

# 硬 X 線偏光観測衛星 TSUBAME の開発

東京工業大学 基礎物理学専攻 河合研究室

修士 1 年 榎本雄太

川上孝介、常世田和樹、戸泉貴裕、谷津陽一、河合誠之(東工大理)、  
松永三郎(東工大工)、片岡淳、中森健之(早稲田大)、久保信(クリアパルス)

## 1. 概要

ガンマ線バースト (GRB) は、突発的に発生する宇宙最大の爆発現象である。現在、GRB の初期放射の偏光観測によって、天体周辺の磁場情報や高エネルギー光子の放射過程の手がかりが得られると考えられている。東工大理学系河合研究室では、工学系松永研究室と共同で、偏光観測衛星 TSUBAME の開発を進めている。TSUBAME には GRB を検知し発生位置決定を行う広視野バーストモニタ(WBM)と、GRB 初期放射の硬 X 線領域(30~100 keV)において偏光観測を行う硬 X 線偏光計(HXCP)を搭載する。TSUBAME では、超小型衛星である利点を活かした高速姿勢制御によって、GRB 発生から 15 秒以内での観測開始を目指している。本発表では、TSUBAME ミッションの概要と、硬 X 線偏光計およびバーストモニタの開発状況について述べる。

## 2. 偏光観測衛星 TSUBAME

### 2-1. 東工大小型衛星開発プロジェクト

東京工業大学工学系機械宇宙システム専攻松永研究室では、2002 年度から Cute Project と呼ばれる小型衛星開発が行われている。小型衛星は、大型衛星と比べて、短期かつ低予算での開発が可能で、新技術の積極的採用が可能であるなど、多くの利点を持つ。松永研究室では、現在までに 3 機の小型衛星の打ち上げに成功しており、そのうち 1 号機 Cute-I と 3 号機 Cute1.7+APD II は現在でも運用されるという素晴らしい成果を上げている。2 号機である Cute-1.7+APD からは、我々理学系基礎物理学専攻河合研究室が加わり、理工学共同で衛星開発が行われてきた。

### 2-2. 硬 X 線偏光観測衛星 TSUBAME

現在、Cute-1.7+APD II に続く小型衛星として、硬 X 線偏光観測衛星「TSUBAME」を理工学、およびその他の参画機関と共同で開発を行っている。本衛星には、コントロールモーメントジャイロ(CMG)を搭載し、小型衛星の利点を活かした高速姿勢制御と、それによる高度な観測ミッションの実現を目指す。以下に、TSUBAME のイメージ図と目標性能を挙げる。

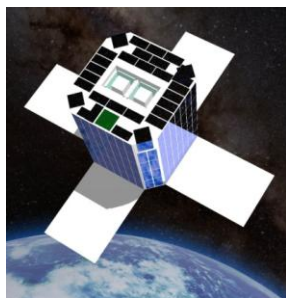


図 1 Tsubame イメージ

|        |                              |
|--------|------------------------------|
| 打ち上げ   | 2012 年以降                     |
| サイズ    | 50 × 50 × 50 cm <sup>3</sup> |
| 重量     | 50 kg                        |
| 稼働期間   | ～1 年                         |
| 姿勢制御手段 | Control Moment Gyro (CMG)    |
| 姿勢制御速度 | 90 deg / 15 秒                |

表 1 Tsubame 目標性能

### 2-3. Tsubame 理学ミッション

河合研究室は、Tsubame の理学ミッションとして、高エネルギー天体、特にガンマ線バースト(GRB) から放射される硬 X 線(30～200 keV) の偏光観測を行う。本衛星には、バーストを検知し天体位置を特定するための広視野バーストモニタ(WBM) を 5 台、硬 X 線領域での偏光観測を行う偏光検出器(HXCP)を 2 台搭載する。衛星壁面 5 面に設置された WBM は硬 X 線のカウントレートの変化を観察しており、入射光子の急激な増加を検知するとバースト発生を判定する。さらに、各 WBM 間のカウント数の違いから、光子の到来方向を計算する。その後、CMG を利用した高速姿勢制御により偏光計を到来方向に向け、バースト検知から 15 秒以内での観測開始を目指す。

