

## 世界初、巨大太陽フレア爆発を正確に予測する 物理モデルの開発に成功

名古屋大学宇宙地球環境研究所所長の草野完也教授が率いる研究グループは、太陽で起きる巨大な太陽フレア爆発をその位置まで正確に予測する物理モデルの開発に世界で初めて成功しました。巨大太陽フレアは地球で磁気嵐などを引き起こし、人間の宇宙活動のみならず通信・測位・電力・航空など我々の生活を支える社会基盤にも影響を与えます。そうした影響や被害を未然に防ぐために、太陽フレアの発生を事前に予測する取り組み（宇宙天気予報）が各国で行われてきました。しかし、太陽フレアの発生機構は未だ十分に解明されていなかったため、これまでの予測は経験的な方法に頼らざるを得ませんでした。

研究グループは太陽表面で発生する不安定性の理論に基づきフレア発生の条件を導くことで、巨大太陽フレアを予測する全く新しい物理モデルを開発しました。さらに、このモデルによって過去 10 年間に発生した巨大太陽フレアを少数の例外を除いてその発生位置まで正確に予測できることを実証しました。本研究は、今後の宇宙天気予報の精度向上と宇宙で起きる爆発現象の理解に大きく貢献することが期待されます。

この研究成果は、2020 年 7 月 31 日付米国科学雑誌 Science オンライン版に掲載されました。

この研究は、2015 年度から 2019 年度に行われた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）』のもとで行われたものです。

### 【ポイント】

- ・ 巨大太陽フレア爆発は地球環境や様々な社会基盤にも影響を与えるため現代社会にとって潜在的なリスクですが、その発生機構は未だ十分に解明されていません。
- ・ 本研究では新たな不安定性理論に基づきフレア発生条件を導くことで、巨大フレアを少数の例外を除いてその発生位置まで正確に予測できる物理モデルの開発に世界で初めて成功しました。
- ・ 本研究の成果は、今後の宇宙天気予報の精度向上と宇宙で起きる爆発現象の理解に大きな貢献をすることが期待されます。

### 【研究背景】

太陽フレア<sup>1</sup>は太陽の表面とその上空の太陽大気（太陽コロナ）において、太陽黒点とその周辺の磁場に蓄積された膨大なエネルギーが爆発的に解放される現象です。太陽フレアが発生すると、電波からガンマ線に至る様々な電磁放射が急激に増加します。同時に、大量の高エネルギー粒子（宇宙放射線）や磁場を伴った巨大なプラズマ（電子とイオンからなる高温気体）の超音速流が宇宙空間に放出され、それらはしばしば地球に到達します。その結果、地球周辺の電磁場や放射線環境が大きく変動し、様々な宇宙天気現象を引き起こします。これにより、宇宙飛行士や軌道上の人工衛星のみならず通信・測位・電力・航空など我々の生活を支える社会基盤にも被害が及ぶ場合があります（図1）。それゆえ、巨大な太陽フレアは現代社会にとって潜在的なリスクです。

こうした宇宙天気現象の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（宇宙天気予報）が各関係機関で行われています。しかし、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、これまでの予測は経験的な方法に頼らざるを得ませんでした。

