# 小型衛星 MIST 搭載

# 軌道放射線モニター CUBES の検出器開発

広島大学理学部物理科学科 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室 B124087内田和海 主査:高橋弘充 副査:志垣賢太 ガンマ線バースト (GRB) は宇宙最大の爆発現象であり、その放出する総エネルギー量は 10<sup>45</sup>J にも達 する。SPHiNX(Segmented Polarimeter for High eNergy X-rays) 衛星計画では GRB を偏光観測し、そ の放射機構を明らかにするこが目的である。搭載されるプラスチックシンチレータ、Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>(BGO)、 Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub>(GAGG) という3種類のシンチレータのうち、GAGG はまだ宇宙での使用実績がない。 MIST(the MIniature Student saTellite) 衛星 (2017年打ち上げ予定) の CUBES(CUbesat x-ray Background Explorer using Scintillators) 検出器は上記3つのシンチレータを搭載し、衛星軌道上での放射線環境とGAGG の放射化・放射線 耐性を実測することを目的としている。

本研究では、CUBES 検出器の読み出し回路の開発とGAGG の基礎特性評価を行った。軌道上では最大10<sup>6</sup>counts/sec もの荷 電粒子が入射し、放射化によって511keV などの輝線が生じる。 右図は3種類の シンチレータに関して、本研究で開発した回路 で測定を行ったスペクトルである。GAGGのスペクトルを見る と、鉛の特性 X線(80keV)と<sup>137</sup>Csの光電吸収ピーク(662keV) が観測できていることから、MIST や SPHiNX 衛星で要求され ているエネ ルギー帯域をカバーし、エネルギー分解能も十分で あることが分かる。



図 1: 測定した <sup>137</sup>Cs のスペクトル

# 目 次

第1章	序論	<b>5</b>
1.1	背景	5
1.2	研究目的....................................	5
第2章	CUBES と放射線観測	6
2.1	CUBES - CUbesat x-ray Background Explorer using Scintillators	6
2.2	CUBESの検出器及び読み出し回路	7
	2.2.1 シンチレーション原理及び放射線耐性	7
	2.2.2 CUBES 搭載シンチレータ	9
	2.2.3 半導体光検出器 (Multi-Pixel Photon Counter)	10
	2.2.4 信号処理回路	11
	2.2.5 分解能とノイズ	15
第3章	読み出し回路の開発・作製	16
3.1		
0.1	CUBES Cの安水仕様	16
3.2	CUBES Cの要求任様	16 17
3.2 3.3	CUBES CO要求任様	16 17 18
3.2 3.3	CUBES CO要求任様	16 17 18 18
3.2 3.3	CUBES CO要求任様	<ol> <li>16</li> <li>17</li> <li>18</li> <li>18</li> <li>19</li> </ol>
3.2 3.3 第4章	CUBES CO要求任様	<ol> <li>16</li> <li>17</li> <li>18</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>26</li> </ol>
3.2 3.3 第4章 4.1	CUBES CO要求任様	<ol> <li>16</li> <li>17</li> <li>18</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>26</li> <li>26</li> </ol>
3.2 3.3 第4章 4.1 4.2	CUBES CO要求任様	<ol> <li>16</li> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>26</li> <li>26</li> <li>29</li> </ol>

# 図目次

1	測定した <sup>137</sup> Cs のスペクトル	1
2.1	CUBES の主な仕様	6
2.2	CUBES 外形	6
2.3	シンチレーション原理の例 [6]	7
2.4	シンチレータと光検出器の接続	9
2.5	プラスチックシンチレータ....................................	9
2.6	BGO	9
2.7	GAGG	9
2.8	MPPC の等価回路 [3]	11
2.9	MPPC の概念図 [2]	11
2.10	回路概念図	11
2.11	前置増幅器の回路図	12
2.12	微分回路の回路図	13
2.13	PZC 回路の回路図	13
2.14	積分回路の回路図..................................	13
2.15	反転増幅回路の回路図	14
2.16	PeakHold 回路図	14
2.17	FWHM の定義	15
3.1	衛星軌道上で想定されるカウント数 [8]	17
3.2	作製した前置増幅器	18
3.3	前置増幅器回路図....................................	18
3.4	Shaping time を変えた時のスペクトル	19
3.5	小信号時の周波数特性 [9]	20
3.6	Shaping time を変えた時のスペクトル	22
3.7	Shaping time を変えた時のスペクトル	24
4.1	形状依存測定	26
4.2	5mm×5mm×5mm	27
4.3	5mm×5mm×10mm	27
4.4	5mm×5mm×20mm	27
4.5	5mm×5mm×30mm	27
4.6	10mm×10mm×10mm	28

4.7	MPPC 受光面と GAGG サイズ	29
4.8	実験風景 (線源室内部)	30
4.9	Noise Parameter	31
4.10	GAGG サンプル 0 番のエネルギースペクトルの時間変化	34
4.11	GAGG サンプル 7 番のエネルギースペクトルの時間変化	34

# 表目次

2.1	シンチレータの特徴	9
2.2	光センサ性能比較 [1]	10
3.1	前置増幅器のコンデンサ容量 $C_f$ を変化させた時の分解能の変化 $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	20
3.2	前置増幅器時定数を変化させた時の分解能の変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	21
3.3	コンデンサの静電容量を変化させた時の分解能の変化.......................	22
3.4	前置増幅器時定数を変化させた時の分解能の変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	23
3.5	コンデンサの静電容量を変化させた時の分解能の変化.........................	24
3.6	前置増幅器時定数を変化させた時の分解能の変化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	25
4.1	GAGG シンチレータエネルギースペクトルの形状及び照射方向依存性.........	28
4.2	PMT1 と PMT2 の測定条件比較	31
4.3	GAGG 試料の測定順番	31
4.4	高電圧電源用電源装置による不定性....................................	31
4.5	GAGG <b>シンチレータの放射線照射実験の解析結果</b>	32
4.6	GAGG シンチレータの放射線照射後の時間変化 ...............................	34

# 第1章 序論

# 1.1 背景

ガンマ線バースト (Gamma-ray Burst:GRB) は宇宙で最も明るい爆発現象である。これは数秒から数十 秒程度の短い時間に、大量のガンマ線を放出する現象であり、その明るさは 10<sup>52</sup>erg、放射起源は宇宙論的 距離 (~100 億光年) にも達する。そのため、初期宇宙の状態を解明する鍵として有力な手段である。この GRB の大量なガンマ線はどこから、どのようなメカニズムで放射されているのか、すなわち放射起源を探 ることが GRB の直接的な理解となる。一般に宇宙分野で用いられる観測方法を大分すると、撮像、測光、 分光、偏光観測の 4 つである。これまで GRB や GRB 残光の撮像、測光、分光によって、GRB の到来方 向、時間変化、エネルギーという 3 つの物理量の観測が活発に行われてきた。ここに偏光に関する情報が 加われば、ガンマ線放射メカニズムにかなり大きな制限を付加することができる。しかし、高エネルギー のガンマ線領域となると偏光観測は大変難しく、事実、GRB の偏光観測例は大変少なく、数例程度しか無 い。現在計画されている SPHiNX 衛星では、この GRB の観測例を増やし、偏光度の分布から GRB の放 射メカニズムの解明を目的としている。

SPHiNX 衛星のように地球近傍を周回する衛星軌道上では、地球の磁場にトラップされた荷電粒子が多 く存在する。特に南大西洋地磁気異常帯 (SAA) では、 $10^6$  counts/sec/cm<sup>2</sup> ものレートが予想される。これ らの荷電粒子は天体信号を観測する上での大きなノイズとなる。そこで、SPHiNX 衛星を打ち上げる前に、 衛星軌道上での放射線環境を調べる必要があり、相乗り小型衛星 MIST に搭載する CUBES 検出器を利用 する。CUBES 検出器には SPHiNX 衛星に搭載予定の Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub>(GAGG) シンチレータと、プラス チックシンチレータ。それに加えて、Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>(BGO) シンチレータを搭載する。光検出器としては Silicon Photomultipliers(Si-PM) を用いる。これらのシンチレータはそれぞれ蛍光時定数や発光量が異なるため、 それぞれに対して回路を開発する必要がある。また、GAGG や Si-PM はまだ宇宙で使われたことがなく、 宇宙での可用性を検証することも重要な課題となる。

### 1.2 研究目的

CUBES は小型相乗り衛星に搭載するため、電子回路的制限とサイズ的制限を強く受ける。そのため、これらの厳しい条件下において、放射化によるガンマ線輝線を検出できるエネルギー分解能 (j10%@662keV) と SAA 中のハイレートでもなるべく処理できる早い処理速度を実現しなければならない。また、SAA 中のような高放射線領域で GAGG シンチレータがどのような振る舞いをするのか、シンチレータの特性はシンチレータの形状によってどのように変わるかなどを理解しておく必要がある。

そこで本研究では、各シンチレータの読み出し回路がどの程度までの高速化に対応できるかを研究し、 回路の開発を行うことを目的とする。また、新規開発され、軌道上での運用実績がまだない GAGG シンチ レータの基礎特性を明らかにする。

# 第2章 CUBESと放射線観測

# 2.1 CUBES - CUbesat x-ray Background Explorer using Scintillators -

CUBES は、スウェーデン王立工科大学のプロジェクト KTH Student Satellite Project という学生が主体で作る CubeSat:MIniature STudent satellite(MIST)の検出器の一つである。この MIST 衛星は 3U型 (100mm×100mm×300mm)の CubeSat であり、CUBES を含め計7つの実験が計画されている。

 CUBES の仕様を以下の表 2.1 にまとめた。括弧書きは MIST 衛星全体での値である。また、右側の図

 2.2 は、想定される CUBES 完成時の外形である。



図 2.1: CUBES の主な仕様

図 2.2: CUBES 外形

CUBES は、衛星軌道上での放射線環境を調べることを目的に計画されており、検出器としては、シンチ レータと Silicon Photomultiplier(Si-PM) を用いる。これらのシンチレータや Si-PM に関しては以降の節 で述べる。

