

修士論文
ASTRO-H 衛星搭載 SXS デジタル波形処理部の
性能実証機の評価試験

埼玉大学大学院 理工学研究科 博士前期課程
物理機能系専攻 物理学コース 田代・寺田研究室

武田 佐和子

平成 25 年 4 月 2 日

Abstract

2014 年完成予定の日本の X 線天文衛星 ASTRO-H は、焦点面検出器の 1 つとして X 線マイクロカロリメータである Soft X-ray Spectrometer (SXS) を搭載する。これは X 線のエネルギーを熱エネルギーに変換して計測する装置であり、50 mK という極低温で動作させることで 0.3 – 12.0 keV の入射 X 線に対して 7 eV (FWHM) という高エネルギー分解能を実現できる。SXS を用いることで、超新星残骸をはじめとしたあらゆる天体の精密分光観測が可能となり、天体プラズマの速度の測定など、宇宙物理学の未解決問題の答えに迫ることができると期待されている。

この SXS の一連の信号処理部のうちデジタルデータを扱う部分が Pulse Shape Processor (PSP) である。PSP はアナログデータ処理部によって増幅と A/D 変換を施された波形データを受け取り、X 線イベントの検出と波高値計算を行う。X 線マイクロカロリメータの波形は X 線のエネルギーによらず検出器素子の熱容量と熱伝導率のみに依存するので再現性が高い。さらにノイズのフーリエスペクトルも考慮し、テンプレート波形を用いた最適化フィルタ処理を行うことで、その波高値、すなわちエネルギーを精度よく求める。

本論文では、PSP の性能実証機の評価試験である熱真空試験とセンサーデータ処理試験の結果について述べる。熱真空試験は PSP が宇宙の熱環境や真空環境に置かれても正常に動作するかを確認する試験で、熱真空槽に PSP を設置して真空引きし、動作/保管可能な限界温度に置き、さらに温度変化にさらす。同時に、PSP は ASTRO-H デジタル信号処理系の代表として供試されるため、PSP 各部の平衡温度の実測値と宇宙環境での熱数学モデルとを比較し、測定結果を熱数学モデルに反映する必要がある。本論文では、熱真空槽壁面からの放射や PSP を取り付けたプレートの熱伝導の影響を取り入れて、熱数学モデルの妥当性を議論した。一方、センサーデータ処理試験は、実際の検出器から取得し増幅と A/D 変換を終えたデータを PSP に入力して、波形処理結果が PSP に課されている要求を満たしているかを確認する試験である。本論文では、波形処理結果の解析を行い、PSP のノイズ処理能力の評価と改善方法の提案し、その結果を含めて波高値解析の正しさを議論したあと、エネルギー分解能が PSP への要求値である 7 eV を満たすことを示した。

目次

第 1 章	X 線天文学と ASTRO-H 衛星	1
1.1	X 線天文学	1
1.2	ASTRO-H 衛星	2
1.2.1	科学目標	2
1.2.2	搭載機器	4
第 2 章	X 線マイクロカロリメータ SXS	8
2.1	X 線マイクロカロリメータ	8
2.1.1	概要	8
2.1.2	原理	8
2.1.3	エネルギー分解能	9
2.2	SXS への要求	10
2.2.1	性能要求	10
2.2.2	設計要求	11
2.3	SXS の構造	12
2.3.1	検出器	12
2.3.2	信号処理系	14
2.3.3	電源系	14
2.3.4	衛星ネットワークルーター	14
2.3.5	Dewar & 冷凍機	14
第 3 章	デジタル波形処理システム PSP	16
3.1	PSP の構造と設計	16
3.1.1	通信手段	17
3.1.2	MIO ボード	18
3.1.3	SpaceCard ボード	18
3.1.4	PSU ボード	19
3.1.5	クロック信号	20
3.2	データ処理アルゴリズム	20
3.2.1	MIO 処理パート	21
3.2.2	SpaceCard 処理パート	24
3.3	性能要求	29

第4章 熱真空試験	31
4.1 目的	31
4.2 熱数学モデル	31
4.3 平衡温度の測定	32
4.3.1 方法	32
4.3.2 使用機材と配置	33
4.4 結果	37
4.5 考察	37
4.5.1 全体の傾向	38
4.5.2 熱真空槽壁面との放射結合	39
4.5.3 熱真空槽床面との伝導伝熱	40
4.6 まとめ	42
第5章 機上ソフトウェアによる波形処理試験	43
5.1 目的	43
5.2 実験	43
5.3 結果	44
5.4 考察	44
5.4.1 ノイズリダクション	44
5.4.2 時刻付け	45
5.4.3 エネルギー分解能	46
5.4.4 処理速度	46
5.5 まとめ	47
第6章 まとめ	49

表 目 次

1.1	各搭載機器の特性	7
2.1	SXS-XCS への科学要求	11
3.1	PSP - Xbox 間の信号	20
4.1	供試体の維持、機能温度。	32
4.2	PSP と熱真空槽壁面のパラメータ。	40
5.1	各ピクセルのイベント数。	44

目 次

1.1	電磁波の透過できる距離。X 線は最大でも地表から 31 km 程度までしか到達できない。	1
1.2	ASTRO-H 衛星の完成予想図。1 - 6 は搭載機器を表す (1.SXT 2.HXT 3.SXI 4.HXI 5.SXS 6.SGD: 各機器については 1.2.2 節参照)。	2
2.1	X 線マイクロカロリメータの構造。吸収体、ピクセル、温度計、サーマルリンク、低温熱浴からなる。	9
2.2	X 線光子吸収時の吸収体の温度応答。 t_0 が X 線入射時刻。温度は ΔT だけ上昇したあと、時定数 τ_0 で指数関数的に減衰する。	9
2.3	SXS の模式図。緑は ISAS/JAXA、青は NASA/GSFC、紫は SRON と Geneva 大学により開発されている機器を表す。	12
2.4	SXS の X 線マイクロカロリメータ検出器の性能実証機。写真では一部吸収体が外されている。写真中心の 36 ピクセルのうち 35 ピクセルが観測用である。端にある 4 ピクセルはキャリブレーション用で、このうちの 1 つが実際に読み出されることになる。	13
2.5	検出器の構成。	13
2.6	左：熱的ダイアグラム。右：Dewar の構造の模式図。Fujimoto et al. (2010) [19] より転載。超流動液体 ^4He を LHe、Joule-Thomson 冷凍機を JT、2 段 Stirling 冷凍機を 2ST と表記している。	15
3.1	PSP のブロックダイアグラム。	16
3.2	MIO ボードのブロックダイアグラム。	18
3.3	SpaceCard ボードのブロックダイアグラム。	19
3.4	PSU ボードのブロックダイアグラム。	19
3.5	PSP で行われる波形処理の流れ。	21
3.6	sample の bit stream。PSP Description Document [25] より転載。	22
3.7	ステートと波形との関係。横軸は ADC sample。赤文字が出力パラメータ、紫の丸がステートが遷移するタイミング。ここでは QUICK_DOUBLE イベントがある場合をしめしている。	24
3.8	セカンドパルス検出の概要。一番上の図は微分前の波形で、赤はセカンドパルスを含み、青は含まない。真ん中の図は一番上の図の波形の微分後。一番下の図は真ん中の図のセカンドパルス部分を拡大したもの。赤 - 青 が緑色の波形。PSP Description Document [25] より転載。	25
3.9	グレード付けの定義。	26

3.10	上の段から平均波形、ノイズ波形、テンプレート波形。左が時間空間、右が周波数空間。	28
4.1	温度プロファイル概略。赤い部分が本論文で扱う測定値取得部分。	32
4.2	熱真空試験セットアップ図。	33
4.3	温度測定点。	34
4.4	熱真空試験の使用機材。	36
4.5	熱数学モデルによる計算値と、熱真空試験による実測値。	37
4.6	今回想定する熱回路とモデル/実測温度。青字がモデルから計算した値、赤字が実測値。 $R1, R2, R3, R4$ は伝導の熱抵抗、 r は実験値の考察をする際に仮定した放射の熱抵抗。	38
4.7	モデルと実測値の温度。青がモデル、赤が実測値。	38
4.8	モデルと実測値の温度。MIO ボードの全ての測定点をプロットに含めた。青がモデル、赤が実測値。	39
5.1	波形処理試験セットアップ図。	43
5.2	px0 イベントの PHA の時間変動。データの繰り返しによる周期性を見ることができる。	44
5.3	波形の比較。左: 通常の X 線イベント。右: クロストーク。横軸は sample 番号、縦軸は PHA。クロストークは通常のイベントより小さな RISE_TIME を持つ。	45
5.4	PHA vs RISE_TIME。RISE_TIME が小さなイベントのほとんどは $PHA < 200$ の範囲にいる。	45
5.5	TICK_SHIFT、TIME_VERNIER のヒストグラム。	46
5.6	エネルギースペクトル。	47
5.7	CPU 使用率に依存した処理イベントカウントレートの変化。緑の点の実測値。緑の 2 点の関係は一次関数的であるとしている。	48

第1章 X 線天文学と ASTRO-H 衛星

1.1 X 線天文学

X 線天文学は、1962 年に Giacconi らがロケット観測で、全天で最も強い X 線源 Sco X-1 と宇宙 X 線背景放射を発見したことに端を発する。その後の X 線観測により、超高温プラズマからの熱的な X 線放射、プラズマ中の高エネルギー電子から放射される非熱的な X 線放射などの高エネルギー現象が多数発見され、それまで考えられてきた静的な宇宙像を覆すこととなった。また、1960, 70 年代には、X 線星の放射の起源が、高密度星に流れ込むプラズマが解放する重力エネルギーであることが分かってきた。これにより、今まで理論的にしか示されていなかった重い恒星が重力崩壊を起こすことで生まれた高密度星、すなわち中性子星やブラックホールの実在が証明され、その詳細な様子について実際に観測する手段が提供されることになった。さらに近年では、高エネルギー現象とは程遠いと思われてきた太陽系内の惑星や彗星、衛星からも X 線が検出されることが確認された。例えば、木星の極付近はオーロラによって、赤道付近は太陽 X 線の散乱によって X 線で光っている。このように、今では宇宙のほとんどの天体が X 線と何らかの形で関わっていることが分かっている。そのため、今や X 線天文学は光学、赤外、電波天文学と並び重要な位置を占め、宇宙の包括的な理解にとってかかせないものとなっている。

宇宙からの電磁波が地球大気を透過できる距離を図 1.1 に示す。X 線は地球の分厚い大気を貫くほどの透過力を持たないため、宇宙から来た X 線は地表まで到達することができない。そのため、X 線で宇宙を観測するには、ロケットや気球、人工衛星などを用いて大気の外に出る必要がある。ロケッ

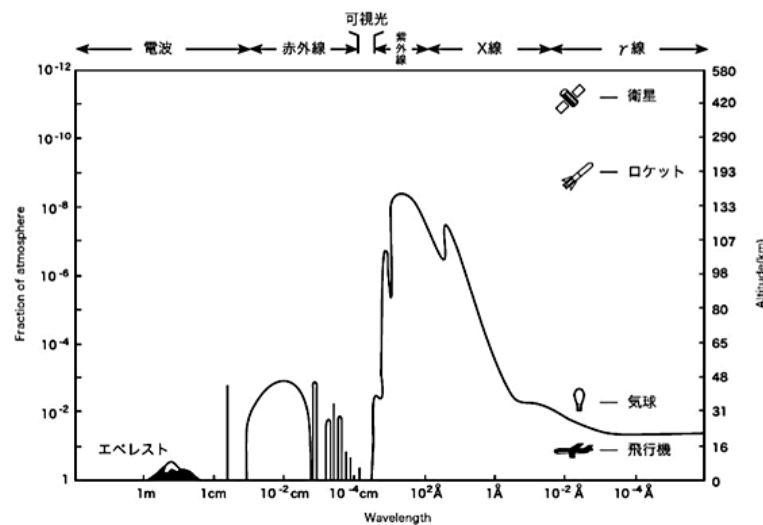


図 1.1: 電磁波の透過できる距離。X 線は最大でも地表から 31 km 程度までしか到達できない。

トによる観測は観測時間が限られており、一方で気球による観測は高度が低く X 線の一部の帯域しか観測できないため、現在は人工衛星を用いた観測が主力となっている。1970 年に世界初の X 線天文衛星「Uhuru」が打ち上げられて以来、世界で多くの X 線天文衛星が打ち上げられ、それぞれが大きな成果をあげている。日本では 1979 年の「はくちょう」に始まり、1983 年に「てんま」、1987 年に「ぎんが」、1993 年に「あすか」、2005 年には「すざく」とこれまでに 5 機の X 線天文衛星が打ち上げられた。このうち「すざく」は現在も運用中であり、広帯域・高感度・高エネルギー分解能・低バックグラウンドといった特性を生かし、今までに超新星残骸の元素組成の解明、太陽風による地球磁気圏からの軟 X 線輝線放射の発見、銀河中心領域の輝線の観測、銀河団のピリアル半径付近のガス温度と元素組成の測定、X 線連星系や活動銀河核の周辺物質の研究、超新星残骸における粒子加速の研究など数多くの分野で成果を挙げている。「すざく」に続く次世代 X 線天文衛星として、本論文の主題となる ASTRO-H 衛星が開発中である。

1.2 ASTRO-H 衛星

ASTRO-H は日本が JAXA を中心に国内の大学、アメリカ、ヨーロッパの各機関・大学とともに開発中の次世代の X 線天文衛星で、2014 年度に完成し、その後種子島宇宙センターから H-IIA ロケットにより打ち上げられる予定である。総重量 2400 kg、発生電力 3150 W 以上、軌道上では全長 14 m にもなり、日本の科学衛星の中では最大となる。完成予想図を図 1.2 に示す。

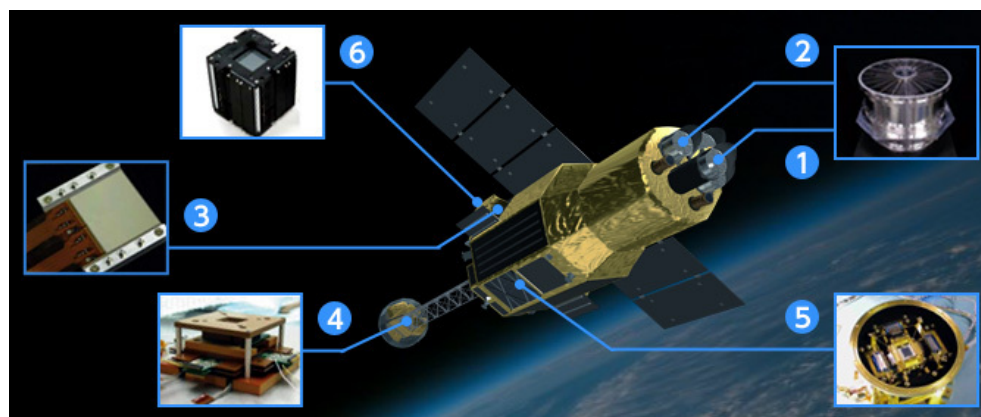


図 1.2: ASTRO-H 衛星の完成予想図。1 - 6 は搭載機器を表す (1.SXT 2.HXT 3.SXI 4.HXI 5.SXS 6.SGD: 各機器については 1.2.2 節参照)。

1.2.1 科学目標

ASTRO-H が目指す科学目標は大きく分けて 4 つある。それぞれについて以下に簡単に述べる。

1. 宇宙の大規模構造と、その進化の解明

宇宙に存在する質量の分布は空間的に一様ではなく、クモの巣状であることが知られている。この構造は宇宙の大規模構造と呼ばれる。大規模構造の節の部分は大きな重力ポテンシャルを持つため、ガスや銀河が密集して銀河団を形成している。そのため、銀河団の形成の過程を知ることで、宇宙の大規模構造の進化を探ることができる。

銀河団の形成過程は、一般に質量進化として研究されており、これは銀河団の質量を距離（年齢）の関数としてあらわしたものである。これまでのX線観測では、銀河団の質量は銀河団を取り巻くプラズマの温度と密度から静水圧平衡を仮定して求められてきた。しかし、実際には熱的プラズマの圧力以外にガスの乱流などの非熱的な力がはたらいているという指摘があり、これまで求められてきた質量は過小評価してしまっていると考えられる。プラズマの乱流の速度は輝線の広がりとして観測されるが、ASTRO-Hでは光子エネルギーに対して6 keVの帯域で300 km/sの分解能で初めてプラズマの速度分散を求めることができる。ASTRO-Hでは、これまでにない正確な銀河団の質量観測結果から、大規模構造の進化の研究に切り込むことができる。

2. 宇宙の極限状態の理解

宇宙には、我々の日常とはかけ離れた極限の環境がいたるところに存在する。このような環境は地上では作り出すことが難しく、極限状態における物理を検証する絶好の実験場である。その中で最たるものはブラックホールである。ブラックホールは太陽の30倍以上の質量を持つ恒星が重力崩壊し超新星爆発を起こすときに元の星の核が圧縮されることで生成される。シュバルツシルト半径の内側は、外側から見て「空間的 (space-like)」な領域であるため、内側の世界を我々が知ることはできない。そのため、ブラックホール内部の直接観測は不可能である。しかしながら、周辺の降着円盤から物質が落ちる際に解放される重力エネルギーの一部をX線として観測し、その周囲の時空について調べることができる。

降着円盤はブラックホールの周りを回転運動しているため、観測者から遠ざかる部分の輝線放射は赤方偏移、近づく部分の輝線放射は青方偏移する。さらに、一般相対論的效果のため、どちらの輝線も重力赤方偏移を受けると考えられる。これまでの観測では、検出器の分光能力が十分でなかったため、複数の領域からの鉄輝線放射が分離できず、重力赤方偏移の効果を明瞭に測定することができなかった。ASTRO-Hは7 eV程度の分解能で分光測定でき、エネルギー決定精度も高いため、重力赤方偏移を受けた輝線の特徴である、二山に分かれて高エネルギー側に傾いた形を確認することができる。

3. 多様性とんだ非熱的エネルギー宇宙の探求

宇宙空間には宇宙線と呼ばれる超高エネルギー粒子が飛び交っている。宇宙線は、星間ガスや銀河磁場、星光や宇宙背景放射などと並ぶ宇宙の基本構成要素の1つである。数やエネルギーの収支が合うこと、加速機構として非線形衝撃波加速が考えられることなどから、超新星残骸と呼ばれる超新星爆発で周囲に広がったガスがその加速源であるという説が有力である。実際に100 TeV程度まで加速

