

超小型衛星TSUBAME搭載用
 γ 線バースト検出器フライトモデルの開発

常世田 和樹

修士論文

東京工業大学 理工学研究科 基礎物理学専攻

2013年 2月

目次

第1章	はじめに	1
1.1	ガンマ線バースト (GRB) 研究の課題	1
1.2	硬 X 線偏光観測衛星 TSUBAME	2
1.3	本研究の目的	4
第2章	超小型衛星 TSUBAME	5
2.1	TSUBAME 衛星全体の概要	5
2.2	TSUBAME システム構成	5
2.3	GRB 観測ミッション	8
2.4	衛星バスへの要求仕様	9
2.4.1	姿勢・軌道情報要求	9
2.4.2	熱・構造要求	11
2.4.3	ソフトウェア要求	11
2.5	運用方針	13
第3章	GRB 観測装置	14
3.1	機能	14
3.2	機器構成	14
3.2.1	回路ボックス	14
3.2.2	WBM	18
3.2.3	HXCP	19
3.2.4	電源系統	19
3.3	CPU 部	21
3.3.1	CPU 基板ハードウェア構成	21
3.3.2	ソフトウェア概要	22
3.3.3	ソフトウェアエラー対策	23
3.4	観測運用	25

3.4.1	GRB 待機・観測	25
3.4.2	定常天体観測、スペクトル観測	28
3.4.3	データ転送	29
3.4.4	ガンマ線観測系リプログラミング	30
3.4.5	その他シーケンス	33
第4章	フライト用硬 X 線偏光計 (HXCP) の開発	35
4.1	コンプトン散乱を利用した偏光計の原理	35
4.1.1	コンプトン散乱	35
4.1.2	エネルギー	36
4.1.3	散乱断面積	36
4.1.4	検出器配置の最適化	38
4.1.5	変調因子 (Modulation Factor)	40
4.2	検出器	40
4.2.1	HXCP の構造	40
4.2.2	マルチアノード光電子増倍管 (MAPMT)	43
4.2.3	アバランシェフォトダイオード (APD)	46
4.2.4	信号読み出し回路、トリガシーケンス	47
4.3	APD-VATA 基板デバッグ・パラメータ調整	51
4.3.1	デバッグ	52
4.3.2	パラメータ調整、レジスタ設定	57
4.3.3	総評	59
第5章	HXCP フライトモデル動作・性能実証実験	60
5.1	セットアップ	60
5.1.1	実験施設	60
5.1.2	治具セットアップ	61
5.1.3	回路セットアップ	62
5.1.4	シンチレータ配置、入射角・回転角定義	63
5.2	試験内容	64
5.3	解析手順	66
5.3.1	データリダクション	67
5.3.2	ペDESTAL補正、ゲイン補正	67

5.3.3	散乱・吸収位置決定	68
5.3.4	コンプトン散乱イベント選定	69
5.3.5	角度計算、散乱方位角分布の作成	73
5.4	解析結果	75
5.4.1	計数率のビーム強度依存性	75
5.4.2	全ピクセルスキャン	76
5.4.3	回転スキャン	81
5.4.4	斜め入射	82
5.5	考察	85
5.5.1	散乱方位角分布のフィッティング結果	85
5.5.2	散乱・吸収位置の決定方法	88
5.5.3	エネルギーカット基準	88
5.6	今後の課題	88
5.7	まとめ	89
第6章	環境試験	90
6.1	放射線耐性試験	90
6.2	振動試験	91
6.3	衝撃試験	91
6.3.1	試験内容	91
6.3.2	試験結果	92
6.3.3	まとめ	94
6.4	熱真空試験	97
6.5	磁気干渉試験	101
6.5.1	試験内容	101
6.5.2	試験結果	101
6.5.3	まとめ	104
6.6	電波干渉試験	106
6.6.1	電波侵入経路、イベントレート調査	106
6.6.2	分解能調査	106
6.6.3	まとめ	107
6.7	まとめ	108

第7章	まとめと今後の課題	109
付録A	CPU 関連補足資料	110
A.1	CPU 部の機能	110
A.1.1	GPIO	110
A.1.2	リセット	110
A.1.3	割り込み	111
A.2	プロセッサ	112
A.2.1	レジスタ	112
A.2.2	アドレスマップ	114
A.2.3	リンカスクリプト	115
A.3	ソフトウェア開発環境	116
A.4	CPU ソフトウェアのフロー概要	118
A.5	FRAM 書き換わり対策	119
A.5.1	背景	119
A.5.2	対策	120
A.5.3	まとめ	121
付録B	補足グラフ	124
B.1	HXCP フライトモデル動作・性能実証実験	124
B.2	電波干渉試験	128
B.3	WBM 位置決定精度	131
付録C	略号集	132

目 次

1.1	GRB のイメージ図	1
1.2	姿勢制御用の小型 CMG	2
1.3	超小型衛星 TSUBAME の CAD 図	3
1.4	超小型衛星 TSUBAME の写真	3
2.1	TSUBAME 衛星のシステム概要	6
2.2	GRB の検出から観測までの流れ	9
3.1	TSUBAME 衛星内でのガンマ線観測系の機器配置	15
3.2	ガンマ線観測系の検出器の写真	16
3.3	WBM の模式図	18
3.4	ガンマ線観測系電源構成	20
3.5	偏光観測ミッションのシーケンス図	27
3.6	定常天体観測・スペクトル観測ミッションのシーケンス図	28
3.7	データ転送のシーケンス図	30
3.8	FRAM 書き換えシーケンス図	32
3.9	SRAM 書き換えシーケンス図	32
4.1	コンプトン散乱模式図	36
4.2	偏光した光子の散乱の模式図	36
4.3	光子がコンプトン散乱した時に反跳電子に与えるエネルギー	37
4.4	散乱角 θ に対する散乱断面積 (無偏光の光子の場合)	38
4.5	散乱方位角 η に対する散乱断面積 ($\theta=90^\circ$ の場合)	38
4.6	散乱型偏光計の原理	39
4.7	散乱角 θ に対する変調 Q	39
4.8	散乱体・吸収体の配置図	41
4.9	HXCP の構成図	42
4.10	R8900-M16 MOD-UBA	44

4.11	MAPMT の構造	44
4.12	ch 毎のゲイン	45
4.13	APD	46
4.14	各 APD の内部構造と増幅領域	46
4.15	VATA のシステム図	48
4.16	VATA のトリガシーケンス。	49
4.17	コインシデンス測定時のトリガシーケンス	51
4.18	APD-VATA 基板上 VATA チップ信号入力段の回路図	52
4.19	vfp に対するゲインのグラフ	54
4.20	ペDESTAL 値の温度変化	55
4.21	APDThold に対する出力 ADC 値の変化	58
4.22	Tcoin に対するトリガーレート変化	58
5.1	BL14A 実験ブース内セットアップ	61
5.2	ビーム試験の治具のセッティング	62
5.3	ビーム試験の回路セットアップ	63
5.4	正面から見た時の HXCP のシンチレータ配置。	64
5.5	真上から見た時の HXCP とビーム入射角の関係	65
5.6	80 keV の X 線ビーム入射時のエネルギーマップ	69
5.7	コンプトン散乱イベント選定基準	71
5.8	イベントカット後の 80 keV ビームのエネルギーマップ	71
5.9	イベントカット前の 30keV ビームのエネルギーマップ	72
5.10	イベントカット後の 30keV ビームのエネルギーマップ	72
5.11	全ピクセルのデータを足しあわせた散乱方位角分布	74
5.12	非対称性を打ち消した散乱方位角分布	74
5.13	HXCP 計数率のビーム強度依存性	75
5.14	ピクセル毎のトリガーレート (80keV, $\phi = 0^\circ$)	77
5.15	ピクセル毎のトリガーレート (60keV, $\phi = 0^\circ$)	77
5.16	ピクセル毎のトリガーレート (40keV, $\phi = 0^\circ$)	77
5.17	ピクセル毎のトリガーレート (30keV, $\phi = 0^\circ$)	77
5.18	有効面積のエネルギー依存性 (戸泉修論 [9] より)	78
5.19	散乱方位角分布 (80 keV, $\phi=0^\circ$)	79

5.20	散乱方位角分布 (60 keV, $\phi=0^\circ$)	79
5.21	散乱方位角分布 (40 keV, $\phi=0^\circ$)	80
5.22	散乱方位角分布 (30 keV, $\phi=0^\circ$)	80
5.23	0° と 45° のデータを足しあわせた 散乱方位角分布 (80 keV, $\phi=0, 45^\circ$)	80
5.24	0° と 45° のデータを足しあわせた 散乱方位角分布 (60 keV, $\phi=0, 45^\circ$)	80
5.25	0° と 45° のデータを足しあわせた 散乱方位角分布 (40 keV, $\phi=0, 45^\circ$)	80
5.26	0° と 45° のデータを足しあわせた 散乱方位角分布 (30 keV, $\phi=0, 45^\circ$)	80
5.27	HXCP を回転させていったデータを足しあわせた散乱方位角分布 (80keV) .	81
5.28	HXCP を回転させていったデータを足しあわせた散乱方位角分布 (30keV) .	81
5.29	斜め入射時の HXCP 内のシンチレータの配置	82
5.30	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 0^\circ$)	83
5.31	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 7.5^\circ$)	83
5.32	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 15^\circ$)	83
5.33	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 22.5^\circ$)	83
5.34	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 30^\circ$)	83
5.35	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 45^\circ, \theta = 0^\circ$)	83
5.36	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 45^\circ, \theta = 7.5^\circ$)	84
5.37	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 45^\circ, \theta = 15^\circ$)	84
5.38	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 45^\circ, \theta = 22.5^\circ$)	84
5.39	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 45^\circ, \theta = 30^\circ$)	84
5.40	Geant4 で構築した HXCP のマスモデル	86
6.1	衝撃試験模式図	92
6.2	コンポーネント衝撃試験セットアップ 左: HXCP 右: MAPMT	93
6.3	衛星筐体 Z 軸ハンマリングの加速度応答 (上) と伝達率 (下)	94
6.4	HXCP 筐体の加速度周波数応答	95
6.5	MAPMT の加速度周波数応答	95
6.6	衝撃試験前後のゲインの比	96
6.7	熱環境試験時の TSUBAME 衛星	98
6.8	熱環境試験タイムテーブル	98
6.9	熱環境試験での回路ボックス、HXCP の温度推移	99
6.10	熱環境試験での WBM の温度推移	100

6.11	MTQ	101
6.12	TSUBAME 衛星内での MTQ と HXCP の配置	102
6.13	MTQ1 の位置関係を模擬して配置	102
6.14	MTQ2 の位置関係を模擬して配置	102
6.15	MAPMT で検出したピークのゲイン比のマップ	103
6.16	MAPMT で検出したピークのゲイン比の分布	104
6.17	MAPMT で検出したピークのゲインの分布	105
6.18	電波干渉試験のセットアップ	107
A.1	Cortex-M1 プロセッサのレジスタ	113
A.2	Cortex-M1 アドレスマップ	114
A.3	CPU ソフトウェアのフローチャート	118
A.4	FRAM 電源投入・切断シーケンス	119
A.5	対策前の FRAM 電源切断シーケンス	120
A.6	TL7709ACP ブロック図	121
A.7	リセット IC のテスト回路とテスト基板	122
A.8	リセット IC テスト結果	122
A.9	リセット IC の電源基板への組み込み	123
A.10	対策後の FRAM 電源切断シーケンス	123
B.1	ピクセル毎のトリガーレート (80keV, $\phi = 45^\circ$)	124
B.2	ピクセル毎のトリガーレート (60keV, $\phi = 45^\circ$)	124
B.3	ピクセル毎のトリガーレート (40keV, $\phi = 45^\circ$)	125
B.4	ピクセル毎のトリガーレート (30keV, $\phi = 45^\circ$)	125
B.5	散乱方位角分布 (80 keV, $\phi=45^\circ$)	125
B.6	散乱方位角分布 (60 keV, $\phi=45^\circ$)	125
B.7	散乱方位角分布 (40 keV, $\phi=45^\circ$)	125
B.8	散乱方位角分布 (30 keV, $\phi=45^\circ$)	125
B.9	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 0^\circ$)	126
B.10	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 7.5^\circ$)	126
B.11	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 15^\circ$)	126
B.12	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 22.5^\circ$)	126
B.13	斜め入射時の散乱方位角分布 (80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 30^\circ$)	127

B.14 斜め入射時の散乱方位角分布 ($80\text{keV}, \phi = 45^\circ, \theta = 0^\circ$)	127
B.15 斜め入射時の散乱方位角分布 ($80\text{keV}, \phi = 45^\circ, \theta = 7.5^\circ$)	127
B.16 斜め入射時の散乱方位角分布 ($80\text{keV}, \phi = 45^\circ, \theta = 15^\circ$)	127
B.17 斜め入射時の散乱方位角分布 ($80\text{keV}, \phi = 45^\circ, \theta = 22.5^\circ$)	127
B.18 斜め入射時の散乱方位角分布 ($80\text{keV}, \phi = 45^\circ, \theta = 30^\circ$)	127
B.19 PMT で取得した ^{241}Am のスペクトル (CW OFF 時)	128
B.20 PMT で取得した ^{241}Am のスペクトル (CW ON 時)	129
B.21 APD で取得した ^{137}Cs のスペクトル (CW OFF 時)	130
B.22 APD で取得した ^{137}Cs のスペクトル (CW ON 時)	130
B.23 WBM 位置決定精度	131

表 目 次

2.1	TSUBAME 衛星の概要	5
2.2	ガンマ線観測系サクセスレベル	13
4.1	偏光計に使用するシンチレータの特性	43
4.2	MAPMT 毎のゲインの平均と偏差	45
5.1	トリガ率	78
5.2	シミュレーションで求めたエネルギーと MF の関係	86
5.3	散乱方位角分布を正弦関数でフィッティングした結果	87
6.1	無線機 OFF、ON 時の HXCP の分解能	107
A.1	ガンマ線観測系アドレスマップ	115
A.2	プログラムのセクション	116

Abstract

Gamma-ray bursts (GRBs) are the most powerful explosions in the universe. In order to investigate these phenomena, we are developing a micro-satellite for hard X-ray polarimetry of gamma-ray prompt emissions of GRBs. This satellite possesses two gamma-ray detectors: one is Wide field Burst Monitor (WBM) that always monitors half the sky searching gamma-ray transient sources and determining the positions of them. The other is Hard X-ray Compton Polarimeter (HXCP) that is the main detector for X-ray polarimetry of GRBs. Cooperating with these the high speed attitude control system aboard TSUBAME, we aim to conduct pointing polarimetry just after the detection, within 15 s after the trigger. In this study we developed and calibrated the flight model of HXCP. In addition we designed a program embedded in the main CPU that controls the entire detector system. The embedded program has three functions. First is the automatic GRB observation. Then the main CPU send a command to the satellite bus to point the GRB. Second is commands and data handling. the main CPU decoding commands from the ground station or from the satellite bus and then do appropriate actions without freezing. On the other hand WBM and HXCP generate a few MByte data per GRB. The obtained data must be converted into the predefined format and sent to the ground station via the satellite bus. Third is house keeping. We employed several COT CMOS devices to reduce the cost. Therefore we must consider the fatal troubles such as single event upsets or single event latch-ups caused by radiation damages. For this purpose the CPU is always monitoring power consumption of every sub branch of the power supply chain. Moreover we designed the CPU system to be capable with rewritable in the orbit to deal with any troubles. The above main functions had been embedded in the CPU and have passed electrical integration tests successfully. The engineering model of HXCP had a few fatal bugs in real time data I/O. In the development of flight model, we fixed these all problems and also optimized the bias settings of the analog signal processors. In order to demonstrate the performance of the flight model HXCP, we conducted a beam test irradiating polarized X-ray beam at KEK-PF. As a result, we successfully measured polarization at 30 keV at room temperature. We also performed several environmental tests of vibration, shock, radiation (TID/SEE), thermal vacuum, thermal cycle, electromagnetic interference, and magnetic interference, and the flight model have survived all the environmental tests. We therefore conclude that HXCP is ready to go.

第1章 はじめに

1.1 ガンマ線バースト (GRB) 研究の課題

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst; GRB) とは、宇宙のある一点から爆発的にガンマ線や X 線が放出される現象であり、銀河系の星すべてが 1 年間に放出するエネルギーと同程度のエネルギーを一瞬で放出する、全天で最も大きなスケールの規模の爆発現象である。この現象の発生頻度は 1 日 1 回程度であるが、継続時間がミリ秒～100 秒程度と短く、発生位置も不確定であることが我々の理解を妨げていた。



図 1.1: GRB のイメージ図 (NASA)

現在、GRB の放射機構として最も有力なものにファイアーボールモデル [3] がある。このシナリオでは、最初に何らかの原因で中心のある一点に $\sim 10^{52}$ erg もの膨大なエネルギーが解放されることから始まる。何らかの物理機構によって爆風が収束され、高温に加熱された物質は外に向かって高速で膨張していく。このとき、相対論的ジェットが生成される。そして、そのジェットの方向が観測者の視線方向と一致しているとき、ジェット内部の相対論的な電子による強いシンクロトロン放射が、特殊相対論的效果で強められることによってガンマ線バーストとして観測されると考えられている。しかし、このジェットが何で作られているのか、そもそもどうしてジェット状に放射されるのか、どの様に粒子が加速されるのかについてはほとんど理解されていない。

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

われてこなかった。偏光観測が重要な点は他の3つの手法では得られない放射源の磁場環境を解明する鍵になり得るからである。シンクロトン放射によって生成された光子は、天体周りの磁場構造を反映した偏光を持つため、もし偏光を観測出来たならばGRBの生成機構にきわめて重大な制限を与えることができる。

1.2 硬X線偏光観測衛星 TSUBAME

GRBの偏光観測は過去に数例存在するが、それらの結果は信憑性に乏しく、有意な偏光観測がなされていないという問題がある。また、最近の成果では、JAXAの打ち上げた小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSに搭載されたGAPという偏光検出器でGRBを数例観測していて、偏光を検出したという報告がされている[5]。しかしGAPの運用は現在終了しているため、さらなる観測が求められている。また、GAP検出器は、光子が検出器の光軸に対して斜めに入射した場合、偏光検出能力が低下するという問題もある。

そこで我々は、GRBのエネルギー輸送・放射機構を解明するために、GRBの硬X線偏光観測を行う超小型衛星TSUBAME(図1.3, 図1.4)の開発を行なっている。我々は2003年より工学部と協力して民生品を使った超小型衛星を開発しており、この分野で世界をリードしている。TSUBAMEは当チームとしては4機目の衛星であり、初めて本格的に天体観測を目的とした科学衛星である。小型衛星は、様々な技術を結集した大型衛星とは異なり、2~3年という短い期間、かつ低コストで開発を行うことができ、さらにピギーバック衛星として打ち上げることで、大型衛星に比べて多くの打ち上げ機会を得ることが可能となってくる。したがって、最先端技術の軌道上実証を率先して行うことができ、そうした技術を大型衛星にフィードバックすることによって、宇宙工学や宇宙物理学の発展につなげることができる。



図 1.2: 姿勢制御用の小型 CMG。定速回転するホイールを支持しているジンバルを回転させることで、ジャイロ効果によるトルクを生み出すデバイスである。

GRBはいつどの方向で発生するか予測できず、継続時間も短いため、その偏光を観測するためには衛星機上でバーストの検出・位置決定を行い、瞬時にバーストの起きた方向に回頭する必要がある。そこでTSUBAMEでは、GRBの検出・位置決定を行う広視野バーストモニタ(WBM)と、高トルク姿勢制御デバイスであるコントロール・モーメン

ト・ジャイロ (Control Moment Gyro; CMG, 図 1.2) を搭載する。衛星筐体 5 面に設置された WBM は半天を常時監視し、計数率に有意な変化があるとバーストと判定する。さらに、各 WBM 間の計数率の比から突発天体の方向を計算する。その後、CMG を用いた 15 秒間で 90° という高速な姿勢制御により GRB の方向を指向して、硬 X 線偏光計 (HXCP) で GRB を光軸上に捉えて偏光観測を行う。

超小型衛星であるため本衛星に大きな検出器を載せることはできないが、GRB は瞬間的には極めて明るいいため、小型の検出器でも目的によっては十分に精度の高い観測が実現できる。バースト発生直後から偏光観測を開始できれば、バーストが終わるまでに十分な光子数を得られると期待される。

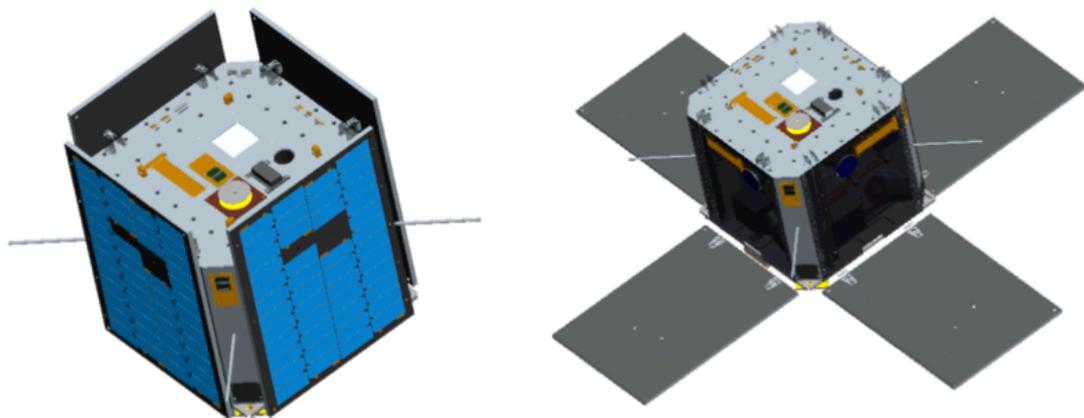


図 1.3: 超小型衛星 Tsubame の CAD 図。左：パドル展開前 右：パドル展開後

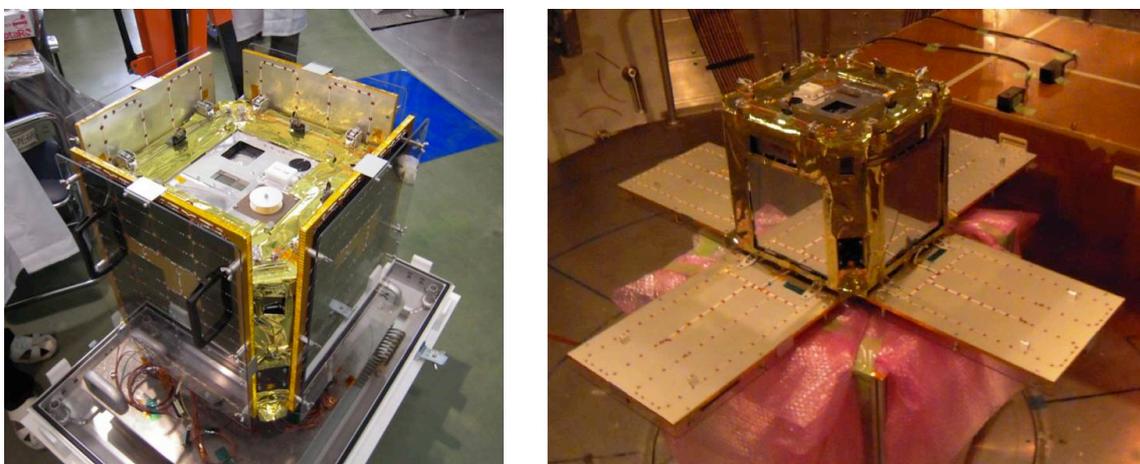


図 1.4: 超小型衛星 Tsubame の写真。左：パドル展開前 右：パドル展開後

1.3 本研究の目的

2004年の概念設計からスタートしたTSUBAMEフライトモデル開発を目的として、実際に宇宙で動作する処理系とHXCPのハードウェア設計、ロジック及び制御ソフトウェア開発を行った。

宇宙機は地上システムとは異なり、電力やサイズ、テレメトリなどに厳しい制約がある。フライトモデル開発にあたっては、衛星システム側と綿密に調整を行い、全ての条件を完璧にクリアしなければならない。本論文では、これらを念頭に行ったガンマ線観測系のシステム設計について説明する。また、HXCPの性能評価実験や、宇宙環境を想定した様々な環境試験を実施しており、その結果の解析と考察も行う。性能評価実験においてはGeant4[2]を用いたシミュレーションも行なって性能を評価した。

第2章 超小型衛星 TSUBAME

本章では、TSUBAME 衛星全体の概要とシステム構成、GRB 偏光観測ミッションや衛星バスへの要求、運用方針について述べる。

2.1 TSUBAME 衛星全体の概要

TSUBAME 衛星の概要を表 2.1 に示す。

表 2.1: TSUBAME 衛星の概要。質量 50kg 程の超小型衛星である。

サイズ	500×500×430 mm ³
質量	50 kg
稼働期間	1 年以上
打ち上げロケット	DNEPR LV
打ち上げ	2013 年、バイコヌール宇宙基地 (カザフスタン)
軌道	軌道傾斜角 97.4 deg、太陽同期軌道 (高度 500 km の円軌道)
電力	134 W(太陽指向時、稼働期間終末期)
電源供給	InGap/InGaAs/Ge 系太陽電池セル、展開式太陽電池パドル
通信	アマチュア低速通信 (9600、1200 bps)、S-Band 高速通信 (最大 100 kbps)

2.2 TSUBAME システム構成

TSUBAME 衛星は、大きく分けて5つのサブシステムに分かれる (図 2.1)。以下にそれぞれの概要を示す。

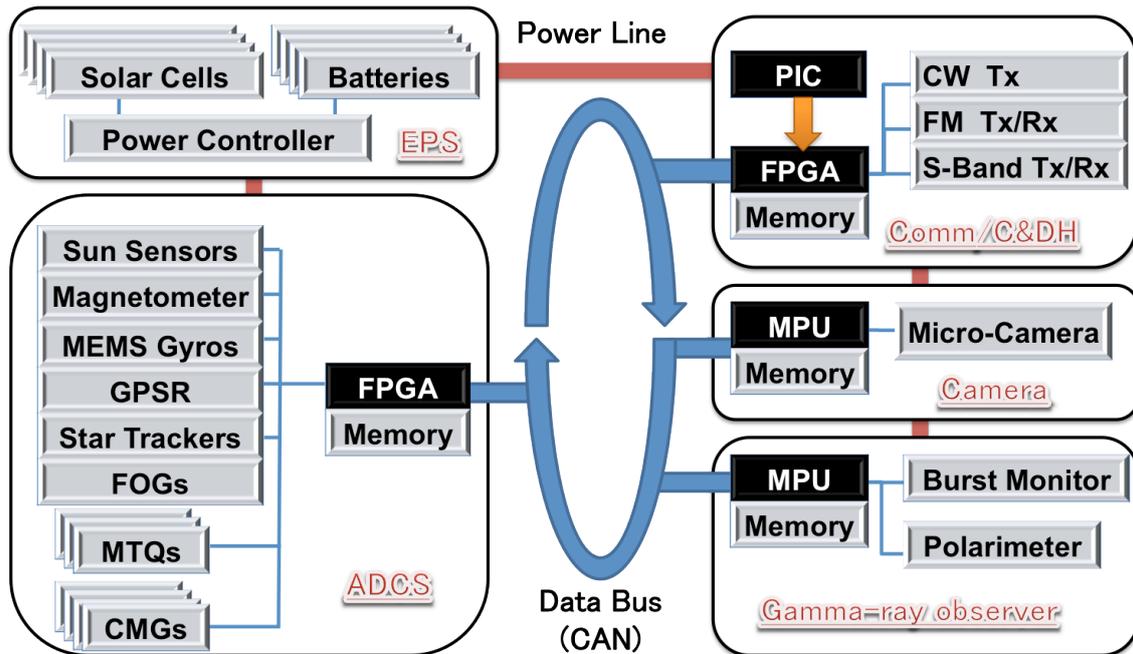


図 2.1: Tsubame 衛星のシステム概要。Tsubame には 5 つのサブシステムがあり、電源バスや通信バスによって繋がっている。

CDH / Comm 系

衛星全体の司令とデータ処理を行う Command & Data Handling 系と、衛星・地上局間の通信を行う Communication 系をまとめた系である (以下、CDH 系と記述する)。Comm 系は、uplink × 1、downlink × 3 系統を持ち、地上からのコマンド受信、衛星からのテレメータ送信を行う。遠隔装置である人工衛星では通信が途絶えた時点で全機能を喪失するため、本衛星システムではメインコンピュータと Comm 系をひとまとめにしてシステム化している。

メインコンピュータである CDH 系は、地上局やサブシステムとのコマンドの送受信や、パドル展開後の太陽指向デタンプリング、セーフモード、GRB 観測モード、リプログラミングといった各種シーケンスを制御する役割を担う。また、CDH 系の大きな役割の一つに各サブシステムの監視がある。民生品を多用した本衛星では放射線による致命的なトラブルが想定されるため、CDH 系は 10 秒毎に各サブシステムに温度などのハウスキーピング (以下、HK と記述する) データを要求し、その返答の有無によって各サブシステムの動作状態を監視する。3 回連続で返答が無い系は異常動作とみなされソフトリセットがかけられ、さらにソフトリセットが 3 回連続しても返答がない場合はサブシステムの電源を遮断し強制リセットがかけられる。CDH 系自身は、FPGA 内に組み込んだ 2 個の

PowerPC コアが互いに相互監視を行なっている他、最上位の動作監視として放射線耐性のある PIC(Peripheral Interface Controller) を搭載し、自身の異常動作に備えている。

また、各サブシステムとのコマンド送受信履歴、ミッションで取得したミッションデータは CDH 系内の大容量の NAND Flash メモリ (512 MB) に保存され、限られた通信時間内でスムーズにダウンリンクが行えるようになっている。

ADCS 系 (姿勢決定・制御系)

ADCS(Attitude Determination & Control System) 系は、太陽センサや磁気センサ、MEMS ジャイロ、光ファイバージャイロ、スタートラッカーを用いて衛星が軌道上でどのような方向を向いているか測定する「姿勢決定」と、CMG と磁気トルカを用いて衛星の方向を制御する「姿勢制御」を担う。TSUBAME では位置情報を取得するために GPS 受信機を搭載しており、GPS から得た時刻情報や軌道情報を各サブシステムに送信するのも ADCS 系の役割である。

EPS 系 (電源系)

最大発電量 134W の太陽電池セルからの電力を安定して供給するため、大容量のリチウムイオン電池の充放電監視、余剰電力の廃棄、電圧制御・電力分配を行う。バッテリーに蓄えられた電力が少なくなり、衛星の生存に支障が出る可能性がある場合や、衛星内機器が異常動作を起こして過剰電流が流れた場合などは、EPS 系が CDH 系にアラートを送信し、機器電源 OFF やセーフモードへの移行を促す。

ガンマ線観測系

「GRB の硬 X 線偏光観測」ミッションを担当する。広視野バーストモニタ (WBM) と、硬 X 線偏光計 (HXCP) を搭載し、GRB の検出・位置決定およびアラートと、偏光観測を行う。また、南大西洋異常帯 (South Atlantic Anomaly; SAA) と呼ばれる荷電粒子が非常に多く分布している地域の検出も行う。

カメラ系

「高分解能小型光学カメラを用いた地球観測」ミッションを担当する。地震による倒壊や津波など広範囲に影響が及ぶ災害の状況を把握する場合、あらかじめ想定されない場所

についても広範囲に状況把握することが必要で、また、台風など容易に接近することが難しい気象現象の詳細な構造などは、天候に左右されない宇宙空間からの観測が望ましく、ゲリラ豪雨など予期できない局所的な気象現象の理解にも、大域的な観測を実現する衛星からの観測が有効である。

この様な観測を行う場合、広い領域を必要に応じて高精細に撮像することが求められ、TSUBAME 衛星には高度 700km から最大地上解像度 14m を実現するカメラを搭載し、これに加えて小型 CMG による高速姿勢制御を加えることで「見たいところを迅速にかつ綺麗に見る」というよりチャレンジングなミッションを実現させる。

2.3 GRB 観測ミッション

GRB の大きな特徴は以下の通りである。

- 発生時刻、発生位置が予測できない突発天体
- 継続時間が非常に短い (典型的には 30 秒程度)
- 非常に高い X 線・ガンマ線強度を示すことがある

これらの特徴により、今までの GRB 観測は、大型衛星や宇宙ステーションに広視野の検出器を搭載し、GRB を待ち受けるという手法が採られてきた。IKAROS 衛星に搭載された GAP 検出器も、このコンセプトに基づき観測を行った。一方で、偏光観測に用いる偏光計は、その光軸に対し光子の入射角度が大きくなると、系統的な誤差が大きくなる。そのため、信頼度の高い偏光観測を行うためには、検出器の光軸と光子の入射方向をなるべく一致させることが望ましい。また、初期放射の観測を行うためには、出来るだけ早くバーストを検知し、検出器を GRB 発生方向に向けなければならない。

これらの要求に対し TSUBAME 衛星では、超小型衛星であるためモーメントムが小さいこと、および CMG の利用による高速姿勢変更機能を活かし、即時・指向観測を試みる。本衛星には、X 線のカウントレート変化から突発天体を検知し天体位置を特定するための広視野バーストモニタ (WBM) を 5 基搭載し、常時半天を監視する。図 2.2 のように、バースト検知・位置決定後、CMG を用いた高速姿勢制御により偏光計を X 線到来方向に向け、バースト検知から 15 秒以内での偏光観測開始を目指す。

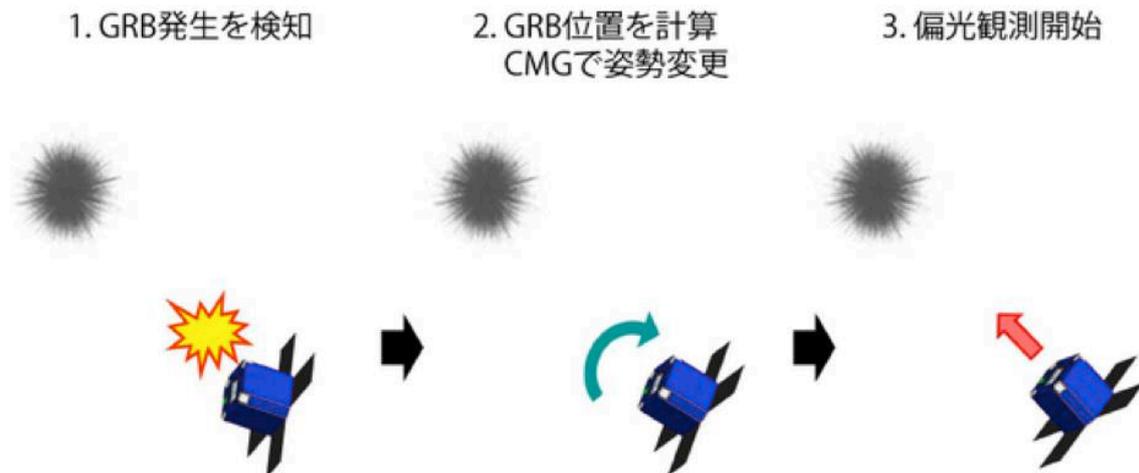


図 2.2: GRB の検出から観測までの流れ。

バーストモニタが GRB を検出すると、各検出器のカウント数の比から GRB の発生方向を決定し、CMG を用いて検出方向に高速で偏光計を向ける。

2.4 衛星バスへの要求仕様

GRB 観測ミッションを行うにあたって必要な、衛星バスへの要求をまとめる。

2.4.1 姿勢・軌道情報要求

ADCS への要求で、旋回速度、指向精度、姿勢決定精度、安定度、および軌道情報と時間精度の 6 つの項目がある。

旋回速度

GRB は非常に継続時間が短い天体現象であり、発生直後から急速に減光する。そのため、GRB 初期放射の偏光を観測するためには、GRB 検知後すぐに偏光計を GRB 発生位置に向けなければならない。WBM が監視できるのは半天 (2π str) であるから、GRB 検知後 90 degree の姿勢変更が可能であれば良い。過去に姿勢系が行った CMG による姿勢変更のシミュレーションでは、90 deg / 15 sec での姿勢変更が可能という結果が出た。そのため、姿勢変更速度の目標値は、90 deg / 15 sec と設定した。ただし、姿勢変更速度は速ければ速いほど良く、速いほど GRB の観測可能性が上がるため、出来るだけ高速の姿勢変更を要求している。

指向精度

TSUBAME 衛星搭載用の偏光計は、光軸と光子の入射方向のなす角 Δ_{HXCP} が 5 deg 以上になると、その偏光検出性能 (モジュレーションファクター) が大きく低下することがわかっている (そのため、TSUBAME で信頼性の高い偏光観測を行うためには、 Δ_{HXCP} は 5 deg 以下になることが望ましい)。一方、現状の WBM の検出器構成において、典型的な明るさの GRB に対する位置決定精度は 4 deg (90% error) と求まっている (常世田卒論 [11]、付録 B.3 節より)。これらの値から、TSUBAME 姿勢系に対する指向精度要求が求まる。今、姿勢系の指向精度を Δ_{ACS} とすると、指向精度と位置決定精度 4 deg を合わせた誤差が 5 deg 以内に収まれば良いので、

$$\Delta_{ACS}^2 + 4^2 < \Delta_{HXCP}^2 = 5^2 \quad (2.1)$$

$$\Rightarrow \Delta_{ACS} < 3 \quad (2.2)$$

すなわち、指向精度が 3 deg 以内になれば良い。

姿勢決定精度

指向精度や WBM の位置決定精度より十分小さければ良いので、指向精度要求 Δ_{ACS} の 1/10 の 0.3 deg 以下となれば良い。

安定度

指向精度が保たれる範囲であれば良い。(ただし、決定制度が十分高いことが条件)

軌道情報

SAA (South Atlantic Anomaly, 南大西洋異常帯) 判定に必要な、軌道情報の分解能である。SAA と呼ばれる地域では、非常に荷電粒子バックグラウンドが多い。このような地域で PMT に高圧を印加すると破損してしまうことが知られているため、SAA を検知して印加電圧を落とすシステムを搭載する。そのシステムの 1 つが軌道情報と SAA マップを照らしあわせるというものであり、軌道情報が粗いと SAA 判定漏れや観測時間のロスに繋がる。

大雑把に見積もるとオーロラ帯の幅はおおよそ 1 度で、それは距離にして ~ 100 km に相当し、TSUBAME 衛星はその距離を 10 数秒程で通り抜ける。また、GPS の時刻取得周期は最短でも 1 秒であることから、軌道情報の分解能は 1 分角あれば十分である。

時間精度

WBM・HXCP のデータ取得可能レートが約 10 kHz であるから、時間分解能は 0.1msec 必要である。絶対精度を高めることは困難であるが、サイエンスの目的としては 1 ms 程度が達成できることが望ましい。

2.4.2 熱・構造要求

熱要求

WBM と HXCP にはシンチレーション光の読み出しにアバランシェフォトダイオード (以降、APD と記載する。) と呼ばれる自己増幅機能を持つ半導体検出器を採用している。APD の増幅率は温度への依存性が高いため、可能な限り各 WBM 間の相対温度差は小さいことが好ましく、許容温度差は 10°C である。

また、APD は高温では暗電流が増加して性能が劣化する。WBM と HXCP の観測エネルギーレンジ下限である 30 keV を達成するためには、全ての APD の温度が 20°C 以下であることが必要である。

構造要求

WBM は科学目標を達成する為に反太陽方向 2π str をカバーする必要がある。WBM は 5 つ組み合わせて初めて 2π str の視野で位置決定ができるが、各 WBM の観測面方向 2π str が遮られるとその方向は位置決定ができなくなってしまう。

よって WBM の視野を最大にするためには、5 つの WBM それぞれで、衛星 Z 軸 (反太陽方向) を含む半天内に視野を遮るものがないこと。

2.4.3 ソフトウェア要求

1. 「ストアードコマンド」に対応すること

ストアードコマンドは地上局からコマンドを送る際に実行時刻を指定し、指定した時刻になったらコマンドを発行するというものである。衛星にトラブルが起こり、ある条件でのみしか観測ができなくなった場合などに対応できる可能性を増やすためである。また、後述する SAA 判定が正常に動作しない場合に備えて、指定した時刻に SAA トリガを出すためにも使用する。

2. 「パススルーコマンド」に対応すること

パススルーコマンドは地上局からのコマンドをそのままガンマ線観測系に流すというものである。これはガンマ線観測系だけで閉じている動作確認コマンド等を発行するために用いる。ストアードコマンドと組み合わせても使用する。

3. 観測シーケンスの管理ができること

ガンマ線観測系 GRB トリガー・位置を受け取って、姿勢制御の命令を ADCS に送るといった、観測シーケンスを進めるために必要である。

4. 観測中の姿勢データを取得でき、イベント時の姿勢を時刻データによって照合できること

これは、GRB 観測時にイベントデータと姿勢を関係づけるために必要である。WBM は衛星座標に対する GRB の方向を計算するため、絶対座標に直すためには衛星そのものの姿勢が必要である。また、GRB 観測時は衛星はスピン安定しているため、刻一刻と WBM や HXCP の向きが変わる。そのためイベントデータの解析には姿勢データの照合が必要である。

5. CDH 系の不揮発メモリにミッションデータを保存できること

これは、ガンマ線観測系が不揮発メモリを搭載していないため必要である。また、限られた通信時間内にスムーズにミッションデータのダウンリンクを行うためにも必要である。

6. CDH 系のメモリにガンマ線観測系のプログラムデータを保存し、地上からのコマンドによってガンマ線観測系のプログラム書き換えができること

これは、万が一プログラムにバグがあった場合に修正できるようにするためである。また、温度補正に必要な大容量のテーブルを更新するためにも使用する。

2.5 運用方針

ガンマ線観測系サクセスレベル（表 2.2）を満たすことを目標とする。なお、「正常動作」は以下のように定義する。

- 全機器に電源を投入し異常なく動作する
- 電気ノイズと、放射線によるバックグラウンドを区別する
- ゲイン補正を行い、設定したエネルギー閾値で放射線を測定する

GRB は発生頻度が低いため、サクセスレベルを満たすためには可能なかぎり GRB 待機モードになっていることが理想である。ただしもちろん他系との兼ね合いになるので、状況によっては WBM の視野が一番広がる日陰のときにのみ GRB 観測を行うといったことも有りうる（WBM は太陽パドル面の反対方向半天に視野を持つが、当然ながら太陽や地球に隠される方向は GRB を検知できない）。

GRB 観測の他にも、1～2ヶ月に1回程度はキャリブレーションの為の観測を行う予定であり、キャリブレーション観測の結果や、その他状況によってはプログラム再書き換え（以下、リプログラミングと記述する）を行うこともある。

表 2.2: ガンマ線観測系サクセスレベル。サクセスレベルを満たせるようにシステム設計と、運用を行う。

	WBM	HXCP	ガンマ線観測系全体
Minimum	WBM の正常動作	HXCP の正常動作	
Full	<ul style="list-style-type: none"> ● GRB、SAA の検出 ● GRB の衛星座標に対する方向決定 	散乱された X 線の異方性を検出	WBM で検出した GRB を HXCP で観測
Extra			少なくとも 1 個の GRB に対して、MDP30%以下で偏光を観測する

第3章 GRB観測装置

ガンマ線観測系全体のシステム構成や制御フロー、観測シーケンスについて説明する。

3.1 機能

ガンマ線観測系はGRBの検出・位置決定と、偏光の観測を行う系である。そのために、2種類のX線検出器、およびそれらの制御と信号処理を行う回路基板を搭載する。

GRBの検出・位置決定は広視野バーストモニタ(以下、WBMと記述する)が行う。シンチレーションカウンタを衛星壁面5面に1個ずつ配置し、反太陽方向 2π strをリアルタイムで監視する。計数率を常にモニタし、急な計数率の変化からGRBの発生を検出することができる。また、X線の入射方向によって各検出器間でX線の計数率が異なることを利用して、GRBの発生位置を求めることができる。

TSUBAME衛星の主ミッションであるGRBの偏光観測は、硬X線偏光計(以下、HXCPと記述する)が行う。コンプトン散乱の異方性を利用して偏光を検出することができる。

これらの検出器への電力供給や制御を行う装置は、回路ボックスにまとめて格納してある。制御の中心となるのは回路ボックス内のCPU基板であり、衛星バスからのコマンドを受けて各種観測シーケンスを進める。

3.2 機器構成

ガンマ線観測系を物理的に筐体で分割された機器ごとに分類すると、回路ボックス、WBM、HXCPの3つに分けられる。衛星内での搭載位置を図3.1に、実際の検出器の写真を図3.2に示す。

