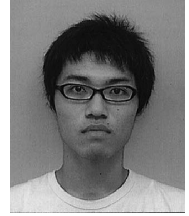


MAXI/GSCによる7年間の 全天軟 X 線カタログ

川 室 太 希

〈国立天文台ハワイ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: taiki.kawamuro@nao.ac.jp



MAXIは2009年8月以来、突発天体の発見や変動天体のモニター観測を行う傍ら、今日に至るまで膨大な全天X線データを蓄積してきた。2016年7月までの約7年間にガス比例計数管（GSC）で得られた4–10 keVデータを全て積算することで、896個ものX線天体を検出することに成功し、高銀緯（ $|b| > 10^\circ$ ）と低銀緯（ $|b| < 10^\circ$ ）領域をカバーする2つのX線天体カタログ（MAXI/GSCカタログ第3版）を出版した。同帯域の全天サーベイ装置としては過去最高の感度を達成しており、検出される天体が他の天体と空間的に分解できなくなる混入限界にほぼ到達している。また、検出されたX線天体のうち約30%は、既存のX線カタログに対応天体を持たず、新天体である可能性がある。同程度のX線フラックス限界で比較した場合、約30年前にHEAO-1で見られていた活動銀河核の約半分はMAXI/GSCでは見えなくなった一方、ほぼ同等数が今回新たに検出されている。したがって、数十年で見える天体が変化することもわかった。

1. X線カタログ

天文学において、天体カタログは統計的な議論などをする上で基礎となる大変重要なものである。X線帯域でのカタログは、特に銀河系内ではブラックホールや中性子星といったコンパクト星の研究、そして系外では活動銀河核（AGN: Active Galactic Nucleus）の研究において重宝される。例えば、コンパクト星は強い星間吸収によって、また一方AGNはトラスと呼ばれる吸収体によって中心部が隠されることが多々あるので、透過力の高いX線を用いるとバイアスの少ないサンプルを得ることができるからである。

これまで、超軟X線（ < 2 keV）では1999年にROSATによって¹⁾、近年では2016年にMAXI/Solid-State Slit Camera（SSC）によってより硬いX線（0.7–7 keV）までカバーした全天カタログが作成されている²⁾。硬X線（ > 10 keV）では、2008

年にSwift/BATや2010年にINTEGRAL/IBISを用いて作成した全天カタログが出版されている^{3), 4)}。そして、特に軟X線（ ~ 2 –10 keV）は歴史が長く、1970年代からUhuruを皮切りにCopernicus, HEAO-1, SAS-3, Ariel-5, 「ぎんが」, 「あすか」, そしてRXTEなどによって非常に多くのカタログが作成されてきている。現在、MAXIが過去最高感度の全天サーベイ装置として、その一翼を担っている。

MAXIの一番の特徴はX線で見える宇宙を常時観測していることであり、 ~ 92 分の頻度で全天を走査している。数秒から数日以内の短い変動に対しては自動アラートシステムが働いており（本特集No. 2根來の記事を参照^{5), 6)}）、様々な変動天体が検出されてきている。一方で、より長い時間スケール（ \sim 数ヶ月）に着目した探査も行われており、短い時間スケールで見つかったこなかった現象、例えば超巨大ブラックホールによる星潮汐破

