

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

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

近年、人類の宇宙進出と宇宙利用は急速に拡大している。民間企業による宇宙開発も目覚ましい発展を見せており、民間人が宇宙空間へ滞在する時代も間近に迫っている。しかし、太陽で発生する巨大爆発（フレア及びコロナ質量放出）に起因して宇宙環境（宇宙天気）は激しく変動し、人工衛星や宇宙飛行士のみならず電力、航空、通信ネットワークなどに致命的な障害を与える可能性がある。すなわち、激しい宇宙天気現象は宇宙利用と情報化が進んだ現代社会にとって潜在的なリスクとなっている。

宇宙天気の社会影響や被害を未然に防ぐためには、太陽フレアの発生とその影響を正確に予測する必要がある。我々はそうした取り組みの一環として、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によってその高い予測能力を実証した[1]。

κ スキームは第 23 太陽周期に太陽中心領域で X2 クラス以上の巨大フレアが発生した 7 つの活動領域のうち、6 活動領域で発生した 7 つすべての巨大フレアをその位置まで正確に予測することができた。しかし、唯一、活動領域 NOAA12192 で発生した巨大フレアを予測することはできなかった。本研究では第 1 に、その原因を探るための研究を行った。第 2 に、フレアに伴ってコロナ質量放出(CME)が発生することを予測するためのパラメータを見出すための研究を行った。第 3 に、太陽内部から太陽表面までを含む黒点形成過程のシミュレーションを行い、太陽内部の対流と黒点形成の因果関係を探った。

以下に、 κ スキームの概要を述べると共に、それぞれの研究の概要を報告する。

2. 太陽フレアの物理予測： κ スキーム

κ スキームは我々が見出した新しい電磁流体力学 (Magnetohydrodynamics: MHD) 不安定性 (ダブルアーク不安定性) のモデルに基づいて構築されている。ダブルアーク不安定性は、捻じれ磁束とそれを覆う磁束の比として定義される κ パラメータが臨界値を超えると不安定化する [2]。それゆえ、太陽表面での磁気リコネクションが十分に進むと、不安定なダブルアークが形成され、フレアが発生すると考えられる。そこで、地球シミュレータを用いて数値的に再現した非線形フォースフリー磁場を利用し、

不安定化条件を満たすために必要な磁気リコネクション領域の大きさを見積もることで、フレアを予測するスキームを開発した。

その結果、フレアを駆動するエネルギー源である非ポテンシャル磁場が 1000 ガウスより強い領域で、不安定化に必要な磁気リコネクションの臨界半径が 1 Mm より小さい点を中心に、X2 クラスを超える巨大フレアのほとんどが発生することが見出された。

3. 太陽活動領域 NOAA12192 の解析

太陽活動領域 NOAA12192 は 2014 年 10 月に観測された大型黒点を伴う活動領域であり、多数のフレアを発生させた。特に、この領域では 10 月 24 日 21:07 UT と同 26 日 10:04 UT に、X3.1 及び X2.0 クラスの巨大フレアがそれぞれ発生した。しかし、これらのフレアは κ スキームによる予測条件を満たしていない。そこで、この領域の不安定化条件と自由エネルギーの 3 次元分布の解析を行った。

その結果、この領域では非ポテンシャル磁場の強度が巨大フレアを発生させた他の領域に比べて比較的弱いと共に、空間的にまばらに分布していることが示された (図 1 上)。その結果、不安定化に必要な太陽表面での磁気リコネクション領域の面積が 5 Mm 以上あることも見出された (図 1 下)。

これらの結果はこの領域における巨大フレアの発生機構は他の領域とは異なることを示唆している。例えば、 κ スキームで想定したように一つの磁気リコネクションをトリガとした不安定化ではなく、複数の磁気リコネクションの集積として不安定化するシナリオが考えられる。今後は、こうした複合的な過程を通じた不安定化を想定して、より多くのフレアを予測することができる拡張スキームの開発を進める予定である。

