

# 全天 X 線監視装置 MAXI/GSC の非 X 線バックグラウンドの 性質とモデル化

京都大学 宇宙物理学教室 博士課程 1 年  
志達 めぐみ

第 42 回天文天体物理若手 夏の学校  
2012 年 8 月 1 日-4 日  
観器 50c

## 1 概要

国際宇宙ステーション (ISS) に搭載された全天 X 線監視装置 (MAXI) のガススリットカメラ (GSC) は、過去最高の検出感度を有する全天 X 線モニタとして、2009 年 9 月以来約 3 年の運用により、多数の X 線新星を発見し、全世界への速報を行ってきた。

GSC の検出感度を決定する主な要因は非 X 線バックグラウンド (NXB) である。したがって、天体のフラックスを正しく見積り、非常に暗い X 線源を逃さず検出するためには、NXB のモデル化が必要不可欠である。そこで、我々は、宇宙線強度の指標となるパラメータとして、検出器でモニターするシールド部・シグナル検出部の同時計数カウント (VC カウント) を用いて GSC の機上データを解析し、NXB のカウントレートとスペクトル、検出機上の位置分布を調べた。その結果、VC カウントが大きいほど NXB レートは高く、スペクトルがハードになることが確認された。さらに、NXB レートはロシアの宇宙船ソユーズに搭載されたガンマ線高度計の影響も受けており、ソユーズの ISS ドッキング時にはカウントレートが 20% 以上増加することがわかった。

我々は、この解析結果を用いて GSC の NXB モデルを作成した。さらに、このモデルを用いてシミュレーションを行い、実データの解析結果と比較することで再現性を調査した。本講演では、GSC 機上データの解析結果の詳細を報告し、NXB モデルの再現性について議論する。

## 2 序論

### 2.1 MAXI の概要

MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image; Matsuoka et al. 2009 [4]) は、国際宇宙ステーション (International Space Station: ISS) の日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームに設置された全天 X 線監視装置であり、JAXA、理研、他連携大学機関により運用されている。MAXI は、全天 X 線監視装置としては過去最高の感度を有し、多数の暗い X 線源を検出する能力を持つ。

MAXI の主な科学目的は、全天の X 線源をリアルタイムで監視して、新天体の出現や既知の天体の光度変

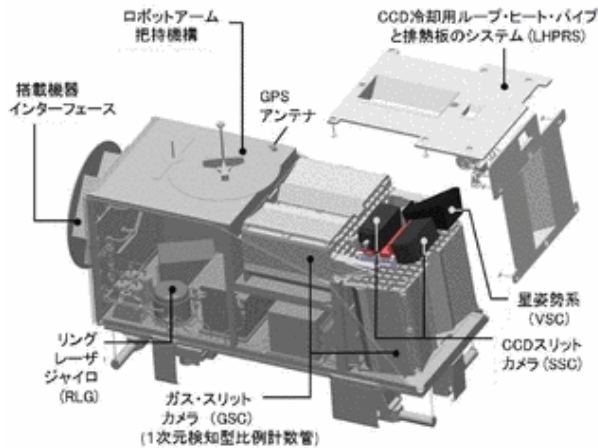


図1 MAXI の概略図。大きさは 1.85 m × 0.8 m × 1 m で、重量は 520 kg。

動を検出し、全世界に向けて素早く速報を出すことで、X線衛星や地上の光赤外・電波望遠鏡などによる観測を促すことである。「すざく」など高精度の詳細観測ができるポインティング型X線衛星は、視野が狭いため新天体や光度変動を発見することは難しいが、MAXIによる速報を用いることで、変動のタイミングに合わせた観測が可能となる。また、MAXIの運用により得られる各天体の長期間にわたるX線データから、ブラックホール連星など変動天体の光度変化にともなう状態変化を追うことも可能である(例えば、Nakahira et al. 2010, 2011 [6], [7], Shidatsu et al. 2011 [12])。さらに、MAXIの広い視野を生かして、全天X線源カタログ作りや、銀河面リッジX線放射などの広がった放射源に関する研究を行うこともできる。

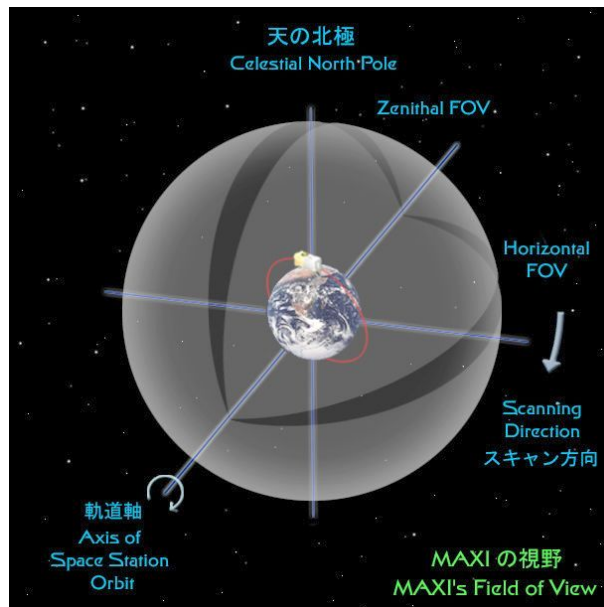


図2 MAXIの視野を表した図。赤線はISSの軌道を示す。2つの半円弧状の視野(黒抜き部分)を持ち、約92分で地球を周回しながら、全天を走査する。

MAXI はガス比例計数管を用いた Gas Slit Camera (GSC: Mihara et al. 2011 [5]) と X 線 CCD カメラを用いた Solid-state Slit Camera (SSC: Tomida et al. 2011 [14], Tsunemi et al. 2010 [15]) の 2 種類の高感度スリットカメラを搭載しており、それぞれ 2 – 30 keV、0.5 – 10 keV のエネルギーバンドをカバーする (図 1)。MAXI は ISS の進行方向とそれと垂直な天頂方向に 2 つの半円弧状の視野を持ち (図 2)、ISS の軌道と同期して約 92 分でほぼ全天を走査する。

MAXI は 2009 年 7 月 16 日にケネディ宇宙センターからスペースシャトル・エンデバー号によって ISS へ運ばれ、同 24 日に日本人宇宙飛行士の若田光一氏のロボットアームによる操作で「きぼう」に設置された。その後、同年 8 月に GSC、及び SSC による観測が開始された。2012 年 8 月現在では、新天体の発見や既知天体の光度変動の速報、毎日の全天 X 線画像の公開、多数の X 線源のライトカーブとイメージ、スペクトルの公開などを精力的に行っている。

