

非球形粒子間隙を通過する Non-Boussinesq 密度流の数値解析

田中 寛樹 (京大・工), 鳥生 大祐 (京大・ACCMS), 牛島 省 (京大・ACCMS)

固体粒子および混ざり合う 2 気体からなる多相場の数値解析手法

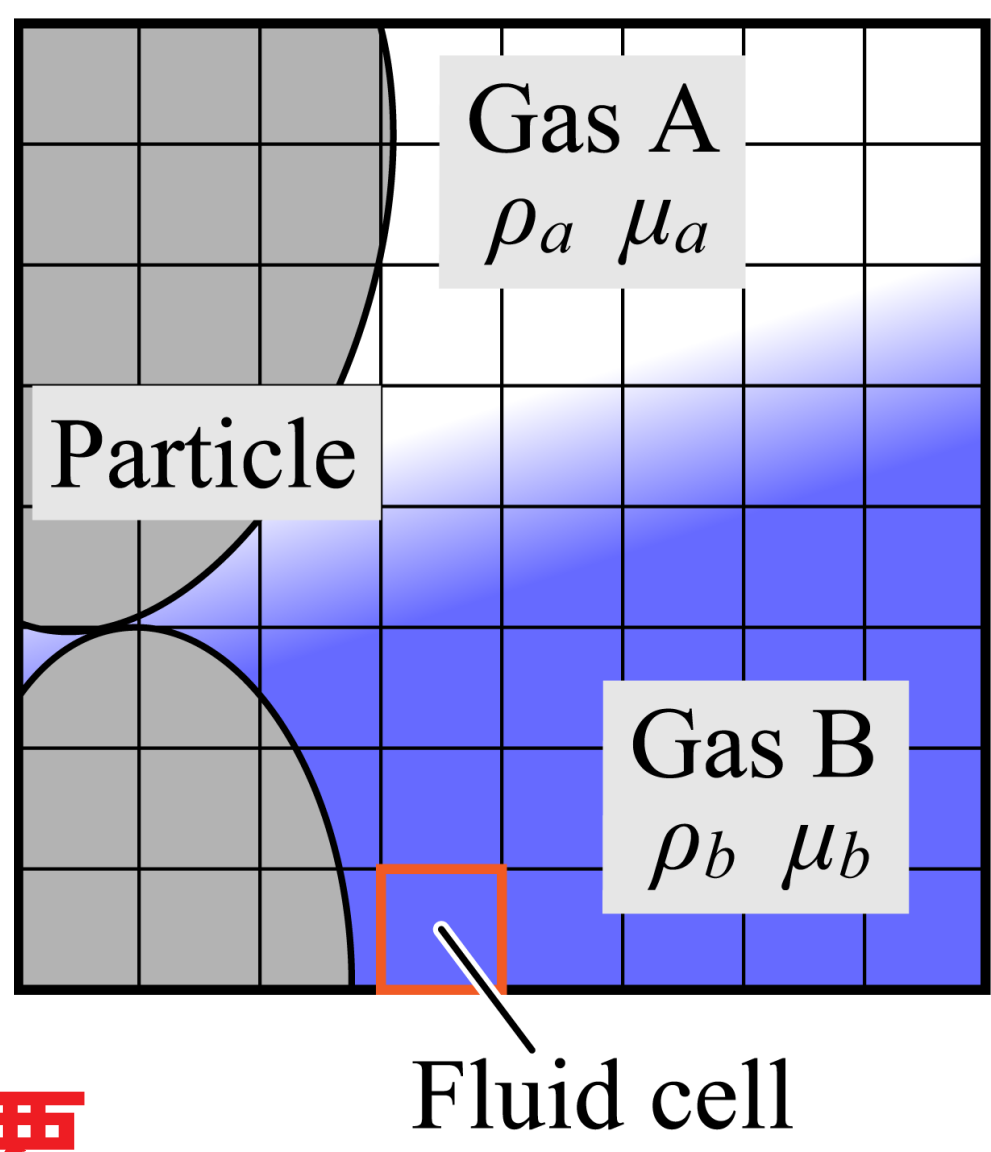
相平均モデル

固相領域に仮想流体を考え、

- 各相の { 質量保存則
非圧縮条件
運動方程式

を平均化した基礎方程式を計算

→ 抗力係数などの実験定数は不要

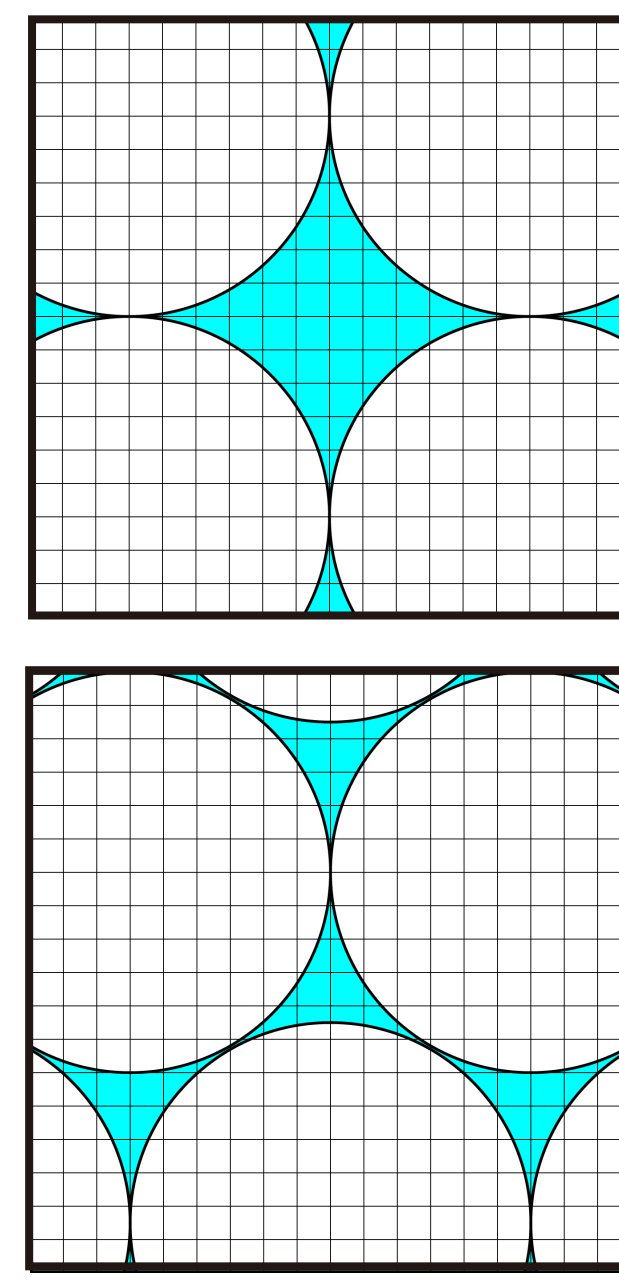


空隙セル解像度 R

流路の確保が重要 → 空隙率に注目

$$R = \frac{d^3 \varepsilon}{\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3} \quad \left(\begin{array}{l} \Delta x_i : \text{計算セル幅} \\ d : \text{代表粒径} \\ \varepsilon : \text{空隙率} \end{array} \right)$$

