

7. 計算機利用共同研究 目次詳細

(所属・職名は平成29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
横山 央明	東京大学	理学系研究科	准教授	フレアを起こす4重極活動領域の形成	344
横山 竜宏	国立研究開発法人 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	346
中村 晃三	国立研究開発法人 海洋研究開発機構	シームレス環境予測 研究分野	主任研究員	雲解像モデルCReSSに組み込まれたピン法雲微 物理モデルの改良	348
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	350
深沢 圭一郎	京都大学	学術情報メディアセ ンター	准教授	エクサフロップス計算に向けたMHDコードの 様々なCPUアーキテクチャへの最適化	352
松清 修一	九州大学	大学院総合理工学研 究院	准教授	無衝突衝撃波遷移層における微視的不安定性	354
森本 昭彦	愛媛大学	沿岸環境科学研究セ ンター	教授	物理低次生態系結合モデルによる日本海の低次 生態系の変動に関する研究	356
渡邊 智彦	名古屋大学	大学院理学研究科	教授	磁気圏-電離圏結合系における磁気流体不安定 性とAlfven乱流	358
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	360
中村 琢磨	オーストリア科学ア カデミー	宇宙科学研究所 (I WF)	任期付研究 員	3次元運動論的シミュレーションによる磁気リ コネクションジェット先端領域の研究	362
薄 良彦	大阪府立大学	大学院工学研究科 電 気・情報系専攻 電気 情報システム工学分野	准教授	広域電力システムのデータ駆動型運用技術構築 に向けた200m超解像度気象シミュレーション	363
寺田 直樹	東北大学	理学研究科	准教授	高次精度中心スキームの開発	364
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	366
馬場 賢治	酪農学園大学	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	369
天野 孝伸	東京大学	理学系研究科	准教授	高エネルギー粒子ハイブリッドコードの開発	371
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	372
品川 裕之	国立研究開発法人 情報通信研究機構	電磁波研究所・宇宙 環境研究室	短時間研究 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	374

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
井上 諭	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	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	376
安永 数明	富山大学	理工学研究部	教授	日本海沿岸地域における冬季の降雨・降雪の特性に関する研究	378
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	380
塩田 大幸	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	データ同化連結階層太陽コロナシミュレータの開発	381
銭谷 誠司	国立天文台	理論研究部	特任助教	無衝突磁気リコネクションの運動論的研究	382
朴 京善	忠北大学校	基礎科学研究所・天文宇宙学科	招聘教授	3次元グローバルMHDシミュレーションを使用したdipole tiltの影響の研究	383
杉山 耕一郎	松江工業高等専門学校	情報工学科	准教授	火星版 CReSS を用いた火星表層環境評価	385
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	387
松村 充	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	研究員	太陽フレアに対する電離圏の応答の数値シミュレーション	390
林 啓志	中国科学院空間科学 研究センタ (NSSC/ CAS)	宇宙天気研究グループ	招聘研究 教員	複数の太陽周期にわたる時間的に連続した太陽風MHDモデリング	392

フレアを起こす4重極活動領域の形成 Formation of a Quadrupolar Active Region Producing a Flare

横山央明 東京大学 理学系研究科

太陽の、デルタ型黒点を持つ活動領域は、巨大なフレアの発生源として知られている。そのような活動領域の一部は、2つの双極の黒点の衝突で誕生すると考えられ、複数の先行研究が2箇所からの磁束管浮上のシミュレーションでそれを再現した ([1], [2])。一方、巨大なフレアは磁束ロープ（ねじれた磁束管）の上昇に起因すると考えられているが、先行研究のシミュレーションではそのような磁束ロープ放出については調べられておらず、デルタ型黒点上空でフレアがどのように起こるかは未解明である。よって、本研究はモデルを改良し、デルタ型黒点上空の磁束ロープ放出の発生過程・発生場所・条件を調べることを目的とする。

太陽の上部対流層からコロナまでを模したシミュレーションボックスを用意し、3次元成層大気中で磁気流体方程式を解いた。広いパラメータレンジや異なるコロナ磁場環境を用いて、2箇所からの磁束管浮上のシミュレーションを行った。名古屋大学 FX100 および UV2000 を使って、計算・解析を行った。

計算の結果、双極の黒点のループ同士の磁気リコネクションと磁束管のねじれに起因する黒点回転により磁束ロープが生成されることを発見した。また、その磁束ロープは、初期の背景に磁場がない場合は上昇を停止するが、浮上磁場とリコネクションを起こすような向きの磁場があるときには上部境界まで上昇することが判明した。特に、ロープがキンク不安定の臨界までねじられ、ひねりながら上昇していくことを発見した (図1)。加えて、本研究ではパラメータサーベイを実施し、磁束ロープの生成・放出条件を調べた。

考察として、対流層の磁束管のねじれがロープ生成にとって重要であり、初期の背景磁場の強さや高さ方向の減少率が上昇の仕方を決定することが分かった。これらは、4重極活動領域における新たな発見であった。

本研究により、デルタ型黒点の形成から、磁束ロープの生成と放出までを統一的に理解することが可能になった。

引用文献

[1] Toriumi, S., Iida, Y., Kusano, K., Bamba, Y., & Imada, S. 2014, *Solar Physics*, 289, 3351

[2] Fang, F., & Fan, Y., 2015, *ApJ*, 806, 79

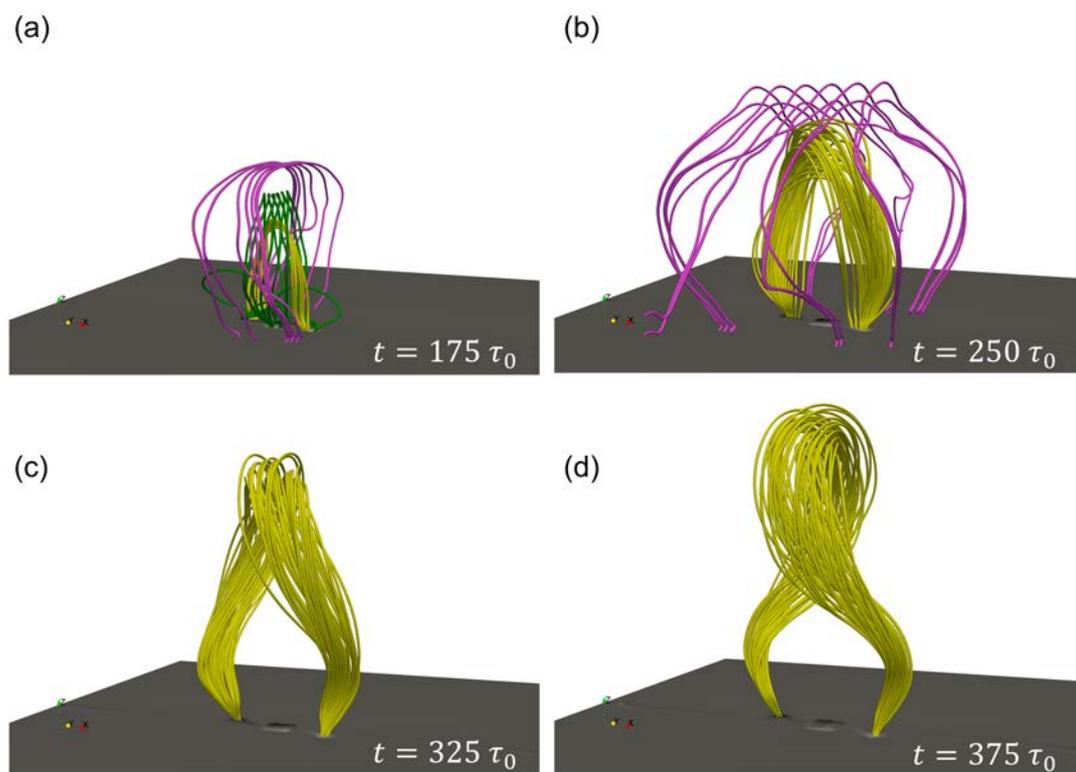
成果発表

Oi, Y., Yokoyama, T., & Toriumi, S., Flux Rope Formation and Eruption in a Quadrupolar Active Region Holding a Delta-spot, *Hinode 10*, 名古屋大学, 2016年9月5日

大井喜智、横山央明、鳥海森、デルタ型黒点を持つ四重極活動領域におけるフラックスロープの形成と放出、天文学会秋季年会、愛媛大学、2016年9月16日

大井喜智、デルタ型黒点を持つ四重極活動領域における磁束ロープの形成と放出に関する数値的研究、東京大学修士論文、2017年3月

図1 背景磁場とのリコネクションにより、ひねりながら放出を起こす磁束ロープ



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、さらに空間分解能を向上させ、プラズマバブル内部の密度変動のパワースペクトルを求めることに成功した。その結果は、過去の衛星、ロケット観測とよく一致することが明らかとなった。

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0.5km以下まで向上させることで、1km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、高度400kmから500kmで平均した東西方向の密度変動のパワースペクトルを示す。流体の乱流構造に類似したスペクトルが得られており、波長3-4km付近でスペクトルの傾きが変化している。このようはスペクトルの特徴は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。

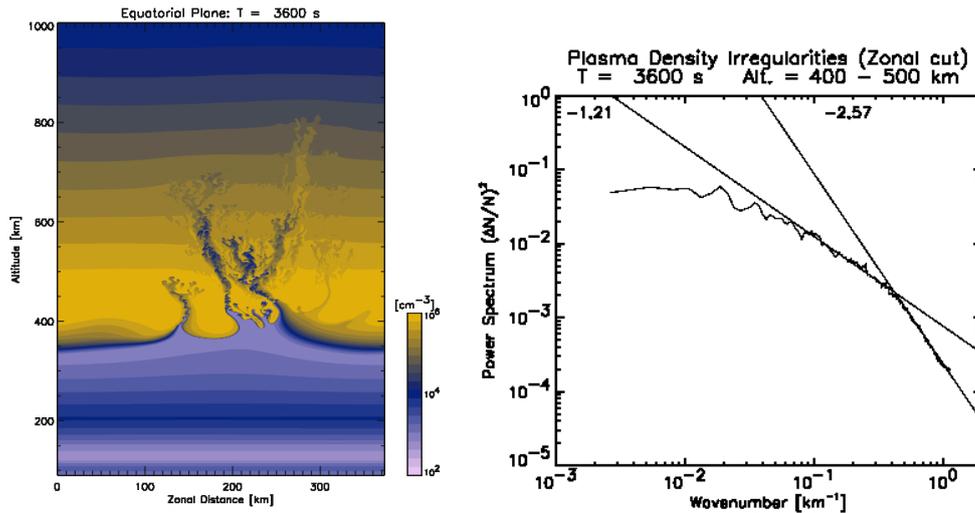


図 1: プラズマバブルの東西断面と、高度 400km から 500km で平均した密度変動のパワースペクトル。

成果発表

Yokoyama, T., and C. Stolle, Low and midlatitude ionospheric plasma density irregularities and their effects on geomagnetic field, *Space Sci. Rev.*, doi:10.1007/s11214-016-0295-7, 2016.

Yokoyama, T., R. F. Pfaff, C. Stolle, and S.-Y. Su, Sub-kilometer simulation of equatorial plasma bubble and comparison with satellite observations, 2016 AGU Fall Meeting [San Francisco, USA: December 2016].

Yokoyama, T., High-resolution modeling of equatorial plasma bubble, ISEE Workshop on Ionospheric plasma bubble seeding and development [Nagoya: November 2016] (Invited).

Yokoyama, T., H. Jin, and H. Shinagawa, Global and regional ionospheric modeling to understand equatorial plasma bubble, The 4th Asia Oceania Space Weather Alliance Workshop [Jeju, South Korea: October 2016].

Yokoyama, T., and C. Stolle, Numerical simulation of magnetic field variation associated with equatorial plasma bubble, 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference [Seoul, South Korea: August 2016] (Invited).

横山 竜宏, 電離圏バブルモデルの課題と展望, 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 [名古屋: 2017 年 1 月] (Invited).

横山 竜宏, Robert F. Pfaff, Claudia Stolle, Shin-Yi Su, 高精細プラズマバブルシミュレーションと衛星観測との比較, 第 140 回 地球電磁気・地球惑星圏学会講演会 [福岡: 2016 年 11 月].

横山 竜宏, 陣 英克, 品川 裕之, Claudia Stolle, 高精細プラズマバブルシミュレーションと地上・衛星観測との比較, 第 10 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, pp. 27-29 [宇治: 2016 年 9 月].

横山 竜宏, 陣 英克, 品川 裕之, Claudia Stolle, 高精細プラズマバブルシミュレーションと地上・衛星観測との比較, 平成 28 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 [仙台: 2016 年 9 月].

横山 竜宏, Claudia Stolle, 赤道プラズマバブルに伴う磁場変動の数値シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会 [千葉: 2016 年 5 月].

雲解像モデルCReSSに組み込まれたビン法雲微物理モデルの改良 Improvement of the bin microphysical scheme in CReSS

中村晃三、海洋研究開発機構・シームレス環境予測研究分野

研究目的

現在の多くの気象モデルの雲微物理過程で使われているバルク法（一般に水滴をごく少数のグループに分け、それぞれのグループの質量・粒子数の変化を扱う方法だが、特によく使われているのは、水滴を落下しない雲と落下する雨の2種に分けて扱う方法）は、様々な過程に関して経験的に決めたパラメタリゼーションスキームを含んでいる。例えば、雲粒同士の衝突併合による雲から雨への変換率を表すautoconversionスキームには、限られた条件下で決められたパラメータが含まれており、さまざまな環境へ適用するとき、それらのパラメタリゼーションがモデルの再現性を悪くしている可能性がある。CReSSに組み込まれているビン法モデル（バルク法に比べ、はるかに多くのグループを考える方法。ここでは、久芳・藤吉によって開発されたモデル、略してKFモデルを扱う）は、そのようなパラメータの不確かさが小さく、よい再現性が期待できるモデルである。このモデルの再現性を向上させ、さらに、その結果を使って高精度で効率的なバルク法を開発することが本研究の目的である。

研究内容および結果

これまでに開発しCReSSに組み込んだビン法雲微物理モデル（KFモデル）の特徴の1つは、上昇流中で、過飽和になって活性化する凝結核の数（最初にできる雲粒の個数密度）を、鉛直速度を使ったパラメタリゼーションによって決定していることである。この「気塊の上昇に伴ってどのサイズまでの凝結核が活性化し、雲粒になるか」という問題は、その後の凝結および衝突成長に大きく影響する問題で、ビン法モデルで工夫されるポイントの1つである。これまでの多くのモデルでは、格子ごとの相対湿度を使ってその個数密度を決めるパラメタリゼーションスキームが使われてきた。しかし、活性化の過程は、活性化した大きな凝結核の凝結成長が上昇による過飽和を解消し、小さな凝結核の活性化を妨げるという水蒸気獲得競争の過程であり、通常の格子モデルでの相対湿度では、格子間隔や時間ステップが大きすぎるため、十分よくその過程を表現できないと考えられる。そこで、KFモデルでは、様々な粒径分布や上昇流などの条件を変化させたパーセルモデルでの上昇過程の実験結果から、鉛直速度の関数として上昇中の最大の過飽和度を決め、その値から活性化する凝結核の最小の大きさを決めることにした。

このモデルを、大西洋の貿易風帯積雲の再現実験に適用した。（設定などは、GCSS比較実験のホームページを参照してください。）その数値実験結果を観測や他のビンモデルと比較すると、雲内の平均雲粒数密度が高さとともに大きく減少するという結果が得られた。この点を改善するため、活性化スキームを「雲粒がある場合には、その凝結成長による乾燥効果を上昇流による加湿効果から引き、その正味の加湿効果に対応する上昇流によって決定する最大達成過飽和度を使って雲内で活性化する最小凝結核を決定する」というように拡張し、その結果、前述の欠点を改善することができた。

その結果を使って、バルク法を開発するために、ビンモデルでの雲微物理過程による変化を、バルク法で考えるそれぞれの過程（雲粒の凝結、蒸発、autoconversionと呼ばれる雲粒同士の衝突による雨の生成、雨粒による雲粒の併合、雨粒の凝結、蒸発、落下など）に対応する部分に分け、それをバルク法で扱う物理量の関数として表すことを考えた。説明変数の数は2つで、関数形としては、基本的には、簡単な指数関数型を考え、様々な物理量を説明変数の候補とし、それぞれの過程について、もっとも小さな誤差を与える説明変数を見つけた。例えば、autoconversionに関しては、雲水混合比と雲粒数密度を使うのがいいことが分かった。

バルク法に含まれる一つ一つの過程に関して、このような結果を得ることができたが、その結果がもっともらしいかどうかを、一つ一つの過程について調べるため、以下のようにビン法の中で個別の過程だけをバルク法に置き換える方法を使った。それは、例えば、autoconversion の場合には、ビン法の計算から、autoconversion に対応する部分についてだけ元に戻し、その代わりに、バルク法で計算される量だけの変換が

起こると考える。バルク法では雲水全体の变化と雨水全体の变化しか与えられないので、雲と雨それぞれのグループの中で、どのビンからどれだけの量に変換にかかわっているかは、ビン法の計算結果の比率に基づいて各ビンに分配することで計算する。このようにして、**autoconversion**以外の部分はビン法を使うことで、**autoconversion**だけをビン法に組み込むことができる。図は、このようにして得られた結果の雲水・雨水混合比の鉛直分布で、これまでの他のバルク法では、ビン法の結果に比べて雨への変換が少ないが、今回の結果はある程度改善していることを示し、このような方法がバルク法の開発に有効であることがわかる。

