

超小型衛星TSUBAME搭載用
理学検出器システムの開発

榎本 雄太

修士論文

東京工業大学 理工学研究科 基礎物理学専攻

2012年 2月

目次

第1章	イントロダクション	1
1.1	ガンマ線バースト (GRB)	1
1.1.1	ガンマ線バースト (GRB) とは	1
1.1.2	GRB の放射機構と偏光	2
1.1.3	X線領域・GRB の偏光観測	3
1.2	超小型衛星 TSUBAME	3
1.2.1	東工大超小型衛星プロジェクト	3
1.2.2	硬X線偏光観測衛星 TSUBAME の概要	4
1.3	本論文について	5
1.3.1	本研究の目的	5
1.3.2	本論文の構成	6
第2章	超小型衛星 TSUBAME	7
2.1	TSUBAME 概要・システム構成	7
2.2	TSUBAME GRB 偏光観測ミッション	9
2.3	TSUBAME 理学系搭載機器	11
2.4	GRB 偏光観測 ミッションシーケンス	13
第3章	TSUBAME 衛星	
	システム設計と検証	17
3.1	姿勢決定・制御	17
3.2	電源設計	19
3.3	熱設計	20
3.4	構造設計	25
3.5	データ構成	27
3.5.1	ミッションデータ	27
3.5.2	TSUBAME ダウンリンク速度	31

3.6	システム設計まとめ	31
第4章	TSUBAME 理学系	
	システム構成	33
4.1	機器構成	34
4.1.1	回路ボックス	34
4.1.2	HXCP 検出器	40
4.1.3	WBM 検出器	40
4.2	電源	41
4.3	通信	44
第5章	X線偏光と検出方法	46
5.1	X線偏光の検出方法	46
5.1.1	ブラッグ反射型	46
5.1.2	光電吸収型	47
5.1.3	コンプトン散乱型	47
5.2	コンプトン散乱	48
5.2.1	エネルギー	48
5.2.2	散乱断面積	49
5.3	コンプトン散乱を利用したX線偏光検出	51
第6章	硬X線偏光計	54
6.1	硬X線偏光計の構造	54
6.2	検出器	57
6.2.1	マルチアノード光電子増倍管 (MAPMT)	57
6.2.2	アバランシェフォトダイオード (APD)	58
6.3	読み出し回路	59
6.4	TSUBAME 搭載用偏光計エンジニアリングモデル	64
6.4.1	プロトタイプからの変更点	64
第7章	偏光計エンジニアリングモデルの偏光検出性能評価実験	66
7.1	実験施設	66
7.2	セットアップ	67
7.3	実施した測定	71

7.4	測定・結果	73
第8章	性能評価実験 解析	74
8.1	データ解析手順	74
8.1.1	ゲイン・ペDESTAL補正、エネルギー換算	74
8.1.2	コンプトン散乱イベント選定	75
8.1.3	散乱・吸収位置決定	79
8.1.4	角度計算	80
8.1.5	散乱方位角分布の作成	80
8.2	結果・考察	85
8.2.1	入射光子のエネルギー変化	85
8.2.2	考察	87
8.3	今後の要解析項目	88
8.4	まとめ	89
第9章	TSUBAME 理学系	
	CPU ソフトウェアの開発	90
9.1	CPU 基板 ハードウェア構成	90
9.1.1	CPU, FPGA	90
9.1.2	ROM, SRAM	90
9.2	CPU ソフトウェアの開発方法	91
9.2.1	プログラム書き込み	91
9.3	CPU の機能	93
9.4	開発した CPU プログラムについて	94
9.4.1	理学系 CPU プログラム 概要	95
9.4.2	通信	95
9.4.3	理学系-C&DH 系 通信試験	98
第10章	まとめと今後の課題	102
10.1	まとめ	102
10.2	今後の課題	102
付録A	GRB 偏光観測での検出イベント数の見積り	103
A.1	HXCP	103

A.2	WBM	105
A.3	計算結果	105
付録B TSUBAME 衛星 通信仕様		108
B.1	CAN 通信	108
B.1.1	CAN 通信の特徴	108
B.1.2	信号線	109
B.1.3	機器構成	110
B.1.4	パケット構成	110
B.2	UART 通信	113

目 次

1.1	BATSE 検出器による GRB 発生位置の分布	2
1.2	TSUBAME 衛星	5
2.1	TSUBAME システム概要	8
2.2	GRB 観測の流れ	10
2.3	TSUBAME 理学系機器配置	12
2.4	偏光観測ミッションシーケンス 1	15
2.5	偏光観測ミッションシーケンス 2	16
3.1	観測開始時間と検出可能光子数の関係	19
3.2	APD の暗電流	21
3.3	APD の信号増幅率	22
3.4	熱環境試験 理学系結果	24
3.5	Cute1.7+APD II での HV 電圧の推移	29
4.1	理学系システム構成	35
4.2	CPU 基板写真	36
4.3	回路ボックス基板構成	38
4.4	回路ボックス外観	39
4.5	WBM 模式図	40
4.6	理学系電源構成	42
4.7	理学系通信構成	44
5.1	コンプトン散乱の模式図	48
5.2	散乱体で反跳電子に与えるエネルギー	49
5.3	偏光した光子の散乱の模式図	50
5.4	散乱型偏光計の原理	51
5.5	散乱角 θ に対する変調 Q	52

6.1	散乱体・吸収体の配置図	55
6.2	TSUBAME 搭載偏光計の構成図	56
6.3	MAPMT R8900-M16 MOD-UBA	58
6.4	MAPMT メタルチャンネルダイノード模式図	58
6.5	APD	58
6.6	各 APD の内部構造と増幅領域	59
6.7	VATA のシステム図	60
6.8	VATA のトリガシーケンス	61
6.9	コインシデンス測定時のトリガシーケンス	63
6.10	HXCP エンジニアリングモデル	65
7.1	BL14A 実験ブース内の様子	67
7.2	ビーム試験 セッティング模式図	68
7.3	経緯台に取り付けた偏光計	69
7.4	性能評価実験 回路セットアップ	70
7.5	試作偏光計のシンチレータ配置	72
8.1	全イベントのエネルギーマップ	76
8.2	エネルギー計算	77
8.3	エネルギー領域カット後のエネルギーマップ	79
8.4	回転角 0°	81
8.5	回転角 30°	81
8.6	回転角 60°	81
8.7	回転角 90°	81
8.8	回転角 120°	82
8.9	回転角 150°	82
8.10	回転角 180°	82
8.11	回転角 210°	82
8.12	回転角 240°	83
8.13	回転角 270°	83
8.14	回転角 300°	83
8.15	回転角 330°	83
8.16	統合した散乱方位角分布	84

8.17	入射光子 80keV での散乱方位角分布	85
8.18	図 8.17 の位相ずらし散乱方位角分布	85
8.19	入射光子 60keV での散乱方位角分布	86
8.20	図 8.19 の位相ずらし散乱方位角分布	86
8.21	入射光子 40keV での散乱方位角分布	86
8.22	図 8.21 の位相ずらし散乱方位角分布	86
8.23	入射光子 30keV での散乱方位角分布	86
8.24	図 8.23 を位相ずらし散乱方位角分布	86
8.25	MF のエネルギー依存性	88
9.1	CPU ソフトウェアのフロー概要	96
9.2	CAN 通信 送受信シーケンス	97
9.3	UART 通信 送信アルゴリズム	99
9.4	UART 通信 受信アルゴリズム	100
9.5	UART 通信 1Byte 取得アルゴリズム	101
A.1	偏光計の有効面積	104
A.2	HXCP 検出光子数の分布	106
A.3	WBM 最大フラックスの分布	107
B.1	CAN の拡張フォーマット	111
B.2	CAN ID の構成	112
B.3	UART 通信のフォーマット	115

表 目 次

2.1	TSUBAME 衛星の概要	7
3.1	姿勢決定・制御要求と現在の設計値	18
3.2	年間検出可能 GRB 数	20
3.3	理学系 温度範囲要求	23
3.4	理学系機器 熱解析結果	25
3.5	理学系機器のサイズと質量	26
3.6	理学系 HK データ	30
3.7	理学データ量	31
3.8	TSUBAME のダウンリンク速度	31
3.9	理学データのダウンリンク速度	32
3.10	理学系のシステム設計現状	32
4.1	理学機器消費電力	43
6.1	偏光計に使用するシンチレータの性能	57
8.1	反跳電子と散乱光子の最小・最大エネルギー	78
8.2	APD+CsI シンチレータのエネルギー分解能	78
8.3	本解析でのイベントカット基準	78
8.4	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
9.1	ROM 書き込みコマンドの例	93
A.1	観測開始時間と HXCP での検出光子数	106
B.1	TSUBAME 衛星内の通信方式概要	108
B.2	送信先 ID の割り振り	113
B.3	送信元 ID の割り振り	113

Abstract

In the last decade, our understanding of the gamma-ray bursts (GRBs), the biggest explosions at the far distant universe, had dramatically progressed, thanks to monitoring satellites and robotic telescopes. However it has been still unclear how to create high energy emission and what is the energy source. Currently the hard X-ray polarimetry is believed to be one of the most effective methods for solving the above essential questions.

"TSUBAME", the fourth nano-satellite of Tokyo Tech, is designed for the real-time GRB polarimetry. TSUBAME possesses four Control Moment Gyros (CMGs) which enables quite rapid attitude control. Taking the advantage of this rapidity, we are planning polarimetry of prompt emissions of GRBs in hard X-ray energy band. The X-ray detector system consists of two detectors: Wide-field Burst Monitor (WBM) and Hard X-ray Compton Polarimeter (HXCP). The WBM is always monitoring half the sky and determines the positions of gamma-ray transients with an accuracy of 4 degrees.

In order to materialize the complicated detector system aboard a very small satellite with strict limitations in size, mass and power, I precisely analyzed the mission requirements. By comparing with the given system resources, the adequacy of the performances of satellite were examined. In discussions, I pointed both the sufficiency and the lack of present performances, and discussed how to solve the problems. And I summarized the principle design of the detector system.

I also designed the outline of the control program of science detector system. The core element in this program is the command and data handling part that communicates with the satellite bus system using the UART and the CAN lines. At this moment, these core components were already implemented. I confirmed that this program runs normally and CPU can communicate with other systems of TSUBAME.

Based on the design principle, we developed an engineering model of the HXCP (EM-HXCP) that is almost the same as the flight model. Utilizing KEK-PF, we conducted a performance test of EM-HXCP by irradiating highly polarized X-ray beam. The obtained data shows a obvious improvement over the proto-type HXCP that we made two years ago. I also confirmed that modulation factor of HXCP is changed with the energy of incident photons, and this trend is consistent with the result of the simulation. As a conclusion, we successfully demonstrated that the EM-HXCP works as planned.

第1章 イントロダクション

ガンマ線バースト (GRB) は、宇宙最大級の爆発現象である。GRB は非常に明るい天体現象であるにも関わらず、継続時間が短い突発天体であるため、発生起源や放射機構など依然として判明していない部分が多く存在する。本章では、GRB という天体現象の概要と、本論文で中心となる初期放射の X 線偏光について説明する。また、GRB 観測用超小型衛星 TSUBAME の概要を述べた後、本研究の目的と、本論文の構成について説明する。

1.1 ガンマ線バースト (GRB)

1.1.1 ガンマ線バースト (GRB) とは

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst: GRB) とは、数 10 msec～数 100 sec という短いタイムスケールで、大量のガンマ線が飛来する天体現象である。天球上のランダムな位置で発生しているように見え、1日に1回ないし数回という頻度で検出される。その総放出エネルギーは $10^{51} \sim 10^{53}$ erg(等方的放射を仮定した場合)にも達し、超新星爆発と同等、あるいはそれ以上の大規模な天体現象である。

1967年に核実験監視衛星 Vela によって発見されて以来、GRB に関して多くの研究と観測が行われてきた。1990年代には、コンプトンガンマ線観測衛星に搭載された BATSE(Burst And Transient Source Experiment) 検出器による統計的な観測 (図 1.1, [1]) や、イタリアとオランダにより打ち上げられた Beppo-SAX 衛星による残光 (Afterflow) の発見などにより、GRB が数十億光年以上遠方の銀河で発生することが明らかになった。また、GRB の継続時間 (全 fluence の 90%が放射される時間: T90) には大きく 2種類の分布があることも分かった。一般的に、継続時間が 2 sec より短いものを short GRB、2 sec より長いものを long GRB と呼ばれる。long GRB には、継続時間 1000 sec を超えるものもあり、後述する超小型衛星 TSUBAME の観測対象も long GRB である。

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

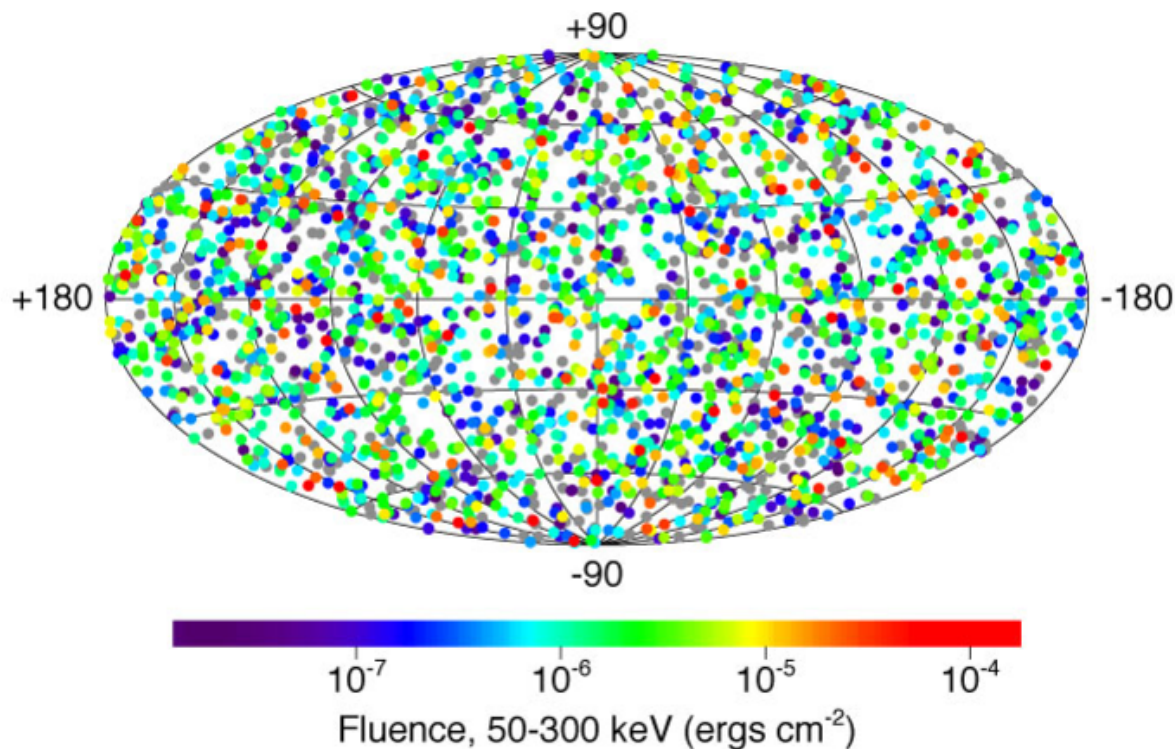


図 1.1: BATSE 検出器による GRB 発生位置の分布。宇宙の等方的な方向で GRB が発生していることがわかる。GRB が銀河系外で発生することの大きな証拠となった。

1.1.2 GRB の放射機構と偏光

現在、GRB の短い時間変動と残光現象を生み出す放射機構の有力な理論モデルとして相対論的火の玉モデル (Fireball Model) がある。このモデルでは、太陽質量の数十倍以上の巨大な星が重力崩壊することにより、ローレンツ因子 Γ が 100 を超える相対論的な速度を持つ粒子からなる衝撃波が何度も放出される。衝撃波同士は互いに衝突し合い、合体することで内部衝撃波を起こす。衝撃波衝突によって光速に近い速度まで加速された電子が強磁場に巻き付いてシンクロトロン放射を起こし、GRB の初期放射を形成する。一方、合体して速度が $\Gamma \sim 10$ 程度になった衝撃波は星間物質を圧縮し、外部衝撃波を形成する。この外部衝撃波からのシンクロトロン放射によって残光が形成されると考えられている。

GRB の放射が強磁場によるシンクロトロン放射によるものだと仮定すると、その X 線・ガンマ線放射は強い偏光を持つと予想される。また、その偏光方向や偏光度は、放射領域での磁場構造に依存する。例えば、磁場がジェット (物質流) の軸対称かつ放射領域内で

一様な強度を持っている場合、偏光度は比較的高く、観測される偏光方向は揃っていると考えられる。一方、放射領域内に磁場方向が異なる領域がパッチ上に存在する場合、一様磁場の場合よりも偏光度は低くなる可能性が高く、観測中に偏光方向が変化することがあり得る。このように、GRBの偏光を観測することができれば、放射領域内部の磁場構造や放射機構の解明に繋がると期待されている。

1.1.3 X線領域・GRBの偏光観測

GRBの偏光観測は、過去に数例存在する。最初に報告されたのは、RHESSIによるGRB021206の観測である。Coburnらは、偏光度 $\Pi = 80\% \pm 20\%$ という高偏光度の直線偏光が得られたと報告した[2]が、同データを独自に再解析した他のグループによると、有意な偏光は確認出来なかったとされる[3], [4]。2番目の報告はINTEGRALによるGRB041219Aの観測である。この観測でも $\Pi = 98\% \pm 33\%$ [5]、あるいは、 $\Pi = 63^{+31}_{-30}\%$ [6]という高偏光度の観測結果が報告されたが、Gotzが報告した $\Pi < 4\%$ というアッパーリミットとは食い違っている[7]。これらが示すように、GRBのX線領域の偏光観測は報告例が少なく、統計的な観測データが乏しいとして、未だ議論が続いている。

2010年には、JAXAの打ち上げた小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSに、金沢大、山形大などが共同で開発したGRB偏光観測検出器GAP(GAMMA-ray burst Polarimeter)を搭載された。本検出器は、GRBの偏光観測に特化した検出器であり、後述するTSUBAMEの偏光検出器HXCPと同じ原理により偏光観測を行うものである。GAPはGRB100826Aの偏光を観測し、偏光度 $\Pi = 27\% \pm 11\%$ という報告がなされた[8]。また、同論文ではバースト中に偏光方向が変化するという興味深い現象も報告されている。

1.2 超小型衛星TSUBAME

1.2.1 東工大超小型衛星プロジェクト

東京工業大学工学系機械宇宙システム専攻松永研究室では、2002年度からCute Projectと呼ばれる超小型衛星開発が行われている。超小型衛星は、大型衛星と比べて、短期かつ低予算での開発が可能で、新技術の積極的採用が可能であるなど、多くの利点を持つ。2003年6月にはCute Project 1号機であるCute-Iが打ち上げられ、予定されたミッションを全て成功させた。この衛星は、8年後の現在でも運用されており、東工大における超小型衛星の設計・開発・運用の基礎を作り上げた。Cute-Iの次の段階の小型衛星であ

る Cute-1.7+APD からは、単なる工学実験を超えて、実用的な衛星バスの実証を目的として、理学系基礎物理学専攻・河合研究室が加わり、理工学共同で衛星開発が行われた。Cute-1.7+APD の理学目標は、1: アバランシェフォトダイオード (APD) の放射線検出器としての世界初の宇宙動作実証、2: 南大西洋磁気異常帯や高緯度上空の放射線帯に分布する荷電粒子の計測の 2 つである。Cute-1.7+APD は 2006 年 2 月に打ち上げられ、ハウスキーピングデータ取得などの初期運用や、ミッション機器である APD の電源投入などには成功したが、シングルイベントラッチアップ (SEL: 荷電粒子の衝突により大電流が流れる現象) が原因と推測されるコマンド送受信のトラブルに陥った。2006 年 5 月 6 日には完全に通信できない状態になり、その後、この衛星は 2009 年 11 月に大気圏再突入している。この経験から、放射線耐性向上などの改良が施された Cute-1.7+APD II が開発された。Cute-1.7+APD II は 2008 年 4 月に打ち上げられ、予定されていた初期運用を終え、現在も定常運用を行っている。この衛星では、工学ミッションとして、PDA の動作実証、姿勢データの取得、衛星写真の撮影、各地のアマチュア無線局での広範囲データ取得など、理学ミッションとして、APD の動作実証、世界初となる 10 keV での軌道上荷電粒子分布の観測、荷電粒子分布の時間変動観測などに成功し、大きな結果を残している ([9], [10])。

1.2.2 硬 X 線偏光観測衛星 TSUBAME の概要

現在、Cute-1.7+APD II に続く小型衛星として、硬 X 線偏光観測衛星「TSUBAME」を東工大理工学部、東京理科大学木村研究室 (カメラ系) や、その他の参画機関と合同で開発を行っている。

本衛星は 2004 年の衛星設計コンテストの設計大賞を受賞した「X 線偏光観測衛星『燕』」の設計をベースにしている。河合研究室では、前述した Cute 衛星の開発と並行して、様々な基礎開発が行われてきた。

- 多チャンネル読み出し用 VATA の性能評価 (2005) [14]
- マルチアノード光電子増倍管の開発 (2006~2008) [15], [16]
- 偏光計基礎設計 (2007~2008) [17], [16]
- 偏光計プロトタイプの性能評価 (2009) [18]

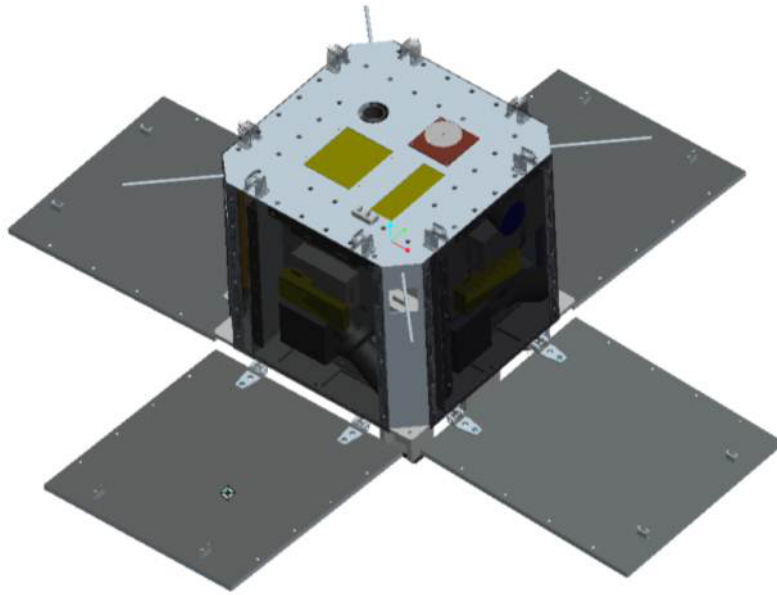


図 1.2: Tsubame 衛星フライトモデル。

- 広視野バーストモニタの開発 (2010) [19], [20]

本衛星の主要ミッションは下記の3つである。

- 超小型コントロールモーメントジャイロ (CMG) の軌道実証
- ガンマ線バーストの硬 X 線偏光観測
- 高分解能小型光学カメラを用いた地球観測

本衛星を特徴付ける重要なミッション機器がコントロールモーメントジャイロ (CMG) である。本衛星では超小型衛星用に開発した CMG、および、超小型衛星である利点を活かした高速姿勢制御と、それによる高度な観測ミッションの実現を目指す。

1.3 本論文について

1.3.1 本研究の目的

Tsubame 衛星は、C&DH 系や ADCS 系、理学系など、複数の系に分かれて開発を行っており (次章参照)、河合研究室では理学系の開発を行っている。理学系は、2 種類の

検出器と信号処理・制御回路から構成され、主ミッションのひとつである GRB 偏光観測を実施する。理学系は現在、「エンジニアリングモデル (EM)」と呼ばれる、動作検証や性能評価に用いるモデルを開発し、性能評価実験や動作検証を行っている。また、EM 開発と並行して、実際に打ち上げる「フライトモデル (FM)」の設計・製造を始めている段階である。

本研究の主な目的は、理学系機器、あるいは、衛星全体の EM システム構成についてまとめ、ミッション遂行性能についての検討を行うことにより、今後の EM・FM 開発への課題や解決策を見出すことである。また、機器 EM の性能評価実験を行い、予想性能との比較をすることで、FM での性能予測を行うことも目的のひとつである。

1.3.2 本論文の構成

本論文では、まず TSUBAME 衛星と偏光観測ミッション、および、そのミッションを達成するためのシステム設計 (衛星全体・理学系単体) について述べる。その後、個別の開発要素として、偏光計 EM の性能評価と、理学系の CPU ソフトウェアの開発について報告する。

第2章 超小型衛星 TSUBAME

本章では、TSUBAME 衛星の概要とシステム構成、および、偏光観測ミッションについて述べる。

2.1 TSUBAME 概要・システム構成

TSUBAME 衛星の概要を表 2.1 に示す。

表 2.1: TSUBAME 衛星の概要

サイズ	500×500×470 [mm]
質量	50 [kg]
設計寿命	1 年
想定軌道	太陽同期軌道 高度 500 km の円軌道
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)
打ち上げ	2012 年 12 月予定

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。

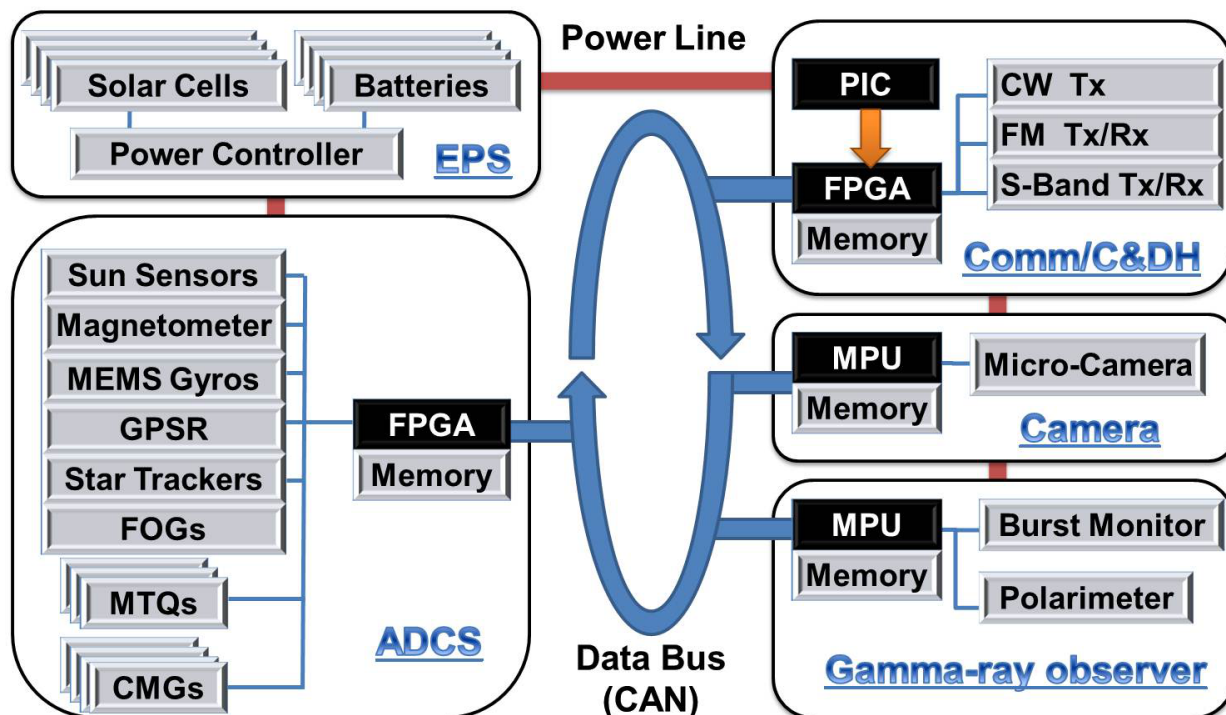


図 2.1: Tsubame 衛星のシステム概要。Tsubame には 5 つのサブシステムがあり、電源バスや通信バスによって繋がっている。

C&DH(Command & Data Handling)/Comm 系

衛星のメインコンピュータを務める C&DH 系と、衛星・地上局間の通信を行う Comm 系 (通信系ともいう) がひとまとめになった系である。地上からのコマンドを受けて、各サブシステムに指令を出す役割を担う。

C&DH 系の大きな役割の一つが、各サブシステムの監視である。C&DH 系は定期的に各サブシステムにハウスキーピング (以後、HK と表記する) データの送信を促し、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。返答が無かった系は、異常動作とみなされリセットがかけられる。C&DH 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っている他、放射線耐性のある PIC (Peripheral Interface Controller) によって FPGA を監視することにより、自身の異常動作に備えている。

また、各サブシステムから収集された HK データや、ミッションで取得したミッションデータは適宜 C&DH 系内の大容量 NAND メモリに保存され、データダウンリンク時にスムーズにダウンリンクが行えるようになっている。

EPS 系 (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。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 系が各サブシステム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。

ADCS 系 (姿勢決定・制御系)

ADCS(Attitude Determination & Control Subsystem) 系は、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 から得た時刻情報を各サブシステムに送信するのも ADCS 系の役目である。

理学系 (ガンマ線観測器系)

「ガンマ線バーストの硬 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) を持ち、GRB の監視・検知・アラートと、偏光観測を行う。理学系のシステム構成については、次章以降で詳しく述べる。

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。長焦点の光学カメラと大容量メモリを持ち、地球観測ミッション中の画像撮影とデータの一次解析・保存を行う。

2.2 TSUBAME GRB 偏光観測ミッション

前章で述べたように、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であること

- 継続時間が非常に短いこと
- 非常に明るい天体現象であること

これらの特徴により、現在の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ために、その偏光検出性能が低下することが知られている。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。

これらの点に対しTSUBAME衛星では、超小型衛星であること、および、CMGの利用による高速姿勢変更を活かして、偏光観測を試みる。本衛星には、X線のカウンtrate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。バーストを検知後、CMGを利用し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。

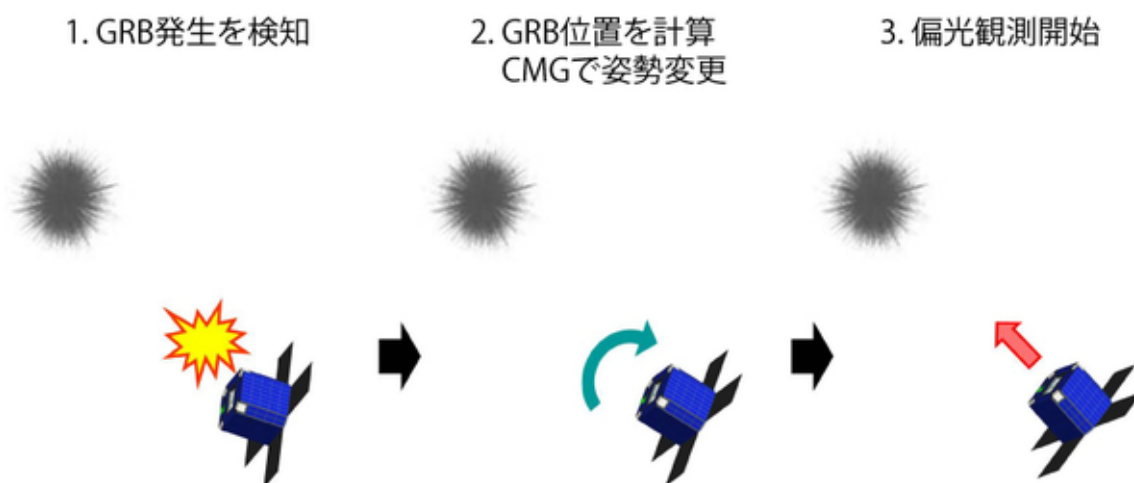


図 2.2: GRB の検出から観測までの流れ。バーストモニタがGRBを検出すると、各検出器のカウント数の比からGRBの方向を決定し、CMGによって検出方向に高速で偏光計を向ける。

2.3 TSUBAME 理学系搭載機器

TSUBAME 衛星の理学系には、2種類の X 線検出器、および、それらの信号処理と制御を行う回路基板を搭載する。本章では各機器の概要を述べ、詳細な構成については第 4 章で説明する。

硬 X 線偏光計 (Hard X-ray Compton Polarimeter: HXCP)

硬 X 線偏光計 (以後、HXCP と略す) は、TSUBAME 衛星の主ミッションである GRB の偏光観測を行う検出器である。コンプトン散乱における偏光光子の散乱異方性を利用した偏光計であり、プラスチックシンチレータとマルチアノード光電子増倍管、CsI シンチレータとアバランシェ・フォトダイオードという、2種類の検出器から構成される。詳細は第 6 章で述べる。TSUBAME 内では、衛星内部のセンターパネルとトップパネルの間に固定されており、太陽電池パドルとは反対側に検出器の入射口が向くように設置されている。

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

広視野バーストモニタ (以後、WBM と略す) は、GRB を検知し位置決定を行うための X 線検出器である。板状の CsI シンチレータとアバランシェ・ダイオード (APD) で構成されるシンチレーション検出器を衛星壁面 5 面に 1 個ずつ設置し、反太陽方向の視野 2π を監視する。急なカウントレートの上昇から GRB 発生を検知する。また、X 線の入射方向によって各検出器間で X 線検出数が変化することを利用し、GRB の発生位置を求める。

回路ボックス

理学系の CPU を搭載した CPU 基板や、電源バスから供給された電力を各機器に分配する電源基板などの、理学系の回路基板 4 枚を格納したアルミの箱である。各基板のコネクタはボックス上部に設置されており、衛星内を這わせたケーブルによって検出器や他系の基板に接続する。

