

7. 計算機利用共同研究 目次詳細

(所属・職名は平成31年3月現在)

| 研究代表者 Principal Investigator | 所属機関 Affiliation | 所属部局 Department | 職名 Position | 研究課題名 Project Title | 頁 Page |
|------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------|---|-----------|
| 坪内 健 | 電気通信大学 | 情報理工学研究科 (芳原研究室) | 客員研究員 | 太陽圏境界領域におけるピックアップイオンダイナミクス | 353 |
| 深沢圭一郎 | 京都大学 | 学術情報メディアセンター | 准教授 | 木星磁気圏衛星観測に対するパラメータサーベイ型シミュレーション | 355 |
| 梅田隆行 | 名古屋大学 | 宇宙地球環境研究所 | 講師 | プラズマ境界層における流体的不安定性のブラソフシミュレーション | 356 |
| 林 啓志 | 名大 ISEE、中国科学院国家空間科学研究センター | 太陽圏環境部門 | 研究協力員 | I PS 解析データに基づいた太陽圏長期変動再現MHDモデル | 358 |
| 松清修一 | 九州大学 | 大学院総合理工学研究科 | 准教授 | 準平行衝撃波のマルチスケール構造と粒子加速 | 360 |
| 藤本桂三 | 北京航空航天大学 | 宇宙・環境学院 | 副教授 | 無衝突磁気リコネクションにおける異常抵抗発生機構の解明 | 362 |
| 関 華奈子 | 東京大学 | 大学院理学系研究科 | 教授 | 太陽風・太陽放射条件が火星周辺宇宙環境および大気散逸機構に与える影響の研究 | 364 |
| 齊藤慎司 | 名古屋大学 | 大学院理学研究科 | 特任准教授 | 磁気圏シース領域での電子運動論を含んだミラーモード不安定性の研究 | 365 |
| 近藤光志 | 愛媛大学 | 宇宙進化研究センター | 講師 | 非対称反平行磁気リコネクションの磁気流体計算 | 367 |
| 堺正太郎 | 東京大学 | 大学院理学系研究科 | 特任研究員 | 固有磁場強度の変遷が惑星大気流出機構へ与える影響に関する研究 | 369 |
| 横山竜宏 | 京都大学 | 生存圏研究所 | 准教授 | 赤道プラズマバブルの生成機構解明と発生予測に向けた研究 | 371 |
| 若月泰孝 | 茨城大学 | 理学部 | 准教授 | 雲解像モデルシミュレーションによる豪雨の予測と検証 | 373 |
| 塩田大幸 | 情報通信研究機構 | 電磁波研究所 宇宙環境研究室 | 研究員 | 内部太陽圏磁気流体モデルを用いた南向き惑星間空間磁場予測手法の開発 | 375 |
| 井上 諭 | 名古屋大学 | 宇宙地球環境研究所 総合解析部門 | 特任助教 | 解適合格子・多層格子電磁流体力学計算による太陽フレア-CMEダイナミクスの研究 | 377 |
| 馬場賢治 | 酪農学園大学 | 酪農学研究科/農食環境学群 環境共生学類 環境気象学研究室 | 准教授 | アジアダストホットスポット域からのエアロゾル輸送に関する研究 | 379 |
| 相木秀則 | 名古屋大学 | 宇宙地球環境研究所 | 准教授 | 千年スケールの気候変動における海洋モード水の役割 | 381 |
| 寺田直樹 | 東北大学 | 理学研究科 | 准教授 | 火星熱圏における大気重力波の伝搬・飽和・散逸過程のDSMCシミュレーション | 382 |

太陽圏境界領域におけるピックアップイオンダイナミクス
Dynamics of interstellar pickup ions in the vicinity of the heliospheric boundary region

坪内 健、電気通信大学・情報理工学研究科

【研究目的】

太陽圏境界 (heliopause; 以下HP) は太陽風プラズマと星間物質が直接相互作用する領域で、宇宙空間における太陽圏の存在を特徴づける上で重要な情報の宝庫と言える。従来の理論では説明つかない諸現象が近年HPを通過したボイジャー探査機による直接観測やIBEX衛星による高速中性粒子 (energetic neutral atom; 以下ENA) 観測から明らかになっており、観測データを解釈するための理論・数値モデルを広くに開発する必要性が増している。本研究課題では特にHP近傍に局所的に存在するENAフラックスの高い領域 (IBEXリボン) の非定常性に着目する。観測されるENAの起源として最有力視されているピックアップイオン (pickup ion; 以下PUI) は、外部ヘリオシース (outer heliosheath; 以下OHS) においてプラズマと中性粒子との間の電荷交換から生じる粒子であり、これをHP近傍の環境を伝えるプローブとして扱う数値シミュレーションを行う。HP構造の動的な現象を再現し、そこからこのリボン構造を構築することで空間・エネルギー分布特性に関するデータベースをパラメータ別にまとめる。この成果を基にして今後のIBEX、更には来るIMAPミッションにおけるENA観測の解析への活用を目指す。

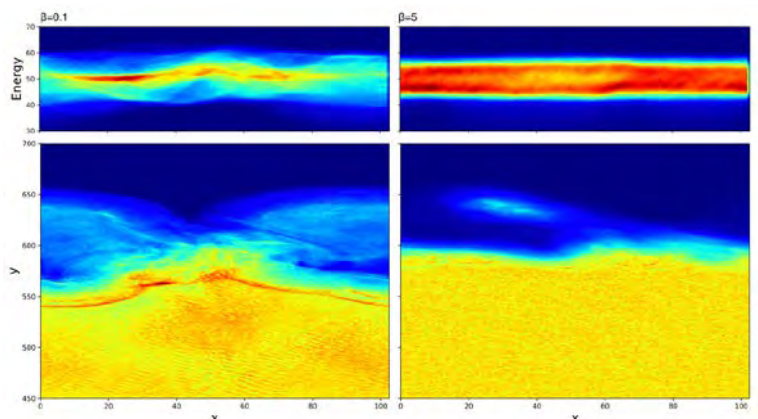
【研究方法】

HP領域を2次元構造に模した数値モデルを作成し、イオンの個別粒子運動を解き進める粒子ハイブリッドコードを用いたシミュレーション計算を名古屋大学情報基盤センターのスーパーコンピュータで行った。本年度は前年度に引き続き、太陽圏プラズマと星間プラズマの間にシアー流が存在する状況から発生するKelvin-Helmholtzモードの不安定性 (KHI) の成長に伴ってOHS中に配置したPUIの密度構造が時間・空間的に変化する過程について、特にプラズマ β が異なるケースの相違点を整理した。

内部ヘリオシース (inner heliosheath; 以下IHS) のパラメータで定義されるプロトンジャイロ周波数・プロトン慣性長で規格化された量を用いて、時間ステップは0.005、空間グリッドは0.2に取った。512×4096グリッドの周期境界を取り、速度遷移層の厚さを0.8、星間プラズマと太陽圏プラズマの密度比を5、PUI密度を星間プラズマの0.004%、速度空間におけるPUIの磁場旋回速度をアルフベン速度の10倍で与えた。磁場はKHIモードが最も不安定になるように、シミュレーション面 (xy) に対し垂直 (z方向) に取り、シミュレーション空間全体で圧力平衡を満たすように設定した。

【研究結果】

IHSのプラズマ β を0.1、5としたときの計算結果を下図 (左: $\beta=0.1$ 、右: $\beta=5$) に示す。図の下部がPUI密度を表し、上部はこれをy方向に積分したコラム密度のエネルギー分布図で、IBEX観測を模したものになる。低 β の場合、ENAの元となるPUIの局所的な密集領域の出現が確認できるのに対し、高 β ではエネルギー分布が空間的にほぼ一様となっていることがわかる。KHモードの成長に伴ってHP沿いに発生する渦運動が誘起するHPの振動の影響でOHS側に磁気音波が放出されるが、低 β におけるOHSではsuper-Alfvénicになることから波の急峻化が起きる。このパルス波がPUIを局所的に掃き集める効果があることが確認され、図に示すようなコラム密度における局所構造の形成が説明付けられる。一方高 β の場合OHSでsub-Alfvénicとなっているために同様のパルス波の発生は見られず、一様なコラム密度に反映されている。



【まとめ】

HPの動的現象のうち特にKHIが生じている状況と、そこからENA観測で得られるであろうPUIの空間・エネルギー分布の描像との関連性について、プラズマパラメータ (β) による違いについて検証した。OHSにおいてマッハ数は β 値依存性が高く、その結果OHSに誘起される

磁気波動の性質に現れる違いがPUIの空間分布にも影響を及ぼしていることが明らかになった。本研究で扱ったパラメータはIBEXによる観測精度に対して遥かに小さいため、この成果を直接IBEXリボン構造などと比較することは不適當である。一方IMAPを始めとする将来のミッションにおいては、より高精度の観測データとの比較が可能になるため、HP近傍におけるプラズマ環境を解釈するためのテンプレートとしての活用が期待できる。

【成果発表】

1. 坪内 健、Local concentration of pickup ions in the outer heliosheath: Relevance to the IBEX observation、日本地球惑星科学連合2018年大会、千葉、2018年5月（口頭発表）
2. Tsubouchi, Ken, The Kelvin-Helmholtz instability along the heliopause and the consequent pickup ion dynamics, Asia-Oceania Geosciences Society 15th annual meeting, Honolulu, 2018年6月（口頭発表）
3. 坪内 健、Hybrid simulations on the evolution of the pickup ion density structure associated with the fluctuating heliopause、第144回地球電磁気・地球惑星圏学会、名古屋、2018年11月（口頭発表）

木星磁気圏衛星観測に対するパラメータサーベイ型シミュレーション
Parameter survey simulation for observations of Jovian magnetosphere

深沢 圭一郎、京都大学・学術情報メディアセンター

近年日本が上げた惑星観測宇宙望遠鏡HISAKIの観測により、木星周辺環境の長時間にわたる観測データが貯まってきており、木星磁気圏の時空間変化が明らかになりつつある。また、Juno探査機が2016年7月に木星に到着し、観測が始まっている。このように木星ではGalileo探査機の観測と合わせて、観測からの研究が進んでいるが、木星磁気圏全体を同時に観測することはできないため、観測された現象が磁気圏内でどのように生成されているか、何と関連づけられるのかなどを理解することが難しい。一方で、数値シミュレーションでは近年の計算機の発展により、計算時間はかかるが、MHD近似に近い計算も可能となってきており、10年前程度の計算サイズであれば、それほど時間がかからずに計算が可能となってきている。

このように、数値シミュレーション結果と比較可能な観測結果の蓄積、また、観測条件に合わせるような様々な入力パラメータでの高速な計算が可能な状況を踏まえ、本研究では、木星磁気圏研究において、観測と比較することを前提にした、パラメータサーベイ型木星磁気圏シミュレーションを行うことを目的とし、計算機を利用した。

本年度の計算としては、実際に観測された太陽風を観測を元に数値シミュレーションで再現した太陽風を入力とし、特定観測期間の磁気圏構造のシミュレーションを行った。入力が大きく変化するため、シミュレーションが止まってしまうこともあったが、境界条件の調整によりこの問題を解決し、シミュレーションを進めることができた。計算結果は、共同研究に参加している観測系の研究者により解析が進められ、観測結果と良好な相関があることが確認されている。今後、この計算結果の解析を観測されている現象の解明に利用できるように研究を進めていく。

・学会発表

深沢圭一郎、木村智樹、土屋史紀、村上豪、埜千尋、北元、村田健史、観測と協調したグローバル木星磁気圏MHDシミュレーションのデータベース開発、日本地球惑星連合2018大会、幕張、2018年5月20-24日

K. Fukazawa, T. Kimura, F. Tsuchiya, G. Murakami, H. Kita, C. Tao, K. T. Murata, Database Development of Global Jovian Magnetospheric MHD Simulations for Collaboration with Observations, AOGS 15th Annual Meeting, Hawaii, 3-8 June 2018.

