

フレアトリガ領域における磁場構造とプリフレア発光の関係

名古屋大学 太陽宇宙環境物理学研究室(SSt 研)

修士 2 年 伴場由美

(y-bamba@stelab.nagoya-u.a.jp)

<Abstract>

太陽系最大の爆発現象である太陽フレアは、コロナ中に蓄積された磁場のエネルギーがプラズマの運動および熱エネルギーとして解放される現象である。その主な磁気エネルギー解放機構は磁気リコネクションであると広く理解されているが、フレアの発生過程に関する定量的な理解は未だ不十分である。フレアの発生過程に関するモデルは幾つか提案されているが、いずれも観測的に実証されていない。本研究では、草野の提案するモデル(Kusano et al. 2012 (submitted to ApJ))の定量的な検証を目的とし、大規模フレアを起こした複数の活動領域における磁場構造とプリフレア発光の関係について検証を行った。

解析対象はひので衛星の可視光磁場望遠鏡(SOT)が 2011 年 7 月までに観測した M5.0 クラス以上の全てのフレアイベント(2006 年 12 月 13 日/X3.4 クラス、12 月 14 日/X1.5 クラス、2011 年 2 月 13 日/M6.6 クラス、2 月 15 日/X2.2 クラス)である。SOT によって得られた光球面磁場画像上に、磁気中性線と、Ca 線での発光の輪郭を重ねて描画することにより、磁場構造とプリフレア発光の位置とタイミングの相関関係を調べた。また、Ca 線で見たフレアリボンの形状から活動領域のシア角を、光球面磁場画像からフレアのトリガとなった小規模磁場構造(トリガ領域)が活動領域の大局的磁場と成す方位角を、それぞれ見積もった。その結果、全てのフレアが草野の提案するモデルに一致することが分かった。

1. Introduction

太陽フレア(以下単に「フレア」と呼ぶ)は太陽系最大の爆発現象であり、フレアに伴って大量のプラズマが宇宙空間へ放出される現象(コロナ質量放出(CME))が発生する場合があります。CMEあるいはフレア及びCMEの衝撃波が作る高エネルギー粒子が地球を直撃すると、情報通信システムへの悪影響や宇宙飛行士の被曝などが懸念され、その影響は人類の社会生活にとって無視できないものである。これらの危険を回避するためには、フレアの発生メカニズムを解明し、フレアの発生そのものを事前に予測することが必要である。これまでの研究により、太陽フレアは、太陽表面に蓄えられた磁場のエネルギーがプラズマの運動エネルギーと熱エネルギーとして瞬時に解放される現象であると広く理解されている。しかし、フレアがいつ・どこで発生するのか、すなわちフレアのトリガは何かという問題には、未だにほとんど解明されていない。

そこで我々のグループでは、数値シミュレーションに基づいた最新のフレアトリガモデルを提案している(Kusano et al. 2012 (submitted to ApJ))。このモデルでは、フレアは活動領域の磁気中性線近傍に現れる小規模な磁束がトリガとなって引き起こされると考える。図 1 左のように、活動領域の磁気中性線上に、ある特徴的な磁場構造を持つ小規模な磁束(たとえば浮上磁束などを仮定したもの)を与えると、もともとあった活動領域磁場とリコネクションを起こしてフレアが発生する。この特徴的な構造を持つ小規模磁束を「トリガ領域」と呼ぶ。フレアの際にはトリガ領域を中心にシアしたりボンが現れる。また、フレアの発生条件は以下の 2 つのパラメータ(図 1 右)によって定量的に決められる。

