

4 太陽・太陽風研究

4 *Research for the Sun and Solar Wind*

4-1 太陽嵐到来予測システム

4-1 *Real-time Prediction System for Solar Storm Arrival*

塩田大幸 八代誠司

SHIOTA Daikou and YASHIRO Seiji

太陽フレアやフィラメント消失現象の発生に伴って惑星間空間へ放出されるコロナガスの塊「コロナ質量放出 (CME)」は、地球磁気圏にまで到来すると宇宙天気じょう乱を引き起こす主要因となり得る。そのため、CME の影響がいつどのように地球に到来しどの程度の影響を及ぼすかに
 ついての予測は、宇宙天気予報の中で極めて重要なタスクの一つである。リアルタイムで得ること
 ができる太陽表面及び太陽コロナの観測データに基づいた 3 次元の磁気流体力学 (MHD) シミュ
 レーションにより数日後の CME の到来を予測するためのシステムを開発し、運用を開始した。本
 稿ではその概要とシミュレーション結果の一例を紹介し、今後の展望について議論する。

Coronal mass ejections (CMEs) are massive coronal gas expelled from the solar corona associated with solar flares and/or filament eruptions, and they can cause large disturbances of space weather in the geo-magnetosphere. Prediction of their arrival and their impact on the space weather is one of the crucial tasks in space weather forecast. Recently we have developed a new prediction system of the CME arrival based on real-time observation of the Sun and 3D MHD simulation of CME propagation into solar wind in the inner heliosphere. Here we introduce overview of the prediction system and an example of prediction results and discuss prospect of the prediction.

1 まえがき

太陽コロナの爆発現象である太陽フレアやフィラメント消失現象が発生すると、発生領域周辺のコロナガスが惑星間空間に向かって放出されることがあり、この現象を「コロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection, 以降 CME)」という。ただし、太陽フレアは常に CME を伴って発生する訳ではなく、CME を伴わない太陽フレアも一定数存在する。太陽フレア・フィラメント消失・CME は、共通の爆発現象の一部が異なって見えているものであり [1]、フレア発生領域とその周囲のコロナの状況などの要因により、CME 発生の有無が決まるのではないかと考えられている。これらの爆発現象を総じて太陽嵐と呼ぶ。深刻な宇宙天気じょう乱を引き起こす高速で強い磁場を持つ大規模な CME は、大規模なフレアに伴うものであることから、リアルタイム予測で対象とする太陽嵐は、太陽フレアと CME が同伴して発生した現象に限定する。

コロナグラフで観測された CME では、しばしば中

心部分に高密なガスがねじれた繊維状構造を形成している様子が観測されている。この構造は磁力線の一部に支えられた構造と理解でき、CME 内部には「ねじれた磁束管 (フラックスロープ)」があると考えられている。本研究報告 4-2 で解説されているように惑星間空間には太陽風が全ての方向に向かって流れ出している。フラックスロープが惑星間空間に放出されると、フラックスロープ自体が膨張しながら、前方を流れる太陽風の中を相互作用しつつ一定の立体角を保持して伝搬していく (図 1)。もし前面を流れる太陽風よりも CME の速度の方が十分に速ければ、太陽風を後ろから押して圧縮し衝撃波を形成する。圧縮された太陽風とその中に含まれる磁場は一部 CME 前面に蓄積されながら一体となって伝搬する (図 1、シース領域)。このように CME は惑星間空間における津波のような現象と理解することができる。

