

ひとみ衛星搭載X線マイクロカロリメータ用 波形処理装置による光子弁別の検証

埼玉大学大学院 理工学研究科
物理機能系専攻 物理学コース
田代・寺田研究室 加藤 優花

2017年2月6日

概要

X 線天文衛星ひとみは、軟 X 線分光検出器 (Soft X-ray Spectrometer, SXS) を搭載している。SXS は、X 線望遠鏡の焦点面におかれ、入射 X 線の光子エネルギー吸収体の温度上昇として測定する X 線マイクロカロリメータを受光部にもつ。受光部を 50 mK という極低温下で動作させ、機上のデジタルデータ処理によって 0.3-12.0 keV の入射光子のエネルギーに対し、5 eV の高エネルギー分解能を実現した。

機上でデジタル化された受光部の温度波形は、デジタル波形処理装置 (Pulse Shape Processor, PSP) へ渡される。PSP は、X 線イベントの検出と光子エネルギーの測定を行う。しかし、検出するイベントの中でも正規イベントのみ抜き出したいため除去すべきものがあり、それらは (1) 波形の中に複数のイベントが重畳しているもの (2) X 線マイクロカロリメータのピクセル外に X 線光子が入射してきたもの (3) 電氣的・熱的なクロストークによるもの の 3 種類に分けられる。

(1) に該当するものは 3 種類ある。(a) 検出したイベントの時間間隔の短いもの。PSP では正確なエネルギー測定を行うために、最適フィルタ処理用のテンプレート長に合わせて、波形のトリガ時間間隔ごとに 3 種に分類して処理をする。(b) イベントの到来時刻が決定できないほど近接した、イベントの入射直後に入射する別のイベントの検知。(c) 重畳のためテンプレート波形とは立ち上がり時間 (RISE_TIME) の異なるイベントであり、より遅い RISE_TIME を有するもの。

(2) に該当するものは 2 種類ある。(a) 波形の RISE_TIME がテンプレート波形よりも短いもの。PSP ではグレード付けで時間間隔の長い方から 2 つに分類された波形にのみ、最適フィルタ処理を行う。このとき、単一光子イベントと著しく異なる波形の場合、テンプレートを大きくシフトさせなければならない。(b) 波形の RISE_TIME がテンプレート波形よりも遅いもの。

(3) に該当する波形は他とは異なり、急激な温度変化を有し、波高値が小さいことを特徴とする。

本論文では、衛星に搭載された較正用 X 線発生装置 (Modulated X-ray Source, MXS) を用いて、2015 年 5 月-6 月につくばの宇宙センターで行った MXS 照射実験でのデータを用い、上述のような特徴をもつ非正規イベント群を確認した。これを (1),(2),(3) の特徴で分類除去し、さらに 80 μ s ~ 140 μ s の RISE_TIME を示すイベントを選ぶことによって、必要な X 線光子イベントを選択できた。MXS を起源とする特性 X 線光子イベントで S/N 比を評価したところ、S/N 比が約 2 倍向上したことを確認した。

目 次

第 1 章	X 線天文学と X 線天文衛星	7
1.1	X 線天文学	7
1.2	ひとみ衛星	8
1.2.1	科学目標	8
1.2.2	搭載機器	10
第 2 章	軟 X 線分光検出器 SXS	13
2.1	X 線マイクロカロリメータ	13
2.1.1	概要	13
2.1.2	原理	13
2.1.3	エネルギー分解能	14
2.2	SXS の構造	15
2.2.1	検出器	16
2.2.2	信号処理系	17
2.2.3	Dewar & 冷凍機	17
2.2.4	衛星ネットワークルーター SpaceWire	18
2.2.5	フィルタホイール & X 線発生装置	19
2.3	SXS への要求	19
第 3 章	デジタル波形処理装置 PSP	22
3.1	PSP の構造	22
3.1.1	通信システム	23
3.1.2	MIO ボード	23
3.1.3	SpaceCard ボード	23
3.1.4	PSU (電源) ボード	24
3.2	データ処理	25
3.2.1	MIO ボード	25
3.2.2	SpaceCard ボード	30
3.3	正規イベントと非正規イベント	36
3.4	性能要求	36
第 4 章	光子弁別の検証	39
4.1	目的	39
4.2	試験設定	39
4.3	解析結果	39
4.3.1	グレードによる分類	40
4.3.2	QUICK_DOUBLE と SLOPE_DIFFER による分類	42
4.3.3	TICK_SHIFT での分類	44
4.4	考察	47

目 次

1.1	電磁波の到達高度と波長の関係	7
1.2	ひとみ衛星の地球軌道上でのイメージ [1]	8
1.3	ひとみ衛星の全体図 [1]	10
1.4	搭載機器の観測帯域 [1]	10
2.1	X 線マイクロカロリメータの構造 [2]	14
2.2	X 線マイクロカロリメータの吸収体の時間による温度変化 [3]	14
2.3	SXS の模式図	15
2.4	X 線マイクロカロリメータの素子 [4]	16
2.5	ピクセルの配置番号 [2]	16
2.6	横からみた検出器の模式図 [4]	17
2.7	Dewar の構造の模式図 [4]	18
2.8	冷却システム [4]	18
2.9	従来のネットワークと SpaceWire [5]	19
2.10	SXS の分光能力 [2]	20
2.11	SXS の有効面積 [2]	21
3.1	PSP の内部構造 [2]	22
3.2	MIO ボードのブロックダイアグラム [2]	23
3.3	SpaceCard ボードのブロックダイアグラム [2]	24
3.4	PSU ボードのブロックダイアグラム [2]	25
3.5	1 sample の構成 [2]	26
3.6	パルス検出におけるステートと波形の関係 [3]	28
3.7	セカンドパルス検出の概要。上図：微分前の波形。赤はセカンドパルスを含み、青は含まない。中央図：上図の微分波形。下図：中央図のセカンドパルス部分を拡大した図。赤 - 愛が緑の波形。 [2]	31
3.8	グレードの定義 [2]	32
3.9	時間空間でのノイズのない波形 (平均波形) [2]	34
3.10	時間空間でのノイズ波形 [2]	35
3.11	時間空間でのテンプレート波形 [2]	35
4.1	ピクセル 23 での DERIV_MAX vs RISE_TIME の相関	39
4.2	ピクセル 23 の DERIV_MAX のヒストグラム	40
4.3	Hp イベントのみ	41
4.4	Mp イベントのみ	41
4.5	Ms イベントのみ	41
4.6	Lp イベントのみ	41
4.7	Ls イベントのみ	41
4.8	Hp イベントのみの DERIV_MAX のヒストグラム	42

4.9 QUICK_DOUBLE イベントを抜いたイベント	43
4.10 QUICK_DOUBLE イベントのみ	43
4.11 SLOPE_DIFFER イベントを抜いたイベントのみ	43
4.12 SLOPE_DIFFER イベントのみ	43
4.13 Hp イベントから QUICK_DOUBLE と SLOPE_DIFFER を抜いた DERIV_MAX のヒストグラム	44
4.14 TICK_SHIFT のヒストグラム	44
4.15 TICK_SHIFT=-8 のイベントのみ	45
4.16 TICK_SHIFT=-7 ~ -1 のイベントのみ	45
4.17 TICK_SHIFT=0 ~ 3 のイベントのみ	45
4.18 TICK_SHIFT=4 ~ 7 のイベントのみ	45
4.19 Hp イベントから QUICK_DOUBLE と SLOPE_DIFFER を抜き、TICK_SHIFT=- 7~-1 のみを抜き出した DERIV_MAX のヒストグラム	46
4.20 DERIV_MAX vs RISE_TIME の 2 次元ヒストグラム	47
4.21 セレクション前の PHA ヒストグラム	48
4.22 Hp イベントのみの PHA ヒストグラム	48
4.23 Hp イベントから QUICK_DOUBLE と SLOPE_DIFFER を抜いた PHA ヒストグ ラム	48
4.24 Hp イベントから QUICK_DOUBLE と SLOPE_DIFFER を抜き、TICK_SHIFT=- 7~-1 のみを抜き出した PHA ヒストグラム	49

表 目 次

1.1	各検出器の特性 [1]	12
2.1	SXS X 線マイクロカロリメータの性能要求 [2]	20
3.1	derivShift と derivHalfLen の関係 [2]	27
3.2	SXS の性能要求と PSP の性能要求との対応 [2]	38
4.1	各ブランチ領域についての分類結果	47

第1章 X線天文学とX線天文衛星

1.1 X線天文学

古代より人々は夜空に浮かぶ星の光を直接、あるいは望遠鏡を用いてその目で眺めてきた。19世紀以降の分光学や撮像技術の発展により、現代では電波・サブミリ波からγ線にいたるまで様々な波長の電磁波を利用した観測が可能になった。X線天文学もその1つであるが、その歴史は浅く、実際に観測が行われるようになったのは20世紀の後半に入ってからである。その起源は、1962年に Giacconi らによるロケット実験で、X線源 Sco X-1 と宇宙X線背景放射を発見したことである。太陽系外の天体のX線観測はこれが初めてであり、以降のX線天文学の発展に大きく寄与した。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た。よって、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、1960~1970年代には、X線星の放射起源は、高密度星に流れ込むプラズマによって解放される重力エネルギーであることが解明されてきた。これより、今まで理論的にしか示されていなかった重い恒星の重力崩壊により生まれた高密度星、すなわち中性子星やブラックホールの実在が証明された。

