

X線望遠鏡XRTの特徴と成果

坂尾 太郎

〈宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1〉
e-mail: sakao@solar.isas.jaxa.jp



「ひので」衛星搭載のX線望遠鏡(XRT)は、100万K以下から2,000万K以上まで、太陽コロナ中のあらゆる温度のプラズマを観測できることを主眼に検討・設計された。特に「ようこう」軟X線望遠鏡SXTがアクセスできなかった200万K以下のプラズマ現象を「ようこう」の1桁高い頻度で撮像観測できることがXRTによる発見をもたらしており、また、ほかのコロナ望遠鏡では十分に観測できないコロナ中の高温プラズマの観測にも強みを発揮する。XRTが検討された背景と観測装置としての特徴、およびこれまでに得られた成果の一部を紹介する。

1. XRTの科学的背景と装置の特徴

1.1 背景

「ようこう」に続く太陽観測衛星SOLAR-B(打上げ後「ひので」と命名)は、1991年に「ようこう」が打上げられた数年後から検討が本格化した。この次期太陽観測衛星に搭載するX線望遠鏡(X-Ray Telescope; XRT^{1),2)}は、可視光磁場望遠鏡SOTが観測する太陽光球面の磁気的活動に対応した、上空コロナの活動現象を詳細に捉えることを目的に構想された。「ようこう」衛星の軟X線望遠鏡SXT³⁾は、約300万K以上の活動的な高温コロナを観測対象とし、黒点周辺の活動領域や太陽フレアなど、活動的なコロナの研究に大きな役割を果たした。一方、波長200-300Å程度の極端紫外光(EUV光)を観測波長とする太陽EUV望遠鏡(SoHO探査機のEIT⁴⁾やTRACE衛星⁵⁾が1990年代半ばより欧米で本格的に稼働した。EUV望遠鏡は100-200万Kの低温コロナを主な観測対象とし、黒点の存在しない静穏領域コロナや、フレア周辺の低温のコロナ構造等の観測に威力を発揮していた。

このような状況を背景とし、XRTはコロナの

全貌を捉えるため「ようこう」SXTとEUV望遠鏡の観測能力を併せ持ち、静穏領域コロナから黒点周辺の活動領域、さらには太陽フレアまで、コロナ中のあらゆる温度のプラズマを観測できることを目指した。

1.2 装置の特徴

コロナをくまなく観測するため、XRTは焦点面検出器としてX線のみならずEUV波長域にも感度をもつ裏面照射型CCDを採用することとした。これに対し、XRTの光学系をSXT同様の斜入射型とするか、EUV望遠鏡が採用している直入射型とする(と言うかEUV望遠鏡とする)かは、ミッションの検討段階で議論があった。EUV望遠鏡は直入射光学系を採用することで、比較的容易かつコンパクトなサイズで高い空間分解能を実現できる。一方、直入射の光学系を組むにあたってEUV光に対する直入射反射率を確保するため、ミラーに特定の波長範囲を対象とした多層膜コーティングを施す必要があり、コロナプラズマからの強い輝線を対象とした狭い波長範囲で反射率をもたせるために観測温度に関してNarrow-band望遠鏡となる。このため、異なる多層膜鏡をもって観測波長チャンネルを複数用意してもコロナの

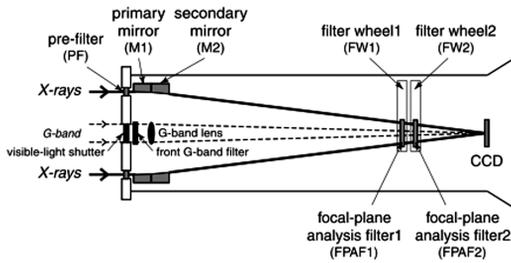


図1 XRTの光学系ダイアグラム⁷⁾。図の左手から入射したX線は斜入射ミラーによる2回反射を受け、焦点面CCD上に結像する。また、他データとのコアライメントを行えるよう、可視光光学系を併せ持つ。

温度範囲全域はカバーしがたく、コロナ中の加熱・冷却を伴うプラズマ活動を余さず捉えるには不向きである。この点を重視し、XRTは観測温度についてBroad-bandとなる斜入射光学系を採用した(図1)。観測波長域は5–200 Åである。この望遠鏡で温度診断を行うため、XRTはSXTと同様にX線の光路中に温度解析用の金属フィルターを挿入して撮像を行い、異なるフィルターでのX線のカウントレートの比から「フィルター比温度」を導出する^{6)–8)}手法を採った。

