

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ことを実証すると共に、太陽フレアの発生を決定する新たな物理パラメタ「磁束捻じれ密度（magnetic twist flux density）」を見出した。

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

1. はじめに

急速に進む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可能性があり、現代社会における潜在的なリスクでもある。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。ただし、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、現在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によってその高い予測精度を実証することに成功した。

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）を導くこ

とに成功した[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）。

さらに我々は、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ことができる数値スキーム（ 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）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）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 度以内で発生した 9 つの巨大太陽フレア (GOES X 線クラス X2 以上) を起こした 7 つの活動領域を解析した。同時に比較のため、大きな黒点を持ちながら同様の巨大フレアを起こさなかった 198 の活動領域のデータも解析した。

その結果、過去 10 年間で最大の太陽フレアが発生した活動領域 (AR12673) を含む 6 活動領域における 7 つの巨大フレアが、臨界半径が 1,000km 以下で解放可能エネルギーが 4×10^{31} erg 以上であると予測された点から発生したことを突き止めた[2]。このことは κ スキームが太陽フレアの発生のみならず、その位置までも正確に予測できることを示している (図 2)。

一方、大型黒点を持ちながら巨大フレアが発生しなかった 198 の活動領域では上記の条件を満たす点はほとんど現れなかった。この結果から、 κ スキームが少数の例外

を除いて巨大フレアの発生をその位置まで正確に予測できることを実証した。巨大フレアのエネルギーに匹敵する自由エネルギーを蓄積しているにも関わらず、フレアが発生しなかった領域の時系列解析も行い、 κ スキームが擬陽性 (false-positive) 予測を与える可能性は 198 領域中 3 領域のみであることを確認した。

さらに、この予測結果が太陽表面の磁場観測誤差に寄らないことも誤差を含んだモンテカルロ解析によって確認した。これは κ パラメタが磁力線に沿った積分によって与えられるため、その結果は局所的な誤差にほとんど依存しないことによる。