CUBES は以下の大きく3つの構成要素に分けられる。

○3つのシンチレータ

放射線を接続した光検出器で検出可能な可視光 (シンチレーション光) に変換する

- $Ce Gd_3Al_2Ga_3O_{12}(GAGG)$
- $Bi_4Ge_3O_{12}(BGO)$
- プラスチックシンチレータ
- ◦シンチレータと光を読み出す光センサー Si-PM

シンチレーション光を電荷信号に変換する。

○ 電子回路

信号処理回路、電源制御回路、メモリなどの電子回路

シンチレータは全て1辺10mmの立方体であり、これらのシンチレータから出力された光をSi-PMで読み出し、電子回路で処理して地上でそのヒストグラムデータを受信する流れとなる。これらの制御は全て Field-Programmable Gate Array(FPGA)を用いて行う。

# 2.2 CUBESの検出器及び読み出し回路

本節では、CUBES に搭載するシンチレータと、シンチレータからの光を読み出す光検出器から出力さ れたパルスの整形・取り込みまでの過程についてそれぞれ述べる。

#### 2.2.1 シンチレーション原理及び放射線耐性

CUBES では、ガンマ線を検出するためにシンチレータをつけることで、幅広いエネルギー帯での観測 を可能にしている。本項では、シンチレータのシンチレーション原理、放射線耐性について述べる。

シンチレータとシンチレーション原理

放射線により蛍光を発する物質をシンチレータと呼ぶ。物質中を放射線が通過するとき、荷電粒子による電離、ガンマ線によるコンプトン散乱、光電吸収などの相互作用を起こす。れらの相互作用によって、図 2.3 のように物質中の原子の軌道電子が励起される。この励起された電子が基底準位に戻るときに放射する 光をシンチレーション光という。この時に放出される光量は、放射線のエネルギーに比例するため、この光 を後段の光検出器で観測することで放射線のエネルギーを測定することができる。



図 2.3: シンチレーション原理の例 [6]

シンチレータは大きく無機シンチレータと有機シンチレータに分けられる。前者は無機物の結晶を利用 したシンチレータであり、無機結晶は密度が高いため、高エネルギーのガンマ線でも光電吸収を起こし、捉 えることができる。一方、後者はプラスチックなどの中に有機発光物質を混ぜたものであり、一般に応答速 度が数 ns と早く、コンプトン散乱を起こしやすい。将来ガンマ線バーストの偏光を観測する SPHiNX 実験 では、シンチレータ中での散乱が入射ガンマ線の偏光方向と垂直に起こりやすいことを利用する。つまり、 ガンマ線バーストからのガンマ線を、コンプトン散乱しやすい物質(散乱体)を用いて散乱させ、散乱され た光を、散乱体の周りに配置した吸収しやすい物質(吸収体)で吸収させる仕組みである。コンプトン散乱 の反応断面積は原子番号 Z の 1 乗に比例し、光電効果の反応断面積は Z の約4~5 乗に比例する [5]。この ことから、散乱体は Z の小さい有機シンチレータを、吸収体としては Z の大きい無機シンチレータを用い るのが良い。

### シンチレータの放射線耐性

放射線が人体の DNA を破壊するのと同様、シンチレータも放射線によって損傷を受け、シンチレータ の性能が劣化するなどの不都合が生じることがある。プラスチックシンチレータのような有機シンチレー タは結晶構造を持たないため、強い放射線でも損傷を受けにくく、放射線耐性が良い。一方無機シンチレー タは放射線によって以下の大きく4つの影響が見られる [7]。

1. カラーセンター生成による透明度の低下

- 2. シンチレーション過程へのダメージ
- 3. 燐光によるノイズの増加
- 4. 自己放射化

これらは高放射線量による格子欠損や不安定同位体の生成に起因する。

1 はその格子欠損がホールや電子を捕捉することによってカラーセンターが生成され、特定の波長を吸 収してしまう(透明度が下がる)現象である。これによって光量の減少が発生する。

2 では、格子欠損によって電子がエネルギー準位を落とすときに、シンチレーション光を出す準位を経ず に熱として変換されてしまう現象である。これによって光量の減少が発生する。

3は、格子欠損によって電子がトラップされるか、遷移時間の長い別の準位を経ていくために発生するもので、これによって燐光が発生し、暗電流の増加を引き起こす。

4 は、反応を起こす粒子が特に陽子や中性子のときに、シンチレータと原子核反応を起こして放射性同 位体となり、シンチレータ自体がガンマ線などの放射源となってしまう現象である。これによってシンチ レータ自身から放出された放射線を自分で観測してしまい、バックグラウンドの原因となる。

シンチレータにも依るが、これらの放射線損傷は常温でも自発的にアニールすることによって、元の性 能を取り戻す場合もある。

#### シンチレータと光検出器の接続

シンチレータと光検出器の受光面の屈折率の違いから、両者を直接接触させて測定すると大幅な光量の 損失となる。そこで、本実験では接触面にオプティカルグリスを塗布する。本実験で用いるオプティカルグ リスは、TANAC 社の TSK2525 であり、これはシンチレータや Si より小さい屈折率 n=1.453(@25°C)を 持つ。これを使うことによって、斜めからきたシンチレーション光が接触面で全反射せずに後段の光検出器 まで届けることができる角度を広げることができる。また、発生したシンチレーション光が漏れ出るのを 防ぐために、シンチレータと光検出器をバルカテープや白色のゴアテックスで覆う。このバルカテープは、 シンチレータを固定する目的も孕んでいる。これらを図に表したのが下図 2.4 である。



図 2.4: シンチレータと光検出器の接続

### 2.2.2 CUBES 搭載シンチレータ

CUBES には Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>(BGO)、Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub>(GAGG)、プラスチックシンチレータの3種類のシン チレータを搭載する。これらは将来計画の SPHiNX 衛星で利用する予定がある。SPHiNX 衛星では偏光情 報を測定するために、コンプトン散乱の異方性を用いる予定があり、散乱体としてプラスチックシンチレー タ、吸収体として BGO か GAGG の利用を計画している。以下に、それぞれのシンチレータの特徴と、実 験で用いるシンチレータの形状について表 2.1 にまとめた。また、図 2.5、2.6、2.7 はそれぞれ今回の実験 で用いるプラスチックシンチレータ、BGO、GAGG の実物の写真である。

	プラスチックシンチレータ (EJ-204)	$BGO(Bi_4Ge_3O_{12})$	$GAGG(Gd_3Al_2Ga_3O_{12})$
<b>密度</b> (g/cm)	1.03	7.13	6.63
<b>応答速度</b> (ns)	2.2	300(室温)	88( <b>室温</b> )
発光量 (photon/MeV)	$\sim 1000(-60^{\circ}C \text{ to } +20^{\circ}C)$	8000( <b>室温</b> )	60000( <b>室温</b> )
屈折率	1.58	2.15	1.93
Peak emission(nm)	4.8	480	520
実験で用いる形状 (mm)	$5 \times 10 \times 1.5$	$10\times10\times10$	$5 \times 5 \times 5, 5 \times 5 \times 10, 5 \times 5 \times 20,$
			$5 \times 5 \times 30, 10 \times 10 \times 10$

#### 表 2.1: シンチレータの特徴



図 2.5: プラスチックシンチレータ



🗷 2.6: BGO

🗷 2.7: GAGG

プラスチックシンチレータは応答が早いが、発光量が少ない。また、密度が小さいため、コンプトン散 乱を起こしやすいため、散乱体としての利用のための試験となる。本実験では Eljen 社の EJ-204 という高 速計数用のプラスチックシンチレータを用いる。

BGO は密度が大きいため吸収体として機能するが、応答が遅く常温では発光量が小さい。一方 GAGG は、応答がある程度速く光量も多いため、近年期待されている物質である。しかし、まだ宇宙に打ち上げられた ことが無い物質であり、放射線耐性など分かっていないことが多い (2016 年 2 月 12 日に打ち上げられる、 次期 X 線国際天文衛星である ASTRO-H の相乗り小型衛星: ChubuSat-2(名古屋大学) が最初の宇宙利用 となる)。本実験では用いる GAGG の形状も多様にし、GAGG の形状依存を調べることも狙っている。

### 2.2.3 半導体光検出器 (Multi-Pixel Photon Counter)

放射線を検出する光センサとして、光電子増倍管 (PMT) やフォトダイオード (PD)、アヴァランシェフォ トダイオード (APD)、Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) などが挙げられる。なお、MPPC は浜松ホト ニクス社の登録商標であり、一般的には Si-PM と呼ばれる。以下にそれぞれの検出器の特徴を表 2.2 にま とめた。[1]

	大きさ (mm)	動作電圧 (V)	<b>量子効率</b> (%)	ゲイン	ゲインの
					温度依存性
光電子増倍管 (PMT)	10 ~ 760	800 ~ 1800	20 ~ 30	$10^5 \thicksim 10^8$	小
フォトダイオード (PD)	$0.1 \sim 30$	~ 100	~ 80	1	小
アヴァランシェフォトダイオード (APD)	$0.2 \sim 10$	<b>~</b> 400	~ 80	$1 \sim 100$	中
Multi-Pixel Photon Counte(MPPC)	1~6	$50 \sim 70$	~ 80	$10^5 \thicksim 10^6$	大

表 2.2: 光センサ性能比較 [1]

CUBES は小型の人工衛星に搭載することから、サイズ、消費電力などに大きな制限がかかる。このこ とを踏まえると、PMT はゲインは大きいが、ある程度の空間的大きさを必要とするし、動作電圧が 1000V 程度と大きいため本プロジェクトには適さない。また、PD や APD は PMT よりも格段に小型であるが、 増幅率が小さく動作電圧も数 100V 程度必要となる。一方、MPPC は小型で動作電圧も 100V 以下で良く、 増幅率も大きい。短所としてはゲインの温度依存性が激しいこと、宇宙で使われた実績が無いことが挙げら れる (GAGG 同様、これも ChubuSat-2 で最初の宇宙利用となる)。以上のことを考慮すると、CUBES で は MPPC が最も適する光検出器であると言える。以下に MPPC の動作原理を述べた。

