

OpenFOAMによる 細管内固液混相流のシミュレーション

富山県立大学 *入山卓 中川慎二 畠山友行

平成26年 11月14日

背景

マイクロカプセルを用いた伝熱デバイス

細管(≒ ϕ 1~2mm) + 相変化マイクロカプセル懸濁液

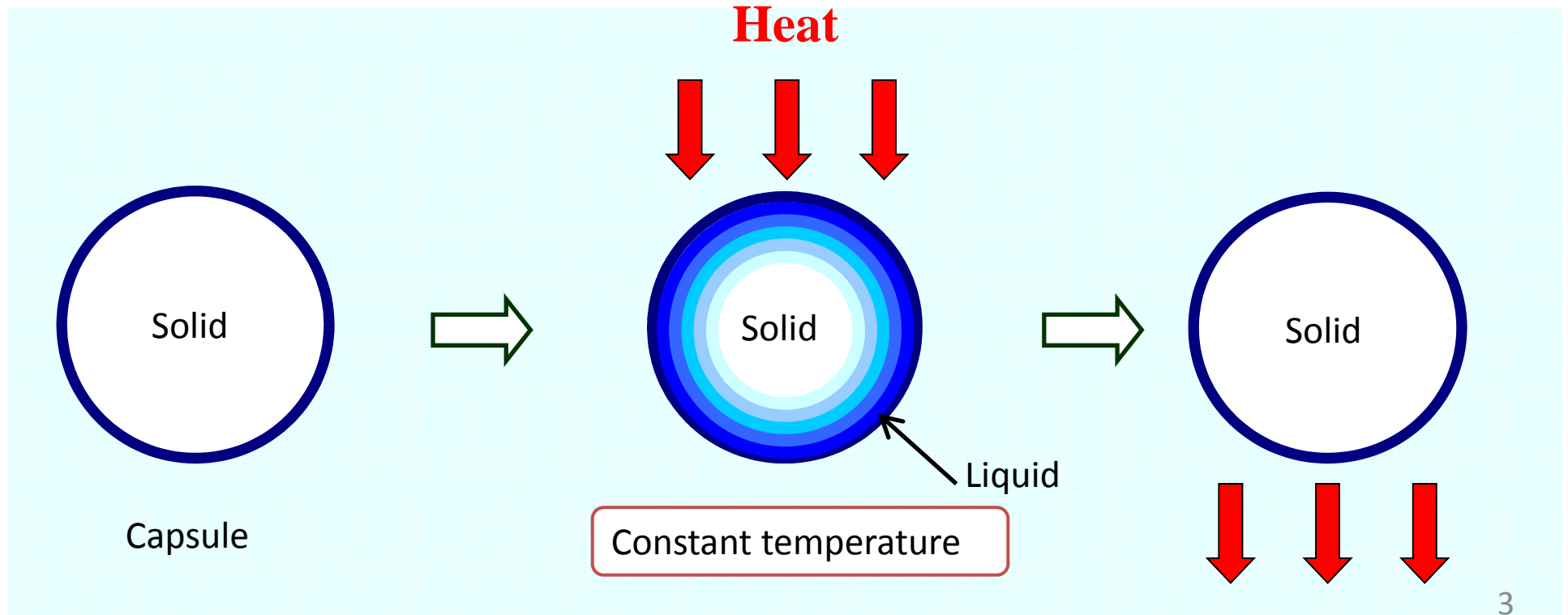
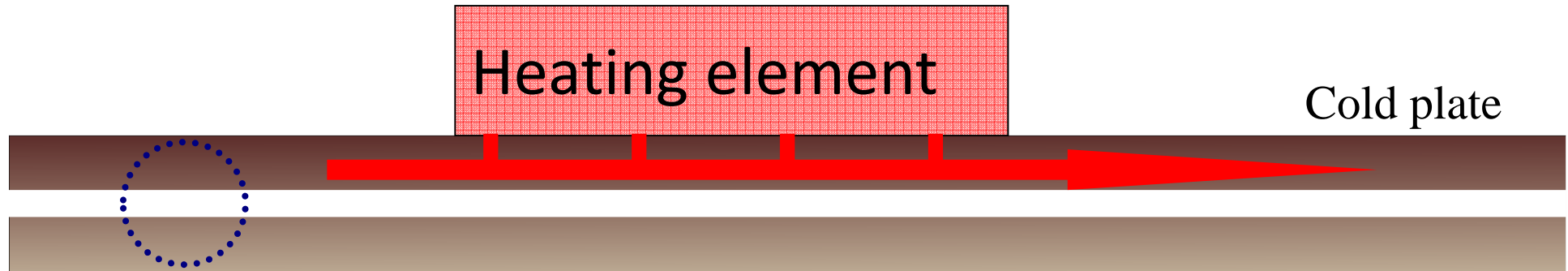


潜熱を利用した伝熱性能の向上

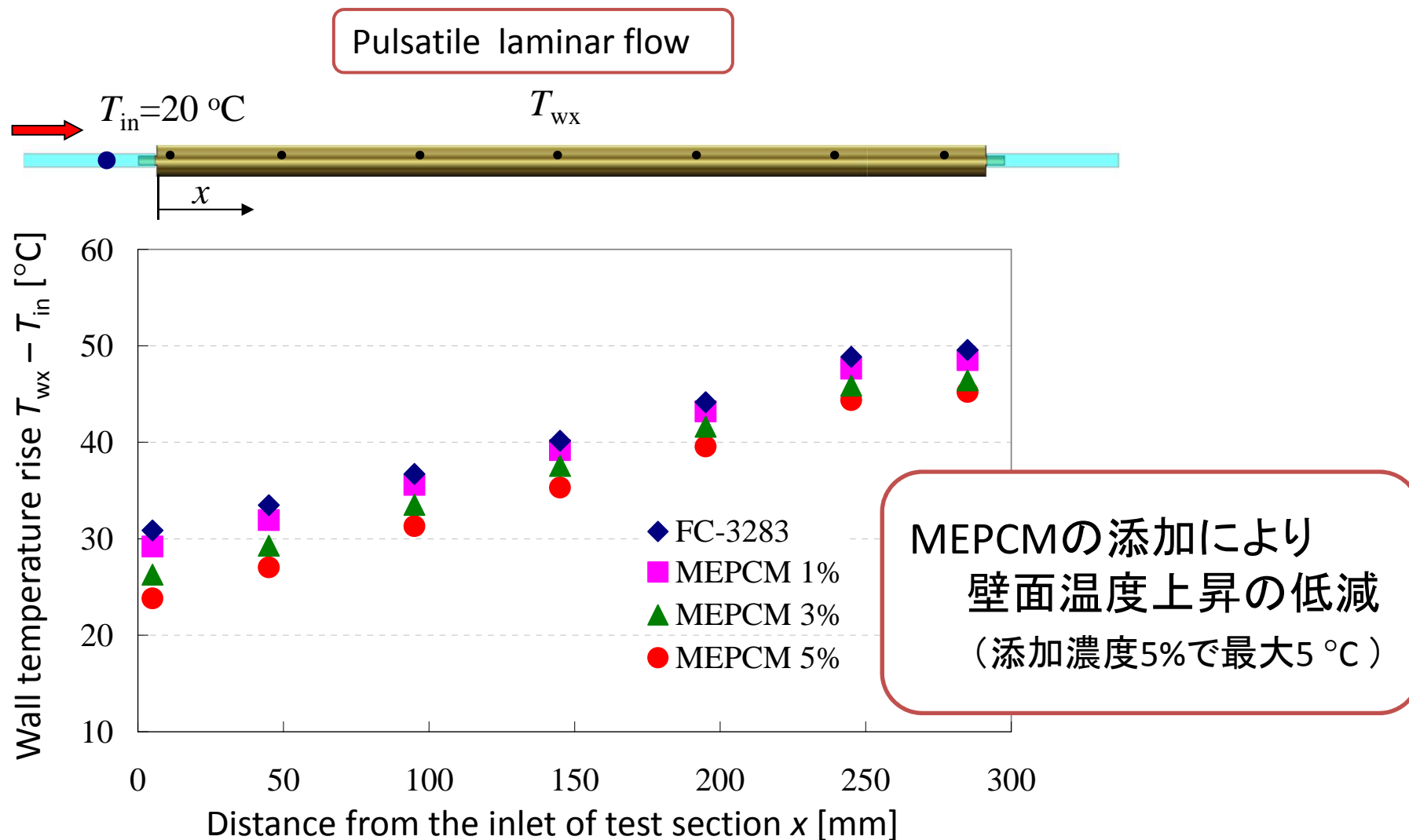
カプセル分散状況の伝熱効率への影響??