4. 噴出型フレア領域の 3 次元磁場解析

コロナ質量放出 (CME) は太陽磁場と共にコロナプラズマが惑星間空間に放出される現象であり、地球に到達すると磁気嵐の原因となる。それゆえ、CME の発生予測は宇宙天気予報の重要課題である。CME はフレアに伴って発生する場合が多いが、フレアには CME を伴う噴出型フレアと CME を伴わない非噴出型フレアがある。それゆえ、噴出型フレアを的確に予測することが求められるが、噴出型

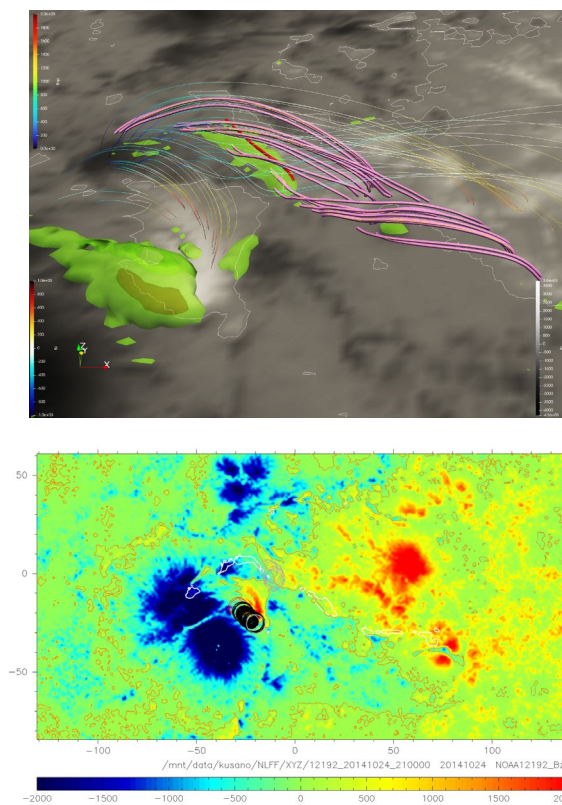


図 1：太陽活動領域 NOAA12192 の 3 次元磁場構造解析。(上図) 磁力線構造と太陽表面の鉛直磁場（グレースケール）。緑色の面は非ポテンシャル磁場強度が 1000G と 2000G の投稿面を表す。(下図) 太陽表面の鉛直磁場（赤と青は正值と負値）。オレンジ線は磁気中性線、白の等高線はフレアリボンの発光領域を示す。黒と灰色の円は κ スキームが予測した不安定化に必要な磁気リコネクション領域の大きさを表す。

フレアを的確に予測する方法は未だに見出されていない。噴出型フレアの原因として考えられるトラス不安定性が成長するためには磁場減衰率が臨界値を超える高さまで磁束管が上昇する必要がある。そこで、非噴出型の巨大フレアが発生した活動領域 NOAA1219 の太陽表面磁場データをもとに数値的に再現した 3 次元磁場を用いて磁場減衰率と磁力線の 3 次元構造を比較する解析を行った。その結果、強く捻じれた磁力線は磁場減衰率の臨界値に到達するが、実際のフレアリボン（太陽表面のフレア発光領域）につながる磁力線は不安定性の臨界領域に到達していないことを明らかにした。このことは、フレアにおける磁気リコネクションの発展が噴出型フレアとなるか否かを決定することを示唆するものである。

5. フレア活動領域の形成過程

フレアや CME のエネルギー源となる磁場のねじれが如何にして形成されるのかを明らかにするため、太陽対流層内における磁束上昇と黒点形成の 3 次元アンサンブルシミュレーションを、富岳を利用して実施した[3]。この

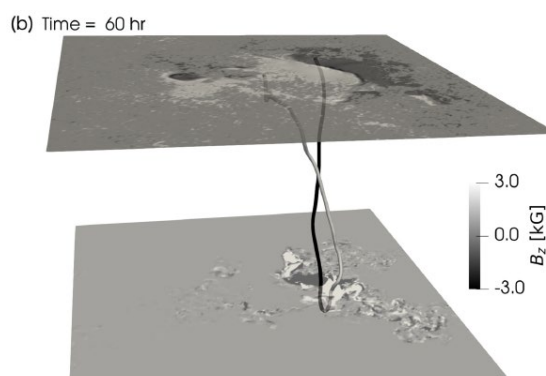


図 2：太陽対流層から太陽表面を含んだ活動領域形成シミュレーションの結果 [3]。上面が太陽表面の磁場（白が正值、黒が負値）を表し、深部につながる磁力線が描かれている。捻じれて磁束管が下降流で変形を受けることにより、捻じれ (Twist) から捩れ (Writhe) へ磁気ヘリシティが変換されることにより表面の双黒点磁場が回転し、非ポテンシャル磁場が強化される。

