# 7.計算機利用共同研究 目次詳細

### (所属・職名は平成30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	東京工業大学	理学院 地球惑星科 学系	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	355
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	357
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	358
井上諭	名古屋大学	宇宙地球環境研究所 総合解析研究部	特任助教	観測磁場データに基づいた太陽フレア・CMEの 電磁流体シミュレーション	359
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	361
近藤光志	愛媛大学	宇宙進化研究セン ター	講師	磁気圏サブストームの計算機シミュレーション	363
松清修一	九州大学	大学院総合理工学研 究院	助教	無衝突衝撃波遷移層における微視的不安定性	365
横山央明	東京大学	理学系研究科	准教授	プラントル数の大きな熱対流における乱流レイ ノルズ応力に関する研究	367
横山竜宏	情報通信研究機構	電磁波研究所宇宙環 境研究室	主任研究員	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	369
林 啓志	中国科学院空間科学 中心	宇宙天気グループ	訪問研究員	IPS データに基づく太陽圏MHDモデルによる STEREO 探査機地点太陽風の再現	371
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電気抵抗発 生機構の解明	372
草野完也	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	教授	太陽フレアの数値予測に関する研究	374
町田忍	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	教授	粒子プラズマシミュレーションと衛星データ解 析を用いた非対称磁気リコネクションの物理過 程の実証的研究	376
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	アジアダストに付着したバイオエアロゾルの時 空間変遷	379
品川裕之	情報通信研究機構	電磁波研究所・宇宙 環境研究室	研究員	全大気圏-電離圏結合モデル(GAIA)を用いた 宇宙環境じょう乱の研究	381
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	383
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	385
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	387
天野孝伸	東京大学	理学系研究科地球惑 星科学専攻	准教授	高エネルギー粒子ハイブリッドコードの開発	389

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、東京工業大学·理学院

#### 【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 を 隔 て る 接 線 不 連 続面として近似できる一方、2012年にHP面を通過したボイジャー1号の観測からは、 HP構造が単純な不連続面とは限らないことが示唆されている。またIBEX衛星による 高速中性原子 (energetic neutral atom; 以下 ENA) 観測からは、"IBEX リボン"と呼 ばれるENAフラックスの高い領域がHP近傍に局所的に存在することが示されており、 HP構造を理解する上で多くの未解明の課題が明らかになってきた。IBEXリボンを構 成するENAの粒子源は、主に太陽圏内部で中性化された太陽風がHP外部(outer heli osheath; 以下OHS) で再度帯電した数keV程度のピックアップイオン (pickup ion; 以下PUI)で、これが更に中性化された結果としてのENAがIBEX衛星で検出されたと 考えられている。これよりPUIはHP構造の特徴を示すプローブの役割を果たしている と見なすことができる。本研究では特徴的なHP構造の下でPUIが受ける影響について、 特にイオンの運動スケールに起因するものを明らかにすることを目的とした数値シ ミュレーションを実行する。HP構造での発生が考えられる現象として、太陽圏内部 から伝わってきた衝撃波との相互作用や界面での不安定性に基づく動的な変動(磁気 リコネクションやケルビン・ヘルムホルツ(KH)不安定など)に特に着目し、これ らに 対 応 す る PUIの 分 布 特 性 の 検 証 結 果 を 用 い て 、逆 に HPで 発 生 し て い る 物 理 過 程 を IBEX衛星で観測されたENA分布から推測することに活用する。

#### 【研究方法】

HP領域を2次元構造で表現した数値モデルを作成し、粒子ハイブリッドコード(イ オンを個別粒子として、電子は電荷中性を保証する質量ゼロの流体として扱う)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 ーで行った。本年度は星間プラズマと太陽圏プラズマの流れの間にシアーが存在する 状況を設定し、そこから発生するKHモードの不安定性の成長に伴い、OHS中に配置 されたPUIの密度構造が受ける時間的・空間的な変動の特徴を検証した。 時間ステップ、空間グリッドはそれぞれ太陽風で定義されるプロトンジャイロ周波

数の逆数、プロトン慣性長で規格化した量として0.005、0.2を与え、計算空間は512x 4096グリッドの周期境界を与えた。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 場旋回速度を太陽圏プラズマで定義されるアルフベン速度の10倍で与えた。磁場はK Hモードが最も不安定となるため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】

右図はKHモードが充分に成長 した後の各種物理量の空間分布を 示す(左からプラズマ密度、磁場 強度、PUI密度、PUI圧力)。HPの 位置はy=600で、上部が太陽圏、下 部がOHSを表す。KH自体は初期の 線形成長段階を経て、渦同士の合 体から乱流生成に至った状態にあ る。プラズマ密度・磁場より、OH S内にパルス状の構造が形成され



ているが、これはOHS内のプラズマが高マッハ数であることによる shocklet的なもの であることを示唆しており、その影響下でPUIの局所的な集中が確認できる。

下図はy方向に積分したPUI密度のx方向プロファイルをエネルギー別に示し、その時間変化する様子を左から並べたものである。この図より、KHの成長に伴ってPUIが上図で見られたような局所的な密集を通じて空間拡散していく過程が確認できる。これをIBEX衛星の観測を模したものと捉えると、HPにおけるKH不安定の痕跡として解釈することが可能となる。



【まとめ】

前年度に引き続き、HPでKH不安定が成長する過程においてOHSのPUI密度構造が 示す変動を検証した。本年度は、前年度の計算で露見した初期条件の不具合(圧力平 衡条件の非成立、境界における非物理的な波動の反射など)を修正するとともに、x 方向の空間スケールを拡大した計算を行うことにより、KH渦を非線形成長段階まで 充分に保ったまま全体のプラズマ構造をより正確に追跡できるようになった。その結 果、研究の到達目標の一つであるIBEXリボン構造の成因を探る上で、形成過程にお けるHP上のプラズマ不安定性の寄与について、特に時間非定常性をもたらす可能性 を議論する段階に達することなった。

【 成 果 発 表 】

- 坪内 健、Pickup ion dynamics in the velocity shear layer across the heliopause、 日本地球惑星科学連合2017年大会、千葉、2017年5月(口頭発表)
- 坪内 健、Evolution of pickup ion density structures in the outer heliosheath、 第142回地球電磁気・地球惑星圏学会、京都、2017年10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 magne tosphere

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。

計算としては、解像度1.5RJ(木星半径)のシミュレーションモデルを用いて、木星磁気 圏での標準的な条件(太陽風動圧0.001~0.1nPa、IMF0.1~1.0nT)を入力パラメータにし、 それぞれの条件で準定常状態まで計算を行った。これにより、ある特定太陽風条件での磁 気圏構造が理解でき、実際にHISAKIの観測結果から得られている現象と比較が行われてい る。次に、HISAKI観測結果やJunoの観測結果から、太陽風動圧の急峻な変化がどのよう に磁気圏に影響を与えるかを調べるために、様々な時間スケールで動圧を大きく変化させ たシミュレーションを行った。この計算からは動圧変化が与える磁気圏への影響がどのよ うな時間スケールになっているかを評価することができた。

今後は、実際に観測された太陽風か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をシミュレーションし、より観測との共同研究を 進めていくことを計画している。

#### 投稿 論 文

Kimura, T., Y. Hiraki, C. Tao, F. Tsuchiya, P. Delamere, K. Yosh ioka, G. Murakami, A. Yamazaki, H. Kita, S. Badman, K. Fukazaw a, I. Yoshikawa, M. Fujimoto, Response of Jupiter's Aurora to Pla sma Mass Loading Rate Monitored by the Hisaki Satellite During Volcanic Eruptions at Io, JGR, accepted,2018.

· 学 会 発 表

K. Fukazawa, Y. Kato, R. J. Walker, T. Kimura, F. Tsuchiya,
G. Murakami, H. Kita, C. Tao, K. T. Murata, A New Appro
ach to Modeling Jupiter's Magnetosphere, AGU Fall Meeting
2017, New Orleans, 2017/12/13.