各機器の搭載される様子を、図 2.3 に示す。

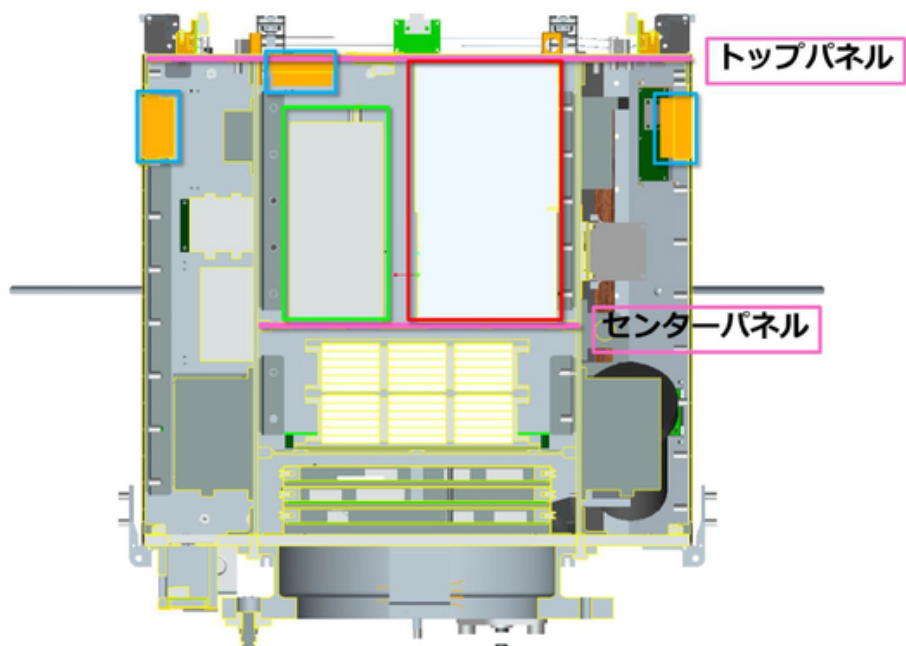
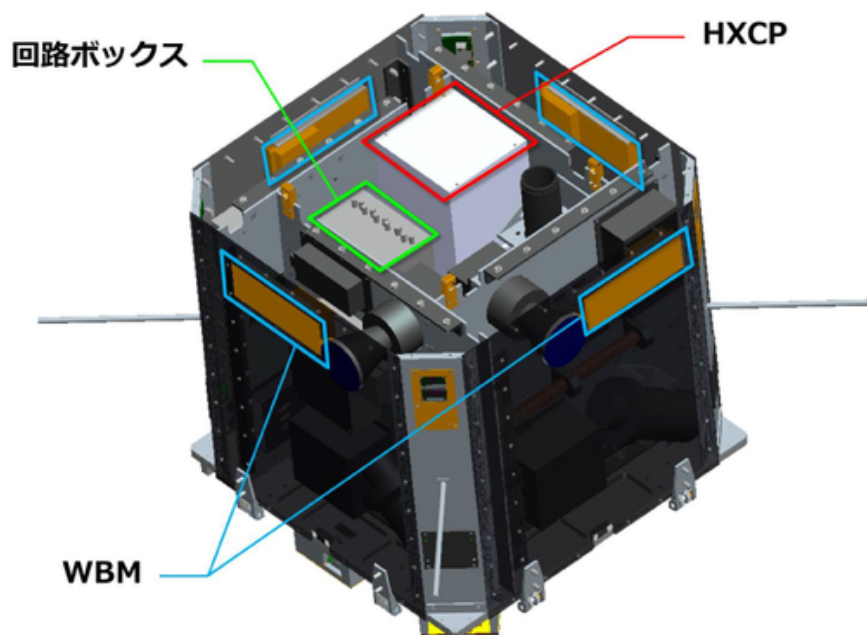


図 2.3: TAUBAME 内での理学系機器配置。上図は衛星のトップパネルを取り除いた図、下図は衛星を横から見た際の断面図である。HXCP はセンターパネル (下図中央の桃色の部分) に載せられ、上部をトップパネルに固定される。WBM は、衛星壁面5面にそれぞれ1個ずつ設置する。

2.4 GRB 偏光観測 ミッションシーケンス

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。一方は WBM を動作させて GRB の発生を待つ「GRB 待機」状態、もう一方は WBM で GRB を検知後、HXCP で偏光観測を行う「GRB 観測」状態である。

観測ミッション開始時、衛星は GRB 待機状態にある。このとき、理学系は WBM を動作させて GRB 発生を待つ。ADCS 系は CMG を動作させて太陽指向を行う。

WBM が GRB を検知すると、GRB 観測状態に移行する。理学系の CPU は GRB の位置を計算し、ADCS 系に GRB 位置情報を送信する。その後、HXCP による観測を開始する。ADCS 系は CMG によって姿勢変更を行い、GRB 方向に HXCP を向ける。

一定時間後、観測を終了し、GRB 待機状態に戻る。衛星は再び姿勢変更し、太陽指向に復帰する。そして、偏光観測ミッションが終了するまで GRB 待機と GRB 観測を繰り返す。

詳細シーケンス

以下で、詳細なシーケンスについて述べる。

1. 機器準備

GRB 偏光観測ミッションに必要な機器を準備する。理学系は検出器、および、信号処理回路の電源を ON にし、各検出器のスレッシュホールドや印加電圧などの設定を行う。ADCS 系は CMG を動作させて太陽指向を行う。

2. 観測開始

地上局からのコマンドにより、GRB 観測ミッションを開始する。C&DH 系からの指示により、理学系は WBM による観測を開始する。また、理学系は衛星全体に観測開始の合図を出し、GRB の待機を始める。理学系からの観測開始メッセージを受けて、C&DH 系では GRB 待機時間のカウンタをスタートする。

3. WBM が GRB を検知

カウント値の変化を元に、WBM は GRB 検知のトリガを出力する。衛星全体に GRB 検出のメッセージを送信する。理学系 CPU は WBM-FPGA から各 WBM のカウント値を取得し、GRB の発生位置を計算する。発生位置計算後、その位置を ADCS 系に報告し、HXCP の観測準備を行う。

4. 姿勢変更、偏光観測開始

ADCS系は理学系から送られて来た位置情報を元に、姿勢変更を開始する。理学系は、HXCPの準備が整い次第、HXCPによるデータ取得を開始し、観測時間カウンタをスタートする。ADCS系は姿勢変更完了後、GRB指向を維持する。

5. 偏光観測終了、姿勢変更

偏光観測開始から一定時間後、偏光観測を終了する。理学系はC&DH系、ADCS系に偏光観測終了メッセージを送信した後、HXCPのPMTの高圧を落とし、WBMをGRB待機状態に戻す。ADCS系は姿勢変更を行い、太陽指向に復帰する。

6. データ処理

偏光観測終了後、GRB待機中に、観測データを理学系メモリからCDHのメモリに移動する。

7. GRB待機終了

一定時間経過後、GRB待機を終了する。C&DHからコマンドが送られ、各自終了処理を行う。

GRB偏光観測ミッション全体の流れを図2.4, 図2.5で示す。

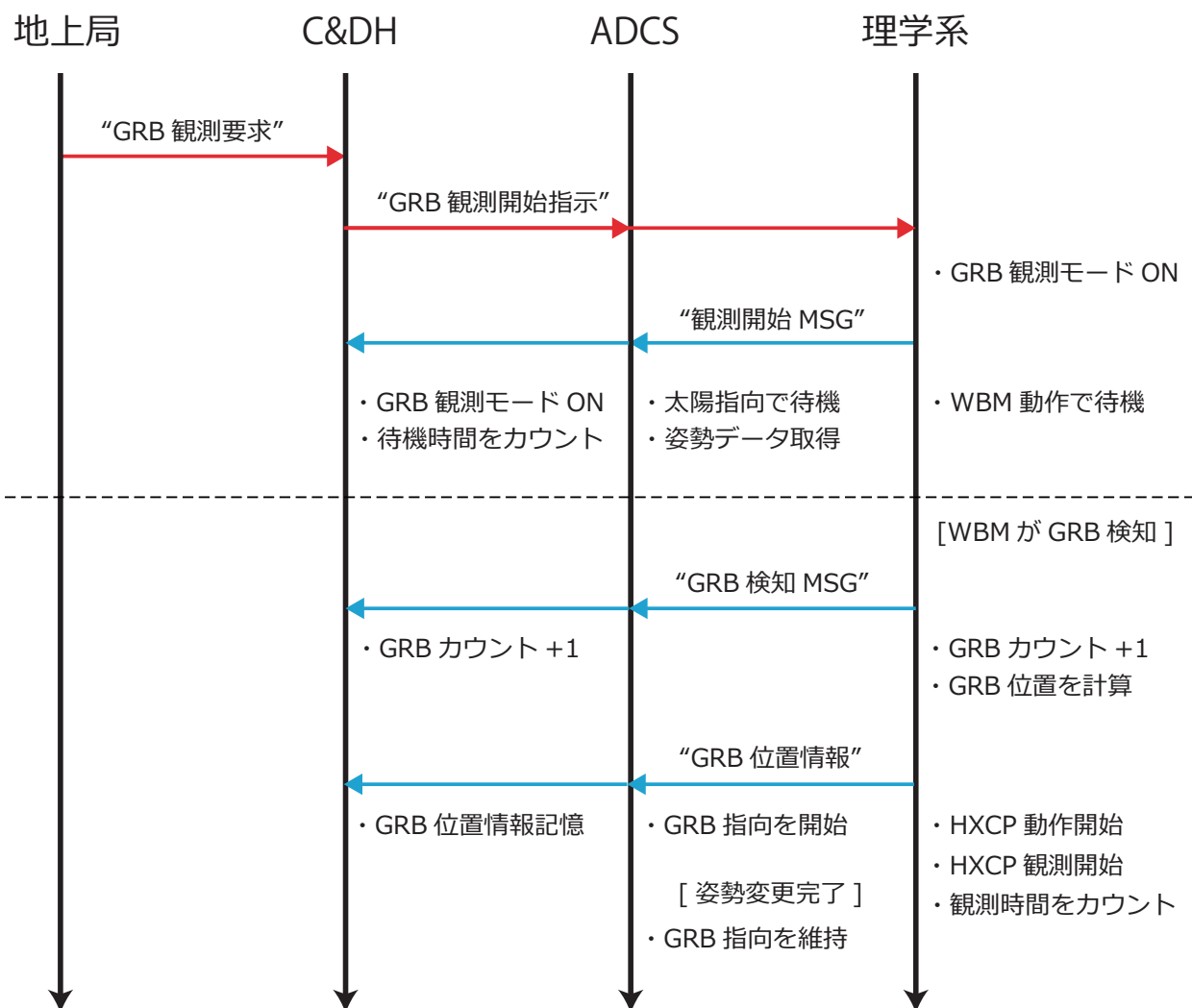


図 2.4: 偏光観測ミッションのシーケンス図。全ての機器の準備が終わった時点からのシーケンスを描いている。上から下に向かって時間が流れる。赤い矢印はある動作を要求するコマンド、青の矢印はある情報を伝達するコマンドである。MSG は"メッセージ"の略。図 2.5 へ続く。

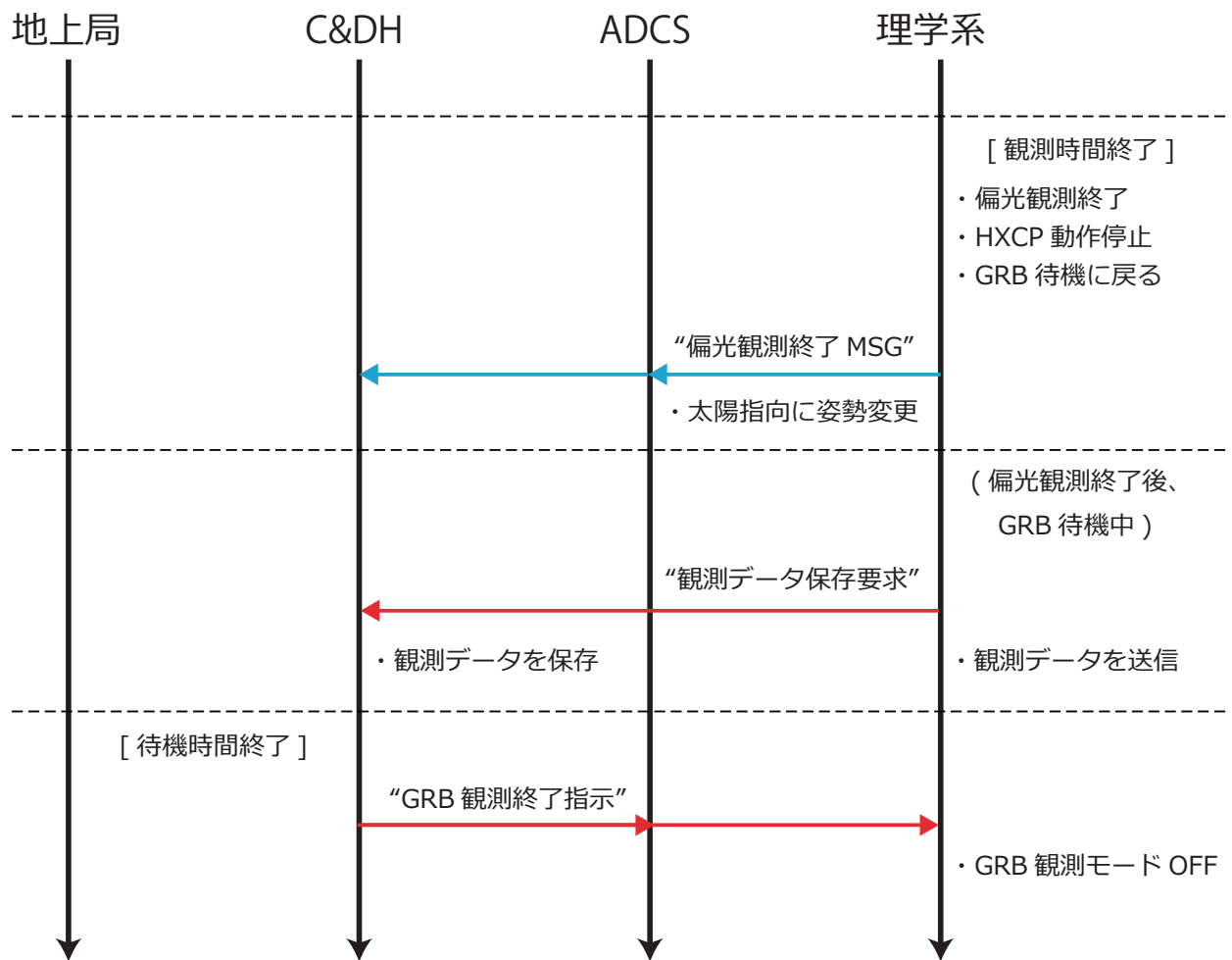


図 2.5: 図 2.4 からの続き。図の見方は図 2.4 と同じである。

第3章 TSUBAME衛星

システム設計と検証

TSUBAME衛星の理学系を開発するためには、ミッションから要求される性能を満たすX線検出器を設計し、その仕様から生じる衛星バス側への要求を満たしてもらう必要がある。一方、サイズ・質量制限などの衛星側からの要求を、検出器側も満たさなければならない。本章では、GRB偏光観測ミッションを行うための検出器仕様と他系への要求について述べ、それに応える設計についてまとめる。

3.1 姿勢決定・制御

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[17]。そのため、TSUBAMEで信頼性の高い偏光観測を行うためには、HXCPの光軸と光子の入射方向のなす角は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が常世田卒論[19]で4 deg(90% error)と求まっている。

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、

$$\begin{aligned}\Delta_{ACS}^2 + 4^2 &< 5^2 \\ \Rightarrow \Delta_{ACS} &< 3 \text{ [deg]}\end{aligned}$$

すなわち、指向精度が3 deg以内になれば良い。

姿勢変更速度

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 (2 Π 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 degree / 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 degree / 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。

姿勢決定・制御要求まとめ

表 3.1 に、GRB 偏光観測ミッションを行うために必要な要求と、現在の TSUBAME 姿勢系の設計値をまとめる。

表 3.1: GRB 偏光観測ミッションのための姿勢決定・制御要求と現在の姿勢系設計値。

(*) : 目標方向指向 3 deg に捉えるまでに約 17 sec

項目	要求	設計値	判定
指向精度	< 3 deg	0.72 deg	○
姿勢変更速度	< 90deg / 15sec	17 sec*	△

指向精度に関しては、カメラ撮影ミッションの要求の方が高く、それらを達成する設計を行っているため、GRB 偏光観測には十分な性能が出ると思われる。一方、現状の姿勢変更速度は目標速度を達成していない。以前、戸泉修論 [16] で偏光計の観測開始時間と検出可能光子数との関係をシミュレーションした結果を参考にすると、観測開始時間がトリガー後 15 秒から 17 秒に伸びることで観測できる GRB の個数は、約 20% 減少する (図 3.1)。CMG の寿命が 1 年間であること、および、有意な偏光観測が行える GRB は 1 年間に数回しか起こらないことを考えると、個数 20% 減の影響は非常に大きいと言える。

現在は、姿勢変更速度の目標を達成するべく構造系と姿勢系で協議を行っている。また、偏光計の視野を制限するコリメータを取り外せば、視野が広がるため多少の姿勢変

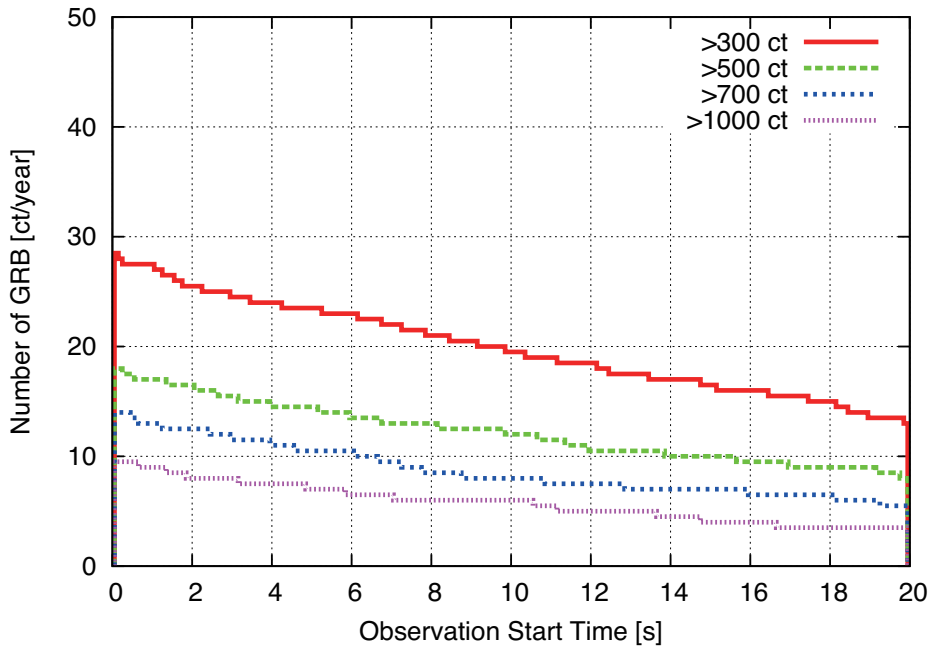


図 3.1: 偏光計の観測開始時間と検出可能光子数、および、GRB 数の関係 [16]。横軸は偏光観測開始時刻、縦軸は GRB 観測数 [個/年]。観測開始時間は、GRB を検知した時間を 0 秒とする。各線は、その時刻に偏光観測を開始した場合に、300 カウント以上 (赤)、500 カウント以上 (緑)、700 カウント以上 (青)、1000 カウント以上 (紫) の光子を偏光計で検出できる GRB 数を示す。観測開始時間が早ければ早いほど、検出可能光子数、および、観測可能 GRB の数は増える。

更の遅れは問題なくなる。しかし、その場合は斜めから入射してくる光子が増えるため、偏光検出性能が低下してしまう。そのため、検出数と偏光検出性能のトレードオフについて、今後議論が必要である。

3.2 電源設計

TSUBAME 衛星の GRB 偏光観測ミッションでは、WBM による GRB 検知後、すぐに姿勢変更を行う必要があるため、GRB 待機中は常時 CMG の電源を ON にする必要がある。このとき、衛星全体での消費電力は 66 W と非常に大きい。偏光観測ミッションを連続で行うためには、1 パス (地球 1 周) 全体での消費電力を日照中の電力発生で賄う必要がある。GRB 偏光観測ミッションに必要な発生電力は、112 W である。

TSUBAME 衛星では、この要求を満たせるように、太陽電池パドルのサイズ、および、設置する太陽電池セルの数を決定した。TSUBAME フライトモデルでは、太陽電池パド

ル1枚につき太陽電池セルを45枚、すなわち、衛星全体で180枚搭載する。遠日点や経年劣化などを考慮に入れた太陽電池セル出力の最悪値を見積もると0.74 Wになるため、衛星全体での最小発生電力は $0.74 \text{ W} \times 180 \text{ 枚} = 134 \text{ W}$ と予想される。これは、GRB偏光観測ミッションに必要な発生電力112 Wよりも十分大きく、長時間のGRB待機が見込める数値である。

GRB 検出レート

現状の電力構成ならば、TSUBAME衛星は常時GRB待機を継続できる。この想定を元に、年間何個のGRBで偏光観測ができるか見積もる。戸泉修論[16]でのGRB個数のシミュレーション結果を参考に、WBMの視野が地球に隠される影響を計算する。GRBの位置が天球上でランダムに分布していることを考慮すると、WBMが軌道上を1周する間に観測できる視野(反太陽方向で、地球に遮られない部分)が全視野の何割になるかを計算すれば良い。結果を表3.2に示す。

表 3.2: 年間検出可能 GRB 数の見積り。戸泉修論 [16] の手法を参考にした。WBM を使用してバックグラウンドの 7σ 以上で検出できる GRB、かつ、偏光計で検出できる偏光光子数が 300, 500, 700, 1000 counts 以上の GRB 数を数えた。TSUBAME の軌道半径は 500 km とした。

検出可能偏光光子数	年間検出可能 GRB 数 [/年]
> 300	12
> 500	7
> 700	5
> 1000	3

3.3 熱設計

軌道上では日照と日陰が交互に訪れ、温度変動が非常に激しい。また、宇宙空間は真空のため、地上のように大気との熱伝導が存在しない。このような状況でも、搭載機器が正常に動くような温度範囲を達成する必要がある。

理学系温度要求

理学ミッションの主検出器であるアバランシェフォトダイオード (APD) は半導体検出器であり、温度によって暗電流量や信号増幅倍率が変化する (図 3.2、図 3.3)。

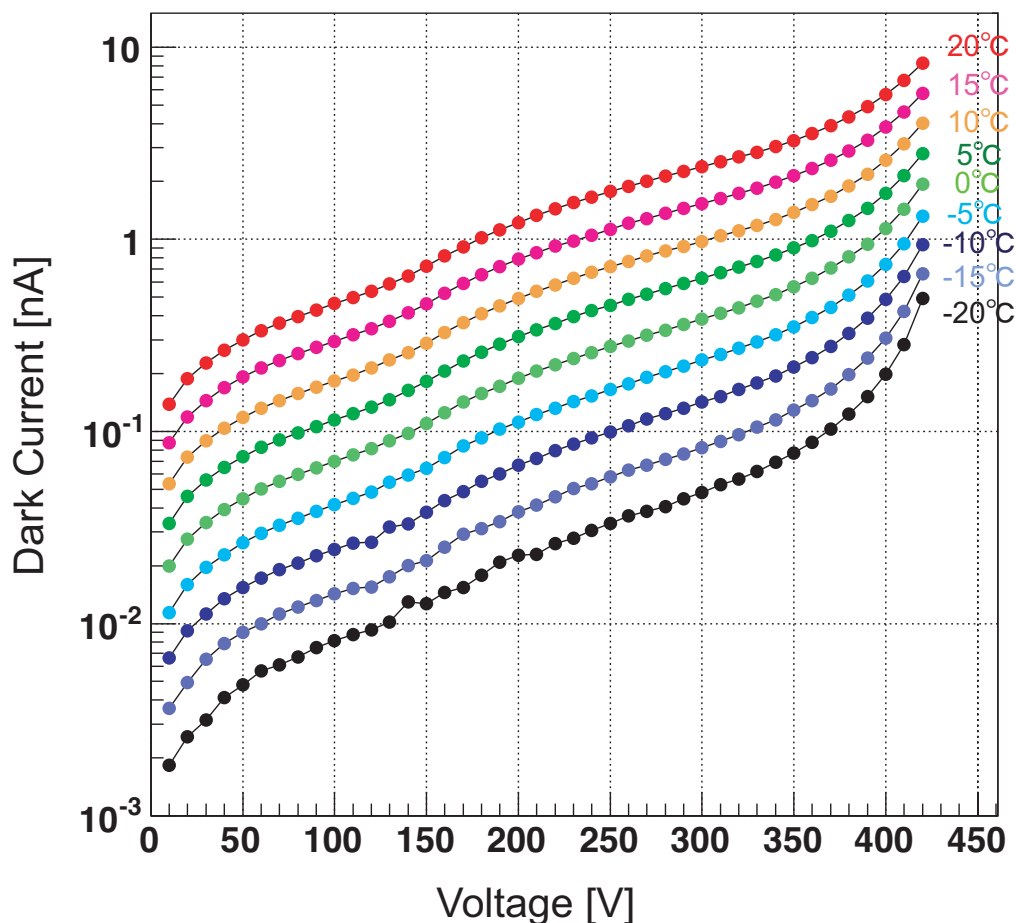


図 3.2: APD の温度に対する暗電流の変動。横軸は印加電圧 [V]、縦軸は暗電流の大きさ [nA] である。印加電圧が同じでも、温度が高くなると暗電流が増加する。

暗電流の増加によるノイズの増大や、増幅率の増減による信号電圧の大幅な変化は、測定のかなげになる。そのため、精密な観測を行うためには、検出器や筐体の温度変動をなるべく小さくすることが重要である。これは放熱経路の設置や、TSUBAME 内の機器配置を調節することで実行できる。

一方、温度変化に対し高圧値を変化させることで、信号増幅率や暗電流をコントロールすることも可能である。これは、Cute1.7+APD II でも使った手法であり、TSUBAME の理学系でも用いる予定である。しかし、衛星壁面に設置された WBM は、日陰・日照

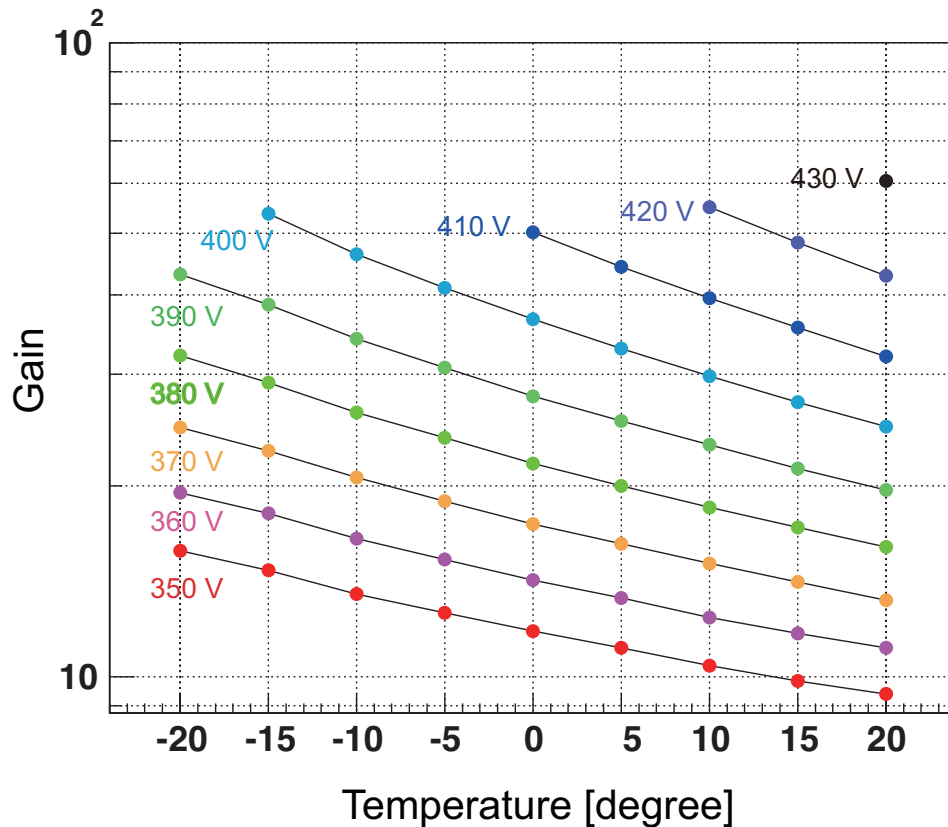


図 3.3: APD の温度に対する信号増幅率の変動。横軸は温度 [C°]、縦軸は増幅率である。温度が低くなると、信号増幅率が大きくなる。

による温度変化、および、各検出器間の温度差が大きくなることを避けられない。温度に対して印加電圧を調節することで信号増幅率を一定に保つことは可能だが、WBM では1つの電源モジュールから供給される共通の電圧を使用する。そのため、印加電圧だけ変化させると、一方のWBMは増幅率が非常に大きく、もう一方のWBMは増幅率が小さい、という事態が起きかねない。そこで、WBMでは、高圧値だけではなく各検出器のスレッシュホールドを調節し、各検出器間の増幅率とノイズレベルをある程度揃える、という手法を採る(詳しいシーケンスについては、後の章で述べる)。ただし、この手法を用いるためには、WBM間の温度差が比較的小さいことが望ましい。

また、極度の高温・低温になると、回路基板上のICの動作異常や、コンデンサの容量変化が起これ、機器が正常に動作しなくなる。そのため、検出器のみならず回路ボックスも極度の温度変化は避けなければならない。

以上の点を考慮し、理学系は熱・構造系に対し、以下の温度要求を提示した。

表 3.3: 熱・構造系に対する理学系温度範囲要求。低温側は回路基板の動作可能温度範囲、高温側は検出器 (APD) の現実的な動作温度から算出される。

機器	要求温度範囲
HXCP	-30 °C ~ +20 °C
WBM	-30 °C ~ +20 °C
回路ボックス	-30 °C ~ +75 °C
WBM 間の温度差	±10 °C

TSUBAME エンジニアリングモデル 熱真空試験

2011年5月24～30日に、TSUBAME エンジニアリングモデル (以下、EM と略す) 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 EM に各系の機器を搭載して動作させ、温度変動に対する機器正常動作の確認や、TSUBAME 内各所での温度変動の様子を調べた。TSUBAME EM 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、軌道上での熱発生状況を模擬した。

理学系では、電源モジュール、および、CPU の動作を確認するため、電源基板と CPU 基板のみを搭載し、搭載しなかった機器については、電力消費を模擬するため抵抗で代用した。機器動作中は外部 PC と簡単な UART 通信を行い、CPU の動作を確認していた。

以下が、理学機器に関する温度変動の結果である。

ただし、これは今回の試験限りのデータであり、必ずしも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修正、および、再解析を活かした構体設計を進めている。現在の熱解析による、理学系機器の温度変動範囲予想値を、表 3.4 に示す。

この中では、WBM の予想最低温度が下限温度要求を下回っているが、実際に衛星温度が最低になるのはセーフモード (衛星の生命維持に必要な最低限の機器のみを動作させるモード) の場合であり、このとき理学系の検出器は動作させない。そのため、予想最低温度が下回る点に関しては、許容できる。

一方、高温側には多少の問題がある。最悪の場合では HXCP の温度が上昇し、APD のノイズレベルが上がるのが予想される。そのため、HXCP 上の熱を筐体に効率良く逃がす機構の考案が必要になるとと思われる。

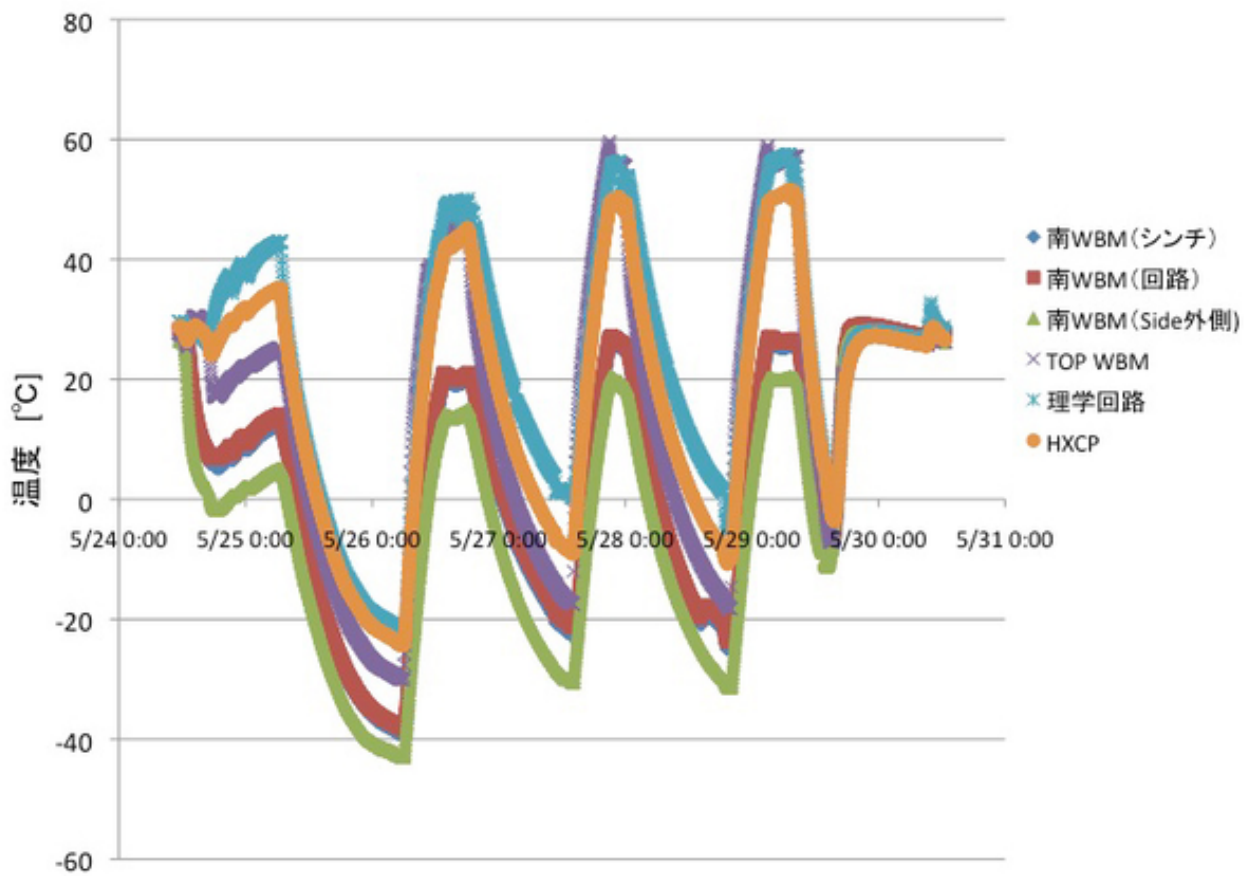


図 3.4: 熱環境試験での理学機器の温度変動。理学系では、理学回路ボックスに1ヶ所、HXCP外壁に1ヶ所、トップ面に設置したWBMに1ヶ所、および、サイドパネル南面に設置したWBMの3ヶ所に温度計を取り付け、温度をモニターした。回路ボックスやHXCPの載ったセンターパネル、および、WBMを設置したトップ面の温度変動が非常に大きい。