3.2.1 回路ボックス

ガンマ線観測系の検出器の制御や電力供給、衛星バスとの通信などを行う装置。衛星バスとの通信、コマンドを受けてのガンマ線観測系各機器の制御やHK収集などを行う

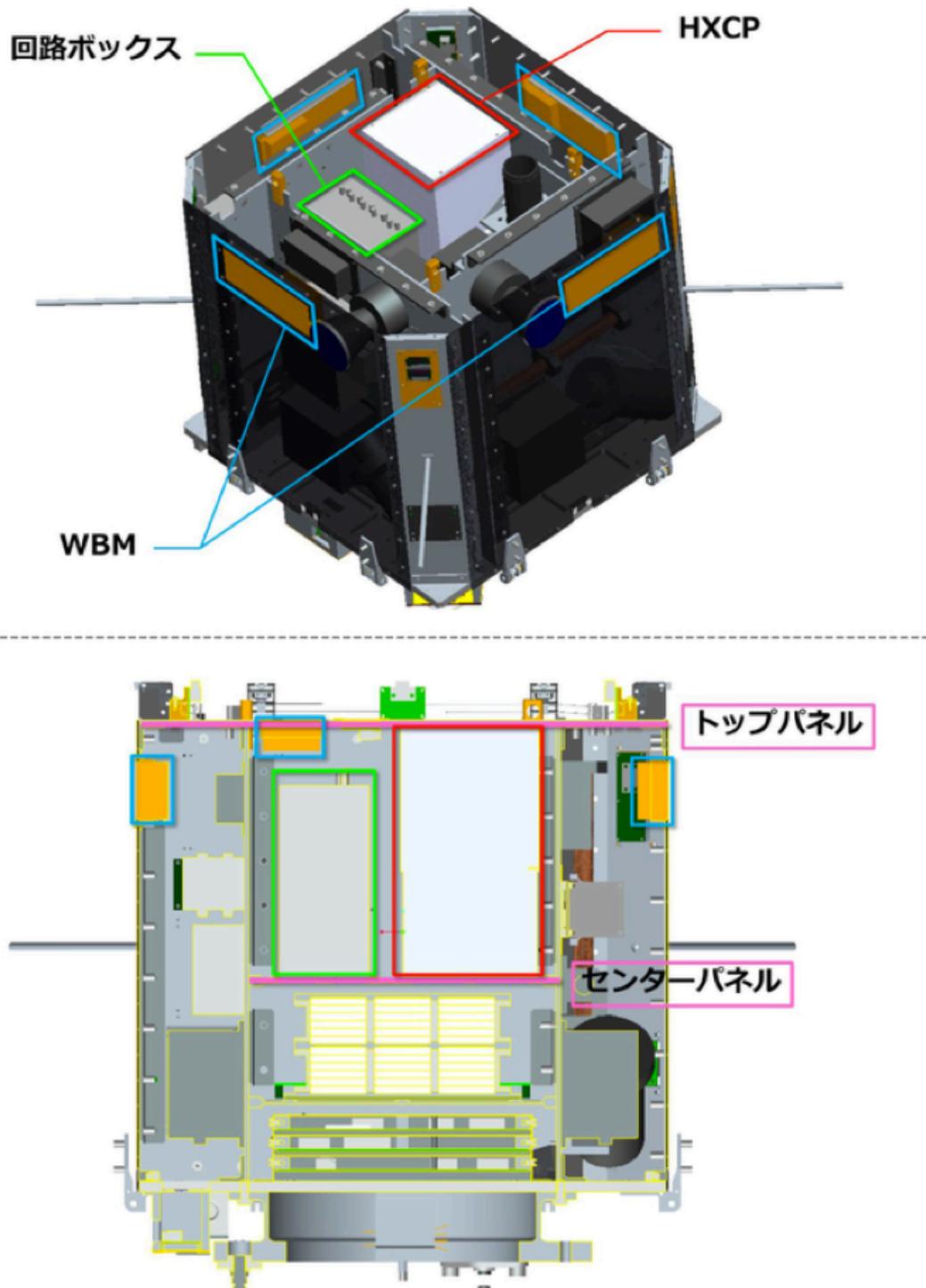


図 3.1: Tsubame 衛星内でのガンマ線観測系の機器配置。上図はトップパネルを取り除いた図、下図は衛星を横から見た際の断面図である。HXCP はセンターパネルに載せられ、上図をトップパネルに固定される。WBM は、衛星壁面 5 面にそれぞれ 1 個ずつ設置する。



図 3.2: ガンマ線観測系の検出器の写真。中央左が回路ボックスで、中央右が HXCP、下の 5 つが WBM である。

CPU 基板、電源バスからの電力受給と通信の中継を行う電源基板、WBM への電力供給を行う WBM 電源基板、WBM 検出器の信号処理や WBM 関連の HK 収集を行う WBM ロジック基板から成る。これら 4 枚の制御基板をバックプレーン基板とサイドプレーン基板で接続してひとまとめにし、アルミ筐体に格納する。複数枚の基板に分けることで個別に動作確認・デバッグを行うことができるので、開発をスムーズに進められる。以下に 4 枚の基板の詳細を記す (バックプレーン基板、サイドプレーン基板は配線をまとめて接続するだけの基板なので、詳細は省く)。

CPU 基板

ガンマ線観測系全体を制御する CPU 部 (FPGA)、および HXCP のリアルタイム Data I/O を行うデジタル処理部 (FPGA) を搭載する基板である。CPU の周辺装置としてプログラムを格納する FRAM や一時記憶領域として使用する SRAM、さらに CAN コントローラ・トランシーバを搭載し、衛星バスからのコマンドを受けて対応した動作を行う。CPU は CPU 基板上の HXCP-FPGA、および WBM ロジック基板上の WBM-FPGA と

パラレル線で接続しており、それらと通信を行うことで、間接的に検出器のスレッシュホールドや印加電圧の調整、HK 収集、データ取得などを行う。HXCP-FPGA は CPU の命令を受けて HXCP のデータ制御・保存を行う。ミッション中に取得した HXCP データは、HXCP-FPGA によって 16 Mbyte の SRAM に一時的に保存される。

電源基板

電源バスから供給されたバス電圧を、ガンマ線観測系で使用する共通の+12 V に降圧する。+12 V 系は複数の経路に分けられ、1 系統は CPU 基板上の DCDC コンバータに直結されており、バス電源が供給されると自動的に CPU-FPGA が起動するようになっている。その他の系統は途中に MOS-FET を用いたスイッチが挿入されており、スイッチングレギュレータと LDO によって内部に必要な電圧を生成する。すべてのレギュレータは電流を常時モニタできるようになっている。

衛星バスとの物理的な IF として、データバス用コネクタ、電源バス用コネクタ、デバッグ用コネクタの 3 つのマイクロ Dsub コネクタを実装している。

通信用に、RS485 トランシーバを 3 個 (UART 送信用、UART 受信用、リセットピン制御用) 搭載しており、CPU 基板からのシングルエンド信号 (RS232C) を差動信号 (RS485) に変換する。変換した後の 2×3 系統の計 6 本の信号線は、CAN 通信用の信号線 2 本と合わせてデータバス用コネクタで CDH 系に接続される。また、リセットピンは+12V 系電圧が 10V より低下した場合にも Low になるように制御される。これは、電圧が低下した際に CPU の動作が不定になって、不用意に FRAM へアクセスしてプログラムを書き換えてしまうリスクを回避するためである。

メインバスと RS485 トランシーバ用+5V 電源は、電源バス用コネクタを介して EPS 系から供給される。デバッグ用コネクタは地上デバッグ用として搭載されており、UART と+12 V 系を接続して動作確認やプログラムの書き換えが可能になっている。

WBM ロジック基板

WBM 検出器の信号処理用に ADC やコンパレータを 5 系統搭載し、各検出器のカウントレートを FPGA に組み込んだカウンタロジックで集計する。HK 取得用の ADC と 8ch のマルチプレクサを搭載し、WBM に関する電圧・電流値、温度などを取得できる。また、HXCP と同様に 16 Mbyte の SRAM を搭載し、WBM のデータをリングバッファの形で一時的に保存する。

WBM 電源基板

衛星壁面5面に設置された各WBMに、プリアンプ基板用の電圧、およびAPD用の高圧を供給する基板。安定した電圧を供給するために、DCDCコンバータを利用して+12Vからいったん±5Vを生成し、それらから低ドロップアウト・レギュレータ(LDO)を使ってプリアンプ基板用の電圧(±5V)を作る。

3.2.2 WBM

WBMはGRBの検出・位置決定を行うためのデータを取得するセンサユニットである。120×30×5 mm³のCsI(Tl)シンチレータと2個の5mm角APD、およびAPDの信号を増幅・整形するプリアンプ基板、バックグラウンドの低減を担う3層シールドから構成される。

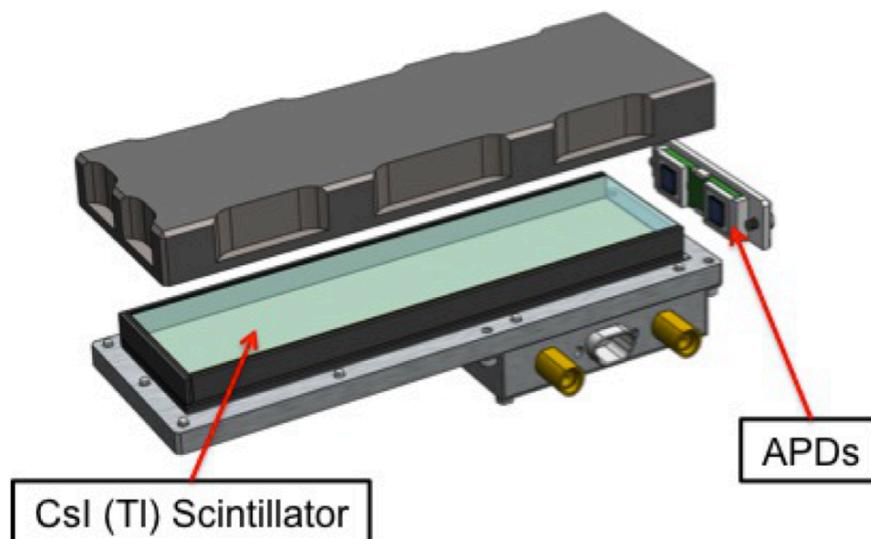


図 3.3: WBM の模式図。WBM は板状の CsI(Tl) シンチレータと、APD2 個から構成される。プリアンプ回路はシンチレータの下の、コネクタが付いているボックス内に格納されている。シンチレータ底面と側面にバックグラウンド低減のための3層シールドを搭載する。

3.2.3 HXCP

HXCP は偏光観測を行うセンサユニットである。放射線検出器部分（CsI シンチレータ+APD、プラスチックシンチレータ+MAPMT）、それらの信号を処理する APD-VATA 基板・PMT-VA 基板、トリガの制御や信号およびコマンドなどの中継を行う IFC、HV を供給する HV モジュール+ブリーダー回路、バックグラウンド低減するための 3 層シールドから成る。

HXCP の詳細は、次章で説明する。

3.2.4 電源系統

図 3.4 にガンマ線観測系の電源系統を示す。ガンマ線観測系の機器全てに電源を供給する電源基板は、衛星のメインバスに接続しており、TDK ラムダ社製の DCDC コンバータによって、バス電圧を+12 V に降圧し、各機器に供給する。

ガンマ線観測系の GND はリターン端子の電位と定義し、回路ボックスを介して衛星構体に一点接地される（メインバスリターンとガンマ線観測系 GND は同電位とは限らない）。

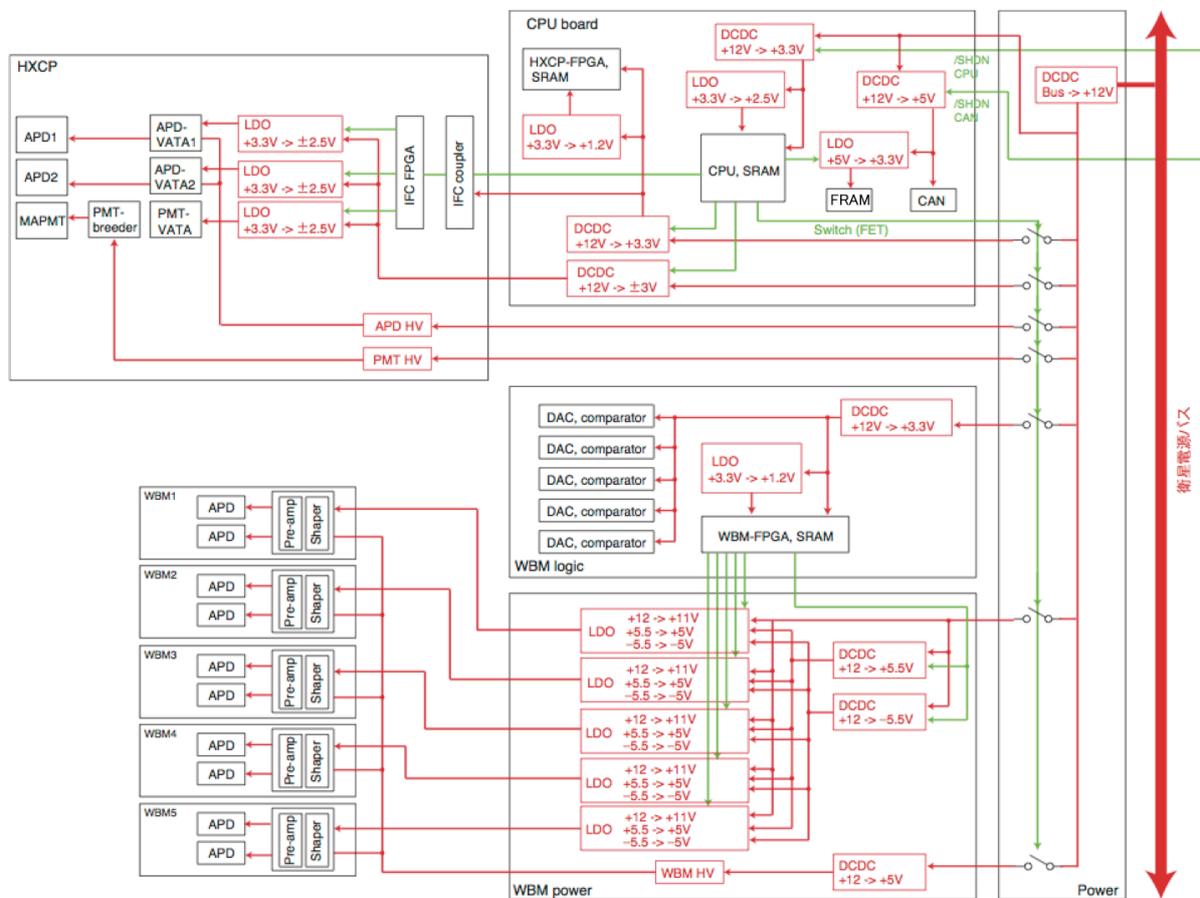


図 3.4: ガンマ線観測系電源構成。まず衛星電源バスから供給される電力を、絶縁型 30W 級 DCDC コンバータで 12V へ変圧する。12V 系はまず CPU 基板 (CPU board) に供給され、CPU が電源基板 (power) の分配スイッチを制御することで他の基板にも 12V 系が供給される。供給された 12V 系はさらに各基板の DCDC コンバータ、LDO によって所定の電圧に変換され使用される。APD、MAPMT で使用する高圧は、松定プレジジョン製の高圧モジュールで昇圧される。

3.3 CPU部

ガンマ線観測系の制御は、FPGAに組み込んだCPUによって行われている。以下でガンマ線観測系を制御する、CPU基板やそのプロセッサ周り、ソフトウェア設計について述べる。

3.3.1 CPU基板ハードウェア構成

ガンマ線観測系のCPUは、FPGAに組み込まれたマイコンである。ここで実行されるプログラムは不揮発性メモリであるFRAMに格納され、起動時にSRAMに移し実行する。他にもCPU基板には、電圧を変換するDCDCコンバーターとLDO、CAN通信を制御するCANコントローラー・トランシーバー、HXCPとの通信・制御・データ保存を司るHXCP-FPGAなどを搭載する。

FPGA、CPU

ガンマ線観測系のCPUには、FPGA(Field Programmable Gate Array)に組み込んだCortex-M1プロセッサを使用する。FPGAとはユーザーが任意の論理回路を組むことのできるゲートアレイの集積回路の一種である。Cortex-M1プロセッサは、FPGAへの実装専用に設計されたARMプロセッサ¹である。使用したFPGAはACTEL社のProASIC3ファミリで、クロックは16MHzである。FPGAをCPUとして動作させるためには、VHDL言語を用いて記述したロジックを、専用の書き込み器を用いてFPGAに書き込むことが必要である。各種ペリフェラル(UART通信、CAN通信、電源操作、HXCP制御、WBM制御)のインターフェースはFPGAのロジックが担っていて、CPUからは特定のアドレスの読み書きをすることで制御をすることが出来る。CPUプログラムの書き込みは、UART通信を介して行う。

FRAM、SRAM

ガンマ線観測系CPU基板では、CPUの動作プログラムは128kByteのFRAM(Ferroelectric Random Access Memory)に書き込まれ、それを読み込んで512kByteのSRAM(Static Random Access Memory)にコピーして、実行される。FRAMは不揮発性メモリで、SRAM

¹ARMプロセッサ：ARM社が設計したアーキテクチャを採用したプロセッサ一般の総称。

は揮発性メモリである。エンジニアリングモデル²開発時はFRAMのかわりにやはり不揮発性のMRAM(Magneto-resistive Random Access Memory)を採用していたが、きわめて磁気に弱く³、磁気トルカなどの影響を受ける危険性があったため、フライトモデル⁴ではCuteシリーズでも実績のあるFRAMを搭載することになった。

3.3.2 ソフトウェア概要

CPU-FPGAに電源が入り起動すると、プロセッサはFRAMの先頭アドレスから順次プログラムを読み出し、実行する。最初に実行されるプログラムはブートコードであり、ブートコードはFRAMのプログラムをSRAMにコピーし、プログラム実行アドレスを移す。その後SRAMに移されたプログラムの永久ループ(メインループ)の中で各種フラグの監視をする。このようにSRAMから実行する理由は、SRAMのほうがFRAMよりアクセスが高速であるということと、プログラム実行中に揮発メモリであるSRAMを書き換えることで、不揮発メモリであるFRAMを書き換えることなく実行プログラムを変えることができるからである。FRAMの書き換えに失敗すると最悪の場合二度と起動しなくなってしまうが、SRAMの書き換えに失敗してもリセットすれば再度FRAMからコードを読み込み直すため、修正前のプログラムを実行させられるなど、柔軟な運用が可能となる。

メインループ実行中に割り込みが発生すると、実行中の処理を中断し、割り込みハンドラと呼ばれるルーチンを実行する(付録A.1.3参照)。割り込みハンドラでは、割り込み要因に応じて、コマンドの受信やフラグを立てるといった簡単な処理をしていて、メインループに戻ると割り込みハンドラ中で立てられたフラグに対応する処理を実行する。例外的に、ADCSから取得する時刻データは、タイミングが特に重要なため割り込みハンドラの中で処理を行う。

観測シーケンスの管理もメインループで行なっており、CDHやADCSとコマンドをやり取りすることでシーケンスが進行する。観測シーケンスの詳細は3.4節に記載する。

²電気的設計、機能的設計などを確立するために使用する衛星モデル。

³微弱な磁石を近づけるだけで破壊されるということが、開発中の不慮の事故で確認されている。

⁴実際に打ち上げ、軌道上で運用される衛星モデル。

3.3.3 ソフトウェアエラー対策

TSUBAME 衛星では民生品を多用しており、ガンマ線観測系の CPU もまた民生品であるため、高エネルギー粒子が入射することでシングルイベント現象 (Single Event Effect; SEE) が発生し、ビット反転やプログラムの停止、最悪の場合では致命的な故障をもたらす可能性がある。したがって、ハードウェア的にも対策をするのはもちろん、ソフトウェア的にもビット反転などのエラーに対応する必要がある。また、どれだけソフトウェアを作りこんでもバグが存在する可能性は否定できないため、機上でプログラムを修正できる仕組みが必要である。

以下で、ビット反転や、バグなどのエラー対策について述べる。なお、これらの処理は、CDH 系が関わるものも含めて全て動作確認済みである。

CDH 系からの監視

前章で述べた、CDH 系の各サブシステムの監視である。定期的に HK 要求を送り、一定期間返答がない場合にソフトリセットがかけられる。さらにソフトリセットが3回続いても返答がない場合は電源が遮断され強制リセットがかけられる。

ウォッチドッグタイマ

ウォッチドッグタイマはガンマ線観測系の CPU が正常かどうか監視するためのタイマで、一定時間タイマーがクリアされない場合にリセットをかける。CPU-FPGA に実装されている機能である。メインループの先頭でタイマのクリアを行っており、3秒以内にメインループに戻って来なかった場合にリセットをかけるようにした。割り込みハンドラでタイマのクリアをすると、メインループで実行しているルーチンにバグがあり、永久ループから抜け出せなくなった場合に対応できないため、メインループでクリアするようにした。

プログラム領域 3 重コピー

FRAM から SRAM にプログラムコードをコピーする際に、全く同じものを SRAM の空き領域に2つ余分にコピーしておき、ビット毎に3重多数決をとることで、ビット反転を修正するという対策である。SAA を通過した際にこの処理を行う予定である。

変数3重コピー

プログラム領域3重コピーでは、値が書き換わる変数には対応できない。そのため、観測モードのフラグなど、特に重要な変数は3重にコピーして、参照するときは常に多数決をとるようにしている。

ダブルコマンド

同じコマンドが2回立て続けに発行される、もしくは別のコマンドによってフラグが立っている時にのみ実行できる、といったように、コマンド実行までに2段階のプロセスを用意するという対策である。これは、ノイズによって偶発的にコマンドが実行されるのを防げる。特に、HVの操作にダブルコマンドを使用する予定である。

FRAM書き換え

ガンマ線観測系プログラムが格納されている、不揮発メモリであるFRAMをCDH系から書き換えるという処理である。ソフトウェアのバグや、ゲインの温度補正で参照する大容量のテーブルを更新するためなどに使用する予定である。

ガンマ線観測系の電源が投入されてから1秒以内に、CDH系からUART経由で特定のコマンドとともにプログラムデータを送信することで書き換えることができる。

SRAM書き換え

SRAMでプログラム実行中に、SRAM自身を書き換えて、実行プログラムを変えろという処理である。

便宜的に、電源投入時にFRAMから実行される通常のブートコードを「FRAMブートコード」、SRAM書き換えをするコードを「SRAMブートコード」と呼ぶことにする。SRAMブートコードは、FRAMブートコードに似た処理をSRAMから実行する。

処理の流れは以下の通りである。

1. CDH系からプログラムデータを、SRAMの空き領域に転送

最大で128 kByteの大容量データなので、データ転送シーケンスを用いて確実に転送する。

2. CDH系からチェックサムとともに、SRAM書き換えコマンドを受信

チェックサムが一致していた場合、実行領域の書き換えを実施する。

3. 転送したプログラムデータを実行領域にコピー

SRAM ブートコードが、空き領域に転送されたデータを実行領域にコピーし直す。オブジェクトのメモリ配置を決めるリンクスクリプトを工夫することで、SRAM ブートコードが配置されるアドレスが、プログラムを変更しても変わらないようにした。アドレスを固定することで、プロセッサがSRAM ブートコードを実行し終えた後、元のアドレスに戻ってきて次の処理を続けることができる。

4. 初期化関数実行

FRAM ブートコードの場合と同様に、SRAM ブートコードが実行された場合も初期化関数を実行し、パラメータの初期化をする。

3.4 観測運用

CDH 系や ADCS 系が関わる観測シーケンスなどの設計、実装、および動作確認を行った。ここではそれらシーケンスについて説明する (GRB カウンタのインクリメントといった、細かい処理は説明から省いた。)。その他シーケンスの一部を除き、CDH 系と試験を行い動作を確認した。

3.4.1 GRB 待機・観測

TSUBAME の GRB 偏光観測ミッションは、大きく分けて2つの状態に分かれる。1つは WBM を動作させて GRB の発生を待つ「GRB 待機」状態、もう1つは WBM で GRB を検知後、HXCP で偏光観測を行う「GRB 観測」状態である。以下で、「機器準備」以降の具体的なシーケンスについて説明する。

CMG を用いた GRB 観測

TSUBAME の主ミッションである、CMG による高速姿勢制御を活かした GRB 観測シーケンスである。シーケンス全体の流れを図 3.5 に示す。

1. GRB 待機モード設定

地上局からのコマンドで GRB 待機モードに設定し、WBM での観測を開始する。ADCS 系は CMG を動作させて太陽指向で待機する。

2. WBM が GRB を検知

衛星バスに GRB 検知メッセージを送信。GRB の発生位置を計算し、ADCS に送信。
HXCP 用 PMT に高圧を印加し、偏光観測を開始する。

3. GRB 指向

姿勢を変更し、GRB 方向に指向する。

4. 観測終了、太陽指向

一定時間経過後、偏光観測を終了し、太陽指向に戻す。検出器と信号処理回路の電源を OFF にする。

5. データ転送

観測データをガンマ線観測系メモリから CDH 系メモリに転送する。

6. モード終了

GRB を検知・観測し、データ転送が完了するか、GRB 待機のまま一定時間が経過したら GRB 待機を終了する。

MTQ を用いた GRB 観測

上記は CMG を用いた GRB 待機・観測モードであるが、CMG を用いず、MTQ のみを用いた GRB 待機・観測モードも存在する。MTQ は大きなトルクは生み出せないため、高速姿勢制御はできない。よって、MTQ による GRB 待機・観測は太陽指向したまま終始、待機・観測をする。

ガンマ線観測系の動作としては CMG を用いた GRB 観測と何も変わらず、TSUBAME 衛星全体でも ADCS 系が姿勢変更をするかどうかの違いしかいないため、詳細なシーケンスは記載しない。

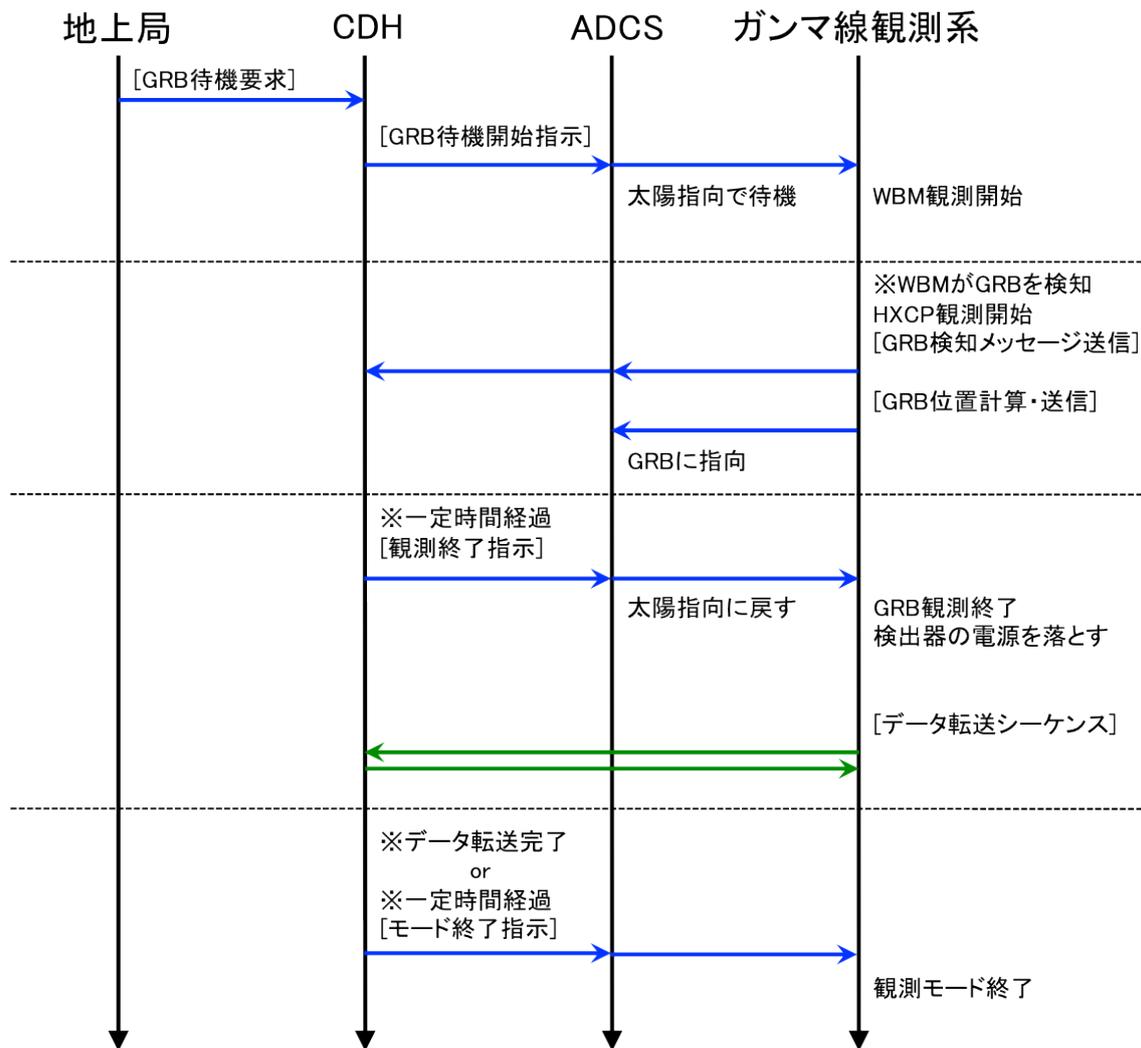


図 3.5: 偏光観測ミッションのシーケンス図。機器準備が終わった時点からのシーケンスを描いている。上から下に向かって進んでいき、※で記された条件が満たされた時に黒破線の先に進む。青線は他系へのコマンドで、緑線はデータ転送シーケンスである。太陽指向で待機したまま WBM で観測を行い、GRB を検知したら ADCS に位置を送信し、HXCP の GRB 指向観測を行う。一定時間経過で観測を終了し、データを転送する。WBM が GRB を検知せずに一定時間経過した場合は、そのまま観測モードが終了する。

3.4.2 定常天体観測、スペクトル観測

指定した方向(太陽指向も含む)を向いて観測を行うモードである。GRBを検出してもGRB方向には指向しない。検出器の機上キャリブレーションにも用いる。GRB待機・観測シーケンスの場合は、GRBを検出したときのみHXCPで観測を行うが、このシーケンスでは準備が完了し次第WBMとHXCPで観測を行う。なお、定常天体観測とスペクトル観測モードの違いは、WBMの動作である。シーケンス全体の流れを図3.6に示す。

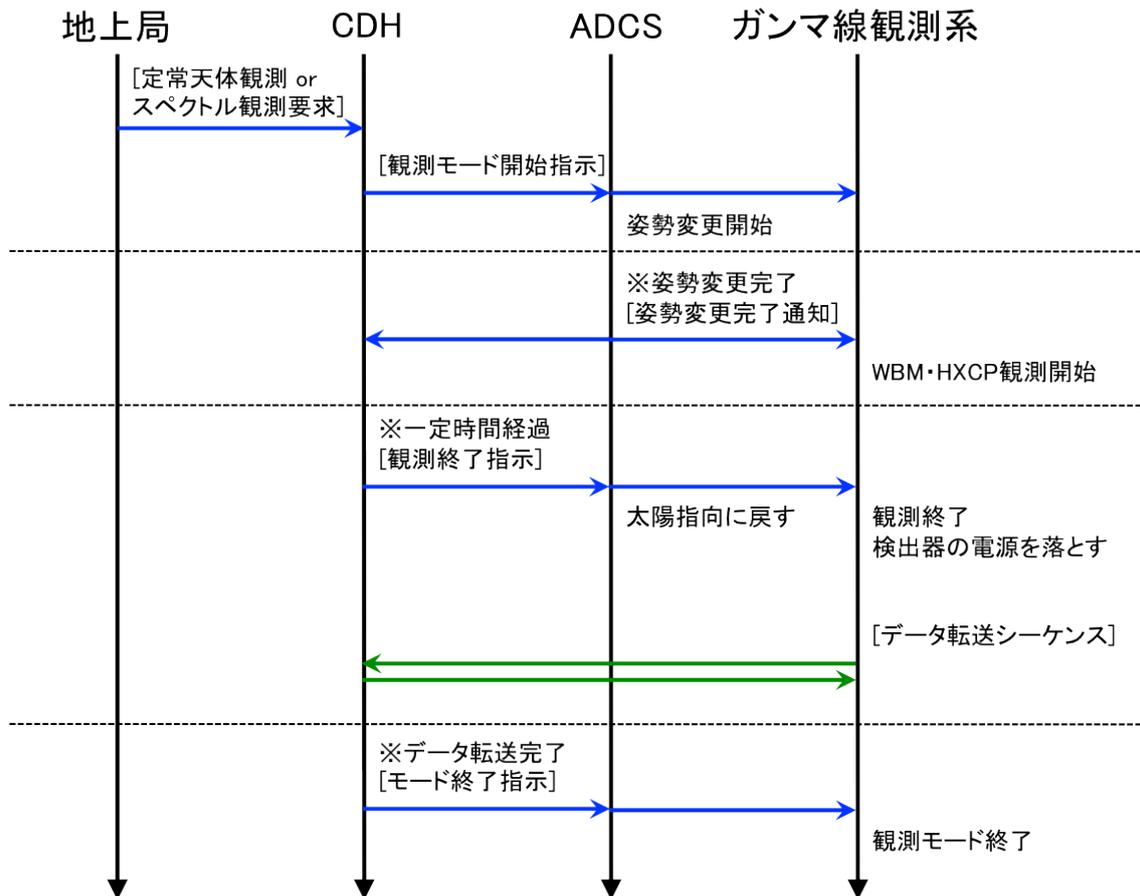


図 3.6: 定常天体観測・スペクトル観測ミッションのシーケンス図。図の見方は図 3.5 と同様である。指定方向への姿勢変更が完了した後に観測を開始する。一定時間経過で観測を終了し、データ転送を行う。

1. 定常天体・スペクトル観測モード設定

地上局からのコマンドで、定常天体、もしくはスペクトル観測モードを開始する。ADCS系はMTQで指定方向に姿勢変更(or 太陽指向)する。

2. 姿勢変更完了、観測開始

姿勢変更が完了したら、ガンマ線観測系の観測を開始する。

3. 観測終了、太陽指向、データ転送

一定時間経過後、観測を終了し、太陽指向に戻す(太陽指向していない場合)。検出器と信号処理回路の電源を OFF にし、観測データ転送を開始する。

4. モード終了

姿勢変更とデータ転送が完了したらモードを終了する。

3.4.3 データ転送

大容量データを転送するシーケンスである。ミッションデータの転送や、SRAM 書き換えで使用する。以下で、ガンマ線観測系から CDH 系にミッションデータを転送する場合の例にして説明する。CDH 系からガンマ線観測系に転送する場合は、ここで説明するシーケンスが逆になる。データ転送シーケンス図を図 3.7 に示す。

1. ミッションデータ転送開始要求通知

CDH 系に転送の可否を訊ねる。Ack が(受信側から送信側へ送られる肯定的な返事)返って来た場合、次のステップに進む。合わせて総ミッションデータ量も送信する。

2. ブロック情報通知

データ転送は、1 ブロック (=2 kByte) を基本単位としてシーケンスを進める。ここでは、これから何ブロック目のデータを送信するか CDH 系に伝える。

3. ミッションデータ転送

1 ブロック分、ミッションデータを転送する。

4. CRC(Cyclic Redundancy Check) 値送信

ミッションデータのチェックサムとして、誤り検出符号の一種である CRC 値を計算して CDH 系に送信する。CDH 系でも同様に、受信したミッションデータから CRC 値を計算して比較する。CRC 値が異なっていれば再送要求をかける。

5. 転送完了通知

全データの転送が完了したら、最後に転送完了通知を CDH 系に送る。

1. 地上局からのコマンドでFRAM 書き換えシーケンスを開始。
2. ガンマ線観測系の電源を ON にする。
3. 電源 ON から 1 秒以内に、CDH 系が書き込み開始コマンドを UART 経由で送信。
4. 続けてプログラムデータを UART 経由で送信。
5. 最後のコマンド受信から 1 秒経過でガンマ線観測系のプロセッサが起動する。
6. CDH 系が HK 要求、ガンマ線観測系が返信。
7. HK を地上局にダウンリンク

SRAM 書き換え

SRAM 書き換えは、プロセッサがソフトウェアで処理する。ガンマ線観測系の電源が ON の状態から実行する。

1. 地上局からのコマンドで SRAM 書き換えシーケンスを開始。
2. CDH 系からガンマ線観測系に、データ転送シーケンスを用いてプログラムデータを SRAM の空き領域に転送。
3. CDH 系がガンマ線観測系に SRAM 書き換え開始コマンド送信。
4. SRAM 書き換え、およびパラメータ初期化を実行。
5. CDH 系が HK 要求、ガンマ線観測系が返信。
6. HK を地上局にダウンリンク

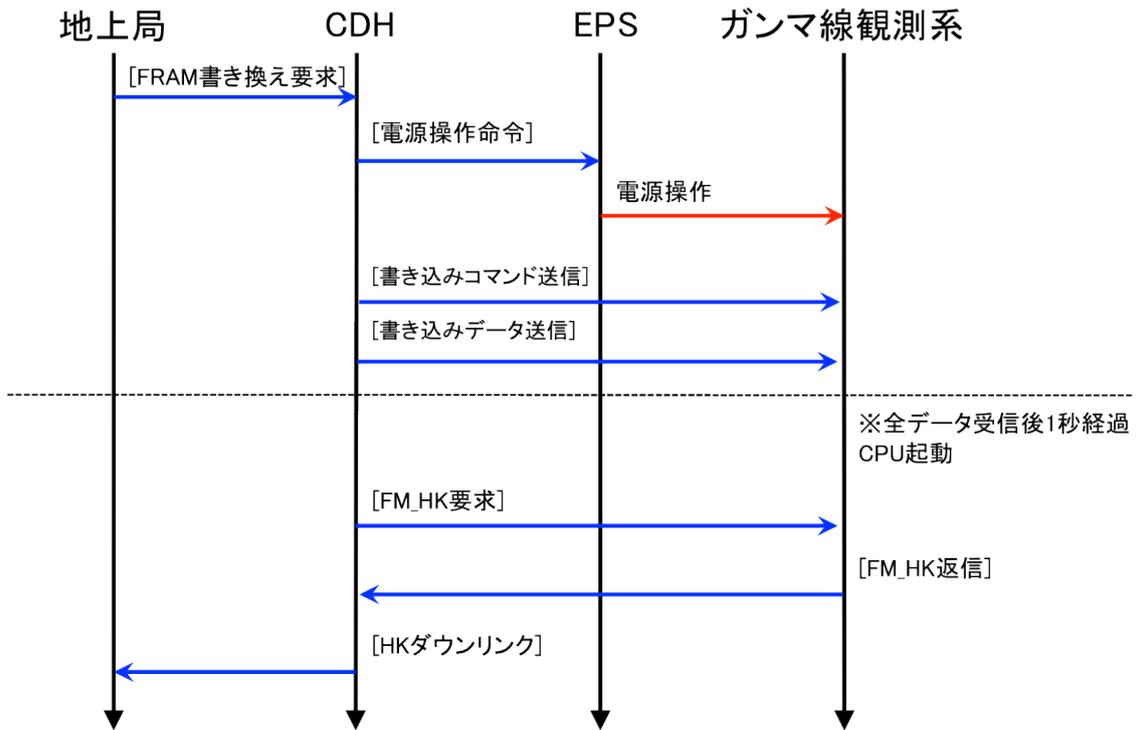


図 3.8: FRAM 書き換えシーケンス図。赤線は電源操作を表す。他の線は図 3.5 と同様である。電源操作から 1 秒以内に特定のコマンドとともにプログラムデータを送信する。

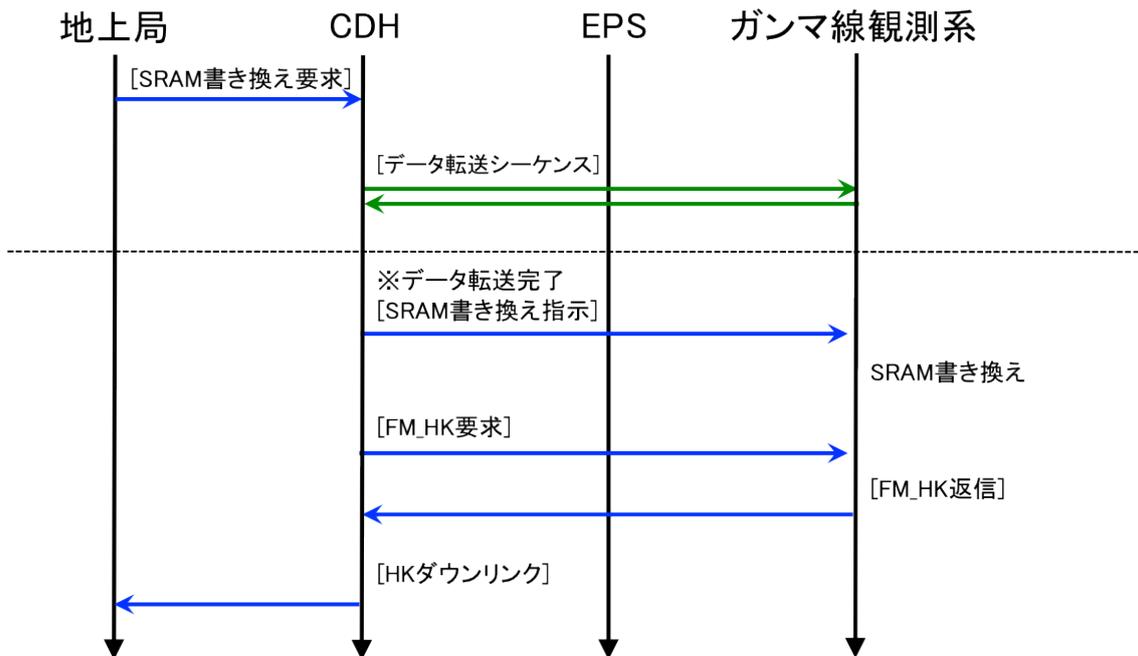


図 3.9: SRAM 書き換えシーケンス図。図の見方は図 3.5 と同様である。

3.4.5 その他シーケンス

その他、細かいシーケンスについて記載する。

動作確認、機器準備

動作確認シーケンスは主にデバッグと、GRB 観測に必要なガンマ線観測系の機器準備に用いる。検出器と信号処理回路の電源の制御、スレッシュホールドや WBM、HXCP 用 APD の印加電圧の設定などもこのシーケンスの枠組みで行う。基本的にガンマ線観測系内で閉じている処理は、このシーケンスで対応する。

1. 地上局から CDH 系にコマンドをアップリンク。
2. CDH 系は即時 or 指定時刻にガンマ線観測系にコマンドをそのまま送信。
3. ガンマ線観測系はコマンドを受けたら対応する動作を実行し、CDH 系に結果を返送。
4. CDH 系は受け取った返答をそのままダウンリンク。

SAA

SAA は WBM の計数などからの判定と、ADCS から送信される衛星の位置データからの 2 つ⁵の判定がある。

1. WBM もしくは位置データから SAA 判定
2. 全系に SAA アラート送信。PMT の印加電圧を 0V にする。
3. SAA を通過したら SAA 終了通知を全系に送信。PMT の印加電圧をもとに戻す。

時刻・位置データ取得

時刻データは 16 秒おきに、位置データ 1 秒おきに、ADCS 側から定期的送信される。時刻データを受け取ったらガンマ線観測系の時刻とともに保存しておき、ミッションデータと一緒にダウンリンクして、地上で時刻補正を行う。

また、位置データを受け取ったら、ガンマ線観測系のメモリに保存した SAA マップと照らしあわせて SAA 判定を行う。

⁵実の所もう 1 つある。デバッグコマンドを用いて任意の時刻に SAA アラートを発行できる。

終了シーケンス

省電力モード(セーフモード)に移行するためのシーケンスである。CDH系からセーフモード移行要求コマンドを受け取ったら、HVを落とし、移行準備完了メッセージをCDH系に送信する。

第4章 フライト用硬X線偏光計 (HXCP) の開発

HXCP(Hard X-ray Compton Polarimeter, 硬X線コンプトン偏光計)は、TSUBAME衛星に搭載される、GRBの偏光を観測する検出器である。この章では、HXCPの原理や構造、回路、パラメータ調整について説明する。

4.1 コンプトン散乱を利用した偏光計の原理

X線は横波である電磁波の一種なので、当然偏光する。ただし、波長が非常に短いので、波動性よりも粒子性が顕著に現れる。そのため可視光のように、偏光子等を用いた偏光測定は行うことができない。しかし偏光X線は、その生成過程や物質との相互作用において、無偏光X線とは違った性質を示すことが知られているため、このような性質を利用することで偏光測定を行うことができる。

手法としては、ブラッグ反射や光電吸収、コンプトン散乱を利用するものがあり、HXCPではコンプトン散乱を利用する。偏光した光子が物質内でコンプトン散乱を起こすとき、光子の散乱方向分布は光子の偏光方向と偏光強度に依存する。なお、以下で用いる用語「偏光」は全て、「直線偏光」のことを指す。偏光方向とは、電場の振動方向を指す。

4.1.1 コンプトン散乱

コンプトン散乱は、物質に入射した光子が物質内の電子と衝突を起こすことによって、光子と電子間でエネルギーと運動量をやりとりする過程である(図4.1)。以下、電子が静止していると考え、「散乱角 θ 」と、「散乱方位角 η 」を図4.2のように定義する。

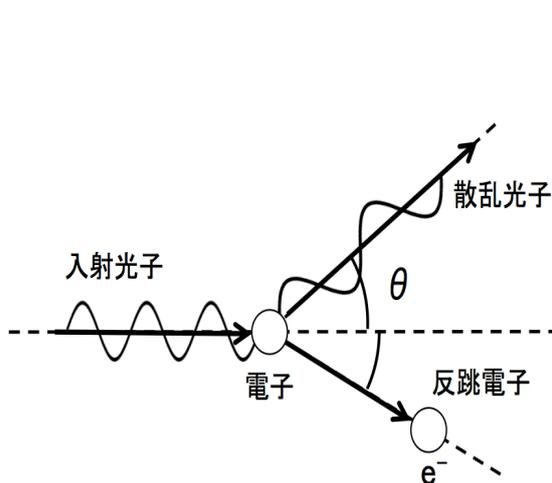


図 4.1: コンプトン散乱模式図。入射光子は散乱角 θ に応じたエネルギーを電子に与え、エネルギーを受け取った電子は反跳電子として放出される。

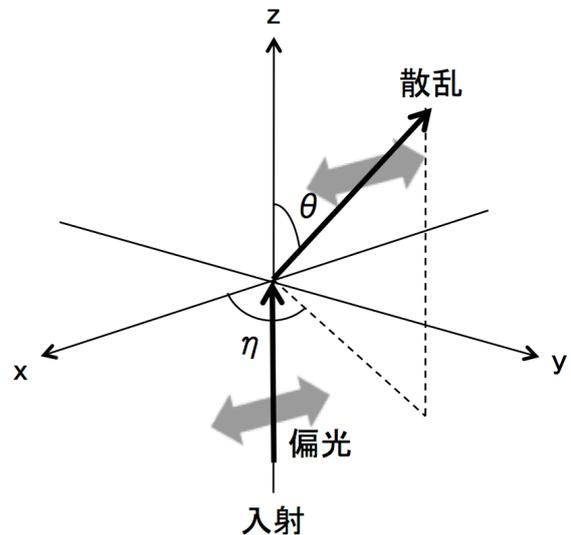


図 4.2: 偏光した光子の散乱の模式図。 θ は入射方向と散乱方向がなす角度 (= 散乱角)。 η は散乱方向を、入射方向に垂直な面に投影したときの角度 (= 散乱方位角)。偏光方向に垂直な方向に最も散乱されやすい。

4.1.2 エネルギー

コンプトン散乱された散乱光子のエネルギー E' は、入射光子のエネルギーを E_0 、入射方向に対する散乱角を θ 、電子の静止質量を m_e 、光速を c とすると、以下のように書ける。

$$E' = \frac{E_0}{1 + \left(\frac{E_0}{m_e c^2}\right)(1 - \cos \theta)} \quad (4.1)$$

