

太陽地球環境システムのシミュレーション研究

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 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

太陽活動は地球環境と社会インフラに多様な影響と被害を与える。しかし、太陽活動と地球及び社会経済システムに対するその影響の予測能力は依然として低いままである。それ故、「太陽地球環境システムのシミュレーション研究」に関する地球シミュレータプロジェクトは太陽活動とその影響に関する理解を拡張し、その予測精度を向上させることを目的としている。2016年度においては、太陽フレアの発生を再現すると共にその予測につながる新たな電磁流体力学シミュレーションを、太陽表面（光球面）磁場の観測データに基づいて実現するモデルの開発に成功した。

キーワード：太陽フレア, コロナ質量放出, CME, 宇宙天気, MHD

1. 導入

太陽活動は地球環境と共に人間の社会経済システムにも影響を与える。特に、太陽フレアやコロナ質量放出(CME)などの大規模太陽面爆発は人工衛星、電力網、通信網などの社会基盤に大きな障害を与える場合がある。それらの被害を軽減するためには、そうした現象の発生と影響を事前に予測することが重要であるが、残念ながら現在の予測信頼性と精度は十分ではない。それゆえ、太陽地球環境の理解と予測は科学的課題としてのみならず、社会経済的な視点でも重要である。

我々はフレアのトリガ機構の系統的なシミュレーション研究を実施した [1]。この研究は様々な線形フォースフリー磁場に小型の磁場擾乱を異なる方位角を持って入射させることで、フレアトリガの物理条件を探るものであった。その結果として、磁場のシアに代表される自由エネルギーの蓄積と共に、磁気中性線 (PIL) の近傍に現れる擾乱磁場の方位角がフレアの発生にとって重要であることが見出された (図 1)。特に、大規模スケールのポテンシャル磁場に対して反対の極性を持つ反極性 (OP) 型磁場と非ポテンシャル磁場の方位角に対して逆方向の磁場である逆シア (RS) 型の擾乱がフレア発生のトリガとなりや

すいことが見出された。これらの磁場擾乱が実際に発生したフレア領域の中心付近に存在していることがこれまで幾つもの観測で確認されている [1, 2, 3]。これらの精密観測の結果は大規模フレアの発生に大きなスケールの磁場構造のみでなく、小スケールの磁場擾乱が関わっていることを示すものである。

しかしながら、実際の太陽表面の磁場構造は線形フォースフリー磁場に比べて極めて複雑である。そのため、これまでのモデルで提案されたフレアトリガ機構が実際のフレア発生に適用できるかどうかを検証するためにはより現実的な磁場モデルを用いたシミュレーションが必要となる。そのために、本研究では太陽表面（光球面）の磁場観測データに基づいて再現された 3 次元の非線形フォースフリー磁場 (NLFFF) を利用したシミュレーションを開発した。

本研究では、太陽活動領域 NOAA10930 を観測した「ひので」衛星の光球面磁場データを利用し、NLFFF を電磁流体力学緩和法により求めた。さらにその 3 次元磁場に様々な向きを持つ小規模磁場を太陽表面から入射する数値実験を行なうことで、どのような性質を持つ磁場擾乱がフレア発生の原因となるかを考察した。