表 3.4: 理学系機器に関する熱解析結果。カッコ内の数値は太陽定数やアルベドなどの諸定数を最悪値にした場合の値。その他の解析値はそれらの定数を平均値として計算した場合である。

機器	下限温度要求	予想最低温度	上限温度要求	予想最高温度
HXCP	-30 °C	-26 °C	20 °C	16(25) °C
WBM	-30 °C	-39 °C	20 °C	8(13) °C
回路ボックス	-30 °C	-16 °C	75 °C	42(48) °C
WBM 間の温度差	最小温度差:	9 °C	最大温度差:	22.5 °C

3.4 構造設計

TSUBAME では、理学系の検出器以外にも、他のミッション機器や各種センサ、バッテリーなど、多くの機器を搭載する。しかし、TSUBAME は超小型衛星であり、相乗りで打ち上げることから、そのサイズや質量には大きな制限がかかる。そのため、理学系の機器にも、サイズ・質量の点で制約が課される。また、ロケット打ち上げ時には、衛星全体に非常に大きな振動・衝撃が発生するため、それらによって機器が破壊されないような構造が必要になる。

以下では、これらの制約、および、それらを達成するための方法について述べる。

機器の大きさ・質量

HXCP

本来、HXCP の大きさは、散乱体と吸収体のシンチレータの数・配置で決定される。これらのシンチレータの配置は検出効率とモジュレーションファクターに密接に関連しており、最適の配置を決めるため、過去にシミュレーションが行われた ([17], [16])。一方、超小型衛星に搭載するためには、衛星側から出される要求を守らなければならない。河合研では、構造系の担当者と議論を重ね、現在のサイズにたどり着いた。

また、当初は筐体をアルミで構成することを考えていたが、衛星側から出される要求重量を超過してしまうことや、シンチレータ部分の固定が難しくなることを考慮し、構造体に工業用プラスチックであるポリエーテル・エーテル・ケトン (PEEK) 樹脂を採用した。PEEK 樹脂は機械的強度に優れ、放射線耐性があり、電気絶縁性があるため、高電圧を用

いる放射線検出器には最適の素材である。これにより、HXCP 全体で 4.5 kg という質量を達成した。

WBM

WBM も HXCP と同様に、構造系との議論により、その大きさと質量が決定したと言える。当初はシンチレータ端面にライトガイドを取り付ける構想だったが、長さや質量が増加するために断念した。しかし、その後、端面に APD を 2 個取り付ける構成が提案・検証され、現在の構成になった。この変更により、衛星からの要求を満たしつつ、検出性能を向上させることに成功した。

また、構体の一部を PEEK 樹脂にすることにより、HXCP 同様軽量化に成功した。

回路ボックス

回路ボックスに関しては、衛星側からの要求を満たしていたので問題はなかった。

以下に、現在の理学系機器のサイズと質量を示す。

表 3.5: 理学系機器のサイズと質量。WBM は検出器 1 台の値。各機器を繋ぐケーブルの質量は入っていない。

機器	サイズ [mm ³]	質量 [kg]
HXCP	108 × 118.5 × 200	4.5
WBM(1 台)	173 × 54.4 × 22.6	0.28
回路ボックス	106 × 99 × 161.4	0.65

対振動・衝撃

人工衛星をロケットで打ち上げる際には、非常に大きな振動と衝撃が発生する。そのため、これらの物理的衝撃に耐える構造強度が、機器に要求される。TAUBAME は、当初 JAXA の衛星の相乗りとして打ち上げることを計画していたため、HII-A ロケットの振動レベルを想定していた。その後、打ち上げに使用するロケットが変更になったため、クリアすべき振動レベルは下がったが、それでも振動試験等をクリアしなければならない。

以後、各機器の対振動・衝撃対策について述べる。

HXCP

HXCPの中で一番振動に弱いと思われるのは、マルチアノード光電子増倍管(MAPMT)である。本検出器はマルチアノード化した結果、内部のダイノードが細かく複雑化したため、衝撃に弱かった。河合研究室では、浜松ホトニクスと共同でMAPMTの耐震化に取り組み、HII-Aの振動レベルでの振動試験に耐え得るMAPMTを開発した([16])。

しかし、以前の耐震試験ではMAPMT単体で試験をしており、衛星全体で生じる共振点を考慮していなかった点や、シンチレータと光学的に接合させたMAPMTの固定が難しい点があるため、完全に不安を払拭できたとは言い難い。現在は、固定法の検証と再度の振動試験とを並行して行っている。

WBM

CsIシンチレータが板状であるため、振動による破損が問題視されたが、振動試験により全く問題にならないことがわかった。APDがもともと振動に強く、筐体にも弱い点が見当たらないため、現在は特に問題は無いと考えられている。

回路ボックス

回路ボックス筐体が1.5 mm厚のアルミ板金から構成されており、回路基板が破損することが懸念されたが、機器単体での振動試験には問題無く耐えた。しかし、試験時に実装されていなかった部品もあるため、もう一度試験することを検討している。

3.5 データ構成

理学系のデータ構成とデータ量、および、ミッションデータをダウンリンクする通信系の仕様について検討する。

3.5.1 ミッションデータ

GRB偏光観測ミッションでは、HXCPで光子のエネルギー情報を、WBMでライトカーブを、それぞれ取得する。また、観測中の時刻や検出器ステータスなどを、ミッションHKデータとして取得する。これらのデータ構成について述べる。

また、以下の説明ではHXCP、および、WBMのデータ量を見積もる部分がある。これらのデータ量は、各検出器で検出されるイベント数(光子数)に依存するため、イベント数のある値で仮定している。これらの仮定の根拠は、付録Aで述べる。

HXCP

HXCPでは、1イベント(光子1個)ごとにデータを保存する。HXCPには検出器が92チャンネル(=APD28個 + MAPMT16チャンネル×4個)あり、これら1個ずつの波高値を記録し、データ解析は地上で行う。いまADCの出力値を512ch(=9bit)とすると、1イベントでの検出器データは $9 \times 92 = 828$ [bit]になる。さらに、ダウンリンク後の解析でイベント時の姿勢情報を照合することを考えると、イベント時の時刻データが必要になる。HXCPのデータ取得可能レートが約1kHzであるから、時間分解能は0.1msec必要である。現在のミッションシーケンスでは、5分間に1回ADCS系からのコマンドによって時刻をリセットし、時報間の時刻は内部クロックで内挿する。そのため、必要な時刻情報は、 $300\text{s} / 0.1\text{ms} = 3 \times 10^6$ countsあれば良い。この時刻情報を表すためには、22ビット($2^{22} = 4,194,304$)あれば良い。検出器データと時刻データの合計850bitに、ステータス6bitを加えると、HXCPの1イベントあたりのデータ量は856bitになる。いま、1回のGRBで10,000イベント観測したとすると、そのときのデータ量は8.56Mbitになる。

WBM

WBMでは、一定時間のイベント数(光子数)を記録する。いま、現在想定している最小積分時間10msecに、上限500counts(50kHz)まで観測する場合を考える。まず、500countsまで記録するには9ビット($2^9 = 512$)必要である。WBMでは3種類のエネルギー領域で、かつ、5個のWBMで別々に計数を行うので、10msecのデータを記録するのに必要なデータ量は、 $9 \times 3 \times 5 = 135$ bitとなる。これに時刻データ20bit、ステータス5ビットを加えると、160bitになる。GRB検知トリガ以前の30秒間、および、検知後の1000秒間のデータを保存すると仮定すると、1回のGRBで取得するGRBは、16.48Mbitとなる。

ハウスキーピング(HK)データ

GRB観測中、理学系CPUは各検出器の温度データから印加電圧やスレッシュホールドを調節する。そのため、ダウンリンクしたデータを正確に解析し、衛星データの信頼性を確か

めるためには、イベント時のHK データを取得しなければならない。このとき、HK データの収集間隔は、検出器データが変化する間隔よりも短くならなければならない。

検出器の印加電圧を温度によって調整する手法は、前衛星 Cute1.7+APD II の APD 観測でも使用されていた手法である。まず、Cute1.7+APD II の観測データから取得した HV 設定値の変化を図 3.5 に示す。

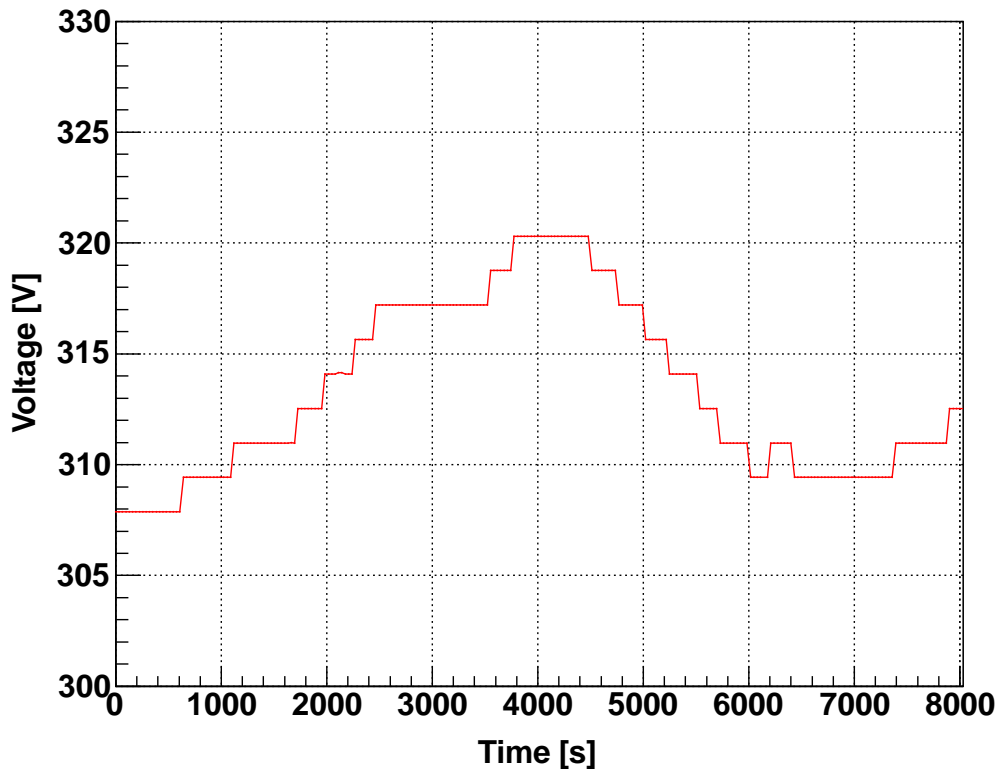


図 3.5: Cute1.7+APD II の観測中の HV 設定値の変化。横軸は観測時間 [s]、縦軸は理学系マイコンの HV 設定値 [V] であり、実際にこの値に HV が印加されているかは知ることができない。

このデータを参考にすると、温度制御による HV 設定値の変化周期は 200 秒程度であることがわかる。この HV 変化周期に対して十分短い時間間隔で HK データを取得すれば良い。

また、HXCP を使用して GRB の偏光を観測している間は、衛星の姿勢情報を取得する。これは、理学系のミッションデータを取得するだけで簡易的な解析を行えるようにする意図がある。このとき、姿勢情報を取得する間隔はなるべく短い方が望ましい。そのため、HXCP での偏光観測中のみは 5 秒おきに HK を取得するなど、HK 取得間隔を調整する仕

組みが必要になる。

HK データの構成案を表 3.6 に示す。

表 3.6: 理学系で観測中に取得する HK データ例。ミッション中はこれらのデータを一定間隔で取得して保存する。

データ種類	必要データサイズ	データ概要
時刻情報	16 bit	時刻情報
各検出器 ON/OFF	8 bit	WBM5 個 + HXCP の APD1,2、PMT
検出器温度	8 bit × 7	WBM5 個 + HXCP の APD 2 系
検出器ゲイン	2 bit × 7	WBM5 個 + HXCP の APD 2 系 (ゲイン 30, 50, 70, 100 の 4 通り)
検出器 HV 値	8 bit × 3	WBM の APD + HXCP の APD、PMT
検出器スレッシュホールド	8 bit × 4 × 5	WBM5 個のスレッシュホールド (3 バンド分)
姿勢情報	16 bit × 4	ADCS 系から取得した衛星姿勢情報 (偏光観測中のみ保存する)
合計	342 bit	姿勢情報未取得時は、278 bit

例えば、GRB 待機中の HK データを 100 秒間隔、偏光観測中の HK データを 5 秒間隔で取得する場合を考える。30 日間 GRB 待機を行った後、1000 秒間偏光観測を行ったと仮定すると、HK データの総量は

$$278 * (30 * 24 * 60 * 60 / 100) + 342 * (1000 / 5) = 7,274,160 \text{ [bit]}$$

となり、およそ 887 KB となる。

理学データ 総データ量

以上で述べた理学データの概要とデータ量を、表 3.7 にまとめた。

これらのデータを保存できるように、理学系では 16 MByte の SRAM を 2 個搭載し、検出器データはそれぞれの SRAM に一時保存されるようになっている。また、HK データに関しては逐一工学系メモリ (500 MByte) に送信し、保存してもらう。これらのメモリ構成により、長時間での観測待機や、GRB が複数回立て続けに起こった場合でも、デー

表 3.7: 理学系のミッションデータ量。HK データの見積りと同様に、30 日間 GRB 待機を行った後、1000 秒間偏光観測を行ったと仮定した場合のデータ量である。

データ種類	データ量
HXCP	8.56 Mbit
WBM	16.48 Mbit
HK	7.274 Mbit
合計	32.314 Mbit (3.9 MByte)

タ保存できるようになっている。

3.5.2 TSUBAME ダウンリンク速度

前小節で述べたようなミッションデータを地上に効率良く転送するために、TSUBAME では従来のアマチュア帯通信に加え、専用帯 (S 帯) 通信の新規開発を行っている。表 3.10 に、TSUBAME 衛星の通信帯とダウンリンク速度を示す。

表 3.8: TSUBAME 衛星のダウンリンク速度。

通信方式	変調方式	周波数帯 [Hz]	ビットレート [bps]
アマチュア帯	AFSK	430 M	1,200
アマチュア帯	GMSK	430 M	9,600
S-Band	BPSK	2 G	10k ~ 100k

TSUBAME 衛星のミッションで重要な役割を果たすのが、S-Band 通信である。理学ミッションデータに関して、ダウンリンク速度と所要時間を表??に示す。

3.6 システム設計まとめ

以上での述べたシステム設計の検討結果について、以下の表??にまとめる。

表 3.9: 理学データに関する、ダウンリンク速度とダウンリンク所用時間。表 3.7 で示した GRB1 回の観測データ量 Mbit をダウンリンクするのにかかる時間である。実際のダウンリンクでは仰角の問題で可視パスの全時間をダウンリンクに使用することはできないため、これ以上の時間を要する。

ダウンリンク速度 [kbps]	10	30	50	100
ダウンリンク時間 [分]	53.9	18.0	10.8	5.4

表 3.10: 理学系のシステム設計の現状。要求を十分に満足する項目もあるが、姿勢制御・熱・構造の部分で、まだ達成できていない点も存在する。

検討事項	判定	判定根拠
姿勢制御	△	姿勢変更速度が目標値に届いていない。 ただし、現状でも観測は可能である。
電源	○	偏光観測を長時間行える設計になっている。
熱・温度	×	WBM 間の温度差が非常に大きく、 満足な観測が行えるかどうか検証が必要。
構造	△	サイズ・質量に関しては、要求を満足している。 MAPMT の耐震強度にミッションの正否がかかる。
データ	○	複数回の観測にも耐え得るメモリ容量がある。 S-band ならば、ダウンリンク速度も十分である。

いまだ目標を達成できていない姿勢制御・熱・構造に関しては、各小節で述べた対策を施した上、検証実験やシミュレーションを行うことが必要になる。

第4章 TSUBAME理学系

システム構成

理学系のシステムをその動作で分類すると、CPU系、WBM系、HXCP系という3つの系に分けられる。

・CPU系

工学系との通信、および、工学系からのコマンドを受けて各機器の電源ON/OFFや制御、HK収集などを行う。CPUを搭載したFPGA(Field-Programmable Gate Array)、および、各機器に電源供給を行う電源基板からなる。

・WBM系

WBM検出器5機、各検出器用のカウンタやGRB検出ロジックを組み込んだWBM-FPGA、WBMデータ保存用のSRAMからなる。WBMの計数値をモニタし、GRBなど突発天体を検出する。また、CPU系からのコマンドを受けて、WBMに関するHKデータの取得や、各検出器のスレッシュホールド調整などを行う。

・HXCP系

HXCP検出器1機、検出データ用のI/Oを組み込んだHXCP-FPGA、HXCPデータ保存用のSRAMからなる。HXCPによる天体観測、および、そのデータ収集を行う。また、CPU系からのコマンドを受けて、HXCPに関するHKデータの取得を行う。

一方、機器として考えると、理学系機器はHXCP検出器、WBM検出器、回路ボックスの3系統に分かれる。

・HXCP検出器

偏光観測を行う検出器。放射線検出器部分(シンチレータ+検出器)、それらから得られ

るアナログ信号を処理し、波高値をデジタル信号で出力する VATA 基板、検出器のトリガを制御する IFC 基板、検出器に HV を供給する HV モジュールで構成される。

- ・ WBM 検出器

GRB の検出・位置決定を行うためのデータを取得する検出器。放射線検出器部分（シンチレータ+検出器）、出力信号を増幅・整形するアンプ回路からなる。

- ・ 回路ボックス

検出器への電力供給、検出器データの処理と保存、工学系との通信などを担う。CPU 基板、電源基板、WBM ロジック基板、WBM 電源基板の 4 枚の基板と、それらをまとめて格納するアルミ筐体からなる。

これらの概要を図 4.1 にまとめた。

以下の節で、各機器について説明する。

4.1 機器構成

4.1.1 回路ボックス

理学系の信号処理基板は 4 枚あり、これらをバックプレーン基板、および、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。これを回路ボックスと呼ぶ。複数枚の基板に分けることにより、各基板ごとに動作試験が実施でき、特に HXCP・WBM 両検出器の試験を同時に実施できることが利点である。ケーブルの引き回しを簡単にするために、4 枚の基板の信号入出力部分(コネクタ)は、回路ボックスの同じ面に設置した。

以下に、4 枚の基板の詳細を示す。

CPU 基板

理学系 CPU 用の FPGA、および、HXCP-I/O 用の FPGA を搭載する基板である。CPU プログラム用の ROM や SRAM、CAN コントローラ・トランシーバを搭載し、衛星側からのコマンドを受けて対応した動作を行う。CPU-FPGA 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

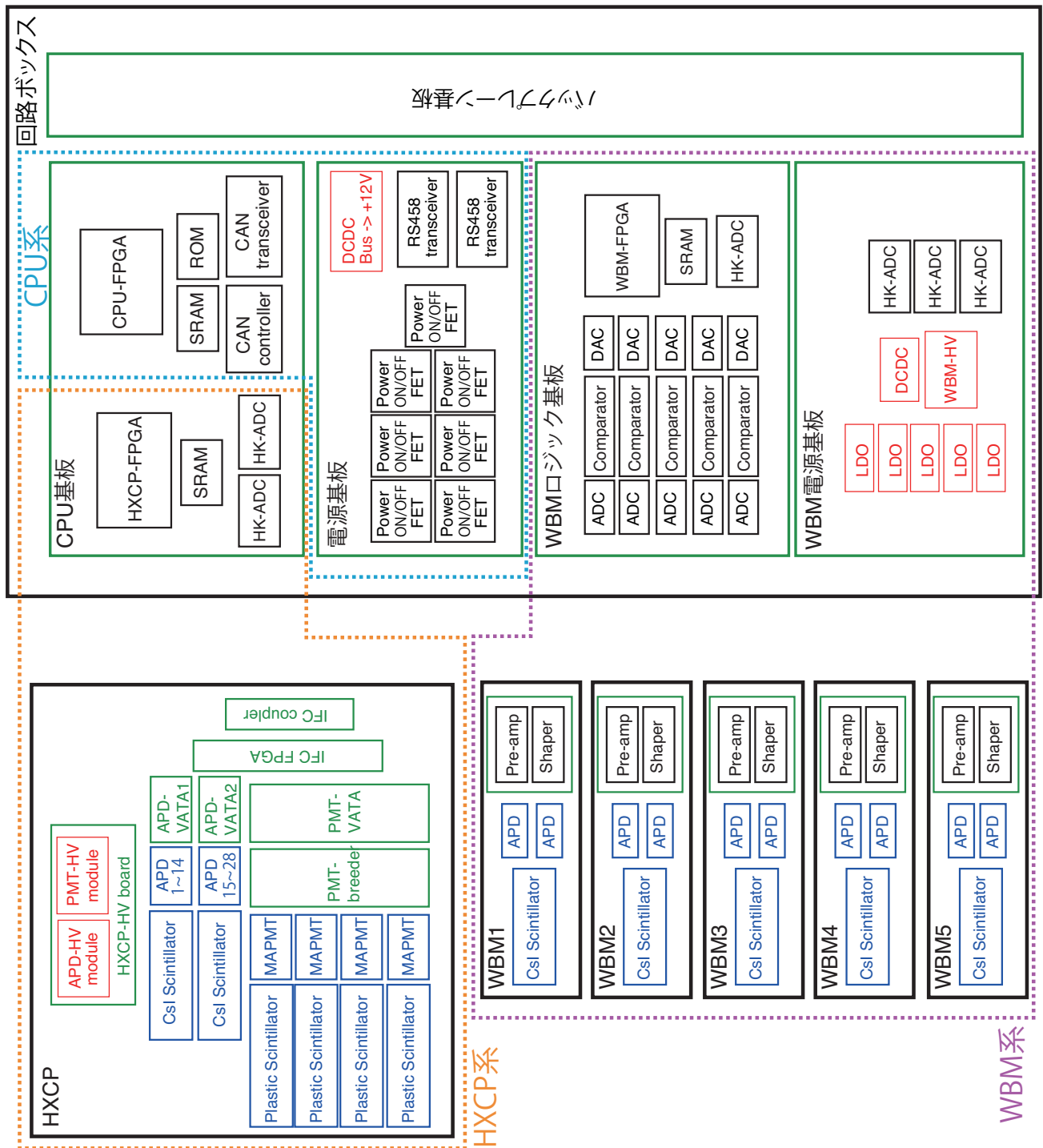


図 4.1: 理学系のシステム構成。回路ボックス、HXCP、WBM という 3つの機器からなるが、その動作目的によって CPU 系 (水色)、HXCP 系 (橙色)、WBM 系 (紫色) に分かれる。

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。



図 4.2: CPU 基板の写真。図中左側にある、正方形の大きな素子が CPU-FPGA である。図中左側のコネクタにバックプレーン基板が、図中上側のコネクタにサイドプレーン基板が接続する。回路ボックス内の 4 枚の基板は、全てこの基板と同じ形をしている。

電源基板

電源バスから供給されたバス電圧を理学系で使用する共通の+12 V に降圧する。つくられた+12 V の経路は 8 系統に分かれ、1 系統は CPU 基板の DCDC コンバータに入力される。これにより、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 7 系統には途中で FET が挿入されており、各 FET に CPU 基板から+3.3 V が入力されたときだけ、+12 V が供給される。これにより、CPU から各基板や検出器の電源 ON/OFF を制御することができる。

また、UART 通信用の RS485 のトランシーバを 2 個 (送信用、受信用) 搭載しており、CPU 基板からの RS232C 信号を RS485 に変換する。変換した後の 4 本 (Rx-A, Rx-B, Tx-

A, Tx-B) の信号線は、CAN 通信用の信号線 2 本 (CAN_H, CAN_L) と合わせて、マイクロ Dsub コネクタで出力する。

WBM ロジック基板

WBM 検出器の信号用に 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 に関連する電圧・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 のデータは一時的にこれに保存される。

WBM 電源基板

衛星筐体各所に設置された各 WBM に、プリアンプ基板用の電圧、および、APD 用の高電圧を供給する基板。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 +12 V からいったん +5.5 V、-5.5 V 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 (~5 V) をつくる用に設計されている。

バックプレーン基板、サイドプレーン基板

上記の 4 枚の基板には、外部接続コネクタとは反対側の辺に 32 ピンのコネクタが 2 個ずつある。これらの基板を相互に繋ぐ役割をするのがバックプレーン基板である。バックプレーン基板は長方形の基板に 32 ピンコネクタを 2 個 × 4 列並べて構成される。

また、基板のスペースとコネクタのピン数の関係から、電源基板から HXCP の高電圧用モジュールに +12V を供給する経路として、サイドプレーン基板を用いる。これは、CPU 基板と電源基板のみを接続する。

これらの基板の接続位置に関しては、図 4.2 を見ると分かり易い。



図 4.3: 回路ボックスを構成する基板4枚の構成例。上から、CPU基板、WBMロジック基板、WBM電源基板、電源基板と並ぶ。ただし、写真中ではWBMロジック基板、WBM電源基板がダミー基板になっている。回路間は、コネクタと金属のスペーサーで接続されている。各基板にはそれぞれコネクタ取り付け用のアルミ板が取り付けられる(図中左側)。

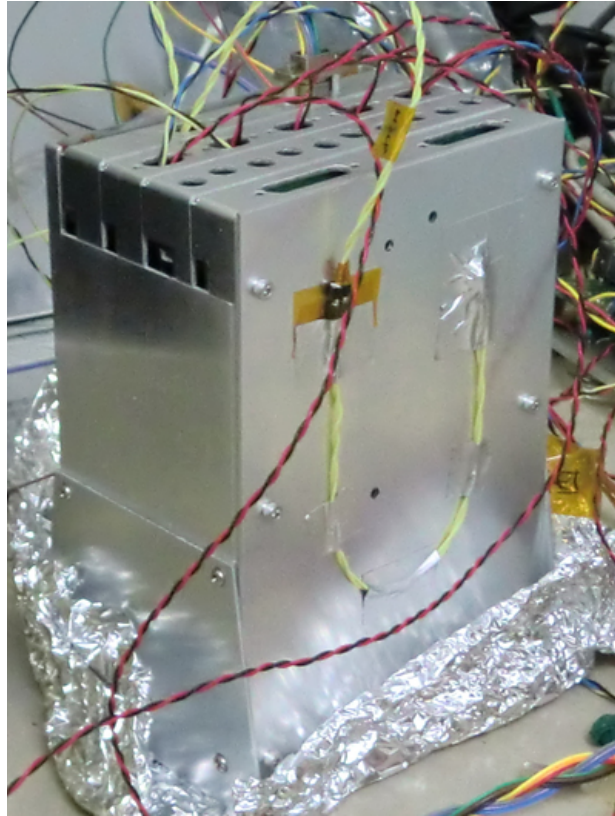


図 4.4: 回路ボックスの外観。図 4.3 のように基板を組み合わせた後、アルミ製の箱に収納し蓋をすることで回路ボックスが組み上がる。衛星内には、この図のような向きで取り付けられ、上側からコネクタやケーブルが出るようになる。

4.1.2 HXCP 検出器

検出器自身については前の章で詳細に説明したため、ここではその制御方法について述べる。

偏光計の地上実験では、データ I/O を外付けの I/O 基板で代用し、データの取得や保存を VME モジュールと外部 PC を用いて行った。一方、TSUBAME ではデータ I/O やデータ管理を行う FPGA(HXCP-FPGA) を CPU 基板に搭載する。HXCP-FPGA は CPU 基板上に搭載され、理学系 CPU との通信により、検出器の制御やデータの読み書き、HK の取得を行う。

4.1.3 WBM 検出器

WBM 検出器は $120 \times 30 \times 5 \text{ mm}^3$ 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から構成される。TSUBAME では、本検出器を衛星壁面 1 面ずつ、計 5 面に設置し、GRB の検知と位置決定を行う。APD 用の高圧とプリアンプの電源は WBM 電源基板から供給され、APD の信号は同軸ケーブルによって WBM ロジック基板に入力される。

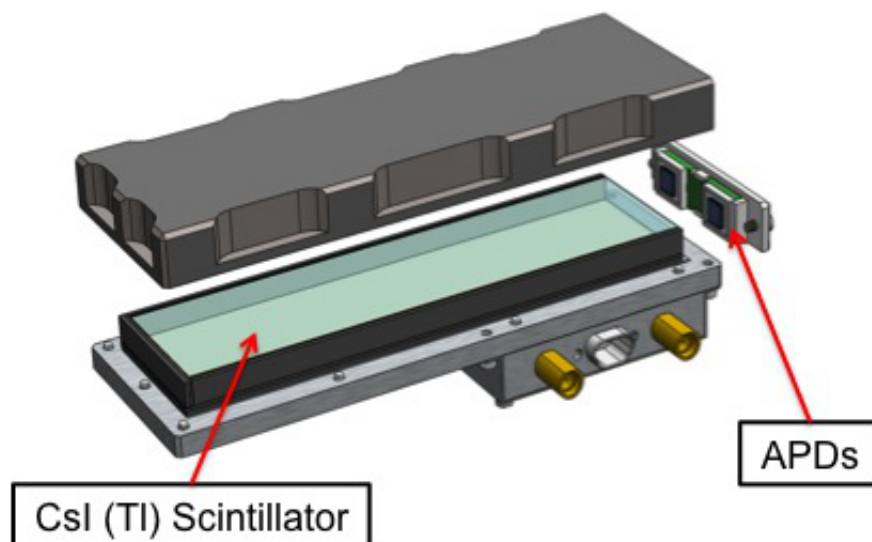


図 4.5: WBM の模式図。WBM は板状の CsI(Tl) シンチレータと、アバランシェ・フォトダイオード (APD) 2 個から構成される。プリアンプ回路は、シンチレータの下の、コネクタが付いているボックス内に格納されている。

4.2 電源

理学系の電源構成を図 4.6 に示す。

理学系には、理学機器全てに電源を供給する電源基板がある。電源基板は、衛星の電源バスに接続しており、TDK ラムダ社製 DCDC コンバータによって、バス電圧を+12V に降圧する。+12V の 1 系統は CPU 基板の CPU-FPGA の電源系統に直接入力されており、電源基板にバス電圧が供給されると自動的に CPU が起動するようになっている。他の系統には電源 ON/OFF のスイッチとして FET が挿入されており、CPU 基板から+3.3V(High 信号)を入力することで、後段に+12V を供給できる。各系統に供給された+12V は、各自で必要な電圧に降圧されて利用される。

・HXCP アナログ系統

CPU 基板上の DCDC コンバータにより+3V に降圧され、IFC-FPGA、および、VATA 基板に供給される。また、VATA 基板では LDO により+2.5V に降圧されて利用される。

・HXCP デジタル系統

CPU 基板上の DCDC コンバータにより+3.3V に降圧され、HXCP-FPGA や SRAM に供給される。また、+3.3V は LDO により 1.5V に降圧され、FPGA のコア電圧として利用される。

・HXCP 高圧電源

HXCP には、APD、および、MAPMT に高電圧を供給する HV 基板が搭載されている。APD-HV モジュール (HAPD-0.5PT)、PMT-HV モジュール (OPTON-1NC12) にはそれぞれ+12V が供給され、CPU 基板から入力するコントロール電圧の値を変化することで出力電圧を調節することができる。

・WBM アナログ系統

WBM1 個ずつに搭載するプリアンプ、および、整形アンプを動作させるのに必要な+11V、+5V、-5V を、LDO によって作る。その際、いったん DCDC コンバータで+12V から+5.5V、-5.5V を作り、そこから+5V、-5V に降圧することで電圧を安定させている。

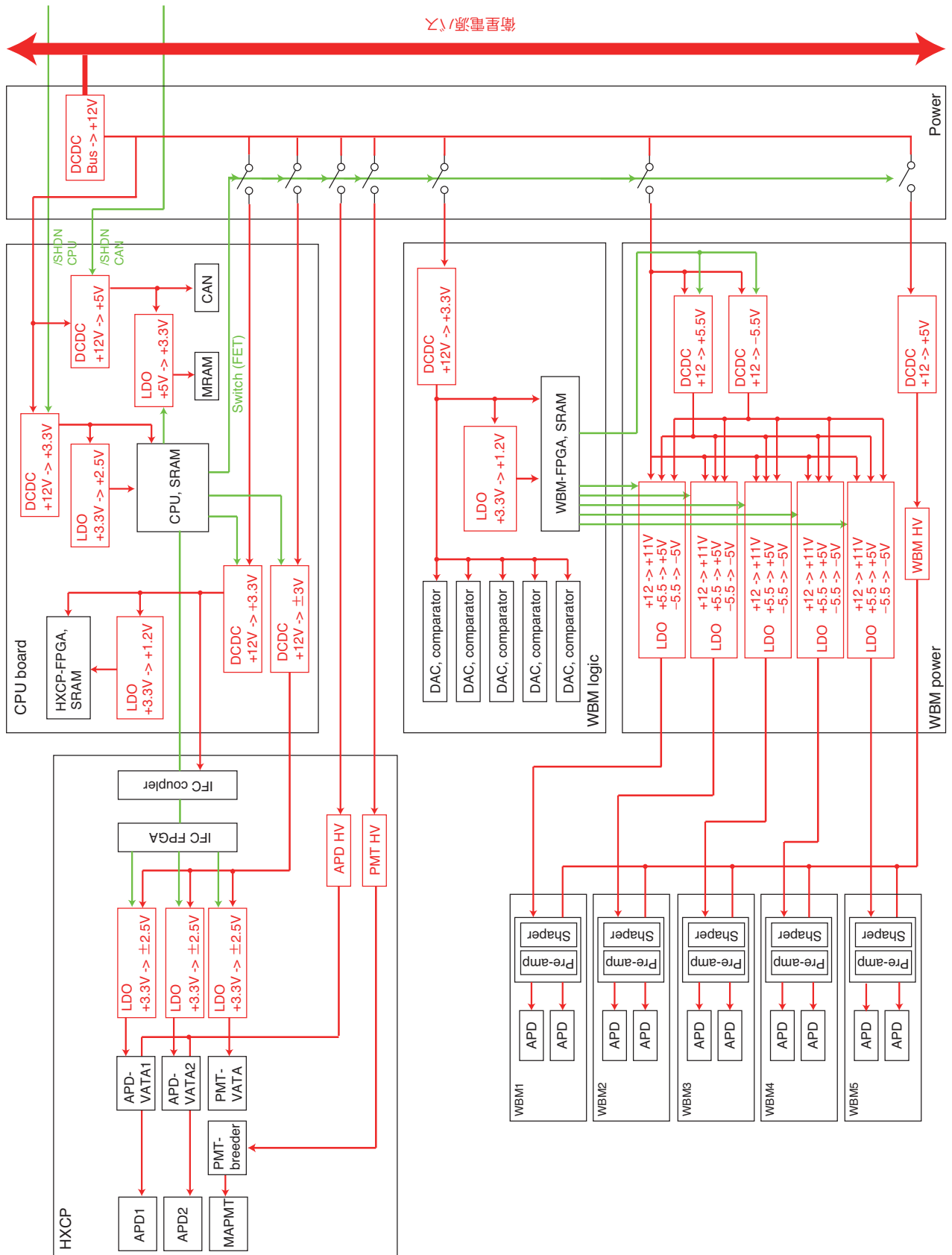


図 4.6: 理学系の電源構成。赤矢印が電源供給関係、緑矢印が電源制御関係を表す。

- ・ WBM デジタル系統

HXCP デジタル系統と同様に、WBM ロジック基板上の DCDC コンバータにより +3.3V、LDO により +1.5V を作り、WBM-FPGA や SRAM などを利用する。