計算には R2D2 コード[4]を利用し、対流層内の複雑な乱流の効果も考慮した。さらに、その結果を κ スキームで解析する計算を地球シミュレータで実施し、形成された活動領域のフレア発生可能性を評価して、太陽内部の対流層の構造とフレア発生の因果関係を調べた。

その結果、大型フレアを生み出す活動領域が、対流層内の下降流の上部に形成される傾向があることを見出した。これは下降流により上昇した磁束管の衝突が起きると共に、磁束管の捻じれ (Twist) が捩れ (Writhe) に変換することにより、双極黒点の回転を生み出し、コロナ磁場のねじれが生まれるためであることを明らかにした (図 2)。

6. 太陽高エネルギー粒子の加速伝播過程

フレアによって形成される高エネルギー粒子は人工衛星の帯電や宇宙飛行士の被曝など宇宙天気災害の原因となる。それゆえ、その機構を探ることは重要な課題です。我々は太陽フレアの電磁流体力学シミュレーションの結果から、プラズマ粒子（陽子）がどのように加速・伝播するのかを数値的に解析した。その結果から、磁気リコネクションが閉じた磁場から開いた磁場に磁力線構造を変えることが高エネルギー粒子の伝播に重要な影響を与えることを見出した[5]。

文献

- [1] Kusano, K., Iju, T., Bamba, Y., Inoue, S., “A physics-based method that can predict imminent large solar flares” Science, 369 (6503), 587 (2020).
- [2] Ishiguro, N. & Kusano, K., “Double Arc Instability in the Solar Corona” The Astrophysical Journal, 843(2), 101 (2017).
- [3] Kaneko, T., Hotta, H., Toriumi, S., and Kusano, K., “Impact

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

1. Introduction

In recent years, mankind's advancement into space and the utilization of space have expanded rapidly. Space development by private companies is also showing remarkable progress, and the time when civilians will stay in space is approaching. However, solar eruptions (flares and coronal mass ejections) that occur on the sun disturb the space environment (space weather) dramatically and impact the operation of satellites and astronauts, electric power, aviation, and communication networks. In other words, severe space weather events are a potential risk for modern society.

To prevent social impacts and damages caused by space weather, it is necessary to accurately predict the occurrence and influence of solar flares. As part of these efforts, we have developed a new method for predicting the occurrence of solar flares (κ -scheme) based on magnetohydrodynamics and demonstrated its high prediction ability through calculations using the Earth Simulator [1].

The κ scheme can accurately predict the positions of all seven giant flares in 6 of the seven active regions where X2 class or higher flares occurred in the heliocentric central region during the solar cycle 23. However, we could not predict the giant flare that occurred only in the active region NOAA12192. In this study, first, we conducted research to investigate the cause of the failed prediction in that region. Second, we investigated the parameters for predicting the occurrence of coronal mass ejections (CMEs) associated with flares. Third, we simulated the sunspot formation process from the sun's interior to the solar surface and explored the causal relationship between solar interior convection and the formation of flaring active regions.

We describe the outline of the κ scheme in the following section and report the outline of each research.

2. Physics-based Flare Prediction: κ -scheme

The κ -scheme is constructed based on a new model of magnetohydrodynamics (MHD) instability (double-arc instability). Double-arc instability becomes unstable when the κ parameter, defined as the ratio of the twisted flux to the overlying flux, exceeds a critical value [2]. Therefore, if the magnetic reconnection on the solar surface progresses sufficiently, an unstable double arc will form, and a flare will occur. Therefore, we developed a scheme to predict flares by estimating the size of the magnetic reconnection region necessary to meet the

destabilization conditions using a nonlinear force-free magnetic field numerically reproduced using the Earth Simulator.