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。宇宙空間を飛び回っているX線はそのほとんどが地球の大気に吸収されてしまい、地上に届くものはわずかであるため、検出するためには検出器を大気圏外まで飛ばす必要がある。現在主流となっているのは人工衛星に搭載して観測するという方法である。日本でもX線天文衛星の研究は盛んに行われている。『はくちょう』(1979)に始まり、『てんま』(1983)、『ぎんが』(1987)、『あすか』(1993)、『すざく』(2005)と続く。そして、本論文の主題である6番目のX線天文衛星『ひとみ』も2016年2月に打ち上げられた。

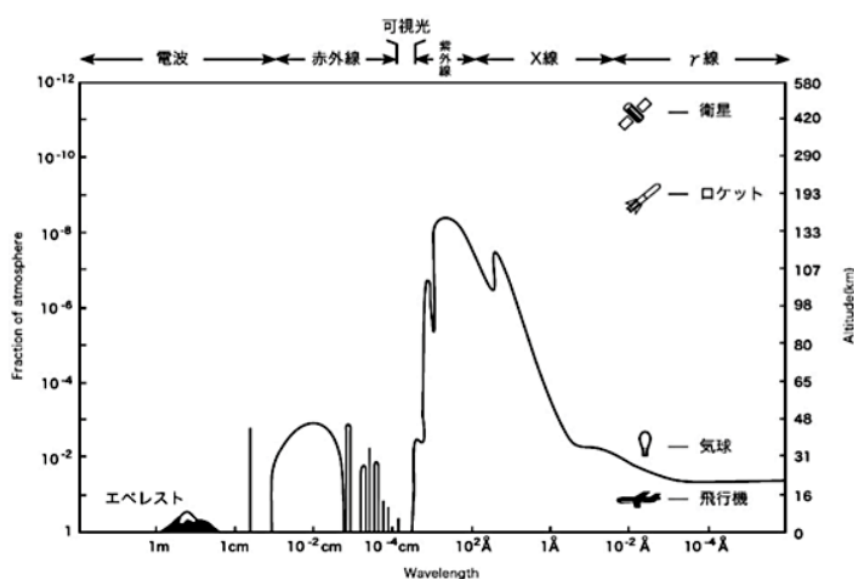


図 1.1: 電磁波の到達高度と波長の関係

1.2 ひとみ衛星

ひとみ衛星は 2016 年 2 月に打ち上げられた日本で 6 番目の X 線天文衛星である。JAXA を中心にアメリカ、ヨーロッパなどの国内外の数多くの大学、研究機関が開発した。総重量 2.5 t、発生電力 3150 W 以上、全長は軌道上で 14 m と、これまでの日本の X 線天文衛星の中では最大となる。また、世界で初めて X 線マイクロカロリメータを用いた観測を行うことができた。

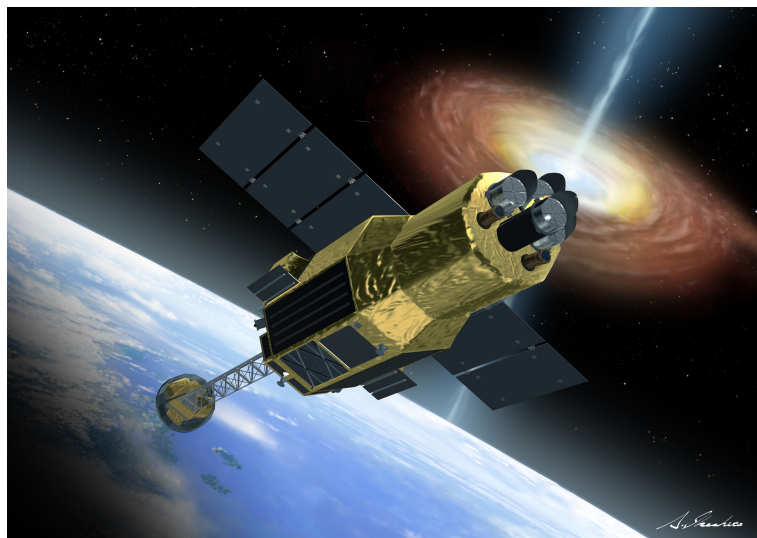


図 1.2: ひとみ衛星の地球軌道上でのイメージ [1]

1.2.1 科学目標

ひとみ衛星は大きく分けて 4 つの科学的目標をもつ。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によって、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っ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、ひとみ衛星では光子エネルギーに対して 0.3 -12 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。ひとみ衛星は、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至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、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はできる。

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。ひとみ衛星は 5 eV 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. 多様性にとんだ非熱的エネルギー宇宙の探索

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。ひとみ衛星では「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、ひとみ衛星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、ひとみ衛星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、1 つ目の項目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。これらより、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・ダークエネルギーの探求

宇宙の組成の 23 % はダークマター、73 % はダーク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、ダークマターやダーク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。1 つ目の項目で述べたように、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実現するために、ひとみ衛星には以下の 4 台の観測機器を搭載している。

- 軟 X 線分光検出器 (Soft X-ray Spectrometer, SXS)+軟 X 線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope-S, SXT-S)
- 軟 X 線撮像検出器 (Soft X-ray Imager, SXI)+軟 X 線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope-I, SXT-I)
- 硬 X 線分光検出器 (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)

各観測機器の詳細を以下に述べ、各検出器の特性を表 1.1 に示す。また、ひとみ衛星の全体図を図 1.3、搭載機器それぞれの観測帯域を図 1.4 に示す。

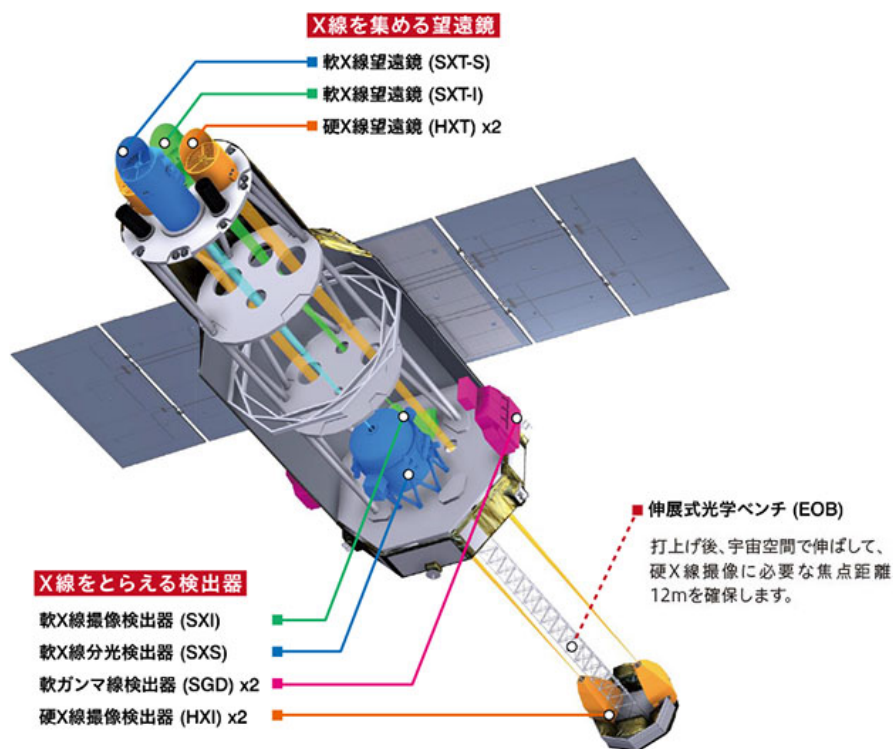


図 1.3: ひとみ衛星の全体図 [1]

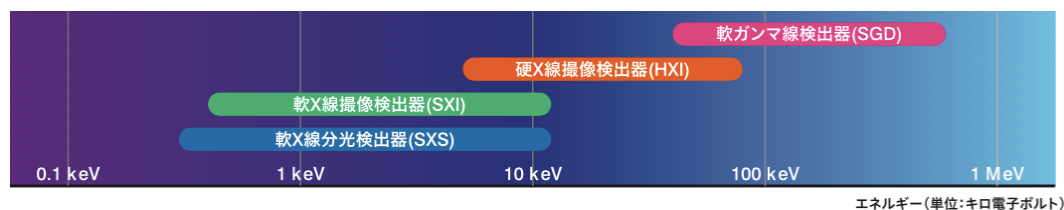


図 1.4: 搭載機器の観測帯域 [1]

SXS + SXT-S

SXS は SXT-S と X 線マイクロカロリメータからなる検出器である。X 線マイクロカロリメータはすざく衛星にも搭載されていたが、打ち上げ後に冷凍機内の冷却用の液体ヘリウムを消失してしまった事故により、観測には使用できなかった。そのため、今回のひとみ衛星での X 線マイクロカロリメータの観測は世界初であり、すざく衛星など従来の衛星の装置より 30 倍も優れた分解能を実現した。SXS の概要については第 2 章で詳しく説明する。

