

「ひとみ」衛星搭載軟X線撮像器 SXI

林 田 清

〈大阪大学 大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-1〉

e-mail: hayasida@ess.sci.osaka-u.ac.jp



「ひとみ」衛星搭載SXIは、軟X線望遠鏡SXTの焦点面に設置されたX線CCDカメラである。軟X線分光器SXSと同じエネルギーバンドで、SXSの視野3分角を含む38分角の広い視野を、より小さなピクセルサイズでカバーし、撮像分光を行う。CCDは、200 μm という厚い空乏層の裏面照射型で、0.4-12 keVというエネルギーバンドで高い検出効率をもつ。軌道上では、ファーストライトとしてのペルセウス座銀河団を含む6天体を観測し、そのX線撮像分光を行った。

1. SXI開発までの道のり

現在軌道上で運用しているX線天文衛星の多くが、斜入射X線反射望遠鏡を搭載し、その焦点面にはX線CCDカメラを設置している。この形式の元祖は、1993年打ち上げの「あすか」衛星である。各元素、各電離状態の輝線を分解できる分光性能と、望遠鏡の撮像性能を十分に発揮できる位置分解能をあわせもった検出器として、X線CCDは大変有効である。X線CCDは、デジタルカメラなどの撮像デバイスとして広く使われてきた可視光用CCDと、原理的、構造的に大きな差はない。しかし、可視光では光の強度のみ計測するのに対し、X線CCDは、個々のX線光子の入射位置とエネルギーの両方を測定し、撮像と分光を同時に実施する。ノイズレベルを1個のX線光子が生じる信号電荷より十分低くおさえないと他、透過率の高いX線光子を検出するために、検出層である空乏層を厚くする必要もある。このため、X線CCDは高抵抗のシリコン素材を使用して製作され、かつ、暗電流を抑えるために -100°C 程度に冷却した状態で使用される。

「あすか」搭載のX線CCDカメラSISは、マサチューセッツ工科大学(MIT)のリンカーンラ

ボ(LL)で開発されたCCDを使用し、日米協力で開発された。2000年打ち上げ(ただし軌道にはのらず)のAstro-E衛星と2005年打ち上げの「すざく」衛星搭載のXISも日米協力で開発された。CCDはMIT LL製で、Chandra衛星のそれと同じモデルであったが、カメラボディの一部とデジタル回路、較正は日本側が担当した。「すざく」XIS¹⁾は、10年間にわたる運用期間中、1,000個を超える天体を観測し、銀河団外縁部のX線放射検出をはじめ様々な成果をあげてきた。

これらのX線CCDカメラの開発と並行して、日本国内でもX線CCD、及びそれを使用したカメラシステムの開発が1980年代末より行われてきた。開発は常深博氏により阪大で開始され、京大、宇宙研、宮崎大、東京理科大、青山学院大、東北学院大、関西学院大、奈良教育大と、人材とともに全国に拡大していった。浜松ホトニクスと共同のCCD開発も1990年代より開始され、その成果は「はやぶさ」、「かぐや」搭載の蛍光X線装置、2009年打ち上げで現在も運用中の国際宇宙ステーション搭載全天X線探査装置MAXI-SSCにもつながっている。本記事の対象である、「ひとみ」衛星搭載X線CCDカメラSXIも、この背景の上に開発されているが、CCDのタイプは大

大きく異なる。この点も含めたSXIの紹介を次にしたい。

2. SXIのデザインとその開発

「ひとみ」衛星の主目的は、超高エネルギー分解能の軟X線分光と、軟X線から軟ガンマ線までの広帯域高感度観測である。前者の主役は軟X線分光器SXSであるが、その視野は3分角と小さい。望遠鏡の角度分解能は1.3分角なので、対象が点源であっても一部の光子は視野外に逃げ、逆に、視野外にあるX線源からの漏れ込みも問題になる。SXS周囲の空を同じエネルギーバンドで同時に監視する必要がある、これがX線CCDカメラの役割のひとつである。

後者の目的は、様々な成分で構成されるX線天体の連続スペクトルの分離に特に重要で、硬X線撮像検出器HXIのエネルギー帯域5-80 keVと重なりをもつ、0.4-12 keVの範囲を高い検出効率、低いバックグラウンドでカバーする必要がある。このために、検出層である空乏層を厚くすることが要求される。空乏層の厚みは、素材シリコンの比抵抗の平方根に反比例するが、これまでのCCDで一般に用いられてきたP型シリコンでは70 μm を超えることは難しい。それに対してN型シリコンはより高い比抵抗(不純物濃度と多数キャリアの移動度に反比例する)の素材が入手可能で、原理的には空乏層を厚くできる。2000年代前半、浜松ホトニクスとの共同でN型シリコンCCDの開発がはじまった。開発目的は(最終的には「ひとみ」衛星に搭載する)X線CCDカメラ及び赤外線に対する高い検出効率が要求される「すばる」望遠鏡のカメラである。長い開発の道のりをたどる紙面の余裕はないが、最終的には2014年ファーストライトの「すばる」HSC、「ひとみ」SXI(2016年)に結実した。SXI CCDは「すざく」XISの3-5倍となる空乏層厚200 μm 達成している²⁾。

