

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を少数の例外を除いてその位置まで正確に予測することができる新たな方法を開発し、2008年から2019年に発生した巨大フレア領域と大型黒点領域の太陽表面磁場観測データを比較することにより、その予測能力を検証した。その結果に基づき太陽フレアの発生が亜臨界分岐構造の遷移として理解できることを提唱する。

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

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社会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。

2. 太陽フレアの物理予測

我々はまず、大規模なプラズマ現象を説明する電磁流体力学 (Magnetohydrodynamics: MHD) 理論に基づいて太陽表面で発生する新しい不安定性のモデル (ダブルアー

ク不安定性モデル) を構築することで、太陽フレアの発生を決定づける新しい物理パラメタ (κ パラメタ) を導いた [1]。このモデルは、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) の結果として、MHD不安定性の一種であるダブルアーク不安定性が成長し、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)。

このモデルに基づき、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数値スキーム (κ スキーム) を開発した。太陽フレアは太陽表面で磁場の向きが上向きから下向きに変わる場所 (磁気中性線: PIL) の近傍で発生することが知られている。開発された 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。

これは山に降り積もった雪にどれほどの亀裂が現れれば、どれほどの大きさの雪崩が発生するかを知ることができることに対応する。すなわち、安定性を失いつつある領域ではわずかな擾乱 (雪山では降り積もった雪の亀裂、太陽では磁力線の繋ぎ替え) が、不安定化のトリガとなることから、不安定化のトリガとなる擾乱の臨界値から太

陽フレアや雪崩の発生を予測することができると考えられる。

3. 太陽フレア予測の実証

我々は、 κ スキームを米国 NASA の太陽観測衛星「ソーラー・ダイナミクス・オブザーバトリー (SDO)」が観測した太陽表面の磁場データに適用し、地球シミュレータ及び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を利用して太陽コロナ中の 3 次元磁場を再現することにより、過去 10 年間に太陽中心から太陽経度 ± 50 度以内に現れた約 200 の大型黒点を持つ活動領域の解析を行った。この活動領域のうち、7 領域だけが巨大太陽フレア (GOES X 線クラス X2 以上) を起こしている。この巨大太陽フレアを起こさなかった領域をグループ 1、起こした 7 領域をグループ 2 として比較した。

その結果 (図 2)、グループ 2 のうち 6 領域では臨界半径が 1,000km 以下で解放可能エネルギーが 4×10^{31} erg 以上である点が巨大フレアの発生前に存在していた。一方、グループ 2 ではそうした点は存在していなかった。この結果は、 κ スキームが少数の例外を除いて巨大フレアの発生の前兆を磁場観測から捉えることができることを示

している。

4. 本成果の意義と今後の計画

従来の太陽フレア予測は経験的な手法に依存していた。これに対して本研究は、物理法則に基づいて導いたフレア発生条件をもとに巨大太陽フレアをその発生位置まで正確に予測できることを世界で初めて実証したものである。それゆえこの成果は、今後の宇宙天気予報の精度向上につながるものと期待される。現在、我々は日本の宇宙天気予報業務を担っている国立研究開発法人情報通信研究機構宇宙天気予報センターと協力し、宇宙天気予報の高度化に向けた検討を開始している。さらに、ダブルアーク不安定性モデルを拡張し、噴出型フレアやコロナ質量放出の予測にも応用する試みも進めた[3]。

本研究の成果は太陽フレア発生前の状態が安定であるが、一定の擾乱 (磁気リコネクション) に対して不安定化する亜臨界分岐構造を持つことを示唆している。それ故、巨大太陽フレアに関する本研究の成果は太陽のみならず多くの恒星や活動的な天体で起きている宇宙プラズマにおける爆発現象の理解にも幅広く貢献するものと期待される。

