

# OpenFOAMによる 細管内固液混相流のシミュレーション

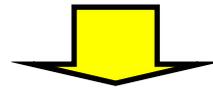
富山県立大学 \*入山卓 中川慎二 畠山友行

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(≒  $\phi$  1~2mm) + 相変化マイクロカプセル懸濁液

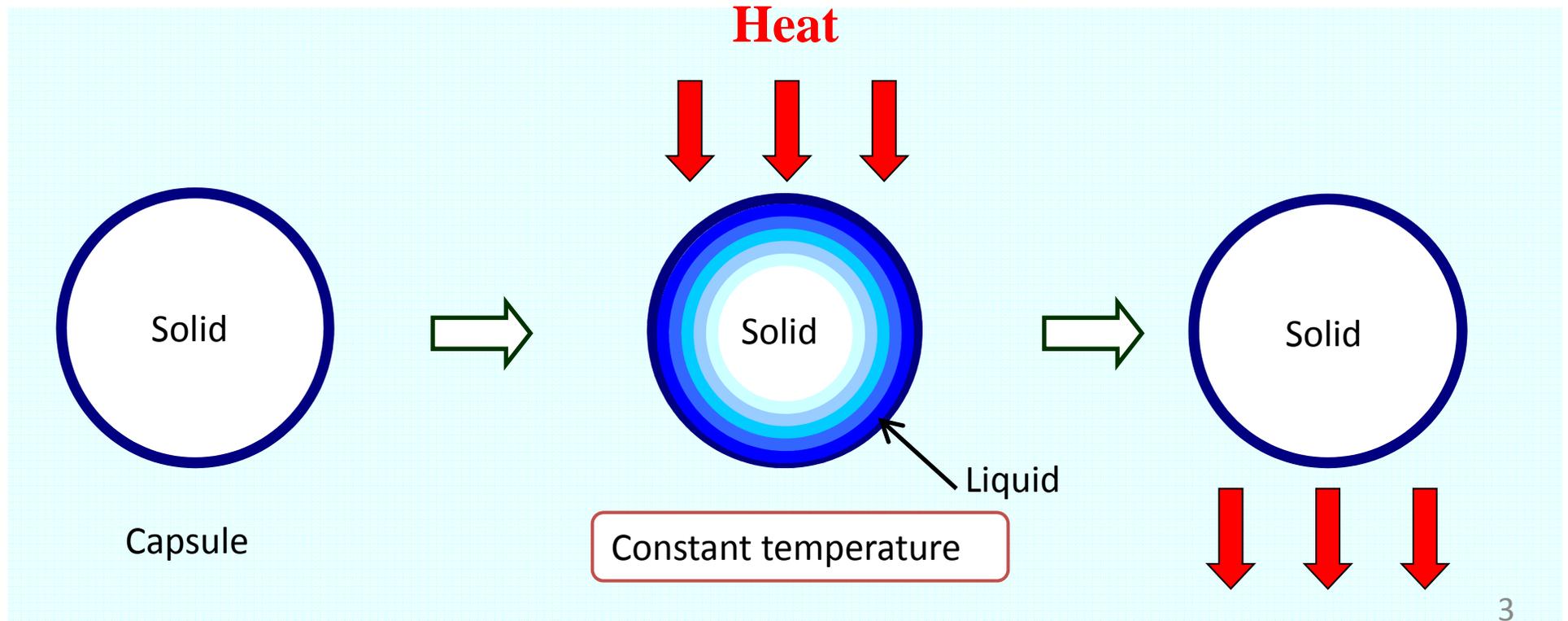
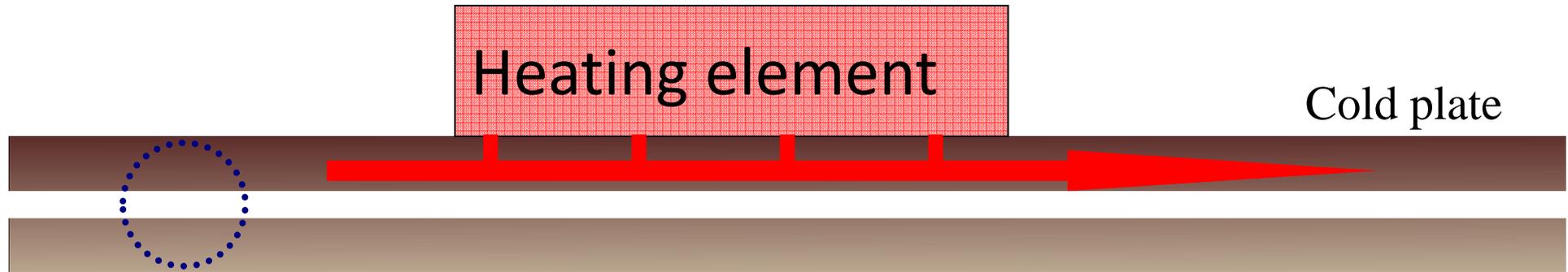


潜熱を利用した伝熱性能の向上

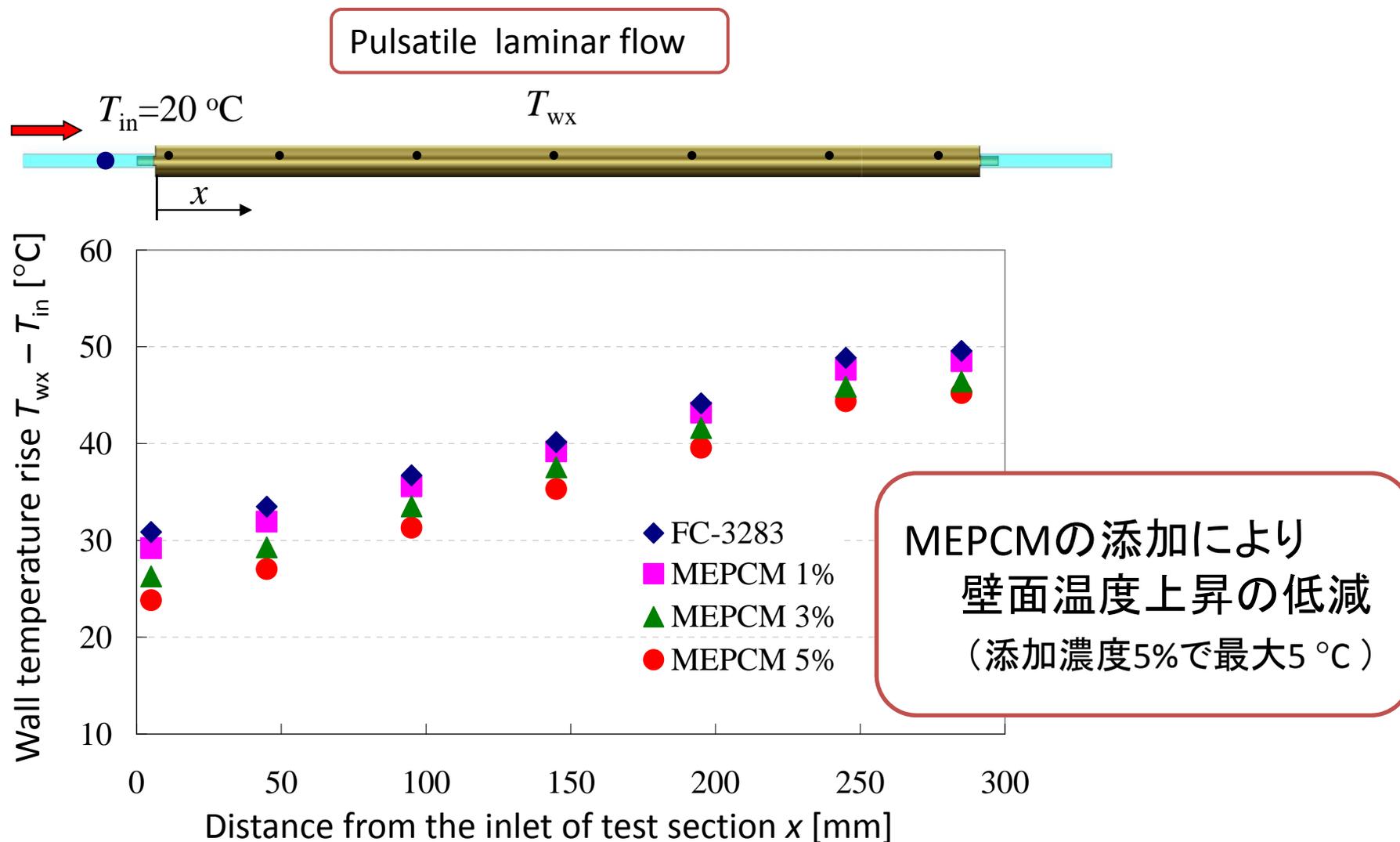
カプセル分散状況の伝熱効率への影響??

