修士論文

Astro-E2X線天文学衛星搭載硬X線検出器 アクティブシールド部の応答

埼玉大学理工学研究科博士前期課程物理学専攻
02SP013 森正統
mori@heal.phy.saitama-u.ac.jp

2004年2月2日

目 次

第1章 Astoro-E2衛星 9
1.1 概要 9
1.2 搭載検出器 9
1.2.1 X-ray Spectrometer (XRS) 9
1.2.2 X-ray Imaging Spectrometer (XIS) 9
1.2.3 Hard X-ray Detector(HXD) 9

第2章 硬X線検出器 HXD 11
2.1 HXDの概要 11
2.2 科学目的 11
2.3 システム構成 12
2.3.1 HXD-S 12
2.3.2 HXD-AE 14
2.3.3 HXD-DE 15

第3章 アンタイカウンター 17
3.1 期待される成果 (Earth Occulation法) 17
3.2 熱サイクル試験 17
3.2.1 ユニット製作 18
3.2.2 熱試験の応力負荷 22
3.2.3 ユニットの温度試験 24
3.2.4 まとめと考察 25

第4章 シンチレータの特性試験 27
4.1 概要 27
4.2 サンプル結晶応答試験 27
4.2.1 セットアップとγ線応答 27
4.2.2 実験結果 27
4.3 CFRP透過測定 28
4.4 アンタイカウンターのユニット 30
4.4.1 目的 30
4.4.2 結果 31

第5章 結晶内の光伝播 37
5.1 結晶内の光伝播 37
5.1.1 概要 37
5.1.2 シンチレーション光伝播 37
5.1.3 光伝播シミュレーター 41

5.1.4 物理プロセスの検証 41
5.1.5 サンプル結晶を用いた実験と計算の比較 43
5.1.6 アンタイカウンターを用いた実験と計算 47

図 目 次

2.1 HXD の連続成分とライン成分に対する感度 . . . 11
2.2 HXD System . . . 12
2.3 HXD Sensor . . . 13
2.4 Well Type Phoswhich Counter . . . 13
2.5 アンチカウンターの有効面積 . . . 14
2.6 コーナーユニット, サイドユニットの構造 . . . 14
2.7 BGO 結晶 ボトム部分、トップ部分 . . . 15
2.8 アンチカウンターユニット . . . 15

3.1 Earth Occulation 法と観測結果 . . . 17
3.2 結晶の温度依存性 . . . 18
3.3 スペクトルの温度依存性 . . . 18
3.4 歪みゲージ . . . 19
3.5 センサーの取り付け . . . 20
3.6 梁近似 . . . 21
3.7 応力測定のセットアップ . . . 23
3.8 接着剤の温度依存性 . . . 24
3.9 歪みの温度変化 . . . 25
3.10 センサーの取り付け場所 . . . 25
3.11 歪みの位置依存性 . . . 26
3.12 結晶を固定させたときの予想される負荷 . . . 26

4.1 セットアップ . . . 27
4.2 ^{137}Cs スペクトル . . . 28
4.3 パルスハイトの線形性と分解能のエネルギー依存性 . . . 29
4.4 γ 線源の距離依存性 . . . 29
4.5 CFRP 透過測定 . . . 31
4.6 アンタイカウンターのセットアップ . . . 32
4.7 z 軸の位置依存性にたいるすスペクトル . . . 32
4.8 パルスハイトと分解能 z 軸依存性 . . . 33
4.9 分解能の z 軸依存性、パルスハイト依存性 . . . 33
4.10 光電吸収ピーク面積 z 軸依存性。 . . . 34
4.11 パルスハイトと分解能 y 軸依存性 . . . 34
4.12 ボトムとトップ部分 y 軸位置依存性 . . . 35

5.1 境界の平面波 . . . 38
5.2 減衰長の検証結果 . . . 42
5.3 反射率の屈折率依存性 . . . 42

5.4 $x-y$ 平面に対して $-z$ 方向に光を入射たときの反射光の分布 43
5.5 結晶内からの光の発生 43
5.6 斜面をもつ効果 44
5.7 反射面を与えたときの Cs スペクトル 45
5.8 光量の反射面依存性 (実験結果) 45
5.9 反射面に対する光量の依存性 (計算結果) 46
5.10 実験結果と計算結果の比較 46
5.11 結晶内で光を発生た計算結果 48
5.12 計算のセットアップ 48
5.13 エネルギー依存性 49

表 目 次

3.1 BGO 結晶、鉛ガラスの機械特性 19
3.2 ゲージの変化率と負荷 1 20
3.3 ゲージの変化率と負荷 2 21
3.4 厚さ方向のパラメーターを変化させたときの変数変動 22
3.5 試料の素性と温度特性 22
3.6 試験器具 22
3.7 測定条件 1 23
3.8 測定条件 1 の結果 23
3.9 測定条件 2 24
3.10 3 体問題の変数とパラメータ 25

4.1 測定に用いたγ 線源 28
4.2 透過測定の結果 30
4.3 CFRP 透過測定、γ 線源にたいする fitting 結果 30

5.1 使用したクラスと関数 41
5.2 反射材の条件 44

要旨

Astoro-E2 搭載硬 X 線検出器 (HXD-II;Hard X-ray Detector) は、積極的にバックグランド除去をすることで、硬 X 線領域 (10 keV ~ 500keV) に従来にない検出感度を実現した硬 X 線観測機器である。検出器は、主検出部とアクティブシールド部で構成される。シールド部は BGO 結晶をもちい、コリメートされた 16 本の主検出部を囲むように 20 本配置される。これら 36 本のユニットの反同時計数を行うことにより、硬 X 線領域で主要なバックグランド源になる荷電粒子およびコンプトン散乱したγ 線イベントの除去をおこなう。また、4 面を囲うシールド部は、1MeV 光子に対しおよそ 600cm^2 もの有効面積をもち、40keV ~ 5MeV の帯域で全天をモニターする。これによってバックグランド除去の働きと同時に、γ 線バースト検出器としての役割や、地球の蝕を利用した天体の光度モニターとしての役割が期待される。

本研究では、このアクティブシールド部の開発、中でも衛星環境下における熱、機械特性、ならびに結晶内の光伝播を考慮したエネルギー応答を取り上げる。HXD-I で潜在していた応力負荷の問題を、ユニット製作に与える負荷と熱歪みを定量的に調べることで、軽減することに成功した。また、40cm 程の長さと斜面を持つアクティブシールドの数値モデルを構築し、γ 線との相互作用と結晶内の光伝播のプロセスをモンテカルロ法で数値シミュレーションを行った。これを別に行った較正実験の結果と照合することで、アクティブシールド部の広視野γ 線検出器としてのエネルギー応答関数構築の道筋を示す。

第1章　Astoro-E2衛星

1.1　概要

世界で最初に打ち上げられたX線観測衛星「Uhnru」は全天を観測し、およそ400のX線天体を発見した。その後、1978年に打ち上げられた「Einstein」衛星では、集光することの難しいX線を、斜入射型の反射望遠鏡を搭載することで、検出感度を向上させることに成功した。これにより、銀河の系内、系外からの天体を観測することで、X線天文学を大きく進歩させた。日本では、1979年に誕生した「はくちょう」から、ほぼ5年ごとに「てんま」「ぎんが」「あすか」と、独自の工夫をこらした衛星が打ち上げられ、2006年に打ち上げが予定されているAstro-E2衛星は、2000年2月に打ち上げられたAstro-E衛星のリカバリーミッションである。このように、日本は80年代から連続的に衛星を持つことで、X線天文学に多大な貢献をしている。

Astoro-E2衛星は、X線反射鏡(XRT)の望遠鏡を用いて、軟X線(0.5keV-10keV)までをX線マイクロカロリメーターアレイ(XRS)とX線CCDカメラ(XIS)で観測し、硬X線(10-600keV)を硬X線検出器(HXD)で観測することで、0.5-600keVの帯域の観測をおこなう。これらの検出器は、様々な研究機関が共同で準備をすすめている。

1.2　搭載検出器

1.2.1　X-ray Spectrometer (XRS)

XRTの集点面に置くXRSは、0.3keV-10keVのX線分光をおこない、6keVのX線にたいして、6eVという極めて優れたエネルギー分解能をもち、鉄輝線からシリコンあたりまで含めての分光が期待される。入射X線のエネルギーを素子の温度変化から観測し、液体ヘリウムタンクの中で低温に冷却して観測をする。

1.2.2　X-ray Imaging Spectrometer (XIS)

XISは、5台のXRTの内4台の焦点面上に搭載される。このCCDカメラは、0.5keVから12keVのX線領域で、広い視野での撮像を行いながら精度の高い分光を連続的に行うことが期待される。

1.2.3　Hard X-ray Detector(HXD)

HXDは、非撮像装置で、10keV-500keVの硬X線領域を観測する。検出器のコンセプトから、この硬X線領域に対して、過去最高感度をもつ。詳細は、3章でのべることにする。

第2章　硬X線検出器 HXD

2.1　HXDの概要

HXD(Hard X-ray Detector) は、Astro-E2 に搭載される観測装置のひとつであり、積極的にバックグランド除去をすることで、硬X線領域 (10-500keV) に対して従来にない検出感度をもつ。検出器は、主検出部とアクティブシールド部で構成される。主検出部は、GSO(Gd_2SiO_5) と BGO($Bi_4Ge_3O_{12}$) の2種類のシンチレータ結晶を用い、フォスイッチシンチレータと、この検出器を4× 4の複眼型に配置することで、高レートの入力信号を同時に処理し、反同時計数によるバックグランド除去を可能にしている。この主検出部構成をアクティブシールドカウンターで囲み、これらもユニットごとで反同時計数を行うことにより、硬X線領域で主要なバックグランド源になるイベントの徹底的な除去をおこなう。(詳細は第3章) 図2.1に検出器の性能を代表的な衛星と比較して示す。

HXDは、日本の様々な研究機関、メーカーの協力をうけて開発が進められている。現在は、搭載検出器の組み上げ作業が終了し、2005年上半期打ち上げにむけて性能評価試験が行われている段階である。

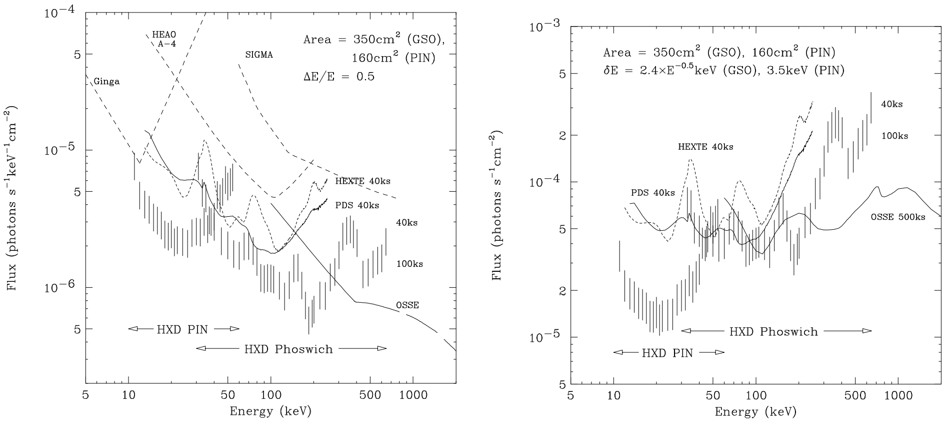


図 **2.1**　HXDの連続成分とライン成分に対する感度

2.2　科学目的

硬X線で感度の高い検出器が実現すると、これまでに見ることが難しかった天体現象を探ることができるようになる。数10keVから数100keVで重要となる放射の素過程には、さまざまあるが、相対論的電子による逆コンプトン過程についてふれる。

活動銀河核は、しばしばジェットとよばれる高速に近い双極子流と、それに付随するローブとよばれる広がった電波源を持っている。これらは、サイズにして100kpcを超えるものも多く、壮大

な加速器をなしている。ローブ中の相対論的電子の主な放射過程は、磁場によるシンクロトロン放射と宇宙マイクロ背景放射との逆コンプトン放射ある。この両方の経路からの放射を比較すれば、逆コンプトン散乱される光子と磁場のエネルギー密度の比を正確に測定することができ、さらに逆コンプトン散乱される光子のエネルギー密度を別の方法で推定すれば、電子と磁場のエネルギー密度を決定することができる。その解析結果から、電子のエネルギー密度が卓越する傾向をもち、ジェットやローブの生成を考える上で興味深い。[1] このような報告は、ほぼ10keVまでのスペクトルからの議論であり、10keV以降のエネルギーバンドとこれまでにない感度を達成させることで、粒子加速の情報を得ることが期待される。

2.3　システム構成

検出器は、検出部であるセンサ部(HXD-S:Sensor)、信号処理を行うアナログエレクトロニクス部(HXD-AE:Analog Electronics)、データ処理を行うデジタルエレクトロニクス部(HXD-DE:Digital Electronics)、検出器全体に電源を供給する電源供給部(HXD-PSU:Power Supply Unit)、衛星と基本的な情報を交換する周辺機器インタフェース部(HXD-PIM:Peripherral Interface Module)から構成される。この構成を図2.2に示す。

HXD-Sにおいて天体などの放射線源からの検出器の応答が電気信号に変換され、HXD-AEへ送られる。HXD-AEは、HXD-Sからの信号を増幅や波形整形などのアナログ処理を行いデジタル信号へ変換してHXD-DEに送られる。さらに、電源管理や温度などの衛星に必要な環境データの取得も行う。HXD-DEは、HXD-AEからのデジタル信号に対してデータ圧縮、選別などの処理を行い、パケットに編集する。さらに、地上からのコマンドに応じてHXD-AEの制御を行う衛星システムとHXD-AEとの間のインターフェイスの役割を果たす。

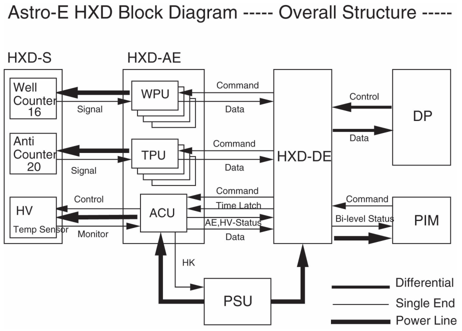

Astro-E HXD Block Diagram ----- Overall Structure -----
HXD-S
HXD-AE
Well Counter 16
Signal
WPU
Command
Data
Control
DP
Data
Anti Counter 20
Signal
TPU
Command
Data
HXD-DE
HV
Temp Sensor
Control
Monitor
ACU
Command
Time Latch
AE,HV-Status
Data
Command
Bi-level Status
PIM
HK
PSU
Differential
Single End
Power Line

図 **2.2** HXD System

2.3.1　HXD-S

図2.3にHXD-Sの全体図を示す。HXD-Sは、主検出部の16本の井戸型フォスイッチカウンター(Well Type Phoswhich Counter)と、アクティブシールド部として、その周りを取り囲む20本のアンタイカウンター(Anti Counter)から成る。センサーのみで総重量は164kgになる検出器である。

