JHPCN: 学際大規模情報基盤共同利用･共同研究拠点

第13回 シンポジウム ポスター発表 EX22206

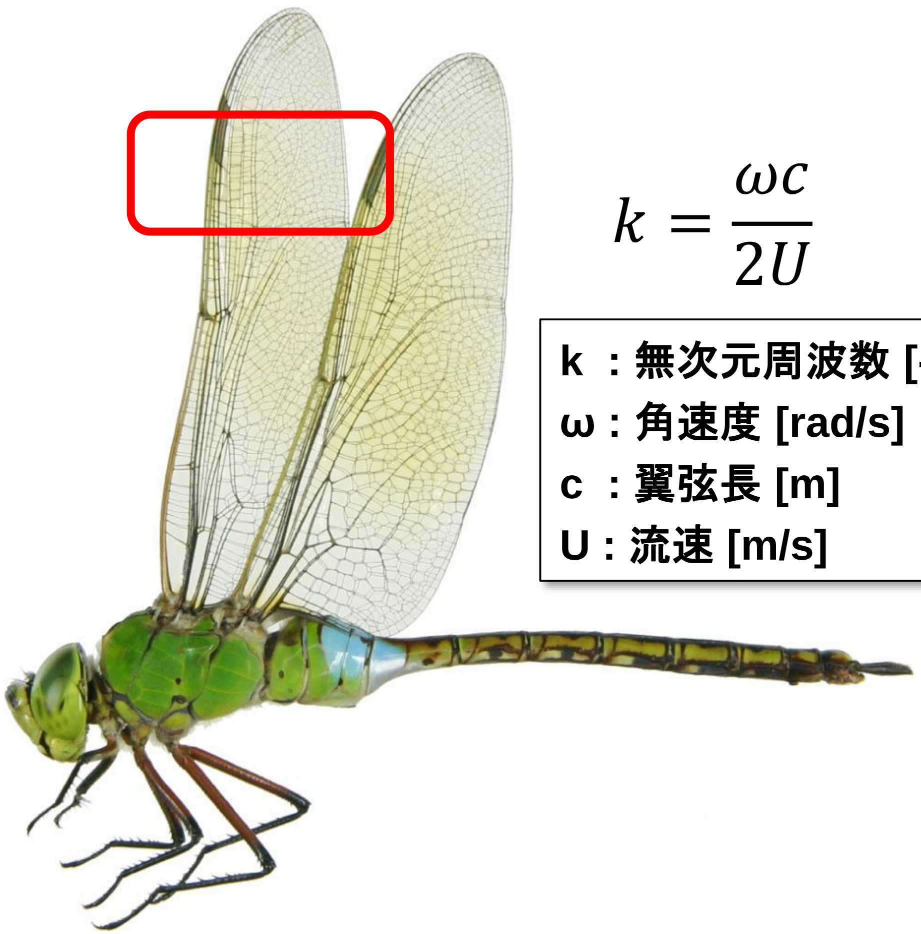
直交格子法による移動境界問題の解法に関する研究

佐々木大輔（金沢工業大学），高橋俊（東海大学）

目次

目次

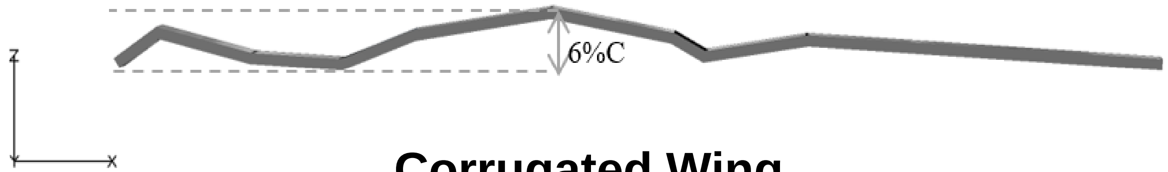
研究背景



https://mintclub.kobe-np.co.jp/skip/event/4089.html

$$k = \frac{\omega c}{2U}$$

k ：無次元周波数 [-]
ω：角速度 [rad/s]
c ：翼弦長 [m]
U：流速 [m/s]



Corrugated Wing

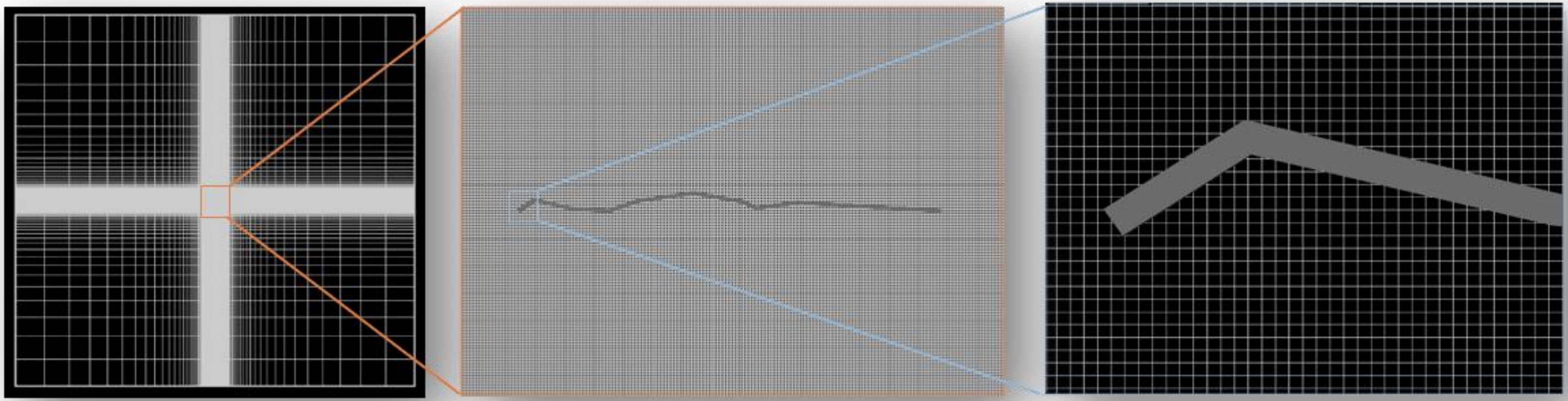
一様流･翼弦長基準Re数	2800
無次元周波数	0.1～0.9
羽ばたき運動	ヒービング（上下方向のみ）

➢ **コルゲート翼と平板翼の空力特性の比較**

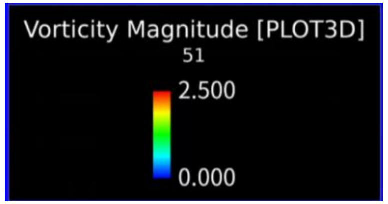
長沼，佐々木，高橋，岡本，
第53 回流体力学講演会／第 39 回航空数値シミュレーション技術シンポジウム
講演論文集，2021年

