



ISSN 1349-1113
JAXA-RR-05-028

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

国際宇宙ステーションきぼう搭載全天X線監視装置

富田 洋・松岡 勝・川崎一義・上野史郎
横田孝夫・倉又尚之・片山晴善・森井幹雄
三原建弘・小浜光洋・磯部直樹・常深 博
宮田恵美・河合誠之・片岡 淳・吉田篤正
山岡和貴・根来 均

2006年 3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

国際宇宙ステーションきぼう搭載全天X線監視装置

富田 洋・松岡 勝・川崎 一義・上野 史郎・横田 孝夫
倉又 尚之・片山 晴善・森井 幹雄¹・三原 建弘・小浜 光洋
磯部 直樹²・常深 博・宮田 恵美³・河合 誠之・片岡 淳⁴
吉田 篤正・山岡 和貴⁵・根来 均⁶

Monitor of All-sky X-ray Image Mission onboard KIBO of the International Space Station

by

Hiroshi TOMIDA, Masaru MATSUOKA, Kazuyoshi KAWASAKI, Shiro UENO, Takao YOKOTA,
Naoyuki KURAMATA, Haruyoshi KATAYAMA, Mikio MORII (Japan Aerospace Exploration
Agency (JAXA)), Tatehiro MIHARA, Mitsuhiro KOHAMA, Naoki ISOBE (The Institute of
Physical and Chemical Research (RIKEN)), Hiroshi TSUNEMI, Emi MIYATA (Osaka
University), Nobuyuki KAWAI, Jun KATAOKA (Tokyo Institute of Technology)
Atsumasa YOSHIDA, Kazutaka YAMAOKA (Aoyama Gakuin University),
Hitoshi NEGORO (Nihon University)

Abstract : MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) is an X-ray all-sky monitor, which is to be attached to KIBO exposed facility of the International Space Station (ISS). MAXI will be transferred to ISS by Space Shuttle or H-II B Transfer Vehicle and start the observation in 2008. MAXI has two types of X-ray Camera. One is called Gas Slit Camera (GSC), which includes 12 gas proportional counters, and another is Solid-state Slit Camera, which includes 32 CCD chips. Both cameras have narrow and long fields of view, which sweep the celestial sphere, which enables us to monitor the all sky in X-ray band. The scan cycle is 90 minutes, which is same as orbital period of ISS. The energy range is 0.5- 30keV. The data of MAXI is transferred to the ground station via data relay satellites. The real time contact is more than 50%. At the ground station, the MAXI data is automatically analyzed, then, in the case of that the transient phenomena is discovered (e.g. X-ray nova), alerts will be issued to the world via the Internet. As for the major X-ray objects, light curve and spectrum will be also opened in the internet, and they are to be updated every day.

概 要

全天X線監視装置(Monitor of All-sky X-ray Image : MAXI)は国際宇宙ステーションに搭載される全天X線モニターで、史上最高の感度で宇宙を監視する。MAXIは2008年にスペースシャトル又は宇宙ステーション補給機で軌道上に運ばれ観測を開始する予定である。X線カメラはスラ

¹ 宇宙航空研究開発機構

⁶ 日本大学

² 理化学研究所

³ 大阪大学

⁴ 東京工業大学

⁵ 青山学院大学

ツツコリメータで決まる細長い視野を持ち、この細長い視野が天球を走査し全天をモニターする。長い視野に沿ったX線到来方向はスリットと一次元の位置検出能力を持つX線検出器（比例計数管およびCCD）で決定し、2種類のカメラをあわせて0.5–30keVをカバーする。比例計数管のカメラはGSCと呼ばれ5350cm²の有効面積を持ち、CCDを用いたカメラはSSCと呼ばれ150eV(5.9keVでの半値幅)を上回るエネルギー分解能と32個のCCDで全面積は200cm²である。取得したデータはデータリレー衛星を経由し地上へ送られ、リアルタイムコネクションは50%以上である。送信されたデータは自動解析され、突発的現象が発見された場合は自動で世界へ速報される。それ以外のデータも天体ごとに分けられスペクトルやライトカーブをインターネットで公開し、毎日更新する予定である。MAXIを用いて多数の活動銀河核のモニタリングが可能になるほか、銀河系内のブラックホール候補天体の新発見、これらの世界への速報、降着円盤の物理解明などさまざまな貢献が期待できる。

Keywords : X-ray, all-sky monitor, CCD, proportional counter, international space station

1. はじめに

宇宙はビックバンと呼ばれる大爆発で生まれ、140億年もの時間をかけてその姿を現在まで進化させてきた。今では宇宙は一見すると冷たく悠久不変で穏やかな姿を人間の目にみせている。しかし実際には今でも星は誕生し、あるものはその一生の最後に大爆発を起こし、我々に最も身近な星である太陽でさえ頻繁にフレアを起こして人間活動に影響を及ぼしながら活発に活動している。宇宙はさまざまな天体が激しく活動する激動の舞台である。しかしその姿を人間が実感するのは簡単ではない。

