

2025年度 07) 計算機利用共同研究 目次詳細

9 件

*所属・職名は2026年3月現在

*Affiliation and Department displayed are current as of March 2026.

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局* Department	職名* Job title	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
梅田隆行	北海道大学	情報基盤センター	教授	ポスト富岳に向けたプラズマシミュレーション手法の開発	320	
戸頃響吾	東京大学	理学系研究科	大学院学生(修士)	スードストリーマに関する1次元太陽風シミュレーション	322	
鈴木亮	東京大学	大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻	博士前期課程2年	太陽近傍におけるCMEの伝播シミュレーション	324	
関戸晴宇	北海道大学	情報基盤センター	特任助教	非MHD効果を扱う新たな電磁流体力学によるグローバル地球磁気圏シミュレーション	326	
山川智嗣	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	学振PD	衛星観測との比較に基づく環電流イオンによるULF波動の励起機構の研究	328	
飯島陽久	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	准教授	太陽・惑星間空間環境予測モデルの開発	330	
山本和弘	名古屋大学宇宙地球環境研究所	統合データサイエンスセンター	特任助教	磁気圏・電離圏観測データに基づく5次元ドリフト運動論的リングカレントモデルを用いたULF波動の励起の研究	331	
齋藤一真	名古屋大学	大学院理学研究科	博士前期課程1年	plume-driven熱対流の物理的性質の研究	333	
山田隆博	京都大学	理学部	学生(B4)	太陽対流層底部から太陽風領域までの統一的な数値シミュレーション	335	

ポスト富岳に向けたプラズマシミュレーション手法の開発
Numerical schemes for plasma simulations on post-Fugaku supercomputer systems

梅田隆行、北海道大学・情報基盤センター

研究目的

スーパーコンピュータ「富岳」は、「京」コンピュータに対して、ノードあたりの性能が約26倍、全体性能が約54倍となった。一方で、ノードあたりのメモリ容量は2倍、全体のメモリ容量は3.7倍に止まっている。この事実は、「富岳」を用いても「京」で行われていた大規模シミュレーションとほとんど変わらない計算サイズのシミュレーションしか行えないこと、またこれから5年以上(「富岳」の運用停止まで)はメモリサイズで5ペタバイト以下のシミュレーションが世界最大サイズとなることを意味している。従って、これまでの「大規模シミュレーション」による力業からパラダイムシフトし、メモリ消費を抑えた新たな計算機シミュレーションについて考える必要がある。そこで本研究では、宇宙プラズマに関する電磁流体、電磁粒子(PIC)、電磁Vlasovおよび、これらのハイブリッドシミュレーション手法に関して、計算時間の短縮と計算精度の向上を両立させる新たな研究開発を行う。

研究方法

電磁界シミュレーションの標準的な数値スキームであるFDTD法について空間差分の高次精度化を行う。従来の計算機シミュレーションでは格子点数を増やすことによって空間解像度を上げていたが、空間差分の誤差を減らすことによって格子点数が少ない構造や波動でもより精度よく解けるように改良を行う。

また、粒子および電磁場の時間積分を高精度化し、時間刻み dt を大きくできるようにする。これにより計算時間を短縮するとともに、より長時間のシミュレーションを目指す。

研究結果

相対論的ドリフト速度を持つMaxwell分布に対して乱数生成を行う手法について検討を行った。従来はSIMD化や並列化には向かない棄却法(Rejection method)によりJüttner分布を生成していた。本研究では、SIMD化や並列化に相性が良い逆関数サンプリング法による、Maxwellエネルギー分布の乱数生成について検討した。逆関数サンプリング法では、生成対象となる分布関数の累積分布に対する逆関数を用いて、生成対象となる分布の乱数生成を行う手法であり、本研究では逆関数化可能なフィッティング関数で累積分布を近似する。Jüttner分布ではエネルギー分布が温度(熱速度)に依存するのに対して、相対論的Maxwellエネルギー分布は温度に依らず分布が非相対論の分布と等しいため、フィッティング関数の係数群が定数で求められる。またドリフト速度を持つ場合には、天頂角方向の累積分布も逆関数化する必要がある。これらを踏まえて、3つの一様乱数のセットからMaxwellエネルギー分布を持つ運動量ベクトル3成分の乱数を生成する新しい数値スキームの開発に成功した。

成果発表

(学会発表)

関戸 晴宇, 梅田 隆行, 三好 由純, 高次精度陽的時間領域有限差分法の電流源における数値誤差の修正, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会 (JpGU2025), 幕張メッセ, 2025 年 5 月 27 日

梅田 隆行, Loading of relativistic Maxwellian distribution revisited, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会 (JpGU2025), 幕張メッセ, 2025 年 5 月 27 日

Takayuki Umeda, Eiichiro Mizoguchi, Riku Ozaki, New Integrator for Relativistic Equations of Motion for Charged Particles, URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC 2025), Sydney, August 19, 2025

Harune Sekido, Takayuki Umeda, Yoshizumi Miyoshi, Correction of Numerical Errors in the Charge Conservation Law at Current Sources in Explicit Finite-Difference Time-Domain Method with Higher-Order Accuracy, URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC 2025), Sydney, August 20, 2025

Takayuki Umeda, Eiichiro Mizoguchi, Riku Ozaki, New Integrator for Relativistic Equations of Motion for Charged Particles, 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP 2025), Fukuoka, September 22, 2025

Xinyu Ge, Harune Sekido, Takayuki Umeda, Yoshizumi Miyoshi, Suppressing Phase Velocity Errors in Higher-Order Finite-Difference Time-Domain Methods, 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP 2025), Fukuoka, September 25, 2025

Harune Sekido, Takayuki Umeda, Correction of Numerical Errors at Current Sources in Explicit Finite-Difference Time-Domain Method for Plasma Kinetic Simulations, 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP 2025), Fukuoka, September 25, 2025

関戸 晴宇, 梅田 隆行, 高次精度陽的時間領域有限差分法における電荷保存則についての数値誤差の抑制, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季年会, 神戸大学, 2025 年 11 月 25 日

葛 心雨, 梅田 隆行, 関戸 晴宇, 三好 由純, 高次精度 FDTD 法における位相速度誤差の低減, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季年会, 神戸大学, 2025 年 11 月 25 日

梅田 隆行, Loading of relativistic Maxwellian-type distribution revisited, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季年会, 神戸大学, 2025 年 11 月 27 日

スードストリーマに関する1次元太陽風シミュレーション
One-dimensional simulation on solar wind like pseudostreamer

戸頃響吾、東京大学・理学系研究科

【研究目的】

太陽風は宇宙天気における重要なファクターの一つである。数値的な宇宙天気予報モデルにおける太陽風速度は、計算コストの制約のために経験則を用いて与える手法が広く用いられている。そのような経験則のなかでも古典的なモデルとして Wang-Sheeleyモデルがある (Wang & Sheeley 1990 ; Arge & Pizzo 2000)。これは特徴量として、太陽風磁束管のコロナ底部から十分遠方で収束するまでの断面積拡大率(expansion factor) f_{∞} を用いている。

