

機械学習による流体計算向け核物質状態方程式サロゲートモデルの開発

○政田 洋平¹ 松本 仁¹ 滝脇 知也² (1.福岡大学 2.国立天文台)

核物質状態方程式 (EOS) は、重力崩壊型超新星や中性子星形成の数値シミュレーションに不可欠である。しかし、一般にEOSは大規模テーブルとして与えられるため、頻繁な補間計算と大きなメモリ消費が計算効率上の課題となる。

本研究では、Lattimer-Swesty EOS (LS220) を対象として、ニューラルネットワークによる流体計算向けEOSサロゲートモデルを開発した。入力変数として密度 (ρ)、比内部エネルギー (e)、電子分率 (Y_e) を用い、圧力 (P)、音速 (c_s)、有効断熱指数 (Γ) を直接予測する。学習においては単なる回帰精度だけでなく、Godunov型流体計算において重要な圧力勾配や特性波速度の再現性を重視した。

約300万点のEOSサンプルを用いた学習の結果、圧力・音速・断熱指数を数%程度の精度で再現できた。また、開発したEOSサロゲートを1次元衝撃波管問題に適用したところ、テーブルEOSを使った場合の結果と良好に一致し、密度・速度・圧力・音速の分布をサブパーセントレベルの誤差で再現した。さらに、回帰誤差が最小のモデルが必ずしも最良の流体計算結果を与えないことを確認した。これは、流体計算の精度が局所的なEOS誤差だけでなく、熱力学多様体の滑らかさや一貫性にも依存することを示唆している。EOSサロゲートを用いることで、EOSのメモリ使用量を従来のテーブルEOSの約30分の1に削減することができる。本講演では、重力崩壊計算や多次元超新星シミュレーションへの応用についても議論する。