K. Fukazawa, T. Kimura, F. Tsuchiya, G. Murakami, H. Kita, C. Tao, T. Tokunaga, K. T. Murata, Open Numerical Simulation Data of Planetary Magnetosphere, AGU Fall Meeting 2018, Washington, D.C., 2018.

プラズマ境界層における流体的不安定性のブラソフシミュレーション Vlasov simulations on fluid-scale instabilities in plasma boundary layers

梅田隆行、名古屋大学・宇宙地球環境研究所

研究目的

従来の研究では、時間および空間スケールの異なるマルチ物理問題に対して、流体コード、ハイブリッドコード、運動論コードを個々に適用させていた。しかしジオスペースでは、イオン・電子やグローバル・マクロ・メソ・ミクロなどの異なる時空間スケールの現象が互いに未知の物理過程で結合しており、これらを理解することが重要である。本研究では、次世代のマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション手法としてブラソフコードに注目し、その研究開発を行う。また、ジオスペースのスケール間結合に関する諸現象に適用する。

研究方法

本研究において開発した、無衝突プラズマの第一原理運動論を記述するブラソフ方程式とマックスウェル方程式を自己無撞着に解き進める超並列ブラソフシミュレーションコード (Umeda et al. IEEE 2012) を用いる。ブラソフ方程式は、1次元保存型・無振動・正值性保障スキーム (Umeda EPS, 2008; Umeda et al. CPC 2012) をベースとした多次元保存型解法 (Umeda et al. CPC, 2009) により安定に解き進め、マックスウェル方程式は陰的時間空間領域差分 (FDTD) 法により解き進めている。また、プラズマが作る電流は電荷保存法により求めている。

今年度は、これまでに行ってきたケルヴィン・ヘルムホルツ不安定性やレイリー・テイラー不安定性において生じていた2次的不安定性の解析を行うために、新たな線形分散ソルバーを開発した。

研究結果

プラズマ中の様々な状況下において磁場を横切るドリフト運動が発生する。このようなドリフト運動はいろいろなプラズマ不安定のエネルギー源となるが、従来の線形分散解析方法では磁場を横切るドリフトをするプラズマは扱えなかった。本研究グループでは、一様プラズマ中を仮定し、磁場を横切るドリフトを分布関数から分離し、ドリフト中心の座標系を用いることで、磁場を横切るドリフトを考慮した新しい線形分散ソルバーを開発した。

また、開発した線形分散ソルバーを、磁気リコネクションのジェット先端のパラメータに適用し、3次元磁気リコネクションの粒子シミュレーションにおいてジェットの先端で生じた運動論的な不安定性の特性が、本線形分散ソルバーで得られた密度勾配ドリフトによる不安定性の特徴とよく一致することが分かった。

成果発表

- Umeda, T., and K. Fukazawa, Performance comparison of Eulerian kinetic Vlasov code between Xeon Phi KNL and Xeon Broadwell, In: AsiaSim 2018, Communications in Computer and Information Science, Vol.946, edited by Liang Li, Kyoko Hasegawa, and Satoshi Tanaka, pp.143-150, 2018. (査読付論文)
- Umeda, T., and T. K. M. Nakamura, Electromagnetic linear dispersion relation for plasma with a drift across magnetic field revisited, Physics of Plasmas, Vol.25, No.10, 102109 (11pp.), 2018. (査読付論文)
- 梅田 隆行, 和田 泰尚, Non-MHD effects in the nonlinear development of the MHD-scale Rayleigh-Taylor instability, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 幕張メッセ, 2018 年 5 月 23 日. (ポスター発表)
- Umeda, T., Vlasov simulation tutorial, 13th International School/Symposium for Space Simulations, Los Angeles, USA, September 6, 2018. (招待講演)
- 梅田 隆行, 深沢 圭一郎, Xeon Phi KNL におけるブラソフコードの性能評価(3), 第 166 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究会, 北海道立道民活動センター, 2018 年 9 月 27 日. (口頭発表)
- Umeda, T., and K. Fukazawa, Performance Comparison of Eulerian Kinetic Vlasov Code between Xeon Phi KNL and Xeon Broadwell, 18th Asia Simulation Conference (AsiaSim2018), Kyoto, Japan, October 28, 2018. (口頭発表)
- Umeda, T., and Y. Wada, Non-MHD effects in the nonlinear development of the MHD-scale Rayleigh-Taylor instability, 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2018), Kanazawa, Japan, November 14, 2018. (ポスター発表)
- 梅田 隆行, 中村 琢磨, Electromagnetic linear dispersion relation for plasma with a drift across magnetic field revisited, 第 144 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 名古屋大学東山キャンパス, 2018 年 11 月 25 日. (ポスター発表)
- 梅田 隆行, Xeon プロセッサにおけるブラソフコードの性能チューニング, 第 167 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究会, 沖縄産業支援センター, 2018 年 12 月 17 日. (口頭発表)

I P S 解析データに基づいた太陽圏長期変動再現MHDモデル

IPS-based MHD simulation of heliosphere

林 啓志、中国科学院国家天文台

平成30年度の計算機共同利用研究のテーマとして、題目のとおり、太陽圏全体の物理課程を理解するための基盤としての太陽圏三次元的構造とその時間変化をより現実に則した形で数値的に再現することを目的とし、名古屋大学宇宙地球環境研究所のIPSデータを用いた太陽風速度構造データを用いた太陽圏MHDモデルを申請した。太陽近傍のコロナ等と比し、太陽圏は時間・空間のスケールが比較的大きいため、通常は要請される計算量はそれほど多大ではないが、本研究においては現存するデータすべてを用いた比較的長時間（50年程度）で且つ広範囲（概ね20～50AU程度を目指した）領域での時間・空間変動をとらえることを企図していたため、高性能な大型計算機による並列計算が必須であった。

予備計算とコードなどの確認を終える前の段階で、本共同利用全体の計算時間割り当てを使い切った旨の連絡があり、30年度の研究として申請・提案した本研究を実際に行うことができなかつた事は残念な次第である。別な計算機において、低い時間・空間の解像度による検証計算などはかろうじて終えることはできたので、次年度には是非とも高空間分解能計算を行いたい次第である。

時間変動する太陽や太陽風のようなは、さまざまな観測により得られている。そのような観測にもとづく時系列データを用いた計算モデルの一つとして、IPSデータを用いた太陽圏モデルを提案した次第であった。

このような観測データを基にシミュレーション・モデルを駆動する手法・アプローチは、太陽物理では盛んであり、特に太陽光球面の磁場などの観測データを基にした太陽活動領域のMHDモデルというものも近年さかんである。その流れのなかで、3成分磁場の時系列データを境界条件として、活動領域を模したMHD計算を近年行ったので、ここではそれについて記述する。

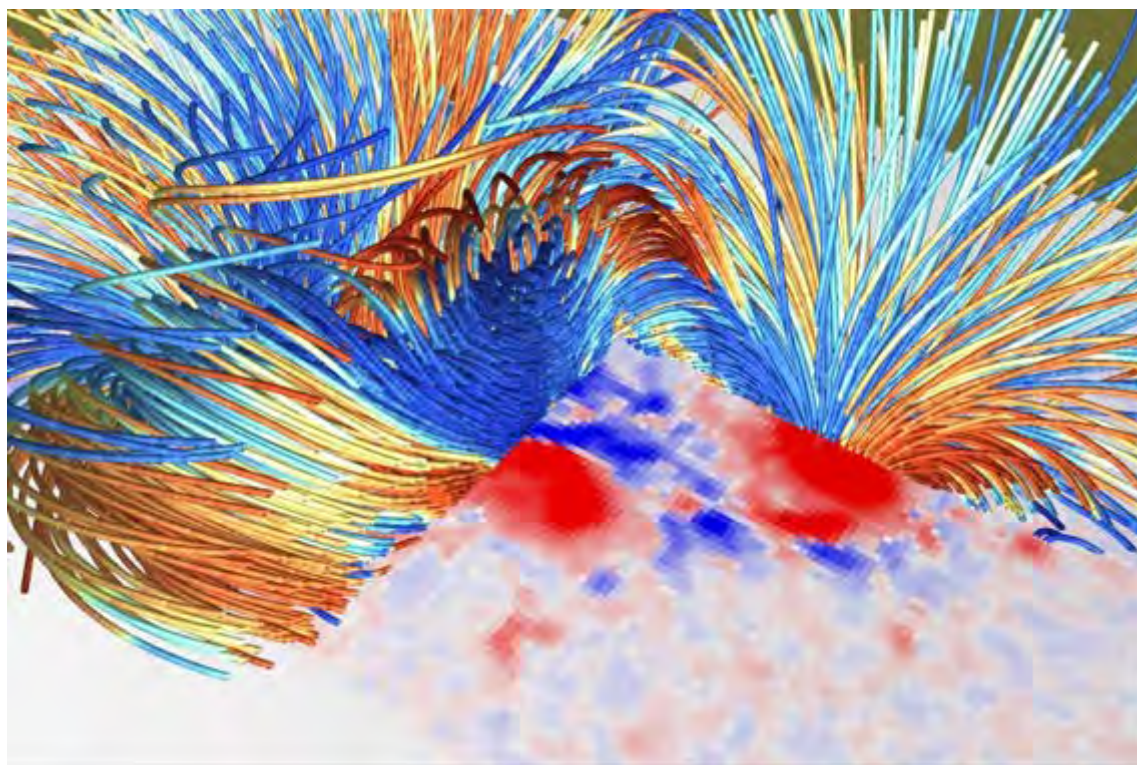
米国のSDO太陽観測衛星に搭載されたHMI 太陽観測望遠鏡により得られた太陽光球面磁場ベクトルの3成分の時系列データを直接的にMHDモデル駆動に用いた計算（2018年の論文; ApJ vol855, 11）を以前行った。これは、境界値磁場駆動に際し、電場を計算したうえでその循環を磁場の時間変化として計算したもので、磁場の発散を理論上ゼロとできる点と観測された磁場3成分にモデル計算の境界値を(差分計算の誤差を除き)一致させることができる点で非常に良好なモデルである。しかし、その代償として、エネルギー保存則を完全に満たすことができない。観測された磁場ベクトルの時間変化を再現するようなプラズマ速度場により駆動することが理想なのであるが、そのような、速度場を求めることはいわゆる ill-posed な問題であるので一般には難しい。そのようななか比較的良好な結果を出すべく広く評価されている米国 Schuck 博士による DAVE4VM と呼ばれる速度場逆算解法モデルにより得られる速度場データを十数時間分用意し、それを用いて、MHD駆動モデル計算を行った。その初期的な結果については ApJ Letter 誌 (2019年 vol.871, L 26) にて発表した。

次頁の図は、そのようなプラズマ速度場による駆動モデル計算の一つから得られた磁力線を描写したものである。磁力線上の色は磁場の循環すなわち電流の磁場に対する向きを赤青の色で、電流強度を色の濃さで表したものである。電流の大きさは非ポテンシャル性、すなわち余剰エネルギーの大きさとも関連する。図示されたケースの場合、電流構造は太

陽光球面にあたる底部境界面で与えられるプラズマ速度の影響を受け、磁場余剰エネルギーは新規に生成され、あるいは消費される。磁力線に沿った方向で電流は比較的一定であり、いわゆる **Force-Free** 場に近い状態にあることがわかる。電流の向きが同じであるような磁力線はお互いに引き合い、反対向きの電流は反発しあう性質があるので、このように近接・隣接した磁場構造の中で電流の向きが異なるという結果は、太陽活動領域内におけるエネルギー蓄積過程が空間・時間的に複雑なものであることを示すものである。

図の説明：

MHDシミュレーションによる太陽活動領域の磁場を描写したもの。磁力線を表す曲線上の色は電流の向きと強さを表現し、底部境界平面上の色は観測に基づく磁場の向きと強さをあらわす。いずれも暖色(赤・茶)が負を、寒色(青・藍)が正の値を表現している。四分の一の領域について磁力線の可視化表現を省くことで、活動領域深内部での磁場を図示するとともに、ねじれた磁場構造の断面をみえるようにしている。



(以上)

準平行衝撃波のマルチスケール構造と粒子加速

Multiscale structures of quasi-parallel shock and associated particle acceleration