1962年アメリカのジャコーニらはX線で太陽以外の宇宙を観測し、その熱い宇宙の姿を初めて目の当たりにした。X線天文学の夜明けである。以来X線天文学は発展し、人類はさまざまな天体からのX線放射を発見し続けてきた。その多くは時間とともにその明るさを変化させ、時には大爆発を起こすこともわかってきた。ブラックホールは明るさを何万倍にも増して突然我々にその姿を現し、パルサーはミリ秒の速さで規則正しく明るさを変化させ、生まれたての赤ちゃん星ですら太陽の何千倍もの爆発を起こしX線を撒き散らす。そのエネルギー源は重力や核融合、磁場など物理過程もさまざまである。X線で観る宇宙はダイナミックで活動的で変化に満ち、輝きを変化させるまさに宝宝箱のようであり、その観測は宇宙物理の専門家を含む世界の人々の好奇心を満足させる重要なものである。

全天X線監視装置(Monitor of All-sky X-ray Image：以後MAXIと略す)は国際宇宙ステーション(International Space Station：以後ISSと略す)に搭載される次世代の全天X線モニターである。活動する宇宙の姿を過去最高の感度でモニターし、激動する宇宙の姿をリアルタイムで世界に中継する。近年のX線天文衛星(すざく、チャンドラ、XMM-ニュートンなど)は特定の天体を深く観測するため全天モニターは搭載しておらずMAXIの重要性は非常に高い。本論文ではMAXIのミッションについて紹介すると同時にその科学的観測意義についても紹介する。

2. MAXIの開発

2.1. MAXIとISS

MAXIはスペースシャトル又は宇宙ステーション補給機(H-II Transfer Vehicle：HTV)により軌道上へ運ばれ、ロボットアームで「きぼう」(ISSの日本実験モジュール)の船外実験プラットフォーム1番ポートへ取り付けられる。MAXIは重量約530kgで、大きさは185×80×106cmである。大きさは船外プラットフォームからの制限により、重量は輸送機積載キャリアの制限による。打ち上げは2008年度で運用期間は2年以上の予定である。

図1はMAXIの概観を示す。メインは2種類のX線カメラ(Gas Slit CameraとSolid-state Slit Camera)である。Optical Star SensorはRLG(Ring Laser Gyroscope)と共に姿勢測定に使用される。Grapple FixtureはロボットアームによりMAXIが「きぼう」に取り付けられる際に使用する。ATCS(Active Thermal Control System)は流体を利用した排熱システムである。

MAXIは「きぼう」から電力(350W)、通信(2経路)、排熱といったリソースの供給を受ける。そのため、MAXIは太陽パドル、電池、通信アンテナ、データレコーダーは持たない。MAXIは「きぼう」に固定されるため姿勢制御システムも持たない。これらに加えて宇宙飛行士による船外活動もMAXIにとって重要なリソースで、取り付けや故障モニターのため必要であれば利用する。これらはMAXIの開発において大きなメリットとなっている。

一方ISSを利用することの欠点もある。人間がいるため安全性が重視され使用できる材料等に制限が大きい、人間活動などによる姿勢擾乱があり精度良いポインティング観測が難しく姿勢が自由にならない、宇宙ステーションの構造物により視野が限られる、ISSの軌道傾斜角が 51.6° のため粒子バックグラウンドの高い地域を通る、インターフェイスポイントが多い(スペースシャトル、ISS、ロボットアーム等)、などである。MAXIは船外プラットフォームに取り付けられる最初のペイロードの一つであり、開発要素が多いのも開発のコストを大きくする。しかしこれらを考慮してもMAXIはISSから得るメリットが大きく、「きぼう」に最適な観測ペイロードである。

当初MAXIは輸送にHTVを利用する予定であったが、早期実現のためスペースシャトルによる打ち上げにも対応できる様に設計が変更された。これに伴い打ち上げ時の取り付け機構と構造設計の一部が変更になり質量が若干大きくなったが、設計の変更は小さく、現在は問題なく製作・試験が続いている。

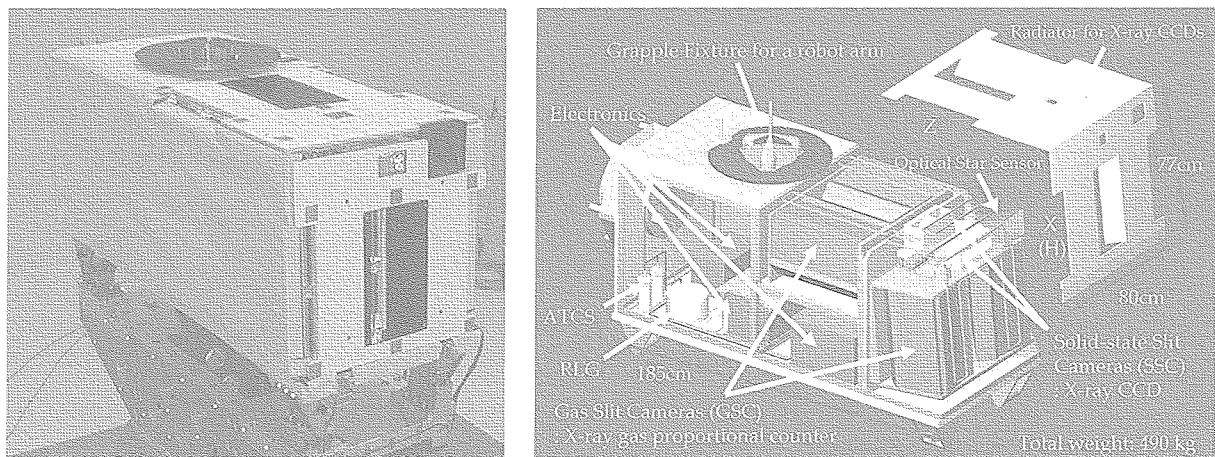


図1 MAXIの概観図。左は熱構造モデル。右は内部の模式図。左に比べ側面パネルとベータクロスと呼ばれる白い輻射断熱用シートが取り外されている。その他の詳細は本文を参照のこと。

