

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：21740170

研究課題名(和文) ミニ衛星による突発ガンマ線観測の感度向上のための結晶シンチレータ検出器

研究課題名(英文) Development of new gamma-ray detector system based on inorganic scintillator aiming at mini-satellite application

研究代表者

中澤 知洋 (NAKAZAWA KAZUHIRO)

東京大学・大学院理学系研究科・講師

研究者番号：50342621

研究成果の概要(和文)：地球大気や深宇宙からの突発ガンマ線探査を、ミニ衛星でも効率よく実現できるように、高い検出効率を持つ BGO 結晶シンチレータに基づく、コンパクトな検出器システムの開発を進めた。BGO は MeV ガンマ線まで見える性能に優れるが、機械的に壊れやすいため、熱膨張率を調整した CFRP に基づく、新しい概念の支持構造を開発した。また小型／簡素な読み出しシステムの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：To be utilized as a high performance, small weight, low power MeV gamma-ray detector, a system made of BGO scintillator crystal, specially designed fixing structure based on CFRP, and compact read-out system utilizing FPGA was developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 ・ 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：衛星搭載、ガンマ線検出器、シンチレータ、複合材、光学観測

1. 研究開始当初の背景

地球大気からの突発ガンマ線や、マグネター天体からのガンマ線フレアは、1 秒以下の短時間に高輝度の MeV ガンマ線をもたらす。その放射起源の理解には、高い時間分解能に加え、スペクトルを数十 MeV まで捉えることが重要である。これらの現象は、装置の工夫次第では 100 kg 前後のミニ／小型衛星でも捉えることが可能で、比較的短期間に限られたコストでトップサイエンスの成果を出すことが可能な分野である。東北大学主導の 50 kg 衛星 SPRITE-Sat(雷神)は、まさにこの目的のために 2009 年初頭に打ち上げられた。我々の開発したガンマ線モニターは、CsI 結

晶シンチレータを 8 こ用い、重量 1 kg、電力 1 W と、極めて軽量、低消費電力でありながら、200-数 MeV 帯域を観測できる能力を持っていた。衛星の電力トラブルにより観測を実施できなかったが、この開発を通じて我々は、次世代の観測のために、同等規模で、数倍の観測性能を持つ、高性能な MeV ガンマ線のモニターの必要性を認識した。

2. 研究の目的

NaI や CsI に代表される無機結晶シンチレータは、ガンマ線に対する高い検出効率を持ち、有効面積 100 cm² 程度で MeV までの感度をもつ検出器を容易に構成できる。中でも

BGO シンチレータは、CsI シンチレータと比較して 300 keV で一桁高い検出効率をもち、数 10cm までの大型化も容易で、潮解性もなく管理が容易である。小型衛星に搭載するには、本来 CsI よりも高効率な BGO が望ましい。しかしその高密度(7.13 g/cm³)、高剛性(105 GPa)、機械的脆弱性(剪断強度 22 MPa)、そして小さな熱膨張率(7 ppm/K)のために、支持構造の設計が困難となる。SPRITE-sat ではこの点の開発リスクが大きかったため、感度は劣るものの比較的柔らかく、割れるリスクの少ない CsI を、敢えて採用せざるを得なかった。

この種の結晶の最も簡単な支持方法は、剛な主構造の中に柔構造で結晶を支持するものである。例えばアルミ箱の中にゴムなどの緩衝材を敷いて支持する方法があり、SPRITE-Sat のガンマ線検出器も同様の構造である。しかしこの場合、特に BGO のような重い結晶を支持するためには、全体の体積、重量の多くを支持構造に割く必要が出てくる。ミニ衛星において感度の良い検出器を実現するには、全重量に占める検出器重量をいかに増やすかが大切となるため、支持構造の簡略化は重要な要素となる。そこで我々は、熱膨張率を調整した CFRP 素材を用いて BGO を剛に固定する新しい手法を開発することとした。またこれに合わせて、簡素な回路で BGO からの蛍光信号を精度よく測定できる読み出しシステムのひな形も合わせて製作する。

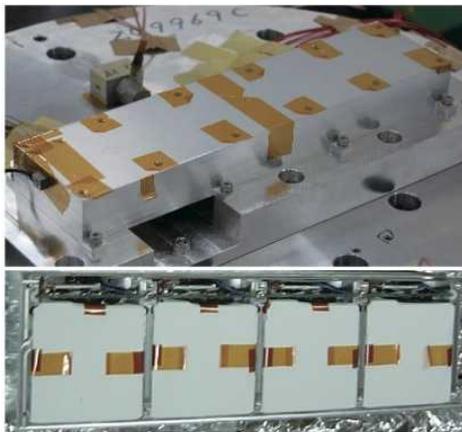


図 1 : SPRITE-Sat 衛星に搭載されたガンマ線モニター。5x5x1.5 cm³ の CsI シンチレータ 4 を雪崩増幅型フォトダイオード(APD)とそれに繋がれた電荷有感型アンプ(CSA)で読み出し、簡単な回路で時間変化を記録する。全体で重量 1 kg、電力 1 W という極めてコンパクトな検出器システムである。

