

太陽フレアの前兆現象における非熱的粒子の研究

梶田聡史^{*1,2}, 下条圭美^{*3}, 北林照幸^{*4}

^{*1} 〒 259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1

東海大学大学院 理学研究科物理学専攻

E-mail:3bsnm004@mail.tokai-u.jp

^{*2} 〒 181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

国立天文台太陽天体プラズマ研究部

^{*3} 〒 181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

国立天文台 野辺山太陽電波観測所

E-mail:masumi.shimojo@nao.ac.jp

^{*4} 〒 259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1

東海大学 理学部 物理学科

E-mail:teruyuki@tokai-u.jp

(2014年9月24日受付；2014年11月19日受理)

A Study of Non-Thermal Particles before the Impulsive Phase of Solar Flares

by

Satoshi KAJITA^{*1,2}, Masumi SHIMOJO^{*3} and Teruyuki KITABAYASHI^{*4}

^{*1} *Graduate School of Science, Course of Physics, Tokai University,*

4-1-1 KitaKaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292, Japan

E-mail:3bsnm004@mail.tokai-u.jp

^{*2} *Solar and Plasma Astrophysics Division,*

National Astronomical Observatory of Japan

2-21-1 Ohsawa, Mitaka, Tokyo, 181-8588, Japan

^{*3} *Nobeyama Solar Radio Observatory,*

National Astronomical Observatory of Japan

2-21-1 Ohsawa, Mitaka, Tokyo, 181-8588, Japan

E-mail:masumi.shimojo@nao.ac.jp

^{*4} *Department of Physics, Tokai University,*

4-1-1 KitaKaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292, Japan

Abstract

In order to understand the conditions for triggering the particle acceleration in solar flares, we investigated the activities before the impulsive phase of solar flares using hard X-ray, soft X-ray and microwave data. First, we classified that into ‘preflare’ or ‘precursor’ on the basis of the X-ray time profiles, and then judged using the hard X-ray spectrums whether the component of the emission from accelerated electrons (non-thermal component) exists. As a result, in the ‘precursor’ events, we found no correlation between the existence of the non-thermal component, and the soft X-ray flux, which is a good indicator of total released energy. Since the feature is shown in normal flares, a ‘precursor’ event might be just a tiny flare. On the other hand, we confirmed that most of the ‘preflare’ events don’t contain the non-thermal component. The observing fact indicates that the particle acceleration is suppressed during a ‘preflare’ event.

1 Introduction

太陽フレアとは太陽大気で起きている爆発現象であり、 γ 線から電波までの広い波長域での増光現象として観測される。この現象はイギリスの天文学者 Richard Christopher Carrington により太陽面上での白色光の増光現象として発見された (Carrington, 1859[1])。その後一度に視野全面の単色像取得が可能なりオフィルターが発明されると (Lyot, 1944[2])、 $H\alpha$ 線の増光現象としてのフレアが頻繁に観測されるようになった。現在では、衛星観測によって極端紫外線や X 線といった、不可視波長域でのフレア観測がされている。

太陽フレアの大きさは 1~10 万 km 程度で、時間スケールの範囲は数分から数時間と幅広く分布し、解放されるエネルギーは $10^{29} \sim 10^{32}$ erg に達する。近年では太陽フレアは Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) によって観測される 1.0\AA から 8.0\AA の X 線のフラックスを用いて $10^{-8} [W/m^2]$ から 10 倍毎に A, B, C, M, X の 5 つのクラスに分類されている。それぞれのフレアの規模は「M5.2」のように軟 X 線フラックスの有効数字 2 桁を添えて表記される。

太陽フレアは「磁気リコネクション」と呼ばれる磁力線のつなぎ変わりによって磁気エネルギーが解放されることで発生すると考えられており (e.g. Sibata & Magara, 2011[3])、この解放された磁気エネルギーによりプラズマが加熱・加速され、数十 keV 以上の非熱的粒子 (イオン・電子) が生成されている。しかし、太陽フレアがどのように開始されるか、特に非熱的粒子の生成がどのように始まるのかについては未だに詳しいメカニズムが解明されていない。

様々な波長領域において増光現象が観測されるフレアだが、各波長によって特徴的な時間変動を示すことがわかっている。主に非熱的粒子¹⁾からの放射の寄与が大きいマイクロ波や極端紫外線・硬 X 線 (> 10keV) では、フレア開始直後に数秒から数分程度の時間スケールで鋭いピークを持つ放射強度の増加・減少がみられる。この期間をインパルスフェーズと称している。この期間に非熱的電子から放射される硬 X 線スペクトルはべき分布を示し、べき指数の絶対値は多くのイベントにおいて 2 から 6 の間に分布する。また、インパルスフェーズ以降、高温の熱的プラズマから放射される軟 X 線 (< 10keV) の