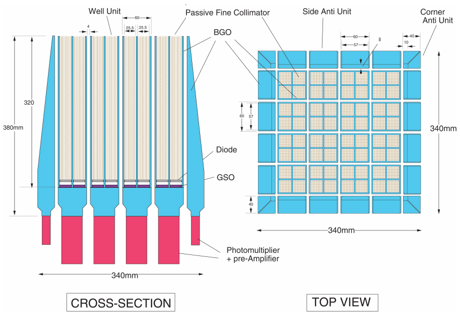

Well Unit
60
4
25.5
25.5
Passive Fine Collimator
BGO
Side Anti Unit
Corner Anti Unit
60
57
8
40
10
320
380mm
60
57
40
340mm
Diode
GSO
Photomultiplier + pre-Amplifier
340mm
340mm
CROSS-SECTION
TOP VIEW

図 **2.3** HXD Sensor

井戸型フォスイッチカウンター (Well Type Phoswhich Counter)

図 2.4 に井戸型フォスイッチカウンターの 1 ユニットの構造を示す。Well 検出器は、GSO シンチレーター (Gd_2SiO_5) と PIN 型シリコン検出器を使用する。エネルギーの低い X 線は PIN 検出器で吸収され、エネルギーの高い X 線は GSO シンチレーターで吸収される。GSO シンチレーターと PIN 検出器の有効面積を図 2.1 に示す。GSO シンチレーターは 40keV から 500keV、PIN 検出器は 10keV から 70keV までのエネルギー領域での観測を行なう。観測天体以外が視野内への混入を防ぐために、PIN 検出器の手前にファインコリメーターを置くことで、視野をおよそ 0.5 ° ×0.5 ° までに絞りこまれている。また、PIN 型シリコンダイオードの性能を発揮させるため、センサー全体を-20 ° まで冷やして動作させる。

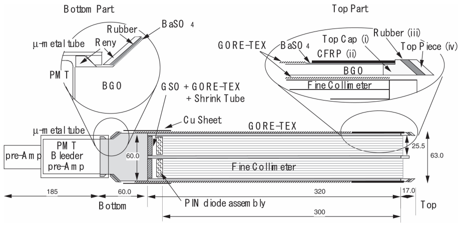

Bottom Part
Top Part
Rubber
BaSO 4
μ-metal tube
Reny
PMT
BGO
GSO + GORE-TEX + Shrink Tube
GORE-TEX
BaSO 4
Top Cap (i)
Rubber (iii)
Top Piece (iv)
CFRP (ii)
BGO
Fine Collimeter
Cu Sheet
GORE-TEX
μ-metal tube
PMT Bleeder pre-Amp
pre-Amp
60.0
25.5
63.0
Fine Collimeter
185
60.0
320
17.0
Bottom
PIN diode assembly
300
Top

図 **2.4** Well Type Phoswhich Counter

アンタイカウンター (Anti Counter)

アンタイカウンターは、図 1.3 に示すように、Well ユニットに対してアクティブシールドとして機能するとともに、SAA 中の数百 MeV 程度のエネルギーを持つ陽子線から Well ユニットを守る役割をもつ。ゆえに、高エネルギーのγ 線または、陽子線にたいして優れた有効面積をもつ。図 2.5 にアンタイカウンターの有効面積を代表的な検出器と並べた。

合計 20 本配置されたアンチカウンターは、結晶部の形状が異なる 2 種類のユニットからなる。すなわち、図 2.3 に示す隅に設置される 4 本のコーナーユニットとその間に合計 16 本のサイドユニットがある。図 2.6 にコーナーユニットとサイドユニットの構造を示す。先端部にゆくにつれて細い構造となっているのは、限られた重量の中で、Well 検出部の GSO のどの方向に対しても 4 cm 厚以上の厚みをもつシールド結晶が設計されている。

1 ユニットは 2 つの BGO 結晶から構成される。すなわち 30cm ほどの長さを持ち、断面の厚さが 1cm から 4cm と変化する斜面を持った形状の結晶 (トップ部分) と、光電子増倍管でシンチレー

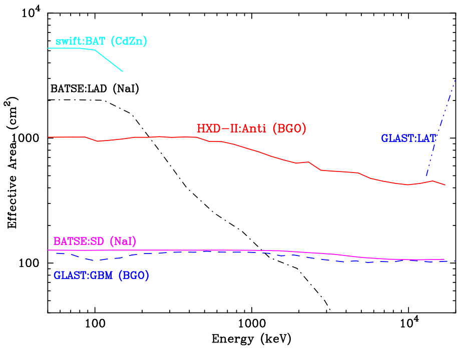
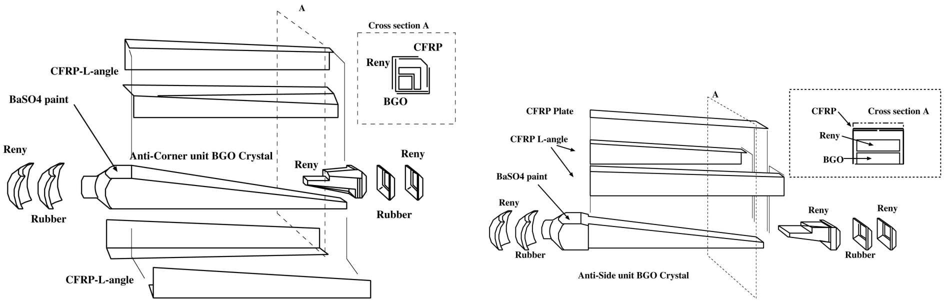


図 **2.5** アンチカウンターの有効面積

ション光を集光する (ボトム部分) を Epotek301-2 で光学接着して使用する。図 2.7 にトップ部分とボトム部分を示す。

先端が極端に細くなった結晶が機械振動で破損しないように、先端部分には反射材 $BaSO_4$ を塗った上から、Well ユニット同様にカーボン強化プラスチック (CFRP) およびハネナイトなどの緩衝材が接着される。さらに結晶に応力が集中することを防ぐために、箱型の CFRP を BGO 周囲から覆うように接着されている。サイドユニットでは、1 mm 厚の CFRP の 2 本の L アングルと 1 枚の板を貼り合わせた「コ」の字型の構造が、BGO と合わせて直方体の箱になるように貼られる。防振材を張ったサイドユニットを図 2.8 に示す。コーナーユニットでは、3 角錐を閉じるような形で同様の CFRP アングル 4 本が貼られる。以上から、単体で-3dB の振動を加えたとき、結晶には 0.13 ~ $10G^2/Hz$ ほどの振動の強さを持つことになる。 [2]



A
Cross section A
CFRP
Reny
BGO
CFRP-L-angle
BaSO4 paint
Reny
Anti-Corner unit BGO Crystal
Reny
Reny
Rubber
Rubber
CFRP-L-angle
A
CFRP Plate
CFRP L-angle
BaSO4 paint
CFRP
Cross section A
Reny
BGO
Reny
Reny
Reny
Rubber
Rubber
Anti-Side unit BGO Crystal

図 **2.6** コーナーユニット, サイドユニットの構造

2.3.2 HXD-AE

HXD のアナログエレクトロニクス部 HXD-AE は、WPU(Well-type Detector Processing Unit)4 モジュール、TPU(Transient Processing Unit)4 モジュールおよび ACU(Analog Control Unit)1 モジュールからなる。WPUi は Well 検出器の Wij(j=0,1,2,3) を担当し、TPUi は Anti 検出器の Wij(j=0,1,2,3,4) を担当しており、その信号処理やデータの生成を行なう。ACU は電源および高圧電源の管理、HK データの生成、クロックの供給などを行なう。

HXD の信号処理部は、シールド部などによる高カウントレートかつ大信号のバックグラウンドの中で、100 系統にもおよぶ信号の処理を誤動作なく処理できるように設計されている。そのため

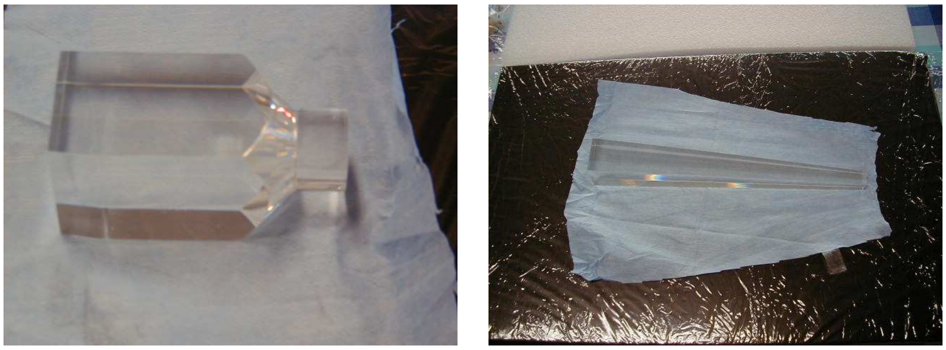


図 **2.7**　BGO 結晶 ボトム部分、トップ部分
左図にユニットのボトム部分を示し、右図にトップ部分を示す。

図 **2.8**　アンチカウンターユニット

に検出器の1つ1つのユニットを独立に処理するようになっており、1つのユニットのトリガーが発生した時、自分自身のユニットと周囲を含め36本のユニットのヒット情報(ヒットパターン)を合わせて読み込めるようになっている。この情報は、機上のCPU処理部および地上の解析で反同時計数の情報として使うことができる。衛星上でのサイズや電力の制限から、HXD-AEでは、部分的に回路のLSI化が行なわれており、HXD-AE全体でのサイズは460mm ×370mm×142mm、重量は13.4kg、電力は約25Wにおさえられている。

2.3.3　HXD-DE

デジタルエレクトロニクス部(HXD-DE)はCPU処理部であり、HXD-AEからのデジタル信号を、さらにソフトウェアにより処理する。HXD-AEではユニットごとの処理を行なうように設計されているのに対し、HXD-DEではそれらを統合処理できることが特徴であり、ハードウェアよりも柔軟な処理ができるよう設計されている。機上でこのような処理をする必要があるのは、地上にテレメトリ伝送できるデータ量に制限があるためである。

HXD-DEのソフトウェアは、システムプログラム部分とPIプログラム部分とから成る。前者はプログラム全体を統合するとともにコマンドの受信と読解、HXD-AEの制御、データパケットの編集とその衛星への送出などを扱う。ここは衛星システムと直接のインターフェイスをもち、高い信頼性が要求されるため富士通が担当する。一方、後者は観測データの詳細な選別・圧縮などを扱

い、HXD-S および HXD-AE の仕様と関連が深いので、大学側により開発されてきた。HXD-AE からのデジタル信号は、HXD-DE のもつメモリに DMA(Direct Memory Access) 方式で書き込まれ、それが一定量だけたまった時 (または一定時間経過した時)、CPU に割り込みがかかってシステムプログラムに受け渡される。システムプログラムはデータ処理シーケンスの中で、必要に応じて PI プログラムを関数として呼び出す。

PI プログラムで扱う Well 検出器のイベントデータの選別は、Δt セレクション、フラグによるセレクション、ヒットパターンによる反同時計数セレクション、波高値によるセレクション、2 次元スペクトル上でのセレクションなどから成る。Δt セレクションとは、時間的に近接したイベントを偽のイベントとして選別し、除去することである。これは、気球実験などでは、大信号のイベントが来た時などに、信号が飽和した後に回路系によって偽のイベントが続けて発生することがしばしば見られたことから設けられた。これらのセレクションを行なうか行なわないか、また、その条件はコマンドにより変更可能であり、もし軌道上でハードウェアに異常を来しても、異常なイベントを選別し、データを圧迫しないようにすることができる。また、地上に伝送できないイベントをヒストグラム情報としてまとめて地上に伝送する機能や、TPU からのヒストグラムデータを圧縮する機能も持つ。PI プログラムは、Anti 検出器のデータを取扱い、その圧縮などを行なう機能も持つ。バースト判定をソフトウェア処理によって行なうことができるようにもなっており、TPU による判定ロジックよりもより柔軟に処理することができる。

HXD-DE のサイズは 317mm×297mm×118.8mm、重量は 5.0kg、動作電力は約 5W である。

第3章　アンタイカウンター

3.1　期待される成果 (Earth Occulation 法)

Earth Occulation 法 [3] とは、図 3.1 の概念図に示すように、衛星が地球を 1 周する時、検出器が地球で隠れる時間帯と、それ以外の時間帯を比較して計数差を求めることにより、天体の明るさを得る方法である。 [4]

CGRO 衛星 (Compton Gamma Ray Observation) 搭載 BATSE(Burst And Transiant Source Experiment) の天体 J1819-2525 観測結果を図 3.1 の右図に示した。BATSE は、衛星のコーナー部分に 4 箇所と衛星の反対側も同様に 4 箇所設置され、全天をしっかりカバーすることができる。この 8 箇所にコリメートを持たない広い面積を持つ検出器 LAD(large-area detector) と広いエネルギーをカバーして、高い分解能を持つ SD(spectroscopy detector) がそれぞれ取り付けられている。LAD(large-area detector) は、面積 2,025cm^2 で、厚さ 1.27cm の NaI 結晶から構成され、20keV-2MeV のエネルギー帯域を持ち、27%(@88keV) の分解能を持つ。SD(spectroscopy detector) は面積 127cm^2、厚さ 7.62cm をもち同様に NaI 結晶が使用されて、エネルギー帯域持 5keV-110MeV を持ち、分解能 7.2 %(@662keV) を持つ。撮像は、LAD のみを使用した技術である。

地球で天体が隠れている時間帯 (1600s ~ 3800s) は、信号が減少していることがわかる。また、LAD は、コリメートしない検出器であるために、別の天体からの放射が効き rate が高くなる時間帯をもつ。

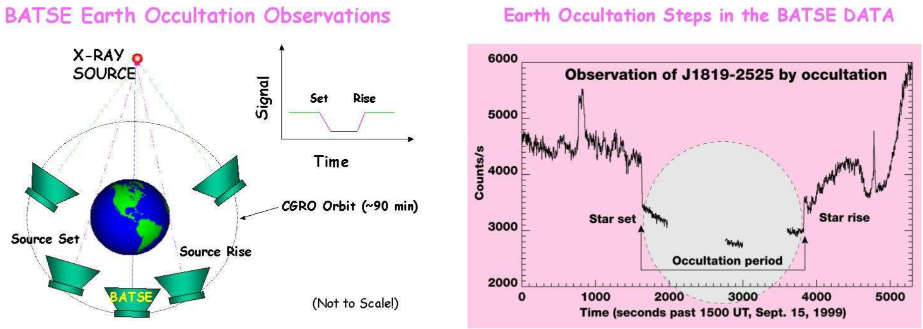


図 **3.1**　Earth Occulation 法と観測結果
Earth Occulation 法を用いた天体観測と、BATSE の天体 J1819-2525 観測結果を示す。

3.2　熱サイクル試験

製作したユニットの全数を熱試験を行う。この試験は、衛星環境下における動作温度-20±5 ℃ (第 3 章) を想定し、+30 ~ -25 ℃の温度範囲で行う。 [5] 図 3.9 に光電吸収ピークの温度依存性をしめす。温度変化により、単一分子のエネルギー準位が広がることで、光電吸収ピークが変化する。

