

論文の内容の要旨

論文題目「流体シミュレーションを用いた混相流の特性把握および現象解明に関する研究」

学位申請者 水野 裕介

キーワード：混相流，数値解析，微粒子，埋め込み境界法，連成解析

流体中に微粒子が混在する固気混相流は流体と微粒子の相互干渉によって現象が複雑化するため現象の予測や実験的現象の把握が難しく数値解析を用いた研究方法が行われている。流体中の微粒子の影響を評価する手法はいくつか提案されており，数式モデルで微粒子の影響を評価する質点近似型や直接微粒子を解像する粒子解像型などが挙げられる。本研究では粒子解像型である埋め込み境界法を用いて流体解析コードの開発を行い，固気混相流の現象把握に向けた解析を取り進めてまとめた。

本研究では2つの固気混相流問題に着目した。1つ目は圧縮性の固気混相流の問題であり，ロケットの排気ジェット中の固気混相流現象に着目した。圧縮性効果や衝撃波との干渉などが生じる微粒子周りの現象は予測が難しく，従来の予測モデルでは高精度な予測が難しいため，圧縮性効果などを考慮した予測モデルの再構築が必要とされている。しかしながら，複数の微粒子では微粒子間の相互の干渉などの詳細な現象が解明されていないため，本研究では開発した圧縮性の流体解析コードを用いて圧縮性固気混相流の現象把握を目的として取り組んだ。2つ目は非圧縮性の固気混相流の問題であり，ショットピーニング加工技術における構造物を含めた固気混相流現象に着目した。様々な加工条件で実施されるため，最適な加工条件や現象の予測が求められる。従来の予測モデルでは流体の影響を考慮していない場合や定常な流れ場として考慮しているため，予測値と実際の加工結果が異なることが問題とされる。本研究では従来手法では考慮できない現象を捉えるため開発した非圧縮性の流体解析コードを用いて非圧縮性固気混相流の現象把握を目的として行った。また，構造解析との連成解析技術を開発し，その解析結果から衝突現象をモデル化することで衝突現象を考慮した流体解析を行える技術を構築した。

これらの流れ場の特徴は微粒子直径が数 μm – mm オーダーで低 Reynolds 数流れとなる点や流体と微粒子の相互干渉の現象が十分に明らかになっていない点が共通点として挙げられるため本研究ではまとめて取り組んだ。

第1章では固気混相流における数値解析や連成解析の取り組み方について述べた後，圧縮性流体における固気混相流と非圧縮性流体における固気混相流の2つの問題点についてまとめた。

第2章では本研究で開発を進めた圧縮性と非圧縮性の流体解析コードで用いた解析手法

や本解析の特徴である埋め込み境界法についてまとめた後、連成解析で用いた構造解析手法や連成手法についてまとめた。本解析手法の特徴である埋め込み境界法ではレベルセット法とゴーストセル法を用いることで格子点上の物体定義と物体の境界条件を定義した。また連成解析では衝突前後の現象を流体解析側と構造解析側で情報のやり取りを行う弱連成解析として取り扱った。

第 3 章では開発した圧縮性流体解析コードを用いた微粒子周り流れの解析結果についてまとめた。はじめに、計算条件の検証として単体の静止微粒子周り流れの解析で既存のモデルや解析結果と比較を行い、現象把握を行えることを確認した。次に複数の静止微粒子周り流れの解析では 2 つの微粒子間を流れる流体や後流の現象に対する微粒子間の距離の関係性について検証を行った。その結果、微粒子間隔が短いと干渉の影響が強くなり、単体条件に比べて抗力係数が増加することや後流の非定常性が強まることを明らかにした。最後に衝撃波が微粒子を通過する流れ場の解析を行った。その結果、微粒子は衝撃波と衝突すると運動し始め、さらに微粒子間でも流れ場を介して干渉することで微粒子間の距離が離れていく方向に運動する傾向を捉えた。

第 4 章では開発した非圧縮性流体解析コードを用いた解析結果と流体-構造連成解析結果についてまとめた。はじめに、用いた解析手法について検証を行い、特徴的な流れ場を捉えることを確認した。次に複数の微粒子を含んだ流れが壁面と衝突する流れ場の解析を行い、従来の解析手法では捉えられない流れ場と微粒子の相互干渉の影響を明らかにした。次に微粒子が構造物と衝突した際の現象をモデル化するために連成解析を行った。衝突時の微粒子速度を基にした反発係数モデルと構造物の最大変形量モデルを得られた結果から構築し、限られた条件ではあるが流体解析のみで壁面形状の変化を考慮した解析を可能とした。構築した衝突モデルを用いた流体解析では衝突後の微粒子速度の変化や壁面形状の変化を捉えることができることを確認した。また、複数の微粒子が衝突する流れ場の解析では微粒子間の距離を変化した場合に、その距離の条件で跳ね返る際の微粒子速度の傾向や壁面近傍における流れ場の様子に違いが生じることを明らかにした。

第 5 章では本研究で得られた成果を総括した。圧縮性固気混相流解析では粒子間の干渉効果が圧縮性効果によって強まる傾向があることを明らかにした。非圧縮性固気混相流解析では非定常的な流れ場が微粒子の運動挙動に影響を与えることと壁面近傍での流れ場は壁面形状に影響を受けることを明らかにした。