

太陽地球圏環境予測プロジェクト (PSTEP)

課題責任者

草野 完也 名古屋大学宇宙地球環境研究所

著者

草野 完也*¹

*¹ 名古屋大学宇宙地球環境研究所

太陽フレアは太陽黒点に起源をもつ磁場に蓄積されたエネルギーが突発的に解放される太陽系最大の爆発現象である。巨大太陽フレアは強力な電磁波、磁化された超音速プラズマ流（コロナ質量放出：CME）、高エネルギー粒子を惑星間空間に放出し、地球環境や人工衛星・航空・通信・電力などの社会基盤にも大きな影響を与える場合がある。それゆえ、巨大太陽フレアの発生を事前に予測することはその社会影響を軽減するためにも必要とされている。しかし、太陽フレアの発生機構が十分に解明されていなかったため、その予測はこれまで経験的な手法に依存していた。我々は電磁流体力学に基づき巨大太陽フレアの発生に至る過程を再現すると共に、その発生と影響を正確に予測するためのシミュレーション研究を進めている。そのため2010年6月から2022年3月までに観測された大型黒点を持つ太陽活動領域の3次元磁場を非線形フォースフリー場モデルに基づいて計算し、データベースとして公開した。

キーワード：太陽フレア、電磁流体力学、宇宙天気、予測、太陽黒点、NLFFF

1. はじめに

宇宙開発と社会の高度な情報化にともない、宇宙環境の変動は現代社会を支える基盤にも直接影響を与える時代が到来しつつある。特に、巨大太陽フレアは人工衛星、航空、通信、測位、電力システムに大きな被害を与える場合があり、現代社会における潜在的なリスクになっている。実際、1989年にカナダのケベック州で巨大太陽フレアによって大規模な停電が発生している。また、2000年には日本のX線天文衛星「あすか」が巨大太陽フレアの影響を受けて姿勢制御を失い大気圏に突入する事故が発生している。

こうした太陽フレアの影響や被害を未然に防ぐため、太陽フレアの発生を事前に予測する取り組みが各国の宇宙天気予報機関で行われている。しかし、太陽フレアの発生機構は未だ十分に解明されていないため、これまでのフレア予測は過去のデータから求めた黒点の大きさや形状と太陽フレアとの相関を基にした経験予測に頼らざるを得ない状況にある。しかし、巨大フレアは稀にしか起きない現象であるため、そうした経験予測の精度は高くない。

こうした状況を改善するため、我々は物理理論に基づく新しい太陽フレア発生予測法（ κ スキーム）を開発し、地球シミュレータを用いた計算をもとにフレア発生領域と非フレア発生領域の統計的な比較を通して、その高い予測能力を実証した。2021年度はこの新しい予測スキームに必要な太陽コロナの3次元磁場（非線形フォースフリー磁場：NLFFF）のデータベースを地球シミュレータで計算し、公開した。

2. κ スキームとフォースフリー磁場

κ スキームは大規模なプラズマ現象を説明する電磁流体力学（Magnetohydrodynamics: MHD）理論に基づいている。我々が見出した太陽表面で発生する新しいMHD不安定性のモデル（ダブルアーク不安定性モデル）によると、磁力線の捻じれ磁束とそれを覆う磁束の比として定義される新しい物理パラメタ（ κ パラメタ）が、臨界値（ ~ 0.1 ）を超えると、ダブルアーク不安定性が成長し、プラズマ中に流れる電流にかかる力（ローレンツ力）によって磁束管が太陽表面から宇宙空間へ噴出する[1]。太陽表面の近くで向きの違う磁力線の一部が繋ぎ換わる現象（磁気リコネクション）が起きると捻じれ磁束が増加するので、このモデルは小規模な磁気リコネクションをトリガとして太陽フレアが発生することを定量的に説明するものである（図1）。

κ スキームはこの不安定性理論に基づき、どれほどの大きさの領域で磁力線の繋ぎ換えが起きれば、太陽フレアが発生するかを計算するものである。太陽フレアは太陽表面で磁場の向きが変わる磁気中性線（PIL）の近傍で発生することが知られている。 κ スキームは磁気中性線上の全ての点で、フレアが発生するために必要な磁力線の繋ぎ換えが起きる領域の大きさ（臨界半径： r_c ）を求めることができる。さらに、このスキームはそれぞれの点で、もしフレアが発生した場合、どれほどのエネルギーが放出され得るか（解放可能エネルギー： E_p ）を計算することもできる。これによって磁気中性線上のそれぞれの場所で発生し得る太陽フレアの規模の推定が可能となる。それ故、もし磁気中性線上のある点を中心としてより小さな領域における磁力線の繋ぎ換えが非常に大きなエネルギーを放出する不安定性を駆動できる場合に、巨大フレ