## 2.2 Gas Slit Camera

Gas Slit Camera (GSC) はカーボン芯線を用いた 1 次元位置検出型ガス比例計数管である。ガス比例計数管では、入射した X 線がカウンタ内に封入されたガスに吸収され、光電離により電子が生じる。芯線に付加された高電圧により、この電子がさらに別の原子を電離し、新たな光電子を生み出す。そのプロセスが繰り返されることで、電子の数が増幅される。生じた電子は最終的に芯線上で捕獲され、芯線の両端でパルス波として検出される。このとき、入射した X 線のエネルギーは、発生した電荷の総量に比例する。したがって、芯線の左右の端で観測されるパルス波高をそれぞれ  $PH_L$ 、 $PH_R$  と定義すると、X 線のエネルギーは

$$PH_L + PH_R$$

の値から決定できる。この値を、Pulse Height Amplitude (PHA) と呼ぶ。X 線の入射方向については、Position Measure (PM) と呼ばれる、芯線の両端のパルス波高の差

$$PM = \frac{PH_R - PH_L}{PH_R + PH_L}$$

を検出器上の位置に変換することで特定される。

図 3 は GSC の構造を示している。GSC カウンタは外寸 358mm×236mm×86mm の直方体で、Xe (99%) と CO<sub>2</sub> (1%) が封入されている。カウンタ内には 6 本のカーボン芯線 (#0 から #5) が張られ、その側面と底面を 10 本の金メッキを施したタングステン製の veto 芯線が囲んでいる。荷電粒子が検出器に入射すると、複数の芯線にエネルギーが与えられる。そこで、カーボン芯線同士、またはカーボン芯線・veto 芯線間の同時計数カウントを用いて、荷電粒子起源の非 X 線バックグラウンドを除くことができる。(全天 X 線監視装置中間報告書 [19])。

図 4 左は GSC で X 線の入射方向を決定する原理を示している。GSC はスリットカメラであり、天体からの X 線光子はスリットを通じて 1 次元位置分解能のあるカーボン芯線の方向へと飛来する。芯線と垂直方向には位置分解能が無いので、カウンタの上にスラット (薄板) コリメータをおいて視野を制限している。GSC は 2 台 1 組で用いられ、ISS の進行方向に 3 組、天頂方向に 3 組の合計 12 台で構成されており、その有効面積は合計 5,350 cm<sup>2</sup> である。このように 2 つの方向に視野を持たせることで、放射線が強く MAXI が観測できない南大西洋磁気異常帯 (South Atlantic Anomaly: SAA) を通過する際の天空域をお互いに補完でき、全天を満遍なく掃くことができる。GSC は各方向にそれぞれ 1.5 (FWHM) 度 × 160 度の半円弧状の視野を持ち (図 4 右)、瞬間的には全天の 2% を、1 日では、観測不可能な ISS の回転軸方向を除いた全天の 95% をカバーする。

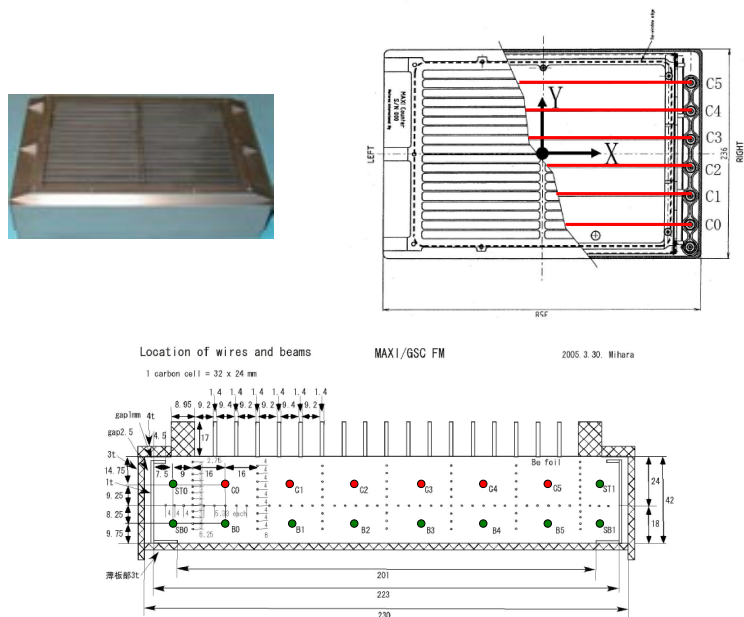


図3 GSCの構造を示した図。左上: カウンタ1台の写真。右上: X線入射窓の方向から見た内部構造。下: 芯線の配置図。上部が入射窓。カーボン芯線(赤)の側面と底面を取り囲んで、10本の veto 芯線(緑)が並んでいる。全天 X線監視装置 中間報告書 [19] より引用。

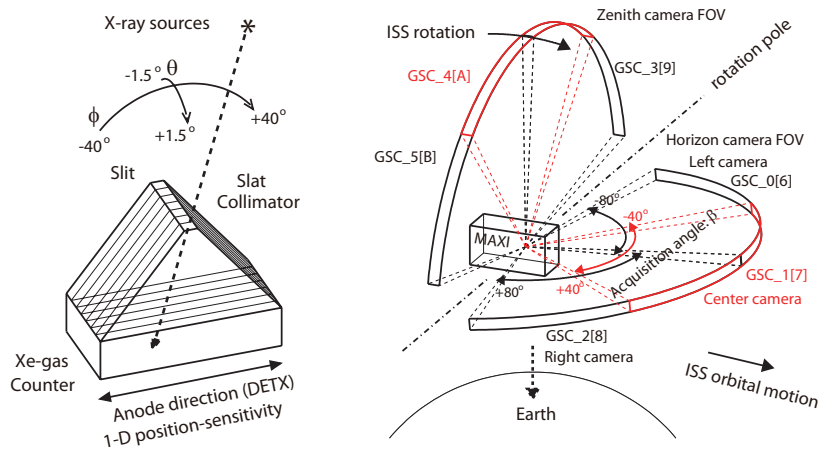


図4 GSCカメラの視野とX線入射方向を決定する原理。左: 1台のカウンタの視野。芯線方向と垂直にスリットを設置し、芯線方向と並行にコリメータを並べることで視野を限定する。さらに、信号を検出した時刻のMAXIの姿勢を用いることで、天体の座標が決定できる。右: 6組(12台)のカウンタの視野の図。天頂方向とISS進行方向に半円弧状の視野を持つ。Sugizaki et al. (2011) [13] より引用。

## 2.3 GSC ソースカタログと非 X 線バックグラウンド

2.1 節のとおり、MAXI の重要な科学目的の一つとして、全天 X 線ソースカタログの作成が挙げられる。2011 年には、運用初期の 2009 年 9 月から 2010 年 3 月までの 7 か月分の GSC データを用いた、初めての GSC 高銀緯 X 線ソースカタログが公開された (Hiroi et al. 2011 [2])。今後、X 線ソースの混み合った低銀緯領域を含め、より長期にわたる積分データのカatalog作りを行うことで、Hiroi et al. (2011) では検出されていない X 線源を多数発見することが期待される。