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、ミラーモードの 非線形発展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。これによりミラーモード磁場の非 線形発展を計算し、イオン慣性長以下で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 】

名古屋大学のスーパーコンピュータシステムFX100を用いて、並列化さ れた粒子シミュレーションコードによる高βプラズマ(β=1)中での イオンの温度異方性不安定性について数値実験を行った。セル当たり のイオン電子ペアの数を256とし、4096x4096の二次元空間グリッドで の計算を2048並列により計算を行った。

【計算結果および考察】

昨年度の実績をもとに、初期パラメータを調整し再度イオンサイクロトロン周期の数倍程 度まで実施したが、熱的ノイズの影響の問題が現状まだ解決されず、ミラーモード不安定 性の成長を確認するに至っていない。現在比較的極端なパラメータで数値実験を開始して おり(イオン・電子質量比16,イオン温度異方性10)、まずは波動の励起を確認し、そ こからどの程度までより現実的なパラメータまで落とし込めるかについて検討を行う。こ の検討を踏まえてミラーモードの励起から非線形発展まで現実的なコンピュータリソース で実施可能かどうかを見積もり、次年度前半中には研究方針の転換が必要かどうかの判断 を行う。

# 観 測 磁 場 データに基 づいた太 陽 フレア・CMEの電 磁 流 体 シミュレーション MHD Simulation of Solar Flares and CMEs Based on the Observed Magnetic Fields

#### 井上 諭 (名古屋大学宇宙地球環境研究所)

#### 【研究目的】

<u>本研究の目的は、宇宙天気予報において極めて重要な課題として位置付けられている、太陽フレアからコロナ質量放出(CME)までの一連のダイナミクスを数値的な観点から明らかにすることである</u>。本年度は、巨大な太陽フレア(X-class フレア)を起こした複数の活動領域における太陽磁場の噴出現象の電磁流体力学(MHD)シミュレーションを実施し、そのダイナミクスを明らかにすることを試みた。太陽表面の観測磁場データから非線形フォースフリー磁場を3次元空間に数値的に外挿し、外挿された磁場を初期条件とした電磁流体シミュレーションを実施した。

#### 【結果】

#### I. 活動領域 11158

昨年度に引き続き、2011年2月にM6.6フレアを引き起こした活動領域11158の数値モデリン グを実施した。数値的な外挿により再現されたねじれた磁場が平衡状態を失うことで、上空へと 上昇し、その上昇過程で周囲のねじれた磁力線と磁気リコネクションを介して融合することで、 より巨大でかつよりねじれた磁気フラックスロープが形成されて上空へと加速的に放出される 様子が再現された。コロナの磁場環境から、フラックスロープの上昇が抑制される場所(あるい は加速される場所)は理論的に予測されており(Kliem & Török 2006)、多くの観測的研究から支 持されている。ところが本研究では、フラックスロープの上昇の抑制が理論的に予測される場所 であっても、フラックスッロープの運動と磁気リコネクションの非線形相互作用が、フラックス ロープをさらに加速させる可能性を指摘した。この結果は、フラックスロープの加速、つまり CMEの形成過程は単純な理論モデルで全てを説明できないことを意味しており、それらを理解 するためには、太陽プラズマの非線形ダイナミクスを十分に理解する必要があることを意味して いる。本研究成果は成果発表1にまとめられた。

#### II. 活動領域 12017

2014 年 3 月 29 日に X1 フレアを起こした活動領域 12017 の数値モデリングを実施した。本研 究は英国との国際共同研究で進められている。本年は、フレア前後を含んだ太陽の光球面磁場の 時系列データを用いて非線形フォースフリー磁場を計算し、3 次元磁場構造の時間発展を調べた。 その結果、フレア前に蓄積されていたねじれの一部がフレア後に緩和しているのを確認した。フ レア前の太陽観測磁場データと分光観測から、この緩和した領域において、光球面の磁気フラッ クスの対消滅やコロナ中で高速上昇流などが観測されており、数値モデリングの結果は観測結果 と良く整合性がとれていることを確認した。本結果は、成果発表2にまとめられ投稿中である。

#### III. 活動領域 12673

2017年9月の大フレア(X9.3)の数値モデリングを実施した。図1aに示すようにフレア前には複数のねじれた磁力線が存在し、その放出過程で磁気リコネクションを介して巨大かつ強くねじれた磁気フラックスロープが形成されることが明らかになった。また、フラックスロープはその非線形過程でキンクモードに対して不安定化して、図1bのように、その上昇過程でよじれることもわかった。このよじれは、地球近傍で観測された南向き磁場を説明するのに、重要な役割を果たすかもしれないことが示唆された。本研究成果は、投稿論文として準備中である。



図 1: 太陽光球面磁場から数値的に外挿された 3 次元磁場(非線形フォースフリー磁場)を用いた MHD シミュレーションの結果。線は磁力線を表しており、パネル a と b は異なる角度から見た磁力線 のダイナミクスをそれぞれ表している。

#### 【成果発表(査読論文)】

- 1. [1] Inoue, S., Kusano, K., Büchner, J. & Skala, J. "Formation and Dynamics of a Solar Eruptive Flux Tube", *Nature Communications*, 9, 174
- [2] Woods, M. Inoue, S., Harra, L., Matthews, S., K. Kusano, & Kalmoni, N. "The Triggering of the 29-March-2014 Filament Eruption" *The Astrophysical J ournal*, Under Review.

# 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・正値性保障ス 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、レイリー・テイラー不安定性の空間2次元・速度2次元のシ ミュレーションを新たに実行した。

#### 研究結果

レイリー・テイラー不安定性(RTI)はこれまで流体シミュレーションの みで研究されてきた。本研究では世界で初めてRTIの第一原理運動論シ ミュレーションを行った。初期密度勾配層の幅に対するイオン慣性長 やイオンジャイロ半径を変化させた3通りのシミュレーションを行っ た結果、ホール効果およびジャイロ運動効果があまり効かない場合に は磁気流体力学(MHD)シミュレーションでみられるような重力軸に対 して対称なキノコ型・泡型の密度構造が発達した。RTモードの波長が イオン慣性長に近い場合(ホール効果が影響する場合)には、RTモー ドが重力軸に対して非対称に発達し、キノコ型の密度構造がイオンジャイ ロ運動と逆向きに渦を巻いた。またRTモードの波長がイオン街路 半径に近い(ジャイロ運動効果が影響する)場合には、イオンジャイ ロ半径スケールの新たな不安定性が生じた。しかし、この小スケール のモードは流体の交換を促すRTモードの速度場の成長には影響を与え ないことが分かった。また、この小スケールのモードの成長には、電

# 成果発表

Umeda, T., and K. Fukazawa, Performance measurement of Eulerian kinetic code on the Xeon Phi KNL, Proceedings of HPC Asia 2018, P1 (4pp.), 2018. (査読付論文)

Umeda, T., and Y. Wada, Non-MHD effects in the nonlinear development of the MHD-scale Rayleigh-Taylor instability, Physics of Plasmas, Vol.24, No.7, 072307 (10pp.), 2017. (査読付論文) 梅田隆行, 宇宙プラズマの運動論シミュレーション, 第 34 回計算数理工学フォーラム, 名 古屋大学東山キャンパス, 2018 年 3 月 16 日. (招待講演)

Umeda, T., and Y. Wada, Vlasov simulation of the Rayleigh-Taylor instability, 25th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP 2017), Leuven, Belgium, September 19, 2017. (口頭発表)

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(2), 第 162 回 ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会, くまもと県民交流館パレア, 2017 年 12月 18日. (口頭発表)



図 1: Runs 1-3 におけるレイリー・テイラー不安定性の非線形発展。カラーはイオン密度を 表す。Run 1 は RT モードの波長がイオン慣性長およびジャイロ半径よりも長く MHD-like な発展をする。Run 2 は RT モードの波長がイオン慣性長に近く、Run 3 は RT モードの波 長がイオンジャイロ半径に近い。

磁気圏サブストームの計算機シミュレーション Computer Simulations of Geomagnetospheric Substorm

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、 太陽風プラズマと地球磁気圏プラズマの境界で電流層を挟んで非対称なプラズマ境界が形 成され、磁気圏尾部とは大きく異なる非対称磁気リコネクションが起こる。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先行研究において示 した[1]。特に、対称磁気リコネクションと大きく異なる点の一つが、電流シート両側から の拡散領域への流入プラズマがぶつかるスタグネーション点(s点)と磁気リコネクション点 (x点)の位置が分かれて、拡散領域では主に磁気シースのプラズマが加速される点にある。 本研究では、このs点とx点のずれを詳しく調べるため、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

2次元磁気流体シミュレーションを行う。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。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。拡散領域内でのx点とs点の分離に注目するため、異常抵抗のx方向への分布を固定し、x点がx方向に分離しないようにする。

