

4-2 高速太陽風予測のための数値シミュレーション

4-2 *Solar Wind Numerical Simulation for High Speed Stream Prediction*

田 光江 田中高史 久保勇樹 亘 慎一

DEN Mitsue, TANAKA Takashi, KUBO Yûki, and WATARI Shinichi

太陽のコロナホールと呼ばれる周囲より温度や密度の低い領域から噴き出す高速太陽風は地球磁気圏に回帰性のじょう乱を引き起こす。高速太陽風の到来時期を予測することは宇宙天気予報の重要な課題の一つとなっている。極付近の高緯度や低緯度に位置するコロナホールから高速風が及ぼす影響は予測しやすい一方、高緯度から低緯度へ延びているコロナホールについては警戒を要するのかが判断が困難である。そこで高速風・低速風領域、セクターなどグローバルな太陽風構造をモニターするために我々は3次元磁気流体(MHD)シミュレーションコード(the REProduce of Plasma Universe: REPPU)を開発した。このモデルの特徴は太陽コロナから1AUまでシームレスにカバーしていることから、高速風領域とその源であるコロナホールの関係が直接結びつけられることにある。また本モデルは2018年よりNICTでの宇宙天気予報の参考データとして活用するために運用を開始した。本稿ではこのモデルの概要と結果及び運用システムについて紹介する。

High speed solar wind emanating from coronal holes (CHs) which are low temperature and density region in solar corona cause recurrent disturbances. Prediction of arrival of high speed stream (HSS) is one of important issues in space weather forecast. While it is easier to predict effects of CHs near the poles or low latitude on environment near Earth, it is still difficult to evaluate the effect of a CH in case that the CH extends from high latitude to lower latitude. We developed three-dimensional magneto-hydrodynamical (MHD) simulation code (the REProduce of Plasma Universe, REPPU) in order to monitor the global solar wind condition such as high speed and low speed region and sector structure. This model covers from solar corona to Earth orbit, so we can connect HSS to the CH expected as the source of that HSS. In this paper, simulation results are presented and we describe our operation system for space weather forecast.

1 まえがき

コロナホール(Coronal Hole、以降CH)は太陽コロナ域で開いた太陽磁場形状によりプラズマが惑星間空間へ出ていき、密度と温度が下がってEUVやX線画像で暗く見える領域であり、高速太陽風の源となっている(図1)。高速太陽風は低速な太陽風に追いつき、磁場が圧縮されて強度を増し、プラズマはエネルギーの散逸により加熱されるという相互作用によりCo-rotating Interaction Region(CIR)と呼ばれる領域を形成するが、このCIRが地球磁気圏に到達するとじょう乱を引き起こす。太陽面の噴出現象であるコロナ質量放出(Coronal Mass Ejection、以降CME)はこれに伴う衝撃波や南向き磁場成分を持つフラックスロープにより地磁気嵐など甚大な宇宙環境じょう乱を起こす

ためCMEの到達予測は重要である(本研究報告4.1参照)が、CMEの伝搬に背景太陽風との相互作用が大きく影響することが知られている。この点においても高速風と低速風及びグローバルな太陽磁場構造を再現することは重要な宇宙天気予報の課題の一つである。

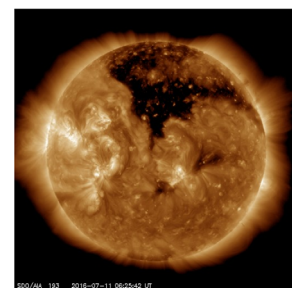


図1 コロナホール(SDO衛星AIA193Åによる観測)

太陽表面の磁場分布と共に CH の形状も時々刻々と変化するが、面積が活動領域と比べて大きなスケールの CH は太陽の自転周期の数回分の期間ほど安定して存在することが多く、このため、このような CH を源にした高速太陽風によるじょう乱は太陽の自転と同様の周期性(約 27 日)を持つことが多い。低緯度に位置する CH から放出される高速風は地球軌道へ達し、極付近の CH からの高速風は地球軌道を外れることが多く、また現象に周期性が見られると高速風によるじょう乱の警戒の要・不要の判断は容易である。一方で中緯度に位置する CH については CH の境界が磁場形状の変化に伴って変化するため CH のどの部分から放出される高速風が地球軌道に達するか、周期性のみでは高速風到来の予測が難しい。そこで CH と地球軌道に到達する高速風との関係を直接結びつけることが可能な太陽風のグローバルなモデリングが必要になる。