#### MPPC の動作原理

MPPC は、APD をクエンチング抵抗を介して並列接続し、マルチピクセル化した構造を持っている (図 2.8)。それぞれの APD は降伏電圧以上 (ガイガーモード) で動作しているため、フォトン検出時に入射フォトン数に依らない、一定のパルスを出力する。以下の図 2.9 は MPPC の概念図である。



図 2.8: MPPC の等価回路 [3]

図 2.9: MPPC の概念図 [2]

今、MPPCの1ピクセルにフォトンが入射したとすると、その光エネルギーにより電子-正孔対が発生す る。この時できた電子-正孔対は、印加されている逆電圧によって正孔はp<sup>+</sup> 側へ、電子はn<sup>++</sup> 側へ加速され、 アバランシェ層で雪崩増幅を引き起こす。これによって出力された電荷はクエンチング抵抗を通って流れだ す。そのため、逆電圧は一時的に降伏電圧以下に下がり、放電現象は終了する。その後は APD は再充電を行 い、逆電圧が降伏電圧まで回復することで次のパルスに備える。以上がパルス出力までの流れである。それ ぞれの APD は並列接続されているので、最終的に出力される波形はそれぞれの APD から出力される波形 を足し合わせた形となる。本実験では、テスト用の MPPC として浜松ホトニクス社の S10362-33-100C(受 光面:3mm×3mm)を使い、フライトモデル (FM 品) として、同社の S13360-6050CS(受光面:6mm×6mm) を用いる。

### 2.2.4 信号処理回路

本項では、MPPC から出力された波形を整形・増幅し、デジタル回路へと受け渡すまでの過程を述べる。 大まかには以下の下図 (図 2.10) の通りである。



図 2.10: 回路概念図

MPPCから出力された電荷信号を前置増幅器で電圧信号に変換し、微分・積分回路を通してガウシアンに 近い形に整形している。その後反転増幅器で適切なゲインで反転増幅させる。本実験では、前置増幅器~反 転増幅回路を開発していく。これらの回路を通した波形は、当面はAmptek社のPocketMCA(MCA8000A) を用いてピークホールド、デジタル化し、パソコンでデータ取得を行なう。実際に CUBES に載せる回路では、最後のディジタル回路部分まで開発することになる。

本実験では、前段の前置増幅器を作成し、既成品の整形増幅器 (EG&G Ortec 571:以下 Ortec571) を用 いて読み出すことで、前置増幅器の回路定数を決定する。この Ortec571 は 0.5µs,1µs,2µs,3µs,6µs,10µs で 整形時定数を変化させることができる。

以下にそれぞれの回路について述べる。

#### 前置増幅器

MPPC から出力される信号は瞬間的なパルス状であり、インピーダンスも大きいため直接測定すること は難しい。そこで、本研究で用いる回路では、入力インピーダンスの小さい前置増幅回路を MPPC の直後 に接続することで微弱な電荷信号を積分し、電圧信号に変換している。[4] 図 2.11 は本実験で用いる前置増幅回路の回路図である。



図 2.11: 前置増幅器の回路図

この回路の出力電圧  $V_{out}$  は、MPPC から出力された電荷を Q、コンデンサの静電容量を  $C_f$  とすると、

$$V_{out} = -\frac{Q}{C_f} \tag{2.1}$$

となる。また、この時のパルスの減衰時間 $\tau_f$ は抵抗値 $R_f$ と静電容量 $C_f$ の積なので、

$$\tau_f = R_f \times C_f \tag{2.2}$$

となる。本研究で用いるオペアンプは、Analog Devices 社の AD8057ARZ を用いる。このオペアンプは硬 X 線の偏光を観測する気球実験: PoGOLite にも使われており、高速の処理能力を実現する。また、単電源 でも動作し、負電源を作る必要が無いのも特徴である。

微分+PZC(Pole-Zero Cancellation) 回路

前置増幅器からの出力波形は、シンチレータの発光時定数に従った早い立ち上がりと、前置増幅器の減 衰時定数に従った非常にゆっくりとしたベースラインへの減衰が見られる。このままだと高レート時に後続 のイベントが重なった波形が観測される (図 2.10 参照)。そこで、前置増幅器の後段に微分回路を接続する ことで、ベースラインへの復帰を素早く行う。





図 2.12: 微分回路の回路図

#### 図 2.13: PZC 回路の回路図

図 3.2 のような CR 微分回路のみでは、パルスにアンダーシュートを生じ、高イベントレート時に、パルスを正確に測定することが出来なくなる。そのため本研究で用いる回路では CR 微分回路のコンデンサ C<sub>d</sub> に並列に抵抗 R<sub>p</sub> を接続することにより、アンダーシュートの少ない波形にしている。この時、CR 微分回路の抵抗値を R<sub>d</sub> として、

$$\tau_f = C_d \times R_d \tag{2.3}$$

となるよう設定することで、アンダーシュートは抑えられる。また、回路の整形時定数 *τ*<sub>d</sub> は、

$$\tau_d = \frac{R_p R_d}{R_p + R_d} C_d \tag{2.4}$$

となる [5]。一般に、放射線検出器の微分回路は周波数特性の面からアクティブ回路で作るべきである。しかし CUBES では電力や基板サイズが限られているため、素子数が少なくできるパッシブ回路で作ることとする。

#### 積分回路

微分回路で微分された波形は、立ち上がり時間が非常に早く、最大波高値を維持する時間も短い。そこで、図 2.14 のような積分回路を通して立ち上がり時間を調節することで正確にアナログ-デジタル (AD) 変換を行えるようにする。



図 2.14: 積分回路の回路図

この積分回路によって出力される波形の立ち上がり時定数は、

$$\tau_i = C_i \times R_i \tag{2.5}$$

となる。波形をガウシアンに近い形に整形するために、*T<sub>i</sub>*は PZC 回路の微分時定数と等しくする。

デジタル化する前に、信号のゲインを適切な大きさに設定する必要がある。それがこの反転増幅回路の 役割である。本研究で考案した回路は以下の通りである。



図 2.15: 反転増幅回路の回路図

この回路は微分回路も併用している。その理由として、リニアテクノロジー社の回路シミュレーション ソフト LTspice を用いて、積分回路までをシミュレーションすると、パルスの Rise time に比べて Fall time が長く、ガウシアンからずれていたため、微分回路も併用して Fall time を短くしようと考えたためである。 また、入力のコンデンサに直列につなげてある抵抗  $R_{\rm b}$  は、ゲインを調整し、パルスの発振を抑えるためで ある。この時のゲイン A= $R_{\rm b}/R_{\rm a}$  であり、減衰時定数  $\tau_a = R_{\rm b} \times C_a$  となる。

○Peak Hold 回路とは

PeakHold 回路とは、その名の通り、ピーク値を保持する回路である。一般に、検出器からの信号が最大 波高値を維持する時間は大変短い。そのため、直接波形をデジタル化しようとすると、正確にピーク値を捉 えることが困難になる (高速の処理能力を持った OP アンプが必要)。そこで、以下のような回路を通すこ とで、次の信号が来るまでピーク値を維持することが可能となり、遅いサンプリングレートでも正確に信号 を処理することが可能となる。下図 2.16 は一般的な PeakHold 回路の回路図である。



図 2.16: PeakHold 回路図

今、電圧信号が In から入ってくると、OP アンプとダイオードを通って、コンデンサ電圧が入力電圧と等 しくなるまでコンデンサに電荷が充電される。その後、波形のピークを過ぎてコンデンサ電圧が入力電圧を 下回ると放電が始まるが、ダイオード側にはダイオードの整流作用により電流は流れず、後段の OP アンプは 入力インピーダンスが高いため流れない。これによってピーク時の電圧が保持される。しかしこれでは、次に パルスが来た時に、波高値が積み上げられていくため、コンデンサに溜まった電荷をリセットしなければなら ない。そこで、コンデンサと並列に抵抗を繋ぐことで放電している。この抵抗でリセットする代わりに、フォ トスイッチリレー素子などを使うこともある。また、本実験で用いる PocketMCA(amptek;MCA8000A/D) では、内部で PeakHold が動いている。

### 2.2.5 分解能とノイズ

回路を作成し、データを解析するにあたって、最も重要なパラメータの一つとして、分解能 (Resolution) を定義しておく。本研究で出てくる分解能は、スペクトルを CERN からリリースされているデータ解析ソフ ト ROOT でガウシアンフィットし、そのピーク値 (PeakCh) と半値全幅 (FWHM) から算出する。FWHM は、以下の図 2.17 に示す通り、ガウス分布の最大値の半分の値を取るところの幅で定義される。



図 2.17: FWHM の定義

FWHM は、ガウシアンの分散を  $\sigma^2$  とすれば、次式 (2.6) で書ける。

$$FWHM = 2\sigma\sqrt{2\ln^2} \simeq 2.35\sigma \tag{2.6}$$

と書ける。この FWHM を用いて、本研究で用いる分解能は下式 (2.7) で定義する。

$$[Resolution] = \frac{FWHM(ch)}{PeakCh(ch)} \times 100$$
(2.7)

以降、この上式の分解能を用いて評価を行なっていく。ここで、この分解能を決める一因として、ノイズが 大きく関わってくる。アナログ回路におけるノイズ要因は暗電流性ノイズと容量性ノイズに大別され、それ らをまとめた回路雑音  $\delta_{noise}^2$  は以下のように表せる [12]。

$$\delta_{noise}^2 = 2q_e (I_{ds}/M^2 + I_{db}F)\tau a_1 + 4kTR_s (C_{tot}^2/M^2)(1/\tau)a_2$$
(2.8)

ここで、 $q_e$  は電気素量、 $I_{ds}$  は MPPC の表面電流、M は MPPC の増幅率、F は過剰維音係数、 $\tau$  はプリ アンプの時定数、k はボルツマン定数、T は絶対温度、 $R_s$  はプリアンプの雑音抵抗、 $C_{tot}$  は MPPC 容量 とプリアンプの容量を足したもの、 $a_1 \ge a_2$  はフィルター特性によって決まる係数である。右辺第1項が暗 電流性ノイズを、右辺第2項が容量性ノイズを意味する。本来は右辺に1/f ノイズも加わるが、これは整形 時定数に依存せず、今回は寄与が小さいとして無視する。

