

超小型衛星 TSUBAME 搭載  
ガンマ線バースト偏光観測器のソフトウェア開発

伊藤 慶

卒業論文

東京工業大学 理学部 物理学科

2014年2月

## 要旨

ガンマ線バースト (GRB) は、短時間に大量のガンマ線・X線が放出される宇宙最大規模の爆発現象であるが、その発生機構の詳細は未だ解明されていない。GRBで放出されるガンマ線・X線の偏光を調べることは、爆発の発生領域における磁場構造の解明に重要な情報を与えることが期待される。

現在、我々はGRBの硬X線偏光観測を目標とした超小型衛星TSUBAMEを開発しており、2014年内の打ち上げを予定している。本衛星はGRBの検知と位置決定を行う広視野バーストモニタ (WBM) と硬X線偏光計 (HXCP) の2種類の観測器を持ち、高速姿勢制御装置によってGRB検出から15秒以内からの光軸上での偏光観測を目指す。

HXCPはX線がコンプトン散乱を起こす際の偏光方向による散乱異方性を利用した偏光計であり、WBMは衛星筐体側面に配置されたX線カウンターである。WBMがGRBを検知してX線の到来方向を計算すると、TSUBAMEはその方向へ姿勢を変更し、HXCPによる偏光観測を開始する。

今年度初頭において、観測器のハードウェア開発はほぼ完了していたが、衛星を実際に軌道上に投入して観測を行うためには、主に以下の2つのソフトウェアの実装が必要であった。1つ目は、観測器故障の条件を回避しながら一定の性能で観測を行うために、温度や衛星位置に応じて光検出器への印加電圧を調整する機能、2つ目は、観測器系と姿勢制御系、および観測データを取り扱う通信系が連携し、観測開始からデータ取得までの一連のシーケンスを制御する機能である。

本研究では、観測器制御用のソフトウェア開発を行い、以上の機能を実装した。また、その動作確認試験において、ソフトウェアが目的の動作を達成することを確認した。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>3</b>
1.1	ガンマ線バースト (gamma-ray burst, GRB)	3
1.2	GRB の硬 X 線偏光観測	4
1.3	超小型衛星 TSUBAME	5
1.4	GRB 観測ミッション	6
1.5	本研究の目的	7
<b>第2章</b>	<b>GRB 観測機器</b>	<b>8</b>
2.1	全体の機器構成	8
2.2	回路ボックス	8
2.2.1	電源基板	9
2.2.2	CPU 基板	9
2.2.3	WBM ロジック基板・WBM 電源基板	10
2.3	HXCP	10
2.4	WBM	11
<b>第3章</b>	<b>検出器保護機能の実装</b>	<b>13</b>
3.1	アバランシェフォトダイオードの温度特性	13
3.2	WBM APD の印加電圧制御	14
3.2.1	温度依存性の測定	14
3.2.2	機能の実装	14
3.2.3	実装した機能の動作確認試験	17
3.3	HXCP APD の印加電圧制御	20
3.3.1	温度依存性の測定	20
3.3.2	機能の実装	25
3.3.3	実装した機能の動作確認試験	28
3.4	HXCP PMT の保護	31
3.4.1	軌道上の荷電粒子	31
3.4.2	荷電粒子分布図による判定	32
3.4.3	電子の分布図	32
3.4.4	陽子の分布図	35
3.4.5	電子・陽子の分布図の統合	36
3.4.6	荷電粒子帯判定関数の実装	36
3.4.7	動作確認	38
3.4.8	WBM のカウントレートによる判定	38
3.4.9	まとめと今後の課題	42

<b>第4章 CPU ソフトウェアの開発</b>	<b>43</b>
4.1 CPU ソフトウェアの開発環境 . . . . .	43
4.2 CPU プログラムのフロー . . . . .	44
4.2.1 初期化部分 . . . . .	44
4.2.2 while ループ部分 . . . . .	46
4.2.3 割り込みハンドラ部分 . . . . .	47
4.2.4 観測シーケンスハンドラ . . . . .	48
<b>第5章 まとめと今後の課題</b>	<b>50</b>
<b>付録A HXCP APD VATA チップのペDESTAL解析結果</b>	<b>51</b>
<b>付録B HK データフォーマット</b>	<b>52</b>
B.1 HK CW . . . . .	52
B.2 HK FM . . . . .	52
<b>付録C CPU クロックの温度依存性</b>	<b>55</b>

# 第1章 はじめに

本研究の最終的な目的は、ガンマ線バーストによって到来する X 線の偏光観測を行い、爆発の発生領域における磁場構造の解明の手がかりを得ることである。この章では、ガンマ線バーストという天体现象と、開発中の衛星 TSUBAME について述べる。

## 1.1 ガンマ線バースト (gamma-ray burst, GRB)

ガンマ線バースト (以下 GRB) は、宇宙のある 1 点から X 線・ガンマ線領域の爆発的な放射が数秒から数百秒にわたって発生する現象である。図 1.1 はコンプトンガンマ線観測衛星に搭載された全天観測装置 BATSE ( Burst And Transient Source Experiment ) によって得られた GRB の発生位置の分布図であり、発生位置が全天に一樣に分布していることがわかる。GRB の地球上空での検出頻度は 1 日 1 回程度であるが、数ミリ秒から数百秒という継続時間のため、視野の狭い観測器による検出は難しい。実際、GRB が初めて発見されたのは 1970 年の偶然の出来事が発端であったが、BATSE の打ち上げは約 20 年後の 1991 年であり、GRB がなかなか理解の進まない天体现象であることが伺える。

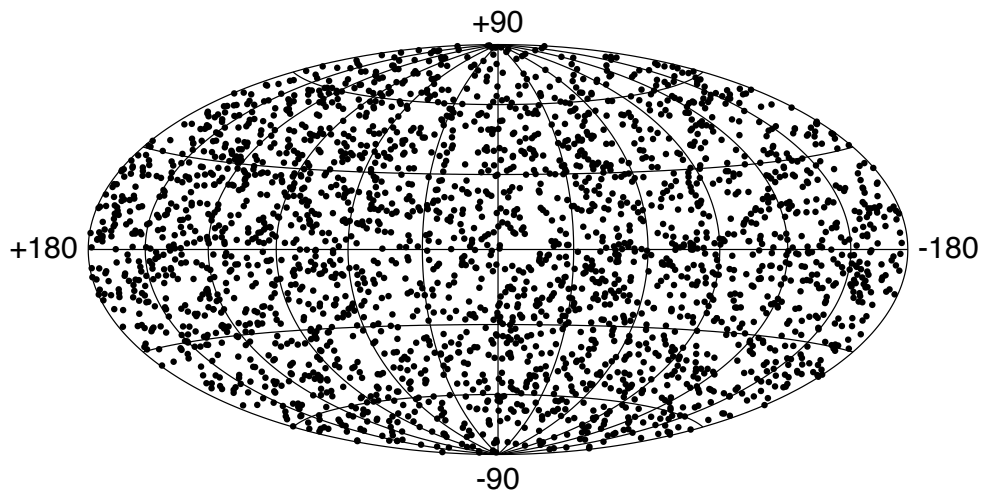


図 1.1: BATSE によって得られた GRB 発生位置の分布 [1]。

BATSE の発見の後、イタリアとオランダによる BeppoSAX 衛星による GRB の X 線残光が発見され、さらに、残光の光度曲線に折れ曲がりが見られることが分かった。このことから、GRB の放射は球対称ではなく、図 1.2 のようにジェット状に広がり、その方向が地球を向いている場合に検出されると現在では考えられている。ガ

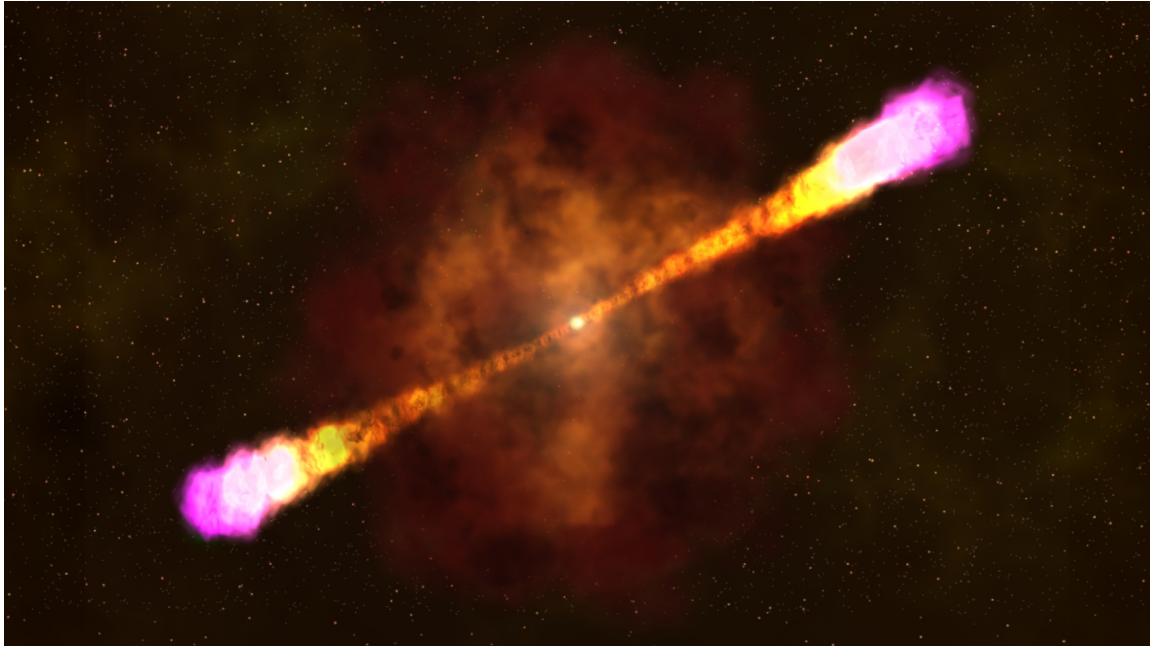


図 1.2: GRB の想像図 [2]。

ンマ線の放射機構としては、ファイアーボールモデルが有力な候補として挙げられる。このモデルによれば、まず、 $10^{52}$ erg 程度のエネルギーを持った火の玉からローレンツ因子が 100 を超えるような相対論的な速度を持つ粒子からなるシェルが放出される。放出されたシェルはより速度の速い後続のシェルが衝突することによって、内部衝撃波が発生する。このときに加速された電子が磁場に巻き付き、シンクロトロン放射によって X 線が放出されると考えられている。

## 1.2 GRB の硬 X 線偏光観測

GRB の発見から今までの間に、先行研究者たちは電波からガンマ線にわたってありとあらゆる波長帯域での観測を行ってきたが、その現象の根幹となっている相対論的ジェット（シェル）の形成・加速メカニズムは全く分かっていない。1.1 節で述べたように、GRB が磁場に巻き付いた電子からのシンクロトロン放射によるものであるならば、偏光は GRB 発生領域の磁場の構造を反映するため、ジェット形成機構を理解するための有力な情報となりうる。しかしながら、波長の短い硬 X 線・ガンマ線の偏光については、大気の吸収により宇宙空間での観測が必要となるなどの技術的な困難のため、観測例は少ない。最近では金沢大学によって開発され、JAXA 開発の衛星 IKAROS に搭載された検出器 GAP による GRB の偏光観測が報告されている [3] が、IKAROS は 2013 年末において状態確認運用を断続的に行っているのみであり、今後の偏光観測は難しいと考えられる。また、GAP による GRB の偏光検出の有意度は  $3\sigma$  程度であり、より信頼度の高い偏光観測例を増やすためには、新たな検出器の開発が期待されている。そこで、我々は GRB の偏光観測を行う検出器を搭載した超小型衛星の開発を行っている。

### 1.3 超小型衛星 TSUBAME

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 という超小型衛星開発プロジェクトが行われている。既にこのプロジェクトでは Cute-I (2003年6月打ち上げ)、Cute1.7+APD (2006年2月打ち上げ)、Cute1.7+APDII (2008年4月打ち上げ) という3機の衛星を開発しており、Cute-I と Cute1.7+APDII は現在も運用が続けられている。河合研究室では Cute1.7+APD からこのプロジェクトに参画しており、工学部と協力して衛星の開発を行っている。このプロジェクト4機目の衛星が本衛星 TSUBAME であり、大学レベルで開発する超小型衛星としては世界で初めての天体観測という科学ミッションを行う。

表 1.1 に本衛星の概要を、図 1.3 に衛星の外観を示す。本衛星は図 1.4 のように電源系、通信系、姿勢系、カメラ系、GRB 観測系の5つのサブシステムからなる。

サイズ	500 × 500 × 430 mm <sup>2</sup>
質量	50kg
稼働期間	1年以上
打ち上げ	2014年
想定軌道	高度 600 km の太陽同期軌道
電力	134 W (太陽指向時、稼働期間末期)
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)
ミッション	X線偏光観測装置を用いた GRB の観測 CMG による高速姿勢変更技術の実証 光学カメラによる高分解能撮像の実証

表 1.1: TSUBAME 衛星の概要。

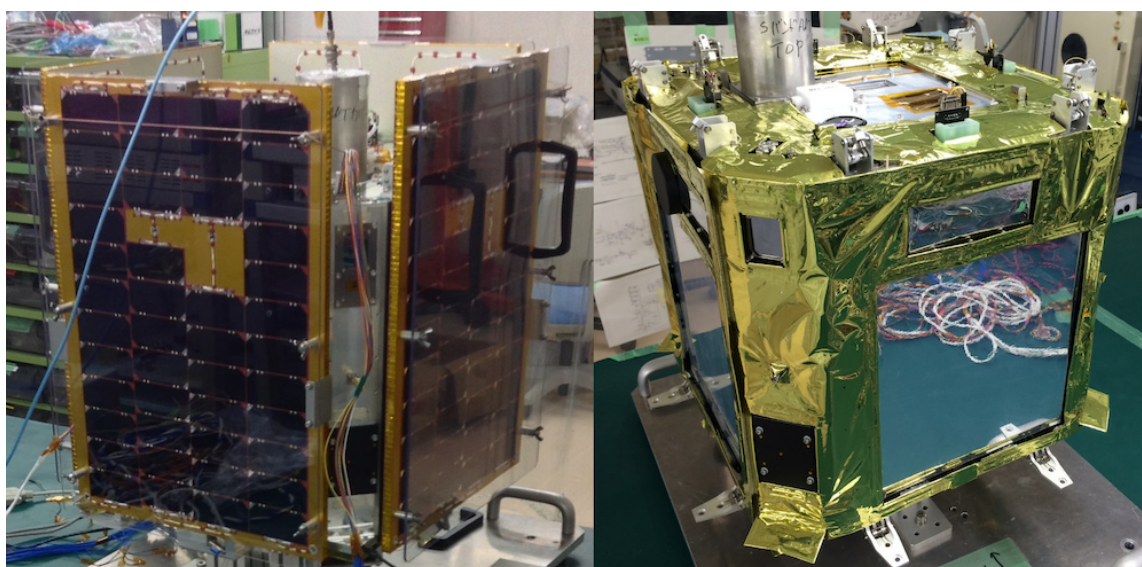


図 1.3: TSUBAME 衛星の外観。左: 太陽電池パネルあり。右: 太陽電池パネルなし。



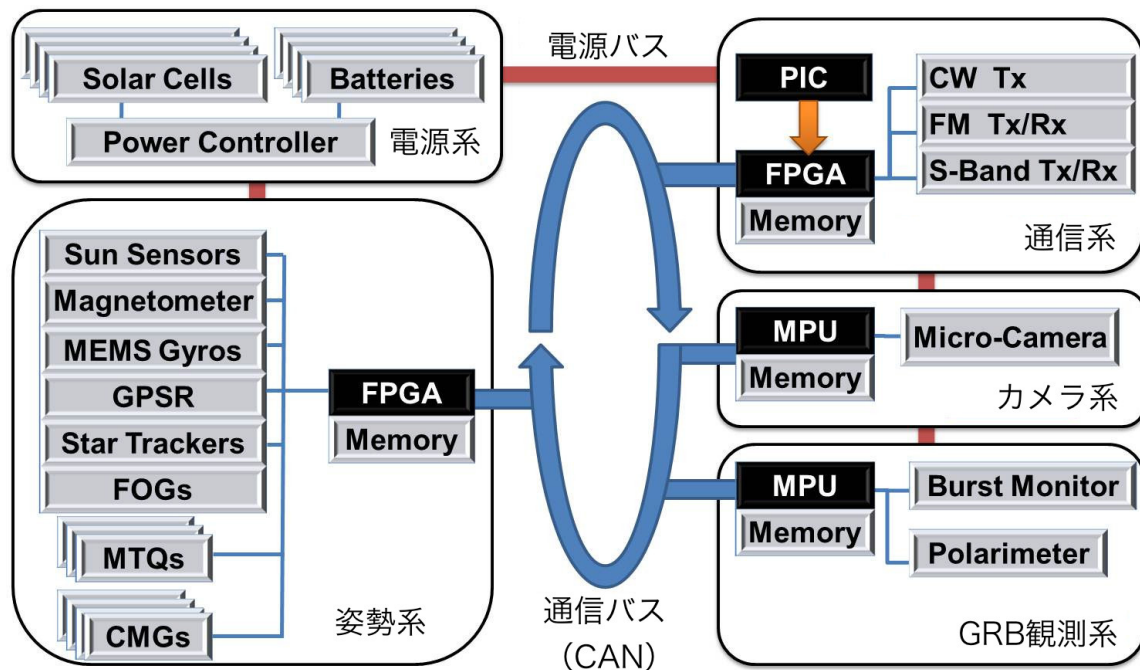


図 1.4: TSUBAME 衛星のシステム構成。

本衛星の主なミッションは3つあり、その中の1つがGRBの偏光観測である。GRBの偏光観測のために、本衛星には広視野バーストモニタ (Wide-field Burst Monitor; 以降 WBM) および硬 X 線偏光計 (Hard X-ray Compton Polarimeter; 以降 HXCP) の2つの検出器が搭載されている。GRB 観測系の詳細については次章で述べる。

## 1.4 GRB 観測ミッション

GRBは全天のランダムな位置から突然 X 線・ガンマ線が降り注ぐ天体現象であるため、観測は視野の大きな検出器を用いて行われることが多かった。しかしながら、X 線・ガンマ線の偏光を観測する場合、偏光計の感度が光軸方向から外れると低下するため、斜めからの入射では系統誤差が大きくなり信頼度が低くなってしまいう問題がある。また、GRBによる X 線・ガンマ線の放射は数秒から数百秒のため、姿勢変更によって偏光計の光軸を一致させる方法は大型の衛星・検出器では難しい。一方、小型衛星では高トルクのアクチュエータを使用すれば比較的高速な姿勢変更が可能であり、GRB発生から短時間での偏光観測が可能となる。

本衛星では、姿勢変更姿勢系のコントロール・モーメント・ジャイロ (Control Moment Gyroscope; 以降 CMG) を利用し、GRB発生から15秒以内からの偏光観測を目指している。図 1.5のように、ミッション中はGRB観測系のWBMが半天を監視し、GRBを検出するとその発生方向を計算し情報を姿勢系に渡す。姿勢変更の後、HXCPは偏光観測を開始する。



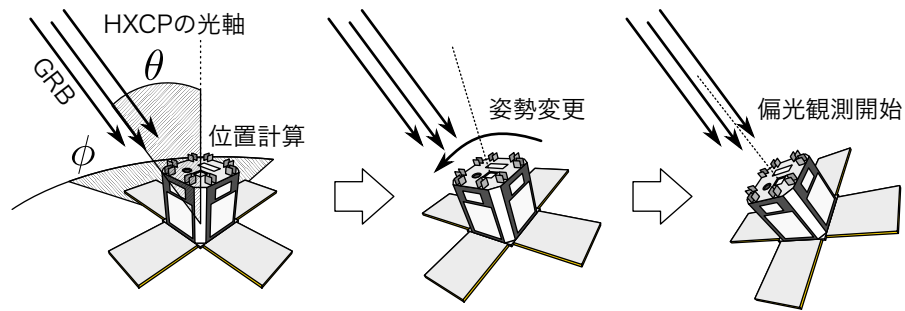


図 1.5: GRB 検知から偏光観測開始までの流れ。

## 1.5 本研究の目的

TSUBAME 衛星の GRB 観測系が、衛星軌道上で実際に観測を行うためには、以下のような機能がソフトウェアに求められる。

- 個々のハードウェアを駆動させる機能（電源の On/Off など）
- 通信系との通信（CAN および UART の送受信）を行う機能
- ハードウェアの状態（House Keeping Data）を取得する機能
- GRB を検出して位置を計算する機能
- 軌道上の環境変化から検出器を保護する機能
- GRB 待機・検知・観測・データ転送といった一連の動作をシーケンスに則って行う機能

このうち、最後の 2 項目についてはソフトウェアが未実装であったため、その実装を行った。軌道上では、日照・日陰にともなって衛星の温度が変化する。検出器に使用している光検出器は温度によって性能が変化し、場合によっては壊れてしまう可能性がある。検出器保護機能は、検出器を壊さずに観測を行うために、温度によって印加電圧の調整等を行う機能である。開発にあたっては、まず各温度における検出器の性能を調べた。その結果からプログラムを実装し、試験を行って実際に検出器保護機能が機能していることを確認した。シーケンス制御機能の開発では、検出器の動作モードを定義し、フローチャートを作成してプログラムを開発した。本論文では検出器保護機能の実装にあたって実施した環境試験についてまとめ、実装した機能が期待した動作を達成していることを説明する。また、実装中の観測シーケンスの内容についても説明する。

## 第2章 GRB観測機器

### 2.1 全体の機器構成

ソフトウェアの説明の前に、GRB観測系のハードウェア構成について説明する。GRB観測系を筐体ごとに分類すると、回路ボックス、WBM、HXCPの3つに分けられる。図2.1にTSUBAME衛星内での機器の配置を示す。

