



第 3 回 直交格子 CFD ワークショップ について

第54回流体力学講演会／第40回航空宇宙
数値シミュレーション技術シンポジウム

2022年7月1日, いわて県民情報交流センター, 盛岡市

松山 新吾

宇宙航空研究開発機構 航空技術部門

直交格子 CFD ワークショップの企画趣旨



- 直交格子法による CFD は格子生成が非常に簡単, 複雑形状を対象とした解析にも容易に対応が可能
- このような要件は CFD が汎用的なツールとなるために必須, 直交格子 CFD はその候補として非常に有望な手法の一つ
- 一方で, 物体適合格子による CFD と比較すると, セル境界が物体に適合しないことから, 物体形状の再現性や固体壁境界の取り扱いなどにはまだ課題が残る
- 本ワークショップではそれらの課題を解決すべく, ベンチマーク的な問題を設定して参加者に解析をしてもらい, その結果を持ち寄って議論を行いながら直交格子CFDをより良い手法とすることを目指すものである

直交格子 CFD ワークショップの解析課題について



- 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 1 回, 第 2 回ワークショップでは課題 1 ~ 3 を主要な解析課題として解析を実施した
(後刷り講演集, JAXA-SP-20-006, JAXA-SP-21-009)
- 課題 4 については今後の回で実施される予定である, また, 新たに課題 0 (verification 問題) を提案したい

2

境界適合格子 & 有限体積法によるリファレンス解析



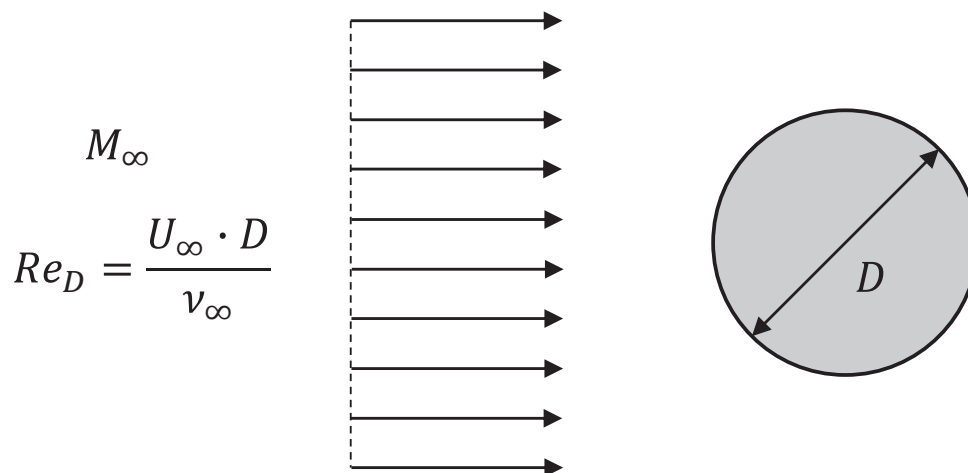
- 各参加者の直交格子法による解析結果の比較対象として, 通常の境界適合格子 & 有限体積法によるリファレンス解析を実施する
- 解析コード : 乱流燃焼解析コード CHARIOT (課題 1 および 2)
熱化学非平衡流解析コード JONATHAN (課題 3)
- 支配方程式 : 二次元 Navier-Stokes 方程式
- 離散化 : マルチブロック境界適合格子 & 有限体積法
- 対流項 : SLAU / SLAU2 スキーム
- 空間高次精度化 : 五次多項式による補間 / 二次精度 MUSCL 法
- 粘性項 : 二次精度中心差分法
- 時間積分 : 二段二次陽的 Runge-Kutta 法 / LU-SGS 陰解法