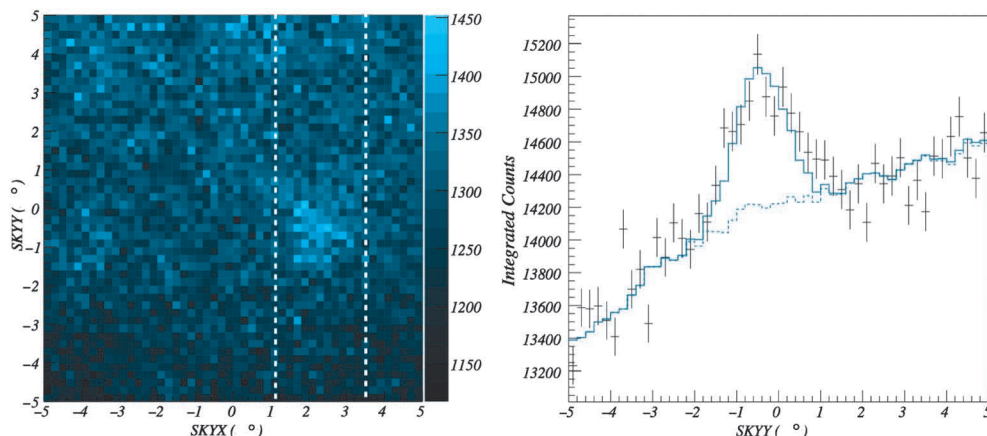


図1 MAXI/GSCによる点源の検出の例。(左) 天球上のある $11^\circ \times 11^\circ$ の領域におけるカウント数の空間分布。ここでは、AGNであるNGC 1365 (SKYX, SKYY $\approx 2^\circ, -1^\circ$)を含む領域を例としてあげている。(右) 左図の破線で挟まれた領域を、SKYY (左図の縦軸) 方向に射影した1次元プロファイル。黒十字が観測データ、青破線がバックグラウンドモデル、青実線がバックグラウンドモデルと点源モデルの和を表す。

壊現象などを検出することに成功している⁷⁾。そしてこれらの観測データを全て積算することで、MAXIの感度を最大限まで引き出し、X線天体カタログが作られている^{8),9)}。

2. MAXI/GSC軟X線 (4-10 keV) カタログ

MAXIを構成する2種類の検出器、すなわちGas Slit Camera (GSC)¹⁰⁾とSSC¹¹⁾のうち、本稿ではGSCによって得られた2009年8月13日から2016年7月31日までの約7年間の軟X線 (4-10 keV) の高銀緯と低銀緯カタログを作成したので、それについて紹介する^{12),13)}。GSCはSSCに比べて、大きな有効面積を持ち、かつエネルギー分解能は低いものの高いX線エネルギーまで感度があり、広い帯域 (2-30 keV) にわたってスペクトルを議論することができる。本カタログでは、特にMAXI/GSCの光子検出効率が高くバックグラウンドもしくは雑音レベルが低い4-10 keV帯域が天体検出に使われている。また透過力が高い帯域のために、星間吸収に対するバイアスも抑えられる。以下に述べるように、高銀緯 ($|b| > 10^\circ$) と低銀緯 ($|b| < 10^\circ$) 領域では考慮すべき事項が異

なることから、別々に解析をしている。

2.1 高銀緯 ($|b| > 10^\circ$) X線カタログ

観測データを集積するにつれてより暗いX線天体まで見つけることができるため、高銀緯カタログは初版の7ヶ月カタログに始まり、37ヶ月カタログの第2版まで、廣井和雄の主導のもと作成された^{8),9)}。今回の7年カタログに関しても本質的に従来の解析手法を踏襲している⁹⁾。基本となる操作は、点源の検出である。それには、全天を図1左のように $11^\circ \times 11^\circ$ の領域に分割して各個に解析している。まず、宇宙X線背景放射と荷電粒子やガンマ線を起源とする信号を合わせてバックグラウンドをモデル化する。それを基に、観測によって得られた画像データから有意な正の信号を抽出し、X線天体の位置を推定する。そして、GSCの角度分解能 (半値全幅で $\sim 1.5^\circ$) を考慮した点源モデルを候補の数だけ作成した後、それらとバックグラウンドモデルを2次的にフィットした。その際、点源モデルについては1天体あたり空間2次元座標上での位置と強度を合わせた3つ、そしてバックグラウンドについては強度の1つが自由パラメータとなっている。図1右が1次元に投影したフィット結果の一例である。