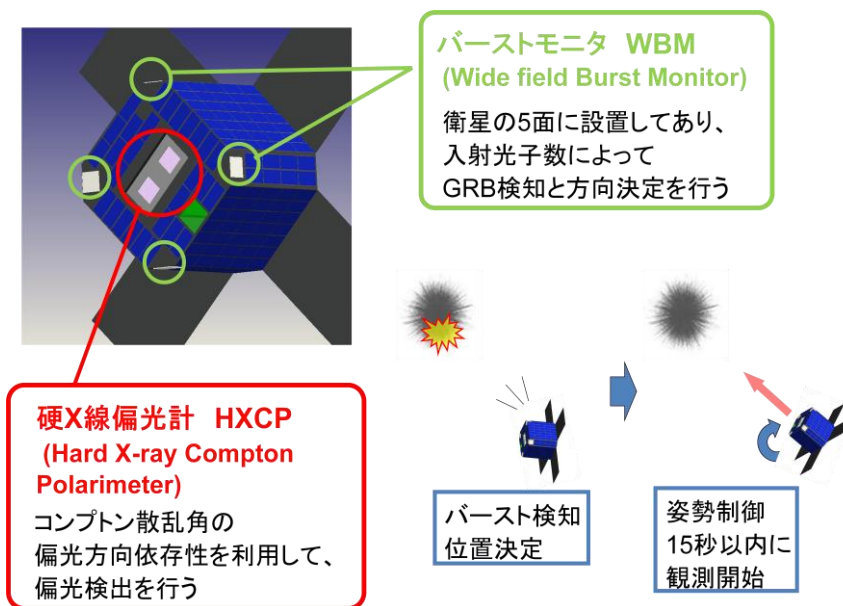


図 2 GRB 偏光観測ミッション

## 3. 硬 X 線偏光計(Hard X-ray Compton Polarimeter : HXCP)

### 3-1. 検出器構成

Tsubame 衛星搭載用偏光計は、光子がコンプトン散乱をする際の散乱方向が、光子の偏光方向に依存するという散乱異方性を利用したコンプトン散乱型偏光計である。光子はコンプトン散乱する際に、光子の偏光方向に対して垂直方向に散乱されやすいという性質を持つ(図 3 左)。そのため、GRB 初期放射由来の多数の硬 X 線に対し散乱方向の分布を取得すれば、GRB 初期放射における光子の偏光方向と偏光度が求められる。

