

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2018～2019

課題番号：17KK0091

研究課題名（和文）Athena++による星形成過程のマルチスケール輻射磁気流体シミュレーション

研究課題名（英文）Multi-scale radiation magnetohydrodynamic simulations of star formation with Athena++

研究代表者

富田 賢吾（Kengo, Tomida）

大阪大学・理学研究科・招へい教員

研究者番号：70772367

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,600,000円

渡航期間： 12ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究ではPrinceton大学のStone教授らと共同でAthena++コードの開発を行った。Athena++は宇宙物理学向けの新しい公開輻射磁気流体計算コードである。本研究では特に自己重力ソルバの解適合細分化格子（AMR）への対応と、その輻射輸送への拡張に取り組んだ。自己重力ソルバはAMR上では多少追加の計算コストを要するものの、安定に計算できる実装が完了した。また、Multigrid法の輻射輸送への拡張の第一段階として拡散近似の実装を行った。拡散係数の分布が滑らかな場合には安定な計算ができたが、非線形性の強い場合や拡散係数が急激に変動する場合には収束性に難があり、継続して改良に取り組む。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Athena++は輻射磁気流体シミュレーションコードであり、インターネット上で広く一般に公開している。自己重力ソルバや輻射輸送ソルバは宇宙物理学の幅広い問題に共通する基礎物理過程であり、これを実装し公開することは幅広くコミュニティに貢献する。また本コードを用いた講習会やユーザーズミーティングも開催しており、若手研究者の育成にも重要な役割を果たしている。また優れたシミュレーションコードは現在の宇宙物理学研究のインフラストラクチャと言えるものであり、国際的な共同研究の基盤ともなる。

研究成果の概要（英文）：I developed the Athena++ public radiation MHD simulation code in collaboration with Professor Stone's group at Princeton University. In this project, I extended the self-gravity solver using the Multigrid method to adaptive mesh refinement (AMR), and extended it to radiation transfer. I implemented a new self-gravity solver which is compatible with AMR. The implementation requires some additional cost on AMR but it works stably. Then I extended it to the simplest diffusion approximation of radiation transfer. The solver works when distribution of the diffusion coefficient is relatively smooth. However, it converges slowly when the diffusion coefficient is highly non-uniform and/or the system is strongly non-linear. I will try other methods for this and improve the stability of the scheme.

研究分野：シミュレーション宇宙物理学

キーワード：宇宙物理学 シミュレーション 磁気流体力学 輻射輸送

1. 研究開始当初の背景

Athena++コードは研究代表者が Princeton 大学の Stone 教授を中心とするグループと共同で開発してきたシミュレーションコードであり、本研究の基課題である「大規模マルチスケールシミュレーションによる星初期質量関数の起源の探求」でも使用している。Athena++は宇宙物理学向けに磁気流体力学や自己重力、化学反応や非理想磁気流体効果など多様な物理過程をサポートしていたが、自己重力は一様格子のサポートにとどまっており、また輻射輸送も主にコンパクト天体周囲の降着円盤等の高エネルギーなシステム向けの陽解法を用いたものだけにとどまっていた。解適合細分化格子 (AMR) に対応した自己重力ソルバ、そして陰的な時間推進法をサポートした輻射輸送ソルバを開発することは、Athena++プロジェクトにとって次の重要な目的であり、これらが実現すれば星形成研究やその他の宇宙物理学全般に関する幅広い問題に適用することが可能となる。

2. 研究の目的

研究代表者は既に Athena++コードに Multigrid 法を用いた自己重力ソルバを実装していた。本研究の第一の目標は、これを AMR に対応するよう拡張することである。また Multigrid 法はポアソン方程式以外の拡散型・波動型の方程式にも適用することができるため、これを陰的時間推進法に基づいた輻射輸送計算にも拡張することが第二の目的である。最終的に、開発したコードを用いて星形成過程の計算、特に分子雲の形成から原始星の母体となる分子雲コアの形成、そしてその後の星形成過程などを一貫して扱うことを目指す。

また、コード全体の開発やサポートを並行して行っており、コードの性能改善やドキュメントの整備、成果物のサポート、そしてコードを利用した講習会やユーザーズミーティングの開催についても推進する。

