

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21840025

研究課題名（和文）小型偏光観測衛星搭載用広視野バーストモニターの開発

研究課題名（英文）Development of the wide field burst monitor
aboard the small satellite for gamma-ray polarimetry

研究代表者

谷津 陽一 (YOICHI YATSU)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40447545

研究成果の概要（和文）：

本研究では、偏光観測用超小型衛星に搭載可能な、小型で高性能なガンマ線バーストの位置決定装置の開発を行った。検出器には CsI シンチレータとアバランシェフォトダイオード採用し、常温で 30keV の X 線検出を実現した。さらに軌道上での実際の位置決定性能を見積もるため、衛星筐体を含めた精密なシミュレーションを行い、本検出器が目標としていた誤差 5° 以下の精度でバーストの位置決定が可能であることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

A detector system for position determination of gamma-ray bursts aboard the very small satellite for gamma-ray polarimetry was developed. The detector consists of CsI scintillator coupled with avalanche photodiodes, which enabled a lower detectable energy of 30 keV even at a room temperature. To evaluate the performance of the system on orbit we ran ray-trace simulation reflecting the whole geometry of the satellite, and confirmed that our detector system can determine the position of GRBs within a tolerance of 5 degrees.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,090,000	327,000	1,417,000
2010 年度	990,000	297,000	1,287,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,080,000	624,000	2,704,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：X 線・ガンマ線天文学、ガンマ線検出器、超小型衛星

1. 研究開始当初の背景

(1) GRB と偏光

ガンマ線バースト (GRB) は宇宙論的な遠方で発生する巨大な爆発現象であり、現在では大質量星の超新星爆発や中性子星・ブラックホール等高密度星の合体などの爆風が、ジェット状に集束されて我々の視線上に打ち出されている現象だと理解されている。しかしな

がら、開放された重力エネルギーがどの様にしてジェットを作り、粒子を加速しているのかという根本の部分は、依然として理解されていない。この粒子加速機構に関しては数多くの理論モデルが存在するものの、現在使われている観測装置だけでは制限を与えることが困難である。

このような状況を打開するため、我々は GRB

の硬 X 線偏光観測を目的とした超小型衛星“TSUBAME”を開発している。X 線偏光観測は世界的に関心の高まっている新しい観測手法であり、測光・撮像・分光といった従来の観測とは全く別の物理情報を提供する。特に期待されるのは、GRB のプロンプト放射近傍の磁場構造探査である。この偏光度を精度良く測定することが出来れば、撮像では絶対に解像することのできない爆発源付近の物理現象に大きな制限を与えることができると期待されている。

(2) 専用観測衛星の開発

2003 年以降、RHESSI や INTEGRAL などの衛星を用いた GRB の偏光に関する研究が何件か報告され大変な議論を呼んだ。残念なことに、これらの測定結果は不確定性が大きく、GRB の物理的描像に制限を与えるには至っていない。

GRB に限らず硬 X 線偏光観測の代表的な手法は、コンプトン散乱の偏光角依存性を応用したものである。実際、先に紹介した観測も既存の観測衛星を駆使して、ガンマ線の散乱角度分布を測ったものであるが、その測定精度は検出器のデザインや入射角に強く依存してしまう。前述の衛星はもともと偏光観測を目的として設計されたわけではないため、偏光検出精度には幾何学的な限界がある。このため、偏光を精度良く測定するためには、偏光観測に最適化された専用の装置を使って、視野中心で観測を行うしか道はない。しかしながら、これほど挑戦的な単機能衛星を通常サイズの衛星で作り上げるのは明らかに非現実的である。偏光計のみを、大型衛星の余剰スペースに相乗りさせてもらう解もありえるが、この場合には偏光計の視野中心で GRB を捉えることが困難となるため、偏光検出精度の向上が難しくなってしまう。

そこで我々は、50kg 級の超小型専用衛星で偏光観測を開発したいと考えている。GRB の放射は長くても 100 秒ほどであるため、検知から数秒以内に位置を算出し、ただちに指向観測に移行する必要がある。このため、本計画では衛星バスに高機動な 3 軸姿勢制御装置を搭載し、バースト検知から 15 秒以内の偏光観測を実現する。

2. 研究の目的

(1) GRB 監視モニター

ガンマ線の偏光観測に必要な条件として、偏光計自体の性能の他に、観測装置の迅速性が挙げられる。GRB は事前に発生を予測出来ないうえ、その継続時間は長くても数十秒程度である。このため、Swift など他の観測衛星からの情報を待つ地上から観測命令を送信するというミッションスタイルは成立しない。そこで、本衛星には GRB の検知と位置