これまでいくつかの太陽風の MHD モデルが開発されている。宇宙天気予報に活用されている代表的なモデルは、計算リソースの負荷が大きい太陽の数 10 太陽半径(以降 R_s) から外側から数 AU(天文単位、太陽-地球の平均距離に由来している。1 AU はおよそ $215 R_s$) までをモデル化している [1]、本研究報告 4.1 や [2] が挙げられる。また太陽コロナ域や光球から惑星間空間までを対象にしているモデルでは [3] や [4]、[5] がある。

Tanaka によって開発された REPPU code [6]、[3] は太陽コロナから約 200 太陽半径までをカバーしているが、我々はこのモデルをベースにして宇宙天気予報に利用できるように改修を行った [7]。このモデルの特徴は球面を覆う計算格子構造にある。通常の球座標と異なり極に特異点がなく、またつなぎ目もなく一様に三角形で覆われている(図 2)。このため球座標に見られる極付近の細かい格子により時間ステップが制約されることがない。このことにより R_s スケール未満の CH と $200 R_s$ 以上のグローバルな太陽風構造の両方を再現することができ、高速太陽風領域とその源になっている CH の関係を同定することが可能になった。本モデルは 2018 年 2 月 28 日より自動化して運用を開始し、

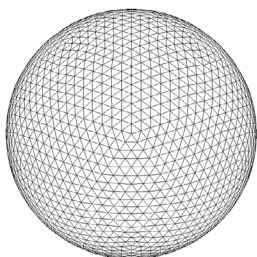


図 2 シミュレーション球面の計算格子構造

NICT にて毎日宇宙天気予報の参考データとして太陽風の予測に用いられている。本稿では REPPU モデルの概略と自動化システム及びシミュレーション結果について述べる。

2 手法

ここで用いているシミュレーション手法やモデルについては [8] 及び [3] に記載されているため、ここではこれらと異なる点について述べる。シミュレーション領域は $217 R_s$ まで延ばし、L1 点(ラグランジュ点。天体と天体の重力平衡点の一つ。太陽-地球系の L1 点は太陽-地球間で地球から約 150 km の位置。)での衛星観測データと直接比較できるようにした。動径方向の格子数は 217 で、格子間隔は等間隔ではなく太陽近傍の最も細かい格子間隔で $0.02 R_s$ 、地球軌道近傍のもっとも粗い間隔は $2.7 R_s$ である。

シミュレーションの入力として GONG (Global Oscillation Network Group; GONG。太陽の内部構造を明らかにするために構築された地上望遠鏡による観測ネットワーク。)による光球磁場観測データを用い、ポテンシャル磁場を求め、定常状態になるまで MHD 計算を実行する。このモデルではコロナを加熱することにより太陽風を加速することから、解くべき MHD 方程式には以下のような加熱項 S'_E を入れている。

$$S'_E = S_E + Q_0 \cdot bf \cdot \left(\frac{B_r}{B_{\text{average}}} \right) \frac{1}{f_s} \exp(-R/L_Q) \quad (1)$$

$$S_E = Q_0 \cdot \frac{1}{f_s} \exp(-R/L_Q) + \nabla \cdot \left(\xi T^{2.5} \frac{\nabla T \cdot \mathbf{B}}{B^2} \right) \cdot \mathbf{B} \quad (2)$$