アがその点から発生する可能性が高いと予測することが可能になる。

我々は第 24 太陽周期に太陽中心付近で発生した X2 クラス以上の大規模フレアを解析し、 κ スキームが約 8 割の大規模フレアをその発生点まで正確に予測できることを実証した [2]。

ただし、 κ スキームでは磁力線の捻じれ磁束を使うため、磁場の 3 次元構造を必要とする。一方、偏光分光観測によって求められる磁場は太陽表面（光球面）のみであり、コロナ磁場を直接観測することはできない。それゆえ、我々は平衡状態にある太陽コロナ磁場をフォースフリー方程式

$$\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$$

を満たす非線形フォースフリー磁場 (NLFFF) を数値的に解くことにより近似的に求めた。ここで、 α は磁力線ごとに値が決まる擬スカラー場であり、境界条件によって決定される。それゆえ、観測された光球面磁場を境界条件としてこの方程式を解くことができる。

3. 非線形フォースフリー場データベース

我々は、米国 NASA の太陽観測衛星「Solar Dynamics

Observatory (SDO)」に搭載されている Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) が観測した太陽表面磁場の Spaceweather HMI Active Region Patch (SHARP) データベースを用いて NLFFF を求めた。SHARP データベースは太陽表面の活動領域ごとに、太陽表面に接する直交座標系に変換した磁場を提供している。

これを境界条件として MHD 緩和法 [3] により NLFFF のデータベース (ISEE NLFFF database) を構築し、名古屋大学宇宙地球環境研究所より公開した [4]。このデータベースは現在までに 2010 年 6 月から 2022 年 3 月までに太陽中心付近（中心子午線より ± 50 度以内）で観測された大型黒点を持つ 208 の活動領域について、2288 データを含んでおり、読み出しソフトウェア (IDL, Python, Fortran) と共に公開されている。

