

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 4日現在

機関番号：12601  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2010 ～ 2011  
 課題番号：22760671  
 研究課題名（和文） 機構論的気液二相流解析の工学利用に向けた格子・粒子ハイブリッド法の研究  
 研究課題名（英文） Research on the mesh-particle hybrid method for engineering applications of mechanistic gas-liquid two-phase flow simulation

研究代表者  
 石渡 祐樹（ISHIWATARI YUKI）  
 東京大学・大学院工学系研究科・講師  
 研究者番号：10334319

## 研究成果の概要（和文）：

新しい気液二相流解析法として、計算対象を格子で分割して格子間の保存則を計算する格子法と、流体のふるまいを粒子間相互作用で表現する粒子法の利点を組み合わせた格子・粒子ハイブリッド法に関する基礎研究を実施した。表面張力、液膜と波、水柱崩壊、気泡の形状・分裂・結合、二相流動様式といった種々の気液二相流現象の解析を通じて本手法の有効性や課題を確認した。

## 研究成果の概要（英文）：

As a novel method of gas-liquid two-phase flow simulation, we have conducted a fundamental research on the mesh-particle hybrid method in which the mesh-based method and particle method are coupled. The advantages and issues to be solved have been identified through the simulations of surface tension, wavy liquid film, collapsing water column, shape/fragmentation/formation of bubbles and two-phase flow regimes.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 総合工学・原子力学

キーワード： 気液二相流シミュレーション、有限体積法、粒子法、界面追跡

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 気液二相流は、軽水炉などにおける重要な流動現象である。気水分離器や蒸気乾燥器、

沸騰水型軽水炉のスペーサなどは、プラントの経済性・安全性向上や新型炉開発に向けた設計改良のニーズが高い。現行炉の出力増強（蒸気流量増加）の影響評価も重要である。実

験コストの低減や現象の解明につながる機構論的解析への期待が大きい。

(2) 現象の鍵となるのが蒸気乱流中の液滴の飛散・分裂・結合、液膜からの発生、液膜への付着である。格子法(界面追跡法など)は気相が分散相(気泡のように分離して存在する相)となる二相流に向けて開発されたため、液滴のように液相が分散相となる解析はできない。液滴を解析できる Lagrange 法は、液滴を剛体球粒子と仮定しているため液膜の挙動や液滴発生・付着は解析できない。粒子法は、液相单相では液滴や液膜のふるまいを解析できるが、二相流で密度差が大きい場合は気相側の軽い粒子に起こる不安定かつ物理的でない飛散などの本質的な問題がある。また、流れ場(特に乱流場)の解析は安定性、精度の面で格子法に比べて向いていない。従来と異なる解析手法が必要である。

## 2. 研究の目的

(1) 乱流を含む流れ場の解析に適した格子法(有限体積法)と液滴や液膜の解析に適した粒子法(MPS 法)の利点を組み合わせた格子・粒子ハイブリッド法が応募者のグループで考案された。図1に示すように、本手法では格子法で計算した気液両相の流れ場に乗って液相に配置した粒子を動かすことで自動的に気液界面が表現される。本研究では、この格子・粒子ハイブリッド法の工学応用に向けた高度化と検証を進めることを目的とした。

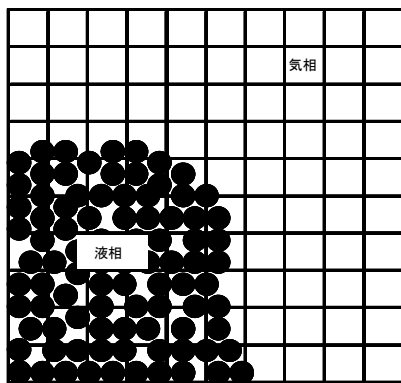


図1 格子分割と粒子配置の例

## 3. 研究の方法・成果

(1) 粒子法では従来、界面粒子を特定して界面の曲率から表面張力を計算する Continuous Surface Force (CSF)モデルが主流であったが、別の方法として粒子間ポテンシャル力モデルが提唱されている。表面張力が微視的には分子間力に起因することから