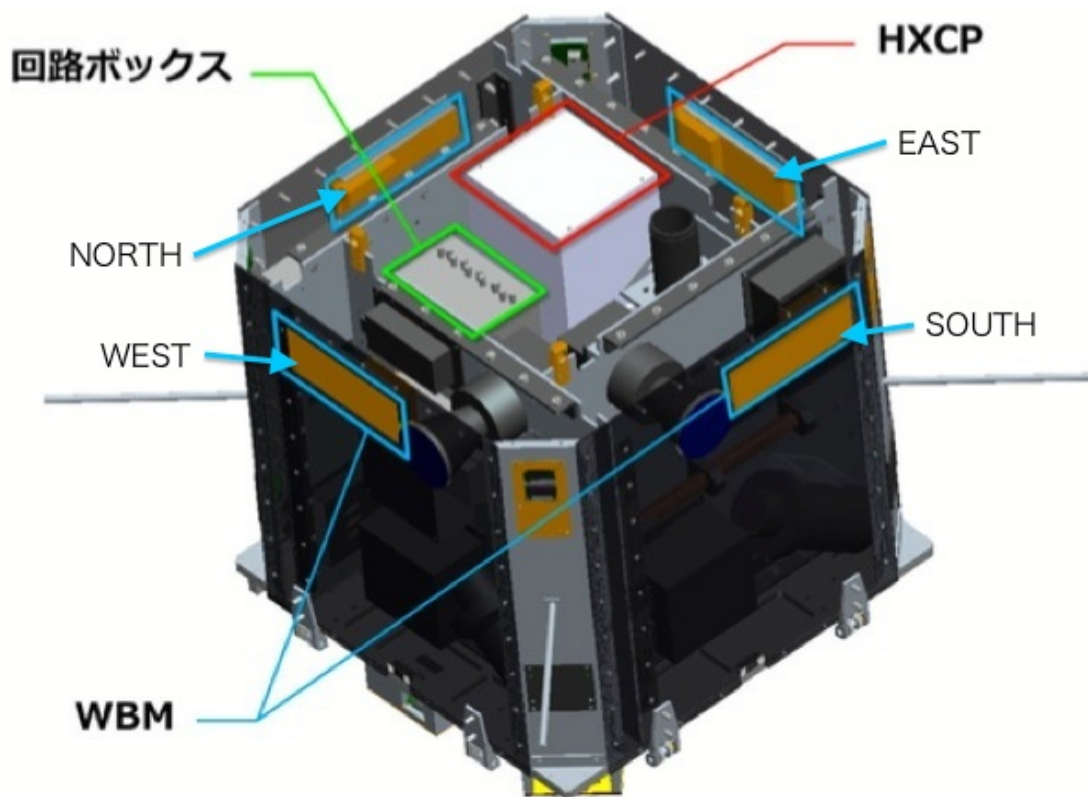


図 2.1: TSUBAME 衛星内での機器配置図。衛星上部のパネルを外した状態を表しており、実際には上部にも WBM の検出器が設置される。

### 2.2 回路ボックス

回路ボックスはGRB観測系のCPUがある筐体であり、各検出器の制御のほか、衛星バスとの通信などを行う。回路ボックスは電源基板、CPU基板、WBM電源基板、WBMロジック基板という4枚の基板で構成される。

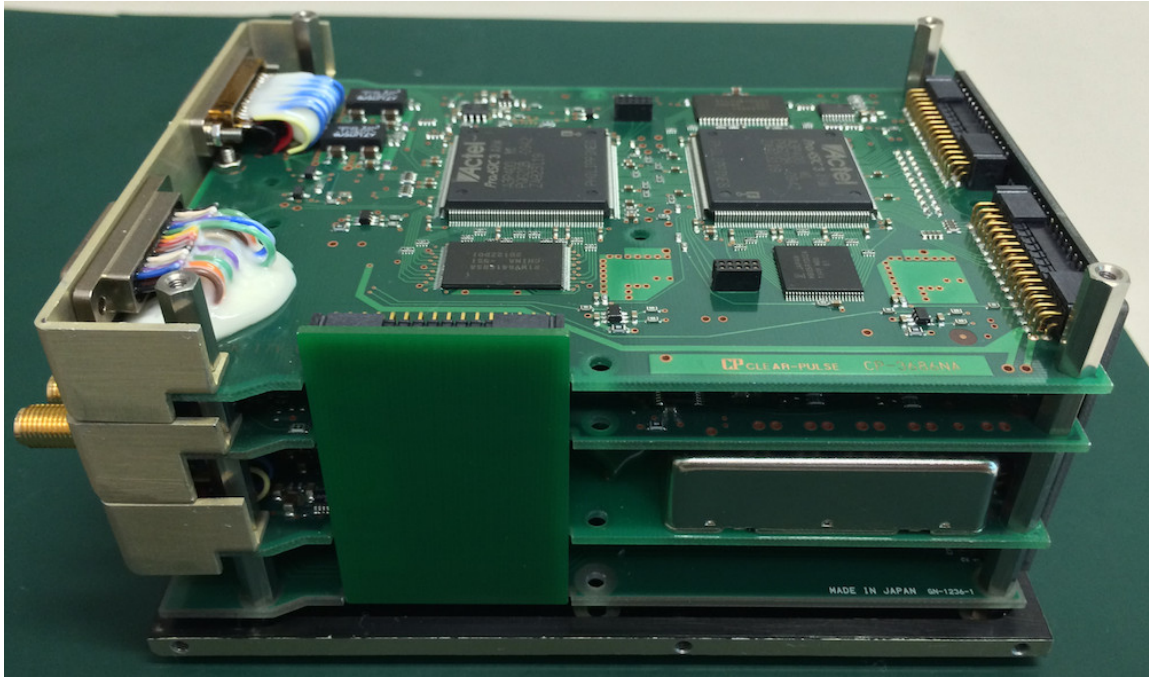


図 2.2: 回路ボックス内部の写真。4 枚の基板はそれぞれ上から CPU 基板、WBM ロジック基板、WBM 電源基板、電源基板である。CPU 基板上に見える 2 つの大きな正方形の素子は、右側が CPU 用 FPGA、左側が HXCP 用 FPGA である。

### 2.2.1 電源基板

GRB 観測系では、+12V を共通の電源として使用する。TSUBAME 衛星はこれまでの衛星開発プロジェクトで開発してきた CubeSat と比較して、電力もサイズも大きい。特に姿勢変更で用いる CMG は大出力のモーターを用いることから、システム間の電磁干渉を避ける目的でメインバス (19 ~ 31 V) と各サブシステムは独立した電源電位をもつ仕様となっている。このため、メインバスから供給された電力は電源基板の絶縁型 DCDC コンバータで変圧してサブシステム側に供給する。同様に、全ての通信回線も電源基板に実装した電磁カプラーにより絶縁を施している。このため、衛星バスとの電氣的インターフェースは全てこの電源基板に集中している。電源基板には他系との接続のためのコネクタが実装しており、電源系、通信系、デバッグ用の外部コネクタとそれぞれ接続される。

### 2.2.2 CPU 基板

図 2.3 に CPU 基板の構成図を示す。CPU 基板は GRB 観測系の CPU 部分と、HXCP のデータ入出力を行うための HXCP デジタル処理部分からなる。CPU 部分には CPU 用 FPGA のほか、強誘電体ランダムアクセスメモリ (FRAM)、CPU 用スタティックランダムアクセスメモリ (SRAM)、CAN コントローラおよびトランシーバが搭載されている。

FPGA は集積回路の一種であり、ユーザーが任意に論理回路を構成することができる。CPU 用の FPGA には FPGA への実装用に設計された Cortex-M1 プロセッサが組み込まれており、GRB 観測系の制御を行うプログラムを実行する。

FRAMは128kByteの不揮発性のメモリであり、電源を切ってもその内容が消えない。このメモリにCPUの動作プログラムを格納する。SRAMは512kByteのメモリである。揮発性であるため、電源を切ると内容が失われる。FRAM内に格納されたプログラムは、GRB観測系の電源投入後SRAMにコピーされてから実行される。

CANコントローラ・トランシーバはTSUBAMEの各サブシステム間の通信を行う。CANは主に車載ネットワーク用に開発された相互通信規格であり、1つのCANバスに複数のデバイスが接続する。差動電圧送信を利用して耐ノイズ性能を向上しており、TSUBAMEでは1Mbpsで通信を行う。CANの1つのパケットは3byteのコマンド部分と8byteのデータ部分があるため、観測データは8byteごとに分割して送信することになる。

HXCP部については、2.3節で説明する。

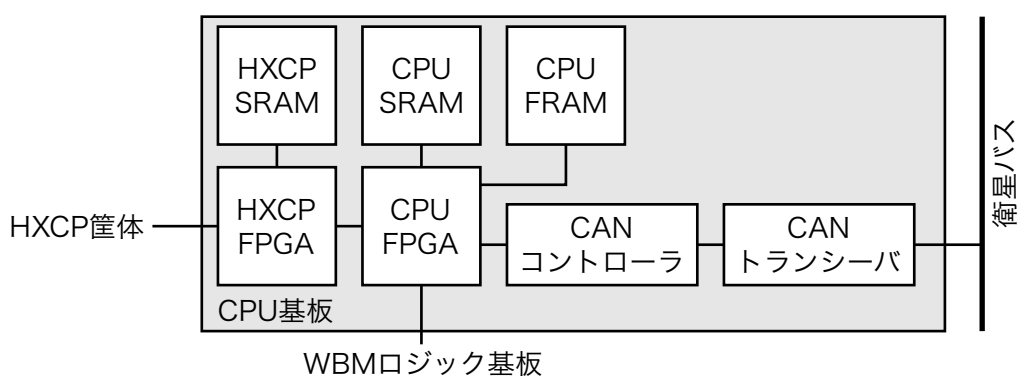


図 2.3: CPU 基板の構成図。

### 2.2.3 WBM ロジック基板・WBM 電源基板

この2枚の基板は、それぞれWBMの信号処理と電源供給を行う基板である。2.4節で説明する。

## 2.3 HXCP

図2.4にHXCP（硬X線偏光計）の構成図を示す。HXCPはコンプトン散乱を利用して偏光観測を行う検出器であり、放射線検出器部分と信号処理部分、およびバックグラウンド低減のための3層シールドからなる。放射線検出器部分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（以降MAPMT）からなる散乱体部分と、CsI(Tl)シンチレータとアバランシェフォトダイオード（以降APD）からなる吸収体部分で構成される。コンプトン散乱を利用した偏光測定の原理については常世田修論[4]にまとめられている。

コンプトン散乱を検出するためには、X線・ガンマ線が散乱体に入射して散乱され、吸収体で吸収されなければならない。図2.4から、HXCPの光軸をGRB発生方向に向ける必要があることが分かる。2012年度に実施したHXCP性能実証実験の結果では、HXCPで偏光を観測するためには、HXCPの光軸がGRBの発生方向から30°以内で



あれば問題なく偏光を検出できることが分かっている [4]。HXCP の光軸を GRB 発生方向の 30° 以内に導入するためには、次節で述べる WBM が必要になる。

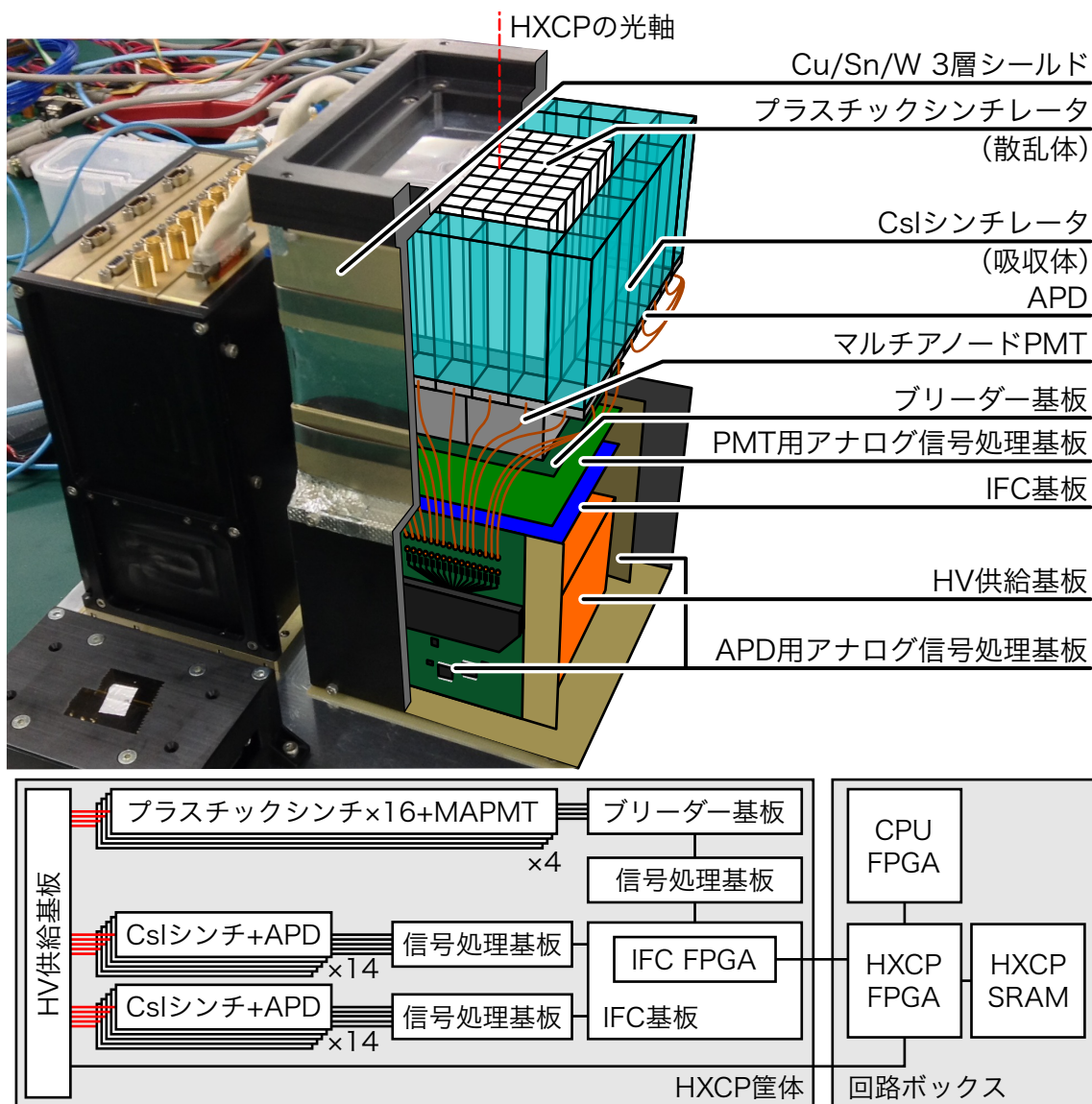


図 2.4: HXCP の構成図。IFC 基板は各アナログ信号処理基板の制御を行う基板である。CPU 用 FPGA と HXCP は CPU 基板上の HXCP 用 FPGA を介して接続されている。HXCP で取得したデータは HXCP 用の SRAM に保存される。

## 2.4 WBM

WBM は  $120 \times 30 \times 5 \text{ mm}^3$  の CsI(Tl) シンチレータと APD からなるシンチレーション検出器 5 つと、回路ボックス内のロジック基板および電源基板で構成される。衛星内での位置は図 2.1 の通りであり、WEST、NORTH、TOP、EAST、SOUTH と名前がつけられている。検出器はそれぞれ衛星の 5 面に分けて設置されているため、常に半天を監視できる。シンチレーション検出器の CAD 図を図 2.5 に示す。

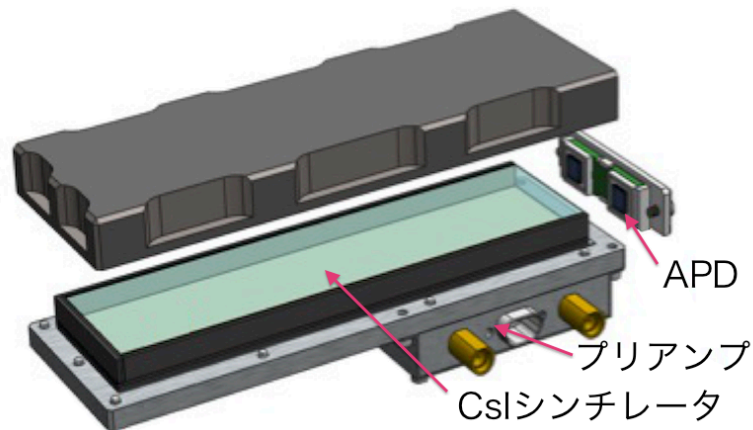


図 2.5: WBM 検出器部分の CAD 図。検出面ではない側面および背面には、バックグラウンド低減用の 3 層シールドが搭載されている。

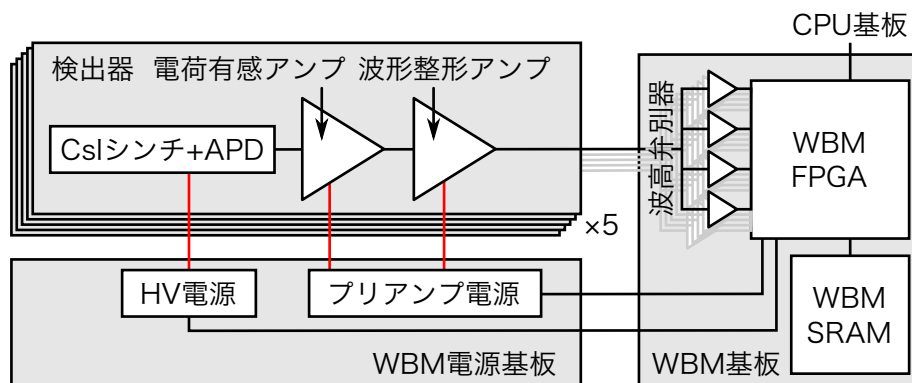


図 2.6: WBM の構成図。

APD からの信号は微弱であり、MTQ や CMG からの干渉を抑える目的で初段の電荷有感アンプは WBM 筐体内に内蔵している。APD の信号は増幅・整形されて回路ボックス内の波高弁別器に入る。波高弁別器では 4 つの閾値を任意に設定でき、初期値は 30keV、80keV、200keV、400keV に設定されている。これにより、例えば初期設定であれば、30-80keV、80-200keV、200-400keV の 3 バンドのカウントレートを取得することができる。

5 つの検出器を含めた WBM 全体のシステム構成図を図 2.6 に示す。WBM 用 FPGA は各検出器で検出した光子数を 0.125 秒間ずつ積分する。積分したデータは WBM 用の SRAM にリングバッファの形で一時的に保存され、CPU ではこの積分データを用いて 0.125 秒ごとに GRB の判定が行われる。リングバッファは約 16400 秒 (4 時間 30 分) の観測データを保存する容量があり、GRB を検知した場合は GRB のトリガから遡ってデータを取得することができる。

## 第3章 検出器保護機能の実装

衛星軌道上では、地上では考えることのない様々な危険が存在している。具体的には、太陽フレアや荷電粒子帯における放射線障害、厳しい温度環境、衛星のトラブルによる突然の電源喪失などである。これらのトラブルから装置を守り、性能を維持することが衛星開発の基本である。この章では、特にソフトウェア的な観点から、WBM および HXCP を衛星軌道上で壊さずに観測するための機能について述べる。この機能は WBM と HXCP のそれぞれに必要であり、各検出器の試験内容とその結果をまとめる。

### 3.1 アバランシェフォトダイオードの温度特性

WBM および HXCP では、検出器部分にアバランシェフォトダイオード (APD) を使用している。APD は小型の半導体光検出器であり、衛星のように容積が限られる場合に最適な検出器である。逆バイアス電圧を印加して使用し、シンチレーション光のような微弱な光を増幅して測定するため、従来のフォトダイオードと比較して高い S/N 比を達成することができる。

この APD の使用にあたっては、温度が重要になる。GRB 観測系では、基本的には APD の増幅率を 50 として観測を行う予定であるが、APD の増幅率  $M$  は温度  $T$  が低いほど増幅率が大きくなるという特性があり、その割合は先行研究から

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dT} \simeq -2.6\%/ \quad (3.1)$$

程度である [13]。この特性によって起こる問題として、例えば、20 において増幅率が 50 となるような HV を維持したまま衛星が日陰に入ると APD の温度が下がると、APD の増幅率が 50 を超え、正しいデータが取得できなくなる上に、APD からの過剰な電流により後段のプリアンプ回路が壊れてしまうことも考えられる。このような故障を防ぐために、軌道上においては検出器の温度を常にモニタして HV 値の調整を行わなければならない。

なお、現在 (平成 26 年) 開発中の次期 X 線国際天文衛星 Astro-H の検出器も同様の問題を抱えており、我々の経験をフィードバックすることができる。



## 3.2 WBM APDの印加電圧制御

### 3.2.1 温度依存性の測定

HV制御機能を実装するためには、まず検出器ごとの温度・電圧・増幅率の関係を測定し、APDの特性を把握する必要がある。GRB観測系で使用しているAPDはあらかじめ放射線照射試験前後のブレイクダウン電圧（逆バイアス状態でもわずかに流れる電流が急激に大きくなる電圧）の測定を行って異常がなく、さらに低温におけるブレイクダウン電圧に異常がないものを選別している[6]。しかしながら、WBMでは5つの検出器のそれぞれでAPDを2個ずつ使用しているため、検出器ごとの温度特性を知るためにはAPDを組み込んだ状態で測定を行う必要がある。

この測定は昨年度に行っており[6]、その結果を図3.1に示す。同じHV値の場合、低温ほど増幅率が大きくなることがわかる。

### 3.2.2 機能の実装

測定データから、HV値を制御するための関数を作成する。WBMに特有の問題としては、それぞれの検出器が衛星の異なる面についているため、検出器ごとの温度に差が出ること、その一方で、電力的制約からAPD用のHV電源が1つしかないことが挙げられる。つまり、それぞれの検出器で設定した増幅率 $G = G_0$ を達成する電圧 $V_1, \dots, V_5$ を計算できても、検出器ごとに異なる電圧を印加することはできない。したがって、 $V_1, \dots, V_5$ からHV値 $V_{\text{apply}}$ を1つに決定しなければならない。

運用上、確実に避けなければならないのは、最も低温のAPDがブレイクダウンして壊れたり、後段の電荷有感アンプを損傷することである。したがって、 $V_{\text{apply}}$ は $V_1, \dots, V_5$ の最小値を採用する。以上をまとめると、HV制御関数のフローチャートは図3.2のようになる。温度計が故障するなどの異常によって正しくHV値の計算ができなくなった場合に備えて、連続して計算に失敗した場合にはHVを下げる処理を入れてある。以下、フローチャート上で(a)(b)(c)(d)と示された部分について、説明を加える。

(a) 検出器 $i$ の温度を取得 WBMの検出器温度は、各検出器内のプリアンプ基板の上に設置された温度計(AD590)によって測定されており、HV制御にはこの値を用いる。これらの検出器温度情報は、検出器の状態を把握するためのハウスキーピングデータ(以降HK)として電圧値・電流値などとともに1秒ごとに保存しているため、この制御でもHKで取得された温度データを使用する。

(b) 印加すべき電圧 $V_i$ を計算  $V_i$ は増幅率 $G$ と温度 $T_i$ の関数 $V_i(G, T_i)$ として表せる。WBMのHV制御関数においては、 $V_i(G, T_i)$ をあらかじめ測定されたデータマトリックスから線形補間によって計算する。データマトリックスはプログラム中に格納されており、これらの処理は衛星上で全てリアルタイムで行われる。図3.3にその概念図を示す。

最初に、増幅率と温度の組 $(G, T_i)$ に最も近い4点の測定データを探す(図3.3左の赤い点)。その4点の電圧値から、温度方向と増幅率方向の線形補間によって $V_i$ を