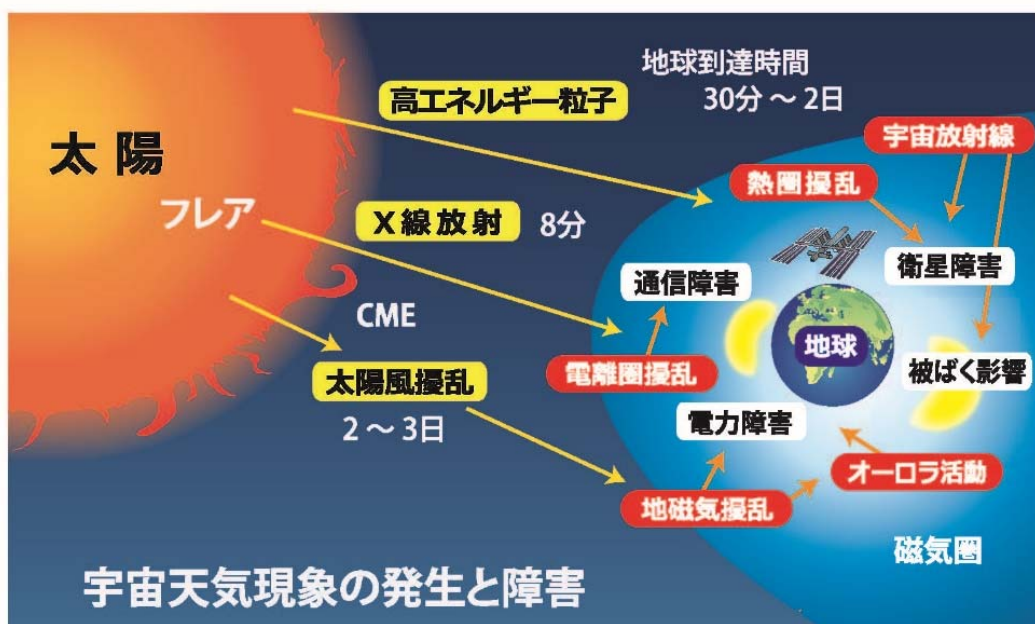


図1：太陽フレアに伴う宇宙天気現象と社会影響

<sup>1</sup> 下線部分の詳細は【用語説明】参照

## 【研究内容】

こうした状況を改善するため、名古屋大学宇宙地球環境研究所所長の草野完也教授が率いる研究グループは、大規模なプラズマ現象を説明する電磁流体力学（MHD）理論に基づいて太陽表面で発生する新しい不安定性（ダブルアーク不安定性）の物理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パラメタ（ $\kappa$ パラメタ）を導きました。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、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説明するものです（図2）。

研究グループは、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、太陽フレアが発生し得るかを計算することができる数値スキーム（ $\kappa$ スキーム）を開発しました。太陽フレアは太陽表面で磁場の向きが外向きから内向きに変わる場所（磁気中性線）の近傍で発生することが知られています。開発された $\kappa$ スキームは、磁気中性線上の全ての点で、ダブルアーク不安定性が成長するために必要な磁気リコネクション領

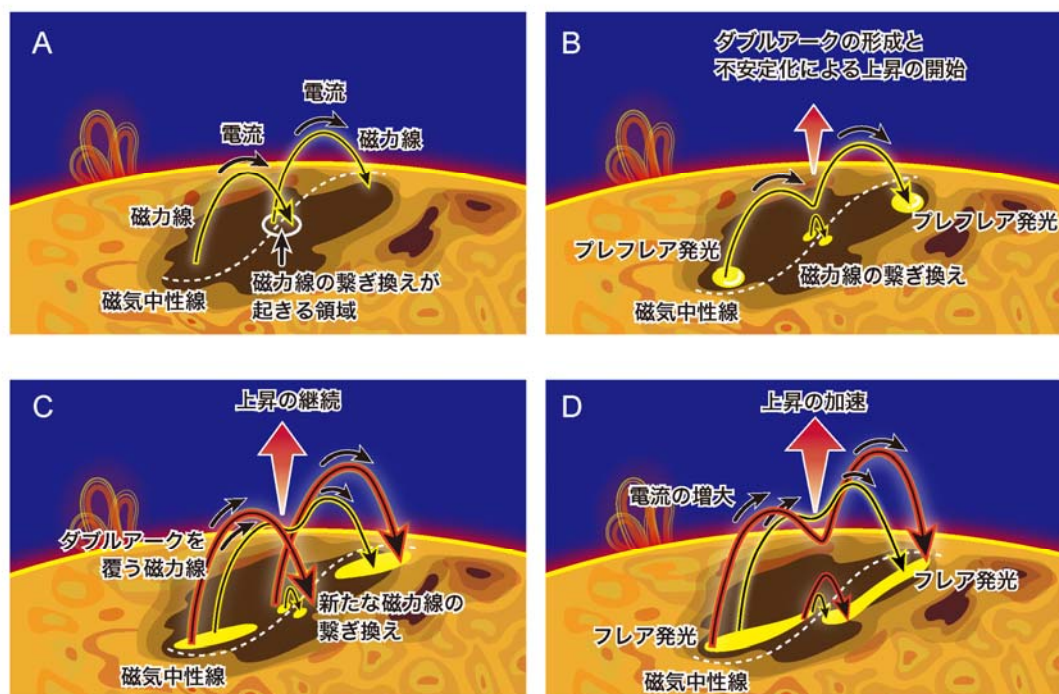


図2：ダブルアーク不安定性による太陽フレアの発生機構。

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。



域の大きさ（臨界半径  $r_c$ ）を求めることができます。さらに、 $\kappa$  スキームはそれぞれの点でフレアが発生した場合、どれほどのエネルギーが解放され得るか（解放可能エネルギー  $E_r$ ）も計算することもできます。これによって磁気中性線上の各点で発生し得る太陽フレアの規模を推定することが可能になりました。それゆえ、このスキームを利用すれば磁気中性線上のどの点において、僅かな磁気リコネクションが巨大フレアを発生させ得るかを予測することができます。この方法は従来の経験的な予測とは異なり、物理法則に従って太陽フレアを予測する全く新しい方法です（解説①参照）。