の類推である。格子・粒子ハイブリッド法における粒子間に図2に示すポテンシャル場をモデル化し、基礎的な特性や妥当性を検討した。

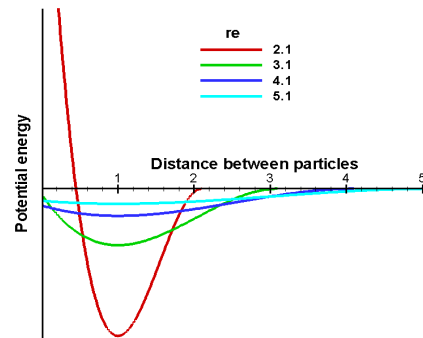


図2 粒子間ポテンシャル力モデル

図3に示すように、表面張力によって静止液滴内に生じる圧力分布を定性的に計算することができた。粒子間ポテンシャル場の強さ(比例係数)の決め方や、表面張力の界面曲率依存性が今後の課題であることが明らかになった。

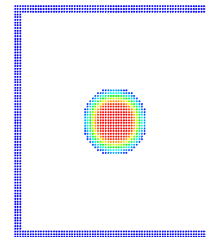


図3 粒子間ポテンシャル力に基づく表面張力モデルで計算した液滴中圧力分布の例

(2) 続いて本手法による液膜解析への適用性を確認するために、Moran らの流下液膜の実験(図4)を解析した。

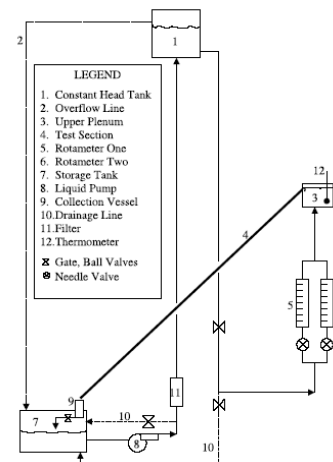


図4 Moran らによる流下液膜の実験体系

図5に例示するように、液膜が比較的薄い場合は液膜厚さ頻度が測定値と近くなり、また図6に示すように波と基底液膜が区別できることが確認された。液膜が比較的厚い場合は、実験との差異が大きくなった。横方向の壁の影響や擾乱波の発生が考えられ、本手法の3次元化の必要性が認識された。

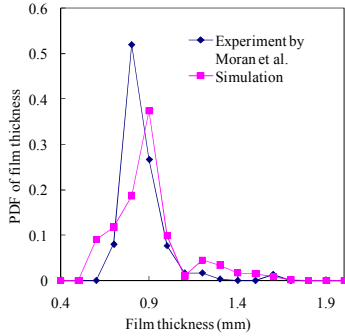


図5 液膜厚さ頻度の比較

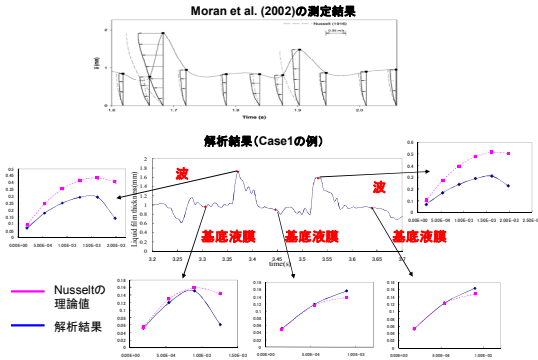


図6 液膜内の流速分布の比較

(3) 格子・粒子ハイブリッド法を3次元モデルに拡張し、汎用流体解析ソフト OpenFOAMにクラスとして組み込んだ。非構造格子体系に新たに適用するために、粒子から格子への体積率や表面張力の外挿に影響半径を用いる新たな手法を考案した(図7)。同様に、格子から粒子への速度場の外挿にも影響半径を用いることとした(図8)。

