

# $\gamma$ 線突発天体の位置決定手法に関する研究

常世田 和樹

卒業論文

東京工業大学 理学部 物理学科

2011年 2月

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	ガンマ線バースト (GRB)	1
1.2	硬 X 線偏光観測衛星 TSUBAME	2
1.3	本論文の目的	2
<b>第2章</b>	<b>広視野バーストモニタ (WBM)</b>	<b>4</b>
2.1	要求仕様	4
2.1.1	仕様根拠	5
2.2	WBM の構成	5
2.3	検出方法	6
2.4	位置決定方法	7
<b>第3章</b>	<b>WBM の要素設計</b>	<b>9</b>
3.1	形状の評価	10
3.1.1	評価方法	12
3.1.2	結果	13
3.1.3	考察	15
3.2	配置の評価	16
3.2.1	評価方法	16
3.2.2	結果	17
3.2.3	考察	19
3.3	シールドの評価	19
3.3.1	評価方法	20
3.3.2	結果	21
3.3.3	考察	22
3.4	総合評価	23
3.4.1	評価方法	23

3.4.2	結果、及び考察	23
<b>第4章</b>	<b>筐体散乱 X 線の評価</b>	<b>27</b>
4.1	TSUBAME 衛星のシミュレーション内での構築	27
4.2	筐体の有無によるカウントレートへの影響	30
4.2.1	評価方法	31
4.2.2	結果、及び考察	31
<b>第5章</b>	<b>位置決定手法</b>	<b>38</b>
5.1	位置決定手法	38
5.1.1	関数による位置決定	38
5.1.2	レスポンスの表による位置決定	39
5.2	性能評価	41
5.2.1	評価方法	41
5.2.2	結果	41
5.2.3	考察	43
5.3	系統誤差の原因調査	43
5.3.1	評価方法	43
5.3.2	結果、及び考察	43
5.4	系統誤差の改善	47
5.4.1	評価方法	47
5.4.2	結果、及び考察	47
<b>第6章</b>	<b>まとめと今後の課題</b>	<b>51</b>
6.1	まとめ	51
6.2	今後の課題	52
<b>付録A</b>		<b>53</b>
A.1	筐体散乱 X 線の評価	53

# 目次

1.1	GRB のイメージ図	1
2.1	WBM	4
2.2	CGRO 衛星に搭載された BATSE 検出器の外観	7
2.3	衛星軌道上の地球磁場に束縛された荷電粒子の分布	8
3.1	シンチレータの模式図	11
3.2	入射方向とカウントの関係	11
3.3	形状の候補	12
3.4	長方形の組の例	12
3.5	規格化したカウント $N_A$	14
3.6	$f(R)$ をカウント比 $R$ の関数として表示	14
3.7	シンチレータの形状による位置決定精度の違い	15
3.8	傾斜ありのシンチレータの組	17
3.9	傾斜有の場合の規格化したカウント $N_A, N_B$	18
3.10	傾斜有無で、 $f(R)$ をカウント比 $R$ の関数として表示	18
3.11	配置による位置決定精度の違い	19
3.12	セットアップ	20
3.13	エネルギーごとの電子の透過率 (検出効率) と、軌道上の電子スペクトル	21
3.14	エネルギーごとの X 線の検出効率と、X 線スペクトル	22
3.15	電子全減数率	22
3.16	X 線全検出効率	22
3.17	シンチレータとシンチレータの周りの物質の模式図	24
3.18	$f(R)$ を $R$ の関数として表示	25
3.19	入射角 $\theta = 10^\circ$ の場合の例	25
3.20	シンチレータの前面に物質が存在する場合での位置決定精度	26
4.1	Geant4 上に構築した TSUBAME 衛星の全体像	27

4.2	TSUBAME の簡略図 (真上から) . . . . .	28
4.3	ベースとなる骨組み . . . . .	29
4.4	理学観測機器、及びその他のコンポーネント . . . . .	30
4.5	それぞれの WBM のカウント $N_0 \sim N_5$ の説明 . . . . .	32
4.6	入射エネルギー 100 keV のときのカウント . . . . .	36
4.7	入射エネルギー 200 keV のときのカウント . . . . .	36
4.8	Band 関数のときのカウント . . . . .	37
5.1	隣の値を使って補正する例 . . . . .	40
5.2	入射角と決定角のずれの分布 . . . . .	42
5.3	入射角と決定角のずれの分布の積分値 . . . . .	42
5.4	関数を用いた場合の、入射角と決定角のずれの等高線 . . . . .	45
5.5	表を用いた場合の、入射角と決定角のずれの等高線 . . . . .	45
5.6	関数を用いた場合の、入射角と決定角のずれのベクトル図 . . . . .	46
5.7	表を用いた場合の、入射角と決定角のずれのベクトル図 . . . . .	46
5.8	改善処置後の入射角と決定角のずれ $\eta$ の分布 . . . . .	49
5.9	改善処置後の入射角と決定角のずれ $\eta$ の分布の積分値 . . . . .	49
5.10	改善処置後の表を用いた場合の、入射角と決定角のずれ $\eta$ の等高線 . . . . .	50
5.11	改善処置後の表を用いた場合の、入射角と決定角のずれのベクトル図 . . . . .	50
A.1	入射エネルギー 30 keV のときのカウント . . . . .	53
A.2	入射エネルギー 60 keV のときのカウント . . . . .	54

# 表 目 次

4.1	真上から入射した場合のそれぞれの WBM のカウント . . . . .	31
4.2	真上から 60° 傾いた方向から入射した場合のそれぞれの WBM のカウント . . . . .	31
4.3	アルファベットと対応するコンポーネント . . . . .	35
5.1	レスポンスの表の例 . . . . .	40
A.1	X線入射エネルギー 30 keV のときのカウント . . . . .	54
A.2	X線入射エネルギー 60 keV のときのカウント . . . . .	55
A.3	X線入射エネルギー 100 keV のときのカウント . . . . .	55
A.4	X線入射エネルギー 200 keV のときのカウント . . . . .	56
A.5	X線入射エネルギー Band 関数のときのカウント . . . . .	56

## 要旨

現在我々は、工学部と共同で超小型衛星 TSUBAME の開発を行っており、ガンマ線バースト (GRB) の硬 X 線帯における有意な偏光観測を目標としている。TSUBAME には偏光を観測する硬 X 線偏光計 (HXCP) と、GRB の検出・位置決定をおこなう広視野バーストモニター (WBM) が搭載される。WBM は衛星筐体の各面に設置された CsI シンチレーションカウンタから構成され、それぞれの検出するイベントレートの違いから GRB の位置を推定する。

本研究では、モンテカルロ・シミュレーションを用いてフライトモデルのデザイン最適化・性能評価を行った。まず、位置決定精度の良くなる CsI シンチレータの形状、配置の検証を行った。また、衛星機上で実際に観測を行う際問題となる荷電粒子バックグラウンドを低減する為、WBM 前面には、荷電粒子バックグラウンドを遮蔽しながら光子のみを透過するプラスチック製の放射線シールドの設置を検討し、その厚みを最適化した。次に、この研究結果をベースに設計された WBM が実際に GRB の位置を決定出来るのかどうかを検証した。特に予測が困難なのは、GRB からの光子が衛星筐体で散乱される事象である。これらは、GRB の放射と同期して起こる為、バックグラウンドとして除外するのが非常に困難である。シミュレーションの結果、筐体の有無により光子の散乱が変化し、各検出器のカウントレートに非対称性が生じることを発見した。この非対称性は位置決定へ影響を及ぼす。この様な検出器の特性を考慮した上で位置決定の計算アルゴリズムとして、重心計算法と、シミュレーションで作成したレスポンスの表を参照する方法の2種類を比較し検討した。天球上のランダムな位置から GRB を入射させ、その位置決定精度と、必要な処理時間を調べた。位置決定精度は分解能  $15^\circ$  のレスポンスの表と比較した場合、重心計算法の方がよい事がわかった。分解能  $3^\circ$  のレスポンスの表の場合同程度になった。しかし処理時間は重心法の方が短く、機上の MPU の性能を考慮した場合、重心法の方が性能が良いことが分かった。

# 第1章 はじめに

## 1.1 ガンマ線バースト (GRB)

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst; GRB) とは、宇宙のある一点から非常に大量のガンマ線や 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、全天で最も大きな爆発現象である。数 10~100 億光年もの遠方で起こる天体現象であるため、ガンマ線バーストの研究は太古の宇宙を読み解く鍵となる。この現象の発生頻度は 1 日 1 回程度であるが、継続時間はミリ秒~100 秒程度と短く、発生位置も不確定であるため早期の観測は困難である。

現在、GRB の放射機構として最も有力なものにファイアーボールモデル [5] がある。ファイアーボールモデルによると、太陽質量の数 10 倍以上の巨大な星が重力崩壊するときや、連星が融合することにより  $\sim 10^{52}$  erg もの膨大なエネルギーが生成され、相対論的ジェットを放出する。そして、そのジェットの方向が観測者の視線方向と一致しているとき、ジェット内部の相対論的な電子による強いシンクロトロン放射が、ローレンツブーストの効果で強められることによってガンマ線バーストとして観測されると考えられている。しかし、このジェットが何で作られているのか、そもそもどうしてジェット状に放射されるのか、どの様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。

これまで天文学では様々な波長で天体の観測が行われており、可視光や電波の波長では天体からの放射強度の時間変動を観測する「測光」や、スペクトルを取得する「分光」、天体の空間構造を映す「撮像」、放射の電場の偏りを観測する「偏光」といった手法で観測が数多く行われてきた。しかし、粒子性の卓越する硬 X 線やガンマ線の電磁波に対しては、「測光」、「分光」、「撮像」が主で、「偏光観測」は技術的に困難なためほとんど行



図 1.1: GRB のイメージ図 (NASA)

われてこなかった。偏光観測が重要な点は他の3つの手法では得られない放射源の磁場環境を解明する鍵になり得るからである。シンクロト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、もし偏光を観測出来たならばGRBの発生機構に大きな制限をつけることが出来る。

## 1.2 硬 X 線偏光観測衛星 TSUBAME

我々は、50 kg 級の超小型衛星を開発し、硬 X 線からガンマ線における領域での偏光検出を目指している。本研究室では、これまでに打ち上げた衛星に続く3機目の衛星として、工学部松永研究室やその他参画機関と共同で超小型衛星 TSUBAME の開発を行っている。小型衛星であるため大きい検出器は載せられないが、GRB は明るいため小型の検出器でも十分に精度の高い観測ができる。ガンマ線バーストのような突発天体の偏光を観測するためには、衛星機上でバーストの検出・位置決定を行い、瞬時にバーストの起きた方向に姿勢制御をする必要がある。バースト発生からすぐに偏光観測を行うことが出来れば、偏光が有意に検出できると期待される。そこで TSUBAME では、高トルク姿勢制御デバイスであるコントロール・モーメント・ジャイロ (Control Momentum Gyro; CMG) を搭載する。これにより、TSUBAME は 15 秒間に  $90^\circ$  の非常に高速な姿勢変更が可能となっている。

本衛星には、GRB の検出・位置決定を行う広視野バーストモニタ (WBM) と、硬 X 線領域での偏光観測を行う硬 X 線偏光計 (HXCP) を搭載する。衛星筐体 5 面に設置された WBM は半天を監視し、カウントレートの変化を観察して有意な変化があるとバーストとして検出する。さらに、各 WBM 間のカウントレートの違いから突発天体の方向を計算する。その後、CMG を用いた高速姿勢制御により方向転換をして、HXCP で偏光観測を開始する。

## 1.3 本論文の目的

本研究では、Geant4[3] を用いたモンテカルロ・シミュレーションを行い、WBM のフライトモデルのデザイン最適化を行った (第3章)。次に、TSUBAME 衛星をシミュレータ内に構築し、衛星筐体により散乱される X 線の影響を見積もった (第4章)。最後に、重心計算法とシミュレーションで作成した表を参照する方法の、2種類の位置決定手法の性能評価を行った (第5章)。本論文では、WBM の構造や位置決定手法について説明し、シ

ミュレーションや解析手法について述べ、結果を考察する。また、WBM の位置決定精度を向上させるための改善点を挙げる。

## 第2章 広視野バーストモニタ (WBM)

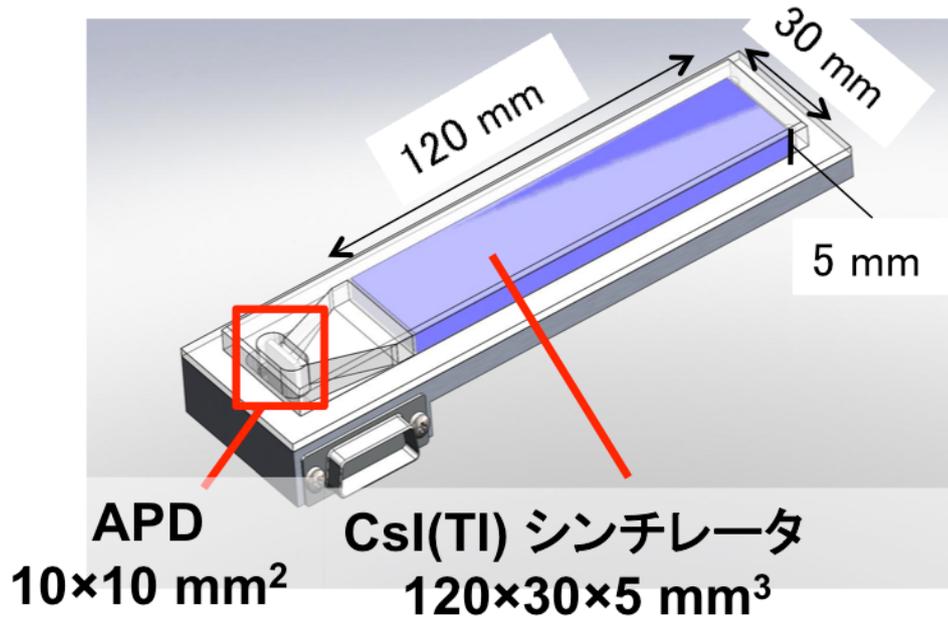


図 2.1: WBM

広視野バーストモニタ (Wide-field Burst Monitor; WBM) は、TSUBAME に搭載される、GRB の検出・位置決定を行う検出器である。また南大西洋磁気異常帯 (South Atlantic Anomaly; SAA) やオーロラ帯 (図 2.3) の検出も行う。

### 2.1 要求仕様

- 質量: 260 g
- サイズ: 173.3×54.4×22.6 mm
- 測定可能カウントレート: 10 kHz 以上
- 最小検出可能エネルギー: 30 keV

### 2.1.1 仕様根拠

**検出可能カウントレート:** 典型的な1ヶ月に1回程度起こるGRBのカウントレートは500 cts/sなので、10kHz以上あれば十分である。

**最小検出可能エネルギー:** 低ければ低いほどカウントが増えるので良いが、30 keV以下はノイズに埋もれやすいためこの付近のエネルギーが限度である。

## 2.2 WBMの構成

WBMはCsI(Tl)シンチレータ(以下、シンチレータと表記する)とアバランシェフォトダイオード(APD)と呼ばれる放射線半導体検出器を組み合わせた検出器となっている。シンチレータに光子が入射しエネルギーを落とすと、落としたエネルギーに比例した量のシンチレーション光を発する。そしてそのシンチレーション光をAPDで検出することで、GRBの光子を検出する。CsIシンチレータは原子番号Zが54と大きく、100 keV程度までのX線はほぼ100%が光電吸収を起こして止まる。また、光量が多く、出力波長がAPDの量子効率が最も高い波長域の500~800 nmに入るため、APDとの相性が良いという利点もある。APDは小型かつ省電力であり、小型衛星のような容積やリソースの限られた環境に搭載するには最適である。

シンチレータの背面にはタングステンシート(W)、錫(Sn)、銅(Cu)の3層から構成されるシールドが搭載される。それぞれの厚みは、タングステンシートが1.0 mm、錫が0.5 mm、銅が0.1 mmである。シールドの最も外側には、X線や荷電粒子バックグラウンドを除去する為に、重元素であるタングステンと樹脂の複合材料であるタングステンシート<sup>1</sup>を使用する。タングステンを設置することでバックグラウンドを低減させることが出来るが、蛍光X線が問題となる。蛍光X線は、元素特有の一定以上のエネルギーを持つ光子を照射することによって、その物質を構成する原子の内殻の電子が励起されて生じた空孔に、外殻の電子が遷移する際に放出されるX線のことである。シールドの内側にはこのタングステンからの蛍光X線を遮蔽するために、タングステンより軽い錫を搭載する。そしてシールドの最も内側には錫からの蛍光X線を遮蔽するために銅を搭載する。銅からの主な蛍光X線のエネルギーは8.1 keVとなっており、最小検出可能エネルギーである30 keVよりも低いため検出されることはなく、十分無視出来る。

---

<sup>1</sup>鉛と同等の高比重、高遮蔽性能を実現しかつ柔軟性、加工性に優れている。

シンチレータの前面には荷電粒子シールドとしてプラスチック（PEEK 樹脂<sup>2</sup>）が搭載される。さらに、全体を覆うように電磁シールドとしてアルミを搭載する。これらのシールドは荷電粒子バックグラウンドを遮蔽しながら光子のみを透過しなければならないため、第3章でその厚みを最適化した。

## 2.3 検出方法

TSUBAME の定常運用時は、WBM を用いて常に半天を監視し、カウントレートに有意な変化があるとバースト判定トリガを生成する。TSUBAME の目的は GRB の硬 X 線偏光検出なので、フラックスが非常に強く、継続時間が長いバーストのみ検出できれば問題ない。そのようなバーストは、面積が数十 cm<sup>2</sup> 程度の小さな検出器でも十分検出できる。

判定時間  $\Delta t$  内でのカウント数  $N$  が得られたとき、それ以前の  $k$  回前までの判定時間でのカウント数  $N_1, N_2, \dots, N_k$  から、バックグラウンドの平均  $N_{BG}$  を計算する。

$$N_{BG} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k N_i \quad (2.1)$$

このバックグラウンドの平均  $N_{BG}$  の揺らぎ  $\sigma_{BG}$  の定数  $n_\sigma$  倍と、判定時間  $\Delta t$  内でのカウントからバックグラウンドの平均を引いた値  $(N - N_{BG})$  を比較することにより、GRB の判定を行う。以上の内容を式として表現すると次のようになる。

$$N - N_{BG} > n_\sigma \times \sigma_{BG} \quad \Rightarrow \quad \text{バースト判定トリガ生成} \quad (2.2)$$

バーストの判定時間が短いと GRB が検出されず、偏光検出可能 GRB 数も減ってしまう。だが、判定時間が長すぎても、偏光計が検出出来る X 線の数が増えるので偏光検出が難しくなり、偏光検出可能 GRB 数は減る。これらを考慮すると、バーストの判定時間  $\Delta t$  には最適値が存在する。この最適値はおよそ 2 秒から 4 秒となり、WBM では 2 秒を採用する予定である [8]。

---

<sup>2</sup>ポリエーテルエーテルケトン。射出成形可能な熱可塑性樹脂としては最高の耐熱性を持つプラスチックである。

## 2.4 位置決定方法

WBMは各面でのカウントレートの違いから、バーストの発生位置を決定することができる。この手法は、米国のCGRO衛星に搭載されたバースト位置検出器BATSE [2]で実際に用いられた実績がある。

