

ひので／可視光磁場望遠鏡で迫る 太陽フレア発生過程の謎



伴 場 由 美

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所SOLAR-Bプロジェクト
〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1〉
e-mail: y-bamba@nagoya-u.jp

太陽表面で発生する爆発現象であり、時として地球周辺の宇宙環境の擾乱の原因となる「太陽フレア」。多くの研究により、フレアは太陽コロナに蓄積された磁気エネルギーが、磁気リコネクションによって解放される現象であると理解されている。しかし、その発生にかかわる物理過程の理解は不十分で、フレア発生予測の精度は大きくは向上していない。本稿では、われわれのグループが進めてきた、太陽フレア発生過程に関する理論的な研究による理解と、その観測的検証の現状を解説する。特に、高い空間分解能を誇るひので／可視光磁場望遠鏡を用いた太陽フレアトリガ研究の成果、および、ひのでの観測によって明らかになった新たな課題について紹介する。

1. 太陽フレアのトリガ問題

太陽表面に現れる活動領域（黒点群）上空に蓄積された磁場のエネルギーが爆発的に解放される現象を「太陽フレア（以下、単にフレア）」という。1回のフレアによって解放されるエネルギーは 10^{29} – 10^{32} ergにもなり、太陽系最大の爆発現象である。太陽観測衛星「ようこう」などによる観測により、太陽外層大気（コロナ）中で反平行の磁力線がつなぎ変わる「磁気リコネクション」の証拠が得られ^{1), 2)}、噴出を伴う太陽フレアの磁気構造に関するCSHKPモデル^{3)–6)}が太陽フレアの標準的なモデルとして広く受け入れられている。しかし、反平行の成分をもつ磁力線は太陽面上に形成される多様な磁場構造の中に無数に存在し、いつ・どこでフレアが発生するのか、すなわちフレア発生のトリガ（引き金）の詳細ははまだ完全には解明されていない。

フレアのトリガ過程に関して、これまでに理論的・観測的アプローチからさまざまなモデルが提

案されている。その一例が、浮上磁場モデル⁷⁾である。フラックスロープと呼ばれる、らせん状にねじれた磁束管が、周囲の磁力線に支えられて存在しているような場合に、フラックスロープを支える磁力線の足元に小規模な磁場構造（浮上磁場）が現れる。この浮上磁場との磁気リコネクションによって、フラックスロープを支える磁力線が弱まり、不安定になったフラックスロープが噴出し、フレアが発生する。実際に、フレアを起こした活動領域中には、フレア発生の前後に浮上磁場が現れる様子が、ひので／可視光磁場望遠鏡(SOT)によって観測されている^{8), 9)}。

また、対流による光球面の水平運動によってフラックスロープそのものがさらに強くねじられることも考えられる。このとき、フラックスロープに沿った電流が強められ、ヘリカルキルク不安定性によってフラックスロープが噴出するという、キルクモード不安定性モデル^{10), 11)}が提案されている。このような、強くねじれたフラックスロープの存在は、「シグモイド」と呼ばれるS字型の

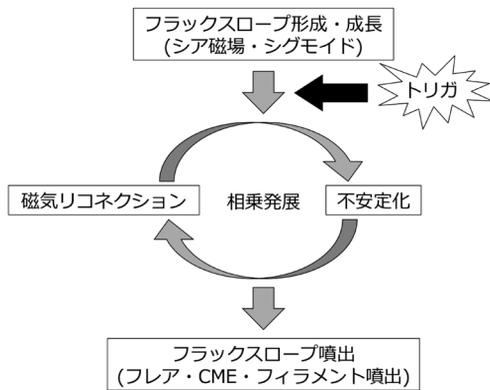


図1 フレア発生に至る物理過程の模式図.

