

硬X線観測で探る太陽フレア粒子加速

石川 真之介

〈自然科学研究機構国立天文台ひので科学プロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: s.ishikawa@nao.ac.jp



われわれは、太陽フレアにおける加速粒子の振る舞いを調べるため、加速粒子からの放射である硬X線が磁気ループ上空と足元の両方に検出されているフレアを探した。磁気ループ上空はフレアのエネルギー解放に関係が深く、足元は加速粒子がエネルギーを消費する場所と考えられているが、その関係はいまだよくわかっていない。われわれはRHESSI衛星によるフレア観測の中から最適例を見つけ出し、硬X線源のスペクトルおよび時間発展を比較した。その結果、このフレアは、ループ上空の領域でほとんどすべての粒子が加速され、その領域に閉じ込められた電子と領域を逃げ出した電子とによりループ上空と足元の硬X線放射が発生するというモデルで説明できることを発見した。

1. 太陽フレアと粒子加速

太陽フレアは太陽系最大規模の爆発現象・エネルギー解放過程であり、太陽地球圏の環境に大きな影響を与えている。太陽大気密度の低い上層部分はコロナと呼ばれ、 ~ 100 万Kの高温であることが知られている。ひとたびフレアが起これば、コロナのプラズマは最大で数千万Kまで加熱され、強烈なX線が放射される。

太陽フレアのX線スペクトルを調べると、数千万Kの高温プラズマによる放射と比較して、はるかに高いエネルギーをもつX線成分が存在することがわかる。以降、主にフレアの際にのみ見られる高エネルギーのX線放射（数キロ電子ボルト以上のエネルギー）を硬X線と称することとする。これらの硬X線は、数千万Kの熱的なプラズマとは別の、さらに高エネルギーのプラズマ成分から放射されていると考えられる。硬X線スペクトルは多くの場合べき関数でよく表されることが知られており、より高温（例えば数億K以上）の熱的プラズマではなく、全く別の成分による放射

であると考えられている。そのため、この高エネルギープラズマは、熱的（thermal）プラズマではないという意味で“非熱的”（non-thermal）成分と呼ばれている。

太陽フレアにおける非熱的プラズマでは、非熱的硬X線放射のスペクトルから、しばしば電子が光速の20%以上、ときには光速の90%以上にまで加速されていることがわかっている。太陽フレアは磁気リコネクションと呼ばれる過程により磁場のエネルギーが解放される現象であるという説が現在では広く受け入れられているが、非熱的プラズマを構成する粒子がどのように高エネルギーまで加速されているかは、いまだ完全には解明されていない。粒子加速の機構を解明するためには、加速粒子の詳細な観測のほか、多波長同時観測や理論計算との連携も必要であり、一朝一夕で解決することはできない。本稿では、粒子加速の機構自体を説明する試みではなく、硬X線観測で見られる加速粒子の特徴的な空間・時間構造の説明を試みた研究を紹介する。

非熱的硬X線放射は、太陽フレアだけでなく、

ブラックホールや中性子星等のコンパクト天体からなる系、超新星残骸、活動銀河核等、宇宙のさまざまなスケールで存在が確認されており、それぞれの粒子加速の物理過程には関連があると考えられる。これらの非熱的プラズマの中でも、太陽はわれわれから近く、空間構造を捉えやすく、研究対象として理想的な天体である。太陽における高エネルギー粒子加速の解明がほかの天体の研究のヒントにもなることが期待される。

2. 太陽フレアの硬X線観測

太陽フレアのX線画像を見ると、通常は熱的X線放射がループ状に見られ、これは太陽黒点の強力な磁場が形成したループ状の構造に沿って高温の熱的プラズマが分布していることを示している。これに対し非熱的放射は、多くの場合磁気ループの足元付近2カ所に分布している。太陽フレアにより発生した加速粒子が磁気ループに沿って運動し、彩層と呼ばれる比較的高密度の太陽大気下層の方向へ突入した際に、制動放射によりエネルギーを失って硬X線を放射するものと考えられている。