決定を行う広視野バーストモニタ (WBM) を搭載する。

(2) WBM の概要と目標性能

WBM は、衛星構体の 5 面に取り付けられたシンチレーションカウンタから構成される。観測待機モードにおいて、WBM は常にガンマ線の入射レートを監視し、急激なレート上昇があった場合には GRB と判定し位置計算を行う。位置の決定は 5 系統の検出器の計数率を比較することで行う。このような位置決定手法は、過去にコンプトンガンマ線天文台の BATSE 検出器でも採用されており、約 1° の位置決定精度を達成した実績がある。一方で、我々の硬 X 線偏光計は視野が差し渡し 15° あるため、バーストの位置決め精度は高々 5° 程度あれば十分である。

本研究の目的は、既の実績のある測定技術を応用し、できるだけ性能を維持しつつ、超小型衛星に搭載可能なレベルまでダウンサイズすることである。超小型衛星は、電力・寸法・質量に非常に厳しい制約があるため、過去の装置を小型化するだけではミッションが成立しない。本研究では、これまで筆者が基礎研究を行ってきたアバランシェ・フォトダイオード (APD) などの新しい放射線計測技術を取り入れ、小型衛星でも高精度の測定が可能な検出器を構築する。

3. 研究の方法

本研究では実際の衛星に搭載することを前提としたエンジニアリングモデルの設計を確立することを目標としており、研究期間に以下の研究・開発を実施した。

- ① WBM に用いるシンチレータの形状と最適なセンサの検討。
- ② 読み出し回路の試作と回路パラメータの最適化。
- ③ 搭載機器の放射線耐性・検出器の放射化による影響の調査。
- ④ 衛星搭載用の軽量筐体・放射線シールドの設計・製作。
- ⑤ 軌道上での位置決定シミュレーション。また、偏光観測を実現するために必要な WBM の性能を以下に示す。

システム要求	
検出器質量：	1,300 g (1 台 260 g 以下)
電力：	6 W 以下
耐震性：	H-IIA に準拠
環境温度：	$-20 \sim +20^\circ\text{C}$
ミッション要求	
視野：	2π str
受光面積：	1 台あたり 36 cm^2 以上
入射レート：	1 台あたり $\sim 10\text{ kHz}$
測定レンジ：	$30 \sim 200\text{ keV}$
位置決定精度：	許容誤差 5° 以下

4. 研究成果

(1) 結晶・センサの形状の決定

GRB の方向を決定する際に特に重要となるエネルギーレンジは入射光子数の多い 30–200 keV 付近である。これより高いエネルギーでは大気散乱ガンマ線などの寄与が増えるため、位置決定計算には都合が悪く、WBM はこのレンジに感度を持つ必要はない。これらを考慮すると、CsI を使うとき位置決定精度を最も良くする結晶の厚みは 5 mm となる。

一方、面積については大きいほど統計は良くなるものの、質量の制約と蛍光の減衰時定数に起因する入射レートの制約があるため、3600 mm² 程度が好ましいという結論に至った。ただし、結晶の縦横比には自由度があるため、最も光収集率の良い形状・読み出し面の調査を行った。我々は形状の異なる数種類の結晶とライトガイドの有無について、実際に測定を行い①光センサの受光面と同程度の面積の端面から、②ライトガイドを介さず直接センサを接着した場合に、最も光収集率が高くなることを確認した。この結果をふまえ、最終的に 120x30x5 mm³ の結晶を採用し一番小さな端面に 5mm 角 APD を 2 個直づけする方式を採用した。

(2) 読み出し回路の開発

本検出器は、計数情報のみを取り扱うため、分光性能を必要としないが、常温で 30keV 検出可能下限閾値と、10 kHz まで数え落とすことなく計数する応答特性が要求される。そこで我々は、分光測定用の電荷有感増幅器を高速化し、改造して使用することにした。リバー型の大面積 APD はきわめて暗電流が少ないため、温度制御が困難な環境下で有用であるが、1 素子あたりの静電容量が 80pF と大きいため、組み合わせるアンプの性能が SN 比に影響してしまう。本研究ではジョンソン雑音の容量勾配が特に小さな専用アンプを開発し、 $ENC = 5.1 + 0.017 \times C_{APD}$ (pF) keV (Si 等価, FWHM) の性能を達成した。これにより、常温において 30keV の検出を実現した (図 1)。また、前置増幅器に組み合わせる整形増幅器では時定数を 1 μ s と設定しており、明るい GRB のプロンプト放射 (およそ 10 kHz 程度) でも飽和することなく計数する事が可能となっている (図 2)。