構造として、ひので/X線望遠鏡 (XRT) によって観測され、その形成過程が数値シミュレーションによって示されている¹²⁾。また、フラックスロープの足元では、光球面磁場の水平成分が強くシアしている (ポテンシャル磁場から大きく逸脱している) と考えられる。このような強くシアした光球面水平磁場は、フレア発生前の活動領域に、ひので/SOTによって観測されている¹³⁾。一方で、必ずしも磁気シアの強い活動領域でのみフレアが発生するというわけではないことも、観測から指摘されている¹⁴⁾。

図1は、フレア発生に至る物理過程を模式的にまとめたものである。まず、ねじれたフラックスロープがコロナ中に形成され、徐々に成長する。フラックスロープで電磁流体的不安定化が起きると、反平行の磁力線構造 (電流シート) が作られ、そこで磁気リコネクションが起きる。磁気リコネクションによる磁気構造の変化は、さらに系を不安定化させる。このように、磁気リコネクションと不安定化の相乗発展によって、フレアにおける磁気エネルギー解放が高速化され、そして激しくフラックスロープを上空に噴出させる。前述のとおり、ひので衛星により、フレア発生過程の全体描像に迫る観測論文が数多く報告されている。しかし、フラックスロープがどのようにして形成されるのか、磁気リコネクションと不安定化

の相乗発展プロセスにどのように移行するののかについて、物理的な理解が不十分であった。したがって、フレアをトリガする物理過程を理解するためには、フレア発生前後の活動領域の、特に磁場構造の発達を詳細に観測することが重要である。

2. ひのでが捉えたフレアトリガ構造

2.1 特徴的な磁場構造の発見

ひので/SOTは、時間分解能・空間分解能ともに世界最高レベルの撮像観測と、世界最高の磁場測定精度を有する偏光分光観測によって、光球面磁場および彩層の微細構造の早いタイムスケールの変化を捉えることが可能である。SOTはこれまでに1,000個以上のフレアを観測しているが¹⁵⁾、本稿ではその中の2006年12月13日に観測された大規模フレアを一例として紹介する。

筆者らは、SOTによって観測された光球面視線方向磁場画像に、彩層でフレア前に見られる強い発光や、フレアリボンと呼ばれるフレア時の増光の輪郭線を重ね合わせ (図2)、それぞれの時間発展を調べた。図2(d) に示すように、南北に存在する正負の黒点にまたがるようにして、二つのフレアリボンがフレア発生直後に現れた。このフレアリボンの中心部分には、細長く引き伸ばされた小規模な双極磁場構造が存在していた。北側が負極、南側が正極という、活動領域の大局的な構造に対し、この小規模構造は逆の極性のパターン (北側が正極、南側が負極) をもっていた。この小規模構造は、フレアの約6時間前には、負極の黒点の中に現れた小規模な正極の島状構造であった (図2(a) 矢印部分)。この正極の島状構造の成長に伴って、引き伸ばされた正負の小規模磁場構造の間の局所的磁気中性線上で、彩層における強い発光 (プリフレア発光) が断続的に観測された (図2(b))。以上のことから、フレア前に活動領域磁場構造中に現れる小規模な双極磁場構造が、フレア発生に際し重要な役割を担っていると推測できる。