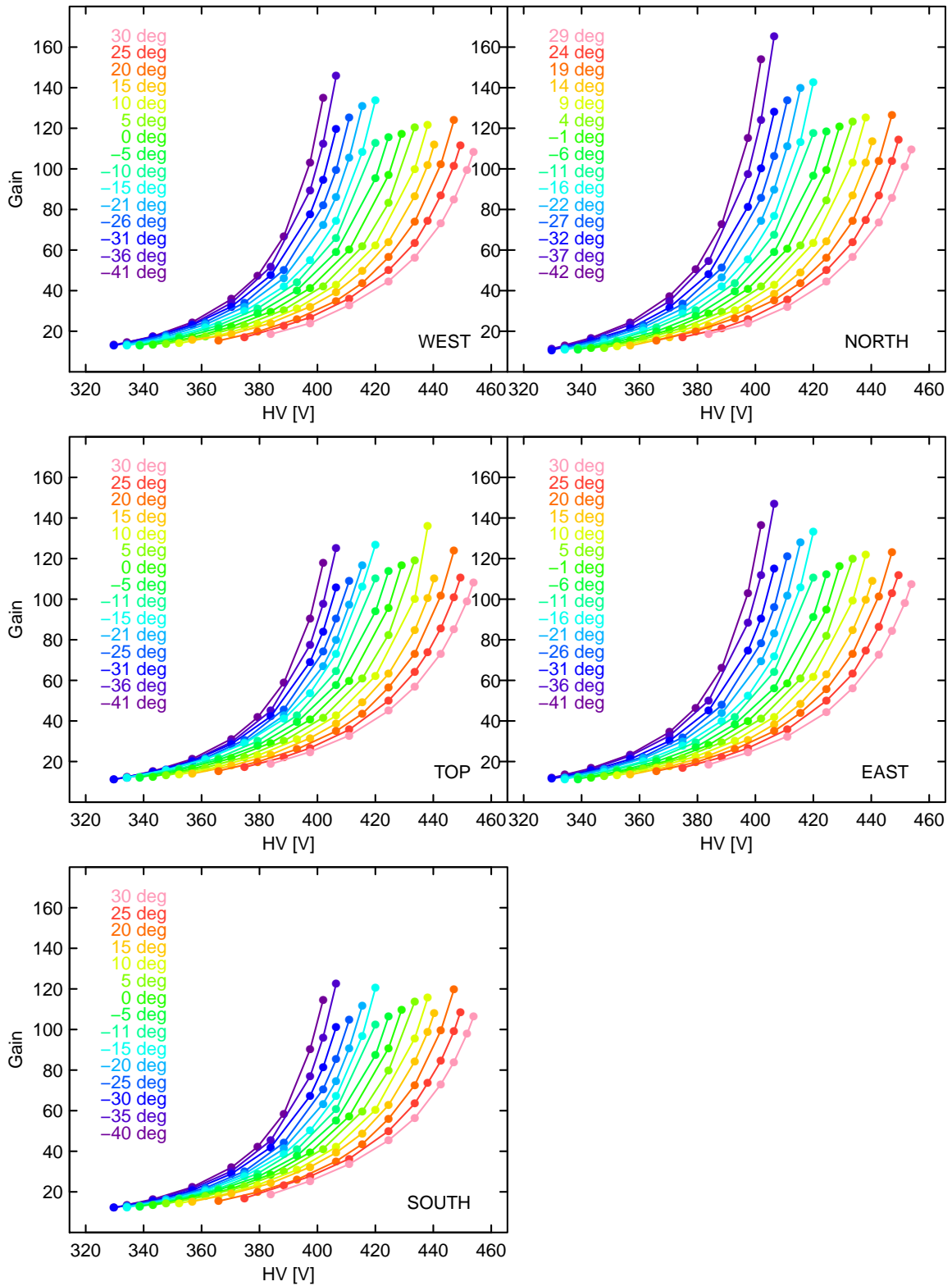


図 3.1: WBM の 5 つの検出器についての増幅率の温度依存性。

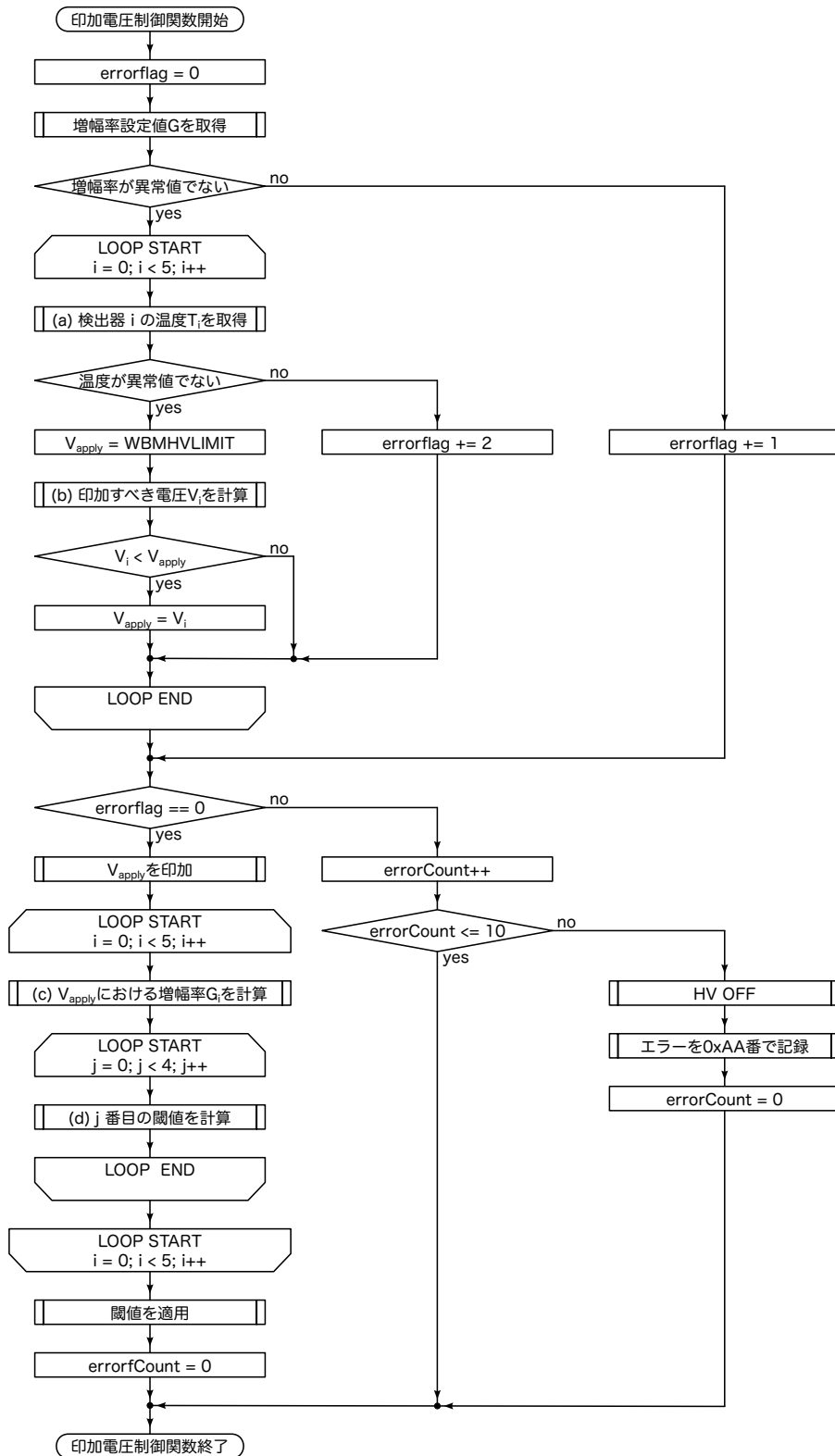


図 3.2: WBM HV 制御関数のフローチャート。(a)(b)(c)(d) については本文の説明を参照。errorFlag は関数内部で異常があった場合に加算される。異常が 1 度あると errorCount が 1 ずつ加算されていき、10 回エラーが続いた場合には HV 制御を停止し、HV 値を 0V に設定する。

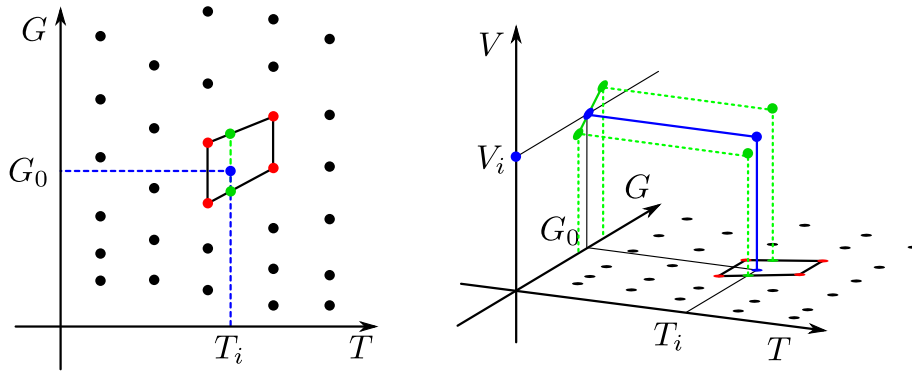


図 3.3: HV 値  $V_i$  の計算方法。説明は本文を参照。

求める。先に温度方向について補間を行い、図 3.3 右の緑の 2 点を得る。次にその 2 点から増幅率方向に補間を行い、 $V_i$  (図 3.3 右の青い点) を得る。

線形補間によって 2 点  $(G_L, V_L), (G_H, V_H)$  から増幅率  $G = G_0$  における HV 値  $V = V_i$  を求めるには、以下の式を使用している：

$$V_i = \frac{V_L(G_H - G_0) + V_H(G_0 - G_L)}{G_H - G_L}。 \quad (3.2)$$

(c)  $V_{\text{apply}}$  における増幅率  $G_i$  を計算  $G_i$  の計算は、 $G_i$  を温度  $T_i$  と HV 値  $V_i$  の関数  $G_i(T_i, V_i)$  として、 $V_i$  の計算と同様に行う。

(d)  $j$  番目の閾値を計算 計算して求めた  $G_i$  を元に、30keV、80keV、200keV、400keV に相当する閾値  $S_i$  を計算する。初期値として  $G_i = 50$  の場合の閾値  $S_{50i}$  が分かっているため、閾値  $S_i$  は以下の式で求める。

$$S_i = S_{50i} \frac{G_i}{50} \quad (3.3)$$

ここで求められた閾値  $S_1, \dots, S_5$  を各検出器に設定する。

### 3.2.3 実装した機能の動作確認試験

実装した HV 制御機能の動作確認試験についてまとめる。

#### 実験の目的

実装した HV 制御機能により、特に APD の増幅率が大きくなる低温において WBM の APD 増幅率が設定値以下に保たれ、検出器が壊れないことを確認する。

## 実験セットアップ

実験セットアップを図 3.4 に示す。回路ボックスおよび WBM を恒温槽に入れ、 $-20$ 、 $0$ 、 $25$  で  $^{137}\text{Cs}$  線源のスペクトル測定を行う。増幅率が異なる場合、スペクトルに現れる  $^{137}\text{Cs}$  のピークの位置がずれる。増幅率を 50 に設定した場合、WBM は  $+25$  において壊れずに動作することが分かっているため、この実験でも増幅率を 50 とし、 $-20$ 、 $0$  におけるピークの位置が  $+25$  での位置と同じであることを確認する。

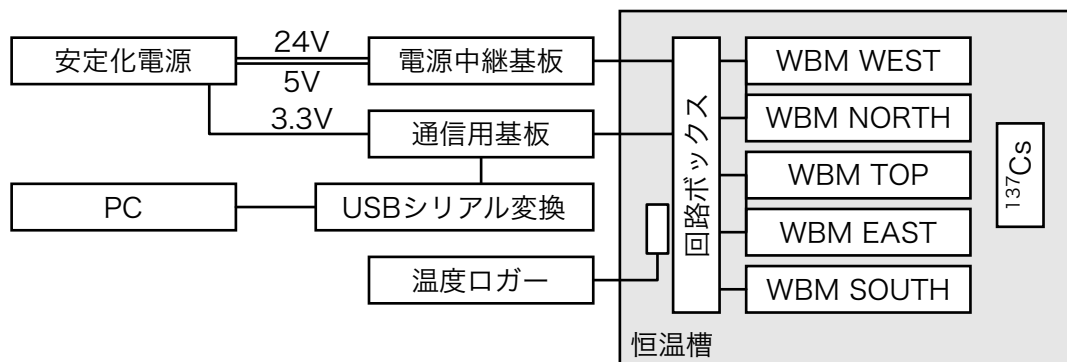


図 3.4: WBM HV 制御機能試験のセットアップ。

## 実験結果

取得したスペクトルを図 3.5 に示す。スペクトルから、各温度において同じ位置にピークが見られており、HV 制御機能が機体通りの動作をしていることが分かる。表 3.1 にスペクトルのピーク位置の解析結果を示す。

温度	WEST	NORTH	TOP	EAST	SOUTH
$-20$	400.5	428.4	415.1	485.6	448.7
$0$	398.1	420.2	408.8	481.7	445.0
$+25$	404.2	421.3	410.1	491.8	447.9
$\Delta p[\%]$	1.49	1.70	1.22	2.06	0.65

表 3.1: 各温度における  $^{137}\text{Cs}$  のスペクトルのピーク位置。 $\Delta p$  として  $+25$  におけるピーク位置からのずれの割合の最大値を示した。

## まとめ

実験結果から、 $-20$  から  $+25$  の範囲において WBM の APD の増幅率は  $50 \pm 2\%$  の範囲に制御できていることが分かった。したがって、実装した HV 制御機能は問題なく動作し、低温条件下でも WBM の検出器を壊すことなく使用することができるようになった。

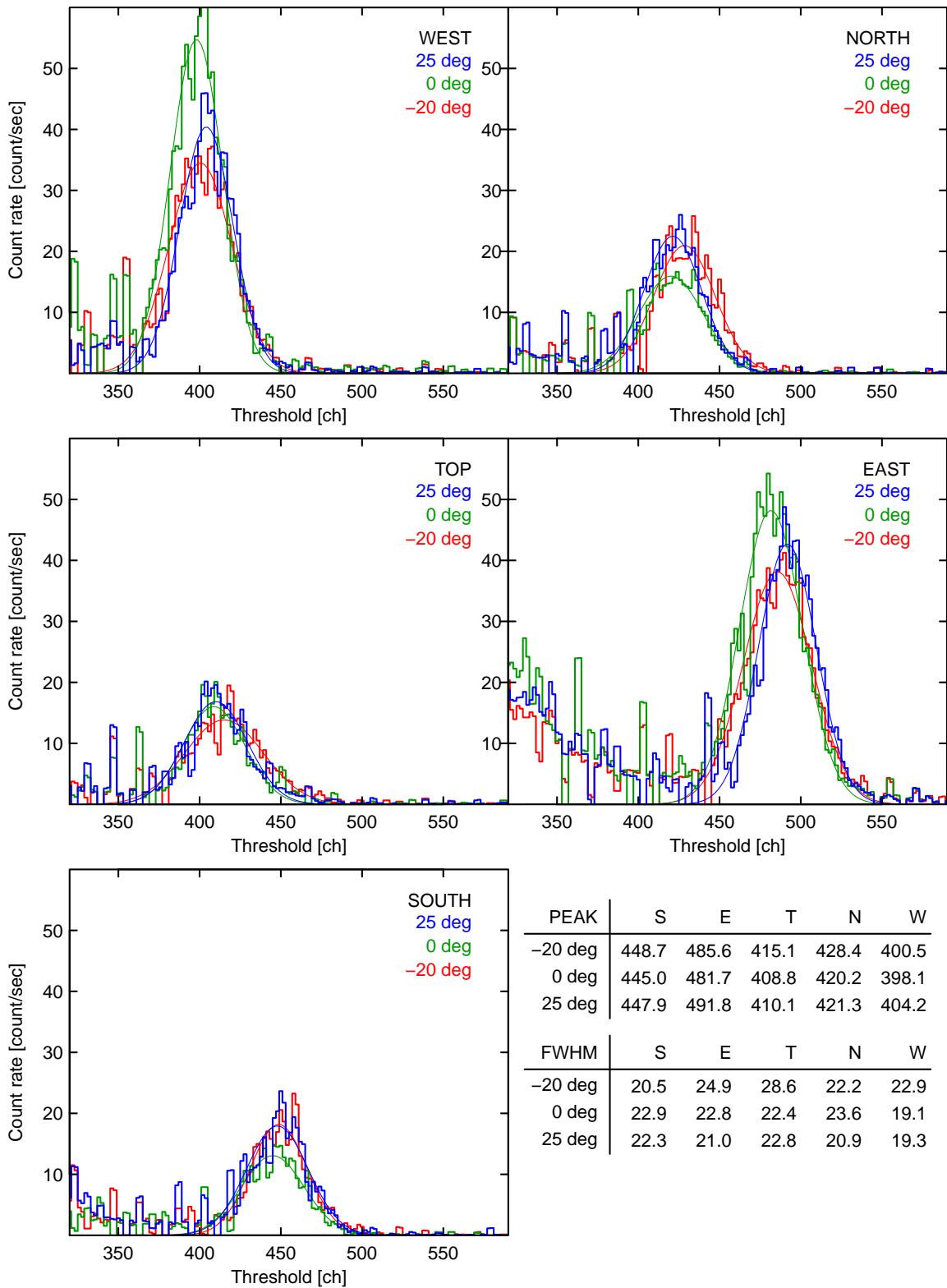


図 3.5: WBM HV 制御機能を動作させて取得した  $^{137}\text{Cs}$  のスペクトル。曲線はガウス関数のフィッティング結果である。検出器ごとのカウントレートの差は線源からの距離が主な原因である。

### 3.3 HXCP APD の印加電圧制御

HXCP の吸収体部分は CsI(Tl) シンチレータと APD を組み合わせたシンチレーション検出器であり、WBM の APD と同様に温度による HV の調整機能が必要である。ただし、HXCP は銅・錫などのシールドで覆われているため、個々の APD の温度は同一であると考えてよい。

#### 3.3.1 温度依存性の測定

まずは、HXCP の APD に関する増幅率の測定を行う。

##### 測定セットアップ

測定のための機器セットアップを図 3.6 に示す。温度は  $-30$  から  $+20$  まで  $10$  ずつ、合計  $6$  つの温度で HV 値を変化させながら  $^{137}\text{Cs}$  のスペクトルを取得する。APD が過剰な増幅率になることを避けるため、十分に低い電圧から順に、増幅率が  $50$  を超えるまで測定する。

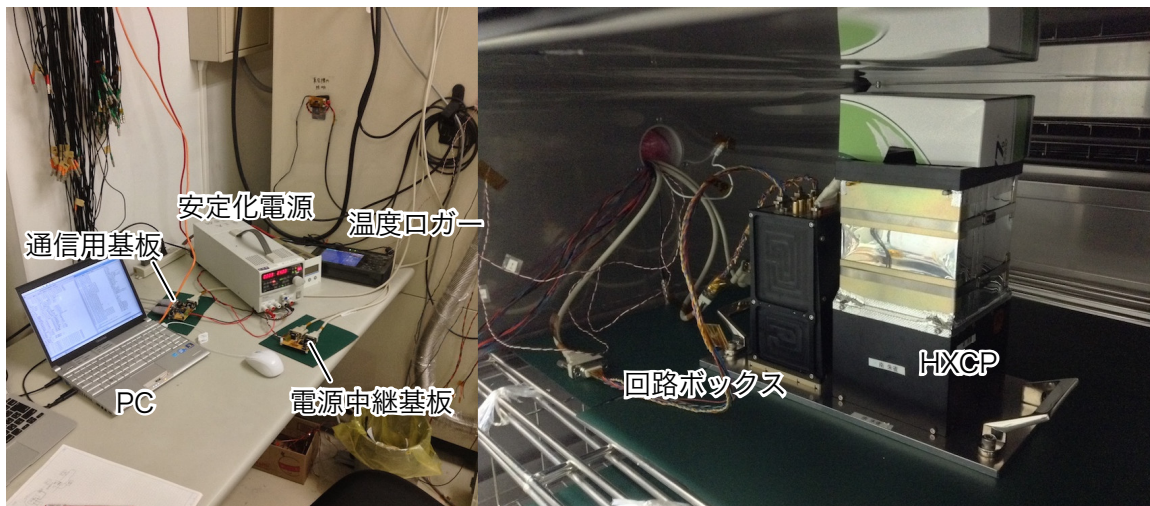
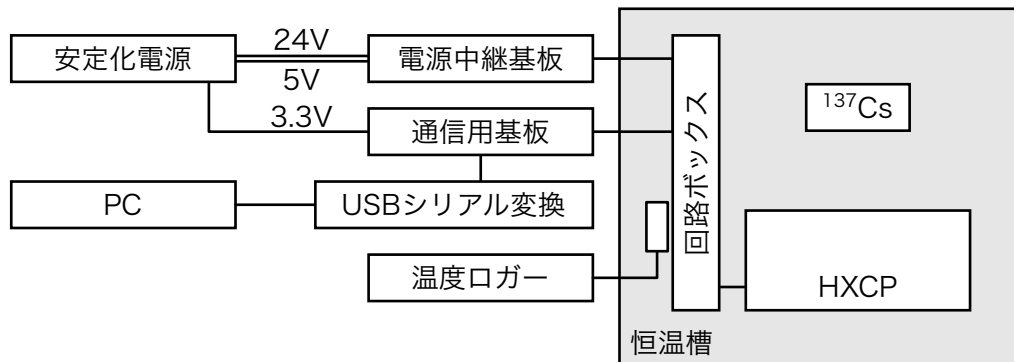


図 3.6: HXCP APD 温度依存性測定のためのセットアップ (上)。左下は恒温槽外部、右下は恒温槽内部の写真である。



## 測定結果

温度依存性の測定結果を図 3.7、3.8 および図 3.9 に示す。HXCP は 28ch ある APD のいずれか 1ch でトリガがかかった場合に全ての ch の波高値を 12bit 出力の ADC を用いて読み出す仕様であり、トリガした ch の情報は保存されない。ただし、光子イベントを検出した ch は波高値が 28ch 中で突出するため、波高値からトリガの有無を判定する。トリガ時の値と光子イベントを検知していない場合の波高値（以降ペDESTAL 値）との差が CsI シンチレータにおいて光子が失ったエネルギーに相当する。データ解析にあたっては、ペDESTAL と光子イベントを分離するため、全データのヒストグラムに加えて、1 イベントにつき最大値となっている ch のみを抽出したヒストグラムを描いた。

