

修士論文要旨

超小型衛星 TSUBAME 搭載用 γ 線バースト検出器 フライトモデルの開発

東京工業大学大学院 理工学研究科 基礎物理学専攻
常世田 和樹

2013年2月28日

1 はじめに

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst; GRB) とは、宇宙のある一点から爆発的にガンマ線や X 線が放出される現象であり、銀河系の星すべてが 1 年間に放出するエネルギーと同程度のエネルギーを一瞬で放出する、全天で最も大きなスケールの規模の爆発現象である。この現象の発生頻度は 1 日 1 回程度であるが、継続時間がミリ秒 \sim 100 秒程度と短く、発生位置も不確定であることが我々の理解を妨げていた。

GRB の放射機構として最も有力なファイアーボールモデルでは、何らかの要因で相対論的ジェットが生成され、ジェット内部の加速された電子による強いシンクロトロン放射が、特殊相対論的効果で強められることで GRB として観測されると考えられている。しかし、このジェットがどのように作られているかや、どのように粒子が加速されるのかについてはほとんど理解されていない。このような GRB の放射機構を解明する鍵となるのが偏光観測である。シンクロトロン放射によって生成された光子は天体周りの磁場構造を反映した偏光を持つため、もし偏光を観測できたならば GRB の生成機構にきわめて重大な制限を与えることができる。

GRB の偏光観測は過去に数例存在するが、それらの結果は信憑性に乏しく、有意な偏光観測がなされていないという問題がある。また、最近の成果では、JAXA の打ち上げた小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS に搭載された GAP という偏光検出器で GRB を数例観測していて、偏光を検出したという報告がされている。しかし GAP の運用は現在終了しているため、さらなる観測が求められている。また、GAP 検出器は、光子が検出器の光軸に対して斜めに入射した場合、偏光検出能力が低下するという問題もある。

そこで我々は、GRB のエネルギー輸送・放射機構を解明するために、GRB の硬 X 線偏光観測を行う超小型衛星 TSUBAME(図 1, 図 2) の開発を行なっている。小型衛星は、様々な技術を結集した大型衛星とは異なり、2 \sim 3 年という短い期間、かつ低コストで開発を行うことができ、さらにピギーバック衛星として打ち上げることで、大型衛星に比べて多くの打ち上げ機会を得ることが可能となってくる。したがって、最先端技術の軌道上実証を率先して行うことができ、そうした技術を大型衛星にフィードバックすることによって、宇宙工学や宇宙物理学の発展につなげることができる。

TSUBAME には、GRB の検知・位置決定を行う広視野バーストモニタ (WBM) と硬 X 線偏光計 (HXCP) の 2 種類の検出器 (図 3) を搭載し、高速姿勢制御を用いて GRB の検知後 15 秒以内での偏光観測開始を目指す。超小型衛星であるため本衛星に大きな検出器を載せることはできないが、GRB は瞬間的には極めて明るいため、小型の検出器でも目的によっては十分に精度の高い観測が実現できる。バースト発生直後から偏光観測を開始できれば、バーストが終わるまでに十分な光子数を得られると期待される。