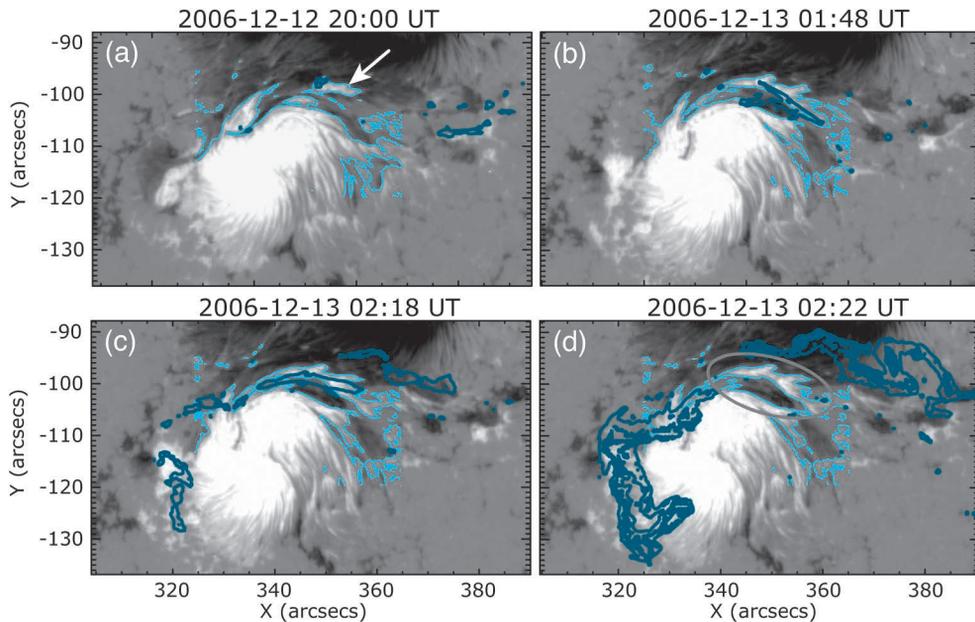


図2 フレアに至るまでの光球面視線方向磁場構造と彩層における発光の時間発展。背景の白/黒が光球面視線方向磁場の正極/負極，明るい水色の線が磁気中性線，暗い青線が彩層における強い発光の輪郭線を表している。(a)に矢印で示した小規模な正極の島状構造が成長し，(d)に丸で囲まれた小規模な双極磁場構造(トリガ構造)を形成する。なお，北側の負極の黒点はさらに北側(画像中の上側)にまで広がって存在しているが，本画像中には表示していない。

2.2 理論モデルとの一致

この観測について，名古屋大学の草野教授を中心としたグループが提案しているフレア発生モデル¹⁶⁾と比較する。このモデルでは，図3上部に示したように，エネルギーの蓄積された大局的磁場(明るい水色)に対して，磁気中性線上に小規模な磁場構造(「トリガ構造」，暗い青色)を与えたときに，フラックスロープの形成や磁気リコネクションの発生，そして噴出に至る過程を数値シミュレーションによって系統的に調べている。このモデルでは，異なる空間スケールの磁場構造を特徴づける二つのパラメータが用いられている。一つは，活動領域の大局的磁場(図3中の水色の矢印で描かれたアーケード)が，どれだけポテンシャル磁場からずれているのかを示すシア角 θ_0 で，活動領域に蓄積された磁場のエネルギーを特徴づける。もう一つは，小規模な双極磁場構造(図3中の青色の矢印)の方位角 φ_e で，フレア発

生の有無を決定づける。これら θ_0, φ_e の組み合わせを変えて数値シミュレーションを行ったところ，図3下の図にまとめたように，特に小規模な双極磁場構造が次の二つのタイプの特徴を満たすときのみ，噴出を伴う大規模なフレアが発生することがわかった。小規模磁場が大局的磁場と逆の極性のパターンをもつ「逆極性タイプ」($\varphi_e=180^\circ$ 付近)の時，または，小規模磁場の局所的磁気シアが大局的磁気シアに反する「反シアタイプ」($\varphi_e=270^\circ$ 付近)のときである。ここで，2.1節で述べた，ひのでで観測されたフレア前に現れる小規模な双極磁場構造を振り返ってみる。活動領域の大局的な構造(南北の正負の黒点)に対し，図2(d)に丸で囲った小規模構造は，逆の極性のパターンを有していた。筆者は，ひので/SOTの偏光分光観測によって得られた光球面3次元磁場データを用いて，角度 θ_0, φ_e を測定した。その結果， $\theta_0=180-186^\circ, \varphi_e=70\pm 15^\circ$ と，逆極性タイプ