しかしこのモデルはスードストリーマという太陽風では速度を過大評価することが示唆されている (Riley+ 2015; Tokumaru+ 2024)。スードストリーマは磁束管が非単調に拡大しexpansion factorが極大を持つことが知られており、これが過大評価の要因の可能性がある。また拡大率ではなく拡大高度が重要だとする観測的研究もある (Dakeyo+ 2024)。これらを踏まえると、コロナ底部と収束高度の間の中間領域の磁束管形状も太陽風速度に重要であることが示唆される。本研究の目的は数値シミュレーションによってこれらの影響を定量的に評価することである。

【研究方法】

コロナ中間領域の磁束管形状が遠方の太陽風速度に与える影響を包括的に評価するために本計算機等を用いて数値シミュレーションを行った。本シミュレーションモデルは、ある1本の磁束管についてエネルギー源として光球面から人工的なAlfvén波を入射し、惑星間空間(太陽中心距離 $r = 70R_{sun}$)まで1次元MHDを時間発展させている。今回解析するにあたり、 $f(r)$ を様々に変えてパラメトリックスタディを行い、準定常状態における1000分間平均データについて解析した。

【研究結果】

昨年度は $f(r)$ を変えたときの速度の変化及びそれらを反映した新たな特徴量について発見し、昨年度の研究報告書にまとめたが、それに加えて、今年度では次のことを明らかにした。

図1に本研究で行なったシミュレーション結果における外側境界における速度(横軸)と、遷音速点におけるAlfvén波のエネルギーフラックス F_A と密度 ρ の比(縦軸)の関係を示す。この図から分かるように、本モデルにおいて太陽風速度は遷音速点における F_A/ρ と強く相関している。このことから、 $f(r)$ を様々に変えた結果太陽風速度が変わるのは F_A または ρ が変化するためであることが示唆される。

f_{∞} や足元磁場の値を変化させず、拡大高度の変化や非単調拡大の度合いのみを変化させたときの遷音速点における F_A や ρ に対する影響について図2を示す。 r_{exp} は拡大高度を表すパラメータであり、 g_{max} は非単調拡大の度合いを表すパラメータである。また F_A や ρ は高度に強く依存するため、遷音速点高度の影響を取り除くためにそれらに磁束管断面積をかけた値 L_A 及び m を示している。つまり F_A/ρ は常に L_A/m に等しい。この図から、拡大高度の変化は F_A にあまり影響せず、 ρ に影響した結果速度が変化していること、非単調拡大は両方に影響するものの、 F_A に大きく変化していることが分かる。

【考察・まとめ】

昨年度の研究結果報告と合わせて、本研究は磁束管形状 $f(r)$ が太陽風速度に与える影響を理論的に示し、

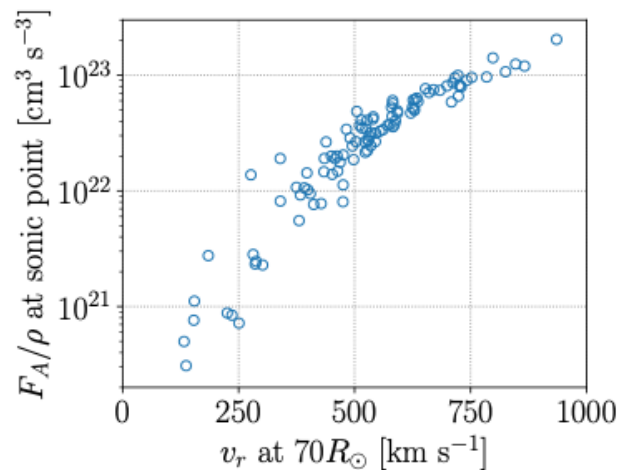


図 1. 太陽風速度と遷音速点における質量あたりのエネルギーフラックスの関係

またそれがエネルギーフラックスの変化や密度の変化を通じて起きることを示している。またこれらの発見により、新たな特徴量によって太陽風速度の予測精度が向上する可能性がある。一方で、本研究で用いたモデルはリコネクションのような物理機構を考慮できていないため、観測的検証により適用限界を探ることは重要である。

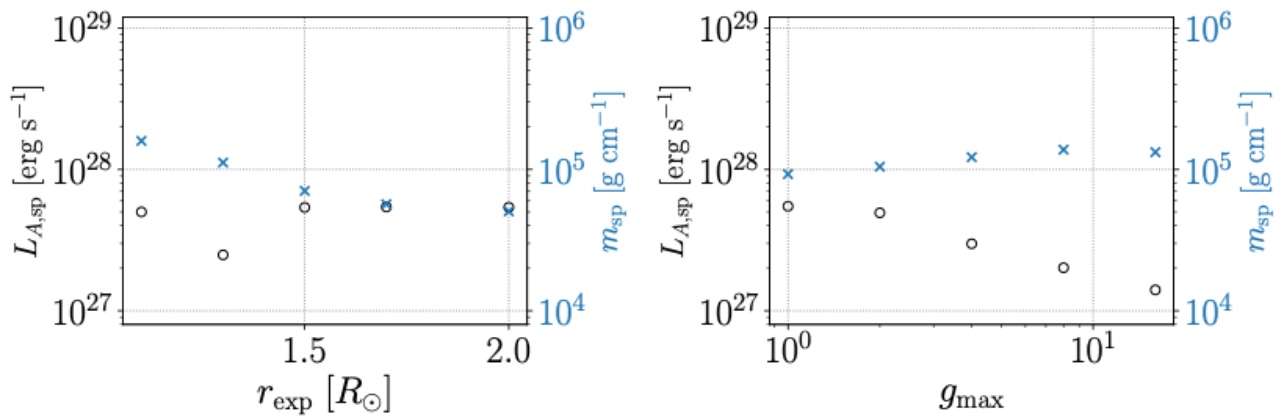


図 2. 拡大高度の変化(左パネル)や非単調拡大(右パネル)の影響

【引用文献】

Wang, Y. M., & Sheeley Jr, N. R. (1990). Solar wind speed and coronal flux-tube expansion. *Astrophysical Journal, Part 1* (ISSN 0004-637X), vol. 355, June 1, 1990, p. 726-732. Research supported by the US Navy., 355, 726-732.

Arge, C. N., & Pizzo, V. J. (2000). Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105(A5), 10465-10479.

Riley, P., Linker, J. A., & Arge, C. N. (2015). On the role played by magnetic expansion factor in the prediction of solar wind speed. *Space weather*, 13(3), 154-169.

Tokumaru, M., Fujiki, K. I., & Watanabe, H. (2024). Optimization of solar-wind speed models using interplanetary scintillation observations. *Solar Physics*, 299(8), 110.