硬X線宇宙観測の初期から現在に至るまで、硬X線の撮像観測にはすだれコリメーターと呼ばれる観測手法が使われている。この手法はもともとX線天文学の故・小田 稔先生が発明されたもので、波長が短く望遠鏡による集光が困難な硬X線にも有効な撮像観測の手法である。すだれ状のパターンをもった金属板を2枚用意し、2枚の板の間を一定の距離だけ離して観測方向を覆うように配置すると、すだれの向きがある条件のときには天体は隠れてX線は検出されず、ある条件のときには天体からのX線はすだれの間を通して検出されるはずである。すだれのパターンからX線発生源の位置を特定する方法が、すだれコリメーターである。

太陽の硬X線観測では、すだれコリメーターによる硬X線望遠鏡 (Hard X-ray Telescope; HXT) が日本のようこう衛星 (1991-2001観測停止) に

搭載され、重要な成果を上げてきた¹⁾。その中でも特に重要な成果が、“増田フレア”と呼ばれる1992年1月13日に起きたフレアの観測である²⁾。現在名古屋大学STE研究所にいらっしゃる増田 智先生が論文として発表したことから、増田フレアと呼ばれており、現在でも太陽硬X線観測の研究会等では極めて高い頻度で引用されるフレアである。増田フレアでは磁気ループの足元の二つの硬X線放射に加え、ループ頂上の上空付近からも硬X線源が検出されていた。ループの上空はコロナであって密度は低く、硬X線が発生する条件が決して整っているわけではない。そのためほとんどのフレアでループ上空の硬X線源は検出されていなかった。増田フレアの発見は、フレアのエネルギー解放はループの上空、すなわちループの外側で起こっていることを示唆している。これはフレアが磁気リコネクションによるエネルギー解放過程であることの証拠の一つと考えられている。日本は太陽フレア粒子加速に関しては観測技術・観測結果共にパイオニア的貢献をしているのである。

ようこう衛星の後の硬X線観測は、RHESSI衛星 (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager, 2002-現在も観測中) に引き継がれている³⁾。RHESSIの撮像手法はようこうと同じくすだれコリメーターであるが、ゲルマニウム検出器により入射X線1光子ごとにエネルギーを測定しており、エネルギー分解能1キロ電子ボルト (半値全幅, 100キロ電子ボルト程度までのエネルギー帯域) という優れた分解能での観測を行っている。ようこうは10キロ電子ボルトから30キロ電子ボルトの幅をもつ四つのエネルギー帯域で観測を行っており、エネルギー分解能は十分でないため、スペクトル分光解析により加速粒子の物理情報を引き出すには十分な性能をもたなかった。RHESSI衛星により太陽フレアに伴う加速粒子の硬X線撮像分光観測が初めて可能になったのである。

3. RHESSI衛星の観測からの増田フレア型のイベント探し

増田フレアの観測以後、ようこう衛星の硬X線望遠鏡およびRHESSI衛星の観測全体の中でも、増田フレアと同様にループの足元とループ上空の両方から硬X線が検出されている例は非常に珍しく、数例に限られていた。ループ上空の硬X線源についてのみRHESSIで観測した例は報告されているが⁴⁾、ループ足元と上空の両方の硬X線源についてRHESSIの分光性能を十分活かした研究を行う例はなく、ループ足元と上空の硬X線源の関係は解明されるには至っていなかった。そこでこの関係を解明するため、われわれはRHESSIで観測された全フレアの中から増田フレアに似たイベントを探した。その結果、この研究を開始した当時RHESSIで80,000以上観測されていたフレアの中から、2003年10月22日のイベントを発見した。