WBMでは、各面のカウントの比を利用して、これらの重心をGRBの到来方向として決定する重心法や、あらかじめシミュレーションで求めたWBMのレスポンスの表を参照し、到来方向を決定する方法などを検討している。これらの位置決定手法は第5章で詳しく考察する。

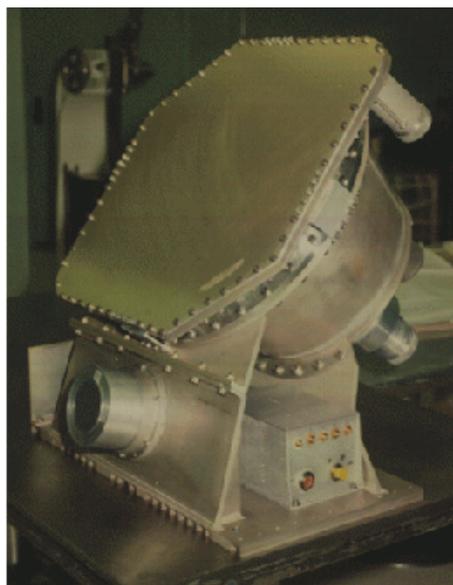


図 2.2: CGRO衛星に搭載されたBATSE検出器の外観。CGRO衛星には8つのBATSE検出器が搭載された [2]

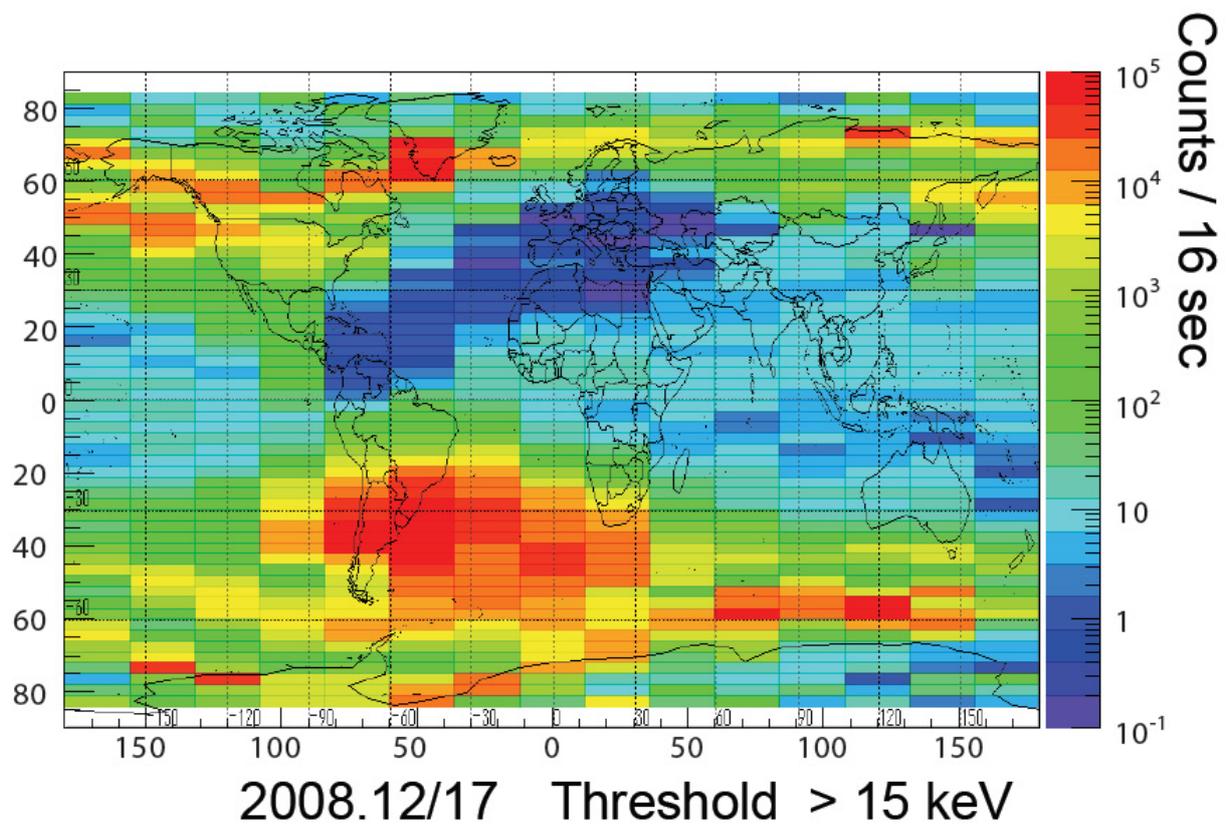


図 2.3: 衛星軌道上の地球磁場に束縛された荷電粒子の分布 (>15 keV)[8]。東工大河合研、松永研が共同で開発を行った、Cute-1.7+APDII により取得した。低緯度ブラジル南下に存在するのが SAA で、高緯度地方に存在するのがオーロラ帯である。

## 第3章 WBMの要素設計

HXCPの視野は $15^\circ$ 程度であり、GRBが視野を外れてしまった場合、精度の高い観測は難しい。そのため、WBMの位置決定精度は可能な限り高い方がよい。

この章ではWBMの構造と位置決定精度の関係について検証する。検討項目は以下の三つである。

1. 形状 — シンチレータの形状について—
2. 配置 — WBMの衛星への取り付け角について—
3. バックグラウンドシールド — W, Sn, Cuの三層からなる背面のシールドについて—

### 解析ツール

本研究では、Geant4[3]を用いて解析を行う。Geant4とは、高エネルギー物理学や宇宙線、原子核実験だけでなく、宇宙科学、放射線医学などの分野も視野に入れて開発された、素粒子が物質中で起こす複雑な振る舞いや反応のシミュレーションを行うためのツールキットである。

Geant4では、モンテカルロ法と呼ばれる、乱数を用いた統計的な計算を行う。素粒子の吸収・散乱といった物質との相互作用は確率過程であるため、測定器の検出効率や測定精度などを定量的に見積もるためには、モンテカルロ法は必須である。

例えば粒子を検出器や周りの構造物に照射した時、構造物の中でどのように散乱し吸収され、その結果として検出されるカウントレートやスペクトルにどのように影響するかを、解析的に計算することは非常に困難である。このような複雑な過程の計算を行うためには、シミュレーションが必要である。よって本研究では、シールドを透過する荷電粒子やX線及び衛星筐体からの散乱X線のカウント数やエネルギーを、Geant4を用いて定量的に評価した。

### 3.1 形状の評価

ここでは WBM に搭載されるシンチレータの形状による、位置決定精度への影響を見積もる。

図 3.1 のように、光子が WBM の面の法線と角  $\theta$  をなして入射してきたとき検出光子数は、GRB のフラックスを  $F$ 、シンチレータの面積を  $S$  とすると、単純には  $FS \cos \theta$  と表される。しかし現在シンチレータの形状は直方体となっており、厚みがあるため X 線が検出面からだけでなく側面からも入射する (図 3.1)。そのため  $FS \cos \theta$  に、 $C = b/a$  として、側面から入射する成分の  $FSC \sin \theta$  を足し合わせたようなカウントが得られる。したがって実際には  $\alpha = \arctan(1/C)$  として、 $FS\sqrt{1+C^2} \cos(\theta - \alpha)$  のような形のカウントが得られる<sup>1</sup>(図 3.2)。これが原因で、 $0 < \theta < 2\alpha$  の領域ではカウントはあまり変化しなくなり、位置決定精度が低くなるのではないかと懸念される。

このような問題を解決するための方法は二つある。一つはシンチレータの側面を斜めに削り、台形にすることで、入射角  $\theta$  が小さい時に側面から X 線が入射しないようにする方法である。これによりカウントが入射角  $\theta$  の関数として単調減少となる。もう一つはシンチレータの背面だけでなく、側面にもシールドを配置し、側面から X 線が入射しないようにする方法である。

---

<sup>1</sup>X 線がシンチレータを透過することを考慮すると、カウントは若干異なる

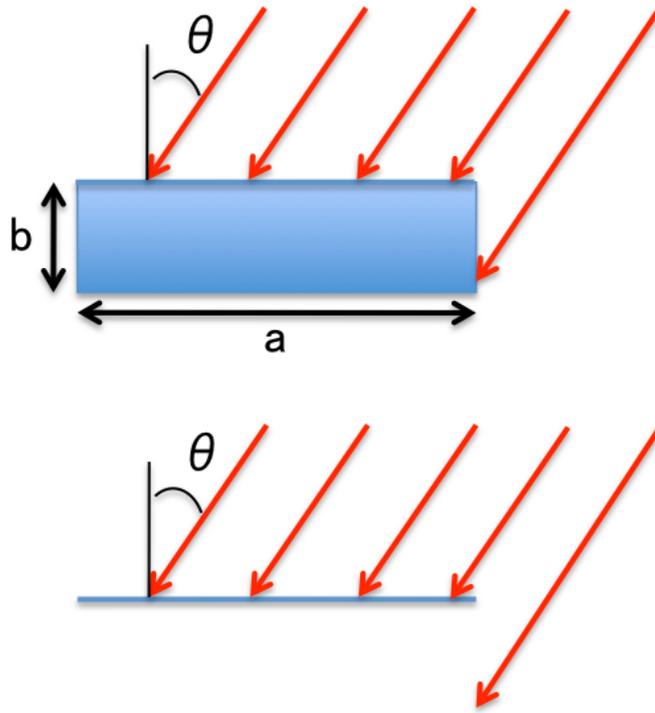


図 3.1: シンチレータの模式図。青い長方形がシンチレータで、赤い矢印が X 線、 $\theta$  が X 線の入射角を表している。上: 厚みのある場合。a はシンチレータの横幅で、b は厚みである。下: 理想的な厚みの無い場合。

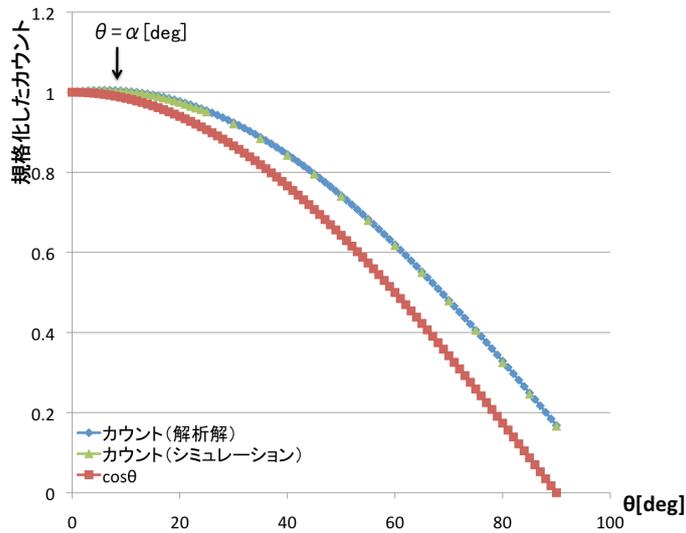


図 3.2: 入射方向とカウントの関係。厚さ 5 mm のシンチレータに 100 keV の X 線を入射したときの、入射角度とカウントの関係を表した図である。 $\theta = 0^\circ$  の時のカウントが 1 となるよう規格化した。青色の点は X 線の入射位置によるシンチレータを通過する距離の違いを考慮して計算した解析解であり、緑色の点はシミュレーションによるものである。

### 3.1.1 評価方法

シンチレータの形状が台形の場合は、入射角 $\theta$ に対するカウントの解析解を求めることは難しいため、シミュレーションを用いて形状の評価を行う。評価は以下の手順で行う。

1. シミュレータ内に、長方形、台形、側面シールドの三パターンを構築
2. 入射角 $\theta$ を変えながら、100 keV の X 線を照射し、シンチレータにエネルギーを落としたイベントを計数



図 3.3: WBM の形状の候補。左から順に、長方形、台形、側面シールドである。青い部分がシンチレータで、黒い部分がシールドである。

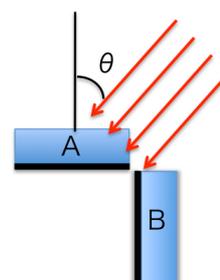


図 3.4: 長方形の組の例

まず、図 3.4 のように、互いに直角に配置されたシンチレータ A, B のカウント  $N_A, N_B$  が、入射角 $\theta$ の関数としてどのように表されるか調べる。次に、得られた  $N_A, N_B$  の組から、 $\theta$  をカウント比  $R$  の関数として  $\theta = f(R)$  と表す。 $R$  は  $N = 0$  となるような特異点を回避するために、式 3.1 のように定義した。

$$R = \frac{N_A - N_B}{N_A + N_B} \quad (3.1)$$

$N_A, N_B$  が確実に決まれば  $R$  も一意に決定できるが、実際には  $N_A, N_B$  の統計的揺らぎや、宇宙背景 X 線放射、大気散乱ガンマ線、荷電粒子バックグラウンド、散乱光子等が混入することにより位置決定に誤差を生じる。このような統計誤差に由来する  $\theta$  の揺らぎ  $\delta_\theta$  を、誤差伝播の式より求める (式 3.2)。

$$\delta_\theta = \frac{\partial f(R)}{\partial R} \times \delta_R \quad (3.2)$$

$\frac{\partial f(R)}{\partial R}$  は  $f(R)$  の傾きであり、 $\delta_R$  は  $R$  の揺らぎである。

ここで、カウント  $N_A, N_B$  は、実際には GRB を検出したときのカウントからバックグラウンドのカウント  $N_{BG}$  を除いたカウントを用いる。そのため、 $N_A$  の揺らぎは  $\delta_{N_A} = \sqrt{N_A + 2N_{BG}}$  と表される。したがって、 $R$  の揺らぎは誤差伝播の式を用いて式 (3.3) のように表される。

$$\begin{aligned}\delta_R &= \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial N_A}\right)^2 \delta_{N_A}^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial N_B}\right)^2 \delta_{N_B}^2} \\ &= \sqrt{\frac{4N_A N_B}{(N_A + N_B)^3} + \frac{8(N_A^2 + N_B^2)}{(N_A + N_B)^4} N_{BG}}\end{aligned}\quad (3.3)$$

GRB のカウントは 1000 cnts とした。これはカウントレートで表現すると 1000 cnts/36 cm<sup>2</sup>/2 s という、月に 1 回程度の頻度で起こる典型的な値を想定している。なお、36 cm<sup>2</sup> はシンチレータの面積で、2 s はカウントの積分時間である。バックグラウンドのカウントレートは 5 cnts/cm<sup>2</sup>/s とする。

### 3.1.2 結果

まず図 3.5 は、X 線の入射角  $\theta$  とシンチレータのカウント  $N_A$  の関係である。なお図 3.5、図 3.6、及び図 3.7 において、黒丸が長方形の、赤丸が台形の、青丸が側面シールドをしたシンチレータの場合のデータ点である。長方形の場合、先に説明したように  $\cos(\theta - \alpha)$  のようなカウントが得られていて、 $\theta$  が 90°、つまり真横からの照射でもカウントは 0 になっていない。次に台形の場合は、期待通り単調減少のカウントが得られた。しかし、長方形の場合と同様に  $\theta = 90^\circ$  のときにカウントは 0 になっていない。最後に側面シールドの場合は、ほぼ  $\cos \theta$  の形のカウントが得られた。

次に図 3.6 は  $f(R)$  を  $R$  の関数として表したものである。長方形及び台形の場合、ほぼ同じ形のグラフが得られた。一方、側面シールドの場合は他の二つよりも  $f(R)$  の傾きが緩やかなグラフが得られた。

最後に図 3.7 が、X 線がある角度  $\theta$  で入射したとき、決定位置がどの程度揺らぐかを表したグラフである。どのパターンでも  $\theta = 0^\circ$  の場合が最も精度が良く、 $\theta = 45^\circ$  の場合が最も精度が悪くなることが分かった。側面シールドの場合が三パターンの中で一番精度が良くなることが分かった。

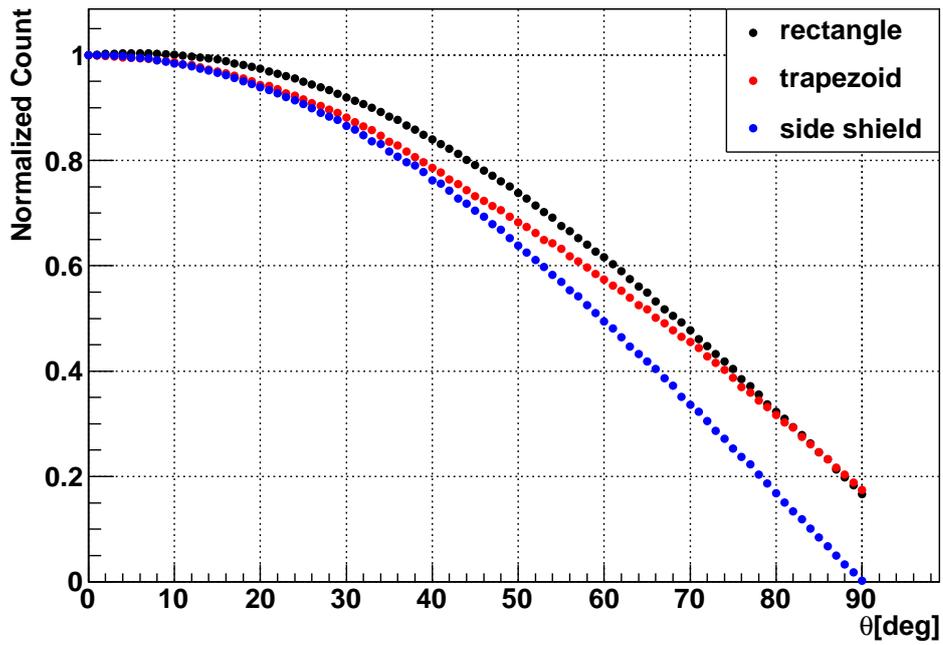


図 3.5: 規格化したカウント  $N_A$ 。横軸は X 線の入射角  $\theta$  で、縦軸は検出面に垂直に X 線が入射したとき 1 となるよう規格化したカウントである。