2.2. MAXIの観測原理

MAXIの観測原理を図2に示す。ISSは飛行機のように地球に対してほぼ同じ姿勢を保って軌道上を周回する。よってISSの地球に対する公転周期はISSの自転周期(約90分)に等しい。そのためカメラを地球と反対側に向けておけば、その視野に地球が入ることなく観測を行うことができる。但し視野方向は常に天球上を移動するためISSでは詳細なポインティング観測には不向きで、全天モニターやサーベイに向いている。

MAXIは細長い視野を持ち、この視野がISSの自転に伴って天球を走査することで全天を観測する。細長い視野はスラッツコリメータ(薄い板を並べたもの)で決定される。細長い視野に沿った天体位置は、スリットと一次元位置検出型X線検出器を用いて決定される。X線検出器としては比例計数管(2.3章)とX線CCD(2.4章)を使用する。比例計数管を利用したカメラはGas Slit Camera(以後GSCと略す)と呼ばれ、CCDを用いたカメラはSolid-state Slit

Camera(SSC)と呼ばれる。この2種類のカメラは有効面積やエネルギー分解能、エネルギーバンド等で互いに弱点を補い合い、あすか衛星([6])のGIS(Gas Imaging Spectrometer)とSIS(Solid-state Imaging Spectrometer)の様にMAXI全体の観測能力を高めよう。

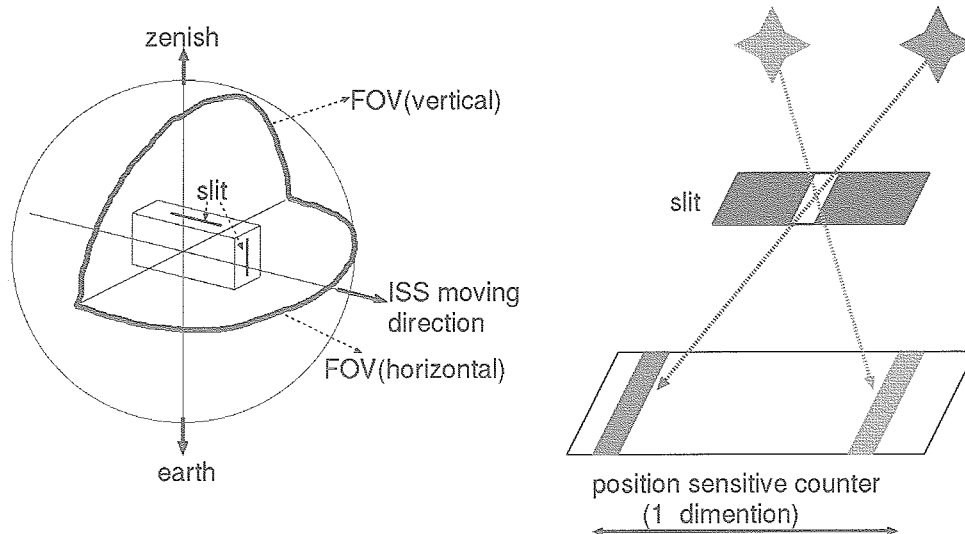


図2 MAXIの観測原理。左はMAXIの視野(太い線)を示す。これが天球を走査し、全天を観測する。右は視野に沿った位置決定の原理を示す。詳細は本文参照のこと。

2.3. GSC : Gas Slit Camera

MAXIで使用する比例計数管を図3(左)に示す。外寸は $358 \times 236 \times 86$ mmで重量は5390gである。Oxford Instruments社(旧Metorex社：フィンランド)が製造を担当した。X線の検出には6本の炭素繊維芯線(太さ $10 \mu\text{m}$ 、長さ333mm、抵抗約 $33\text{k}\Omega$)を用いており、炭素芯線のガスセルをvetoセルが囲んでいる。veto芯線は金メッキのタングステン(直径 $18 \mu\text{m}$)である。炭素芯線とveto芯線の反同時計数により粒子線バックグラウンドを除去する。

MAXIではこの比例計数管を12台使用し有効面積を 5350cm^2 としている。これらを2つのユニットに分け、6台を反地球方向に、6台をISSの進行方向に視野を向ける。視野を2つに分けるのは放射線帯などで観測不能となる領域を別ユニットでカバーするためである。比例計数管1台で $1.5^\circ \times 80^\circ$ の視野をカバーし、2台が同じ領域を見る。これが3セットあり、互いに重なり合う視野領域を形成し1ユニットで $1.5^\circ \times 160^\circ$ の視野をカバーする。