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

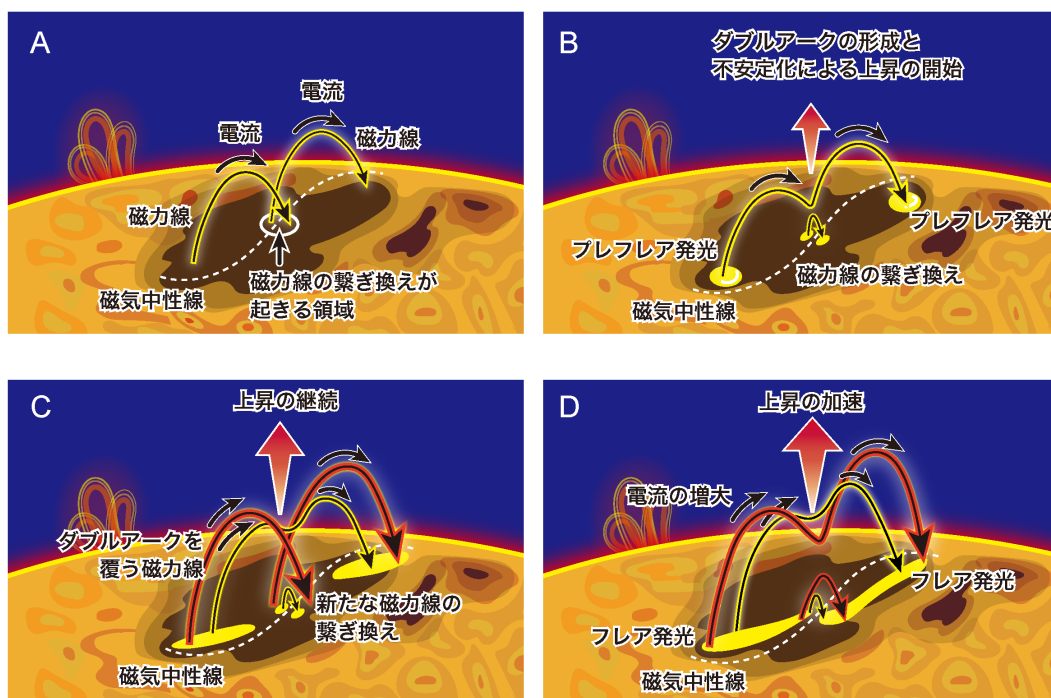


図 1 : ダブルアーク不安定性による太陽フレアの発生機構。A: フレアが発生する前の太陽面上の活動領域が持つ磁場の構造。磁気中性線の上に電流を伴った捻じれた磁力線がある。これらがエネルギーを蓄積している。その後、磁力線の一部が磁気中性線上の小さな領域で繋ぎ換わる。B: 磁力線の繋ぎ換わり (磁気リコネクション) の結果として、ダブルアーク型 (M 字型) の磁力線が形成される。磁気リコネクション領域が臨界半径を超えるとダブルアークが不安定化し、上昇を開始する。繋ぎ換わった磁力線が太陽表面に繋がる点 (磁力線の「足」) でフレア発光が始まる。C: ダブルアークの上昇と共にダブルアークを覆う磁力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

度化に向けた検討を開始している。

また、ダブルアーク不安定性モデルに基づく巨大太陽フレアの子測性が実証されたことは、少なくとも多くの大規模太陽フレアが小規模な磁気リコネクションと MHD 不安定性の相乗的作用を通して発生していることを意味する。磁力線に沿って電流が流れるとその磁力線の周りを回転する新たな磁場が生まれるため、磁力線は捻じれ (magnetic twist) を持つ。ダブルアーク不安定性が成長するためには、ダブルアークを形成する磁束 (磁力線の束) が大きな捻じれを持つことが必要である。そのため、磁気中性線の近傍で大きな磁束捻じれ密度 (magnetic twist flux density) を持つ点では、小さな領域での僅かな磁気リコネクションが、大きな捻じれをダブルアークに与え不安定化させることができるため、フレア発生点となり得る。一方、磁束捻じれ密度が弱い領域では、ダブルアーク不安定性の成長のために大きな領域での磁気リコネクションが必要である。そのため、フレア発生の可能性は低いと予測できる。この結果から本研究は磁束捻じれ密度が、巨大太陽フレアの発生と性質を決定していることを見出すこともできた。

太陽フレアの発生プロセスには複数のタイプが存在する可能性があるため、より規模の小さなフレアの発生プロセスを全て明らかにすることは今後の課題として残されているが、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における爆発現象の理解にも資するものと期待される。

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).

