



第4回 直交格子 CFD ワークショップ 解析課題について

(課題 1) 二次元円柱に対する解析

第55回流体力学講演会／第41回航空宇宙
数値シミュレーション技術シンポジウム

2023年7月14日,
国立オリンピック記念青少年総合センター, 渋谷区

直交格子 CFD ワークショップ実行委員会

直交格子 CFD ワークショップの解析課題

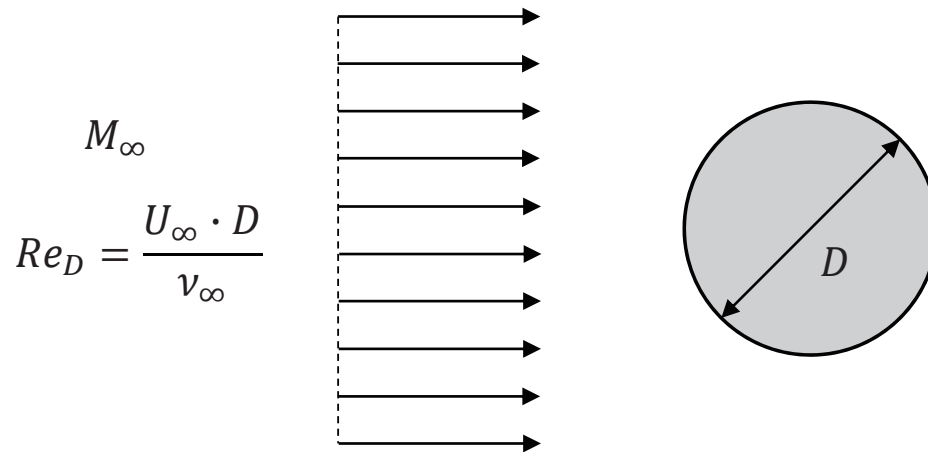


- 直交格子 CFD ワークショップ(CFD-WS)の参加者は以下の課題について解析を実施し、解析結果を提出する
 - 課題 1 : 二次元円柱に対する解析
 - 課題 2 : 二次元角柱に対する解析
 - 課題 3 : 単純形状に対する壁面摩擦・熱流束の評価
 - 課題 4 : 複雑形状・配置に対する解析
- 第2回 直交格子 CFD-WS では課題 1 と 2 を主要な解析課題とし、課題 3 は希望者のみが解析を実施する
- 課題 4 については次回以降の WS で実施される予定である

課題 1：二次元円柱に対する解析



- 目的：単純な二次元形状に対して、物体周りの流れ場、および、物体に働く流体力を正確に計算できることを示す
- 解析対象：一様流中に置かれた直径 D の二次元円柱



2

課題 1：二次元円柱に対する解析



- 解析条件：下記の条件を必須とし、それ以外は任意とする

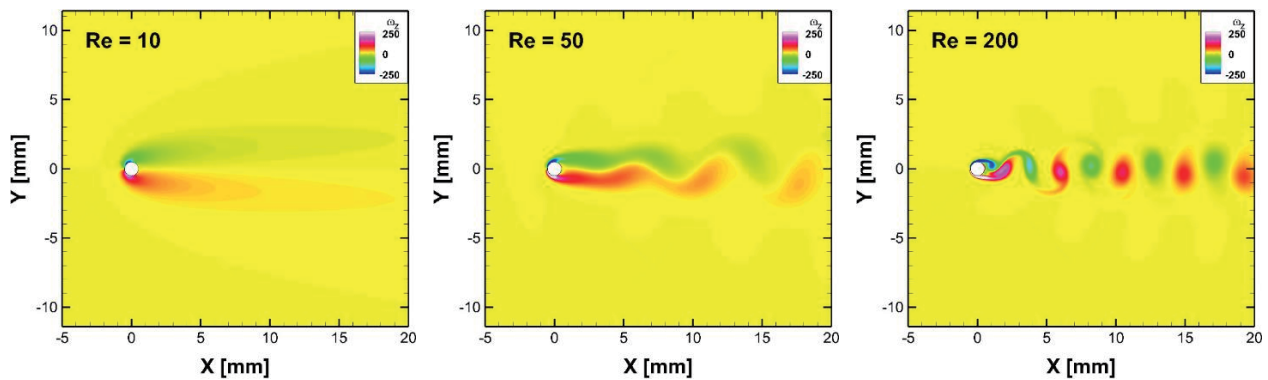
| M_∞ | Re_D | 備考 |
|----------------------------------|--------|------|
| 非圧縮流条件 ($M_\infty = 0.1$ 程度) | 10 | 定常流 |
| | 20 | |
| | 40 | |
| | 50 | 遷移点 |
| | 100 | 非定常流 |
| | 150 | |
| | 200 | |

3

課題 1 : 二次元円柱に対する解析



- 境界適合格子 + 有限体積法による解析例 (ω_Z の瞬時場)



4

課題 1 : 二次元円柱に対する解析



- 提出データ(必須) : 各 Re_D 条件について以下を提出する
 - C_D, C_L (時間平均), C'_D, C'_L (変動 RMS)
 - ストローハル数 St
 - 瞬時の渦度分布 ω_Z , 時間平均速度分布 (流線)
- 提出データ(任意) : 以下については提出を任意とする
 - 円柱表面の C_p, C_f 分布
 - $C_{Dp}, C_{Df}, C_{Lp}, C_{Lf}, C_{ps}, C_{pb}$
 - 循環域長さ L_r , 剥離位置 θ_s

5

課題 1 : 二次元円柱に対する解析



- 参考文献

[1] Qu et al., Quantitative numerical analysis of flow past a circular cylinder at Reynolds number between 50 and 200, *Journal of Fluids and Structures* 39, pp.347–370 (2013).

[2] Nakabayashi et al., Numerical Analysis for Viscous Shear Flows past a Circular Cylinder at Intermediate Reynolds Numbers, *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering* 36(1), pp.34–41 (1993).

[3] Das et al., Immersed boundary method (IBM) based direct numerical simulation of open-cell solid foams: Hydrodynamics, *AIChE Journal* 63(3), pp.1152–1173 (2017).



第4回 直交格子 CFD ワークショップ 解析課題について

(課題 2) 二次元角柱に対する解析

第55回流体力学講演会／第41回航空宇宙
数値シミュレーション技術シンポジウム

2023年7月14日,
国立オリンピック記念青少年総合センター, 渋谷区

直交格子 CFD ワークショップ実行委員会

直交格子 CFD ワークショップの解析課題

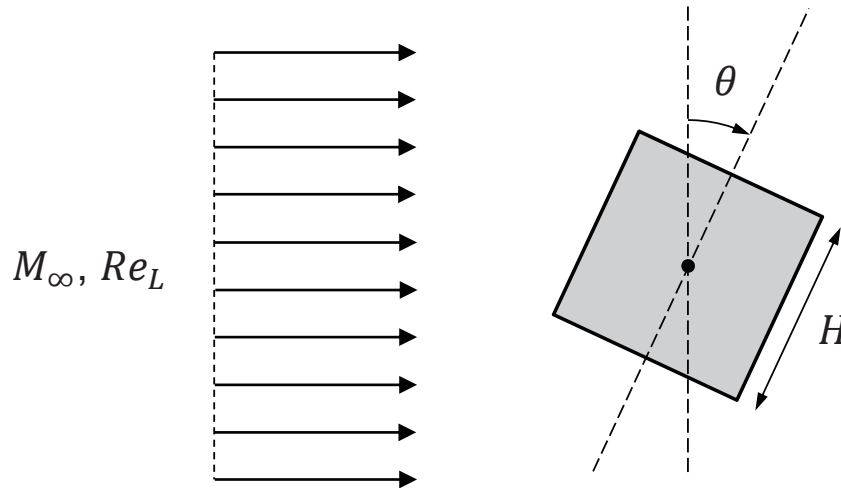


- 直交格子 CFD ワークショップ(CFD-WS)の参加者は以下の課題について解析を実施し、解析結果を提出する
 - 課題 1 : 二次元円柱に対する解析
 - 課題 2 : 二次元角柱に対する解析
 - 課題 3 : 単純形状に対する壁面摩擦・熱流束の評価
 - 課題 4 : 複雑形状・配置に対する解析
- 第 2 回 直交格子 CFD-WS では課題 1 と 2 を主要な解析課題とし、課題 3 は希望者のみが解析を実施する
- 課題 4 については次回以降の WS で実施される予定である

課題 2 : 二次元角柱に対する解析



- 目的 : 単純な二次元形状に対して, 物体周りの流れ場, および, 物体に働く流体力を正確に計算できることを示す
- 解析対象 : 一様流中に置かれた高さ H の二次元角柱



2

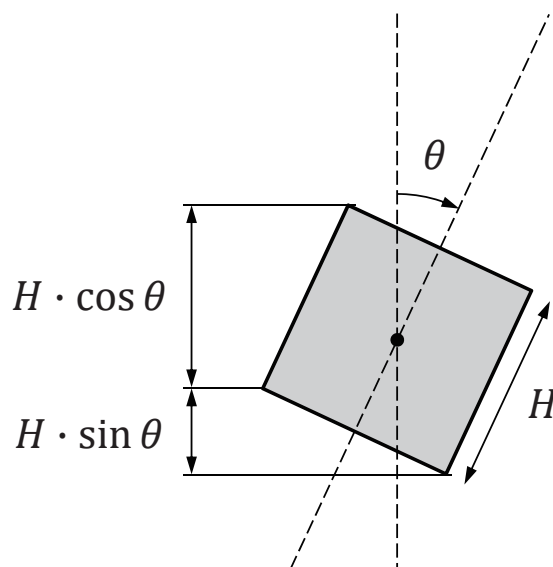
課題 2 : 二次元角柱に対する解析



- レイノルズ数 Re_L の定義 :

$$Re_L = \frac{U_\infty \cdot L_{\text{ref}}}{\nu_\infty}$$

$$= \frac{U_\infty \cdot H(\sin \theta + \cos \theta)}{\nu_\infty}$$



3

課題 2 : 二次元角柱に対する解析



- 解析条件 : 下記の条件を必須とし, それ以外は任意とする

| M_∞ | Re_L | $\theta, ^\circ$ | 流れパターン |
|----------------------------------|--------|------------------|--------|
| 非圧縮流条件 ($M_\infty = 0.1$ 程度) | 30 | 0 | S |
| | 60 | | MS |
| | 100 | | MS |
| | 150 | | DSV |
| | 60 | 2.5 | MS |
| | 100 | | SSV |
| | 150 | | DSV |
| | 60 | 15 | MS |
| | 100 | | MS |
| | 150 | | VM |