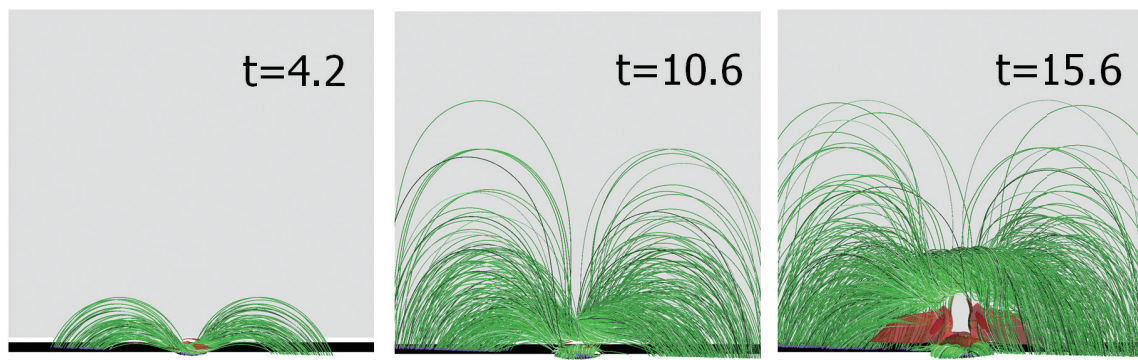


図 1 線形フォースフリー磁場に反極性型磁場を入射した場合のシミュレーション結果の時間変化。緑線は磁力線、赤面は高電流密度領域を示す。

2. 結果

活動領域 NOAA10930 の NLFFF はその中心の磁気中性線上に正極と負極を繋ぐ強く捻じれた磁場構造を持っている。その大局的構造は「ひので」衛星で観測された軟 X 線画像に見られるいわゆるシグモイド構造とよく一致している (図 2)。

我々は実際にフレアの初期発光が観測された NLFFF の中心部分に様々な小規模磁場を入射する実験を実施した。特に、小規模磁場の方位角と一位置に注目して探索を行った。その結果、反極性型と逆シア型の小規模磁場の入射がフレア爆発の発生の原因となることを見出すことが出来た。反極性型磁場が入射された場合、その近傍に足を持つ 2 つのねじれた磁力線が、反極性磁場と再結合し、さらにねじれの大きな磁力線が形成されることにより磁

場が不安定化することが見出された (図 3)。一方、逆シア型の磁場が入射された場合は、初期磁場との再結合によって、NLFFF に蓄積されていた磁気ヘリシティが部分的に消失することで、磁気ループが中心に向けて収縮するため、電流層が形成されてフレアを駆動する磁気再結合が始まる (図 4)。それゆえ、前者と後者ではフレアに至るトリガ過程は異なり、前者を「放出駆動リコネクション (eruption-induced reconnection)」、後者を「リコネクション駆動放出 (reconnection-induced eruption)」と呼ぶことができる。

3. 議論とまとめ

今回の実験の結果は文献 [1] で見出されたフレアトリガ機構と同等のプロセスが実際の太陽活動領域磁場でも

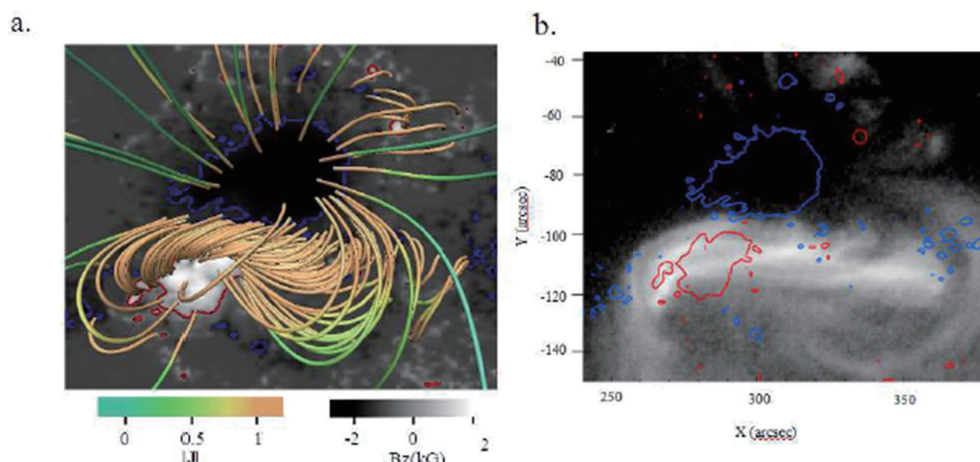


図 2 (a) 活動領域 10930 の非線形フォースフリー磁場の磁力線構造と (b) 同じ領域で「ひので」衛星 XRT 望遠鏡が観測した軟 X 線画像。文献 [4] (Muhamad et al. 2017 ApJ) より転載。