このフレアは、GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 衛星のX線観測によるフレアの規模の分類がクラスM9.9のイベントであり、最大クラスであるクラスXにはわずかに届かないものの(M10クラス=X1クラス)、RHESSIの全観測の中でも有数の大きなフレアであり、100キロ電子ボルト以上という高いエネルギーまで硬X線が検出されていた。図1はこのイベントのGOES衛星によるX線観測と、RHESSI衛星による硬X線観測のライトカーブである。熱的プラズマによる放射を表すGOES衛星のライトカーブの上昇中に三つの硬X線ピーク、GOESピーク後に一つの硬X線ピークが見られる。これらの硬X線ピークの継続時間はいずれも数十秒程度であった。これらの四つの硬X線ピークそれぞれにおける硬X線の画像を確認したところ、三つめのピークではっきりと磁気ループ上空に硬X線源が見られることがわかった。そこで三つめの硬X線ピークの時間帯に注目して、ループ足元およ

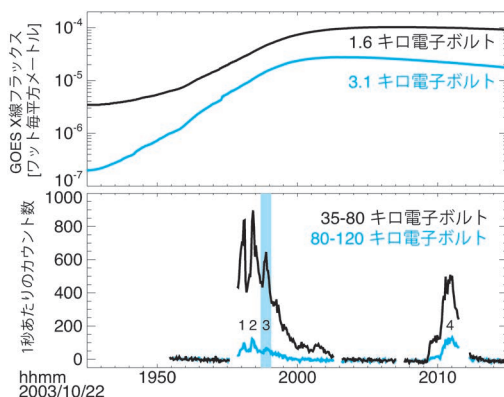


図1 2003年10月22日に発生したM9.9クラスの太陽フレアの、GOES衛星のX線観測とRHESSI衛星の硬X線観測のライトカーブ。GOESの観測は熱的プラズマから、RHESSIの観測は非熱的加速粒子からの放射。

び上空の硬X線源の時間変化およびスペクトルの比較を行った。

4. 2003年10月22日フレアの撮像分光観測

2003年10月22日フレアのRHESSIによる観測の画像とスペクトルを図2に示す。灰色の等高線は10-15キロ電子ボルトの放射で熱的プラズマからの放射であり、薄水色の等高線は35-100キロ電子ボルトの放射で加速粒子からの放射である。黒い点線は太陽光球を示しており、黒い実線は太陽外縁である。

この画像を見ると、灰色で示された熱的プラズマがループ状に分布しており、その下方（光球側、向かって右側）と上方（光球と逆側、向かって左側）に加速粒子が存在していることがわかる。ループ下方の硬X線源はちょうどループを光球方向に延長していった先にきており、ループと関連があることがはっきりと見て取れる。ただしループ下方からの硬X線放射は、ループの足元のうち片方からしか見られなかった。これまでの統計的観測から、多くのフレアでループ足元の硬X