4. 本成果の意義と今後の計画

非線形フォースフリー磁場はフレア発生の予測と共に、様々な太陽活動の解析にとって有用である。NLFFF の計算

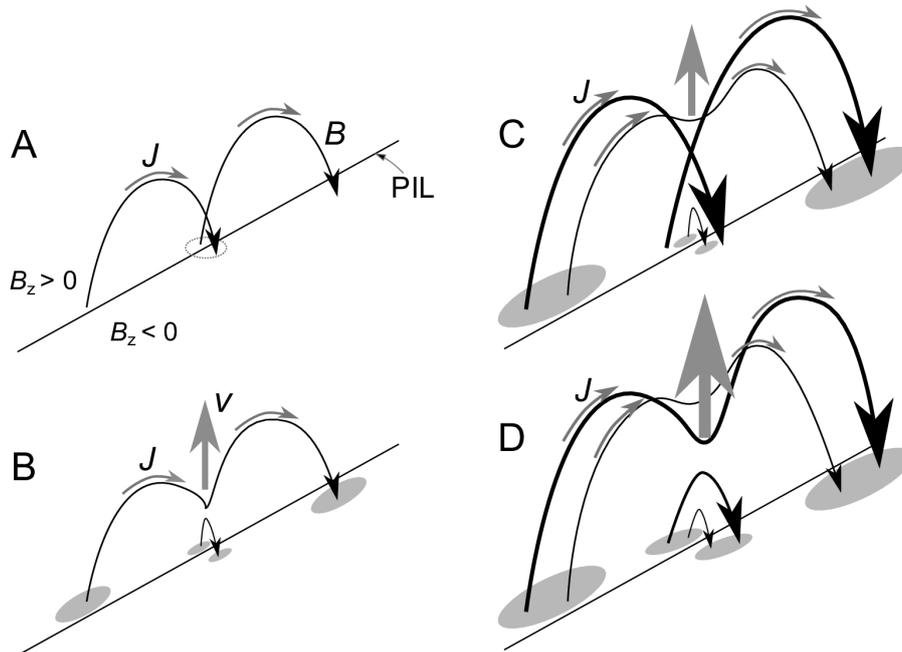


図 1：ダブルアーク不安定性による太陽フレアの発生機構。A：フレアが発生する前の太陽面上の活動領域が持つ磁場の構造。磁気中性線の上に電流を伴った捻じれた磁力線がある。これらがエネルギーを蓄積している。その後、磁力線の一部が磁気中性線上の小さな領域で繋ぎ換わる。B：磁力線の繋ぎ換わり（磁気リコネクション）の結果として、ダブルアーク型（M 字型）の磁力線が形成される。磁気リコネクション領域が臨界半径を超えるとダブルアークが不安定化し、上昇を開始する。繋ぎ換わった磁力線が太陽表面に繋がる点（磁力線の「足」）でフレア発光が始まる。C：ダブルアークの上昇と共にダブルアークを覆う磁力線が上方へ引き延ばされ、ダブルアークの下で衝突することで、新たな磁力線の繋ぎ換えが起きる。D：ダブルアークを覆う磁力線が繋ぎ換わり、ダブルアークに流れる電流が増加することでダブルアークの上昇が加速する。その後、ダブルアーク不安定性と磁気リコネクションが相乗的に拡大し、フレアが爆発的に発達する。文献 [2] の図 1 より引用。

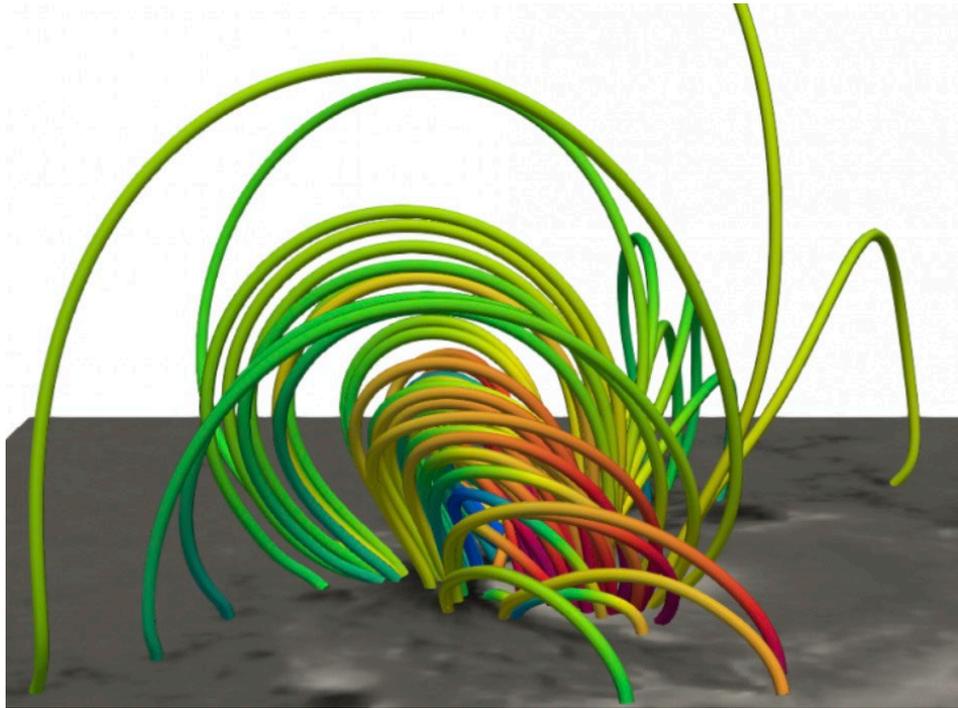


図2：ISEE NLFFF データベースによる太陽活動領域の磁力線構造解析の一例

には高速計算が必要であるため、これまで系統的なデータベースは存在しなかった。それゆえ、世界初のNLFFFデータベースである本データベースは、太陽フレア予測の高度化と太陽磁場構造の解析研究に大きな貢献をするものと考えられる。

謝辞

この研究は文部科学省科学研究費補助金新学術領域(研究領域提案型)「太陽地球圏環境予測：我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成(領域代表者：草野完也)」(2015年度～2019年度)のもとで行われたものです。また、本研究の一部は文部科学省科学技術試験研究委託事業「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発『生命を育む惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明(研究代表者：牧野淳一郎)』の一環として実施されました。本研究では海洋研究開発機構(JAMSTEC)地球シミュレータ、名古屋大学情報基盤センタースーパーコンピュータシステム、名古屋大学宇宙地球環境研究所統合データサイエンスセンターCIDASシステムが利用されました。本研究で利用した太陽観測データは米国NASAのLiving with a Star(LWS) Programミッションである太陽観測衛星「ソーラー・ダイナミクス・オブザーバトリー(SDO)」で取得されたものです。