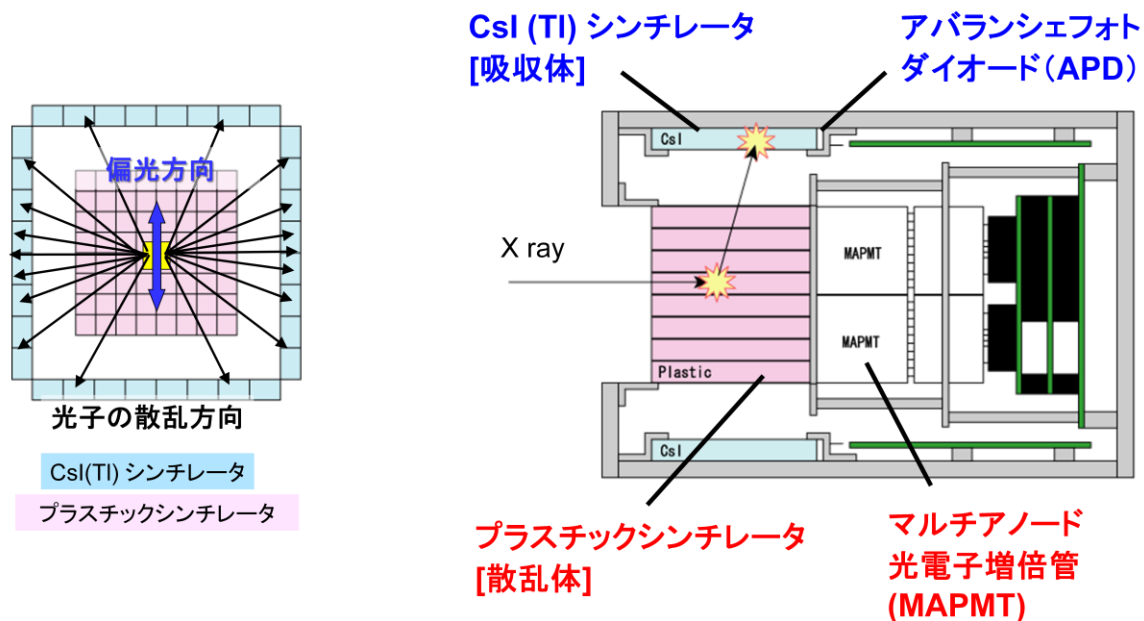


図 3 コンプトン異方性と、検出器構成

TSUBAME 搭載用の散乱型偏光計は、X 線をコンプトン散乱させて散乱位置を検出する散乱体と、散乱した X 線を光電吸収させて散乱方向を検出する吸収体から成る(図 3 右)。入射口から入射してきた X 線は、検出器中心の散乱体でコンプトン散乱し、散乱体を取り囲む吸収体で光電吸収される。散乱体はプラスチックシンチレータとマルチアノード光電子増倍管(MAPMT)で構成される。また、吸収体には CsI(Tl)シンチレータとアバランシェフォトダイオード(APD)を用いる。これらのシンチレーション検出器を用いて、光子の散乱位置と吸収位置を検出し、光子の散乱方位角分布を得る。これら 2 つの検出器のコインシデンスイベントを取得することで、コンプトン散乱イベントのみが取得できる。表 2 に、現在の予想性能を示す。

|                                                       |                              |
|-------------------------------------------------------|------------------------------|
| 検出エネルギー領域                                             | 30 – 100 keV                 |
| 視野                                                    | 15 deg <sup>2</sup>          |
| 有効面積                                                  | 7 cm <sup>2</sup> (@100 keV) |
| モジュレーションファクター(MF)<br>(検出器に一様照射時)                      | 47.8%                        |
| MDP(Minimum Detectable<br>Polarization) (3 $\sigma$ ) | 6.2 % (GRB011206 想定)         |

表 2 HXCP 現状の予想性能

### 3-2. 偏光計プロトタイプの開発

昨年、河合研究室では偏光計のプロトタイプを製作し、高エネルギー加速器研究機構のフotonファクトリーにおいて、偏光 X 線ビームを用いた性能評価試験を行った。試験では、82.5 keV の偏光 X 線を偏光計に入射し、光子の散乱方向の分布を取得、それを用いて、偏光検出性能を示す値であるモジュレーションファクター(MF)を求めた。これにより、現状の検出器構成で偏光検出が可能であること、さらに、その性能が事前のシミュレーション

