3$, $T_\infty = 298.15$ [K]
- Minimum cell size dx
0.01(Wedge), 0.005(Cylinder)



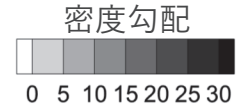
計算結果(くさび角度: 6°)



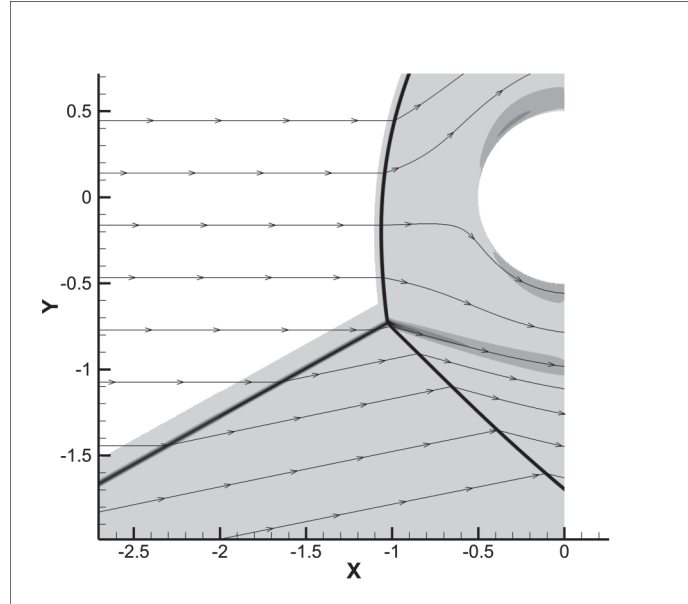
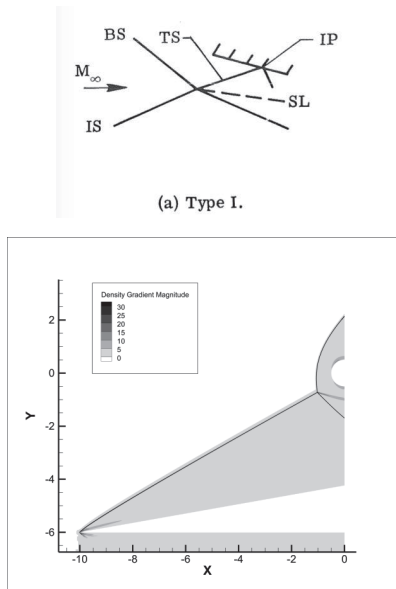
- Type Iと似ているが、円柱表面に衝撃波が当たっていない



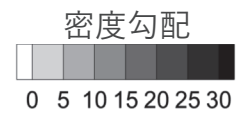
計算結果(くさび角度: 10°)