また、望遠鏡を口径35 cmと大型化して集光能力を高めることで、1 CCDピクセル(1ピクセルが1.0秒角に相当)当たりSXT(2.45秒角ピクセル)と同等の露光時間での撮像を可能とするとともに、ミラーの精密研磨により太陽観測用の斜入射X線望遠鏡として過去最高の空間分解能2秒角を達成。これにより、100万K以下から2,000万Kを超える広い温度範囲のコロナプラズマを、温度の抜けなく詳細に観測することを可能とした。ミラーの研磨はインシュタイン衛星やチャンドラ衛星および「ようこう」SXTの斜入射X線ミラーを手がけた米国グッドリッチ社が行った(なお同社は斜入射ミラー研磨をもうやめてしまっている)。

SOLAR-Bの検討段階で、コロナ観測機器(XRT・EIS)に求める空間分解能として、光球面の磁力

線が根差している微細磁束管は上空にいくと拡がっていくので、1秒角/CCDピクセル程度の空間分解能があればよい、という議論があった。一方、「ひので」の観測開始後、明瞭に認識されたことだが、SOTが0.2秒角の分解能で観測する光球面の輝度構造・磁気構造に対するコロナの空間的かつ時間的な対応関係を探るには、XRTおよびEISの2秒角の空間分解能は不十分であった。SOTで微細構造が「見え過ぎ」てXRT・EIS画像のどこにどう対応しているのかわからないのである。しかし、ではコロナ観測機器の空間分解能を上げれば光球構造との対応がついたか? と言うと、それはどうだろうかと思う。光球とコロナの間には彩層と呼ばれる大気層があり、彩層の磁場構造は光球とはかなり様相が異なる(という話を、あるとき、Jack Harveyという米国の太陽研究者がSOLAR-Bの科学検討会議で報告・注意喚起していたのが忘れられない)らしい。結局、必要条件として彩層の磁場構造まで観測で同時に押さえない限り、コロナと下層大気(光球・彩層)との磁力線を介した直接的な(原因と結果の対応を示すような)つながりは探れないのだろう。将来の太陽観測の課題である。

1.3 観測データレート

観測装置自体の性能に加え、「ようこう」との大きな違いは観測データレートである。特に、非フレア時のコロナ観測では、同じ観測視野サイズに対して、XRTはSXTのほぼ1桁高い頻度での撮像が可能となっている。このことにより、例えば後述のように、静穏と思われていた太陽極域のコロナ中でX線ジェットが頻発していることを見いだすなど、これまでに知られている現象が予想外の頻度で発生していることも明らかにした。

2007年年末からのX帯変調器の不調により、観測データのダウンリンクは大幅に制約を受けることとなったが⁹⁾、機上でのデータ圧縮など観測の工夫によって、科学的品質をできるだけ損なわない範囲で発生するデータ量の削減に努め(それ

でも観測の制約は多々あるが、引き続き高い撮像頻度を確保している。

1.4 国際協力による開発と観測運用

「ひので」は日米英(打上げ後はさらに欧州ESA)の大規模な国際協力で実現した。XRTは望遠鏡のミラーと鏡筒構造、解析用フィルターとフィルター駆動機構、および全制御エレクトロニクスを米国ハーバード＝スミソニアン天文台(SAO)が担当し、焦点面のCCDカメラとカメラ制御エレクトロニクスを日本(JAXA宇宙研と国立天文台)が担当した。さらにCCDをSAOで鏡筒に取り付けた後の望遠鏡全体の試験を、NASA/GSFC(機械環境試験・熱真空試験)とNASA/MSFC(光学性能検証試験)で実施したのち、JAXA宇宙研での衛星総合試験に供した。

「ひので」打上げ後の運用では、日米XRTチームは、メール連絡はもちろんのこと、観測運用当番は一週間交代のため、毎週定例の国際電話会議を開催し、前の週のXRT観測内容と機器状態の報告、およびこれからの週の観測予定や機会を利用して、日米チームのface-to-face会議の機会も確保し、チームを維持し続けている。

2. XRTの成果の一部

前述のように、XRTは斜入射光学系のもつBroad-band温度特性を活かし、フレアや活動領域で生成される高温プラズマだけでなく、100–200万K程度の低温プラズマも観測することができる。広い観測温度範囲と高い撮像頻度の組み合わせによって可能となったXRTの観測成果のうち、紙面の都合で2例のみ紹介する。