細管内でのマイクロカプセル分散状況の把握

マイクロカプセルを用いた液冷システム



先行研究：壁面温度分布 (脈動あり, 流量 7mL/min)



先行研究：流動粒子の可視化

カメラ(側面)

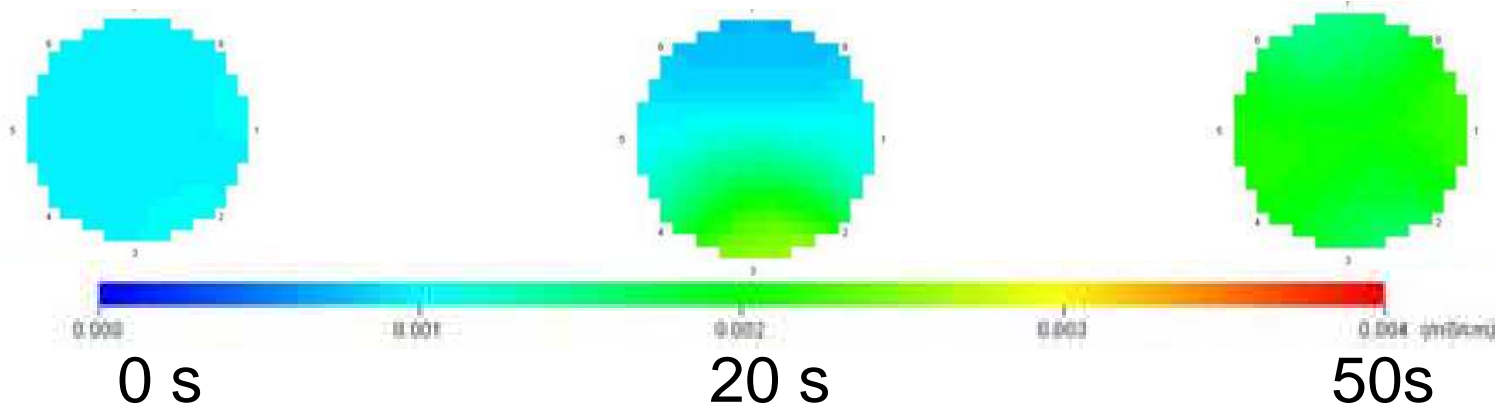
・密度比
粒子/流体=1.1

・質量濃度
5%

脈動なし



ERT



立島ら：電気抵抗式トモグラフィーを用いた細管内固液混相流の可視化に関する基礎研究
可視化情報 Vol.31 Suppl. No.2 (2012) pp.59-60.

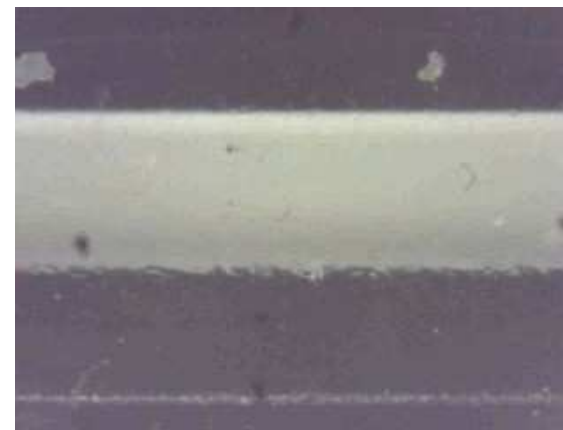
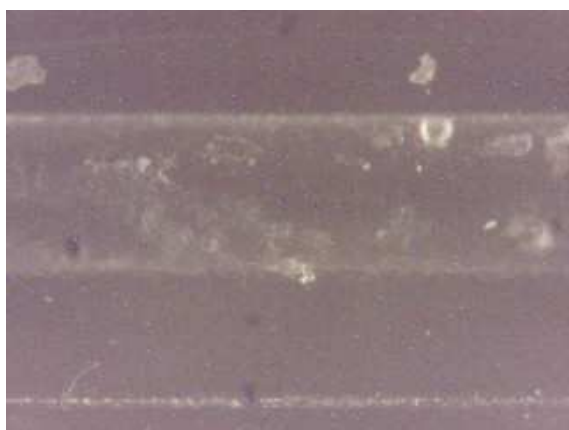
先行研究：流動粒子の可視化

カメラ(側面)

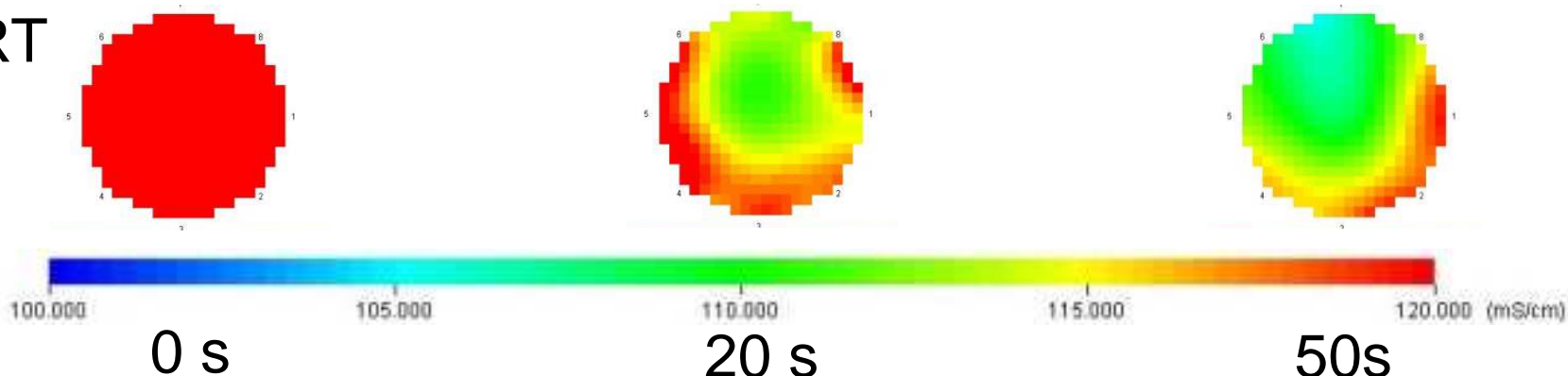
・密度比
粒子/流体=0.6

・質量濃度
5%

脈動なし



ERT



立島ら：電気抵抗式トモグラフィーを用いた細管内固液混相流の可視化に関する基礎研究
可視化情報 Vol.31 Suppl. No.2 (2012) pp.59-60.

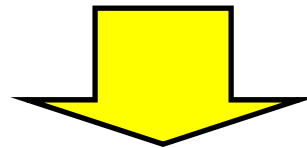
先行研究

- 壁面温度上昇の低減

○ マイクロカプセルを用いた伝熱デバイス

- 流動粒子の可視化実験

× 詳細な分散状況(解像度, センサの設置)
カプセル内部の固液相変化率



シミュレーション技術の活用

目的

細管内を流れる粒子分散状況を
OpenFOAMを用いシミュレーションする。
その実用性を検討する。

- DEM(Discrete Element Method)
- 二流体モデル

シミュレーション手法

- CFDソフトウェア

「OpenFOAM ver 2.3.0」

- 使用ソルバ

DEM :icoFoam

+icoUncoupledKinematicParcelFoam

二流体 :twoPhaseEulerFoam

DEM:支配方程式(流体)

- 連続の式

$$\nabla \cdot \vec{U}_f = 0$$

- Navier-Stokes方程式

$$\frac{\partial \vec{U}_f}{\partial t} + \vec{U}_f \cdot \nabla \vec{U}_f = -\frac{\nabla p}{\rho_f} + \nu \nabla^2 \vec{U}_f - \frac{\vec{S}_p}{\rho_f}$$

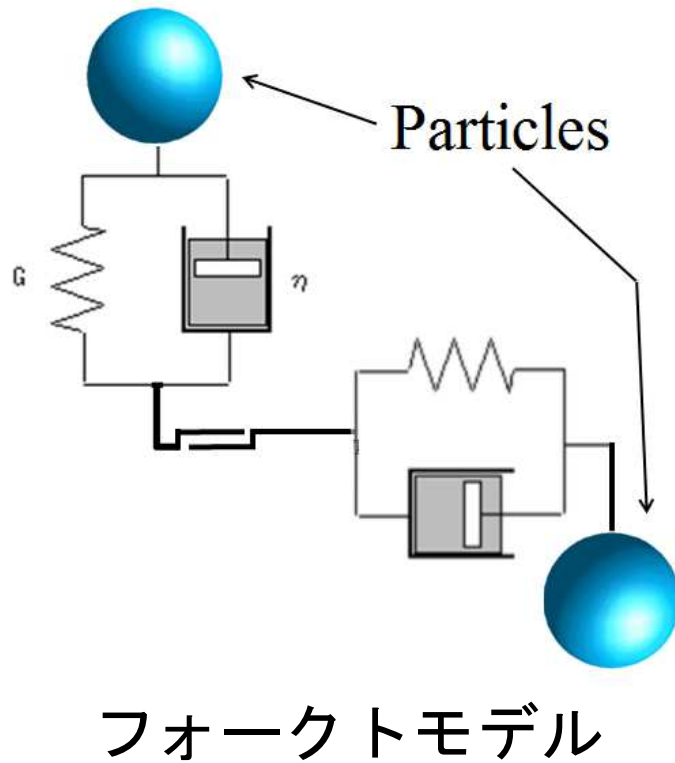
粒子からの影響

DEM:支配方程式(粒子)