4

課題 2 : 二次元角柱に対する解析



- 解析条件 : 下記の条件を必須とし, それ以外は任意とする

| M_∞ | Re_L | $\theta, ^\circ$ | 流れパターン |
|----------------------------------|--------|------------------|--------|
| 非圧縮流条件 ($M_\infty = 0.1$ 程度) | 60 | 30 | MS |
| | 100 | | VM |
| | 150 | | VM |
| | 60 | 45 | MS |
| | 100 | | VM |
| | 150 | | VM |

5

課題 2 : 二次元角柱に対する解析



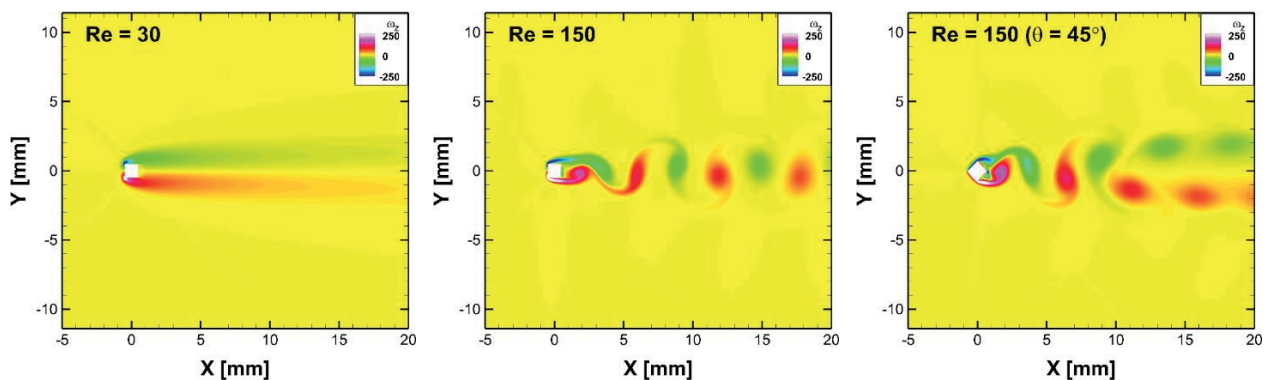
- 流れパターンの分類 [1]:
 - S = steady
 - MS = main separation
 - VM = vortex merging
 - SSV = single secondary vortex
 - DSVs = dual secondary vortices

6

課題 2 : 二次元角柱に対する解析



- 境界適合格子 + 有限体積法による解析例 (ω_z の瞬時場)



7

課題 2 : 二次元角柱に対する解析



- 提出データ(必須) : 各 Re_L, θ 条件について以下を提出する
 - C_D, C_L (時間平均), C'_D, C'_L (変動 RMS)
 - ストローハル数 St
 - 瞬時の渦度分布 ω_z , 時間平均速度分布 (流線)
- 提出データ(任意) : 以下については提出を任意とする
 - 流れパターンの分類 (S / MS / VM / SSV / DSV)
 - 円柱表面の C_p, C_f 分布
 - $C_{Dp}, C_{Df}, C_{Lp}, C_{Lf}, C_{ps}, C_{pb}$
 - 循環域長さ L_r

8

課題 2 : 二次元角柱に対する解析



• 参考文献

[1] Yoon et al., Flow past a square cylinder with an angle of incidence, *Physics of Fluids* 22, 043603 (2010).

[2] Sohankar et al., Low-Reynolds-number flow around a square cylinder at incidence: study of blockage, onset of vortex shedding and outlet boundary condition, *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 26, pp.39–56 (1998).

9



第4回 直交格子 CFD ワークショップ 解析課題について

(課題 3) 単純形状に対する壁面摩擦・熱流束の評価

第55回流体力学講演会／第41回航空宇宙
数値シミュレーション技術シンポジウム

2023年7月14日,
国立オリンピック記念青少年総合センター, 渋谷区

直交格子 CFD ワークショップ実行委員会

直交格子 CFD ワークショップの解析課題

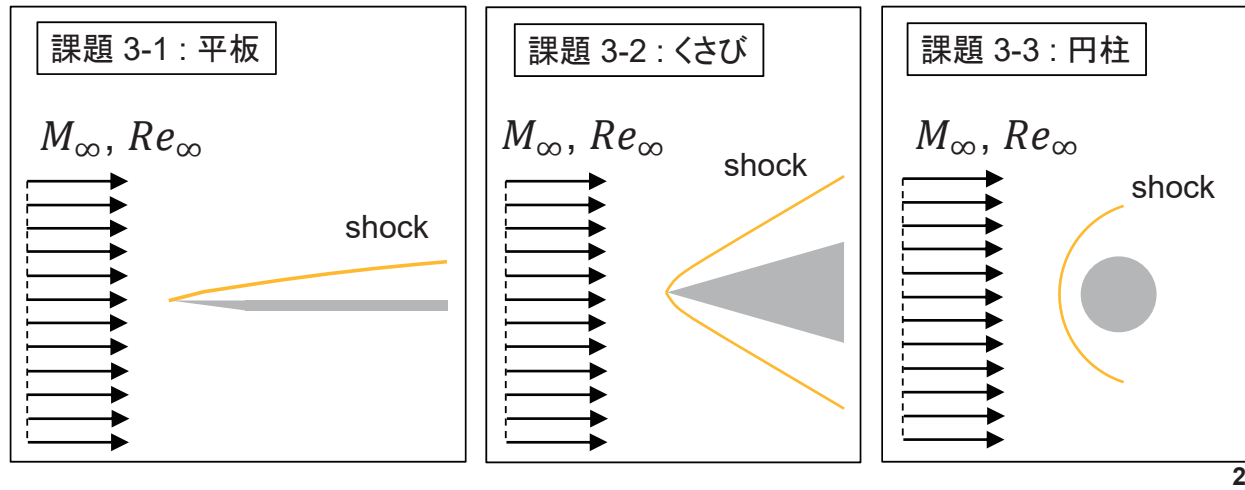


- 直交格子 CFD ワークショップ(CFD-WS)の参加者は以下の課題について解析を実施し, 解析結果を提出する
 - 課題 1: 二次元円柱に対する解析
 - 課題 2: 二次元角柱に対する解析
 - 課題 3: 単純形状に対する壁面摩擦・熱流束の評価
 - 課題 4: 複雑形状・配置に対する解析
- 第2回 直交格子 CFD-WS では課題 1 と 2 を主要な解析課題とし, 課題 3 は希望者のみが解析を実施する
- 課題 4 については次回以降の WS で実施される予定である

課題 3 : 単純形状に対する壁面摩擦・熱流束の評価



- 目的 : 単純な二次元形状に対して, 物体周りの流れ場・衝撃波形状, および, 壁面における局所摩擦・熱流束を正確に計算できることを示す
- 解析対象 : 一様流中に置かれた平板・くさび・円柱



課題 3-1 : 平板に対する壁面摩擦・熱流束の評価



- レイノルズ数の設定 :

$$Re_{\infty} = Re_{\infty, x} = \frac{\rho_{\infty} \cdot U_{\infty} \cdot x_{\text{ref}}}{\mu_{\infty}}$$

課題 3-2 : くさびに対する壁面摩擦・熱流束の評価



- レイノルズ数の設定 :

$$Re_{\infty} = Re_{\infty,s} = \frac{\rho_{\infty} \cdot U_{\infty} \cdot s_{\text{ref}}}{\mu_{\infty}}$$

4

課題 3-3 : 円柱に対する壁面摩擦・熱流束の評価



- レイノルズ数の設定 :

$$Re_{\infty} = Re_{\infty,D} = \frac{\rho_{\infty} \cdot U_{\infty} \cdot D}{\mu_{\infty}}$$

5

課題 3：単純形状に対する壁面摩擦・熱流束の評価



- 解析条件：下記の条件を必須とし、それ以外は任意とする

| M_∞ | Re_∞ | T_w, K |
|------------|-------------|-----------|
| 0.3 | 10^3 | 断熱壁 / 等温壁 |
| | 10^4 | 断熱壁 / 等温壁 |
| | 10^5 | 断熱壁 / 等温壁 |
| 1.5 | 10^3 | 断熱壁 / 等温壁 |
| | 10^4 | 断熱壁 / 等温壁 |
| | 10^5 | 断熱壁 / 等温壁 |
| 3 | 10^3 | 断熱壁 / 等温壁 |
| | 10^4 | 断熱壁 / 等温壁 |
| | 10^5 | 断熱壁 / 等温壁 |

6

課題 3：単純形状に対する壁面摩擦・熱流束の評価



- 解析条件：下記の条件を必須とし、それ以外は任意とする

| M_∞ | Re_∞ | T_w, K |
|------------|-------------|-----------|
| 5 | 10^3 | 断熱壁 / 等温壁 |
| | 10^4 | 断熱壁 / 等温壁 |
| | 10^5 | 断熱壁 / 等温壁 |
| 7 | 10^3 | 断熱壁 / 等温壁 |
| | 10^4 | 断熱壁 / 等温壁 |
| | 10^5 | 断熱壁 / 等温壁 |

7

課題 3 : 単純形状に対する壁面摩擦・熱流束の評価

- 提出データ(必須) : 各 M_∞ , Re_∞ 条件について以下を提出する
 - 壁面に沿った圧力分布, および, 局所摩擦係数 c_f の分布
 - 壁面に沿った熱流束の分布
- 提出データ(任意) : 以下については提出を任意とする
 - 境界層の速度・温度プロファイル
 - 斜め衝撃波の角度(くさび), 衝撃波離脱距離(円柱)

8

課題 3 : 単純形状に対する壁面摩擦・熱流束の評価

- 参考文献

[1] John D. Anderson Jr., Hypersonic and High-Temperature Gas Dynamics, Third Edition, Chapter 6, 2019.