こうして作られた本カタログは、これまでの MAXI/GSC カタログと比較して、データ蓄積時間を長くすることで統計誤差を減らしたほか、再現性の鍵となるバックグラウンドと点源のモデルの精密化を図ることで、系統誤差を減らし、その結果として検出感度を向上できた。従来までに、宇宙線強度や宇宙船ソースズが MAXI に近いポートにドッキングしているかどうかでバックグラウンドの検出器上の位置分布やエネルギー分布が変化することがわかっていた。今回さらに機上データを精査することで、その特性が MAXI の南北の指向方向によって異なることもモデルに考慮した¹⁴⁾。また図 1 右のように点源が広がる効果をあらわす点源応答関数は、従来の簡単なものを改良し、X 線の検出器への入射角度の依存性やエネルギー依存性を考慮したモデルを構築し採用している^{13), 15)}。その結果、点源応答やバックグラウンドが検出器の位置に依存する効果を、うまく再現することができた (図 1 右)。

初版では 7σ 以上^{*1}で 143 個の X 線天体が検出されていたが、第 3 版にあたる 7 年カタログでは統計誤差が減ったこともあり、約 5 倍に相当する 682 個もの X 線天体を 6.5σ 以上で検出することに成功した。この閾値は、モデルの不定性によって出る負の信号の検出数を数え、それと同数が偽天体として正の信号にも入り込むという統計的な仮定のもと、その数が少なくなるように決めている。図 2 に検出した天体の空間分布を示す。こうして「かに星雲」の X 線フラックスの 2000 分の 1 にあたる $\sim 6 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の感度を達成した。これはほぼ MAXI の混入限界、つまりこれ以上感度を上げて検出できたとしても、空間的に他の天体と分離できなくなる限界に相当する。

既存の X 線カタログと比較したところ、約 60% の天体は過去の X 線カタログに対応天体があり、それらの多くは銀河団や AGN に同定されている。

残りの約 40% は、既存の X 線カタログに対応天体が無かった。それらの正体は、以下のとおり様々であると考えられる。

- ・時間変動により明るくなり、検出感度を越えた天体。
- ・サーベイ感度が向上したため新たに発見された、暗い天体。
- ・従来のカタログで、たまたまサーベイの浅い領域にあった天体。
- ・適度な吸収かつ硬 X 線で暗い急峻なスペクトルにより、超軟 X 線と硬 X 線の両方のカタログで見落とされている天体。

現状の MAXI で持ちうる情報を見る限り、例えば軟 X 線と硬 X 線光子の強度比から、対応天体の無いものの多くは活動銀河核ではないかと思われる。より詳細な解析や追観測等は、今後の課題である。

2.2 低銀緯 ($|b| < 10^\circ$) X 線カタログ

低銀緯についても同様に、堀貴郁の主導のもと X 線カタログを作成した¹³⁾。しかし、高銀緯と比較して 2 つの困難があった。そのためカタログの出版は遅れ、7 年カタログが初版に相当する。第 1 の困難は、MAXI の角度分解能 (半値全幅で $\sim 1.5^\circ$) のせいで分離できないほど明るい X 線天体が数多く存在することである。そこで、角度分解能のよい Swift /BAT (半値全幅で $\approx 0.3^\circ$) による 105 ヶ月カタログ¹⁶⁾ で存在がわかっている天体については、その位置を固定して考慮した。そのうえで、MAXI で新たに見えてきた天体を含めることで、天体混入の影響を抑えて 2 次元画像を再現した。それでも、銀河中心の周囲 ($|b| < 5^\circ, l < 30^\circ$, かつ $l > 330^\circ$) は明るい天体が密集しているために、今回の解析領域から外さざるを得なかった。第 2 の困難は、銀河面に沿って広がった X 線放射 (Galactic Ridge X-ray Emission) の影響である。今回は、既存の観測結果をもとにその空間分布をモデル化し