- $$m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = \sum \vec{F}$$
$$= \underbrace{\vec{F}_D}_{\text{抗力}} + \underbrace{\vec{F}_G}_{\text{重力・浮力}} + \sum \underbrace{\vec{F}_c}_{\text{接触力}}$$

- $$\frac{d\vec{\omega}_p}{dt} = \frac{\sum \vec{T}_p}{I_p} \quad \text{回轉運動}$$

接触力



$$\sum \vec{F} = \vec{F}_D + \vec{F}_G + \sum \vec{F}_C$$

$$\vec{F}_C = -k\delta^{1.5} - \eta\vec{v}$$

弾性力

(ばね)

減衰力

(ダッシュポット)

KinematicCloudProperties

```
patchInteractionModel  standardWallInteraction;  
  standardWallInteractionCoeffs  
  {  
    type      rebound;  
    e          0.9;  
    mu        0.43;  
  }  
  
collisionModel  none;           //pairCollision;
```

二流体モデル

支配方程式(連続の式)

- 連続相(水)

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_w \overrightarrow{U_w}) = 0$$

- 分散相(粒子)

$$\frac{\partial \alpha_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_p \overrightarrow{U_p}) = 0$$

二流体モデル

支配方程式(Navier-Stokes方程式)

- 連続相(水)

$$\frac{\partial \alpha_w \vec{U}_w}{\partial t} + \alpha_w \vec{U}_w \cdot \nabla \vec{U}_w = -\frac{\alpha_w}{\rho_w} \nabla p + \alpha_w \nu_w \nabla^2 \vec{U}_w - \frac{\vec{M}}{\rho_w} + \alpha_w \vec{g}$$

- 分散相(粒子)

$$\frac{\partial \alpha_p \vec{U}_p}{\partial t} + \alpha_p \vec{U}_p \cdot \nabla \vec{U}_p = -\frac{\alpha_p}{\rho_p} \nabla p + \alpha_p \tau_p + \frac{\vec{M}}{\rho_p} + \alpha_p \vec{g}$$

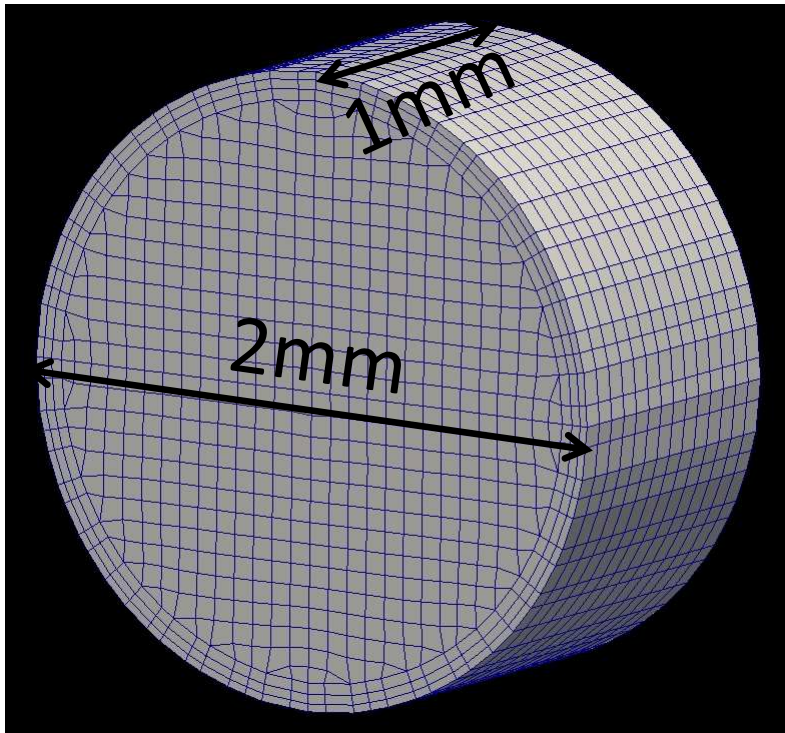
粒子間の接触応力 相互の影響 重力

相間の運動量輸送項 M

$$\frac{\vec{M}V}{\alpha} = \vec{F}_d + \vec{F}_l + \vec{F}_{vm} + \vec{F}_o$$

drag lift virtual other
 mass forces

モデル,境界条件,初期条件 (DEM,二流体モデル共通)



Cell数 11000

境界条件

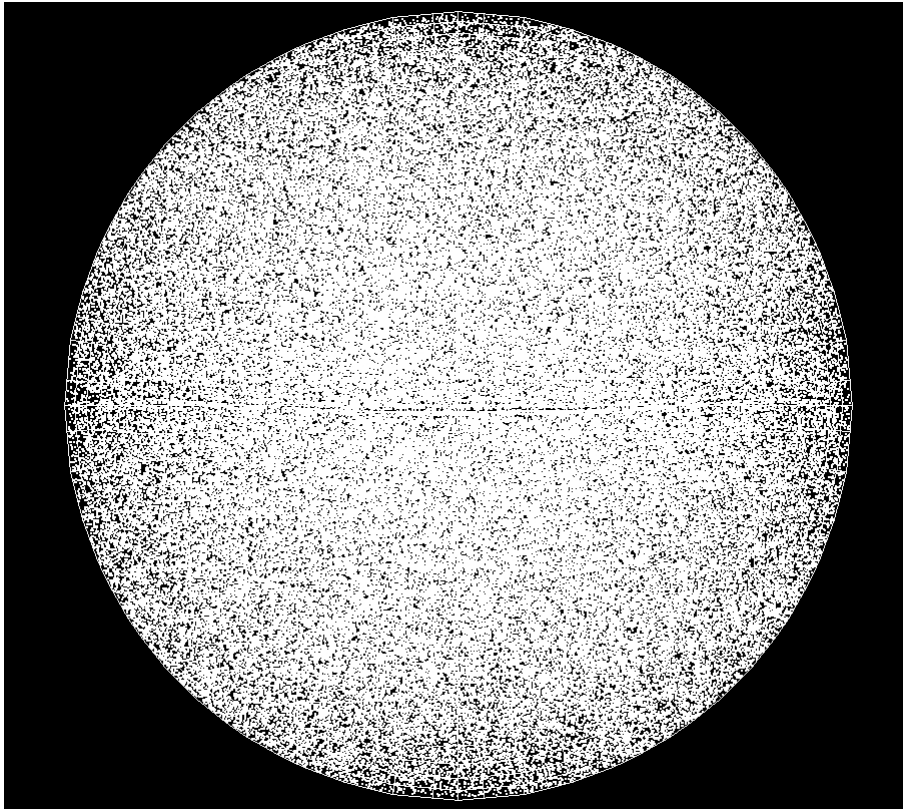
	速度[m/s]	圧力差[Pa]	
		密度比[-]	
		1.1	0.6
入口	周期境界条件	0.43	0.87
出口	周期境界条件		
壁	0	勾配0	

初期条件

速度[m/s]