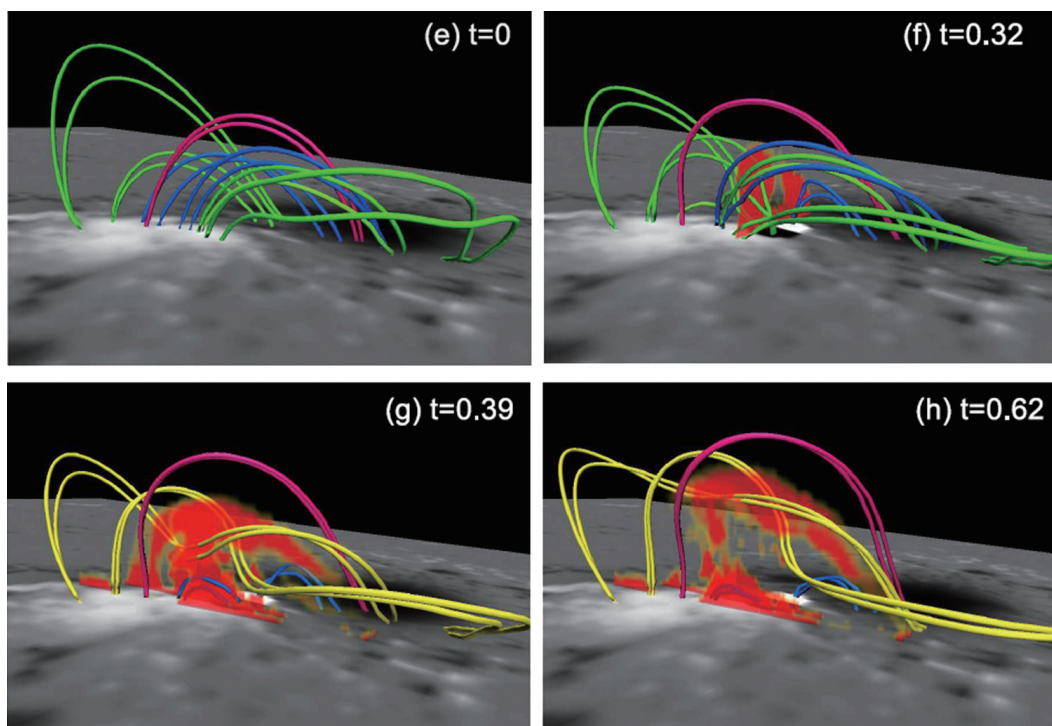


図 3 反極性型の磁場入射によって発生するフレアのシミュレーション結果。文献 [4] (Muhamad et al. 2017 ApJ) より転載。

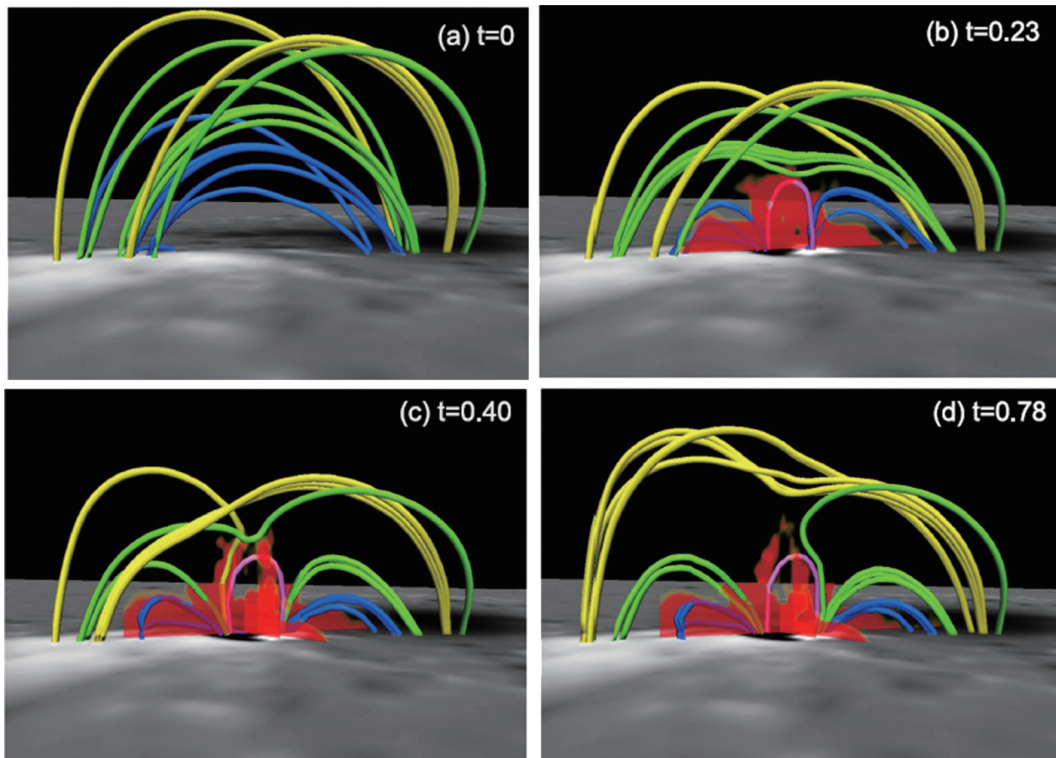


図4 逆シア型磁場の入射によって発生する太陽フレアのシミュレーション結果。文献 [4] (Muhamad et al. 2017) より転載。

働く可能性を示すものである。今回、考察された活動領域では X3.4 クラスフレアに至る数日間に黒点の回転運動が観測されており、それによって磁場のねじれが増加し、自由エネルギーが蓄積されたと考えられる。しかし、エネルギーの蓄積だけではフレアの発生条件は満足されず、小規模磁場の出現に依る磁力線の繋ぎ替えが最終的な爆発のトリガとなったことが示唆された。特に、反極性(OP)型の磁場の出現がこの領域のフレア発生のトリガとして働いた可能性が高い。この結論は文献 [1] の解析結果と一致すると共に、他のフレア爆発でも同様の性質が指摘されている [3]。

これらの結果は太陽表面磁場の観測によってフレアの発生を予測できる可能性を強く示唆するものである。特に、観測から見出される磁場の捻じれ (magnetic twist) と磁気中性線の空間的乱れがフレア発生にとって重要であると考えられる。また、捻じれた磁場が与えられた場合、どのような磁場の乱れがフレアのトリガとなるかを事前に評価するために今回行ったシミュレーションは有効な方法論となるであろう。すなわち、精密な太陽面磁場観測と3次元電磁流体シミュレーションの組み合わせは、将来的なフレア発生の数値予報の強力なツールとなるものと考えられる。

謝辞

本研究は MEXT/JPSPS 科研費新学術領域「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 A02「太陽嵐の発生機構の解明と予測 (研究代表：一本潔)」JP15H05814 の助成を受けたものです。

文献

- [1] Kusano, K., Y. Bamba, T. T. Yamamoto, Y. Iida, S. Toriumi, and A. Asai. 2012. "MAGNETIC FIELD STRUCTURES TRIGGERING SOLAR FLARES AND CORONAL MASS EJECTIONS." *The Astrophysical Journal* 760 (1). IOP Publishing: 31. doi:10.1088/0004-637X/760/1/31.
- [2] Bamba, Y., K. Kusano, T. T. Yamamoto, and T. J. Okamoto. 2013. "STUDY ON THE TRIGGERING PROCESS OF SOLAR FLARES BASED ON HINODE/SOT OBSERVATIONS." *The Astrophysical Journal* 778 (1). IOP Publishing: 48. doi:10.1088/0004-637X/778/1/48.