ミニ衛星はその準備のリードタイムが極めて短い。このため、衛星計画が決まってから検出器デザインをすると、観測効率が少々悪くても、よりリスクの少ない方法を採用せ

ざるを得ない。一方で、MeV ガンマ線検出器では、観測感度を決定づけるのは検出器重量そのものなので、搭載する衛星やその重量配分が決まっていない段階で詳細設計を進めることは非効率である。このため、観測装置のカギ技術を事前に確立し、その概念設計をあらかじめおえておくことが重要である。

3. 研究の方法

本研究では、以下の 2 つの軸で装置の要素技術の確立と、実証実験を行った。

- BGO シンチレータの支持構造の開発：コンパクトかつ軽量で、ロケットの打ち上げ環境や衛星の熱環境に耐える支持構造を開発
- コンパクトかつ簡素な読み出しシステムの試験：1 cm 四方、厚さ 3-4 mm で、400 V で動作する、小型、軽量、低バイアス電圧の電子雪崩型フォトダイオード(APD)を用いて信号を読み出す。回路系も極力簡素化し、必要最低限のアナログ回路から直ちに ADC と FPGA でパッケージ化して記録できるシステムとする。多チャンネル読み出しとし、システムの拡張性を確保する。

4. 研究成果

4-1 : BGO シンチレータの支持構造の開発

BGO 結晶シンチレータを容易にハンドルできる新しい支持構造の開発をおこなった。支持構造には、剛性と強度に優れ、熱膨張率がアルミよりも BGO に近い、CFRP を基本とする。我々はこの研究のために、複合材構造メーカーとともに、炭素繊維とガラス繊維を適切に配合することで、強度、剛性を損なうことなく、必要な軸方向の熱膨張率を 5.8 ppm まで大きくできることを実証した (CFGF 複合材：特許 2009-101259 参照)。これにより BGO をこの支持構造に剛に接着しても熱ひずみで破壊されることはなくなった。柔構造なしでも BGO を支持できる手法を入手したことは、検出器のデザインの上で大きな自由度をもたらす。

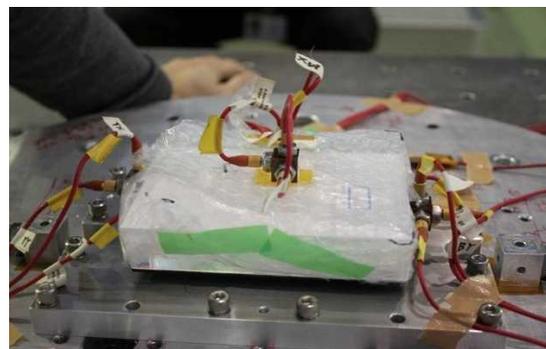


図 2 : CFGF 複合材に接着された、20cm 長さ、3.3cm 厚さ、重量 5.3 kg の大型 BGO シンチレータの振動試験の様子。H-IIA ロケット対応の振動レベルに耐えることを実証した。

この支持構造は、単体であれば +40C〜-30C の熱サイクルにも耐えることが実証されている。ただし、反射材塗料に直接 CFGF 構造を接着するために、蛍光の収集効率がやや劣り、ESR や GoreTex を用いた地上で標準的な測定方法と比較して、2-3 割ほど光量が暗い。この改良が今後の課題である。

4-2 : コンパクトかつ簡素な読み出しシステムの試験

シンチレータの発する蛍光を検出する光デバイスとして、数 cm 立方と大柄で 1000 V もの高電圧を必要とする光電子増倍管(PMT)ではなく、小型の APD を用いる。具体的には、HPK 社 S8664-1010 APD を用いて、これを Charge Sensitive Amp. (CSA) とアナログ波形成形器で信号増幅し、 \sim MHz サンプルの比較的に低速なデジタル波形処理システムで読み出すシステムを試作した。概念実証を重視し、簡単のために、CSA は既存のもの(CP5505)を用い、アナログ波形成形器、および ADC ボードも既開発のものを流用している。

この種のデジタル波形処理技術では、通常は初段の CSA の直後に高速の ADC を配置し、精緻な波形処理を行う。しかし、ここでは消費電力を減らすことを目指し、敢えて波形成型器を通すことで、ADC のサンプル速度が低くても、高い性能を得られるようにしている。また、アナログのコンパレータとピークホルダーを用いる旧来の方式と比較して、基板面積を削減できる。この装置の基本概念は過去に実証されており (Yuasa et al. IEEE Nuclear Science Symposium, Dresden, Germany, 19-25 October, 2008)、今回は、実際に BGO を読み出す作業、および 3 個以上の多チャンネルを動作する実証を行った。