(3) シールド・筐体設計

検出器を実際の衛星に搭載する場合、打ち上げの振動に耐える強度と、厳しい質量制限を両立しなければならない。また、そのうえで軌道上の荷電粒子バックグラウンドや、後方からの散乱 X 線を遮る放射線シールドも必要となる。

シンチレータ背面からの放射線を遮るシールドは、ガンマ線も荷電粒子も同時に遮断

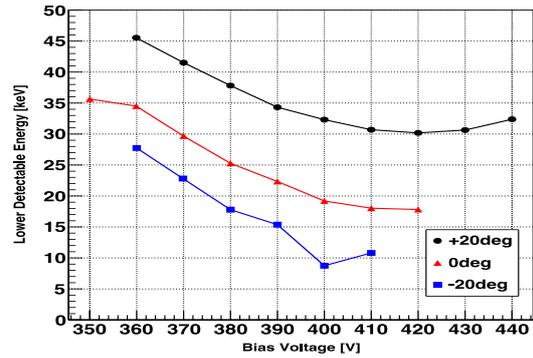


図 1 : WBM 試作機の検出下限閾値エネルギーと印加電圧

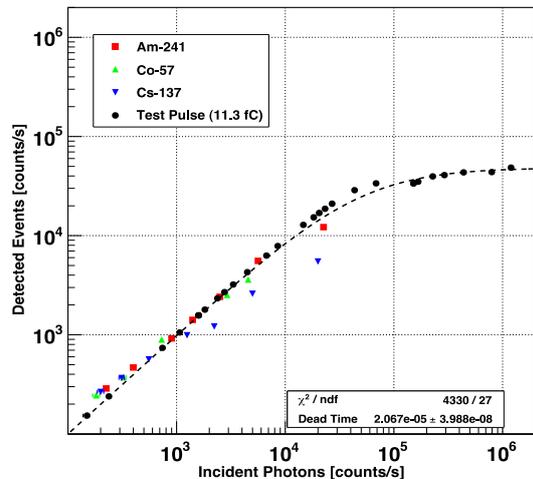


図 2 : WBM 試作機の高計数応答特性。データ系列はそれぞれ、黒=150keV 相当のテストパルス (ランダム)、赤=241Am、緑=57Co、青=137Cs のガンマ線に対応。測定環境は T=20°C、Gain=50、閾値 30keV。

できれば良いので、単純に密度の大きな素材を使えば良い。我々はさまざまな材料を検討した結果、比重が大きく加工性に優れた 1 mm 厚のタングステンシートを採用することにした。タングステンは単体での密度が鉛の約 2 倍あり、構造を薄くすることができ、さらにタングステンの K 吸収端は 69.5 keV であるため、WBM が最も感度を発揮するエネルギーレンジで鉛よりも効果的なシールド特性を期待できる。さらに、タングステン自身の蛍光 X 線を止めるため、スズ 0.5 mm、りん青銅 0.1 mm を重ねた “graded” シールドを採用した。

一方、受光面側では天体からのガンマ線は透過し、荷電粒子のみを遮断する必要があるため、光電吸収の少ない軽元素の方が都合が良い。このため、シンチレータを支持する筐体には、強靱で放射線耐性に優れたスーパーエンジニアリングプラスチック (PEEK) を採

用した。また、その外側には S-band 送信機等からの電磁干渉を避ける為に、金属製のシールドを設置する。

地磁気に束縛されている電子のエネルギーは、およそ 10 MeV 程度までであり、基本的にクーロン散乱により物質と相互作用すると考えて良い。このため、シールドの効果は「密度×厚み」に比例する。また、荷電粒子は高緯度の極冠にあるオーロラ帯と南大西大洋異常帯に集中して存在しており、太陽同期軌道への打ち上げを仮定した場合、周回ごとにオーロラ帯を通過しなければならない(図3)。面積 3600 mm² のセンサを用いた場合、単純な幾何計算を基に見積もると、反太陽側のパスで 80 % 以上の観測時間を確保するためには、荷電粒子バックグラウンドの漏れ込みを 1/100 程度に抑えなければならないことが分かった。