コンプトン散乱で入射光子が電子に与えるエネルギー ΔE は、エネルギー保存則より入射光子と散乱光子のエネルギーの差に等しく

$$\Delta E = E_0 - E' = \frac{\frac{E_0^2}{m_e c^2}(1 - \cos \theta)}{1 + \left(\frac{E_0}{m_e c^2}\right)(1 - \cos \theta)} \quad (4.2)$$

すなわち、散乱方向に応じて散乱後の光子のエネルギー、及び光子が散乱体で反跳電子に与えるエネルギーが決まる (図 4.3)。

4.1.3 散乱断面積

光子がコンプトン散乱を起こすときの散乱断面積は、光子の偏光状態によって異なる。

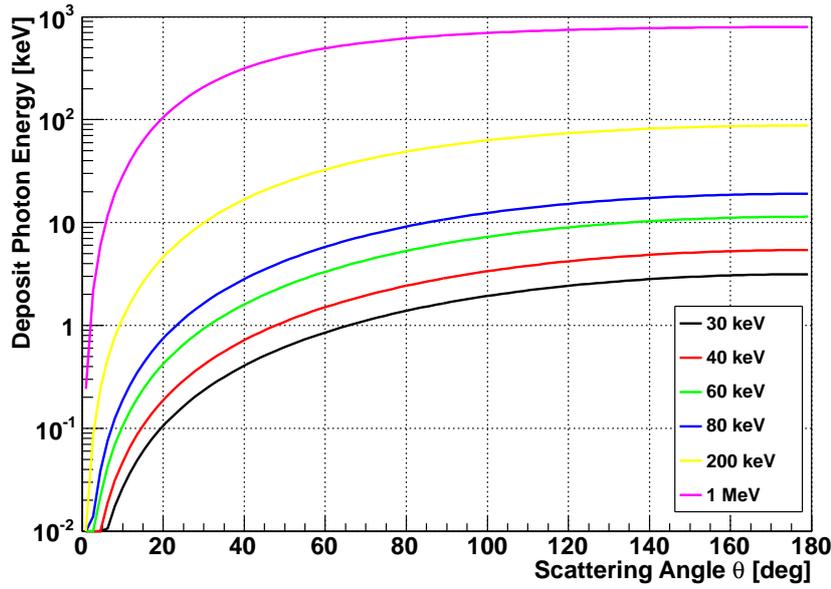


図 4.3: 光子がコンプトン散乱した時に反跳電子に与えるエネルギー。横軸が散乱角、縦軸が散乱体で落とされる光子のエネルギー。0° は透過を意味するので、反跳電子に与えるエネルギーは 0 になる。

光子がコンプトン散乱をした場合、微分散乱断面積は Klein-Nishina の式として以下のようにならされる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_0^2 \epsilon^2 (\epsilon + \epsilon^{-1} - \sin^2 \theta) \quad (\text{無偏光の光子の場合}) \quad (4.3)$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_0^2 \epsilon^2 (\epsilon + \epsilon^{-1} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \eta) \quad (\text{偏光した光子の場合}) \quad (4.4)$$

ここで r_0 は電子の古典半径である。 ϵ は光子の入射エネルギー E_0 、光子の散乱後のエネルギー E' 、散乱角 θ から、

$$\epsilon = \frac{E'}{E_0} = \frac{1}{1 + \frac{E_0}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (4.5)$$

と表される。 η は散乱方位角である。これらの式からわかるように、無偏光の光子は散乱角 θ が一定の下では、散乱断面積も一定になる。すなわち、等方的に散乱する。

偏光した光子の散乱断面積は、散乱方位角 η に依存する。式 4.4 で、角度 θ を固定すると、散乱断面積は $\eta = 90^\circ$ の時に最大になることがわかる。つまり、偏光した光子がコンプトン散乱する場合、その偏光面に対して直角に散乱しやすい。これが、偏光した光子が持つ散乱異方性であり、これを利用することで散乱型偏光計をつくることが可能になる。

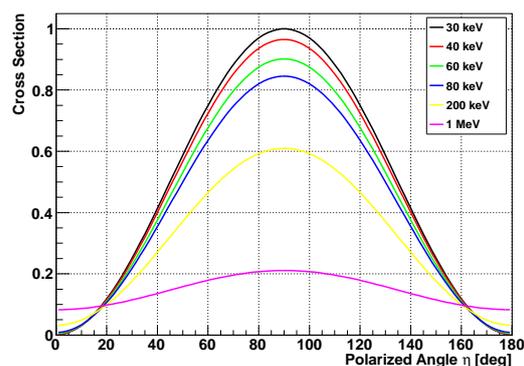
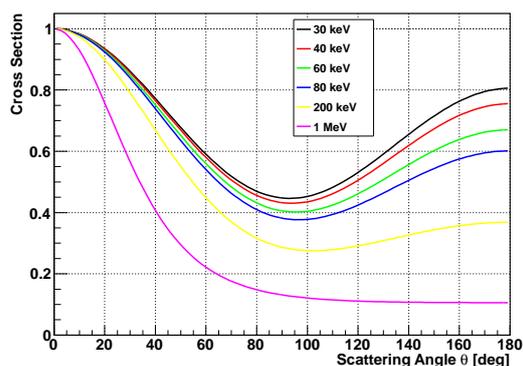


図 4.4: 散乱角 θ に対する散乱断面積 (無偏光の光子の場合)。エネルギーが高くなるにつれて後方散乱は減少していく。
 図 4.5: 散乱方位角 η に対する散乱断面積 (偏光した光子の場合)。エネルギーが高くなるにつれて、散乱方向の異方性は弱くなっていく。

4.1.4 検出器配置の最適化

偏光した光子は散乱方位角 η に依存する散乱断面積を持つため、散乱方位角に異方性が生じる。図 4.6 のように、微小な検出器 A、B で構成される理想的なコンプトン散乱偏光計を考える。入射光子は散乱体 A でコンプトン散乱され、散乱された光子は吸収体 B で光電吸収されるとする。偏光した光子のコンプトン散乱の異方性から、散乱方位角 η に応じて、検出器 B でのカウント数は変調する。

入射光子の偏光方向を $\eta = 0^\circ$ とする。Klein-Nishina の式 (4.4 式) から、 $\eta = 90^\circ$ のときにそのカウント値は最大 (N_\perp) となり、 $\eta = 0^\circ$ のときにカウント値は最小 (N_\parallel) となる。ここで、変調の度合い Q を式 (4.6) のように定義する。

$$Q = \frac{N_\perp - N_\parallel}{N_\perp + N_\parallel} \quad (4.6)$$

N_\perp と N_\parallel は散乱断面積に依存するので、 Q はさらに式 (4.4) から、

$$Q = \frac{\sin^2 \theta}{\epsilon + \epsilon^{-1} - \sin^2 \theta} \quad (4.7)$$

と表される。

Q は、散乱方向の変調の大きさを示す値である。もし Q が小さくなると、偏光による変調が統計誤差の範囲内に入ってしまうため、偏光しているかどうか判別がつかなくなる。よって、コンプトン散乱型偏光計では、なるべく Q が大きくなるような検出器配置をとらなければならない。式 (4.7) を見ると、 Q が最大値をとるのは、 $\theta = 90^\circ$ である。つまり、コンプトン散乱偏光計での偏光検出能力を最も高くするためには、 $\theta = 90^\circ$ のイベン

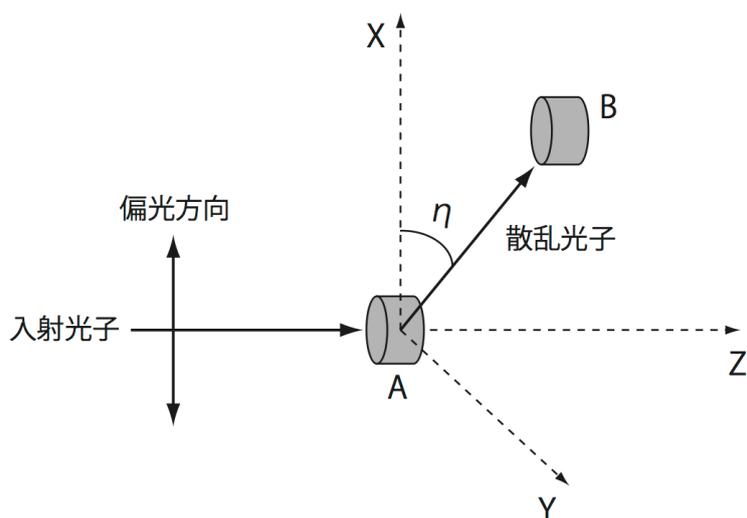


図 4.6: 散乱型偏光計の原理。微小な検出器 A、B を考える。光子は散乱体 A でコンプトン散乱し、吸収体 B で光電吸収を起こす。このようなイベントの割合が、散乱方位角 η に応じて変化する。

トを検出すればよく、吸収体を入射方向に対して $\theta = 90^\circ$ の位置に配置すればよいことがわかる。

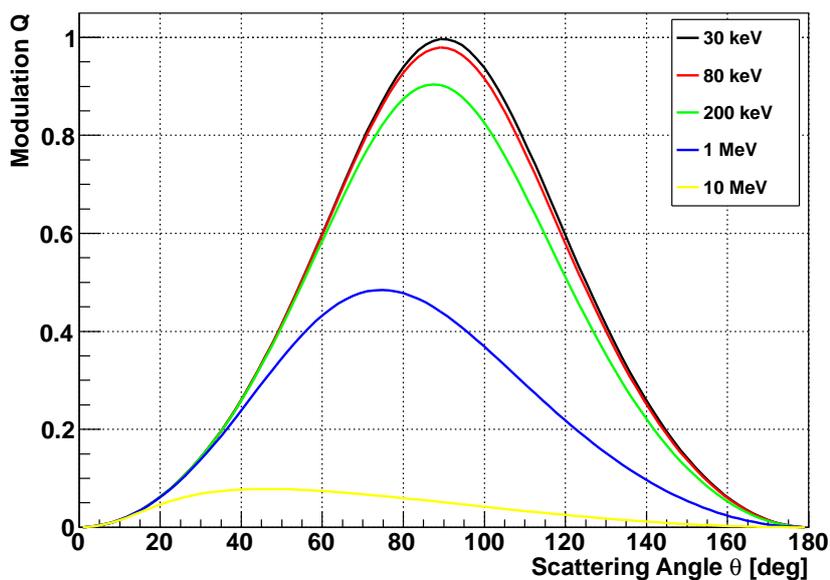


図 4.7: 散乱角 θ に対する変調 Q 。高エネルギーになるにつれて、変調が小さくなっていくことがわかる。硬 X 線領域では、 $\theta=90^\circ$ で変調が最大になる。

4.1.5 変調因子 (Modulation Factor)

ある検出器に、偏光度 P の光子を入射したときに得られる変調の振幅を Q とすると、同じ検出器が偏光度 100% を持つ光子に対して示す変調は以下の式で与えられる。

$$M = \frac{Q}{P} \quad (4.8)$$

この値 M は、散乱体・吸収体間の位置関係や検出器の大きさによって変化する値で、モジュレーションファクター (MF:変調因子) と呼ばれる。この式を変形すると、

$$Q = MP \quad (4.9)$$

となり、 M が大きい偏光計ならば、偏光度 P が小さい光子に対しても、大きな変調 Q を得られるため、偏光を検出することが可能になる。このことから、モジュレーションファクター M は偏光計の偏光検出性能を示す指標として使われる。本論文では偏光度 100% の入射光子に対する M をモジュレーションファクターと定義する。

4.2 検出器

偏光計に使用される検出器について、さらに詳しく述べる。

4.2.1 HXCP の構造

TSUBAME 搭載用の散乱型偏光計は、入射してきた X 線をコンプトン散乱させて散乱位置を検出する散乱体と、散乱した X 線を光電吸収させて吸収位置を検出する吸収体から成る (図 4.8)。入射口から入射してきた X 線は、検出器中心の散乱体で散乱され、散乱体を取り囲む吸収体で吸収される。散乱体、吸収体は共にシンチレータ+検出器という構成をしており、散乱、吸収過程で光子が失ったエネルギーをシンチレータで光に変換し、シンチレーション光を検出することによって光子が付与したエネルギーを測定する。散乱体、吸収体でのエネルギー測定から、光子の散乱位置と吸収位置を検出できる。吸収体、散乱体両方でエネルギーを付与したイベントを計数して、散乱角度分布を取得することによって、光子の偏光度、偏光方向がわかる。

理想的な偏光計とは異なりシンチレータに奥行きがあるので、散乱角 90° 以外の様々な方向に散乱された光子も取得する。そのため、結果として検出器のモジュレーションファクターは低下してしまう。一方、散乱体の奥行きを小さくすると、入射光子が反応せず

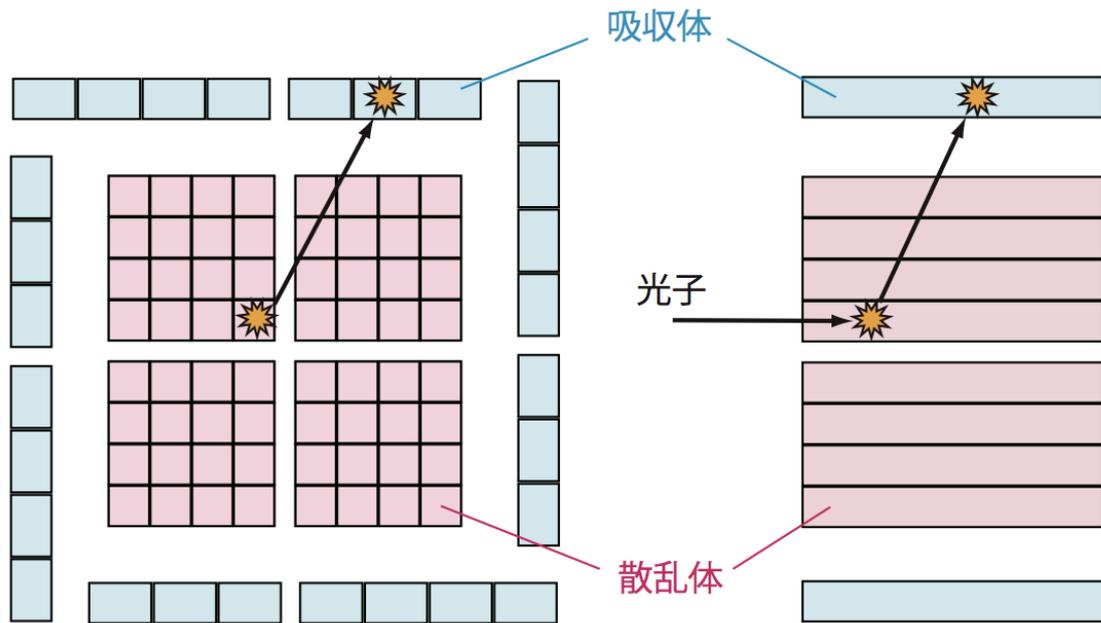


図 4.8: 散乱体・吸収体の配置図。入射してきた光子は散乱体でコンプトン散乱し、吸収体で光電吸収を起こす。

に通り抜けてしまう確率が上がるため検出効率が落ちる。また、散乱体と吸収体が近すぎると散乱角度の分解能が悪くなり、それによってもモジュレーションファクターは低下する。これらのことから、シミュレーションを用いて検出効率とモジュレーションファクターが最も良くなる散乱体、吸収体の最適な大きさ、位置関係を計算する必要がある。以下で述べる現在の検出器構成は、戸泉修論 [9] でシミュレーションによって求められた構成を元に考えられたものである。

以下では、散乱体、吸収体の構成と使用されている検出器について述べる。まず、TSUB-AME 偏光計の構成図を図 4.9 に示す。

散乱体

検出器中心に配置する散乱体には、プラスチックシンチレータを用い、そのシンチレーション光はマルチアノード光電子増倍管 (以下、MAPMT) を用いて検出する。プラスチックシンチレータは主原料である炭素の原子番号が 6 と小さく、HXCP が狙う硬 X 線領域 (30 - 200 keV) の光子に対する反応は、コンプトン散乱が最も支配的になる。コンプトン散乱で光子が失うエネルギーは非常に小さく、プラスチックシンチレータの発光光量も少ないため APD による検出は難しく、1 光電子程度レベルのイベントまで検出するために

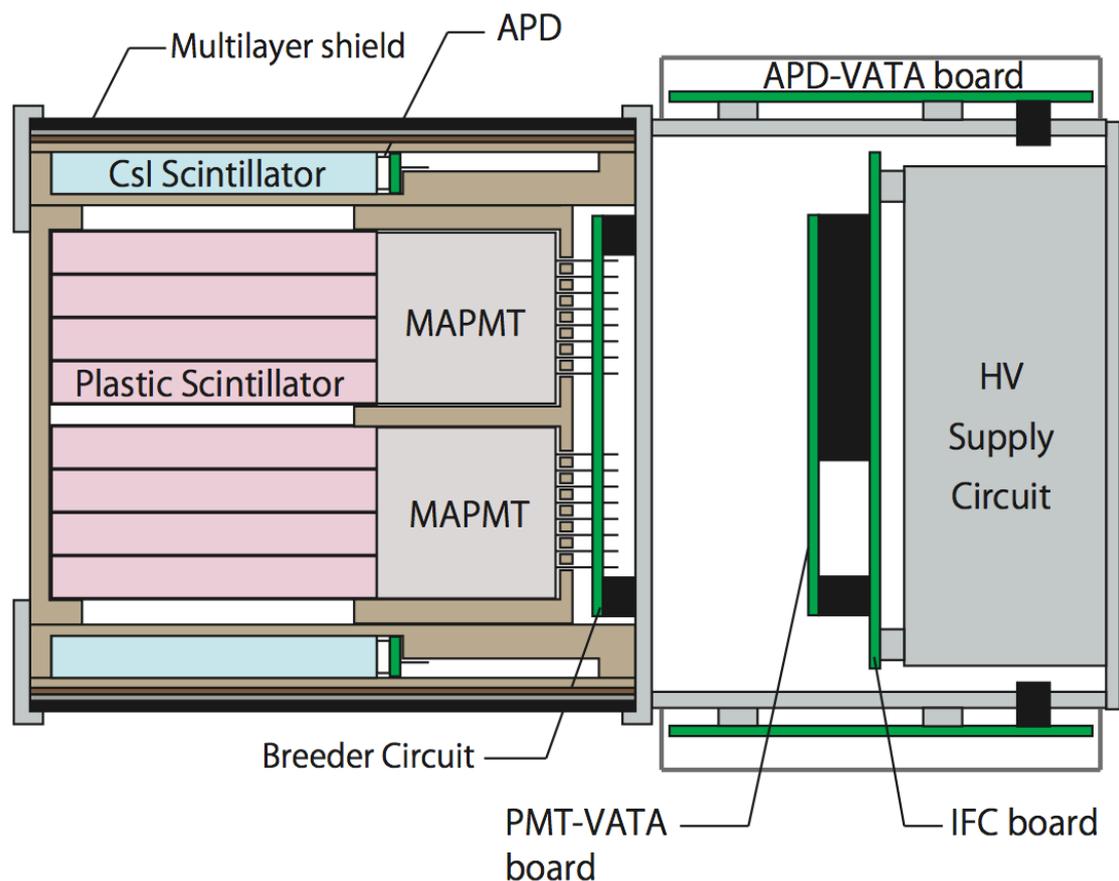


図 4.9: HXCP の構成図。散乱体にプラスチックシンチレータとその読み出しに MAPMT、吸収体に CsI シンチレータとその読み出しに APD を用いる。黄土色の部分は工業用プラスチック素材、灰色の部分はアルミで構成される。バックグラウンド低減のため、シンチレータの周りには銅、錫、タングステンの 3 層シールドを配置している。

は、どうしても光電子増倍管を用いる必要がある。我々が用いる MAPMT は、アノードが 16 に分かれている特殊な光電子増倍管であり、複数のシンチレータと組み合わせることで、多チャンネルの位置検出器として使用できる。本偏光計では、 $6.5 \times 6.5 \times 49 \text{ mm}^3$ の大きさのプラスチックシンチレータ 64 本と MAPMT 4 個を用いて、 8×8 ピクセルの散乱体を成している。

吸収体

散乱体を取り囲むように配置された吸収体には、CsI(Tl) シンチレータを用い、そのシンチレーション光はアバランシェフォトダイオード (以下、APD) を用いて検出する。CsI シンチレータは原子番号 Z が 53(I)、55(Cs) と大きく、100 keV 程度までの X 線のほぼ

表 4.1: 偏光計に使用するシンチレータの特性

シンチレータ	比重	原子番号	波長 [nm]	時定数 [ns]	光子数 [個/keV]	潮解性
Plastic	1.0	6	420	10	3	なし
CsI(Tl)	4.5	54	550	1000	61	少々

100%が光電吸収を起こして止まる。また、光量が多く、出力波長がAPDの量子効率が最も高い波長域(500~800 nm)に入るため、APDとの相性が良いという利点もある。APDは、Cute1.7+APD IIで初めて宇宙空間での放射線検出器としての動作実証が成された検出器である[4]。APDを用いる最大の利点は、小型かつ省電力な点であり、超小型衛星に搭載する検出器には最適である。これらは、検出器壁面1枚につき7個ずつ並べられ、CsIシンチレータ+APDが28セットで散乱体を取り囲むことになる。CsIシンチレータの大きさは $6.5 \times 10 \times 49 \text{ mm}^3$ であり、散乱体から偏光計の外壁へ向かう方向の厚さは6.5 mmである。

4.2.2 マルチアノード光電子増倍管 (MAPMT)

マルチアノード光電子増倍管(以下、MAPMTと記述する)は、入射光子によって光電面で放出された光電子が、ダイノード部分で増幅され、増幅された信号を複数のアノードで出力することにより、位置検出器としての機能を持つ光電子増倍管である(図4.11参照)。光電子増倍管は、信号の増幅率が大きく、ノイズが小さいため、1光電子程度の微弱なエネルギーを持つ光子も検出できる。そのため、偏光計の散乱体においてコンプトン散乱イベントとその散乱位置を知るために、MAPMTは最適な検出器であると言える。

これまで河合研究室は、浜松ホトニクスと共同でMAPMTの開発に取り組んできた。小型衛星開発の利点として、新技術の積極的利用が可能な点があるが、本偏光計に使用されるMAPMTにも新しい技術が取り入れられている。本偏光計で用いるR8900-M16 MOD-UBAは、光電面にウルトラバイアルカリを採用し、光子から電子への変換効率(量子効率)を、従来の光電子増倍管に比べて倍以上(~40%)まで向上させ、16chの信号検出ができるMAPMTである。R8900シリーズは広い有効面積(~80%)と、各ピクセル間で均一な検出効率を持つように改良されたMAPMTであり、ウルトラバイアルカリの採用によって感度の向上、分解能の改善、検出エネルギー下限値の引き下げを達成した。さらに、MAPMTは、微細な内部構造がロケット打ち上げの振動に弱く、衛星に採用されづらいという経緯があったが、R8900-M16 MOD-UBAの開発ではレーザー溶接によるダイ

ノード強化によりこの弱点も克服し、高感度で耐震性を持つ優れた MAPMT を実現した。以前から MAPMT R8900-M16 MOD-UBA 単体の基礎特性評価および振動試験を実施しており、その結果は戸泉修論 [9] に詳しくまとめられている。さらに、偏光計や衛星筐体による共振を考慮した振動・衝撃試験を実施し、固定方法を工夫することでロケット振動に耐えうることが確認された。振動試験の結果は林卒論 [13] でまとめられており、衝撃試験の結果については 6.3 節でまとめる。



図 4.10: R8900-M16 MOD-UBA。
量子効率はおおよそ 40%である。

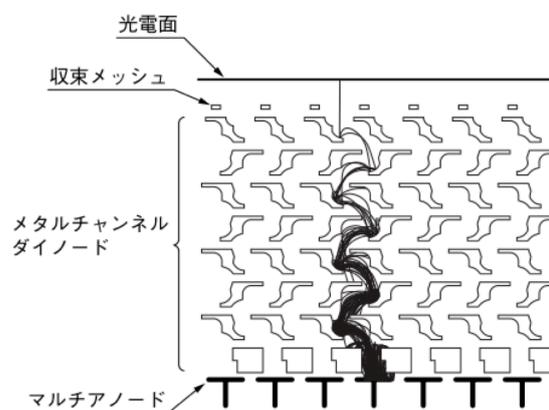


図 4.11: MAPMT の構造。

光電面から放出された光電子は、位置情報を保ちながらメタルチャンネルダイノードで増幅され、アノードで信号として検出される。

フライト用 MAPMT 選定

LED を用いた 1 光電子測定を行い、MAPMT のゲインを測定することで、フライト用 MAPMT の選定を行った。選定基準はゲインが高く、かつ揃っているものである。

結果を図 4.12 と表 4.2 に示す。まず、ZB2638 と ZB3855 は、他のものに比べてかなりゲインが低いため除外した。残りの 5 つの中で見ると、ZB3849 は偏差は小さいが、ゲインも低い。ゲインと偏差のどちらが重要であるかを決めるのは難しいが、今回は 1 光電子程度の微弱なエネルギーを検出する必要があるため、出来る限りゲインが高いものを選ぶことにした。よって、フライト用 MAPMT はゲインが高い 4 つ、ZB3845、ZB3846、ZB3847、ZB3648 を採用した。

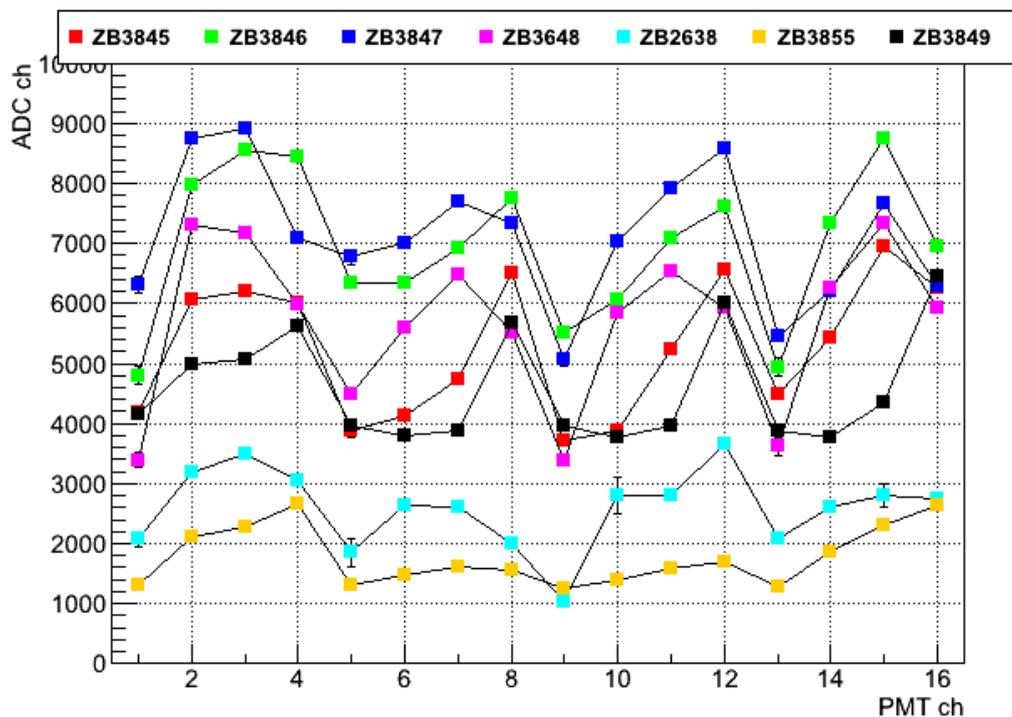


図 4.12: ch 毎のゲイン。横軸は PMT の ch 番号で、縦軸はピークの ADC 値である。7つの MAPMT に対して LED を用いた 1 光電子測定を行い、ゲイン分布を測定した。ゲインが高く、かつ揃っているものをフライト用 MAPMT として採用する。

表 4.2: MAPMT 毎のゲインの平均と偏差

MAPMT 番号	ピーク ch 平均	偏差
ZB3845	5270	1081
ZB3846	6960	1188
ZB3847	7130	1080
ZB3848	5670	1269
ZB3849	4580	887
ZB2638	2590	640
ZB3855	1770	467

4.2.3 アバランシェフォトダイオード (APD)

アバランシェフォトダイオード (以下、APD と記述する) は、河合研究室が放射線検出器として世界で初めて宇宙での動作実証を行った半導体検出器である。APD は、量子効率が高く応答速度が非常に早いフォトダイオード (PD) と、高い信号増幅率を持ち少量の光子を検出できる光電子増倍管 (PMT) の両方の性質を併せ持つ。また、小型、軽量かつ頑丈で、低消費電力であることから、搭載スペースや使用電力に制限のある小型衛星に搭載するのに最適な検出器である。

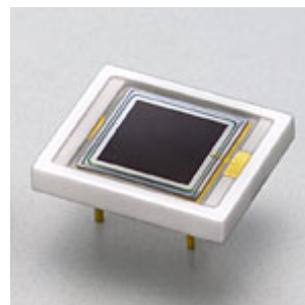


図 4.13: APD

APD は、pn 接合された半導体検出器であり、逆バイアスをかけて使用する。電圧をかけることで生じた空乏層に光子が入射すると、光子のエネルギーに応じた数の電子正孔対が生成される。APD には、高電圧が印加された増幅領域が存在し、生成した電子正孔対はこの領域でなだれ増幅を起こす。そのため、微弱な信号でも増幅して検出することができる。

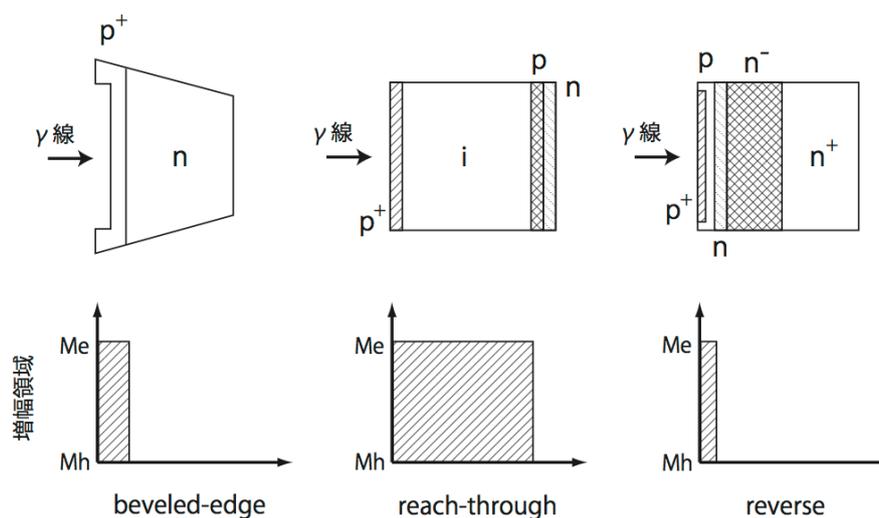


図 4.14: 各 APD の内部構造と増幅領域

APD は、その内部構造の違いによって、Beveled-edge type、Reach-through type、Reverse type の 3 種類に分類することができる (図 4.14)。これら 3 種類の APD は、最高性能を発揮するのに必要な印加電圧や、検出光子の波長域に対する検出効率が異なっており、用途に応じて種類を選ぶ必要がある。今回の偏光計では、CsI のシンチレーション光

検出が APD の使用目的である。そのため、暗電流が小さく、CsI シンチレータの波長域 (可視光) での量子効率が高い Reverse type を使用する。

フライト用 APD 選定

川上修論 [12] の基準で選定した。ゲイン曲線を考えると、正常な素子はゲイン 50 になる電圧とブレイクダウン電圧¹が 1 次の相関にのる。1 次の相関に乗らない素子は、ゲインに異常か、表面電流やバルク電流が大きい個体であるため、フライト品から除外する。さらに、予想される温度範囲で異常が見られないという条件も課す。また、放射線耐性という観点からは、ガンマ線は浜松ホトニクス株式会社の選定基準を超えたものは軌道上で耐えること、プロトンは Cute 衛星の同プロセスのものに異常が無いことを確認しているため問題ない。この選定を乗り越えた上で、暗電流が小さく、ゲインが揃っている APD28 個をフライト品として採用した。

4.2.4 信号読み出し回路、トリガシーケンス

偏光計の信号読み出し回路は、APD 系の信号読み出しを行う APD-VATA 基板、PMT 系の信号読み出しを行う PMT-VA 基板、それらからのトリガ処理およびデータ通信を仲介する IFC 基板に分けられる。HXCP の制御やデータ通信・保存は CPU 基板上の HXCP 用 FPGA が行う。以下で、信号読み出しに用いる VATA チップと、HXCP のトリガシーケンスに関して説明を行う。

VATA チップ

VATA チップは、アナログ信号読み出し用に製造された VLSI であり、それぞれも VLSI であるアナログ信号増幅部 (VA)、トリガ生成部 (TA) をまとめたものである。本論文では、特別な理由がない限り、VATA とひとまとめにして呼ぶことにする。

VA は主に各チャンネルの信号のサンプルホールドを行う。VA に入力された電荷は、電荷有感型前置増幅器 (Charge Sensitive Amplifier; CSA) によって電圧に変換され、さらに一定の時定数を持つ波形整形増幅器 (Slow Shaper) によって整形される。整形された信号の波高情報はサンプルホールドによって電圧として保存され、出力バッファから 1ch ずつ読み出すことができる。一方、TA は各チャンネルのトリガ信号の生成を行い、VA の動作

¹逆バイアス状態でもごくわずか流れる電流 (漏れ電流) が急激に大きくなり始める電圧。

タイミングを決定する。VA に入力された電荷は CSA 以降で分岐して TA に入り、VA より早い整形時定数をもつ波形整形増幅器 (FastShaper) によって整形される。Fast Shaper で整形された信号は、波高弁別器によって設定された電圧閾値を越えたものだけがトリガ信号となる。全チャンネル分のトリガ信号は OR をとって、1つのトリガ信号として出力される。VATA は内部に ADC が内蔵されたものもあるが、本偏光計の信号処理回路では、VATA の内部 ADC は使わず、VATA の外に置かれた ADC を用いて信号の A/D 変換を行う。以下に、VATA のシステム図 4.15 と、トリガシーケンス図 4.16 を示す。

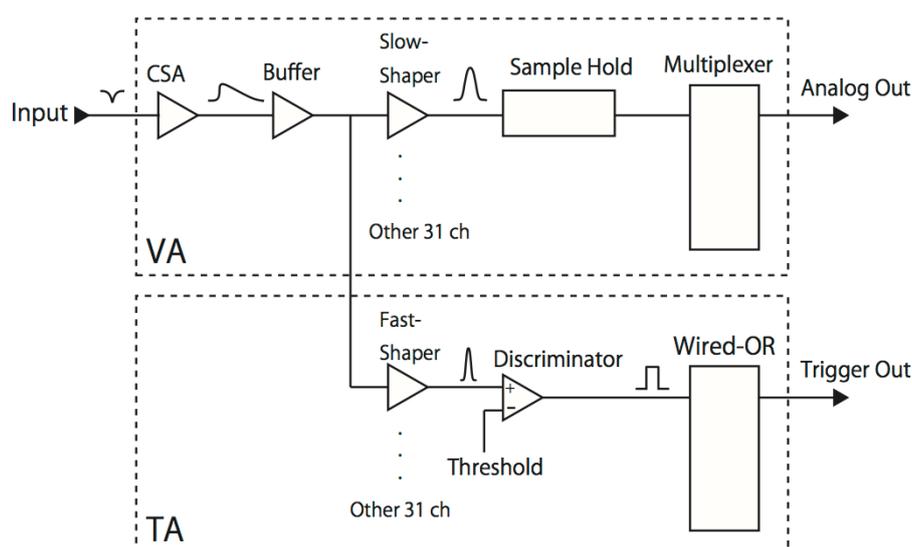


図 4.15: VATA のシステム図。CSA から出力された信号は、分割されて Slow と Fast の 2 つの整形アンプに入力される。早い整形時定数を持つ TA 側 (Fast) ではトリガ信号がつかわれ、VA 側 (Slow) ではそのトリガ時間に合わせて、信号のサンプルホールドが行われる。

HXCP では、APD および MAPMT からの多チャンネル信号処理をそれぞれ VATA を用いて行う。APD 用 VATA として、IDEAS 製 VATA462 という VATA チップを使用する。このチップと ADC を合わせた回路を 1 つの基板に載せ、これを以後、APD-VATA 基板と呼ぶ。HXCP では、APD-VATA 基板を 2 枚使用し、計 32ch の信号を読み出す。一方、PMT 用 VATA には、同じく IDEAS 製 VA32HDR14、TA32CG2 を合わせた VATA チップを使用する。この VATA を 2 個と ADC2 個を搭載した基板で、計 64ch の信号を読み出す。この基板を以後、PMT-VA 基板²と呼ぶ。トリガーがかかってから、全 ch の信号を読み出すまでにかかる時間は 100 μ s 程度である。

²PMT 用の読み出し回路では、TA は使用せず、基板上の論理回路を用いてトリガ生成を行なっているため、PMT-VATA 基板とは呼ばず、PMT-VA 基板と呼んでいる。

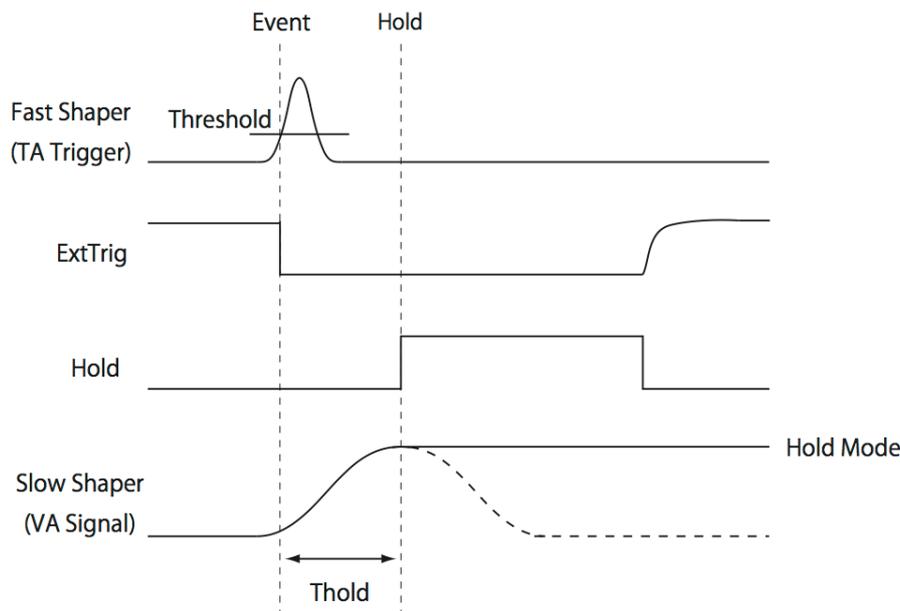


図 4.16: VATA のトリガシーケンス。まず、TA 側で Fast Shaper によって整形された信号からトリガ信号が作られる。トリガ信号から時間 Thold だけ遅らせた Hold 信号が VA に入力され、Slow Shaper の出力電圧をホールドする。

HXCP トリガシーケンス

PMT と APD の 2 種類の検出器を搭載する本偏光計では、使用する検出器によって 3 種類の異なるトリガシーケンスを用意する。本偏光計で行える測定は以下の 3 種類に分かれる。

- APD 単体での測定
- PMT 単体での測定
- コインシデンス測定

APD 単体、もしくは PMT 単体での測定は、主に動作確認やデバッグ、キャリブレーションに用いる。一方、コインシデンス測定は、本偏光計の特徴のひとつであり、偏光観測時に用いる。以下で、各測定でのトリガシーケンスについて説明する。

APD 単体測定 APD 単体での測定には、APD-VATA 基板を用いて、「VATA」の項で説明したものと同様のトリガシーケンスを用いる。

PMT 単体測定 PMT 単体での測定では、TA を使わずに MAPMT の最終段ダイノード信号からトリガ信号をつくり、サンプルホールドのタイミングを決める。これは、一度分散させた信号をもう一度 TA で集めるより、ダイノードから直接トリガを作ったほうが、回路として簡単であるからである。

コインシデンス測定 散乱型偏光計では、コンプトン散乱イベントを取得する必要がある。本偏光計ではコンプトン散乱イベントを取得しつつ、ノイズを落とす目的で、PMT と APD の同時イベントのみを計測するモードを用意する。これを以後、「コインシデンス測定」と呼ぶ。コインシデンス測定でのトリガシーケンスは、図 4.17 のようになる。

コインシデンス取得のトリガとして起点になるのは、PMT のダイノード信号である。PMT のダイノード信号がスレッシュホールドを超えると、PMT トリガが立ち上がる。このとき、PMT 信号の波高値を記録しておき、PMT トリガの立ち上がりから一定時間 (Tcoin) 経過するまでに APD トリガが立ち上がると、コインシデンスイベントとして判定する。そして、記録されていた PMT 波高値のデータを読み出しに行く。一方、APD 信号は、PMT トリガから一定時間 (Thold) だけ経過した時点でサンプルホールドされ、波高値が読み出される。

トリガレート異常問題

エンジニアリングモデル開発時、特にコインシデンス測定において、トリガレートが半分になったり、まったくトリガしなくなるといった問題があった。この問題は幾つかの要因が絡まっているようであったため、フライトモデルを開発するのに合わせて一からロジックを書きなおしてデバッグを行った。

新しいロジックでも同様にトリガレートの問題が発生したが、APD Thold(APD 用 VATA チップのホールドタイム)、PMT Thold(PMT 用 VATA チップのホールドタイム)、Tcoin(コインシデンス判定受付時間) の 3 つを変化させて、テストパルスを用いてトリガの様子を調べることで、バグフィックスを行った。その結果、ホールドタイムの設定ができていない、コインシデンス判定されなかったトリガのクリアをしていない、などの細かいミスが発覚した。それらを修正したところ、テストパルスの入射数と、HXCP でのコインシデンストリガ数が一致した。さらに後述する KEK 試験で、トリガ率がシミュレーションでの予想に近い値 18.5%(80 keV) を達成したため、問題は解決したと言える。

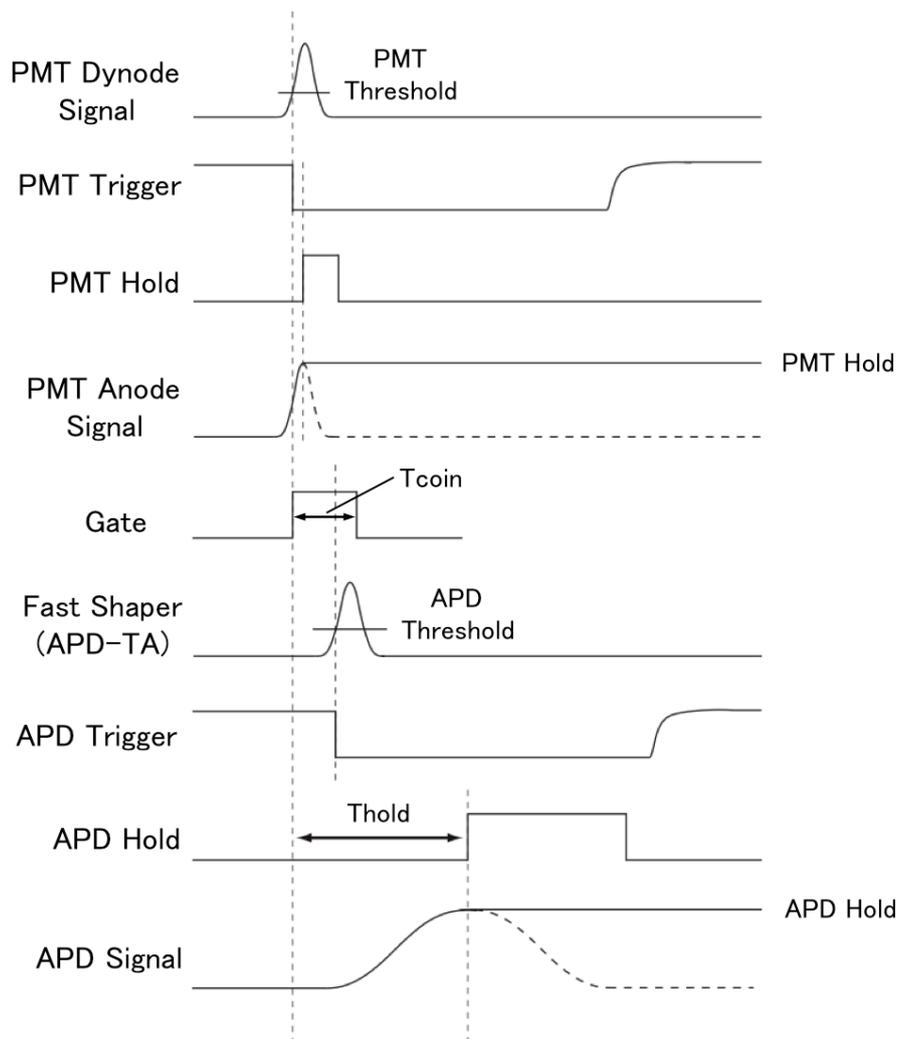


図 4.17: コインシデンス測定時のトリガシーケンス。最初に、シンチレータの減衰時定数の短い PMT のダイノード信号が入力され、トリガが立ち上がる。その時点から一定時間だけゲート信号が開き、この間に APD のトリガ信号が検知されると、コインシデンスイベントと判定する。

4.3 APD-VATA 基板デバッグ・パラメータ調整

エンジニアリングモデル開発時 APD-VATA 基板において、波高値の時間変動というバグがあった。それらは調査の結果、VATA チップに供給する電圧や電流値が安定動作点から逸脱していたことが主な原因であることが分かった。

調査ではまずは、「想定通り」に動作させることを念頭にデバッグを行った。「想定通り」とは、波高値の時間変動をなくし、安定して長時間動作することを意味する。ここではそれら APD-VATA 基板上の VATA チップを正常に動作させるためのデバッグやパラ