# 第3章 読み出し回路の開発・作製

本章では、MPPCからの信号を読み出し、整形する回路を作製する。まず CUBES で要求される仕様を 述べた後、読み出し回路の作製方法を示す。その後、それぞれのシンチレータに関して、回路パラメータを 変えて測定を行い、最終的に採用する回路の仕様を決定する。

# 3.1 CUBES での要求仕様

CUBES ミッション要求としては、SPHiNX 衛星を見据えたものとなる。また、小型衛星ゆえの制限も 存在する。要求仕様は以下の通り。

- プラスチックシンチレータは SPHiNX において散乱体として用いるため、50keV~100keV(可能ならば 200keV) を観測帯域とする。
- BGO,GAGG は将来 SPHiNX 衛星において吸収体として用いるため、100keV~1 MeV(可能なら 2MeV)を観測帯域とする。また、放射化によって生じる 511keV などの輝線を判別できるエネルギー 分解能 (10%@ 662keV) を持つこと。
- 可能な限り早い (1µs 以下) 処理速度。
   (最もハイレートな状況が予想される南大西洋異常帯 (SAA) 中では、東工大の Cute-1.7+APDII の観 測データ [8] より、カウント数が 10<sup>6</sup> count/16sec にも上る。)
- 4. 低消費電力。
- 5. 5cm × 5cm の基板に収まること。

このうち、1,2 の SPHiNX 衛星では検出器を冷却することができ、観測範囲の下限はプラスチックシンチ レータでは数 keV、BGO が 30keV、GAGG は 20keV を達成する必要がある。CUBES では常温 (±20°C) で測定しなければならないため、下限を 100keV とした。



図 3.1: 衛星軌道上で想定されるカウント数 [8]

それぞれのシンチレータで光量が異なるため、前置増幅器のオペアンプの出力限界を超える (サチレーションする)事の無いようにコンデンサ容量 *C<sub>f</sub>*を決定する。また、許される基板サイズが限られているため、使用する素子数をできる限り減らすことが必要となる。

## 3.2 CUBES 用の回路設計

CUBES において、MPPC からの信号を読み出す方法は2つ考えられる。以下に書く、Peak Hold 回路 を通すか否かである。

○Peak Hold 回路を通す方法

この方法は2章で述べたように、一般的な放射線検出器で用いられる方法である。つまり、前置増幅器 からの信号を整形増幅器に通すことで波形整形し、Peak Hold 回路を通して AD 変換する方法である。こ の方法では、Peak Hold をするためサンプリングレートが遅くても良く、AD 変換での省電力が見込める。 しかし、整形増幅器を作製する必要があるため回路素子数が増える。また、1つの読み出し回路にピーク ホールド回路で OP アンプを2つ使用するため、その分の消費電力が増加することが考えられる。

#### ○Peak Hold 回路を通さない方法

この方法は、前置増幅器からの信号をサンプリング AD することで波形データを得て、その波形から Field-Programmable Gate Array(FPGA)で波高値を算出する方法である。この方法は前述の PoGOLite に も使われており、整形増幅器を作らなくても良いため、回路素子数が少なく済む。その一方で、ADC で高 速のサンプリングレートが必要となり、デジタル回路での消費電力が多くなることが予想される。 ○ 上記 2 つの方法について、消費電力を概算した結果が以下の通りである。3 個のシンチレータを処理 することを想定している。

FPGA 部分の消費電力は、計算で求めることは困難であるため、記載していない。しかし、両方の回路で 大まかに同程度の電力を消費すると考えられる。

Peak Hold	$\mathrm{ChargeAmp} \rightarrow$	$\mathrm{ShapingAmp} \rightarrow$	Peak Hold $\rightarrow$	差動アンプ	$\mathrm{ADC} \rightarrow$	FPGA
有り	OP アンプ×3	OP アンプ×3	OP アンプ×6	不要	ADC	Peal Hold
消費電力	$\sim 75 \mathrm{mW}$	$\sim 60 \mathrm{mW}$	$\sim 300 \mathrm{mW}$	$0 \mathrm{mW}$	$\sim 10 \mathrm{mW}$	リセット機能
無し	OP アンプ×3	不要	不要	OP アンプ×3	ADC	波高計算機能
消費電力	$\sim 75 \mathrm{mW}$	$0 \mathrm{mW}$	$0 \mathrm{mW}$	$30 \mathrm{mW}$	$\thicksim 300 \mathrm{mW}$	

上表を見ると、Peak Hold 回路を通さない方が (FPGA 以外での) 消費電力が少なく、ShapingAmp を作 らなくても良いため、素子数の削減が見込める。以上の理由から、現状では CUBES は Peak Hold をせず に、ChargeAmp からの波形をそのまま ADC に通す方法が良いと考えられる。 以上、本研究ではどちらの回路にも必須である前置増幅器までを開発する。

# 3.3 前置増幅器

### 3.3.1 前置増幅回路開発用基板の作製

初めに、初段の前置増幅器開発用基板を作製した。できた回路は以下の図 3.3 であり、その回路図を図 3.3 に載せた。



図 3.2: 作製した前置増幅器



図 3.3: 前置増幅器回路図

ユニバーサル基板上で作製しており、遮光とノイズ防止のため、アルミシャーシ中に収めてある。また、 前置増幅器の抵抗 *R*<sub>f</sub>、*C*<sub>f</sub>部分はソケット状にすることで、差し替えて回路定数を変化させることを可能 にしている。

この前置増幅器の動作は単電源電圧  $V_{cc} = 3.6$ V、基準電圧  $V_{ref} = 2.6$ V で行なっている。

#### 3.3.2 コンデンサと抵抗値の選定

前置増幅器の適切なゲイン (コンデンサの静電容量 *C<sub>f</sub>*)を決定するため、コンデンサ容量と分解能の関係を求めて選定に用いる。

実験の手順としては、まず適当な抵抗とコンデンサをつけた状態で、各シンチレータについて Ortec571 の 整形時定数を変えて測定を行い、最適な時定数に設定する。その後、前置増幅器の時定数  $\tau_f = R_f \times C_f = 1 \mu s$ になるように  $R_f \ge C_f$ を適当に選んで測定を行う。市販の固定抵抗、コンデンサでは、ちょうど良い値がな い場合がある。その場合は  $\tau_f$  が  $1 \mu s$  になるべく近くなる抵抗、コンデンサを用いた。これを各シンチレー タについて行うことによって、それぞれのシンチレータについて適切な前置増幅器のゲインを決定する  $C_f$ の値を決定することができる。そうして決めたコンデンサの静電容量で固定したまま、抵抗値を変えること で時定数を変化させ、最適な時定数を求めていく。この時使用した MPPC は 3mm×3mm の受光面を持つ S10363-33-100C という MPPC である。動作電圧は 72V(breakdown 電圧+2V) で行った。それぞれのシン チレータに関する測定結果を述べる。

#### プラスチックシンチレータ

前述の通り、プラスチックシンチレータではなるべく低エネルギー側を観測したい。そのため、実験で はガンマ線源である <sup>241</sup>Am の 59.5keV の光電吸収ピークを用いるべきであるが、回路定数が適切でない状 態で <sup>241</sup>Am のピークを見ることは難しいため、<sup>137</sup>Cs のコンプトンエッジ (477.4keV) を用いて Ortec571 の整形時定数を決定する。図 3.4 がその結果である。この時の回路定数  $R_f = 1000$ pF、 $C_f = 100$ kΩ、測定 時間それぞれ 10 分である。





Fitting Result								
Color Shaping time(µs) Resolution(								
	0.5	21.4±0.7						
	1	$22.6 \pm 0.8$						
	2	$25.5 \pm 0.6$						
	_							
	3	$26.1 \pm 0.6$						
	~	000100						
	D	$30.2\pm0.3$						
	10	466±06						

図 3.4: Shaping time を変えた時のスペクトル

黒線で 2000ADC チャンネル付近にあるピークが <sup>137</sup>Cs の 662keV によるコンプトンエッジである。図 の横に色と Shaping time、エネルギー分解能を示した。これを見ると、Shaping time が  $0.5\mu$ s と小さい時 に良い分解能を持つことが分かる。Shaping Amp はバンドパスフィルターであり、狙った周波数帯だけを 通すように設計されている。プラスチックシンチレータは応答が早いため、Shaping Amp の整形時定数が 早い(高周波)時に真のパルスを通し、ノイズ成分を通しにくくなる。その結果 Signal-Noise(SN)比がよく なり、結果的に分解能が良くなったと考えられる。以降、プラスチックシンチレータについては Shaping Amp(Ortec571)の整形時定数を 0.5µs で測定を行うことにする。

次に前置増幅器 (プリアンプ) コンデンサ容量  $C_f$  を決定する。この時の線源は <sup>241</sup>Am(59.5keV) で行った。以下に前置増幅器の時定数を  $\tau_f = 1\mu$ s で固定したままコンデンサの静電容量を変化させて測定した時の結果を載せた。(表 3.1)

静電容量 $C_f(pF)$	抵抗値 $R_f(\mathbf{k}\Omega)$	時定数 $ au_f(\mu s)$	PeakCH	FWHM(CH)	分解能 (%)
3300	0.3	0.99	$40\pm2$	$41\pm3$	$104 \pm 8$
2200	0.47	1.034	$164 \pm 1$	$101\pm3$	$61\pm2$
1000	1	1	$183 \pm 9$	$133 \pm 17$	$73\pm9$
470	2.2	1.034	$432\pm5$	$256{\pm}14$	$60\pm3$
220	4.7	1.034	$1016\pm8$	$610{\pm}17$	$60\pm2$
100	10	1	$2040{\pm}30$	$1003 \pm 83$	$50\pm4$
47	22	1.034	$3927 \pm 37$	$2277{\pm}83$	$58\pm2$
33	30	0.99	$4927{\pm}36$	$1965 \pm 84$	$40\pm2$
22	47	1.034	$5648{\pm}73$	$2522{\pm}143$	$45\pm2$