された電子がいる証拠となる硬 X 線帯域のシンクロトロン放射が多くの超新星残骸から検出されている。

シンクロトロン放射のスペクトルは、電子のエネルギーに応じたカットオフを持つ。ASTRO-H では「すざく」の 100 倍の感度で硬 X 線帯域の分光観測と撮像を行う。これを用いて超新星残骸の観測を行えば、超新星残骸のどの部分でどれぐらいのエネルギーまで電子加速が行われているかを決定することができる。さらに、ASTRO-H で実現される軟ガンマ線帯域の広視野撮像観測も合わせて行い、加速電子起源の逆コンプトン散乱のスペクトルをシンクロトロン放射のスペクトルと合わせて見れば、加速現場の磁場を求めることができ、加速機構に制限をつけられる。また、ASTRO-H の高分解能分光観測も利用できる。残骸中のプラズマが出す輝線を見れば、項目 1 で述べたようにプラズマの運動速度が分かり、さらに各イオン毎の輝線の強度比を調べることでプラズマ中のイオンの電離状態が分かるためプラズマの温度を求めることもできる。これらから、超新星爆発のエネルギーが宇宙線を生み出す過程を解明することができる。

4. ダークマター・暗黒エネルギーの探求

宇宙の組成の 23 % はダークマター、73 % は暗黒エネルギーでできており、我々が直接観測可能なバリオンは宇宙全体のわずか 4 % である。宇宙を理解するためには、ダークマターや暗黒エネルギーの研究を進めることが必須である。これらの直接観測には至っていないが、銀河団を観測することで間接的にダークマターの質量進化を調べることができる。銀河団中には、ダークマターとガスと銀河が、30:5:1 の質量比で存在している。項目 1 で述べたように、銀河団の質量進化を調べることでダークマターの質量進化の歴史も探ることができる。また、大規模構造の進化から、暗黒エネルギーが宇宙の進化に果たした役割にも迫ることができる。

1.2.2 搭載機器

1.2.1 節で挙げた科学目標を達成するために、ASTRO-H は 0.3 keV - 80 keV までの天体からの X 線を X 線望遠鏡によって集光・結像し、3 種類の焦点面検出器によってそれぞれ撮像と分光を行う。また、10 eV - 600 eV の X 線を非集光型の装置によって検出する。

これを実現するために、ASTRO-H には以下の 4 台の観測機器が搭載される。

- 軟 X 線分光撮像検出器 (Soft X-ray Spectrometer : SXS)
- 軟 X 線撮像検出器 (Soft X-ray Imager : SXI) + 軟 X 線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope : SXT)
- 硬 X 線撮像検出器 (Hard X-ray Imager : HXI) + 硬 X 線望遠鏡 (Hard X-ray Telescope : HXT)
- 軟 γ 線検出器 (Soft Gamma-ray Detector : SGD)

これら観測機器の特性を表 1.1 にまとめる。また、各機器の詳細を以下に述べる。

SXS

SXS は、軟 X 線望遠鏡 SXT と、X 線マイクロカロリメータ検出器 (X-ray Calorimeter System : XCS) の総称である。

SXT は、約 20 keV 以下の軟 X 線の集光、撮像を目的とした X 線望遠鏡であり、その焦点面に SXC を用いる SXT-S と SXI を用いる SXT-I の 2 つがある。SXT-S と SXT-I の設計は同じであり、円錐近似した Wolter I 斜入射光学系を用いる。望遠鏡の設計、製作方法は基本的に「すざく」と同じであるが、「すざく」よりも大きい 45 cm の口径と、5.6 m という長い焦点距離をもつ。

SXS の最大の特徴は、6 keV の入射光子に対して 7 eV という驚異的な超高分解能分光能力である。X 線マイクロカロリメータ検出器は、X 線のエネルギーを吸収体の温度変化、すなわちフォノンとして測定する。熱による雑音を減らすと同時に吸収体の比熱を極限まで小さくするために 50 mK という極低温に冷却される。X 線光子のエネルギーを計量する量子としてフォノンを用いることで、これまで一般的であった X 線を電荷に変えて検出する装置に比べて統計ゆらぎが抑えられ、原理的には 10 - 100 倍優れた分光能力を発揮できる。この機器は 1.2.1 節で挙げたすべての科学目標に強く関係している。

X 線マイクロカロリメータは「すざく」にも搭載されていたが、打ち上げの直後に冷却用の液体ヘリウムが冷凍機の不具合によって消失してしまい、観測が行われることはなかった。X 線マイクロカロリメータによる天体観測は成功すれば ASTRO-H が世界初となる。

本論文では、この SXS の波形処理系の性能実証を取り上げる。X 線マイクロカロリメータ検出器については次章で、SXS のデジタル波形処理部 Pulse Shape Processor (PSP) においては 3 章で詳しく述べる。

SXI + SXT

SXI は 背面照射型 X 線 CCD カメラであり、ASTRO-H 搭載検出器の中では広視野・高感度・撮像可能の 3 点が大きな特徴である。背面照射型にすることで低エネルギー側での感度を向上させている。素子は 4 枚あり、熱による雑音を極力減らすために 153 K ($= -120^{\circ}\text{C}$) に冷却されている。

「すざく」に搭載された背面照射型 CCD (XIS) との大きな違いは、 $> 200\ \mu\text{m}$ の厚い空乏層である。空乏層が厚いほど高いエネルギーの X 線に対する感度が高くなる。また、エネルギー分解能についても XIS と同等の性能が地上実験では実証されている。

HXI + HXT

HXT は Pt と C を多層に蒸着した多層膜スーパーミラーであり、表面での全反射に加え、多層膜によるブラッグ反射によって硬 X 線光子を焦点に集める。その焦点面に置かれる HXI は半導体コンプトンカメラであり、CdTe 半導体検出器の上に、4 段に積み重ねた Si 半導体検出器を置いた構造をしている。原子番号の小さい Si 検出器で光子を散乱させ、散乱ガンマ線を原子番号の大きい CdTe 吸収体で捉える。両半導体検出器はいずれも、両面にストリップ状の読み出しノードを持ち、ガンマ線との相互作用によって形成された電荷の二次元的な位置と電荷量を測定できる。検出器の周りには「すざく」搭載硬 X 線検出器 (HXD) でも用いられた井戸型に組み上げた BGO シンチレータを設置し、反同時計数によってバックグラウンドを極力削減する。この検出器の特徴は高感度であることと、撮像能力を持つことである。高感度を持つ「すざく」HXD と比較し、10-80 keV 帯域で二桁もの感度向

上が見込まれ、高い精度の硬 X 線観測を実現する。この機器は特に 1.2.1 節で挙げた 3 番の科学目標の達成に必要である。

SGD

SGD も HXI と同じ半導体コンプトンカメラである。HXI より高エネルギー光子を検出するため 32 段のシリコンストリップ検出器と 8 段の CdTe 検出器を重ねた構造を持ち、検出効率とエネルギー分解能の向上を図っている。また、HXI と同様に BGO シンチレータによってバックグラウンドを軽減している。そのため、SGD はこの帯域の観測器の中で世界最高感度を誇る。SGD には Photo absorption mode と Compton mode という 2 つの観測モードが用意されている。Photo absorption mode は ~ 60 keV 以下で行われ、入射された光子を Si の層で光電吸収して検出する。Compton mode は ~ 60 keV 以上で行われ、入射された光子が Si の層でコンプトン散乱されたものを、CdTe で検出する。この機器も HXI と同様に 1.2.1 節で挙げた 3 番の科学目標の達成に必要である。

表 1.1: 各搭載機器の特性

	SXS	SXI + SXT	HXI + HXT	SGD
焦点距離	6 m	6 m	12 m	–
有効面積	210 cm ² (@ 6 keV)	360 cm ² (@ 6 keV)	300 cm ² (@ 30 keV)	200 cm ² (Photo absorption mode @ 30 keV) 30 cm ² (Compton mode @ 100 keV)
エネルギー帯域	0.3 - 12.0 keV	0.4 - 12.0 keV	5 - 80 keV	10 - 600 keV
角分解能	1.3 arcmin	1.3 arcmin	1.7 arcmin	–
視野	3.05×3.05 arcmin ²	38×38 arcmin ²	9×9 arcmin ²	600×600 arcmin ² (@ >150 eV)
エネルギー分解能	7 eV	150 eV (@ 6 keV)	<2000 eV (@ 60 keV)	2000 eV (@ 40 keV)
時間分解能	8×10 ⁻⁵ s	4 s	10 ⁻⁵ s	10 ⁻⁵ s
検出器バックグラウンド	0.7×10 ⁻³ /s/keV/FOV ¹ (@ 6 keV)	0.1 /s/keV/FOV ¹ (@ 6 keV)	6×10 ⁻³ /s/keV/FOV ¹ (@ 10 keV)	<10 ⁻⁶ /s/keV/FOV ¹

^aField of view: 視野。

第2章 X 線マイクロカロリメータ SXS

2.1 X 線マイクロカロリメータ

2.1.1 概要

X 線マイクロカロリメータは、X 線光子のエネルギーを熱量に変えて測定する X 線検出器である。X 線光子 1 個を光電吸収した時の温度変化は数 mK 程度と非常に小さいため、雑音を極限まで小さくするために 0.1 K 以下の極低温で安定させる必要がある。

X 線マイクロカロリメータの特長は、非常に高い分光能力を備えていること、つまりエネルギー分解能が良いことである。検出器のエネルギー分解能の良し悪しは、一般にキャリアの統計ゆらぎに依存する。キャリア数が多い検出器ほど統計ゆらぎが少なくなり、エネルギー分解能が良い。比例計数管や CCD などのようなほとんどの検出器は X 線入射時に電離した電子などをキャリアとして取り出すが、これらの検出器では電子 1 つの電離エネルギーは 20 eV 程度である。一方、X 線マイクロカロリメータでフォノン 1 つが生成されるのに必要なエネルギーは数ミリ eV 以下であり、1 つのキャリアを生成するエネルギーが圧倒的に小さい。このため、フォノンをキャリアとする X 線マイクロカロリメータのほうが他の検出器よりも統計が良く、結果としてエネルギー分解能が良いのである。一般によく使われる X 線検出器の 6 keV の入射に対するエネルギー分解能 (FWHM) は、比例計数管では ~ 1000 eV、X 線 CCD では ~ 100 eV、X 線マイクロカロリメータでは 10 eV 程度である。ブラッグ反射をもちいた分散分光計は、これに匹敵する分光能力をもつが、高いエネルギー帯域になるほど散乱角が小さくなるので、分光が困難になる。現状では、鉄の $K\alpha$ 線領域で十分に実用に耐え、かつ 10 eV クラスのエネルギー分解能を持つ検出器は、X 線マイクロカロリメータ以外には存在しないと言われている。

2.1.2 原理

X 線マイクロカロリメータの基本構造の模式図と、X 線に対する応答をそれぞれ図 5.2 と図 2.2 に示す。図 5.2 に示されるように、X 線マイクロカロリメータは吸収体、ピクセル、温度計、サーマルリンク、低温熱浴からなっている。図 5.2 で、 E は入射 X 線光子のエネルギー、 C は吸収体の熱容量 (ピクセルの熱容量と同じにしてある)、 G はサーマルリンクの熱伝導度である。X 線光子が吸収体に入射すると、光電効果によって吸収され、入射光子のエネルギーに応じて温度が上昇する。その温度変化は以下の式で表せる。

$$\Delta T = \frac{E}{C} \quad (2.1)$$

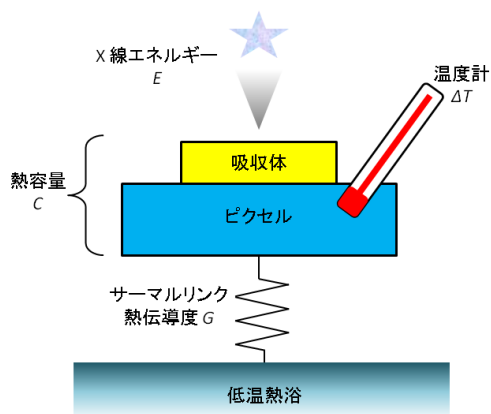


図 2.1: X 線マイクロカロリメータの構造。吸収体、ピクセル、温度計、サーマルリンク、低温熱浴からなる。

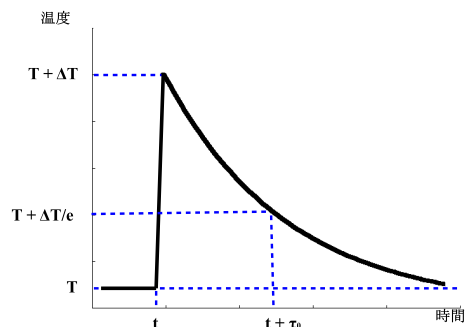


図 2.2: X 線光子吸収時の吸収体の温度応答。 t_0 が X 線入射時刻。温度は ΔT だけ上昇したあと、時定数 τ_0 で指数関数的に減衰する。

これは温度計の抵抗値の変化として測定される。吸収体で生じた熱はサーマルリンクを通して低温熱浴に逃げ、ゆっくりと定常状態に戻る。このとき以下の式が成り立つ。

$$C \frac{d\Delta T}{dt} = -G\Delta T \quad (2.2)$$

この式を解くと緩和の時定数 τ_0 は

$$\tau_0 = \frac{C}{G} \quad (2.3)$$

であることが分かる。

以上より、X 線マイクロカロリメータからの信号は、エネルギーの大きさにピークが比例しており、時定数 τ_0 で指数関数形に減衰する図 2.2 のような波形となる。

2.1.3 エネルギー分解能

以下で、 k_B はボルツマン定数、 T は X 線マイクロカロリメータの動作温度とする。

X 線が入射することで励起されたフォノン 1 個のもつ平均熱エネルギーは

$$\epsilon = k_B T \quad (2.4)$$

であり、X 線マイクロカロリメータが持つ全熱エネルギーは

$$U = CT \quad (2.5)$$

であるので、平均のフォノン数は

$$N = \frac{U}{\epsilon} = \frac{C}{k_B} \quad (2.6)$$

と書ける。この個数はポアソン統計に従って、 $\sqrt{N}$ で揺らぐ。したがってエネルギーの揺らぎは、フォノン 1 個がもつエネルギーに個数の揺らぎをかけてやればよく、

$$\Delta U = \epsilon \sqrt{N} = \sqrt{k_B T^2 C} \quad (2.7)$$

と書ける。すなわち、エネルギー分解能は FWHM で

$$\Delta E = 2.35\xi\sqrt{k_B T^2 C} \quad (2.8)$$

となる。ここで、 ξ は温度計の感度や雑音などで決まる係数 (~ 1) である。

式 (2.8) から、エネルギー分解能は T と C によって決まることが分かる。次に、吸収体の熱容量 C がどのように決まるかを考えてみる。立方体の内部エネルギーは一般に

$$U = \iiint_0^{\sqrt[3]{N}} \epsilon(n) \frac{3}{e^{\frac{\epsilon(n)}{k_B T}} - 1} dn^3 \quad (2.9)$$

と書ける。ここで n はモード数である。これをデ바이近似すると

$$U = 9Nk_B T \left(\frac{T}{T_D} \right)^3 \int_0^{\frac{T_D}{T}} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \quad (2.10)$$

である。 T_D はデバイ温度を表わし、 x は $\frac{\hbar\omega}{k_B T}$ で定義され、 ω はフォノンの周波数である。式 (2.10) を T に関して微分することで、熱容量 C を

$$C = 9Nk_B \left(\frac{T}{T_D} \right)^3 \int_0^{\frac{T_D}{T}} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad (2.11)$$

と求めることができる。ここで、低温 ($T \ll T_D$) の極限をとると

$$\begin{aligned} C &\cong 9Nk_B \left(\frac{T}{T_D} \right)^3 \int_0^\infty \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \\ &= \frac{12\pi^4}{5} Nk_B \left(\frac{T}{T_D} \right)^3 \end{aligned} \quad (2.12)$$

すなわち、 $C \propto T^3$ である。これを用いて式 2.8 を書き換えると

$$\Delta E = 2.35\xi\sqrt{k_B T^5} \quad (2.13)$$

となり、結局 X 線マイクロカロリメータが動作するような低温極限ではエネルギー分解能は、温度に非常に強く依存していることがわかる。

2.2 SXS への要求

2.2.1 性能要求

SXS が科学的成果を達成するために定められている性能要求の中で、XCS に課せられたものを表 5.1 にまとめる。SSR-01 は先ほど述べたとおりの高エネルギー分解能を保つための精度のよい波形処理を要求している。SSR-02 は、1.2.2 で述べた、ASTRO-H で実現する 0.3 - 80 keV の広帯域観測の低エネルギー側の観測を担当する機器への要求である。SSR-03 は、高感度の観測を行うための要求である。SSR-07 は、有効面積に関するものである。有効面積は実際の検出器の面積に検出効率をかけたもので、有効面積が大きいとそれだけ多くの光子から天体の情報を得ることができる。SSR-09

は、エネルギースケールやエネルギー分解能を求めるときの誤差である。SSR-10 は処理速度の要求で、これによってどこまで明るい天体を観測できるかが決まる。SSR-11 は X 線の入射時刻の測定に関する要求で、時間変動のある天体を観測するときに必要なとなる。この要求は、周期パルスを出す中性子星のパルスを十分に分解できるような値が採用されている。本論文では、これらのうち、SXS のデジタル波形処理部に関連する要求 SSR-01 と SSR-10 について検証した結果を 5 章で示す。

表 2.1: SXS-XCS への科学要求

#	項目	要求	目標
SSR-01	エネルギー分解能 (FWHM)	7 eV	4 eV
SSR-02	エネルギー帯域	0.3 - 12 keV	0.1 - 16 keV
SSR-03	未処理バックグラウンド	$1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$	$1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$
SSR-07	有効面積 @ 1 keV	160 cm ²	160 cm ²
	有効面積 @ 6 keV	210 cm ²	210 cm ²
SSR-09	エネルギースケール精度	2 eV	1 eV
	エネルギー分解能決定精度	2 eV	1 eV
SSR-10	アレイ当たりのカウントレート	$> 150 \text{ count s}^{-1}$	$> 150 \text{ count s}^{-1}$
	ピクセル当たりのカウントレート	$> 20 \text{ count s}^{-1}$	$> 20 \text{ count s}^{-1}$
SSR-11	絶対時刻精度	10 ms	0.08 ms
	時間分解能	0.08 ms	0.08 ms

2.2.2 設計要求

SXS は衛星搭載機器であるため、ASTRO-H 全体の設計要求に合うように設計される。ASTRO-H の設計要求として、電気設計基準、熱設計基準、耐環境設計基準、機械設計基準の 4 つが定義されている。ここでは、本論文の 4 章に關係する熱設計基準と耐環境設計基準について簡単に触れる。

熱設計基準では、機器の形状や表面処理などの熱設計要求、機器上の規定点での温度範囲や設定温度、熱解析の方法、温度センサの設置場所などが定められている。基準は衛星内に搭載され宇宙空間への露出がない機器へのものと、検出器などの宇宙環境に直接さらされる機器へのものに分けられている。機器ごとに設定温度を決める際には外部熱源強度の変動、姿勢変化による熱入力の変動、機器動作状態による自己発熱の変化、その公差や温度・時間依存性、材料の公差による熱特性のばらつきや温度・時間依存性、材料の宇宙環境による劣化、放射や伝導に関する機器温度の変化、熱解析の精度、が考慮されなければならない。このように決められた熱設計は、熱数学モデルを組み込んだ熱解析結果と設計確認試験によりその適合性が評価されなければならない。SXS のデジタル波形処理部の熱設計については、4 章で議論する。