計算手法

支配方程式	非圧縮性3次元NS方程式
計算格子	等間隔直交格子
物体表現	レベルセット法
物体境界条件	ゴーストセル法

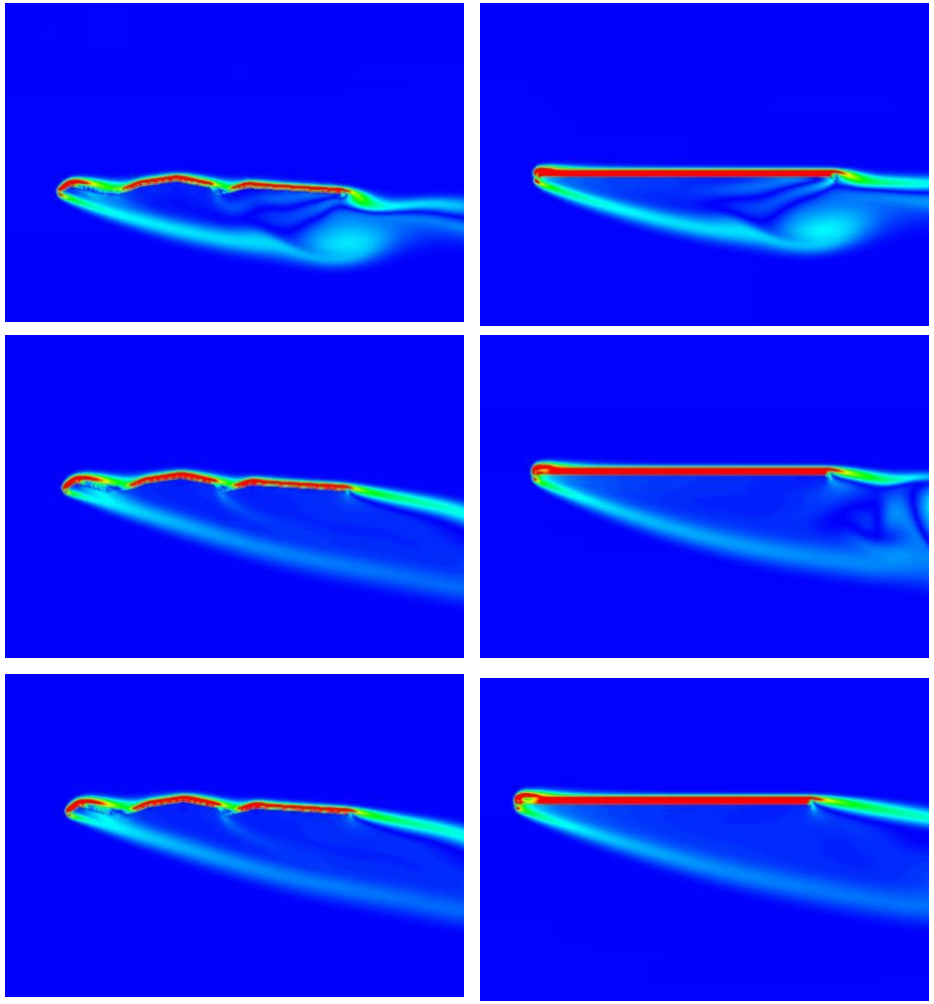


計算結果(上昇時の渦度)



