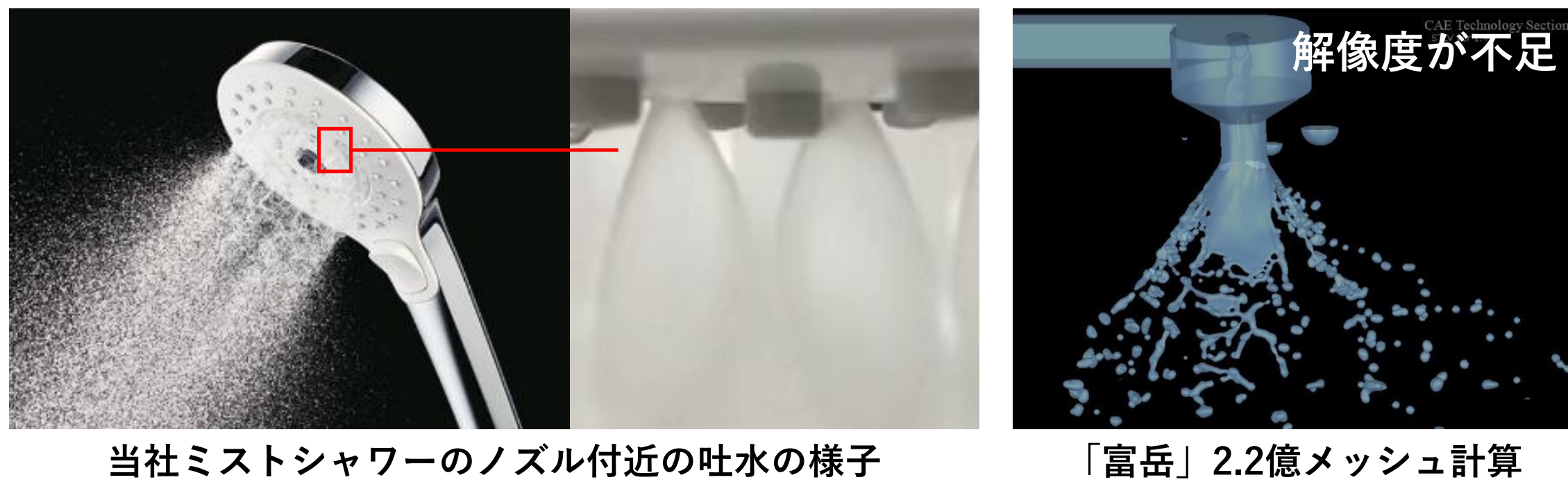


# AMR法を用いたLBMによる気液二相流シミュレーション開発と住宅設備機器への適用

佐々木 一真 (TOTO株式会社)

## 研究概要

- 住宅水まわりにおける“きれいと快適・健康”と“環境”を両立するサステナブルプロダクトを開発するため、微小水滴や薄膜流れを計算する気液混相流シミュレーションソフトを自社開発してきた
- 今後の商品開発ではこれまで以上に高い解像度が必要となり、開発者が**効果的に**シミュレーションを活用するには、長くても2~3日、可能であれば一晩といった**計算スピードの10倍程度の高速化**が課題である



当社ミストシャワーのノズル付近の吐水の様子

「富岳」2.2億メッシュ計算

- 近年のLBMによる二相流シミュレーションの既往研究において高密度比の計算が安定的に計算できる手法が示され、計算スピードの10倍高速化が期待される
- 本研究は、**AMR法による計算精度向上と計算時間短縮の両立**を実現し、複雑形状内部流れへのLBMによる気液二相流適用と実用化を目的とする

## JHPCN課題 推進体制

**TOTO** : 自社コード開発と実用化に向けた検証

↑ 共同研究 (2025~)

九州大学 : AMR-LBMのGPU実装と精度について学術的指南

利用資源

東京科学大 TSUBAME 4.0

## 流体計算手法

### 流れの計算手法

#### 非圧縮性Navier-Stokes方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \frac{1}{\rho} [-\nabla p + \mu \{ \nabla^2 \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \}] + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_b$$

$\mathbf{u}$ : 流速  $p$ : 圧力  
 $\rho$ : 密度  $\mu$ : 粘性係数  
 $\mathbf{F}_s$ : 表面張力  $\mathbf{F}_b$ : 重力

