

# ひので衛星で探る白色光フレアの起源

渡 邊 恭 子

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所・日本学術振興会特別研究員  
〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1〉  
e-mail: watanabe.kyoko@isas.jaxa.jp



主に大規模な太陽フレアに伴って可視連続光が観測される「白色光フレア」現象は、古くから知られている現象ではあるが、観測例の少なさなどから、その起源や発生機構が現在でもよく理解されていない。しかし近年、衛星等を用いて行われている太陽フレア現象の多波長観測などから、白色光放射の起源はフレアで加速された非熱的電子ではないかと考えられている。太陽観測衛星「ひので」に搭載されている可視光望遠鏡は、この白色光フレアを今までにない高い解像度で観測している。RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) 衛星で観測される硬X線画像と「ひので」の白色光画像を比較することによって、これらの発光場所や物理量の関係が明らかになりつつある。今回は、「ひので」がとらえた白色光フレアを紹介し、長年の議論的であった白色光フレアにおける白色光と硬X線の発光高度の違いの問題に焦点を当て、白色光フレアの起源に迫る。

## 1. はじめに

太陽は地球から一番近くにある粒子加速天体である。特に「太陽フレア」という太陽系最大の突発的な爆発現象によって粒子加速が発生しているが、太陽では加速された粒子や粒子加速に伴った現象が実際に観測されているため、粒子がいつ・どこで・どのように加速されているかという情報は簡単に得られるものだと思われがちである。しかし、「太陽フレア中において粒子がどのように加速されるのか」は、太陽フレア研究でいまだにほとんど理解されていない謎の一つである。その理由は、粒子が加速されている場所が見えて(観測できて)いないからである。

太陽フレア現象自体は、近年、電波からガンマ線まで、いろいろな波長での観測が衛星などを用いて行われており、その発生時刻や発生場所だけでなく、詳しい磁場構造なども観測されるように

なってきた。これら電磁波の観測から太陽フレアモデル(磁気リコネクションモデル<sup>1)</sup>、図1)が構築されているが、このモデルは太陽フレア中で起こっている粒子加速現象についてはあまり説明できていない。例えば、加速された電子の情報は硬X線や電波の観測から得られるが、図1には硬X線の放射場所は示されているものの、電波の情報は取り入れられておらず、説明もされていない。

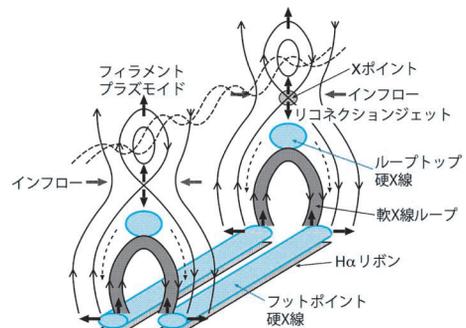


図1 太陽フレアモデル<sup>1)</sup>。

い。またイオン加速の情報は核ガンマ線や太陽中性子などから得られ、そのエネルギーは最大で十数GeVという高エネルギーまで達しているが<sup>2)</sup>、これらの高エネルギー加速イオンも太陽フレアモデルの中ではまだ説明されていない。

タイトルにある「白色光」の放射源も図1には示されていないが、太陽フレアで強い粒子加速が発生したときに白色光（可視連続光）、つまり人間の目に見える光でも爆発に伴う増光が観測されることがある。白色光がどのように増光しているのか、その起源も謎で、いまだに電子であるのかイオンであるのかも特定できていない（もちろん両方ともという可能性もある）。白色光放射の起源と発光プロセスを突き止めることができれば、太陽フレア中で加速された粒子の情報をまた一つ多く得ることができる。また、白色光は現在では1秒角以下という精度で細かい構造まで見ることができることから、数秒角から数十秒角に広がった構造しか観測できない硬X線や電波とは違った粒子加速の情報を得ることができることになる。

### 1.1 白色光フレアとその観測

「白色光フレア」の観測は古く、太陽フレアの発見時までさかのぼる。もともと太陽フレア現象自体が1859年にイギリスの天文学者キャリントンが黒点のスケッチ中に白色光の増光として偶然発見したものである<sup>3)</sup>。このときのフレアが現在の分類では白色光フレアに相当すると考えられている。