しかし、ユニットの熱試験をすすめるなか、図 3.3 にしめすように異なった応答があらわれ、低

いパルスハイトの箇所にイベントが発生していることが判明した。図はスペクトルの時間変化を示し、x 軸にパルスハイト、y 軸に時間変化で表している。

そこで、製作過程から熱試験にいたる過程で結晶にかかる応力をすべて見直した。

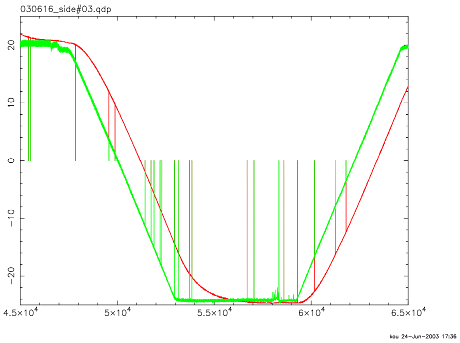


図 **3.2**　結晶の温度依存性
緑に結晶の温度変化を示し、赤で結晶のパルスハイトの変化を示している。

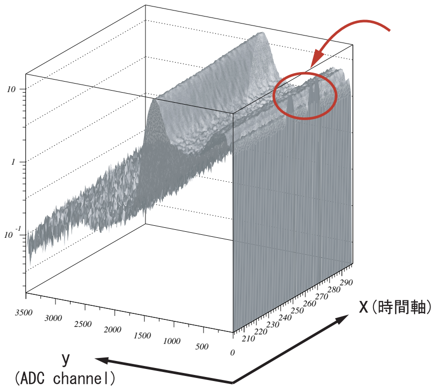


図 **3.3**　スペクトルの温度依存性
x 軸に時間軸、y 軸にパルスハイト でしめす。(詳細は第 4 章で示す。)

3.2.1　ユニット製作

製作工程

製作工程の見直しから、補強用 CFRP を結晶に接着する作業で結晶の上におもりをのせる工程に着目した。接着方法を以下に示す。

(1)、結晶の斜面を下にして、CFRP で型をつくる。L アングルの CFRP を 2 枚を結晶にかぶせ、平面の CFRP をアラルダイトで接着する。

(2)、布テープを用いて固定して、その上に銅ブロックをそっと上に乗せて圧着する。銅ブロックは 4.5kg,1.5kg,4.5kg の順に合計 (10.5kg) を乗せて放置する。

(3)、次に、結晶の斜面を上にして、(2) の過程で作った型と結晶を Mos7 で接着する。(2) と同様におもりを乗せて放置する。

結晶とおなじ形状をもつ鉛ガラスを用いてこの工程で結晶ににかかる負荷を見積ため、鉛ガラスを用いて (2) の過程における歪みを測定した。代用した鉛ガラスと BGO ユニットのの機械特性をについて表 3.1 に示す。

表 **3.1** BGO 結晶、鉛ガラスの機械特性

材質	ヤング率 [GPa]	破断領域 [MPa]	密度 [g/cm^3]	形状
BGO 結晶	109	23.3	7.12	フライトユニット
鉛ガラス	59	~30	~8.4	フライトユニット

歪みゲージの特性

製作工程の歪みと温度環境下における歪みを『ひずみゲージ』を用いて測定した。歪みゲージは一般的に構造物等の伸び縮みを計測する時に用いられる。歪みゲージに取り付けられたセンサーには、抵抗導線が取り付けられ、導線の伸びまたは縮みに対して抵抗の変化が生じる。この抵抗の変化を利用して、試料の変位を計測する。変位は微小な長さを扱うため、ブリッチ回路を用いて微小な抵抗の変化を精密に読み取る。歪みゲージの接続方法には温度補償や計測精度によりゲージ法が異なるが、製作工程を 2 ゲージ法を使用し、温度特性の試験を 4 ゲージ法を用いて試験した。歪みゲージを図 3.4 に示す。

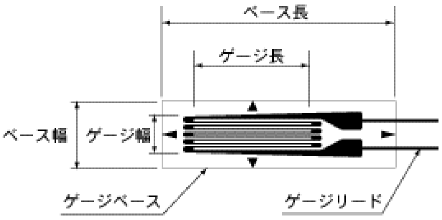


図 **3.4** 歪みゲージ

セットアップ

重心とレニーの付け根 2 点に歪ゲージを取り付けた。センサーをはった鉛ガラスを図 3.5 にしめす。以下に示す方法で接着し、センサーのドリフトを防いだ。 [6]

(1) 接着面は研磨後有機溶媒 (アセトン等) で良く拭き取り、接着面を暖める。
(2) 接着剤はゲージ裏面全体に塗布するが多過ぎは禁物で、その場合は振り払うなどを行い適量にし、貼付位置に置き、ビニールシートなど非接着媒体を介してゲージ全体を手などで試験体の押しつけ数分程度維持する。

結果

結果 1 CF を接着する工程 [製作工程 (3)]

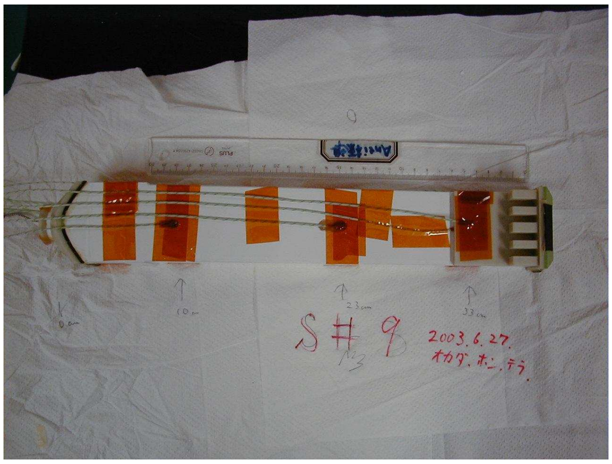


図 3.5　センサーの取り付け

負荷を与えないとき負荷を与えたときの歪みを読み取り、そこから鉛ガラスにかかる負荷を算出した。表 3.2 にゲージの変化率と算出した負荷をまとめる。歪みゲージはブリッチ回路の抵抗変化から歪みの次元に変換され、デジタルメータの差 $[\Delta]$ と負荷 $[\sigma]$、ヤング率 $[E]$ は、$\sigma = E \times \Delta$ の関係をもつ。

表 3.2　ゲージの変化率と負荷 1

測定場所	測定回数	Δ	負荷 [MPa]
重心	1	+724	0.59 ±0.05
	2	+705	0.58 ±0.05
	3	+698	0.57 ±0.05
レニーの付け根	1	+907	0.77 ±0.08
	2	+847	0.70 ±0.07
	3	+820	0.68 ±0.07

結果 2 型を作る工程 [製作工程 (2)]

次に型を作る工程の歪みを測定した。1 の試験と同様に、重心とレニーの付け根にセンサーを取り付けた、作業工程を再現して、歪みを測定した。試験結果を表 3.3 に示す。表に示す通り、作業工程 1 より計測した歪みの値が増加した。

考察

測定結果は、$\sigma = E \times \Delta$ の式で示される 1 次元の歪みから、結晶にかかる応力を見積もった。そこで、梁近似を用いて結晶の負荷を計算した。図 3.6 に針近似を計算したジオメトリーを示す。それぞれの変数は、表 3.4 にも使用されている。

梁近似の両端固定を考えたとき、断面二次モーメントは、

$$I = \frac{1}{12} b h^3 \tag{3.1}$$

となり、歪みの最大値 (δ_{max}) は、

表 **3.3** ゲージの変化率と負荷 2

測定場所	測定回数	Δ	負荷 [MPa]
重心	1	+821	0.67 ±0.05
	2	+801	0.66 ±0.05
	3	+753	0.62 ±0.05
	4	+753	0.62 ±0.05
レニー付け根	1	+1180	0.97 ±0.19
	2	+951	0.84 ±0.17
	3	+1018	0.78 ±0.15
	4	+1155	0.95 ±0.19

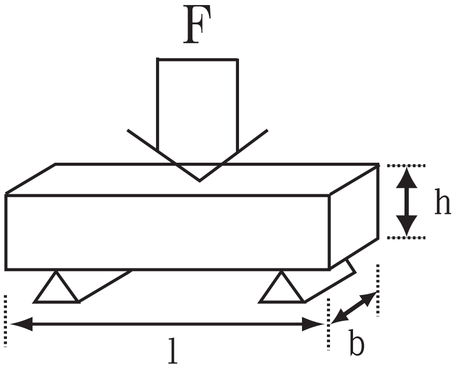


図 **3.6** 梁近似

$$\delta_{max} = \frac{5}{384}\frac{Wl^3}{EI} \tag{3.2}$$

となり、最大引張り応力 (σ_{max}) は、

$$\sigma_{max} = \frac{1}{8}\frac{Wl_e}{I} \tag{3.3}$$

応力とヤング率の関係から、

$$\sigma_{max} = E\delta_{max} \tag{3.4}$$

δ_{max} は、最大応力の歪みとなる。

E はヤング率、W は図 3.6 に示す方向にかける負荷、le は、中立軸からの距離を示す。

支点間の距離 30cm(l に相当)、b を 6cm の固定値として、h を 1cm から 4cm までの変動値にとり、それぞれのパラメーターの計算値を表 3.4 に示す。

計測値と計算値から、結晶の薄い部分では、負荷が高くなることが示唆される。計測値から見積もる負荷は、計算値より低くなる傾向をもち、形状が完全な直方体でないこと。結晶にかかる応力は、重心が ~ 0.6MPa 程度、レニーの付け根が ~ 0.8MPa 程度と見積もった。これは、BGO 結晶を用いた時も同様の負荷が加わり、BGO 結晶の引張強度は 23.4MPa であるので、安全係数は最大で ~ 30 倍持つ。

表 3.4　厚さ方向のパラメーターを変化させたときの変数変動

h(厚さ)[cm]	断面二次モーメント [m^4]	δ max [μ m]	σ max [MPa]	Δ max
1	5×10^{-9}	63.22	22.05	202.29×10^{-6}
2	4×10^{-9}	7.9	2.76	25.29×10^{-6}
3	1.35×10^{-9}	2.34	0.82	7.49×10^{-6}
4	3.2×10^{-9}	0.99	0.34	3.16×10^{-6}

3.2.2　熱試験の応力負荷

概要

製作工程と同様に熱試験にいたる過程で結晶にかかる応力負荷を測定した。応力負荷は、結晶、接着剤、CFRP の異なる熱膨張計数を持つことから生じると予想される。そこで、接着剤の温度変化に対する強度と結晶の温度変化にたいする応力負荷に着目した。

接着剤の強度試験

熱試験で結晶と CFRP との接着で使用する接着剤の温度による強度変化を調べる。測定した試料の温度特性と素性を表 3.5 にまとめた。アラルダイト 1(国産) は、HXD-1 に使われていたもので、アラルダイト 2 (英国産) は HXD-2 に使用している。MOS7 は、アラルダイトより弾性をもつ接着剤で、ユニットの製作時に様々な場所で使用されている。

表 3.5　試料の素性と温度特性

試料	線膨張計数@ 80 ℃以下 [mm/mm ℃]	@80 以上 [mm/mm ℃]	色
アラルダイト 1(国産)	158	48	乳白色
アラルダイト 2 (英国産)	139	50	ベージュ色
MOS7	不定	不定	乳白色

測定方法

測定方法の概念図を図 3.7 に示す。Ｌアングルのアルミ面における接着面を $\sim 4.7\mathrm{cm}^2$ とり、テグスをＬアングルに溝を作りひっかけバネばかりで接着面に対して、完全に平行に引っ張る。(実験 1) 次に台をぶら下げ鉛ブロックを置き負荷をかけ、温度変化を計測した。(実験 2) 変位は、設置したマイクロメーターで読み取り、負荷をかける方向を＋方向にした。負荷と接着剤の使用した面積の関係から、接着面にかかる負荷を見積もった。試験に使用した物を表 3.6 にまとめた。

表 3.6　試験器具

接着面	Ｌアングルのアルミとアルミ板
負荷	鉛 11kg 2 ブロックと 5.6kg 2 ブロック
	バネばかり (最大 196 N)
計測系	マイクロメーター

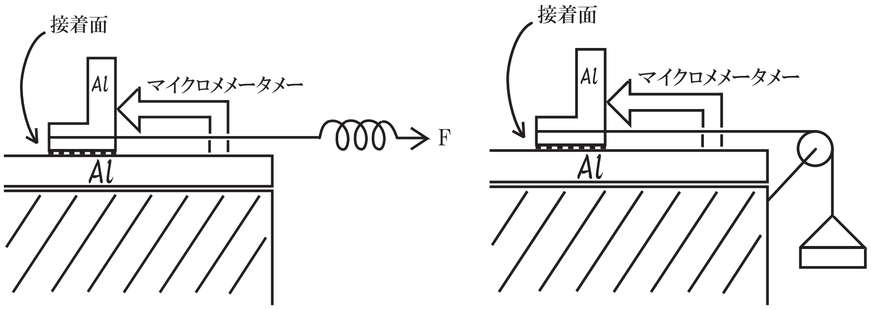


図 **3.7**　応力測定のセットアップ

実験 1

平行に負荷をかけた伸びを測定をした。測定条件と測定結果を表 3.7、表 3.8 に示す。新、旧とも約 0.4MPa までの負荷では伸びは計測されない。

表 **3.7**　測定条件 1

F	0	98	196	[N]
接着面にかかる負荷	0	0.17	0.38	[MPa]
温度	25 ℃			

表 **3.8**　測定条件 1 の結果

負荷 [MPa]	新アラルダイト [μm]	旧アラルダイト [μm]	MOS7[μm]
0	0	0	0
0.17	0	0	21
0.38	0	-1	34

実験 2

試験 1 と同様に、鉛ブロックを使用した測定条件を表 3.9 に示し、温度条件+25 ℃と-25 ℃で計測した。結果を図 3.2.2 に示しす。アラルダイトは、負荷をかけると– 方向に変位を持っている。結果 1 から、0.38MPa までの負荷に対して伸びを計測しないことから、L アングルと接着面の治具の変形から、負の変位を持ったことが予想される。

考察

アラルダイトの強度は、温度による違いを調べることができなかった。Mos7 の強度は、温度変化に依存し、負荷に対して伸びを計測する。以上から、低温時のフライトユニットは、CFRP と結晶との接着をアラルダイトにした場合は、結晶の応力を逃すことが難しく、Mos7 を使用することで、結晶内の応力をを拡散させる方向を持つことが示唆される。

表 **3.9**　測定条件 2

おもりによる負荷	0	110	230	270	330	[N]
接着面にかかる負荷	0	0.23	0.49	0.57	0.70	[MPa]
温度			25 ℃	-25 ℃		