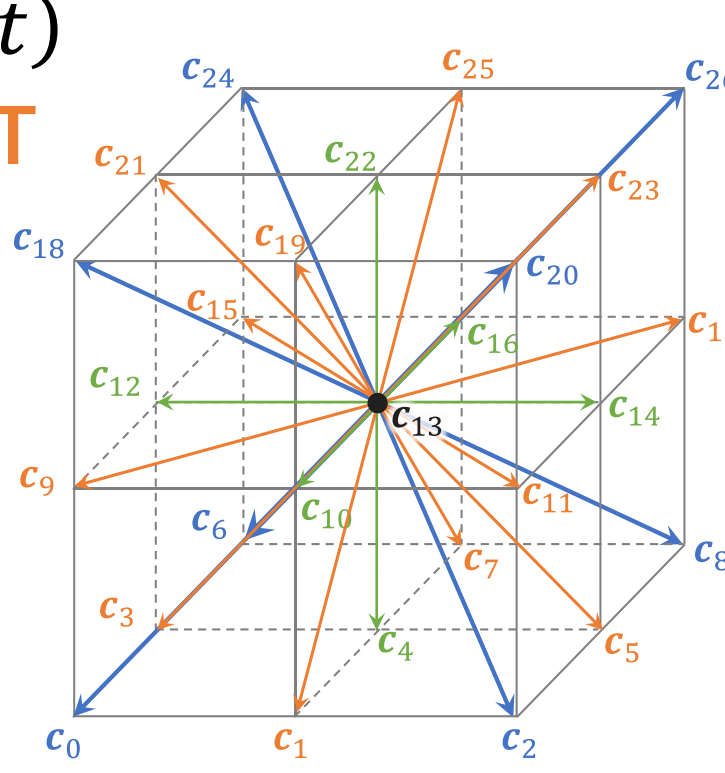
#### 格子ボルツマン方程式 (速度ベース)

$$g_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = g_i(\mathbf{x}, t) + \Omega_i^g(\mathbf{x}, t) + G_i(\mathbf{x}, t)$$

→衝突項: CM-MRT

$$p^* = \sum_{i=0}^{26} g_i(\mathbf{x}, t) = \frac{p}{\rho c_s^2}$$

$$\mathbf{u} = \sum_{i=0}^{26} \mathbf{c}_i g_i(\mathbf{x}, t) + \Delta t \frac{\mathbf{F}(\mathbf{x}, t)}{2\rho(\mathbf{x}, t)}$$



D3Q27モデル

### 気液界面の計算手法 (Phase field法)

#### 保存型Allen-Cahn方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left[ M \left( \nabla \phi - \frac{4}{\xi} \phi (1 - \phi) \mathbf{n} \right) \right]$$

$\phi$ : Phase Field変数  
 $M$ : モビリティ  
 $\xi$ : 界面幅  
 $\mathbf{n}$ : 界面の法線ベクトル

#### 格子ボルツマン方程式

$$h_i(\mathbf{x} + \mathbf{d}_i \Delta t, t + \Delta t) = h_i(\mathbf{x}, t) + \Omega_i^h(\mathbf{x}, t) + H_i(\mathbf{x}, t)$$

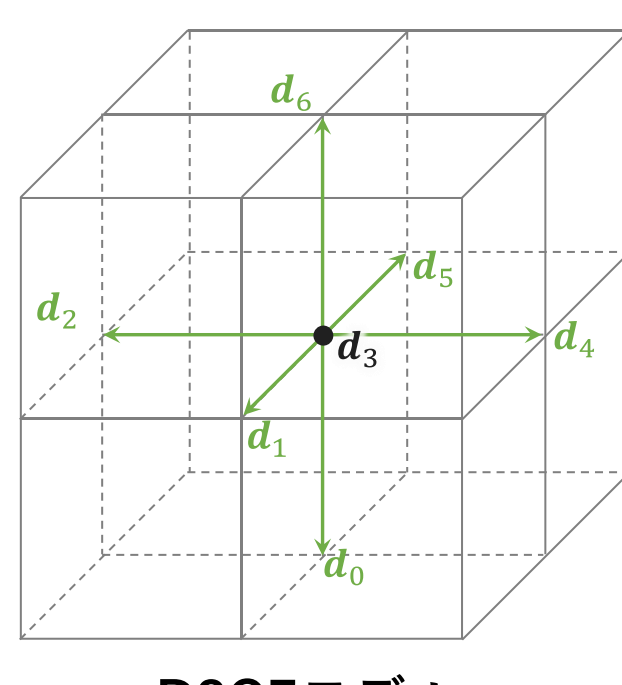
→衝突項: CM-MRT

$$\phi(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=0}^6 h_i(\mathbf{x}, t)$$