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)

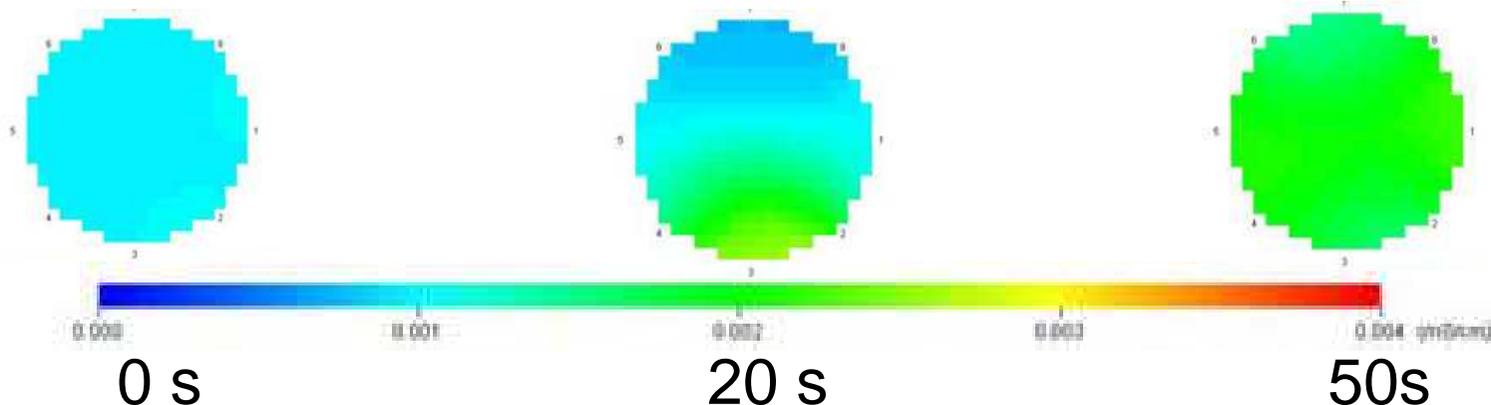
・密度比  
粒子/流体=1.1

・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.

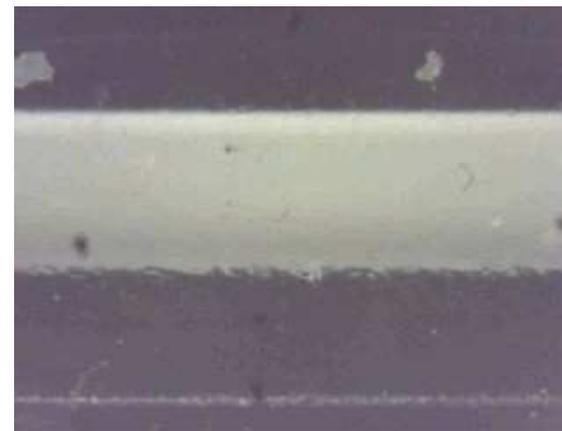
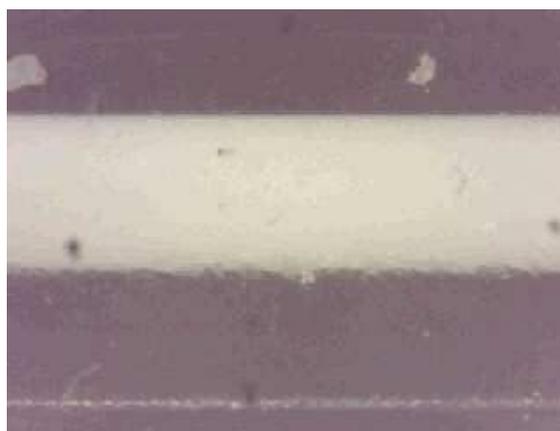
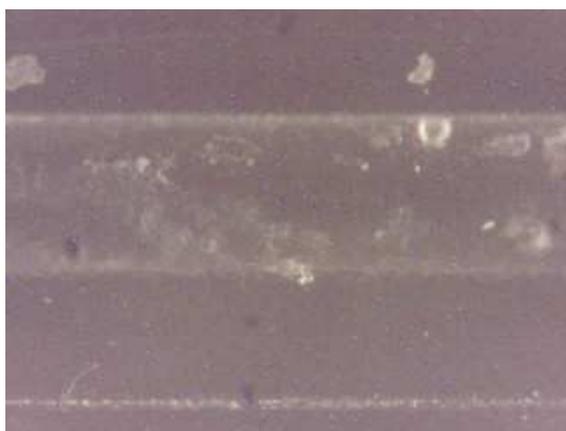
# 先行研究：流動粒子の可視化

カメラ(側面)

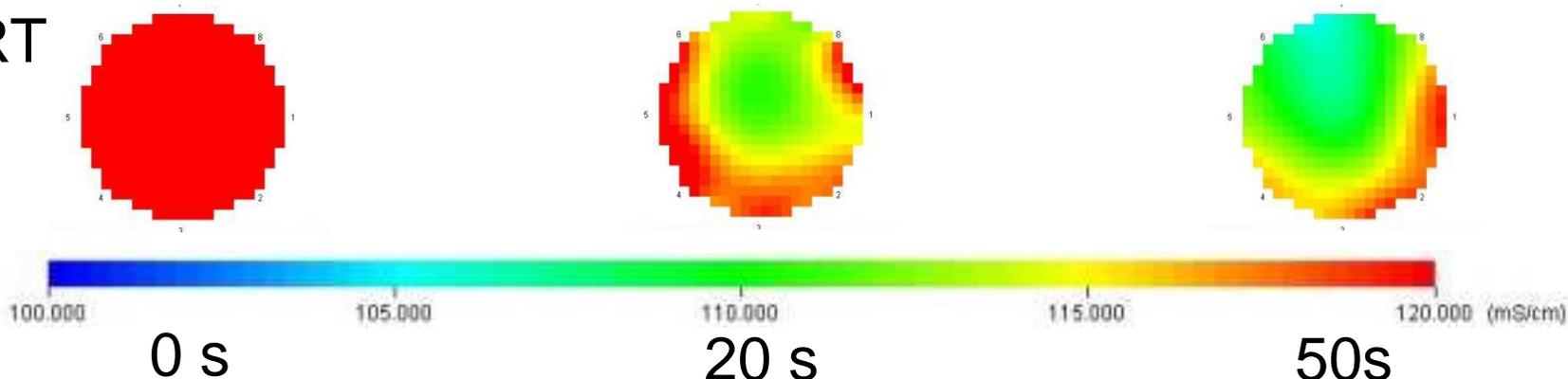
・密度比  
粒子/流体=0.6

・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.