表 3.1: 前置増幅器のコンデンサ容量 C<sub>f</sub> を変化させた時の分解能の変化

これを見ると、コンデンサの静電容量が小さいほど良い分解能を持ち、 $C_f = 33p$ Fの時が最良の分解能を持つことが分かる。また、それ以上静電容量を小さくすると、分解能が悪くなっている。これらの理由として、まずプリアンプのノイズ要因を考える。 $C_f$ は小さいほどプリアンプのゲインは大きくなる。このため、 $C_f$ が小さいほど後段回路のノイズの影響を小さく抑えられる。また、ある程度以上にコンデンサ容量を小さくしすぎると (ゲインを上げ過ぎると)、OPアンプの周波数特性が悪くなる。以下図 3.5 に OP アンプ AD8057ARZ のデータシートから、小信号時のゲインと周波数特性のグラフを抜粋した。



図 3.5: 小信号時の周波数特性 [9]

プラスチックシンチレータは応答が 2.2ns と速く、高周波である。上のグラフ (図 3.5) より、一般的には OP アンプはゲインが大きいほど周波数特性が悪くなり、高周波ほど増幅率が小さくなる傾向にある。以上 のことより、*C<sub>f</sub>* はなるべく小さく、かつ OP アンプの周波数特性を考慮した値を選ぶと良い分解能が得ら れることが分かる。

ただし、 $C_f = 33pF$ だとゲインが大きく、100keV以上を測定した時にオペアンプがサチレーションする可能性があるため、オペアンプの出力限界の余裕を見て、 $C_f = 100pF$ が良いと考えられる。次に、 $C_f = 33p$ を固定して、 $R_f$ を変えることで、最適な時定数を求める。下表 3.2 がその結果である。

抵抗值 $R_f(\mathbf{k}\Omega)$	時定数 $ au_f(\mu s)$	PeakCH	FWHM(CH)	エネルギー分解能(%)
1	0.1	$631 \pm 7$	$367\ \pm 17$	$58 \pm 3$
3	0.3	$1493{\pm}14$	$790~{\pm}28$	$53\pm2$
5.1	0.51	$1910{\pm}22$	$829\ \pm 56$	$43 \pm 3$
10	1	$2465{\pm}25$	$1442\ \pm 57$	$59\pm2$
27	2.7	$2939{\pm}28$	$1674\ \pm 59$	$57\pm2$
51	5.1	$3123{\pm}26$	$1844\ \pm 55$	$59\pm2$
100	10	$3072{\pm}26$	$1586\ \pm 56$	$52\pm2$
150	15	$2748{\pm}28$	$1553\ \pm 56$	$56\pm2$
200	20	$2601{\pm}49$	$1379\ \pm 88$	$53 \pm 3$
240	24	$2402{\pm}25$	$1320\ \pm 54$	$55\pm2$
300	30	$148\pm2$	$105~\pm4$	71±3

表 3.2: 前置増幅器時定数を変化させた時の分解能の変化

これを見ると、300kΩ を除いて全てが近い分解能を持っている。つまり、このプラスチックシンチレータの光量では、エネルギー分解能は抵抗値(時定数)にはあまり依存しないことが分かる。また、100kΩ以下の抵抗値までは、抵抗値を大きくするにつれてピーク位置が大きい値を持つようになるが、100kΩ以上では、逆に小さくなっていることが分かる。これは、抵抗値を大きくすることによって、前置増幅器の時定数が長くなり、Shaping Amp の時定数 0.5 $\mu$ s で電荷を積分する時間が増えることに起因する。また、100kΩ以上の抵抗値の場合は前置増幅器の時定数が、MPPC と OP アンプの間の抵抗  $R_G$  とコンデンサが放電する時定数に近くなるため、前置増幅器で積分している間に、すでに信号が減衰しているためと考えられる。

BGO

プラスチックシンチレータと同様に、まず Ortec571 の整形時定数を決める。BGO の測定では、SPHiNX 実験で狙うエネルギー領域を考慮して、線源は <sup>137</sup>Cs を用いた。 $0.5\mu$ s、 $1\mu$ s、 $2\mu$ s、 $3\mu$ s、 $6\mu$ s、 $10\mu$ s と、そ れぞれ測定した結果が以下の図 3.6 である。この時の抵抗値  $R_f$ =200k $\Omega$ 、コンデンサの静電容量  $C_f$ =100pF である。黒線の 700 チャンネル付近に見えるピークが <sup>137</sup>Cs の 662keV の光電吸収ピークである。



図 3.6: Shaping time を変えた時のスペクトル

これを見ると、整形時定数 3µs の時が最も良い分解能を持つことが分かる。この結果は、BGO の応答時 間が 300ns と遅いことから出た結果であると考えられる。

次に、プリアンプのゲインを決めるコンデンサの静電容量 *C<sub>f</sub>* の値を決める。時定数を一定のまま、コンデンサの静電容量を変化させた結果が以下の表である。

静電容量 $C_f(pF)$	抵抗值 $R_f(\mathbf{k}\Omega)$	時定数 $ au_f(\mu s)$	PeakCH	FWHM(CH)	分解能 (%)
4700	0.2	0.94	$10.59{\pm}0.09$	$9.5 \pm \ 0.3$	$90{\pm}3$
1000	1	1	$131.1{\pm}0.2$	$37.2{\pm}0.6$	$28.3{\pm}0.4$
470	2.2	1.034	$286{\pm}0.5$	$76\pm 1$	$26.7{\pm}0.5$
100	10	1	$1375 \pm 1$	$304 \pm 3$	$22.1{\pm}0.2$
47	22	1.034	$2753 \pm 4$	$619{\pm}10$	$22.5{\pm}0.4$
10	100	1	$3456{\pm}4$	$840{\pm}~12$	$24.3 \pm 0.3$

表 3.3: コンデンサの静電容量を変化させた時の分解能の変化

これを見ると、コンデンサの静電容量が 100pF の時が最も分解能を持つことが分かる。プラスチックシンチレータの時と同じ理由で、この結果についても考察する。662keV を光電吸収した BGO は、60keV を吸収したプラスチックシンチレータよりも光量が多いため、プラスチックシンチレータの出す信号よりもノイズに強く、後段の処理でノイズに埋もれにくい。また、前述の通り、OP アンプの周波数特性はゲインに依存し、低ゲインであるほど良い周波数特性を持つ (図 3.5)。その結果、BGO はゲインを小さくでき、OP アンプを周波数特性が良い帯域で用いることができたため、プラスチックシンチレータよりも大きい静電容量  $C_f$ =100pF で最も良い分解能を持つのだと考えられる。

コンデンサ $C_f$ の静電容量が決まったので、次は抵抗値を決定する。 $C_f$ の容量を変えずに抵抗値のみを 変化させた時の結果が以下の表 3.4 である。

抵抗值 $R_f(\mathbf{k}\Omega)$	時定数 $ au_f(\mu s)$	PeakCH	FWHM(CH)	分解能 (%)
1	0.1	$160.1{\pm}0.1$	$49.3 \pm 0.3$	$30.8{\pm}0.2$
4.99	0.499	$439.6{\pm}0.4$	$116.2{\pm}0.8$	$26.4{\pm}0.2$
10	1	$680{\pm}0.7$	$154\pm2$	$22.7{\pm}0.3$
15	1.5	$1066 \pm 1$	$237 \pm 4$	$22.3{\pm}0.4$
20	2	$1617 \pm 2$	$340\pm5$	$21{\pm}0.3$
24	2.4	$1748 \pm 2$	$357\pm5$	$20.4{\pm}0.3$
30	3	$1567 \pm 2$	$322\pm5$	$20.6{\pm}0.3$
39	3.9	$2046{\pm}3$	$403 \pm 8$	$19.7{\pm}0.4$
51	5.1	$2232\pm2$	$461 \pm 7$	$20.6{\pm}0.3$
62.2	6.22	$2358 \pm 3$	$491\pm8$	$20.8{\pm}0.3$
110	11	$2718{\pm}3$	$758\pm7$	$22.7{\pm}0.2$
200	20	$2600{\pm}2$	$580\pm8$	$22.9{\pm}0.2$
390	39	$1209 \pm 2$	$543\pm 6$	$45\pm0.5$

表 3.4: 前置増幅器時定数を変化させた時の分解能の変化

これを見ると、 $R_f$ =39k $\Omega$  で分解能が最小となり、その値から外れるほど分解能が悪くなっているのが 分かる。これは、この時の時定数  $\tau_f$ =3.9 $\mu$ s が、BGO の時定数に対応する周波数でバンドパスフィルタを 形成し、信号はよく通してノイズは通しにくくなるため、分解能が良いと考えられる。プラスチックシン チレータの時は光量が小さかったため、時定数に依る分解能の変化は見られなかったが、BGO ではプラス チックシンチレータよりも光量が多く、光子数による統計的なゆらぎが小さいため、このように時定数に顕 著な極値を持ったと考えられる。

GAGG

次に GAGG シンチレータについて前置増幅器の時定数を決定する。この時の線源は <sup>137</sup>Cs(662keV)を用いた。また、シンチレータのサイズは 10mm×10mm のものを使用した。測定時の抵抗値  $R_f$ =100kΩ、コンデンサの静電容量  $C_f$ =100pF まず、Ortec571 の整形時定数を変えた時のスペクトルと、フィッティングして得られたエネルギー分解能 (@662keV) を以下の図 3.7 に示す。黒線の 1250 チャンネル付近のピークが 662keV の光電吸収ピークである。



図 3.7: Shaping time を変えた時のスペクトル

この結果から、時定数は 0.5µs が一番良いことが分かる。これは GAGG シンチレータの応答速度が 88ns と速いためである。また、これを見ると、時定数を合わせる前から光電吸収ピークがはっきりと見えている こと分かる。このことからも GAGG の光量が、プラスチックシンチレータや BGO よりも十分多いことが 分かる。