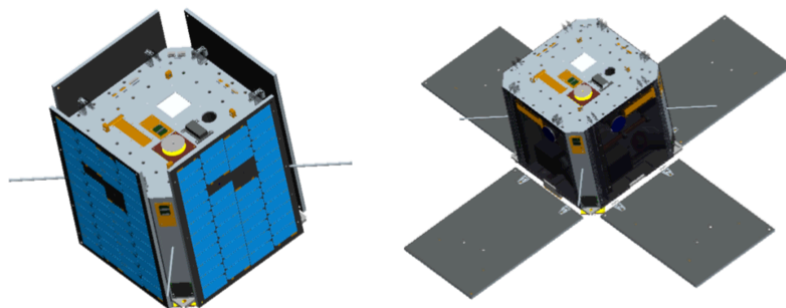


図 1 超小型衛星 Tsubame の CAD 図。左：パドル展開前 右：パドル展開後

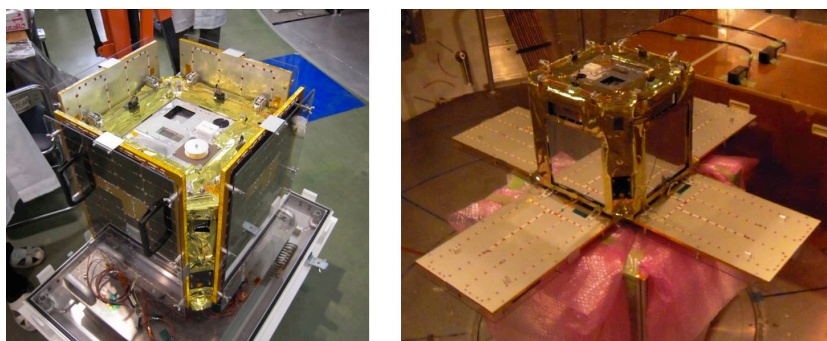


図 2 超小型衛星 Tsubame の写真。左：パドル展開前 右：パドル展開後

2 本研究の目的

2004 年の概念設計からスタートした Tsubame フライトモデル開発を目的として、実際に宇宙で動作する処理系と偏光計のハードウェア設計、ロジック及び制御ソフトウェア開発を行った。

宇宙機は地上システムとは異なり、電力やサイズ、テレメトリなどに厳しい制約がある。フライトモデル開発にあたっては、衛星システム側と綿密に調整を行い、全ての条件を完璧にクリアしなければならない。本論文では、これらを念頭に置いて行ったガンマ線観測系のシステム設計について説明する。また、偏光計の性能評価実験や、宇宙環境を想定した様々な環境試験を実施しており、その結果の解析と考察も行う。性能評価実験においては geant4 を用いたシミュレーションも行なって性能を評価した。

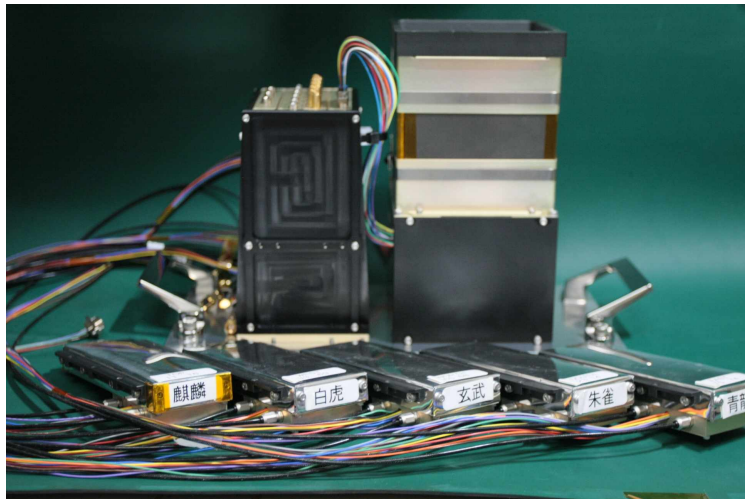


図3 検出器の写真。中央左が検出器の処理基板が搭載されている回路ボックスで、中央右が偏光計、下の5つが広視野バーストモニタである。

3 ガンマ線観測系の CPU 部の開発

ガンマ線観測系は GRB の検知・位置決定と、偏光の観測を行う系である。天球上のランダムな位置で発生し短時間しか続かない GRB を捉えるために、最初の 2 秒間で検知・位置決定を行い、姿勢制御に必要な情報を衛星バス部に送る機能をもつ。また、ゲインを一定に保つための電圧制御や、観測データの整形・転送も行う。民生品を多用している為に、宇宙線によるメモリセルのビット反転や、CMOS デバイスのラッチアップ等、考えられうる全てのトラブルに柔軟に対応できるように設計した。さらに、想定しきれない事態にも対応できる可能性を上げるために、制御プログラムの機上書き換え機能を実装した。このように開発した制御システムは、衛星バスとの複数回に渡るシーケンス試験を経て、中心的な機能の正常動作を確認した。

4 偏光計の開発

偏光計の開発では、エンジニアリングモデル開発時に存在していた、トリガーレート異常、ADC 値の時間変動といった、複数の致命的な問題点を解決し、回路等のパラメータを最適化することで最大性能を引き出した。

その結果、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) での偏光 X 線ビームを用いた性能評価試験において、検出器の目標性能である 30 keV での偏光検出 (図 5) を達成し、実際に機上に搭載されるガンマ線観測系フルセットでの動作が確認された。光子が 10 kHz で入射するような非常に明るい場合でも対応可能であり、そのときの数え落としは 23%、デッドタイムは 156 μ s と、ほぼ設計通りの値が得られた (図 6)。さらに、光子が偏光計の光軸に対して 30° 傾いて入射した場合でも変調を検出することができた (図 7)。これは先に紹介した GAP 検出器と異なり、本偏光計は GRB に対して斜めに傾いて観測しても十分な偏光検出能力を持つことを示していて、いつどこで発生するか分からない GRB に対しては非常に有利な点となる。

