

有限要素法による移動界面実用数値解析スキームの構築

河野晴彦

論文の内容の要旨

本論文では、移動界面の不連続jump量に起因する現象やその変形、さらには電磁場や微小重力場に置かれた液体の界面挙動を含む流れ場を調査・再現する上で有用な、有限要素法を基盤とする数値解析スキームの構築を目的とする。移動界面は工学的に制御の対象となることが多く、宇宙空間における材料の育成では表面張力の影響が顕在化する。特殊な環境に置かれた界面の挙動を実験で調査することは困難な場合が多いことから、精度、経済性、汎用性、安定性を満たす実用的な数値解析スキームを構築する利点は大きい。以下に本論文の構成を記す。

第1章は序論であり、最初に本論文の背景および目的を述べる。その後、界面問題の概要を解説し、従来の研究例を挙げるとともに本研究の位置付けを示す。

第2章では、有限要素法による Marangoni 対流解析スキームを構築する。自由表面上の jump 条件は応力ベクトルの jump 量として記述されることから、Navier-Stokes 方程式の重み付き残差式を弱形式化して得られる境界積分項へ導入することができる。同章では、Marangoni 効果を考慮した Galerkin 法による空間離散化式を導出し、その後、構築したスキームを検証するため、Metzgerらによって行われた実験結果との定性的、定量的な比較を行う。

第3章では、自由表面大変形問題に対して安定な Level Set 法に解適合格子法を組み合わせ、精度と経済性が両立する新たな解析スキームを構築する。その際に重要となる格子分割・削除の指針値としきい値の選択は、それぞれ Level Set 関数とスムージング幅が最適であることを示す。また、本研究で構築した4角形格子4分割中間節点排除形解適合格子法のアルゴリズムについても詳述する。その後、同章で構築したスキームを用いて水柱崩壊、無重力場液滴振動、無重力場液滴上昇の解析を行い、他者の数値解析結果、実験結果、および厳密値との定性的、定量的な一致を確認するとともに、同スキームを用いることで、自由表面大変形問題の解析において精度と経済性が両立し得ることを示す。また、同スキームを適用する上での注意点についても述べ、同スキームが有効に活用される範囲を明確化する。

第4章では、自由表面を有する融液の電磁場制御を良好に再現し得る高周波交流磁場下における流体-電磁場連成解析スキームを構築する。電磁場の計算においては、半無限気体領域に対して境界要素法を、任意形状を取り得る解析領域に対して有限要素法を採用し、最終的にそれらを組み合わせ、混合有限・境界要素法として適用する。この時、電磁場の物理量はベクトルポテンシャル法より計算される。また、Lorentz 力による作用で大きく変形し得る導電性液体の流れ場の計算には Level Set 法を適用する。構築したスキームを用いて無重力場に浮遊する導電性液滴の振動解析を行

い、その有効性を示す。

第5章では、凝固・融解時における固液界面の変形問題に対して、ALE法を適用した新たな解析スキームを構築する。解析対象は低重力場に置かれたFZ法単結晶棒であり、同章ではそれに特化した2次元アルゴリズムを構築する。同スキームでは、熱流束のjump条件から界面移動速度を陽的に求めるべく、界面上の節点において固相側と液相側の熱流束の差を質量加重平均を用いて計算する。移動界面問題にALE法を適用する場合、連続の式を満たすべく支配方程式は時間に関して陰的に離散化されるが、同スキームでは予測子を用いた陽的反復法を採用することで計算の高速化を図る。その後、構築したスキームを用いて低重力場に置かれたFZ法単結晶棒内の熱流動解析を行い、重力加速度の大きさや自由表面の境界条件に依存して変化する溶融帯内部の流れ場、および固液界面形状に関して調査を行う。また、磁場を印加することで生じる対流抑制効果、およびそれに伴う界面形状の変化についても検討する。

第6章は結論であり、本論文で構築したスキームの特徴および適用範囲について記述するとともに、今後の課題について述べる。

以上