

氏名（本籍） たか はし りょう へい 高橋亮平（埼玉県）  
学位の種類 博士（工学）  
学位記番号 甲第932号  
学位授与の日付 平成29年3月18日  
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当  
学位論文題目 **MPS法とMAC法のカップリングに基づく  
固気液三相流計算手法の開発**

論文審査委員 （主査）教授 山本 誠  
教授 荒井 正行 教授 石川 仁  
教授 川口 靖夫  
電気通信大学大学院 情報理工学研究科  
機械知能システム学専攻 教授 前川 博  
准教授 元祐 昌廣 嘱託准教授 福島 直哉

## 論文内容の要旨

現在、コンピュータの性能の向上と共に、航空宇宙・機械・船舶・エネルギー・化学・医療など様々な産業分野において、CFD (Computational Fluid Dynamics)が活用されている。このような産業で扱われる流体の多くは複数の相からなる多相流であり、産業分野におけるCFD技術の発展のためには多相流解析手法の進歩が重要課題といえるであろう。多相流では、固・気・液相の異なる物性が混在し、各相の相互作用により複雑な流動現象となることから、数値的な解析においても特別な取扱いが必要となることが知られている。これまで、固液・気液・固気二相流に関する数値的な研究はよく行われており、様々な計算手法及びその適用例が報告されている。一方で、数値計算を用いた固気液三相流に関する研究はほとんど行われていない。固気液三相流は化学処理における反応促進やスラリー輸送・エアリフトポンプや各種分離装置において見られる現象であり、固気液三相流の数値的な取扱いは、相間界面による数値的な不安定・大変形する界面の捕捉・三相間の相互干渉による複雑な物理を伴うことから非常に困難であることが知られている。これまでの三相流解析の多くは二相流計算手法を流用することにより扱われており、気液界面と固体粒

子の相互干渉などの詳細な現象は考慮されていない。しかしながら、スラリー溶液内での気泡による固体粒子の巻き上げや固体への微細気泡の付着など、三相流特有の現象を再現するためには、固気液三相間の相互作用を取り扱うことのできる固気液三相流計算手法が必要となる。そこで本研究では界面の取扱いに特化した MPS 法に基づく固気液三相流計算手法の開発を行う。MPS 法では、流体は多数の球形要素の集合として表現され、流体の運動と共に計算点が移動するため界面の変形が計算点の分布により直接表現される。また、Lagrangian 的手法であることから数値拡散の原因となる対流項を扱う必要がなく、非常に高い界面捕捉性能を持つことが知られている。しかしながら、気相計算への適用性が低い、計算領域に対して局所的に計算解像度を変化させることが困難であり、従来手法と比較して計算コストが高いなどの欠点を持っている。そこで、本研究では MPS 法と非圧縮性解析で広く用いられている MAC 法のカップリングに着目し、MPS 法による高い界面捕捉性能と MAC 法による気相計算への適用性・比較的低い計算コストを併せ持つ計算手法の開発を目的とする。本論文では、カップリング手法の開発を 3 段階に分割し、(1) 固気液三相を MPS 法により扱う手法、(2) 気液二相を MPS 法と MAC 法のカップリングにより扱う手法、(3) 固気液三相を MPS 法と MAC 法のカップリングにより扱う手法を順に記載する。開発した手法はそれぞれ他の実験・数値的研究と比較を行うことで検証された。

第 1 章では序論であり、多相流の概要や多相流解析において一般的に用いられる数値的手法、固気液三相流に関する過去研究を概観し、本研究の意義と目的を明確にした。

第 2 章では、固気液三相全てを MPS 法により扱う手法の提案を行った。手法の検証のために、ダム崩壊シミュレーション及び固体粒子の液面衝突シミュレーションを行い、気液二相流・固液二相流・固気液三相流計算について実験値との比較を行った。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 液単相・気液二相流計算について、ダム崩壊シミュレーションを用いて検証を行った。ダム崩壊時の液面の挙動について実験値との比較を行い、両計算共によい一致を得ることができた。
- (2) ダム崩壊シミュレーションでは、気液二相計算と液単相計算の結果を比較し、気液二相流計算において液単相よりも液面速度が小さく評価された。これは、液相に対する気相による抵抗、つまり空気抵抗が再現された結果であると考えられる。
- (3) 固液二相・固気液三相流計算について、固体粒子の液面衝突シミュレーションを行った。両計算で液面衝突後の固体粒子の鉛直下向き速度について実験値と妥当な一致が得られた。
- (4) 固体粒子が液面に衝突・沈降する過程で固体粒子後流への気泡の巻き込みが再現され、巻き込みプロセスについて実験的な研究と定性的に同様の傾向を得ることができた。

