所属・職名は2022年3月現在

2021年度 11件

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	備考 Remarks
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	272	
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	274	
堺 正太朗	東北大学	大学院理学研究科	助教	CME時における火星型惑星大気流出機構に関す る研究:EUV放射照度及び固有磁場強度による 比較	275	
Hayashi Keiji	Stanford University	Hansen Experimental Physics Lab.	Research Scientist	IPS データ駆動による太陽圏長期変動再現モデル	278	
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	279	
井上 諭	ニュージャージーエ 科大学			太陽フレア爆発のデータ駆動型磁気流体シミュ レーション	281	
長濱智生	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	准教授	太陽放射の短期変動に伴う中間圏大気組成変動 影響の研究	283	
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	284	
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	287	
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	289	
関 華奈子	東京大学	大学院理学系研究科	教授	恒星放射・恒星風・惑星固有磁場が地球型系外 惑星からの大気散逸機構に与える影響の研究	291	

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

2020 年度に開発した、動的負荷バランスを導入した並列コードを、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。また開発した並列コードを用いて、 レーザー生成衝撃波の数値実験及び、オーロラ加速領域ダブルレイヤーのシミュレー ションを行った。

粒子の初期分布から数値的ノイズを取り除くための一様分布と、それを用いた正規 分布の生成プログラムを新たに開発し、コードに導入した。

# 成果発表

- Yamazaki, R., S. Matsukiyo, T. Morita, S. J. Tanaka, T. Umeda, K. Aihara, M. Edamoto, S. Egashira, R. Hatsuyama, T. Higuchi, T. Hihara, Y. Horie, M. Hoshino, A. Ishii, N. Ishizaka, Y. Itadani, T. Izumi, S. Kambayashi, S. Kakuchi, N. Katsuki, R. Kawamura, Y. Kawamura, S. Kisaka, T. Kojima, A. Konuma, R. Kumar, T. Minami, I. Miyata, T. Moritaka, Y. Murakami, K. Nagashima, Y. Nakagawa, T. Nishimoto, Y. Nishioka, Y. Ohira, N. Ohnishi, M. Ota, N. Ozaki, T. Sano, K. Sakai, S. Sei, J. Shiota, Y. Shoji, K. Sugiyama, D. Suzuki, M. Takagi, H. Toda, S. Tomita, S. Tomiya, H. Yoneda, T. Takezaki, K. Tomita, Y. Kuramitsu, and Y. Sakawa, High-power laser experiment forming a supercritical collisionless shock in a magnetized uniform plasma at rest, *Physical Review E*, Vol.105, No.2, 025203, 2022.
- Nakamura, T. K. M., K. A. Blasl, H. Hasegawa, T. Umeda, Y.-H. Liu, S. A. Peery, F. Plaschke, R. Nakamura, J. C. Holmes, J. E. Stawarz, and W. D. Nystrom, Multi-scale evolution of Kelvin-Helmholtz waves at the Earth's magnetopause during southward IMF periods, *Physics* of *Plasmas*, Vol.29, 012901, 2022.
- 梅田 隆行, 一様及び正規分布の生成方法再考, 第150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,2021年11月3日.

- 池羽 良太,梅田 隆行,三好 由純、オーロラ加速領域における電界構造の計算機シミュレーション、第150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、2021年11月4日.
- 梅田 隆行, Performance measurement of plasma kinetic simulation codes on the Flow supercomputer system at Nagoya University, Japan Geoscience Union Meeting 2021, オンライン, 2021年6月4日.
- 池羽 良太,梅田 隆行,三好 由純,オーロラ加速領域における電界構造の計算機シミ ュレーション, Japan Geoscience Union Meeting 2021,オンライン,2021年6月4日.
- Umeda, T., and K. Kurogi, High-accuracy numerical scheme for finite difference on staggered grids, 34th General Assembly and Scientific Symposium (GASS) of the International Union of Radio Science, オンライン, 2021年8月31日.

# 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 integratio n 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的としている。

昨年度は名古屋大学のスパコンリプレイスもあり、十分な計算が実行できなかったが、 低解像度なシミュレーションを行い、計算時間を削減することで、最低限のデータが行え るかを調査し、一定の成果を得た。今年度は昨年に引き続き、解像度を低くした磁気圏シ ミュレーションを行い、データの蓄積を優先した。現実の太陽風条件を利用した磁気圏シ ミュレーションを行いたかったが、利用できる計算資源上毎日準リアルタイムにシミュレ ーションを行うことは不可能なため、特定のイベントなど特徴的な太陽風条件でのシミュ レーションを実行し、データ整備を行った。

また、本研究ではこのままデータ整備、それを活用した観測データとの融合を進める予 定であったが、来年度の計算機利用共同研究の制度に変更があり、計算資源の問題で本共 同研究では研究実施が難しいため、他の共同研究制度で研究を継続する予定である。

成果発表

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・観測に よる宇宙プラズマ現象研究に向けた学習データの整備"、Japan Geoscience Union Meeting 2021、オンライン開催、2021年5月30日-6月6日.

