

マキシ 全天 X 線監視装置 MAXI 連続観測 10 年



三原 建弘 & MAXI チーム

〈理化学研究所 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: tmihara@riken.jp

2019年8月15日、全天X線監視装置MAXIは観測開始10年を迎える。この間、軟X線新星MAXI J0158-744、多くのX線ブラックホール新星などを発見し、激動するX線宇宙を世に見せてきた。観測されたX線源は21世紀初頭における3MAXIカタログとして結実している。MAXIは天体のX線データを提供し、電波からTeVガンマ線までの「多波長天文学」の一波長帯を担っている。これは、重力波、ニュートリノを加えた「マルチメッセンジャー天文学」に発展している。さらにリアルタイム性を活かし、MAXIとSwift/BATとでX線/ガンマ線突発天体の「時間領域天文学」のトリガー役となっている。本特集ではMAXIの成果を引き続き紹介していく。

1. 全天 X 線監視装置 MAXI

全天X線監視装置MAXI (Monitor of All-sky Image)¹⁾は、国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟の船外実験プラットフォームに搭載されている日本の装置である (図1)。MAXI チームは、理研, JAXA, 8大学ほか、計20名ほどの研究者からなり、運用と速報に当たっている。検出器には大面積のXeガス比例計数管を用いたガススリットカメラ (GSC)²⁾ とX線CCDを用いたソリッドステートスリットカメラ (SSC)³⁾がある。GSCはX線 (2-20 keV) のエネルギー帯で92分に一回、ほぼ全天 (90%以上) をスキャンしている。SSCは0.7-7 keVで同約20%の天域をスキャンしている。観測データは、MAXI ホームページ (HP)^{*1}から即時公開されていて、誰でもいつでも「本日のX線の空」や「はくちょう座 X-1 の10年間の光度曲線」などを見ることができる。MAXI HPでは既知の約400個の天体のモニタに加え、任意の位置の任意の時間におけるX

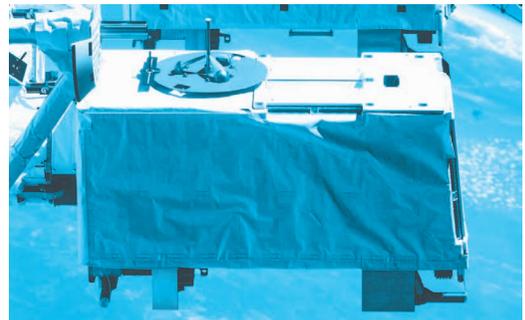


図1 全天X線監視装置MAXI (JAXA提供)。

線画像、光度曲線、スペクトルを生成できる「MAXI オンデマンド」も稼動している。MAXI による全天の積分画像は、MAXI HPのトップページや次の根来の記事の図1にある。数多くのX線源に加え、軟X線で広がるNorth Polar Spur などや、2-10 keVでは銀河リッジなどの大きく広がった構造も一目瞭然である。

2. MAXI の設計思想

1990年代初頭、当時、科学技術庁下の理化学

*1 MAXI ホームページ <http://maxi.riken.jp>

研究所松岡勝はISSの天文学利用としては「X線全天モニタ」が最善であるという結論に至った。天体の出現と消滅が日常茶飯事であるX線の空において「全天モニタで発見し、主観測機器で詳細観測を行う」という組み合わせは王道である。実際1987年打ち上げの「ぎんが」衛星では全天モニタASMでX線新星を発見し、直後から主観測機器LACによる詳細観測が行われた⁴⁾。MAXI提案当時、ASTRO-E, Chandra, XMM-Newtonという望遠鏡型衛星が同時期に計画されていた。それらに観測ターゲットを供給するための高感度全天モニタは、世界のX線天文学者が必要と感じていた。

さてMAXIがスリットカメラによるスキャンという方式の全天モニタになった大きな要因は、ISSならではの姿勢の事情があった。ISSは常に「下側」を地球に向けて飛んでおり、通常の天文衛星のように星空空間に静止した姿勢を取らない。すると軌道1周回(92分)で1自転してしまうため、1つの星をポインティング観測するには、可動機構が必要で、技術的困難、コスト高、長期の信頼性の低下をまねく。一方、スキャン型としてISSの自転を利用すれば、カメラを動かすことなく観測でき効率的である。

その場合、スキャン頻度は自転周期である92分に決まってしまう。したがって観測対象は1日スケールより長いゆっくりした変動をする活動銀河核(AGN)などが考えられた。当時の全天モニタはRXTE衛星のASMであり、面積が小さいうえに符号化マスク方式なのでその感度は50 mCrab^{*2}/day (5 σ)と低く、AGNは検出できていなかった。ISSのペイロードを使えば、大面積の比例計数管を多数搭載でき(MAXIではA4紙大の窓面積を持つ比例計数管を12台搭載)、AGNのような暗い天体も観測できる。さらにス