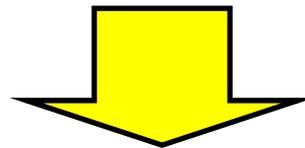
# 先行研究

- 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

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

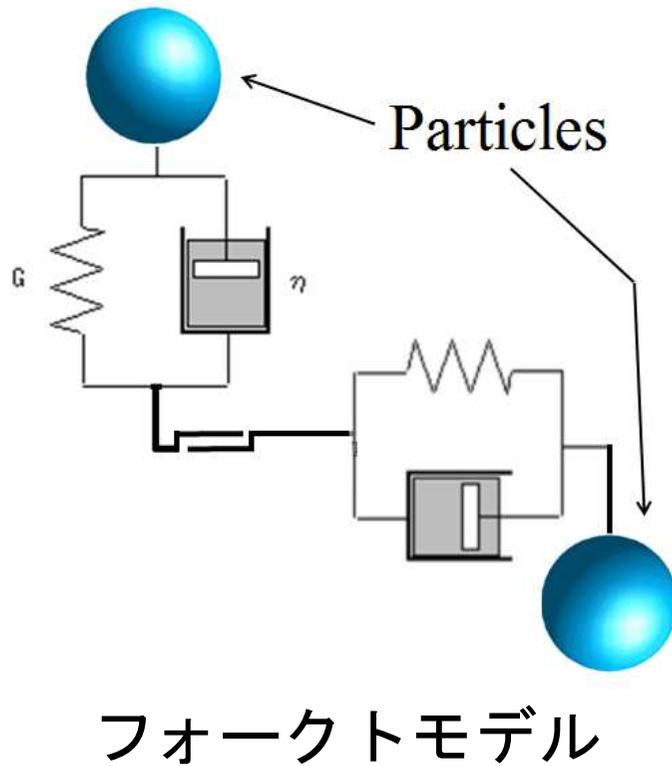
粒子からの影響

# 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)

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

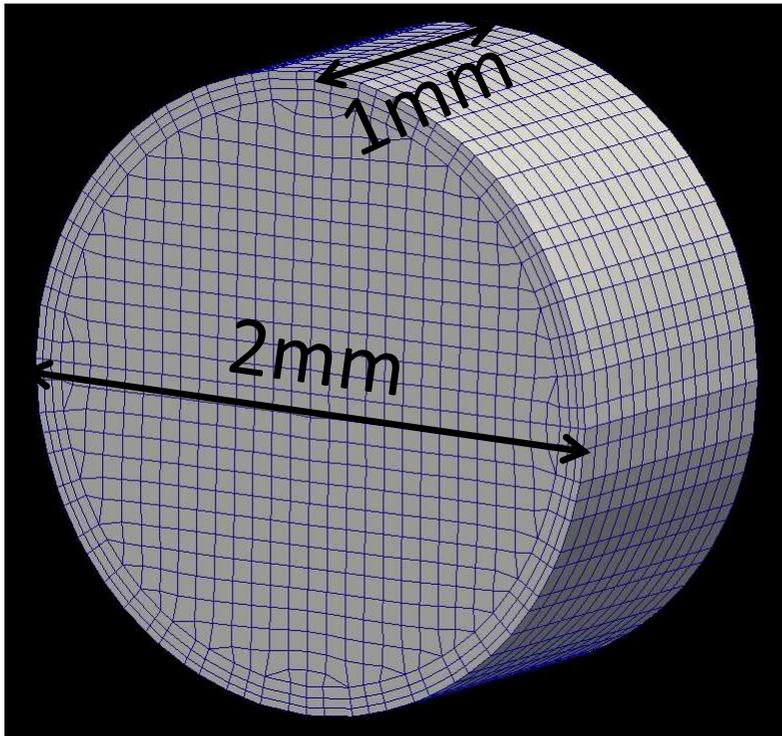
- 分散相(粒子)

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

粒子間の接触応力      相互の影響      重力



# 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

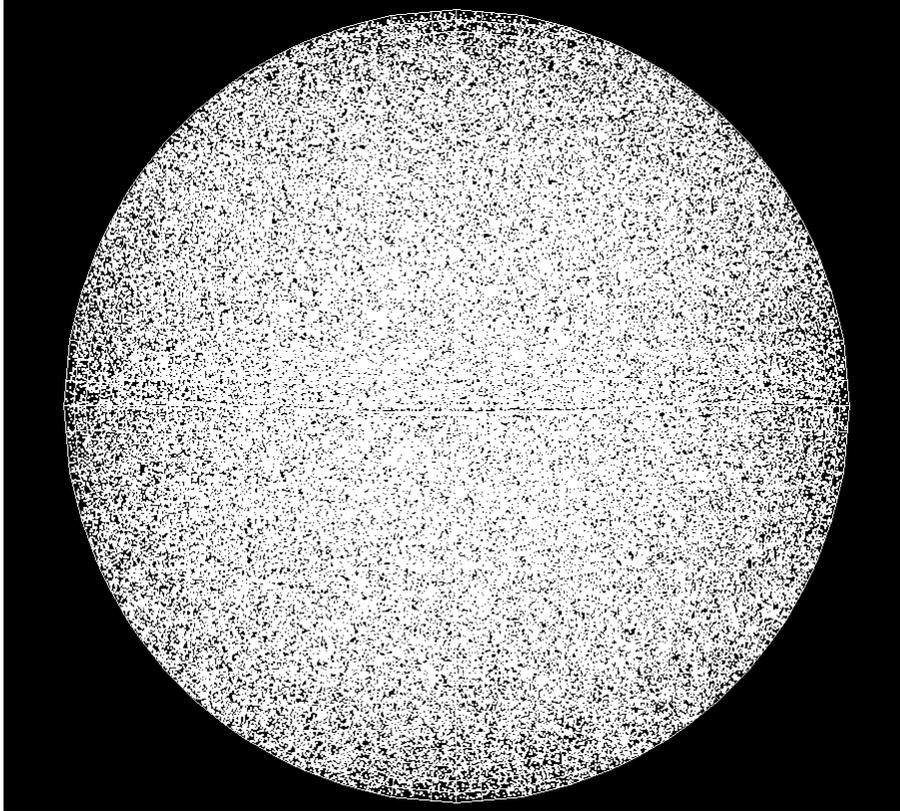
	速度[m/s]	圧力差[Pa]	
		密度比[-]	
		1.1	0.6
入口	周期境界条件	0.43	0.87
出口	周期境界条件		
壁	0	勾配0	

## 初期条件

速度[m/s]

発達した速度分布

# 物性値, 粒子配置

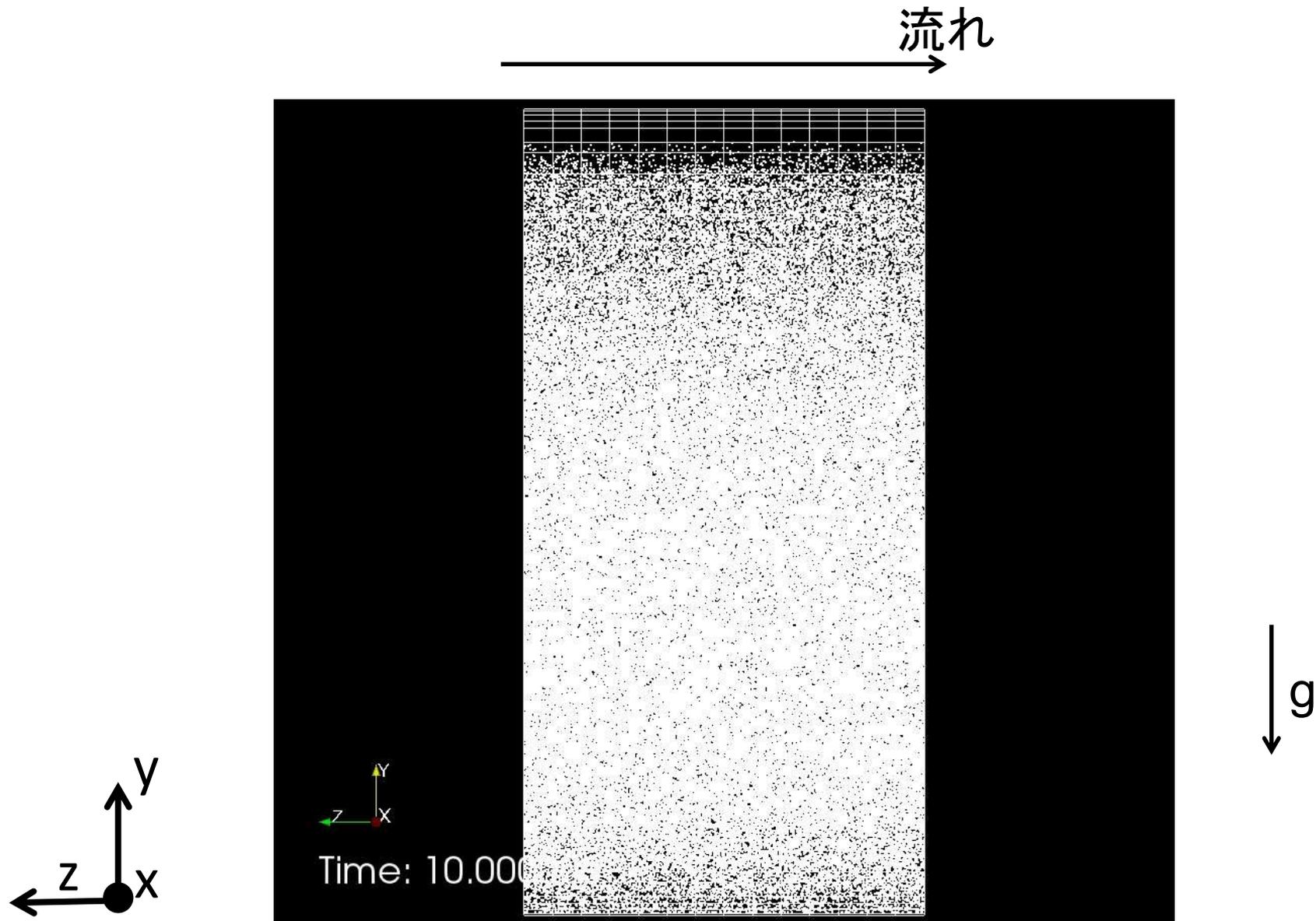


	密度比 [-]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	動粘度 [m <sup>2</sup> /s]
Liquid	1.1	1000	$1 \times 10^{-6}$
	0.6	1800	$1.14 \times 10^{-6}$