松清修一、大塚史子（九州大学）
梅田隆行（名古屋大学）

研究目的

地球バウショックの準平行衝撃波上流に形成されているフォアショックと呼ばれる領域では、大振幅波動や高エネルギー粒子が観測されている。本研究では大規模1次元フル粒子計算により、準平行衝撃波と十分発達したフォアショックを含む系を自己無撞着に再現し、その詳細な電磁的構造と粒子加速過程を理解する。

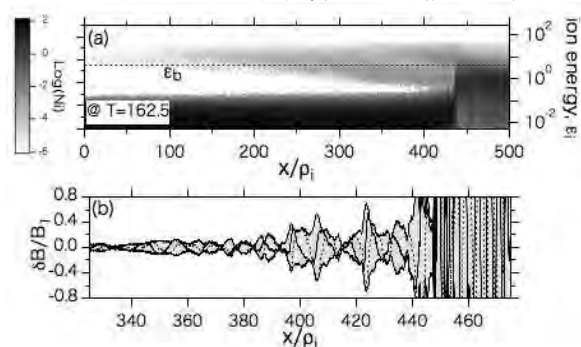
研究方法

本研究では無衝突プラズマの第一原理計算法として知られるフル粒子計算により準平行衝撃波を再現する。衝撃波の生成には一般的なインジェクション法を用いる。準平行衝撃波では、入射イオンの一部が衝撃波面で電磁的に反射され上流に背走し、イオンビームが形成される。このイオンビームの占める領域がフォアショックであり、十分発達した非線形波動が存在する。これら非線形波動は粒子の散乱・加速において重要な役割を担っていると考えられている。本研究では、十分発達したフォアショックを再現するために、衝撃波法線1次元方向に十分な計算領域($L=500\rho_i$)を確保した計算を行った。ここに、 ρ_i は入射イオンの磁場旋回半径である。衝撃波法線方向および入射イオンの流れ x 方向とし、背景磁場は x - z 面内に取り、 x 軸からの角度(衝撃波角, Θ_{BN})を20度とする。衝撃波のマッハ数=6.6、電子ベータ値(=電子の熱的圧力と磁気圧の比)=0.5、イオン/電子温度比=1、イオン/電子質量比=64、電子プラズマ/サイクロトロン周波数比=12.5として大規模計算(空間グリッド数= 5×10^5 、総超粒子数 $>3 \times 10^8$)を行った。

研究結果・考察

図1(a)に $T=162.5$ におけるイオンの空間密度分布(イメージ)を示す。ここに、時間はイオンサイクロトロン振動数の逆数 Ω_i^{-1} で規格化している。また、縦軸は上流静止系で評価したイオンのエネルギーを入射イオンのバルクエネルギーで規格化した値(ϵ_i)であり、横軸は全計算領域 $0 < x < 500\rho_i$ を示す。高密度かつ低エネルギー($\epsilon_i < 0.3$)な領域は入射イオンの熱的成分を示し、低密度かつ高エネルギー($\epsilon_i > 0.3$)の領域は衝撃波面で反射し上流へ背走するイオンビームを示す。図1(b)に同時刻に $325\rho_i < x < 475\rho_i$ の領域に励起された磁場揺動を示す。実線および破線はそれぞれ y および z 成分の磁場揺動である。また、灰色の背景は磁場揺動の包絡線を示す。衝撃波上流遠方($340\rho_i < x < 360\rho_i$ 辺り)では、振幅がほぼ一定で非圧縮な単色波動が励起されている。これはイオンビームをエネルギー源としたイオンサイクロトロン共鳴不安定性によって励起された低周波のアルフヴェン波動である[1]。衝撃波面へ近づくにつれ、磁場揺動の増幅と同時にその包絡線も振動しており、圧縮性の大幅波動へと成長している。これは単色なアルフヴェン波動が入射プラズマに押し流される過

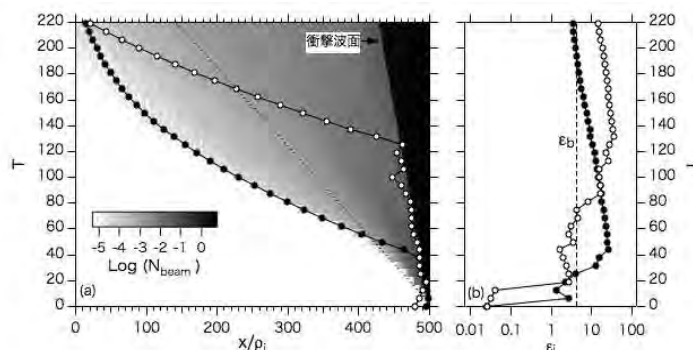
図1. (a)イオンの密度分布と(b)揺動磁場



程で、崩壊不安定性などを経て広帯域化・非線形化したと考えられる。

次に、イオンビームの生成過程を考察する。イオンビームが衝撃波静止系において鏡面反射により生成されたと考えると、運動エネルギーは $\varepsilon_b = 4 + \tan^2 \Theta_{BN} = 4.13$ (図 1(a) の点線) である。しかし、イオンはそれより高エネルギーの領域 ($\varepsilon_i < 40$) まで広がっており、単純な鏡面反射では説明できない。そこで、上流遠方に到達した高エネルギーイオンビームの軌道を逆追跡し、その生成の

図 2. (a)イオンビームの軌道と(b)そのエネルギー発展



起源を探ったのが図 2 である。図 2(a) はふたつのイオンビームの $x-t$ 空間における軌道であり、背景はビーム密度を示す。ここで、ビーム密度はイオンエネルギーが $\varepsilon_i > 0.3$ を満たす粒子の積分より得た。また、破線は単純な鏡面反射により到達できる境界を示す。ビーム密度分布は $T > 60$ でこの境界を超えて広く分布しており、鏡面反射以外のイオン加速メカニズムを示唆する。図 2(b) は(a)の粒子軌道に対応するエネルギー ε_i の時間発展である。初期に衝撃波面での鏡面反射によって ε_b までエネルギーを獲得後も衝撃波面に停滞している間にそれ以上のエネルギーを獲得している。その後、徐々にエネルギーを失いながら上流遠方へイオンビームとして伝搬する。よって、入射イオンの一部が鏡面反射以外のメカニズムによって衝撃波近傍で効率よく加速され、衝撃波上流遠方に高エネルギーイオンビームが生成されたと結論づけた。

まとめ

無衝突衝撃波上流に十分大きな領域を確保した1次元フル粒子計算を行い、上流遠方へ伝播する高エネルギーイオンビームの存在を明らかにした。また、イオンビームによる上流波動の励起から非線形発展に至る過程を再現した。衝撃波近傍でのイオンビーム加速メカニズムとして、Sugiyama and Terasawa (1999) [2]が提案した大振幅波動との非共鳴型散乱による衝撃波加速の可能性がある。

引用文献

- [1] Gary, Gosling, and Forslund, *J. Geophys. Res.*, 86, 6691, 1981
 [2] Sugiyama and Terasawa, *Adv. Space Res.*, 24, 73, 1999

成果発表

1. F. Otsuka, S. Matsukiyo, T. Hada, PIC simulation of quasi-parallel terrestrial bow shock, 12th International conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics (HEDLA), 倉敷, 2018年5月31日 (ポスター発表)
2. 大塚史子、地球フォアショックの1次元PICシミュレーション、第378回生存圏シンポジウム「実験室宇宙・天体プラズマ物理学に関する研究集会」、京都、2018年8月20日 (口頭発表)
3. F. Otsuka, S. Matsukiyo, T. Hada, PIC simulation of a quasi-parallel collisionless shock: Interaction between upstream waves and field-aligned ion beams, International symposium “Recent progress in heliospheric physics by direct measurements of unexplored space plasmas”, 名古屋, 2019年2月26日 (口頭発表)

無衝突磁気リコネクションにおける異常抵抗発生機構の解明
Generation mechanism of the anomalous resistivity in
collisionless reconnection

藤本桂三、北京航空航天大学 宇宙・環境学院

【研究目的】

磁気リコネクションは、太陽フレアや磁気圏サブストームにおいて効率的なエネルギー開放を実現するプロセスとして着目されている。磁気リコネクション過程は磁気中性線（X線）近傍に発生する電気抵抗を介して、磁力線が繋ぎ変わる（散逸する）ことによって初めて実現可能となる。しかしながら、粒子間の衝突周波数が極めて低い宇宙プラズマにおいて、効率的なエネルギー開放を可能にする電気抵抗生成機構は未だに十分には解明されていない。電気抵抗発生機構の1つとして、プラズマ波動による運動量輸送（異常輸送）が挙げられる。最近の、地球磁気圏における衛星観測や実験室プラズマにおける直接観測から、磁気X線近傍で強い電磁波動が検出されている。また、大規模3次元粒子シミュレーションでも、観測結果と矛盾しない波動モードが発生することが確認されている。我々は、線形波動解析から、このモードが電流層におけるフローシアアによって励起される新しい不安定性（電流層シアア不安定性）であることを突き止めた。本研究では、粒子シミュレーションと線形波動解析により電流層シアア不安定性の線形および非線形特性を調べ、波動による電気抵抗発生機構を明らかにすることを目的とする。

【研究方法】

本年度は、数値シミュレーションの実施に先立って予備的な研究として、数値的線形波動解析に焦点を絞って研究を進めた。電流層シアア不安定性は2流体方程式系を線形化することによって得られる。背景の電流層プロファイルは、準定常磁気リコネクション過程に特有な電流層構造（密度勾配無し）を模擬して、以下のように与える。

$$\begin{aligned}n_{i0}(z) &= n_{e0}(z) = n_0 = \text{const}, \\B_{x0}(z) &= -B_{0i} \tanh(z/\delta_i) - B_{0e} \tanh(z/\delta_e), \\V_{sy0}(z) &= -V_{s0} / \cosh^2(z/\delta_s), \\T_{s0}(z) &= - \int^z q_s V_{sy0}(\xi) B_{x0}(\xi) d\xi,\end{aligned}$$

微小擾乱は $\delta A(y, z, t) = \delta A(z, t) \exp(ik_y y)$ のように与え、2流体方程式系を線形化する。線形化方程式系は時間発展方程式となるため、yz平面内でrandom noiseを初期条件として数値的に解くことにより、最大成長率をもつ波動モードの特性を調べることができる。数値手法としてはLax-Wendroff法を用いた。

【研究結果・考察】

これまでの研究では、シミュレーション結果と比較するため質量比が100 ($m_i/m_e=100$)

の場合のみについて解析を行っていた。それに対し、本研究では、さまざまな質量比についての解析も実施し、電流層シア不安定性の質量比依存性を調べた。その結果、線形成長率は、質量比の増加とともに大きくなることが明らかになった。これは、質量比が大きくなるにつれて、電子電流層の厚さが相対的に（イオン慣性長に比べて）より小さくなり、電子フローシアが大きくなるためである。このことから、シミュレーションでは非現実的なパラメータ ($m_i/m_e=100$) を用いていたが、現実的なパラメータの下でも電流層シア不安定性は十分励起し得ることがわかった。これは、磁気リコネクションの観測結果とも整合的である。

【成果発表】

1. 投稿論文

- Fujimoto, K., Multi-scale kinetic simulation of magnetic reconnection with dynamically adaptive meshes, *Front. Phys.*, 6, 119, doi:10.3389/fphy.2018.00119, 2018.