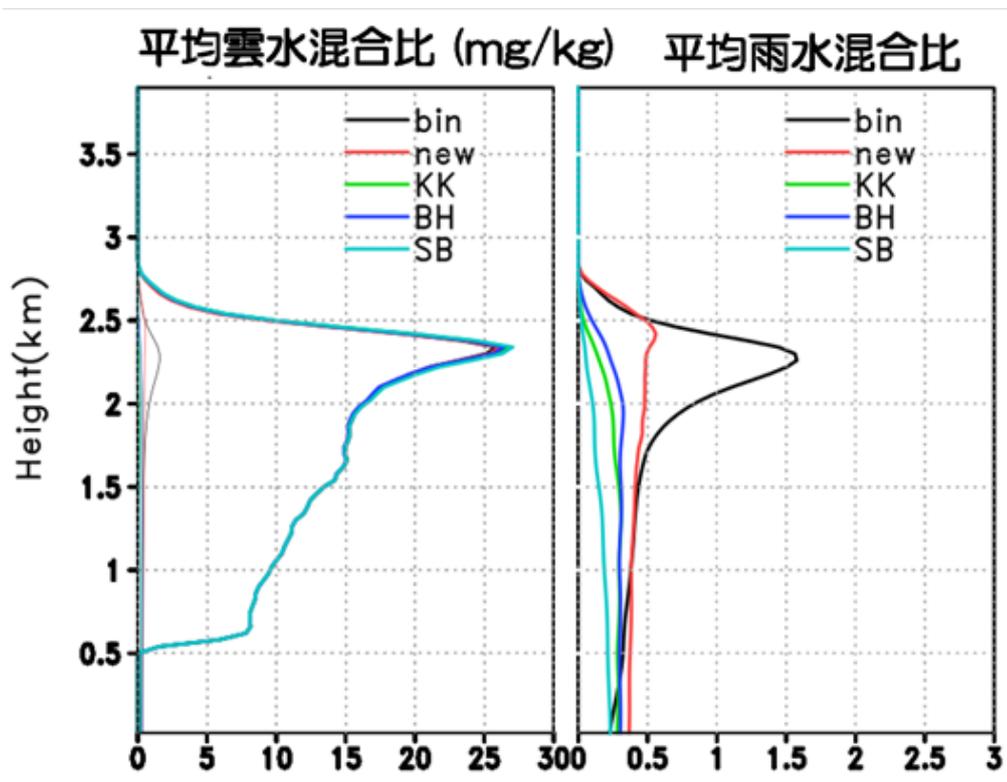


図
ビン法とビン法の**autoconversion**過程だけにバルク法を組み込んだモデルでの雲水と雨水の水平平均値の鉛直分布。

黒線：ビン法の結果。黒以外はバルク法で、赤線が今回の結果。KK: Kha iroutdinov and Kogan (2000)、BH: Beheng(19 94)、SB: Seifert and B eheng(2001)は、これまでの代表的なバルクモデル。

まとめ

久芳・藤吉によって開発された雲微物理過程モデルの改良を進め、さらにその結果を使ってバルク法モデルの開発を行った。開発したバルク法モデルの有効性を確かめるため、ビン法の中で、バルク法のある過程に対応する部分だけをバルク法の結果に置き換える方法を考案し、その有効性を示した。

参考文献

<http://projects.knmi.nl/rico/> GCSS(GEWEX Cloud System Study)で行われたRICO(Rain In Cumulus over Ocean)のホームページ。

Beheng, K. D., A parameterization of warm cloud microphysical conversion process, Atmospheric Research, 33, 193-206, 1994.

Khairoutdinov, M. and Y. Kogan, A new cloud physics parameterization in a large-eddy simulation model of marine stratocumulus, Mon. Wea. Rev., 128, 229-243, 2000.

Seifert, A. and K. D. Beheng, A double-moment parameterization for simulation autoconversion, accretion and selfcollection, Atmospheric Research, 59-60, 265-281, 2001.

成果発表（当該年度に行った口頭発表を含む）

中村晃三、藤吉康志、坪木和久、久芳奈遠美、ビン法雲微物理モデルを使った積雲境界層の再現実験（凝結核の活性化スキームと関連して）、日本気象学会春季大会、2016/05/20

Nakamura, K., Y. Fujiyoshi, K. Tsuboki, N. Kuba, Development of a bulk parameterization scheme of warm rain using bin scheme model results, The 4th International Workshop on Non-Hydrostatic Model (NHM2016),2016/12/02.

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規定する上で重要な情報の宝庫である。近年HPを通過したボイジャー1号の観測では、太陽圏起源の異常宇宙線 (ACR) と銀河宇宙線 (GCR) の急激な減少・増加の切り替わりが生じた時点をもってHP通過と判断したが、それ以前のACRとGCRの急激な変動には明瞭な相関が見られないことも判明してきた。これはHP近傍の構造が単純な不連続面でなく、より複雑な形状を呈していることを示唆するものである。観測データは星間空間の環境 (電磁場、粒子とも) が比較的安定したものであることを示していることから、時間・空間的に変動する太陽圏内部 (heliosheath; 以下HS) の構造がHP領域に及ぼす影響を評価する必要がある。またHP近傍は星間空間から到来する高エネルギー環境の緩衝領域という側面も持ち、これを向かい受ける太陽圏側の (ACRに代表される) 高エネルギー成分との相互作用過程は、太陽圏環境の外部境界条件を決定する必須の要素である。本研究では、ACRの起源粒子であるピックアップイオン (星間中性粒子が太陽圏内で帯電したもの; 以下PUI) のHP近傍における生成・加速・輸送過程について、イオンの運動スケールに起因する現象の詳細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。具体的には特にHPが単純な電磁流体不連続面である場合・太陽風が運ぶ電流シートの多層構造となっている場合・ケルビン・ヘルムホルツ不安定に代表されるプラズマ混合過程で変動する場合、それぞれを仮定してHS内で生じる衝撃波や乱流との相互作用の影響を定量的に評価する。

【研究方法】

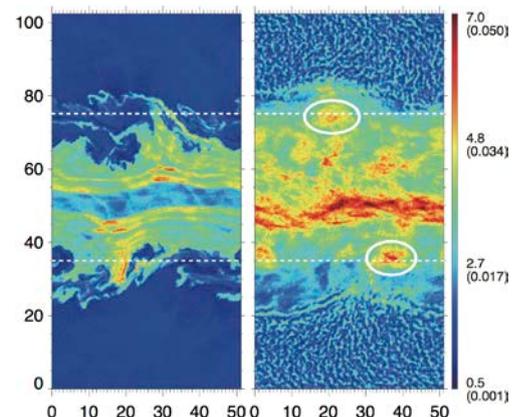
HP領域を2次元構造で模した数値モデルを作成し、粒子ハイブリッドコード (イオンを個別粒子として、電子は電荷中性を保証する質量ゼロの流体として扱う) を用いたシミュレーション計算を名古屋大学情報基盤センターのスーパーコンピュータで行った。本年度は星間プラズマと太陽圏プラズマの流れが接しているときのケルビン・ヘルムホルツ (KH) 不安定の発展において、星間プラズマ中にPUIを含む場合の電磁場構造の形成過程およびHPを介した粒子の混合過程、特にPUIのエネルギー・空間分布の変動を検証した。

時間ステップ、空間グリッドはそれぞれ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0.001、0.2を与え、計算空間は256x512グリッドの周期境界を与えた。速度遷移層の厚さを0.5、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1%、磁場をプラズマ流と垂直に取り、圧力平衡を満たすように設定した。

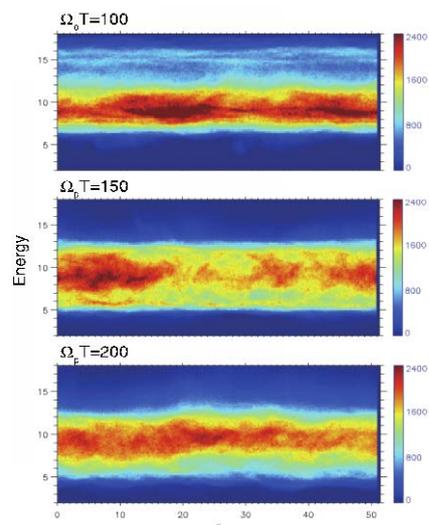
【研究結果】

右図に $\Omega_{pt}=200$ のときの (左) プロトン (右) PUI の密度の空間分布を示す。密度の高いところが星間プラズマ領域に対応している。KH不安定は既に十分に成長して、渦構造の形成→崩壊・合体→乱流化に至っているのが見られる。PUI密度は大局的にはプロトン密度と同様の構造を示している一方で、局所的には元々星間プラズマ領域中のみ存在していたPUIの一部が太陽圏内部に取り込まれている (図中白丸で囲ったところ) 様子も確認できる。

近年IBEX衛星の観測で発見された、HP近傍の高速中性粒子 (ENA) 密集領域 (IBEXリボン^{[1])}) の物理



特性を理解することを、本研究の主目的の一つとしている。その粒子源として最有力視されているPUIの振舞の検証にあたってIBEX観測との比較を想定し、y方向に積分したエネルギー別PUI密度のx方向の構造が時間の経過とともに変動する様子を右図に示した。IBEXリボンに見られた空間構造の移動が、KHの成長に伴うものとして解釈可能であることを示唆している。



【まとめ】

本課題は今年度から着手したもので、研究結果はまだ予備的なものである。現時点では初期の圧力平衡が厳密に保持されず、人工的に発生する磁気音波が渦構造形成に影響を与えてしまうなどの問題があり、初期条件の与え方を改良する必要がある。また現行の数値モデルでは、PUIは初期条件で与えられている（速度空間で背景プラズマ速度を半径とする球対称分布）が、IBEXリボンとの関連性をより正確に評価するために、PUI-ENA間の電荷交換過程も考慮した計算モデルに拡張する予定である。

【引用文献】

[1] McComas, D. J. et al., *Science*, 2009.

【成果発表】

- 坪内 健、Pickup ion dynamics in the heliospheric boundary region、地球電磁気・地球惑星圏学会、福岡、平成28年11月22日（口頭発表）

エクサフロップス計算に向けたMHDコードの様々なCPUアーキテクチャ
への最適化
Optimization of MHD code to various CPU architecture toward
exa-flops computer

深沢 圭一郎、京都大学・学術情報メディアセンター

スーパーコンピュータと呼ばれる計算機システムは、現在のペタフロップス級計算機から、2020年頃にはエクサフロップス級計算機へ発展していると想定されている。その頃の計算機に使われるCPUはそれほど現在と変わらずXeon系が主であり、また日本においては「ポスト京」に採用されるARMも利用されると予想される。また、CPUの周波数向上が難しくなっている現在では、並列数（コア数、ノード数）やSIMDの幅を増やすことがエクサフロップスへの性能向上の手段となっている。

我々の磁気圏MHDシミュレーションコードは様々なタイプの計算機で利用されてきたが、多数のノードを利用した京では並列性能の劣化、最新のXeonでは実行効率の低下という問題が見えてきている。グローバル磁気圏を精度良く計算するために、現在は1年程度の計算時間が必要となるため、10%実効性能劣化が約1ヶ月の計算時間増加として響いてくる。これらの問題はシミュレーションコード全般に共通する問題であり、周波数以外で性能向上が進む2020年では、より顕在化し、非常に大きな問題になると容易に考えられるため、今から対処に向けた技術を蓄積していくことは非常に重要である。そこで、本研究では、名古屋大学情報基盤センターの計算機システムCX400とFX100を利用し、MHDコードの最適化を行うことを目的とした。

本年度では、SIMDに対するMHDコードの最適化を行う。CX400で採用されているHaswellアーキテクチャではSIMD幅（ベクトル幅）が従来の倍になっている。このSIMD幅はエクサフロップス級計算機では更に倍になると想定される。従来のMHDシミュレーションコードではこのSIMD幅がうまく利用できておらず、実効性能が高くなかった。そのため、SIMD幅を効率的に利用するために、配列の64bitアライメント、プリフェッチの調整、同一式中の演算数の調整や計算内のループ構造の調整をおこなった。これらにより実行効率が5%程度向上した。

次に、多数のノードを利用した場合の性能劣化に向けて、ISEE共同研究で開発中である通信と計算をオーバーラップさせる手法をMHDコードに組み込み、その性能をFX100において多数のノードを利用し確認をした。開発中の手法を組み込まない場合は、256ノード利用時（1024プロセス、8スレッド）に並列計算性能向上が見えないが、組み込む場合は性能向上が続くことが確認できた（図1）。

これらの結果は随時発表、情報公開をしており、STP分野だけでなく、様々な数値計算アプリケーションに適用できるように進めていく。

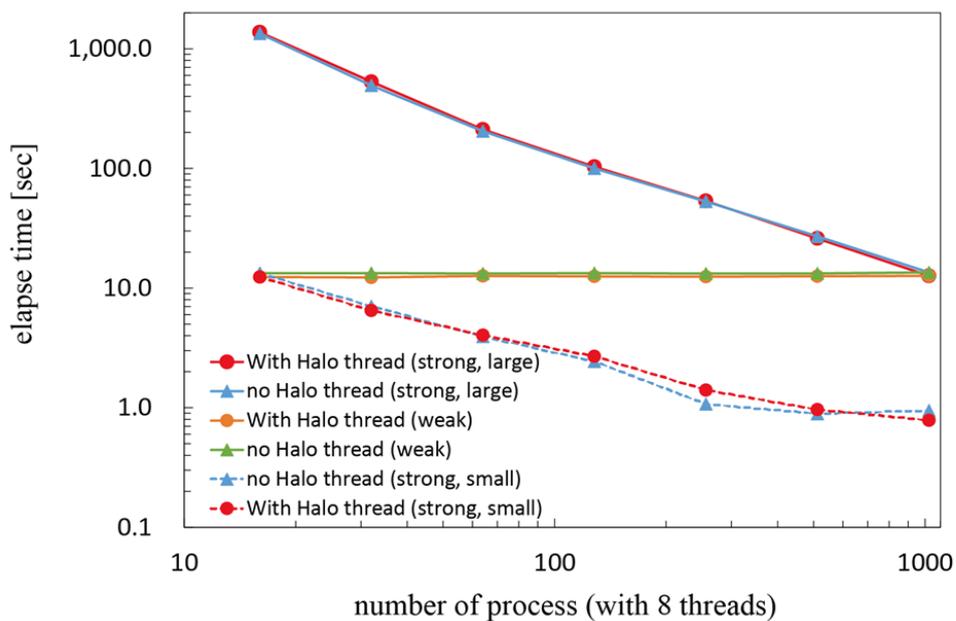


図1 FX100での Halo スレッド導入・非導入時における計算時間の変化

・国内研究会発表

深沢圭一郎、森江善之、曾我武史、高見利也、南里豪志、"並列ステンシル計算における Halo 領域通信の高効率実装"、STEシミュレーション研究会、2016年

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、従来にない高精度の多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。

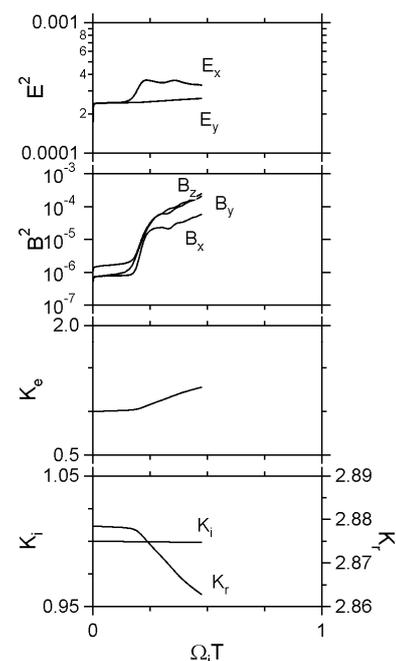
研究方法

高マッハ数の超臨界衝撃波では、入射イオンの一部が衝撃波面で反射される。磁力線が衝撃波面法線方向と垂直に近い角をなす準垂直衝撃波の場合、反射イオンは上流で磁場旋回運動を行いながら再び衝撃波に還流してくる。反射イオンが上流にせり出す領域をフットと呼ぶが、その空間サイズはイオンの磁場旋回半径 (ρ_i) 程度である。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 ($\ll \rho_i$) 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。したがって、ここではこのフットの一部 ($L \sim \rho_i/5$) 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ている。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。

研究結果・考察

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と固定し、イオン/電子質量比 (μ) と電子プラズマ/サイクロトロン周波数比の2乗 (τ) をさまざまに変えた計算を昨年までに複数行っている。今年度は、宇宙で観測される現実のパラメータに近い $\mu=1836$ 、 $\tau=25$ および $\tau=100$ とした最大規模計算 (空間グリッド数 = 2048×8192) を中心に行った。

右図に $\mu=1836$ 、 $\tau=100$ の場合 (最大規模計算) の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。当初想定以上に時間を要したため (計算の待ち時間が想定より長かった) 予定していた時間ステップまで計算が進まなかったが、他のパラメータの場合同様、不安定性による波動の励起が確認できた。 $\Omega_i T \sim 0.2$ 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ドリフト



不安定性と、ワイベル不安定性によるものと考えられる。ここに、 Ω_i はイオンサイクロトロン振動数である。電子サイクロトロンドリフト不安定性は、反射イオンの流れのエネルギーを源とし、 E_x 成分の増幅に寄与している。ワイベル不安定性はイオンの実効的な温度異方性を源としており、磁場揺動の増幅に寄与している。 $\Omega_i T > 0.25$ において、さらなる揺動磁場の増幅が見られるが、これは変形2流体不安定性によるものである。変形2流体不安定性は入射イオンの流れのエネルギーを源として、磁場揺動に加え E_x 成分の増幅にも寄与することが知られているが、 $\Omega_i T \sim 0.5$ の時点では変形2流体不安定性による電場揺動は電子サイクロトロンドリフト不安定性によるものよりも小さいことが確認できている。変形2流体不安定性は線形成長率が小さいためいまだ成長途中であり、この後さらに成長して電子サイクロトロンドリフト不安定性を凌駕する可能性がある。

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遂行中である。各不安定性は異なる粒子（電子、イオン）の応答を引き起こすため、それぞれの飽和レベルを定量的に把握することが重要になる。特に、質量比 (μ) と周波数比 (τ) を同時に十分大きな値にとることで、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高い信頼性のもとに評価することが、本研究の主目的である。そのため変形2流体不安定性が飽和状態に達するまでの最大規模計算の継続が不可欠である。

成果発表

口頭発表

1. 松清修一、梅田隆行、超臨界垂直衝撃波における微視的不安定性再考、JpGU2016年大会、千葉、2016年5月25日
2. S. Matsukiyo, Collisionless shock and particle acceleration, seminar at RCAE S GGI of HAS, Hungary, Jun. 16, 2016.
3. S. Matsukiyo, Roles of microinstabilities in collisionless shocks, East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas, Tsukuba, Jul. 11, 2016. (invited)