*1 1σ は 2 次元フィットに用いた χ^2 分布に従う尤度関数が 1 だけずれたときのフラックスの誤差で、データの感度を表す基本的な単位として用いられる。

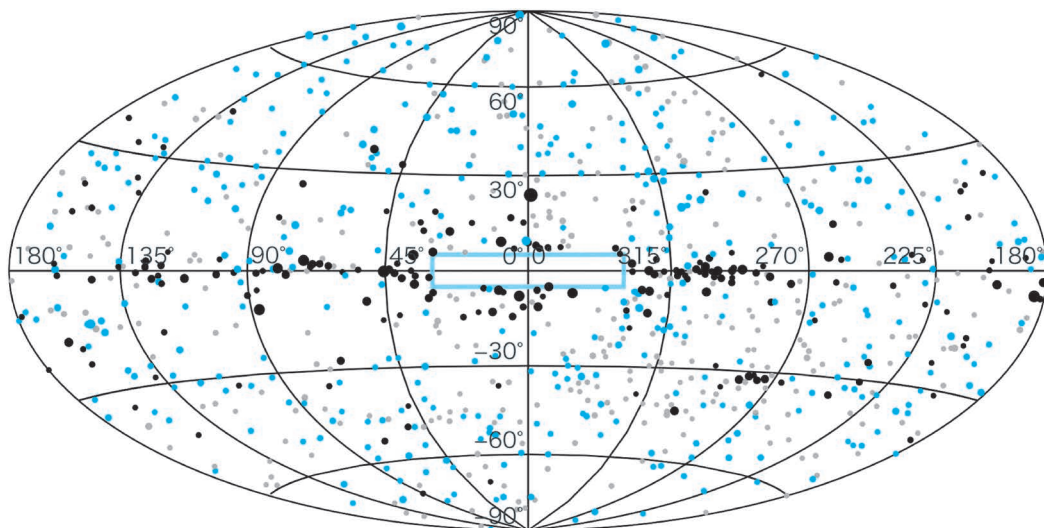


図2 MAXI/GSCの7年間の積算データから検出された全天896天体(高銀緯で682天体, 低銀緯で214天体)の銀河座標での空間分布. 銀河中心の周囲(シアン)の四角内)は除く. 青は系外の天体(AGNや銀河団)と同定されたものを表し, 黒は銀河系内や大/小マゼラン雲に存在するX線天体(X線連星系, 活動性の高い星, パルサーなど)とわかったものを表している. 灰色は未同定天体である. サイズが大きい天体ほど明るい.

て考慮した¹⁷⁾.

最終的に, 銀河中心領域を除いて低銀緯でも, 点源, 銀河面X線放射, バックグラウンドのモデルを用いて観測データを高精度で再現することができた. そして, 混入限界に近い感度のもと, 214天体ものX線天体を検出することに成功した. 他のカタログとの比較から, それらの約80%は既知のX線天体であり, 全体の30%は銀河系内のX線連星系である.

2.3 X線光度の長期変動

ここで, 検出されたX線天体の光度変動についても簡単に紹介しておきたい. 第1章で述べたようにMAXIの最大の特徴は長期的な全天常時モニタリング観測であり, ≈ 92 分間隔で光度やスペクトルの時間変化を調べることができる. 図3にあるように, 7年間で数倍もの光度変動は様々な天体で見られている. この事実から期待されるように, 7年間のデータをより短い時間スケールに分けることで, 一時的に明るい天体が見つかる.

高銀緯ではAGNの時間スケールに着目して1年毎にデータを分けて, 4天体を検出した. 一方で, 低銀緯ではより小さい系に重きをおいて, 73日毎にデータを分けて, 7天体を検出している. また, このような光度変動が原因で, 同程度の限界フラックスで比較した場合, 約30年前にHEAO-1¹⁸⁾で見られたAGNの約半分はMAXIで受かっておらず, ほぼ同等の数のAGNが新たに検出された. このことからAGNのX線放射は, 数十年のタイムスケールで大きく変動することが示唆される.

本カタログ記載の全ての天体については, 2016年7月31日までの光度曲線が既に作成され, 論文から一覧できるようになっており, 興味のある方はぜひご覧頂きたい^{12), 13)}. より詳細な解析をしたい場合には, 任意の座標と時間での画像や光度曲線, そしてスペクトルがMAXIオンデマンドシステム^{*2}を通して取得できるようになっている.

