

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

地球と太陽を包含する太陽地球圏の環境は太陽活動の変化に起因して大きく変動し、人間社会と地球表層環境にも多様な影響を与える。しかし、複雑なその変動メカニズムは未だ十分に解明されていない。このため、現代の情報化社会は太陽地球圏環境変動に対して潜在的なリスクを抱えている。本研究では、最新の観測データと先進的なシミュレーションの融合によって太陽地球圏環境の変動を再現・予測する分野横断研究を実施した。特に、太陽フレア発生の機構解明と予測を目的として研究を進め、第 24 太陽周期における巨大フレアの多くを正確に予測することができる新たな物理予測手法「 k スキーム」の開発に成功した。

キーワード : 太陽フレア、宇宙地球圏環境予測、PSTEP、宇宙天気、電磁流体力学不安定性、フォース・フリー磁場、磁気リコネクション

1. はじめに

過去半世紀に亘り人類の宇宙進出は急速に進み、今やその探査領域は太陽系全体に広がりつつある。その結果、宇宙空間がそれまで考えられていたより遥かに激しく変動する世界であると共に、地球環境と人間社会にも関係する「太陽地球圏環境」を形作っていることが分かってきた。そのため、もし 1859 年にキャリントン[1]が発見した強力な太陽面爆発（フレア）に伴う超高速のコロナ質量放出（CME）と巨大磁気嵐等（キャリントン・イベント）が現在起きた場合、電力、衛星、航空、通信ネットワークは前例の無い致命的な打撃を全地球的に受けると考えられている。さらに、樹木年輪中に残された宇宙線生成核種（炭素 14）の解析から、西暦 774 年にはキャリントンが発見した強力なフレアの 10 倍以上の巨大イベント（三宅イベント）が発生した可能性も示されている[2]。

こうした観測事実は太陽に起因する惑星規模の環境変動が将来必ず起きると共に、それらは人類が想定す

べき危険な自然災害となることを明確に示している。それ故、そうした激甚宇宙天気災害の発生と地球環境への影響を正確に予測するための科学的な基盤を早急に確立する必要がある。しかしながら、太陽フレアの発生など太陽地球圏環境変動の予報は未だ不十分な経験モデルにもとづいており、その予測能力は十分でない。

本研究はこの問題を解決するため、最新の観測データと物理モデルに基づく最先端のシミュレーションの有機的な連携を通して、大規模な太陽地球圏環境変動の再現と予測を実現することで、大規模な太陽地球圏環境変動の理解度を高めると共に、将来の激甚宇宙天気災害へ備えるための基盤を確立することを目的とする。そのため、本研究では最新の衛星観測データと数値計算の連携によって巨大フレアの発生を予測する新たなスキーム（ k -scheme）を開発すると共に、第 24 太陽周期のデータをもとに k -scheme の予測能力の検証を行った。