- [3] Wang, Haimin, Chang Liu, Kwangsu Ahn, Yan Xu, Ju Jing, Na Deng, Nengyi Huang, et al. 2017a. "High-Resolution Observations of Flare Precursors in the Low Solar Atmosphere." *Nature Astronomy* 1 (March). Nature Publishing Group: 0085. doi:10.1038/s41550-017-0085.
- [4] J. Muhamad, K. Kusano, S. Inoue, and D. Shiota, "Magnetohydrodynamic Simulations for Studying Solar Flare Trigger Mechanism", *The Astrophysical Journal*, Volume 842, Number 2, 2017 June 16, doi:10.3847/1538-4357/aa750e.

Simulation Study of Solar-Terrestrial Environmental System

Project Representative

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

Author

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

Solar activities may seriously impact terrestrial environment as well as our infrastructure in different manners. However, our predictability of solar activities and the influence upon the earth and the socio-economic systems is substantially hindered. The objective of the Earth Simulator Project “Simulation Study of Solar-Terrestrial Environmental System” is to advance our understanding for the variability of terrestrial environment and to improve our predictability of the solar dynamics. In FY 2016, we have developed the new simulation to reproduce and predict the solar flare events based on the magnetohydrodynamic simulation and the observed data of magnetic field vector on the solar surface (photosphere).