2.1 低速太陽風の発生源

太陽系は、太陽風と呼ばれる太陽からの荷電粒子の流れで満たされている。太陽風には秒速600–700 km程度の「高速太陽風」と、秒速300–400 km程度の「低速太陽風」があり、前者は太陽の南北両極域を含む中・高緯度領域から、後者はそれ以外の低緯度領域から吹き出ていることがUlysses衛星の観測によって明らかとなってきた¹⁰⁾。しかしながら、特に低速太陽風が太陽低緯度領域の具体的にどのような場所から出ているのかを直接的に示す観測はこれまでなかった。

XRTは、2007年2月に観測した活動領域のコロナホールに隣接した端部(図2右の○で示した領域)から、筋状に見える磁力線に沿って、軟X線を放射するプラズマが絶えず流れ出ているパター

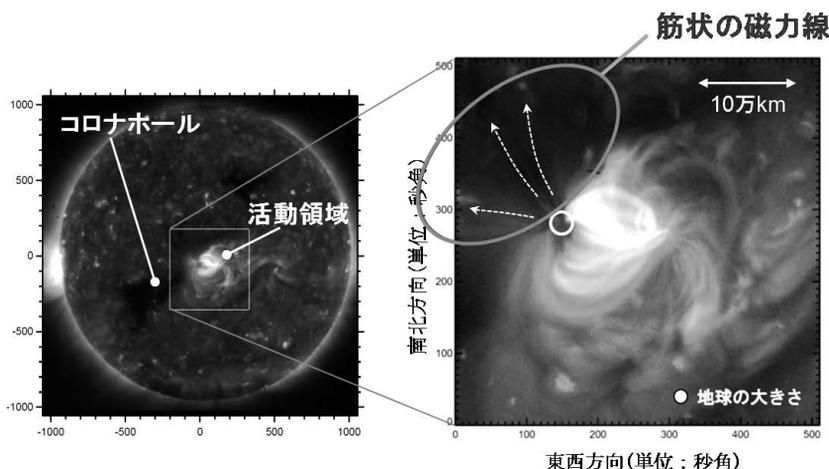


図2 XRTによる低速太陽風の流出源の特定¹¹⁾。

ンを発見した¹¹⁾ (連続画像でパターンとして見えているので、密度ムラがある)。同時に観測したEISのFe XII輝線データから、この流出域で視線方向上向きのドップラー速度が検出され、XRTが観測した流れのパターンがプラズマの流出によるものであることが確認された。また、ポテンシャル磁場計算の結果、この流出域から上空へと延びる磁力線は太陽表面に戻るのではなく、惑星間空間へとつながっていることが示唆され、この場所が太陽風の流出源である可能性が判明した。流出を示すプラズマの温度はXRTのフィルター比温度解析から110万K程度であり、SXTでは観測できなかったコロナプラズマである。

コロナホールに接した活動領域端部が低速太陽風の流出源であるという指摘は、名古屋大学の電波シンチレーションを用いた太陽風伝播の観測^{12), 13)} や、米国ACE衛星による太陽風のその場観測¹⁴⁾ からなされており、XRTの観測は、これを画像として裏づけた結果と言える。太陽風の発生源や、XRTで見える流れのパターンの正体(プラズマの流れと波動とが混在しているようである)については、その後、EISを用いて精力的に研究が進められているので、そちらも併せてご参照いただきたい¹⁵⁾。

2.2 X線ジェット

X線ジェットは「ようこう」SXTによって発見された現象で、コロナ下部で生成した高温プラズマが磁力線に沿って細くコリメートされてコロナ上方へ伝播していく。ジェットの足元付近で発生した磁気リコネクションによってプラズマが加熱されてジェットが形成されることが考えられているが、XRTはこのX線ジェットが、SXTでジェットが専ら観測された活動領域だけでなく、静穏領域やコロナホール中でも頻発していることを見いだした。特に極域のコロナホールで頻発するX線ジェット(図3)は印象的で、2007年に米国科学誌Scienceで「ひので」成果特集号が刊行されたときは、ジェットを捉えたXRTの画像が表紙を

