論文内容の要旨

Hard X-ray Investigations of Particle Acceleration in Solar Flares

(太陽フレアにおける粒子加速の硬 X 線撮像分光観測による研究)

石川真之介

1　太陽フレアの硬 X 線観測

太陽フレア中には非熱的な分布をとる加速された粒子が存在しており、そのエネルギーは電子で ∼MeV までと相対論的にまで達するが、粒子加速の機構や全体像はいまだ十分に解明されていない。フレアにおける熱的プラズマが数 keV の X 線を放射するのに対し、∼30 keV 以上の硬 X 線では加速された電子からの非熱的制動放射が主要な成分となる。そのため、太陽の硬 X 線観測は太陽フレアにおける粒子加速を研究するのに非常に重要な手段である。

太陽観測衛星ようこう (1991-2001 年) 搭載の硬 X 線望遠鏡 (HXT) は、フレア中の磁気ループの両端が彩層に突き刺さっている点 (フレアループの「足元」) と、磁気ループよりも上空のコロナ中の空間の両方に硬 X 線源が存在することを突き止めた。ループ上空の硬 X 線源は、太陽フレアが磁気リコネクションにより起きているという強い示唆を与えるとともに、磁気リコネクションが起きている近傍に加速された粒子が存在していることを示している。これは、HXT の ∼5 秒角という優れた位置分解能による 30 keV 以上のイメージングにより実現された成果である。

粒子加速がどのように起こっているかを調べるためには、それぞれの硬 X 線源のスペクトルを比較することが必要であるが、ようこう/HXT は 14-93 keV を 4 バンドに分けた撮像観測を行うのみであり、分光性能が不足していた。また、∼150 keV 以上の相対論的電子がどこに、どの程度分布しているかを調べるためには、∼150 keV 以上の硬 X 線のイメージングが必要である。これらの目的を達成するため、ようこうにを引き継ぐ太陽硬 X 線観測衛星 *RHESSI* がカリフォルニア大バークレー校が中心となって開発され、2002 年に打ち上げられた。*RHESSI* は 2.3 秒角という位置分解能に加え、3 keV から ∼10 MeV という幅広いエネルギー帯域と <100 keV で ∼1 keV という高いエネルギー分解能を持ち、高分解能・広帯域による太陽フレアの硬 X 線撮像分光観測を初めて実現している。

本論文では、*RHESSI* で初めて実現された広帯域・高分解能を生かし、今までの観測全ての中から、150 keV 以上でイメージング可能な全てのフレアのイメージング解析と、コロナ中の硬 X 線源が最もはっきりとループ上空に観測されているイベントの探索及び撮像分光解析を行った。さ

らに、*RHESSI* のダイナミックレンジではループ上空に硬 X 線が見られないようなイベントについても同様の研究を行うため、硬 X 線集光撮像という新しい手法に注目し、硬 X 線ロケット実験 *FOXSI* を進めている。本論文では特に、*FOXSI* に向けた高分解能半導体検出器の開発を行った。

2　相対論的に加速された粒子からの硬 X 線放射の空間分布のサーベイ

RHESSI により初めて観測可能となった、フレア中の 150 keV 以上の相対論的高エネルギー電子の空間分布を調べるため、150 keV 以上の硬 X 線イメージングを、イメージング可能な全てのフレアについて行った。>300 keV の放射が検出された 26 個のフレアの全てについて、継続時間全体で積分したところ、21 イベントでイメージを作成することができた。残りの 5 つのフレアは fluence が数百 photon/cm^2 以下で、カウントが不十分なためイメージングできなかった。10 個のフレアでは 2 つの足元を分解してイメージングできたので、それぞれのフレアについて、2 つの足元におけるスペクトルの光子指数を別々に推定した。その結果、それぞれのフレアにおいて 2 つの足元の光子指数の差は誤差の範囲で 0.6 以内であり、ようこう/HXT 、*RHESSI* による 100 keV 以下のみの観測と同様の結果が得られた。したがって、相対論的に加速された粒子が、フレアループの両側でそれぞれ非相対論的な粒子とほとんど等しい割合で存在することを初めて示すことができた。

今回イメージングを行った全フレアに関してコロナからの相対論的硬 X 線が検出されていないかどうかを検証したが、すでに知られている 3 つの巨大フレア以外では有意な硬 X 線源は確認できなかった。これはダイナミックレンジが低いためであり、現在の観測手法の限界である。