物理低次生態系結合モデルによる日本海の低次生態系の変動に関する研究

Study on variability in lower trophic ecosystem in the Japan Sea by means of coupled physical-ecological model

森本昭彦 愛媛大学・沿岸環境科学研究センター

1. 研究目的

東シナ海陸棚上を流れ対馬海峡より日本海へ流入する対馬暖流は膨大な熱、水、物質を水平的に輸送している。対馬暖流により東シナ海から日本海へ輸送される物質のうち、植物プランクトンの増殖に不可欠な栄養塩の輸送は、北緯40度以南の対馬暖流域の基礎生産の約8割に寄与していると言われており、対馬海峡から流入する栄養塩量の変化は日本海の低次生態系を変化させると考えられている。対馬暖流の上流に位置する東シナ海では、中国の急激な経済成長に伴う富栄養化や、長江中流に建設された三峡ダムの影響、中国北部の水不足を解消するために運河により長江の水を北部へ輸送する南水北調事業により、東シナ海の海洋環境は劇的に変化している。

本研究では九州大学で開発された日本海の物理モデルDREAMSに低次生態系モデルを結合したモデルにより、東シナ海から日本海へ流入する栄養塩量の変化に伴う日本海の低次生態系の応答を明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

九州大学応用力学研究所で開発された物理モデルDREAMSの流速・流向、水温データを使い、2種類の栄養塩、2種類の植物プランクトン、3種類の動物プランクトン、粒子態有機窒素をコンパートメントとする3次元低次生態系モデルを構築する。これまで研究代表者が観測してきた対馬海峡での栄養塩濃度を境界条件として与え、日本海の低次生態系の再現計算を行う。モデルの再現性を確認した後、日本海の基礎生産における日本海起源、対馬海峡起源、日本の河川起源の3つの栄養塩源の寄与率を計算し、日本海の低次生態系において、どの栄養塩源が重要なのか定量的に明らかにする。

3. 研究結果と考察

モデルにより計算された表層クロロフィルa濃度のA～E海域における時系列と人工衛星から得られた表層クロロフィルa濃度を図1に示す。海域Aにおいて春のブルームのタイミングが少しずれているが、全体的には季節変化を再現できており、特に海域Eの再現性は高い。PONの海底での挙動を取り得たことにより、陸棚が広がる海域Eの再現性がよくなったと思われる。一方、海域Cのクロロフィルa濃度は観測値に比べ低い。河川からの栄養塩の流入を考慮しているにもかかわらず再現性が悪いことから、成層期に下層に貯まったPONが分解されDINとなり、秋季の鉛直混合によりそのDINが有光層に運ばれるプロセスの再現に問題があると考えられる。

日本海、対馬海峡、河川、起源の栄養塩の各季節の基礎生産における

寄与率を計算した。日本海の南北で寄与率は大きく異なっており、北部は日本海起源の栄養塩、南部は対馬海峡起源の栄養塩がそれぞれ基礎生産に大きく寄与している。その割合は80%以上と高い。一方、河川起源の栄養塩の寄与は沿岸から数十Kmの範囲に限られており、その寄与率は高くても20%程度である。このことから、日本海南部の基礎生産は対馬海峡から流入する栄養塩、つまり東シナ海からの栄養塩の変化に敏感であると予想される。また、対馬海峡起源の栄養塩の寄与率の季節変化を見ると、秋季に最も高く春季に低くなっている。これは、夏季から秋季にかけて対馬海峡から流入する栄養塩量が増加することと、その栄養塩が生物過程により循環し密度躍層以深の栄養塩濃度を増加させ、さらに秋季の海面冷却による鉛直混合により再度有光層に栄養塩が供給されるためと考えられる。

4. まとめ

開発した3次元低次生態系モデルにより、日本海の低次生態系の再現計算を行った。日本海南部においては、表層クロロフィルa濃度をRMSで2.4mg/m³の精度で再現することに成功した。このモデルを使い、日本海の基礎生産における日本海、対馬海峡、河川起源の栄養塩の寄与率を求めた。日本海南部の基礎生産は80%以上対馬海峡起源の栄養塩により支えられていることが分かった。

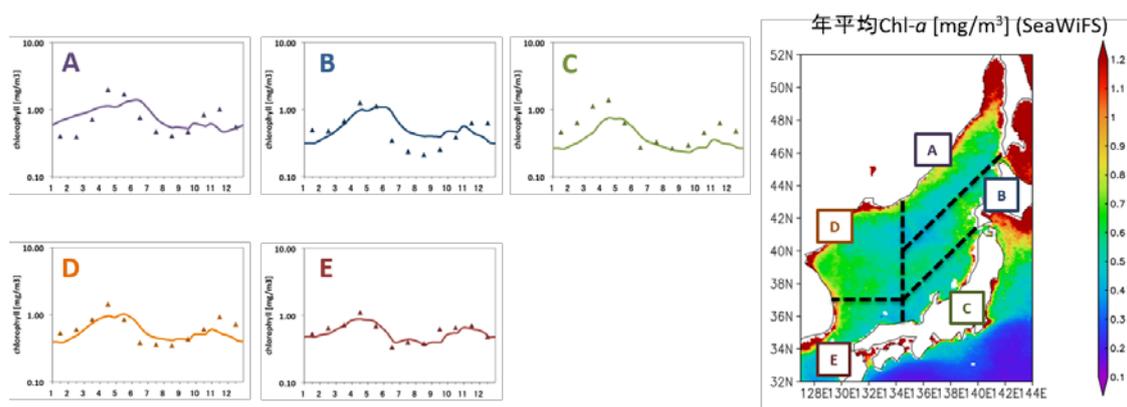


図1. 海域A~Eにおける表層クロロフィルa濃度の月変化。実線が数値モデル、△印が人工衛星により観測された値。

5. 研究成果

口頭発表・ポスター発表

- 1) 森本昭彦：S-13 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 公開シンポジウム 「日本海の低次生態系への東シナ海からの影響」
- 2) Morimoto, A., Ito, M., Shibano, R., and Ishizaka, J.: EMECS 11-Sea Coasts XXVI Joint Conference, 「Impact on lower trophic ecosystem in the Japan Sea associated with nutrient transport change through the Tsushima Strait」
- 3) 柴野良太、森本昭彦、高山勝巳、伊藤雅：2016年水産海洋学会研究発表大会 「河川供給に伴う日本海における栄養塩動態に対する影響評価」
- 4) 柴野良太、森本昭彦、高山勝巳、伊藤雅：第2回沿岸生態系の評価・予測に関するワークショップ 「日本海低次生態系への東シナ海からの栄養塩輸送の影響」

磁気圏-電離圏結合系における磁気流体不安定性とAlfven乱流
Magnetohydrodynamic instability and Alfvenic turbulence in the
magnetosphere-ionosphere coupling system

渡邊智彦 名古屋大学・大学院理学研究科

研究目的

オーロラの舞台となる地球極域電磁気圏は、完全電離プラズマで満たされた磁気圏と部分電離プラズマからなる電離層がアルヴェン波を介して相互作用する場でもある。オーロラ現象に関わる種々の不安定性（バルーニング不安定性やKelvin-Helmholtz不安定性など）の解析には、磁気圏プラズマのダイナミクスを考察するだけでなく、電離層効果を適切に取り入れることが本質的である。また、磁気圏-電離圏(M-I)結合系において初めて発現するフィードバック不安定性は、オーロラの発生と構造形成の一因をなすと考えられている。我々もこれまでにフィードバック不安定性の理論解析およびシミュレーション研究を進めてきた。

本課題では、オーロラ成長やサブストーム発生過程における磁気流体不安定性についてのより深い理解の獲得を目指す。これまでに整備を進めてきたM-I結合系の理論および数値モデルを拡張しつつ、これらに基づいたフィードバック不安定性とバルーニング不安定性の理論・数値解析を行う。特に、磁気シア効果、磁場形状効果、有限圧力効果、などに着目して解析を進める。

一方、フィードバック不安定性やバルーニング不安定性が十分発達すると、その成長の飽和後に非線形段階に移行する。そこで、上記の解析を発展させたM-I結合系の非線形シミュレーションを実行し、Alfven波がもたらす乱流状態の解析を行う。これまでの人工衛星観測[Chaston et al., PRL 2008]などにおいて、オーロラ領域上空でAlfven乱流が観測されているが、その発生過程や特性について理論的研究はいまだ十分なされていない。本課題で進めるM-I結合系の非線形シミュレーションは、その理論解析に道を拓くとともに、従来から研究が進められてきた太陽風のAlfven乱流と比較することで、その物理機構への理解を深めることを目的としている。

研究方法

本研究では、2種の数値解析コードを用いた。(1)磁気流体不安定性の線形解析では、これまでに開発した簡略化磁気流体方程式に基づいた線形不安定性・固有値解析コードを活用した。本課題では、新たに磁気シアや磁場形状効果、有限圧力効果を取り入れたモデルへと拡張し、フィードバック不安定性とバルーニング不安定性の解析に適用した。(2)Alfven乱流の解析では、理想化された理論モデルのもとでM-I結合系におけるAlfven乱流の基本特性を解明する目的のもと、スペクトル法を用いた非線形シミュレーション・コードを新たに開発した。この解析において名古屋大学のFX100計算機を利用した。

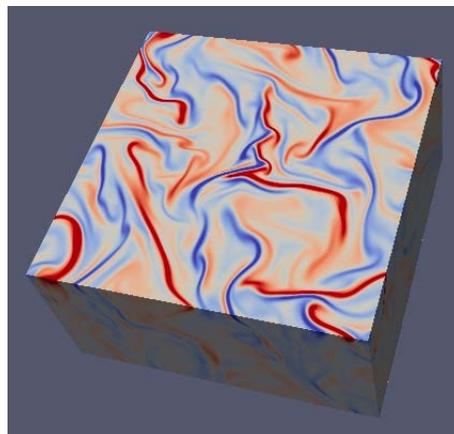
研究結果

(1)よく知られているように、オーロラ領域には、大規模沿磁力線電流(FAC)がほぼ定常的に存在する。この電流が作る東西成分の磁場は、磁力線に

実効的なシアを作り出し、Alfvén波の伝播に影響を及ぼす。この効果をフィードバック不安定性解析に取り入れ、線形成長率、周波数、固有関数への影響を評価した。その結果、数 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ 程度の沿磁力線電流が作る磁気シアにより不安定性の成長率に2倍程度の差が生じる得ることが分かった。磁気シアが有限な場合、つまり大規模FAC領域では、磁気シアゼロの場合に比べて成長率の増大が確認された。これは、大規模FAC領域と極冠域とでフィードバック不安定性の成長、ひいてはオーロラアークの発達特性に違いが現れ得ることを理論的に示唆する結果である。

(2) M-I結合系の理論モデルを、有限圧力揺動と双極子磁場形状を取り入れた場合に拡張し、フィードバック不安定性とバルーニング不安定性を同時に扱うことのできる解析手法を開発した。磁気圏のプラズマ密度分布を仮定して、圧力勾配をパラメータとして線形不安定性解析を行った結果、圧力勾配がある閾値を超えると、不安定モードがフィードバック不安定性からバルーニング不安定性へと遷移することが見出された。これはフィードバック不安定性により形成された暗いオーロラアークが、磁気圏内の圧力勾配の増加とともに、より成長率の高いバルーニング不安定性へとスイッチする可能性を示しており、特にオーロラのビーズ構造形成機構と関連して興味深い。

(3) 直線磁場を用いた理想化されたM-I結合系モデルをもとに、スペクトル法を用いた非線形シミュレーション・コードを新たに開発し、フィードバック不安定性の非線形発展を長時間にわたって解析することに成功した。このシミュレーションでは一定の対流電場を継続的に与えている。すると、線形不安定性成長の飽和とともに揺動成分の磁気エネルギーと運動エネルギーがピークした後、準定常的な乱流状態に至ることが明らかになった。ここでは揺動の磁気エネルギーと運動エネルギーがほぼ釣り合ったエネルギー等分配が実現され、いわゆるAlfvén乱流状態にあることが示された。その状態での磁気圏内の渦度分布のスナップショットを右図に示す。この成果は、オーロラの成長をもたらすフィードバック不安定性の非線形発展の結果、Alfvén乱流が自発的に生成され得ることを示唆しており、ChastonらによるFAST衛星でのAlfvén乱流やAlfvénオーロラの観測結果とも整合するもので、その起源を考える上で非常に興味深い。今後さらにモデルを拡張し、双極子磁場形状の導入やAlfvén乱流中での電子加速について研究を進める計画である。



M-I結合系の非線形シミュレーションで得られた Alfvén 乱流状態での磁気圏内の渦度分布 (上面が磁気赤道面に対応)

成果発表

以上の成果は、地球惑星科学連合同大会、SGEPSS講演会、日本物理学会秋季大会・年会などにおいて発表された。また成果の一部は、すでに以下の論文として出版されている。

T.-H. Watanabe, H. Kurata, and S. Maeyama, "Generation of Auroral Turbulence Through the Magnetosphere-Ionosphere Coupling", *New Journal of Physics* **18**, 125010 (2016).

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、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。その結果、ホール効果およびジャイロ運動効果あまり効かない場合には空間的に対称なキノコ型・泡型の密度構造が発達し、ホール効果が影響する場合には、非対称な三つ子構造が生じることが分かった。また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、キノコ型・泡型の構造の成長を阻害することが分かった。

成果発表

T. Umeda and Y. Wada, Secondary instabilities in the collisionless Rayleigh-Taylor instability: Full kinetic simulation, *Physics of Plasmas*, Vol.23, No.11, 112117, 2016. (査読付論文)

T. Umeda and K. Fukazawa, Performance comparison of Eulerian kinetic Vlasov code between

flat-MPI parallelism and hybrid parallelism on Fujitsu FX100 supercomputer, Proceedings of the 23rd European MPI Users' Group Meeting, pp.218-221, 2016. (査読付論文)

T. Umeda, N. Yamauchi, Y. Wada, and S. Ueno, Evaluating gyro-viscosity in the Kelvin-Helmholtz instability by kinetic simulations, Physics of Plasmas, Vol.23, No.5, 054506, 2016. (査読付論文)

Y. Wada, T. Umeda, and S. Machida, Vlasov simulation of the Rayleigh-Taylor instability, European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2016, Vienna, Austria, 2016.4.17-22. (ポスター発表)

T. Umeda and K. Fukazawa, Performance comparison of Eulerian kinetic Vlasov code between flat-MPI parallelism and hybrid parallelism on Fujitsu FX100 supercomputer, 23rd European MPI Users' Group Meeting (EuroMPI2016), Edinburgh, United Kingdom, 2016.9.25-28. (ポスター発表)

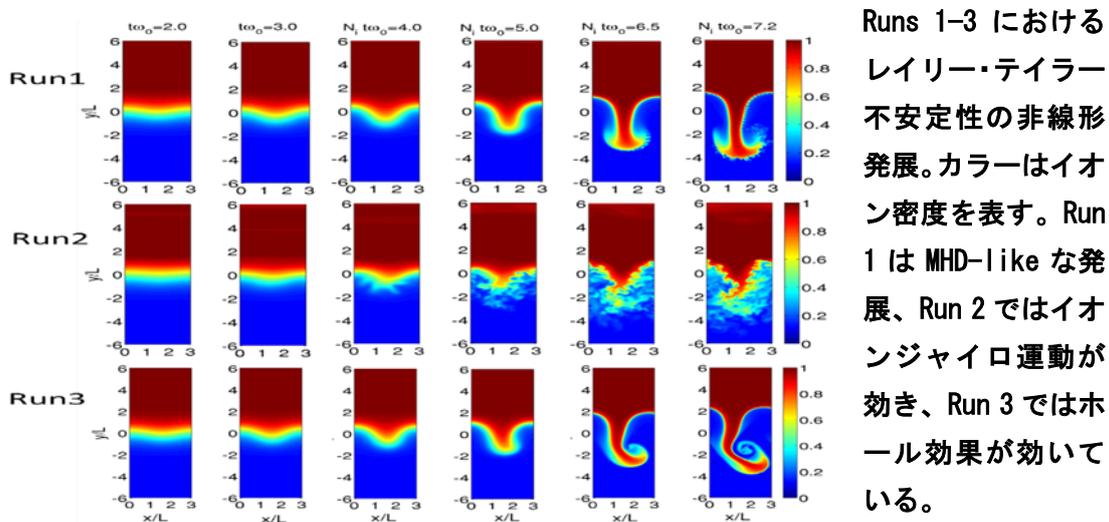
T. Umeda, Hyper-dimensional Vlasov code for space plasma simulations and its performance on the FX100 supercomputer, 35th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology (JSST2016), Kyoto, Japan, 2016.10.27-29. (口頭発表)

和田 泰尚, 梅田 隆行, 町田 忍, レイリー・テイラー不安定性のブラソフシミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ, 2016.5.22-26 (ポスター発表)

梅田隆行, 深沢圭一郎, スーパーコンピュータ FX100 におけるブラソフコードの性能評価, 第 156 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会, 小樽経済センター, 2016.9.15-16. (口頭発表)

和田泰尚, 梅田隆行, 町田忍, Secondary instabilities in the collisionless Rayleigh-Taylor instability: Full kinetic simulations, 九州大学伊都キャンパス, 2016.11.19-23. (口頭発表)

梅田 隆行, 深沢 圭一郎, KNL Xeon Phi におけるブラソフコードの性能評価, 第 157 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会, 沖縄産業支援センター, 2016.12.21-22. (口頭発表)



3次元運動論的シミュレーションによる磁気リコネクションジェット先端領域の研究
Study on the jet front region of magnetic reconnection: 3D fully kinetic simulations

中村琢磨、オーストリア科学アカデミー・宇宙科学研究所 (IWF)

本研究では、磁力線同士の繋ぎ変わりにより磁場に蓄積されたエネルギーを解放するプラズマ特有の爆発的エネルギー輸送現象である「磁気リコネクション」を対象とした数値シミュレーションを行った。計算手法は、プラズマを構成する電子とイオンを共に（超）粒子として扱い十分な数の超粒子の軌道を追うことで Vlasov-Maxwell 方程式系を解くことを可能にする「完全粒子法（full particle-in-cell method）」を用いた。

これまでの先行研究により、現実に近いイオン-電子の質量比($M_i/M_e=256$)の条件下では、磁気リコネクションのジェット先端領域が、Lower-hybrid drift instability (LHDI)及び Ballooning/ interchange instability (BICI)の3次元的な成長に伴い乱流化することが示されていた。本年度は、同シミュレーションを用いてジェット先端領域における乱流化のメカニズムをさらに詳しく調べ、LHDIに起因する電場の擾乱がBICIと結合することで、BICIの非線形成長及びその後の乱流の成長が強められることを発見した。過去の研究により、磁力線の繋ぎ変わる磁気リコネクション中心領域において、3次元的に成長するLHDIが磁気リコネクションの成長を早めることが知られていることから、本研究は、LHDIの磁気リコネクション過程における重要性をさらに高める結果と言える。本研究の詳しい結果は、下記参考文献にまとめ発表した。

また、本計算の初期条件は、オーロラサブストームのエネルギー源と考えられている地球磁気圏尾部領域をモデル化している。この領域で発生する磁気リコネクションは、2015年より運用を開始したNASAの大規模磁気圏ミッション Multiscale-Magnetospheric Mission (MMS)の主要観測対象となっており、2017年3月以降に集中的な観測が行われることから、本研究結果は近い将来、MMS衛星による実証的研究へ繋がると期待できる。

本年度はさらに、LHDIの成長が期待できない条件下での計算（具体的には、電流層中心と背景領域の密度比を1/4倍とした計算）も行った。結果の解析には至らなかったが、今後この結果を解析することでLHDIの果たす役割を系統的に理解することが期待できる。

【参考文献】

Nakamura, T. K. M., R. Nakamura, W. Baumjohann, T. Umeda, and I. Shinohara (2016), Three-dimensional development of front region of plasma jets generated by magnetic reconnection, *Geophysical Research Letters*, 43, 8356-8364, doi:10.1002/2016GL070215.