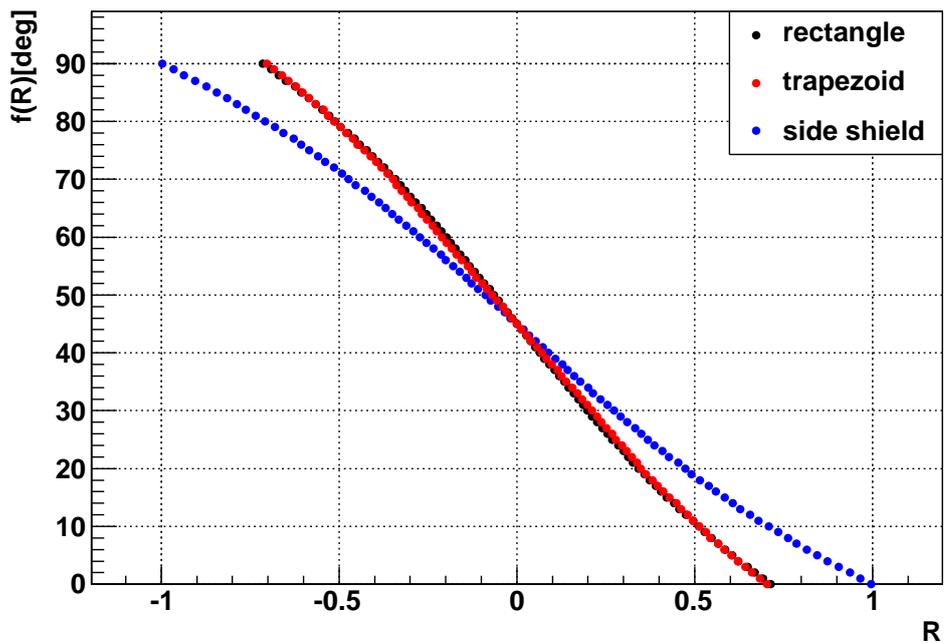


図 3.6:  $f(R)$  をカウント比  $R$  の関数として表示。横軸はカウント比  $R$  で、縦軸は  $f(R)$  である。

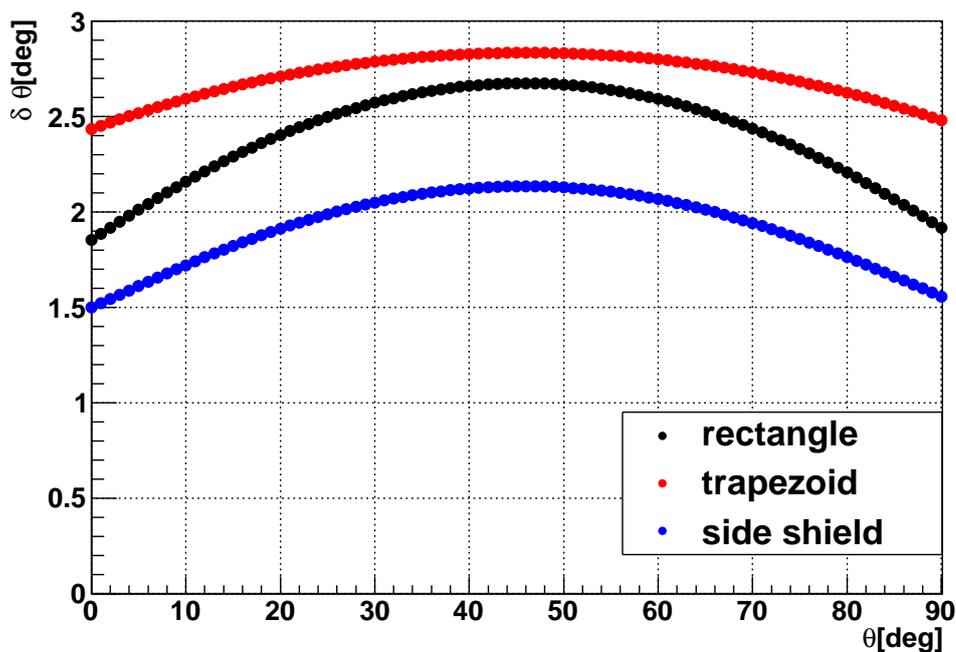


図 3.7: シンチレータの形状による位置決定精度の違い。横軸は X 線の入射角  $\theta$  で、縦軸はそのときの決定角の揺らぎ  $\delta\theta$  である。揺らぎの値は  $1\sigma$  エラーで単位は degree である。

### 3.1.3 考察

側面シールドの場合が最も精度が良くなったのは、 $f(R)$  の傾きが最も小さい、つまりカウント比  $R$  の変化に対して決定角  $\theta = f(R)$  の変化が小さいため、カウントの統計的揺らぎによる影響が最も小さいからであると考えられる。また、台形の場合が最も精度が悪くなったのは、 $f(R)$  の傾きは長方形の場合とほぼ変わらないが、シンチレータを削ったために有効面積が減少し、長方形に比べてカウントが少なくなり、統計エラーが顕著になったと考えられる。実際、天頂 ( $\theta = 0^\circ$ ) から入射した場合、検出光子個数はシンチレータが長方形の場合 96384 cnts で、台形の場合 87911 cnts であった。そのため、 $\delta R$  は 1.1 倍になるので統計エラーは増加する。

また、側面シールドの場合、WBM 一つあたり 20 g ほど重くなるという欠点があるが、位置決定精度が良くなること以外にも、いくつかの利点がある。一つは衛星筐体を透過して、WBM の後ろから入射する GRB の光子や筐体による散乱 X 線、及び荷電粒子等を防げることである。もう一つは、シンチレータに厚みがあり、直方体であることが由来のカウントの非対称性<sup>2</sup>を少なく出来ることである。これは、位置決定手法の簡略化につなが

<sup>2</sup>直方体の側面の長い側に入射した場合と、短い側に入射した場合にカウントが異なるという非対称性である。円柱形のシンチレータならばこの非対称性は現れない。

り、位置決定にかかる処理時間の短縮や、搭載出来るメモリの量からくる位置決定手法の制限を受けにくくなるといった利点がある。

## 3.2 配置の評価

配置の評価は二通りあり、一つは WBM の取り付け位置で、もう一つは WBM の取り付け角度である。ここでは、WBM の取り付け角に、傾斜が無い場合と有る場合でどちらが位置決定精度が良いか見積もる。取り付け位置については、第 4 章で考察する。

現在 WBM は衛星筐体面に平行に設置される予定のため、それぞれの WBM 同士は互いに垂直もしくは平行となっている。従って、X 線が衛星機軸方向に平行に近い角度で入射した場合、機軸方向を向いた WBM は検出面にほぼ垂直に X 線が入射するためカウントは大きくなる。一方で、衛星側面方向を向いた WBM には検出面にほぼ平行に入射するためカウントは減少する。

極端にカウントが少ない場合、バックグラウンドの影響が大きくなり、計算角の精度が下がってしまう。この問題は衛星側面に取り付けられる WBM を面に平行ではなく傾けて設置し、機軸平行に X 線が入射した場合でも、側面の WBM のカウントが極端に減らないようにすることで解決できる可能性がある。

以上の理由から、機軸平行に入射してきた場合に、WBM の取り付け角に傾斜が無い場合とある場合のどちらの方が位置決定精度が良いのか評価する必要がある。シンチレータ単体 (およびその背面のシールド) を配置した場合にどのようなカウントが得られるのか調べ、位置決定精度を評価する。

### 3.2.1 評価方法

3.1 節の形状の評価と同様の方法で、互いに垂直なシンチレータの組と、図 3.8 のように、垂直ではなく  $45^\circ$  傾いたシンチレータの組で位置決定精度を比較する。GRB のカウントレートは  $1000 \text{ cnts}/36 \text{ cm}^2/2 \text{ s}$  で、バックグラウンドのカウントレートは  $5 \text{ cnts}/\text{cm}^2/\text{s}$  とする。

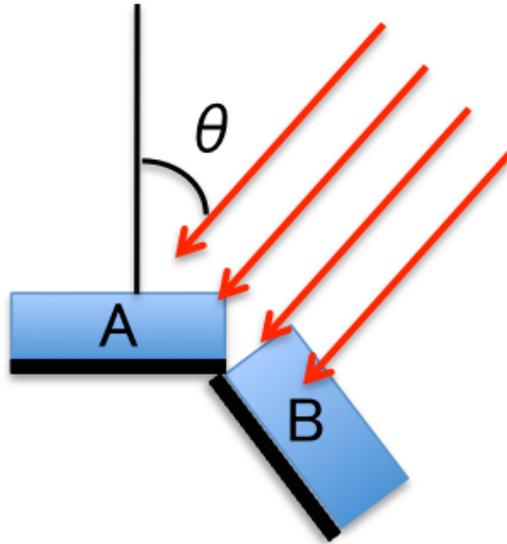


図 3.8: 傾斜ありのシンチレータの組

### 3.2.2 結果

まず図 3.9 は、図 3.8 のように配置した場合の、シンチレータ A のカウント  $N_A$  と、 $45^\circ$  傾けて配置したシンチレータ B のカウント  $N_B$  の関係である。 $N_B$  は  $\theta = 45^\circ$  付近でカウント数が一定になっていることが分かる。

次に図 3.10 は、カウント比  $R$  と  $f(R)$  の関係を表している。黒丸が互いに直角に配置した場合、紫丸が  $45^\circ$  傾けて配置した場合のカウント比  $R$  と  $f(R)$  の関係である。 $45^\circ$  傾斜がある場合、途中で折れ曲がって傾きが急になっていることが分かる。

最後に図 3.11 は、X 線の入射角  $\theta$  と、決定角の揺らぎの関係である。 $45^\circ$  傾斜をつけると位置決定精度が悪くなっていることが分かる。

また、傾斜角を  $45^\circ$  ではなく  $10^\circ$  にして同様の解析をしたが、その場合でも位置決定精度は良くならなかった。

以上より、シンチレータを互いに垂直に配置した方が位置決定精度が良いことが分かった。

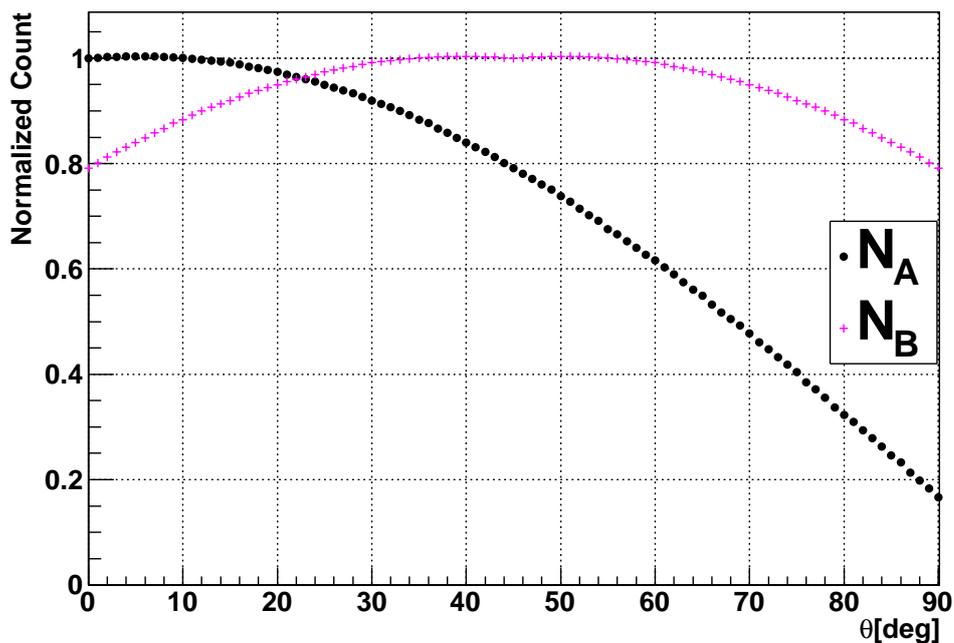


図 3.9: 傾斜有りの場合の規格化したカウント  $N_A, N_B$ 。横軸は X 線の入射角  $\theta$  で、縦軸は検出面に垂直に X 線が入射したとき 1 となるよう規格化したカウントである。

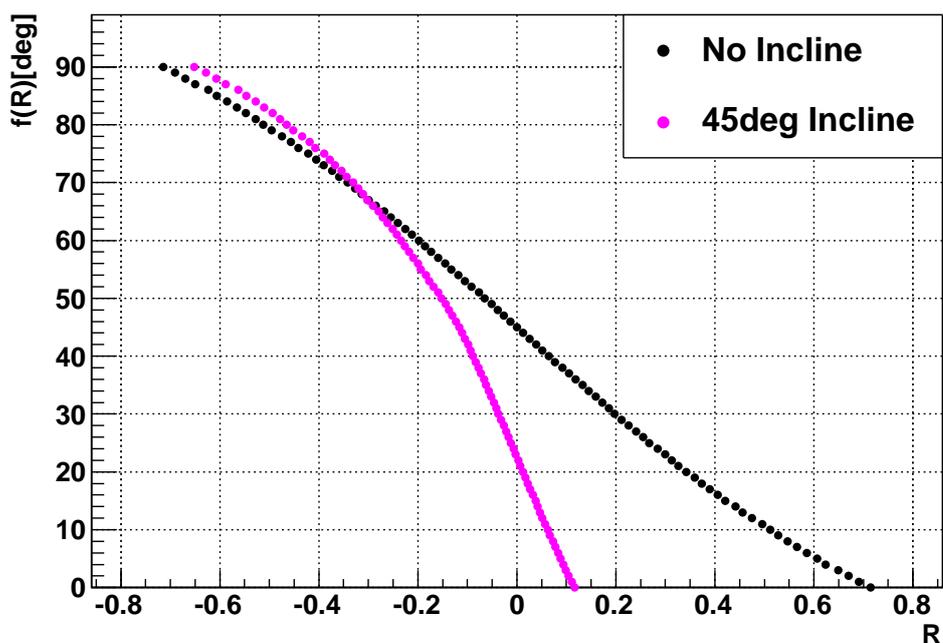


図 3.10: 傾斜有無で、 $f(R)$  をカウント比  $R$  の関数として表示。横軸はカウント比  $R$  で、縦軸は  $f(R)$  である。

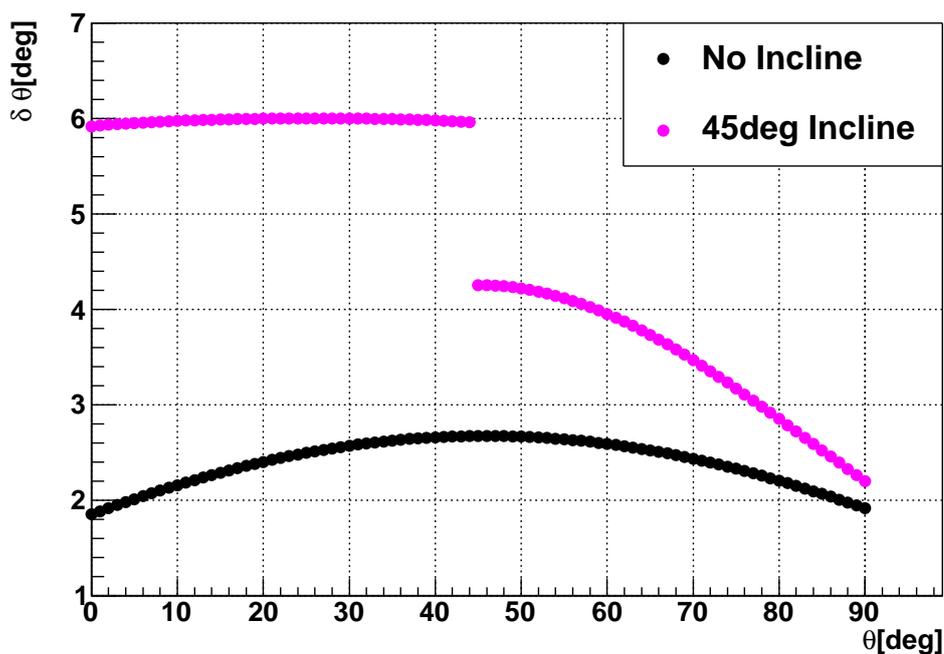


図 3.11: 配置による位置決定精度の違い。横軸は X 線の入射角  $\theta$  で、縦軸はそのときの決定角の揺らぎ  $\delta\theta$  である。揺らぎの値は  $1\sigma$  エラーで単位は degree である。

### 3.2.3 考察

傾けてシンチレータを配置した場合に位置決定精度が悪くなったのは、直角に配置した場合よりも、 $f(R)$  の傾きが急になった影響が強く出たためだと考えられる。なお、 $45^\circ$  で位置決定精度が不連続になったのは、図 3.9 の  $N_A$  の  $\theta$  微分 ( $= \frac{\partial N_A}{\partial \theta}$ ) が  $45^\circ$  で不連続なため、 $f(R)$  の傾きが不連続になったからだと考えられる。

## 3.3 シールドの評価

衛星軌道上、特に南大西洋磁気異常帯 (SAA) やオーロラ帯では地球磁場に束縛された非常に多くの荷電粒子が存在している (参考: 図 2.3)。このような荷電粒子は WBM のバックグラウンドになるため、シールドをして出来る限り影響を減らす事が望ましい。WBM ではこのためのシールドとしてプラスチックを用いる。プラスチックを用いる理由は、原子番号が小さいため X 線を光電吸収しづらいためである。また、衛星内部からの電磁ノイズを防ぐためにアルミのシールドも必要である。

これらのシールドは、荷電粒子バックグラウンドや電磁ノイズを遮蔽するという意味で

は出来る限り厚い方が良い。しかし、あまり厚くしすぎてしまうと目標天体からの X 線まで吸収してしまい、WBM の検出効率を下げってしまう。そのため、GRB の光子のみ透過し荷電粒子を遮蔽する最適な厚みを検討しなければならない。

### 3.3.1 評価方法

1. Al、PEEK、シンチレータの平板を隙間無く重ね、Al 側から垂直に一定エネルギーの X 線 (電子) を照射し、シンチレータにエネルギーを落としたイベントを計数 (図 3.12)

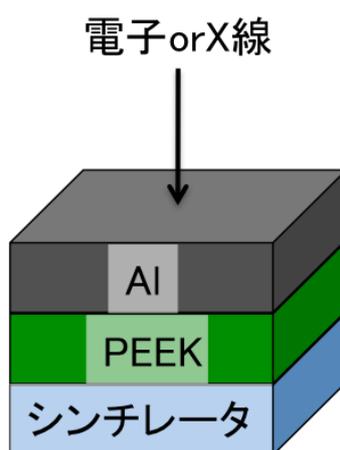


図 3.12: セットアップ

2. 入射粒子のエネルギーを変えていき繰り返すことで、エネルギーごとの検出効率を求める
3. 1. 2. をプラスチック、アルミの厚みを変えていき繰り返す
4. 式 3.4 のように、エネルギーごとの検出効率の重みをつけてスペクトルを積分することで、全検出効率 (全減数率) を求める

$$\text{全検出効率} = \frac{\int \text{スペクトル} \times \text{エネルギーごとの検出効率} dE}{\int \text{スペクトル} dE} \quad (3.4)$$

$$\text{全減数率} = 1 - \text{全検出効率} \quad (3.5)$$

プラスチック (PEEK) の厚みを 1.0mm, 2.0mm, 3.0mm、アルミの厚みを 0.1mm, 0.5mm, 1.0mm とそれぞれ変化させてシミュレーションを行った。

軌道上の電子のスペクトルは SPENVIS [4] を用いて計算する。また、X 線のスペクトルは GRB を模擬してベキ関数を使用する。

### 3.3.2 結果

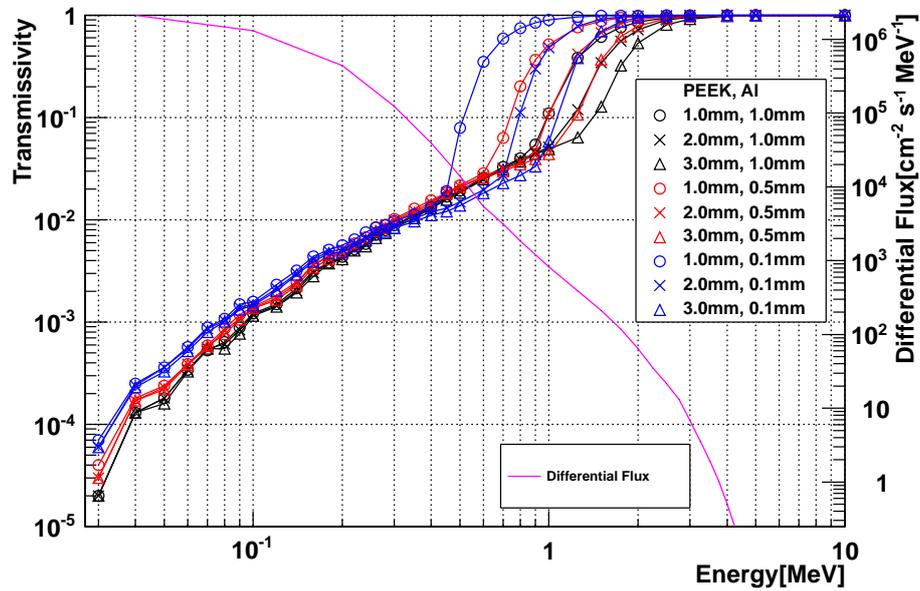


図 3.13: エネルギーごとの電子の透過率 (検出効率) と、軌道上の電子スペクトル。横軸縦軸ともに対数目盛で表示した。透過率と同時に紫色の線で、高度 628km における電子のスペクトルを表示した。