¹⁾本稿での“非熱的粒子”は、速度分布が Maxwell 分布から外れて加速された粒子を意味している。

緩やかな放射強度の増加・減少の期間をメインフェーズと名付けられている。一方、インパルスフェーズの前にも、メインフェーズの軟 X 線増光よりかなり小さな放射強度の増加がみられることが知られている。このフレア発生前に発生する前兆現象には、軟 X 線の増光の他に紫外線・電波の増光や軟 X 線輝線による観測からわかる温度やドップラー速度の増加、サージと呼ばれる低温（数万度）のジェット現象など、様々な現象が発生している (e.g. Simnett, 1999[4])。前兆現象は、粒子加速が起きる物理的条件を探る鍵となる現象と考えられ、これまでに様々な研究が行われている。粒子加速に着目した前兆現象の研究を列挙すると、Farnik and Savy (1998) [5] では、ようこう衛星の軟 X 線望遠鏡とブラッグ結晶分光計で観測された 32 イベントを調べ、軟 X 線の画像及び輝線から前兆現象の放射はフレアの発生していない黒点上空の放射と差が見られないと報告した。一方、Asai et al. (2009) [6] は、野辺山電波ヘリオグラフ及び RHESSI 衛星で観測された 2002 年 7 月 23 日 X4.8 クラスフレアを解析し、マイクロ波及び硬 X 線のデータにおいてフレア前に電子が数十 keV から 1MeV 以上へと加速されている事を確認した。また、Battaglia et al. (2009) [7] は RHESSI 衛星で得られた硬 X 線スペクトルにより、前兆現象における X 線の増光は熱伝導による彩層蒸発が原因であると結論づけた。この研究に対し Altyntsev et al. (2012) [8] は、硬 X 線よりも非熱的電子に感度があるマイクロ波を用いて Battaglia et al. (2009) で解析された 2 イベントを含む 5 イベントを解析し、プリフレアフェーズにおけるシグナルが熱的なプロセスのみを用いたモデルでは説明が出来ないと主張している。このように前兆現象において粒子加速が発生しているかどうかについては未だ明確な答えは出ていない。

当研究では、粒子加速が起きる物理的条件を探るため、2002 年から 2004 年及び 2011 年から 2013 年の M4 クラス以上のフレアの前兆現象を、X 線及び電波データを用いて総括的に調べた。以前の研究とは異なり、断続的なエネルギー解放として考えられる数分間という短時間内で X 線強度の増加・減少が起きるイベントを「プリカーサー」(図 1 左)、連続的なエネルギー解放と考えられるインパルスフェーズに向けた X 線強度の単調な増加を「プリフレア」(図 1 右)と分類した上で、それぞれのイベント毎に非熱的粒子による放射（非熱的放射）が存在するかを調べた。これらの結果を基にどのような物理条件が揃うと粒子加速が始まるのかを議論する。

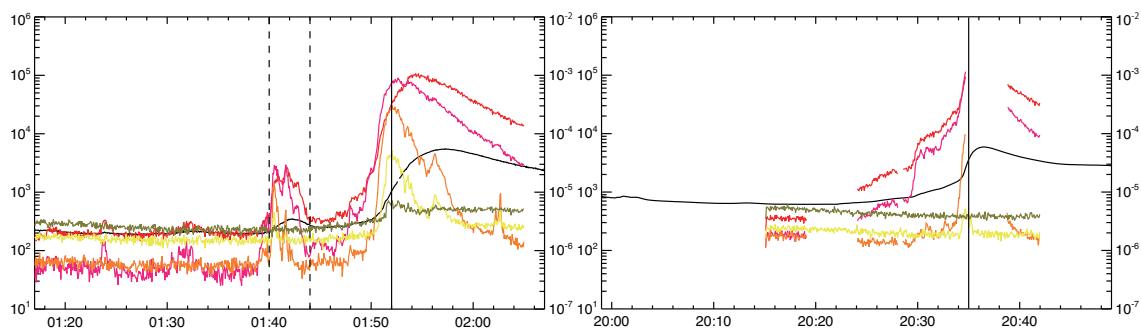


図 1: プリカーサー (左図) とプリフレア (右図) の例

左図 2002 年 8 月 22 日の M5.4 クラスフレアにおける X 線強度の時間変化

右図 2011 年 9 月 24 日の M5.8 クラスフレアにおける X 線強度の時間変化

黒: 8.0-1.0Å / 赤: 6-12keV / ピンク: 12-25keV / オレンジ: 25-50 keV

黄: 50-100 keV / 緑: 100-300keV / 縦の実線: インパルスフェーズ開始時間

左図内の破線: プリカーサーの発生した時間帯

2 観測機器

2.1 Geostationary Operational Environmental Satellite/X-Ray Sensor

Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) は 1975 年から観測を開始しているアメリカ合衆国の静止気象衛星シリーズで、NASA が開発と打ち上げを担当し、アメリカ海洋大気庁 (NOAA) によって運用されている。2014 年現在 GOES13 から GOES15 の 3 機が運用中である。GOES は地球大気と地球近傍の宇宙空間の環境を観測することを目的としており、太陽全面から放射される波長 8.0\AA から 1.0\AA と 0.5\AA から 4.0\AA の 2 つの波長帯の軟 X 線強度を測定する X-ray Sensor (XRS: Donnelly et al. 1977[9]) が搭載されている。GOES は静止衛星のため地球の夜側に入ることがあり、連続して太陽の観測を行うことはできない。連続観測を可能にするため、3 つの機体を異なる経度の静止軌道上に配置している。