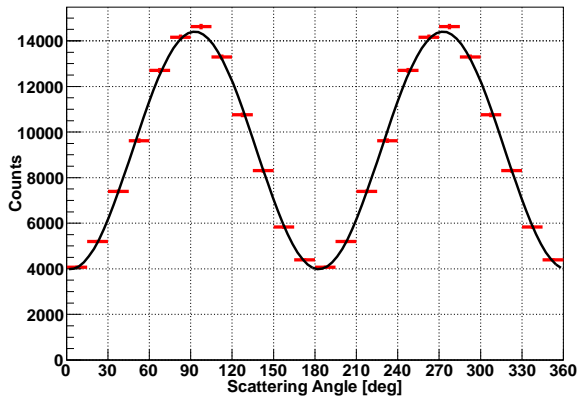


図4 散乱方位角分布 (80 keV, 垂直入射)。横軸は、どの方向に散乱されたかという散乱方位角で、縦軸は計数である。散乱方向による計数の変調を検出できていることがわかり、これは偏光を検出できたことを意味する。

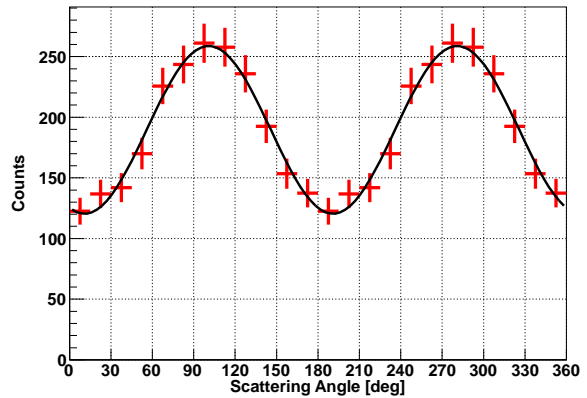


図5 散乱方位角分布 (30 keV, 垂直入射)。光子のエネルギーが 30 keV の場合でも同様に変調を検出できた。

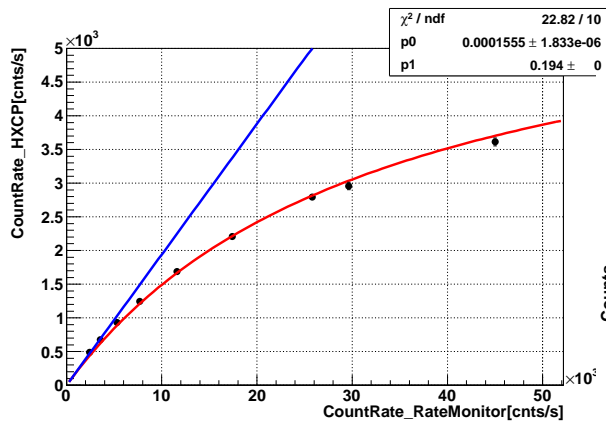


図6 偏光計計数率のビーム強度依存性。横軸はレートモニターで測定した計数率で、縦軸は偏光計のコインシデンスモードで測定した計数率である。青線はシミュレーションで求めた直線である。黒点が測定値で、non-extended のデッドタイムモデルの関数でフィッティングを行なっている (赤線)。デッドタイムは $156\mu\text{s}$ と求まった。

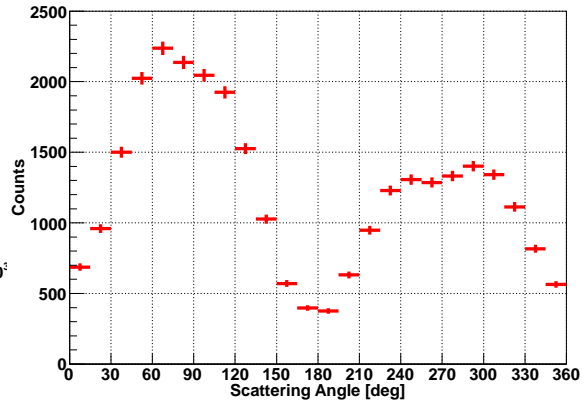


図7 斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, 斜め入射角 $\theta = 30^\circ$)。斜め 30° から光子が入射した場合でもはっきりと変調を検出できていることがわかる。

5 各種環境試験

各種環境試験では、ロケットの振動、宇宙空間の放射線や熱真空、衛星内の磁気・電波干渉にさらされる過酷な環境においても検出器が問題なく動作するか試験した。当初の設計そのままでは不十分であることが分かったが、例えば振動に対しては固定や接着方法を改修する、放射線は部品のスクリーニングをする、磁気・電波はシールドを取り付けるといった対策を施すことで全試験において正常動作を確認した。