CME時における火星型惑星大気流出機構に関する研究: EUV放射照度及 び固有磁場強度による比較

Atmospheric escape from a Mars-like planet during the CME ev ent under intrinsic magnetic field conditions: Comparison of EUV irradiance and magnetic field intensity

堺正太朗、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ター, X線及び極端紫外線(XUV)放射照度は大気流出を 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.約40億年前の火星 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にかけて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,周辺磁場の影響及びXUV放射照度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.また,過去太陽からのXUV放 射照度は現在のものよりも高かったと考えられている(e.g., Tu et al., 2015).固有磁場や XUV放射照度が大気流出機構へ与える影響を調査することは,火星が過去から現在までに 起こった気候変動の理解へとつながるのである.更に,XUV放射照度の高い恒星は近年発 見が相次いでいるハビタブルゾーンを持つ系外惑星系にも多く見られ,本研究は恒星系全 体の理解へもつながるものである.

Sakai et al. (2021) では、火星赤道表面で 100 nT の固有磁場の下、太陽風パラメターの 一つである惑星間空間磁場 (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 のみが調査されたが、流出率が増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、IMF が北向きから南向きに変化する間にどのような条件で流出率が増大するのか を調査する. 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. また、高 XUV 環境下である系外惑 星系 (赤色矮星・M 型星) のハビタブルゾーン内に火星型惑星が存在すると仮定した時の大 気流出についても調査を行う.

#### 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 REPPU-Planets で、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.本コードは8つの変数から成る MHD 方 程式を, Total Variation Diminishing (TVD) スキームを用いて解いている. また, 本モデ ルは電離圏から(誘導)磁気圏までを包括的に解くことが可能で、14 イオン種の連続の式を 解いている. 本研究では 10 種の中性大気モデル (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO, CO, N<sub>2</sub>, O, N, C, He, H)を入力として与えることで, 超高層大気中での主要なイオン (CO<sub>2</sub>+, O<sub>2</sub>+, NO+, CO+, N<sub>2</sub>+, O+, N+, C+, He+, H<sub>2</sub>+, H+, Ar+) 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は Sakai et al. (2021) で用いられたものを, M 型星周りの系 外惑星では M 型星の XUV スペクトルを考慮した Nakayama et al. (in prep.) によって得 られた大気モデルを用いる. 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.

本研究では、半径方向に対して並列化を行っており、MPI を用いてシミュレーションを 行った.また本コードは、半径方向に 336 グリッド、緯度・経度方向に 1922 グリッド用い ている.恒星風パラメターは、現在の火星系では密度 3 cm<sup>-3</sup>、速度 400 km/s、温度 10<sup>5</sup> K、 磁場 2.5 nT を、M 型星周り仮定する.

#### 研究結果・考察

現在太陽環境下における研究では、非磁化惑星と赤道表面で 100 nT の固有磁場を持つ磁 化惑星とで比較を行う. 北向き IMF からスタートし、12 時間で IMF が半周する条件で計 算を行う. 磁化惑星においては北向き IMF での定常状態は Sakai et al. (2021) で得られた ものを用いる.まず非磁化惑星では、IMF が回転する間に流出率はほとんど変化しなかっ た. 残留磁場を考慮していないため、大気が磁場の回転に影響することがほとんどないと 考えられる.一方で磁化惑星の場合、北向き IMF から南向き IMF までの間に流出率が 30 倍程度になることが明らかとなった.特に、IMF 時角が 45°を超えると急激に流出率が増大 し、時角 60°を超えるとイオン流出率は緩やかに上昇する.

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に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と、磁気圏内の電流量が増えることから磁気再結合の量が増え、流出率の増大につながることがわかった.

次に, M 型星周りのハビタブルゾーン内に存在する火星型惑星 (非磁化) における研究成果

276

ついては,現在計算結果の鋭意解析中であるが,現在の火星で流出の大部分に寄与する分子イ オンよりも原子イオンの流出が卓越しそうであることが分かりつつある.

# 引用文献

- Sakai, S., et al. (2018). Geophys. Res. Lett., 45, 9336-9343. https://doi.org/10.1029/2018GL079972
- 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

- 1. 堺正太朗, 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, Enhanced ion escape rate during the CME-like IMF rotation under weak intrinsic magnetic field conditions on a Mars-like planet, 第23回惑星圈研究会, 00209-AM3, オンライン, 2022 年2月 (口頭).
- Sakai, S., K. Seki, N. Terada, H. Shinagawa, R. Sakata, T. Tanaka, and Y. Ebihara, Impact of the CME-like IMF rotation on ion escape mechanisms from a Mars-like planet under weak intrinsic magnetic field conditions, American Geophysical Union Fall Meeting 2021, SM15A-1955, New Orleans, LA, USA / Online, December 2021 (poster).
- 3. 堺正太朗, 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, Ion escape mechanism from a Mars-like planet under weak intrinsic magnetic field conditions: Dependence of IMF clock angle, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, PCG18-05, オンライン, 2021 年 6 月 (口頭).

