

氏 名 佐 藤 淳

学位（専攻分野） 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第290号

学位授与の日付 平成9年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 Improvement of Vohkoh Hard X-ray Imaging  
and Analysis of Long Duration Solar Flares

論文審査委員 主 査 教 授 笹尾 哲夫  
教 授 鷺目 信三  
教 授 小杉 健郎  
教 授 岩間 尚文（富山県立大学）  
教 授 牧島 一夫（東京大学）

## 論文内容の要旨

### Improvement of Yohkoh Hard X-ray Imaging and

### Analysis of Long Duration Solar Flares

### 「ようこう」硬 X 線望遠鏡の画質向上と長寿命太陽フレアの研究

太陽観測衛星「ようこう」に搭載されている硬 X 線望遠鏡 (HXT) の飛躍的な画質向上が達成された。また、達成された高画質画像を用いて、これまで撮像が困難だった長寿命フレアの研究を行なった。

#### 「ようこう」硬 X 線望遠鏡の画質向上

これまで、HXT を用いた太陽フレア硬 X 線画像の解析では、時間的、空間的に安定した画像が得られない場合がある等の問題が指摘されてきた。代表的な問題は、(i) 時間積分をするほど、再生画像が不安定になり、パッチ状の構造 (空間分解能以下のもある) が現れやすくなる、(ii) 通常のフレアより長寿命でサイズの大きなフレアにおいて、硬 X 線画像がパッチ状の構造となり、短寿命のコンパクトなフレアで観測される硬 X 線画像と軟 X 線ループレ画像との対応関係が見られなくなる、ことなどである。

HXT は、フーリエ合成型の望遠鏡であり、最大エントロピー法 (MEM) などの非線形の像合成法を用いて対象に関する断片的な情報から対象の復元を行なう。このような逆問題では、観測値から対象を推定する手続きが確立されていることが重要となる。我々は、前述の硬 X 線画像合成における問題を解決するために、像合成に使用される装置関数と、MEM を用いた像合成ソフトを全面的に再検討し、以下の 3 点の改良を主に施した。

- (1) 空間応答関数であるモジュレーション・コリメーターの X 線透過パターン (モジュレーション・パターン) の改善
- (2) MEM における対象の全強度 (Total Flux) 推定法の改良
- (3) 観測システム誤差評価の確立

(1) については、X 線透過パターンをコリメーターの形状に基づいてより正確に表現する定式化を採用するとともに、パターンを表現するパラメーターを太陽フレア自身を較正源として高精度に決定した。決定されたパラメーターは様々な方法で比較検討されたが、これまで使用してきた地上実験で決定されたパラメーターと大きな食い違いがあった。そこで、装置全体にわたってこの食い違いの原因を追求した結果、これまで考慮されていなかった個々の X 線検出器に固有なチャンネル・エネルギー特性の影響によりこの食い違いを説明できることが判明した。この改善によって画質低下を引き起こしていた主要な原因のひとつと推察されるモジュレーション・パターンの不定性がほとんど取り除かれた。

(2) については、MEM に関連する原理的なあるいは現実への応用に関するこれまでの多数の論文では、ほとんど注意が払われていなかった全強度の取り扱いに問題があることを発見した。その結果、全強度が原理的に MEM 画像合成法を通して決定できることと、現実への応用で広く取り扱われて来た全強度を既知量として扱う方法では、対象を実際以上に細かく分解してパッチ状の構造を作る場合が多いことを発見した。後者は、これまで MEM の本質的な弱点と考えられていた点である。我々が採用した MEM の改良によって、この点が MEM の原理に起因する問題ではないことが明らかになり、より安定した画像が得られるようになった。

(3) については、これまでの観測システムの誤差評価より、より適切な誤差評価をすることによって観測誤差の処理を適切に行なえるようにし、わずかに残ったモジュレーション・パターンの不定性の影響が合成像にほとんど影響を与えないようにした。

上記 3 点の改良の結果、HXT の飛躍的な画質向上が達成された。この改良が妥当なものであることは以下の 3 点で確認されている。

- (a) 時間積分の増大にともない画像が安定化する。フレアの時間発展に画像の変化がよく対応している。
- (b) 短寿命のフレアにおいて、軟 X 線で見られる構造との対応関係が以前よりはっきり見ら

れる。

(c) 長寿命のフレアにおいても軟X線大規模構造に対応した大規模構造が得られた。

### 長寿命太陽フレアの研究

太陽フレアにおいては、磁気再結合に伴って生成されると考えられる高エネルギーの熱的・非熱的電子が、どこで、どうやって生成されるかということが未解明の基本的な問題である。この問題を解明するためには、熱的成分が卓越する長寿命フレアと、そうでない短寿命フレアを詳細に調べる必要がある。「ようこう」の硬X線望遠鏡(HXT)によって、短寿命フレアでは磁気再結合により高エネルギー電子が直接生成されていると推測される現象が捉えられた。しかし、長寿命フレアにおける研究は、画像合成上の困難が解決されず、なかなか進展しなかった。この研究は、本論文の第一章で達成された硬X線画像の画質向上によって、初めて本格的に可能になった。

本研究では、1991年10月から1994年末までに発生したフレアの内、硬X線の寿命が長い約40例を調べた。現在までに得られた長寿命フレアにおけるX線源の主な性質は、以下の通りである。

