

学位論文の要旨

Abstract of Thesis

研究科 School	自然科学研究科
専攻 Division	産業創成工学専攻
学生番号 Student No.	51428306
氏名 Name	関 超

学位論文題目 Title of Thesis (学位論文題目が英語の場合は和訳を付記)

流体中の球形気泡・粒子運動に対する数値計算法の開発

学位論文の要旨 Abstract of Thesis

本論文では、様々な条件下における多数球形気泡・粒子を含む流れのシミュレーションを目指して、2001年にMaxeyらによって開発されたStokes領域における球形粒子に適用する計算手法Force-coupling Method (以下FCMと略す)に基づく新たな計算手法Modified Force-coupling Method (以下MFCMと略す)とRenormalized Force-coupling Method (以下RFCMと略す)を提案した。主な改良点は、①ストークス近似およびオセーン近似から外れた条件下での球形粒子の液体中の運動解析が可能となった。②固体粒子ばかりでなく、球形気泡にも適用できるようになった。③計算コストの削減も達成した。

第1章では、自然現象や工業装置などにおいて、気液・固液二相流の普遍性およびそれに対する数値計算法の重要性、さらに既存の数値計算法の紹介を述べるとともに、本研究の必要性和目的についての概要を述べた。

第2章では、無限静止流体中における単一球形気泡・粒子に働く各種の力について要約するとともに、壁面の影響で生じた気泡・粒子に働く抵抗力の増加量の数学モデルを理論解析によって導出し、その数学モデルを用いて気泡・粒子が壁面からの影響に対する検討を理論解析に基づいて行った。

第3章では、まずFCMの基礎方程式を述べる。次にFCMの基礎方程式における離散化方法を述べるとともに、気泡・粒子が球形を保持するため、FCMのFD項(回転相互作用項)における気泡・粒子内のひずみ速度がゼロとなるような反復計算を再正規化し、全体の計算速度の約2.5倍の高速化が実現できた。さらに気泡・粒子に働くストークス抵抗に低次の補正項を加えることにより、ストークスレットの補正ができると仮定する観点から、FCMにおける球形気泡・粒子から流体に作用する既存のモデルに代わり、気泡の場合および粒子の場合に対する新たな力モデルを用いるMFCMを提案した。その後、球形気泡・粒子の中心を点源として周りの流れに作用する視点に立ち、その作用力の分布を与えるFM項とFD項の力の影響範囲に対して、平滑化デルタ関数 Δ_M と Δ_D 中のそれぞれの影響力長さスケールを表す σ_M と σ_D に対して、気泡・粒子のストークス近似の理論解と近くなるように定め、気泡・粒子の半径 R を用いて、粒子の場合は、 $\sigma_M = R/\sqrt{\pi}$ 、 $\sigma_D = R/(6\sqrt{\pi})^{1/3}$ を、気泡の場合は、 $\sigma_M = R/\sqrt{1.88\pi}$ 、 $\sigma_D = R/(3\sqrt{\pi})^{1/3}$ を用いるRFCMを提案した。

第4章では、FCMの外力項を含めたNaiver-Stokes方程式の解法を述べたとともに、本研究で用いた計算格子を説明し、計算モデルにおける周期境界条件のある x 方向にのみ4点差分に対応したフーリエ変換を行う空間離散化の方法を述べた。

第5章では、MFCMとRFCMの計算結果の正確さに関する検討を行った。多数気泡・粒子を含む流れ

を解析への第一歩として、MFCM と RFCM 両手法を用いて、無限流体中における単一球形気泡・粒子への解析を行い、気泡の場合は竹村と矢部（1997）の実験結果と、粒子の場合は Clift et al.（1978）の式による理論解との比較を行い、壁面近傍を上昇する単一球形気泡・粒子への解析を行い、球形気泡の場合は竹村ら（2000）の実験結果と、球形粒子の場合は竹村ら（2002, 2003）の実験結果との比較を行い、RFCM のみを用いて静止流体中において鉛直に上昇する 2 球形気泡間の相互作用について Katz and Meneveau（1996）の実験結果との比較を行ったことにより、MFCM と RFCM を用いて球形気泡・粒子を計算するときに、適用可能なレイノルズ数の範囲をまとめた。さらに、気泡・粒子が壁面近傍を上昇する場合、壁面を向いている方向に圧力勾配が生じ、水平方向の揚力を生み出す物理的メカニズムは本研究で用いた MFCM と RFCM による計算結果から、気泡・粒子周りの圧力分布を求めることができ、現象のより定量的な再現が可能となった。また、静止流体中において鉛直に上昇する 2 球形気泡間の相互作用によって加速される原因および 2 気泡間の距離が短縮する物理的なメカニズムを再現することができた。

第 6 章では、現在の工業分野などに気泡向けの最も用いられる VOF 法（Hirt and Nichols, 1981）を用いて、RFCM の計算コストを検討した。計算コストについては、気泡の 3 次元計算に対する計算時間、VOF 法は RFCM の約 50 倍となり、1 個気泡の 3 次元計算における必要なメモリ、VOF 法は RFCM の約 100 倍となることがわかった。

以上のように、本研究で提案した球形気泡・粒子に対する新たな数値計算法について、妥当性を確認したとともに、計算コストが大幅に低減できることを確認した。