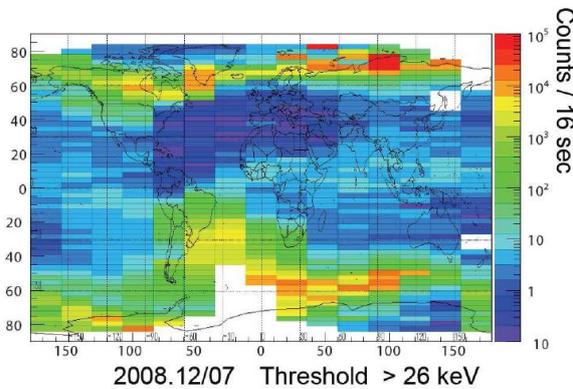


図 4：東工大の超小型衛星で観測した軌道上電子分布図

そこで我々は、これらの条件を満たす構造材の厚みを決定するため、モンテカルロ・シミュレーションを用いてさまざまな条件下で荷電粒子・光子の分光透過率を計算した。

図 4 (上) は、荷電粒子が WBM 入射した際に CsI にエネルギーが落とされる確率を示したものである。1 MeV 以下の電子は、飛程がシールドよりも短いため、直接シンチレータに入射することはないものの、励起されたプラスチックからの特性 X 線が漏れ込むと予想される。一方、1 MeV 以上になると入射電子がシンチレータに到達するようになるため、透過率は急激に増大する。シールドの厚さは、この立ち上がりのエネルギー閾値を決めており、前述の目標を達成するためには、アルミ・プラスチックの材質を問わず 3mm 以上の厚さを確保すれば良いと結論できる。

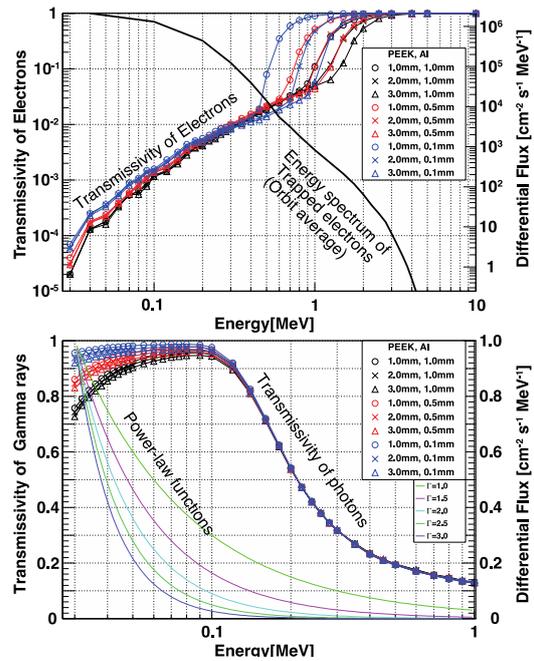


図 3：荷電粒子シールドの厚さの検討。上：電子の分光透過率（電子を入射した場合にシンチレータにエネルギーが落とされる確率。シールドからの蛍光 X 線も含む。）と軌道上電子のエネルギースペクトル。下：シールド+シンチレータのガンマ線光子の検出効率と GRB を模したべき関数。

一方、図 4(下) は WBM にガンマ線を照射したときに、結晶にエネルギーが落とされる確率を示したものである。100 keV 以上においてシールドの変化による検出効率の違いはほとんど見られない。GRB からの光子が最も多い 50 keV 以下のエネルギーバンドでは、電磁シールドとして用いるアルミの厚さによって、ガンマ線の透過率が大きく変化する。GRB の位置決定精度はほとんど 50 keV 以下の光子で決まってしまうため、アルミを出来るだけ薄くする事が重要となる。逆に樹脂の厚みではほとんど透過率が変動しない為、厚み 3mm 以上のプラスチックを用いても、位置決定精度が劣化することはないと考えられる。

最終的に、我々は上記の評価・考察を根拠として、樹脂厚 3 mm・電磁シールド厚 0.1mm の筐体を設計することにした。結晶形状・センサ取り付け方法・シールド支持を考慮に入れ、なおかつシステム要求である 1 個あたり 260 g の質量制限を満たす為、3次元 CAD を用いた詳細な構造設計を行った(図 5)。



図 6：エンジニアリングモデル管体（フライト時にはプラスチック部を電磁シールドで遮蔽）。シンチレータ支持部はスーパーエンジニアリングプラスチック製、ベースには肉抜きしたアルミニウム合金を使用し、シールド材を含めた質量を 260g 以下に抑えている。