リットカメラによるスキャン^{*3}を採用することで、たとえ10年間のデータでも同一画像上で一度に加算して処理でき、観測すればするほど感度が上がる。つまりスナップショット的には全天モニタとして、データをためれば特定の星の詳細観測器としても使える一挙両得のカメラができる。こうして「最高感度の全天モニタ」MAXIの基本コンセプトが決定した。理想的感度(5 σ)は、5 mCrab/day、2年間で混入限界感度に達するとされた¹⁾。

3. MAXIで目指したサイエンス

MAXI提案時に掲げた3つの目標は、21世紀のX線カタログ作成、突発天体の速報、X線天体の長期変動の監視である。すでに述べたAGNの変動の他、ブラックホールや中性子星への長期の降着現象と放射過程の解明にも期待できる感度である。

MAXIは全天モニタと言う性格上、迅速に情報を提供することに意味がある。MAXIデータは最初から誰にでもすぐ利用できる形での無償提供、即時公開の方針とした。ここには良くも悪くもHETE-2衛星(2000~2007)の経験が活かされた。HETE-2はリアルタイムでのガンマ線バーストの位置速報で成功をおさめた一方、データは一般に広く利用できる形で公開されなかったため、チーム外の研究者に利用されることはなかった。MAXIチームは自分たちで論文を書くと同時に、国際的な天文コミュニティへの貢献を重視することで、より広いサイエンスに利用されることを目指した。

4. 打ち上げから初期故障を経て最終的な感度

さてこうして、松岡らの提案は1997年4月に第

*2 強い定常X線源であるカニ星雲のX線強度を1 Crabと呼ぶ。mCrabは1 Crabの1000分の1。

*3 天空上の1点が検出器上の1点に対応しているという意味で、基本的にピンホールカメラである。ピンホールカメラの検出器面のY軸を時間軸にしたものと思えばよい。

1期ペイロードとして採択された⁵⁾。ISSで初めての天文学利用である。打ち上げは当初予定の2003年から6年も遅れたが⁶⁾、多くの方々の御尽力のおかげで、2009年7月16日スペースシャトルにより打ち上げられた。そして若田光一宇宙飛行士のロボットアーム操作による取り付けを経て、2009年8月15日からMAXIの運用は始まった。

ところがその3週間後、カメラ2台で、比例計数管の炭素繊維芯線が切れるという故障が起きた。MAXI/GSCの前身にあたるHETE-2のWXM装置では成功を収めていた炭素繊維芯線がMAXI/GSCで破断したのにはいくつかの原因がある。HETE-2衛星は、ほぼ赤道軌道だったのに対し、ISSの軌道は傾斜角が51.6度と大きいため、南大西洋異常帯（当然そこでは比例計数管は停止していた）だけでなく、高緯度地帯で多くの電子や陽子を受けることになった。赤道上に比べ6倍も強い粒子線により比例計数管の中で放電が誘起され、1か所へ集中した放電電子のスパッタリングによって炭素繊維芯線が細くなり、破断したと考えられる。また、WXMの芯線端の特性を改善するため、芯線張りの構造を変えたことも遠因にあった。もちろん軌道上の高い放射線環境に備え、打ち上げ前には強い¹³⁷Csガンマ線を比例計数管に照射して放射線耐性を確認した。しかし荷電粒子は実験室で簡便に当てることはできないため、事前の試験や検討が不十分であったことは否めない。ちなみに当時もその後も放電をせずに、現在でも初期と同じ1650 Vの高圧で運用しているカメラも2台ある。粒子線に対する放電のしやすさにはカメラの個性があるようだ。

初期故障が起きて以降、3つの「安全運用」の方針を採用した。(i) GSCは極地方では運用しないこととし、時間稼働率は80%から40%に下がった。(ii) 放電は起こしたが破断には至っていないカメラは念のため停止し温存し、運用カメラ数を12台から8台に減らした。(iii) 放電の気配があるカメラでは高圧を1650 Vから1550 Vに

下げて運用した。それによりPSF（点源広がり関数）はやや悪くなり、1PSF内のバックグラウンドは1.5倍増えることになった。これらの対策のおかげでMAXIは2009年9月23日以降、ほぼ安定して運用を続けている。Metorex社製の比例計数管はとても安定していて、10年間でガス増幅率の変化は1%以内である⁷⁾。

その後の調査により、MAXIのカメラの何台かは、ソユーズ宇宙船の高度計からの散乱ガンマ線を受けており、バックグラウンドレベルが1.5倍程度高いことが分かった⁸⁾。当初懸念されたISSという400トンもの大質量による宇宙線シャワー発生による粒子・ガンマ線バックグラウンドの増加は、MAXIでは認められなかった（同じくISSに搭載のCALETのCAL装置では検出されている）。