2.2 The Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager 衛星

The Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI: Lin et al. 2002[10]) 衛星は、太陽フレアにおける粒子加速の物理的要因を探るために 2002 年 2 月に NASA によって打ち上げられた太陽硬 X 線/ γ 線観測衛星である。搭載されている観測機器はフーリエ合成型望遠鏡のため、隙間の間隔が異なるすだれコリメーターが搭載された 9 台の硬 X 線/ γ 線検出器で構成されている。衛星自体が回転することによって 2 次元のフーリエ成分を取得し、硬 X 線/ γ 線での太陽像を合成することが可能である。また、検出器のカウント率が前もってセットされている閾値を超えるとアルミニウムのシャッターが入り検出器に入る光子数を抑え、検出器が飽和しないような工夫が施されている。一方、シャッターが入る前後では検出器のエネルギーレスポンスが変化してしまうため、同じシャッター状態で取得されたデータ間でしか時間積分やバックグラウンドの差し引きが出来ない等の欠点がある。RHESSI 衛星は低軌道 (上空約 600km) を約 1 時間半で周回する衛星で、軌道の半分は地球の夜側を通る。そのため 45 分毎に衛星に夜が訪れ、連続的に太陽を観測することは出来ない。また、南大西洋上空には南大西洋異常帯 (South Atlantic Anomaly : SAA) と呼ばれる衛星軌道上に高エネルギー粒子が多く存在する領域があり、この領域中を通過すると地球磁気圏の高エネルギー粒子による信号が記録されてしまう。本研究で扱うデータはこのような太陽フレア以外の信号が少ない時間帯を選んだものである。表 1 に RHESSI 衛星搭載装置の緒元をまとめた。

表 1 : RHESSI 衛星搭載装置の緒元

観測エネルギー帯	3 keV ~ 17MeV
エネルギー分解能	$\geq 1 \text{ keV}(3 \text{ keV}) \sim 5 \text{ keV}(17\text{MeV})$
空間分解能	2.3 arc sec(<100keV) 7 arc sec(100keV ~ 400keV) 36 arc sec(100keV ~ 400keV)
最高時間分解能	2 秒
視野	全面 ($\sim 1^\circ$)

2.3 野辺山電波ヘリオグラフ

野辺山電波ヘリオグラフ (NoRH: Nakajima et al. 1994[11]) は国立天文台野辺山太陽電波観測所内に T 字型に設置された直径 80cm のパラボラアンテナ 84 台からなる、最大基線長が東西 490m、南北

220m の太陽専用電波干渉計である。NoRH による太陽の観測は 1992 年 6 月末から行われており、毎日日本時間 7 時 45 分から 15 時 30 分まで（世界時間 21 時 45 分から 6 時 30 分まで）、約 8 時間の連続観測を行っている。表 2 に NoRH の諸元をまとめた。当研究には 17GHz の電波強度のデータのみを使用している。

表 2：野辺山電波ヘリオグラフ (NoRH) の諸元

観測周波数	17GHz (左右両円偏波) 34GHz (強度のみ)
観測視野	太陽全面
空間分解能	10 秒角 (17GHz) 5 秒角 (34GHz)
時間分解能	0.1 秒 (活動時) 1 秒 (静穏時)

3 イベント選択及び解析方法

3.1 イベント選択概要

太陽フレアの発生頻度は 11 年の太陽活動周期に合わせて増減している。当研究では太陽活動が活発な時期であった 2002 年から 2004 年（第 23 太陽周期極大期の後半）及び、2011 年から 2013 年（第 24 太陽周期極大期の前半）の M4 クラス以上のフレアを用いた。この条件を満たすフレアは 192 イベントあるが、当研究は太陽フレアの前兆現象における非熱的粒子からの放射に注目しているため、以下の条件に当てはまるフレアのみを解析した。

解析対象とするイベントデータの条件

（ローマ数字は、条件によるイベント選択の順番を示している。）

- I フレア発生 30 分前からメインフェーズにかけて GOES による軟 X 線データと RHESSI 衛星による硬 X 線データが存在するイベント [全 66 イベント]
- II フレア発生前に RHESSI 衛星による 12-25keV バンドよりもエネルギーの高いバンドで増光が見られるイベント [プリフレア 13 イベント/プリカーサー 38 イベント]
- III フレア発生前の増光のソースがフレアの発生する活動領域に存在するイベント [プリフレア 13 イベント/プリカーサー 29 イベント]
- IV RHESSI 衛星による硬 X 線のデータに SAA やシャッターの影響が無くスペクトル解析が可能なイベント [プリフレア 10 イベント/プリカーサー 23 イベント]