# IPS データ駆動による太陽圏長期変動再現モデル IPS-data driven MHD model of long-term variation of global heliosphere

林 啓志、George Mason University, College of Science

太陽圏の三次元的な構造を実際の状況に近い形で再現するには、様々 な実測データをモデルに導入・同化する必要がある。利用されるデー タには、太陽光球面磁場データや太陽風実測データとともに、名大ISE EによるIPS太陽風プラズマ観測のデータを挙げる事ができる。IPS観測 は太陽風を太陽高緯度領域を含む太陽・地球間の全球を計測する事の 出来るおそらく唯一の地上観測手法であり、また半世紀にわたり蓄積 されたデータでもある。我々はこれまでIPSデータをMHD太陽風モデル に導入する手法を構築してきた。

太陽圏物理においてはプラズマ量とともに、磁場が重要な役割を果たす。多くの研究では、太陽光球面磁場計測データを基にポテンシャル磁場モデルにより太陽大気の磁場を外挿し、その外挿磁場から更に太陽風磁場を予測・推定する、という手法が用いられてきた。

本研究では、太陽風や太陽圏全体のモデルの構築における太陽光球面とコロナの磁場の取り扱いの物理モデルの改良を企図した。

下図は改良されたMHDモデル計算の一つから作成された図である。緑 色の線はモデル計算で得られた太陽コロナ磁力線を描いたものである。 多くのモデルでは太陽光球面データのうち動径成分のみを用いる。一 方、本計算では磁場3成分全てをコロナMHDモデルに導入可能な新手法



を用いて、コロナ磁場の非 ポテンシャル性を数値的に 再現する事を試みている。 図底部の分散図3つは観測 から与えられた磁場3成分 と計算内の境界値とを比較 したものである。本計算内 において、観測データの境 界値への導入手法が正しく 機能している事を示す。 コロナグラフ等の他の観 測と比較検証すると、非ポ テンシャル性の再現性に未 だ改善の余地が大きい事が わかる。とはいえ、我々の 太陽コロナモデルは、他モ デルでは取り扱い出来ない 物理事象を扱う事ができる ので、太陽風モデルにおけ る惑星間空間磁場の再現・ 予測の改善に寄与するもの と考える。

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

これまでの我々の研究[1,2]により、地球磁気圏前面における電流シ ートを挟んで磁場強度や熱物理量などが非対称な環境における磁気リ 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。ただし、これまでの研究は、電流方向に一様であることを 仮定して二次元計算を行ってきた。もちろん実際には電流方向に非一 様であり、リコネクションラインの長さも有限である。そこで、本研 究では、これまでの二次元計算を三次元に拡張し。リコネクションラ インの長さに対する依存性について明らかにすることを目的とする。

#### 研究方法

これまでの自発的磁気リコネクションモデルに基づいた大規模な二次元磁気流体計算を三次元に拡張し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する。今年度の計算では、k=2で固定し、初期擾乱として与える初期抵抗のz方向の幅r<sub>2</sub>をパラメータとして、三次元非対称磁気リコネクションのr<sub>2</sub>に対する依存性を調べる。

#### 研究結果とまとめ

図1に、三次元計算の結果の1 例を示す。図中赤の等値面が初期抵抗を与えた領域を示 しており、z 方向の幅 rz=2 における結果を示している。今回は rz=2 から6 までの計算を行 っており、最も三次元性が強い場合の結果を示している。青の等値面が高圧領域、つまり プラズモイドを示しており、プラズモイドが x 方向に移動しながら z 方向に広がっている ことが分かる。また、y 方向には二次元計算に示したと同様の非対称構造が形成されている。 図2は、初期抵抗の z 方向の幅 rz が異なる3 つの計算(rz=2, 4, 6)における同時刻の x-y 平面のプラズマ密度のカラー等高図を示している。 三次元性が強くなる、つまり r<sub>2</sub>が小さ い計算ほどプラズモイド前面に形成される衝撃波が弱くなっている。初期に与えた抵抗の 大きさやその他の物理条件は同一であるにも関わらず、リコネクションラインの長さが短 くなる程、衝撃波が弱く、つまり下側プラズモイドの伸展速度が遅くなることを示してい る。しかしながら、最終的なリコネクションレイトは同程度にまで発達することが示され、 三次元性が強いほどリコネクションの発達が遅くなることが示された。三次元性が強い、 リコネクションラインが短いほど、z方向からのプラズマの流入がリコネクションの発達を 妨げることで、このような依存性が引き起こされたことが示された。このことは、地球磁 気圏前面においては、リコネクションラインが短いほど、プラズモイド前面の衝撃波の観 測が困難であり、観測するためには高緯度での観測が必要であることを示している。



図 1 x-y 平面の圧力のカラー等高図、高圧領域の三次 図 2 元分布(青等値面)および初期の抵抗領域(赤等値面)。図 平面の 中の初期抵抗領域の z 方向の幅 r<sub>z</sub>=2.0

図2 時刻 t=64 における x-y 平面のプラズマ密度のカラ 一等高図(上から初期抵抗領 域の幅 r<sub>z</sub>=2.0, 4.0, 6.0)

#### 引用文献(成果論文を含む)

- Nitta, S., and Kondoh, K., "Fundamental properties of she ared/guide field MHD magnetic reconnection", The Astrophys ical Journal, 907:21 (21pp), 2021
- Nitta, S., and Kondoh, K., "Properties of extremely asymm etric magnetic reconnection", The Astrophysical Journal, 8 72:147 (17pp), 2019
- Nitta, S., Wada, T., Fuchida, T., and Kondoh, K., "Critic al differences of asymmetric magnetic reconnection from s tandard models", The Astrophysical Journal, 828:63 (16pp), 2016

