

# MAXI/SSCの10年間の稼働実績と 0.7-4 keVのX線全天マップ



中平 聡 志

〈宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: nakahira.satoshi@jaxa.jp

全天X線監視装置MAXIに搭載されたSSC (Solid-state Slit Camera) は新しい国産技術を多く用い、32枚ものX線CCDを搭載したチャレンジングな検出器である。ここではSSCが目指したサイエンスと、それを実現するための設計思想について簡単に触れた上で、国際宇宙ステーション軌道上における観測実績およびCCDの性能変化について述べ、最後にSSCの観測で得られた軟X線全天マップを示す。

## 1. はじめに

これまで多くの観測実験によって電波からガンマ線にわたる電磁波の全天マップが取得され、様々な空間的な構造が確認されてきた。そのような結果、地球近傍から銀河系全体にわたるダストやガスの分布に始まり、ビッグバンの名残としての背景放射による宇宙論パラメータに至る、種々の重要な情報が明らかになってきた。

軟X線帯域では、1990年代のROSAT衛星<sup>1)</sup>により全天マップの全貌が明らかになった。その結果によると、0.3 keV以下と0.4-1.2 keV帯域で、異なる空間構造が確認された。前者は現在では、太陽風と地球近傍の原子の相互作用による電荷交換反応 (SWCX) が起源だと考えられているが、後者 (おもに銀経、 $|l| \sim \pm 60^\circ$ 、銀緯、 $-30 < b < 60$  に分布) の起源は、それがおそらく銀河系に分布する温度  $\sim 10^6$  Kの大規模プラズマの熱的放射であること以上にはわかっていない。近年、この「軟X線巨大構造」と部分的に重複する領域に、フェルミバブル<sup>2)</sup>と呼ばれるガンマ線の巨大構造が見つかり、この軟X線巨大構造の起源の解明に新たな関心が向けられている。

## 2. MAXI搭載のSSC

### 2.1 SSCの設計思想

全天X線監視装置MAXIに搭載されたSSC (Solid-state Slit Camera)<sup>3),4)</sup> は、GSC (Gas Slit Camera)<sup>5)</sup> と同じく一次元のピンホールカメラとして働くが、GSCが2-30 keVに感度を持つのに対して、SSCはより低い0.5-12 keVに感度を持っている。望遠鏡を備えないSSCの点源に対する有効面積は最大で1 cm<sup>2</sup>と小さく、空間分解能は点源広がり関数 (Point Spread Function; PSF) の半値幅にして1.5°と粗いため背景放射に対する点源の検出感度は高くない。一方で90°×3° (×2台; 水平向きのSSC-Hと、垂直向きのSSC-Z) のファンビーム状の視野のおかげで、幾何学的因子 $S\Omega$ は合計で $\sim 150 \text{ deg}^2 \text{ cm}^2$  (@6 keV) に達し、92分の軌道周回ごとに全天の数十%の領域を観測して足し合わせることで、数度以上の大きさの拡散構造に対して過去最高の観測性能を持つ。さらにX線CCDの優れたエネルギー分解能によって、酸素から鉄にわたる様々な元素の輝線の空間分布を調べる能力も高い。こうして、「軟X線巨大構造の起源を調べる事」がSSCの使命として

与えられた。

## 2.2 国産の新技術の応用

国産の新しい技術が数多く用いられていることも SSC の特徴である。詳しくは富田氏による天文月報第 103 巻 8 号の記事<sup>6)</sup>でも述べられているが、SSC に搭載された CCD は常深博氏ら大阪大学グループと浜松ホトニクス (HPK) による共同研究で開発された。MAXI/SSC の開発から派生した HPK の CCD は「かぐや」および「はやぶさ」でも利用され<sup>\*1</sup>、すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ (HSC) や X 線分光撮像衛星 (XRISM) でも使用される。