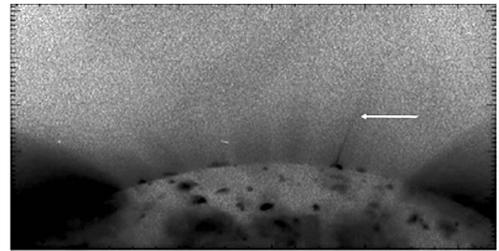


図3 極域コロナホールで頻発していることが発見されたX線ジェットの例¹¹⁾。

飾っている。

例えばXRTで観測した極域コロナホールの中でのジェットの発生頻度は、1日あたり典型的に60個である¹⁶⁾。観測領域が異なるので正当な比較ではないが、この検出頻度はSXTに比べて桁違い(10倍)に大きい。前述したXRTの非フレア時の撮像頻度がSXTより1桁高くできることにより、このように高い発生頻度を明らかにできたのであるが、XRTで見えるジェット自身に(SXTで観測できた)300万K以上の高温のものだけでなく、100-200万K程度の比較的低温のものがあることが、最近の研究で示された¹⁷⁾。後者の低温ジェットは、近年のSDO衛星のAIAなどEUV望遠鏡でも観測できるものであるが、XRTでは高温・低温ジェットのどちらも、高い撮像頻度で、観測できる利点を活かして、これらのジェットの発生場所の分布や形成機構の違い(磁気張力によるジェット形成と蒸発流によるジェット形成)も議論されている¹⁷⁾。

2.3 フレア検出機能

直接の観測成果ではないが、XRTは「ひので」のフレア観測に大きな貢献をしていることも書いておきたい。XRTの機上での観測を制御するミッションデータプロセッサ(MDP)は、XRTが定期的に取得するCCD全面の撮像データを用いて太陽面上のX線の増光をモニター・解析することで、フレアの発生を機上で検知するフレア検出機能をもつ。フレアの発生とその位置情報はXRTだけでなく、「ひので」搭載の他観測機器(SOT

およびEIS)にも通知され、各機器はその情報を用いてそれぞれのフレア観測を自動的に開始する。SOTとEISは観測視野が限られるため、フレア発生位置が観測視野の外だとフレア観測には移行しないが、XRTはCCD上のフレア発生位置に観測領域を定め、フレア観測を行うことができる。

XRTは「ひので」の望遠鏡全体に対するフレアモニターの役割も果たすため、フレア検知動作の最適化が重要となる。そこで、「GOES衛星のX線フラックスレベルでMクラスの半ば以上の大きなフレアに対しては、X線ピークの1/10のレベルにフラックスが上昇してきた段階で確実にフレア発生を検知すること」という要求を設定し、取得画像を用いた地上でのシミュレーター(MDP)のフレア解析動作を模擬する)による検証も含めて、モニター画像の取得頻度、X線増光の閾値、それまでの画像の重み付け、など、MDPが行うフレア検知のためのパラメーター設定を慎重に進め、上記要求のフレア検出動作を達成した。このような調整を経たXRT-MDPシステムによるフレア検出・観測成績を図4に示す。横軸はフレアのGOES衛星X線クラス、縦軸はそのクラスのフレアのうちXRTで観測されたものの割合である(灰色はフレア観測モードに移行して観測されたもの、黒は、フレア発生と検知されず通常観測モードで観測されたもの)。縦軸の分母のフレア数には、XRTがCCD上に堆積するコンタミネーション物質を飛ばすためのCCDベークアウトや軌道上の荷電粒子帯通過などの観測中断期間中に発生したフレアも含むため、「観測成績」を論ずるのに妥当か疑問ではあるが、にもかかわらず、GOES M9以上の大フレアはすべてフレア観測モードでデータ取得できているなど、良好なフレア検知・観測性能が実現できていることが見て取れる。

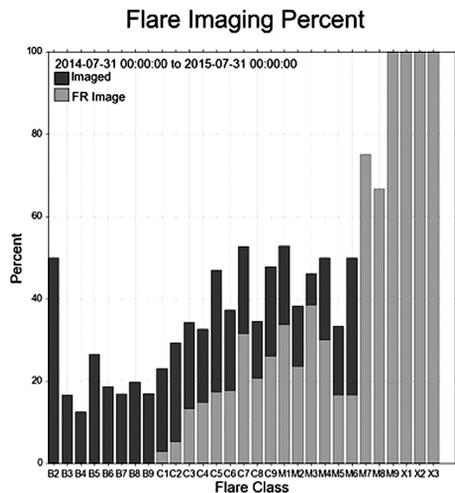


図4 2014年から2015年にかけての1年間のXRTによるフレア観測成績。横軸はGOES衛星のピークX線フラックスレベル。縦軸は各GOESレベルごとの発生した全フレアに対する観測フレア数の割合。(米ハーバード=スミソニアン天文台のK. Reeves, N. Schanche両博士による集計。)