ンによる予想性能と誤差の範囲内で一致することが確かめられた(図 4)。

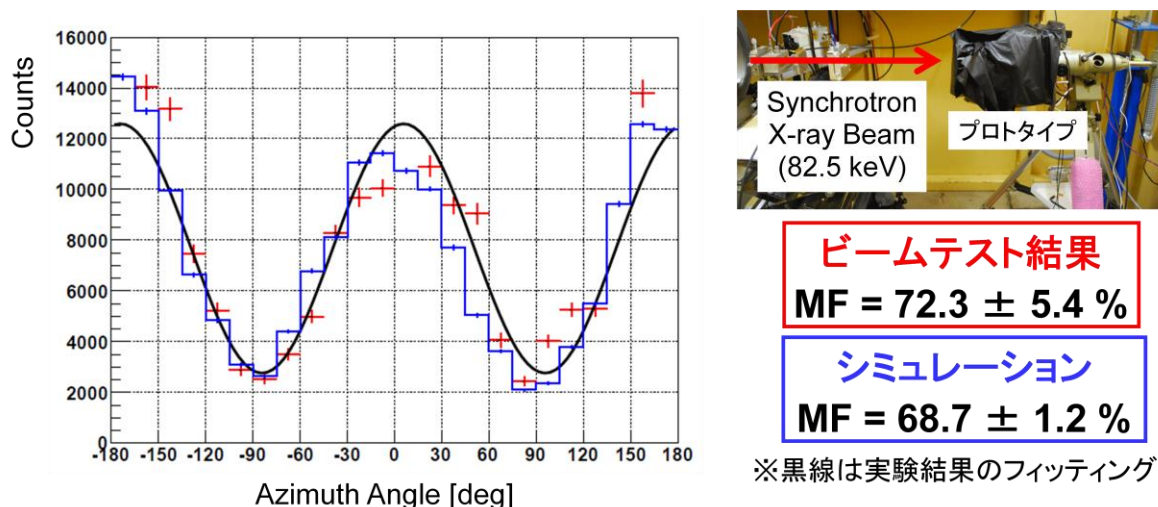


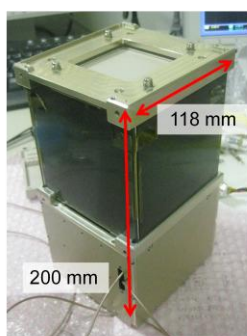
図 4 プロトタイプ偏光計 性能評価試験結果

今回の実験では、ビームの偏光方向に対して、垂直な方向を 0 deg と定義した。すると、光子の散乱方向は、0、180 deg(偏光方向に垂直)方向に大きく偏っており、コンプトン散乱を用いた偏光検出の結果が見てとれる。また、得られた分布をサインカーブでフィットすると、MF が求まり、これはシミュレーションの結果と一致する。

### 3-3. 偏光計エンジニアリングモデルの開発

現在、我々は偏光計のエンジニアリングモデル(EM)の開発を行っている。EM では、プロトタイプ的设计を活かして、組み立てなどで不便だった点を改善し、読み出し基板の改修によって性能向上を狙っている。また、宇宙環境でのバックグラウンド対策として、鉛、タングステン、錫によるパッシブシールドを搭載しつつも、衛星搭載に向けた小型化・軽量化を目指して設計を行っている。

#### HXCP エンジニアリングモデル



- ・パッシブシールド (W, Sn, Cu) を搭載
- ・APD用高性能VLSIを採用し、S / Nの大幅改善
- ・軽量化 (~4 kg / 1 HXCP)

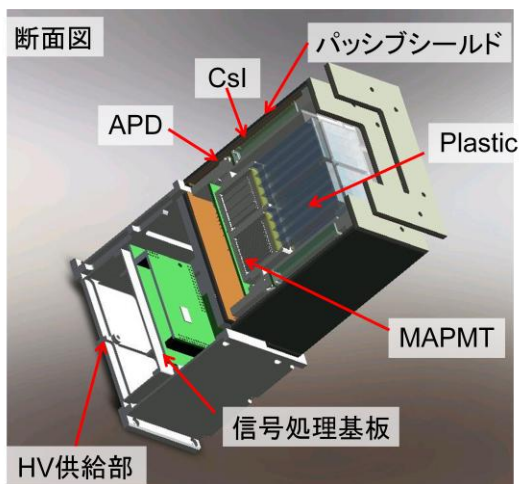


図 5 偏光計 EM

## 4. 広視野バーストモニタ(Wide-field Burst Monitor : WBM)

### 4-1. バーストモニタ概要

広視野バーストモニタ(WBM)は、 $120 \times 30 \times 5 \text{ mm}^3$  の CsI(Tl)シンチレータと、APD を組み合わせたシンチレーション検出器である。細長く平たいシンチレータの短辺にライトガイドを取りつけ、シンチレーション光を APD に引き込む。また、裏面には偏光計と同様のパッシブシールドを搭載し、GRB イベント以外のバックグラウンドをなるべく落とすような構造になっている。

