

星団形成シミュレーションへ向けた輻射流体コードの開発

Development of radiation hydrodynamics code for simulations of star cluster formation

福島肇

筑波大学計算科学研究センター

1. 研究目的

宇宙において、星は星の集合体である星団として誕生する。このため、星形成の解明には、複数の星が同時に誕生する過程を解明する必要がある。星団形成の理論研究では、数値シミュレーションを用いた研究が盛んに実施されてきた。これまでの研究から、星形成過程には、ガスの流体力学や重力収縮を起こす自己重力の他にも、アウトフローなどを駆動する磁場やガス雲全体の破壊に関連する電離光子の輻射輸送や熱進化に関連した非平衡化学などの多くの効果を同時に計算することが必要であることが明らかになった。また、星形成では、重力収縮により、ガスの密度が約 20 桁程度上昇することから、高密度領域に選択的に格子を配置することできる適合格子細分化法 (Adaptive Mesh Refinement: AMR 法) などのアルゴリズムの導入が必要不可欠となる。星・星団形成についての計算コードは、上記のように考慮する過程の多さや、AMR 法などの複雑なアルゴリズムを採用する必要があることから、これまでは主に CPU を主体にした計算に主眼が置かれてきた。しかし、流体や自己重力などの領域間通信を多く必要とする箇所については現状の並列計算では、通信部分がボトルネックとなりつつあることから、計算の規模や研究できる範囲が制限されていた。このような中で、昨今の高性能計算機の発展から GPU を用いた計算への移行が必要不可欠となりつつある。しかし、これまで CPU を用いた計算が主流であった経緯から、GPU への移行は未だ進んでいない。そこで、本プロジェクトでは星団形成シミュレーションを GPU 上で実行可能な、輻射磁気流体シミュレーションコードの開発を行うことを目標としている。初年度であった 2023 年度では、計算コードの中で最も複雑なアルゴリズムとなる、AMR 格子構造の分割、流体格子の袖についての通信、及び粗・密セル間での物理量や流速の補正等についてコード開発を行い、流体計算を実施することを目標とした。

2. 研究成果の内容

今年度はコード開発を主に進め、格子構造の作成及び、流体力学計算を実施する部分まで開発を完了し、実際に計算を実行することに成功した。テスト問題として、衝撃波管問題を実施した。まず、一様格子について計算を行い、既存のコードと結果につ

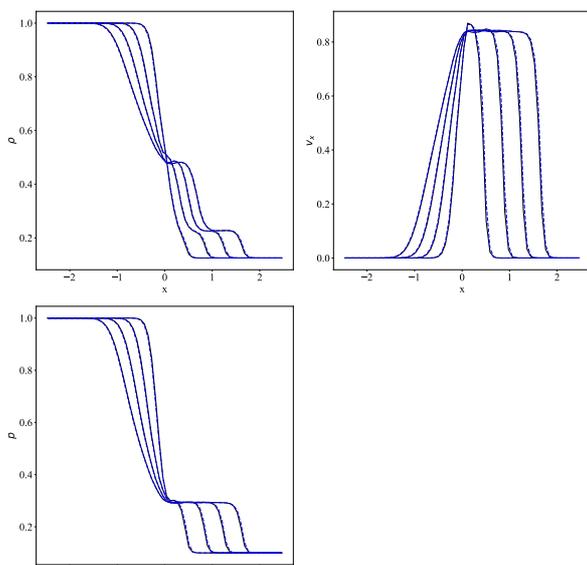


図 2: 衝撃波管問題についてのテスト計算。黒線と青線は既存と新規開発コードでの結果を表す。

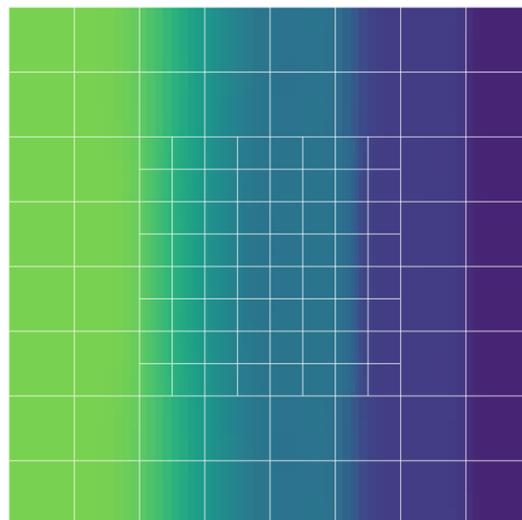


図 1: nested grid 構造における衝撃波管問題における密度分布。

いて、相違がないことを確認した (図 1)。また、nested grid 構造の場合についても計算を行い、粗・密格子の境界間で問題なく移流計算を行えることを確かめた。この計算は、MPI 通信による複数 GPU を使用することを想定しているため、複数 GPU でも問題なく計算できることも確認した。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