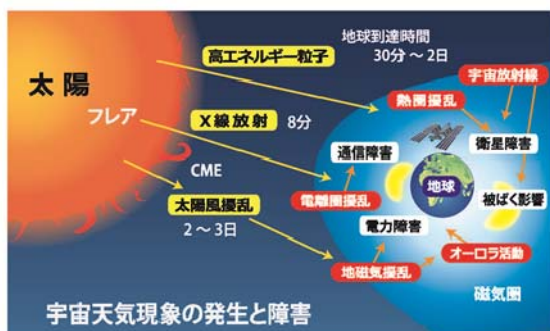


図 1 : 太陽フレアを原因として発生する宇宙天気擾乱現象とその社会影響

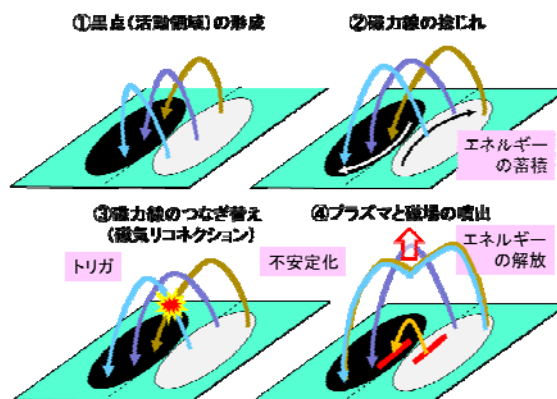


図 2 : ダブルアーク不安定性 (Ishiguro & Kusano 2017) による太陽フレアの発生過程

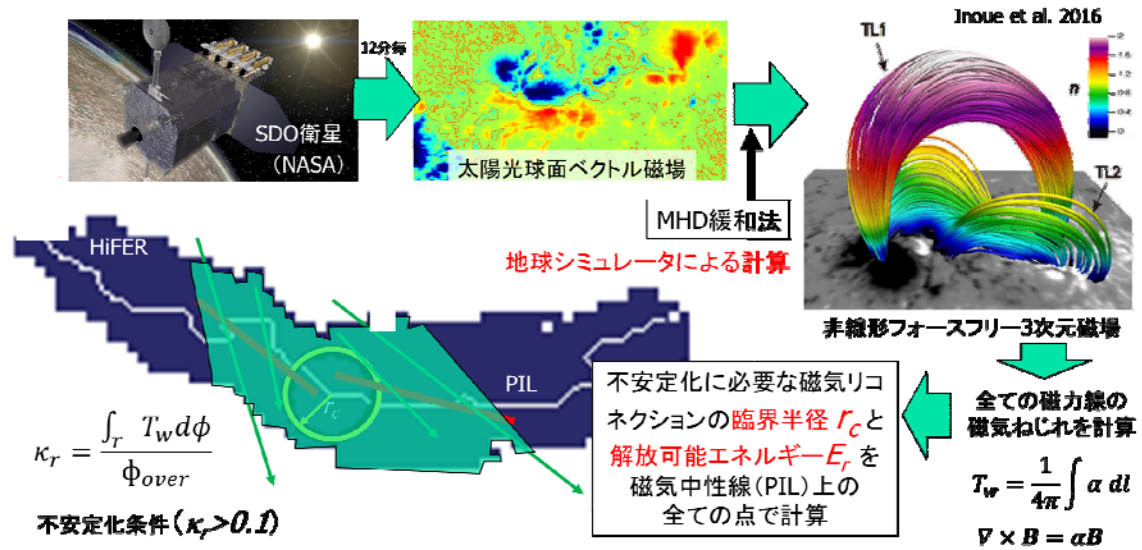


図3：太陽フレアの発生とその規模を予測するk-schemeの計算手順

2. 太陽フレアの発生機構と予測方法

太陽フレアは太陽黒点を含む太陽活動領域の磁場に蓄積された自由エネルギーの爆発的な解放現象である。これまでの研究によって、太陽フレアの発生機構は何らかの電磁流体力学 (MHD) 不安定性と磁気リコネクション (磁力線の繋ぎ替え) の相乗的な非線形過程で説明できると広く考えられている。しかし、キンクモード不安定性やトラスモード不安定性など様々な不安定モードと太陽フレアの関係が指摘されているものの、理論的に予測される不安定性の臨界条件とフレア発生との関係については明確になっていなかった。そのため、各国の宇宙天気予報機関は黒点面積など様々な観測パラメータと太陽フレアの経験的な関係をもとに、フレア発生予測を実施している。

我々は最近、磁気リコネクションがMHD不安定性のトリガとなることに注目し、太陽フレアの発生機構として「ダブルアーク不安定性 (DAI)」を新たに提唱した[3]。DAIは図2に示すように、磁力線のねじれによってエネルギーが蓄積された黒点磁場が部分的な磁気リコネクションによって不安定化することによりエネルギーを解放しながらプラズマを惑星間空間に放出する現象である。Ishiguro & Kusano (2017)によれば、DAIは新しいパラメータ $\kappa = T_w (\Phi_{rec} / \Phi_{over})$ が0.1程度の臨界値を超えると不安定化する。ここで、 T_w 、 Φ_{rec} 、及び Φ_{over} を磁力線の捻じれ (磁気捻じれ)、磁気リコネクションする磁束、ダブルアークの上部を覆う磁束である。

本研究では図3に示す方法により太陽フレアの発生予測を行うk-schemeを開発した。まず、NASAのSolar Dynamics Observatory (SDO)衛星が観測した太陽表面 (光球面)ベクトル磁場を境界条件として利用し、Inoue et al. (2016)などで使われているMHD緩和法[4]により太陽活動領域の非線形フォース・フリー磁場 (NLFFF)を地球シミュレータで計算する。これを使って全ての磁

