

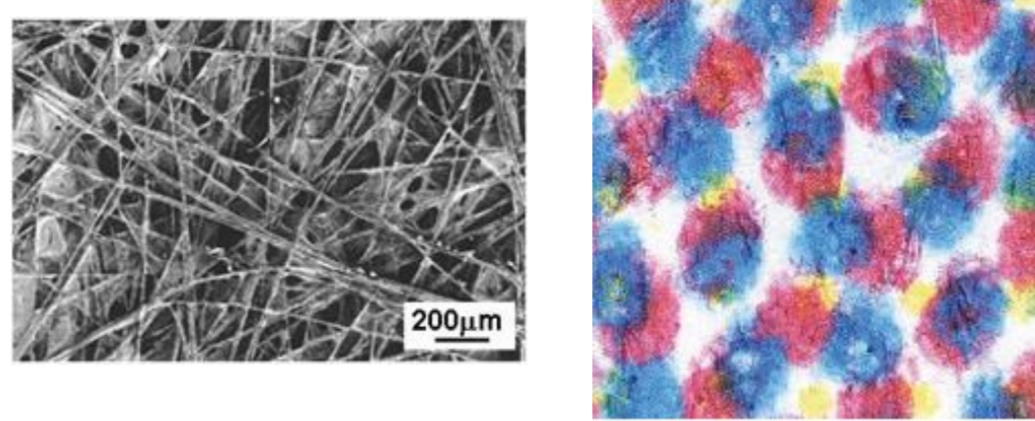
# 圧力発展格子ボルツマン法による大規模気液二相流GPUコードの開発 ならびに多孔体浸潤液滴シミュレーション