学際共同利用プログラムにより、GPU を用いたコードの開発・実行に取り組むことが可能となった。特に、宇宙物理研究用の GPU を用いたアプリケーションの開発は、まだ発展途上であり、計算コードの開発に成功することで世界的に見てもトップレベルの研究を行える体制を構築することが可能となるため、学際共同利用が本プロジェクトで果たす役割は非常に大きいと言える。

4. 今後の展望

流体計算コードが完成したため、次に自己重力や輻射輸送、化学反応といった各プロセスの実装に開発の段階を移行する。これらを次年度中に行うことを目指し、最終的には星団形成についてのシミュレーションを実施することで、科学的な成果の創出を行える体制を構築する予定である。加えて、星形成以外にも多くの宇宙物理分野にも、本プロジェクトで開発している流体コードを用いることが可能であるため、例えばブラックホールへの降着成長といった、様々な問題に応用していく予定である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

“The formation of globular clusters with top-heavy initial mass functions”, Hajime Fukushima, Hidenobu Yajima, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 524, 1422 (2023)

“Generation of high circular polarization of interstellar Lyman radiation triggering biological homochirality”, Hajime Fukushima, Hidenobu Yajima, Masayuki Umemura, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 524, 2114 (2023)

“Observational signatures of forming young massive clusters: continuum emission from dense H II regions”, Mutsuko Inoguchi, Takashi Hosokawa, Hajime Fukushima, Kei E. I. Tanaka, Hidenobu Yajima, Shin Mineshige, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 527, 3612 (2024)

“3D Radiation-hydrodynamic Simulations Resolving Interior of Rapidly Accreting Primordial Protostar”, Kazutaka Kimura, Takashi Hosokawa, Kazuyuki Sugimura, Hajime Fukushima, ApJ, 950, 184 (2023)

(2) 学会発表

“宇宙初期の超大質量星形成における星周円盤と原始星構造の共進化”, 日本天文学会 2023 年秋季年会, 木村和貴, 細川隆史, 杉村和幸, 福島肇, 大向一行

“乱流中の異なる星形成環境での分子雲コアの形成・進化”, 日本天文学会 2023 年秋季年会, 野崎信吾, 福島肇, 町田正博

“ALMA ACA による小マゼラン雲超広域 CO 探査 (4):N83/N84/N86 領域 12CO, 13CO (J=2-1) 輝線データ解析”, 日本天文学会 2023 年秋季年会, 松本健 et al. incl. 福島肇

“星団形成における星風の影響”, 初代星初代銀河研究会, 福島肇, 矢島秀伸

“超大質量星形成における原始星構造と星周円盤の共進化”, 初代星初代銀河研究会, 木村和貴, 細川隆史, 杉村和幸, 福島肇, 大向一行

“高赤方偏移銀河円盤シミュレーション”, 第 36 回理論懇シンポジウム, 福島肇, 矢島秀伸

“原始惑星系円盤への外部輻射の影響”, 第 36 回理論懇シンポジウム, 松本凜, 福島肇

“Conditions for young massive star cluster formation”, Protostars and Planets VII, H. Fukushima, H. Yajima

“Radiation hydrodynamics simulations of star cluster formation in high- z galaxies”, The Olympian Symposium, Star formation in the era of JWST, Hajime Fukushima, Makito Abe, Hidenobu Yajima

“星団形成におけるフィードバック過程”, 2023 年度国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング, 福島肇

“星風による金属量進化を考慮した銀河円盤シミュレーション”，次世代のサブミリ波観測とシミュレーションの計画検討会，福島肇，矢島秀伸

“高密度星団形成シミュレーション”，ブラックホール大研究会，福島肇，矢島秀伸

“大質量星団形成における星風による金属量進化”，天文学会 2024 春季年会，福島肇，矢島秀伸

“超大質量星形成における星周円盤形成後の原始星進化過程”，天文学会 2024 春季年会，木村和貴，細川隆史，杉村和幸，福島肇，大向一行

“Physics Informed Neural Network を用いた陰解法の初期値推定”，天文学会 2024 春季年会，朝比奈雄太，波多野智，大須賀健，矢島秀伸，福島肇

“機械学習を用いたエディントンテンソルの推定”，天文学会 2024 春季年会，上野航介；朝比奈雄太，大須賀健，矢島秀伸，福島肇

“機械学習による散乱光シグナルを用いた吸収体の逆問題解析”，天文学会 2024 春季年会，近藤謙成，矢島秀伸，福島肇

(3) その他

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※	
		当初配分	追加配分
Cygnus	○	7000	0
Wisteria/BDEC-01			
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			