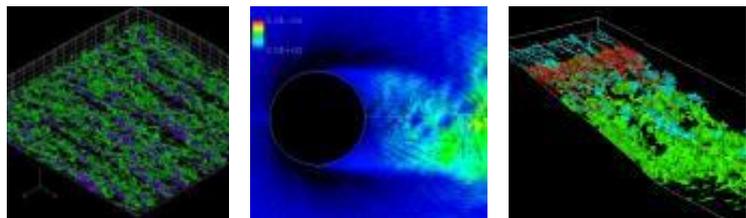


# 流体解析における 大規模シミュレーション

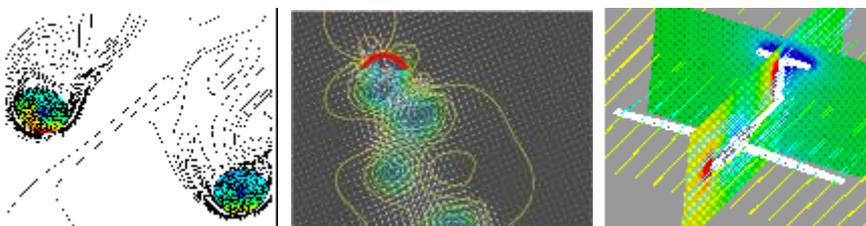
井上 洋平(名工大・CREST)  
<yohei.inoue@nitech.ac.jp>

## 大規模コンピューティングと流体解析

Fundamentals of  
turbulent flow



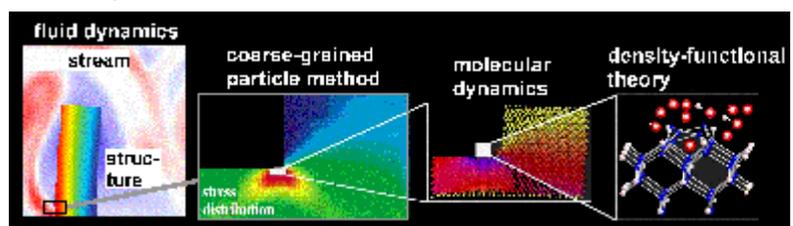
<http://www-fluid.mech.eng.osaka-u.ac.jp/>



Multiphase flow analysis  
Fluid-solid interactions

Takeuchi, S. *et al.* IUTAM symposium, Turkey, 2007

Hybrid simulation of multi-scale physics  
-nano, meso, microscales-



CREST, Japan Science and Technology Agency

# 流体解析における大規模計算

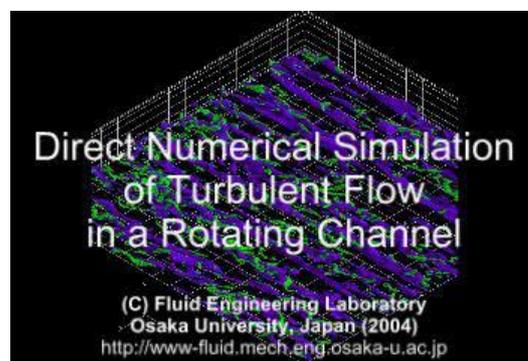
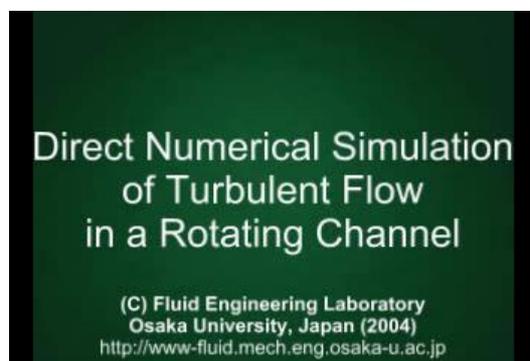
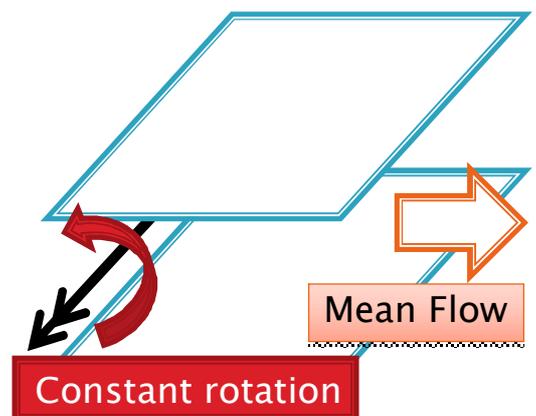
- ▶ 乱流の直接計算 … 必要格子点数は  $Re^{9/4}$ 
  - 実験系:  $Re > O(10^4) \Rightarrow$  最低  $10^9$ (点)必要
  - 実用問題:  $Re > O(10^5) \Rightarrow$  さらに多くの格子点
- ▶ 複雑流動現象の解明・モデリング
  - 気液・固液・固気二相流, 固気液三相流など
  - 流体・構造体連成問題
- ▶ ナノ・メゾ・マイクロ領域の統合シミュレーション
  - マルチスケール物理現象の解明