以下に上記の条件によるイベント選択の詳細を述べる。

3.1.1 軟 X 線及び硬 X 線のタイムプロファイルによるイベントの抽出

図 1 のグラフは両方ともフレア発生前 30 分からメインフェーズ後半までの GOES による軟 X 線強度の時間変化と RHESSI 衛星による硬 X 線の 5 つのエネルギー帯の強度の時間変化の例である。イベント選択を行うにあたって、まず 192 イベント全てについて図 1 と同様の X 線強度の時間変化のグラフを作成した。図 1 左の例では 01:52 頃から始まるフレアによる増光の前に 01:40 から 01:44 頃にかけてプリカーサーと思われる増光が観測されている。また、図 1 右の例では 20:35 のフレアスタートの前に 25-50keV までの各波長帯でプリフレアと思われるフレアへ向けた連続的な増光が確認出来る。

太陽フレアにおいてコロナ中で磁気リコネクションが発生すると、解放された磁気エネルギーによっ

て電子が数十 keV 以上に加速される。メインフェーズ前のフレアループ内は密度が低いいため、加速された電子はコロナ中のイオンとはあまり衝突せずに密度の高い彩層まで到達する。彩層に到達した電子は彩層のイオンとクーロン衝突を起こし、制動放射により電磁波が放射される。このとき、高エネルギー電子のエネルギーが硬 X 線のエネルギーに近い為、制動放射では主に硬 X 線が放射される。この放射は、フレア発生直後のインパルスフェーズで観測される。その後、高エネルギー粒子との衝突や熱伝導によって数百万度から数千万度まで加熱された彩層プラズマは上昇し、コロナループを満たしながら軟 X 線を放射する。これがメインフェーズに観測される軟 X 線の増光である。硬 X 線と軟 X 線にはこのような関係があるため、硬 X 線の時間変化を積分すると軟 X 線の時間変化に似た変動がみられる (Neupert, 1986[12])。当研究ではインパルスフェーズ開始の時間を、軟 X 線強度変化の時間微分が最大値となる時間として定め、それ以前の時間帯の RHESSI 衛星のデータがある 66 イベントのうち、RHESSI 衛星による硬 X 線データ、主に 12keV から 50keV でインパルスフェーズ以前に増光が見られる 51 イベントについて次節以降の解析を行った。第 1 節で述べた本研究での前兆現象の分類を基に、GOES の軟 X 線強度にメインフェーズへ向けた単調増加が見られる 13 イベントをプリフレアイベント、それ以外の 38 イベントをプリカーサーイベントと分類した。

3.1.2 RHESSI 衛星の硬 X 線像による増光領域の確認

前述のように RHESSI 衛星にはフーリエ成分を取得するためのすだれコリメーターを付属する 9 台の硬 X 線/ γ 線検出器が搭載されており、2 秒以上の積分時間で太陽像を合成することが可能である。前兆現象と思われる増光が出現した時間帯のデータから硬 X 線像を合成し、前兆現象と思われる増光領域と RHESSI 衛星チームが公開している RHESSI Flare List[13] に記載されていた座標を基にフレアが発生した活動領域の座標を比較した (図 2)。比較の結果、フレアが発生した活動領域以外で前兆現象と思われる硬 X 線の増光領域が発生した 9 イベントを解析対象から外し、プリフレア 13 イベント、プリカーサー 29 イベントを抽出した。

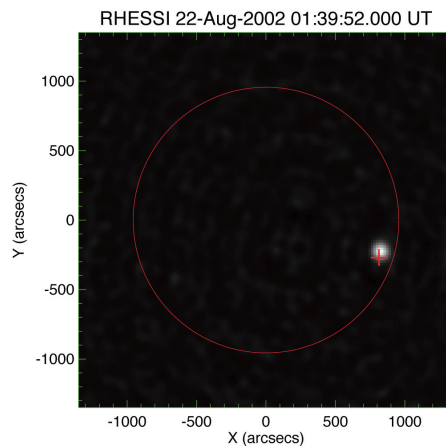


図 2: インパルスフェーズ前の増光時の硬 X 線ソース (グレースケール) とフレアの発生領域の座標 (赤十字) の比較例
両方の発生領域が一致している例

3.2 スペクトルフィッティングによる非熱的放射の有無の判定

前節までのデータセレクションによって、フレア発生前の RHESSI データが存在する全てのフレア 66 イベントのうち、フレア発生と同じ活動領域内で前兆現象が起きている例は 42 イベント (64%) であることが分かった。これらのイベントについて SAA による影響や、RHESSI 衛星のシャッターの出入り