図 1 の様に SSC は 1 ユニットあたり 16 枚、異なる視野を観測する 2 ユニットを合計すると 32 枚と大量の CCD を備えるので、その冷却が大きな課題となった。検討の結果「すざく」XIS 装置と同じ冷却システムでは冷やしきれない事がわかったので、ペルチェ素子 (一段) と一体型の CCD として開発し、機械的にもペルチェで支える設計となった。ISS は常に軌道周回と同じ周期で自転しているため、1 軌道周回の間には様々な方向から太陽光を受ける。ペルチェから排出される熱はループヒートパイプによってラジエータと接続されるが、SSC は異なる方向を向く 2 つのラジエータを備え、ループヒートパイプはより冷えた面と熱的に接続される。

## 3. 軌道上における SSC の稼働実績

### 3.1 冷却系の稼働状況

代表的な測定点の 10 年間にわたる温度変化を図 2 に示した。ラジエータの温度 (図 2 上段) はヒートパイプの稼働状況によって熱源と接続される面が入れ替わるので振動しているが、概ね 10 年間、一定の性能を維持している。図 2 の中・下段は、1 日毎の最低温度を各 CCD について求め、その 16 CCD の中央値を示したものである。CCD

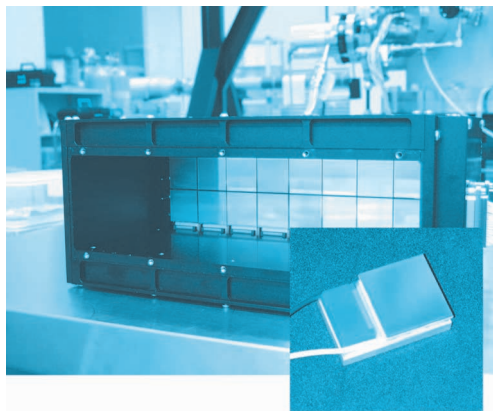


図 1 SSC 1 ユニット分の内部写真。2×8 枚の CCD が並んでいる。実際にはこの上にコリメータとスリットが取り付けられている。右下は 1 枚の CCD で、ペルチェ一体型である。

表 1 SSC の装置パラメータ。

CCD 枚数	16 枚 × 2 台
CCD サイズ	1024 × 1024 pixel/1CCD 24 × 24 μm/pixel
読み出し	64 pixel-binning
遮光	0.2 μm Al 蒸着
観測帯域	0.5–12 keV (設計) 0.7–7 keV (実際)
エネルギー分解能	~150 eV@5.9 keV
瞬間的な視野	90° × 3° × 2 台
点源に対する有効面積	~1 cm <sup>2</sup>
幾何因子 (Ω)	~150 cm <sup>2</sup> deg <sup>2</sup> (2 台)

温度も 10 年経過後も大きく変わっておらず、ペルチェを含む冷却システム全体の経年劣化は見られない。

2013 年の中頃に SSC-Z 温度が上昇しているのは、MAXI 搭載の 1 枚の CPU ボードが 1 年にわたり停止し、ペルチェを含め SSC-Z がストップしたためである。この事によって熱発生は低下したが、その間も稼働中だった SSC-H の CCD 温度はむしろ上昇した。これは、熱入力が減るとループヒートパイプの性能は低下するという特性のため

\*1 MAXI 打ち上げの遅れから両者の方が先に軌道上で利用された。

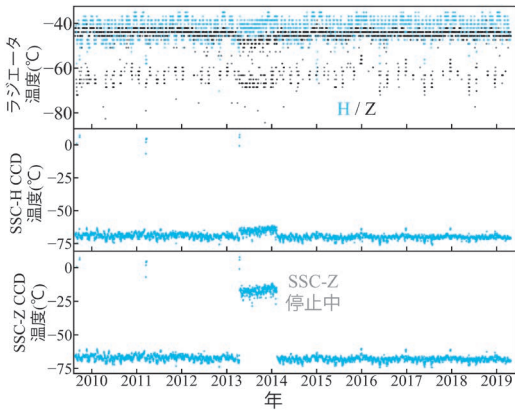


図2 上からラジエータ (H, Z面), SSC-Hおよび SSC-Zの CCD 温度. CCD 温度は 16 枚の中央値.

である.