Keywords: solar flare, coronal mass ejection, CME, space weather, MHD

1. Introduction

The solar activities influence the terrestrial environment and the socio-economic system. In particular, giant solar eruptive events such as solar flares and coronal mass ejections (CMEs) may seriously impact the infrastructures of satellite, power grids, and communication facilities. However, our capability to predict the onset and the influence of solar eruption is still limited. Therefore, the improvement in our understanding and predictability of the solar-terrestrial environment is crucially important not only from scientific point of view but also from the social and economic aspects.

Earth Simulator Project “Simulation Study of Solar-Terrestrial Environmental System” was established in order to improve our understanding and predictability of solar-terrestrial environmental dynamics. In FY 2016, we have developed the magnetohydrodynamic (MHD) simulation to improve our understanding of the trigger mechanism of flares and the predictive capability of it.

Systematic studies of the flare trigger mechanisms have

been performed by Kusano et al. (2012)[1]. They carried out ensemble MHD simulations with different Linear Force-Free Fields (LFFFs) and small bipole structures with different orientations imposed onto the LFFF. From their study, magnetic structures as well as the orientation of the bipoles which are effective in triggering a flare can be identified. They found that solar eruptions can occur as a result of interaction between the instability driven by strong shear of the large-scale magnetic field near the polarity inversion line (PIL) and the proper disturbance in small-scale magnetic fields (Fig.1). The proper disturbances proposed in their study are the opposite polarity (OP) and the reversed shear (RS) structures.

The opposite polarity refers to the small bipole magnetic field whose polarity is opposite to the polarity of the large-scale field structure at the PIL. The reversed shear field refers to the small bipole field which is directed nearly opposite to the sheared component of the magnetic field. Several observational analyses of flare events have been conducted [1, 2, 3]. Their results demonstrated that there were the small-scale magnetic

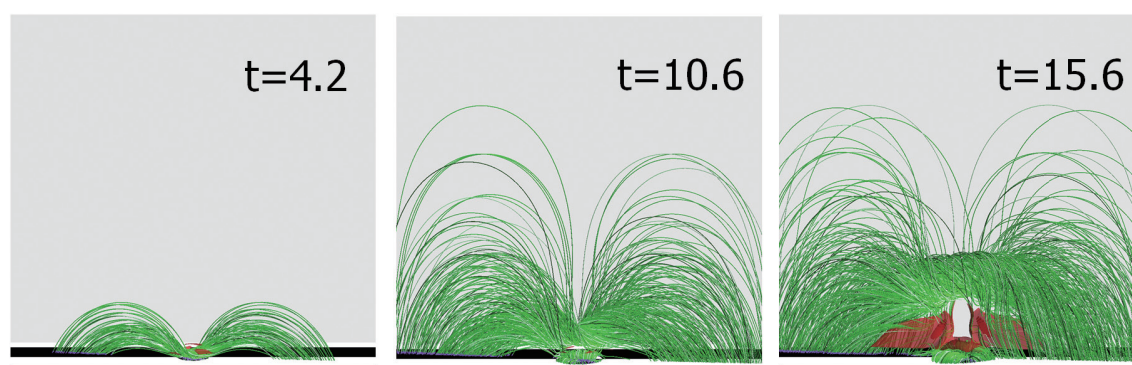


Fig. 1 The time evolution of simulation of solar flare, in which the opposite polarity field triggers the onset of eruption. Green lines and red surface are magnetic field lines and the region of high electric current density.

fields proposed by Kusano et al. (2012)[1] indeed in the central region of large solar flares.

However, the configurations of magnetic fields in the Sun are much more complex than the LFFF structures. In order to verify the applicability of the flare trigger model to realistic system, we have to develop the simulation of realistic magnetic field, which should be consistent with the observations. For this purpose, we have carried out the simulation study of solar flares triggering process using the nonlinear force-free field (NLFFF) extrapolation, which can reconstruct the three-dimensional magnetic field of solar active region from the observed magnetic field vector on the photospheric surface.

In this study, we used the data of photospheric magnetic field on the solar active region (AR) NOAA 10930 observed by Hinode satellite, and investigate which kind of small-scale magnetic field is responsible to trigger the solar flare by making different simulations in which various kind of small scale field is injected into the NLFFF extrapolated from the Hinode's observation data.