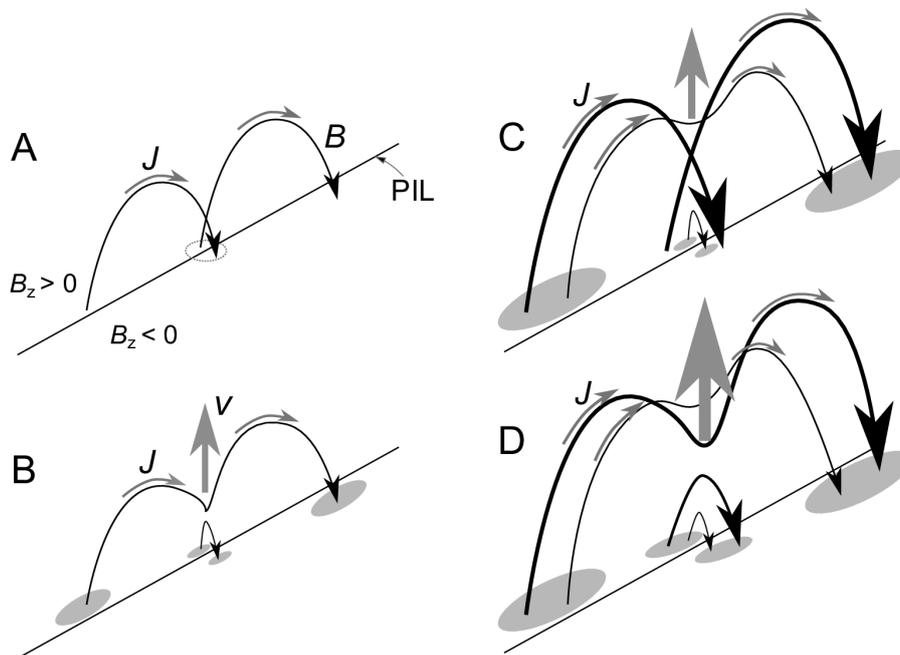


図 1: ダブルアーク不安定性による太陽フレアの発生機構。A: フレアが発生する前の太陽面上の活動領域を持つ磁場の構造。磁気中性線の上に電流を伴った捻じれた磁力線がある。これらがエネルギーを蓄積している。その後、磁力線の一部が磁気中性線上の小さな領域で繋ぎ換わる。B: 磁力線の繋ぎ換わり (磁気リコネクション) の結果として、ダブルアーク型 (M 字型) の磁力線が形成される。磁気リコネクション領域が臨界半径を超えるとダブルアークが不安定化し、上昇を開始する。繋ぎ換わった磁力線が太陽表面に繋がる点 (磁力線の「足」) でフレア発光が始まる。C: ダブルアークの上昇と共にダブルアークを覆う磁力線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。

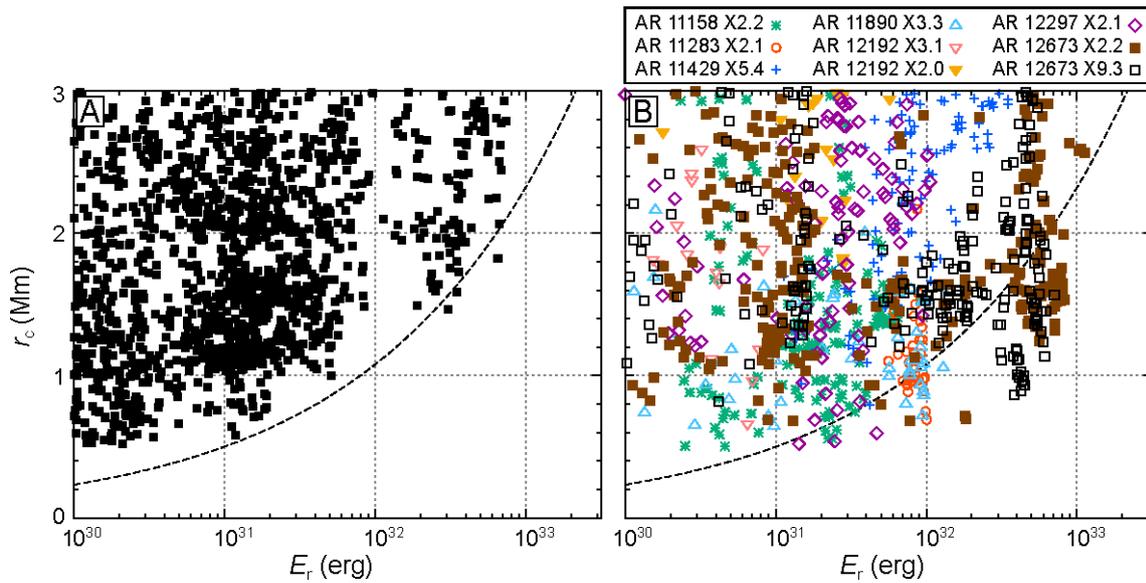


図2: κ スキームによる第24太陽周期における活動領域の安定性解析。グループ1 (A) とグループ2 (B) の活動領域の磁気中性線上の点における解放可能エネルギー (E_r) と臨界半径 (r_c) を表す。グループ2のマークは活動領域と発生したフレアの規模を意味する。破線は自己相似解における関係 $r_c \propto E_r^{1/3}$ を示す。文献[2] Fig. 4をもとに作成。

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] Lin PH, Kusano K, Shiota D, Inoue S, Leka KD, Mizuno Y. “A New Parameter of the Photospheric

Magnetic Field to Distinguish Eruptive-flare Producing Solar Active Regions”. Astrophys J. 894, 20 (2020).