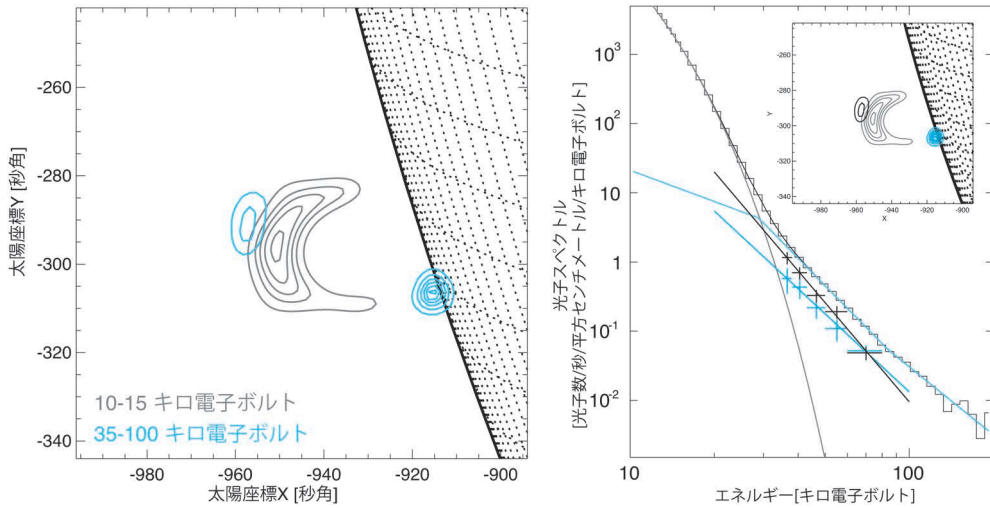


図2 2003年10月22日のフレアの画像とスペクトル。(左)フレアの画像。灰色がフレアの熱的プラズマ、薄水色が非熱的プラズマによる放射。(右)フレアのスペクトル。黒い折れ線は視野全体からのスペクトル。灰色と薄水色の線は、黒い折れ線をフィッティングして得られた熱的成分と非熱的成分。黒と水色のデータ点はループの足元と上空それぞれの硬X線スペクトル。

線放射は二つの足元で同程度の強度をもつことが知られている。そのためこのフレアでも、もう片方の足元からの硬X線放射は太陽光球により遮られてRHESSI衛星からは見えないだけで、実際には両方の足元に加速粒子が存在している可能性が高い。

ループ上空の硬X線源は、熱的ループの頂上付近よりもおよそ6,000 km上空に位置していた。ループの大きさと比較してコンパクトな硬X線源がループ上空に存在しており、その硬X線源は有意にループから離れて外側にあり、また足元からの硬X線放射も同時に観測されている点で、このフレアは増田フレアと極めてよく似ている。この調査を行った時点で、RHESSI衛星の観測の中では最もよく似ている例であった。

図2右側に示されているのがこのフレアのスペクトルである。黒い折れ線で示したのが太陽全体からのスペクトルである。この黒い折れ線のスペクトルを、熱的成分を表す関数と非熱的成分を表す関数でフィッティングした結果が灰色と薄水色

の線であり、灰色が熱的成分、薄水色が非熱的加速粒子を示す。およそ30キロ電子ボルトよりも低いエネルギーでは熱的プラズマからの放射が、それよりも高いエネルギーでは加速粒子からの放射が支配的であり、フレア全体のスペクトルとしては典型的なものであった。

ループ足元と上空の硬X線源についてそれぞれスペクトルを調べてプロットしたのが黒と水色のデータ点である。これらのスペクトルは、できるだけ細かいエネルギー幅で画像を作成し、それぞれの領域からのフラックスを見積もることにより作成したものである。すだれコリメーターによる観測では作成する画像には不確実性が残る。そのため画像の不確実性からフラックスの誤差範囲を見積もり、スペクトルの誤差とした。このようにして単一のフレアにおいて、ループの足元と上空の両方の硬X線源のスペクトルを同時に測定することに初めて成功した。

図2の黒および水色の直線はそれぞれのデータ点をべき関数でフィッティングした結果であり、

両方の硬X線源ともに単一のべき関数でよく再現される分布をしていることがわかる。光子指数(べき関数のべきにあたるパラメーター)は、ループ足元と上空で 3.7 ± 0.5 および 4.8 ± 0.4 であり、足元のほうがより硬いべきをもつ(高エネルギーほど相対的に放射が強い)ことがわかった。これらの光子指数の差は 1.1 ± 0.6 であった。

加速された電子から発せられる硬X線のスペクトルは、加速電子自身のスペクトルのほか、制動放射のターゲットとなる周囲のプラズマ密度にも依存する。理論計算によると、加速された電子のスペクトルが単一のべき関数だと仮定した場合、制動放射によって発せられる硬X線スペクトルの光子指数は、周囲のプラズマ密度が非常に高い場合と非常に低い場合とで、1.5ないし2.0だけ異なるはずであり、周囲のプラズマ密度が高いほうが硬いべきになるはずである。ループの足元からの硬X線放射は、加速粒子が彩層に突入したことによる放射であると考えられており、彩層の密度はコロナに比べてずっと高いため、周囲のプラズマ密度は高いと考えるのが普通である。ループ上空からの放射はコロナにおける放射であり、周囲のプラズマ密度は低いと考えられる。ループ上空と足元からの放射が共に単一の成分の電子による放射であると仮定すると、光子指数の差 1.1 ± 0.6 はターゲットの密度の差による1.5ないし2.0に近い範囲に入っており、この仮定は観測結果と矛盾しないと考えられる。