メータ調節について述べる。参考として、APD-VATA 基板上の VATA チップ信号入力段の回路を図 4.18 に示す。

4.3.1 デバッグ

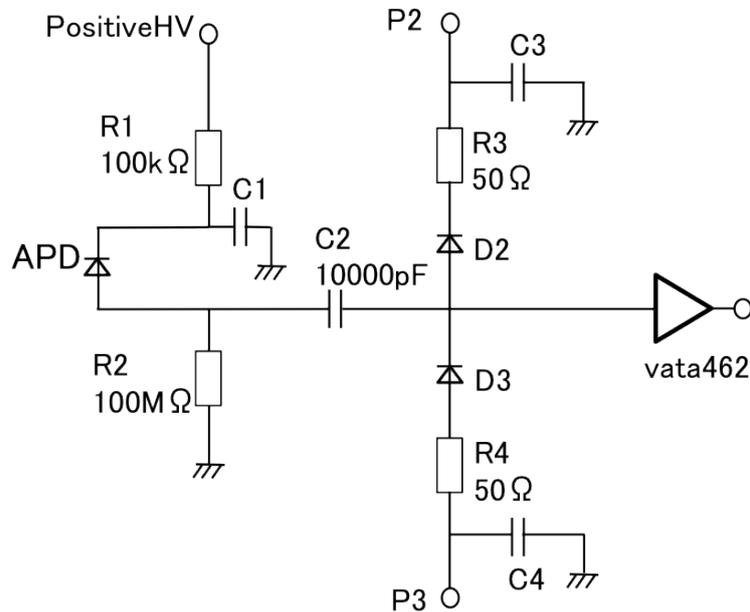


図 4.18: APD-VATA 基板上 VATA チップ信号入力段の回路図。PositiveHV から APD に高圧が印加され、APD の信号はアノードから読み出す。アノード読み出しは、高圧値が直接プリアンプ入力段に印加されないという利点がある。信号は C2 のコンデンサで AC カップルされて VATA チップに入力される。VATA チップ入力段には、クランプダイオード D2, D3 が挿入されていて、このダイオードによって入力段の電圧値域が制限されることで、プリアンプを保護することができる。

波高値の時間変動や、トリガレートの異常のバグフィックスのために、試行した実験について述べる。結論から先に述べると、波高値の時間変動バグフィックスにおいて、最も重要な要因は mbias と vfp の 2 つであった。これらが初期設定の場合、出力の ADC 値は時間が経つにつれて、ゼロ点であるペDESTAL 値 (エネルギーデポジットの無いときに読み出された ADC 値) まで落ち込み、それ以降は信号を入力してもまったくトリガしなくなってしまう。また、ペDESTAL 値まで落ち込みはしないものの、より長い時間スケールでの緩やかな時間変動も存在し、それは温度によるものであった。

mbias

mbias とは、VATA チップ内のメインバイアスネットワークにおいて参照されているバイアス電流である。他の全てのバイアスは、mbias を元に生成される。

当初は mbias を $50 \mu A$ に設定していた。しかし、mbias の推奨値は $250 \mu A$ であるということが後に判明した³。そのため、APD-VATA 基板上の mbias 電流制限抵抗を交換し、 $250 \mu A$ に対応できるようにして $250 \mu A$ に設定した。これだけでは波高値の時間変動バグは治らなかったが、消費電力が増大し、ペDESTAL 値が 1600 から 800 程度へと大きく変化した。また、Slow Shaper のピーキングタイムも $8 \mu s$ から $2 \mu s$ 程度へと、正常な値に変化した。これらのことから mbias は、VATA の動作に大きな影響を与えるパラメータであることが分かった。おそらく初期設定の $50 \mu A$ では、VATA チップをまともに駆動できていなかったのではないかと予想される。

vfp

vfp とは、VATA 入力段プリアンプのフィードバック MOS-FET へ供給するバイアス電圧である。この値を調節することで、プリアンプの整形時定数を変えることができる(と予想される⁴)。入力電荷量が多すぎる場合、整形時定数の値によってはプリアンプがサチュレーションを起こして出力が一定値に張り付いてしまう可能性がある。なので、波高値の時間変動がプリアンプのサチュレーションによるものであるならば、vfp を調整すれば解決する可能性がある。

vfp は当初、 -430 mV に設定されていた。また、推奨値は -600 mV であるということが後に判明した。だがしかし、このどちらの値でも波高値の時間変動は直らなかった。そこで、mbias と vfp の値を幾つか変えて測定を繰り返し、安定動作点を探った。その結果、 $\text{mbias} = 250 \mu A$, $\text{vfp} = -300 \text{ mV}$ という組み合わせで、後述する温度変動の対処をすれば、波高値の時間変動は起こらないことが分かった。

この $\text{vfp} = -300 \text{ mV}$ という値は、正常動作を優先させた上で出来る限りゲインを下げないようにして決定した値である。図 4.19 は横軸に vfp、縦軸にゲインをとったグラフである。ゲインは ^{137}Cs のスペクトルを、波高値が時間変動するまえに測定を終了し取得することで様々な vfp の値に対して求めた。ゲインは $\text{vfp} = -600 \text{ mV}$ 付近で極大となることがわかる。正常動作しているのであれば vfp は推奨値でもあるこの値を採用すべきである

³当初そのチップのマニュアルが見つからず、別チップのマニュアルを元に値を設定していた

⁴VATA チップの詳細は公開されていないため、推測である。

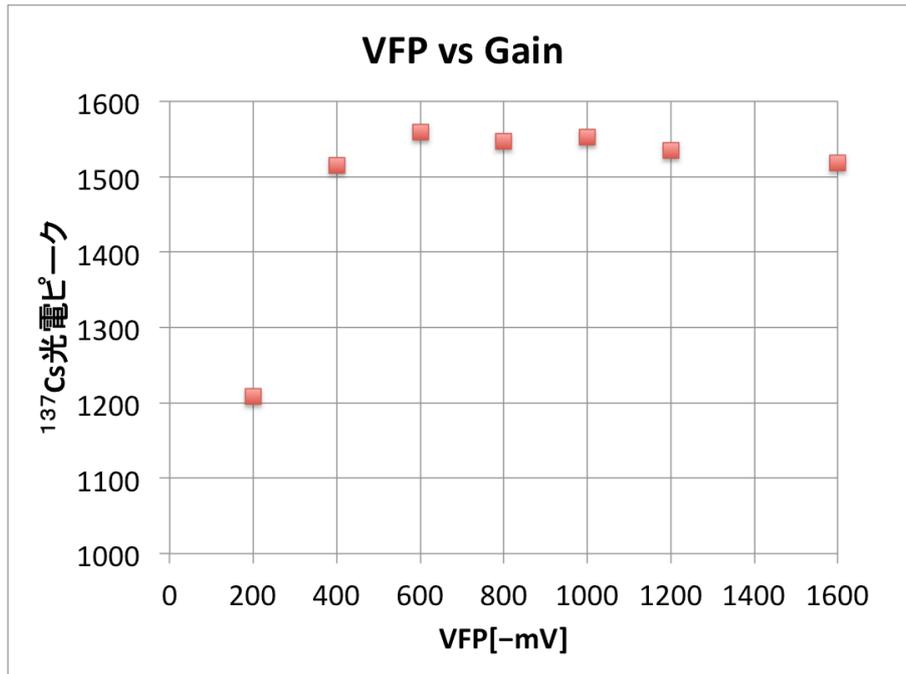


図 4.19: vfp に対するゲインのグラフ。横軸が vfp の値で、縦軸は ¹³⁷Cs の光電吸収ピークの値である。エラーはプロット点のサイズに埋もれる程度の大きさである。mbias は 250 μ A に設定してあり、波高値の時間変動が起こる前に測定を終了させた。ゲインが極大となるのは -600 mV 付近であることがわかる。しかしこの値では波高値が時間変動してしまうため、vfp の値は時間変動せずに出来る限りゲインが高くなる -300 mV を採用した。

う。しかし、波高値の時間変動が発生しないというのが当然第一条件であり、それでいて最もゲインが高くなる値として vfp = -300 mV を採用した。VATA チップの詳細は明かされていないことやその他の事情も相まって、原因を追求するのは難しいが、この値で長時間動作させて異常は発生していないため問題ないであろうと結論付けた。

ペDESTALの温度変動

mbias と vfp だけでなく、他にも波高値の時間変動に関わってくる要因が存在し、それは基板の温度であった。ペDESTALが温度によって変動するという事が分かった。ペDESTALは ADC 値のゼロ点であるため、ペDESTALが変われば信号が入力されたときの出力 ADC 値もその分変化してしまう。

ペDESTALの温度による変動を図 4.20 に示す。恒温槽で温度を一定に保ちつつ、ダミートリガでペDESTAL値を取得した。温度を変えると、それに合わせてペDESTAL値も変化していることがわかる。この問題には、他の ch の値を引くという対策をとる。すべての

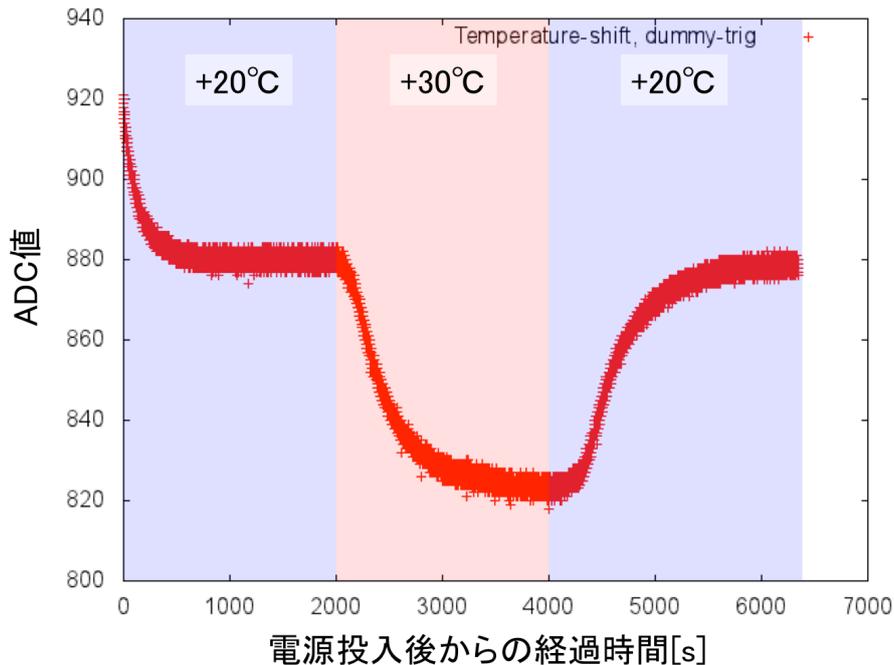


図 4.20: ペDESTAL値の温度変化。恒温槽で温度を一定に保ちながらダミートリガでペDESTAL値を取得。温度を変えるとペDESTAL値が変動するのがわかる。また、最初の5分間ほど続くペDESTAL変動は、電源投入によって基板温度が上がったことが原因だと考えられ、基板温度が平衡点に達するまで5分ほどかかることを示唆している。

chが同様の温度変化を示したため、温度変化によるペDESTAL変化は他のchの値を引くことで打ち消すことができる。

その他の試行

以下、効果が見られなかった、もしくは対策として十分ではなかった試行について簡単に記述する。基本的に mbias と vfp は、推奨値の $250 \mu A$ と $-600 mV$ の設定で調査した。

- DCカップル

図 4.18 の AC カップルコンデンサ C2 を外して、DC カップルで APD の信号を読み出すというものである。温度が $+20^{\circ}C$ 以下で APD の信号を読みだした場合は安定動作をすることがわかった。当初は対策の本命かと思われたが、なぜかテストパルスの場合は変わらず波高値の時間変動が発生したのと、APD の場合でも $+30^{\circ}C$ 以

上になると発狂してしまうことから、対策としては不十分という結論になった⁵。

- クランプダイオード外し

図 4.18 のクランプダイオード D2, D3 を外してテストパルスを入力したが、安定しなかった。

- 負極性テストパルス入力

極性を間違えている可能性を考え、負極性のテストパルスを入力したが、安定しなかった。

- バイアス電流注入

1G Ω程の抵抗を介して 1 nA オーダーのバイアス電流をプリアンプに入力するというものである。安定動作はしたが、VATA チップ製造元に問い合わせた所、このような使い方は想定していないとのこと。設計からかなり外れた使い方をしてることになり、環境が変わるとふとしたきっかけで動作しなくなる可能性があるため、不採用となった⁶。

- CC_on

VATA チップの機能のリーク電流補償を使うかどうかの設定レジスタである。使用しない設定にした場合も、安定動作には結びつかなかった。その上ゲインも下がったので、現在は電力補償を使用する設定にしている。

- Prebi_hp

初段プリアンプの FET に流すバイアス電流をきめる設定レジスタである。設定を変えても安定動作には結びつかなかった。なお、大きなバイアス電流を流すと消費電力は増えるが、ノイズ性能がよくなる。そのため、バイアス電流を大きくする設定にしている。

- PosII

リーク電流のオフセット値をきめる設定レジスタである。設定を変えても安定動作には結びつかなかった。

⁵HXCP の温度は+20°C を超えないように熱設計を依頼しているが、+30°C ではなく+20°C で発狂するようにならないとも限らないため。

⁶さらに、基板の改修が必要になるという好ましくない点もあった。

4.3.2 パラメータ調整、レジスタ設定

前節では、APD-VATA 基板が安定動作する動作点を探った。ここでは、検出器の性能を最大限引き出すようなパラメータや、VATA のレジスタ設定について述べる。

共通スレッシュホールド

APD-VATA 基板上の 10bit DAC を用いて、APD 用 VATA チップの大域的なスレッシュホールド電圧を設定することができる。ここで設定したスレッシュホールドは、VATA チップ全 ch に共通して参照される。ゲイン 50 において、1bit はおよそ 2 keV に相当することが実験的に判明している。このスレッシュホールドは、HXCP の最高温度の+20°C で、トリガーレートが飽和しない程度の値に設定した。

スレッシュホールド微調整レジスタ

VATA チップの設定レジスタの 1 つで、ch 毎のスレッシュホールドを微調整できる。1ch につき 4bit あり、1bit はおよそ 1 keV に相当することが実験的に判明している。このスレッシュホールドの調整で、¹³³Ba など線源のスペクトルがどの ch でも同じ形になるようにした。

mask

VATA チップの設定レジスタの 1 つで、ch を個別にマスクできる。マスクされた ch はトリガしなくなる。VATA チップは 1 つにつき 32ch あるが、我々の設計ではそのうち半分の 16ch しか使用しないため、残りの 16ch はマスクしてある。もしどこかの ch が破損した場合も、このレジスタに値を設定してマスクすることになると思われる。

Thold

トリガしてからサンプルホールドするまでの時間である。SlowShaper の信号が最大となるような値に設定するのが良い。図 4.21 に、APDThold に対する出力 ADC 値の変化を示す。Thold の値はこのグラフを参考に、ADC 値が最大になるおよそ 3 μ s に設定した。

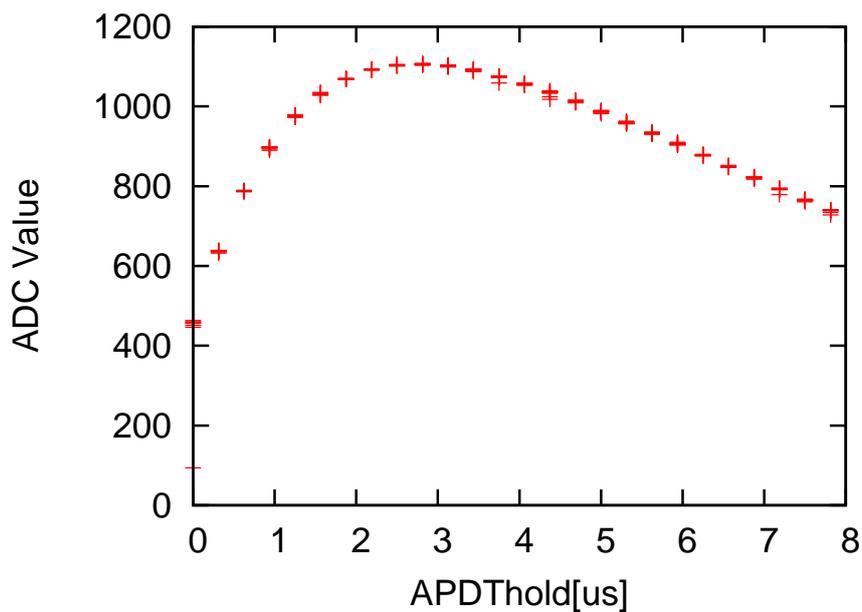


図 4.21: APDThold に対する出力 ADC 値の変化。3 μ s 付近で最大となっている。

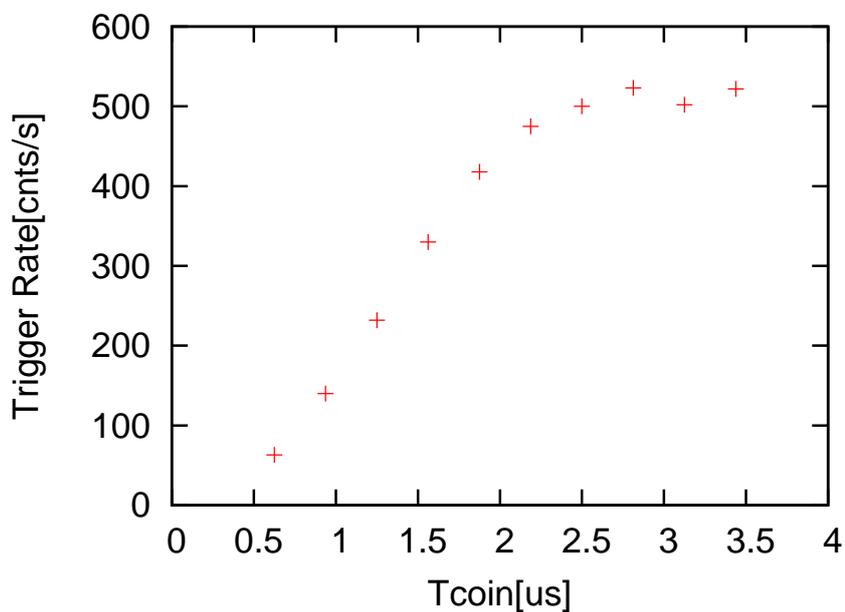


図 4.22: Tcoin に対するトリガーレート変化。Tcoin を長くしていくとカウントレートは上がっていき、3 μ s までいくと変わらなくなる。

TCoin

PMT のトリガが生成されてから、コインシデンス判定を受け付けるゲートの時間である。Tcoin の間に APD のトリガも立つとコインシデンスイベントだと判定される。短す

ぎると APD のトリガが立つ前にコインシデンス判定を終了してしまい、長すぎるとノイズでもコインシデンス判定してしまう。なので、ノイズでコインシデンス判定されず、本来のコインシデンスイベントのみを判定できるような T_{coin} の領域を探る必要がある。

図 4.22 に、 T_{coin} に対するトリガーレートの変化を示す。3 μs 付近でプラトーな領域に達しており、本来のコインシデンスイベントを全て拾えていると考えられる。よって T_{coin} はこのグラフを参考におよそ 3 μs に設定した。

4.3.3 総評

HXCP の開発において、最も大きな障害の 1 つは APD-VATA 基板を安定動作させることであった。実際、本論文に記載されている研究内容で、最もリソースを割いたのは APD-VATA 基板のデバッグであった。時間がかかった原因は、情報の引き継ぎがうまくいかなかったこと、そもそも資料(マニュアル)がほとんど無いこと、バグの要因が複雑に絡み合っただけで切り分けが難しかったことが挙げられる。

だがそのような困難はすべて乗り越え、後述する KEK 試験にて実際に正常動作し、目標性能を達成することを確認できた。この一連の作業によって初めて、地上での HXCP の動作は保証されたと言える。

第5章 HXCP フライトモデル動作・性能実証実験

2012年12月、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の放射光科学研究施設(Photon Factory; PF)において、HXCP フライトモデルの偏光検出性能評価実験を実施した。偏光検出性能評価だけでなく、ガンマ線観測系のフルセットで観測、データ取得・整形・転送といった実際に使用する機能の正常動作を確認する意味合いも含まれている。

5.1 セットアップ

5.1.1 実験施設

KEKのPFは、電子がシンクロトロン運動するときに放射されるシンクロトロン光を用いて、大強度のX線ビームをつくる放射光施設である。PFでは、1つのシンクロトロンリングから何本ものビームが引き出され、複数のビームラインが形成されている。ビームはさらに枝分かれして、各々の実験ステーションに送られる。

本実験で使用したのは、ビームライン14のステーションA(以下、BL14Aと記述する)である。BL14Aは電子を鉛直方向に何回も蛇行させる垂直ウィグラーを光源としている。BL14Aでは、X線をシリコン結晶でブラッグ反射させて、単色光を作るようになっており、鉛直方向に強く偏光したX線ビームが得られる。ビームのエネルギー領域は使用する結晶の種類によって決まり、今回使ったSi(553)では23.0~82.7 keVである。ビームのエネルギーは結晶の位置を変化させることで、任意のエネルギーに設定することが出来る。また、ビームの強度は照射ブース内のビーム経路上にタングステンや錫の薄板を置くことで、ある程度の増減が可能である。ビームの偏光度は正確にはわかっていないが、2008年2月時点で $89.7 \pm 0.6\%$ (50 keV)であるという報告がある[7]。

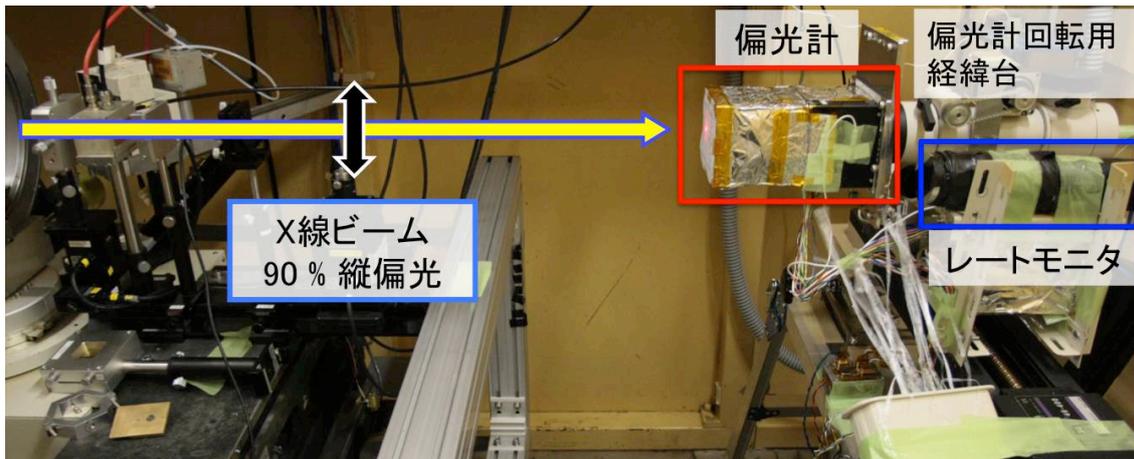


図 5.1: BL14A 実験ブース内セットアップ。左側から偏光 X 線ビームが入射してくる。偏光計は水平ステージに設置された経緯台に取り付けられていて、ブース外から水平位置の調整ができる。水平ステージにはレートモニタも設置してあり、ブース外からの操作でレートも測定できるようにした。

5.1.2 治具セットアップ

BL14A の実験ステーションの作業ブースは、金属壁で覆われた 3 m 四方程度の部屋になっている。今回の実験では、ブース内に台座、高さ調節用のラボジャッキ、水平ステージを設置し、水平ステージに取り付けた経緯台に偏光計を固定した。水平ステージには一緒にレートモニタも設置した。その他、ブース内にはデータ取得用 PC、レートモニタ用高圧電源やディスクリミネーターなどが入った NIM ビン、および回路基板に電源を供給する安定化電源、クーラー、水平ステージコントローラを設置した。通信用 PC、レートモニター用ビジュアルスケラはブース外に設置し、ブース内とは LEMO ケーブルや LAN ケーブルなどで情報をやり取りした。空気が籠りやすいためクーラーを設置して、ブース内を 25°C 以内に保った。図 5.1 に、ブース内のセットアップを示す。

今回の実験では、プラスチックシンチレータ全 64 ピクセルに個別にビームを当てて測定し、その都度レートも測定していくので、HXCP とレートモニタは水平ステージに乗せてブース外からビーム入射位置を変えられるようにした。垂直方向は手動でラボジャックを上下させて調整した。また、ビームをあるピクセルに入射させて回転させながらの測定も行うため、回転できる台座として経緯台を使用した。経緯台にはステッピングモーターを接続し、外部から回転角を操作できるようにした。ステージ、および偏光計の水平度は、水平儀によってその都度確認した。

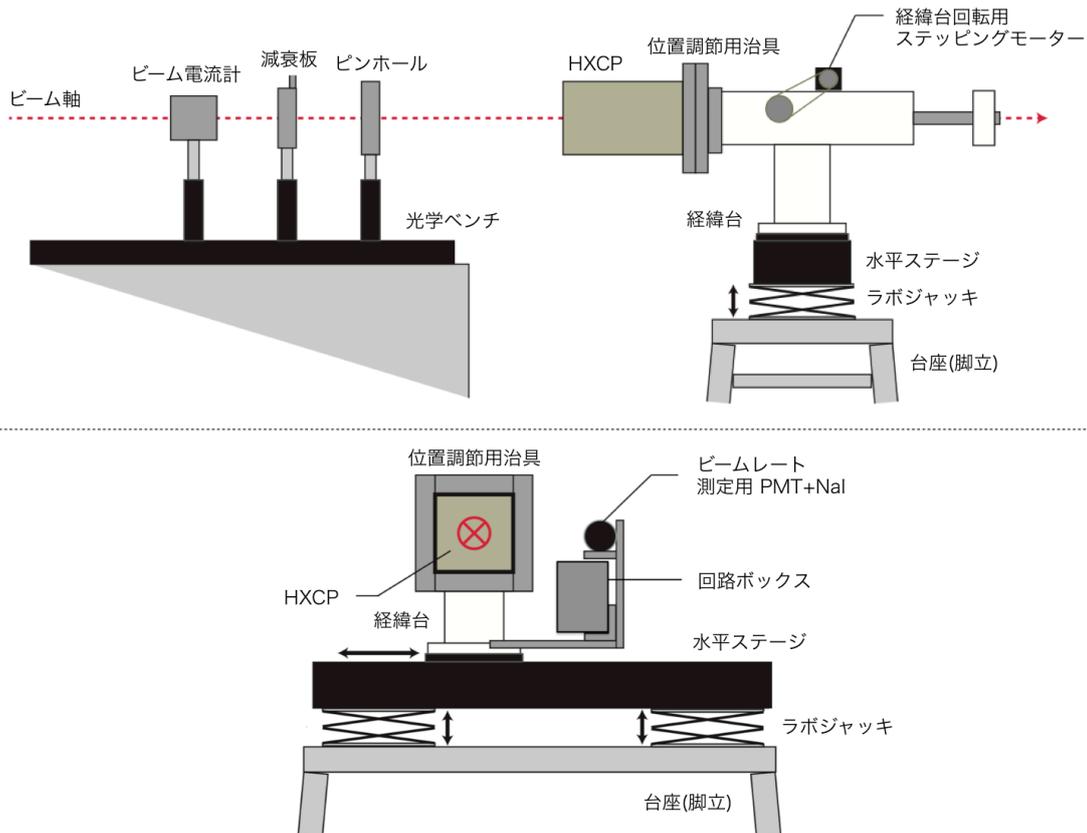


図 5.2: ビーム試験の治具のセッティング。上図はビームラインを横から見た図、下図はビーム入射方向から見た図である。

経緯台上での偏光計の固定には、専用の固定具を作製し利用した。この固定具は、平板3枚にそれぞれ固定用のネジ穴 (M6 径) と、位置合わせ用のネジ穴 (M3 径) が開けており、位置合わせ用のネジ穴の組み合わせを変えることで、偏光計の回転軸がプラスチックシンチレータの各ピクセルの位置と一致するようになっている。

ビームは2つのピンホールによって、直径1 mm 程度のビームとして照射される。ピンホールの間にはタングステンや鉛の薄板を設置できるホルダがあり、薄板の厚さを変えることでビームの強度を調節できるようになっている。また、ビームの入射位置と偏光計回転軸や入射位置の調整は、X線感光紙と照準用レーザーを用いて行った。

5.1.3 回路セットアップ

図 5.3 に回路セットアップを示す。HXCP と回路ボックスは実機と同様に接続されていて、実機で回路ボックスに接続される衛星バスは、安定化電源と PC で代替した。CAN バ

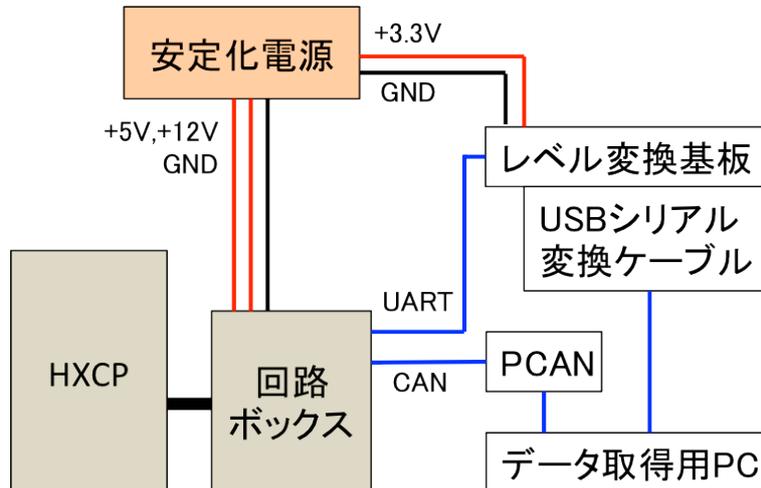


図 5.3: ビーム試験の回路セットアップ。多少簡略化してある。回路ボックスに、HXCP、安定化電源、UART ライン、CAN ラインが接続されている。データ取得用 PC から UART、もしくは CAN を用いてコマンドを送受信し、HXCP の制御・データ取得ができる。

スはそのまま回路ボックスから引き出して、PCAN という装置で PC に接続した。UART は途中でレベル変換基板を通して、USB シリアル変換装置で PC に接続した。

レートモニタの高圧は NIM ビンの HV モジュールから供給した。レートモニタの信号はディスクリミネーターで分別し、ビジュアルスケアラで計数した。

水平ステージはステージコントローラを介して PC と接続、GPIB (General Purpose Interface Bus) 通信で制御した。

5.1.4 シンチレータ配置、入射角・回転角定義

本実験でのシンチレータの配置や、ビーム入射角および偏光計回転角の定義を図 5.4 と図 5.5 に示す。図 5.4 の状態を偏光計の回転角 $\phi = 0^\circ$ と定義する。また、図 5.5 のように、HXCP 光軸とビームのなす角をビーム入射角 θ とする。赤く塗られているシンチレータ 2 つは、トラブルにより信号が読み出せなかったピクセルである。HXCP は完全な対称形 (円形) ではないため、偏光検出時には系統誤差が生じる。さらに、2 ピクセル分信号が読み出せないことで、より大きな系統誤差が生じてしまう。だが、HXCP は 180° 回転対称であり、光子の散乱確率も 180° 回転対称であるため、 180° 反対側の測定値を足し合わせて平均することでデータを補正することができる。また、HXCP を回転させて測定したデータも足し合わせることもできる。そのため HXCP は赤道儀に設置し、ビーム光軸に対して回転させ、取得したデータを足し合わせることでデータの抜けや系統誤差を補正

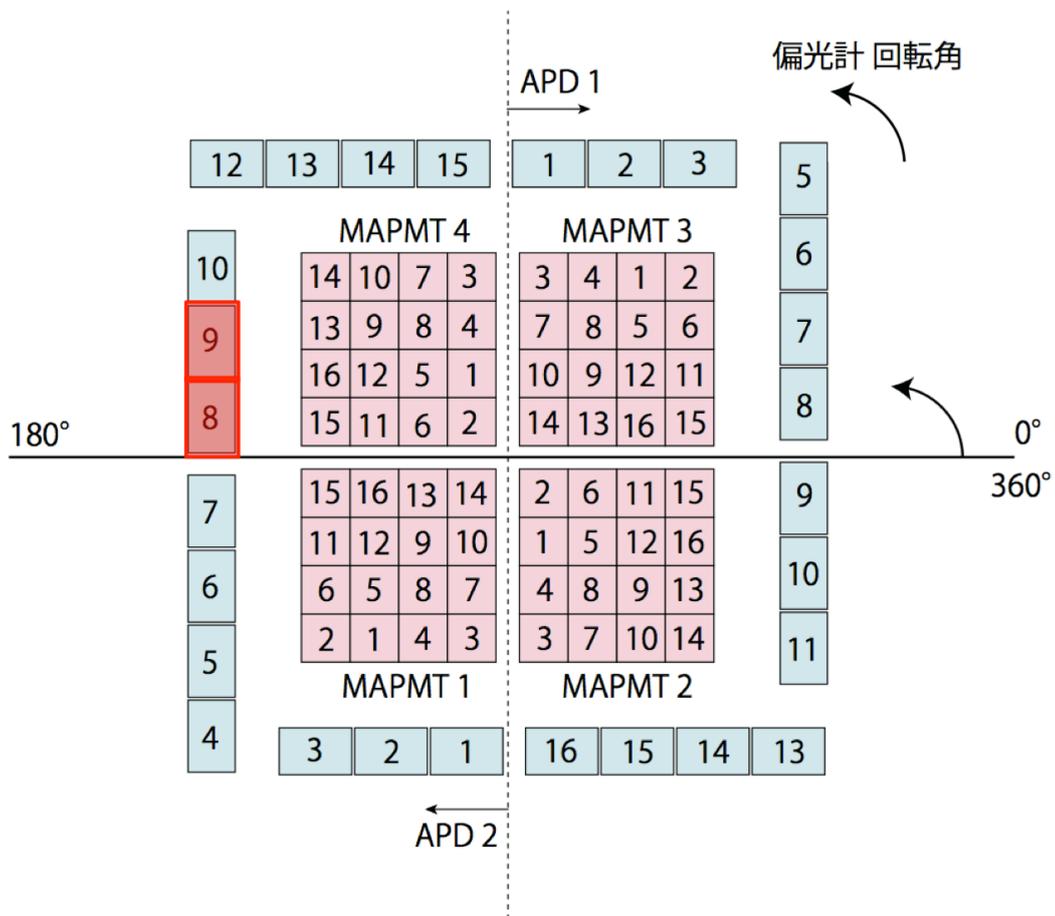


図 5.4: 正面から見た時の HXCP のシンチレータ配置。桃色がプラスチックシンチレータ、水色が CsI シンチレータを表す。番号は散乱体・吸収体のピクセル番号であり、この順番にデータが読み出される。この図の状態を偏光計の回転角 $\phi = 0^\circ$ と定義した。また、この図のように散乱方位角を設定した。赤色で塗られている 2 つのシンチレータは、トラブルにより信号が読み出せなかったピクセルである。

した。

5.2 試験内容

実際に行った試験内容について説明する。HXCP による測定の前後で、毎回レートモニタによるビームレートの測定を行った。また、各測定ごとに温度計の値を読み取り、記録した。

真上から見た図

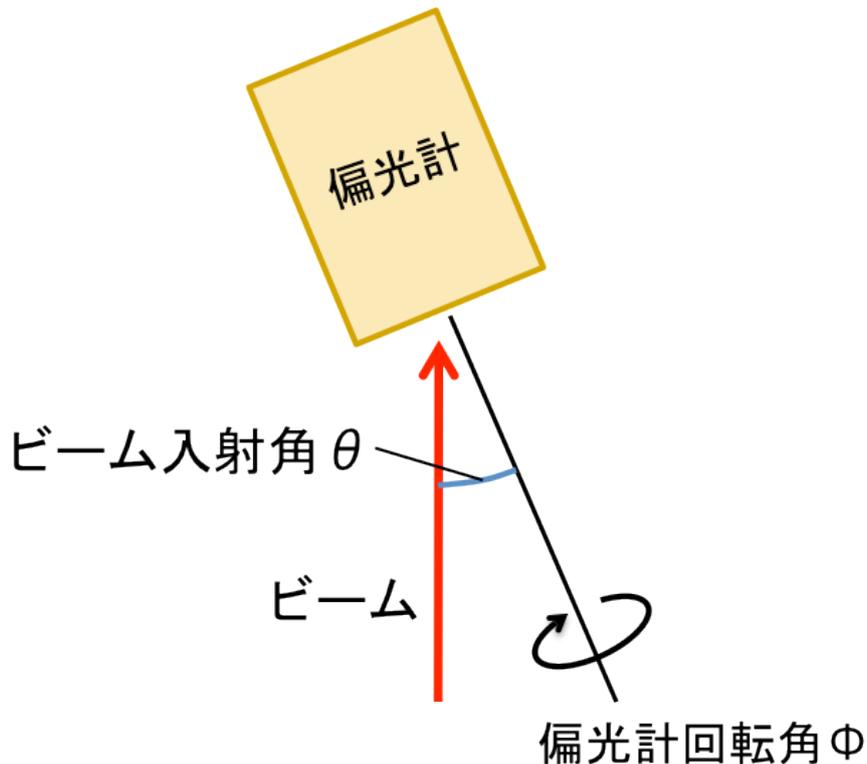


図 5.5: 真上から見た時の HXCP とビーム入射角の関係。斜め入射のときは偏光計を図の θ 方向に傾けて測定をした。偏光計の回転角は偏光計の光軸を中心に回転させた角度である。散乱方位角は、水平方向右側が 270° 方向、水平方向左側が 90° 方向であり、紙面に垂直方向が 0° と 180° 方向に対応している。

計数率のビーム強度依存性

ビーム経路中の薄板を変えることでビームのレートを調節し、HXCP のコインシデンス測定での計数率がどのように変化するか測定した。トリガーレートのバグを解消できていることを確認し、明るい GRB を測定する場合でも対応できることを示す。

全ピクセルスキャン

まず 80 keV のビームを 1 ピクセル毎に照射し、全 64 ピクセルについてデータ取得を行った。他にも $60, 40, 30 \text{ keV}$ のビームでも測定したが、全ピクセル測定する時間はなかったため 16 ピクセルについて測定した。角度はどのエネルギーも、 0° と 45° の 2 通り試した。

ビームがプラスチックシンチレータ群の端に入射し散乱された場合は、吸収体である CsI シンチレータまでの間にはほとんど何もないが、ビームが中心付近に入射した場合は、吸収体との間にプラスチックシンチレータが横たわっているため、途中で吸収や、再び散乱されてしまう可能性がある。このようなピクセル毎の感度の違いを測定するのが目的である。

回転スキャン

ある 1 ピクセルにビームを照射し測定を行い、そのピクセルを中心に HXCP を回転させ再度測定を繰り返す。回転角は 0° から 15° 刻みで 90° まで変化させた。ビームの偏光角を回転させるのは難しいため HXCP 自体を回転させて、偏光角の変化をきちんと検出できることを確認するのが目的である。

斜め入射

偏光計の回転軸をビーム入射軸に対して傾けて測定を行った。プラスチックシンチレータに斜めに入射させることで、ビームが複数のシンチレータを通過することになり、コンプトン散乱を起こす可能性のあるピクセルが複数になる。こういった非対称性がカウントの変調にどのような影響をもたらすかを調べるのが目的である。傾け方として、ビーム入射軸と偏光計回転軸のなす角が 7.5° 、 15° 、 22.5° 、 30° の 4 パターン行った。

5.3 解析手順

HXCP で得られる元データは、1 イベントごとに、MAPMT の波高値 64ch、APD の波高値 26ch + ペDESTAL 値 (ゼロ点) 6ch¹ である。この他にも時刻データやトリガ情報も含まれている。VATA チップは PMT 側で 2 個、APD 側も 2 個搭載していて、どの VATA チップでトリガしたか判別できるので、実際に転送するデータはトリガした VATA チップ側のみにして波高値のデータ量を半分になっている。

これらのデータを用いてモジュレーションカーブを作成するには、以下の手順が必要である。

1. データリダクション

¹本来は APD の波高値は 28ch 分で、ペDESTAL 値は 4ch 分である

2. ペDESTAL補正、ゲイン補正
3. 散乱・吸収位置決定
4. コンプトン散乱イベント選定
5. 角度計算、散乱方位角分布の作成

各手順について、エネルギー 80 keV、垂直入射 ($\theta = 0^\circ$)、偏光角 (ϕ)= 0° のときの全ピクセルのデータを足しあわせたデータや、同様の 30 keV のデータを例にして説明する。

5.3.1 データリダクション

CPU が扱うデータは 1 byte が最小単位であるが、HXCP の各ピクセルの ADC 値 (波高値) は 12 bit で表されているため、無駄なく転送するためには適切に 1byte ごとに区切る必要がある。また、波高値以外にも、どの VATA でトリガしたかや、トリガした時刻などの情報も合わせて転送する。さらにシステム上の要求から、イベントによるトリガだけでなくダミートリガも発行しているため、時折ダミートリガによるデータも混じっている。これらのデータを PC 上で解析するには、適切にリダクションして元の ADC データに戻さなければならない。データは 16 進数で来るため、扱いやすいように 10 進数の数値に変換するといったこともしている。

5.3.2 ペDESTAL補正、ゲイン補正

ペDESTAL補正

APD および PMT の信号検出で使用している ADC は、各 ch でそれぞれ異なったペDESTAL (ゼロ点) を持つ。そのため、APD および PMT の信号を入力せずに ADC の出力値を記録し、これらを各 ch のペDESTAL 値としてデータから差し引く。特に APD 側の ADC 値は、温度によっても変化するということが判明しているため、同じイベント中の APD が付いていない違う ch のデータも考慮して引く必要がある。この手法はコモンモードノイズの除去にも有効である。

ゲイン補正

各 APD、および MAPMT の各 ch にはそれぞれ固有の増幅率がある。また、シンチレータの光量や接合の様子も各 ch ごとに異なる。そのため、同一エネルギーの光子が入射しても異なった波高値を返す。よって、同じ波高値を返すようにゲイン補正を行う必要がある。

まず、校正線源を用いて特定のエネルギーの X 線を照射したデータから、各 ch での光電ピークの波高値を測定した。各 ch の波高値に、それら光電ピークがスペクトル上で同一の値となるような係数を求めて、ゲイン補正係数とした。ゲイン補正関数は、ADC 値からエネルギーに直せるように規格化してある。PMT のゲイン補正は ^{241}Am 線源を当てたデータを、APD のゲイン補正は ^{137}Cs を当てたデータを用いて行った。

5.3.3 散乱・吸収位置決定

検出信号から求められるエネルギーの大きさを比較して、散乱体での散乱位置、および吸収体での吸収位置を決定する。

PMT64ch、APD26ch それぞれの中で、検出したエネルギーが最大の ch を選び出し、その ch をコンプトン散乱、または光電吸収が起こった ch と判定する。ただし、散乱・吸収が起こったピクセルまではわかるが、厳密な散乱・吸収位置を求めることはできない。もしそれぞれのシンチレータの中心を散乱・吸収位置と定めてしまうと、散乱方位角を作成したときに、特定の角度のビンに入りやすいといった非対称性が発生してしまう。そこでひとまず、一様分布乱数を利用し、ピクセル断面のランダムな位置を散乱・吸収位置と定めることとする。具体的には、PMT 側は $6.5 \times 6.5 \text{ mm}^2$ の範囲の 1 点、APD 側は散乱位置に最も近い 1 辺上の 1 点と定めた。APD 側の吸収位置をシンチレータ上の 1 辺上のみにするのは、CsI シンチレータ内での光電吸収確率が非常に大きく、散乱光子はほとんどシンチレータ表面で吸収されるからである。この散乱・吸収位置の決定方法に関しては、後に考察する。

5.3.4 コンプトン散乱イベント選定

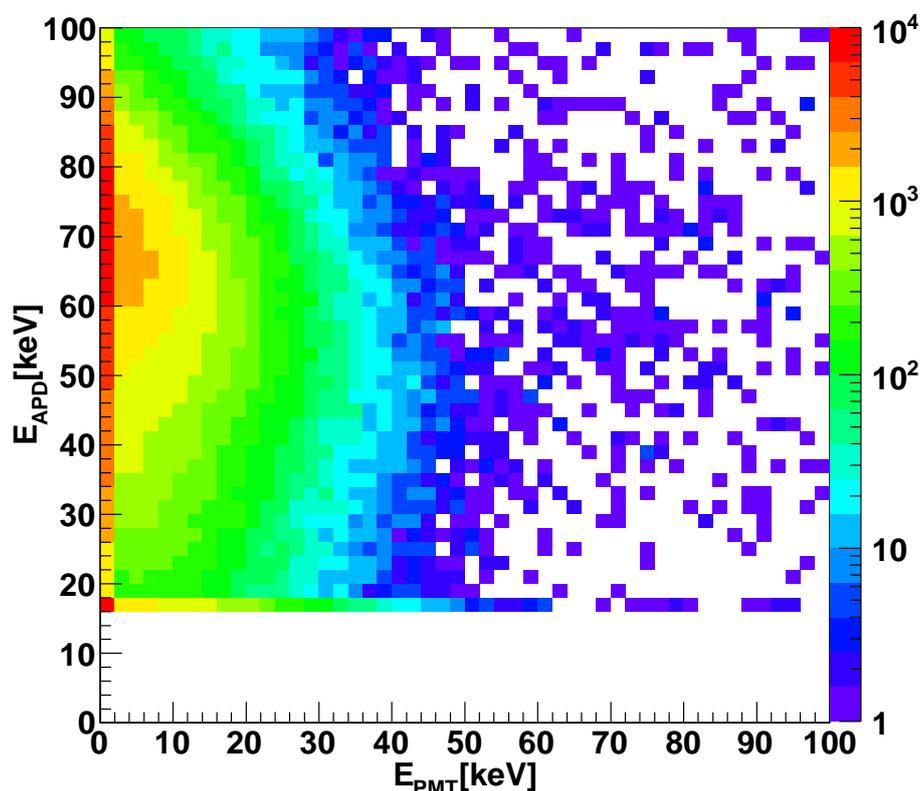


図 5.6: 80 keV の X 線ビーム入射時のエネルギーマップ。垂直入射 ($\theta=0^\circ$)、偏光角 (ϕ) 0° の全ピクセルのデータを全て足しあわせたデータを使用。ピクセルごとの検出感度でイベント数を規格化して足しあわせた。横軸は PMT で検出したエネルギー (E_{PMT})、縦軸は APD で検出したエネルギー (E_{APD}) である。 $E_{APD}=60\sim 80$ keV あたりの領域が、目的のコンプトン散乱イベントだが、他にも $E_{PMT}=0\sim 2$ keV 付近の縦に伸びた領域や、 $E_{APD}=16\sim 18$ keV 付近の横に伸びた領域が存在する。

