

## 7. 計算機利用共同研究(一般) 目次詳細

(所属・職名は2021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	297
深沢 圭一郎	京都大学	学術情報メディアセンター	准教授	観測・数値シミュレーション・機械学習の融合による宇宙プラズマ現象の理解	298
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	300
Hayashi Keiji	NorthWest Research Associates	Boulder office	Research Scientist	時間変動する大局MHD太陽圏モデリングとIPS観測との長期比較	302
馬場 賢治	酪農学園大学	農食環境学群	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	303
長濱 智生	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	准教授	化学輸送モデルによる高エネルギー粒子降り込みの中間圏大気組成への影響研究	305
坪内 健	電気通信大学	情報理工学研究科	客員研究員	プラズマ密度構造から探る太陽圏境界変動	307
塚 正太郎	東北大学	大学院理学研究科	助教	CME時における火星大気流出機構に関する研究: 非磁化惑星と磁化惑星の比較	309
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	312
齊藤 昭則	京都大学	大学院理学研究科	准教授	電離圏下部における突発的な層構造形成の3次元シミュレーション	315
関 華奈子	東京大学	大学院理学系研究科	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	317
若月 泰孝	茨城大学	理工学研究科(理学野)	准教授	雲解像大気モデルを用いた降水現象の予測と気候応答に関する研究	318

(別紙様式 7 - 2)

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

前年度に開発および性能チューニングを行った電磁粒子 Particle-In-Cell コードのノード間並列化を行う。また、電磁粒子コードの各カーネル部分の手法について検討し、高(次)精度化を目指す。

## 研究結果

2019 年度に開発した周期系スレッド並列 PIC コード(Umeda 2020)へ、Oh-Help (Nakashima et al. 2009)による動的負荷バランスを導入した。さらに、上流側に境界からのプラズマ粒子の流入・下流側に境界へのプラズマ粒子の流出がある開放系であり、流入・流出したプラズマ粒子の管理に工夫が必要な衝撃波静止系コード(Umeda & Yamazaki 2008; Umeda et al. 2009)へと拡張した。またこれに伴い、安定な開放系境界条件を新たに開発した。また、開発した並列コードのテストとして、オーロラ加速領域ダブルレイヤーの 2 次元シミュレーションを開始した。

非相対論運動方程式の解法である Boris 法(1970)について、多段アルゴリズムに基づいて高精度化を行った。本成果は査読付論文誌に投稿中である。

## 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)
- 梅田 隆行, Multi-step Boris integrator for non-relativistic E-cross-B drift, 第 148 回地球電磁気・地球惑星圏学会の総会および講演会, オンライン, 2020 年 11 月.

(別紙様式 7 - 2)

観測・数値シミュレーション・機械学習の融合による宇宙プラズマ現象の理解

Understanding the space plasma phenomena with the integration of observation, numerical simulation and machine learning

深沢圭一郎、京都大学・学術情報メディアセンター

本研究は、飛翔体宇宙プラズマ観測データとプラズマ数値シミュレーションを、機械学習によって統合的に解析することで、低空間次元・小観測数・単地点観測 (=時空間変動分離が困難) という観測データを時空間拡張し、環境変動を抽出することを最終目的とする。特に、惑星の磁気圏スケールの巨視的な環境での 3 次元空間変動を機械学習によって推定させる。究極的には、この時空間拡張されたデータを、数値シミュレーションと融合させることで、観測したい宇宙プラズマ現象がいつどこで起きるかを予測するモデルの構築を目指している。

いわゆる機械学習は様々な画像データを学習し、そこに現れる特徴を認識し、推定する。この際、特徴とはデジタルデータ上の何らかの集合 (形状) であり、その集合が物理法則に従っているかは不明である。そのため、これらを科学的に利用する場合には、この集合が物理法則を満たす担保が必要となる。本研究ではこの問題に対し、物理法則に従って、データを作成する数値シミュレーションのみで学習を行うことで、数値シミュレーションと同程度の物理的担保を実現することを目指している。

このモデルの構築には大量のシミュレーションデータが必要になるが、高解像度なシミュレーションを実行するには、時間も計算資源も足りない。そこで、現実の太陽風を入力にし、必要最低限の解像度で長時間のグローバル地球磁気圏 MHD シミュレーションデータを生成し、観測、シミュレーション、機械学習の融合が可能か実験的に調査・研究した。

本年度は特定の期間における太陽風データを用いた磁気圏シミュレーションを行い、その結果から観測のジオメトリーに合わせたオーロラ画像を作成した。これは、オーロラ観測画像が欠損した場合に復元できる学習モデルの学習データとなる。また、THENIS 観測からオーロラ地上観測 (ASI) 結果を正解データ (オーロラが出ている)、不正解データ (曇りやオーロラが出ていない) に分類することで、学習に利用する訓練データとして整備した。さらにシミュレーションの極域オーロラ画像と同様の図を準備する必要があるため、同時刻のいくつかの ASI をうまく磁気緯度に合わせて、極域にマッピングした図を作成し、学習データとして整備した。今後は、特定のイベントだけでなく、太陽活動一周期分の計算結果を蓄積することを目指す、計算量が膨大になるため、その実現方法を検討する。

## 成果発表

1. 深沢圭一郎、木村智樹、徳永旭将、中野慎也、宇宙プラズマ現象予測モデル開発に向けた機械学習・数値シミュレーション・観測による学習データの整備、地球電磁気・地球惑星圏学会第148回総会及び講演会、2020年11月1日-4日.
2. (Invited) K. Fukazawa, Research of applying the machine learning to space plasma physics with observation and numerical simulation data, LHAM Keynote in CANDAR2020, 25-27 Nov. 2020.
3. (Invited) 深沢 圭一郎、木村 智樹、徳永 旭将、中野 慎也、機械学習・数値シミュレーション・観測融合による宇宙プラズマ現象予測モデル開発に向けた学習データの整備、2020年度ISEE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」、2021年3月25-16日

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

近藤光志、愛媛大学宇宙進化研究センター

## 研究目的

地球磁気圏前面の磁気圏境界では太陽風磁場と地球磁気圏磁場の間に形成される電流シートを挟んで磁場強度や熱物理量などの非対称な磁気リコネクションが起こっている。これまでの我々の研究[1, 2]により、このような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を示してきた。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。また、昨年度の研究により、非対称磁気リコネクションでは、非対称度がわずかな場合においても、高速プラズマ領域は、低ベータ側プラズモイド領域に発達し、プラズマ速度の最大値は、リコネクションファン領域と同等に達することが示された。この場合、実衛星観測では、高速プラズマ流を観測したとしても、リコネクション構造における観測領域を決めることができないことを意味している。そこで、本研究では、非対称磁気リコネクションにおけるリコネクション構造を調べ、領域ごとの特徴を明らかに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大規模な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。本研究では、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。時間発展と共にほぼ相似的に領域が広がるため、段階的に計算領域を広げることで計算コストを抑えることが可能である。

## 研究結果とまとめ

磁気リコネクション領域をy方向に横切る場合、磁場のx成分の符号反転場所(時刻)が最も物理量の変化が明確であるため、この位置(時刻)を基準とする。磁場強度非対称、等温初期平衡から開始した非対称磁気リコネクションの場合、アルフヴェン速度の差からプラズ