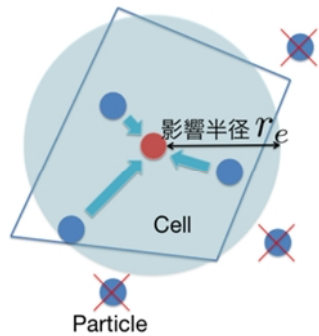


図7 非構造格子に対応した粒子から格子へのパラメータ外挿モデル

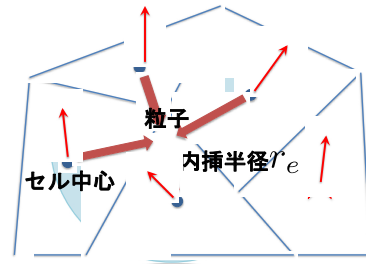


図8 非構造格子に対応した格子から粒子へのパラメータ外挿モデル

(4) 3次元に拡張した格子・粒子ハイブリッド法を用いて、ダム崩壊問題を解析した。図9に示すように、本手法による解析結果は、他の解析手法とよく一致した。また、実験ではダム先端に丸みができるため解析の方が先端位置を大きめに評価するという傾向も正しく再現できた。

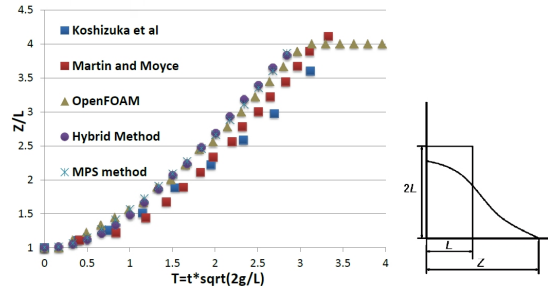


図9 無次元化されたダム先端位置の比較

(5) 浮力によって上昇する単一気泡を3次元体系で解析し、既往の気泡形状マップと比較した。図10に示すように、気泡レイノルズ数とエトベス数で整理された気泡形状マップと一致する結果が得られた。気泡の終端速度についても、実験値と概ね一致した(図11)。