高い計算負荷・大容量の記憶領域が要求される

**HPC(大規模計算環境)が不可欠**

## 乱流の直接計算(1)

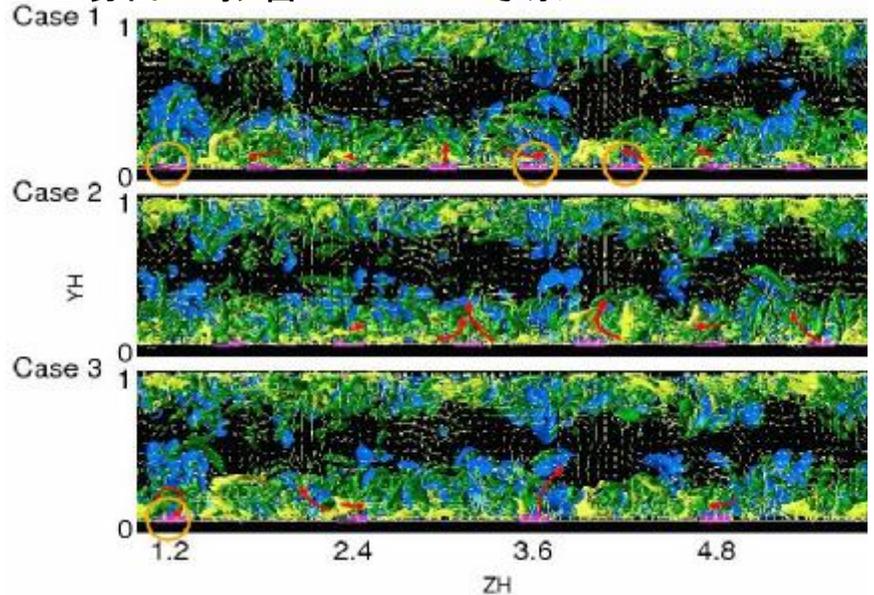
- ▶ 回転平行平板流路の乱流解析
  - $Re = U_c H / \nu \sim 5000$  (乱流状態)
  - 流路の横断方向を軸に回転
  - コリオリ力により流動様式が変化



Inoue and Kajishima, ISROMAC-11(2006)

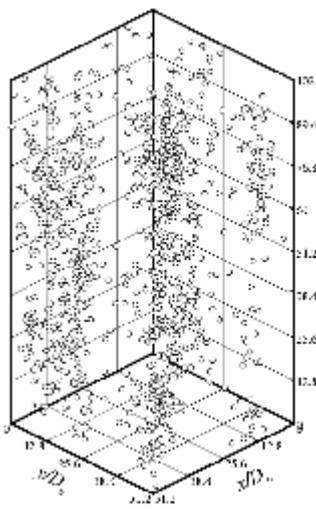
# 乱流の直接計算(2)