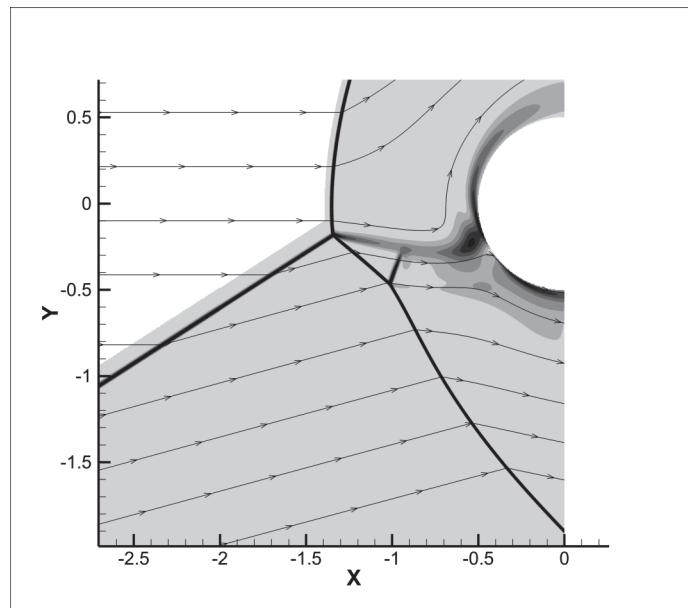
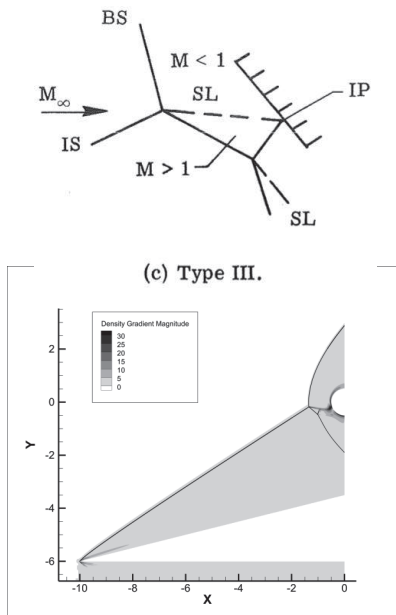
- Type Iと似ているが、円柱表面に衝撃波が当たっていない



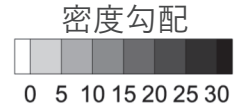
計算結果(くさび角度: 14°)



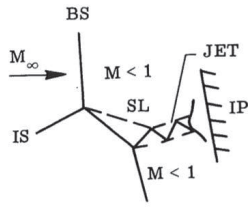
- Type IIIと似ているが、うまく解像できていない



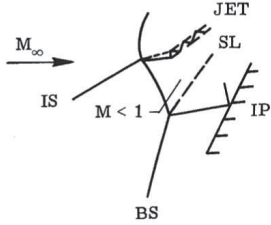
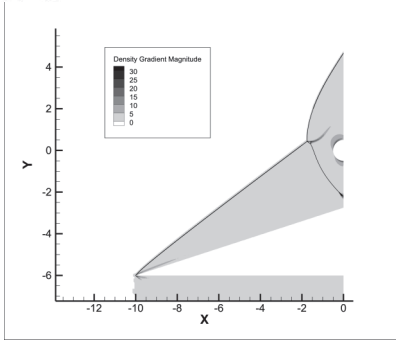
計算結果(くさび角度: 18°)



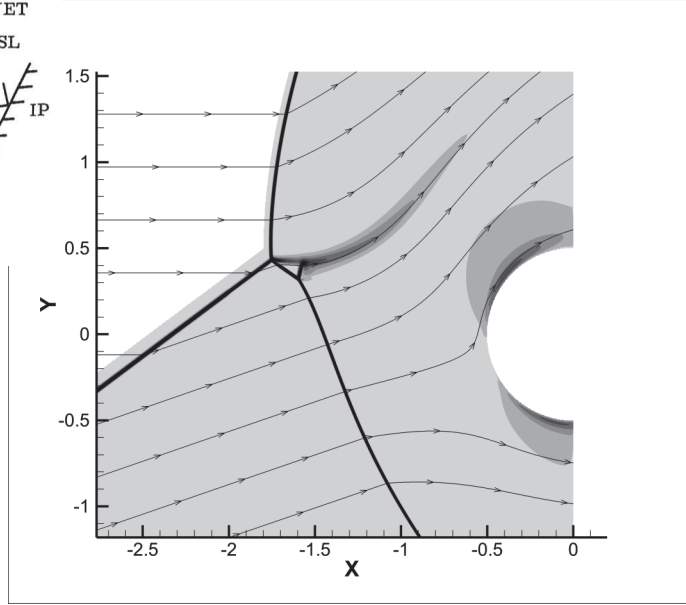
- Type IVもしくはType Vのように見える



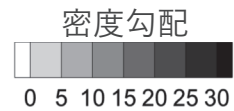
(d) Type IV.