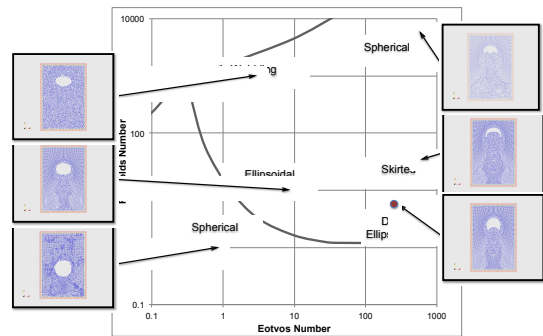


図10 単一上昇気泡の解析結果と気泡形状マップの比較

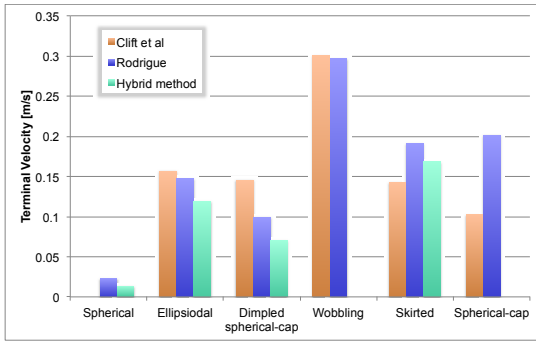


図 11 単一上昇気泡の終端速度の比較

気泡の分裂や合成を解析できることも、気液二相流解析法として重要である。図 12, 13 に示すように、本手法でも気泡の分裂や解析が適切に解析できた。

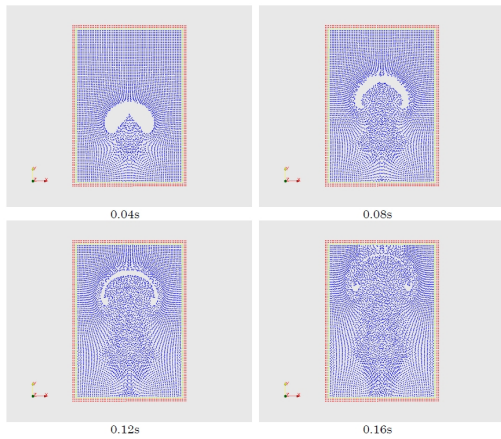


図 12 気泡の分裂の解析結果

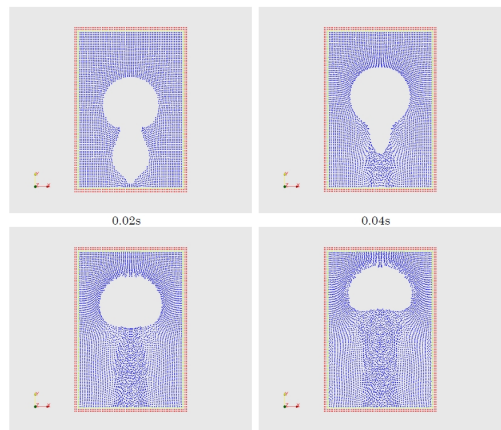


図 13 気泡の合体の解析結果

(6) 解析による二相流動様式の予測は、軽水炉の炉心熱流動や石油パイプライン、化学プラントなどでニーズが高い。まず、鉛直矩形流路内の上昇流を 2 次元モデルで解析し、二相流動様式の予測を試みた。図 14 に示すように、気泡流、スラグ流、スラグ-チェーン

流がそれぞれ適切に解析できた。

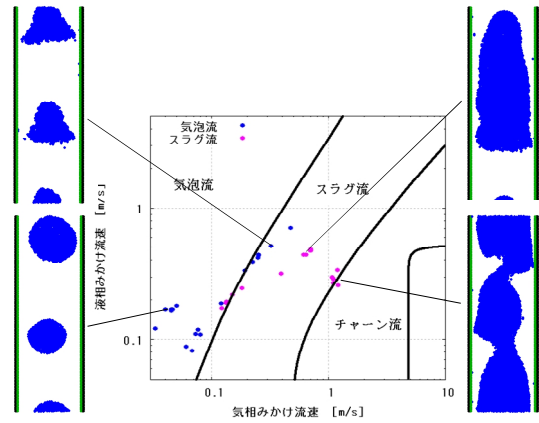


図 14 2次元モデルによる矩形流路内二相流動様式の解析結果

続いて、鉛直円管内の上昇流を解析した。円管流路を解析するために、格子・粒子ハイブリッド法で構造格子を初めて適用した。また、周期境界条件として粒子をコピーする方法を考案した。周期境界において圧力を固定せず、一定量を加圧するポンプモデルを採用した。気泡流の解析結果の例を図 15 に示す。気泡内部で液相体積率がゼロにならず、気体と液体の中間的な密度が得られた。粒子から非構造格子への体積率の外挿モデルに改良の余地があることが分かった。

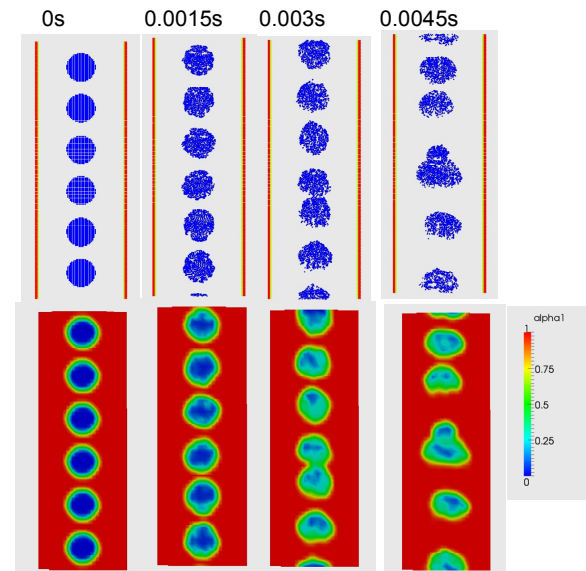


図 15 3次元モデルによる円管流路内気泡流の解析結果 (上: 粒子配置、下: 体積率)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① R. Chen, W. Tian, G.H. Su, S. Qiu, Y. Ishiwatari and Y. Oka, Numerical investigation on bubble dynamics during flow boiling using moving particle semi-implicit method, *Nuclear Engineering and Design*, 査読有, 240[11], 2010, 3830-3840

