Astro-E2衛星搭載 ガンマ線バーストモニタの 信号処理回路の開発と応答関数の構築

大野 雅功

広島大学大学院 理学研究科 物理科学専攻 M1479005

高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

2004年2月10日

Astro-E2 衛星は日本で5 番目の X 線天文衛星であり、2005 年 2 月の打ち上げに向けて、 現在は搭載機器の地上較正試験の段階に入っている。搭載される検出器の一つである硬 X 線検出器 (HXD-II) は主検出器の周りを Anti 検出器と呼ばれる厚い BGO シンチレー タによって取り囲むことで極限までバックグラウンドを低減させている。Anti 検出器は 周りを取り囲むことで全天を見渡すことができることと BGO シンチレータが高いガンマ 線阻止能を持っていることから MeV 領域までおよぶガンマ線バーストの観測が可能であ る。Astro-E2 衛星は Astro-E 衛星の再挑戦計画でもあるために、HXD-II においても最小 限の設計変更でできるだけ性能を向上させることが要求された。Anti 検出器においても ガンマ線バーストモニタとしての性能向上が求められた。本研究では、Anti 検出器の信 号処理回路を見直すことでガンマ線バーストモニタの性能を向上させることを行い、回路 開発を行った。その結果、観測エネルギー領域を従来の 100 keV - 2 MeV から 50 keV -5 MeV に拡大させることに成功し、詳細な試験を行い、フライト品の基板を開発した。

ガンマ線バーストモニタの性能を向上させることには成功したが、検出器の性能を最大限に生かすためには検出器応答を正しく知ることが不可欠である。特に、Anti 検出器は 主検出器に対するシールドとしての役目を持っているために、その構造は巨大で複雑であ る。このことは検出器応答も複雑なものになることを意味する。例えば、Anti 検出器は 巨大であるためにBGOで発生したシンチレーション光が読みだされるまで長い距離を走 らねばならず、最終的に得られる光量がガンマ線の入射位置によって変わってしまうエネ ルギー応答の特性を持つ。また、一般に検出器はガンマ線の入射方向によって検出効率が 変化する角度応答をもつ。これらは検出器応答の重要な要素であるが、そのパラメータは 実際に測定によって求めるしか方法がない。そこで、フライト品相当の Anti 結晶を用い て、エネルギー応答と角度応答について実際に測定を行った。その結果、光量の位置依存 性を詳細に取得でき、パラメータをモデル化した。角度応答については検出効率がほぼガ ンマ線入射位置から検出器を見込む面積に比例する結果が得られた。これらの結果をとり こんだシミュレーションは実験を良く再現し、モデル化が正しいことを実証した。最終的 にこれらの結果をもとに、Anti 検出器の応答関数を Astro-E2 衛星も含めて初めて構築す ることができた。

さらに、構築したレスポンスを使った観測シミュレーションでは、Astro-E2 衛星も含めた Anti 検出器のガンマ線バーストモニタとしての性能を評価することができ、特に観測エネルギー領域を拡大したことにより、効果的なガンマ線バースト観測ができることを初めて示すことができた。

目 次

第1章	序論	3
1.1	Astro-E2 衛星	3
1.2	硬 X 線検出器 HXD-II	3
	1.2.1 システム構成	4
	1.2.2 HXD-II センサ部	5
	1.2.3 HXD-II における信号処理の流れ	5
	1.2.4 HXD-II で探る物理	6
1.3	Anti 検出器を用いた全天観測	7
	1.3.1 Anti 検出器の構成	7
	1.3.2 地食を利用したトランジェントモニタ	8
	1.3.3 ガンマ線バーストの観測	9
1.4	本研究の目的	15
弗2草		1 –
0.1		17
2.1		10
2.2		18
2.3		19
		19
0.4		21
2.4		21
	2.4.1 IPU 開発スクンユール	21
	2.4.2 観測エイルキー領域の拡入	24
	2.4.3 Iff \bot \wedge	24
		25
	2.4.5 IPU FPGA にのりる VHDL 記述	20
第3章	検出器の応答関数	29
3.1	応答関数とは	29
3.2	応答関数の構築の手順・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
3.3	Anti 検出器の応答関数の構築	32
	3.3.1 応答関数を決める入力パラメータ	32
	3.3.2 Anti 検出器固有の応答	33
	3.3.3 本研究の測定項目	34
<u> </u>		20
弗4草 ₄₁	Anti 快山岙の心合の測定 DCO シンチーー ちゃちが開始 の測定	50
4.1	BGU ンノナレータの心合関数の測定	36
	4.1.1 ゼットアツノ	36

		00
	4.1.3 検出効率の測定	39
	4.1.4 シミュレーションによるスペクトルの再現	41
4.2	Anti 検出器単体の応答の測定	43
	4.2.1 セットアップ	44
	4.2.2 光量の位置依存性測定	44
	4.2.3 角度応答の測定	50
	4.2.4 まとめ	54
第5章	衛星まで含めた応答関数の構築	55
5.1	HXD-II 単体の応答	55
	5.1.1 HXD-I 時代の測定	55
	5.1.2 シミュレーションによる再現	57
5.2	Astro-E2 衛星も含めた応答	59
	5.2.1 HXD-I 時代の測定	59
	5.2.2 シミュレーションによる再現	59
5.3	応答関数の構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	64
	5.3.1 レスポンス構築の流れ	64
	5.3.2 作成したレスポンス	65
5.4	レスポンスを用いた観測シミュレーション	66
	5.4.1 シミュレーションの 手順	66
	5.4.2 ガンマ線バーストのスペクトルモデル	66
	5.4.3 ガンマ線バーストの検出数見積もり	67
	5.4.4 ガンマ線バーストの位置決定精度	69
	5.4.5 ガンマ線バーストのスペクトルシミュレーション	70
5.5	まとめ	72
第6章	まとめと今後の課題	73

第1章 序論

1.1 Astro-E2 衛星

Astro-E2 衛星は「あすか」に続く、日本で5番目のX線天文衛星であり、2000年に不運にも軌道への投入の失敗により失われてしまった Astro-E 衛星の再挑戦計画でもある。 Astro-E2 衛星は 2005 年に M-V ロケットによって打ち上げが予定されており、現在は搭載される検出器も含めた総合的な試験の段階に入っている。

Astro-E2 衛星に搭載される観測機器は 軟 X 線反射鏡 (X-Ray Telescope; XRT)の焦点 面に置かれた 4 つの X 線 CCD カメラ (X-ray Imaging Spectrometer; XIS) および高分 解能 X 線分光器 (X-ray Spectrometer; XRS) と、硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector; HXD) から成る。XIS は CCD の持つ非常に優れた位置分解能と高いエネルギー分解能に より、精度の良い分光と撮像が同時にできることが特徴である。このことは、銀河団や超 新星残骸などの拡がった天体の観測に大きな力を発揮する。XRSはX線入射にともなう 素子の微弱な温度変化を電気信号に変換することで、X線のエネルギーを非常に精度よく 決定することができ、6.0 eV という非常に高いエネルギー分解能を実現している。この高 いエネルギー分解能は、活動銀河核のブラックホール近傍から放射されていると考えられ ている鉄輝線をかつてない精度で分光し、輝線放射領域周辺の状態を探ることができるな ど、様々な成果が期待されている。硬 X 線検出器 HXD-II は 10 keV から 600 keV という 非常に広い軟ガンマ線領域を観測することができる。HXD-IIについては後の章で詳しく 述べることにする。このように、Astro-E2 衛星は 0.5 keV から 600 keV までの非常に広 いエネルギー領域に渡ってこれまでにない精度の分光、撮像観測を同時に行うことのでき る衛星として、期待されている。さらに、同時期に打ち上がるガンマ線天文衛星 GLAST との同時観測は7桁以上にもおよぶ広いエネルギー領域の観測を可能にする。

1.2 硬X線検出器 HXD-II

Astro-E2 衛星に搭載される硬 X 線検出器 HXD-II は 10 keV から 600 keV までの非常 に広範囲のエネルギー領域を観測する。この領域は熱制動放射や黒体輻射などの熱的な放 射からシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱などの非熱的放射が見えて来る非常に重 要な領域でありながら、ガンマ線の相互作用としてコンプトン散乱が支配的になるため、 ガンマ線の全エネルギーを測定することが難しく、バックグラウンドが非常に大きくなる ため、有効な観測がこれまで行われずにいた。しかし、HXD-II はバックグラウンドを極 限までに抑える構造を持つために、数 100 keV のエネルギー領域において、これまでの いかなる検出器よりも良い感度をもつ。ここでは、HXD-II の基本的な構造と、HXD-II により探ることのできる物理について述べる。



図 1.1: Astro-E2 衛星

1.2.1 システム構成

HXD-II は HXD-S(Sensor)、HXD-AE(Analogue Electronics)、HXD-DE(Digital Electronics)、HXD-PSU(Power Supply Unit) によって構成される。これらの構成を図 1.2 に 示す。センサー部である HXD-S は井戸型の主検出器部である Well 検出器と、周りをか こむシールド部の Anti 検出器により構成される。HXD-AE はセンサーからのアナログ信 号を処理しており、主検出器の信号は WPU(Well Processing Unit)、Anti 検出器からの 信号は TPU(Transient Processing Unit)、によってそれぞれ波形整形、AD 変換などの処 理がなされる。HXD-DE は AE から送られる信号を CPU を用いてデジタル処理する部 分であり、データの選別、圧縮などを行う。また、地上からのコマンドを受信、処理し、 AE へ送り出すことも行っている。HXD-PSU では衛星から供給される電源をアナログ用 の $\pm 12V$ 、 $\pm 5V$ 、デジタル用の $\pm 5V$ 電源に変換する。



図 1.2: HXD-II のシステム構成

HXD-IIの主検出器は中央に配置された16本の井戸型フォスイッチ構造を持ったWell 検出器である。フォスイッチ構造とはBGOシンチレータとGSOシンチレータを組み合 わせた検出器のことで、井戸型の構造をもったBGOはGSOに対して反同時計数をとる ことで、コンプトン散乱などのバックグラウンドイベントを効率良く除去することができ る。さらにこのフォスイッチ構造の検出器を複数並べる配置をとることによって、視野外 からのX線混入を防ぐための狭い視野を維持しながら大面積の検出器を実現した。この 複眼型構造は隣り合うユニット間での反同時計数を取ることを可能にし、さらにバックグ ラウンドを軽減させることができる。さらに井戸部には燐青銅で作られたパッシブなファ インコリメータが挿入されており、低エネルギー側の視野をさらに狭めている。HXD-II のWell検出器はこのようなバックグラウンドを極限までに抑える設計がなされており、 その結果、従来の検出器に比べて数倍以上良い感度を実現している。

また、主検出器の周囲には厚い20本のBGOシンチレータが取り囲んでいる。これら は宇宙線陽子などの宇宙線から主検出器を守るシールドとしての役割とともに反同時計 数にも参加することで、さらなるバックグラウンドの低減を実現しており、Anti 検出器 と呼ばれている。Anti 検出器は主検出器の周りを取り囲み、視野が広いことと、阻止能 の高いBGO 結晶で構成されていることから、全天を観測するトランジェントモニタや、 MeV 領域に渡るガンマ線バースト検出器として用いることができる。Anti 検出器につい ての詳細は§1.3 で述べる。



図 1.3: HXD-II センサー

図 1.4: 他の衛星と比較したときの HXD-IIの 感度。下にいくほど感度が良い。

1.2.3 HXD-IIにおける信号処理の流れ

天体からの X 線は Well 検出器の GSO や Anti 検出器の BGO シンチレータによってシ ンチレーション光に変換され、光電子増倍管によって電荷増幅される。増幅された電流信 号のうち Well 検出器のダイノード信号は高速のチャージアンプ、Anti 検出器のアノード 信号はエミッタフォロワ型のプリアンプによって電荷電圧変換、インピーダンス変換さ れ、アナログ処理回路へと送られる。PIN 型半導体検出器の信号は低雑音チャージアン プ (PIN-CSA) を通し、増幅されたあと、アナログ処理回路へと送られる。Well 検出器の 出器からの信号に対して波形整形、波形弁別やAD変換などが行われる。波形弁別とは BGOとGSOの蛍光時定数の違いを利用して、GSOのみで反応したイベントを区別する 手法である。BGOで反応したイベントは、視野外からのX線、あるいはコンプトン散乱 によってGSOで全てのエネルギーを落し切らなかったイベントとして全てバックグラウ ンドイベントと見なされる。波形弁別の方法は次のようになる。二つの整形アンプを用意 しておき、片方の積分時定数は蛍光時定数の短いGSO信号に合わせて小さくしておき、 もう片方の積分時定数は蛍光時定数の長いBGOに合わせて大きくしておく。こうすると 速いGSO信号ではどちらのアンプでも積分されきるが、遅いBGO信号では小さい時定 数のアンプで積分されきれないために、両者の波高値に差が生じる。この差を利用して、 両者を区別するのである。図1.6に二つの整形アンプ出力を軸にとった2次元図を示す。 この図において、傾きがほぼ1の直線にのっているイベントがGSOのみで反応したイベ ント、やや傾きが急なものがBGOのみで反応したイベント、両者の間に広がって分布し ているのがGSOとBGO両方で反応したイベントである。図の囲まれた部分だけをイベ ントセレクションすることで、GSOのみのイベントとして扱うことができる。

Anti 検出器のアナログ処理回路は TPU(Transient Processing Unit) と呼ばれる。TPU では Anti 検出器からの信号を増幅、整形し、Well 検出器に対するヒットパターンを生成 するとともに、自身の信号を AD 変換し、スペクトル作成も行う。TPU については 2章 で詳しく述べる。





図 1.6: WPU によって処理された二つの整形 アンプ信号の2次元図。ここでは²²Naのガ ンマ線が照射されている。

図 1.5: HXD-II におけるセンサーから AE へ^く の信号の流れ

1.2.4 HXD-IIで探る物理

これまで述べて来たように HXD-II は硬 X 線から軟ガンマ線領域にかけて、これまでの どの検出器よりも感度が良い。この領域で重要となる放射には太陽や星のフレアなどに よる非熱的な制動放射や超新星残骸からのシンクロトロン放射、様々な核ガンマ線、ブ (Seyfert II)からの放射など、非常に多くあり、HXD-IIによって観測できる天体の種類は 向上すると考えられる。例えば、隠れたAGN Seyfert II では視線方向に厚い吸収体を見 込んでいると考えられており、10 keV 以下では中心に存在すると考えられている巨大ブ ラックホールからの放射を直接観測することができず、散乱光を観測できるのみであった。 それゆえ、スペクトルの変動からはその起原が中心活動の変動なのかまわりの散乱体の変 動なのかを特定できないでいた。HXD-II による軟ガンマ線にまで渡る観測は中心からの 放射を直接観測することを可能にし、周りの物質構造のさらなる情報を得ることができる と期待される。



図 1.7: Seyfert 2 型銀河 Mrk1210 のスペクトル。1995 年に ASCA で観測された (左) も のに比べて、2000 年に BeppoSAX で観測されたもの (右) は大きくスペクトル構造が異な る。BeppoSAX は 100keV 付近で中心 BH からの power-law スペクトルを検出できるが、 ASCA ではできず、スペクトルに中心成分が直接見えているかどうか区別できない。

1.3 Anti 検出器を用いた全天観測

HXD-II の Anti 検出器は、主検出器に対するアクティブシールドのみならず、トラン ジェントモニタ、ガンマ線バースト検出器としても活躍が期待される。ここでは、Anti 検 出器を用いた全天観測について述べる。

1.3.1 Anti 検出器の構成

Anti 検出器は主検出器を取り囲むように配置されており、4隅に配置されたコーナーユ ニットとそれぞれの面に4本づつ配置された16本のサイドユニットにより構成される。そ れぞれのユニットは無機シンチレータである BGO 結晶で作られている。BGO は有効原 子番号や比重が他の無機シンチレータに比べ高く、阻止能が高いのが特徴的である。Anti 検出器の形状は図に示すように非常に複雑である。そのために bottom 部と top 部に分け て結晶が製作され、それらを接着する方式をとっている。用いる接着剤は Epotek301-2 である。top 部の構造は先端に行くに従って細くなっている。これは限られた重量制限の 中で主検出部のどの方向に対しても4cm 厚のシールドを見込む様に設計された結果であ る。細くなった先端部が打ち上げ時の機械振動などで破損しないように強化プラスチック 1mm 厚の箱型構造をもった CFRP が接着されている。bottom 部の構造は読みだし用の 光電子増倍管付近ではテーパ形状となっている。このような複雑な構造は検出器応答に大 きく影響してくる。

Anti 検出器は巨大な構造を持ち、典型的な厚みが 4 cm と厚いために、高エネルギー側 まで大きな有効面積を保持することが可能である。有効面積は 1 MeV 付近でも約 800 cm² と非常に大きい。また、HXD-II を取り囲むように配置されているために全天を見渡すこ とができる。このことはいつどこで発生するかわからないガンマ線バーストを検出するた めに都合が良い。このような要因から Anti 検出器はガンマ線バースト検出器としても大 きな効果が期待されている。また、全天を見渡す構造はトランジェント天体のモニタとし ても有効である。地食を利用した全天観測は Cyg-X1 などのトランジェント天体のモニタ としても利用できる。他にも Anti 検出器は荷電粒子モニタを行うことでブラジル上空の 地磁気異常帯 (SAA) を通過する際に検出器の高圧電源の供給を止める機能も兼ね備えて いる。

図 1.8: Anti 検出器の構造。左はサイドユニット、右はコーナーユニットの詳細図。

1.3.2 地食を利用したトランジェントモニタ

地球の食を利用した天体観測(Earth Occultaion)とはある既知の天体が地球に隠れる 前後でのカウントレートの差を観測することで、対象天体の明るさを測定する観測技術の れており、CGRO 衛星に搭載された BATSE などが有名である。BATSE ではこの手法に より、毎日数 10 個の天体をモニタした。BATSE で得られたかに星雲の地蝕前後のカウン トレートを表したものを図 1.9 に示す。ここに見られるように地蝕前後で有為なカウント レートの差が見られる。

Earth Occultation 法においてはバックグラウンドの評価をいかに精度良く行うかが重要になって来る。なぜなら、視野の広い検出器にとって、バックグラウンドは非常に高いものとなり、地蝕前後のカウントレートの差に大きく影響するからである。ここでいうバックグラウンドとは、宇宙線バックグラウンドや対象天体以外からのX線の他にも自身の検出器が宇宙線陽子などによって放射化されたときに生じるガンマ線も含む。われわれのグループでは既に地上実験として衛星搭載品相当のAnti検出器に対して陽子ビームを照射することを行っており、放射化バックグラウンドのモデル化を進めている。また、宇宙線バックグラウンドについてもGLASTで用いられている宇宙線バックグラウンドモデルをシミュレーションに取りこむことによってモデル化を行っている。モデル化されたバックグラウンドスペクトルを図1.10に示す。