2. 口頭発表

- K. Fujimoto, Whistler wave emission and electron acceleration associated with plasmoid collision, 15th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society (AOGS-2018), Honolulu, USA, June 5, 2018
- K. Fujimoto & R. Sydora, Electromagnetic turbulence in the reconnection current layer, 13th Annual International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows (ASTRONUM2018), Panama City Beach, USA, June 25, 2018 (Invited)
- K. Fujimoto & R. Sydora, Turbulent current layer in collisionless reconnection with anti-parallel configuration, 2018 US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection in Space, Solar, Astrophysical, and Laboratory Plasmas (MR2018), Princeton, USA, September 7, 2018

太陽風・太陽放射条件が火星周辺宇宙環境および
大気散逸機構に与える影響の研究

Effects of solar wind and radiation conditions on Martian space
environment and atmospheric escape processes from Mars

関 華奈子、東京大学・大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

約40億年前の火星は海を持ち温暖湿潤な気候であったと推定される一方で、現在の火星は寒冷で乾燥した気候を持つ。このような劇的な気候変動を引き起こすには、少なくとも1気圧分程度のCO₂大気が表層環境から取り除かれる必要があると考えられており、宇宙空間への大気散逸が重要な役割を果たしたと期待されているが、そのメカニズムはわかっていない。すなわち、CO₂大気を宇宙空間に逃がすことができる物理機構の解明は、火星気候変動研究の重要課題の一つである。

火星の地質学的な探査結果から、この大規模な気候変動が起こった時期は、火星が固有磁場を失った後の約35-40億年前の間の時期であったと推定されている。太陽型星の観測から、この時期の太陽風や太陽放射は、現在のものとは大きく異なり、太陽風流束は現在の約100倍、超高層大気の状態と大気流出に重要な役割を果たすEUV放射は現在の6~10倍であったと推定されている。

現在の火星は、地球のようなグローバルな固有磁場を持たず、太陽風と火星大気が直接相互作用している。近年の火星探査機による観測結果から、火星においては、低高度まで太陽風や太陽宇宙線が侵入し、大気散逸や地球とは異なるタイプのオーロラを引き起こしていることが観測されている。こうした火星周辺の宇宙環境や大気散逸機構は、約35-40億年前の太陽風や太陽放射条件下ではどのように変化するのだろうか？本研究の目的は、多成分MHD近似による太陽風-火星相互作用系のグローバルシミュレーションに基づき、太陽風条件や太陽放射条件に伴い、火星からの大気散逸機構や火星周辺宇宙環境がどのように変化するかを明らかにすることにある。

計画初年度の平成30年度には、まず、Terada et al. [AstroBio, 2009]で45億年前の火星周辺宇宙環境の数値シミュレーションに適用された実績のある、多成分MHDグローバルシミュレーションコードを使用し、約45億年前の太陽放射および太陽風条件下で、火星が固有磁場を持った場合に、火星大気からのイオン流出率がどのように変化するかを調べた。与えた太陽条件は、上述の先行研究と同じ値を用いており、太陽風動圧は磁気圧に変換すると約4100nTに相当する極端な条件下である。先行研究は固有磁場がない場合のみの研究であったが、本研究では、惑星赤道表面での惑星固有磁場強度を、0, 100, 1000, 3000, 5000 nTの5つの場合について、シミュレーションを行った。その結果、双極子型の固有磁場の存在下では、太陽風動圧が固有磁場の磁気圧より強い条件下では分子イオンの流出を増加させること、固有磁場の磁気圧が太陽風動圧と同程度か強くなると、急激にイオン流出率が下がることなどの初期結果を得た。

磁気圏シース領域での電子運動論を含んだミラーモード不安定性の研究

Mirror mode instability with electron kinetic process
in magnetosheath region

齊藤慎司、名古屋大学・大学院理学研究科

【研究目的】

本研究は地球磁気圏シース領域内に存在するミラーモード磁場について、イオンスケールから電子スケールの物理までを含めた非線形発展、およびその散逸に伴うプラズマ加熱プロセスの理解を目的としている。ミラーモード不安定性は、比較的プラズマ β の高い領域で発生し、イオンの温度異方性（磁場に対して垂直方向温度が平行方向温度より高い）が起源となり背景磁場を変形させるような磁場変動を起こす。イオン慣性長より大きな構造を励起し、波数ベクトルは背景磁場に対して準垂直方向で、励起された磁場構造は周波数の実部がゼロとなるモードとして特徴付けられる。シース乱流磁場の摂動はイオン慣性長スケール以下まで存在していることが示唆されており、非線形磁場構造に伴うエネルギーカスケードによって小スケールへのエネルギー輸送が起きていることが考えられる。このようなエネルギー輸送およびその散逸・加熱プロセスを理解するために、本研究ではプラズマ粒子シミュレーションを用いて静止した無衝突衝撃波を再現し、シース領域にあたるその下流域で発生するプラズマ乱流発展を追跡する。イオンスケールから電子スケールまでの運動論を含めた計算を行うことで、非線形的に発達した磁場構造のもとで、イオン慣性長以下の物理を含めた波動エネルギー散逸過程について研究を行う。

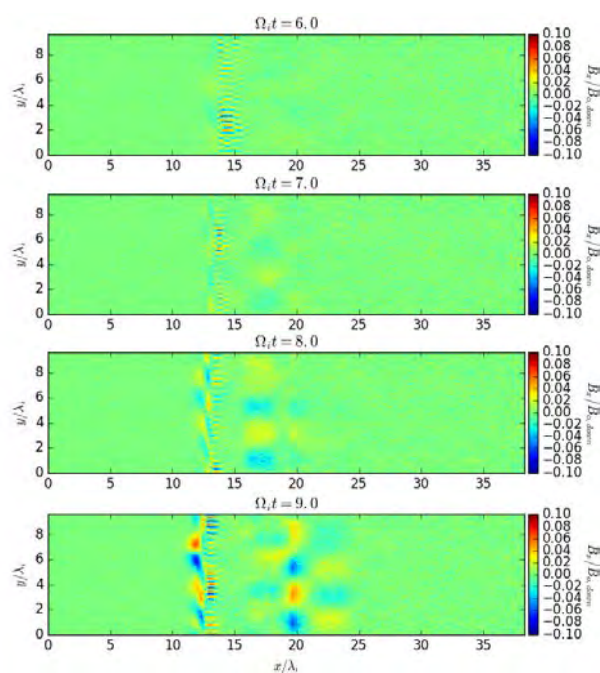
【計算方法】

ショック静止系プラズマ粒子シミュレーション (Umeda et al. 2008) を用いてマッハ数を約4、上流側プラズマ β を0.5とした垂直プラズマ衝撃波を再現する。ここでイオンと電子の間の質量比は100、上流の電子・イオン温度比を1、下流の温度比を5とし、下流のプラズマパラメータを等方的な2流体プラズマを仮定し定義している。計算領域はx方向にイオン慣性長の38.3倍、y方向に9.6倍を与え、2次元平面を仮定している。y方向（背景磁場方向）は周期境界条件としている。衝撃波の位置は計算領域の中心から上流側へ配置することで ($x=12.8$)、下流側のダイナミクスを出来るだけ広範囲に再現出来るように配慮している。

【計算結果および考察】

図は、背景磁場 (y 方向) に対して垂直方向の磁場成分 (x 方向) の 2 次元空間プロットである。上から時間発展を示しており、上流のイオンサイクロトロン角周波数で規格化している。t=6 において、ショックの遷移層付近において y 方向の波数を持った電子空間スケール程度の波動が励起されている。これはショック遷移域で断熱的に加熱された電子が温

度異方性を形成したために生じる whistler 波動の励起に相当すると考えられる。この後、衝撃波の reformation が生じることによって衝撃波面が移動し（磁場 y 成分の時間発展により確認されている）、これに伴い $t=8$ 以降、上流側でリップルと思われる構造が形成される。一方下流側では、リップルの発生に対応するような y 方向にモード 2 の比較的整った構造が現れているのが確認出来る。イオン慣性長の数倍程度の波長を持っているため、上流側から下流域へ進入したイオンがその励起に関与していると推測している。磁



場 z 成分も同様のモード 2 の構造が現れているのを確認したが、 $t=8$ 、 $x=20$ 付近において位相がほぼ揃っており、この付近においては円偏波の特徴を満たしていない。このため現段階ではイオンの断熱加熱に伴うようなイオンサイクロトロン波動では無いと考えている。しかしながら正負の方向に伝搬しているケースを考えると磁場のスナップショットのみから推測は難しいため、実際はより詳細な波動の解析が求められる。

今後さらに下流側でのプラズマの発展を追跡し、励起されている波動がイオンスケールの非線形的な構造を形成していくのかどうかについて研究を進める。特に下流域でのイオンの位相空間密度の解析と併せて、波動の励起原因およびそのモード特性について明らかにする。またこの中で電子スケールの物理がどのように関わってくるのかについて解析を進め、無衝突衝撃波中における電子・イオン間でのクロススケールカップリングの役割について注目した研究を進める。

【成果発表】

Saito, S., Y. Nariyuki, and T. Umeda (2018) Magnetosonic/whistler mode turbulence influenced on ion dynamics, *Phys. Plasmas* 25, 122301 (2018);
<https://doi.org/10.1063/1.5053760>

【参考文献】

T. Umeda, M. Yamao, and R. Yamazaki (2008) Two-dimensional full particle simulation of a perpendicular collisionless shock with a shock-rest-frame model, *Astrophys. J. Lett.*, Vol. 681, L85.

非対称反平行磁気リコネクションの磁気流体計算
MHD simulation of asymmetric magnetic reconnection

近藤光志、愛媛大学宇宙進化研究センター

研究目的

地球磁気圏前面における太陽風磁場と地球磁気圏磁場の磁気リコネクション領域では、電流層を挟んで非対称なプラズマ境界が形成され、非対称磁気リコネクションが起こる。先行研究において非対称磁気リコネクションにおいては、対称磁気リコネクションのペチェック型とは大きく異なるリコネクション構造が形成されることを磁気流体シミュレーションにより示した[1][2]。特に、これまで指摘されてきたリコネクションファン内のプラズマ速度の最大値が非対称度の増加に伴い減少することも確かめられた。本研究では、リコネクションファン内のみでなく、リコネクション構造全体でのプラズマ流構造を明らかにし、その非対称度依存性を示すため、非対称反平行磁場環境における自発的高速磁気リコネクションの数値計算を行った。

研究方法

本研究のシミュレーションでは、境界条件に依存しない自発的な磁気リコネクションを実現するために、大規模な二次元空間を計算している。1次元の等温ハリス平衡解を設定し、電流シートを挟んで正負 x 方向に磁場を与える。本研究では、地球磁気圏前面の非対称な磁場環境における磁気リコネクションを調べるため、 $y < 0$ の領域の磁場強度を1とし、 $y > 0$ の領域の磁場強度を $1/k$ とし、パラメータ k を非対称度と呼ぶこととする。なお、電流シートに垂直な方向を y 方向とする。原点付近に初期擾乱を与え、磁気リコネクションを発展させる。抵抗領域は固定せず、電子イオンドリフト速度に依存した異常抵抗モデルを用いて自発的な高速磁気リコネクションを計算している。

研究結果とまとめ

図1は、数値計算で得られた非対称度 $k=2$ の場合のプラズマ流の x 成分(V_x)のカラー等高図と磁場(実線)の時間変化を示している。時間とともに、電流シートを挟んで非対称なプラズモイドが成長し、プラズモイド後方のリコネクションファン内で流速が上がっていることがわかる。一方、図中下側プラズモイドにおいても流速が上がっていることがわかる。この下側プラズモイドにおける流束の上昇は、単純にリコネクションファン内のプラズマがプラズモイド内に侵入しているわけではないことは、これら2つの領域の間で減速領域が存在していることから明らかである。

この減速領域を調べた結果、この領域で x 負方向のローレンツ力が働いていることが明らかになった。このローレンツ力は、上側のプラズマが下側プラズモイドへ侵入することによる磁力線の押し曲げに起因するものである。下側プラズモイドでは、正のローレンツ力により加

速されたプラズマにより流速が上昇することが分かった。この下側プラズモイドの流速の最大値は、リコネクションファン内の流束の最大値を時間とともに上回るようになり、非常に大規模な高速領域を形成することになる。