GSCではX線吸収位置は炭素芯線での電荷分割方式で決定する。位置決定能力を重視するため、比例計数管を制限比例領域(高い印加電圧)で使用し、エネルギー分解能を犠牲にしているが、運用で標準的に使用する1650Vの印加電圧で8keVのX線に対し、位置分解能は平均1.3mm、エネルギー分解能は平均15.5%を達成している。ガスセルの窓は厚さ $100 \mu\text{m}$ のベリリウムで、これにより低エネルギー側の感度は2keV程度までとなる。高エネルギー側の感度はガス組成とガスセルの厚み、及びガス圧で決定される。ガスの組成はXe(99%)+CO₂(1%)、厚さは24mm、圧力は1.4気圧で、およそ30keVまでの観測が可能である。但しこのエネルギー領域ではX線光子数は少ないため、粒子バックグラウンドの正確な見積もりが検出限界を下げるために重要であろう。

MAXIの比例計数管はHETE-2衛星のWXM([5])の発展型として開発されたものである。WXMではガスをCO₂=3%として使用していたが、MAXIの比例計数管では異常増幅現象([4])が顕著となるため、CO₂を少なくして使用する。しかし少なすぎると紫外線によるアフターパルスが発生するため、試行錯誤の末1%と決定した。しかしこのガス組成でも異常増幅は残っており、ガスセル深くで吸収される硬X線ではその影響が大きい。またX線レスポンス(ガス増幅率など)が吸収される場所に大きく依存するため、正確な観測を行うには比例計数管の詳細な性能評価が必須である。そのため我々は一年以上かけて較正試験を行い、現在はそのデータを元にしたデータ解析用レスポ

ンスファイルの作成を行っている。図3(右)に例としてペンシルビームに対するGSCのレスポンスを示す。GSCには性能モニターのための較正用放射線源(^{55}Fe)を搭載しており性能の時間変化も追えるようになっている。

GSCの光学系はスリットとスラツコリメータである。スリットはタンゲステン製で幅が3.7mmである。スラツ板は厚さ $100\mu\text{m}$ の燐青銅を3.1mm間隔で並べ、1カウンターにつき64枚使用している。軟X線の全反射を防ぐため、表面をケミカルエッチングしてある。評価試験結果によると、コリメータによって決まる視野の大きさ、及び比例計数管の位置決定能力と時間決定精度により、X線の到来方向は約 1.5° で決定できることがわかった。十分明るい天体では 0.1° より良い精度で天体位置を決定できる。

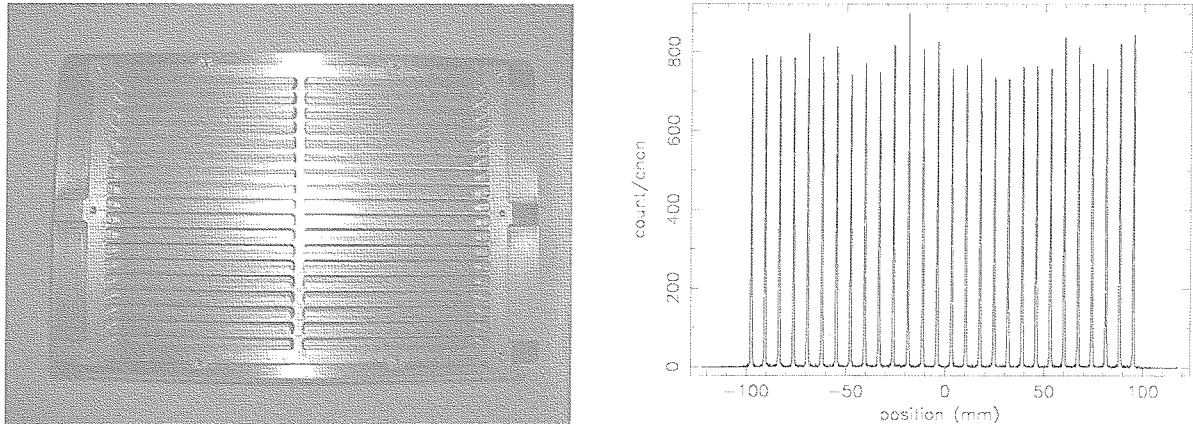


図3：左：MAXI GSCの比例計数管。X線の入射窓側から見ている。ボディはチタンでベリリウム膜のサポートも兼ねている。その他の詳細は本文参照のこと。右：GSCに8keVのペンシルビーム(直径0.1mm)を28箇所照射したときのレスポンス。横軸は決定された位置(mm)、縦軸はカウント数。位置分解能は1.2mm(半値幅)である。

2.4. SSC : Solid-state Slit Camera

SSC(Solid-state Slit Camera)は図4(左)のCCDを利用したX線カメラである。SSCはCCDを16個搭載したカメラを2ユニット使用し、GSCと同じくISSの進行方向と反地球方向を観測する。但し進行方向ユニットの視野の向きは太陽光の地球からの反射を避けるために、GSCに比べて 6° だけ反地球方向に傾きを持たせている。