モイドの先端は低ベータ側が大きく先行する。それにより、非対称磁気リコネクション構造は大きく、リコネクションファン領域、プラズモイドコア領域、先行プラズモイド領域の3領域に分けることができる。本研究の結果、マグネットポーズ内における先に述べた基準前後のプラズマ密度、プラズマ流速、磁場強度の変化から図1に示すように、この3領域が分けられることが示された。リコネクションファン領域は、基準から磁気圏側でプラズマ密度とプラズマ流速が増加。先行プラズモイド領域は、電流シートに基準点があるため、そこでプラズマ密度の増加を観測した後、先行プラズモイド領域でプラズマ速度の増加と再度のプラズマ密度の増加が観測される。プラズモイドコア領域は基準領域、つまりx方向磁場成分のゼロ領域が広く、また基準領域にまたがってプラズマ密度、プラズマ速度の緩やかな増加がみられる。これらの特徴から以上の3領域を観測から大別することが可能となった。

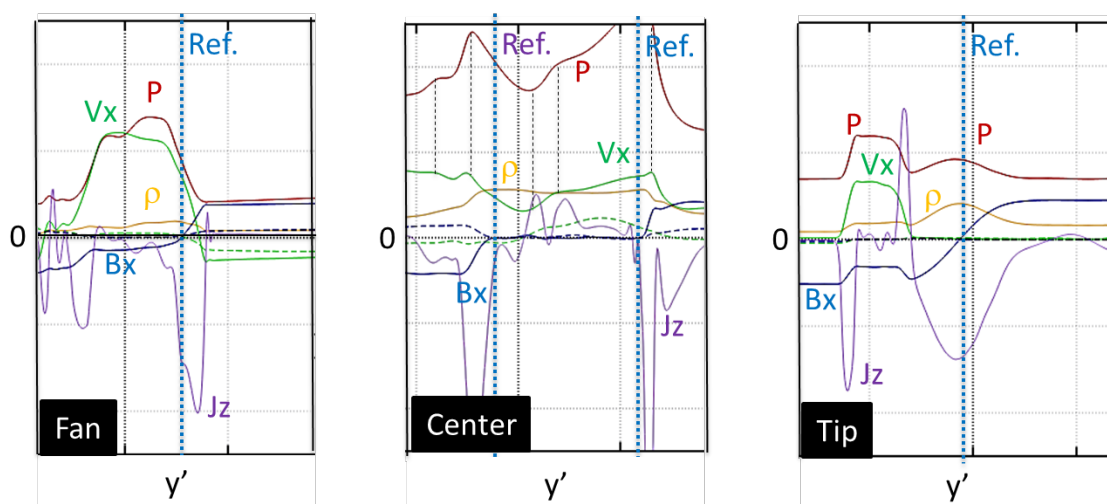


図1、リコネクションファン領域(Fan)、プラズモイドコア領域(Center)、先行プラズモイド領域(Tip)の3領域通過時の物理量変化。縦の点線が基準位置を示す。

#### 引用文献 (成果論文を含む)

1. Nitta, S., and Kondoh, K., "Fundamental properties of sheared/guide field MHD magnetic reconnection", The Astrophysical Journal, 907:21 (21pp), 2021
2. Nitta, S., and Kondoh, K., "Properties of extremely asymmetric magnetic reconnection", The Astrophysical Journal, 872:147 (17pp), 2019
3. 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

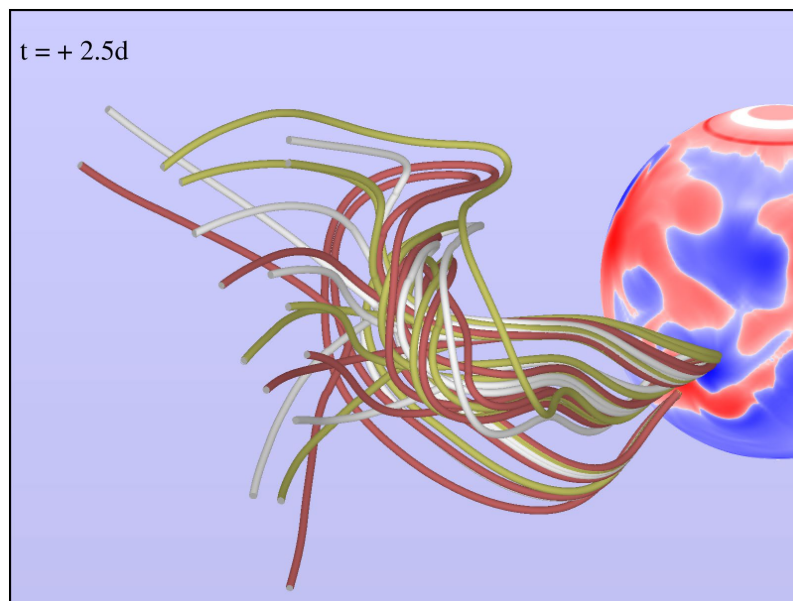
時間変動する大局MHD太陽圏モデリングとIPS観測との長期比較  
long-term comparison of IPS observations with solar-wind  
solutions derived from MHD model using  
solar-surface magnetic field observation data

林 啓志、スタンフォード大学、HEPL

2020年度において、時間変動する太陽圏のモデリングの特に太陽近傍におけるものを中心にMHDモデルの開発を行った。特に太陽近くでは太陽コロナと太陽風プラズマの動径方向の勾配が極めて大きいため、格子数を多めにとる必要があること、および、Alfven速度が大きいことによる計算の時間ステップ幅を小さくとる必要がある事の2点の理由により、大型計算機での計算が不可避であった。

モデル手順は、太陽光球面近くにおける磁場の時間変動を、電場に変換したうえで、誘導方程式を通じて太陽近くの磁場を駆動する。その他の変数(プラズマ密度・温度・速度)は、所与の磁場変動と、ある種の無反射条件を取り扱う特性曲線法により、決定される。この境界面の取り扱いは、亜Alfven領域において数値的安定性と物理的・数学的適合性を両立する、おそらく唯一の手法である。この境界条件の構成により初めて、太陽近傍コロナにおける大局的な時間変動を解くことができた。関連することとして、境界条件の磁場は、観測値を用いることが多いが、他の底部コロナモデルの出力を用いるという構成をとることもできる。この件については、米国研究者との共同により、査読論文受理にこぎつけた(ApJS, in press)。下図はその論文中の図の一つで、磁場駆動によりコロナの磁束が放出される様子を可視化したものである。

次年度は、このコロナ近傍モデルを太陽圏に延長し、また、長期的なデータ駆動モデルを実行することを予定している。これにより、当初の目的であった、太陽圏の典型時間に匹敵する半世紀にわたる名大IPS観測との比較およびデータ同化モデリングの構築へと発展したい。



(別紙様式 7 - 2)

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  
農食環境学群環境共生学類

### 目的

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

### 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。また、アジアダスト発生源であり、生物由来物質が集積しやすいドライレイクやワジなどの流跡痕に着目し、同地域の起伏や表面温度、粗度長などを計測し、それらのデータを基にしたダストデビル発生に関する調査について、領域気象モデルを用いて行う。また、同地域での生物由来物質について、簡易風洞実験により飛散させたダストから分類する。