耐環境設計基準は、地上・打ち上げ時・軌道上での温度・湿度・気圧・振動衝撃等の環境条件がまとめられ、それらの環境への耐性を試験する、ランダム振動試験・正弦波振動試験・パイロ衝撃試験・加速度試験・温度試験・真空試験・熱真空試験の基準が定められている。本論文の 4 章で取り上げる熱設計確認試験は、耐環境設計基準内で定められた熱真空試験の一環として行われたものである。

2.3 SXS の構造

SXS は 2.2 節に挙げた設計要求や性能要求を満たすように作られている。その構造の模式図を図 2.3 に示す。SXS の構成機器は大きく分けて検出器、波形処理系、電源系、ルーター、Dewar & 冷凍

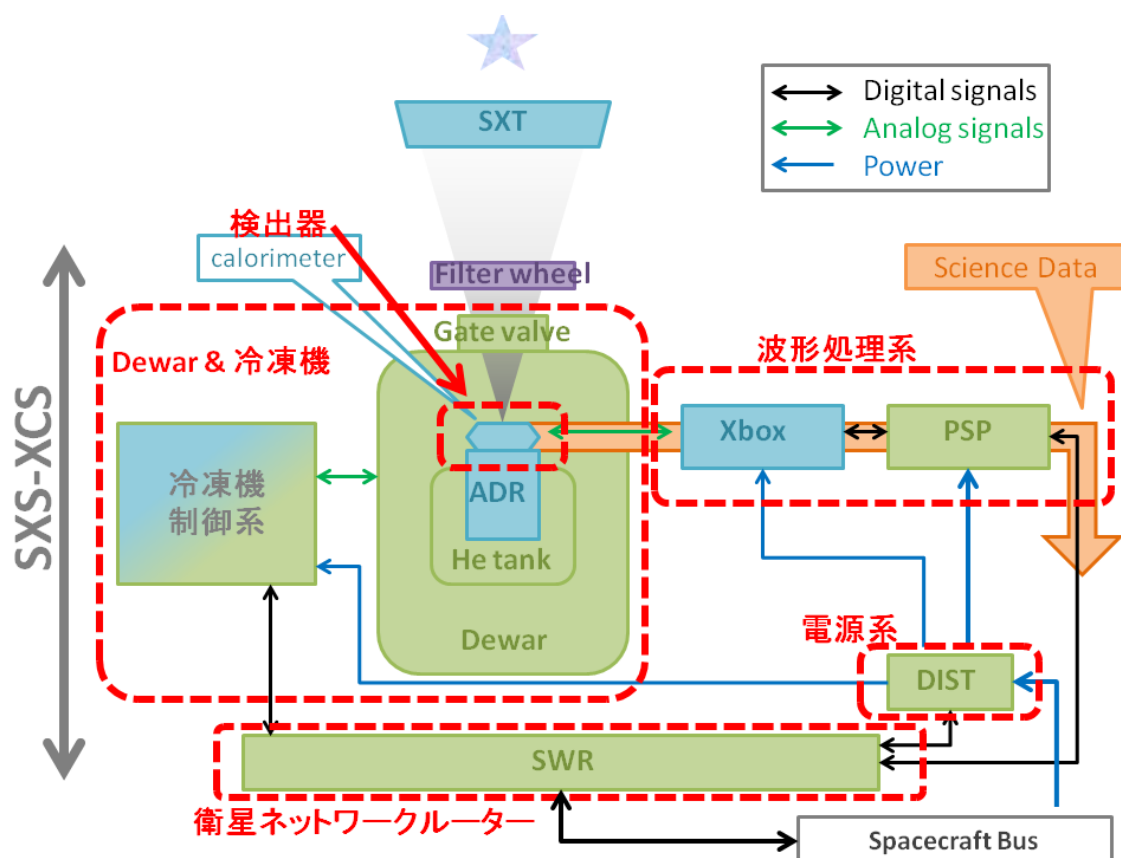


図 2.3: SXS の模式図。緑は ISAS/JAXA、青は NASA/GSFC、紫は SRON と Geneva 大学により開発されている機器を表す。

機がある。それぞれについて以下に述べる。

2.3.1 検出器

X 線マイクロカロリメータ

SXS の X 線マイクロカロリメータ検出器は NASA/GSFC によって開発されている。素子 1 ピクセルが $814\ \mu\text{m}$ の正方形で、 6×6 のアレイ状に配置される。36 ピクセルのうち 35 ピクセルが天体観測に使用される。また、アレイより外側に内蔵する較正線源のためのキャリブレーション用のピクセルが 4 つ用意されており、うち 1 つが実際に配線され読み出される。すなわち、観測用とキャリブレーション用の計 36 ピクセル分のデータが実際に使われることとなる。その写真を図 2.4 に示す。2.1.1 節の式 (2.8) から、吸収体の比熱と温度が小さいほどエネルギー分解能が良くなる。これを踏まえ、SXS の X 線マイクロカロリメータは、「すざく」搭載の X 線マイクロカロリメータより 10 mK

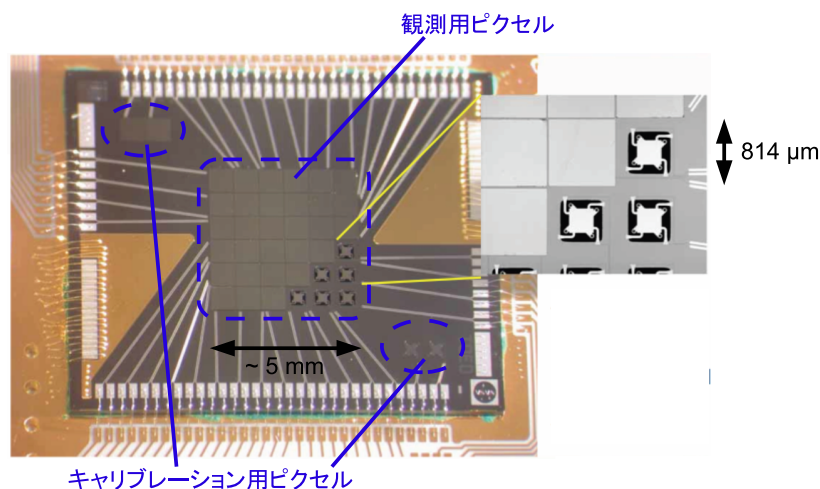


図 2.4: SXS の X 線マイクロカロリメータ検出器の性能実証機。写真では一部吸収体が外されている。写真中心の 36 ピクセルのうち 35 ピクセルが観測用である。端にある 4 ピクセルはキャリブレーション用で、このうちの 1 つが実際に読み出されることになる。

低い 50 mK に冷却される。また、吸収体は HgTe に Cd を注入したもので、「すざく」で用いていた HgTe に比べて比熱が 1/4 程度に抑えられている。データの読み出しは後で述べる X-ray box (Xbox) によって行われる。

反同時計数検出器

SXS には宇宙線などの高エネルギー荷電粒子が入射しバックグラウンド源となる。このようなバックグラウンド事象を反同時計数によって除去するために 反同時計数検出器が搭載されている。反同時計数検出器は NASA/GSFC によって開発されている。反同時計数検出器は図 2.5 のように X 線マイクロカロリメータの下に設置される。1 cm × 1cm × 0.5 mm の大きさで、Si 半導体の片面に Br を、

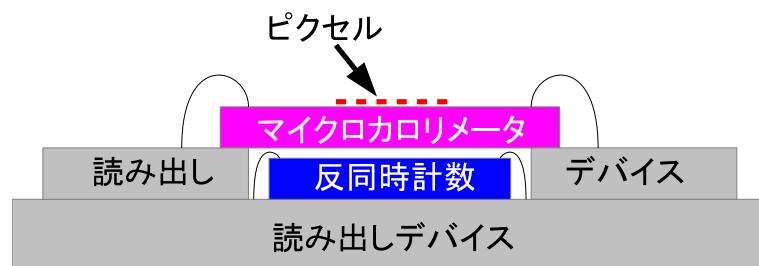


図 2.5: 検出器の構成。

もう片面に P をドーピングしている。読み出しは X 線マイクロカロリメータ部と同様に Xbox によって行われる。

2.3.2 信号処理系

X-ray Box (Xbox)

Xbox は SXS のアナログ信号処理部であり、NASA/GSFC によって開発が進められている。Xbox は カロリメータと 反同時計数検出器からの信号を読み出し、信号のフィルタリング、増幅と A/D 変換を行う。A 系と B 系の 2 系統が存在し、それぞれがカロリメータアレイ 18 ch + 反同時計数検出器 1 ch の信号を扱う。反同時計数検出器は一つしか無いが、その信号は分岐され A/B 両系で読み出される。増幅・デジタル変換されたデータは Low Voltage Differential Signaling (LVDS) により差動信号としてデジタル波形処理部の対応する系に送られる。Xbox はデータ処理のほかに、カロリメータや反同時計数検出器への電圧供給や増幅器の温度制御、さらにその電圧と温度のモニタリングも行う。

Pulse Shape Processor (PSP)

SXS のデジタル波形処理部は Pulse Shape Processor (PSP) と呼ばれ、ISAS/JAXA と共同で埼玉大学と首都大学東京が開発している。PSP にも A 系と B 系の 2 系統が存在し、それぞれ対応する系の Xbox でデジタル変換されたデータを受け取り、X 線イベントの検出や検出イベントのエネルギー計算などを行う。PSP の性能実証が本論文のテーマであるため、PSP については次章で詳しく述べる。

2.3.3 電源系

電源系である Distributor (DIST) は衛星のバス電源を XCS の各機器へ分配する装置である。バス電源は各機器に用意されている Power Supply Unit (PSU) と呼ばれる電源供給用の基板へ送られる。これは DIST から供給された 32.5 - 52.0 V の非安定化電源を変圧し供給する。また、電流値を監視しており、異常があった場合には電源供給を自動的に止める。

2.3.4 衛星ネットワークルーター

衛星内のデータ通信は SpaceWire (SpW) という規格を用いて行われており、SXS の各デジタル機器と衛星内 SpW ネットワークを接続するために SpaceWire Router (SWR) が用意されている。冗長のために電氣的に同等な SXS-SWR A/B の 2 系統が存在し、両系はそれぞれ並列に各機器と接続されている。

2.3.5 Dewar & 冷凍機

Dewar は X 線マイクロカロリメータ検出器を低温に保つための容器である。衛星内温度約 290 K に対し検出器搭載部を 50 mK に保つため、真空中で断熱された多層構造をとっている。Dewar の構造を図 2.6 に示す。図 2.6 の左の図に示されるように、Dewar 内部には 140 K、100 K、30 K、4.5 K、1.2 K の 5 層と、検出器のいる最奥部の 6 領域が存在する。その構造の模式図は図 2.6 右の図に示さ

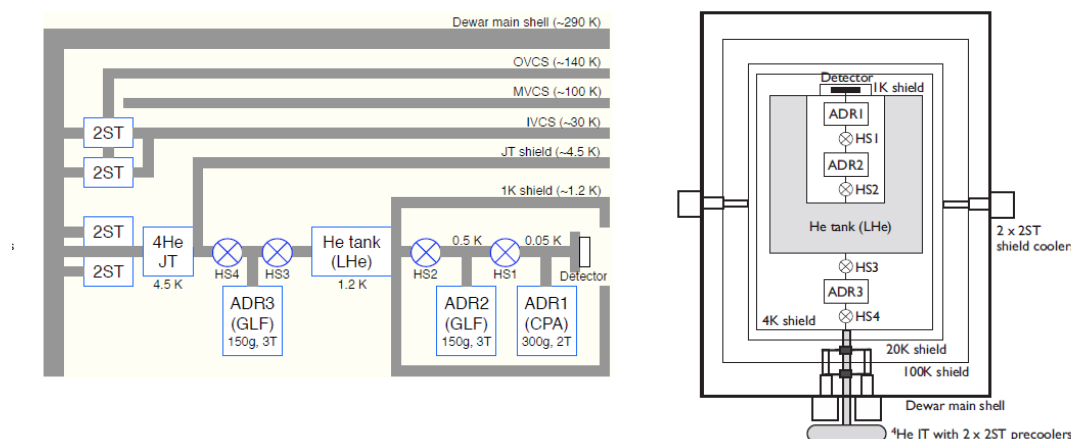


図 2.6: 左：熱的ダイアグラム。右：Dewar の構造の模式図。Fujimoto et al. (2010) [19] より転載。超流動液体 ^4He を LHe、Joule-Thomson 冷凍機を JT、2 段 Stirling 冷凍機を 2ST と表記している。

れる。最奥部の冷凍機として 2 つの断熱消磁冷凍機 (adiabatic demagnetization refrigerator : ADR) が採用されている。この ADR の熱浴として液体 He 30 リットルが使われている。その外側の 4 K 層は、He タンクへの負荷を減らすために、4 He Joule-Thomson (JT) 冷凍機で冷却される。また、液体 He がなくなったあとのために、He タンクと JT 冷凍機の間で 3 番目の ADR がヒートスイッチと共に使われる。He がなくなったときにはこの ADR が 1 K 層を冷やすことになる。また、1 K シールドの温度ゆらぎを抑えるために 2 番目の ADR も 1 K 層の温度調整を行う。

20 K と 100 K の放射層の冷却と JT の冷却のため、2 対の 2 段 Stirling (2ST) 冷凍機が使われる。1 対のそれぞれの 2ST は通常時は 50 % の能力で運転している。もし片方が動作しなくなった場合は、残った方が 100 % で運転される。

「すざく」では、気体となった He を排気する弁を衛星内部に設けていたため、逃げた He の一部が真空容器排気弁から真空断熱部に入り込み、断熱が悪くなっただけでなく、凝結熱を発生させた。その温度上昇のために He が蒸発し、という正のフィードバックがかかり、1 か月で He がすべて消失してしまった。その経験から ASTRO-H では He 排気弁は衛星外部に備えられているが、万一 He の流出が起きたとしても観測が続けられるように、上で述べたような厳重な冗長系が組まれている。

第3章 デジタル波形処理システム PSP

PSP は SXS のデジタル波形処理部であり、ISAS/JAXA、埼玉大学、首都大学東京、三菱重工業によって開発されている。2 章で述べたように、X 線マイクロカロリメータは原理的には優れたエネルギー分解能を発揮できるが、その信号を精度よく処理しなければエネルギー分解能は劣化してしまう。そのため、SXS の性能要求を満たす上で、信号処理系をどう設計するかは非常に重要なポイントとなる。

3.1 PSP の構造と設計

PSP は PSP-A と PSP-B という機能的に同等な互いに独立な 2 つのユニットによって構成される。それぞれのユニットは $250 \times 350 \times 91.3 \text{ mm}^3$ 、質量 4.011 kg の直方体形状を持つ。材質はアルミであるが、表面は酸化防止と放射による熱結合をよくするためエアロジンで塗装される。PSP の動作温度範囲は -20°C から 55°C で、保管温度範囲は -30°C から 70°C である。

PSP は MIO ボード 1 枚、SpaceCard ボード 2 枚、PSU ボード 1 枚の 3 種類の機能をもつ 4 枚の基板からなる。それぞれの基板の構造については、3.1.2 節以降に述べる。接続図を図 3.1 に示す。箱

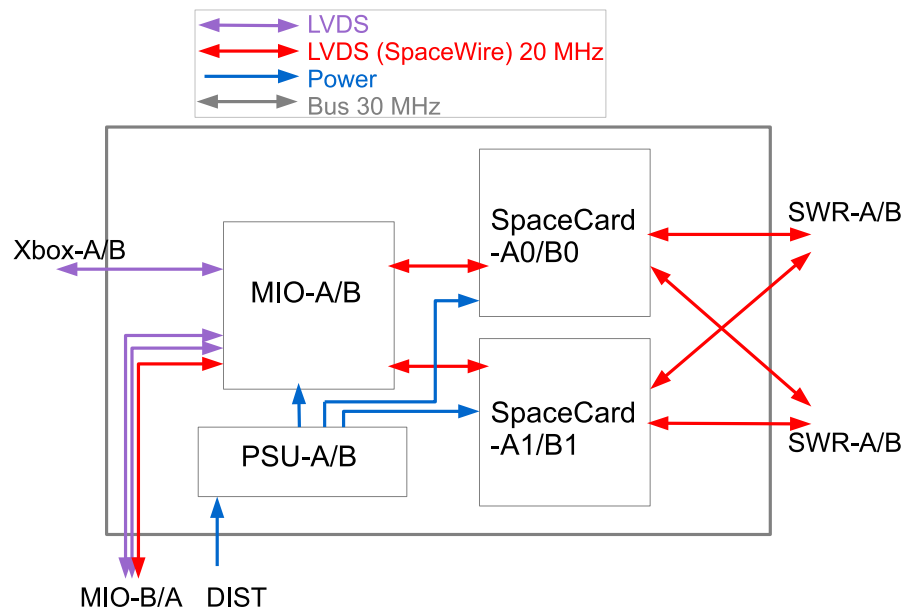


図 3.1: PSP のブロックダイアグラム。

は 4 層構造で、上から順に SpaceCard-A0/B0、MIO-A/B、SpaceCard-A1/B1、PSU-A/B が収めら

れている。これらの基板は ASTRO-H の全ての検出器のデジタル波形処理系の機器に共通のもので、他の検出器では違う組み合わせで使用されている。

3.1.1 通信手段

図 3.1 に示したように、PSP は周辺機器との通信に LVDS を利用している。LVDS は、ツイストペアケーブルを用いた差動信号システムであり、2 本の信号配線を使って逆位相の信号を同時に送っている。受信側は受け取った 2 つの信号を合成して元の信号を復元する。LVDS には 3 つの特長がある。1 つ目は、0.3 V という低電圧であるため High - Low の電圧遷移が短時間で済み、結果として高速なデータ転送が可能となることである。2 つ目は、絶対電位でデジタル情報を伝送する場合に比べ、ケーブル全体の絶対電位がゆらぐようなコモンモードノイズに強いことである。外来ノイズの影響を 2 本の信号配線が同じように受けるため、受信側で排他的論理和をとり信号を復元する際にノイズを打ち消すことができる。3 つ目は、逆位相の信号配線をクロスさせるため、放射雑音 (電磁波として放射されるノイズ) を減らせることである。

PSP 周辺を含む衛星内の機器間では SpaceWire という衛星内通信ネットワークの標準規格を採用した LVDS 通信が行われている。SpaceWire は、機器ごとにデータ収集システムを構築するための膨大なコストと手間を省き、1 度作ったシステムを将来の衛星に生かすための統一規格として制定された。SpaceWire は網目状のネットワークの構成が可能であり冗長系が組みやすく、回線の途絶や混雑などがあっても迂回ルートの確保が容易で、信頼性の高いシステムを構築できる。