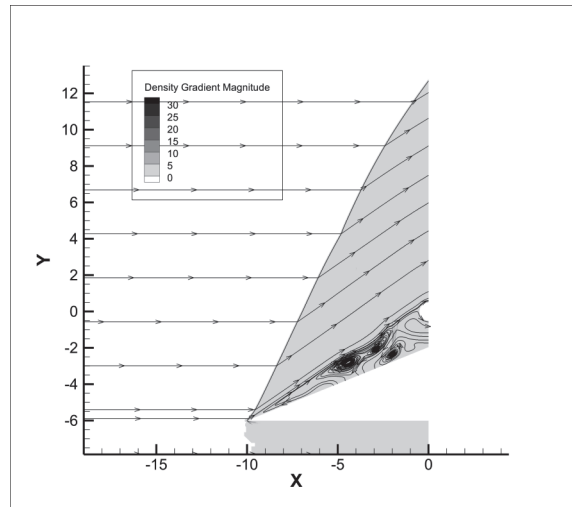
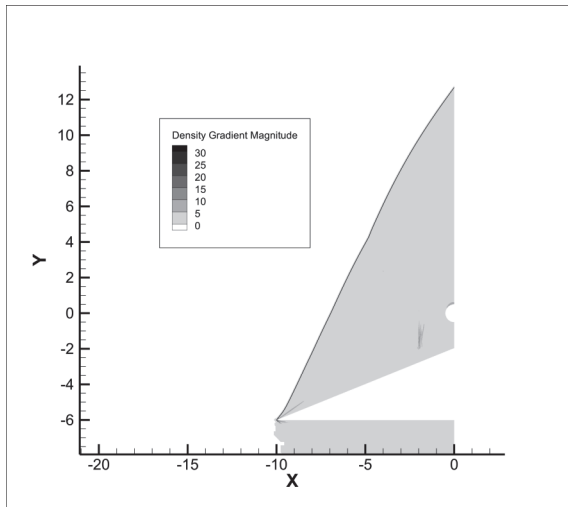
(e) Type V.



計算結果(くさび角度: 22°)



- 斜め衝撃波の角度が大きく、衝撃波干渉は見られなかった





斜め衝撃波の角度について

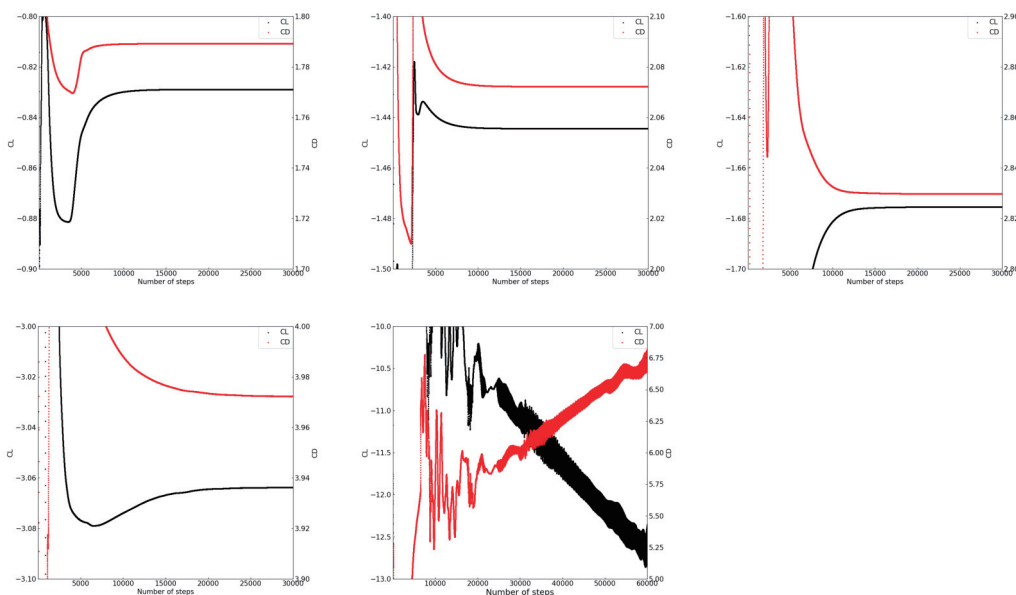
- 轉向角(くさびの角度)とマッハ数から斜め衝撃波の理論角度を求めた
- 数値解析結果の斜め衝撃波上, 5点から角度を求めた
- くさびの角度が 6, 10, 14, 18°の場合は近い値となった
- くさびの角度が 22°の場合は大きな差異が生じた