右図は粒径が同じで空隙率が異なる領域を
同じ計算セルサイズで分割した様子を示す
上図に比べ、下図は十分な流路を確保できていない



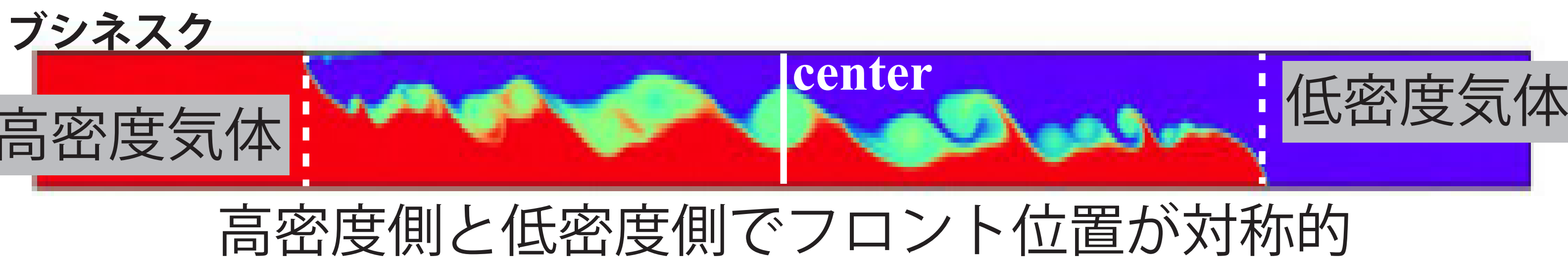
非ブシネスク流れも計算可能

$$\rho_0 \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho_f g_i$$

【ブシネスク近似】密度変化が十分小さいと仮定し、左辺の密度は基準密度(定数)、右辺の密度には 2 気体の混合密度 ρ_f を用いる

$$\rho_f \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho_f \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho_f g_i$$