図 3 : 5 チャンネルの BGO 結晶を APD で読み出したシステムを恒温槽に納めた写真。ここには、検出器を納めた構造体と 4 チャンネル CSA 2 台が写っている。波形成型器と ADC ボードは恒温槽の外に設置した。

アナログの回路構成などは本来、SPRITE-Sat で用いた、8-30mm 規模の小型 CSA

と、5x5 cm² 規模のコンパクトなアナログ波形成形基板を元に、よりフライトを意識した実験とする予定であった。しかし、構造開発の方でコストとスケジュールが超過したため、こちらの読み出しシステムの開発では、既存の装置を流用した実験のみを行った。システムは正しく動作し、5 個の BGO シンチレータからの信号をバケットに納め、これを PC で問題なく読み出すことができた。

4-3 : 将来への課題

構造開発では中型衛星の基準での機械衝撃および熱環境に対する耐性が確認できた。しかし、ミニ衛星への搭載へ向けて、2 つの課題が残された。一つは、熱ひずみのさらなる緩和である。本研究で開発した構造は、熱膨張率をあわせた CFGF 複合材に、反射塗料を経由して BGO 結晶を剛に接着しており、中型衛星の代表的な条件下では成功を収めた。しかし、ミニ衛星は熱計装に割く重量も少なく表面積に対する熱容量も小さいため、時に 1 時間で 40C もの温度変化がある。これは中型衛星の数倍のレートである。このような境界条件でも絶対に破損しない構造が理想であるが、今回の設計ではそこまでは達成できていない。接着材を弾性接着剤で、かつ十分な接着強度と、衛星搭載に耐えるアウトガス特性をもつものに変更することで、構造の中にやや柔な構造をうまく挟むなど、もう一工夫が求められる。

もう一つは、BGO の蛍光の収集効率である。接着面には蛍光を反射する塗料を用いることで光収集効率の低下は押さえられているが、大型の BGO 結晶を小面積の APD で読む場合には、蛍光は結晶内を多数回反射してから APD で検出されるため、反射材の微妙な反射率の違いが大きな影響を及ぼす。今回の設計では、最良の反射材利用時と比較して、おおよそ 2 割の光を失うことが分かった。これは大きな問題ではないものの、改善が余地がある。

読み出しシステムについては、特に、多チャンネルで実際に動作させ、良好な結果を得た。しかし、低消費電力で、いつでも衛星搭載できる処理回路を最終的に開発できた訳ではない。SPRITE-sat の成果もあわせると、残された課題は、低消費電力の ADC と FPGA を組み合わせた読み出し回路を実際に試作すること、電源およびそのフィルター回路も試作し、検出器全体のグラウンド、ノイズ対策などを含めて end-to-end での動作実証、性能実証をすることである。

4-4 : まとめと今後の展開

いくつかの課題は残るものの、ミニ衛星用の MeV ガンマ線検出器を搭載する提案をする機会が訪れた場合の技術的な見通しが、以下

のように拓けた。

- ・ BGO を用いることで検出効率を上げること
- ・ BGO の支持には、熱膨張率を調整した CFGF 複合材を用いること（今後の課題として、可能であれば弾性接着剤などを挟む）
- ・ APD を用いて読み出すこと
- ・ その読み出しは、アナログ／デジタル波形処理を組み合わせて、コンパクトかつ低消費電力にすること

雷からの地球由来ガンマ線の観測では、フランスの TARANIS 衛星が間もなく打ち上げられる予定であり、SPRITE-sat のサイエンスの大部分はこの計画に引き継がれている。しかし今後 10 年間を見据えると、SGR 天体からの突発ガンマ線の研究、TARANIS の結果を受けた地球ガンマ線の次世代観測など、中型、大型の将来衛星が計画されず、ミニ衛星でも可能なサイエンスが存在する。これらの動向を見ながら、将来計画を検討中である。

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 0 件）

〔学会発表〕（計 4 件）

- ① 中島 健太, ” ASTRO-H 衛星硬 X 線・軟ガンマ線検出器アクティブシールドの構造設計”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 27 日 (WEB 上のみ。見なし発表)
- ② 鳥井 俊輔, ” 硬 X 線撮像検出器 HXI に向けたアクティブシールド機能の最適化”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 27 日 (WEB 上のみ。見なし発表)
- ③ 中島 健太, ” ASTRO-H 衛星硬 X 線・軟ガンマ線検出器アクティブシールドの開発 (II): 機構開発”, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 20 日, 岡山大学
- ④ 西岡 博之, ” 結晶シンチレータの蛍光伝搬シミュレータの開発”, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 20 日, 岡山大学

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況（計 1 件）

名称: 複合繊維化プラスチック及び補強パネル

発明者: 中澤 知洋、上田 聡

権利者: 同上

種類: 特願

番号: 2009-101259

取得年月日: 平成 21 年 4 月 17 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中澤 知洋 (NAKAZAWA KAZUHIRO)

東京大学・大学院理学系研究科・講師

研究者番号: 50342621