Dakeyo, J. B., Rouillard, A. P., Réville, V., Démoulin, P., Maksimovic, M., Chapiron, A., ... & Louarn, P. (2024). Testing the flux tube expansion factor-Solar wind speed relation with Solar Orbiter data. *Astronomy & Astrophysics*, 691, A77.

【成果発表】

論文：

TOKORO, Kyogo; SHODA, Munehito; IMADA, Shinsuke. Proposal of a Novel Physical Parameter Characterizing Solar Wind Speed in a Wave-Driven Model. *The Astrophysical Journal*, Volume 997(2), 351. doi: 210.3847/1538-4357/ae2fea, (2026)

学会発表(口頭)：

戸頃響吾, 庄田宗人, 今田晋亮, The effect of expansion factor in intermediate region on solar wind speed, 日本地球惑星科学連合大会, 千葉, 2025年5月27日

戸頃響吾, 庄田宗人, 今田晋亮, wave-drivenモデルによる新たな太陽風速度特徴量の可能性, 日本天文学会, 山口, 2025年9月11日

戸頃響吾, 庄田宗人, 今田晋亮, The effect of the radial profile of flux-tube shape on solar wind speed, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 兵庫, 2025年11月24日

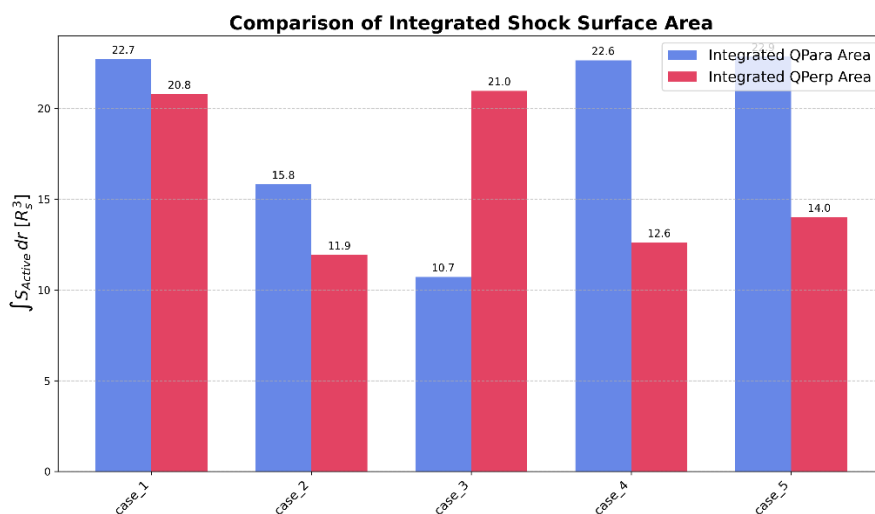
太陽近傍におけるCMEの伝播シミュレーション
A simulation of CME propagation near the sun

鈴木 亮(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 宇宙惑星科学講座)

研究目的 宇宙空間は人類の活動の場の一つになっており、太陽地球環境がどのように変動するか社会的な関心・需要が高まってきている。一方で、特に太陽フレアに伴う CME の発生機構の解明及びその予測は全く実現されていないのが現状である。本研究の目的は太陽フレアに伴う CME の発生機構を解明し、未だ達成されていない CME の発生・伝搬予測研究を行う事である。具体的には、これまで確立されてきた黒点周辺の磁場のみを用いたフレア予測シミュレーションを超え、フレア予測シミュレーションを太陽全球の磁場を考慮したグローバルなシミュレーションに発展させることを目標とする。

研究方法 CIDAS の計算機システムを利用し、宇宙地球環境研究所所属の教員に計算アルゴリズムの中身やその実行方法に関するアドバイスを受けつつ、申請者が CME の伝播に関するシミュレーションを行う。初期条件として、太陽の大局的磁場の強度、またはフラックスロープの位置や磁場強度を変えながらシミュレーションを行い、伝播の様子がどう変わっていくのかを調べる。CME の形状や初期条件は Shiota et al.[2010]、太陽風の条件については Manchester et al.[2004]に準じる。

研究結果 CME がシミュレーション内で形成する衝撃波を同定し、衝撃波パラメータ(アルフベンマッハ数、衝撃波角)を求めた。それらを用いて、陽子と電子を加速することのできる領域の面積について計算し、基本となるケース(ケース 1)から、CME の発生緯度を上げたケース(ケース 2)、CME に対する双極子磁場の向きを逆にしたケース(ケース 3)、太陽風の速度分布を極大期を想定したものに変えたケース(ケース 4)、双極子磁場の強度を大きくしたケース(ケース 5)においてそれぞれの時間平均を比較した。その結果、陽子は低緯度で磁場が同じ向きの場合加速されやすく、電子は低緯度で磁場が強く、太陽風構造が極小期の場合加速されやすいということがわかった。今後はより現実的な背景磁場構造に近づけ、同様の比較研究を行っていくことが展望として考えられる。



学会発表 鈴木亮(東京大学), 今田晋亮(東京大学), 庄田宗人(東京大学), 千葉翔太(名古屋大学), 塩田大幸(情報通信研究機構)「CME衝撃波に対する太陽の大域的磁場の影響」2025年度秋季天文学会

2025年9月10日 海峡メッセ下関

出典

Manchester, Ward, B., Gombosi, T. I., Tamas I., Roussev, I., Ilia, R., De Zeeuw, D. L., Sokolov, I. V., Powell, K. G., Tóth, G., & Opher, M. 2004, Res.: Space Phys, 109, A01102

Shiota, D., Kusano, K., Miyoshi, T., & Shibata, K. 2010, ApJ, 718, 1305

(別紙様式07-2)

非MHD効果を扱う新たな電磁流体力学によるグローバル地球磁気圏シミュレーション
Global simulation of Earth's magnetosphere with new electromagnetic-fluid-dynamics
including non-MHD effects

関戸晴宇、北海道大学・情報基盤センター

研究目的

地球磁気圏全体の時間発展を第一原理運動論方程式によって解くことができれば、磁気圏内で観測される物理過程をより精密にシミュレートすることができる。しかし、 10^5 km スケールという広い計算領域を運動論で解くには膨大なメモリが必要になるため、現代の計算機の能力では計算することができず、20年後においても実現の見込みは薄いと考えられる。そのため、計算負荷を抑えられる流体シミュレーションが有効であると考えられる。しかし、MHD 単一流体近似では慣性効果やジャイロ粘性効果が切り落とされており、運動論シミュレーションとの間には様々な違いが現れる。流体シミュレーションをより運動論シミュレーションに近づけるためには、高次モーメント量 (Umeda 2020) とともに、Ohm の法則における慣性項が必要である。このうち、高次モーメント量の導入は、世界的にもほとんど研究が行われていない。そこで本研究では、電磁流体力学シミュレーションに関して、以下の2つを目的とする。