SSCは浜松ホトニクス社のCCD(FFTCCD-4673)を使用している。通常CCDは可視光にも感度を持つため、このCCD受光部は表面に薄くアルミコーティングしている。輻射による熱流入を防ぐ効果もある。これらを含めた電極側の構造物がCCDの低エネルギー側の感度を決定し、0.5keVまでが観測可能となっている。高エネルギー側感度は空乏層の厚さで決定され、およそ $70\mu\text{m}$ で12keVまでが観測可能である。ピクセルサイズは $24\times 24\mu\text{m}$ で、 1024×1024 ピクセルが各CCDにある。SSCでは一次元の位置決定能力があればいいので、これを縦方向に加算して読み出す。CCDはフルフレームトランスファー(FFT)方式で蓄積領域はない。16個のCCDは1つの回路で駆動・読み出しを行うため、一つのCCDを読み出している時間が他のCCDの露出時間となる。

CCDは放射線に弱く、軌道上では宇宙線によりその性能は劣化していく。その主因は電荷転送効率の低下であるが、それには電荷注入が性能回復に効果的で([1]), MAXIのCCDには電荷注入用のゲートがある。電荷注入にはデメリットもあり、データ処理の都合上読み出しに時間がかかり、そのため時間分解能が落ち、露出が長くなるため暗電流も増加する。MAXIでは運用で電荷注入をコントロールできるため打ち上げ初期では電荷注入は行わず、性能劣化が大きくなった時点で電荷注入モードに切り替える。但し電荷注入を用いなくても軌道上での2年の運用後でも電荷転送効率の低下は 2×10^{-5} 以下であることが実験により確かめられている。性能をモニターする為に各ユニットにそれぞれ較正用放射線源(^{55}Fe)を一つ搭載しており、各ユニット16CCDのうち2素子にMn-K X線が照射される。

現在フライトカメラは一部が完成しており、その性能の例を図4(右)に示す。駆動・読み出しを行う回路部はエ

エンジニアリングモデルを使用したものだが、エネルギー分解能は16個(1ユニット)の平均で147eVである。CCD素子単体レベルの試験でも、読み出しのノイズが電子換算で10個以下、エネルギー分解能も平均で150eVを上回り、十分な性能を得ている。

SSCの特徴としてGSCに比べてエネルギー分解能が良いことがあげられる。そのためにはCCD受光部の冷却が必須であり、MAXIのCCD(FFTCCD-4673)には電子冷却器(ペルチェ素子)が内蔵されている。熱流入を最小限にするためペルチェ素子自身で受光部を支える構造であり、受光部裏面には輻射熱伝導を抑えるため金メッキを施している。ペルチェ素子を含むカメラの発熱はLoop Heat Pipe(LHP)を用いてラジエタまで輸送し宇宙空間に放射して捨てる。LHP+ラジエタシステムでカメラをおよそ -20°C 程度に冷却し、ペルチェ素子で受光部は -60°C 程度まで冷却する。LHPはSwales社(米)が製作する。MAXIはポインティング衛星ではないためISSから見た太陽方向が常に変化し、それに伴いラジエタ温度も刻々と変化する。ラジエタは2面あり、一方のみが深宇宙を見て、片方が太陽にさらされることもある。そのような場合流量バルンサーが機能し、より冷たいラジエタで多くの熱が放射される。ラジエタ温度の変化により受光部の温度が変化しないよう、ペルチェ素子のアクティブな電流制御が可能である。

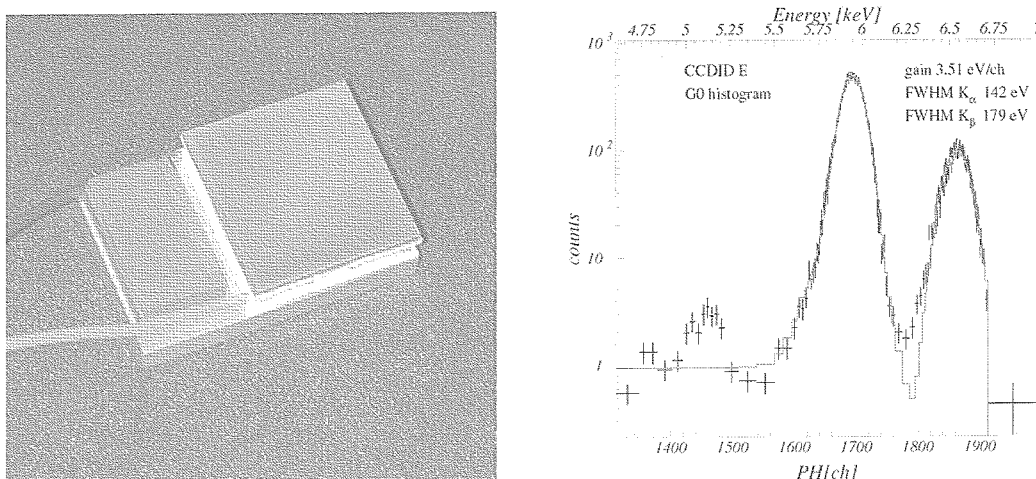


図4：左：MAXI/SSCで使用するX線CCD。受光部表面はアルミコーティングしている。大きさは受光面が $25 \times 25\text{mm}$ である。ペルチェ素子は受光面の下にあり、左に伸びるケーブルはペルチェ素子用である。右：フライト用CCDカメラで取得したMn-K X線のスペクトル(1CCD分)。横軸がADC出力値(エネルギーに相当)で縦軸がカウント数、+印がデータで実線はモデル関数である。この素子ではエネルギー分解能は142eV(半値幅)で、読み出しノイズは電子換算で6個程度である。