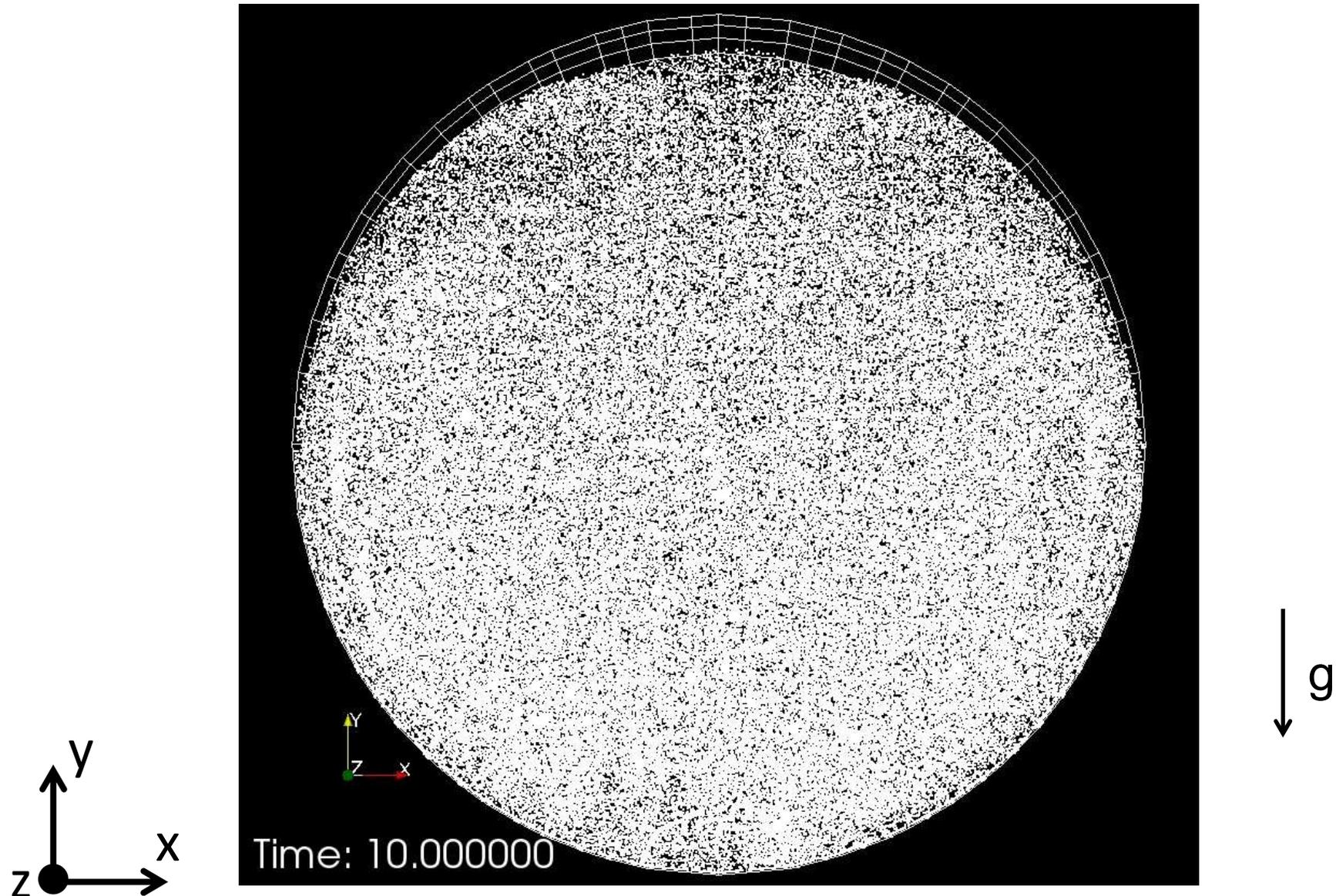
	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	粒子径 [μm]	投入速度 [m/s]	密度比 [-]	粒子数 [個]	体積濃度 [%]
Particle	1100	11	0.053	1.1	205000	4.55
				0.6	357500	7.93