HXCP で検出したイベントには、偏光検出に必要なコンプトン散乱イベント以外に、PMT、APD のノイズや宇宙線を検出したイベントが含まれている。コンプトン散乱時はある決まった組み合わせのエネルギーを PMT と APD で検出するため、適切なカット条件を決めることでコンプトン散乱イベントのみを取り出すことができる。

ここで、PMT で検出したエネルギーを E_{PMT} 、APD で検出したエネルギーを E_{APD} と定義する。最初にまず、全イベントをエネルギーによって 2次元ヒストグラムに描いた図を図 5.6 に示す。

次に、ノイズなどによるイベントを除くために、コンプトン散乱を起こした際にPMT、およびAPDで検出されるべきエネルギー範囲を求める。入射光子がコンプトン散乱したときに、散乱体と吸収体に落とすエネルギーの組み合わせは、入射光子のエネルギーと散乱方向によってのみ決まる。よって、PMTとAPDで検出したエネルギーの組み合わせが、コンプトン散乱によるものなのかそうでないのかの制限をつけることができる。また、検出器の性能とエネルギースレッシュホールドの設定を考慮すると、PMTは2 keV以下、APDは20 keV以下のエネルギーイベントがあるとは考えにくい。さらに、観測エネルギーレンジ上限が200 keVという条件も課した。それらを考慮すると、イベントカットは図5.7のようになる。コンプトン散乱によるエネルギー下限値の制限は、PMTのスレッシュホールド2 keVに比べて小さいためイベントカット条件から除外した。

このとき、実際に検出器で検出されるエネルギーは、エネルギー分解能に応じて揺らぐ。エネルギー分解能はピクセルごとに異なり、検出光子のエネルギーやノイズレベル、温度などによって変化するため、エネルギーカット基準を決めることは難しい。そのため、今回の解析ではエネルギーの揺らぎ幅を一律 $\pm 15\%$ と定め、イベントカットを行った。この是非については後に考察する。

以上のイベントカット条件を、図5.6の80 keVビームのイベントデータに対して適用してコンプトン散乱イベントを取り出すと、図5.8のようになり、低エネルギー側のノイズが取り除かれたことがわかる。また、30 keVのビームに対しての同様のカットを施すと、図5.9が図5.10になる。30 keVの場合は、光電吸収される確率が80 keVより高いため、全イベントに占める光電吸収イベントの割合が上がり、エネルギーマップに光電吸収イベントが有意に現れてしまう。このような場合でもイベントカットを行えば、図5.10のように光電吸収イベントを取り除くことができることが分かる。

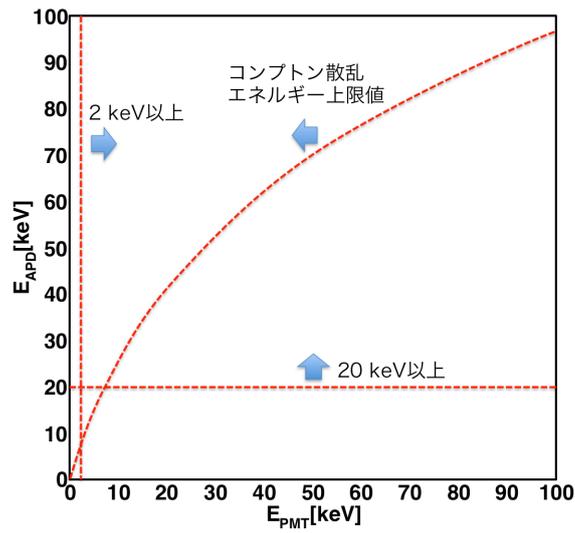


図 5.7: コンプトン散乱イベント選定基準。検出器の性能とスレッシュホールド設定から、PMT は 2 keV 以上、APD は 20 keV 以上という制限がかかる。そして、コンプトン散乱により散乱体と吸収体に落とすエネルギーの組み合わせから、コンプトン散乱エネルギー上限値が決まる（下限値は PMT のスレッシュホールド 2 keV より小さいため、条件から除外した）。

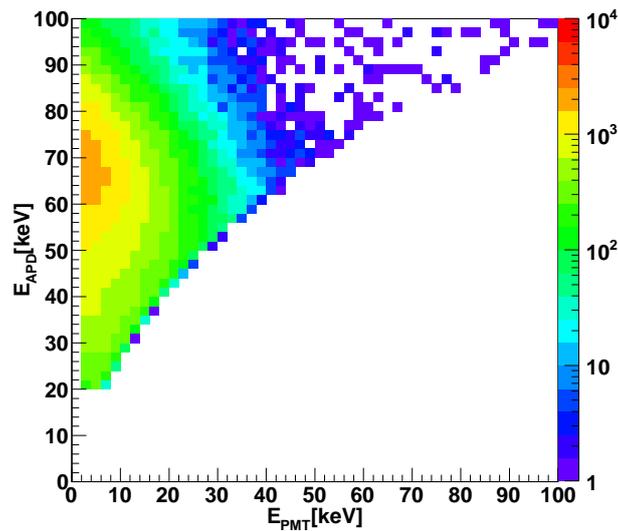


図 5.8: イベントカット後の 80 keV ビームのエネルギーマップ。低エネルギー側のノイズ成分が取り除かれ、目的のコンプトン散乱イベントが残っている。

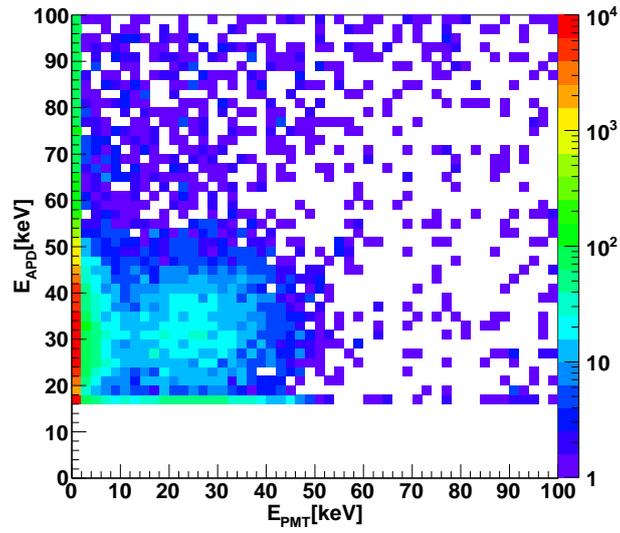


図 5.9: イベントカット前の 30keV ビームのエネルギーマップ。ノイズのほか、光電吸収イベントもあるのがわかる。

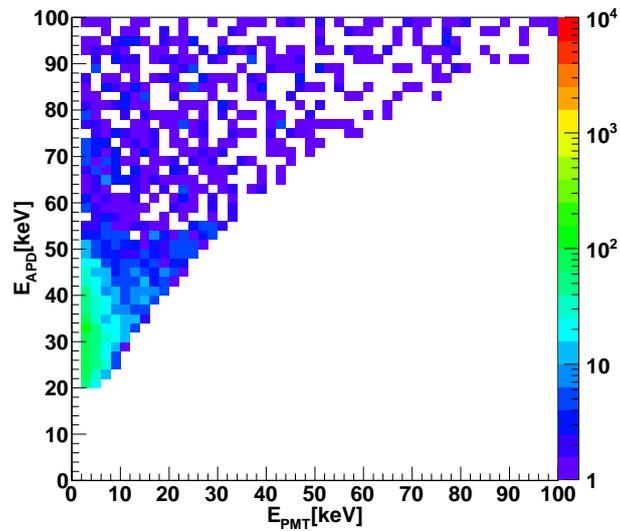


図 5.10: イベントカット後の 30keV ビームのエネルギーマップ。ノイズと光電吸収イベントが取り除かれ、目的のコンプトン散乱イベントが残っている。

5.3.5 角度計算、散乱方位角分布の作成

以上の手順から、1 イベントごとのコンプトン散乱での散乱・吸収位置が割り出せる。それらの位置関係から、入射光子の散乱角度を求める。HXCP の回転角が 0° のときの水平方向を、散乱角の 0° と定義する (図 5.4 参照)。

図 5.11 は、横軸を散乱方位角 [deg]、縦軸をカウントとしたヒストグラムである。横軸の範囲は $0^\circ \sim 360^\circ$ 、ビン幅を 15° とした。今、地面に対して垂直方向を 0° とし、入射光子の偏光方向は地面に垂直である。よって、 0° 方向に散乱しにくく、 90° 方向には散乱しやすい。したがって、偏光光子の散乱角によるカウントの変調が検出できたことがわかる。

グラフには若干の非対称性が存在している。回路トラブルでデータが取得できなかった 2 ピクセルは、 270° 方向にはほとんど寄与しない。なのでこれは、ピクセル毎のスレッシュホールドやゲインを、完全には揃え切れなかったせいではないかと考えられる。また、HXCP はクーラーで一方から冷やしていたため、温度も不均一だった可能性がある。だが、こういった非対称性は、 180° 回転に対応する位置にある 2 ビンのデータを平均することで打ち消すことが出来る。具体的には、 $0\text{-}15^\circ$ のビンと $180\text{-}195^\circ$ のビン、 $15\text{-}30^\circ$ のビンと $195\text{-}210^\circ$ のビン、というように、位相が 180° ずれた 2 つのビンを平均し、その値を再度 2 つのビンに詰め直す。このような方法が取れるのは、HXCP の構造と、偏光光子の散乱角度分布が 180° 回転対称だからである。図 5.12 にそのようにして非対称性を打ち消した方位角分布を示す。使用したデータは図 5.11 と同一のものである。以降の解析では、このように 180° 位相がずれたビンを平均したデータを使用する。

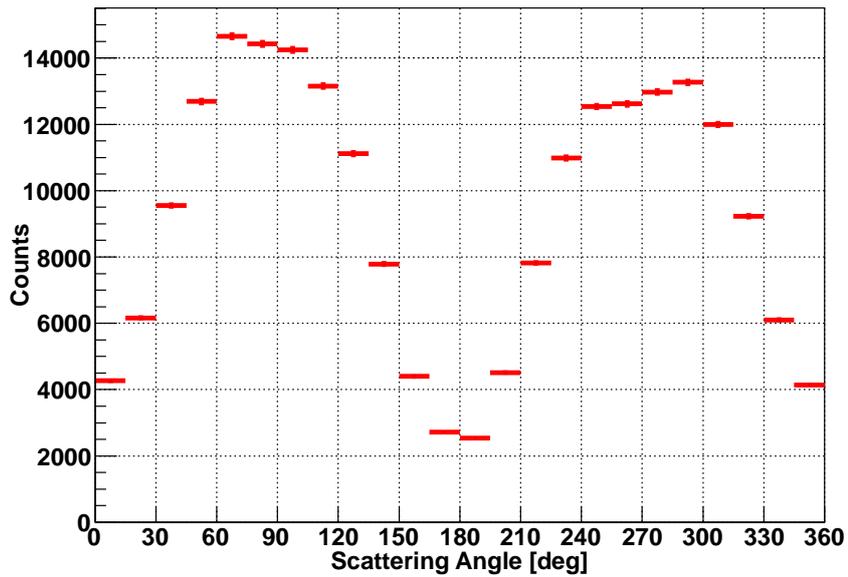


図 5.11: 全ピクセルのデータを足しあわせた散乱方位角分布。散乱方位角による変調が現れていることが分かる。

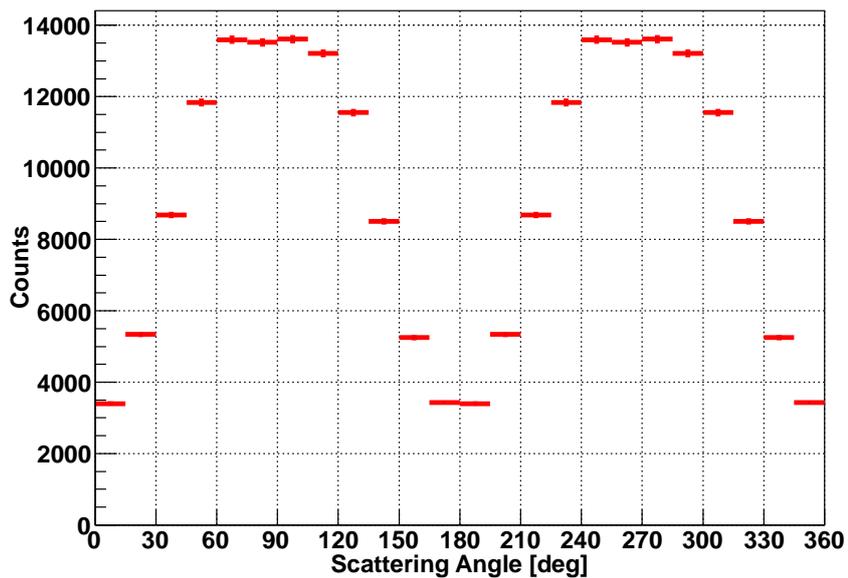


図 5.12: 非対称性を打ち消した散乱方位角分布。180° 位相がずれた 2 つビンを平均して、その値を再度 2 つのビんに詰めなおした。図 5.11 に存在していた非対称性を打ち消せていることがわかる。

5.4 解析結果

ここでは基本的に、偏光計の回転角 (ϕ)=0° の結果を載せる。 $\phi=45^\circ$ の結果は付録 B.1 に載せる。フィッティング結果は 5.5 節にまとめて載せた。

5.4.1 計数率のビーム強度依存性

図 5.13 に 80 keV ビームによる HXCP 計数率のビーム強度依存性測定の結果を示す。ビーム強度が上がるにつれて、デッドタイムの効果でだんだん数え落としが増えていくことがわかる。フィッティングにより、デッドタイムは $156 \mu\text{s}$ と求められた。これは、もともと HXCP のコインシデンス測定のためのデッドタイムが $100 \mu\text{s}$ 程度であることを考えると、ほぼ設計通りの値と言える。10 kHz で光子が入射したときの数え落としは 23 % であり、そのような非常に明るい場合でも十分対応可能であることが分かった。

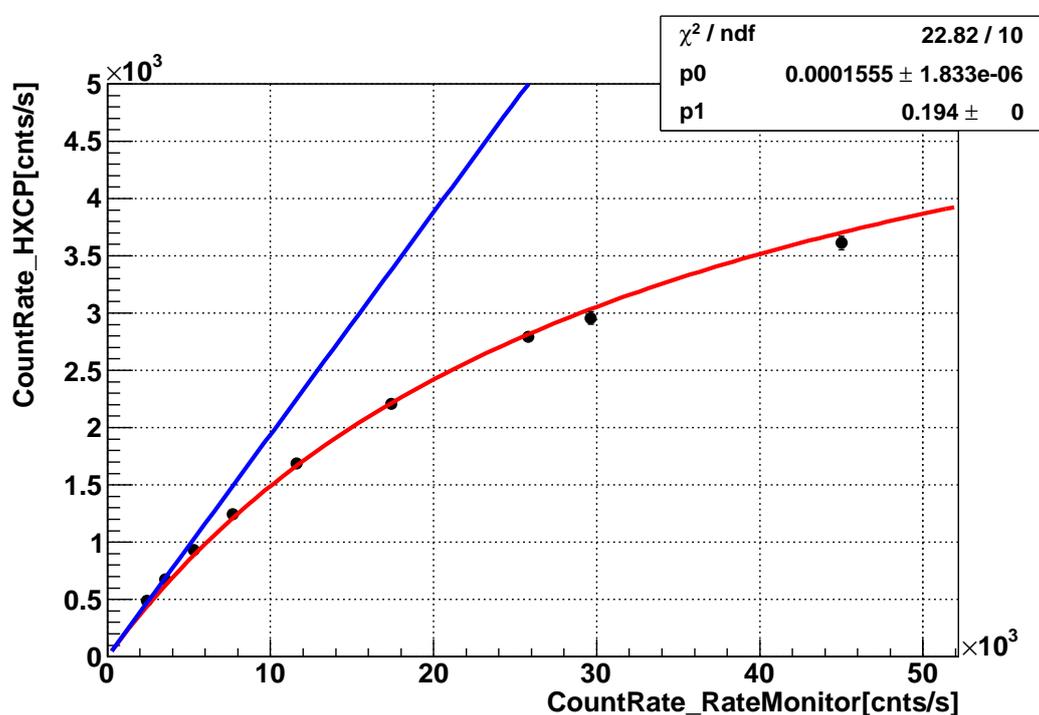


図 5.13: HXCP 計数率のビーム強度依存性。横軸はレートモニタで測定した計数率で、縦軸は HXCP のコインシデンスモードで測定した計数率である。青線は戸泉修論 [9] で行われたシミュレーションを元にした、入射光子のうち何割をコインシデンスとして検出するかという直線である。黒点が測定値で、non-extended のデッドタイムモデルの関数でフィッティングを行なっている (赤線)。デッドタイムは $156 \mu\text{s}$ と求められた。

5.4.2 全ピクセルスキャン

トリガーレート

図 5.14～図 5.17 に、全ピクセルスキャンによるトリガーレート測定の結果を示す。入射光子の偏光方向 (ϕ) は 0° で、図の左右方向に対応している。HXCP で取得したデータのレートを、ビームのレートで割った値をプロットした。それぞれ 1 マスが 1 ピクセルに対応している。80 keV 以外は測定時間の都合上、16 ピクセルのみである。

80 keV と 60 keV で顕著であるが、全体として、中心に向かうほどトリガーレートが下がることが確認された。これは、散乱体で散乱された光子が、吸収体で吸収される前に、途中にある散乱体で吸収、もしくは再度散乱されてしまうためだと考えられる。また、散乱位置による、吸収体が占める立体角の違いも影響していると考えられる。これらは今後、シミュレーションをして検証を進めていきたい。図 5.14 において、左上付近のピクセルのレートが低いのは、測定できなかった 2 ピクセルの APD が付近にあるためだと考えられる。

また、コインシデンストリガした数を入射光子数で割った値(「トリガ率」)を表 5.1 に示す。トリガ率(測定値)はデッドタイム補正済みである。トリガ率(シミュレーション値)は、戸泉修論 [9] の有効面積のエネルギー依存性と散乱体の幾何面積から求めた。シミュレーションと一致したとは言えないものの、30 keV 以外は十分近い値が出ていると言える。30 keV は検出エネルギー下限に近いため、他に比べてトリガ率の測定値とシミュレーション値の差が大きくなってしまったと考えられる。

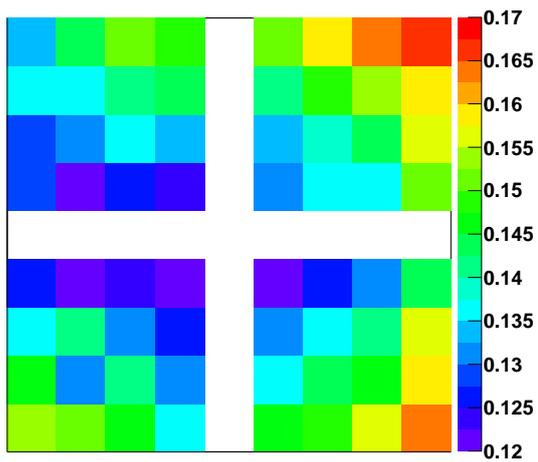


図 5.14: ピクセル毎のトリガーレート
(80keV, $\phi = 0^\circ$)

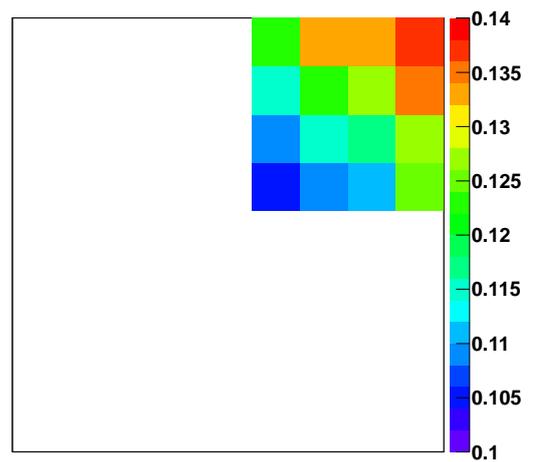


図 5.15: ピクセル毎のトリガーレート
(60keV, $\phi = 0^\circ$)

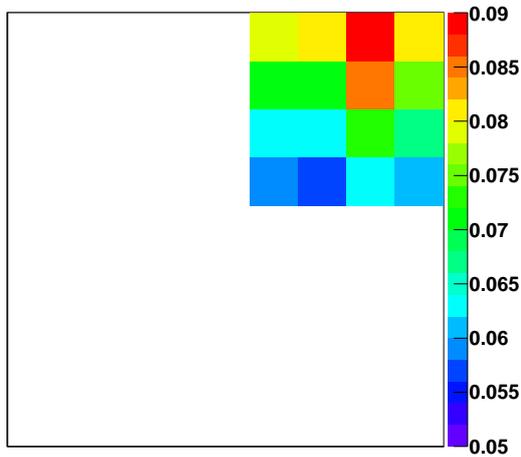


図 5.16: ピクセル毎のトリガーレート
(40keV, $\phi = 0^\circ$)

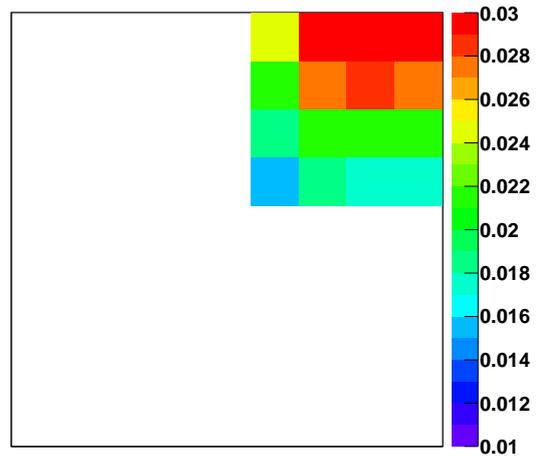


図 5.17: ピクセル毎のトリガーレート
(30keV, $\phi = 0^\circ$)

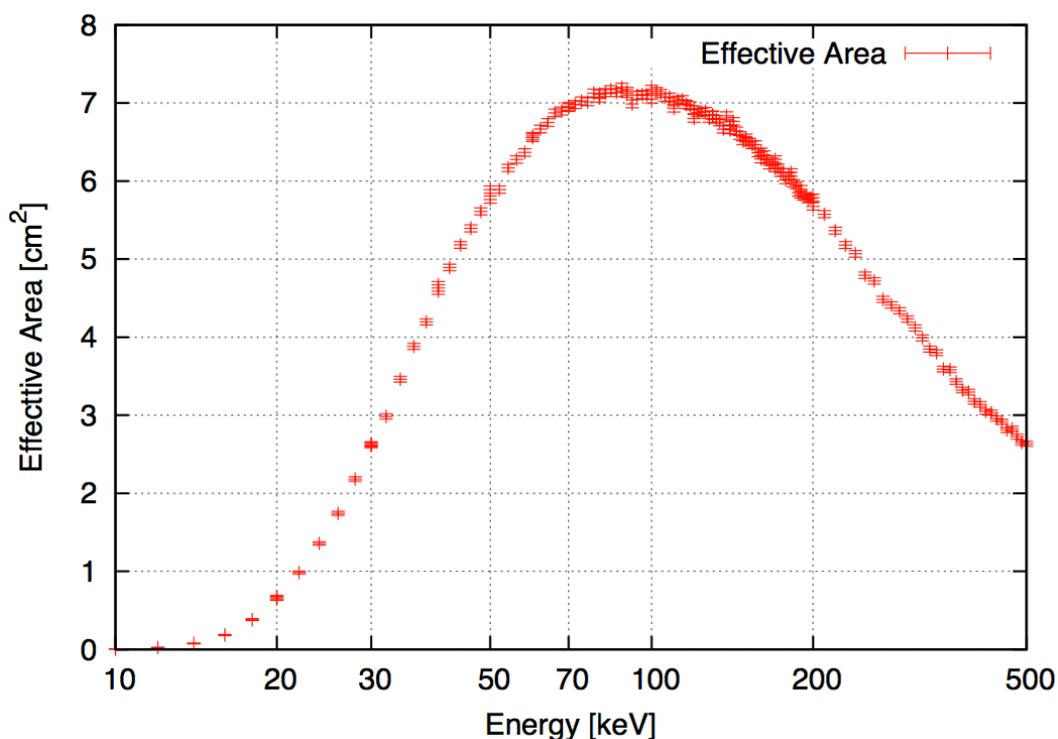


図 5.18: 有効面積のエネルギー依存性 (戸泉修論 [9] より)。低エネルギー側では光電吸収が優位になるので有効面積が減る。高エネルギー側では、コンプトン散乱の散乱断面積の減少と、前方散乱の割合が増えることで有効面積が減っていく。この値と散乱体の幾何面積から、表 5.1 のトリガ率 (シミュレーション値) を求めた。

表 5.1: トリガ率。コインシデンストリガした数を入射光子数で割った値。入射光子のうち何割をコインシデンスイベントとしてトリガしたかを表す。シミュレーションと一致したとは言えないものの、30 keV 以外は十分近い値が出ていると言える。30 keV は検出エネルギー下限に近いため、トリガ率は下がってしまう。

エネルギー	トリガ率 (測定値)	トリガ率 (シミュレーション値)
80 keV	18.5%	19.4%
60 keV	15.2%	18.1%
40 keV	8.88%	12.5%
30 keV	3.01%	6.94%

散乱方位角分布

全ピクセルスキャンによるデータを足しあわせたデータを元にして、散乱方位角分布を作成する。イベント数はピクセル毎に、上記ビームレートで規格化して足しあわせた。エネルギー毎の散乱方位角分布を図 5.19～図 5.22 に示す。

偏光計の性能を評価する値の1つである MF 値を見積もるために、散乱方位角分布を正弦関数 $f(\Theta) = A \cos 2(\Theta - \Theta_0) + B$ でフィッティングしてある。MF 値そのものは 5.5.1 節にまとめて載せるが、80 keV と 60 keV のグラフから明らかに、 $\Theta=90, 270^\circ$ 付近でカウン트가上がりきっていないことがわかる。はっきりした原因は不明だが、おそらく MAPMT や APD のゲイン、およびスレッシュホールドを調整しきれておらず、非対称性が生じてしまったのではないかと考えられる。

この非対称性を打ち消すために、 $\phi=0^\circ$ のデータに、 $\phi=45^\circ$ のデータをシフトして重ね合わせる。重ねあわせた結果を図 5.23～図 5.26 に示す。フィッティング関数によく合っているため、MAPMT や APD の個体差をうまく打ち消せたと考えられる。

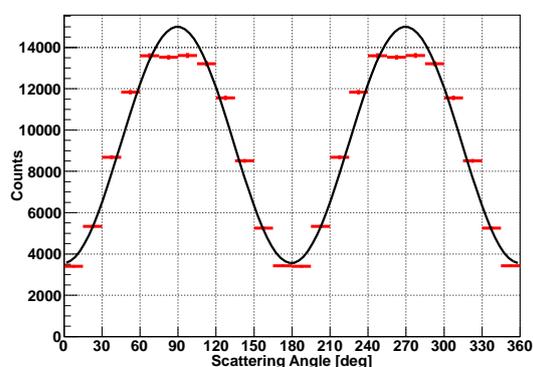


図 5.19: 散乱方位角分布 (80 keV, $\phi=0^\circ$)

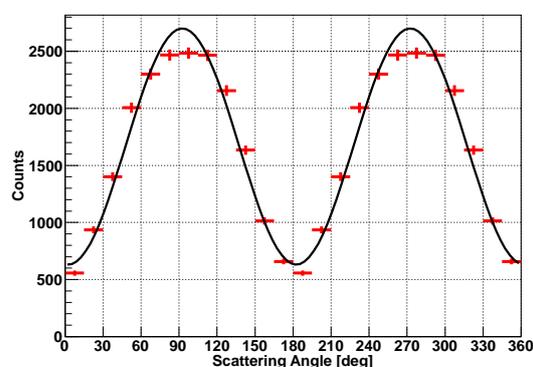


図 5.20: 散乱方位角分布 (60 keV, $\phi=0^\circ$)

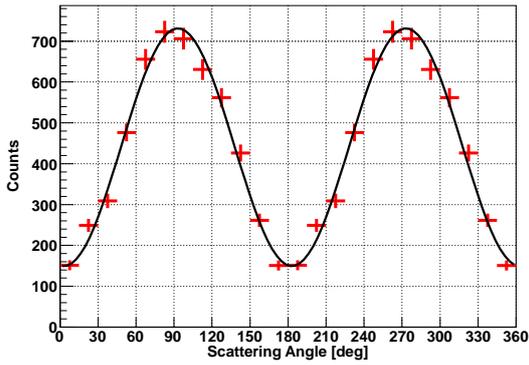


図 5.21: 散乱方位角分布 (40 keV, $\phi=0^\circ$)

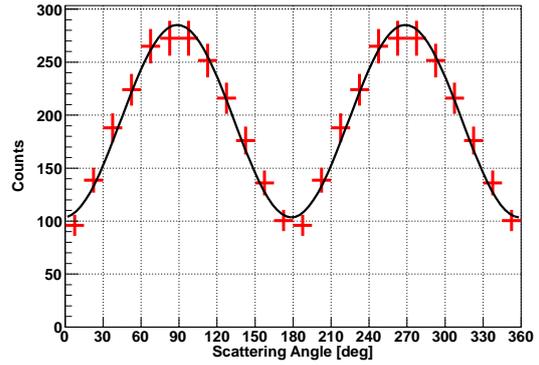


図 5.22: 散乱方位角分布 (30 keV, $\phi=0^\circ$)

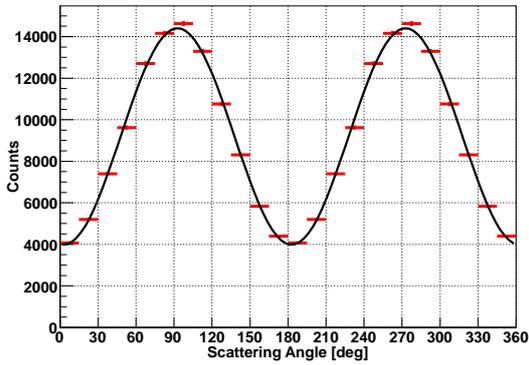


図 5.23: 0° と 45° のデータを足しあわせた
散乱方位角分布 (80 keV, $\phi=0, 45^\circ$)

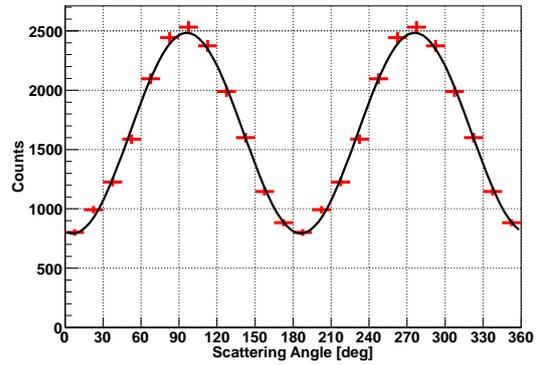


図 5.24: 0° と 45° のデータを足しあわせた
散乱方位角分布 (60 keV, $\phi=0, 45^\circ$)

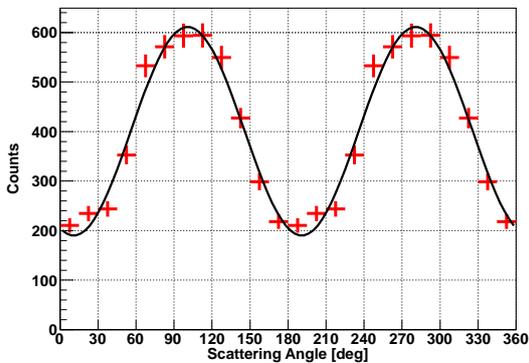


図 5.25: 0° と 45° のデータを足しあわせた
散乱方位角分布 (40 keV, $\phi=0, 45^\circ$)

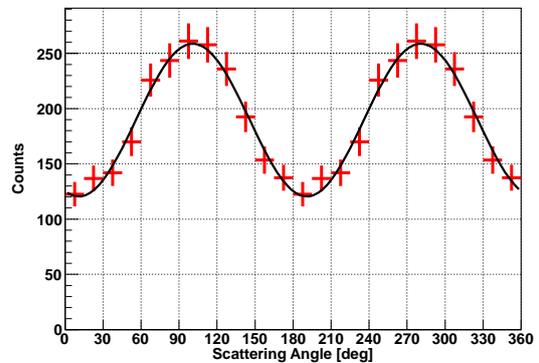


図 5.26: 0° と 45° のデータを足しあわせた
散乱方位角分布 (30 keV, $\phi=0, 45^\circ$)

5.4.3 回転スキャン

ビームを散乱体の中心付近の1ピクセルに照射し、そのピクセルを中心に 0° から 15° 刻みで 90° まで測定した。そのデータをシフトしながら足しあわせた散乱方位角分布を図5.27、図5.28に示す。

30 keVの散乱方位角は、他のものに比べるとはっきりとは偏光を検出できていない。これはおそらく、もとよりトリガーレートが少ない30 keVで、さらに散乱体の中心のピクセルに光子を入射させたため、相対的にイベントに占めるノイズの割合が上がってしまったためでは無いかと考えられる。だが80 keVにおいては、前節で見たように、HXCPを回転させてデータを取得することの効果をはっきりと示すグラフになっている。特にここでは、散乱体の1ピクセルのみに照射したデータを用いているため、吸収体であるCsIシンチレータの光を検出するAPD側の非対称性を打ち消していると考えられる。APDのゲインやスレッシュホールドが完全には揃っておらず、APD2ピクセル分のデータが取得できていなくとも、HXCPを回転させてデータを取得すればそのような非対称性は打ち消され、きれいな散乱方位角分布を得ることができるという結果を示している。

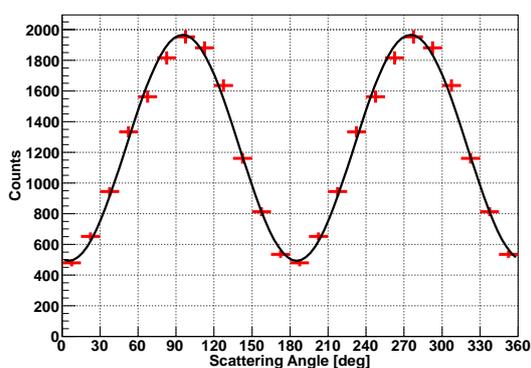


図 5.27: HXCP を回転させていったデータを足しあわせた散乱方位角分布 (80keV)。回転角 $\phi=0^\circ$ から 15° 刻みで 90° まで足しあわせた。

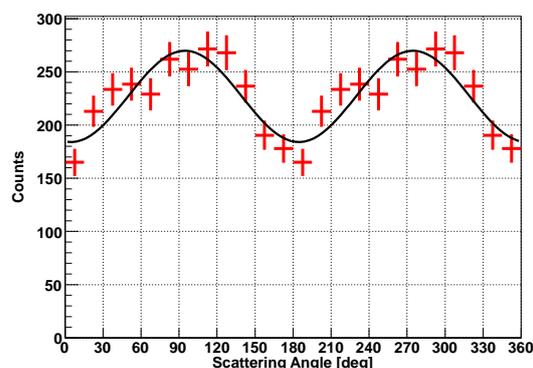


図 5.28: HXCP を回転させていったデータを足しあわせた散乱方位角分布 (30keV)。図 5.27 と同様に足しあわせた。

5.4.4 斜め入射

HXCP を傾けて (θ 方向に変化させることに対応)、ビームを斜めに入射させてデータを取得した。180° 対称性を利用した補正をする前の結果を図 5.30～図 5.39 に示す (180° 対称性を利用し補正したグラフは付録に示す)。斜め 30° から入射した場合でも、変調を検出できていることがわかる。

また、傾き角 θ が大きくなるに連れて、散乱方位角分布の 90° の割合は増加し、270° 方向は減少することがわかった。これは、偏光計内のシンチレータの配置関係は図 5.29 のようになっており、散乱体の浅い領域で散乱された光子は 90° 方向は検出しやすく、反対の 270° 方向には検出しづらいためである。なお、90° 方向は前方散乱を検出しやすく、270° 方向は後方散乱を検出しやすいという項もあるはずだが、結果を見る限りそのような影響は少ないようである。

真上から見た図

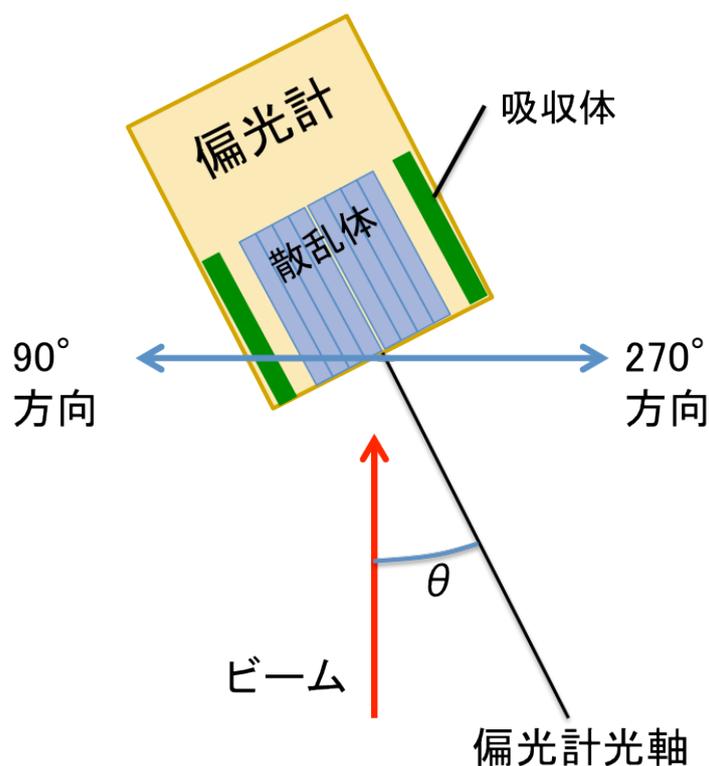


図 5.29: 斜め入射時の HXCP 内のシンチレータの配置。図の左側が散乱方位角においての 90° 方向で、右側が 270° 方向である。紙面垂直方向が 0° と 180° である。散乱体の浅い領域で反応した場合、90° 方向に検出する割合が多くなる。

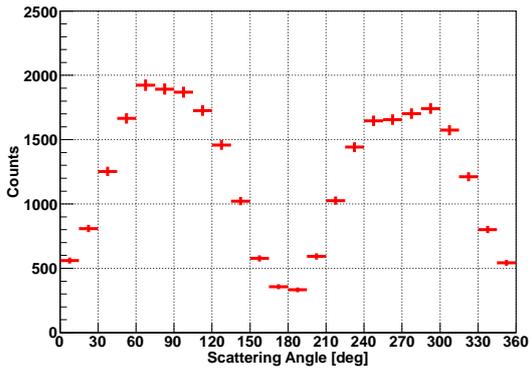


図 5.30: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 0^\circ$)

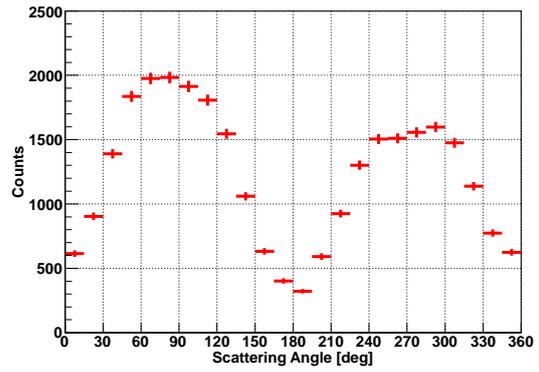


図 5.31: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 7.5^\circ$)

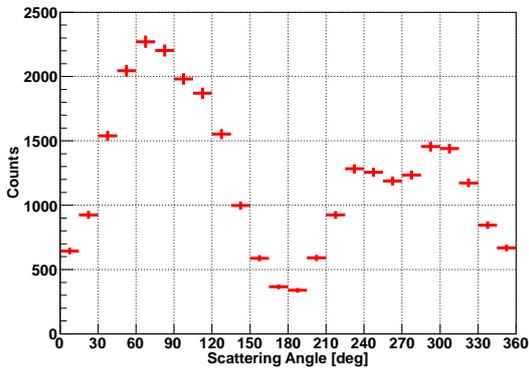


図 5.32: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 15^\circ$)

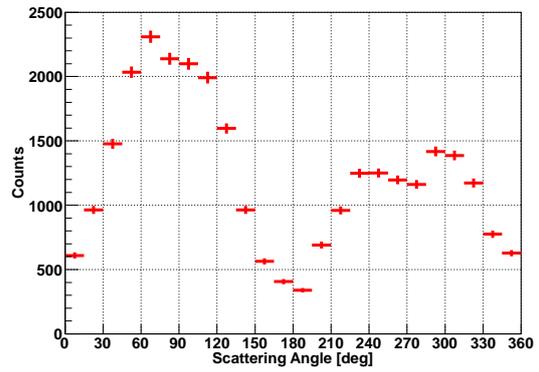


図 5.33: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 22.5^\circ$)

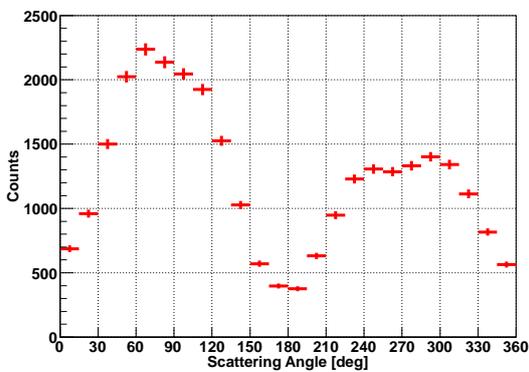


図 5.34: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 30^\circ$)

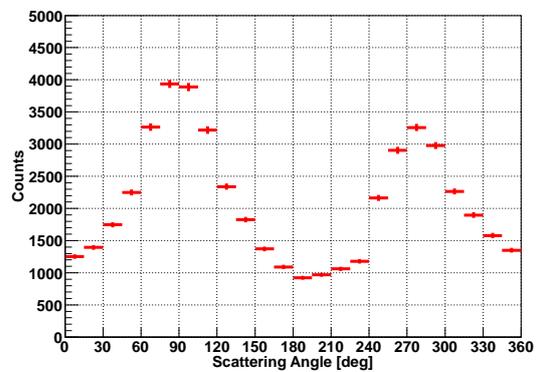


図 5.35: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 45^\circ, \theta = 0^\circ$)

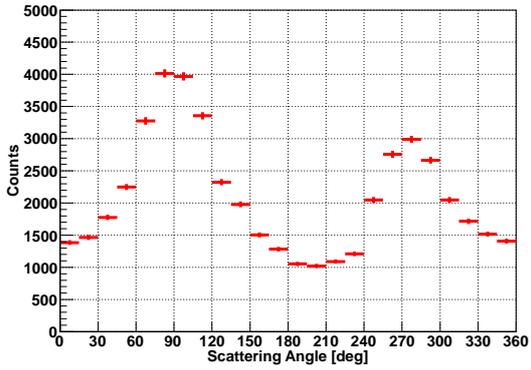


図 5.36: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 45^\circ$, $\theta = 7.5^\circ$)

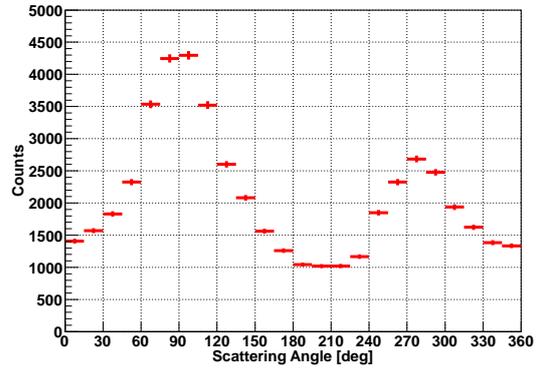


図 5.37: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 45^\circ$, $\theta = 15^\circ$)

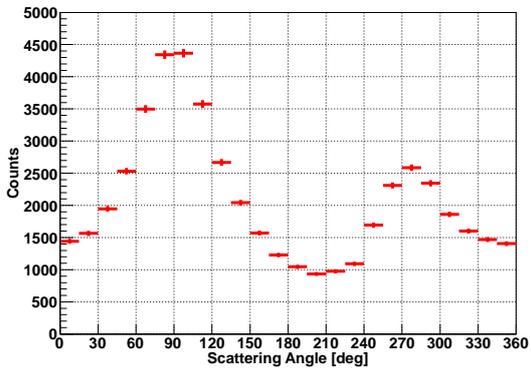


図 5.38: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 45^\circ$, $\theta = 22.5^\circ$)

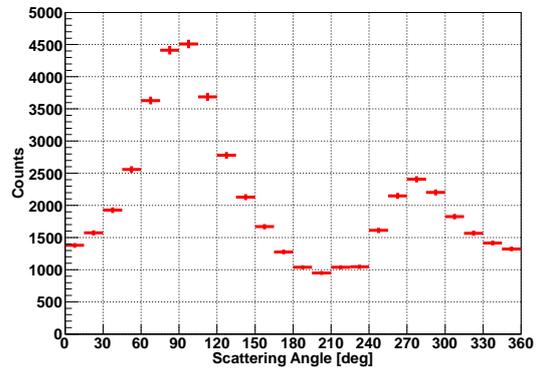


図 5.39: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 45^\circ$, $\theta = 30^\circ$)

5.5 考察

5.5.1 散乱方位角分布のフィッティング結果

散乱方位角分布を正弦関数 $f(\Theta) = A \cos 2(\Theta - \Theta_0) + B$ でフィッティングした結果と、そこから求められるモジュレーションファクター (MF) を表 5.3 に示す。 θ は HXCP とビームの成す角度で、垂直入射の場合は 0° である。 ϕ は HXCP の回転角である。 Θ_0 はフィッティングパラメータである。 ϕ に合わせて散乱方位角分布をシフトさせているので、どの場合でも Θ_0 は 90° になるのが理想である。 ϕ が 0,45 と記載されているのは、 $\phi=0^\circ$ と 45° のデータを足しあわせたデータを使用している。 ϕ が 0-90 と記載されているのは、 $\phi=0^\circ$ から 15° 刻みで 90° まで測定したデータを足しあわせたデータを使用している。