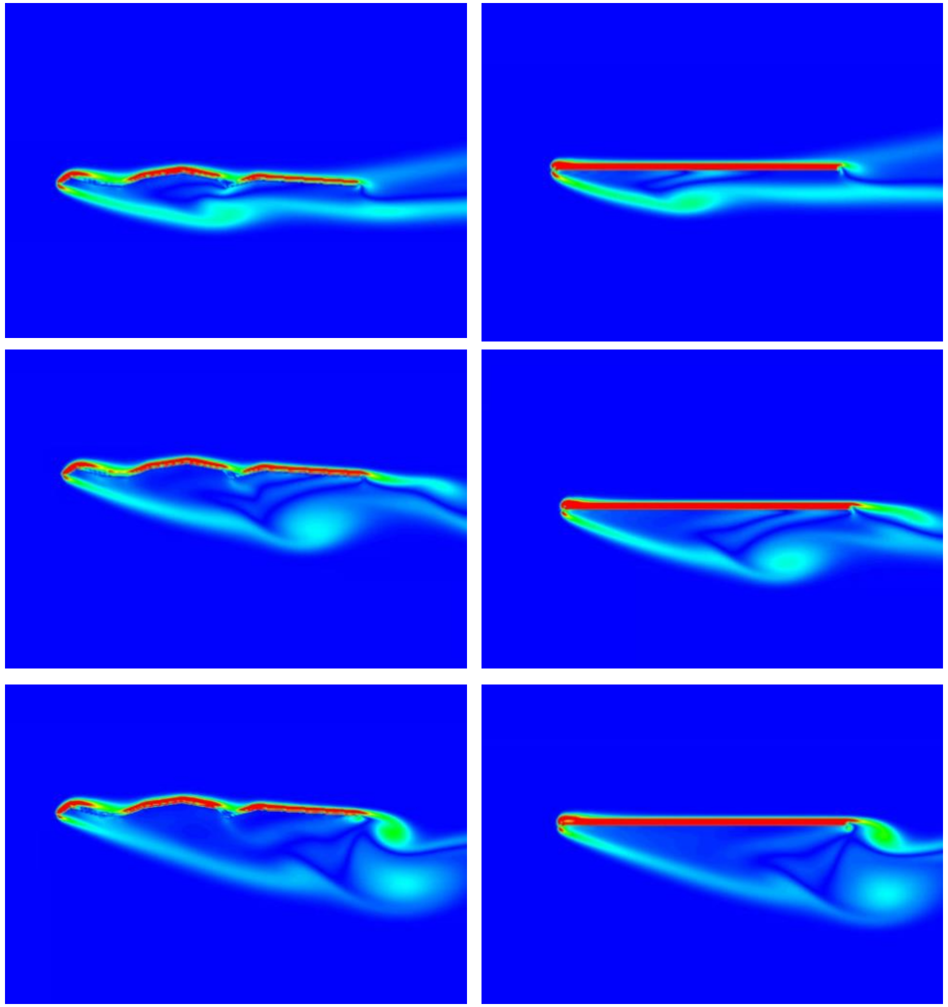
k=0.2

コルゲート翼　平板

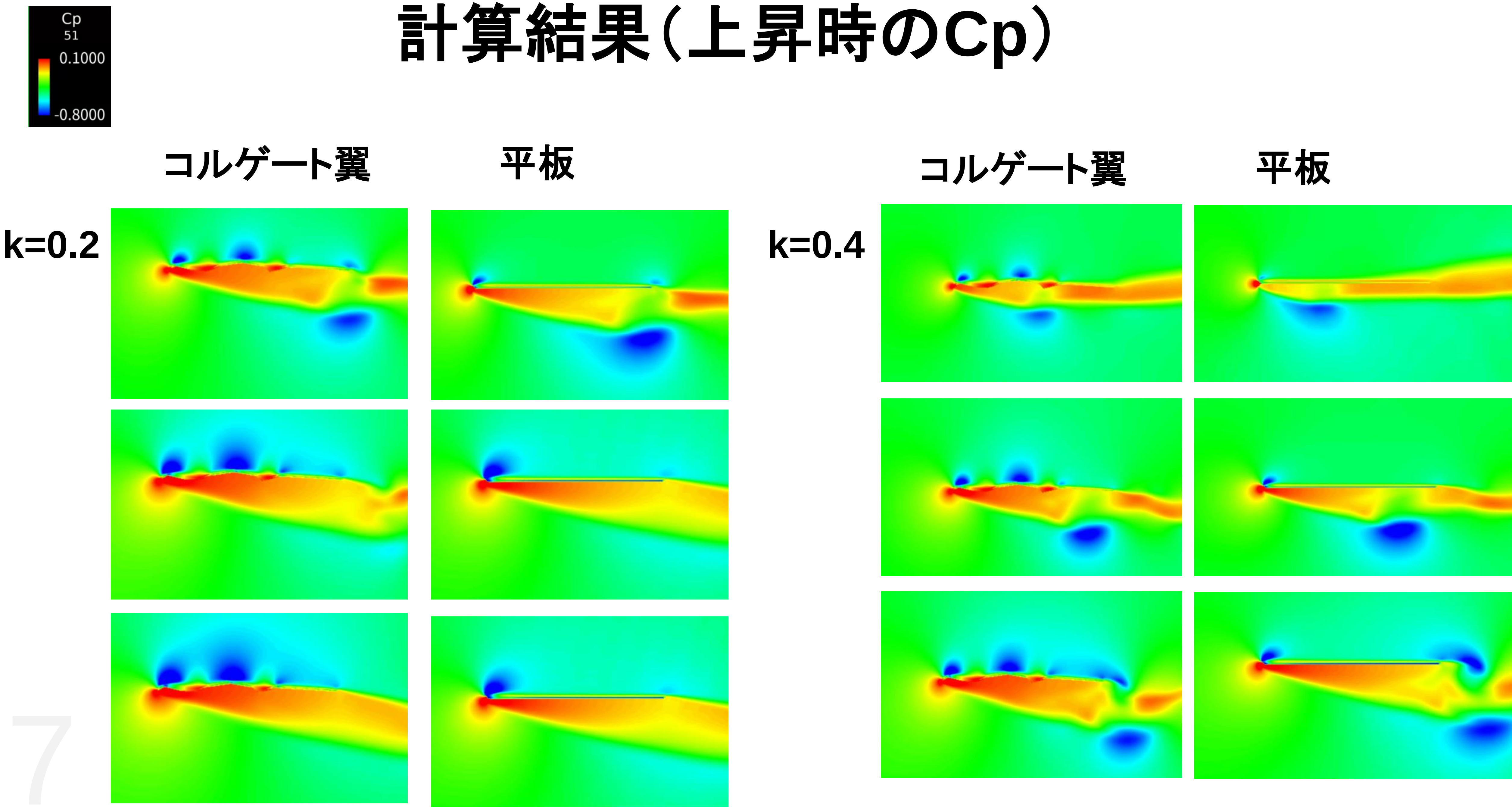


k=0.4

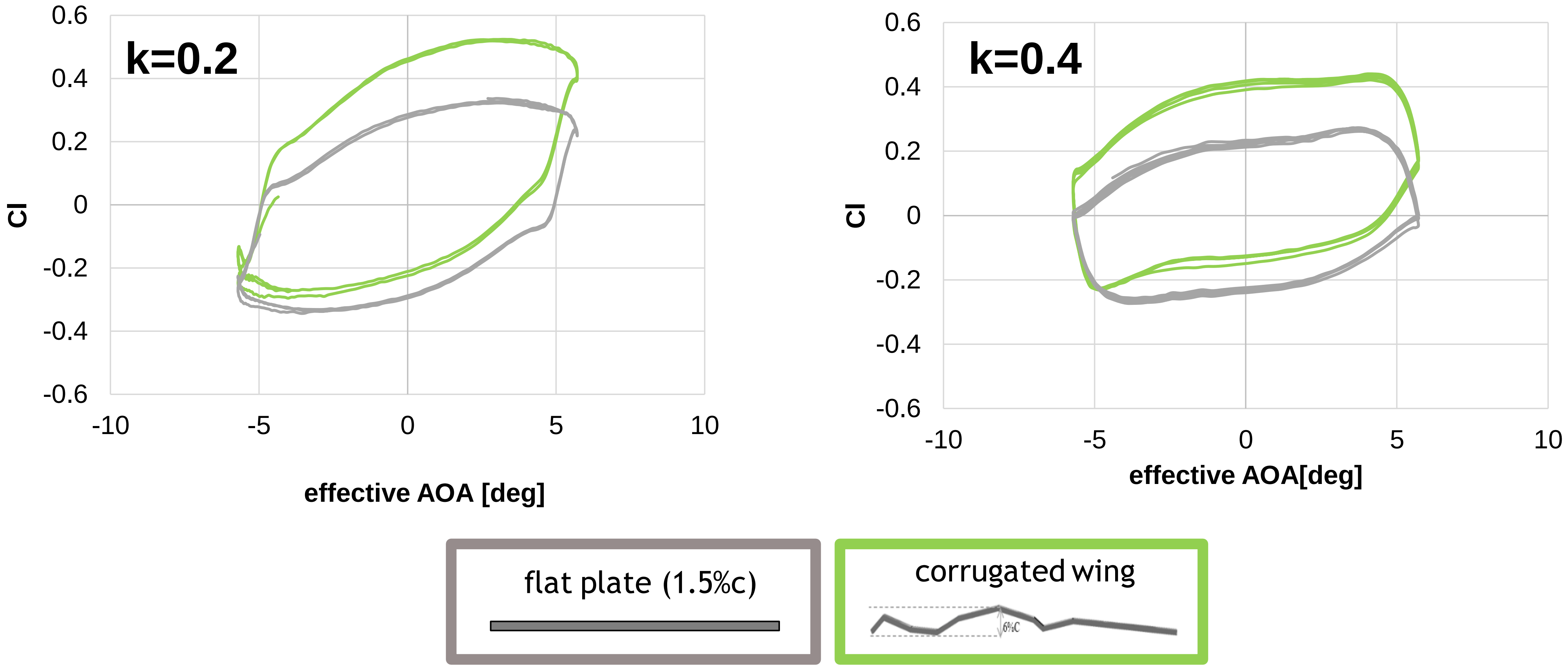
コルゲート翼　平板



計算結果（上昇時のCp）



計算結果(揚力係数)



➤ いずれの場合にもコルゲート翼の方が高Cl

目次

解析手法

支配方程式

連続の式

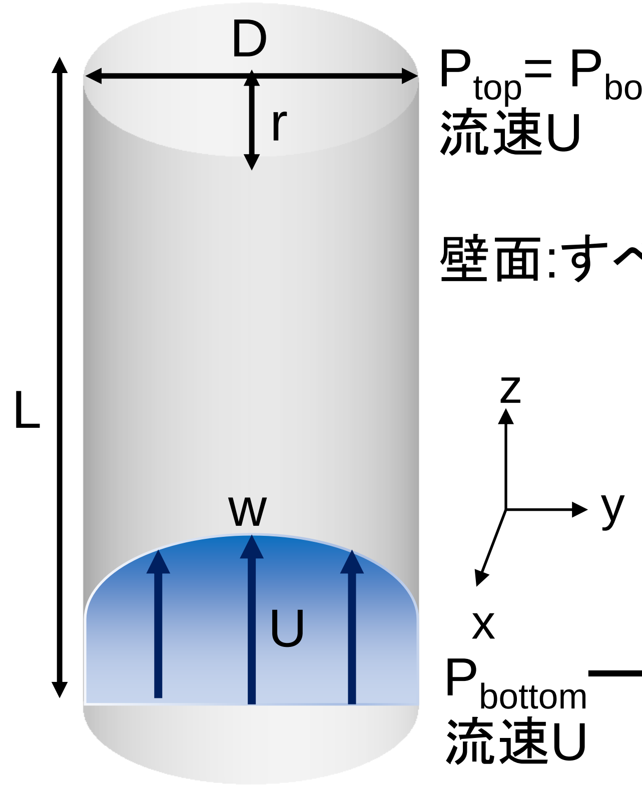
$$\nabla \cdot U = 0$$

3次元非圧縮性Navier-Stokes方程式

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2 U$$

格子	完全等間隔直交格子
離散化	有限差分法
流体-物体境界条件	埋め込み境界法 Level set法，Ghost cell法
圧力解法	BiCGSTAB法
粘性項	2次精度中心差分法
対流項	5次精度WENO法
粘性項の時間積分	Crank-Nicolson法
対流項の時間積分	3次精度TVD Runge-Kutta法

周期境界条件



P_{top}= P_{bottom} -ΔP
流速U

壁面:すべり無し

P_{bottom}
流速U

初期条件:Hagen–Poiseuille流れ
速度分布定義

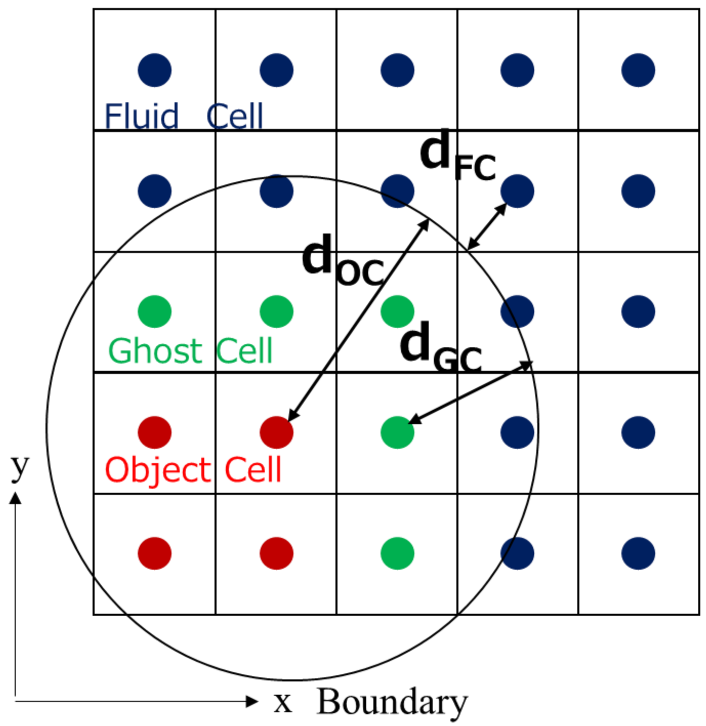
$$w(r) = \frac{\Delta P}{4\mu L}\left\{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - r^2\right\}$$