しかし、太陽における白色光の増光現象は、主に大規模太陽フレア（発生頻度の少ない最大規模のXクラスフレア）に伴って観測される希な現象であったため、この白色光の発生メカニズムは、長年にわたり解明されていなかった。これは従来行われてきた地上観測では測光精度があまり高くなく、白色光での増光が認められる観測例がごく少数にとどまっていたためでもある。

しかし近年では、TRACE (Transition Region and Coronal Explorer) 衛星などによる衛星観測によって、Xクラスフレアよりも軟X線強度が2桁も

小さいCクラスフレアでも白色光放射が観測されるようになってきた<sup>4), 5)</sup>。特に2006年9月23日に宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が打ち上げた太陽観測衛星「ひので」に搭載された可視光望遠鏡は、太陽の活動領域の光度の分布やその時間変化の精密な測定を行うことによって、白色光発光現象が多くフレアに見られる普遍的な現象であることを示しつつある<sup>6)</sup>。これは規模の小さいフレアであっても粒子が加速されている証拠である。

### 1.2 白色光フレアの特徴

これまでに観測された白色光フレアにおける研究から、その特徴が明らかになりつつある。特に、衛星で観測された白色光イベントは、野辺山電波ヘリオグラフなどによって観測された電波のデータやRHESSI衛星などで観測された硬X線のデータと比較され、お互いの放射の時間変動や発光している場所がほとんど同じであることが、数多くの観測によって確認されている<sup>5), 7)</sup>。太陽フレアで観測される電波や硬X線の起源はフレアで加速された非熱的電子であることから、白色光の起源も非熱的電子ではないかと考えられている。

また上記の観測などから、白色光放射に寄与している非熱的電子のエネルギー範囲も見積もられている。白色光のエネルギーは観測された白色光放射に対して黒体放射を仮定することにより、また非熱的電子のエネルギーは硬X線のデータから厚いターゲットモデルを仮定することにより求めることができる。これらのエネルギーを比較することによって、白色光放射エネルギーは50 keV程度以上の加速電子で説明できるということが確認されている<sup>8)-10)</sup>。ただこのエネルギー閾値はイベントや解析方法によってかなり異なっており、20 keV以上であるとする統計研究<sup>11)</sup> などもあるが、100 keV以上の非熱的電子で説明しようとするとエネルギーが足りず、白色光のエネルギーを説明できなくなるという点では、どの結果も一致している。

## 2. ひので衛星による白色光フレア観測

ひので衛星に搭載されている可視光望遠鏡はGバンド (4,305 Å), 青 (4,505 Å), 緑 (5,550 Å), 赤 (6,684 Å) という四つの波長を用いて可視連続光を観測している。ひので衛星が観測を開始した2006年頃は主にGバンドでの観測を行っていたが、2011年頃からはフレア発生を検知したときに自動的に赤・青・緑の3色の連続光画像を取得するフレア観測プログラムを用いて観測を行っている。

ひので可視光望遠鏡は測光精度が良く、空間分解能も0.2秒角程度と細かい描像まで観測することができるのだが、視野が最大でも328秒角×164秒角と、大きな黒点一つが視野に収まる程度の大きさであるので、白色光フレアのみならず、いつでも発生するかわからない太陽フレアをとらえることは非常に難しい。そこで、太陽フレア発生時に「ひので」搭載の各機器がそのフレアを観測していたのかどうかをまとめた「ひのでフレアカタログ<sup>12)</sup>」を開発して一般に公開している<sup>\*1</sup>。このデータベースを用いることにより、太陽フレア観測データの有無について簡単に調べることができる。白色光フレアについても「ひのでフレアカタログ」を活用することによって簡単にイベントを探すことができるようになった。

### 2.1 ひので可視光望遠鏡で観測された白色光フレア

ひので可視光望遠鏡は測光精度が良いとはいえ、すべての太陽フレアで白色光の増光を観測できているわけではない。フレア現象がひので可視光望遠鏡の観測視野内に入っていたXクラスフレアについては、ほぼ100%の確率で白色光の増光が観測されているが、Mクラス (Xクラスよりも1桁規模が小さい) では40%程度でしか見られていない。白色光フレアの観測例数も「ひので」の

打ち上げから2013年までで30例程度 (XクラスとMクラスフレアに伴ったもののみ) であり、全フレア発生数と比べると、1割以下でしか白色光フレアは観測されていない。