研究グループは、 $\kappa$  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、スーパーコンピュータ（海洋研究開発機構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  $\pm 50$  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ました。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ました。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  $4 \times 10^{31}$  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ました（図 3）。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ませんでした。この結果から、 $\kappa$

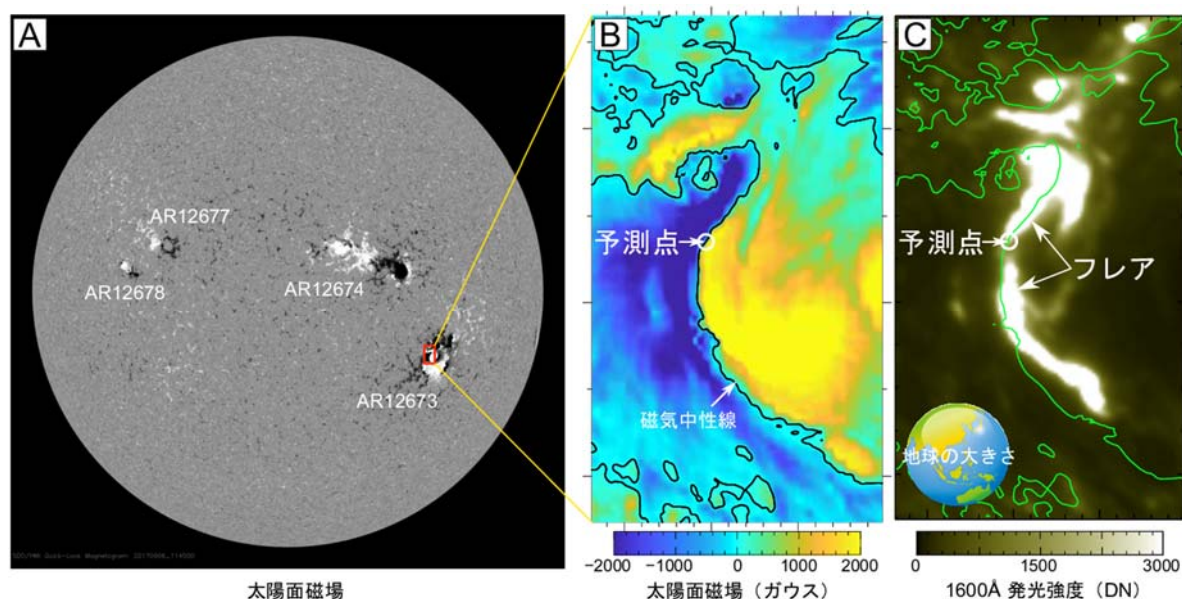


図 3：過去 10 年間で最大の太陽フレア（X9.3 クラス）が発生した 2017 年 9 月 6 日の太陽面磁場とフレア予測点及びフレアの初期発光画像。

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  $\kappa$  スキームによる巨大太陽フレアの予測点。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 は本研究の発表論文（Kusano et al. 2020 Science）Fig. 3 をもとに作成。

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ました。

### 【成果の意義】

太陽フレアの発生条件はこれまで解明されていませんでした。それゆえ、従来の太陽フレア予測は黒点の大きさや形、活動領域の磁場の形態などをもとに主に経験的な方法によって行われてきました。しかし、巨大太陽フレアは非常に稀にしか起きないため、経験的な方法による予測には限界がありました。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す。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ます。現在、研究グループでは、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（センター長：石井守）と協力し、宇宙天気予報の高度化に向けた検討を開始しています。

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予測実現性が実証されたことは、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します。この結果から本研究は「磁束捻じれ密度 (magnetic twist flux density)」と名付けた新しい物理量が、巨大太陽フレアの発生と性質を決定していることを発見しました【解説②】。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ますが、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ます。

### 【解説①】「経験的な方法による予測」と「物理モデルによる予測」について

太陽フレアのエネルギーは活動領域の磁場中に数日～数時間かけて蓄積されます。太陽フレアはこの蓄積したエネルギーを短時間で一気に解放する現象です。それゆえ、長い時間かけて山の上に降り積もった雪が一気に崩れ落ちる雪崩に似ています。太陽黒点の大きさや活動領域中の磁場の形状から太陽フレアを予測する従来の「経験的な方法」は、過去の経験に基づき雪崩を起こしやすい山の大きさやスロープの形状を見出すことで雪崩の発生を確率的に予測する取り組みに対応します。これに対して本研究が行った「物理モデルによる予測」は、実際に降り積もった雪の量とその分布から、どの程度の亀裂がどこに現れたならば、どれほどの雪崩になり得るかを物理法則に従って計算することで雪崩の発生・位置・規模を予測する方法に対応します。