### 結果と考察

モンゴルゴビ砂漠ドライレイクにおけるダストデビル発生に関するシミュレーション解析を行うために、地表面データの整理を中心に進めた。先行研究では一様なフラックスを下面から与えているが、本研究では現実に即したフラックス分布によるダストデビル発生メカニズムの理解を目指している。シミュレーション解析には地表面からの熱フラックスが重要なため、過年度ドローンにより観測を行った赤外線放射分布と地形などの関連性について、理解する取り組みを行った。この結果、ドライレイク内の地形の起伏と赤外線分布がほぼ一致しており、現地での幾つかの水分データとも比較すると、水分が多い凹地など標高が低い場所の方が赤外線の値が小さく、低温傾向であることが求められた。このデータを用いてシミュレーション解析を行おうとしたが、残念ながら20年度は既にグループでのポイントが十分では無かったため、計算することができなかった。次年度は早めに準備を整えて、シミュレーション解析を行いたいと考えている。

一方、同地域のドライレイクやワジ等における生物由来物質(バクテリア)は、それぞれの場所により、2つの門と7つの分離株が明らかになり、ほとんどの株が土壌由



来であったが、動物由来も確認された。これらがダストとして飛散することで人間に影響を与える可能性を示唆した。

成果発表：

論文)

Katsuro Hagiwara, Tamaki Matsumoto, Purevsuren Tsedendamba, Kenji Baba, Buho Hoshino, Distribution of Viable Bacteria in the Dust-Generating Natural Source Area of the Gobi Region, Mongolia Atmosphere 11(9) 893 – 893, DOI:10.3390/atmos11090893, 2020 年

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

口頭発表)

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

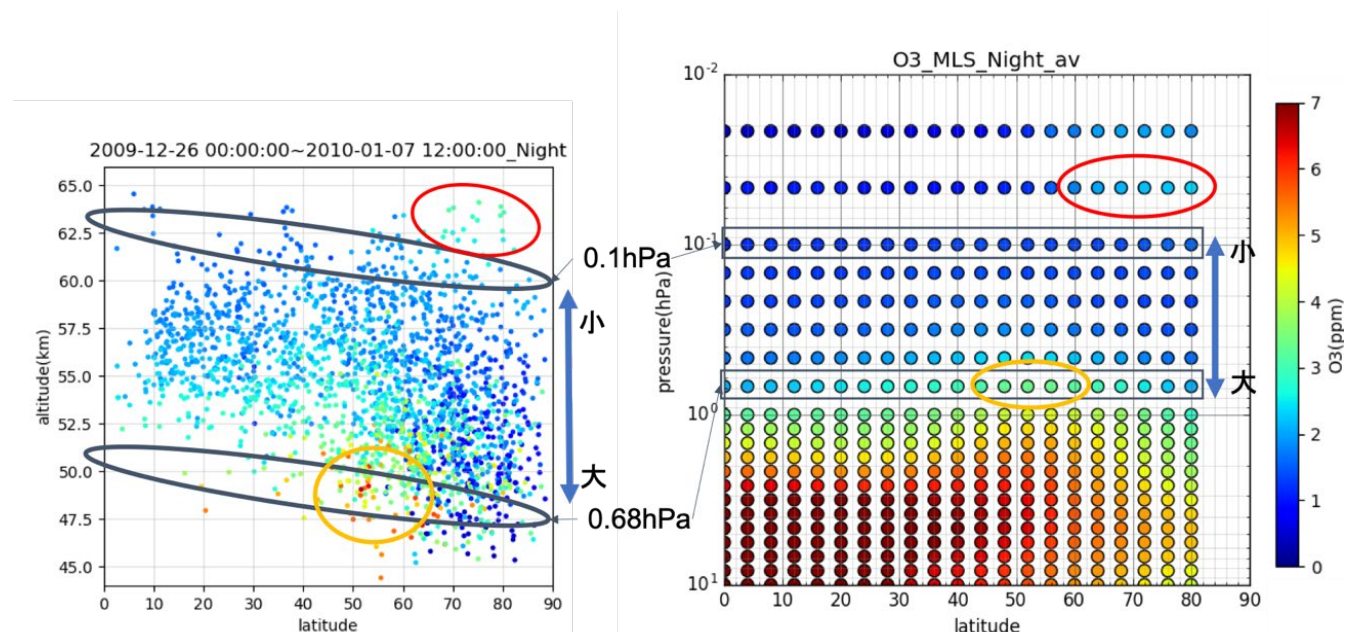
化学輸送モデルによる高エネルギー粒子降り込みの中間圏大気組成への影響研究  
 Study on influence of energetic particle precipitation on composition in  
 the mesosphere using a chemical transport model

長濱智生、名古屋大学・宇宙地球環境研究所

本研究は、太陽活動に伴う高エネルギー荷電粒子の降り込み(Energetic Particle Precipitation: EPP)による極域中間圏の大気組成変動を、ラグランジュ型化学輸送モデルによる実験により再現し、さらに両極でのミリ波大気微量分子観測データと比較検討することでEPPの中間圏大気環境への影響を評価することが目的である。このために、我々は気象場の再解析データを用いてラグランジュ型流跡線解析モデル上で放射場と各種化学反応の計算を行うラグランジュ型化学輸送モデルの開発を進めてきた。粒子の流跡線及び拡散計算にはFLEXPART、波長ごとの太陽放射計算にはlibRadtran、化学反応計算にはFlexChemを用い、それぞれを時間ステップ内で結合させて各粒子の位置で中性分子とイオンの化学反応計算を行い、観測地点上空を通過する粒子の流跡線上で組成の時間変化を追うものである。

本研究では、極域から赤道域までの広い領域で長期間シミュレーションを行うために、(1)高度面の統一、(2)場所や時間ごとの初期値の設定、(3)極付近での光解離反応係数モデルの改良、を行い、その後、2009年12月下旬から2010年1月上旬の2週間の北半球中間圏領域のオゾン混合比のシミュレーションを行い、Aura/MLSによる観測データとの比較を行った。また冬季極域であるため、中間圏でのイオン化学反応を含まないモデルでシミュレーションを行った。粒子は12月25日UT0時から24時間ごとに、北緯30°、50°、70°で経度方向に10°ごとの高度60 kmの地点108か所から放出し、1月7日UT19時までの間の各粒子の流跡線と点上での化学組成を計算した。本計算の実行時間は約30時間であった。

図1(左)に本シミュレーションによる夜間のオゾン混合比の緯度高度断面図を示す。12月26日UT0時から1月7日UT12時に期間で、太陽天頂角が90度以上の場所にある粒子のオゾン混合比をプロットしてある。図1(右)に同期間にAura/MLSで観測された夜間のオゾン混合比の緯度高度断面図を示す。Aura/MLSのデータは、Level3データ(version 4.23)を用いた(Schwartz et al., 2020)。両者を比較すると、緯度高度



(図1) 左は本シミュレーション、右はAura/MLSで観測されたオゾン混合比の緯度高度断面図。両者の分布はよく似た傾向を示すが、シミュレーションのほうが観測よりも全般的に値が大きい。