2.5. その他のサブシステム

2.5.1. Data Processor

MAXIはデータプロセッサ(Data Processor：以後DPと略す)と呼ばれる管理用計算機を搭載する。DPはコマンドの受付、サブシステムの管理、サブシステムからのデータの処理、テレメトリの生成、時刻管理、姿勢の決定などを行う。DPは4つのCPUボードを搭載し、1つがGSCのデータ処理、2つがSSCのデータ処理、残る一つがシステムその他の処理を行うが、CPUボードの故障に対する冗長性を考慮し、これら機能を他のCPUボードに移すことも可能である。CPUにはオペレーションシステム(VxWorks)が走り、アプリケーションはC言語で記述されている。万が一の場合には軌道上でのアプリケーションの書き換えが可能である。

MAXIは時刻決定のためGlobal Positioning System(GPS)機能を有している。アンテナや回路部は民生品を基にJAXAで宇宙用に開発した国産品を使用している。これによりDPは時刻を $120 \mu\text{sec}$ 以下の精度で管理でき、GSCの各X線イベントにはこの精度が保障され、特にパルサーなどの研究で威力を発揮する。

MAXIは有人施設に取り付けられるため、その安全管理機能が重要である。「きぼう」からの急な電源遮断要求

にも対応し、ISSから配信される軌道位置や太陽方向情報を基に比例計数管の印加電圧とCCDのバイアス電圧を落とすことも可能である。DPはファイルシステムをサポートし、これを用いてコマンドなどのログを残している。必要に応じて地上へのファイル転送が可能である。

SSCのイメージデータはDPでリダクションされX線イベントのみが地上へ転送される。データリダクション方法は、「すざく」衛星のXISカメラの処理([2])を参考にしている。SSCではCCD各ピクセルの電荷は縦方向に加算されるためXISでのtimingモードの処理が基本になるが、ダークパッファは各ピクセルについて保有する。DPはSSC診断モードを持ち、その場合のみCCDの全イメージが時間をかけてテレメトリへ出力される。GSCデータもDPでリダクションされ、イベント数に応じてテレメトリに収まるよう編集モードを変えられる。

2.5.2. 排熱

DPや各カメラの回路部からの熱はActive Thermal Control System(ATCS)と呼ばれる機構で「きぼう」へ輸送される。冷媒(パーフルオロカーボン(FC72))の温度は20℃程度であるためSSCカメラの冷却には不向きで使用しないが、カメラの性能が回路部(特にアナログ部分)の温度に依存するため、これを一定に保つ重要な機能を果たしている。

2.5.3. 姿勢

MAXIの姿勢はスターセンサーとジャイロ스코ープを用いてDPで決定される。基本的にスターセンサーで決定されるがスターセンサー視野内に太陽が入るなどの場合にジャイロ스코ープでその補完を行う。MAXIではトランジェント天体の速報が重要であるが、スターセンサー非可視域でのジャイロ스코ープの情報だけでは完全な姿勢情報が得られない。そのためDPがスターセンサー可視時刻からのジャイロ스코ープ情報を積分し姿勢を決定する。テレメトリへ出力する姿勢情報の精度は 0.1° より十分良い。MAXIはISSに固定されているため姿勢制御に関しては自らコントロールすることはできず、モメンタムホイール等は搭載していない。

2.6. 観測シミュレーション

上記のMAXIの性能を考慮したGSC観測の全天シミュレーション結果を図5(左)に示す。この図はCosmic X-ray Background(CXB)などの広がったX線天体を含まず、粒子線によるバックグラウンドも含んでないため、かなり楽観的な見積もりであるが、HEAO-1レベルのX線カタログが一週間から一ヶ月で完成すると考えられる。図5(右)はバックグラウンドとしてCXBを入れた場合のポイントソースのプロファイルである。10mCrabの天体がクリアに検出できている。最終的な観測限界はバックグラウンドの評価で決まるが、我々は1mCrabを目標としている。

MAXIは放射線バックグラウンドの高い領域やカメラ視野が太陽近傍の場合は観測できない。またISSの太陽電池パドルやロボットアームが視野を横切する場合もある。これに対してもシミュレーションで計算結果が出ており、太陽と放射線帯の影響が全くない場合に比して50%程度のexposure(有効面積と観測時間の積)を確保できる。

