

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

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）は宇宙環境（宇宙天気）を激しく変動させる。その結果、人工衛星や宇宙における人間活動に大きな影響を与えられ、電力、航空、通信ネットワークなどの社会インフラにも様々な障害が現れる可能性がある。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事前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]。

しかし、太陽フレアの影響は多岐にわたるため、単にフレアの発生を予測するのみならず、様々なその影響の予測にも取り組む必要がある。現在、米国を中心として新たな月面への有人ミッション（アルテミス計画）が進行している。それゆえ、近い将来、人間が月周辺や月面に常駐する時代が来ると考えられる。月はほとんどの時間、地球の磁気圏の外にあるため、地磁気による宇宙放射線のシールド効果が無い。巨大フレアに伴って宇宙空間に大量の高エネルギー粒子（太陽高エネルギー粒子：SEP）が放出された場合、月面ではフレア直後に致死量に匹敵する被ばくを受ける可能性がある。

そうした事故を未然に防ぐためにはSEPが急増するイベント（SEPイベント）の原因となる太陽フレアの発生を予測する必要がある。そうしたSEPイベントの発生にはフレアによる粒子加速、フレア後に形成されるコロナ質量放出の前面に形成される衝撃波による粒子加速、加速された粒子の惑星間空間の輸送などが複雑に関係している。しかし、そのすべてを物理モデルで予測することは難しい。さらに、惑星間空間における磁場と粒子の測定は少数の探査機でしか実施できない為、データが不足している。そのため我々は、SEPイベントの予測のためには、太陽表面の磁場やコロナの観測データとSEPイベントの関係を統計的に解析し、SEPイベントが発生する特徴量を統計的に見出すための研究を開始した。

本研究ではその準備として、これまで詳しく調べた幾つかの太陽活動領域についてその磁場構造とSEPイベントの関係を調査する。そのため、地球シミュレータによって太陽表面磁場データを境界条件とした3次元平衡磁場（非線形フォースフリー磁場：NLFFF）を生成し、その特徴量とSEPイベントの関係を比較解析する。さらに、機械学習を利用してSEPイベントの発生条件の抽出を試みている。

2. 活動領域 NOAA11429 の磁場構造と SEP イベント

活動領域(AR) NOAA11429 で2012年3月7日に発生したX5.4クラスフレアはGOES 静止衛星で測定したプロトン・フラックスが6530 pfuに達した第23太陽周期で最大のSEPイベントを引き起こした。それゆえ、この領域とフレアの特異性を調査した。

図1はこの領域で発生したフレアの軟X線のライトカーブであり、最大イベントがX5.4フレアである。このフレアの発生直前の磁場構造とフレアリボンを図2に示す。その特徴は非常に長い磁気中性線（磁極の符号が反転する境界線）を持っており、それに沿って100Mm程の長大な

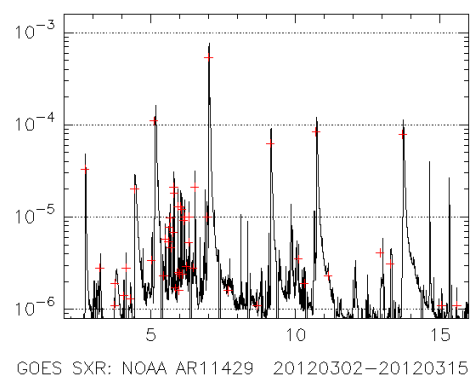


図1：2012年3月2日から15日までにGOES衛星で観測された軟X線エネルギーフラックス。横軸と縦軸の単位はそれぞれdayとW/m²である。赤のプラスマークは活動領域NOAA11429で発生したフレアのピークを表し、最大フレアのクラスはX5.4である。

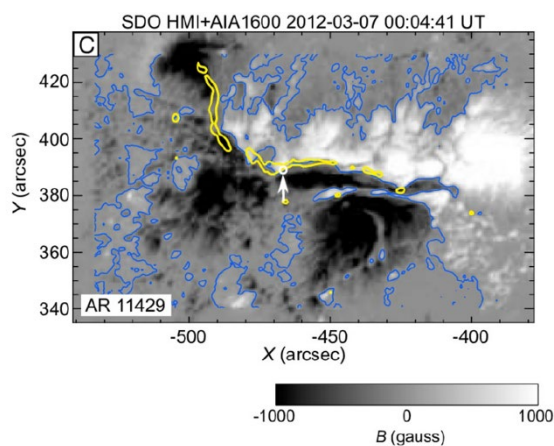


図 2：2012 年 3 月 7 日における活動領域 NOAA11429 の太陽表面磁場（グレイスケール）と SDO/AIA 1600Å で観測された X5.4 フレアのフレアリボン（黄色）。矢印で示された白丸は κ スキーム [1] で予測されたフレアトリガ領域。

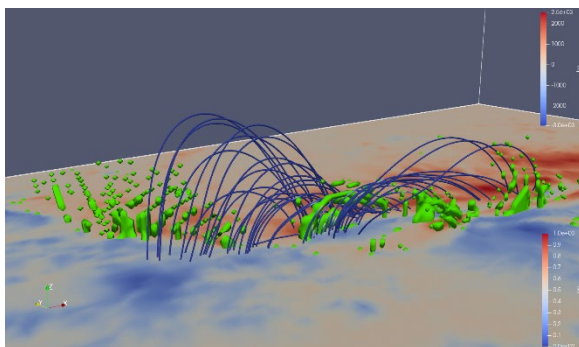


図 3：X5.4 フレア発生直前における活動領域 NOAA11429 の磁場（カラスケール）と磁力線（青線）。緑の面はボードパッチ領域を示す。

フレアリボンが現れていることである。

図 3 は同じ領域の 3 次元磁場構造を磁力線で示したものであり、緑の面はボードパッチと呼ばれる磁場の向きと水平面での鉛直磁場の勾配ベクトルが 90 度以上の角度を持つ領域を表す。ボードパッチは磁力線が大きく捻じれた構造を持つ領域であり、図 2 で示したフレアリボンと同じように長大な領域においてボードパッチが分布していることが分かる。

一方、さらに大きなフレア（X9.2 フレア）を発生させたが SEP イベントを伴わなかった活動領域 NOAA12673 でのフレア及びその磁場構造との比較も行った。その結果、X9.2 フレアの磁気中性線は 40Mm 程度であることが確認された。こうした比較研究はフレアによってエネルギーが解放される磁気中性線の長さが SEP イベントの発生と関係している可能性を示唆している。

3. NLFFF モデルに基づく統計解析

上記した比較研究などを通して見出された仮説を検証するため、SEP イベントを伴ったフレア領域と伴わなかったフレア領域について 1,000 以上のデータ解析を地球シミュレータを利用して行った。さらに、機械学習を利用して SEP イベントの発生条件を抽出する試みを行っている。その初期結果については近く公表する予定である。

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).