

## 太陽フレアにおける磁気リコネクションと粒子加速の関係

北川 潤 (名古屋大学大学院 理学研究科)

### Abstract

僕は太陽フレアに興味があり、関する研究をこれからしようとしているので CHANG LIU et al. の THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE HARD X-RAY SPECIAL INDEX AND THE LOCAL MAGNETIC RECONNECTION RATE という論文を紹介します。この論文は、2005 年 5 月 13 日に起こった M8.0 フレアと、それに伴い 100keV を超えるリボン状の硬 X 線 (HXR) 源が観測された現象について、高分解能を持つ硬 X 線望遠鏡である RHESSI 衛星を用いてこのイベントの HXR 放射の特徴を調査しているものです。結果として、フレアリボンに沿った形で HXR フラックスとスペクトルの間に反相関係があり、X 線強度が時間発展に対し作り出す soft-hard-soft(SHS) の空間発展の類の物であるとされています。さらに HXR スペクトルのべき絶対値とフレア中の電子加速を示唆するリボンに沿った電場との反相関係があることが発見されました。これは、電場が強いときに高いエネルギーまで効率よく粒子加速が起きていることを示す重要な結果です。

### 1 背景

太陽フレア発生機構については、太陽コロナ中の磁気エネルギーが磁気リコネクションにより熱・運動・粒子加速エネルギーに変換される現象だと理解されています。しかし、太陽フレア中の磁気リコネクション現象を直接観測することは難しく、また、太陽コロナ中の磁場や電場も直接計測することはできません。したがって、磁気リコネクションに関わるコロナ中の電場は、太陽光球磁場とフレアリボン(コロナで解放されたエネルギーが彩層に注入され、明るく輝く領域)の広がる速度を用いて推測することしかできません。

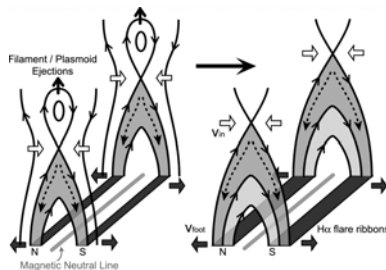


図 1: フレアと磁気リコネクションの生成機構

RHESSI 衛星の観測により、フレアで加速された電

子から放射される硬 X 線と磁気リコネクション電場との関係について、詳細かつ新しい研究成果が報告されたので、その論文を読み、知識を深めました。次章では、その論文「Liu, C., Lee, J., Jing, J., Gary, D. E., and Wang, H., THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE HARD X-RAY SPECIAL INDEX AND THE LOCAL MAGNETIC RECONNECTION RATE, ApJL, 672, L69-L72, 2008.」を紹介します。

図 1 は Ayumi Asai et al. 2004. FLARE RIBBON EXPANSION AND ENERGY RELEASE RATE の fig.1 から引用。

### 2 論文紹介-Introduction

硬 X 線 (HXR) 放射はフレアによって生成された加速電子を判断する強力な指標となっています。非熱的な電子から放射された HXR スペクトルは光子エネルギーに対しべき乗の分布を見せ、電子エネルギー分布の時間発展は支配的な加速過程を確認するのにとても重要になっています。

シンチレーションカウンター分光器の先行結果で知られるように、HXR スペクトルは一般的にフレアの X 線強度の impulsive phase における上昇・最大・

衰退の相の中で soft-hard-soft のスペクトルパターン (SHS) に従っていて、それは太陽硬 X 線望遠鏡である RHESSI 衛星の結果によって、1 分から 8 秒以下までの HXR のサブピークでも SHS パターンが確認され、より明らかなものになっています。さらに、コロナとコロナの足元両方の HXR 源のスペクトル発展を調査して、共通して SHS の振る舞いをしていることを発見しました。この結果から、SHS がフレアの impulsive phase において電子加速の固有の特徴であると考えています。

最も hard なスペクトルは最大フラックス付近で現れるので、SHS は HXR スペクトルとフラックスの間にも関係ともみなすことができ、このような考えはセットで研究されてきています。それを考えさせられるいくつかの先行研究もありますが、しかしながらこの関係が単純にこのように変化しうるかどうかにについては直接の研究が必要です。これはこの論文が RHESSI 衛星の撮像分光能力を使って到達を目指す研究のゴールの一つでもあります。