#### 密度、粘性係数分布

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \rho_L + (\rho_H - \rho_L) \phi(\mathbf{x}, t)$$

$$\frac{1}{v(\mathbf{x}, t)} = \frac{1}{v_L} + \left( \frac{1}{v_H} - \frac{1}{v_L} \right) \phi(\mathbf{x}, t)$$



D3Q7モデル

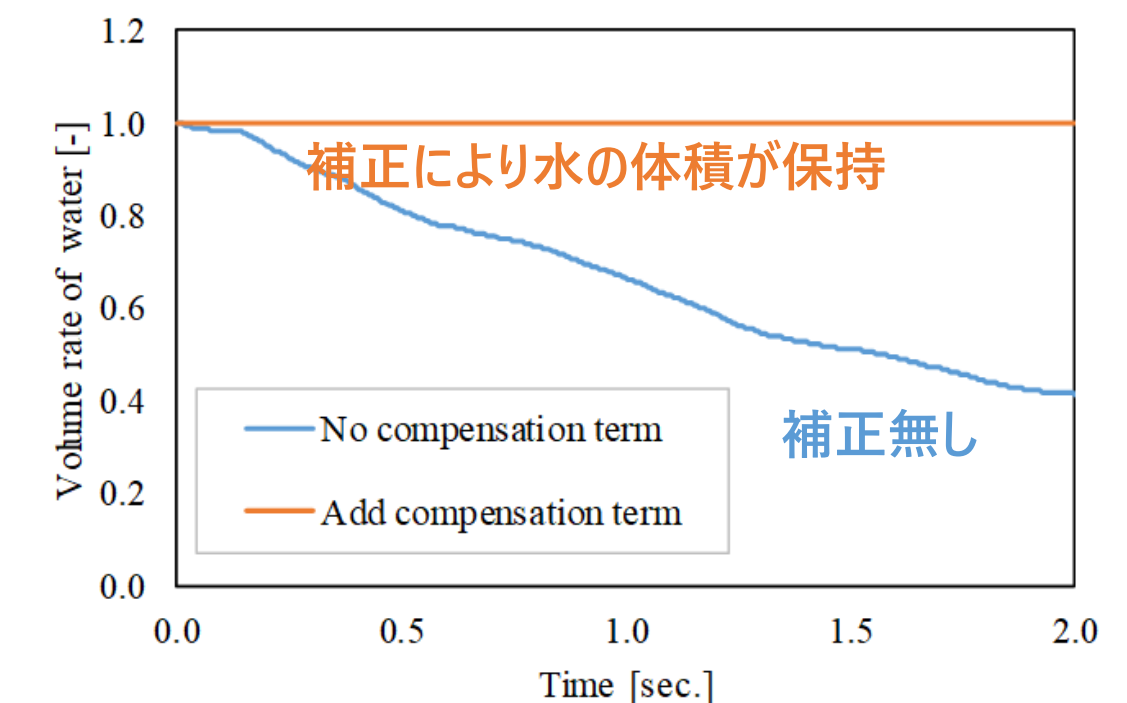
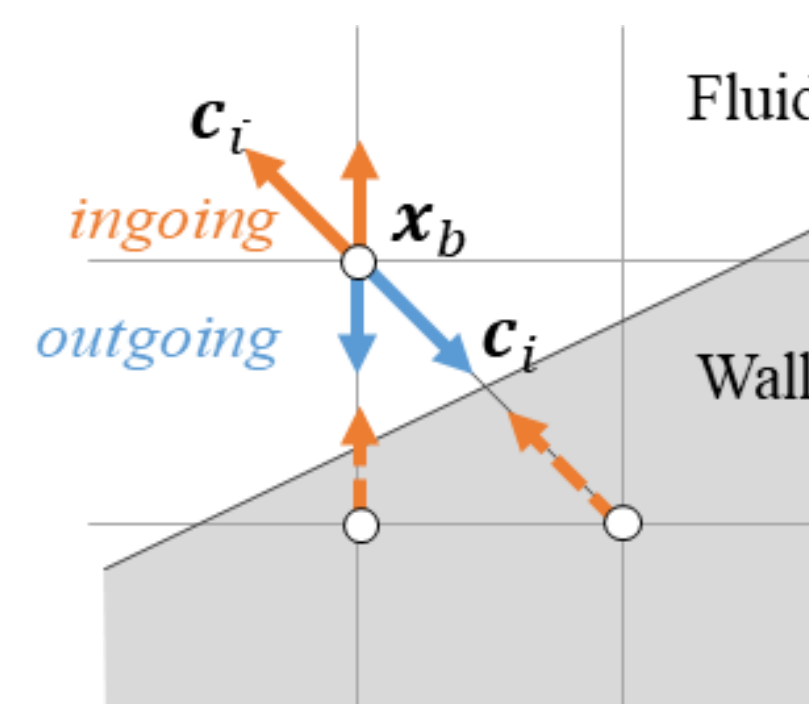
高密度比・高レイノルズ数流れが安定して計算可能