SXT は 12 keV 以下の 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 X 線マイクロカロリメータを用いる 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衛星と同じであるが、すざく衛星よりも大きい 45 cm の口径と、5.6 m という長い焦点距離をもつ。

SXI + SXT-I

SXI は SXT-I と X 線 CCD からなる検出器である。0.4-12.0 keV の X 線を撮像し、大面積の CCD を 4 個並べることにより 38×38 分角での観測を可能にした。CCD チップに背面照射型のものを用い、低エネルギー側での感度を向上させている。すざく衛星に搭載された背面照射型 CCD(X-ray Imaging Spectrometer, XIS) との大きな違いは、200 μm の厚い空乏層である。空乏層が厚いほど高エネルギー側の感度が向上する。また、検出器を -120 °C (= 153 K) に冷却して運用することで、熱によるノイズを軽減させている。

HXI + HXT

HXI は 5-80 keV の X 線の分光と撮像をする検出器である。これは CdTe 半導体検出器 1 層の上に Si 半導体検出器 4 層を積み重ねた構造をした、半導体コンプトンカメラであり、同等のものを 2 つ搭載する。原子番号の小さい Si 検出器で光子を散乱させ、原子番号の大きい CdTe 吸収体で散乱ガンマ線を捉える。半導体検出器はどちらも、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。また、検出器の周囲にはすざく衛星にも搭載された 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軽減している。この検出器の特徴は、高感度であることと撮像をすることが可能であることである。

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、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。

SGD

SGD は 10-600 keV までの広いエネルギー範囲で、軟ガンマ線観測を行う。HXI と同じ半導体コンプトンカメラであり、同等のものが 2 つ搭載されている。検出器は HXI よりも高エネルギー光子を検出するために、Si 検出器 2 層と CdTe 検出器 8 層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 と同様に反同時計数による BGO シンチレータを利用し、バックグラウンドを軽減している。さらに、SGD には光子吸収モードとコンプトンモードという 2 つの観測モードがある。光子吸収モードは、60 keV 以下の入射光子を Si 層で光電吸収して検出する。コンプトンモードは、Si 層でコンプトン散乱された 60 keV 以上の入射光子を CdTe 層で検出する。

表 1.1: 各検出器の特性 [1]

	SXS	SXI	HXI	SGD
検出技術	X 線マイクログロカリメータ	X 線 CCD	Si/CdTe 両面検出器	Si/CdTe コンプトンカメラ
焦点距離	5.6 m	5.6 m	12 m	-
有効面積	310 cm ² @ 6 keV	360 cm ² @ 6 keV	300 cm ² @ 30 keV	20 cm ² 以上 @ 100 keV
観測帯域	0.3 ~ 12 keV	0.4 ~ 12 keV	5 ~ 80 keV	60 ~ 600 keV
エネルギー分解能 (FWHM)	7 eV 以下	200 eV 以下 @ 6 keV	2 keV @ 60 keV	4 keV 以下 @ 60 keV
角度分解能	1.3 分角以下	1.3 分角以下	1.7 分角以下	-
視野	3 分角 × 3 分角	38 分角 × 38 分角	9 分角 × 9 分角	0.6 度 × 0.6 度

第2章 軟X線分光検出器 SXS

SXS は JAXA を中心に、首都大学東京、金沢大学、立教大学、筑波大学、埼玉大学、理化学研究所、物質材料研修機構、ウィスコンシン大学、エール大学、ジュネーブ大学、NASA/GSFC(ゴダード宇宙飛行センター)、SRON の国内外の大学、研究機関の協力で開発されている。2.1 節では SXS の内部で X 線検出器として働く X 線カロリメータの構造、2.2 節では SXS 全体の構造について述べる。

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、入射 X 線光子の 1 個 1 個のエネルギーを素子の温度上昇として測定する 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上昇は数 mK 程度と非常に小さいため、検出器を 50 mK の極低温で動作させている。よって、熱雑音を極限まで小さくでき、温度上昇を精度よく検出することができる。

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持っている、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、キャリアの統計ゆらぎに依存している。キャリア数の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。これまでの X 線天文衛星に搭載されていた比例計数管や X 線 CCD カメラなどのほとんどの検出器は、X 線光子の入射時に電離した電子などをキャリアとして取り出す。この生成エネルギーは電子 1 つにつき約 20 eV 程度である。一方、X 線マイクロカロリメータで発生するフォノン 1 つの生成エネルギーは 10^{-6} eV と非常に低いため、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。よって、同じエネルギーを持つ入射 X 線光子に対し、発生するキャリア数は X 線マイクロカロリメータの方が格段に多くなり、統計ゆらぎを抑えられる。結果、SXS では 6 keV の入射 X 線光子に対して 5 eV という高エネルギー分解能を実現した。

これに匹敵する分解能を持つ検出器には、他にブラッグ反射を用いた分散分光器がある。しかし、高エネルギー帯域になるほど散乱角が小さくなるため、分光が困難になり、分解能が低下してしまうという欠点がある。現状、X 線マイクロカロリメータは高エネルギー帯域でも高いエネルギー分解能を持っているため、宇宙での天体の精密分光に適している検出器である。

2.1.2 原理

図 2.1 は X 線マイクロカロリメータの構造を模式的に表したものである。X 線マイクロカロリメータは吸収体、ピクセル、温度計、熱リンク、熱浴からなっている。X 線光子が吸収体に入射すると、吸収体の温度が数 mK 上昇する。入射 X 線光子のエネルギーを E 、吸収体の熱容量を C 、熱リンクの熱伝導を G とすると、このときの温度上昇 ΔT は

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

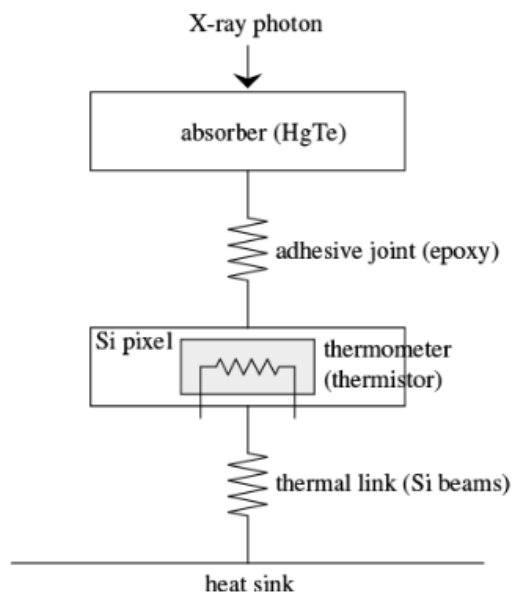


図 2.1: X 線マイクロカロリメータの構造 [2]

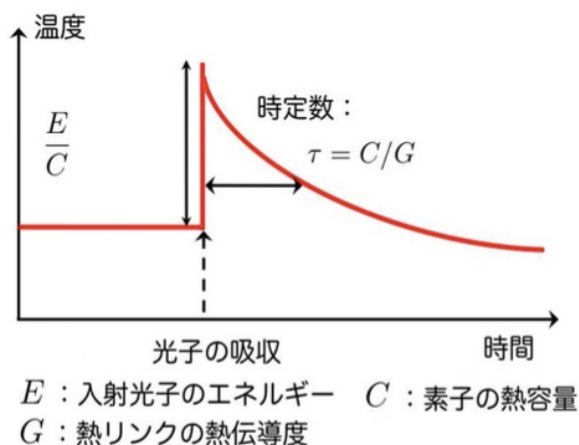


図 2.2: X 線マイクロカロリメータの吸収体の時間による温度変化 [3]

温度計は吸収体から熱的には部分的に切り離されており、吸収体の熱平衡に達すると温度上昇を感知し、測定される。その後、この熱は熱リンクを通しゆっくりと熱浴に流れていき、温度計は元の温度へ戻る。このとき以下の式が成り立つ。

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

この式を解くと減衰の時定数 τ_0 は

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

と定数であることがわかる。この X 線マイクロカロリメータの時定数 τ_0 は、一般的におよそ 1 ms である。

以上より、X 線マイクロカロリメータの温度上昇は、エネルギーの大きさに比例している。また、温度の時間変化は入射 X 線光子のエネルギーによらず、時定数 τ_0 で指数関数的に減衰する図 2.2 のような波形となる。

2.1.3 エネルギー分解能

X 線マイクロカロリメータの動作温度を T 、ボルツマン定数を k_B とすると、X 線の入射によって生成されるフォノン 1 個あたりの平均熱エネルギーは

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

である。X 線マイクロカロリメータの全熱エネルギーは

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

となるので、平均のフォノン数 N は

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

と表せる。この個数はポアソン統計に従い $\sqrt{N}$ で揺らいでいる。よって、熱エネルギーの揺らぎは、フォノン 1 個がもつ平均熱エネルギーに個数の揺らぎをかければよく

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

となる。したがって、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。ただし、 ξ は温度計の感度や雑音によって決まるパラメータ (~ 1) である。これより、エネルギー分解能を高めるためには、熱容量 C を小さくするか温度 T を低くすれば良いことがわかる。固体物理学によると、低温極限での C は T^3 に比例するため、式 (2.8) は

$$\Delta E \propto T^{\frac{5}{2}} \quad (2.9)$$

となる。結果、温度を下げることによってエネルギー分解能を大きく向上させることができる。

2.2 SXS の構造

SXS の構造の模式図を図 2.3 に示す。大きく分けて検出器、波形処理系、電源系、衛星ネットワークルーター、冷凍機系で構成されている。それぞれについて以下に述べる。

