

7. 計算機利用共同研究 目次詳細

(所属・職名は2020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
梅田隆行	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	准教授	プラズマ粒子シミュレーションコードの並列化と性能チューニング	322
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	324
林 啓志	NWRA	Boulder 支局	Research scientist	I P S 速度データに基づく太陽圏複太陽周期のMHDモデル	325
関 華奈子	東京大学	大学院理学系研究科地球惑星科学専攻	教授	太陽条件および固有磁場が火星周辺宇宙環境および大気散逸機構に与える影響の研究	326
辻野智紀	国立台湾大学	大気科学研究科	博士研究員	領域雲解像モデルにおける双方向ネスティングシステムの開発と適用	327
坪内 健	電気通信大学	情報理工学研究科(芳原研究室)	客員研究員	プラズマ密度構造から探る太陽圏境界変動	329
近藤光志	愛媛大学	宇宙進化研究センター	講師	非対称反平行磁気リコネクションの磁気流体計算	331
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	准教授	アジアダストホットスポット域からのエアロゾル輸送に関する研究	333
永田伸一	京都大学	大学院理学研究科附属天文台	助教	高時間分解能の非線形フォースフリー磁場計算によるMHD不安定性発達の研究	335
相木秀則	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	准教授	千年スケールの気候変動における海洋モード水の役割	338
寺田直樹	東北大学	理学研究科	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	341
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	343

プラズマ粒子シミュレーションコードの並列化と性能チューニング Parallelization and performance tuning of particle-in-cell code for plasma simulations

梅田隆行、名古屋大学・宇宙地球環境研究所

研究目的

宇宙プラズマ現象はマルチスケール・マルチ物理過程であるが、従来の研究では、時間および空間スケールの異なる現象に対して、それらに適した流体コード、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、プラズマ流体・イオン・電子やマクロ・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いる宇宙プラズマにおいては、第一原理によりこれらを理解することが重要である。本研究では、第一原理運動論シミュレーション手法である粒子コードに再注目し、その並列化および性能チューニングを行う。

研究方法

データ構造の変更：従来の `particle-in-cell` 粒子コードは、粒子番号に基づいたループ構造を持つ。しかし、粒子番号と空間格子の位置は無関係であり、粒子が空間格子の電磁場データにアクセスする場合および、粒子の電荷・電流を空間格子に配置する場合に、メモリへのランダムアクセスが発生し、演算性能が低下する。ランダムアクセスによる性能低下を回避するには、粒子番号を空間格子上の位置に基づいて並べ替える必要がある。近年では、天文学分野の重力多体コードで用いられているような、空間格子の位置に紐づいた粒子のデータ構造を採用し、空間格子と粒子番号の多重ループ構造を持つコードもあり、従来の粒子コードと比べて 10 倍以上の計算速度を達成している。本研究では、空間格子に紐づいた粒子コードを新たに開発し、従来のコードおよびソーティングを施した従来のコードとの性能比較を行う。

研究結果

データ構造を変更した新たな `particle-in-cell` 粒子コードを開発し、Xeon プロセッサ上で従来のコードとの性能比較を行った。格子に対して繰り返し演算を行う新しいプログラム構造は、粒子のみに対して繰り返し演算を行う従来のプログラム構造に対して数倍高速であることを示した。一方で、新しいプログラム構造は粒子データのソートが必須であり、計算カーネル部の高速化に伴ってソートカーネルの負荷が目立つようになった。今後、より高速かつスケラビリティの高いスレッド並列ソーティングアルゴリズムを探す必要がある。またプログラムの高速化に伴って、電流密度の計算における `OpenMP` の `reduction` 演算のオーバーヘッドが目立つようになったため、ループタイリングなどによる演算順序の変更により、`reduction` 演算を用いない計算法に変更する必要があることが分かった。

成果発表

- Umeda, T., Paradigm shift in program structure of particle-in-cell simulations, In: Parallel Computing: Technology Trends, Advances in Parallel Computing, Vol.36, pp.455-463, 2020. (査読付論文)
- Nakamura, T. K. M., T. Umeda, R. Nakamura, H. S. Fu, and M Oka, Disturbance of the front region of magnetic reconnection outflow jets due to the lower-hybrid drift instability, Physical Review Letters, Vol.123, No.23, 235101 (6pp.), 2019. (査読付論文)
- Yamazaki, R., A. Shinoda, T. Umeda, and S. Matsukiyo, Mach number and plasma beta dependence of the ion temperature perpendicular to the external magnetic field in the transition region of perpendicular collisionless shocks, AIP Advances, Vol.9, No.12, 125010 (4pp.), 2019. (査読付論文)
- Umeda, T., Multi-step Boris rotation schemes for Lorentz force equation of charged particles, Computer Physics Communications, Vol.237, pp.37-41, 2019. (査読付論文)
- 梅田 隆行, プログラムモデルの異なる PIC コードの性能測定, 第 172 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, 2019 年 12 月. (口頭発表)
- Umeda, T., Paradigm shift in program structure of particle-in-cell simulations, International Conference on Parallel Computing (ParCo2019), Prague, Czech, September 2019. (口頭発表)
- Umeda, T., R. Yamazaki, and Y. Ohira, Full particle-in-cell simulation of the interaction between two plasmas for laboratory experiments on the generation of magnetized collisionless shocks with high-power lasers, 15th symposium of Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (IPELS), Tokyo, Japan, September 2019. (口頭発表)
- Umeda, T., and T. K. M. Nakamura, Electromagnetic linear dispersion relation for plasma with a drift across magnetic field, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 16th Annual Meeting, Singapore, July 2019. (ポスター発表)
- Umeda, T., Self-reformation of rippled perpendicular collisionless shocks: Full particle simulations, 14th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows (ASTRONUM 2019), Paris, France, July 2019. (招待講演)
- 梅田 隆行, 中村 琢磨, Electromagnetic linear dispersion relation for plasma with a drift across magnetic field, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 幕張メッセ, 2019 年 5 月. (ポスター発表)

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

深沢 圭一郎、京都大学・学術情報メディアセンター

2013年に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どのようになっているか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、観測が開始されており、HISAKI の観測との比較も可能となってきている。木星磁気圏ではこれまでも Galileo 探査機による長期間周回観測があり、観測主体の研究が進んでいるが、磁気圏全体を複数点で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、どのようなことに影響しているかなど時空間にわたる変化を理解することが難しい。

一方で、木星磁気圏数値シミュレーションでは、近年の計算機の発展により、計算時間は膨大になるが 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磁気圏全体の計算が可能となっている。

このように、HISAKI による数値シミュレーションと比較可能な観測結果が蓄積されはじめていること、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る状況を踏まえ、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ている。

本年度では、これを更に進めて、HISAKI の観測だけでなく Juno の観測結果に対応するために、Juno が観測をしているある特定期間の磁気圏シミュレーションを行った。Juno では木星到着前に太陽風データも観測しており、この太陽風データを利用し、現実的な入力パラメータでのシミュレーションを行った。このシミュレーション結果と観測には、相関があることが分かり、観測結果の説明に利用できることを確認した。これらの成果は AGU において報告されている。

・学会発表

(Invited) Kimura et al., Recent updates on the Hisaki observations for Jupiter's magnetosphere and Io's atmosphere, AGU Fall Meeting 2019.