CME は図 1 に示す様に、地球近傍の惑星間空間に達するまでに巨大な空間スケールにまで膨張していると考えられ、それ故 CME の伝搬方向と地球の位置と

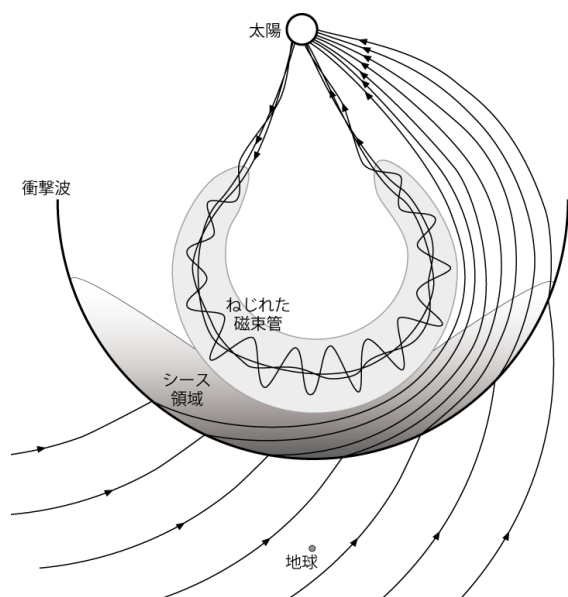


図1 太陽風の中を伝播するCMEの模式図 矢印が磁力線、背景の色が相対的な密度を示す。

の関係によって観測される様子が異なる。一般的に、太陽フレアに伴ってCMEが発生すると、太陽フレア発生領域から動径方向にCMEが放出される。例えば地球の真正面で太陽フレアが発生し高速なCMEが放出されると、CMEの中央が地球の位置を通過する。一方、地球から見て太陽面中心から少し離れた領域からすれば、CMEの脇の領域が地球の位置を通過する。フラックスロープの広がりよりも更に離れている場合は、衝撃波のみが到来する。さらに、CMEの広がりよりも大きく離れた領域からCMEが放出されれば、地球にCMEが到来しない。また、CMEが宇宙天気じょう乱を引き起こす際にその影響の大きさを決める要素として、地球に到来するCME内部の磁場が南向き成分を持つかどうかが重要になる(本研究報告3参照)。その磁場の向きについても、フラックスロープのどの位置が通過するかが関係してくるため、CMEの形状とともに伝搬方向を正確に予測することが重要になる。

このように地球から見て太陽面のどの位置から(どの方向に)どれくらいの広がりを持ってどのような状態のフラックスロープが放出・伝搬されるかが重要になる。SOHO衛星に搭載されたコロナグラフ(LASCO)は、太陽近傍の30太陽半径(太陽地球間距離の約0.15倍)までの範囲の太陽コロナを観測しているため、CMEが放出された初期段階を捉えることができる。一方で、コロナグラフ視野の外の範囲については観測データが乏しく、そこから地球に至るまでの間のCMEの伝搬過程については、観測から情報をほとんど得ることができない。コロナグラフ視野の外の次に観測情報を詳細に取得できるのはDSCOVR衛星等に

よる太陽地球間のL1点でのその場観測であり、L1点での観測後1時間未満で地球へ到来する。

そこで十分に長いリードタイムをもったCMEの到来予測を実現するために、太陽コロナの観測データに基づいた3次元の磁気流体力学(MHD)シミュレーションを利用する。最終的には、CME到来による宇宙天気じょう乱発生の有無の予測が目的となるため、MHDシミュレーションによって現実的な非一様な太陽風の中をCMEが伝搬する過程を再現することで、CMEと太陽風の相互作用の結果変形したCMEが地球へ到来するかどうかを計算することができる。この実現のために、X線のフラックス時系列データ・極端紫外線による太陽コロナ画像・コロナグラフ画像などの観測データを自動的に収集・解析をして、入力するCMEの位置・速度・大きさ・向きなどの状態が異なる複数ケースのアンサンブルシミュレーションを容易に実行するためのシステムを開発した。本稿では、そのシステムの概要と、結果の一例を紹介する。その後、残された課題と今後の展望について議論する。