# 太陽フレア爆発のデータ駆動型磁気流体シミュレーション A data-driven MHD simulation of solar flares

井上 諭(ニュージャージー工科大学)

【研究目的】

太陽フレアは太陽の大気であるコロナで観測される突発的な発光現象である。太陽フレア はしばしば大量のコロナガスを惑星間空間に放出するコロナ質量放出(CME)を伴うことか ら、その発生機構の理解と予測は宇宙天気予報にとって非常に重要な課題として位置づけ られている。本研究は、時系列の光球面磁場を境界条件とした磁気流体力学(MHD)シミュ レーションコードを開発し、フレア発生前の磁場構造の再現から、磁場の噴出までの再現 を目的とする。

#### 【研究方法】

太陽フレアの発生機構を調べるために光球磁場の時系列データを境界条件とした磁気流体 力学(MHD)計算コードを開発する。Hayashi et al.2018では時系列の光球磁場から電場を 導出し、上空の磁場を駆動する方法が提案された。この方法をもとに、新たにコードを開 発しそのパフォーマンスを調べ、太陽活動領域12371へ応用する。

#### 【研究結果】

コードのパフォーマンスを調べるために、Amariらが実施したMHDの計算を行い、この結 果をground-truth dataとして、データ駆動型計算の精度を調べた。Ground-truth dataの 底面境界の時系列の磁場から時系列の電場を導出し、その電場をデータ駆動型MHD計算の 境界条件として与えた。 その結果、データ駆動計算では、Amariらが見せたような磁気フ ラックスロープの放出の再現に成功した(図1a)。さらに、活動領域AR12371にも応用し、 磁気フラックロープの噴出に成功した(図1b)。図1bの左のパネルはデータ駆動計算で得られ た噴出前の磁場構造で、図1cの左のパネルは非線形フォースフリー磁場で得られた磁場で ある。どちらも、実際のフレアが起きる数十分前の太陽表面観測磁場を用いて再現された。 これらの結果から、データー駆動計算で得られた磁場と非線形フォースフリー近似で外挿 された磁場構造は全く異なることがわかった。また、図1cから非線形フォースフリー磁場 は噴出を起こさないことから物理的な安定性も異なることがわかった。

#### 【考察・まとめ】

データ駆動計算はフレア直前の磁場構造などをよく再現することはわかったが、フレア後 は光球面の磁場の緩和がされず、またフレアからのバックリアクションなどの情報が含ま れることから、フレア後においても過度に磁場がねじられることがわかった。一方、フレ ア後に電場の駆動を止めると、ポストフレアループなどのフレアに伴う現象はよく再現さ れたが、境界の磁場の時間発展は観測磁場と矛盾することがわかった。本研究から信頼で きるデータ駆動計算を実施するためには、方法だけではなく磁場観測の技術の向上も望ま れることが示唆された。 【成果】

- 1. S. Inoue, K. Hayahis, & T. Miyoshi, "An Evolution and Eruption of the Coron al Magnetic Field through the Data-driven MHD Simulation", Under Review b y ApJ
- 2. S. Inoue, K. Hayashi, T. Miyoshi et al., "What is Required Toward Reliable S olar Data-based Magnetohydrodynamic Simulation', To be submitted.



図1 (a) Ground-truth dataの境界条件を用いて実施したデータ駆動型計算。(b) 活動領域AR12371のデー タ駆動型計算。時系列の太陽面観測磁場データを用いて実施された。(c) フレア発生直前の非線形フォース フリー磁場と、非線形フォースフリー磁場を初期条件として与えたMHD計算。

太陽放射の短期変動に伴う中間圏大気組成変動影響の研究 Study on influence of short-term variation of solar radiation on chemical composition in the mesosphere

長濱智生、名古屋大学・宇宙地球環境研究所

本研究は太陽フレアや日食等の太陽放射の短期変動時の中間圏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、人工衛星による中間圏オゾン観測データ等と比較検討することで太陽放射の 短期変動の中間圏大気環境への影響を評価することを目的としている。そのために、我々はこれまで気象場の 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。このモデルは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。本手法で全球の大気組成変動を求めるには 100 万粒子規模の計算を必要 とするため、各プロセスの計算では並列化などの高速化が不可欠である。具体的には、これまで Corei7 プロ セッサー1 コアで粒子数 300 個に対して 10 秒タイムステップで1 日後の大気組成分布計算を行った場合、約 1 日の計算時間を要しており、目標を実現するには少なくとも4 桁程度の速度向上が必要である。

2年計画の初年度は、ラグランジュ型化学輸送モデルの化学反応計算部について高速化を行った。従来は常 微分方程式である反応速度方程式を、FlexChem ライブラリをそのまま用いて計算を行っていたが、100万粒 子ごとに化学反応計算が必要な本研究では、膨大な計算時間を要する。そこで FlexChem を OpenMP に対応 させて計算の加速化を行った。FlexChem の OpenMP を用いたマルチスレッド化に関しては、同様の手法を 採用している 3D 化学輸送モデルである GEOS・Chem の化学反応計算部を参考に、成層圏・中間圏の中性成 分の化学反応式に対して導入した。その結果、複数スレッドによる並列計算によりスレッド数の増加に対して 0.85 倍の加速が得られた。実際に前述の条件(粒子数 300、10 秒タイムステップ、1 日後の組成分布計算) でのテスト計算では、4 コア 4 スレッドを使って約 7 時間で完了した。今後、太陽放射計算部についても同様 の高速化を図りつつ、粒子位置計算についても OpenMPI による並列化を進めるが、次年度は手持ちのリソー スよる開発を中心の進め、必要な段階に達したときに共同利用申請を行う予定である。

