

審査の結果の要旨

氏名 新井 淳

本論文は MPS 法による流体解析手法の拡張に関する研究で、5 章より構成されている。

第 1 章は序論で、研究の背景と目的が述べられている。数値解析手法の代表的な方法が示され、その中で粒子法は流体の分裂や合体、流体構造連成などの複雑現象を取り扱い易い。代表的な粒子法には SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法と MPS(Moving Particle Semi-implicit)法がある。MPS 法は流体のみならず、剛体や弾性体、塑性体などの固体力学計算にも適用されている。工学的な流体の問題においてしばしば、衝撃波を伴う圧縮性流れを解析する必要がある。さらに、液相や気相などが共存する場合は、非圧縮性流れと圧縮性流れが同時に解析できることが望ましい。しかしながら、MPS 法ではこのような解析を行うアルゴリズムはこれまでに提案されていない。また、レイノルズ数が数千～数万といった流れを解析しようとする場合、乱流モデルを導入する必要がある。粒子法においても近年乱流モデルを使用した計算例が見られるが、未だ報告は少ない。

このような背景から、本研究では MPS 法の工学的問題への広範囲な適用において重要な、圧縮性・非圧縮性流れの同時解析アルゴリズムの提案を行う。また、MPS 法に LES(Large Eddy Simulation)乱流モデルを組み込むとともに、壁面を含むような実用計算で不可欠となる壁面モデルを提案するとしている。

第 2 章では MPS 法に基づく圧縮性・非圧縮性流れの解析手法として MPS-AS (MPS for All Speed)法が提案されている。MPS-AS 法は C-CUP (Constrained Interpolation Profile, Combined Unified Procedure)法と同様に、圧縮性流れの基礎方程式より導かれた圧力の発展方程式を陰的に解くことで、圧縮性および非圧縮性流れの統一的な解法を可能としている。検証問題として MPS-AS 法を衝撃波管問題へ適用した。一次元および二次元の計算に関して理論値とよい一致が見られた。密度比が 5 倍程度の強い衝撃波に関して理論値と比較的良く一致しているが、不連続面近傍での振動などが見られた。非圧縮性流れの検証計算として行った单相のダム崩壊問題について、MPS-AS 法が非圧縮性流れの解析も行えることが示された。さらに、気液二相のダム崩壊問題について、気相、液相で異なる状態方程式を用いて計算が行えることが確認できた。MPS-AS 法が、圧縮性、非圧縮性および圧縮・非圧縮が共存する流れに適用できることが示された。

第 3 章では応用問題への MPS-AS 法の適用として、圧縮性を考慮した壁面への液滴衝突

解析を行った。この解析の目的は、原子力プラントの配管等に高速な液滴が衝突することで壊食を促進させる、液滴衝撃エロージョンの現象に対する知見を得ることである。計算結果は衝撃波の伝播速度や形状に関して実験と一致した。最大圧力の予測に関しては、Rochester による実験的な式に近い値となった。MPS-AS 法を用いて液滴衝撃エロージョンの解析をおこない有益な知見を得ることができた。

第4章では MPS 法による乱流解析のための乱流モデルの導入、および壁面モデルの構築を行った。乱流モデルとしては LES 乱流モデルを導入した。壁面モデルとして、対数則速度分布に基づく 0 方程式 RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes)を使用した渦動粘性係数を与えた。検証計算として平行平板間乱流を解析した。壁面近傍の平均速度が対数則速度分布へと収束する結果が得られ、壁面モデルの妥当性が示された。また、速度の変動強度を算出し、妥当な変動強度が計算されていることが示された。エネルギースペクトルを算出した結果、乱流に特有な $-5/3$ 乗則の領域が現れていることが確認された。

応用的な乱流場への適用として立方体周りの乱流場解析を行った。得られた結果を実験結果と比較したところ、計算で得られた流線は実験に見られるような立方体前方、上面および背後にある主要な渦を再現した。立方体後方の渦の位置や再付着点に関しては実験よりも後方に位置する結果となった。また、立方体後方の流路中央部における主流方向速度のエネルギースペクトルを算出し、 $-5/3$ 乗則の領域を確認した。今回の計算は $-5/3$ 乗則の領域まで解像できており、現実的な計算負荷でこのような複雑な乱流場の解析が行えることが示された。

第5章は結論であり、本研究のまとめが述べられている。

以上を要するに、本研究では流体解析において MPS 法を工学的な応用問題へ適用する上で重要な、圧縮・非圧縮性流れの統一解法、および乱流モデルの構築を行った。また様々な検証計算によって手法の妥当性を確認した。これらの成果は MPS 法による流体解析が取り扱える分野を大幅に拡大しうるものであると考えられ、システム量子工学の進歩に貢献するところが少なくない。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。