によってバックグラウンドをとれない9イベントを除き、プリカーサー23イベント、プリフレア10イベントについてフレア前の増光のタイミングでスペクトルフィッティングを行い、非熱的放射の有無を判断した。フィッティングを行う際のスペクトルデータは、前兆現象からの放射のみを調べるため前兆現象時のスペクトルから前兆現象発生前の静穏時のスペクトルを差し引いたものを使用している。また、フィッティングを行ったエネルギー帯のエネルギー下限値は8keV以上とし、パイルアップの影響を受けていないエネルギー下限値を採用している。エネルギー上限値はフィッティングを行うために十分なフォトンカウントが得られている値を上限値とした。フィッティングの例を図3に示す。フィッティングには(1)単温度の熱的プラズマを仮定したモデル、(2)二つの温度成分を持つ熱的プラズマを仮定したモデル、(3)単温度の熱的プラズマからのスペクトルと非熱的電子からの放射であるべき分布スペクトルを足し合わせたモデルの3種類のモデルを用いた。フィッティングパラメーターは、エミッションメジャー、プラズマ温度及び、非熱的電子による硬X線スペクトルのべき分布の指数である。これらの3つのスペクトルモデルを使ったフィッティング結果を基に、以下の基準を用いて非熱的放射の有無の判断を行った。

非熱的放射の有無の判断基準

- I 非熱的電子からのスペクトルを含むスペクトルモデルのフィッティング結果において χ^2 値が単温プラズマのスペクトルや二つの温度成分を持つスペクトルモデルのフィッティングでの値よりも小さくなっている。
- II フィッティングの結果、非熱的電子からのスペクトルと考えられる指数関数の指数の絶対値が7未満である。

3.3 軟X線の増加量の評価

軟X線フラックスは、放射冷却の時間スケールよりも短い現象に対しては、その現象中で解放されたエネルギー総量の良い指標となる。一方、放射冷却の時間スケールより長い現象では、測定された時間帯までに解放されたエネルギー下限値の指標となる。その為、それぞれのイベントにおいて硬X線で前兆現象が確認された時間帯の軟X線フラックスから前兆現象発生前の静穏時のフラックスを引いた値を前兆現象時の解放エネルギーの指標として利用した。

3.4 NoRH 17GHz データを用いた非熱的放射発生時刻の推定

GOES では軟X線を2つの波長帯で観測しているため、そのフラックス比から軟X線を放射しているプラズマの温度とエミッションメジャーを求めることが出来る。この解析方法を利用し、前兆現象発生前の軟X線フラックスを前兆現象やフレア発生時の軟X線フラックスから引いた値を利用することで、前兆現象時及びフレア時に生成された高温プラズマの温度及びエミッションメジャーを推定することが出来る。この推定した温度とエミッションメジャーから、生成されたプラズマが17GHzにおいて光学的に薄い熱的放射をしていると仮定し、17GHzの放射強度を求めることが出来る。この際に求まる放射強度は熱的放射による寄与しか含まないため、熱的及び非熱的成分の両方を含むNoRH 17GHzで観測された電波強度から計算で求めた熱的放射による強度を引くことで、非熱的電子から放射された電波強度の時間変化を推定することが出来る。

当研究では、解析対象のプリフレアイベントのうち、NoRHでも観測データのある4イベントについて上記の処理を行いRHESSI衛星による硬X線の強度変化との比較を行った。

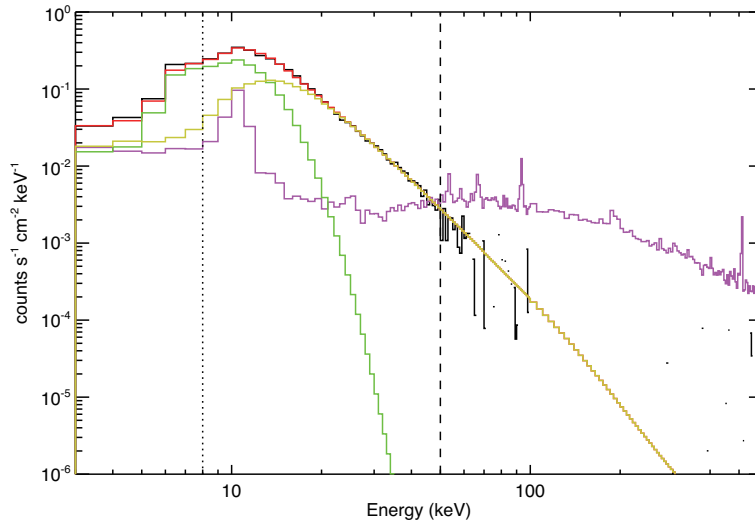


図 3: 2002 年 8 月 22 日プリカーサー時 (01:40:40-01:42:40) における
スペクトルのフィッティング結果

ピンク：バックグラウンドのスペクトル

黒：対象のタイムインターバルのスペクトルからバックグラウンドを引いたスペクトル

緑：単温を仮定したプラズマからの硬 X 線スペクトルモデル (エミッションメジャー = $7.60 \times 10^{46} \text{cm}^{-3}$, プラズマ温度 $2.00 \times 10^7 \text{K}$)

黄：非熱的電子によるべき分布スペクトルを仮定した硬 X 線スペクトルモデル (べき指数=4.15)

赤：フィッティング結果 ($\chi^2 = 1.08$)