- ①活動領域の大局的磁場のシア角: θ
- ②活動領域の磁気中性線近傍に現れる小規模磁束の方位角: ϕ

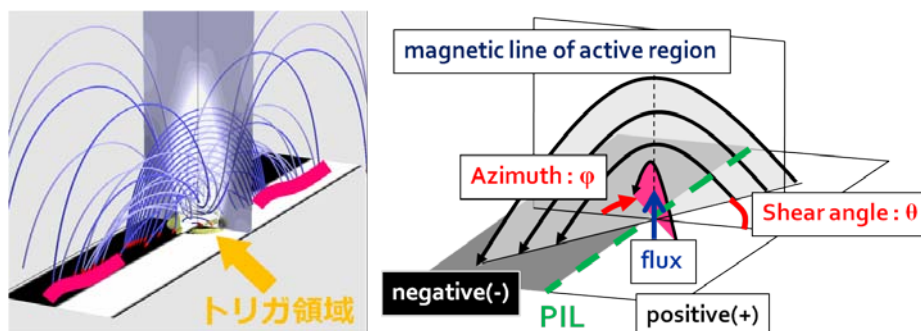


図 1 左: Kusano et al. 2012 によるシミュレーションの一部。
白/黒は磁場の正極/負極を、水色の線は磁力線を表す。
活動領域の磁気中性線近傍に与えられた、ある特定の磁場構造を持つ小規模磁束がフレアのトリガとなりうる。
右: フレアの発生条件を表すパラメータ。
活動領域の大局的シア角 θ 、トリガとなる小規模磁束の方位角 ϕ

これにより、フレアを発生させるトリガ領域には、次の 2 つのタイプがあることが分かった。

- ①Opposite Polarity Type
小規模磁束の極性のパターンが、活動領域の大局的磁場の極性のパターンに対して逆の場合。
- ②Reversed Sheared Type
小規模磁束のシアが、活動領域の大局的磁場のシアに対して逆の場合。

これらのシミュレーション結果は、Flare Phase Diagram(図 2)にまとめられる。

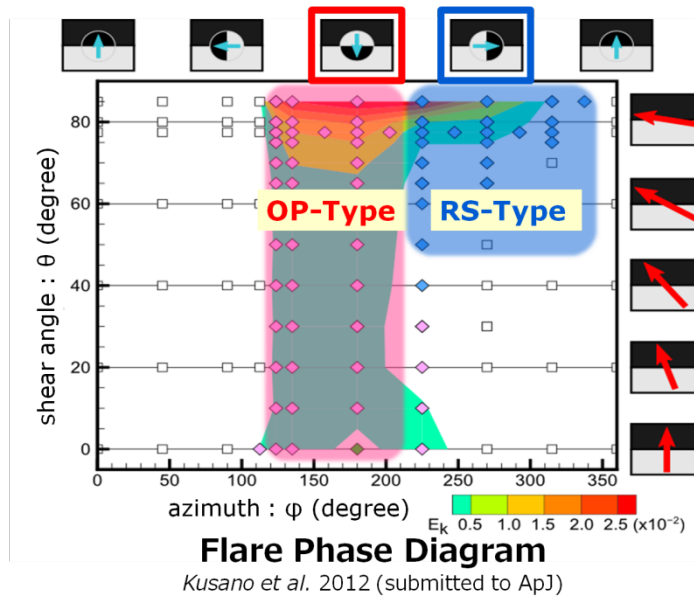


図 2: Flare Phase Diagram

白の四角の条件ではフレアは発生せず、
色つきのダイヤモンドの条件(OP- or RS-Type)でのみフレアが発生。
背景の色はフレアが発生した時に解放される運動エネルギーの最大値。

本研究の目的は、上述のフレアトリガモデルの観測的検証を行うことであり、過去に起きた複数の大規模フレアについて、フレアの発生条件がモデルで示唆される条件に一致するかを調べた。

2. Data Analysis

解析を行ったイベントは、2006年3月～2011年7月までにひので衛星・可視光磁場望遠鏡(SOT)によって観測された、GOES X線強度がM5.0クラス以上の大規模フレアである。このような条件を満たすイベントは、以下の4例であった。