- ▶ 乱流構造と壁面噴流との相互作用
  - 工学的に重要(乱流制御・冷却など)
  - 吹出口配置を変化させた場合の影響について考察

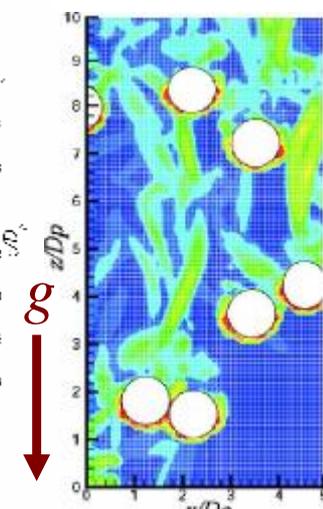


# 複雑流動現象(1)

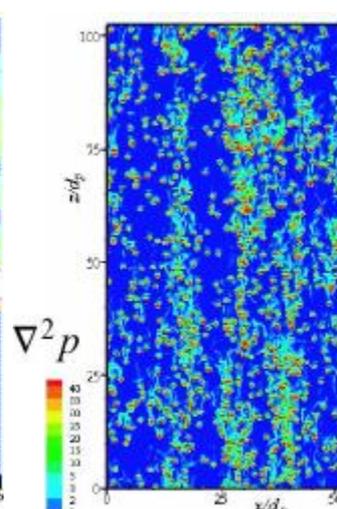
- ▶ 大量の粒子を含む流れ場の計算
  - 埋め込み境界法(Immersed-Boundary Method)
    - ⇒ 矩形(直方体)計算格子で任意形状物体周りの流れが解析可能(Kajishima, et al.)



Particle distribution



Induced vortices



Columnar structures

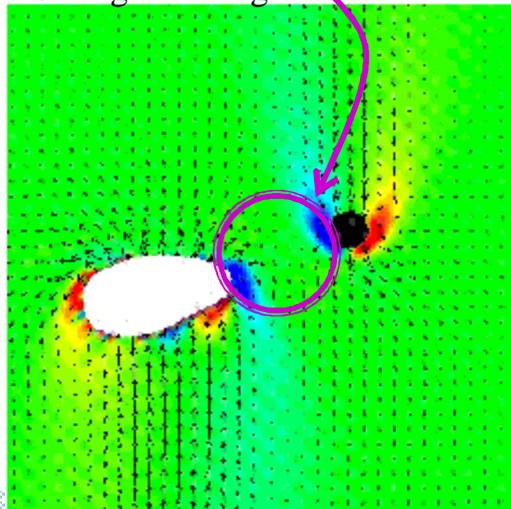
1024 Particles  
 $Re=300$   
 $\rho_p/\rho_f = 8.8$

## 複雑流動現象(2)

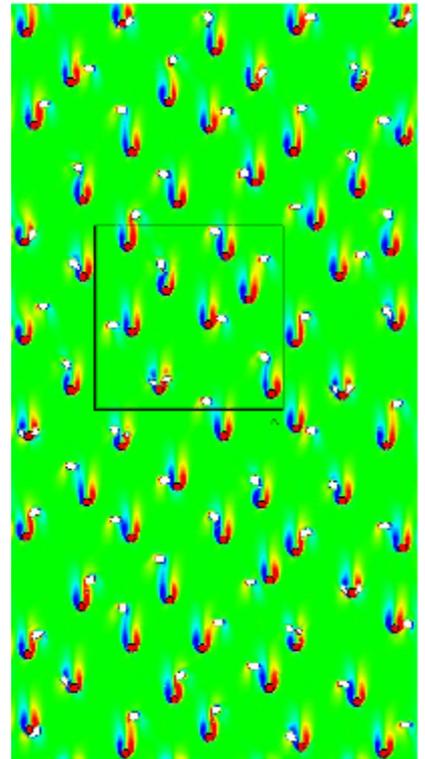
### ▶ 埋め込み境界法+Volume of Fluids (VOF) 法 (Takeuchi, et al., 2007)

- 気体・固体・液体を含む複雑流れの解析
- 多数の物体・気体を含む場合も解析可能

Strong shear region



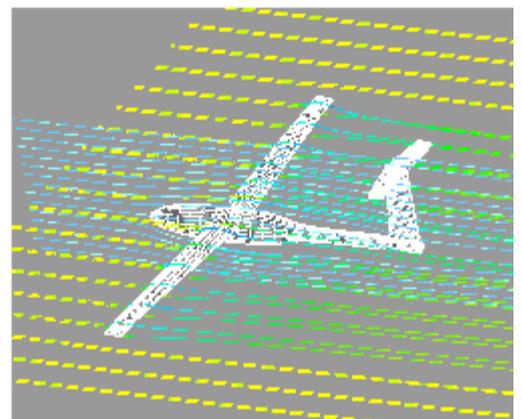
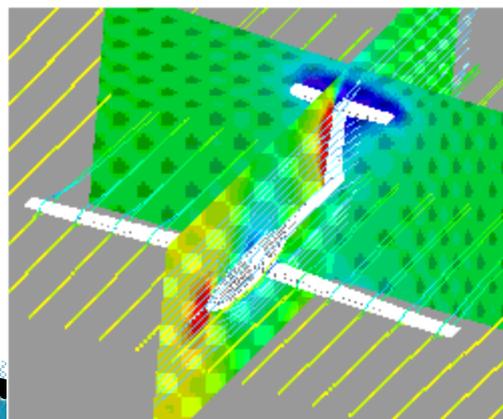
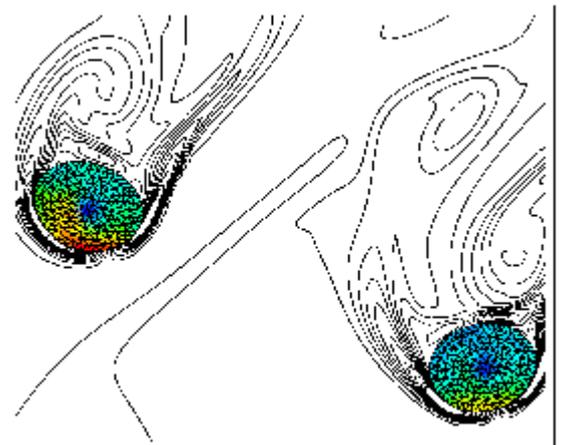
colour: vorticity