## 複雑形状内部流れへの適用

### Interpolated Bounce Back Scheme と体積補正処理

- 複雑形状の曲面を表現
- Feiら<sup>\*</sup>による速度分布関数に補正項を追加する処理

$$g_0(\mathbf{x}_b, t + \Delta t) = g_0^*(\mathbf{x}_b, t) + \left[ \sum_{outgoing} g_i^*(\mathbf{x}_b, t) - \sum_{ingoing} g_i(\mathbf{x}_b, t + \Delta t) \right]$$

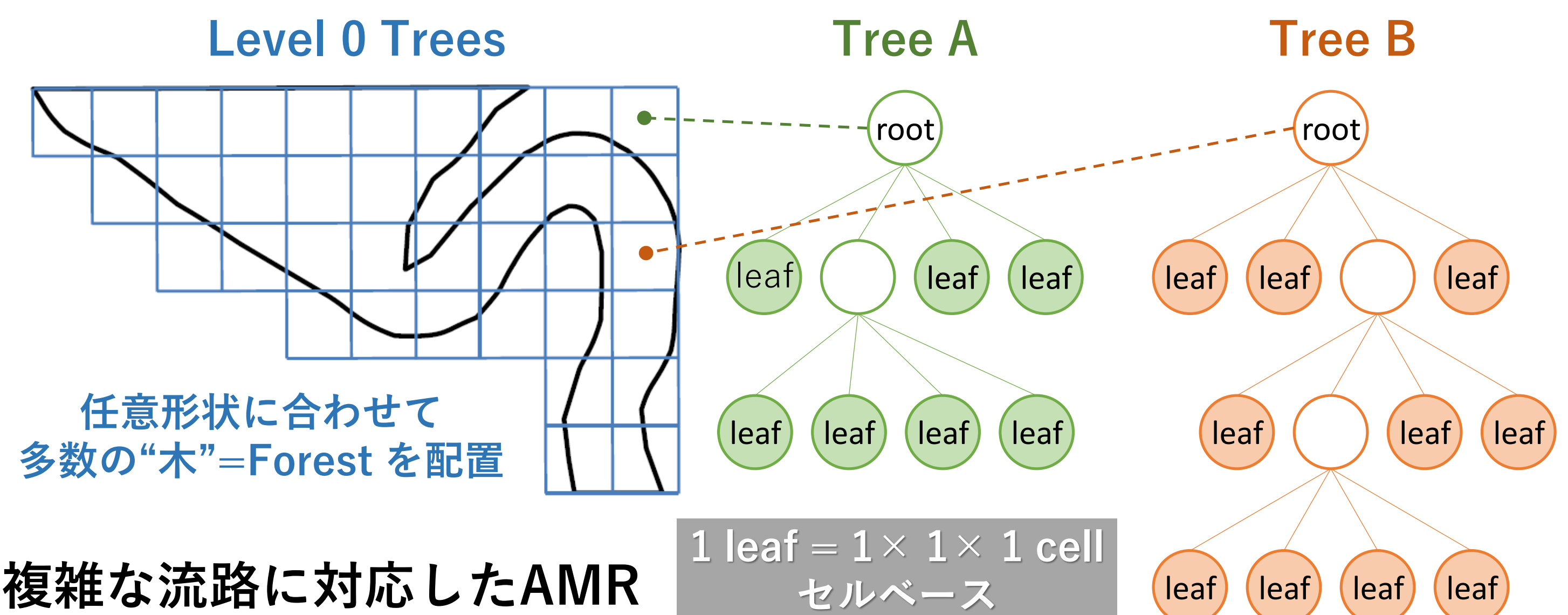


## 複雑な形状における気液二相流LBMを実現

<sup>\*</sup>Fei, L. et al. (2023), "Coupled lattice Boltzmann method-discrete element method model for gas-liquid-solid interaction problems", *Journal of Fluid Mechanics*, 975, A20