SXI CCDは裏面照射型である。裏面照射型であることは、軟X線検出効率の点でもメリットが

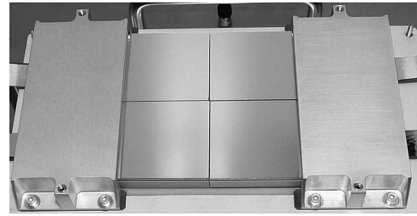


図1 SXIカメラのクールドプレート上に配置したCCD。撮像領域の大きさ30 mm角のCCDを4枚モザイク状に配置して、38分角の視野をカバーする。

あるが、より重要な点は転送電極面が外部に露出していないため微小隕石衝突に対する耐性が高いことである。可視光遮断はフィルタではなく、X線入射面にコートしたアルミ膜で対応する。CCDはフレーム転送型で、撮像領域はサイズ24 μm 角のピクセル1,280×1,280で構成される。ただし、常に2×2ビンニングで読み出すので実効的ピクセルサイズは48 μm である²⁾。このCCDを4枚モザイク状に並べて38分角の広い範囲をカバーする(図1)。

SXIシステムは、CCD以外にもアナログ回路、デジタル回路、カメラ構体(図2)、冷却機構で構成される。標準的にはCCDの温度は-110°Cで、1枚のフレームの露出時間は4秒である。この条件における5.9 keVのX線に対するエネルギー分解能(半値全幅)は161-170 eV、読み出しノイズ(二乗平均平方根)は6-7 e-である²⁾。

SXIのPI(研究代表者)は常深博氏、副PIとして筆者、鶴剛氏、堂谷忠靖氏があたり、国内のX線CCD関係者総動員で開発にあたった。ハードウェアのデバッグ、CCDの評価、較正の多くは阪大、京大で実施したが、ソフトウェアは宮崎大、東北学院大を中心に開発、放射光施設実験は東京理科大、衛星試験はJAXAがリードなど、地の利も生かした役割分担で対処した。メーカーは冷凍機が住友重工、その他が三菱重工で、アナログ回路の基本設計にJohn Doty氏(Noqsi Aerospace)の力を借りた以外、フルの国内開発と

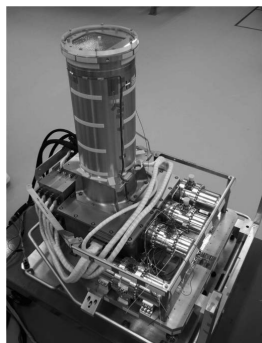


図2 SXIカメラ概観。足，フードを含めた高さは約73 cmで重量は約40 kgある。

なった。当然，苦労も多かったものの，それに比例して学んだことも大きい。

3. SXIの軌道上運用

「ひとみ」打ち上げから13日後，SXIシステムの立ち上げを開始した。エレクトロニクス立ち上げ，CCD冷却開始を経て，2016年3月6日にファーストライトを迎えた。ただし，SXIのカメラには開閉式のドアがあるわけでもなく，対象天体のペルセウス座銀河団は，銀河団としてはもっとも明るいものの，視野全面にひろがっており，SXIの4秒のフレームデータだけでX線イメージとして認識するのは難しい。しかし，約1日後には，イベントデータを積分したX線イメージで確かにペルセウス座銀河団のコアが検出された。

図3に示したのは，その後の観測もあわせて作成したX線イメージである³⁾。4枚のCCDにまたがってペルセウス座銀河団が検出されている。図3に四角で示したのが軟X線分光器SXSの視野で，図4右には実際にSXSで取得されたX線イメージを表示している。同じ領域のSXIのイメージ（図3の一部拡大）が図4左となる。SXIが，SXSの視野を含む広い領域をカバーするとともに，SXSに比べて小さなピクセルサイズによって，望遠鏡の角度分解能をフルに生かすX線イメージを取得できている。X線スペクトルには高

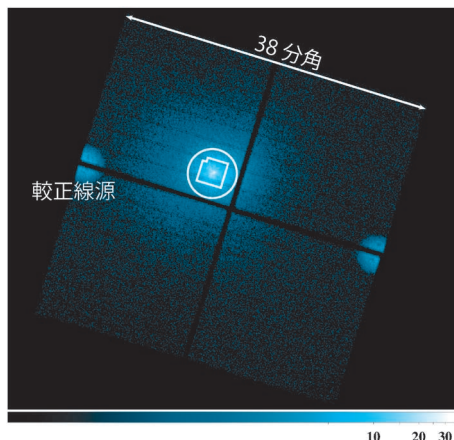


図3 「ひとみ」SXIで取得したペルセウス座銀河団のX線イメージ。38分角の視野を4枚のCCDでカバーしている。中心部の四角の枠はSXSの視野。

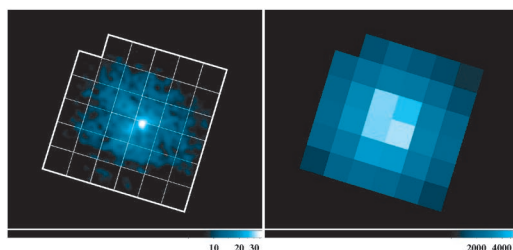


図4 SXIで取得したペルセウス座銀河団中心部のX線イメージ（左）と同じ領域のSXSイメージ（右）。SXSの1ピクセルは約0.5分角。

温プラズマからの電離した鉄輝線が明確に検出された³⁾。図3にも見えている⁵⁵Fe校正線源からのX線データから求められた分光性能も，地上試験の結果と大きな齟齬はない。