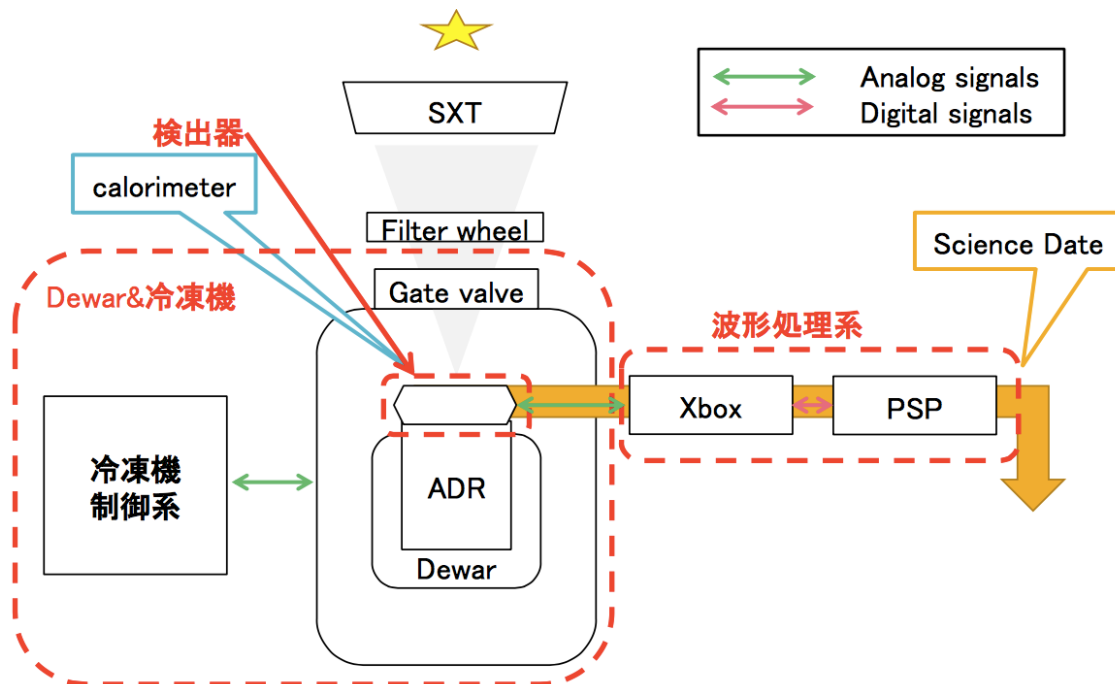


図 2.3: SXS の模式図

2.2.1 検出器

X 線マイクロカロリメータ素子

X 線マイクロカロリメータは NASA/GSFC が中心となって開発された。1 ピクセルの一边 $814\ \mu\text{m}$ の正方形の素子が 6×6 のアレイ状に配置されており、それぞれが独立に光子を検出できるようになっている。36 ピクセルのうち 35 ピクセルが天体観測用に用いられ、一边 $5\ \text{mm}$ の正方形領域内に配置されている。残りの 1 ピクセルはアレイより外側に配置され、 ^{55}Fe を用いた較正線源が照射されている。

また、吸収体は HgTe に Cd を注入した合金を使用しており、すざく衛星で用いられていた HgTe と比較して、比熱が $1/4$ 程度に抑えられている。データの読み出しは 2.2.2 節で述べる X-ray BOX(XBOX) によって行われる。

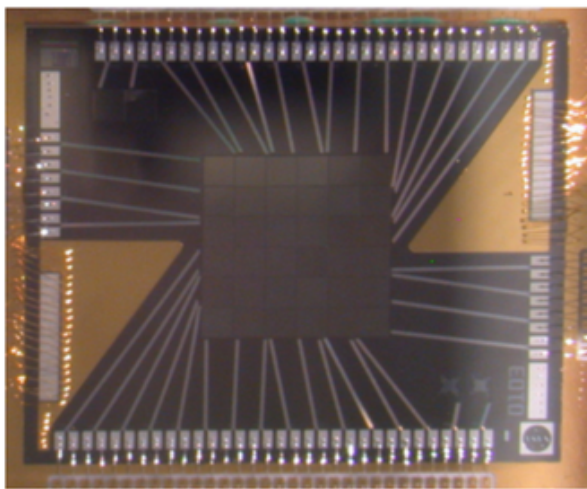


図 2.4: X 線マイクロカロリメータの素子 [4]

30	32	34	26	24	23
29	31	33	25	22	21
27	28	35	18	20	19
1	2	0	17	10	9
3	4	7	15	13	11
5	6	8	16	14	

12

図 2.5: ピクセルの配置番号 [2]

反同時計数検出器

X 線マイクロカロリメータの下には、図 2.6 のように反同時計数検出器 (antico-cocidence) が配置されている。これは、宇宙線などの高エネルギー荷電粒子バックグラウンドを反同時計数によって除去する役割をする。反同時計数検出器も同様に、NASA/GSFC によって開発された。大きさは一边が $1\ \text{cm}$ の正方形、厚さは $500\ \mu\text{m}$ である。Si 半導体の片面に Br を、もう片面に P を注入している。データの読み出しは X 線マイクロカロリメータと同様に、XBOX によって行われる。

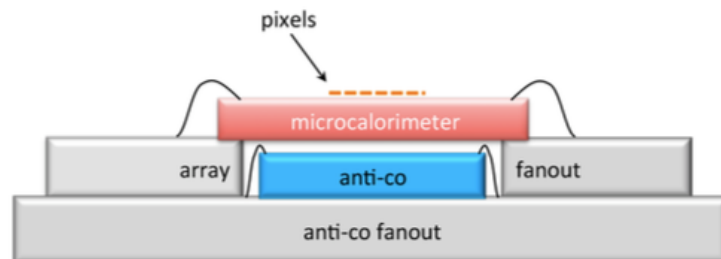


図 2.6: 横からみた検出器の模式図 [4]

2.2.2 信号処理系

X-ray amplifier Box (XBox)

XBox は SXS のアナログ信号処理装置であり、NASA/GSFC を中心に開発が進められた。XBox は X 線マイクロ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、増幅や 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 X 線マイクロカロリメータアレイ 18 ch + 反同時計数検出器 1 ch の信号を処理する。反同時計数検出器は 1 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差動信号としてデジタル波形処理装置の A/B それぞれの対応する系に送られる。また、XBox はデータ処理以外にも、X 線マイクロ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 Proccer (PSP)

SXS のデジタル波形処理装置は Pulse Shape Processor (PSP) と呼ばれ、ISAS/JAXA、三菱重工業株式会社、埼玉大学、首都大学東京、立教大学などの日本の多くの機関が開発した。PSP にも XBox と同様に A 系と B 系の 2 系統が存在する。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信し、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。X 線マイクロカロリメータの高分解能を生かすために、波形処理にも高い質が求められる。PSP については第 3 章で詳細を説明する。

2.2.3 Dewar & 冷凍機

SXS には X 線マイクロカロリメータ検出器を冷却するために、Dewar と冷凍機を搭載している。Dewar の高さは約 1.3 m、直径は約 1 m である。ひとみ衛星のような低地球軌道衛星の内部温度は約 290 K であるが、検出器搭載部を 50 mK に保つため、真空中で断熱された 6 層構造をとっている。Dewar の構造の模式図を図 2.7 に示す。図 2.7 のように、Dewar 内部には 140 K、100 K、30 K、4.5 K、1.2 K、50 mK と徐々に低温になっている。

Dewar の 30 K の層までは、放射層の冷却と ジュールトムソン (JT) の冷却のため、2 台のスターリング (2ST) 冷凍機が使用されている。それぞれ 2 台の 2ST は通常時は 50 % の能力で運転している。もし 1 台が動作しなくなった場合、もう片方が 100 % で運転される冗長系をなしている。4.5 K の層では、He タンクへの負担を減らすために 4 He ジュールトムソン冷凍機 ($^4\text{HeJT}$) を 1 台使用されている。1.2 K の層では、超流動ヘリウム (LHe) によって冷却が行われる。最奥部の冷凍機に 2 つの断熱消磁冷凍機 (Adiabatic Demagnetization Refrigerator, ADR) が使用され

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。また、この He タンクと 4HeJT 層の間には ADR が 1 台あり、液体 He がなくなった後は代わりにこれが稼働して温度を保つ。この冷却システムを図 2.8 に示す。

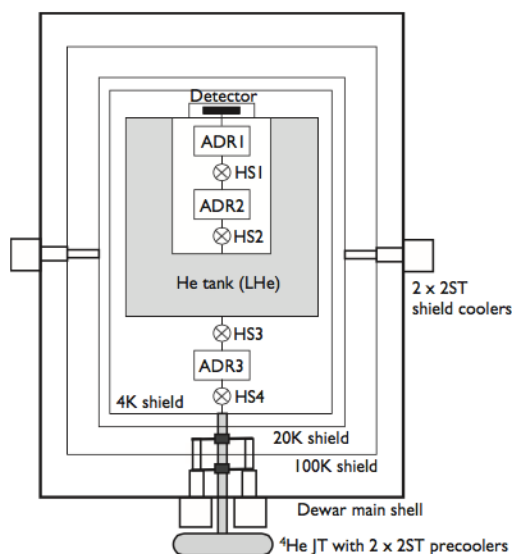


図 2.7: Dewar の構造の模式図 [4]