# 結果 DEM

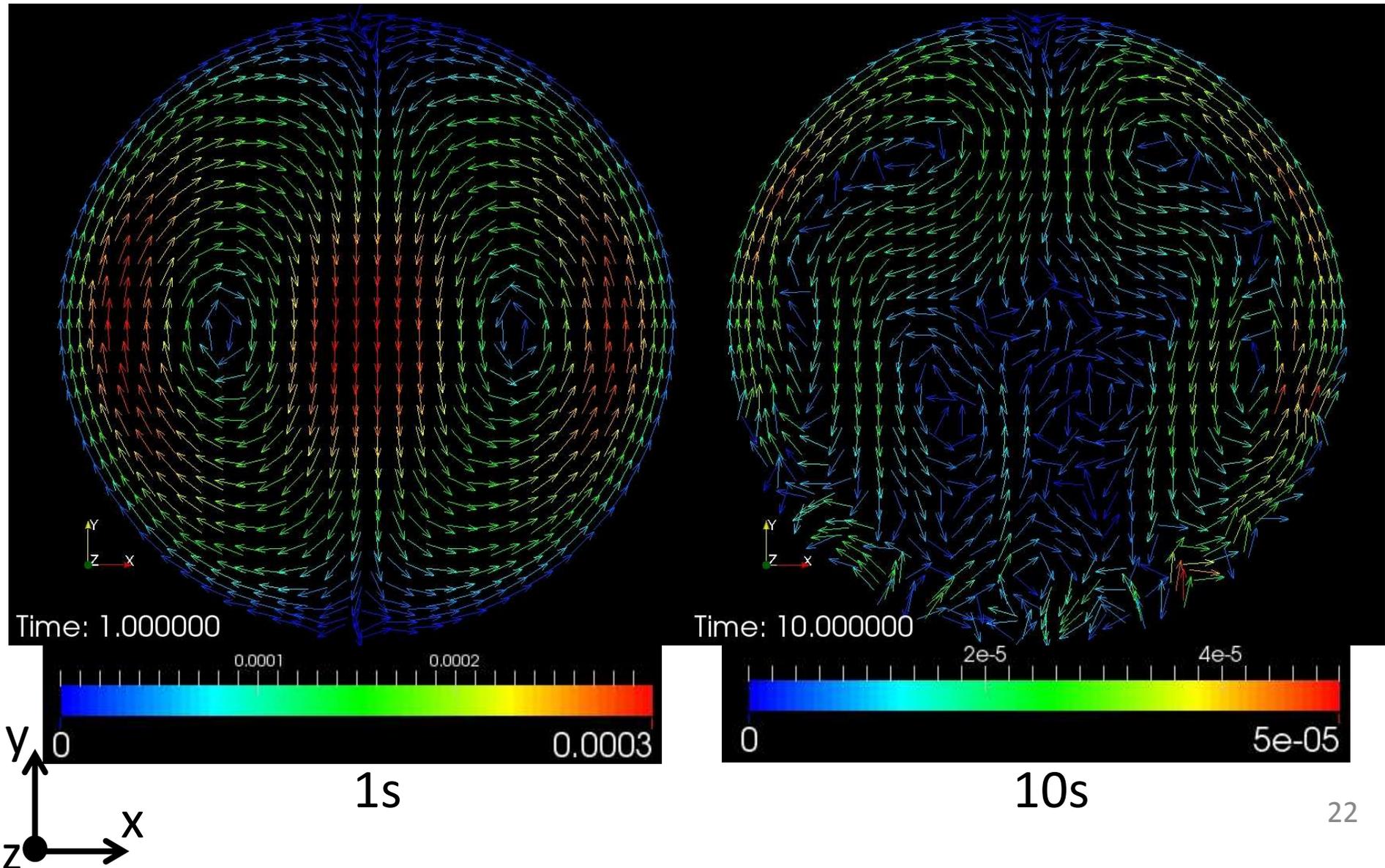
# 粒子の挙動 密度比1.1



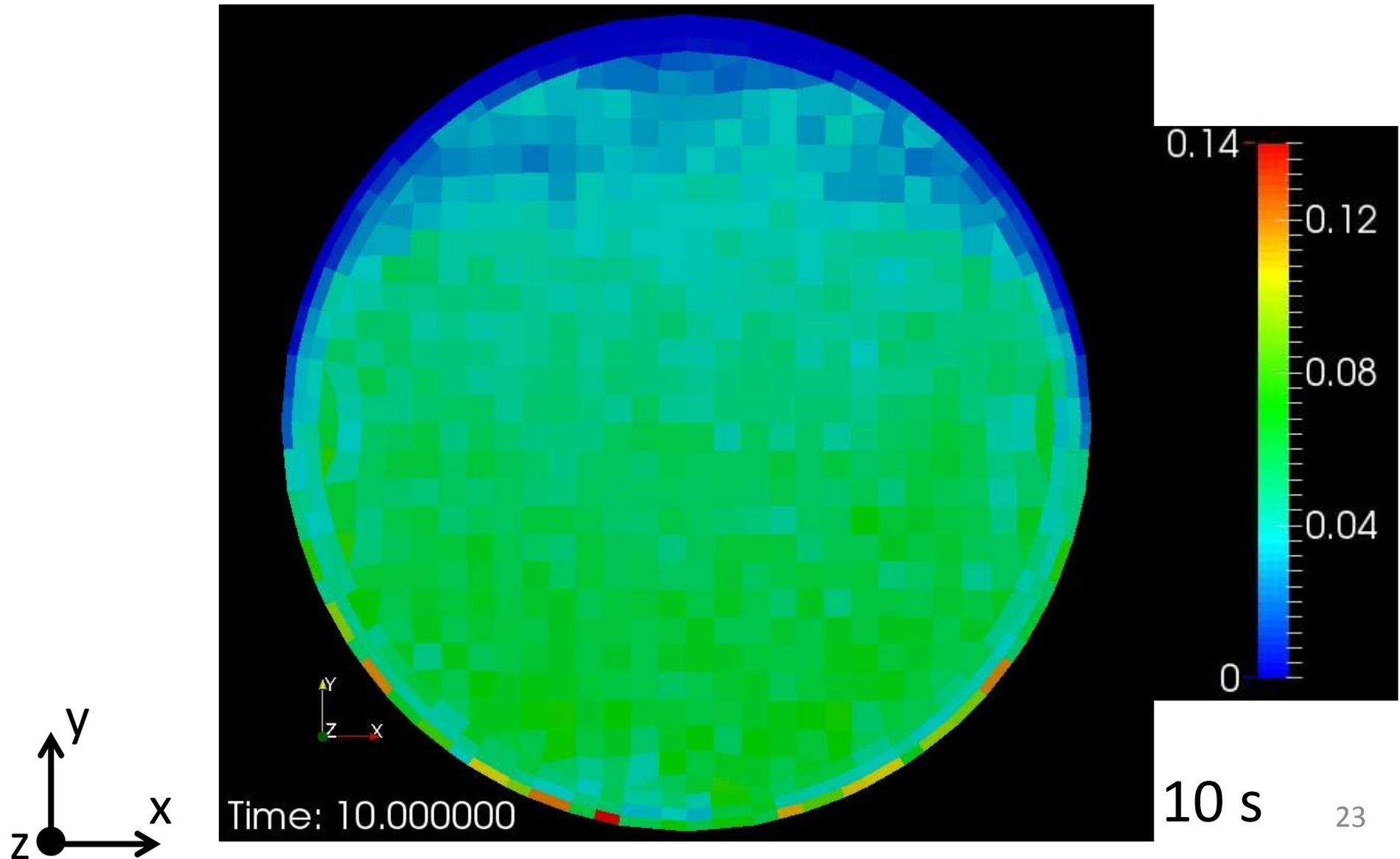
# 粒子の挙動 密度比1.1



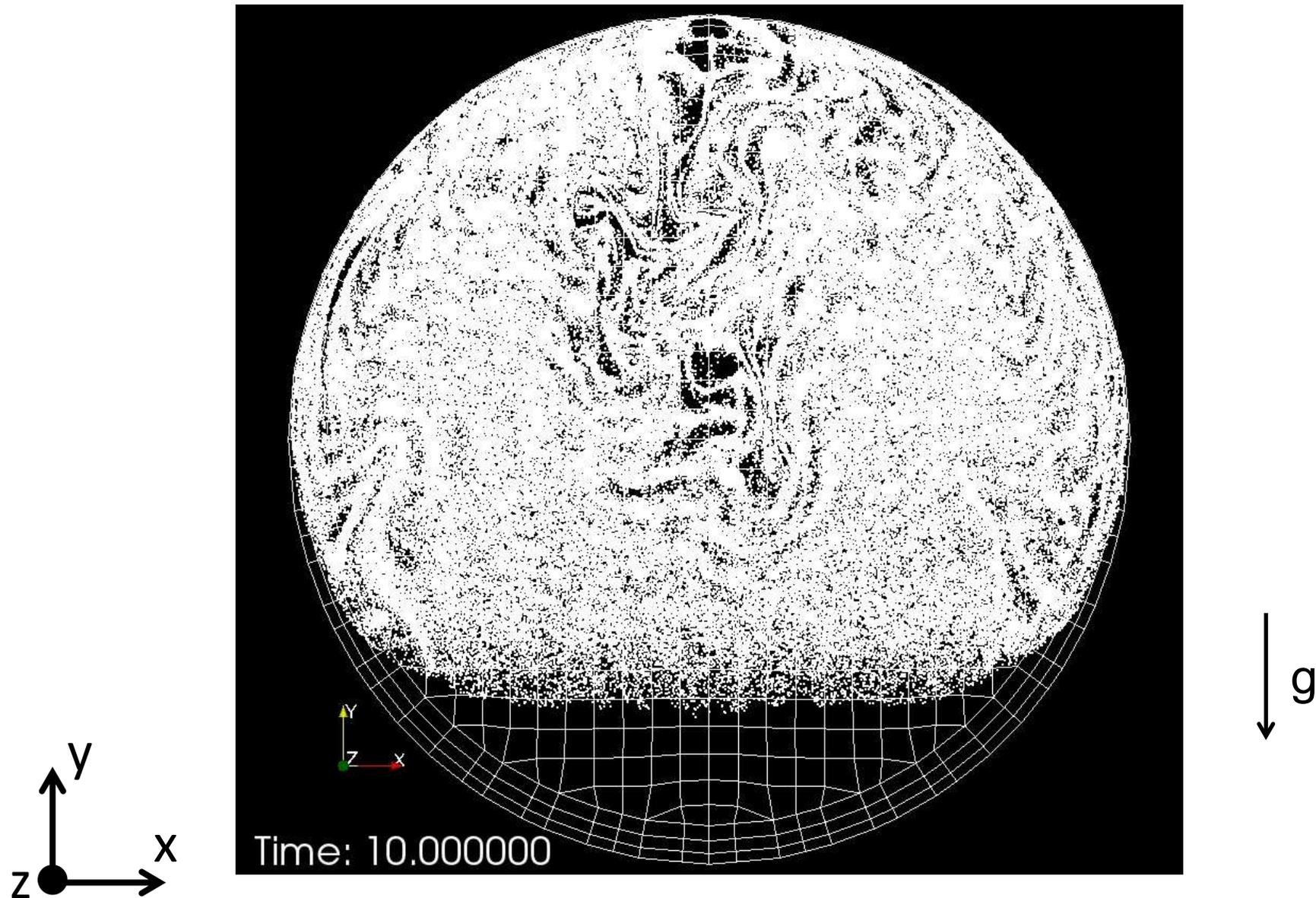