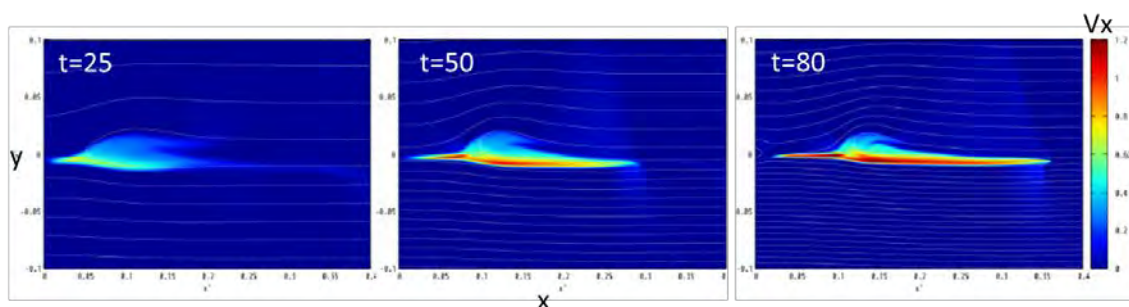


図1、プラズマ流速のx成分（カラー等高図）と磁力線の時間発展

引用文献（成果論文を含む）

1. Nitta, S., and Kondoh, K., "Properties of extremely asymmetric magnetic reconnection", The Astrophysical Journal, 872:147 (17pp), 2019
2. Nitta, S., Wada, T., Fuchida, T., and Kondoh, K., "Critical differences of asymmetric magnetic reconnection from standard models", The Astrophysical Journal, 828:63 (16pp), 2016

成果発表

1. 近藤光志, 「非対称磁気リコネクションにおけるプラズマ加速」, 地球電磁気・地球惑星圏学会2018年秋学会, 名古屋大学 (2018年11月)
2. 清水徹, 近藤光志, 「FKRとLoureiroのテアリング不安定性線形理論の再検証」, 地球電磁気・地球惑星圏学会2018年秋学会, 名古屋大学 (2018年11月)
3. 新田伸也・近藤光志, 「ガイド磁場印加リコネクションの自己相似的時間発展の特徴」, 日本天文学会2018年秋季年会, 兵庫県立大学 (2018年9月)
4. 近藤光志, 「非対称磁気リコネクションの磁気流体計算と昼側磁気圏観測」, STEシミュレーション研究会 - プラズマ・大気複合システムのシミュレーション研究 -, 成蹊大学 (2018年9月)
5. 清水徹, 近藤光志, 「一様抵抗テアリング不安定の線形理論」, STEシミュレーション研究会 - プラズマ・大気複合システムのシミュレーション研究 -, 成蹊大学 (2018年9月)

固有磁場強度の変遷が惑星大気流出機構へ与える影響に関する研究
Effects of the transition of intrinsic magnetic field
on the atmospheric escape from planets

堺正太朗、東京大学大学院理学系研究科

研究目的

惑星の固有磁場は大気流出を考える上で非常に重要な物理量である。特に、固有磁場強度は太陽風と惑星間の相互作用に影響を与え (e.g., Seki et al., 2001), 流出機構自体を変えてしまう可能性がある。一方で、火星は約 40 億年前には温暖で湿潤な機構であったが、その後大気や水が失われ、現在では薄い大気を残すのみとなった。つまり、火星は過去から現在にかけて大規模な大気流出を経験したということである。大気流出の主要機構の一つに、周辺磁場の影響に関連した高層大気からのイオン流出が挙げられる。太古の火星には、現在の火星地殻に残留磁化が存在していることから、全球的な固有磁場が存在していた可能性が考えられている。その固有磁場が大気流出機構へ与える影響を調査することは、火星が過去から現在にかけて起こった気候変動の理解へとつながるのである。

本研究では、まずは火星赤道表面で 100 nT という弱い固有磁場を仮定した時と固有磁場を持たない場合で大気流出機構がどのように変化するかを調査する。

研究方法

本研究では 3 次元多成分一流体電磁流体力学 (MHD) シミュレーションを行う。用いたコードは、もともとは非磁化惑星のモデリング用に構築され (Tanaka, 1993), その後、地球磁気圏や惑星電離圏モデリング用に改良された (e.g., Terada et al., 2009a; 2009b)。本モデルは電離圏から磁気圏までを包括的に解くことが可能で、14 イオン種の連続の式を解いている。本研究では 10 種の中性大気モデル (CO_2 , O_2 , NO , CO , N_2 , O , N , C , He , H) を入力として与えることで、火星高層大気中で主要なイオン (CO_2^+ , O_2^+ , NO^+ , CO^+ , N_2^+ , O^+ , N^+ , C^+ , He^+ , H^+) の物理量を計算する。入力で用いられる中性大気モデルは Terada et al. (2009a) で用いられたものを用いる。イオン - 中性大気の反応率、解離再結合率、光電離率、電子衝突による電離率、イオン - 中性大気・電子 - 中性大気の衝突周波数、電子衝突によるエネルギー消失率、熱伝導率は Terada et al. (2009a and references therein) のものを使用した。また太陽風はパーカースパイラル型のものを用いて計算を行う。計算は CX400 で行った。

研究結果・考察

まず固有磁場を持たない場合は、中心付近にピークを持つ一つの流出経路からイオンが流出する一方で、弱い磁場を仮定した時、大きく 2 つの流出経路があることが明らかとなった (図 1)。一つは高緯度での流出で、カスプのような開いた磁力線が流出に寄与している。もう一つの流出経路は磁気中性面に沿った経路で、磁気圏の脇からの流出である。こちらの流出経路は、磁気圏の脇で固有磁場と太陽風磁場が磁気再結合し、惑星起源プラズマを多く含む磁力線が開くことで流出を促すことが明らかとなった。

流出率は固有磁場がない時, $\sim 3.3 \times 10^{24} \text{ s}^{-1}$ だったのが, 弱い固有磁場を仮定すると, $\sim 4.1 \times 10^{24} \text{ s}^{-1}$ と 25% 程増加した. また, O_2^+ や CO_2^+ の流出率が増加したことから, 固有磁場の存在は, 電離圏下部にある重イオンの流出を促進することを明らかにした.

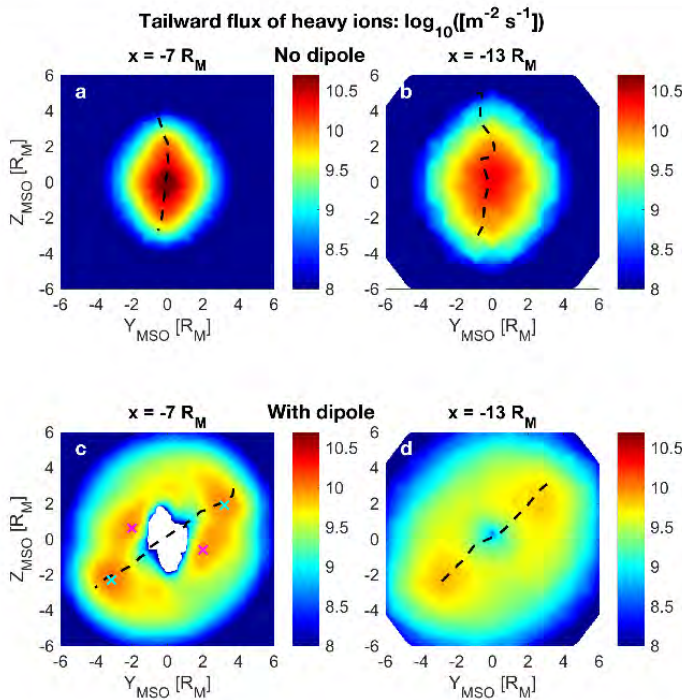


図 1: O_2^+ , O^+ , CO_2^+ の合計流出率フラックス. 上側: 固有磁場がない場合, 下側: 固有磁場を仮定した時.

引用文献

1. K. Seki, R. C. Elphic, M. Hirahara, T. Terasawa, and T. Mukai (2001), On atmospheric loss of oxygen ions from Earth through magnetospheric processes, *Science*, 291(5510), 1939-1941.
2. T. Tanaka (1993), Configurations of the solar wind flow and magnetic field around the planets with no magnetic field: Calculation by a new MHD simulation scheme, *J. Geophys. Res.*, 98(A10), 17,251-17,262.
3. N. Terada, H. Shinagawa, T. Tanaka, K. Murawski, and K. Terada (2009a), A three-dimensional, multispecies, comprehensive MHD model of the solar wind interaction with the planet Venus, *J. Geophys. Res.*, 114, A09208.
4. N. Terada, Y. N. Kulikov, H. Lammer, H. I. M. Lichtenegger, T. Tanaka, H. Shinagawa, and T. Zhang (2009b), Atmosphere and water loss from early Mars under extreme solar wind and extreme ultraviolet conditions, *Astrobiology*, 9(1), 55-70.

成果発表

1. (招待講演) 堺正太郎, 関華奈子, 寺田直樹, 品川裕之, 田中高史, 海老原祐輔, 弱い固有磁場環境下における火星大気流出機構に関するシミュレーション研究, 第 393 回生存圏シンポジウム 生存圏ミッションシンポジウム, 京都大学, 京都府宇治市, 2019 年 2 月 25 日.
2. (Invited) S. Sakai, K. Seki, N. Terada, H. Shinagawa, T. Tanaka, and Y. Ebihara, Effects of an intrinsic magnetic field on atmospheric escape from Mars, Symposium on Planetary Sciences, Tohoku University, Sendai, Japan, 19 February 2019.
3. 堺正太郎, 関華奈子, 寺田直樹, 品川裕之, 田中高史, 海老原祐輔, Effects of an intrinsic magnetic field on the ion escape from Mars, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, PCG23-08, 幕張メッセ, 千葉県千葉市, 2018 年 5 月 20 日.

赤道プラズマバブルの生成機構解明と発生予測に向けた研究

Understanding and forecasting of equatorial plasma bubble

横山 竜宏 京都大学 生存圏研究所

研究目的

電離圏のプラズマは、その運動が中性大気との衝突によって強く支配されているため、中性大気と電離大気の相互作用を解明することは電離圏の物理過程を理解する上で非常に重要である。局所的なプラズマ密度の不規則構造を伴う電離圏擾乱が発生した場合には、電波の振幅、位相の急激な変動(シンチレーション)が生じるため、GPS等による電子航法に障害を及ぼすことが知られている。このような電離圏擾乱の発生機構を解明し、発生を事前に予測することが、科学・実用の両面から求められている。本研究では、特に深刻な障害の原因となる赤道スプレッドF(プラズマバブル)の生成機構解明と発生予測を目指し、低緯度電離圏数値モデルを用いたプラズマバブル生成に関する研究を実施する。

昨年度までに、プラズマバブルを非常に高い空間分解能で再現できるモデルを完成させ、プラズマバブル内部の複雑な非線形過程、プラズマバブルの東西非対称性の形成メカニズム等を明らかにした。本年度は、電波伝搬への定量的評価を実施することを目的として、計算されたプラズマバブル内部の微細構造のスペクトル解析を行った。その結果、ある波数を境として、パワースペクトルの指数が変化することが明らかとなった。この特徴は、過去のロケット、衛星観測と類似しており、実際のプラズマバブル内部の微細構造が、シミュレーションにおいても再現されたと考えられる。

研究手法

本研究は計算機利用共同研究として、情報連携基盤センターのスーパーコンピュータを利用した。正イオンとしてNO⁺(E領域)とO⁺(F領域)の2種類を与える。各イオンと電子の連続の式、運動方程式、電流保存の式は以下で与えられる。

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + \nabla \cdot (N_i \mathbf{V}_i) = S_i \quad (1)$$

$$q_j(\mathbf{E} + \mathbf{V}_j \times \mathbf{B}) + M_j \mathbf{g} - \frac{\nabla(N_j k_B T)}{N_j} + M_j \nu_{jn}(\mathbf{U} - \mathbf{V}_j) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \left[e \left(\sum_i N_i \mathbf{V}_i - N_e \mathbf{V}_e \right) \right] = 0 \quad (3)$$

磁気赤道を中心とするダイポール座標系を用い、磁気赤道上で高度88-1270km、緯度方向に±20度、経度方向に3.4度の領域を確保した。磁力線直交方向のグリッド間隔を200mまで向上させることで、400m程度までの波長のパワースペクトルを求めることが可能となる。