- ・ WBM 高圧電源

WBM の APD に使用する HV モジュール (HAPD-0.5PT) は、WBM 電源基板に搭載される。高圧電源用の +12V は、WBM アナログ系統用の +12V とは別に供給される。CPU は WBM-FPGA を介して入力コントロール電圧を変化させ、出力電圧を調節できる。

各機器/系統の使用電圧と、消費電力を表 4.1 に示す。

機器/系統	使用電圧 [V]	消費電力 [mW]
CPU-FPGA	+3.3	700*
WBM-FPGA	+3.3	700*
WBM Analog	+12, +5, -5	945
WBM Digital	+3.3	100*
WBM HV	+5	525
HXCP-FPGA	3.3	700*
HXCP Analog	+3.3, -3.3	2043
HXCP Digital	+3.3	172
HXCP APD-HV	+12	525
HXCP PMT-HV	+12	2448
合計		8858

表 4.1: 理学機器の消費電力。* 印が付いた値は現状の予想値、その他の値は実測値である。FPGA は内部に書き込むロジックやクロック速度で消費電力が変化するため、今後改めての実測が必要である。

4.3 通信

理学系での通信用システム構成を図 4.7 に示す。

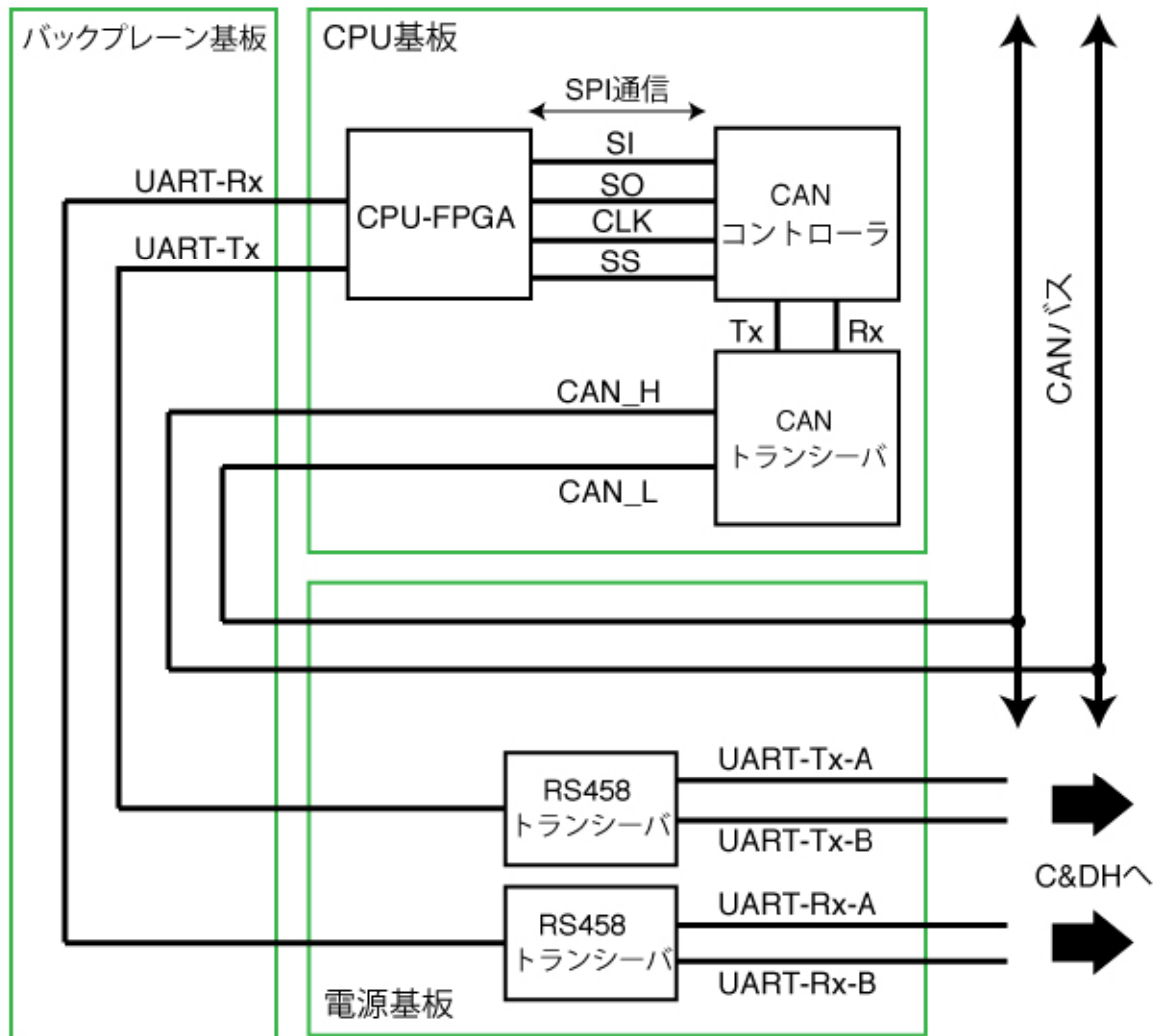


図 4.7: 理学系の通信構成。CAN、UART 用の信号はどちらも CPU 基板から送信され、バックプレーン基板を通して電源基板から出力される。

CPU に使用する 8051 コアには、もともと備え付けの UART 機能 (RS232C 規格) が付属しており、これを利用する。RS232C の Tx、Rx 信号を RS485 トランシーバである ADM2486 を使って RS485 の差動信号に変換する。この出力を C&DH 系に繋ぎ、他系との通信を行う。

一方、CAN には CAN コントローラ MCP2510 と CAN トランシーバ SN65HVD1050 を使用する。CPU-FPGA と CAN コントローラ間は SPI (Serial Peripheral Interface) バスで

接続されており、設定用レジスタの書き込み・読み込みや、送受信・リセットの指示など、CAN の操作は全て SPI 通信を通して行う。CAN コントローラ以降は、CAN 通信の説明 (B.1) で述べた通りの構成になっている。

通信信号はどちらも CPU 基板から送信され、バックプレーン基板を通して電源基板から出力される。これは、電源バスと通信バス、両方のケーブルを 1 枚の基板に集中させて、衛星内のケーブルの取り回しを行い易くする意図がある。

第5章 X線偏光と検出方法

X線は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、可視光などのように、偏光子などを用いて偏光X線と無偏光X線を区別することができない。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。このような粒子性の性質を利用する手法として、ブラッグ反射、光電吸収、コンプトン散乱などを利用するものがある。本章では、「TSUBAME」衛星で採用するコンプトン散乱を用いた偏光の検出方法を述べる。なお、以下で使う「偏光」は、全て「直線偏光」のことを意味する。

5.1 X線偏光の検出方法

一般的なX線偏光検出方法として、ブラッグ反射型、光電吸収型、コンプトン散乱型の3種類が知られている。

5.1.1 ブラッグ反射型

ブラッグ反射とは結晶によるX線の回折現象の一種である。入射光子の波長を λ 、結晶の格子定数を d 、光子の結晶への入射角を θ とすると、X線の回折条件は以下の式で表される。 $(n$ は正の定数)

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (5.1)$$

この条件が満たされて起こる反射をブラッグ反射と呼ぶ。このとき、光子の反射率はその偏光方向に依存し、偏光方向が結晶面に対して平行な場合に反射率は最大となり、垂直な場合に反射率は0となる。したがって、結晶の周囲にX線検出器を配置し、光子の入射軸に対して結晶を回転させると、回転角に対する反射率の変化から入射X線の偏光方向、および強度を調べることができる。

ブラッグ反射型偏光計では、使用結晶と入射光子がブラッグ反射の条件を満たす必要があるため、ある結晶に対して特定の波長（エネルギー）の光子の偏光のみが検出できる。例えば、OSO-8衛星に搭載された Graphite Crystal X-ray Spectrometer という検出器ではグラファイト結晶を使用しており、 $n = 1, 2$ の反射、つまり、2.6 keV と 5.2 keV という2つの単色光のみで偏光が検出できる。

5.1.2 光電吸収型

偏光した光子が物質中で光電吸収を起こすとき、原子の K 殻から放出された光電子の散乱方向は、入射光子の偏光方向に依存する。光子の入射方向に対する電子の放出角度を θ 、入射光子の偏光方向に対する電子の放出角度を η 、光速 c に対する放出電子の速度 v の比を $\beta = v/c$ とすると、光子の散乱断面積は以下の式で与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \eta}{(1 - \beta \cos \theta)^4} \quad (5.2)$$

このとき $\eta = 0$ 、すなわち、入射光子の偏光方向に沿った方向に電子は放出されやすい。この原理により、光電子の放出方向の分布を測定することで光子の偏光方向が調べられる。例えば、ガス比例計数管を用いると、検出器内に広がった電子雲の形状から光電子の放出方向、および偏光情報を取得することができる。光電吸収型偏光計の観測可能エネルギー範囲は数 keV～ 数 10keV 程度であり、ブラッグ反射型とは違って連続したエネルギー領域で偏光情報を取得できる。

5.1.3 コンプトン散乱型

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。TSUBAME衛星の硬 X 線コンプトン偏光計（HXCP）では、この原理を利用している。以後の説明では、コンプトン散乱における偏光光子の性質と偏光検出原理について述べる。

5.2 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 5.1)

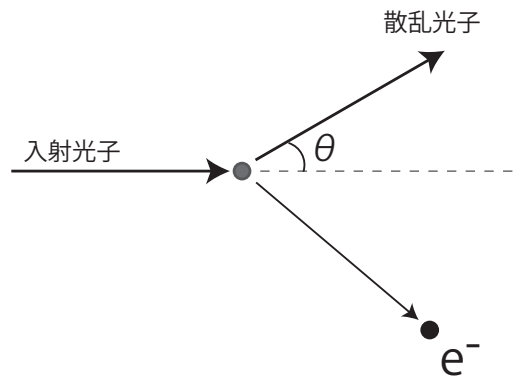


図 5.1: コンプトン散乱の模式図

5.2.1 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、以下のようにかける。

$$E' = \frac{E_0}{1 + \left(\frac{E_0}{m_e c^2}\right)(1 - \cos \theta)} \quad (5.3)$$

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

$$\Delta E = E_0 - E' = \frac{\frac{E_0^2}{m_e c^2}(1 - \cos \theta)}{1 + \left(\frac{E_0}{m_e c^2}\right)(1 - \cos \theta)} \quad (5.4)$$

すなわち、散乱方向に応じて散乱後の光子のエネルギー、およ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 5.2)

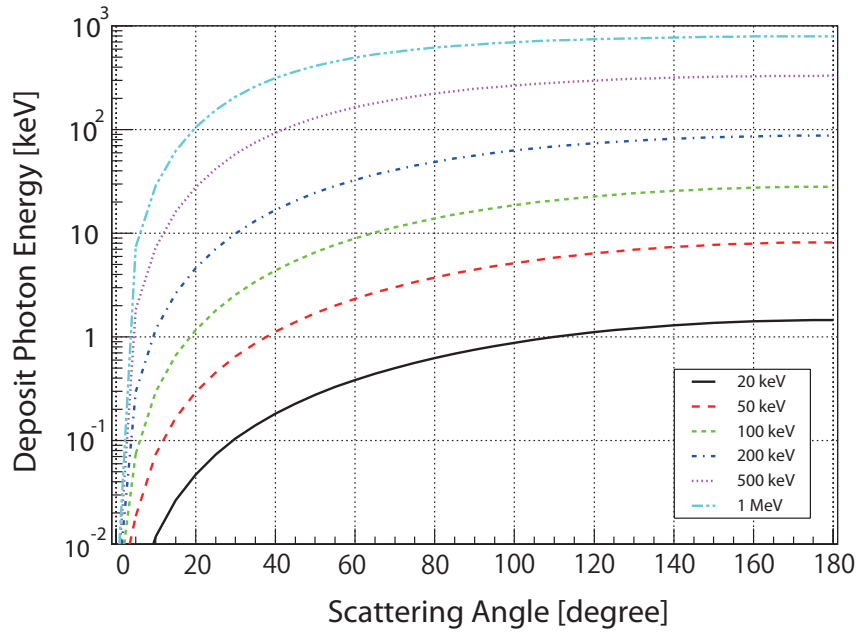


図 5.2: 光子が散乱体で反跳電子に与えるエネルギー。横軸が散乱角、縦軸が散乱体で落とされる光子のエネルギー。0°は透過を意味するので、反跳電子のエネルギーは0になる。

5.2.2 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。

無偏光の光子の場合

無偏光の光子が電子に衝突する場合、微分散乱断面積は Klein-Nishina の式として以下のように与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_0^2 \epsilon^2 (\epsilon + \epsilon^{-1} - 2 \sin^2 \theta) \quad (5.5)$$

ここで r_0 は電子の古典半径であり、 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、

$$\epsilon = \frac{E'}{E_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{E_0}{m_e c^2}\right)(1 - \cos \theta)} \quad (5.6)$$

と表される。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。

また散乱後の光子の偏光度は以下のように与えられる。[12]

$$\Pi = \frac{\sin^2 \theta}{\epsilon + \epsilon^{-1} - 2 \sin^2 \theta} \quad (5.7)$$

偏光した光子の場合

次に偏光した光子についてのコンプトン散乱について述べる。偏光した光子がコンプトン散乱をした場合 (図 5.3)、その微分散乱断面積は以下のような Klein-Nishina の式で与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_0^2 \epsilon^2 (\epsilon + \epsilon^{-1} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \eta) \quad (5.8)$$

ここで、 η は散乱方位角であり偏光面からの角度である。すなわち、偏光した光子の散乱断面積は、散乱方位角 η に依存する。この式で、角度 θ を固定すると、微分散乱断面積は $\eta = 90^\circ$ の時が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。

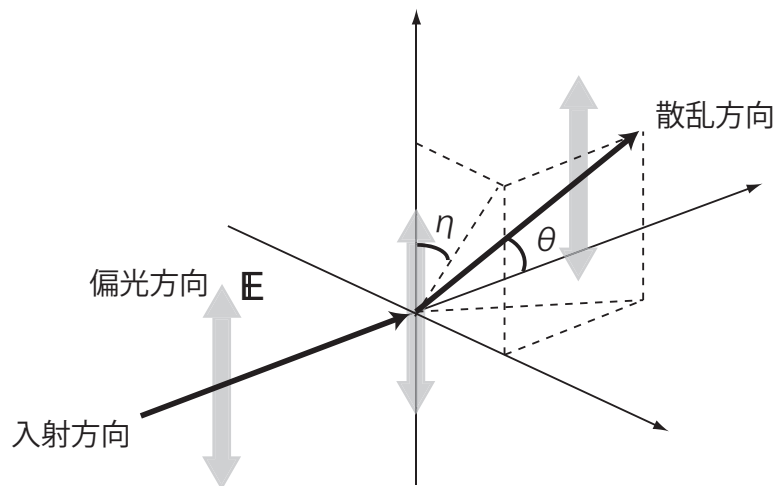


図 5.3: 偏光した光子の散乱の模式図。 θ は入射方向に対する散乱角。 η は偏光方向に対する散乱角。散乱光子の偏光方向は、入射光子の偏光方向と散乱光子の散乱方向とがつくる平面に含まれる。

5.3 コンプトン散乱を利用した X 線偏光検出

散乱型偏光計

上で述べたように、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。そのため、散乱方位角に異方性が生じる。ここでは、この性質を利用したコンプトン散乱偏光計について述べる。図 5.4 にあるように、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。入射光子は検出器 A でコンプトン散乱され、散乱された光子は検出器 B で光電吸収されるとする。 η は散乱方位角であり、入射光子の偏光方向を 0° 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。

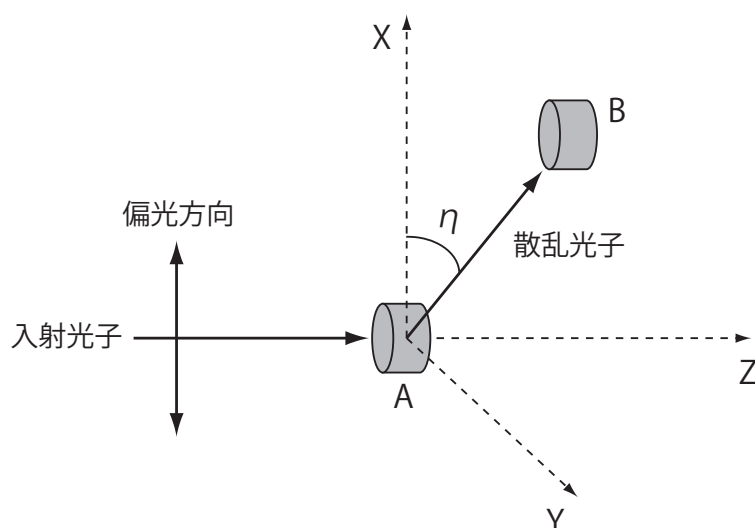


図 5.4: 散乱型偏光計の原理。微小な検出器 A, B を考える。光子は散乱体 A でコンプトン散乱し、吸収体 B で光電吸収を起こす。このようなイベントの数が、角度 η に応じて変調する。

式 (5.8) 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 (5.9) のように定義する。

$$Q = \frac{N_\perp - N_\parallel}{N_\perp + N_\parallel} \quad (5.9)$$

N_\perp と N_\parallel の値は微分散乱断面積に依存するので、 Q はさらに、式 (5.10) のような形になる。

$$Q = \frac{\frac{d\sigma}{d\Omega}(\eta = 90^\circ) - \frac{d\sigma}{d\Omega}(\eta = 0^\circ)}{\frac{d\sigma}{d\Omega}(\eta = 90^\circ) + \frac{d\sigma}{d\Omega}(\eta = 0^\circ)} \quad (5.10)$$

さらに、式(5.8)から、 Q は θ を用いて

$$Q = \frac{\sin^2 \theta}{\epsilon + \epsilon^{-1} - \sin^2 \theta} \quad (5.11)$$

Q は、散乱方向の変調の大きさを示す値であった。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(5.11)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。

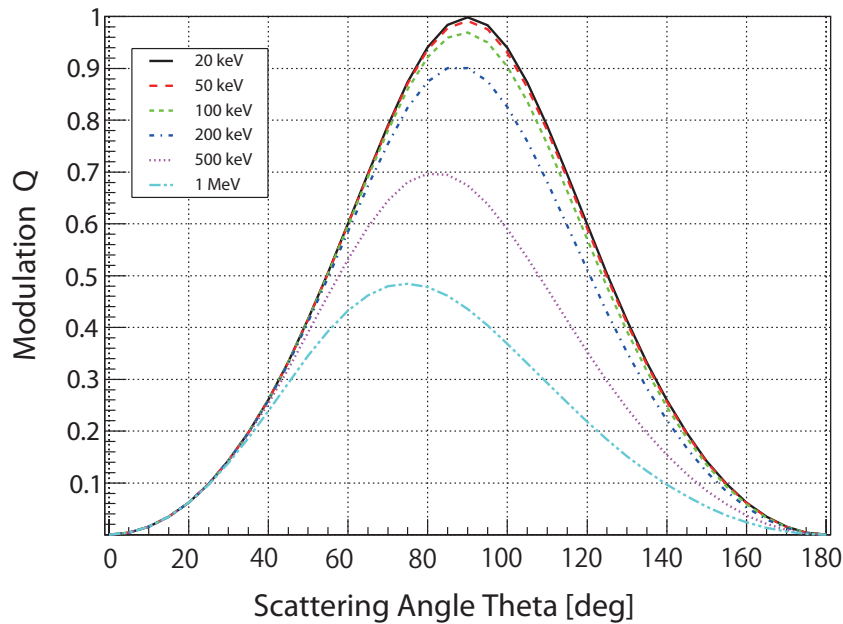


図 5.5: 散乱角 θ に対する変調 Q 。高エネルギーになるにつれて、変調が小さくなっていくことがわかる。硬 X 線領域では、 $\theta = 90^\circ$ で変調が最大になる。

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 100% 偏光を持つ光子に対して示す変調は以下の式で与えられる。

$$M = \frac{Q}{P} \quad (5.12)$$

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、

$$Q = MP \quad (5.13)$$

式 (5.13) からわかるように、 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、変調 Q が大きくなり、偏光を検出することが可能になる。ここから、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値として使われる。一般に、モジュレーションファクターは、100% 偏光に対する M のことである。本論文ではこの定義を採用する。

第6章 硬X線偏光計

この章では、硬X線偏光計、特に河合研究室で現在開発している超小型衛星TSUBAME搭載用の散乱型偏光計の構造について説明する。

6.1 硬X線偏光計の構造

散乱型偏光計の基本原理については前章で説明したので、ここでは実際の検出器の構造について述べる。

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散乱方向を検出する吸収体から成る(図6.1)。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、吸収過程で光子が落とし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落としたエネルギーを検出する。散乱体、吸収体でのエネルギー検出から、光子の散乱位置と吸収位置が検出できる。吸収体、散乱体両方でエネルギーを落としたイベントを計数することで、散乱角度分布を取得でき、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ため、実際の光子は散乱角90度以外の様々な方向に散乱し、結果として検出器のモジュレーションファクターは下がってしまう。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に通り抜けてしまう確率が上がり、検出効率が落ちる。これらのことから、シミュレーションを用いて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った。以下で述べる現在の検出器構成は、戸泉修論でシミュレーションによって求められた構成[16]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、TSUBAME偏光計の構成図を図6.2に示す。

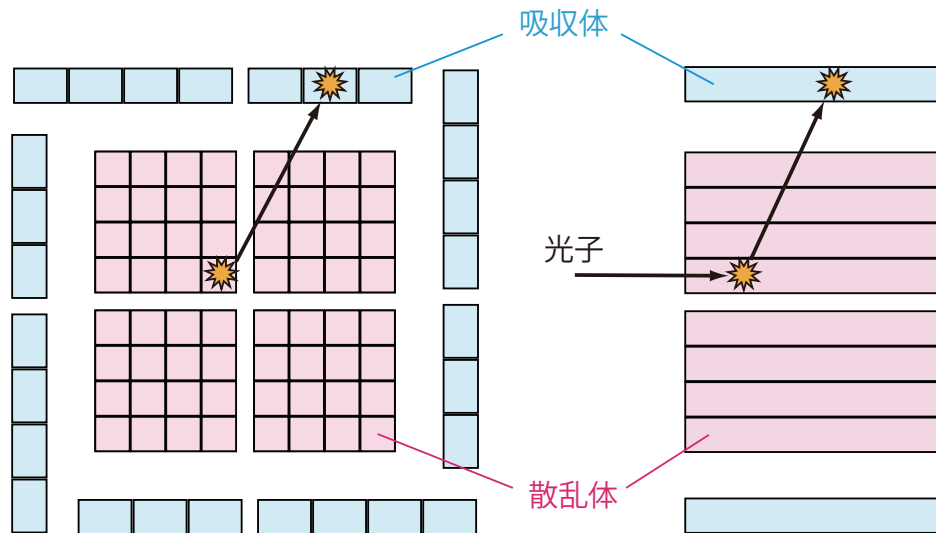


図 6.1: 散乱体・吸収体の配置図。入射してきた光子は散乱体でコンプトン散乱し、吸収体で光電吸収を起こす。

散乱体

検出器中心にある散乱体には、プラスチックシンチレータとマルチアノード光電子増倍管(以下、MAPMT)を用いる。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、TSUBAME 衛星が狙う硬 X 線領域 (30 ~ 200 keV) の光子に対しては、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落とす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光量も少ないため、1 光電子程度のエネルギーまで検出するために光電子増倍管を用いる必要がある。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 MAPMT4 個を用いて、 8×8 ピクセルの散乱体を成すことになっている。

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) シンチレータとアバランシェフォトダイオード(以下、APD)を使用する。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 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 (500~800nm) に入るため、APD

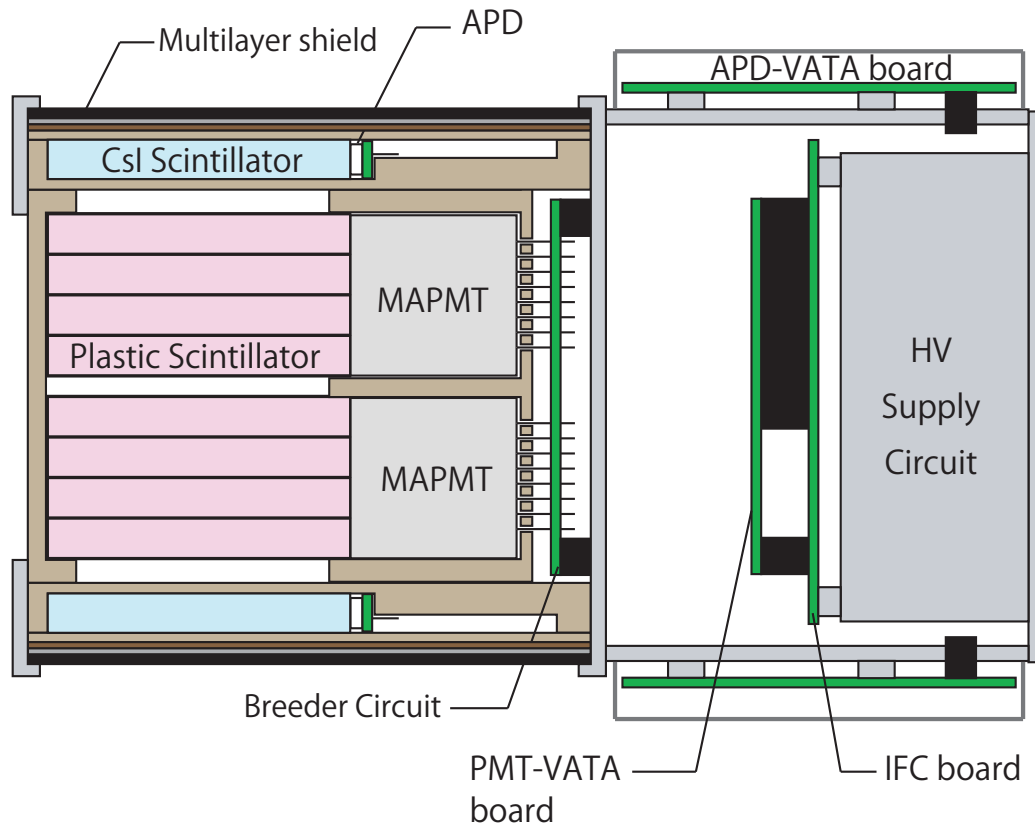


図 6.2: Tsubame 搭載偏光計の構成図。散乱体にプラスチックシンチレータと MAPMT、吸収体に CsI シンチレータと APD を用いる。前段にはシンチレータと検出器、後段に信号処理回路を配置している。黄土色の部分は工業用プラスチック素材、灰色の部分はアルミで構成される。バックグラウンド低減のため、シンチレータの周りには銅、錫、タンゲステンシートの薄板を配置している。

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。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が 6.5 mm となる。

表 6.1: 偏光計に使用するシンチレータの性能

シンチレータ	比重	原子番号	波長 [nm]	時定数	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

6.2 検出器

この節では、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。

6.2.1 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) 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。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 ($\sim 40\%$) 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 ($\sim 80\%$) 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狙ったものである。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耐えられないことから、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。以前から河合研究室は MAPMT R8900-M16 MOD-UBA 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 [16] に詳しくまとめられている。

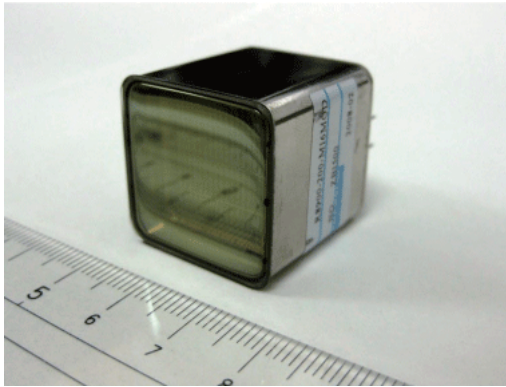


図 6.3: MAPMT R8900-M16 MOD-UBA

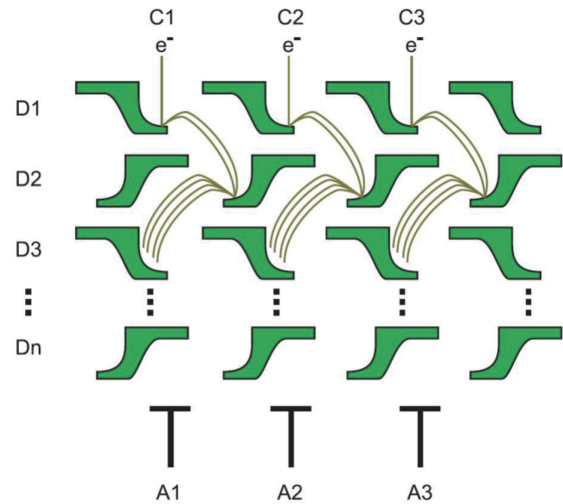


図 6.4: MAPMT 内部のメタルチャンネルダイノードでの増幅過程。光電子は光電面からアノードまで位置情報を保ちながら増幅される。

6.2.2 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) 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。

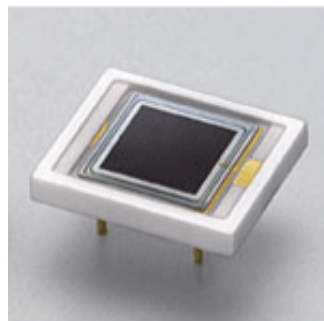


図 6.5: APD の例。写真は受光面が 5mm × 5mm の APD(浜松ホトニクス製 S8664-55)

APDの基本構造

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。

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6.6)。これら3種類のAPDは、最大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。

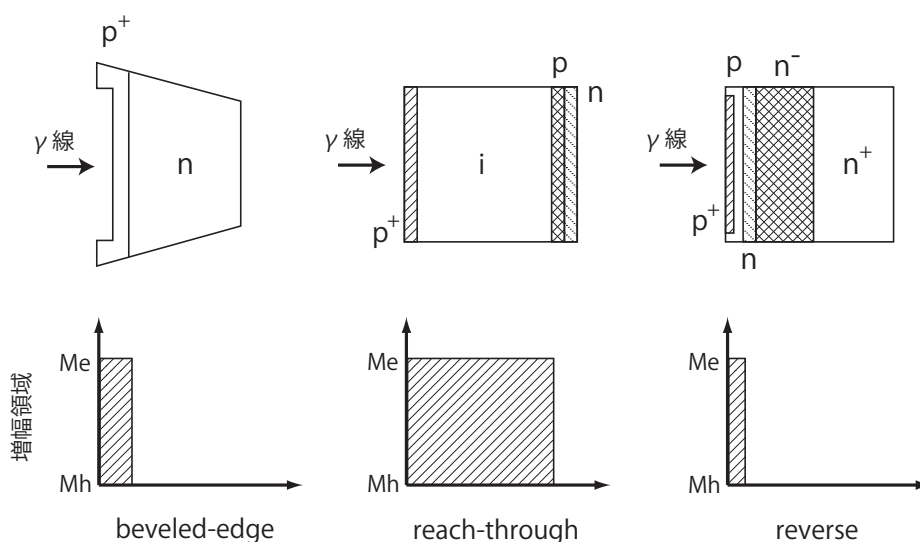


図 6.6: 各 APD の内部構造と増幅領域

6.3 読み出し回路

偏光計の読み出し回路は、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-VATA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。以下で詳しく説明を行う。

VATA

VATA 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、電荷積分型前置増幅器 (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 (Fast Shaper) 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 (図 6.7) と、トリガシーケンス (図 6.8) を示す。

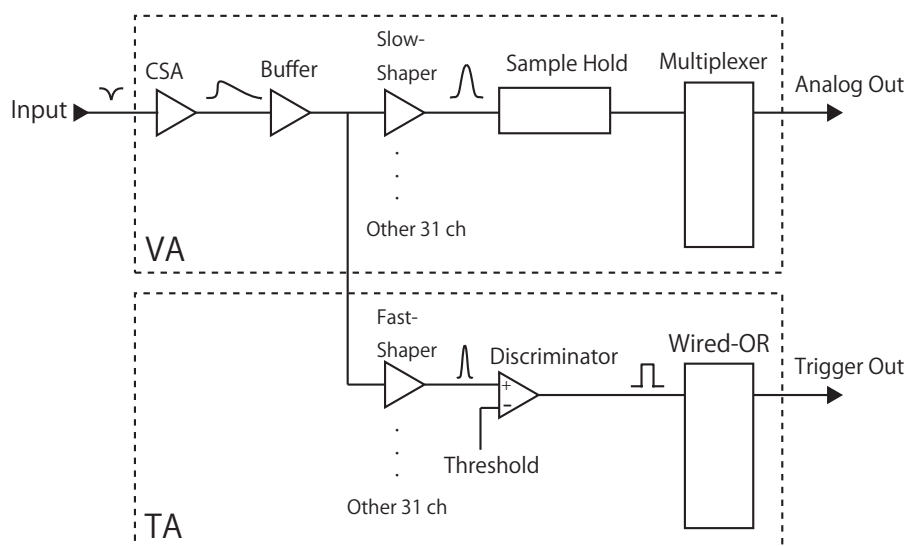


図 6.7: VATA のシステム図。CSA から出力された信号は、分割されて Slow と Fast の 2 つの整形アンプに入力される。TA 側 (Fast) ではトリガ信号が作られ、VA 側 (Slow) ではそのトリガ時間に合わせて、信号のサンプルホールドが行われる。