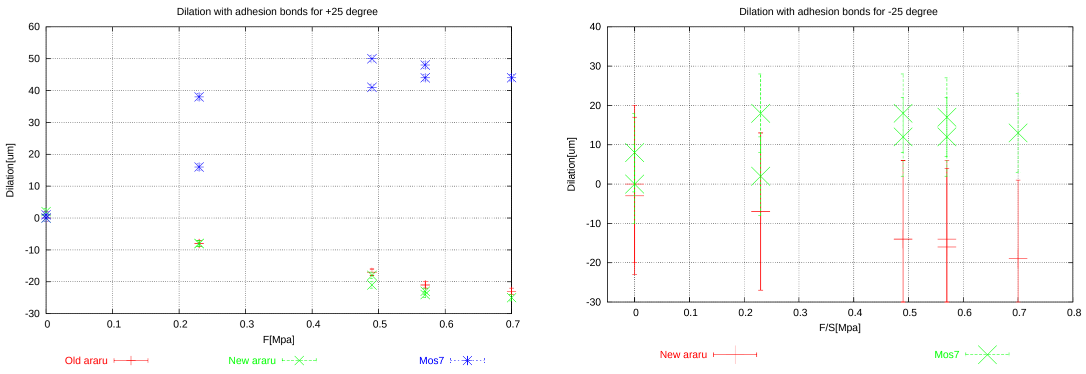


図 **3.8**　接着剤の温度依存性

接着剤の温度依存性をしめす。右図に+25 ℃の計測結果、左図に-25 ℃の計測結果を示す。赤；アラルダイト 1 、緑；アラルダイト 2、青；MOS7

3.2.3　ユニットの温度試験

ユニット熱ひずみの測定をおこなった。製作の時と同様に、歪みゲージ用いて図 3.5 のように、センサーを張り付ける。センサーは、ボトム部の光電面から 7cm(ボトム部分)、13cm(ユニットの重心)、17cm、23cm、32cm(レニーの付け根)、38cm(先端) の合計 6 箇所に張り付けた。4 ゲージ法を利用して温度補償も考慮した。

測定結果

光電面から 32cm(レニーの付け根) の場所の温度変化を測定した。結晶の温度をモニターし、マイクロメータの変位を調べた。恒温槽の温度を+20 度から 0 度まで一定の温度で下げて、そこから 0 度の温度を保って連続的に歪みの計測した。図 3.9 に温度変化と歪みを示す。温度の変動に比例した結果が得られた。

残りのセンサーに関しては、+20 ℃と、0 ℃の 2 点で測定をした。図 3.10 に示した場所に歪みゲージを取り付け、図 3.2.3 に歪みの位置依存性を示す。

考察

温度変化に対して、連続的に測定した 32cm の結果から結晶にかかる応力に換算した。温度と応力の関係を図 3.12 に示す。温度変化 (+20 度から 0 度) の歪みは、CFRP のわずかな膨張計数を無視するとおよそ 8MPa 程度の負荷が見積もられる。

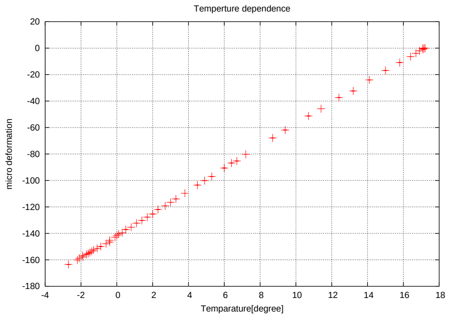


図 **3.9** 歪みの温度変化

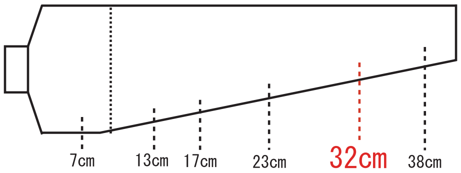


図 **3.10** センサーの取り付け場所

3.2.4 まとめと考察

製作過程から熱試験にいたる過程で結晶にかかる応力をすべて見直した。熱試験 (+20 度から 0 度) における応力は、製作過程のおよそ 10 倍ほどもっていたことがわかった。この熱試験から、+20 ℃から-20 ℃までの応力の変化が線型性を持ったとき、結晶の応力が逃げなければ、およそ 16MPa 程度の負荷がかかることを見積もった。しかし実際は、結晶の収縮に伴う CFRP の歪みとなって、結晶の応力は緩和される傾向をもつ。結晶と CFRP と接着剤の 3 体問題とした扱う必要がある。3 体問題に関わる変数とパラメータを表 3.10 にまとめる。

表 **3.10** 3 体問題の変数とパラメータ

全体の長さ	L	0.3 [m]
BGO および CFRP のヤング率	E	109 [GPa]
BGO の熱膨張率	δ	7.15×10^{-6}[mm/mm]
BGO 断面積	S_{BGO}	10[cm^2]
CFRP の断面積	S_{CFRP}	1.8[cm^2]
接着面積	S_m	120 [cm^2]
接着面のバネ定数	k	21 [GPa/m] (実測値から)
BGO の収縮にから加わる力	F	
BGO にかかる応力	$\sigma = F/S_{BGO}$	

以上の変数を用いて、3 体間のつりあいを求める。
CFRP の歪み ; $\Delta c(1) = LF/ES_{CFRP}$
BGO の歪み ; $\Delta c(2) = LF/ES_{BGO}$
接着面の歪み ; $\Delta m = LF/kLS_m$
3 体の歪みの関係は ; $\delta L = \Delta c(1) + \Delta c(2) + \Delta m$
と表せる。以上から BGO にかかる応力 σ は、

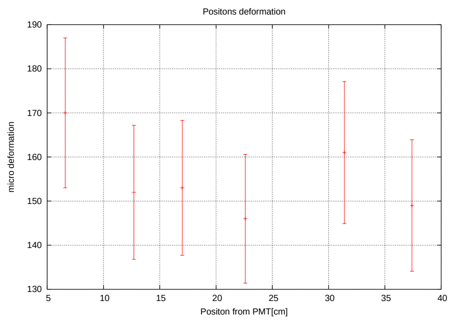


図 **3.11**　歪みの位置依存性

横軸を光電面からの距離、縦軸を歪みで示している。光電面から 32cm に相当する場所の温度モニターをした。

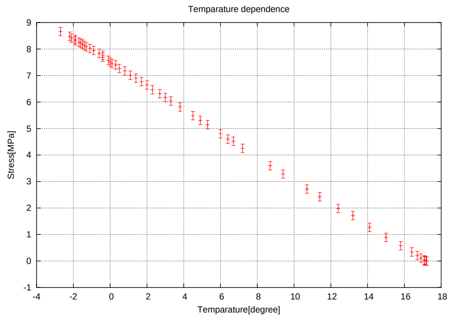


図 **3.12**　結晶を固定させたときの予想される負荷

$$\sigma = \frac{E\delta}{(1 + \frac{S_{BGO}}{S_{CFRP}} + \frac{S_{BGO}}{S_m}\frac{E}{kL})} \tag{3.5}$$

と表し、分母が結晶の応力を緩和させる役割を持ち、変数にパラメータを代入し応力を計算すると、接着剤の効果は、緩和を促す 20 %ほどになる。以上から応力は、5Mpa ほどで熱試験で見積もった値と離れているのは、CFRP の歪みによって応力緩和を促す働きがメインであり、安全マージンは factor 4 程度となる結果が得られた。

第4章　シンチレータの特性試験

4.1　概要

アンチカウンターのγ 線応答についてのべる。サンプル結晶を用いて、BGO 結晶の特性試験をおこなったあと、ユニットの特性試験を詳細におこなった。シンチレータを用いたγ 線スペクトル測定は、ヨウ化ナトリウム (NaI) の導入より初めて使用できるようになった。高い効率で検出でき、また線源の放出する多数の異なったエネルギーのγ 線の寄与を分離するのに十分な優れたエネルギー分解能をもつ。HXD で採用されている BGO 結晶は、NaI とくらべて高い阻止能と放射化レベルが低い結晶である。 [7]

4.2　サンプル結晶応答試験

4.2.1　セットアップとγ 線応答

試験のセットアップを図 4.1 に示す。サンプル結晶と光電子増倍管 (PMT)[浜松フォトニクス製] は、接着に容易なオプティカルグリス [応用光研工業株式会社 OKEN6262A] を用いた。サンプル結晶からの信号は、PMT で読み出される。PMT にかける電圧は ORTEC556 を用いて、HV 電圧を 600V かけた。PMT のアノードの出力はプリアンプ (PC581)、整形アンプ (ORTEC570) で増幅された後、ADC に入力される。ADC の出力は MCA ボードを介して PC で読み出される。測定に使用した線源を表 4.1 に示す。図 4.2 に得られたスペクトルを示し、応答の物理プロセスを以下にまとめた。

1、1300ch 付近にγ 線の光電吸収ピーク (全吸収のピーク)
2、1000ch 付近にコンプトンエッジ
3、300ch 付近に後方散乱ピーク
4、50ch 付近に 137Cs の娘核である 137Ba からの特性 X 線の光電吸収ピーク

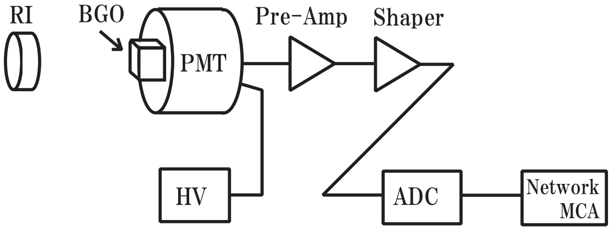


図 4.1　セットアップ

4.2.2　実験結果

1、エネルギー応答

表 **4.1** 測定に用いたγ 線源

核種	半減期	エネルギー [keV]	放出率	初期値	購入日	線源の形状
^{241}Am	458 y	59.5	35.9	388 kBq	2000/6/1	ボタン状
^{57}Co	2.717E+02d	122.1	85.6	1.0MBq	1998/7/22	円柱状 (ベリリウム窓)
		136.5	10.68			
^{137}Cs	30.17y	661.7	85.1	不定	1961/6/10	円柱状 (アクリル製)
^{22}Na	2.6909E+00y	511.0	179.79	1.0MBq	1998/7/22	円柱状 (ベリリウム窓)
		1274.5	99.94			

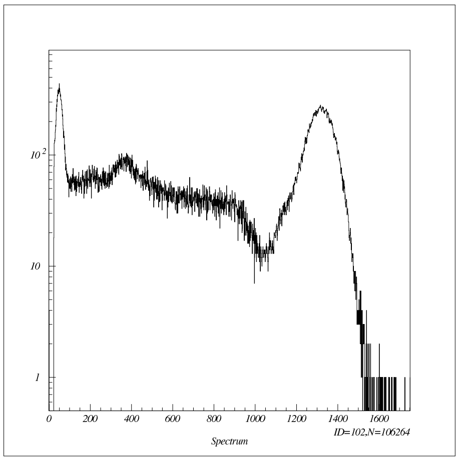


図 **4.2** ^{137}Cs スペクトル

シンチレータのエネルギー応答と分解能のエネルギー依存性を図 4.2.2 に示す。シンチレータはγ 線のエネルギーに線型性のある応答を示す。

2、線源強度の距離依存性

様々なγ 線源を用いて、線源と結晶の表面との距離と光電吸収のイベントレイトの関係を調べた。その関係を図 4.2.2 に示した。このイベントレイトは、ガウス関数を用いてモデルをあてることで、関数の -∞ ～ +∞ まで積分したときの面積に相当します。様々な強度のγ 線源を用い、積分時間が異なるので、1 秒当たりのイベントレイトにスケールを合わせて示した。図 4.2.2 の ^{57}Co は、線源強度が低いことから、17cm,20cm の解析データを得られなかった。検出器の立体角を近似すると (線源と結晶の表面との距離が検出器のサイズにくらべて長いとき)、$N(d) \sim 1/d^2$ (d; 線源と結晶の表面との距離) の関係をもつ。点線で示しているのは、$N(d) \sim 1/d^2$ でモデルフィットさせた結果を示している。

4.3 CFRP 透過測定

アンタイカウンターに使用している CFRP(第 3 章) の透過測定をした。

コリメーター鉛 (4mm Φ) を使用し、結晶と鉛の距離を 1cm に設置して、その間に CFRP を 0,2,5 枚入れて測定した。測定結果を表 4.2 にまとめ、60keV と 1274keV のデータを比較すると傾きに違いをもつので、特に低いエネルギーでは、影響をすることが予想される。図 4.5 に、モデル

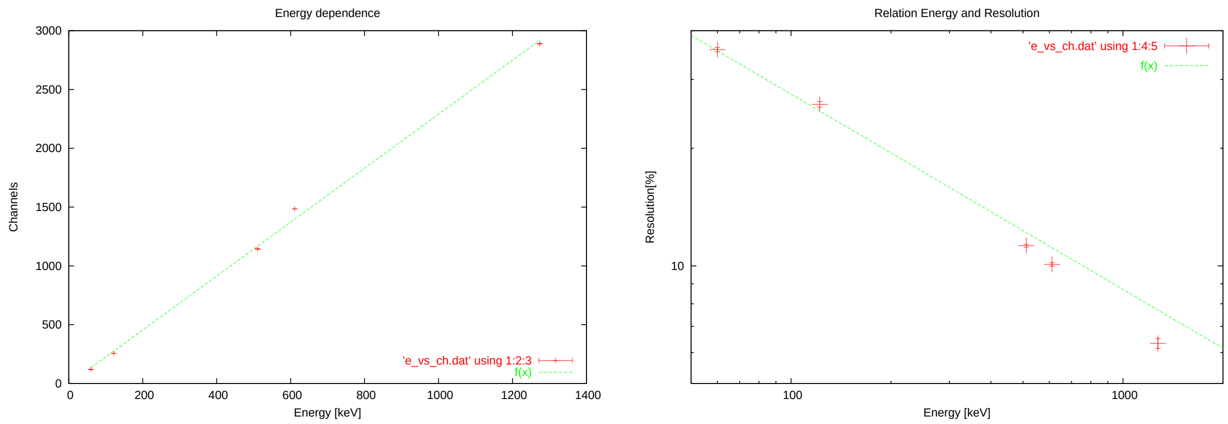


図 **4.3** パルスハイトの線形性と分解能のエネルギー依存性

右図にパルスハイトの線形性、左図に分解能のエネルギー依存性を示す。右図 ; 横軸にエネルギー、縦軸にハルスハイトで示し、各γ 線の光電吸収ピークのパルスハイトを示している。

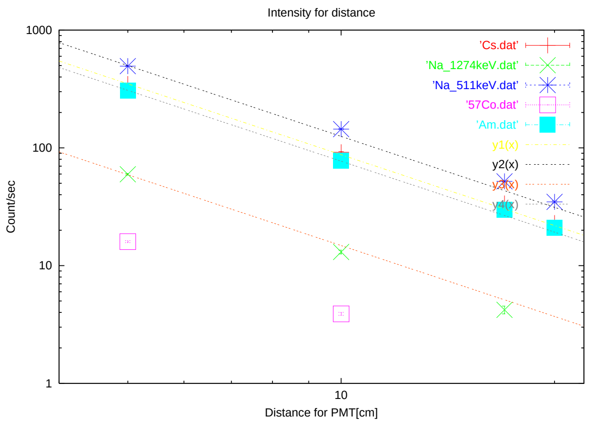


図 **4.4** γ 線源の距離依存性

γ 線源 $^{241}\mathrm{Am}, ^{57}\mathrm{Co}, ^{137}\mathrm{Cs}, ^{22}\mathrm{Na}$ の距離依存性を示す。横軸を線源と結晶の表面との距離、縦軸を 1 秒のイベントレートで示した。