発達した速度分布

物性値, 粒子配置

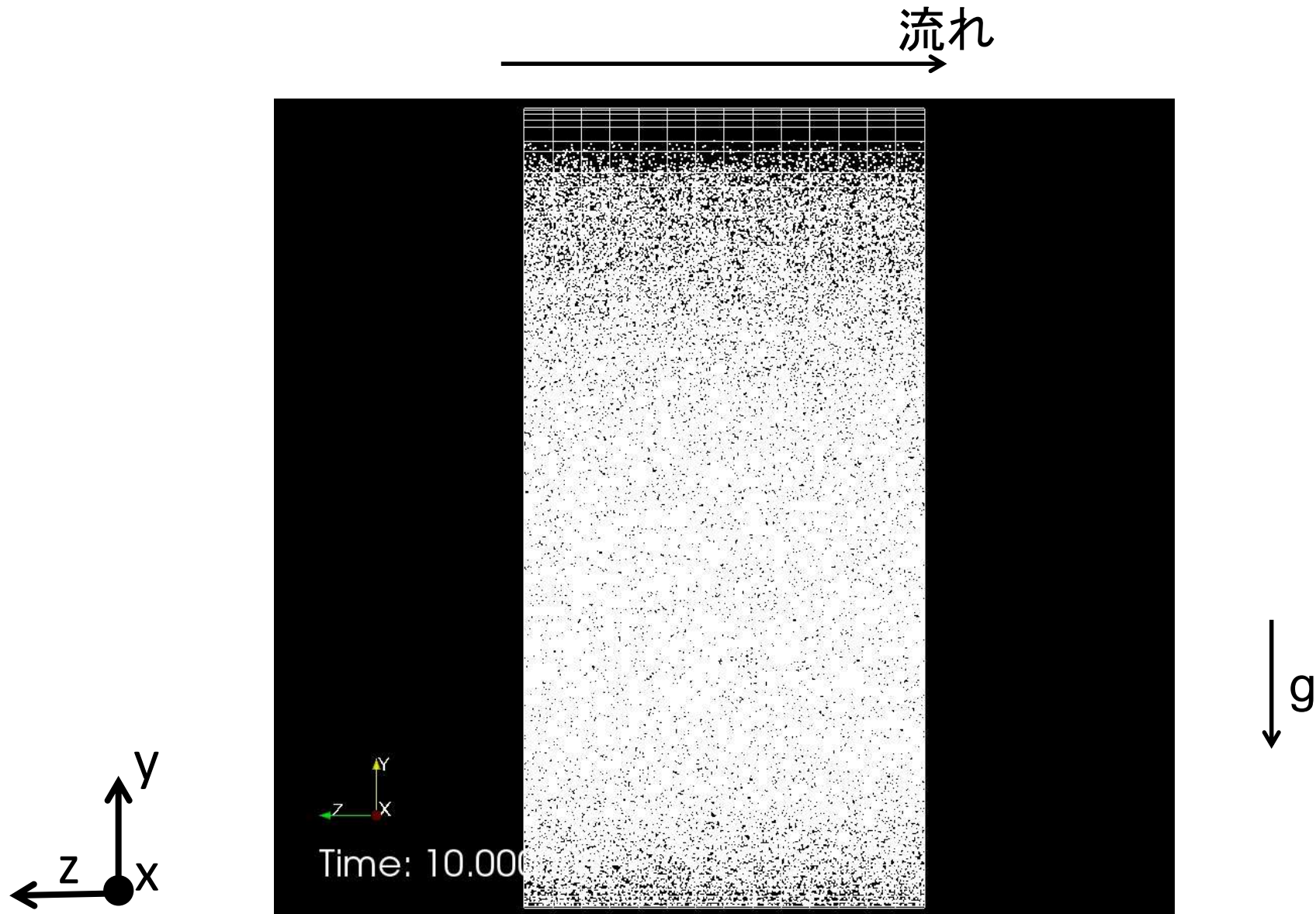


	密度比 [-]	密度 [kg/m ³]	動粘度 [m ² /s]
Liquid	1.1	1000	1×10^{-6}
	0.6	1800	1.14×10^{-6}

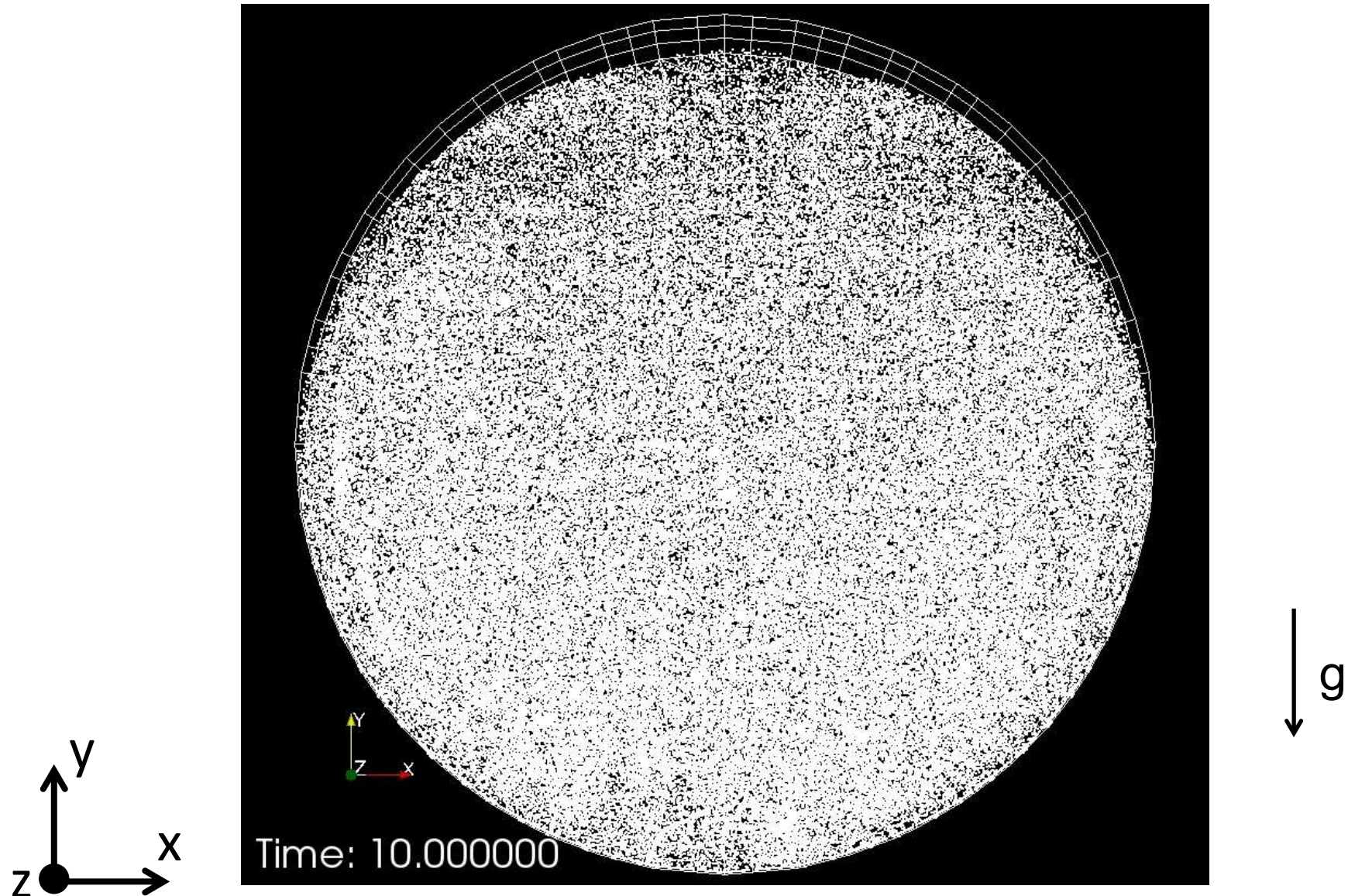
	密度 [kg/m ³]	粒子径 [μm]	投入速度 [m/s]	密度比 [-]	粒子数 [個]	体積濃度 [%]
Particle	1100	11	0.053	1.1	205000	4.55
				0.6	357500	7.93