周期境界条件:底面圧力、上面圧力の差一定
流入口，流出口速度が周期境界条件

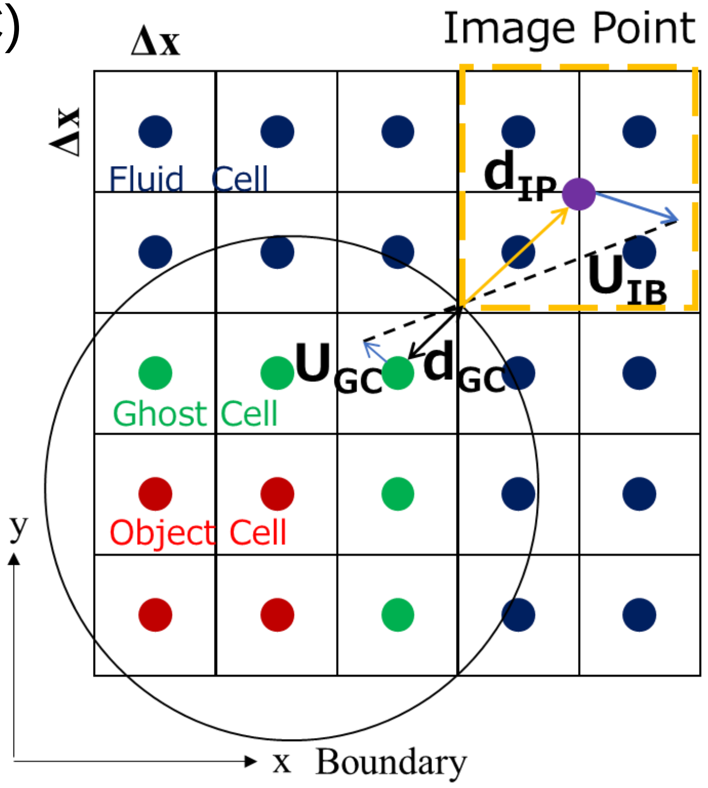
埋め込み境界法

複雑形状･移動物体定義に有効

流体領域：Fluid Cell（FC）
固体：Object Cell（OC）
流体と固体の境界：Ghost Cell（GC）



cellの分類



埋め込み境界法

埋め込み境界法:
格子上のlevel set法 ,ghost cell法
物体,流体境界定義

cellの分類

$$d_{FC} > 0$$
$$d_{GC} \leq 0 \; and \; d_{GC} \geq -2.25\Delta x$$
$$d_{OC} < -2.25\Delta x$$

ghost cellに付加される速度

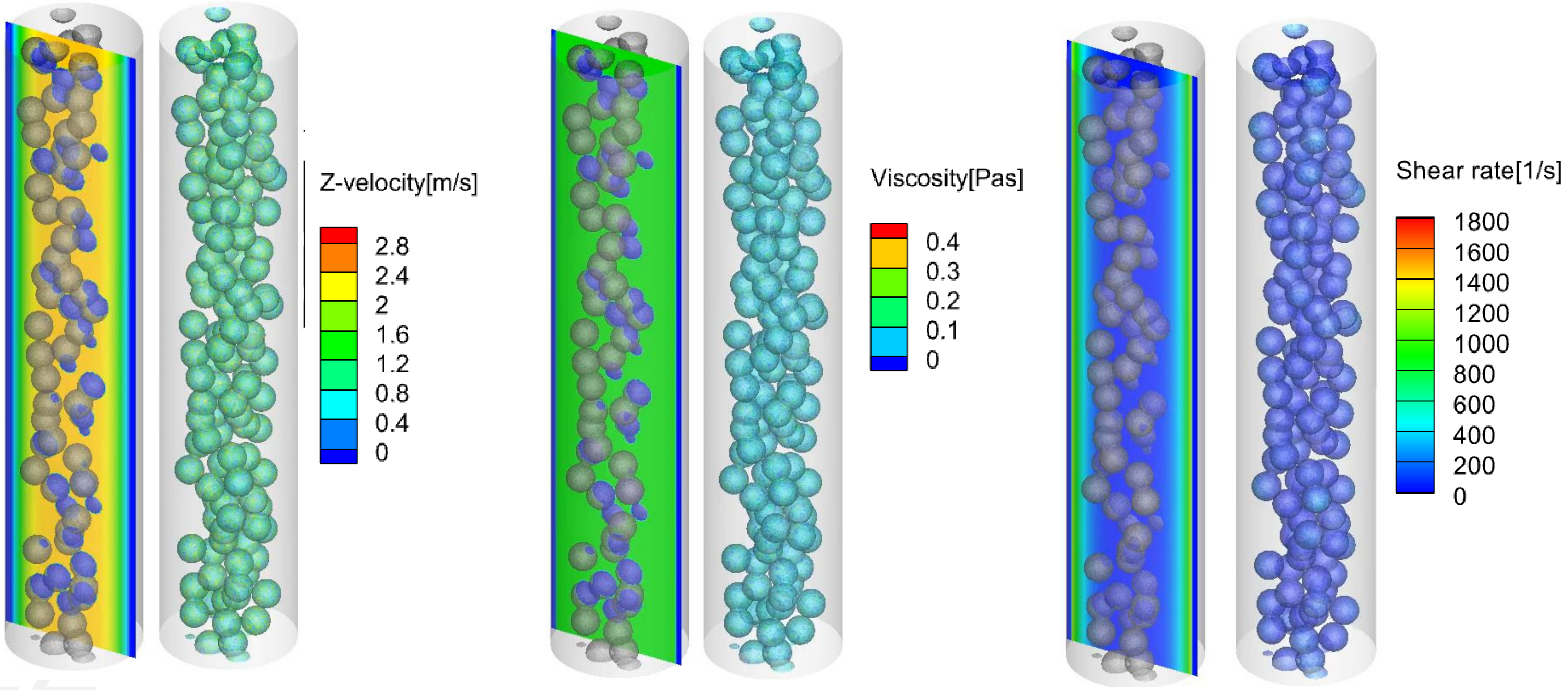
$$U_{GC} = U_{IP} - \frac{d_{IP} + d_{GC}}{d_{IP}}(U_{IP} - U_{IB})$$

S. Takahashi, T. Nonomura, and K. Fukuda, Journalof Applied Mathematics, 2014 (2014),pp.1-21.

円管の可視化(α=0.15)

球分割数	格子幅[m]	格子点数
20	0.15×10^{-3}	100×100×466=4,660,000

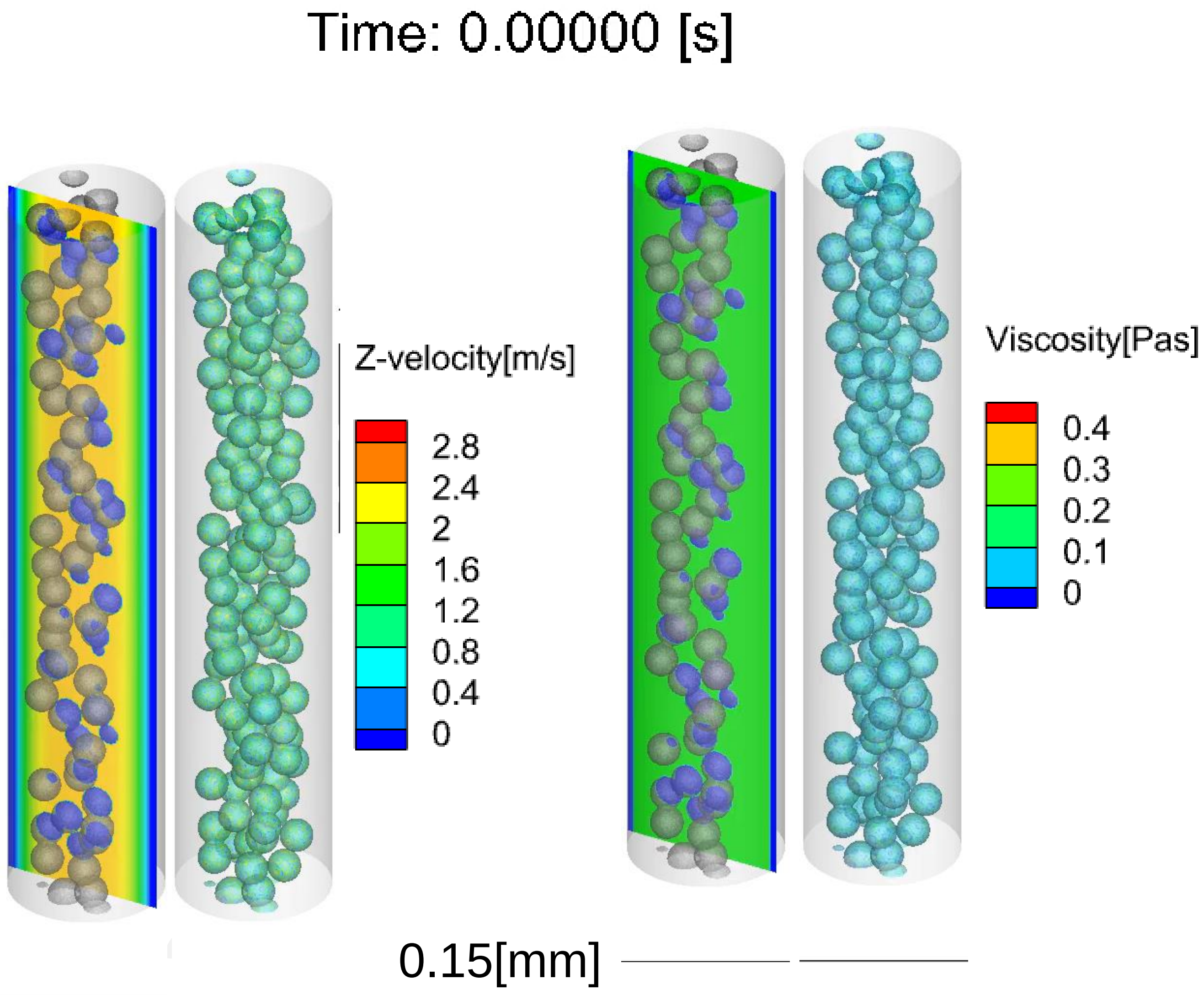
Time: 0.00000 [s]