「ひので」で最初に観測された白色光フレアは2006年12月6日に発生したX6.5クラスフレアに伴ったイベントであった。このイベントではKruckerら<sup>7)</sup>がRHESSI衛星で観測された硬X線のイメージと比較を行い、硬X線放射と白色光放射 (Gバンド) の形状が30秒角と広範囲にわたって一致していたことを発見した。これより、硬X線放射と白色光増光のメカニズムは物理的に関連があると考えられた。

次に、2006年12月13日に発生したX3.4クラスフレアに伴って2例目の白色光フレアが観測された。このイベントでは、フレア発生前に光球で見えていた構造 (半暗部の筋構造や粒状斑) が、白色光増光中でも見えていたことから、白色光フレアは光球が光っているのではなく、上空の彩層中に光球のような高密度の状態が一時的に形成されたため白色光が発光したと考えられた<sup>13)</sup>。(白色光の発光高度については3章で詳しく議論する。)

その後、2012年中までに30例以上の白色光フレアが「ひので」で観測されたのだが、まずはこれらの白色光フレアイベントの中から、3例目の「ひので」白色光フレアイベントであった2006年

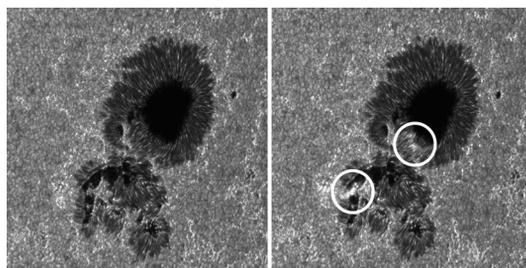


図2 2006年12月14日の太陽フレアで「ひので」が観測した白色光放射。右図の白丸辺りなどで白色光の増光が見られる。

\*1 ひのでフレアカタログ: [http://st4a.stelab.nagoya-u.ac.jp/hinode\\_flare/](http://st4a.stelab.nagoya-u.ac.jp/hinode_flare/)

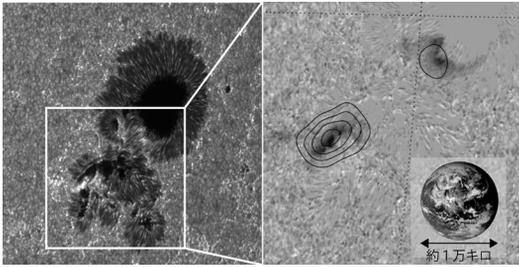


図3 左:「ひので」が観測した白色光の増光. 右: 白色光の差分画像と RHESSI 衛星がとらえた硬 X 線 (等高線).

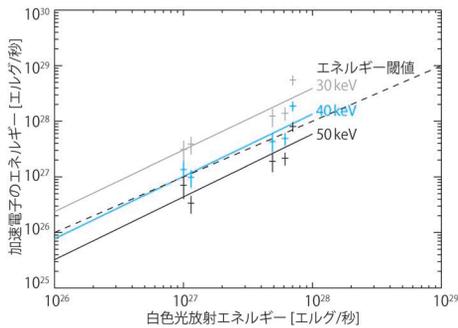


図4 白色光放射エネルギーと加速電子のエネルギーの比較. 40 keV 以上の加速電子のエネルギーが白色光放射のエネルギーとほぼ一致している.

12月14日のイベントについての詳細な解析結果を紹介する.

### 2.2 2006年12月14日に発生した白色光フレア

2006年12月14日の22:09(世界時)に発生したX1.5クラスの太陽フレアでは、図2のようにひので可視光磁場望遠鏡によって白色光(Gバンド)の増光が観測された。それと同時刻にNASAのRHESSI衛星によってフレアに伴った硬X線が観測されており、これらの画像を定量的に比較研究することが可能となった。解析の結果、RHESSI衛星がとらえた硬X線、すなわちフレアによって高速に加速された電子(非熱的な電子)の時間変動は「ひので」がとらえた白色光のそれと極めてよく一致しており、これらの存在場所も図3のようによく一致していた。また、硬X線と

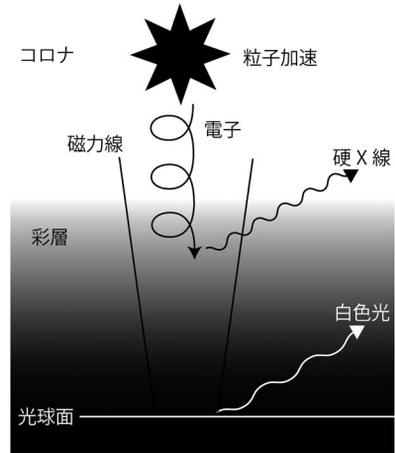


図5 白色光の発光高度の模式図.