## 複雑流動現象(3)

### ▶ 埋め込み境界法+有限要素法 (Takeuchi, et al., 2007)

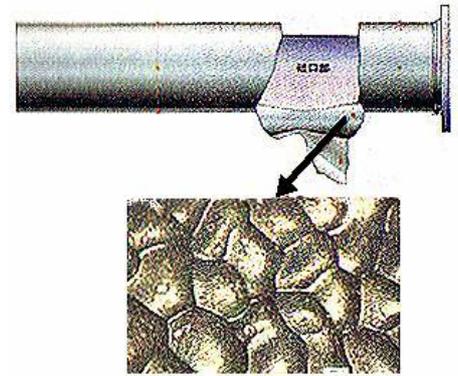
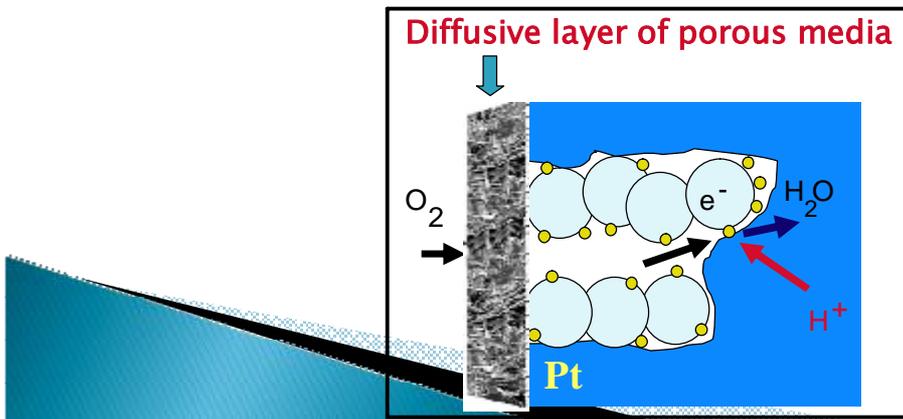
- 変形する物体を含む場合も解析可能
  - 塑性変形物体周りの流れ
  - 任意形状の弾性体周りの流れ, etc.



# マルチスケール解析(1)

## ▶ ナノ・メゾ・マイクロの複雑固液界面の大規模数値解析 (JST CREST, Oct.2005–Oct.2010)

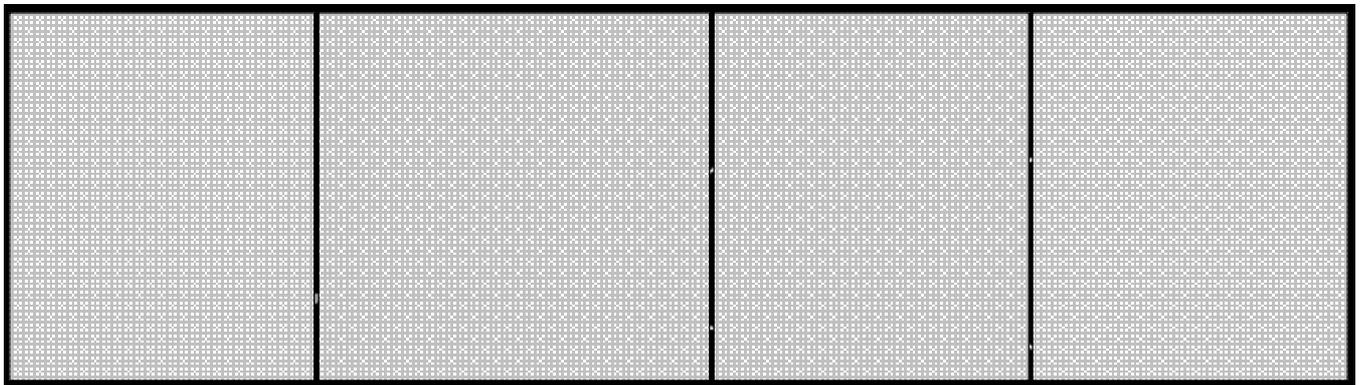
- 流体・固体界面近傍の物理化学過程
  - 流体中のナノ・マイクロ構造物の挙動(燃料電池・MEMS等)
  - 流体中の物体の壊食, 腐食による破壊 (マクロな挙動に対するマイクロスケール現象の影響)
  - 生体機構の挙動(赤血球, 鞭毛・繊毛 等)