力線の磁気捻じれ T_w を計算する。さらに、太陽表面の法線磁場成分の符号が反転する磁気中性線 (PIL)上の点を中心として、半径 r の円形領域内部で磁気リコネクションが発生した場合の κ パラメータを計算し、DAIの不安定化に必要な磁気リコネクション領域の臨界半径 r_c をPIL上の全ての点で求める。同時に、各点でDAIが成長した場合に、その結果として発生する磁気リコネクションが解放する自由エネルギー E_r を磁力線の構造から推定する。

もし、磁場構造の安定性が低下すれば、僅かな磁気リコネクションによって不安定化すると考えられるので、臨界半径 r_c がフレア発生の前に減少すると考えられる。それゆえ、解放可能自由エネルギー E_r が大型フレアに匹敵する大きな値を持つと同時に、不安定化に必要な臨界半径 r_c が減少するとき、大型フレアの発生が近いと予測することができるであろう。

3. 大型フレアの予測検証

我々は上記したk-schemeの予測能力を、太陽活動領域12673で発生した大型太陽フレアについて検証した。この活動領域では、2017年9月6日8:57 UTにX2.2クラスフレアが、同日の11:53 UTにはX9.3クラスフレアが発生している。このうち、後者は第24太陽周期最大の太陽フレアである。

その結果、フレア発生の24時間前から E_r はXクラスフレアの典型的なエネルギーである 10^{32} erg以上を保ったまま、臨界半径 r_c が継続して減少することを見出した。特に、X2.2フレア及びX9.3ふれあの発生の直前には、それぞれ $E_r=2 \times 10^{32}$ erg, $r_c=0.8$ Mm 及び $E_r=4 \times 10^{32}$ erg, $r_c=0.9$ Mmに達する点が出現した。さらに、それぞれのフレアが実際にそれらの点を中心として、出現したこともSDO衛星による観測データから確認することができた。この結果は、k-schemeが巨大フレアの発生と規模

だけでなく、その位置までも正確に予測できる可能性を示唆するものである。

我々はさらに、同様の解析を第 24 太陽周期に太陽中心領域で発生した X2 クラス以上の大型フレア 9 イベントすべてについて適用した実施した。その結果、7 活動領域で発生した 9 イベントのうち、6 活動領域で発生した 7 イベントについて k-scheme はその発生と位置を予測することができることを明らかにした。なお、このうち予測できなかったフレアが発生した唯一の領域についても、フレアの発光形状に基づいて予測できない原因を考察した。

また、第 24 太陽周期において大型黒点を持ちながら X2 クラス以上の巨大フレアを観測から 20 時間以内に発生させなかった活動領域のデータについても k-scheme による解析を行い、それらが今回見出された巨大フレアの予測条件を実際にほぼ満たさないことも確認することができた。

これらの詳しい結果は、Kusano et al. (2020)にて報告予定である[5]。

4. まとめ

太陽フレアは太陽のみならず恒星や宇宙プラズマで発生する爆発現象の典型であり、その発生機構の解明は天文学とプラズマ物理学における重要な課題である。同時に、巨大太陽フレアは現代社会を支えるインフラの障害を引き起こし得るため、高度情報化社会における潜在的なリスクでもある。本研究では、最新の衛星観測による太陽表面の精密磁場観測データと地球シミュレータによる高速計算によって、電磁流体力学不安定性理論に基づく巨大フレアの発生予測が可能であることを実証することができた。この成果はこれまで経験的な手法に依存していた太陽フレア予測と宇宙天気予報の発展に大きな進展をもたらすと共に、太陽フレアの発生に PIL 近傍の微細磁場構造が関与することを明らかにしたことによりその発生機構の理解にも大きく貢献するものである。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究（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：草野完也）」計画研究：太陽嵐班（A02：研究代表 一本潔）研究課題番号：15H05814 の支援によって実施されました。

文献

- [1] R. C. Carrington, Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859. Mon. Not. R. Astron. Soc. 20, 13-15 (1859).
 [2] F. Miyake, K. Nagaya, K. Masuda, T. Nakamura, A signature of cosmic-ray increase in AD 774-775 from tree rings in Japan. Nature. 486,

240-242 (2012).