広域電力システムのデータ駆動型運用技術構築に向けた
200m超解像度気象シミュレーション
200m super-resolved weather simulation for data-driven
operation technology of wide-area power systems

薄 良彦, 大阪府立大学・工学研究科

研究目的・方法

本研究の目的は、日本周辺を対象とする2km解像度気象シミュレーションのデータと洋上ウィンドファーム(WF)を対象とする200m解像度気象シミュレーションのデータを統合的に用いて、広域連系電力システムの運用技術を確認することにある。この確立に向けて、本研究では、前年度に可能性を検討した実運用されている洋上WFの周辺域に対する200m高解像度シミュレーションを実施し、得られたシミュレーションデータに基づく洋上WFの風況特性の評価を行った。シミュレーションの方法としては貴研究所で開発されてきた雲解像モデル(CReSS)を採用した。

研究結果

本研究では、CReSSによる風向・風速予測データ(空間解像度200m, 時間解像度1Hz)と実運用されている洋上WFの実測データとの比較を行い、以下2点の知見を得た。

- ・ 風向に関するCReSSデータは標準偏差10degの精度で実測データと一致した。
- ・ 風速に関するCReSS及び実測データは類似の周波数スペクトルを示し、どちらもほぼワイブル分布に従う。

以上は、200m解像度シミュレーションを初めて実行することで明らかになったCReSSのシミュレーション能力に関する知見であり、洋上WFの特性評価のベースとなる。

まとめ

本研究では、洋上WFの周辺域に対する200m高解像度シミュレーションを実行し、シミュレーションデータに基づく洋上WFの風況特性の評価を行った。得られた結果は、国際会議[1]で一部発表し、現在学術誌への投稿論文[2]を準備している。

成果発表

- [1] F. Raak, Y. Susuki, K. Tsuboki, M. Kato, S. Eguchi, and T. Hikiyara, Wind power simulation and analysis incorporating highly-resolved weather prediction and measurement data of Japan, The 15th World Wind Energy Conference and Exhibition (WVEC2016), Tokyo, Japan, November 1 (2016).
- [2] F. Raak, Y. Susuki, K. Tsuboki, M. Kato, S. Eguchi, and T. Hikiyara, Assessment of offshore wind farm characteristics with the cloud resolving storm simulator: A case study in Japan (in preparation for submission to an archival journal, 2017).

高次精度中心スキームの開発
Development of high-order semi-discrete central schemes

寺田直樹、東北大学・大学院理学研究科

【研究目的】

本研究では、次世代の惑星電磁気圏流体シミュレーションに求められる3つの要素「不連続や衝撃波をシャープに解像する」「小振幅波動（乱流）を減衰させない」「非MHD項を組み込む事が可能」を兼ね備える高次精度中心スキームを開発する。非MHDシステム方程式系では、系の固有値・固有ベクトルを求めることが通常困難となるので、MHDシミュレーションで広く用いられている高精度風上スキームが適用出来ず、高精度解は得られてこなかった。そこで本研究では、近年、数値流体力学分野で発展が著しい高精度中心スキームの導入を行い、さらに、4次精度以上の高次精度化を実現し、非MHDシステム方程式系における遷移層・境界層や混合層スペクトルなどの高精度解を得る事を目標とする。

【研究方法】

本研究では、高精度中心スキームを適用したMHDおよび非MHDシミュレーションコードを用いる。本研究では地球惑星電磁気圏における各種遷移層・境界層や非線形・小振幅線形波動を再現する為に、各次元について数100-1000グリッド以上確保を目標とするので、名古屋大学情報連携基盤センターFX100やCX400を利用する。並列計算にはMPIを用いた並列化を行う。

【研究結果】

平成28年度は、昨年度までに開発した高次精度中心セミディスクリートスキームの実問題への適用を進めた。特に火星電離圏界面におけるKelvin-Helmholtz不安定（KHI）の時空間発展を、4次精度版の中心セミディスクリートスキームを適用した非周期境界系のMHDシミュレーションコードを用いて調査した。非周期境界系でのKHIの発達は、従来の周期境界系計算の結果とは異なり、渦構造の空間非対称の為に先頭の渦の下流側でシース流に激みが生じ、電離圏プラズマが深く挟られる（運動量輸送が従来考えられていたより急速に進む）ことを示した。また、混合層厚みの成長率の、電離圏とシースプラズマの密度比に対する依存性などのパラメータ依存性を求めた。並行して、ISEEの梅田隆行博士と共同で、運動方程式及びエネルギーの式にイオンの有限ラーマー半径（FLR）項を追加した非MHDコードを開発し、ブラソフ、フルPIC、ハイブリッドPICなどの運動論コードの結果との比較を通してFLR項の妥当性の評価を進めた。

【成果発表】

(学会・研究会発表)

- 相澤紗絵, 寺田直樹, 笠羽康正, 八木学, 松本洋介, "An MHD simulation study of the Kelvin-Helmholtz instability at the Martian ionopause with a day-to-night density gradient", 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張, 幕張メッセ, 2016/5.
- 相澤紗絵, 梅田隆行, 寺田直樹, "ケルビン-ヘルムホルツ不安定における FLR-MHD の改良と妥当性評価", STE シミュレーション研究会-太陽地球惑星系探索とシミュレーション研究-, 仙台, 東北大, 2016/9.

- 相澤紗絵, 寺田直樹, 笠羽康正, 八木学, 松本洋介, "The spatial evolution of the mixing layer in the Kelvin-Helmholtz instability at the Martian ionopause", 地球電磁気・地球惑星圏学会第 140 回総会および講演会, 福岡, 九州大学, 2016/11.
- 相澤紗絵, 寺田直樹, 笠羽康正, 八木学, 松本洋介, "The spatial evolution of the mixing layer in the Kelvin-Helmholtz instability at the Martian ionopause", 地球型惑星圏環境に関する研究集会, 東京都豊島区, 立教大学, 2016/12.
- Aizawa, S., N. Terada, Y. Kasaba, M. Yagi, Y. Matsumoto, "The spatial evolution of the mixing layer in the Kelvin-Helmholtz instability at the Martian ionopause", American Geophysical Union 2016 Fall Meeting, USA, San Francisco Moscone Center, 2016/12.

磁気圏サブストームの計算機シミュレーション
：非対称磁気リコネクションにおける接触不連続面
Computer Simulations of Geomagnetospheric Substorm
：Contact Discontinuity in the 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

太陽フレアや地球磁気圏サブストームのような、宇宙プラズマにおける大規模爆発現象において磁気リコネクションは非常に重要な役割を果たしている。これまで地球磁気圏や太陽コロナにおけるこれら磁気リコネクション現象の磁気流体的研究が活発に行われ、人工衛星観測や地上観測の結果は、磁気流体的によく説明できることが示されてきた。特に、地球磁気圏尾部における電流層を挟んで対称な磁場環境での磁気リコネクションは、全体像を含めてよく理解されてきている。一方で、太陽側地球磁気圏境界における非対称反平行磁場環境での磁気リコネクションについても研究されてきたが、リコネクションジェット付近の構造についてはよく理解されてきた一方で、その全体的な不連続構造の理解が不十分であった。特に本研究では、非対称反平行磁場環境での磁気リコネクション機構の全体的な構造と太陽風プラズマの磁気圏への流入問題を詳細に調べることを目的とした。

研究方法

本研究では、自発的高速磁気リコネクションモデルに基づいて研究を進める。つまり、磁気リコネクションは、外部境界によらずシステム内部で自発的に発達するというモデルである。磁気リコネクションが開始してから磁気流体波が境界に達する前まで計算を行えるように十分広い領域を計算領域として、磁気流体方程式を数値的に解く。不連続構造に注目するため、数値計算スキームとしては、HLLD法を用いる。計算コードは、銭谷氏のOpenMHDコードを使用している(Zenitani, S., 2016, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1604.001)。非対称な反平行磁場を初期状態として配置し、ハリス平衡状態を設定する。電流層に垂直に y 軸をとり、 $y>0$ の領域の磁場方向を x 軸正方向とする。 $y<0$ の領域の磁場強度を1に固定し低 β となるように設定する。 $y>0$ の領域の磁場強度を変えることで磁場強度比 k を設定する。つまり $k=2$ の場合、 $y>0$ の領域の磁場強度は0.5であり、以降、 $y>0$ の領域を高 β 領域、 $y<0$ の領域を低 β 領域と呼ぶ。原点付近に初期擾乱を与え、原点付近から磁気リコネクションが開始するように設定する。磁気流体計算では、物理的な抵抗は直接解くことができないため、 y 軸上原点付近のボックスに一樣に抵抗を与える。これにより、磁気リコネクション点は y 方向にのみ自由に移動可能となる。

研究結果

本報告書では、電流層を挟んだ磁場強度の比(非対称度 k)が1.1(弱非対称)、1.5、2.0(強非対称)倍とした3ケースの計算結果を示す。図1は、磁気リコネクションが十分発達した時

刻($t=2100$)での密度分布を示している。ここで、 x', y' は相似座標($x'=x/(tV_{A0}), y'=y/(tV_{A0})$)を表している。強非対称のケースである $k=2.0$ (下パネル)からわかるように、アルフヴェン速度の違いのため、低 β 領域(下側)のプラズモイドが高 β 側プラズモイドより先行している。これは弱非対称のケース($k=1.1$)の場合でも同様である。先に示したように、低 β (下側)領域のアルフヴェン速度はどのケースでも同じである。しかしながら、プラズモイド先端の移動速度が非対称度が大きくなるほど遅くなることが分かる。これは、高 β 領域のアルフヴェン速度の違いを反映している。つまり、上側の遅いプラズマを引きずることで下側プラズモイドの速度が遅くなることを示している。図2の白抜きプロットは、各ケースのプラズモイド先端の x 座標位置の時間変化を示している。先に述べたように、非対称度が大きくなるにつれて移動速度が遅くなっている。

一方、図1の弱非対称のケースでは、リコネクションジェット領域に明確な接触不連続面(黄色とピンクの境目)が見られる。この接触不連続面は、下側プラズモイドに入り込んでいる。この下側プラズモイドへの入り込みは、非対称度が大きくなるほど明確に見られる($k=1.5, k=2.0$ におけるピンクと青の境目)。この接触不連続面の先端の速度の時間発展が図2の色塗りプロットで示されている。接触不連続面の先端速度も非対称度が大きくなるにつれて移動速度が遅くなる。また、プラズモイド先端の速度と接触不連続面先端の速度はほぼ一致していることが分かる。

以上に示した接触不連続面は、磁力線を横切るように形成される。また、低 β 領域側プラズモイドへの接触不連続面の入り込みは、磁気圏前面の非対称磁気リコネクションの場合、磁気圏側プラズモイドへの浸入にほかならず、これにより太陽風プラズマが磁気圏側へ大量に入り込むことを示唆している。実際衛星観測では、太陽風プラズマは境界層の磁気圏側に入り込んでいることが観測されており、この接触不連続面の入り込みを意味していると考えられる。

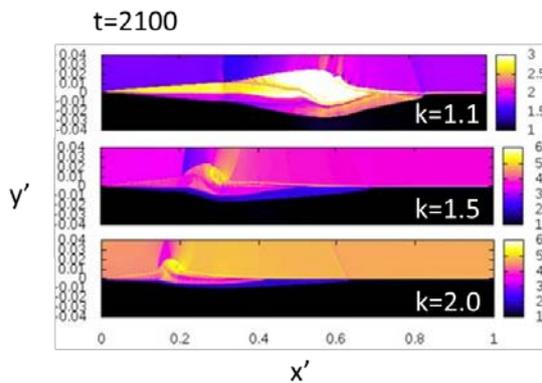


図 1 リコネクションが十分発達した時刻($t=2100$)での密度分布

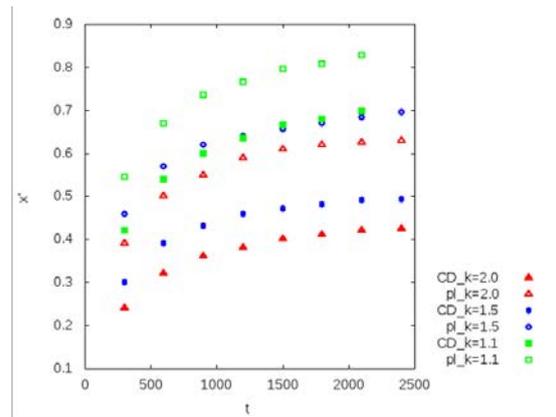


図 2 プラズモイド先端 (白抜き) および接触不連続面先端の x 座標位置の時間変化

成果発表

論文発表

1. Shimizu, T., Torii, H., and Kondoh, K., MHD study of three dimensional spontaneous fast magnetic reconnection for crosstail plasma inflows in magnetotail, *Earth Planets and Space*, 68:89 2016
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

口頭発表

1. 近藤光志, 「Simulation study of the asymmetric magnetic reconnection in the shear flow」, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2016 年秋学会, 九州大学(2016 年 11 月)
2. 清水徹&近藤光志, 「一様抵抗 MHD モデルにおける間欠的で自発的な 2 次元高速磁気再結合過程の可能性」, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2016 年秋学会, 九州大学(2016 年 11 月)
3. 坂口達哉&近藤光志, 「GEOTAIL 衛星による地球磁気圏前面での磁気リコネクションの観測」, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2016 年秋学会, 九州大学(2016 年 11 月)
4. 丸山翔也&近藤光志, 「非対称磁気リコネクションにおける接触不連続面の発達の数値シミュレーション」, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2016 年秋学会, 九州大学(2016 年 11 月)
5. 吉福財希&近藤光志, 「太陽活動領域 11158 における磁気リコネクション」, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2016 年秋学会, 九州大学(2016 年 11 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。また、近年ではアジアダストにより、ウイ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、ウイ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イ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の理解やそれらの多寡や変遷について時空間的な解釈を行う。

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。特に、CReSS では分解能を上げて、アジアダストの挙動を評価する。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年に札幌でアジアダスト（黄砂）が観測された4月30日の事例について、気象モデル CReSS を用いて札幌付近からの後方流跡線解析を行った。範囲は東経100度～150度、および北緯30～50度、格子間隔は0.04度、初期時間は2012年4月29日00UTCである。この結果、札幌からモンゴルゴビ砂漠を指向していることが求められた（図1）。また、大気境界層を超えた対流圏下層3000m前後の層を移動していた。モンゴルゴビ砂漠付近で発達した温帯低気圧に伴って、その前面の強い南風により巻き上げられたアジアダストが偏西風により運搬されていることが推測できる。上空500hPaの天気図からは、偏西風がモンゴルゴビ砂漠付近から北海道まで、ほぼ直線状に分布していた。

アジアダスト発現日の29日9時を初期値の前方流跡線（図2）からは、モンゴルゴビ砂漠付近から北海道に指向している。対流圏下層から中層までにおいては、あまり南北に拡散せずに移動している。アジアダストが境界層を超えて、上空まで巻き上がれば、偏西風に乗り1日程度で日本付近まで到達することが確認できる。Wakimoto(1985)や Takemi and Satomura(2000)では、乾燥地・半乾燥地においては時に境界層が地上から4kmの高度まで及ぶことを指摘しており、このような条件が砂漠での積乱雲の発達を助長し、この強い強い上昇気流がダストを境界層から自由対流層へ鉛直輸送していることを指摘している。境界層を超える原因・過程については、今までの結果を調べると共に、計算領域を小さくし、解像度を上げて詳細に調べ、先行研究との比較を行いながら検討する必要がある。

Sainshand と札幌のライダーによるエアロゾル観測の結果からは、Sainshand 付近において、4月29日に発生したアジアダストを捉えており、翌30日には札幌においてアジアダストが観測されている。図1の後方流

跡線や図 2 の拡散の結果と概ね整合性がある

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、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急務である。本年度は、過去に計算した結果を用いて、解析や考察を行ったが、事例を増やしてアジアダストの挙動について理解を深める予定である。

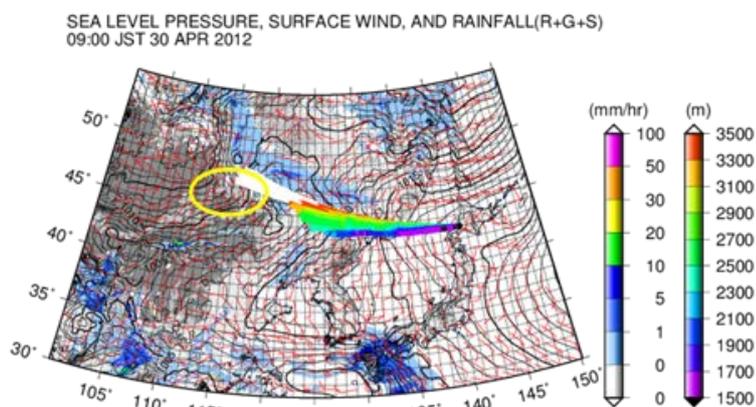


図 1 2012 年 4 月 30 日 00UTC の地上気圧・風・降水量分布および 24 時間の後方流跡線。黄色い枠線がモンゴルゴビに相当。

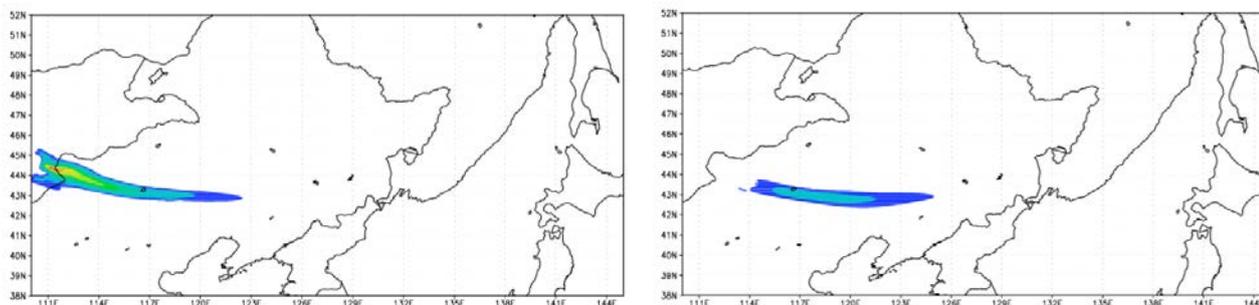


図 2 モンゴルゴビ砂漠付近からの前方流跡線 12 時間後 (左: 高度 3184m, 右: 5380m)

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.