SpaceWire でのデータ転送はすべてパケット単位で行われる。パケットには 2 種類あり、アドレスを指定して任意のデータを送るパケットと、内容が決まっている最優先コードに分けられる。前者は Destination Address、Cargo、End of packet marker の 3 部分でできている。Destination Address はパケットの宛先アドレス部、Cargo は実際に送りたいデータ部分である。End of packet marker は 1 パケットの終わりを示す印である。SpaceWire ではパケットの始まりを示す印は定義されていないため、End of packet marker の後ろに来るデータが次のパケットの先頭と解釈される。後者の最優先コードの 1 つとして、Time-Code がある。ASTRO-H では、GPS 衛星から取得した絶対時刻のタイミングから Time-Code が生成され、衛星機器全体へと配信される。PSP を含む各衛星機器は Time-Code を元に時刻の同期を行う。

SpaceWire では、Remote Memory Access Protocol (RMAP) プロトコルでデータやパラメータの転送を行う。RMAP は SpaceWire ネットワーク上でデータ通信を行うためのプロトコルで、CPU が自分のメモリ空間の一部であるかのようにネットワーク末端機器の搭載メモリにアクセスできる機能を提供している。RMAP は command パケットと reply パケットの組をひとつの単位として動作している。送り手が command パケットを送信し、受け手がその返事として reply パケットを送り返すことでデータの通信をする。主要な RMAP コマンドは RMAP read (メモリ読み出し) と RMAP write (メモリ書き込み) がある。RMAP read が送り手から送られると、受け手は要求されたアドレスに対応するデータが含まれる reply パケットを送り手に返す。RMAP write が送り手から送られると、受け手は要求されたアドレスのメモリを送られてきたデータで書き換えて、書き換えたことを示す reply パケットを送り手に返す。パケットの宛先の指定の方法は 2 通りあり、Pass Addressing と Logical

Addressing と呼ばれている。Pass Addressing は受け手までのルータでの分岐の進み方を 1 つずつ指示する方法である。Logical Addressing は受け手のアドレスを直接指示する方法である。ASTRO-H では Pass Addressing を採用し、冗長系を組みやすくしてある。

SpaceWire 通信では 2 機器間のリンクレートは任意に設定できる。PSP のリンクレートの初期値は 10 MHz で、コマンドで 20 MHz に変更できる。また、SpaceWire 通信では 8 bit 長のデータを符号化して 10 bit 分が使われる。それゆえ、データ転送速度のハードウェア的な上限はリンクレートの 0.8 倍で、PSP では最大レートは 16 Mbps である。

3.1.2 MIO ボード

MIO ボードのブロックダイアグラムを図 3.2 に示す。MIO ボード 1 枚には Field Programmable

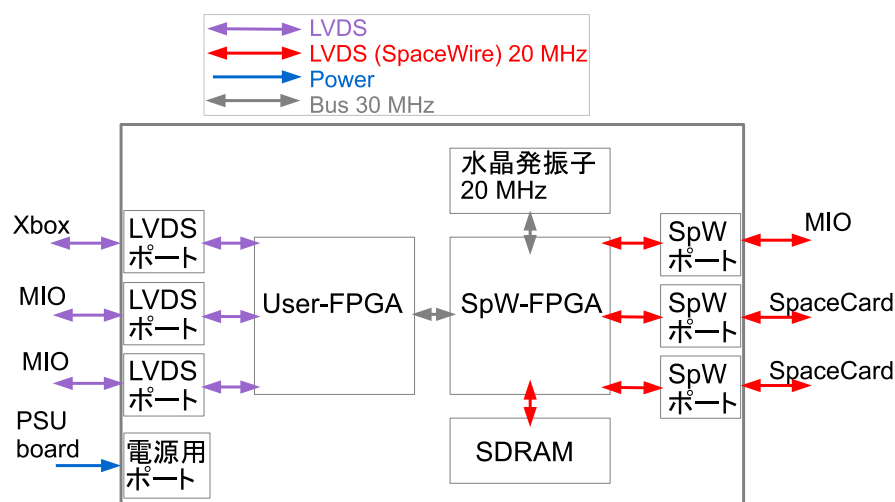


図 3.2: MIO ボードのブロックダイアグラム。

Gate Array (FPGA) という集積回路が 2 つ載っており、1 枚は SpaceWire(SpW)-FPGA、もう 1 枚は User-FPGA と呼ばれる。SpW-FPGA は SpaceWire 通信と SDRAM へのアクセスを担当しており、このロジックは全機器で同じものを使っている。一方、User-FPGA のロジックは PSP 用にカスタマイズされている。このロジックは 3.2.1 節で述べる。

ボードには SDRAM が 1 個載せられている。バスのアクセス長は 32 bit である。ボード上の水晶発信子は 20 MHz のクロックを生成している。インターフェースは、Xbox との通信用の LVDS ポートが 1 つと、MIO 間の通信用の LVDS ポート 2 つと SpW ポート 1 つ、SpaceCard との通信用の SpW ポートが 2 つ、PSU からの電源用ポートが 1 つである。

3.1.3 SpaceCard ボード

SpaceCard ボードのブロックダイアグラムを図 3.3 に示す。SpaceCard ボードには CPU 1 つと、MIO ボードと同様に SpW-FPGA 1 枚が載っている。CPU の Operating System には TOPPERS

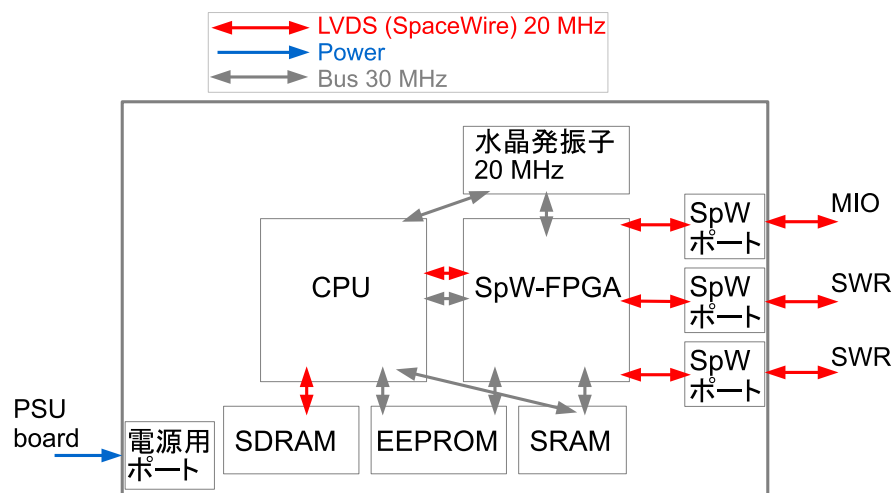


図 3.3: SpaceCard ボードのブロックダイアグラム。

が使われている。また、TOPPERS 上で動作する PSP 用のアプリケーションソフトウェアが搭載されている。

メモリは、EEPROM が 5 個、SRAM が 5 個の 2 セット、SDRAM が 3 個搭載されている。それぞれ、メインプログラムの保存用、メインプログラムの動作用、データ保存用として使われる。インターフェースは、MIO ボード との通信用の MDM ポートが 1 つと、SWR との通信用の MDM ポートが 2 つ、PSU から電源用ポートが 1 つである。

3.1.4 PSU ボード

PSU ボードのブロックダイアグラムを図 3.4 に示す。PSU ボードは DIST から供給されたバス

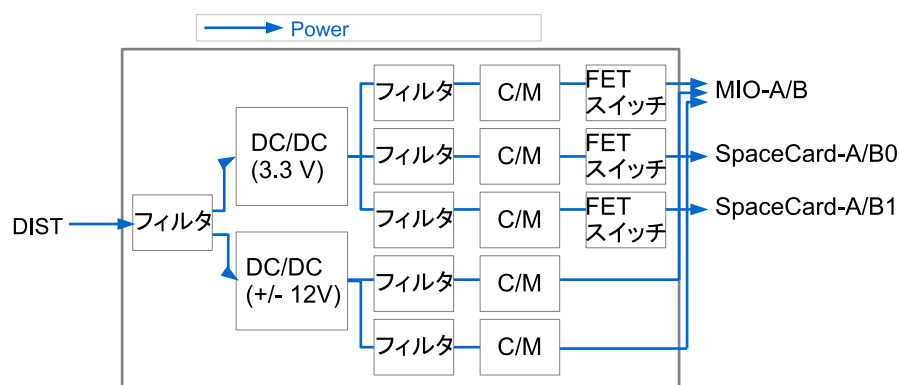


図 3.4: PSU ボードのブロックダイアグラム。

電源を変圧し、他のボードに供給する。具体的には、32.5 - 52 V のレンジの直流一次電圧を 2 つの DC/DC コンバータで +3.3V と ±12 V に変換する。3.3 V は MIO ボードと SpaceCard ボードに送

られ、各ボード内で 1.5 V に変換されて使われる。12 V は MIO ボードに送られ、3.3 V 電源のカレントリミッタに使われる。

PSU ボードは電源のノイズを削減するフィルタを持つ。FET スイッチを使う電源ラインにはカレントリミッタがつけられている。もしカレントリミッタが電源ラインの過電流を検出したら、FET スイッチが自動で閉じられ、コマンドによって開かれるまで閉じたままに続ける。

3.1.5 クロック信号

PSP - Xbox 間のクロック信号を表 3.1 にまとめる。BASE_CLK は MIO と Xbox の通信のタイミン

表 3.1: PSP - Xbox 間の信号

Name	Frequency (Hz)	from	Description
BASE_CLK	5 M	PSP	MIO からの信号のタイミングの基準クロック
SMP_CLK	12.5 / 15.625 k	PSP	データのサンプリングレートを定める
CMD_ENA	–	PSP	コマンドデータの有効範囲を決める
CMD_DAT	–	PSP	コマンドデータ
TLM_CLK	5 M	Xbox	Xbox からの信号のタイミングの基準クロック
SCI_ENA	12.5 / 15.625 k	Xbox	サイエンスデータの有効範囲を決める
SCI_DAT	–	Xbox	サイエンスデータ
HK_ENA	–	Xbox	HK データの有効範囲を決める
HK_DAT	–	Xbox	HK データ

グを決める基準クロックとして使われる。SMP_CLK、CMD_ENA、CMD_DAT は BASE_CLK の立ち上がりのタイミングで電圧レベルが変更され、立ち下がりタイミングで電圧レベルが記録される。BASE_CLK は TLM_CLK として Xbox から返される。SCI_ENA、SCI_DAT、HK_ENA、HK_DAT は TLM_CLK の立ち上りエッジのタイミングで電圧レベルが変更され、立ち下がりタイミングで電圧レベルが記録される。

3.2 データ処理アルゴリズム

Xbox からデジタル化されたデータを受け取ったあと、PSP はデータの中から X 線イベントを探し波高値解析をする。通常、検出器から取得できる X 線イベント波形はエネルギーに依存した波高値を持つため、波高値から入射 X 線光子のエネルギーを計算できる。しかし、X 線マイクロカロリメータで要求されたエネルギー分解能を達成するためには、数 μK 精度の読み出しが必要になり、波高を直接測るだけでは、精度よくエネルギーを求めることはできない。そこで、2 章でも述べた、X 線マイクロカロリメータのイベント波形の時定数はエネルギーに依存せず検出器によって完全に決定されるという特徴を生かし、波高値はテンプレートとなる波形を用いた最適フィルタ処理により入射したエネルギーの値を測定する。ただし、波形が減衰し定常状態に戻るだけの時間を置かずに次の X 線イベントが入射した（このイベントはセカンドパルスと呼ばれる）場合は、単発 X 線イベントと同様なテ

ンプレートを用いることができない。そのため、前後の X 線イベントとの入射間隔によってイベントをグレードに分け、グレード毎に使用するテンプレートの長さを変更する必要がある。このようなカロリメータ特有の波形処理の流れを、図 3.5 に従って述べる。

PSP では波形処理を MIO の User-FPGA と SpaceCard の CPU で分担して行っている。FPGA と CPU の特性上、MIO は単純な仕事を高速で行い、SpaceCard は複雑な計算を担当する。3.2.1 節では MIO の仕事を述べる。a) では Xbox からデータ受信について、b) では受信したデータのエラーチェックやデータ分割について述べる。c) では、イベント検出の準備として行われる、カロリメータ波形の微分計算について述べる。微分されたことでイベント波形の時定数が短くなり、イベント検出がしやすくなる。d) で、計算された微分値にしきい値を設けることで行われるイベント検出について述べる。3.2.2 節で SpaceCard の仕事を述べる。e) ではまず MIO からイベント検出情報を読み出すことに触れる。f) では微分波形を用いたセカンドパルスの検出について、g) ではイベント同士の前後の時間間隔によるイベントのグレード付けについて述べる。f) でテンプレートフィッティングによるイベントの波高値計算について述べる。i) では、h) で用いるテンプレートの作成について述べる。

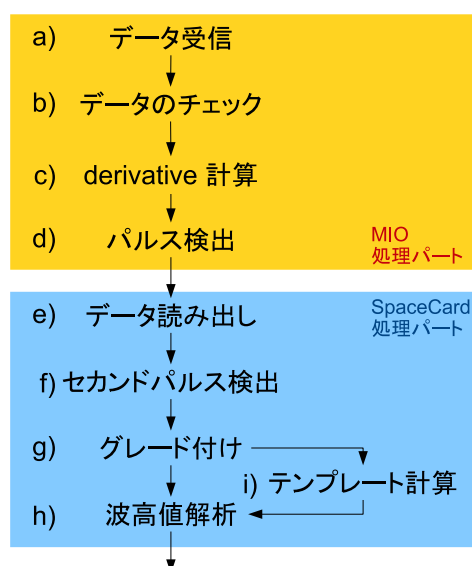


図 3.5: PSP で行われる波形処理の流れ。

3.2.1 MIO 処理パート

a) データ受信

以降では、ある時刻の全ピクセル分の波高値データの集合を sample、そこに含まれる個々のピクセルの波高値データを ADC sample と表記する。

Xbox は対応する系の MIO に 3.1.5 節で述べた TLM.CLK、SCIENA、SCLDAT を送信し続ける。sample は TLM.CLK のタイミングに合わせて 12.5 / 15.625 kHz で送られてくる。SCIENA は sample の長さを決めている信号で、その立ち下がりが sample の始まり、立ち上がりが sample の終わりを表す。

b) データのチェック

demultiplex 1 sample の長さは 312 bit 固定であり、その中にカロリメータ 18 ピクセル (16 bit × 18) + anti-coincidence 1 ch (16 bit) 分のデータと、sciRecvCnt (8 bit) と呼ばれる sample 番号が時分割されて一緒に入っている。PSP はピクセルごとに別々に処理を行うために、これらをピクセル毎の情報に分解 (demultiplex) する。1 sample 312 bit の内訳を図 3.6 に示す。各チャンネルのフォーマットは同じであり、MSB から ADC sample 14 bit、値 0 の spare bit が 1 bit、odd parity 1 bit から成る。odd parity はビット化けエラー検出のための bit で、1 ch 分の 16 bit の中に 1 が奇数個含まれるように 0 か 1 かが決められる。

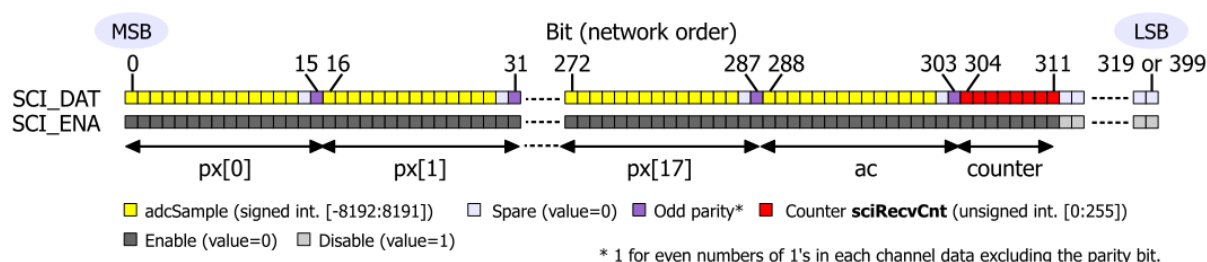


図 3.6: sample の bit stream。PSP Description Document [25] より転載。

エラーチェック demultiplex の前後に、送られてきたデータのエラーチェックが行われる。チェック項目は以下のとおり。下記のどれかを満たさない sample はエラーと判定される。

- sample 長が 312 bit であること。
- 直前の sample との sciRecvCnt の差が +1 であること。
- ADC sample 16 bit の中で '1' をとる bit が奇数個であること。
- ADC sample が上限値 (8192) か下限値 (-8191) を取っていないこと。これに限り、満たされていなくてもエラーとはならない。

ここで、データやエラーはバッファに格納される。ADC sample は、ピクセルに対応した番号の pxDelayBuf に格納される。pxDelayBuf は 1536 bits (= 96 samples × 16 bit) のサイズをもつ。上記のチェックのに引っかかった sample は捨てられて、1 つ前の sample に置き換えられる。最初の sample にエラーがあれば、代わりに 0 が格納される。一方、sciRecvCnt は、sciRecvCntDelayBuf に入れられる。こちらは、エラーのあった sample のものでもそのままの値で格納される。

c) derivative 計算

次に ADC sample の時間微分 (derivative) を計算する。この微分は、計算したい ADC sample より過去の 32 ADC sample を負、未来の 31 ADC sample と現在の 1 ADC sample を正として足し合わせることで計算できる。i 番目の ADC sample を AdcSample(i)、時間微分を derivative(i) とすると、

具体的な計算式は以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 L(i) &= \left(\sum_{i'=0}^{H-1} \text{pxAdcSample}(i+i') \right) - \left(\sum_{i'=-H}^{-1} \text{pxAdcSample}(i+i') \right) \\
 &= L(i-1) + \text{pxAdcSample}(i+H-1) - 2\text{pxAdcSample}(i-1) + \text{pxAdcSample}(i-H-1)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\text{derivative}(i) = (L(i) + 2^{S-1}) / 2^S \tag{3.2}$$

H は微分計算に使う ADC sample 数 (先ほどの説明では 32) である。また、derivative は計算中は最大 20 bit 長まで許されるが、保存するときは容量の削減のため 16 bit になるようにビットシフトされる。 S はこのとき何ビット分シフトするかを決めるパラメータである。微分計算の結果の値が 1 桁増えればその分 1 bit 多くシフトしなければならなくなる。 H が大きいほど計算結果が大きくなるので、 S は H に依存し、今回説明したような $H = 32$ の場合であれば $S = 4$ となる。