2 太陽嵐到来予測システム概要

2.1 MHDシミュレーション SUSANOO-CME

まず初めに、本システムの中核となる3次元MHDシミュレーション「SUSANOO (Space-weather Usable System Anchored Numerical Operations and Observations)-CME」[2]について説明する。この数値シミュレーションでは、重力を入れた理想MHD方程式を時間発展させて、プラズマの挙動を計算する。本研究報告4-2で解説をされたように、コロナから惑星間空間を流れる太陽風は、一様に流れているわけではなく、太陽表面の磁場分布を反映して、速い太陽風が流れる領域と遅い太陽風が流れる領域が混在し、またその分布も太陽表面の磁場分布の変化に応じて変化していく。このような太陽風の分布は観測データに経験的に知られたモデルを適用することである程度再現できることが知られている[3]。GONGプロジェクトで得られた太陽表面の磁場分布から十分に加速された太陽風の分布を内部境界条件として仮定することで、計算を単純化・高速化するために太陽コロナ領域を省略したシミュレーションが実行可能になる。計算領域を太陽中心から25太陽半径(約千7百万km)から火星の軌道を含む約3億kmまでの領域とし、全方向を解くために、野球ボールのように部分球殻2つを組み合わせたYin-Yang格子[4]を用いる。太陽表面磁場は時々刻々と変化していき、それに伴って内部境界の太陽風の分布も時間変化させていく。このように現実的な太陽風を再現し、それを背景場にしてCMEを伝搬させる。

次に入力する CME のモデルについて説明する(図 2)。このモデルでは、内部にねじれた磁束管(フラックスロープ)を含むほぼ球状の高速のプラズマの塊がシミュレーション内部境界を通過する過程を模擬する。フラックスロープは球殻の中で閉じる解析的に記述可能な force-free 磁場モデルである spheromak 磁場を使用する(図 2 左)。この CME が動径方向に伝搬膨張し(図 2 右)、内部境界のある位置(25 太陽半径)を通過すると仮定したときに、その位置の CME 通過中の断面の分布の情報をシミュレーションの内部境界の太陽風データの中に埋め込む。このモデルではどの位置・時刻にどのような状態の CME を入力するかを決めるパラメータが 10 種類あり、これによって決まる CME が太陽風と共に内部境界を通過して計算領域の中に入ってきて、そのまま外に向かって伝搬していく。このようにそれぞれの CME に対してパラメータを決めて太陽風境界条件に情報を追加しているため、連続して CME が複数発生した場合のシミュレーションが実行可能であり、複数 CME 同士の伝搬中の相互作用についても再現することが可能になっている。

実際に太陽活動が非常に活発な時期には大規模な太陽嵐が連続して発生し、それぞれの CME が相互作用

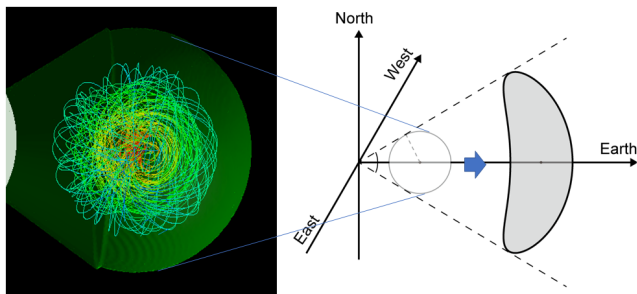


図 2 CME モデルの模式図 (左) 3D 構造 色のついた直線が spheromak 磁場の磁力線、透明な等値面の内側が高い速度を持つ領域を示す。(右) 動径方向の伝搬により CME がグレーの領域に変形したと仮定。

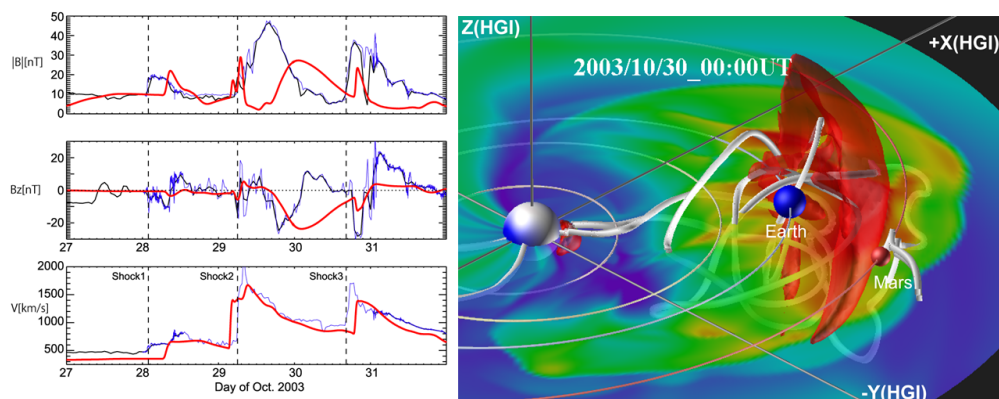


図 3 (左) 太陽風その場観測と SUSANOO-CME での地球に到来する太陽風(太線)の比較 破線は観測された衝撃波到来のタイミングを示す。(右) SUSANOO-CME で再現された CME の 3 次元構造。太いチューブは磁力線を示す。赤い等値面は内側の速度が 1,200 km/s を超える領域を示す [2]。