図 1.9: BATSE により観測されたライトカー ブ、地食の前後に有意なカウントレートの差 が見える。

図 1.10: Anti 検出器のバックグラウンドモデ ル。宇宙ガンマ線バックグラウンドと放射化 バックグラウンドを示してある。

1.3.3 ガンマ線バーストの観測

ガンマ線バーストとは宇宙における最大の爆発現象である。1960年代からその存在が 知られており、日に数個というけっして希ではない頻度で発生する現象でありながら、そ の正体はまったく謎につつまれていた。

ガンマ線バーストの観測において大きなブレークスルーをもたらしたのが 1991 年に打 ち上げられた CGRO 衛星に搭載された BATSE である。BATSE では数多くのガンマ線 バーストをその位置とともに検出し、ガンマ線バーストが宇宙のあらゆるところから等方 的に発生していることや、そのガンマ線スペクトルに 300 keV 付近のカットオフが見ら れることなどを明らかにした。また、バーストの持続時間には典型的に 10 秒程度のもの バーストという分類をおこなった。

次に観測的に大きな成果をもたらしたのが BeppoSAX 衛星である。BeppoSAX はガン マ線バーストに X 線領域の残光が存在することを初めて明らかにし、その後の可視光や 電波領域での残光現象の発見に大きく貢献した。可視光の残光のスペクトルにより、ガン マ線バーストの赤方偏移が初めて検出され、ガンマ線バーストの距離は宇宙論的な非常 に遠方の距離で起こっていることが明らかとされた。距離が求められたことで、ガンマ線 バーストのエネルギーを求めることができ、GRB971214では z=3.42 で、等方的にエネル ギーが放出されていると仮定すると、その放出エネルギーが 10⁵³ erg という莫大なもの になるということが分かった。また、X 線領域にも短い発光現象 (X-ray flash) が存在する ことも明らかとなった。

その後も数多くのガンマ線バーストがガンマ線領域や他の波長領域の残光によって観測 され、ガンマ線バーストの理論的モデルとして、火の玉モデルというものが提唱された。 このモデルは現在ももっとも有力なモデルの一つとされている。火の玉モデルによると、 はじめに非常に高いエネルギーの"火の玉"が発生し、その火の玉が膨脹を始める。膨脹 の過程によって異なった速度で膨脹するシェル同士で衝突をおこし、衝撃波面で加速され た高エネルギー電子によるシンクロトロン放射により、ガンマ線が発生する。また、シェ ルと星間物質との間でまた衝撃波面が形成され、そこで発生した光は残光として観測され るというものである。図 1.12 に模式図を示した。このモデルには、はじめの火の玉の起 源が必要となるが、それには超新星や連星中性子星系の合体などが考えられてきた。

このような中、ガンマ線バーストに超新星が付随していると言う結果もいくつか報告されており、また典型的な超新星に比べ吸収線の幅が非常に広く、膨脹速度が大きいと考えられる特異な超新星"極超新星"が付随しているという可能性もいくつか報告され、ガンマ線バーストと超新星との関係が示唆されてきたが、いづれも確証にまでは至らなかった。

近年、ガンマ線バーストの観測に劇的な進展が見られた。2003年の3月29日に非常に 明るいガンマ線バーストが観測されたのである。このバーストは、世界初のガンマ線バー スト観測専用衛星 HETE-2 によって直ちに地上の観測所に通報され、迅速な残光観測が 行われた。その結果残光の中に極超新星の成分が現れ、ガンマ線バーストと極超新星に関 連があるということが初めて明らかとなった。

このように、ガンマ線バーストの起源については火の玉モデルが一応の成功をおさめつ つあるが、シンクロトロン放射の特徴を表すと思われているガンマ線領域のスペクトル の折れ曲がりのエネルギーの頻度分布について、BATSEでは 250 keV 付近に集中してい るという結果をだしているが、HETE-2 では低エネルギー側まで広がっているという一 致しない結果がでていることや、MeV 領域のスペクトルにシンクロトロン放射では説明 できない超過成分が存在すること (Gonzalez et al. 2003) やショート、ロングバーストや X-ray flash などの統一的な描像の構築など、まだまだ多くの謎が残されている。

最近のガンマ線バースト観測衛星

- CGRO 衛星搭載 BATSE
 - ガンマ線バースト観測を主目的として打ち上げられた衛星のうち、最近のもので有 名なものとして CGRO 衛星に搭載された BATSE がある。BATSE には NaI シン チレータで作られた大面積のバースト検出のための LAD(Large Area Telescope) と スペクトル取得のための SD(Sensitive Detector) が搭載されており、これを一組と して、衛星上の8面体の各面に配置されており、全天からのバースト観測が可能で

図 1.11: BATSE により観測されたガンマ線バーストの位置 (左)。CGRO 衛星搭載の BATSE、OSSE と EGRET によるスペクトル解析によって明らかとなったガンマ線バース トの MeV 領域の超過成分 (右)。右図では上から順に時間が進行しており、時間とともに 減衰するシンクロトロン放射と思われる低エネルギー側の折れ曲がりを持った power-law 成分の他に、変動のタイムスケールが長い MeV 領域の超過成分が見られる。横軸がエネ ルギー、縦軸は E²f(E) である。

図 1.12: ガンマ線バーストの発生源のモデル

ストを検出し、ガンマ線バーストが全天から等方的に発生していることを明らかにした。

• HETE-2

BATSE はガンマ線領域において多数のバーストを検出したが、すでに述べたよう に、BeppoSAX や ASCA などの結果から、ガンマ線バーストにガンマ線以外の領 域の残光があることが明らかとなっていた。すなわち、ガンマ線領域で継続時間の 短いバーストもできるだけ早くその位置を知ることができれば残光の追観測が可能 となり、より多くの情報を得ることができるということである。このようにガンマ 線バーストの位置決定と地上観測機器への早期通知という新しい観点から開発され たのが HETE-2 衛星である。HETE-2 衛星は400 keV までの高エネルギー側は NaI シンチレータ、10keV 付近の低エネルギー側は CCD およびコーデッドマスク付きの 比例計数管で観測する。広い視野を持ち、単体で 10 分角という分解能によってガン マ線バーストの位置を決定することができる。さらに、バースト検出の通知のため の通信局を軌道にそった地上のいたるところに配置することで、バースト検出から 10 – 20 秒ほどで通知することが可能である。

• INTEGRAL

現在打ち上がっている衛星では他に INTEGRAL がある。INTEGRAL のハード X 線検出器 SPI は Ge 検出器でエネルギー領域は 20 keV – 8 MeV と広く、検出器面 積も 500cm² とある程度大きいが、視野が狭い。INTEGRAL では SPI の周りを巨 大な BGO シンチレータがシールドとして配置されており、Anti 検出器と良く似て いる。しかし、このシールドはスペクトル取得機能を持っていない。

• Swift

Astro-E2 と同時期のガンマ線バースト観測衛星としては Swift 衛星がある。Swift のガンマ線バースト検出器 BAT は検出器面に半導体検出器の CdZnTe を用いてい るのが特徴である。このことにより、100 keV まで BATSE の5 倍よい有効面積を 実現している。また、位置分解能も HETE-2 に比べて良く、明るいバーストでは4 分角の精度で位置決定ができると期待されている。さらに、ガンマ線検出器だけで なく、X 線望遠鏡や、紫外/光学望遠鏡も搭載しており、地上へのアラートだけでな く、自身で多波長に渡る残光の観測が可能となっている。Swift 衛星は 2004 年春に 打ち上げが予定されている。

• GLAST GBM/LAT

2007 年打ち上げ予定のガンマ線観測衛星 GLAST にもバーストモニター GBM が搭 載されている。このバーストモニターは NaI と BGO シンチレータの組み合わせで 10 keV から 25MeV までの広いエネルギー領域をカバーしている。有効面積は 126 cm² と、HXD-II Anti 検出器に比べ小さいが、GeV 領域を狙う主検出器である LAT と連携することで、6 桁にもおよぶスペクトルの取得や、LAT の広い視野による年 間数 100 個のバーストの検出が期待されている。また、HXD-II Anti 検出器との連 携も期待されている。

このようにAnti検出器と同時期には多数のガンマ線バースト検出器が存在しているが、 ほぼ全天の視野を持ち、MeV領域まで数100cm²という巨大な有効面積を持ち、スペクト スト観測において最も有効な検出器であると言える。各検出器の有効面積とAnti検出器の有効面積を図 1.13 に示した。また、各検出器の性能を表 1.1,1.2 にまとめた。

図 1.13: 最近のガンマ線バースト検出器の有効面積の比較

へ 1.1. 取近のガノマ線バース「快山船の住肥							
	BATSE	HETE-2	INTEGRAL				
			SPI/ACS				
Detector Type	NaI	NaI, CCD	Ge/BGO				
		比例計数管					
Energy Range	25 keV - 10 MeV	$1.0-500 { m ~keV}$	$18 \mathrm{keV} - 8 \mathrm{MeV}$ /				
			100 keV - a few MeV				
Detector Area	2000 cm^2	120 cm^2	$500 \ {\rm cm^2} \ / \ 3000 \ {\rm cm^2}$				
Angular Resolution	25 °	20	2.5 °/ $-$				
Field of View	all sky	$1.5-2.0 \mathrm{\ str}$	$0.28~{\rm str}$ / all sky				
Obserbation period	1991 - 2000	2000 – ongoing	2002 - ongoing				
Collaboration	*	米仏印日	伊				

表 1.1: 最近のガンマ線バースト検出器の性能

表 1.2: 最近のガンマ線バースト検出器の性能(続き)

	HXD-II Anti	Swift BAT	GLAST
			LAT/GBM
Detector Type	BGO	CdZnTe	Tower / NaI, BGO
Energy Range	50 keV - 5 MeV	15 keV - 150 keV	$20~{\rm MeV}-300~{\rm GeV}$ /
			$10~{\rm keV}-25~{\rm MeV}$
Detector Area	800 cm^2	5200 cm^2	$8000 \text{ cm}^2 / 126 \text{ cm}^2$
Angular Resolution	3°	4	0.15 °/ 15 °
Field of View	all sky	$2.0 \ \mathrm{str}$	2.0 str / all sky
Obserbation period	2005 -	2004 -	2007 -
Collaboration	E	米英伊日	米伊仏日

Tower は1モジュールにシリコンストリップ層と、

カロリメータ (CsI) をアンチシールドで囲う構造を持つ。

Anti検出器で探るガンマ線バーストの物理

すでに述べたように Anti 検出器を用いたガンマ線バースト観測は、数 100keV から MeV 領域においてこれまでのどの検出器よりも有効な観測が行えることが期待される。ガンマ 線領域でガンマ線バーストを観測することで、バーストそのものの物理を解明することが 可能である。この領域において期待される物理には以下のようなものがあると思われる。

1. バースト発生領域の物理の解明

ガンマ線バーストには典型的にスペクトルの折れ曲がりが見られることがBATSE などにより報告されている。ガンマ線領域の放射はシンクロトロン放射であると考 えられており、この折れ曲がりは高エネルギー電子のエネルギーに関係があると考 えられる。ガンマ線バーストのスペクトルの時間変動をみてみると、時間が経ち、 スペクトル強度が下がるに連れて、折れ曲がりのエネルギー E_{peak} も低くなってい 失っていくためであると考えられる。この過程のタイムスケール (クーリングタイム)を知ることでバースト領域の電子のエネルギーや磁場のエネルギー密度を求めることが可能である。HXD-II Anti 検出器は時間分解能がよく、E_{peak}の変動を詳細に追うことが可能である。

2. E_{peak} の分布問題の結着

BATSE と HETE-2 両者では E_{peak} の分布が異なる結果が得られている。後の章で 詳しく述べるが、HXD-II Anti 検出器は バーストスペクトルの E_{peak} を 100 keV か ら 3 MeV までの広範囲にわたって精度良く決定することが可能である。Anti 検出 器による ガンマ線バーストの観測によりこの問題に結着をつけることができると期 待されている。また、これまでの結果により、 E_{peak} とバーストのガンマ線光度に相 関が見られることが示唆されている。図 1.14 によるとガンマ線領域から X 線領域 にわたって両者の相関が見られる。しかし、エラーが大きいところもあり、詳細な 構造は分からない。Anti 検出器によって E_{peak} が精度良く求まると、この関係をさ らに詳細に調べることが可能である。

3. GLAST との連携による新たな粒子加速の解明

GLAST を用いたガンマ線バースト観測では6桁にもおよぶ広範囲のスペクトル解 析が可能となる。すでに述べたようにガンマ線バーストの sub-MeV 領域のスペク トルには、シンクロトロン放射では説明できず、シンクロトロン放射で生じた光子 が高エネルギー電子によって逆コンプトン散乱されることでさらにエネルギーがま す自己コンプトン過程を用いてすら説明できない。つまり、この領域の放射はシン クロトロン放射とはまったく別の物理過程によって起こっている可能性がある。現 在のところ、可能性としてはハドロンの加速が起こっていることが考えられている が全く謎といってもよい。この問題を解決するには MeV-GeV 領域にわたるスペク トル取得が必要であるが、GLAST と連携することでそれは可能となる。すなわち、 MeV 領域の変動は Anti 検出器でしっかり抑えておき、GLAST との連携で高エネル ギー側までのスペクトル解析が可能となる。

1.4 本研究の目的

すでに述べたようにAnti検出器は主検出器に対するシールドのみならず、ガンマ線バー スト検出器やトランジェントモニタとしても大きな力を発揮することができる。Astro-E2 は再挑戦計画でもあるために、HXD-IIに対しても最小限の変更で、その機能をできるだ け向上させることが要求されている。本研究の目的はAnti検出器のトランジェントモニ タ、ガンマ線バーストモニタとしての機能を信号処理回路の改良という観点から最大限に 向上させ、その結果得られた性能を反映した検出器の応答関数を構築することである。後 に述べるように検出器を改良することで性能を上げたとしても、それに応じた応答関数を 正しく求めなければ精度良い観測を行うことは不可能であり、非常に重要である。

図 1.14: ガンマ線バーストの E_{peak} と放射光度の比較。縦軸が E_{peak} 横軸が光度。ここで 放射光度はガンマ線バーストのフラックスが等方的であると仮定して求められている。

第2章 Anti検出器の信号処理回路の開発

Anti 検出器をガンマ線バースト検出器として有効に使うためにはできるだけ高いエネル ギーまで観測可能にすることが必要である。そのため、HXD-I から HXD-II への変更に あたり、Anti 検出器の観測エネルギー領域の拡大など、様々な改良を行った。ここでは Anti 検出器における信号処理の流れについて述べたあとに、行った改良、開発について 述べる。

2.1 **TPUのアナログ信号処理**

Anti 検出器の信号処理回路は TPU(Transient Processing Unit) と呼ばれる。TPU は全部で4つのボードで構成され、それぞれのボードでは、Anti 検出器の1つの面、すなわちサイドユニット4本とコーナーユニット1本の信号を処理する。TPU における信号処理の流れを図2.1 に示した。それぞれの Anti 検出器からのエミッタフォロワ出力が TPU に入力されると、まずポールゼロ補償付きの微分回路によって、500 ns の微分がかけられる。次に反転アンプを通したあと、ユニット間のゲイン調整のための増幅回路を通す。このゲインアンプは、DAC を用いて 256 通りのゲイン調節が可能である。ゲインアンプを通したあとの信号は2通りに分けられ、一方は全ユニットを足し合わせることでスペクトル作成に用いられる。もう片方は LD(Lower Discri)を通すことでヒットパターン信号生成に用いられる。ここで作られたヒットパターン信号は AE 内のヒットパターン/スに流され、WPU に対する反同時計数に用いられる。スペクトル作成に用いられるのは基本的にサイドユニットの信号のみである。なぜなら、Anti 検出器ではガンマ線バーストの到来方向を2面のカウントレートの比によって決定しており、2つの方向からのガンマ線を同時にカウントしてしまうコーナーユニットを参加させると不都合が生じるからである。

コーナーユニットの信号は Radiation Belt Monitor (RBM) 機能として用いられている。 荷電粒子のカウントレートが非常に高くなる SAA 中では、大量のシンチレーション光が 発生することで PMT が損傷する可能性があるために、通常は PMT への高電圧を 0V に した状態にしておく予定だが、なんらかの原因で高圧電源が 0V にされない場合も想定さ れる。その安全対策としてコーナーユニットの LD 出力のカウントレートがある値を越 えたときにコントロール部 (ACU) へ高電圧を 0V にするためのフラグを通知するのが RBM 機能である。ガンマ線バーストなどの他の要因で誤って RBM 機能が働かないよう に、判定レベルは注意して決められている。また、TPU 側と ACU 側双方でフラグの通知 の ON/OFF が可能となっている。

スペクトル作成のための信号は、サムアンプと呼ばれるバッファアンプを通すことで4 つのサイドユニットの信号を全て足し合わせるとともに、積分を掛けることで波形整形 を行う。足し合わされた信号はベースラインリストアラを通ったあと、AD 変換される。 Anti検出器は大面積でカウントレートが非常に高いために、AD 変換にはピークホールド ピーク検出にはサムアンプ出力を減衰させたものと積分をかけた信号の交点をとらえる 方式をとっている。AD 変換される前の信号は後に述べるトリガーロジックを駆動させる ために LD にかけられる。この LD は SumLD と呼ばれる。また、非常に大きな信号が入 力されたときに、後続の信号に影響を及ぼさないように通常よりも長い AD 変換禁止信号 を出すようにしている。このレベルは UD(Upper Discri) によって決められている。また、 ADC には正規の AD 変換のビットに加えて、飽和電圧から UD レベルまでの信号を AD 変換するためのビットが用意されており、これをオーバーフロービットと呼ぶ。