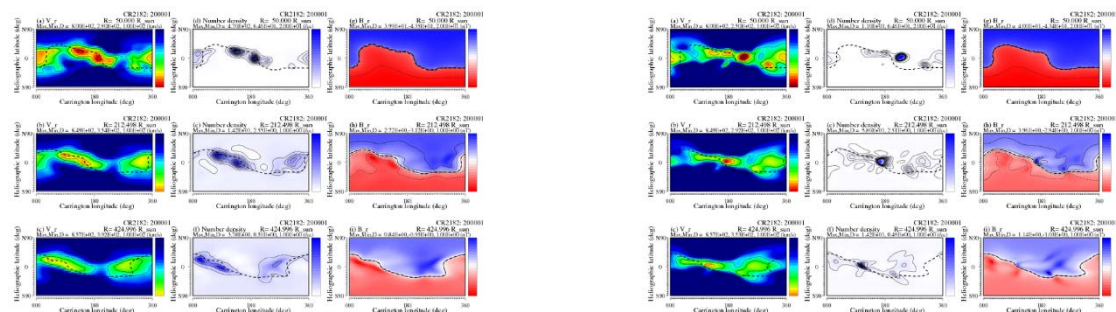
K. Fukazawa, T. Kimura, T. Tokunaga, S. Nakano, Application of Machine Learning to magnetospheric physics and preparation of training data for global magnetospheric configuration and physics, AGU Fall Meeting 2019.

I P S 速度データに基づく太陽圏複太陽周期の M H D モデル
MHD simulation of multi-solar cycle variation based on IPS velocity data

林 啓志、NWRA、Boulder

太陽周期にともなう太陽圏プラズマ流（太陽風）の三次元的な状況を、探査機の直接的な測定だけで決定することは現状では不可能である。その一方、そのような三次元的なデータは、宇宙物理、とくに宇宙天気分野において、重要である。たとえば、CME などに始まる太陽風擾乱の地球への伝搬を予想するにあたり、平穏時の太陽風構造を三次元的に把握することは決定的に重要であるし、銀河宇宙線の伝搬などの太陽系外からの影響を考察する上でもマクロ的な太陽圏の状態の把握は高エネルギーの太陽系内浸潤過程を理解する上で役立つであろう。われわれは、名大 IPS(interplanetary scintillation) 観測データのうち特に太陽風速度についてのデータと太陽光球面磁場データを主な入力とする、MHD 太陽風三次元トモグラフィ法を開発してきた。これは現状では唯一の太陽圏全体の太陽風プラズマを計測する手段である IPS 観測と MHD 方程式を同時に満たすような三次元解を求める解析手法である。

本研究では複数の太陽周期での適用の改良を図ると同時に、最近の太陽風のより新しいデータを取り入れたモデリングの進展を企図し、欧州電波望遠鏡群 (LOFAR) の IPS 観測データを組み合わせたモデル計算を、2016 年 10 月の時期に対して行った。左図は LOFAR のデータを使った場合、右図は使わなかった (名大 IPS データのみの) 場合でそれぞれ MHD-IPS トモグラフィにより復像された緯度・経度図を表す。LOFAR データを加える事で、特に低速風領域(左列、褐色部分) の分布に違いが表れた。差異は遠方 (図の中段 (1 AU) と下段 (2 AU)) にて MHD 非線形性により強調され、密度(中列)と磁場強度(右列)の圧縮領域の違いとして表れる。これら結果についての論文を準備中である。



(左) 名大 IPS データとともに欧州 LOFAR による IPS 観測データを同時に用いて復元した太陽風構造。(右)名大 IPS データのみを用いたもの。LOFAR による観測が行われた 2016 年 10 月における太陽光球面磁場データを太陽風磁場を決定するために用いている。

太陽条件および固有磁場が火星周辺宇宙環境および大気散逸機構
に与える影響の研究

Effects of solar conditions and planetary intrinsic magnetic field on Martian space environment and atmospheric escape processes from Mars

関華奈子、東京大学・大学院理学系研究科

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

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

現在でも太陽風や太陽 EUV 放射は短時間に大きく変動していることが知られているが、本研究では、継続時間が長かったと思われる典型的な太陽風パラメータを中心にシミュレーションを行う太陽風条件を選定した。まず、太陽風磁場の方向については、太陽風の Parker spiral で決まる方向を仮定し、先行研究と同じ 45 億年前相当の太陽条件下で、惑星固有磁場強度を変えてシミュレーションを行った。また、次に、同様のシミュレーションを、35 億年の太陽風および太陽放射の条件下で行い、45 億年前相当の太陽条件下での結果と比較した。

その結果、弱い固有磁場を持つ場合には、現在の太陽条件下と同様、大気流出が増加することが示された。また、固有磁場を更に強くしていくと、大気流出率は減少に転じることも明らかになった。図 4 に示されているように、この傾向は、分子イオンなどの特に重い粒子種で顕著であることが示された。大気流出が増加から減少に転じる固有磁場強度が何で決まるかについて調べた結果、太陽風動圧が固有磁場の磁気圧より強い条件下では、固有磁場の存在が大気流出率を増加させるが、磁気圧が弱くなると減少に転じることなどが明らかになった [Sakata et al., *J. Geophys. Res.*, 2020]。

領域雲解像モデルにおける双方向ネスティングシステムの開発と適用
Development and application of an interactive nesting
in a cloud-resolving model

辻野 智紀 (国立台湾大学 大気科学研究科)

研究目的

近年頻発する豪雨や強風災害の多くは、水平スケールが 200 km 程度のメソスケール気象擾乱 (メソ擾乱) によってもたらされ、その高精度な数値予報は防災の観点から重要である。メソ擾乱は水平スケール 20 km 以下の積乱雲群によって構成され、水平スケール 2000 km 程度の高・低気圧の流れと水蒸気供給によって移動、維持する。メソ擾乱の高精度な予報には、個々の雲を表現可能な (2 km 以下の) 水平解像度で、かつメソ擾乱周辺の高・低気圧を覆う広い領域を粗い解像度で、互いの情報を領域境界で交換しながら同時に数値計算することが要求される。このような手法は双方向ネスティングと呼ばれる。本研究では、既存の数値大気モデルに新たに双方向ネスティング手法を導入し、現実的なメソ擾乱のシミュレーションを試みる。既に実装されている数値モデルではメソ擾乱の再現性の改善のみに着目されている。本研究ではそれに加えて、メソ擾乱を計算する高解像度シミュレーションの結果が高・低気圧を計算する低解像度シミュレーションの結果に与える影響も調査する。

研究手法

本研究では CReSS (Cloud-Resolving Storm Simulator) に双方向ネスティング手法を導入し、2018 年 6 月 30 日と同年 8 月 17 日において台湾北部の台北盆地で発生した豪雨事例のシミュレーションに適用する (実験名: 2wy-nest)。このとき、高解像度シミュレーションは 1 km (1K 領域)、低解像度シミュレーションは 5 km (5K 領域) の水平解像度で実施される。双方向ネスティングの性能を検証するため、同事例に対して、1K 領域の結果を 5K 領域の境界にフィードバックしない実験 (1wy-nest) および 1K と 5K 領域を同時ではなく別々に計算する実験 (Off-nest) も実施する。共同研究者 (Kuo 教授) のグループにおいて実施された特別観測プロジェクトの取得データを用いて、シミュレーション結果の妥当性が検証される。

結果と考察

導入された双方向ネスティングシステムによる 2wy-nest 実験の計算時間は、1wy-nest 実験の約 1 割程度の増加にとどまったため、実事例の数値シミュレーションの実施には十分な処理速度を有していると考えられる。本報告書では 8 月 17 日の事例のみを示す (6 月 30 日の事例は成果発表 1 にて発表)。この事例は東シナ海に台風が存在し、台湾周辺は台風に吹き込む南西風が卓越した (図略)。日中に陸面が短波放射で加熱され、典型的な海風が台北盆地に流入した。15 LST に盆地内で顕著な積乱雲の発達を観測し、台北市では 59 mm h⁻¹ の顕著な降水を観測した (図 1a)。2wy-nest 実験の結果はこの発達した積乱雲に伴う強いレーダ反射強度を示しており (図 1b)、1wy-nest や Off-nest (図 1c, 1d) に比べて現実的な積乱雲を再現している。