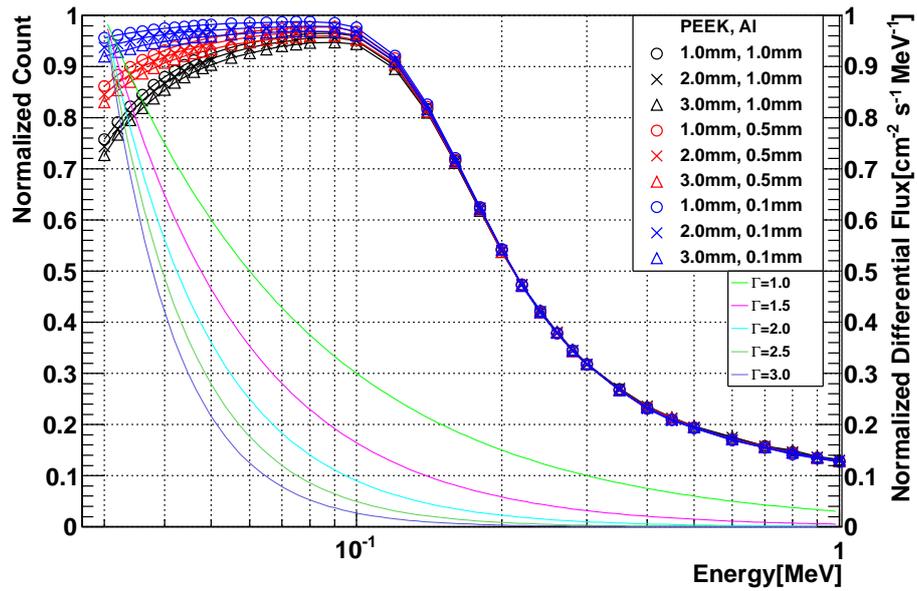


図 3.14: エネルギーごとの X 線の検出効率と、X 線スペクトル。横軸のみ対数目盛りで表示した。検出効率と同時にベキ指数が 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 のベキ関数も表示した。

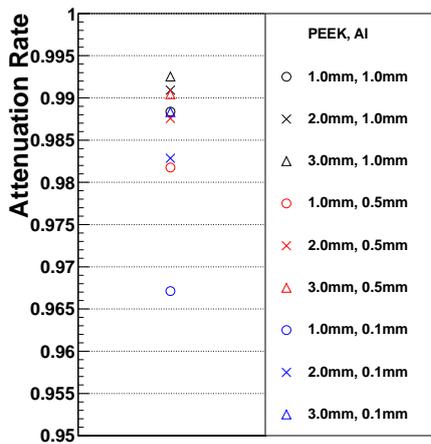


図 3.15: 電子全減数率

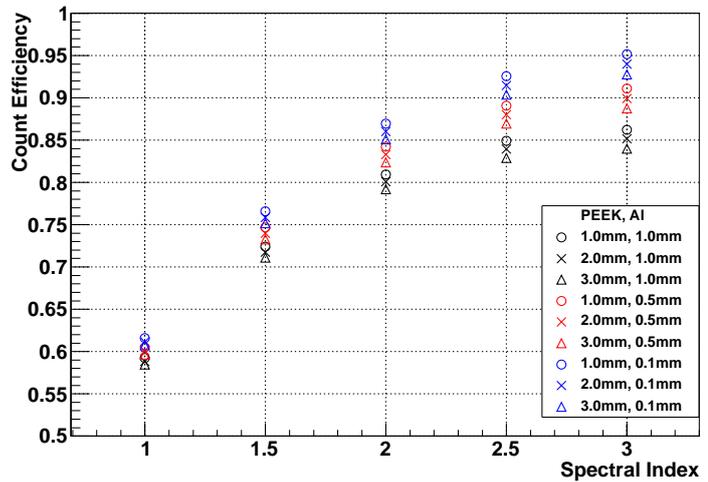


図 3.16: X 線全検出効率。横軸は入射 X 線のベキ指数である。

### 3.3.3 考察

図 3.15 から、電子の全減数率は 97~99%程度であることが分かる。図 3.16 から X 線の全検出効率は、典型的なベキ指数が 1.5 の GRB の場合、エネルギーが 30 keV ~1.0 MeV の範囲を積分すると、71~77%程度であることが分かる。この二つの釣り合いを考え、プ

プラスチックの厚さを 3.0mm に、アルミの厚さを 0.1mm にすると、電子全減数率は 98.8%、X 線全検出効率 は 75% となる。

### 3.4 総合評価

実際の WBM の配置や構造と、入射光子が 100 keV の単色ではなく GRB のスペクトルに近い状況で、位置決定が可能なことを確かめる。

シンチレータの前面 (X 線入射面) には荷電粒子シールドのプラスチック (PEEK 樹脂) や電磁シールドのアルミがあるため、平行に近い角度で入射するとこれらの物質を通過する距離が長くなり、X 線が吸収されやすくなる。その結果、カウントに影響が出て位置決定に支障をきたす恐れがある。

よって、シンチレータの前面や周りにプラスチックとアルミ、および衛星筐体の CFRP<sup>3</sup> が存在する場合でも問題なく角度が決まるかどうか確かめる必要がある。

また、今までは単色の X 線 (100 keV) で解析を行ってきたが、今回は実際の GRB を模擬するために、入射 X 線のスペクトルがベキ関数 (ベキ指数は 1.5 とした) となるようにした。

#### 3.4.1 評価方法

1. シンチレータの周りの物質を図 3.17 のように構築したものを二つ用意し、互いに垂直に配置する。
2. GRB の入射角とカウントの関係を調べて、カウント比  $R$  から角度に変換する関数  $f(R)$  を求める。
3. スペクトルがベキ関数で表される GRB を 100 回分入射させ、あらかじめ求めた関数を用いて角度を決定し、決定角の分布を調べる。

#### 3.4.2 結果、及び考察

まず図 3.18 は、カウント比  $R$  と X 線の入射角  $\theta$  の関係を表している。式 3.6 でフィッティングし、カウント比から角度に変換する関数を求めた。なお、角度を求める関数とし

<sup>3</sup>炭素繊維強化プラスチック。強度に優れ、鉄やアルミなどの金属に比べ、同じ強度・剛性であっても、より軽量化できるという特徴を持つ。TSUBAME では筐体の SIDE-PANEL に使用する。



図 3.17: シンチレータとシンチレータの周りの物質の模式図。厚みはそれぞれ、PEEK が 1.5 mm、Al が 0.1 mm、CFRP が 2.0 mm である。

て式 3.6 の形を用いたのは、 $\arctan$  を用いた式では入射角  $\theta$  が  $0^\circ$  付近でうまく合わなかったが、分母・分子に三次関数をとった関数を用いるとうまくカウント比  $R$  と入射角  $\theta$  の関係を再現出来たためである。これはカウント  $N_A(N_B)$  がおおよそ三次関数で表すことが出来るためであると考えられる。だが、式 3.6 を使う物理的理由は特に無いため、その正当性は若干怪しいところがある。しかし、式 3.6 を用いて角度が実際に求まっており、決定角の揺らぎの値も、以前に求めた値と誤差の範囲で同じ値である。このことから、式 3.6 を使って角度を計算し、その分布を調べることに問題は無いと言える。

$$\theta = f(R) = \frac{c_4 + c_5 R + c_6 R^2 + c_7 R^3}{c_0 + c_1 R + c_2 R^2 + c_3 R^3} \quad (c_i \text{ は定数}) \quad (3.6)$$

次に図 3.19 は、GRB を 100 回分入射させて、式 3.6 を用いて角度を求めたときの分布を、ガウシアンでフィッティングした例である。この例の場合、決定角は  $9.8^\circ \pm 1.8^\circ$  ( $1\sigma$  エラー) であった。

最後に図 3.20 は、図 3.19 のようにして求めた決定角の揺らぎ ( $1\sigma$  エラー) をグラフにしたものである。赤丸は GRB のカウントレートが  $1000 \text{ cnts}/36 \text{ cm}^2/2 \text{ s}$  の場合で、黒丸は同様に  $200 \text{ cnts}/36 \text{ cm}^2/2 \text{ s}$  の場合である。 $\theta$  の値が小さい、つまり X 線の入射角が WBM の面と平行に近いところでも、決定角の揺らぎは大きくなっておらず、問題なく位置決定出来ていることが分かる。

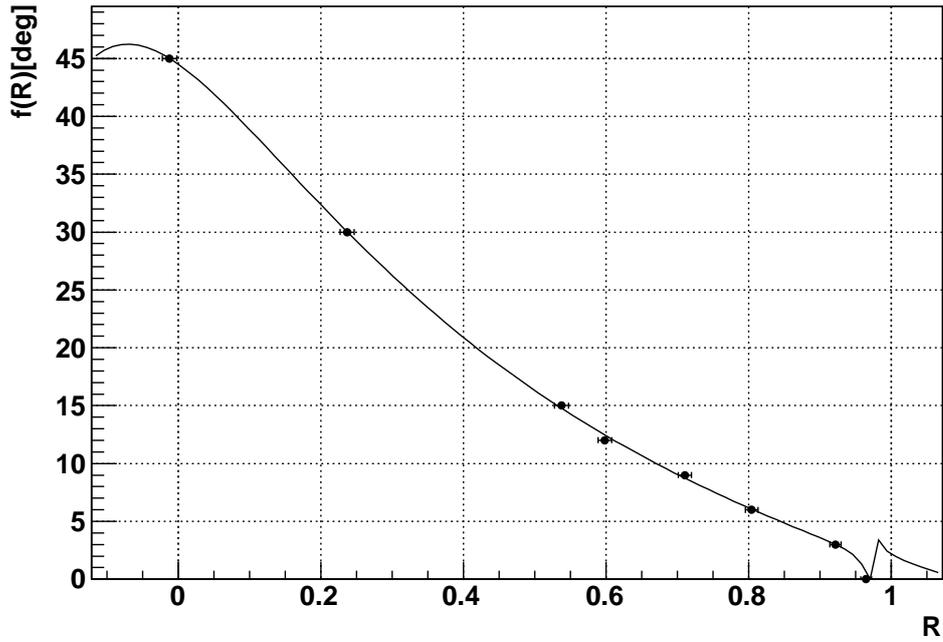


図 3.18:  $f(R)$  を  $R$  の関数として表示。横軸はカウント比  $R$  で、縦軸は  $f(R)$  である。  
 $c_0 \sim c_7$  の値は  $c_0$  から  $c_7$  まで順に、 $8.67 \pm 0.141$ ,  $9.83 \pm 0.165$ ,  $-44.0 \pm 0.182$ ,  $25.3 \pm 0.183$ ,  
 $0.195 \pm 0.00355$ ,  $0.411 \pm 0.0221$ ,  $0.281 \pm 0.0465$ ,  $-0.937 \pm 0.0407$  であった。

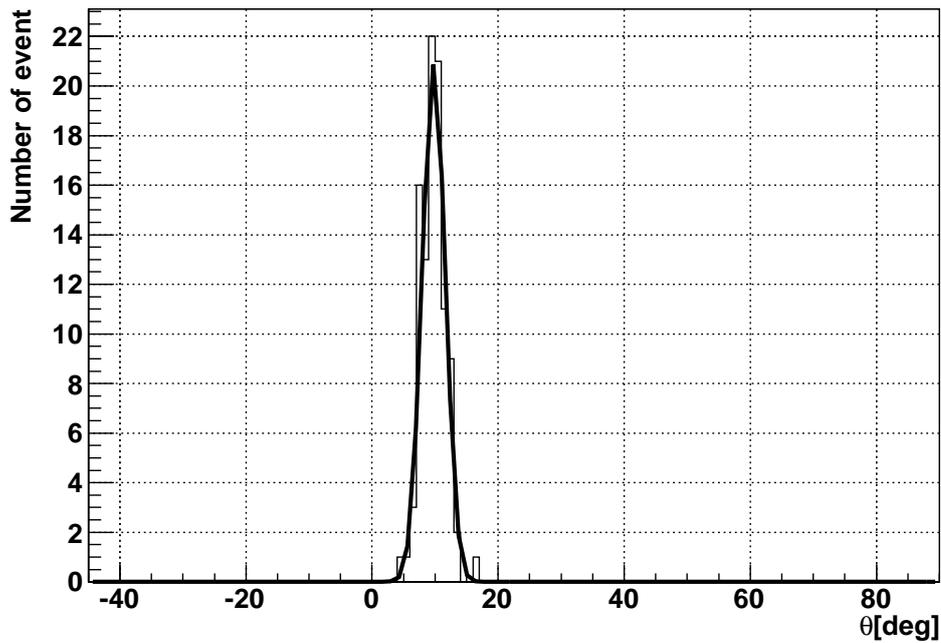


図 3.19: 入射角  $\theta = 10^\circ$ 、GRB のカウントレートが  $1000 \text{ cnts}/36 \text{ cm}^2/2 \text{ s}$  の場合の例。横軸は決定角  $\theta$  で、縦軸はイベント数である。

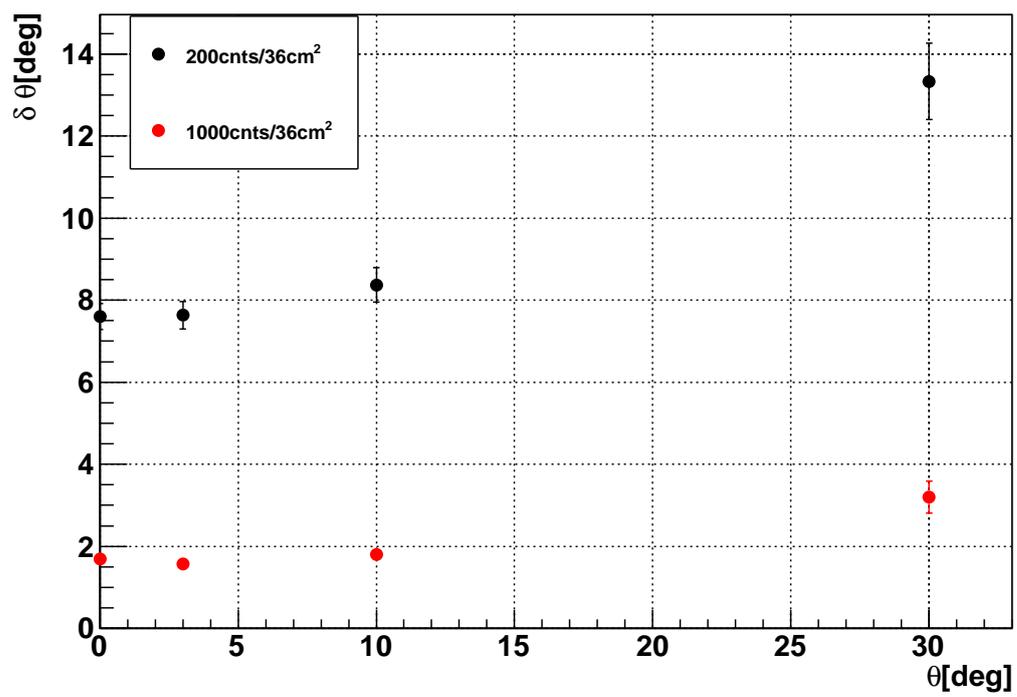


図 3.20: シンチレータの前面に物質が存在する場合での位置決定精度。横軸は入射角  $\theta$  で、縦軸は決定角の揺らぎ  $\delta\theta$  である。

## 第4章 筐体散乱X線の評価

WBMのカウンタは、直接入射してくる光子だけでなく、衛星筐体によって散乱されて間接的に入射してくる光子の影響も受ける。そのため、この光子の影響がどのくらいあるのか調査する必要があり、影響が大きいのようならば改善処置を施さなければならない。そこでシミュレータ内にTSUBAME衛星を構築し、散乱X線のカウンタを定量評価する。

本章の目的は、衛星筐体も含めたWBMのレスポンスの表を作るために、シミュレータ内に衛星筐体を構築することと、衛星筐体で散乱された光子の影響を調べることである。

### 4.1 TSUBAME衛星のシミュレーション内での構築

#### TSUBAME全体像

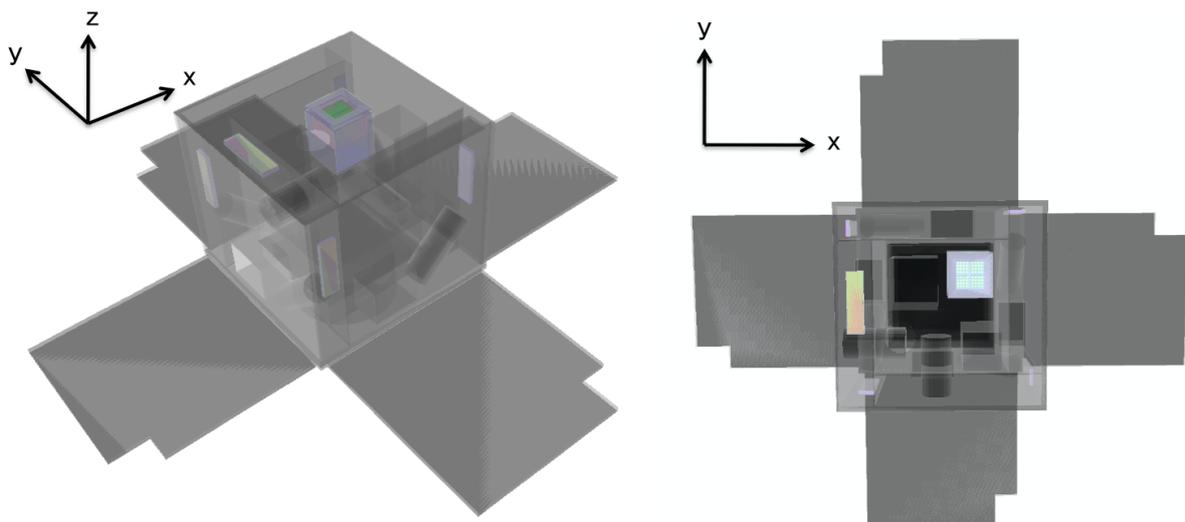


図 4.1: Geant4 上に構築した TSUBAME の全体像。左: 斜め上から。右: 真上から。

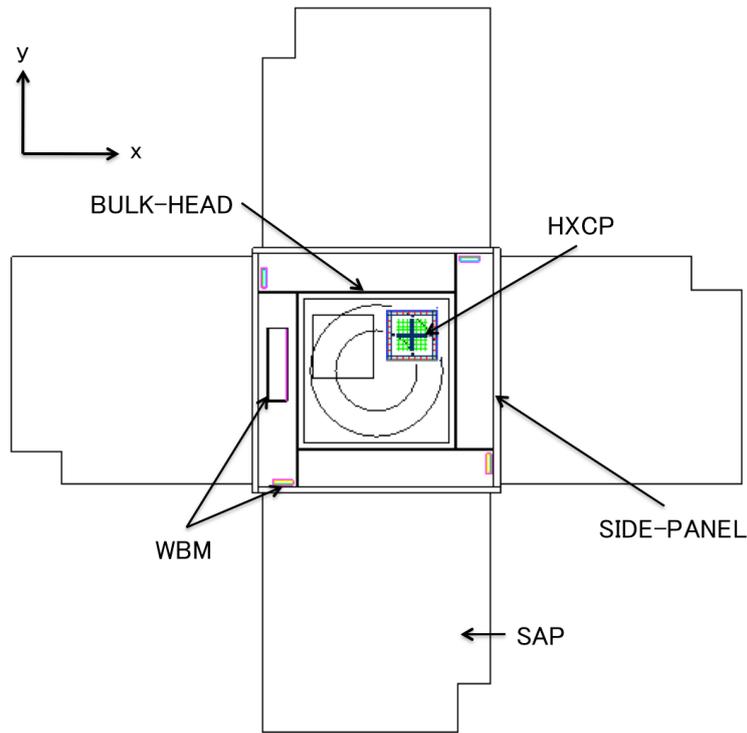


図 4.2: TSUBAME の簡略図 (真上から)