9

課題 3-1 : 平板に対する解析



- 平板に対する解析条件の一例 :

| M_∞ | $Re_{\infty,x}$ | $U_\infty, \text{m/s}$ | T_∞, K | P_∞, Pa | $x_{\text{ref}}, \text{mm}$ |
|------------|-----------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 0.3 | 10^3 | 329.63 | 3000 | 2012.8 | 100 |
| | 10^4 | | | 20128 | 100 |
| | 10^5 | | | 201280 | 100 |
| 1.5 | 10^3 | 790.41 | 690.0 | 82.750 | 100 |
| | 10^4 | | | 827.50 | 100 |
| | 10^5 | | | 8275.0 | 100 |
| 3 | 10^3 | 1393.3 | 536.0 | 30.919 | 100 |
| | 10^4 | | | 309.19 | 100 |
| | 10^5 | | | 3091.9 | 100 |

10

課題 3-1 : 平板に対する解析



- 平板に対する解析条件の一例 :

| M_∞ | $Re_{\infty,x}$ | $U_\infty, \text{m/s}$ | T_∞, K | P_∞, Pa | $x_{\text{ref}}, \text{mm}$ |
|------------|-----------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 5 | 10^3 | 1830.4 | 333.0 | 10.439 | 100 |
| | 10^4 | | | 104.39 | 100 |
| | 10^5 | | | 1043.9 | 100 |
| 7 | 10^3 | 1910.0 | 185.0 | 3.4542 | 100 |
| | 10^4 | | | 34.542 | 100 |
| | 10^5 | | | 345.42 | 100 |

11

課題 3-2 : くさびに対する解析



• くさびに対する解析条件の一例 :

| M_∞ | $Re_{\infty,s}$ | $U_\infty, \text{m/s}$ | T_∞, K | P_∞, Pa | $s_{\text{ref}}, \text{mm}$ |
|------------|-----------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 0.3 | 10^3 | 329.63 | 3000 | 2012.8 | 100 |
| | 10^4 | | | 20128 | 100 |
| | 10^5 | | | 201280 | 100 |
| 1.5 | 10^3 | 790.41 | 690.0 | 82.750 | 100 |
| | 10^4 | | | 827.50 | 100 |
| | 10^5 | | | 8275.0 | 100 |
| 3 | 10^3 | 1393.3 | 536.0 | 30.919 | 100 |
| | 10^4 | | | 309.19 | 100 |
| | 10^5 | | | 3091.9 | 100 |

12

課題 3-2 : くさびに対する解析



• くさびに対する解析条件の一例 :

| M_∞ | $Re_{\infty,s}$ | $U_\infty, \text{m/s}$ | T_∞, K | P_∞, Pa | $s_{\text{ref}}, \text{mm}$ |
|------------|-----------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 5 | 10^3 | 1830.4 | 333.0 | 10.439 | 100 |
| | 10^4 | | | 104.39 | 100 |
| | 10^5 | | | 1043.9 | 100 |
| 7 | 10^3 | 1910.0 | 185.0 | 3.4542 | 100 |
| | 10^4 | | | 34.542 | 100 |
| | 10^5 | | | 345.42 | 100 |

13

課題 3-3 : 円柱に対する解析



- 円柱に対する解析条件の一例 :

| M_∞ | Re_D | $U_\infty, \text{m/s}$ | T_∞, K | P_∞, Pa | D, mm |
|------------|--------|------------------------|----------------------|-----------------------|----------------|
| 1.5 | 10^3 | 529.80 | 310 | 318.04 | 10 |
| | 10^4 | | | 3180.4 | 10 |
| | 10^5 | | | 31804 | 10 |
| | 10^5 | | | 3180.4 | 100 |
| 3 | 10^3 | 882.42 | 215 | 98.822 | 10 |
| | 10^4 | | | 988.22 | 10 |
| | 10^5 | | | 9882.2 | 10 |
| | 10^5 | | | 988.22 | 100 |

14

課題 3-3 : 円柱に対する解析



- 円柱に対する解析条件の一例 :

| M_∞ | Re_D | $U_\infty, \text{m/s}$ | T_∞, K | P_∞, Pa | D, mm |
|------------|--------|------------------------|----------------------|-----------------------|----------------|
| 5 | 10^3 | 1003.0 | 100 | 19.838 | 10 |
| | 10^4 | | | 198.38 | 10 |
| | 10^5 | | | 1983.8 | 10 |
| | 10^5 | | | 198.38 | 100 |
| 7 | 10^3 | 1087.7 | 60.0 | 6.2986 | 10 |
| | 10^4 | | | 62.986 | 10 |
| | 10^5 | | | 629.86 | 10 |
| | 10^5 | | | 62.986 | 100 |

15



第4回 直交格子 CFD ワークショップ 解析課題について (課題 4) 複雑形状・配置に対する解析

第55回流体力学講演会／第41回航空宇宙
数値シミュレーション技術シンポジウム
2023年7月14日,
国立オリンピック記念青少年総合センター, 渋谷区
直交格子 CFD ワークショップ実行委員会

直交格子 CFD ワークショップの解析課題

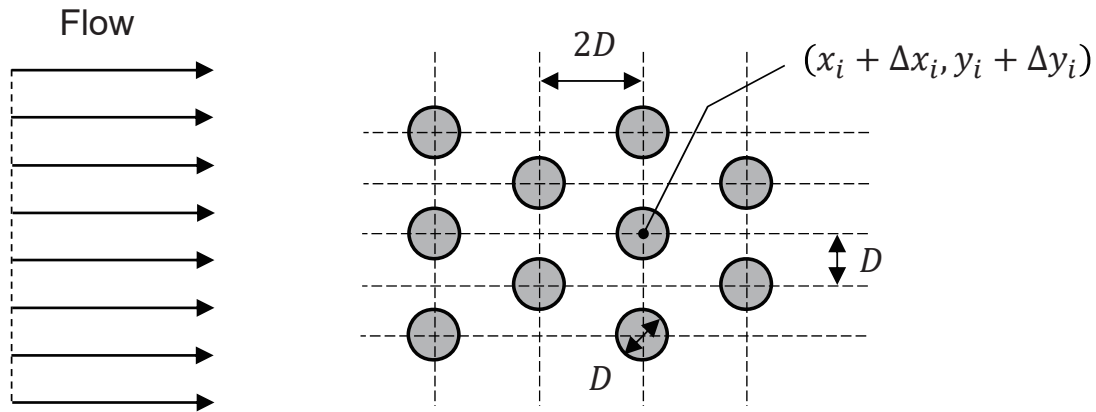


- 直交格子 CFD ワークショップ(CFD-WS)の参加者は以下の課題について解析を実施し, 解析結果を提出する
 - 課題 1: 二次元円柱に対する解析
 - 課題 2: 二次元角柱に対する解析
 - 課題 3: 単純形状に対する壁面摩擦・熱流束の評価
 - 課題 4: 複雑形状・配置に対する解析
- 第2回 直交格子 CFD-WS では課題 1 と 2 を主要な解析課題とし, 課題 3 は希望者のみが解析を実施する
- 課題 4 については次回以降の WS で実施される予定である

課題 4 : 複雑形状・配置に対する解析



- (案 1) 一様流中に置かれた複数円柱, 円柱列



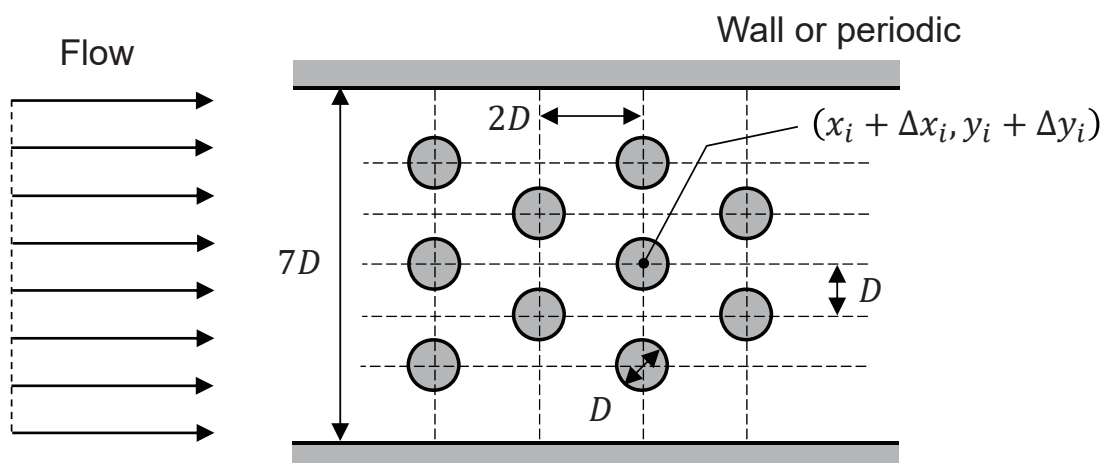
$\Delta x_i, \Delta y_i = 0$, もしくは, ランダム ($-0.25D < \Delta x_i, \Delta y_i < 0.25D$) に与える

2

課題 4 : 複雑形状・配置に対する解析



- (案 1') 流路内に置かれた複数円柱, 円柱列 (熱交換器モデル)



