

# 圧力発展格子ボルツマン法による大規模気液二相流GPUコードの開発 ならびに多孔体浸潤液滴シミュレーション



## 研究背景

### 多孔体内+二相流と課題

- 燃料電池ガス拡散層
- ヒートパイプ凝縮水
- オイルミストフィルター
- エマルション分離フィルター など

複雑構造内の液水挙動の予測が重要

### 課題と解決の糸口

- 多孔体, 液水の物性に依存した液水挙動・デバイス性能予測が困難
- ⇒ 数値解析 (格子ボルツマン法=複雑流れ場に効果的)
- 二相流解析の困難さ (高密度比解析において圧力計算が不安定<sup>[1]</sup>)
- ⇒ 圧力発展方程式の導入
- 大規模・高精度解析の必要性
- ⇒ TSUBAMEによる大規模並列解析, 格子解像度高精度化

## 研究目的

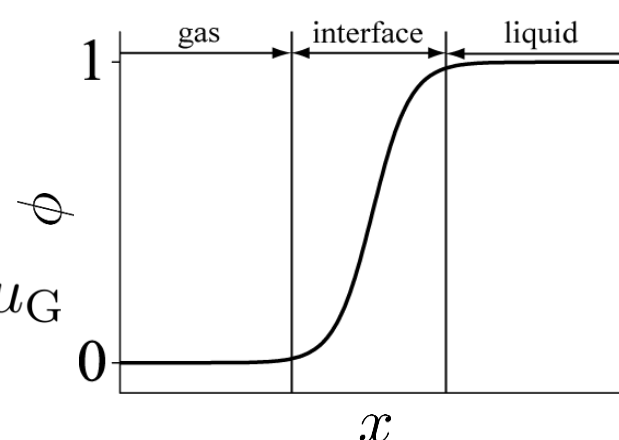
高密度比二相流解析の改良 (境界条件, マランゴニ効果)  
液水の挙動解析の実施 (輸送・分離)

## 解析手法 圧力発展格子ボルツマン法<sup>[2,3]</sup>

秩序変数  $\phi$  によって二相を区別

密度  $\rho$ , 粘度  $\mu$  を秩序変数で線形補間  $(1 - \phi) \mu_G$

$$\rho = \phi \rho_L + (1 - \phi) \rho_G$$



### 圧力分布関数の時間発展方程式

$$f_\alpha(\mathbf{x} + \mathbf{e}_\alpha \delta_t, t + \delta_t) = f_\alpha(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{\tau_f + 1/2} [f_\alpha - f_\alpha^{\text{eq}}]_{(\mathbf{x}, t)} + F_\alpha$$

$$f_\alpha^{\text{eq}} = w_\alpha (p - \rho c_s^2) + \rho \Gamma_\alpha c_s^2 - \frac{1}{2} F_\alpha$$

### 秩序変数 (密度) 分布関数の時間発展方程式

$$h_\alpha(\mathbf{x} + \mathbf{e}_\alpha \delta_t, t + \delta_t) = h_\alpha(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{\tau_h + 1/2} [h_\alpha - h_\alpha^{\text{eq}}]_{(\mathbf{x}, t)}$$

$$h_\alpha^{\text{eq}} = \phi \Gamma_\alpha + w_\alpha \frac{M}{c_s^2} \left[ \frac{4}{W} \phi (1 - \phi) \right] \left( \mathbf{e}_\alpha \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right)$$