図 2.1: TPU における信号処理のブロック図

2.2 **TPUのロジック信号処理**

TPUでは波形成形などのアナログ処理だけではなく、AD 変換のためのトリガーロジッ クやガンマ線バースト判定ロジック、各種カウンタ、データ編集、転送などのロジック処 理も行う。ロジック処理は FPGA(Field Programable Gate Array) と呼ばれるプログラ ム可能な論理素子を用いて行う。TPU には 4 つの FPGA が搭載されている。それぞれ PLSSEQ、DATOUT、TPUSEQ、THSEQ と呼ばれる。TPU で波形整形されたアナロ グ信号は ADC を用いて AD 変換される。AD 変換された信号は ADD ONE フラグが立つ と Dual Port RAM を用いてハードウェア的に積算され、ヒストグラム化される。この ADD ONE フラグや AD 変換を許可するゲート信号などを作っているのが PLSSEQ であ る。PLSSEQ では SumLD 入力をトリガーとして図 2.2 に示すタイミングチャートに従っ たトリガーロジックで ADD ONE フラグを立てる。また、トリガーロジックのシーケン スが走っている間はデッドタイムとして後続のトリガーを禁止する。。PLSSEQ ではトリ ガーロジックの他にも各種ロジック信号のパルス幅調整や RBM 判定、DE からのコマンド デコードなどの処理も行っている。Dual Port RAM を用いて積算されたヒストグラムや 各種カウンタデータはある決まった時間間隔で SRAM や FIFO といったメモリへと記録 される。この積算時間やメモリへのコピー許可、DE からの定期的なリクエストに応じた のメインシーケンスを司るのが TPUSEQ である。DATOUT では TPU で作られたヒット パターンや WPU のヒットパターンを数える各種カウンタである。カウントされたデータ は TPUSEQ により、メモリへと蓄えられる。ガンマ線バースト判定や、バーストデータ のカウンタなどバーストデータの処理を主に行うのが THSEQ である。

図 2.2: トリガーシーケンスのタイミングチャート

2.3 TPUのデータハンドリング

2.3.1 TPUのデータフォーマット

TPUによって AD 変換されたデータは、PH(pulse hight history) データ、TH(time history) データの2種類のデータフォーマットに変換される。PH データはパルスハイト情報 を重視したデータであり、オーバーフローチャンネルを合わせた ADC65 チャンネルのう ち、0 – 47 channel はそのまま、48 – 55 channel は 2bin まとめ、56 – 63 channel は 4bin まとめされたヒストグラムで合わせて 54 bin のデータとなる。時間分解能は初期設定で 1 秒である。TH データは時間情報を重視したデータであり、エネルギービンは ADC チャ ンネルを 4 つのバンドに分けて取得することで少ないが、時間分可能は最大で 16ms と非 常に良い。ADC チャンネルと TH データの対応を表 2.1 に示す。TH データは各チャンネ ルのカウントレートをモニタすることでガンマ線バースト判定に用いられる。

TPU が取得するデータには常時 DE からのリクエストに応答して転送するトランジェ ントデータとガンマ線バーストが発生したときのみ転送するガンマ線バーストデータが ある。トランジェントデータはPHデータ、カウンタデータなどのTH以外の各種データ を含み、FIFO を用いたメモリに記録されている。一方、TH も含めたガンマ線バースト データはSRAM を用いたリングバッファメモリに記録される。二つのメモリに格納され るデータの種類をまとめたものを表 2.2 に示す。ガンマ線バーストが判定されると、ある 決められた時間後にメモリのデータを書き込み禁止し、ガンマ線バーストが起こった時間 の前後のデータをフリーズする。フリーズされる時間は4通りに設定可能である。フリー ズされたデータはSAA 中などのテレメトリフリーな時間帯に地上へ転送される。それぞ れのデータの時間分解能とフリーズされる時間を表したものを表 2.3 に示す。

<u>表 2.1: TH</u>データに格納される ADC チャンネル

TH data energy bin	ADC channel
TH0	1 - 2 channel
TH1	3 - 4 channel
TH2	5 - 15 channel
TH3	16 - 63 channel

表 2.2: 各種カウンタデータの格納先

counter	格納先	トランジェントデータ	ガンマ線バーストデータ
PH	FIFO, SRAM		
TH	SRAM	×	
Over flow	FIRO, SRAM		
Pseudo	FIFO, SRAM		
LD, UD, DT	FIFO, SRAM		
Well Hit	FIFO, SRAM		

表 2.3: TH、PH データの時間分解能とフリーズされる時間

mode	TH data	PH data	memory coverage
0	$1/64 {\rm ~s}$	$1/2 \mathrm{~s}$	$64~{\rm s}~({\rm pre}~8~{\rm s}~/~{\rm post}~56~{\rm s})$
1	$1/32 {\rm s}$	$1 \mathrm{s}$	128 s (pre 16 s / post 112 s)
2	$1/16 \mathrm{~s}$	$2 \mathrm{s}$	256 s (pre 32 s / post 224 s)
3	$1/8 \mathrm{~s}$	4 s	512 s (pre 64 s / post 448 s)

ここではガンマ線バーストの観測において重要な要素のひとつである、ガンマ線バース トの判定処理について述べる。Anti検出器ではガンマ線バーストの判定を自身のハード ウェアで判断して行っている。判定の流れを表したブロック図を図 2.3 に示した。判定の 原理は常に数えているバックグラウンドと最新のバックグラウンドの差をポアソンゆらぎ と比較するものである。TPU でガンマ線バーストの判定に用いられるのはTH データの ひとつのチャンネルである。そこでまず、THデータのチャンネルをコマンドにより選択 する(1)。次に行うのがデータの圧縮である。ガンマ線バーストはカウントレートが非常 に高く、カウンタが飽和してしまう可能性がある。そこで4bitの前置カウンタのカウン タ bit のうち、ひとつの bit を取りだすことでデータの圧縮を行う (2)。圧縮されたデータ は18bitのバックグランドカウンタで数えられる。このカウンタの下位3bitのうち一つが 平方根カウンタで数えられ、バックグラウンドのポアソンゆらぎとして用いられる。どの bit を選ぶかによってガンマ線バーストの判定レベルに相当する (3)。バックグラウンドカ ウンタの上位 12bit はバックグラウンドとして常時数える (4)。また、バックグラウンド モニタの下位 bit は最新のバックグラウンド情報としてそれぞれ1秒カウンタ、1/4秒カ ウンタで数える(5)。最後にこれらのカウンタ値を比較することでガンマ線バーストを判 定するのである(6)。判定に1秒カウンタを用いるか1/4秒カウンタを用いるかは選択可 能である。判定条件を式で表すと次式のようになる。

$$S_{<1s} - \frac{B_{8s}}{8} > \frac{16}{\sqrt{k}} \sqrt{\frac{B_{8s}}{8}}$$
(1s 積分) (2.1)

$$S_{<0.25s} - \frac{B_{8s}}{8} \cdot 0.25 > \frac{16}{\sqrt{k}} \sqrt{\frac{B_{8s}}{8} \cdot 0.25} \qquad (0.25s \, \mathbf{積分})$$
(2.2)

ここでSは最新のシグナルカウント、Bはバックグラウンドカウント、判定レベルは $\frac{16}{\sqrt{k}}\sigma$ で表され、k の値によって可変である。

ガンマ線バーストの判定は TPU によって行われるハードウェア的な判定の他に DE で 行われるソフトウェア的な判定も行われる。また、他の TPU ボードからのバースト判定 フラグも通知され、通常はこれらすべてのフラグの or によってガンマ線バースト発生と 判断され、メモリをフリーズする。各ボード、DE からのフラグの通知はコマンドによっ て ON/OFF が可能である。

2.4 HXD-IIにおける改良

Astro-E計画の再挑戦でもある今回の Astro-E2 計画では、従来の設計を大幅に変更する ことなく、最小限の変更でできるだけ性能を向上させることが要求された。ここでは Anti 検出器の信号処理回路において、われわれが行った改良点について述べる。

2.4.1 TPU 開発スケジュール

これから述べる様に、TPUは様々なパラメータ変更がなされた。その過程でさまざま な試験基板が作成され、試験が行われてきた。表 2.4 に TPU の開発スケジュールとそれ ぞれの開発基板において行われた試験についてまとめた。

図 2.3: ガンマ線バースト判定ロジックのブロック図

まず、HXD-I時代からのTPU(TPU-Iアナログ基板:クリアパルス社製)に対して、観 測エネルギー領域の拡大が模索された。およそ1年に渡って思案、試験を行うことで改良 案が考えられた(大野卒論)(1)。次にこの改良案に基づいて実際に基板デザインレベルか ら設計を行うことで試験基板 (TPU Analogue) が作成された。この基板についてはアナロ グ処理のみについてのみ詳細な試験が行われた。特に2002年の11月には理化学研究所の ビームラインを用いて核子あたり 90 MeV の Fe²⁴⁺ をフライト相当の Anti 検出器に入射 し、軌道上で予測される高エネルギー粒子などによって引き起こされる大信号を摸擬し、 この基板を用いて読みだすことで大信号に対する回路応答について試験を行い、問題なく 動作することが確認できた(2)。これらの試験によってアナログ処理においては我々の設 計が正しいものであることが確認できたので、次にフライト相当の部品を用いた試験基 板を試作した (Pre-FM TPU)。当初は FPGA の仕様が完全に決まっておらず、アナログ 部のみについて詳細な試験を行った(3)。後にFPGAの仕様も固まり、FPGAも搭載した Pre-FM 基板についてデジタル、アナログも含めた総合試験が初めて行われた(4)。これら の試験の結果、基板デザインレベルにまでおよぶ仕様の変更が新たに必要となることが明 らかとなったために、最終的に作成された試験基板が post-FM 基板である (5)。post-FM 基板は最終的なフライトモデルと同じデザインとなっているために、これを用いた総合 試験が現在も行われており、衛星が打ち上がった後も不測の事態における原因究明に用い られるなど、重要な基板である。post-FM 基板ができあがるころにはすでに衛星搭載品 の TPU 基板 (FM-TPU) が作成されてきた (6)。FM 基板にはこれまでの試験で得られた 結果が全てスケジュールぎりぎりまでフィードバックされ続けて来た。現在は4つあるす べてのFM 基板の全数試験が行われている。なお、TPU も含めた HXD-AE はクリアパル スや大学、明星電気によって設計が行われ、明星電気に製作を依頼している。

図 2.4: TPU 開発スケジュール

図 2.5: TPU の post-FM 基板 (左)、開発過程で行われた大信号ビーム試験のようす (右)。

すでに述べたように、ガンマ線バーストの有効な観測には、できるだけ高エネルギー側 まで観測することが重要である。ガンマ線バーストは MeV 領域においても十分明るいが、 BGO のガンマ線阻止能の限界から 5 MeV を越えるとバックグラウンドに埋もれ、観測 が難しくなってくる。従って今回は Anti 検出器の観測エネルギーの上限を 5MeV まで引 きあげることを行った。ここで注意したのが Anti 検出器本来の目的である Well 検出器の ヒットパターン機能を損なわずに観測エネルギー領域を拡大することである。そのために は高エネルギー側の信号を大きくするしかない。そこで、各アンプの電源電圧を高くする ことで観測エネルギー領域を高エネルギー側まで伸ばした。電源電圧の取り方は正側の 信号を出力するアンプは+側の電源電圧を、負側の信号を出力するアンプは-側の電源電 圧を大きくすることで、消費電力をできるだけ抑える工夫をほどこした。この工夫によっ て、電力増加をおよそ 2W に抑えることができた。また、ADC の飽和電圧が問題となっ たが、これは高エネルギー側の信号をオーバーフロービットに詰めることで解決した。

一方、Anti 検出器は地食を利用したトランジェントモニタとしても用いることができ る。かに星雲などのX線源は100 keV以下の光子数が多く、できるだけ低エネルギー側 を観測することが効果的である。しかし、従来のTPUでは基板内電気干渉の影響により、 100 keV が観測できる下限であった。そこで、今回は基板デザインレベルから再設計を行 うことで、基板内の電気的干渉を低減し、より低エネルギー側まで観測可能とし、観測エ ネルギー領域の下限を50 keVまで下げることに成功した。

これらの観測エネルギー領域拡大を目指した TPU 再開発の結果、観測エネルギー領域 を従来の 100 keV から 2 MeV に対して 50 keV から 5 MeV まで拡大させることに成功 した。また、サムアンプのゲインを可変にすることで高エネルギー側までの詳細なスペク トル取得を可能とした。観測エネルギー領域拡大については大野卒論、洪修論に詳細が述 べられている。

2.4.3 THエネルギーレンジ見直し

Anti 検出器は 400 keV 以上で BATSE などこれまでのガンマ線バースト検出器に比べ有 効面積が最も大きい。また、時間分解能が良いためにガンマ線バーストの高エネルギー側 のスペクトル変動を詳細に追っていくことが可能である。これまでの観測では、BATSE ではスペクトルの折れ曲がりの位置は、色々なバーストの間で 200keV 付近に集中してい るという結果が出ていた。一方、で HETE2 では低エネルギー側に分布をしているという 一致しない結果が得られており、Anti 検出器でで 200keV 付近の折れ曲がりを網羅するこ とが期待されている。また、さらに高いエネルギーに折れ曲がりをもつバーストの発展を 追うことができることも期待されている。以上のような経緯と最新の試験結果をふまえて TH エネルギーレンジの切り分けを見直すことにした。見直しの際に特に気を付けたのが 以下の 3 点である。

1. TH0 を有効に活用する

従来の設計では THO に 50 keV 以下のチャンネルが含まれており、LD で落とされ てしまい無駄である。よって THO に詰めるチャンネルをひとつずらし、有効に活用 できるようにした。

2. TH1、TH2 で 200keV 付近の折れ曲がりを網羅する

マ線バーストの折れ曲がリエネルギーを網羅することができ、BATSE よりも詳細 に折れ曲がりの時間変化を追うことが可能になる。

3. TH3 の光子数を確保する

Anti 検出器では MeV 領域までガンマ線バーストのスペクトルを取得できるのが特徴で、まさに Anti 検出器のみが観測できる領域である。よって、この領域の感度をあげるために、できるだけ光子数を確保することが重要である。

これらを考慮し、変更した TH チャンネルのエネルギービン分けを表 2.4 に示す。また、 典型的なガンマ線バーストスペクトル (折れ曲がりエネルギー Epeak = 200 keV, photon index = -1.0(E<200 keV), -2.0(E>200 keV))を仮定したときのそれぞれのエネルギービン に含まれる光子数の割合も示した。なお、ここで求めた光子数の割合は、 $\S5$ において求 めた Anti 検出器の応答関数を用いて見積もられた値である。

表 2.4: 変更後の TH データに格納される ADC チャンネルとガンマ線バーストスペクトルの光子数の割合

	energy coverage	ADC channel	photon rate
TH0	47 - $109~{\rm keV}$	2 - 3 channel	49.0~%
TH1	109 - $234~{\rm keV}$	4 - 7 channel	30.7~%
TH2	234 - $516~{\rm keV}$	8 - 16 channel	14.3~%
TH3	516 - 5000 ${\rm keV}$	17 - 63 channel	6.0~%

2.4.4 回路図入力から VHDL へ

FPGA へのプログラムの書き込みは HXD-I では回路図入力で行われてきた。回路図入 力とは、回路設計をあらかじめ用意されたゲート回路を組み合わせて設計する手法であ り、ゲートの組み合わせなどをグラフィカルに行うことができて扱い易いが、回路ゲート が無駄に使われて収納率が下がったり、シーケンス処理を扱いにくい。また、設計の変更 を行いたいとき、回路全体に渡って変更する必要があり、回路の変更が非常に複雑とな るという欠点があり、大規模な回路設計にはあまり適さないものであった。VHDLとは HDL と呼ばれるハードウェア記述言語の一種である。VHDL は回路図入力と違って、あ たかもC言語でプログラミングを行うような感覚で回路設計を行うことができる。VHDL を用いて書かれた回路は論理合成と呼ばれるコンパイルのような過程を経て最適なゲー ト回路の組合せをソフトウェアを用いて構成し、FPGA へと焼込まれる。従来の回路図入 力ではゲートやフリップフロップの組み合わせで回路を設計するため、それらの動作を熟 知しておく必要があったが、VHDL などのハードウェア記述言語を用いると回路の動作 のみを言語で記述するだけで良く、大規模な回路設計に適している。一般的に論理合成や FPGA への焼込みに用いられるソフトウェアとしては Altera 社の MAX-PLUSII などが 有名である。TPU では FPGA のシミュレーション及び焼込みに Actel 社の Libero を用 いている。このように、ソフトウェアを用いて回路を構成するために、回路の変更が容易 にできることが利点である。しかし、その反面、必ずしも最適な構成がなされるとは限ら ず、VHDLの書き方に細心の注意を払う必要がある。HXD-IIではWPUも含め、FPGA 気にプログラミング、FPGAへの焼込みを依頼している。

2.4.5 TPU FPGA における VHDL 記述

TPUにおける VHDL 記述ではカウンタや判定処理といった特徴を持った処理それぞれ を別々にモジュール化しておき、最後にそれぞれを組み合わせて1つの FPGA の処理を 構成している。それぞれのモジュールを独立に定義することでそれぞれのモジュール内の シーケンスの流れを把握しやすくしている。また、モジュール毎に FPGA に焼こんで試 験を行うことも可能である。各 FPGA 間でのモジュール単位での信号の流れを図 2.6 に、 それぞれの FPGA に含まれるモジュールとその役割についてまとめたものを図 2.5, 2.6 に まとめた。

図 2.6: TPU FPGA におけるロジック処理の流れ

表 2.5: TPU FPGA における各モジュールの役割

FPGA 名称	モジュール名称	内容
DATOUT		WPU、TPU の各種カウンタ。
	WACNT	WPU からのヒットパターンカウンタ。CNT16 を用いてカ
		ウントする。
	TACNT	TPU アナログ処理部からのヒットパターン、SumLD、UD、
		DT カウンタ。CNT16、CNT19 でカウントする。
	CNT16, CNT19	それぞれ 16bit, 19bit の non-reset カウンタ
TPUSEQ		メモリ処理など、TPU メインシーケンス
	HDOUT	出力データに付加するヘッダに各種データ(時間情報など)
		を格納する処理。
	TIME	タイムカウンタ。ACU から送られて来るクロックを数えて
		時間を測る。
	OUTSEQ	データ出力シーケンス。DE からのリクエストによって駆動
		し、決まったタイミングでヘッダ、データなどを順番にメモ
		リからデータバスに流す。
	COPYSEQ	設定された時間間隔にしたがって随時メモリへのコピー許
		可、アドレス変更を子プロセスへ通知するシーケンス。ガ
		ンマ線バーストが発生したと判断されるとメモリをフリー
		ズするシーケンスが駆動する。
	SRAM_WRCNT	メモリのアドレスを変更する。タイミングは COPYSEQ に
		よりあたえられる。
	TACSEQ	LD などの各種カウンタデータをメモリにコピーする。コ
		ビーのタイミングは COPYSEQ によって定められている。
	PHCSEQ	PHのヒストグラムデータをメモリへとコピーする。
	THCSEQ	TH データをメモリヘコピーする。