1. 磁気流体力学シミュレーション手法に対し、4次までの高次モーメント量を導入する。磁気流体力学方程式系の保存則およびモーメント量の時間発展を解く方程式は、Vlasov 方程式のモーメントをとることで導出される。高次モーメント量の導入により磁気流体力学にジャイロ粘性効果を反映させることができる。
2. 新手法の開発の後、Kelvin-Helmholtz 不安定性、Rayleigh-Taylor 不安定性および磁気リコネクションの発達について、運動論シミュレーションとの比較を行うとともに、地球磁気圏の数値シミュレーションを行う。ジャイロ粘性効果および慣性効果の導入により空間解像度の制限を取り払うことができるため、従来のグローバル磁気圏 MHD シミュレーションよりも高解像度で計算を行う。本研究の完成により、磁気圏における物理現象をより正確かつ詳細に再現することが可能となる。これにより、地球周辺の宇宙物理の解明や宇宙天気予報の精度向上に資することが見込まれ、将来の宇宙開発への貢献が予想される。

研究結果

1次元流体シミュレーションについて、Roe 法 (Roe 1981) を実装し、HLLD 法 (Miyoshi & Kusano 2005) との比較を行った。また、FVS (Flux Vector Splitting) 法に基づいて、Steger-Warming 法 (Steger & Warming 1981) で解像されていなかった接触不連続を解像する新たな手法の開発を行った。この手法についても HLLD 法との比較を行った。

プラズマ運動論シミュレーションで電磁場計算手法として用いられる FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法について、高次精度手法の開発を行った。プラズマシミュレーションへの適用にあたり、電荷保存則が丸め誤差の範囲で満たされるように電流密度の補正を行った。

引用文献

1. T. Umeda, “Evaluating higher moments in the transverse Kelvin–Helmholtz instability by full kinetic simulation”, *Physics of Plasmas*, Vol. 27, 032112, 2020
2. P. L. Roe, “Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, pp. 357–372, 1981
3. T. Miyoshi and K. Kusano, “A multi-state HLL approximate Riemann solver for ideal magnetohydrodynamics”, *Journal of Computational Physics*, Vol.208, pp. 315–344, 2005
4. J. L. Steger and R. F. Warming, “Flux vector splitting of the inviscid gasdynamic equations with application to finite-difference methods”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 40, pp. 263–293, 1981

成果発表

以下の国際学会、国内学会および研究集会で研究発表を行った。

国際学会

- 2025 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, Sydney, Australia
- 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Fukuoka, Japan

国内学会・研究集会

- Japan Geoscience Union Meeting 2025, 千葉市
- 第158回 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) 総会・講演会, 神戸市
- STE シミュレーション研究会：プラズマ科学とデータ駆動科学の協調, 東京都

(別紙様式07-2)

衛星観測との比較に基づく環電流イオンによるULF波動の励起機構の研究

Study of excitation mechanisms of ULF waves by ring current ions based on the comparison with spacecraft observations

(1行スペース)

山川智嗣、名古屋大学宇宙地球環境研究所

(2行スペース)

研究目的

地球磁気圏における最大規模の変動現象である磁気嵐時には、環電流(keV帯の荷電粒子)が発達し、地球の双極子磁場の減少や地球近傍の宇宙空間(内部磁気圏)における大規模な変動を引き起こす。この過程で、環電流は地球の磁場を変化させるだけでなく、ULF波動(mHz帯の磁気流体波動)を励起させることがある。ULF波動は、環電流および内部磁気圏で最もエネルギーの高い領域である放射線帯(MeV帯の電子)のダイナミクスに重要な役割を果たすため、内部磁気圏での変動現象を理解する上で非常に重要な波動である。しかし、磁気嵐時において、どこでどのようにULF波動が励起されているかについては、本質的な理解には至っていない。本研究の目的は、内部磁気圏モデルと観測との比較に基づき、磁気嵐時の領域間結合が内部磁気圏ダイナミクスやULF波動の励起に果たす役割を明らかにすることである。

研究方法

本研究では、これまで我々が用いてきた内部磁気圏における電磁場と粒子の変動を自己無撞着に解くことが可能な環電流モデル(GEMSIS-RC)[Amano et al., 2011]と電離圏において電場ポテンシャルを全球で解くポテンシャルソルバー(GEMSIS-POT)[Nakamizo et al., 2012]を結合した内部磁気圏モデルを用いた。さらに、太陽風条件に応じた沿磁力線電流分布を与えるために、経験モデル(Weimerモデル[Weimer, 2005])を電離圏側で用いた。本研究では、過去に別の環電流モデル[Fok et al., 2010]で数値計算が行われた、2009年7月22日の磁気嵐に着目し、HPC計算機システムにおいて、256並列計算で数値計算を行った。

研究結果・考察

夜側に粒子が注入された状態を初期条件として仮定し、計算を行った結果、Figure 1のように環電流が形成され、05:00UTまで時間と共に圧力が増加し、その後は環電流粒子の消失により減少することが示された。このような傾向は、従来の環電流モデル[Fok et al., 2010]でも示唆されている。磁気嵐中の03:00-04:00 UTにおいて、GOES衛星および地上磁力計によりULF波動が観測された。またモデルにおいても、03:00 UT以降に周波数約1.6 mHzのULF波動の励起が確認された。周波数・方位角方向の波数といったULF波動の特性は、観測とよく一致していた。一方で、振幅が観測に比べて2桁程度小さく、モデルの改良の余地があることが示された。さらに、モデルで励起された波動の空間分布や粒子分布を解析した結果、ULF波動は夕方側から夜側に向けみられ、50-200keVの環電流イオンとのドリフト共鳴によって励起されたことが示唆された。

まとめ

本研究では、磁気嵐時における環電流の時間発展とULF波動の自己無撞着な励起をモデルで再現するとともに、観測との比較に基づき、その励起機構および空間分布を明らかにした。以上の結果については、論文にまとめ、国際学術誌に掲載された。