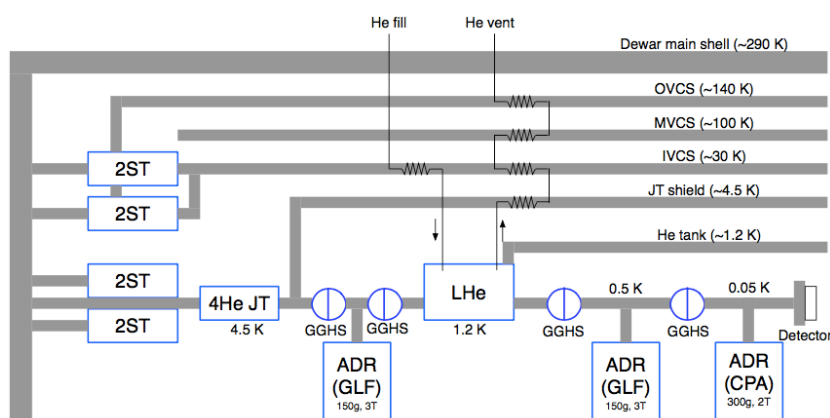


図 2.8: 冷却システム [4]

2.2.4 衛星ネットワークルーター SpaceWire

SpaceWire (SpW) はひとみ衛星で採用されている、LVDS による人工衛星の通信規格である。人工衛星に使用される通信システムはこれまで様々なものが用いられていたが、そのたびに規格の策定や開発期間を必要としていた。SpW はこの点を改善するために設けられた標準ネットワーク規格である。また、SXS の各デジタル機器と SpW ネットワークを接続するために、SpaceWire Router (SWR) を使用する。従来のネットワークと SpW のネットワークを図 2.9 に示す。図 2.9 のように、SWR を複数用いることによって網目状のネットワークの構成が可能である。そのため、従来のシステムと比較すると冗長系が組みやすく、回路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、信頼性が大きく向上している。さらに、標準規格として統一することにより、使用しやすく、保守しやすいというメリットもある。

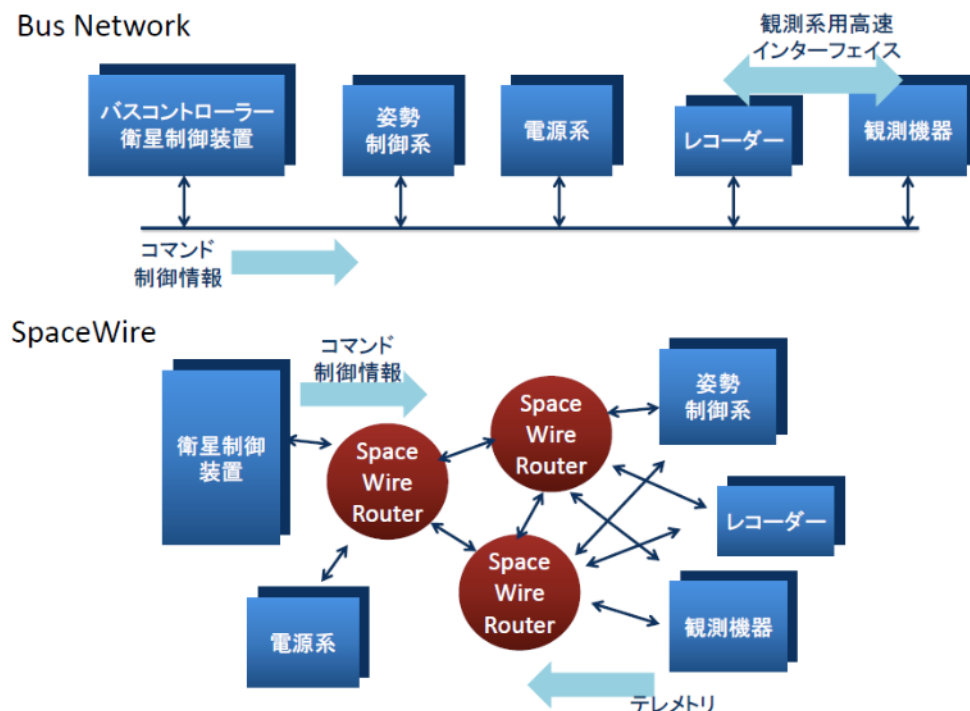


図 2.9: 従来のネットワークと SpaceWire [5]

2.2.5 フィルタホイール & X 線発生装置

X 線マイクロカロリメータは、入射 X 線光子に対するレスポンスが他の X 線検出器に比べると遅い。最大のカウントレートを 1 ピクセルあたり数 c/s 程度に抑える必要があるため、Dewar の前面にフィルタホイール (FW) を搭載している。FW は 3 種類の X 線用フィルタと 1 つの 較正用線源 (^{55}Fe)、Open の 6 つのポジションを取ることが可能である。観測目的・観測対象に応じて適切なフィルタ等を選択することができる。FW には較正用の X 線発生装置 (Modulated X-ray Source, MXS) が搭載されており、一定の時間間隔で X 線マイクロカロリメータの全ピクセルに X 線を照射することが可能である。したがって、天体観測中でもエネルギー較正を行うことができる。

2.3 SXS への要求

SXS が科学的目標を達成するために設定された性能要求の中で、X 線マイクロカロリメータに課せられたものを表 2.1 にまとめる。図 2.10 に SXS の分光能力、図 2.11 に SXS の有効面積を示す。

表 2.1: SXS X 線マイクロカロリメータの性能要求 [2]

番号	項目	要求	目標
SSR-01	エネルギー分解能 (FWHM) [eV]	7	4
SSR-02	エネルギー帯域 [keV]	0.3 - 12.0	0.1 - 16
SSR-03	未処理バックグラウンド [$s^{-1} \text{ keV}^{-1}$]	1.5×10^{-3}	1.5×10^{-3}
SSR-04	視野 [arcmin^2]	2.9×2.9	2.9×2.9
SSR-05	検出器アレイ	6×6	6×6
SSR-06	角度分解能 in HPD [arcmin^2]	1.7	1.7
SSR-07	有効面積@1 keV [cm^2]	160	160
	有効面積@6 keV [cm^2]	210	210
SSR-08	寿命 [yr]	3	5
SSR-09	エネルギースケール精度 [eV]	2	1
	エネルギー分解能決定精度 [eV]	2	1
SSR-010	アレイ当たりのカウントレート [s^{-1}]	> 150	> 150
	ピクセル当たりのカウントレート [s^{-1}]	> 20	> 20
SSR-011	絶対時刻精度 [ms]	10	0.08
	時間分解能 [ms]	0.08	0.08

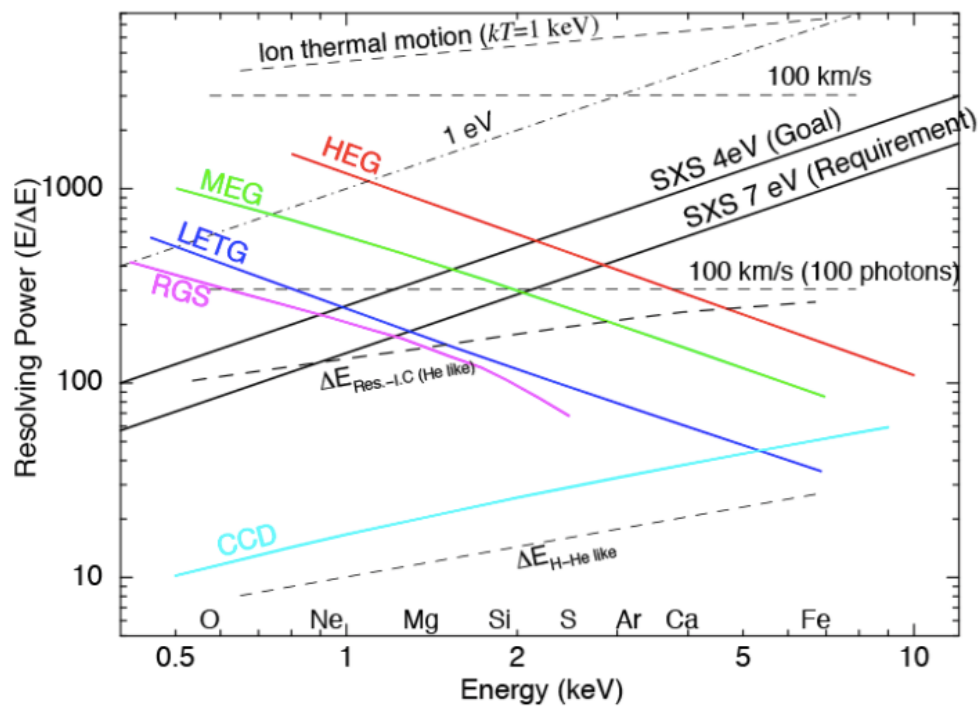


図 2.10: SXS の分光能力 [2]