#### 研究結果

数値計算により得られた、磁場非対称度k=2の場合のy軸上のx点、s点、拡散領域およびx 点とs点の距離L(s-x)の時間変化を図に示す。x点は拡散領域内のシース側(磁場強度の弱い 側)に、そしてs点はその磁気圏側(磁場強度の強い側)に移動している。ただし、拡散領 域全体は、yの負方向、つまり磁気圏側に移動している。x点とs点は時間とともに分離し、 距離L(s-x)は時間とともに広がっていき、拡散領域幅が一定になるとほぼ同じタイミングで L(s-x)も一定になっていく。ただし、拡散領域幅はゆっくりと広がっていく一方で、L(s-x) はほぼ一定のままであるため、L(s-x)は拡散領域幅に完全に依存しているわけではない。ま た、s点付近から接触不連続面がx方向に延び、リコネクションジェットについてもx点より も下側、s点付近から高速なジェットとしてx方向に流れており、接触不連続面の正負y方向 に広がって分布していることがわかった。

#### まとめ

本研究の結果、電流シートを挟んで磁場強度の非対称な非対称磁気リコネクションにおいて拡散領域内でのx点s点の分離と拡散領域幅の関係を示し、s点から延びる接触不連続面の構造を示した。



x (リコネクション) 点 (濃い×印)、s(スタグネーション)点 (薄い×印) および拡散領域 (グレーハッチ)のy方向位置の時間変化。白抜き四角□ がs点とx点の距離、黒四角■が拡散領域の幅にそれぞれ-1をかけたものを 示している。

### 引用文献

1. Nitta, S., Wada, T., Fuchida, T., and Kondoh, K., "Critical differences of asym metric magnetic reconnection from standard models", The Astrophysical Journ al, 828:63 (16pp), 2016

#### 成果発表

- 1. Shimizu, T., <u>Kondoh, K.</u>, and Zenitani, S., " Numerical MHD study for Plasmoid Instability in Uniform Resistivity", Phys. Plasmas, 24, 112117, 2017
- 2. <u>近藤光志</u>,「非対称リコネクションにおける拡散領域と接触不連続面の磁気流体数値計 算」,宇治リコネクションワークショップ 2017,京都大学(2017年10月)
- 3. <u>近藤光志</u>,「非対称磁気リコネクションの磁気流体計算」,地球電磁気・地球惑星圏学 会 2017 年秋学会,京都大学(2017 年 10 月)
- 新田伸也・近藤光志・丸山翔也、「非対称磁気リコネクションの強非対称極限での振る 舞い」、日本天文学会 2017 年秋季年会、北海道大学(2017 年 9 月)
- 5. 近藤光志,「非対称磁気リコネクションの大規模磁気流体計算」,STE シミュレーション 研究会 -太陽地球惑星系複合システムのシミュレーション研究-,神戸大学 計算科学 教育センターおよび惑星科学研究センター(2017 年 7 月)
- <u>近藤光志</u>,「太陽コロナ・惑星磁気圏磁気リコネクションの磁気流体計算」,九州天文ゼミ,愛媛大学(2017年7月)

## 無衝突衝撃波遷移層における微視的不安定性 Microinstabilities in the transition region of a collisionless shock

松清修一、九州大学·大学院総合理工学研究院

#### 研究目的

宇宙の無衝突衝撃波におけるエネルギー散逸過程および粒子加速過程のカギを握る衝撃 波遷移層に着目し、そこで励起される微視的不安定性を、高精度の2次元フル粒子計算に よって再現する。これによって、微視的不安定性が衝撃波の散逸過程や粒子加速過程に与 える影響を定量的に理解する。

#### 研究方法

本研究では、衝撃波遷移層のフットと呼ばれる領域に着目する。フット領域は、衝撃波 面で反射された一部の入射イオンが上流にせり出す領域で、その空間サイズはイオンの磁 場旋回半径(pi)程度である。高マッハ数の超臨界衝撃波では、無視できない量の反射イオ ンが生成されるため、フット領域は入射イオンと電子、反射イオンから成る3成分プラズマ としてモデル化でき、各成分のバルク速度の違い

を源として電子スケール(<<  $\rho$ i)のさまざまな微 視的不安定性が励起されることが知られている。 ここではこのフットの一部(L~ $\rho$ i/5)をとりだし て局所近似を適用した2次元周期境界フル粒子計 算を行った。平均的な衝撃波面(計算領域外)を y・z面とし、入射および反射イオンの流れの方向を それぞれx方向、\*x方向とする。計算空間はx・y面と し、y方向に背景磁場をとる。座標系は電子の静止 系とする。昨年度から引き続いて、衝撃波のマッ ハ数=5、反射イオンの相対密度=25%、電子ベー タ値(=電子の熱的圧力と磁気圧の比)=0.2、イ オン/電子温度比=1、イオン/電子質量比µ= 1836、電子プラズマ/サイクロトロン周波数比の2 乗を $\tau$ =100として大規模計算(空間グリッド数= 2048×8192、総超粒子数=6.4×10<sup>9</sup>)を行った。

#### 研究結果・考察

図1に、揺動電磁場および電子、イオンのエネル ギー時間発展を示す。T~0.2付近に見られる揺動 電磁場の指数関数的増幅は、電子サイクロトロン ードリフト不安定性 (ECDI) と、ワイベル不安定 性によるものである。ここに、時間はイオンサイ クロトロン振動数の逆数 $\Omega_i^{-1}$ で規格化している。



図1.各種エネルギーの時間発展

ECDIによって増幅された電場Exは、その後電子のエ ネルギー(Ke)上昇を伴いつつ緩やかに減衰している。 一方、揺動磁場By,Bzは増幅を続け、T~0.75で依然と して成長途上である。この少し前からExが増幅に転じ ており、またKeも上昇率を上げている。これらは変形 2流体不安定性(MTSI)によるものである。ECDIと MTSIは波数スペクトルで区別することができる。図2 に、T = 0.49, 0.75におけるEx成分の波数スペクトル を示す。T=0.49では、非線形発展により広帯域化し たECDIがMTSIよりも大きな振幅を持っているが、 T = 0.75になるとECDIは減衰して、代わってMTSI が支配的になっている。以上は、代表者の過去のケー ススタディ[1]およびH28年度までに行ったτの小さな 場合(τ = 4, 25)の計算結果と同様の特徴である。 Muchietti and Lembege (2013)[2]は、ECDIのみに注 目した1次元計算を行い、τが大きくなるとECDIが支 配的になると述べている。本研究でも、τを大きくし ていくことでECDIの影響がしだいに強くなることを 確認したが、最終的にはMTSIが支配的となった。





方、ECDIの成長はベータ値に依存することも確認した。ベータ値が0.1を下回る場合には、 ECDIの役割が顕著になる可能性がある。

#### まとめ

無衝突衝撃波遷移層で起こる微視的不安定性を、地球軌道付近の現実に近い宇宙空間の パラメータを用いて再現する2次元フル粒子計算を行った。質量比(μ)を現実の値に保っ て周波数比(τ)を大きくしても、MTSIとECDIの競合過程に質的な変化が無いことを示し た。ただし、ベータ値が十分小さい場合には、ECDIの相対的な重要性が増す可能性がある。

#### 文献

- [1] Matsukiyo and Scholer, J. Geophys. Res., 111, A06104, 2006
- [2] Muschietti and Lembege, J. Geophys. Res., 118, 2267, 2013

#### 成果発表

口頭発表

- 松清修一、梅田隆行、垂直衝撃波遷移層の微視的不安定性、H29年度名古屋大学宇宙地球環境研究所共同研究集会「STEシミュレーション研究会-太陽地球惑星系複合システムのシミュレーション研究-」、神戸、2017年9月8日
- 2. 松清修一、無衝突衝撃波の理論的研究、地球電磁気・地球惑星圏学会第142回講演会 「田中舘賞受賞記念講演」、京都、2017 年10 月 24 日
- 3. 松清修一、松本洋介、高ベータ超臨界衝撃波の内部構造、日本物理学会第73回年次 大会「3学会合同宇宙セッション 宇宙プラズマ」、野田、2018年3月23日

# プラントル数の大きな熱対流における乱流レイノルズ応力に関する研究 Research on Turbulent Reynolds Stress in High-Prandtl Number Thermal Convection

横山央明(東京大学・理学系研究科)

## 【研究背景・研究目的】

太陽磁気活動の11年周期の起源は未解明である。磁場はプラズマガスの対流運動由来のダイナ モ作用によって増幅されるため、太陽内部の対流を正しく理解することが問題解決の鍵である。 しかしながら、我々の太陽熱対流に対する理解は未だ不十分である。特に近年、数値計算や混合 距離理論から得られる対流速度が速すぎることを示す様々な証拠が見つかり、深刻な問題とな っている(太陽熱対流問題 / solar convective conundrum)。