MAXI の検出感度を決定する主な要因は、非 X 線バックグラウンド (NXB) の強度である。したがって、MAXI の感度を最大限まで引き出し、非常に暗い X 線源を検出し、そのフラックスを正しく見積もるためには、NXB の正確なモデル化が不可欠である。そこで、本研究では、宇宙線の強度を示すパラメータである Cut off Rigidity (COR) 及び検出器でモニターするシールド部 (veto 芯線)・シグナル検出部 (カーボン芯線) の同時計数カウント (VC カウント) に着目し、GSC の機上データを用いて、特に検出器の芯線上の位置分布とエネルギー分布 (スペクトル) に注目し、NXB を系統的に解析した。この解析手順と結果について 3 節に示す。次に、解析で得られた NXB のモデルを用いて MAXI シミュレータでシミュレーションを行い、再現性を調査した。4 節には、そのシミュレーション手法と結果について記述する。さらに、シミュレーションで得られた擬似 NXB データを利用して、バックグラウンドを除去した GSC 全天マップを作成した。また、この全天マップを用いたサイエンスの一例として、銀河面 X 線放射の強度分布の見積りを行った。これらについて 5 節に述べる。

## 3 GSC の非 X 線バックグラウンド調査

以下に、NXB の調査手順と結果を示す。なお、特に断りがない限り、解析に使用したデータは、Hiroi et al. (2011) [2] と全く同じ、2009 年 9 月 1 日から 2010 年 3 月 31 日の 7 か月分、2.0–20 keV のエネルギー領域のデータで、プロセスバージョンは 0.3 である。ただし、#1 及び #2 芯線には他の芯線に比べて大きなデータ較正の不定性が残されている (Sugizaki et al. 2011 [13]) ため、#1 と #2 芯線で検出されたイベントを全て取り除いた上で解析を行った。また、この解析では、NXB に宇宙 X 線背景放射 (CXB) を加えたものを扱った。以後、「バックグラウンド」と言えば NXB と CXB を合わせたものを指す。CXB は、GSC バックグラウンドの約 30 % を占める (詳細は 3.3) が、一様等方な定常成分であるため、バックグラウンドの時間変動には寄与しない。

### 3.1 バックグラウンド成分の抽出

まず、各カメラの 1 日ごとのイベントデータから、明るい点源や銀河面リッジ X 線放射の支配的な領域を見ていない時刻のデータを抜き出し、バックグラウンド成分を抽出した。銀河面リッジ X 線放射の領域は  $|b| < 10^\circ$ 、 $|l| < 50^\circ$  と定義し、明るい点源 70 天体を除去対象とした (図 5)。

### 3.2 NXB レートの変動と Soyuz の影響

宇宙線強度のパラメータと NXB の相関を探る前に、長いタイムスケールでの NXB レートの振る舞いを確認するため、各カウンタの 1 日平均のバックグラウンド・レートの変動をカウンタ毎に調べた。図 6 は、

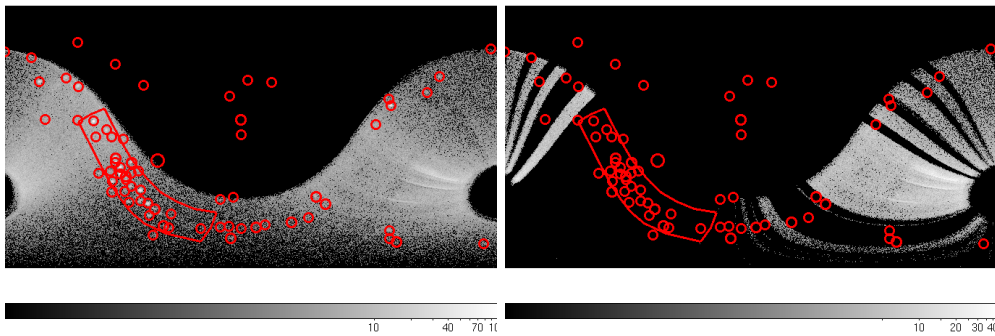


図5 左: GSC カウンタ 1 台 (GSC0) の 2009 年 9 月 1 日の全天画像。赤道座標。明るいソースの領域を赤で示した。帯状の領域は、銀河面放射の領域。右: 上図から明るいソースを見た時刻のデータを除去した後の画像。

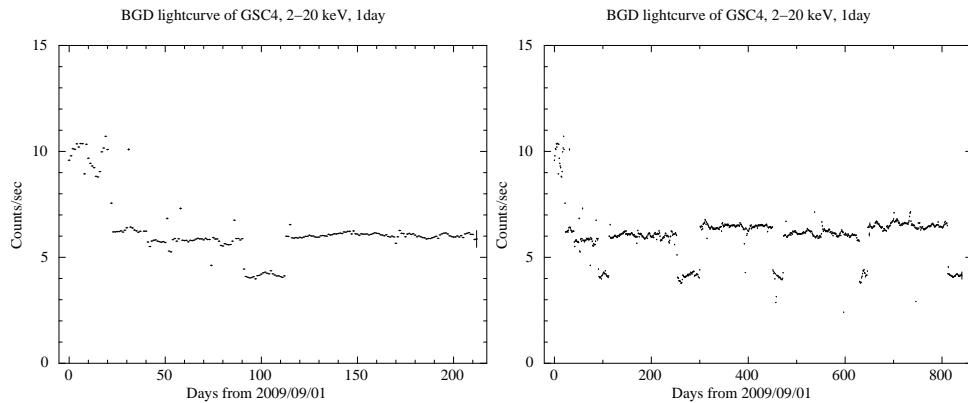


図6 GSC4 (天頂方向中央のカウンタ) の 1 日平均バックグラウンド・レートの変動。左は 2009 年 9 月 1 日から 2010 年 3 月 31 までの 7 か月、右は 2011 年 12 月 20 日までの約 2 年間。

2.0–20 keV のエネルギーバンドにおける GSC4 (天頂方向中央のカウンタ) についてのバックグラウンド強度曲線である。

図 6 左のとおり、2009 年 9 月 22 日以前は、カウントレートが約 10  $\text{count s}^{-1}$  と、他の時期に比べて約 2 倍高くなっている。この日付は、GSC の運用方法が変わった日に対応する。9 月 22 日以前は、荷電粒子の多い高緯度領域でも観測を行っていた。しかし、放電による芯線切れでカメラの故障が相次いだため、ISS が緯度  $40^\circ$  以上の領域を通過する際にはカウンタの電圧を 0V にする保護措置をとり、観測を行わないことになった。したがって、初めの 22 日間の初期運用の時期にバックグラウンド・レートが高いのは、高緯度地帯の荷電粒子によるイベントが原因であると考えられる。そこで、次節以降では、初期運用の期間のデータについても、ISS が緯度  $40^\circ$  以上の領域を通過している時間帯のイベントを取り除いた上で、バックグラウンド解析を行った。

2009 年 12 月には、バックグラウンド・レートが約 20% ( $2 \text{ count s}^{-1}$ ) 減少していることがわかる。このような変動が 2010 年 4 月以降にも存在するかどうかを調査するため、GSC4 のデータを例にとり 2012 年 1 月までのデータを同様に調べると、図 6 右のとおり、約 6 か月の周期で低レートの時期が出現すること