白色光の発光強度も比例関係にあった。

白色光放射と硬X線放射、それぞれについて黒体放射と厚いターゲットモデルを仮定することにより、白色光放射と加速電子のエネルギー量を直接比較したところ、40 keV以上に加速された電子のもつエネルギーすべてが、白色光の発光に必要なエネルギーに匹敵していた(図4)。この結果は、この太陽フレアにおいては、40 keV以上に加速された電子が白色光の起源であることを示している<sup>10)</sup>。

### 3. 白色光の発光高度

太陽フレアで加速される電子は上空のコロナ(リコネクションポイント)で生成されるとされ(図1)、その電子が太陽面近くの密度の濃い太陽大気に降り注ぐことで、硬X線などを放射すると考えられている(図5)。2.2章で白色光放射に寄与していると求められた40 keV程度の加速電子は光球から約1,000 km程度上空(彩層, 光球面から1.5秒角程度離れた密度 $10^{13.5} \text{ cm}^{-3}$ 程度辺り)の高度で硬X線を放射していると考えられている。しかし白色光は太陽の表面である光球(高度 $\sim 0 \text{ km}$ 辺り)から主に発光されると考えられている。硬X線と白色光の放射場所はよく一致し

ていると言われているが、これは太陽表面に水平な方向に対しての話であり、放射高度は1,000 km程度の高度差があると考えられている<sup>8)</sup>。加速電子が光球まで到達しているとする、900 keVという高エネルギーの電子が大量に必要となり、観測とは一致しない。

この白色光と硬X線の放射高度差の説明としては、電子照射により一時的に非常に密度の濃い層が光球より上空に作られ、硬X線とともに白色光が発光している可能性が考えられている。実際2006年12月13日に「ひので」で観測された白色光フレアでも、彩層上部に密度の高い層ができ、そこから白色光が放射したと考えられた<sup>13)</sup>。この描像が正しいかどうかについては、太陽の縁で起こった白色光フレアを観測することによって解決することができる。

### 3.1 白色光フレアの発光高度についての論争

白色光の発光高度問題について、2011年2月24日に太陽の東縁で発生した白色光フレアで新たな論争が発生した。この白色光フレアはNASAが2010年に打ち上げたSolar Dynamics Observatory (SDO) という衛星に搭載されているHelioseismic and Magnetic Imager (HMI) という装置で観測され、また同フレアをRHESSI衛星も観測を行っていたため、硬X線のデータとの比較も可能であった。Battagliaら<sup>14)</sup>がSDO/HMIで観測された白色光のデータを調べたところ、太陽の縁から上空に浮き上がったところで白色光が観測されていた。この白色光放射は25-50 keVの硬X線よりも1,000 kmほど上空に存在していた。このことから彼らは、白色光の起源は12 keV以下の低エネルギー電子であると結論づけた。

一方、Martínez Oliverosら<sup>15)</sup>が同じ太陽フレアの同じデータを解析し直したところ、白色光放射と硬X線放射の場所は誤差の範囲内で一致しているという結論を得た。彼らはSTEREO (Solar

TErrestrial RElations Observatory) 衛星の観測データも組み合わせることで、地球から見ると太陽の縁に存在している太陽フレアの正確な発生場所を同定した。これを元に、SDO/HMIデータの画像位置補正を行い、Battagliaらの解析<sup>14)</sup>はいろいろな波長で観測された画像の位置補正が間違っていたと結論づけた。

これを受けてBattagliaら<sup>16)</sup>は同じデータを再解析するが、白色光放射は硬X線の放射よりも400 km程下層に位置するものの、光球から1,000 km程度上空の場所に存在しているという結果となっている。

