

SPH法における断熱圧縮テストの提案と過剰数値散逸の比較評価

○高橋 良朋¹ 森 正夫¹ (1.筑波大学)

数値流体力学におけるSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法では、衝撃波の安定な捕捉が重要な課題であり、主に人工粘性やリーマンソルバーを用いたGodunov型の手法によって対処されてきた。しかし、これらの散逸機構は衝撃波後面での非物理的な振動を抑制する反面、衝撃波を伴わない滑らかな圧縮流においても過剰に作用し、圧力および内部エネルギーの非物理的な増大を引き起こすという副作用を抱えている。

本研究では、この過剰な散逸を定量的に評価する新たなベンチマークとして断熱圧縮テストを提案する。本テストは、マッハ数が十分小さな速度場を与え、系全体をゆっくりと圧縮する。この条件下では衝撃波は発生せず、流体は断熱関係に従って圧縮されるため、解析解からのずれを測定することで数値散逸の特性を明確に判定できる。

本研究では、従来型のSPH、Density Independent SPH (DISPH)、Godunov SPH (GSPH)、およびGSPHをDISPHの枠組みに拡張したGDISPHの4手法に加え、散逸を物理的に制御するエントロピースイッチをGSPHとGDISPHにそれぞれ導入した計6手法について比較実験を行った。

数値実験の結果、従来型SPHおよびDISPHでは圧縮領域全体で散逸機構が過剰に働き、解析解から上方へ逸脱する圧力および内部エネルギーの非物理的な増大が一様に確認された。また、リーマンソルバーに基づくGSPHやGDISPHにおいても数値流束の評価に伴う特有の数値散逸が存在し、いずれのベース手法を用いても解析解から系統的なずれが生じることが明らかとなった。

これに対し、流体のエントロピー変化を検知して散逸を制限するエントロピースイッチをGSPHおよびGDISPHに導入した手法では、滑らかな圧縮場における過剰な数値散逸が適切に抑制され、圧力や内部エネルギーの誤差を大幅に低減できることが確認された。本提案のテストは、各計算スキームが本質的に抱える数値散逸を鋭く評価し、正確な熱力学的進化の追跡におけるエントロピースイッチの有効性を実証する極めて有効な指標となる。