## 研究背景

多孔体内における気液二相流

- 燃料電池ガス拡散層
- 熱交換器凝縮水
- インクジェット液滴
- 珪藻土内の水の蒸散, 土壌への雨水の浸透 など



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
- 大規模並列解析, 格子解像度高精度化

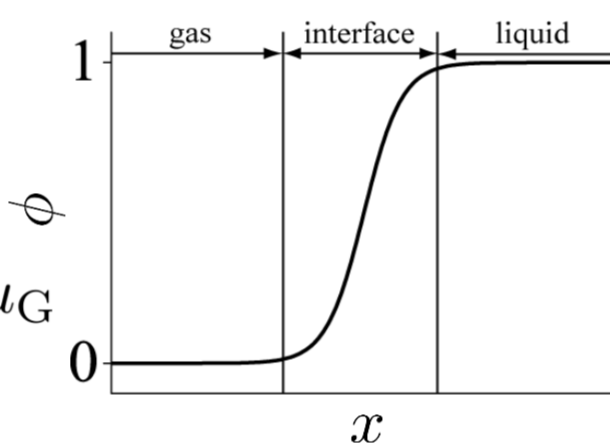
## 研究目的

高精度かつ高密度比二相流解析手法の確立  
多孔体へ滴下した液水の浸潤挙動解析を実施

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



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

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

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

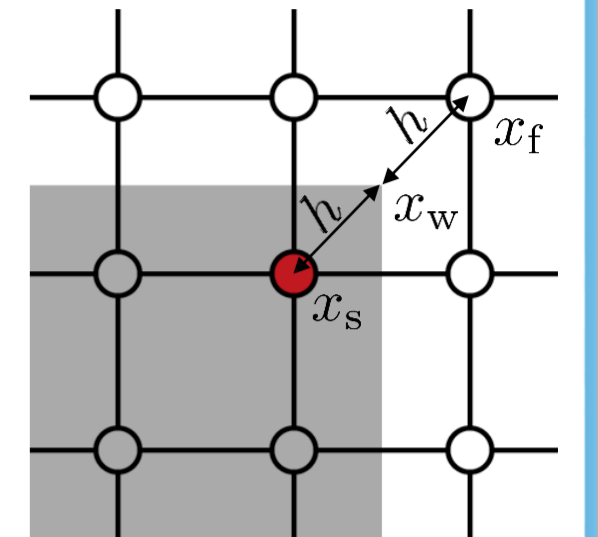
## 濡れ性境界条件

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

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

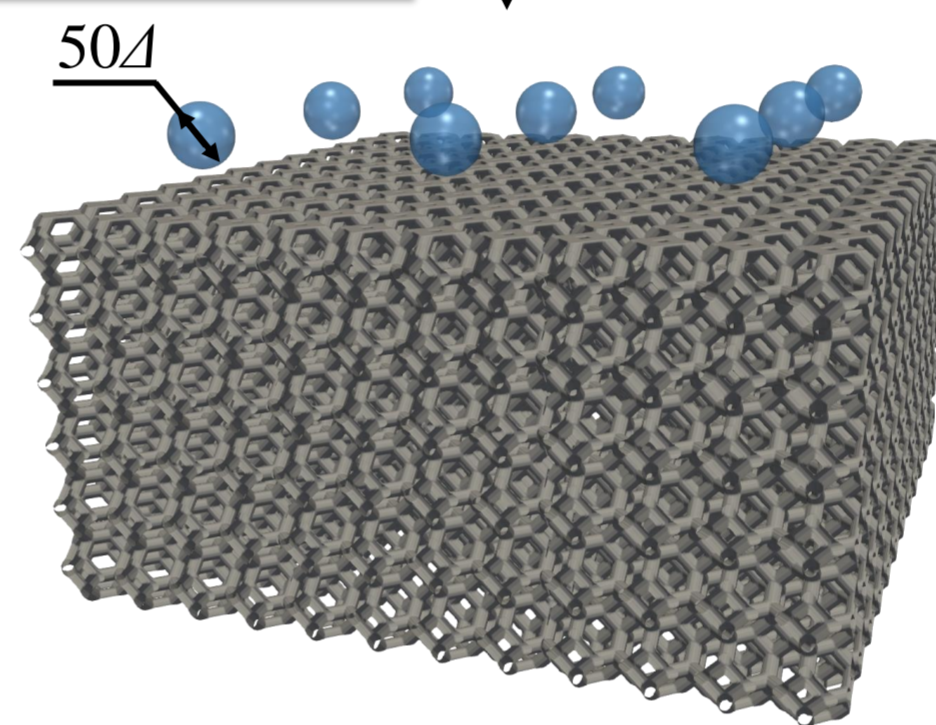
接触線以外 ( $\phi = 0, 1$ ) では  $\left. \frac{\partial \phi}{\partial n_w} \right|_{(x_w)} = 0$