3



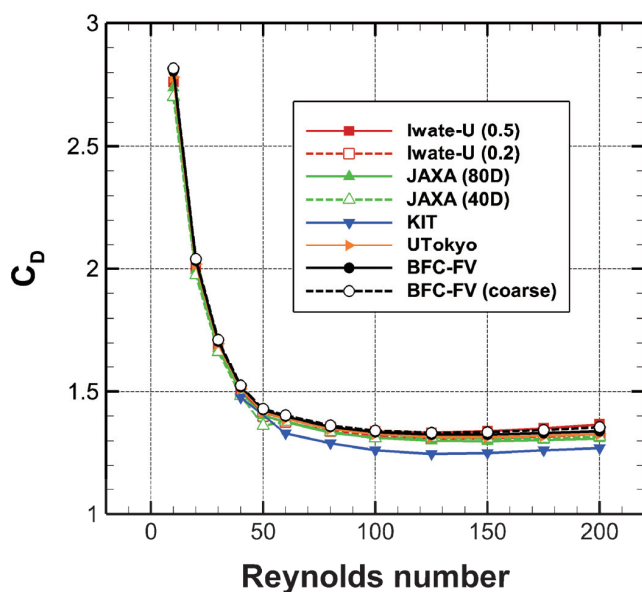
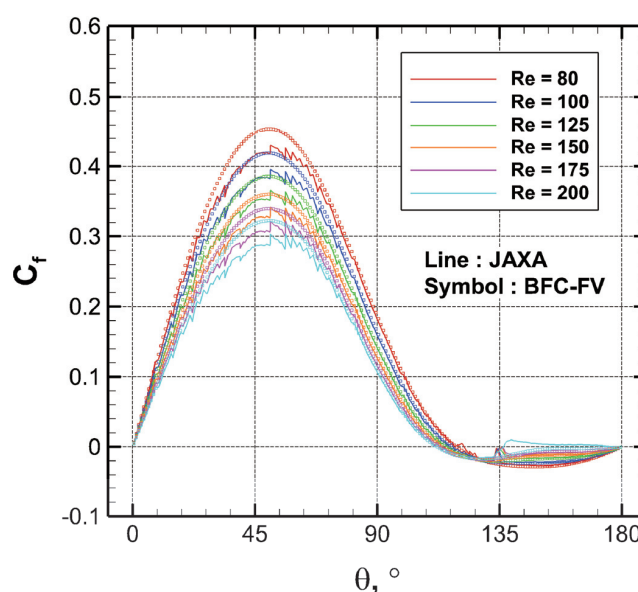
課題 1：二次元円柱に対する解析