断面ではよく似た傾向の分布を示すことが分かった。このことは、今回のモデル計算が、大まかには、中間圏オゾンとオゾンの生成・消滅過程に関連する微量成分の分布と時間変動をシミュレーションできていることを示唆している。一方で、本シミュレーションによるオゾン混合比はAura/MLSによる観測値より全体的に大きく、約20%過大評価している。領域ごとで比較すると、高度が50 km以上では観測データとシミュレーション結果に良い相関が見られるが、それ以下の高度領域では違いが大きく、特に極域では顕著に異なり、シミュレーションのほうが観測値よりも顕著に小さい。冬季極域のオゾンは光化学反応がないため化学的寿命が長く、極渦内では低いオゾン混合比の気塊として下方に輸送される。そのため、極渦の内外でオゾン高度分布が大きく異なる。実際には、極渦内でも低高度の気塊と一部混合するため、低高度の高いオゾン混合比の気塊と混ざりあったオゾン混合比となるが、今回のモデルでは混合過程が考慮されていないため、極渦内の低い高度領域でオゾン混合比が観測と大きく異なってしまうことが考えられる。今後、混合過程を導入して極渦内の大気組成変動のシミュレーションの高精度化を目指す。

共同研究者

藤田健、名古屋大学大学院理学研究科博士前期課程2年（M2）

参考文献

Schwartz, M., Froidevaux, L., Livesey, N., Read, W., and Fuller, R. (2020), MLS/Aura Level 3 Daily Binned Ozone ( $O_3$ ) Mixing Ratio on Zonal and Similar Grids V004, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: November 20, 2020, 10.5067/Aura/MLS/DATA/3317.

成果発表

- 1) T. Nagahama, et al., “Development of a new ISEE Chemical Lagrangian Model to elucidate the atmospheric composition changes in the mesosphere”, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Jul. 12-16, 2020, Online.
- 2) K. Fujita, et al., “Analysis of the mesospheric ozone enhancement event in the Arctic winter with a new ISEE Chemical Lagrangian Model”, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Jul. 12-16, 2020, Online.
- 3) 藤田健、「ラグランジュ型化学輸送モデルを用いた中層大気組成変動の研究」、名古屋大学大学院理学研究科令和2年度修士論文、2021.

### 【研究目的】

太陽風プラズマによって押し広げられた空間である太陽圏の境界 (heliopause; HP) をボイジャー探査機が通過し、その場におけるプラズマ環境を直接観測したことをきっかけに、現在は境界形状やそのサイズについて定量的に検証するフェーズに入っている。HPは太陽風と星間物質が接する領域であり、これらの相互作用過程はHPの構造変動という形で捉えることが期待できる。本研究の主目的は、HP構造における非一様・非定常性を伴う変動過程の特性を解明することにある。特に着目するのが、高速のプラズマ流と星間中性粒子との電荷交換を通じてHP近傍で生成される高速中性粒子 (energetic neutral atom; ENA) およびその対生成となるピックアップイオン (pickup ion; PUI) の振舞である。太陽風磁場の影響を受けずに地球まで到達できるENAを検出する観測研究を通じて、HP領域の全体構造に関する知見が深まっている。この状況を受けて、本研究ではHP領域に対する数値シミュレーションからHPの構造変動とこれに伴うプラズマの分布特性との関連付けを行い、実際のENA観測結果を解釈する上でのフィードバックを図っていく。

### 【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。本年度は太陽風プラズマと星間プラズマの間に速度シアがある場合に予想されるケルビン=ヘルムホルツ不安定性 (KHI) の成長過程について検証を進めた。これまでは計算コストを節約するために太陽風と星間プラズマの密度比を実際より1桁以上小さく設定していたものを、本年度はより現実に近いパラメータを用いて計算した。星間プラズマと太陽風プラズマの密度比を10とし、PUIは星間空間側に背景プラズマの0.01%を一様に配置した。PUIの速度分布はプラズマ系で磁場に対する垂直 (xy) 成分内に一様の半径を持ったリング形状で与えた。その半径は太陽風速度に相当し、本計算ではアルフベン速度の10倍とした。シミュレーション空間をxy面として、KHIの効率を最大限に上げるためにx軸方向に速度シア、z軸方向に磁場を取った。物理量は全て内部ヘリオシース (太陽風側) のパラメータで規格化してある (時間はプロトンサイクロトロン周期、空間はプロトン慣性長、速度はアルフベン速度)。

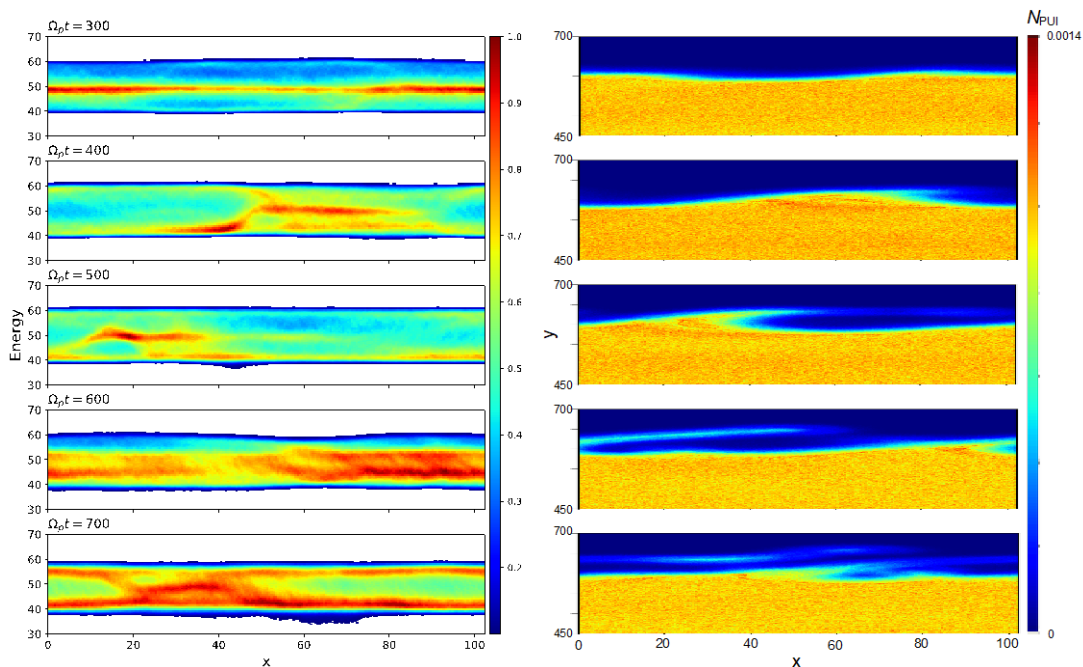
### 【研究結果】

計算結果を次頁図に示す。左はy方向について積分したPUIコラム密度をエネルギー別に表したもので、右はxy面内におけるPUI密度の2次元マップになる。右図より、 $y \sim 600$ の不連続面がHPを表し、 $y > 600$ が内部ヘリオシース (IHS)、 $y < 600$ が外部ヘリオシース (OHS、星間空間側) となっている。図は上から時刻  $t = 300$  から700までの時間発展の様子を示している。 $t = 300$ では左図のコラム密度はほぼ全 (x) 空間に渡って一様であるのに対し、 $t = 400$ 以降ではエネルギー  $E \sim E_c = 50$ 付近で増大した構造が局所的に出現し、また-x方向へ移動している様子が確認できる。右のPUI密度マップと比較すると、この局所的な密度増大はKHI成長に伴った渦形成が顕著になる  $t = 400$ 以降において、渦がIHS側に膨れている領域に対応していることがわかる。コラム密度におけるエネルギーの広がり ( $E = 40 \sim 60$ ) は、PUIの磁場旋回運動に背景プラズマのx方向の流速が合成された影響によるもので、 $E_c \sim 50$ はプラズマ系においてPUIの運動が主にy方向に生じていること (速度のx成分がゼロ) を示唆している。つまりKH渦の成長によってOHSのPUIがIHS側に引き込まれていく過程が、 $E \sim E_c$ への局所的なコラム密度の増加という現象によって表現されていると捉えることができる。