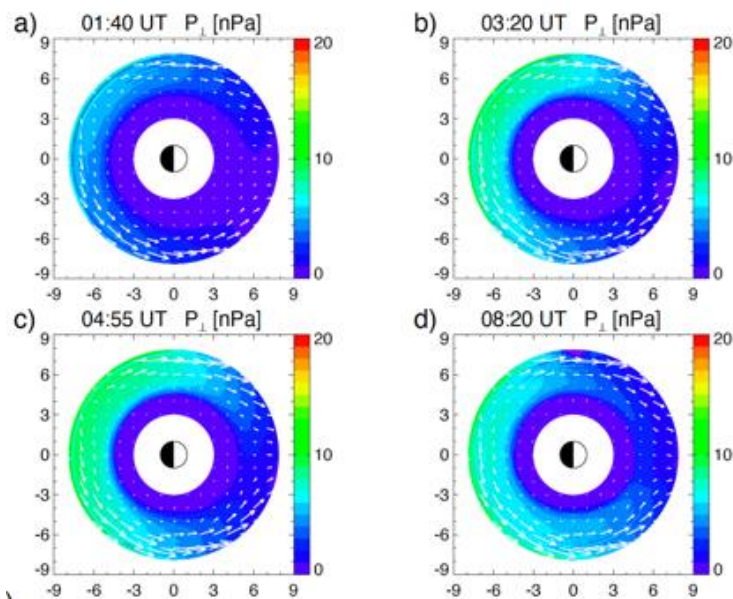


Fig.1 モデルにおける赤道面での圧力分布。右側が太陽側。白い矢印は電場ドリフト速度を表す。

成果発表

(論文)

1. Yamakawa, T., K. Seki, Y. Miyoshi, K. Yamamoto and A. Nakamizo, Excitation of storm-time Pc5 ULF waves during the 22 July 2009 storm: Comparison of GOES, ground observations, and GEMSIS coupled simulation, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 130, e2024JA003467, June, 2025, doi:10.1029/2024JA003647

(口頭)

1. Yamakawa, T., K. Takahashi, K. Seki, Y. Miyoshi, K. Yamamoto et al., Non-uniform excitation of storm-time Pc5 ULF waves in the inner magnetosphere: Van Allen Probes and Arase observations, *ERGサイエンス会議*、2026年3月
2. Yamakawa, T., K. Seki, Y. Miyoshi, K. Yamamoto and A. Nakamizo, Excitation of storm-time Pc5 ULF waves during the 22 July 2009 storm: Comparison of GOES, ground observations, and GEMSIS coupled simulation, 2025年度ISEE合同研究集会「太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」、東京、2026年3月

(ポスター)

3. Yamakawa, T., K. Seki, Y. Miyoshi, A. Nakamizo and K. Yamamoto, Excitation of Pc5 waves in the inner magnetosphere during the magnetic storm on 22 July 2009, *GEM workshop*, Iowa, June 2025.
4. Yamakawa, T. K. Takahashi, K. Seki, Y. Miyoshi, K. Yamamoto et al., Non-uniform excitation of storm-time Pc5 ULF waves in the inner magnetosphere: Van Allen Probes and Arase observations, *SGEPSS Fall Meeting*, 神戸、2025年11月

(別紙様式07-2)

太陽・惑星間空間環境予測モデルの開発

Development of numerical models for predicting the solar and interplanetary space environments

飯島陽久、東海国立大学機構名古屋大学・宇宙地球環境研究所

【研究目的】

太陽から惑星間空間を経て惑星高層大気に至るまでの宇宙天気環境の予測において、太陽・惑星間空間モデルの高度化はリーディングタイムを延長するうえで不可欠な課題である。本研究では、特に太陽風と惑星間空間磁場に注目し、惑星間空間における熱的プラズマ環境を予測するためのモデル開発を実施する。

【今年度の成果】

2025年度は8月末からの研究開始であったため、まず研究の初期段階として太陽全球を計算領域とするプラズマ数値シミュレーションのための基盤を作ることにした。具体的には、Yin-Yang格子 (Kageyama & Sato, 2004) を用いた3次元全球移流ソルバを、C++を利用して新規開発した。

球座標系では極に特異点があり、数値計算上は安定性や高速化の上で問題を発生させる。Yin-Yang格子は、位置関係が相補的になるよう回転された2つの異なる格子を組み合わせることで球面全球を覆う計算格子で、局所的には球座標系のコードがそのまま流用出来るため、様々な分野で活用されている。本研究でも、これをフルスクラッチで実装し、今後開発するプラズマ数値シミュレーションモデルの基盤とした。図1に単純なスカラー移流方程式に対する収束性を示す。空間4次精度の中央差分法を中心に構成したが、意図した通り空間3次精度以上の収束性を示している。

プログラミング言語としてC++を採用した理由は2つある。1つは、単体テストのフレームワークを始めとする周辺開発環境の充実である。テストフレームワークとしては、doctestを採用した。2つ目の理由は、今後ますます重要になるGPU上のプログラミングフレームワークにおいて幅広い選択肢があることである。

今後引き続き開発を進め、惑星間空間環境予測モデルとしての機能を追加していく。

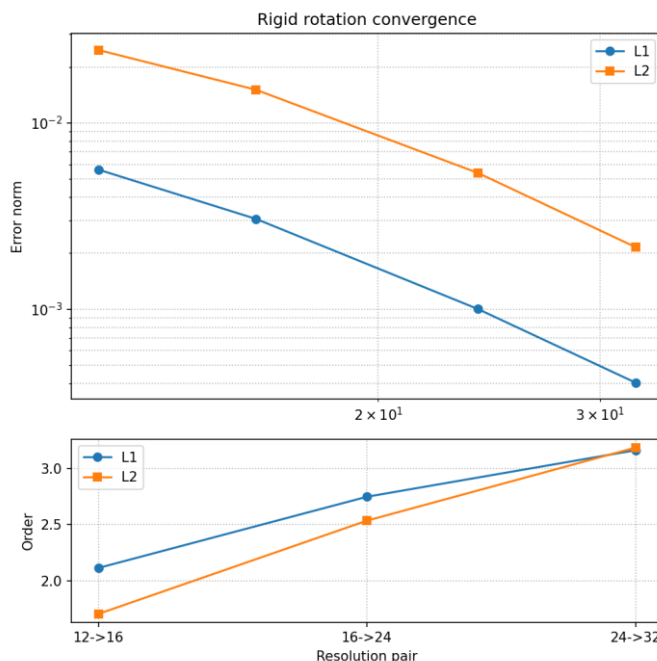


図1. Yin-Yang格子上でスカラー場の剛体回転による移流問題。(上段) 格子点数に対してL1/L2誤差が減少する様子。(下段) 隣接する格子点数間での空間収束次数。

(別紙様式07-2)

磁気圏・電離圏観測データに基づく5次元ドリフト運動論的リングカレントモデルを用いた
ULF波動の励起の研究

Study on ULF wave excitation using a five-dimensional drift-kinetic ring current model based on ionospheric and magnetospheric observations