全ピクセルスキンのデータについて： 気になるのは、まず、 ϕ が 45° のとき Θ_0 があまり 90° に近くないという点である。低エネルギーになるにつれて 90° から遠くなっていることから、MAPMT 側に原因がある可能性が高い。というのも 30 keV の場合 MAPMT では、1 photon 程度を検出しなければならず、4 つの MAPMT の全ピクセルで 1 photon を検出できるかはかなり怪しいところがある。

また、特に 80 keV の $\phi=0^\circ$ や 45° において、reduced χ^2 値が大きい傾向にある。これは、非対称性が存在してしまっている現状では当然であり、むしろ低エネルギー側が小さいのが不自然で、これはエラーが大きいためであると考えられる。どうしても低エネルギー側では全イベントに占めるノイズイベントの割合が高くなってしまい、エラーが大きくなっていると考えられる。

しかし、こういったシステムティックな偏りも、HXCP を回転させてデータを取得すれば打ち消せるということが、 ϕ が 0,45 のデータや、0-90 のデータからわかる。これら回転させて足しあわせたデータでは、 Θ_0 や reduced χ^2 の値はかなり改善されている。

回転スキンのデータについて 30 keV においては、もともと検出効率が低い 30 keV で、真ん中のピクセルであったためさらに検出効率は下がったことで、ノイズの割合がかなり多くなり、モジュレーションファクターが低下してしまったと考えられる。 80 keV においてはよく変調を検出している。若干ではあるがモジュレーションファクターが他の場合と比較して高い部類であるのは、端に比べて真ん中で散乱された方が散乱角度の分解能が良いためであると考えられる（散乱体と吸収体が近い場合は角分解能が悪く、モジュレーションファクターが低下してしまうということがシミュレーションで分かったため、

散乱体と吸収体の距離を若干離す構造になった経緯がある)。

斜め入射のデータについて： 180° 対称性を利用した補正を行った後にフィッティングを行った所、ビーム入射角 θ を変えていってもほとんどモジュレーションファクターは変わらなかった。よって、斜めに入射しても、少なくとも 30° 程度までは問題なく偏光を観測できることがわかった。

MF(モジュレーションファクター)のシミュレーションとの比較 Geant4 を用いて正面 ($\theta=0^\circ$) からビームが入射した場合のモジュレーションファクターを求めた (表 5.2)。表 5.3 の $\phi=0,45$ の MF と比べると、60 keV においては 2σ エラーの範囲内で、他のエネルギーは 1σ のエラーの範囲内で一致した。よって、本偏光計は設計通りの偏光検出性能を有していると言える。

表 5.2: シミュレーションで求めたエネルギーと MF の関係 (エラーは 1σ)。

入射光子エネルギー	MF[%]
80 keV	$63.0 \pm 0.2 \%$
60 keV	$57.4 \pm 0.6 \%$
40 keV	$58.4 \pm 1.2 \%$
30 keV	$40.5 \pm 1.7 \%$

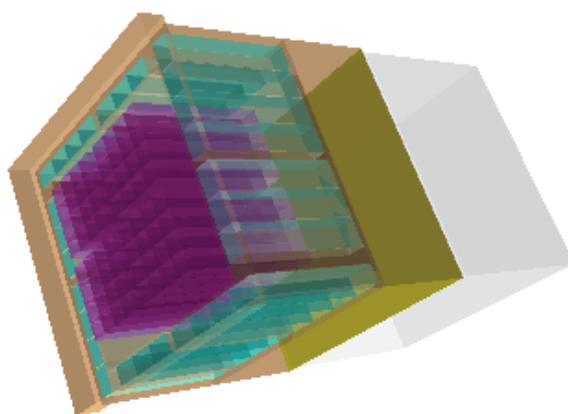


図 5.40: Geant4 で構築した HXCP のマスモデル。このモデルを元にビーム実験を模擬したシミュレーションを行った。

表 5.3: 散乱方位角分布を正弦関数でフィッティングした結果 (エラーは 1σ)。

エネルギー	ビーム入射角 θ	HXCP 回転角 ϕ	Θ_0	MF[%]	reduced χ^2
80 keV	0	0	89.5 ± 0.1	68.5 ± 0.3	56.94
60 keV	0	0	92.6 ± 0.3	69.0 ± 0.8	8.58
40 keV	0	0	93.0 ± 0.6	73.4 ± 1.6	1.61
30 keV	0	0	88.7 ± 1.3	51.9 ± 2.3	0.45
80 keV	0	45	97.2 ± 0.2	59.2 ± 0.4	113.04
60 keV	0	45	102.3 ± 0.4	48.5 ± 0.8	21.25
40 keV	0	45	115.8 ± 0.9	52.1 ± 1.7	3.51
30 keV	0	45	117.9 ± 1.6	43.1 ± 2.4	2.39
80 keV	0	0, 45	92.8 ± 0.1	63.0 ± 0.2	7.20
60 keV	0	0, 45	96.1 ± 0.3	57.4 ± 0.6	2.72
40 keV	0	0, 45	100.8 ± 0.5	58.4 ± 1.2	3.49
30 keV	0	0, 45	100.8 ± 1.1	40.5 ± 1.7	0.61
80 keV	0	0-90	95.3 ± 0.4	66.6 ± 0.9	1.91
30 keV	0	0-90	94.6 ± 2.9	21.0 ± 2.1	1.43
80 keV	7.5	0	89.1 ± 0.4	64.5 ± 0.9	9.18
80 keV	15	0	87.7 ± 0.4	62.0 ± 0.9	15.20
80 keV	22.5	0	87.1 ± 0.4	62.8 ± 0.9	13.99
80 keV	30	0	86.7 ± 0.3	62.6 ± 0.6	20.37
80 keV	7.5	45	96.8 ± 0.3	53.9 ± 0.7	39.13
80 keV	15	45	96.6 ± 0.3	54.1 ± 0.7	32.95
80 keV	22.5	45	96.5 ± 0.3	53.3 ± 0.7	26.98
80 keV	30	45	96.7 ± 0.4	53.4 ± 0.7	19.73

5.5.2 散乱・吸収位置の決定方法

今回の解析では、最終的な吸収・散乱位置の決定に乱数を用いた。ピクセルサイズ分の不定性はどうしても仕方ないが、ある散乱体と吸収体の組み合わせが取りうる角度の分布は、単純な幾何学だけで決まるので計算で求めることができる。なので、不定性がある乱数を用いるよりは、幾何学から角度分布のモデル関数を作り、その関数を用いて散乱方位角分布をフィッティングするほうが良いであろう。もっとも、例えば今回の 80 keV のデータのような、十分なフォトン統計がある場合は乱数を用いた散乱・吸収位置の決定でも問題はないと考えられる。

5.5.3 エネルギーカット基準

コンプトン散乱イベントの選定において、分解能によるエネルギーの揺らぎ幅を一律 15% と定めた。これは、フライトモデルとほとんどコンフィギュレーションが同じエンジニアリングモデルにおいて、実験に近いエネルギー領域でのエネルギー分解能がおおよそ 30% だったことによる。ただ、分解能はエネルギーによっても変わるため、エネルギー毎に揺らぎ幅を決定するのが良いであろう。

5.6 今後の課題

今後行うべき解析項目についてまとめる。

散乱・吸収位置の決定方法の検討

考察で述べた、乱数を用いずモデル関数でフィッティングする方法について検討する。

エネルギー毎の分解能測定

考察で述べた、エネルギーカット基準をより良いものにするために、エネルギー毎の分解能を測定する。

シミュレーションとの比較

特に、斜め入射のシミュレーションを Geant4 上で行い、シミュレーション結果と実験結果を比較する。斜め入射のレスポンスについては今までほとんど測定・シミュレートしていないため、念入りに解析・シミュレーションを行うべきである。TSUBAME の、MTQ を用いた GRB 観測シーケンスにおいては、GRB 方向に指向せず、指定方向を向いたままずっと観測を行うため、GRB が大きく斜め入射する可能性は高い。そのような場合でも、迅速に解析とシミュレーションを進められるよう、解析パイプラインの構築を行う。

検出器パラメータの最適化

30 keV で偏光を観測するためには、1 光電子程度のエネルギーのイベントを検出しなければならない。そのために、増幅率やスレッシュホールドの調整をより厳密に行い、フライトに向けて最終調整を進める必要がある。

5.7 まとめ

KEK-PF の偏光 X 線ビームを用いて、HXCP フライトモデルの性能評価を行った。その結果、検出器の目標性能である 30 keV での偏光検出を達成し、実際に機上に搭載されるガンマ線観測系フルセットでの動作が確認された。光子が 10 kHz で入射するような非常に明るい場合でも対応可能であり、そのときの数え落としは 23%、デッドタイムは 156 μ s と、ほぼ設計通りの値が得られた。これは、エンジニアリングモデル開発時に存在していた致命的な問題点を全て解決できたことを意味する。さらに、光子が偏光計の光軸に対して 30° 傾いて入射した場合でも、十分な偏光検出能力を持つことが分かった。斜め入射でも偏光を検出できるということは、CMG で GRB 方向に指向する前の初期放射のデータを有意に利用でき、GRB の観測において強力な武器となるであろう。また、より実際の側面として、CMG が破損して GRB 方向を指向できなくなってしまった場合でも十分観測を続けることができるという利点もある。

今後は、シミュレーションとの比較を中心に解析を進めつつ、フライトに向けたパラメータ最終調整をしていく。

第6章 環境試験

衛星はロケットの振動や、宇宙空間の放射線、真空状態でめまぐるしく変わる熱環境といった、過酷な環境に曝される。とりわけガンマ線観測系は、ノイズに埋もれてしまいかねない微小な信号を検出しなければならないため、通常の装置では気にならないような衛星内部の磁気、電波も考慮に入れなければならない。そのため、そのようなガンマ線観測系が曝される環境条件を模擬した試験を行い、問題があれば対策を施す必要がある。

試験項目は以下の6つである。

- 放射線耐性試験
- 振動試験
- 衝撃試験
- 熱真空試験
- 磁気干渉試験
- 電波干渉試験

6.1 放射線耐性試験

FPGA に対して陽子ビームを用いた SEE の評価試験を行った。入射陽子数は約 3.08×10^{10} 個で、トータルドーズは 3.752 krad に相当する。これは軌道上で予想される陽子数の 9.8 年分である。試験中に FPGA のコンフィギュレーションが変化したり、致命的な損傷を与える SEL などの現象は見られず、消費電流にも大きな変化は見られなかった。

だが、シフトレジスタに 1 回、メモリブロック部には合計 38 回の SEU が発生したため、軌道上では論理回路部に年間 12.6 回の SEU が発生する可能性がある。その反応断面積は $\sigma_{mem} \sim (6.9 \pm 1.1) \times 10^{-14} \text{cm}^2 \text{bit}^{-1}$ と推定される。従って、CPU はこれを考慮に入れたエラー訂正、冗長系を実装する必要がある。詳細は川上修論 [12] にまとめられている。

6.2 振動試験

ロケット打ち上げ時には非常に大きな振動がかかるため、衛星の各機器はロケット側からの耐振要求値を満たしている必要がある。振動試験においてロケット振動を模擬した加振を行い機器の破損が無いか確認を行った。

最初の振動試験においてMAPMTが一部破損し、支持機構の改修が必要となった。そのため、HXCP内の振動を調べ、支持機構の強化を行った。HXCPの振動データを元にMAPMTの再加振を行い、ロケット振動条件の1.5倍以上の $22G_{RMS}$ の加振に耐えることが実証された。詳細は林卒論[13]にまとめられている。

6.3 衝撃試験

パイロロックの分離衝撃が構造部材間をどのように伝達していくか(=減衰率)を把握し、測定した減衰率を加味してDNEPRロケットに規定されている衝撃力を加え、MAPMTが破損しないかどうか確認する。

6.3.1 試験内容

衝撃試験を行うには、ハンマリング、振り子、高加速度試験装置、火薬など、様々な方法が提案されているが、ここでは最もシンプルなハンマリングで試験を行った。

試験は1. 衛星筐体の衝撃伝達関数測定、2. HXCP筐体の衝撃伝達関数測定、3. MAPMT単体試験、3回に分けて実施した。

1. 衛星筐体の衝撃伝達関数測定

TSUBAME構造モデルを用い、図6.1(a)に示すように衛星をクレーンで吊り上げた状態で試験を行う。ハンマリング箇所は、DNEPR IFのパイロアダプター取り付け位置付近とする。

2. HXCP筐体の衝撃伝達関数測定

衛星筐体を伝わってくる衝撃は、HXCP筐体により共振を起こし衝撃が増幅される。よって、MAPMT単体試験の前にHXCP単体で試験を行い、HXCP筐体の衝撃伝達関数を測定した。HXCP筐体の衝撃試験は図6.1(b)、図6.2左のように治具に取り付けて行った。

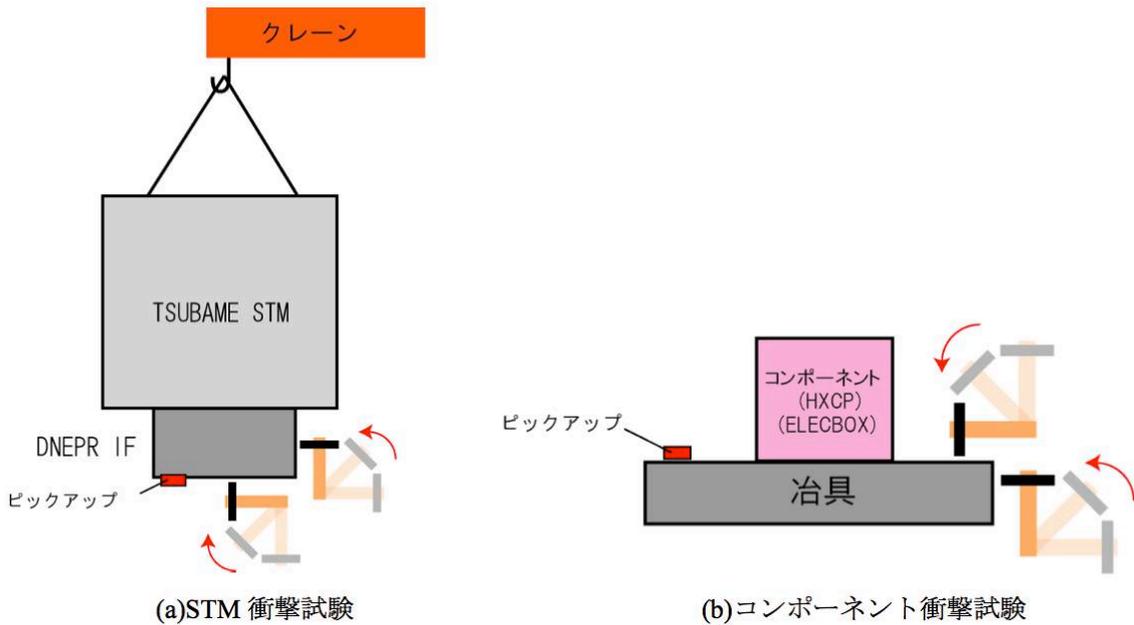


図 6.1: 衝撃試験模式図。左図：衛星筐体の衝撃伝達関数測定。クレーンで TSUBAME 構造モデルを吊り上げハンマリングを行い、ピックアップで加速度を測ることで伝達関数を測定する。ピックアップは DNEPR IF と、TSUBAME 筐体内の様々な構造部材に取り付けられている。右図：コンポーネント単体衝撃試験。コンポーネントを治具に固定し、衝撃伝達関数測定で求めた伝達関数を加味した衝撃力をハンマリングで加えて試験を行う。ピックアップは治具と、コンポーネントに取り付けられている。

3. MAPMT 単体試験

MAPMT 単体試験は、図 6.1(b)、図 6.2 右のように治具に取り付けて行った。衝撃力は、DNEPR ロケットの規定レベルに 1.2. の試験で得られた衛星筐体と HXCP 筐体の衝撃伝達関数を乗じたものを加えて試験した。

6.3.2 試験結果

本来は X、Y、Z 軸の 3 軸の衝撃入力を行うべきであるが、応答スペクトルを見ると Z 軸の応答が最も衝撃の減衰が小さく、各軸のスペクトル形状に大きな変化がなかったため、試験の評価としては Z 軸ハンマリングの結果のみ採用することとした。

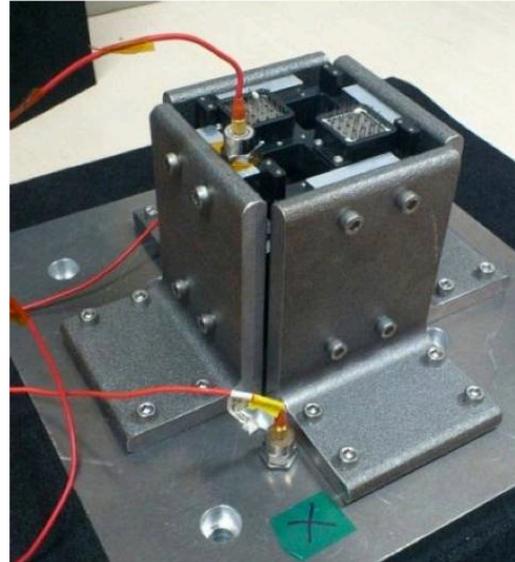
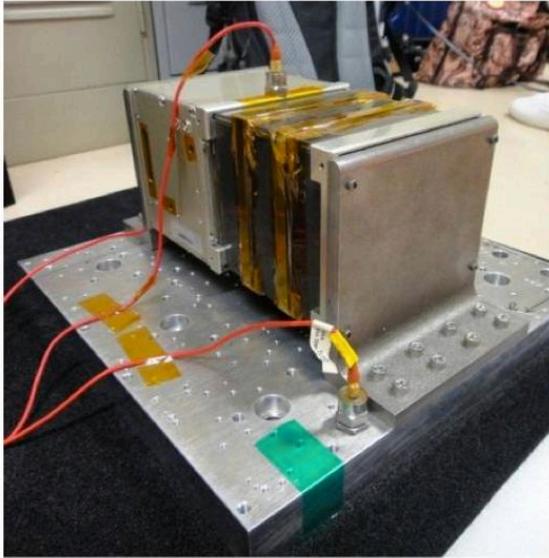


図 6.2: コンポーネント衝撃試験セットアップ 左: HXCP 右: MAPMT。
赤い線の先に加速度ピックアップが付いている。緑色のテープの所にハンマリングした。

衛星筐体の衝撃伝達関数測定

図 6.3 に衛星筐体 Z 軸ハンマリングの加速度周波数応答、及び基準ピックアップに対する伝達率を示す。HXCP 搭載位置への衝撃の伝達率は約 0.25 倍であることが分かる。

HXCP 筐体の衝撃伝達関数測定

HXCP 筐体のハンマリング試験を行い、筐体共振による衝撃増幅がどの程度行われるか測定した。衝撃力は、DNEPR ロケット規定レベルに、上記試験で得られた減衰率 0.25 を乗じた値を加えた。その結果、HXCP 筐体による共振は小さいことが分かった。

MAPMT 単体試験

HXCP 筐体の共振が小さいことが分かったので、衝撃力は HXCP 筐体のハンマリング試験と同様の、DNEPR ロケット規定レベルに 0.25 を乗じた値を加えた。衝撃試験前後の MAPMT 動作確認結果を図 6.6 に示す。動作確認の結果、破損はなく、試験前と同様の性能が出ていることが確認された。

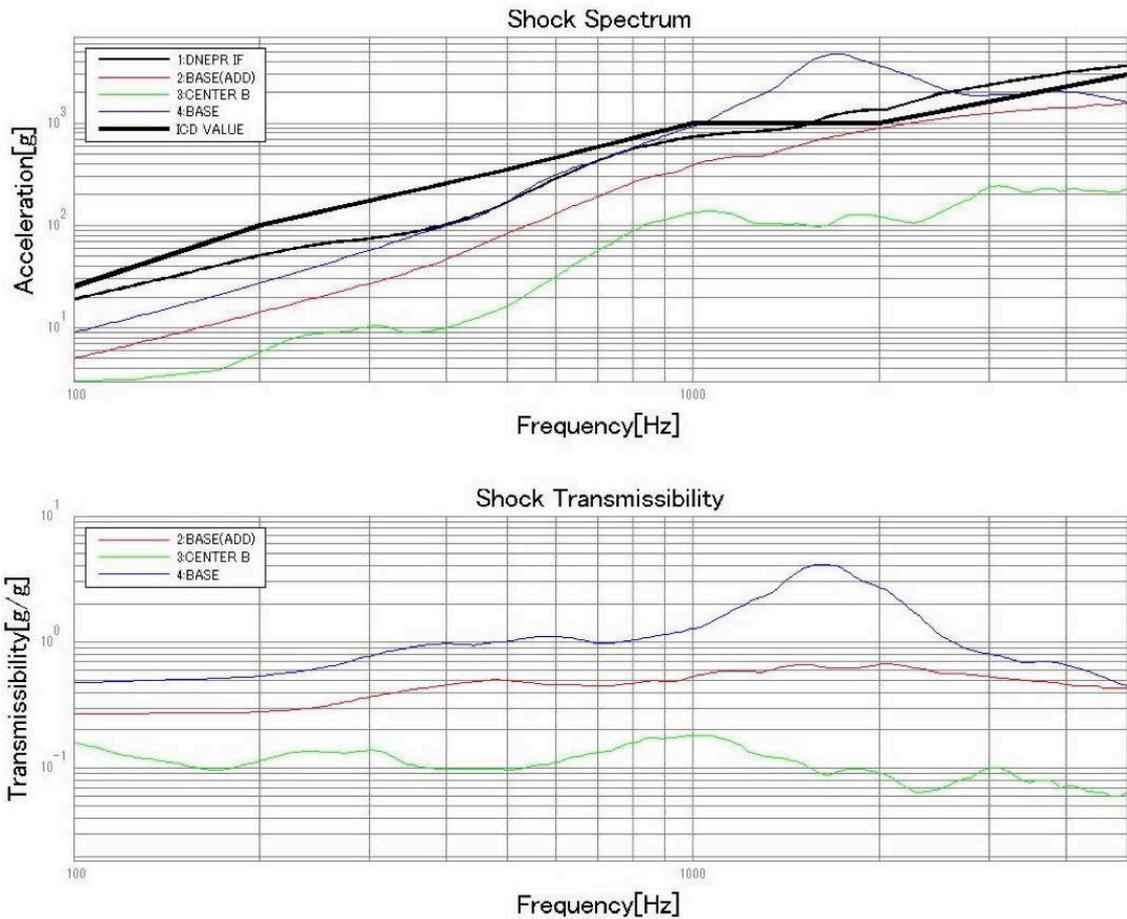


図 6.3: 衛星筐体 Z 軸ハンマリングの加速度応答（上）と伝達率（下）。加速度応答は、横軸に周期、縦軸に加速度をとったグラフである。HXCP の搭載位置は CENTER B であり、加速度応答を DNEPR IF との比をとることで伝達率を求めた結果、約 0.25 倍に減衰することが分かった。

6.3.3 まとめ

MAPMT は、衝撃に弱いことからこれまで宇宙利用を敬遠されてきたが、これらの入念な試験により打ち上げに耐えられることを確認した。同機種は、TSUBAME により世界初の宇宙実証となる。

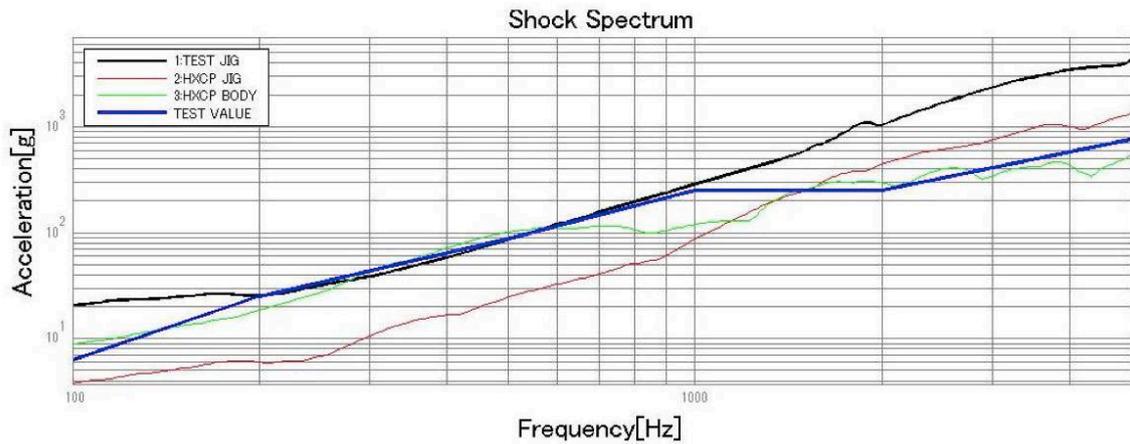


図 6.4: HXCP 筐体の加速度周波数応答。TEST VALUE は伝達率を加味した衝撃入力目標値である。TEST JIG(黒線) がハンマリング入力加速度で、HXCP JIG、HXCP BODY が HXCP での加速度を表している。TEST JIG と HXCP での値がほとんど変わらないため、共振は起こしていないことが分かる。

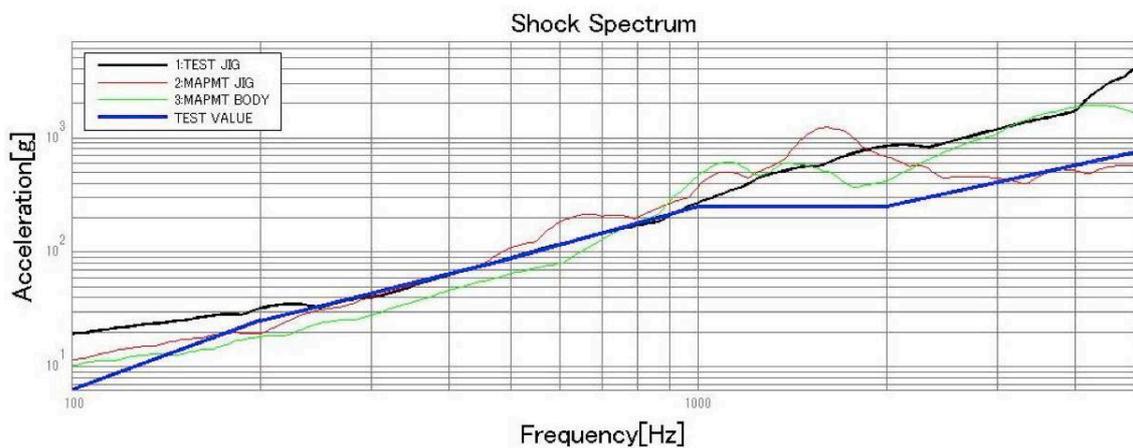


図 6.5: MAPMT の加速度周波数応答。TEST VALUE は伝達率を加味した衝撃入力目標値で、TEST JIG(黒線) がハンマリング入力加速度で、MAPMT JIG、MAPMT BODY が MAPMT での加速度を表している。MAPMT での加速度が TEST VALUE 以上となるように衝撃を加えた。

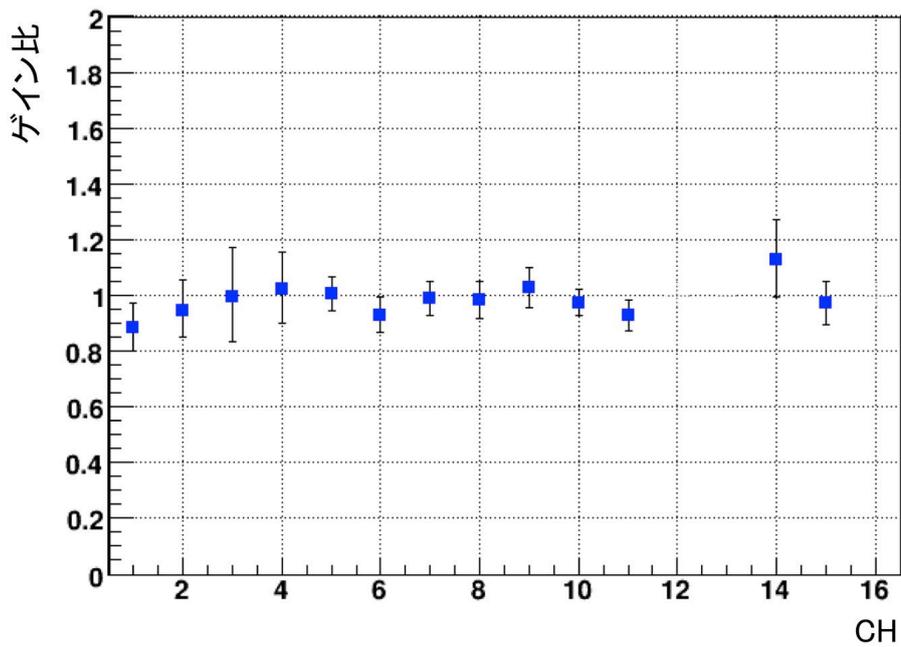


図 6.6: 衝撃試験前後のゲインの比。 ^{241}Am のピークを測定し、試験前後でゲインの比をとってグラフにした。横軸は MAPMT の各 ch で、3ch 分はもともとゲインが低く、正確にゲインを求めることができなかつたので除外してある。どの ch もゲイン比の揺らぎはエラー程度で、破損していなことが分かる。

6.4 熱真空試験

熱真空試験は、宇宙環境を模擬した熱・真空状態で、衛星搭載機器が問題なく動作するかや、熱はどのように伝わるかを調べる試験である。

TSUBAME フライトモデルを用いて熱真空試験を実施し、現在の熱設計検証を行った。本試験では TSUBAME 筐体に各系の機器を搭載して動作させ、機器の正常動作や、温度変動の様子を調べた。TSUBAME は真空チャンバに入れ、各機器の電源状態を実際の動作モードに合わせて設定し、真空状態で軌道上での熱発生状況を模擬した。

試験のタイムテーブルは図 6.8 の通りで、真空排気を行った後に、高温 SOAK や低温 SOAK 試験を行った。SOAK 試験とは、衛星を長時間最大予測温度に浸し、故障や劣化が生じないかを確認する試験である。試験時の温度推移を図 6.9 と図 6.10 に示す。ただし、これは今回の試験限りのデータであり、実機が軌道上でこのような温度変動をすることは限らない。現在はこの結果を元に、熱解析のパラメータ合わせ込みを行い、最終調整を行っているところである。特に高温になると APD や MAPMT のノイズレベルが上がることで予想されるため、熱を筐体に効率良く逃がす機構が必要になると思われる。なお、検出器内の熱はグラフィイトシートを用いて逃し、検出器全体で可能な限り温度が均一になるようにしている。

試験中、ガンマ線観測系はデバッグポートを通して外部 PC と通信を行い、CPU の動作を監視した。衛星への組み込み時には様々なトラブルが発生したが、試験では、HK の取得、WBM・HXCP の電源操作、高圧操作、WBM スペクトル取得、データ転送、セーフモード移行などを試し、どれも正常動作を確認できた。

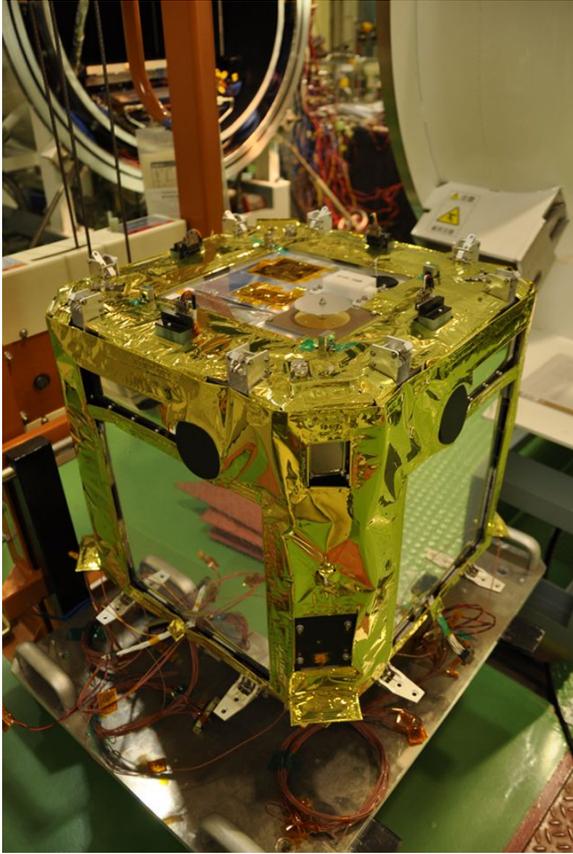


図 6.7: 熱環境試験時の Tsubame 衛星。
左奥にある熱真空チャンバに入れて試験を
実施した。

フェーズ	試験モード	所要時間[h]	
		予想	結果
0	セットアップ	12.5	14
1	真空排気	11	13
2	高温移行	7	
3	高温SOAK-1	4.6	6
4	低温移行	15	8.5
5	低温SOAK-1	4.6	4.5
6	高温移行	7	6
7	高温SOAK-2	4	2.5
8	低温移行	15	14.5
9	低温SOAK-2	4	3
10	高温移行	24	7
	常温戻し		8.5
11	大気圧戻し	6	1
12	チャンバ開放	6.6	4

図 6.8: 熱環境試験タイムテーブル。試験の
モードや所要時間を記載。チャンバの性能
が想定より良かったのと、消費電力が小さ
く冷え易かったことで、予想より試験時間
は短縮できた。

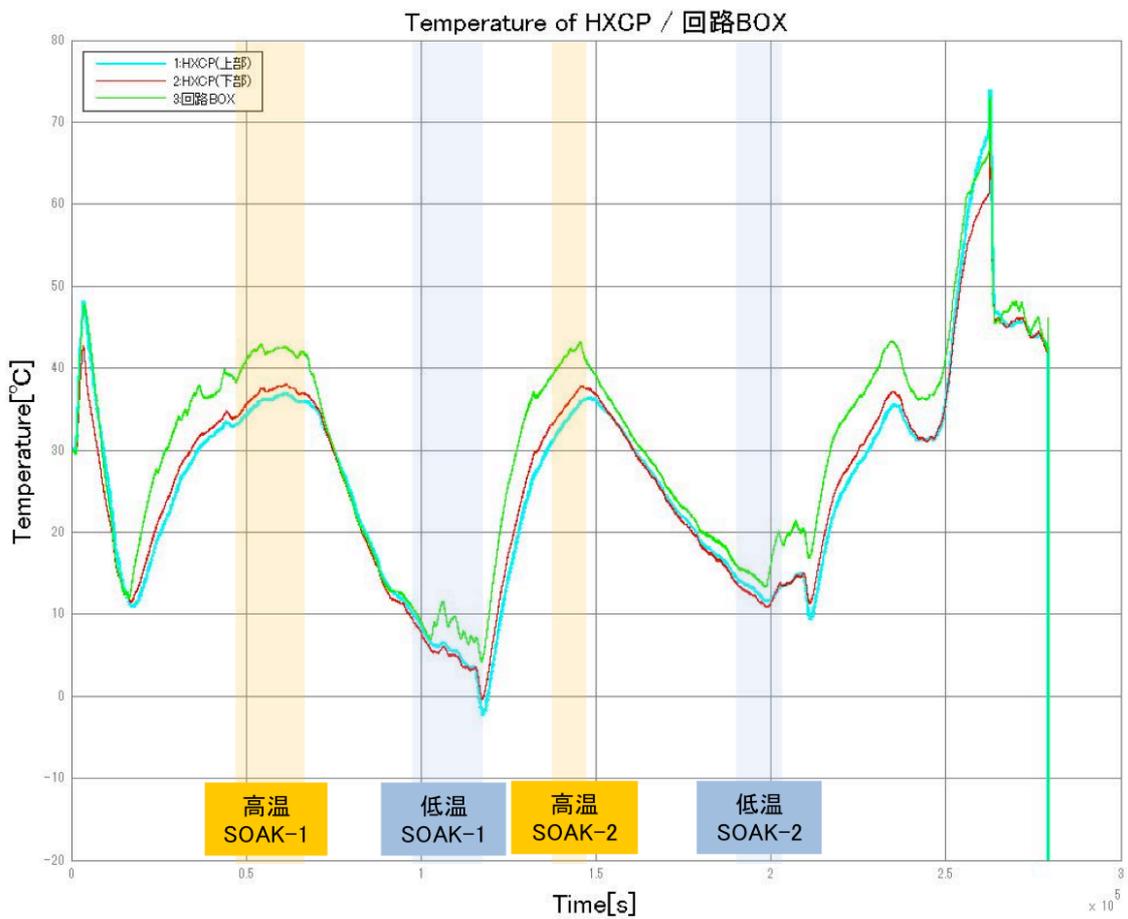


図 6.9: 熱環境試験での回路ボックス、HXCP の温度推移。回路ボックス上に1つ、HXCP の上部と下部に1つずつ熱電対を取り付けて温度を測定した。高温 SOAK 時に HXCP の温度が上がりすぎており、効率的に熱を筐体に逃がす機構が必要になる。HXCP は TSUBAME 筐体内にあることもあり、上部と下部で温度がほぼ均一だった。

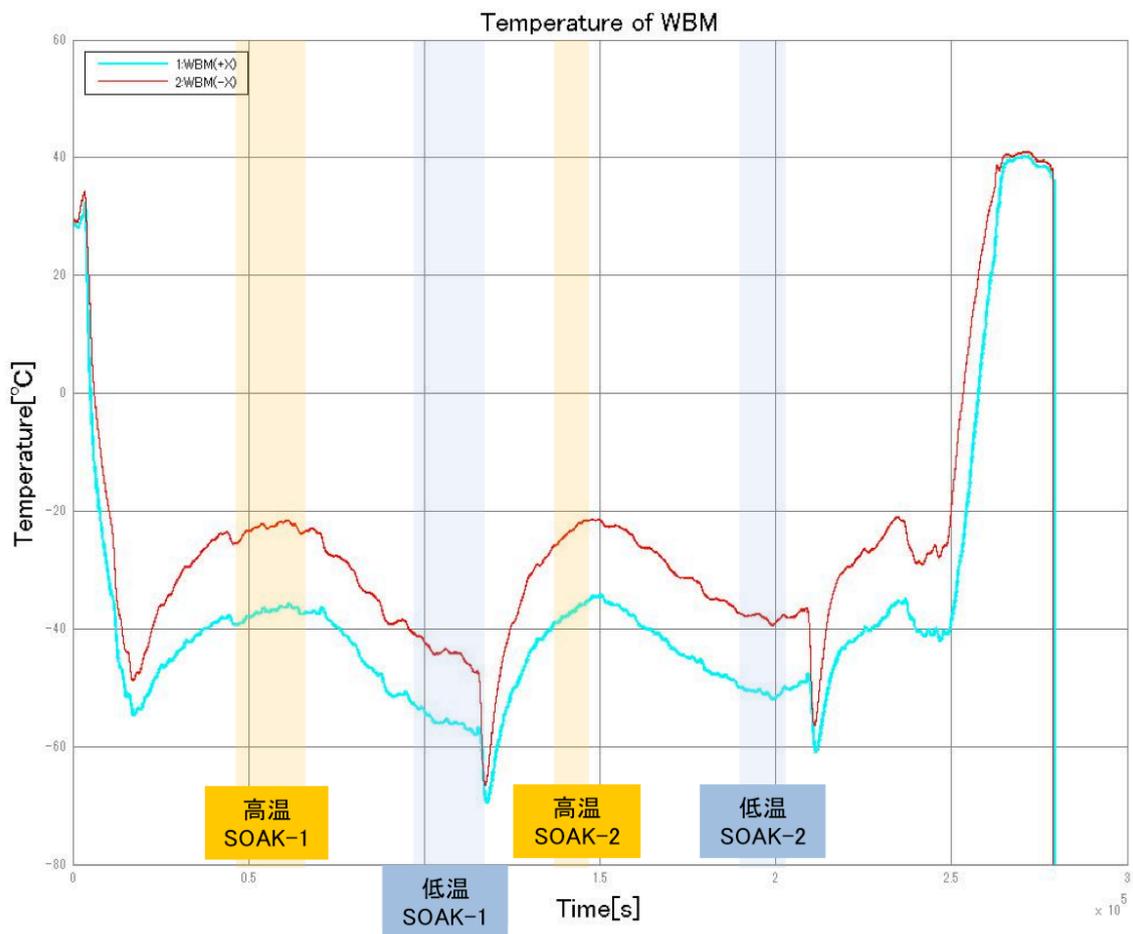


図 6.10: 熱環境試験での WBM の温度推移。WBM の表と裏に 1 つずつ熱電対を取り付けて温度を測定した。WBM の表と裏で温度が随分離れてしまっているが、これは熱電対の取り付け方が不十分であったと考えられる。表側（青い線）の熱電対は WBM 表面アルミシールドに取り付けられていて、この取り付けが甘く、若干浮いてしまっていた可能性がある。低温 SOAK-1 の最後の、急激な温度低下は、オペレーションミスによるもので、想定よりも冷え易いことも要因の 1 つとなった。

6.5 磁気干渉試験

TSUBAME 衛星には、姿勢制御装置として磁気トルカ (Magnetic Torquer; MTQ、図 6.11) が搭載されている。その特性上磁気を発生させるため、その磁気がどの程度観測装置に影響を与えるか調べる必要がある。特に、PMT は一般的に磁界に敏感であるため、影響があるようであれば磁気シールドを付けるといった対策をしなければならない。理論的な MTQ の発生磁場の大きさや、シールドの効果は林卒論 [13] でまとめられている。ここでは実験的に、HXCP に MAPMT を組み込んだ状態でゲイン変動を見ることで、影響の大きさを評価する。



図 6.11: MTQ。コイルに電流を流すことで磁界を発生させ、外部磁場との相互作用を利用してトルクを発生させる人工衛星の制御デバイス。

6.5.1 試験内容

HXCP と MTQ を実際の衛星内の位置関係と同様に配置 (MTQ1 の位置関係を模擬：図 6.13、MTQ2 の位置関係を模擬：図 6.14)。磁化する恐れがあったため紙製の治具を作成し、金属の机からは 30 cm 以上離れた。 ^{241}Am のスペクトル測定を行い、ピークをガウシアンでフィッティングすることでゲインを取得。MTQ が off の場合と on の場合でゲインがどのように変わるか調査する。

MAPMT の印加電圧は-800V、MTQ 電流値は実際の運用時の最大値である ± 40 mA で測定を行った。

6.5.2 試験結果

MTQ off 時と on 時で ^{241}Am の 59.5 keV ピークの大きさ (=ゲイン) を求めて、ゲインの比がどの程度変わるか調べた。もともと持つ統計的な揺らぎを MTQ off で 2 回測定することで求めて、その統計的な揺らぎを逸脱してゲインが変化しないことを確認する。試験結果を図 6.15、図 6.16、図 6.17 に示す。

図 6.15 は、ゲインの比を 2 次元カラーヒストグラムに詰めたグラフである。図 6.16 は、図 6.15 の全 64ch のゲイン比を 1 次元ヒストグラムに詰めた図である。図 6.15、図 6.16 か

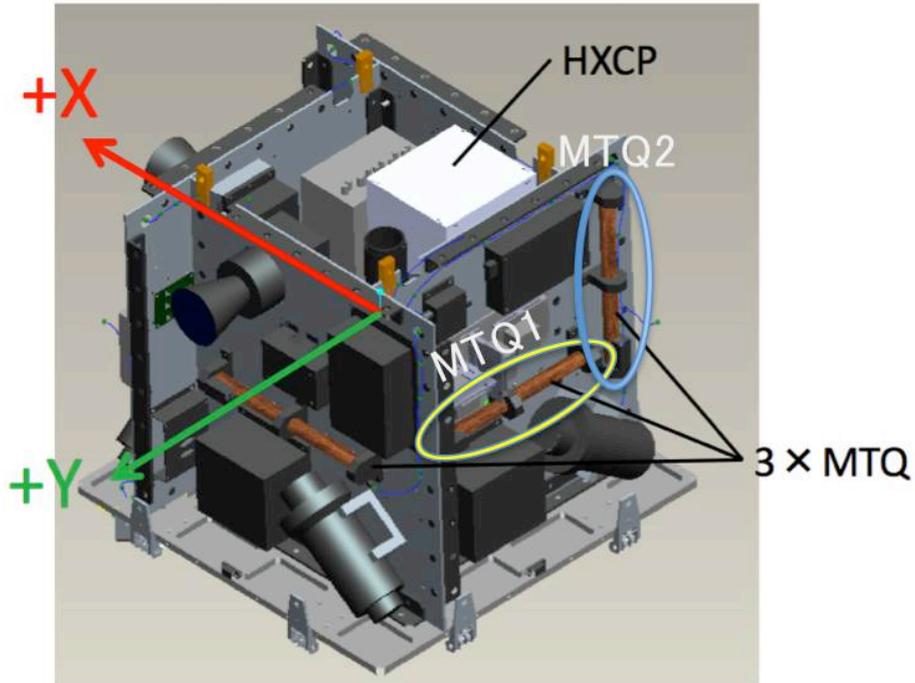


図 6.12: Tsubame 衛星内での MTQ と HXCP の配置。HXCP に近い MTQ1 と MTQ2 の位置関係を模擬して試験を行う。MAPMT に一番近い、MTQ1 の中心軸と MAPMT との距離は 62.3 mm である。

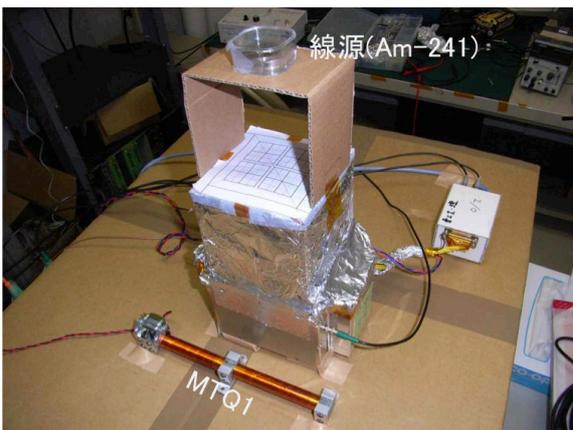


図 6.13: MTQ1 の位置関係を模擬して配置。図 6.14: MTQ2 の位置関係を模擬して配置。

下側の橙赤色のデバイスが MTQ である。 上側の橙赤色のデバイスが MTQ である。

ら、そもそも統計的な揺らぎで、ゲインの比は 5% 程度は変動することが分かる。また、MTQ off 時と on 時のゲイン変動も 5% 程度であることは、MTQ の影響は、もともと持つ統計的なゆらぎと同程度かそれ以下であることを示唆している。