表 2.6: TPU FPGA における各モジュールの役割(続き)

FPGA 名称	モジュール名称	内容
PLSSEQ		TPU アナログ処理部から送られて来るパルス信号処理。
	TRGSEQ	TPU アナログ処理部からの SumLD をトリガとして、AD-
		DONE パルスを作るためのシーケンスが走る。シーケンス
		間はデッドタイムとなる。
	DTUD	トリガーシーケンスで発生した DT の間、クロックパルスを
		作る。DATOUT でカウントされることでデッドタイムが分
		かる。UD は幅調節されることで ADC 禁止時間を調節する
		ことができる。
	ADDONE	トリガーシーケンスで作られた ADDONEパルスを Dual Port
		RAM に通知し、ヒストグラムの積算を行うシーケンス。
	RBM	コーナーユニットのヒットパターンパルスをカウントする
		ことで、ある閾値を越えたときに RBM フラグを発生させる
		シーケンス。閾値はコマンドで設定可。
	HITPAT	ヒットパターンパルスの幅調節を行うシーケンス。幅調節さ
		れたヒットパターンはカウントされたり、ヒットパターンバ
		スへと送られる。HITPAT では各種ヒットパターンが入力さ
		れ、実際には子プロセスの HPWD によって幅調節が実行さ
		れる。
	HPWID	ヒットパターン幅調節を実行するシーケンス。
	THPH_DEC	ADC の 64 チャンネルデータを TH、PH 用それぞれにビン
		まとめするシーケンス。TH データは THSEQ へ、PH デー
		タは Dual Port RAM へ送られ、積算される。
	CMDDEC	DEからのコマンドデータをデコードし、各モジュールへ送
		るシーケンス。
THSEQ		ガンマ線バースト判定など、TH データを扱うシーケンス。
	GB	ガンマ線バースト判定処理。 詳細は §2.3.2 で述べている。
	THCNT	TH データのカウンタ。TH データはビン数が少なく、積分
		時間も短いので、直接カウントすることでヒストグラム化す
		る。カウンタにはCNT16を用いる。

第3章 検出器の応答関数

3.1 応答関数とは

我々は検出器を通して天体からのガンマ線、X線のエネルギーなどを知ることができる。 つまり我々が観測するエネルギースペクトルには必ず検出器固有の応答が現れて来るこ とになる。ここで理想的な検出器の場合は、ある単色エネルギーのガンマ線が入射したと き、ある一つの値のパルスハイトのみを返すことができる。しかし、現実には単色のガン マ線が入射した場合でもガンマ線と検出器の様々な相互作用のために我々が受け取るのは 検出器固有の確率分布に従った複数のパルスハイトである。このような入射ガンマ線に対 するパルスハイトの確率分布のことを検出器のエネルギー応答と呼ぶ。図 3.1 に単色のガ ンマ線が入射したときの BGO シンチレータの応答の例を示す。ここには光電吸収によっ てすべてのエネルギーが吸収されたイベントとコンプトン散乱によってすべてのエネル ギーを落さなかったイベントがシンチレータの分解能でなまされている応答を見ることが できる。

また、ガンマ線が検出器に入射した際、必ずしも検出器と反応するとは限らず、そのま ま検出器をすり抜けてしまう場合もありうる。入射したガンマ線の数のうち検出器で全て のエネルギーを落したものの割合のことを検出効率と呼び、これは検出器の形状、ガンマ 線の入射角度、位置、エネルギーなどに大きく依存し、検出器の応答の重要な要素のひと つである。検出効率に検出器の幾何学的面積をかけたものを有効面積と呼ぶ。

一般的な宇宙 X 線ガンマ線検出器の応答関数は上で述べたエネルギー応答と有効面積を 合わせたもので表され、しばしば前者を rmf (response matrix file)、後者を arf (angular response file) と呼ぶ。エネルギー応答関数はパルスハイト空間とエネルギー空間を変換 する行列で表される。入射ガンマ線があるエネルギー分布 f(E) を持っているとき、受け 取るパルスハイトスペクトルは

$$H(PH) = \int R(E, PH) \times A(E) \times f(E)dE$$
(3.1)

と表される。ここで、エネルギー応答を R(E,PH)、有効面積が A(E) である。ただし、 実際の観測データは AD 変換されることで離散的な値をとることから

$$H(PH_j) = \sum_{i} R_{ij} \times A_i \times f(E_i)$$
(3.2)

となる。すなわち、

$$\begin{pmatrix} H(PH_1) \\ \vdots \\ H(PH_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & a_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f(E_1) \\ \vdots \\ f(E_n) \end{pmatrix}$$
(3.3)

となる。ここで、 R_{ij} の各要素 r_{ia} は、単色エネルギー E_a のガンマ線が入射したときの パルスハイトの確率分布に相当し、それぞれ

(3.4)

を満たしている。初めに述べた理想的な検出器の場合は完全な対角行列である。ここで 非対角項に検出器固有の成分が現れてくるわけである。一方、有効面積はガンマ線入射角 度やエネルギーに大きく依存し、これを検出器の角度応答と呼んでいる。

X線ガンマ線天文学の分野では、天体からのスペクトルに対して、べき乗分布や黒体放 射などのモデルを用いてフィッティングを行い、様々な物理パラメータを決定する手法を とる。エネルギーの関数である入射ガンマ線スペクトルのモデル関数は、応答関数を用い て検出器のパルスハイト空間に変換され、データと比べてフィッティングを行う。故に、 応答関数が正しく求められていないと仮に正しいモデルを選択していたとしても、フィッ ティング精度は悪くなり、正しいモデルが棄却される事態になりかねない。ゆえに、検 出器の応答関数を知ることは天体からのガンマ線のスペクトルを知る上で極めて重要で ある。

HXD-II の応答関数は Well 検出器の応答関数と Anti 検出器の応答関数がある。Well 検 出器のエネルギー応答は GSO や PIN の検出器固有のエネルギー応答に加えて、反同時計 数や波形弁別などによるイベントセレクションも含まれる。また、検出効率には GSO や PIN だけでなく、周りの BGO や、ファインコリメータの形状も影響してくる。図 3.2 に HXD-I 時代に測定された Well 検出器の角度応答を示す。高エネルギー側になると、ファ インコリメータを透過する様子が分かる。

図 3.1: 662 keV の単色ガンマ線に対する 図 3.2: HXD-I 時代に測定された Well 検出器 BGO シンチレータの応答スペクトル の角度応答。横軸は検出器の視野方向に対す るガンマ線の入射角度。

3.2 応答関数の構築の手順

検出器の応答関数は、理想的には応答関数を決定するパラメータ空間の全ての点で測定 して求めるのが良く、そのためには任意のエネルギー、入射位置、入射角度のガンマ線を 用いて測定する必要があるが、現実的には不可能であるために、測定点間を計算で補う 必要が生じる。また、数100keVの領域ではガンマ線と物質との相互作用においてコンプ トン散乱が支配的になってくる領域である。従って解析的に計算を行うことは困難であ り、一般的にはモンテカルロシミュレーションによって計算を行う。モンテカルロシミュ

たエネルギーデポジットを検出器のエネルギー分解能でなますことなどを行うことができ るが、エネルギー分解能などの検出器に固有のパラメータは実際に測定することでシミュ レーションに取りこむ必要がある。つまり、応答関数の構築の手順は次のようになる。ま ず、単色エネルギーの放射線源を用いて、実際に検出器の応答を測定し、測定でのみ求 めることができるパラメータをシミュレーションに取りこみ、両者を比較しながらシミュ レーションを改善する。そして最終的には任意のエネルギーや入射角度において応答関数 をシミュレーションによって求める。これらの流れを図3.3に示した。

ガンマ線が検出器に落すエネルギーデポジットを計算するシミュレーションにはHXD-I時代では EGS4 というツールが用いられて来た。EGS4 は Electron Gamma Shower version 4 の略であり、物質中での電子や光子の輸送過程を計算することができる。EGS4 は物理過程の再現は非常に良いものの、ジオメトリの再現が非常に困難であるという欠点 をかかえており、HXD-I時代も簡略化されたジオメトリでしかシミュレーションを行っ てこなかった。HXD-IIではシミュレーションツールとして Geant4 を用いることにした。 Geant4 は Geometry and Tracking version 4 の略であり、EGS4 と同じく物質中の光子や 電子の輸送過程を計算することができる。Geant4の最も大きな特徴はジオメトリの再現 が簡単に行うことができることである。このために衛星全体の複雑なジオメトリでさえ も詳細に再現することができ、最近では物理過程の再現性もかなり良くなって来ている。 また、Geant4 は Swift など近年の観測衛星のシミュレーションツールに用いられて来て おり、情報の共有ができるなど、多くの利点がある。今回用いた Geant4 のバージョンは Geant4.5.2(patched) である。本論文で用いた各相互作用テーブルと各バージョンを表 3.1 に示す。

シミュレータの開発、改善

図 3.3: 応答関数構築の流れ

名称	内容	バージョン
Geant4	Geant4 メインプログラム	4.5.2 (patched)
CLHEP	高エネルギー物理における標準クラスライブラリ	1.8.1.0
G4EMLOW	低エネルギー側の電磁相互作用反応断面積	2.1

表 3.1: Geant4 で用いた各テーブルのバージョン

3.3 AIIII 快山铅000合用数0伸来

3.3.1 応答関数を決める入力パラメータ

すでに述べたように、応答関数を構築するには、実測でしか得られないパラメータをシ ミュレーションに取りこむ必要がある。ここでは、シミュレーションに取りこむべきパラ メータについて列挙する。

まず、検出器応答を決めるパラメータには、検出器の性質、形状といったジオメトリカ ルなものに起因したものと、信号処理などのエレクトロニクスに起因するものに大きく分 けられる。まず、ジオメトリカルなパラメータとしては以下のようなものが考えられる。

入射エネルギー (△E)

応答関数の最も代表的な入力パラメータはガンマ線の入射エネルギーである。応答 関数は入力されたガンマ線のエネルギーに応じたパルスハイトの確率分布を出力す る。検出器がどのようなエネルギー応答を示すかは、単純な結晶の段階から測定す ることができ、HXD-II単体としての応答まで測定する。

● 入射角度 (*p*)

入射角度の依存性のうち、最も重要なものが検出器の検出効率の角度依存性である。 これはAnti検出器単体レベルやHXD-IIとして組まれた状態、また、Astro-E2衛星 上で全て異なるために、それぞれで測定する必要がある。

入射位置 (*x*)

後に述べるように、Anti 検出器はガンマ線の入射位置によって応答が異なる。従っ て、Anti 単体でその振るまいをしっかりと抑えておき、HXD-II として組まれた状 態で測定する必要がある。Astro-E2 として組まれてしまうと、測定のセットアップ が困難であるために測定できない。

● 温度 (T)

一般に、検出器応答は温度によっても変化する。例えば、BGOシンチレータは温度 が下がると光量、すなわちゲインが増大する振るまいを示す。すなわち、地上での 常温の測定と、軌道上での低温下の状況では検出器応答は異なることになる。これ は単体ユニットレベルでしっかりと抑えておき、HXD-IIや衛星まで組まれた状態 でも測定を行う。

ここまではジオメトリカルなものに起因するパラメータについて述べた。つぎにエレクトロニクスに起因するパラメータを列挙する。

● エネルギー線形性 (L)

信号処理回路においては、一般的には供給される電源電圧付近までは線形な応答を 示すが、それがどこまで保持されるかは必ず実測しておく必要があり、出力パルス ハイトと入力エネルギーとの関係、エネルギー較正は常にチェックする必要がある。

• LD、HV、ゲイン (Gain)

LD はエネルギーの下限をどこに設定するかを決める重要なパラメータである。特 に Anti 検出器のようなアクティブシールドの役目をもつ検出器にとっては主検出器

LD は回路のゲインやPMT にかける高電圧にも影響されるためこれらのパラメータ は相関して求められる。反同時計数をとる必要があるためやにパラメータはHXD-II として組まれた後に求める。

• 時間変動 (t)

何年も連続して稼動する観測衛星にとって、検出器応答の時間変動は無視できない パラメータである。とくに、PMTのゲインの時間変動がもっとも顕著である。これ は地上においてその特性を理解した後に、衛星軌道上で常にゲインをモニターして おくことでパラメータとする必要がある。

レート依存 (F)

信号のレートが高くなって来ると、前回の信号が完全にゼロにもどる前に次の信号 がきてしまい、受け取るパルスハイトが高くなる。これをパイルアップとよび、Anti 検出器のような大面積で信号レートが高い検出器では重要な応答である。特に、ガ ンマ線バーストはある瞬間ではレートが異常に高くなることが予測されるので、回 路応答のレート依存を知ることは重要である。詳細な測定が行えるのはHXD-II単 体レベルまでであると思われる。

Anti 検出器のように、複数のユニットから構成される検出器にとっては、上記全てのパ ラメータがユニット間で微妙に異なる可能性がある。そのようなユニット間の個性の違い も測定すべきパラメータの一つである。(unit) これは、製作の段階において、ユニット毎 に調べられており、HXD-II として組まれたときに再び測定する必要がある。

最後に、ここまで列挙した全てのパラメータについて、測定される時期を表 3.2 にまと めた。

本研究では、単純な結晶から Anti 単体までを用いた、エネルギー応答、角度応答、位置依存について測定し、パラメータを求めることを行う。

	Ε	\vec{p}	\vec{x}	Т	Gain	L	t	F	unit
単純な結晶		_	_	_	_				_
Anti 検出器単体					_		_		
HXD-II 単体							_		
Astro-E2	—		—				_	_	—
衛星軌道上	—	—	—			—		_	—

表 3.2: 応答関数を決めるための入力パラメータとそれぞれのパラメータが測定される時期

3.3.2 Anti 検出器固有の応答

Anti 検出器固有のパラメータとしては光量の位置依存性というものがある。すでに述 べたように、Anti 検出器は非常に巨大な構造をしているために、BGO シンチレータで発 生するシンチレーション光は PMT へと到達するまでに非常に長い距離を走らなければな らず、最終的に得られる光量がガンマ線の入射位置によって変わることが分かっている。 これを光量の位置依存性と呼び、Anti 検出器のエネルギー分解能をさらに悪くする効果 ンマ線入射位置によって10%ほどばらつくことが分かっている。また、Anti 検出器はガ ンマ線バーストの発生位置をAnti 検出器の2面のカウントレートの比によって決定する。 すなわち Anti 検出器の角度応答は非常に重要であり、シミュレーションによって確実に 再現できるようにする必要があり、測定との比較を注意して行わなければならない。

これらはAnti検出器1本のレベルでも求めることができるが、HXD-IIとして組まれた とき、すなわちAnti検出器複数本となったときの応答を調べることも重要である。さら に、Astro-E2衛星も含まれたときの角度応答も重要となってくる。なぜならAnti検出器 はほぼ全天の視野を持つために、衛星に搭載されているHXD-II以外の機器の影響が非常 に大きく現れてくるからである。例えばAstro-E2衛星の検出器のひとつであるXRS は 超伝導体素子を用いたカロリメータであるために、常に検出器を冷やしておく必要があ る。この冷却系はAnti検出器のある1面の視野を遮る形で配置されており、この方向 からのガンマ線は強い吸収を受けることが予想される。他にも衛星上には様々な機器が 載っており、さらに衛星構体による影響も考える必要がある。

図 3.4: Astro-E2 衛星を上から見た図。図における HXD の下側の視野は XRS の冷却系で 遮られる。

3.3.3 本研究の測定項目

本研究では Anti 検出器の応答関数を構築するために以下の手順に従って測定を行った。

1. 単純な構造を持った BGO シンチレータの応答の測定

本研究の目的は Anti 検出器の応答を測定、構築することであるが、Anti 検出器は 非常に複雑な構造を持っているために初めから Anti 検出器の応答を測定するとその
定、シミュレーションと比較することで BGO シンチレータの応答の基礎を理解し、 また Geant4 が物理過程を正しく再現できるかどうかを確認することを行う。

2. Anti 検出器 1 本を用いた応答の測定

Anti 検出器 1本の測定では特に光量の位置依存性と角度応答の測定を行う。エネル ギー分解能や光量の位置依存性を実測し、光量の位置依存性は測定結果をモデル化 し、シミュレーションに取りこむ。角度応答の測定ではカウントレートの入射角度の 依存性を測定し、得られたスペクトルを光量の位置依存性を取りこんだシミュレー ションにより再現することを行う。

3. HXD-II 単体の応答の再現

ここまでは測定によってパラメータを求めることができたが、HXD-IIとして組ま れた状態での測定はまだ行われていない。そこで、これまで得られたパラメータを 取りこんだシミュレーションによって、HXD-I時代に測定された結果を再現するこ とでシミュレーションが正しいかどうかを求める。

4. Astro-E2 衛星も含めた応答の再現

同様に衛星も含めた状態でのAnti検出器の応答をシミュレーションにより再現し、 HXD-Iの結果と比較することでシミュレーションが正しいかどうかを確認する。

5. 応答関数の構築

上記の手順によってシミュレーションが正しいことが確認されたのちに、任意のエ ネルギーにおける応答関数をシミュレーションにより構築する。

第4章 Anti検出器の応答の測定

4.1 BGOシンチレータの応答関数の測定

本研究の最終目的は Anti 検出器の応答関数を測定、構築することである。しかし、す でに述べたように Anti 検出器の応答関数は非常に複雑なものであり、初めから Anti 検出 器そのものを測定対象にすると複雑な応答の理解が困難になる。従って、まず単純な構 造をした BGO シンチレータについて応答を測定し、基本的な物理素過程、応答の特性を 理解した上で、複雑な構造をもつ Anti 検出器の応答を測定することが必要である。また、 シミュレータとして用いる Geant4 についても物理素過程に間違いがないかを検証する必 要があり、そのためにも単純なジオメトリを持つ BGO を用いる必要がある。ここでは一 辺が 1 cm の単純な立方体構造をした BGO シンチレータ (以下、サンプルピースと呼ぶ) について様々な応答の測定を行った。