結果 DEM

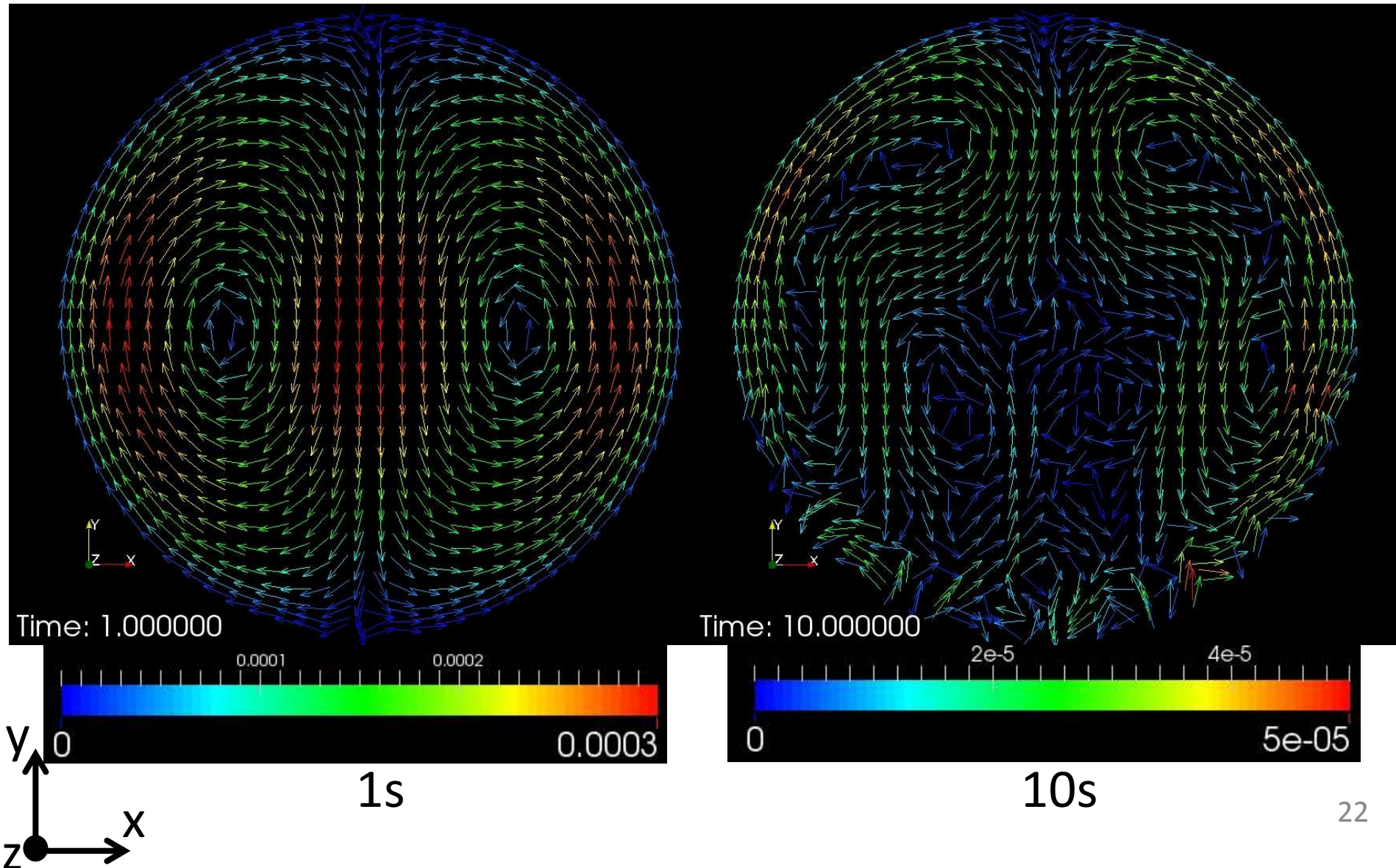
粒子の挙動 密度比1.1



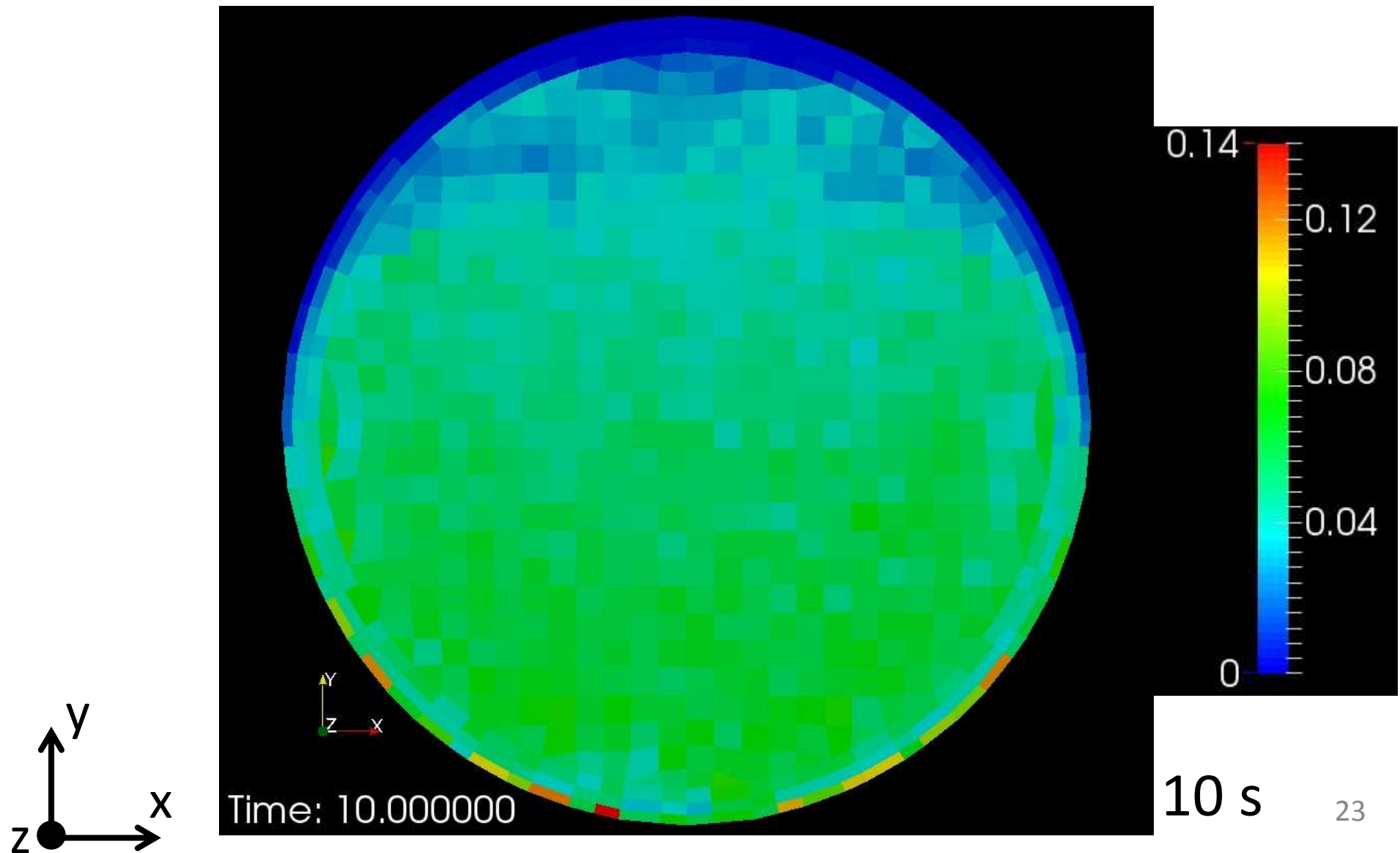
粒子の挙動 密度比1.1



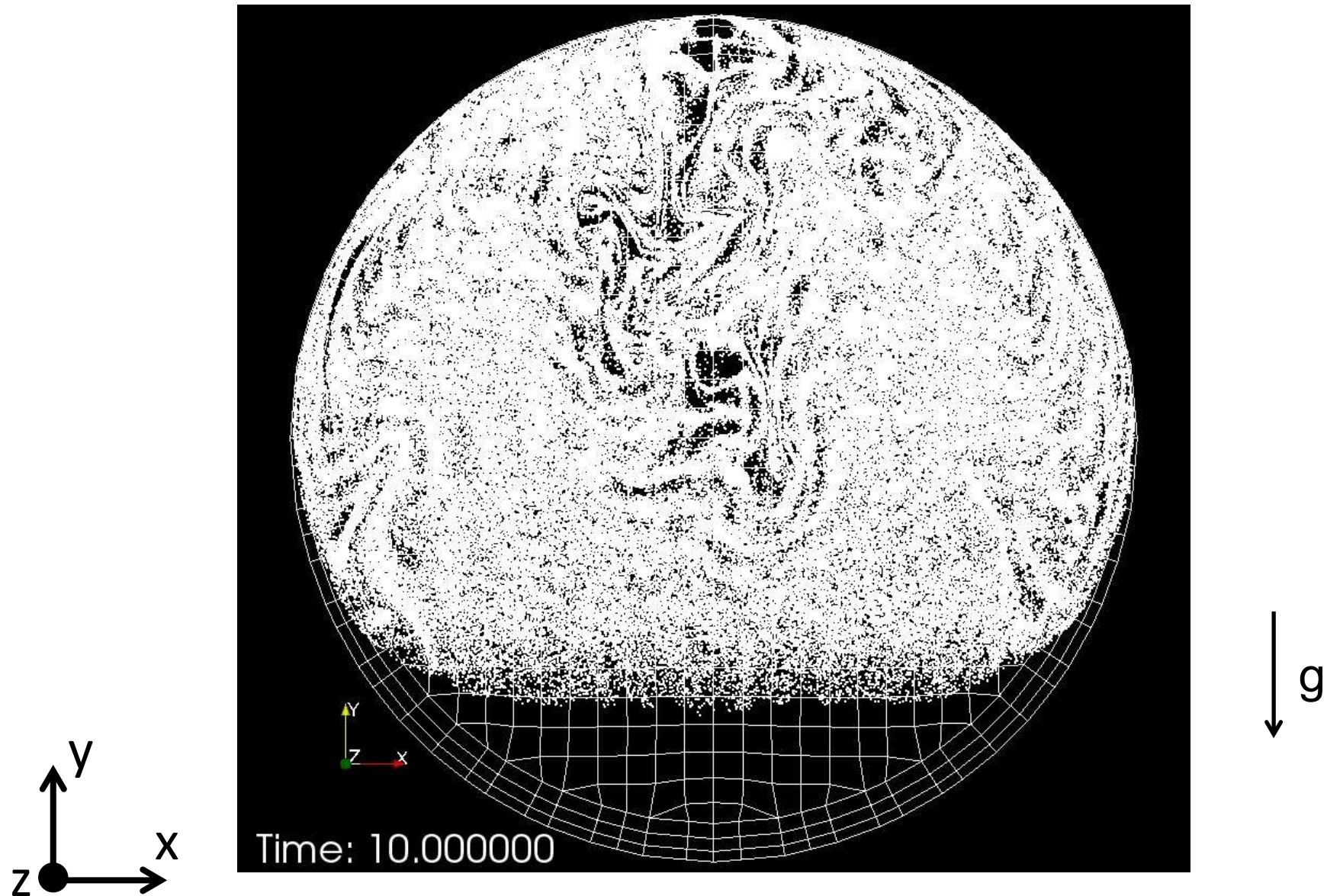