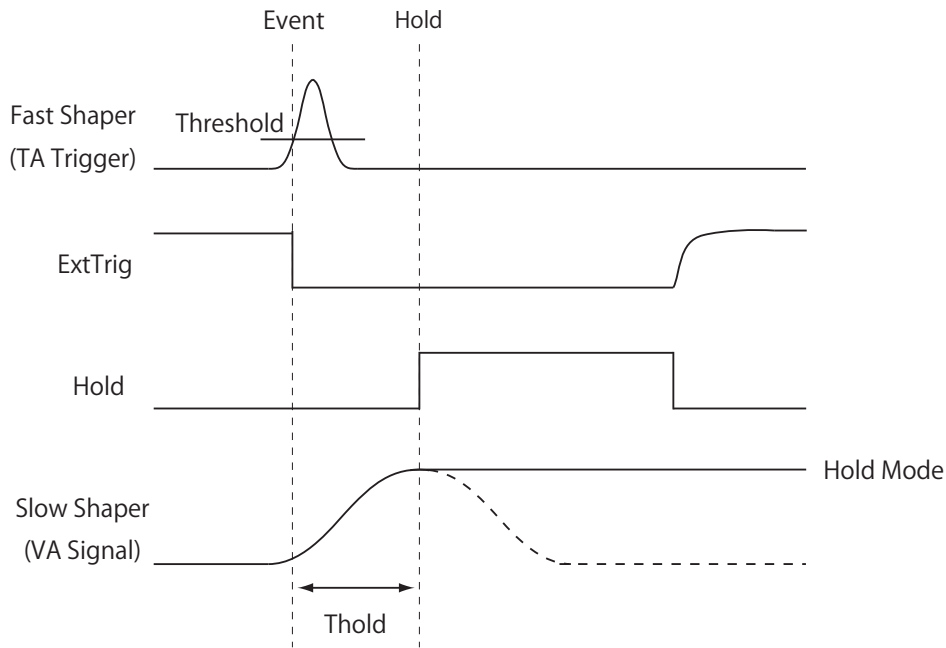


図 6.8: VATA のトリガシーケンス。まず、TA 側で Fast Shaper によって整形された信号からトリガ信号が作られる。トリガ信号から時間 T_{hold} だけ遅らせた Hold 信号が VA に入力され、Slow Shaper の出力電圧をホールドする。

TSUBAME 偏光計では、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。TSUBAME 偏光計では、APD-VATA 基板を 2 枚使用し、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-VATA 基板と呼ぶ。

IFC

APD-VATA、および PMT-VATA からのデジタル信号を統括する基板として、インターフェース基板 (IFC) がある。光子イベントは不定期にやってくるため、ロジックによる信号処理が必要になる。そのため、IFC には FPGA が搭載され、以下のことを行う。

- VATA のレジスタ書き込み (T_{hold} 、Threshold 等の設定書き込み)
- トリガー信号の論理演算処理

- ADC 制御
- 外部バスとのデータ通信

偏光計のトリガーロジック

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、主に動作試験やデバッグ、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 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つくった方が、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、バックグラウンドを落とす目的で、PMT と APD の同時イベントのみを計測する、特殊な測定モードを用意する。これを以後、「コインシデ

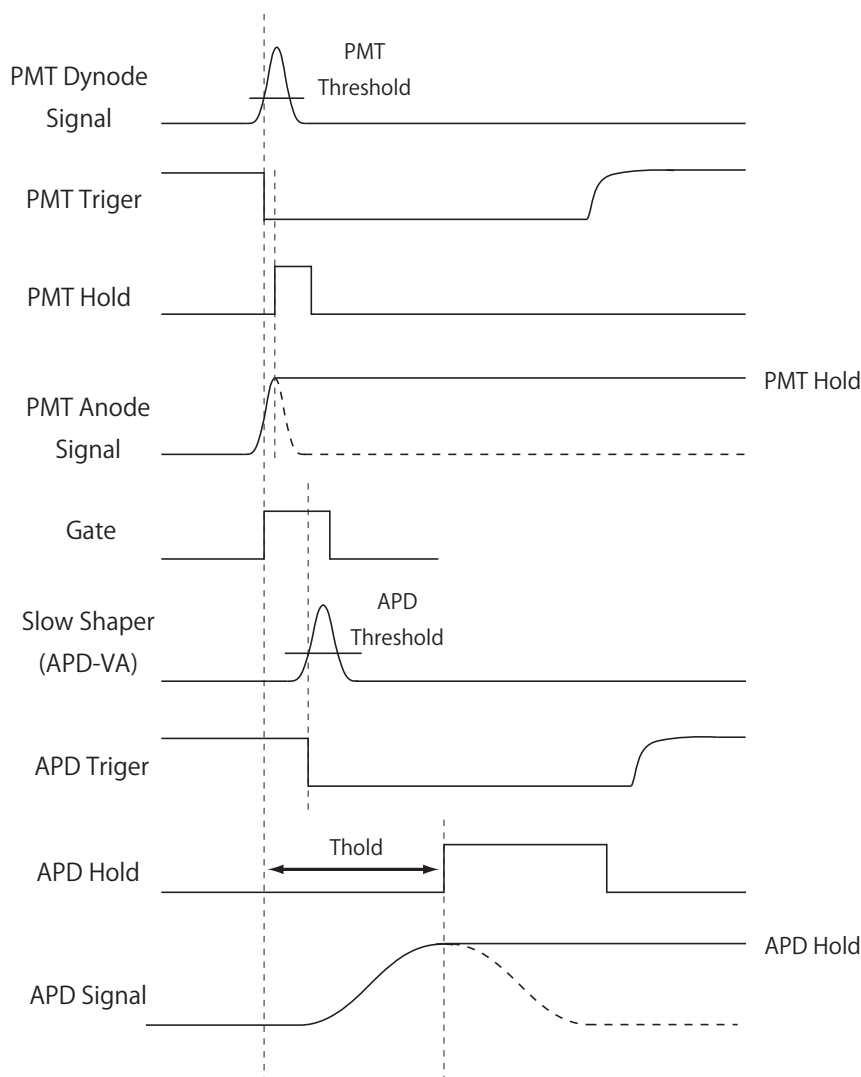


図 6.9: コインシデンス測定時のトリガシーケンス。最初に、シンチレータの減衰時定数の短い PMT のダイノード信号が入力され、トリガが立ち上がる。その時点から一定時間だけゲート信号が開き、この間に APD のトリガ信号が検知されると、コインシデンスイベントと判定する。

ンス測定」と呼ぶ。コインシデンス測定時のトリガシーケンスは図 6.9 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る。

6.4 TSUBAME 搭載用偏光計エンジニアリングモデル

榎本卒論 [18] で製作した偏光計プロトタイプを元に、2010 年から偏光計エンジニアリングモデル (EM) の製作を開始した。ここでは、HXCP EM の構造と、その特徴を述べる。EM の構造図は、図 6.2 に載せている。

6.4.1 プロトタイプからの変更点

- CsI(Tl) シンチレータ、APD の数を変更
CsI シンチレータ、および、APD は壁面 1 面につき 8 個設置する予定だったが、構造系からの HXCP サイズの縮小要求に応えるため、壁面 1 面につき 7 個に変更した。
- 構造体に工業用プラスチック (PEEK 樹脂) を使用
強度、質量、絶縁性などから、工業用プラスチックのポリエーテルエーテルケトン (PEEK) を採用した。プラスチックであるため、硬 X 線に対する阻止能が小さく、シンチレータの固定などに使用できる。
- ブリーダー回路とコネクタ変更基板を統合し、1 枚の基板に変更
プロトタイプでは、MAPMT と同サイズのブリーダー回路と、ブリーダー回路と PMT-VATA 基板の間のピンアサインを変更するコネクタ変更基板を搭載していたが、これらの回路を統合し、1 枚のブリーダー基板とした。
- APD 側の VATA を、VATA462 に変更
プロトタイプで使用していた VA32TA7 から VATA462 に変更したことで、S/N 比が大幅に改善し、飛躍的な感度向上を達成した。
- 高電圧モジュールを内蔵
APD、MAPMT にそれぞれ高電圧を供給する HV 電源基板を製作し、信号処理基板の下の部分に配置している。ただし、次章で述べる性能評価試験では、外部の高圧印加モジュールを使用した。
- 多層シールドを搭載
衛星軌道上では、天体からの放射以外に、バックグラウンドと成り得る宇宙 X 線背

景放射 (CXB) や、高エネルギー荷電粒子が存在する。これらによるバックグラウンドを低減するために、シンチレータの周囲に原子番号 Z が大きい物質 3 種類の薄板を配置する。EM でのシールドの厚さは、タングステンシート (タングステンとエラストマーの複合材料) 2 mm、銅 0.5 mm、錫 1.0 mm である。

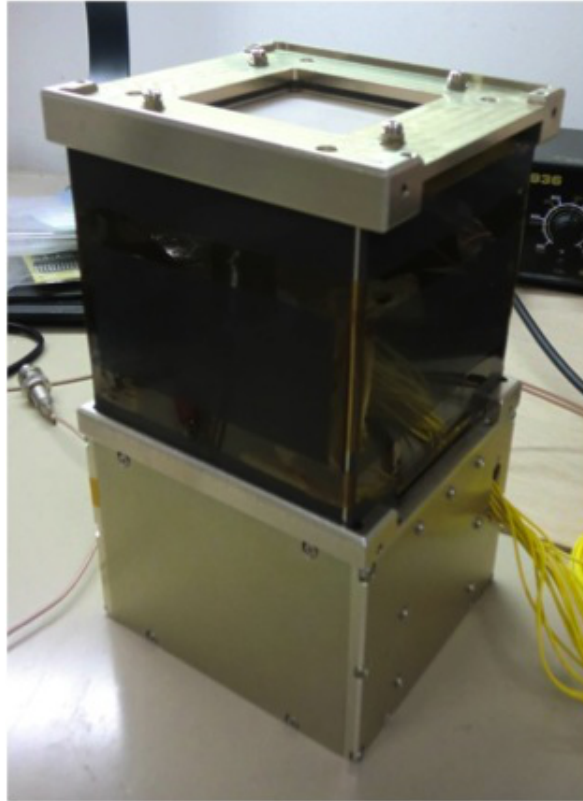


図 6.10: HXCP のエンジニアリングモデルの写真。図中の黒い壁面はタングステンシートであり、内部にシンチレータや検出器が入っている。検出器部の下側に VATA 基板や IFC 基板などが格納される。

第7章 偏光計エンジニアリングモデルの 偏光検出性能評価実験

2011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(PF)において、偏光計エンジニアリングモデルの偏光検出性能評価実験を実施した。本章では、性能評価実験のセットアップと、行った実験について述べる。データの解析、考察については、次章以降で述べる。

7.1 実験施設

高エネルギー加速器研究機構(以下、KEK)の放射光科学研究施設(以下、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)である。BL14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ゲ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 $89.7 \pm 0.6\%$ (50keV)であるという報告がある [13]。

7.2 セットアップ

全体のセットアップ

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3m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2個、X軸ステージを設置し、X軸ステージに取り付けた経緯台に偏光計を固定した。その他、ブース内には検出器に高圧を印加する高圧電源が入ったNIMビン、および回路基板に電源を供給する安定化電源を設置した。VMEラック、トリガ信号モニタ用のオシロスコープ、データ取得用PC、レートモニター用ビジュアルスケーラはブース外に設置し、ブース内とはLEMOケーブル、LANケーブルなどで信号をやり取りした。また、ブース内は空気が籠りやすいため、温度が上がってAPDの性能が大きく変化しないようにクーラーを設置し、排気はブース外に出ていくように誘導しながら常に稼働しておいた。これにより、ブース内の気温はおよそ25°Cに保たれていた。図7.1に、ブース内の様子を示す。

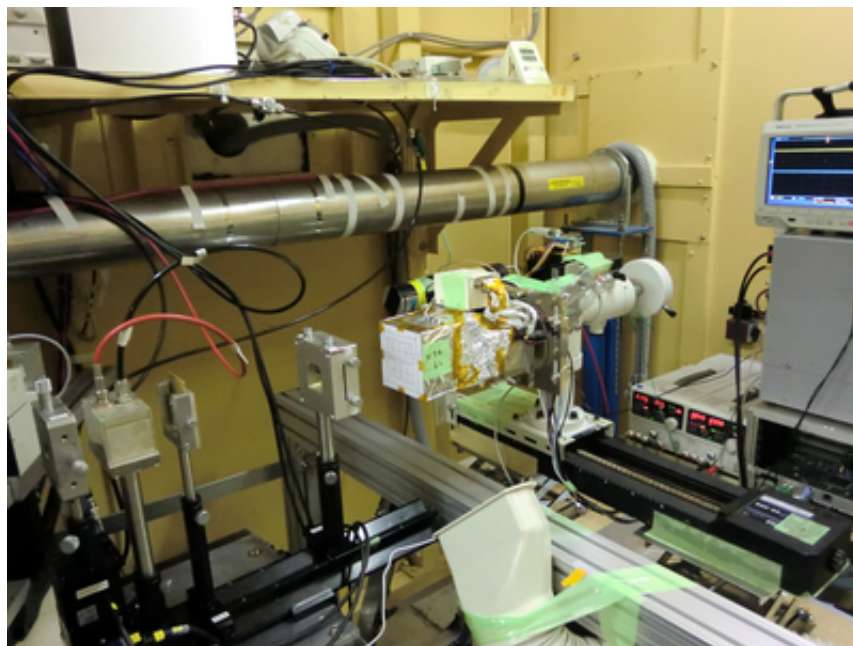


図 7.1: BL14A 実験ブース内の様子。左側にビームライン、中央奥に台座・ステージ・赤道儀・偏光計、その隣にNIMのラック、安定化電源、クーラーが置いてある。

今回の実験では、偏光計を回転させながら測定するため、回転出来る台座として経緯台を使用した。経緯台にはステップ信号供給用のマイコンとステッピングモーターを接続し、外部PCからコマンドを送ることで経緯台が回転するようにした。赤道儀はX軸ス

ステージに載っており、回転軸の X 方向の移動はこのステージを用いて行える。この X 軸ステージは GPIB(General Purpose Interface Bus) 通信を通じて遠隔操作が可能であり、X 方向の位置合わせやレートモニター用 PMT の移動がブース外から可能になっている。また、X 軸ステージは台座上に左右に並べた 2 台のラボジャッキに載せてあり、このステージのつまみを回すことで高さ、および、水平度の調整ができる。ステージ、および、偏光計の水平は、水平儀によってその都度確認した。

また、経緯台上での偏光計の固定は、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。偏光計の傍には、NIM のラックを置き、ここから APD および MAPMT に高圧電源を供給した。また、その上には安定化電源を置き、こちらは回路基板の電源供給に使用した。

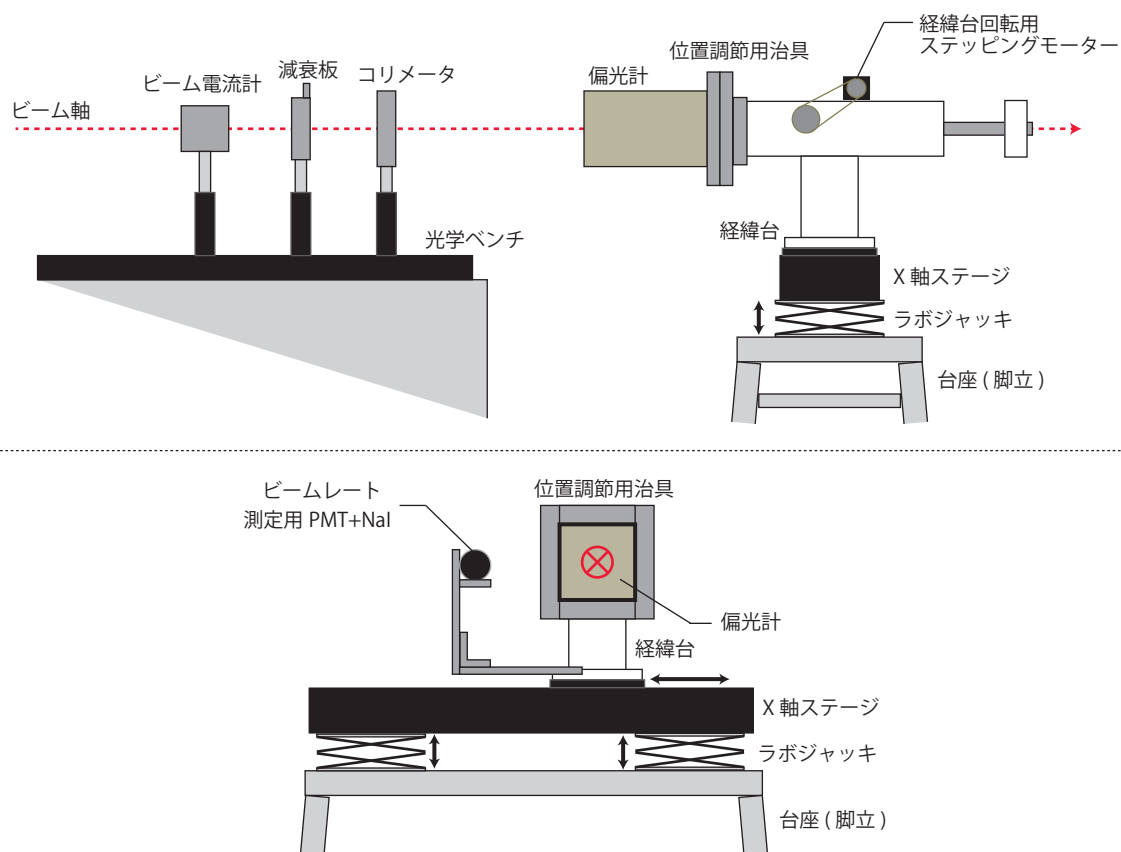


図 7.2: ビーム試験のセッティング。上図はビームラインを横から見た図、下図はビーム入射側から見た図である。

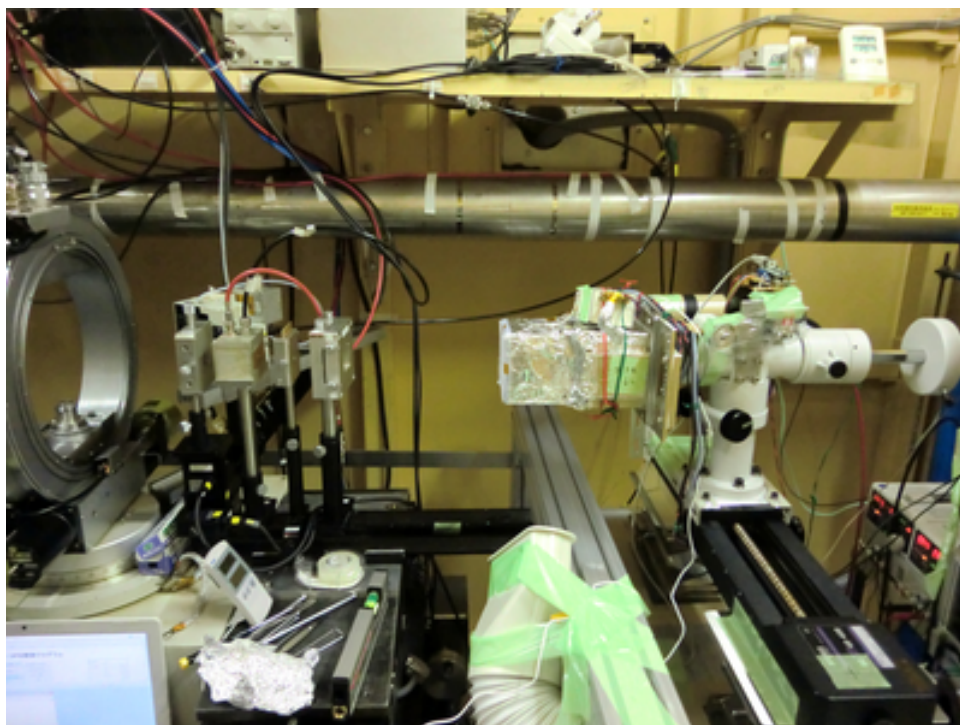


図 7.3: ステージ・経緯台に取り付けた偏光計の写真。IO 基板は小さな箱に入れ、筐体にくくりつけてある。ケーブルはあらかじめ経緯台に巻き付けてあり、偏光計が回転するにつれてほどけていくようにした。図では見え辛いですが偏光計の向こう側にレート測定用の PMT が設置してあり、X 線ビームを止めて入室することなく、X 軸ステージを動かすだけでレート測定が行えるようになっている。

ビームは2つのコリメータによって、直径 1mm 程度のビームとして照射される。コリメータ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、目測で行った。

回路セットアップ

図 7.4 に性能評価実験での回路セットアップを示す。

APD-VATA 基板を 2 枚使用し、1 枚の APD-VATA 基板で APD14 個の信号を処理した。MAPMT4 個はブリーダー回路を経由して PMT-VATA 基板と接続した。PMT のダイノード信号は PMT 単体測定時、およびコインシデンス測定時のトリガ信号として取り出し

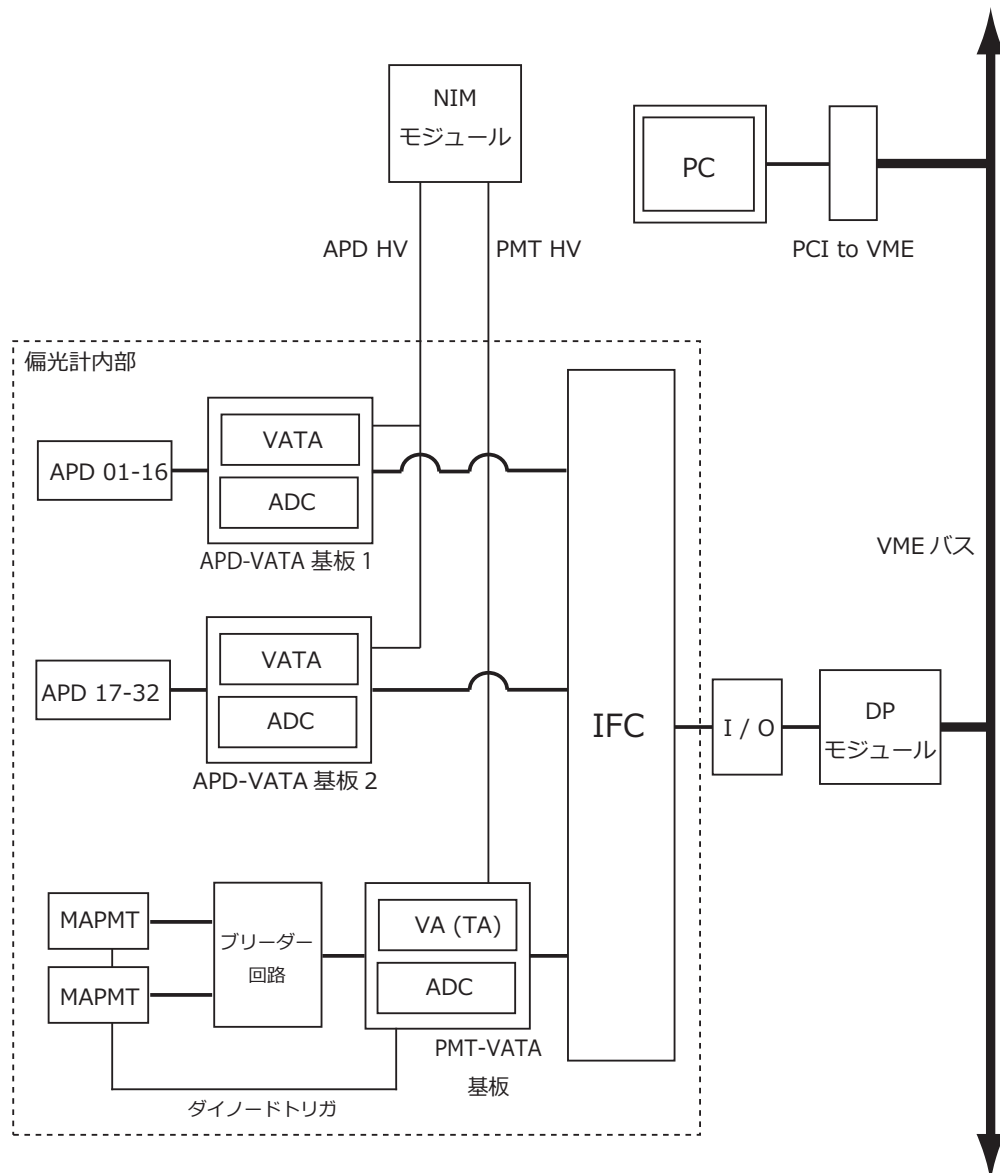


図 7.4: 性能評価実験 回路セットアップ

ていた。APD、PMT 共に、外部の NIM モジュールから VATA 基板を介して高電圧が印加された。VATA 基板はどちらも IFC に接続し、論理演算やサンプルホールドの設定は全て IFC 上で行った。今回の偏光計では、IFC 基板の出力をケーブルで出し、外付けの I/O 基板を介して入出力を行った。I/O は FPGA が搭載された VME-DP(クリアパルス製 80057C PMT-DataProcessor) に接続してある。我々が PC から実際に制御していたのは VME-DP までであり、それ以降 (I/O、IFC) は VME-DP 上の FPGA が全て制御していた。VME-DP は VME バスを介して Linux PC とデータ通信を行った。

7.3 実施した測定

この節では、実際に行った測定について説明する。実験中に生じたトラブルについては、付録で詳しく説明し、考察を行う。

シンチレータ配置

今回の実験では、シンチレータ、検出器ともにフライトモデルと同数使用し、実験を試みた。しかし、HV 供給部分の不具合により、APD0 側の VATA が使用不可能になったため、本実験では APD の片側のデータのみを解析に使用する。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。また、今回の実験では APD が半分しか使用できなかったため、データの半分は抜けていることになる。ただし、HXCP は軸対称であるため、 180° 回した測定値を足し合わせることで、データを補正することができる。そのため、赤道儀に偏光計を設置し、ビーム光軸に対して偏光計を回転させ、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した。図 7.5 に、本実験でのシンチレータ、および、検出器の配置を示す。

垂直入射

散乱体のプラスチックシンチレータ 1 ピクセルを狙ってビームを当て、 30° ずつ回転させて測定を行った。垂直入射実験は、2 段階に分けて行った。

1. エネルギーを 80 keV で固定・ピクセルを移動

光子のエネルギーを 80 keV に固定し、回転角 $0^\circ \sim 330^\circ$ の範囲を 30° 刻みで測定した。この測定を、対称性を考えたときの最少 10 ピクセル (図 7.5 中 MAPMT4 の 2, 5, 6, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16 チャンネル) で実施した。

2. エネルギーを 30, 40, 50, 80 keV と変化・ピクセルを固定

光子のエネルギーを 30, 40, 50, 80 keV と変化させ、同じピクセルへビームを入射してデータを取得した。実験時間の都合上、回転角 $0^\circ \sim 150^\circ$ の範囲を 30° 刻みで測定した。ただし、30 keV の測定を行うために、1. エネルギー固定の実験よりも APD の印加電圧を上げて実験している。

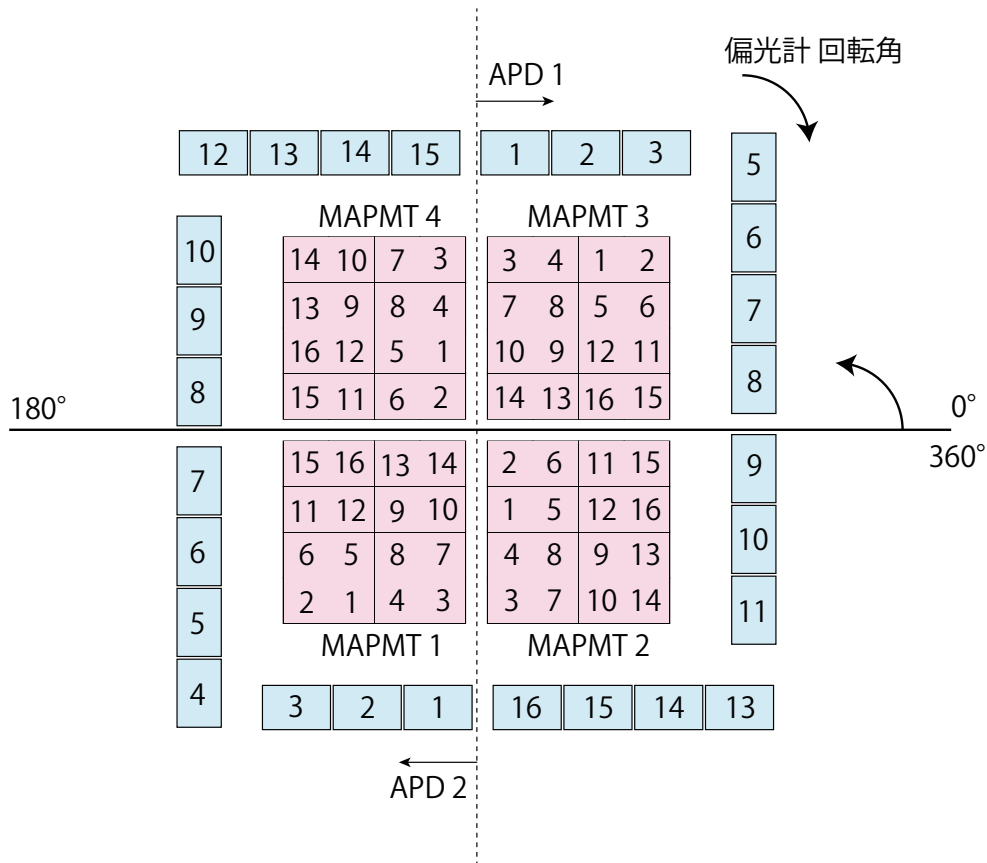


図 7.5: 偏光計のシンチレータ配置。桃色がプラスチックシンチレータ、水色が CsI シンチレータを表す。番号は散乱体・吸収体のチャンネル番号であり、この順番にデータが読み出される。この図の状態を偏光計の回転角 0° と定義した。また、この図のように散乱方位角を設定した。

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。これ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 10° の場合、 20° の場合、 30° の場合の、3 通り行った。

7.4 測定・結果

前節までに述べたセットアップ、実験内容で、ビーム照射を行った。各実験ごとに0°、180°の測定前にNaIシンチレータとPMTを用いてビームレートを測定した。また、各測定ごとに温度計の値を読み取り、記録してある。

データの解析、および結果については、次章以降で説明する。

第8章 性能評価実験 解析

この章では、性能評価実験のデータ解析の手順、およびその結果を述べる。

8.1 データ解析手順

本偏光計で得られるデータは、1 イベントごとに、MAPMT の波高値 64 ピクセル分、および APD の波高値 14 ピクセル分 (本来は 28 ピクセル分) である。これら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. ペDESTAL補正・ゲイン補正
2. 散乱・吸収位置決定
3. コンプトン散乱イベント選定
4. 角度計算・補正
5. 散乱方位角分布の作成

各手順について、垂直入射・エネルギー固定 (80 keV) のときに、MAPMT4 のチャンネル 2 に入射した際の偏光計回転角 0° でのデータを例にして、説明する。

8.1.1 ゲイン・ペDESTAL補正、エネルギー換算

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。

ゲイン補正

各 APD、および MAPMT の各チャンネルにはそれぞれ固有の増幅率がある。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解析上で補正を行う。

まず、較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を用いて、各チャンネルでの光電ピーク波高値を測定した。各チャンネルの波高値に係数をかけたときに、それら光電ピークがスペクトル上で同一チャンネルになるような係数を求め、それらの係数をゲイン補正係数とした。偏光計のデータ解析では、この係数を用いて各チャンネルのゲインを揃えている。今回の実験では、PMT のゲイン補正には ^{241}Am 線源を当てたデータ、APD のゲイン補正には ^{241}Am 線源を当てたデータと ^{133}Ba 線源を当てたデータを用いて、ゲイン補正係数を求めた。

エネルギー換算

APD および PMT で得られるのは、ADC の波高値である。そのため、以降の解析での理解を容易にするため、ADC の波高値をエネルギーに換算しておく。

ゲイン補正と同様に較正線源を使用し、光電ピークのエネルギーとスペクトル波高値の値から、ADC の波高値とエネルギーの対応関係を求め、これに従って ADC 波高値をエネルギーに換算する。今回の実験では、ゲイン補正に用いたデータを再使用し、エネルギー換算を行った。

8.1.2 コンプトン散乱イベント選定

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。そのため、カット条件を決め、コンプトン散乱イベントのみを取り出す必要がある。

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示す (図 8.1)。

さらに、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、MAPMT、および、APD で検出されるべきエネルギー範囲を計算で求める。散乱光子、