4.1.1 セットアップ

測定のセットアップを図 4.1 に示した。まず、サンプルピースの PMT 接着面を除いた 各面に BaSO4 を薄く塗布する。これはサンプルピースで発生したシンチレーション光が BaSO4によって反射することで光が外に逃げ出すのを防ぎ、光収集効率を上げるためであ る。塗布する厚さは Anti 検出器と同じ 0.5 mm とした。次にこのサンプルピースを PMT に光学接着する。接着には扱いが容易なオプティカルグリース(応用光研工業株式会社 OKEN6262A) を用いた。PMT は Anti 検出器に用いられているものと同じ浜松フォトニ クス社の R3998 である。また、PMT にかける高電圧を供給するブリーダの回路も Anti 検 出器と同じにした。PMT にかける高電圧は²²Na の 1274 keV までを ADC チャンネルに おさめる最も適した値として 600 V を選んだ。PMT のアノードから出力される電荷信号 はプリアンプ (クリアパルス CP581 フィードバックコンデンサは 68 pF) によって電荷電 圧変換、増幅される。増幅された信号は波形整形のためのシェーピングアンプ (ORTEC 570) へと入力される。シェーピングアンプの波形整形には時定数 2.0µs、増幅率 26 (coarse : 20 fine: 6) を用いた。波形整形された信号は pocketMCA(Multi Channel Analyser; AMPTEK 社 MCA8000A) によって AD 変換、ヒストグラム化され、PC に取りこまれる。 このようなセットアップに対して密封放射線源から放射されるガンマ線をシンチレータに 照射することでスペクトルを取得する。放射線源はコイン型のアクリルケースなどに納め られており、検出器との高さ合わせのための支持台に固定されている。ここで、ガンマ線 との相互作用を起こしにくい原子番号の小さな物質で構成された、加工が容易な発泡スチ ロールを支持台に用いている。測定に用いたガンマ線源について表4.1にまとめた。



図 4.1: サンプルピースを用いた測定のセットアップ



図 4.2: 測定を行った実験室。写真中央の黒の発泡スチロールの上にセットアップを展開 した。

核種	半減期	エネルギー (keV)	放出率 (%)	
$^{241}\mathrm{Am}$	432.7 y	59.5	35.9	
¹³³ Ba	30.07 y	79.6	2.6	
		81.0	34.1	
		276	7.2	
		303	18.3	
		356	62.1	
		384	8.9	
		31.0^{*}	5.6	
		35.0^{*}	1.3	
$^{137}\mathrm{Cs}$	30.7 y	662	85.1	
22 Na	$2.602 { m y}$	511	$89.8(\times 2)$	
		1274	99.9	
⁸⁸ Y	$1\overline{06.7}$ d	898	93.7	
		1836	99.2	

表 4.1: 用いたガンマ線放射線源の半減期、放出エネルギー、放出率

* これらのエネルギーは Anti 検出器のエネルギー領域外なので、

実際に Anti 検出器の較正に用いられることはない。

4.1.2 線形性、エネルギー分解能の測定

まず、検出器応答の基礎となる、エネルギー線形性とエネルギー分解能について調べた。 ¹³⁷Cs、⁵⁷Co、²²Na を用いて、パルスハイトとエネルギーの関係を求めたところ、図 4.3 の 様になった。結果は、ax+bの直線により 5%の精度でよく fit できた。すなわち、用いた BGO シンチレータと回路系は今回測定に用いたエネルギー 356 keV から 1274 keV まで 十分な線形性を保っているといえる。また、図 4.4 にエネルギー分解能の入射エネルギー 依存性をプロットした。図中に、 $E^{-0.5}$ に比例する直線を同時にプロットした。この結果か ら PMT のエネルギー分解能はほぼ $E^{-0.5}$ に比例していることがわかる。このことは PMT のエネルギー分解能は電荷キャリアの統計ゆらぎによって決まることを示している。



図 4.3: サンプルピース測定のリニアリティ。図 4.4: エネルギー分解能の入射エネルギー依存性。 E^{-0.5}の直線も同時にプロットした。

有効面積は検出器応答の重要なパラメータの一つである。有効面積を求めるためは検出 器の検出効率を知る必要がある。検出効率は検出器に入射したガンマ線数と検出器で全て のエネルギーを落したガンマ線数の比である。

検出効率を測定することは極めて困難である。その理由として検出効率を求めるために は線源より放射されるガンマ線の数を知る必要があるが、ガンマ線は線源から四方八方 に放射されており、検出器に入射する割合がどのくらいか厳密に求めるのが難しいこと、 ガンマ線源が実際にどれくらいのガンマ線を放射しているのかを正確に求める方法が無 いなどが上げられる。そこで、今回は現在のガンマ線強度を線源を購入した当時のカタロ グ値を信用することで半減期を考慮して現在の強度に換算した値とし、放射線源から完全 に等方的に放射されていると仮定して検出効率を求めた。また、シミュレーションによっ ても検出効率を求め、両者を比較した。

まず、測定によって検出効率を求めた。 $\S4.1.1$ のセットアップを用いて、様々なガンマ 線源を照射し、スペクトルを取得し、得られた光電ピークに対してガウシアンフィッティ ングを行うことで、光電ピーク面積を求め、検出されたガンマ線数とする。今回の測定で はシンチレータと線源の距離 d [cm] に比べ、シンチレータの面積 A [cm²] が充分小さい ために、線源に対する立体角 Ω は $\Omega = A/4\pi d^2$ と近似できるものとする。よって検出さ れたガンマ線数 N_d はあるエネルギー E における検出効率を ε (E)、測定時間を t[s] 現在の 線源強度を R[Bq]、ガンマ線放出率を η とすると

$$N_d = R \times \eta \times \frac{A}{4\pi d^2} \times \epsilon(E) \times t \tag{4.1}$$

と表すことができる。ここで様々な距離で検出効率を測定することで立体角の近似が正 しいかどうかを知ることができる。

測定で得られたスペクトルを図 4.5 に示す。これらのスペクトルにおける光電ピーク面 積を求め、上式を用いて、BGO の各エネルギーに対する検出効率を求めた。結果は表 4.2 の様になる。ここで誤差については統計誤差のみを考慮している。検出効率を検出器に入 射した光子数に対して考えるならば、それは線源の距離によらず一定になるはずである。 結果はほぼ一定になっているが、若干異なる場合もあり、これは測定にともなう系統誤差 や立体角を 1/d² で近似したことなどが原因と考えられる。また、1274keV の入射ガンマ 線についても検出器の距離が近づくにつれて、検出効率が大きく下がっている。これは、 検出器に近づくにつれて、等方的に放射されるガンマ線のうち、検出器を通過する実効長 さが短くなるものが多くなり、検出効率が下がるものと考えられる。

	60 keV	122 keV	511 keV	1274 keV
$5 \mathrm{~cm}$	0.695 ± 0.0490	0.855 ± 0.0186	0.332 ± 0.002	0.0740 ± 0.0012
10cm	0.705 ± 0.0104	0.8326 ± 0.0284	0.388 ± 0.0035	0.0853 ± 0.0023
$17 \mathrm{~cm}$	0.781 ± 0.0187		0.404 ± 0.0056	0.0876 ± 0.0046
simulation@17cm	0.8379	0.8306	0.3851	0.0952

表 4.2: 測定、シミュレーションで得られた検出効率

次にシミュレーションによって検出効率を求める。Geant4により、反射材としてのBaSO₄ を塗布したサンプルピースと放射線源のみを再現した。ここでBaSO₄については結晶の



図 4.5: 測定によって得られたスペクトル。左:¹³⁷Cs、右:²²Na

表面に一様な密度(5.0 g/cm²)で分布していると仮定し、溶剤などは考慮していない。放 射線源から発生するガンマ線はサンプルピースに当たる範囲内においてのみ等方的に発 生させた。シミュレーション結果からデポジットエネルギーが分かるので、全エネルギー をデポジットしたもののみをカウントすると、検出効率は以下のように表される。

このようにして求めた各エネルギーに対する検出効率を図 4.6 に示す。低エネルギー側 では空気による吸収、高エネルギー側では BGO との相互作用確率が落ちるために検出効 率が下がっている様子が分かる。

ここまでの結果を元に、両者の結果を比較したものを図 4.6 に示す。ここに見られるように低エネルギー側で、シミュレーションと実験の結果が合っていないことが分かる。これは Geant4 がもともと高エネルギー物理のためのシミュレータのために、以下に挙げるような低エネルギー側の物理素過程のテーブルが正確ではなかったためである。

- 低エネルギー側での正確な光電吸収断面積
- 低エネルギー側での正確なコンプトン散乱断面積
- 蛍光 X 線発生過程

そこで、これらの物理過程について、表 3.1 で述べたテーブルを用い、、再びシミュレーションを行った。結果を図 4.6 に示す。全てのエネルギー範囲において両者が良く一致する結果を得た。ここでシミュレーション結果において、40 keV 付近で急激に落ちているのはBaSO4 における Ba の K-edge によって光電吸収断面積が急激に増加することで BaSO4 によってガンマ線が吸収されてしまったこと、100 keV 付近で再び落ちているのはBGO における Bi の K-edge で BGO の表面において光電吸収を起こしてしまい、その結果発生した特性 X 線が BGO の外へ逃げ出してしまったことが考えられる。実際、このエネルギー付近のスペクトルにはエスケープピークが強く現れている。しかし、まだ 60 keV の低エネルギー側の検出効率が測定とシミュレーションで若干異なる。これは測定で塗布した BaSO4 の密度ゆらぎや溶剤などの影響があることが考えられる。今後はシミュレー

おいても違いが見られる。これは1274keVの検出効率がもともと低く、フィッティング精度が悪かったことが原因の一つとしてあると思われる。この場合は巨大な検出器を用いるか測定時間を長くしておく必要がある。これらを含めても、測定とシミュレーションは10%以内の精度で一致しており、測定による検出効率の見積もりが近似的に正しいこと、シミュレーションに取り込まれている物理素過程が正しいことが分かった。



図 4.6: 測定によって得られた検出効率とシミュレーションの比較。左はシミュレーションの低エネルギー側の物理過程が含まれていない。

4.1.4 シミュレーションによるスペクトルの再現

HXD-IIにおいてはシミュレーションツールをGeant4に移行することになった。Geant4 は最近では物理過程の再現性も高いと言われているが、それをそのまま信用してなんの検 証も行わないまま用いるのは危険である。しかし、Anti検出器などの複雑な構造体で検 証するとどのような相互作用が起こっているのか理解し難い。よって、サンプルピースを 用いた測定をGeant4で再現することで、Geant4の物理過程の扱いを検証することにし た。すでに §4.1において良い再現性が確認されているが、ここではシンチレータ以外か らのコンプトン散乱成分などの再現性も含め、スペクトル形状の再現性を検証した。

実験においては、線源から直接シンチレータに入射するガンマ線以外にも、周囲の物質 で散乱されたガンマ線も検出される。すなわち、実験のスペクトルを再現するためには、 散乱体としてシンチレータ以外の物質のジオメトリについても詳細に再現する必要があ る。よって、このシミュレーションにおいては検出器だけではなく、まわりの構造体につ いても図4.2をできるだけ再現して行った。再現したジオメトリを図4.7に示す。まず、実 験室に置かれている机を再現した。4つあるうちの3つ机は木でできており、密度を実測 し、炭素によって再現した。もう一つの机は石でできており、これは単純にSiO2により 再現した。次に机の上に置かれていたアクリルケースを再現した。アクリルはC4H6O2に よって再現した。次に測定系であるが、セットアップは発泡スチロールの台の上に展開し たので発泡スチロールをC8H8により再現した。線源の支持台についても同様に発泡スチ ロールで再現した。また、線源ケースをさきほど述べたアクリルによって再現した。最後 に部屋の壁をコンクリートによって再現した。コンクリートは単純にセメント鉱石の一つ としてエーライト 3CaO·SiO2により再現した。これらのジオメトリは単純な構造の組み 合わせで形状を近似していたり、物質も単純なもので再現している場合もあることから完 全な再現性があるとは言えないものの、様々な物質を再現していたり、寸法は実測により 現した物質や、今後新たに再現される物質についてまとめたものを表 4.3 に示す。なお、 ここにまとめたのは今回新たに私が再現したもののみであり、BGO などについては ISAS の久保らによって作成された HXD の Geant4 シミュレーションプログラムで再現されて いるものを用いた。

測定によって得られたスペクトルとシミュレーションによって得られたスペクトルを図 4.8 に示す。図 4.8 は¹³⁷Cs のスペクトルである。黒が測定結果、緑は検出器のみを再現 したもの、青は図 4.7 のジオメトリを再現したシミュレーション結果である。この結果か らジオメトリの再現性がよくなるほど、散乱成分はよく合うことが分かる。ただし、200 keV 付近に見られる後方散乱ピークあたりの連続成分がまだ十分に再現できていない。ま た、数 10 keV 付近のピーク構造が合っていない。前者はまだシミュレーションのジオメ トリ再現が不完全であること、後者は¹³⁷Cs における軌道電子捕獲に付随した 30 keV の Ba-K 特性 X 線をシミュレーションに取り込んでいないことから生じる。以上からピーク 周辺の構造については数%の精度でシミュレーションは測定を再現することができた。ま た、コンプトン散乱成分についても大部分については数%で再現することができた。ただ し、後方散乱周辺の構造はまだ 20%ほどの誤差がある。この部分はジオメトリの不定性 が原因であると考えられ、で、散乱過程も含めた Geant4 の物理素過程は測定を良く再現 しており、今後のシミュレーションに用いることに問題がないことが分かった。



図 4.7: サンプルピースのスペクトルシミュレーションで再現したジオメトリ左: 拡大図 右: topview



図 4.8: 再現されたスペクトルと測定値の比較。黒:測定値 緑:シミュレーション (ジオ メトリは検出器のみ) 青:シミュレーション (詳細にジオメトリを再現)

- 化 4.0. ノヘエレ ノコノによ ノし行坑しに初身	表 4.3:	シミュレ-	-ションによっ	て再現した物質
------------------------------	--------	-------	---------	---------

名称	用途	構成物質	密度 (g/cm^3)	
空気	—	N, O, C, Ar	1.205	
コンクリート	部屋の壁材	3CaO·SiO2	2.35	
バリウム	反射材	BaSO_4	5.0	
木	机	\mathbf{C}	0.517	
石	机	$ m SiO_4$	3.50	
アクリル	線源ケースなど	$C_4H_6O_2$	0.956	
発泡スチロール	支持台など	C_8H_8	0.0277	
Anti 検出器単体試験				
名称				

Cr (18%), C (0.12%), Fe (81.8%)

7.70

4.2 Anti 検出器単体の応答の測定

机

ステンレス (SUS 430)

サンプルピースの試験結果から、BGO におけるガンマ線応答の物理素過程を理解する ことができた。また、Geant4 によるシミュレーションも測定を良く再現しており、今後 の応答関数構築に用いることに問題がないことが分かった。よって、ここからは Anti 検 出器一本に対して検出器応答を測定し、シミュレーションで再現することを行う。

すでに述べたように、Anti 検出器の応答の特徴としては光量の位置依存性と検出効率の 角度依存性が挙げられる。よって、今回は実際のフライト品相当の構造を持った Anti 検 出器の BGO 結晶についてこれらの応答を測定する。なお、今後位置依存性や角度応答を 測定するにあたり、座標系と角度方向の定義をあらかじめ行っておく。座標系としては、 Anti 検出器の高さ方向を z 軸、幅方向を y 軸、厚み方向を x 軸と定義する。また、角度と しては天頂角方向を θ 方向、水平角方向を ϕ 方向と定義する。これらの定義を図 4.9 に表 した。



図 4.9: 測定における Anti 検出器の座標系

セットアップはPMT から信号を読み出した後の信号処理過程については基本的にサン プルピースの試験と同様である。ただし、用いる結晶がフライト相当品であるために結晶 の扱いには細心の注意を払う必要がある。結晶への衝撃を最小限に抑えるために Anti 検 出器の BGO 結晶を箱型のアクリルケースへと納めた。また、アクリルケースと結晶の間 には発泡スチロールや板状のゴムなどをはさむことでケース内に結晶を固定、衝撃の吸収 などを行う。Anti 検出器はサンプルピースに比べてシンチレーション光の収集効率が幾 分悪い。よって、PMT にかける高電圧を 700 V に設定した。



図 4.10: セットアップ



図 4.11: 実験の信号処理系

4.2.2 光量の位置依存性測定

Anti 検出器は巨大な BGO シンチレータで構成されているために、シンチレーション光 が読み出されるまでに非常に長い距離を走る必要がある。その間に光子は結晶と反射材と の全反射、乱反射、吸収などを繰り返す複雑な過程を経て、PMT へと到達する。従って、 最終的に PMT へと到達する光量はガンマ線の入射位置によって変化してしまう。この特 性を光量の位置依存性と呼び、Anti 検出器のエネルギー分解能を悪くする効果を持つ。

Anti 検出器の応答関数を構築するにはこの光量の位置依存性を正しくモデル化し、シ ミュレーションに取り込むことが必要である。しかし、この特性は全反射、乱反射、吸収 が複雑に入り乱れた過程によって生じるために解析的に計算することは極めて困難であ る。そこで、実際にガンマ線入射位置によって光量がどれぐらい変化するかを実測し、そ の結果を単純な関数でモデル化することで、近似的に光量の位置依存性を検出器応答に取 り込むことにする。なお、光伝搬シミュレーションによる計算の試みは埼玉大学の森修論 によって行われている。

我々が知りたいのはガンマ線入射位置を変化させたときの検出器応答である。よって、 ガンマ線をコリメートすることで絞ったビームを検出器に入射させる必要がある。コリ メータにはガンマ線阻止能が高く、かつ穴を開ける必要があるので工作が容易であること が要求される。これらの条件からコリメータとして鉛を用いることにした。コリメートす るスポットサイズは小さければ小さいほど良い。しかし、スポットサイズが小さくなり過 ぎるとガンマ線収集効率は悪くなり、現実的でなくなる。また、鉛へ穴を開けるための工 作限界も存在する。そこでシミュレーションにより最適な穴の大きさを検討し、穴の大き さが4 mm ϕ の鉛コリメー タを設計、作成した。 現するのは困難である。そこで、散乱成分を極力抑えるために、結晶の周りを鉛で囲った。