表 1 バックグラウンド・レートの異なる期間

名称	期間	説明
Phase 0	2009/09/23-2009/11/30, 2009/12/24-2010/03/31	Soyuz ドッキング中
Phase 1	2009/09/01-2009/09/22	初期運用 (高緯度帯で観測あり)
Phase 2	2009/12/01-2009/12/23	Soyuz アンドック中

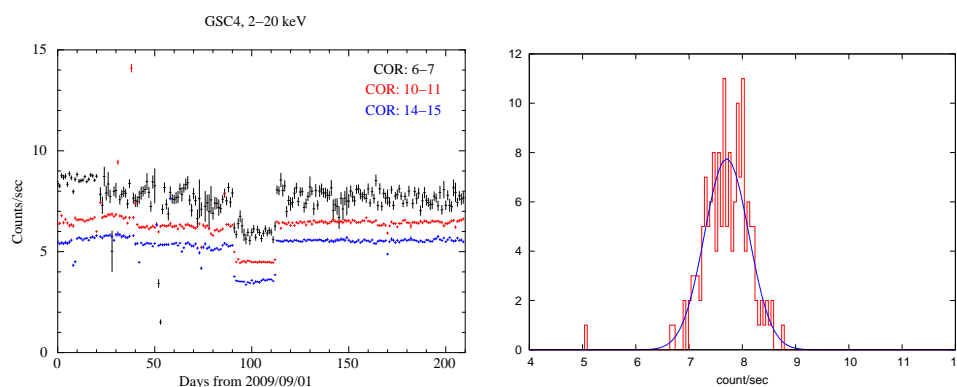


図 7 左: COR でソートした GSC4 のバックグラウンド・レートの時間変動。黒、赤、青はそれぞれ COR 6-7、COR 10-11、COR 14-15 を示す。右: COR 6-7、phase 0 のカウントレートをヒストグラム化し (赤)、ガウス関数 (青) でフィットしたものを。

がわかった。そこで、これらの日付を調べたところ、カウントレートの低い時期は、MAXI に近いドッキング・ポートに停泊していたロシアの宇宙飛行船 Soyuz が ISS から離れた時期と完全に一致することがわかった。Soyuz はガンマ線高度計を搭載しており、放射性物質のセシウム 137 を大量に積んでいる。この放射線が MAXI に影響を及ぼしていることが考えられる。

これらの結果を踏まえて、以後の解析では、2009 年 9 月からの 7 か月間を表 1 の 3 つの期間に分け、各期間のデータを別々に扱うことにした。

### 3.3 Cut Off Rigidity を用いた解析

前節で GSC のバックグラウンド・レートの長期変動の様子が明らかになったが、1 日以下の短いタイムスケールでは、主に ISS の周回にともなう宇宙線量の変化が NXB の変動に影響する。地球上空では、地磁気により一部の宇宙線が遮蔽されているが、地磁気の大きさは場所により変化するため、ISS の周回による位置の変化に合わせ、GSC に入射する宇宙線強度も変化する。そこで、この解析では、地磁気と宇宙線の強度の指標となるパラメータとして Cut Off Rigidity (COR) を採用し、バックグラウンド成分のカウントレートやエネルギー分布、検出器上の位置分布との相関を調べた。COR とは、地磁気にトラップされずに入射できる宇宙線の最低エネルギーを示すもので、過去の観測により位置の関数として決まっている。

まず、各カウンタのバックグラウンドを 1 日毎に COR で分類し、それぞれの 1 日平均カウントレートの時間変動の図を作成した。これを用いて、Phase 毎にカウントレートをヒストグラム化し、ガウス関数でフィットすることでカウントレートの平均値を計算した (図 7)。この平均値を COR に対してプロットすると、図 8 のように良い相関があることがわかった。また、COR が低く宇宙線量が多いほど、カウントレート

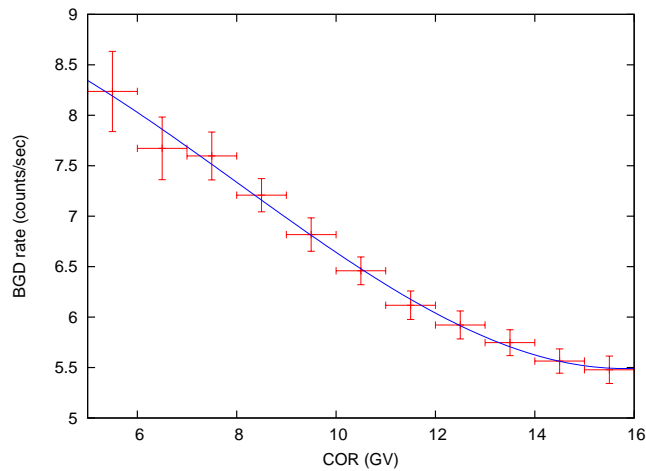


図8 GSC4, Phase 0 についての COR とバックグラウンド・レートの関係。カウントレートの誤差はデータ点のばらつき (図 8 左のガウス関数の幅) を表している。3 次関数でフィットした結果を青で示した。

が高くなることが確認できた。

### 3.4 VC カウントを用いた解析

ここでは、宇宙線強度の指標となるパラメータとして、COR ではなく、検出器でモニタする veto 芯線とカーボン芯線の同時計数カウント (VC カウント、詳細は 2.2 節) を用いてバックグラウンドとの相関を調べた。COR は位置の関数であるが、実際にカウンタに入射する宇宙線の量は、検出器の向きや ISS の速度ベクトル、太陽活動の大きさなどの影響を受けて、同じ場所であっても時間によって変化する可能性がある。一方で、VC カウントは各カウンタ毎にリアルタイムで取得するものであるため、現実の宇宙線量をより忠実に反映していると考えられ、NXB に対して COR よりも良い相関を持つことが期待できる。

まず、COR の場合と同様、各カウンタのバックグラウンドを VC カウントで分類し、Phase 毎に 1 日平均バックグラウンド・レートの平均値を計算した (図 9)。この図と COR の場合 (図 9) を比較すると、VC カウントでソートする方が各 Phase のバックグラウンド・レートの揺らぎが少なく、VC カウントの方が COR よりも良い相関があることがわかる。図 10 に GSC4, Phase 0 に対する VC カウントとバックグラウンド・レートの関係を示した。この図から、VC カウントが大きき宇宙線量が多いほど、カウントレートが高くなることを確認できる。

さらに、位置分布とスペクトルに対する VC カウントの依存性を調べた。図 11 と図 12 は、それぞれ GSC4, Phase 0 の PM, PHA 分布を示す。PM 分布の形状については、COR 分類の場合と同様、VC カウントにほとんど依存しない。また、図 12 から、VC カウントが大きき宇宙線量が多いほど、スペクトルがハードになっていることが確認できる。