$$f_s = \left(\frac{R_s}{R} \right)^2 \frac{B_{Rs}}{B_R}$$

(2) 式は [8]、[3] で用いられてきた加熱項で、右辺第一項指数関数的に減衰する volumetric metric heating function、第二項は Spitzer タイプの熱伝導式である。(2) 式下の f_s は expansion factor と呼ばれる磁場形状に関係する量で、磁力線の開き具合を示している。 B_{Rs} 、 B_R 、 R はそれぞれ太陽面と太陽からの距離 R での磁場強度、太陽からの距離を表す。磁力線の開き具合と加熱・加速との関係が経験則的に知られていることから expansion factor の逆数を加熱項に用いている。また Q_0 、 L_Q はそれぞれ加熱強度と減衰スケールで、 $Q_0 = 13.2 \times 10^{-6} \text{ J m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ を用いており、 L_Q は後に述べるが自動化にあたって調整している。また (1) 式右辺第二項は Kojima et al. (2004 [9]) により太陽風加速は (2) 式の $1/f$ だけでなく、磁場エネルギーの供給を考慮して太陽風加速は B/f に比例すると提案されたことから付加した関係式である。ここでは計算の安定性のため

に太陽からの一定距離で平均化した磁場強度 $B_{average}$ で規格化した動径方向の磁場成分 B_r を乗じて用いている。また bf は自由パラメータで後ほど触れる。

太陽活動はおおよそ11年周期で変化するが、ここでの太陽風シミュレーションの自動化ではこの活動度に応じて自由パラメータを定めることが必要であるが、このモデルの自由パラメータは加熱モデルの L_q 、 b_f である。また太陽コロナの過熱と太陽活動度で変化する太陽磁場強度とのバランスを取る必要がある。例えば加熱に比べて磁場強度が弱い場合、加熱により磁場が閉じることができずに多くの磁力線が開き、観測データから乖離することになる。自由パラメータを最小限にするため、加熱モデルに含まれる強度等ではなく入力である観測磁場データの強度を調整する。すなわち太陽活動度に応じて磁場強度が変化するため、活動度が低く磁場強度が小さい場合は観測磁場データを例えば20倍し、活発になって磁場強度が増した場合は数倍にする、などの設定を行った。他に加熱モデルのスケールハイト L_q 及び磁場強度によってタイムステップが変化するため、定常に達するまでのステップ数がパラ

メータになる(表1)。

3 シミュレーション結果

ここでは代表的なシミュレーション結果と運用中のWeb表示画面を紹介する。

図3～5は2017年7月14日から8月19日のGONGデータを用いた計算結果である。図3はこの期間にSDO (Solar Dynamics Observatory) 衛星の紫外線及び極端紫外線望遠鏡 AIA (Atmospheric Imaging Assembly) 211により観測されたCH(上段)とそれに対応するシミュレーション結果(下段)であり、カラーマップは温度を表している。L1点での太陽風観測と対応付けるため、CHにはA、B、X、Cのラベル付けを行っている。ここでXのラベルを付けたCHは8月7日に中央子午線を通過しているが、8月7～9日の観測データが欠損していたため、代わりに8月10日のデータを用いている。四つのCHはおおよそシミュレーションで再現できていることが分かる。図4上段は図3下段のシミュレーション結果のCHから出ている磁力線と下段に同一の磁力線を地球軌道面の太陽風速度のカラーマップに描いている。この図から磁力線と高速風の領域がほぼ重なっていることが分かり、

表1 自動実行のためのパラメータ

入力磁場 データ最大値 [Gauss]	m (倍数)	L_q (スケール ハイト) [太陽半径]	$bf(B/f$ 加 熱項係数) [%]	計算 ステップ数
～45	49	0.5	0	240,000
～50	47	0.5	0	240,000
～70	45	0.5	0	240,000
～80	41	0.5	0	240,000
～90	36	0.5	0	240,000
～95	34	0.5	0	240,000
～100	32	0.5	0	240,000
～115	28	0.5	0	240,000
～120	27	0.5	0	240,000
～130	23	0.7	0.04	240,000
～140	21	0.7	0.04	240,000
～150	20	0.7	0.04	240,000
～170	20	0.7	0.0425	240,000
～200	17	0.7	0.0425	240,000
～300	15	0.7	0.025	240,000
～400	13	0.7	0.025	240,000
～500	11	0.7	0.0125	240,000
～600	9	0.7	0.05	240,000
～700	8	0.7	0.05	300,000
～900	8	0.7	0.07	360,000
～1,000	7	0.7	0.05	360,000
～1,100	6	0.7	0.1	480,000
<1,100	5	0.7	0.05	300,000