物理モデルによる太陽フレア予測では、フレア発生前に起きる小規模な磁力線の繋ぎ換わり（磁気リコネクション）が雪崩を引き起こす亀裂の役割を果たします（図 2A）。もし、僅かな亀裂が大きな雪崩を引き起こし得る場合、その点から大規模雪崩が起きる可能性が高いと予測できます。同様に、本研究では衛星観測データとスーパーコンピュータを利用し、ダブルアーク不安定性の成長に必要な磁気リコネクションの臨界半径  $r_c$  と不安定性が解放し得るエネルギー  $E_r$  を物理法則に従って磁気中性線上の全ての点について求めることで、正確な太陽フレアの予測を実現しました（解説②参照）。

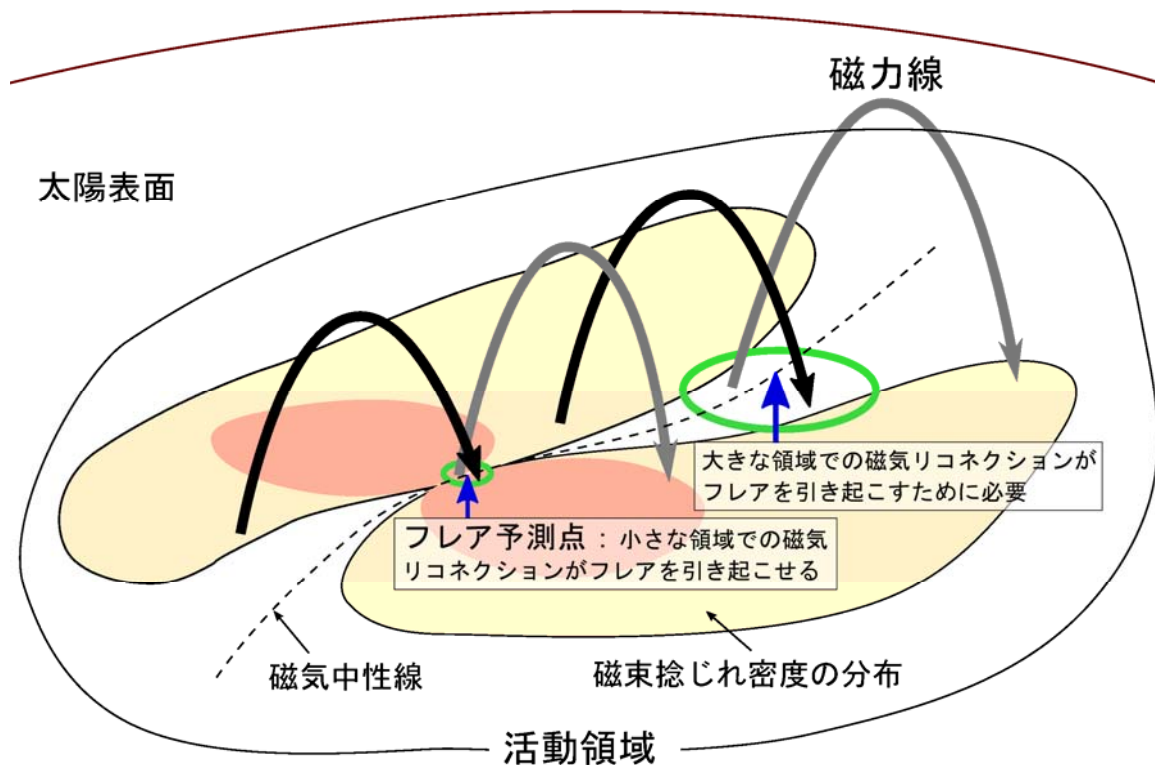


図4：磁束捻じれ密度の分布とフレア予測点の関係

#### 【解説②】磁束捻じれ密度の分布とフレア発生位置の関係について

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) を持ちます。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す。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、フレア予測点となり得ます (図4)。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す。そのため、フレア発生の可能性は低いと予測できます。

#### 【論文情報】

雑誌名：Science (Vol. 369, Issue 6503, Pages 587–591, 2020年7月31日)

論文タイトル：A physics-based method that can predict imminent large solar flares (差し迫った巨大太陽フレアの予測を可能とする物理学的方法)

著者：草野完也 (名古屋大学宇宙地球環境研究所 所長・教授)

伊集朝哉 (国立天文台太陽観測科学プロジェクト 特任専門員)