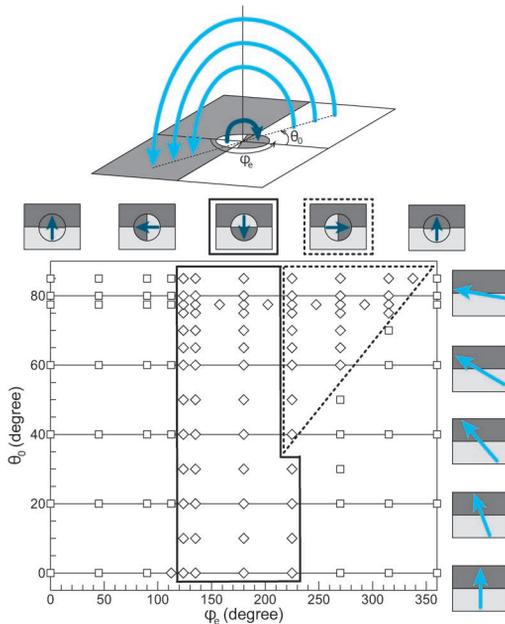


図3 フレア発生条件を表した図¹⁶⁾. 数値シミュレーションによると、◇で表される θ_0 , ϕ_e の組み合わせのときのみフレアが発生する(□はフレア発生なし). 黒の太線と破線で囲まれている◇印はそれぞれ逆極性タイプと反シアタイプに分類される.

の条件に一致することを見いだした. したがって, ひのでで観測された小規模な双極磁場構造は, 2006年12月13日の大規模フレアの逆極性タイプのトリガ構造であったと結論づけた. また, フレア前に見られたプリフレア発光(図2(b)参照)は, 大局的な構造(正負の黒点をつなぐ磁気アーケード)と逆極性タイプのトリガ構造の間の磁気リコネクションによって発生すると考えられる. また, 前述の反シアタイプのトリガの特徴を満たす小規模磁場構造も, ひので/SOTの観測により発見されている¹⁵⁾⁻¹⁷⁾. このように, ひのでで観測されたフレア前の一連の特徴的な変化は, 草野教授らのモデルと非常によく一致する¹⁶⁾.

2.3 さらに示唆

ところで, 前述のとおり, 図2(d)に見られる逆極性タイプのトリガ構造は, フレア発生の約

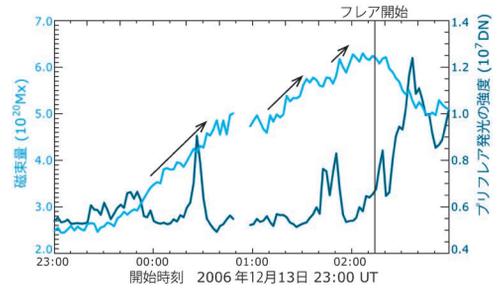


図4 フレアに至るまでのトリガ構造の磁束量(水色)とプリフレア発光の強度(暗青)の時間変化.

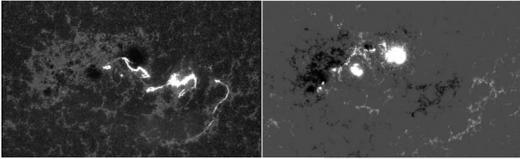
3時間前にはすでに完成されており, 角度 θ_0 , ϕ_e の条件が満たされていた. にもかかわらず, フレア発生までに3時間を要したことから, フレア発生条件として角度 θ_0 , ϕ_e 以外の条件が存在する可能性が高い. そこで, 逆極性タイプのトリガ構造に含まれる磁束量およびトリガ構造周辺のプリフレア発光の強度について, フレアに至るまでの時間変化を調べた. 図4に示したように, トリガ構造の磁束量(水色)はフレア発生時刻(黒縦実線)に向けて段階的に増加している. また, 磁束量の増加に反応してプリフレア発光が見られ, 磁束量がある臨界値に達するとフレアが発生する. これは, トリガ構造の磁束量が増加するに従って, トリガ構造と大局的磁場の間での磁気リコネクションが徐々に進行し, やがて大規模な構造が不安定化することを示唆している. つまり, 前述のパラメータ θ_0 , ϕ_e のほかに, 「トリガ構造の磁束量」が, 特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の候補として見いだされた.