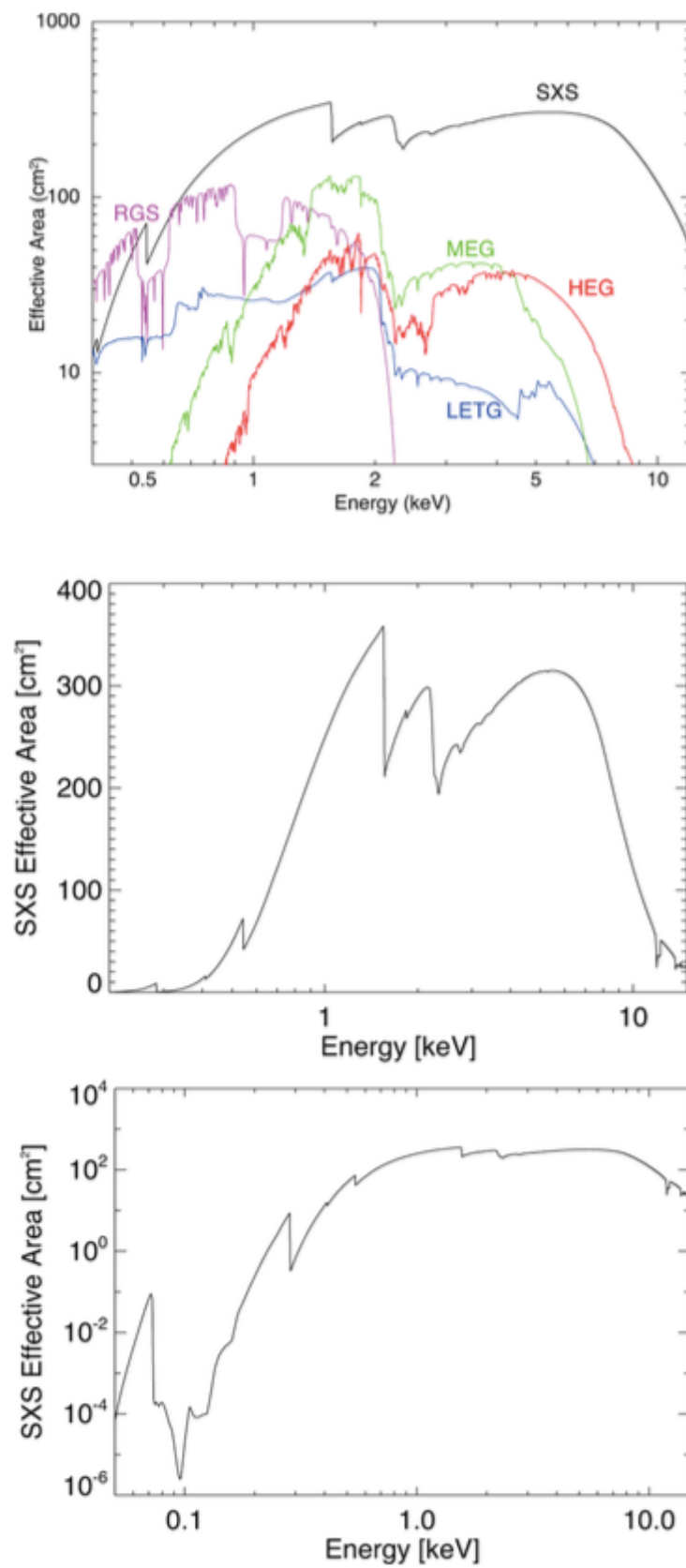


図 2.11: SXS の有効面積 [2]

第3章 デジタル波形処理装置 PSP

SXSのデジタル波形処理装置はPulse Shape Processor (PSP) と呼ばれ、ISAS/JAXA、三菱重工業株式会社、埼玉大学、首都大学東京、立教大学などの日本の多くの機関が開発した。第2章で述べたように、X線マイクロカロリメータは高分解能を発揮するが、その波形処理を精度良く求めなければ、エネルギー分解能は劣化してしまう。よって、SXSの性能要求を満たすよう、波形処理系を設計することが重要である。

3.1 PSP の構造

図 3.1 のように PSP は、XBox と同様に冗長系のため、PSP-A と PSP-B という機能的に同等で互いに独立な 2 つによって構成される。それぞれは $250 \times 350 \times 91.3$ mm、質量 4.011 kg の直方体型である。材質はアルミで、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ゾンで塗装されている。PSP は A/B 両系それぞれ、MIO ボード $\times 1$ 、SpaceCard ボード $\times 2$ 、PSU ボード $\times 1$ の 3 種類の機能をもつ 4 枚基板からなる。X 線マイクロカロリメータの全 36 ピクセルの内、0~17 ピクセルを PSP-A が、18~35 ピクセルを PSP-B が処理している。それぞれの基板の構造については、3.1.2 節以降で詳細に述べる。

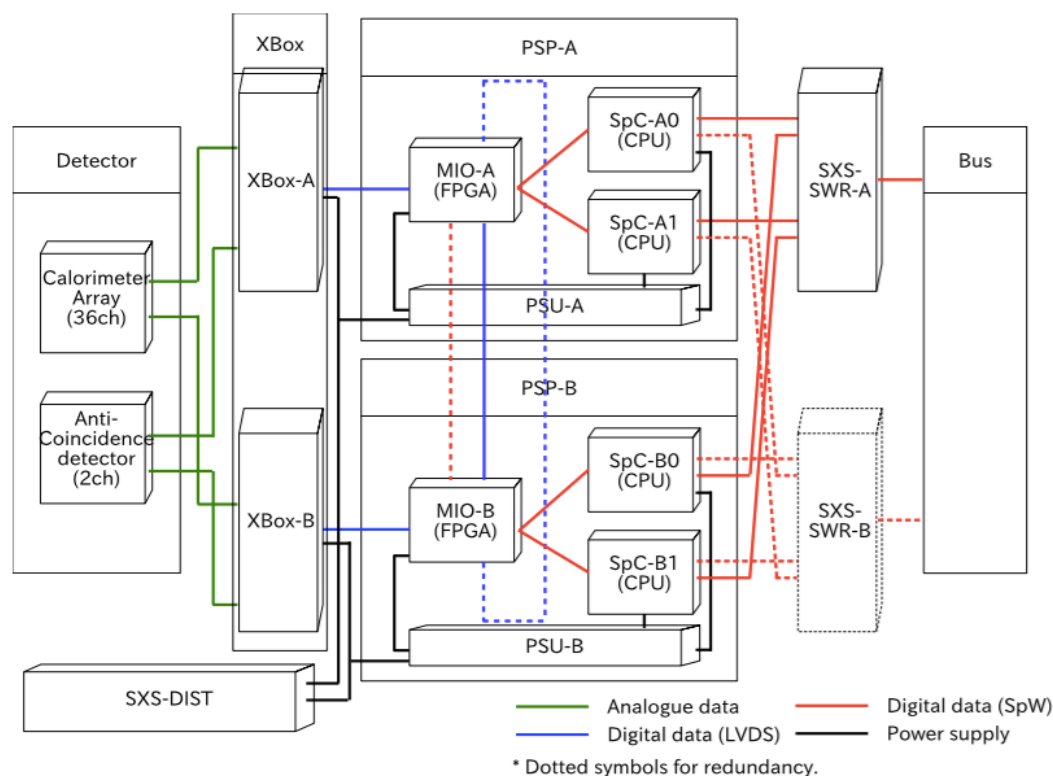


図 3.1: PSP の内部構造 [2]

3.1.1 通信システム

図 3.1 に示すように、PSP は XBox やルーターなどの機器同士との信号の通信に Low Voltage Differential Signaling (LVDS) を採用している。LVDS は電圧振幅が小さい信号を、ツイストペアケーブルを用いて転送する差動信号システムである。2 本の信号配線を使って同時に逆位相の信号を送っている。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 という低電圧を扱っているため、High - Low の電圧遷移時間が短くなり、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と比較すると、ケーブル全体の絶対電位が揺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受信側で排他的論理和をとることで、ノイズ成分だけを除去することができる。3 つ目は、逆位相の電流がクロスしているため、転送による周辺機器への電磁波として放射されるノイズを減らせることである。

この LVDS を利用した通信プロトコルが SpaceWire 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。1 枚の MIO ボードには 2 つの Field Programmable Gate Array (FPGA)、水晶発振子、データ保存に利用される SDRAM(64 MB) を搭載している。それぞれの FPGA は、SpW-FPGA、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いる。一方で、User-FPGA のロジックは PSP 用にカスタマイズされている。これについては 3.2.1 節で詳細に述べる。

SDRAM のバスのアクセス長は 32 bit である。ボード上の水晶発振子は 20 MHz のクロックを生成し、ここからさらに 2 つのクロック Base clock(5 MHz)、Sampling clock(15.625 kHz) を生成している。