乱流渦による磁場の引き伸ばし効果に起因する乱流ダイナモは、従来の混合距離理論では無視 されており現行のいかなる数値計算でも十分に捉えきれていないため、熱対流問題における理 論と観測とのギャップを生んでいる要因の一つであると考えられる。近年行われた高解像度数 値計算の結果、乱流ダイナモが活発になると乱れた磁場のローレンツ力が実効的な粘性として 振る舞うと同時に乱流熱拡散を抑制するため、実効的プラントル数(粘性と熱拡散の比)が上昇 することが示された[1]。そこで本研究では、高プラントル数熱対流の数値計算を行い、本質的 に磁化された熱対流の性質を調べることを目的とした。研究の実際は、大学院生の戸次宥人が修 士学位研究として実施した。

#### 【本年度前半の研究内容】

高プラントル数レジームでは、対流による熱輸送が非局所的かつ効率的になり成層が対流安定 化するため、対流速度が抑制されることが予想された。そこで当初の予定を変更し、本年度前半 は上記の物理機構を数値的に実証するために非回転系における対流数値計算に従事した(膨大 な数値資源を要する課題ではなかった為 ISEE のスーパーコンピュータは用いていない)。その 結果、高プラントル数レジームでは対流層下部に亜断熱層が形成され深部で駆動される大スケ ールの対流速度が選択的に抑制されることが示された[2]。

#### 【本年度後半の研究内容】

上記の研究で用いたモデルを局所 f 平面モデルへと拡張し回転の効果を取り入れた一連の数値 計算を行うことで、対流による熱エネルギー輸送に加えて角運動量輸送の性質がどのようなプ ラントル依存性を持つのか調べた。主要な結果は以下の2点である。

- 回転の効果は熱輸送効率を下げ成層はより超断熱的になる為、プラントル数の上昇に伴う速度場の抑制は回転によって打ち消される傾向を持つ。
- 高プラントル数レジームでは、対流速度が抑制されるにも関わらず、対流プルームによ

って角運動量が動径下向きに輸送される性質を持つ。これは、大局的には極加速型差動 回転が実現されてしまうことを示唆している[3]。

すなわち、高プラントル数レジームにおけるプルーム状対流は、熱エネルギー輸送の問題に 関して理論と観測とのギャップを緩和するが、角運動量輸送まで考慮すると観測との乖離 をむしろ広げてしまうため、最終的な解決策にはなりえないことを示している。今後は、本 研究で考慮していなかった乱流磁場のローレンツ力が実効的な粘性を強化する効果や、太 陽表面の磁気熱対流から深部対流への非局所的な影響などを吟味する予定である。



図1: (a) 非回転系と (b) 回転系における高プラントル数熱対流の様子. エントロピー擾乱 の3次元構造を示している. ロスビー数 Ro 以外のパラメータは固定 (Pr = 20, Re = 30).

#### 参考論文

- [1]. H. Hotta, M. Rempel, & T. Yokoyama., 2015, ApJ, 803, 42
- [2]. Y. Bekki, H. Hotta, & T. Yokoyama., 2017, ApJ, 851,74
- [3]. B. Karak, M. Miesch, & Y. Bekki., 2018, submitted to Physics of Fluids

#### 成果発表

- Y. Bekki, H. Hotta, & T. Yokoyama., "Effects of Prandtl Number on Stratified Thermal Convection with and without Rotation", Helicity Thinkshop 3, Tokyo, Japan. 2017. 11.
- Y. Bekki, H. Hotta, & T. Yokoyama., "Role of the Effective Prandtl Number on the Convective Amplitude, Stratification and Angular Momentum Trasnport", IAU Symposium 340, Jaipur, India. 2018. 2.
- ・ 戸次宥人, 堀田英之, 横山央明. "太陽熱対流問題に対する実効的プラントル数の効果". 日本天文学会 2018 年春季年会, 千葉. 2018. 3.
- ・ 戸次宥人."太陽熱対流速度・成層・角運動量輸送に対する実効的プラントル数の効果".
   東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻修士論文. 2018.3.

# 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 情報通信研究機構 電磁波研究所

#### 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、空間分解能を向上 させ、磁力線直交方向に最大 200m の分解能でプラズマバブル内部の微細構造を再現することに成功した。GPS 電波 にシンチレーションを起こすスケール (300-400m)を直接再現することがほぼ可能となり、シンチレーションの定量 的な評価を行えることが期待できる。

#### 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<sup>+</sup>(E領域) と O<sup>+</sup>(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。

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

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

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

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、40m 程度までのパワース 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、成長したプラズマバブルの東西-鉛直断面と、赤道面上、高度460kmにおけるプラズマ密度の東西方向の 変動を示す。従来の結果と比較して、より微細な内部構造が形成されている。C/NOFS、ROCSAT-1等の低軌道衛 星観測で得られた特徴とよく一致しており、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。

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予定である。



図 1: 赤道面におけるプラズマ密度分布と、高度 460km における東西方向の電子密度変動。

# 成果発表

- Yokoyama, T., and C. Stolle, Low and midlatitude ionospheric plasma density irregularities and their effects on geomagnetic field, *Earth's Magnetic Field*, Space Science Series of ISSI vol. 60 edited by C. Stolle, N. Olsen et al., 503-527, 2017.
- Yokoyama, T., A review on the numerical simulation of equatorial plasma bubbles toward scintillation evaluation and forecasting, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 4, 37, doi:10.1186/s40645-017-0153-6, 2017 (13 pages).
- Tulasi Ram, S., K. K. Ajith, T. Yokoyama, M. Yamamoto, and K. Niranjan, Vertical rise velocity of equatorial plasma bubbles estimated from Equatorial Atmosphere Radar (EAR) observations and HIRB model simulations, J. Geophys. Res. Space Physics, 122, 6584-6594, doi:10.1002/2017JA024260, 2017.
- Yokoyama, T., S. Tulasi Ram, K. K. Ajith, M. Yamamoto, and K. Niranjan, Vertical rise velocity of equatorial plasma bubbles estimated from Equatorial Atmosphere Radar observations and High-Resolution Bubble model simulations, 2017 AGU Fall Meeting [New Orleans, USA: December 2017] (Oral).
- Yokoyama, T., C. L. Rino, C. S. Carrano, K. M. Groves, and P. A. Roddy, Spectral analysis of equatorial plasma bubbles obtained by high-resolution bubble model and C/NOFS satellite, XXXIInd International Union of Radio Science General Assembly and Scientific Symposium [Montreal, Canada: August 2017] (Invited, Oral).
- Yokoyama, T., S. Tulasi Ram, K. K. Ajith, and M. Yamamoto, Plasma bubble rise velocity estimated from EAR observation and High-Resolution Bubble model, 15th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar [Tachikawa: May 2017] (Oral).
- Yokoyama, T., C. L. Rino, C. S. Carrano, K. M. Groves, and P. A. Roddy, Spectral analysis of equatorial plasma bubbles obtained by high-resolution bubble model and C/NOFS satellite, JpGU-AGU Joint Meeting 2017 [Chiba: May 2017] (Invited, Oral).
- 横山 竜宏,S. Tulasi Ram, K. K. Ajith, 山本 衛, K. Niranjan, 数値シミュレーションと赤道大気レーダー観測によるプラズマバ ブル上昇速度の推定第 142 回 地球電磁気・地球惑星圏学会講演会 [宇治: 2017 年 10 月] (Oral).
- 横山 竜宏, S. Tulasi Ram, K. K. Ajith, 山本 衛, K. Niranjan, 数値シミュレーションと赤道大気レーダー観測によるプラズマ バブル上昇速度の推定第 11 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, pp. 86-88 [宇治: 2017 年 9 月] (Oral).
- 横山 竜宏, プラズマバブルシミュレーションの高解像度化, 平成 29 年度 名古屋大学太陽地球環境研究所 研究集会 STE シミュ レーション研究会 [神戸: 2017 年 9 月] (Oral).