3. 今後の展望

3.1 多様なフレアイベント

このように, 筆者らの研究によって, 図3にまとめたフレアトリガモデルに一致する多数のフレアイベントが発見された. さらに, ひのでの精密な磁場観測により, 図3に示されている二つのパラメータに加え, フレア発生のタイミングを決定

(a) 活動領域中心部から外れた領域で発生するフレア



(b) 複雑な磁場構造の領域で発生するフレア

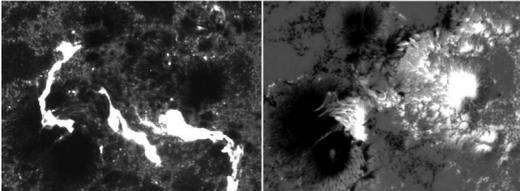


図5 さまざまなフレアの例。それぞれ左側が彩層におけるフレアリボン、右側が同じ観測視野の磁場画像。いずれもSDO衛星によって観測されたもの。

するうえで重要となる、別のパラメータの存在が示唆されている。一方で、フレアは活動領域中心部だけではなく、図5(a)のように活動領域周辺の弱い磁場が分布する領域でも発生する。また、図5(b)のように、図2で紹介したよりもさらに複雑な磁場構造の領域でも発生する。これらの場合には、2章で述べたような、トリガ構造を特定するうえで重要な指標となる「シアした二つのフレアリボン」あるいは「プリフレア発光」が明確でないことがある。こうした多様なフレアイベントに対し、図3のフレアトリガモデルがどの程度適用できるのかを評価するためにも、さらに多くのフレアの統計解析を行い、モデルとの整合性を評価する必要がある。そのような統計解析には、2010年に打ち上げられた、米国のSolar Dynamics Observatory (SDO) 衛星によるデータと、ひので衛星によるデータを相補的に用いて解析を行うことが有効である。SDO衛星は、空間分解能はひので/SOTに劣るものの、太陽全面を多波長で、かつ高時間分解能で観測しており、ほぼすべてのフレアイベントが観測できているため、特にフレアイベントの統計解析に適している。一方、ひので/SOTは、観測視野が活動領域一つ

分程度(最大で $327'' \times 163''$)と狭いが、前述のとおり世界最高の空間分解能と磁場測定精度により、磁場構造の詳細解析に適している。このようにして、図5に示すような多様なフレアイベントと、図3に示したモデルをはじめとする、さまざまな理論モデルとの整合性を評価することで、フレアのトリガにかかわる物理過程の統一的理解に迫る研究を現在進めている。

3.2 宇宙天気研究への貢献

図1にまとめたように、フラックスロープの噴出はフレアやコロナ質量放出(CME)、フィラメント噴出などとして観測される。特に、フレアに伴って発生する高エネルギー粒子やCMEに伴う衝撃波などは、地球周辺の宇宙環境の擾乱を引き起こすことがある。大規模なフレアが発生すると高い確率でCMEも同時に観測されることが知られているが¹⁷⁾、これらは必ずしも同時に発生するとは限らない。実際に、図5(b)に示したフレアは、近年まれに見る巨大黒点領域において発生した大規模フレアであったが、CMEを伴わなかった。高度な情報化社会を守る観点からも、フレアやCMEの発生を含む宇宙環境の擾乱予測、すなわち宇宙天気予報のニーズが高まっている。最近では、SDO衛星による膨大なフレア観測データの解析から、フレア・CME発生予測に有用なパラメータを探る試みが盛んに行われている^{18), 19)}。しかし、このような試みの多くは、「経験的」にフレア・CME発生と相関があると考えられるパラメータを見いだすことはできても、それらの発生予測の精度自体を大きく向上させるには至っていない。これは、どのパラメータがフレア・CME発生のどの過程で重要なのかを、物理的に理解できていないからにはほかならない。経験的な手法による従来の予測の精度を大きく向上する、新たなフレア・CME発生モデルの実現のためには、フレア・CMEのトリガ機構を物理的に理解することが不可欠である。2015年より始動した新学術領域研究「太陽地球圏環境予測：わ