(4) 位置決定アルゴリズムの開発

次に、WBM が実際の衛星上で GRB の位置決定ができるかどうかを検証した。これまで、単純な幾何計算による性能評価を行ってきたが、実際の環境ではガンマ線光子が衛星などの構造物により散乱されるため、その性能を解析的に見積もるのは困難である。そこで、衛星バス全体の詳細なジオメトリを考慮に入れて正確にモデリングを行い、レイトレースシミュレーションを実施した（図7）。その結果、衛星構体のパネル付近に設置した検出器において、隣接する構造物で光子が散乱されるため、カウントレートの分布に非対称性が生じる事が明らかになった

カウント情報からガンマ線源を再構築する方法として、我々は ①単純な幾何計算をベースとして、各検出器でのカウントレートをその受光面の法線方向を向いたベクトルとして合成する「重心法」と、②あらかじめレスポンス・マトリックスを準備して、実際の測定値をと比較する「レスポンス・マトリックス法」の2種類について評価を行った。その結果、3deg × 3deg グリッドのレスポンス・マトリックスを用いた計算と重心法による位置計算とでは有意な差は見られず、筐体散乱による光子数の非対称性よりも CXB による揺らぎが卓越するという結論が得られた。

我々が開発している検出器の制御装置は、演算能力・メモリサイズともに制限が厳しい為、レスポンス・マトリックスを用いる事がそもそも困難である。その上、性能的な優位性がほとんど見られないため、フライトモデルでは重心法をベースとした姿勢計算プログラムを開発することにした。図7に重心を用いた場合に期待される明るいGRBの位置決定精度を示す（偏光測定が可能な明るいGRB、発生頻度は2回/月程度を想定）。現時点では気散乱ガンマ線の寄与が入っていないが、CXB や荷電粒子バックグラウンドを考慮に入

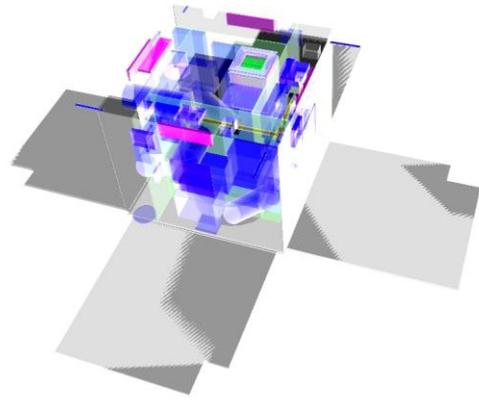


図 5：シミュレーションに用いた衛星バスを含むマスモデル。桃色で描かれている構造が WBM である。

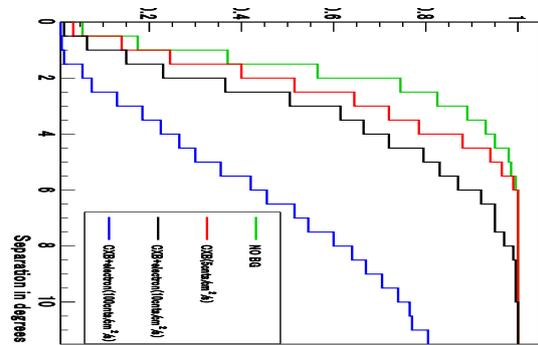


図 7：重心法で求めた、位置決定誤差分布図。横軸は GRB の到来方向と重心法で推定した方向との離角、縦軸は推定方向を中心として、予報円内に GRB が存在する確率を示す。

れても、約 90% の GRB に対して、位置決定誤差 5° 以内の精度で GRB の方向を決定出来る見込みである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① T. Toizumi, T. Enomoto, Y. Yatsu, et al.,
“Development of the small satellite
TSUBAME”, Physica E, 43, 685-688, 2011,
(査読有)

[学会発表] (計6件)

- ① 谷津陽一、榎本雄太、他、「超小型衛星搭載用ガンマ線バースト位置検出器の開発」、日本物理学会、2011年3月28日、新潟市
- ② 常世田和樹、谷津陽一、他「ガンマ線突発天体の位置決定手法に関する研究」、日本天文学会、2011年3月18日、つくば市
- ③ 川上孝介、谷津陽一、他、「超小型衛星TSUBAMEの開発搭載用広視野バーストモニタのシステム構築」、日本天文学会、2011年3月18日、つくば市
- ④ 榎本雄太、谷津陽一、他、「超小型衛星搭載用」日本物理学会、2010年9月11日、北九州市
- ⑤ 谷津陽一、他、「超小型硬 X 線偏光衛星に搭載する広視野バーストモニタの開発」、日本天文学会、2009年3月28日、東広島市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷津 陽一 (YATSU YOICHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40447545