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)

地球の内部磁気圏領域は平均的には双極子磁場の支配的な低ベータ領域であるが、磁気嵐時などにはプラズマシートからのプラズマ供給によって、リングカレント粒子のプラズマ圧が磁気圧と同程度になることが分かっており、このような場合のプラズマダイナミクスを調べるのが本研究の大きな目的である。特に、内部磁気圏領域での低周波 MHD 波動(ULF 波動)の起源として考えられてきたプラズマ不安定性の理解を目指し、背景プラズマを MHD、リングカレント粒子のみを運動論的に扱う高エネルギー粒子ハイブリッドコードの開発を行っている。

本研究で開発中の数値シミュレーションコードでは、内部磁気圏を模擬した環境ではプラズマ不安定性の励起は再現出来ていない。この理由として数値的なノイズや散逸が悪影響を及ぼしている可能性が考えられる。そこで、一様系のシミュレーションによってパラメータサーベイを行い、コードに内在する数値的效果の見積を行った。この結果、既存の数値シミュレーションコードでは数値的散逸の効果が非常に大きいことが分かり、これが結果に影響している可能性が示唆された。従って、同様に一様系モデルで、この問題を解決するためにシミュレーションコードに様々な改修を行った。

特に本コードで用いていた HLL-UCT スキームに含まれる人工的な電気抵抗の効果が非常に大きいことが判明したため、このスキームの採用をやめ、いくつかの人工的な電気抵抗モデルを導入して比較した。その結果、hyper-resistivity と呼ばれる 4 回微分に比例するような散逸項を磁場の誘導方程式に導入することでこの数値的問題が概ね解決出来ることが分かった。今後はこのアルゴリズムにて磁気圏を模擬した非一様系のモデルでパラメータサーベイを行う。

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

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てきた (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。

研究方法

本研究の目的を達成するため、以下の研究を実施した。

1. 非線形フォースフリー磁場(NLFF)データベースの構築
2. 非線形フォースフリー磁場の非線形安定性解析
3. フレアの非線形発展過程のシミュレーション研究
4. 太陽表面ベクトル磁場の構造解析
5. 磁気リコネクションの精密シミュレーション

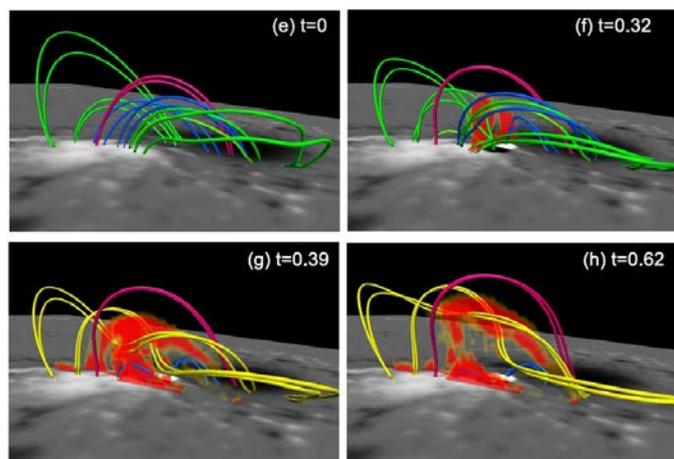


図 1 : 非線形フォースフリー磁場を使ったフレア発生シミュレーション

研究成果

2010年以降に出現した比較的黒点面積の大きな300の太陽活動領域のベクトル磁場観測データを用いて、非線形フォースフリー磁場(NLFFF)を緩和法を用いて計算し、そのデータベースの構築を進めた。そのデータを基に磁力線の捻じれと太陽フレア発生の相関解析を行いつつある。また、NLFFFに様々な小スケールの磁場擾乱を導入することで、平衡磁場の非線形安定性解析を実施した(図1)。その結果、これまでにフレアのトリガとなることが示唆されている反極性磁場型及び逆シア型の磁場擾乱が太陽コロナ磁場を不安定化することで、実際の太陽磁場中でもフレア発生のトリガとなり得ることを見出した。さらに、フレアの非線形発展過程のシミュレーション研究: MHDシミュレーションによるフレア発生過程のシミュレーション(図2)を行い、フレア発生の原因となるダブルアーク不安定性を特定すると共に、その不安定性の臨界パラメータ κ が不安定化の予測に利用可能なことをシミュレーション結果の解析から見出した。

高磁気レイノルズ数領域におけるMHD磁気リコネクションの3次元シミュレーションを実施し、複数の磁束間の絡まりが自発的に発生することで乱流的なリコネクションが進行することを見出した。

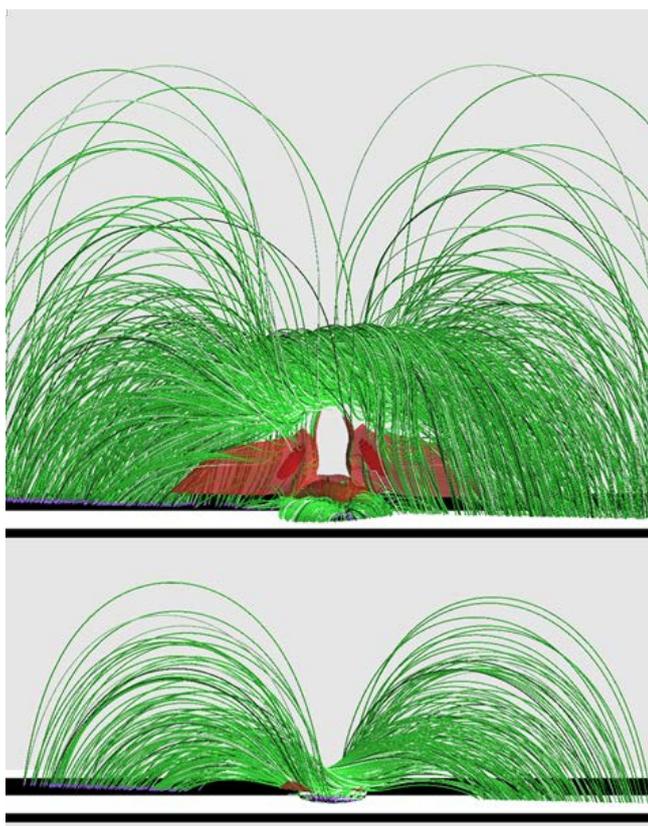


図2: フレア発生過程のシミュレーション

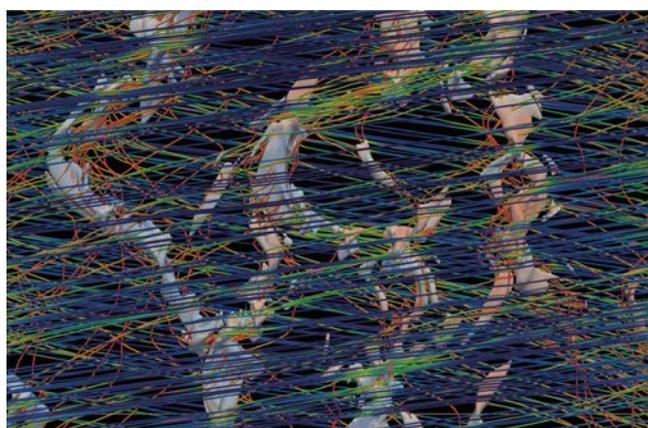


図3: 磁気リコネクションの3次元MHDシミュレーションにおける磁力線構造

発表論文

1. Haimin Wang, Chang Liu, Kwangsu Ahn, Yan Xu, Ju Jing, Na Deng, Nengyi Huang, Rui Liu, Kanya Kusano, Gregory D. Fleishman, Dale E. Gary & Wenda Cao, High-resolution observations of flare precursors in the low solar atmosphere, *Nature Astronomy* 1, Article number: 0085, 2017/03/27, DOI: 10.1038/s41550-017-0085
2. Shukuya, D.; Kusano, K., Simulation Study of Hemispheric Phase-Asymmetry in the Solar Cycle, *The Astrophysical Journal*, Volume 835, Issue 1, article id. 84, 11 pp. 2017/01, DOI: 10.3847/1538-4357/835/1/84

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

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

大気圏－電離圏－磁気圏系の結合過程を定量的に解明するには、磁気圏から下層大気までの相互作用過程を矛盾なく含んだシームレスなシミュレーションモデルが必要である。本研究では、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) をベースに、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

これまで用いてきた緯度・経度 2.5 度の格子間隔のモデルを 1 度の格子間隔にして分解能を上げ、さらにプログラムの並列化を進めることにより計算速度を 3 倍程度にした。その結果、従来モデルでは再現できなかった水平スケールが数 100km 程度の熱圏・電離圏構造を再現することが可能となった。

(2) フレア時の電離圏変動のシミュレーション

太陽フレアの X 線・EUV スペクトルモデルを入力として GAIA を実行する環境を構築し、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。その結果を基に、結合のスキームやパラメータの整合性などについての検討を行った。また、プラズマバブルモデルに関して横山がレビュー論文を出版した [Yokoyama and Stolle, 2016]。

(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。この結果に関して、現在論文化を進めている。

(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、シミュレーション結果についての検討を行った。今後、入力スキームについて、さらに改良を行い、実際の太陽風を入力として与えて、熱圏・電離圏がどのように応答するかを調べる予定である。

(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

Es 層の発生には、潮汐波などの大気波動に伴う鉛直シアアが関与していると考えられている。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ア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]。

論文

- Shinagawa, H., Y. Miyoshi, H. Jin, and H. Fujiwara (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.
- Miyoshi, Y., D. Pancheva, P. Mukhtarov, H. Jin, H. Fujiwara and H. Shinagawa (2017), Excitation mechanism of non-migrating tides, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 156, 24-36, doi:10.1016/j.jastp.2017.02.012.
- Maruyama, T., H. Shinagawa, 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.
- Terada, K., N. Terada, H. Shinagawa, H. Fujiwara, Y. Kasaba, K. Seki, F. Leblanc, J.-Y. Chaufray, and R. Modolo (2016), A full-particle Martian upper thermosphere-exosphere model using the DSMC method, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, DOI: 10.1002/2015JE004961.
- 吉川晃平, 高星和人, 中田裕之, 鷹野敏明, 松村 充, 品川裕之, 富澤一郎 (2016), HF ドップラーにより観測された地震に伴う電離圏変動の中性大気波動数値シミュレーションによる定量的評価, *電気学会論文誌A*, 136, DOI: 10.1541/ieejfms.136.259.
- Yokoyama, T., and C. Stolle (2016), Low and midlatitude ionospheric plasma density irregularities and their effects on geomagnetic field, *Space Sci. Rev.*, DOI 10.1007/s11214-016-0295-7.

国際学会・研究集会発表

- Shinagawa, H., H. Jin, Y. Miyoshi, H. Fujiwara, T. Yokoyama, and Y. Otsuka, Occurrence Probability of Plasma Bubbles Deduced From the Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Model GAIA, 13th AOGS Annual Meeting, Beijing, China, August 3, 2016.
- Shinagawa, H., H. Jin, Y. Miyoshi, H. Fujiwara, T. Yokoyama, and Y. Otsuka, Prediction of plasma bubble occurrence using the atmosphere-ionosphere coupled model GAIA, The 4th Asia-Oceania Space Weather Alliance, Jeju, Korea, October 25, 2016.
- Shinagawa, H., H. Jin, T. Yokoyama, Y. Miyoshi, H. Fujiwara, T. Yokoyama, and Y. Otsuka, Occurrence characteristics of plasma bubbles deduced from GAIA simulation data, ISEE Workshop on Ionospheric Plasma Bubble Seeding and Development Institute for Space-Earth Environmental Research (ISEE), Nagoya University, Nagoya, Japan, November 30, 2016.
- Miyoshi, Y., H. Jin, H. Fujiwara, and H. Shinagawa, Impacts of gravity wave on the thermosphere simulated by a whole atmosphere-ionosphere coupled Model, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 12–16 December 2016.
- Matsumura, M., K. Shiokawa, H. Shinagawa, H. Jin, H. Fujiwara, Y. Miyoshi, and Y. Otsuka, GAIA modeling of electrodynamics in the lower ionosphere during a severe solar flare event, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 12–16 December 2016.

国内学会・研究集会発表

- Shinagawa, H., H. Jin, Y. Miyoshi, H. Fujiwara, T. Yokoyama, and Y. Otsuka, Occurrence probability of plasma bubbles deduced from GAIA simulation data, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2016 年 5 月 22–26 日.
- Miyoshi, Y., H. Jin, H. Fujiwara, and H. Shinagawa, Behavior of gravity waves in the thermosphere simulated by high resolution GAIA, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2016 年 5 月 22–26 日
- 品川裕之, 陣 英克, 三好勉信, 藤原 均, 横山竜宏, 大塚雄一, 大気圏-電離圏結合モデル GAIA を用いたプラズマバブル発生予測, STE シミュレーション研究会, 東北大学, 2016 年 8 月 31 日.
- 品川裕之, 陣 英克, 三好勉信, 藤原 均, 横山竜宏, 大塚雄一, GAIA の長期シミュレーションデータから推定するプラズマバブル発生特性, 第 140 回 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2016 年 11 月 20 日.
- 三好勉信, 陣 英克, 藤原 均, 品川裕之, 重力波が熱圏・電離圏におよぼす影響について, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 140 回総会・講演会, 九州大学, 2016 年 11 月 19 日–23 日.
- 品川裕之, 高緯度のスポラディック E 層について, 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, 京都大学理学研究科, 2016 年 12 月 21 日.
- 品川裕之, 太陽研連シンポジウム「太陽系科学の中での太陽研究の将来展望」, 近年の電離圏研究と太陽分野への期待, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所相模原キャンパス, 2017 年 2 月 22 日.