Event No.	Date	X-ray class	Active region	Start time
1	13-Dec-2006	X3.4	10930	02:14 UT
2	14-Dec-2006	X1.5	10930	22:07 UT
3	13-Feb-2011	M6.6	11158	17:28 UT
4	15-Feb-2011	X2.2	11158	01:44 UT

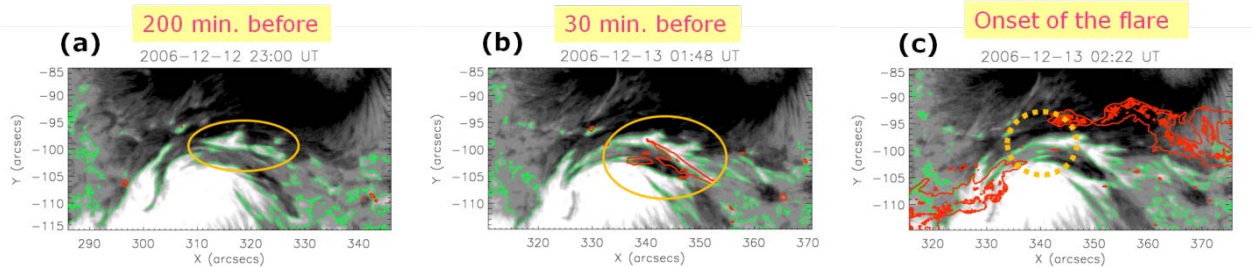
また、ひので/SOTは、現在運用されている太陽観測衛星の中でも最高の空間分解能を有する。本研究では、このようなひので/SOTの特徴を生かして、フレア前の活動領域の磁場構造の変化と、フレア前の短時間で断続的な発光現象であるプリフレア発光の時間的・空間的な相関関係について解析を行った。手法としては、ひので/SOTによって得られた磁場画像上に磁気中性線を描画し、さらにその上にCa線によって観測されるプリフレア発光の輪郭線を重ねることで、上記の4つのフレアイベントについて、次の3点を調べた。

- ① トリガ領域はどこか？
- ② フレアのタイプはいずれか？(OP- or RS-Types?)
- ③ シア角 θ 、方位角 ϕ はどの程度か？

3. Results

本章に示す画像中では、背景の白/黒は磁場の正極/負極、緑線は磁気中性線、赤は Ca 線によるプリフレア発光を表す。今回は解析を行った 4 つのイベントのうち Event1 と Event3 について、詳細を報告する。

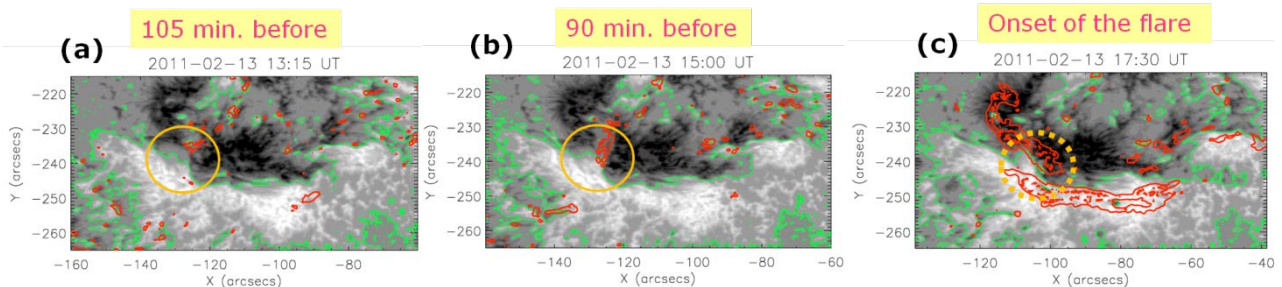
(1) Event1 2006/12/13 X3.4-class



Event1 は Opposite Polarity (OP) Type のフレアであった。

パネル(c)にみられるように、初期のフレアリボンはシミュレーション結果から示唆される通りのシアした構造をもつ。これより、トリガ領域は(c)に示す破線の丸のあたりに存在することが考えられる。その場所をフレアの約 200 分前の画像(a)でみると、負極の中に正極の島があることが分かる(黄色の丸で示した部分)。この正極の島は徐々に成長し、OP-Type の磁場構造を形成する。パネル(b)の丸で示した部分にみられるように、フレアの 30 分前には OP-Type の磁気中性線上でプリフレア発光、すなわち活動領域の大局的磁場と小規模磁束間のリコネクションがみられる。