IPS データに基づく太陽圏MHDモデルによるSTEREO 探査機地点太陽風 の再現

IPS-based MHD model for predicting solar wind at STEREO spac e probes

林 啓志、中国科学院・空間科学センタ

数十年にわたる名大IPS観測の他に類を見ない特徴の一つとして、複数の太陽周期とい う長い時間スケールと惑星間空間全球という幅ひろい空間範囲における太陽風の諸量、と くに太陽風プラズマ速度の実際の情報を提供できる点をあげる事が出来る。我々はこの利 点を生かし、(a) 視線積分データであるIPS太陽風速度データから静穏太陽風三次元構造 を復元する手法を作成していた。また、(b) 太陽近傍の太陽圏最内部での短期的な非定常性 についての観測データに基づく情報を導入する手法および(c) 太陽長期変動の太陽風(と くに温度とプラズマ密度) への影響を考慮した経験則(関数の引数に時刻を導入したもの) を開発していた。29年度では、これら3つの手法を統合したMHDモデル計算を構築し、 計算結果を幅広い太陽経度をカバーする米国STEREO探査機の実測データと比較・検 証することを企図した。計算機利用承認後の利用日数が短かった為、検証・評価ついては 30年度にずれ込む事となったが、モデル統合および緩やかに変動する太陽風の静穏成分 のMHDモデル計算については終える事ができた。



上の二図はユリシーズ探査機による太陽風諸量の太陽経度走査の実測値(黒線)と計算に よる再現(赤線)を比較したものである。上から磁場(動径・経度・緯度成分)、プラズマ密 度、速度、温度の6つの量を実測時間を横軸に、描いたもの。期間は2001年の1年間。 左図は手法(a)と(b)のみを導入したモデル、右図は手法(c)を導入した新規モデルによ り得られた一年にわたって時間的に連続した計算結果を用いて作成された。第三の手法要 素導入による顕著な弊害もなく、これまでは難しかった太陽高緯度における太陽風の高温 状態の再現について良化・改善された(黄色楕円で囲んだ部分)。

無衝突磁気リコネクションにおける電気抵抗発生機構の解明 Generation mechanism of the electric 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ーによって励起される新しい 不安定性(電流層シアー不安定性)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ー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、外国為替法及び外国貿易法にともなう該非判定に多くの時間を要したため、 数値的線形波動解析に焦点を絞って研究を進めた。電流層シアー不安定性は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。

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

微小擾乱は $\partial A(y, z, t) = \delta A(z, t) \exp(ik_y y)$ 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 (mi/me=100)

の場合のみについて解析を行なっていた。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、電流層シアー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、電子フローシアー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(mi/me=100)を用いていたが、現実的なパラメータの下でも電流層 シアー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
  - <u>Fujimoto, K.</u> and R. D. Sydora, Linear theory of the current sheet shear ins tability, J. Geophys. Res., 122, 5418-5430, doi:10.1002/2017JA024079, 2017.
  - <u>Fujimoto, K.</u>, Bursty emission of whistler waves in association with plasmoi d collision, Ann. Geophys., 35, 885-892, doi:10.5194/angeo-35-885-2017, 2017.

# 2. 口頭発表

- <u>K. Fujimoto</u>, Plasma waves and their roles in collisionless magnetic reconnec tion, 12th Annual International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows (ASTRONUM2017), St. Malo, France, May, 26, 2017 (Invited)
- <u>K. Fujimoto</u>, Lower-hybrid waves in the reconnection current layer, 7th East -Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasma s (EASW-7), Weihai, China, July 24, 2017 (Invited)
- <u>K. Fujimoto</u>, Generation of the bursty bulk flows in collisionless magnetic re connection, 14th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society (AOGS -2017), Singapore, August 8, 2017
- <u>K. Fujimoto</u>, 3D outflow jets originated from collisionless magnetic reconnect ion, 32nd International Union of Radio Science General Assembly and Scient ific Symposium (URSI2017-GASS), Montreal, Canada, August 25, 2017

#### 太陽フレアの数値予測に関する研究

Study of Numerical Prediction of Solar Flares

草野完也、名古屋大学·宇宙地球環境研究所

1. 研究目的

太陽フレアは太陽コロナ磁場に蓄積されたエネルギーが突発的に解放される太陽系最大 の爆発現象である。大型の太陽フレアは衝撃波を伴うコロナ質量放出(CME)、高エネルギ ー粒子、X線などを放出することで、地球の電磁気圏・大気圏に大きな影響を与え、衛星・ 通信・測位などの社会システムに障害をもたらす場合がある。それ故、フレアの発生を事 前に予測することは、そうした社会システムの障害を回避するために重要な課題である。 また、非線形不安定性に起因する太陽フレアの発生機構を解明することは、プラズマの非 線形ダイナミクスの理解の深化をもたらす。しかし、各国の宇宙天気予報機関によるフレ ア発生予測の信頼性は低いままであり、過去 30 年間改善していない。これは太陽フレアの 発生機構の理解が十分ではないことを示唆している。

本研究では上記のような背景のもと、太陽表面磁場の観測データに基づく数値シミュレ ーションによって太陽フレアの発生を予測するためのモデル開発とそれを用いた太陽フレ ア発生機構の解明を目的とする。我々はこれまでのシミュレーションと観測データ解析の 比較を通して、大きなスケールでのシア磁場による自由エネルギーの蓄積と 2 種類の特徴 的な構造を持つ小さなスケールの磁場の相互作用がフレア発生に重要な役割を果たしてい ることを見出した (Kusano et al. 2012)。本研究ではその成果のもとに事項に示す複数の方 法で、フレア発生の予測を試みる。さらに、各方法による予測精度を定量的に評価し、従 来の経験的なフレア予測の結果とも比較することで、より精度の高いフレア予測スキーム

を開発する。さらに、そのスキー ムを利用してフレアが起きる場合 と起きない場合の本質的な違いを 明らかにすることにより、フレア 発生の物理機構を探る。

2. 研究結果

(1)非線形フォースフリー磁場
 (NLFFF)データベースの構築と
 フレア予測スキームの開発:

太陽中心子午線を通過した比較 的大きな活動領域について、ひの



で衛星及びSDO衛星が観測した太陽表 面のベクトル磁場データを境界条件と して NLFFF を計算し、世界で初めて の「活動領域3次元磁場データベース」 を構築した。その結果、我々がフレア 発生の原因として提案したダブルアー ク不安定性の臨界パラメタのプロクシ ーであるκ\*とフレア活動の間に高い 相関関係があることを見言い出した

(図1)。また、大規模フレアが発生し た2つの活動領域では $\kappa$ \*パラメタの 時間変化も計算した。その結果、 $\kappa$ \*は 大規模フレアが発生する前に一定の閾 値を超え、フレア発生後急激に減少し て閾値を下回ることを見出した(図2)。 これらの結果は、 $\kappa$ \*パラメタがフレア 発生の必要条件を与えることを示唆し ており、大規模フレアの発生予測に応 用できる可能性を示すことができた。



図2:太陽活動領域 NOAA11158 におけるフ レア軟 X 線フラックス(上)、κ\*パラメタ (中)、全自由エネルギー(下)の時間変化。

(2) 太陽面爆発の原因となる電磁流体力学(MHD) 不安定性のシミュレーション:

太陽活動領域に磁気ヘリシティを注入すると共に、小規模双極子磁束を太陽面に入射す ることにより、不安定化する過程の3次元 MHD シミュレーションを実施し、不安定化モ ードを特定する研究を進めた。その結果、不安定化の臨界状態がダブルアーク型(或いは シグモイド型)の磁場構造を持つことが示された。さらに、計算結果はこの臨界状態を超 えてシステムが不安定化する過程をκパラメタの変化によって予測できることを示唆した。 (3) コロナ質量放出(CME)の形成条件を探る3次元磁場解析:

太陽フレアと CME の相互関係は重要な研究課題でありながら未だに明確な結論が得ら れていない。我々はフレアが発生した際に CME が発生するかどうかに、フレアリボンに含 まれる磁束と活動領域全体の磁束の比が重要なパラメタになるという鳥海ら(2017)の研 究を参考に、ベクトル磁場観測データから計算された NLFFF の磁場構造と CME 発生確率 の関係を統計的に調べた。その結果、磁場の捻じれ(magnetic twist)が一定値より大きな 領域の磁束とその領域を覆う磁束の比が特定の閾値を超えた場合に、その領域で発生する フレアが高い確率で CME を伴なうことを見出した。その結果から、フレアが CME を伴な うことを予測したときの TSS (True Skill Statistics)が 0.78 に達することを明らかにした。 この結果は、磁場観測データから CME の発生をある程度予測することができることを意味 するものである。

# 粒子プラズマシミュレーションと衛星データ解析を用いた 非対称磁気リコネクションの物理過程の実証的研究

Empirical study on physical processes in asymmetric magnetic reconnection via full-particle plasma simulations and spacecraft data analyses