### 外力項

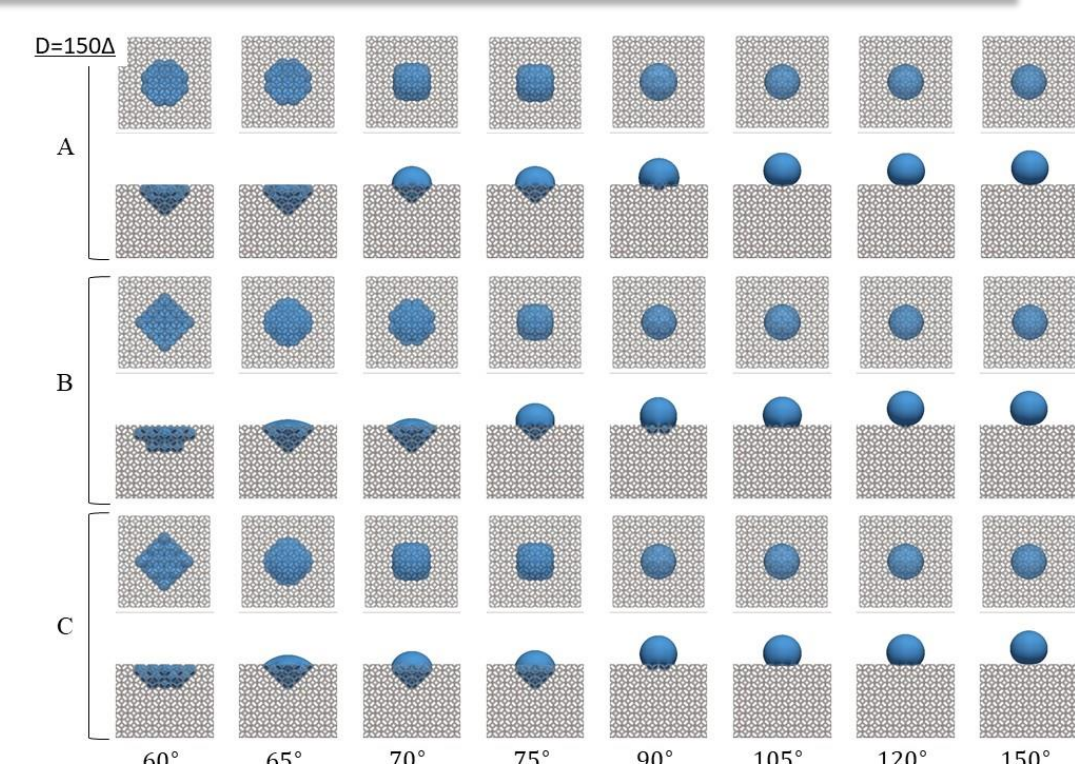
$$F_\alpha = \delta_t [(\Gamma_\alpha - w_\alpha) (\rho_L - \rho_G) c_s^2 + \Gamma_\alpha \mu_\phi] (\mathbf{e}_\alpha - \mathbf{u}) \cdot \nabla \phi + \delta_t \Gamma_\alpha (\mathbf{e}_\alpha - \mathbf{u}) \cdot \rho \mathbf{g}$$

### 巨視的変数

$$\phi = \sum_\alpha h_\alpha \quad \rho \mathbf{u} = \frac{1}{c_s^2} \sum_\alpha \mathbf{e}_\alpha f_\alpha + \frac{\delta_t}{2} (\mu_\phi \nabla \phi + \rho \mathbf{g})$$

$$p = \sum_\alpha f_\alpha + \frac{\delta_t}{2} \mathbf{u} \cdot \nabla \rho c_s^2$$