- 軟X線で観測される複数のループからなるアーケード構造の頂上部で、1つ、もしくは複数の硬X線源が見つかった。明るい硬X線源は、軟X線望遠鏡の観測から求まる高密度な領域かその上空に位置するが、高温領域(~20 MK)よりは下方に位置する。また、明るい硬X線、軟X線源は、アーケード列の端のループに属する傾向がある。
- 複数の硬X線源が観測される場合、暗い硬X線源は明るい硬X線源に近接した領域でコンパクトな成分として観測される。これらの硬X線源同士は、単純な同一の時間変動を示さない。また、暗い硬X線源が明るい硬X線源に比べて硬いエネルギースペクトルを示すものもある。
- フレアの後半部において、ループ上空の軟X線強度が弱い領域で、硬X線の放射(主としてL band)があることがわかった。この硬X線源は、コロナ中を上昇していく。

上記の観測結果は、長寿命のフレアでは異なった時間と場所でエネルギー解放が行なわれ、かつ解放されるエネルギーが個々のループに均等に分配されていないことを意味する。すなわち、エネルギー解放が起こりやすい領域とそうでない領域があることを示唆している。

## 論文の審査結果の要旨

本論文は、太陽観測衛星「ようこう」搭載の硬X線望遠鏡(HXT)の画像合成能力を大幅に改良した研究(第1章)を中心に、この成果を活かしてこれまで画像合成が困難であった拡がった構造を持つと推測される硬X線源を伴う『長寿命太陽フレア』を解析した結果(第2章)を報告したものである。

HXTは、世界で初めての『フーリエ合成型』硬X線望遠鏡であり、64素子の「2層すだれコリメータ」で構成されている。各素子は、互いに方向角とピッチが異なる「2層すだれ」の空間応答を経て入射する硬X線の光子数を計測する。硬X線画像はこれらの光子計数データから復元されるが、得られる『フーリエ成分』の数が限られているために逆変換の一義性は保証されない。そこで、最大エントロピー原理等の仮定を用いて、観測と矛盾しない範囲で最も確からしい画像を得ている。

HXTは、広いエネルギー域と高い空間及び時間分解能という画期的性能を活かして、硬X線における多数の太陽フレア像を取得し、少なからぬ科学成果を産みだしてきた。

しかしこれまでの解析から、

- (1) 光子計数の積分時間を長くしてS/N比を改善しても、むしろ画質が劣化する、
- (2) スペクトルが急峻な場合に良好な画像を得にくい、
- (3) 大きく拡がったX線源の画像合成がむずかしい、

という重大な問題点が明らかになり、結果として、得られる画像に軟X線画像との有意な対応が見られない、分解能以下の斑状構造が生じる、などの深刻な弱点をもたらす場合があることが明らかになっていた。

この画質劣化の原因追及は、どこから手をつけて良いかわからないような複雑な問題と見られていたが、申請者はこれをひとつひとつ解きほぐし、最大の要因が、1)採用しているコリメータの空間応答関数の誤差、2)最大エントロピー画像合成法(MEM)におけるX線全強度推定値の取扱いにおける問題点、のふたつにあることをつきとめた。本論文は、独創的な方法でこれらの問題点を解決することによって上記の弱点を大部分取り除き、画質を画期的に向上させたことを報告している。

衛星軌道上の『2層すだれコリメータ』の空間応答関数の誤差を光子計数の観測値を用いて自己較正するのは困難な課題であったが、申請者は観測対象である太陽フレア自身を較正源とし、合成フレア画像から推定される光子計数を観測値と比較して逐次的に空間応答関数を改良するアルゴリズムを構築し、振幅で1%程度、ピーク位置で1秒角を上回る精度で較正を実現した。このアルゴリズムの要点は、多数のフレアを同時に用いることで、空間応答関数の振幅と位相の狂いを分離して評価できる点にあるが、これは先例のない独創的な工夫であり、著しい画像の改善をもたらした。実際の較正にあたっては空間応答関数の初期推定として打ち上げ前に実験的に決めたパターンを使用するが、この初期推定に大きな狂いが無い限り空間応答関数が本アルゴリズムによって正しい値に収束することは、数値シミュレーションによって確認されている。

また、これまでのMEM画像合成法では、画像の全強度(明るさ)は他の方法で推定した値をMEMの論理の外部から与えていた。しかしHXTの場合、本来全強度の正確な推定は画像を得ることなしには不可能である。そこで、従来の方法は、フレアの位置によっては無視できない誤差をもたらす。本論文は、申請者の新しい着想により、MEM画像合成法の中にMEMの原理に則った全強度推定法を組み込む巧妙な方法を用いて、この問題を解決した。

これらの改良により、HXTの画像合成能力の著しい改善が見られ、画像のダイナミックレンジが大幅に向上した。この結果、軟X線画像等との対応を論議することが出来るようになった。

第2章では、改良の成果として得られた『長寿命フレア』(約10イベント)の画像を示し、軟X線画像に見られるループ(若しくはループ・アーケード)の高輝度部分及びその上部の高温部分に対応した硬X線源が見つかるという新しい結果を報告している。これは予備的成果であるが、画質の向上が現実に新しい硬X線源の発見につながることの例証として、第1章の画像合成法の改良の成果を端的に示すものとなっている。新しく見出された硬X線源は『長寿命フレア』における高温プラズマ生成域と粒子加速域との関係に新しい光をあてるものであり、今後の研究の進展が待たれる。

以上の研究成果、特に第1章に述べられたHXT画像合成法の改良の部分は、独創的な方法で目覚ましい画質の改善をもたらしたこと、及びHXTが新しい型の硬X線望遠鏡であり画像合成法自身も研究開発の対象であることに照らして、重要な科学的貢献と認められる。よって、全審査委員の一致した意見として、本論文は学術博士の学位を授与するに値するものと判定した。

なお、論文の構成と記述に関しては、画像合成法に関する導入的概説等に改良の余地が見られる、複数の改良点の各々の寄与の割合を明示していない等が指摘された。これらが改善されるならば、論旨は一層明解になり、本論文の価値を更に高めることになるであろう。