3　ループ上空の硬 X 線源の撮像分光観測

ようこうではできなかった、フレアループ上空と足元の両方の硬 X 線源のスペクトルを比較するため、*RHESSI* が今まで観測した中でコロナ中の硬 X 線が最もはっきりとループ上空に観測されているイベントを探し出し、撮像分光解析を行った。我々が探し出したのは 2003 年 10 月 22 日に起きたフレアで、~150 keV まで硬 X 線が検出されている。35-100 keV のイメージ中では、片方の足元に加えコロナからの放射もはっきりと見られ、コロナ中の硬 X 線源は熱的フレアループよりも ~6000 km 上空に位置していた (図 1 、左) 。それぞれの硬 X 線スペクトルは単一成分のべき関数でよく再現され、光子指数は足元で 3.6±0.3 、コロナ上空で 5.1±0.4 であり (図 1 、右) その差は 1.5±0.5 であった。これは、それぞれの硬 X 線源が単一のべき関数分布の電子により、密度の低いループ上空のコロナと、ループ足元の密度の高い彩層をターゲットとする制動放射によるものであると考えてコンシステントな結果である。

ループ上空の硬 X 線源内に加速されていない熱的電子も含まれているとすると、それらは加速された電子によりエネルギーを与えられてただちに超高温に加熱されるはずであるが、対応するような高温の放射は観測されていない。これは、この領域内には低エネルギーの熱的電子はほぼ存在せず、ほとんどの電子が加速されていることを示唆している。そこで、加速された電子は最初全てループ上空の領域に存在し、足元の放射はループ上空から降下した電子によると仮定して、粒子数やタイムスケールの推定を行った。ループ上空の領域内の全ての電子が加速されいているとすると加速された電子の密度と制動放射のターゲットとなるイオンの密度は一致すると考えられる。薄いプラズマをターゲットとした非熱的制動放射のモデルに従って計算すると、領域全体の加速された

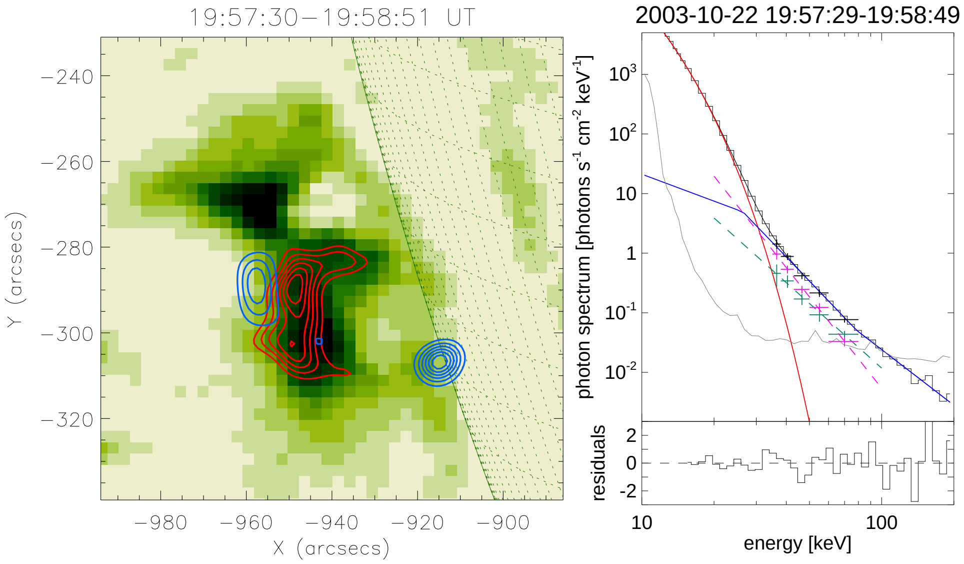

図 1: 2003 年 10 月 22 日に起きたフレアの、*RHESSI* 衛星により観測されたイメージとスペクトル。左：*SOHO* 衛星による 195 Å の極端紫外線のイメージに重ねた、12-15 keV (赤、熱的プラズマ) と 35-100 keV (青、加速された電子) の等高線。右：放射全体 (黒) 、フッティングにより得た熱的 (赤) 及び非熱的 (青) 成分、イメージから得たループ上空 (マゼンタ) と足元 (緑) のスペクトル。ループ上空と足元のスペクトルは光子指数 5.1 、3.6 のべき関数で表される。

電子数は 30 keV 以上で $7{\times}10^{35}$ 個、密度は 2×10^9 cm^{-3} 程度と見積もられる。一方、ループの足元で彩層に衝突してエネルギーを失う、30 keV 以上の加速された電子の数は、毎秒 2×10^{34} 個程度である。太陽外縁の向こう側にもう片方の足元が隠れており、2 つの足元で失われるエネルギーは同等であるとすると、コロナ上空で加速された電子が全て足元に降下するタイムスケールは 17 s と見積もられる。このタイムスケールは、コロナ上空の硬 X 線源のライトカーブから推定される減衰のタイムスケールの 20 s と近い値である。そのため、コロナ上空の硬 X 線源を撮像分光できたこのフレアについては、コロナ上空の領域中で全ての電子が加速され、逃げ出した電子がループに沿って彩層に達するという最も単純なモデルが成り立つことを示すことができた。このモデルが、コロナからの硬 X 線放射のより弱い一般的なフレアについてどの程度普遍的に成り立つかは、今後の観測によって検証する必要がある。