- 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



4

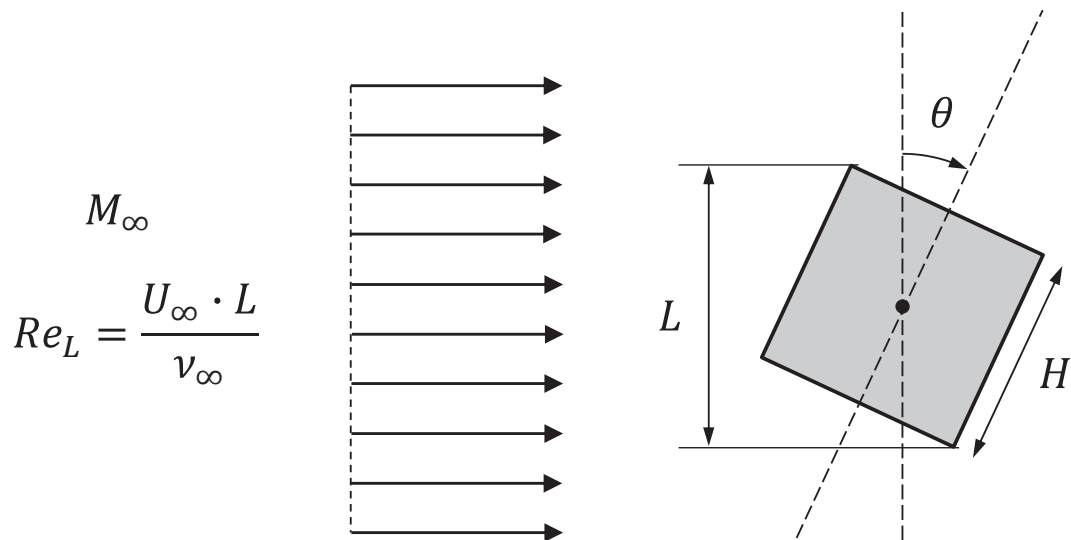
課題 1：第 1 回ワークショップの結果例

抵抗係数 C_D 壁面摩擦係数 C_f 

5

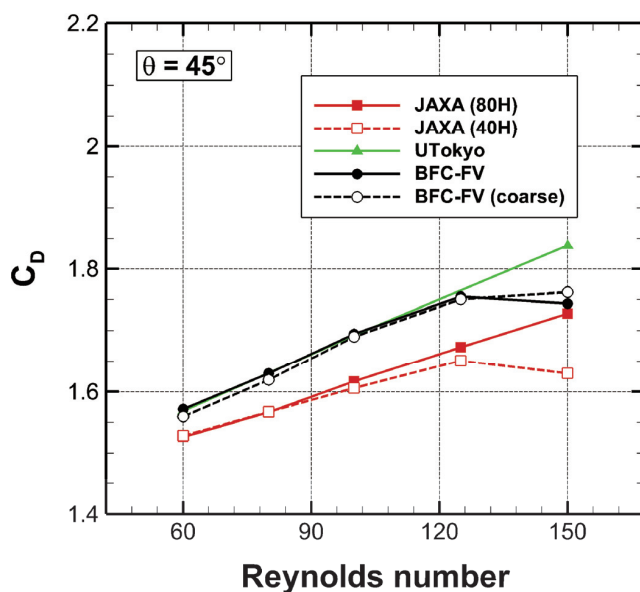
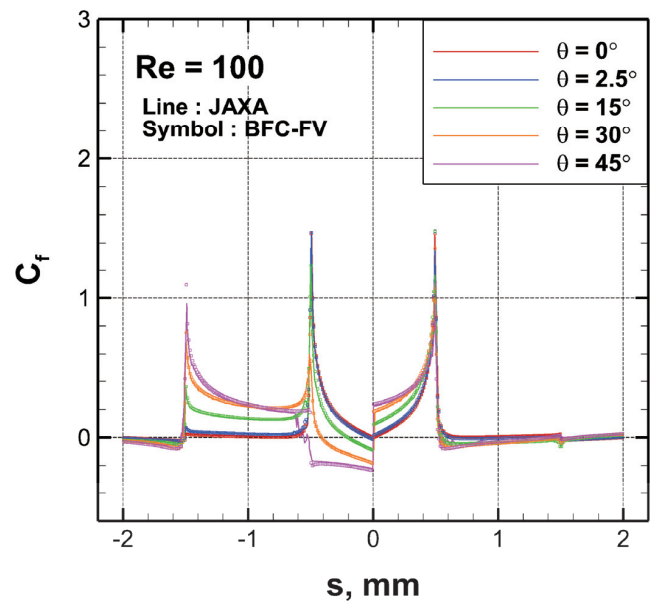
課題 2：二次元角柱に対する解析

- 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



6

課題 2：第 1 回ワークショップの結果例

抵抗係数 C_D 壁面摩擦係数 C_f 

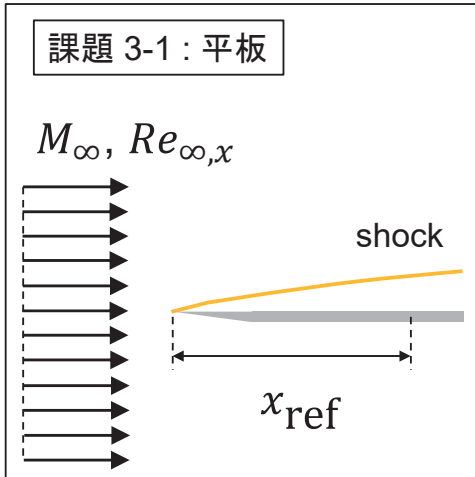
7

課題 3：単純形状に対する壁面摩擦・熱流束の評価

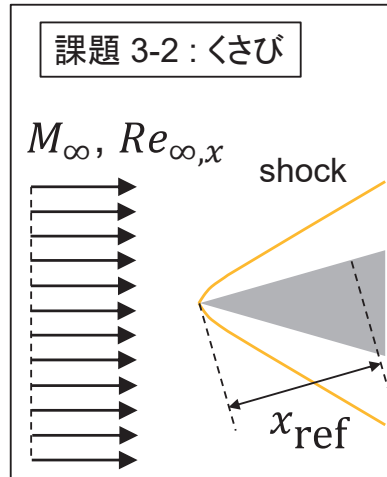


- 目的：単純な二次元形状に対して、物体周りの流れ場・衝撃波形状、および、壁面における局所摩擦・熱流束を正確に計算できることを示す
- 解析対象：一様流中に置かれた平板・くさび・円柱