安全運用の対策 (i) と (ii) により、理想的状態に比べ、単位時間内のシグナル (S) の量は0.26倍に減った。他方、対策 (iii) とソユーズの影響により、バックグラウンド (B) は2倍（その揺らぎは $\sqrt{2}$ 倍）に増えた。これらにより現在の感度 (S/\sqrt{B}) は100 mCrab/スキャン、25 mCrab/dayとなっている (5σ 値)⁹⁾。

こうして当初の目的の1つであるAGNの長期モニタをするには感度が不足となり、観測可能AGN数が減ってしまった。しかし数個のAGNの強度モニタは行われている。特に変動の激しい明るいとかげ座BL型天体のMrk 421については幾度もフレアを検出したり、パワースペクトルを求めたりしている¹⁰⁾。また一番明るいAGNのCen Aについても変動解析がなされている¹¹⁾。

5. 歴史に残るMAXIカタログ

定常な微弱X線源の検出を行う場合には、一挙両得カメラであるがゆえに、シグナル量の減少は時間をかければ取り戻せる。7年間のGSCデータを用いた3MAXIカタログでは、3–20 keVで896個のX線源がリストされ、感度はほぼ混入限界の0.4 mCrabに達した（後続の川室氏の記事）。同

程度の感度限界で 1970 年代に HEAO-1 A2 により得られた Piccinotti の AGN サンプルと比べると、数十%の AGN はリストから消えると同時に、ほぼ同数が新たにリストに加わっていた。それは数十年単位の AGN の変動を物語っている。

また 7 年間の SSC カタログも発行された。0.7–1.85 keV と 1.85–7.0 keV の 2 バンドで、各々感度 3 と 4 mCrab で 140 と 138 個がリストされている¹²⁾。これらの MAXI カタログは 21 世紀初頭の X 線源の基礎データとして歴史に残るであろう。

6. MAXI の速報体制と 時間領域天文学

MAXI は ISS に搭載されているため、アメリカのデータリレー衛星 TDRSS を経由して 70% の時間、リアルタイムで地上へデータが降りてくる。JAXA 筑波宇宙センターでは MAXI の突発天体発見システムがデータを監視し、大增光があれば登録者に直接、電子メールで知らせる¹³⁾。自動速報の最速記録は発生後 11 秒である⁹⁾。通常程度の増光であれば、MAXI 当番がデータを吟味した後 GCN (ガンマ線バースト連携ネットワーク) や ATel (天文学者電報) へ新星情報を発信する。それらを元に、世界中の地上の、小口径から大口徑まで、波長も電波から TeV まで、の望遠鏡や、はたまた Swift などの軌道上望遠鏡も、秒単位あるいは時間単位で急いで追跡観測を行う。この時間領域天文学へのトリガー役が評価され、MAXI は 2016 年 ISS 研究開発国際会議の Innovation in space science 賞を受賞した¹⁴⁾。

実は故障したカメラ 3 台のうち 2 台は、有効面積が半分で反同時計数なしという状態なので、感度は 1/4 だが使用できることが分かり、運用を始めた。「ぎんが」が発見した V404 Cyg は、26 年たった 2015 年 6 月 15 日に再び出現し、MAXI ではそれらのカメラで検出・速報された。今回の増光では、ガンマ線から可視光、電波までの現代の観測機器が総動員され、その激しい変動ぶりがつ

ぶさに観測された¹⁵⁾。それによりブラックホール連星におけるガス降着からジェット放出までの姿が描き出され、多波長天文学の成功例となった。

7. 長期モニタとしての活躍

MAXI の運用は 3 回にわたり延長された結果、長期モニタならではの新しい成果も増えて来た。例えば数年ごとにアウトバーストを繰り返すブラックホール連星では、その長期光度曲線の驚くほどの類似性が認識された¹⁶⁾。ポインティング衛星の観測では決して得られなかった視点である。

長期モニタとしての成果のもうひとつには、積極的なデータ公開によって、MAXI チーム外の研究者によるデータの利用が進んだ点があげられるだろう。MAXI の観測結果は X 線領域での標準的な参照データとして世界的に認められたと言える。その証拠に MAXI の装置論文 Matsuoka¹⁾ (2009) の引用数は、いまや 325 回 (ADS, 2019.5.1.現在) になった。それを「何らかの形で MAXI を使用した論文」の数と見なすと、これは MAXI チームが執筆した論文 76 編に加えて、その 3 倍の数の論文が外部の研究者によって書かれていることを意味する。ここ 6 年間では毎年 40 回程度引用されており、MAXI のコンスタントな活躍を物語っている。この貢献が評価され 2013 年度には第 18 回 PASJ 論文賞を頂いた。