二次流れ(奥行平均) 密度比1.1



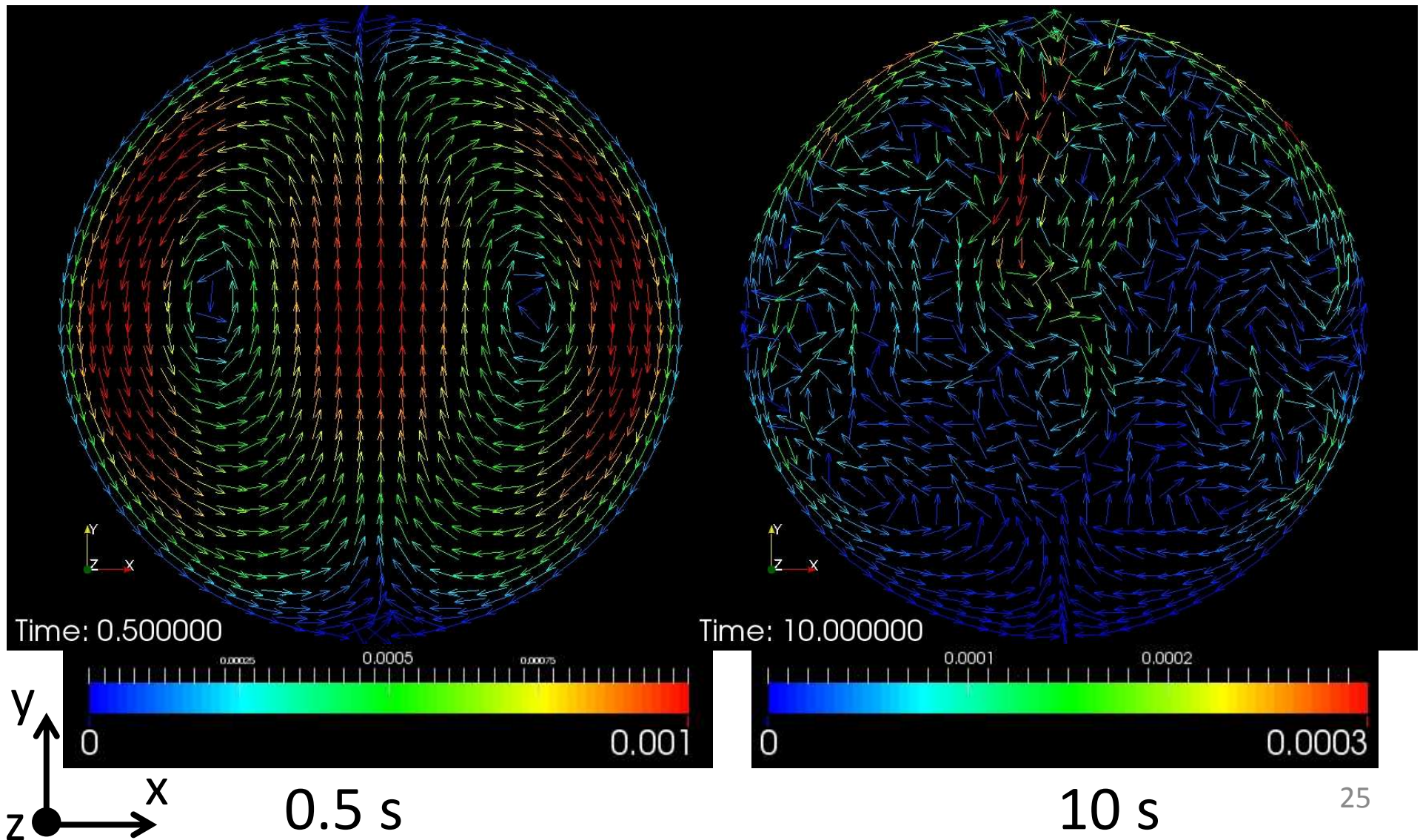
粒子体積率(奥行平均) 密度比1.1



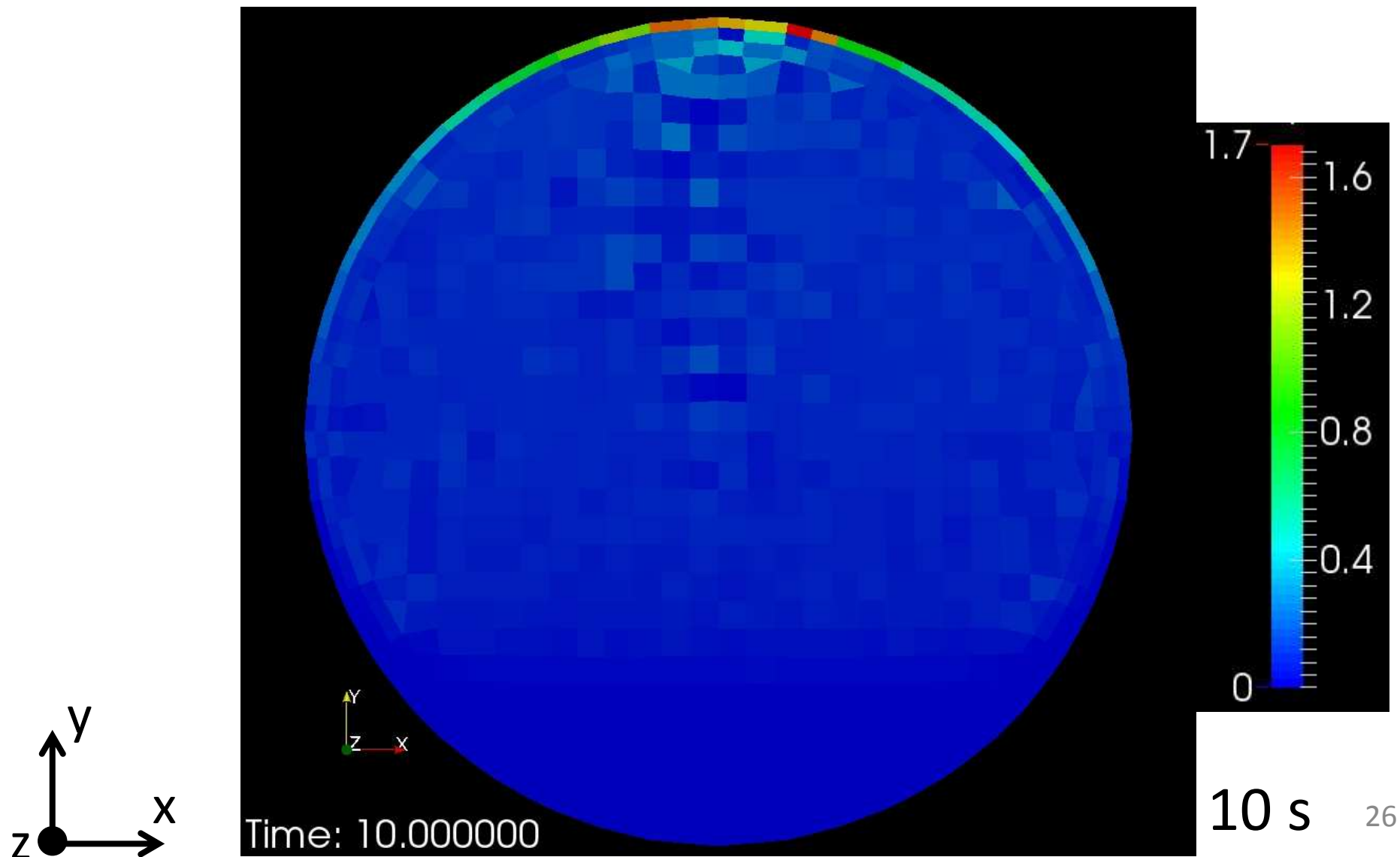
粒子の挙動 密度比0.6



二次流れ 密度比0.6