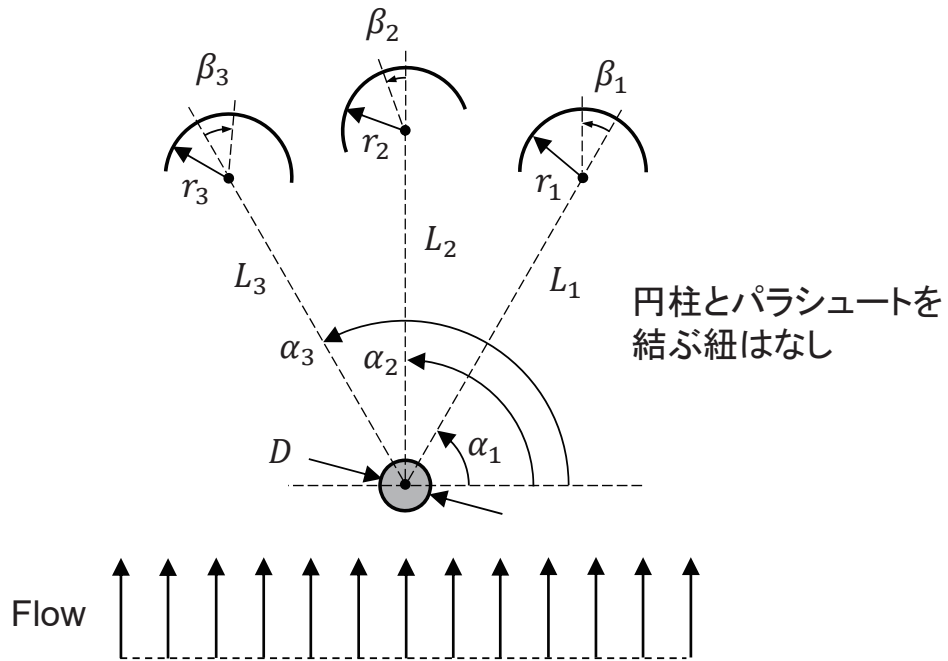
$\Delta x_i, \Delta y_i = 0$, もしくは, ランダム ($-0.25D < \Delta x_i, \Delta y_i < 0.25D$) に与える

3

課題 4 : 複雑形状・配置に対する解析



- (案 2) 一様流中に置かれた単一円柱と複数パラシュート

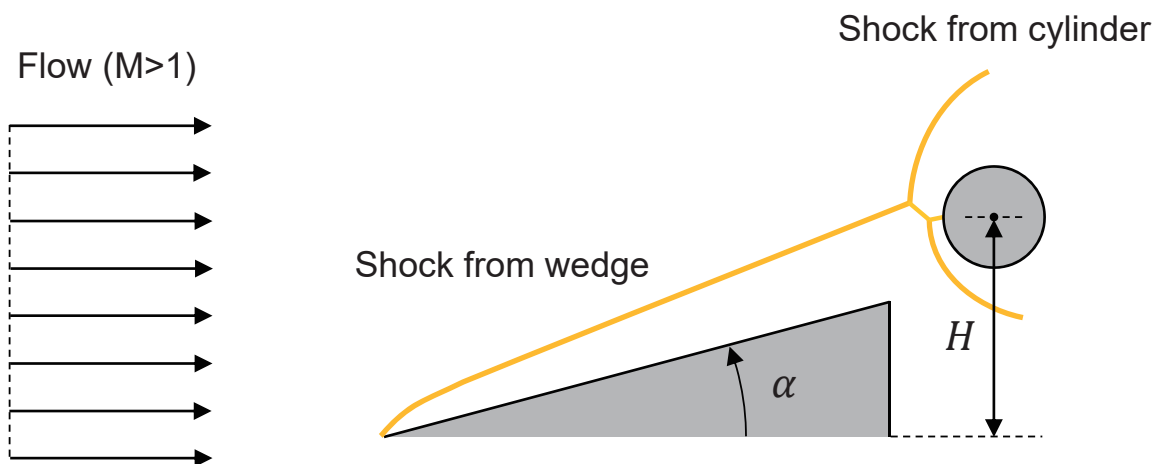


4

課題 4 : 複雑形状・配置に対する解析



- (案 3) 一様流中に置かれたたくさびと円柱 (衝撃波干渉問題)

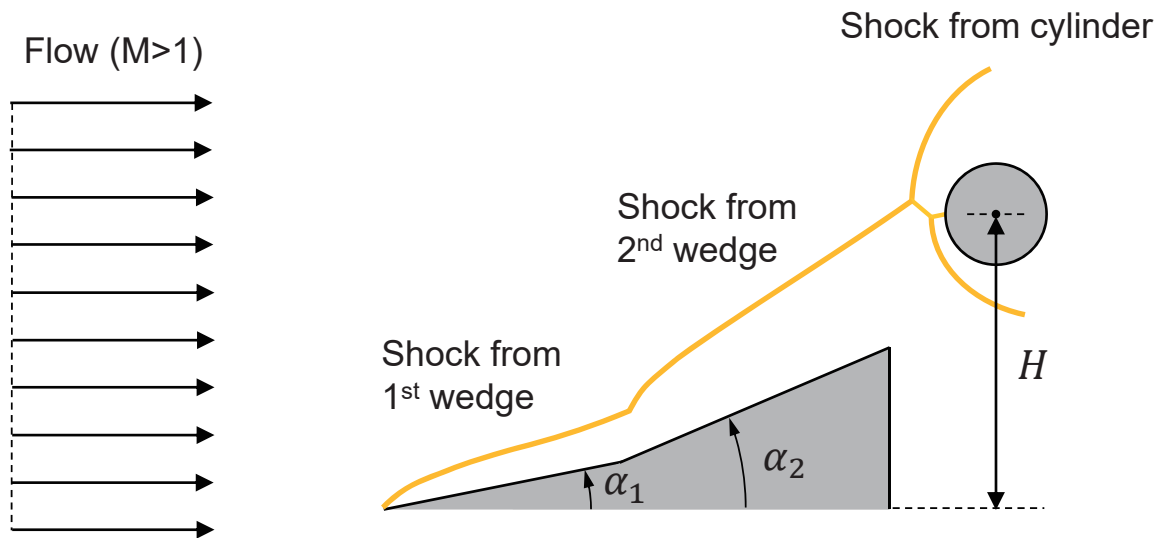


5

課題 4 : 複雑形状・配置に対する解析



- (案 3') 一様流中に置かれた二重くさびと円柱 (衝撃波-境界層干渉問題)



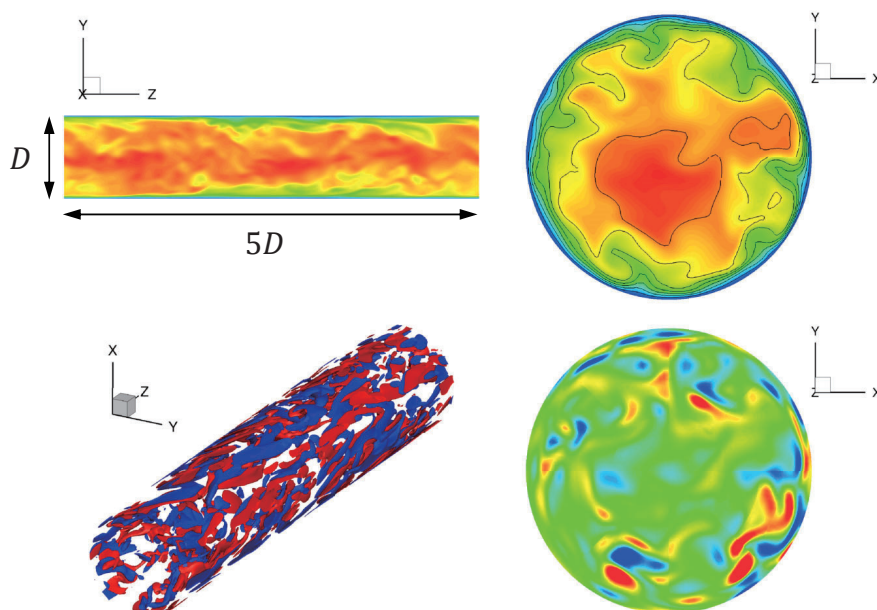
6

課題 4 : 複雑形状・配置に対する解析



- (案 4) 円管内乱流の DNS (三次元問題)

$Re_b = 5300$, 総格子セル数 = 236 万セル



7



第4回 直交格子 CFD ワークショップ フリーディスカッション

第55回流体力学講演会／第41回航空宇宙
数値シミュレーション技術シンポジウム

2023年7月14日,
国立オリンピック記念青少年総合センター, 渋谷区

直交格子 CFD ワークショップ実行委員会

ディスカッションのまとめ



- 6回目以降もワークショップの役割がなくなる限りは継続する。
- ワークショップ(WS)に期待すること：
 - 各自が困っている内容を共有して意見やアドバイスをもらう場としてWSは有用である。
 - 初学者や分野外からの新規参加者が解析結果の良し悪しを確認するための手段や手順, ベンチマーク問題の設定, データを提供する場としてWSを活用すべき。
 - 上記に関連して, JAXA-SP 以外にもウェブサイトでの情報の公開・共有を検討してはどうか。

ディスカッションのまとめ



- ワークショップの方向性について：
 - 直交格子 CFD 以外の参加者も受け入れる（物体適合非構造格子 CFD & 非構造格子自動生成などの手法もウェルカム）。
 - 質量保存の問題を本格的に実施する。
 - すでに実施済みの課題についても何らかのまとめが必要か。
 - 格子の自動生成（直交格子だけでなく、物体適合非構造格子もあり）に関する問題などを設定してもよいかもしれない。
 - スクラム実験機（S-520-RD1）に関する問題も設定したい（ANSS企画2 宇宙輸送を支えるシミュレーションとのコラボレーション）。

2



以降, 当日のディスカッションで使用した資料

3

第4回までのワークショップを受けての所感など



- 課題 1：物体周りの流れは正確に解ける(空力係数, 剥離位置, 循環域長さ). しかし, 壁面に沿った圧力・せん断力の分布にはガタつく傾向がみられ, 改善の余地がある.
- 課題 3：壁面に沿ったせん断力・圧力・熱流束の分布はともに大まかな傾向を捉えられるが, 振動が顕著. ただし, 格子解像度を上げることで振動は押さえられる.
- 新たな方向性として質量保存に注目した課題を提案したが, 参加者の皆さんの興味はどの程度あるだろうか

4

第4回までのワークショップを受けての所感など



- せん断力や熱流束の分布にみられる振動は IP の取り方などで改善できる余地があるはず.
- 物体形状を精密に捉えるため, もしくは, 熱流束などの壁面上の分布を正確に計算するために格子を細かくすると, 直交格子 CFD は格子セル数が過剰になる傾向があるのではないかと. 三次元計算だと簡単に 10 億セルくらいになりそう.
- 物体近傍で格子を細かくすることをあきらめ, 粗い格子で壁面上の分布を正確に計算する手法やモデル(壁モデルのようなもの)を追求するのも一つの方法か.