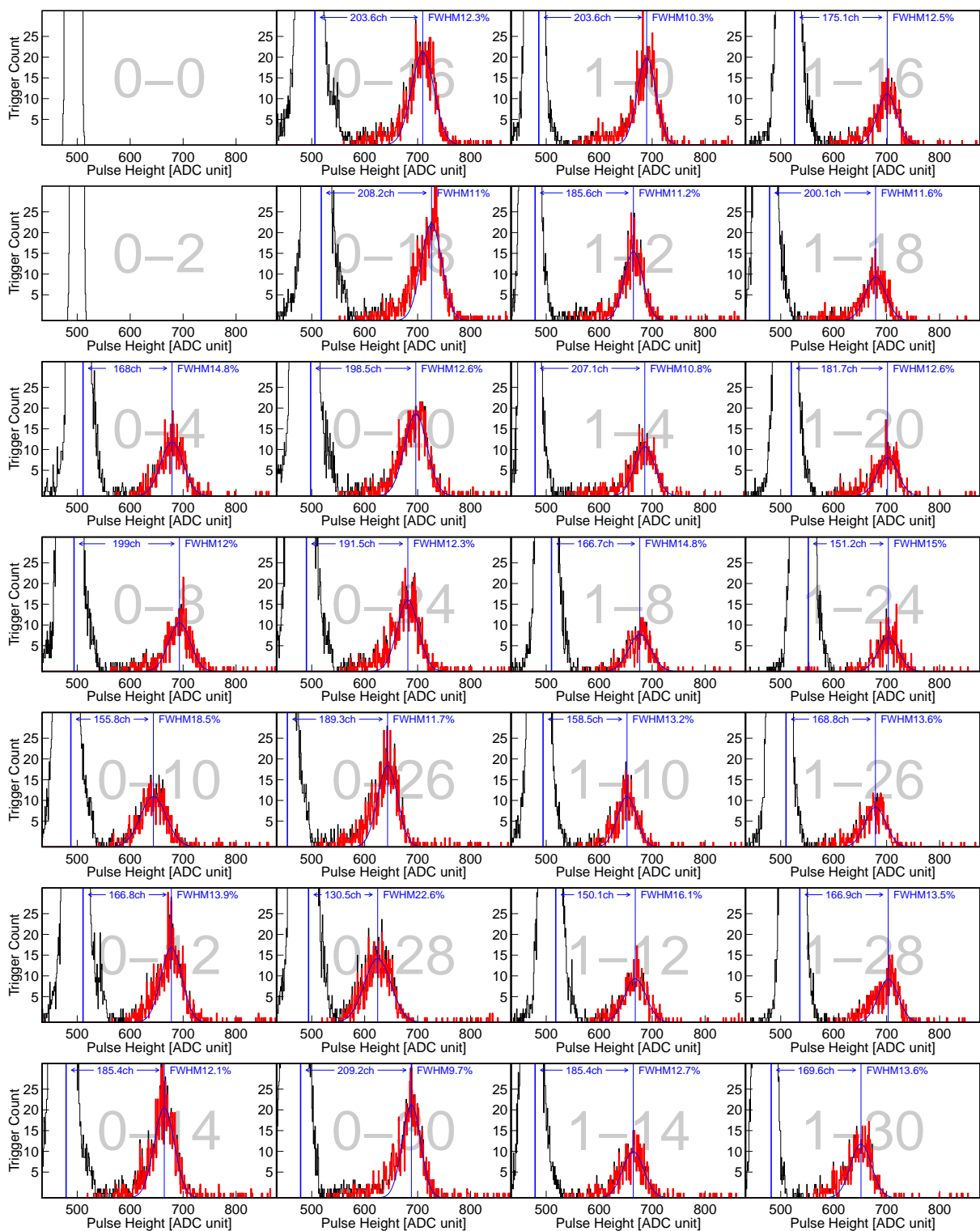


図 3.7: HV=397.4V (DAC 設定値 880)、温度 25 における  $^{137}\text{Cs}$  のスペクトル。この条件を増幅率 50 として他の温度での増幅率を見積もる。黒線は全データのヒストグラム、赤線は波高値が最大のイベントについてのヒストグラムである。ペDESTAL (黒) と光子イベント (赤) が分離できていることが分かる。なお、トリガのスレッシュホールドを光電ピーク付近に設定していたため、コンプトン端などは見えていない。ペDESTAL 値が分布の右側に偏っているが、この理由については図 3.8 で説明する。0-0 と 0-2 の ch については信号が読み出せなかったが、後日、原因は APD の故障であることが分かったため、予備の APD と交換した。

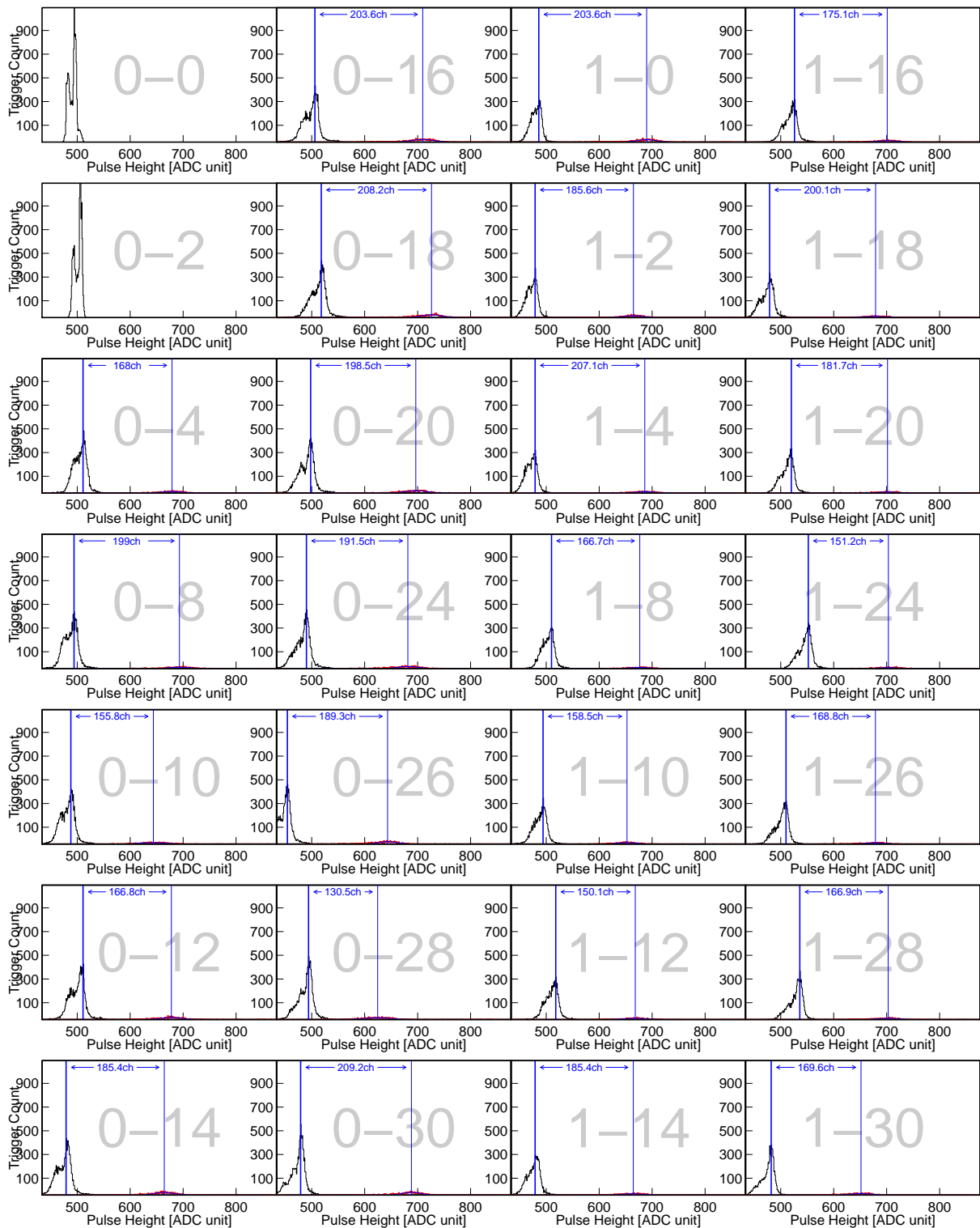


図 3.8: HV=397.4V (DAC 設定値 880) 温度 25 における測定時のペDESTALの分布。図 3.7 の縦軸のスケールを大きくしたものである。APD 故障で信号が読み出せなかった 0-0 と 0-2 の ch の分布を見ると、ペDESTALが 2 つのピーク  $P_{左}$  および  $P_{右}$  を持っており、ピークの高さは  $P_{右}$  が  $P_{左}$  の 2 倍ほどになっていることがわかる。この構造はどの ch でも同様の傾向が見られているが、この原因はまだわかっていない。増幅率測定においては、 $P_{右}$  の位置をペDESTALとして採用した。このため、図 3.7 のペDESTAL位置が右側に偏っているように見えてしまっている。

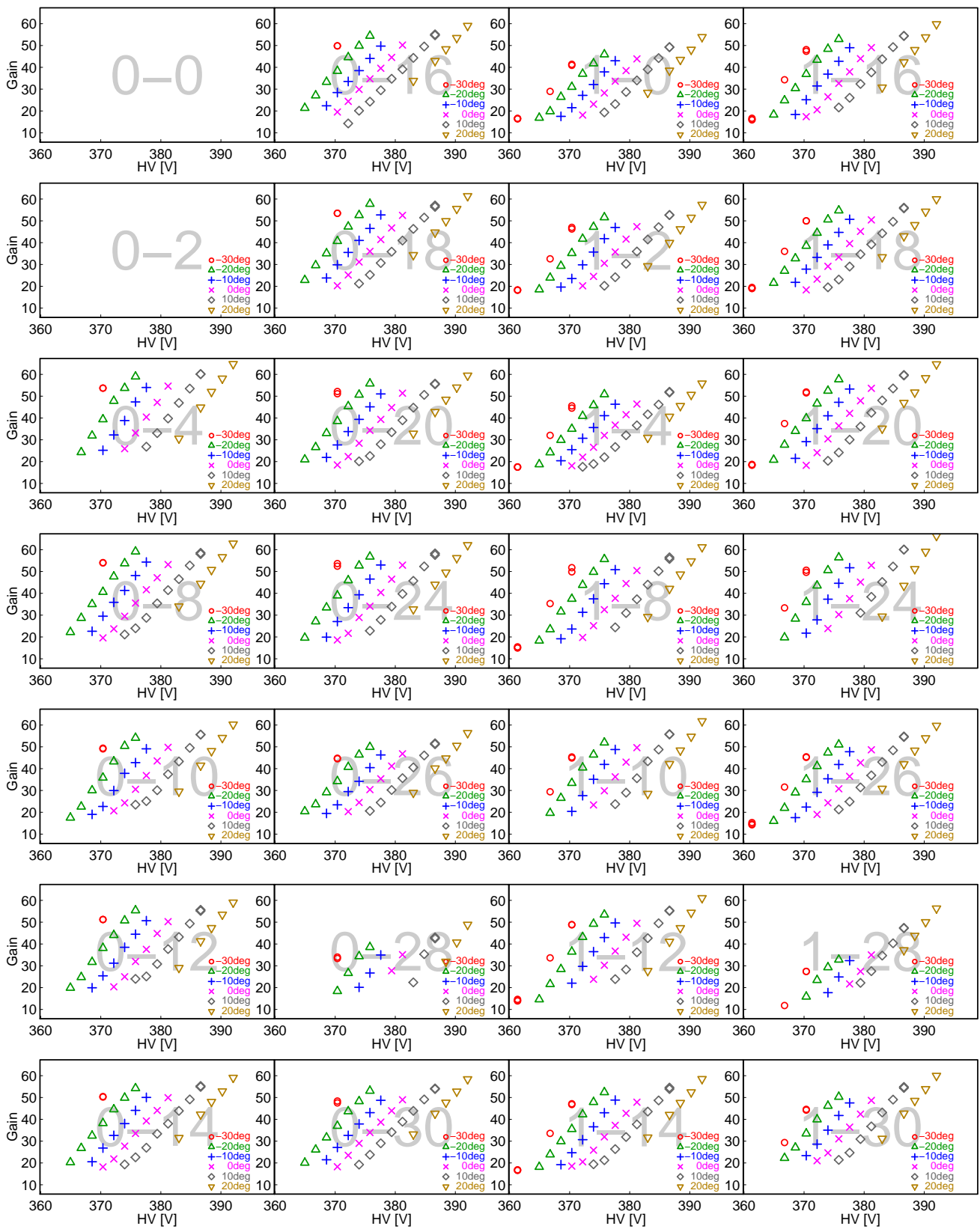


図 3.9: 温度・HV・増幅率の測定結果。HV 値はDAC 設定値を  $V = 462.5 \times V_{DAC}$  値/1024 で換算してある。

### 3.3.2 機能の実装

測定結果から、HV 値を制御するための関数を作成する。HXCP には 28 個の APD が使用されており、これら全ての APD を保護する必要がある。そのためには、28 個の APD の中から一番増幅率の大きい APD を選択し、その APD の増幅率が過剰な値にならないようにすればよい。

#### HV 制御に使用する APD の選出

HV 制御に仕様する APD を選出するため、まずは各温度、HV 値ごとに APD の増幅率を調べる。図 3.9 の結果を温度と HV 値に着目してまとめた図を 3.10 に示す。また、増幅率が最大となった回数を表 3.2 にまとめた。

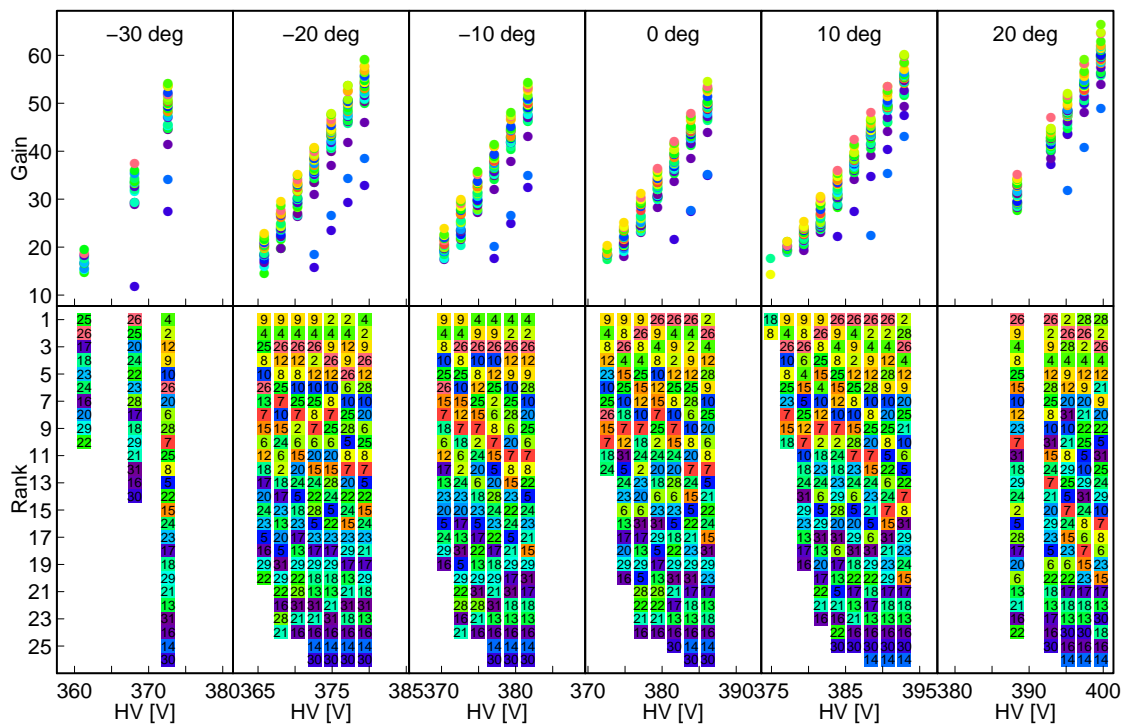


図 3.10: 温度と HV 値に着目してまとめ直した測定結果。上側は増幅率のグラフであり、1 つの枠に全 ch の APD の増幅率を描いた。下側はその結果から各 HV 値ごとに増幅率の順位を調べた結果である。上側に描いてある番号ほど、増幅率が大きい。

順位	1	2	3	4	5	備考
最大となった回数	12	10	6	5	2	
図 3.10 での番号	9	26	4	2	28	$l = 16m + n/2$
図 3.9 での番号	0-18	1-20	0-8	0-4	0-24	$m-n$

表 3.2: 増幅率が最大となった回数。

この結果から、9 番の APD の測定結果を元に HV 制御機能を実装することにした。なお、26 番および 4 番についてもほぼ同じ増幅率であったため、同様の結果が得られている。

## 選出した APD の特性

選出した APD の特性を図 3.11 に示す。

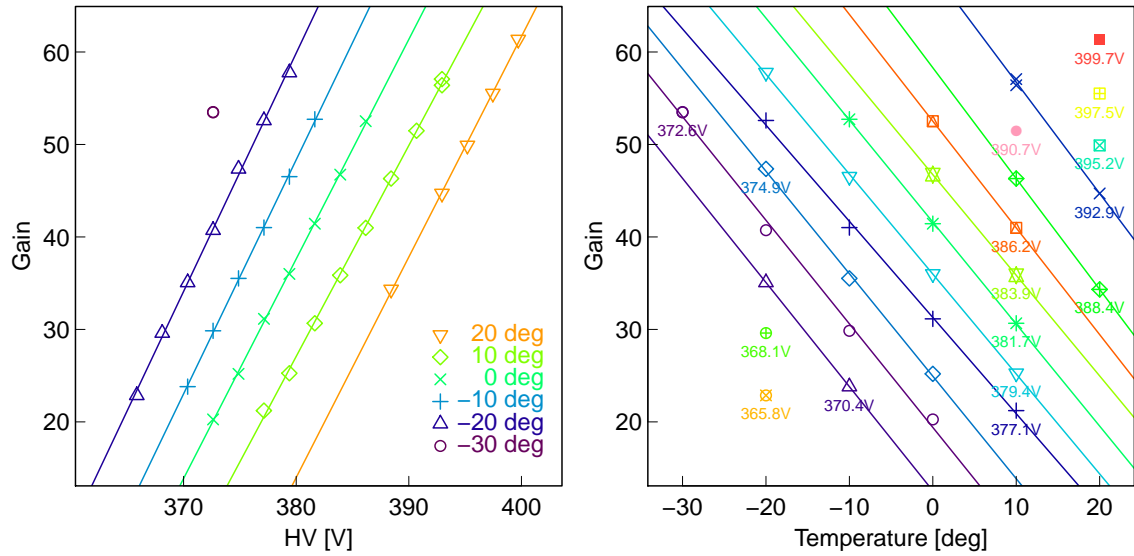


図 3.11: 選出した APD の温度特性。

グラフを見ると、HV 値  $V$ 、温度  $T$  と増幅率  $G$  の関係はそれぞれ直線で良くフィッティングできていることから、増幅率を以下の式で表してみる：

$$G = AT + BV + C。 \quad (3.4)$$

最小自乗法でパラメータ  $A, B, C$  を求めた結果、式 3.4 は以下ようになった：

$$G = -1.099T + 1.073V_{\text{DAC}} - 865.6、 \quad (3.5)$$

$$V_{\text{DAC}} = +1.025T + 0.9270G + 807.0。 \quad (3.6)$$

ただし、 $V_{\text{DAC}}$  は DAC 設定値である。この式 3.5 が測定結果をどれくらい再現できるかを図 3.12 に示す。

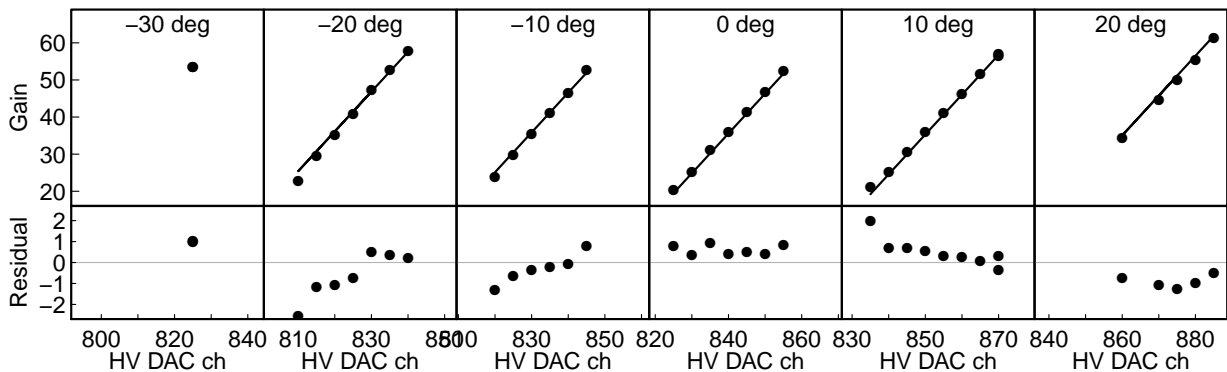


図 3.12: 測定結果 (点) と式 3.5 による計算結果とその残差 (実線)。

図 3.12 から、式 3.5 による結果は低 HV 側で誤差が大きくなる傾向があるものの、この領域は増幅率が低い領域であるため、この誤差が検出器の故障につながることはないと判断し、式 3.6 を用いて関数を実装することにした。

## 関数のフローチャート

以上の考察をもとに、HV 制御関数を実際に作成する。関数のフローチャートを図 3.13 に示す。

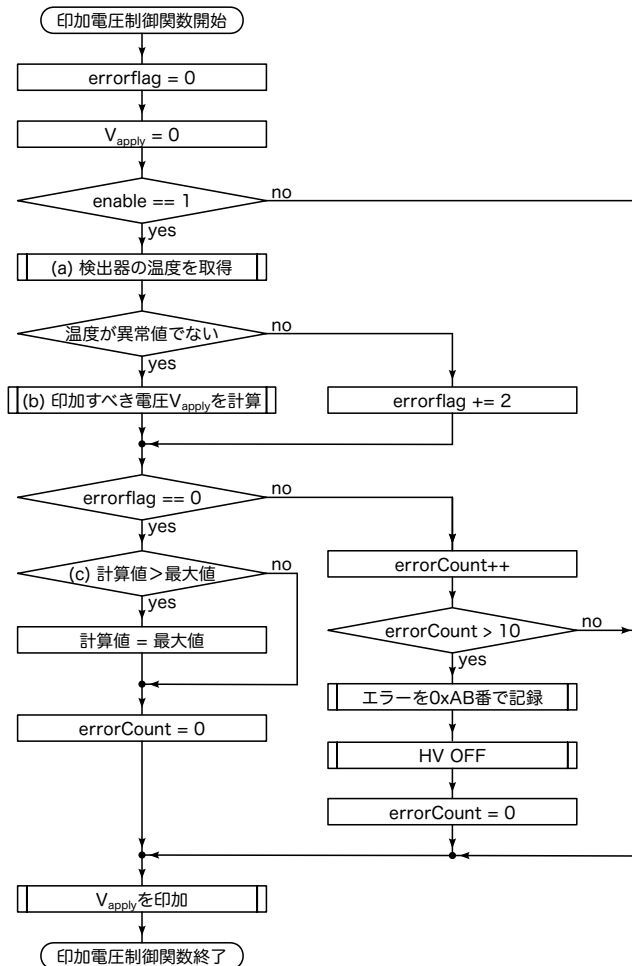


図 3.13: HXCP APD HV 制御関数のフローチャート。(a)(b)(c) は本文の説明を参照。errorFlag は関数内部で異常があった場合に加算される。異常が 1 度あると errorCount が 1 ずつ加算されていき、10 回エラーが続いた場合には HV 制御を停止し、HV 値を 0V に設定する。