山本和弘
名古屋大学宇宙地球環境研究所
統合データサイエンスセンター

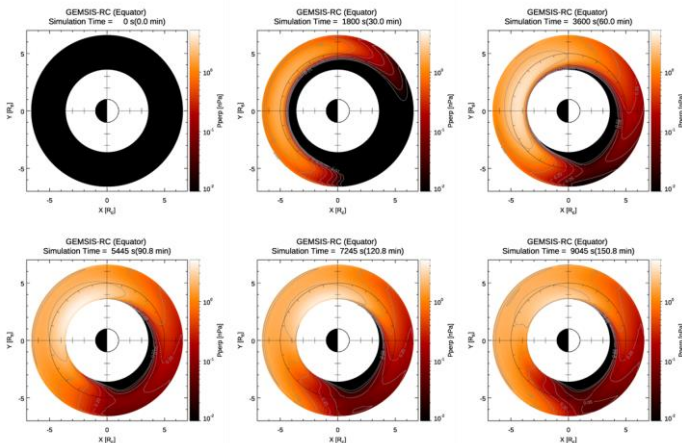
研究目的・手法

地球磁気圏で観測される数mHから数十mHzの超低周波数(ULF)波動の励起にはリングカレントイオンの空間勾配が重要であると指摘されている。本研究の目的は、ドリフト運動論的5次元ブラソフ方程式とマクスウェル方程式を自己無撞着に解くリングカレントイオンの物理モデル(GEMSIS-RC)を用いてRBSP衛星で観測されたULF波動の再現実験を行い、衛星では把握することが難しいイオンの空間勾配の波動励起における役割を明らかにすることである。

使用した共同利用装置は、統合データサイエンスセンター(CIDAS)計算機システムの計算ノード・IDLノードで、Intel Compilier(MPIライブラリ)を用いたGEMSIS-RCモデルの並列計算を行い、IDL、IDL/SPEDASを用いてシミュレーションデータの解析を行った。GEMSIS-RCモデルの設定は次の表1のとおりである。

表1. 数値シミュレーションの設定

空間グリッド数	$N_1 = 64$ (磁力線方向) $N_2 = 32$ (動径/L 値方向), $L = 3.6-6.6$ $N_3 = 128$ (方位角方向)
分布関数のグリッド数	$N_v = 32$ (磁場平行速度), $-4,500$ km/s から $4,500$ km/s $N_m = 32$ (磁気モーメント), 10^{-5} keV/nT から 1 keV/nT
時間ステップ	$\Delta t = 0.05$ s $\Delta t_{M-I} = 100\Delta t$ (電磁気圏結合計算の時間ステップ)
境界条件	R1FAC 電流(ピーク値 $0.3\mu A$ のガウス分布を $70-75^\circ$ 付近) 夜側境界 ($18-6$ MLT) にロスコーン分布 ($T_{ion} = 16$ keV, $n_{ion} = 5$ cm $^{-3}$)



研究結果

図1に上記の設定で得られたリングカレントイオン圧力 P_{\perp} の時空間発展を示す。夜側の外側境界から高圧領域がイオンの方位角方向ドリフトを反映しつつ磁気圏内部に広がっていく。夜側から夕方側にかけて圧力のピーク位置は急速に内側 L-shell に移動し、90 分後には内側境界にまで達している。この領域では、イオンの位相空間密度も地球方向の勾配を持つと考

図1 リングカレントイオン圧力 P_{\perp} の時空間発展。

えられ、西向きに伝搬する ULF 波動を励起すると予想される。反対に、朝側では時間の経過とともに 5 Re 以下の領域でイオンの圧力の低下領域が現れる。遮蔽電場などのイオンの侵入を防ぐ機構が顕著に働いていると考えられる。

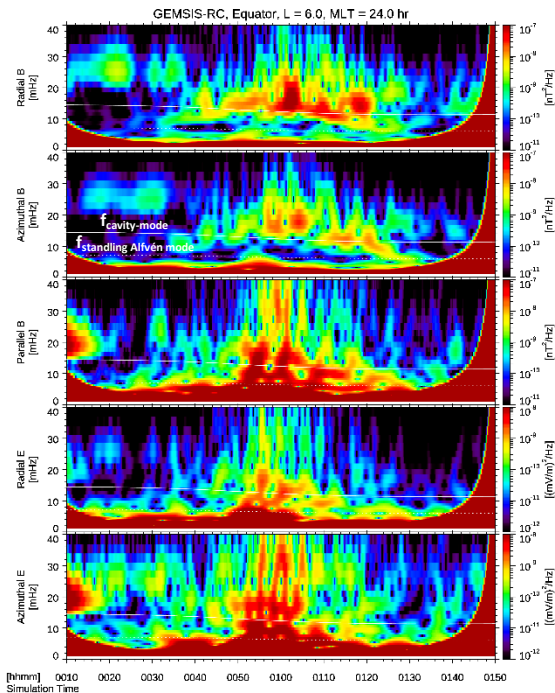


図 3 L = 6.0, 24 MLT の赤道における電磁界 wavelet パワースペクトル。白の実線は fundamental cavity mode の固有振動数、城の点線は fundamental Alfvén 定在波の固有振動数を示す。

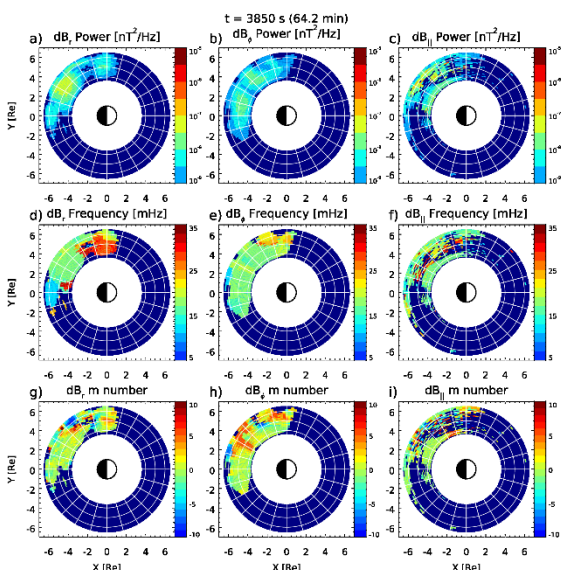


図 2 波動のパワーがピークになる時間帯 (60 分前後) の波動パワー、波動の周波数、東西波数(m number)の赤道面分布。左端の列が radial 磁場、中央が azimuthal 磁場、右端が parallel 磁場振動の分布を示す。

図 2 にシミュレーション内で検出された ULF 波動の例を示す。この run では、シミュレーションを開始してから 40 分経った以降、主に夜側から夕方側にかけて 10 mHz 以上の高周波の波動が頻繁に発生していた。特に radial 成分に顕著である一方で、波動のパワーはかなり低めに出ている。波形データを確認したところ、少し離れた場所の間 ($\Delta\text{MLT} \sim 0.1$) ではほとんど位相差はなく、波数が極めて小さいことがうかがえる。

波動のパワーが極大となる 60 分後前後の波動パワー、周波数、東西波数 (m number) の赤道面分布を図 3 に示す。図 3a に見られるように、radial な磁場 (B_r) の変動が 21 MLT ごろ最も高いパワーのピークを持つが、その周辺では azimuthal な磁場変動も同程度広がっている。azimuthal 方向に離れた二点の磁場変動から、この radial 振動の m number を算出したところ、 $L > 6$, 20–21 MLT 付近でスポット状に見えているものを除きほとんど 0 付近の波数を持つと判明した。