4 結果

4.1 プリカーサーについて

今回解析対象としたフレアのインパルスフェーズ前 30 分間に硬 X 線のデータがある 66 イベントの内、プリカーサーが発生しているイベントは 23 イベントであった。また、それらのイベントについて硬 X 線スペクトルデータからプリカーサー時の放射が非熱的な成分を含むかどうかを調べ、表 3 にまとめた。その結果、プリフレア 23 イベント中 11 イベントに非熱的なスペクトルが見られた。プリカーサーにおいて非熱的放射がみられると判断されたイベントと非熱的放射がみられないと判断されたイベントのそれぞれについて、プリフレア後に発生しているフレアの GOES クラスを比べると、今回解析対象とした M4 クラス以上という条件の中では、プリカーサー時の非熱的放射の有無は続くフレアの規模と相関しないことが分かった。また、プリカーサー時の非熱的放射の有無と非熱的放射の判定のためのスペクトルを作成する時に使用したデータの時間帯の GOES 軟 X 線フラックス (プリカーサーカウント) を比較しても相関が見られなかった (図 4)。これらは通常フレアと同じ性質であるため、粒子加速という観点から考えるとプリカーサーは単なる小さなフレアである可能性が高い。ただし、プリカーサーはフレアを発生させるための磁場の構造変化を起こすことが可能であるため (Moor et al. 2001[14]; Bamba et al. 2013[15])、磁気リコネクションを開始させるトリガーとなっている可能性は否定出来ない。

表 3: プリカーサーイベントの非熱的放射の有無とプリカーサー時における GOES の軟 X 線カウント数、及び非熱的放射がある場合のフィッティング結果

	日にち	クラス	スペクトルフィット	プリカーサーカウント	χ^2	べき指数	プラズマ温度 [K]
1	2002年3月14日	M5.7	熱的	0.17×10^6	—	—	—
2	2002年7月3日	X1.5	熱的	0.91×10^6	—	—	—
3	2002年8月20日	M5.0	非熱的	2.87×10^6	2.43	3.63	3.40×10^7
4	2002年8月22日	M5.4	非熱的	1.41×10^6	1.08	4.15	2.00×10^7
5	2002年8月30日	X1.5	熱的	0.58×10^6	—	—	—
6	2002年10月31日	X1.2	熱的	-0.15×10^6	—	—	—
7	2003年4月23日	M5.1	熱的	1.42×10^6	—	—	—
8	2003年4月26日	M7.0	非熱的	1.10×10^6	7.23	3.21	2.88×10^7
9	2003年6月8日	M4.0	非熱的	0.17×10^6	2.03	4.95	1.61×10^7
10	2003年6月9日	M4.7	熱的	0.51×10^6	—	—	—
11	2004年1月17日	M5.0	熱的	0.41×10^6	—	—	—
12	2004年7月13日	M6.2	非熱的	1.64×10^6	2.46	3.49	3.84×10^7
13	2004年7月14日	M6.2	熱的	0.21×10^6	—	—	—
14	2004年8月14日	M5.6	熱的	0.08×10^6	—	—	—
15	2004年10月30日	M5.9	非熱的	0.07×10^6	1.29	6.93	1.083×10^7
16	2011年2月15日	X2.2	非熱的	0.33×10^6	1.03	3.00	2.18×10^7
17	2011年2月18日	M6.6	非熱的	2.76×10^6	1.21	5.41	1.88×10^7
18	2011年8月9日	X6.9	非熱的	0.49×10^6	1.12	5.53	2.60×10^7
19	2011年9月26日	M4.0	非熱的	0.23×10^6	1.77	2.05	2.59×10^7
20	2012年7月5日	M6.1	熱的	-0.05×10^6	—	—	—
21	2013年5月13日	X1.7	熱的	0.07×10^6	—	—	—
22	2013年10月25日	X1.7	熱的	0.36×10^6	—	—	—
23	2013年11月10日	X1.1	非熱的	0.20×10^6	1.00	4.16	2.76×10^7

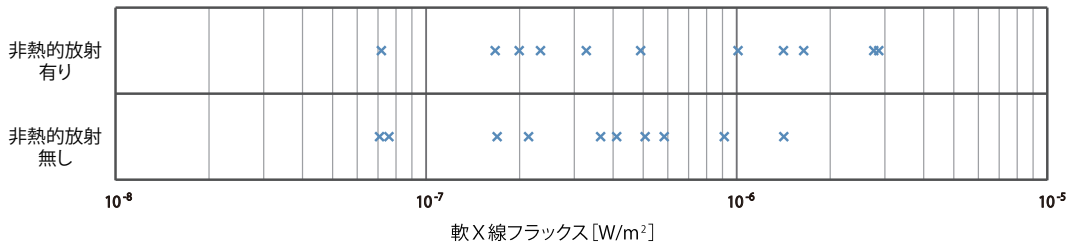


図 4: プリカーサー時の軟 X 線フラックス増加量と非熱的放射の有無

4.2 プリフレアについて

プリフレア 10 イベントについて、RHESSI 衛星によるスペクトルデータからプリフレア時の放射が熱的か非熱的かどうかを調べ表にまとめた (表 4)。その結果、10 イベント中 6 イベントが熱的なスペクトルを示し、非熱的と判断された 4 イベントにおいても、2 イベントが非熱的なスペクトルのべき指数が 6.5 以上と、熱的なスペクトルに近い指数となっていた。