5

今後のワークショップ(WS)について



- 少なくとも, 第 5 回までは開催する予定 (松山の考えです).
- 第 6 回目以降をどうするかについては WS 参加者の意見をお聞きしたい. 参加者の皆様がどうしたいかが最も重要です.
- いくつか方向性を考えてみました.
 - 第 5 回で一度 WS を終了とする. 今後, 新たな問題意識がはっきりした時点で再開, もしくは, 新たな WS を立ち上げる.
 - これまでの問題設定は原理原則を明らかにするためシンプルな設定にしてきたが, もっと実問題 (実際の複雑形状) や直交格子 CFD でしか解けないような問題にシフトする.
 - 直交格子 CFD と非構造格子 CFD (& 格子自動生成) を競わせる方向へシフトする.

6



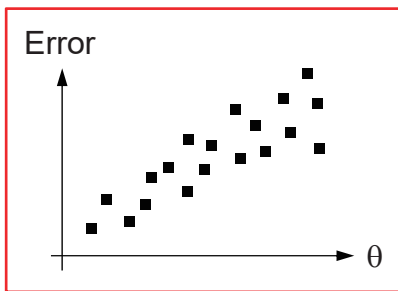
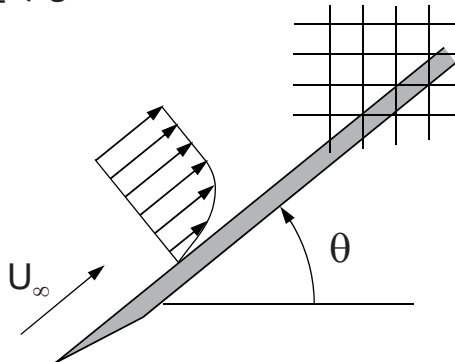
参考資料など

7

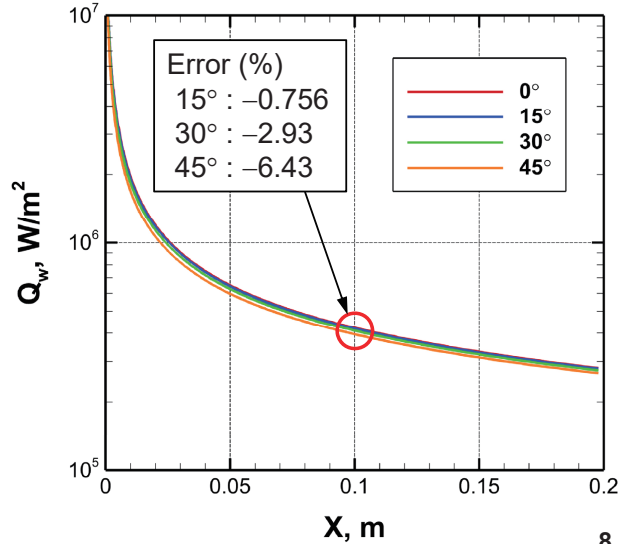
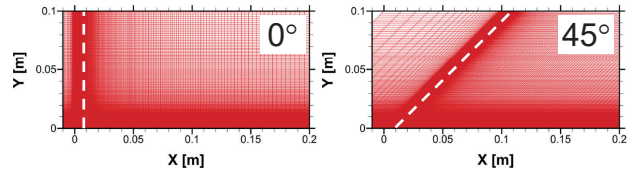
次回以降のワークショップに向けた提案など



- 格子線と平板の角度(θ)を変化させて直交する場合(0°)からの誤差の傾向をみる



物体適合格子の場合

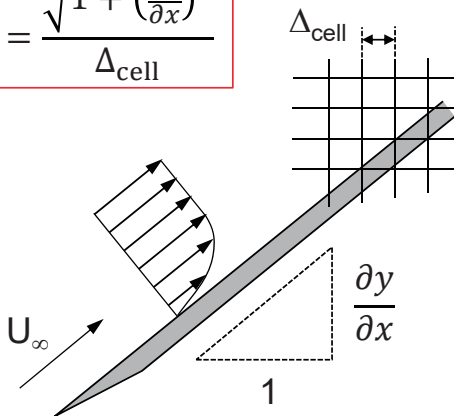


次回以降のワークショップに向けた提案など



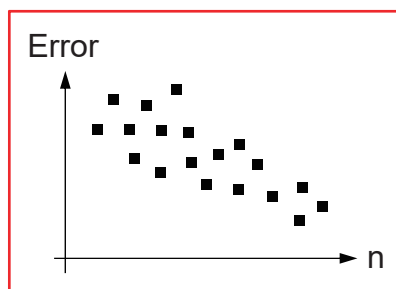
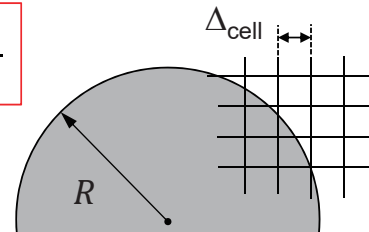
- 熱流束などの壁面上で計算される量を正確に計算するための、単位勾配あたりに必要な格子解像度

$$n = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2}}{\Delta_{\text{cell}}}$$



- 単位曲率あたりに必要な格子解像度
- 壁面上の量に加えて、物体に沿った流れ(圧力変化など)の正確性も評価

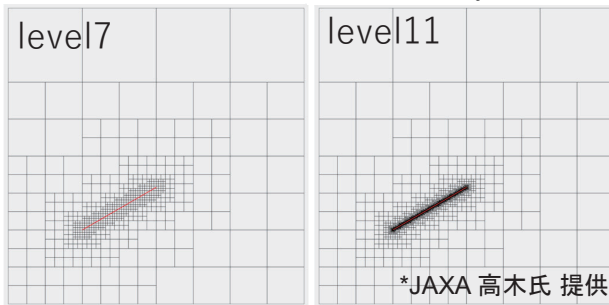
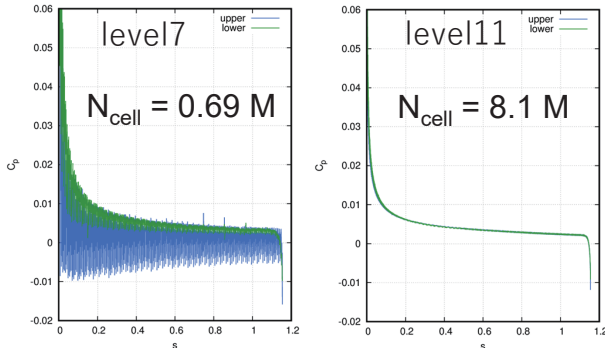
$$n = \frac{2\pi R}{\Delta_{\text{cell}}}$$



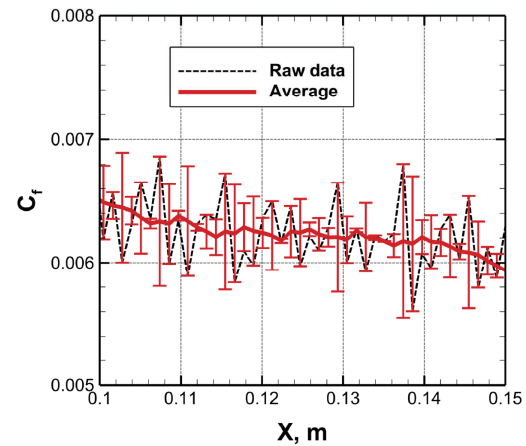
次回以降のワークショップに向けた提案など



- 粗い格子でも良い結果を得る工夫を
 - 物体適合格子(平板) : 19万セル
 - 直交格子(平板) : 69万 ~ 810万セル



- 熱流束が振動している場合も、流体計算は必ずしも破綻しているわけではない
- 壁面上で定義される量にエラーバーを導入するのはどうか
 - 現状でも工学的に受け入れられる?
 - エラーバーの意味(物体形状の再現精度に関するエラー?)



10



次回ワークショップの新課題について (課題 0) Verification 問題

課題 0 : Verification 問題



- 目的 : 内部流の解析を実施し, 流入・流出境界および流路内での質量流量が正しく計算され, 系全体の質量が保存されることを示す
- 解析対象 : 直管流路, ベンチュリ管, 曲がり管, ラバールノズル, 高圧タンク, 連結された 1 対のタンク, など