# マルチスケール解析(2)

## ▶ マルチスケール物理現象の解明

- 各スケールで最適な計算手法 + ハイブリッド手法

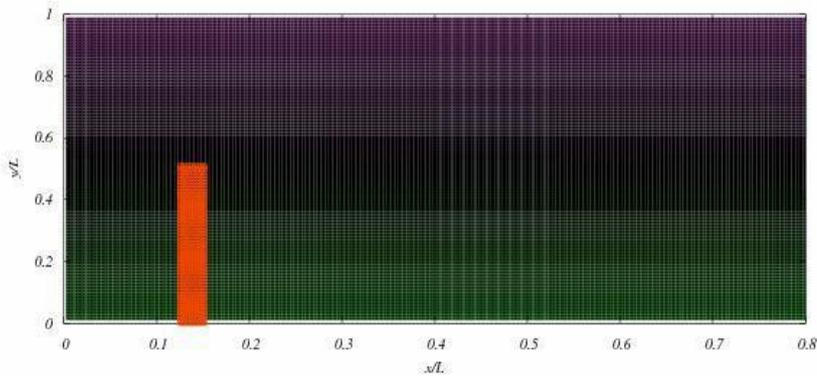


密度汎関数法 + 分子動力学法

分子動力学法 + 粗視化粒子法

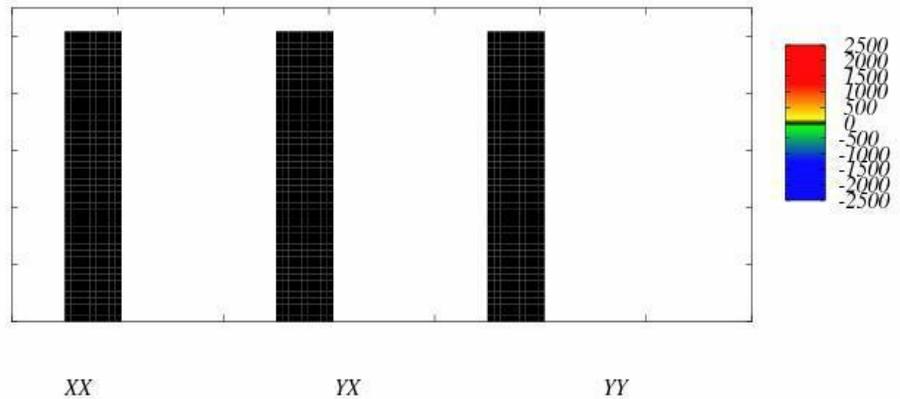
粗視化粒子法 + 格子ボルツマン法

# マルチスケール解析(3)



2次元Poiseuille流れ  
+  
粗視化粒子構造体  
+  
埋め込み境界法

- $Re=500$
- Ar原子を粗視化
- 粗視化率  $2^{10}$
- 粗視化粒子系より物体内部の応力分布を直接計算



Inoue, et al. DSFD(2007)

## おわりに

### ▶ 計算科学の進展

- 乱流解析: より高いレイノルズ数の精細なデータ
- 複雑流動現象: 大規模・複雑な系への応用  
マルチスケール物理現象の解明

### ▶ 流体解析における計算資源への要求

- ベクトル演算性能(⇒差分法では特に重要)
- 並列計算(⇒ハイブリッドシミュレーション)
- 一時記憶(RAM)の容量・アクセス速度
- 後処理(=計算結果の可視化)の高速化