以下、フローチャート内で (a)(b)(c) と書かれている部分について説明する。

(a) 検出器の温度を取得 HXCP には APD のアナログ信号処理基板に 1 つずつ、計 2 つの温度計 (1,2) がついている。冗長のため、計算においてはいずれか片方の温度計データを用いる。初期設定では温度計 1 を使用することになっているが、設定は変更することができる。2 つの温度計データは ADC の読み出し値であるため、式 3.6 の係数は温度計の較正結果を用いて補正する必要がある。APD 増幅率の温度依存性測定の際に温度計のデータも同時に取得しており、データの解析結果から ADC 読み



出し値  $T_{1\text{DAC}}, T_{2\text{DAC}}$  と摂氏温度  $T$  の間には以下の関係があることが分かっている：

$$T = 0.1010T_{1\text{DAC}} - 64.23 \text{ ( 温度計 1 )} \quad (3.7)$$

$$T = 0.1009T_{2\text{DAC}} - 63.37 \text{ ( 温度計 2 )} \quad (3.8)$$

(b) 印加すべき電圧  $V_{\text{apply}}$  を計算 式 3.6 に式 3.7 および式 3.8 を代入すれば、 $V_{\text{apply}}$  は以下の式で計算できる：

$$V_{\text{apply}} = 0.1035T_{1\text{DAC}} + 0.9270G + 741.2 \text{ ( 温度計 1 )} \quad (3.9)$$

$$= 0.1034T_{2\text{DAC}} + 0.9270G + 742.1 \text{ ( 温度計 2 )} \quad (3.10)$$

ここで、DAC のレジスタが 10bit であり、0 から 1023 までの値しか設定できないことを考慮すると、温度計の個体差は無視できる。したがって、 $V_{\text{apply}}$  は以下の式で計算する：

$$V_{\text{apply}} = \frac{26T_{\text{DAC}} + 237G + 189747}{256}。 \quad (3.11)$$

ただし、処理系の仕様のため係数は整数になっており、分母の 256 による除算は 8 ビットのビットシフトで実現する。

(c) 計算値 > 最大値 式 3.11 による計算結果がある一定の電圧を超えないようにするための処理である。上限となる電圧は変更可能であるが、初期値は 50 において増幅率が 50 となる電圧値 ( DAC 設定値 940 ) に設定してある。

### 3.3.3 実装した機能の動作確認試験

実装した HV 制御機能の動作確認試験についてまとめる。

#### 実験の目的

実装した HV 制御機能により、HXCP の APD 増幅率が設定値以下に保たれ、検出器が壊れないことを確認する。また、増幅率の測定の際に壊れていた 2 個の APD の交換を動作確認試験前に行ったため、その APD に異常がないことを確認する。

#### 実験セットアップ

実験セットアップは増幅率の温度依存性を測定した時と同じ ( 図 3.6 を参照 ) であるため省略する。実装した HV 制御機能を動作させ、 $-30$  から  $+30$  まで 10 ごとに計 7 回  $^{137}\text{Cs}$  のスペクトルを取得する。

#### 実験結果

得られたスペクトルを図 3.14 に示す。また、スペクトルの解析結果を図 3.15 に示す。

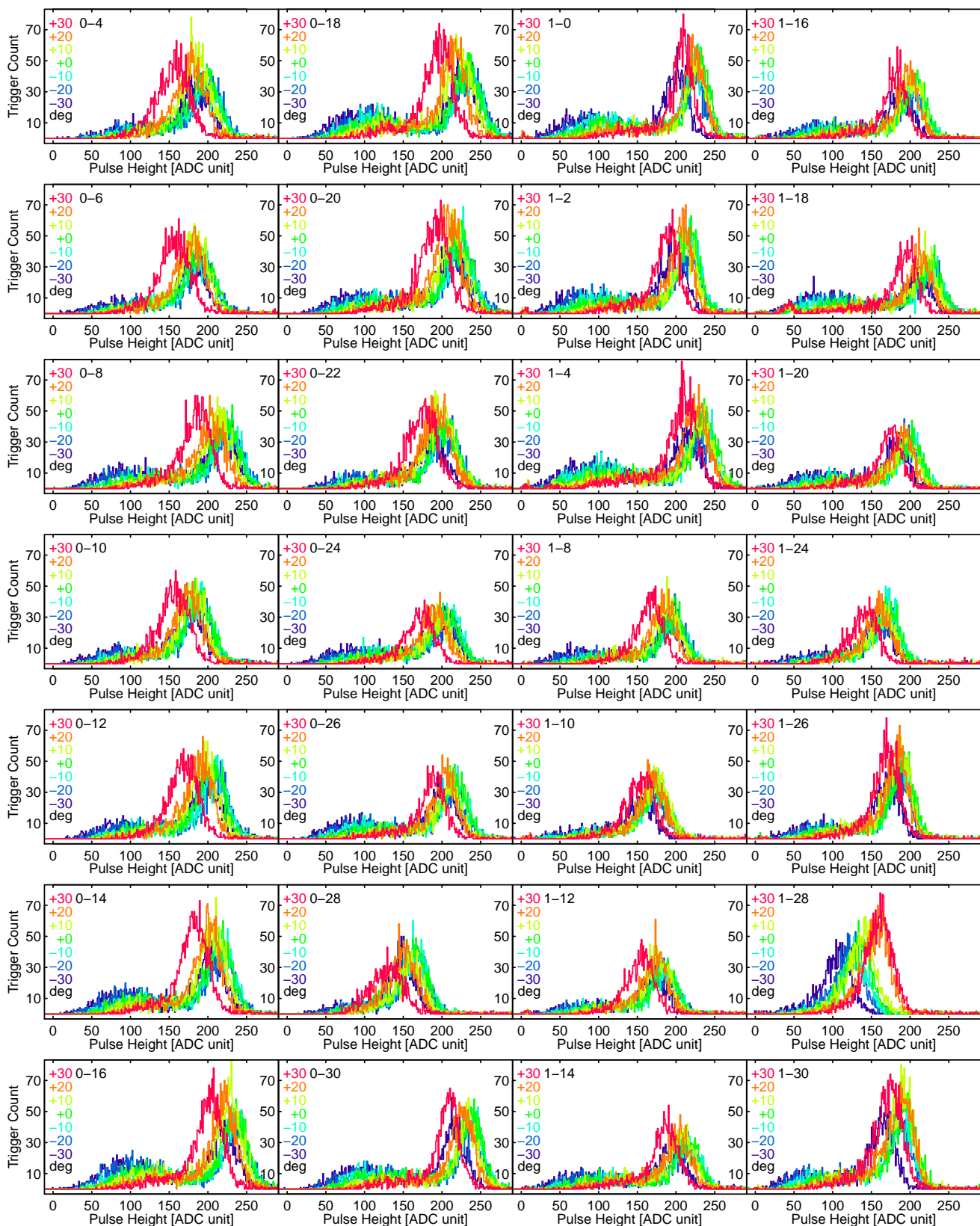


図 3.14:  $-30$  から  $+30$  における  $^{137}\text{Cs}$  のスペクトル。ペDESTALが温度によって変化するため、ペDESTALが横軸のゼロに対応するように水平移動させてある。 $+30$  での増幅率が低い傾向が見られるが、これは実験時に HV 上限値を安全のため低く設定していたことが原因であり、現在は修正済みである。なお、交換した APD は 0-6 と 0-22 である。

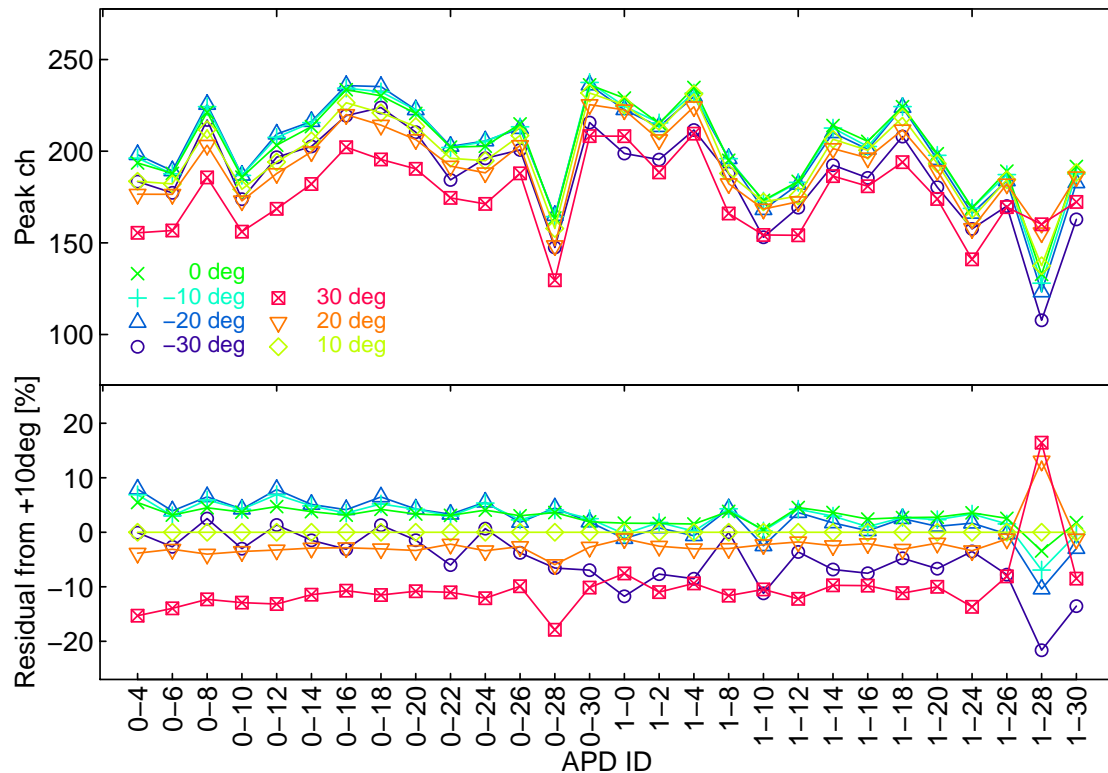


図 3.15:  $-30$  から  $+30$  における  $^{137}\text{Cs}$  のスペクトルの解析結果。上段はピーク的位置、下段に  $+10$  を基準にピーク位置のずれを%で示した。ずれの基準を  $+10$  にしたのは、HV 上限値の設定を低かったために、高温において電圧が上がりきらず、ピーク位置が下がってしまっているからである。

### 考察とまとめ

スペクトルの解析結果から、1-28 の APD を除いて、増幅率は 10% 以内のずれに制御できている。1-28 の APD は低温におけるピーク位置が低いという特徴である。これは、APD とシンチレータの間にあるシリコン接着剤が低温のために収縮して光学的な接着が悪くなり、APD で検出される光量が下がったことが増幅率の低下として現れていると考えられる。したがって、機会があれば接着のやり直しが必要であることがわかった。一方で、この問題は APD の故障ではないと考えられるため、実装した HV 制御機能を使用している場合に、この ch の増幅率が異常に大きくなって故障に至る可能性は低いと考えられる。したがって、現状において増幅率が 100 を超えて故障に至る状況は回避できるようになったと言える。しかしながら、実験結果は APD の個体差だけでは説明できず、温度依存性が残っている。この問題の原因として、APD アナログ処理基板上の VATA チップのペDESTAL の特性が把握しきれていないことが考えられる。ペDESTAL 特性を把握してデータ解析方法を修正することで、エネルギー分解能および増幅率の正確な値を求められるようになる可能性があるため、今後この VATA チップのペDESTAL についての解析を行う必要がある。

## 3.4 HXCP PMT の保護

HXCP の散乱体部分は、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）を組み合わせたシンチレーション検出器である。MAPMT は位置検出機能を有した光電子増倍管であり、APD よりも微弱な 1 光電子程度レベルのイベントを検出することができる。MAPMT では光電面に温度依存性があり、高温において熱励起電子によるイベントが増加するものの、コンプトン散乱イベントの検知には影響せず、また、増幅率の温度依存性は無視できることがわかっている [10]。一方で、1 光電子程度レベルのイベントを検出できる増幅率を持つため、光量が非常に多くなると MAPMT 内に多量の電流が流れることによって最終段のダイノードが劣化するため、MAPMT の寿命を縮めてしまう。

また、MAPMT の受光面に使用されているウルトラバイアルカリは、高温（50℃）になると分解してしまい、量子効率（入射した光子を電子に変換する効率）が低下する。この問題については、HK データの取得時に温度が 50℃ を超えた場合に通信系に対してアラートを送信するようにした。TSUBAME 衛星内の主な熱源は CMG であり、このアラートが発行された場合は CMG の電源を切ることになっている。

以下、この節では地球上空の荷電粒子による MAPMT の劣化を防止する対策について説明する。

### 3.4.1 軌道上の荷電粒子

地球上空には、電子や陽子が集まっている領域が存在する。このような荷電粒子は、太陽風によって運ばれてきたプラズマが地球の磁場によって捕らえられたものであると考えられている。東工大が開発した Cute1.7+APDII 衛星は、この荷電粒子の分布を実際に計測しており、高緯度と南大西洋において荷電粒子が多く分布していることが分かっている（図 3.16）。

地球上空の電子・陽子の分布は地球観測衛星によって観測され、SPENVIS[12]などのデータベースにまとめられている。WBM では宇宙 X 線背景放射（CXB）が常に計数されるが、荷電粒子によるイベントが CXB と比較して有意に増加した場合、GRB の誤検知を引き起こすことが予想されている。このような領域では WBM の GRB 検出アルゴリズムは停止しなければならず、同時に MAPMT に印加されている HV を下げる措置を行うことによって、MAPMT の劣化および故障を回避する。

荷電粒子帯の検知方法としては、あらかじめ荷電粒子帯の分布を求めておき、衛星の位置情報をもとに判定を行う方法のほか、WBM のカウントレートの増加から荷電粒子帯に突入したことを判定する方法が考えられる。WBM のカウントを元に判定する方法は荷電粒子帯を直接観測するため、太陽活動による荷電粒子帯分布の時間変動に対応できる。一方で、カウントが飽和してしまった場合には検出口ジックが働かなくなってしまうため、ここでは 2 つの方法の OR をとって荷電粒子帯を判定することにした。

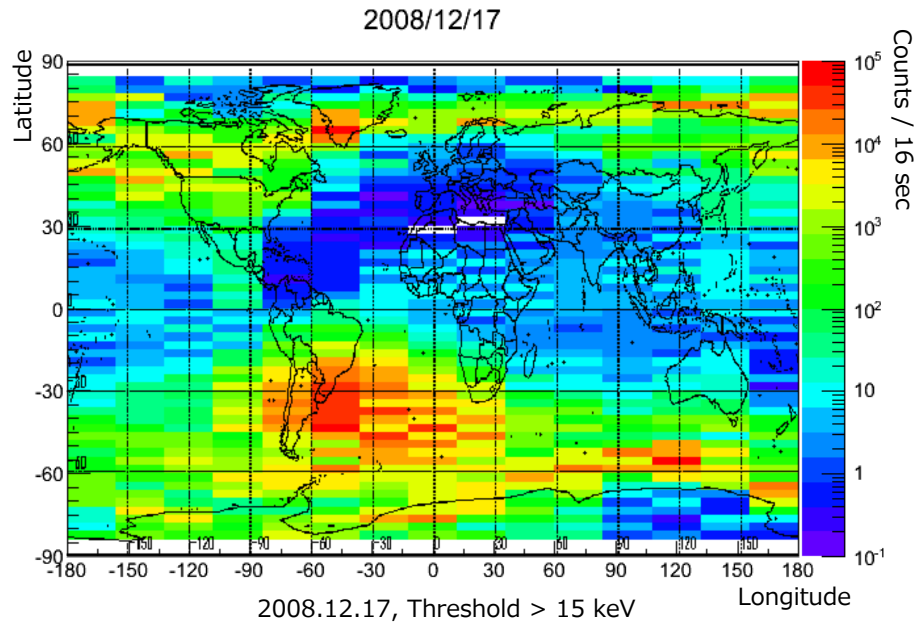


図 3.16: Cute1.7+APDII によって観測された 15keV 以上のエネルギーを持つ荷電粒子の分布 [9]。

### 3.4.2 荷電粒子分布図による判定

栗田卒論 [8] によれば、WBM で検出される CXB は約  $180 \text{ cnt sec}^{-1} \text{ WBM}^{-1}$  である。この値から電子および陽子の検出閾値を設定し、荷電粒子分布図を作成する。この結果をソフトウェアに組み込み、荷電粒子帯検出に用いる。

#### WBM の受光面側荷電粒子シールド

WBM には、荷電粒子によるバックグラウンド低減のためのシールドがある。このシールドは常世田卒論 [5] のシミュレーション結果から決められており、荷電粒子シールドとして 3.0 mm のユニレート（ガラス繊維強化プラスチック<sup>1</sup>）、衛星内部からの電磁ノイズ対策として 0.1 mm の Al を用いている。これにより、1 MeV の電子を 1/100 に低減することができる（以下を参照）。

### 3.4.3 電子の分布図

3 mm のユニレート（質量厚さ  $0.495 \text{ g cm}^{-2}$ ）の電子に対する阻止能については栗田卒論 [8] で計算されており、約 1.0 MeV 以下の電子を遮蔽できるという結果が得られている。したがって、まずは衛星の軌道である高度 600 km において 1.0 MeV 以上のエネルギーをもつ電子の分布図を SPENVIS のデータベースを用いて作成した。作成した電子の分布図を図 3.17 に示す。

<sup>1</sup>ユニチカ株式会社：<http://www.unitika.co.jp/plastics/products/unilate/ul-01.html>

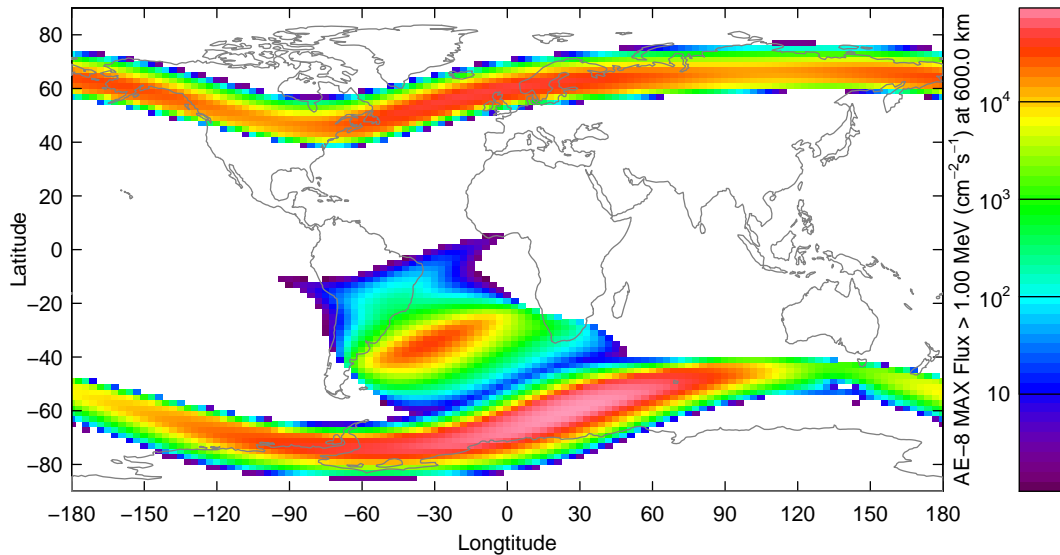


図 3.17: 高度 600 km で 1.0 MeV 以上のエネルギーを持つ電子の分布図。

### 電子のフラックスに関する閾値

次に、電子の検出個数の閾値を設定する必要がある。閾値は、遮蔽しきれない最低のエネルギー 1.0 MeV を持つ電子が、CXB と同じオーダー ( $\sim 100 \text{ cnt sec}^{-1} \text{ WBM}^{-1}$ ) 以上で検出されないように設定する。WBM に入射した電子はシールド内で多重散乱を起こすため、検出されるかどうかは確率過程による。この問題は常世田卒論 [5] でシミュレーションされており、図 3.19 にシミュレーション結果を示す。

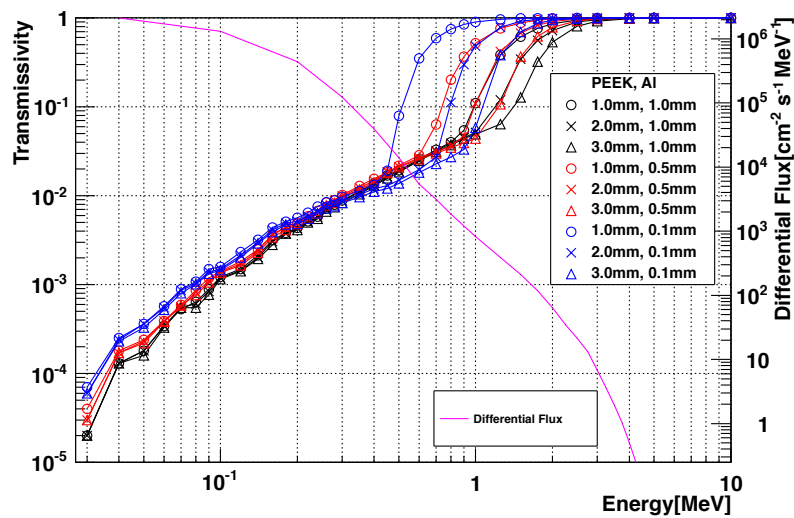


図 3.18: WBM に対して垂直に入射した電子がシールドを透過する (検出される) 確率 (常世田卒論 [5] 図 3.13)。紫の線は軌道上における電子のスペクトルである。

また、シミュレーション結果の 1.0 MeV における透過率を抽出したものを図 3.19 に示す。電子の透過が確率で記述できることから、試験的にシールドの厚さ  $x$  による透過率  $T = T(x)$  を指数関数でフィッティングした結果、以下の式が得られた：

$$T(x) = C \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) = 0.4174 \times \exp\left(-\frac{x}{0.2807}\right) \quad (3.12)$$