この研究の目的の一つは、HXR のフレアリボンの動きで磁気リコネクションによるフレアのエネルギー開放の発展を明らかにすることです。再結合している電流シート (RCS) の計測できない電場を、計測可能な足元の光球面の垂直磁場の強さ  $B$  とリボンの拡散速度  $u$  から  $E=ub$  として推測するというものです。電場による電子の直接加速がフレア中の高エネルギー電子生成の可能性となり得ることから電場の間接的な計測をすることは重要になってきます。HXR フラックスとこの方法で得られた電場に時間的な相関関係があることを示されていますが、スペクトル指数と RCS 中の電場には空間的な相関関係もあるかどうかというのが興味のあるところです。粒子シミュレーションなどのモデルを使い、HXR スペクトルの測定や電場との比較も行います。

この論文では、2005 年 5 月に起きた M8.0 フレアの HXR 源が撮像分光に適切に広がっていて、つまりスペクトル指数と電場の間の可能な空間関係の研究に十分という意味で特有のイベントであることから、これを利用し HXR スペクトルと電場の空間分布を調査します。

### 3 論文紹介 -Imaging Spectroscopy

わたしたちは HXR 撮像分光において、その高い時間、空間分解能によって、それぞれのピクセルの上の HXR スペクトル指数を計測することで局所的なスペクトル指数を計測しています。9 つある RHESSI 衛星のすべてのグリッドを使い、 $\sim 5.9$  秒角の半値幅の分解能で観測を行っています。

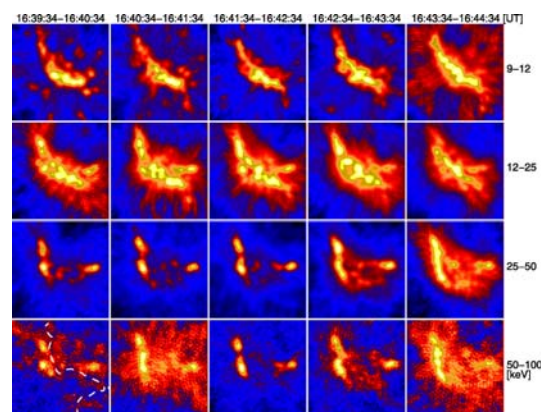


図 2: RHESSI 撮像イメージ

図 2 は 1 秒角のピクセルサイズ  $128 \times 128$  で、HXR の上昇・最大・下降の過程を 1 分間隔で 5 回、9~100 keV を 4 つのエネルギーバンドに区切った像です。高エネルギー ( $\gtrsim 25$  keV) の放射はフレアループの足元と思われる磁気分極の反転ライン (PIL) の両側のソースから出ていることがわかります。footpoint の HXR 源からリボン状の HXR 源への変形は 16:42:04 UT の HXR のピーク時刻付近において見ることができます。低エネルギー帯においては、footpoint リボンの硬 X 線も見えますが、PIL 上空の硬 X 線源が支配的になっています。これはコロナの XHR 源が熱的なスペクトル分布をしているためと考えています。図 2 の 4 つのエネルギーバンドのマップを得て、それぞれのピクセルの HXR スペクトルは光子エネルギーにおいて  $\alpha = -d \log I / d \log E$  で定義されるスペクトル指数のべき乗分布に従っていると考えられます。コロナの HXR 源が熱的なスペクトル分布をするのに対し、高エネルギーの足元部分は加えてべき

乗のスペクトルを示し、両者を見分けることができます。が、よって、すべての HXR 源を支配的とされる一つのべき乗スペクトルで fitFIT することは必ずしもできないので良い近似ではなく、それを考慮し、0.25 の値の 2 乗の値が 0.25 より悪い場合は、べきの算出を行いませんでした。