関数 $f(x) = a \times exp(-x/b)$ からフィット結果を示し、表 4.3 にフィット結果をまとめた。

表 **4.2** 透過測定の結果

核種 (測定回数)	CFRPの枚数	CFRPの厚さ [mm]	area	積分時間 [s]
Am	0	0	22362 ± 235	1000
	0	0	21275 ± 214	1000
	2	2.4	18917 ± 213	1000
	5	6.0	17354 ± 196	1000
Cs	0	0	58017 ± 160	1000
	0	0	55601 ± 391	1000
	2	2.4	54011 ± 381	1000
	5	6.0	52747 ± 380	1000
Na,511keV	0	0	50267 ± 395	600
	0	0	48371 ± 416	600
	2	2.4	46088 ± 402	600
	5	6.0	43560 ± 404	600
Na,1274keV	0	0	11922 ± 165	600
	0	0	11049 ± 169	600
	2	2.4	11146 ± 170	600
	5	6.0	10630 ± 167	600

表 **4.3** CFRP透過測定、γ線源にたいするfitting結果

核種 (エネルギー)	a	b	WSSR/ndf	sqrt(WSSR/ndf)
Am	21.6205 ± 0.5411	0.0398949 ± 0.008932	0.657421	0.810815
Cs	56.5635 ± 0.9205	0.012764 ± 0.005264	1.93879	1.3924
Na,511keV	81.9016 ± 1.191	0.0211251 ± 0.004846	3.22591	1.79608
Na,1274keV	19.1466 ± 0.4812	0.0128841 ± 0.008132	0.529671	0.727785

fitting結果を示す。a, b は、関数 $f(x) = a \times exp(-x/b)$ の変数を表している。

4.4　アンタイカウンターのユニット

4.4.1　目的

この実験は、1本のAntiシールドの応答を調べることを目的としている。(今回はX軸方向から線源を照射したときの応答を調べた。) Antiシールドは、結晶を2つ組み合わせて作られている。光りを集光してPMTに受け渡すボトム部分と、長さ30cmほどの斜面をもつ形状のトップ部分から構成されている。そのように複雑なジオメトリ- をもつことから、結晶のシンチレーション光を発した場所で光の集光性に違いを生ずる。以上の性質を探る実験を行った。図4.6にセットアップを示す。図に示すようにアクリクケースに納め、鉛ブロックで周りを囲んで環境バックグランドを除去し、穴 (4mmϕ) の開いた鉛ブロックをコリメータに用い、ユニットにγ線源を照射して測定を行った。コリメータは、γ線を絞ったビームを照射し検出器の応答を詳細に調べるために用いた。ビームのスポットサイズが小さいほど詳細に調べることができるが、γ線収集効率と工

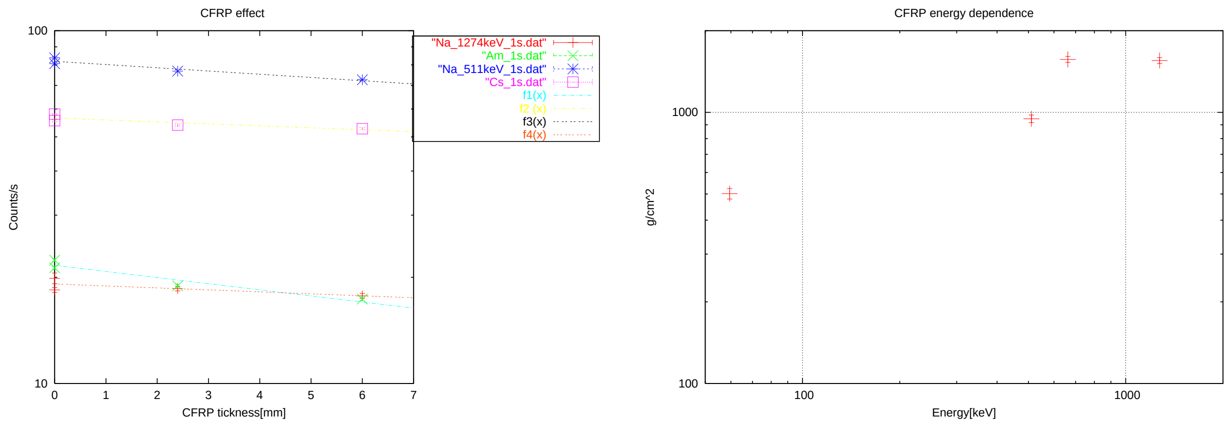


図 **4.5** CFRP 透過測定

左図は、横軸を CFRP の厚さ、縦軸をイベントレートを log スケールで示している。低エネルギー Am は他のγ 線源より、CFRP の厚さに依存している結果を得られた。右図は、横軸にエネルギー、縦軸に飛程 × 密度 $(\mathrm{g/cm}^2)$ で示す。

作上の限界から穴のサイズを決定した。

4.4.2 結果

1、 z 軸位置依存性

図 4.7 に PMT から 1cm,5cm,8cm,14cm,24cm,34cm の距離をもつ場所に線源を照射したときのスペクトルを重ねて表示する。照射した場所によって、スペクトルの形態、光電吸収の波高値にも大きな違いが生じていることがわかる。スペクトルの形態に変化がでるのは、光の集光性に加え、シンチレーション光を発する場所が効いてくる。1cm の測定データでいくつも光電ピークが生じるのは、PMT と接触している円柱の部分とボトム部分のシンチレーション光をを集光したものと予想される。

z 軸に対して詳細に計測を行った。γ 線源を照射する場所を PMT から 1cm 刻みで測定をした。光電吸収ピークの波高値の変化を図 4.8 に示す。図は、横軸に PMT からの距離をとり、縦軸に波高値をとりプロットした。γ 線源は、Na を使用し、511keV,1274keV の光電ピークをプロットしている。8cm の測定データから、トップ部分をメインに結晶とγ 線との相互作用が予想され、そこから PMT にたいして離れるほど、光量が上昇していく傾向をもつ。図 4.8 の左図は、結晶と PMT との距離を 23cm のパルスハイトで規格し、Na 照射の 511keV,1274keV の結果を同時に示した。PMT から 8-17cm 離れた付近で異なる傾向をもつ。この付近は、ボトムとトップの接着付近であり、エネルギー応答の違いを持つことが示唆される。次章の光伝播で詳細を記す。図 4.4.2 に分解能の依存性を示す。ボトムとトップの接着付近に膨らみをもち、トップに進むにつれてなだらかに下る傾向を持つ。左図にパルスハイトと分解能の依存性を示している。図 4.4.2 に光電吸収ピーク面積の z 軸依存性を示す。ボトムとトップ部分の接着面付近に検出効率を高くもち、トップ方向に進むと低くなる傾向をもち、シンチレータの厚みが薄くなる影響を示している。また、PMT 付近やトップの先端はγ 線が当たりにくい。

2、y 軸位置依存性

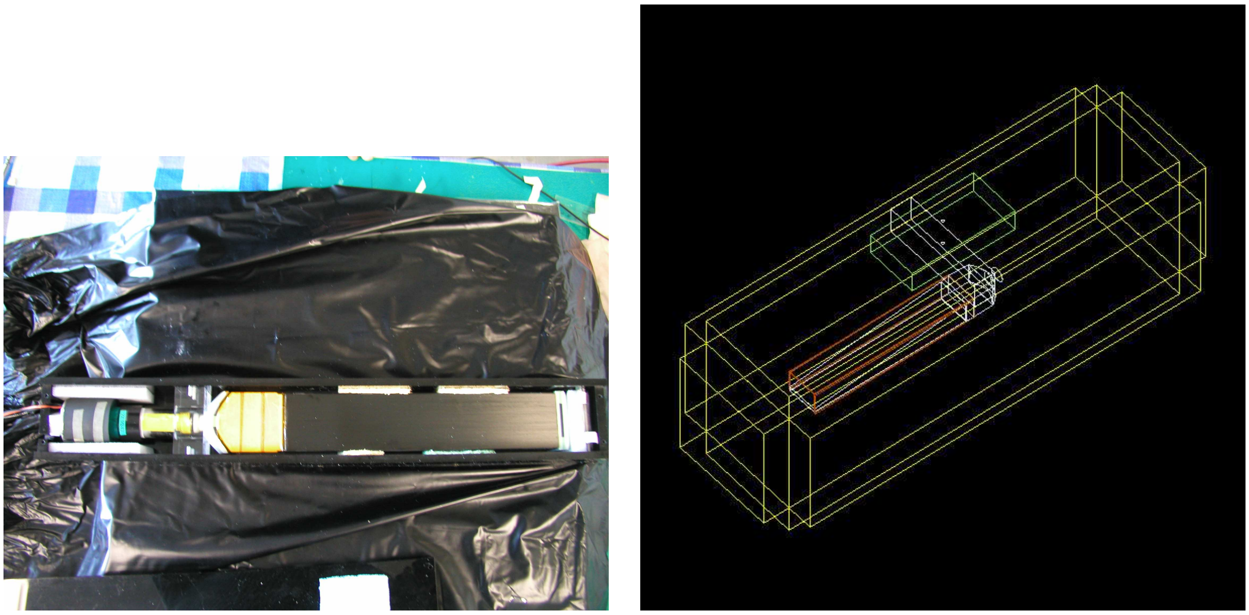


図 **4.6** アンタイカウンターのセットアップ

z 軸同様にボトム部分、トップ部分に対して y 軸の位置依存性を測定した。図 4.4.2、図 4.4.2 に測定結果を示す。図 4.4.2 にパルスハイトと分解能の関係を示し、図 4.4.2 に光電吸収ピーク面積の位置依存性を示す。端のほうではγ 線がが当たりにくい。

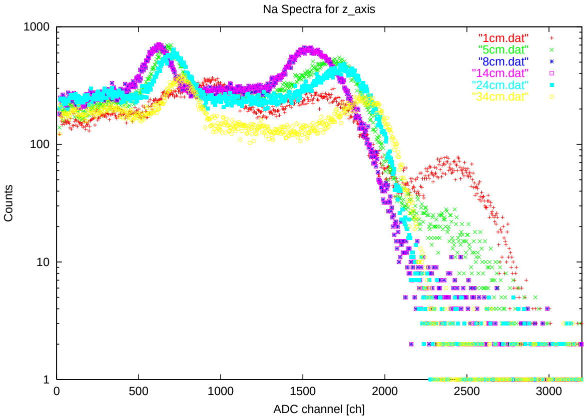


図 **4.7** z 軸の位置依存性にたいするスペクトル

γ 線源 Na スペクトルの z 軸にたいする位置依存性を示す。PMT から 1cm,5cm,8cm,14cm,24cm,34cm の距離にγ 線源を照射した。

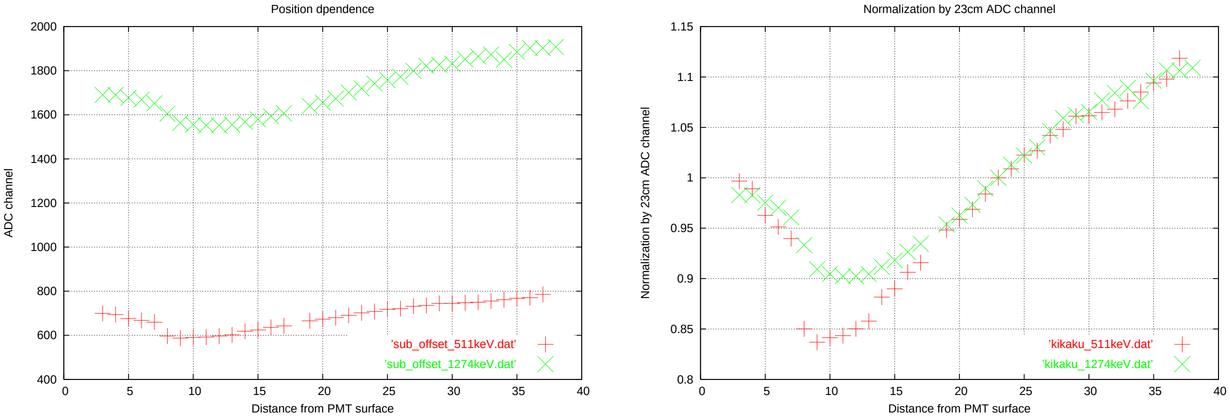


図 **4.8**　パルスハイトと分解能 z 軸依存性

γ 線源 Na に対する、パルスハイトの位置依存性を示す。赤色に 511keV, 緑色に 1274keV の応答を示す。左図、横軸を PMT からの距離縦軸を ADC channel で示す。右図、左図の結果から、照射位置 23cm のデータで規格化した。

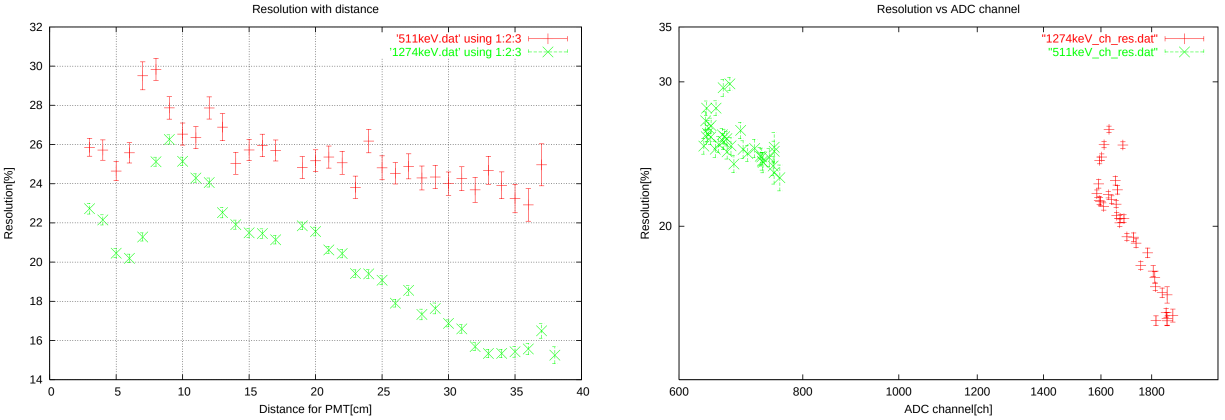


図 **4.9**　分解能の z 軸依存性、パルスハイト依存性

分解能の z 軸依存性、パルスハイト依存性を示す。右図、横軸に PMT からの距離、縦軸に分解能で示す。左図、横軸を ADC channel、縦軸を分解能で示す。