## AMR法 (適合格子細分化法)

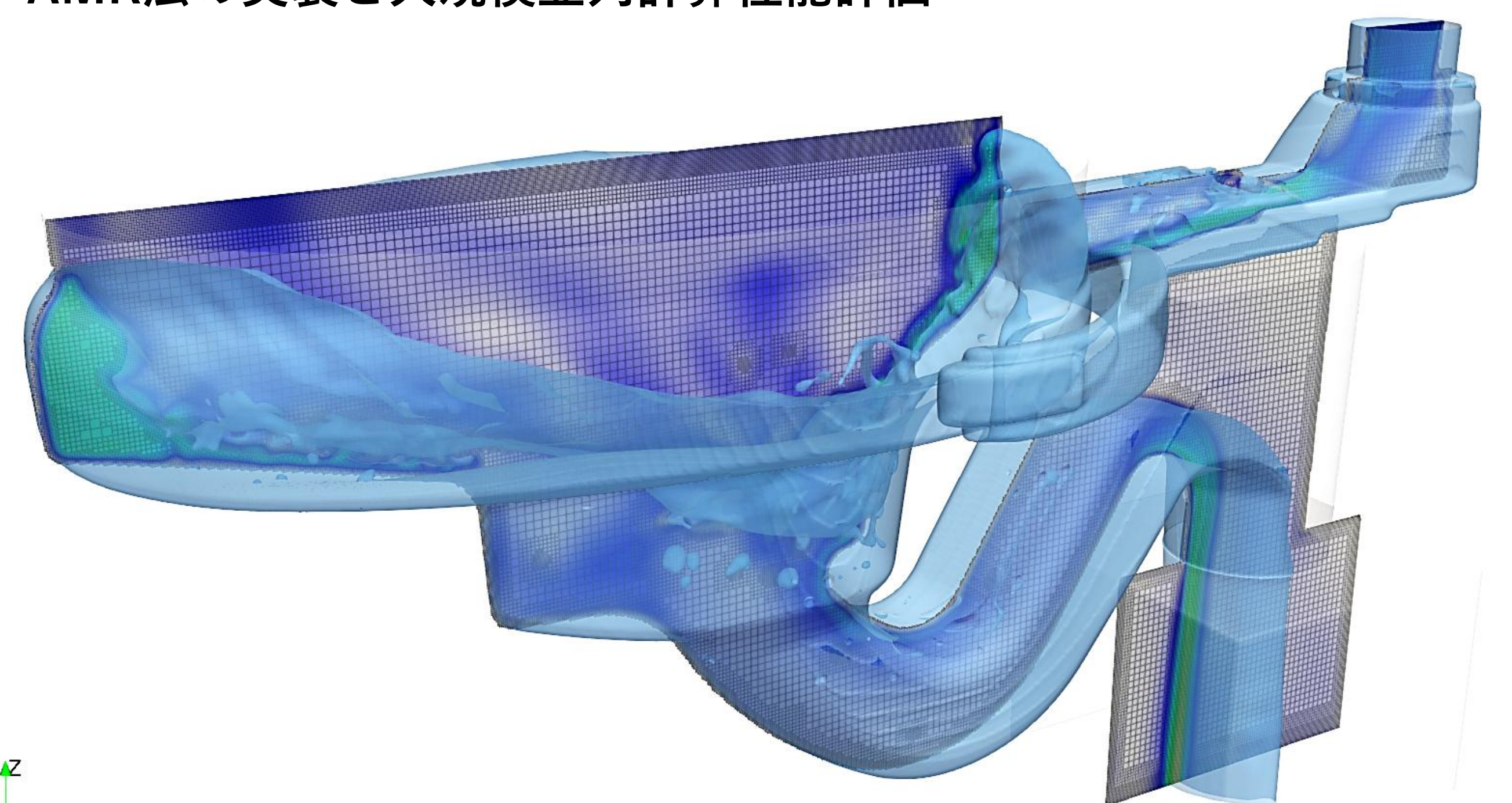
### Cell-based AMR on a Forest of Octrees (フォレスト型セルベースAMR)



## 研究計画

### 第1Q

- AMR法の実装と大規模並列計算性能評価



## 複雑形状気液二相流LBMへAMR法の実装を推進中

### 第2Q

- AMR法を用いたLBMによる気液二相流れのベンチマークテスト

### 第3Q

- 大便器洗浄シミュレーションの妥当性検証

### 第4Q

- シャワー吐水シミュレーションの妥当性検証

## 今後の課題

- 複雑形状AMRのマルチGPU並列計算対応
- 計算精度の検証 (計算精度と計算コストのトレードオフ)
- 様々な形状に対する汎用性、プリポスト処理を含めた実用性の向上