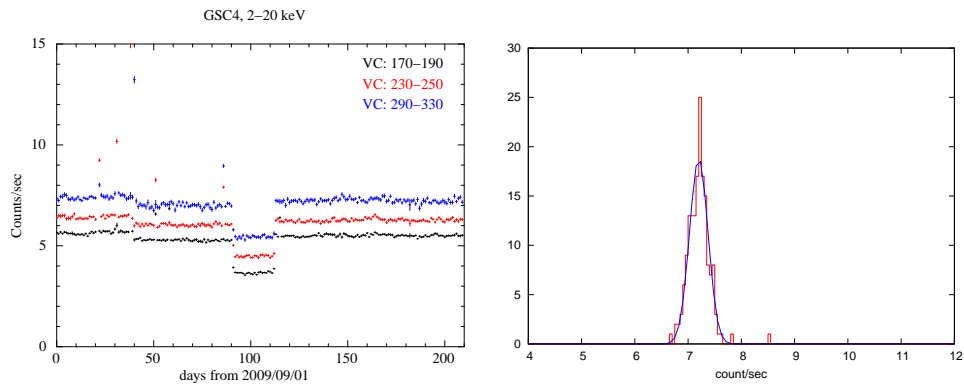


図9 左: VC カウントでソートした場合の GSC4 のバックグラウンド・レートの時間変動。黒、赤、青はそれぞれ VC 170–190、VC 230–250、VC 290–330 を示す。右: VC 290–330、phase 0 のカウントレートをヒストグラム化し (赤)、ガウス関数 (青) でフィットしたもの。

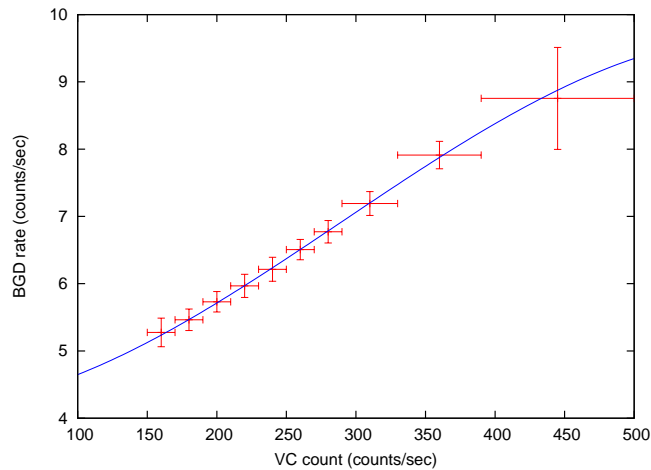


図10 GSC4、Phase 0 についての VC とバックグラウンド・レートの関係。カウントレートの誤差はデータ点のばらつき (図 10 左のガウス関数の幅) を表している。3 次関数でフィットした結果を青で示した。GSC4 では VC カウントが 100–150 の時期の露出時間がほぼゼロであったため、図中にデータ点がない。

#### 4 シミュレーションによるモデルの再現性の評価

前節の VC カウントによる解析結果をバックグラウンド・モデルとして用いて、MAXI シミュレータでシミュレーションを行った。さらに、その結果を実データと比較することで、バックグラウンド・モデルの再現性を調査した。

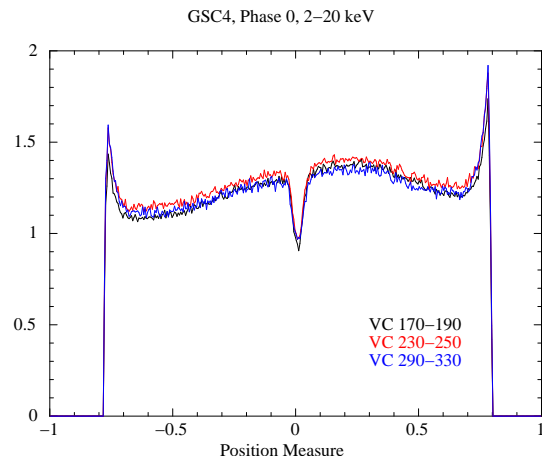


図 11 GSC4, Phase 0 の PM 分布。PM = 0 で 1 となるように規格化した。黒、赤、青はそれぞれ VC 170-190、VC 230-250、VC 290-330 を示す。

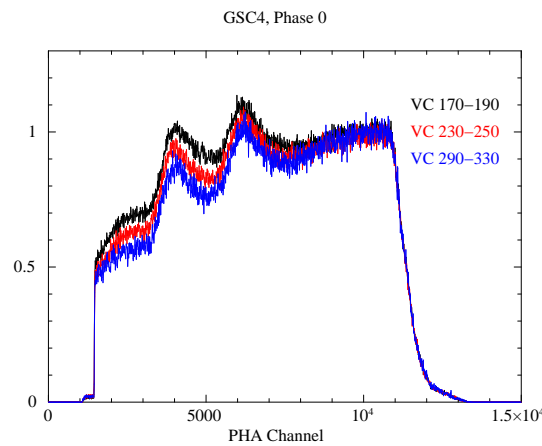


図 12 GSC4, Phase 0 の PHA 分布。PHA = 10000 で 1 となるように規格化した。黒、赤、青はそれぞれ VC 170-190、VC 230-250、VC 290-330 を示す。

#### 4.1 MAXI シミュレータ

MAXI シミュレータとは、MAXI の運用で得られるデータの一次処理や Quick Look 解析システムなど、MAXI ミッションで使用するシステムの設計を最適化するために、MAXI 打ち上げ前の段階からテスト・データを提供する目的で開発されたソフトウェアである (江口智士 修士論文 2008 年 [18])。MAXI シミュレータは、太陽 X 線や南大西洋磁気異常帯を通過する際のカメラ保護処理や、検出器のバックグラウンド、太陽電池パネルなどの ISS の構造物による視野の遮蔽など、実際に起こりうる複雑な観測状況を考慮しつつ、天体からの X 線イベントを時間変動も含めて正しく再現する。

MAXI シミュレータは、各時刻の VC カウントと、VC カウントに対するバックグラウンドのカウントレート、位置 (PM) 分布、エネルギー (PHA) 分布のテーブルを与えることで、バックグラウンドのシミュレーションを行う機能を有している。図 13 はシミュレータがバックグラウンドのイベントを生成する手順を示す

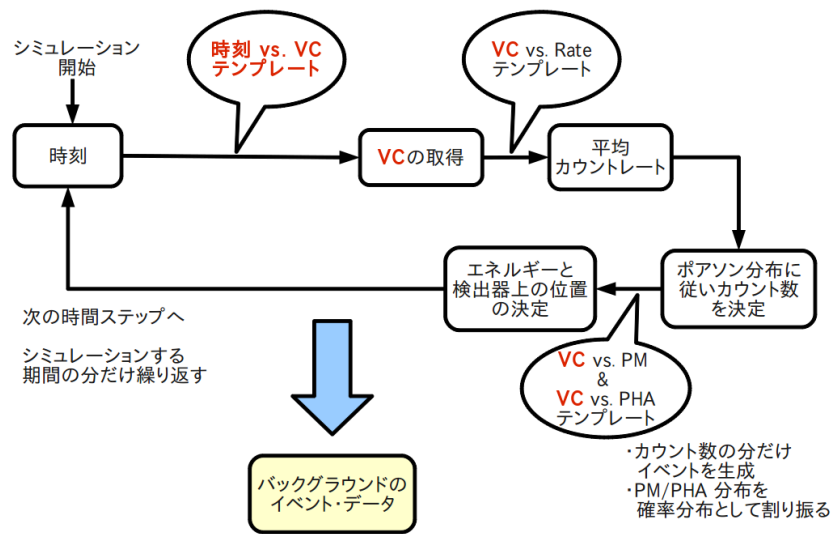


図 13 VC カウントによるバックグラウンド・シミュレーションの流れ。

フローチャートである。まず、与えられた時刻の VC カウントをテーブルから読み出す。次に、得られた VC カウントの値に対応する平均カウントレートをテーブルから取得する。さらに、ランダム数を利用し、ポアソン分布に従って、その時間ステップのカウント数を決定する。最後に、このカウント数の分だけイベントを生じさせる。ここで、VC カウントに対する PM、PHA 分布のテーブルを読み込んで、該当する VC カウントの PM、PHA 分布を確率分布として、各イベントのエネルギーと検出機上の位置とをランダム数を用いて割り振る。