ここまで使ってきた ADC sample と、今述べた derivative はこの時点でピクセル毎に SDRAM 上の Wave Form Ring Buffer (WFRB) に格納される。WFRB は 1 MByte (= 262144 samples $\times$ (ADC sample 16 bit + derivative 16 bit)) のサイズをもつ。WFRB には連続的にデータが記録されつづけ、一杯になったときは書き込みポイントがバッファの先頭に戻り古いデータから上書きされる。12.5 (15.625) kHz で書き込みが続けられるので、約 21 (17) 秒で一杯になる。

d) パルス検出

パルス検出は MIO の User-FPGA のステートマシンを利用して行われる。ステートマシンは状態が入力信号の変化によって刻々と変化するような動作を FPGA で実装する際に有効な方法で、入力によってステート (状態) を遷移させることで出力を変化させる手法である。このステートマシンの入力信号は WFRB に保存された ADC sample と derivative、出力は DERIV_MAX (derivative の最大値)、QUICK_DOUBLE (derivative 減衰中に再び増加し始めたときのフラグ)、LO_RES_PH (ADC sample の最大値からベースラインを引いた値)、TRIG_LP (イベントがトリガされた sample の WFRB での場所) である。ステートは 6 種類用意されている。ステートと波形との関係を図 3.7 に示す。各ステートで行われている動作を以下にまとめる。

ステート 0, 1 モジュールの初期化を行う。

ステート 2 パルスのトリガをするステートである。ここでは、derivative を監視し、その値がイベントトリガ用のしきい値以上になったとき、ステート 2 へと遷移する。また、後で LO_RES_PH を決めるためのベースラインの計算を行う。計算式を以下に示す。

$$\text{Baseline}(i) = \frac{1}{2^P} \times \left(\sum_{i'=G+1}^{2^P+G} \text{pxAdcSample}(i-i') + 2^{P-1} \right) \tag{3.3}$$

さらに、TRIG_LP が記録される。

ステート 3 derivative が減少に転じるまで続くステートである。ここでは ADC sample と derivative の最大値が探される。後者は DERIV_MAX と呼ばれる。

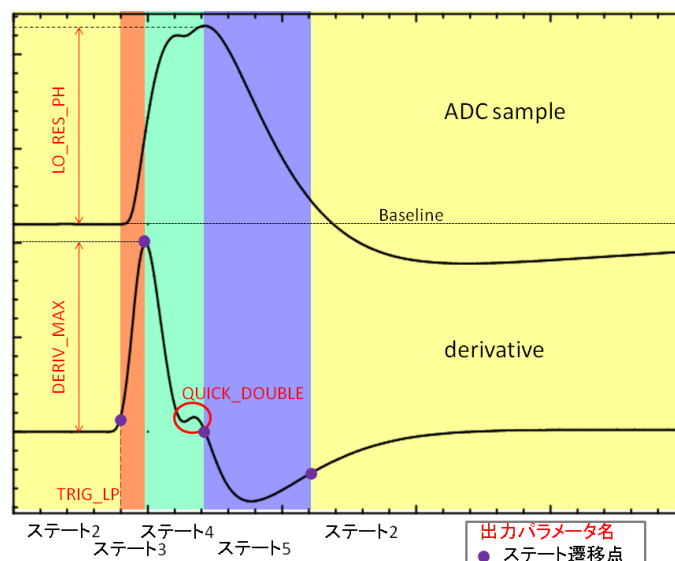


図 3.7: ステートと波形との関係。横軸は ADC sample。赤文字が出力パラメータ、紫の丸がステートが遷移するタイミング。ここでは QUICK_DOUBLE イベントがある場合をしめしている。

ステート 4 derivative がステート 4 終了用のしきい値以下になるまで続くステートである。ステート 3 と同様に、ADC sample と derivative の最大値が探される。このステートにいる間は derivative は減少を続けるはずであるが、まれに別のイベント (quick double イベントと呼ばれる) の入射によって derivative 値が増加することがある。直前の derivative との差分が quick double イベント用のしきい値以上になった場合は、QUICK_DOUBLE の値が 1 に設定される。

ステート 5 このステートは、遷移してから、もしくは ADC sample の最大値が最後に更新されてから一定時間が経つまで続く。ここでは ADC sample の最大値が探されるが、ステート 3 や 4 と異なり derivative の最大値は探されない。このステートの最後で LO_RES_PH の計算が行われる。ADC sample の最大値を AdcSampleMax とし、以下に LO_RES_PH の計算式を示す。

$$\text{LO_RES_PH} = \text{AdcSampleMax} - \text{Baseline} \quad (3.4)$$

もし上記の計算結果が負になった場合は、0 に置き換えられる。このステートの後は、再びステート 0 へと遷移する。

ここで出力された DERIV_MAX 16 bit、QUICK_DOUBLE 1 bit、LO_RES_PH 14 bit、TRIG_LP 24 bit は、トリガ情報として SDRAM 上の Event Dual Buffer (EDB) に保存される。

3.2.2 SpaceCard 処理パート

e) データ読み出し

ここから先の処理は全て SpaceCard の CPU のユーザアプリケーションソフトウェアによって行われる。CPU が最初に行う仕事は、MIO の WFRB、EDB からデータを読み出すことである。はじ

めに EDB のトリガ情報を読み込む。EDB の保存領域は 2 面あり、片方に MIO の User-FPGA がデータを書き込んでいる間、CPU はもう片方からデータを読み出す。読み出したトリガ情報を元に、WFRB から波形データを転送し SRAM の pxEvent1stFIFO に詰める。1 つのイベント波形データは、トリガされた ADC sample と、そこから過去の 219 ADC sample と未来の 874 ADC sample の全 1024 ADC sample と定義されている。

f) セカンドパルス検出

pxEvent1stFIFO に詰められたイベントデータ全てで、MIO の User-FPGA ではトリガできなかったような小さな波高値を持つセカンドパルスが探される。WFRB から読み出した対象とする微分波形から、SpaceCard の CPU が保持している平均微分波形を引き、その差分がセカンドパルス用のしきい値以上になったときにセカンドパルスがトリガされる。セカンドパルス検出の概要を図 3.8 に示す。

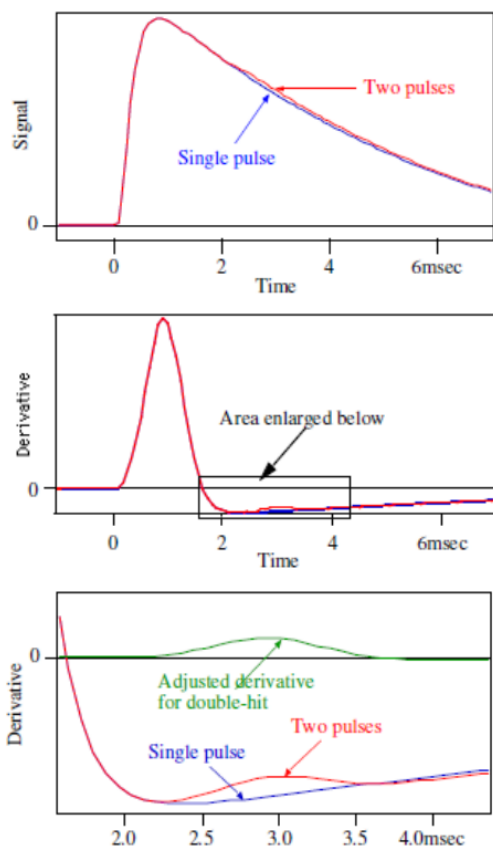


図 3.8: セカンドパルス検出の概要。一番上の図は微分前の波形で、赤はセカンドパルスを含み、青は含まない。真ん中の図は一番上の図の波形の微分後。一番下の図は真ん中の図のセカンドパルス部分を拡大したもの。赤 - 青 が緑色の波形。PSP Description Document [25] より転載。

g) グレード付け

セカンドパルス検出後、イベントのトリガタイミングの時間間隔によってグレード付けが行われる。グレード付けの定義を図 3.9 に示す。グレードは High、Medium、Low と primary、secondary の組

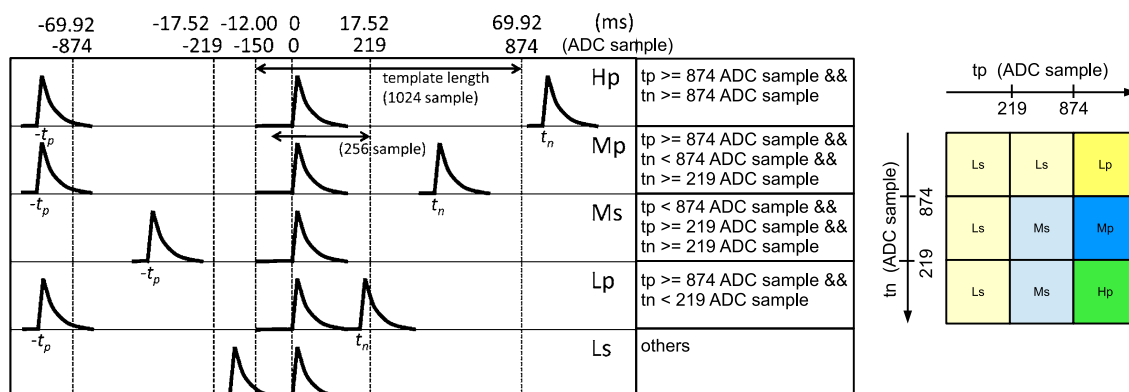


図 3.9: グレード付けの定義。

み合わせでつけられる。High Resolution (HR) イベントは、トリガされた時刻から 874 ADC sample の間に他のイベントが入射していないイベントを指す。Medium Resolution (MR) イベントは、トリガされた時刻から 256 ADC sample の間に他のイベントが入射していないイベントを指す。それ以外のイベントは Low Resolution (LR) イベントとしてグレード付けされる。primary、secondary はイベントどうしの前後関係によって決まる。L より M、M より H の方が、また secondary より primary の方が隣のパルスによる波形のゆがみが少ないので、よりよいエネルギー分解能が得られる。Hp、Mp、Ms イベントはこの次にそれぞれのテンプレートで最適フィルタ処理による波高値解析が行われる。L イベントは FPGA で計算された LO_RES_PH がそのまま波高値として用いられる。ここでつけられたグレードは TYPE という 3 bit のパラメータとなり保存される。

h) 波高値解析

PSP での波高値解析は、テンプレート波形を用いた最適フィルタ処理によって行われる。まずその数学的背景を述べる。ノイズのない信号とノイズのパワースペクトルをそれぞれ $S(\omega)$ と $N(\omega)$ と表す。処理されるデータ $D(\omega)$ は

$$D(\omega) = HS(\omega) + N(\omega) \quad (3.5)$$

と分解できる。ここで H は信号の波高値である。 H のベストフィットの値は、以下の χ^2 値が最小になるように決定される。

$$\chi^2 \equiv \sum_{\omega} \frac{|D(\omega) - HS(\omega)|^2}{|N(\omega)|^2} \quad (3.6)$$

H は $\frac{\partial}{\partial H}\chi^2 = 0$ から、以下のように求めることができる。

$$H = \frac{\sum_{\omega} \frac{D(\omega)S^*(\omega) + D^*(\omega)S(\omega)}{2|N(\omega)|^2}}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2} \quad (3.7)$$

アスタリスクは複素共役を表す。 $D(\omega)$ と $S(\omega)$ は実関数なので、 $D^*(\omega) = D(-\omega)$ 、 $S^*(\omega) = S(-\omega)$ と書ける。つまり

$$D(\omega)S^*(\omega) = D(-\omega)S^*(-\omega) = D^*(\omega)S(\omega) \quad (3.8)$$

が分かる。ここから、 H は

$$H = \frac{\sum_{\omega} \frac{D(\omega)S^*(\omega)}{|N(\omega)|^2}}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2} \quad (3.9)$$

または

$$H = \frac{\sum_{\omega} \frac{D(\omega)}{S(\omega)} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2} \quad (3.10)$$

と書き直すことができる。式 3.10 は、 H が $\left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2$ を重みとしたときの $\frac{D(\omega)}{S(\omega)}$ の平均値であることを表す。ここで、周波数空間でのテンプレート

$$F(\omega) \equiv \frac{S(\omega)}{|N(\omega)|^2} \frac{1}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2} \quad (3.11)$$

のように定義する。これを時間空間に戻すことによって、 H が次のように求まる。

$$H = \sum_t D(t)F(t) \quad (3.12)$$

これが最適フィルタ処理と呼ばれる。この本質は観測された波形 D が $\frac{1}{|N(\omega)|^2}$ の重みをもった $2 \sum_{\omega} DS$ の積の和によってノイズなし波形 S とクロスコレーションされることである。そのため、ノイズ成分が卓越する周波数帯域 ($|N(\omega)|$ が大きいところ) の寄与が抑えられる。

実際のソフトウェア上でのクロスコレーションは、テンプレートに対して生データを時間軸方向の前後に i ADC sample シフトさせることで計算される。 i は $-8 \leq i \leq 7$ の範囲をとる。 i 番目のシフトでは波高値 $PHA(i)$ が計算され、その最大値を探される。 i_{max} 番目のシフトで $PHA(i_{max})$ が最大になると仮定する。この i_{max} は TICK_SHIFT という 4 bit のパラメータに保存される。ここから、本当のピークである PHA_{peak} が二次関数で補間して求められる。 PHA_{peak} は PHA (16 bit)、波高値が PHA となるときの時刻は TIME_VERNIER (4 bit) として保存される。

i) テンプレート計算

他の仕事と並行して、SpaceCard は最適フィルタ処理で用いられるテンプレート波形の計算を行っている。テンプレートは h) で述べたように、ノイズのない波形とノイズ波形から作成される。ノイズのない波形は、数百の波形 (ノイズ入り) の平均をとることで作成される。この波形は平均波形と呼ば

れる。ノイズの波形は、パルスの無い時のノイズの波形を数百個平均して作成される。ノイズの主要な成分は Johnson ノイズ、phonon ノイズ、読み出しノイズである。実際の平均波形、ノイズ波形、テンプレート波形を図 3.10 に示す。周波数空間の波形を見ると、h) で述べたように、確かにテンプレート波形ではノイズが卓越する周波数帯域の寄与が抑えられていることが分かる。

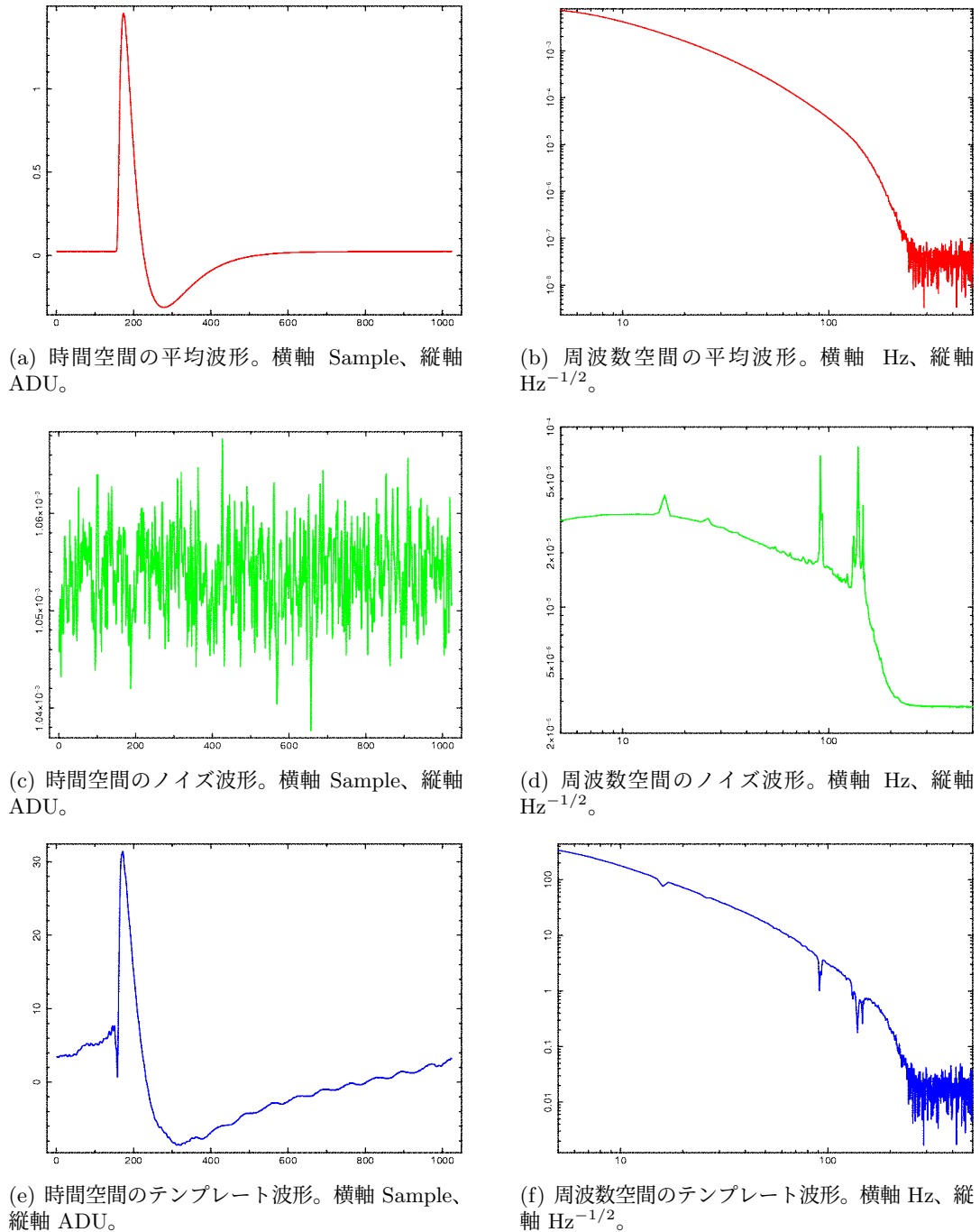


図 3.10: 上の段から平均波形、ノイズ波形、テンプレート波形。左が時間空間、右が周波数空間。

3.3 性能要求

SXS の科学要求を達成するために、SXS の構成要素である PSP にも個別の要求が課せられている。性能要求のうち、本論文で扱うカロリメータパルス処理についてを以下に記す。また、2.2.1 節で述べた SXS への性能要求のどの項目と対応しているのかを、項目名の横の () 内に記す。

ここまで述べてきた設計やアルゴリズムは、すべてこれらの要求を満たすために考えられたものである。この設計で製作された PSP がこれらの要求のうち CR-P10 と、CR-P07 の上位の要求である SSR-01 を満たすことを確認したデータ処理試験についてを 5 章で述べる。

エネルギーレンジ

CR-P01 (SSR-02) PSP は 0.3 - 12.0 keV のエネルギーレンジでイベントを検出する。ここでいうエネルギーとは、打上げ前のキャリブレーションでの波高値とエネルギーの線形関係のベストフィットで定義されたものを指す。

CR-P02 (SSR-02, 09) PSP は 12.0 keV をカバーするダイナミックレンジを持つ。

パルス検出とグレード付け

CR-P03 (SSR-01, 02, 03, 09) PSP はピークの波高値が $> 5 \times (\text{rms noise})$ のパルスを検出する。ここでいう rms noise とは、パルスのない状態での ADC sample の二乗平均平方根として定義されたものを指す。