### ベースとなる構造

TSUBAME のベースとなる骨組みを図 4.3 に示す。まず一番下の丸い衛星フレームの上に、土台となる BASE-PANEL があり、そのまわりを太陽電池を搭載する SAP が取り囲んでいる。そして、BASE-PANEL の上には 4 畳半構造で BULK-HEAD が組まれている。さらにもう一つ、BASE-PANEL の上に BULK-HEAD を取り囲むように SIDE-PANEL がある。最後に、BULK-HEAD の上に蓋をするように TOP-PANEL がある。SIDE-PANEL は CFRP で構成されており、他のパーツはアルミで構成されている。SAP はハニカム構造<sup>1</sup>で、軽量の造りになっている。なおシミュレータ内でハニカム構造は、アルミの密度を軽くして、ハニカム構造にしたときの質量と等しくなるようにすることで対応した。

<sup>1</sup>蜂の巣のような、正六角柱を隙間無くならべた構造。Al 薄板 2 枚の間に Al ハニカム板を挟んで接着した軽量の板材。

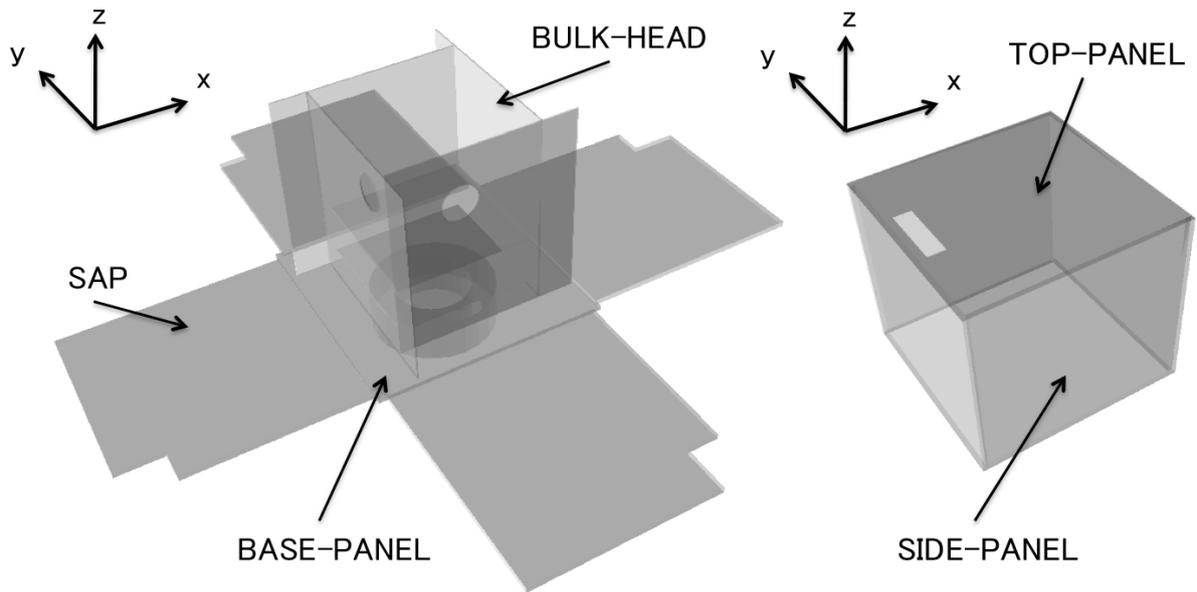


図 4.3: ベースとなる骨組み。左: BASE-PANEL、SAP、BULK-HEAD 等。右: TOP-PANEL、SIDE-PANEL。TOP-PANEL には WBM 用の穴が開いている。

#### 理学観測機器、及びその他のコンポーネント

理学観測機器の WBM や HXCP の他に、比較的重いコンポーネントを取り入れた。理学観測機器は正確に構造や物質を取り入れたが、その他のコンポーネントは大まかに再現した。基板やケーブルに含まれている銅や、CMGに含まれている鉄、スタートトラックに含まれているタングステンなど原子番号の大きい物質は、光電吸収の断面積が大きいいためカウントに影響を与えると予想される。しかし、これらの原子番号の大きい物質はすべて WBM より衛星の内側にあり、さらに、WBM にはこれらからの散乱 X 線を防ぐためのシールドを搭載している。そのため、影響は少ないと予想されるので、今回のモデルには取り込んでいない。これらの物質の影響の評価は、今後の検討課題として挙げられる。

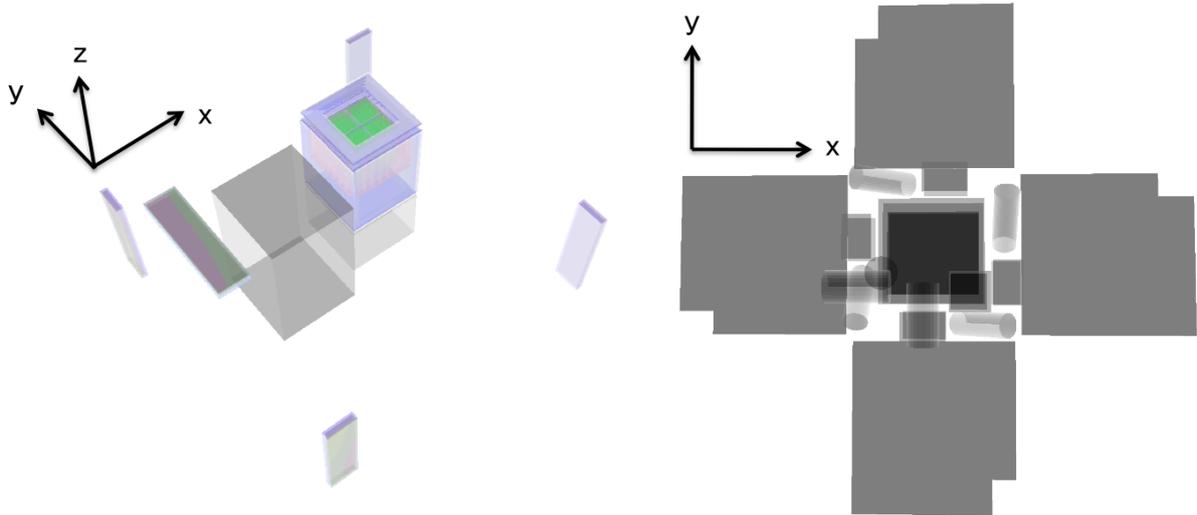


図 4.4: 左: 理学観測機器。WBM、HXCP、理学回路 BOX。右: その他のコンポーネント。CMG、スタートトラック、バッテリー、カメラ等。

## 4.2 筐体の有無によるカウントレートへの影響

まずは、真上(図 4.1, 4.3, 4.4 の +Z 軸方向) から X 線が入射したときに、衛星筐体の有無によるカウントの変化を調べた。その結果が表 4.1 である。それぞれの WBM のカウント  $N_0 \sim N_4$  は図 4.5 のように定義した。入射カウントは  $10^5$  cnts/ $36 \text{ cm}^2$  である。衛星がある場合、側面に取り付けられた WBM のカウントが衛星が無い場合のほぼ倍になった。よって、筐体の影響は大きいことが分かる。

位置決定を重心計算で行う場合は、カウントの大きさがその方向のベクトルの大きさを表していると考えるので、真上から X 線が入射した場合側面の WBM のカウントは 0 となることを想定している。そのため真上から X 線が入射した場合、側面の WBM のカウントの大きさがそのまま系統誤差となって現れる。当然ながら系統誤差は無くすことが望ましいため、このような衛星の有無によるカウントの違いを調査し、影響が大きいようならば改善しなければならない。なお、シンチレータに側面シールドが無い場合、側面の WBM のカウントはさらに大きくなり、系統誤差はより大きくなる。

以上からこの節では、衛星筐体に散乱された X 線等の影響を調べる。特に、真上から  $60^\circ$  傾いた方向から X 線が入射した場合に、WBM のカウント  $N_2$  と  $N_4$  に散乱 X 線によると思われる非対称性が見られた(表 4.2)。入射カウントは  $3.0 \times 10^4$  cnts/ $36 \text{ cm}^2$  である。衛星が無い場合は  $N_2$  と  $N_4$  はエラーの範囲内で一致したが、衛星がある場合には  $N_2$  と  $N_4$  は大きく異なる値となった。ここでは、この現象がなぜ起きたか調査する。

表 4.1: 真上から入射した場合のそれぞれの WBM のカウント

	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$
衛星筐体を含めた場合	83624	2092	2121	2180	2139
衛星筐体を含めない場合	83296	1041	985	1036	1037

表 4.2: 真上から 60° 傾いた方向から入射した場合のそれぞれの WBM のカウント

	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$
衛星筐体を含めた場合	12737	21543	1367	1473	741
衛星筐体を含めない場合	13133	22423	813	1287	804

#### 4.2.1 評価方法

シミュレータ内で、カウントに大きな影響を与えると思われる構造の一部もしくは全部を取り除いた場合や、WBM の背面シールドの密度を上げて、背面から X 線が透過して入射しないようにした場合に、カウントがどのように変化するか調べる。また、散乱 X 線と、背面シールドを透過する X 線の影響を切り分けて調べるために、入射 X 線のエネルギーは 30, 60, 100, 200 keV とする。さらに、実際に GRB が入射したときに、散乱 X 線と、透過 X 線の影響が組み合わさってどのようなカウントが得られるか調べるために、GRB のスペクトルを模擬した X 線を入射させてカウントを調べる。このときの GRB のスペクトルは、低エネルギー側の光子指数が  $\alpha = -1.08$ 、高エネルギー側の光子指数が  $\beta = -2.33$ 、そしてスペクトルの折れ曲がりのエネルギーが  $E_b = 195$  keV の Band 関数を使用した [6]。これらの値は、BATSE で検出した明るいバーストを Band 関数でフィッティングして、分布を調べたときの中央値である [7]。入射カウントは  $3.0 \times 10^4$  cnts/36 cm<sup>2</sup> とする。Band 関数は式 4.1 のように定義される。

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dE} &= A \left( \frac{E}{100 \text{keV}} \right)^\alpha \exp \left( -\frac{E}{E_b} \right) && [(\alpha - \beta)E_b > E] \\ \frac{dN}{dE} &= A \left[ \frac{(\alpha - \beta)E_b}{100 \text{keV}} \right]^{\alpha - \beta} \exp(\beta - \alpha) \left( \frac{E}{100 \text{keV}} \right)^\beta && [(\alpha - \beta)E_b \leq E] \end{aligned} \quad (4.1)$$

#### 4.2.2 結果、及び考察

特に変化が大きかったカウント  $N_2, N_3, N_4$  のグラフを図 4.6, 4.7, 4.8 に示す。アルファベットの有無で物質の有無を表現した (表 4.3)。例えば「A」がある場合はシミュレータ内

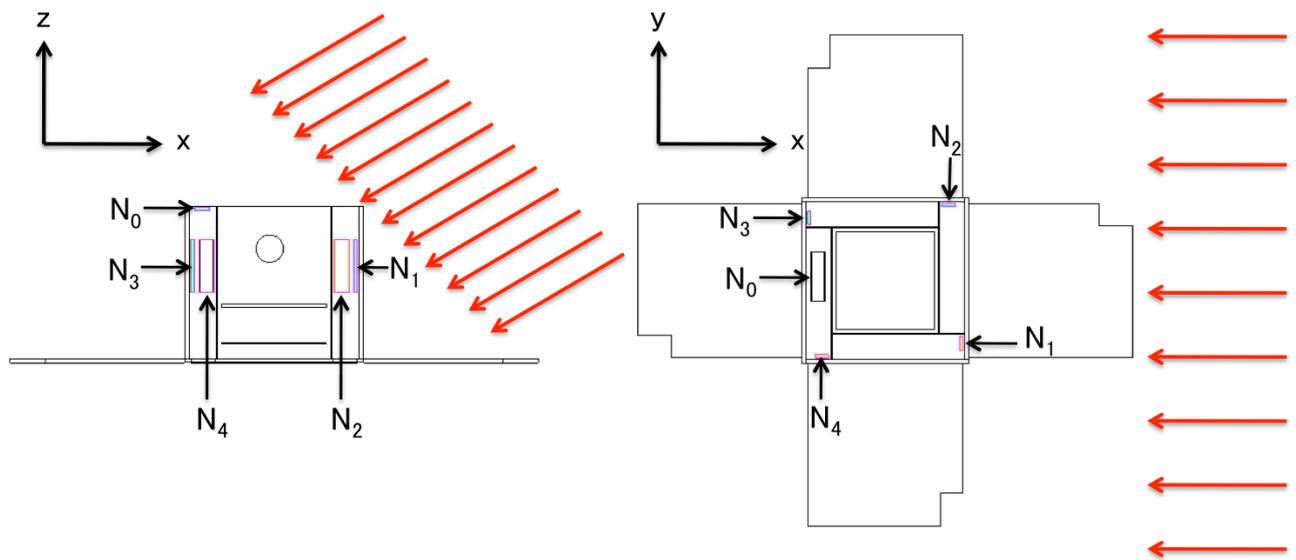


図 4.5: それぞれの WBM のカウント  $N_0 \sim N_5$  の説明。左: 真横から。右: 真上から。+ Z 軸方向を向いた WBM のカウントが  $N_0$  である。同様に + X 方向が  $N_1$ 、+ Y 方向が  $N_2$ 、- X 方向が  $N_3$ 、- Y 方向が  $N_4$  である。Z 軸となす角が  $60^\circ$  で赤い線で示した X 線が入射している。

に SAP が存在することを意味する。同様に「B」は SIDE-PANEL、「C」は BULK-HEAD、「D」は TOP-PANEL、「W」は WBM を表し、「E」は「A」「B」「C」「D」「W」以外の CMG やカメラ等のコンポーネントを表す。「F」がある場合はシンチレータの背面シールドの密度を上げた場合を表す。

入射エネルギーが 30, 60, 100 keV の時はどれも散乱 X 線のカウントが支配的で、カウントは似た傾向を持っていたため、ここでは 100 keV のグラフのみ示す。30 keV、60 keV のグラフは付録 A.1 に示した。また、それぞれのカウントを表にしたものも付録 A.1 に示した。なお、ここでのカウントはシンチレータにエネルギーを落とした X 線を全て計数している。同様に、シンチレータに最小検出可能エネルギーである 30 keV 以上のエネルギーを落とした X 線の数も計数したが、カウントの傾向は変わらなかった。

まず分かるのは、「W」の場合、つまり WBM のみ配置した場合  $N_2$  と  $N_4$  が等しい値になっているので、衛星筐体の影響でカウント  $N_2$  と  $N_4$  に違いが出たことが分かる。また「FW」の場合、つまりシールドの密度を上げて、WBM のみ配置した場合でも  $N_2$  と  $N_4$  は 0 になっていない。これはシンチレータの表面にあるプラスチックにより散乱された X 線を計数しているからだと考えられる。さらに、「F」のシールドの密度を高くした場合に、入射エネルギーが 200 keV の場合カウントが大きく減少したが、100 keV の場合だと

ほとんど変わらなかった。よって、200 keV ではシールドを透過する X 線が、100 keV では散乱 X 線がカウントに影響を与える主要素となっているのが分かる。なお、どのカウントも SAP の影響は少なかった。これは SAP がハニカム構造で出来ており、X 線を散乱しづらいためであると考えられる。

次に、それぞれの WBM ごとにカウントの変化を考察する。その後、それぞれの WBM 間のカウントの関係について考察する。

### カウント $N_0, N_1$ について

$N_0, N_1$  は WBM の検出面がある側から X 線が入射するため、筐体等によるカウントへの影響は比較的少ない。 $N_0$  は「D」の TOP-PANEL に取り付けられており、WBM 用の穴が開いているが、斜め入射のときは若干 TOP-PANEL が検出面に被る。「D」が有る場合にカウントが減少していることから、TOP-PANEL で X 線が吸収されることが分かった。 $N_1$  は「B」の SIDE-PANEL に取り付けられており、「B」が有る場合にカウントが減少していることから、SIDE-PANEL で X 線が吸収されることが分かった。(参考: 付録 A.1)

### カウント $N_2$ について

$N_2$  は X 線が側面から入射する。X 線の経路には「B」の SIDE-PANEL がある。図 4.6 を見ると、特に「B」の SIDE-PANEL が無い場合にカウントが大きく減少していることが分かる。次に、図 4.7 を見ると先に述べたように、「F」のシールドの密度を高くした場合にカウントが減少していることから、200 keV ではシールドを透過する X 線が主要素となっているのが分かる。これらをふまえて図 4.8 を見ると  $N_2$  は、SIDE-PANEL での 100 keV 以下の X 線による散乱と、100 keV 以上の高エネルギー X 線による透過が、カウントのおよそ半分ずつを占めていることが分かる。

### カウント $N_3$ について

$N_3$  は X 線が裏面から入射する。X 線の経路には「C」の BULK-HEAD と「D」の TOP-PANEL がある。図 4.6 を見ると、ここでも「B」の SIDE-PANEL が無い場合にカウントが大きく減少していることが分かる。これは  $N_3$  が、検出面側にある SIDE-PANEL からの散乱 X 線の影響を強く受けているからだと考えられる。また、付録 A.1 の低エネルギーの場合を見ると、「C」「D」が無い場合にカウントが上がっていることから、若干 BULK-HEAD と TOP-PANEL もカウントに影響を与えているようだ。これは、検出面側にある

SIDE-PANEL までの途中の経路にある BULK-HEAD や TOP-PANEL によって、低エネルギー X 線が吸収されるからだと考えられる。次に図 4.7 を見ると、先ほどと同様にシールドを透過する X 線が主な要素となっているのが分かる。最後に図 4.8 を見ると  $N_3$  のほとんどは、透過 X 線によるものだということが分かる。

### カウント $N_4$ について

$N_4$  は X 線が側面から入射する。X 線の経路には「B」の SIDE-PANEL、「C」の BULK-HEAD、及び「D」の TOP-PANEL がある。図 4.6 を見ると、「B」が無い場合にカウントが減少し、「D」が無い場合にカウントが増加しているのが分かるので、SIDE-PANEL と TOP-PANEL がカウントに影響を与えるようだ。これは  $N_4$  が、TOP-PANEL を透過して、SIDE-PANEL で散乱された X 線を計数するからだと考えられる。図 4.7 では先ほどまでと同様に、シールドを透過する X 線が主な要素となっているのが分かる。図 4.8 を見ると  $N_4$  は、散乱 X 線と、透過 X 線がカウントのおよそ半分ずつを占めているのが分かる。