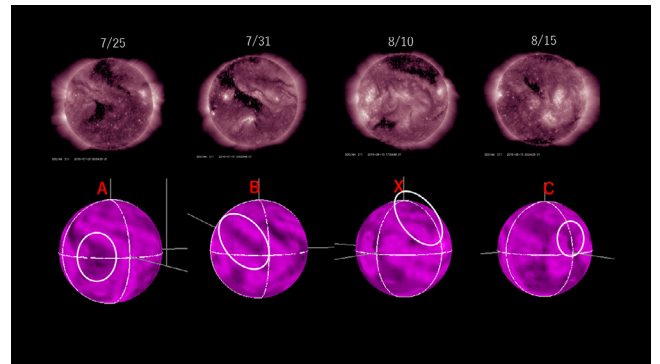


図3 SDO 211 Åで観測されたCHと対応するシミュレーション結果([7]からの引用)

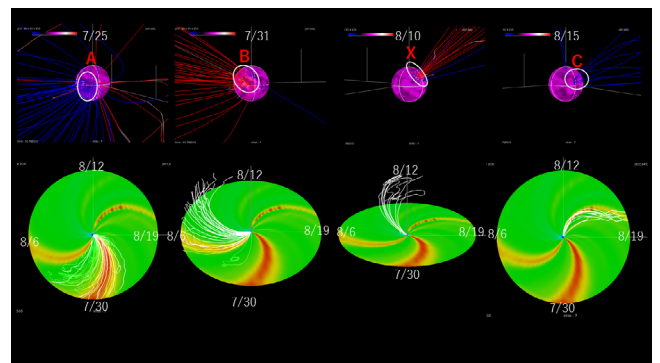


図4 図3のシミュレーションのCHからの磁力線とそこから発したと考えられる太陽風速度のカラーコンター([7]からの引用)

CH と高速風領域の関係が明らかになっている。図5はL1点での太陽風速度(上段シミュレーション、中段DSCOVRによる観測データ)と地磁気じょう乱の重要度を示すローカルな地磁気K指数(下段)である。K指数の黄色や赤い棒は地球の地磁気水平成分にじょう乱があったことを示している。黄色い半透明部分は高速太陽風領域でA、B、Cのラベルを付けたCHに対応している。青い半透明部分はCME通過によるもので、これについては本研究では扱わない。灰色の半透明部分は観測データでは高速風が来ているが、シミュレーションでは見られない領域である。図4ではラベルXのCHから出た磁力線は高緯度へ行っており、地球軌道に達していない。この差異は磁力線の形状を示すexpansion factorの評価による可能性がある。また興味深いのはラベルCのCHと高速風である。L1点で中程度の速度の太陽風が観測されており、またシミュレーションでもそれに対応するCHと高速風が見られるが、SDOの画像データではCHの確認が困難になっている。このようにSDOからでは予測できないが、L1点での高速風の原因をシミュレーションから推測することができる。