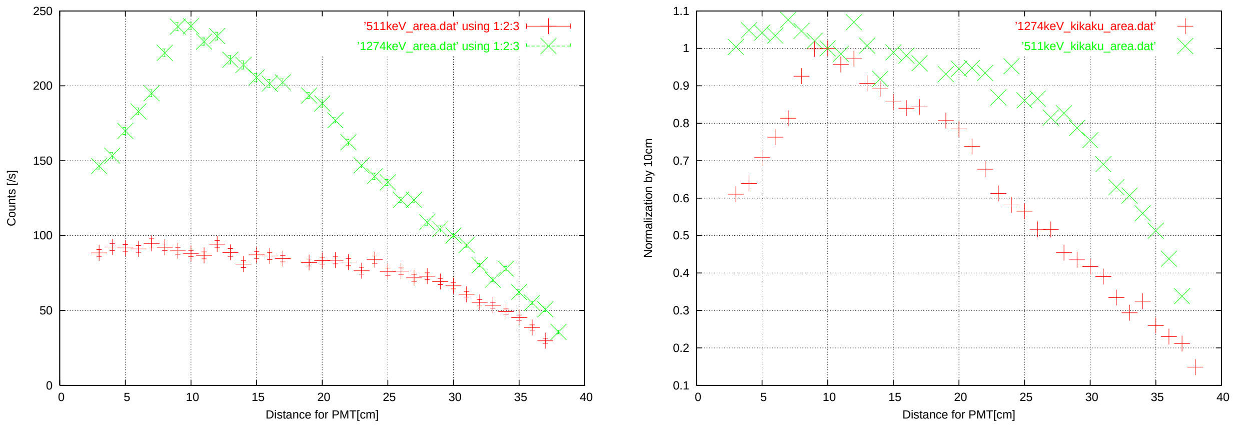


図 4.10　光電吸収ピーク面積z軸依存性。

光電吸収ピーク面積z軸依存性を示す。右図、横軸にPMTからの距離、縦軸に1秒あたりの光電吸収面積で示した。左図、右図の結果から照射位置10cmのデータで規格化した。

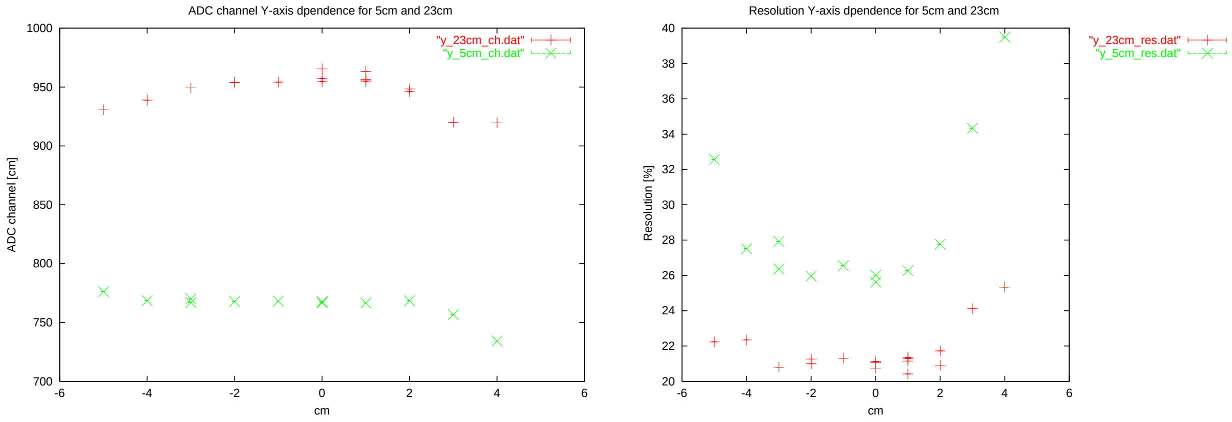


図 4.11　パルスハイトと分解能y軸依存性

左図にパルスハイトのy軸依存性を示す。γ 線源Csを用いy軸方向に+4cmから−5cmまで測定した。横軸を原点からの移動距離、縦軸をADC channelで示している。右図も同様は同様で、縦軸に分解能で示す。

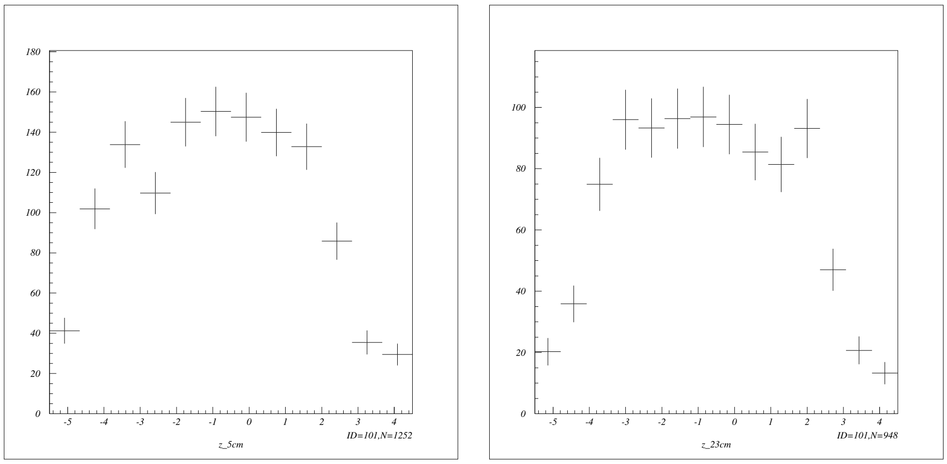


図 4.12 ボトムとトップ部分y軸位置依存性

右図にγ線照射位置PMTから5cm、左図にγ線照射位置PMTから23cm縦軸に一秒当たりの光電吸収イベント数で示している。

第5章　結晶内の光伝播

5.1　結晶内の光伝播

5.1.1　概要

検出器の応答構築を目的に、アンタイカウンターの結晶中の光伝播について数値計算と実験結果の両面から検証する。

荷電粒子やX線などの放射線があたったときに蛍光を出す物質のことをシンチレータといい、この発光現象をシンチレーション、光のことをシンチレーション光という。シンチレーターは、ガス、有機物、無機結晶などに広く使用される。アンタイカウンターは、高い阻止能が求められるため、ビスマス化合物結晶である無機シンチレータのBGO結晶が採用されている。無機結晶の特徴は、密度が高く、原子番号も大きいことから、高いエネルギーの放射線や荷電粒子との反応断面積が高い。

シンチレーション光は、荷電粒子や硬X線などの放射線が物質中に通過する時に、物質中の電子を励起してエネルギーを失い、その一部が光として放出される。この光が結晶内で反射、屈折、散乱吸収の複雑なプロセスを経て光電子増倍管の光電面にたどり着く。その光は、光電効果により光電子に変換され、その光電子を増幅することから電気的なシグナルを読み出す。光伝播の過程は、結晶の形状や透明度によるため、結晶の特性を十分考慮する必要がある。この章では、光電面に光が到達するまでの物理プロセスを理解し応答関数構築をするため、実験と比較しながら数値シミュレーションを行う。

アンタイカウンターは、異なるインゴットの結晶を光学接着することで読み出し系となる光電子増倍管までの距離が最大で40cm程になる。(2.3.1章) このような形状をもつシンチレーターの応答は、80年代後半から進められ、結晶の透明度、表面状態、形状などさまざまな要素と物理プロセスとの重なりあった応答が現れる。[11]

5.1.2　シンチレーション光伝播

光は物質の境界面で反射、透過または吸収を起こす。この物理過程の違いは、その境界面をつくる両側の物質の違い (不導体の物質、不導体と金属) や、境界面の表面状態によって定められる。光子の状態は2つのベクトル、光子の運動量 ($\mathbf{p} = \hbar\,\mathbf{k}$)、光子の偏光 ($\mathbf{e}$) によって定義され、偏光ベクトルの方向は電場の方向である。$\mathbf{u}$ は第一媒質から第二媒質の向きで、その境界面と垂直な単位ベクトルである。この光子の境界面での振舞いは、次の3つに分けて考えることができる。

1. 屈折、または反射角
2. 屈折、または反射波の振幅
3. 屈折、または反射する光子の確率

これらのことを考慮にいれて、dielectric(不導体) → dielectric、dielectric → metal(導体) の場合について区別していく。

dielectric → dielectric　光子は通過する (屈折光) か、反射される (反射光) か吸収される。これらは光子の波長、入射角、偏光、境界面をつくる物質の屈折率に依存する。

dielectric → metal　光子は透過せず金属に吸収されるか、不導体の方へ反射される。

境界での光子の振舞いを決めるために、まず同質で単一な平面波を扱う。

$$E = E_0 e^{ik\cdot x - i\omega t}$$

$$B = \sqrt{\mu\epsilon}\frac{k\times E}{k}$$

ここで、μ : 透磁率、ϵ : 誘電率、E : 電場ベクトル、B : 磁場ベクトル、k : 波数ベクトルである。古典論において、入ってきた波は反射波 (double prime) と屈折波 (single prime) に分かれる。

$$E' = E_0{}' e^{ik'\cdot x - i\omega t}$$

$$E'' = E_0{}'' e^{ik''\cdot x - i\omega t}$$

波数には、次のような関係がある。

$$|k| = |k''| = k = \frac{\omega}{c}\sqrt{\mu\epsilon}$$

$$|k'| = k' = \sqrt{\mu'\epsilon'}$$

ここで、物質中の波速は、$v = \frac{c}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ で、$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\mu\epsilon}$ は、物質中の屈折率である。3 つの波、屈折、反射、入射が物質の表面で同じ位相を持つ状態は、フルネルの法則でよく知られており以下のようになる。

$$(k\cdot x)_{\mathrm{surf}} = (k'\cdot x)_{\mathrm{surf}} = (k''\cdot x)_{\mathrm{surf}}$$

$$k\sin i = k'\sin r = k''\sin r'$$

ここで、i、r、r' は各々、表面に垂直なところを基準とした入射角、屈折角、反射角である。

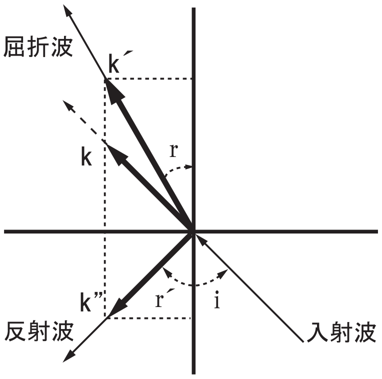


図 **5.1**　境界の平面波

このことから次のことがいえる。

$$i = r'$$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \sqrt{\frac{\mu'\epsilon'}{\mu\epsilon}} = \frac{n'}{n}$$

境界での波の力学的特徴は、マックスウェル方程式より得られる。すなわち入ってきた波に対する生成された波の振幅の比は、次のように記述される。

光子の方向と境界面と垂直な方向によって決められる面に対して垂直な電場 (偏光ベクトル) の平面波は、

$$\frac{E_0{}'}{E_0} = \frac{2n\cos i}{n\cos i + \frac{\mu}{\mu'}n'\cos r} = \frac{2n\cos i}{n\cos i + n'\cos r}$$

$$\frac{E_0{}''}{E_0} = \frac{n\cos i - \frac{\mu}{\mu'}n'\cos r}{n\cos i + \frac{\mu}{\mu'}n'\cos r} = \frac{n\cos i - n'\cos r}{n\cos i + n'\cos r}$$

である。ここで、可視光またはほぼ可視光のときは、$\mu/\mu'^{\approx 1}$。

一方、境界面と平行な電場の平面波は、

$$\frac{E_0{}'}{E_0} = \frac{2n\cos i}{\frac{\mu}{\mu'}n'\cos i + n\cos r} = \frac{2n\cos i}{n'\cos i + n\cos r}$$

$$\frac{E_0{}''}{E_0} = \frac{\frac{\mu}{\mu'}n'\cos i - n\cos r}{\frac{\mu}{\mu'}n'\cos i + n\cos r} = \frac{n'\cos i - n\cos r}{n'\cos i + n\cos r}$$

となる。特に入射角 i が $0°$ 、すなわち入射方向が境界面と垂直な場合、次のような関係になる。

$$\frac{E_0{}'}{E_0} = \frac{2n}{n'+n}, \frac{E_0{}''}{E_0} = \frac{n'-n}{n'+n}$$

ここでもし、$n' < n$ なら、反射波は逆位相であることを意味している。

逆に $i \neq 0$ のときは偏光方向によって、屈折波と反射波の振幅が異なることに注意が必要である。次に光子の粒子性により、光子が屈折や反射をする確率が計算される。光子数はエネルギーに比例するので、光子数が保たれるということは、境界面でのエネルギーが保存される、ということと同じである。

マックスウェルの方程式より、エネルギー流は、

$$S = \frac{1}{2}\cdot\frac{c}{4\pi}\sqrt{\mu\epsilon}E\times H = \frac{c}{8\pi}\sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}E_0{}^2 k$$

であり、境界の単位面積のエネルギー収支は、境界面に対して垂直方向の単位ベクトルを用いて、

$$S\cdot u = S'\cdot u - S''\cdot u$$

$$s\cos i = s'\cos r + s''\cos i$$

$$\frac{c}{8\pi}\cdot\frac{1}{\mu}nE_0{}^2\cos i = \frac{c}{8\pi}\cdot\frac{1}{\mu'}n'E_0{}'^2\cos r + \frac{c}{8\pi}\cdot\frac{1}{\mu}E_0{}''^2\cos i$$

となる。よって、$\mu/\mu' \approx 1$ とすると、光子の透過確率 T は

$$T = \left(\frac{E_0{}'}{E_0}\right)\frac{2n'\cos r}{n\cos i}$$

反射する確率：R は $R = 1 - T$ となる。反射の場合、入ってきた光子 (k、e)、屈折した光子 (k''、e'') との関係は

$$q = k\times u$$

$$e_\perp = \left(\frac{e\cdot q}{|q|}\right)\frac{q}{|q|}$$

$$e_{\parallel} = e - e_{\perp}$$

$$e_{\parallel}{}' = e_{\parallel}\frac{2n\cos i}{n'\cos i + n\cos r}$$

$$e_{\perp}{}' = e_{\perp}\frac{2n\cos i}{n\cos i + n'\cos r}$$

$$e_{\parallel}{}'' = \frac{n'}{n}e_{\parallel}{}' - e_{\parallel}$$

$$e_{\perp}{}'' = e_{\perp}{}' - e_{\perp}$$

$\sin r = n\sin\frac{i}{n'} > 1$ の場合、屈折した波はなく、次式による全内部反射が起こる。

$$k'' = k - 2(k\cdot u)u$$

$$e'' = -e + 2(e\cdot u)u$$

以上のように、光は二つの均一等方で完全に透明な媒質の境界面に入射すると一部分は反射し、一部分は屈折する。したがって、屈折した波のエネルギー (または粒子数) は入射した波のエネルギー (または粒子数) よりも小さくなる。先に述べたように反射の場合は R で、屈折の場合は T の確率でそれぞれ起こる。