CR-P04 (SSR-01, 07, 09) PSP は > 5 ms の間隔を空けて到来したすべてのパルスを検出する。

CR-P05 (SSR-01, 07, 09) PSP は > 2 ms の間隔を空けて到来したすべてのパルスを検出する。2 つの連続したパルスは、コントラストが < 30 のものである。

CR-P06 (SSR-01) PSP はすべてのパルスにグレードをつける：それは high-resolution (HR)、medium-resolution (MR)、low-resolution (LR) のどれかと、primary もしくは secondary のどちらかを合わせたものである。

ノイズ負荷

CR-P07 (SSR-01, 09) HR イベント処理はスペクトル分解能の劣化を 5 eV 以内に抑える。

CR-P08 (SSR-01, 09) MR イベント処理はスペクトル分解能の劣化を HR イベントの分解能から 1 eV 以内の劣化に抑える。

CR-P09 (なし) LR イベント処理はスペクトル分解能の劣化を HR イベントの分解能の 10 倍以内に抑える。

最大レート

CR-P10 (SSR-10) PSP は $150 \text{ s}^{-1} \text{ array}^{-1}$ のイベントレートを処理する。

CR-P11 (SSR-10) PSP は最も明るいピクセルでは $20 \text{ s}^{-1} \text{ pixel}^{-1}$ のイベントレートを処理する。

Live time

CR-P12 (SSR-01, 07) PSP は $< 2\%$ の dead time を持つパルスをすべて検出する。ここでいう PSP の dead time とは、パルスの record length の範囲内でパルスを探していないわずかな時間として定義されたものを指す。

CR-P13 (なし) PSP は 1% 未満の精度でパルスの live time (検出時間) を求める。

第4章 熱真空試験

2.2.2 節で述べた熱設計要求と耐環境設計基準を PSP が満たすことを確認するために熱真空試験を行った。本章では、本試験で測定した恒温状態における PSP の温度情報を用いて、熱数学モデルとの比較・検証を行った結果をまとめる。

4.1 目的

PSP 性能実証機の恒温環境での平衡温度測定の結果を、熱数学モデルを用いた熱解析の結果と比較し、熱数学モデルの評価を行う。この結果から、熱数学モデルの妥当性について議論する。3.1 節の最初に述べたように、ASTRO-H では全ての検出器のデジタル処理機器に共通の基板が使われる。PSP は ASTRO-H 搭載デジタル処理機器の代表として供試されることになっているため、本試験を通しての熱解析モデルの完成は他機器の設計にも関わる重要な事項である。なお、ここで用いる熱数学モデルは PSP を共同開発している三菱重工業によって作成されたものである。

4.2 熱数学モデル

まず、今回の実験結果の比較対象となる熱数学モデルについて述べる。温度分布を求めるなどの熱解析を行うには、物体を有限の要素に分割し、要素間の熱流平衡の方程式を解くという手法が用いられる。このための解析モデルを熱数学モデルと呼ぶ。これは、熱的に均一である要素を 1 つの節点で代表し、物体を n 個の節点で近似して、それぞれの節点 i に対し以下の熱流平衡方程式をたてたものである。

$$m_i c_i \frac{dT}{dt} + \sum_{j=1}^n D_{ij} (T_i - T_j) + \sum_{j=1}^n \sigma R_{ij} (T_i^4 - T_j^4) = P_i \quad (4.1)$$

ここで、 $m_i c_i$ は節点 i の熱容量 [J/K]、 T_i は節点 i の温度 [K]、 D_{ij} は節点 i 、 j 間の伝導伝熱コンダクタンス [W/K]、 R_{ij} は節点 i 、 j 間の放射伝熱コンダクタンス [m^2]、 P_i は節点 i の内部発熱 [W] を表す。式全体を見ると、第 1 項は物体の比熱による熱量の変化、第 2 項は伝導による伝熱、第 3 項は放射による伝熱を表す。衛星搭載機器は真空中で動作するため、対流による伝熱は考えなくてよい。

機器は熱設計と熱数学モデルによる熱解析を繰り返しながら、徐々に詳細な温度分布が求められていく。ふつう熱設計ではモデルで使用するパラメータの不定性をカバーするため、要求された温度範囲に上下に 10 °C のマージンを設ける。加えて設計や製造の予測不可能な不定性をカバーするため、さらに上下に 5 °C のマージンを設ける。このように、熱設計は細心の注意を払いながら進められていく。最終的に、熱数学モデルで機器が所定の温度条件に収まっていることが確認されたら、熱真空

試験が行われる。熱真空試験では、各部分の熱的性質が衛星搭載品と同じ熱試験機を作り、真空槽の中で試験を行い、各点の温度を実際に測定し、設計結果を検証する。

4.3 平衡温度の測定

4.3.1 方法

熱真空試験は、PSP が設計要求を満たすことを確認する試験である。設計要求では、供試体の保管温度、性能維持温度、機能維持温度、ターンオン温度は表 4.1 のように規定されている。供試体がこれらの温度で動作・保管できるか確認するために、PSP を温度変化させた。試験の温度プロファイルの略図を図 4.1 に示す。また、熱環境は周囲の真空度によっても変化するため、真空度は設計要求 1.33×10^{-3} Pa を下回る $1 - 4 \times 10^{-4}$ Pa に保たれるようにした。

表 4.1: 供試体の維持、機能温度。

温度 (°C)	説明
-30	保管最低温度
-20	性能維持最低温度 = 機能維持最低温度 = ターンオン最低温度
55	性能維持最高温度 = 機能維持最高温度 = ターンオン最高温度
70	保管最高温度

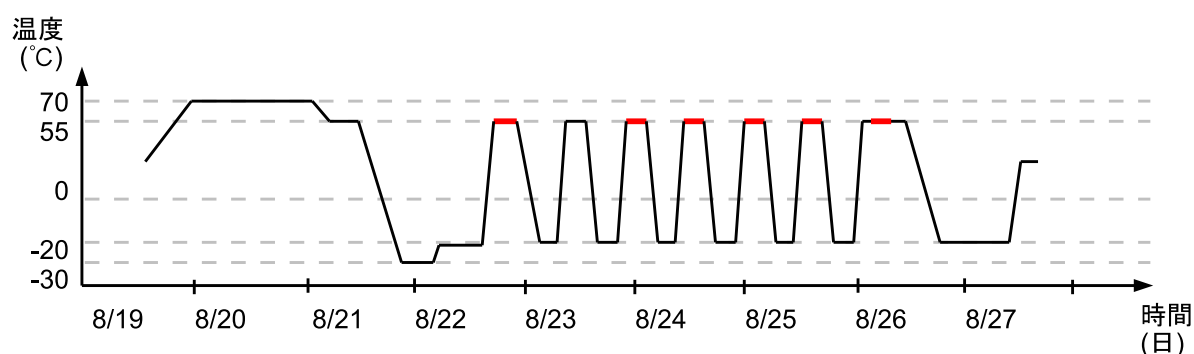


図 4.1: 温度プロファイル概略。赤い部分が本論文で扱う測定値取得部分。

今回の熱数学モデルの議論のために必要となるのは、恒温状態での平衡温度測定である。そのため、熱サイクル中に 55°C を 3 時間保つフェーズ 6 回 (図 4.1 の赤い部分) の測定温度の平均を今回測定したい恒温状態の測定値とした。今回は性能維持最高温度 = 機能維持最高温度 = ターンオン最高温度である 55°C での測定値を扱う。

4.3.2 使用機材と配置

セットアップ

まず機材の接続図を図 4.2 に示す。PSP-A (供試体) を熱真空槽の床面にネジで固定する。供試体の温度は熱電対で測定され、データロガーに記録される。記録された温度データをリアルタイムで監視するために、データロガーは温度モニタ用 PC と接続されている。温度測定点については図 4.3 にまとめた。また、衛星内通信を再現するために、Xbox シミュレータ、PSP-B 模擬用 MIO と接続される。通信状態の監視のため、通信監視用 PC にも接続される。それぞれの機材については以下に述べる。

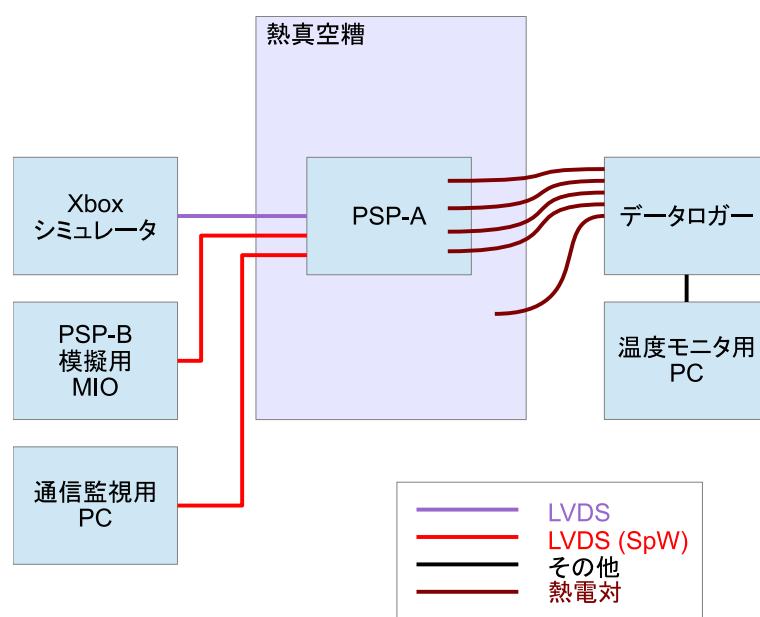


図 4.2: 熱真空試験セットアップ図。

供試体

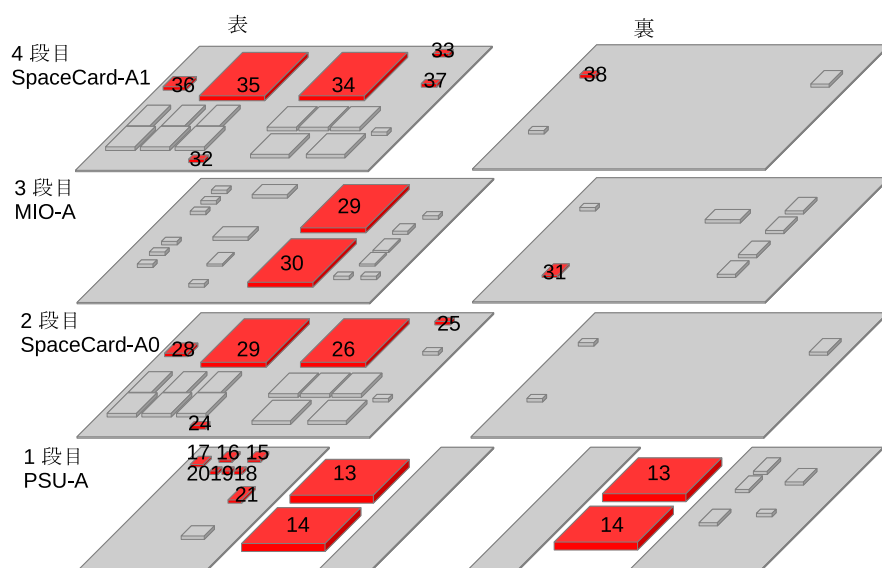
PSP の性能実証機を PSP の A 系 (PSP-A) として用いた。性能実証機は衛星搭載品と熱的にほぼ同等である。質量 4.011 kg、アルミ製の直方体で表面にエアロジンが塗布されている (3.1 節)。発熱量は、16.25 W (通常値)、19.21 W (最大値) である。下面にて衛星構体に接触しており、熱流量は 0.0439 W cm^{-2} である。本実験中は SUS304 M5 × 15 ネジによって熱真空槽内に 12 箇所を固定される。写真を図 4.4 (a) に載せる。

熱真空槽

使用した熱真空槽は宇宙科学研究所の実験室に備え付けのものである。槽内壁面はアルミ合金で、大きさは $960 \times 760 \times 800 \text{ mm}^3$ である。写真を図 4.4 (b) (c) に示す。

ch	測定点
P 13	PSUDCDC3.3V
S 14	PSUDCDCpm12V
U 15	PSUPowerMOS-FETa
	16 PSUPowerMOS-FETb
	17 PSUPowerMOS-FETc
	18 PSU過電流検出抵抗a
	19 PSU過電流検出抵抗b
	20 PSU過電流検出抵抗c
	21 PSULCフィルタ用L
S 24	SpC0レギュレータa
P 25	SpC0レギュレータb
C 26	SpC0CPU-IF-FPGA
A 27	SpC0CPU
O 28	SpC0PLL
M 29	MIOUser-FPGA
I 30	MIOレギュレータ
O 31	MIOレギュレータ
S 32	SpC1レギュレータa
P 33	SpC1レギュレータb
C 34	SpC1CPU-IF-FPGA
A 35	SpC1CPU
I 36	SpC1PLL
	37 SpC1LVDSドライバa
	38 SpC1LVDSドライバb

(a) データロガーのチャンネル番号と測定点の名前。



(b) 温度測定された部品の場所を赤色で示した。番号はデータロガーのチャンネル番号。

図 4.3: 温度測定点。

供試体はアダプタプレートというアルミ製の供試体固定用プレートを介して熱真空槽に固定される。固定に使用されるネジはステンレス (SUS304) の M5 × 15 が用いられる。固定点は 12 箇所である。

データロガー

温度の測定には熱電対を使用し、その記録のためにデータロガーを使用した。このデータロガーは全部で 64 チャンネルの読み出しが可能であり、今回はそのうち 49 チャンネルを利用した。データロガーの写真を図 4.4 (d) に示す。

温度モニタ用 PC

データロガーで取得した温度データをその場でモニタし供試体に異常がないか常に確認するために温度モニタ専用 PC を用いた。試験中 10 秒に一度データロガーから温度モニタ用 PC 上のエクセルファイルにデータが出力された。モニタ用 PC の写真を図 4.4 (e) に示す。

Xbox シミュレータ

供試体の実際の通信状態を再現するために、Xbox シミュレータを供試体に接続し、ダミーのマイククロカロリメータのデータを供試体に送り続けるようにした。写真を図 4.4 (f) に示す。

PSP-B 模擬用 MIO

Xbox シミュレータ同様供試体の通信状態を再現するために、PSP-B として MIO の設計実証機が供試体に接続された。SpaceCard 間には通信を行わないため、B 系の通信のみを再現する場合は MIO のみで問題ない。写真を図 4.4 (g) に示す。

通信監視用 PC

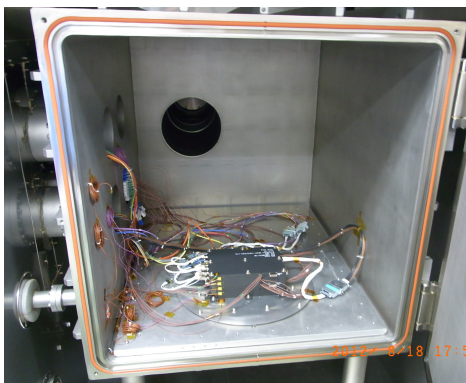
供試体の通信状態を監視するために専用の PC が接続されている。写真を図 4.4 (h) に示す。



(a) 供試体。



(b) 熱真空槽 (外観)。



(c) 熱真空槽 (内観)。



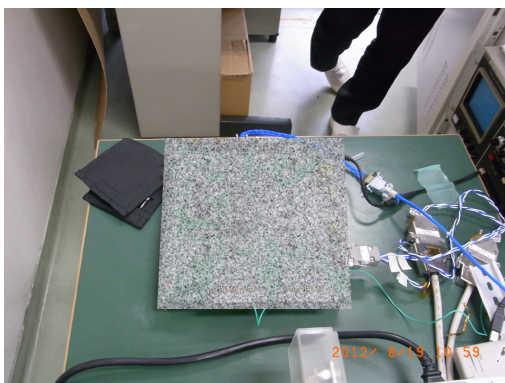
(d) データロガー。



(e) 温度モニタ用 PC。



(f) Xbox シミュレータ。



(g) PSP-B 模擬用 MIO。



(h) 通信監視用 PC。

図 4.4: 熱真空試験の使用機材。

4.4 結果

熱数学モデルによる計算値と、熱真空試験による実測値を図 4.5 にまとめる。設計要求では動作温度は 55 °C であるが、熱真空槽の設定温度を 55 °C にしたところ実際には 58 °C が PSP に入力された。58 °C の入力に対してもメーカーの保証温度を上回った素子は存在しなかったため、実験としては問題ない。また、今回用いた熱数学モデルでは要求温度 55 °C にマージン 10 °C を加えた 65 °C で PSP 底面温度が固定され、放射による伝熱は考慮されていない。

	ch	測定点	熱数学モデル [°C]	実測値平均 [°C]
P	13	PSUDCDC3.3V	65.8	60.15
S	14	PSUDCDCpm12V	66.1	59.1
U	15	PSUPowerMOS-FETa	69.1	58.61
	16	PSUPowerMOS-FETb	69.4	60.56
	17	PSUPowerMOS-FETc	71	60.29
	18	PSU過電流検出抵抗a	68.9	61.83
	19	PSU過電流検出抵抗b	69.1	61.4
	20	PSU過電流検出抵抗c	69.8	62.21
	21	PSULCフィルタ用L	71.8	60.36
S	24	SpC0レギュレータa	74.6	65.19
P	25	SpC0レギュレータb	76.9	63.53
C	26	SpC0CPU-IF-FPGA	71.5	61.84
A	27	SpC0CPU	70.2	62.71
O	28	SpC0PLL	79.5	63.76
M	29	MIOSpW-FPGA	72.5	62.05
I	30	MIOUser-FPGA	73.6	61.65
O	31	MIOレギュレータ	83.8	66.98
S	32	SpC1レギュレータa	75.7	65.44
P	33	SpC1レギュレータb	78.1	64.41
C	34	SpC1CPU-IF-FPGA	72.7	62.39
A	35	SpC1CPU	71.3	63.88
1	36	SpC1PLL	80.6	64.02
	37	SpC1LVDSドライバa	75.8	62.32
	38	SpC1LVDSドライバb	74.1	62.27

図 4.5: 熱数学モデルによる計算値と、熱真空試験による実測値。

4.5 考察

図 4.5 の結果を簡略化し、伝導熱抵抗や放射熱抵抗を仮定して図に表わしたものが図 4.6 である。青文字が熱数学モデルから求めた温度、赤文字が熱真空試験の実測値である。今回考察を行うにあたって、各ボードの温度は、基板中の最大測定値を持つ部品の温度で一様であるとした。すなわち、PSU は過電流検出抵抗 c、SpC-A0 はレギュレータ a、MIO はレギュレータ、SpC-A1 はレギュレータ a の温度で代表している。また、DC/DC は PSU の一部であるが、基板と直接接触していないため、別の部品として表現した。DC/DC の温度は 3.3 V の方の温度を表記してある。上蓋と側面はそれぞれの平均温度を書いてある。これらはどちらも温度が同じであったことから、間に熱抵抗はないと考えた。また、4.5.3 節での考察のため、PSP 表面と熱真空槽の放射の熱抵抗 r を書き加えてある。モデルでは放射の影響は考慮されていないため r は存在しない。