## 4.2 シミュレーション結果とモデルの再現性の評価

まず、3.4 節の VC カウントとバックグラウンドの関係をカウンタ毎、Phase 毎にテーブル化し、MAXI シミュレータを用いてシミュレーションを行った。表 2 にシミュレーションの条件とソフトウェアの環境を示した。

次に、シミュレーションで得られた擬似バックグラウンド・データを、3.4 節の実データの解析と同じ方法で処理し、1 日平均のカウントレート変動、PM、PHA 分布が再現されるかを調査した。ここでは、Hiroi et al. (2011) [2] で解析に使われている、4–10 keV のエネルギー範囲に注目して、実データとの比較を行った。前節と同様、#1、#2 芯線で検出されたイベントは除いている。

図 14 は、バックグラウンドの 1 日平均カウントレートについて、実データとシミュレーション結果を示したものである。この図から、実データとシミュレーションの差は、大きいところでも 10% 程度に収まっていることがわかる。また、PM、PHA 分布については、図 15 のとおり、シミュレーション結果が実データのバックグラウンドにほぼ一致している。

表2 シミュレーションの条件

ソフトウェア (シミュレーション)	maxisim version 8.0.0
ソフトウェア (イベントフィルタリング)	heasoft version 6.10
シミュレーション期間	2009/09/01 – 2010/03/31
使用カメラ	GSC0-9, GSCA, GSCB の全 12 台* <sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> GSC6、GSC9、GSCA、GSCB については、9 月 22 日以降運用が停止していたため、Phase 1 の期間のみシミュレーションを行った。

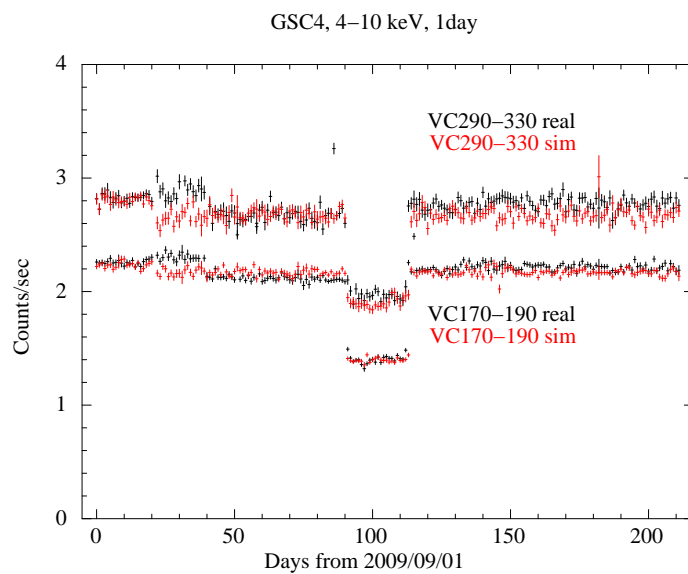


図 14 実データ (黒) とシミュレーション結果 (赤) の 1 日平均カウントレートの比較例。エネルギーバンドは 4-10 keV。上は VC カウントが 290-330 の範囲、下は 170-190 の範囲。

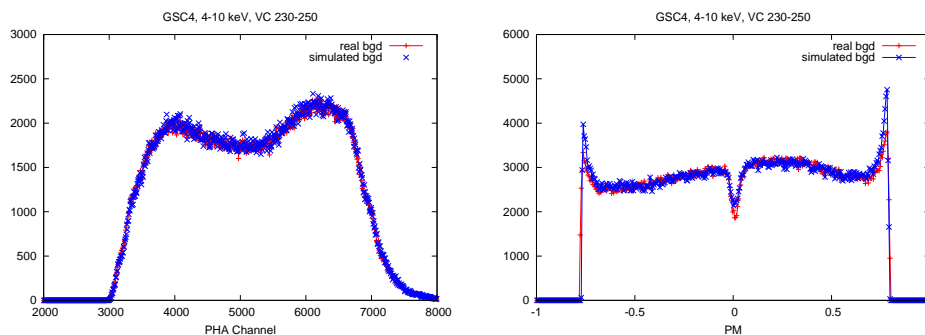


図 15 実データ (赤) とシミュレーション結果 (青) の比較例。左: GSC4、Phase 0、VC 230-250 の PHA 分布。縦軸は Phase 0 の全期間のカウント数を積分したもの。右: GSC4、Phase 0、VC 230-250 の PM 分布。縦軸は左図と同様。

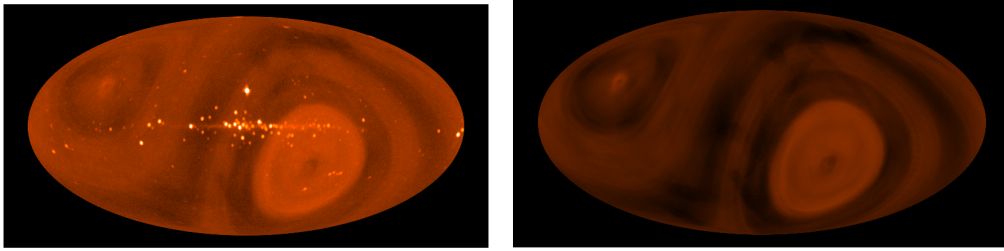


図 16 上段: 2009 年 9 月 1 日から 2010 年 3 月 31 日までの 7 か月分の実データを積分した 4–10 keV の全天画像。全カメラのデータを合算。銀河座標、モルワイデ図法。中段: シミュレーションで得られたバックグラウンドの画像。積分期間、解析条件、座標、図法は上段と同じ。

## 5 バックグラウンド・モデルのサイエンスへの応用

### –全天マップの作成と銀河面 X 線放射の強度分布の調査–

バックグラウンドの精密なモデル化によって、薄く広がった X 線ソースや非常に暗い点源などの X 線強度を正確に見積ることが初めて可能となり、様々な研究への応用が期待できる。本節では、バックグラウンド・モデルを利用した科学研究の基礎となる全天 X 線画像の作成を行った。さらに、サイエンスへの応用の一例として、全天画像を用いた銀河面リッジ X 線放射の強度分布を調べた。