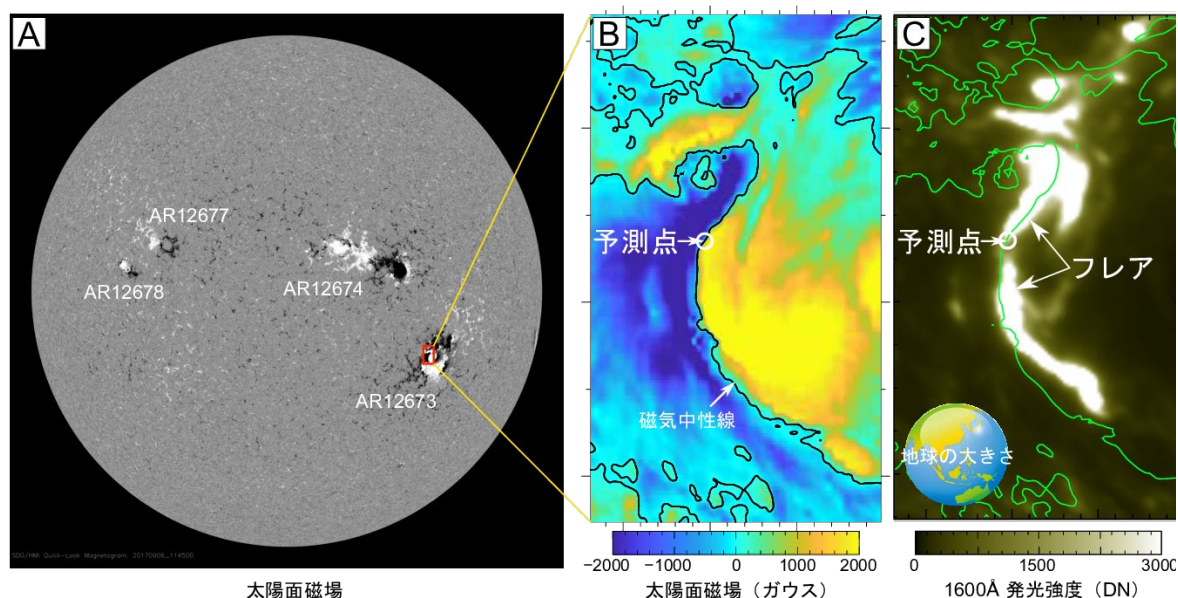


図 2：過去 10 年間で最大の太陽フレア (X9.3 クラス) が発生した 2017 年 9 月 6 日の太陽面磁場とフレア予測点及びフレアの初期発光画像。A：同日 11:45 (世界標準時) の太陽面磁場、白と黒は紙面外向きと内向きの磁場強度をそれぞれ表す。B：最大フレアが発生した活動領域 (AR) 12673 の太陽面磁場の拡大図と κ スキームによる巨大太陽フレアの子測点。黒線は太陽面磁場の極性が変わる磁気中性線。C：同日 11:52 (世界標準時) に発生した巨大太陽フレアの初期発光を SDO 衛星 AIA1600 Å で観測した画像。緑線は磁気中性線。比較のため地球の大きさを示している。B 及び C は文献 [2] Fig. 3 をもとに作成。

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 develop the k-scheme, a physics-based model 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 k-scheme predicts most imminent large solar flares, with a small number of exceptions for confined flares. We conclude that magnetic twist flux density, close to a magnetic polarity inversion line on the solar surface, determines when and where solar flares may occur and how large they can be.

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

1. Introduction

Solar flares emit sudden, strong bursts of electromagnetic radiation from the Sun's surface and its atmosphere, 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

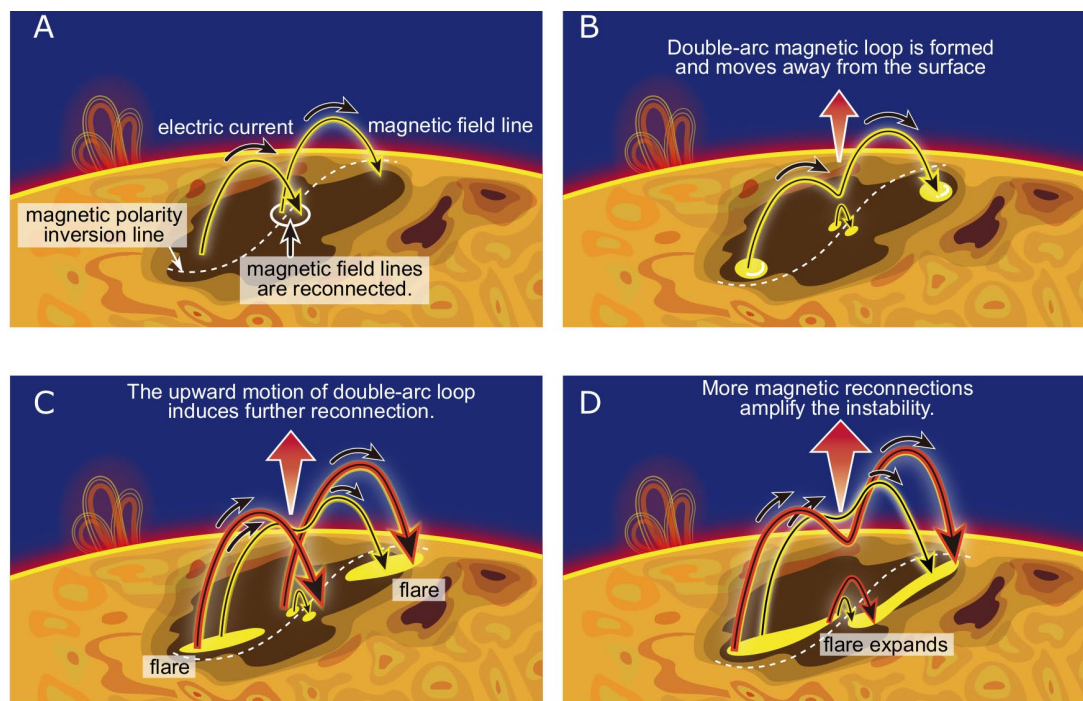


Figure 1: The process of solar flare production in the physics-based prediction method. A: Electric currents flow along magnetic field lines across the magnetic polarity inversion line on the solar surface, where the magnetic field changes its polarity. B: Magnetic field lines are reconnected and form a double-arc loop that moves away from the surface due magnetohydrodynamic instability. C: The upward motion of the double-arc loop induces further magnetic reconnection. A solar flare begins to burst out from the base points of the reconnected field lines. D: More magnetic reconnections amplify the instability and the solar flare expands.

large solar 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 predict how a small magnetic reconnection triggers a large flare and how a large solar flare can occur [2].