### 3.2 CCD側面からの光漏れ

X線 CCD は赤外線や可視光にも感度を持つが, SSCの CCD は入射面に  $0.2 \mu\text{m}$  のアルミニウムを蒸着しており, この遮光は期待通りに働いた. しかし, CCD の側面の遮光が十分でなく, ISSが昼の間, もしくは月が視野付近にある間は可視・赤外光の影響を強く受けることが判明した. この間のデータを利用することは難しいので, 昼の時間帯には観測を停止し, 月の影響を受ける間はデータ処理で対応した. そのため, 全体としての観測効率は当初予想の半分以下に低下した.

### 3.3 放射線ダメージによる性能低下

衛星軌道上で稼働する放射線検出器には放射線ダメージによる劣化が一般的に見られ, SSCで用いる CCD の場合, 熱的ノイズの増加や電荷の収集効率の悪化で起きる, 低エネルギーイベントの増加やエネルギー分解能の悪化が想定される. 図3 (a, b) にはそれぞれ, 観測初期とその7年後の検出器座標でのイベントレート分布を示した. この図の左右はコリメータの入射角に対応しており, 中心が  $\theta=0^\circ$ , 両端が  $|\theta|=45^\circ$  である. 図3 (a) と (b) を比べると,  $|\theta|\sim 45^\circ$  の CCD#H0 (各ユニットの 16 枚の CCD は 16 進で #0, 1, ..., E,

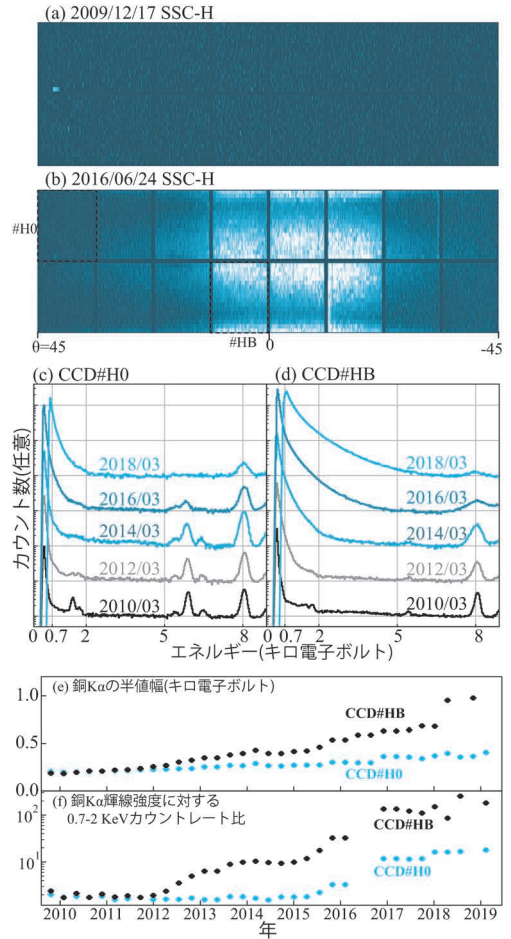


図3 (a) 2009年12月と (b) 2016年6月の, 検出器面上のイベントレートのマップ. (c, d) CCD#0と#Bのエネルギースペクトル. (e) 銅  $K\alpha$  輝線の半値幅, (f) 銅  $K\alpha$  輝線強度に対する  $0.7\text{--}2 \text{ keV}$  イベントレート比の時間推移.

Fと名付けられている) では6.5年を経てもイベント数は大きく増加せず, 図3(c) の様にスペクトルにも大きな変化は無いが,  $\theta\sim 0$  (CCD#HB) ではイベントレートが大きく増加し, その位置でのスペクトル (図3d) では, 特に低エネルギー側が上昇し, エネルギー分解能も劣化したことがわかる. 放射線劣化が位置によって違う事は, コリメータから入ってくる比較的低エネルギーの陽子 (数 MeV) のためである. つまり, コリメータから直接入ってくる個数は  $\cos \theta$  に比例し, 通