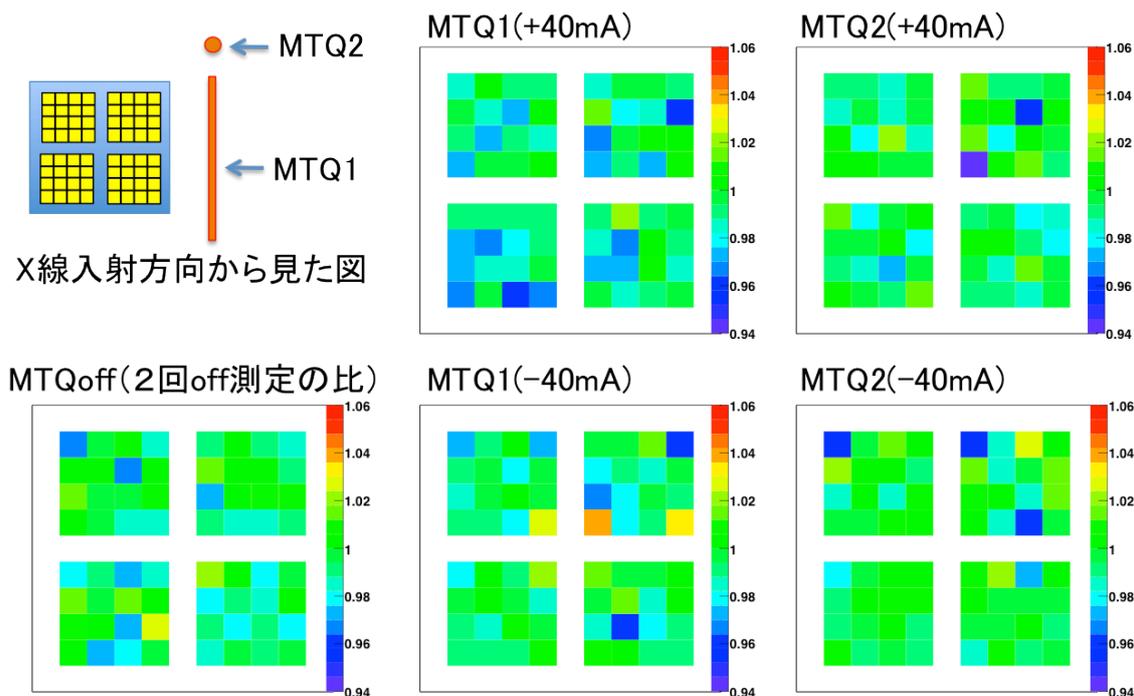


図 6.15: MAPMT で検出したピークのゲイン比のマップ。左上の図は X 線入射方向から見た時の MAPMT の各 ch の並びと、MTQ1、2 の配置図である。MTQ1 は MAPMT 観測面に垂直方向、MTQ2 は平行方向に配置されている。黄色のマスキ目が MAPMT の各 ch を、オレンジ色の線が MTQ を表している。中央と右側の 4 つの図は、MTQ が off の場合と on の場合でそれぞれ、 ^{241}Am の 59.5 keV ピークの大きさを求めて、その比を 2 次元カラーヒストグラムに詰めたグラフである。マス目 1 つが 1 つの ch に対応していて、色でゲイン比の大きさを表している。左下の図は同様に、2 回 MTQ off で測定してゲインの比を求めたものである。MTQ の電源状態によらず、どの場合でも 5% 程度はゲインが変化することが分かる。また、ゲイン比の分布には、MTQ に近い ch のほうがゲイン比が小さいといった偏りは見られない。

図 6.17 は横軸に MTQ off 時のピーク値、縦軸に MTQ on 時のピーク値をプロットしたグラフである（左下の図は縦軸も MTQ off 時の測定値）。理想的にはプロット点は、原点を通る傾き 1 の直線上に乗る。2 回 MTQ off で測定した場合に求められる理想的な直線からのずれの分布と、MTQ on にした場合の理想的な直線からのずれの分布が等分散であること、つまりずれの分布に有意な差があるかどうかを確認するために F 検定を行う。もし理想的な直線からのずれの分布に有意な差が無いのであれば、それは MTQ on によるゲイン変動は、統計的なゆらぎから逸脱して大きくはないと考えられる。

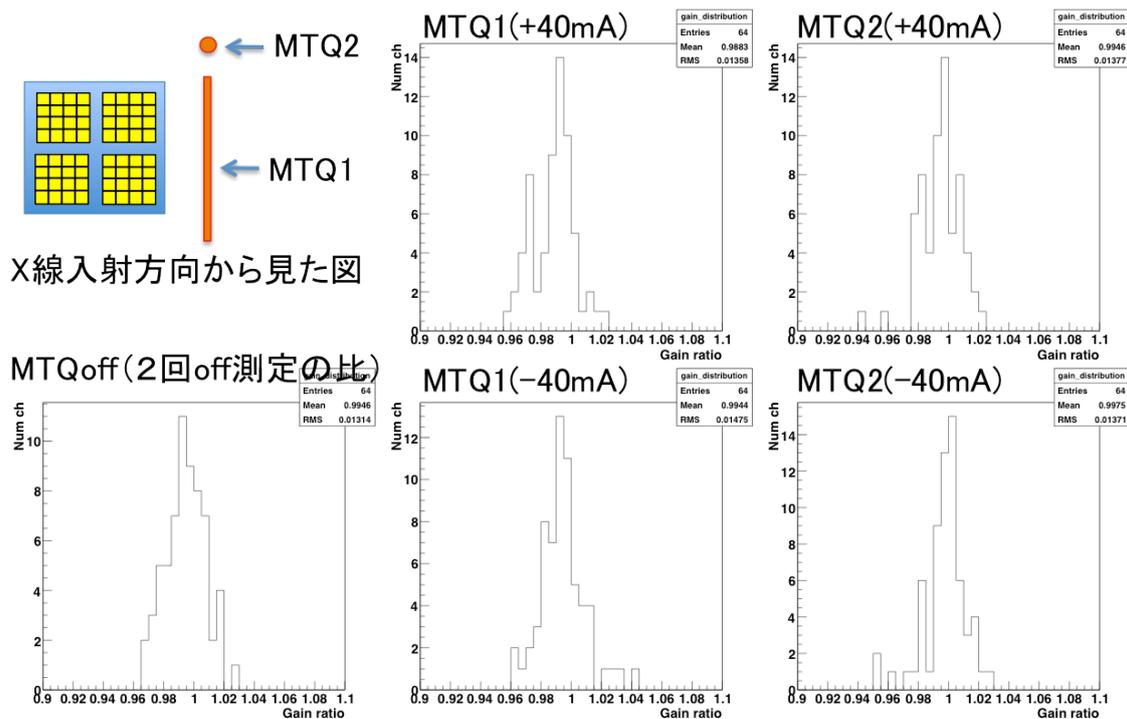


図 6.16: MAPMT で検出したピークのゲイン比の分布。図 6.15 のゲイン比を、1 次元ヒストグラムに詰めたグラフである。ゲイン比はどの場合もおよそ 1 を中心に、最大で 5% 程度のゆらぎを持って分布していることが分かる。

自由度 62 の有意水準 5% となる F 値は 1.53 であり、実験結果から求められる F 値は最大でも 1.44 であった。そのため、MTQ off 時と on 時のゲイン変動の分布は、信頼度 95% で等分散であると言える。よって MTQ を on にしても、ゲイン分布に統計的なゆらぎを逸脱するような大きな影響は与えない。

6.5.3 まとめ

静磁界シミュレーションによる予想 (林卒論 [13]) によると、MAPMT での最大磁場は 2.75 G で、この磁場を MAPMT に影響が出ないと予想される 1 G 以下にするためには、パーマロイの厚みは 0.1 mm あれば十分であると求まっている。

さらに今回、実際に MAPMT を動作させて、MTQ の発生磁場が MAPMT に与える影響を実験的に調べた。その結果、統計的なゆらぎを逸脱するような影響は与えないことが分かった。これらの結果より、磁気シールドを搭載する MAPMT は、MTQ からの磁場の影響はほとんど無いと結論づけられる。

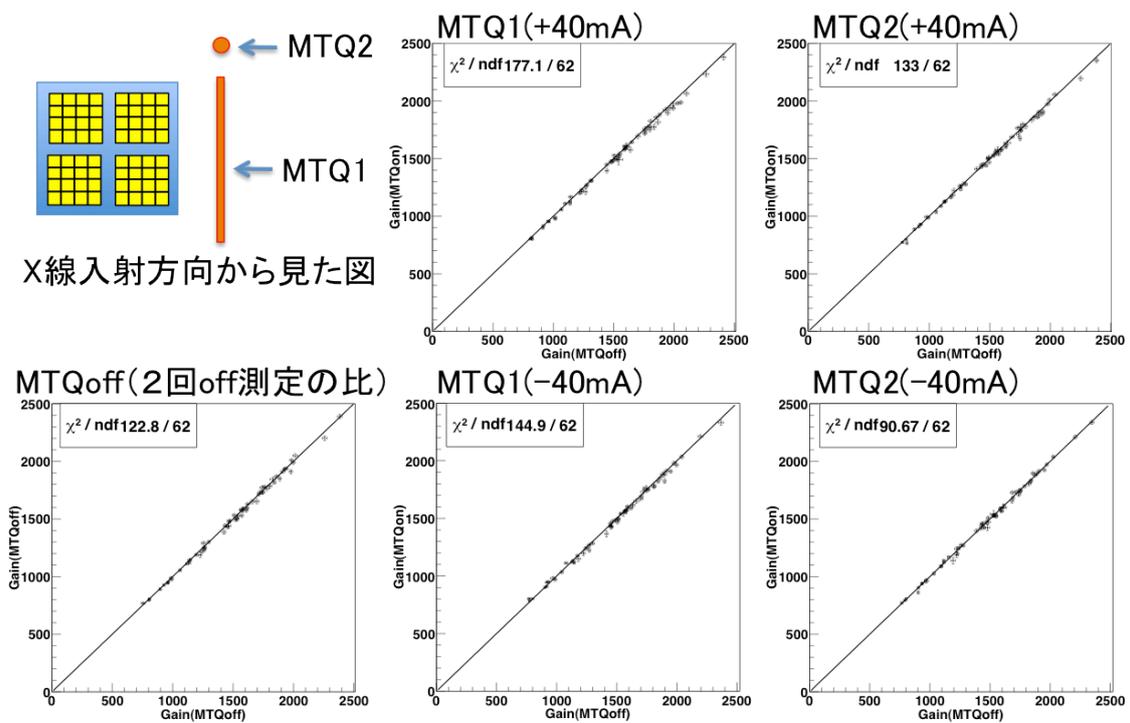


図 6.17: MAPMT で検出したピークのゲインの分布。図 6.15、図 6.16 と異なり、横軸に MTQ off 時のピーク値、縦軸に MTQ on 時のピーク値をプロットしたグラフである（左下の図は縦軸も MTQ off 時の測定値）。理想的には原点を通る傾き 1 の直線に乗る。理想的な直線とのずれを計算し、 χ^2 値を求めた。

6.6 電波干渉試験

TSUBAME 衛星には地上局との通信用に、CW(continuous wave) と、FM(frequency modulation) 方式を用いた無線機が搭載されている。この無線機が放つ電波が、検出器にどのような影響を及ぼすか調査する。FM は可視パス中しか使用せず、その間は観測を行わないので、ここでは CW に注目して試験を行う。

WBM の電波干渉試験については川上修論 [12] にまとめられている。ここでは HXCP の電波干渉試験についてまとめる。ハンディ無線機を用いて、HXCP と無線機のみで試験を行った。セットアップを図 6.18 に示す。HXCP は実機と同様に回路ボックスに接続されており、回路ボックスの電源は安定化電源から供給する。また、回路ボックスの通信ラインはデータ取得用 PC に接続され、種々のコマンドやデータがそのラインを通じて送受信される。

6.6.1 電波侵入経路、イベントレート調査

まず予備試験として、HXCP やそのハーネスが電磁的にシールドされていない状態でイベントレートの測定を行った所、無線機から電波を放射するとレートが増えてしまった。これは、HXCP 筐体の隙間やハーネスから電波を拾い、ノイズとなって検出されているためである。そこで、HXCP 筐体の隙間やハーネスをアルミホイルで覆った所、イベントレートはかなり改善された。また、ハーネスの配置によっても随分変わり、ループになっている場合は電波を拾いやすいと考えられる。

6.6.2 分解能調査

実際は HXCP 筐体の隙間は塞がれ、ハーネスも電磁シールドを搭載する予定なので、図 6.18 のように、そのようなシールドをアルミホイルで模擬して試験を行った。ハンディ無線機は HXCP から 10 cm 離れた所に設置し、無線機の向きはいくつか試して一番影響が出やすい向きにした。衛星筐体に組み込んだ際は、無線機と HXCP は 10 cm 程度は離れており、さらに間にはバルクヘッドという衛星の構造部材があり、HXCP は金属の壁で覆われている状態である。よって今回の試験は実機より厳しい条件での試験となっており、この状態でも影響が出ないようであれば問題はない。

試験結果を 6.1 に示す。線源のスペクトルを取得し、分解能を測定した。スペクトルそのものは付録 B.2 節に載せた。CW をつけても有意な変化は見られず、分解能はエラーの

範囲内で一致した。

6.6.3 まとめ

電波ノイズの侵入経路や分解能を調査した。その結果、HXCP の筐体やハーネスを電磁シールドで覆えば、CW 無線機がついていても問題なく測定できることが分かった。今後は、実際の衛星に組み込んだ状態での電波干渉試験を実施し、正常動作を確認する。

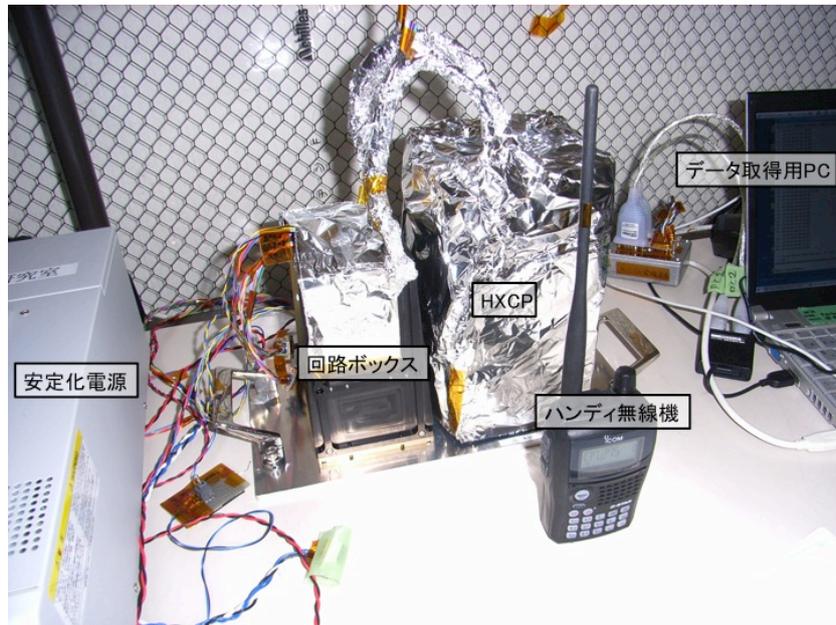


図 6.18: 電波干渉試験のセットアップ。回路ボックスと HXCP は実機と同様に接続し、回路ボックスの電源は安定化電源から供給した。回路ボックスの通信ラインはデータ取得用 PC に接続され、コマンドやデータはそのラインを通じて送受信した。

表 6.1: 無線機 OFF、ON 時の HXCP の分解能。常温で測定。PMT の印加電圧 = -830V、APD の印加電圧=381V。PMT は ^{241}Am のピークを、APD は ^{137}Cs のピークをフィッティングして分解能を求めた。CW の電源をつけても有意な変化は見られず、分解能はエラーの範囲内で一致した。

	CW OFF	CW ON
MAPMT(^{241}Am)	42.4±5.4%	43.4±5.6%
APD(^{137}Cs)	10.7±0.6%	10.8±0.6%

6.7 まとめ

ロケットの振動や、宇宙空間の過酷な放射線、および熱真空、衛星内の磁気、電波といった、ガンマ線観測系が曝される各種環境を模擬して試験を行った。

放射線耐性試験では、FPGA に対して陽子ビームを照射し SEE の発生率の評価した。軌道上約 10 年分の照射により、SEL などの致命的な現象は見られなかったが、SEU は多発した。この実験によって、軌道上で年間 12.6 回の頻度で SEU が発生する可能性があることがわかった。よって、CPU はこれを考慮に入れたエラー訂正、冗長系を実装する。

振動・衝撃試験では、MAPMT の支持機構の改修を行うことで、ロケット振動条件の 1.5 倍以上の $22G_{RMS}$ の加振と、パイロロックの分離衝撃に耐えることが実証された。MAPMT は、衝撃に弱いことからこれまで宇宙利用を敬遠されてきたが、これらの入念な試験により打ち上げに耐えられることを確認した。同機種は、TSUBAME により世界初の宇宙実証となる。

熱真空試験では、TSUBAME フライトモデルを用いて現在の熱設計検証を行った。宇宙環境を模擬した熱・真空状態で、衛星搭載機器が問題なく動作することが確認され、熱解析のパラメータを合わせ込むための温度変動データを取得した。この結果を元に、最終的な構造がフィックスされる。

磁気干渉試験では、MTQ の発生磁場が HXCP の MAPMT に与える影響を実験的に調べた。その結果、MAPMT での最大磁場である 2.75 G でも、影響は無いことがわかった。

電波干渉試験では、無線機が放射する電波の影響を調査した。その結果、HXCP の筐体やハーネスを電磁シールドで覆えば、無線機から電波が放射されていても問題なく測定できることが分かった。

以上の各種環境を模擬した試験により、宇宙空間の衛星内という過酷な環境においても、ガンマ線観測系は正常に動作することが保証された。

第7章 まとめと今後の課題

本論文では、衛星上で検出器を制御するプログラムの設計・実装、HXCPの開発、性能評価、および宇宙環境を想定した様々な環境試験について述べた。

ガンマ線観測系プログラムの設計では、宇宙線によるメモリセルのビット反転や、CMOSデバイスのラッチアップ等、考えられうる全てのトラブルに柔軟に対応できる様に設計した。それらを念頭に制御プログラムを実装し、衛星バスとのシーケンス試験によって、中心となる機能の動作を確認できた。まだ完全には固まっていない仕様もあるため、衛星側と綿密な打ち合わせを行い開発を進めていきたいと考えている。

偏光計の開発では、エンジニアリングモデル開発時に存在していた複数の致命的な問題点を全て解決し、回路などのパラメータの最適化を行った。その結果、高エネルギー加速器研究機構(KEK)での偏光X線ビームを用いた性能評価試験において、検出器の設計性能である30keVでの偏光検出を達成し、実際に機上に搭載されるガンマ線観測系フルセットでの動作が確認された。光子が10 kHzで入射するような非常に明るい場合でも対応可能であり、そのときの数え落としは23%、デッドタイムは156 μ sと、ほぼ設計通りの値が得られた。さらに、光子が偏光計の光軸に対して30°傾いて入射した場合でも、十分な偏光検出能力を持つことが分かった。今後はGeant4を用いてシミュレーションを行い、その結果と比較することで性能評価を行なっていく。同時に、フライトに向けた最終パラメータ調整を進めていく。

各種環境試験では、ロケットの振動、宇宙空間の放射線や熱真空、衛星内の磁気・電波干渉にさらされる過酷な環境においても検出器が問題なく動作するか試験した。当初の設計そのままで不十分であることが分かったが、対策を施すことで全試験において正常動作を確認した。

付録A CPU関連補足資料

論文の筋とは直接関係ないソフトウェア関連の資料をまとめる。

A.1 CPU部の機能

A.1.1 GPIO

ガンマ線観測系に電源が供給されると、まず自動的にCPU-FPGAが起動する。その他の機器の電源はCPUが管理していて、GPIO(General Purpose Input/Output)ピンの上げ下げや、各FPGAを制御することで電源のON、OFFができる。

GPIOピンは電源基板に繋がっており、MOS-FETを用いたスイッチによってDCDCの出力を制御する。

A.1.2 リセット

荷電粒子の入射によるビット反転エラーや、何かしらのバグでプログラムが無限ループに入ったり、暴走してしまった場合の対策として、ソフトリセットを設けてある。ソフトリセットがかかるとプログラムは初期状態に戻り、ブートコードから起動し直される。

ソフトリセットが掛かる場合は2つある。1つはリセットピンから操作された場合である。これはCDHから操作できるようにしてあり、CDHはガンマ線観測系からHKの返答がない場合にリセットをかける。もう1つはウォッチドッグタイマである。ウォッチドッグタイマはガンマ線観測系のCPUが正常かどうか監視するためのタイマで、一定時間タイマーがクリアされない場合にリセットをかける。作成したプログラムではメインループの先頭でタイマーのクリアを行っており、プログラムが3秒以内にメインループに戻って来なかった場合は異常とみなしてリセットをかけるようにした。

ソフトリセットではあえてハードウェア的にガンマ線観測系全ての電源状態をOFFにはしないようにした。これは、検出器に高圧が印加されている時に電源が落ちてしまうと、プリアンプに過大な電流が流れて破壊されてしまう可能性を避けるためである。高

圧値と CPU のリセット回数は、FPGA 内部にロジックで設けた、ソフトリセットではリセットされない専用のメモリに保存する。ハードウェアリセットは、CDH がガンマ線観測系の DCDC コンバータへの電源を操作したときにのみ起こる。

A.1.3 割り込み

装置を制御するという事は、装置の状態に則した指示を与えることであり、入出力装置のプログラムにおいて装置の状態の取得はかなり重要な位置を占める。状態の取得の方法には大きく分けて2通りの方法がある。1つは「ポーリング」で、もう1つは「割り込み」である。

ポーリングとは、メインループの中で順番に状態を監視し、状態に変化があれば対応する処理を行うというものである。順番に状態を検査するので即応性が悪く、通信などのタイミングが重要な処理には向いていない。

割り込みとは、割り込み要因が発生したら現在行なっているルーチンを中断し、別のルーチンを実行した後また元のルーチンに戻るといった仕組みのことである。ポーリングと違って、割り込み要因が発生したときのみ対応する処理を行うため即応性が良く、コマンド受信などはすべて割り込み処理で行なっている。割り込みが発生した際に処理するルーチンの先頭アドレスが記載されている表を割り込みベクターテーブルといい、CPU はテーブルの内容を元に対応するルーチンを実行する。割り込みが発生した際に呼び出されるルーチンのことを割り込みハンドラという。また WBM の制御では、WBM からのタイミングが重要になるため WBM 割り込みを設けてある。

ガンマ線観測系の割り込み要因は以下の通りである。

- タイマー

ガンマ線観測系では 0.125 秒毎にタイマー割り込みがかかるようにした。これは、定期的に実行したいルーチンの制御に使用する。例えば、プリアンプが壊れないように高圧の印加はゆっくり行うことと、温度に依って変化する APD のゲインを一定にするために、定期的に印加電圧を変化させる必要があることから、高圧はタイマー割り込みを用いて制御する。これは wait を用いた処理でも実現できるが、その間は他の処理ができなくなってしまうため割り込みで対応する。高圧制御の他に、定期的な HK の取得にもタイマー割り込みを使用する。

- WBM

WBM の定期的なカウンタの読み出しに使用する。

- UART1、2

UART 通信による割り込みである。UART で文字を受信すると UART 割り込みがかかり、コマンドの受信処理を行う。割り込みハンドラ内では基本的に、コマンドの受信のみを行い、メインループの中で受信コマンド毎の処理を行う。時刻同期だけはタイミングが特に重要になるため、例外的に割り込みハンドラ内で処理を行う。

- CAN

UART と同様の、CAN 通信による割り込みである。

A.2 プロセッサ

ガンマ線観測系のメイン CPU である Cortex-M1 プロセッサの機能や、アドレスマップについて記述する。

A.2.1 レジスタ

Cortex-M1 プロセッサは図 A.1 に示す 32bit レジスタ¹を持っている。R0-R12 は汎用レジスタ、R13 はスタックポインタ (SR)、R14 はプログラムカウンタ (PC)、R15 はプログラムステータスレジスタ (xPSR) である。それぞれの役割は以下のとおりである。

- 汎用レジスタ

特にアーキテクチャで決まった用途はなく、計算結果やアドレスの保持等、様々な用途に使用される。

- スタックポインタ

スタックは、割り込み要求が発生した場合や、関数を呼び出す場合等に、それを呼び出す直前まで実行していたプログラムの状態やフラグを一時的に退避する場所として使われる。スタックポインタはそのスタックを管理するポインタであり、状態やフラグの退避先を示す。bit [1:0] への書き込みは無視され、自動的に 32bit 境界に配置される²。スタックへ出し入れするデータは、先に格納したデータを後から取り出す FILO(First-in Last-out) 方式を使用して管理する。ガンマ線観測系の CPU では

¹プロセッサ内部にある、演算や実行状態の保持に用いる記憶素子をレジスタと呼ぶ。動作は極めて高速だが容量が小さい。

²スタックポインタの値は必ず 4 の整数倍になるということである。

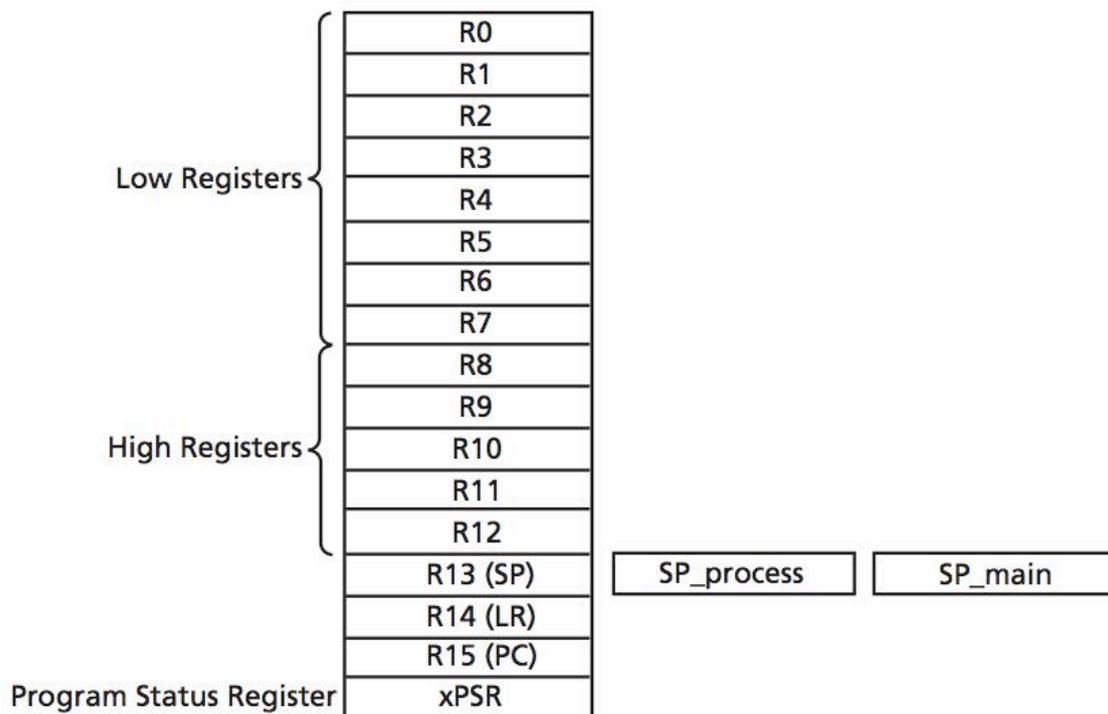


図 A.1: Cortex-M1 プロセッサのレジスタ。汎用的なレジスタと、スタックポインタ、リンクレジスタ、プログラムカウンタ、プログラムステータスレジスタといった特定の用途に使われるレジスタがある。

SRAM の最終アドレスをスタックポインタの初期値に設定してあり、スタックに値が積まれるにつれてスタックポインタのアドレスは小さい側に進んでいく。

- リンクレジスタ

BL 命令 (サブルーチンコール) で分岐した場合の戻りアドレス を保持する。

- プログラムカウンタ

実行中のメモリアドレスを保持する。bit [0] は常に 0 になっていて、命令は常に 16bit 境界に配置される。

- プログラムステータスレジスタ

オーバーフローフラグ等の、様々な演算の状態を保持する。

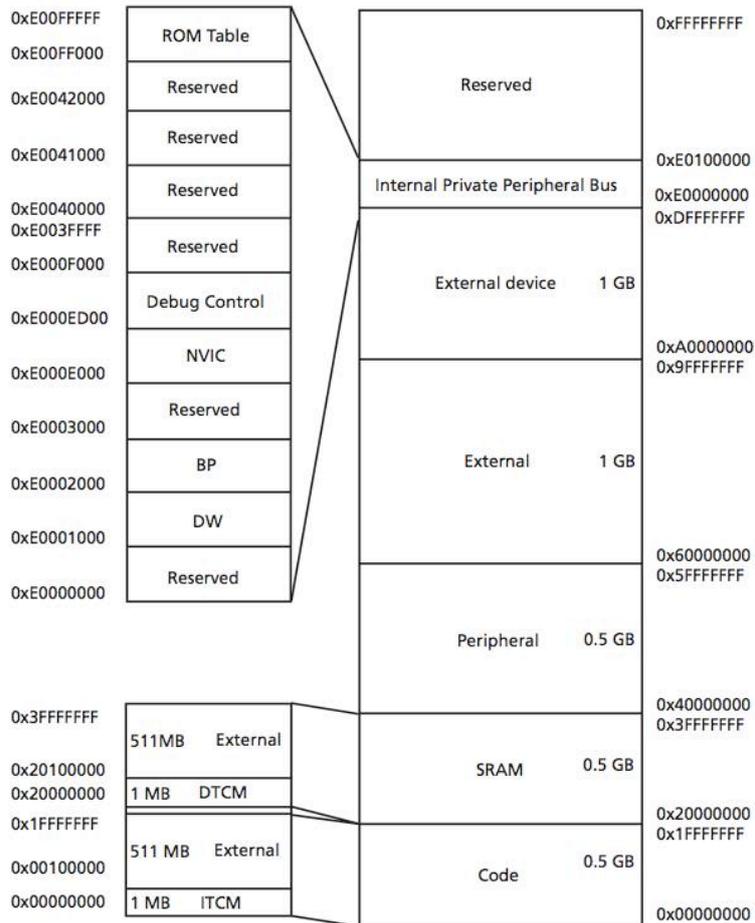


図 A.2: Cortex-M1 アドレスマップ。Code や SRAM、External device など、様々な領域に分けられている。特にガンマ線観測系では、Code の領域に FRAM を割り当てて使用している。

A.2.2 アドレスマップ

Cortex-M1 プロセッサのアドレスマップを図 A.2 に示す。このうち、特に我々が開発したガンマ線観測系 CPU に注目したアドレスマップを表 A.1 に示す。プロセッサとバスとの間には FPGA のロジックが入るので、アドレスマップは自由に変更することが可能である。各種制御のインターフェースはベースアドレス 0xC0000000~0xC0000600 に配置されていて、このアドレスに対して読み書きをすることで電源制御や通信といった、各種機能を実現できる。

表 A.1: ガンマ線観測系アドレスマップ。FRAMやSRAM、各種制御インターフェースから成る。例えば、CANインターフェースの特定のアドレスを読み書きすることで、CANコントローラの制御をしてCAN通信を行うことができる。

アドレス	名称
0xC0000600 - 0xC000061C	HXCP インターフェース
0xC0000500 - 0xC0000528	WBM、タイマーインターフェース
0xC0000400 - 0xC000048C	UART1、ウォッチドッグタイマインターフェース
0xC0000300 - 0xC0000310	UART2 インターフェース
0xC0000200 - 0xC0000228	GPIO インターフェース
0xC0000100 - 0xC0000108	CAN インターフェース
0xC0000000 - 0xC0000004	割り込みコントローラ
0x20000000 - 0x20080000	SRAM
0x00000000 - 0x00020000	FRAM

A.2.3 リンカスクリプト

ソースをコンパイルしてオブジェクトファイルになった段階では、オブジェクトの実際のメモリアドレスへの割り当てはまだ行われていない。このメモリ割り当てに必要なのがリンカスクリプトで、このファイルの内容を元にリンカが各オブジェクトを具体的なアドレスに割り当てる。リンカスクリプトには以下の項目が必要である。

- フォーマット、ターゲットアーキテクチャ、エントリーポイントの定義

出力フォーマットはARM用のリトルエンディアン³を選択し、ターゲットアーキテクチャはARMを選択した。また、プログラムの入り口となるエントリーポイントはブートコードを選択。以上の設定により、ブートコードから実行されるARM用リトルエンディアン形式のバイナリファイルが生成される。

- メモリ空間の定義

メモリ空間の開始アドレスや、サイズを指定する。ガンマ線観測系のCPUでは、FRAMの開始アドレスとサイズをそれぞれ、0x00000000、128kByteと設定した。

³リトルエンディアン: 2byte以上のデータを記録する際に、最下位のバイトから順に記録する方式。反対の方式にビッグエンディアンがある。

同様に SRAM は、0x20000000、512kByte と設定した。

- セクションの定義

セクションとは、リンカがオブジェクトを結合する際に配置する基本となる単位である。ガンマ線観測系の CPU では表 A.2 のセクションを定義した。表 A.2 のうち、.reset 以外のセクションは必ず記述しなければならないセクションである。.reset セクションには割り込み時に参照されるベクターテーブルと、CPU が起動したときに一番最初に実行されるブートコードのアドレスが格納される。.data セクションには 0 以外の初期値をもつグローバル変数やスタティック変数が格納され、.bss セクションには初期値をもたない、もしくは初期値が 0 のグローバル変数やスタティック変数が格納される。

表 A.2: プログラムのセクション。 .reset セクション以外は必ず記述しなければならない。リンカスクリプトでこれらの各セクションへのオブジェクトの配置を決定している。

セクション名	内容
.reset	ベクターテーブルとブートコードのアドレスが格納される領域
.text	プログラムコードを格納する領域
.rodata	読み込み専用の変更されない定数を格納する領域
.data	初期値をもつ変数を格納する領域
.bss	初期値をもたない変数を格納する領域

さらに、プログラムの実行にはオブジェクトを配置する以外にもスタックの指定が必要で、スタックのアドレスもリンカスクリプトで指定した。

A.3 ソフトウェア開発環境

CPU は FRAM に記憶されたプログラムに沿って動作する。ここではプログラムを作成し、FRAM に書き込むまでの流れを簡単に説明する。

1. プログラム記述

プログラムの開発は、ARM用クロスコンパイル環境⁴を用いて行なっている。大部分はC言語で記述されるが、ベクターテーブルなどはアセンブリ言語で記述される。C言語の部分は通常のCプログラムと同様に開発できるが、割り込みハンドラ用の記述⁵など、特有の仕様も存在する。

2. コンパイル、リンク

C言語、およびアセンブラ言語のソースファイルを、ARM用GNUコンパイラでコンパイルしてそれぞれのオブジェクトファイルを生成する。その後、リンカがリンクスクリプトの記述を元に、複数のオブジェクトファイルを結合し、1つのバイナリコードを生成する。これらの作業はMakefileで管理していて、デバッグ用にコンパイラの指定を変えると、PC上で実行して動作を確認できるようにした。

3. HEXファイル変換、書き込み用ファイル生成

HEXファイルは、マイコンなどのプログラム書き込みに広く使われるファイル形式である。書き込み先のアドレスやデータ長、データ内容に加え、チェックサムなどの書き込み自体には不要な情報が含まれている。これらの不要な情報をスクリプトによって削除し、書き込み作業に必要なファイルを新たに生成する。

4. 逆アセンブル

生成されたバイナリコードを逆アセンブルすることで、CPUで具体的にどのような命令が実行されるのかや、コード毎のアドレスマップが分かる。プログラム書き込みには直接は必要ないが、デバッグには必須の機能であり、プログラムの全てのアドレスが分かるため特定の変数のアドレスを直接指定して書き換えるといったことも可能になる。

5. FRAMへのプログラム書き込み

UART1を介してFRAMへの書き込みを行う。CPU-FPGAに電源を投入すると、FPGAは1秒だけ待機する。待機中にサイズや書き込み開始アドレスなどに割り当てられた特定のコマンドを送り、続けて書き込むデータを送るとFRAMへ書き込むことができる。データ受信中は待機時間が延長され、最後のデータ受信から1秒経過するとプログラムが起動する。なお、同様の方法で読み込みもできる。

⁴別のプロセッサで動作するプログラムを作成することをクロスコンパイルと呼ぶ。

⁵割り込みハンドラの中身は通常のCプログラムで書けるので扱いやすい。

A.4 CPUソフトウェアのフロー概要

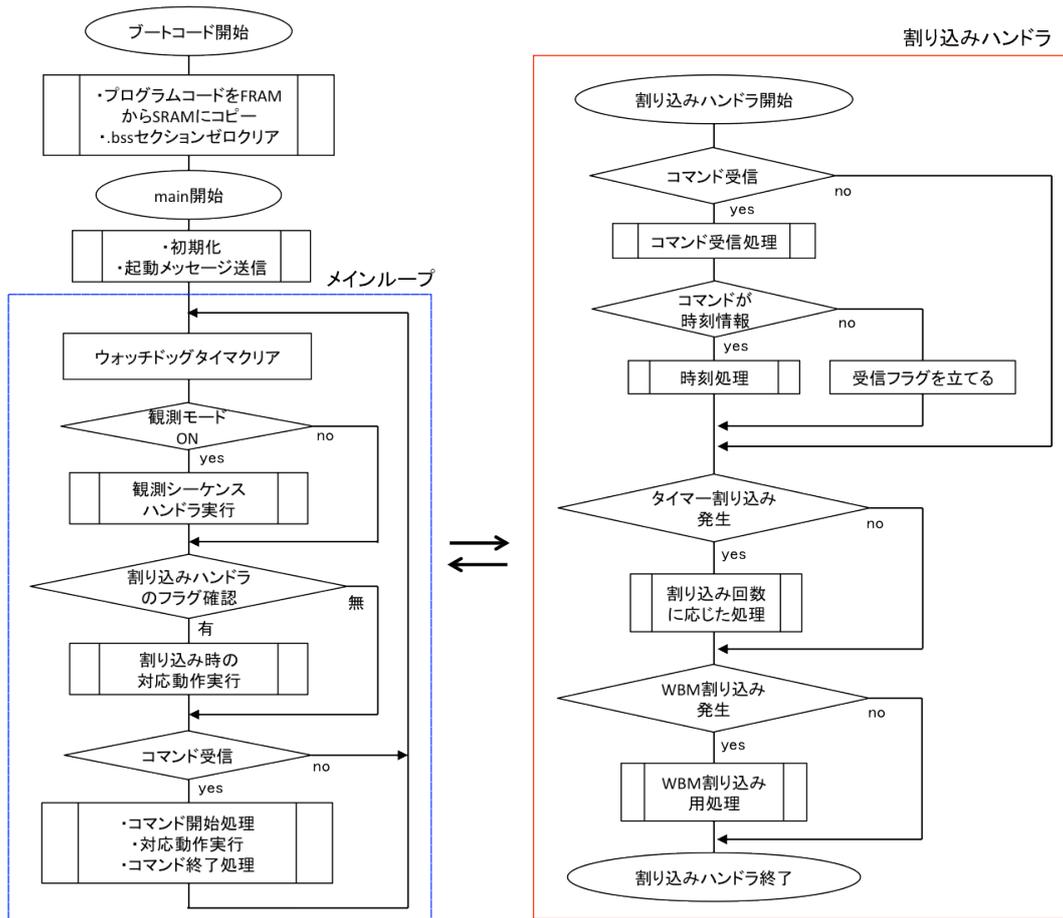


図 A.3: CPUソフトウェアのフローチャート。電源が投入されるとブートコードが実行され、FRAMからSRAMへプログラムコードがコピーされる。その後SRAMからmain文が実行され、メインループで観測シーケンスを制御する。割り込みが発生したら割り込みハンドラに飛び、コマンド受信や割り込み要因に対応するフラグを立てて、メインループに戻る。メインループでは割り込みハンドラで立てられたフラグに対応する処理を実行する。

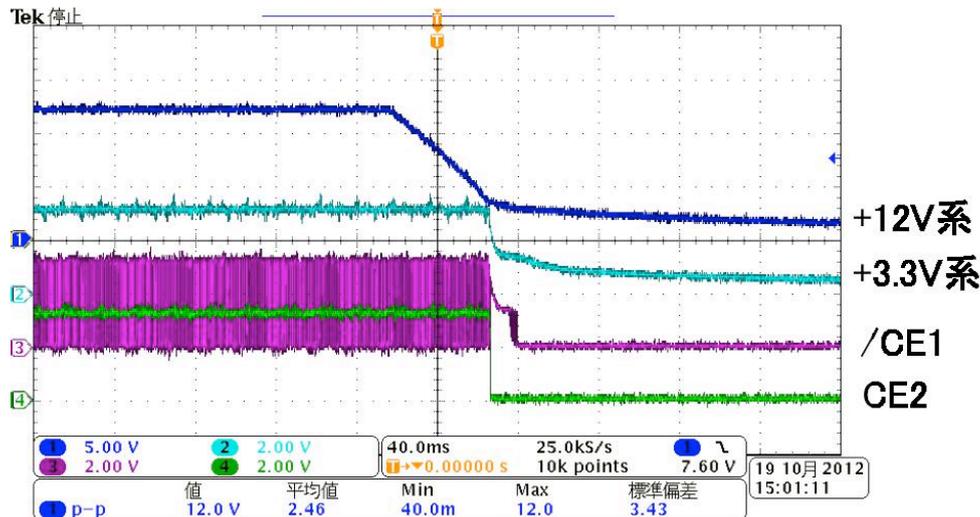


図 A.5: 対策前の FRAM 電源切断シーケンス。青：+12V 系 水色：+3.3V 系 紫：/CE1 緑：CE2。FRAM に供給する+3.3V 系は+12V 系から作っている。+3.3V 系が落ちる直前まで/CE1 が動いており、アクセスを続けていることが分かる。

A.5.2 対策

正常な FRAM 電源切断シーケンスを辿らせるために、電源電圧の低下を検知し、一定電圧を下回ったらリセットをかけて FRAM アクセスを停止させるという対策をとる。リセット IC を利用してそのような対策の有効性を検証した。

リセット IC 動作確認

動作検証用のリセット IC は TL7709ACP という素子を使用する。この素子は入力が 7.6V を下回った時に /RESET を Low にする（ブロック図 A.6 参照）。

動作確認用に図 A.8 のようなテスト回路を作成した。結果は図 A.8 の通りで、想定通り電源が 7.6V を下回った時にリセットがかかることが確認できた。

電源基板へ組み込んでの効果検証

上記のリセット IC 単体動作確認を踏まえて、ガンマ線観測系電源基板に図 A.9 のように組み込んで対策の効果を検証した。結果を図 A.10 に示す。+12V 系が 7.6V まで落ちた瞬間に/CE1 が止まり、アクセスが停止したことが分かる。このセットアップで、電源 OFF、ON を 100 回以上繰り返したが、1 度も FRAM が書き換わることは無かった。

A.5.3 まとめ

ガンマ線観測系の電源 OFF 時にときどき、FRAM の内容が書き換わるという問題は、正常な FRAM 電源切断シーケンスをたどれば発生しないことが分かった。この検証に使用した IC は動作温度範囲が足りないため、温度範囲を満たし同等の機能を持つ回路に変更する予定である。また、リセット時に CE2 ピンが安全側になっていなかったため、リセット時はチップセクタ 2 つとも安全側になるよう修正した。

ただ、このような事態にならないようにもともとプルダウン抵抗が挿入されていて、電源が落ちると自動的に電源切断シーケンスを辿るように設計していたはずであるが、結果として現在の設計の場合プルダウン抵抗では十分ではなかったようだ。FPGA の動作電圧なども関係していると考えられる。ここは、次回設計するときには要検討事項であろう。

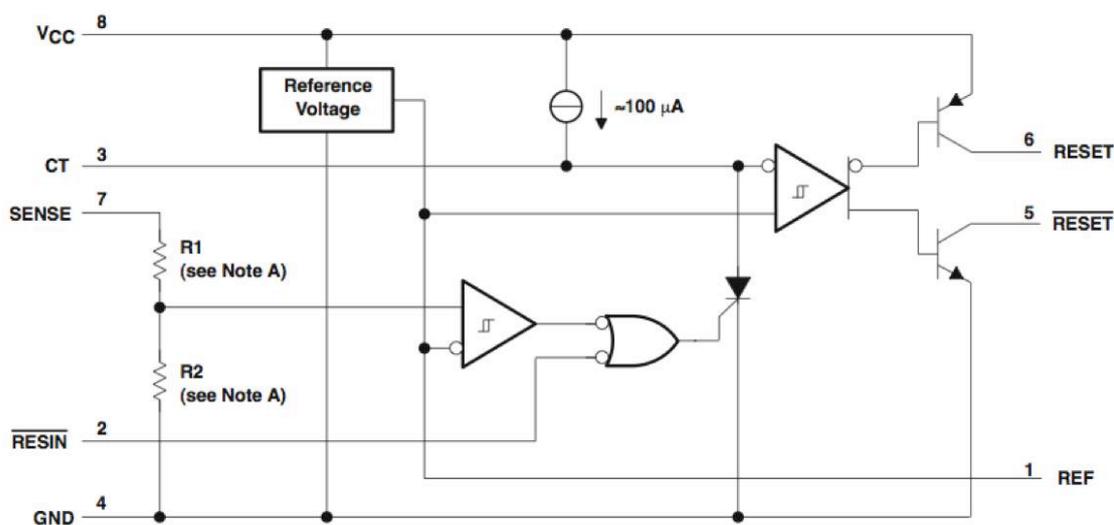


図 A.6: TL7709ACP ブロック図。V_{CC}、SENSE ピンの電圧低下、もしくは /RESIN ピンの操作で /RESET ピンの状態が変化する。/RESET ピンの状態にヒステリシスを付けるために、シュミットトリガを搭載している。これは、ノイズ除去のためと、マイコンなどの状態が安定するまで待つためである。