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 developed a new physics-based model (κ -scheme) to predict large solar flares through a critical condition of magnetohydrodynamic (MHD) instability, triggered by magnetic reconnection. Analysis of the largest (X-class) flares from 2008 to 2019 (during solar cycle 24) shows that the κ -scheme predicts most imminent large solar flares even for the precise location with a small number of exceptions. Based on the results, we proposed that the onset of solar flares can be explained as the transition between a stable branch to an unstable branch in the sub-critical bifurcation.

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

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, to

mitigate their impact their occurrence needs to be predicted. However, as the onset mechanism of solar flares is unclear, most flare prediction methods so far have relied on empirical methods. We recently succeeded in developing the first physics-based model that can accurately predict imminent large solar

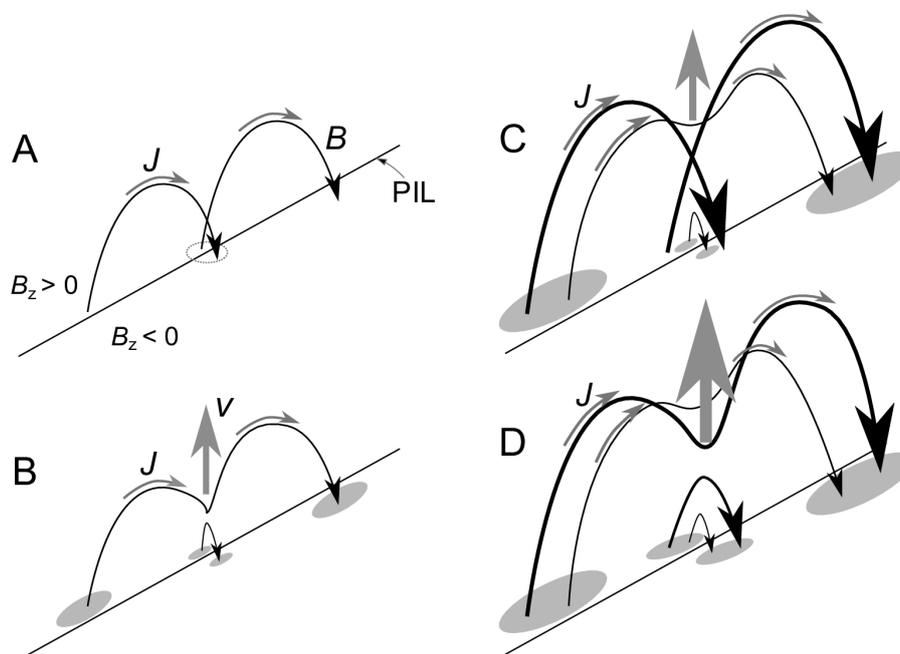


Figure 1: Schematic illustration of the sequence (A to D) of our proposed solar flare onset model. The curved black lines represent the magnetic field (B), and the curved gray arrows are the electric current (J). The vertical arrows show the ascending motion (V) caused by the magnetohydrodynamic instability. The straight line represents the magnetic polarity inversion line (PIL)—the boundary between positive and negative values of the vertical magnetic field B_z on the solar surface. Ellipses illustrate the bright flare ribbons on the foot points of reconnected magnetic field lines. From Fig. 1 of Ref. [2].