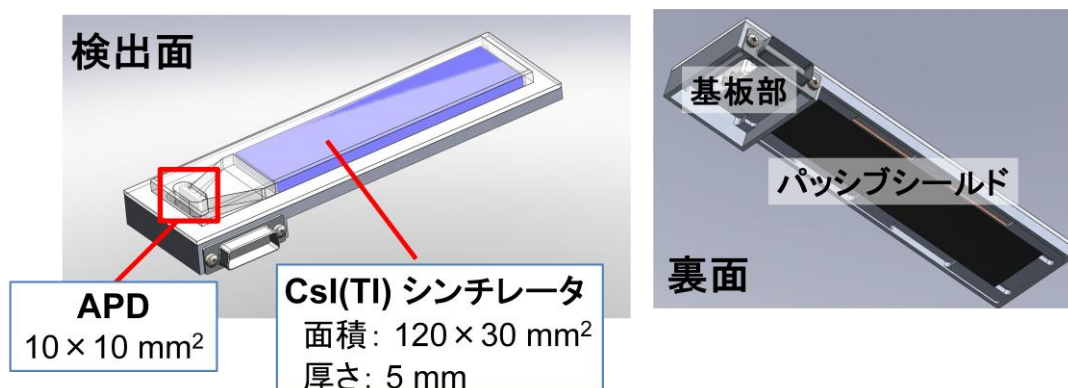


図 6 WBM 構造

TSUBAME では、この検出器を衛星壁面 1 面につき 1 個、合計 5 個搭載する。これにより、 $2\pi$  の視野を監視することができる。GRB が発生すると、カウントレートの上昇を検知して、衛星全体にアラートを出す。さらに、GRB の到来方向によって各検出器間のカウントレートに差が生じる。そのため、5 個の検出器のカウントレートの比を利用して、重心法によって到来方向を決定する(図 7)。表 3 に、WBM の目標性能を記す。

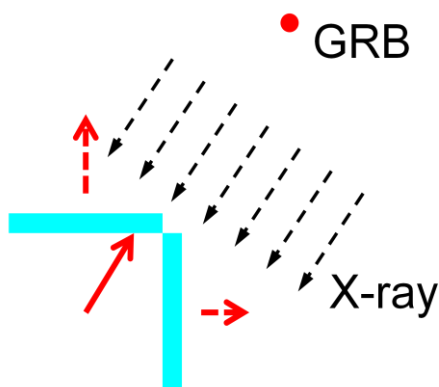


図 7 GRB 方向決定方法の模式図

上図のように、GRB からの X 線がほぼ一様に衛星に入射した場合、上の WBM のカウントレートは大きく、右の WBM のカウントレートは小さくなる。すると、WBM の法線ベクトル(赤点線)の重心を、カウントレートの比を使って求めると、GRB の到来方向(赤実線)が決定できる。

|             |                   |
|-------------|-------------------|
| 測定可能カウントレート | $\geq 10$ kHz     |
| 最小検出可能エネルギー | 30 keV (at 20 °C) |
| 位置決定精度      | <15 deg           |
| 重量          | 260 g             |

表 3 WBM 目標性能

#### 4-2. WBM 開発状況

昨年度、我々は WBM のプロトタイプを開発した。プロトタイプでは、シンチレータと APD は同一のサイズのものを使用し、試作した回路基板を使って信号読み出しを行った。その結果、常温で 30 keV の検出に成功した。また、目標である 10 kHz 以上のカウントレートが計測可能であることも確認した。