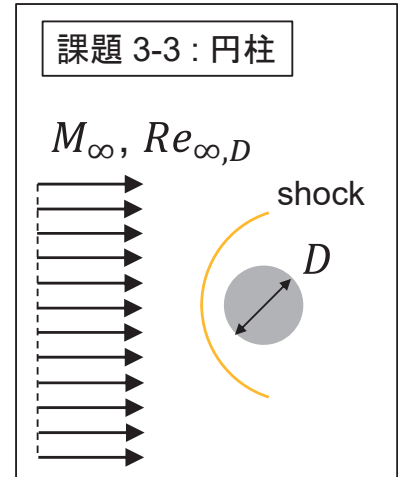
課題 3-1：平板



課題 3-2：くさび



課題 3-3：円柱



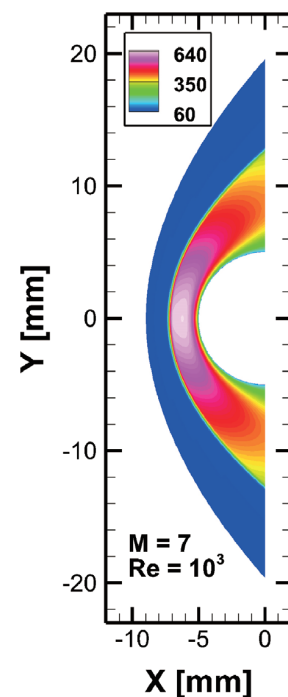
8

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_∞	$Re_{\infty, x}$ or $Re_{\infty, D}$	壁面境界条件
0.3	$10^3, 10^4, 10^5$	等温壁 / 断熱壁
1.5	$10^3, 10^4, 10^5$	等温壁 / 断熱壁
3	$10^3, 10^4, 10^5$	等温壁 / 断熱壁
5	$10^3, 10^4, 10^5$	等温壁 / 断熱壁
7	$10^3, 10^4, 10^5$	等温壁 / 断熱壁

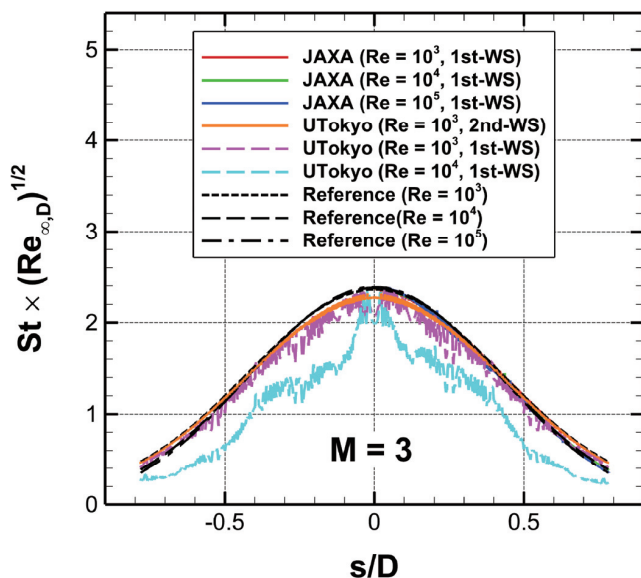


9

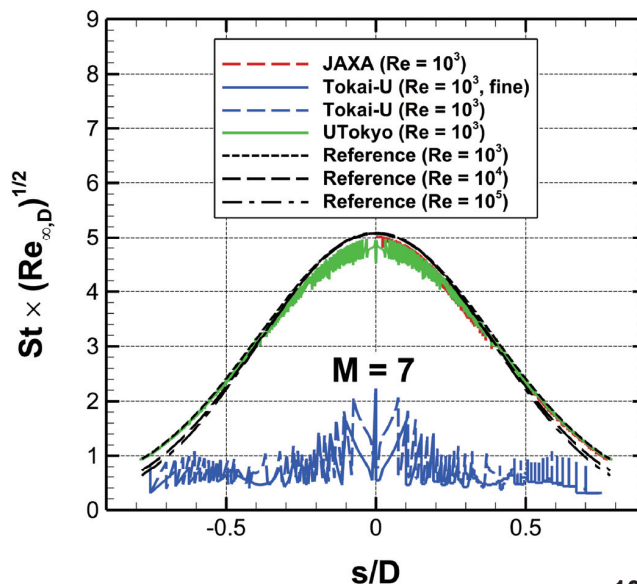
課題 3 : 第 1 回ワークショップの結果例

$$St \times (Re_{\infty,D})^{1/2} = \frac{q_w}{\rho_{\infty} U_{\infty} (H_0 - H_w)} \times \left(\frac{\rho_{\infty} U_{\infty} D}{\mu_{\infty}} \right)^{1/2} \quad H_0 - H_w = \left(C_p T_{\infty} + \frac{U_{\infty}^2}{2} \right) - C_p T_w$$

壁面熱流束(円柱, M = 3)