N. Ishiguro, K. Kusano, Double Arc Instability in the Solar Corona. ApJ. 843, 101 (2017).

[3] N. Ishiguro, K. Kusano, Double Arc Instability in the Solar Corona. Astrophys. J. 843 (2017).

[4] S. Inoue, K. Hayashi, K. Kusano, Structure and Stability of Magnetic Fields in Solar Active Region 12192 Based on the Nonlinear Force-free Field Modeling. Astrophys. J. 818 (2016).

[5] K. Kusano, T. Iju, Y. Bamba, S. Inoue, Physics-based prediction of imminent giant solar flares (under review).

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-terrestrial dynamics has various effects that influence on the geo-environment and even human society. The severe space weather disaster caused by giant solar flares is a potential risk for the modern socio-economic system. However, the mechanism of the solar-terrestrial dynamics is not yet well elucidated. In this study, we conducted cross-disciplinary research to predict the variability of the solar-terrestrial environment and developed the first-ever physics-based prediction scheme of giant solar flares, called “ κ -scheme”, that has strong power for discriminating active regions producing giant solar flares.

Keywords : solar flares, solar-terrestrial environment prediction, PSTEP, space weather, magnetohydrodynamic instability, force-free field, magnetic reconnection

1. Introduction

Over the past half-century, humankind has advanced rapidly into space, and its exploration is now spreading throughout the entire solar system. As a result, it has become clear that the solar-terrestrial environment is more dynamic than the previous thought and it can affect even human society. For instance, if a severe magnetic storm caused by a giant solar flare as discovered in 1859 by Carrington [1] now occurs, satellite, aviation, and communications networks may suffer unprecedented and catastrophic impacts globally. Furthermore, an analysis of cosmogenic isotope (¹⁴C) in tree rings suggests that an extreme event (Miyake event) more than ten times stronger than the powerful flare discovered by Carrington occurred in 774–775 C.E [2].

These observations show that the planetary-scale disaster caused by the sun will occur in the future and that they are a risk for humankind. Therefore, it is necessary to establish a scientific basis for accurately predicting the occurrence of such a severe space weather disaster and its impact on human society. However, forecasting solar-terrestrial environmental dynamics such as the occurrence of solar flares is still based on ambiguous empirical methods, because the mechanism of the onset of solar flares is not yet elucidated.

To solve this problem, we developed a new prediction of the solar-terrestrial environment through the novel observation data and numerical simulations. This study aims to raise the level of understanding of solar-terrestrial environmental variability and to establish a foundation for the next-generation space weather forecasting. This year, we developed a new scheme (κ -scheme) for predicting the occurrence of giant solar flares by linking the satellite observation data of solar magnetic field and numerical calculations. Then, we verified the predictive power of the

κ -scheme based on the data of the 24th solar cycle.

2. Method of Solar Flares

A solar flare is an explosive release of free energy stored in the magnetic field of solar active regions including sunspots. It is widely believed that the mechanisms of a solar flare can be explained by the nonlinear feed-back processes of some magnetohydrodynamic (MHD) instabilities and magnetic reconnections. However, although many studies pointed out the relationship between kink and torus mode instability and solar flares, the relationship between the theoretically predicted critical condition of instability and the occurrence of solar flares is still ambiguous. For this reason, space weather forecasting in operation still relies on the empirical relationship between various parameters, such as sunspot area, and the occurrence of solar flares.

We recently proposed a new instability, called the "double arc instability (DAI)", as the initial driver of solar flares [3]. DAI is destabilized by partial magnetic reconnection if the new parameter $\kappa = T_w(\Phi_{rec}/\Phi_{over})$ exceeds a critical value of about 0.1. Here, T_w , Φ_{rec} , and Φ_{over} are the magnetic twist number, the reconnected magnetic flux and the magnetic flux overlying the double arc.