# 二次流れ(奥行平均) 密度比1.1



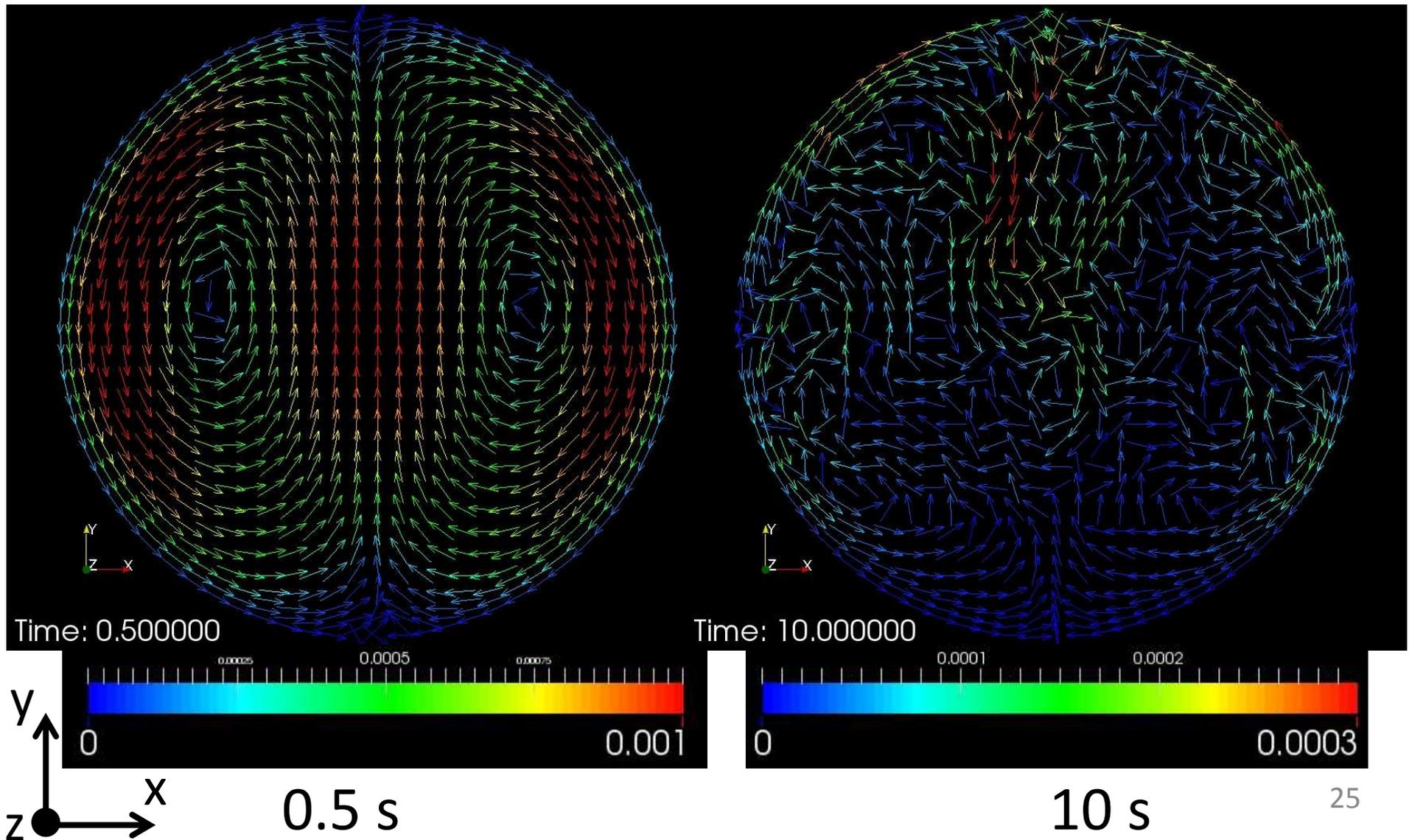
# 粒子体積率(奥行平均) 密度比1.1



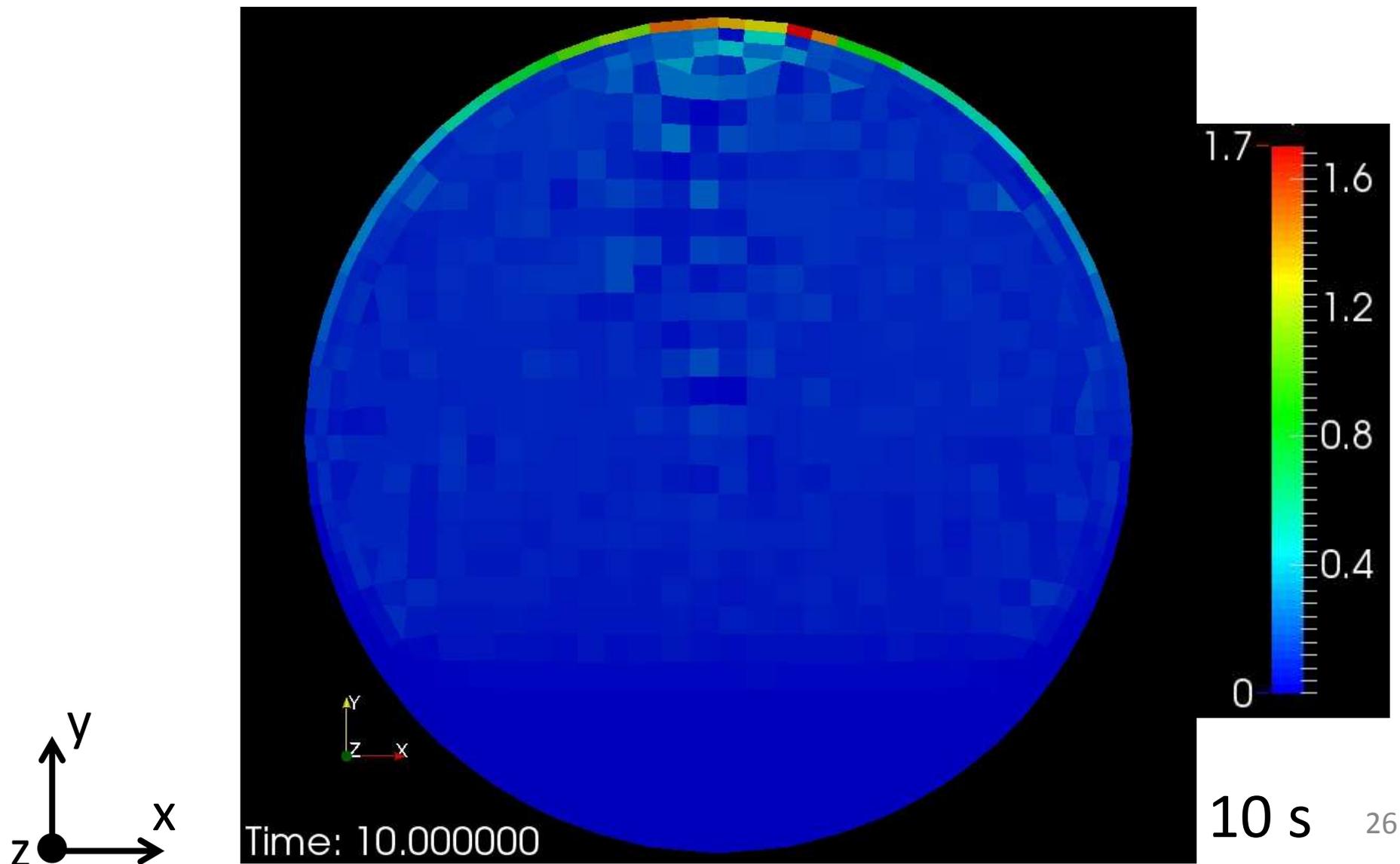
# 粒子の挙動 密度比0.6



# 二次流れ 密度比0.6