- (5) 固液二相・固気液三相流計算の結果を比較すると、固気液三相流計算では固液二相流計算と比べ、固体粒子の液面衝突による減速を小さく見積もった。これは、固気液三相流計算では固体後流における高圧領域により、固体粒子前後の圧力差が減少するからである。
- (6) 本手法により、液相をベースとする気液二相・固液二相・固気液三相流に対応できることが示された。

第3章では、気液二相をMPS法とMAC法のカップリングにより扱う手法の提案を行った。手法の検証のために、せん断流内の液滴変形シミュレーションを行い、流れ場及び液滴の変形挙動について、数値的・実験的研究の結果と比較を行った。得られた知見は以下の通りである。

- (1) Caが大きくなるほど、液滴の表面張力に対する周囲流体のせん断力が大きくなり、液滴長さは増加、高さ・幅が減少し、液滴は扁平な形状で流れに対して小さな角度をとる。
- (2) 液滴の変形が大きくなるほど、液滴と流入する流れの衝突による高圧部が拡大し、逆に液滴から流れが剥がれることで生じる低圧領域が収縮する。
- (3) 液滴は中心部まで全体が回転しており、他の数値的・実験的研究を同様の傾向が得られた。また、液滴の回転に周囲流体が引きずられ、液滴に沿う流れが発生する。
- (4) 液滴中心断面における形状について、VOF法を用いた数値的研究と比較を行い、定性的に良好な一致を得ることができた。
- (5) 液滴形状について、変形パラメータ及び変形角度を数値的・実験的研究と比較を行い、よい一致を得ることができた。
- (6) 格子解像度による影響を流れ場及び液滴形状について調査し、本計算における格子解像度の妥当性を確認した。
- (7) 本手法によりVOF法などで用いられる流体充填率のような間接的な変数を介すことなく直接的に界面を捉え、数値拡散の影響を受けることなく、相間の相互作用及び界面の変形を高精度に取り扱うことが可能となった。
- (8) 計算領域全体をMPS法により計算する場合(ALL-MPS法)と比較し、本手法では計算コスト削減効果が得られることが確認された。特に、計算領域に対してMPS法計算領域が大きくなるほど、コスト削減効果が大きいと考えられる。

第4章では、第2,3章で提案した2手法を組み合わせることで、固気液三相をMPS法とMAC法のカップリングにより扱う手法の提案を行った。手法の検証のため、固体粒子の液面衝突シミュレーションを行い、実験値との比較を行った。また、液面衝突速度について3 Caseの解析を行い、固体粒子及び液面の挙動への調査を行った。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 固体粒子の液面衝突シミュレーションにおいて、固体粒子の液面衝突から液中沈降のプロセスについて、実験的に得られている典型的な挙動と定性的に同様の傾向が再現され、固体粒子の鉛直下向き速度について実験値と妥当な一致を得ることができた。
- (2) All-MPS法の結果と比較し、MPS-MAC法では固体粒子の液面衝突直後の減速をより正



- 確に再現することに成功した。これは気相計算を MAC 法により行うことで固体粒子後流の気相計算についてより高い予測精度が得られたことに起因していると考えられる。
- (3) 液面衝突速度を変化させた場合も固体粒子の鉛直下向き速度の時間履歴は同様の傾向を示すが、衝突速度が大きいほど液面衝突後の減速は早く、また、大きなクラウンが形成された。
  - (4) 気相巻き込み時の液面復活により液面にはすり鉢状の窪みが形成される。すり鉢形状は液面衝突速度が大きくなると共に深くなるが、窪み形状の幅に大きな影響は見られなかった。また、そのとき液面衝突速度が大きくなると液面復活時の固体粒子の沈降距離も大きくなる。
  - (5) 固気液三相流計算についても、MPS-MAC 法を用いることで All-MPS 法と比較して大幅な計算コストの削減が可能であることが確認された。