### カウント $N_2, N_3, N_4$ 間の関係

以上の考察を踏まえて、 $N_2, N_3, N_4$  間の関係について考察する。

図 4.6 を見ると、WBM のみ配置した場合には  $N_2$  と  $N_4$  が同じ値になっているが、他の場合には異なる値となっている。これは近くに散乱体となる SIDE-PANEL や、その他のコンポーネントなどとの、位置関係が違うことが原因であると考えられる。 $N_2$  は X 線の入射方向側に近いのに対して、 $N_4$  は遠い。そのため、 $N_4$  の近くの散乱体に到達するまでに X 線が減衰する。また、WBM のみ配置した場合に  $N_3$  の値のみほぼ 0 になったのは、 $N_3$  は裏面から X 線が入射するため、シンチレータ表面のプラスチックに X 線が入射しないためである。

次に図 4.7 を見ると、 $N_2, N_4$  に比べて  $N_3$  は、「F」の有無によるカウントの変化が大きいため、シールドを透過する X 線の影響が大きいためである。これは  $N_2, N_4$  は側面から X 線が入射するが、 $N_3$  は裏面から入射することが原因である。側面の長手側の面積は  $6 \text{ cm}^2$  であるのに対して裏面の面積は  $36 \text{ cm}^2$  なので、面積の違いによるシールドを透過する X 線の数の違いが出ているのである。

## まとめ

最後に今までの考察を全て考慮して、なぜ図 4.8 のようなカウントが得られたか考察する。

まず、SIDE-PANEL が無い場合カウントが大きく減少することから、SIDE-PANEL での X 線の散乱がカウントに大きな影響を与えることが分かった。それは SIDE-PANEL までの経路に他の物質が無い  $N_2$  において最も顕著に見られた。次に TOP-PANEL 等の、SIDE-PANEL までの経路の途中にあるコンポーネントを通過することにより、SIDE-PANEL まで到達する X 線が減少することで、散乱 X 線の数が減る現象が  $N_4$  に見られた。また、シールドを透過する X 線もカウントに十分含まれることが分かった。X 線が裏面から入射し、受光面積の大きい  $N_3$  はほとんどがシールドを透過する X 線によるものだと分かった。結局、WBM 以外の物質による散乱により、 $N_2$  と  $N_4$  のカウントに違いが出たことが分かり、最も大きな影響を与えるコンポーネントは SIDE-PANEL であることが分かった。

$N_2$  と  $N_4$  の値の違いは、SIDE-PANEL による散乱の影響が大きいので、側面に取り付けられる WBM の位置を面の端ではなく、面の中央にすれば解決出来ると考えられる。また、値そのものを低減させるためには、SIDE-PANEL の内側に取り付けるのではなく、WBM の面と SIDE-PANEL の外側の面が同じ位置になるように配置すれば良いと考えられる。今後このような改善処置を検討し、可能ならば施す予定である。

なお、透過 X 線を低減するには背面シールドを厚くすればよいが、質量の制限があるため難しい。

表 4.3: アルファベットと対応するコンポーネント

アルファベット	対応するコンポーネント
A	SAP
B	SIDE-PANEL
C	BULK-HEAD
D	TOP-PANEL
E	ABCDW 以外のコンポーネント
F	背面シールド密度高
W	WBM

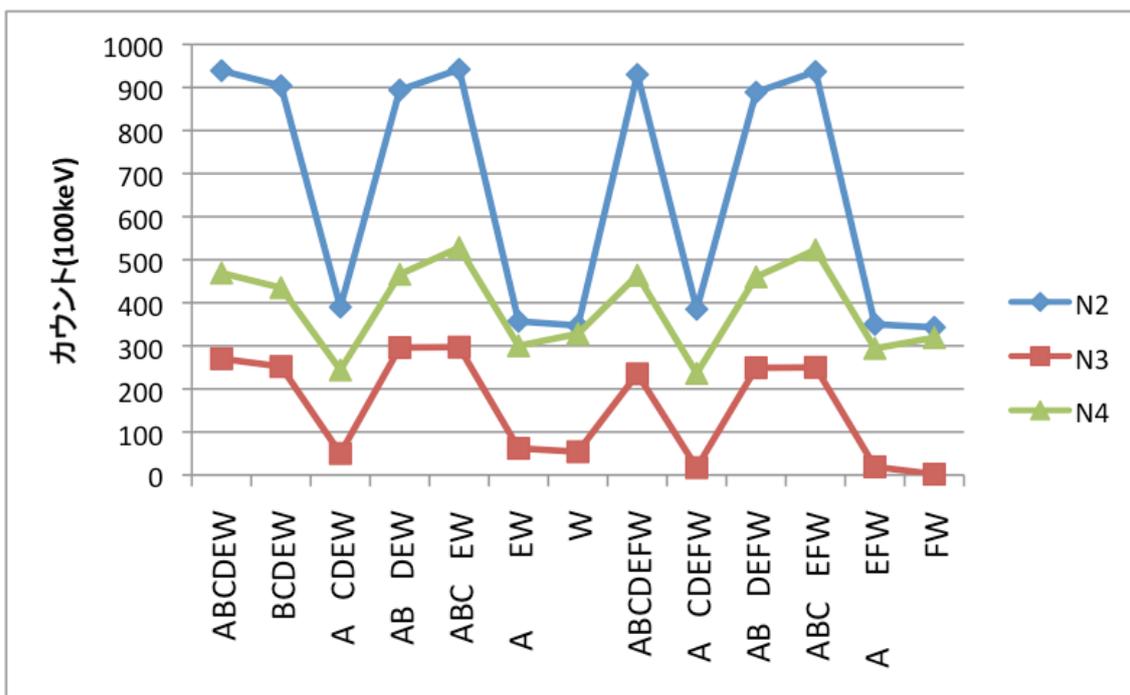


図 4.6: 入射エネルギー 100 keV のときのカウント

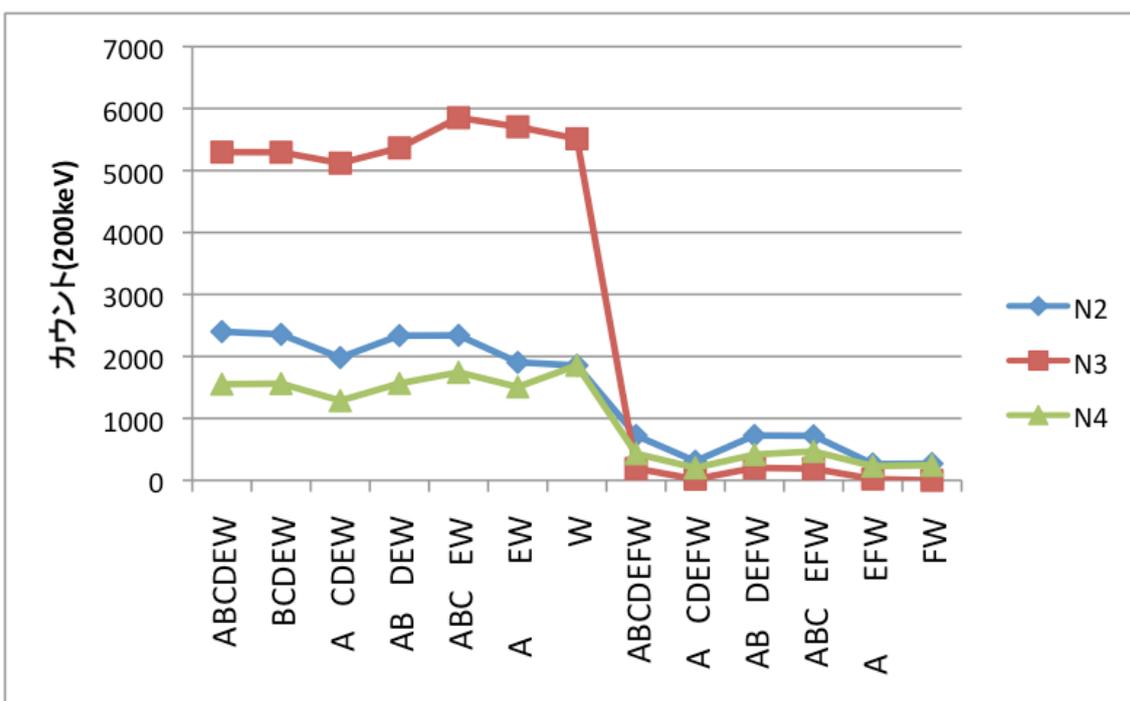


図 4.7: 入射エネルギー 200 keV のときのカウント

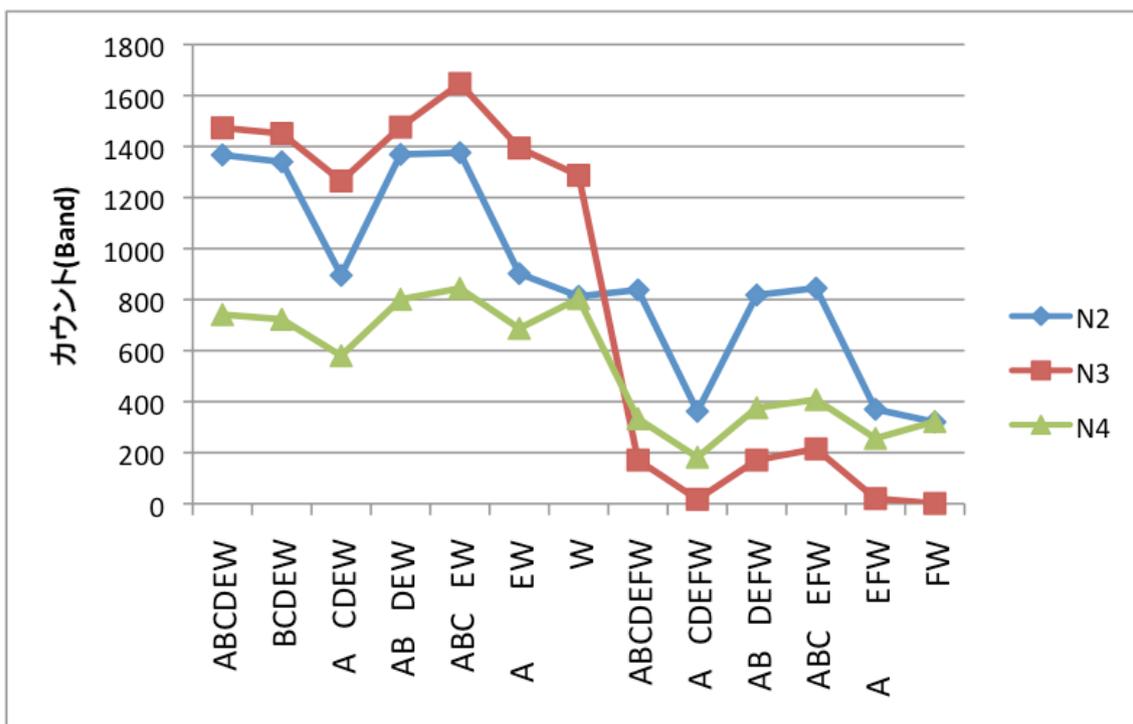


図 4.8: Band 関数のときのカウント

# 第5章 位置決定手法

この章では、衛星機上で実行し、GRBの位置を決めるのに「最適」な手法を考察する。ここでの「最適」とは二つの要素があり、一つは位置決定精度が良いこと。もう一つは処理時間が短いということである。(さらに前提条件として、WBMのメモリに搭載出来るデータサイズでなければならない。)

## 5.1 位置決定手法

### 5.1.1 関数による位置決定

関数による位置決定は重心法を使う。この方法ではそれぞれの面に置かれたWBMのカウン트가、その面の法線方向のベクトルの大きさを表していると考えられる。したがって、それぞれのカウン트는GRBのフラックスを $F$ 、シンチレータの面積を $S$ として、式5.1, 5.2, 5.3のように表される。

$$N_X = FS \sin \theta \cos \phi \quad (5.1)$$

$$N_Y = FS \sin \theta \sin \phi \quad (5.2)$$

$$N_Z = FS \cos \theta \quad (5.3)$$

よって、入射角 $\theta, \phi$ はそれぞれ式5.4、式5.5のように表される。

$$\theta = \arctan \sqrt{\frac{N_X^2 + N_Y^2}{N_Z^2}} \quad (5.4)$$

$$\phi = \arctan \frac{N_Y}{N_X} \quad (5.5)$$

実際の位置決定では、 $N_Z$ は+Z軸方向(図4.1,4.4参照)を向いたWBMのカウン트를、 $N_X, N_Y$ は側面方向を向いたWBMのうち、カウン트의大きい二つの値を使用する。

### 5.1.2 レスポンスの表による位置決定

もう一つの位置決定手法は、あらかじめシミュレーションでWBMのカウンターのレスポンスの表を作り、その表に最も近い値をサーチするというものである。レスポンスの表は、入射角 $\theta, \phi$ を変えていきX線を入射させ、各WBMでのカウントを計数することによって作成する。このときのカウントは、統計誤差が無視出来るほど多くするのが望ましい。(レスポンスの表の例を、表5.1に示す)

WBMのカウントは二つのパラメータに強く依存していて、一つはGRBの入射角で、もう一つはGRBの強度である。そのため入射角を求める際には、GRBの強度を求めなければならない。よって、まずGRBのフラックス $F \times$ 面積 $S$ を、式5.6で求める。 $(N_X, N_Y$ は側面に配置されたWBMのうち、カウントの大きい二つの値を使用する)。同様にして、あらかじめ作ったレスポンスの表からも、レスポンスの表のカウントのフラックス $F' \times$ 面積 $S$ を求める。

$$FS = \sqrt{N_X^2 + N_Y^2 + N_Z^2} \quad (5.6)$$

次に、それぞれのカウントをフラックス $\times$ 面積で割ることで規格化する(式5.7, 5.8)。(iは0から4の値。 $N_0 \sim N_4$ の定義は図4.5と同様)

$$r_i = \frac{N_i}{FS} \quad (\text{GRBのカウントから}) \quad (5.7)$$

$$R_i(\theta, \phi) = \frac{N_i}{F'S} \quad (\text{レスポンスの表のカウントから}) \quad (5.8)$$

そして、 $R_i(\theta, \phi)$ をカウントの理論値とし、式5.9から理論値と実測値のずれを示す $\chi^2$ を求め、 $R_i$ のパラメータ $\theta, \phi$ を変えていき $\chi^2$ が最小となる角度を求める。

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^4 \frac{(r_i - R_i(\theta, \phi))^2}{\sigma_{R_i}^2} \quad (5.9)$$

このままだと $\theta, \phi$ は離散的な値しかとれないため(レスポンスの表が離散的なため)、図5.1のように、最小値の隣の角度の $\chi^2$ の値を通る二次関数を用いて補正する。そして、二次関数が最小値をとる角度を最終的な決定角とする。

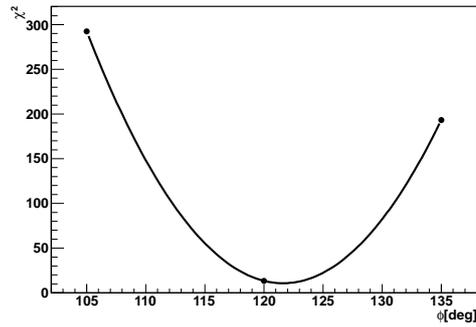


図 5.1: 隣の値を使って補正する例。この場合では、 $\phi$  が  $105^\circ, 120^\circ, 135^\circ$  の時の  $\chi^2$  の値を通る二次関数を求める。そしてその二次関数が最小値をとる  $122^\circ$  が  $\phi$  の決定角となる。

表 5.1: レスポンスの表の例。 $N_0 \sim N_4$  の定義は図 4.5 と同様である。カウントは  $3000 \text{ cnts}/36 \text{ cm}^2$  で作成した。

$\theta$	$\phi$	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$
0	0	2545	56	62	79	61
15	0	2352	621	81	78	71
30	0	2208	1269	82	80	75
45	0	1901	1693	99	121	86
60	0	1312	2127	138	133	74
75	0	569	2455	156	147	69
90	0	68	2518	124	166	73
15	15	2331	572	150	71	62
30	15	2299	1178	319	112	72
45	15	1830	1713	451	119	78
$\vdots$						

## 5.2 性能評価

二種類の位置決定手法について、位置決定精度および計算時間を調べ、比較する。

### 5.2.1 評価方法

- 二種類の位置決定手法を用い、天球上のランダムな位置から GRB を入射させ、入射角と決定角のずれの分布を調べる
- 処理にかかる時間を測定する

入射角と決定角のずれ  $\eta$  は、入射角方向ベクトルを  $\mathbf{A}$ 、決定角方向ベクトルを  $\mathbf{B}$  とすると、ベクトルの内積から、式 5.10 を用いて計算できる。

$$\eta = \arccos \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{A}| |\mathbf{B}|} \quad (5.10)$$

レスポンスの表は  $15^\circ$  刻みで、カウントは  $3000 \text{ cnts}/36 \text{ cm}^2$  である。

GRB のカウントレートは  $1000 \text{ cnts}/36 \text{ cm}^2/2 \text{ s}$ 、スペクトルは第 4 章と同様に、 $\alpha = -1.08, \beta = -2.33, E_b = 195 \text{ keV}$  の Band 関数とする。バックグラウンドのカウントレートは  $5 \text{ cnts}/\text{cm}^2/\text{s}$  とする。

### 5.2.2 結果

図 5.2, 5.3 から、現状では関数の方が位置決定精度が良いことが分かった。関数を用いた位置決定では、ずれ  $\eta$  は全体の 90% が  $4^\circ$  以内に収まっている。それに対して表を用いた位置決定では、ずれ  $\eta$  が  $4^\circ$  以内に収まるのは全体の 20% 程度で、全体の 90% が収まるのはずれが  $10^\circ$  以内のときであった。また処理時間も、研究室のパソコン (3 GHz) では、関数の場合だと  $2 \mu\text{s}$ 、表の場合  $529 \mu\text{s}$  で、関数の方が良いことが分かった。なおクロック周波数やメモリを考慮して実機ではこの 1 万倍時間がかかるとすると、処理時間は関数の場合で  $20 \text{ ms}$ 、表の場合だと  $5.29 \text{ s}$  かけると予想される。表の場合の  $5.29 \text{ s}$  という処理時間はバーストの判定時間よりも長いいため致命的であるが、関数で求めた位置付近のみサーチするという手法を使えば解決できる。