図6と7は運用中のシミュレーション結果を示すWeb page画面である。2018年6月16日のGONG磁

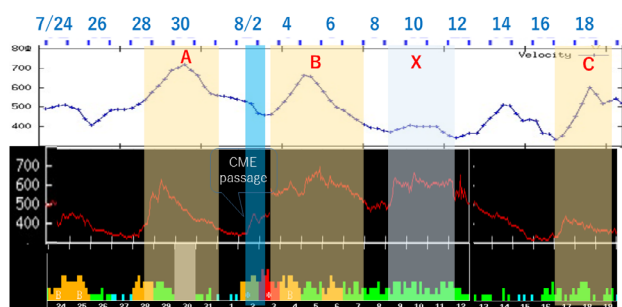


図5 L1点での太陽風。上段二つがシミュレーション、中段二つがDSCOVR衛星による観測データ。最下段が柿岡地磁気観測所によるK指数。

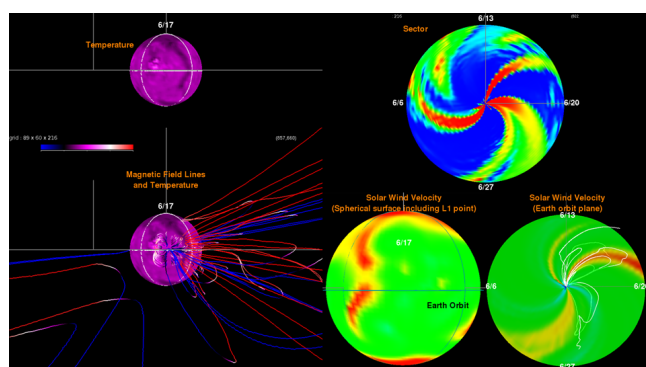


図6 運用モデルのシミュレーション結果。コロナの温度のカラーマップ(左上、下)、セクター構造(右上)、太陽風速度のカラーコンター(下段中、右)。左下図で、実線は磁力線を表し、赤はAway、青はToward。

場観測データを入力にして6月17日のCHと太陽風を予測している。図6左上は太陽コロナの温度のカラーマップで暗い部分がCHに相当する。左下はCHから発する磁力線であるが、開いていることが分かる。右上は太陽磁場の方向を色分けで示しており、赤はAway(太陽から地球方向)、青はToward(地球から太陽方向)でセクター構造と呼ばれている。円の周囲の数字は地球が位置する日を示す。右下二つは太陽風速度のカラーマップで、右端は地球軌道面、その左隣は太陽からL1点までの距離を半径とした球面上に投影したもので、上下が南北方向である。右上図と同様に数字は地球の位置を示している。図7はシミュレーションによるL1点での太陽風の密度、速度、温度、磁場強度と南成分のプロットで、水色のハッチ部分が6月17日の予測になっている。また検証のために該当するCHのSDO観測データとDSCOVRの太陽風観測データを図8(a)、(b)に示した。CHはおおよそ再現されており、またL1点での太陽風速度は期間によって定量的には過小評価、過大評価が見られるが定性的に

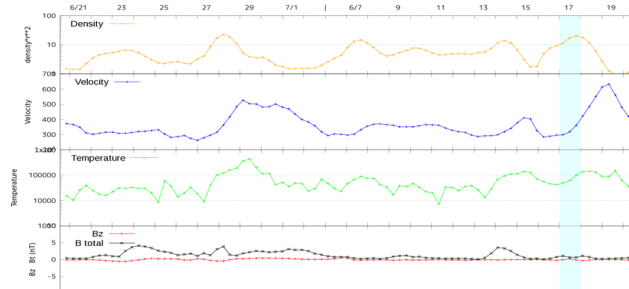


図7 図6と同様、運用モデルのシミュレーション結果でL1点での太陽風のプロット図 上から密度、速度、温度、磁場強度と南北成分

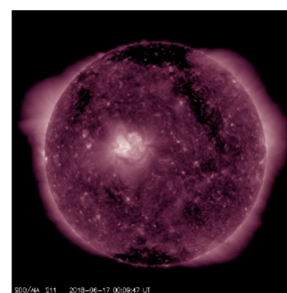


図8 (a) 図6に対応するSDO AIA211の観測データ

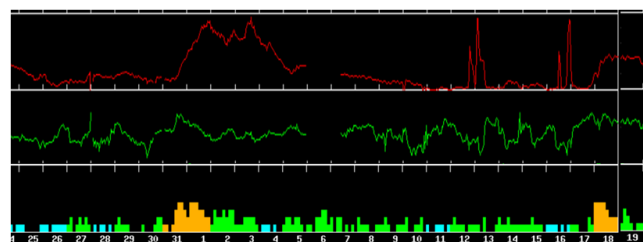


図8 (b) 図7に対応するDSCOVR観測データ

は高速風到来の予測ができています。本システムは1日に1度更新され、機構内Webで参照可能になっている。

4 まとめと今後の展望

我々はCHとグローバルな太陽風構造を再現できる3次元MHDシミュレーションモデルREPPUを開発した。またCHとこれに伴う高速太陽風を再現できることを示し、CHから出る磁力線を明示することによりCHと高速太陽風の関係が同定できることが分かった。本モデルは2018年2月末より運用を開始しており、自動実行のためのシステム構築について述べ、運用モデルの結果の例を示した。