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

流体近傍の固相ノードに濡れを考慮

## 解析条件

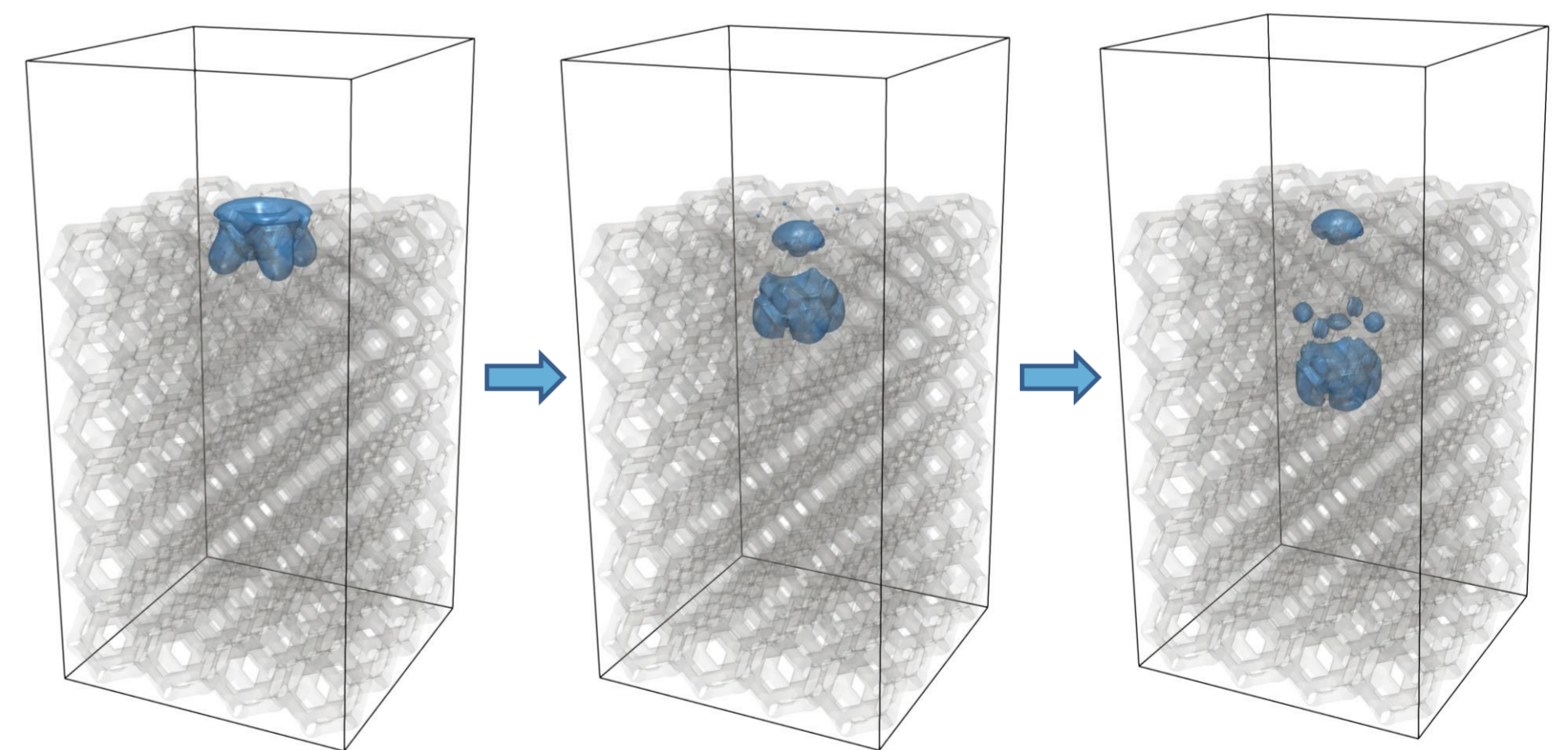


物体境界: Half-way Bounce-back  
濡れ性境界: Cubic Boundary Condition

$\Delta$ : 格子間隔

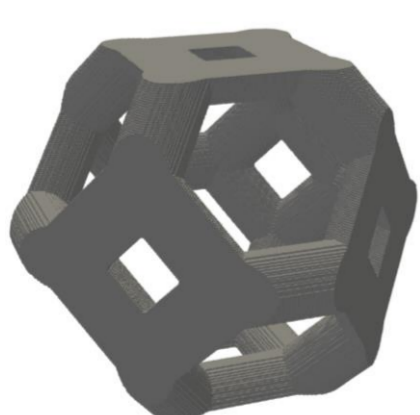
|                      |                                   |
|----------------------|-----------------------------------|
| 密度比 $\rho_L/\rho_G$  | 100 ( $\rho_L=1$ )                |
| 粘性比 $\mu_L/\mu_G$    | 1 ( $\mu_L=1.67 \times 10^{-3}$ ) |
| 接触角 $\theta_c$ [deg] | 90                                |
| 重力加速度 $g$            | $5 \times 10^{-7}$                |
| 表面張力係数 $\sigma$      | $1 \times 10^{-4}$                |
| 界面厚さ $W$             | $4\Delta$                         |
| モリテイ $M$             | 0.01                              |

## 解析結果



## モデル多孔体

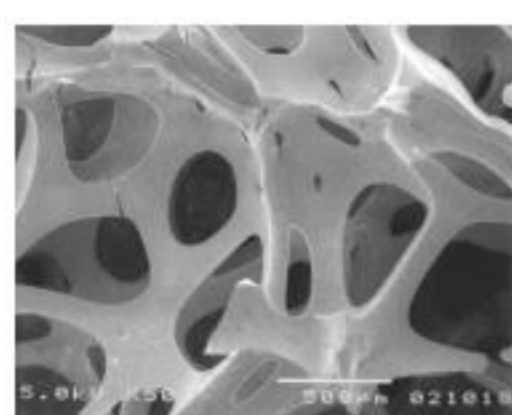
発泡多孔体を模擬



Kelvinセル<sup>[4,5]</sup>



Kelvinセル多孔体



発泡多孔体

## 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).