硬 X 線の非熱的放射がみられない原因として、非熱的放射の強度が RHESSI 衛星の検出限界を下回っているという、装置性能起源の可能性が考えられる。この可能性を排除するため、まずはプリフレア時の GOES 軟 X 線フラックスと非熱的放射がみられる小規模イベントでの GOES 軟 X 線フラックスとの比較を行った。軟 X 線フラックスは、放射冷却を無視すれば、その時間までにフレア領域にて解放されたエネルギーの総量のよいプロキシであり、もしも非熱的放射が見られないプリフレア時と同じ GOES 軟 X 線フラックスをもつ小規模イベントで非熱的放射が存在すれば、RHESSI 衛星の検出感度の問題ではなく、同じ程度のエネルギー解放が起きたとしてもプリフレアでは非熱的粒子の生成が小さいことを示すこととなる。当研究では基準となる小規模イベントとして、2011 年 9 月 26 日に発生した M4.0 クラスフレアの前に観測されている非熱的放射が存在するプリカーサーイベントを選んだ。このプリカーサーでの軟 X 線ピークフラックスは $0.23 \times 10^{-6} \text{W/m}^2$ であった。このカウント数は今回解析したプリ

フレア時の軟 X 線フラックスの全てを下回っている。よって、プリフレア自体の解放されたエネルギーが少なく、それに応じて非熱的粒子の生成が小さいため非熱的放射が RHESSI の検出限界を下回っている訳ではないと言える。

また、非熱的放射の検出感度は硬 X 線の観測より電波観測の方が高いため、3.3 節で述べた NoRH 電波観測データと GOES の軟 X 線観測データから推定した非熱的放射強度の時間変化と RHESSI 衛星の硬 X 線の時間変化の比較を行った (図 5)。図 5 から NoRH と GOES から非熱的な放射が検出されるタイミングは、非熱的放射の寄与が大きいと思われる 25keV 以上の硬 X 線の増光のタイミングとほぼ一致していることが分かる。NoRH/GOES データから非熱的放射の存在が確認出来る 2004 年 7 月 15 日のイベントでは、プリフレア開始前に RHESSI 12-25keV の強度変化にプリカーサー的な増減がみられ、純粋なプリフレアのイベントではないことが分かる。NoRH/GOES データから推定した非熱的放射は、このプリカーサーのイベント時に生成された非熱的電子がループ内にトラップされ、電波放射をしているものと思われる。以上のことから、複数のプリフレアにおいて RHESSI 衛星のデータから非熱的放射がみられない原因として RHESSI 衛星の検出限界を下回っている可能性は少なく、プリフレア時には粒子加速が効率的に働いていないことを示している。

表 4: プリフレアイベントにおける非熱的放射の有無とプリフレア時の GOES の軟 X 線カウント数、及び非熱的放射がある場合のフィッティング結果

	日にち	クラス	スペクトルフィット	プリフレアカウント	χ^2	べき指数	プラズマ温度 [K]
1	2002年2月20日	M4.3	非熱的	2.10×10^{-6}	0.65	6.96	3.13×10^7
2	2002年8月3日	X1.0	熱的	0.61×10^{-6}	—	—	—
3	2003年6月11日	M4.5	熱的	5.15×10^{-6}	—	—	—
4	2004年1月6日	M5.8	非熱的	1.36×10^{-6}	2.91	3.70	3.24×10^7
5	2004年7月15日	X1.8	熱的	3.57×10^{-6}	—	—	—
6	2011年9月24日	M5.8	熱的	5.73×10^{-6}	—	—	—
7	2012年7月19日	M7.7	熱的	2.23×10^{-6}	—	—	—
8	2013年5月15日	X1.2	熱的	3.94×10^{-6}	—	—	—
9	2013年5月22日	M5.0	非熱的	8.10×10^{-6}	0.34	6.77	1.54×10^7
10	2013年10月28日	M4.4	非熱的	0.57×10^{-6}	2.14	1.67	2.49×10^7

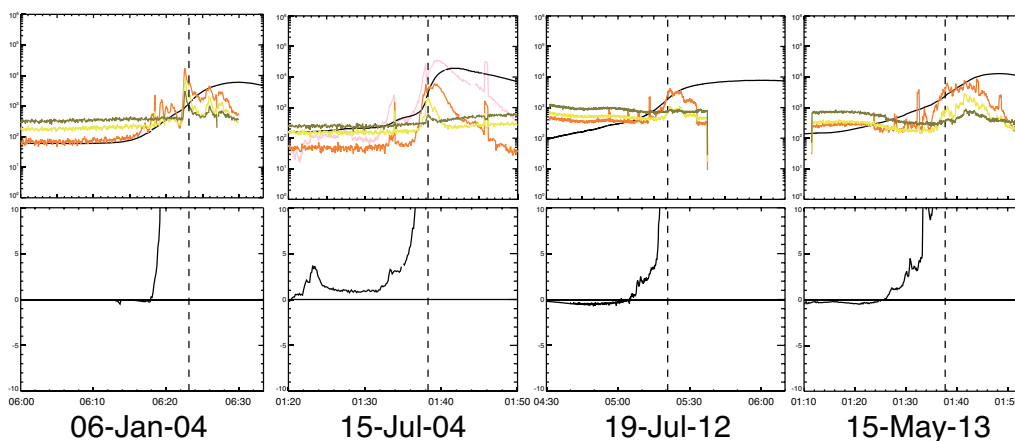


図 5: RHESSI 衛星硬 X 線及び GOES 軟 X 線の時間変化 (上)