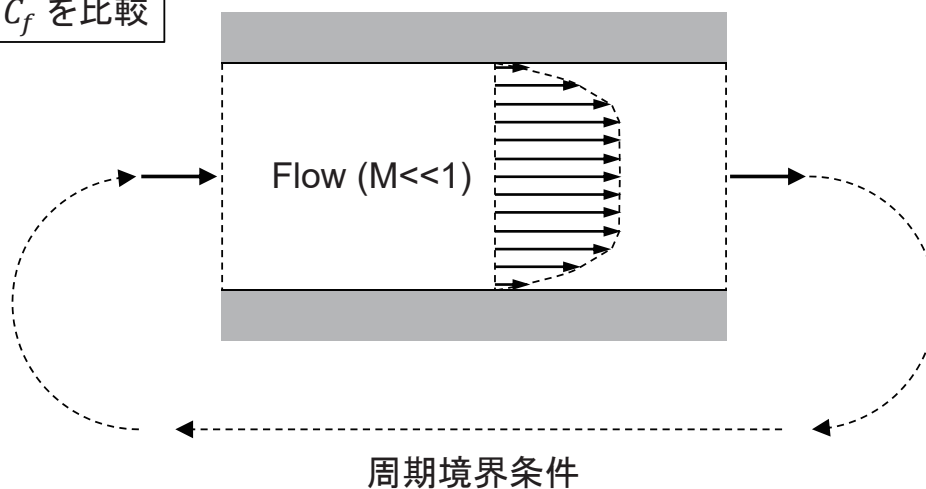
12

課題 0 : Verification 問題



- (案 1) 直管内 / 平行平板間の流れ

\dot{m} , C_f を比較



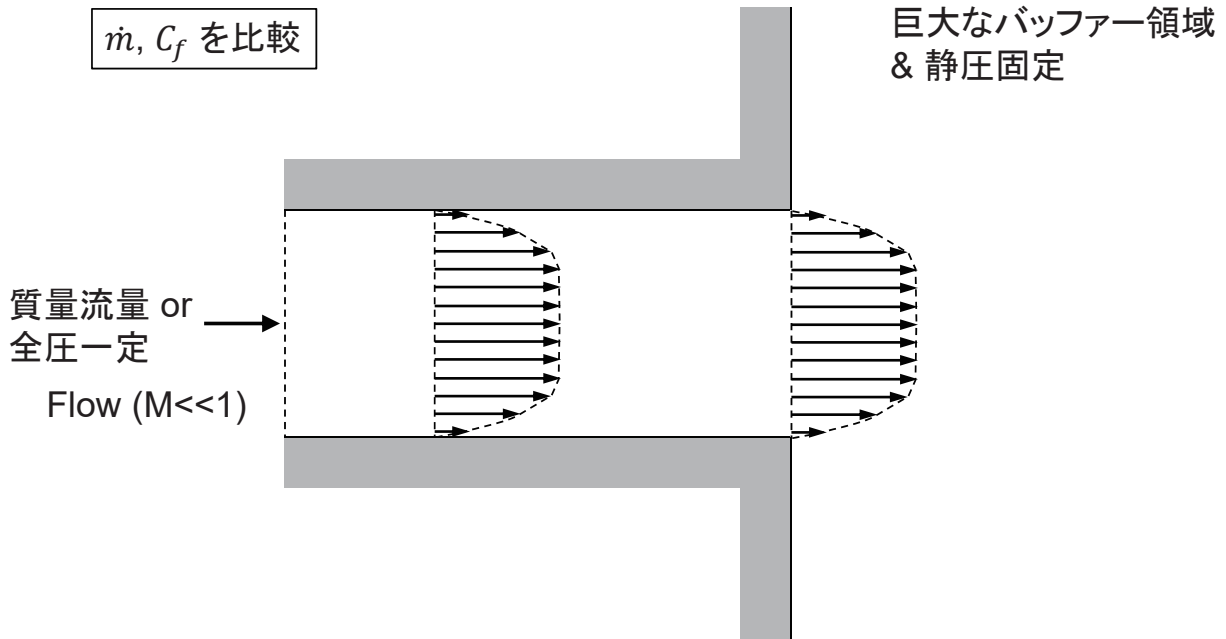
$$\text{流れを駆動するための体積力: } \rho f_x = -\frac{dp}{dx} = \frac{\tau_w}{\delta} = C_f \cdot \frac{1}{2} \rho U^2$$

13



課題 0 : Verification 問題

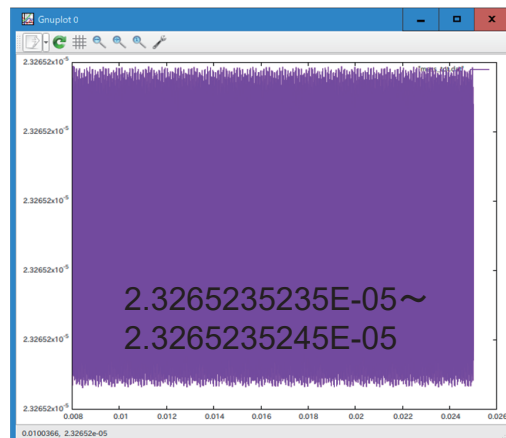
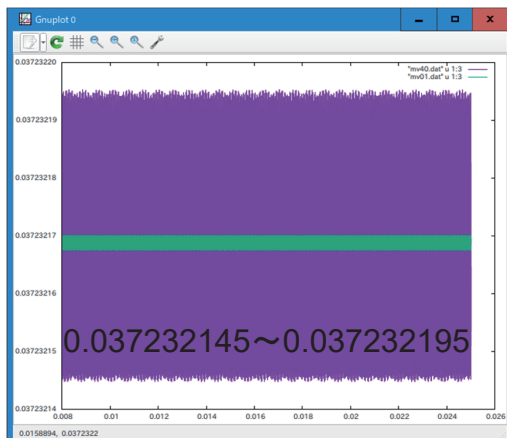
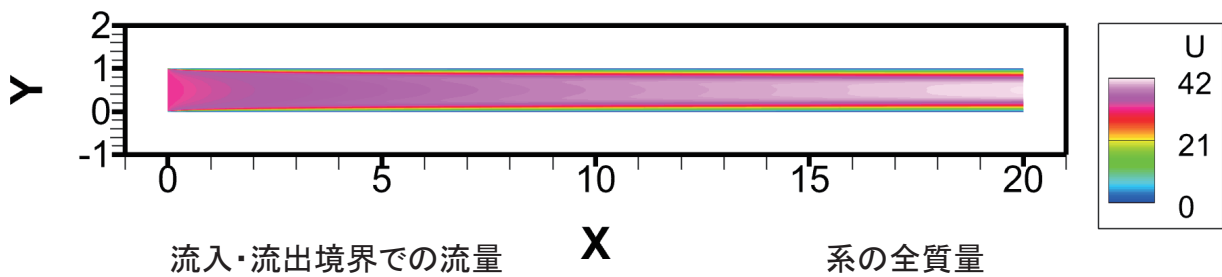
- (案 1') 直管内 / 平行平板間の流れ



課題 0 : Verification 問題



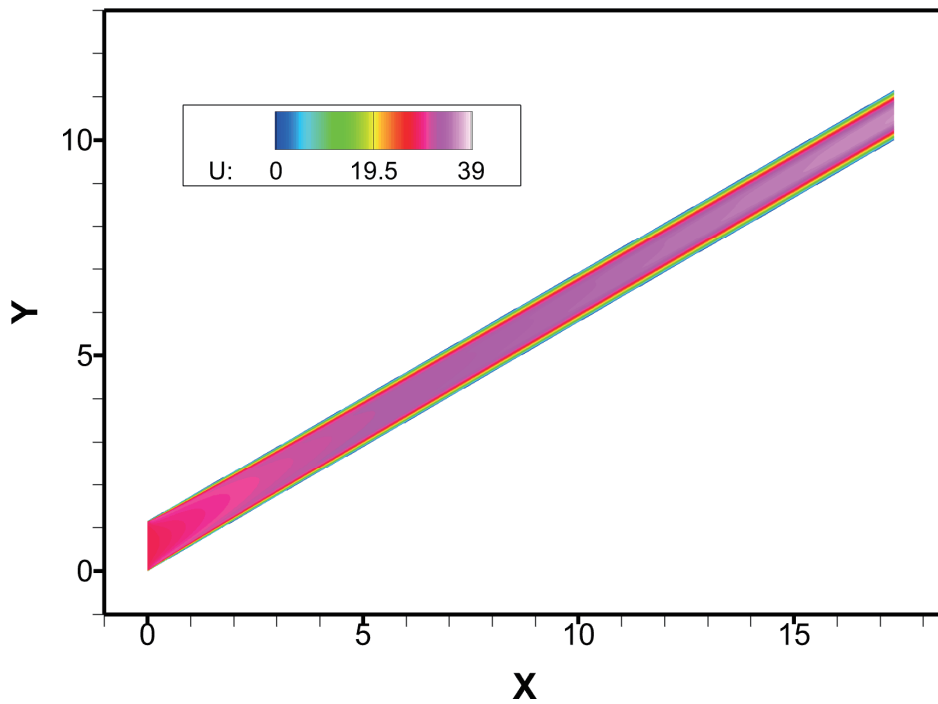
- (案 1') 直管内 / 平行平板間の流れ



課題 0 : Verification 問題



- (案 1') 直管内 / 平行平板間の流れ



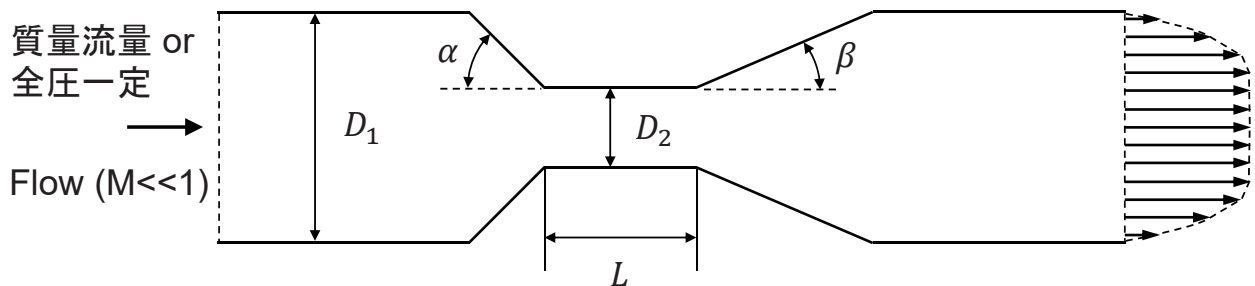
課題 0 : Verification 問題



- (案 2) ベンチュリ管

$Q, \Delta p$ を比較

巨大なバッファ領域
& 静圧固定 ?