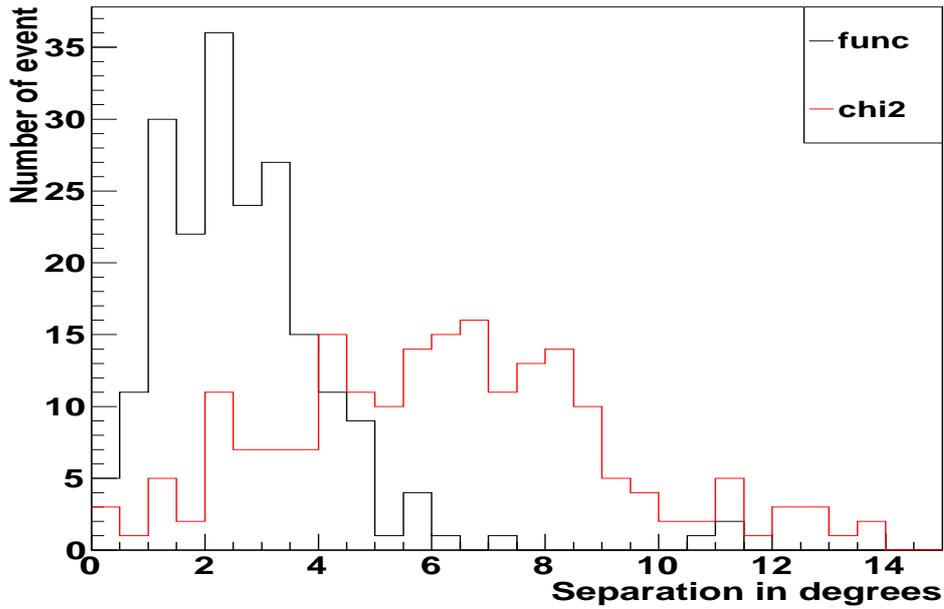


図 5.2: 入射角と決定角のずれ $\eta$ の分布。横軸は $\eta$ で、縦軸はイベント数である。黒線が関数、赤線が表による位置決定の場合である。

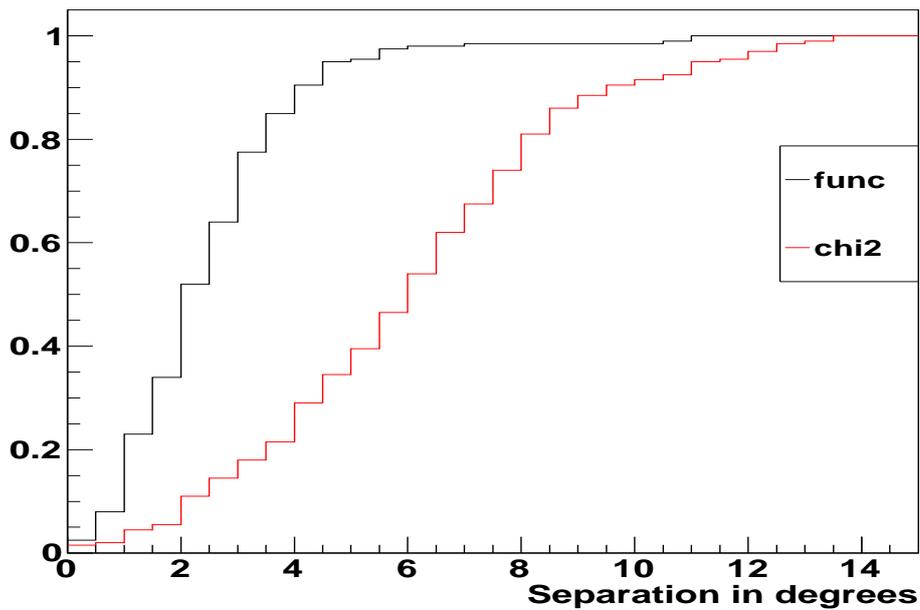


図 5.3: 入射角と決定角のずれ $\eta$ の分布の積分値。横軸は $\eta$ で、縦軸は $\eta$ が横軸の値以下だったイベント数であり、全イベントで1となるよう規格化してある。黒線が関数、赤線が表による位置決定の場合である。

### 5.2.3 考察

関数による位置決定では、図 5.2 を見ると、入射角と決定角のずれの最頻値は  $\sim 2.5^\circ$  であることがわかる。 $0^\circ$  が最頻とならなかったのは、系統的な誤差が影響しているのではないと思われる。関数による位置決定の場合、単純に幾何学的な構造のみから位置を決定するため、シンチレータの周りの物質や、筐体散乱 X 線等の影響を取り入れてない。そのため系統誤差が生じると考えられる。

レスポンスの表による位置決定では、関数で求める方法に比べて精度が悪くなっている。これは、現在レスポンスの表は  $15^\circ$  おきに作成されているため、単純に表が粗いことが原因であると考えられる。

## 5.3 系統誤差の原因調査

先の結果から、関数を用いた位置決定には系統的な誤差がある可能性が分かったので、その系統誤差にどのような傾向があるか調べる。また、現状のレスポンスの表を用いた位置決定では、関数を用いた位置決定に比べて精度が低いことが分かったので、その原因を詳しく調べる。

### 5.3.1 評価方法

ずれの系統的な誤差を調べるため、入射角  $\theta, \phi$  を等間隔に  $5^\circ$  おきにして GRB を入射させ、入射角と決定角の系統誤差を調べる。

レスポンスの表は  $15^\circ$  刻みで、カウントは  $3000 \text{ cnts}/36 \text{ cm}^2$  である。

GRB のカウントレートは  $1000 \text{ cnts}/36 \text{ cm}^2/2 \text{ s}$ 、スペクトルは  $\alpha = -1.08, \beta = -2.33, E_b = 195 \text{ keV}$  の Band 関数とする。ここでは系統的な誤差のみ評価したいため、バックグラウンドは無しとする。

### 5.3.2 結果、及び考察

図 5.4, 5.5 は、GRB の入射角  $\theta, \phi$  とそのときの、入射角と決定角のずれの大きさ  $\eta$  を、色で表した図である。図 5.6, 5.7 は、GRB を角度  $\theta, \phi$  で入射したときに、決定角がどの方向にずれるかを表した図である。矢印の根元の赤い点が入射角で、矢印の先が決定角である。

## 関数を用いた場合

図 5.4, 5.6 を見ると決定角は、 $\phi$  が  $0^\circ, 90^\circ$  付近、 $\theta > 45^\circ$  の領域でずれが大きくなり、 $\phi$  の値が大きくなる方向にずれていることが分かる。これは第 4 章で判明した、カウントの非対称性の影響が出ていると考えられる。カウントが大きくなる方向に決定角が引っ張られているのである。ほかには、 $\theta$  が  $20^\circ$  付近と  $70^\circ$  付近の領域においてずれの大きさは異なっていることが分かる。これは + Z 軸方向を向いた WBM はアルミの単板に取り付けられていて、GRB の光子を吸収しないように WBM の形に穴が開けられているのに対し、側面の WBM は CFRP に取り付けられていて、穴は開いていない。穴が開いている場合、入射角によって WBM を覆う面積が変わる。この覆う面積の違いと、アルミと CFRP という物質の違いにより、吸収される光子数に違いが出る。この違いが位置決定のずれに系統的な誤差を及ぼしているのではないかと思われる。

## 表を用いた場合

図 5.5, 5.7 を見ると決定角は、 $\theta, \phi$  ともに  $45^\circ$  付近でずれが小さく、その他の領域では大きいことが分かる。これは、現状の  $15^\circ$  おきのレスポンスの表では粗いため、最小  $\chi^2$  とその隣の角度の  $\chi^2$  を二次関数で結ぶ補正がうまく作用しないためだと考えられる。二次関数で結ぶ補正が可能なのはレスポンスの表が細かく、隣の角度の差が微小な時のみであると考えられる。図 5.7 から  $\chi^2$  の値は  $\theta, \phi$  が  $45^\circ$  付近で比較的小さくなる傾向があると予想される。これは第 3 章で、X 線の入射角  $\theta$  が  $45^\circ$  のとき最も位置決定精度が低くなったことに対応していて、 $45^\circ$  付近では入射角の変化に対するカウントの変化が小さくなり、 $\chi^2$  の値の変化も小さくなるということを示唆している。

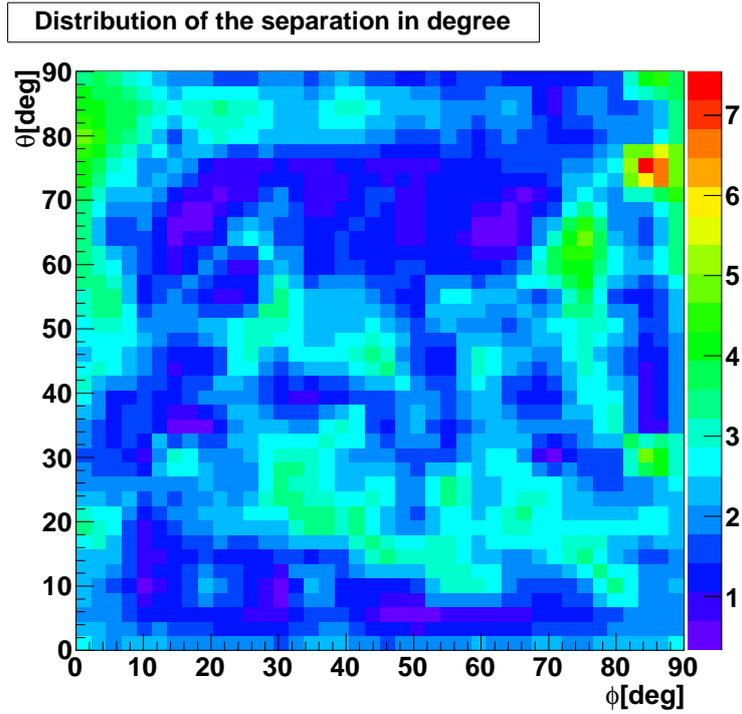


図 5.4: 関数を用いた場合の、入射角と決定角のずれの等高線。横軸が $\phi$ 、縦軸は $\theta$ で、ずれの大きさ $\eta$ は色で表した。

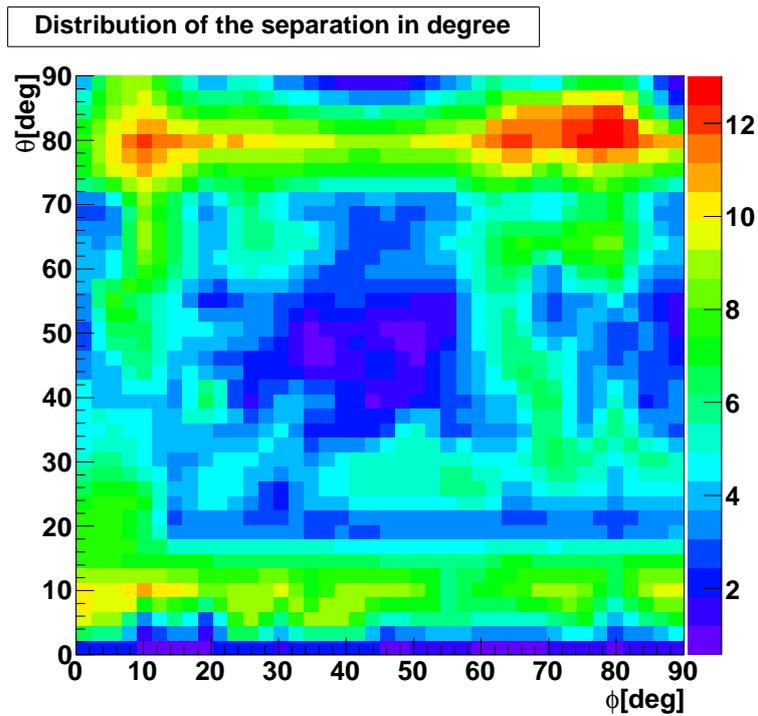


図 5.5: 表を用いた場合の、入射角と決定角のずれの等高線。横軸が $\phi$ 、縦軸は $\theta$ で、ずれの大きさ $\eta$ は色で表した。

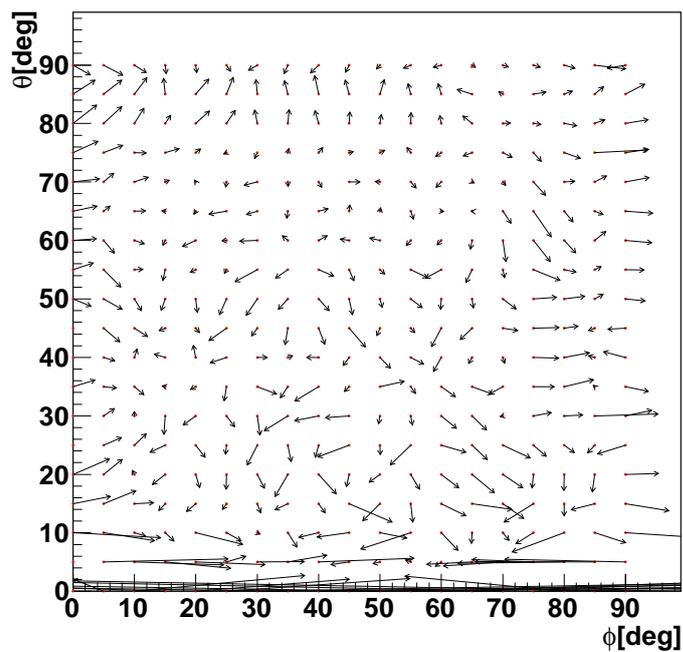


図 5.6: 関数を用いた場合の、入射角と決定角のずれのベクトル図。横軸が  $\phi$  で縦軸は  $\theta$  である。矢印の根元が入射角、矢印の先端が決定角を表している。

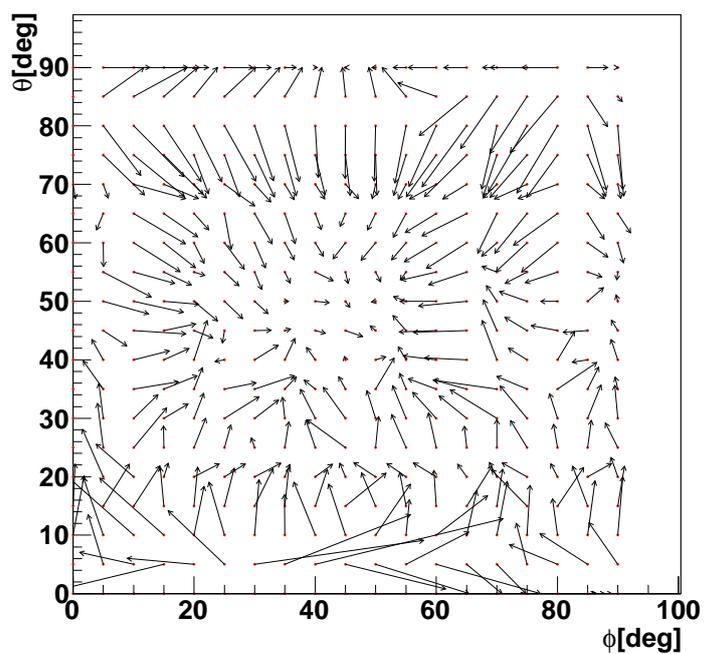


図 5.7: 表を用いた場合の、入射角と決定角のずれのベクトル図。横軸が  $\phi$  で縦軸は  $\theta$  である。矢印の根元が入射角、矢印の先端が決定角を表している。

## 5.4 系統誤差の改善

関数による位置決定の系統的な誤差を改善するためには、衛星筐体や周りの物質からの散乱 X 線や、WBM の背面シールドを透過してくる X 線の数を減少させることが必要である。だが、質量の制約から背面シールドを厚くして透過 X 線の数を減少させることは難しく、構造の制約から散乱 X 線を少なくすることにも限度がある。よって関数による位置決定での対策は、第 4 章で示した、側面の WBM の取り付け位置をその面の中央にする配置と、SIDE-PANEL の外側の面と WBM の検出面が一致する配置にするよう検討するだけに留める。

レスポンスの表による位置決定のずれを改善するためには、表を細かくすること、そしてカウントを増やし統計誤差を少なくすることが必要である。まず、カウントを増やして表の統計誤差を少なくしたが、決定角のずれは小さくならなかった。図 5.7 を見ると分かるように、このずれは現状では、表が粗いことによる系統誤差が主であると考えられる。よってここでは、カウントの多さは変えずに 3000 cnts/36 cm のままでレスポンスの表を細かくし、位置決定精度がどの程度変化するか評価する。

### 5.4.1 評価方法

第 5.3.1 節と同様の方法でずれの系統的な誤差を評価する。入射角  $\theta, \phi$  を等間隔に  $5^\circ$  刻みで GRB を入射させ、入射角と決定角の系統誤差を調べる。

今回はレスポンスの表は  $3^\circ$  刻みで、カウントは 3000 cnts/36 cm<sup>2</sup> である。またその範囲は、以前は  $0^\circ \leq \theta < 90^\circ, 0^\circ \leq \phi < 360^\circ$  であったが、マシンタイムの制限から今回は、 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ, 0^\circ \leq \phi < 45^\circ$  の範囲<sup>1</sup>で作成している。

GRB のカウントレートは 1000 cnts/36 cm<sup>2</sup>/2 s、スペクトルは  $\alpha = -1.08, \beta = -2.33, E_b = 195$  keV の Band 関数とする。バックグラウンドのカウントレートは 5 cnts/cm<sup>2</sup>/s としたものと、系統的な誤差のみ評価したいため無しとしたものがある。

### 5.4.2 結果、及び考察

結果を図 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 に示す。図 5.8, 5.9 はバックグラウンドの揺らぎの影響を入れた。図 5.10, 5.11 は系統的な誤差のみ評価したいため、バックグラウンド揺らぎの影響は入れなかった。改善処置を施した後では、関数による手法と同程度の位置決定精度と

<sup>1</sup>隣の値を使用し補正するので正確には  $\phi$  は、 $-9^\circ \sim 54^\circ$  の範囲で作成した

なったことが分かる。ベクトル図 5.11 も、以前のベクトル図 5.7 に見られた、決定方向が系統的に  $\theta, \phi$  が  $45^\circ$  付近に向かう現象は見られない。

そもそも表による位置決定には、カウントに筐体散乱 X 線等の影響が取り入れられている。そのため、もし表を無限に細かくし、そのカウントも統計誤差が無視出来るほど多くしたならば、位置決定における系統的な誤差は無くなり、検出光子数の統計誤差のみになる。よって、原理的には表による位置決定の方が精度を良くすることが出来る。しかし現実的には機上の MPU の性能や搭載できるデータ量は限度があるため、複雑で膨大なアルゴリズムは搭載できない。表による位置決定手法が搭載されるのは、そのような制限の元でも、関数による位置決定より精度が良くなる場合である。

なお実際に GRB を検出した場合、地上で WBM のデータを再解析出来る。なのでその場合には、十分に細かく、統計誤差を無視出来るほどカウントを多くとった表から位置決定を行い、系統誤差をなくすことが望ましい。

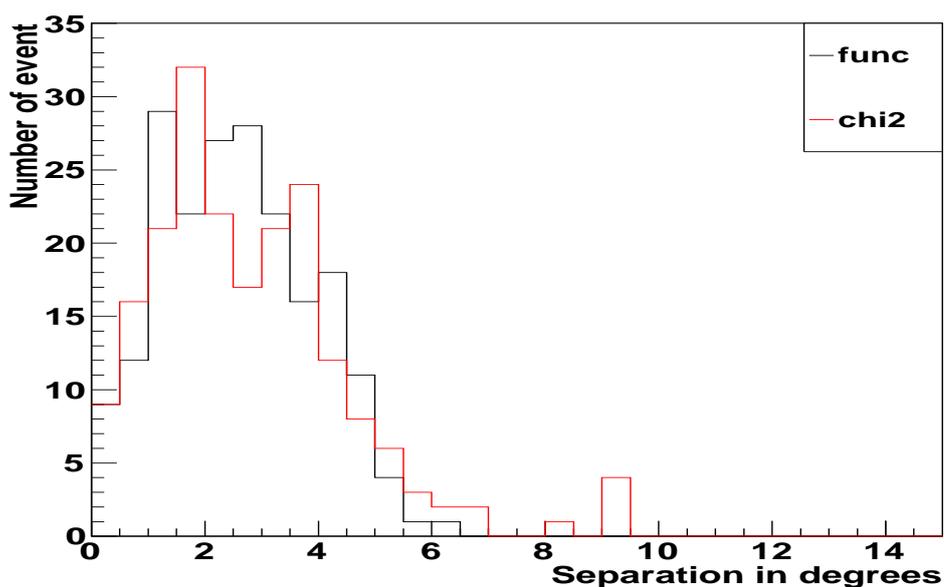


図 5.8: 改善処置後の入射角と決定角のずれ  $\eta$  の分布。横軸は  $\eta$  で縦軸はイベント数である。黒線が関数で、赤線が表による位置決定の場合である。