### 【考察】

IBEX衛星で発見された、“IBEXリボン”として知られるENA放射構造はHP近傍のプラズマ環境を反映していると考えられている。そこでリボン構造に記されているであろうHP領域の物理過程の痕跡を数値シミュレーションから見出すことを目的に、本研究ではHP近傍のKHIと観測データの関連性に焦点を当てた。ENAのエ

エネルギー別フラックスをHPに垂直な視線方向に積分した値が観測で取得可能なデータとなるが、シミュレーション結果からこれを模して作成した図を元に、KHIとの関係について検証した。その結果、KH渦の成長およびそのHP沿いの移動が、これに対応した領域におけるPUIコラム密度の局所的な増加として捉えられる可能性を示唆するに至った。今後は、より大規模な計算が必要となる現実的なパラメータで検証するために計算コードの最適化を進めるとともに、本研究では考慮していないプラズマ-中性粒子間の電荷交換過程も陽に取り入れたプログラム作成にも着手する。



【成果発表】

1. 坪内 健、Relationship between the inner heliosheath thickness and the pickup ion density、日本地球惑星科学連合2020年大会、（オンライン）、2020年7月

(別紙様式 7 - 2)

CME時における火星大気流出機構に関する研究：  
非磁化惑星と磁化惑星の比較

Atmospheric escape from the Martian atmosphere at the CME  
event: Comparison of unmagnetized and magnetized planet

堺 正太郎、東北大学大学院理学研究科

## 研究目的

惑星の固有磁場や太陽風パラメータは大気流出を考える上で非常に重要な物理量である。固有磁場強度は太陽風と地球型惑星間の相互作用に影響を与え (e.g., Seki et al., 2001), 流出機構自体を変えてしまう可能性がある。火星は, 約 40 億年前は温暖湿潤な機構であったが, その後大気や水が失われ, 現在では薄い大気を残すのみとなった。つまり, 火星は過去から現在までに大規模な大気流出を経験した。大気流出の主要機構の一つに, 周辺磁場の影響に関連した超高層大気からのイオン流出が挙げられる。太古の火星には, 現在の火星地殻に残留磁化が存在していることから, 全球的な固有磁場が存在していた可能性が考えられている。

Sakai et al. (2021) では, 火星赤道表面で 100 nT の固有磁場の下, IMF の向きが大気流出機構・流出率にどのような影響を与えるか調査した。すると, 固有磁場に平行な北向き IMF の時にはパーカースパイラル型や反平行な南向き IMF の時と比べて一桁程度小さくなることが明らかとなった。これは非磁化火星でのイオン流出率よりも小さい値であり, このことから北向き IMF は大気流出が抑制されることが示された。一方で, パーカースパイラル型や南向き IMF では流出率がほとんど変わらなかった。先行研究では北向き, パーカースパイラル型, 南向き IMF の 3 ケースのみ調査されたが, 流出率が增大する決定的な要因はよくわかっていない。そこで本研究では, 北向き IMF から南向き IMF に至るまでにどのような条件で流出率が增大するのかを調査することを目的とする。これは, コロナ質量放出 (CME) 時に起こる IMF の変動に似ていることから, CME 時の大気流出応答の理解につながる研究である。

## 研究手法

本研究では 3 次元多成分一流体電磁流体力学 (MHD) シミュレーションを行う。用いたコードは, もともとは非磁化惑星のモデリング用に構築され (Tanaka, 1993), その後, 地球磁気圏や惑星電離圏モデリング用に改良された (Tanaka, 1998; Terada et al., 2009a; 2009b)。Sakai et al. (2018) では非磁化惑星モデリング用に固有磁場を加えることで, 大気流出機構の違いを明らかにした。本モデルは電離圏から磁気圏までを包括的に解くことが可能で, 14 イオン種の連続の式を解いている。本研究では 10 種の中性大気モデル ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{H}$ ) を入力として与えることで, 火星超高層大気中で主要なイオン ( $\text{CO}_2^+$ ,  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{NO}^+$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{C}^+$ ,  $\text{He}^+$ ,  $\text{H}^+$ ) の物理量を計算する。入力で用いられる中性

大気モデルは現代の火星で Terada et al. (2009a) 及び Sakai et al (2018) で用いられたものを用いる。イオン-中性大気の反応率、解離再結合率、光電離率、電子衝突による電離率、イオン-中性大気・電子-中性大気の衝突周波数、電子衝突によるエネルギー消失率、熱伝導度は Terada et al. (2009a and references therein) のものを使用した。太陽風パラメータは、密度  $3 \text{ cm}^{-3}$ 、速度  $400 \text{ km/s}$ 、温度  $10^5 \text{ K}$ 、磁場  $2.5 \text{ nT}$  を仮定する。

## 研究結果・考察

本研究では、北向き IMF からスタートし、24 時間で IMF が 1 周する条件で計算を行う。すると、IMF 時角が  $45^\circ$  を超えると急激に流出率が增大することが明らかになった。合計イオン流出率は時角  $0^\circ$  の北向き IMF では  $5 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$  であったが、時角  $60^\circ$  では  $7 \times 10^{24} \text{ s}^{-1}$  まで上昇した。時角  $60^\circ$  を超えるとイオン流出率は緩やかに上昇する。

ここからは IMF 時角  $45^\circ$  を超えると流出率が增大する理由を考察する。北向き IMF では、磁気圏ローブ領域での磁気再結合が大気流出を担っていた (Sakai et al., 2021)。IMF の時角が徐々に変わるとつれて磁気再結合点が磁気圏ローブ領域から磁気圏フランク領域へと移動する。磁気再結合点の移動に伴い、イオン密度が増大する昼側電離圏からの流出が増えることで流出率の増大につながったと考えられる。これはパーカースパイラル型 IMF でも起こっており (Sakai et al., 2018; 2021)、流出パターンが似ていることから IMF の時角が  $45^\circ$  を超える領域でも既にパーカースパイラル型 IMF と同様の流出過程が起こっていることがわかった。その後、IMF 時角が大きくなるにつれて磁気再結合点が昼側へ移動し、IMF 時角  $180^\circ$  の南向き IMF では完全に開いた磁気圏が形成される (e.g., Sakai et al., 2021)。

今後、本研究においては、太陽 X 線及び極端紫外線 放射照度や固有磁場強度を増大させた時に、流出機構や流出率の変遷がどのように変わるのかを比較し、議論していく予定である。