考察

今回のシミュレーション設定は Yamakawa et al. (2019) の論文で議論されている GEMSIS-RC の結果と同じグリッド数を採用している ($N_3 = 128$) ため、Yamakawa et al. (2019) と同じような ULF 波動が発生することが期待されていた。しかしながら、今回のシミュレーションではやや異なる位置や波数の波動が検出されている。Yamakawa et al. (2019) ではシミュレーションの比較的早い段階 (600–2,400 秒) で compressional-poloidal 波動が 15 MLT 付近に見えており、その m number はおよそ -20 程度であった。今回のシミュレーションは速度分布は同じながら、境界での空間分布のさせ方が違うため、イオンのドリフトの仕方によっては Yamakawa et al. (2019) で得られているようなエネルギー勾配による不安定が生じていない可能性がある。また、図 3a で見られるような波動が励起した領域はリングカレントイオン圧力の地球方向勾配とよく一致しそうであるが、不安定の条件を満たすのか分布関数の解析が必要である。

引用文献

Yamakawa, T., Seki, K., Amano, T., Takahashi, N., & Miyoshi, Y. (2019). Excitation of storm time Pc5 ULF waves by ring current ions based on the drift-t-kinetic simulation. *Geophysical Research Letters*, 46, 1911–1918. <https://doi.org/10.1029/2018GL081573>

plume-driven 熱対流の物理的性質の研究
Study of the physical properties of plume-driven convection

齋藤一真・名古屋大学大学院・理学研究科

【研究目的】

太陽内部に存在する熱対流は太陽の磁気活動や恒星進化の重要な要素である。熱対流の理論的枠組みである混合距離理論と熱対流の数値シミュレーションはともに対流層の厚みと同程度の空間スケールをもつジャイアントセルの発生を予想している。しかし、太陽表面流れのエネルギースペクトルにはジャイアントセルに対応するスケールのピークが見られず、その実在が疑われている。この理論的予測と観測との食い違いは熱対流の難問 (O'Mara et al. 2016) と呼ばれ、太陽・恒星対流理論の再検討の必要性を示唆する問題となっている。

混合距離理論によれば、太陽対流層はそのほぼ全ての深さで対流不安定であり、そのような広い対流不安定層が大規模対流を駆動してしまう。これを防ぐための仮説として、太陽光球での放射冷却によって生じる強い下降流 (プルーム) がエネルギー輸送を担うことで、対流不安定層を太陽表面に限定し、大規模対流の駆動を抑えるという理論が議論されている。このようにして駆動される熱対流はplume-driven熱対流 (Nelson et al. 2018) と呼ばれ、近年注目されている。

plume-driven熱対流を扱った数値シミュレーションの先行研究は複数あるが、それらはプルームの性質を調査することに注目しているためか、磁場を含まない計算で行われている。熱対流に対して磁場が与える影響が大きいことはHotta et al. (2015)で明らかにされており、磁場を含まない計算だけではplume-driven熱対流の仮説としての妥当性を判断することは出来ない。本研究の目的は磁場がplume-driven熱対流に与える影響を明らかにし、plume-driven熱対流の仮説としての妥当性を判断する上での示唆を与えることである。

【研究方法】

本研究では「CIDASシステム」の計算ノードを使用し、plume-driven熱対流を計算する直交座標系磁気流体コードを開発した。エネルギー方程式に含まれる放射フラックスの項を変化させることでプルームを生成し、プルームの幅、寿命、冷却の強さはパラメータとして指定できるように設定されている。このコードを使用して、磁場の有無やプルームのパラメータを変えながら格子点数 $128 \times 128 \times 64$ で16ケースの計算を実施した。

【研究結果】

磁場を含まない計算の結果、plume-driven熱対流が従来の大規模対流に比べて低エントロピー成分をより効率的に計算ドメイン下部へと輸送することで、そこでの対流安定性を増加させることを確認した。これは先行研究でも見られていた現象で、対流不安定な領域が狭くなることで大規模対流を抑制する効果を持つ。大スケールの運動エネルギーが減少していることはエネルギースペクトルからも読み取れるため、今回設定したプルームは先行研究と同様の効果を有していることがまず確かめられた。

計算に磁場が含まれる場合、低エントロピー成分を周囲と混合して拡散させる原因となる流れがローレンツ力によって制限され、低エントロピー成分が維持されたまま計算ドメイン下部へと運ばれることで、その輸送効率が高まる。その結果、計算ドメイン内がより対流安定となり、大規模対流は更に抑制されることがわかった。

また、パラメータを変化させた計算の結果、プルームの幅をより狭くした場合、寿命をより長くした場合、冷却をより強くした場合に対流不安定な領域がより制限されることがわかった。これらは全て下降流を強める操作であり、対流不安定層が制限される原因が確かにプルームにあることが示された。一方で、大スケールの流れ場がもつ運動エネルギーの減少幅は下降流の強さと単調に関係していなかった。これは、流れの速さがプルームだけでなく磁場との相互作用にも影響されるためだと考えられる。磁場は流れ場との相互作用によって飽和するまで成長するが、プルームの状態が変化すると速度場と磁場の

バランスが変化し、ブルームによる速度場への影響が緩和される。

【考察・まとめ】

今回の結果はplume-driven熱対流による熱対流の難問の解決という仮説を支持するものであり、この熱対流に関するさらなる研究を行う意義があることを示すものである。今後は自転の効果を含めた計算を行うことでplume-driven熱対流の性質を調べると共に、全球コードを開発することで流れ場と磁場との全球的な相互作用について調査予定である。

【引用文献】

Hotta, H., Rempel, M., and Yokoyama, T., “Efficient Small-scale Dynamo in the Solar Convection Zone”, *The Astrophysical Journal*, vol. 803, no. 1, Art. no. 42, IOP, 2015. doi:10.1088/0004-637X/803/1/42.

Nelson, N. J., Featherstone, N. A., Miesch, M. S., and Toomre, J., “Driving Solar Giant Cells through the Self-organization of Near-surface Plumes”, *The Astrophysical Journal*, vol. 859, no. 2, Art. no. 117, IOP, 2018. doi:10.3847/1538-4357/aabc07.

O'Mara, B., Miesch, M. S., Featherstone, N. A., and Augustson, K. C., “Velocity amplitudes in global convection simulations: The role of the Prandtl number and near-surface driving”, *Advances in Space Research*, vol. 58, no. 8, Elsevier, pp. 1475–1489, 2016. doi:10.1016/j.asr.2016.03.038.