また並行して、化学輸送モデルによる日食時の中間圏微量成分変動のシミュレーションを行った結果と比較 を行うために、日食時の衛星観測データの整備を行った。2009 年 7 月 22 日の皆既日食及び 2010 年 1 月 15 日の金環日食時の中間圏オゾンの高度分布と時間変動を、AURA/MLS による観測データ(L2 及び L3 帯状平 均 version 4.2 データ)を使って求めた。その結果、高度 50 から 58 km の範囲で中間平均濃度に対して約 15-20%の増加が検出された。今後、全球でのシミュレーションに対応した各微量成分の観測データを整備し、 我々のモデル計算との比較を進める。

# 成果発表

Tianliang Yang and Tomoo Nagahama, Time Variations of Mesospheric Ozone During the Solar Eclipse Observed with AURA/MLS, 15th Quadrennial Solar-Terrestrial Physics symposium (STP-15), online, 21-25 February 2022.

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】

地球電磁気圏擾乱現象の発生機構の原因となる太陽フレアは、巨視的な電磁流体力学系で あるコロナ磁場に蓄積された自由エネルギーの解放現象と理解されている。すなわち、自由 エネルギーを有する巨視的な系が、どのようにして力学的に不安定化し、微視的な不安定性 による磁気リコネクションをエンジンとしたエネルギー解放に至るメカニズムを解明する ことが、正確な地球環境変動予測につながると考えられる。したがって、観測的な観点から は、巨視的な力学系の不安定化の定量的な理解が最も重要な課題の一つであり、太陽フレア を引き起こす活動領域の特徴的な巨視的構造であるフラックスロープ、磁束のつながりの 不連続面であるQuasi Separatrix Layerの形成過程が重要な観測・解析対象である。これ については、2010年に打ち上げられたSolar Dynamics Observatory(SDO: Pesnell et al. 2012)衛星に搭載のHelioseismic and Magnetic Imager (HMI: Scherrer et al. 2012) が常時12分間隔で取得する光球磁場と非線形フォースフリー磁場ソルバー(cf. Inoue et a 1. 2014)の発展に伴い、個別のフレアについてフレア発生前の特徴的な構造が多くの先行研 究で報告されている。2017年9月に観測された活動領域AR12673はX9フレアをはじめとし た、巨大フレアを複数回起こし、コロナ質量放出(Coronal Mass Ejection: CME)も観測さ れている(Yang et al. 2017, Inoue et al. 2018, Yamasaki et al. 2021)。この特徴的な 活動領域で起こった複数のフレアについて、HMIから3次元磁場を外挿し、京都大学飛騨天 文台太陽磁場活動望遠鏡(SMART: Nagata et al. 2014)が取得する高時間分解能(1分)の 光球磁場、フィラメントの分布と運動速度の時間発展のデータを比較することで、(1)X9フ レア発生に至る活動領域のエネルギー蓄積、不安定化過程を調べ、また、(2)中新領域で空 間的に似た増光を示したM5およびM4フレアのコロナ質量放出発生の有無を決める物理機 構を調査することを目的とする。

【研究方法】

名古屋大学ISEEにて開発された非線形フォースフリー磁場計算コードを用いて、時系列で 得られた太陽表面観測磁場データに基づいた3次元の磁場の外挿計算を行い、コロナ磁場の 物理量の時間発展を求めた。特に、フレア発生前の磁場の進化(エネルギー蓄積過程)とフレ ア前後(エネルギー解放前後)の特徴としてM5フレアおよびM4フレア発生の1時間前、5分前、 40分後について、それぞれ光球面の磁気フラックス、磁気自由エネルギー、磁力線の捻れ(B erger & Prior 2006)、理想MHD不安定のひとつであるトーラス不安定の指標となるDeca y index(Kliem & Török 2006)、さらにダブルアーク不安定の指標となる $\kappa$ パラメータ(Is higuro & Kusano 2017, Kusano et al. 2020)の時系列変化について定量的な解析を行っ た。さらに、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、M5フレアの発生前1時間には活動領域の中心部分で磁気自由エネルギー、

フレアに関わる磁力線構造の捩れフラックス、κパラメータの値はそれぞれ減少傾向を示した。また、M4フレアの発生前1時間には活動領域の中心部分でこれらのパラメータの値は それぞれ増加傾向を示した。他方、M5フレア後には噴出を伴うCMEが観測され、M4フレ ア後には噴出現象は観測されなかった。