壁面熱流束(円柱, M = 7)

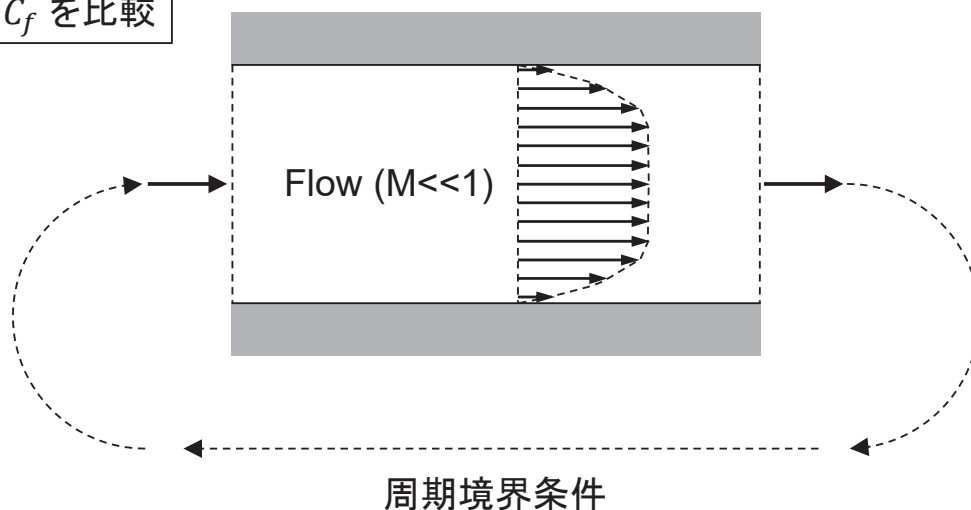


10

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



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

11



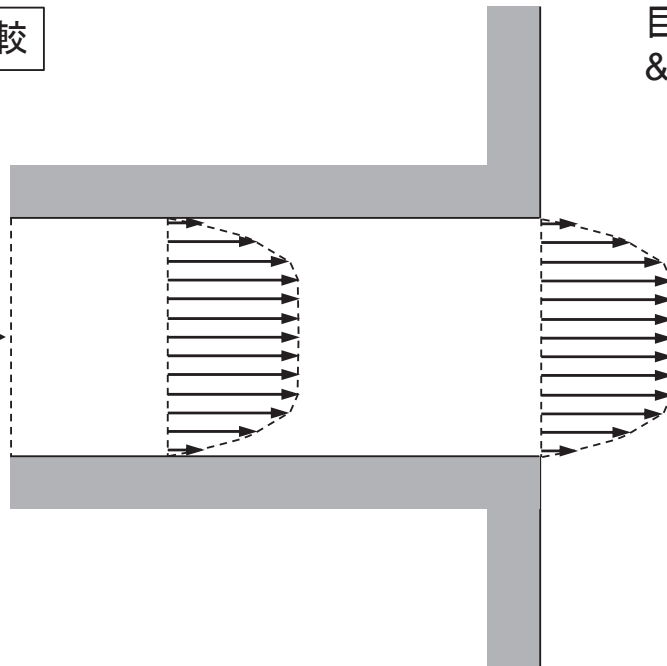
課題 0 : Verification 問題

- (案 1') 直管内／平行平板間の流れ

\dot{m} , C_f を比較

巨大なバッファ領域
& 静圧固定

質量流量 or
全圧一定
Flow ($M \ll 1$)



12

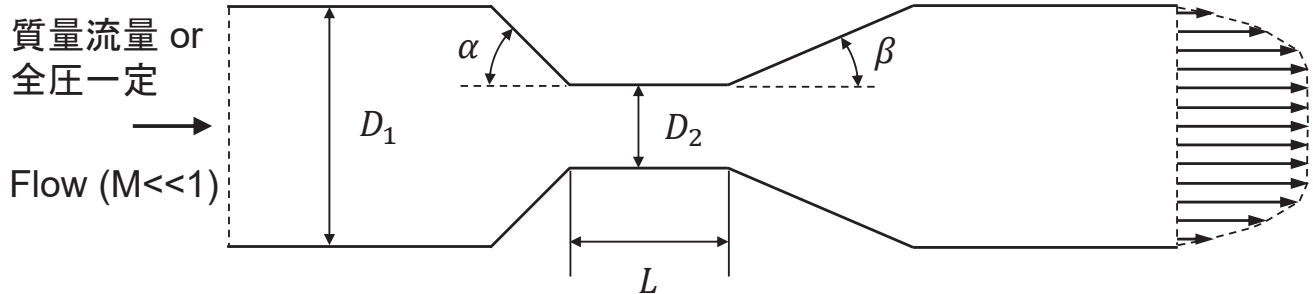
課題 0 : Verification 問題



- (案 2) ベンチュリ管

Q , Δp を比較

巨大なバッファ領域
& 静圧固定 ?