## 多孔体による液滴捕獲



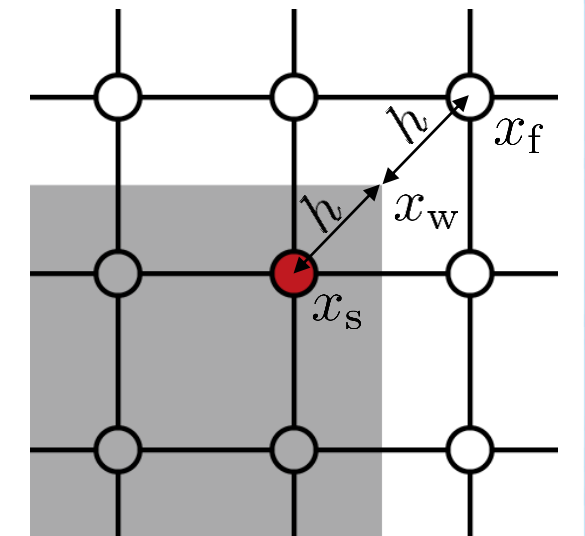
発泡多孔体では液滴を保持することが判明. 多孔体形状との相関も大事

## 濡れ性境界条件

Cubic Boundary Condition<sup>[2]</sup>

任意の接触角に応じて秩序変数  $\phi$  の壁面法線方向勾配を決定

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial n_w} \right|_{(x_w)} = \frac{\phi_f - \phi_s}{2h} = -\frac{4}{W} \phi_w (1 - \phi_w) \cos \theta_c$$



接触線以外 ( $\phi = 0, 1$ ) では  $\left. \frac{\partial \phi}{\partial n_w} \right|_{(x_w)} = 0$

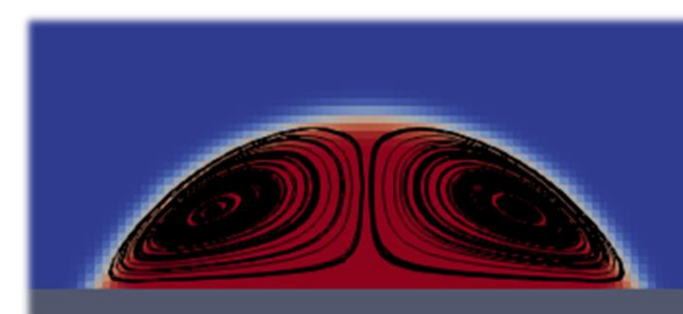
$$\Rightarrow \phi_s = \frac{1}{a} \left( 1 + a - \sqrt{(1 + a)^2 - 4a\phi_p} \right) - \phi_p \quad \left( a = -\frac{4h}{W} \cos \theta_c \right)$$

⇒ 流体近傍の固相ノードに濡れを考慮

Interpolated bounce-backへの拡張

## 熱マランゴニ効果

二次元解析において温度差起因のマランゴニ効果を考慮



液滴内熱物質輸送を考慮

平板上の液滴内に誘起される温度差マランゴニ対流

物体境界: Half-way Bounce-back

濡れ性境界: Cubic Boundary Condition

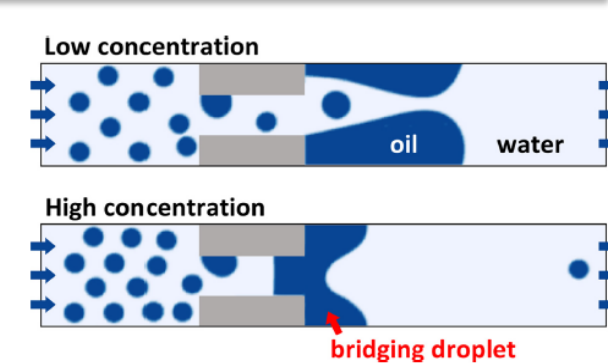
マランゴニ効果の検証と三次元解析への拡張

## 液滴衝突・合一のモデル化

油水分離などの現象では液滴衝突 (合一) が正しくモデル化されていない

液滴同士の反発をモデル化

## 多孔体流れ解析



一例として油水分離フィルター<sup>[6,7]</sup>に着目

## 参考文献

- [1] 稲室隆二, J. HTSJ, **55** 233 8-13(2016).
- [2] Fakhari, A. and Bolster, D., J. Comput. Phys. **334** 620-638(2017).
- [3] Fakhari, A. et al., J. Comput. Phys. **341** 22-43(2017).
- [4] Thomson, W., Acta Math. **11** 121-134(1887).
- [5] Weaire, D. and Phelan, R., Phil. Mag. Lett. **69** 107-110(1994).
- [6] Nino, Y. et al., Colloids and Surfaces A **491** 70-77 (2016).
- [7] <https://www.asahi-kasei.co.jp/eutec/>