伴場由美 (名古屋大学高等研究院・宇宙地球環境研究所 特任助教)

井上 諭 (名古屋大学宇宙地球環境研究所 協力研究員)

DOI: [10.1126/science.aaz2511](https://doi.org/10.1126/science.aaz2511)

## 【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。

## 【用語説明】

プラズマ： 気体を構成する原子が電子とイオンに電離した状態。約 1 万度を超える高温の気体はプラズマ状態となる。

太陽大気（太陽コロナ）： 太陽を取り囲む希薄な気体。約 100 万度に加熱されており、ほとんどの原子が電子とイオンに電離したプラズマ状態にある。皆既日食の際に地上から肉眼でも見ることができる。

太陽黒点： 太陽表面にしばしば現れる暗い領域。太陽黒点には太陽表面を貫く数千ガウスの磁場があり、その効果によって太陽表面の温度が下がるため現れる。

太陽活動領域： 太陽表面で磁場が強く X 線などで明るく輝く領域。しばしば太陽フレアを発生に引き起こす。黒点を伴う場合が多い。

太陽フレア： 太陽表面及び太陽大気で発生する爆発現象。様々な波長の電磁波放射を急増させる。同時に、高エネルギー粒子や磁場を伴う巨大なプラズマを放出する場合がある。太陽活動領域の磁場に蓄積されたエネルギーを爆発的に解放する現象である。巨大フレアは水素爆弾 1 億個に匹敵するエネルギーを解放する太陽系最大の爆発現象である。1859 年に英国の天文学者キャリントン (Richard Christopher Carrington、1826-1875) によって発見された。

GOES X 線クラス： 静止軌道上で運用される米国の環境観測衛星 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) によって測定される太陽の軟 X 線（波長が  $1\text{ \AA} - 8\text{ \AA}$ ）放射エネルギー流束の最大値によって太陽フレアの規模を表す尺度。X クラスは  $1 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-2}$  を超えるエネルギー流束を持つ。例えば、X2 クラスフレアは軟 X 線のエネルギー流束が  $2 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-2}$  に達する。

磁力線： 磁場の構造を幾何学的に表現する仮想的な線。磁力線の方法は磁場の向きを、磁力線の線密度は磁場の強度を表す。

磁気中性線： 太陽表面を貫く磁場の向き（極性）が反転する点を結んだ線。太陽フレアは磁気中性線を含む領域で発生する。

磁気リコネクション： 磁力線の繋ぎ換え現象。磁気リコネクションに伴って、磁場の

エネルギーの一部が気体（プラズマ）の運動エネルギーや熱エネルギーに変換される。

電磁流体力学（MHD）： 磁場を伴った大スケールのプラズマ運動を説明するための物理理論。電磁気学と流体力学の融合によって作られている。スウェーデンの物理学者ハンス・アルヴェーン（Hannes Olof Gösta Alfvén, 1908 – 1995）によって発展し、その業績によりアルヴェーンは 1970 年にノーベル物理学賞を受賞した。磁気流体力学とも呼ばれる。

MHD 不安定性： 電磁流体力学で説明されるプラズマ中の不安定性。僅かな揺らぎや変動が成長することにより、プラズマと磁場に蓄積されたエネルギーが解放される現象。

ダブルアーク不安定性： 太陽表面に足を持ち、電流を伴う 2 つのアーク型（半円状）の磁力線が足元で磁気リコネクションを受けることで形成されるダブルアーク型磁力線で起きる MHD 不安定性。電流を伴うダブルアーク型磁力線が、太陽表面から宇宙空間へ向かって加速的に上昇することによって生じる。太陽フレアの発生機構として石黒直行（名古屋大学元大学院生）と本研究の代表者である草野によって 2017 年に理論的に提唱された（参考文献：Ishiguro, N. & Kusano, K. Double Arc Instability in the Solar Corona. *Astrophys. J.* 843, DOI:10.3847/1538-4357/aa799b (2017)）

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）」： 米国 NASA の Living With a Star (LWS) プログラムの一環として 2010 年より軌道上で観測を続けている太陽観測衛星。

宇宙天気現象： 地球環境や人間活動に影響を与える宇宙環境変動の総称。太陽フレアや太陽風の変動に伴う宇宙放射線、地球磁気圏、電離圏、大気の変動などを含む。通信・測位システム、航空、人工衛星や宇宙飛行士、電力網などへも影響や被害を与える場合がある。

宇宙天気予報： 宇宙天気現象の社会影響と被害を軽減する目的で、宇宙天気現象を事前に予報する取り組み。日本では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（センター長：石井守）がその運用を担っている。