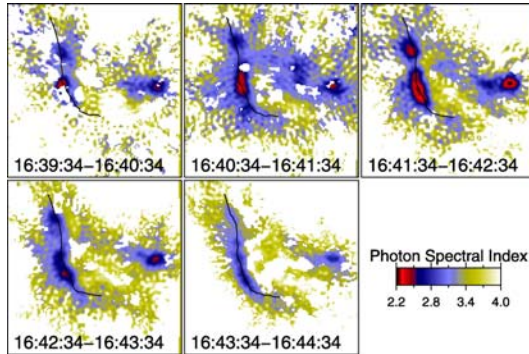


図 3: HXR のスペクトル map

それぞれの時間積分の結果は図 3 に示され、カラーコードのスペクトル指数は各ピクセルの fitting 結果です。ピクセルのフラックスを意味のある数字にするために、 $4 \times 4$  ピクセルのセットを 1 ピクセルに平均することで像を  $32 \times 32$  ピクセルにまで減らし、スペクトル特徴を考察します。

#### 4 論文紹介-Results

図 2 と図 3 の比較をすると、最初に、 $\sim 16:42:04$  UT で 3 つのスペクトル指数が  $\sim 2.2$  の最小値に達する最大 HXR 放射がみられます。このイベントの前または後では HXR 源のフレア領域の全スペクトルはより soft で、指数が高い値であり、この SHS パターンの時間発展は典型的に今まで観測されていたものと同じです。次に、主な HXR 源は の小さな値 (hard スペクトル) の中心から大きな値 (steeper スペクトル) の外側の領域に空間分布を示しています。

どのような物理量が空間的に変わるのかを知るために、リボンの軸に沿って HXR スペクトル指数とフラックスの空間分布の比較を図 4 上段に示していま

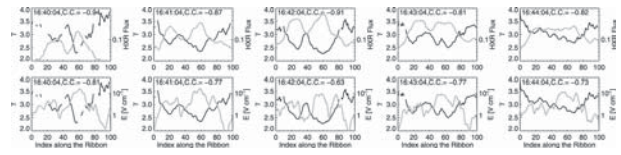


図 4: HXR スペクトルと HXR フラックスの空間分布 (上段)HXR スペクトルと RCS 中電場の空間分布 (下段)

す。その結果、HXR スペクトルは HXR フラックス ( $\log F$ ) と相関係数  $> 0.8$  という値で強い空間反相関をしていることが明らかになりました。下段ではさらに、HXR スペクトルと RCS 中の電場の空間分布を比較して、二つの量の間の  $> 0.65$  の相関係数で顕著な反相関関係が存在していることもわかります。

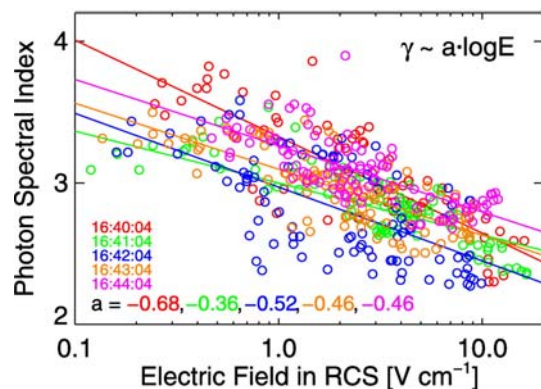
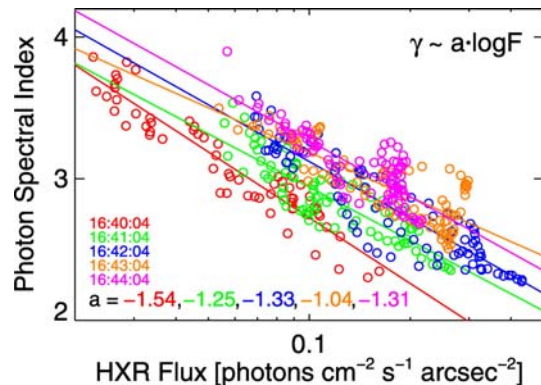


図 5: HXR フラックスとスペクトル分布 (上部)

図 6: HXR フラックスと RCS 中電場 (下部)