## 引用文献

1. Sakai, S., et al. (2018). *Geophys. Res. Lett.*, 45, 9336-9343. <https://doi.org/10.1029/2018GL079972>
2. Sakai, S., et al. (2021). *J. Geophys. Res. Space Physics*, 126, e2020JA028485. <https://doi.org/10.1029/2020JA028485>
3. Seki, K., et al. (2001). *Science*, 291, 1939-1341. <https://doi.org/10.1126/science.1058913>
4. Tanaka, T. (1993). *J. Geophys. Res.*, 98(A10), 17251-17262. <https://doi.org/10.1029/93JA01516>
5. Tanaka, T. (1998). *Earth, Planets and Space*, 50, 259-268. <https://doi.org/10.1186/BF03352112>
6. Terada, N., et al. (2009a). *J. Geophys. Res.* 114, A09208. <https://doi.org/10.1029/2008JA013937>
7. Terada, N., et al. (2009b). *Astrobiology*, 9, 55-70. <https://doi.org/10.1089/ast.2008.0250>

## 成果発表

### (口頭発表)

1. 堺正太郎, 関華奈子, 寺田直樹, 品川裕之, 坂田遼弥, 田中高史, 海老原祐輔, Effects of the IMF direction on atmospheric escape from Mars under weak intrinsic magnetic field conditions,

第 148 回地球電磁気・地球惑星圏学会秋季講演会, R009-30, オンライン, 2020 年 11 月.



(別紙様式 7 - 2)

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  
non linear 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月に出現した活動領域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複数引き起こし、太陽活動周期24で最も活動的であった (Yang et al. 2017)。先行研究から、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が大規模フレアの発生に寄与したことが示唆された (Vemareddy 2019)。また、X9.3フレアの発生機構については、Inoue et al. (2018)による磁気流体シミュレーションから、活動領域に形成された磁気フラックスロープ (MFR)の噴出によることが明らかになった。しかし、大規模フレア発生に至る3次元磁場構造の時空間発展については、明らかになっていない。特に、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解明である。本研究では、X9.3フレア発生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日までの3日間を12時間刻みで、磁力線の捻れ (Berger & Prior 2006) 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1600Å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した。

【研究結果】

図1に示した通り、9月4日20:24UTの時点で3本の磁気フラックスロープ (MFR A, B, C) が形成されていた。先行研究から、MFR Aは9月6日のX9.3フレアの発生に関与することが示唆されている (Liu et al. 2019)。また、MFR Bは他2本と捻れ方向が異なり、9月4日12:00UT頃から急成長する様子が再現された。さらに、9月4日から5日にかけて、Mフレアが連続して発生している間、AIA 1600Åでは主にMFR Bの周辺で顕著な増光を示すことが確認された。

【考察】

9月4日20:24UTの時点で、MFR Aが形成されていたことから、X9.3フレア発生2日前の段階で、すでに大規模フレア発生の可能性があったことが示唆される。また、MFR Bの形成発展過程についての結果から、連続するMフレアは、MFR Bの急成長に起因すると考えられる。さらに、連続するMフレアの中で最も大規模な、9月4日20:30UT頃発生のM5.5フレアについて、外挿された磁場構造とAIA 1600Åの初期発光及びフレアリボンの位置の詳細な比較から、図2に示した様に、MFR B上空の「ヌル点」での磁気リコネクションが、MFR Bの上昇および、それに伴うM5.5フレアの発生に寄与したとするシナリオが考えられる。

## 【引用文献】

- Berger, M. A., & Prior, C. 2006, Journal of Physics A  
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  
Liu, L., Cheng, X., Wang, Y., & Zhou, Z. 2019, The Astrophysical Journal  
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  
Yamasaki, D., Inoue, S., **Nagata, S.**, & Ichimoto, K., 2021, The Astrophysical Journal  
Yang, S., Zhang, J., Zhu, X., & Song, Q. 2017, The Astrophysical Journal Letters

## 【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: “Evolution of the Nonpotential Magnetic Field in the Solar Active Region 12673 Based on a Nonlinear force-free Modeling”  
誌名: The Astrophysical Journal, 908, 132, 9pp, 2021

### (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” (iPoster)  
学会名: JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, online, 2020 Jul.

### (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、石井貴子、浅井歩、**永田伸一**、一本潔  
題目: 「非線形フォースフリー磁場外挿を用いた活動領域NOAA 12673における連続するM5.5とM4.2フレア発生機構の比較」 (ポスター発表)  
学会名: 太陽研究者連絡会シンポジウム、オンライン、2020年12月
2. 著者: 山崎大輝、井上諭、石井貴子、浅井歩、**永田伸一**、一本潔  
題目: 「活動領域NOAA 12673における連続するM5.5、M4.2フレア発生機構の比較」 (口頭発表)  
学会名: 日本天文学会2021年春季年会、オンライン、2021年3月

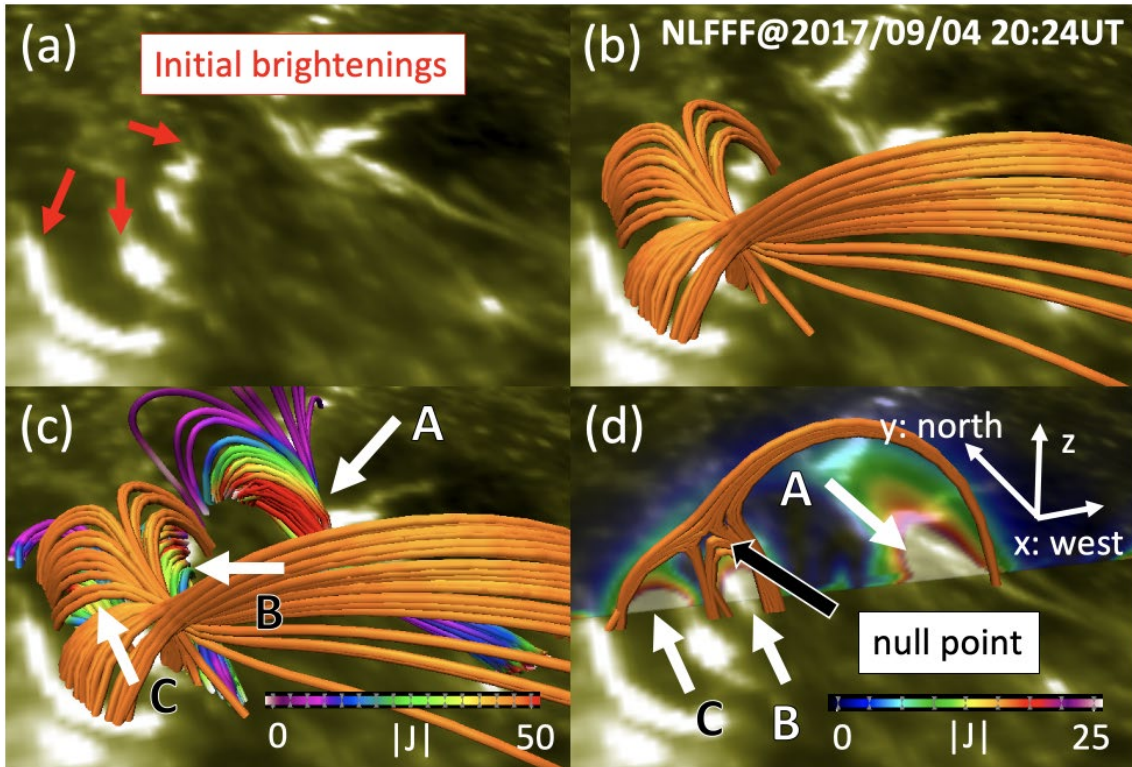


図 1. AIA 1600 Å 撮像データおよびコロナ磁場外挿結果の比較, (a) M5.5 フレアの初期発光, (b) 初期発光と大局的な磁場構造, (c) MFR A, B, C と大局的な磁場構造, (d) 垂直面内に射影した大局的な磁場構造と MFR A, B, C の位置関係.