ペルセウス座銀河団に加え，超新星残骸（N132D，G21.5-09，かに星雲），X線連星IGR J16318-4848，単独中性子星RX J1856.5-3754を3月25日までに観測した。「ひとみ」はこの時点で姿勢制御の調整中であつたものの，いずれの天体もSXIの視野にとらえX線撮像分光に成功した。詳細は，それぞれの観測記事を参照願いたいだが，例えば，IGR J16318-4848は鉄輝線を含む広帯域スペクトルを取得し，広視野観測でSXSの観測をサポート

トするというSXIの役目を見事に果たしている。

しかしながら、ファーストライトとほぼ同じタイミングで、観測データの一部に、天体からのX線でも宇宙線イベントでもないイベントが多数含まれる期間があることに気が付いた。イベントが多すぎてテレメトリデータが飽和する事象も起こった。チームあげでの検討の結果、独立な二つの原因があることが突き止められた。ひとつはCCDからの信号読み出しのクロストーク(複数信号間の電氣的干渉)の影響、もうひとつは、想定以上の可視光の混入で、機上処理で決定しているピクセル毎のダークレベルが不適となり、結果的に多くの偽イベントが生じていたのである。前者のクロストークは打ち上げ前から認識していたものの、宇宙線イベントが頻発する軌道上でその影響が拡大した。機上処理パラメータを調整することで解消できることが判明しており、「ひとみ」の観測をもう少し続けられていたら解決できた。後者の可視光混入に関しては、打ち上げ前に様々な検討・対策を施していたものの、あるひとつの光パスを見逃していたのが原因である³⁾。

4. XRISM Xtendの開発

「ひとみ」喪失からXARM(現XRISM)立ち上げのプロセスの中で、科学目的、搭載機器の絞り込みが行われた。マイクロカロリメータによる超高エネルギー分解能の軟X線分光が主眼と確認され、同じバンドでより広い視野をカバーする装置としてX線CCDカメラの搭載が決定した。あえてSXI CCD以外の可能性も検討したものの、視野の大きさと空乏層厚(硬X線検出器がない分をできるだけ補填したい)の点でSXIの再製作が唯一解であった。開発は、装置マネージャ富田洋氏、PI筆者、副PI森浩二氏と、リード体制を刷新し、ひとみSXIチームをベースに、新たに名古屋大、静岡大、奈良女子大、関東学院大が参加したチームで実施している⁴⁾。望遠鏡とCCDカメラをあわせた軟X線分光撮像システムとして

Xtendという名称で、両チームの連絡をより密にすることも図っている。

きわめて限られたスケジュールで、設計変更は必要最小限におさえているが、問題となった衛星内の光パスを防ぐのはもちろん、CCDの可視光遮断性能をさらに高める改良を施している。また、放射線損傷による転送劣化の度合いを抑えるノッチ構造をCCDの電荷転送路に導入し、試験素子で効果を確認している。搭載候補CCDの製作はすすんでおり、本記事が公開される前後には4枚のCCD選定は終了している見込みである。エレクトロニクスやカメラボディの製作もはじまる。較正及び各種試験と打ち上げまでのスケジュールはタイトであるが、「ひとみ」SXIの開発で学んだことを活かし、より完成度を高めたい。

謝辞

SXIの開発は、20名を超えるスタッフと、40名を超える大学院生、さらに多くのメーカ関係者による10年近い期間の共同作業である。あらためて深く感謝したい。

参考文献

- 1) Koyama, K., et al., 2007, PASJ, 59, S23
- 2) Tanaka, T., et al., 2018, JATIS, 4(1), 011211
- 3) Nakajima, H., et al., 2018, PASJ, 70(2), 21
- 4) Hayashida, K., et al., 2018, SPIE Proc., 10699, 1069923

Soft X-ray Imager on board Hitomi

Kiyoshi HAYASHIDA

Department of Earth and Space Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

Abstract: Hitomi SXI is an X-ray CCD camera installed on the focal plane of the soft X-ray telescope. It covers a wide FOV of $38' \times 38'$ much larger than that of the SXS, with a smaller pixel size, and performs X-ray imaging spectroscopy. SXI CCD has a thick depletion layer of $200 \mu\text{m}$, which lead to high detection efficiency at an energy band overlapping with the hard X-ray detectors.