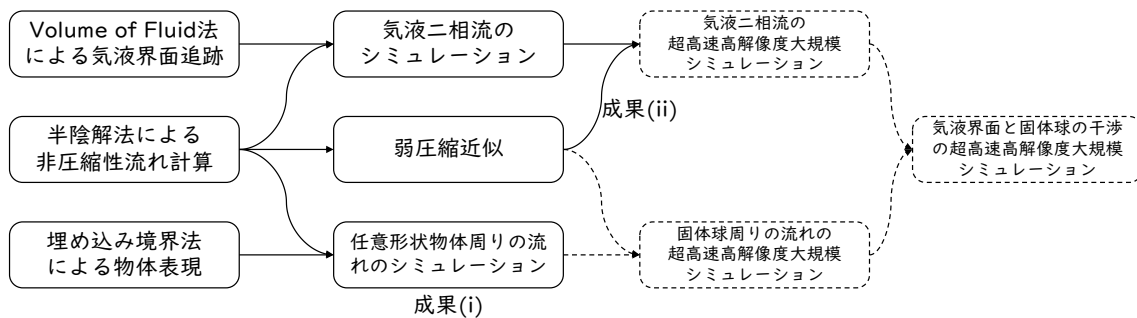


## 気液界面と固体球の干渉に伴う界面変形プロセスの 高解像度大規模シミュレーション

研究代表者：高牟礼光太郎（名古屋大学）

共同研究者：内山知実，出川智啓，阿部完，大島聡史（名古屋大学）

気液界面と固体球のシミュレーションを実現するための第一段階として、(i) 固体球と流体を含む固液界面のシミュレーションと、(ii) 気液二相流および気液界面の計算手法の考案を個別に実施した。下記は課題達成までのロードマップと今年度の成果であり、以下に成果の詳細を示す。



### (i) 固体球と流体を含む固液界面のシミュレーション

固体球と流体の境界面のシミュレーションの精度向上を図った。流動場の支配方程式は、非圧縮性流体に対する連続の式および Navier-Stokes 方程式である。支配方程式の数値解法には部分段階法を用いた。時間進行には三次精度の Adams-Bashforth 法および SMAC 法を用いた。空間離散化には全方向に対して四次精度の中心差分法を適用した。計算格子にはスタガード格子を適用した。固液界面（球体周りの境界）に対して埋込境界法を適用した。以上のシミュレーションコードは、計算速度を向上させるために、空間に対して Message Passing Interface (MPI) 並列処理を施した。シミュレーション条件は、空間に固体球を固定し、一様流を計算領域に流した。本計算では、固体球の後流の速度場及び渦構造の分布を調査し、本計算手法の妥当性を検討した。本シミュレーションによって、図 1 に示すような埋込境界法を適用することで、後流の速度場(図 2 (a))および渦構造(図 2(b))が現実の流れ場に近づくことが明らかとなった。また、後流幅やその他統計量が、実験によって得られた先行研究の結果と類似することを明らかにした。

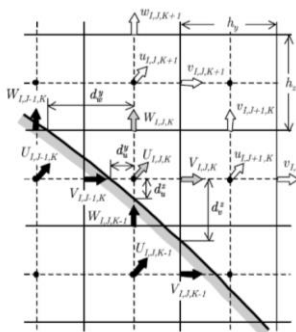


図 1：埋め込み境界法の概要

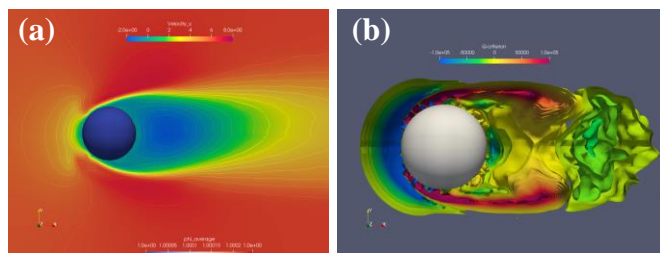


図 2：粒子周りの流れ場(a) 速度場, (b) Q 値

(ii) 気液二相流および気液界面の計算手法の考案

固体球と気液界面の干渉を詳細に捉える高解像度大規模数値シミュレーションを実現するために、気液二相流の数値計算法に埋め込み境界法をカップリングし、かつ弱圧縮近似を導入することで、圧力 Poisson 方程式の求解を回避する。

MPI を用いた複数ノード並列化による超高速高解像度大規模シミュレーション達成のために、気液二相流の計算手法に弱圧縮近似を導入した。計算には以下の支配方程式を用いた。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{m} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{m} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F} \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p = -\rho c^2 \nabla \cdot \mathbf{u} + \varepsilon f_{\text{cure}} \tag{3}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\phi) = -\phi \nabla \cdot \mathbf{u} \tag{4}$$

ここで、 $\rho, \mathbf{u}, p, \mathbf{m}, \phi$  は流体の密度、速度、圧力、運動量、体積率である。 $\mathbf{F}$  は外力であり、重力および表面張力を含む。 $f_{\text{cure}}$  は圧力安定化のための項であり、非圧縮性流れにおける速度と圧力の関係から導出し、パラメータ  $\varepsilon (= O(\Delta x))$  を乗じてその強さを調整する。音速  $c$  は代表速度に基づく Mach 数が 0.1 となるように定めた。

不老 Type I サブシステムの 1 ノードを用いて、ベンチマーク問題である液柱崩壊問題の計算を実行した。図 3 は液柱の先端位置および高さの時間変化であり、実験結果[1]とよい一致を示している。3 通りの格子分割数で計算を行ったところ、格子による違いは見られなかった。これは、運動量を保存するよう支配方程式を構築したことに起因しており、本研究課題における大きな成果の一つである。

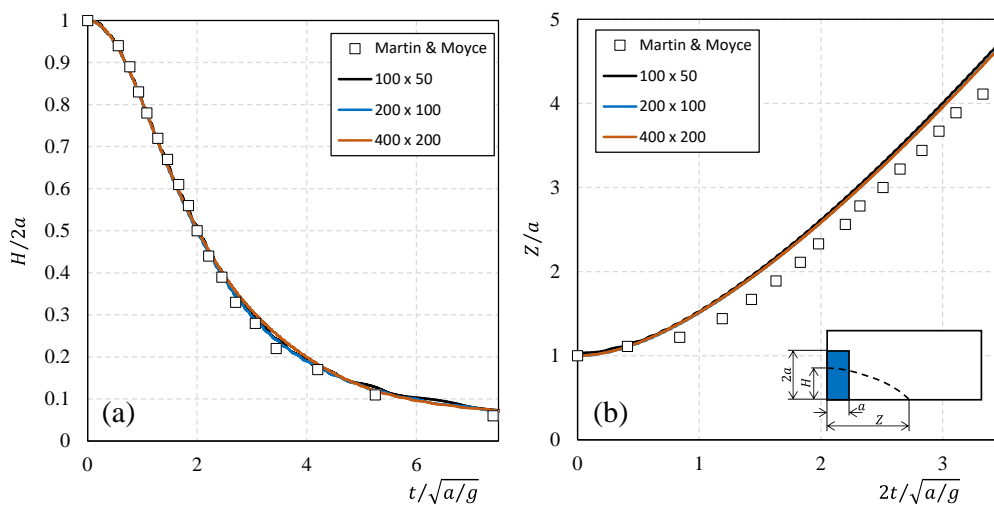


図 3 計算結果と実験との比較 (a)液柱高さ (b)液柱先端位置)

[1] Martin, J.C. and Moyce W. J., Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, Vol. 244, 312-324 (1952).