# 町田 忍 名古屋大学宇宙地球環境研究所 小林 勇貴 名古屋大学宇宙地球環境研究所

# <u>研究目的</u>

申請の課題について今年度は地球磁気圏昼側の磁気リコネクションに焦点をあてて研究を行った。 その領域では、太陽風磁場の向きに応じて太陽風起源のプラズマと磁気圏起源のプラズマによる非対称 磁気リコネクションが起こることが知られている。図1は、電流層中心(x/λ=2.8)の左側がマグネトシー ス、右側が磁気圏の設定として再現された非対称磁気リコネクションのシミュレーション結果であり、y 方向の電子の流速と電流を示している。対称磁気リコネクションとは異なり、ホール電流系を作る電子 の高速流が電流層の磁気圏側に発生している。昨年、一昨年は、この非対称磁気リコネクション起源の 電子高速流に着目し、人工衛星のイベントデータと粒子シミュレーションの比較研究を行ったが、今年 度は中央部に位置する電子およびイオンの磁気拡散領域について研究を行った。



図1. 粒子シミュレーションで再現された非対称磁気リコネクションのy方向の電子速度構造(左) と電流構造(右)

# <u>研究手法</u>

前節で述べたように、本研究課題では、磁気リコネクションの中央部に位置して反対方向を向いた磁 力線同士をつなぎ変える役割を果たす電子およびイオンの磁気拡散領域の構造と、その中で生起してい る物理過程の解明に焦点を当てる。そのために、次のような2流体方程式と呼ばれる電子とイオンを別々 の流体として扱う枠組みを用いて、問題の解明に取り組んだ。

$$n_{e}m_{e}\left(\frac{\partial \boldsymbol{v}_{e}}{\partial t} + \boldsymbol{v}_{e} \cdot \nabla \boldsymbol{v}_{e}\right) = -en_{e}(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v}_{e} \times \boldsymbol{B}) - \nabla \cdot \overleftarrow{p}_{e} + \boldsymbol{R}_{e}$$
$$n_{i}m_{i}\left(\frac{\partial \boldsymbol{v}_{i}}{\partial t} + \boldsymbol{v}_{i} \cdot \nabla \boldsymbol{v}_{i}\right) = en_{i}(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v}_{i} \times \boldsymbol{B}) - \nabla \cdot \overleftarrow{p}_{i} + \boldsymbol{R}_{i}$$

MMS 衛星は4機が立体的に配位されることから、衛星で観測されたスカラー量の空間勾配(∇) やベクト ル量の発散(∇・)、回転(∇×)などを差分法によって計算することができる。それらの値を用いると、 4機の衛星の中心(平均位置)における電子とイオンに関する2流体運動方程式の成立について調べる ことができる。

# <u>研究成果 · 考察</u>

本研究では、図 2(a)に示すような Science 誌で Burch et al. [2016]が報告している MMS 衛星が電子 拡散領域(Electron Diffusion Region: EDR)の近傍を通過しているデータについて、上記の方法を適 用した。この事例に関する昼間側磁気リコネクションの構造に対する衛星の軌道を模式的に示したもの を図 2(b)に再掲する。 4機の MMS 衛星は、EDR に最接近する直前に南側ジェット領域から上流側の昼 間側磁気圏に出て、そこから EDR をかすめて北側ジェット領域に飛行していった。

(b)

(a)



図2.(a) MMS 衛星で観測された諸物理量、(b)衛星の軌道、およそ L 軸は北向き、M 軸は夕方向き、 N 軸は磁気圏界面の法線向き

その時の MMS 衛星データに基づいて求められた電子衝突項(ベクトルの)絶対値を素電荷と電子密度の積で割った量と、電場波動観測によって得られた波動のダイナミックスペクトルおよび低域混成波帯

(1/2f<sub>LIR</sub> < f < 3/2 f<sub>LIR</sub>)の波動強度を図3に示す。図からわかるように、電子の衝突項を素電荷と電子 密度の積で割った量と、低域混成波帯の波動強度が驚くほど高い相関を持っている。この時間帯は、MMS 衛星が EDR に最接近する直前に南側ジェット領域から上流側の昼間側磁気圏に出ていた時に対応し、イ オン拡散領域(IDR)の内部に相当する領域で見いだされた現象である点が重要である。この事実は、IDR おいて、静電的な低域混成波が励起され、それが異常抵抗の発生を引き起こしている可能性を示してい る。地球磁気圏中の無衝突磁気リコネクションにおいては、電子慣性あるいは、電子圧力テンソルの非 対角成分で表される電子粘性に原因があるとされているが、それが発生する EDR を取り巻くように存在 する IDR における異常抵抗も、磁力線を拡散させ融合させることに関して、ある一定の割合、寄与して いる可能性がある。しかし、われわれのグループでは、今回の観測を支持するような粒子シミュレーシ ョンの結果が得られなかった。また、過去において、他のグループによって、該当する結果が報告され ていないか文献調査を行ってみたが、今のところ、そのような成果は見あたらなかった。その原因の一 つとして、現存する粒子シミュレーション空間分解能が十分でないために、本来励起される低域混成波 を系内に励起できないのではないかと考えている。このように非常に興味深い結果が得られているので、 ぜひ来年度も継続して原因の解明を進めたい。



図2.(上段)MMS衛星で観測された低周波動のダイナミックスペクトル、(中段)低域混成波帯の電場波 動強度、(下段)電子の衝突項を素電荷と電子密度の積で割った値

# <u>成果発表</u>

- Y. Kobayashi, S. Machida, N. Kitamura, Y. Saito, Investigation of the magnetic neutral line region with the frame of two-fluid equations : A possibility of anomalous resistivity inferred from MMS observations, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 千葉, 2017 年 5 月
- Y. Kobayashi, S. Machida, N. Kitamura, Y. Saito, A. Ieda, S. Imada, and Y. Miyoshi, Investigation of the magnetic neutral line region with the frame of two-fluid equations, 第142回 SGEPSS 総会及び講演会, 京 都, 2017年10月

# アジアダストに付着したバイオエアロゾルの時空間変遷 Spatiotemporal change of Asian dust with bioaerosol

馬場賢治 酪農学園大学 農食環境学群

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.この時のアジアダストについて、宮崎県付近で発 症直前に黄砂が飛来しており、人工衛星の解析から、先に口蹄疫が発症した中国・甘粛省を経由して飛来して 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、アジアダストイベント毎の経路と症 状発祥地との関連も含めて評価を行い、それらを基にして、新たに現地での観測を行いながら解釈を行う.本 研究では、今まで行われていなかった雲物理過程の変遷がバイオエアロゾルの保存と輸送に与える影響を評 価する.この成果は、時空間的なバイオエアロゾルの挙動が示され、家畜などの伝染病予防や方策が見込まれ ることから、社会的な還元が出来ることが期待される.

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.併せて, アジアダストイベント毎の経路と症状発祥地との関連も 含めて評価を行う.

結果と考察

2012 年以降に現地観測を行っているため、それに合わせて気象モデル CReSS を用いて計算を行った.その 計算結果を用いて、後方流跡線解析すると、札幌で黄砂が観測する場合は、中国北部からモンゴル南部のゴビ 砂漠付近を起源とするアジアダストが多くみられた(図 1).また、ライダーデータからモンゴルゴビ砂漠の Sainshand 現地ステーション付近でアジアダストが発生した時間を初期時間として仮想的にサンプルを巻い た実験からは、北海道付近を指向していることが求められた(図 2).現地では境界層が深い影響で、偏西風に 乗り易く、対流圏下層から中層にかけてのダスト群はあまり南北方向に拡散しないまま運ばれている.但し、 アジアダスト発生回数のサンプルが少ないため、今後も事例を増やす必要がある.現段階では、個々の事例解 析において境界層の発達の様相やアジアダスト輸送に関して特徴を明らかにすることが急務である.

一方,バイオエアロゾルをメタゲノム分析によりアジアダスト発生地(モンゴルゴビ砂漠)と飛散先(札幌) で比較をすると,アジアダストイベント時には普段現れない型をもつ生物由来物質が幾つか特定された(現在 修正投稿中).これらから,モンゴルゴビ砂漠起源の物質が移動していることが裏付けられた.

今後の課題

境界層を超えて自由大気に入るメカニズムについては未解明な部分があるため、事例を増やしてモデルデ ータや観測データから理論的に解明することが必要である.



図1 2012年4月30日00UTCの地上気圧・ 風・降水量分布および24時間の後方流跡線 (色は高度を示す). 黄色い枠線がモンゴル ゴビに相当.



図2モンゴルゴビ砂漠付近からの前方流跡線12時間後(左:高度3184m,右:5380m)

成果発表:

馬場ほか, CALIPSO を用いた 2012 年 4 月のダストストームの時空間変遷について,日本気象学会,名古屋大学,2016 年 10 月 28 日.