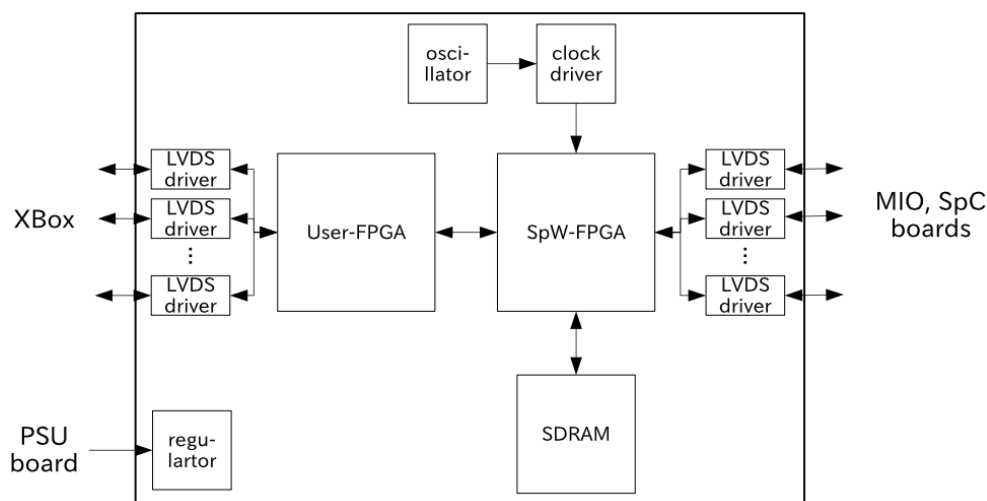


図 3.2: MIO ボードのブロックダイアグラム [2]

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。1 枚の SpaceCard ボードには CPU、MIO ボードと同様の SpW-FPGA、水晶発振子、SDRAM、SRAM(4 MB)、EEPROM(2 MB) を

1 つずつ搭載している。LVDS によって、データを両 MIO ボードや SpW ルーターと送受信している。SRAM はメインプログラムの動作用、EEPROM はメインプログラムの保存用として使用される。

SpaceCard ボードは 1 枚の MIO ボードに対し 2 枚ある。MIO ボードで処理された 18 ピクセル分のデータをさらに半分に分割し、それぞれ 9 ピクセルずつ処理をする。較正用のピクセル 12 は SpaceCard-A1 が担当する。

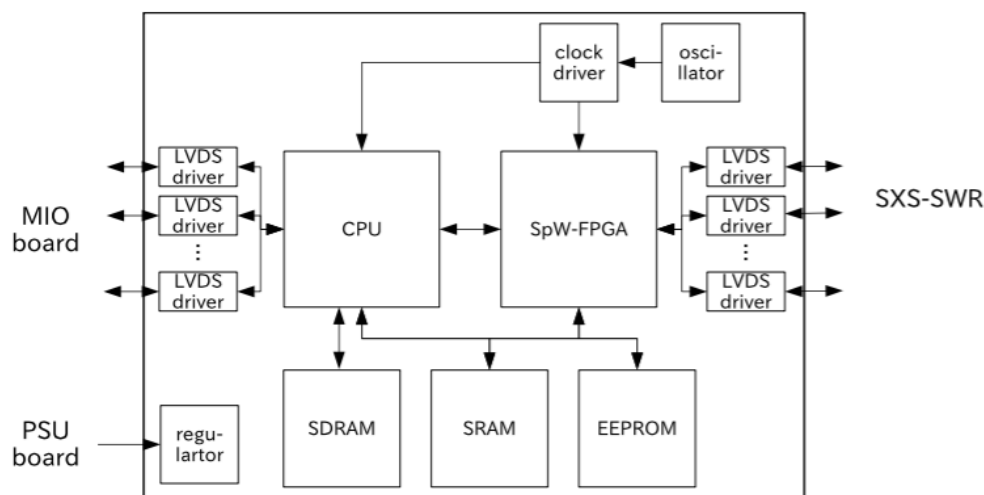


図 3.3: SpaceCard ボードのブロックダイアグラム [2]

3.1.4 PSU (電源) ボード

Power Supply Board (PSU) ボードのブロックダイアグラムを図 3.4 に示す。PSU ボードは供給されたバス電源を変圧し、他のボードに供給している。具体的には、32.1 - 52 V の範囲の直流一次電圧を 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のみ使用される。

また、PSU ボードは電源のノイズを削減するフィルタを 3.3 V と 12 V の両方に持っている。FET スイッチを使う電源ラインにはカレントリミッタが付いている。カレントリミッタが電源ラインの過電流を検出した場合、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の状態を持続する。

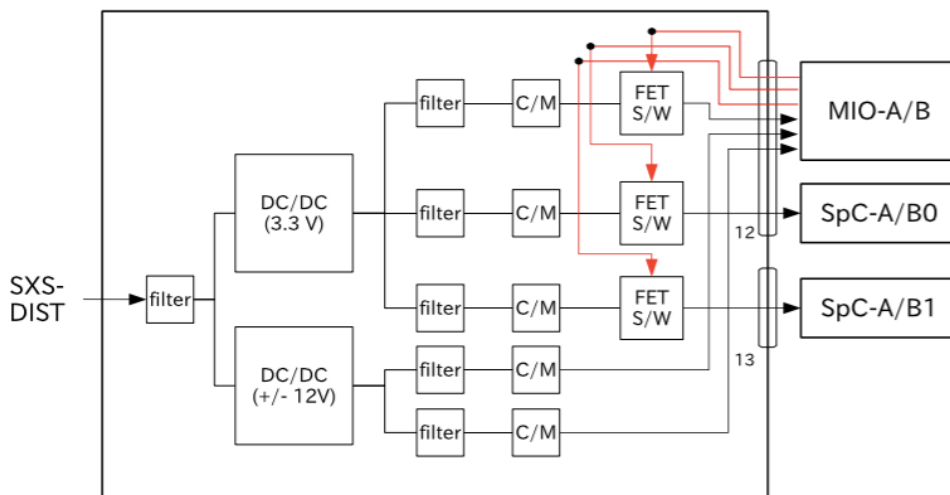


図 3.4: PSU ボードのブロックダイアグラム [2]

3.2 データ処理

PSP は XBox からデジタル変換されたデータを受信すると、データの中から X 線イベントを探し波高値解析を行う。検出された X 線イベント波形はエネルギーに依存した波高値を持っている。そのため、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、第 2 章でも述べた通り、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、波高を直接測定するだけでは、精度良くエネルギーを求めることはできない。そこで、波高値はテンプレート波形を用いた最適フィルタ処理により入射 X 線光子のエネルギーの値を測定する。

PSP では波形処理を MIO ボードと SpaceCard ボードで分担して行う。それぞれのボードの処理について、詳細に説明する。

MIO ボード

- (a) データ受信
- (b) データのチェック
- (c) derivative 計算
- (d) パルス検出

SpaceCard ボード

- (e) データ読み出し
- (f) セカンドパルス検出
- (g) グレード付け
- (h) 波高値解析
- (i) テンプレート計算

3.2.1 MIO ボード

MIO ボードで計算を行っているのは User-FPGA である。SpaceCard ボードと比較すると、MIO ボードは単純な計算を高速で行うことができるという特長を持つ。これ以降、ある時刻の全ピクセルと anti-co 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 とする。

(a) データ受信

データは sample の繋がりとして MIO ボードに送信され、サンプリングクロックの立ち上がりによって 400 bit ずつに区切られる。

(b) データのチェック

demultiplex (分解)

実質的には、1 sample の長さは 312 bit である。その中身は、カロリメータ 18 ピクセル (各 16 bit) + anti-coincidence 1 ch (16 bit) + sciRecvCnt (8 bit) の 3 種類で構成される。sciRecvCnt (8 bit) とは、sample 毎にカウントを増加させるものである。残りの 88 bit は常に 0 の値を示す spare bit であり、データとしては使用されない。PSP はピクセルごとに別々に処理を行うため、これらをピクセル毎の情報に分解 (demultiplex) する必要がある。1 sample の内訳を図 3.5 に示す。

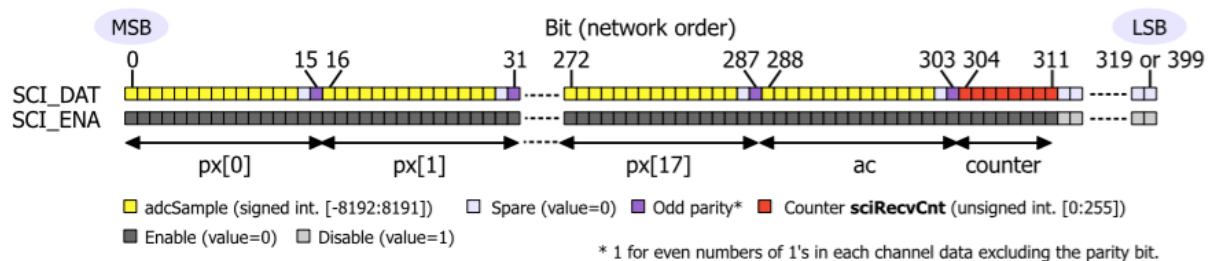


図 3.5: 1 sample の構成 [2]

エラーチェック

demultiplex の前に、受信データのエラーチェックが行われる。各 sample 毎に下記のエラー条件と照らし合わせ、sample にフラグ付けをする。

- sciLenErrCnt sample 長が 312 bit ではない
- sciCntErrCnt 直前の sample との sciRecvCnt の差が +1 ではない