図 4.12: 光量の位置依存性の測定セッ図 4.13: 光量の位置依存性の測定セットアップ トアップ 概念図

これまでは検出器の高さ方向(z軸)に対して光量の位置依存性があるといわれてきた。 しかし、他の軸方向には依存性がないかどうかを確認する必要がある。まず、結晶のッ軸 方向に対してz軸方向の3点について1cm間隔で測定を行い、この方向に対して依存性が ないことを確認した後、z軸方向に対して同様に1cm間隔で依存性を測定した。x軸方向 の測定は結晶を傾けなければならないなどセットアップが難しいために今回は行わなかっ た。

v

軸方向の測定には

¹³⁷Cs

を用い、

z

軸方向に関しては

²²Na

を用いて測定を行った。 まず、線型性と分解能について調べた。図 4.14 の左に z = 23 cm におけるエネルギー とピークチャンネルをプロットしたものを示す。ここに見られるように、測定データは ax+bの直線でよくfitされ、誤差は2%以内である。また、z軸方向の位置と、エネルギー 分解能の関係を示したものを図 4.14 の右に示す。これは z 軸の光量の位置依存性を測定 したときの²²Naの測定点ごとのエネルギー分解能をプロットしたものである。1274 keV の分解能が位置によって大きく変動していることが分かる。これは1274keVのほうがス ポットサイズが大きいために、結晶の様々な位置、深さで反応をおこすことで、光量の位 置依存性の影響を強く受けたためだと考えられる。コリメートされたビームのスポットサ イズなどとの関係を今後は調べる必要がある。なお、z = 8.0 cm 付近で不連続になって いるのは、topとbottom両方にビームが当たっているためであると考えられる。ここで、 結晶から遠くはなれたところ (z>30cm) ではエネルギー分解能は $E^{-0.5}$ の比例関係をもつ ようである。これを確かめるために、さまざまなエネルギーで z=35cm からガンマ線を照 射したときの入射エネルギーとエネルギー分解能の関係を調べたのが図 4.15 である。こ こに見られるように、たしかに $E^{-0.5}$ に比例していることが分かる。つまり、もともとは E^{-0.5}に比例するエネルギー分解能が、zが小さくなり、結晶の厚みが増すにしたがって、 高いエネルギーのガンマ線では結晶の厚さが見えて来ることで影響を受けてしまうこと が考えられる。そこで、今後行うシミュレーションにおいては、エネルギー分解能のエネ ルギー依存性を E^{-0.5} に従うと仮定して行うことにする。

y軸方向およびz軸方向のの光電ピークチャンネルの位置依存性を図4.16,4.17に示す。 y軸方向に関しては端の方で5%ほど光量が下がる傾向が見られる。これは結晶の境界面 で反射、吸収される確率が上がるためであると考えられる。z軸方向には図4.17に見られ るように最大で20%も変化する複雑な光量の位置依存性が存在する。このときスペクト ルは図4.18のように非常に大きく変化しており、この応答を無視していては、スペクト ルが正しく再現されないことが分かる。傾向としてはtop部においては先端に向かうほど



図 4.14: Anti 検出器のリニアリティ(左)。Anti 検出器のエネルギー分解能と入射位置の 関係(右)。横軸にコリメートしたガンマ線の入射位置、縦軸にエネルギー分解能をとっ た。上側に分布しているのが 511keV の分解能。下側に分布し大きく変動しているのが 1274keV の分解能である。



図 4.15: z=35cm で測定した Anti 検出器のエネルギー分解能の入射ガンマ線エネルギー 依存性。横軸が入射エネルギー、縦軸がエネルギー分解能である。 $\propto E^{-0.5}$ のラインを同 時にプロットしてある。

のは結晶が斜面構造をとっていることから、反射、吸収をくり返すうちにいずれは全反射 角を越えて外へ逃げだしてしまい、吸収されるものが増えて光量が落ちてしまうが、先端 に近づくにつれて先端部で bottom 方向へ反射されるものが増えて光量が落ちてしまうが、先端 に近づくにつれて先端部で bottom 方向へ反射されるものが増え、そのために光量が上が る、ということが山岡らによって指摘されている。また、z=8 cm あたりの bottom 部と top 部の境目で光量の飛びが見られる。これは top と bottom が Epotek という BGO と 屈折率の異なるもので接着されているからであると考えられる。さらに、bottom 付近で ガンマ線のエネルギーによって光量の位置依存性に違いがあることが分かった。この結果 を受けて他の様々なエネルギーの依存性を測定したところ図 4.19 の様になった。この結 果ではエネルギーが低いほど光量が z=10cm の bottom 付近で急激に落ちる傾向にある。 これはエネルギーによって BGO の厚さ方向で反応する位置が異なり、中心付近で反応す るとそこで発生したシンチレーション光のうち、接着面を BGO と接着剤の全反射角以上 をもって入射する割合が増えると考えることで説明できる。すなわち、厚さ方向 (x 軸方 向) の位置依存性が見えている可能性がある。この厚さ方向の位置依存性は非常に複雑で あるために今回はモデル化には取り入れていないが、将来的には光伝搬シミュレーション などでその振るまいを理解し、モデル化を行うことで取り入れる必要がある。



図 4.16: y軸方向のピークチャンネルの 図 4.17: z軸方向のピークチャンネルの 位置依存性 位置依存性

次に測定によって得られた光量の位置依存性を簡単な関数でモデル化し、シミュレー ションに取りこむことで測定を再現することを行った。モデル化には bottom 側と top 側 に分けてそれぞれ1次関数でを用いた。つまり、PH = (az + b) × E となるような a,b を z < 8 cm と z ≥ 8 cm について求め、モデル化を行った。また、今回の結果では エネル ギーによって依存性が異なるが、よりコリメートがなされていることで正確な位置依存性 を反映しているであろうと考えられる 511 keV の位置依存性についてモデル化を行った。 さらに複雑な関数を用いればモデル化の精度は上がるが、物理的意味が明白でない。一

方、bottomからtopにかけては光量が増加する傾向があるということは定性的に分かっており、物理的解釈もなされているので単純な1次関数をもちいることにした。

シミュレーションにおいては鉛ケイブやコリメータまで含めたジオメトリを用いて行う。 Anti 検出器のジオメトリとしては、結晶部分に加えて、今回の単体試験においては補強 材の CFRP まで再現した。再現したジオメトリを図 4.22 に示す。さらにシミュレーショ ンのアウトプットとして、最終的なデポジットエネルギーだけではなく、なんらかの相互 作用によってエネルギーデポジットがあった場合、その位置 z_i とデポジットエネルギー E_i を出力させる。この位置によってエネルギーデポジットに位置依存性を加え、最終的 にそれらの和を計算する。この流れを図 4.21 にブロック図として表した。シミュレーショ



図 4.18: z 軸方向によるスペクトル形状の変化。PMT からそれぞれ 10cm (黒)、20 cm (青)、30 cm (赤)。



position dependency of light output

図 4.19: 様々なエネルギーにおける z 軸方向のピークチャンネルの位置依存性。z = 8cm 付近を拡大したものを同時に載せた。



図 4.20: 光量の位置依存性モデル

ンでは ²²Na を用いた測定を再現することした。ここで、 ²²Na は、511 keV と 1274 keV のガンマ線が表 4.1 で示す効率で同時に放出される。ただし、511 keV のガンマ線は 陽 電子の対消滅にともなうガンマ線である。対消滅によって対称な運動量をもった 2 つの 511keV ガンマ線が放出されるが、検出器に入射しない方向に放射されるガンマ線もバッ クグラウンドとして再現されるべきである。そこで、シミュレーションでは 0 eV の陽電 子と 1274 keV のガンマ線を表 4.1 にしめす放出率に従った確率で発生させることした。0 eV の陽電子は発生後ただちに対消滅をおこし、2 つの 511keV ガンマ線を放出する。



図 4.21: 光量の位置依存性シミュレーションの流れ

シミュレーション結果は図 4.23 のようになった。ピークの位置という点においてはシ ミュレーションは 5%以内の精度で測定を良く再現している。ただし、1274 keV のピー クの広がりが再現しきれていない。これはモデルが不充分である可能性があるが、詳しく は不明である。今後はより厳密なモデルを構築する必要がある。また、511 keV と 1274 keV のライン比が測定と異なっている。これは測定やシミュレーションにおいてコリメー タを用いており、さらに線源と検出器の距離が非常に近いことから、シミュレーションの ジオメトリがライン比に大きく寄与してくることが分かっている。また、コリメータを用 いると放射線源が有限の大きさを持っていることも大きく影響してくる。放射線源の正確 な大きさは実測する手段がなく、完全にライン比を再現することはこの実験では困難であ る。ラインの強度比は光量の位置依存性に対しては独立である。以上のような不定性はあ るものの、ピークの位置は測定を良く再現しており、モデル化によるシミュレーションは 正しいものであるということが言える。



図 4.23: 再現したスペクトル (青) と測定 (黒) の比較。それぞれ、PMT から 10 cm (左)、 20cm (中)、30 cm (右) の²²Na のスペクトル。

4.2.3 角度応答の測定

衛星などのジオメトリは Anti 検出器の角度応答に大きく影響してくる。それらを考慮 する以前に、Anti 検出器自体の角度応答を理解しておくことは極めて重要である。Anti 検出器単体の角度応答について図 4.9 で定義した天頂角方向 (θ 方向) と水平角方向 (φ 方 向) について角度応答を測定を行い、シミュレーションとの比較を行った。

実際の天体からのガンマ線入射を摸擬するためにはできるだけ平行な拡がったビームを 入射しなければならない。このためにできるだけ離れたところから線源を照射する必要が ある。実験室の大きさの限界から線源は検出器から 3m 離れたところに設置した。また、 散乱成分を抑えるために鉛で検出器を囲うことはできない。そこで、実験室のあらゆるも のを排除し、検出器と線源、測定系のみを部屋の中に配置した。角度応答を測定するには 線源を移動させながら測定する必要がある。ここで線源を天頂角方向に精度良く動かすこ とは難しく、必ず水平角方向に移動させるなければならない。それゆえ、 θ 方向と ϕ 方向 の測定では結晶の向きを変える必要がある。今回は ϕ 方向測定では結晶を立てることにし た。このとき、結晶の下側にPMT などの精密機器が付いているために、逆向きに立てる ことにした。一方、 θ 方向の測定では結晶を横に寝かせて測定を行った。セットアップの 概念図を図 4.25 に示す。

測定結果を図 4.26,4.27 にしめす。左図は光電ピークチャンネルのガンマ線入射角度依存性を示している。すでに述べたように光電ピークチャンネルはガンマ線入射位置依存性を持つ。しかし、今回は検出器の全面にガンマ線が照射されているので入射角度による依存性は見えない。また、右図の θ 方向、 ϕ 方向それぞれにおける検出されたガンマ線のカウント数の入射角度依存性はほぼ cosine に従っている。これはガンマ線発生位置から検出器を見込む面積がまさに cosine の角度依存性を持っているためである。しかし、端の

であると考えられる。





図 4.24: 角度応答測定セットアップ 図 4.25: 角度応答セットアップ 模式図



図 4.26: ϕ 方向のピークチャンネル (左) と総カウント数 (右) の角度依存性。¹³⁷Cs で行ったシミュレーション結果を実線で重ねてある。



図 4.27: θ 方向のピークチャンネル (左) と総カウント数 (右) の角度依存性。¹³⁷Cs で行ったシミュレーション結果を実線で重ねてある。

次に、試験結果をシミュレーションで再現することを試みた。再現したジオメトリを図 4.28 に示す。結晶を置く机は木により再現し、線源を置く台はステンレス製の机に発泡ス チロールの支持台を置いたものを再現した。最後に部屋の壁をコンクリートにより再現し た。手順はこれまでと同様に反応ステップ毎のエネルギーデポジットに光量の位置依存性 悪いが、これは光量の位置依存性によるものである。よって、なますエネルギー分解能は 光量の位置依存性でコリメート照射したときのもの、 $25\% \left(\frac{E}{511 \text{keV}}\right)^{-0.5}$ を用いる。再現したのは 137 Cs を用いた実験である。

まず、Anti 検出器にとって重要な、ガンマ線検出数の角度依存性がシミュレーションで 再現できるかを調べた。シミュレーションによって検出されたガンマ線カウント数を図 4.26,4.27 に実線で示した。¹³⁷Csの測定結果と比較すると θ 方向 φ 方向ともにシミュレー ションは実験を 10% 以内の精度で再現していることが分かる。つまり、Anti 検出器の角 度応答はシミュレーションで十分に再現できていると言える。

次に光量の位置依存性を取りこんだスペクトルを実験と比較することを行った。再現した¹³⁷Csのスペクトルを図4.29に示す。両者はピークチャンネルの点においては全ての測定点で図4.26,4.27に見られるように、5%以内の精度で一致したが、図4.29に見られるように、ピークの幅が一致していない。測定された分解能が予想値よりも悪いのである。これは、角度依存性測定のために検出器を逆さまに立てることを行ったために、結晶とPMTとの光学接着が緩み、PMTへと届く光量が減少し、分解能が悪くなったと考えられる。実際、各アンプからの出力波形は減少しており、そのため今回は高圧を上げて800Vで測定を行った。このことからもPMTの光量が減少していると考えられる。

このことをもう少し定量的に議論する。高圧を 700V から 800V にあげたときに予想される出力電圧の増分は PMT の高圧指数を 7.0 とすると $(800/700)^7 = 2.53$ 倍になると予想される。つまり、光量の位置依存性の測定時に ¹³⁷Cs の 662keV で 950 ch であったピークチャンネルは高圧を 800V にしたときには 2000ch 以上になるべきである。ところが今回の測定では 1140ch でしかなかった。このことは光量が $(1140/950)/2.53 \sim 47$ %ほども減少したことを意味する。PMT のエネルギー分解能はほとんど光電面に集まるシンチレーション 光の統計ゆらぎによって決まる。つまり、光量が 47 % 減少したとき、ポアソンゆらぎは $\sqrt{(1/0.47)} \sim 1.46$ 倍に増大することになり、実質のエネルギー分解能も $25 \times 1.46 = 36\%$ にスケーリングされることになる。

実際に分解能を36%とし、シミュレーションをやりなおした。結果が図4.30であり、測定の再現が改善していることが分かる。つまり、測定時にはなんらかの理由でPMTに届く光量が下がっており、そのためにエネルギー分解能が悪くなったと考えられ、その要因としては結晶を逆さまに立てるというコンフィグレーションであると考えるのがもっともらしいのである。結晶を逆さまにすると実際に光量が下がることは再現実験により確認されている。

測定で光量が下がっていたことを考慮すると再現性が改善したが、まだピークの高エネ ルギー側の広がりや低エネルギー側の連続成分が10%ほど一致していない。30 keV 付近 のピーク構造は §4.5 で述べた Ba の 30 keV 特性 X 線を再現していないことから生じる。 連続成分が一致しないのは今回は結晶をおさめたアクリルケースなどを再現していなかっ たことなどが考えられる。高エネルギー側のピークの広がりはさきほど行った光量の減少 分の補正を厳密に行えば合っていく可能性はあるが詳しい原因は不明である。今後は光量 がセットアップにより減少しないように注意した再測定を行う必要がある。



図 4.28: 角度応答シミュレーションのジオメトリ 左 拡大図 右 topview



図 4.29: 分解能を 511 keV で 25%と図 4.30: 分解能に光量分の補正を加え、 したときの¹³⁷Csのスペクトルの比較。511 keV で 36 % としたときの比較。 青:シミュレーション黒:測定 青:シミュレーション 黒:測定

今回行った実験により、Anti 検出器の応答の最も大きな特徴の一つである、光量の位置 依存性について、測定結果からモデル化を行い、そのモデルは測定を5%の精度で良く再 現できることができた。また、Anti 検出器の角度応答についても予測された結果が得ら れ、カウントレートなどの角度依存性はシミュレーションで10%以内の精度で再現できる ことできた。ただし、スペクトルの再現性はセットアップの不備などから、まだ精度よく 行えていない。これらの結果から、Anti 単体における検出器応答を理解することができ た。今後はこれらの結果を取り入れて Anti 単体から HXD 単体まで組んだ状態、さらに Astro-E2 衛星まで含めた状態での応答関数を構築して行くことができる。

第5章 衛星まで含めた応答関数の構築

ここまでで、Anti 検出器単体ユニットの応答をモデル化し、シミュレーションによりあ る程度再現できることが分かった。そこでこれら結果を用いて、HXD-II 単体、さらには Astro-E2 衛星まで含めた応答関数を構築する。ただし、そのための測定はまだスケジュー ル的な問題により行われておらず、HXD-II として組まれたとき、もしくは Astro-E2 衛星 まで含んだときの位置依存性などの正確なパラメータは分かっていない。そこでここまで で得られたパラメータを用いてシミュレーションを行い、HXD-I 時代の測定結果と比較 することでシミュレーションやモデルの整合性を近似的に議論する。整合性が確認された 後に §3.1 で述べた応答関数を実際に構築することを行う。ここでも、初めから衛星まで 含めた複雑な応答を求めることはせずに、まず HXD-II として組まれた状態での応答を再 現、理解したのちに衛星まで含めた応答を求めることを行う。

5.1 HXD-II単体の応答

5.1.1 HXD-I時代の測定

HXD-I時代には HXD 単体の測定として、コリメートした線源による光量の位置依存性 測定と、様々な角度に配置した線源からの角度応答測定がなされた。光量の位置依存性測 定はコリメータをフォークリフトに載せることで z 軸方向をスキャンした。測定の概念図 を図 5.1 に示す。スキャンする位置 z は z = 5、11、23、29、35 cm である。HXD に搭 載されるすべての Anti ユニットに対して測定を行った。²²Na を用いてあるサイドユニッ トをスキャンした測定結果の例を図 5.2 に示す。z = 5 cm で当てたのが黒、z = 11 cm で 当てたのが青、z = 23 cm で当てたのが赤、z = 35 cm から当てたのが緑である。z = 35 cm で当てた緑のスペクトルのピークチャンネルが最も高く、top と bottom の境界に近 い z = 11 cm で当てたスペクトルのピークチャンネルが最も低い。また、z = 5 cm と 23 cm で当てたスペクトルのピークチャンネルはほぼ同じになっており、この傾向は今回測 定した光量の位置依存性で理解することができる。

角度応答測定は HXD から 3 m 離れた位置に線源を配置し、 θ 方向、 ϕ 方向について測 定を行った。ここで、 $\theta < 0$ の下側については HXD を反転させて測定する手法を取って いる。 $\phi = 0$ °において、 θ 方向に線源を動かしたときの TPU1 ののスペクトルの変化を 図 5.2 に示す。黒が 15 °、青が 45 °、赤が 90 °から当てたときの ⁸⁸Y のスペクトルであ る。 $\theta = 45$ °から $\theta = 15$ °にかけてピーク面積が大きく減少しており、cosine の角度応答 を持っていることが分かる。50 ch 付近からスペクトルに飛びが見られるが、これは §2.3 で述べたように TPU では 48ch 以上からビンまとめを行うからである。また、80ch 付近 にカウントがたまっているが、これは ADC のオーバーフロービットを表している。