#### 5.1 全天マップの作成

前節で、VC カウントによるモデルでシミュレーションによりバックグラウンドを再現する方法を確立できた。ここでは、シミュレーションで得られるバックグラウンドの擬似データを使用して、2009 年 9 月 1 日から 2010 年 3 月 31 日の 7 か月分の積分による全天マップを作成した。

まず、7 か月分の各カメラについての実データを全て足し合わせて、図 16 上段のように全天イメージを作成した。次に、VC カウントのモデルを用いたシミュレーションで 7 か月分のバックグラウンド擬似データを生成してイメージ化し (図 16 中段)、実データの 7 か月イメージからバックグラウンド・イメージを引き算した。ここでは、統計的揺らぎを無視できるほど小さく抑えるために、カウントレートを 10 倍にしてバックグラウンドのシミュレーションを行った。

GSC は、ISS の軌道に合わせて露出時間が場所毎に異なるため、その補正が必要となる。そこで、露出時間マップとして、MAXI シミュレータの広がった X 線源のシミュレーション機能を用いて、一様等方な定常ソースである CXB の 7 か月積分のイメージを作成した。CXB についても、上のバックグラウンドの場合と同様、統計揺らぎを抑えるために、カウントレート 10 倍でシミュレーションした。こうして得られた CXB 画像を利用して、バックグラウンドを差し引いた全天イメージの露出補正を行った。

以上の処理により、7 か月積分による X 線ソースの全天マップを得ることができた。この全天画像を図 17 に示した。

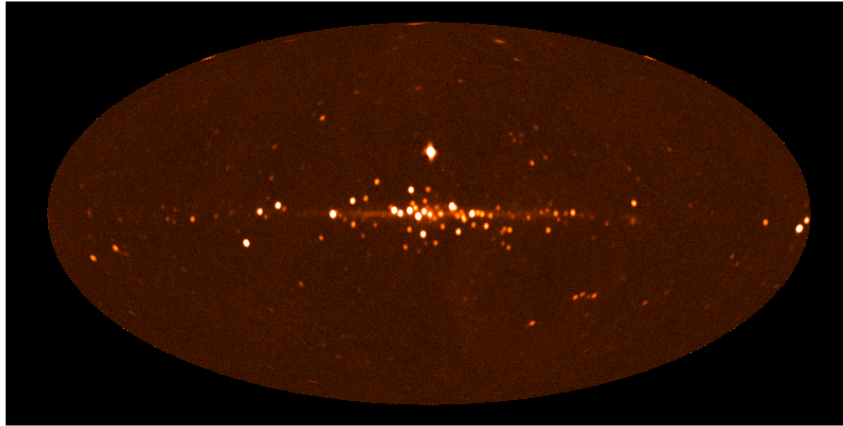


図 17 7 か月積分による 4-10 keV の全天 X 線画像。バックグラウンドと露出時間の補正済。銀河座標、モルワイデ図法。

## 5.2 銀河面 X 線放射の強度分布

銀河面リッジ X 線放射 (Galactic Ridge X-ray Emission: GRXE) とは、銀河面に沿って大規模に広がった X 線放射である。その放射起源については、未分解のブラックホール X 線連星や中性子星連星などの点源の重ね合わせであるという説と、真に広がったプラズマからの高エネルギー放射であるという説がある。最近の Chandra 衛星を用いた観測により、少なくとも鉄 K 輝線の起源は銀河系内の点源の重ね合わせで説明できると示唆されている (Revnivtsev et al. 2009 [11]) が、その他のエネルギー領域の放射起源については未だ決着がついてはいない。GRXE の起源を理解するためには、その強度分布を大きな角度スケールで観測的に決定することが重要である。このような観測には、広い視野を持つ高感度の検出器を用いた全天サーベイが有効である。MAXI/GSC は、4-10 keV のエネルギーバンドの全天サーベイとしてはかつてない感度を達成しており、GRXE の研究に最適である。そこで、本研究では、前節で得られた 7 か月積分の GSC の全天データを解析して GRXE の強度分布を調べた。

まず、前節で得られた 4-10 keV 領域の 7 か月積分による全天画像 (図 17) から GRXE 成分のみを抽出するために、点源の除去を行った。図 18 は、前節の全天画像の銀河面付近の拡大図に点源除去に用いたマスク領域を重ねて表示したものである。銀河面付近の点源を半径 5 pixel (約 2.5°) の円で囲んでいる。次に、銀緯が  $-2^\circ < b < 2^\circ$  の領域を銀経  $20^\circ$  ずつに区切り、それぞれ点源を除いた各ピクセルの平均カウントを求めた。ここで、解析に用いた全天画像は、カウントレート 10 倍でシミュレーションした CXB 画像を 1/1000 倍したもので割り算して露出時間補正を施したものであることから、1 ピクセルあたり 1 カウントが CXB の表面輝度の 1/100 に相当する。単位立体角あたりの CXB 強度のエネルギー依存性は、HEAO-1 による観測結果にしたがうと、

$$\text{CXB}(E) = 9.0 \times 10^{-9} \left( \frac{E}{3\text{keV}} \right)^{-0.29} \exp \left( \frac{-E}{40\text{keV}} \right) \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ str}^{-1} \text{ keV}^{-1}$$

である (Boldt 1987 [1])。これを 4-10 keV で積分すると、 $3.60 \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ str}^{-1}$  となる。した

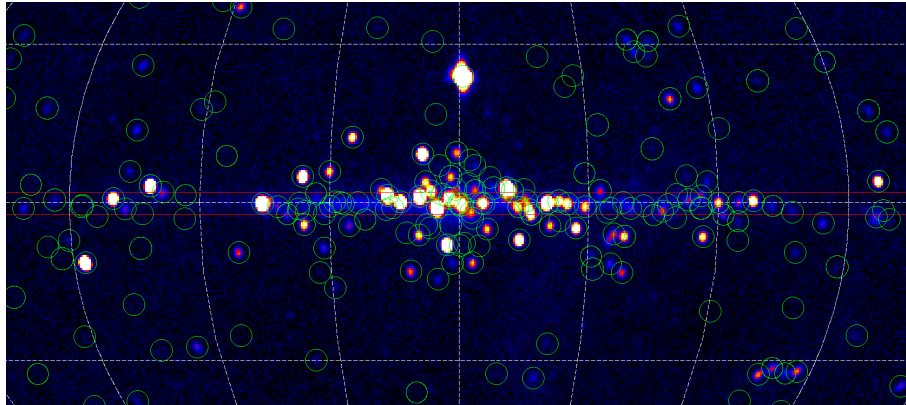


図 18 全天イメージ上における、銀河中心付近の点源除去用の領域。X 線源の座標を中心とする、半径 5 pixel (約  $2.5^\circ$ ) の円形領域 (緑) である。GRXE を抽出した領域 ( $-2^\circ \leq b \leq 2^\circ$ ) を赤色で示した。中央が銀河中心。銀経・銀緯の線を  $30^\circ$  ごとに白色の点線で表示した。