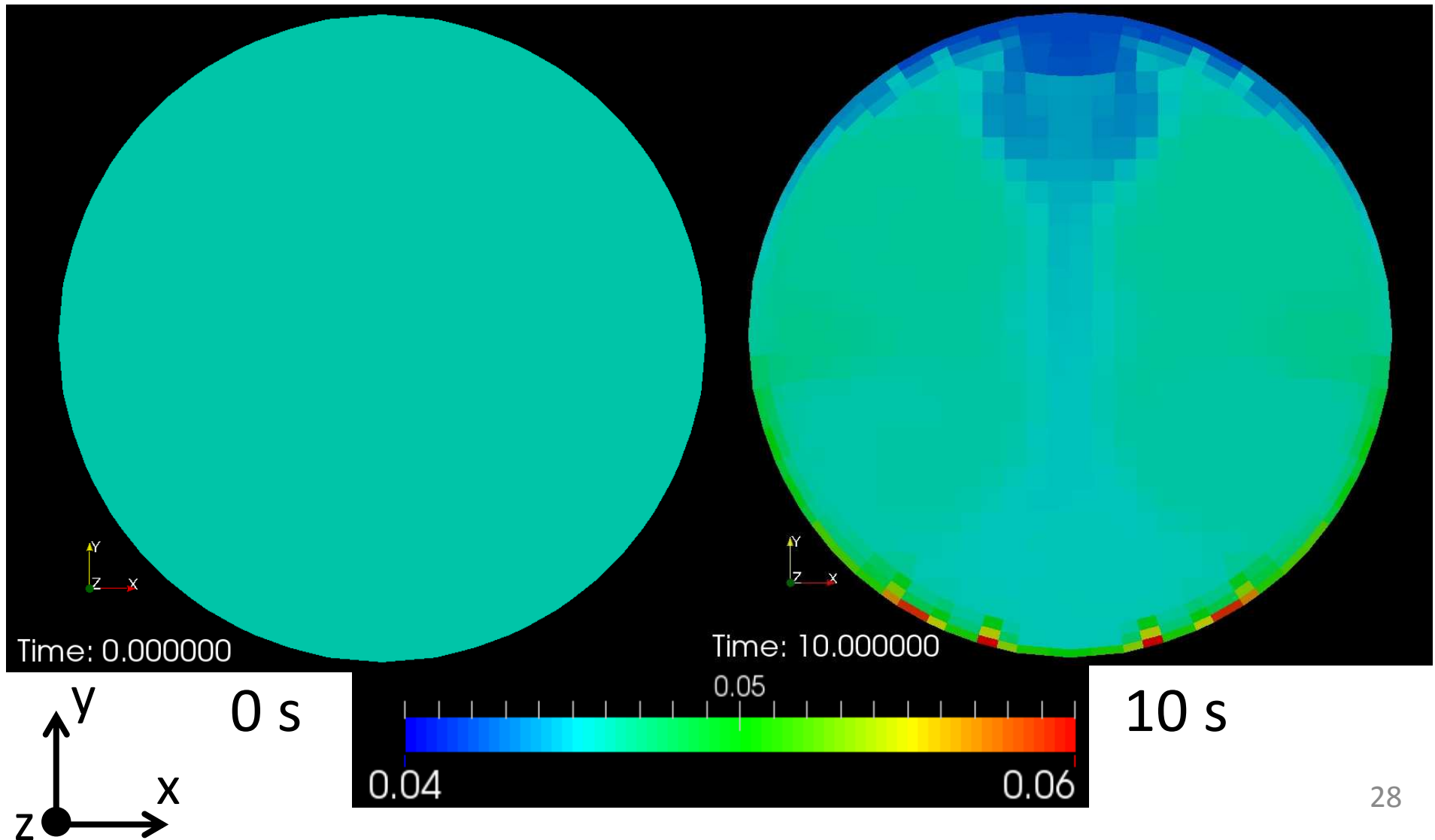


粒子体積率(奥行平均) 密度比0.6

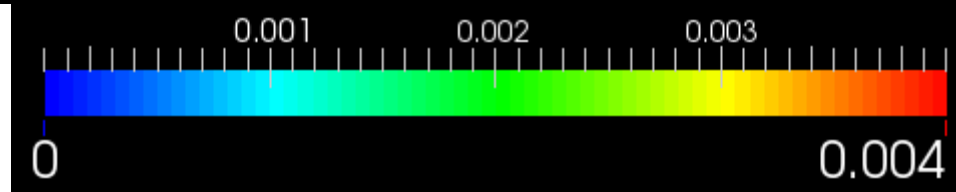
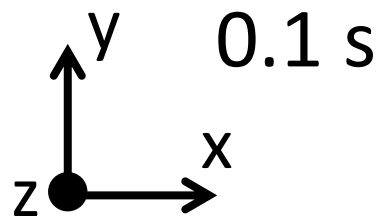
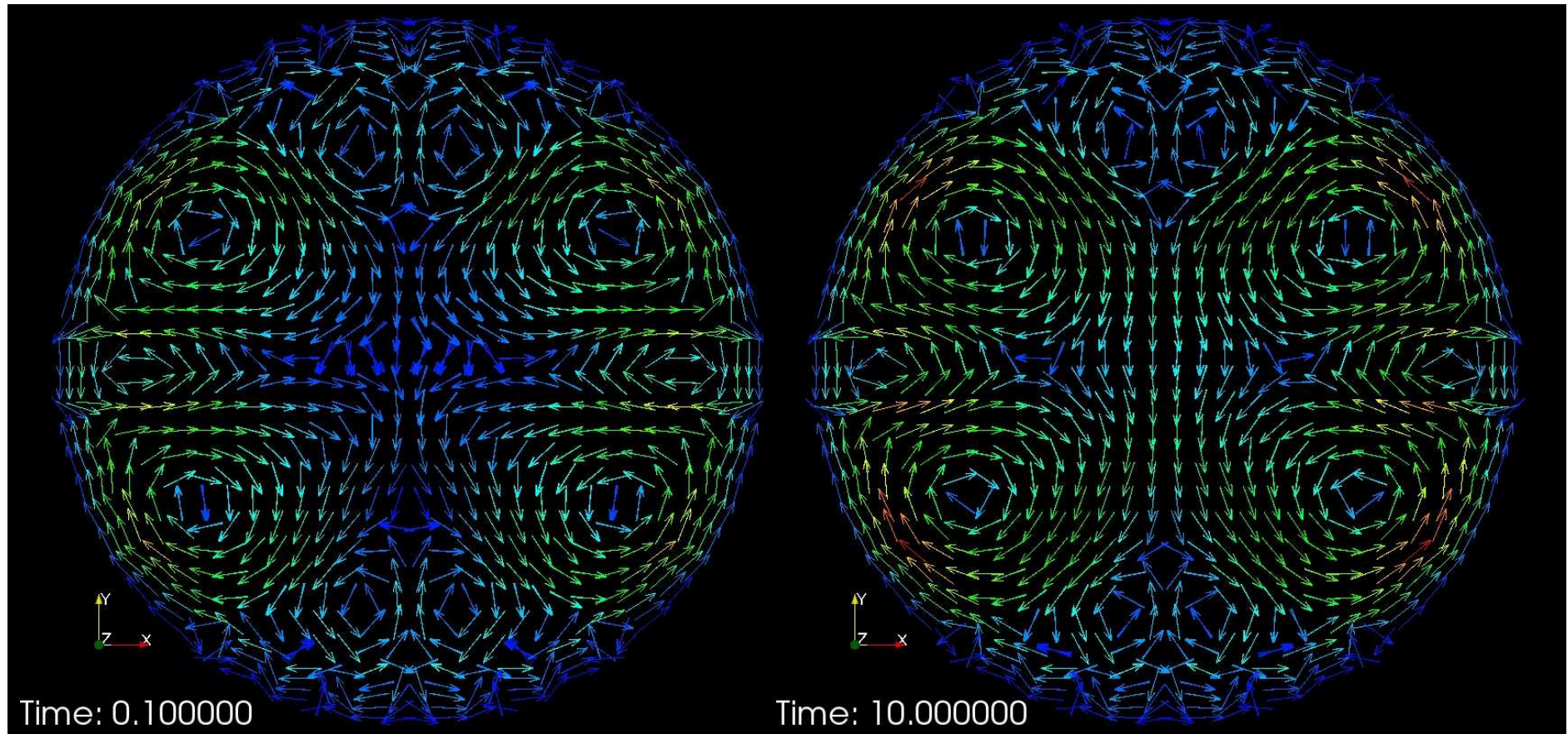