The predictive model was tested on about 200 active regions during solar cycle 24 from 2008 to 2019 using data obtained by NASA’s Solar Dynamics Observatory (SDO) satellite. It was demonstrated that with few exceptions, the kappa-scheme predicts most imminent solar flares, as well as the precise location they will emerge from (Fig. 2).

We also discovered that a new parameter – the “magnetic twist flux density” close to a magnetic polarity inversion line on the solar surface – determines when and where solar flares probably occur and how large they are likely to be.

Previous flare prediction methods have relied on empirical relations in which the predictions of the previous day tend to continue into the next day even if flare activity changes. In contrast, the κ -scheme predicts large solar flares through a physics-based approach regardless of previous flare activity. While it takes a lot more work to implement the scheme in real-

time operational forecasting, this study shows that the physics-based approach may open a new direction for flare prediction research.

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), Nagoya University; the FX100 and CX400 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).

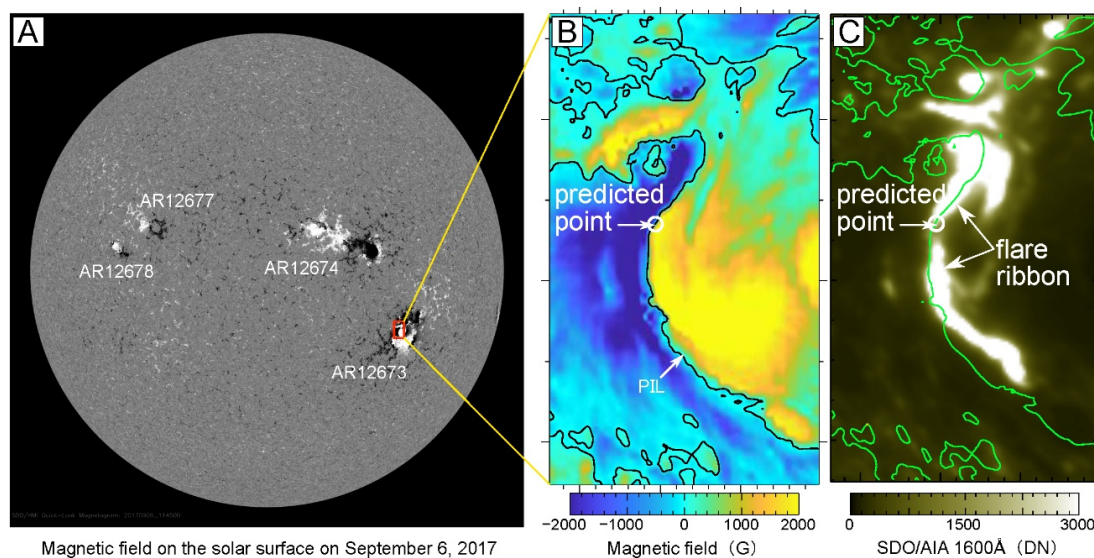


Figure 2: The magnetic field on the solar surface and the initial brightening of the largest solar flare (GOES class X9.3) during solar cycle 24 in NOAA Active Region (AR) 12673 on Sep. 6, 2017. This was observed by the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) and the Atmospheric Imaging Assembly (AIA) onboard the NASA’s Solar Dynamics Observatory (SDO) satellite. A: The magnetic field on the solar surface before the onset of the large flare at 11:45 UT. White and black indicates the intensity of the magnetic field along the line of sight out of and toward the plane. B: An expanded view of the vertical magnetic field in AR 12673. A white circle indicates the location where a large flare was predicted by this study. The black contour shows the magnetic polarity inversion (PIL). C: Bright flare ribbon observed by SDO/AIA1600Å at 11:52 UT. Figures B and C are based on Fig.3 of the research paper [2].