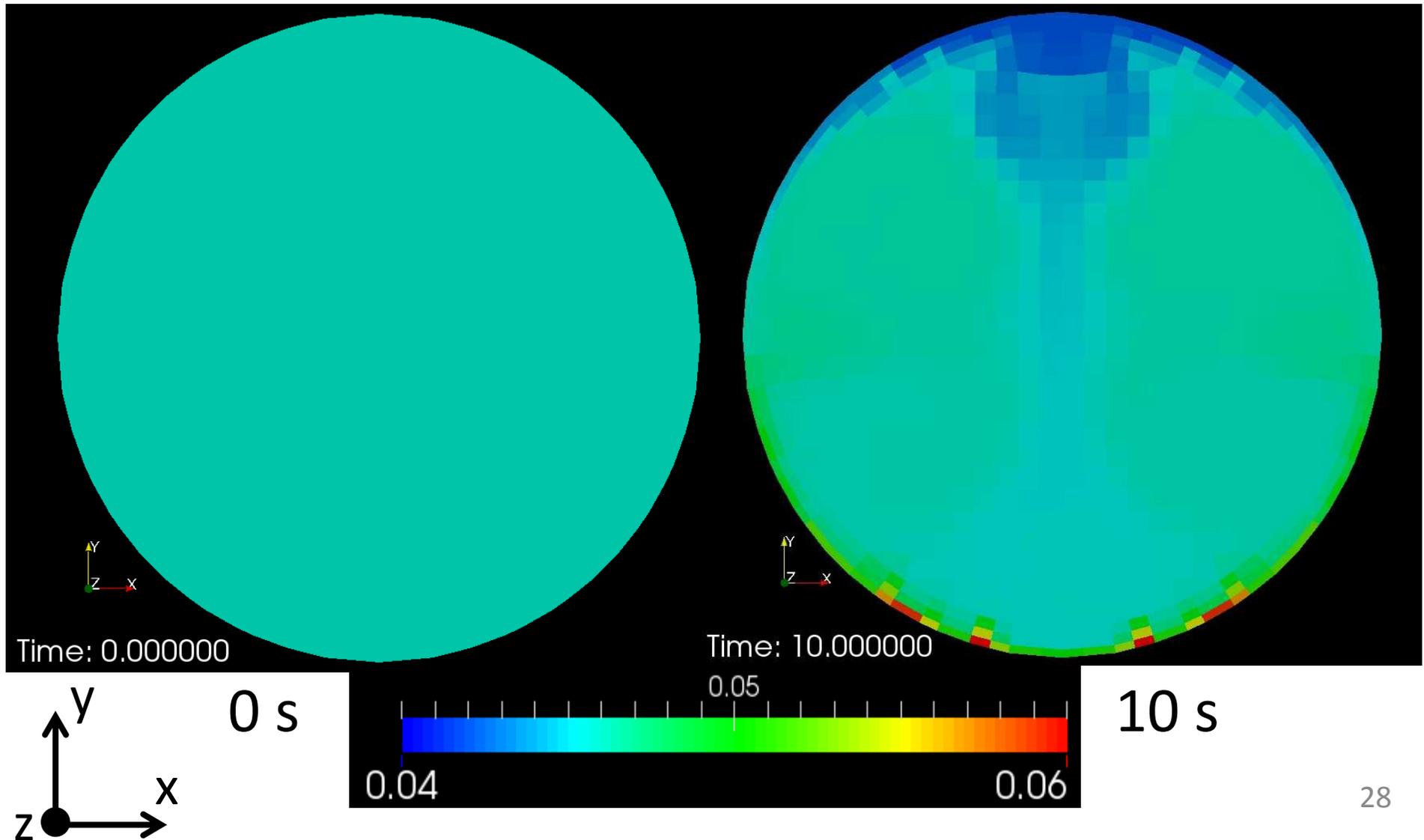


# 粒子体積率(奥行平均) 密度比0.6

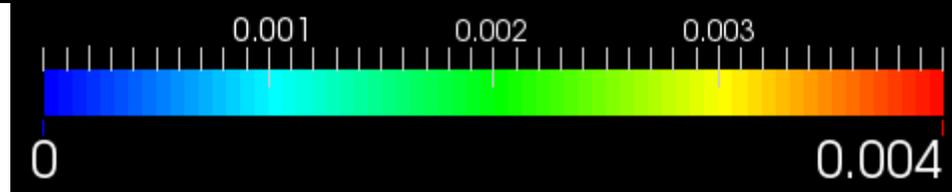
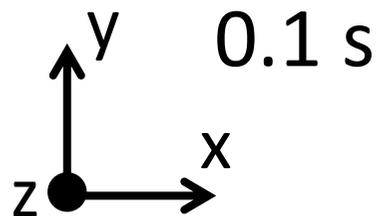
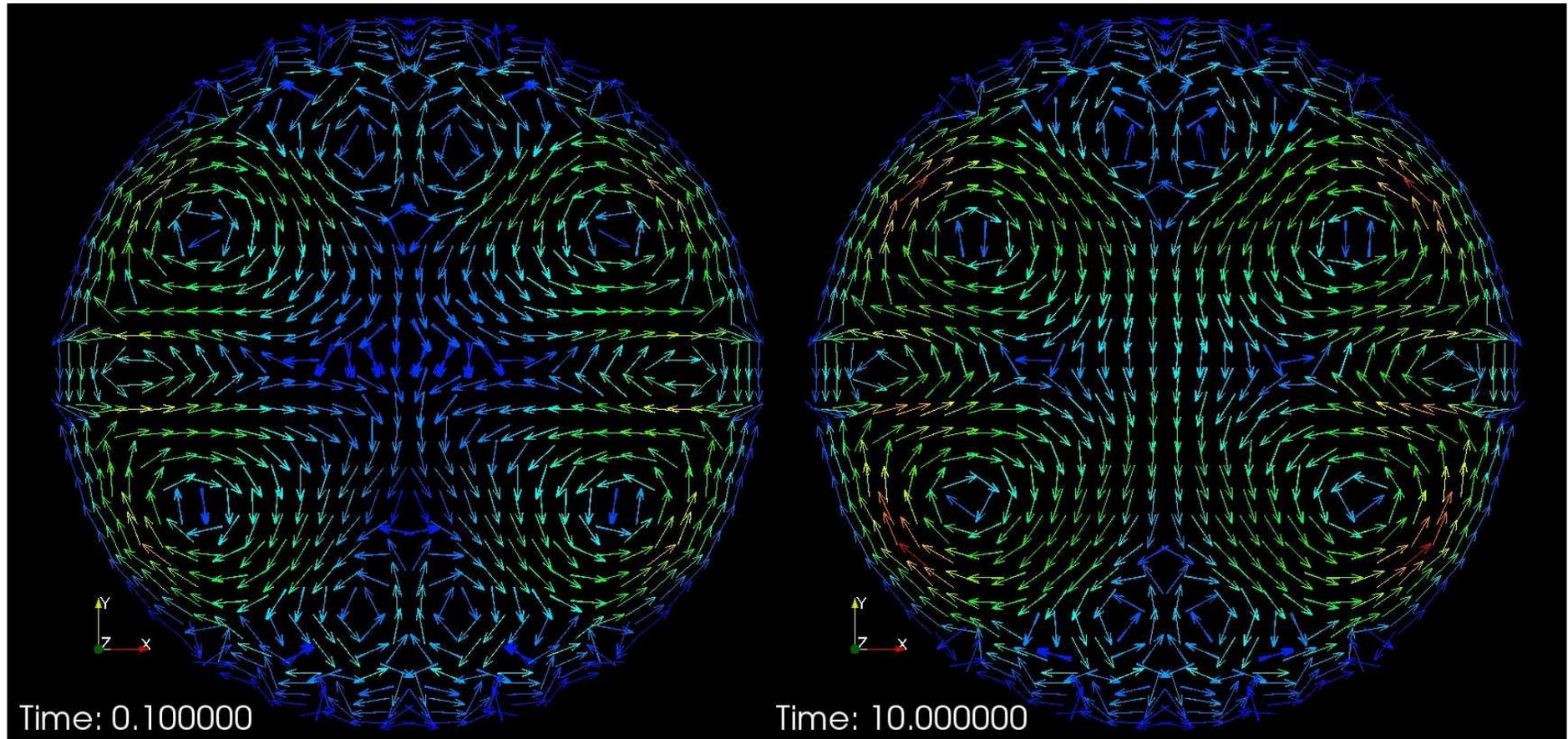