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 an Observed
Magnetic Field

井上 諭 (名古屋大学 宇宙地球環境研究所)

【研究目的】

本研究の目的は、宇宙天気予報において極めて重要である太陽フレアとコロナ質量放出(CME)の関係性を数値的な観点から見出すことである。本年度は、2011年に活動領域 11158 で発生した M6.6 クラスフレアと、それに伴う太陽プラズマの噴出現象を電磁流体力学(MHD)シミュレーションで再現し、そのダイナミクスを明らかにすることである。

【研究方法】

まず、太陽観測衛星 solar dynamics Observatory (SDO)から得られる太陽表面の観測磁場データ(M6.6 フレアが発生する 90 分前のデータ)に基づいて、3次元の太陽活動領域磁場をフォースフリー近似に従って数値的に外挿する。次に、外挿された磁場を MHD シミュレーションの初期条件として用いて、その進化を追跡することでダイナミクスを定量的に理解する。

【結果】

1. 外挿されたフォースフリー磁場は理想 MHD 不安定性に対して安定であることがわかった。一方、ねじれた磁力線群同士の磁気リコネクション”テザーカティングリコネクション”を介して、強くねじれた磁力線群である flux tube が形成されるとフォースフリー条件が破れ、磁場は非平衡になることが確認された。これは観測結果からも示唆されている。
2. 平衡状態を失った flux tube は上昇し、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しながら合体し、さらに強くねじれた flux tube を形成することがわかった。
3. flux tube の上昇過程で起こる磁気リコネクションは、flux tube の上昇を駆動するために極めて重要であることがわかった。その理由は、磁気リコネクションによって flux tube のポロイダル磁場が増強され、上昇力の駆動源たる hoop 力が増強されるからである。
4. 多くの研究が、flux tube のダイナミクスの進化は、トーラス不安定性の開始を決める decay index で決まると考えられてきた。本研究でも、flux tube の平衡状態から非平衡状態への遷移過程は、decay index は重要なファクターであることは支持するが、その一方で、その後のダイナミクスは flux tube の上昇過程と磁気リコネクションとの非線形相互作用で決定づけられ、decay index には依存しないことを指摘した。これは、爆発の進化を予測する上で、極めて重要な発見である。

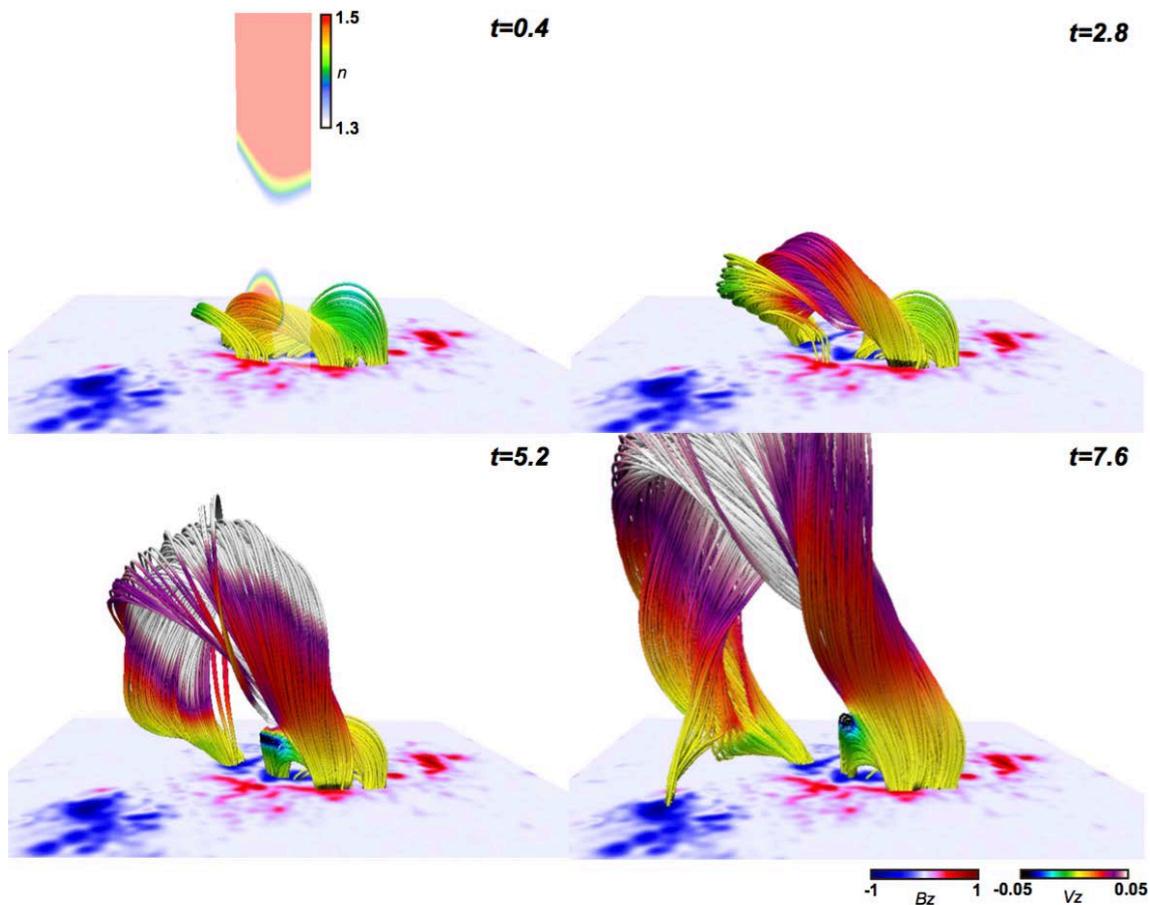


Fig.1: MHD シミュレーションの結果。初期にテザーカティングリコネクションで形成された flux tube が平衡状態を消失することで上昇する。Flux tube の上昇過程で、磁気リコネクションを介して周囲のねじれた磁力線と合体し、巨大なフラックスチューブが形成される。線は磁力線を表しており、色は鉛直方向の速度場を表している。背景は磁場の B_z 成分を表しており、光球面磁場に相当する。

【成果発表(査読論文)】

- [1] S. Inoue “Magnetohydrodynamic Modeling of the Coronal Magnetic Field and Solar Eruptions Based on the Photospheric magnetic Field”, Progress of Earth and Planet Science, 3, 19, 2016
- [2] S. Inoue, Y. Bamba, & K. Kusano “Onset Mechanism of Solar Eruptions”, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Under Review.

日本海沿岸地域における冬季の降雨・降雪の特性に関する研究
Characteristics of Rainfall and Snowfall on the Japan Sea Coastal Region during the Winter Monsoon Season

安永数明，富山大学・理工学研究部

1. 研究目的

冬季には、大陸からの冷たい季節風が吹く一方で、日本海には相対的に暖かい暖流が存在する。この為、日本海沿岸地域では冬場に最も降水量が多くなり、場所によっては年間の3分の1程度の降水量を稼ぐ。このことから地域の水資源という点では、冬季の時期の降水は重要である。また、日本海沿岸地域の多量の降雪は、都市機能の麻痺や交通の障害といった雪害をしばしば引き起こす。大雪による人的被害も毎年大きく、平成25年度版の「防災白書」によると、除雪作業中による事故により平成24年度には80人程度が死亡している。これは集中豪雨等の気象災害による年間の犠牲者を上回るもので、日本海沿岸地域では、こうした雪害の低減に向けた取り組みが、各自治体を中心に進められている。本研究では、今後起こり得る雪害の低減に向けた基礎となる科学的知見の蓄積を目的に、「日本海沿岸地域における冬季の平均的な降雨・降雪パターンとその形成メカニズムの解明」を目指す。

冬季の降水量の平均分布を調べると、降水極大は海岸線から少し内陸側に位置する。一方で、降水の強度の指標の1つと考えられる雷の発生頻度分布は、降水量の平均分布に比べて、より海岸側で極大となる。この一般的な説明としては、地表面近くでは陸と海の温度差により陸風（南風）が卓越し、収束線を海岸線付近に作る、一方で、対流圏中下層においては、冬季季節風により北風が卓越し、この北風によって積雲の上部が南側に流されることで、強い上昇流を持つ対流の発生する位置に比べて、実際の降水の強い場所が南側に位置する、というものである。しかし冬季雷の発生時のホドグラフでは、雲頂高度に対応すると考えられる850-500hPaは、南風が卓越することが指摘されている。このことから従来の仮説は、降水極大の位置を説明出来ない。このことから、本研究課題ではより具体的な目標として「降水分布の極大が海岸線から少し内陸側に入り込んだところに位置する原因の解明」に取り組む。

2. 研究方法

本研究では上記の研究課題に取り組むにあたって、気象メソスケール数値モデルを用いて数値実験を行った。数値実験の対象領域は日本海と北陸全域を含む領域とし、水平格子間隔を3kmとした。また鉛直層数を80層として、降水システムの形成・発達に重要な冷氣プールが形成される大気下層の解像度を特に良くするように設定した。

まず2014年12月1日~31日の1ヶ月間の計算を行い、アメダスデータと比較することで、数値モデルの再現性が良いことを確認した。次に、海岸線付近に停滞し大きな降水をもたらした2014年12月5日~7日の事例を対象に、①陸上のすべての地表面粗度を水面の値に変更した実験、②降雪の落下速度を雨の落下速度に変更した実験を行った。実験①は、海上と陸上の摩擦の違いによる海岸収束帯への影響を調べることで、実験②は落下粒子の終端速度の違いによる昇華・蒸発効率を通じた冷氣プールの形成への影響を調べることを目的とする。なお、これらの数値実験にあたっては、名古屋大学高性能コンピュータシステムFX100のノード時間を使用した。

3. 結果

標準実験では日本海からの寒気の南下とともに北陸地方の陸側で冷氣プールが形成され、時間とともに発達する様子が再現出来た。冷氣プールと季節風との境界付近で降雪分布が顕著であり、新潟と石川の沿岸の鉛直断面図でも冷氣プールと季節風との境界で上昇流が卓越でかつ凝結物の値が強まり、雪雲が発達する様子が確認できた。冷氣プールの形成時を鉛直断面図で確認すると、氷から水へ相変化する場に冷氣プールの形成が対応していた。

陸側の粗度を変えた感度実験①では、平野部で降雪量が減少する結果となり（図1）、海岸付近での雪雲の発達を抑制したものと思われる。降雪の落下速度を変えた感度実験②では、解析期間内で海側の冷氣は弱化されたものの、陸側での冷氣プールは反対に強化されていた（図2）。これにより、実験後では海側での降雪量が増加していた。

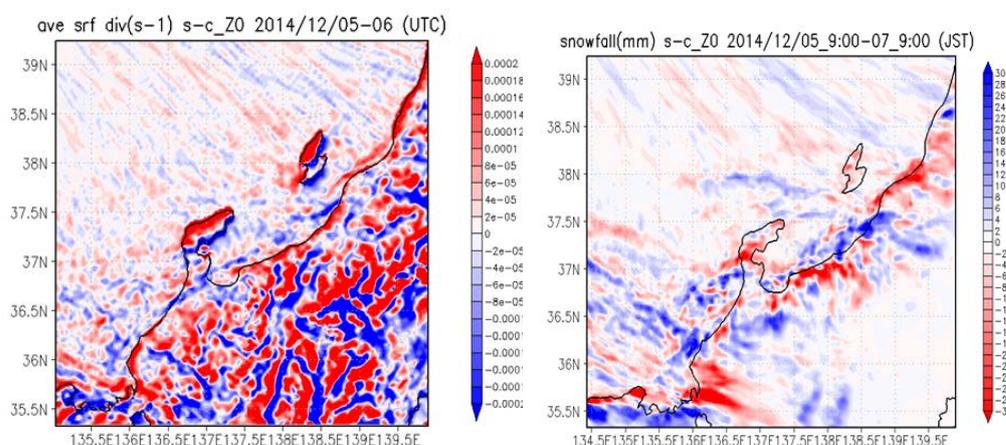


図1：地面粗度を変更した感度実験と標準実験におけるモデル最下層の水平収束の違い（左図）と、降雪総量（右図）の違い（感度実験－標準実験）。

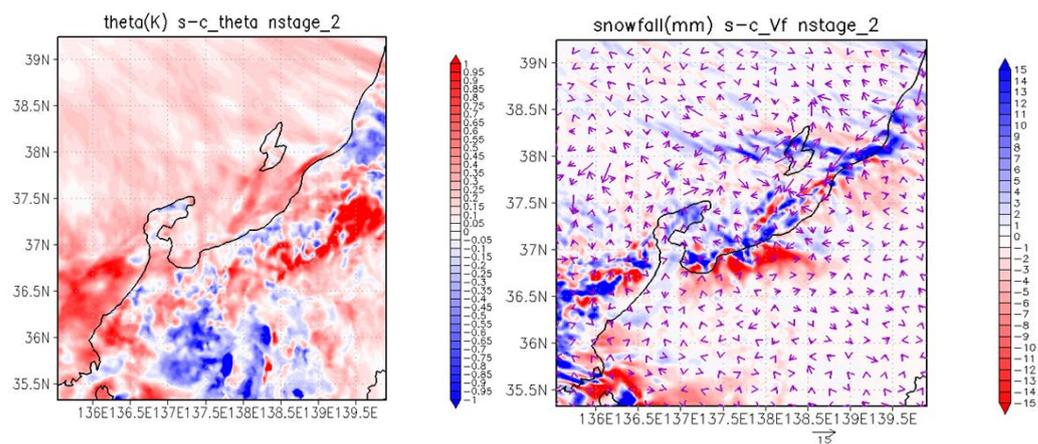


図2：降雪の落下速度を変更した感度実験と標準実験におけるモデル最下層の気温の違い（左図）と、降雪総量と地上風（右図）の違い（感度実験－標準実験）。

4. 研究発表

當眞嗣淳、日本海沿岸域の降雪帯の維持メカニズムに関する数値実験、2016年度富山大学理学部地球科学科卒業論文

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】

本研究は磁気圏シース内に存在するミラーモードについて、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。この不安定性は磁気圏シース領域で多く観測されており、近年では多点衛星観測での波動分散関係の解析により、イオンスケールにおいて周波数がほぼ0の磁場構造が存在することが明らかになっている。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、そのスペクトルはpower-lawに従うことが観測されている。これは、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を示唆している。シース領域でのプラズマ物理を理解するためにはミラーモードの非線形発展を追跡することが重要である。イオン慣性長以下への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。これによりイオンの温度異方性から励起されるミラーモード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ミラーモードの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($\beta=1$)中でのイオンの温度異方性(垂直温度を平行温度の5倍と設定)に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】

イオンサイクロトロン角周波数で規格化した時間で1.0程度まで計算を実行した結果、ミラーモードに対応するイオンスケールの構造の成長はまだ確認されていない一方で、熱的ノイズの増幅が顕著に見られた。特に計算空間二次元面に対して垂直方向の磁場成分の増幅が顕著であり、他2成分については特徴的な増加は見られていない。イオンスケールの磁場構造が成長してくることを想定していたが、現状の計算ではそれ以上に熱的ノイズの成長が支配的であり、ミラーモードの非線形物理を追跡するには現状至っていない。パラメータの調整(超粒子数を増やす、熱速度を下げる、など)により熱的ノイズの低減を図ることは可能であるが、相応の計算コストの増大が見込まれる。現実的な計算コストでどの程度まで熱的ノイズを低減しかつミラーモードの成長を含めた非線形発展を追跡出来るかはより慎重に見積もる必要があることが明確になった。また、ここでは非線形構造の発展を含めた統一的な発展を粒子シミュレーションで追跡することを前提としているが、初期にミラーモード的な構造が存在していることを仮定しその後の非線形発展を追跡するなど、初期モデルの再考を視野に入れたより現実的な研究方針の転換を考える必要があると思われる。

データ同化連結階層太陽コロナシミュレータの開発
Development of data-assimilation interlocked solar corona
simulator

塩田大幸、名古屋大学・宇宙地球環境研究所

太陽から流出するプラズマの流れ太陽風・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。一方で、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最重要研究課題である。これらの太陽コロナ・太陽風・CMEの形成過程において共通する点は、太陽の複雑な構造を持つ磁場が本質的な役割を果たしている点である。しかし、太陽コロナ中の磁場構造を直接計測することは非常に困難である。よって、実際の太陽の複雑な磁場ため構造による影響を考慮するは、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が最も有効な手段である。本研究ではこれまで、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進めてきた。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)を開発し、運用を行なっている。本研究では、宇宙天気予報の予測精度向上にむけた取り組みとともに、上記の太陽コロナ・太陽風・CMEの形成過程の解明に向けた複数のテーマでの研究開発を行なった。

SUSANOO太陽風モデル(Shiota et al., 2014)は、太陽風のグローバルな構造をよく再現する。光球の磁場観測データのみを入力として、経験的に知られている太陽コロナ磁場と太陽風速度の関係性WSモデル(Arge & Pizzo, 2000)を用いて太陽風境界条件を与えている。しかし、2009年など速度の定量的再現性の悪くなる期間があり、信頼性の高い宇宙天気予報の実現のためには、より再現性の高い太陽風モデルの構築が求められる。そこで、IPS観測と太陽コロナ磁場から得られた関係性に基づいたB/fモデル(Fujiki et al., 2015)を用いた2007年から2014年までのシミュレーションを行い、それぞれの太陽風速度プロファイルの再現性を評価した。その結果、WSモデルは高くない水準であるが長期的に安定した再現が可能であり、一方、B/fモデルは、極小期で再現性が良く、極大期で再現性が悪いという太陽活動に依存したモデルであることが分かった。

CMEは、太陽から放出されるねじれた磁束管(フラックスロープ)の放出現象であり、その磁束管内の磁場が南を向いて地球を通過したとき地球磁気圏に大きな擾乱をもたらす。つまり、CMEの磁束管の向きが決まる過程を理解することが宇宙天気予報に重要となる。そこで本研究では、CMEが放出される際に、磁気フラックスロープが回転する要因を探るために、太陽表面から太陽風が十分な速度に至る15太陽半径までの領域の3次元電磁流体力学(MHD)シミュレーションを行った。背景の磁場強度、初速度を変えた計算を行なった結果、回転のメカニズムは、フラックスロープのねじれを解放する内部キックモードと背景磁場とフラックスロープの相互作用によるティルトモードの成長の競争により決まることが示唆された。背景磁場が強い場合、ティルトモードが優勢になり、回転量は各地点での背景磁場強度とフラックスロープの速度によって決まることがわかった。

本研究では、データ同化による太陽コロナ加熱・太陽風加速メカニズムを探るために、太陽風中の乱流に着目し、その再現を目指すモデル開発に着手した。太陽風中のMHD乱流の輸送を記述する理論モデルをSUSANOO太陽風モデル(Shiota et al., 2014)に適用した新しいシミュレーションを開発し、極小期の3次元太陽風とそこでの乱流輸送の定常状態を計算した。これによりHeliosおよびUlyssesで観測された内部太陽圏内の乱流の分布を再現することに成功している。今後、太陽風加速が起きている太陽コロナ領域に応用するためにさらなる乱流輸送モデルの修正を進める。

無衝突磁気リコネクションの運動論的研究
Kinetic modeling of collisionless magnetic reconnection

銭谷 誠司、国立天文台・理論研究部

宇宙空間でおきる磁気爆発現象（磁気リコネクション）の振る舞いは、プラズマ粒子の複雑な運動によって支配されています。その中でも電子の運動はリコネクション系の物理を考えるうえの最小構成要素です。本研究では、こうした電子の振る舞いを探るべく、リコネクション系における電子の軌道パターンを、プラズマ粒子シミュレーションを使って徹底的にサーベイしました。その結果、これまで知られていなかった新しいタイプの軌道を多数、発見しました。下の図の中で、二重枠で囲ったものが今回見つかった軌道です。この発見は、粒子軌道の理論と、それを前提に構築されたリコネクション物理の議論全てに波及する重要な結果です。本研究成果を報告した論文 [1] は、アメリカ物理学協会 (AIP) の19ジャーナルの中から週間ハイライト論文に選出されました [2]。

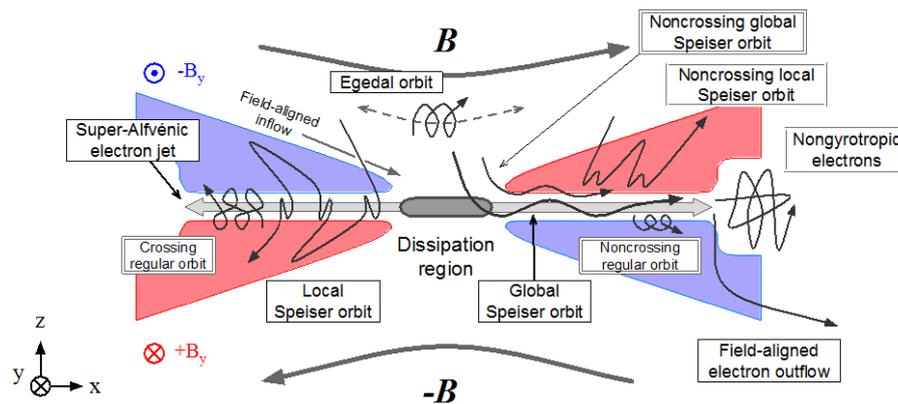


図1 リコネクション系の構造と電子軌道 (Zenitani & Nagai 2016 [1])