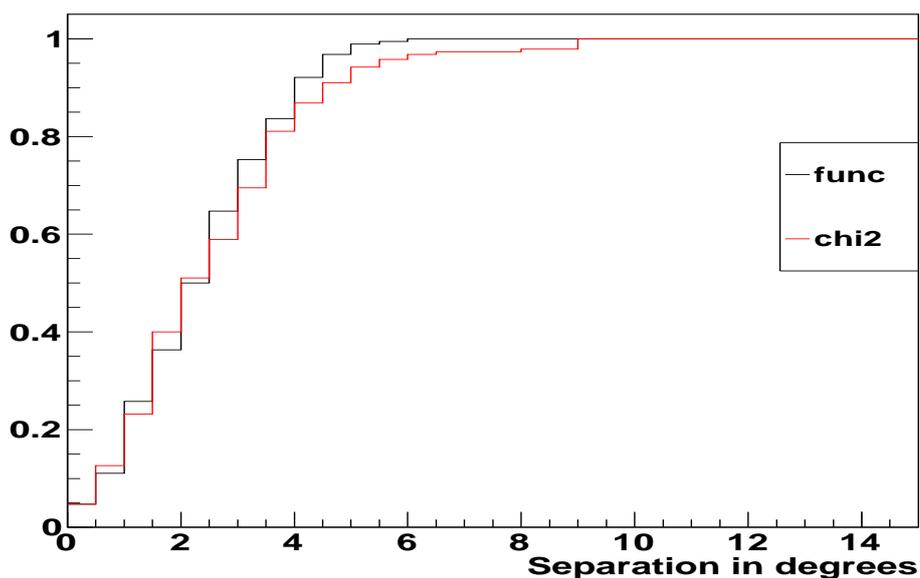


図 5.9: 改善処置後の入射角と決定角のずれ  $\eta$  の分布の積分値。横軸は  $\eta$  で縦軸は  $\eta$  が横軸の値以下だったイベント数であり、全イベントで1となるよう規格化してある。黒線が関数で、赤線が表による位置決定の場合である。

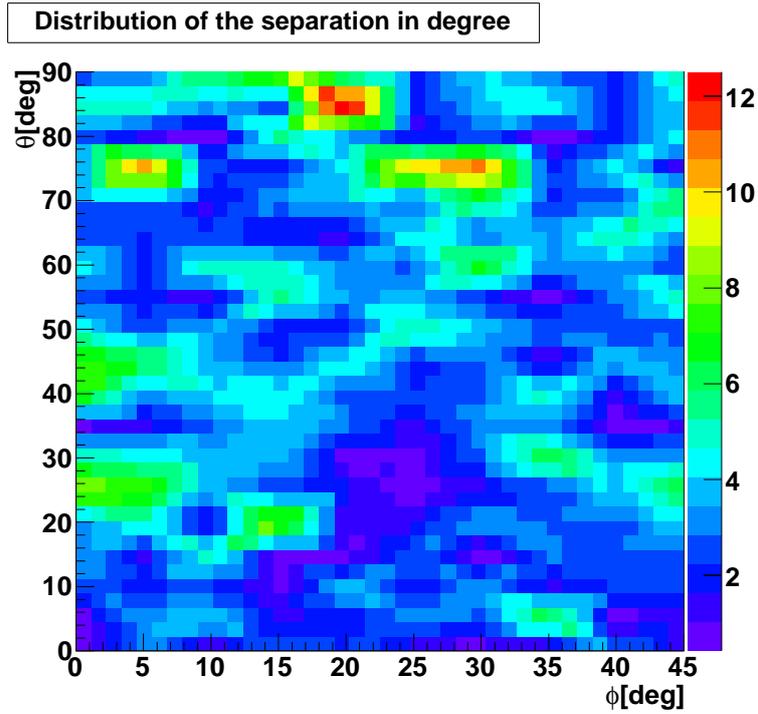


図 5.10: 改善処置後の表を用いた場合の、入射角と決定角のずれ  $\eta$  の等高線。横軸が  $\phi$ 、縦軸は  $\theta$  で、ずれの大きさ  $\eta$  は色で表した。

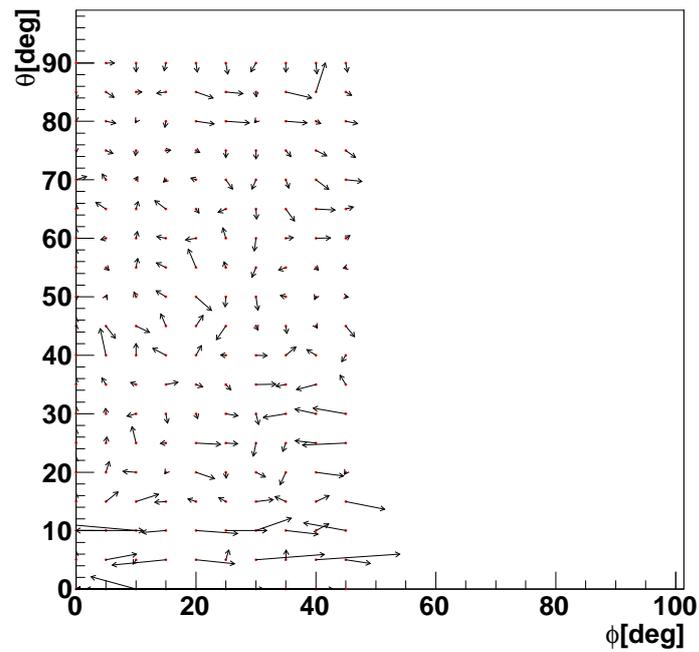


図 5.11: 改善処置後の表を用いた場合の、入射角と決定角のずれのベクトル図。横軸が  $\phi$  で縦軸は  $\theta$  である。矢印の根元が入射角、矢印の先端が決定角を表している。

## 第6章 まとめと今後の課題

### 6.1 まとめ

本論文では、超小型衛星 TSUBAME 搭載用広視野バーストモニタ (WBM) のデザインの最適化と、衛星筐体により散乱される X 線の影響の評価、および位置決定手法の性能評価について述べた。

WBM のデザインの最適化では、位置決定精度のよくなる CsI シンチレータの形状、配置の評価を行った。その結果、直方体のシンチレータの背面だけでなく側面にもシールドをし、互いに直角に配置した場合が最も位置決定精度が良くなることが分かった。さらに、シンチレータの前面に設置するプラスチックシールドの厚みの最適化を行った。このシールドは荷電粒子バックグラウンドを遮蔽しながら光子のみを透過しなければならない為、最適な厚みを検討しなければならない。現状の厚みの候補での、バックグラウンドとなる電子の全減数率は 98.8% で、光子の検出効率は 75% であった。

次に、この研究結果をベースに設計された WBM が実際に GRB の位置を決定出来るのかどうかを検証した。その際に、検出光子数の非対称性を発見した。これは衛星筐体の SIDE-PANEL に散乱された X 線が主な原因となっていることが分かった。この非対称性は位置決定に影響を及ぼすので、改善処置を行うよう検討した。この様な検出器の特性を考慮した上で位置決定の計算アルゴリズムとして、重心計算法と、シミュレーションで作成した表を参照し角度を求める方法の、位置決定精度と処理時間を比較し検討した。その結果、位置決定精度は分解能  $15^\circ$  のレスポンスの表と比較した場合、重心計算法の方が良いことが分かった。分解能  $3^\circ$  のレスポンスの表を用いた場合同程度になった。なおその精度は、 $1000 \text{ cnts}/36 \text{ cm}^2/2 \text{ s}$  という月に 1 回程度起こり、偏光検出が期待される明るい GRB の場合、 $3^\circ$  程度であった。処理時間は重心計算法の方が遥かに短く、位置決定精度の結果も合わせると、現状では重心計算法の方が性能が良いことが分かった。

## 6.2 今後の課題

今後は、まず、より正確にバックグラウンドの影響を見積もる為に、宇宙背景 X 線放射をシミュレータ内に再現する必要がある。だが GRB と同期していない定常的なバックグラウンドは、GRB が起きる以前のカウンtrateから補正ができる。そのため、位置決定精度への影響は統計的な揺らぎのみである。次に、地球大気に散乱された GRB の影響を評価する必要がある。大気散乱 GRB は、GRB と同期して Tsubame に入射してくるため、バックグラウンドとして除去することが難しい。そのため影響が大きく系統誤差となって現れる可能性がある。そして、これらを考慮した上で位置決定手法の性能を検討し、その実行時間を実機や実機と同様のマイコン等で評価することで、最終的な位置決定手法を確定する。最後に、確定した位置決定手法をもとに、GRB の強度やスペクトル、発生頻度等を考慮した、総合的な位置決定精度の評価を行う。

# 付録A

## A.1 筐体散乱X線の評価

第4章で載せきれなかった、筐体の有無によるカウントへの影響に関するグラフや表をここに載せる。

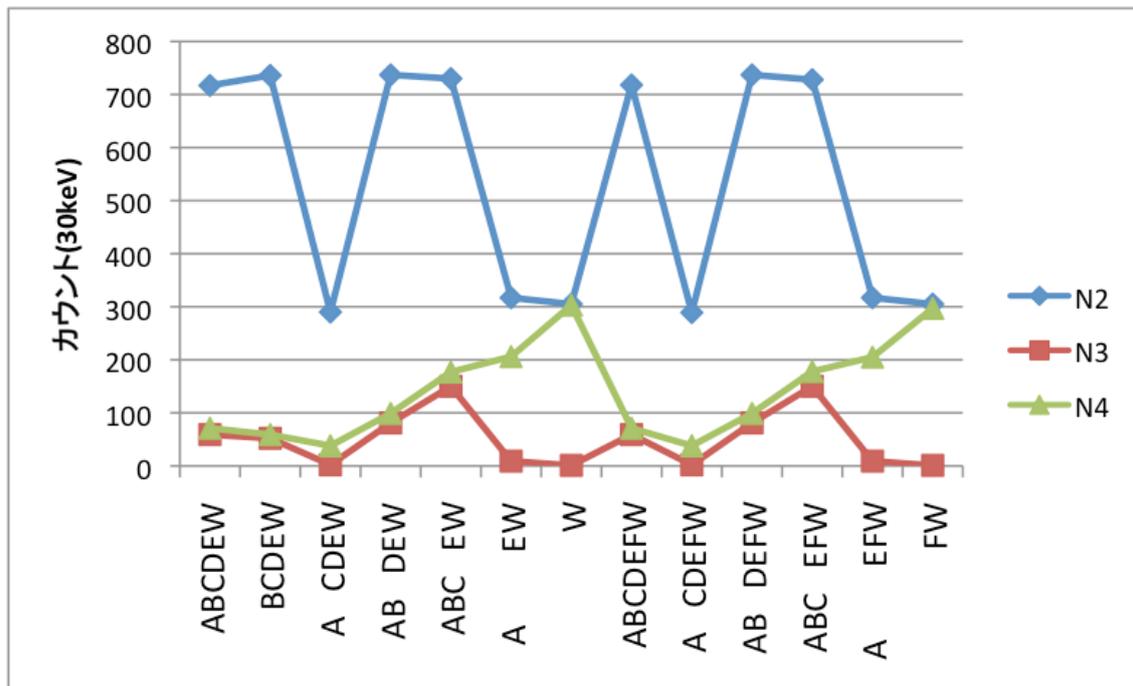


図 A.1: 入射エネルギー 30 keV のときのカウント

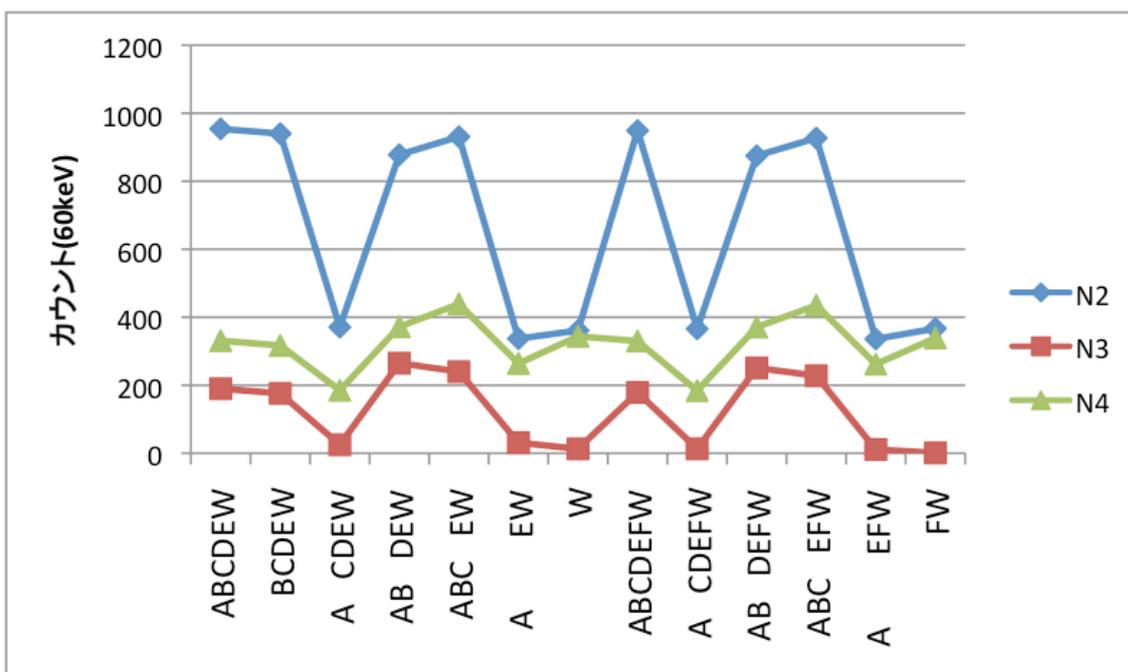


図 A.2: 入射エネルギー 60 keV のときのカウント

表 A.1: X線入射エネルギー 30 keV のときのカウント

	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$
ABCDEW	12126	23152	717	59	71
BCDEW	12139	23083	736	52	59
ACDEW	12223	24580	290	2	38
ABDEW	12123	23216	737	81	99
ABCEW	13491	23183	730	150	177
AEW	13486	24432	317	9	206
W	13408	24412	305	1	303
ABCDEFW	12115	23148	718	59	71
ACDEFW	12216	24585	289	2	38
ABDEFW	12124	23228	737	81	99
ABCEFW	13492	23184	728	150	178
AEFW	13488	24442	317	9	205
FW	13415	24356	305	1	297

表 A.2: X線入射エネルギー 60 keV のときのカウント

	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$
ABCDEW	14204	24517	954	190	331
BCDEW	14165	24584	940	176	317
ACDEW	14156	25447	371	25	185
ABDEW	14080	24599	878	265	372
ABCEW	14482	24416	931	240	439
AEW	14430	25266	337	31	264
W	14432	25327	361	13	344
ABCDEFW	14204	24520	949	179	330
ACDEFW	14150	25437	366	13	184
ABDEFW	14064	24594	875	251	371
ABCEFW	14477	24411	927	228	435
AEFW	14434	25239	336	11	262
FW	14427	25348	367	1	339

表 A.3: X線入射エネルギー 100 keV のときのカウント

	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$
ABCDEW	14195	24510	939	270	469
BCDEW	14247	24580	904	252	435
ACDEW	14244	25159	390	50	244
ABDEW	14264	24366	894	296	466
ABCEW	14410	24484	942	297	528
AEW	14342	25112	357	62	300
W	14360	25368	347	54	328
ABCDEFW	14130	24502	930	235	464
ACDEFW	14175	25168	385	17	236
ABDEFW	14198	24365	889	249	460
ABCEFW	14342	24471	937	250	523
AEFW	14293	25106	350	19	294
FW	14338	25372	343	2	319

表 A.4: X線入射エネルギー 200 keV のときのカウント

	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$
ABCDEW	11600	15605	2400	5297	1552
BCDEW	11630	15676	2356	5295	1561
ACDEW	11674	15693	1981	5119	1286
ABDEW	11378	15483	2336	5365	1564
ABCEW	11609	15734	2340	5852	1743
AEW	11606	15615	1904	5706	1507
W	11566	15596	1855	5513	1855
ABCDEFW	10734	15481	723	191	430
ACDEFW	10796	15654	308	18	202
ABDEFW	10600	15405	724	201	416
ABCEFW	10754	15642	719	188	467
AEFW	10760	15621	264	21	229
FW	10814	15353	270	0	243

表 A.5: X線入射エネルギー Band 関数のときのカウント

	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$
ABCDEW	12737	21543	1367	1473	741
BCDEW	12716	21515	1340	1451	723
ACDEW	12678	22257	895	1265	580
ABDEW	12739	21452	1369	1476	801
ABCEW	13204	21396	1376	1647	844
AEW	13162	22158	902	1394	687
W	13133	22423	813	1287	804
ABCDEFW	12484	21460	838	171	333
ACDEFW	12448	22194	362	17	182
ABDEFW	12517	21391	818	171	376
ABCEFW	12912	21317	845	215	408
AEFW	12907	22092	370	20	256
FW	12888	22407	320	1	322

## 関連図書

- [1] NASA, <http://www.nasa.gov/>
- [2] BATSE, <http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/>
- [3] Geant4, <http://www.geant4.org/geant4/>
- [4] SPENVIS, <http://www.spenvis.oma.be/>
- [5] T.Piran Physics Reports, 314, 575-667 (1999)
- [6] D. Band et al. Astrophysical Journal, 413, 281-292(1993)
- [7] Y. Kaneko et al. Astrophysical Journal, 166, 298
- [8] 戸泉 貴裕, 修士論文「東工大 Cute-1.7+APDII の荷電粒子観測とガンマ線バースト偏光観測衛星 TSUBAME の検出器開発」東京工業大学 (2009)

# 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々のお世話になりました。まず、このような研究の場を与えて頂いた、河合教授、谷津助教に深く感謝いたします。

谷津さんには、実験の初歩から、解析に必要な理論についての知識、本論文に対するアドバイスなど、何から何まで懇切丁寧に教えていただきました。戸泉さんには Geant4 の解析や発表のことから、日々の研究生活に関することまで、様々な面で助けて頂きました。榎本さんには作成したスライドや解析結果などに対して、詳細なアドバイスを頂き非常に助かりました。本当にありがとうございました。

共に衛星開発を行う工学部松永研究室の方々や理科大木村研の皆様には、TSUBAME の開発でご協力頂きました。

研究室の皆様には、普段からとても良くして頂き、本当にありがとうございます。研究のことはもちろん、学生生活に関することまで色々なことを教えて頂きました。同期の方々とは遅くまで論文執筆をともにし、精神的に助かりました。1年間、楽しい研究生活を送ることができたのも、皆様のおかげです。

お世話になった方々の名前全てを挙げることはできませんが、関わって頂いた皆様に深く感謝致します。本当にありがとうございました。