次に、プリアンプの静電容量を決定する。静電容量を変えて測定を行った結果が以下の表 3.5 である。 100pF ではゲインが大きかったため、後段の Shaping Amp のゲインを 1/2(実質 0.52 倍)、MCA の測定レ ンジを元々の 10V から 5V(Shaping Amp のゲインと、MCA レンジの変更で積算 0.26 倍) にして測定を行 なった。

静電容量 $C_f(pF)$	抵抗值 $R_f(\mathbf{k}\Omega)$	時定数 $ au_f(\mu s)$	PeakCH	FWHM(CH)	分解能 (%)
2200	4.7	10.34	$233.7{\pm}0.1$	$21{\pm}0.3$	$9.0{\pm}0.1$
1000	10	10	$268.8{\pm}0.1$	$24.4 {\pm} 0.3$	$9.1{\pm}0.1$
560	18	10.080	$475.9{\pm}0.2$	$42.4 {\pm} 0.5$	$8.9{\pm}0.1$
220	47	10.34	$2805 \pm 1$	$248 \pm 4$	$8.9{\pm}0.1$
100	100	10	$1275.8 {\pm} 0.7$	$95\pm2$	$7.5 {\pm} 0.2$

表 3.5: コンデンサの静電容量を変化させた時の分解能の変化

この表から、誤差の範囲内ではあるが、コンデンサの容量は小さいほうが分解能が良い傾向がある。これは、容量が小さいとゲインを大きく取ることができ、後段の処理で乗るノイズに強いパルスにできること。また、抵抗値が大きくなるため、抵抗に流れる電流が小さくなり、抵抗自体が発するジョンソン(熱) ノイズが減ることなどが原因であると考えられる。

GAGG は光量が多いため、100pF でも OP アンプがサチレーションしている可能性がある。そのため、 SPHiNX で目標とする  $1 \sim 2$ MeV を捉えることはできない。本研究では、十分に余裕があり、分解能もある 程度良い、 $C_f = 560$ pF でゲインを決定する。 次に、この決定したゲインで、前置増幅器の時定数を決定する。以下に、コンデンサの静電容量を $C_f$ =560pFで固定したまま抵抗値を変化させた時の測定結果を表 3.6 にまとめた。

抵抗值 $R_f(\mathbf{k}\Omega)$	時定数 $ au_f(\mu s)$	PeakCH	FWHM(CH)	分解能(%)
0.1	0.1	$163.7 {\pm} 0.2$	$13.6 {\pm} 0.6$	$8.3 {\pm} 0.4$
0.51	0.2856	$683.8{\pm}0.6$	$57\pm2$	$8.3{\pm}0.3$
1	0.56	$1039.2{\pm}0.9$	$83\pm2$	$8.0{\pm}0.2$
5	2.8	$1738\pm2$	$135\pm 5$	$7.8{\pm}0.3$
10	5.6	$1869 \pm 1$	$154 \pm 3$	$8\pm0.2$
120	67.2	$2025 \pm 2$	$170 \pm 6$	$8.4 {\pm} 0.3$

表 3.6: 前置増幅器時定数を変化させた時の分解能の変化

この表を見ると、プリアンプの時定数が2.8µsの周辺で最も良い分解能をとっている。これは、ノイズ 成分は早い時定数を持つため、プリアンプ時定数が早すぎるとノイズまで通してしまうことに依るものと 考えられる。

ここまでの実験では、2009 年製の 3mm 角の MPPC を用いてきたが、この MPPC は旧式であり、暗電 流性ノイズが多いと考えられる。今後は、実際に CUBES に搭載予定の MPPC の性能評価のため、受光面 6mm×6mm の 2015 年製 MPPC(S13360-6050CS) を用いて実験を行なっていく。この新型の MPPC は、暗 電流、クロストークが提言され、動作電圧も 50V 程度と低い電圧での動作が可能となっている。

# 第4章 GAGGシンチレータの基礎特性評価

これまでの章では、回路が正しく動作しているかの確認も兼ねて、受光面が3mm×3mmのMPPC(S10362-33-100C)を用いて測定を行なってきた。しかし新型のMPPCが開発されたため、CUBESに搭載するMPPC は受光面6mm×6mmのMPPC(S13360-6050CS)を予定している。以降の実験ではこの新型の6mm角の MPPCを用いて実験を行なっていく。まず、MPPCにつけるGAGGの形状によって、エネルギースペク トルがどのように変化するかを確認する。これは、SPHiNX衛星でのシンチレータの形状を決めるデータ にもなる。その後、GAGGシンチレータに宇宙で想定されるよりも十分に強い放射線を当て、GAGGシン チレータの放射線耐性、ひいては衛星軌道上での可用性について議論する。

# 4.1 形状依存性

この節では、GAGGの形状を変えた時のエネルギースペクトルの変化を見る。実験に用いるシンチレータ は、2章で述べた通り10mm×10mm×10mm、5mm×5mm×5mm×、5mm×5m×10mm、5mm×20mm、 5mm×5mm×30mmの5種類である。

また、直方体の物に関しては形状依存と同時に放射線 を当てる角度を、MPPCの受光面と垂直と、MPPCの受 光面と並行(右図 4.1 参照)の2種類でも測定を行う。 一般に、シンチレーション波長域とシンチレータ結晶自 身の吸収波長のスペクトルにはほとんど重なりを持たな い(Stokes シフト)。しかし、実際にはドープされた原子 により再度吸収されたり、結晶中の不純物などの影響によ り、自発したシンチレーション光を熱として逃がす、消光 (quenching)現象を起こす準位が存在する。つまり、シン チレーション光がシンチレータ内を通って MPPC へ入射 するまでに減衰することが考えられるのである。形状依存 及び、シンチレータの長い面と短い面で測定するのはこの ためで、図 4.1 のように直方体の結晶の場合、垂直に照射



図 4.1: 形状依存測定

したものは並行に照射するよりもシンチレーション光が通る経路が長いイベントが多くなる。このため、シ ンチレーション光が吸収され、並行照射に比べて垂直照射の方が、MPPCに入る光子数が少なくなる可能 性がある。一方で、放射線がシンチレータを通過する距離が長いほど、反応確率は高くなるため、ある程度 の厚みは必要である。

この実験では、将来の SPHiNX 衛星に向け、反応確率と減衰の寄与の両方の兼ね合いから決まる、GAGG

シンチレータの最適な厚さを研究する。立方体のものに関しては、その対称性から垂直と並行で光量に違い は出ないと想定している。以下にそれぞれのシンチレータに関して、放射線をを MPPC と垂直に照射した ものと並行に照射したものを重ねたエネルギースペクトルを載せる。図 4.2 が 5mm×5mm×5mm、図 4.3 が 5mm×5mm×10mm、図 4.4 が 5mm×5mm×20mm、図 4.5 が 5mm×5mm×30mm、図 4.6 が 10mm×10mm ×10mm のものであり、黒が垂直 (top)、赤が並行 (side) である。



⊠ 4.2: 5mm×5mm×5mm



 $\boxtimes$  4.4: 5mm  $\times 5$ mm  $\times 20$ mm



⊠ 4.3: 5mm×5mm×10mm



⊠ 4.5: 5mm×5mm×30mm



⊠ 4.6: 10mm×10mm×10mm

 $5mm \times 5mm \times 5mm$ の top や、 $5mm \times 5mm \times 10mm$ 、 $5 \times 5 \times 20mm$ 、 $5 \times 5 \times 30mm$ の side については、放射 線照射方向の厚みが 5mm しか無く、またプリアンプのケースのサイズにより線源との距離が遠いため、カウ ント数が少ない。そのため、これらのエネルギースペクトル (図  $4.2 \sim$ 図 4.6) では、 $5mm \times 5mm \times 5mm$ GAGG については 6000 秒の測定を行い、 $5mm \times 5mm \times 10mm$ 、 $5 \times 5 \times 20mm$ 、 $5 \times 5 \times 30mm$ の side に対しては、600秒の測定結果を 15 回分積算 (9000 秒分) した結果である。top と side でスペクトルが高エネルギー側へシ フトしていることが見て取れる。これら全てのスペクトルに対してフィッティングを行った結果が以下の表 4.1 通りである。

形状	照射方向	$\operatorname{PeakCh}(\operatorname{CH})$	$\operatorname{resolution}(\%)$	<b>測定時間</b> (s)
$5 \text{mm} \times 5 \text{mm} \times 5 \text{mm}$	$\operatorname{top}$	$2889 \pm 1$	$7.7{\pm}0.1$	6000
$10 \text{mm} \times 10 \text{mm} \times 10 \text{mm}$	$\operatorname{top}$	$764.3{\pm}0.5$	$8.9{\pm}0.2$	600
$5$ mm $\times 5$ mm $\times 10$ mm	$\operatorname{top}$	$2683\pm2$	$6.7{\pm}0.3$	600
	side	$2743\pm1$	$6.1{\pm}0.1$	9000
$5$ mm $\times 5$ mm $\times 20$ mm	$\operatorname{top}$	$1911{\pm}0.9$	$6.5 {\pm} 0.1$	600
	side	$2110.5{\pm}0.5$	$6.67{\pm}0.06$	9000
$5$ mm $\times 5$ mm $\times 30$ mm	$\operatorname{top}$	$1706.6 {\pm} 0.5$	$7.05{\pm}0.08$	600
	side	$1839.4 {\pm} 0.5$	$10.32{\pm}0.06$	9000

表 4.1: GAGG シンチレータエネルギースペクトルの形状及び照射方向依存性

同じ形状のシンチレータで top と side の PeakCh 比較すると、いずれも side の方が大きい値をとってい ることが分かる。また、top を比較すると、細長い形状のものほど PeakCh が小さい値を持っていることが 分かる。これらは前述の通り、シンチレータ自身による吸収が現れているためであると考えられる。また、 10mm×10mm×10mm のものでは、大幅に光量が減少している。これは、MPPC の受光面が 6mm×6mm であることから引き起こされると考えられる。シンチレータの 5mm×5mm の面が 6mm×6mm の MPPC に接している場合、発生したほぼすべてのシンチレーション光が MPPC 受光面に入射することになる。一 方で、10mm×10mm の結晶に対し 6mm×6mm の受光面は小さく、受光面に入らない光が多く、反射する 割合が高くなる。そのため、消光する確率も高くなり、光量が大幅に少なくなったと考えられる (図 4.7)。 また、放射線入射方向に対して厚みがあるものほど、分解能が悪化している傾向がある。これもシンチレー h70mm