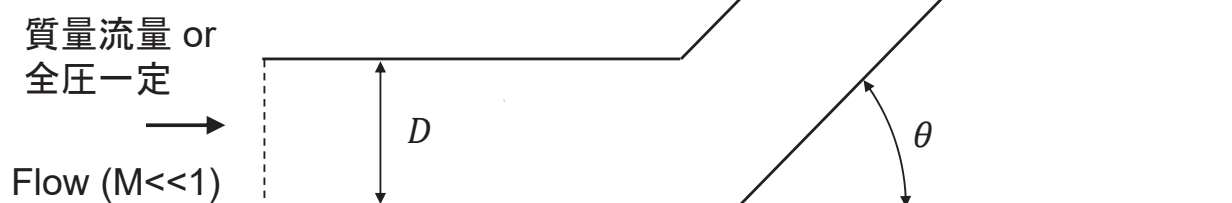


13

課題 0 : Verification 問題

• (案 3) 曲がり管

$Q, \Delta p$ を比較



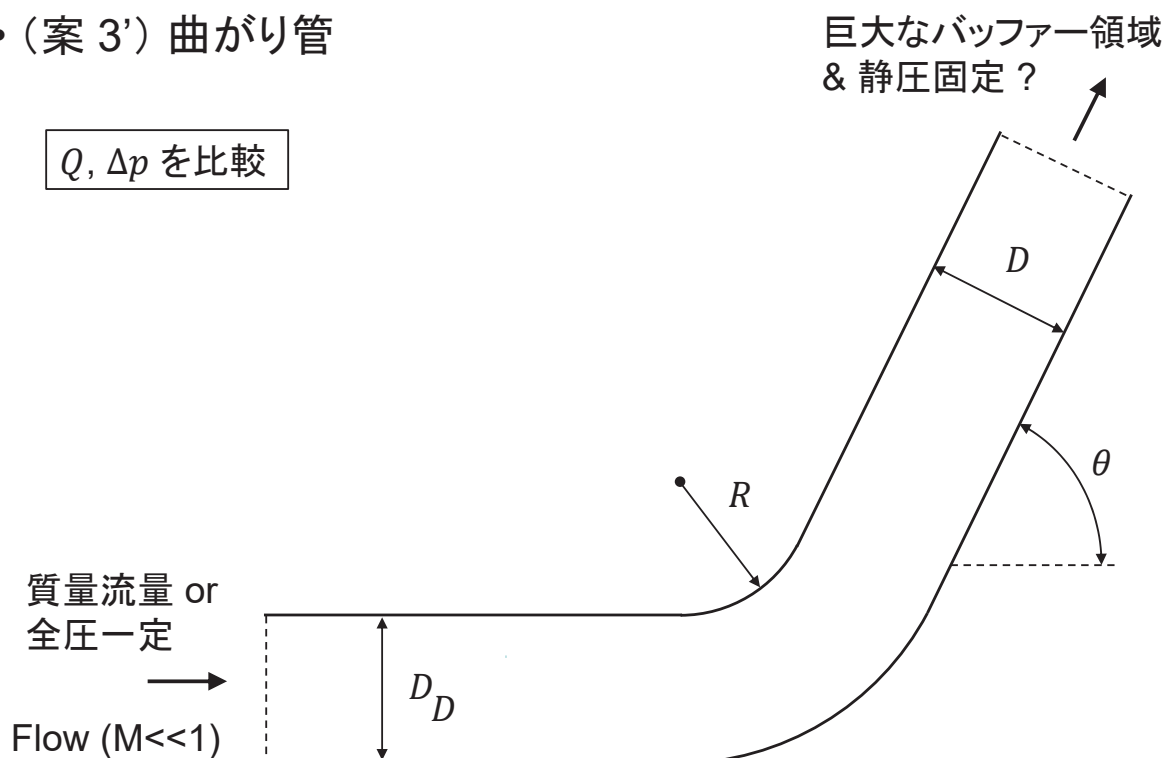
*Matsumoto et al., Phys. Fluids 28, 103602 (2016).