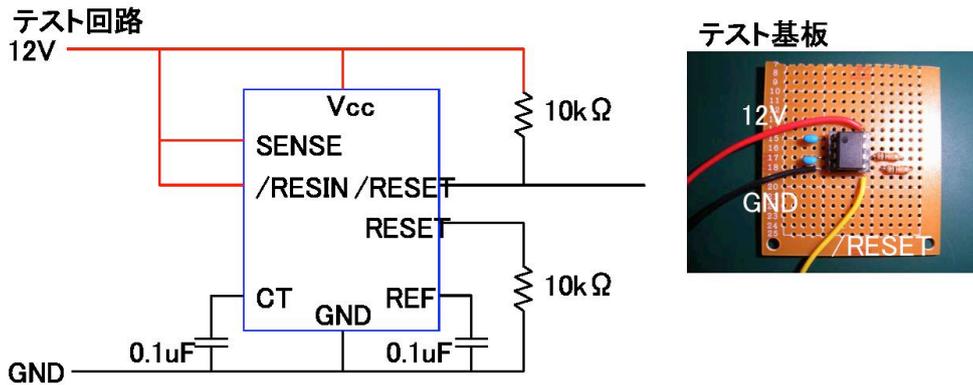


図 A.7: リセット IC のテスト回路とテスト基板。12V 系が 7.6V 以下になると、/RESET ピンが GND に引っ張られるようにした。

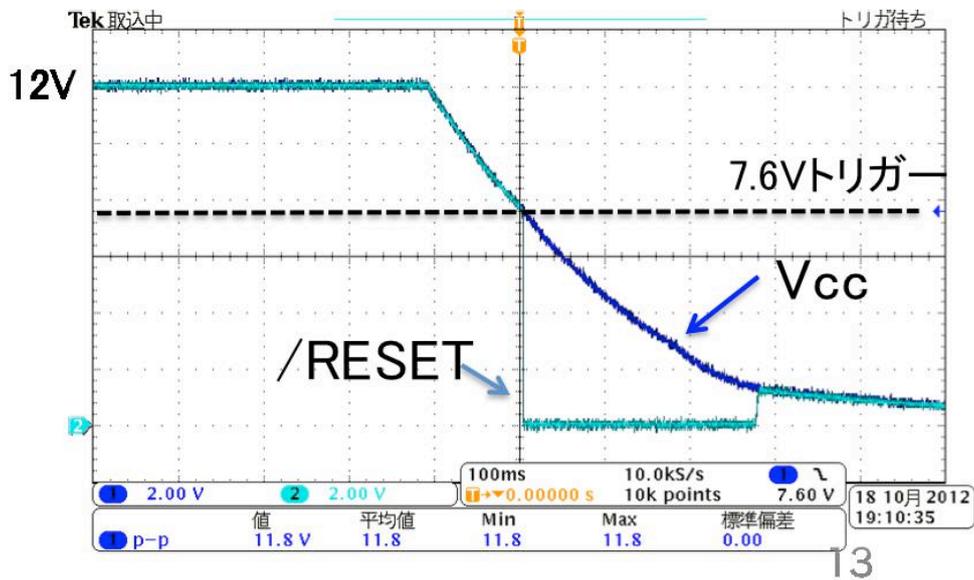


図 A.8: リセット IC テスト結果。想定通り、Vcc(12V 系)が 7.6V より下回った時に /RESET ピンが Low になることが確認された。その後、Vcc が 1.6V 付近になると /RESET ピンが再度上がっているが、これはリセット IC の動作保証電圧を下回ったためだと考えられる。実用上はここまで Vcc が下がっていれば、マイコンも動作していないため問題ない。

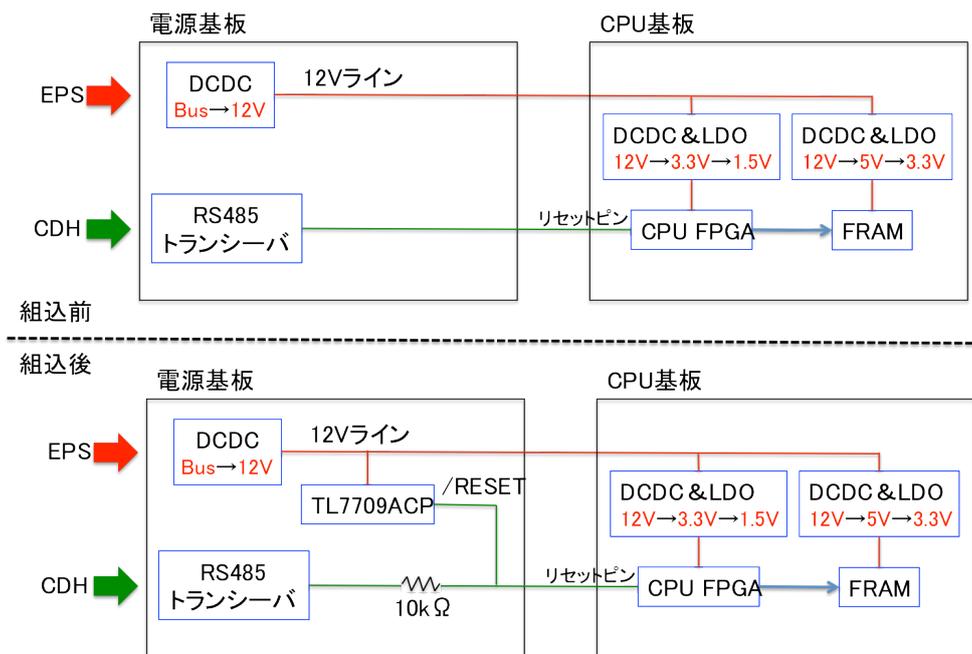


図 A.9: リセット IC の電源基板への組み込み。上図：組込前 下図：組込後。リセット IC を電源基板に組み込む前は、CDH から操作する IC の出力が直接 CPU-FPGA に接続されていた。このラインにリセット IC を組み込んで、12V 系の電圧が低下したときにリセットがかかるようにした。

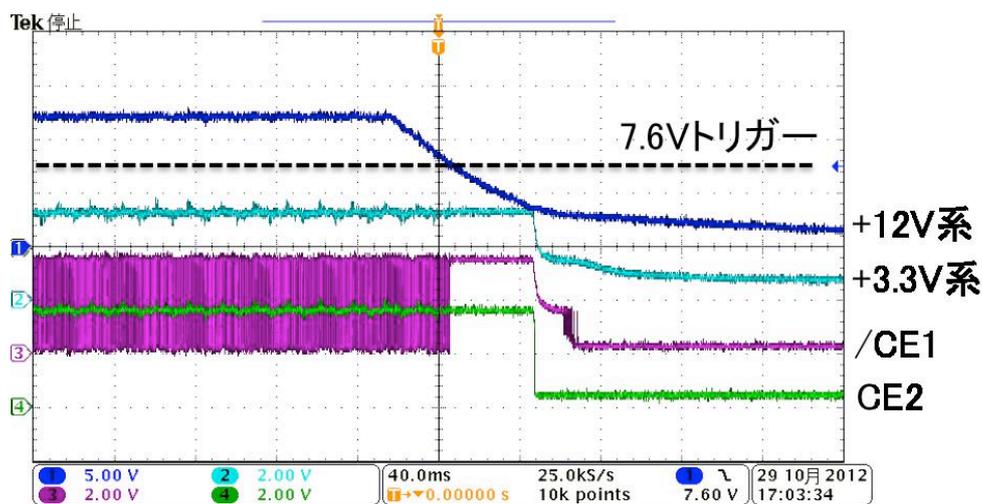


図 A.10: 対策後の FRAM 電源切断シーケンス。青：+12V 系 水色：+3.3V 系 紫：/CE1 緑：CE2。FRAM に供給する +3.3V 系は +12V 系から作っている。対策前の図 A.5 と異なり、+12V 系が 7.6V まで落ちた瞬間に /CE1 が止まり、アクセスが停止したことが分かる。

付録B 補足グラフ

B.1 HXCP フライトモデル動作・性能実証実験

5.4.2 節、全ピクセルスキャンの補足グラフ

偏光計回転角 $\phi=45^\circ$ のときのピクセルスキャンのグラフを示す。

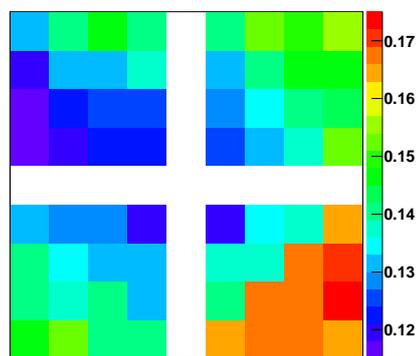


図 B.1: ピクセル毎のトリガーレート
(80keV, $\phi = 45^\circ$)

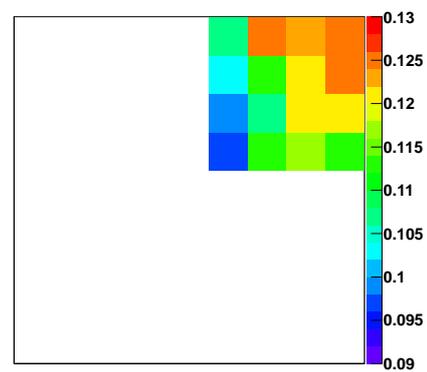


図 B.2: ピクセル毎のトリガーレート
(60keV, $\phi = 45^\circ$)

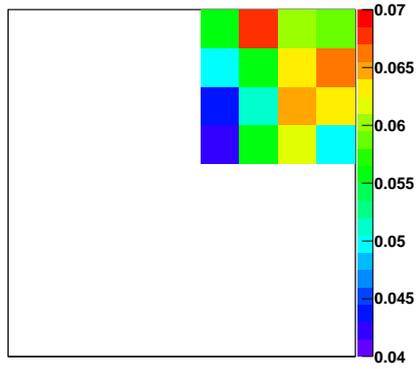


図 B.3: ピクセル毎のトリガーレート
(40keV, $\phi = 45^\circ$)

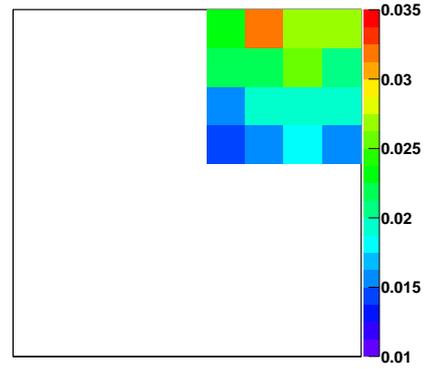


図 B.4: ピクセル毎のトリガーレート
(30keV, $\phi = 45^\circ$)

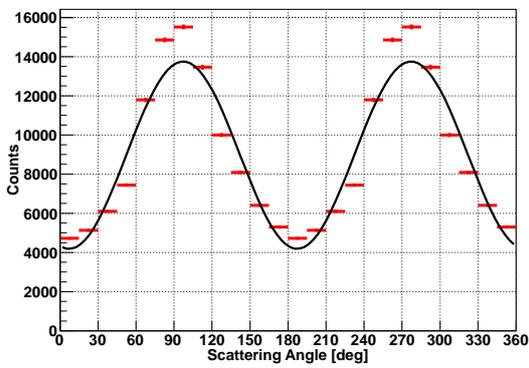


図 B.5: 散乱方位角分布 (80 keV, $\phi=45^\circ$)

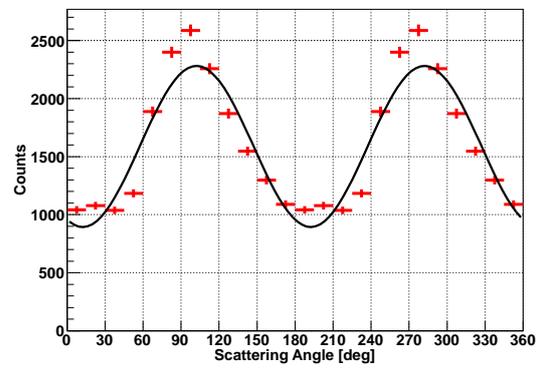


図 B.6: 散乱方位角分布 (60 keV, $\phi=45^\circ$)

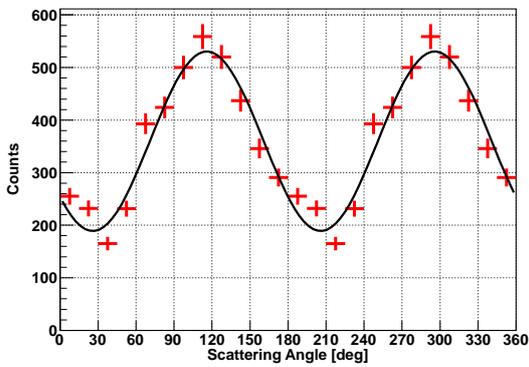


図 B.7: 散乱方位角分布 (40 keV, $\phi=45^\circ$)

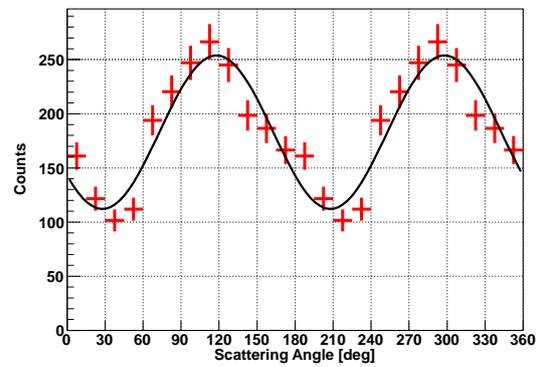


図 B.8: 散乱方位角分布 (30 keV, $\phi=45^\circ$)

5.4.4 節、斜め入射の補正グラフ

5.4.4 節のグラフと異なり、 180° 対称性を利用した補正と、フィッティングを行なっている。

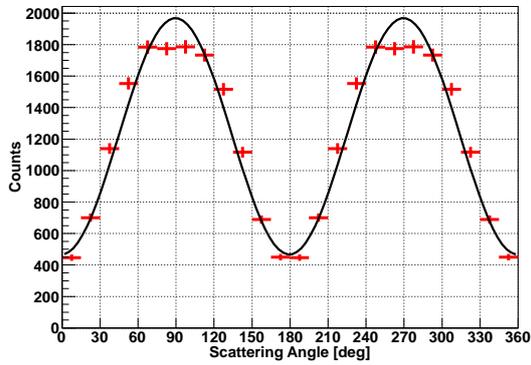


図 B.9: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$)

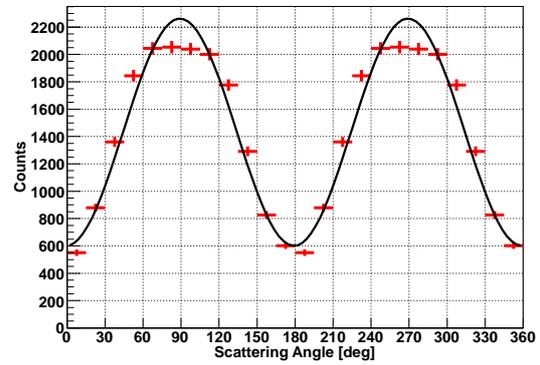


図 B.10: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 0^\circ$, $\theta = 7.5^\circ$)

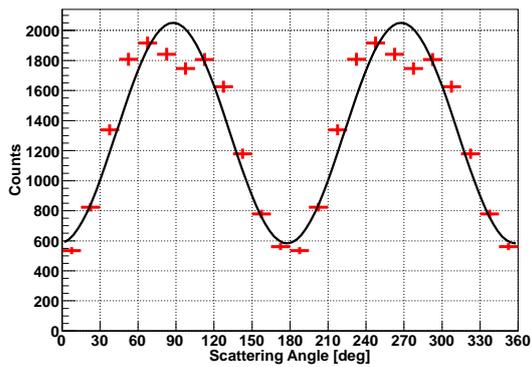


図 B.11: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 0^\circ$, $\theta = 15^\circ$)

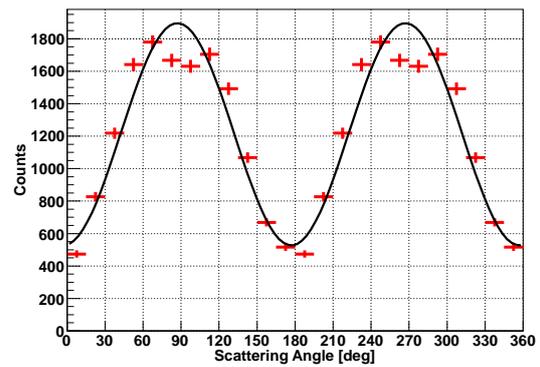


図 B.12: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 0^\circ$, $\theta = 22.5^\circ$)

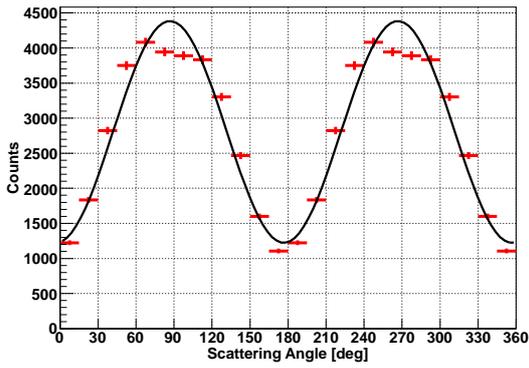


図 B.13: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 0^\circ, \theta = 30^\circ$)

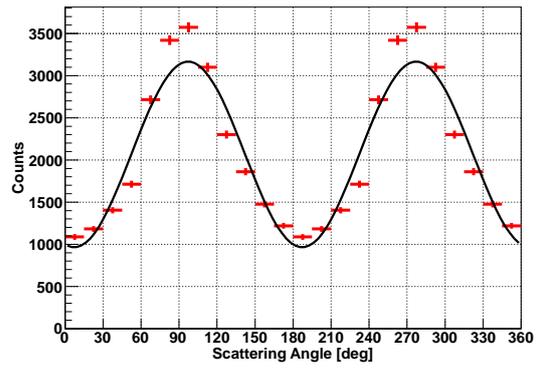


図 B.14: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 45^\circ, \theta = 0^\circ$)

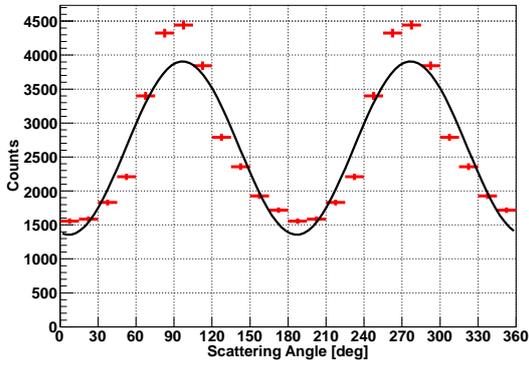


図 B.15: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 45^\circ, \theta = 7.5^\circ$)

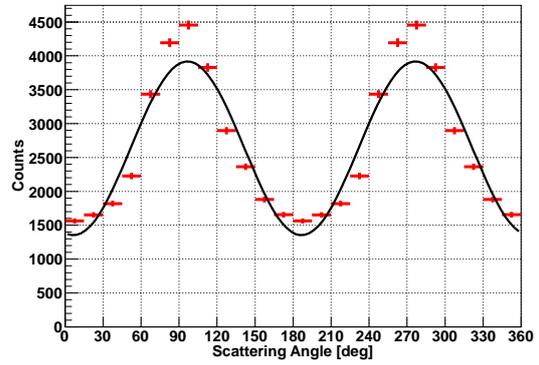


図 B.16: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 45^\circ, \theta = 15^\circ$)

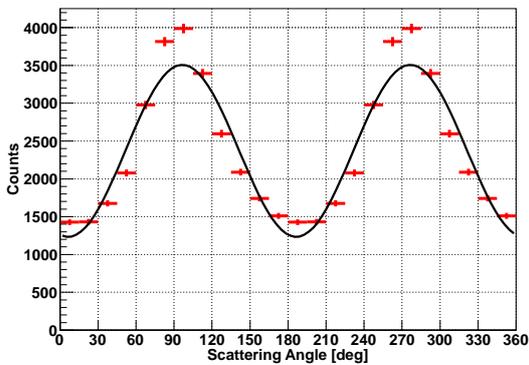


図 B.17: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 45^\circ, \theta = 22.5^\circ$)

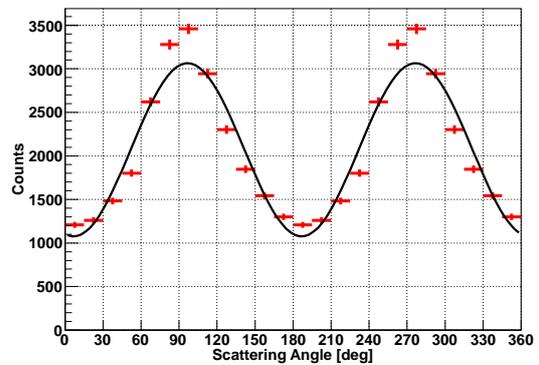


図 B.18: 斜め入射時の散乱方位角分布
(80keV, $\phi = 45^\circ, \theta = 30^\circ$)

B.2 電波干渉試験

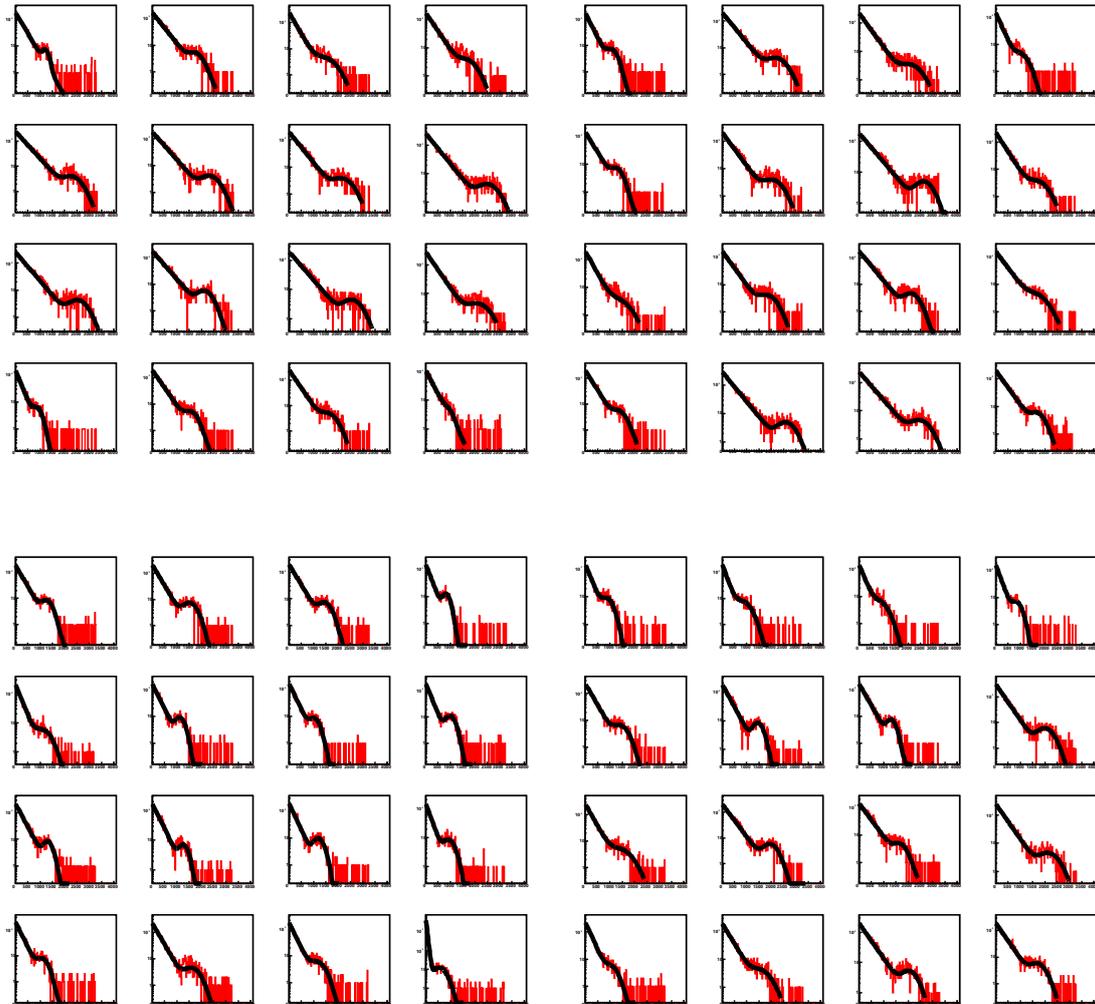


図 B.19: PMT で取得した ^{241}Am のスペクトル (CW OFF 時)。常温、HV = -830V。横軸が ADC 値 (リニアスケール) で縦軸は計数值 (対数スケール) である。指数関数とガウス関数を重ねあわせた関数でフィッティングして分解能を求めた。指数関数は暗電流によるノイズ成分を、ガウス関数は光電吸収による ^{241}Am のピークを想定した。

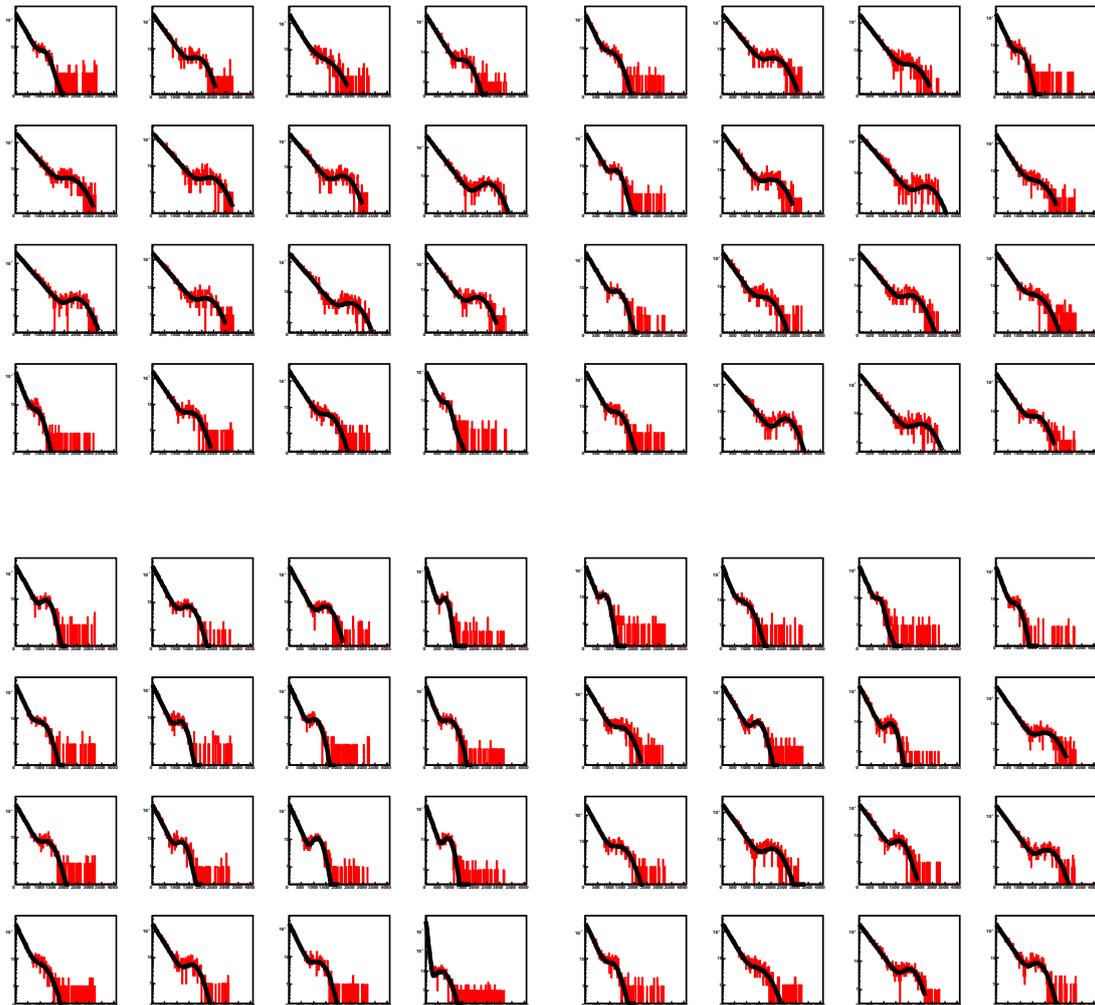


図 B.20: PMT で取得した ^{241}Am のスペクトル (CW ON 時)。CW の電源をつけている以外は、図 B.19 と同様の設定である。

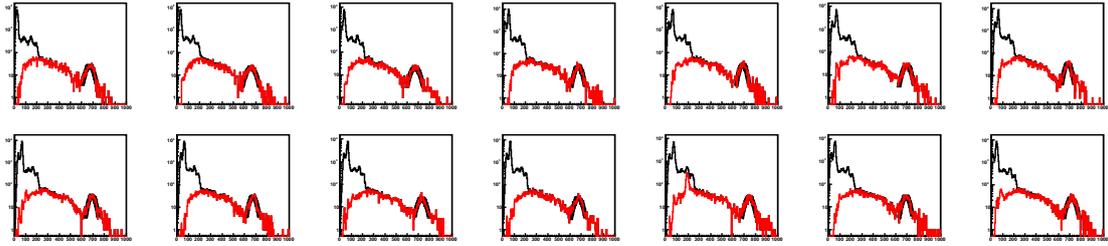


図 B.21: APD で取得した ^{137}Cs のスペクトル (CW OFF 時)。常温、印加電圧=381V。横軸は ADC 値 (リニアスケール) で縦軸は計数值 (対数スケール) である。黒線は取得したデータをそのまま詰めたヒストグラムで、赤線は全 ch から最大の ch のみ詰めたヒストグラムである。フィッティングはフィードバックをかけて、フィッティング結果が変わらなくなるまでフィッティングを続けた。

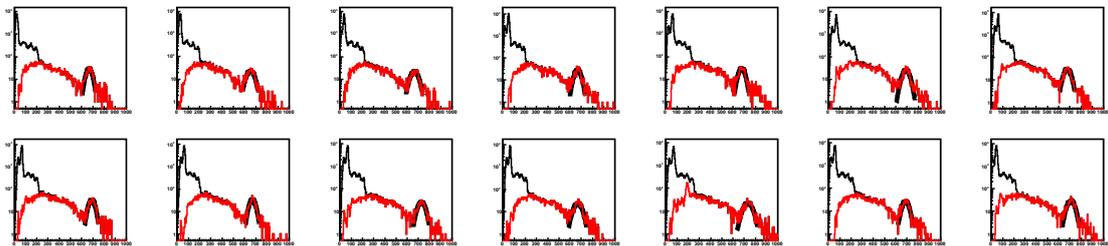


図 B.22: APD で取得した ^{137}Cs のスペクトル (CW ON 時)。CW の電源をつけている以外は、図 B.21 と同様の設定である。

B.3 WBM 位置決定精度

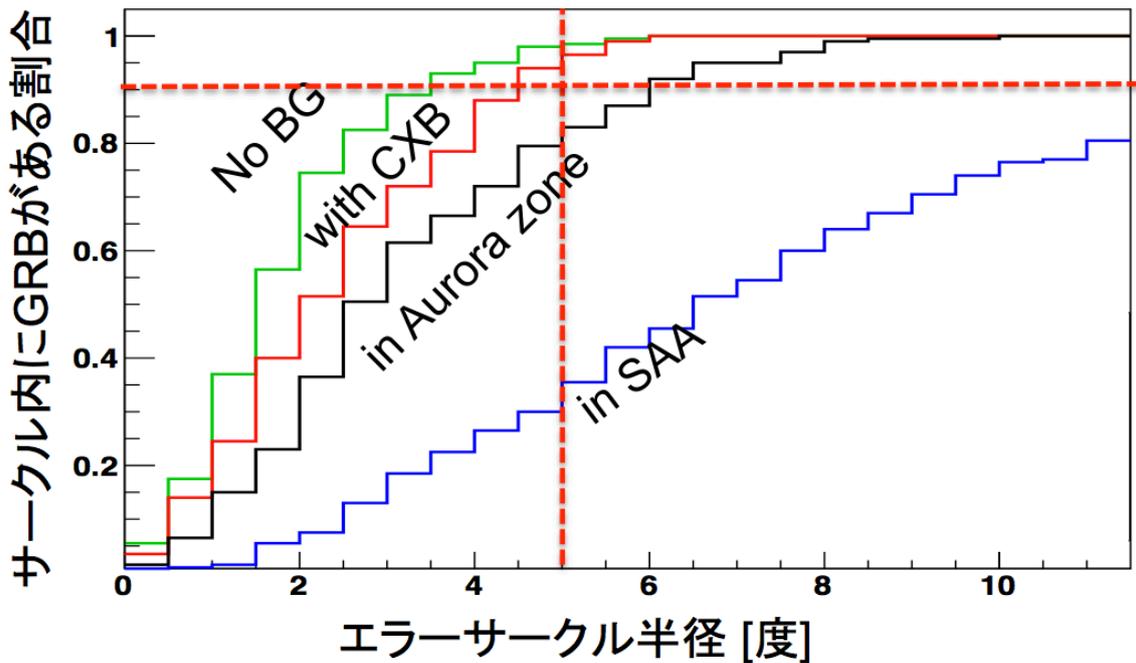


図 B.23: WBM 位置決定精度。横軸がエラーサークルの半径で、縦軸はそのエラーサークル内に GRB がある割合である。常世田卒論 [11] で実施したシミュレーション結果の解析をさらに進め、オーロラ帯や SAA において位置決定精度がどの程度になるか求めた。バックグラウンドが CXB のみの状況であれば、90% の GRB の位置を 5 度以内の精度で決定できる。

付録C 略号集

本論文で用いられている略号についてまとめる。略号（英語, 日本語）というように表記する（日本語はなければ記載していない）。

ADC (Analog-to-Digital Converter)

アナログ信号をデジタル信号に変換する回路。

ADCS (Attitude Determination & Control System, 姿勢決定・制御系)

太陽センサや磁気センサを用いて衛星が軌道上でどのような方向を向いているか測定する姿勢決定と、CMG や磁気トルカを用いて衛星の方向を制御する姿勢制御を行う系を合わせた総称。

APD (Avalanche PhotoDiode)

アバランシェ増倍と呼ばれる現象を利用して受光感度を上昇させたフォトダイオード。

ASIC (Application Specific Integrated Circuit)

特定の用途向けに複数機能の回路を1つにまとめた集積回路の総称。

BBM (BreadBoard Model, ブレッドボードモデル)

設計の初期段階において、重要な構造や回路などの機能を検討するために使用される簡易なモデル。

CAD (Computer Aided Design)

コンピュータを用いた設計。あるいはコンピュータによる設計支援ツール。

CAN (Controller Area Network)

耐ノイズ性を考慮して車載ネットワーク用に開発された相互通信規格。複数のデバイスを1つのCANバスに接続し、バスが空いていればどのデバイスでもメッセージを送信することができる（マルチマスタ形式）。差動電圧送信を利用して耐ノイズ性能を向上している。CANの通信バスの規格には最大1 MbpsのHigh Speed CANと、最大125 kbpsのLow Speed CANの2種類があり、TSUBAMEでは1 Mbpsで通信を行う。

CDH (Command & Data Handling)

衛星のメインコンピュータを務める系。本論文では、衛星・地上局間の通信を行うCommunication系も合わせてCDHと記述している。

CMG (Control Moment Gyro)

定速回転するホイールを支持しているジンバルを回転させることで、ジャイロ効果によるトルクを生み出す制御デバイス。

CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)

MOSFETを相補形に配置したゲート構造を持つ半導体。PチャネルMOSFETとNチャネルMOSFETという、特性の異なる二つの電界効果トランジスタを、相互に特性を補うように接続して構成した論理回路。

CPU (Central Processing Unit, 中央処理装置)

コンピュータを構成する、中心的な処理装置として働く電子回路。計算処理を行う中核部品群の総称。各装置の制御やデータ処理を行う。ほぼMPUと同義であるため、本論文ではMPUと区別せずに用いている。

CRC (Cyclic Redundancy Check, 巡回冗長検査)

誤り検出符号の一種。簡単に言ってしまうと、ビット列を素数で割った時の余りである。データの転送や格納時にその一部が偶然変化したことを検出するチェックサムとして使用できる。TSUBAMEでは、CRC-16-CCITTと呼ばれるものを使用する。

CSA (Charge Sensitive Amplifier, 電荷有感型前置増幅器)

入力した電荷量に比例した電圧を出力する前置増幅器。

CW (Continuous Wave)

無変調連続波の断続で符号を送受信する方式。符号にはモールス信号が用いられる。TSUBAME 衛星では、HK データのうち最も基本的な情報を、CW に載せて常に送信している。

DAC (Digital-to-Analog Converter)

デジタル信号をアナログ信号に変換する回路。

EM (Engineering Model, エンジニアリングモデル)

電气的設計、機能的設計などを確立するために使用する衛星モデル。

EPS (Electrical Power System, 電源系)

バッテリーや太陽電池セルから得られた電力を各サブシステムに供給し、予備電力や各サブシステムの消費電流監視を行う系。

FM (Flight Model, フライトモデル)

実際に打ち上げ、軌道上で運用される衛星モデル。

FM (Frequency Modulation)

搬送波の周波数の変化で符号を送受信する方式。

FRAM (Ferroelectric Random Access Memory)

強誘電体を利用した不揮発メモリ。ガンマ線観測系には 128 kByte の FRAM が搭載され、プログラムの格納に使用。書込み/読出し耐性は 10^{10} 回。CDH から書き換えが可能。

FPGA (Field-Programmable Gate Array)

製造後に構成を変更できる集積回路。構成設定はハードウェア記述言語を用いて行い、任意の論理機能を実現できる。

GPIO (General Purpose Interface Bus)

コンピュータと周辺機器を接続するためのバス規格の1つ。主に計測器を接続するのに使われる。

GPIO (General Purpose Input/Output, 汎用入出力)

電子機器が備える入出力端子の一種。様々な用途に利用できる。ガンマ線観測系では電源基板の12V系のスイッチの制御に用いる。

GRB (Gamma-Ray Burst, ガンマ線バースト)

宇宙のある一点から非常に大量のガンマ線やX線が放出される現象。銀河系の星すべてが1年間に放出するエネルギーと同程度のエネルギーを一瞬で放出する、全天で最も大きな爆発現象。

HK (House Keeping)

衛星の状態を把握すること、もしくはそのための情報。TSUBAME衛星では各種電圧や温度といった、基本的な情報が含まれている。

HV (High-Voltage, 高電圧)

本論文では、ガンマ線観測系が使用するAPDやMAPMTに供給する高電圧のことを指す。松定プレシジョン製の高圧モジュールを用いて供給する。

HXCP (Hard X-ray Compton Polarimeter, 硬 X 線コンプトン偏光計)

ガンマ線観測系に搭載される検出器。コンプトン散乱の異方性を利用して GRB の偏光観測を行う。CsI シンチレータと APD、プラスチックシンチレータと MAPMT、ブリーダー基板、PMT-VA 基板、APD-VATA 基板、IFC、高圧モジュール、3 層シールドから成る。質量は 4.5 kg。エネルギーレンジは 30 - 200 keV。最大検出率は 1 kHz。

IC (Integrated Circuit, 集積回路)

トランジスタ、抵抗、コンデンサ、ダイオードなどの素子を集めて基板上に配置し、各種の機能をもたせた電子回路。

IFC (InterFace Card, インターフェース基板)

HXCP に搭載される基板。VATA 基板と CPU 基板を中継する役割を持つ。

LDO (Low Drop Out)

本論文では LDO レギュレータの略語として用いている。低い入出力間電位差でも動作するリニア・レギュレータ。

LED (Light Emitting Diode, 発光ダイオード)

導電することによって発光する半導体素子。

MAPMT (Multi Anode PhotoMultiplier Tube, マルチアノード光電子増倍管)

PMT のうち、電子増倍部と陽極が複数に分かれており、位置検出器としての機能を持つもの。本論文では、PMT と区別せずに用いている。

MDP (Minimum Detectable Polarization, 限界検出偏光度)

有効面積と変調因子の両方を考慮した、偏光計で検出できる最小の偏光度。

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)

微小機械素子、センサ、アクチュエータ、電子回路を一つのシリコン基板、ガラス基板、有機材料などの上に集積化したデバイス。電気と機械を融合した超小型システムである。

MF (Modulation Factor, 変調因子)

100%偏光の光子に対して示す変調の割合。偏光計の性能を表す指標となる。

MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)

電界効果トランジスタ (FET) の一種。

MPU (Micro-Processing Unit)

中央処理装置を1個の半導体チップに集積した部品。コンピュータ内で基本的な演算処理を行う半導体チップ。CPU とほぼ同義であるため、本論文ではCPU と区別せずに用いている。

MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory)

磁気を利用した記憶素子。

MTQ (Magnetic TorQue, 磁気トルク)

コイルに電流を流すことで磁界を発生させ、外部磁場との相互作用を利用してトルクを発生させる制御デバイス。

NIM (Nuclear Instrument Modules)

米国原子力委員会 (AEC) において1960年代に制定された放射線測定モジュール標準規格。この規格に準拠した回路は、NIM モジュールと呼ばれ、原子力関連、高エネルギー加速器、宇宙線、精密計測システムの構築など広く研究用途に活用されている。

PIC (Peripheral Interface Controller)

マイクロチップ・テクノロジー社のワンチップマイコン。コンピューターとして最低限必要なCPU、ROM、RAM、I/Oなどが全て1つのICに入っていて、わずかな外付け部品を付けるだけで動作させることができる。

PMT (PhotoMultiplier Tube, 光電子増倍管)

光電面、集束電極、電子増倍部、陽極（電子を集める電極）を真空管の中に収めた高感度の光センサ。入射光子によって光電面で放出された光電子は、電子増倍部で増幅されて陽極から出力される。信号の増幅率が大きく、ノイズが小さいため、1光電子程度の微弱なエネルギーを持つ光子も検出できる。本論文では、MAPMTと区別せずに用いている。

RISC (Reduced Instruction Set Computer)

コンピュータの命令セットの設計様式の1つ。個々の命令を簡略化することで実行時間を短くし、処理の高速化を狙ったもの。RISCプロセッサは構造が単純なため、高い周波数で動作させやすい。Cortex-M1はRISCプロセッサである。反対の設計手法にCISC (Complex Instruction Set Computer)がある。

RMS (Root Mean Square, 2乗平均平方根)

統計値や確率変数の散らばり具合を表す数値。

SAA (South Atlantic Anomaly, 南大西洋異常帯)

ヴァン・アレン帯における異常構造。SAAでは荷電粒子の分布の下限高度が低くなっており、非常に放射線が多い。SAAのように非常に荷電粒子が多い地域でMAPMTを動作させると破損してしまうため、ガンマ線観測系ではSAAを検知してMAPMTに印加する高圧を落とすシステムを搭載する。

SEE (Single Event Effect)

半導体デバイスに、高エネルギー粒子が入射することで引き起こされる現象。SEUやSELなどの症状が知られている。

SEL (Single Event Latch-up)

PNP型とNPN型の寄生バイポーラトランジスタによって作られるPNPNサイリスタ構造が、シングルイベントによって導通状態になること。CMOS特有の故障モードで、SELが生じると最終的には回路が焼き切れてしまう可能性がある。

SEU (Single Event Upset)

データのある一部、もしくは多数がbit反転してしまう現象。半導体デバイスに致命的な損傷を与えることはないが、データの破壊を引き起こす。

SRAM (Static Random Access Memory)

フリップフロップ回路を用いて記録する揮発性メモリ。アクセスが高速で、書き換え可能回数はほぼ無制限であるが、集積度を上げるのが難しいためビットあたりのコストが高価。ガンマ線観測系ではプログラムコードの実行に使用する。

UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)

シリアル転送方式とパラレル転送方式のデータを相互に変換するためのデバイス。パソコンのシリアルポートや、マイコンなどによく使用される。UARTではいくつか通信速度を選んで、TSUBAMEでは115 kbpsで通信を行う。

VATA

アナログ信号読み出し用に製造されたASIC。それぞれもASICであるアナログ信号増幅部(VA)、トリガ生成部(TA)をまとめたものである。

VLSI (Very Large Scale Integration)

大規模な集積回路。

WBM (Wide field Burst Monitor, 広視野バーストモニタ)

ガンマ線観測系に搭載される検出器。GRB や SAA の検知と位置決定を行う。CsI シンチレータと APD、およびプリアンプ・シェーパー、3 層シールドから成る。質量は 1 台あたり 280 g。視野は半天 (2π str) で、位置決定精度は 4° (90% error)。エネルギーレンジは 30 - 200 keV。最大検出率は 1 kHz。

関連図書

- [1] NASA, <http://www.nasa.gov/>
- [2] Geant4, <http://www.geant4.org/geant4/>
- [3] T.Piran Physics Reports, 314, 575-667 (1999)
- [4] J. Kataoka et al. Journal of Geophysical research, 115, A05204 (2010)
- [5] D. Yonetoku et al. ApJ, 743, L30 (2011)
- [6] Y. Kaneko et al. Astrophysical Journal, 166, 298
- [7] T. Mizuno et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A600, 609 - 617 (2009)
- [8] 津布久 佳宏, 修士論文「東工大小型衛星プロジェクトにおける理学モニター部の開発と性能評価」東京工業大学 (2008)
- [9] 戸泉 貴裕, 修士論文「東工大 Cute-1.7+APDII の荷電粒子観測とガンマ線バースト偏光観測衛星 TSUBAME の検出器開発」東京工業大学 (2009)
- [10] 榎本 雄太, 修士論文「超小型衛星 TSUBAME 搭載用理学検出器システムの開発」東京工業大学 (2012)
- [11] 常世田 和樹, 卒業論文「ガンマ線突発天体の位置決定手法に関する研究」東京工業大学 (2011)
- [12] 川上 孝介, 修士論文「超小型衛星 TSUBAME 搭載用ガンマ線バースト位置決定検出器の開発」東京工業大学 (2013)
- [13] 林 真由美, 卒業論文「超小型衛星 TSUBAME 搭載硬 X 線偏光計用 MAPMT の熱設計及び耐振動対策」東京工業大学 (2012)

謝辞

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

同じ TSUBAME 開発チームの戸泉さん、榎本さん、川上くん、林さん、栗田くんには大変お世話になるとともに、ご迷惑も多々おかけいたしました。来年度 TSUBAME チームの学生は栗田くん1人になってしまい大変かと思いますが、是非 TSUBAME の完成と打ち上げまで頑張ってください。

共に衛星開発を行い、苦楽を共にした松永研や木村研の皆様にも大変お世話になりました。複数人で開発することの難しさと力強さを感じさせられる3年間でした。

また、同じ居室で過ごす河合研、並びに陣内研の皆様には、普段からとても良くして頂き、本当にありがとうございます。研究のことはもちろん、学生生活に関することまで色々なことを教えて頂きました。

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