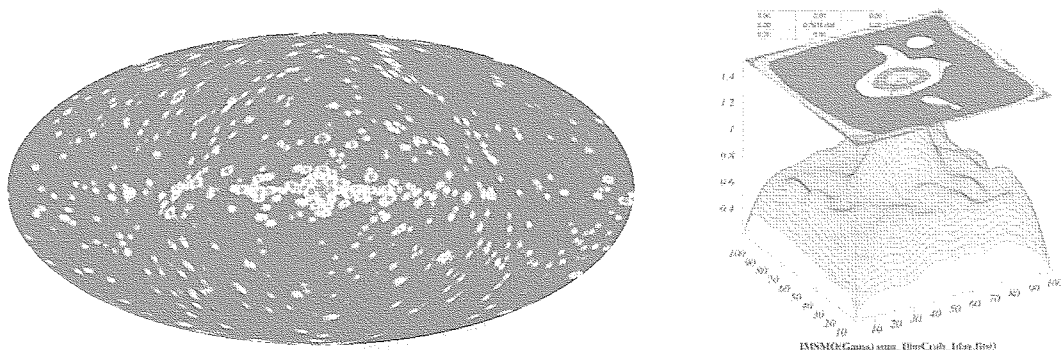


図5: MAXIのシミュレーションイメージ。左: 全天イメージ。銀河座標にプロットしている(中心が銀河中心)。粒子線によるバックグラウンドや広がった天体は含まれていない。X線天体カタログは[3]を使用した。観測時間は約一週間。右: 10mCrabの天体を1日観測したときの様子。バックグラウンドは高銀緯での宇宙背景放射を考慮している。 $10^\circ \times 10^\circ$ の領域の中心に天体を置いている。

3. MAXIの観測とサイエンス

3.1. 全天モニター

MAXIは過去最高の感度で全天をモニターする。図6は各種X線天体の地球で観測した場合の明るさを距離の関数でプロットしたものである。これまでの全天モニターではRossi X-ray Timing Explorer (RXTE)がおおよそ20mCrabまでモニターしている。これに対しMAXIでは1スキャン(天体がMAXIの視野を一度横切る)でRXTE程度、一日で10mCrabを切り、一週間で1~数mCrabまでが観測可能である。つまりこれまでに比べ感度が一桁向上し、以下のような観測が可能になる。

* AGN(Active Galactic Nuclei)は中心に巨大ブラックホールが存在し時間変動することが知られているが、銀河系外の天体の多くはこれまで全天X線モニターの観測限界以下であった(図6)。そのため系統的な時間変動解析の例は少ない。MAXIではその感度の良さによりAGNをその研究対象にできる。銀河系内ブラックホール候補天体についての時間変動は秒より十分短い時間スケールが知られているが、単純なマスキングではAGNでの典型的な時間変動スケールはyearのオーダーになり、MAXIの実力が十分に発揮される。

- 銀河系内のブラックホール候補天体はこれまで20~30個程度が知られているのみである。これらは質量降着率により時間変動すると考えられているが、MAXIではその感度からフレアのかかなり早い段階からアラートを出すことができ、多波長観測のトリガーとなれる。また、MAXI自身もSSCを用いて低エネルギー側のスペクトルが詳細に得られ、降着円盤に対する研究が大きく進むと期待される。またMAXIでは暗い新しいブラックホール候補天体を探し出し、その数を増やすこともできる。
- 銀河系内ジェット天体もトランジェントで、ジェットの放出とX線の活動性には相関が示唆されている。多波長観測が盛んで、電波で全天モニターも行われているが、そのフレアは電波よりもX線で先に起こるためX線モニターによる早期トリガーは必須かつ重要で、MAXIの活躍が待たれる。新しいジェット天体の発見も数は少ないであろうが期待できる。
- ガンマ線バーストについてはバースト本体とアフターグローの観測がそれぞれ年に10例ほど期待できる。SWIFT衛星はガンマ線バースト後の最初の3時間でこれまでの予想と異なる現象を明らかにしており、MAXIはそのライトカーブに寄与ができるであろう。ともに発見後の速報も重要な意味を持つ。

他にも時間変動する天体は中性子星およびその連星系、白色矮星連星系などたくさんあり、超新星や生まれたての星も近傍であれば重要な観測対象になろう。キューサーやブレーザーもMAXIの格好のターゲットになるだろう。

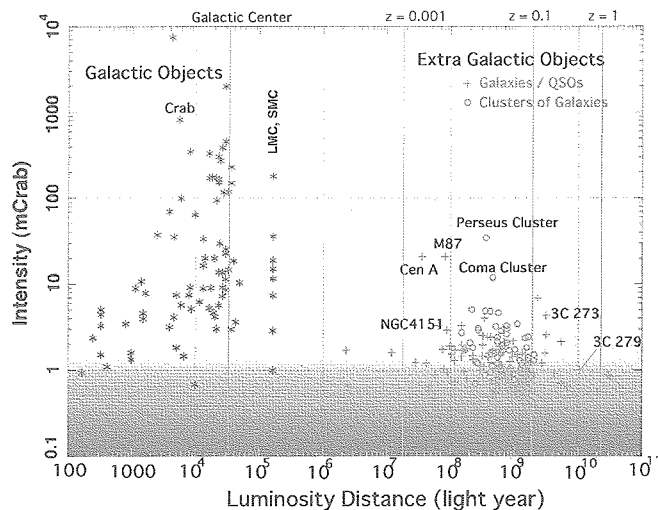


図6・各種X線天体の距離(横軸: 単位=光年)とみかけの明るさ(縦軸: 単位mCrab)。ともに対数スケールで表示している。

3.2. 全天マップ

MAXIは全天をくまなく観測するためX線での全天マップも自動で取得できる。特に数度を超えて大きく広がる天体で威力を発揮する。硬X線ではHEAO-1を統計量で凌駕し、軟X線でもROSATをエネルギー分解能で上回る全天X線マップが得られる。対象としては銀河中心や銀河面に沿って大きく広がる熱的なプラズマやlocal hot bubbleと呼ばれる太陽系近傍に大きく広がるプラズマ(おそらく古い超新星残骸)のスペクトル解析でその起源に迫ることができる。銀河面の深い吸収に埋もれた新しい超新星残骸の発見にも挑戦したい。