14

課題 0 : Verification 問題

• (案 3') 曲がり管

$Q, \Delta p$ を比較



15

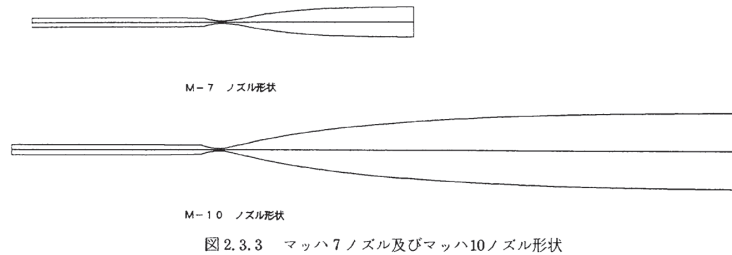


課題 0 : Verification 問題

- (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



*NAL-TR-1261 および NAL-TR-116

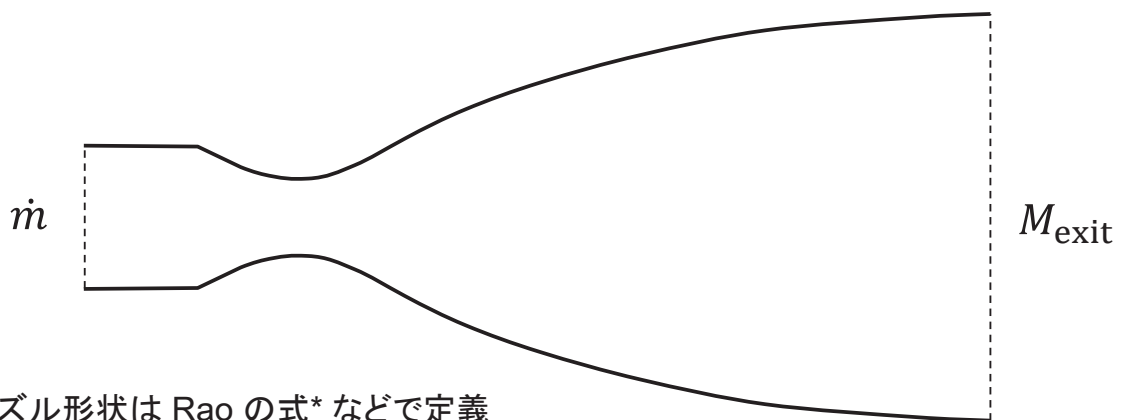
16



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

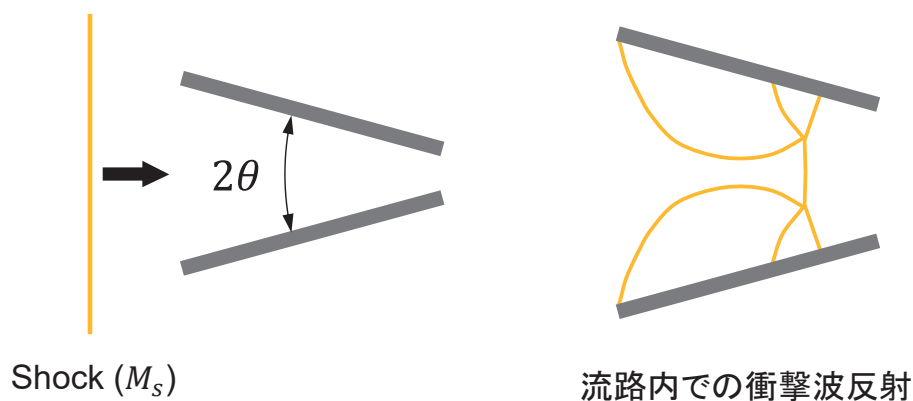


*Rao, G. V. R. "Recent Developments in Rocket Nozzle Configurations,"
ARS Journal , vol. 31, no. 11, 1961, pp. 1488–1494.