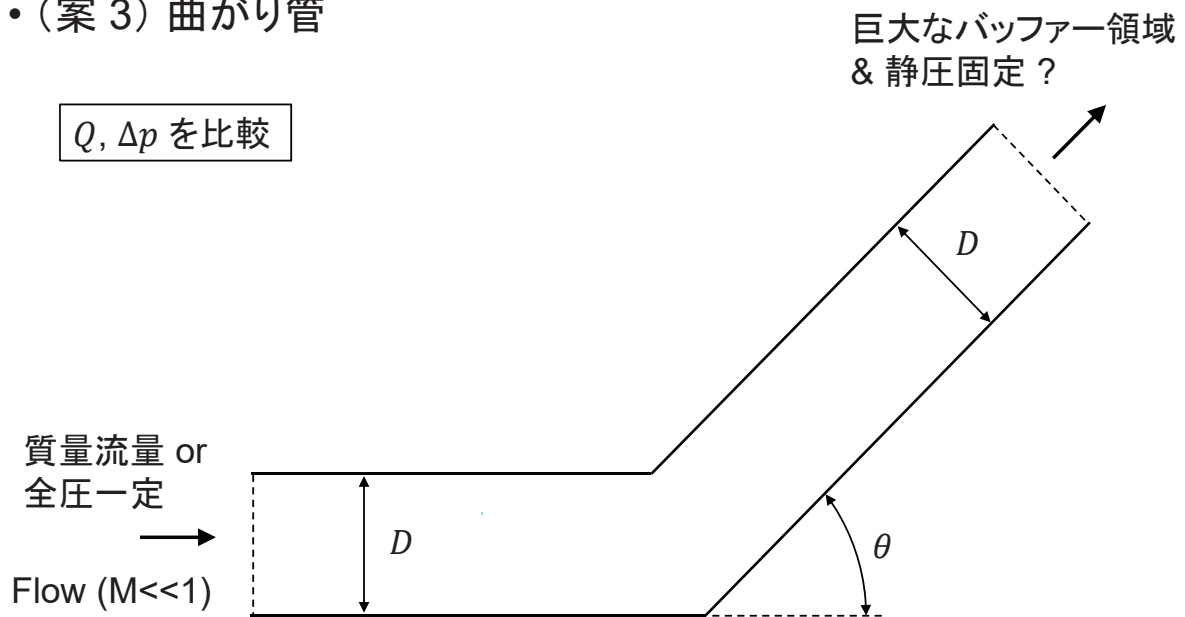


課題 0 : Verification 問題



• (案 3) 曲がり管

$Q, \Delta p$ を比較



*Matsumoto et al., Phys. Fluids 28, 103602 (2016).

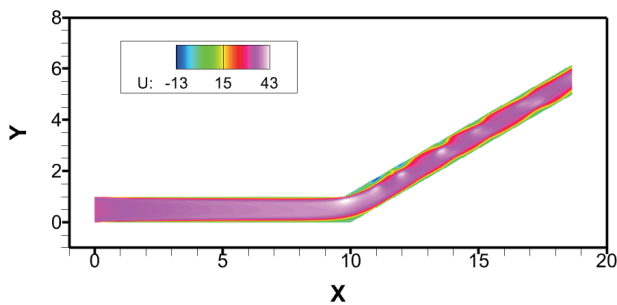
18

課題 0 : Verification 問題

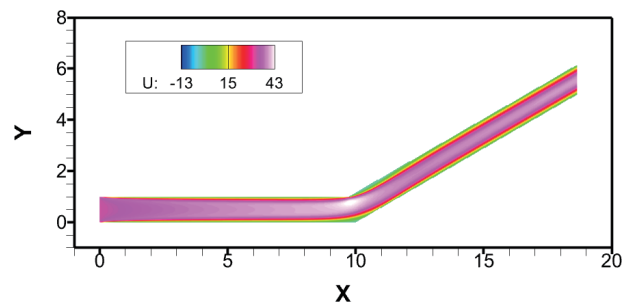


• (案 3) 曲がり管

$Re = 2000, \theta = 30^\circ$



$Re = 1000, \theta = 30^\circ$



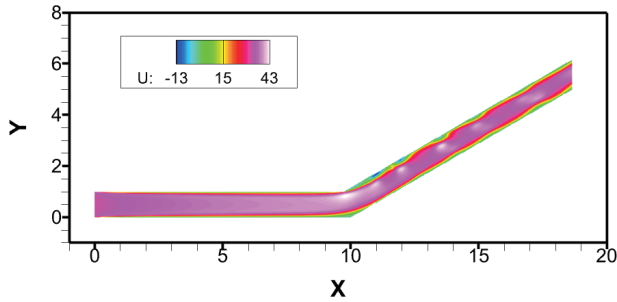
19

課題 0 : Verification 問題

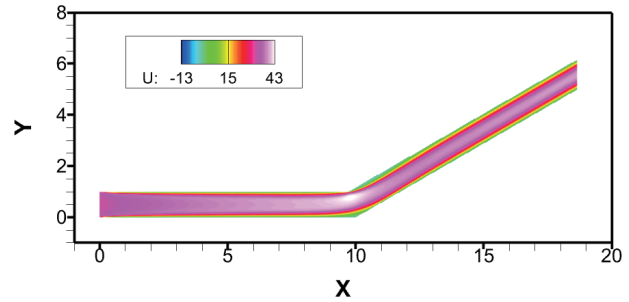


- (案 3) 曲がり管

Re = 2000, $\theta = 30^\circ$



Re = 1000, $\theta = 30^\circ$

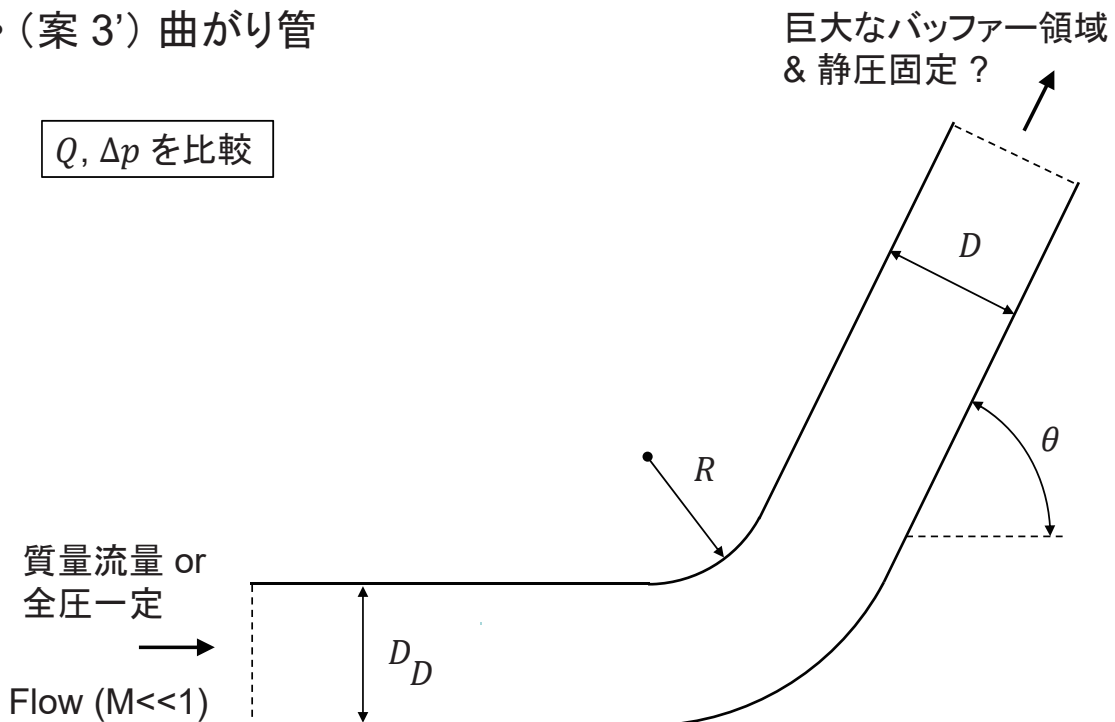


課題 0 : Verification 問題



- (案 3') 曲がり管

$Q, \Delta p$ を比較



課題 0 : Verification 問題



- (案 4a) ラバールノズル – 調布極超音速風洞

$$M_{\text{exit}} = 5, 7, 10, P_0 = 1 \sim 6 \text{ MPa}, T_0 = 600 \sim 1000 \text{ K}$$

\dot{m} , M_{exit} を比較

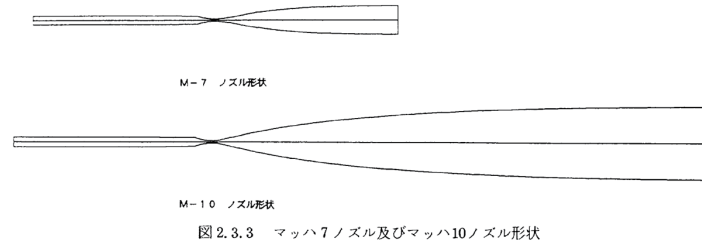


図 2.3.3 マッハ7ノズル及びマッハ10ノズル形状

*NAL-TR-1261 および NAL-TR-116

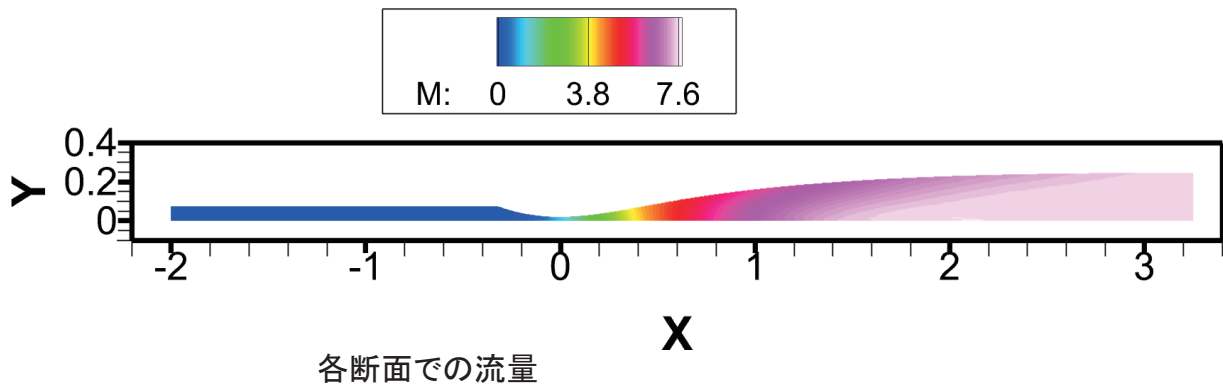
22

課題 0 : Verification 問題



- (案 4a) ラバールノズル – 調布極超音速風洞

$$M_{\text{exit}} = 5, 7, 10, P_0 = 1 \sim 6 \text{ MPa}, T_0 = 600 \sim 1000 \text{ K}$$



| 各断面での流量 | |
|---------|--------------------|
| Inlet | 7.8264816909371069 |
| Throat | 7.8264816909387385 |
| Exit | 7.8264816909387429 |