8. MAXI の成果

このような MAXI の成果を俯瞰すれば、MAXI のサイエンスには、次の 4 つのパターンがある。後続の記事のテーマを () 内に記した

1) MAXI 単独でできる研究 (MAXI カタログ、恒星フレア、遅いパルサーの時系列解析、軟 X 線拡散 X 線源など)、

2) MAXI の発見と Swift/XRT や NICER などによる追観測を相補的に組み合わせた成果 (X 線新星発見など)、

3) MAXI と RXTE/ASM, Swift/BAT, Fermi/

GBMなどの全天モニタとを組み合わせる研究（アウトバーストの形やスペクトル状態変化や周期性、パルサーのパルス周期と光度関係など）、

4) マルチメッセンジャー天文学への貢献（重力波天体、ガンマ線バーストなど）。

例えばMAXIで一番の特異な天体、軟X線新星MAXI J0158-744の発見は2)に入る。この天体は1スキャンだけで検出され、4 keV以下のみで光る軟X線天体で、小マゼラン雲にありながら1 Crabと明るく、光度に直せば1太陽質量のエディントン光度^{*4}の100倍もあった。そしてそこにはBe星が存在した。未知の天体現象に出会った時の研究者の驚きや試行錯誤は、天文月報¹⁷⁾に掲載されている。その他さまざまな成果については、後続の記事をご覧ください。

9. そして10年

MAXIの10年の運用により、提案時に掲げた、21世紀のカatalog、新星の速報、X線天体の長期変動の監視は、ほぼ達成され、現在も継続中である。この10年でMAXI J0158のような新天体も現れ、ブラックホール新星も頻繁に報告されるようになった。

さらに特筆すべきは、この10年の天文学の進歩の一形態として、潮汐破壊現象、重力波、超高エネルギーガンマ線、超高エネルギーニュートリノといった、高エネルギー現象や激しい時間変動を含む新しいサイエンスが出現したことである。MAXIはこれら高エネルギー天体のX線データを提供しており、それによりMAXI自身の重要性も増している。

MAXIチームでは研究の潮流を知り世界の研究者と議論するため、合計6回のMAXI国際会議を開催した。そこにはMAXIの成果もまとめられていて、集録や発表資料はMAXI HPから入手可能である。

一般向けとして、JAXAからMAXIサイエンスニュースも随時発行している¹⁸⁾。ISSツイッターにもときおり登場している。

MAXIのカメラは現在も安定して稼働している。これからも激動のX線宇宙をお見せするだろう。

参考文献

- 1) Matsuoka, M., et al., 2009, PASJ, 61, 999
- 2) Mihara, T., et al., 2011, PASJ, 63, 623
- 3) Tomida, H., et al., 2011, PASJ 63, 397
- 4) Tsunemi, H., et al., 1997, proc All-Sky X-ray obs.15
- 5) 三原建弘, 1999, 天文月報, 92, 154
- 6) 上野史郎, 2006, 天文月報, 99, 441
- 7) Sugizaki, M, et al., 2018, proc New eyes on X-ray astrophys. with Japanese and Chinese obs.
- 8) Mihara, T., et al., 2014, SPIE, 9144, 1O
- 9) Negoro, H., et al., 2016, PASJ, 68, S1
- 10) Isobe, N., et al., 2015, ApJ, 798, 27
- 11) Tachibana, Y., et al., 2016, PASJ, 68, S25
- 12) Tomida, H., et al., 2016, PASJ, 68, S32
- 13) 鈴木素子, 根来均, 2010, 天文月報, 103, 465
- 14) ISASニュース2016年9月号, ISS研究開発賞
- 15) 例えばKimura, M., et al., 2016, Nature 529, 54
- 16) 中平聡志, 2012, 天文月報, 105, 166
- 17) 森井幹雄, 2015, 天文月報, 108, 225
- 18) MAXIサイエンスニュース <http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/maxi>

MAXI 10 years of observation

Tatehiro MIHARA & MAXI team

RIKEN, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: On 2019 August 15, it will be 10 years since MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) started observations on the International Space Station. MAXI discovered the soft X-ray nova MAXI J0158-744, and many black-hole X-ray novae. The 3 MAXI catalog was published as that in the early 21st century. MAXI provides basic data in X-ray objects. It takes part in the "multi-wavelength astronomy" from radio to TeV gamma-ray. Recently together with the gravitational wave and the neutrino, MAXI contributes to the "multi-messenger astronomy". MAXI and Swift/BAT are leading the "time-domain astronomy" in the X-ray and Gamma-ray transients.

^{*4} 星が輝ける最大の光度。星の質量に比例する。1太陽質量であれば 1.4×10^{31} W, 太陽光度の3万倍である。当光度以上になると光圧が重力に勝り、星表面のガスが宇宙空間に飛散し、星の体をなさなくなる。