17

課題 0 : Verification 問題

- (案 5) 収縮流路へ入射する衝撃波



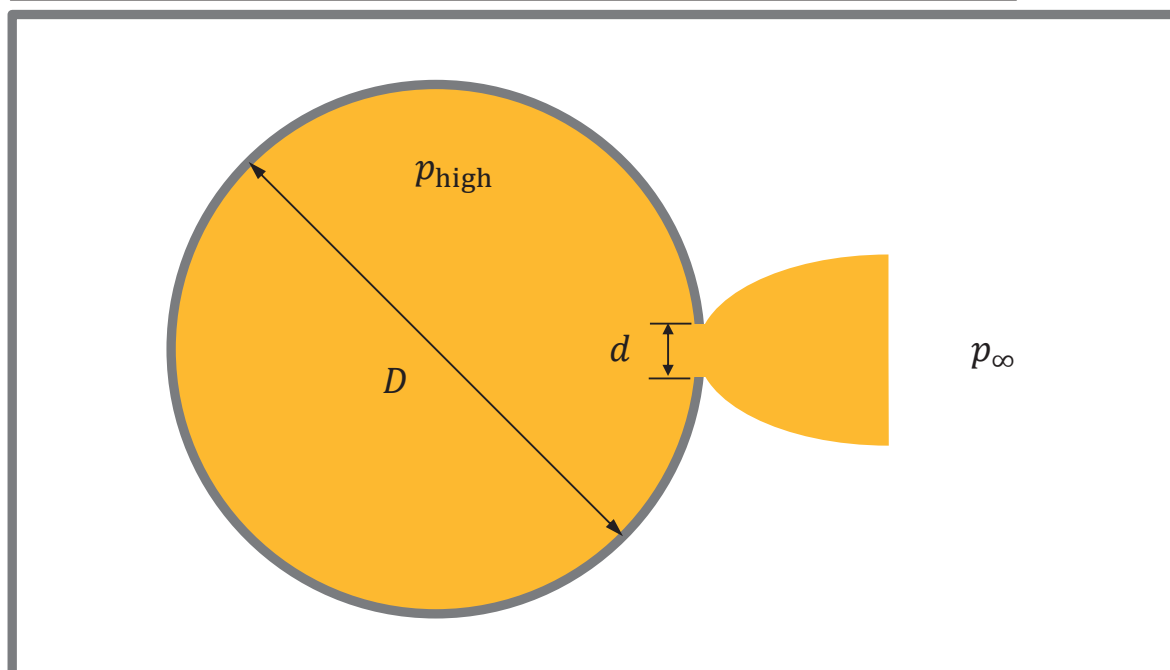
*Bond et al., J. Fluid Mech. (2009), vol. 641, pp. 297–333.

18

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



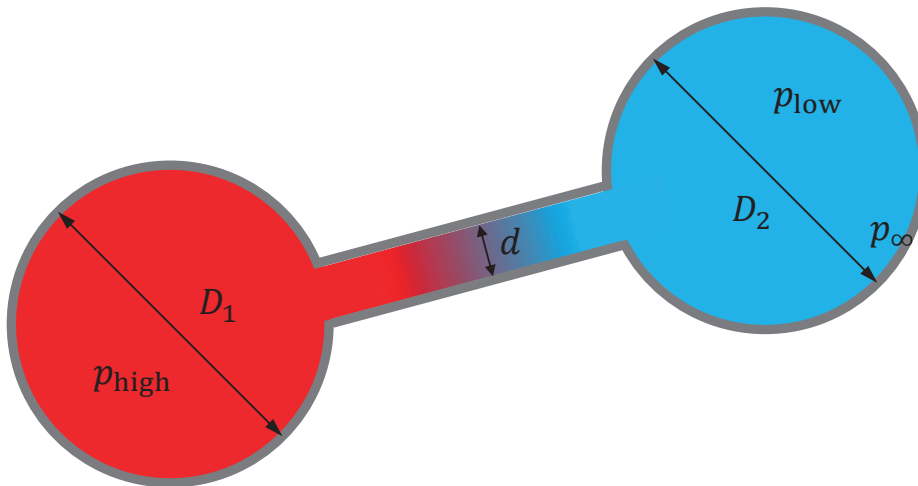
19



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



20

第 1 回, 第 2 回ワークショップを受けての所感など



- 課題 1 と 2 : 物体周りの流れは正確に解かれていて, 空力係数 (C_D , C_L) や剥離位置, 循環域長さなどはリファレンスの解と良く一致する. しかし, 壁面に沿った圧力やせん断力の分布に少し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, 振動が顕著となる傾向. ただし, 格子解像度を上げることで振動は押さえられる
- せん断力や熱流束の分布がなぜガタつくのかといった点は IP の取り方などに改善の余地がある
- 第 3 回ワークショップでは質量保存に注目した課題 0 を新たに提案. また, ディスカッションのセッションにおいてワークショップの今後の方向性についても議論したい

21