結果 二流体

粒子体積濃度 密度比1.1

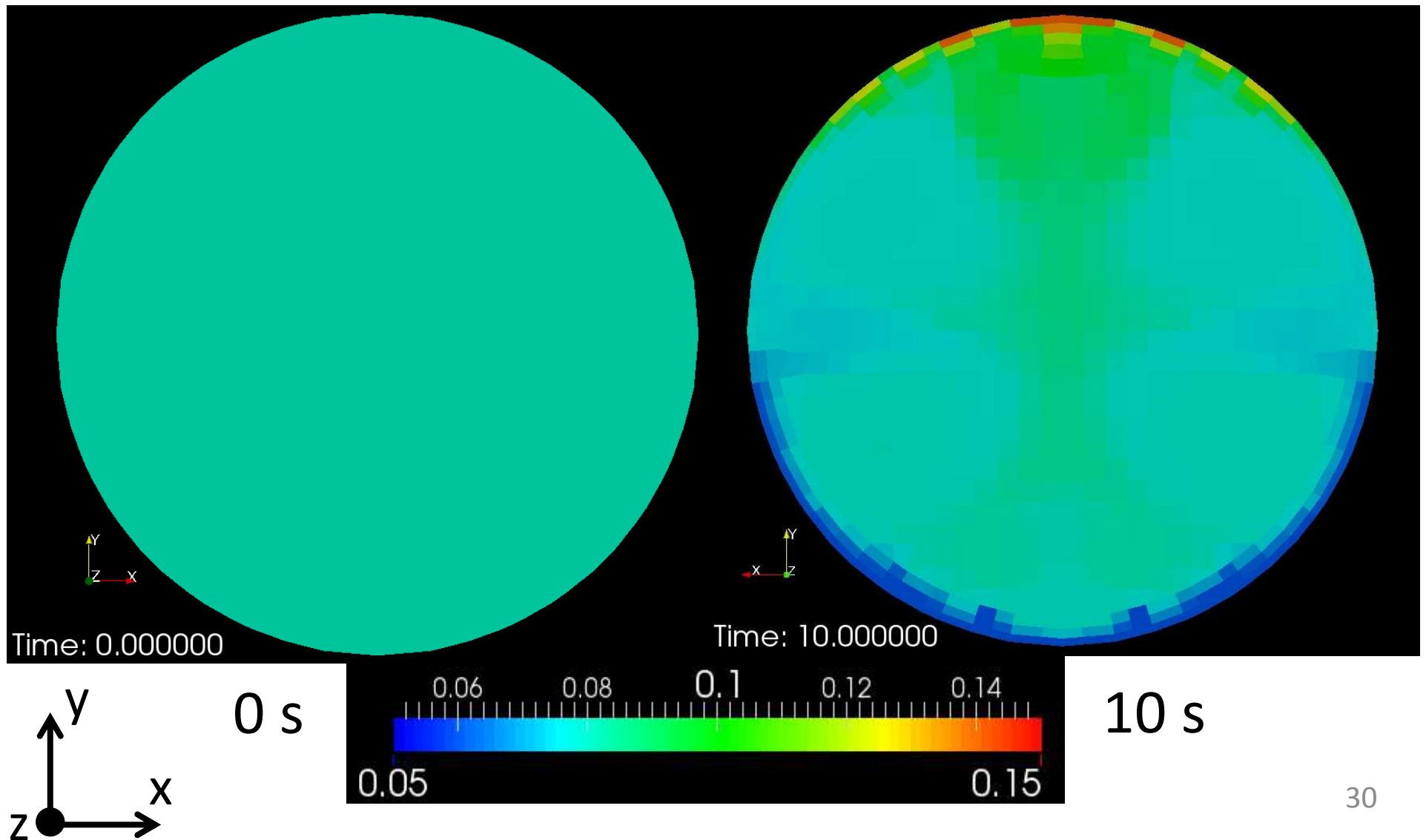


二次流れ 密度比1.1

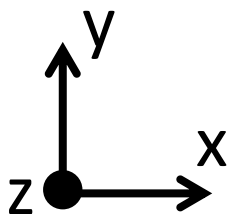
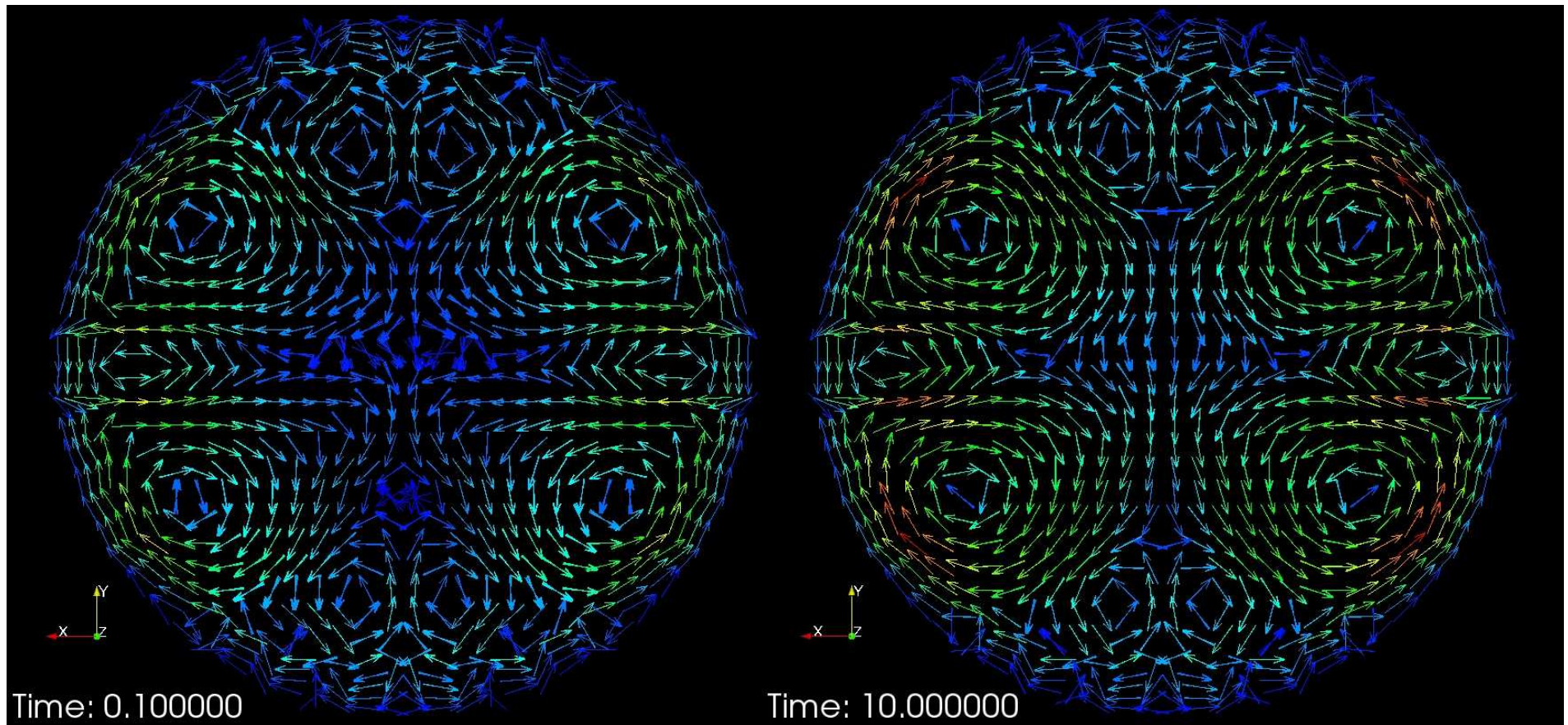


10 s

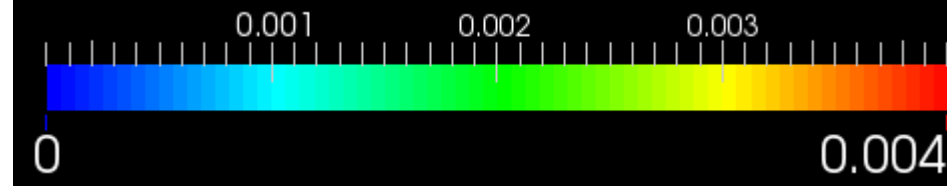
粒子体積濃度 密度比0.6



二次流れ 密度比0.6



0.1 s



10 s

計算負荷

解析手法	密度比 ρ_p/ρ_f [-]	粒子数 [万]	Mesh数 [万]	計算時間 [s]	CPU使用時間 [h]
DEM ⁽¹⁾	1.1	20	1	10	14
	0.6	35			25
二流体 ⁽²⁾	1.1	-	1	10	0.3
	0.6				0.4
DEM ⁽²⁾ 粒子間衝突あり	1.1	1	10	10	720

(1)• CPU(Intel®Core™ i7-4790(4.00GHz))

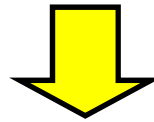
- 並列なし

(2)• CPU(Intel®Core™ i7-3770(3.40GHz))

- 4並列

結論

DEM法と二流体モデルのそれぞれの方法で
細管内を流れる粒子分散状況を調査した。



二流体モデル

- 二次流れの向き、大きさは密度比に依存しない。
- 濃度分布に大きな偏りがない。

DEM法

- 二次流れの向きは密度比により逆になる。
- 二次流れの大きさは密度比 $0.6 >$ 密度比 1.1 である。
- 濃度分布が大きく、体積濃度 0% の領域が存在する。
- 粒子間衝突の有無で計算負荷が大きく変わる。