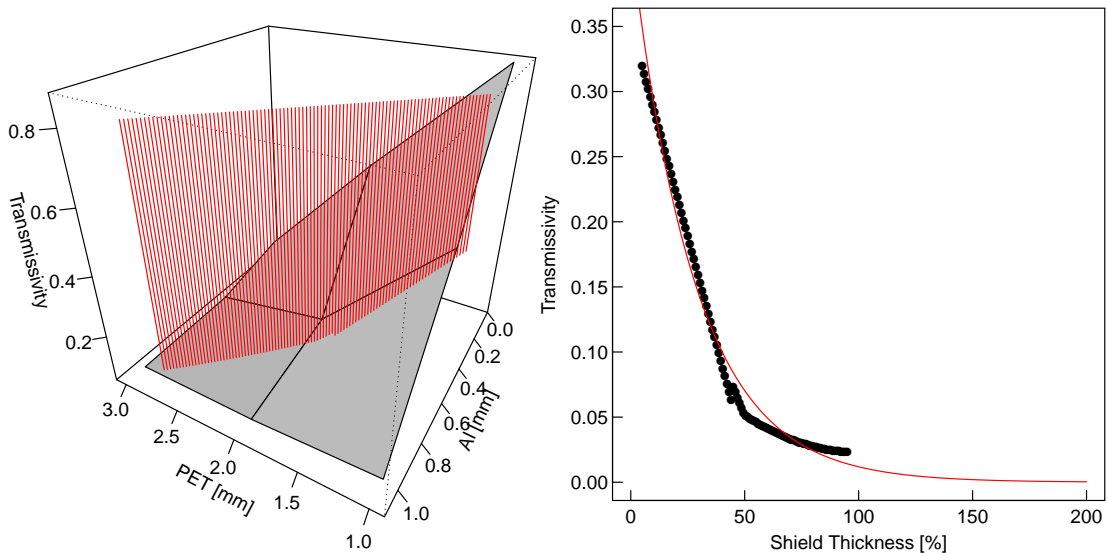


図 3.19: 左 : 1.0 MeV のエネルギーをもつ電子の透過率のグラフ (灰色の面の頂点部分の9点)。赤い面はユニレートと Al の厚さの比が 30 : 1 になる部分を表す。右 : 電子の透過率のシールドの厚さによる変化。赤い線は指数関数でフィッティングした結果である。

ここで、 $x = 1$  は WBM のシールドの実際の厚さ (3.0 + 0.1 mm) に対応する。ただし、指数関数で表すことができるのは「電子が散乱されない確率」であり、検出率のより正確な議論のためには多重散乱を考慮したシミュレーションが必要になる。以下では、この式 3.12 から、入射した 1.0 MeV のエネルギーを持つ電子の検出確率  $P$  を見積もる。

WBM に入射する電子の運動方向が等方的であると仮定すると、図 3.21 のように、その入射角によってシンチレータまでの距離が変わる。

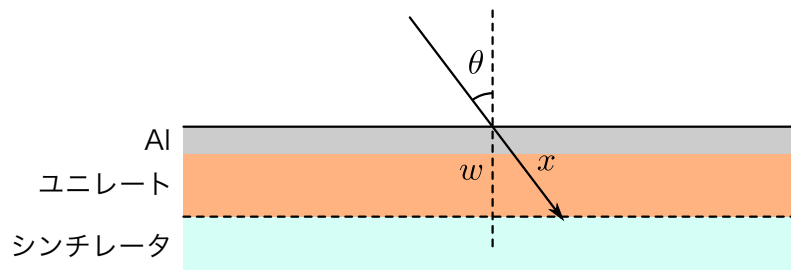


図 3.20: 電子の入射方向とシンチレータまでの距離。

$x = w / \cos(\theta) = 1 / \cos(\theta)$  であるから (長さのスケールが WBM のシールドの厚さなので  $w = 1$ )  $T(x)$  の式 3.12 に代入する :

$$T(\theta) = C \exp\left(-\frac{1}{\lambda \cos \theta}\right) \quad (3.13)$$

この式 3.13 を半球について積分すれば、1.0 MeV の電子の検出確率  $P$  が得られる :

$$P = \int_{\text{半球}} d\Omega T = \int_0^{\pi/2} d\theta C \exp\left(-\frac{1}{\lambda \cos \theta}\right) 2\pi \sin \theta \quad (3.14)$$



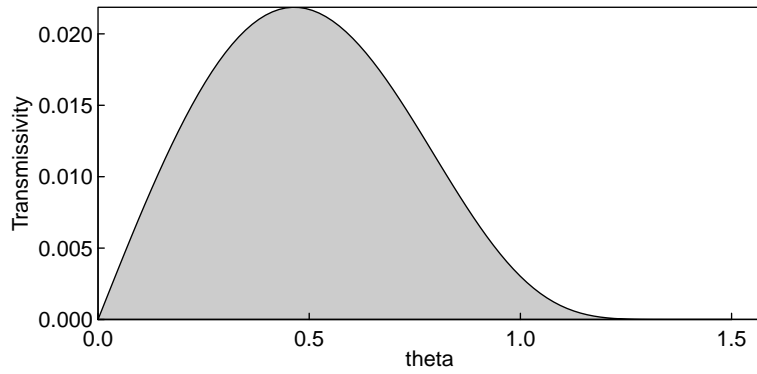


図 3.21: 式 3.14 の被積分関数のグラフ。

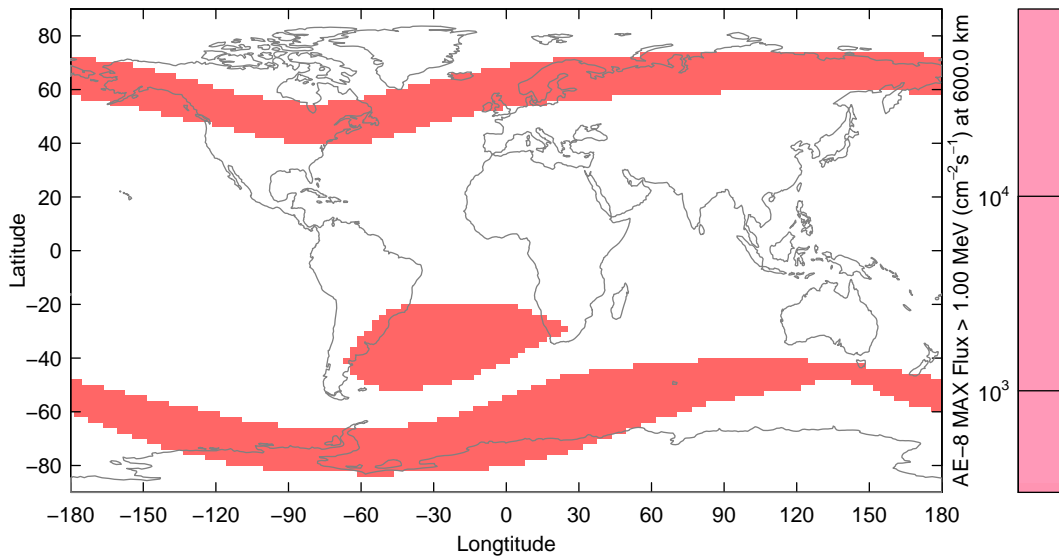


図 3.22: 高度 600 km で 1.0 MeV 以上の電子が  $300 \text{ cnt sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  を超える領域。

数値積分によって、 $P$  の値は 0.0141 と求まった。したがって、WBM に入射した 1.0 MeV の電子は 1/100 程度の確率で検出されることがわかった。

#### 電子によるイベントが過剰になる領域

以上の計算より、1.0 MeV の電子のフラックスが  $10000 \text{ cnt sec}^{-1} \text{ WBM}^{-1}$  程度のとき、CXB と同程度検出されることが分かった。WBM の有効面積がシンチレータ検出面の面積  $36 \text{ cm}^2$  であるとするれば、単位面積あたりでは  $300 \text{ cnt sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  となる。図 3.17 の荷電粒子分布においてこの値を超える領域を抽出すると、図 3.22 のようになる。

#### 3.4.4 陽子の分布図

陽子に関しても、電子の場合と同様に閾値を決定し、WBM に過剰な信号を発生させる領域を計算する。栗田卒論 [8] より、シールドを通過する陽子の最低エネルギーは 20 MeV である。また、陽子の質量は電子の約 1800 倍であり、シールド内での軌

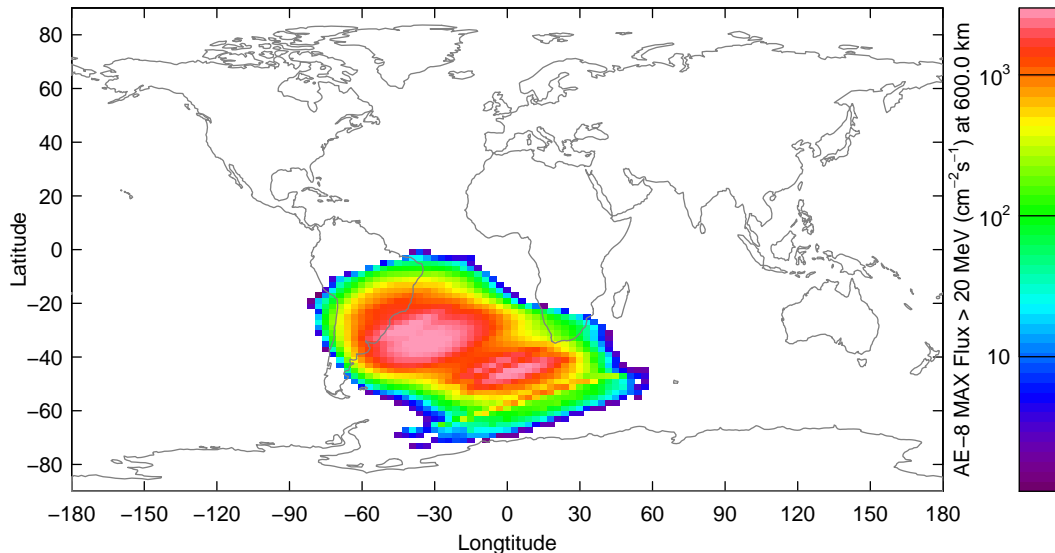


図 3.23: 高度 600 km で 20 MeV 以上のエネルギーを持つ陽子の分布図。

跡は電子よりも直線的になると考えられるため、20 MeV を超えた陽子は全て WBM で検出されると考えられる。

その他、WBM 側の要請を考慮する必要がある。陽子はエネルギーが大きいため、WBM で検知される場合には信号が非常に大きくなり、波高の出力値が上限に達してしまうことになる。これはノイズであり、さらにこの時、プリアンプは電荷が過剰な状態になるため、溜まった電荷がなくなるまで測定不可能な状態になる。このように、陽子は検出器のデッドタイムを増加させ、GRB の検知を妨げる。したがって、陽子に関しては閾値を CXB の 10 分の 1 のオーダーまで下げることにした。なお、これは荷電粒子帯の判定領域を増やす方向の処置であり、MAPMT の保護の観点からの問題はない。

したがって、閾値は  $10 \text{ cnt sec}^{-1} \text{ WBM}^{-1}$  となり、単位面積あたりでは  $0.3 \text{ cnt sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  である。

図 3.23 に SPENVIS を用いて作成した陽子の分布図、図 3.24 に上記の閾値  $0.3 \text{ cnt sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  を超える領域を示す。

### 3.4.5 電子・陽子の分布図の統合

作成した 2 つの分布図を統合し、荷電粒子帯として判定するための分布図を作成する。統合にあたっては、2 つの分布の境界領域の扱いが問題になるが、陽子の分布で閾値を下げているため、単純に 2 つの図の OR をとることにした。最終的に作成した図を図 3.4.6 に示す。

### 3.4.6 荷電粒子帯判定関数の実装

図を用いて、GRB 誤検知防止および MAPMT 保護のための機能を実装する。GRB 観測系は、姿勢系から TSUBAME 衛星が地球上のどこにいるのかを示す軌道情報を 5 秒ごとに受信するため、この情報を用いて荷電粒子帯の検出を行う。受信するデータ

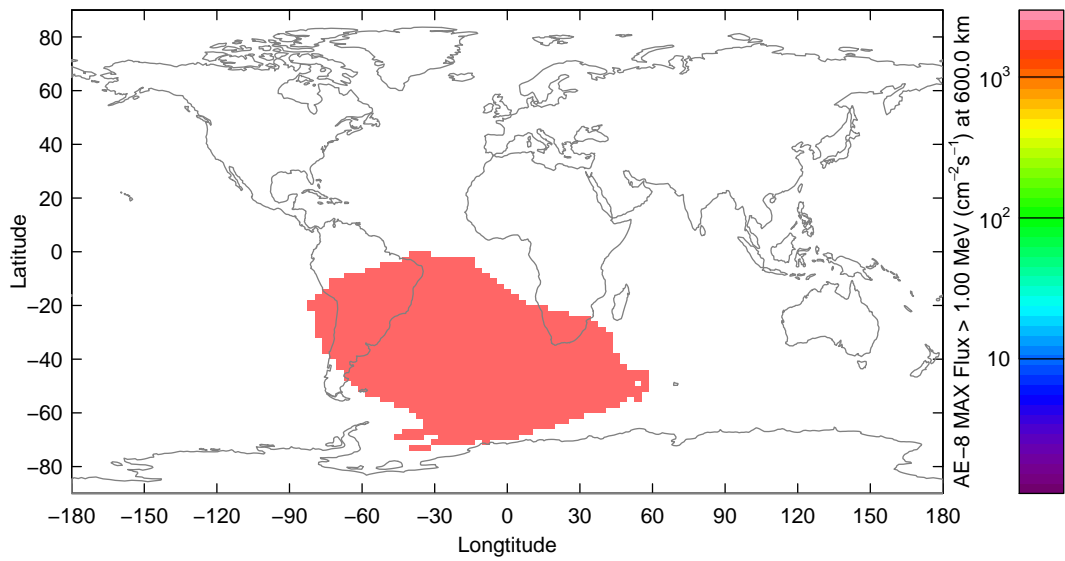


図 3.24: 高度 600 km で 20 MeV 以上の陽子が  $0.3 \text{ cnt sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  を超える領域。

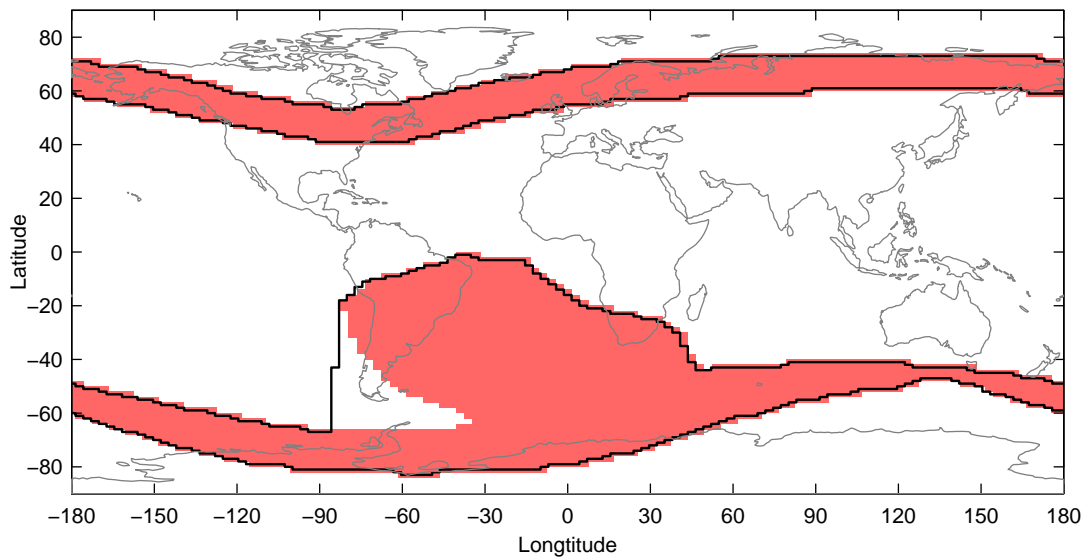


図 3.25: 荷電粒子帯と判定する領域。黒線は実装したマップの境界を示す (3.4.6 節を参照)。

軌道情報 [度]	分角 [分]	short 型	受信データ
(80, 10)	(4800,600)	(0x12C0,0x0258)	0x12C00258
(10, 170)	(600,10200)	(0x0258,0x27D8)	0x025827D8
(-80, -10)	(-4800,-600)	(0xED40,0xFDA8)	0xED40FDA8
(-10, -170)	(-600,-10200)	(0xFDA8,0xD828)	0xFDA8D828

表 3.3: 姿勢系からの軌道情報の例

は上位 2byte が緯度情報、下位 2byte が経度情報の計 4 byte で、単位は分 (1/60 度) であり、それぞれ符号付きの short 型である。受信するデータの例を表 3.3 に示す：

判定の際に参照するため、図の分布図を経度方向に 128 分割し、テーブルを作成してソフトウェアの中に組み込んだ。なお、南アメリカ大陸南端部分の領域に関しては、コードの簡略化のために窪みができないように分布を簡略化した。実際に使用したデータをプロットしたものが図 3.4.6 の黒線である。また、姿勢系からの軌道情報が分角単位であるため、テーブル作成にあたっては角度を分角単位に直してあるほか、緯度経度はそれぞれ 0 度から 180 度および 360 度の範囲になるようにしてある。図 3.26 に実装したソフトウェアのフローチャートを、図 3.27 に実際のテーブル部分のコードを示す。

### 3.4.7 動作確認

実装した関数が引数としてもらいうる全ての値に対して正しく判定できることを確認するため、関数単体での動作確認試験を実施した。引数としてもらう値の候補は  $(180 \times 60) \times (360 \times 60) = 233280000$  通りある。この全ての引数を与えて、関数の動作に問題がないことを確認する。180 × 360 の試行を 1 分角ずつ緯度方向と経度方向にずらしながら  $60 \times 60 = 3600$  回行えば、全候補について試験が行える。実行結果のデータについては、1 回の試行を 1bit の情報として送信することにした。

動作確認のために用意したプログラムのコードを図 3.28 に示す。関数 SaaCheck() は全ての引数候補について荷電粒子帯の判定を行う関数である。関数 BitSend() は一回の試行結果を受け取り、64 回ごとに CPU から実行結果を送信する関数である。

動作確認試験の結果を図 3.29 に示した。この結果から、実装した関数によって図 3.4.6 の荷電粒子帯の分布が再現できていることが分かる。

### 3.4.8 WBM のカウントレートによる判定

WBM を用いた荷電粒子帯の検出について説明する。衛星が荷電粒子帯に突入すると、WBM のカウントレートが増加する。GRB の場合と異なり、荷電粒子帯に突入した場合は WBM の 5 つすべての検出器でカウントレートが増加する。よって、対面に位置する WBM でのカウント増加をトリガにして、荷電粒子帯の検出を行う。この機能については、まだ実装されていないため、今後実装を行う予定である。