2. Results

The magnetic field lines of the NLFFF of AR NOAA 10930 is strongly twisted above the polarity inversion line between the main positive and negative magnetic pole. The overall structure of twisted fields is consistent with the morphology of soft-X ray image taken by the Hinode satellite (Fig. 2).

We carried out multiple simulations, in which various kinds of small-scale magnetic bi-poles are injected onto the center of sheared magnetic flux of the NLFFF to survey the capability of small scale magnetic pole as the trigger of flare. In particular, we focus on the orientation of small-scale bi-pole field and eight different angles of the bi-poles are investigated. As the result of them, we found that the opposite polarity and the reversed shear cases favor the onset of solar eruption. In the former case, the reconnection of two twisted field rooted near the small-scale bi-pole forms more strongly twisted loops, and destabilizes the eruptive instability (Fig. 3). In the latter case, the reduction of magnetic shear due to the magnetic reconnection with the injected reversed-shear field causes the collapse of magnetic loop and triggers the eruption (Fig. 4).

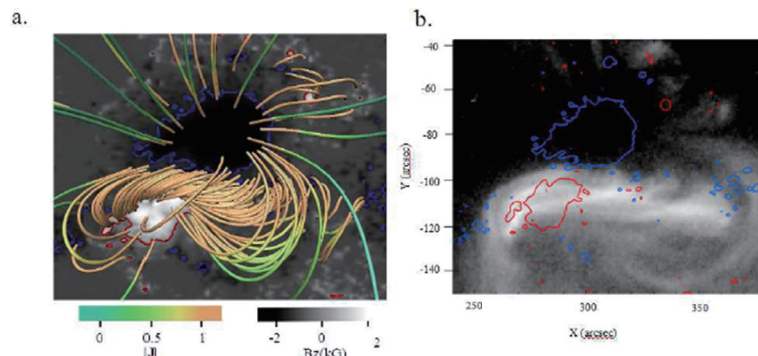


Fig. 2 (a) Magnetic field lines of the NLFFF of AR 10930, and (b) the X-ray image observed by Hinode/XRT. Blue and red contours are for the vertical component of magnetic field. This is the copy from Ref. [4] (Muhamad et al. 2017 ApJ).

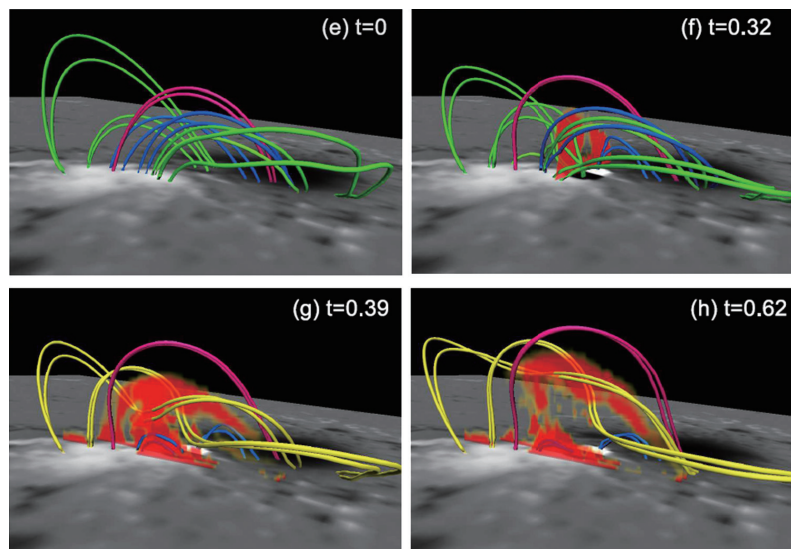


Fig. 3 Dynamics of eruption-induced reconnection caused by the OP-type structure. Green lines show the field lines before the flux rope is formed by reconnection with the OP-type bipole field. Blue lines show the magnetic field lines that changed their connectivity due to the reconnection with the imposed OP-type structure. Purple lines show the magnetic field lines that retain the same connectivity. Yellow lines show the flux rope created by the reconnection. The red areas show enhanced current density. This is the copy from Ref. 4 (Muhamad et al. 2017).