過する入射面アルミニウムの厚さは  $1/\cos \theta$  に比例するため、コリメータ直下と端で大きな差が現れた。

次に、CCD#H0と#HBの時間的な性能変化を詳しく調べた。図3(e, f)には、銅K $\alpha$ 輝線を観測したときのエネルギー分解能に加え、低エネルギーに見られる熱的ノイズの量の指標として銅K $\alpha$ 輝線レート(1日平均ではほぼ一定)に対する0.7-2 keV イベントレートを100日刻みで測定し示した。エネルギー分解能はどちらのCCDもFWHM $\sim$ 0.2 keVで安定していたが、2012年頃からCCD#HBの急激な性能低下が始まり最終的にFWHM $\sim$ 1 keVまで低下し輝線検出が難しくなったが、CCD#H0は2016年頃まで緩やかな変化にとどまっている。低エネルギーイベント量も同様の傾向を示し、銅K $\alpha$ に対する0.7-2 keV イベントレート比はどちらも $\sim$ 2だったが、CCD#HBでは2012年以降増加し2019年現在は2桁増、CCD#H0では2015年まで変化がなく現在は1桁増である。ここまでの性能悪化は想定されておらず、劣化が小さい期間でも低エネルギーの観測帯域下限を当初想定の0.5 keVから0.7 keVに上げざるを得なくなり、大きな影響が出た。将来的に同様に開口角の大きい広視野モニターとしてCCDを利用する場合は留意が必要である。

### 3.4 データ通信の中断

SSCの装置に起因する問題ではないが、SSCの観測に大きな影響を与えた事象として記録しておく。MAXIはMIL-STD-1553B<sup>\*2</sup>とEthernetの通信系を持ち、データ量の大きいSSCは実質にEthernetだけで観測データをダウンリンクするよう運用されている。しかし観測が始まった直後のおよそ8ヶ月間は、通信ソフトウェアの不具合により、異常パケットを受信するたび、数日間隔でEthernet通信系が停止した(この異常が発生する度、その数日後に、MAXI全体のリセットを行い

復帰させた)。このことで、この問題が修正されるまでの間、放射線ダメージの影響が少ない初期の観測データを10-20%ほど失う結果になった。この問題は、フィルタ機能付きMACアドレス変換ルータ(アルマジロで実装)を打ち上げて、宇宙飛行士がイーサネットケーブルに挿入することで無事に解決した。有人ミッションならではの解決法である。

### 3.5 SSC稼働状況のまとめ

MAXI/SSCは国産の新規開発技術を複数投入し、32枚ものX線CCDを搭載した挑戦的な装置であり、多少の問題を経ながらも致命的な故障なく稼働し続けている。SSCの冷却系はほぼ当初の性能を維持しているが、CCDの放射線ダメージによる性能低下は確実に進行していて、今後暗い拡散X線の観測を積み増して行くことは望めない。それでもGSCでは観測できない2 keV以下の帯域における明るい軟X線トランジェントの探査は継続可能である。SSC軌道上運用の観測計画作成および地上データ処理(宇宙研が運用するDARTSサーバーにおける公開まで)が完全に自動化されSSC固有の運用コストが掛からない事もあり、SSCの観測運用を続けるとともに、以下に示すように観測初期に取得したデータの詳細解析を進めている。

## 4. SSCの全天マップ

SSCはこれまでの観測で、「はくちょう座」スーパーバブル(Cygnus Super Bubble; CSB)の観測<sup>7)</sup>や「新星爆発点火の瞬間」MAXI J0158-744<sup>8)</sup>の発見など様々な観測成果を上げている。ここではSSCによる観測の集大成である軟X線全天マップの作成<sup>9)</sup>について紹介する。