4　硬 X 線集光撮像による高感度観測計画と搭載検出器の開発

RHESSI のダイナミックレンジでは解析できないほどコロナからの硬 X 線放射が微弱なフレアも同じように撮像分光解析を行うために、新しい観測手法として、我々は近年実現しはじめている硬 X 線望遠鏡を用いた硬 X 線集光撮像に注目している。硬 X 線望遠鏡を使えば、ようこう/HXT や *RHESSI* で必要とされた画像再構成が不要であり、ダイナミックレンジを飛躍的に向上させることができる。さらに、小さい体積の焦点面検出器でも大きな有効面積を実現できるので、荷電粒子等によるバックグラウンドを抑えて感度を向上させることが可能となる。

我々は、カリフォルニア大バークレー校、NASA とともに、2011 年 10 月の打ち上げ予定の太陽観測ロケット実験 *FOXSI* を進めている。*FOXSI* は太陽フレアの硬 X 線集光撮像観測という全く

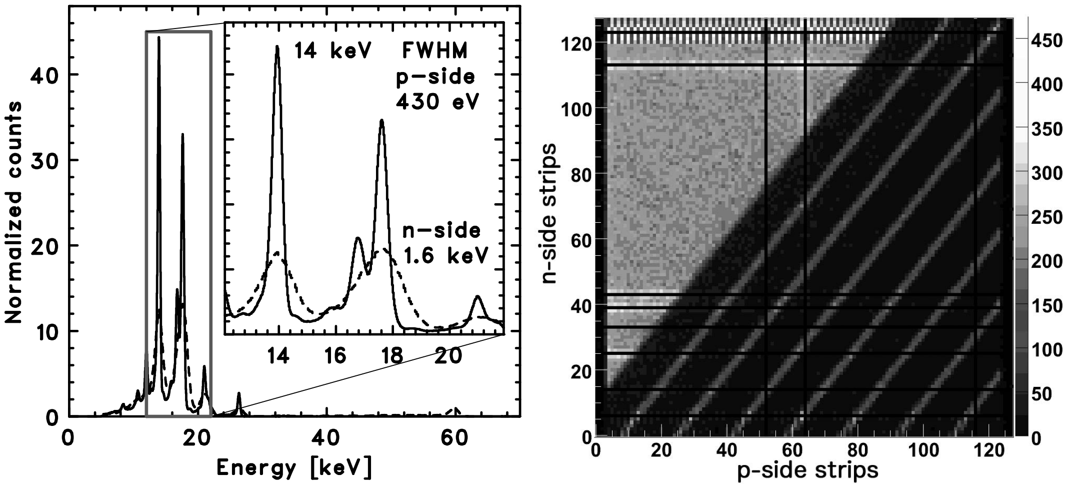

図 2: 太陽硬 X 線観測ロケット実験 *FOXSI* 用に開発した両面シリコンストリップ検出器による、放射線源のシャドーイメージとスペクトル。エネルギー分解能 430 eV 、位置分解能 75 μm という優れた分解能を達成した。

新しい手法を実証するとともに、これまでの感度では不可能であった、静穏領域で加速された粒子からの放射の観測を目的としている。観測エネルギー帯域は 5-15 keV 、望遠鏡は焦点距離 2 m で 12 秒角の分解能を持ち、*RHESSI* 衛星の 100 倍の感度を達成する見込みである。

FOXSI には、$\sim$100 μm 以下の位置分解能と、ロケット実験でも容易に実現可能な −20 °C 程度の温度の下で $\sim$1 keV 以下のエネルギー分解能を持ち、$\sim$100 counts/s 程度のカウントレートで観測可能な焦点面検出器が必要である。これらの要求を実現するフライト用検出器として、高分解能の両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) と低ノイズの読み出し ASIC を開発した。開発した DSSD のストリップ間隔は 75 μm で、2 m の焦点距離に対して 8 秒角に対応する位置分解能を持つ。検出器は −20 °C 、バイアス電圧 300 V の下で正常に動作し、14 keV のガンマ線ラインに対して 430 eV という非常に優れたエネルギー分解能を達成した (図 2 、左) 。また、シャドウイメージを取得して優れた位置分解能のイメージング性能を実証し、FOXSI の科学的要求を満たすことを確認した (図 2 、右) 。

さらに、搭載機器を改良する予定の 2 回目の打ち上げ (FOXSI 2) に向け、10 keV 以上でも検出効率の高いテルル化カドミウム (CdTe) 半導体による両面ストリップ検出器のプロトタイプを開発した。この検出器でもシャドウイメージの取得に成功し、CdTe 半導体による高分解能の撮像分光検出器というコンセプトを実証することができた。