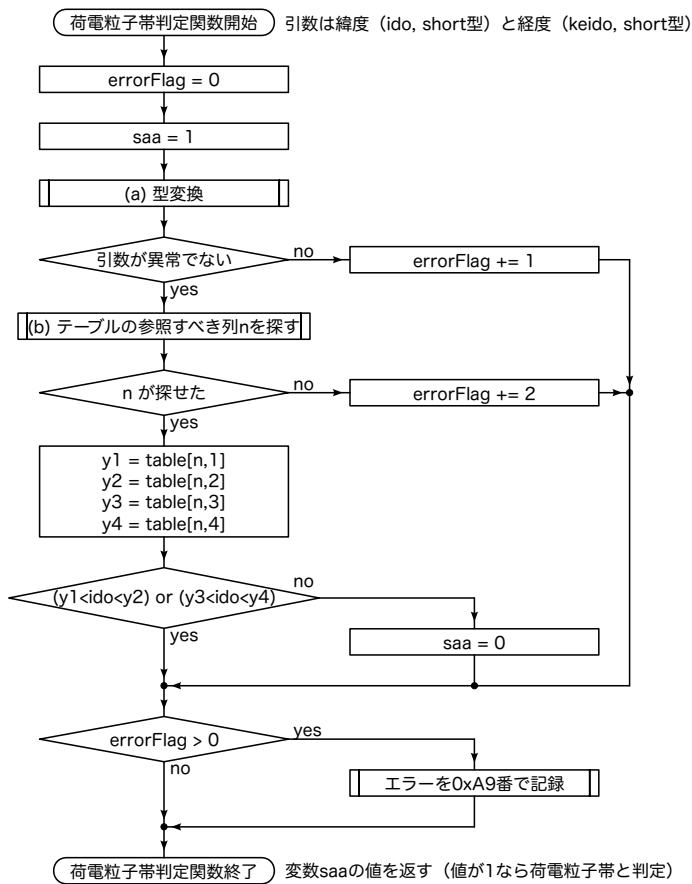


図 3.26: 荷電粒子帯判定関数のフローチャート。(a) 型変換: short 型を符号なし整数型に変換する。(b) テーブルは経度ごとに分割してあるため、引数の経度から参照すべき列を探す。

```

uint2 saaMapTable[129][5]=
{
{ 84,1800,2460,8940,9660}, { 253,1740,2400,8880,9660}, { 422,1680,2340,8820,9660},
{ 591,1620,2340,8820,9600}, { 759,1560,2280,8820,9540}, { 928,1500,2220,8760,9540},
{ 1097,1440,2220,8700,9540}, { 1266,1380,2160,8700,9540}, { 1434,1380,2160,8700,9540},
{ 1603,1320,2100,8700,9480}, { 1772,1260,2100,8640,9420}, { 1941,1200,2040,8580,9420},
{ 2109,1140,1980,8580,9360}, { 2278,1080,1980,8520,9300}, { 2447,1020,1920,8460,9300},
{ 2616,1020,1860,8460,9240}, { 2784, 960,1860,8400,9180}, { 2953, 900,1860,8340,9180},
{ 3122, 900,1800,8340,9120}, { 3291, 840,1740,8340,9060}, { 3459, 780,1740,8280,9000},
{ 3628, 780,1680,8220,8940}, { 3797, 720,1620,8220,8940}, { 3966, 660,1620,8160,8880},
{ 4134, 660,1620,8160,8880}, { 4303, 660,1560,8100,8820}, { 4472, 660,1500,8100,8820},
{ 4641, 660,1500,8040,8820}, { 4809, 600,1500,7980,8760}, { 4978, 540,1500,7980,8700},
{ 5147, 540,1440,7980,8700}, { 5316, 540,1380,7920,8700}, { 5484, 540,1380,7860,8700},
{ 5653, 540,1380,7860,8640}, { 5822, 540,2820,7860,8580}, { 5991, 540,4320,7860,8580},
{ 6159, 540,4440,7860,8580}, { 6328, 540,4620,7860,8640}, { 6497, 540,4740,7860,8700},
{ 6666, 540,4800,7860,8700}, { 6834, 540,4800,7860,8700}, { 7003, 540,4860,7860,8700},
{ 7172, 480,4860,7860,8700}, { 7341, 420,4920,7860,8760}, { 7509, 420,4980,7920,8820},
{ 7678, 420,5040,7980,8820}, { 7847, 420,5100,7980,8880}, { 8016, 480,5100,8040,8940},
{ 8184, 540,5160,8100,8940}, { 8353, 540,5280,8100,9000}, { 8522, 540,5340,8160,9060},
{ 8691, 540,5340,8220,9060}, { 8859, 540,5280,8280,9120}, { 9028, 540,5220,8340,9180},
{ 9197, 540,5220,8340,9180}, { 9366, 540,5220,8400,9240}, { 9534, 540,5220,8400,9240},
{ 9703, 540,5220,8460,9300}, { 9872, 540,5220,8460,9300}, {10041, 540,5100,8520,9300},
{10209, 540,4920,8580,9360}, {10378, 600,4800,8580,9420}, {10547, 660,4680,8580,9420},
{10716, 660,4560,8640,9420}, {10884, 660,4440,8700,9480}, {11053, 660,4320,8700,9540},
{11222, 720,4200,8700,9540}, {11391, 780,4140,8700,9540}, {11559, 780,4140,8700,9540},
{11728, 840,4080,8760,9540}, {11897, 900,4020,8820,9600}, {12066, 900,4020,8820,9660},
{12234, 900,4020,8820,9660}, {12403, 960,3960,8820,9660}, {12572,1020,3900,8820,9660},
{12741,1080,3900,8820,9660}, {12909,1140,3840,8820,9660}, {13078,1200,3720,8820,9660},
{13247,1260,3600,8820,9660}, {13416,1320,3300,8880,9660}, {13584,1380,2940,8940,9660},
{13753,1440,2760,8940,9660}, {13922,1500,2760,8940,9660}, {14091,1560,2820,8940,9720},
{14259,1620,2820,8940,9780}, {14428,1680,2820,8940,9780}, {14597,1740,2820,8940,9780},
{14766,1740,2820,8940,9780}, {14934,1740,2820,8940,9780}, {15103,1800,2820,8940,9780},
{15272,1860,2820,8940,9780}, {15441,1920,2820,8940,9780}, {15609,1980,2880,8940,9780},
{15778,2040,2940,8940,9780}, {15947,2100,2940,8940,9780}, {16116,2100,2940,9000,9780},
{16284,2100,2940,9060,9780}, {16453,2160,2940,9060,9780}, {16622,2220,2940,9060,9780},
{16791,2220,2940,9060,9780}, {16959,2220,2940,9060,9780}, {17128,2280,2940,9060,9780},
{17297,2340,2940,9060,9780}, {17466,2340,2940,9060,9780}, {17634,2340,2940,9060,9780},
{17803,2340,2940,9060,9780}, {17972,2340,2940,9060,9780}, {18141,2400,2940,9060,9780},
{18309,2460,2880,9060,9780}, {18478,2520,2820,9060,9780}, {18647,2580,2820,9060,9780},
{18816,2580,2820,9060,9780}, {18984,2580,2820,9060,9780}, {19153,2580,2820,9060,9780},
{19322,2520,2820,9060,9780}, {19491,2460,2820,9060,9780}, {19659,2460,2760,9060,9780},
{19828,2400,2700,9060,9780}, {19997,2280,2700,9060,9780}, {20166,2220,2700,9060,9780},
{20334,2220,2700,9060,9780}, {20503,2160,2700,9060,9780}, {20672,2100,2640,9060,9780},
{20841,2040,2580,9000,9780}, {21009,1980,2580,8940,9780}, {21178,1980,2580,8940,9720},
{21347,1920,2520,8940,9660}, {21516,1860,2460,8940,9660}, {21600,1979,2405,8939,9541}
};

```

図 3.27: 荷電粒子帯判定用テーブルを表すコード。{} 内はそれぞれ経度、荷電粒子帯の南側の下端、南側の上端、北側の下端、北側の上端に対応する。ただし、単位は分角である。uint2 型は unsigned 2word int の意味であり、符号なしの 16bit 整数であり、0 から 65535 までの整数を表現できる。

```

1 #include "header.h"
2
3 void BitSend(uint2 bit){
4     static uint2 i,j,data[8];
5     if(bit==0xFF){//内容をリセット
6         for(i=0;i<8;i++){
7             data[i] = 0;
8             tx.len = 1;
9             SendPkt();
10        }
11        i = j = 0;
12    }else{
13        data[i] |= ((bit&0x1)<<(7-j));
14        j++;
15        if(j>7){
16            i++;
17            j = 0;
18            if(i>7){
19                for(i=0;i<8;i++){
20                    tx.data[i] = data[i];
21                    data[i] = 0;
22                }
23                tx.len = 8;
24                SendPkt();
25                i = 0;
26            }
27        }
28    }
29 }
30
31 void SaaCheck(){
32     uint2 i,j,k,l,ido,keido;
33
34     tx.cmd[0] = 0xF5;
35     tx.cmd[1] = 0x3F;
36     tx.cmd[2] = 0xFF;//試験用のコマンド番号
37
38     for(i=0;i<60;i++){//緯度のシフト量
39         for(j=0;j<60;j++){//経度のシフト量
40             for(k=0;k<180;k++){//緯度
41                 for(l=0;l<360;l++){//経度
42                     ido = i + k - 5400;//short型に変換
43                     keido = j + l - 10800;//short型に変換
44                     BitSend(SaaCheck(ido,keido));//実行
45                 }
46             }
47             BitSend(0xFF);//リセット
48         }
49     }
50 }

```

図 3.28: 荷電粒子帯判定関数の動作確認用コード。



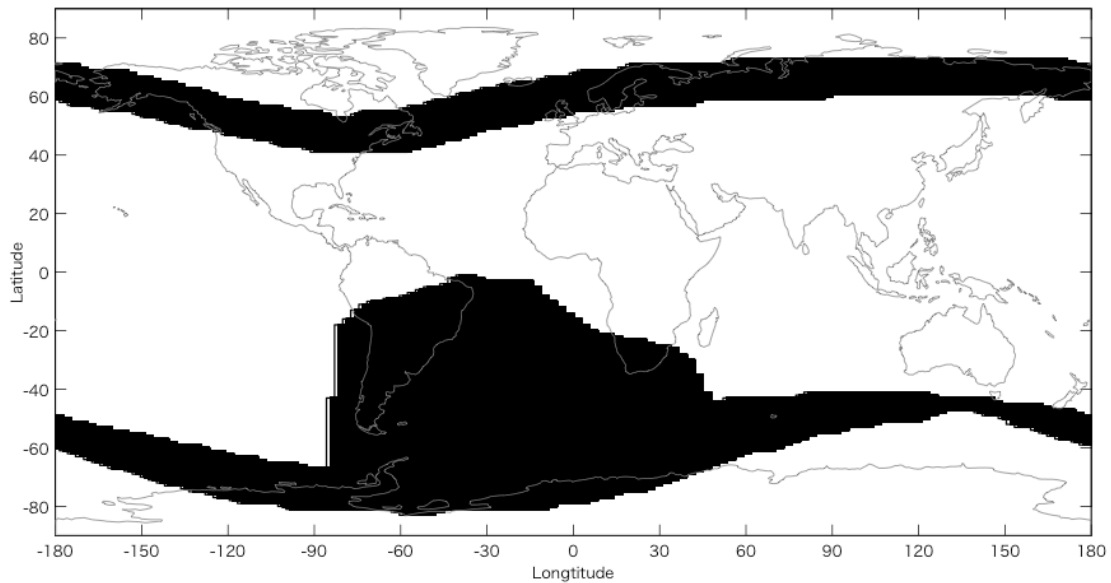


図 3.29: 荷電粒子帯判定関数の動作確認結果。関数によって荷電粒子帯と判定された部分に点を打った。分角単位でプロットを行ったため、個々の点は識別できない。

### 3.4.9 まとめと今後の課題

WBM および HXCP の APD について、HV 制御関数を実装した。また、その動作確認試験において、温度変化のある環境化において APD のブレイクダウンによる劣化および故障を回避できることが確認できた。

MAPMT については、地球上空の荷電粒子による影響を見積もり、MAPMT の HV を下げる領域を決定した。また、その領域をプログラムにテーブルとして格納し、姿勢系からの軌道情報から荷電粒子帯の判定を行えるようになった。

一方で、HXCP では HV 制御関数にパラメータ調整の余地があること、および APD の 1 つでシンチレータの接着不良が見つかった。よって、今後は早急に接着不良の対策を行い、HV 制御関数のパラメータ調整を行っていく予定である。

## 第4章 CPUソフトウェアの開発

3章では、検出器を保護するための機能について述べた。ここでは、検出器を使用して観測を行うためのソフトウェア開発について説明する。ただし、ソフトウェア開発は現在も続いており、ここではソフトウェアの概要と、開発項目について述べる。

### 4.1 CPUソフトウェアの開発環境

まずは、GRB観測系のプログラムの開発環境について説明する。まず、CPUは回路ボックス内のCPU基板にあるCPU用FPGAであり、FPGAにはCortex-M1プロセッサが組み込まれている。Cortex-M1プロセッサ用のプログラムは、基本的にC言語で記述される。

プログラムを記述したコードARM用GNUコンパイラを用いてコンパイルすると、code1.c, code2.c, ...といったソースファイル群からオブジェクトファイル群code1.o, code2.o, ...が生成される。それぞれのオブジェクトファイルはリンクスクリプトの記述を元に結合され、ELF形式のバイナリコードを生成する。このバイナリ実行データに、ここではtbmという名前をつける。

tbmは、そのままではFRAMに書き込むことはできない。書き込むためには、tbmをプログラム書き込みに適したHEX形式に変換する必要がある。また、プログラム書き込みはUART通信経由で行うため、UART通信ソフトが読み込みやすいよう、HEXファイルを手直しする必要がある。図4.1にここまでの流れをまとめた。

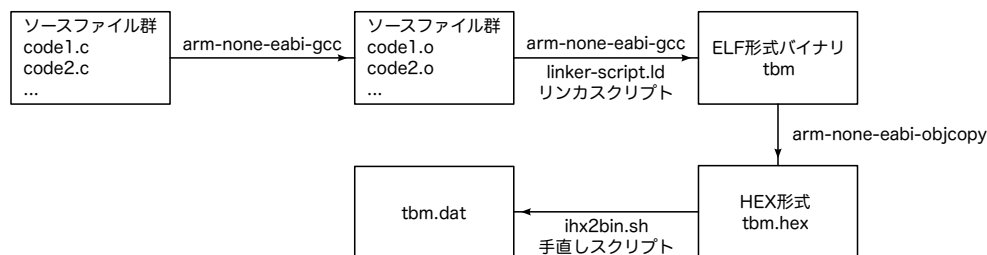


図 4.1: メインソフトウェアのフローチャート。

ihx2bin.shによって生成されたファイルtbm.datがFRAMに書き込むプログラムのデータである。書き込む場合はCPU用FPGAに電源を投入した後1秒以内にUART通信ソフトウェアを使用してtbm.datの内容を送信する。最後のデータが送信されると、1秒後にプログラムは起動する。

開発中、書き込み後にプログラムが起動しない問題があった。この現象が発生したのはWBMのHV制御用のマトリックスを実装した前後であり、それ以前には見られていなかった現象であった。現象が発生するかどうかはマトリックスの有無に依存し

ていたため、マトリックスのサイズを変えるなどして調査をした結果、tbm.dat の行数が 4096 行を超えるとこの現象が発生することが分かった。結局、原因は ihx2bin.sh の記述にあり、tbm.hex は 64kByte を超えるとセグメントアドレスレコードを挿入することを考慮し忘れていた。したがって、HEX ファイルの先頭から 8 文字目と 9 文字目（レコードタイプ）が書き込むべきプログラム部分であることを示す 00 である部分のみを抽出するように書き直した結果、プログラムは正常に起動するようになった。

なお、この問題が発生しているときにも、CPU が起動することがあった。これは偶然であり、この状態で検出器を動作させることは、予期しない動作を引き起こす可能性があり危険であった。プログラムには .data セクション（初期値を持つ変数を格納する領域）と .bss セクション（初期値を持たない変数を格納する領域）があり、tbm.dat のオブジェクトファイルの結合時に参照するリンクスクリプトでは、これらのセクションを後半に配置することになっていた。WBM の HV 制御用マトリックスを格納することで .data セクションが大きくなるが、これによって 64kByte を超える場合、.data セクションと .bss セクションが 64kByte 境界に配置されることになる。したがって、.text セクション（プログラムコード領域）に影響がなかったため CPU は起動することがあるが、.data セクションが 64kByte をまたぐ状態で意図しないデータが混入した場合、初期値ありの変数の初期値が意図しない値になっていることになる。実際、HXCP の動作試験の際には測定データが正しく得られなくなることがあったが、これは VATA チップのレジスタに設定する初期値が書き変わってしまったことが原因であった。

## 4.2 CPU プログラムのフロー

図 4.2 に CPU プログラムの主要な部分のフローチャートを示す。CPU が起動すると、まずブートコードが実行される。ブートコードでは、FRAM に保存されたプログラムを SRAM にコピーしてから、main 関数に移る。SRAM へのコピーは .text セクションと .data セクションについて行われ、.bss セクションについてはゼロクリアされる。main 関数では、最初に初期化を行って起動メッセージを送信した後、無限ループに入る。

### 4.2.1 初期化部分

main 関数が呼ばれた後に 1 度だけ実行される初期化部分では、まず SRAM 上のプログラムのコピーが作成される。衛星軌道上では、宇宙線などによってメモリが書き換わってしまうことがある。これを SEU (Single Event Upset) といい、GRB 観測系で使用している FPGA については、放射線耐性試験の結果、衛星軌道上では 12.6 回/年の頻度で SEU が発生すると見積もられている [6]。ここでのプログラムコピーは SEU 対策であり、SEU によってビットが反転してしまった場合に 3 カ所の多数決をとることによって反転してしまったビットを元に戻せるようにしてある。

UART・CAN 初期化部分では、UART および CAN を用いた通信ができるようにコントローラの設定を行う。

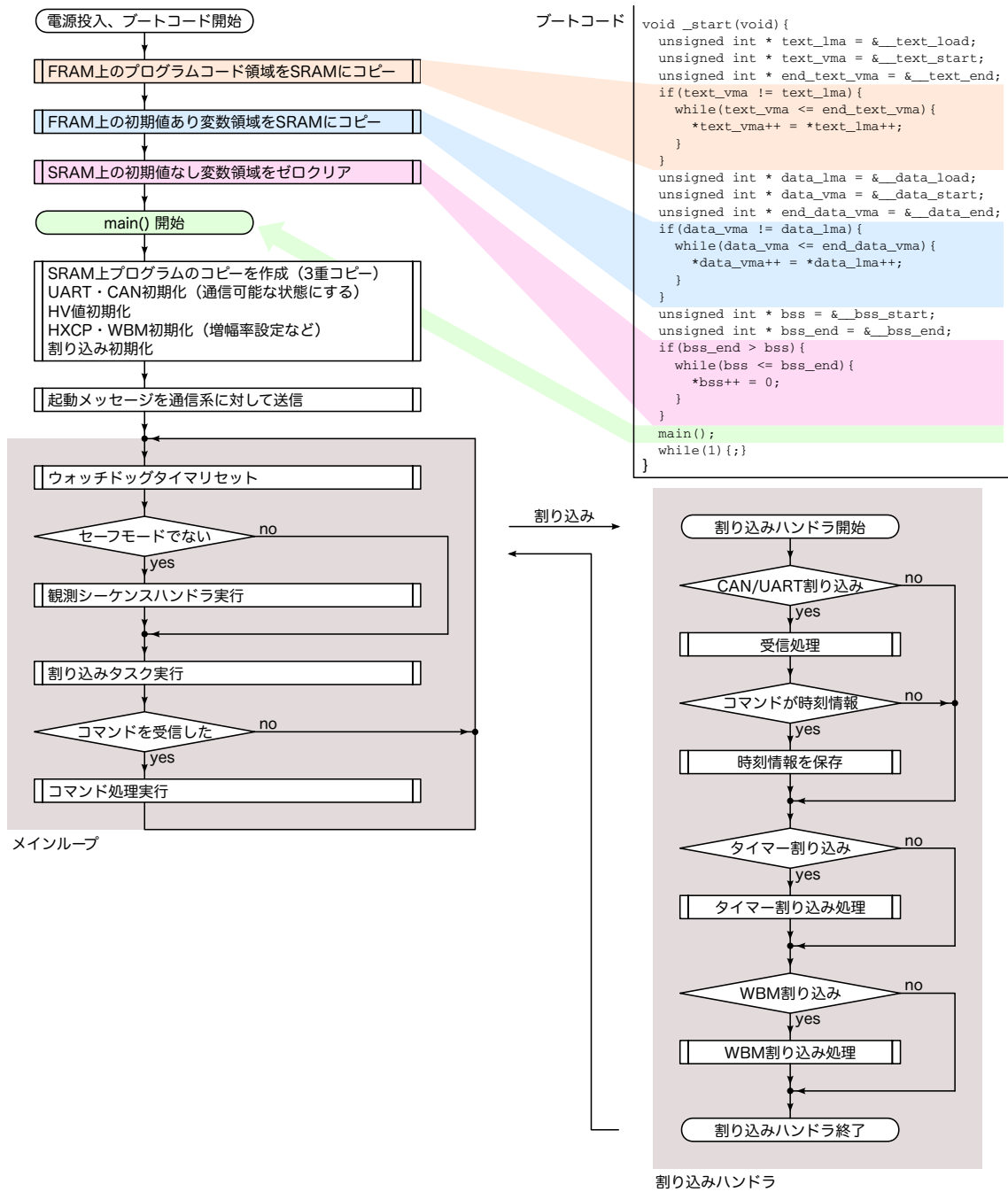


図 4.2: ソフトウェアのフローチャート。

HV 値初期化部分では、HV 値を FPGA 上に実装されたメモリから読み出す。FPGA 上には 16bit×4 のメモリが用意されており、それぞれ WBM APD HV 値、HXCP APD HV 値、HXCP PMT HV 値およびリセット回数が格納される。このような仕様になっているのは、検出器に HV が印加された状態で CPU ソフトウェアのリセットがかかった場合、HV を一気に切ってしまうとプリアンプに大きな電流が流れて故障してしまう可能性があるためである。FPGA 上のこれらのメモリは電源が入っている限り値を保持するため、ソフトウェアがリセットされてもそこから値を読み出すことでリセット前の HV 値を維持することができる。

HXCP・WBM 初期化部分では、増幅率・閾値などの設定値を初期化する。このときは設定値を初期化するのみであり、HXCP および WBM の電源は投入されない。

割り込み初期化部分では、割り込みを有効にする。詳しくは後の割り込みハンドラの小節で述べる。

## 4.2.2 while ループ部分

main 関数内の while ループ部分について説明する。

### ウォッチドッグタイマリセット

ウォッチドッグタイマはソフトウェアの状態を監視するためのタイマーであり、タイマーをリセットできなくなった場合にはソフトウェアに異常があったと判断し、リセットをかける。タイマーは 3 秒であり、while ループの冒頭でこのタイマーのリセットをしているため、while ループに 3 秒間処理が戻ってこない場合にリセットがかけられることになる。

### 観測シーケンスハンドラ実行

観測シーケンスの制御を行う部分である。GRB 観測系では GRB 待機・検知・観測・データ転送までの一連の動作を地上からのコマンドではなく、自律的に行う。この部分では自律動作のための機能が実装される。この内容については 4.2.4 節で述べる。

### 割り込みタスク実行

割り込みがかかると割り込みハンドラに処理が移るが、割り込みハンドラで重い処理を行うと元の処理に復帰するまでに時間がかかり、ウォッチドッグタイマによってリセットがかけられてしまう可能性がある。したがって、割り込みハンドラ内の処理は最小限にとどめる方針で開発を行っている。現状では、割り込みによって実行する関数へのポインタを格納する配列を用意し、割り込みハンドラではこの配列に実行したい関数のポインタを割り込みタスクとして追加するだけにとどめ、while ループ内で配列に追加されたタスクを処理するようになっている。

## コマンド処理実行

コマンド受信は割り込みを発生するが、コマンドについても割り込みハンドラではコマンド内容の格納とコマンドがあったことを示すフラグを立てるのみにとどめ、while ループ内でコマンドに対応する処理を行う。

### 4.2.3 割り込みハンドラ部分

割り込みは、現在実行中の処理を中断して他の処理（割り込みハンドラ）を実行する機能であり、割り込みハンドラ実行後は元の処理を再開する。割り込みハンドラ部分は、割り込みがかかった際に実行される関数である。割り込み要因は WBM、タイマー、CAN/UART の3つがある。そのどれが要因であっても同じ割り込みハンドラが実行され、割り込み要因の判定は割り込みハンドラ内で行われる。

#### CAN/UART 割り込み

CAN/UART 割り込みは TSUBAME 衛星内の他のサブシステムからのコマンドを受信した際に発行される。この割り込みが発生した時点ではコマンドの内容はまだ分かっておらず、コマンド内容を知るためには、CAN コントローラや UART コントローラのレジスタを読みにいかなければならない。CAN 割り込みでは、コマンド内容を読んで配列に格納するまでの処理を行う。

#### タイマー割り込み

タイマー割り込みは、一定数のクロックごとに発行され、現在は 0.125 秒ごとに割り込みが発生するようになっている。割り込みハンドラ内では、割り込み回数に応じたタスクを追加する。例えば、8 回のタイマー割り込みごとに HK データ取得関数が実行されるが、これは 1 秒ごとに実行されることになる。以下に現在タイマー割り込みで実行される関数を挙げておく。

- HK データの取得（1 秒ごと）
- HV 値制御（4 秒ごと）
- CAN のステータスチェック（8 秒ごと）
- HXCP のリングバッファ管理（8 秒ごと）
- 通信系のウォッチドッグタイマ（16 秒ごと）

通信系のウォッチドッグタイマは、通信系からの HK 要求が来ているかどうかを監視する機能である。もし通信系ソフトが通信不能になった場合には、観測を行ってもデータを転送できないため、シーケンスを自動的に中断する。現状では 32 秒間 HK 要求が途絶えた場合には通信系に異常があったと判断して、観測を停止するようになっている。

## WBM 割り込み

WBM 割り込みは、WBM が観測をしている間に 0.125 秒間隔で発行される。この割り込みのタイミングで WBM のカウンタの値が読み出せるため、GRB 待機モード中は WBM 割り込みごとに GRB 判定ロジックを実行し、GRB の発生を検知する。

### 4.2.4 観測シーケンスハンドラ

観測シーケンスハンドラでは、観測ミッションを行うための検出器制御を行う。電源投入後の状態をコマンド待機モードと呼び、モード変更コマンドによって GRB 観測モード、定常天体観測モード、キャリブレーション観測モードに遷移する。