### 4.1 データ処理とバックグラウンドのモデル化

X線拡散放射のデータ解析では、点源データ解析と異なり隣接領域をバックグラウンドとする差

\*2 航空機や宇宙機で用いられるデータバス規格



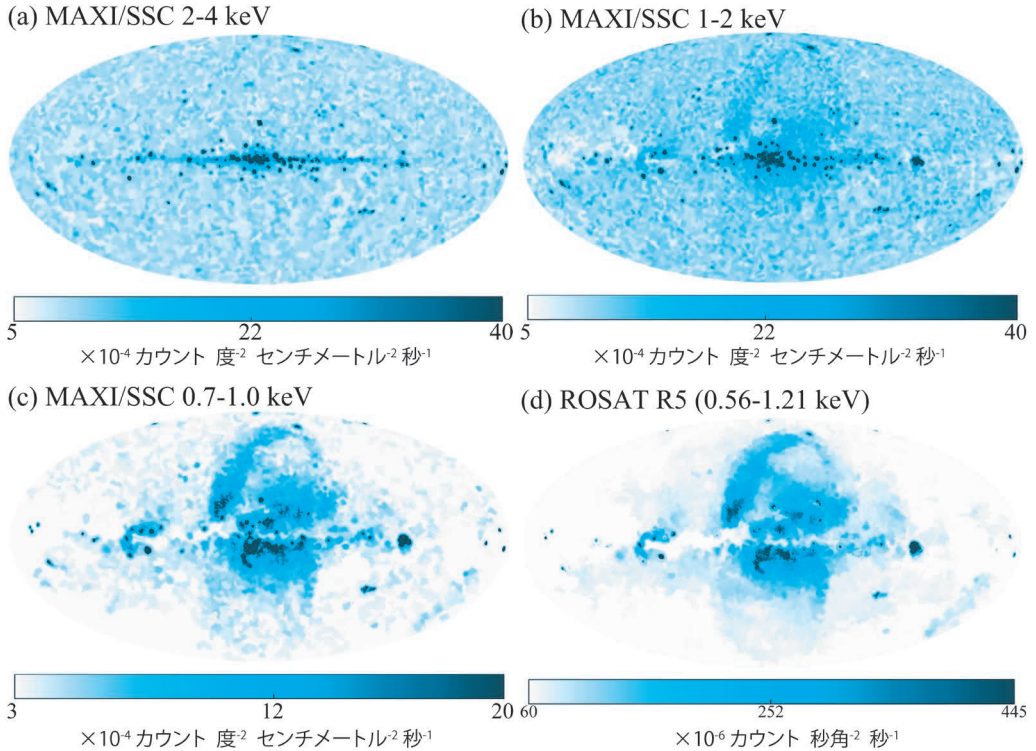


図4 SSCで取得した (a) 2-4 keV, (b) 1-2 keV と (c) 0.7-1 keV の全天マップ. 比較のため, (c) と近い帯域の ROSAT 全天マップを (d) に示した. (a-c) はそのデータ自体からピンを計算したが, (d) については (c) と同じピンニングを行った.

し引きが通用せず, 何らかの方法で非X線バックグラウンド (Non X-ray Backgrounds; NXB) を見積もる必要がある. 「すぎく」のような指向形観測の装置では望遠鏡が地球を向き空からの信号が遮られる「地没」観測が存在するため, NXBの寄与を推定できる. しかしISSは常に速度ベクトルに対して同じ姿勢を維持する (同じ方向を地球に向ける) ため検出器は常に空を向くことになり, 地没データが得られない. そこでこの研究では, ROSATの全天マップを参考に, SSCの視野が軟X線放射が暗い領域, つまり  $|l| > 60^\circ$  かつ銀河面の外を見ているときは, 目的とする軟X線巨大構造からの光子はほとんど検出器に到達しないと考え, この条件で取得されたデータを, バックグラウンドとして用いることとした. そして露出補正の後, 宇宙X線背景放射 (Cosmic X-ray

Background; CXB) および銀河ハローからの放射の寄与を推定して差し引くことでNXBを見積もった. すでに§2でも述べたように, 昼間の観測は行っておらず, 更にここで当初の2年だけを使うなど厳しくデータを選別したので, 得られたライブタイムは  $1.51 \times 10^7$  秒になった.