くさび角度 [deg]	6	10	14	18	22
CFD(くさび+円柱) [deg]	27.6	30.5	33.9	37.9	63.4
理論値(弱い衝撃波) [deg]	23.9	27.4	31.2	35.5	40.2
理論値(強い衝撃波) [deg]	87.9	86.4	84.8	83.1	81.1



数値解析結果の収束について

- 6, 10, 14, 18°では収束したが, 22°では収束しなかった





Appendix C

円柱-パラシュート流れ

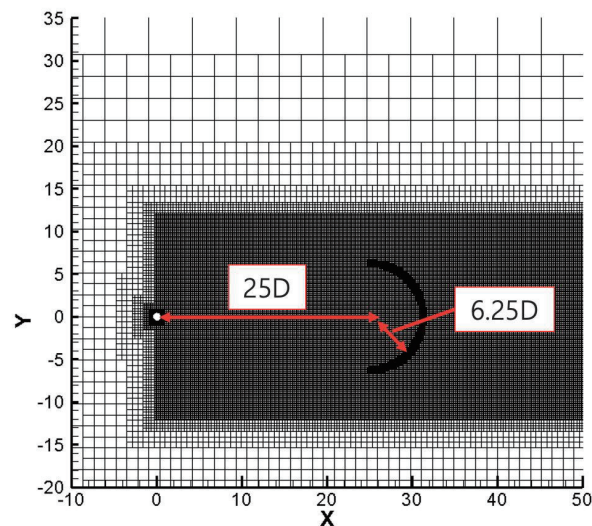


入力形状と計算格子



- 円柱直径 $D = 1$ とした際のパラシュートの形状と配置
- 円柱の最小格子幅: $dx/D = 0.01$

パラシュートの最小格子幅: $dx/D = 0.1$



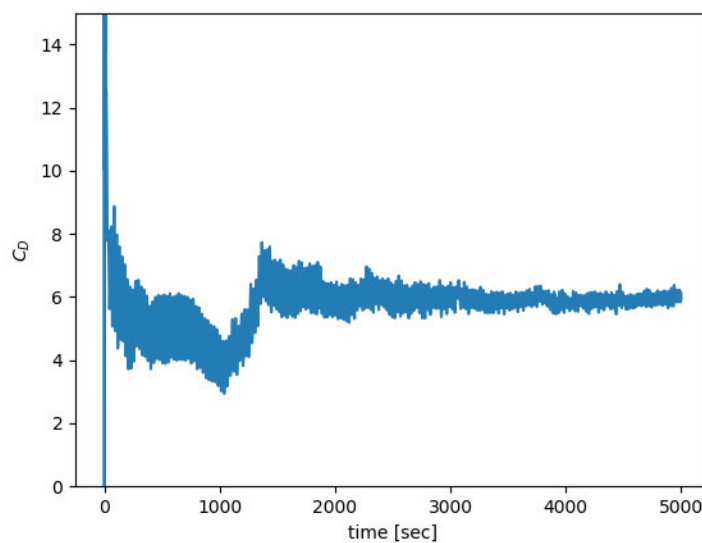


Appendix D

複数円柱流れ



収束履歴



計算格子