As a result, we found that, in the region where the non-potential magnetic field, which is the energy source driving flares, is stronger than 1000 Gauss and the critical radius of the magnetic reconnection required for destabilization is smaller than 1 Mm, a large flare exceeding the X2 class was generated.

3. Analysis of Active Region NOAA 12192

Solar active region NOAA12192 is an active region with large sunspots observed in October 2014 and produced many flares. In particular, X3.1 and X2.0 class flares occurred at 21:07 UT on October 24 and 10:04 UT on October 26, respectively. However, these flares do not satisfy the prediction conditions by the κ scheme. Therefore, we analyzed the three-dimensional distribution of the free energy in this region to clarify how this region was destabilized.

As a result, it was shown that the strength of the non-potential magnetic field in this region is relatively weak compared to other regions where the giant flare occurred, and it is spatially sparsely distributed (Fig. 1, top). We also found that the area of the magnetic reconnection region on the solar surface required for destabilization is more than 5 Mm (Fig. 1, bottom).

These results suggest that the mechanism of giant flares in this region differs from that in other regions. For example, instead of the destabilization triggered by a single magnetic reconnection as assumed in the κ -scheme, a scenario in which destabilization occurs as an accumulation of multiple magnetic reconnections is conceivable. In the future, assuming destabilization through such complex processes, we plan to develop an extension scheme that can predict more flares.

4. Three-Dimensional Analysis of Eruptive Flare Region

A coronal mass ejection (CME) is a phenomenon in which coronal plasma is ejected into interplanetary space along with the solar magnetic field, causing a geomagnetic storm when it reaches Earth. Therefore, the prediction of CME is essential for space weather forecasting. There are two types of flares: eruptive flares with CMEs and confined flares without CMEs. It is required to predict the occurrence of eruptive flares, but a method for accurately predicting eruptive flares has yet to be developed.

The torus instability is thought to be the cause of eruptive flares.

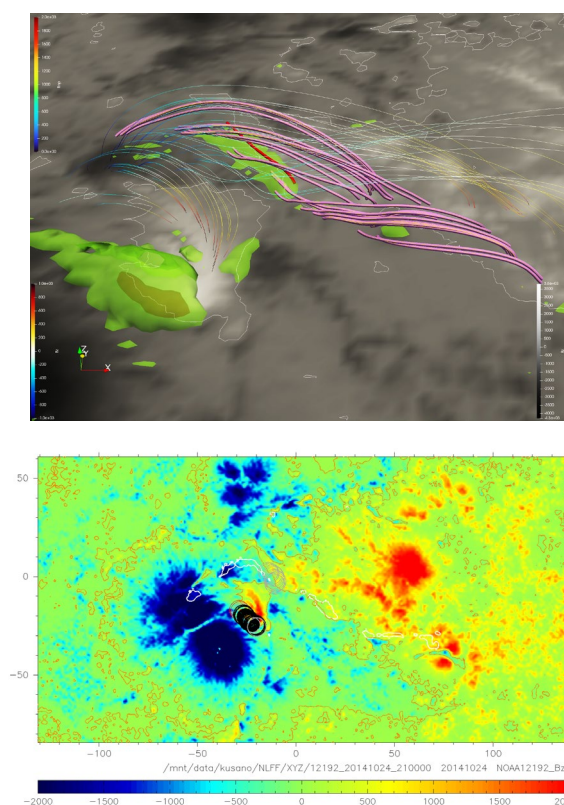


Figure 1: 3D magnetic field structure of the solar active region NOAA12192. (Upper) Magnetic field structure and vertical magnetic field on the surface of the Sun (grayscale). The green surfaces represent the regions with non-potential magnetic field strengths of 1000 G and 2000 G. (Bottom) Vertical magnetic field on the surface of the Sun (red and blue are positive and negative values). The orange line is the magnetic neutral line, and the white contour line shows the emission of the flare ribbon. The black and gray circles represent the size of the magnetic reconnection region required for destabilization predicted by the κ scheme.