# 結果 二流体

# 粒子体積濃度 密度比1.1

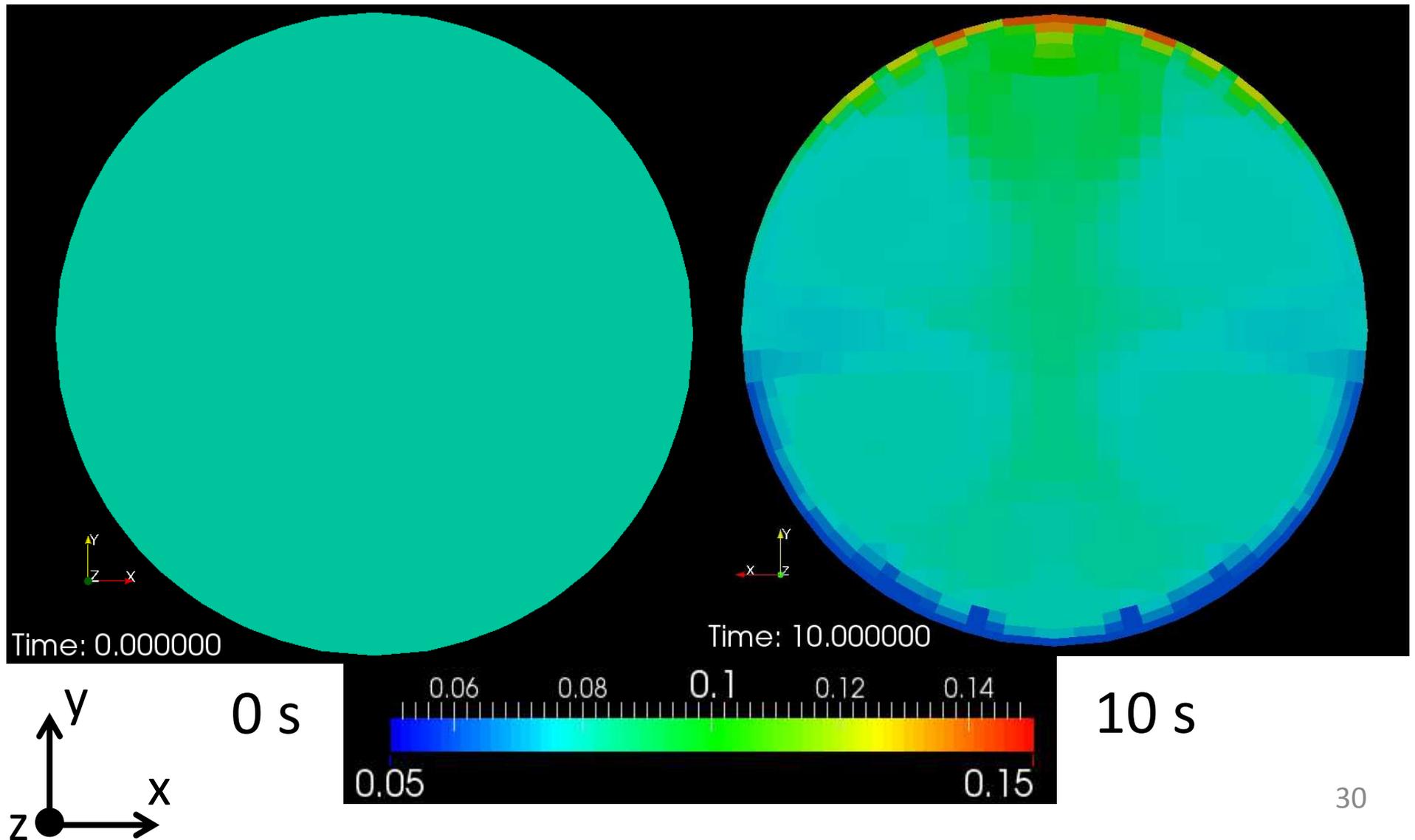


# 二次流れ 密度比1.1

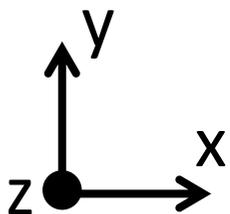
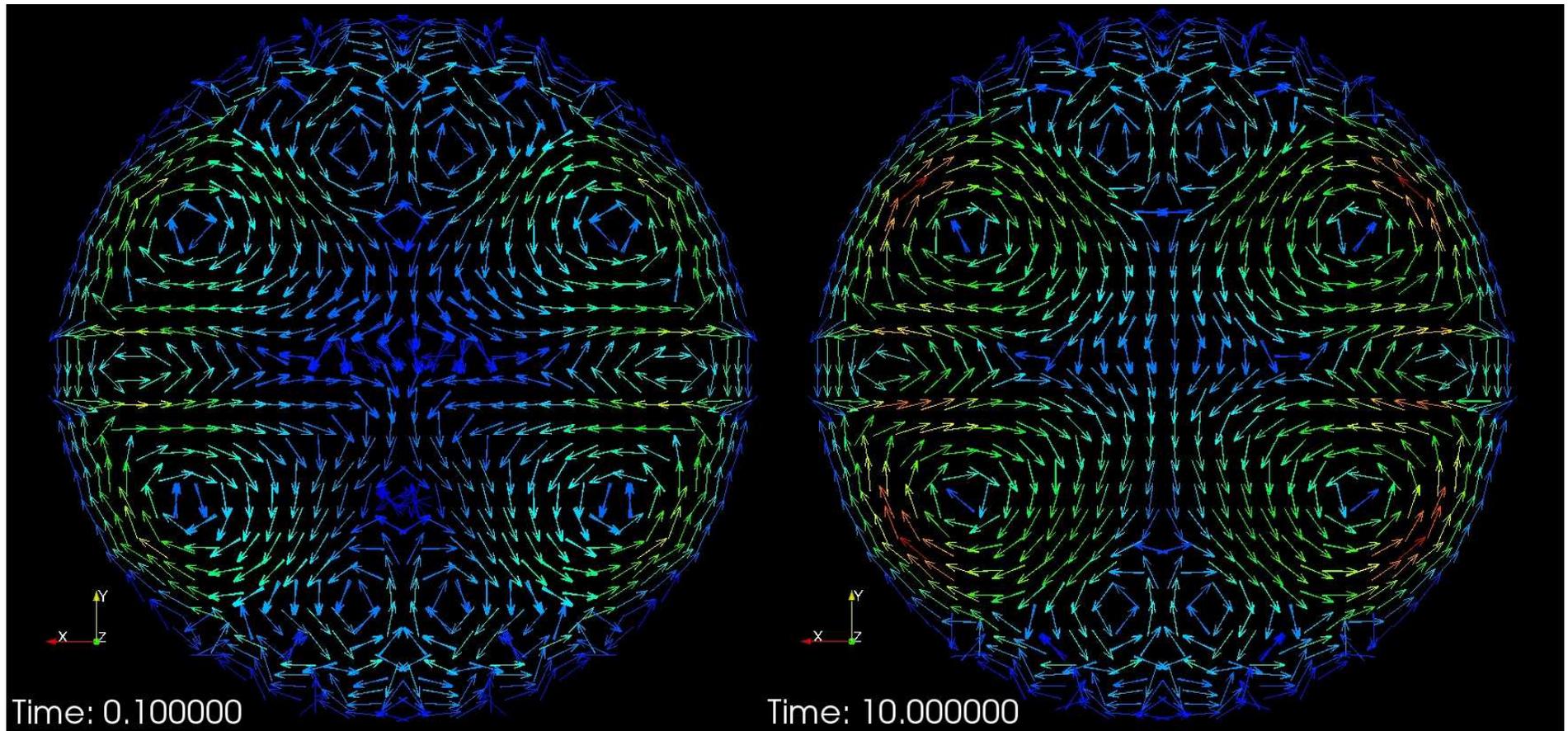


10 s

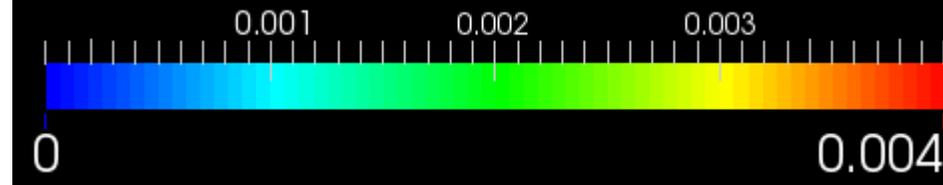
# 粒子体積濃度 密度比0.6



# 二次流れ 密度比0.6



0.1 s



10 s

# 計算負荷

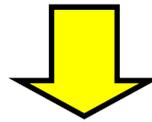
解析手法	密度比 $\rho_p/\rho_f$ [-]	粒子数 [万]	Mesh数 [万]	計算時間 [s]	CPU使用時間 [h]
DEM <sup>(1)</sup>	1.1	20	1	10	14
	0.6	35			25
二流体 <sup>(2)</sup>	1.1	-	-	-	0.3
	0.6				0.4
DEM <sup>(2)</sup> 粒子間衝突あり	1.1	1	10	10	720

- (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。