5K 領域に含まれる台風についてみると、2wy-nest 実験と 1wy-nest 実験で最大 100 km 程度の経路差が見られる (Off-nest は 1wy-nest と同様に 1K 領域から情報が入ってこないため 1wy-nest と全く同じ結果となる)。さらに中心気圧についても最大約 10 hPa の差を生んでいる。これは台風中心に流れ込む下層の流れとその流れに伴う水蒸気供給の差によるものと考えられる。2wy-nest 実験では台風の風上側にあたる台北盆地で顕著な降水が発生したため、1wy-nest に比べて乾燥した空気が中心に流れ込む。また風上での降水に伴う水蒸気の凝結は大気を加熱し、対流圏下層の気圧を低下させる。この台風中心の風上側における気圧低

下は下層での台風に向かう流れを弱め、台風の経路が南へ偏った可能性がある。

まとめ

数値大気モデル CReSS に新しく双方向ネスティングシステムを導入し、顕著な降水の事例に対してシミュレーションを行った。双方向ネスティングは高解像度領域での降水を観測と同様に再現していた。双方向ネスティングによる高解像度領域から低解像度領域へのフィードバックが、低解像度領域における台風の経路と強度の両方に影響を与えた。

成果発表

1. 辻野 智紀, 郭 鴻基, 尤 虹叡, 坪木 和久, 夏季の台北盆地における熱雷の組織化に対する対流圏中層の水蒸気と水平風の役割: 2018 年 6 月 30 日の事例. 「グローバルスケールとメソスケールを貫く気象学」研究集会, 札幌, 2019 年 09 月 27 日 (口頭).

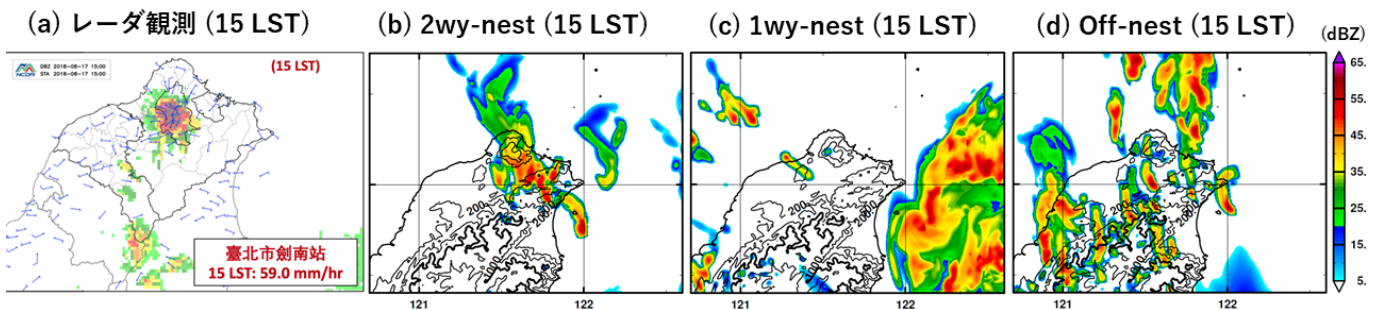


図 1: 8 月 17 日の事例における 15 LST でのレーダ反射強度 (カラー; dBZ) と標高 (等値線; m)。 (a) は中央気象局による観測値、 (b) から (d) はそれぞれ CReSS による 2wy-nest, 1wy-nest, Off-nest での 1K 領域で計算されたレーダ反射強度を示す。中央気象局レーダ観測は国立台湾大学 尤 虹叡 博士より提供。

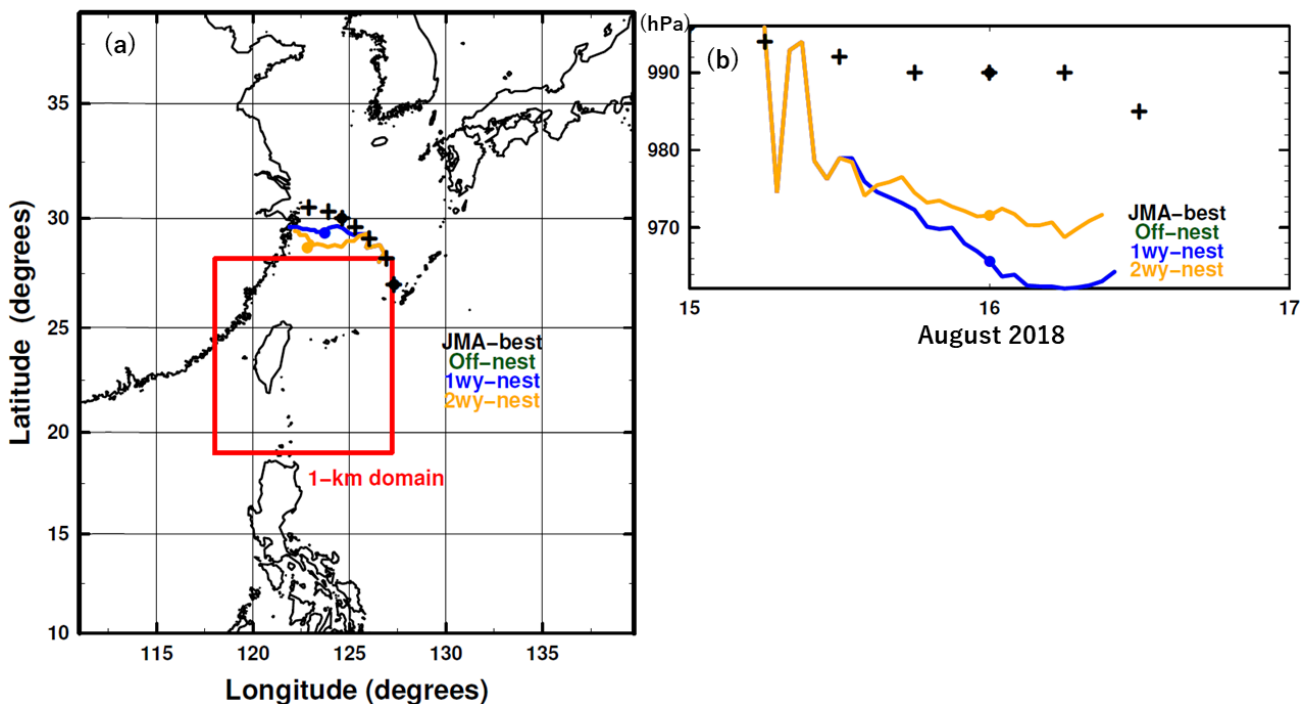


図 2: 8 月 17 日の事例における (a) CReSS シミュレーションの計算領域と各実験での台風経路、 (b) 各実験での中心気圧の時間変化。黒色の十字は気象庁ベストトラックを示す。(a) における赤線で囲まれた領域が 1K 領域、描かれている領域全体が 5K 領域をそれぞれ表す。