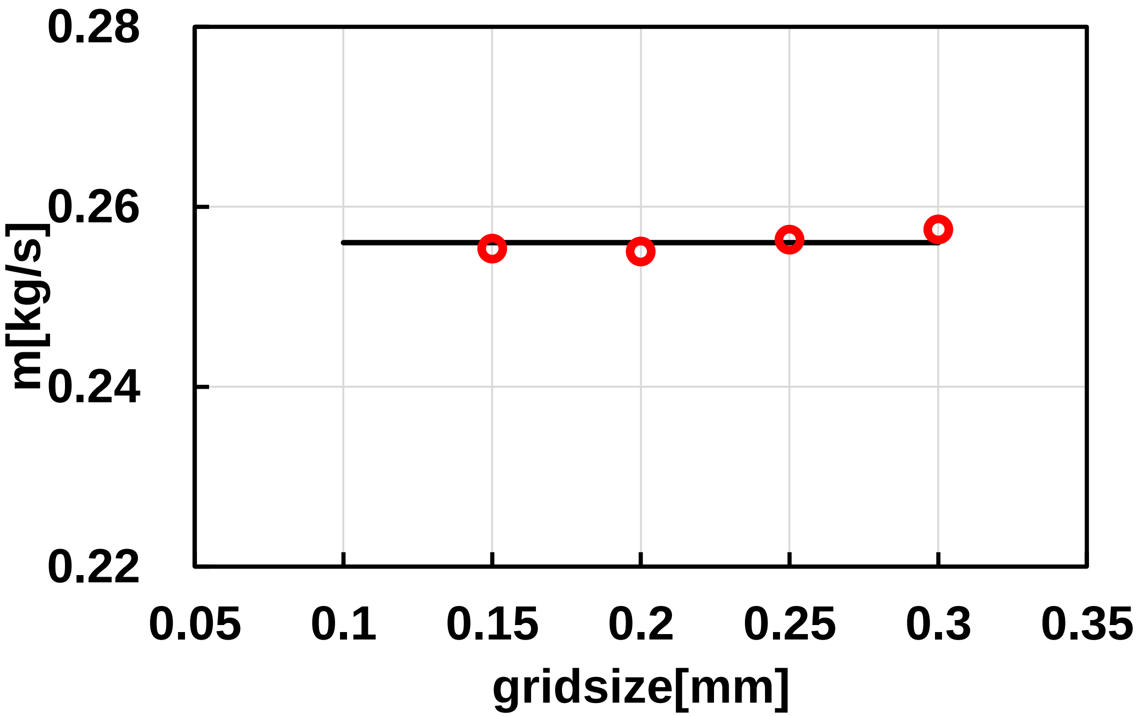


混相流の定量比較(α=0.15)

固体占有率:α

球分割数	格子幅[m]	格子点数
10	0.30×10^{-3}	57×57×233=757,017
12	0.25×10^{-3}	65×65×280=1,183,000
15	0.20×10^{-3}	75×75×350=1,968,750
20	0.15×10^{-3}	100×100×466=4,660,000





質量流量と格子幅の関係(α=0.15)

実験値とCFDの良好な一致を確認

目次

支配方程式

continuous eq.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

momentum eq.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{Ma}{Re}\frac{\partial(\tau_{ij})}{\partial x_j}$$

energy eq.

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\rho E + p)u_j\right] = \frac{Ma}{Re}\frac{\partial(u_i \tau_{ij})}{\partial x_j} - \frac{\partial q_i}{\partial x_i}$$

equation of state

$$p = (\gamma - 1)\left(\rho E - \frac{1}{2}\rho u_i u_i\right) \qquad T = \gamma\frac{p}{\rho}$$

stress tensor

$$\tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}\right)$$

heat flux

$$q_i = -\mu\frac{\gamma}{\gamma - 1}\frac{Ma}{RePr}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{p}{\rho}\right)$$

Sutherland's law

$$\mu = \left(\frac{\tilde{T}}{T_{ref}}\right)^{\frac{3}{2}}\frac{T_{ref} + S}{\tilde{T} + S}$$

equation of motion

$$\frac{\rho \pi s}{6}\frac{\partial U_j}{\partial t} = \int_{\Gamma}\left[-p\delta_{ij} + \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]n_j dS$$

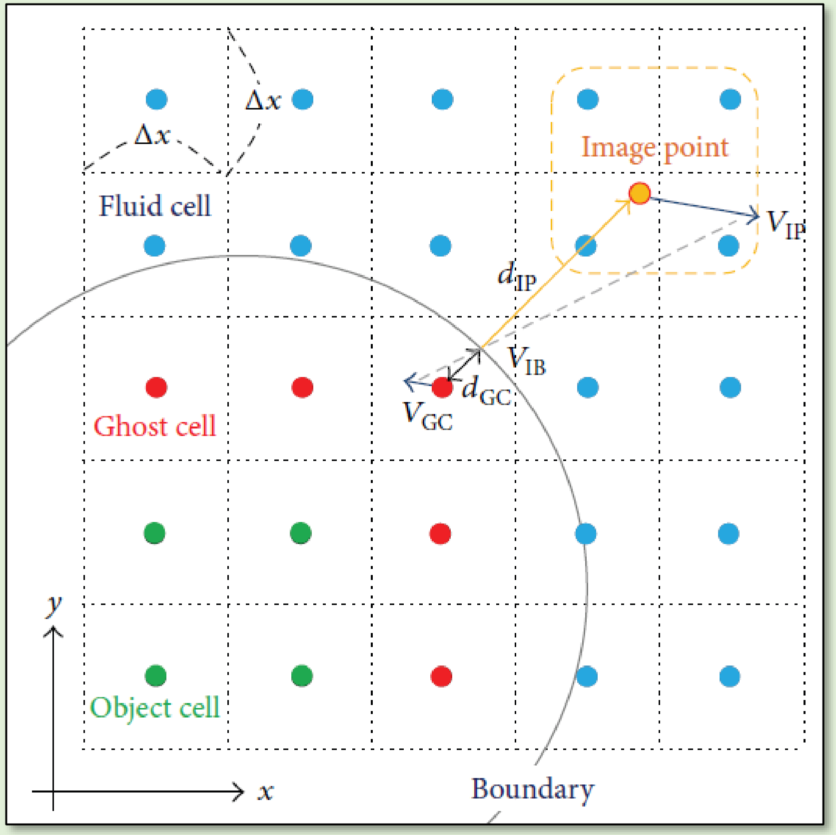
- 無次元化Navier-Stokes方程式
- Sutherland則
- 球の3自由度並進の運動方程式

計算手法

流体の方程式	圧縮性Navier-Stokes方程式 & Sutherland式
運動の方程式	3自由度並進運動方程式（回転含まない）
空間離散化	等間隔直交格子（外部境界近傍は不等間隔直交格子）
非粘性流束	3次精度MUSCL-Roe & 2次精度擬混合型ハイブリッド
粘性流束	2次精度中心差分
時間積分	3次精度TVD Runge-Kutta陽解法
壁面境界条件	ゴーストセル型埋め込み境界法（断熱・粘性壁）
外部境界条件	流入：Dirichlet型　側面&流出：Neumann型
並列計算法	ハイブリッドMPI