【考察】

M5フレア発生前に活動領域の中心部分で磁気自由エネルギー、フレアに関わる磁力線構造の捩れフラックス、κパラメータの値はそれぞれ減少傾向を示した理由は、活動領域上空での磁気リコネクションによって大局的な磁場構造が緩和したためであると考えられる。また、この活動領域上空の大局的な磁場構造の緩和が噴出現象につながったと考えられる。他方、M4フレア発生前には、M5フレア発生前に見られたような上空での緩和がなかったため、噴出に至らなかったと考えられる。大局的な磁力線構造の緩和の観測的な証拠として、図2に広視野の活動領域の増光を示した。M5フレア発生時点において、フレア領域の外側にも増光が確認される。一方で、M4フレア発生時点においては確認されていない。このフレア領域の外側で見られた増光は上空での磁気リコネクションによるものと考えられる。

【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

Ishiguro, N., & Kusano, K. 2017, The Astrophysical Journal

Kusano, K., Iju, T., Bamba, Y. et al. 2020, Science

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

**<u>Nagata, S.</u>**, Morita, S., Ichimoto, K., et al. 2014, Publications of the Astoronomical Society of Japan

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

Yamasaki, D., Inoue, S., Nagata, S., & Ichimoto, K., 2021, The Astrophysical Jour nal

Yang, S., Zhang, J., Zhu, X., & Song, Q. 2017, The Astrophysical Journal Letters

【成果発表】

 学術雑誌に発表した論文、著書 現在、The Astrophysical Journalへの投稿論文を準備中である

(2) 国際会議における発表

1. 著者: Yamasaki, D., Inoue, S., Kusano, K., Ishii, T., T., Asai, A., <u>Nagata, S.</u>, & Ichimoto, K.

題目: "Investigation on the Evolution of the Nonpotential Magnetic Field an d the Onset Mechanism of the Successive M-class Solar Flares in the Active Region NOAA 12673 Based on a Nonlinear Force-Free Modeling" (oral) 学会名: AGU Fall meeting 2021, New Orleans, USA, 2021 Dec.

(3)国内学会、シンポジウムにおける発表

1. 著者: Yamasaki, D., Inoue, S., Ishii, T., T., Asai, A., <u>Nagata, S.</u>, & Ichimoto, K.

題目: "Onset Mechanism of the Successive M-class Solar Flares in the Solar Active Region 12673 Based on a Nonlinear Force-Free Modeling" (oral) 学会名: 日本地球惑星科学連合2021年大会、オンライン、2021年6月



図 1. M5 および M4 フレア発生 1 時間前から 40 分後までの物理量の時間変化. 黒実線が M5、赤実線が M4 フレアに対応. 緑実線はフレア初期発光時刻. (a) 活動領域全体の磁気 自由エネルギー, (b) 活動領域中心, フレア発生箇所の磁気自由エネルギー, (c) フレア発生 箇所の捩れフラックス, (d) κパラメータ, ただし青実線は理論モデルにおけるダブルアー ク不安定の臨界値.



図 2. M5 および M4 フレアの初期発光時の AIA 1600 Å 画像と磁力線構造. 青線はフレアに 関わる捩れた磁力線構造で, 橙線は周辺の磁場構造. 赤矢印は初期発光箇所. (a-c) M5 フレ ア, 黄矢印は大局的な増光箇所, (d-f) M4 フレア.

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 Prec ipitation Phenomena Using Cloud-Resolving Model

若月泰孝 茨城大学·理工学研究科 (理学野)

#### 研究目的

雲解像大気モデルは、地域スケールの豪雨の予測、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。高解像度の雲解像モデル実験で積乱雲枠積乱雲群が再現可能と なるため、長期間にわたって計算すれば、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。日本でのこのような計算は、気候変化予測プロジェクトで実施され、気象庁・ 気象研究所のNHM(もしくはNHRCM)、アメリカで開発されたWRF、名古屋大学で開 発されたCReSSなどのモデルが多くの実績を持っている。本研究では、それらの性能を生 かした雲解像大気モデルを用いた大規模数値シミュレーション研究を実施する。さまざま なテーマの研究を扱っているが、その中で、申請者は、①豪雨の短時間の振る舞いの予測 技術開発、②豪雨をもたらす現象(線状降水帯など)のメカニズムの解明、③台風などの 豪雨災害をもたらす現象の気候応答、④その他の領域気候応答研究を実施する。これらの 目的の中から、今年度は①と②の研究を主に共同研究として実施した。

#### 研究方法

まず①の研究では、2015年に開発された上流下層加湿法の改良手法を研究した。上流下 層加湿法では、積乱雲に伴う豪雨をレーダで探知し、それをその上流側の20分程度前の時 刻の下層大気を加湿することで、積乱雲を前の時刻の風上側に発生させる技術である。た だし、上流側を加湿するだけでなく、より現実的な積乱雲の初期構造を開発した。この積 乱雲の初期構造をさまざまな大気環境に置くことで、積乱雲の集団化メカニズムや線状降 水帯の形成メカニズムについて研究した(②)。