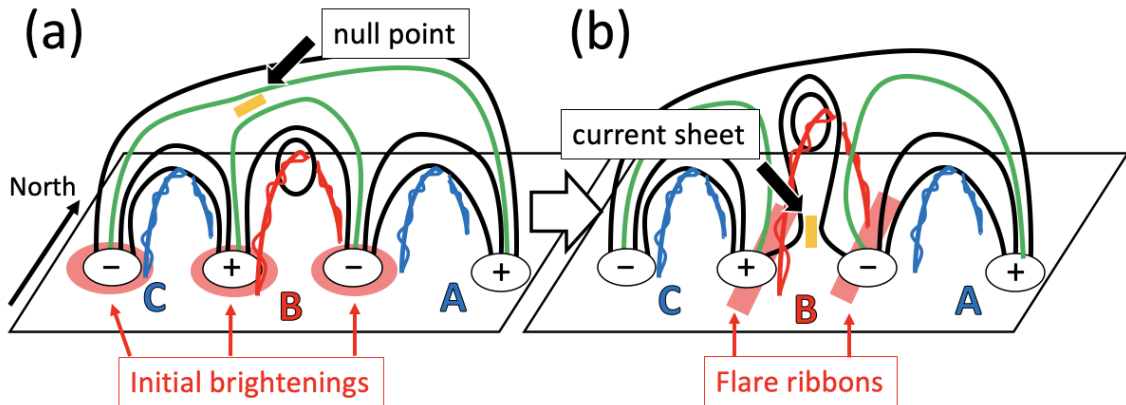


図 2. M5.5 フレアの発生シナリオ, 黒線は大局的な磁場構造, 緑線は磁気リコネクションに関わる磁力線, 捻れた青線及び赤線は磁気フラックスロープ A, B, C, 黄色で示したのは電流シート. (a) M5.5 フレア発生前の磁場構造, (b) M5.5 フレア発生後の磁場構造.

(別紙様式 7 - 2)

電離圏下部における突発的な層構造形成の3次元シミュレーション  
Three-dimensional simulation of the sporadic layers  
in the bottomside ionosphere

齊藤昭則、京都大学・大学院理学研究科

## 目的

電離圏下部における突発的な層構造形成の物理過程を3次元シミュレーションにより解明することを目的として研究を実施した。高度200km以下の電離圏下部における層構造の発生は様々な手段で観測されている。これらの層の形成には、潮汐波などによる中性風の高度方向のシアが重要であることはロケット観測などにより明らかにされているが、形成される層の突発的な振る舞いは、構造の複雑な形成・発展・減衰を示唆している。特にイオンの運動は高度200kmより高高度では磁場によるジャイロ運動が支配的であり、高度100kmより低高度中性大気の衝突による運動が支配的であり、この間の領域では、高度により磁場と中性風の寄与が移り変わり複雑な層構造の形成の原因になると予想されており、3次元シミュレーションによりその再現を行うことが重要である。

## 方法

従来は、この高度における3次元的中性風場の情報がなかったため、電離圏下部における現実的な状況における層構造形成の3次元シミュレーションによる研究はほとんど行われてこなかったが、全大気モデルの発達で現実的な3次元中性場が利用できるようになったことを受けて、本研究では、中性風場としては全大気モデルであるGAIAモデルの出力値を用いる高精度な電離圏プラズマ3次元数値モデルを開発し、sporadic-E層の3次元構造とその時間発展の再現とその物理過程の解明を行った。計算領域としては緯度経度それぞれ20度幅、高度85kmから220kmの領域を扱い、1秒の時間分解能で計算を行った。

## 結果・考察

日本上空電離圏下部について2015年6月の30日間の計算を行い、突発的な層構造の形成と時間発展の再現を行なった。まず、平均的な振る舞いを同定するために、それぞれの時刻における月間平均値の中性風場を用いた計算を行い、層構造の形成過程を以下の4段階に分けた：(1) 高度110km以上では、層構造は東西風シアのnullに拘束されている (2) 高度110km以下では、層構造は東西風シアのnullから外れていき、その動きはnullだけでなく水平風によって支配される (3) 降下する層構造の下に停滞する層構造がある場合には、その層が持ち上げられ降下する層構造と重なり、密度の増加を起こす (4) 高度100km以下では層構造は停滞、あるいは鉛直風により輸送される。その後、各日毎の中性風場を用いた計算を行い、突発的な層構造の日々の変化を調べた。上記の層構造の4段階の発展は各日毎の層構造の発展においてもみられるが、それぞれの段階の度合いは日によって異なり、これが強い日々変動の原因であることが明らかになった。

## まとめ

突発的な層構造の数値モデルにより再現により、その4段階からなる生成・発展過程と「突発的」な振る舞いを示す過程が明らかになった。今後は今回の数値モデルには含まれていない電場の寄与や、他の地域での振る舞いなどの解明を進める。

## 成果発表

- Andoh, S., Saito, A., Shinagawa, H., Ejiri, M.K. and Miyazaki, S., Three-dimensional ionospheric simulation of the Es layer: Physical mechanism of the sporadic appearance, JpGU -AGU Joint Meeting 2020, オンライン, 2020年7月12日-15日  
安藤慧, 齊藤昭則, 品川裕之, 中緯度スポラディックE層の発生に及ぼす電気力学的影響に関する数値シミュレーション, 地球電磁気・地球惑星圏学会第148回 総会・講演会, オンライン, 2020年11月2日
- Andoh, S., Saito, A., Shinagawa, H. and Ejiri, M.K., First simulations of day-to-day variability of mid-latitude sporadic E layer structures, American Geophysical Union fall meeting 2020, オンライン, 2020年12月1日-17日
- Andoh, S., Saito, A., Shinagawa, H. and Ejiri, M.K., First simulations of day-to-day variability of mid-latitude sporadic E layer structures. Earth Planets Space 72, 165 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01299-8>

(別紙様式 7 - 2)

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 気圧分程度の CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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 X 線および EUV(XUV)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。本研究では、この太陽風と XUV が火星からの大気散逸におよぼす影響を評価するため、約 35 億年前の太陽活動が激しい場合の太陽風条件を基準として、太陽風と XUV を変化させたシミュレーションを行った。太陽風磁場の方向については、自由度が高いが、継続時間がもっとも長いと思われる太陽風の Parker spiral で決まる方向を仮定することとした。また、基準となるケースについては、惑星の固有磁場強度を変化させてシミュレーションを行い、固有磁場強度の影響を調べた。