【研究目的】

太陽風プラズマで満たされた太陽圏は高エネルギー宇宙線の内部への侵入を遮断する働きを備えている。その仕組み、特に空間・時間依存性の解明にあたっては、境界領域 (heliopause; 以下HP) で太陽風と星間物質との間に生じる相互作用の物理過程を理解することが不可欠である。2012年にボイジャー1号が、2018年に2号がそれぞれHPを通過したが、いずれもHPの遷移層が単純な不連続面ではないことを示唆している。本研究課題においては、その非一様・非定常性の物理特性の解明を主目的とする。HP周辺領域は多成分の粒子・プラズマ環境下にあるという特徴があり、特に高速のイオンと中性粒子との荷電交換で生成される高速中性粒子 (ENA) は太陽風磁場の影響を受けずに直進することから、これを検出するIBEX衛星の観測によってHPの全体構造を捉えることが可能になった。本研究ではこのENAおよびその起源粒子となるピックアップイオン (PUI) の密度・エネルギー構造の変動に関する数値シミュレーションによる検証を通じて、ENA観測とHP構造変動との関連性を明らかにする。

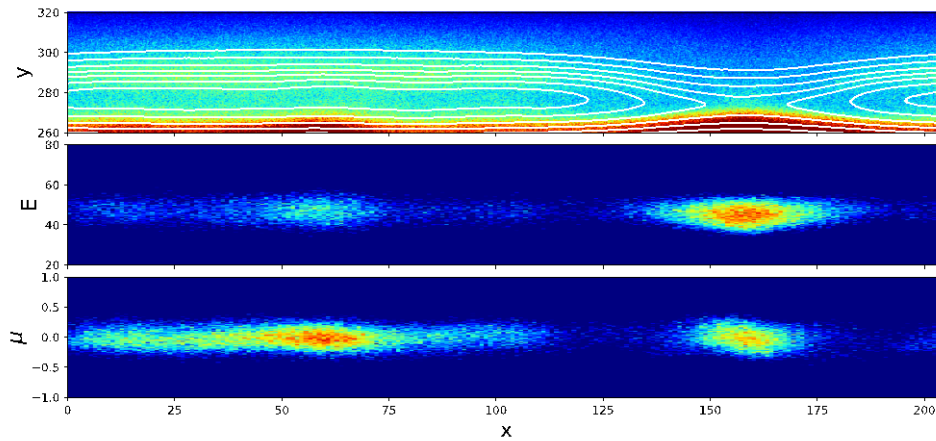
【研究方法】

HP領域を2次元構造に模した数値モデルを作成し、イオンの個別粒子運動を解き進める粒子ハイブリッドコードを用いたシミュレーション計算を名古屋大学情報基盤センターのスーパーコンピュータで行った。本年度は太陽風磁場と星間磁場が反転した状態で接する状況を想定し、HPで発生する磁気リコネクションの成長がHP近傍に分布するPUIの密度構造に反映される過程およびこれを観測として検出したときに予想される特性について検証する。物理量は外部ヘリオシース (outer heliosheath; 以下OHS) のパラメータで定義されるプロトンジャイロ周波数・プロトン慣性長で規格化し、時間ステップは0.005、空間グリッドは0.2に取った。シミュレーション空間はxy面で定義される1024×2048グリッドの周期境界を設定し、太陽風側と星間プラズマ側で互いに反平行となる磁場を与えると同時に、両側で全圧力 (プラズマ+磁場) が均衡を保つようにプラズマ温度を与えた。磁場遷移層の厚みは0.8、星間プラズマと太陽風プラズマの密度比は5、磁場強度比は2とした。

”IBEXリボン”として知られる局所的なENA放射構造には、HP近傍のプラズマ環境が投影されていると予想されていることから、その起源粒子であるPUIをOHS内に配置し、密度は星間プラズマの0.01%の密度とした。PUIの背景磁場に対する旋回速度は、太陽風速度に該当するアルフベン速度の10倍として磁場垂直成分のリング状分布で与えた。xy面で定義されるシミュレーション空間において初期磁場はx成分のみを与え、全ての物理量はx方向に一様とした。HPに垂直な方向にy軸を取る。

【研究結果】

シミュレーション結果 ($t = 500 \Omega_p^{-1}$) を次ページの図に示す。上の図はxy空間におけるPUI密度を示し、白線は磁力線を表す。磁力線は $(x, y) \sim (160, 270)$ において再結合が生じ、その両側に磁気島が形成されてPUIは内部に取り込まれている。HPは $y \sim 270$ の位置に該当し、 $y < 270$ がOHS、 $y > 270$ が内部ヘリオシース (太陽風側) となる。磁気再結合自体は図で示した時間以前から複数の箇所でも発生していて、時間の経過とともに隣接する磁気島同士の合体を繰り返している。真ん中の図はPUI密度のy方向への積分値をエネルギー別に示したもので、IBEX衛星などで検出されるENAを模したものとなる。図から、強いemissionが再結合領域に集中して現れていること、エネルギーは初期に与えたリング分布の速度に対応していることがわかる。また $x \sim 60$ のあたりにも若干弱めのemissionがあるが、これは2つの磁気島が合体する以前の再結合領域に該当している。下の図はPUIのピッチ角 θ に対する $\mu = \cos \theta$ の分布を示す。PUIの速度は初期状態において磁場垂直方向にのみ与えられていたため、 μ の分布は全領域で0になる。一方この図から、再結合領域以外の所ではピッチ角が拡散している様子が表されている。再結合領域では磁気リコネクションに伴って磁力線が磁場垂直方向に動くために $\mu = 0$ はそのまま保持されるのに対し、その外側では磁力線の曲率半径より大きなジャイロ半径を持つPUIの速度に磁場平行成分が現れることを意味している。



【考察】

IBEX衛星で観測されるENAの中でも特に、“IBEXリボン”と呼ばれる局所的に強いENA放出領域はその起源としてHPからすぐ外側のOHSに存在するPUIが最有力視されている。そこで本研究は、HPで発生する現象の特性がPUIのエネルギー分布情報の中に埋め込まれているという仮定の下で磁気リコネクションに焦点を当て、その成長過程に対応するPUI密度構造の示す特徴について考察する。

PUIが中性粒子との電荷交換反応を起こしてENAとなるまでの典型的な時間スケール（年単位）の間はピッチ角散乱を起こさずにリング状分布を保つことが、IBEXリボンを形成するために必要な条件と考えられている。本研究結果より、 $\mu \sim 0$ が長時間保たれるのは太陽風側と星間プラズマ側との間で磁力線の再結合が起こった領域に限られ、またその領域においてPUIの積分密度に顕著な増加が確認された。これよりIBEXリボンとして観測されたENAの空間構造に切断が見られる場合、その領域に磁気リコネクションが発生している可能性に関する議論への発展が今後期待できる。

【成果発表】

1. 坪内 健、Structural variations in the pickup ion density associated with magnetic reconnection at the heliopause、日本地球惑星科学連合 2019 年大会、2019 年 5 月、千葉
2. Tsubouchi, Ken, Properties of the heliopause fluctuations embedded in the pickup ion density profiles, American Geophysical Union 2019 Fall meeting, San Francisco, December 2019

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

近藤光志、愛媛大学宇宙進化研究センター

研究目的

地球磁気圏の反太陽方向（地球磁気圏尾部）領域では、磁気圏が太陽風により引き延ばされ、その反平行磁場で形成された電流シート中で磁気リコネクションが起こっている。一方、地球磁気圏前面の磁気圏境界では、尾部領域とは異なり、太陽風磁場と地球磁気圏磁場の異なるプラズマ領域間で、電流シートを挟んで非対称な磁気リコネクションが起こっている。これまで、非対称磁気リコネクションにおいても、対称磁気リコネクションの延長として、Petscheckモデルを拡張したモデルで磁気リコネクションを議論されてきた。しかしながら、昨年までの我々の研究[1,2]により、非対称磁気リコネクションでは、Petscheckモデルとは大きくことなる構造がみられることが示されてきた。とくに、プラズモイドの前方に形成される大規模な衝撃波や、接触不連続面の地球磁気圏側への侵入が特徴としてあげられる。