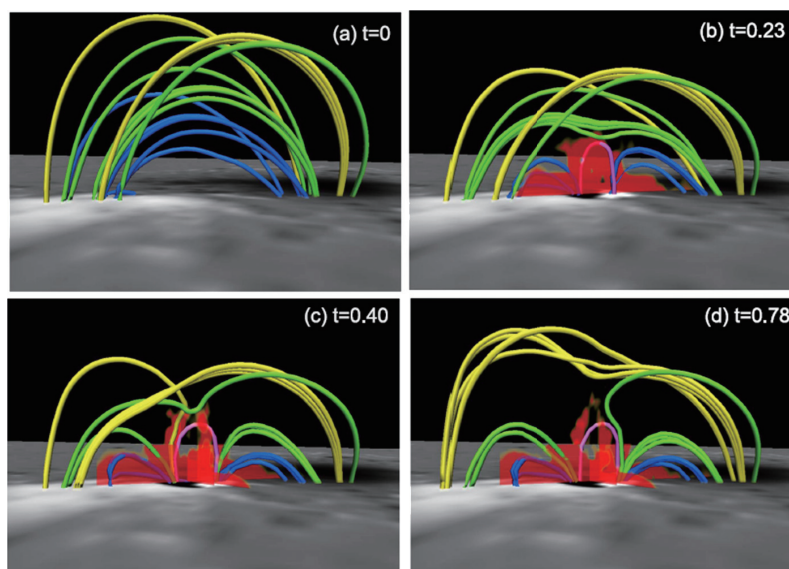


Fig. 4 Dynamics of reconnection-induced eruption caused by RS-type structure: (a) the initial state, (b) after bipole flux is injected, (c) during the formation of the flux rope, and (d) when the flux rope erupts. Blue lines show the magnetic field lines that changed the connectivity due to reconnection with the imposed RS-type structure. Green lines show the magnetic field lines that collapsed to the center of the RS-type structure, and then finally reconnected with the imposed RS-type structure. Yellow lines show the magnetic field lines that created the flux rope. Red areas correspond to intense current density layers. This is the copy from Ref. [4] (Muhamad et al. 2017 ApJ).

3. Discussion and Summary

Our simulations show that the trigger mechanism proposed by Kusano et al. (2012[1]) can be applied to the real coronal-like magnetic field environment. Although the trigger structures appear as emerging flux in our simulations, it is possible that the trigger may come from other processes—as long as the configuration of the trigger structure exists in the proper way. This emerging twisted flux rope evolved and appeared as a sunspot motion or rotation by means of the kink instability. Finally, in this study, we succeed to confirm the OP-type trigger structure and mechanism responsible for X3.4 flare in AR 10930, as proposed by Kusano et al. (2012[1]), based on observation and simulations using an idealized AR model.

Acknowledgement

This work was supported by MEXT/JSPS KAKENHI Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas (15H05814) “Project for Solar-Terrestrial Environment Prediction (PSTEP).

References

- [1] Kusano, K., Y. Bamba, T. T. Yamamoto, Y. Iida, S. Toriumi, and A. Asai. 2012. “MAGNETIC FIELD STRUCTURES TRIGGERING SOLAR FLARES AND CORONAL MASS EJECTIONS.” *The Astrophysical Journal* 760 (1). IOP Publishing: 31. doi:10.1088/0004-637X/760/1/31.
- [2] Bamba, Y., K. Kusano, T. T. Yamamoto, and T. J. Okamoto. 2013. “STUDY ON THE TRIGGERING PROCESS OF SOLAR FLARES BASED ON HINODE/SOT OBSERVATIONS.” *The Astrophysical Journal* 778 (1). IOP Publishing: 48. doi:10.1088/0004-637X/778/1/48.
- [3] Wang, Haimin, Chang Liu, Kwangsu Ahn, Yan Xu, Ju Jing, Na Deng, Nengyi Huang, et al. 2017a. “High-Resolution Observations of Flare Precursors in the Low Solar Atmosphere.” *Nature Astronomy* 1 (March). Nature Publishing Group: 0085. doi:10.1038/s41550-017-0085.
- [4] J. Muhamad, K. Kusano, S. Inoue, and D. Shiota, “Magnetohydrodynamic Simulations for Studying Solar Flare Trigger Mechanism”, *The Astrophysical Journal*, Volume 842, Number 2, 2017 June 16, doi:10.3847/1538-4357/aa750e.