3. 研究の方法

Multigrid 法は離散化した偏微分方程式の数値解法の一つである。従来の Jacobi 法や Gauss-Seidel 法に基づく緩和法は短波長のエラーはすぐに収束するものの、長波長のエラーを収束させて大局的に整合的な解を得るには多くの回数のイテレーションが必要であった。Multigrid 法では格子の分解能を変えながらこれらの緩和法を適用することで、短波長から長波長のモードまで一様に収束させる手法であり、高い計算性能と安定性を持つ優れた手法である。特に、自己重力のポアソン方程式に関してはほぼ最適な手法だと考えられている。拡散型・波動型の方程式に対しても適用できるため非常に幅広い応用がある。更に、格子の分解能を変えながら緩和法を行うという性質上、局所的に解像度の異なる格子を導入する AMR との親和性が高い。

Athena++には既に研究代表者自身が開発した Multigrid 法に基づく一様格子用の自己重力ソルバが実装されているため、これを AMR に拡張する。特に AMR では異なる解像度の格子の間で整合的な解を得ることが重要となるが、格子間で重力力線数が保存し非物理的な質量が現れない mass-conservation formula (Feng et al. 2018) という離散化を採用することでこれを実現する。

陰的時間推進法に基づく輻射輸送ソルバの第一段階として、最も簡単な拡散近似に Multigrid 法を拡張する。輻射輸送方程式は非線形であり通常の Multigrid 法は適用できないため、Full Approximation Scheme (Brandt 1977) と呼ばれる手法を用いる。

4. 研究成果

自己重力ソルバについては、AMR 上でも非物理的な構造が生じない mass-conservation formula による離散化を取り入れて正確に計算できるコードを実装した。一様格子では Full Multigrid 法という一回のイテレーションで収束する非常に強力な手法があり、AMR でもこれを実装したが、AMR 上では一回では期待する精度には達しないことが分かった。これは異なる解像度のレベル間の境界において、どうしても離散化に起因するエラーが生じることが原因である。同種の問題は他のコードでも報告されており、これは手法の限界であると考えて複数回のイテレーションによって精度を改善することとした。これにより多少計算コストはかかるものの安定した計算を実現した (図 1)。

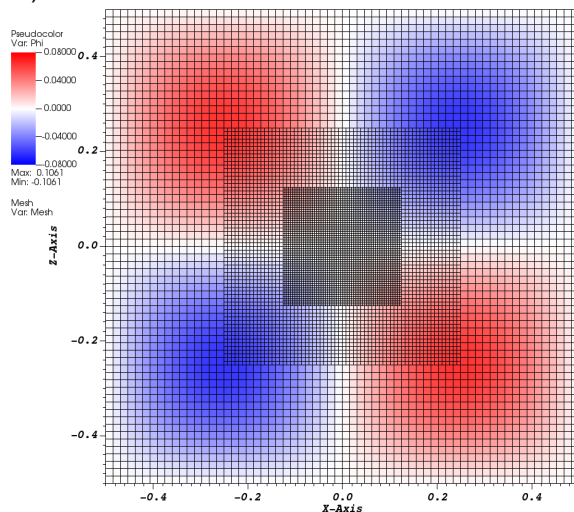


図 1 : AMR 上での自己重力ソルバによる計算結果。異なる解像度の格子間でも滑らかに解が接続されている。

また、輻射輸送については、Multigrid 法を最も簡単な近似である拡散近似に適用し、1 次の後退オイラー法による時間推進法を実装した。非線形な問題に対応するために Full Approximation Scheme を実装し、拡散係数の空間分布が比較的滑らかな場合には良好な性能と収束性を実現することができた（図 2）。一方で、拡散係数が急激に変化する場合や非線形性が強い場合には収束性に悪影響があることも分かった。これは、Multigrid 法では異なる分解能の格子を用いて解を緩和させるが、拡散係数が急激に変化する場合は粗い格子が細かい格子の良い近似にならないためと考えられる。これは特に原始星の表面のような星の密度が急激に変化する領域や、ダストの蒸発によってオパシティが急激に変化する領域などで問題となる可能性が高い。粗い格子への粗視化には幾つかの手法があり、今後これらを比較検討し手法の改善を行う予定である。また、Variable Eddington Factor 法などの、より精密な輻射輸送計算法の実装も計画している。