12ケタまで保存

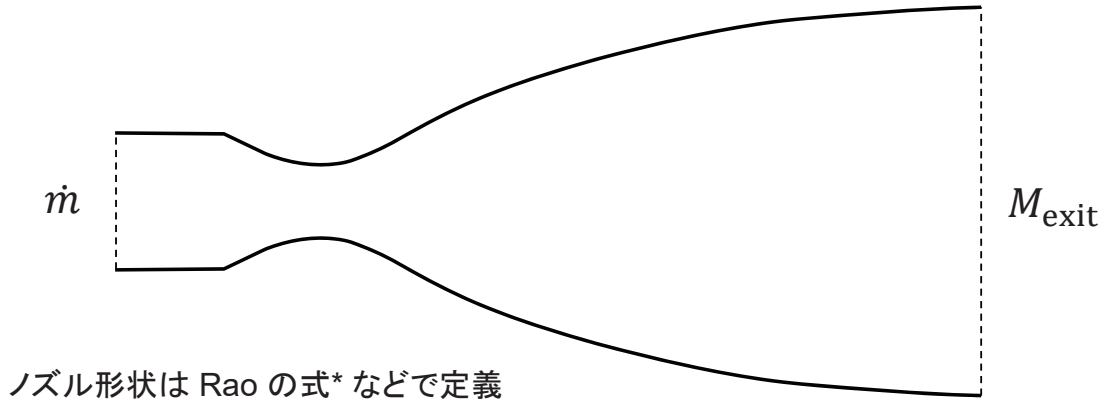
23

課題 0 : Verification 問題



- (案 4b) ラバールノズル – ロケットノズル

\dot{m} , M_{exit} を比較



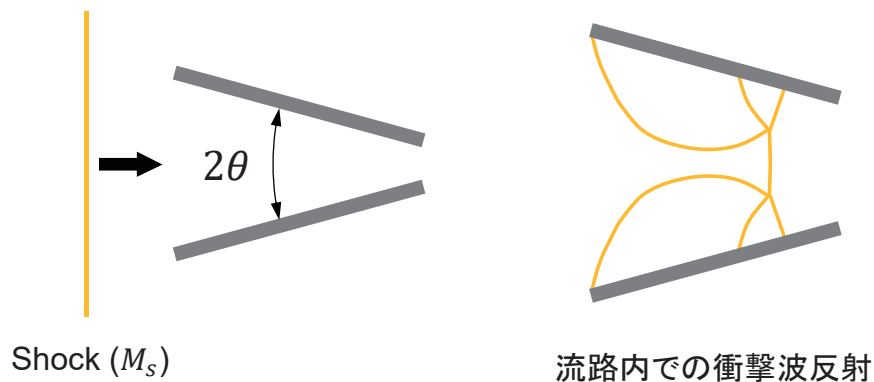
*Rao, G. V. R. "Recent Developments in Rocket Nozzle Configurations," ARS Journal , vol. 31, no. 11, 1961, pp. 1488–1494.

24

課題 0 : Verification 問題



- (案 5) 収縮流路へ入射する衝撃波



*Bond et al., J. Fluid Mech. (2009), vol. 641, pp. 297–333.

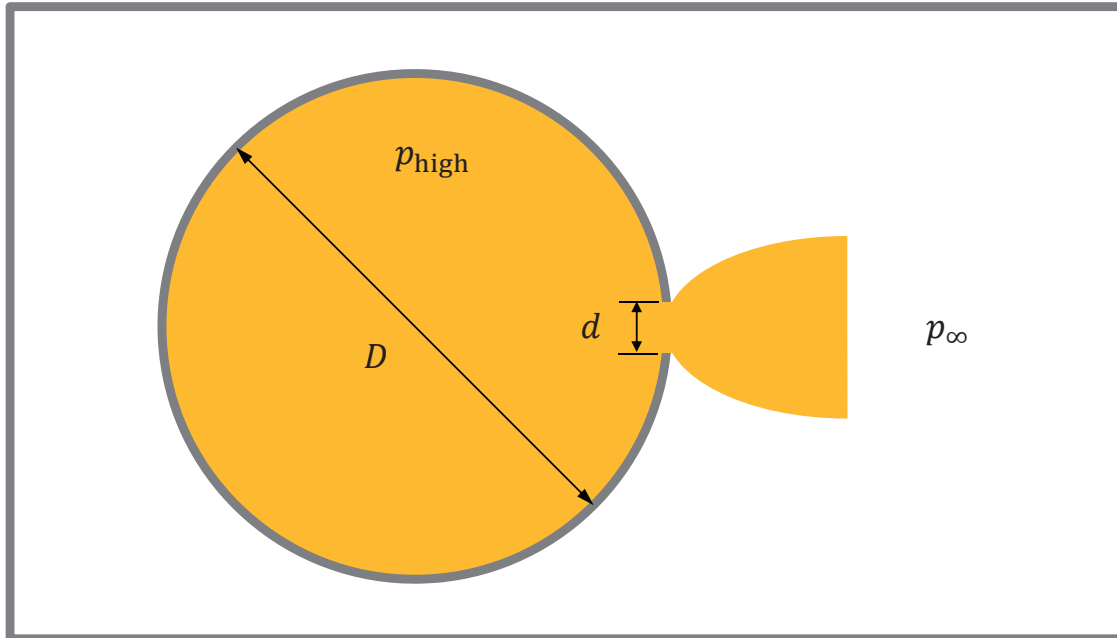
25

課題 0 : Verification 問題



• (案 6) 高圧タンクからのガス漏洩

穴から流出する m の時間履歴, 系全体の質量保存などを比較

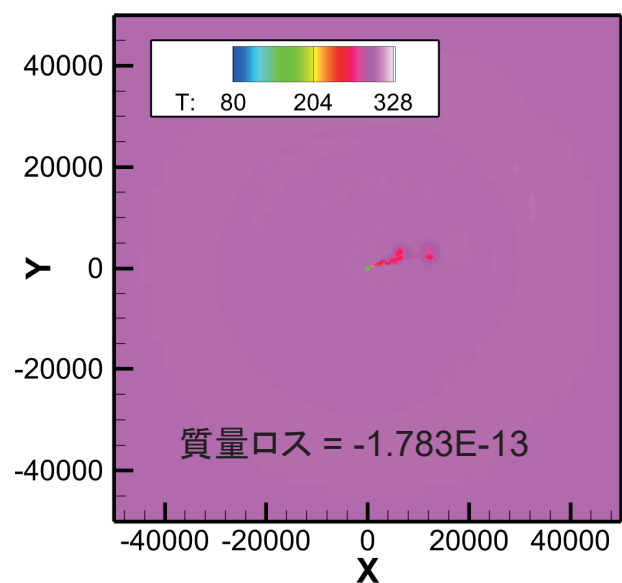
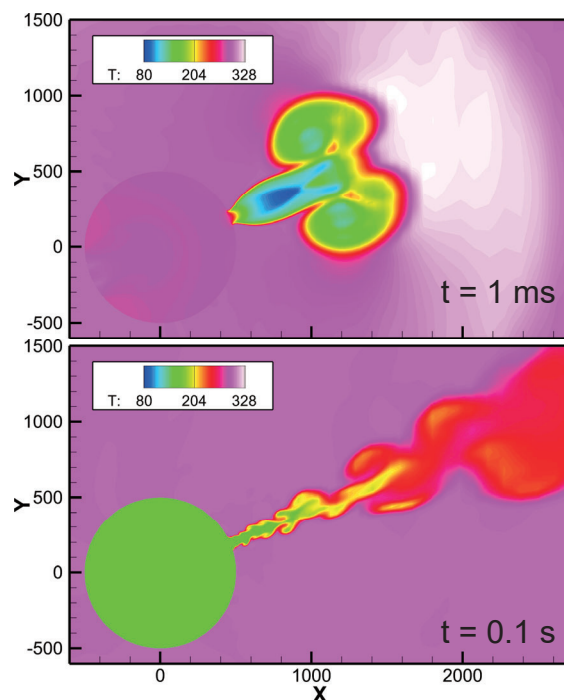


26

課題 0 : Verification 問題



• (案 6) 高圧タンクからのガス漏洩



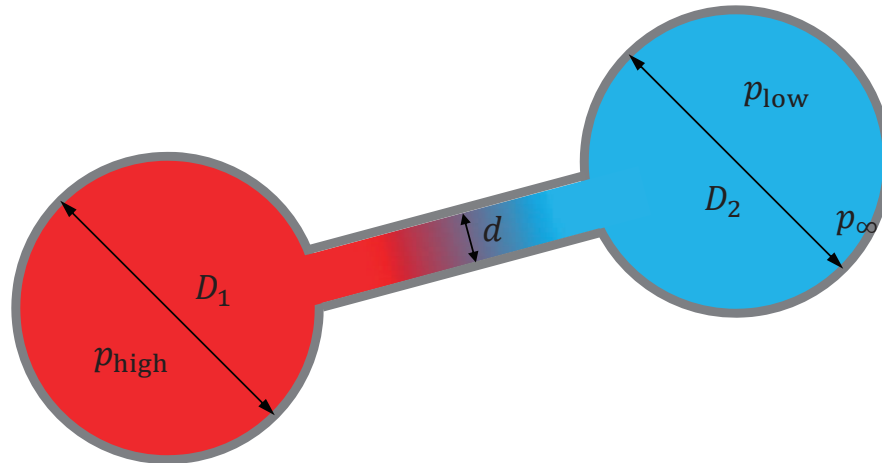
27

課題 0 : Verification 問題



- (案 6') 細い管で連結された圧力差のある 1 対のタンク

連結管を通る m の時間履歴, 系全体の質量保存などを比較



課題 0 : Verification 問題



- (案 6') 細い管で連結された圧力差のある 1 対のタンク