文献

- [1] Ishiguro, N. & Kusano, K., “Double Arc Instability in the Solar Corona”, *The Astrophysical Journal*, 843(2), 101 (2017).
- [2] Kanya Kusano, Tomoya Iju, Yumi Bamba, Satoshi Inoue, “A physics-based method that can predict imminent large solar flares”, *Science*, 369 (6503), 587 (2020).
- [3] Inoue S, Magara T, Pandey VS, Shiota D, Kusano K, Choe GS, et al. Nonlinear Force-free Extrapolation of the Coronal Magnetic Field Based on the Magnetohydrodynamic Relaxation Method. *Astrophys J.*, 780 (101), 2014
- [4] K. Kusano, H. Iijima, T. Kaneko, S. Masuda, T. Iju, and S. Inoue, “ISEE Database for Nonlinear Force-Free Field of Solar Active Regions,” *Hinode Science Center, Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University*, 2021. doi: 10.34515/DATA.HSC-00000

Project for Solar-Terrestrial Environment Prediction (PSTEP)

Project Representative

Kanya Kusano Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Author

Kanya Kusano *¹

*¹Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Solar flares are the biggest explosion in the solar system that affect Earth's space weather. The mechanism that drives the onset of solar flares is unknown, hampering efforts to forecast them, which mostly rely on empirical methods. We are conducting simulation research to reproduce the process leading to giant solar flares based on magnetohydrodynamics, and to accurately predict their occurrence and influences. Therefore, the three-dimensional magnetic field of large solar active regions observed from June 2010 to March 2022 was calculated based on the nonlinear force-free field model and released it as an open database.

Keywords : solar flares, magnetohydrodynamics, space weather, prediction, sunspots, NLFFF

1. Introduction

Solar flares emit sudden, strong bursts of electromagnetic radiation from the solar corona, and eject plasma and energetic particles into inter-planetary space. Since large solar flares can cause severe space weather disturbances affecting Earth, it is crucial to predict large flares to mitigate their impact. However, as the onset mechanism of solar flares is unclear, most flare prediction methods so far have relied on empirical methods.

To improve this situation, we have developed a new solar flare prediction method (κ scheme) based on physics theory, and statistically confirm the high predictability of this new method by statistically analyzing the data of flaring active regions in the solar cycle 24. In FY2021, we developed and released the database of the three-dimensional magnetic field (non-linear force-free magnetic field; NLFFF) of the solar corona, which have been calculated for the flare prediction study by the Earth Simulator.

2. κ scheme and force-free magnetic field

The κ scheme is based on the magnetohydrodynamics (MHD) theory, which explains large-scale plasma phenomena. We developed the new model of MHD instability that occurs on the surface of the sun (called double-arc instability). Through this study, we have found, a new physical parameter (κ parameter) defined as the ratio of the magnetic twist flux to the overlying magnetic flux determines the occurrence of the double-arc instability. When κ exceeds the critical value (~ 0.1), the double-arc instability can grow, and the magnetic flux tube is ejected from the solar surface, resulting in a flare [1].

Based on this theory of instability, the κ scheme

calculates the critical size of magnetic reconnection which causes solar flares by increasing the magnetic twist. Solar flares are known to occur near the magnetic neutral line (PIL), where the magnetic polarity is reversed on the solar surface. The κ scheme can also calculate how much energy can be released if flares occur. This makes it possible to estimate the magnitude of solar flares that can occur at each location on the PIL.

However, since the κ scheme uses the magnetic twist flux, a three-dimensional structure of the magnetic field is required. On the other hand, the magnetic field in the corona is not measurable, we have to reconstruct the three-dimensional magnetic field by solving the nonlinear force-free field (NLFFF) equation,

$$\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}.$$

Here, α is the force-free parameter determined by the boundary condition on the solar surface.

3. NLFFF database

We used the Spaceweather HMI Active Region Patch (SHARP) of the solar surface magnetic field observed by the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) onboard NASA's Solar Dynamics Observatory (SDO) to calculate NLFFF. The SHARP database provides the magnetic field converted into a Cartesian coordinate system contacting the solar surface for each active region.