をした結果、地球に到来することがある。今世紀最大規模の太陽嵐である 2003 年 10 月下旬に発生したハロウィン・イベントもそのうちの一つである。図 3 は、2003 年 10 月のハロウィン・イベント及びその前後の CME を再現したシミュレーション結果である。図 3 左は地球に到来した太陽風のその場観測結果(青線・黒線)とシミュレーション結果(赤線)を比較したグラフ、図 3 右は CME 中心のねじれた磁場構造が地球を通過している瞬間の惑星間空間の磁場とプラズマ速度の様子を示している。実際に観測された CME 前面の衝撃波、その直後に高速のシース領域が形成され、その構造が実際の観測と近いタイミングで地球を通過していることがわかる。さらに、衝撃は通過後に強い南向き磁場が通過しており、これが CME 内部のフラックスロープの磁場に対応することがわかる。

2.2 リアルタイム太陽観測データを用いた予測システム

次に、SUSANOO-CME を用いた予測シミュレーションを実行するために、リアルタイムの観測データに基づいて入力する CME のパラメータを決める必要がある。そのために、太陽フレア及び CME を自動もしくは半自動で解析をすることで素早くシミュレーションの実行を可能にした。

まず太陽フレアの観測データについて自動的に解析を行うシステムを構築した。GOES 衛星太陽 X 線 flux の時系列データから、開始時刻・ピーク時刻・終了時刻・X 線ピーク flux・flux を時間積分した fluence を求める。SDO 衛星 AIA 観測装置による太陽面の極端紫外線画像を使用し、フレア発生領域の位置(緯度・経度)を特定する。

次に、CME に観測データについては、SOHO 衛星 LASCO の差分画像を作成する。CME の自動検出は難しいため、ブラウザ上で差分画像での CME の先端の

位置と角度の幅を測定することで、伝搬速度・広がり・方位角を測定する。図4に2017年9月4日のCMEの測定した結果を例として示す。(a-f)のように、各画像で最も太陽中心から離れた先端を記録する。図4(g)にあるように各画像での先端の距離を時系列に並べると先端が広がっていく様子を見ることができ、放出された伝搬速度を求めることができる。ちなみにグラフの記号の色は、画面上でどの方向に先端が伝搬しているかの方位 (position angle: PA) を示している。

CMEの測定を終えた後、CMEと対応する太陽フレアを選択する。まえがきに記述したとおり、太陽フレアに伴うCMEのみを影響予測の対象とする。そのため、対応するフレアとCMEのペアを決めるために、図4(h)のように、フレアとCMEの発生時刻を対比させ、発生時刻と方位の近いフレアクラスの大きいものをムービー等のデータを確認しながら決定する。

このように太陽フレアとCMEの観測データを組み合わせることで、発生位置・発生時刻・伝搬速度・CMEの広がり・エネルギー規模などを特定することができるが、CMEのフラックスロープの向き・ねじれの向きなど観測から特定が難しいパラメータも存在する。また、フレア領域から動径方向にまっすぐ外に伝搬せずに逸れて伝搬するケースも存在する。これらの不定性がある情報で予測シミュレーションを行うため、入力CMEのパラメータを変えた複数のケースを並列実行するアンサンブル予測を行うシステムを構築した。