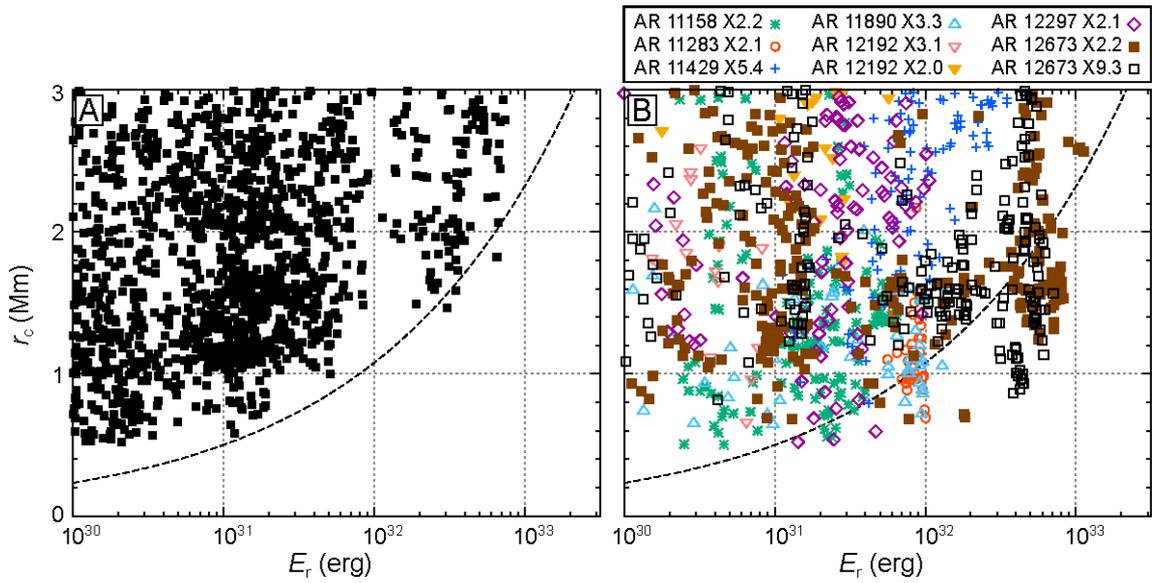


Figure 2: Stability analysis results for the ARs in solar cycle 24. A and B are for the ARs of groups 1 and 2, respectively. The critical size of reconnection r_c and the releasable energy E_r for all points on the PILs in high free energy regions are plotted. For group 2, AR numbers are indicated by the symbols shown in the legend. The dashed curve represents the self-similar scaling relationship $r_c \propto E_r^{1/3}$. From Fig. 4 of Ref. [2].

flares.

2. Physics-based prediction of solar flares

The new method of flare prediction, called the κ -scheme, is based on the theory of “double-arc instability,” that is a magnetohydrodynamic (MHD) instability triggered by magnetic reconnection [1]. We assumed that a small-scale reconnection of magnetic field lines can form a double-arc (m-shape) magnetic field and trigger the onset of a solar flare (Fig. 1). The κ -scheme can calculate the critical radius (r_c) of magnetic reconnection which may trigger the instability and the energy which can be released by the instability for each point of the magnetic polarity inversion line (PIL) [2].

The predictive model was tested on about the two groups of active regions (ARs) during solar cycle 24 from 2008 to 2019 using data obtained by NASA’s Solar Dynamics Observatory (SDO) satellite. Group 1 consists of 198 ARs with the largest sunspot areas and includes only data for each AR observed at 00:00 UT for the day when the AR was located nearest the central meridian of the Sun. None of the ARs of group 1 produced solar flares larger than class X2 within 20 hours after the observation. Group 2 comprises the seven ARs that produced all flares of class X2 or stronger within solar latitudes $\pm 50^\circ$ during solar cycle 24.

Figure 2A-B shows r_c and E_r for all points on the PILs in high-free energy regions of Groups 1 and 2. None of the ARs in Group 1 satisfied the conditions $r_c < 1$ Mm and $E_r > 2 \times 10^{31}$ erg, and most of the points had a higher r_c than expected for self-similar scaling, $E_r \propto l^3$ and $r_c \propto l$ for the length-scale l . In contrast, six ARs except only one in Group 2 satisfied the condition $r_c < 1$ Mm and $E_r > 4 \times 10^{31}$ erg before the flares. It was demonstrated that with

few exceptions, the κ -scheme predicts most imminent solar flares.

Recently, we applied the theory of the double-arc instability to the prediction of eruptive flares and coronal mass ejections (CMEs) [3]. The results suggest the potential of the physics-based methods to predict the various space weather phenomena.

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] Lin PH, Kusano K, Shiota D, Inoue S, Leka KD, Mizuno Y. “A New Parameter of the Photospheric Magnetic Field to Distinguish Eruptive-flare Producing Solar Active Regions”. *Astrophys J.* 894, 20 (2020).