4. MAXIのデータ

4.1. MAXIから地上まで

MAXIは自身では通信アンテナ等は持たず、ISSおよび「きぼう」のリソースを利用し地上と通信を行う。データ中継衛星を利用するため50%以上の時間帯でリアルタイム通信が行えると予測される(通信経路に伴う物理的な数秒の遅れを除く)。これは多波長観測のトリガーを速やかに発行するために全天モニターとして非常に重要である。

MAXIのデータは2種類に分けられる。一つは中速系データと呼ばれISS上のethernetへデータ送出する。もう一方は低速系データと呼ばれMAXIからMIL-1553Bプロトコルでデータ送出する。中速系データは最低200kbpsが保障されているため、詳細なデータも送信可能である。低速系データは25kbpsの保障だが信頼性は高くMAXIでは低速系データのみでも必要なサイエンスが行える。

これらの2種類のデータはそれぞれ2つのルートで地上へ転送される。1つは日本のデータ中継衛星経由、もう一方はアメリカのデータ中継衛星経由でISSのリソースである。低速系データは両ルートに同じデータが送られるため冗長系をなし、リアルタイムコンタクトの時間も長いため、トランジェント現象の自動探索をこのデータを用いて行う。一方、中速系データは2つのルートのいずれかにのみ送られる。リアルタイム性は低いが回線が太いため、検出器の診断や詳細なスペクトル解析などはこのデータを使用して行う。

地上に送られたデータはすべてJAXAの運用管制システム(Operation Control System : OCS)を経由しミッションチームに届けられる。コマンドもOCSを経由する。OCS自身の機能としてデータアーカイブ、コマンド送信、取得データの簡単なブラウズ等の機能はあるが、MAXIでは独自のアーカイブ、自動解析システムを準備する。これらの計算機は外部ネットワーク(インターネット)には接続できないので、セキュリティの保障された方法でデータを外部に取り出し、速報することが現在の課題として残る。外部の一般ユーザー向けのデータアーカイブシステムも別に用意する。

4.2. データの公開

MAXIは全天モニターであるので公募観測は行わない。主要な(明るい)天体に関しては、スペクトル、ライトカーブ等を世界へ公開し、毎日更新する予定である。MAXIのデータをできるだけ多くのユーザーに使ってもらうためアクセス制限はできるだけ少なくする方針で、データのフォーマットもユーザーが使いやすい形式とし、解析ソフトウェアや検出器レスポンス等もミッションチームで準備する予定である。全天モニターはスピードが大事であるため「あとでゆっくり解析」というわけにはいかない。運用開始までに入念な準備が必須で、現在ソフトウェアの設計・製作・試験を行っている。

MAXIのデータはリレーショナルデータベースを用いて管理するが、MAXIはポインティング観測を行わないため、すべてをフォトン(イベント)の単位でデータを登録する。そのためレコード数が2年で 10^{11} 程度と大きくなる。我々はすでにそのシステムの試作・調整も始めており、約100日分の観測データに対し任意の 1° 四方の天空領域のイベント検索を数十秒程度で完了することがわかっている。

低速系データは地上装置で自動解析される。それによりX線新星発見やフレア現象等の突発現象が発見された

場合は、位置や明るさ等の情報がインターネットを通じ自動で世界へ通報される。速報は電子メール(あるいはそれに準ずるもの)の利用を検討している。そのため登録は必須となろうが、その登録もできるだけ制限を小さくしユーザーに使いやすいものとする予定である。

5. まとめ

2006年2月時点でMAXIは設計を終えてフライトモデル製作の段階にある。X線カメラについてはその製作を終え、性能評価試験の段階にあり、当初の予定通りの性能が得られている。今後は2006年夏に行われる機械的・電気的一次噛み合わせ、及びその後の総合試験と地上設備の整備、データ解析・管理ソフトウェアの作成がMAXI開発の中心になっていくであろう。2008年度に無事打ち上げられ、直ちに運用を開始し世界のユーザーにデータを公開できるようMAXIチームは全力を挙げていく。世界の人々がそのデータを用いてさまざまな解析や多波長観測を行い、激動する宇宙の新しい姿を明らかにできるMAXIの活躍を期待している。

参 考 文 献

- [1] 鎌塚友幸, 大阪大学理大学院 理学研究科 宇宙地球科学専攻 修士論文, 2002
- [2] 科学衛星Astro-E2 実験計画書 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 宇宙科学研究本部 データセンター2005
- [3] Ebisawa,K., et al.: *Astron Astrophys*, 411, L59, 2003
- [4] Mihara,T., et al., : *Proc. SPIE*, 4497, 173, 2002
- [5] Shirasaki,Y., et al. : *PASJ*, 55, 1033, 2003
- [6] Tanaka,Y., et al. : *PASJ*, 46, L37, 1994

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-05-028

発行 平成 18 年 3 月 8 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株)フジブランド

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写、転載、電子媒体に加工すること禁じます。