**GRB 観測モード** GRB 観測モードは GRB の偏光観測を目的としたモードであり、このモードは 2 つのモードに分けることができる。1 つは WBM のトリガロジックを動作させて GRB を待ち受けている GRB 待機状態、もう 1 つは WBM による GRB 検知後の HXCP による偏光観測を行っている GRB 偏光観測状態である。

**定常天体観測モード・スペクトル観測モード** 指定した方向を向いて観測を行うモードであり、検出器のキャリブレーションに用いる。このモードにおいては GRB 待機のような状態はなく、目標に指向が完了した場合には観測を開始する。

**シーケンスハンドラの実装** 以上 3 つのモードは「自律モード」と呼んでおり、モード変更コマンド受信後は全て自動で観測を行う。自律モードでは、検出器の電源状態をチェックし、検出器の設定を行い、HV 印加を行った後、観測を開始する、という流れでシーケンスを進める。観測の流れはいずれのモードもほぼ同じであり、検出器制御の概念図は図 4.3 のようになる。図 4.4 に、実際のシーケンスハンドラのフ

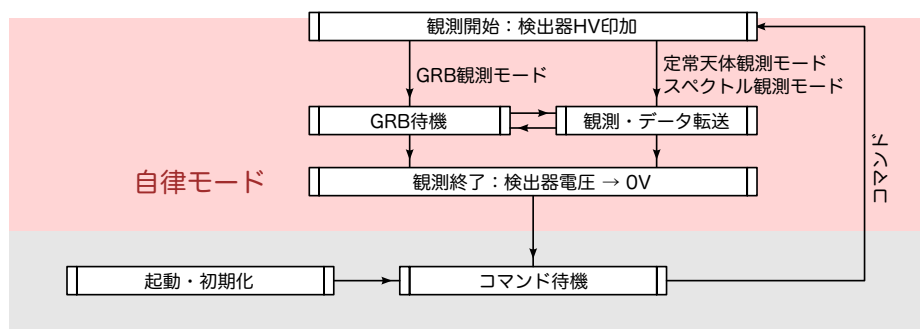


図 4.3: GRB 観測系内のモード遷移図。

ローチャートを示す。

観測シーケンスハンドラは実装して GRB 観測系単体での動作は確認してあるが、実際に Tsubame 衛星内のサブシステムを動作させた状態での試験はまだ行っていないため、まだ確実に動作するとは言い切れない。したがって、観測シーケンスハンドラに関してはソフトウェアの統合試験を実施する必要がある。



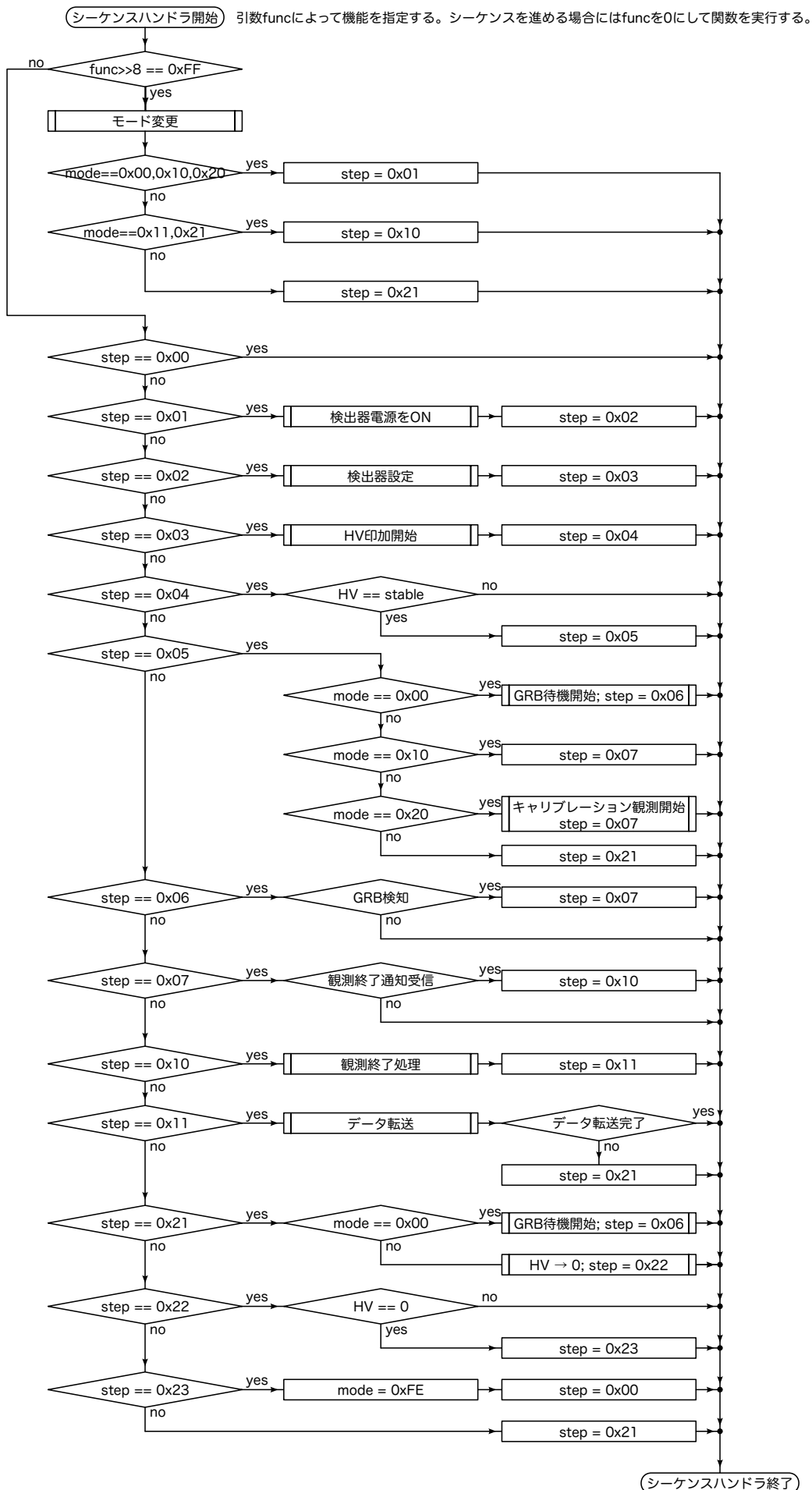


図 4.4: 観測シーケンスハンドラのフローチャート。

## 第5章 まとめと今後の課題

本論文では、衛星軌道上の環境において、検出器の劣化および故障を防ぐための機能をソフトウェアの観点から検討し、実装した。また、実装した機能の動作確認試験を行い、実際に衛星軌道上の環境において劣化および故障の原因となる条件を回避できるようになったことを確認した。

一方で、動作確認試験の過程において HXCP APD 接着面の剥離と思われる現象が発見された。今後はまずこの APD の修理を早急に行う必要がある。また、APD VATA チップの特性についても不明な点があるため、解析を進めて最適なデータ解析方法を検討する。

ソフトウェアの開発については、GRB 観測系内での動作確認は行っているが、各サブシステム間の通信を含めた試験をやらなければ十分とは言えないため、準備ができ次第ソフトウェア統合試験および End to End 試験を実施する予定である。

# 付録A HXCP APD VATAチップのペデスタル解析結果

3.3節において、APD VATAのペデスタル解析を行う必要があった。ここでは、これまでに行ったペデスタルの解析結果を示す。

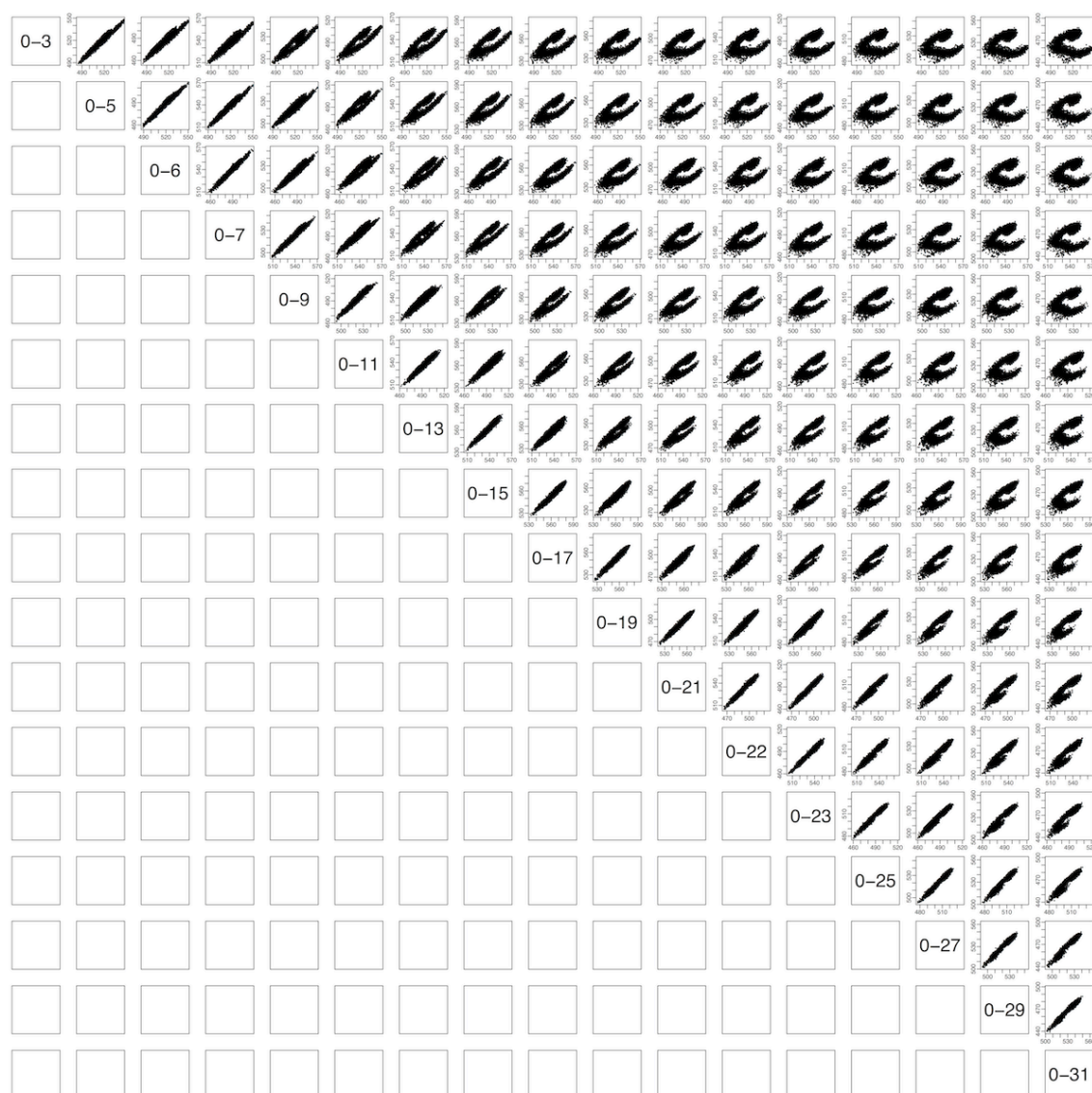


図 A.1: VATAの隣接するch同士のペデスタル相関。近いchではペデスタルは同期して変動しているが、遠くなるほどずれる傾向が見えている。したがって、ペデスタルの補正の際に隣接chを使用することで、コモンモードノイズを除去する効果が見込まれる。

# 付録B HKデータフォーマット

TSUBAME衛星との通信で取得できるデータのフォーマットについて記述する。

## B.1 HK CW

TSUBAME衛星は、HKデータの中でも最も基本的な情報をCWビーコンで常に送信する。過去に開発された衛星では、CUTE-1が13byte、Cute-1.7+APDIIが14byteのデータをCWで送信しており、TSUBAME衛星では15byteのデータを送信する。この15byteのうち、理学系内のデータに割り当てられているのは14byte目の7bitであり、構成は表B.1の通りである。例えば、CWで得られたデータの14byte目が00011001だった場合、HXCPに電源は供給されておらず、WBMのみに電源が供給されていることをデータから読み取ることができる。

bit	内容
7	CMG4 過電流検出 (理学系のデータではない)
6	HXCP デジタル回路用電源状態
5	HXCP アナログ回路用電源状態
4	WBM デジタル回路用電源状態
3	WBM アナログ回路用電源状態
2	Resetの有無 (リセットがあった場合にはビットが立つ)
1	HXCP 高電圧供給用電源状態
0	WBM 高電圧供給用電源状態

表 B.1: CW フレーム 14byte 目の構成。

## B.2 HK FM

HK FMは周波数変調方式 (Frequency Modulation; FM) によるダウンリンクを想定したHKデータである。GRB観測系のHKのサイズは8 byte × 9 frame = 72 byteである。図B.2および図B.2にその構成を示す。

cmd2	idx	bit								説明 注：HKx-yはcmd2がx、idxがyの項目を指す。
		7	6	5	4	3	2	1	0	
0	0	CW用HK								内容は別表を参照。
1	0	CPU用FPGA コア電圧								ノミナル1.5V, 7ル5.0V
	1	CPU用FPGA I/O電圧								ノミナル3.3V, 7ル5.0V
	2	CPU用FPGA コア電圧電流								7ル500mA
	3	CPU用FPGA I/O電圧電流								7ル250mA
	4	mode	step	GRBカウント						シーケンスの状態。内容は別表を参照。
	5	HXCP PMT HV設定値								974で-817Vを出力
	6									
2	7	HXCP PMT HV測定値								12bit, 7ル1000V
	0	HXCP APD HV設定値								890で381Vを出力
	1									
	2	HXCP APD HV測定値								12bit, 7ル500V
	3	WBM APD HV設定値								940で369Vを出力
	4									
	5	WBM APD HV測定値								12bit, 7ル500V
3	6	CPU基板温度								5.875mV/K, 7ル2.5V動作未確認
	7	WBM基板温度								5.875mV/K, 7ル2.5V較正済み
	0	WBM用FPGA コア電圧								ノミナル1.2V, 7ル2.5V
	1	WBM用FPGA I/O電圧								ノミナル3.3V, 7ル5.0V
	2	WBM基板内部電圧+5.5V								ノミナル5.5V, 7ル10.0V
	3	WBM基板電圧								ノミナル12.0V, 7ル25.24V
	4	HXCPデジタル部電圧								ノミナル12.0V, 7ル25.24V
	5	WBM用HV電圧								ノミナル12.0V, 7ル25.24V
6	WBM用プリアンプ電圧								ノミナル12.0V, 7ル25.24V	
4	7	HXCP用FPGA I/O電圧								ノミナル3.3V, 7ル5.0V
	0	HXCP用FPGA コア電圧								ノミナル1.5V, 7ル5.0V
	1	CANドライバ電圧								ノミナル5.0V, 7ル10.0V
	2	HXCPアナログ部負電圧								ノミナル-3.0V, 7ル-5.0V
	3	HXCPアナログ部正電圧								ノミナル3.0V, 7ル5.0V
	4									
	5	理学系内時刻								単位は100us
5	6									
	7									
	0	WBM基板内部電圧電流								7ル250mA
	1	WBM1 (西) +11V電流								7ル25mA
	2	WBM1 (西) +5V電流								7ル25mA
	3	WBM2 (北) +11V電流								7ル25mA
	4	WBM2 (北) +5V電流								7ル25mA
6	5	WBM5 (南) +11V電流								7ル25mA
	6	WBM3 (上) +5V電流								7ル25mA
	7	WBM4 (東) +11V電流								7ル25mA
	0	WBM3 (上) +11V電流								7ル25mA
	1	WBM4 (東) +5V電流								7ル25mA
	2	WBM5 (南) +5V電流								7ル25mA
	3	WBM用FPGA コア電圧電流								7ル500mA
4	WBM用FPGA I/O電圧電流								7ル250mA	
5	WBM HV 電流								要確認	
6	HXCP用FPGA コア電圧電流								7ル500mA	
7	HXCPアナログ部電圧電流								7ル250mA	

図 B.1: HK FM データフォーマット (1)。

7	0	HXCP用FPGA I/O電圧電流	7/250mA	
	1	HXCP温度0	X*1.62-64.22[°C]	
	2	HXCP温度1	X*1.62-63.37[°C]	
	3	WBM1 (西) 温度	X*1.60-274.17[°C]	
	4	WBM2 (北) 温度	X*1.59-272.30[°C]	
	5	WBM3 (上) 温度	X*1.60-273.53[°C]	
	6	WBM4 (東) 温度	X*1.61-275.36[°C]	
	7	WBM5 (南) 温度	X*1.60-273.63[°C]	
8	0	WBM1カウントレート		
	1	WBM2カウントレート		
	2	WBM3カウントレート		
	3	WBM4カウントレート		
	4	WBM5カウントレート		
	5	WBM STATUS	積分状態、電源状態	
	6		過電流検出	
	7	HXCP STATUS	観測ON/OFF	
9	0		リングバッファ状態など	
	1		reserved	
	2		reserved	
	3		reserved	
	4		reserved	
	5	CRC TEXT		
	6			
	7	リセット回数		

図 B.2: HK FM データフォーマット (2)。

## 付録C CPUクロックの温度依存性

水晶振動子の周波数は温度によって変化するが、一般に、ATカットの振動子では温度特性は3次関数で近似できる。GRB観測系の基板に実装されている水晶振動子の温度特性を測定した。恒温槽に回路ボックスを入れ、1秒ごとに割り込みをかけてコマンドを送信するようにした。コマンド送信間隔を通信用に使用しているLinux PC（恒温槽外部に設置）で測定した。測定結果を図C.1に示す。

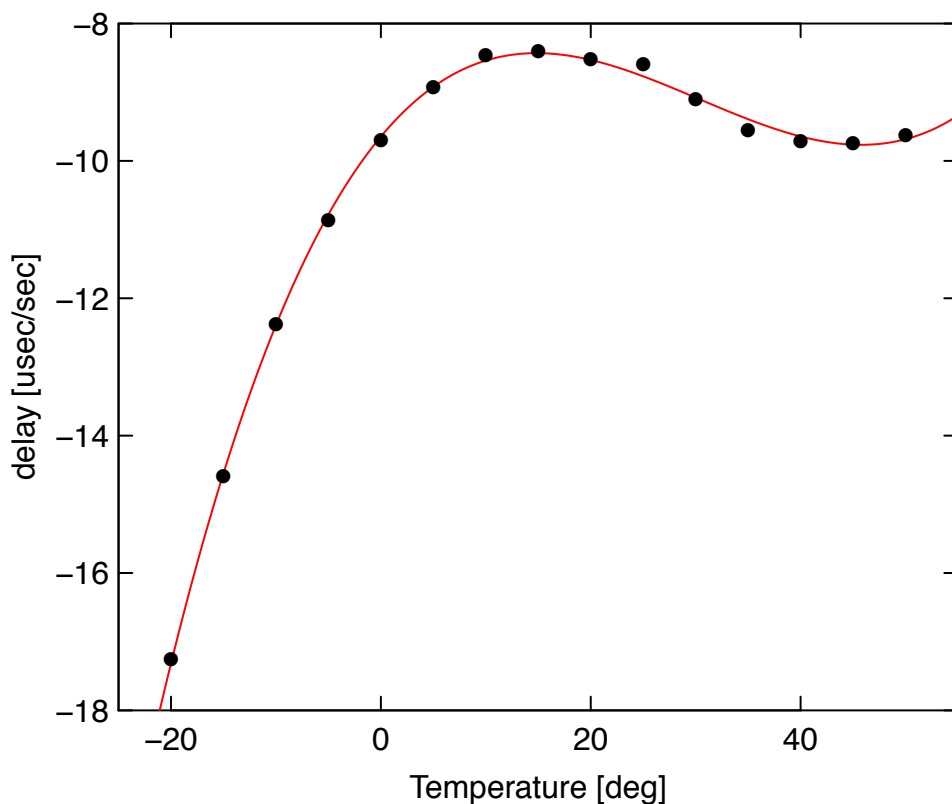


図 C.1: CPU 基板に実装されている水晶振動子の温度依存性。縦軸は通信用に使用している Linux PC の時刻からのずれを表す。

時刻は姿勢系からの時報と比較するため、同じずれが続く場合には内挿によって正確な時刻を求めることができる。時刻が正確性が低下するのは時報間で温度が変化する場合であり、5秒間隔で送信される時報間に  $-20$  から  $-15$  へ  $5$  の温度変化があった場合、内挿によって得られる時刻は実際の時刻から  $2\mu\text{sec}$  程度ずれる。構造系の熱解析結果から温度変化は  $1$  /sec 以下であるという結果が得られているため、実際にこの大きさの影響が出ることは考えにくい。また、このずれが問題になるのはデータの取得レートが  $500\text{kHz}$  程度の場合であり、WBM・HXCP のデータ取得可能な最大のレートが約  $10\text{kHz}$  であることから、問題ないと判断した。



## 関連図書

- [1] BATSE Skymap, <http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/skymap/>
- [2] Briefing Materials: NASA Missions Explore Record-Setting Cosmic Blast, <http://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a010000/a011400/a011407/>
- [3] D. Yonetoku et al. *Apj*, 743:L30 (2011)
- [4] 常世田 和樹, 修士論文「超小型衛星 TSUBAME 搭載用  $\gamma$  線バースト検出器フライトモデルの開発」, 東京工業大学 (2013)
- [5] 常世田 和樹, 卒業論文「 $\gamma$  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)
- [6] 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検出器の開発」, 東京工業大学 (2013)
- [7] 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
- [8] 栗田 真, 卒業論文「TSUBAME 衛星用ガンマ線バースト検出アルゴリズムの偏光観測のための最適化」, 東京工業大学 (2013)
- [9] 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)
- [10] 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 (2007)
- [11] 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)
- [12] SPENVIS, <http://www.spenvis.oma.be/>
- [13] 五十川 知子, 修士論文「宇宙利用に向けた X 線・ $\gamma$  線検出用アバランシェ・フォトダイオードの開発」, 東京工業大学 (2013)

# 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。河合教授、谷津助教には、衛星開発の機会を与えてくださり、いろいろなお指導を頂きました。河合教授にはガンマ線バーストや衛星の運用・過去の事例などについて、谷津助教には、衛星開発の姿勢について学んだことが印象に残っております。また、実験のアドバイスは大変参考になりました。ありがとうございました。これからもプロジェクトの成功に向けて、可能な限り頑張りたいと思います。

有元さんには、ソフトウェア開発やデータ解析において、さまざまな議論・提案をしていただきました。ありがとうございました。栗田さんには、全く何も分からない状態の自分に、開発環境について詳しく教えていただきました。これからも研究を頑張ってください。応援しています。

松永研や木村研の皆様とは、宇宙研での作業の度に協力していただきました。感謝しております。

河合研OBの常世田さん、川上さん、林さんには、お忙しい中自分の分からないところについて丁寧に教えていただきました。ありがとうございました。