## 論文審査の結果の要旨

これまでの流体シミュレーション（以下、CFD）は、空気や水といった単相流をターゲットとして研究が行われ、各種流体機械の設計・開発業務において、日常的に活用されるようになってきている。しかし、多くの流体機械に関連する流れは固体相、液体相、気体相のうちの複数の相が混在して流れる混相流であることが多く、混相流を高精度に予測するための CFD 手法の開発が産業界において強く求められている。特に、三相のすべてが混在する固気液三相流に対する CFD 手法はほとんど研究が行われておらず、その開発が急務となっている。

本研究は、このような CFD の状況に鑑み、固気液三相流を妥当な精度かつ実用的な計算時間で予測可能な新たな CFD 手法の開発を目的として行われたものである。まず、界面の大変形に対応できる粒子法に着目し、その代表例である MPS 法を用いて三相流を数値計算する手法が開発された。次いで、計算時間の大幅な短縮のため、格子法的一种である MAC 法と MPS 法のカップリング手法の提案が行われた。開発したコードをダム崩壊問題、液滴のせん断変形問題、液面への固体粒子の衝突・沈降問題に対して適用することにより、本 CFD 手法が三相流を妥当に予測可能であり、MPS 法に比べて計算時間が大幅に短縮できることが示された。

本論文は全 5 章から構成されている。以下に、各章で記述された内容を示す。

第 1 章は緒論である。まず、流体機械で遭遇する混相流の概要とその CFD 手法について、過去の研究動向が述べられた。次いで、本研究の位置づけを明確にし、本研究を遂行する意義を唱え、本研究の最終目的が述べられた。

第 2 章では、計算格子を用いる従来の格子法に比べて界面の大変形に対して容易に適用できるという粒子法の特性に着目し、粒子法的一种である MPS 法を用いて、三相流を数値予測するための新たな CFD 手法が提案された。数値計算

上もっとも問題となる（発散しやすい）液相と気相の相互干渉を妥当に予測可能なカップリング手法が開発され、ダム崩壊問題、液面への固体粒子の衝突・沈降問題に対する適用を通じて、本 CFD 手法の妥当性が検証された。

MPS 法は、その計算原理の特性上、三次元計算において非常に長い計算時間を必要とする。第 3 章では、この問題点を克服するため、MPS 法を格子法の一つである MAC 法とカップリングし、計算時間の大幅な短縮を図る新たな CFD 手法の構築を目的として研究が進められた。液相領域を MPS 法で、気相領域を MAC 法で計算しつつ、液面の大変形を十分に捉えられるカップリング手法が提案された。開発した手法を液滴のせん断変形問題に適用して検証計算を行った結果、本 CFD 手法がこの現象を妥当に再現可能であるとともに、MPS 法計算に比較して、計算時間を約 80% 低減できることが示された。

第 4 章では、第 3 章で開発された計算コードに固体の挙動を再現できるような機能を追加し、固気液三相流が計算できるように改良が施された。固体相の計算には MPS 法が採用された。開発したコードをダム崩壊問題、液面への固体粒子の衝突・沈降問題に適用して検証計算が実施された結果、本研究で開発した CFD 手法が三相流を妥当に再現できること、第 1 章での MPS 法計算に比べて計算時間が約 60% 削減できることなどが明らかとなった。

第 5 章は総論であり、本研究で得られた成果を取りまとめるとともに、今後の課題を述べ、本研究の総括が行われた。

本論文は、これまで予測が極めて困難であった固気液三相流を実用的な時間で安定に計算するための CFD 手法を新たに開発した点で数値流体力学分野に多大な貢献をなしており、また、大変形を伴う界面における二相間のカップリング法に関して多くの有益な知見を与えている。よって、本論文が博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認める。

以上