このように結論にばらつきがあるのは、異なる衛星・異なる装置で観測された画像間の位置合わせを行うことはかなり難しいことを反映している。特に太陽の縁は、波長によって縁の位置も異なり、画像の中に奥行きの情報と高さの情報が混在するため、異波長の画像を重ねるのはかなり難しい。また、ここで議論しているのは1,000 km(約1.5秒角)程度の違いであるため、観測装置によっては数ピクセル程度の違いを議論していることになる。「ひので」可視光望遠鏡は0.2秒角の分解能があるので、「ひので」のみで観測を行っていたならば~10ピクセル程度の違いが見えてくるのであろうが、残念ながら、このフレアが発生したとき、「ひので」は別の領域を観測していた。一方、「ひので」は他のXクラスフレアを太陽の縁において観測していたので、次にこのイベントを紹介する。

### 3.2 2012年1月27日に「ひので」が観測した白色光フレアにおける白色光高度

2012年1月27日、X1.7クラスフレアに伴って白色光放射がひので衛星で観測された<sup>17)</sup>。このイベントは比較的太陽の縁に近い場所で発生したフレアで、実際に白色光が観測された場所は太陽表面上で西経83度\*2という位置にあった。した

\*2 太陽の縁は90度。

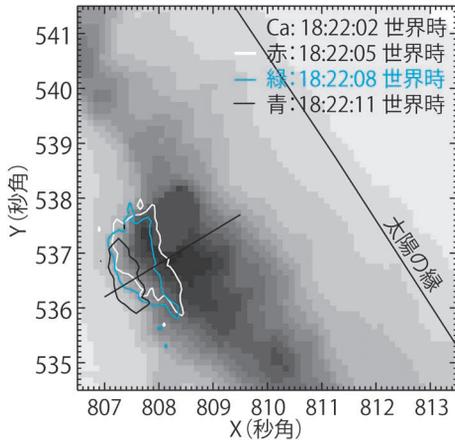


図6 2012年1月27日に観測された白色光放射（等高線）。背景イメージはカルシウム画像。

がって、このイベントは硬X線と白色光放射の放射高度を決定するための良いイベント候補であったが、残念ながら RHESSI 衛星はこのフレアを観測していなかったため、硬X線のデータとの直接の比較はできなかった。しかし、カルシウム線 (Ca II H, 3,969 Å) が「ひので」可視光望遠鏡で観測されており、これは硬X線と同様ではないが、太陽フレアの足下で発光が見られ、加速粒子が彩層へ衝突したときの反応も含まれていると考えられるので、このカルシウム線のイメージと白色光のイメージの比較を行った。これらのデータは同じ衛星の同じカメラで観測されていることから、3.1章にあった画像間の位置合わせの問題はない。

図6に観測された白色光放射をカルシウムの画像とともに示す。3色の白色光の増光部分を示している等高線は信号の統計的有意性が3シグマ以上であることを示しているが、それぞれの色の放射場所が重なっておらず、少しずつずれているのがわかる。このイベントは太陽の縁近くで観測された現象であるため、フレア現象自体を横から見ていると考えることができる。よって、各色の位置の違いは、発光高度の違いを表している可能性が考えられる。放射場所のずれは0.5秒角以下、

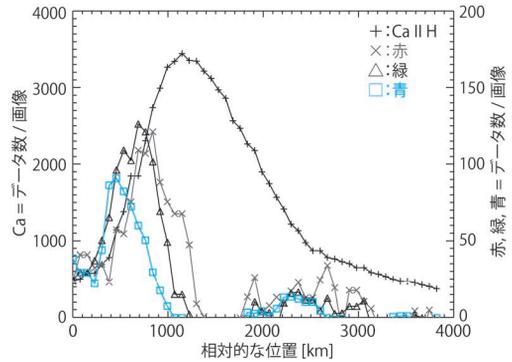


図7 Ca II Hと白色光（赤・緑・青）の相対的な放射高度分布。

200-300 kmの違いであったため、「ひので」可視光望遠鏡の分解能をもって初めて観測された現象であると言える。

観測された3色の白色光とカルシウムの放射の相対的な場所の違いを見るために、図6の白色光放射を横切る直線上における放射強度を調べた(図7)。これによると、赤色光の放射場所はカルシウムの放射場所とピークで300 kmほど離れており、また青色光の放射場所は赤色光と400 kmほど離れていることがわかる。この場所の違いが高度の違いを示しているならば、赤色光はカルシウム放射よりも300 kmほど下層に存在し、青色光は赤色光よりも400 kmほど下層（光球側）に存在していることを示していることになる。