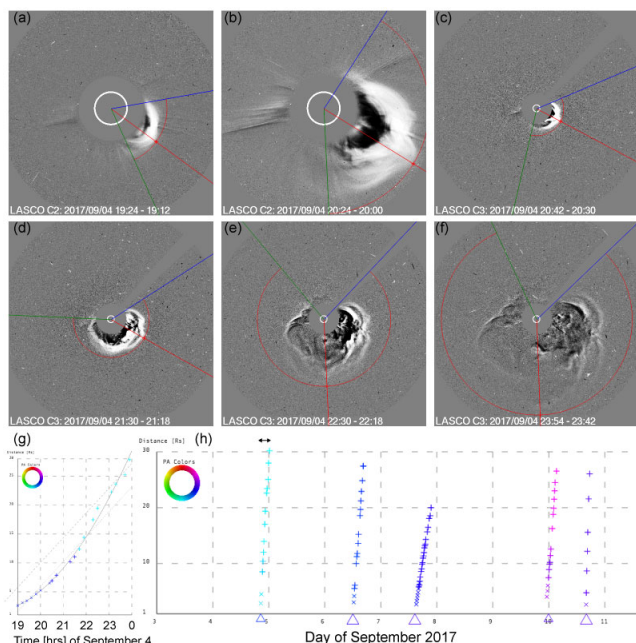


図4 (a-f) SoHO衛星LASCOで観測された2017年9月4日のCME画像は差分画像。直線、円弧は、本システムを用いた測定結果。(g) 9月4日のCMEの測定結果の軌道。横軸が時刻、縦軸が太陽中心からの距離。(h) 9月3-11日の間に発生したCMEと対応するフレアを選択した結果。三角がフレアのピークの時刻、大きさがフレアクラスを示す。記号の色が太陽面中心からの方位 (PA) を示す。

3 アンサンブルシミュレーション結果の一例

図5に2017年9月初旬に発生したCMEのアンサンブルシミュレーション結果を示す。2017年9月初旬に活発な活動を示した活動領域NOAA12673では27回のMクラスフレアと第24太陽活動周期で最大規模のX9.3フレアを含む4回のXクラスフレアが発生したが、そのうち大規模なCMEを伴ったものは図5(a)に示した5例であった。9月4日20:33 UTのM5.5フレアに伴うCMEによる衝撃波が9月6日23:47 UTに到来、X9.3フレアに伴うCMEの衝撃波が、9月7日23:02 UTに到来した図5(c)。M5.5フレアに伴うCMEによる南向き磁場が9月7日20:00 UT頃から通過し始めたが、前述の後続CMEの衝撃波がその通過の最中に到来し、南向き磁場が強く圧縮され30 nT近くになり(図5(d))、この結果地磁気嵐が発生した(図5(b))。

シミュレーションでは、M5.5フレア-CMEとX9.3フレア-CMEの2つのCME(先行CME、後続CMEと呼ぶ)のパラメータを大きく変化させてアンサンブルシミュレーションを実行した。その結果を図5に示す。今回は予測ではなく既にあるDSCOVRの観測を参考にパラメータの変更の影響を調査した。

まず、CMEの速度や磁束量を大きくすると衝撃波及びフラックスロープの到来時刻が早くなり、その影響は後続CMEの背景場を変えることでその到来時刻も早めてしまう。先行CMEと後続CMEの両方のパ

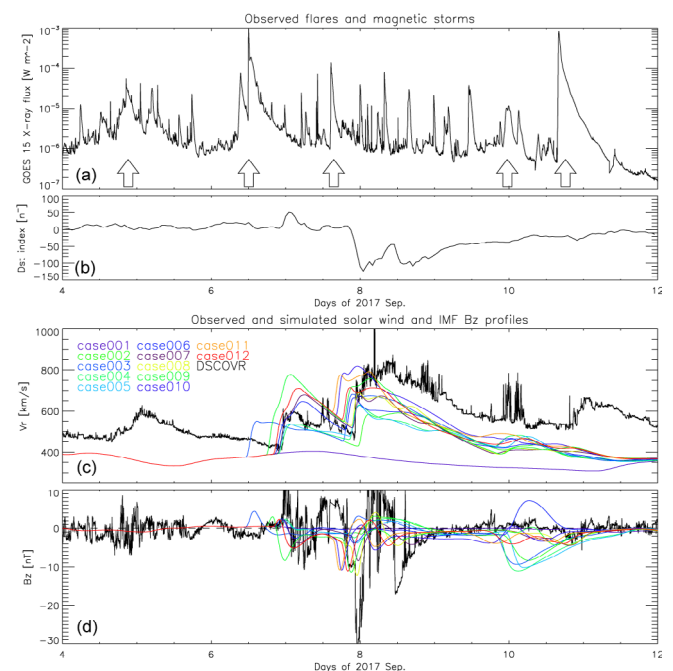


図5 (a) 2017年9月4-11日のGOES衛星X線の時系列データ 矢印がCMEの発生タイミング。(b) 地磁気変動を示すDst指数の時系列データ。(c,d) 太陽風その場観測(黒線)とSUSANOO-CMEでの地球に到来する太陽風(色線)の比較。(c) が太陽風速度、(d) 磁場の南北成分。