参考文献：

- [1] S. Zenitani, & T. Nagai, Particle dynamics in the electron current layer in collisionless magnetic reconnection, *Physics of Plasmas*, 23, 102102 (2016)
- [2] <https://publishing.aip.org/publishing/journal-highlights/japanese-researchers-find-new-classes-electron-orbits>

学会発表：

- [3] 銭谷誠司・長井嗣信・篠原育、無衝突磁気リコネクションにおける電子軌道の全ラグランジュ解析、第140回地球電磁気・地球惑星圏学会、九州大学伊都キャンパス、2016年11月23日
- [4] S. Zenitani, Nongyrotropic electron orbits in collisionless magnetic reconnection, AGU Fall Meeting 2016, San Francisco, USA, December 2016

3次元グローバルMHDシミュレーションを使用したdipole tiltの影響の研究

The study for the dipole tilt effect by using a global MHD simulation

朴京善、忠北大学校・基礎科学研究所・天文宇宙学科

1) 研究目的

太陽風と磁気圏・電離圏の相互作用研究に対して3次元グローバルMHDシミュレーションは非常に良い手段である。本研究でも3次元グローバルMHDシミュレーションを行い、傾いた地球磁気軸(Dipole Tilt)の影響を調べる。

特に今回は地球磁気軸(0°から45°まで5°毎回転させる。)の影響だけを理解するために定常状態の太陽風とIMFをシミュレーションの入力パラメーターとして使う。それで、地球磁気圏の昼側と尾部側での磁気リコネクション過程、細かい構造、特に磁気リコネクションのサイズ、Z軸からどれだけ離れているのかなどについて定量的に調べる。

シミュレーションから得られた研究結果は磁気圏衛星観測と比較したいと希望している。そのためには高精度・細かい格子間隔(0.1~0.05Re)に関するシミュレーションが必要である。

2) 研究方法

磁気軸が傾いたときの地球磁気圏環境の影響を調べるため、0°から45°まで5°毎にシミュレーションを実行する。特に昼側、尾部側での磁気リコネクション過程を詳しく調べる。

シミュレーションの入力パラメーター: IMF Bz = -5 nT、太陽風密度: 5/cc、太陽風速度=400 km/s

3) 研究結果と考察

南向きのIMFの時(IMF Bz = -5nT、地球磁気軸が0度から45度まで傾くと昼側の磁気リコネクションの場所は $10.5R_E$ から $11.4R_E$ まで、夜側は $14R_E$ から $17R_E$ まで移動していた。(図1、図2、図3)

MHDシミュレーションの結果から磁気リコネクションのlineは昼側で $1.7\sim 2.4R_E$ 、夜側で $2.2\sim 2.54R_E$ が得られた。傾いた磁気軸により磁気リコネクションのZ軸の距離は昼側で0から $-8.1R_E$ まで、夜側で0から $0.4R_E$ まで離れていった。

さらに、夜側でのHinging Distanceは $12\sim 13R_E$ であった(図2、図3)。

特にMMSとGeotailの観測から(Kitamura et al., 2016)磁気軸が-27度傾いているときの昼側での磁気リコネクションlineは $1.8\sim 5.5R_E$ 、磁気リコネクションのZ軸の距離は $1.5\sim 5.2$ と報告されていた。この結果は我々のシミュレーションと似たような結果だと思う。

ところが、得られたMHDシミュレーションの結果が計算格子($0.3R_E$ 、 $0.2R_E$ 、 $0.1R_E$ など)の依存性と太陽風とIMFの強さによる依存性を調べる必要がある。

Dipole tilt angle = 35°

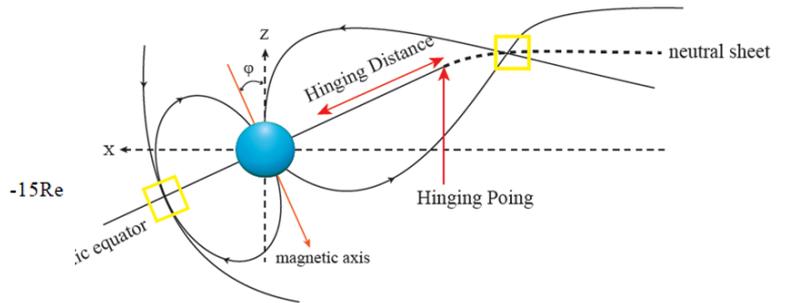
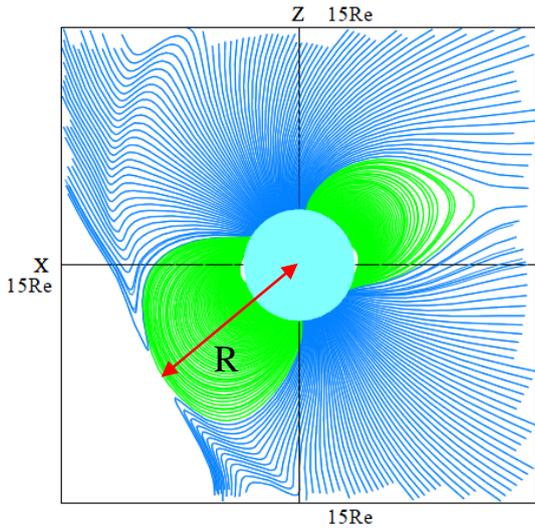


図1 IMF $B_z = -5\text{nT}$ と地球磁気軸は35度の時の昼側の磁気圏

図2地球磁気圏図式

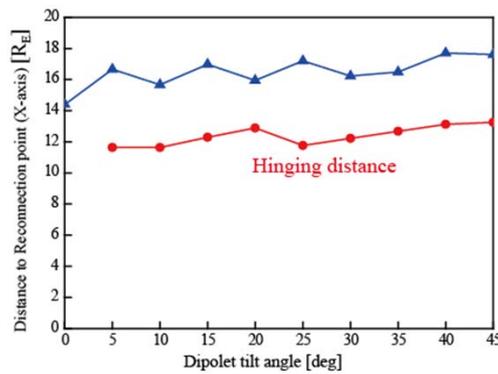


図3夜側の磁気リコネクション場所とHinging Distance

4) 成果発表

研究会口頭発 :

Kyung Sun Park, Dae-Young Lee, and Tatsuki Ogino, The Study of the Magnetospheric Phenomena for the Dipole Tilt by using a Global MHD Simulation, The Korean Space Science Society-2016 spring conference, Gangneung in Korea, 28-29/04/2016.

Kyung Sun Park et al, Global MHD simulation study of the vortex at the magnetopause boundary for the southward IMF and steady solar wind conditions, JpGU-AGU join meeting 2016, Chiba in Japan, 22-26/05/2016.

Kyung Sun Park, Hyomin Kim, Tatsuki Ogino, C. R. Clauer, J. M. Ruohoniemi, D.-Y. Lee, and D.-H. Lee, Global MHD simulation of magnetospheric and ionospheric response to a sudden increase solar wind dynamic pressure during northward IMF, AOGS 2016, Beijing in China, 31/7-5/8/2016.

火星版 CReSS を用いた火星表層環境評価
An assessment of Mars surface environment:
application of CReSS to Martian atmosphere

杉山 耕一朗, 松江工業高等専門学校・情報工学科

1. 研究目的

日本の宇宙惑星コミュニティにおいて計画中の火星探査計画では、着陸機的设计および運用計画立案のために、着陸候補地点の表層環境評価が必要とされている。我々は表層環境評価を実施するための環境整備の一環として、雲解像モデル CReSS の火星大気への適用を進めてきた。昨年度までに地形と大規模循環の効果を考慮しない理想化実験を多数実施することでモデルの動作検証を行い、地表面付近の鉛直温度分布や風速はサブグリッド乱流過程の混合長の定式化に大きく依存することを示した。次いで火星のように大気が薄く(地上気圧 ~ 7 hPa)、起伏に富む地形においても CReSS が動作可能か確認するため、NASA の火星探査ローバー Opportunity の観測地点を想定した数値計算を行ってきた。今年度は昨年度に引き続いて Opportunity の観測地点を想定した実験結果の解析を進める。さらに、これまで行った理想化実験と同様に、混合長の定式化に対する風速の依存性を調べる。

2. 研究方法

火星版 CReSS を用いて NASA の探査ローバー Opportunity の着陸地点 (1.9S, 2.5W) 付近において数値計算を実行する。計算領域は水平 350 km, 水平解像度は 700 m とする。鉛直計算領域はおおよそ 60 km である。鉛直格子ストレッチングを用いるため鉛直解像度は最下層で 20 m, 大気上部で 500 m 程度である。ダストの光学的厚さは 0.3 とした。季節は春分 ($L_s = 0$) とし、数値積分は 3 日分を行った。初期値および境界値として、惑星大気大循環モデル DCPAM によって作成された火星全球気象データを利用する。数値計算には名古屋大学情報基盤センター CX400 を利用した。

3. 研究結果

得られた結果は日中に活発な対流運動が生じることを示す。地方時 $LT = 14:00$ では、地表付近ではクレーターの縁で斜面風に伴う鉛直流が生じ、地表から約 400 m 付近においては鉛直速度の分布は細胞状となる(図 1)。この細胞状の形状は、解像度や地形の有無という違いがあるにもかかわらず、Michaels and Rafkin (2004) や理研/AICS の SCALE-LES の結果 (Nishizawa et al., 2016) と似ている。混合長の表現を CReSS のデフォルト

から従来の火星研究（例えば Spiga et al., 2010）で使われてきた Deardorff (1980) にすることで、地表から約 400 m 付近の鉛直速度は強まり（図 1）、対流運動の生じる高度領域は厚くなる（図は無し）。この傾向は我々がこれまで行ってきた理想化実験の結果と整合的である。

混合長として Deardorff (1980) の表現を用いた実験について、地表付近での水平風速の頻度分布とそれをワイブル分布でフィッティングした結果を図 2 に示す。地表付近でダスト巻き上げに必要と言われる風速 20 m/s 以上の風は見られないことと、風速の頻度分布はワイブル分布に概ね一致することが確かめられた。この特徴は対流運動が活発な日中（11:00～17:00）において共通して見られる特徴である（図は無し）。

4. まとめ

Opportunity の着陸地点のように火星地形の中でも起伏が比較的緩やかな地点を選べば、時間ステップや格子のアスペクト比を調整することで、対流運動の日変化を計算可能であることを確認した。しかし、マリネリス溪谷のような地形が非常に急峻な地点での数値実験は現時点では成功していない。数値積分に関するパラメタの調整方法の検討や、他の火星領域モデルで使われているパラメタの調査および検証実験を進める必要があるだろう。

現在の数値実験の分解能では図 2 に示したようにダストデビルを発生させるような強風を表現できていない。解像度をあげた計算を行うと共に、等方格子を用いた LES モデルと連携した計算を行うことが有効であると思われる。理研/AICS で開発された SCALE-LES と CReSS との連携をより一層進める。

成果発表

橋本 薪之輔, 2017, 火星領域気象モデル CReSS-Mars を用いた高解像度気象シミュレーション結果の解析, 岡山大学理学部地球科学科卒業論文。

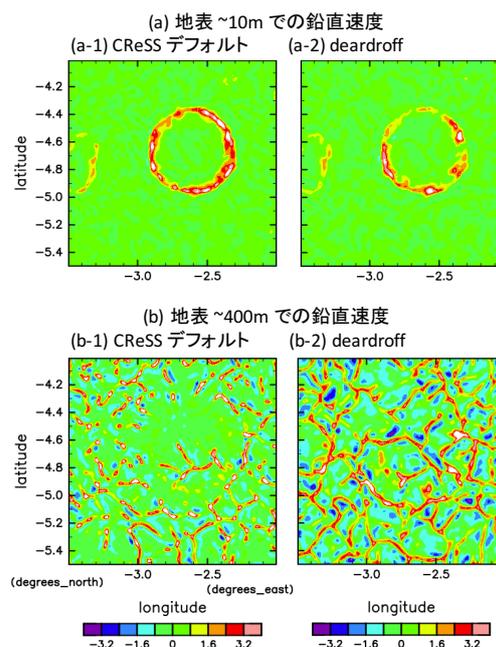


図 1: 混合長の表現として CReSS デフォルトと Deardorff (1980) を用いたときに得られたクレーター付近の鉛直速度の分布。地方時は LT = 14:00 である。

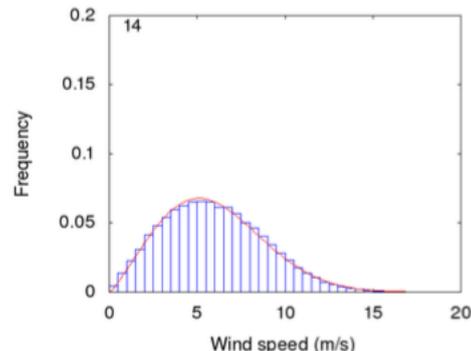


図 2: 地方時 LT = 14:00 における水平風速の頻度分布 (青) とワイブル分布を用いたフィッティング (赤)。

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 analysis

町田 忍 名古屋大学宇宙地球環境研究所
内野 宏俊 京都大学大学院理学研究科
田中 瑠 名古屋大学宇宙地球環境研究所

研究目的

昼間側の磁気圏境界等でみられる特性の異なるプラズマの間で発生する非対称磁気リコネクションに着目し、その電子拡散領域周辺の物理過程を、電子流体の観点から粒子シミュレーションを用いて調べる。電子流体の加減速を記述する運動方程式は、

$$m_e \frac{d\mathbf{v}_e}{dt} = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) - \frac{1}{n_e} \nabla \cdot \overleftarrow{P}_e \quad (1)$$

と表記される。また、電子流体に乗った系における電子流体のエネルギー密度($= \frac{1}{2} n m_e \int v^2 dv_e$)の時間変化は

$$\frac{d\epsilon_e}{dt} = \mathbf{j}_e \cdot \mathbf{E} - \nabla \cdot \mathbf{Q}_e + \mathbf{v}_e \cdot \nabla \epsilon_e \quad (2)$$

という式で表される。ここで、 \mathbf{Q}_e はエネルギー流ベクトル $\mathbf{Q}_e = \frac{1}{2} n m_e \int v^2 \mathbf{v}_e dv_e$ である。

本研究では、これらの各項の比較を行うことによって、電子拡散領域周辺のプラズマの素過程の詳細を解明する。

計算手法

本研究では2次元電磁プラズマ粒子シミュレーションコード pCANS [Ikeya and Matsumoto, 2015]を用いる。今回は、2次元の非対称磁気リコネクションを再現するために、x-y平面に1200×4800のグリッドをとり、マグネトシースと磁気圏の物理量の比が、磁場強度比1:1、密度比20:1、電子温度比1:10、イオン温度比1:22.5となるように設定した。また、電子とイオンの質量比は1:25とした。図1は、初期条件のx方向の物理量の空間構造を示しており、 $x/\lambda_i < 2.8$ がマグネトシース、 $x/\lambda_i > 2.8$ が磁気圏の各領域に対応する。

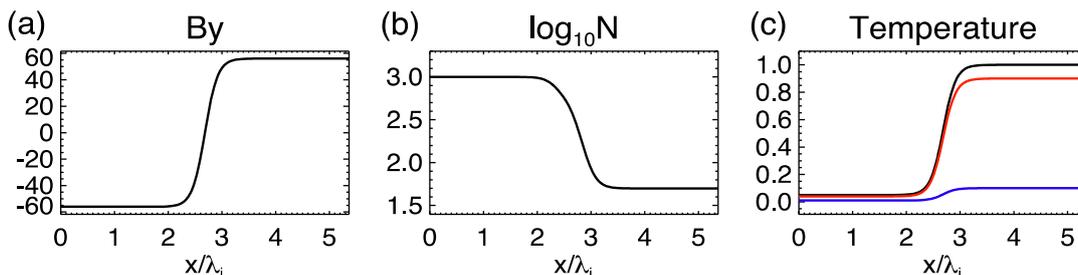


図1. 非対称磁気リコネクションの初期条件 (a)磁場強度、(b)粒子密度、(c)電子温度(青線)、イオン温度(赤線)、全温度(黒線)

研究成果・考察

図1のような初期条件で、非対称磁気リコネクションを $x/\lambda = 2.8$ 、 $y/\lambda = 5.4$ 付近を中心として発生させた。時刻 $\Omega_i t = 18$ における、式(2)の各項を左から順に並べたものを図2に示す。図2bは、電子電流と電場により生じるジュール熱項（右辺第1項）、図2cはエネルギー流ベクトルの発散項（右辺第2項）、図2dはエネルギー密度の対流項（右辺第3項）、図2aが各項を式(2)で関係づけて得られる電子流体のエネルギー密度の時間変化（左辺）である。図2bと図2cは、電子拡散領域周辺で非常に似た特徴を示すことがわかる。これは、電子拡散領域外部からの電子のエネルギーの供給が電子拡散領域でのジュール熱を生み出していることを示している。次に、図2aと図2dを比較すると、式(2)の右辺第1項が電子流体に乗った系で見たエネルギー変化であるが、その変化は、ほぼエネルギー密度の対流項を反映したものとなっていることがわかる。電子流体のエネルギー密度が上昇する領域は、 $\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}_e$ で定義される拡散領域よりも少しマグネトシース側に位置しており、電子流体のエネルギー密度の上昇は、この領域における加速・加熱・密度上昇を示唆している。