【非ブシネスク(本報)】すべての密度に混合密度 ρ_f を用いる
密度比 2.18 以上の流れも正確に再現できる (池田ら, 2012)



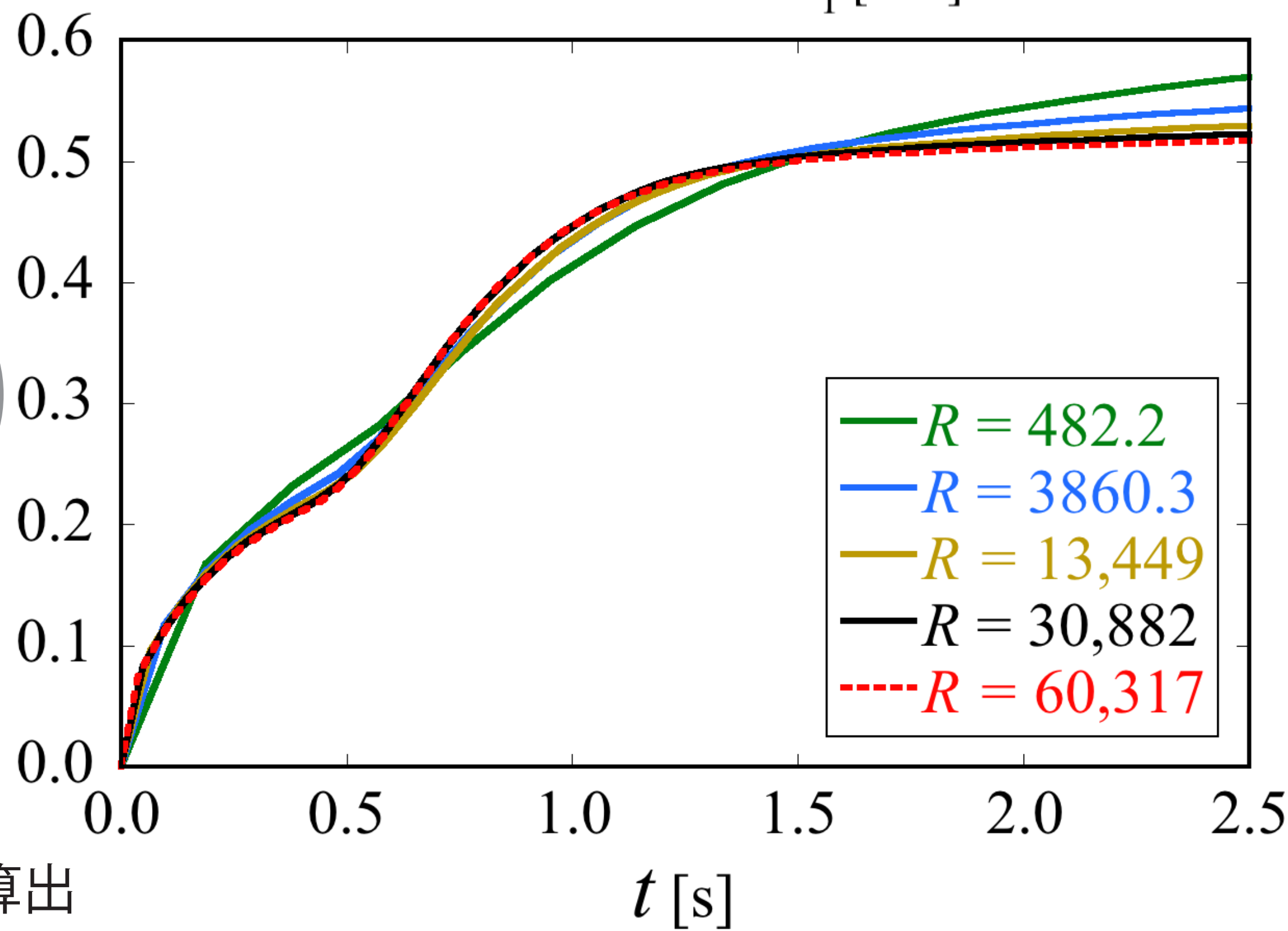
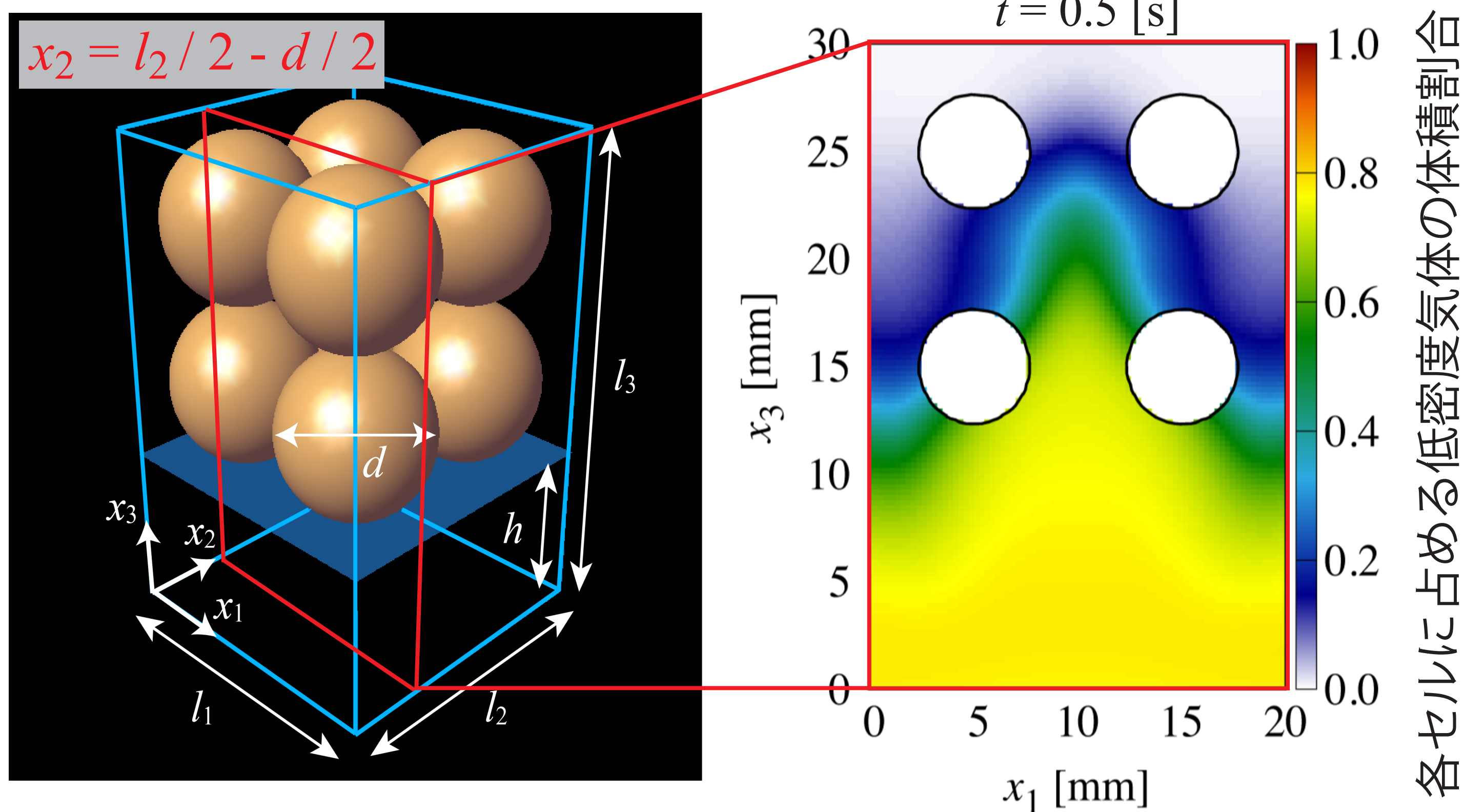
高密度側と低密度側でフロント位置が対称的
高密度側のフロントがより速く進む様子が再現できている

池田ら (2012) による lock-exchange 流れの計算結果
(密度比 2.99, 同時刻, 上図はブシネスク近似を用いた結果)