結果と今後の課題

図1に、枝分かれ(bifurcation)するプラズマバブルの様子と、成長したプラズマバブル内部のスペクトル構造を示す。枝分かれしたプラズマバブルは、徐々に複雑な構造を持ち始め、成熟したバブルの内部は乱流のカスケード構造に類似したスペクトルを持ち始める。プラズマバブルの高度によってスペクトルの構造が異なっており、これらの特徴は、C/NOFS、ROCSAT-1等の低軌道衛星観測や、過去の観測ロケットから得られた特徴とよく一致している。従って、実際のプラズマバブル内部の複雑な構造が再現されたと考えられる。

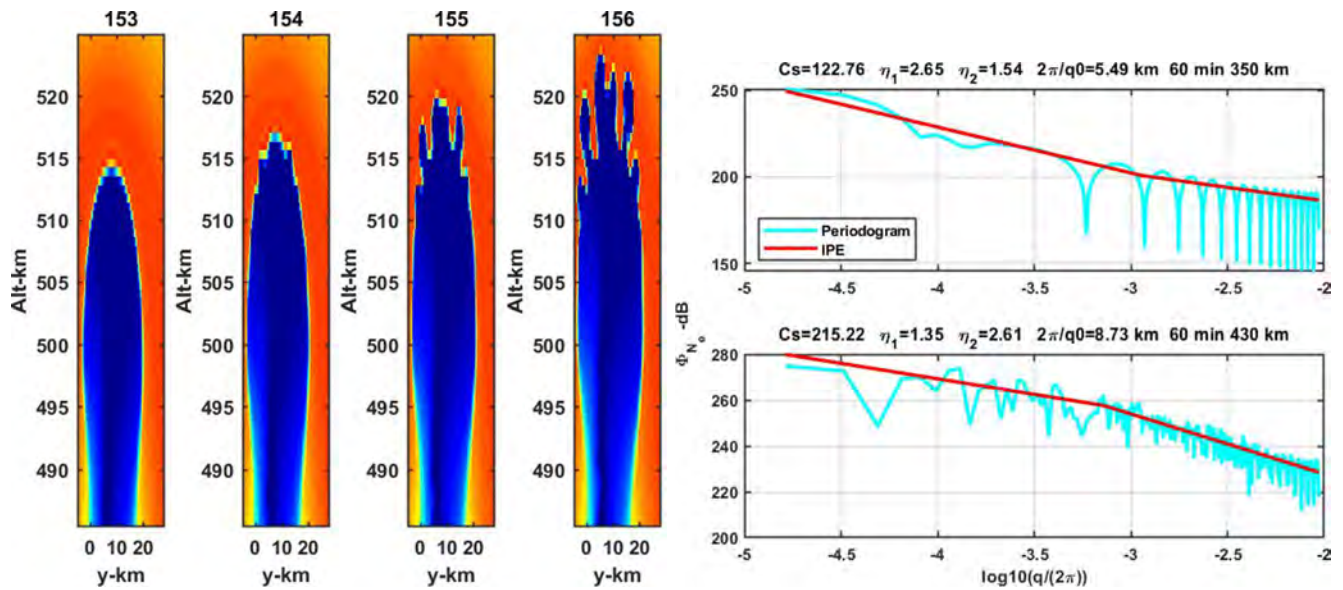


図 1: 枝分かれするプラズマバブルの様子と、プラズマバブル内部のスペクトル構造 (Rino et al., 2018).

今後は、全球大気圏電離圏モデルから得られる背景の条件を本研究で開発した領域モデルに組み入れ、プラズマバブルの生成について検討を進める。また、衛星電波への影響を、より定量的に評価する予定である。

成果発表

Rino, C., T. Yokoyama, and C. Carrano, Dynamic Spectral characteristics of high-resolution simulated equatorial plasma bubbles, *Prog. Earth Planet. Sci.*, **5**, 83, doi:10.1186/s40645-018-0243-0, 2018 (13 pages).

Rino, C., C. Carrano, K. Groves, and T. Yokoyama, A configuration space model for intermediate-scale ionospheric structure, *Radio Sci.*, **53**, 1472-1480, doi:10.1029/2018RS006678, 2018.

Yokoyama, T., Recent results of high resolution plasma bubble modeling, 15th International Symposium on Equatorial Aeronomy [Ahmedabad, India: October 2018] (Invited, Oral).

Yokoyama, T., H. Jin, and H. Shinagawa, Neutral wind effects on equatorial plasma bubbles simulated by High Resolution Bubble model, Asia Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting [Honolulu, USA: June 2018] (Invited, Oral).

Yokoyama, T., C. L. Rino, and C. S. Carrano, Spectral characteristics of equatorial plasma bubbles simulated by High Resolution Bubble model, Asia Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting [Honolulu, USA: June 2018] (Invited, Oral).

Yokoyama, T., High Resolution Plasma Bubble Modeling, The 3rd PSTEP International Symposium [Koganei: May 2018] (Poster).

横山 竜宏, Charles Rino, Charles Carrano, プラズマバブル内部のスペクトル解析, PSTEP 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 第 3 回 [小金井: 2019 年 1 月] (Poster).

横山 竜宏, 陣 英克, 品川 裕之, 熱圏鉛直風によるプラズマバブルシーディング, 第 144 回 地球電磁気・地球惑星圏学会講演会 [名古屋: 2018 年 11 月] (Oral).

横山 竜宏, 熱圏鉛直風によるプラズマバブルシーディング, 第 12 回 MU レーダー・赤道大気レーザーシンポジウム, pp. 89-90 [宇治: 2018 年 9 月] (Oral).

横山 竜宏, 熱圏鉛直風によるプラズマバブルシーディング, 平成 30 年度 名古屋大学太陽地球圏環境研究所 研究集会 STE シミュレーション研究会 [武蔵野: 2018 年 9 月] (Oral).

横山 竜宏, 陣 英克, 品川 裕之, H. Liu, Neutral wind effects on equatorial plasma bubbles simulated by High Resolution Bubble model, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会 [千葉: 2018 年 5 月] (Oral).

雲解像モデルシミュレーションによる豪雨の予測と検証
Predictions of heavy rainfall events using cloud resolving atmospheric models and their evaluations

研究課題代表者：茨城大学理学部 若月泰孝
共同研究者 名古屋大学・宇宙地球環境研究所 坪木和久

雲解像大気モデルは、地域スケールの気候再現や気候変化予測において重要な役割を果たしている。高解像度にして雲解像モデルを長期間にわたって計算すれば、積乱雲や積乱雲群を再現可能となるため、豪雨頻度の気候変化予測計算などを実施することができる。関連した多くの研究テーマを挙げることができるが、今年度の本研究では、主に昨年度計算した関東域の夏季を対象とした高解像領域大気モデル実験の解析を進めた。関東域では夏季に積乱雲が頻発する。この中でも注目を集めているのは、豪雨と都市の関係である。都市効果を考慮することによる局地大気循環や雲降水の変化に着目する。なお、この研究は、文部科学省の受託研究「気候変動適応技術社会実装プログラム」と協力して実施したものである。

研究では、気象庁が開発した非静力学雲解像大気モデル（NHM）を用いて、関東域を覆う1km解像度の数値実験を実施した。約一カ月の計算を10年分実施した。この時、夏季の大気不安定環境下で多くの積乱雲が発生していた。ここで、都市効果に関する3種類の実験を実施した。一つは、(a)都市効果を単層都市キャノピーモデル（SPUC; Aoyagi and Seino, 2011）で表現したもの、(b)2つ目は都市を草地として都市を抜いたもの、(c)3つ目は都市を草地としているものの、都市相当の粗度のみを与えた実験である。(a)-(b)で都市効果を、(a)-(c)で都市の熱的效果を、(c)-(b)で都市域の力学的効果を評価することができる。

都市ありから都市なしを引いた降水量の差分を図1に示す。大きなシグナルではないものの、日中午後を中心に、都市域で降水量が増加していることが明瞭にわかる。降水量とも関係する中層雲量について、熱的效果と力学的効果を比較してみた。力学的効果では日中午後の前半に雲量が増加し、熱的效果では日中午後の後半に増加していた。これは、力学的効果である都市域の粗度の影響で昼前から吹く海風が遮断され、都市域の海岸線付近に上昇気流が発生していたためである。熱的效果では、都市域が暖められて下層の混合層が発達する午後の後半を中心に対流を生成する。このように、両方の効果が合わさって、都市域での降水量と雲量増加に寄与していたと推定された。

今後は、より詳細なメカニズムの解明に向けて解析を追加していく。

参考文献

Aoyagi, T. and N. Seino, 2011: A square prism urban canopy scheme for the NHM and its evaluation on summer conditions in the Tokyo metropolitan area, Japan. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 50: p. 1476-1496.

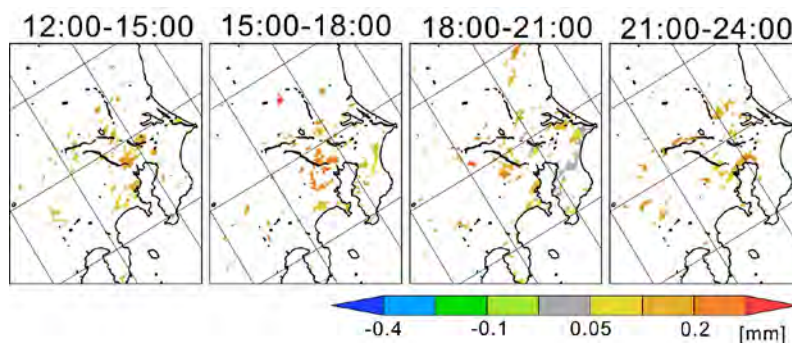


図1: 降水量について、都市あり実験から都市なし実験を引いた差分 (T検定により有意差があった領域のみ)

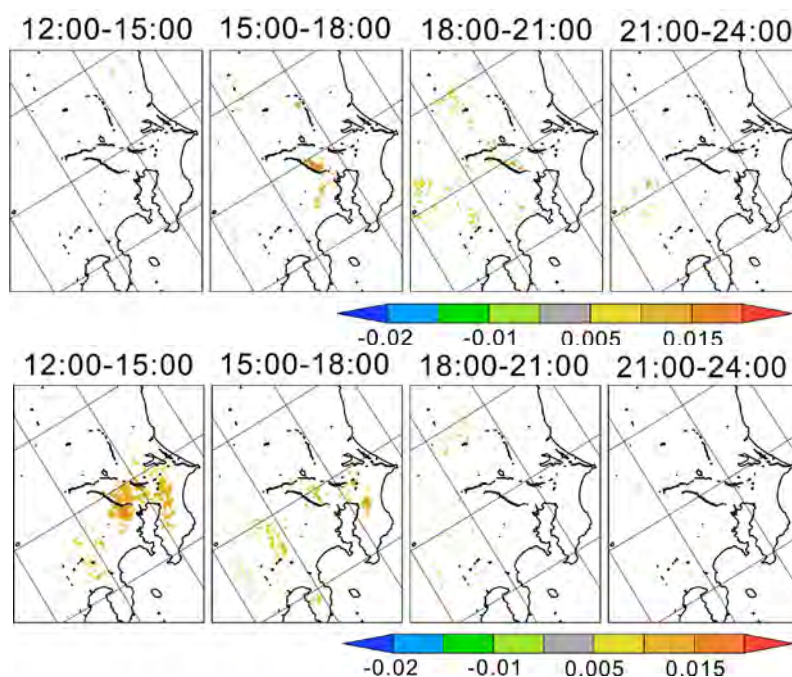


図2: 中層雲量の差分 (上図は熱的効果, 下図は力学的効果) (T検定により有意差があった領域のみ)

内部太陽圏磁気流体モデルを用いた南向き惑星間空間磁場予測手法の
開発

Prediction of Arrival of Southward Interplanetary Magnetic
Field based on MHD simulation of the inner Heliosphere