図 4.7: MPPC 受光面と GAGG サイズ

タが厚いほど、シンチレーション光が内部で消光する確率が上がるため、MPPCに入射する光子数が少な くなるためと考えられる。

## 4.2 放射線耐性

この節では、 $5mm \times 5mm \times 5mm \times 0$  GAGG シンチレータ 15 個に対して、軌道上で想定されるよりも十分に強いガンマ線を照射して、衛星軌道上での GAGG シンチレータの可用性を調べる。この 15 個はシン チレータ製造の際のインゴットやインゴット内での場所が異なる。ガンマ線の照射にあたって、広島大学大 学院工学研究科放射線総合実験棟の <sup>60</sup>Co のガンマ線源を使用した [13]。この放射線源は、1997 年 4 月時点 での強度が 370[TBq] であり、<sup>60</sup>Co の半減期が 5.3 年であることから、実験を行った 2016 年 2 月現在の強 度は  $L \sim 31.1$ [TBq]。放射線が等方的に放射されているとし、線源からシンチレータまでの距離を D[mm]、 線源に向いている GAGG シンチレータの面を S=5[mm]×5[mm]=25[mm<sup>2</sup>]、<sup>60</sup>Co は 1.17MeV と 1.33MeV の 2 本のガンマ線を放出するので、ライン放出率 P=2 として、1 秒間にシンチレータに入射する光子数  $N_0$ は

$$N_0 = \frac{S}{4\pi D^2} LP = \frac{1.24 \times 10^{14}}{D^2} \ [\text{@}/s]$$

ここで、反応断面積を  $\kappa$ [cm<sup>2</sup>/g]、シンチレータの密度  $\rho$ =6.63[g/cm<sup>3</sup>]、シンチレータの厚さ d=0.5[cm] と すると、検出数 *N* は

$$N = N_0 (1 - e^{-\kappa \rho d})$$

と書けるので、コンプトン散乱によってガンマ線が GAGG に落とすエネルギーを E とすれば、GAGG が 吸収するエネルギー  $E_d$  は

$$E_d = N_0(1 - e^{-\kappa\rho d}) \times E$$

ここで、NIST[10] のデータベースから、1.25MeV 領域での GAGG の光電吸収の反応断面積  $\kappa_p$ =2.655×10<sup>-3</sup>cm<sup>2</sup>/g、 散乱断面積  $\kappa_s$ =4.985×10<sup>-2</sup>cm<sup>2</sup>/g であり、コンプトン散乱の散乱角による確率分布より平均散乱角を 20° とすれば、E=572keV。 $E_d$ を GAGG の質量 m で割れば照射量になり、計算して整理すれば

$$\frac{E_d}{m} = \frac{1.36 \times 10^{22}}{D^2} \text{ [eV/kg/s]} \\ = \frac{2.18 \times 10^5}{D^2} \text{ [rad/s]}$$

を得る。本実験では、2度に分けて照射した。一回目の照射は線源中心から平均11.5cmの位置に置き、3時間照射したため、平均線量は180[krad]である。ここで一度GAGGシンチレータを取り出し、目視で変化がないことを確認した上で、光量とノイズレベルの測定を行った。2回目の照射は、1回目の照射が終了して約4時間後に照射を開始し、線源中心から8cmの位置で24時間の連続照射を行った。つまり2.7[Mrad]の照射となる。図4.2が線源室内の写真である。ジャッキを使って線源位置である15.2cm までGAGGを上げている。モニタールームから操作すると、地下から中心の円筒を通って線源がせり上がってくる仕組みである。円筒の周りに扇状に並べてあるのが、個別に袋に入れた5mm角のGAGGである。全ての結晶になるべく同程度の放射線が照射され、スムーズに実験を行えるようにするために、中央の円筒に沿った切り込みを入れたダンボール板にGAGG結晶を固定してある。

衛星軌道上での年間吸収線量は 0.5[krad] である [11]。つまり、本実験では 1 回目の照射で軌道上で想定 される線量の 356 年分、2 回目の照射で 5400 年分、合計約 5756 年分の照射をしたことになる。

本実験でのスペクトル測定は、以下のような測定条件 で行った。

#### 測定条件

・光センサ:浜松ホトニクス社製 光電増倍管 (PMT)
 R7899型 2本

・プリアンプ:クリアパルス社製 CP2869、506E 2個
 ・Shaping Amp:Ortec 社製 Ortec571 2個
 ・恒温槽設定温度:20

○PMT1/2の基準電圧用電源:PLD-36-1.2、PMT1の高電
 圧用電源:PLD-18-2、PMT2の高電圧用電源 PLE-18-2 こ
 れらの電源は全て松定プレシジョン社製のアナログ電源を
 使用した。

○<sup>137</sup>Cs ガンマ線源を一定位置から照射



図 4.8: 実験風景 (線源室内部)

PMT のゲインはほとんど温度には依存しないが、本実 験では純粋に結晶自体のバックグラウンドノイズを見る必

要があるため、温度や光などに依るノイズを遮るために恒温槽を20 に設定している。また、本実験では 早急に測定する必要があるため、PMT を2本使って、同時に2つの GAGG を測定する。その際、それぞ れでゲインが異なるので、前もって線源を照射していない同じ GAGG(サンプル番号0番のもの)を測定し てお互いのゲインと性能を比較した。その結果が以下の表4.2である。測定にあたって、15個の GAGG に 番号を振り、2つの PMT にそれぞれ番号 PMT1、PMT2 という名称をつけた。

PMT 番号	高電圧ソース用電源電圧 (V)	$\operatorname{Peak}(\operatorname{CH})$	$\operatorname{Reaolution}(\%)$
PMT1	+3.0	$2391\pm2$	$8.3{\pm}0.2$
PMT2	+3.1	$2062\pm2$	$8.5{\pm}0.2$

表 4.2: PMT1 と PMT2 の測定条件比較

この表から、PMT1とPMT2は誤差の範囲内で一致する性能を持ち、この高圧電源では、PMT1はPMT2 に比べてゲインが 1.16 倍程度であることが分かる。1回目、2回目の測定順序は同じ順番で測定を行い、 その順序は以下の表 4.3 の通りである。

PMT 番号	高電圧ソース用電源電圧 $(V)$	測定順序 (時系列順)
PMT1	+3.0	$0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \ \rightarrow 4 \ \rightarrow \ 5 \ \rightarrow \ 6 \ \rightarrow \ 0$
PMT2	+3.1	$7 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow 14$

表 4.3: GAGG 試料の測定順番

上表の測定シフト終了後、PMT1は0番のGAGGのまま、PMT2は最初に測った7番のシンチレータ に付け替えてループ測定を行い、エネルギースペクトルの時間変化を観測した。

本実験では、PMT の高電圧ソース用の電源装置にアナログのものを使用し、測定毎に電源装置のつまみ を回して調整するため、小数点第二位以下に不定性がある。これによってゲインにある程度の変動が見られ る。下表 4.4 に PMT1、PMT2 のアナログ電源による不定性をまとめた。本実験では、PMT1 については 1-2 の「2.9V よりの 3.0V(=表示が 2.9V から 3.0V に変わった位置)」、PMT2 に関しては 2-2 の「3.0V よ りの 3.1V(=表示が 3.0V から 3.1V に変わった瞬間)」に統一して行なうよう努めたが、下表から分かる通 り、最大で 6%程度のピーク位置のずれは存在し得ることが分かる。

PMT	測定番号	電圧 (V)	$\operatorname{PeakCH}(\operatorname{ch})$	1-2/2-2 基準の不定性 (%)	NoiseParameter(ch)
PMT1	1-1	3.0V よりの 2.9V	$2247\pm2$	6%	$1.144{\pm}0.003$
	1-2	2.9V よりの 3.0V	$2398\pm2$	_	$1.061{\pm}0.003$
PMT2	2-1	3.1V よりの 3.0V	$1892\pm2$	3.3%	$1.322{\pm}0.004$
	2-2	3.0V よりの 3.1V	$1957 \pm 1$	_	$1.234{\pm}0.005$

#### 表 4.4: 高電圧電源用電源装置による不定性

よって、PMT1 に関しては 6%以下、PMT2 に関しては 3.3%以下のピーク位置のずれは測定誤差とする。 次ページにこの 15 個のシンチレータに、線源 <sup>137</sup>Cs を当てた時のスペクトルを並べて示す。(図 4.2)。

これらのデータを PMT のゲインに依存しない定量的なデータとして扱うにあたって、本論文中では光 電吸収ピーク位置に対する低エネルギー側のノイズの割合 (以下、*Noise Parameter* と呼ぶ) を定義する。

31

これは、測定時間 600 秒において、低エネルギー側を支 配するノイズがカウント数 100 を取る位置の ADC チャン ネル数を *ADC<sub>noise</sub>、<sup>137</sup>Cs* の光電吸収ピーク *ADC(peak)* とすれば (図 4.2 参照)、以下の式で書ける。

$$[Noise \ Parameter] = \frac{ADC_{noise}}{ADC_{peak}} \times 100$$



☑ 4.9: Noise Parameter

つまり、この値が大きいほど、低エネルギー側のノイズが 相対的に大きいことを意味する。照射前(term0)、第一回 照射後(term1)、第二回照射後(term2)の測定結果をすべ てフィッティングし、15個のシンチレータのデータの平均 をとったものを下表 4.5 にまとめた。