#### 4.2 SSCの全天マップ

NXBを差し引いたSSCの全天マップを図4(a)-(c)に示した, ここではROSATとの比較のため, 全天に一様に分布するCXBの寄与は差し引いていない. これらのマップは暗い領域の構造をよりはっきりさせるために, 表面輝度の近いピクセル同士を空間ごとにグループ化する `contbin`<sup>10)</sup> を用いて空間的にビンニングして表示している. 高エネルギーのマップ (a; 2-4 keV) では銀河面上に多数の点源と, より高い銀緯にもいくつかの点源が

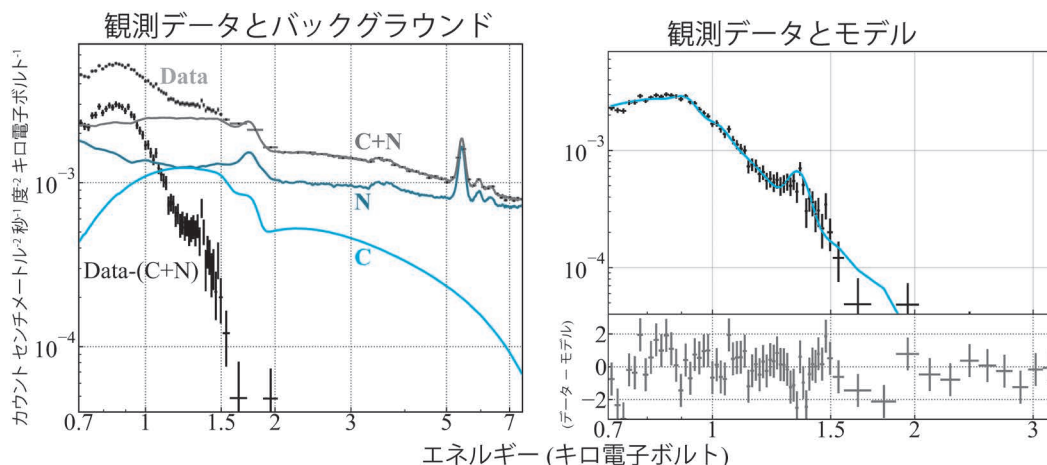


図5 SSCで抽出した銀河面の北西側の明るい構造のエネルギースペクトル. (左) 計算したバックグラウンドと合わせてプロットしたもの. (右) 希薄な電離プラズマモデルを使ったフィット結果.

見られ、GSCと同様の結果<sup>11)</sup>が得られた。銀河面放射を除くとSSCのPSFより大きい構造は見られない。中間エネルギーのマップ (b; 1-2 keV) では大まかには高エネルギーと同じであるが、点源以外に、CSBと「ほ」座超新星残骸に加え、銀河面北側に巨大構造がかすかに識別できる。低エネルギーのマップ (c; 0.7-1 keV) ではさらに様子が変わり、低銀緯の点源の多くが星間吸収の影響で見えなくなると同時に、巨大な拡散放射の形状がよりはっきり見えてきた。図4(c), (b), (a)を赤、緑、青に対応させた疑似カラー合成画像を本号表紙に掲載した。

比較のため、(c)と近い帯域 (R5; 0.56-1.21 keV) のROSATマップを図4(d)に示した。このようにSSCの0.7-1 keVマップと、ROSAT R5帯域のマップは、概ね同じであると言える。約20年の間隔を開けて取得したこれらのマップの間に明確な差異が無い事から、この帯域で見えている構造が、太陽風電荷交換反応などの地球近傍で短時間で変動する成分の影響を受けておらず、ともに地球から遠くに位置する放射を見ているということがわかった。銀河面南北の構造について、特に明るい箇所 ( $\sim 6 \times 10^{-4}$  counts deg<sup>-2</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) だけに着目してみると、おおよそ銀経、 $l \sim 340^\circ$ 、銀緯、 $b$

$\sim 15^\circ$ を中心とする円状に分布している。より暗い構造まで含めて見ると、南北それぞれそれぞれ銀緯、 $|b| > 60^\circ$ まで伸びる楕円の構造としても識別可能である。