図 5、6 は図 4 の結果の散布プロットで、スペクトル

とフラックス、電場の関係がそれぞれ上、下で表されています。図 5 で見られる HXR スペクトルとフラックスの反相関係はよく知られる HXR 放射の SHS パターンの類似物であると考えています。図 6 のスペクトルと電場の反相関係も考えることができ、この結果は RCS 中の電場による直接の電子加速がフレア中のエネルギー電子を生成するのに重要な役割を占めているという仮説を立てることができます。

## 5 論文紹介-Summary and Discussion

RHESSI の撮像分光用いて、2005 年 5 月 13 日に観測された広がった HXR 源のスペクトルを決定し、HXR フラックスとある時間で積分した HXR スペクトルのべき指数と RCS 中の電場の間に空間的な反相関係を見つけました。

リボンの外側の HXR スペクトルは内側より強く、スペクトルはリボンの幅を横切るにつれ徐々に変わっていきます。これはリボンの端が最近まで再結合したエネルギーの強い場の力線につながっていて、物理的に矛盾のない現象になります。

私たちは HXR スペクトルが HXR フラックスとフレアの impulsive phase において強い空間的な反相を示していることを発見しました。これを空間的 SHS の振る舞いと呼び、これはフレア電子加速の重要な特徴でもあり、広がった H と UV リボンを比べて HXR 源の本質を説明するのに役に立ちます。

ここで考えておかねばならないのが、空間的 SHS が HXR フラックスとスペクトルの関係を厳密に反映しているということです。それぞれの孤立した HXR 源は時間的な SHS パターンを独立に示していて、フラックス-スペクトル関係 (F- 関係) は一つ一つで違っています。一方、われわれの空間的 SHS は F- 関係を全領域に適用させています。この違いは、空間的 SHS は HXR 源の個々の足元の点を積分したスペクトルではなく、ある片側のリボン上での個々のローカルな footpoint 硬 X 線源の間の相関について言及しているところです。このイベントの全局所領域が共通の加速と輸送過程によって支配されていると推測しているので、この結果が今までの結果に矛

盾しないものと考えています。

この研究における新しい結果は HXR スペクトルのべき指数の絶対値と RCS 中電場の間の空間的な反相関係です。この特性はスペクトルと電場を広範囲の位置の関数として測定することで見つかったものです。比較として電子の直接的な電場加速の数値シミュレーション (Wood and Neukirich 2005) は、電場  $E = 0.1, 1.0$  と  $10 \text{ V/cm}$  の状況で電子エネルギー分布をそれぞれ、べき指数  $= 4.0, 2.6, 1.5$  と求めています。現在の結果はフレア電子の直接的な電場による加速の支配を示唆していますが、そこには他の可能性も存在しています。効率の良い電子加速は強い HXR フラックス領域に制限され、弱い HXR フラックス領域のなかでは伝搬効果の結果に近いものがある可能性はあり、電子加速機構の状況下での集合を確認するために時間的、空間的という物理量の関係のよりシステムティックな調査が必要とされるでしょう。

## 6 まとめと今後

この論文で記述されているフレア中電場  $E$  とは、表面磁場とフレア拡散速度  $v$  から計算されているものであるため、実際のコロナ中の電場ではありません。加えて、この 2005 年 5 月 27 日のイベントは HXR 源がリボン状に観測された非常にまれなイベントであるために他の例も少なく、この一例のみの解析でリコネクション電場と粒子加速の関係が確立されたとは言いきれません。

また、今回のスペクトル解析は  $100 \text{ keV}$  以下に限られており、 $100 \text{ keV}$  以上の電子生成機構は異なっている可能性を残しています。

図 5 において、少なくとも  $100 \text{ keV}$  以下の範囲においては、 $E$  と HXR スペクトルの反相関係の可能性は高そうですが、これまでもよく知られている図 4 の soft-hard-soft の反相関係の比に比べ、近似直線からの誤差も大きくなっている印象を受けるので、電場以外にも粒子加速に関わっている因子があるかもしれないとも考えています。いずれにせよ、この論文の解析だけでなく、もっとイベントを増やして、一般的な特徴なのかどうかを検証することは重要だと考えます。