塩田大幸、情報通信研究機構・電磁波研究所・宇宙環境研究室

太陽から流出するプラズマである太陽風・コロナ質量放出(CME)は、地球に到来すると磁気圏環境に擾乱をもたらす。時には電磁波による通信や安定した電力供給網などの社会インフラに深刻な被害をもたらすことが知られている。太陽風・CMEの影響を予測し、警戒情報を発信する活動は、「宇宙天気予報」とよばれ、日本では情報通信研究機構が予報業務を担っている。一方で、太陽風・CMEの起源の理解にとって重要なコロナ加熱・太陽風加速・CME形成過程は、太陽地球系物理学における未解明の研究課題である。これらは共通して太陽の複雑な磁場構造によるものであるが、コロナ磁場の直接計測は非常に困難を伴う。よって現在、測定が可能な太陽表面(光球)の磁場観測結果に基づいて太陽コロナ・惑星間空間を再現する数値モデルを用いたモデリングが、太陽風・CMEの影響予測に最も有効な手段となっている。

我々はこれまで、YinYang格子を用いて太陽コロナ・惑星間空間を再現するMHDシミュレーションコードの開発を行ってきた。このコードを用いて、毎日の光球の磁場観測データから太陽風・放射線帯の宇宙天気予報を行う全自動宇宙天気予報システム(SUSANOO, Shiota et al., 2014)を開発し、運用を行なっている。

現在のSUSANOOの太陽風予測は、予測結果がよく合う時期もあれば全く合わない時期もある。予測が合わなくなる原因は、太陽風モデル自体の問題とCMEが発生・到来したことによる問題がある。よって本研究では、SUSANOO-CME (Shiota & Kataoka 2016)のCMEモデルを、情報通信研究機構の宇宙天気予報での利用に向けた準備研究と、太陽風モデル改良を行うことで宇宙天気予報の予測精度向上につなげることを目指している。

本年度は、情報通信研究機構において、リアルタイムの太陽フレア・CMEの観測データを入力として、SUSANOO-CMEを複数パターン実行する太陽嵐影響予測システム(図1)の開発を進めている。本研究では、当システムを利用したアンサンブル予測を行う時に、観測から決めることができない自由度のあるパラメータの適切な範囲の設定のために、2017年9月初旬にXクラスフレア4つを引き起こした活発な活動領域NOAA12673の一連の現象を対象として、再現シミュレーションを行った。図2にその結果を得られた地球の位置の太陽風の速度と磁場の南北成分の変動、DSCOVERの観測とともに示している。観測された特徴をよく再現することができた結果を中心にパラメータ範囲決める方針とし現在論文にまとめている。

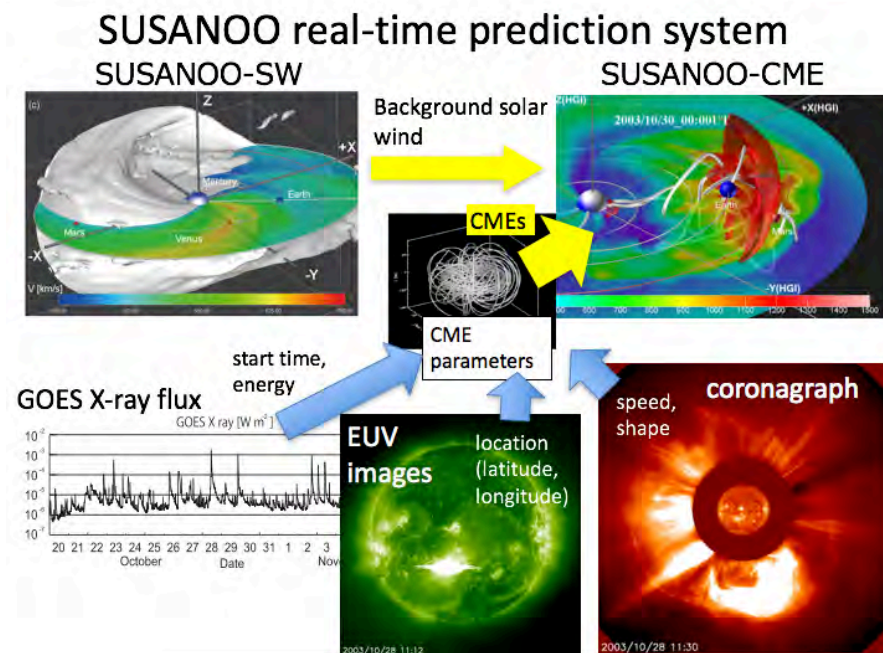


図1 太陽嵐影響予測システムの概要

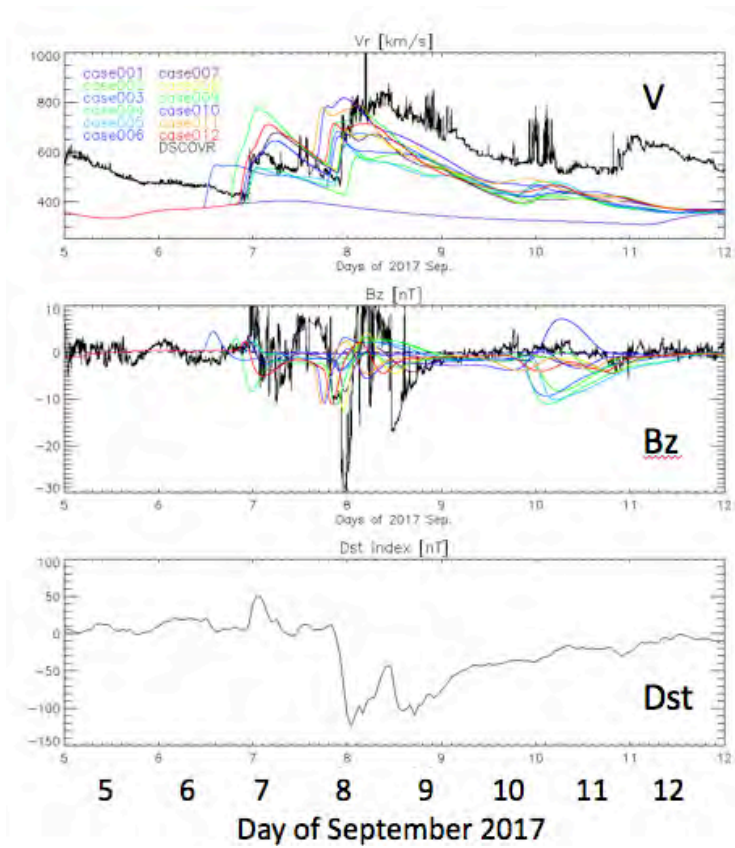


図2 2017年9月初旬の太陽風 in situ観測(黒線：上段：速度、中段：惑星間空間磁場南北成分)とシミュレーション結果。下段はDst indexの時間変化。

解適合格子・多層格子電磁流体力学計算による太陽フレア-CMEダイナミクスの研究

Study of Solar Flare-CME Dynamics using AMR-Nested MHD code

井上 諭 名古屋大学宇宙地球環境研究所

【研究目的】

太陽表面で観測される「太陽フレア」や、大量のコロナガスを惑星間空間に放出する「コロナ質量放出(CME)」は、地球近傍の宇宙空間である磁気圏や電離圏の電磁気環境を激しく乱すことから、宇宙天気予報の観点から重要視されている。また、太陽フレアからCMEに到るまでのダイナミクスは、強い非線形過程で支配されており、非線形電磁流体力学の基礎物理過程の観点からも、非常に興味深い現象である。本研究は、太陽フレアの発生機構からCMEの形成過程までのダイナミクスを明らかにすることが目的である。特に、フレア前に太陽表面に現れる微小な磁場変動から、CMEまでの大きく異なる空間スケールでの現象を、数値的に再現することを目的としている。

【研究方法】

本年は、広大な空間スケールでの現象を数値的に再現するために、多層格子法を実装した電磁流体力学(MHD)コードの開発を実施した。多層格子法を用いることで、必要な箇所(例えば、太陽フレアが発生する領域)に計算格子を十分に割り当てることが可能となり、また非等方格子に比べ、計算速度のコストも良いことが知られている。計算コードは、星形成問題を解くために、共同研究者である松本倫明教授に開発されたSFUMATO¹を太陽活動領域-コロナの問題に応用するために改良した。

本研究では、2014年3月に活動領域12017で発生した、X1フレアの再現を試みた。まず井上らにより開発された非線形フォースフリー磁場外挿コード²を用いて、フレア発生前の太陽表面の観測磁場から、上空の磁場をフォースフリー近似に基づいて数値的に再現した。次に、外挿された磁場と、新たに開発された多層格子を実装したMHDコードを用いて、太陽活動領域の局所領域に擾乱を与えることで、磁場の噴出実験を実施した。

【研究結果・考察】

図1(a)と(b)に、観測磁場から再現されたフレア前の3次元磁場構造を示す。図1(b)は図1(a)の四角で囲まれた領域の拡大図であり、ねじれた磁力線群である「磁気フラックスロープ」がよく再現されている。多層格子を用いることで、図1(b)のように、磁気フラックスロープに十分な格子を集めた。磁気フラックスロープはフレアを起こす磁気エネルギーを蓄積しており、初期の噴出時に磁気リコネクションを伴う激しい磁場変動を起こすことが予想され、このような格子配置を設定した。シミュレーションでは、観測に基づいて、磁気フラックスロープの下部に、フラックスロープよりもさらに小さいスケールの浮上磁

場を擾乱として与えた。その結果、図1(c)に示すように、浮上磁場と磁気フラックスロープが、磁気リコネクションを介して相互作用することで、さらに巨大な磁気フラックスロープが形成され、上空へと噴出していく様子が再現された。具体的には、フレア前には磁気フラックスロープが複数存在しており、浮上磁場を介したフラックスロープ間の磁気リコネクションにより、さらに強くねじれた巨大なフラックスロープへと成長する。噴出するフラックスロープの足元は、観測されたフレアリボンの足元によく一致した。

その一方で、擾乱として与えている浮上磁場の強さが、観測されている磁場の大きさに比べて大きいことや、フラックスロープの噴出の様子が観測と定性的にも一致しないなどの問題も残っており、今後は観測を説明するようなシミュレーションを展開していく必要がある。

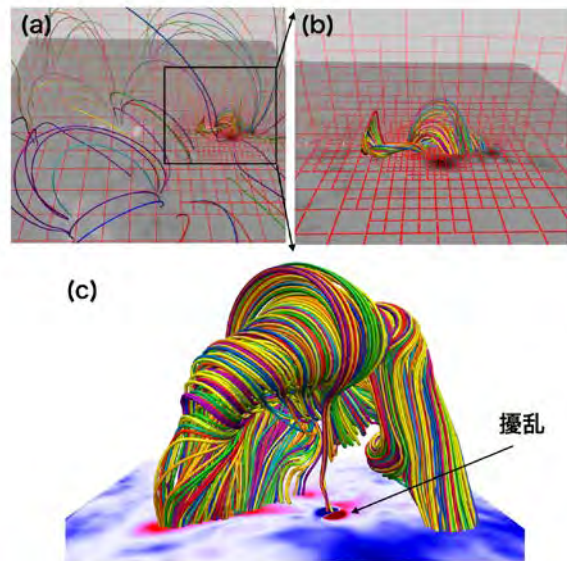


図1:a,X1フレアを発生させた、活動領域12017の太陽表面の観測磁場から、上空の磁場をフォースフリー近似に基づいて、3次元磁場を数値的に外挿した結果。線は磁力線を表しており、直線は計算格子を表している。b.aの四角で囲まれた領域の拡大図。ねじれた磁力線群である「磁気フラックスロープ」が再現されており、ここに計算格子を集中して集めた。c.擾乱として浮上磁場を磁気フラックスロープの下部に与えた際の、磁場のダイナミクス。巨大な磁気フラックスロープが上空へと噴出される様子が再現された。

【引用文献】

1. Matsumoto, T. "Self-Gravitational Magnetohydrodynamics with Adaptive Mesh Refinement for Protostellar Collapse" PASJ, 59, 905, 2007
2. Inoue, S., Magara, T., Pandey, V.S., "Nonlinear Force-Free Extrapolation of the Coronal Magnetic Field Based on the Magnetohydrodynamic Relaxation Method" The Astrophysical Journal 780, 101, 2014