また、第一媒質の屈折率が第二媒質の屈折率より大きい場合は、特定の入射角 (全反射の臨界角) 以上では屈折波が存在せず、入射波のエネルギーが全て正反射、つまり、全反射する。

dielectric → metal　光子は透過せず金属に吸収されるか、不導体の方へ反射される。

完全に透明でない物質中の波の伝搬を考える場合には、一般に波数ベクトル $\vec{k}$ を複素数

$$\vec{k} = \vec{k'} + i\vec{k''}$$

を導入する必要がある ($\vec{k'}$、$\vec{k''}$: 実ベクトル)。いま、波動ベクトルが特定の方向をもつ、つまり $\vec{k'}$ と $\vec{k''}$ が互いに平行であるとすると、このような波は、その中の電磁場の値が一定の面が、伝搬方向に垂直な平面になる。

この場合には、$\vec{k} = \vec{k}\vec{l}$($\vec{l}$ は $\vec{k'}$ と $\vec{k''}$ の方向の単位ベクトル) によって波動ベクトルの長さ k を導入することができ、$\mathrm{k} = \sqrt{\epsilon\mu}\frac{\omega}{c}$ となる。複素量 $\sqrt{\epsilon\mu}$(物質中) は普通、実数 n と κ を使って $k = n + i\kappa$ という形に書くので、

$$k = \sqrt{\epsilon\mu}\frac{\omega}{c} = (n + i\kappa)\frac{\omega}{c}$$

となる。ここで、n は媒質の屈折率、κ は吸収係数と呼ばれ、伝搬につれて波が減衰する速さを決めるものである。ある吸収性の媒質に光子が入ってきたとき、その光子はこの吸収係数にしたがってエネルギーをおとしていく。

特に、第二媒質が吸収性である金属の場合は一般に反射波の強度が強くなり、また屈折波は吸収される。したがって、第二媒質野もつ特有の吸収係数によって、入射光波の反射と吸収する割合が変わる。

5.1.3 光伝播シミュレーター

Geant4 シミュレーターを使用して、結晶内の光伝播のプロセスをモンテカルロ法で数値シミュレーションを行った。シミュレーションにおけるソフトウェアの構造ならびに物理プロセスの記述は、Geant4 を基礎とした。このソフトウェア郡は、様々な粒子と物質中で起こす複雑な振舞や反応をシミュレートする大規模なソフトウェアであり、放射性医療学治療、トモグラフィ、放射線遮蔽、宇宙工学などの分野で幅広く活用されている。また Geant4 は、国際協力で進められている次世代の高エネルギー実験に対応するため、オブジェクト指向技術の採用され C++で記述されている。 [8]

Geat4 では、様々な物理素過程をクラスという単位で導入することで、シミュレーションをおこなう。光伝播で使用するものは、光の発生、光の伝播とそれをとりまく環境を必要とする。以下に、Geant4 で使用したクラスと関数の種類を示す。 [9]

表 **5.1** 使用したクラスと関数

プロセス			
光の発生	シンチレーション光	チェレンコフ光	
光粒子	opticalphoton	gamma	
光伝播	吸収	レイリー散乱	
物質の境界面	反射	透過	吸収

5.1.4 物理プロセスの検証

概要

計算コードが光伝播のプロセスを正しくシュミレートしていくことを検証するために、各物理プロセスクラスの動作を順に進める。特に実験で求めた様々な物理パラメータを正しく算入できているのかに注目する。以下に物理プロセスと、検証方法と検証結果をを示す。

結晶の減衰長

結晶内で光が透過する時、物質との相互作用で吸収される。よく知られているようにそのプロセスは単純な指数関数の減衰曲線として記述される。そこで、吸収係数をもつ物質を定義して検証する。減衰長を 4m と定義した計算結果を図 5.2 に示す。指数関数のモデルで合わせることで、定義した減衰長の長さを再現していることを検証した。

反射、屈折

垂直な面に入射する光のプロセス透過、屈折率のみに依存し、反射率 (R)、透過率 (T) は、

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \tag{5.1}$$

$$T = 1 - R \tag{5.2}$$

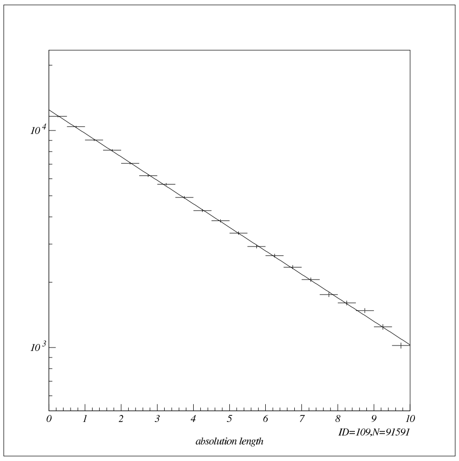


図 **5.2**　減衰長の検証結果

クロスで計算結果を示し、直線で指数関数のモデ ルフィット結果を示す。減衰長を 4m と定義して横軸に長さ [m] をとり、縦軸に頻度を示す。直線は、指数関数モデルでフィットした。モデルに良く合い、減衰長を再現する。

と表すことができる。n_1、n_2 は 2 種類の媒質の屈折率を示す。図 5.3 に、屈折率をもった媒質から $n = 1$ の媒質へ入射したときの反射率の理論値と、屈折率 1.5(ガラス) と 2.15(BGO 結晶) の媒質から、屈折率 1(真空) の媒質へ入射したときの反射率の計算結果を示す。

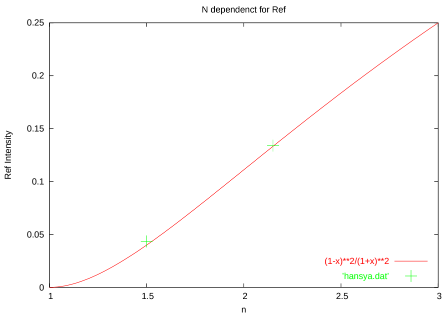


図 **5.3**　反射率の屈折率依存性

クロスに $n = 1.5$、$n = 2.15$ の計算結果を示し、曲線で理論値を示しめす。横軸に屈折率、縦軸に規格化した反射率をしめす。

乱反射

アンタイカウンターは、BGO 結晶の周りに反射材として $\mathrm{BaSO_4}$ の塗料が塗られている。この場合、光は入射方向の運動量に依存しない乱反射のプロセスが主要となる。この乱反射のプロセスを検証した。

乱反射の条件を与えてた $x - y$ 平面に $-z$ 方向にに光を入射した。図 5.4 に反射光の球面分布の計算結果を示す。入射方向に依存しない乱反射が再現できている。

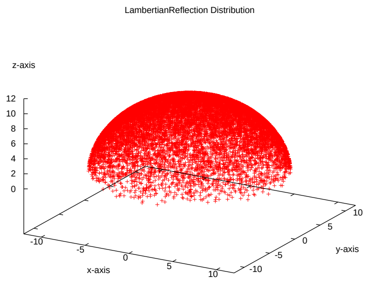


図 **5.4** $x-y$ 平面に対して $-z$ 方向に光を入射たときの反射光の分布

斜面の効果

アンタイカウンターは、傾きをもったシンチレータである。発生した光の場所が読み出し系に遠くなるほどパルスハイトが高くなることが HXD-I の時から報告され、今回もアンタイカウンターの応答でも確認されている。(図 4.7) そこで、斜面をもつシンチレータと直方体のシンチレータを用いて、光の集光性を数値シミュレートする。図 5.5 に示すように、シンチレータの中心軸に沿って等方的に光を発生させる。図 5.6 に計算結果を示す。直方体のシンチレータは、フラットな応答を示し、吸収体付近 (0-3cm) では、同じ傾向が現れ、吸収体から遠ざかるほど差をもつ。結晶の界面は、全反射のみを定義して計算を行った。

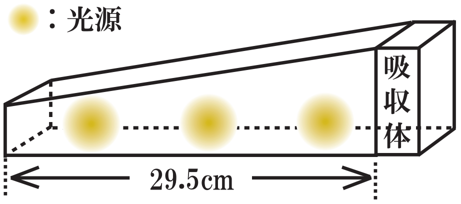


図 **5.5** 結晶内からの光の発生

5.1.5 サンプル結晶を用いた実験と計算の比較

概要

サンプル結晶を用いた実験をもとに、乱反射の効率などの未決定のパラメータを推定する。この計算結果をもとに、アンタイカウンターの応答関数構築に必要なパラメーターを決定する。サンプル結晶は、第 4 章でシンチレータの特性試験で使用した同じものを使用する。試験系ならびにセットアップも同様のものを使用した。

実験

サンプル結晶は立方体を用いているので、シンチレーション光の読み出す PMT との接着面を除くと 5 面の結晶面を持っている。その結晶面を 1 面ずつ塗って光量を測定した。測定条件ならびに測定結果を表 5.2 にまとめ、反射面条件から、それぞれの光電吸収ピークを図 5.7 に示した。ADC チャンネルは、PMT に集光されたシンチレーション光の量を現している。図 5.1.5 に反射

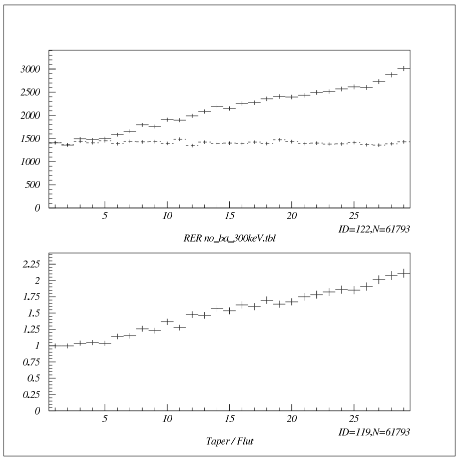


図 **5.6** 斜面をもつ効果

上図に、直方体のシンチレータと斜面をもつシンチレータの吸収体からの距離依存性を示す。横軸に吸収体からの距離を示し、縦軸に吸収イベントで示す。下図に、光を発生させた場所ごとに、斜面をもつ形状の結果を直方体の形状の結果で規格している。

面を増やしたときの反射面とγ 線の光電ピークの関係を示す。反射材の面を増やすことで、光の集光性が増加する傾向をもつ。

表 **5.2** 反射材の条件

測定条件	a	分解能 [%]	p	Chisq/ndf
反射材なし	45.59± 0.24	14.30 ±0.07	748.71 ±0.29	1.23
1 面	51.72± 0.30	14.08 ±0.08	863.30 ±0.35	1.23
2 面	52.72± 0.28	13.76 ±0.07	900.00 ±0.34	1.24
3 面	54.74± 0.27	13.61 ±0.06	944.91 ±0.33	1.18
4 面	59.89± 0.28	13.35 ±0.06	1054.06 ±0.34	1.16
全て反射材	62.42± 0.30	11.15 ±0.05	1315.58 ± 0.34	1.07

測定条件とモデルフィット結果を示す。

変数 a に単位時間当たりの光電ピーク面積、変数 p は光電吸収ピークの ADC channel で示した。

計算

前章の検証とサンプル結晶を用いた実験と検証から、アンタイカウンターに条件をあわせる。ここで、反射材の影響として、先ほど検証した乱反射のプロセスと反射確率を適応させた。ここで示す反射確率は、電総研の実験値を使用した。この実験は、「シャープ リトル法」と呼ばれる、球面積分法を用いて、白色板 (反射材) の絶対反射率を実験から求めている。波長依存性をわずかにもち、波長 450 ~ 700nm に対して、絶対反射率 92 % ±0.15 %を定量的に求めている。 [12]

以上の条件を踏まえて、シミュレーションをおこなった。実験に対応する計算結果を図 5.1.5 に示す。反射材の面を増やすことで、吸収イベントの増加する傾向をもつ。集光率は、対称的な場所に反射材の面を置くことで大きな変化をを伴う結果となった。反射面を 2 面から 3 面に増やした時がその条件に相当し、結晶をよく再現しており、モデルが妥当であることが示された。

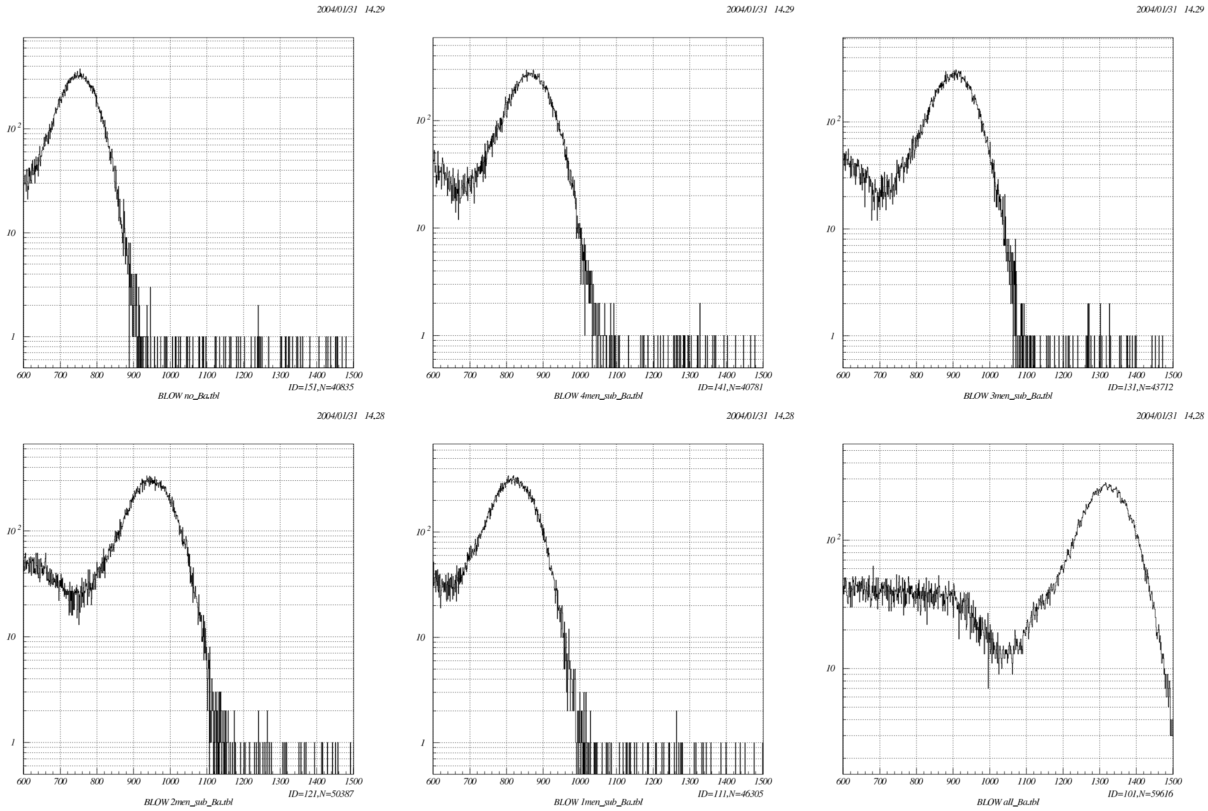


図 **5.7**　反射面を与えたときの Cs スペクトル

左上段に反射面を与えていない時を示し、以降反射面を増やした条件で示している。右下段に反射面を完全に塗ったときのサンプル結晶を示している。

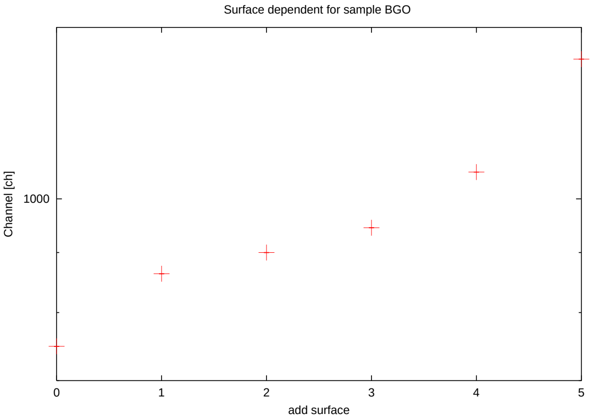


図 **5.8**　光量の反射面依存性 (実験結果)