3. ま と め

以上、XRTが構想された背景と成果の一部を中心に述べてきたが、「コロナを温度抜けなく観測する」という課題に対する回答は書かないでいる。関連する論文が投稿段階で滞っている(レフェリーから温度解析にいちやもんがついて、差し戻された)ためだが、XRTで観測した太陽全面コロナの活動領域・静穏領域・コロナホールなど場所ごとの温度分布と加熱・冷却状態を論じる興味深いもので、第一著者の某君は早くこれを改訂・再投稿して、世に出して欲しい。また、活動領域の高温プラズマ成分の観測でも、XRTはEUV望遠鏡(SDO/AIA)にないユニークな優位性をもち¹⁸⁾、コロナ中の高温プラズマ観測に独自の地歩を占める。フレアに伴い生成されるさらに高温なプラズマの観測では、対象となるフレア構造の時間発展が激しいためフィルター比温度の解析には注意が必要だが、XRTで面白い結果が得られつつある。これについてはいずれまた報告したい。

「ひので」打上げから10年、XRTは現在も順調に観測を続けている。これからも観測や解析の工夫によって新たな発見を目指し、観測運用を続けていきたい。

謝 辞

「ひので」衛星は、国内では「ひのとり」以来のJAXA宇宙科学研究所と国立天文台との緊密な協力、また、国外では「ようこう」以来の米国NASA、英国PPARC（現STFC）との広範な国際協力のもとで開発されました。打上げ後は、ESAが地上受信局のサポートで全面的に協力しています。また、開発段階・運用段階を通じて、JAXAの工学系研究者の皆様とメーカー各位の多大なご助力をいただき、XRTはこの10年、所期の性能で順調に観測を続けることができました。改めて御礼申し上げるとともに、今後も引き続き、「ひので」へのご支援をよろしくお願いいたします。

参考文献

- 1) Golub L., DeLuca E., Austin G., et al., 2007, *Sol. Phys.* 243, 63
- 2) Kano R., Sakao T., Hara H., et al., 2008, *Sol. Phys.* 249, 263
- 3) Tsuneta S., Acton L., Bruner M., et al., 1991, *Sol. Phys.* 136, 37
- 4) Delaboudinière J.-P., Artzner G. E., Brunaud J., et al., 1995, *Sol. Phys.* 162, 291
- 5) Handy B. N., Acton L. W., Kankelborg C. C., et al., 1999, *Sol. Phys.* 187, 229
- 6) Acton L. W., Weston D. C., Bruner M. E., 1999, *JGR* 104, 14827
- 7) Narukage N., Sakao T., Kano R., et al., 2011, *Sol. Phys.* 269, 169
- 8) Narukage N., Sakao T., Kano R., et al., 2014, *Sol. Phys.* 289, 1029
- 9) 清水敏文, 2016, *天文月報* 109, 524
- 10) McComas D. J., Bame S. J., Barraclough B. L., et al., 1998, *GRL* 25, 1
- 11) 坂尾太郎, 2008, *天文月報* 101, 491
- 12) Kojima M., Fujiki K., Ohmi T., et al., 1999, *JGR* 104, 16993
- 13) Ohmi T., 2003, Ph.D. Thesis, Nagoya University
- 14) Ko Y.-K., Raymond J. C., Zurbuchen T. H., et al., 2006, *ApJ* 646, 1275
- 15) Lee K.-S., Brooks D. H., 今田晋亮, 2016, *天文月報* 109, 700
- 16) Savcheva A., Cirtain J., DeLuca E. E., et al., 2007, *PASJ* 59, S771
- 17) Sako N., 2014, Ph.D. Thesis, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)
- 18) 石川真之介, 2016, *天文月報* 109, 544

X-Ray Telescope (XRT) aboard Hinode Taro SAKAO

Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara 252-5210, Japan

Abstract: The X-Ray Telescope (XRT) aboard Hinode was designed so as to observe coronal plasmas in their entire temperature range, spanning from below 1 MK up to beyond 20 MK. In particular, capability of observing low-temperature (below 2 MK) plasmas that were not accessible with Yohkoh Soft X-ray Telescope (SXT), coupled with an order of magnitude higher cadence than SXT, has brought XRT various discoveries on coronal activities. Furthermore, XRT has its unique strength in observing high-temperature plasmas in the corona that are not necessarily well observed with other coronal imagers. Scientific background of the XRT design and key points of the instrument features are reviewed, followed by some highlights from observations made with XRT.