れわれ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」(略称: PSTEP, 領域代表: 草野完也名古屋大学教授)では, 大規模フレアやCMEのトリガ過程を物理的に理解し, 高精度フレア発生予測スキームを開発することを目指して, ひので衛星などによる精密な太陽面磁場観測と先進的な物理モデルの連携による研究を推進している. また, 光球とコロナをつなぐ彩層の磁場観測を目指す, 次期太陽観測衛星Solar-C計画によって, 光球の微細な磁場構造変化が, 大規模なコロナ磁場のトポロジー変化を引き起こすメカニズムの詳細を理解することができると期待されている.

謝 辞

本稿は, 筆者らが発表した投稿論文²⁰⁾⁻²²⁾および筆者の博士学位論文²³⁾に基づいております. 筆者の指導教員である草野完也教授はじめ, 共同研究者の皆様のご指導とご協力, また, 編集委員の皆様的確な助言に感謝いたします. 2006年の衛星打上げ当時高校生であった筆者が, 今こうして素晴らしいデータを用いて研究することができるのは, 「ひので」の実現のために尽力された皆様のおかげです. 皆様の粉骨砕身の努力に敬意を表するとともに, 心より感謝申し上げます.

参考文献

- 1) Masuda S., et al., 1994, Nature 371, 495
- 2) Tsuneta S., et al., 1992, PASJ 44, L63
- 3) Carmichael H., 1964, NASA Special Publication 50, 451
- 4) Sturrock P. A., 1966, Nature 211, 695
- 5) Hirayama T., 1974, Solar Physics 34, 323
- 6) Kopp R. A., Pneuman G. W., 1976, Solar Physics 50,

85

- 7) Chan P. F., Shibata K., 2000, ApJ 545, 524
- 8) Kubo Y., et al., 2007, PASJ 59, S779
- 9) Toriumi S., et al., 2013, ApJ 773, 128
- 10) Fan Y., Gibson S. E., 2003, ApJ 589, L105
- 11) Török T., Kliem B., 2005, ApJ 630, L97
- 12) Amari T., et al., 2014, Nature 514, 465
- 13) Magara T., Tsuneta S., 2008, PASJ 60, S1181
- 14) Leka K. D., Barnes G., 2003, ApJ 595, 1277
- 15) Watanabe K., et al., 2012, Solar Physics 279, 317
- 16) Kusano K., Bamba Y., et al., 2012, ApJ 760, 31
- 17) Yashiro S., et al., 2006, ApJ 650, L143
- 18) Bobra M., et al., 2015, ApJ 798, 135
- 19) Bobra M., et al., 2016, ApJ 821, 127
- 20) Bamba Y., Kusano K., et al., 2013, ApJ 778, 48
- 21) Bamba Y., Kusano K., et al., 2014, PASJ 66, S16
- 22) Bamba Y., Kusano K., et al., ApJ submitted
- 23) 伴場由美, 2016, 博士論文 (名古屋大学)

A New Approach to Solar Flare Trigger Process with Hinode Solar Optical Telescope

Yumi Bamba

SOLAR-B Project, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara 252-5210, Japan

Abstract: Solar flares are explosive phenomena that release magnetic energy stored in the solar corona. Flares sometimes impact our terrestrial environment. However, the triggering process of flares is still not completely understood. Here, I review the current status of our theoretical understanding and observational examination. Especially, I introduce the outcomes and newly risen subjects from our trigger study using Hinode/Solar Optical Telescope (SOT).