光量の反射面依存性を示す。横軸に反射面の枚数を示し、縦軸に光電吸収の ADC チャンネルをしめす。x 軸の 0 は反射材をぬらないサンプル結晶を表し、x 軸の 5 は反射材を完全に塗ったサンプル結晶を表している。

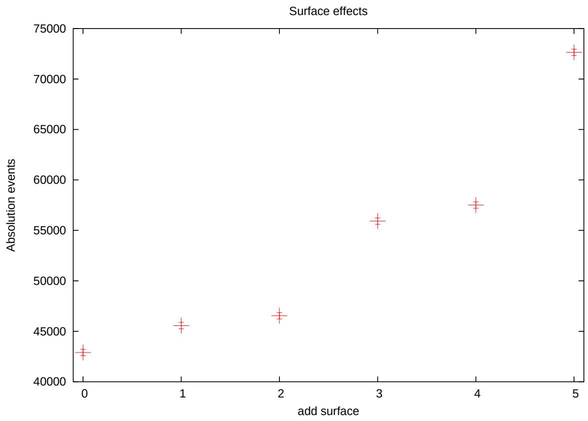


図 **5.9**　反射面に対する光量の依存性 (計算結果)

横軸に反射材の塗った枚数を示し、縦軸に吸収したイベント数で示している。x 軸の 0 は反射材をぬらないサンプル結晶を表し、x 軸の 5 は反射材を完全に塗ったサンプル結晶を表している。

考察

実験結果と計算結果との比較を図 5.1.5 を示す。反射材の枚数と集光する光の傾向はほぼ再現できた。特に、反射材の枚数を 4 枚から 5 枚にしたときの集光率の変化が実験値をよく再現している結果となった。しかし、反射面が 1 から 2 枚の時は、実験値は計算値をうわまっている。これは、使用したサンプル結晶の 6 面のうち 4 面がすりガラス状になっていることから、反射材を塗る前から結晶内の光が反射されやすいことによると考えられる。また、現状の計算では、結晶面それぞれに異なる表面状態を定義することができず、そのバラツキが実験との差として現れている。

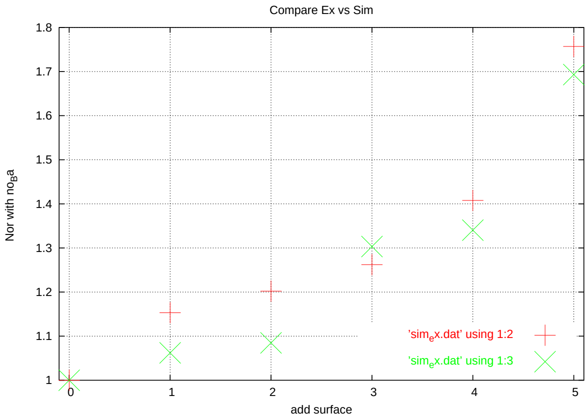


図 **5.10**　実験結果と計算結果の比較

実験結果と計算結果を比較する。横軸に反射面の枚数を示し、縦軸を、反射材なしの実験値、計算値でそれぞれ規格化している。

5.1.6 アンタイカウンターを用いた実験と計算

概要

前章で、計算の検証とサンプル結晶の実験と計算から結晶内の光の伝播モデルについて基本的な検証をおこなった。この節では、実際のアンタイカウンターのサイズと形状を想定した光の伝播について実験と計算を比較する。ユニットの応答を示した5章にあるように、BGO結晶は、自己吸収係数が4mあること、また斜面をもつ形状をもち、反射材を使用していることから、光の伝播は主要な全反射のプロセスと反射材面の乱反射が重なり、発生した光の場所が光の読み出す光電子増倍管に遠くなるほどパルスハイトが高くなることがHXD-Iの時から報告されている。(図4.7) ここでは、ユニットの応答を光伝播から、定量的に評価をする。

トップ部分

アンタイカウンターは、第3章に示したように2つの異なるインゴットのトップ部分とボトム部分を光学接着している。トップ部分をサンプルピースを用いた計算方法を用いて数値シミュレートする。実験では、ボトム部分を完全に反射材を塗って、トップ部分にγ 線を照射させてシンチレーション光を発生させた。実験結果は、HXD-Iにおこなわれた実験を参考にした。[10]

数値計算は、計算検証と同様に、図5.5に示す方法で、結晶内で光を等方的に発生させ、トップ部分を抜け出した光を吸収体でカウントする。この結晶の中心軸のz軸依存性を計算し、計算結果を図5.1.6に示す。

次に、エネルギー依存性を図5.1.6に示した方法で、結晶の斜面側に向けて、1cm刻みでγ 線を照射した。計算結果を5.1.6に示す。左図から右図に向かい100keVから600keVまでのγ 線を照射した計算結果を示している。エネルギーごとに2枚のグラフを用い1セットで示している。1枚目のグラフは、全反射のみの条件と全反射と乱反射との条件を同時に示し、上側の計算結果が全反射と乱反射との条件の計算結果を示す。2枚目のグラフは、乱反射の加わった計算結果を全反射のみの計算結果で規格化している。横軸に吸収体からの距離を示し、縦軸に吸収カウントを示す。入射エネルギーと吸収カウントの比例関係をもち、全てのデータで右上りの傾向を持つ。2枚目のグラフは反射材の効果を示し、先端部分 (zの値が高い部分) では、反射材の効果が低くなる。

考察

光の集光性の理解することができるが、エネルギー応答 (図5.1.6) では、形状の優位な差を表現することができていない。光伝播の計算とγ 線と結晶のエネルギー応答を計算する必要をもつ。この2通りの計算から、アンタイカウンターの関数構築を進める必要がある。

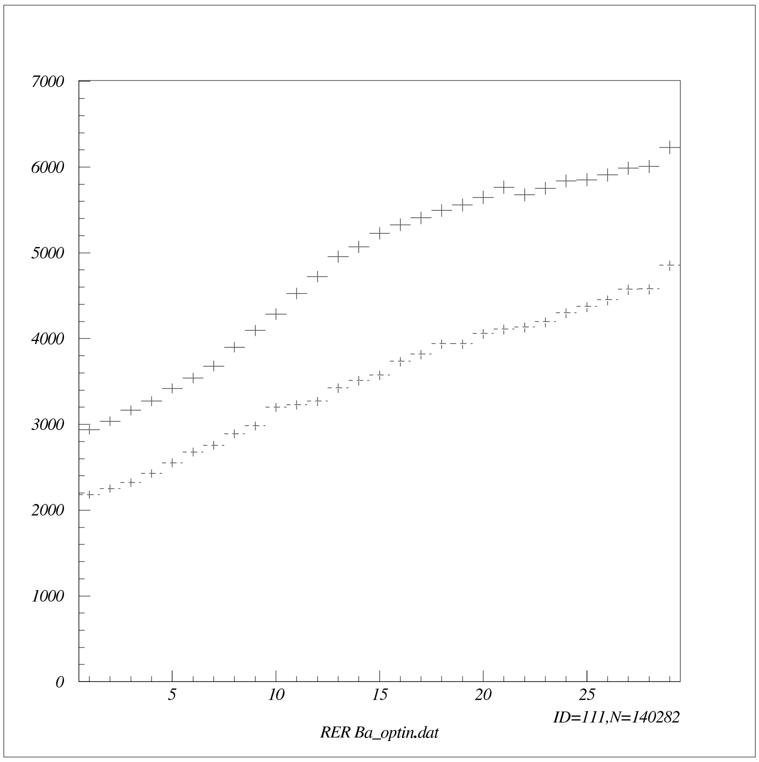


図 **5.11** 結晶内で光を発生た計算結果

結晶内で光を発生させたときの、乱反射を取り込んだ効果を示す。横軸に吸収体からの距離 [cm]、縦軸に吸収イベントで示す。

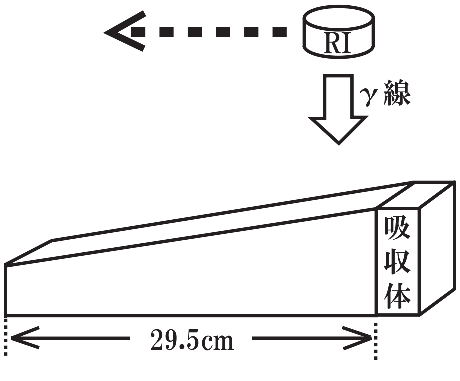


図 **5.12** 計算のセットアップ

トップ部分の z 軸依存性計算結果をしめす。入射γ 線エネルギーを 100keV から 600keV のエネルギーで数値シュレーションを行った。

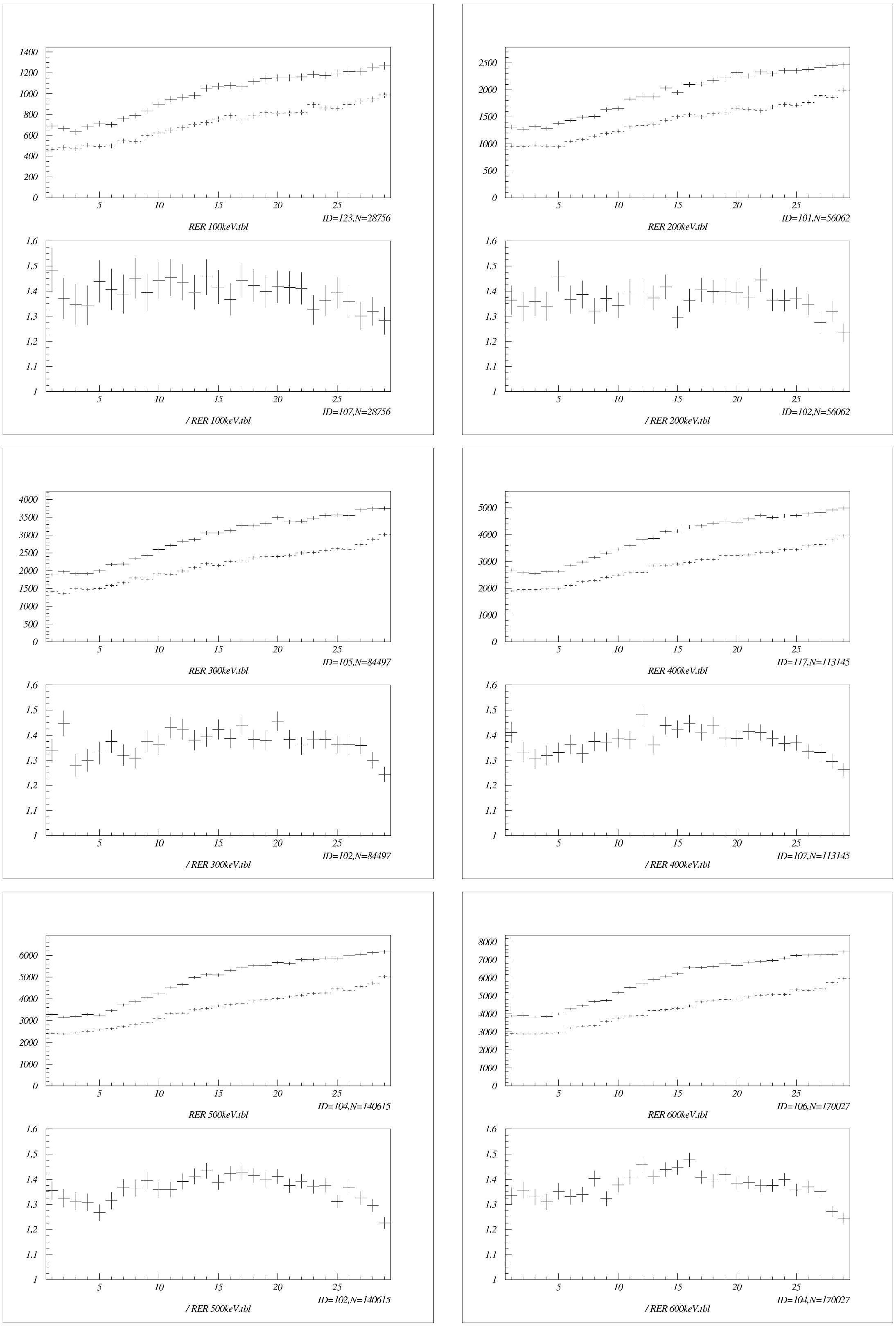


図 **5.13** エネルギー依存性

z 軸依存性、計算結果横軸に吸収体からの距離、縦軸に吸収カウントを示す。入射γ 線エネルギーを 100keV から 600keV まで、各エネルギーごと 2 枚 1 セットでまとめた。1 枚目のグラフは、全反射の条件と乱反射の加わった条件を同時に示し、上側が乱反射のくわわった条件のグラフとなり、2 枚目のグラフは、乱反射の加わった条件と全反射のみの条件の商を示している。

参考文献

[1] Isobe, N.,2002,PhD thesis, University of Tokyo

[2] 中澤知洋 修士論文 東京大学 1998

[3] A MASKLESS GAMMA-RAY ALL-SKY IMAGER:BATSE/CGRO[1]

[4] http://www.mathworks.com/access/helpdesk/

[5] 久保田あや 修士論文 東京大学 1998

[6] http://www.naoe.t.u-tokyo.ac.jp/member/tecnet/techsympo2000.html

[7] 放射線計測ハンドブック GLENN F.KNOLL

[8] http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/geant4/geant4.html

[9] http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/n

[10] 山岡和貴 修士論文 東京大学 1998

[11] Effect of Surface Roughness and Crystal Shape on Performance of Bismuth Germanate Scintillators

Journal of Applied Physics vol.25

[12] Recent Status of Development on Photometric and Radiometric Standards

電子技術総合研究所彙報 vol.64

謝辞

この修士論文の作成にあたり、多くの方々に大変お世話になりました。指導教官の田代先生には、研究活動全般について指導して頂き、論文のまとめ方を教えて頂き、大変感謝しています。理化学研究所の寺田さんには、考えが拡散している私をよく軌道修正して頂きました。青山大学の山岡先生には、実験の大切なポイントを教えて頂きました。

洪さんには、研究活動全般に助言をして頂き、鈴木さんには、計算機まわりに関してお世話になりました。阿倍くんには、いろいろ参考となる話をして頂き、共同活動した広島大学の大野くんから多くのことを教わりました。本研究を支えてくださった、研究室の皆様、理化学研究所の皆様に感謝致します。