本研究では、非対称磁気リコネクションにおけるプラズモイド構造と高速および低速プラズマ流を理解することを目的とする。

研究方法

本研究では、自発的磁気リコネクションモデルに基づいた2次元磁気流体計算を用いて非対称磁気リコネクションを調べる。自発的磁気リコネクションでは、外部境界の影響を受けずにシステム内部のプラズマ流と拡散領域のポジティブフィードバックにより磁気リコネクションが発達するため、初期擾乱で発生したファストモード波が境界に達するまでの時間内のリコネクション現象を調べることを目指し、十分に大きな領域を計算する。シミュレーションの初期状態として、等温非対称電流シートを仮定し、電流シートに垂直な方向をy方向、それに垂直な方向をx方向とし、電流シートの下側領域の磁場強度を1として、上側磁場強度をその1/k倍となるように設定し、このkを非対称度パラメータとする。

研究結果とまとめ

プラズマ流構造の全体像を調べるため、図1に磁気リコネクション点からプラズモイド先端を含む領域のプラズマ流x成分のカラー等高図と磁場構造を示す。また、非対称度依存性を調べるため、非対称度 $k=1, 1.1, 1.4, 2.0$ の4パターンの結果を示す。 $k=1$ の対称磁気リコネクションの場合、明らかにプラズマ流の最大速度は、スローショックに挟まれたリコネクションファン内で観測される。一方、 $k=1.1\sim 2.0$

の非対称磁気リコネクションでは、非対称度が大きくなるにつれ、最大速度が観測される領域が、リコネクションファンから下側（低ベータ側）プラズモイド内に移行する。また、 $k > 1$ の場合、リコネクションファンの形状が高ベータ側に歪み、デルタ型の低速領域が広がっていくことが分かる。

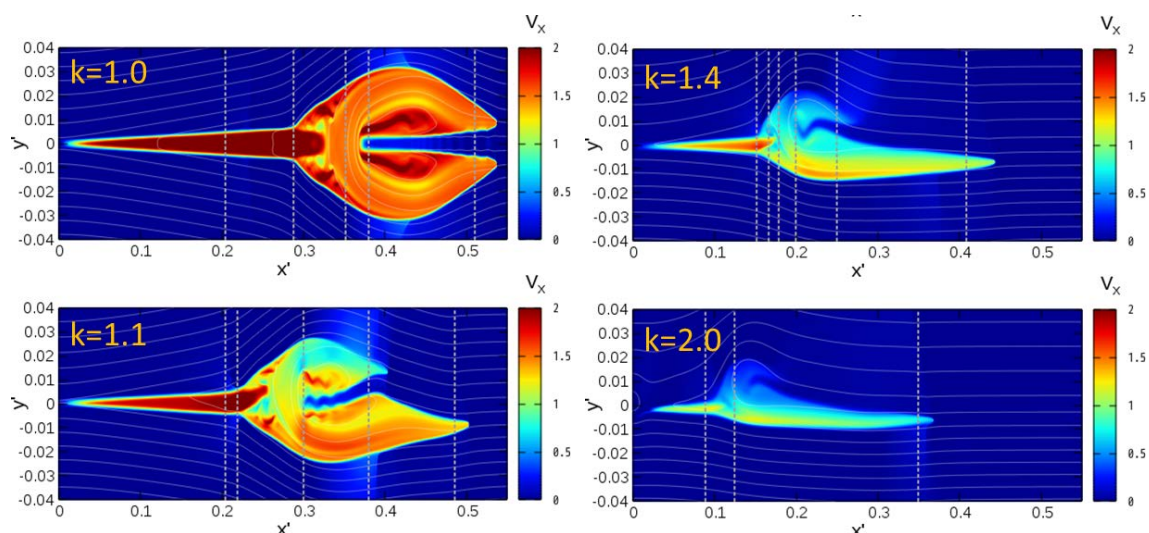


図1、非対称度 $k=1, 1.1, 1.4, 2.0$ における時刻 $t=80$ でのプラズマ流速の x 成分（カラー等高図）と磁場構造（実線）

引用文献（成果論文を含む）

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

成果発表

1. 近藤光志, 「非対称磁気リコネクションアウトフローの構造」, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2019 年秋学会, 熊本大学 (2019 年 10 月)
2. 近藤光志, 「非対称磁気リコネクションの MHD シミュレーションによる大規模構造の理解」, 宇治リコネクションワークショップ 2019, 熊本大学 (2019 年 10 月)
3. 新田伸也・近藤光志, 「ガイド磁場印加リコネクションの自己相似的時間発展：リコネクションレイトについて」, 日本天文学会 2019 年秋季年会, 熊本大学 (2019 年 9 月)
4. 近藤光志, 「非対称磁気リコネクションの大規模構造」, STE シミュレーション研究会 -計算プラズマ物理の新潮流-, 広島大学 (2019 年 9 月)

アジアダストホットスポット域からのエアロゾル輸送に関する研究 Research on aerosol transportation from Asian dust hotspot region

馬場賢治
酪農学園大学 酪農学研究科/農食環境学群

1. 研究の目的

バイオエアロゾルを観測する試みによる報告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の論文はほとんどない。バイオエアロゾルのメタゲノム解析から、アジアダスト発生地と飛来地において一部同定されたことから、客観性を持たせるためには更なる観測が必要である。また、生物由来物質が集積しやすい場所での飛散過程も調査する必要がある。本研究では、アジアダスト発生地域のうち、流水により集積したことが考えられるドライレイクやワジにおいて、簡易風洞実験による砂塵飛散実験の比較やその粒子に付着した化学的・生物学的な理解を昨年に行き続き行う。

2. 研究方法

過去のリモートセンシングデータ (MODIS) から、滞水が確認され、且つ、アジアダスト発生源であるポイントの位置情報を抽出し、現地において目視でドライレイクやワジの位置を特定した (図1)。この地点において、送風機とチャンバー、およびテントを設置し (写真1)、簡易的な風洞実験を行う。送風機の回転数を徐々に段階的に増加させ、風を地表面に当て、巻き上がった特定の大きさの粒子数をテント内で計測する。また、粒径は、0.3、0.5、3、および5 μm を光学式パーティクルカウンター (KANOMAX社製 Model 3886) を用いて計測する。

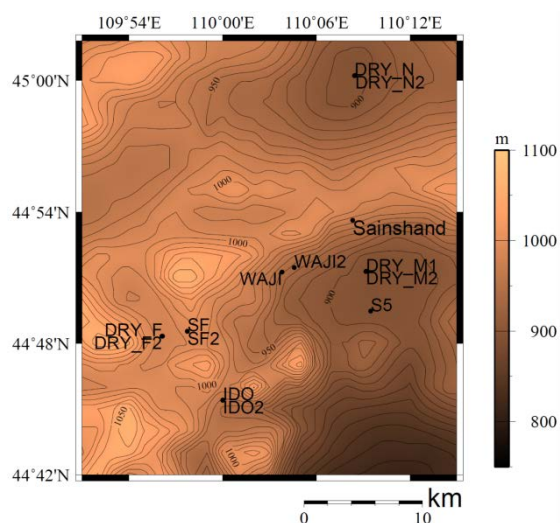


図1 対象地域



写真1 飛散実験風景

3. 結果と考察

春期の観測は、新型コロナウイルスの影響で残念ながら、行うことは出来なかった。状況が収まり次第、観測を敢行し、経年的な状況の変動やローカルな大気循環場について理解を深めていきたい。

成果発表：

論文)

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

Kuribayashi Morine, Kawano Keiichi, Demura Yuta, BABA KENJI, SOFUE YUKI, PUREVSUREN TSEDENDAMBA, MATSUMOTO TAMAKI, HAGIWARA KATURO, KARTHAUS OLAF, KAI KENJI, HOSHINO BUHO, Imaging of micro-organisms on topsoil particles collected from different landscape in the Gobi Desert, E3S Web Conferences 99 2019年

Purevsuren Tsedendamba, Jugder Dulam, Kenji Baba, Katsuro Hagiwara, Jun Noda, Kei Kawai, Ganzorig Sumiya, Christopher McCarthy, Kenji Kai, Buho Hoshino, Northeast Asian Dust Transport: A Case Study of a Dust Storm Event from 28 March to 2 April 2012, 2019.