#### 研究結果

スケールの小さい線状降水帯事例として知られる広島豪雨は、線状降水帯の上流側の同 じような場所で次々に積乱雲が発生したことで、停滞性の線状降水帯が形成され、その結 果として200mを超える豪雨が観測された。この上流部の大気環境構造を一様に空間に与え て、積乱雲の初期構造を置くことで、積乱雲の集団化や線状降水帯の形成について調査し た。この大気プロファイルは、積乱雲が発生しやすい大気構造をもっており、比較的湿潤 な環境であった。また、風向が下層で南風、中層で南西風となるような風の鉛直シアを伴 っていた。大気モデルとして気象庁NHMを用い、水平解像度を500mとした。ここで、積 乱雲の初期構造を1個置いた場合と、下層の風に直交する東西方向に3つ並べた実験を行っ た。その結果の降水量分布を図1に示す。これによると、積乱雲の初期構造を3個置いた場 合に線状降水帯に似た降水分布が再現された。この現象は、2つの点で重要な要素があるこ とを示していた。1つ目は、3つ並べることで、数10kmスケールの収束流が下層にできて、 それが単発積乱雲を集団化した積乱雲にしていたことである。初期構造には、下層に弱い 収束流を伴っている。2つ目は、積乱雲群の北側(下層風の下流側)に高気圧偏差を形成し たことである。この高気圧偏差からの発散流が、持続的な風上側での積乱雲形成に重要な 役割を果たしていたと考えられる。 次に温度構造のある環境下での積乱雲の集団化実験を行った。線状降水帯が東西に分布 するように広島豪雨の上流の風を回転させた。また、観測などを参考にして、北側下層に 低温域を置いた。そして、南風がある場合とない場合で、比較実験を実施した。その結果、 南風を置いた場合にのみ、線状降水帯が形成された。南北の気圧偏差を調べた結果(図2)、 南風が北側に高気圧偏差を形成し、高気圧偏差が発散流を形成することで、持続的な収束 が形成され、線状降水帯が維持されていたことがわかった。

これらの研究は、若月と佐藤(2021)で発表された。



図1:積乱雲の初期構造を(左)1個と(右)3個の場合の降水量分布.60~90分後の平均 降水量



図 2: 南北温度傾度を置き、生成される降水システムの南北の気圧分布の時系列.(左)下層 の南風がない場合.(右)下層に南風を置いた場合.

## 引用文献

若月泰孝, 佐藤未笛, 2021: 仮想大気環境場での線状降水帯の数値実験. 日本気象学会202 1年度春季大会, SP6-09+

# プラズマ密度構造から探る太陽圏境界変動 Exploring heliopause fluctuations in association with plasma density structures

**坪内**健、電気通信大学·情報理工学研究科

#### 【研究目的】

近年の観測研究の進展によって、太陽圏境界(heliopause、以下HP)近傍のプラズマ環境に関する理解は急速に深まっていると同時に、新たな課題も数多く明らかになってきた。本研究では特に、太陽風と星間物質の間で物質やエネルギーの交換をもたらすHPの動的な構造変動現象に着目する。その物理特性を解明する鍵となるのがピックアップイオン(PUI)の振舞である。PUIは太陽風プラズマと星間中性粒子との電荷交換によって生成される荷電粒子で、背景プラズマと比べて2~3桁高い熱エネルギーを持つことから、HP近傍領域におけるエネルギー密度の主成分であり、太陽圏を支える圧力の大半を担っている。PUIは更に中性粒子との電荷交換を通じて高速中性粒子となった一部が地球を周回するIBEX衛星などで検出可能で、HP環境の痕跡を知る手かがりにもなっている。2025年に打上げ予定の後継ミッション(IMAP)では、より空間・時間分解能の高い粒子運動スケールの観測が期待されることを踏まえ、衝撃波や不安定性といったプラズマ環境に出現する物理現象にPUIダイナミクスが及ぼす影響を数値シミュレーションによって定量的に検証することが本研究の目的である。

#### 【研究方法】

本研究では1次元ハイブリッドコード(イオンを個別粒子、電子を流体として扱う)を用いたシミュレーション計算を名古屋大学情報基盤センターのスーパーコンピューターで行った。本年度は太陽圏外縁部のスケールとPUI密度の関連性に焦点を当て、初期状態では太陽風プラズマと星間プラズマを密度比10の不連続面を介して一様に配置し、PUIは太陽風側にのみ、太陽風速度に該当する速度を磁場垂直面内のリング状分布として与えた。生成されるTSが垂直衝撃波となるように、磁場はシミュレーション空間に対して垂直方向に与えた。太陽風プラズマを太陽風側のパラメータで定義されるアルフベン速度の10倍の速度でシミュレーション空間内に常時注入して星間プラズマに直接衝突させて、その反動でHPから太陽風側に終端衝撃波(termination shock、以下TS)、星間空間側に外側衝撃波をそれぞれ自発的に生成させた。空間グリッドを0.5プロトン慣性長、時間ステップを0.06ジャイロ周期に取り、総空間スケール10万グリッド(2.8天文単位に相当)、40万時間ステップ(309時間に相当)に渡る計算を行うことで、IHS・OHS領域のスケールを十分に確保した。

### 【研究成果】

太陽圏外縁部は、HPを挟んでTSまでの太陽風側領域(inner heliosheath、以下IHS)と外側衝撃波までの星間空間領域(outer heliosheath、以下OHS)で構成される。本研究では全プラズマ密度に含まれるPUIの割合を1,5,10,2025%と変えて、太陽圏外縁構造の発展過程を再現した。計算結果より、PUI密度とIHS、OHSの空間スケール、更にTSにおけるプラズマ圧縮率の間の関係を下図に示す。