図7に示したのはそれぞれの放射の相対的な位置関係であったが、光球面 (5,000 Åで光学的厚さが1となる高さ) からの絶対的な高さも「ひので」のデータから議論することができる。Judgeら<sup>18)</sup>によると、カルシウム放射は光球面から800 km程度上空で主に発生していると見積もられている。これが図7のカルシウム放射のピークであるとすると、青色光から赤色光は光球面から100-500 kmの高度で放射されていることになり、観測された白色光は光球層に存在していると言える。

ひので可視光望遠鏡で観測された白色光放射は

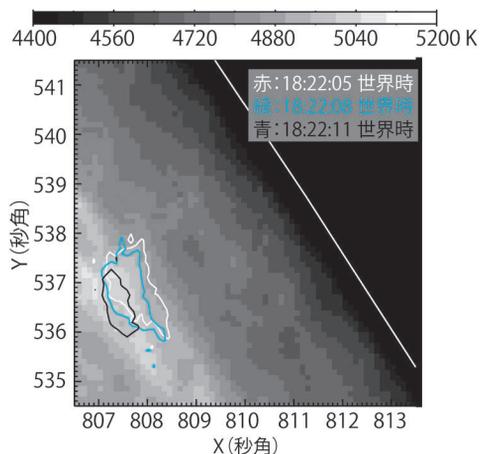


図8 白色光から見積もった白色光フレアの温度分布.

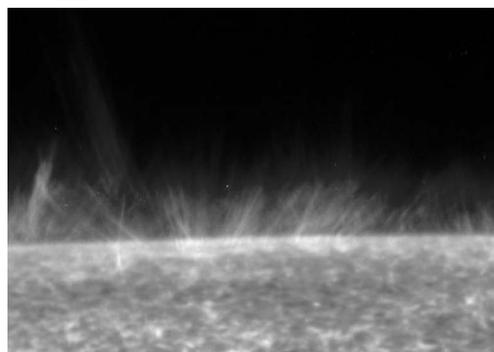


図9 太陽の縁で観測されたスピキュール (岡本文典氏提供).

3色あるため、黒体放射を仮定して、白色光放射の温度を導出することができる。このようにして求めた白色光フレアの温度分布を図8に示す。それぞれの色の放射の等高線内の平均温度を求めたところ、どこにおいても5,000度程度の温度であったが、赤色光（上層）よりも青色光（下層）のほうが温度が高い傾向が見られた。これは光球でも下層のほうが加熱されることによって白色光が発光していることを示唆している。

白色光と硬X線の放射高度の矛盾の説明としては、電子照射により一時的に非常に密度の濃い層が光球より上空に作られ硬X線とともに白色光が発光している可能性が考えられており、「ひので」で観測された2006年12月13日のイベントもこの解釈が適応されている。しかし、本イベントの解析結果から、この可能性は否定できる。本イベントでは硬X線のデータが無いため、実際に観測された白色光の放射高度を硬X線の放射高度と比べることはできていないが、硬X線が放射されると考えられているような上空に密度の濃い層は形成されておらず、白色光の放射も光球層であることが本イベントで確認できた。

#### 4. まとめと今後の展望

「ひので」可視光望遠鏡で観測された白色光フレアの解析結果により、40 keV程度の電子が白色光発光において重要な役割をしていることが判明し、白色光は光球層で発光していることが確認された。これらの結果から問題になるのは、40 keV程度の加速電子がどのようにして光球まで到達することができるのか？ ということである。本当に40 keV程度の電子が光球層まで到達しているのかどうかについて観測的に確かめるためには、近い将来太陽の縁で「ひので」による白色光観測とRHESSI衛星による硬X線観測が同時に行われるのを待つしかないが、可能性としては次のようなことが考えられる。(1) 太陽の縁で見られるスピキュールの構造(図9)からもわかるように、太陽大気は高度と密度が1対1では決まっておらず、同じ高度でも密度の濃いところと薄いところがある。加速電子は磁力線に沿って密度の薄いところを通して光球まで達している。(2) 太陽フレアで彩層蒸発した後の薄くなった大気に加速粒子が降り込んでいる。これらを検証するためには太陽表面の細かい磁場情報と白色光・硬X線等の多波長観測情報を比較研究していく必要があるが、これまでの観測データからも、統計的な解析を行うことによって、太陽大気中に