ここに紹介したモデルは解像度が不十分なため、面積の小さいCHやCHの境界を明確に表せておらず、この点でまだCHと高速太陽風との対応付けが不十分である。この問題を解決するため、現在高解像度版REPPUを開発し、並行して運用を行っている。

今後は日々のシミュレーション結果と観測を比較しつつ加熱モデルの精緻化などに取り組んで行くことを考えている。

謝辞

本業務の一部は、総務省委託業務「0155-0099 電波伝搬の観測・分析等の推進」によって行われたものである。入力データや結果の評価に用いている観測データを提供している次の機関 the Global Oscillation Network Group (GONG) program, Sola Dynamics Observatory, NOAA DSCOVR satellite team, and Kakioka Magnetic Observatory に感謝します。

【参考文献】

- 1 D. Shiota and R. Kataoka, "Magnetohydrodynamic simulation of interplanetary propagation of multiple coronal mass ejections with internal magnetic flux rope (SUSANOO-CME)," R. Space Weather, vol.14, p56, 2016.
- 2 D. Odstrcil, V.J. Pizzo, and C.N. Arge, "Propagation of the 12 May 1997 interplanetary coronal mass ejection in evolving solar wind structures," J. Geophys. Res., vol.110, A02106, 2005.
- 3 A. Nakamizo, T. Tanaka, T., Y. Kubo, S. Kamei, H. Shimazu, and H. Shinagawa, "Development of the 3-D MHD model of the solar corona-solar wind combining system," J. Geophys. Res., vol.114, A07109, 2009.
- 4 G., Toth, I.V. Sokolov, T.I. Gombosi et al., "Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community," J. Geophys. Res., vol.110, A12226, 2005.
- 5 P. Riley, P., J.A. Linker and Z. Mikic, "An empirically-driven global MHD model of the solar corona and inner heliosphere," J. Geophys. Res., vol.106, 15889, 2001.
- 6 T. Tanaka, "Finite volume TVD scheme on an unstructured grid system for three-dimensional MHD simulation of inhomogeneous systems including strong background potential fields," J. Comp. Phys., vol.111, 381, 1994.
- 7 M. Den, T. Tanaka, Y. Kubo and S. Watari, "High Speed Solar Wind Forecast Model From The Solae Surface To 1AU Using Global 3D MHD

Simulation," International Astronomical Union 2018. doi:10.1017/S1743921317011607

- 8 M. Den, T. Tanaka, Y. Kubo, and S. Watari, "Three-dimensional MHD simulation of the solar wind from the solar surface to 400 solar radius using REPPU (REProduce Plasma Universe) code," Proceedings of Science, ICRC2015, 184, 2015.
- 9 M. Kojima et al., "Fast solar wind after the rapid acceleration," J. Geophys. Res., vol.109, A04103, 2004.



田 光江 (でん みつえ)

電磁波研究所
電磁波伝搬研究センター
宇宙環境研究室
研究員
博士(理学)
宇宙物理学

田中高史 (たなか たかし)

電磁波研究所
電磁波伝搬研究センター
宇宙環境研究室
協力研究員/
九州大学名誉教授
博士(理学)
磁気圏物理学



久保勇樹 (くぼ ゆうき)

電磁波研究所
電磁波伝搬研究センター
宇宙環境研究室
研究マネージャー/
宇宙天気予報グループ
グループリーダー
博士(学術)
太陽物理学、予報評価技術



巨 慎一 (わたり しんいち)

電磁波研究所
電磁波伝搬研究センター
宇宙環境研究室
博士(理学)
太陽地球系物理学