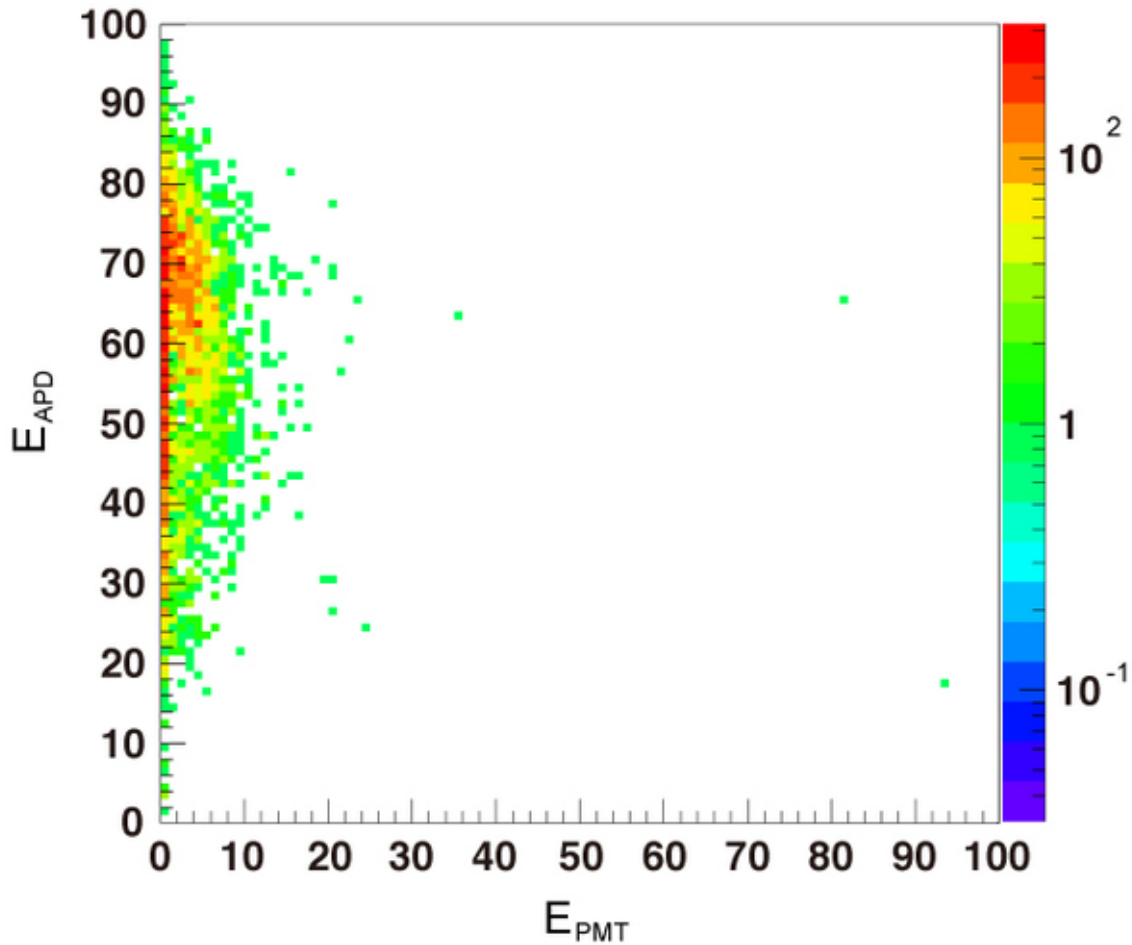


図 8.1: 80 keV の X 線ビームを偏光計 (回転角 0°) に垂直入射したときの全イベントのエネルギーマップ。横軸は PMT で検出したエネルギー (E_{PMT})、縦軸は APD で検出したエネルギー E_{APD} である。 $E_{APD}=60\sim 80$ keV あたりの領域が、目的のコムプトン散乱イベントだが、それ以外にも $E_{PMT}=0\sim 2$ keV 付近の縦に伸びた領域が存在する。

および、反跳電子のエネルギーは、入射光子のエネルギーと散乱方向によって決まるが、入射光子のエネルギーは単一であるから、散乱方向、すなわち、光子の散乱・吸収位置で決まる。散乱光子の取り得るエネルギー範囲が一番大きくなるのは、散乱ピクセル (プラスチックシンチレータ) と吸収ピクセル (CsI シンチレータ) が一番近い場合である。両シンチレータ間の距離を本偏光計のシンチレータ間の最短距離 9.2 mm とし、各入射光子のエネルギーに対し、コムプトン散乱が起こった際の散乱光子と反跳電子のエネルギーの最大・最小値を求めた (図 8.2)。結果を表 8.1 に示す。

このとき、実際に検出器で検出されるエネルギーは、その検出器のエネルギー分解能に応じて揺らぐ。エネルギー分解能は検出光子のエネルギーやノイズレベルによって変化する

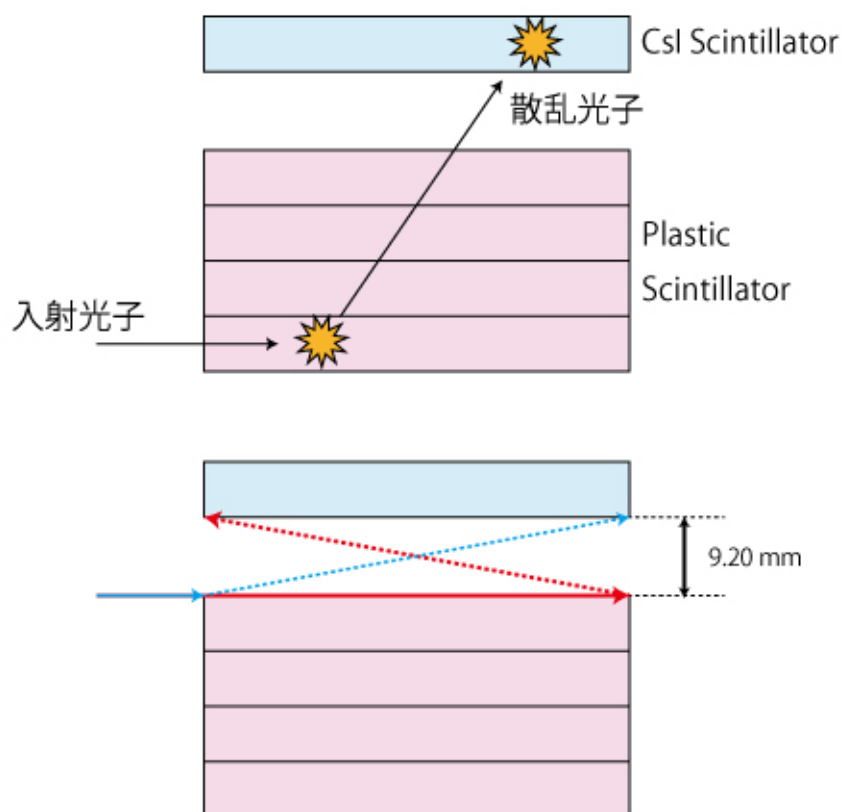


図 8.2: (上図) コンプトン散乱の模式図。コンプトン散乱時、入射光子のエネルギーは散乱光子と反跳電子に分配されるが、その割合は散乱光子の散乱方向で決まる。本偏光計で散乱光子のエネルギーが最大・最小になるのは、CsI シンチレータに最も近いプラスチックシンチレータで散乱した場合であり、そのときのシンチレータ間の距離は 9.2 mm である。散乱光子のエネルギーが最大になるのは散乱角 10.4° のとき (水色の矢印)、最小になるのは散乱角 169.6° のとき (赤色の矢印) である。

るので、参考のために較正線源を照射したデータを用いて、実験でのエネルギーに近いエネルギー領域でのエネルギー分解能を求めた。結果を表 8.2 に示す。

実際には、各チャンネルごとに分解能は異なり、APD の分解能は温度によっても変動するため、エネルギーのカット基準を決めることは難しい。今回の解析では、エネルギーの揺らぎ幅を 15% と一律に定め、イベントカットを行った。このイベントカット基準の是非に関しては、後に考察する。また、反跳電子の最小エネルギーは $0.03\sim 0.21$ keV と非常に小さいが、データ測定時点で MAPMT のエネルギースレッシュホールドを 2keV 程度に設定しており、それほど小さいエネルギーのイベントがあるとは考えにくい。そのため、MAPMT 側の低エネルギー側のイベントカット基準は 2.0 keV とした。

表 8.1: 入射光子のエネルギーに対する、反跳電子と散乱光子の最小・最大エネルギー。単位は全て keV である。反跳電子のエネルギーは MAPMT で、散乱光子のエネルギーは APD で、それぞれ観測される。

	80 keV	60 keV	40 keV	30 keV
反跳電子 最大エネルギー	18.96	11.33	5.38	3.13
反跳電子 最小エネルギー	0.21	0.12	0.05	0.03
散乱光子 最大エネルギー	79.80	59.89	39.95	29.97
散乱光子 最小エネルギー	61.04	48.67	34.62	26.87

表 8.2: APD+CsI シンチレータ、MAPMT+プラスチックシンチレータのエネルギー分解能。校正線源を当てスペクトルを測定し、光電吸収ピークの幅をガウス関数でフィッティングすることで、標準偏差 σ とエネルギー分解能を求めた。APD の標準偏差は 14 チャンネル分の平均値、PMT は 64 チャンネル分の平均値を用いている。

検出器	校正線源	ピークエネルギー	標準偏差 σ	エネルギー分解能
APD	^{241}Am	59.5 keV	8.3 keV	32.8 %
APD	^{133}Ba	81 keV	10.4 keV	30.2 %
PMT	^{241}Am	59.5 keV	13.4 keV	53.0 %

最終的に採用したカットイベント基準を表 8.3 に示す。

表 8.3: 本解析でのイベントカット基準。コンプトン散乱での理論値に対し、高エネルギー側・低エネルギー側に 15% の揺らぎが存在するとして、計算した。ただし、PMT の低エネルギー側のカット基準は、測定時のスレッシュホールド 2.0 keV で統一している。

	80 keV	60 keV	40 keV	30 keV
E_{PMT} Max	21.80	13.03	6.18	3.60
E_{PMT} Min	2.0	2.0	2.0	2.0
E_{APD} Max	91.76	68.87	45.94	34.47
E_{APD} Min	51.89	41.37	29.43	22.84

条件によるカットの結果

図8.1から、以上のエネルギーカット条件を適用してコンプトン散乱イベントを取り出してプロットすると、図8.3のようになる。

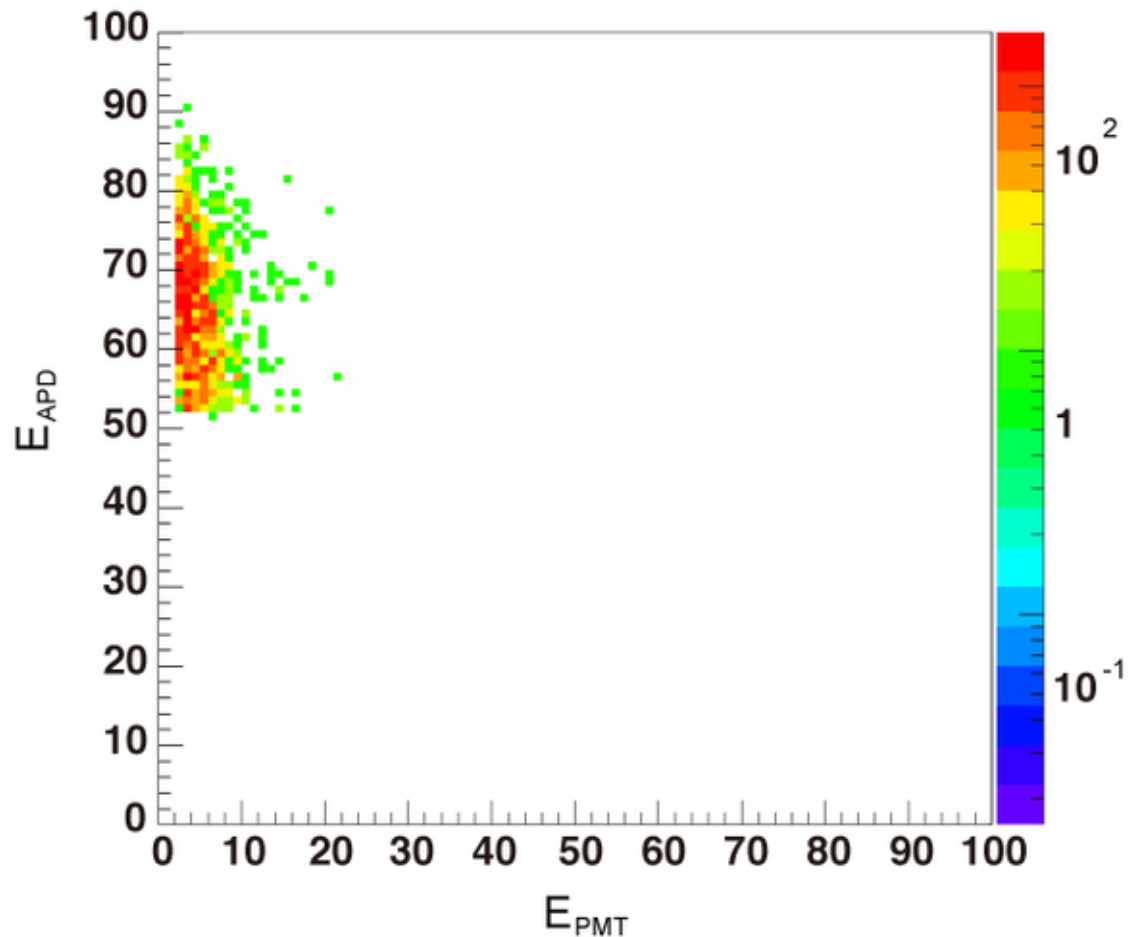


図 8.3: 条件でカットした後のエネルギー マップ。ノイズ成分や光電吸収イベントが取り除かれ、目的のコンプトン散乱イベントが残っていることがわかる。

以後の解析では、これらのコンプトンイベントのみを扱うこととする。

8.1.3 散乱・吸収位置決定

検出信号の大きさを比較して、散乱体での散乱位置(ピクセル)、および吸収体での吸収位置(ピクセル)を決定する。

散乱位置・吸収位置の決定

PMT64ch、APD14ch それぞれの中で、波高値が最大のピクセルを選び出し、そのピクセルをコンプトン散乱、または、光電吸収が起こったチャンネルと判定する。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出来ない。そこで、ROOT ソフトウェアの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位置・吸収位置と定めることとする。具体的には、PMT 側は $6.5 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm}$ 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 の吸収位置の範囲をシンチレータ 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も、後に考察する。

8.1.4 角度計算

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が求められる。今回の実験では、偏光計の回転角が 0° のときの水平方向を、散乱角の 0° と定義する (図 7.5 参照)。

8.1.5 散乱方位角分布の作成

以上の手順を用いて、各イベントでの光子の散乱方位角が求まった。これらを集計して、横軸を散乱方位角 [deg]、縦軸をカウントにしたヒストグラムをつくり、散乱角によるカウントの変調の様子を調べる。ただし、今回の実験では APD-VATA 基板の 1 枚が正常に動作しなかったため、APD14 個のデータは使用できない。そのため、偏光計を 30° ずつ回転させながら、 180° 領域の散乱方位角分布を作成し、1 周分のカーブを足し合わせることで、 360° の散乱方位角分布を求めた。

ヒストグラムの作成

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をつくる。このヒストグラムは、横軸の範囲を $0^\circ \sim 360^\circ$ とし、ビン幅を 15° とした。また、このヒストグラム作成時に、データ測定時のビームレートと測定時間について規格化している。

散乱方位角分布 結果

まず、偏光計を 30° ずつ回転させながら測定したときの、各偏光計回転角での、散乱方位角分布を示す (図 8.4~8.15)。それぞれ、横軸が散乱方位角 [deg]、縦軸がカウントである。全ての散乱方位角分布は、測定時間 300 秒でカウントを規格化してある。

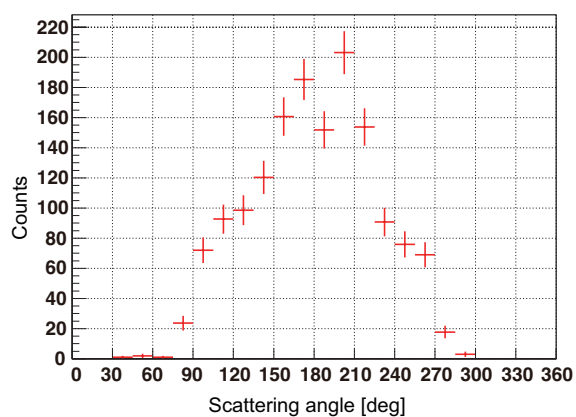


図 8.4: 回転角 0°

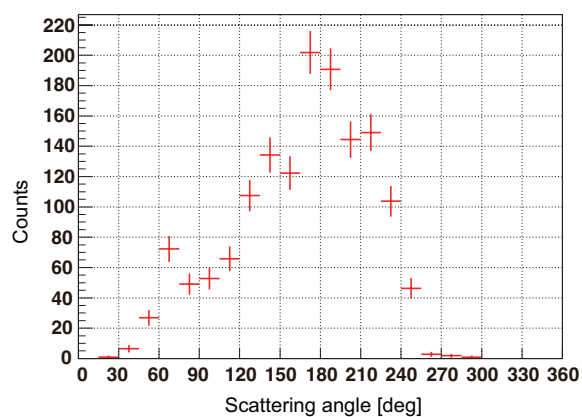


図 8.5: 回転角 30°

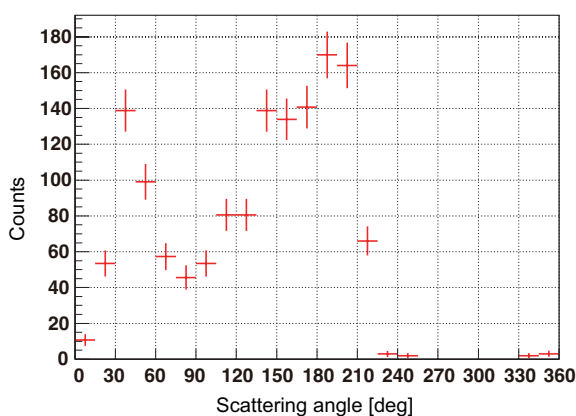


図 8.6: 回転角 60°

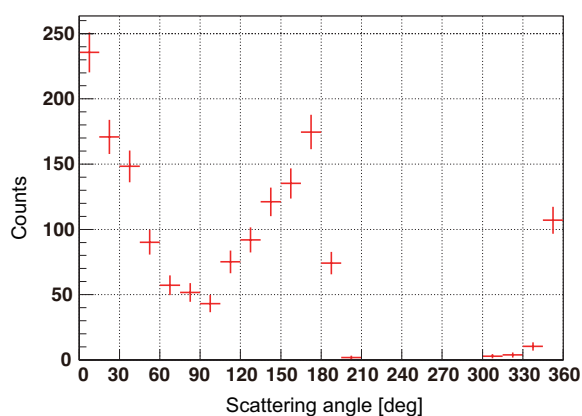


図 8.7: 回転角 90°

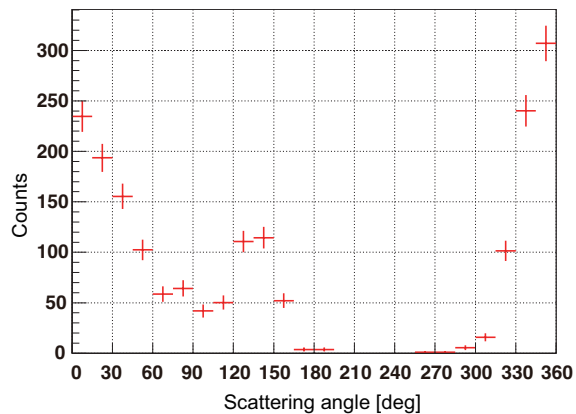


図 8.8: 回転角 120°

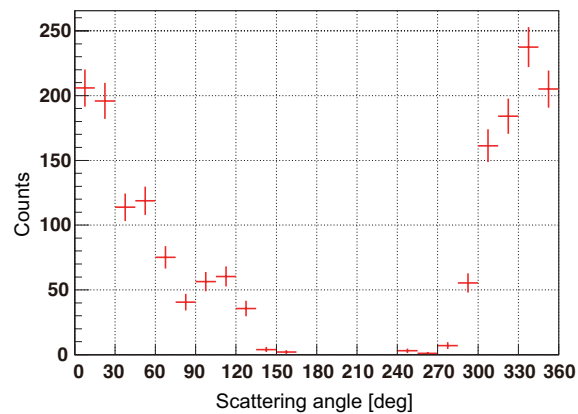


図 8.9: 回転角 150°

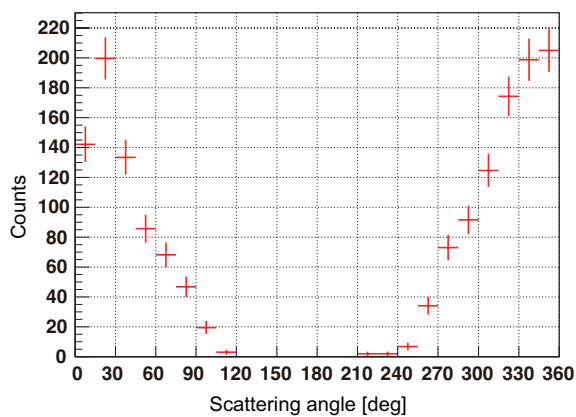


図 8.10: 回転角 180°

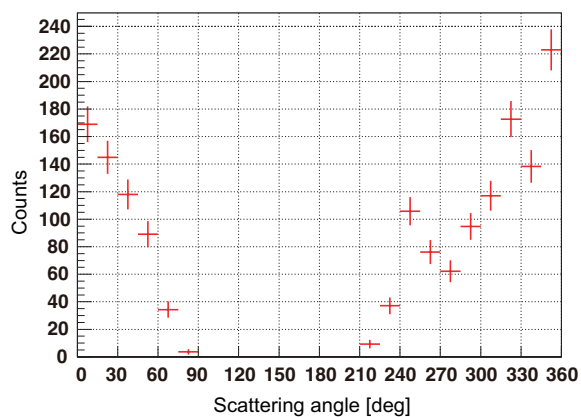


図 8.11: 回転角 210°

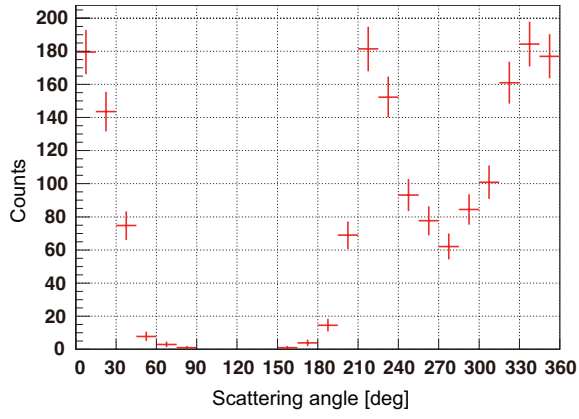


図 8.12: 回転角 240°

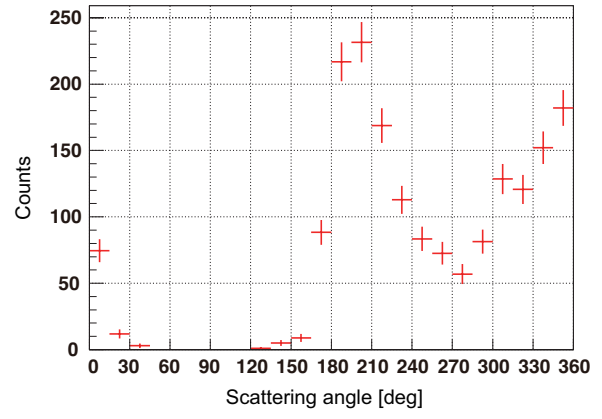


図 8.13: 回転角 270°

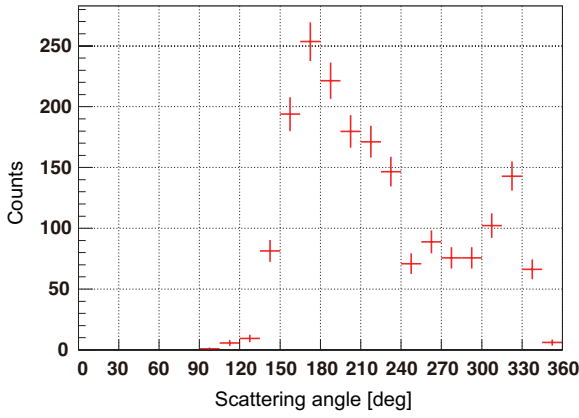


図 8.14: 回転角 300°

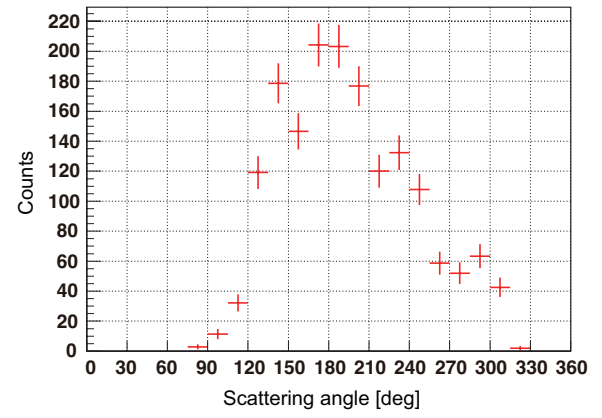


図 8.15: 回転角 330°

本来、APD 検出器が全て動作していれば、全周分のデータが取得でき、図 8.16 のような散乱方位角分布が取得できるはずである。しかし、今回の実験では、半周分のデータが欠けているため、APD が無い角度部分だけが抜け落ちていることが、図 8.4 ~ 8.15 でわかる。

一方で、これらの分布はもともと同一の散乱方位角分布からそれぞれ別の領域が抜けた図であり、足し合わせることができることがわかる。これらの分布を足し合わせた散乱方位角分布を、図 8.16 に示す。

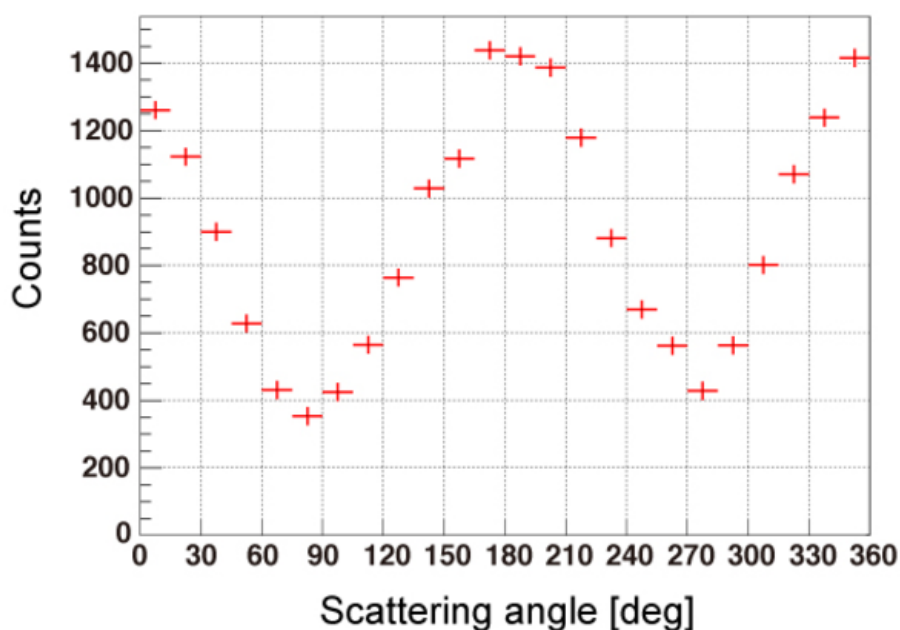


図 8.16: 全角度のデータを足し合わせた散乱方位角分布。散乱方位角によるカウントの変調が現れていることがわかる。

今、水平方向を 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° 方向に散乱しやすく、 90° 方向には散乱しにくい。したがって、図 8.16 から、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。

8.2 結果・考察

本節では、プロトタイプの性能評価 [18] で行えなかった、エネルギーに対する偏光検出性能に注目して考察を行う。

8.2.1 入射光子のエネルギー変化

入射光子のエネルギーを 80, 60, 40, 30 keV と変化させて、それぞれの場合での散乱方位角分布を作成した。ただし、ビーム時間の都合上、偏光計の回転角が 0, 30, 60, 90, 120, 150° の場合しか測定していない。そのため、これらの回転角での散乱方位角分布を足し合わせた分布を作成した後、0-15 deg のビンと 180-195 deg のビン、15-30 deg のビンと 195-210 deg のビン、というように、位相が 180 deg ずれた 2 ビンの値を平均し、平均値をそれら 2 ビンに詰め直した散乱方位角分布 (以後、「位相ずらし散乱方位角分布」と呼ぶ) を作った。このような方法が取れるのは、偏光光子の散乱角度分布が偏光方向 (いまは 90, 270°) に対して対称性を持つからである。また、この手法を採ることで、1 ピクセルのみに入射したことによる非対称性を打ち消すこともできる。以下に、回転角 0-150° のデータから作った散乱方位角分布と、位相をずらして足し合わせた散乱方位角分布を示す。全てのデータは、ビームレートと測定時間で規格化してある。

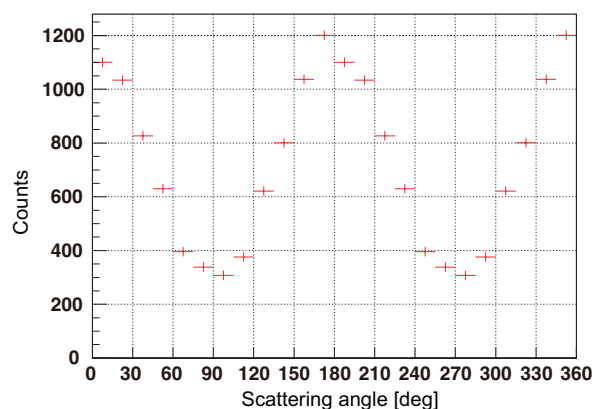
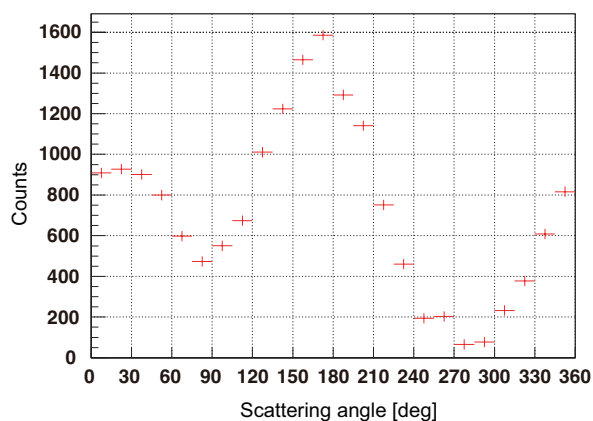


図 8.17: 入射光子 80keV での散乱方位角分布 図 8.18: 図 8.17 の位相ずらし散乱方位角分布

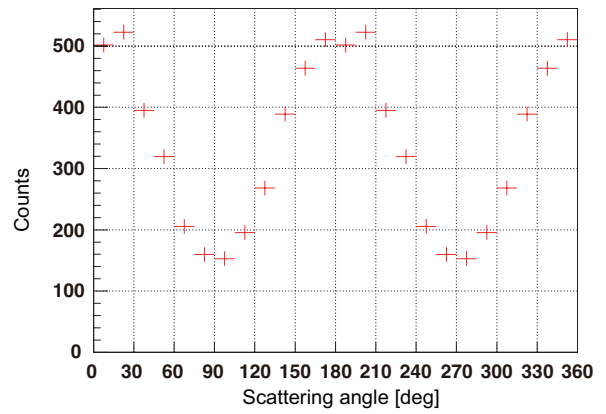
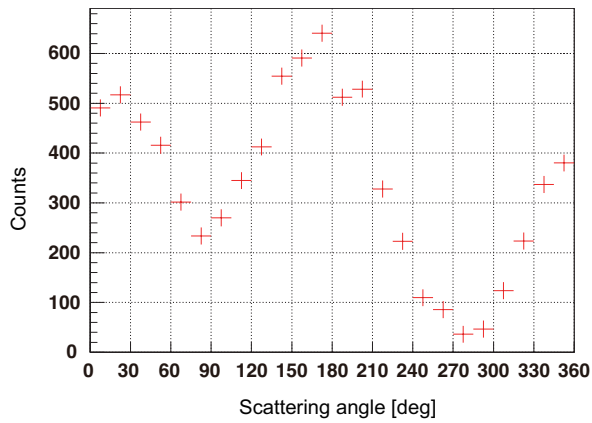


図 8.19: 入射光子 60keV での散乱方位角分布

図 8.20: 図 8.19 の位相ずらし散乱方位角分布

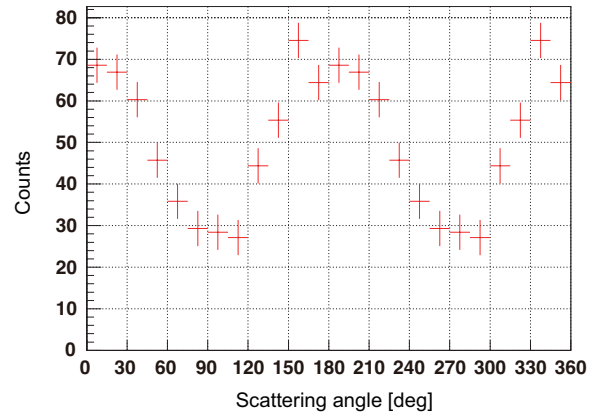
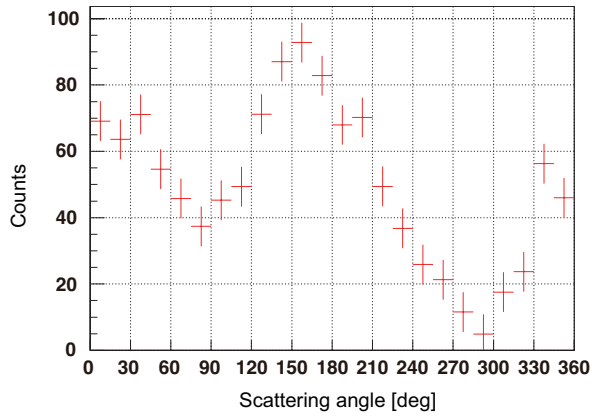


図 8.21: 入射光子 40keV での散乱方位角分布

図 8.22: 図 8.21 の位相ずらし散乱方位角分布

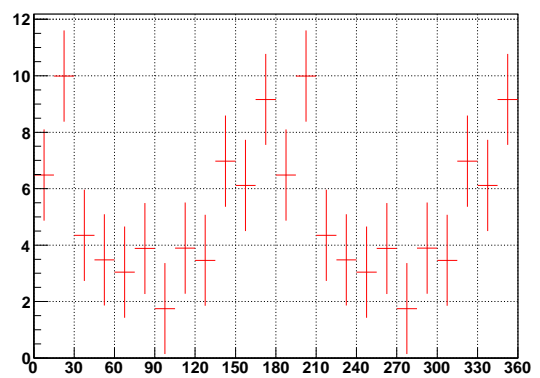
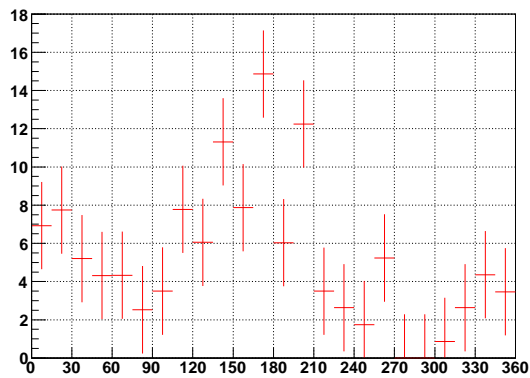