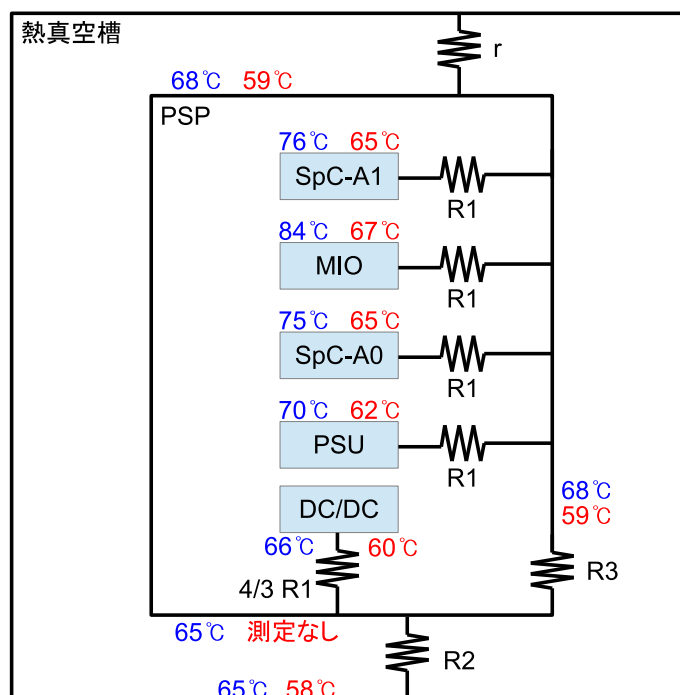


図 4.6: 今回想定する熱回路とモデル/実測温度。青字がモデルから計算した値、赤字が実測値。 $R1$, $R2$, $R3$, $R4$ は伝導の熱抵抗、 r は実験値の考察をする際に仮定した放射の熱抵抗。

4.5.1 全体の傾向

まず、単純に実測温度とモデルの温度を図 4.7 のように比較してみる。PSP 底面は試験の際熱電対を取り付けなかったため、熱真空槽床面は PSP 本体ではないため除外する。MIO-A を除き、モデル

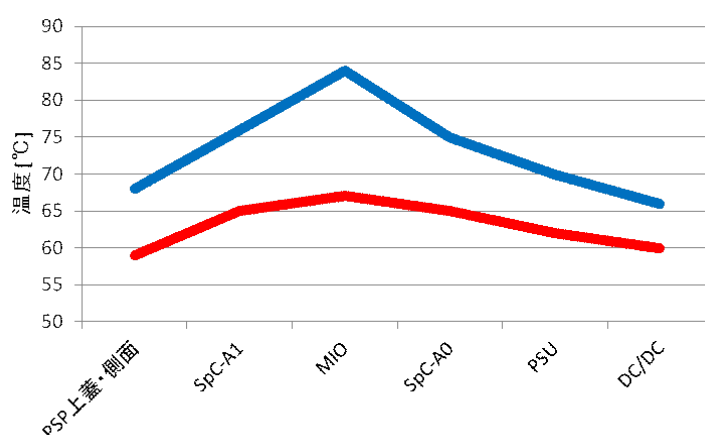


図 4.7: モデルと実測値の温度。青がモデル、赤が実測値。

と実測値は同じような温度分布を示し、(モデル) - (実測値) の値は $7 \pm 4^\circ\text{C}$ になっている。これは、モデルと実験の熱入力之差が $+7^\circ\text{C}$ あることを考えれば妥当な結果である。

MIO-A については、実は熱解析結果から、今回 MIO の代表としたレギュレータは基板上の取り付け部付近と 10 °C 程度の温度差をつけて局所的に高温になることが分かっている。ところが、実測値を見ると MIO-A (レギュレータ) の温度は SpC-A0 や A1 と同程度の温度になっている。これは、熱電対取付箇所が適切ではなく、レギュレータ取付部周辺の温度を測定してしまったのではないかと考えられる。実際、MIO-A の他の部品でもモデルと実測値の比較をすると、図 4.8 に示したように、他の基板と同様モデルと実測値は同じような温度分布を示す。そのため、適切な場所に熱電対を取り付ければレギュレータ部分でもモデルと同様な振る舞いをすると期待される。以上より、熱数学モデルは PSP の温度分布を良く再現しているといえる。

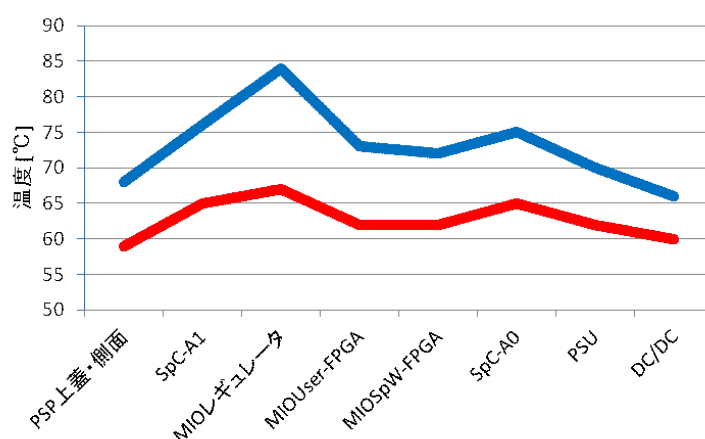


図 4.8: モデルと実測値の温度。MIO ボードの全ての測定点をプロットに含めた。青がモデル、赤が実測値。

今回の実験では熱数学モデルの条件と違い、PSP を衛星構体ではなく熱真空槽に固定したため、熱真空槽を相手とした放射を含む伝熱が起こっていたはずである。そこで、放射と伝導がどれほどの割合で起こっていたか、実際の衛星上ではそれがどう変わるかについて考察した。PSP と熱真空槽との放射結合についてを 4.5.2 節で、PSP の底面を介した熱真空槽との伝導伝熱についてを 4.5.3 節で述べる。

4.5.2 熱真空槽壁面との放射結合

この節では、PSP 表面と熱真空槽壁面との放射結合による熱流を考える。PSP は表面がエアロジンで塗装された直方体で、 $250 \times 350 \times 91.3 \text{ mm}^3$ の大きさを持つ (3 章)。熱真空槽内壁面はアルミ合金で、大きさは $960 \times 760 \times 800 \text{ mm}^3$ である (4.3.2 節)。放射伝熱を考える際に必要となる PSP と熱真空槽壁面のパラメータを表 4.2 にまとめる。今回は、放射結合は PSP と熱真空槽が向かい合った面だけで起き、PSP 1 面からの放射の全てが熱真空槽の対応する面に到達するものとみなした。また、PSP も熱真空槽も放射の強度が黒体と同じで強度のみ異なる物質であるとした。以上のような仮定をすると、PSP のある 1 面 (面積 A_p 、温度 T_p 、放射率 ε_p) から熱真空槽の向かい合った 1 面 (面

表 4.2: PSP と熱真空槽壁面のパラメータ。

	PSP	熱真空槽
材質	エアロジン (表面)	アルミ合金
黒体に対する放射率 ε	0.84	0.06
温度 T [K]	331.6	330.2
熱真空槽床面に水平な面の面積 A_1 [m ²]	0.00875	0.7296
熱真空槽ドアに垂直な面の面積 A_2 [m ²]	0.02283	0.768
熱真空槽ドアに水平な面の面積 A_3 [m ²]	0.03196	0.608

積 A_c 、温度 T_c 、放射率 ε_c) への熱流量 $\dot{Q}_{pc}$ [W] は

$$\dot{Q}_{pc} = \frac{A_p}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1-\varepsilon_c}{\varepsilon_c} \frac{A_p}{A_c}} \times \sigma(T_p^4 - T_c^4) \quad (4.2)$$

と書ける。 $\frac{A_p}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1-\varepsilon_c}{\varepsilon_c} \frac{A_p}{A_c}}$ は放射伝熱における熱の流れやすさを示す量で、放射伝熱コンダクタンスと呼ばれる。これを用いて、表 4.2 に書いた 3 種類の面の組み合わせそれぞれに対して $\dot{Q}_{pc}$ を計算すると、

$$\dot{Q}_{pc1} = 0.33[\text{W}] \quad (4.3)$$

$$\dot{Q}_{pc2} = 0.16[\text{W}] \quad (4.4)$$

$$\dot{Q}_{pc3} = 0.18[\text{W}] \quad (4.5)$$

が分かる。これらから、PSP と熱真空槽の間の総熱流量 $\dot{Q}_{pcall}$ は

$$\dot{Q}_{pcall} = \dot{Q}_{pc1} + 2\dot{Q}_{pc2} + 2\dot{Q}_{pc3} = 1.0[\text{W}] \quad (4.6)$$

が求められる。

PSP 全体の発熱量は 16 W である (4.3.2 節)。以上から、熱真空槽との放射結合による熱の流出は PSP の発熱量に対して 6.25 % しか効かなかったことが分かる。

4.5.3 熱真空槽床面との伝導伝熱

図 4.6 を見ると、熱真空槽床面と DC/DC の温度差が、モデルでは 1 K である一方実測では 2 K であることが分かる。これは、モデルでは PSP 底面の温度を直に 65 °C に設定しているが、実際には熱真空槽床面からの熱伝導によって PSP 底面が加熱されていることから来る差異である。この熱量を考えてみる。

温度 T_1 を持つ物体 1 から温度 T_2 を持つ物体 2 への伝導伝熱による熱流量 $\dot{Q}$ は一般に以下の式で表せる。

$$\dot{Q} = D(T_2 - T_1) \quad (4.7)$$

D [W/K] は伝導伝熱コンダクタンスという、伝導伝熱においての熱の流れやすさを表す量である。伝導伝熱コンダクタンスは、2 物体の接触面同士の圧力に依存している。

PSP は 4.011 kg の質量を持つアルミ製の直方体で (3.1 節)、SUS304 M5 × 15 ネジによって 12 箇所を固定される (4.3.2 節)。実は PSP の底面にはエアロジン塗装は施されていないため、熱真空槽とはアルミ同士で接触することになる。また、PSP の底面積は単純に立法体の底面積ではなく、43711 mm² であることが分かっている。質量 4.011 kg、底面積 43711 mm² の箱をただ置いただけのときに床にかかる圧力は

$$\frac{4.011[\text{kg}] \times 9.8[\text{m/s}^2]}{0.043711[\text{m}^2]} = 899.27[\text{N/m}^2] = 0.90[\text{kN/m}^2] \quad (4.8)$$

である。この箱を SUS304 M5 × 15 ネジで固定したときの、ネジが床に加える面圧も計算できる。SUS304 M5 × 15 ネジの標準締付けトルクは 0.3 N・m で、呼び径 (ネジの軸の直径) 5 mm、長さ 15 mm、頭部の外径が 9.0 mm である。面圧は、以下の式で表せる。

$$(\text{面圧})[\text{N/m}^2] = \frac{F[\text{N}] \times n}{A[\text{m}^2]} \quad (4.9)$$

ここで、 F はネジ締付け力、 n はネジ本数、 A はネジ頭部と床の接触面積である。 F は締め付けトルク T と呼び径 d から、次のように計算できる。

$$F = \frac{100T[\text{N} \cdot \text{m}]}{0.2d[\text{m}]} \quad (4.10)$$

式 4.9 と 4.10 を用いてネジ 12 本が床に加える面圧を求めると

$$(\text{面圧}) = 2.0 \times 10^9 [\text{N/m}^2] = 2.0 \times 10^6 [\text{kN/m}^2] \quad (4.11)$$

となる。この値は箱をただ置いた状態の約 10⁶ 倍の圧力である。PSP は自身の重さの 10³ 倍の力がかかっても衛星構体から外れないような設計になっているため、ネジ 12 本の面圧がこの程度の値になるのは問題ない。

伝導伝熱コンダクタンスは、熱接触抵抗の逆数と接触面積の積で表される。アルミの熱接触抵抗の値は接触圧力が 100 kN/m² (～ 1 気圧) のとき 1.5 - 5.0 m² K/W、10000 kN/m² (～ 100 気圧) のとき 0.2 - 0.4 m² K/W をとることが知られている¹。ここでは、接触圧力が 2 桁増えると熱接触抵抗は 1 桁減る傾向が見られる。つまり、接触圧力がさらに 2 桁高い今回のケースでは、熱接触抵抗値は 10⁻² m² K/W 程度になると予想できる。熱接触抵抗値 = 10⁻² m² K/W として伝導伝熱コンダクタンスを求めると、

$$D[\text{W/K}] = \frac{1}{10^{-2}[\text{m}^2\text{K/W}]} \times 0.043711[\text{m}^2] = 4.4[\text{W/K}] \quad (4.12)$$

となる。

これと式 4.7 を用いて、今回の状況での熱流量を求めてみる。

$$\dot{Q}[\text{W}] = 4.4[\text{W/K}](332[\text{K}] - 330[\text{K}]) = 8.8[\text{W}] \quad (4.13)$$

今回の実験では PSP 底面と熱真空槽底面の温度差は 2 K あるので、熱流量は 17.6 W となる。熱接触抵抗の見積もりが粗いので PSP の発熱量 16 W を超えているが、放射による熱流を除いた全ての熱量、すなわち PSP の発熱の 93.75 % が PSP 底面から流出していることが分かる。

¹<http://help.solidworks.com/2012/Japanese/SolidWorks/cworks/Thermal.Contact.Resistance.htm?id=93f6914ffc754f7086ab7ad99fc8aae9#Pg0> 参照

PSP が実際に衛星構体に取り付けられる際には、接触部分の熱伝導を増加させるサーマルフィラーが底面に塗布されるため、PSP 底部と衛星構体との熱抵抗による温度差はほとんどなくなるはずである。そのため、大部分の熱は構体との放射結合ではなくモデルと同様に伝導伝熱によって移動することが予想される。

4.6 まとめ

本実験では、温度が 55 °C に保たれている熱真空槽内部の PSP 性能実証機の各部の温度を測定し、熱数学モデルでの計算結果と比較した。以下のことが分かった。

- 熱真空試験により動作保障温度を超えた素子や部品は存在しなかった。
- 熱数学モデルは PSP の温度分布をよく再現していた。
- PSP はその発熱量の 6.25 % を放射、93.75 % を伝導によって解放していた。実際には PSP 底面にもサーマルフィラーを塗るため、モデルと同様にほとんど伝導のみが効くと考えられる。

第5章 機上ソフトウェアによる波形処理試験

本章では、PSP の性能実証機による波形処理試験の結果について述べる。マイクロカロリメータ検出器実機から取得したデータを Xbox でデジタル変換して、PSP の性能実証機に入力し、PSP の波形処理の性能を実機で評価した。この結果から、2.2.1 節で述べた性能要求の妥当性を議論する。

5.1 目的

本試験の目的は PSP の性能実証機が SSR-01 と CR-P10 を満たすことを実証することである。

5.2 実験

まず機材の配置図を図 5.1 に示す。本実験では Xbox シミュレータと、PSP 性能実証機を用いた。

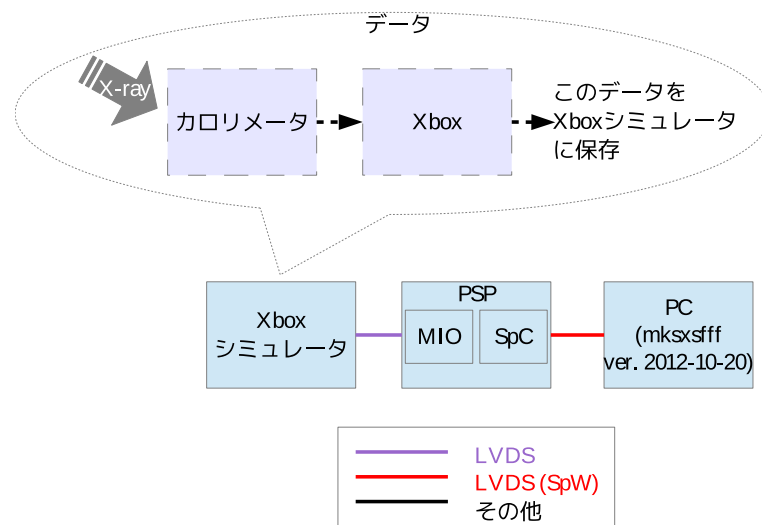


図 5.1: 波形処理試験セットアップ図。

ただし、PSP は SpaceCard が 1 枚しかない特殊構成のものである。PSP の SpaceCard の搭載ソフトは開発中であり、今回は "psp_uapp ver.121015" を使用した。PSP には Xbox シミュレータが接続された。Xbox シミュレータには事前に検出機実機から取得してあったデータが貯められている。そのとき使用した X 線源は Mn、K、Al の特性 X 線を放射するものである。このデータが PSP に送信された。送信時間は 1 時間 2 分、データ量は SpaceCard 1 枚が処理するデータ量である 9 ピクセル分である。ただし、この 9 ピクセルのデータは同一であり、かつ 670 秒分が繰り返して使用された。出

力データは、外部 PC 内でデータ処理ソフト “mksxsfff ver.2012-10-20” を使って天文業界標準のファイル形式である FITS 形式へと変換された。

5.3 結果

図 5.2 に 0 番ピクセル (px0) データの PHA の時間変動を示す。データを繰り返して使ったことによる周期性を見ることができる。さらに、表 5.1 に各ピクセルの Hp、Mp、Ms、Lp、Ls イベント数

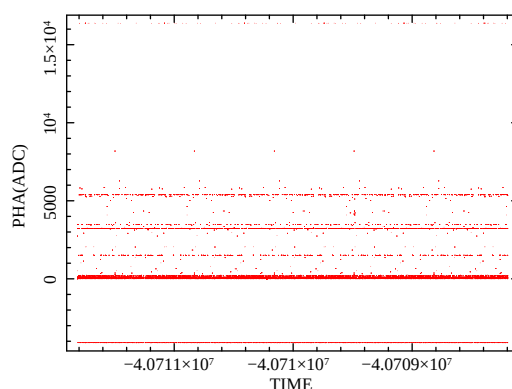


図 5.2: px0 イベントの PHA の時間変動。データの繰り返しによる周期性を見ることができる。

の和を示した。イベント数はおおよそのピクセルでほとんど同じになっている。ピクセル間のイベントの総数の違いは Xbox シミュレータのビット化けによるものである。

表 5.1: 各ピクセルのイベント数。

ピクセル番号	0	1	2	3	4	5	6	7	8
イベント数	5566	5678	5661	5541	5656	5614	5685	5589	5583

5.4 考察

5.4.1 ノイズリダクション

熱的、電氣的クロストークイベントが偽イベントとしてトリガされることがある。図 5.3 に通常の X 線イベントとクロストークイベントの波形の例を示した。これを見ると、クロストーク波形は通常のイベントに比べ小さい RISE_TIME を持つことが分かる。