図3には、式(1)の項が左から順に示されている。図3aにより、電子拡散領域周辺に、電子流体速度の y 方向の上下方向に加速領域が存在していることがわかる。図3b-3dの比較によって、より中心に近い領域では圧力テンソル項による加速が、中心から離れるとローレンツ項による加速が支配的になることがわかる。また、電子流体速度の z 成分の加速領域(負の値が顕著な領域)は、ほぼ圧力テンソル項を反映していることがわかる。対称磁気リコネクションでは、電流と逆方向の電子流体の加速は、その領域の電場によって主に生じるが、上流側の密度差・温度差が顕著な非対称磁気リコネクションでは、圧力テンソル項が重要になることを示している。また、 y 成分・ z 成分の加速が生じる領域は、図2aの電子流体のエネルギー密度の時間変化が正となる領域と類似しており、この領域の加速がエネルギー密度上昇に寄与していることを示唆する結果となった。

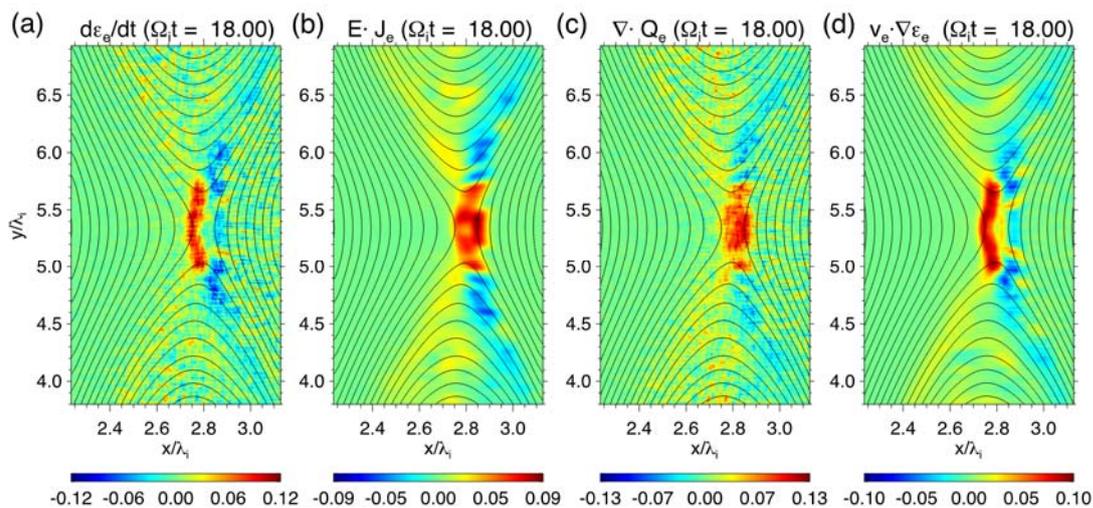


図2. $\Omega_i t = 18$ における式(2)の各項のカラーマップ

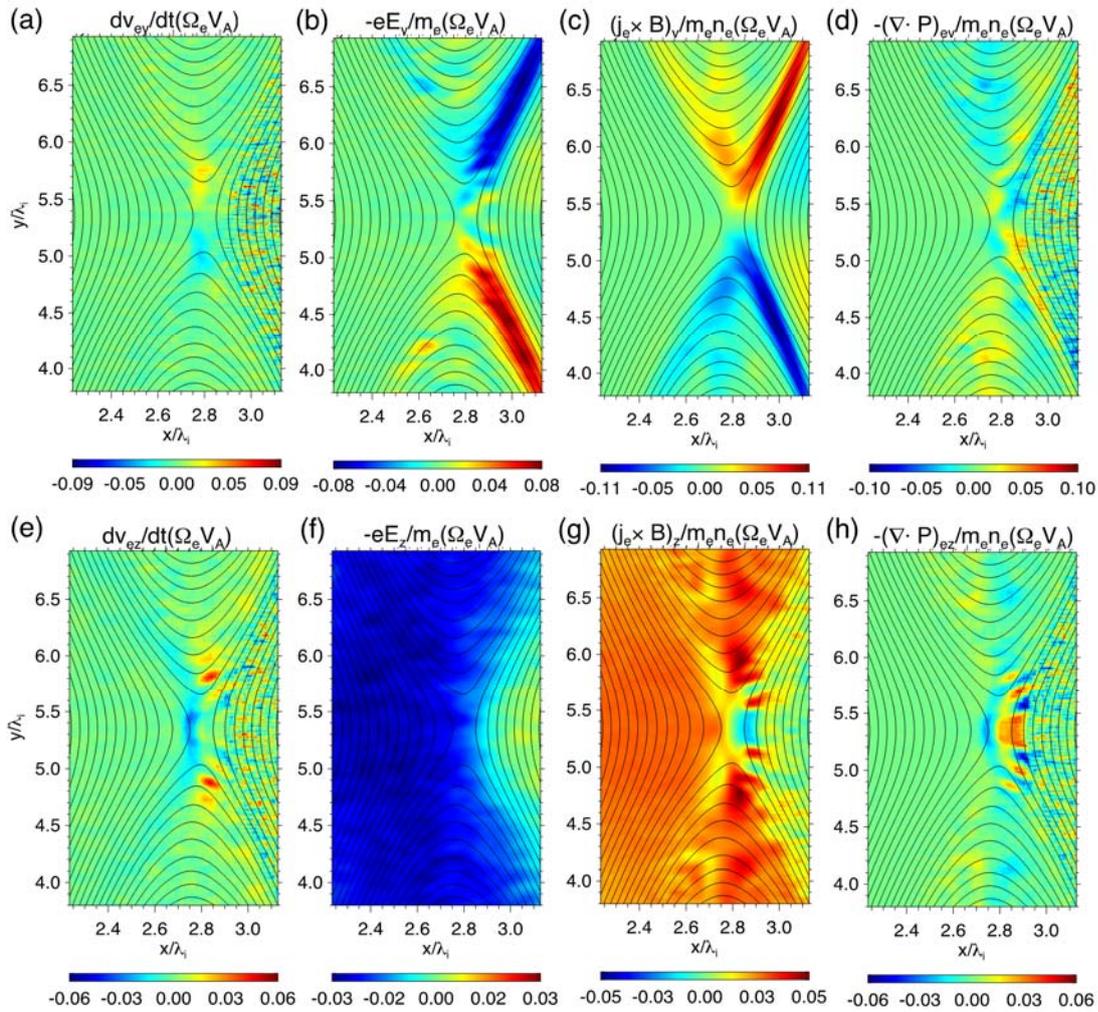


図 3. $\Omega_i t = 18$ における式(1)の各項のカラーマップ。上段:y成分、下段:z成分。

成果発表

(ポスター)

1. 内野 宏俊, 栗田 怜, 原田 裕己, 町田 忍, Vassilis Angelopoulos, 昼側磁気圏界面リコネクションの最地球側境界層におけるプラズマ波動, 第 140 回 SGPSS 総会および講演会, 福岡, 2016 年 11 月

(口頭発表)

1. 田中 瑠, 町田 忍, 内野 宏俊ほか, Geotail 衛星のデータを用いた昼側磁気リコネクションのホール磁場構造に関する研究, 第 140 回 SGPSS 総会および講演会, 福岡, 2016 年 11 月

(論文)

1. Uchino, H., S. Kurita, Y. Harada, S. Machida, and V. Angelopoulos (2017), Waves in the innermost open boundary layer formed by dayside magnetopause reconnection, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, doi:10.1002/2016JA023300.

太陽フレアに対する電離圏の応答の数値シミュレーション
Numerical simulations of ionospheric response to solar flare

松村充、名古屋大学・宇宙地球環境研究所

【研究目的】

太陽フレアはX線や極端紫外線を放射し、地球電離圏の電子密度を急激に増加させ（SIDと呼ばれる）、衛星測位の精度低下や短波通信の遮断をひきおこす。このような事態を予測するためには、SIDがどこでどれくらい強く、それがどれくらい長く継続するのか、その特性とメカニズムを理解する必要がある。

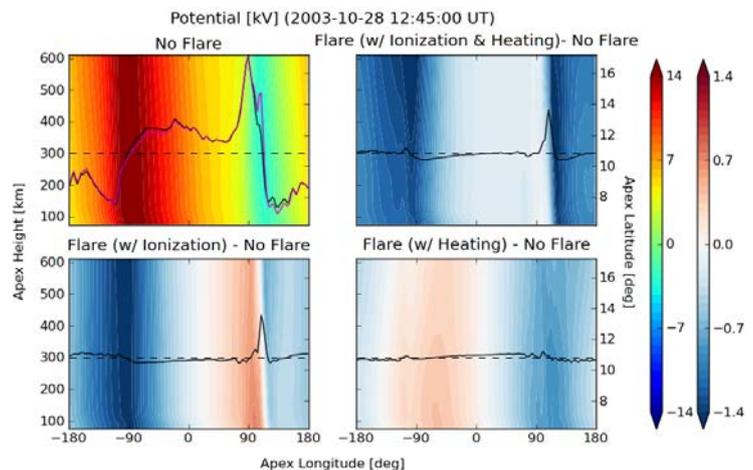
近年の研究から、磁気赤道域のSIDの分布には、電場によるドリフトが大きな役割を果たしていることが明らかになりつつある。この領域の昼側では、東向き電場によって電子が極方向にドリフトしているが、2003年10月28日のX17フレア時には、磁気赤道での電子密度増大が周りの緯度に比べて大きくなったことが観測されており、東向き電場と極方向のドリフトが弱まったことが示唆されている[1]。また同じイベントでは、フレア放射の時間に比べて、電離圏全電子密度（TEC）の増大時間が3倍以上長く継続したことが報告されている[2]。この継続時間についても電場の寄与が示唆されているが、なぜ東向き電場が弱まり、その効果が長時間継続するのかは未だ解明されていない。電場を変化させる要因と考えられているのは、中性大気電離の増大による電気伝導度分布の変化か、加熱の増大による中性風ダイナモの変化であるが、本研究では、これらのうちどちらがどのように電場を変化させて電子密度の増大を維持するのか、数値シミュレーションにより解明することを目的とする。

【研究方法】

数値シミュレーションには、大気圏・電離圏の全球モデルGAIA[3]を用いた。SIDを再現するために、GAIAに入力する太陽放射スペクトルを、フレアに対応した経験モデルFISM[4]に変更した。また、太陽放射から中性大気電離率や放射加熱率を計算するために、吸収断面積などのパラメータをSolomon and Qian[5]の論文から引用した。これらの改良を施したGAIAを用いて、2003年10月28日のX17フレアに対する電離圏の応答をシミュレートした。計算には名古屋大学情報基盤センターの計算機FX100およびCX400を使用した。

【研究結果】

シミュレーションの結果、フレアがおこるとTECは昼半球全体で増大したが、とくに磁気赤道付近の朝側での増大が顕著であり、そこでは東向き電場は減少した。一方、夕方側ではTECの減少がみられ、そこでは東向き電場が増大した。この電場の成因が電気伝導度分布と中性風ダイナモのどちらの変化によるのかを調べるために、電気伝導度を変化させるのは放射による電離、中性風ダイナモを変化させるのは放射による加熱と考えて、4通りのシミュレーションをおこなった。1つめはフレアがおこらず放射・電離・加熱のいずれも変化しない場合（run1）、2つめはフレア放射によって電離率・加熱率がともに増大する場合（run2）、3つめはフレア放射によって電離率のみが増大する場合（run3）、4つめはフレア放射によって加熱率のみが増大する場合（run4）である。右図はその4つの場合について、電離圏の静電ポテンシャルを、地球主磁場の磁力線の頂点の経度と高度についてプロットしたものである（時刻はフレア開始から1.75時間後）。黒色の実線は高度300kmにおける東向き電場、点線はその電場の基準線をあらわしている（単位は0.01mV）。ただし、run1（左上）の電場にはrun2の電場を紫色で重ねてプロットしており、run2（右上）、run3（左下）、run4（右下）については、run1から



の差をプロットしている。run2の東向き電場には、朝側（経度-90° 付近）で減少、夕方側（経度90° 付近）で増大がみられた。また、東向き電場の変化はrun2とrun3ではほぼ同じであり、それらに比べてrun4の電場が小さかった。run2の電場は電離（run3）と加熱（run4）の両方の影響が含まれているので、この結果は、run2の電場の変動をつくっているのが、主に電離による電気伝導度の変化であることを示している。

【考察】

電気伝導度と電場の関係は、電流の収束/発散による分極電荷の増大/減少で説明することができる。まず、昼側電離圏では東向きの電場によって東向きの電流が流れている。フレア放射によって昼側の電気伝導度が増大すると、朝/夕方側では電気伝導度勾配が強まるために、電流が発散/収束し分極電荷が増加/減少する。分極電荷は静電ポテンシャルを変化させるので、朝/夕方側で負/正のポテンシャルをつくる。図のポテンシャル分布はこれで説明できる。またここには掲載しないが、この二次的な電場によって、昼夜境界の昼側/夜側では電子が下/上向きにドリフトして輸送され、電気伝導度が増大/減少し、勾配が維持されることも明らかになった。これが電場および電子密度の変動を維持していると考えられる。さらに、夕方側の東向き電場はプラズマバブル生成の重要な要因であるので、夕方側での東向き電場は、バブルの継続時間を延ばしたり、クラスター状のバブルの生成を促したりする可能性がある。

【まとめ】

大気圏・電離圏の全球モデルGAIAを改良して、フレア時のSIDを再現できるようにした。さらに、SIDとそれに影響を及ぼす電場について、以下の特性とメカニズムを明らかにした。

- ・東向き電場が弱まることで、電子は磁気赤道付近で収束し、TEC増大が長く継続する。この効果は朝側ほど強い。
- ・東向き電場を弱めているのは、フレア放射による電離である。昼夜境界の電気伝導度勾配が急になり、朝/夕方側に負/正の分極電荷が溜まって昼側（特に朝側）の東向き電場が弱まる。夕方側では逆に東向き電場が強まる。
- ・分極電場によるドリフトで電気伝導度の急勾配が維持されるので、電場も維持される。

【引用文献】

- [1]Liu, H., et al. (2007), *J. Geophys. Res.*, 112, A07305, doi:10.1029/2007JA012313.
- [2]Tsurutani, B. T., et al. (2005), *Geophys. Res. Lett.*, 32, L03509, doi:10.1029/2005RS003331.
- [3]Jin, H., et al. (2011), *J. Geophys. Res.*, 116, A01316, doi:10.1029/2010JA015925.
- [4]Chamberlin, P. C., et al. (2008), *Space Weather*, 6, S05001, doi:10.1029/2007SW000372.
- [5]Solomon, S. C. and L. Qian (2005), *J. Geophys. Res.*, 110, A10306, doi:10.1029/2005JA011160.

【成果発表（口頭発表）】

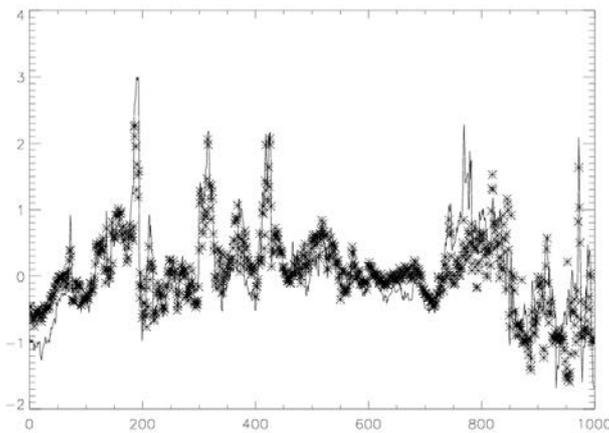
1. 松村充, 塩川和夫, 品川裕之, 陣英克, 藤原均, 三好勉信, “GAIAモデルを用いた太陽フレアに対する電離圏応答のシミュレーション”, 地球電磁気・地球惑星圏学会第140回講演会, 九州大学, 2016年11月20日.
2. Matsumura, M., K. Shiokawa, H. Shinagawa, H. Jin, H. Fujiwara, Y. Miyoshi, Y. Otsuka, “GAIA modeling of electrodynamics in the lower ionosphere during a severe solar flare”, American Geophysical Union 2016 Fall Meeting, サンフランシスコ, 2016年12月15日.
3. 松村充, 塩川和夫, 大塚雄一, 品川裕之, 陣英克, 藤原均, 三好勉信, “電離圏・大気圏のフレア応答”, PST EP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」, 名古屋大学, 2017年1月26日.

複数の太陽周期にわたる時間的に連続した太陽風MHDモデリング
Solar-wind MHD simulation temporally seamless over solar
cycle 21 to 24

代表者： 林 啓志、NSSC/CAS及びISEE名古屋大学

静穏太陽風をMHDモデル計算により求解する場合、太陽に近い内部境界球面に（太陽回転系でみた場合の）固定端条件を適用することが一般的である。しかしながら、擾乱のような非静穏な事象を除いて考えても、厳密には太陽コロナの非定常的に伴う変動が静穏な太陽風でも存在する。本研究では、数十年にわたる名大IPS実測データおよびWSO磁場観測データを基に時間変動する太陽圈内側境界値を与えたMHDモデル計算を行う事でより実際に近い、惑星間空間・太陽圏のMHDモデルの構築を企図していた。計算機利用許可の問題により、28年度では予備計算にとどまってしまった。

この予備計算には、モデル境界磁場変動を許容するMHDモデル(2012年にJGR誌に発表済み)を用いた。MHD計算を始めるにあたり、太陽風の密度と温度は上記2つの観測からは決定できないため、ある種の経験関数が必要となる。このための経験関数最適化手法を考案し、2016年JGR誌にて発表済みのものをまずは用いた計算を行った。また、機械学習によるその場観測データに基づいた経験関数決定を試験的に行ないその結果をMHDモデルに適用する予備計算も行っている(添付図)。これらの温度・密度関数の評価を含めた計算と結果解析が今後の課題である。



左図：機械学習により太陽風速度と磁場強度から予測された太陽風密度(×印)と実際に計測された密度(実線)。縦軸値は規格化された密度の対数値。横軸は時間で単位は時。一例として1991年2月頃の時期のものを図示している。学習には別な(1年後の)期間のデータを用いた。太陽風データ分類器および密度・温度補間器として機能する事を確認した。

関連する発表・論文：

- 1) Keiji Hayashi, Munetoshi Tokumaru, and Ken'ichi Fujiki, "MHD-IPS analysis of relationship among solar-wind density, temperature, and flow speed", (2016) *JGR*, vol.121, 7367 - 7384, doi:10.1002/2016JA022750