ラメータを両方変化させる必要があり、先行 CME の磁束量あげて速度を下げることで観測と近い値を再現できた。また、CME の伝搬方向を地球に少し寄せた方が、フラックスロープが地球をかすめやすくなるため南向き磁場が到来しやすくなった。フラックスロープ内の磁場の向きを変更することで地球に到来する磁場の形状が大きく変化した。

以上のように、GOES X 線フラックス、AIA や LASCO にコロナ観測画像から得られたパラメータそのものを使用するのではなく、観測データに修正を加えて使用することで、実際に DSCOVR による観測に近い結果を得ることができた。その修正の手法についてはイベントごとのばらつきが大きいいため、統一的な手法を見つける段階には至っていない。特にフラックスロープの向きや、伝搬方向の変化は地球に到来する磁場の向きを全く別のものにしてしまうため、アンサンブルメンバーのパラメータをどのように振るかを探ることが重要になってくる。今後、過去の大量の CME イベントについての再現を試みることで、その傾向を詳しく調査する必要がある。

4 今後の展望

以上に示したとおり、宇宙天気予報に利用するためのリアルタイム太陽観測データ及び MHD シミュレーションを使用したアンサンブル予測システムを構築し、運用を開始した。CME の到来時刻及び南向き磁場の予測を行うことが可能であるが、パラメータの不定性を減らす取組や、予測の精度を上げるための研究が今後重要な課題となる。

CME 内部のフラックスロープの向きやそのねじれの向きを決めるための情報として、フレアを発生した活動領域の磁場構造のデータが利用できる可能性がある。磁場のデータをリアルタイムで取得し、フレア発生領域を重ねることで、フレアを起こした磁気ループの性質を抽出する仕組みを今後整備する予定である。

CME の到来時刻に影響を及ぼす要素として、背景となる太陽風の状態が重要となる。本システムのシミュレーションでは太陽風は簡略化したモデルで与えているため、実際の状態と乖離することがある。このような時には CME のパラメータを変えるだけでは対処が難しい。この対策として、複数の異なる太陽風モデルを用いて複数パターンの背景太陽風を準備することで、その時の一番実際の観測と合うモデルを選択し問題を回避する予定である。

予測精度を上げる取組の一つとして、名古屋大学宇宙地球環境研究所の惑星間空間シンチレーション (IPS) 観測を用いた予測結果の評価及びデータ同化手

法の開発が進められている [5][6]。現在最新の IPS 観測データを名古屋大学から提供されていて、宇宙天気予報の参照データとして使用しており、[5][6] によって開発された手法を取り入れる準備を進めている。

SUSANOO-CME と用いた当システムと同様に、惑星間空間の太陽風の中を CME の伝搬する過程を事前にシミュレーションしてその到来を予測する試みは、諸外国でも運用されている。先駆的なモデルは ENLIL[7] と呼ばれる 2000 年代初頭から米国で開発がすすめられた MHD シミュレーションを用いたもので、NASA, NOAA をはじめとして、英国 Met Office や韓国での運用が行われている。現在運用されている ENLIL- Cone モデル [8] は、アンサンブル予測の技術の開発が先行している [9] が、CME 内部に磁場が入っていないため、CME の影響度の予測には向いていない。我々の先行研究 [2] が世界に先んじて開発をした後、米国・欧州・中国などでも磁場を含む CME を入力する MHD シミュレーションの技術が開発されている [10]-[12]。到来する CME の時刻とその速度や磁場南北成分が精度よく予測が実現すれば、その次のステップとして CME の宇宙天気影響度の予測が可能になることが期待される。近い将来に、各国の宇宙天気予報機関による予報結果をお互いに参照し合い、競い合う時代が来ることが期待される。