図 8.23: 入射光子 30keV での散乱方位角分布

図 8.24: 図 8.23 を位相ずらし散乱方位角分布

これらの位相ずらし散乱方位角分布を用いて、偏光計の性能を評価する値の1つである Q 値を見積もる。 A, B, θ_0 を変数として、散乱方位角分布を正弦関数 $f(\theta) = A \cos 2(\theta - \theta_0) + B$ でフィッティングすると、フィットパラメータから、 Q 値も求められる。また、仮にビームの偏光度を 90% とすると、モジュレーションファクター (以下、MF) が求まる。フィットパラメータ、 Q 値、および、MF は、表 8.4 のようになった。

表 8.4: 散乱方位角分布を正弦関数でフィッティングした結果

エネルギー	A	B	θ_0	Q [%]	MF [%]	reduced χ^2
80 keV	435.9 ± 15.4	722.3 ± 13.9	90.3 ± 1.0	60.3 ± 2.3	67.1 ± 2.3	3.06
60 keV	190.9 ± 10.4	340.4 ± 7.4	92.6 ± 1.6	56.1 ± 3.3	62.3 ± 3.7	1.84
40 keV	19.3 ± 3.4	43.2 ± 2.4	91.8 ± 5.1	44.6 ± 8.3	49.6 ± 9.2	1.02
30 keV	2.9 ± 1.4	5.2 ± 1.0	89.1 ± 13.9	55.3 ± 28.8	61.5 ± 32.0	0.77

8.2.2 考察

低エネルギーでの偏光観測

以上の結果から、30-80 keV での偏光観測が可能であることがわかった。30 keV の場合は、イベント数が少なく、他のエネルギー領域の結果と比べて Q 値の誤差が大きい。これには、2つの理由が考えられる。

1. 30 keV の光子がプラスチックシンチレータ内でコンプトン散乱を起こす際に、反跳電子が得るエネルギーが最大でも 3.1 keV しか無いから。この場合、MAPMT では 1 光電子程度のイベントを検出しなければならず、増幅率やノイズ、スレッシュホルドの設定を厳密に行わないと観測できない。
2. 80 keV などの場合と比べ、散乱光子がプラスチックシンチレータ内で光電吸収を起こす割合が高くなって来るから。散乱光子がプラスチックシンチレータ内で吸収されると、コインシデンスイベントとして検出できなくなってしまう。

これらの理由により、コインシデンスイベントが少なくなり、イベント数が減少すると考えられる。

シミュレーションとの比較

結果を、簡易的にだが、シミュレーションと比較する。過去に行われたシミュレーションで、入射光子のエネルギーと MF の関係が計算されている [16]。今回の 4 種類の結果を、過去のシミュレーション結果と照らし合わせたものを図 8.25 に示す。

今回の実験では、X 線ビームをある 1 ピクセルに入射させたため、全ピクセルに X 線を一様照射したシミュレーション結果よりも、MF が大きく算出される。また、30, 40 keV の結果は誤差が大きく、正確な MF が求められない。しかし、グラフの形はエラーの範囲内で一致しているように見える。今後、ビームを一点に入射した場合のシミュレーションを行い、結果を検証する予定である。

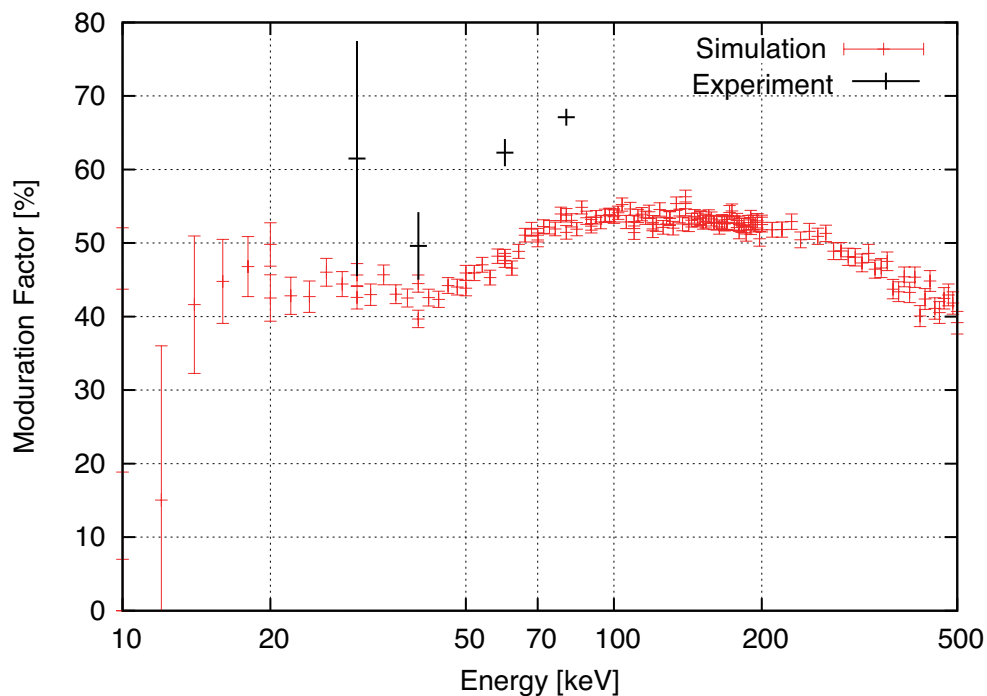


図 8.25: 戸泉修論 [16] で行われた MF のエネルギー依存性のグラフに、今回の結果を加えたもの。横軸は入射光子のエネルギー [keV]、縦軸は MF [%] である。赤い点が過去のシミュレーション結果、黒い点が今回の実験結果を示す。

8.3 今後の要解析項目

今後のエンジニアリングモデル・フライトモデルの性能評価で行うべき解析項目についてまとめる。特にエンジニアリングモデルに関しては、今回のデータ解析では検証できな

かった部分が多いため、早急に行いフライトモデル開発に活かしたい。

シミュレーションとの比較

今回の試験を模擬した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とを比較する。シミュレーション結果と実験結果とが良く合うことを確認する。

光子一様照射の場合の偏光検出性能の推定

今回の試験では、X線ビームを1ピクセルのみ入射させていたので、偏光計全体に光子が入射する実際のGRB観測とは状況が異なる。そのため、偏光計に一様にX線が入射した場合についてシミュレーションを行い、偏光計全体でのモジュレーションファクターを推定する。

レスポンスの測定

入射光子が偏光計の光軸とはずれた角度で入射すると、偏光検出性能が下がることがわかっている。較正線源などを用いて偏光計の斜め方向から光子を入射させ、レスポンスなどが入射角度がどのように変化するかを測定する。

検出器設定値の微調整

考察でも述べたように、30 keVで偏光を観測するためには、1光電子程度のイベントを検出できるように、増幅率やスレッシュホールドを調整しなければならない。そのため、厳密に測定を行い、最適なパラメータの洗い出しが必要になる。

8.4 まとめ

KEK-PFの偏光X線ビームを用いて、偏光計エンジニアリングモデルの性能評価を行った。これにより、30 keVのエネルギー領域で偏光を観測可能であることが確認できた。今後は、シミュレーションとの比較を中心に解析を進め、フライトモデルの開発と性能評価に活かしていくつもりである。

第9章 TSUBAME理学系 CPUソフトウェアの開発

9.1 CPU基板 ハードウェア構成

理学系のCPU基板の主な機能は、CPUを組み込んだFPGA(以後、CPU-FPGAと表記する)、CPUのプログラムを格納するROM、プログラムやデータを格納するRAMにより実現される。これらの構成や回路設計、FPGAロジックの開発については、株式会社クリアパルスに委託している。

9.1.1 CPU, FPGA

理学系のCPUには、FPGA(Field Programmable Gate Array)に組み込んだcore8051ロジックを使用する。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。使用したFPGAはACTEL社のA54SX72A PQ208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、FPGAに書き込むことが必要である。理学系のCPU-FPGAには、Core8051ロジックをベースにして、電源操作やSPI通信用のSFR(Special Function Register)を追加した特別なコアが書き込まれており、クロック4MHzで動作する。

9.1.2 ROM, SRAM

ROM

理学系CPU基板では、CPUの動作プログラムはROM(Read Only Memory)に書き込まれ、それを読み込んでCPUが動作する。EMのCPU基板では、ROMにMR0A08BYS35(EverSpin Technologies)というMRAM(Magnetoresistive Random Access Memory)を使用する。ただし、MRAMが外部磁気に弱く、内部情報が読み出せなくなる可能性があるため、フライトモデルではFRAM(Ferroelectric Random Access Memory)に置き換える予定である。

CPU 基板に電圧が供給されると、CPU は同基板上の ROM に記憶されたソフトウェアに従って動作を開始する。しかし、この ROM は民生品であり、宇宙放射線による影響 (Single Event Error) を受ける可能性がある。そのため、TSUBAME ではプログラムコピーという手法を用いる。TSUBAME では、CPU の動作プログラムを ROM から放射線耐性のある SRAM (Static Random Access Memory) にコピーした後、ROM の電源を OFF にする。その後は、動作プログラムを SRAM から読み出していき、CPU を動作させるという手法である。これにより、ROM の電源 ON である時間が最小限になり、SEE の起こる可能性を最小限に抑えることが出来る。

SRAM

理学系 CPU 基板では、容量 128 kByte の SRAM の記憶領域を、プログラムコピーに用いるプログラム領域 64 kByte と、データを保存するデータ領域 64 kByte に分けて使用する。プログラム領域には ROM からコピーされた CPU の動作プログラムが書き込まれ、CPU は SRAM のプログラム領域のプログラムにより動作する。データ領域にはプログラム上での変数や、取得したデータなどを格納できる。

9.2 CPU ソフトウェアの開発方法

9.2.1 プログラム書き込み

CPU は ROM 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、ROM に書き込むまでの流れを簡単に説明する。

言語と開発環境

理学系の CPU ソフトウェア開発には、SDCC というマイクロプロセッサ用の C コンパイラと、アセンブラやリンカを含む GPUTILS というパッケージ群を用いる。SDCC はもともと 8051 系マイコンをターゲットとして開発されたフリーのコンパイラであり、マイコンの動作を C 言語を使って表現できるため開発をスムーズに行うことができる点、サンプルコードを比較的容易に入手できる点が魅力である。SDCC で生成されたアセンブリ言語のソースコードは、GPUTILS に含まれる `gplink` によってリンクされ、`gpasm` によって HEX ファイルという特殊なフォーマットのファイルに変換される。

C言語で書いたソースファイルから、書き込み用のファイルを生成するまでの手順を簡単に説明する。

1. C言語によるプログラム記述

C言語により、CPUの動作を記述する。変数の宣言や値の代入など、通常のCプログラミングの感覚で記述することが出来る。また、通常のCプログラム開発と同様に、複数のソースファイルやヘッダファイルを作成し、後に分割コンパイルすることが可能である。ただし、変数領域の確保場所の指定や、割り込み関数(後に説明する)用の記述など、マイコン独特の仕様も存在する。特に、変数のサイズが通常のCプログラムとは異なる点には注意が必要である。

2. コンパイル、アセンブル、リンク

C言語のソースファイルを、SDCCを用いてアセンブリ言語のソースコードに変換する。このとき、オプションを設定することで、変数領域確保場所の指定や、内部RAMのサイズ指定などが行える。その後、GPUTILSを用いてHEXファイルという書き込み用のファイルを生成する。ソースファイルを分割していた場合はそれぞれコンパイルを行い、オブジェクトファイルとリンクファイルを作っておき、最後にリンクを行う必要がある。

3. HEXファイルの変換

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。フォーマットの詳細については省くが、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. ROMへのプログラム書き込み

TSUBAMEのCPU基板では、プログラム書き込み用に作られたシリアルポートを利用してROMへの書き込みを行う。CPU-FPGAの電源をONにすると、FPGAは512 μ secだけ待機する。その待機中に書き込み用ポートに書き込みコマンド(0x11)が送られてくると、FPGAはそれ以後のデータを取得し、ROMへの書き込み動作を行う。512 μ sec以上データが送られてこない場合、タイムアウトしてCPUが起動する。

これらの仕様により、書き込み手順は以下のようになる。

- (a) 電源投入後すぐにタイムアウトしてしまうのを防ぐため、電源投入前から連続して sync code(0xaa) を送り続ける。
- (b) 電源 ON を確認後、書き込みコマンドを送る。一度に書き込めるデータ量は 256 Byte までで、指定出来る書き込み先のアドレスは 0x0000 ~ 0x7fff である。このとき、書き込みコマンドの構成は表 9.1 のようになる。例として、アドレス 0x1234 から 128 バイト書き込む場合のコマンドを示す。

データ概要	データ内容
ROM 書き込みコマンド	0x11
書き込み開始アドレス上位バイト	0x12
書き込み開始アドレス下位バイト	0x33
書き込むデータ数 - 1	0x7f
書き込むデータ 1byte 目	0x??
書き込むデータ 2byte 目	0x??
以後、データが続く	⋮

表 9.1: ROM 書き込みコマンドの例。アドレス 0x1234 から 128 バイト書き込む場合のコマンドはこのようになる。

- (c) 次の書き込みコマンドを送るまで、再び sync code(0xaa) を送り続ける。書き込みが終了した場合は、何も送らなくても良い。
- (d) 最後のコマンドが届いてから、512 μ sec 以上経過すると、自動的に CPU が起動し、ROM に書き込まれたプログラムを実行し始める。

9.3 CPU の機能

理学系 CPU の中でも、重要な 2 つの機能について述べる。

SFR

SFR(Special Function Register) とは 8051 マイコンの特定の機能をコントロールするメモリの特殊な領域である。CPU のプログラムでは SFR の値を変数のように扱うことができ、値の書き込みや読み込みが出来る。SFR の値を変更することで動作モードの変更

を行うことや、SFR の値を読み込むことでステータス確認、データ取得を行うことが可能である。これらの SFR は、基本的に使用する 8051 マイコンの種類で固有のものだが、FPGA に CPU を組み込む際に独自の SFR を追加することもできる。理学系の CPU では、Actel の core8051 に新規 SFR を追加して組み込んでいる。

割り込み

8051 マイコンをベースとした CPU は「割り込み」という機能を持っている。CPU は通常、プログラムのメインループを実行しているが、割り込み機能を使うことで、実行中のメインループに対して割り込み、実行していた動作とは別の動作を実行することが出来る。割り込みの検知はプログラム外で行われ、割り込みがかかった瞬間から CPU はあらかじめ設定されたサブルーチンの実行を開始する。このとき、実行していた動作やレジスタ値は全て保存される。サブルーチンが終了すると、メインプログラム内の今まで実行していた動作の続きから再び動作を開始する。この機能により、外部からコマンドが送られてきたときや、タイマがオーバーフローしたときなど、特定のイベントが発生したときのみ行いたい動作を、素早く実行することができる。

割り込み機能によってジャンプするサブルーチンのことを割り込みハンドラといい、割り込みハンドラにジャンプする要因となるイベントを割り込み要因という。これらの割り込み要因の種類は CPU に依存し、今回開発した CPU ではタイマーのオーバーフロー、シリアルポートのキャラクタ送受信、および、外部イベントが割り込み要因となっている。外部イベントには、FPGA の特定のポートのピン状態 (High/Low) を当てはめることができるため、CAN コントローラや他の FPGA から CPU-FPGA に割り込みをかけることが可能である。理学系 CPU では、CAN コマンドの送受信や、WBM による GRB 検知によって CPU に割り込みをかけることが出来る。

9.4 開発した CPU プログラムについて

前章以前で述べた偏光観測ミッションを達成するために、現在は CPU 用のプログラムを開発中である。本節では、CPU プログラムの概要と、これまでに開発・試験を行った部分について述べ、今後の開発要素と展望についてまとめる。

9.4.1 理学系 CPU プログラム 概要

理学系 CPU は、C&DH 系により理学系電源基板にバス電圧が供給されると自動的に起動する。起動直後、SFR レジスタの値や変数の値の初期設定を行い、C&DH 系に起動報告コマンドを送信する。その後、メインループを開始する。

メインループ内では、必ずループ先頭でフラグを確認する。フラグは CAN・UART によるコマンド受信や、WBM による GRB 検知などの割り込みによって立てられる。フラグの種類によって CPU はどの割り込みが行われたかを判別し、その後の動作を決定する。フラグ処理に要する処理時間や、動作の優先度から、フラグ処理順を決めることが出来る。(図 9.1)

9.4.2 通信

TSUBAME 衛星の通信では、コマンド (3 Byte) やデータ (0~8 Byte) を含む 7~15 Byte の集まりを 1 パケットと定義し、通信を行う。CAN 通信では、CAN コントローラを使用することにより 1 パケット分のデータを一齐に送受信できる上に、エラー検出などを自動的にしてくれる。一方、UART 通信では 1 Byte ずつ送受信を行わなければならない。本小節では、これらの通信を実現するアルゴリズムについて述べる。

CAN 通信

CAN 通信では、CAN コントローラを用いることでパケットの送受信を易しく行うことができる。CAN コントローラには送信用バッファ、受信バッファがそれぞれ存在し、CPU はこれらのバッファの値を読み書きすることで、送信パケットの用意や受信パケットの取得が行える。CPU-FPGA と CAN との間は SPI により通信を行う。

送信

CAN コントローラの送信バッファに値を書き込んでいく。このとき、送信用の各レジスタは 1 Byte(8 bit) 単位である上に、所々に通信用の固定ビットがあるので、ビットシフトを使ってコマンドを分割・結合しながら書き込む必要がある。送信するデータを全て書き込んだ後、CAN コントローラの送信レジスタを操作すると、バッファに格納されたパケットが送信される。NACK が返って場合、再び送信レジスタを操作すれば同じパケットを再送できる。(図 9.2)

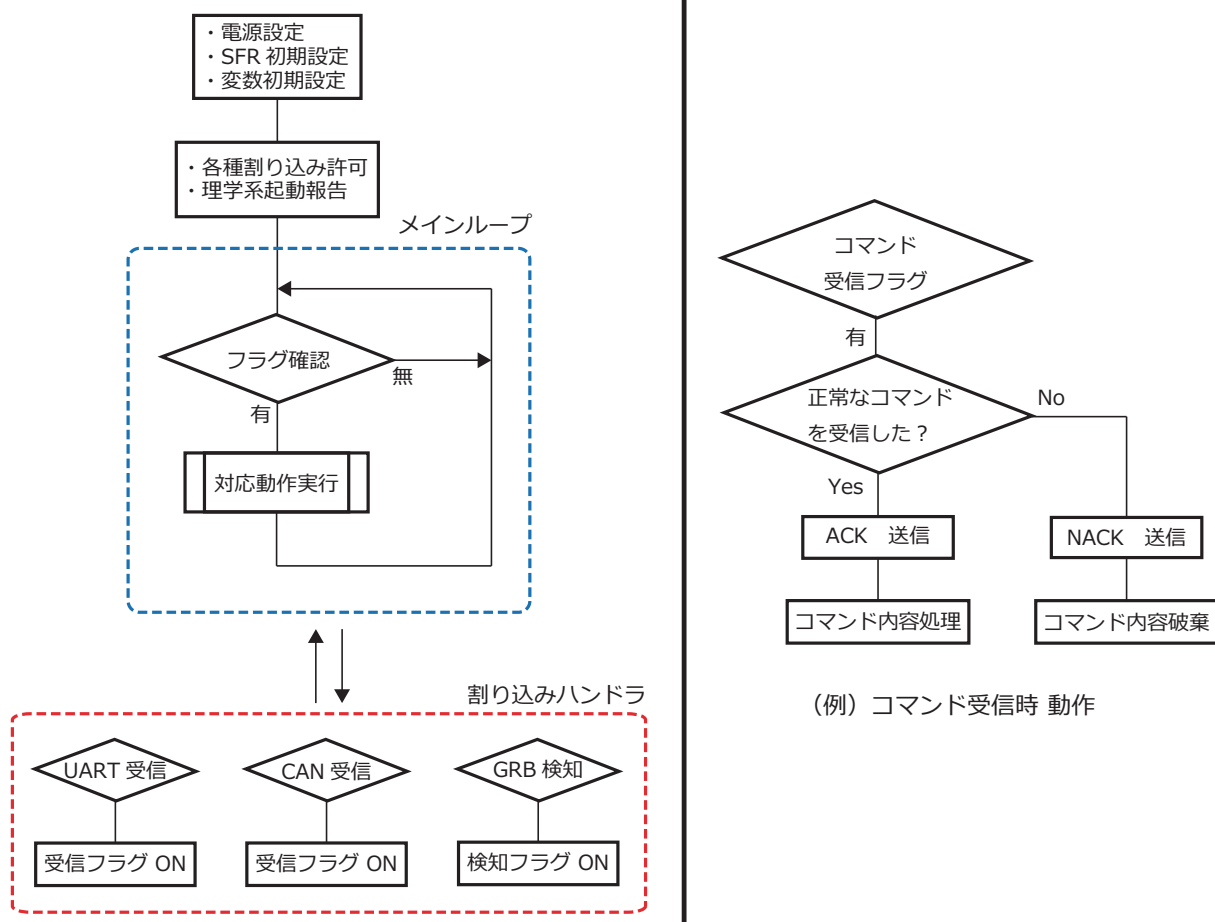


図 9.1: (左図) CPU ソフトウェアのフロー概要。初期設定後、メインループに入り、フラグを検知したときだけ処理を行う。割り込みが発生した際は、割り込みハンドラを実行した後、メインループに戻る。

(右図) 左図中の「対応動作」の例。コマンドを正常に受信した場合は、ACK を送った後、コマンドに対応する処理を行う。

受信

CAN コントローラがパケットを受信すると、CAN コントローラが割り込み信号を生成し、CPU-FPGA に送信する。CPU は割り込みを検知すると、CAN 受信フラグを立てて割り込みフラグを解除する。その後、メインループ内でCAN 受信フラグを確認し、パケットの取得を行う。CAN の受信用レジスタを順に読み出していくことで、コマンドやデータが取得できる。(図 9.2)

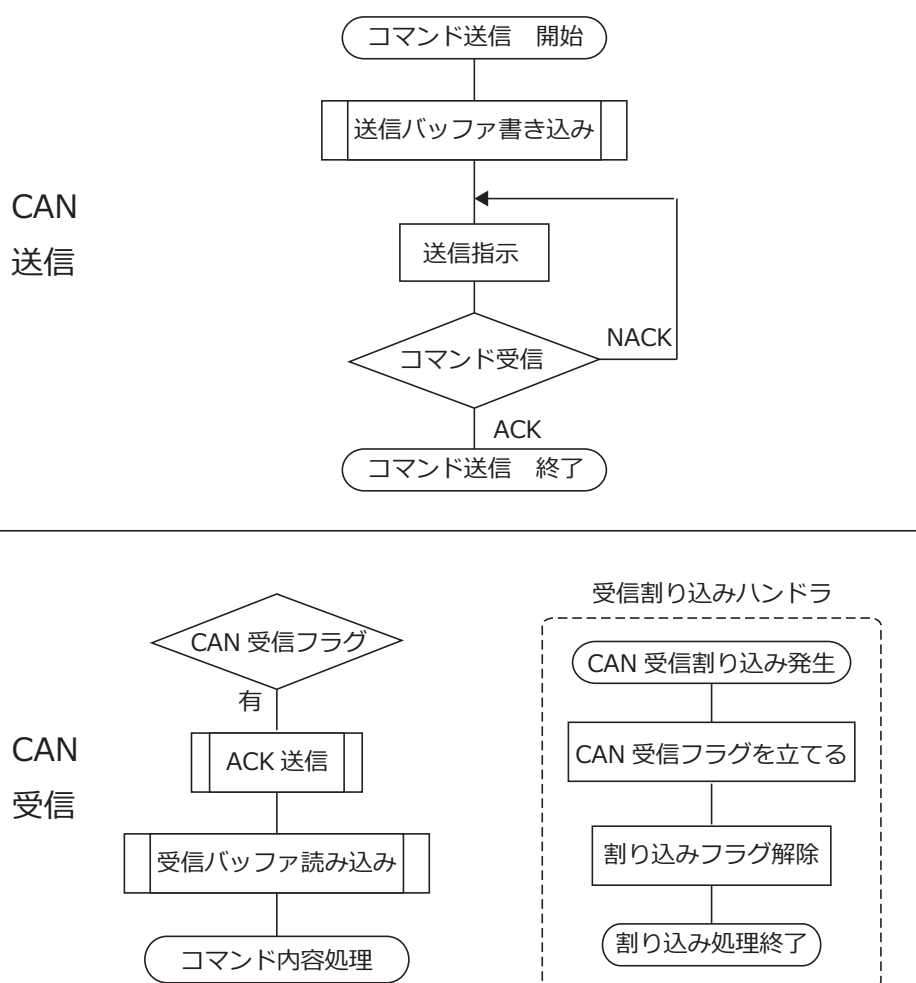


図 9.2: CAN 通信での送受信シーケンス。上図が送信、下図が受信の図である。

UART 通信

8051 コアでの UART 通信には、「SBUF」という SFR を用いる。SBUF は送受信両用のレジスタである。SBUF に 1 Byte 書き込むと書き込んだ値が送信される。また、外部

から送信された 1 Byte は自動的に SBUF に格納され、CPU は SBUF から値を読み出すことで受信した 1 バイトを取得することができる。

SBUF を用いた通信では、受信完了時、もしくは、送信完了時に割り込みが発生する。これにより、CPU は外部からの信号送信に気付くことや、続けて別の文字を送ることが可能である。その後、割り込みフラグ(受信用は「RI」、送信用は「TI」)を解除しない限り、次の 1 Byte を送受信することができないため、受信した文字を取り逃すことは無い。

送信

前述したように、TSUBAME 衛星の通信では、コマンド (3 Byte) やデータ (0~8 Byte) を含む 7~15 Byte の集まりを 1 パケットと定義し、通信を行う。一方、シリアル通信では 1 Byte ごとの通信しか行えない。そのため、1 Byte を連続して送信する仕組みが必要になる。

今回開発した CPU ソフトウェアでは、8051 コアの送信割り込みを利用した。8051 では、データの送信を完了したときに、送信完了を示す割り込みが発生する。送信割り込み発生時に未送信のデータが残っている場合は、割り込みハンドラ内で次の 1 Byte を送信する。このアルゴリズムにより、最初の 1 Byte を送れば連鎖反動的にパケット内の全データを送信することが出来る。(図 9.3)

受信

送信と同様、1 Byte ごとの受信しか行えない。そのため、パケット受信中は、受信した 1 Byte をバッファに格納するだけに留め、コマンドの解釈や実行、ACK・NACK の送信はパケット全体を受信した後に行う。このとき、ヘッダやフッタが間違っている場合や、データ長と実際のデータ量が合わない場合は、受信エラーとみなしてエラーフラグが立つようにした。(図 9.4, 9.5)

9.4.3 理学系-C&DH 系 通信試験

以上のアルゴリズムを実装し、機上での主な通信相手である C&DH 系の回路基板と接続して、通信試験を行った。電源は EPS 系の基板を介して理学系電源基板から供給し、UART、および、CAN の通信線を C&DH 系基板に接続した。C&DH 系の動作プログラ

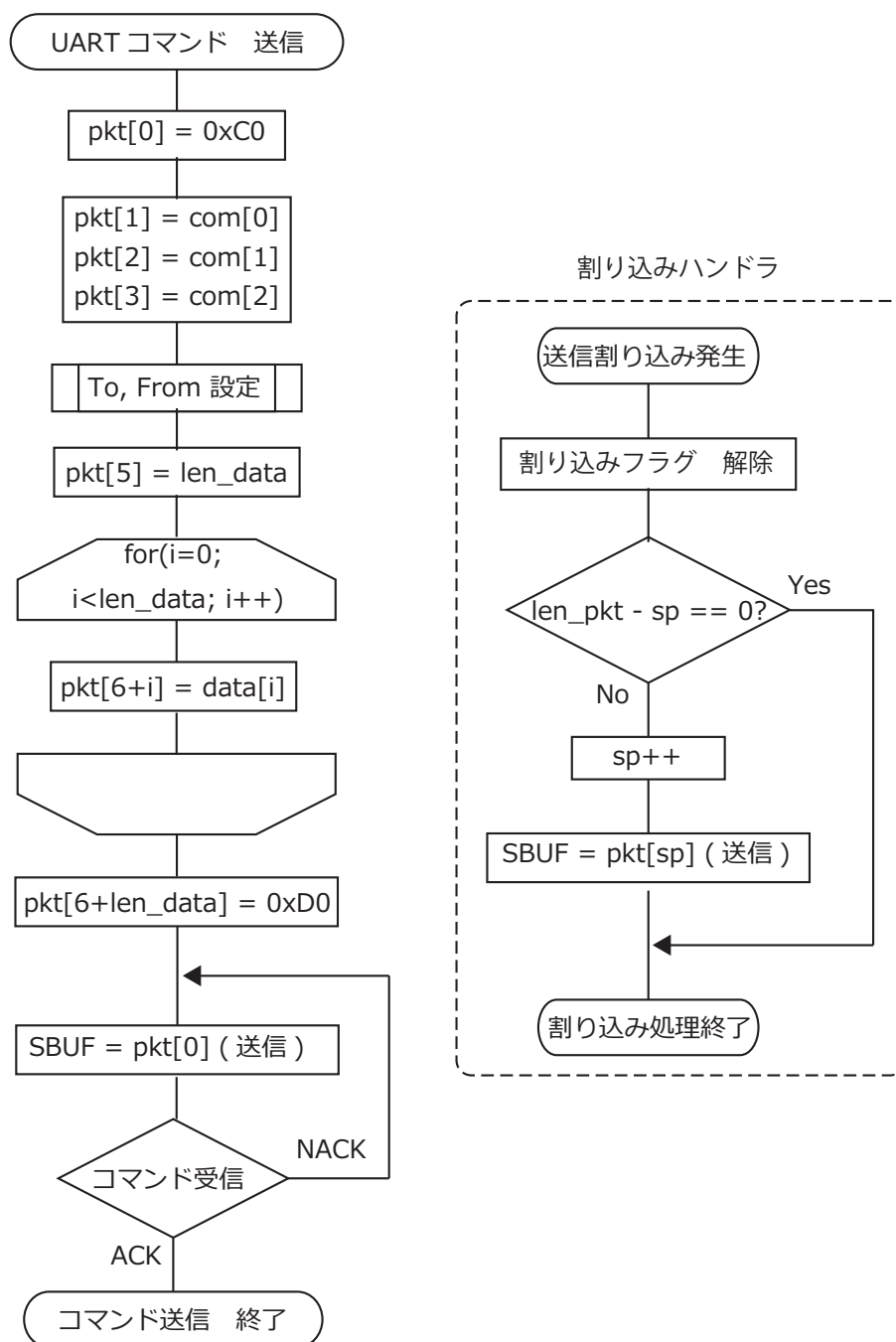


図 9.3: UART 通信での送信アルゴリズム。1 Byte 送信すると送信割り込みが発生することを利用し、1 パケット (7~15 Byte) を連続して送れるようにした。com[i]: コマンド (3 Byte)、data[i]: データ (0~8 Byte)、len_data: 送信データ長、len_pkt: 送信パケット長、sp: パケットの何文字目まで送信済かを示す値。UART 通信のパケット構成については B.2 を参照。

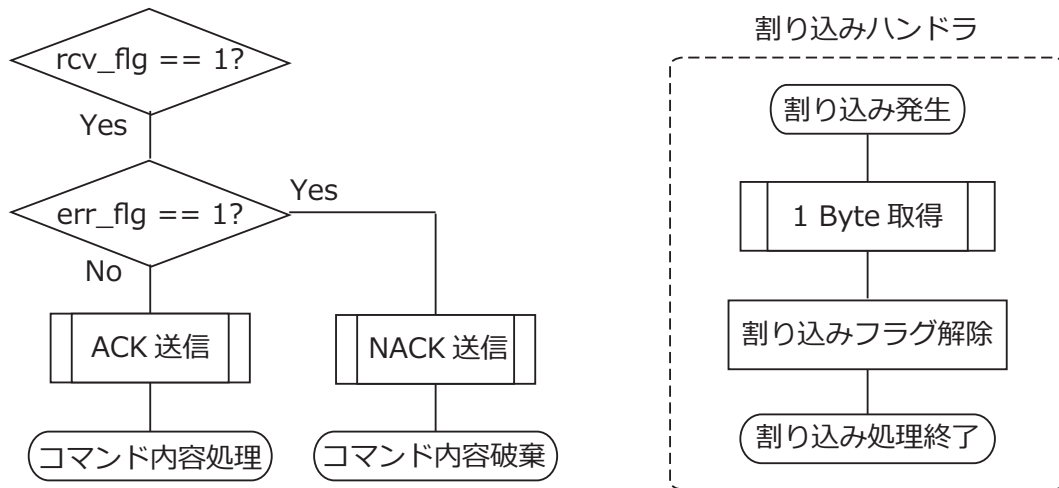


図 9.4: UART 受信アルゴリズム。(左図) メインループ内で受信フラグを確認すると、正常に受信できていれば ACK を、受信エラーが起きていれば NACK を返送する。正常に受信できたならば、その後にコマンド内容処理を行う。

(右図) UART 受信の割り込みハンドラ。割り込みハンドラ内では、受信した 1 Byte をバッファに格納するだけで処理を終了する。「1 Byte 取得」のアルゴリズムについては、図 9.5 に示す。

ムはデバッグ用のものであり、C&DH 系デバッグポートに接続したデスクトップ PC から指示を与えることで、他系にコマンドを送信することが出来る。

通信速度は実際の仕様と同様に、UART:115,200 bps、CAN: 1 Mbps とし、コマンドの送受信を行って、アルゴリズムが正常に動作すること、および、ハードウェア的に通信に問題が無いことを確認した。