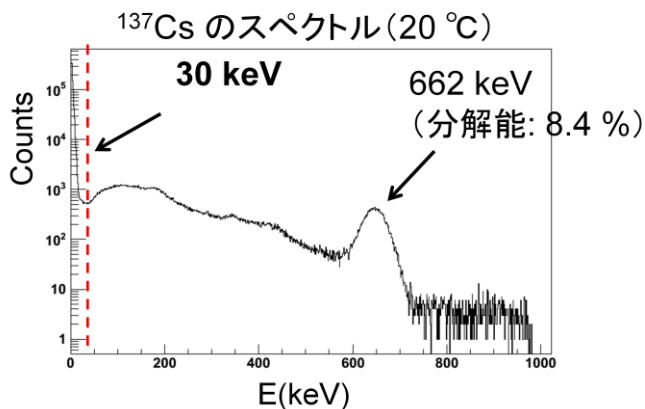


図 8

WBM プロトタイプによる  $^{137}\text{Cs}$  のスペクトル  
ノイズ閾値が 30keV 程度であることが確認できる。

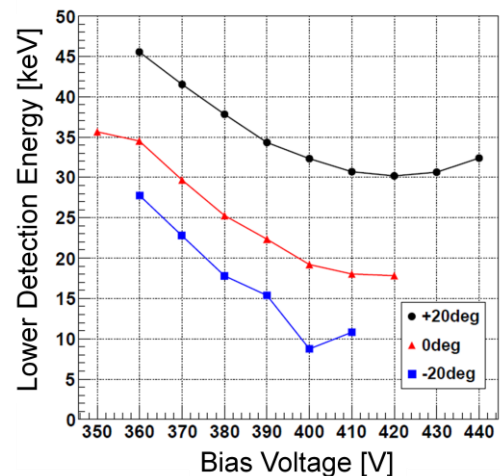


図 9

WBM プロトタイプの最小検出エネルギー

現在、WBM もエンジニアリングモデル(EM)を開発中である。EM では、衛星搭載に向けた筐体进行設計し、信号回路の小型化も行った。また、偏光計と同様にパッシブシールドを搭載している。

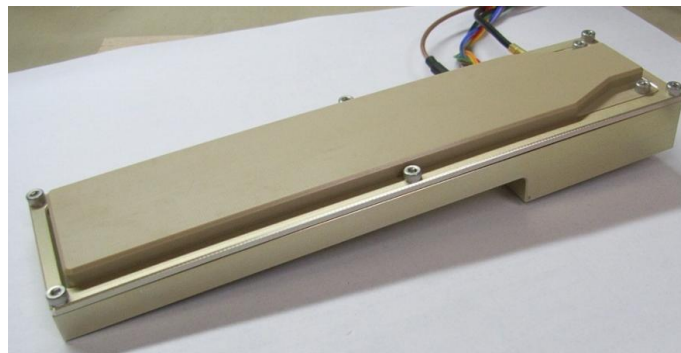


図 10 WBM エンジニアリングモデル

## 5. まとめ

現在、東工大理学系河合研究室、および工学系松永研究室は、ガンマ線バースト(GRB)初期放射における硬 X 線偏光観測を行うために、偏光観測衛星 TSUBAME の開発を行っている。TSUBAME には、バーストを検知、位置決定を行う広視野バーストモニタ(WBM)と、硬 X 線偏光観測を行うための散乱型偏光計(HXCP)を搭載し、超小型衛星である利点を活かした高速姿勢制御によって、GRB 発生後 15 秒以内での観測開始を目指している。

昨年度、我々は両検出器のプロトタイプを製作し、性能評価試験を行った。偏光計は、現行設計で偏光が検出できることを確認し、その偏光検出性能がシミュレーションと一致することがわかった。また、バーストモニタは、目標であった常温での 30 keV 検出と、10 kHz 以上のカウントレートでの計測が可能だとわかった。

これらのプロトタイプ製作、および性能評価試験の結果を受けて、現在は両検出器ともに本格的な衛星搭載に向けて、エンジニアリングモデルの開発を行っている。