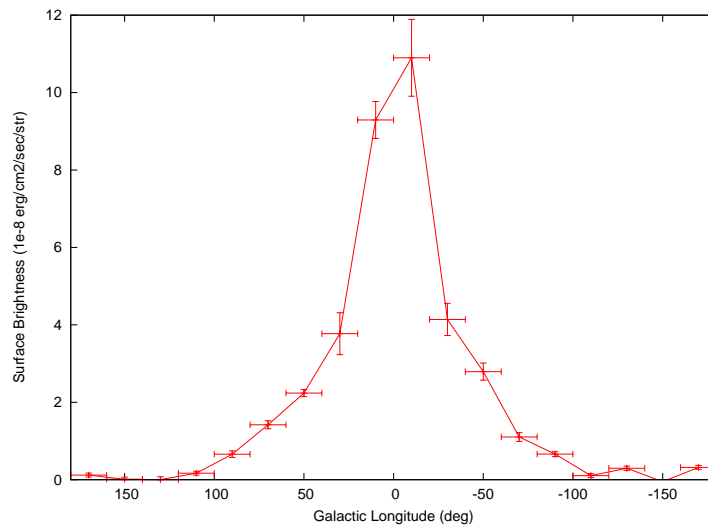


図 19 銀経方向に対する GRXE の強度分布。銀経  $180^\circ \leq l \leq 360^\circ$  については、 $l - 360^\circ$  で表示した。縦軸は表面輝度で、単位は  $1 \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ str}^{-1}$ 。

がって、1 ピクセルあたりのカウント値と表面輝度の間に、次の関係が成り立つ。

$$1 \text{ count} = 3.6 \times 10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ str}^{-1}$$

これを用いて、平均カウント値を表面輝度に変換した。

上記の解析により得られた 4–10 keV における GRXE の分布を図 19 に示した。このグラフから、GRXE は  $|l| = 50^\circ - 100^\circ$  まで存在していることがわかる。また、銀河中心に対してほぼ対称な強度分布で、典型的な表面輝度はおよそ  $10^{-8} - 10^{-7} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ str}^{-1}$  である。この強度分布は、RXTE 衛星の PCA 検出器による 2–30 keV のエネルギー領域の観測で得られた  $-0.5^\circ \leq b \leq 0.5^\circ$  の平均強度分布 (Revnivtsev et al. 2006 [10]) とほぼ一致する。ただし、エネルギーバンドの変換には、Valinia & Marshall (1998) [16] による  $-45^\circ \leq l \leq 45^\circ$ 、 $-5^\circ \leq b \leq 5^\circ$  の領域における GRXE スペクトルのベストフィットモデルを利用した。ま

た、本研究で表面輝度を算出する際に用いた銀緯幅 ( $|b| \leq 2^\circ$ ) と、Revnivtsev らの銀緯幅 ( $|b| \leq 0.5^\circ$ ) との違いを補正するため、過去の観測で得られた銀緯方向の強度分布 (Warwick et al. 1985 [17]、Koyama 1989 [3] など) を考慮して、我々の強度分布を全体に 2 倍した上で Revnivtsev らの結果との比較を行った。

## 6 まとめ

MAXI は、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームに取り付けられた全天 X 線モニタであり、ガス比例係数管 (Gas Slit Camera:GSC) と X 線 CCD (Solid-state Slit Camera:SSC) の 2 種類のスリットカメラを搭載している。MAXI は約 92 分の周期で地球を周回しながら全天の常時探査を行い、突発天体の発見や長期間ライトカーブ・スペクトルの公開、全天 X 線カタログの作成といったミッションを遂行している。

本研究では、GSC のデータから最高の検出感度を引き出すための、精密な非 X 線バックグラウンド (NXB) モデルを確立することを目的として、機上データの解析を行った。宇宙線強度を表すパラメータとして Cut off Rigidity (COR) 及び VC (同時計数) カウントを使ってバックグラウンド・レートの変動を調査したところ、VC カウントを用いる方が、COR より良い相関が見られることを発見した。また、VC カウントが大きく宇宙線強度が高いほど、バックグラウンド・レートが大きく、スペクトルがハードになることが確認された。

この解析結果から得られた NXB モデルを用いて、MAXI シミュレータで擬似バックグラウンド・データを作成し、実データと比較して再現性を調査した。その結果、4–10 keV では 10% 以下の精度で実際の NXB を再現していることがわかった。さらに、運用開始から 7 か月間の GSC データと擬似バックグラウンド・データを用いて、7 か月積分の全天 X 線画像を作成した。これを利用して、銀河面 X 線放射の強度分布を定量的に求めることに成功した。

将来計画としては、今回開発した NXB モデルを最近のデータにも適用した上で、未だ作られていない MAXI 銀河面 X 線ソースカタログを作成し、本研究で取り扱った銀河面 X 線放射をはじめとする、広がったソースの詳細な研究を行うことが挙げられる。さらに、1 日以下のタイムスケールでの NXB の変動の調査を進め、より精確で完全なバックグラウンドモデルを確立し、速報精度の向上や、短いタイムスケールで光度変動を示す X 線ソースの研究などに役立てたいと考えている。

## 参考文献

- [1] Boldt, E. 1987, Phys. Rep., 146, 215
- [2] Hiroi, K., et al. 2011, PASJ, 63, S677
- [3] Koyama, K. 1989, PASJ, 41, 665
- [4] Matsuoka, M., et al. 2009, PASJ, 61, 999
- [5] Mihara, T., et al. 2011, PASJ, 63, S623
- [6] Nakahira, S., et al. 2010, PASJ, 62, L27
- [7] Nakahira, S., et al. 2012, PASJ, 64, 13
- [8] Negoro, H., et al. 2010, The Astronomer's Telegram No.2873
- [9] Negoro, H., et al. 2011, The Astronomer's Telegram No.3330
- [10] Revnivtsev, M., Sazonov, S., Gilfanov, M., Churazov, E., & Sunyaev, R. 2006, A&A, 452, 169
- [11] Revnivtsev, M., Sazonov, S., Churazov, E., Forman, W., Vikhlinin, A., & Sunyaev, R. 2009, Nature, 458, 1142



- [12] Shidatsu, M., et al. 2011, PASJ, 63, S803
- [13] Sugizaki, M., et al. 2011, PASJ, 63, S635
- [14] Tomida, H., et al. 2011, PASJ, 63, 397
- [15] Tsunemi, H., Tomida, H., Katayama, H., Kimura, M., Daikyuji, A., Miyaguchi, K., Maeda, K., & MAXI Team, 2010, PASJ, 62, 1371
- [16] Valinia, A., & Marshall, F. E. 1998, ApJ, 505, 134
- [17] Warwick, R. S., Turner, M. J. L., Watson, M. G. & Willingale, R. 1985, Nature, 317, 218
- [18] 江口智士 『*Swift*/BAT 硬 X 線全天サーベイで見つかった活動銀河核の「すざく」による追求観測および MAXI シミュレータの開発』 (修士論文、2008 年)
- [19] 全天 X 線監視装置開発チーム 『全天 X 線監視装置 中間報告書』