5. ループ上空と足元の加速粒子の関係

増田フレア型のフレアの重要な特徴の一つは、ループ上空の硬X線源がループ内ではなく、ループから外れた領域に存在していることである。ループ内は熱的プラズマで満たされており密度は高く、加速電子がループ内にとどまっていれば制動放射を起こして硬X線を発する可能性は高い。しかし、ループと硬X線源の位置がずれていると

いうことは、加速粒子はループの熱的プラズマと相互作用して硬X線を発しているのではなく、熱的プラズマとは独立して存在していることが示唆される。もしこの領域内に加速粒子とは別の成分の(低エネルギーの)電子が存在した場合、加速粒子との相互作用により、直ちに高温まで加熱され、熱的X線を放射すると考えられる。しかし、2003年10月22日のフレアの場合、そのような熱的放射の兆候はループ上空の硬X線源付近には見られない。考える可能性としては、この領域内の多くの電子はすでに高エネルギーに加速された電子として存在しており、この領域にはほかの成分は存在しないということである。そこで、以降はこの領域内のすべての電子が加速されたべき分布をもつと仮定し、物理量を推定して観測との矛盾点がないかどうかを検証した。

ループ上空の領域ですべての電子が加速されているとすると、制動放射のターゲットの密度と加速粒子の密度はこの領域内で一致しているはずである。この領域に存在している「加速電子の数」は、「硬X線強度」および「ターゲット密度」からモデル計算で見積もることができる。一方「加速電子の密度」は、「加速電子の数」を「領域の体積」で割ることで求めることができる。「領域の体積」を画像の硬X線源のサイズから見積もり、「ターゲット密度」と「加速電子の密度」が一致すると仮定すると、「硬X線強度」は観測量であることからこの連立方程式を解くことができ、「加速電子の数」を推定することができる。この計算の結果、加速電子の数は 7×10^{35} 個であった。

ループ足元では、ターゲット密度は十分高いと考えられるため、入射される加速粒子は短時間でエネルギーを失うと考えられる。この場合、モデル計算によって「硬X線強度」から「単位時間あたりに消費されるエネルギー」、さらには「単位時間あたりに入射してくる加速電子の数」を見積もることができる。計算の結果、入射する電子数

