

## 別紙 4

報告番号	※ 甲 第 号
------	---------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 Study on Solar Flare Trigger Process Based on Satellite Observations  
(衛星観測に基づく太陽フレア発生過程の研究)

氏 名 伴場 由美

## 論 文 内 容 の 要 旨

太陽フレアは、太陽コロナ中に蓄積された磁気エネルギーが解放される爆発現象である。フレアに伴い発生する高エネルギー粒子や衝撃波により、地球周辺の宇宙空間が擾乱を受けることがあり、人工衛星の故障や通信障害など、人類の社会生活にも影響が及ぼされることがある。このため、フレアの発生に関わる物理機構を理解し、その発生を予測することは、太陽物理学的に重要であるだけでなく、地球周辺の宇宙空間の擾乱を予測する宇宙天気予報という観点からも有意義である。しかし、フレアの発生条件については未だ統一的な理解が成されていない。

本研究では、太陽フレアの発生に関わる物理機構を理解し、その発生条件を明らかにすることを目的とする。このため、数値シミュレーションに基づくフレア発生モデルである KB12 モデル(Kusano & Bamba et al. 2012)に着目し、実際に太陽面上で発生した大規模フレアとの整合性を評価した。KB12 モデルでは、活動領域の大局的磁場と、その磁気中性線上に現れる小規模な磁場擾乱であるトリガ磁場の磁気リコネクション(内部リコネクション)によって、フレアの大規模な磁気リコネクションが引き起こされると考えている。また、活動領域の大局的磁気シア角  $\theta$ 、トリガ磁場の方位角  $\phi$  という単純な 2 つのパラメータを用いて、フレアの発生条件を定量的に表している。本研究では、ひので衛星、SDO 衛星、IRIS 衛星によって観測された多数のフレアの解析を行い、KB12 モデルから示唆される観測的特徴の実証を試みた。

まず、ひので衛星によって観測された 4 つの大規模フレアについて、トリガ領域(トリガ磁場の現れる領域)の特定を試みた。ひので衛星によって取得された光球面磁場画像と彩層画像を高精度に位置合わせを行い、光球面磁場構造と彩層におけるフレア前の発光(プリフレア発光)の時間的、空間的相関関係を調べた。この結果、フレア最初期に見られるシアしたフレアリボンの中心領域において、幾何学的に特徴ある磁場構造上でプリフレア発光が頻繁に見られ、これは KB12 モデルから示唆されるトリガ領域の特徴と一致した。さらに、KB12 モデルでフレア発生を決定づけるパラメータ  $\theta$  および  $\phi$  について、ひので衛星による 3 次元磁場データから定量的な測定を行い、実際のフレア発生条件と KB12 モデルによる条件を比較した。結果、解析を行った 4 つの大規模フレア全てについて、トリガ領域を特定し、それらが KB12 モデルで提案されるトリガ磁場の 2 つのタイプ、Opposite Polarity (OP) type と Reversed Shear (RS) type のいずれかに一致することを定量的に実証した(結果 1)。

上記 4 イベントは KB12 モデルの数値シミュレーションの初期条件に近い、比較的単純な磁場構造の活動領域で発生したフレアであったが、実際のフレアの多くはより複雑な磁場構造の下で発生する。そこで、フレア最初期に見られるフレアリボンが、KB12 モデルで示唆されるよりも複雑な構造を呈

するフレアイベントについて、モデルとの整合性を検証した。ひので衛星データに対して開発した前述の解析手法を SDO 衛星データに適用し解析を行った結果、このフレアが RS type のトリガ磁場によって、直前の小規模イベントから 2 段階のトリガ過程を経て発生したことを明らかにした。また、モデルではトリガ領域は 2 つのフレアリボンの間の磁気中性線上に挿入されるのに対し、このフレアのトリガ領域は磁気中性線からやや離れた位置に存在した。このことから、RS type の場合については、フレア発生に対する磁場構造の幾何学的条件がある程度の自由度を持つことが明らかになった(結果 2)。

ひので衛星、SDO 衛星を用いた解析では、OP または RS type の磁場構造上の彩層で観測されるプリフレア発光をトリガ領域の指標として用いてきた。これは、彩層におけるプリフレア発光を、KB12 モデルで提案される内部リコネクションの結果として位置付けていたためである。そこで、彩層の高分解能分光観測を用いて、トリガ領域上空のプラズマの運動を調べることで、フレア前の内部リコネクションの存在について定量的な議論を展開した。その結果、トリガ領域上でプリフレア発光が観測された直後に、そのごく近傍の領域において、彩層下部から遷移層の各スペクトル線の青方偏移がみられた。これは、光球上部から彩層下部における内部リコネクションによって、彩層中のプラズマが加熱され上空へと打ち上げられた結果と考えられる。光球面視線方向磁場データからコロナ中の磁気アーケードの構造を外挿した結果からも、内部リコネクションの高度は光球上部から彩層下部と推定された。したがって、コロナ中で発生する大規模な磁気アーケード間の磁気リコネクション(フレアリコネクション)が、低高度における小規模なトリガ磁場との内部リコネクションによって誘発されるという KB12 モデルの描像を支持する結果が得られた。

さらに本研究では、SDO 衛星によって観測されたフレア 32 イベントについて統計解析を行い、OP/RS type を含む独立した 6 つのタイプに分類することで、KB12 モデルの普遍性について議論を行った。分類の結果、70%程度のイベントについて、初期のフレアリボンの形状が極めて複雑であるか、フレア前にプリフレア発光がみられないため、本研究で開発した手法によるトリガ領域の特定は容易ではないことがわかった。これらの領域では、同一領域におけるフィラメント噴出や小規模フレアイベントとの位置および時間間関係も含めて詳細に解析することで、トリガ領域の特定が可能となることがわかった。また、20%程度のイベントが RS type に分類された一方で、OP type は統計解析を行った 32 イベント中には存在せず、前述のひので衛星データ解析(結果 1)によって発見された 2 イベントのみであった。この分類結果および前述の SDO 衛星データ解析(結果 2)から、KB12 モデルの数値シミュレーションにおいて、OP および RS type のそれぞれについて、磁気中性線からのトリガ磁場の空間的変位を考慮した新たな数値シミュレーションを実施することを提案した。その結果、RS type の物理機構の方がトリガ磁場の磁気中性線からの空間的変位に対する許容量が大きいことが明らかになった。したがって、実際の太陽表面では RS type のトリガにより駆動されるフレアの方が高い可能性が示唆され、これは本研究の統計解析から得られた傾向と一致した。さらに本研究では、ひので衛星による磁場データの解析から、OP または RS type のトリガ構造が形成されることに加えて、トリガ磁場の磁束量がある臨界値に達した直後にフレアが発生することを発見した。このことから、KB12 モデルでフレアの発生条件として提案される、活動領域磁場の幾何学的構造を特徴づける 2 つのパラメータ  $\theta$ 、 $\phi$  の他に、フレア発生のタイミングを決定する新たなパラメータとしてトリガ磁場の磁束量の存在を提案した。

以上のように本研究では、KB12 モデルで提案される、フレア発生に至る物理機構を観測的に実証し、2 つのパラメータ  $\theta$ 、 $\phi$  は実際の大規模フレアの発生条件と一致することを確かめた。また、フィラメント噴出と関係して発生するフレアや複雑な磁場構造のもとで発生するフレアであっても、基本的な物理機構は KB12 モデルの概念で説明できる可能性が高いことを示した。