Sofue Yuki, Hoshino Buho, Demura Yuta, Kai Kenji, Baba Kenji, Nduati Eunice, Kondoh Akihiko, Sternberg Troy, Satellite Monitoring of Vegetation Response to Precipitation and Dust Storm Outbreaks in Gobi Desert Regions, LAND 7(1) 2018年

高時間分解能の非線形フォースフリー磁場計算による
MHD不安定性発達の研究
A study on MHD instability with high time cadence
Nonlinear force free field

永田伸一、京都大学・理学研究科、助教

【研究目的】

2017年9月に現れた活動領域12673は、9月6日のX9.3フレアをはじめとする大規模フレアを引き起こすなど、太陽活動周期24で最も活動的であり、フレアの発生機構についての研究が多数なされてきている。中でも、X9.3フレア発生2日前における急速な磁気フラックスの注入の報告(Vemareddy 2019)や、理論的側面では、Inoue et al. (2018)では、磁気流体シミュレーションにより磁気フラックスロープの噴出がフレアを起こしたとする見解を示している。しかしながら、3次元磁場構造の観点からエネルギー蓄積過程の詳細な研究はなされておらず、さらにはX9.3フレアに先行して連続的に発生したMフレアの発生機構については未だ明らかになっていない。そこで、本研究ではX9.3フレア発生の2日前から連続的に発生したMフレアの発生機構を明らかにすることを目的とした。

【研究方法】

本活動領域について、我々はSolar Dynamics Observatory (SDO; Pesnell et al. 2012) / Helioseismic and Magnetic Imager (HMI; Scherrer et al. 2012) による光球ベクトル磁場を境界条件とした非線形フォースフリー磁場外挿 (Inoue et al. 2014) を施し、9月4日から9月6日まで磁力線の捻れの時系列変化の定量的な解析を行った。また、SDO / Atmospheric Imaging Assembly (AIA; Lemen et al. 2012) による紫外線1600 ÅでのMフレアの撮像観測データによる増光箇所と外挿された磁場構造の対応を調査する。

【研究結果】

(1) 9月4日の時点で3本の磁気フラックスロープA, B, Cが形成されており(図1)、AがX9.3フレアを引き起こした。(2) Bは他2本と捻れの方向が異なり、9月4日UT12:00頃から急成長する様子が再現された。(3) Mフレアが連続して発生している間、AIA1600 Åは主にB周辺で顕著な増光を示した。

【考察】

(1)の結果から、X9.3フレア発生2日前の段階から大規模フレア発生の可能性が示唆される(成果発表(3)-1)。また、(2)および(3)の結果から、連続するMフレアはBの急成長に起因すると考えられ、連続するMフレアの中で最も大規模であった9月4日UT20:30頃発生のM5.5フレアについて、外挿された磁場構造とAIA1600 Åの初期発光及びフレアリボンの増光箇所の詳細な比較から、図2に示したシナリオが考えられる(成果発表(2)-1, (3)-2)。

【引用文献】

Inoue, S., Magara, T., Pandey, V., S. et al. 2014, The Astrophysical Journal
Inoue, S., Shiota, D., Bamba, Y., et al. 2018, The Astrophysical Journal
Lemen, J. R., Title, A. M., Akin, D. J., et al. 2012, Solar Physics
Pesnell, W. D., Thompson, B. J., & Chamberlin, P. C. 2012, Solar Physics
Scherrer, P. H., Schou, J., Bush, R. I., et al. 2012, Solar Physics

Vemareddy, P. 2019, The Astrophysical Journal

【成果発表】

(1) 学術雑誌に発表した論文、著書

1. 著者: Yamasaki, D., Inoue, S., Nagata, S., & Ichimoto, K.
題目: “Nonlinear force-free field modeling of the flare-productive magnetic field observed in the solar active region 12673”
誌名: The Astrophysical Journal (投稿準備中)

(2) 国際会議における発表

1. 著者: Yamasaki, D., Inoue, S., Nagata, S., & Ichimoto, K.
題目: “Nonlinear force-free field modeling of the flare-productive magnetic field observed in the solar active region 12673” (poster)
学会名: The 4th PSTEP International Symposium, Nagoya, 2020 Jan.

(3) 国内学会、シンポジウムにおける発表

1. 著者: 山崎大輝、井上諭、永田伸一、一本潔
題目: 「非線形フォースフリー磁場モデリングに基づいた活動領域12673におけるエネルギー蓄積過程とフレアの発生機構に関する研究」 (口頭発表)
学会名: 日本天文学会2019年秋季年会、熊本大学、2019年9月
2. 著者: 山崎大輝、井上諭、永田伸一、一本潔
題目: 「非線形フォースフリー磁場モデリングに基づいた活動領域12673におけるエネルギー蓄積過程とフレアの発生機構に関する研究II」 (口頭発表)
学会名: 日本天文学会2020年春季年会、筑波大学、2020年3月

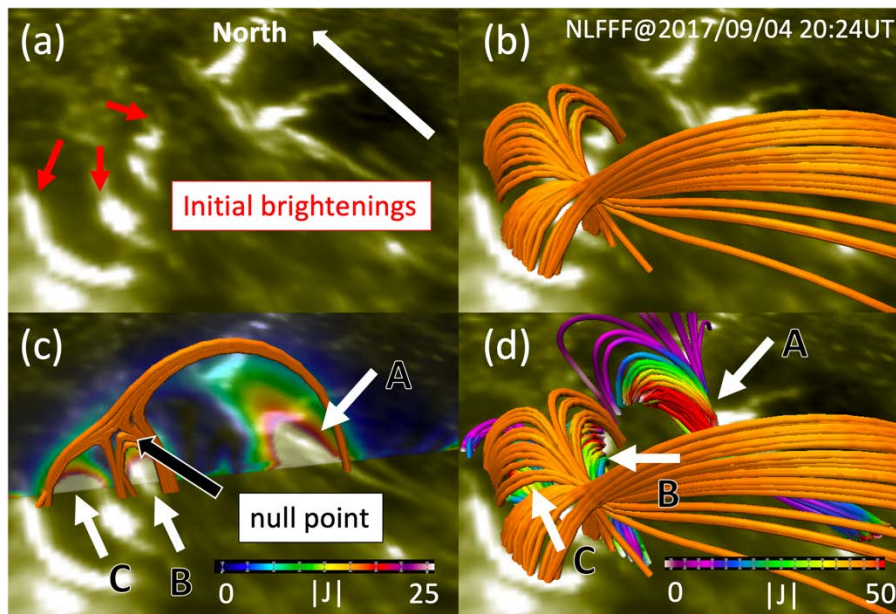


図 1. AIA 1600 Å 撮像データおよび外挿結果, (a) M5.5 フレアの初期発光, (b) 初期発光と大局的な磁場構造, (c) 大局的な磁場構造と高さ方向の電流密度分布, (d) 磁気フラックスループ A, B, C と大局的な磁場構造.