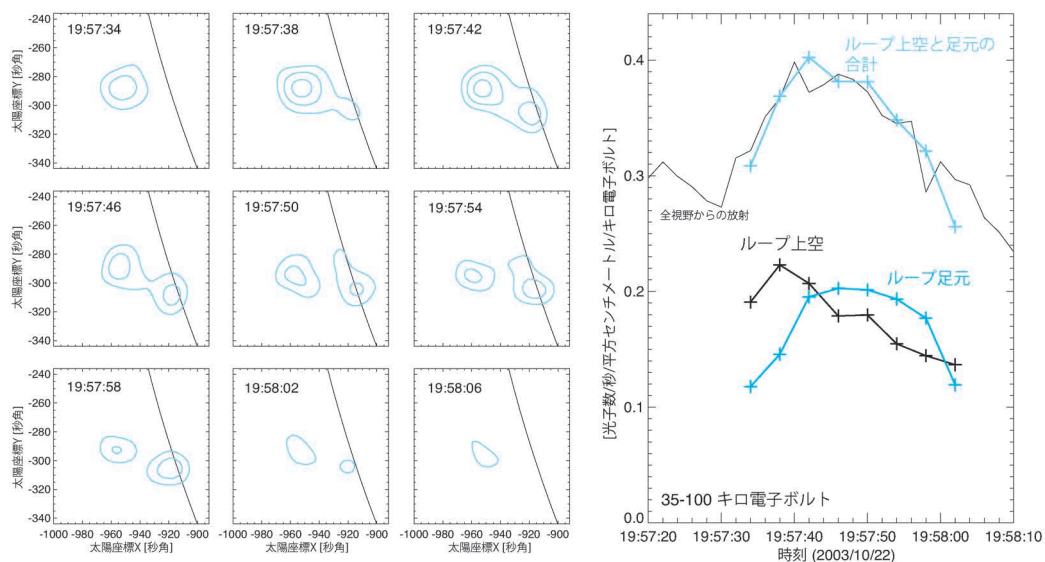


図3 10/22フレアにおける、二つの硬X線源の時間発展. 左: フレア中の4秒ごとのイメージ. 右: コロナ上空, ループ足元の各硬X線源の35-100キロ電子ボルトにおけるライトカーブ. 黒のデータ点がループ上空, 水色のデータ点がループ足元の硬X線源で, 薄水色のデータ点はこれらの合計. 背景の黒の折れ線は全視野(太陽全面)からの放射のライトカーブ.

は毎秒 3×10^{34} 個であることがわかった.

ループ上空の領域の「加速電子の数」をループ足元で「単位時間あたりに入射してくる加速電子の数」で割ると, ループ上空にある電子がすべてループ足元で消費されるのにかかるタイムスケールを見積もることができる. このイベントにおいてこれらの値を割り算すると, 24秒という値が得られた. もしループのもう一方の足元(太陽外縁により隠されていて見えない)でも同じだけ電子が消費されていると仮定すると, 電子が消費されるペースは倍になり, タイムスケールは半分の12秒になる. このイベントの硬X線ピークの継続時間はライトカーブから数十秒であり, 24秒ないし12秒という値はイベントのタイムスケールとしてオーダーで一致する結果であった. このことは, ループ上空で加速電子の密度が制動放射のターゲット密度と等しい, すなわちループ上空ですべての電子が加速されているという仮定と整合する結果である. よって増田型のフレアの一例

であるこの観測結果は, 「ループ上空ですべての粒子が加速されており, その領域内に加速粒子は一定時間閉じ込められて硬X線を発し, その領域から抜け出した粒子は足元で直ちにエネルギーを失って硬X線を発する」というモデルで説明することができる. このモデルは二つの硬X線源の関係を単一の加速粒子の分布から説明するものであり, 粒子の加速機構については仮定を置いていない. どのような物理過程により粒子加速が起こっている場合でも, このモデルは成立しうるのである.

このモデルと観測との間に矛盾がないかどうか, このフレアの時間発展を詳しく見て検証したのが図3である. 図3の左側は注目している硬X線ピークのための4秒ごとにイメージを作成したものである(4秒はRHESSIによる撮像の限界時間分解能である). 右側はループ足元と上空のそれぞれの硬X線源のライトカーブを示したものである. このライトカーブを見ればわかるとおり, 最

初にループ上空の硬X線が極大値を迎え、ループ上空の硬X線源の減衰時にループ足元の放射が強くなっていることがわかる。これはまさにループ上空に閉じ込められた粒子が逃げ出すことによりループ足元に降り注ぐとするモデルと一致する観測結果である。図3左側の4秒ごとのイメージの時間発展を見ると、ループ上空の放射が減少することによりループ足元の放射が発生している様子がよくわかる。

6. まとめと今後の観測

以上のように、RHESSI衛星により硬X線撮像分光観測が可能になったことによって、単一のフレアに対してループ上空と足元の時間発展の関係とスペクトルの関係を調べることができた。その結果、ループ上空の領域の電子がほとんどすべて加速され、加速された単一成分の電子によりループ上空とループ足元の硬X線源が生まれるというモデルを構築することができた。