図 5.1: HXD 単体較正試験セットアップ模式図。左:光量の位置依存性測定。右:角度応 答測定



図 5.2: HXD-I 時代に得られた HXD 単体での光量の位置依存性 (左) 黒が z=5cm、青が z=11cm、赤が z=23cm、緑が z=35cm から当てたもの。右図はスペクトルの角度応答を 示す。 $\phi=0$ °において、 θ が黒が 15 °、青が 45 °赤が 90 °から当てたときの TPU1 のス ペクトル。

これまでで得られた光量の位置依存性モデルを取り入れたシミュレーションによって、 HXD-I時代の測定を再現することを行う。再現する測定は⁸⁸Yを用いた角度応答測定で ある。再現したHXDのジオメトリを図 5.3 に示す。こここにはWell検出器も含めて再現 されているが、Anti検出器に関しては補強材のCFRPなどはまだ再現されていない。こ のHXDに対して、3 m 離れたところから等方的にガンマ線を発生させる。線源の位置は θ および ϕ 方向にそれぞれ 10 deg きざみで発生させ、エネルギーは表 4.1 に示した放出 率に従った確率で 898 keV と 1836 keV を発生させる。シミュレーション結果を図 5.4 に 示す。図 5.4 は θ = 90 °において ϕ 方向に線源をスキャンして行ったときの各面 4 つの Anti サイドユニット毎の総カウント数の角度応答である。シミュレーションにおいては HXD-Iのエネルギーの下限である、100keV 以上のエネルギーを落したイベントをカウン トした。各面の正面に線源がきたときにカウントレートが最大となる様子が分かる。こ の結果は HXD-I の測定結果を 5%以内でよく反映しており、シミュレーションに用いた HXD ジオメトリが正しいことを示している。

次に、スペクトル形状の再現性を調べた。図 5.5 はスペクトル形状の角度応答である。 黒が $(\theta, \phi) = (90, 0)$ 、 青は(45, 0)、緑は(20, 0)赤が(0, 0)である。スペクトルは得られた光量の位置依存性を取りこんで作成した。この結果もスペクトルのピーク面積が線源が正面からはなれていくと減少して行く傾向を示し、HXD-Iの測定をよく再現している。

スペクトル形状を詳細に比較したのが図 5.6 である。図 5.6 の左は TPU0 において光量の 位置依存性を取りこんだスペクトルを測定値と比較したものである。測定結果に対する再 現性は 10%程度であるが、これはモデルがまだ完全でないこと、また、HXD-I と HXD-II ではパラメータが完全に一致していないことなどが挙げられる、また、スペクトルにおい て低エネルギー側の連続成分が測定と一致していないが、これは再現したものが HXD の みであるために床などからの散乱成分を考慮していないためである。床をコンクリートで 再現したときのスペクトルの比較を図 5.6 の右に示す。確かに床などの散乱成分の寄与が 大きいことが分かるが、当時の部屋の状況などが不明であるため、今回のシミュレーショ ンにおいては部屋の再現は行わないことにする。以上の結果から、今回構築した光量の 位置依存性モデルは HXD 単体まで組んだ状態でも測定を再現できることが分かった。た だし、厳密なパラメータは Anti 単体レベルと HXD 単体レベルでは異なる可能性があり、 今後の測定によりそれらを測定することでさらに精密な応答関数を構築する必要がある。



図 5.3: Geant4 で再現した HXD のジオメトリ。



図 5.4: Anti 検出器各面の検出されたガンマ線カウント数の $\theta = 90$ °における ϕ 方向依存性。左上が TPU0、右上が TPU1、左下が TPU2、右下が TPU3。線で結んであるものが シミュレーション。



図 5.5: シミュレーションで得られたスペクトルの角度応答。 $\phi=0$ °において $\theta=0$ °(赤)、 20 °(緑)、45 °(青)、90 °(黒) から線源を照射した。



図 5.6: 光量の位置依存性モデルを取りこんで再現したスペクトル。左: $\theta=90 \phi = 0$ 右は 壁を取り入れた場合。黒が実測、青がシミュレーション

5.2 Astro-E2 衛星も含めた応答

5.2.1 HXD-I時代の測定

次に、Astro-E2 衛星のジオメトリを加えたときの応答を再現することを試みた。ここ でも HXD 単体の場合と同様に、HXD-I時代の測定結果と比較することで、これまで構築 してきたモデルが正しく応答を再現できるかどうかを確認する。HXD-I時代では Astro-E 衛星まで含めたセットアップにおいて、主に角度応答に重点をおいて測定を行った。これ はすでに §3.3 で述べたように衛星の機器、とりわけ XRS の冷却系の角度応答への影響が 非常に大きいからである。角度応答の測定は衛星から 4m 離れた位置に²²Na を配置し、 様々な角度からガンマ線を照射することで行った。結果を図 5.8 に示す。左図は Anti 検出 器の一面である TPU0 のスペクトルの角度応答である。検出器の正面 (この場合は 90°) から見込む角度が小さくなるほどカウントレートが下がることが分かる。このように各面 はほぼこれまでと同様の角度応答をとる。ただし、正面に XRS の冷却系を見込んでいる TPU2 のみは他の面と振るまいが個となる。右図は各面の正面から線源を当てたときのス ペクトルである。ここに見られるように XRS の冷却系に面した TPU2 は非常に強い吸収 を受けてしまうことが分かる。

5.2.2 シミュレーションによる再現

HXD 単体でのシミュレーションに ISAS の久保によって作成された Astro-E2 衛星のジ オメトリを組み込み、カウントレートとスペクトルの角度応答の再現を行った。シミュ レーションで再現したジオメトリを図 5.9 に示す。ただし、HXD-I 時代の実測時にはソー







図 5.8: HXD-I時代に得られた Astro-E 衛星も含めた角度応答。左は TPU0 のスペクトル の ϕ 方向の角度応答。右は各面の正面から線源を当てたときのスペクトル。TPU2 のみに 非常に強い吸収が見られている

このようなジオメトリに対して、²²Naから放射されるガンマ線を4m離れた位置から等 方的に発生させた。結果として、各面の 1274keV のカウントレートの角度応答を図 5.10 に示す。実線で示したシミュレーション結果がほとんどの点で測定値を5%以内の精度で 再現していることが分かる。ただし、300°付近における TPU1の振るまいがシミュレー ションと実測で異なる。TPU1 は実測においても 300°付近で他のユニットに比べカウン トレートが低いなど違った振るまいを持っている。これは測定時に衛星の周りにあった 足場が影響し、30%ほど吸収されてしまったこということが古徳らによって報告されてい る。当時の足場がどのように組まれていたかが分からないために、今回のシミュレーショ ンでは足場は再現しておらず、また測定とシミュレーションの違いがおよそ30%ほどであ ることから、ここの違いは足場のジオメトリを再現していなかったためであると考えて良 いだろう。また、TPU0においても 90°付近で測定とシミュレーションが異なっている。 本来、カウントレートは cosine の分布をもつはずであるが、測定値の方が 90°で急激に 増加しており、不自然である。これは今後の測定で注意して見てみる必要がある。さらに TPU2 でも 270 °付近で振るまいが異なる。これは XRS の冷却系を見込みはじめる角度 であり、冷却系の中がどのように満たされているかが影響してくると考えられる。シミュ レーションでは冷却系の中味をすべて固体ネオンで満たしてある。実測時にはどのよう に満たされていたか厳密に知ることはできない。これは今後の測定で必ず実測し、シミュ レーションに取りこむ必要がある。

図 5.11 は光量の位置依存性を取りこんだ TPU0 のスペクトル形状の角度応答である。黒 は ϕ =45°、青は 90°、緑が 330°、赤が 270°である。この角度応答は図 5.8の測定結果 を良く再現している。図 5.12 でスペクトル形状の比較を $\phi = 0$ の TPU1 のスペクトルで 行っている。黒が実測、青がシミュレーションである。ピークチャンネルという点に置い ては両者は数%の精度で良く一致しているが、ライン強度がかなり異なっている。これま でもジオメトリの不完全さのためにライン強度は完全に合わせ込むことは難しかったが、 今回も 20%以上も異なっており、これは Astro-E2 衛星も含めたジオメトリで応答関数を 構築する上で問題である。原因としてはやはりジオメトリが不完全であることが考えら れる。今回用いた Astro-E2 衛星のジオメトリは外見はよく再現されているものの、物質 構造の再現性が完全でない。例えば、衛星構体としてのパネルは本来、厚みが 2.5cm で あり、その構造はそれぞれが 5.0mm 厚の CFRP によるハニカム構造をとっている。しか し、シミュレーションのジオメトリではパネルは2.5cmの厚みを全てアルミニウムによっ て満たされており、ここで低エネルギーのガンマ線が多く吸収されてしまう。パネルの構 造を完全に再現することは現状では難しく、また、パネル以外にも様々なジオメトリの不 定性が含まれていることから、今回はパネルを CFRP で満たし、その厚みを調節するこ とで、ライン比を合わせ込むことにした。パネルの厚みを1.0cm としたときのスペクトル を図 5.12 の右に示す。測定を良く再現することができた。無論、これは暫定的な処置で あり、本来はパネルの構造を忠実に再現することや、実際にパネルのガンマ線透過率を測 定するべきである。これは今後の測定において必ず行う必要がある。また、低エネルギー 側の連続成分も一致していないが、これは床などからの散乱と考えられる。床からの散乱 についてはすでに HXD 単体レベルのシミュレーションで言及したのでここでは取り扱わ ないことにする。



図 5.9: Geant4 により再現した Astro-E2 衛星も含めたジオメトリ



図 5.10: 各面のカウントレートの ϕ 方向の角度応答。左上が TPU0、右上が TPU1、左下 が TPU2、右下が TPU3。線で結んであるものがシミュレーション。



図 5.11: TPU0 のスペクトルの ϕ 方向の角度応答赤: ϕ =270°、緑: 330°、黒: 45°青: 90°。



図 5.12: スペクトルの比較。黒:実測、青:シミュレーション。左はパネルの厚みが 2.5cm のもの。右は 1.0cm とした。

0.0 心合法成の伸呆

ここまでのシミュレーションと測定の比較から、位置依存性のモデル化や Geant4 のシ ミュレーションが正しいことを示すことができた。よって、このまま Geant4 を用いて、 応答関数を構築して行く。ここでいう応答関数とは実際の解析に用いられる行列の形をと り、天文学の共通のフォーマットである fits 形式によって記述されるたものを指す(以後、 レスポンスと呼ぶ)。まずレスポンスの構築の手順をまとめた後、HXD 単体レベルでのレ スポンス、Astro-E2 衛星まで含めたレスポンスを構築する。

5.3.1 レスポンス構築の流れ

1. 各エネルギーにおけるパルスハイト確率分布を求める

§3.1 で述べたように、レスポンスはパルスハイトの確率分布 (rmf) と、有効面積 (arf) から構成される。まず、rmf を求める。rmf は検出器の観測領域内での全てのエネ ルギー空間において、単色ガンマ線が入射したときの確率分布で構成される。つま リ、シミュレーションによってあらゆるエネルギーの単色ガンマ線を入射させ、得 られたスペクトルのパルスハイト確率分布を得れば良い。ここで、入射させるエネ ルギーの間隔は細かければ細かいほどよい。しかし、あまり細かすぎるエネルギー を用いると時間がかかるなど現実的でない。そこで、今回はエネルギーを最低限必 要な検出器のエネルギービンだけで振ることにした。もちろん、できる限り細かく 振る方が精度は良いので今後行う必要がある。Anti 検出器のエネルギービンは約 40 keV である。よって 0 – 5 MeV まで 40 keV 刻みで単色エネルギーを検出器に入射 させ、パルスハイトの確率分布を得た。

2. 検出器の有効面積を求める

次にレスポンスを構成するもう一つの要素である有効面積 (arf)を求める。§3.1 で述 べたように有効面積は検出効率と検出器の幾何学的面積によって表される。検出効 率はエネルギーに依存するために、各エネルギーにおいて求めておく必要がある。 そこで、今回は rmf を求めるシミュレーションにおいて、ビーム幅を HXD-IIよりも やや大きくしておき、全エネルギーを検出器に落したガンマ線数と発生させたビー ムの数の比を検出効率とした。ここにビーム幅の面積をかけることで有効面積を求 めることができる。このようにして rmf を求めた各エネルギーについて有効面積を 求めた。

3. rsp として fits 形式に変換する

すでに述べたようにレスポンスは rmf と arf を掛け合わせたものであるが、一般的 な検出器では rmf と arf は独立させて作成され、実際に解析に用いられるときに初 めて掛け合わされることが多い。しかし、Anti 検出器の場合は入射角度によってス ペクトルの形自体が変化するなど、rmf と arf が相関していることがある。従って レスポンスを作る時点で両者を掛け合わせる手法をとる。このように両者を掛け合 わせた形を rsp (response) と呼ぶ。よって、今回上記によって求めた rmf と arf を 掛け合わせることで rsp とした。

天文学の分野では、解析データの共通のフォーマットとして fits 形式というものが 用いられている。fits 形式はまずはじめに観測時期や観測機器などの詳細な情報を 含めたテキストヘッダーがついており、その後に実際のデータがバイナリー形式で ウェアの間でデータを共有できるなど様々な利点がある。そこで、今回、作成した rsp を fits 形式に変換した。

5.3.2 作成したレスポンス

上記の手順に従って、HXD-II単体と衛星も含めたジオメトリでのそれぞれのレスポン スを作成した。レスポンスを用いて計算した有効面積を図 5.13 に示す。HXD 単体では 300 keV においても 800 cm² の有効面積をもっている。これはこれまで見積もられている 値とコンシステントである。ただし、衛星まで含めたレスポンスでは衛星構体などの吸 収が効いてくるために、有効面積は全体的に若干下がり、最大でもおよそ 600 cm² となっ てしまう。これは衛星構体のパネルを 1 cm 厚の炭素と近似したときのガンマ線吸収率が 70% @50 keV であることで説明できる。このことは周りのジオメトリが大きな影響を持っ ていることを示しており、今回初めて構築した、衛星も含めたレスポンスを用いることで 明らかとなった。また、両者ともに 50 keV や 5 MeV といったエネルギー領域の境界に おいて有効面積が大きく下がっている。これは、検出された光子のエネルギーがエネル ギー分解能の影響により、観測エネルギー領域の外まで拡がってしまったために、discri によって切られてしまった効果が見えているためである。



図 5.13: 作成したレスポンスにより計算された有効面積。左は HXD-II 単体、右は Astro-E2 衛星も含めたときの Anti 検出器のある一面に正面からガンマ線が入射したときの有効 面積

3.4 レス小ノスを用いた観烈ノミュレ ノョノ

ここまでで、Anti 検出器のレスポンスを構築することができた。そこで、このレスポンスを用いて、実際に衛星軌道上におけるガンマ線バーストのスペクトルを再現することで、Anti 検出器のガンマ線バーストモニタとしての性能を評価することにする。

5.4.1 シミュレーションの手順

実際の軌道上のスペクトルを再現するためには、軌道上で予測されるバックグラウンド を考慮しなければならない。そこで、今回は川添によって見積もられた軌道上のバックグ ラウンドスペクトルを用いることにする。ただし、このバックグラウンドスペクトルは 2.5 MeV までしか求められていない。そこで、今回は2.5 MeV 付近がべき乗分布をして いると仮定して、そのべきでそのまま 5 MeV まで外挿することで近似的に 5 MeV まで のバックグラウンドとして用いることにした。図5.14 に川添によって見積もられたバック グラウンドスペクトルと今回 5 MeV まで外挿したスペクトルを示す。無論、5 MeV まで 同じべきでスペクトルが伸びている保障はなく、今後 5 MeV まで考慮したバックグラウ ンドスペクトルの見積もりを行うことは必須である。今回の観測シミュレーションにおい ては、このバックグラウンドとガンマ線バーストのスペクトルモデルを同時に発生させ、 後に 5%の系統誤差を付けたバックグラウンドを引くことでスペクトルの再現を行うこと にする。



図 5.14: 軌道上で予測される Anti 検出器一面のバックグラウンド。左はこれまで見積も られたもの、右は今回のために 5MeV まで外挿したもの

5.4.2 ガンマ線バーストのスペクトルモデル

ガンマ線バーストのスペクトルはすでに述べたように 2 成分の power-law モデルでよく 表される。このモデルは Band function (Band et al. 1993) として知られており、低エネ ルギー側、高エネルギー側の photon index をそれぞれ α 、 β 、スペクトルの折れ曲がり を特徴づけるエネルギーを E_c、規格化定数を A とすると以下のようにに表される。

$$A(E) = \begin{cases} A \times E^{\alpha} \times \exp(-E/E_{c}) & \text{for } E <= (\alpha - \beta) \times E_{c} \\ A' \times E^{\beta} & \text{for } E > (\alpha - \beta) \times E_{c} \end{cases}$$
(5.1)

エネルギー E_{break} は $E_{\text{break}} = (\alpha - \beta) \times E_{\text{c}}$ となる。

数多くのガンマ線バーストを検出した BATSE の結果によると、べきはそれぞれ $\alpha = -1.0 \beta = -2.3$ に多く分布するようである (図 5.15)。また、検出したバーストのフラック スの分布を図 5.16 左に示す。ここに示すように、10.0 photons/s/cm² 以上のフラックス を持った明るいガンマ線バーストからその数は急激に減少している。また、ガンマ線バー ストの持続時間を示したのが図 5.16 右である。ここには 2 つのピークが見られるのが特 徴で、それぞれおよそ 0.2 s, 20 s にピークを持っている。



図 5.15: BATSE により求められたガンマ線バーストスペクトルのパラメータの頻度分布。 左が α 、右が β 。



図 5.16: BATSE により観測されたガンマ線バーストのピークフラックスの頻度分布 (左)、 持続時間の頻度分布 (右)。

5.4.3 ガンマ線バーストの検出数見積もり

今回、レスポンスを作る上で Anti 検出器の有効面積を見積もることができた。この結 果を用いて、次の手順によって Anti 検出器を用いてガンマ線バーストを年間どれくらい 検出することができるかを見積もることができる。今回、エネルギーレンジを 50 keV -5 MeV として見積もることにした。

1. バースト判定ロジックから検出限界のバーストレート counts/s を求める

- クス counts/s/cm² を求める。
- 3. BATSE により得られた logN-loS 図と比較してバースト数を見積もる

まず どれぐらいの明るさであれば、Anti 検出器でガンマ線バーストとして検出できるか を考える。§2.3.2 で述べたガンマ線バーストの判定ロジックと、軌道上で予測されるバッ クグラウンド (図 5.14)を用いると、ガンマ線バーストとして判定できる最低限のバース トの明るさ Fmin は以下の様に表される。

$$F_{\min} = (detection \ level) \times \sqrt{(background \ rate)}$$
(5.2)