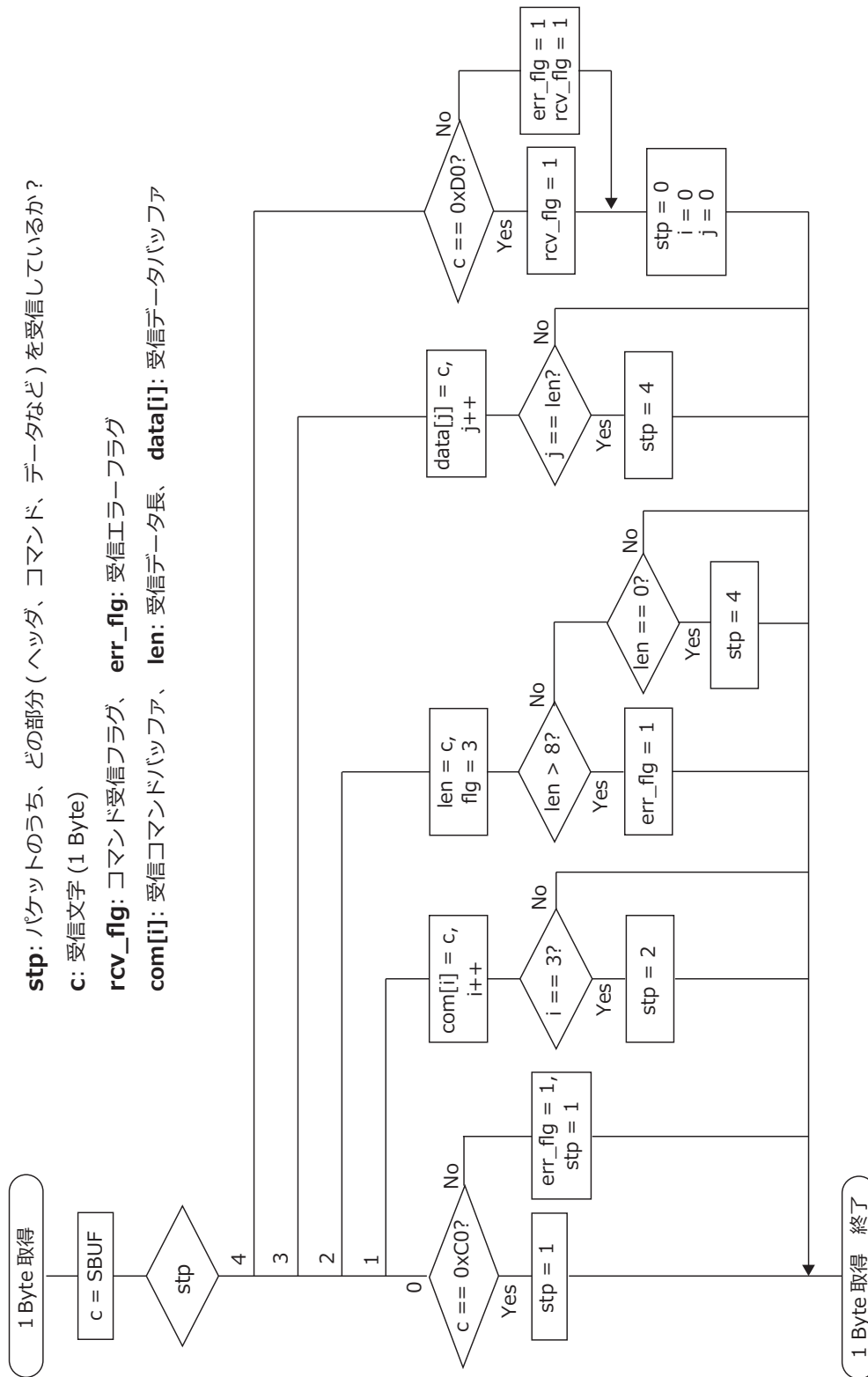


図 9.5: UART 受信アルゴリズム内での、1 Byte ずつ取得するアルゴリズム。パケット内の、どの部分を受信しているかで分岐する。ヘッダやフッタが間違っている場合や、データ長と実際のデータ量が合わない場合は、受信エラーとみなす。

第10章 まとめと今後の課題

10.1 まとめ

本論文では、TSUBAME衛星のシステム検討、偏光計エンジニアリングモデルの性能評価、および、CPUソフトウェアの開発について述べた。

TSUBAMEのシステム設計では、衛星設計の大半がGRB偏光観測ミッションに関わる要求を満たすことが確認できたが、いまだ未達成項目が残るものもある。特に、温度と構造に関しては、今後試験を重ねながら慎重に検討を進める必要がある。また、ミッションデータの構成など、完全に固まっていない仕様もあるため、早急に衛星側との協議や理学系内での検討を進めていきたいと考えている。

高エネルギー加速器研究機構(KEK)での性能評価実験では、偏光計エンジニアリングモデル(EM)に偏光X線ビームを照射し、EMでの偏光検出確認を行った。また、そのデータを解析して散乱方位角分布を作成し、30 keVでも偏光が検出できることを確認した。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、性能評価を行っていく。

理学系CPUソフトウェアの開発では、通信などの基礎部分の開発に従事した。通信部分に関しては、他系との接続試験を行い、正常に通信が行えることを確認している。現在は検出器によるデータ取得、および、実際のミッションシーケンスに沿ったプログラムの開発に移行しており、2~3月中から徐々にシーケンス試験を行っていく予定である。

10.2 今後の課題

今後は、偏光計のデータ解析、特に、本論文に入れられなかったシミュレーションとの比較を早めに行いたいと考えている。検出器パラメータの微調整など、フライトモデルに向けた準備も進める予定である。また、CPUソフトウェアの完成を目指すとともに、衛星側との協議をより一層行い、開発上での見落としや未設定項目を減らしていきたいと考えている。

付録A GRB偏光観測での検出イベント数の見積り

本節では、HXCP、WBMのデータ量について考察した際の、検出イベント数の根拠について述べる。

CGRO衛星(1991-2000)に搭載されたBATSE検出器(Burst And Transmit Source Experiment)は、WBMと同様の原理に基づきGRBの位置を決定できる位置検出器である。BATSE検出器によって観測されたGRBのデータは、BATSEカタログとして誰でも利用できるようになっている。ここではBATSEの観測結果から、TSUBAMEでのGRBの観測を十分に再現できると仮定する。BATSEカタログ[21]からトリガID、Fluence [erg/cm²]、T90 [s](GRB検出からそのGRBの全カウント数の90%が得られるまでの時間)、Peak flux [photon/cm²/s](64 ms 積分データでの最大のフラックス)のデータを参照し、これらの値から、偏光計で検出できる光子数、および、WBMで観測できる最大のフラックスを見積もる。ここでは検出するエネルギーの範囲を30 ~ 300 keVの間とする。

A.1 HXCP

まず、HXCPで検出できるイベント数を見積もる。GRBのスペクトルを式A.1のように仮定する。簡単のため、photon indexは1.0とする。

$$\frac{dN}{dE} = N_f E^{-1} \quad (\text{A.1})$$

さらにこのスペクトルの式から、Fluence F とパラメータ N_f の関係が、式A.3のように求まる。

$$F = \int E \frac{dN}{dE} dE = N_f \int dE \quad (\text{A.2})$$

$$N_f = F \left(\int dE \right)^{-1} \quad (\text{A.3})$$

これから、有効面積 $S(E)$ である HXCP で検出でき得る全光子数 N_{tot} は、式 A.4 のように求められる。

$$N_{tot} = \int \frac{dN}{dE} S(E) dE = \frac{F}{E_{max} - E_{min}} \int E^{-1} S(E) dE \quad (\text{A.4})$$

ここで、 E_{max} 、 E_{min} は、Fluence F を観測したエネルギー領域の最大値、最小値である。HXCP の有効面積 S_{hxcp} は、エネルギー E によって変化するが、ここでは戸泉修論 [16] でのシミュレーションによる予測値 (図 A.1) を用いる。今回の解析では、有効面積を特定のエネルギー領域で分けし、それぞれのエネルギー領域で有効面積 S_{hxcp} がエネルギー E の一次関数で表されると仮定する。式 A.5 に、今回の仮定した式を示す。

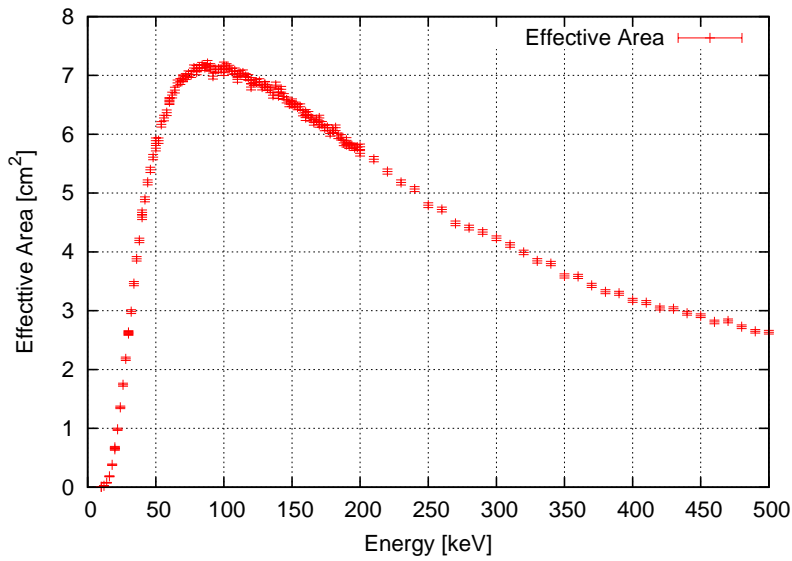


図 A.1: シミュレーションによる偏光計の有効面積のエネルギー依存性。横軸は入射光子のエネルギー [keV]、縦軸は有効面積 [cm²]。低エネルギー側では光電吸収が優位になるので、有効面積が減少する。一方、高エネルギー側ではコンプトン散乱の散乱断面積の減少と、前方散乱の散乱確率が増えることで有効面積が減少する。

$$S_{hxcp} = \begin{cases} (5.7/35) * E - (17.1/7) & (15 - 50 \text{ keV}) \\ 0.065 * E + 2.45 & (50 - 70 \text{ keV}) \\ 7.0 & (70 - 100 \text{ keV}) \\ -0.014 * E + 5.6 & (100 - 300 \text{ keV}) \end{cases} \quad [cm^2] \quad (\text{A.5})$$

これらにより、Fluence の値 F から全検出光子数 N_{tot} を求めることができる。Fluence 25–50 keV の値 F_1 、50–100 keV での値 F_2 、100–300 keV での値 F_3 の 3 つの値を参照し、こ

これらのエネルギー範囲で積分することによって、全検出光子数 N_{tot1} 、 N_{tot2} 、 N_{tot3} を計算する。

一方、GRB は時間と共に減衰するため、これらの光子が全て検出できるわけではない。そこで、時刻 $t = 0$ で立ち上がり、指数関数で減衰する GRB の典型的な光度曲線を考える。その関数が $N(t) = N_0 \exp(-at)$ ($a > 0$) で表されるとすると、Fluence F と T90 の定義から、ある観測開始時刻 t_{start} から無限時間 $t = \infty$ までに偏光計で検出される光子数 N_{det} は、式 A.6 のようになる。

$$N_{det} = \int_{t_{start}}^{\infty} N_0 \exp(-at) dt = N_{tot} \exp\left\{\frac{t_{start}}{T90} \ln(0.1)\right\} \quad (\text{A.6})$$

これにより、観測開始時刻が $t = t_{start}$ のときに、HXCP で検出できる全イベント数が算出できる。

A.2 WBM

WBM ではある積分時間内で検出できる最大のイベント数を見積もれば良い。そのため、Peak Flux [photon/cm²/s] の値に WBM の有効面積を掛け合わせれば、最大のフラックスが求められる。ここでは、WBM の有効面積を CsI シンチレータの面積 36 cm² とする。

A.3 計算結果

BATSE Current Catalog の中で、Fluence と T90 が両方とも与えられている GRB 1973 個に対し、以上の計算を行い、1 回の GRB で HXCP が検出する光子数と、WBM が観測する最大フラックスを計算した。図 A.2 に、 $t_{start} = 15$ s のときの HXCP の検出光子数の分布を示す。

これらのデータから、HXCP が検出する最大光子数を求めた。BATSE が観測した GRB のうち、HXCP での検出光子数が最も多くなるのは、トリガ ID:7301 の GRB990104 を想定した場合であり、そのときの検出光子数を表 A.1 に示す。

これにより、BATSE のデータから推測される HXCP での最大検出イベント数は 5521 event であり、ミッションデータ量の見積りで、最大 10,000 event を想定したのは妥当であると言える。

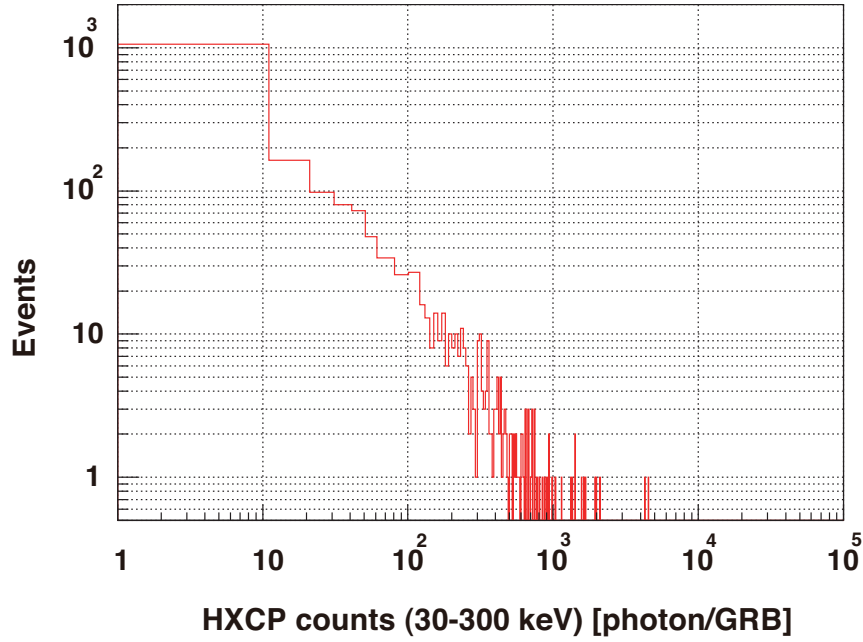


図 A.2: BATSE で観測した GRB に対し、1 回の GRB で HXCP が検出する光子数の分布。横軸は光子数 [photons/GRB]、縦軸が GRB の個数。

表 A.1: GRB990104 における、観測開始時間 t_{start} と HXCP で検出される光子数の関係。

観測開始時間 [s]	0	5	10	15	20
検出光子数	5521	5169	4839	4530	4240

また、図 A.3 に、WBM が観測する最大フラックス [photon/s] の分布を示す。

これらのデータから、WBM が検出する最大フラックスを求めた。BATSE が観測した GRB のうち、WBM での最大フラックスが最も大きくなるのは、トリガ ID:5614 の GRB960924 を想定した場合であり、そのときの最大フラックスは 6601.3 counts/s である。このフラックスのときに、10 ms 積分でのカウントは 66 counts となり、上限 500 counts の設定で十分に観測可能である。ただし、WBM のデータ量はかなり大きく、今後削減を考える必要はある。

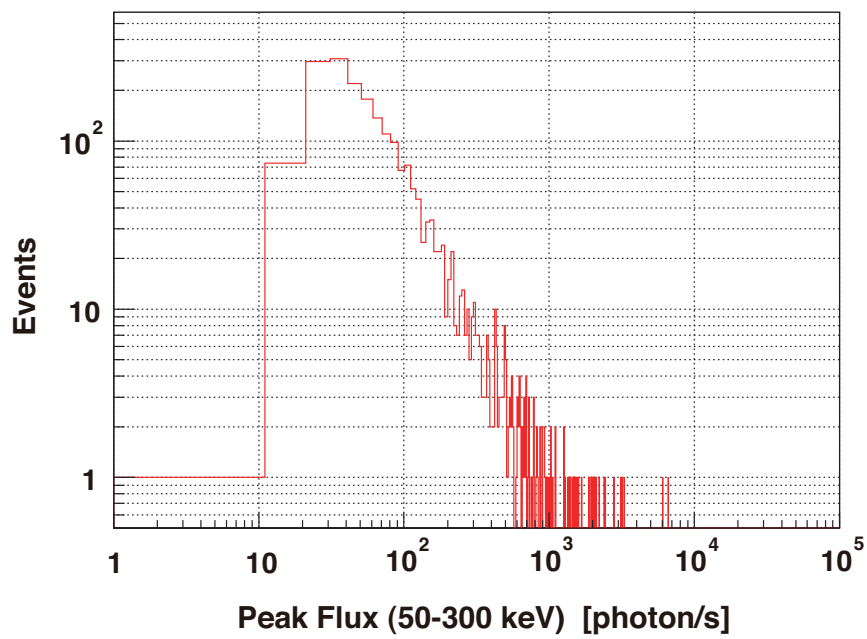


図 A.3: BATSE で観測した GRB に対し、1 回の GRB で WBM が検出する最大フラックスの分布。横軸はフラックス [photons/s]、縦軸が GRB の個数。WBM1 基が検出する最大フラックスを示す。

付録B TSUBAME衛星 通信仕様

TSUBAME衛星における、通信の仕様についてまとめる。

理学系含め、全てのサブシステムは衛星バスを通じて他系と通信を行う。TAUBAME衛星では、通信方式としてCAN(Control Area Network)とUART(Universal Asynchronous Receiver Transmitter)を使用する。表B.1に両通信方法の特徴とTSUBAME内での用途を簡単にまとめた。

	信号線本数	TSUBAME内速度	TSUBAME内での用途
CAN	2本	1 Mbps	主通信
UART(RS485)	5本	115.2 kbps	CAN不通時

表 B.1: TSUBAME衛星内の通信方式概要

通常時は通信速度が速いCANを使用し、CANが不通時のみシリアル通信で確認を行う予定である。以下で、各通信を行う上でのTSUBAME内での仕様、および、通信パケットの構成を述べる。

B.1 CAN通信

Control Area Network(CAN)は、主に自動車内の機器間通信などで利用されている通信方式である。CANでは通信線(バス)に複数のノードがライン型に接続し、各ノードに平等なバスアクセスが可能なマルチマスター方式を採用しており、各ノード間の優先順位付けやエラー検出など、様々な機能を備えている。

B.1.1 CAN通信の特徴

- ・ ID

各ノードが送信するデータにはID（識別子）を割り振ることができる。このIDはデータ内容や送信ノードを識別するために使用する他に、通信調停の優先順位決定にも使用される。

- ・通信調停

各ノードが送信するデータは、そのIDの値が小さいものほど優先順位が高くなる。データは優先順位に従って送られ、複数データが同時に送信されることは無い。

- ・誤り検出

送信データにはCRC(Cyclic Redundancy Check)シーケンスという15ビット長のデータが添付される。このデータは送信したIDやデータの値から演算された値であり、受信ノードが受信したIDやデータから演算した結果と比較して、データを正常に受信できたかどうかの判断を行う。

- ・ACK

信号送信時、受信したノードは特定のタイミングでACK(Acknowledgement)信号を送信し、正常に信号を受信できたノードが存在することを送信ノードに知らせる。

- ・エラー検出

送信・受信ノードは、それぞれバス監視やCRCによってビットエラーを検出できる。エラーが検出された場合、各ノードはエラーフラグを送信し合い、エラー検出をバス全体に知らせる。その後、送信ノードは同じデータを再送信する。

また、各ノードは送信・受信エラーカウンタを持っており、送信・受信でエラーが発生した場合にカウンタを増やす。エラーカウンタの値によって、ノードは『アクティブ』（送受信ともに行える）、『パシブ』（強制的に送信待機を行う）、『バスオフ』（バスから切り離され通信不能）という状態を遷移し、各ノードの不具合がバス全体に影響を与えないような設計になっている。

B.1.2 信号線

CANではCAN_H、CAN_Lという2本の信号線があり、両信号線の電圧の差分によりリセッシブ（1）、ドミナント（0）の信号レベルを規定している（2線式差動電圧方式）。

差動式であるため、外部からのノイズに強く、長距離間の通信が可能になっている。

B.1.3 機器構成

一般的な CAN 通信では、CAN プロトコルコントローラと CAN トランシーバが用いられる。

- ・ CAN プロトコルコントローラ

上で述べたような CAN プロトコルの機能（通信調停、エラー検出、CRC チェック）を実現する。また、フィルタを搭載し、特定の ID を持つ信号のみを受信することが可能である。

- ・ CAN トランシーバ

バス送信電圧の発生・調整、動作電流の確保、配線の保護を行う。

B.1.4 パケット構成

CAN 通信には標準フォーマット、拡張フォーマットという、2 種類のデータフレーム構成がある。これらは ID のデータ量が異なり、標準フォーマットでは 11 bit、拡張フォーマットでは $11+18=29$ bit の ID を割り振ることができる。TSUBAME 衛星内では、全てのパケットに拡張フォーマットを採用する。拡張フォーマットの構成 (図 B.1) と、TSUBAME における CAN ID の割り振り (図 B.2) を以下に示す。

1. コマンド 0 ~ 2

データフレーム内のデータ内容を示す。

2. 送信先

データフレームの宛先を示す。送信先の割り振りは、表 B.2 に示す。

3. 送信元

データフレームの送信元を示す。送信元の割り振りは、表 B.3 に示す。

4. データ長

データフィールドに含まれるデータ長を示す。

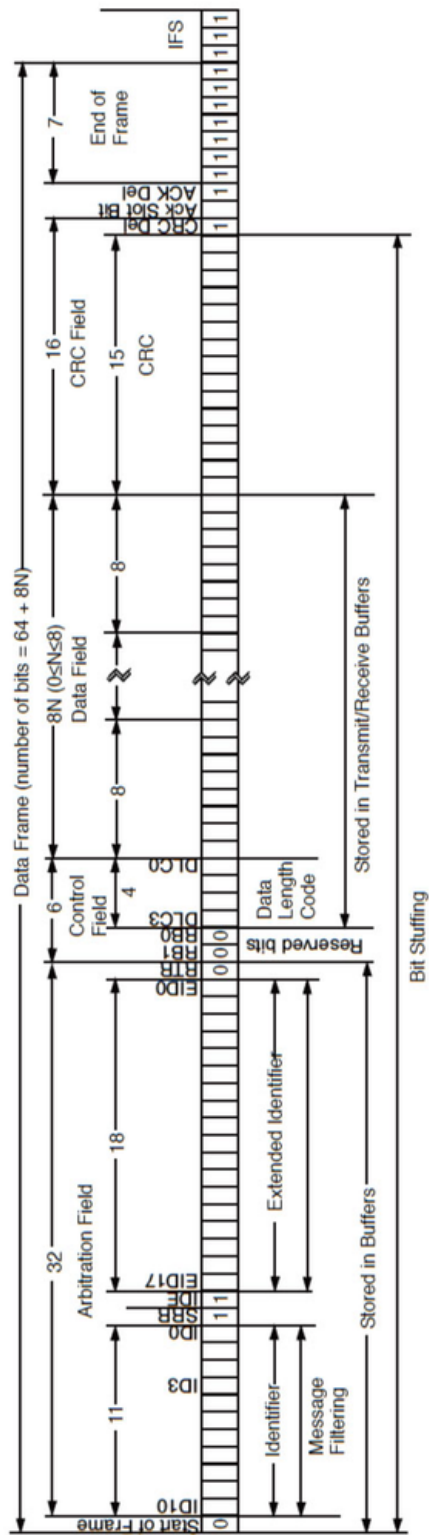


図 B.1: CAN の拡張フォーマット。ID 29 bit、データ長 4 bit、データ 0~8 Byte、および、エラー検出で使うビット群などで構成される。

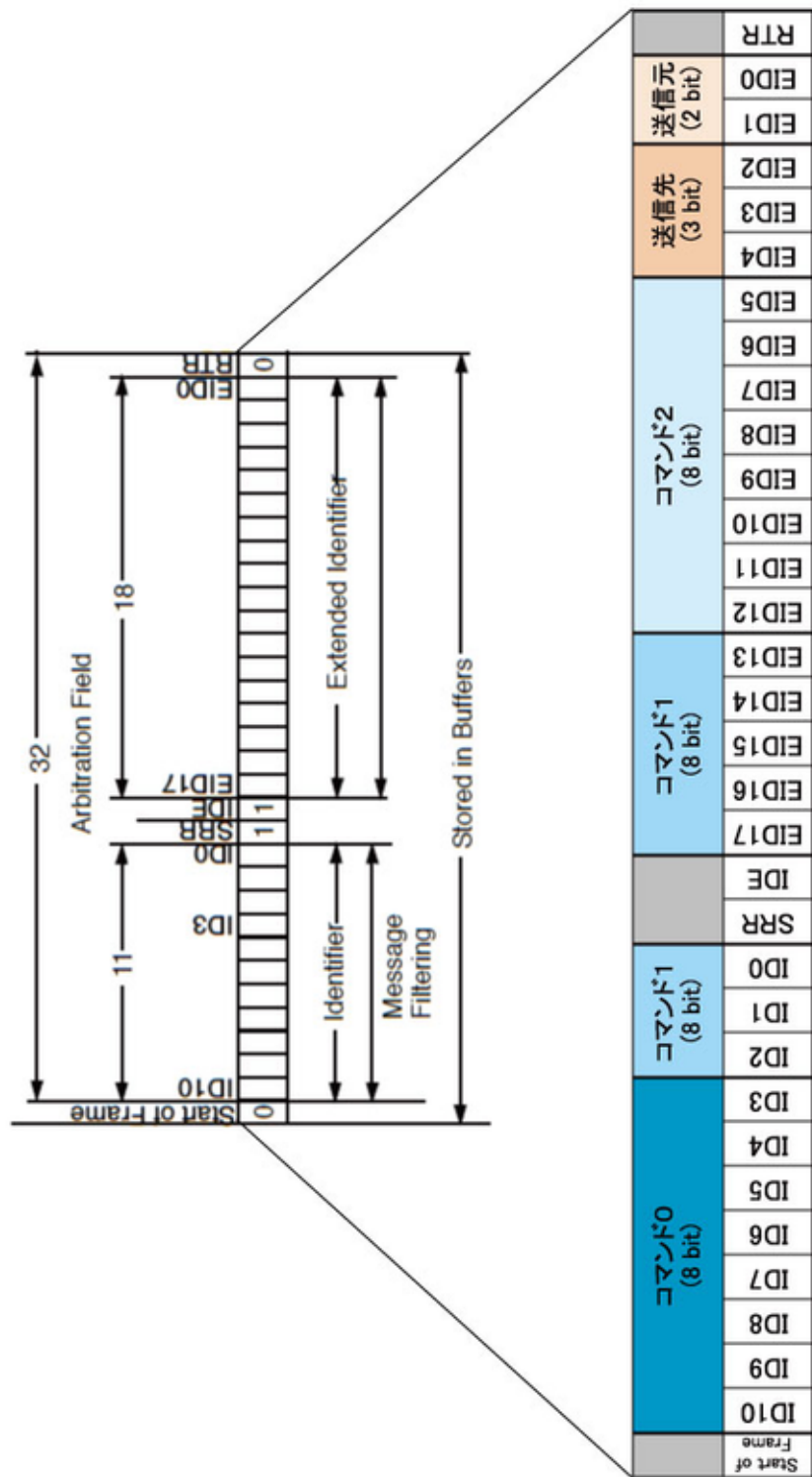


図 B.2: CAN ID の構成。コマンド 3 Byte に加え、送信先を表す 3 bit、送信元を表す 2 bit が含まれる。

5. データフィールド

送信データそのもの。1パケットにつき、0~8 Byte まで送信出来る。

6. その他のデータ (SRR、IDE、RTR、CRC など)

CAN プロトコルコントローラが自動で付属して送信する。

	EID4	EID3	EID2
C&DH	0	0	1
ADCS	0	1	1
理学	1	0	1
カメラ	1	1	1
全系	0	0	0

表 B.2: 送信先 ID の割り振り

	EID1	EID0
C&DH	0	0
ADCS	0	1
理学	1	0
カメラ	1	1

表 B.3: 送信元 ID の割り振り

B.2 UART 通信

UART(Universal Asynchronous Receiver Transmitter) は、非同期にシリアル通信を行うためのデバイスの名前であり、マイクロコントローラなどで非常に広く使われる技術である。この技術を応用した通信規格に RS232C、RS422、RS485 などがある。TSUBAME 衛星では、RS485 を使用する。RS485 はバス型のマルチポイント接続に対応し、最大で 32 台までの複数対複数の接続が可能なシリアル通信規格である。送信線 (Tx)、受信線 (Rx) それぞれに差動信号線を使用しており、CAN 同様ノイズに強く、長距離間の通信が可能である。

それぞれの差動信号線は+/-という 2つのピンから構成されており、

+ : ラインがアイドル (1) のとき positive(5V)

- : ラインがアイドル (1) のとき negative(0V)

また、+/-ではなく A/B で区別されることも多いが、メーカーによって A/B の名前付けが逆になっている場合もある。(正式には、'A'='-', 'B'='+')

TSUBAME 衛星では、ストップビット 1 bit、パリティビット無し、通信速度 115,200 bps の非同期式通信を行う。RS485 の通信方式では、全てのデータは 1 Byte ごとに送信さ

れる。TSUBAMEではヘッダ、フッタ、コマンド、データなどを含む7~15 Byteの固まりをパケットとして構成している。以下にシリアル通信でのパケット構成を図B.3に示す。

このパケット構成、特にコマンド部分はCANのフレーム構成を参考にしており、似た構成でデータの送受信できるような構成になっている。送信先、送信元の割り振りはCANと同じである。

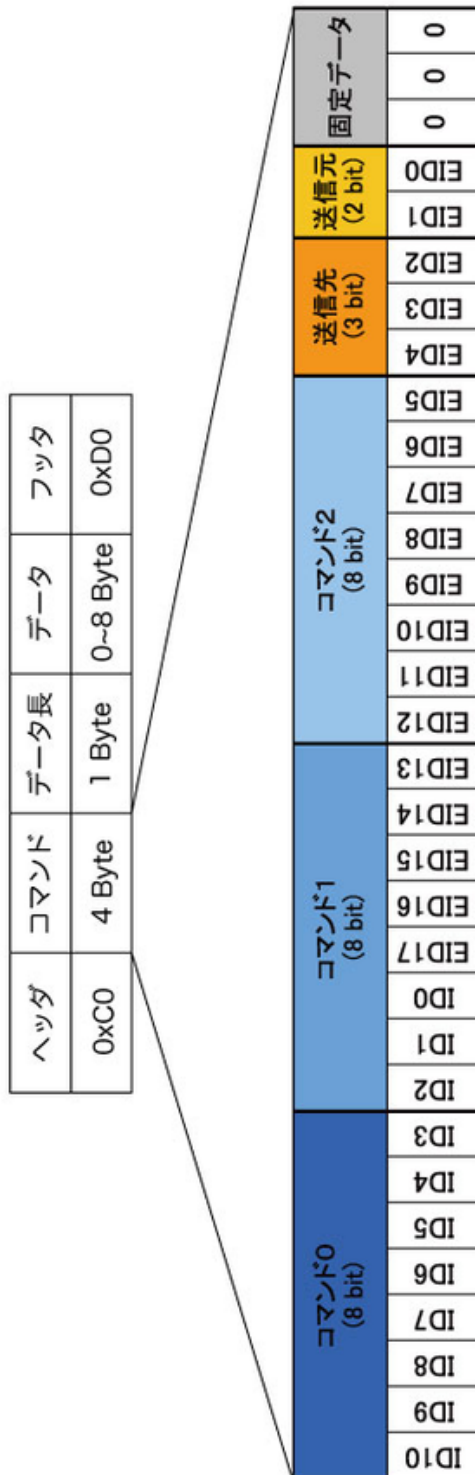


図 B.3: TSUBAME内で使用される UART 通信のフォーマット。コマンド 4 Byte、データ長 1 Byte、データ 0~8 Byte、および、ヘッダ 1 Byte とフッタ 1 Byte で構成される。

関連図書

- [1] M. S. Briggs, ApJ, 459, 40-63 (1996)
- [2] W. Coburn & S. E. Boggs, Nature, 423, 415-417 (2003)
- [3] R. E. Rutledge & D. B. Fox, MNRAS, 350, 1288-1300 (2004)
- [4] C. Wigger et al. ApJ, 613, 1088 (2004)
- [5] E. Kalemci et al. ApJS, 169, 75 (2007)
- [6] S. McGlynn et al. A&A, 466, 895-904 (2007)
- [7] D. Götz et al. ApJ, 695, L208 (2009)
- [8] D. Yonetoku et al. ApJ, 743, L30 (2011)
- [9] J. Kataoka et al. Journal of Geophysical research, 115, A05204 (2010)
- [10] T. Toizumi et al. Physica E, 43, 685-688 (2011)
- [11] B. D. Ramsey et al. Space Science Reviews, 69, 139 (1994)
- [12] F. Lei et al. Space Science Reviews, 82, 309-38 (1997)
- [13] T. Mizuno et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A600, 609-617 (2009)
- [14] 齊藤 孝男 修士論文「2次元 APD Array と VLSI を用いた X 線・ σ 線用撮像剣検出器の開発」東京工業大学 (2005)
- [15] 戸泉 貴裕, 卒業論文「硬 X 線偏光計用多チャンネルシンチレーション検出器の開発」東京工業大学 (2009)
- [16] 戸泉 貴裕, 修士論文「東工大衛星 Cute-1.7+APDII の荷電粒子観測とガンマ線バースト偏光観測衛星 TSUBAME の検出器開発」東京工業大学 (2009)

- [17] 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)
- [18] 榎本 雄太, 卒業論文「偏光観測衛星 TSUBAME 搭載用硬 X 線偏光計の試作と性能評価」東京工業大学 (2010)
- [19] 常世田 和樹「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)
- [20] 川上 孝介「超小型衛星 TSUBAME 搭載用広視野バーストモニタのシステム構築」東京工業大学 (2011)
- [21] BATSE Current Gamma-Ray Burst Catalog
<http://gammaray.msfc.nasa.gov/batse/grb/catalog/current/>

謝辞

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

谷津さんには、実験の初歩から、検出器・電気回路についての知識、本論文に対するアドバイスなど、懇切丁寧に教えて頂きました。戸泉さん・薄井さんには、研究や発表のことから、日々の研究室生活に関することまで、様々な面で助けて頂きました。本当にありがとうございました。後輩であり、同じTSUBAME開発チームである川上くん、常世田くん、林さんにも大変お世話になりました。僕は途中で抜けてしまいましたが、ぜひともTSUBAMEの完成まで頑張ってもらいたいと思います。

また、同じ部屋で過ごす河合研の方々、ならびに、陣内研の方々には、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した。研究のことではもちろん、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。合計3年間、楽しい研究室生活を送ることができたのも、皆様のおかげです。

共に衛星開発を行う工学部松永研究室の方々には、TSUBAMEの開発やCute-1.7+APD IIの運用など、様々なところでご協力頂きました。僕が修士になってからは外部での実験や統合試験が増えたためか、一緒に活動する機会も多く、交流が増えて楽しかったです。また、クリアパルスの久保様、早稲田大学の片岡准教授、中森助教、学生の皆様方も、検出器開発で大変お世話になりました。

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。