図:PUI密度とIHS (●), OHS (×)の厚み、TSにおけるプラズマ圧縮率(■)の関係。

この図からは、OHSのスケールがPUI密度にあまり依存していないのに対して、IHSはPUIの割合が増えるほ

289

ど厚みを増していることがわかる。TSでのプラズマ圧縮率は先行研究でも既に明らかにされているように、P UI密度の増加に伴って低下している。これは、衝撃波上流で実効的な熱エネルギーの高いPUIが混合すること でプラズマβが増加した結果、磁気音波の位相速度が上昇してマッハ数が低下することによる。注入する太陽 風全量が変わらないことから、TSでの圧縮率が低い場合はIHSの体積が増えることでプラズマ総量が一定に保 たれる。一方OHSにはPUIの影響が及ばないので、太陽風中のPUIの割合に関係なくプラズマ環境が変わらず、 空間的な広がりにも変化は生じていないと考えられる。

# 【考察】

太陽圏外縁部の物理環境については、近年のVoyager探査機による直接探査およびIBEX衛星によるHP領域由 来の粒子観測によって、従来のモデリングでは仮定として導入していた各種物理パラメータが実測値に置き換 えられつつある。特に不定性の大きかったPUI密度に関してもNew Horizons探査機の観測からの外挿で、TS近 傍では全プラズマの25%程度を占めることが示唆されている。HPやTSといった境界領域の位置は太陽風と星 間空間との圧力バランスによって決まってくるが、PUIの寄与が本質的に重要であることは明らかであり、そ の定量性のより精確な評価が今後益々必要とされる。本研究で示したPUI密度とIHSの厚みの間に見られる関 係を用いて、実際に観測されたHPやTSの位置から逆にPUIの密度・エネルギーを推定することが期待できる。

# 【成果発表】

- K. Tsubouchi, Variations in the pickup ion density structure in response to the growth of the Kelvin-Helmholtz instability along the heliopause, The Astrophysical Journal, vo.915, doi:10.37 47/1538-4357/ac01d6, 2021
- 坪内 健、Energy density composition in the inner heliosheath affected by pickup ions、第150 回地球電磁気・地球惑星圏学会、(オンライン)、2021年11月

恒星放射・恒星風・惑星固有磁場が地球型系外惑星からの大気散逸機 構に与える影響の研究

Effects of stellar conditions and planetary intrinsic magnetic field on atmospheric escape processes from terrestrial exoplanets

関華奈子、東京大学大学院理学系研究科

地球型惑星の表層に安定して液体の水が存在できる可能性のある中心星からの距離の範囲をハビタブルゾーンと呼ぶ。2018年に打ち上げられた NASA のトランジット系外惑星探索 衛星 TESS は昨年、太陽系外の恒星系のハビタブルゾーン内に地球サイズの惑星 TOI 700dを 初めて発見した。TESS は、特に、地球の近くに存在する明るい恒星を観測することで系外 惑星を発見することを目的にしており、今後、いくつか第二の地球の候補惑星が見つかると 期待されている。ハビタブルゾーンに惑星があっても、惑星表層に水を安定して保持するに は、一定気圧以上の大気が必要である。従って、実際にその地球型惑星がハビタブル環境を 持つかどうかは、その惑星がどういった大気を保持できるかに依存している。特に、系外惑 星探索では、ハビタブルゾーンが中心にある恒星(主星)に近い M型矮星等に発見されるこ とが多く、太陽のような G型星より主星の活動度が高いため、強い恒星 XUV 放射や恒星風 による宇宙空間への惑星大気の散逸を推定することが、重要な課題となっている。本研究で は、これまで申請者らが、太陽系内の惑星からの大気散逸研究に適用してきたグローバル多 成分 MHD モデルを系外惑星に応用することで、M型矮星まわりの地球型惑星が大気を保持で きる条件を調べることを目的としている。

研究初年度である 2021 年度には、上述の系外惑星 TOI 700d からの電離大気散逸シミュ レーションを行った。この系外惑星系の中心星である TOI 700 は、大きさと質量が太陽の 42%ほどの M 型矮星であり、表面温度は約 3500K である。TOI 700d は、この M 型矮星のハビ タブルゾーンに見つかった系外惑星で、周期 37 日で公転している地球型惑星であり、地球 の約 1.4 倍の質量を持つと推定されている。更に、11 か月間の追観測中に主星のフレアが 見られなかったことから、TOI 700 は M 型矮星の中では活動度が低いと推定されており、大 気を保持できる可能性が高い。そこで本研究では、こうした恒星の活動度から推定された恒 星風や恒星 XUV 放射を数値シミュレーションの境界条件やインプットパラメータとして与 えることで、系外惑星 TOI 700d からの電離大気散逸のシミュレーションを行った。その結 果、M 型星の強い XUV 放射の中では CO<sub>2</sub> 大気を保持するのが難しいこと、恒星風のパーカー スパイラル角が小さいことで電離大気流出が抑制されることが明らかとなった。また惑星 表面で 1000 nT 程度の固有磁場を惑星が持つ場合には、大気散逸が抑制され、長期間大気を 保持することが可能になることも示された。