図 5.14 において、Anti 検出器の有効面積をかけることでバックグラウンドのカウント レートを見積もることができる。ただし、数 100 keV のバックグラウンドの主な成分は 放射化成分であり、衛星まで含めた有効面積ではなく、HXD 単体としての有効面積を用 いる必要がある。そのようにして求めた 50 – 300 keV のバックグラウンドレートは 2421 counts/s となった。ここで、TPU のガンマ線バースト判定条件 (16 σ , 11.4 σ , 8.0 σ , 5.7 σ) に ついて、 F_{min} は、それぞれ表 5.1 の様に求められる。ここで、BATSE の logN-logS 図と 比較してバーストの検出数を見積もるわけであるが、そのためには Anti 検出器の全ての 面を考慮した平均有効面積を求める必要がある。そこで、次に Anti 検出器のすべての面 で有効面積の角度応答を考慮して全方位で平均した平均有効面積について見積もる。

衛星まで含めた Anti 検出器の有効面積の角度応答は非常に複雑なものとなる。まず、 ϕ 方向について考える。200 keV の単色ガンマ線が平行光で $\theta = 90$ °から入射したきのそれぞれの面の検出カウント数を ϕ 方向にスキャンしたものを図 5.17の左に示す。ここで TPU0 はぼぼ cosine に従う分布を持っているが、TPU1、TPU3 は非常に複雑な角度応答を持っている。ここで $\phi=30$ °付近もしくは $\phi=130$ °付近から TPU1、TPU3 の検出効率が急激に下がり始めるのは展開されたソーラーパネルによって吸収されるためであると考えられる。 $\phi = 0$ °や $\phi = 180$ °で急激に効率が回復しているのは入射ガンマ線が平行光であるためにソーラーパネルを全く見込まなくなったためであると考えられる。また、 $\phi = 270$ °付近ではすべての面の検出効率がほぼ0になっている。これはまさに XRS の冷却系によって吸収されているためである。そこで、TPU0 については cosine で積分を行い、他の面についてはこの効率からスケールした値を用いることとした。スケールファクターは TPU1、TPU3 は 0.55、TPU2 は 0.32 とした。

次に θ 方向の角度依存性について考える。 ϕ 方向と同様に、各面の正面からビームを 当てたときの θ 方向の角度応答をスキャンしたのが図 5.17 の右である。ここでも TPU 0 はほぼ cosine の分布をしており、TPU1、3 はやや複雑な応答、TPU2 は XRS 冷却系の 影響を受けて上半分ではほとんど見えていない。 θ 方向でも TPU0 は cosine で積分し、 他の面ではスケールファクターをかけることとした。 スケールファクターは TPU1、3 で 0.82、TPU2 で 0.46 である。

以上から、Anti 検出器の全方位での平均有効面積をもとめるには TPU0 について θ , ϕ 方向について cosine で積分を行った後、他の面については TPU0 の結果に上記のスケー ルファクターをかけることで求めることができる。まず、A を $(\theta, \phi) = (90, 90)$ における TPU0 の有効面積とすると TPU0 の全方位平均は次のように表される。

$$\langle \mathbf{A} \rangle = \frac{\mathbf{A} \iint \cos(\theta - \pi/2) \sin\theta \cos\phi d\theta d\phi}{\iint \sin\theta d\theta d\phi} = 0.5\mathbf{A}$$
(5.3)

かけて、4面全てを用いた時の平均有効面積を求めると

$$0.5A(1 + 0.55 \times 0.82 + 0.55 \times 0.82 + 0.32 \times 0.46) = 1.02A$$
(5.4)

となる。ここで A は レスポンスにより得られており 600 cm² であるから、全方位の平 均有効面積は612 cm² と見積もることができる。この有効面積を用いて求めた各判定条件 におけるバーストフラックスの検出限界と BATSE の logN-logS から推定できる年間バー スト数を表 5.1 に示す。この結果から、HXD-II Anti 検出器では年間 100 個程度のガンマ 線バーストを検出することが可能であると考えられる。



図 5.17: 左図はφ方向についての各面のカウント数の角度応答。左から TPU1、0、2、3 の順に正面を見込む。右図は各面の正面からガンマ線が入射したときのθ方向の角度応答 のスキャン。

	ハースト判定レベル			
	16.0 σ	11.4 σ	8.0σ	5.7σ
検出限界のレート (c/s)	787.2	560.8	393.6	280.4
検出限界のフラックス $(c/s/cm^2)$	1.28	0.92	0.64	0.46
年間バースト数	92	115	159	186

表 5.1: 各判定条件におけるガンマ線バースト検出限界と推定される年間バースト数

5.4.4 ガンマ線バーストの位置決定精度

すでに述べたように Anti 検出器ではガンマ線バーストの発生位置を同時に捕えた 2 面 のカウントレートの比によって決定する。今回、衛星も含めた Anti 検出器のレスポンス を初めて作成することができたので、衛星も考慮した Anti 検出器の位置決定精度を評価 することが可能である。そこで、色々な角度で求めたレスポンスを用い、それぞれの角度 でガンマ線バーストのスペクトルを再現し、TPU0 と TPU1 のカウントレートの比を調べ た。用いたガンマ線バーストのスペクトルは BATSE で典型的な $\alpha = -1.0 \beta = -2.3 E_c =$ 250 keV で、バーストフラックスは 50 keV – 300 keV において 5.0 photon/s/cm², 10.0 photons/s/cm² をパラメータとして入力した。積分時間は 20 s とし、スペクトル再現の 行い、平均値からの分散をエラーとした。

結果を図 5.18 に示す。左が 5.0 photon/s/cm² のバースト、右が 10.0 photons/s/cm² の明るさのバーストである。ここに見られるように 5.0 photon/s/cm² のバーストではエ ラーのために位置決定は 3 °よりも精度良くは行えないが、10.0 photons/s/cm² ほどに 明るくなると 1 °ほどの位置決定が可能であることが分かる。この結果は川添や片岡らに よって HXD 単体で求められている結果と矛盾しない。

このように、明るいバーストであっても Anti 検出器は単体ではその位置決定精度は HETE-2 などの衛星に比べて決して良いとは言えない。しかし、Anti 検出器は時間分解 能が最大で 16ms であり、このことは IPN に参加することで非常に良い位置決定精度を 実現できる可能性を示している。IPN は (Inter Planetary Network)の略称であり、惑星 軌道上で稼動している検出器を用いて、ガンマ線バースト検出の時間差から位置を決定す るためのネットワークである。IPN を用いると、検出器間の距離を D、検出時間差を δ t、光速をc、ガンマ線バーストが発生した角度を θ とするとバーストの角度は

$$D\cos\theta = c\delta t \tag{5.5}$$

となり、角度分解能は

$$\delta\theta = c\sigma(\delta t) / Dsin\theta \tag{5.6}$$

と表される。すなわち、時間分解能がそのまま位置決定精度に結びつくわけである。ここで Anti 検出器の典型的な時間分解能を 1/32 ms とすると、上式より位置決定精度は 1[']となる。

つまり、Anti単体で大まかにバースト発生位置を決めておき、後で IPN を用いて発生 位置を精度良く決定することもできる。



図 5.18: バーストを同時に観測した 2 面 (TPU0 と TPU1) のカウントレートの比。左が 5.0 photon/s/cm² のバースト、右は 10.0 photons/s/cm² のバースト。 θ =45,90 °について、 ϕ を 10 °刻みで振ってある。細かいところは 1 °刻み。

5.4.5 ガンマ線バーストのスペクトルシミュレーション

次に、Anti検出器を用いた、ガンマ線バーストのスペクトル解析について評価する。まず、非常に明るいGRB940217と、様々な波長で明るくて極超新星が付随していることを明らかにしたGRB030329の二つについてスペクトルを再現することを行った。それぞれ
また GRB030329のパラメータは東工大の坂本により提供された。このようなパラメータ に従って Anti 検出器のある一面、ここでは TPU0 の正面に垂直に入射するように発生さ せたガンマ線バーストスペクトルを図 5.19 に示す。左図は GRB940217 のスペクトル、右 図は GRB940217 をそれぞれ再現した。これらのスペクトルは 50 keV から 5 MeV の範囲 でたしかに再現されており、作成したレスポンスが正しいものであることを示している。

表 5.2: シミュレーションに用いたガンマ線バーストスペクトルのパラメータ。αβE_cdurationGRB940217-1.26-2.6760 keV180 sGRB030329-1.3-2.391.6 keV63 s



図 5.19: レスポンスを用いて再現したガンマ線バーストのスペクトル。左: GRB940217、 右:GRB030329

次に、§2で述べた Anti 検出器の観測エネルギー領域拡大が、Anti 検出器のガンマ線バー スト観測にどのような効果をもたらすのかについて具体的に評価してみる。我々は Anti 検出器のガンマ線バースト観測によって、スペクトルの折れ曲がりのエネルギーを詳細に 追跡したいと考えている。すなわち、HXD-Iに比べてどのぐらい高いエネルギーまで折 れ曲がりを追うことができるのかということが重要な点となる。

そこで、上記に示したガンマ線バーストのスペクトルモデルにおいて、典型的なバーストの場合に折れ曲がりエネルギーが変化したときにどのくらいの精度でそのパラメータが決定できるかを調べた。ここで、典型的なバーストとはBATSEで観測されたバーストの持っている平均的なパラメータを指す。すなわち、べきは α = -1.0、 β = -2.3、また持続時間は 20 s と設定した。ここで、E_cを変化させたときのE_cの決定精度をバーストのフラックスが 50 keV - 300 keV で 1.0, 5.0, 10.0 photons/s/cm² であるときに HXD-I とHXD-II のそれぞれのエネルギー領域、すなわち、HXD-I では 100 keV から 2.5 MeV、HXD-II では 50 keV から 5 MeV の場合について比較した。バーストはTPU0の正面から発生させることにする。結果は図 5.20 のようになった。ここにはE_cの決定精度を表している。横軸に設定したパラメータ、縦軸にシミュレーションにより求まったパラメータをプロットしてある。すなわち、理想的には y = x の直線にのるはずである。そこで y = x の直線も同時にプロットした。ここに HXD-I のエネルギーレンジで求めたパラメータを 黒、HXD-II のエネルギーレンジで求めたパラメータを赤で示した。図にあるように、全体的な精度は HXD-II の方が良くなっていることが分かる。また、HXD-I では E_c = 2.5 MeV 以上では正確にパラメータが決まらないが、HXD-II では E_c = 3 MeV 近くまで非 上の明るいバーストであれば、 E_c が100 keV であっても HXD-II では決定可能である。 これは HXD-I では決してできなかったことである。これらの結果から、観測エネルギー 領域の拡大は非常に有効であることが示された。



図 5.20: E_c の決定精度。左図がバーストフラックス 1.0 photon/s/cm²、中図が 5.0 photons/s/cm²。右図が 10.0 photons/s/cm²。シミュレーションで入射させたバーストの本来の E_c を直線に示した。青に HXD-I のエネルギーレンジ、赤に HXD-II のエネル ギーレンジで求めたものをプロットしている。

5.5 まとめ

HXD 単体や Astro-E2 衛星まで含めたときの Anti 検出器の応答をこれまでで求めた光 量の位置依存性のモデルなどを取り入れて再現した。HXD-I 時代に実測されたそれぞれ の応答と比較したところ良く再現されており、これまで構築したモデルが HXD 単体や衛 星まで含めたレベルでも正しく適用でき、また、シミュレーションも正しいものであるこ とが分かった。これらの結果より、Anti 検出器のレスポンスマトリックスを構築した。ま た、今回初めて Astro-E2 衛星まで含めたレスポンスを構築したが、衛星構体の影響を初め て定量的に見積もり、その影響が大きく実測が必ず必要であることが分かった。また、求 めたレスポンスを用いたシミュレーションによって、観測エネルギーを拡大した HXD-II は HXD-I に比べ、より広いエネルギー領域でガンマ線バーストのスペクトルを追うこと ができることを示すことができた。

第6章 まとめと今後の課題

本研究では、Astro-E2 衛星に搭載されるガンマ線バーストモニタに対して信号処理回路 の改良を行い、観測エネルギー領域の拡大を実現することで、より効果的なガンマ線バー スト観測を可能とした。その上で、観測するときに必ず必要となる検出器の応答関数につ いて、自らの手で構築することを行った。応答関数の構築においては Geant4 を用いたシ ミュレーションが正しいものであることを確認しながら検出器単体レベルから衛星まで含 めた応答関数について段階的に構築することで検出器応答に対する理解を深めることが できた。これらの過程により、応答関数を構築することができ、その応答関数を用いた観 測シミュレーションでは Astro-E2 衛星も含めた Anti 検出器のガンマ線バーストモニタと して性能を初めて評価した。特に、観測エネルギー領域の拡大によって、より効果的なガ ンマ線バーストの観測ができることを具体的に示すことができた。

しかし、これらの研究により新たに出てきた問題点も数多くある。

- 1 Anti 検出器単体レベル
 - 光量の深さ方向の位置依存性
 - まず、単体レベルでの測定では光量の位置依存性に深さ方向の位置依存性がある可 能性が出てきた。これについてはより詳細な解析や光伝搬のシミュレーションも考 慮することで後にモデルに組み込む必要性がある。
 - 角度応答の再検証

また、角度応答の測定では測定におけるセットアップの不備により、光量が落ちて しまった可能性がある。そのためにエネルギー分解能が完全に再現できない結果に なってしまった。今後はセットアップを熟考した上で再び角度応答を測定する必要 がある。

- 2 HXD-II 単体の段階
- 各ユニットのパラメータ測定

今回のシミュレーションでは各ユニットの光量の位置依存性などのパラメータを HXD-Iのパラメータを用いて近似した。そのために完全にスペクトルを再現するこ とができなかった。実際にはHXD-IIとして組まれた状態のパラメータを用いるべ きである。このための測定は今後行われる予定である。

ジオメトリの再現

今回はHXD-I時代の測定に用いられた部屋の状況などが分からなかったために部屋 などを再現しなかった。そのためにスペクトルの連続成分の再現性が十分でなかっ た。今後の測定とシミュレーションの比較では部屋なども忠実に再現し、連続成分 まで含めた議論を進める必要がある。

- 角度応答の測定

今回、周囲のジオメトリの影響などから角度応答がシミュレーションとHXD-Iの測定で違うところが数多くあった。これは今後の測定によって本当にジオメトリの影響だけなのかを確認する必要がある。

• 衛星ジオメトリの忠実な再現

今回シミュレーションに用いた衛星のジオメトリはまだ完全に再現されていない部 分が多く、測定結果と合うようなパラメータを使うことで暫定的に対処した。本来 は、実際にまわりのジオメトリの吸収、散乱などを実測したり、物質構造を忠実に 再現したジオメトリ(Mass Model)を構築する必要がある。

Acknowledgment

本論文を執筆するにあたって、様々なご指導をくださった指導教官の大杉先生と深沢先生 に感謝致します。特に、深沢先生には的確なご指摘を何度もしていただき、本当に勉強に なりました。川端先生にはガンマ線バーストに関して非常に多くの有益な情報を頂き、感 謝しています。

また、測定はほとんど理化学研究所で行いましたが、理化学研究所のみなさんにはとて もお世話になりました。有り難うございます。特に、青山学院大学の山岡氏、理化学研究 所研究員の寺田氏、埼玉大学の洪氏には実験で様々アドバイスを頂きました。有り難うご ざいます。また、共同で実験を行った埼玉大学の森氏とは様々な議論を交わすことができ ました。有り難うございます。

研究室においては M2 の井本さん、上田君、佐藤さん、富永君、中本君のお陰で研究の みならず、その他の面においても非常に楽しく過ごすことができました。ありがとうござ います。また、M1 や4年生のみなさんにもお世話になりました。また、事務の上原さん、 石井さんのお陰で研究環境が整い、研究に専念することができました。有り難うござい ます。

最後に、お世話になった全ての人びとに深く感謝致します。有り難うございました。

References

- [1] 磯部 直樹「宇宙硬X線検出器のエネルギー応答の測定とレスポンス関数の構築」修 士学位論文、 東京大学理学研究科物理学専攻、 1999 年。
- [2] 川添 哲史「Astro-E2 衛星搭載硬 X 線全天モニタ装置のバックグラウンドの推定」修 士論文、広島大学理学研究科物理科学専攻、 2003 年。
- [3] 山岡和貴「ASTRO-E 硬 X 線検出器シールド部の開発とトランジェント天体モニ
 ターへの応用」修士学位論文、東京大学理学研究科物理学専攻、1998年。
- [4] 片岡 淳 「ASTRO-E 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD) の試作及び性能評価」修士学位 論文、 東京大学理学研究科物理学専攻、1997 年。
- [5] 洪 秀徴 「硬 X 線検出器 (HXD-II) シールド部の信号処理回路の開発とその検証」修 士学位論文、 日本大学大学院理工学研究科物理学専攻、2003 年。
- [6] 宇宙科学研究所 SES データセンター「科学衛星 Astro-E2 中間報告書 (第2分冊) 12.6 硬 X 線検出器 (HXD)」
- [7] 古徳 淳一、山岡 和貴 「Anti 衛星上 Calibration 報告」Astro-E2 硬 X 線検出器への 道 (3)、2001 年。
- [8] 古徳 淳一、山岡 和貴、寺田 幸功、国分 紀秀、他 HXD チーム 「Anti 応答関数レ ポート」Astro-E2 硬 X 線検出器への道 (3)、2001 年。
- [9] 山岡和貴、寺田幸功、国分紀秀、古徳淳一「Anti 単体較正試験報告」2000年。
- [10] GLENN F. KNOLL 著、 木村 逸郎、阪井 英次訳 「放射線計測ハンドブック 第2版」 日刊工業新聞社、1997年。
- [11] 植村 誠、他 VSNET Collaboration チーム 「近傍で発生したガンマ線バースト GRB030329」
- [12] Bing Zhang. and Peter Meszaros. (astro-ph 0311321)
- [13] P. Meszaros, Annu. rev. Astron. Astrophys. 40, 137 (2002)
- [14] Charles A. et al. 1996, ApJ, 106, 65.
- [15] William S. Pacieas et al. 1999, ApJ, 122 465.
- [16] R.D.Preece et al. 2000, ApJ, 126, 19.
- [17] M.M.Gonzalez et al. 2003, Nature, 424, 749.
- [18] Band, D. L., et al. 1993, ApJ, 413, 281.