謝辞

本稿で紹介した取組の一部は総務省委託業務「0155-0099 電波伝搬の観測・分析等の推進」の支援を受けて行われている。本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金 (15 H05813, 15 H05814, 15 K21709, 19 K23472, 21 H04492) の助成を受け実施した。観測データを提供している次の機関 the Global Oscillation Network Group (GONG) program, NASA Solar Dynamics Observatory team, LASCO coronagraph group, NOAA DSCOVR satellite team NOAA GOES satellite team、京都大学地磁気世界資料解析センター、名古屋大学宇宙地球環境研究所に感謝する。

【参考文献】

- Shibata K., "New Observational Facts about Solar Flares from Yokoh Studies- Evidence of Magnetic reconnection and a Unified Model of Flares," Adv. Space Res., vol.17, Issue 4-5, pp.9-18, 1996.
- Shiota D. and R. Kataoka, "Magnetohydrodynamic simulation of interplanetary propagation of multiple coronal mass ejections with internal magnetic flux rope (SUSANOO-CME)," Space Weather, vol.14, pp.56-75, 2016. doi: 10.1002/2015SW001308
- Arge C. N. and V. J. Pizzo, "Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates," J. Geophys. Res., vol.105, Issue A5, pp.10465-10479, 2000. doi:10.1029/1999JA000262

- 4 Kageyama A. and T. Sato, "'Yin-Yang grid': An overset grid in spherical geometry," *Geochem. Geophys. Geosyst.*, vol.5, Q09005, 2004. doi:10.1029/2004GC000734
- 5 Iwai K., D. Shiota, M. Tokumaru, K. Fujiki, M. Den, and Y. Kubo, "Development of a coronal mass ejection arrival time forecasting system using interplanetary scintillation observations," *Earth Planets and Space* vol.71, article number 39. 2019. doi:10.1186/s40623-019-1019-5
- 6 Iwai K., D. Shiota, M. Tokumaru, K. Fujiki, M. Den, and Y. Kubo, "Validation of coronal mass ejection arrival-time forecasts by magnetohydrodynamic simulations based on interplanetary scintillation observations," *Earth Planets and Space*, vol.73, article number 9. 2021. doi:10.1186/s40623-020-01345-5
- 7 Odstrcil D., "Modeling 3-D solar wind structure," *Adv. Space Res.*, vol.32, Issue 4, pp.497-506, 2003. doi:10.1016/S0273-1177(03)00332-6
- 8 Xie H., L. Ofman, and G. Lawrence, "Cone model for halo CMEs: Application to space weather forecasting," *J. Geophys. Res.*, vol.109, A03109, 2004. doi:10.1029/2003JA010226
- 9 Mays M. L. et al., "Ensemble Modeling of CMEs Using the WSA-ENLIL+Cone Model," *Sol. Phys.*, vol.290, pp.1775-1814, 2015. doi:10.1007/s11207-015-0692-1
- 10 Singh T., Yalim M.S., and Pogorelov N.V., "A Data-constrained Model for Coronal Mass Ejections Using the Graduated Cylindrical Shell Method," *AstroPhys. J.*, vol.864, no.1 article number 18, 2018. doi:10.3847/1538-4357/aad3b4
- 11 Scolini C. et al., "Observation-based modelling of magnetised coronal mass ejections with EUHFORIA," *Astronomy & Astrophys.*, vol.626, A122, 2019. doi:10.1051/0004-6361/201935053
- 12 Zhang M., X. S. Feng, and P.Y. Li, "Three-dimensional MHD simulation of the 2008 December 12 coronal mass ejection: from the Sun to Interplanetary space," *J. Space Weather Space Clim.*, vol.9, A33, 2019. doi:10.1051/swsc/2019034



塩田大幸 (しおた だいこう)

電磁波研究所
電磁波伝搬研究センター
宇宙環境研究室
主任研究員
博士(理学)
太陽物理学、太陽圏物理学

八代誠司 (やしろ せいじ)

米国カトリック大学
Data Scientist
博士(理学)
太陽物理学