〔学会発表〕(計14件)

- ① Y. Ishiwatari, "Numerical Simulation Studies for Light Water Reactors and Next Generation Reactors," GoNERI Symposium 2010, Embedded Workshop on "Next Generation Reactor Engineering Technology," December 10, 2010, Tokyo, Japan
- ② 石渡祐樹, 吉村高紀, 川上俊弘, 熊珍琴, "気液二相流解析のための格子-粒子ハイブリッド法の研究," 第15回粒子法研究会, 2011年2月28日, 東京大学武田ホール(2011)
- ③ 石渡祐樹, 熊 珍琴, 吉村高紀, "格子-粒子ハイブリッド法における粒子間ポテンシャル力を用いた表面張力モデルの研究," 日本原子力学会2011年春の年会予稿集(震災のため中止、予稿集は発行)
- ④ 川上俊弘, 吉村高紀, 石渡祐樹, "格子-粒子ハイブリッド法の3次元への拡張と汎用CFDソフトへの組み込み," 日本原子力学会2011年春の年会予稿集(震災のため中止、予稿集は発行)
- ⑤ 吉村高紀, 石渡祐樹, "格子-粒子ハイブリッド法の二流体一圧力モデル化と計算安定性および解析能力に関する考察," 日本原子力学会2011年春の年会予稿集(震災のため中止、予稿集は発行)
- ⑥ Toshihiro Kawakami, Yuki Ishiwatari, "Study of 3-dimensional mesh-particle hybrid method," Proc. 4th Joint International Symposium on Nuclear Science and Technology, Xi'an, China, September 8-11 (2011)
- ⑦ 川上俊弘, 石渡祐樹, "3次元格子-粒子ハイブリッド法に関する基礎研究," 日本原子力学会2011年秋の大会予稿集, 北九州, 2011年9月19-22日(2011)
- ⑧ 川上俊弘, 間所 寛, 石渡祐樹, "格子-粒子ハイブリッド法による液膜流の3次元解析," 日本原子力学会2012年春の年会, F41, 福井, 2012年3月19-21日(2012)
- ⑨ 間所 寛, 川上俊弘, 石渡祐樹, "格子-粒子ハイブリッド法による気泡形状と二相流動様式の3次元解析," 日本原子力学会2012年春の年会, G12, 福井, 2012年

3月19-21日(2012)

- ⑩ 間所寛, 川上俊弘, 石渡祐樹, "格子-粒子ハイブリッド法による気泡形状及び二相流動様式の3次元解析," 日本原子力学会北関東支部若手研究者発表会, 東海村, 2012年4月20日(2012)
- ⑪ 石渡祐樹, 川上俊弘, 間所寛, Maolong Liu, "気液二相流解析のための格子・粒子ハイブリッド法の研究(1)解析モデルの紹介," 日本混相流学会年会講演会2012講演論文集, B311, 柏, 2012年8月9日(木)~8月11日(土)(2012)
- ⑫ 間所寛, 石渡祐樹, 川上俊弘, Maolong Liu, "気液二相流解析のための格子・粒子ハイブリッド法の研究(2)気泡解析および流動様式解析への適用," 日本混相流学会年会講演会2012講演論文集, B312, 柏, 2012年8月9日(木)~8月11日(土)(2012)
- ⑬ 川上俊弘, 石渡祐樹, 間所寛, Maolong Liu, "気液二相流解析のための格子・粒子ハイブリッド法の研究(3)液膜流解析への適用," 日本混相流学会年会講演会2012講演論文集, B313, 柏, 2012年8月9日(木)~8月11日(土)(2012)
- ⑭ Toshihiro Kawakami and Yuki Ishiwatari, "Improvement of three-dimensional Mesh-Particle Hybrid Method," Proc. 5th Joint International Symposium on Nuclear Science and Technology (UT-XJTU-SJTU Joint Workshop), Tokyo, Japan, August 20-21 (2012)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石渡 祐樹 (ISHIWATARI YUKI)  
東京大学・大学院工学系研究科・講師  
研究者番号: 10334319