

Godunov Density-Independent Smoothed Particle Hydrodynamics法におけるエントロピースイッチの実装と性能検証

○高橋 良朋¹ 森 正夫¹ (1.筑波大学)

宇宙流体现象の多くは圧縮性流体として記述され、衝撃波、接触不連続面、剪断層はその進化において重要な役割を果たす。そのため、これらの構造を安定に捕獲しつつ、不要な過剰散逸を抑制することが、数値シミュレーションの精度を左右する。標準的なSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法では、衝撃波捕獲のために人工粘性が導入されてきたが、剪断流や滑らかな圧縮流における過剰な散逸が問題となる。この問題に対して、Balsaraスイッチなどの粘性抑制法が提案され、標準SPHにおける数値散逸の制御に広く用いられてきた。

一方、GSPH (Godunov SPH) やGDISPH (Godunov Density-Independent SPH) などのGodunov型SPH法は、Riemann solverに基づく散逸が衝撃波捕獲の中核を担っている。これは単なる非物理的な補正項ではなく、不連続面を解くための有効散逸として定式化されている。しかしそのため、標準SPHのBalsaraスイッチをそのまま適用するのはGodunov型SPH法の定式化と整合せず、必要な散逸を維持しつつ過剰散逸のみを抑制する手法はこれまで確立されていなかった。

本研究では、この未解決問題に対し、エントロピー生成に基づく新たな散逸制御の枠組みを構築した。これは、エントロピーの時間変化を用いることで、不可逆な衝撃波圧縮と可逆的な滑らかな圧縮を区別する手法である。本研究では、この考え方をGSPHおよびGDISPHの定式化に組み込むための具体的な導入方法を開発し、Godunov型SPH法において散逸の強度を動的かつ選択的に制御する拡張スキームを構築した。この散逸制御の仕組みをGSPHおよびGDISPHに組み込んだのは本研究が初の試みである。

提案手法の有効性を、一次元衝撃波管問題と二次元Kelvin-Helmholtz不安定性問題、断熱圧縮テストで検証した。その結果、衝撃波管問題では従来の手法と同程度の衝撃波捕獲能力を維持し、Kelvin-Helmholtz不安定性問題では剪断層での過剰散逸が抑制され、渦の成長や微細構造が良好に再現された。断熱圧縮テストでは、従来の手法よりも過剰散逸を抑制し、高精度な結果を示した。

以上より、本研究で構築したエントロピー生成に基づく散逸制御法は、GSPHやGDISPHの過剰散逸問題に対する有効な解決策となる。本研究は、Godunov型SPH法の衝撃波捕獲能力を損なわず、DISPH法の接触不連続面捕獲能力を継承しつつ、剪断流などの複雑な流体现象をより高精度に扱う拡張GDISPH法を提案するものである。