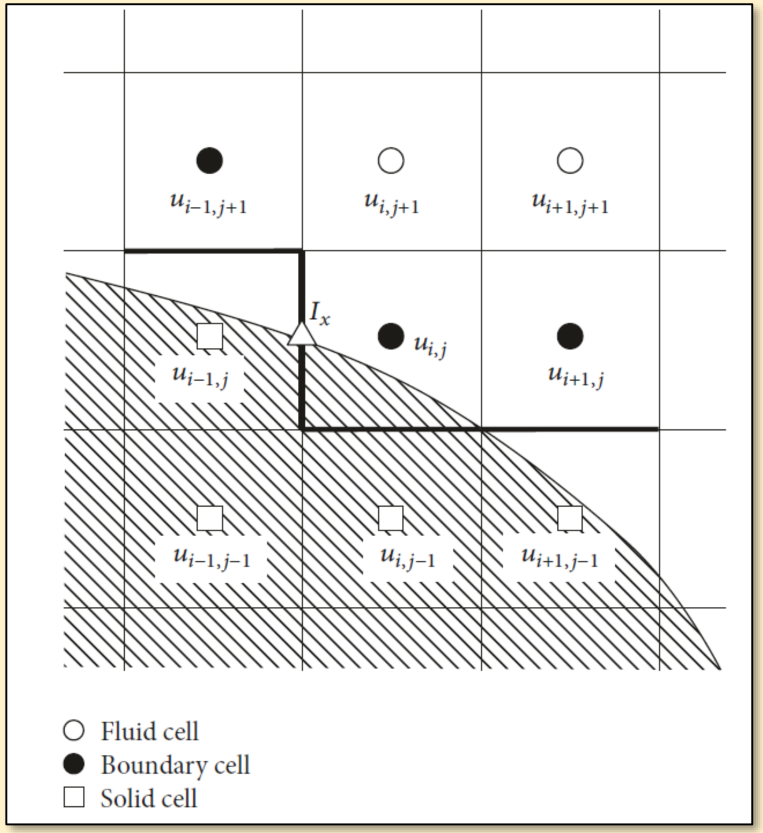
埋め込み境界法(IBM)

Takahashi, S., et al.,
J. of Appl. Math. (2014) ,252478



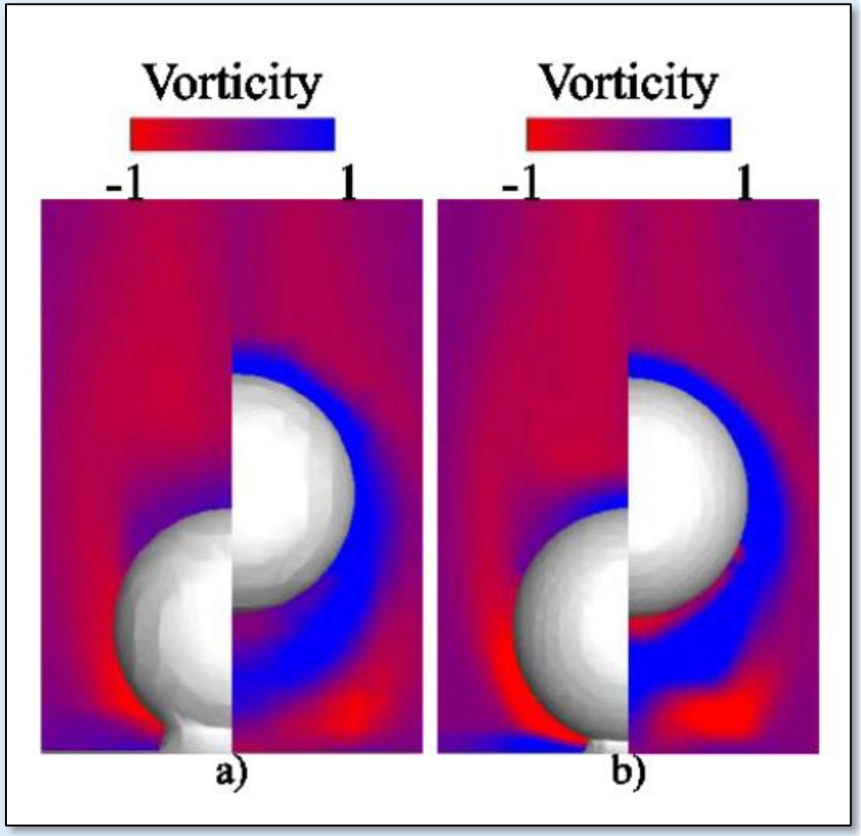
➢ゴーストセル型IBMの開発

Nonomura, T., et al.,
Math. Prob. Eng. (2017) ,8314615



➢表面流体力計算の開発

Mizuno, Y., et al.,
Appl. Sci. (2018) ,8, 2387



➢運動方程式連成の開発

亜音速～超音速の低Re数の物体周りの数値計算法の開発

先行研究に基づいた初期条件

Tanno, H., et al.,
Shock Waves (2003) 13: 191–200

- 衝撃波Ma数:1.22
- 粒子Re数:30万
- 衝撃波管による実験&CFD
- 論文の条件抜粋

高圧領域(2):窒素

$\rho_2 = 1.66\ \mathrm{kg/m^3}$
$u_2 = 114\ \mathrm{m/s}$
$p_2 = 159\ \mathrm{kPa}$
$\mu_2 = ?$

D=80mm

Exp

低圧領域(1):室温空気

$\rho_1 = 1.205\ \mathrm{kg/m^3}$
$u_1 = 0$
$p_1 = 101\ \mathrm{kPa}$
$\mu_1 = 1.82\mathrm{x}10^{-5}\ \mathrm{Pa{\cdot}s}$

Sun, M., et al.,
Shock Waves (2004) 14: 3–9

- 衝撃波Ma数:1.22
- 粒子Re数:49~49万
- BFC軸対称細分化格子CFD
- 論文の記述を元に無次元化

高圧領域(2):理想気体

$\rho_2 = 1.9269$
$u_2 = 0.3361$
$p_2 = 1.5696$
$\mu_2 = 0.013217$

D=1

Sun≒本研究

低圧領域(1):理想気体

$\rho_1 = 1.4$
$u_1 = 0$
$p_1 = 1$
$\mu_1 = \mu_2$

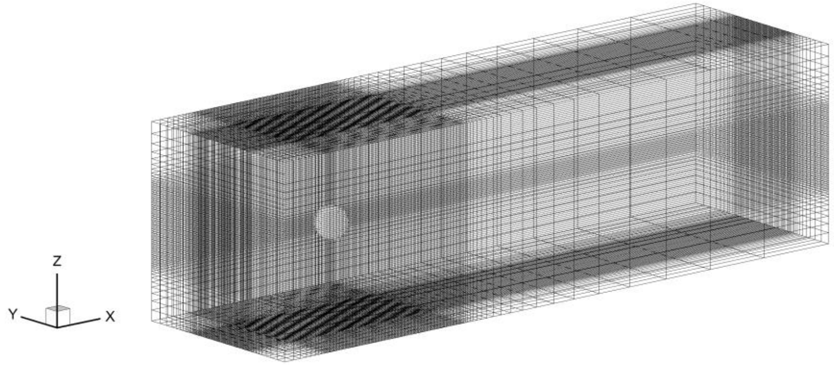
本研究は
粒子Re数が
49の場合のみ
($Kn=9.4\times10^{-3}$)