黒:8.0-1.0Å / ピンク:12-25keV / オレンジ:25-50 keV / 黄:50-100 keV / 緑:100-300keV

NoRH と GOES のデータから推定した非熱的な 17GHz 放射の時間変化 (下)

5 Discussion and Summary

今回の研究により、解析可能な 66 イベントに対して 34.8%にあたる 23 イベントにおいてプリカーサーと判断されるイベントが発生していたが、それらについてスペクトルを解析した結果非熱的粒子の観点からはメインフレアとの有意な相互関係は見つからなかった。

一方、プリフレアは 15.2%にあたる 10 イベントで発生しており、発生数は少ないが解析を行ったプリフレア 10 イベントについては、6 イベントに非熱的放射スペクトルがみられず、また、非熱的スペクトルと判断された 4 イベント中 2 イベントで非熱的電子からのスペクトルとして仮定した指数関数の指数の絶対値が 6.5 以上となっており熱的なスペクトルに近いスペクトルの形状をしていた。これらの解析結果と、同じ軟 X 線フラックスを持つ小規模イベントの比較により、解放されたエネルギーに比べプリフレアイベント中では粒子が加速されにくいことが示唆される。粒子加速が抑制される原因としては、軟 X 線フラックスの増加が示すように、プリフレアにおけるエネルギー解放により粒子加速が行われる領域のプラズマ密度が高くなり、電子が衝突しやすくなることで加速機構の効率が下がることが考えられる。この考え方は、Battaglia et al. (2009) で示された、インパルスフェーズ前の熱伝導による彩層蒸発の発動と整合がとれている。ただし、粒子が加熱されているということは、衝突断面積が小さくなるということも考えなければならない。実際には加速機構の効率・粒子の衝突周波数・加速の前の加熱等が複雑に絡み合って粒子加速が行われていることは容易に想像ができる。そのため、それらのことを考慮した粒子加速の議論が必要である。

今回解析したプリフレアイベントの中でも 2 つのイベントに関しては明確な非熱的スペクトルが示されている。そのため、これら非熱的放射が明確に現れるイベントを含めてプリフレア時のプラズマ温度や密度、プリフレア発生位置と磁場の構造の関係を詳しく調べることにより、インパルスフェーズに繋がる粒子加速の開始条件を特定することができるだろう。

参考文献

- [1] Carrington, R.C., MNRAS, 20, p30 (1859)
- [2] Lyot, B., Annales d’Astrophysique, Vol.7, p31 (1944)
- [3] Shibata, K. & Magara, T., Living Reviews in Solar Physics, vol.8, no.6 (2011)
- [4] Simnet, G.M., The many faces of the sun: a summary of the results from NASA’s Solar Maximum Mission. Edited by Keith T. Strong, Julia L.R. Saba, Bernhard M. Haisch, and Joan T. Schmelz, New York: Springer, p201 (1999)
- [5] Farnik, F., Savy, S.K., Solar Phys., 183, p.339 (1998)
- [6] Ayumi Asai, Hiroshi Nakajima, Masumi Shimojo, Takaaki Yokoyama, Satoshi Masuda, Sam Krucker, Astrophys J.,695,p.1623 (2009)
- [7] Battaglia, M., Fletcher, L., and Benz, A. O., Astronomy & Astrophysics, 498, p891 (2009)
- [8] Alexander A. Altyntsev, Gregory D. Fleishman, Sergey V. Lesovoi, and Nataliia S. Meshalkina, The Astrophysical Journal, vol.758, p138 (2012)
- [9] Donnelly, R.F., Grubb, R.N., and Cowley, F.C., NOAA Tech. Memo. ERL SEL-48 (1977)
- [10] Lin, R.P., et al., Solar Phys., 210, p3 (2002)
- [11] Nakajima, H., et al., Proc. IEEE, Vol.82, No.5, p705 (1994)
- [12] Neupert, W.M., The Astrophysical Journal, vol.153, p.L59 (1986)
- [13] NASA, “RHESSI Web Site: RHESSI Flare List: View the RHESSI flare list”, http://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessidata/dbase/hessi_flare_list.txt (accessed September 17, 2014)
- [14] Moor, R., et al., The Astrophysical Journal, vol.552, p833 (2001)
- [15] Bamba, et al., The Astrophysical Journal, vol.778, p48 (2013)