# 全大気圏ー電離圏結合モデル(GAIA)を用いた宇宙環境じょう乱の研究 Study of space environment disturbances using the whole atmosphere-ionosphere coupled model GAIA

品川裕之(情報通信研究機構・電磁波研究所・宇宙環境研究室)

# 研究の目的

本研究は、情報通信研究機構で開発された全大気圏-電離圏結合モデルGAIA(Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy)を用いて、下層大気起源の大気波動の影響、磁気圏の電 磁エネルギーの影響、降り込み粒子の影響、太陽フレアの影響などを含めた総合的なシミュレーション を行うことにより、宇宙環境現象、特に、宇宙天気予報で重要となるプラズマバブル、スポラディックE 層、電離圏嵐などの電離圏じょう乱現象を定量的に解明することを目的とする。

## 本年度の研究結果

(1) GAIA モデルの高精度化と高速化

前年度開発した水平分解能1度のGAIAモデルを用いてテスト計算を行った結果、条件によっては数値 が異常になる場合があったため、原因の究明を行い、安定かつ正確に計算ができるように改良を行った。 改良版を用いた計算の結果、従来モデルでは再現できなかった水平スケール数100kmの熱圏・電離圏構 造を再現することが可能となった。このモデルを用いて電離圏の波動を再現した論文を作成し、出版さ れた[Miyoshi et al., 2018]。

(2) フレア時の電離圏変動のシミュレーション

前年度構築した太陽フレア時のX線・EUVスペクトルモデルを入力して実行するGAIAを用いて、さま ざまなフレア時の電離圏変動のシミュレーションを行った。また、太陽フレア時の電離圏下部領域(E層、 D層)におけるイオン・中性組成変動を調べるため、化学反応過程モデルの開発も進めた。

(3) プラズマバブルモデルと GAIA の結合

NICT で開発したプラズマバブルモデルに GAIA から得られる背景場を入力として、プラズマバブルの伝搬のシミュレーションの試験を行った。その結果、パラメータの整合性などについて問題があり、結合のスキームを検討する必要があることがわかった。

(4) GAIA を用いたプラズマバブル発生の確率予測方法の研究

GAIA のシミュレーションデータからプラズマバブルの線形成長率を求めることにより、プラズマバブル発生確率予測を行う方法について調べた。その結果、モデル中の線形成長率の大きさが発生確率の指標として有意な情報を与えることがわかった。この結果は、プラズマバブル発生確率予測の新しい手法となる可能性がある。この結果を基に論文を作成し、出版された [Shinagawa et al., 2018]。

(5) 極域電離圏パラメータの GAIA への導入

極域電離圏ポテンシャルの経験モデル(Weimer モデル)をGAIAの入力としたシミュレーションのテストを行い、初期の結果を得た。本年度は、実際の太陽風パラメータを入力として与えて、熱圏・電離圏のダイナミクスと構造の変化を求め、結果を検討した。

(6) GAIA を用いたスポラディック E(Es) 層の発生率に関する解析

本研究では、GAIAのシミュレーションデータから求めた中性風シアーによる鉛直方向のイオン収束率 を求め、観測で得られた Es 層の発生データと比較した。その結果、イオン収束率のグローバル分布と Es 層の発生率が比較的良く対応していることがわかった。このことは、GAIAを用いることにより Es 層の発 生がある程度予測できる可能性を示唆している[Shinagawa et al., 2017]。本年度は、この結果に基づ いて、ある地点における日々の Es 層発生予測方法についての検討を行った。

# 論文

- 1. <u>Shinagawa, H., Y. Miyoshi, H. Jin</u>, and <u>H. Fujiwara</u> (2017), Global distribution of neutral wind shear associated with sporadic E layers derived from GAIA, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, doi:10.1002/2016JA023778.
- 2. Maruyama, T., <u>H. Shinagawa</u>, K. Yusupov, and A. Akchurin (2017), Sensitivity of ionosonde detection of atmospheric disturbances induced by seismic Rayleigh waves, *Earth Planets Space*, 69:20, doi: 10.1186/s40623-017-0600-z.
- 3. <u>Miyoshi, Y.</u>, D. Pancheva, P. Mukhtarov, <u>H. Jin</u>, <u>H. Fujiwara</u>, and <u>H. Shinagawa</u> (2017), Excitation mechanism of non-migrating tides, *J. Atmos. Terr-Sol. Phys.*, *156*, 24-36, doi: 0.1016/j.jastp.2017.02.012.
- 4. <u>Tao, C., H. Jin, H. Shinagawa, H. Fujiwara</u>, and <u>Y. Miyoshi</u> (2017), Effect of intrinsic magnetic field decrease on the low- to middle-latitude upper atmosphere dynamics simulated by GAIA, *J. Geophys. Res.*, 122, 9751-9762, doi: 10.1002/2017JA024278.
- 5. Watanabe, M., S. Fujita, T. Tanaka, Y. Kubota, <u>H. Shinagawa</u>, and K. T. Murata (2018), A magnet ohydrodynamicmodeling of the interchange cycle foroblique northward interplanetarymagnetic field. *J. Geophys. Res.: Space Physics*, *123*, 272–286.https://doi.org/10.1002/2017JA024468
- 6. <u>Shinagawa, H., Y. Miyoshi, H. Jin, H. Fujiwara, T. Yokoyama</u>, and Y. Otsuka (2018), Daily and seasonal variations in the linear growth rate of the Rayleigh-Taylor instability in the ionosphere obtained with GAIA, *Progress in Earth and Planetary Science*, 5:16 https://doi.org/10.1186/s40645-018-0175-8.
- 7. <u>Miyoshi, Y., H. Jin, H. Fujiwara</u>, and <u>H. Shinagawa</u> (2018), Numerical study of Traveling Ionospheric Disturbances generated by upward propagating gravity wave, *J. Geophys. Res.: Space Physics*,, https://doi.org/10.1002/2017JA025110.
- 8. Fujita, S., Y. Murata, I. Fujii, <u>Y. Miyoshi, H. Shinagawa</u>, <u>H. Jin</u>, and <u>H. Fujiwara</u> (2018), Evaluation of the Sq magnetic field variation calculated by GAIA, *Space Weather*, https://doi.org/10.1002/2017SW001745.

## 口頭発表

- 1. <u>Shinagawa, H.</u>, <u>H. Jin</u>, <u>Y. Miyoshi</u>, <u>H. Fujiwara</u>, Predictability of thermosphere-ionosphere variations originating from the lower atmosphere using GAIA, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 幕張メッセ国際会議場, 2017 年 5 月 23 日.
- <u>品川 裕之</u>, <u>陣 英克</u>, <u>三好 勉信</u>, <u>藤原 均</u>, <u>横山 竜宏</u>, 大塚雄一, 垰 千尋, GAIA を用いたプラズマバ ブル発生予測について, 第 142 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 京都大学宇治キャンパス, 2017 年 10 月 19 日.
- 3. <u>品川 裕之</u>,大気圏・電離圏モデルに関する最近の話題,高緯度電離圏の電気力学過程およびその磁気圏や熱圏との結合過程に関する研究集会,京都大学理学部,2017年11月15日.

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 models and their evaluations

若月泰孝・茨城大学・理学部

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、関東域の夏季を対象とした高解像領域大気モデル実験を実施した.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2種類の実験を実施した. 一つは、都市効果を単層都市キャノピーモデル(SPUC; Aoyagi and Seino, 2011)で表現したものと、都市の粗度効果のみを考慮し、熱的効果を入れなかったものの2種類である.都市効果を抜いた実験も実施していたが、今年の中には終わらなかった.

SPUCは,夜間のヒートアイランド現象に大きく影響を及ぼした.深 夜から早朝の最低気温は,東京近郊の都市域だけ有意に高くなった. 一方,雲降水プロセスに関しては,熱環境ほど大きな違いを示さなか った.SPUCを用いると、午後から夜にかけて都市の混合層高度が高く なった.混合層の発達は,都市域で低気圧偏差を作り出し,夕方を中 心として、収束が強化された.それらの変化に伴い、東京から神奈川 の湾岸域を中心として雲量の増加がみられた.ただし,雲量増加のシ グナルは,混合層高度の上昇や低気圧化,収束強化のシグナルと比べ るとわずかしかない。これは,混合層高度の発達とともに,乾燥化も 進んでしまったためである.水蒸気混合比は有意に減少していた.降 水量の変化については,雲量以上に不明瞭で,ほとんど違いは見られ なかった.