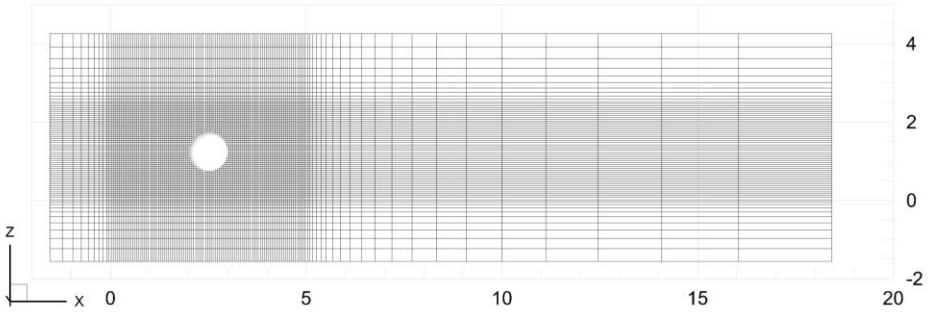
※CPD: Cell Per Diameter

計算格子

※1/8粗視化データを可視化

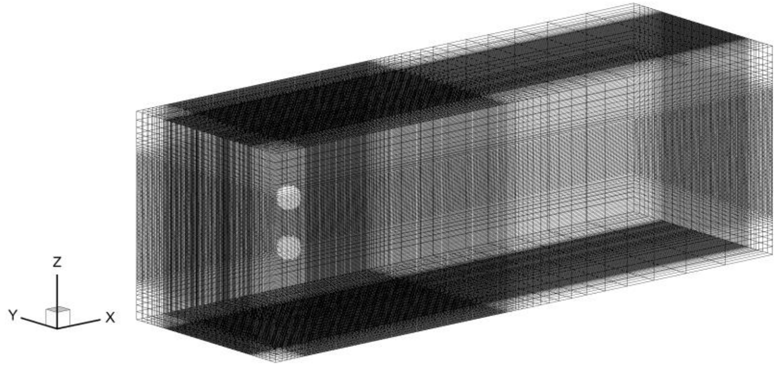
単一球の解析

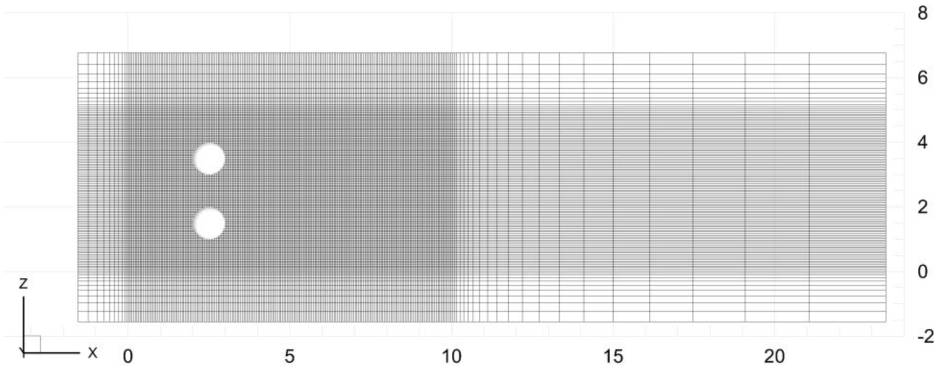




名称	格子幅	格子点数
CPD20	0.05D	1.3M (160×90×90)
CPD40	0.025D	5.1M (260×140×140)
CPD80	0.0125D	26M (460×240×240)

2球の解析

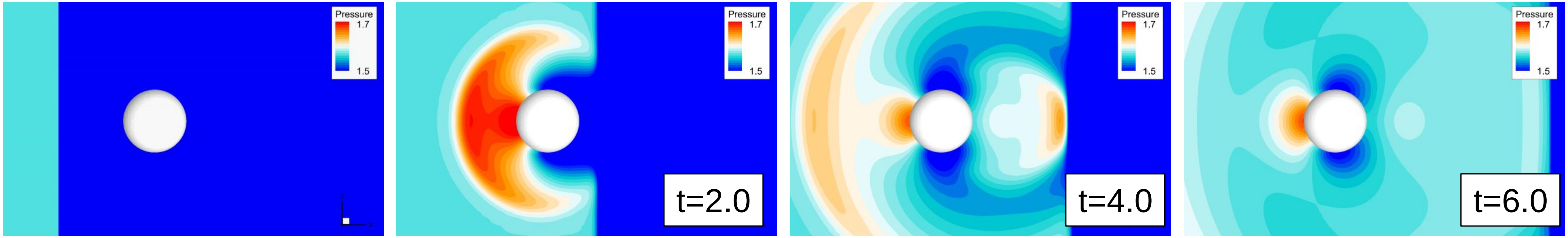


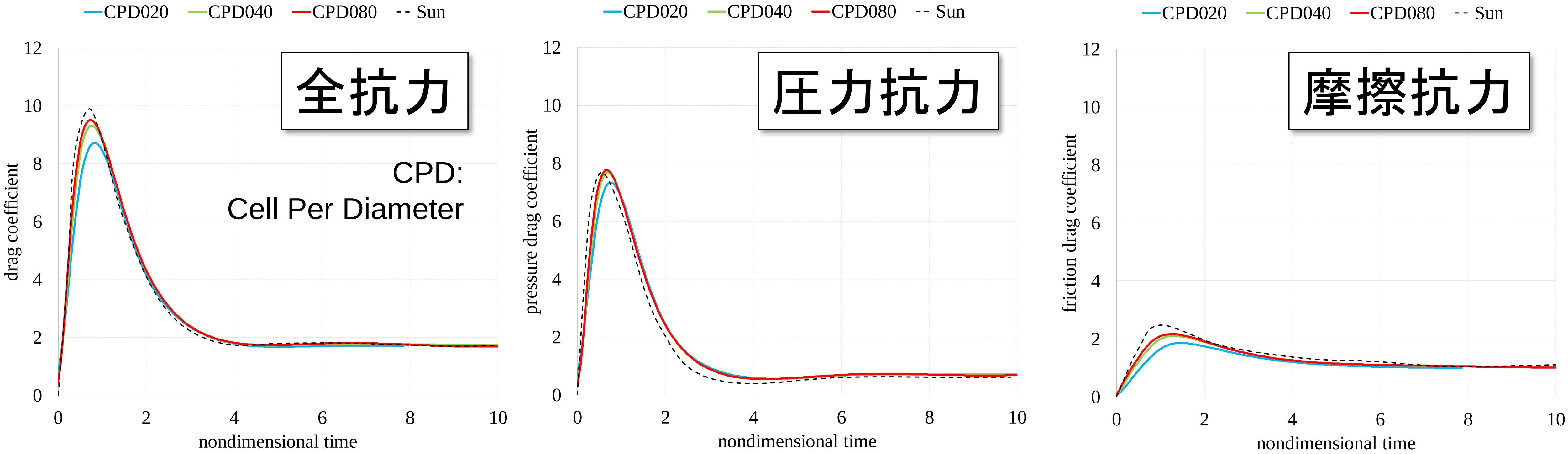


名称	格子幅	格子点数	球の比重
直列	0.025D (CPD40)	26M (460×240×240)	10, 100, 1000 (気体密度に対する比)
並列			
斜め			