太陽対流層底部から太陽風領域までの統一的な数値シミュレーション
Unified Numerical Simulation from the Bottom of the Convection Zone
to the Solar Wind Region

山田 隆博 京都大学・理学部

1. 研究目的

本研究は、太陽内部の対流層底部から太陽風領域までを統一的にあつかう数値シミュレーションを実現することを目的としている。既存の数値計算コードである RAMENS (Iijima & Yokoyama, 2015; Iijima, 2016)では、太陽光球下部に存在する対流層の上部からコロナ・太陽風領域までを計算することが可能であるが、本研究ではこのコードをさらに発展させ、より深部の対流層底部から計算を行うことで、太陽全域における物理現象を包括的に、また、物理的に一貫した形で解明することを目指す。

2. 研究方法

本研究の目的を達成するための第一段階として、既存の数値計算コードである RAMENS の構造および実装されているアルゴリズムの全容把握に努めた。具体的には、計算領域を対流層底部へ拡張するために必要となる、基礎方程式の取り扱いや各種アルゴリズムの解析を進めた。さらに、計算領域の拡大に伴う計算コストの飛躍的な増大に対応するために、大規模数値計算に向けた基盤技術の検討を行った。その一環として、自作の数値計算コードについて、名古屋大学宇宙地球環境研究所統合データサイエンスセンター計算機システム (CIDAS システム) を利用して MPI を用いた並列計算手法を実装した。この自作コードを用いた並列化の効率解析にあたっては、Kudoh, Matsumoto & Shibata (1998)による 2.5 次元シミュレーションを用いた降着円盤ジェットモデルを実装してテスト計算を実行し、並列環境下におけるプロセス間のデータ通信や計算機上の挙動を確認した。

3. 研究結果

初年度の研究を通じて RAMENS コードの基本構造に対する理解を深め、対流層深部への領域拡張に向けて修正が必要となる中核的なモジュールを概ね把握することができた。一方で、Kudoh, Matsumoto & Shibata(1998)の降着円盤ジェットモデルを用いた自作コードの MPI 並列計算では、プロセス数の増加に対して、十分な並列化効率の向上を得ることができなかった (図 1)。並列効率が上がらなかった原因として、weak scaling で解析を行ったためにプロセス数の増加に従って計算グリッドが細かくなり、高解像度化によって微細な乱流構造が新たに見えるようになったことが影響していると考えられる。また、対流層底部へ拡張するにあたり必要となる境界条件の仕様解析についても、現時点では不十分である。これらの結果から、乱流による負荷の変化が排除される単純なモデルを用いたテスト計算を通じて通信オーバーヘッドなどの並列計算におけるボトルネックを特定および改善しつつ、RAMENS コードで用いられる境界条件の定式化と実装に向けた詳細な解析を進めることが必要である。

4. 考察

自作コードを用いた並列化計算において十分なスケールングが得られなかった主な原因は、weak scaling の採用に伴う解像度の向上により、微細な乱流構造が新たに見られるようになったことであると推測される。乱流や衝撃波に伴う複雑な構造が計算領域内に局所的に発生することで、プロセス間での計算負荷に偏りが生じたり、プロセス間の通信に伴うオーバーヘッドが増大したりするため、並列効率の低下を招いたと考えられる。純粋な MPI 分割に伴う並列化効率を評価するためには、物理的現象に起因する負荷の領域毎の不均衡を排除する必要がある。従って、自作コードに適用するテスト計算では、空間的な計算負荷が領域によって大きく異なることのない滑らかな物理モデルへ変更して評価を行うことが必要とされる。この自作コードを用いて並列計算の手法を確立することは、本研究の最終目標である RAMENS コードを用いた太陽全域シミュレーションにおいても不可欠な基盤である。自作コードの開発過程で得られる通信最適化のような知見は、RAMENS コードの拡張や新たな境界条件の実装においても極めて重要な役割を果たす。

5. まとめ

本研究では、大規模数値計算に向けて基盤となる数値計算技法の取得を主軸とし、自作の数値計算コ

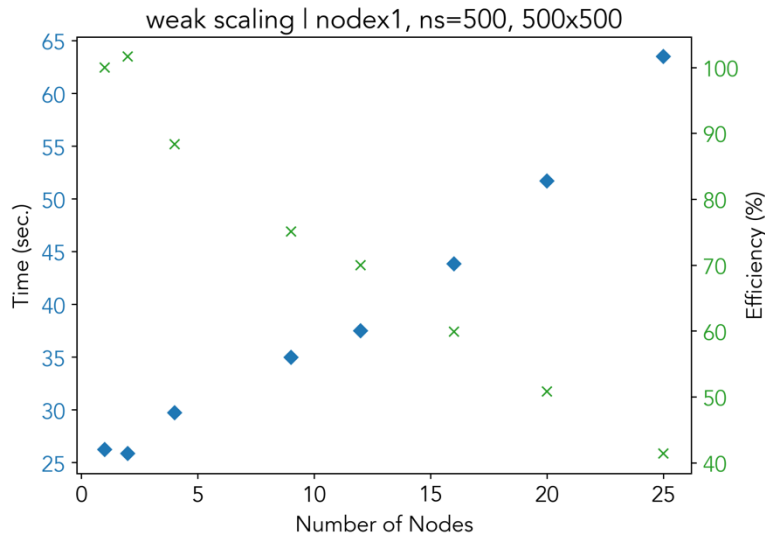


図 1. weak scaling を用いて計算効率の比較を実行した結果. 横軸にプロセッサ数, 縦軸 (左, ◆) は計算時間, 縦軸 (右, ×) は計算効率を示す. プロセッサ数の上昇とともに計算効率が急激に低下していることが確認される.

ードに対する MPI 並列化手法の実装と性能評価を実施した. Kudoh, Matsumoto & Shibata (1998) のモデルを用いたテスト計算の結果, 高解像度化に伴う乱流構造が出現することによりプロセス間での計算負荷のインバランスを引き起こし, 並列効率を低下させると考えている. このような現象から, 純粋な計算機パフォーマンスを評価するためには滑らかな物理モデルを用いたテスト計算を行う必要があると考えられる. 今後は, 自作コードにおけるテスト計算に利用するモデルを変更した上で, 通信のボトルネックとなっている部分と並列化の最適化を進める. これと並行して, 既存の RAMENS コードの構造把握と, 対流層底部における境界条件の仕様解析をさらに深める. 自作コードで得られた知見をもとに RAMENS コードの開発へ応用するというので, 次年度以降に予定している太陽内部から太陽風領域までを統一的に扱う大規模シミュレーションの実現を目指す.

なお, 本報告の研究は筆者の京都大学理学部における課題研究 (卒業研究) として実施したものである.

6. 引用文献

- Iijima, H. 2016, PhD thesis, University of Tokyo, Department of Earth and Planetary Environmental Science
 Iijima, H., & Yokoyama, T. 2015, The Astrophysical Journal Letter, 812, L30
 Kudoh, T., Matsumoto, R., & Shibata, K. 1998, The Astrophysical Journal, 508, 186