$\operatorname{term}$	$\mathbf{PMT}$	$ADC_{noise}$	$ADC_{peak}$	$\operatorname{reslution}(\%)$	$Noise\ Parameter$
term0	PMT1	$41.4{\pm}0.2$	$2344.5 {\pm} 0.7$	$9.4{\pm}0.1$	$1.789{\pm}0.009$
	PMT2	$47.6{\pm}0.6$	$1944.8 {\pm} 0.5$	$9.6{\pm}0.1$	$2.45{\pm}0.09$
term1	PMT1	$41.7{\pm}0.4$	$2324.9 {\pm} 0.5$	$9.01{\pm}0.07$	$1.8 {\pm} 0.05$
	PMT2	$58.4{\pm}0.1$	$1957.5 {\pm} 0.5$	$9.58{\pm}0.08$	$2.99{\pm}0.02$
$\mathrm{term}2$	PMT1	$45.9{\pm}0.1$	$2282.3{\pm}0.6$	$9.42{\pm}0.08$	$2.02{\pm}0.03$
	PMT2	$60.6{\pm}0.2$	$1907.2 {\pm} 0.6$	$9.5{\pm}0.1$	$3.18{\pm}0.03$

表 4.5: GAGG シンチレータの放射線照射実験の解析結果

これを見ると、*ADC<sub>peak</sub>*のズレは放射線照射前後で全て、HV による不定性の 6%未満に入っており、有 意な変化は見られない。つまり、放射線照射は光量にはほとんど影響を及ぼさないことが分かる。また、分 解能にも有意な変化は見られない。一方、*Noise Parameter* を見てみると、照射毎に値が大きくなってい ることが確認できる。これは高放射線量を当てると、低エネルギー側のノイズが増えるたことを意味する。 以上の結果を、2.2.1 項で述べたシンチレータが高放射線量によって受ける 4 つの影響を元に考察する。ま ず、光量の増減が無いことと分解能の悪化が見られないことから、カラーセンター生成とシンチレーション 過 程へのダメージ、燐光によるノイズの増加はあまり目立った影響を示さない。また今回は陽子や中性子 ではなく、~1MeV のガンマ線照射であるため、放射性同位体は生成されず、自己放射も起こらない。それ に対して、低エネルギー側のバックグラウンドが増加していることから、ガンマ線で励起された準位にとど まる蓄光が起こっていると考えられる。蓄光であれば、基底準位へ落ちることで時間とともにバックグラウ ンドレベルが下がるはずである。そこで、表 4.3 のシフトが終わった後に、PMT1 に 0 番、PMT2 に 7 番 の GAGG サンプルつけてループ測定した時のエネルギースペクトルが以下の図 4.10、図 4.11 である。そ れぞれの図の右側に、低エネルギー側 (0-120Ch)を拡大したものを示す。黒色が <sup>60</sup>Co 線源を照射する前、 赤色が線源照射の約 30 分後、緑が 3 時間後、青が 4 時間後、水色が 5 時間後のスペクトルである。







1500 ADC





図 4.10: GAGG サンプル 0 番のエネルギースペクトルの時間変化



図 4.11: GAGG サンプル7番のエネルギースペクトルの時間変化

これらの結果についても、同様に Noise Par	neter を求めて解析する。	、その結果が以下の表 4.6 である。
---------------------------	-----------------	---------------------

GAGG 番号	照射後の時間 (h)	$\operatorname{Peak}(\operatorname{CH})$	$\operatorname{Reaolution}(\%)$	Noise Parameter
0	照射前	$2391~{\pm}2$	$8.3 {\pm} 0.2$	$1.208 \pm 0.004$
	0.5	$2340{\pm}1$	$8.3 {\pm} 0.1$	$3.68{\pm}0.06$
	3	$2317 \pm 1$	$8.2 {\pm} 0.1$	$2.08{\pm}0.03$
	4	$2264{\pm}1$	$8.1{\pm}0.2$	$1.07{\pm}0.03$
	5	$2256{\pm}2$	$8.5 {\pm} 0.2$	$1.2 {\pm} 0.1$
7	照射前	$1893 \pm 1$	$9.6{\pm}0.2$	$1.81 {\pm} 0.07$
	0.5	$1952\pm2$	$10.0{\pm}0.2$	$4.0 {\pm} 0.1$
	3	$1947 \pm 1$	$9.9{\pm}0.2$	$2.22{\pm}0.02$
	4	$1934{\pm}1$	$9.3 {\pm} 0.2$	$1.86{\pm}0.02$
	5	$1924{\pm}1$	$9.0{\pm}0.2$	$1.785{\pm}0.006$

表 4.6: GAGG シンチレータの放射線照射後の時間変化

この表より、分解能にはほとんど変化が見られないが、*Noise Parameter* は時間とともに線源照射前の 値に近づいていき、5時間後にほぼ元通りの値へと戻っていることが分かる。これは、数時間のタイムス ケールで元の状態にアニールすることを示している。また、今回の照射量は衛星軌道上での数千年に対応 するため、1日スケールではこの蓄光の影響は無視できると考えられ、GAGG は宇宙で十分可用なシンチ レータであることが示唆された。

# 第5章 まとめ及び今後

本研究では、小型衛星 MIST に搭載する CUBES 検出器の開発を行った。この研究は、読み出し回路開 発と GAGG シンチレータの基礎特性実験の大きく 2 つに分けられる。まず、読み出し回路測定では、以下 のようなことを行った。

- CUBES 用 MPPC 読み出し回路 (アナログ部) テスト基板を開発した。
- プラスチックシンチレータ、BGO、GAGGのそれぞれに対して、適切なプリアンプの積分時定数を 決定した。
- SAA 中での測定は、応答が早いプラスチックシンチレータならある程度は可能であるが、プリアンプの時定数を数 μs よりも短くすると、BGO や GAGG ではエネルギー分解能を犠牲にする必要がある。
- CUBESの電力と検出器サイズの制限から Shaping Amp を利用するのではなく、プリアンプからの 波形を直接 AD 変換する方が良いことを検討している。
- 以上のことから、CUBESの大まかな仕様と、それぞれのシンチレータに対する回路の制限を決めた。 次に、GAGGシンチレータ自体の性能評価を行い、以下のようなことが分かった。
  - GAGG 結晶では数 cm のサイズになると自己のシンチレーション光を吸収する消光現象が発生し、それによって光量やエネルギー分解能の劣化が観測される。
  - GAGG 結晶は 2.7Mrad の高放射線量を浴びても、光量や分解能自体には大きな変動は無い。
  - GAGG 結晶は高放射線量を浴びると蓄光が見られるが、数時間程度のタイムスケールでアニールし、 元の状態に戻る。

以上の結果から、GAGGシンチレータは衛星軌道上の放射線環境でも十分可用である。また、SPHiNX衛星で用いるシンチレータ形状を決定する一因となるデータを取得した。(実際に SPHiNX衛星で用いる形状は、検出器の検出効率を優先するか、エネルギー分解能を優先するかで変わってくる)

謝辞

本研究を遂行するにあたり、大変多くの方にお世話になったため、以下に謝辞として紙面上で大変恐縮 ではありますが、御礼申し上げます。

まず、何よりも主査であり、研究を指導してくださった高橋弘充先生。先生には、私が寝不足と疲労で 数が数えられなくなったときも、ずっとそばで見守っていて、私が至らないところを補完してくださいまし た。また、深夜遅くまで実験を行なっている時に夕食を食べることができたのも、先生が食べに連れて行っ て下さったからです。本当にありがとうございました。

深沢先生。深沢先生には、教養ゼミから始まり、ハイサイを通してお世話になっており、この研究で解 析用プログラムを作るときもほとんど迷わずに作れたのは先生のおかげです。本当に感謝しております。

M2の中岡さん。MPPC に関してわからない時に一番最初に聞くのは中岡さんでした。夜行性なのか、 夜中の時間によく研究室に在室しており、質問したい時に大変有り難かったです。

D2の河野さん。実験の基礎を教えていただきました。実験の前半と後半で、実験室の私の作業スペースのエントロピーは小さくなったでしょうか。今後ともご指導をいただくかもしれませんが、よろしくお願いします。

<sup>60</sup>Co線源照射にご協力いただいた、広島大学大学院工学研究科の方々。モニター室での放射線源の操作 など、放射線耐性実験にご尽力いただきました。ありがとうございました。

まだまだお礼を書きたい方はたくさんおられますが、ここに書く代わりに日頃の行動や言動などで感謝 の念を表し、筆を置かせていただきます。

# 関連図書

- [1] 宇井崇紘「広島大学 2010 年度卒業論文」
- [2] 横山 将志、魚住 聖「Multi Pixel Photon Counter の研究開発」

http://www.jahep.org/hepnews/2007/Vol26No3-2007.10.11.12yokoyamauozumi.pdf

[3] 光半導体素子ハンドブック

https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/03\_handbook.pdf

- [4] 中川崇之「シンチレータと光半導体素子 MPPC を用いた携帯型放射線スペクトロメータの実用化」 2014 年 広島大学修士論文
- [5] Glenn F. Knoll「放射線計測ハンドブック」第4版
- [6] William R.Leo <sup>r</sup> Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments
- [7] R.-Y.Zhu <sup>r</sup> Radiation Damage Effects J
- [8] 戸泉貴裕「東工大衛星 Cute-1.7+APDII の荷電粒子観測とガンマ線バースト偏光観測衛星 TSUBAME の検出器開発」2009 年 東京工業大学 修士論文
- [9] ANALOG DEVICES AD8057/AD8058 datasheet
- [10] NIST:XCOM http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm
- [11] 浅野哲也 「BGO と APD を用いた宇宙 線検出器アクティブシールドの研究」2004 年 広島大学卒 業論文
- [12] R.Sato, J.Kataoka, Y.Kanai, Y.Ishikawa, N.Kawabata, T.Ikagawa, T.Saito, Y.Kuramoto, N.Kawai <sup>r</sup> Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A J 556 (2006) 535 542
- [13] Ayanori MURATAKA, Satoru ENDO, Yasuaki KOJIMA and Kiyoshi SHIZUMA <sup>r</sup> Dose Rate Estimation Around a 60Co -ray Irradiation Source by Means of 115mIn Photoactivation J. Radiat. Res., 51, 197 203 (2010)