ROSATの観測に対してSSCが優れる点としてエネルギー分解能の高さがあり、その点を生かしたエネルギースペクトル解析を行った。図5には「ノースポーラースパー」と呼ばれる、図4(c)銀河中心北西の最も明るい構造を中心とする領域のエネルギースペクトルを示した。左図には生データとバックグラウンドの各成分を示し、右図には希薄な電離プラズマモデルでフィットしたスペクトルと残差を示した。得られたパラメータはプラズマの温度  $0.31 \pm 0.01$  keV、重元素量  $0.51^{+0.13}_{-0.14}$  太陽組成、星間吸収量は銀河系全体の0.6-1倍の間となり、上述の楕円に見える構造を9分割した各領域でも同様の結果が得られた。このパラメータは「すざく」などの局所ごとの観測<sup>12, 13)</sup>と同様であり、今回SSCを使って空を隙間なく観測したデータによっても確認できた。

### 4.3 SSCが観測した軟X線巨大構造

MAXI/SSCの最初の2年間のデータを用い、ROSAT以来の軟X線全天マップの取得に成功した。20年を経てROSATとよく一致する全天マッ

プが得られたことから、この帯域の軟X線放射は、地球近傍で時間的に変動するSWCXではなく、より遠方にある太陽系外からの放射であることがより確実に言ったと言える。ROSATの観測では、明らかに両極間のスキャン方向に沿った空間的ギャップや濃淡が残り(図4dではcと同じ空間的ビンニングを用いたのでギャップが埋まって見える)、暗い領域の解釈が難しかった。そのため明るい領域を中心にして、軟X線巨大構造は銀河面の北側に偏った非対称な構造だという解釈に留まっていた。SSCによる観測では数十分間(全天の数十%)の観測を2年間で1万回程度も繰り返す事で、スムーズで空間的に隙間の無い観露出マップが得られ、今回得られた全天マップ(図4c)では軟X線巨大構造は銀河面に対して、表面輝度は非対称だが、外形として対称な殻状構造に見える。明るい領域(北西)の星間吸収量や、銀河面付近の軟X線が減光している特徴も考慮に入れると、この構造は銀河系に付随する高温プラズマを反映している可能性が高い。ここで得られた解釈をより確たるものとするため、詳細なデータ解析が進められている。

## 謝辞

MAXI/SSCの装置開発に関わったすべての方々に敬意を表したい。また常深博氏には、「SSCを使った全天マップの作成」におけるデータ解析から論文執筆において、細部にわたるご指導を頂いた。この場を借りて感謝を申し上げる。

## 参考文献

- 1) Snowden, S. L., et al., 1997, ApJ, 485, 125
- 2) Dobler, G., et al., 2010, ApJ, 717, 825
- 3) Tomida, H., et al., 2011, PASJ, 63, 397
- 4) Tsunemi, H., et al., 2010, PASJ, 62, 1371
- 5) 三原建弘, 2019, 天文月報, 112
- 6) 富田洋, MAXI/SSC チーム, 2010, 天文月報, 103, 515
- 7) Kimura, M., et al., 2013, PASJ, 65, 14
- 8) Morii, M., et al., 2013, AJ, 779, 118
- 9) Nakahira, S., et al., 2019, PASJ, submitted
- 10) Sanders, J. S., 2006, MNRAS, 371, 829
- 11) Hiroi, K., et al., 2013, ApJS, 207, 36
- 12) Kataoka, J., et al., 2013, ApJ, 779, 57
- 13) Tahara, M., et al., 2015, ApJ, 802, 91

### Ten years operation of MAXI/SSC and 0.7–4 keV all-sky map

Satoshi NAKAHIRA

*ISAS/JAXA Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo, Sagamihara, Kanagawa 252-5210, Japan*

Abstract: The Solid-state Slit Camera (SSC), onboard the Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI), is a challenging instrument which consists of 32 CCD chips and employs a lot of newly developed Japanese domestic technology. In this article, we first explain its primary scientific purposes and the design concepts to realize them, and then present its performance change during the ten-year operation on the ISS orbit. Finally, we show the soft X-ray all-sky maps in the 0.7–4 keV energy bands.