Using it as the boundary condition, the NLFFF database (ISEE NLFFF database) was constructed based on the MHD relaxation method [3]. The database was released from the Institute for Space-

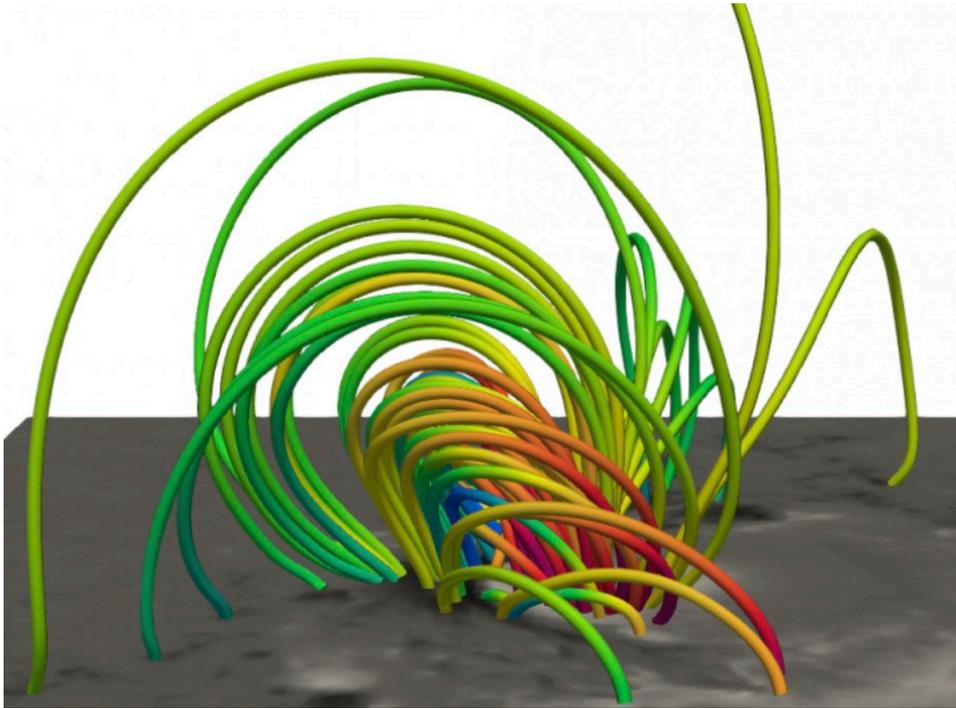


Fig.1 : An example of three-dimensional magnetic field of solar active region analyzed using the ISEE NLFFF database.

Earth Environmental Research, Nagoya University [4]. This database contains 2288 data for 208 active regions with large sunspots observed near the center of the Sun (within ± 50 degrees from the central meridian) from June 2010 to March 2022 to date. We provided also the readout software (IDL, Python, Fortran). Figure 1 shows an example of three-dimensional magnetic field plotted using the ISEE NLFFF database.

4. Results and future plans

NLFFFs are useful for predicting solar flares as well as for analyzing various solar activities. Until now, there was no systematic database of NLFFF because the calculation of NLFFF requires heavy computation. Therefore, our database, which is the world's first NLFFF database, is considered to make a great contribution to the advancement of solar flare prediction and the research of the solar magnetic field structure.

Acknowledgement

This work was supported by MEXT/JSPS KAKENHI JP15H05814, MEXT as “Exploratory Challenge on Post-K computer” and JAMSTEC. Part of this work was carried out by using the computational resources of the Center for Integrated Data Science, Institute for Space-Earth Environmental Research

(ISEE), the supercomputer systems at the Information Technology Center, Nagoya University, and the Earth Simulator at JAMSTEC. The SDO is a mission for NASA’s Living with a Star Program.

References

- [1] Ishiguro, N. & Kusano, K., “Double Arc Instability in the Solar Corona”, *The Astrophysical Journal*, 843(2), 101 (2017).
- [2] Kanya Kusano, Tomoya Iju, Yumi Bamba, Satoshi Inoue, “A physics-based method that can predict imminent large solar flares”, *Science*, 369 (6503), 587 (2020).
- [3] Inoue S, Magara T, Pandey VS, Shiota D, Kusano K, Choe GS, et al. Nonlinear Force-free Extrapolation of the Coronal Magnetic Field Based on the Magnetohydrodynamic Relaxation Method. *Astrophys J.*, 780 (101), 2014
- [4] K. Kusano, H. Iijima, T. Kaneko, S. Masuda, T. Iju, and S. Inoue, "ISEE Database for Nonlinear Force-Free Field of Solar Active Regions," Hinode Science Center, Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, 2021. doi: 10.34515/DATA.HSC-00000