その結果、昨年度発表した約 45 億年前の条件下と同様に、弱い固有磁場を持つ場合には、大気散逸量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、大気散逸率は減少に転じることも同様に示された。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。さらに、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詳しく調べた結果、固有磁場の磁気圧が惑星表面で太陽風動圧の 10%程度になると大気散逸率が減少に転じることなどが明らかになった。また、大気散逸の形態も、カスプからの流出が支配的な弱磁場ケースから、磁気圏界面での磁気再結合で駆動される低緯度電離圏でのイオン流による流出が支配的な強磁場ケースに移行することなどが明らかとなった。

(別紙様式 7 - 2)

雲解像大気モデルを用いた降水現象の予測と気候応答に関する研究  
Studies on Prediction and Regional Climate Response for Precipitation Phenomena Using Cloud-Resolving Model

若月泰孝 茨城大学理工学研究科 (理学野)

令和2年度は、降水予測や積乱雲の集団化(組織化)の理解に資する技術開発として、雲解像大気モデルでの数値実験における初期摂動法の開発を進めた。これまで、積乱雲の発生初期に上空(1000~2000m程度の高度)の大気を加熱する手法や、下層を人為的に加湿する手法が広く用いられてきた。しかし、上空を加熱したり、下層を加湿するだけでは、積乱雲の初期構造としては適切ではない。それに替わる手法として、**Air-Lifting-Blending (ALB)**法を開発した。この方法で積乱雲を生成させると、よりスムーズな積乱雲の成長が計算できることがわかった。図1はその初期構造の一例を示したものである。この成果は次年度に公表していく予定である。

令和元年東日本台風(台風19号)において、東日本の各地が水害の被害に見舞われた。このような現象が地球温暖化した将来に発生した場合の影響を見積もるために、雲解像大気モデルを用いた疑似温暖化数値実験を実施した。まず、気象庁の客観解析データを用いて、台風19号の降水の再現実験を実施した。計算した結果、関東山岳域を中心とした大雨を量的に精度よく再現できていた(図略)。さらに、この数値実験で用いた境界条件に4℃上昇した大気条件を仮定した気候差分を上乗せし、同様の数値実験を行った。これによって、台風19号の降水量の気候変化応答を調べることができる。その結果、約35%程度の降水量増加を見積もることができた(図2)。下層の水蒸気量がおおむね30%増加するという仮定に対して、降水量はおおむねそれぞれと同等かやや上回る降水量増加となった。次年度に、メカニズムの理解に向けた解析を進める予定である。

さらに昨年度まで進めていた、関東の都市効果の気候変化応答の数値実験研究に関して、気象学会で成果を発表した。



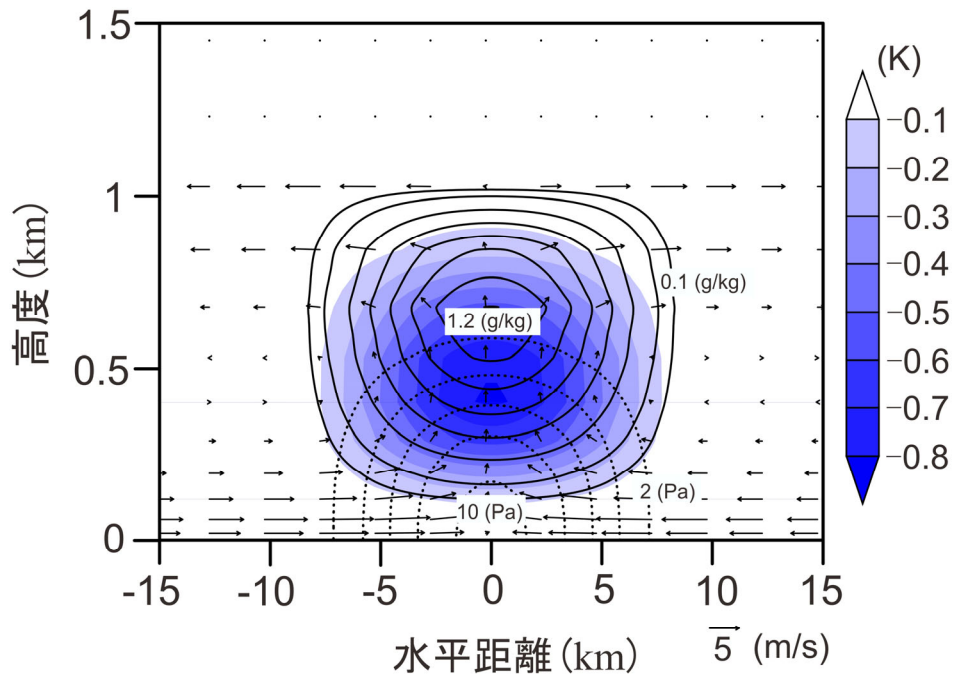


図 1 : ALB 法における温度偏差 (カラー)、水蒸気混合比偏差 (実線)、気圧偏差 (点線)、風速偏差 (矢印) の水平鉛直断面図の例

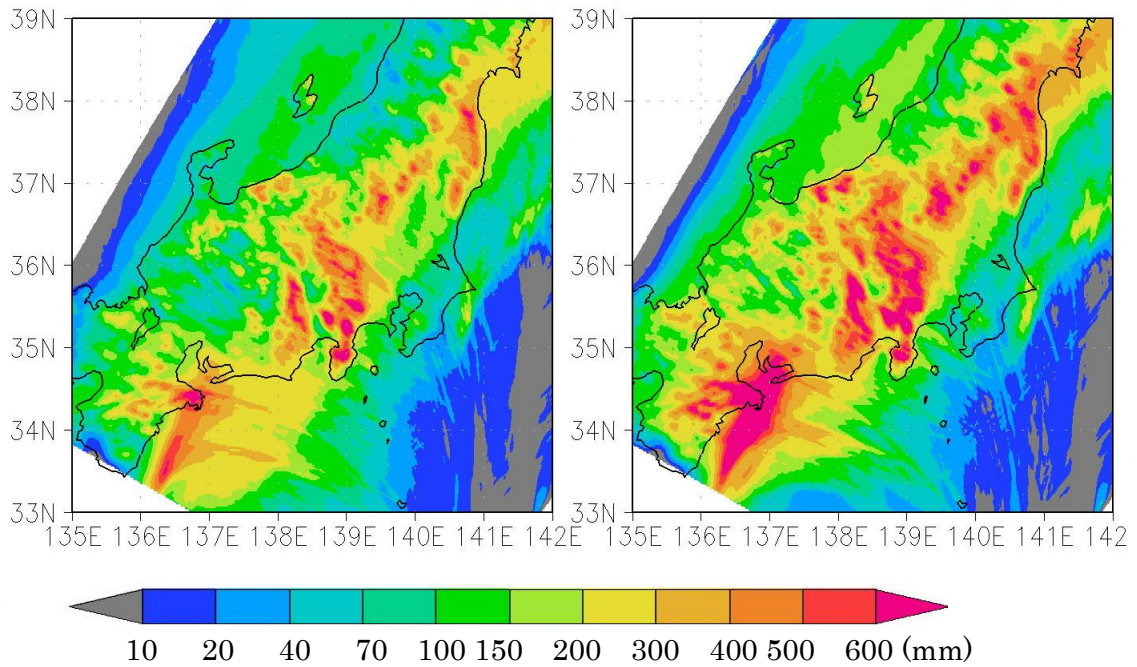


図 2 : 令和元年台風 19 号での再現された積算降水量 (左) と将来気候を仮定した実験での降水量 (右)