図 5.4 は PHA vs RISE_TIME 平面上でのイベント散布図で、PHA < 200 のイベントが小さな RISE_TIME を持つことを示す。この分布から、PHA < 200 のほとんどのイベントがクロストークによるものであることが分かる。このプロットから、RISE_TIME > 40 のイベントを除去すれば低エネルギー側のクロストークノイズを 70 % 減らすことができることが分かる。

したがって、クロストークを含む非 X 線イベントは PHA vs RISE_TIME の区別を利用して除くことができると期待される。

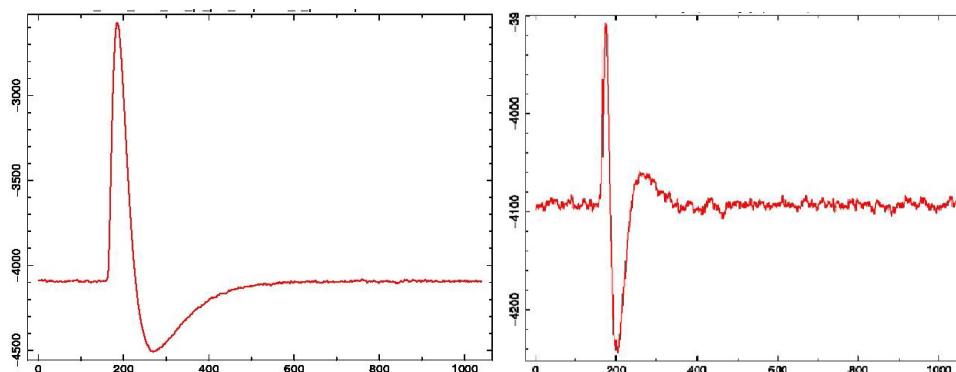


図 5.3: 波形の比較。左: 通常の X 線イベント。右: クロストーク。横軸は sample 番号、縦軸は PHA。クロストークは通常のイベントより小さな RISE_TIME を持つ。

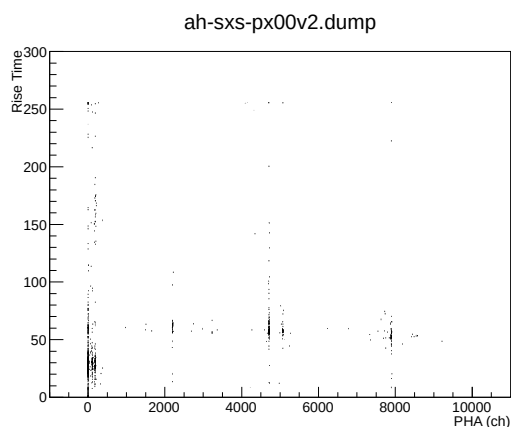
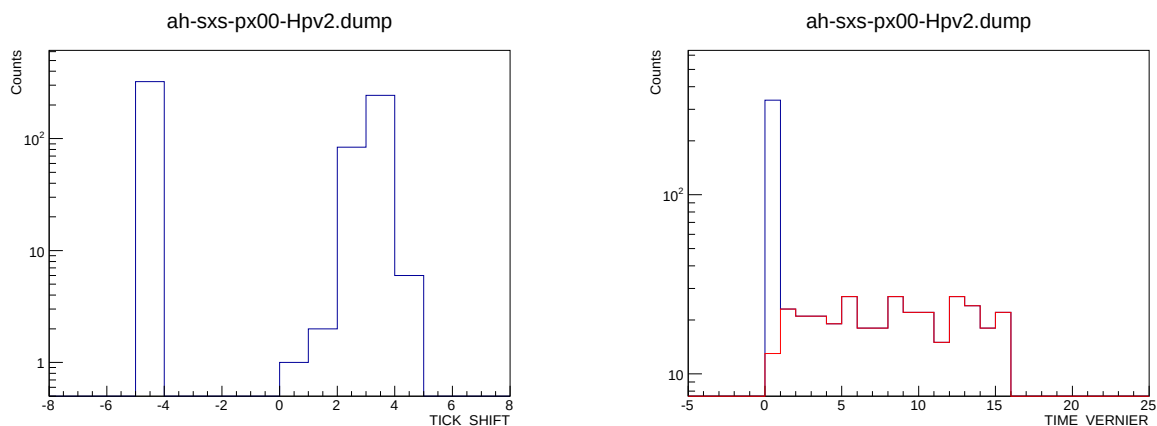


図 5.4: PHA vs RISE_TIME。RISE_TIME が小さなイベントのほとんどは PHA < 200 の範囲にいる。

5.4.2 時刻付け

図 5.5 (a) は Hp イベントの TICK_SHIFT のヒストグラムを示す。図 5.5 (a) から、TICK_SHIFT が 0 から 4 の範囲に分布していることが分かる (-5 は既知のバグによるものである)。最適フィルタ処理が理想的にできていれば TICK_SHIFT のピークは 0 であるはずなので、この偏った分布はテンプレート波形に調整の余地があることを示す。

図 5.5 (b) は Hp イベントの TIME_VERNIER のヒストグラムである。赤線は $-4 \leq \text{TICK_SHIFT} \leq 4$ のイベントのみを、青線は全てのイベントを使って作成したヒストグラムである。イベントは時間的にランダムに発生するため、TIME_VERNIER の分布は均一であるはずである。青いヒストグラムの TIME_VERNIER = 0 のピークは、バグによる TICK_SHIFT = -5 のイベントで構成されている。



(a) Hp イベントの TICK_SHIFT のヒストグラム。TICK_SHIFT は 0 to 4, -5 の範囲に分布している。TICK_SHIFT = -5 のイベントはバグによるものである。

(b) Hp イベントの TIME_VERNIER のヒストグラム。赤線は $-4 \leq \text{TICK_SHIFT} \leq 4$ のイベント、青線は全てのイベントを使って作成した。バグによるおかしな TICK_SHIFT のイベントを除けば、TIME_VERNIER は均一に分布する。

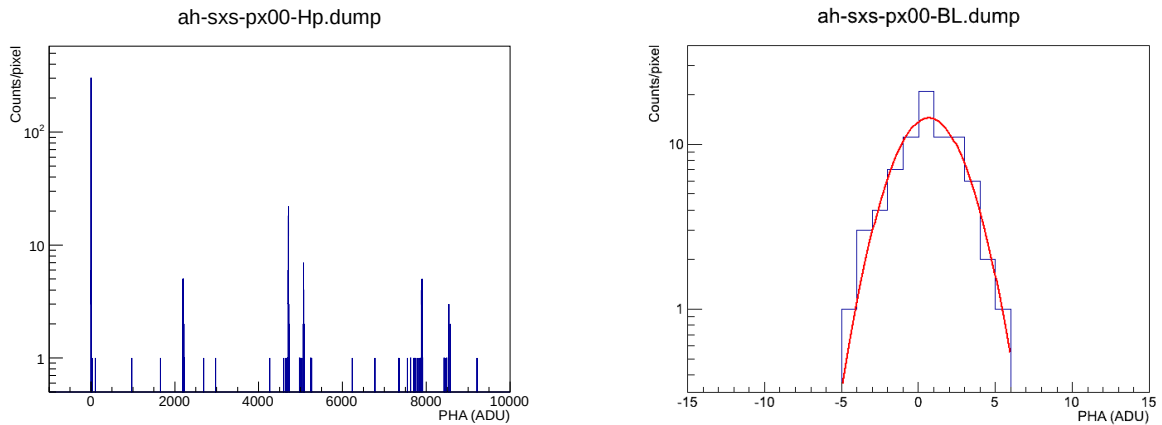
図 5.5: TICK_SHIFT、TIME_VERNIER のヒストグラム。

5.4.3 エネルギー分解能

Mn K α 線のエネルギー分解能を求めた。図 5.6 (a) は全帯域のスペクトルである。Al K α 線、K K α 線と K β 線、Mn K α 線と K β 線のスペクトルとベースラインの存在が分かる。ベースラインがイベントパルスが検出されない時間に収集され、イベントパルスと同じ方法で処理されている。このベースラインの揺らぎはエネルギー分解能に制限をつける。図 5.6 (b) ではベースライン分解能がしめされ、FWHM で約 3.6 eV であることが分かる。図 5.6 (c) は Mn-K α 線をモデルフィッティングした結果である。ここで使ったモデルは、quantum Lorentzian profile と random Gaussian profile の convolution である Voigt 関数を 8 個使って構成されたものである。8 つのピークを合わせて 2 つの主要なピークを表わし、観測される輝線を再現する。フィッティングからエネルギー分解能 4.02 ± 1.22 eV が求められた。ここから、この波形処理システムが Hp イベントに関して、要求 SSR-01 の “ $\Delta E < 7$ eV” を満たすことが示された。テンプレートの調整を行えばさらに良いエネルギー分解能を得られることが予想される。

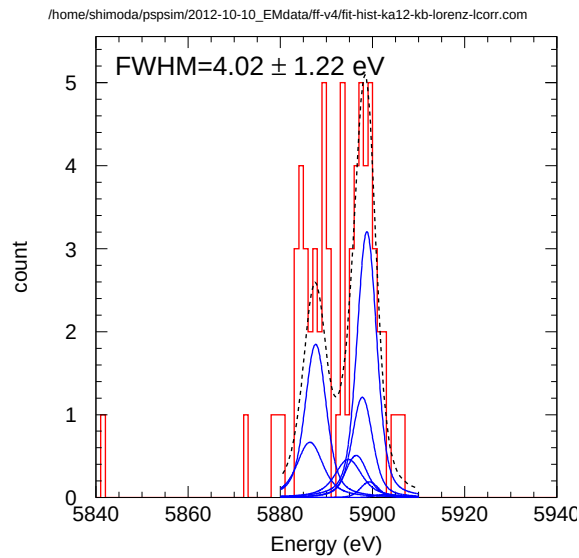
5.4.4 処理速度

最後に、処理速度を確認するために、X 線イベントの処理中とそうでない時の CPU 負荷を比較し、イベント処理による CPU の負荷を見積もった。X 線イベント処理中でないときの平均 CPU 使用率は 5.000 % であった。一方、X 線イベント処理中は 61.25 % であった。この 2 者が線形関係だと仮定すると、図 5.7 に示したように、CPU 負荷は 45.5 count/s/CPU、すなわち 182 count/s/array の X 線イベント処理中に 100 % に到達すると見積もられる。この結果は PSP の要求 CR-P10 “150 count/s/array” を上回っている。これを実証するために、将来的に高レートイベント処理実験を実施する必要がある。



(a) 全帯域のエネルギースペクトル。ベースライン、Al $K\alpha$ 線、K $K\alpha$ 線と $K\beta$ 線、Mn $K\alpha$ 線と $K\beta$ 線がある。

(b) ベースライン分解能は FWHM で約 3.6 eV。エネルギー分解能はこれに制限される。



(c) Mn $K\alpha$ 線のエネルギースペクトル。エネルギー分解能は 4.02 ± 1.22 eV。これは SSR-01 “ $\Delta E < 7$ eV” を満たす。

図 5.6: エネルギースペクトル。

5.5 まとめ

本実験では、マイクロカロリメータ検出機実機から取得したデータを用いて PSP の性能実証機の基本性能を求めた。成果は以下のとおり。

- RISE_TIME vs PHA の関係はノイズ削減に有効であることが分かった。
- Hp イベントは SSR-01 で課された $\Delta E < 7$ eV を満たす。
- 処理速度は CR-P10 で課された 150 count/s/array を上回ることができると予想できた。

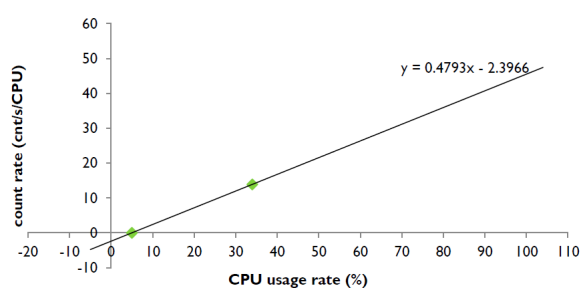


図 5.7: CPU 使用率に依存した処理イベントカウントレートの変化。緑の点が実測値。緑の 2 点の関係は一次関数的であるとしている。

第6章 まとめ

2014 年完成予定の ASTRO-H 衛星には、超高分光能力をもつ X 線マイクロカロリメータ SXS が搭載される。本論文では、このデジタル信号処理部 PSP の性能実証機に対しての評価試験を行った。

熱真空試験では、その温度測定結果を熱数学モデルの計算結果と比較し、熱数学モデルが実際の温度分布を良く再現していることを確認した。また、実験に用いた熱真空槽による放射伝熱と伝導伝熱の熱流量を計算し、実験結果には放射伝熱がほとんど利いていないことを確認した。

波形処理試験では、検出器実機から取得したデータを PSP に処理させることで、PSP に搭載されたカロリメータ波形処理用アルゴリズムが正しく動作し、SXS に課された要求である $\Delta E \leq 7 \text{ eV}$ を満たすことを示した。また、CPU 使用率から処理速度を見積もり、PSP への要求である $150 \text{ count/s/array}$ の処理が達成できることを予測した。

関連図書

- [1] 久保田あや、「ASTRO-E 搭載硬 X 線検出器の熱設計とその検証」修士論文、東京大学、1998
- [2] 萩原利士成、「撮像型 X 線 TES マイクロカロリメータのデジタル信号処理」修士論文、東京大学、2007
- [3] 瀬田裕美、「ASTRO-H 衛星搭載軟 X 線マイクロカロリメータ用デジタル信号処理系の設計」、修士論文、埼玉大学、2009
- [4] 下田優弥、「X 線天文衛星「Astro-H」搭載マイクロカロリメータのデジタル信号処理系における Pulse の最適微分方法について」、卒業論文、埼玉大学、2009
- [5] 神頭知美、「ASTRO-H 衛星における時刻付けシステムの開発」、修士論文、埼玉大学、2010
- [6] 藤永貴久、「ASTRO-H 衛星搭載 X 線 CCD カメラデータ収集システムの構築」、修士論文、東京工業大学、2010
- [7] 朝比奈正人、「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載共通デジタル処理回路の通信速度測定」、卒業論文、埼玉大学、2010
- [8] 下田優弥、「ASTRO-H 衛星搭載 SXS デジタル信号処理系の設計実証モデルによる性能評価」、修士論文、埼玉大学、2011
- [9] 阿部祐輝、「ASTRO-H 衛星搭載 軟 X 線分光器 SXS の波形処理システム PSP の開発」、修士論文、首都大学東京、2011
- [10] 福山太郎、「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載用テルル化カドミウム半導体素子の開発と性能評価」、修士論文、東京大学、2011
- [11] 武田佐和子、「次世代 X 線天文衛星搭載マイクロカロリメータのデジタル波形処理部における最適な微分フィルタの開発」、卒業論文、埼玉大学、2011
- [12] 山口直、「次世代 X 線マイクロカロリメータのための最適微分フィルタの実装」、卒業論文、埼玉大学、2012
- [13] 小山勝二、嶺重慎、『ブラックホールと高エネルギー現象』、シリーズ現代の天文学 8、日本評論社、2007
- [14] 井上一、小山勝二、高橋忠幸、水本好彦編、『宇宙の観測 III——高エネルギー天文学』、シリーズ現代の天文学 17、日本評論社、2008

- [15] Charles Kittel 著、宇野良清、津屋昇、森田章、山下次郎共役『キッテル 固体物理学入門 上 第7版』、丸善株式会社、2000
- [16] 山際伸一著、『改訂版 FPGA ボードで学ぶ論理回路実習』、CQ 出版、2009
- [17] 国立天文台編、『理科年表』、丸善株式会社、1994
- [18] Porter, F.S. et al. “The detector subsystem for the SXS instrument on the Astro-H observatory”, SPIE, 2010
- [19] R. Fujimoto et al. “Cooling system for the Soft X-ray Spectrometer (SXS) onboard ASTRO-H”, SPIE, 2010
- [20] 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 ASTRO-H プロジェクト、“ASTRO-H システム確認書”, ASTH-100_rev15, 2012
- [21] 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 ASTRO-H プロジェクト、“ASTRO-H ミッション・システム要求書”, ASTH-020_rev1, 2010
- [22] 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 ASTRO-H プロジェクト、“ASTRO-H 搭載機器の熱設計基準書”, ASTH-102-rev2, 2010
- [23] 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 ASTRO-H プロジェクト、“ASTRO-H 搭載機器の耐環境設計基準書”, ASTH-110-rev8, 2012
- [24] K. Mitsuda and Y. Takei, “SXS-XCS Description Document”, JAXA-XCS-001_v07, 2011
- [25] M. Tsujimoto and M. Tashiro, “Pulse Shape Processor (PSP) Description Document”, JAXA-XCS-E-007, 2012
- [26] Y. Ezoe, “DIST description”, JAXA-SXC-CSE-011, 2012
- [27] S. Takeda and M. Tsujimoto, “PSP (EM) 環境試験結果 (3) 熱真空試験”, SXS-MEMO-2012-008, 2012

謝辞

本修士論文を完成させるまでに、多くの方々にお世話になりました。この場を借りて心から感謝申し上げます。

田代先生には首都大や三菱重工での実験のたびに基本的なことを何度も教えていただきました。また、天文学会や IEEE に参加した際には発表直前までご指導いただきました。本修士論文についても方針を示していただき、その上何度も添削いただきました。

寺田先生には実験に対するアドバイスや、研究をする上でのものの見方のヒントをいただきました。IEEE 関連の書類について丁寧に添削しコメントをくださいました。実験のみならず、天体解析でもたいへんお世話になりました。

下田さんには何から何までお世話になりました。実験中に発生した問題を一緒に考えてくださったり、書類や論文の添削を何回も何回もしてくださいました。また、研究生生活のあり方を教えていただき、進路相談にも乗っていただきました。

山口くんには実験を手伝っていただき、色々な仕事を引き受けてもらいました。いつも積極的に実験に関わろうとする姿は私も見習うべきだと思っています。これからも頼りにしています。

鈴木くんはいつも基本的な質問をぶつけてくれて、逆にこちらがたいへん勉強になりました。修士論文を書いている間はあまり細やかな指導ができなかったこと、反省しています。就職してもがんばってください。

私の所属する ASTRO-H プロジェクトチームの皆様、特に PSP チームの皆様にはたいへんお世話になりました。首都大学東京の石崎先生には、実験結果の解析などでアドバイスをいただきました。宇宙科学研究所の辻本先生は実験の一部を私に任せてくださり、実践的な勉強の機会を与えてくださいました。立教大学の瀬田さんには国際学会に臨む心構えを教えていただきました。

研究室の皆様、いつも心地良い研究環境を提供してくださってありがとうございました。特に同期の朝比奈さん、小林さん、坂本さん、高原さんが各自の研究に励んでいたことで、私も気を引き締めて研究に取り組むことができました。

皆様、ありがとうございました。