(2) Event3 2011/02/13 M6.6-class



Event3 は Reversed Shear (RS) Type のフレアであった。

Event1 同様、パネル(c)ではシアしたリボンがみられる。これよりトリガ領域は(c)に示した破線の丸のあたりに存在すると考えられ、フレアの約 105 分前の画像(a)では丸で示した部分に正極が負極側に半島状に侵入した構造がみられる。この半島部分では、パネル(b)にみられるように半島の西側で、フレア前に頻繁にプリフレア発光がみられた。この活動領域の大局的シアは、シアしたリボンの形から南西から北東(画像の右下から左上)の方向であることが推測され、それに対し半島のプリフレア発光がみられた部分では南東から北西(画像の左下から右上)の方向であったと考えられる。したがって、プリフレア発光がみられた領域は局所的に RS-Type の磁場構造を持っており、これがフレアのトリガとなったと考えられる。

4. Summary

本研究では、Kusano et al. 2012 で提案されるシミュレーションモデルを観測的に検証するために、ひので/SOT によって得られた磁場画像とCa線画像から、フレア前の磁場構造とプリフレア発光の時間的・空間的な相関関係について解析をおこなった。結果として、解析を行った全てのフレアイベント(2006年12月13日/X3.4クラス、12月14日/X1.5クラス、2011年2月13日/M6.6クラス、2月15日/X2.2クラス)について、

- ① トリガ領域の場所の特定
- ② 活動領域の大局的シア角 θ 、フレアのトリガとなった小規模磁束の方位角 ϕ の測定
- ③ フレアのタイプ分類

を行った。これにより、過去に起きた大規模フレア4例を、Kusano et al. 2012 で提案される Flare Phase Diagram 上にプロットした(図3)。結果として、すべてのフレア Kusano et al. 2012 で示される条件のもとで発生したことが確かめられた。

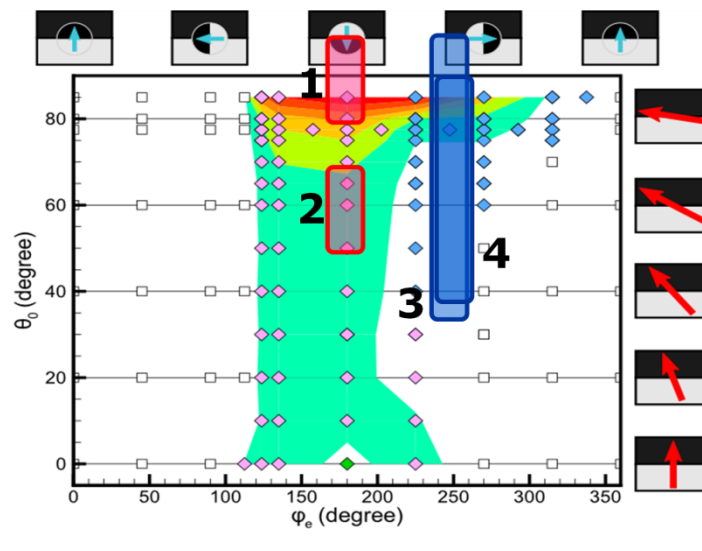


図3: Event1~4のフレア発生条件を Flare Phase Diagram 上にプロットしたもの。
すべてのイベントがシミュレーションから示唆されるフレア発生条件のもとで発生していることが分かる。