おける加速粒子のエネルギー輸送をモデル化することができると期待される。

最初に述べたように、「太陽フレア中において粒子がどのように加速されるのか」は、太陽フレア研究でほとんど理解されていない謎の一つだが、太陽大気中において加速粒子がどのような振る舞いをするのかを解明することは、粒子の加速情報を得るために重要な課題である。また、加速された高エネルギー粒子が大量に地球まで到達すると、地球磁場の擾乱や地上における宇宙線量の増加などを引き起こし、私たち人間の生活にまで影響を及ぼすことがある。ここ数年は太陽が活動的でないことが話題になっているが、現在も太陽の活動期は続いており、最大規模のXクラスフレアも発生している。今後も「ひので」衛星が太陽フレアを観測をする機会が増えれば、新たな知見が得られることが期待できる。

## 謝 辞

本稿の科学的な内容は、2010年と2013年に筆者らが発表した投稿論文<sup>10), 17)</sup>に基づいているので、詳しくはそれらをご覧ください。天文月報への執筆を助めていただいた清水敏文氏と、編集を担当して下さった勝川行雄氏からは原稿について有益なコメントを数多くいただきました。

## 参考文献

- 1) Shibata K., Masuda S., Shimojo M., et al., 1995, ApJ 451, L83 など
- 2) Muraki Y., Matsubara Y., Masuda S., et al., 2008, *Astroparticle Physics* 29, 229
- 3) Carrington R. C., 1859, *MNRAS* 20, 13
- 4) Matthews S. A., van Driel-Gesztelyi L., Hudson H. S., Nitta N. V., 2003, *A&A* 409, 1107
- 5) Hudson H. S., Wolfson C. J., Metcalf T. R., 2006, *Solar Physics* 234, 79
- 6) Wang H.-M., 2009, *Res. Astron. Astrophys.* 9, 127
- 7) Krucker S., Hudson H. S., Jeffrey N. L. S., et al., 2011, ApJ 739, 96
- 8) Neidig D. F., 1989, *Solar Physics* 121, 261
- 9) Ding M. D., Liu Y., Yeh C.-T., Li J. P., 2003, *A&A* 403, 1151
- 10) Watanabe K., Krucker S., Hudson H., et al., 2010, ApJ 715, 651
- 11) Fletcher L., Hannah I. G., Hudson H. S., Metcalf T. R., 2007, ApJ 656, 1187
- 12) Watanabe K., Masuda S., Segawa T., 2012, *Solar Physics* 279, 317
- 13) Isobe H., Kubo M., Minoshima T., et al., 2007, PASJ 59, S807
- 14) Battaglia M., Kontar E. P., 2011, *A&A* 533, L2
- 15) Martínez Oliveros J.-C., Hudson H. S., Hurford G. J., et al., 2012, ApJ 753, L26
- 16) Battaglia M., Kontar E. P., 2012, ApJ 760, 142
- 17) Watanabe K., Shimizu T., Masuda S., et al., 2013, ApJ 776, 123
- 18) Judge P. G., Carlsson M., 2010, ApJ 719, 469

## Origin of White-Light Flare by *Hinode/SOT*

Kyoko WATANABE

*Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency (ISAS/JAXA), 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara-shi, Kanagawa 252-5210, Japan*

Abstract: In association with solar flares, we sometimes observe enhancements of visible continuum radiation, which is known as a “white-light flare.” Such flares are mainly associated with energetic events, such as X-class flares, and they are still rarely observed since first being discovered about 150 years ago. Because many observed events show a close correlation between the time profiles and locations of white-light emission, and the hard X-rays and/or radio emission, there is some consensus that the origin of white-light emission is due to accelerated particles, especially non-thermal electrons. *Hinode/SOT* has the capability of observing white-light flares in the G-band (4,305 Å) and continuum (Blue: 4,505 Å, Green: 5,550 Å, Red: 6,684 Å) with broadband filters. From white-light flare observations by *Hinode/SOT*, we found that the power of the white-light emission can be explained by greater than 40 keV non-thermal electrons. Moreover, we also found that white-light emission was emitted from the photosphere. In this paper we show some observations of the *Hinode/SOT* white-light events, and discuss the flare parameters and origin of the white-light emission.