圧力の可視化

【検証】格子依存性



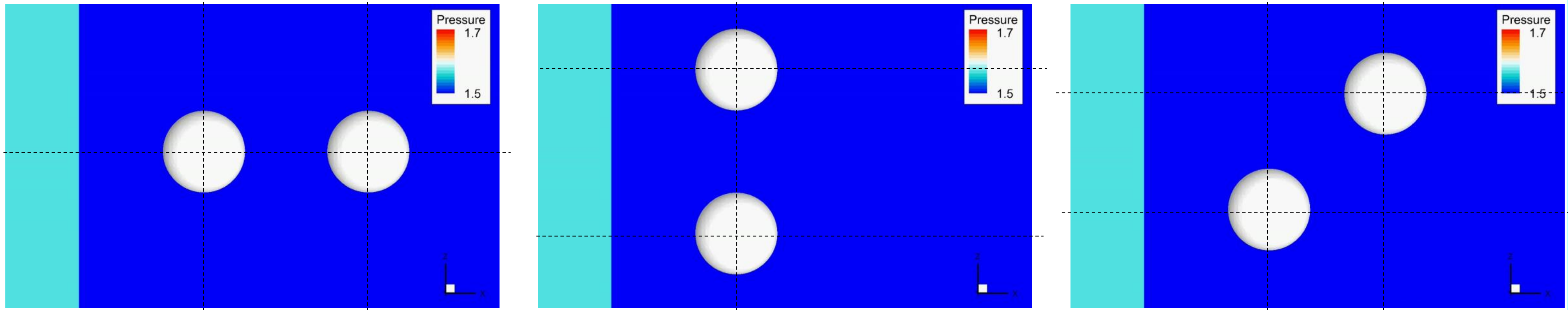


CPD40で格子収束→移動球の解析はすべてCPD40で実施

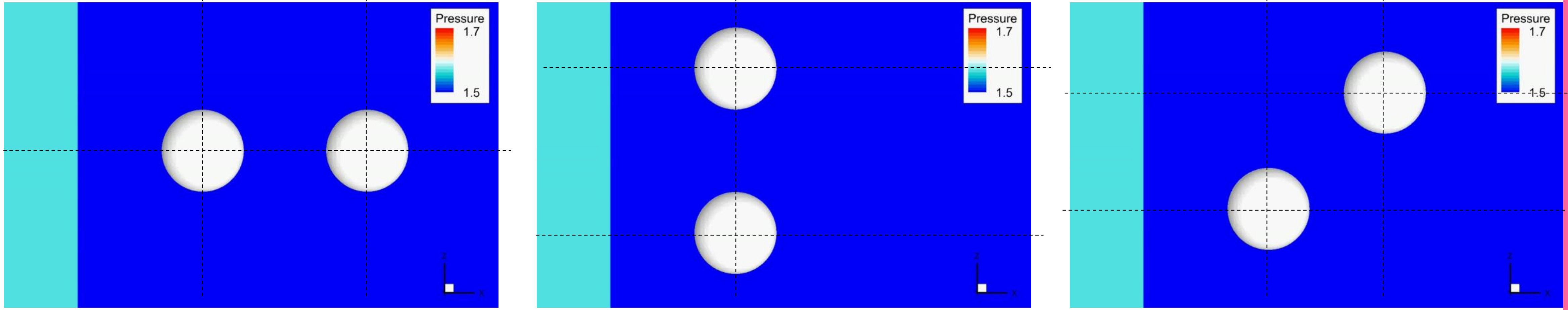
※ここでの比重
→気体に対する密度比

【応用2】比重別の移動する2球の解析

比重
10

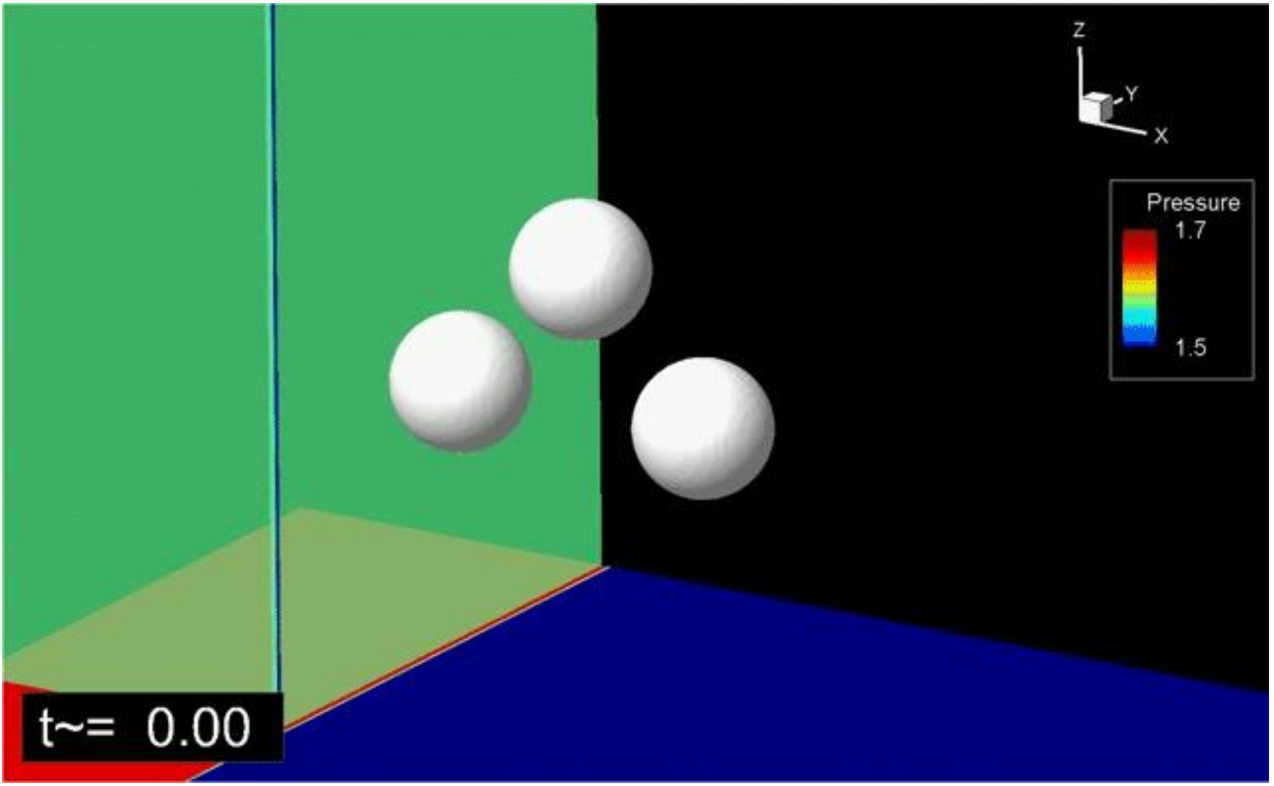


比重
1000

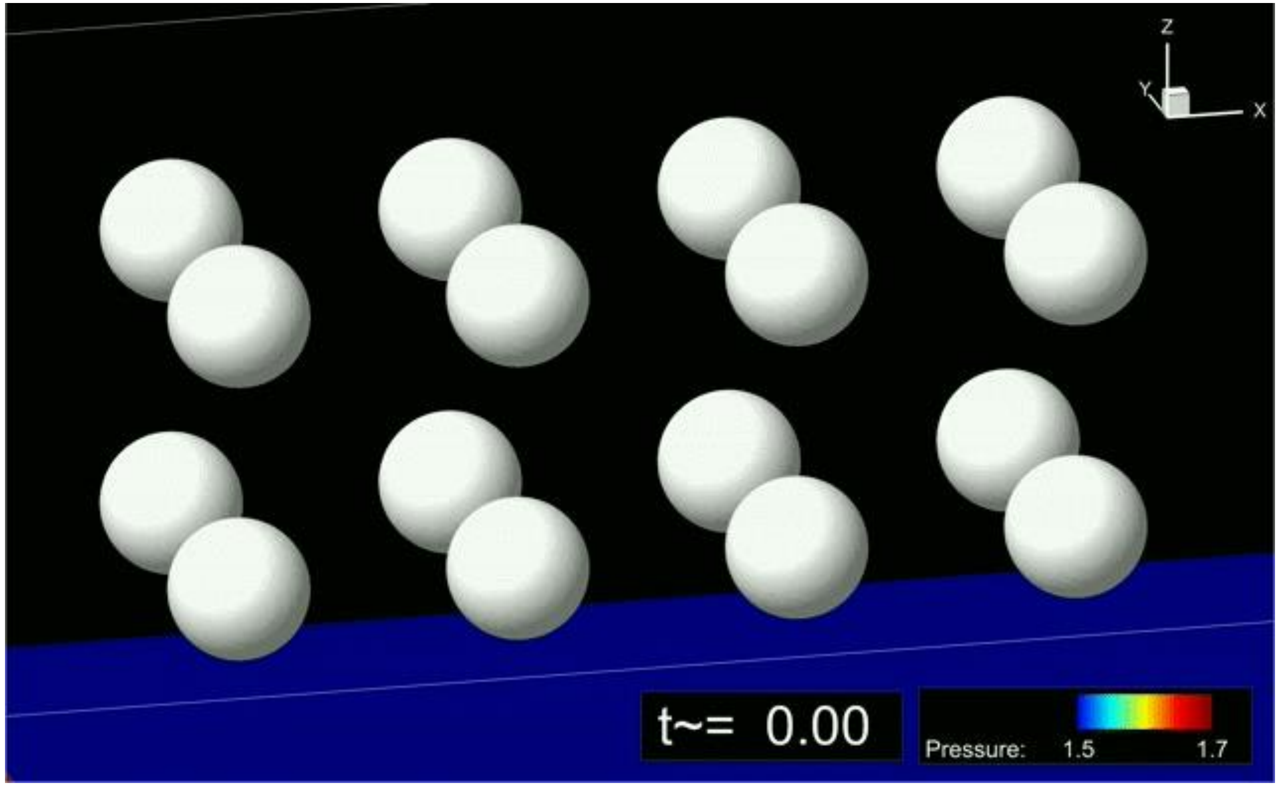


比重1000は比重10に比べて固定と見做して差し支えない（移動量100倍差）

衝撃波負荷により移動する多数粒子



3粒子



16粒子

まとめと今後の課題

1. ゴーストセル法の応用性を移動境界問題で確認
2. ゴーストフルード法を非圧縮・圧縮流れに適用
3. さらに高精度かつ汎用性の高い解析法の構築