ただし、この結果は一つのフレアの観測にすぎず、すべての増田型フレアに当てはまるかどうか、すべてのフレアの中でどの程度の割合に対して同様の説明が可能なのかは明らかでない。RHESSIで増田型フレアの観測が極めて少ないことは、観測装置にも原因がある。すだれコリメーターを用いた硬X線撮像分光観測では、すだれの位置関係と硬X線強度のパターンから、画像再構成アルゴリズムを用いて画像を推定する必要がある。この方法の難点は、視野内に強い硬X線源がある場合、その硬X線源に影響を受け、ほかの弱い硬X線源の空間構造を調べるのが困難になる点である。増田フレアや本稿のフレアではループ上空の硬X線源はループ足元の硬X線源と同程度の強度をもっていたため、すだれコリメーターでも画像を得ることができた。しかし、多くの場合においてループ足元の硬X線源の方が放射が強く、ループ足元の彩層付近とコロナの両方から硬X線放射がある場合でも、コロナからの放射の画像を

得ることは難しい。

この困難を克服するため、新しい観測手法として、すだれコリメーターを用いない方法が実現しつつある。近年、硬X線の領域まで集光できる斜入射型硬X線望遠鏡の技術が飛躍的に進み、太陽観測にも応用可能になってきている。硬X線望遠鏡は可視光等の波長と同じく太陽の像を結び、焦点面に撮像検出器を置くことによって直接画像を得ることができ、画像再構成法を必要としない。そのため、ループ足元の強い硬X線源とコロナからの微弱な硬X線源の同時観測が可能になると期待される。硬X線望遠鏡による太陽観測は、ロケット実験FOXSI (Focusing Optics Solar X-ray Imager) により、一昨年初めて実現した⁶⁾。私はFOXSIロケット搭載検出器の開発および観測結果を用いた研究も行っており、現在チームの一人として観測結果の発表を準備している状況である。近いうちに、この新しい技術による太陽観測の結果も報告できることを期待している。

謝辞

本稿の科学的な内容は、2011年に筆者らが発表した投稿論文⁵⁾に基づいているので、詳しくはそちらをご覧ください。本研究の共同研究者であり、筆者がカリフォルニア大学バークレー校の博士研究員だった際の受入研究者でもあったS. Krucker博士には、RHESSIのデータ解析手法の初歩から科学的解釈に至るまでたいへんお世話になった。大学院時代の指導教官である宇宙科学研究所の高橋忠幸教授には、カリフォルニア大学バークレー校で本研究を行うきっかけを与えていただいた。また、本研究の共同研究者であり、RHESSIの提案者でもあった故R. P. Lin教授にも大いにご協力いただき、結果を高く評価していただいた。この場を借りて御礼を申し上げたい。

参考文献

- 1) Kosugi T., Makishima K., Murakami T., et al., 1991, Sol. Phys. 136, 17
- 2) Masuda S., Kosugi T., Hara H., Tsuneta S., Ogawara Y., 1994, Nature 371, 495
- 3) Lin R. P., Dennis B. R., Hurford G. J., et al., 2002, Sol. Phys. 210, 3
- 4) Krucker S., Hudson H. S., Glesener L., et al., 2010, ApJ 714, 1108
- 5) Ishikawa S., Krucker S., Takahashi T., Lin R. P., 2011, ApJ 737, 48
- 6) Krucker S., Christe S., Glesener L., et al., 2013, Proc. SPIE 8862, 00

Hard X-Ray Investigation of Solar Flare Particle Acceleration

Shin-nosuke ISHIKAWA

Hinode Science Project, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: We find and analyzed the most prominent example of an above-the-loop-top hard X-ray source with a footprint source in the RHESSI flare observations. The derived number of nonthermal electrons within the above-the-loop-top source is large enough to provide the needed number of precipitating electrons. These observations support the simple scenario where bulk energization is accelerating all electrons within the above-the-loop-top source and precipitating electrons produce the footprint emissions.