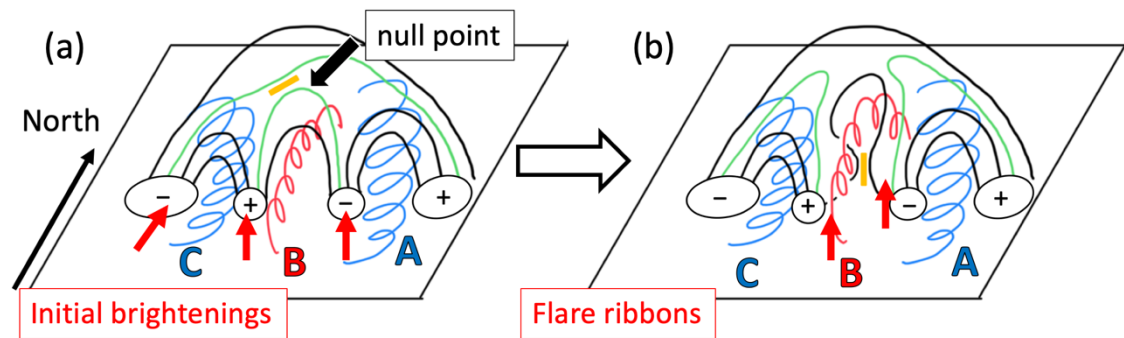


図 2. M5.5 フレアの発生シナリオ, 黒線は大局的な磁場構造, 緑線は磁気リコネクションに関わる磁力線, 捻れた青線及び赤線は磁気フラックスロープ A, B, C, 黄色で示したのは電流シート. (a) M5.5 フレア発生前の磁場構造, (b) M5.5 フレア発生後の磁場構造.

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

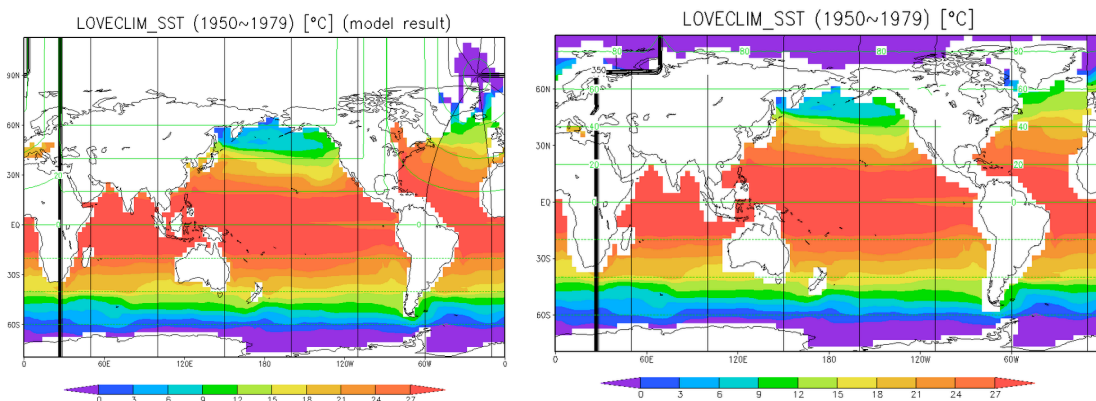
相木 秀則, 名古屋大学・宇宙地球環境研究所

研究目的

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

研究内容

本研究で使用した大気海洋陸域結合全球モデルLOVECLIMは、ベルギーの研究グループが開発した簡易数値気候モデルEMIC (Earth-System Model of Intermediate Complexity) である。前年度には、海水の状態方程式がモード水の鉛直構造や地理学的分布にどのような影響を及ぼすのかを調べるために、Eckart (1958)の式、Vallis (2006)の式、UNESCOの式をそれぞれ実装して1000年積分の結果を比較した。LOVECLIMの海洋・海氷コンポーネントCLIOでは、北極点に計算格子の特異点が現れることを防ぐために、緯度経度座標系を歪めることによって対処している。このためモデル結果を通常の可視化ソフトで表示すると、下図左のように北極海的位置がずれてしまいモード水の体積収支の計算が複雑に



なっていた。今年度は可視化ソフトGrADS (Grid Analysis and Display System) のPDF機能を使って下図右のように正しい位置に北極海が表れるように解析コードのアルゴリズムを改良した。具体的には下記のプログラムのように、射影先の経度と緯度を3° 間隔のグリッドで用意して、それぞれの点についてモデル座標グリッドのどこ値を参照すればよいのかをリストした。まず射影元グリッドをモデル歪座標グリッドの10倍細かくとって、モデル歪座標グリッドに格納されている実際の経度と緯度の情報を線形内挿補完し、射影先の経度と緯度と最も近い点を同定することで、射影元であるモデル歪座標グリッドの場所を決定することとした。このアルゴリズムを用いることで、海洋・海氷モデルCLIOの内部で歪座標グリッドを定義した際に使用したであろう複雑な公式を直接参照することなく、可視化ソフトGrADS用の射影情報を準備することができた。

```

do jj = 1, 57
do ii = 1, 120
  lon = (ii-1)*3.0e0+1.5      射影先の経度
  lat = (jj-1)*3.0e0-79.5e0  射影先の緯度
  mindist = 400.0d0
  do j = 1, 641  モデル歪座標の10倍細分グリッド (射影元緯度グリッド)
  do i = 1, 1200 モデル歪座標の10倍細分グリッド (射影元経度グリッド)
    ci = int(1 + (i-1)*0.1)  モデル歪座標グリッド
    cj = int(1 + (j-1)*0.1)  モデル歪座標グリッド
    a = (i-1)*0.1-int((i-1)*0.1) 隣接するモデル歪座標グリッドとの端数
    b = (j-1)*0.1-int((j-1)*0.1) 隣接するモデル歪座標グリッドとの端数
    clon = mtlon(ci,cj)*(1.0-a)*(1.0-b) + mtlon(ci+1,cj)*a*(1.0-b) + & 射影元の経度
           mtlon(ci,cj+1)*(1.0-a)*b + mtlon(ci+1,cj+1)*a*b
    clat = mtlat(ci,cj)*(1.0-a)*(1.0-b) + mtlat(ci+1,cj)*a*(1.0-b) + & 射影元の緯度
           mtlat(ci,cj+1)*(1.0-a)*b + mtlat(ci+1,cj+1)*a*b
    crot = murot(ci,cj)*(1.0-a)*(1.0-b) + murot(ci+1,cj)*a*(1.0-b) + & 射影元の北極向き
           murot(ci,cj+1)*(1.0-a)*b + murot(ci+1,cj+1)*a*b
    dist = min((clon-lon)**2+(clat-lat)**2, &
              (clon-lon-360.0d0)**2+(clat-lat)**2) 射影先と射影元の距離
    if (dist < mindist) then
      mindist = dist
      gi(ii,jj) = 1 + (i-1)*0.1e0  射影元のモデル歪座標グリッド
      gj(ii,jj) = 1 + (j-1)*0.1e0  射影元のモデル歪座標グリッド
      gr(ii,jj) = crot
      gd(ii,jj) = mindist
    endif
  endif
  if(gi(ii,jj) == 120.0e0) then
    gi(ii,jj) = 119.9999e0
  endif
enddo
enddo
enddo
enddo

open(unit=20, file='dclio-xpyp.pdf', form='unformatted', status='replace', action='write',
access='direct', recl=120*57, iostat=err)

write(20,rec=1,iostat=err) gi

```

```
write(20,rec=2,iostat=err) gj  
write(20,rec=3,iostat=err) gr  
write(20,rec=4,iostat=err) gd
```

GrADSのコントロールファイルには下記の行をくわえることで自動的に射影して描画することができる。

```
PDEF 120 65 bilin stream binary-big ^dclio-xpyp.pdef
```