【成果発表】

1. Satoshi Inoue, Daikou Shiota, Yumi Bamba, and Sung-Hong Park, "Magnetohydrodynamic Modeling of a Solar Eruption Associated with X9.3 Flare Observed in Active Region 12673" The Astrophysical Journal, 867, 1, 83 2018
2. S. Inoue, K. Kusano, T. Matsumoto, M. M. Woods, D. Shiota, Y. Bamba, & T. Miyoshi, "An Origin and Evolution of Solar Eruptive Flux Ropes" AGU Fall Meeting, Washington D. C., U.S., December 10-14
3. S. Inoue, K. Kusano, T. Matsumoto, J. Büchner, & J. Skala "Magnetohydrodynamic Modeling of a Solar Eruptive Flux Tube" Japan Geoscience Union (JPGU) 2018 Makuhari, Japan, 2018 May 20-24

目的

アジアダスト（黄砂）は、社会活動や自然環境に寄与する現象の一つであり、これまでに大規模なプロジェクトが行われ、物理、化学、生物など様々な側面から影響評価が行われている（例えば、Intergovernmental Panel on Climate Change や ADB-GEF [地球環境ファシリティ] 黄砂対策プロジェクトなど）。アジア大陸では、砂漠化、過放牧、過耕作や森林伐採などによって、アジアダストが生じ易い場となっている。このアジアダストに汚染物質付着やそれらによる変質・光化学汚染などが先行研究で観測されており、我々の環境場への影響を明確にすることが求められている。また、近年ではアジアダストにより、ウィルスなどの生物粒子であるバイオエアロゾル輸送の可能性が指摘されている。その一例として、2010年宮崎県での口蹄疫発生に黄砂が関与していることが真木ら（2011）により指摘している。この他に、Makiら（2010）は、黄砂バイオエアロゾルの長距離輸送について研究を行い、日本での観測事実を報告している。バイオエアロゾルを観測する試みは、幾つか存在しているが、ウィルスなどの生物起源物質の保存を考慮した大気場の過程や状況について考察している試みはほとんどない。そこで、本研究では、アジアダストに付着したウィルスなどの生物起源物質が大気場輸送中に保存される環境場について、つまり、アジアダストが凝結核となり、雲水、氷晶、雪などに変遷する雲物理過程を気象モデルやリモートセンシングデータから明らかにし、時空間的な拡散の変遷や多寡を理解する。また、黄砂発生のファクターの一つであるダストデビル生成についても考慮する。

研究方法

気象モデル CReSS やリモートセンシングデータ、ライダーデータを基に、実測と理論（モデル）の双方から、アジアダストの挙動について明らかにする。また、アジアダスト発生源であり、生物由来物質が集積しやすいドライレイクに着目し、同地域の起伏や表面温度、粗度長などを計測し、それらのデータを基にしたダストデビル発生に関する調査について、領域気象モデルを用いて行う。

結果と考察

気象モデル CReSS を用いてシミュレーション解析結果から、対象とするモンゴルゴビ砂漠地域において発生したアジアダストは、偏西風に乗り日本付近に到達することが求められた。同地域のライダーデータからも発生している様子が分かっている。また、人工衛星 CALIPSO データからもアジアダストの移動が認められた。発生源の標高は 1000m ほどであり、さらに境界層が深いことから偏西風に乗り、長距離移動が可能であることが推測できる。偏西風の指向や強さに依存して拡散の差異が考えられる。一方、境界層については、様々な条件があり、これらを分類し、詳細に調べる必要がある。その中で、下層から上昇へダストを運搬する事象の一つとしてダストデビルがある。特に、我々が対象としているドライレイク地域では、生物由来物質が集積しているため、研究を進める必要性が大きい。今回は、現地においてドローンにカメラと赤外線カメラを搭載し撮影を行い、空間的な場の把握を行った（2018年度 ISEE 国際共同研究）。現在は、これらを整理している段階であり、このローカルなシミュレーションを行うことが出来なかったが、今後進めていく予定である。

成果発表：

論文)

Buho HOSHINO, Yuki SOFUE, Yuta DEMURA, Tsedendamba PUREVSUREN, Morine KURIBAYASHI, Kenji BABA, Enkhtuvshin ZOLJARGAL, Katsuro HAGIWARA, Jun NODA, Keiichi KAWANO, Olaf KARTHAUS, Kenji KAI, Detection of dry lake beds formation and estimate of environmental regime shift in semi-arid region, 沙漠研究, 28(5) 109-113, 2018年

口頭発表)

馬場賢治, 松本珠季, 星野仏方, モンゴルゴビ砂漠ドライレイク・ワジにおける飛散実験解析, 第6回大気エアロゾルシンポジウム, 北海道大学, 2018年11月9日

千年スケールの気候変動における海洋モード水の役割
The role of oceanic mode water
in millennial-scale climate variations

相木 秀則, 名古屋大学・宇宙地球環境研究所

研究目的

海洋のモード水とは冬季の冷却によって形成された背の高い海洋混合層が、夏季の加熱によって亜表層に閉じ込められた水塊のことであり、気候変動のメモリー効果を探る指標になっている。地球上の気候システムは、太陽放射によるエネルギー入力の変動と、地球上の大気水圏の固有周期及び、人為起源の温室効果ガス排出の相互関係によって成り立っている。この相互関係の詳細な解明は、名古屋大学宇宙地球環境研究所の主要ミッションのうちの1つである。地球上の大気水圏系の固有周期のうち、氷河期/間氷期に次いで長いサイクルを持つのが、海洋の深層循環であり、世界の大洋を一巡するのに2千年かかる。その出発点であるグリーンランド沖から沈み込んだ高塩低温水は、大西洋子午面循環 (AMOC: Atlantic Meridional Overturning Circulation) の一部となるのであるが、その短期変動 (10年スケール) は、海面水温を通して世界各地の気候に影響を与えていることが近年の研究によってわかってきた。一方で、産業革命以降の地球温暖化にともなう北極海の海水面積の減少にともなって、AMOCは減衰傾向にあり、その影響予測が盛んに研究されている。太平洋・インド洋では海洋中層循環の必要性が、気候変動との関連において、しばしば指摘されており、北西太平洋における貯熱量増加との相互関係の解明が急がれている。

研究内容

本研究で使用した大気海洋陸域結合全球モデルLOVECLIMは、ベルギーの研究グループが開発した簡易数値気候モデルEMIC (Earth-System Model of Intermediate Complexity) である。LOVECLIMを名大の大型計算機CXシステム上で動かしたところ、千年積分/計算時間1日程度で実行することができた。本研究では、海水の状態方程式がモード水の鉛直構造や地理学的分布にどのような影響を及ぼすのかを調べた。海水の状態方程式とは水温、塩分、圧力を入力値として海水の密度を出力する関数のことである。この関数は物性解析から求められた複雑な多項式によって表され、LOVECLIMにはEckart (1958)の式が採用されていた。海水の状態方程式を解釈しやすいように、Vallis (2006)が次のように近似式を提出した。

$$\frac{\rho^{Vallis2006}}{\rho_0} - 1 = \frac{gZ}{c^2} - \alpha(1 + \gamma_B Z)(\Theta - 10) - \frac{\gamma_C}{2}(\Theta - 10)^2 + \beta(S - 35)$$

$$c = 1500, \quad \alpha = 1.67 \times 10^{-4}, \quad \beta = 0.78 \times 10^{-3}, \quad \gamma_B = 1.1179 \times 10^{-4}, \quad \gamma_C = 1 \times 10^{-5}$$

ここで海水の密度 $\rho^{Vallis2006}(\Theta, S, Z)$ は、水温 Θ 、塩分 S 、深さ Z の関数になっている。 ρ_0 と c は海水の基準密度と水中の音速を表す。水温が低いほど密度が高く性質は α によって表され、塩分が高いほど密度が高くなる性質は β によって表される。 γ_B は圧力依存性に関する非線形効果 (thermobaricity) を表す。 γ_C は温度依存性に関する非線形効果 (cabbeling) を表す。本研究では LOVECLIM に Vallis (2006) の状態方程式を実装し、cabbeling の効果が太平洋、大西洋、南大洋のモード水の形成にどのような影響を与えるのかを考察した。

火星熱圏における大気重力波の伝搬・飽和・散逸過程の
DSMCシミュレーション

DSMC simulations of propagation, saturation, and dissipation
processes of gravity waves in the Martian thermosphere

寺田直樹、東北大学・大学院理学研究科

【研究目的】

本研究は、火星熱圏DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) モデルを用いて、下層大気から伝搬する大気重力波ならびに熱圏で直接励起される大気重力波の伝搬・飽和・散逸過程を調査し、熱圏の大気組成分布に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。近年、地球のみならず火星の中間圏や熱圏においても、下層大気で生成された大気重力波が大規模風速場や熱収支に影響を及ぼす可能性が指摘され、注目を集めている。本研究では、火星大気大循環モデルから得られた重力波のスペクトル情報や風速場情報、並びに誘導磁気圏側からの降込イオンフラックスを入力値として火星熱圏DSMCシミュレーションを実行し、大気重力波が火星熱圏の組成分布に及ぼす影響を定量的に調査する。そして、得られたシミュレーション結果を用いて、火星探査機MAVENによって得られた火星上部熱圏における大気重力波の活動度分布の成因解明を試みる。さらにMAVENやMars Express探査機が観測した重いイオン (CO_2^+) の宇宙空間への高い流出比率に着目して、大気重力波の効果、惑星の温室効果ガスの流出に及ぼす影響を調査する。

【研究方法】

火星探査機MAVEN搭載の中性大気イオン質量分析器および紫外観測器によって観測された火星熱圏の大気重力波活動度の高度分布と緯度経度分布の成因を解明すべく、誘導磁気圏側からの降込イオンフラックスと火星下層大気・中層大気・下部熱圏の大気大循環モデル (GCM) から得られた大気重力波のスペクトル情報を入力値として、火星熱圏DSMCシミュレーションを実行する。そして励起された音波と大気重力波の組成ごとの振幅や位相差の高度分布特性を解析し、それぞれの波動モードの特定を試みる。そして、それぞれの波動モードの飽和と散逸が、熱圏におけるO, CO_2 , N_2 , Hなどの密度や温度の高度分布にどのような影響を与えるかを定量的に調査する。

DSMCシミュレーションでは分子の平均自由行程を分解する必要があるため、本計算の下側境界 (高度130km) では10m程度の空間分解能で計算格子を配置する必要がある。数100kmの波長をもつ大気重力波を再現するためには、下側境界で数10000程度の格子点数を用い、かつ各格子には数10以上の粒子数を用いる必要がある。本計算では2次元の熱圏DSMCモデルを用い、空間的に変化する格子構造を採用している。

【研究結果】

平成30年度は、誘導磁気圏側からの降込イオンフラックスを入力値として火星熱圏DSMCシミュレーションを実行し、励起された音波と大気重力波の組成ごとの振幅や位相差の高度分布特性を解析した。そしてそれらをMAVEN探査機が取得したデータと比較し、誘導磁気圏側からの降込イオンと下層大気からの大気重力波による擾乱生成のどちらがより観測を説明するかを調査した。その結果、誘導磁気圏側からの降込イオンは大気重力波のみならず音波モードも生成している可能性が高く、 CO_2 と N_2 の擾乱振幅比は観測と逆センスになる場所が多いことを示した。本結果は、火星の上部熱圏で多数観測される大気擾乱は、主に下層大気から伝搬する大気重力波に起因することを示唆する。

【成果発表】

(学会・研究会発表)

- 寺田直樹, 寺田香織, 中川広務, 黒田剛史, 火星外圏における大気重力波の DSMC 計算, 気象学会 2018 年度秋季大会, 仙台国際センター, 2018 年 10 月 29 日～11 月 1 日.
- 寺田直樹, 寺田香織, 中川広務, 黒田剛史, 藤原均, 関華奈子, On generation, propagation, and dissipation of gravity waves in the Martian upper atmosphere, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 幕張メッセ, 2018 年 5 月 20～24 日.