In this study, we developed the κ -scheme to predict solar flares by the following procedure. First, using the vector magnetic field on the solar surface (photosphere) observed by NASA's Solar Dynamics Observatory (SDO) satellite as the boundary condition, we calculated the nonlinear force-free magnetic field (NLFFF) in the solar active regions based on the MHD relaxation method [4] by the Earth Simulator. Then, we calculated the magnetic twist number T_w of all the field lines of magnetic force and evaluated the critical radius r_c of reconnection which could trigger the DAI at a point on the

magnetic neutral line (PIL) where the sign of the normal magnetic field component on the solar surface is reversed. The critical radius r_c of the magnetic reconnection region for the instability is obtained at all points on the PIL. At the same time, we evaluate the free energy E_r which could be released by the DAI from the structure of magnetic field lines.

If the stability of the magnetic field decreases, the critical radius r_c decreases. It suggests that the reduction of r_c can correspond to a precursor of the instability and the onset of solar flares. Therefore, when the releasable free energy E_r has a large value comparable to a large flare and the critical radius r_c decreases, we can predict the occurrence of large flares.

3. Verification of κ -scheme

We verified the predictive power of the κ -scheme for the large solar flares occurred in the solar active region NOAA 12673. In this activity area, the X2.2 and X9.3 class flares occurred at 8:57 UT and 11:53 UT, respectively, on September 6, 2017. The latter is the largest solar flare in the 24th solar cycle.

As a result of the analysis, we found that the critical radius r_c continuously decreased for 24 hours before the occurrence of the X2.2 flare, while E_r maintained larger than 10^{32} erg which is comparable to the energy of typical X-class flare. Some points on the PIL satisfied the condition $E_r = 2 \times 10^{32}$ erg, $r_c = 0.8$ Mm and $E_r = 4 \times 10^{32}$ erg, $r_c = 0.9$ Mm, immediately before the occurrence of the X2.2 and X9.3 flares, respectively. Furthermore, the fact that each flare appeared around those points was confirmed from the observation data by the SDO satellite. This result suggests that the κ -scheme can accurately predict not only the occurrence of giant flares but also their locations.

We further performed the same analysis for all nine large flare events of the X2 and larger class which occurred in the central region of the solar disc during the 24th solar cycle. As a result, we confirmed that the κ -scheme could predict the occurrence and location of the seven events that occurred in the six active regions out of the nine events in the seven active regions. The cause of the failed prediction only in one region was also explained based on the comparison between the flare emission structure and the theoretical model of flares.

Besides, we analyzed the data of active regions that had large sunspots in the 24th solar cycle but did not produce large flares above the X2 class within 20 hours of the observation by κ -scheme, and confirmed that the κ -scheme made only three false positive alarms out of 192 active regions. The results indicate the strong predictive power of the κ -scheme for giant solar flares.

Detailed results will be reported in Kusano et al. (2020) [5].

4. Summary

Solar flares are the typical explosive phenomena that occur in the sun, stars, and cosmic plasmas. Severe space weather disasters caused by giant solar flares are also a potential risk in an advanced information society. In this study, we have demonstrated that it is possible to predict the occurrence of giant flare based on the magnetohydrodynamic instability theory by using the latest magnetic field observation data on the sun's surface by solar observation satellite and high-speed calculations by the Earth Simulator. This result greatly contributed to the progress in the development of solar flare prediction and space weather forecasting. It also clarified that the small-scale magnetic field structure near the PIL is responsible for the onset of a solar flare. The finding can greatly contribute to a better understanding of solar flares.

Acknowledgment

This work was supported by MEXT/JSPS KAKENHI Grant Numbers JP15H05814

References

- [1] R. C. Carrington, Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 20, 13-15 (1859).
- [2] F. Miyake, K. Nagaya, K. Masuda, T. Nakamura, A signature of cosmic-ray increase in AD 774-775 from tree rings in Japan. *Nature*. 486, 240-242 (2012).
- [3] N. Ishiguro, K. Kusano, Double Arc Instability in the Solar Corona. *ApJ*. 843, 101 (2017).
- [4] S. Inoue, K. Hayashi, K. Kusano, Structure and Stability of Magnetic Fields in Solar Active Region 12192 Based on the Nonlinear Force-free Field Modeling. *Astrophys. J.* 818 (2016).
- [5] K. Kusano, T. Iju, Y. Bamba, S. Inoue, Physics-based prediction of imminent giant solar flares (under review).