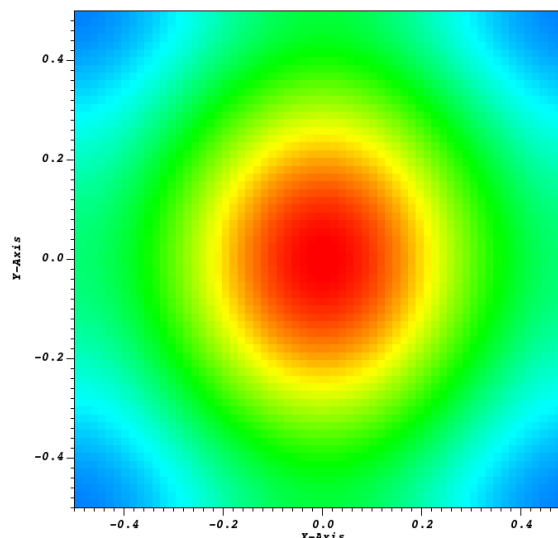


図 2：拡散近似の輻射輸送計算の結果（温度分布）。中心に熱源があり、左右方向には光学的厚みが高いため輻射が伝わりにくく、上下方向には伝わりやすいという状況を想定している。

これらの開発と並行して Athena++コード全体の開発や性能向上にも取り組んだ。メモリアクセスを最適化することで 50%以上の性能向上を実現した他、ブロックの格納方式を変更することで、AMR で多数のブロックが存在する状況でも性能が低下しないよう改善した。

Athena++を用いたコミュニティへのシミュレーションの普及活動も行っている。本研究期間中に、インド・ハイデラバードでのウィンタースクールで Athena++を用いた講習会を実施し、参加者から好評を得た。また、2019 年 3 月にははじめての Athena++のユーザー・開発者ミーティングを米国ラスベガスで開催し、約 70 人もの参加者を得た。

更に、Athena++コードを総括するまとめの論文も執筆し、The Astrophysical Journal Supplement 誌に投稿した（2020 年 5 月にアクセプトされた）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takasao Shinsuke, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Suzuki Takeru K.	4. 巻 878
2. 論文標題 Giant Protostellar Flares: Accretion-driven Accumulation and Reconnection-driven Ejection of Magnetic Flux in Protostars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L10 ~ L10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab22bb	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hu Xiao, Zhu Zhaohuan, Okuzumi Satoshi, Bai Xue-Ning, Wang Lile, Tomida Kengo, Stone James M.	4. 巻 885
2. 論文標題 Nonideal MHD Simulation of HL Tau Disk: Formation of Rings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 36 ~ 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab44cb	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Kengo Tomida
2. 発表標題 Athena++: a New MHD Simulation Code with Adaptive Mesh Refinement
3. 学会等名 The 8th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kengo Tomida
2. 発表標題 MHD Simulations with Athena++: from molecular clouds to protoplanetary disks
3. 学会等名 Max Planck Princeton Center Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kengo Tomida
2. 発表標題 Inside Athena++
3. 学会等名 Athena++ Users and Developers Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kengo Tomida
2. 発表標題 Formation and Early Evolution of Protoplanetary Disks
3. 学会等名 Workshop on Star Formation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kengo Tomida
2. 発表標題 Formation and Early Evolution of Circumstellar Disks
3. 学会等名 Zooming in on Star Formation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Tomida, K. Iwasaki, S. Takasao, S. Okuzumi, S. Mori, T. K. Suzuki
2. 発表標題 Global Non-ideal Magnetohydrodynamic Simulations of Protoplanetary Disks
3. 学会等名 CCS International Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富田賢吾
2. 発表標題 Multigrid gravity solver on AMR for Athena++
3. 学会等名 令和元年度 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト ユーザーズミーティング
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Athena++ http://princetonuniversity.github.io/athena/ Athena++日本語サポートページ https://www.astr.tohoku.ac.jp/~tomida/athena/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ストーン ジェームズ (Stone James)	プリンストン大学・Department of Astrophysical Sciences・Professor	