粒子間隙における非ブシネスク流れの数値実験

均一球体を規則的に配置

- 計算領域の上部に高密度気体 (空気の物性値)、下部に低密度気体 (水素ガスの物性値) を配置
- 密度は水素ガス 0.084 [kg/m³], 空気 1.2 [kg/m³]
→ 密度比がおおよそ 14 の非ブシネスク流れ
- 計算セルサイズを変え、 R についての検討を行う



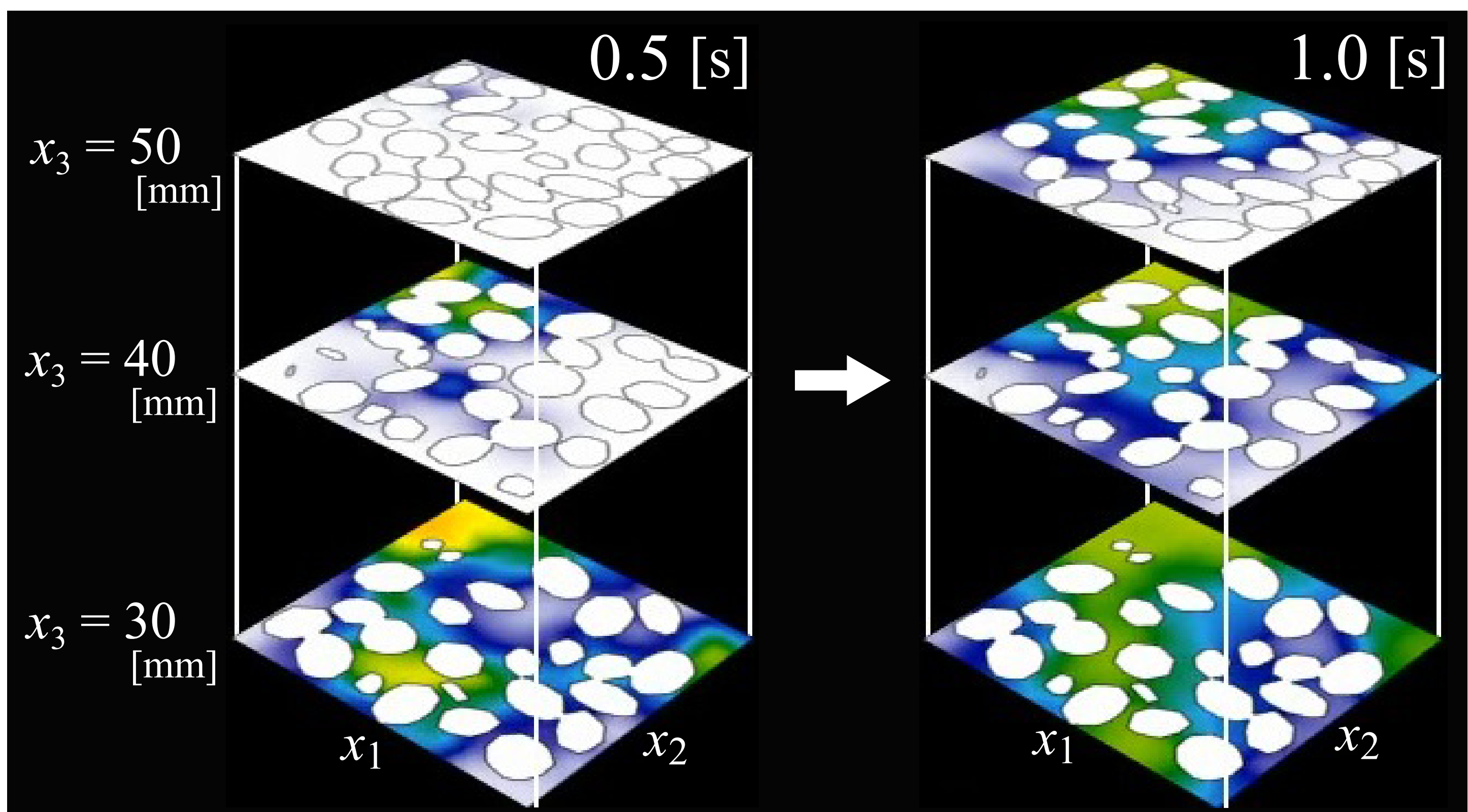
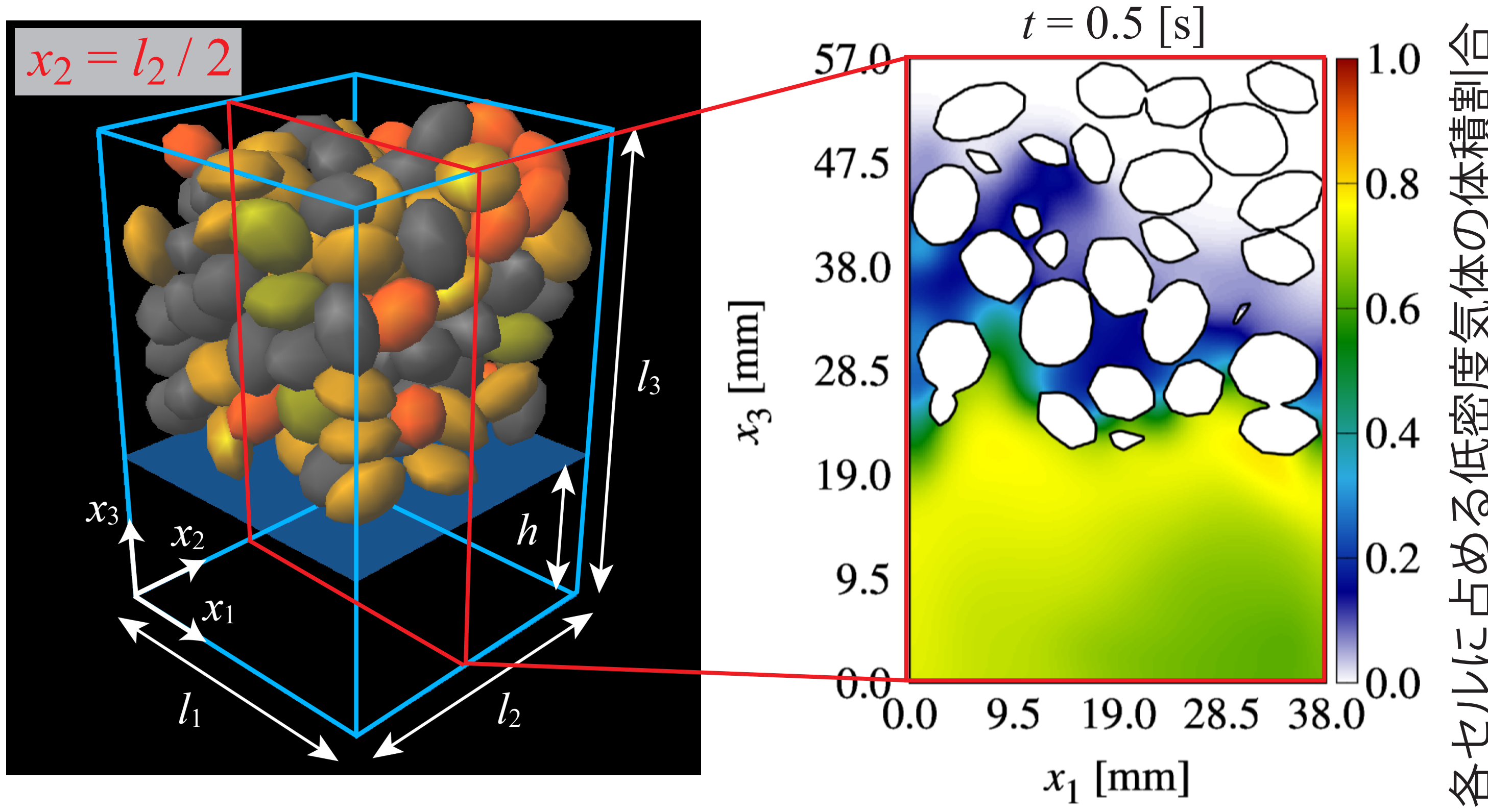
全体における
低密度気体の
総体積を、
 $x_3 > h$ における
低密度気体の
総体積で除して算出

H_{in} (低密度気体の粒子間隙への侵入率) の時間変化

→ 本計算において $R > 30,882$ ではほぼ同様の結果

非球形粒子を不規則に配置

- 形状や粒径の異なる 4 種類の粒子 128 個を配置
- 代表粒径 d は中径の平均値 7.7 [mm] とした
- R が約 30,000 となるよう計算セルサイズを設定
- 3 次元的な描画を行い、粒子間隙にどのように低密度気体が流入するか、その傾向を確認する



→ 大きな間隙に低密度気体が流入する傾向を確認
非対称で 3 次元的な流れが間隙で発生した