*2 <http://maxi.riken.jp/mxondem/>

3. まとめと展望

MAXIの約7年にわたる観測データを利用し、4–10 keVのX線帯域でかつてない感度の(銀河中心領域を除いたほぼ)全天カタログを作成した。高銀緯と低銀緯で合わせて896天体を検出し、そのうち約30%については過去のX線カタログから対応天体が見つからなかった。結論を下すにはさらなる調査が必要だが、新天体の可能性がある。また今回、混入限界に近い感度に到達したことから、MAXIの運用が更に継続していったところでこれ以上の意味のあるカタログができるのか、と疑問に思うかもしれない。しかし前述の通りX線でみる宇宙は刻々と変化しており、着目する期間や時間スケールを変えれば、新たな天体が必ず見つかるかと期待している。事実これまで、ある時間スケールに着目することで、高銀緯と低銀緯でそれぞれ一時的に明るい4天体と7天体を検出した。そのため、現状の合計の検出数は907天体になる。

2019年7月13日には、ドイツとロシアによるX線全天サーベイ装置eROSITAが無事に打ち上げられた。eROSITAは、0.5–10 keVをカバーし感度も位置分解能もMAXI/GSCのそれらよりはるかに高い。これによりやがて詳細な全天X線カタログが作成されるだろう。しかし、eROSITAは全天を常時モニターするわけではない。従ってMAXIの常時全天モニター観測は、これからもX線天体の観測に欠かせない役割を果たし続けることになる。

謝辞

本稿の科学的内容は筆者1人でなし得たものではなく、MAXIチームのこれまでの運用やデータ校正の努力があってこそのものである。そしてとりわけ、上田佳宏准教授のもと京都大学のチームがこれまで約10年近く連綿と解析してきた結果である。具体的には廣井和雄氏そして堀貴郁氏の

京都大学での博士課程での成果やその解析技術が引き継がれて、ここに結果がまとまっていることを述べておきたい。そして末筆ながら、以上全ての方々に改めて感謝を述べたい。

参考文献

- 1) Voges, W., et al., 1999, A&A, 349, 389
- 2) Tomida, H., et al., 2016, PASJ, 68, S32
- 3) Tueller, J., et al., 2008, ApJ, 681, 113
- 4) Bird, A.J., et al., 2010, ApJS, 186, 1
- 5) Negoro, H., et al., 2016, PASJ, 68, S1
- 6) 根來均, 2019, 天文月報, 112, 627
- 7) Kawamuro, T., et al., 2016, PASJ, 68, 58
- 8) Hiroi, K., et al., 2011, PASJ, 63, S677
- 9) Hiroi, K., et al., 2013, ApJS, 207, 36
- 10) Mihara, T., et al., 2011, PASJ, 63, S623
- 11) Tsunemi, H., et al., 2010, PASJ, 62, 1371
- 12) Kawamuro, T., et al., 2018, ApJS, 238, 32
- 13) Hori, T., et al., 2018, ApJS, 235, 7
- 14) Shidatsu, M., et al., 2017, 7 Years of MAXI: Monitoring X-ray Transients, 29
- 15) 堀貴郁, 2018, 博士論文(京都大学)
- 16) Oh, K., et al., 2018, ApJS, 235, 4
- 17) Revnivtsev, M., et al., 2006, A&A, 452, 169
- 18) Piccinotti, G., et al., 1982, ApJ, 253, 485

The 7-year MAXI/GSC All-sky Soft X-ray Source Catalog

Taiki KAWAMURO

National Astronomical Observatory of Japan,
2–21–1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181–8588, Japan

Abstract: MAXI has successfully accumulated a large amount of all-sky X-ray data since 2009 August to date, while detecting new transients and monitoring variable sources. Utilizing the first 7-year MAXI/GSC data in the 4–10 keV band, we successfully detected 896 X-ray sources and released X-ray source catalogs in high- and low-galactic latitudes. The 4–10 keV band sensitivity is the highest ever achieved as an all-sky X-ray survey in a similar energy band, and is close to the confusion limit of the MAXI/GSC. We found no counterparts for 30% of the detected sources from past X-ray catalogs, being perhaps new objects. Also, we found that for a given flux limit, a half of the active galactic nuclei detected by HEAO-1 ≈ 30 years ago could not be detected by the MAXI/GSC, suggesting a change of detectable X-ray sources within a few decades.