Kusaka et al. (2014)は、4km解像度と少し粗い計算ではあるものの、都市効果で降水が増加することを数値モデルシミュレーションで示唆した.本研究は、都市を完全に抜いた実験が終了していないので、類似の比較はできないが、この結果を用いて考察すると、都市の影響で雨が増えるのは、主に都市の力学効果によるものと推定できる. さらなる調査が必要である.

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.
- Kusaka, H., A. Suzuki-Parker, Y. Takane, N. Furuhashi, 2014: Mechanism of Precipitation Increase with Urbanization in Tokyo as Revealed by Ensemble Climate Simulations. J. Appl. Meteor. Climatol., 53, 824-839.



図1: 2m気温の時刻別の比較 (SPUCありマイナス SPUCなし)



図2: 混合層高度の時刻別の比較(SPUCありマイナスSPUCなし)



図3: 降水量の時刻別の比較 (SPUCありマイナス SPUCなし)

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し、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。

2017年9月初旬、太陽に活発な活動領域NOAA12673が急速に発展し、Xク ラスフレア4つを含む52の太陽フレアが発生(図1)、それらに伴う現象による社会 影響がニュースにも取り上げられ、注目を浴びたことが記憶に新しい。本研究で は、これらの一連のイベントのCMEの再現を試み、リアルタイムSUANOOO-CME システムの構築を進めた。一部の太陽フレアに伴い3回の地球方向に向けたハ ローCMEが発生、衝撃波が地球の位置を通過した。そのうち2回目の衝撃波通 過時9月7日から8日にかけて南向きの惑星間磁場が到来し(図2下段)、磁気 嵐が発展した。

本研究では、リアルタイムでCME到来前に得られる観測データのみからCME予 測を可能にする手法を模索した。その結果、地球(日本)に影響を耐えたX9.3 クラスフレアに伴うCMEの発生位置およびCME内部のフラックスロープの回転角 が、地球に到来する太陽風プロファイルを大きく変えうることが明らかになった。 観測された太陽風プロファイルをよく再現したケースの結果を図2に示す。予報 での利用のためには、CMEパラメータを自動で与える仕組みが必要であり、これ らの決めることが難しいパラメータを変動させてアンサンブル予測を行うシステムを 開発している。









図 2 SUSANOO-CME で再現された CME の伝搬の様子(上段)。下段は、地球の位置 での太陽風変動のグラフ(赤線)と DSCOVR による太陽風 in situ 観測(色)。縦の青 線(DOY250.875)が右上段の9月7日21:00 UT に対応する。

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<sub>2</sub>+)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 果が、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(NGIMS)によって観測された火星 上部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の下層大気・中層大気・下部熱圏の大気大循環モデル から得られた大気重力波のスペクトル情報や風速場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する。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加熱効率のどちらがより観 測を説明しうるかを比較調査するとともに、熱圏におけるO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Hなどの密度や温 度の高度分布がどのような影響を受け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10 0km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29年度は、前年度までに初期的な開発を行った火星熱圈DSMCモデル[K. Terada et al., 2016]に、大気重力波の分散・分極関係式を用いて下側境界から大気重力波を入力し、 様々な鉛直波長スペクトルの大気重力波の伝播・飽和・散逸特性を調査した。そして、MA VEN探査機のNGIMS観測データを用いて火星上部熱圏における大気重力波の活動度の高 度分布と緯度経度分布を解析し[N. Terada et al., 2017]、数値実験結果と探査機観測の組 成ごとの振幅や位相差を比較することにより、火星上部熱圏および外圏底近傍で観測され る大振幅擾乱は鉛直波長が200km以下の大気重力波では説明がつかない(鉛直波長が200k m以上の重力波が必要もしくは他の要因により生成)ことを明らかにした。

### 【成果発表】 (論文発表)

- Terada, N., F. Leblanc, H. Nakagawa, A. S. Medvedev, E. Yigit, T. Kuroda, T. Hara, S. L. England, H. Fujiwara, K. Terada, K. Seki, P. R. Mahaffy, M. Elr od, M. Benna, J. Grebowsky, and B. M. Jakosky, Global distribution and para meter dependences of gravity wave activity in the Martian upper thermospher e derived from MAVEN/NGIMS observations, Journal of Geophysical Research, 122, pp.2374–2397, doi:10.1002/2016JA023476, 2017.
- Terada, K., N. Terada, H. Shinagawa, H. Fujiwara, Y. Kasaba, K. Seki, F. Le blanc, J.-Y. Chaufray, and R. Modolo, A full-particle Martian upper thermosph ere-exosphere model using the DSMC method, Journal of Geophysical Researc h, 121, pp.1429-1444, doi:10.1002/2015JE004961, 2016.

(学会・研究会発表)

- Terada, N., K. Terada, H. Nakagawa, F. Leblanc, A. S. Medvedev, E. Yigit, T. Kuroda, H. Fujiwara, and K. Seki, Gravity waves in the Martian exosphere, 地球電磁気・地 球惑星圏学会第142回総会および講演会, 2017年10月15日~2017年10月19日, 京 都大学宇治キャンパス(京都府宇治市)
- ・ 寺田 直樹,惑星大気・プラズマシミュレーション,STE シミュレーション研究会 -太陽
   地球惑星系複合システムのシミュレーション研究・2017年9月6日~2017年9月8日, 神戸大学統合研究拠点(兵庫県神戸市)(招待講演)
- Terada, N., K. Terada, H. Nakagawa, F. Leblanc, A. S. Medvedev, E. Yigit, T. Kuroda, T. Hara, S. L. England, H. Fujiwara, K. Seki, P. R. Mahaffy, M. Elrod, M. Benna, J. Grebowsky, and B. M. Jakosky, Thermospheric Perturbations at Mars, Venus, and Earth: Solar Wind or Lower Atmosphere Forcing?, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 14th Annual Meeting, Singapore, 6-11 August 2017. (Invited)
- Terada, N., K. Terada, H. Nakagawa, S. Maeda, F. Leblanc, A. S. Medvedev, E. Yigit, T. Kuroda, T. Hara, S. L. England, H. Fujiwara, K. Seki, P. R. Mahaffy, M. Elrod, M. Benna, J. Grebowsky, and B. M. Jakosky, MAVEN/NGIMS observations and full-particle DSMC modeling of gravity waves in the Martian upper thermosphere, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, Chiba, 20-25 May 2017.

高エネルギー粒子ハイブリッドコードの開発 Development of Energetic-Particle Hybrid Simulation Code

天野孝伸(東京大学·理学系研究科)

宇宙プラズマでは高エネルギーの非熱的粒子が背景の熱的プラズマや、磁場と同程度のエ ネルギー密度を持つ場合がしばしば見られる.熱的プラズマのジャイロ半径や慣性長より も十分空間スケールが大きい巨視的なダイナミクスは電磁流体(MHD)で精度良く近似され るが、高エネルギー成分が存在する場合にはそのジャイロ半径が大きいため MHD スケー ルにおいても運動論効果が無視できない.本研究では高エネルギー粒子の運動論を取り入 れ、背景プラズマについては電磁流体(MHD)として近似し、両者を自己無撞着に連立させ た高エネルギー粒子ハイブリッドコードの開発を行った.

本研究では流体近似した電子・イオンの 2 成分に加えて,任意の質量・電荷を持つ運動論 的成分から成る系を考えた.これにより,(1)MHD,(2)準中性 2 流体,(3)ハイブリッドの いずれのモデルにもある極限において帰着する,より一般的なモデルを構築することに成 功した.このモデルはこれらの中間的な場合として,本研究の目的である高エネルギー粒 子ハイブリッドモデルを含有する.特にこのモデルでは質量や電荷についても任意である ため,高エネルギー電子成分の運動論効果についても正しく考慮していることは特筆に値 する.

本研究で新たに開発した並列化された 3 次元シミュレーションコードを用いて,実際にこ れらの特徴を確認した.シミュレーションコードは HLL-UCT と呼ばれる div(B)=0 を保証 する近似リーマン解法による流体・磁場の時間発展と,PIC 法を用いた運動論的成分の発 展を同時に扱う.開発したコードは系の固有モードや種々の線形不安定性を理論予測通り に再現することを示した.また,温度異方性が励起する firehose 不安定性について,(1)熱 的成分が温度異方性を持つ場合,(2)非熱的成分が温度異方性を持つ場合,の両者について 数値シミュレーションを行ったところ,両者の非線形発展が顕著に異なることも明らかに なった.これは同じプラズマベータ・温度異方性を持つ場合でも,圧力を保持する成分の ジャイロ半径などの違いが不安定性の非線形発展を支配することを意味し,MHD スケール においても高エネルギー粒子の運動論効果が重要になる可能性を示唆する結果である.