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

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

寺田直樹、東北大学・大学院理学研究科

【研究目的】

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

【研究方法】

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

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

【研究結果】

令和元年度は、誘導磁気圏側からの降込イオンフラックスや下層大気から伝搬する大気重力波の鉛直波長や振幅等を変化させて様々なスペクトルについて火星熱圏DSMCシミュレーションを実行した。そして火星熱圏DSMCシミュレーションにおいて励起・伝搬する音波と大気重力波の組成ごとの振幅や位相差をMAVEN探査機の観測データと比較し、降込イオンと大気重力波による擾乱生成のどちらがより観測を説明するかを調査した。その結果、降込イオンは大気重力波モードと音波モードの両者を生成し、降込み領域近傍を除いては CO_2 と N_2 の擾乱振幅比が観測と逆センスになることを示した。その一方で、下層大気から伝搬する大気重力波のうちで鉛直波長が200kmを越すモードは観測と整合する振幅の高度分布や CO_2 と N_2 の擾乱振幅比が得られた。本結果は、火星の上部熱圏で多数観測される大振

幅の大気擾乱は、下層大気から伝搬する大気重力波に主に起因することを示している。さらに、無衝突の外圏においても観測される大振幅大気波動の特性を調べるべく、鉛直波長が長い大気重力波を印加したDSMCシミュレーションの結果を解析した。その結果、外圏底より上側の構造は、外圏底における水平構造をそのまま反映（分子の弾道軌道を反映）しており、波面は完全に水平方向に向くことを明らかにした。この結果は、探査機の軌道沿いの観測のみでは導出が困難であった大気重力波の水平/鉛直波長を観測的に切り分ける方法に示唆を与えるものとなった。さらに初期火星や系外惑星の上層大気における大気重力波の影響を調査すべく、太陽EUV放射が強い条件における上層大気のDSMCシミュレーションを実行し、膨張大気の鉛直組成・温度等の基本構造を得た。

【成果発表】

(学会・研究会発表)

- 寺田 直樹, 寺田 香織, 藤原 均, 遅進流体力学的散逸の DSMC シミュレーション, STE シミュレーション研究会: 計算プラズマ物理の新潮流, 広島 (広島大学東千田キャンパス), 2019 年 9 月 24-26 日.
- Terada, K., N. Terada, and H. Fujiwara, DSMC simulation of slow hydrodynamic escape from Earth-like exoplanets, Planet2/RESCEU Symposium 2019, From Protoplanetary Disks through Planetary System Architecture to Planetary Atmospheres and Habitability, Okinawa (Bankoku Shinryokan), 2019 年 10 月 14-18 日.
- 寺田 香織, 寺田 直樹, 藤原 均, 地球類似惑星における遅進流体力学的散逸の DSMC シミュレーション: 外圏底近傍の断熱冷却について, 日本惑星科学会 2019 年秋季講演会, 京都 (京都産業大学神山ホール), 2019 年 10 月 7-9 日.
- 寺田 香織, 寺田 直樹, 藤原 均, 地球型惑星における遅進流体力学的散逸の DSMC シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 千葉 (幕張メッセ), 2019 年 5 月 26-30 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 atmospheric models and their evaluations

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

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

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

将来気候実験では、20世紀末に比べ21世紀末に約4℃気温が上昇することを仮定した。気候モデルデータに基づき、温暖化による昇温量は上層ほど大きく、相対湿度は不変と仮定した。将来気候についても(a)、(b)、(c)の実験を実施し、その差分を解析することで、都市効果の気候変化を評価した。その結果、地球温暖化によってヒートアイランド強度（(a)-(b)で評価）がわずかに弱化的ることがわかった（図1）。また、それは熱的效果によってもたらされていた。同時に、早朝の混合層高度は、温暖化によって上昇していた（図略）。混合層高度の上昇に対応する鉛直温位分布は、本来図2の赤のようになり、地上の気温は都市部でより大きく上昇するはずだが、実際はヒートアイランド強度が弱化的しており、下がっている。これと対応するように、都市域では、早朝に下降流の偏差シグナルと対応する温位偏差構造がみられた（図2）。ヒートアイランド強度が温暖化によって弱化的するという結果は、過去に報告のない結果であり、今後のメカニズム理解に向けたさ

らなる研究が期待される。

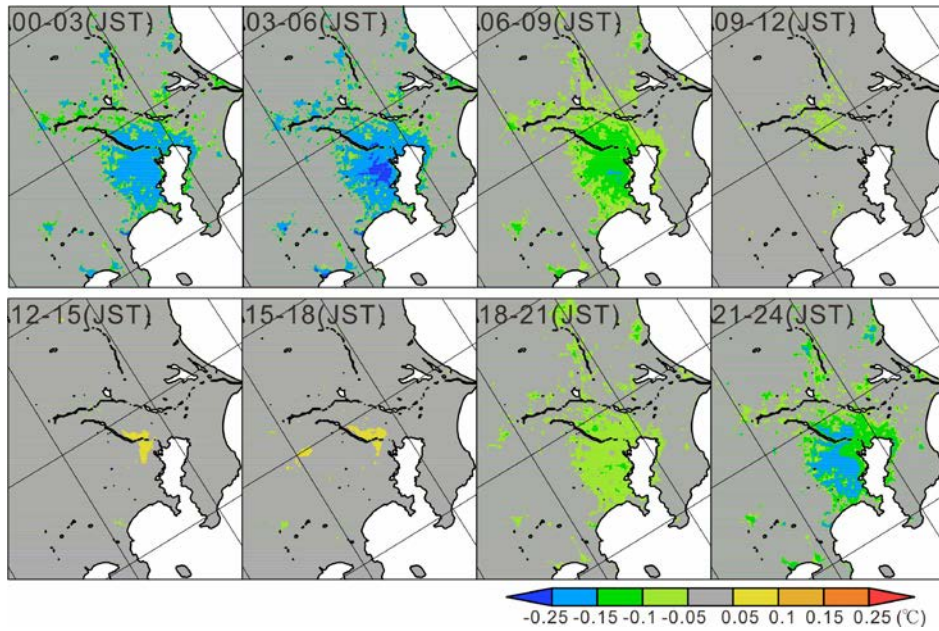


図1:3時間ごとのヒートアイランド強度（地表面気温の(a)-(b)）の気候差分

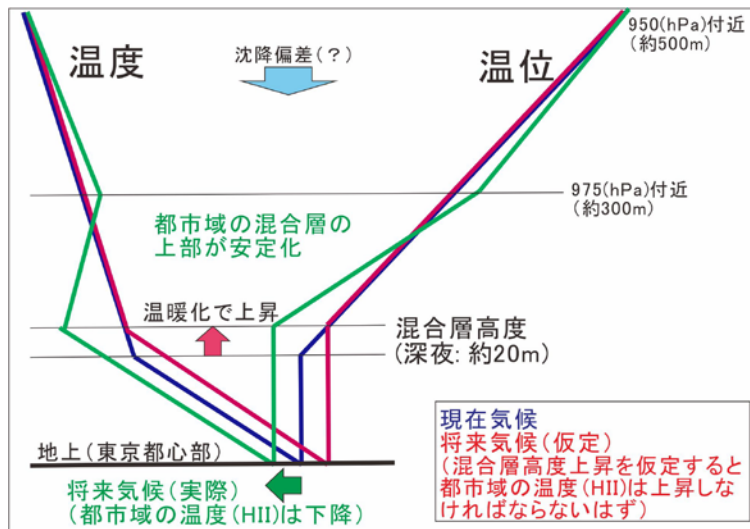


図2: 温位の鉛直分布の概念図（現在気候（青），混合層高度が温暖化によって上昇したことを仮定した場合（赤），将来気候実験結果（緑））