To destabilize it, the magnetic flux tube must rise to a height where the magnetic field decay index is larger than the critical value. Therefore, we performed an analysis comparing the decay index and the three-dimensional structure of the magnetic field lines using the nonlinear force-free field numerically reproduced based on the solar surface magnetic field data of the active region NOAA1219, where large confined flares occurred. As a result, it was clarified that although the strongly twisted magnetic field lines reached the critical value of the decay index, the magnetic field lines connecting to the actual flare ribbon did not reach the critical region of instability. This suggests that the evolution of magnetic reconnection in the flare determines whether it becomes an eruptive flare.

5. Formation Process of Flaring Active Regions

To clarify how the magnetic twist, the energy source of flares and CMEs, is formed, a three-dimensional ensemble simulation of magnetic flux emerging and sunspot formation was performed

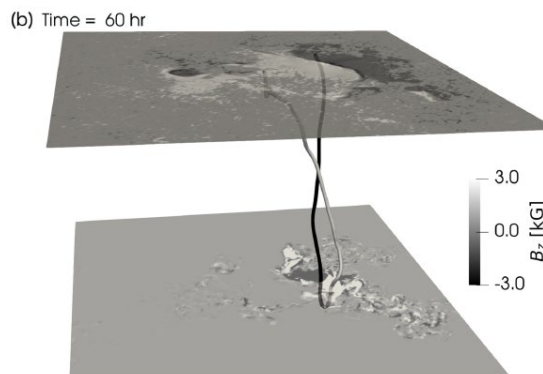


Figure 2: Simulation result of active region formation, including the solar surface from the solar convective zone [3]. The upper surface shows the magnetic field on the solar surface (white is positive, black is negative), and the magnetic field line connecting the active sunspot to the deeper region is plotted. As the flux tube is twisted and deformed by the downward flow, the magnetic helicity is converted from twist to writhe, which rotates the bipolar magnetic field on the surface and strengthens the non-potential magnetic field.

using the Fugaku supercomputer [3]. The R2D2 code [4] was used for this simulation, and the effects of turbulence in the convection zone were also included. Furthermore, we analyzed the results with the κ scheme using the Earth Simulator, evaluated the possibility of flare occurrence in the formed active region, and investigated the causal relationship between the structure of the convection in the Sun's interior and the occurrence of flares.

As a result, we found that the active region that produces large flares tends to form in the upper part of the downdraft in the convection zone. This is because the descending flow causes the collision of the bipolar field on the solar surface and converts the magnetic helicity from the twist of magnetic flux to writhe. It causes a rotation of the bipolar field of sunspots on the surface and generates a twist of the corona magnetic field (Fig. 2). This result suggests a new way to discriminate where the flaring active region will be formed.

6. Acceleration and Propagation of Solar Energetic Particles

High-energy particles formed by flares can cause space weather disasters, such as charging satellites and exposing astronauts to radiation. Therefore, it is an important issue to investigate their mechanism. We have numerically analyzed how plasma particles (protons) accelerate and propagate based on the results of magnetohydrodynamics simulations of solar flares. We found that if magnetic reconnection changes the magnetic field line structure from closed lines to open lines, it has an important effect on the propagation of energetic particles [5].

References

- [1] Kusano, K., Iju, T., Bamba, Y., Inoue, S., "A physics-based

method that can predict imminent large solar flares” *Science*, 369 (6503), 587 (2020).

[2] Ishiguro, N. & Kusano, K., “Double Arc Instability in the Solar Corona” *The Astrophysical Journal*, 843(2), 101 (2017).

[3] Kaneko, T., Hotta, H., Toriumi, S., and Kusano, K., “Impact of subsurface convective flows on the formation of sunspot magnetic field and energy build-up” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 517(2), 2775 (2022).

[4] Hotta, H., Iijima, H., and Kusano, K., “Weak influence of near-surface layer on solar deep convection zone revealed by comprehensive simulation from base to surface” *Science Advances*, 5(1), 2307 (2019).

[5] Mykola, G., Browning, P., Kusano, K., Inoue, S., Vekstein, G., “Particle acceleration and their escape into the heliosphere in two solar flares with open magnetic field” *The Astrophysical Journal* (2023, in press).