どちらかを検知されると、対応するエラーカウントが増加し、sampleErr フラグが 1 となる。

この後、demultiplex が行われる。demultiplex の終了後、データがクリップされているかを検証する。

- pxClipCnt ADC sample が上限値 (8192) か下限値 (-8191) をとっている

このフラグは、このデータが 14 bit で表現することができないことを示している。

次に、各データの channel error をチェックする。

- parityErrCnt 18 ピクセルと 1 anti-co のどちらかに parity エラーがある

いずれかのチャンネルでこのエラーを検知した場合、そのエラーカウントが増加し、channelErr も 1 となる。

これらの処理の終了後、データとエラーはバッファに格納される。ADC sample は、pxAdcSample という名前で、ピクセル番号の pxDelayBuf に格納される。この pxDelayBuf は 1536 bits (= 96

samples × 16 bit) の大きさを持つ。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 に置換される。最初の sample にエラーがあった場合は、代わりに 0 を格納する。また、anti-co データは acDelayBuf に格納される。一方、sciRecvCnt はエラーの存在した sample もそのままの値で、sciRecvCntDelayBuf に格納される。

(c) derivative 計算

ADC sample の時間微分 (derivative) をの計算を行う。SXS の生波形の時定数は約 1 ms であるが、derivative を用いることによって立ち上がりが早くなり、検出しやすくなる。この微分の計算式は以下である。

$$\begin{aligned} \text{derivLong}(i) &= \sum_{i'=0}^{\text{derivHalfLen}-1} \text{pxAdcSample}(i+i') \\ &\quad - \sum_{i'=-\text{derivHalfLen}}^{-1} \text{pxAdcSample}(i+i') \\ &= \text{derivLong}(i-1) + \text{pxAdcSample}(i+\text{derivHalfLen}-1) \\ &\quad - 2\text{pxAdcSample}(i-1) + \text{pxAdcSample}(i-\text{derivHalfLen}-1) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\text{derivative}(i) = \frac{\text{derivLong}(i) + 2^{\text{derivShift}-1}}{2^{\text{derivShift}}} \quad (3.2)$$

ここで、derivHalfLen は derivative 計算の長さを決定するパラメータである。0 ~ 31 の値をとるが、デフォルト値は 8 である。derivHalfLen = 0 のときは、derivHalfLen=32 として考慮する。derivLong の計算法は、pxAdcSample(i) を起点とし、その前の derivHalfLen-1 個のデータに+1 を、その後の derivHalfLen 個のデータに-1 を掛け、それらの差分をとることで求まる。この derivLong は 20 bit で計算された derivative の全長である。したがって、derivative は上記のように求まり、derivLong を $2^{\text{derivShift}-1}$ で割った 16 bit で表される。derivShift はビットシフトの数であり、derivHalfLen の値によって表 3.1 のように決まる。

表 3.1: derivShift と derivHalfLen の関係 [2]

derivShift	derivHalfLen
0	$1 \leq \text{derivHalfLen} \leq 2$
1	$3 \leq \text{derivHalfLen} \leq 4$
2	$5 \leq \text{derivHalfLen} \leq 8$
3	$9 \leq \text{derivHalfLen} \leq 16$
4	$17 \leq \text{derivHalfLen} \leq 32$

計算後、pxAdcSample(i) と derivative はピクセル毎に SDRAM 上の Wave Form Ring Buffer (WFRB) に格納される。WFRB は 1 MB (= 262144 samples × (ADC sample 16 bit + derivative 16 bit)) の容量を持つ。WFRB には連続的にデータが記録され、一杯になると書込みがバッファの先頭に戻り、古いデータから上書きされていく。12.5 (15.625) kHz で書込みが続けられるので、約 21(17) 秒で一杯となる。

(d) パルス検出

パルス検出は WFRB に格納されている derivative のデータを用いて、User-FPGA のステートマシンを利用して行われる。このステートマシンへの入力信号は WFRB に格納された ADC sample と derivative の 2 つ、出力信号は DERIV_MAX、QUICK_DOUBLE、LO RES PH、TRIG LP の 4 つである。ステートマシンの状態は 6 種類ある。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。

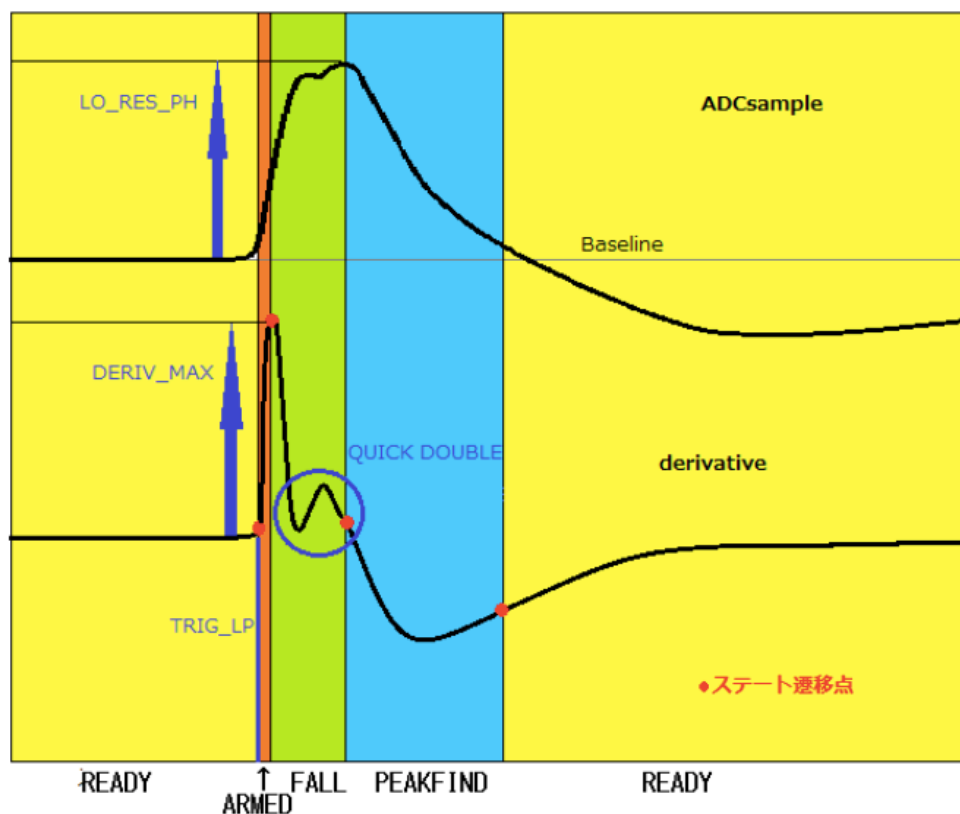


図 3.6: パルス検出におけるステートと波形の関係 [3]

INST, STEDY

まず、電源が入ると INST ステートに入る。INST, STEDY でモジュールの初期化が行われる。

READY

初期化を終えると、READY ステートに移る。ここでは、derivative の値が閾値 `pxPulseThres` を超えるとパルスがトリガされる。その後、MRMED ステートに移る。

$$\text{pxPulseThres} \leq \text{derivative} \quad (3.3)$$

また、トリガと同時に LO_RES_PH 決定のための基準となるベースライン Baseline の計算を行う。計算式を以下に示す。さらに、TRIG_LP が記録される。

$$\text{Baseline}(i) = \frac{1}{2^P} \times \left(\sum_{i'=G+1}^{2^P+G} \text{pxAdcSample}(i - i') + 2^{P-1} \right) \quad (3.4)$$

ARMED

derivative が減少に転じるまで続くステートである。

$$\text{derivative} < \text{derivPre} \quad (3.5)$$

ここで、derivPre はある点を基準としたその一つ前の derivative 値を表している。また、このステートでは pxAdcSample と derivative の最大値が探され、それぞれ pxAdcSample と derivativeMax へ格納される。後者を DERIV_MAX と呼ぶ。このステートで別のイベントが入ってしまった場合、データは破棄される。

FALL

このステートは、derivative のピークから終了の閾値以下になるまで続く。ARMED ステートと同様に、pxAdcSample と derivative の最大値が探される。

$$\text{derivative} < \text{pxFallEndThres} \quad (3.6)$$

このステートの間は derivative は減少を続けるはずであるが、減少の途中で他のイベントの入射した場合、再度増加する。このイベントを QUICK_DOUBLE と呼ぶ。直前の derivative 値との差分が、QUICK_DOUBLE の閾値 pxQuickDoubleThres を超えた場合、QUICK_DOUBLE フラグとしてカウントする。

$$\text{derivative} - \text{derivPre} \leq \text{pxQuickDoubleThres} \quad (3.7)$$

PEAKFIND

式 (3.6) を満たしこのステートに移ると、pxAdcSampleMax が探される。pxAdcSampleMax は ADC sample の最大値である。ARMED と FALL ステートとは異なり、derivative の最大値は探されない。このステートは以下の 2 点のどちらかを満たすまで継続する。

- PEAKEND ステートの開始後、sample 数がある一定の長さを超えた場合
- pxAdcSampleMax が更新された後、sample 数がある一定の長さを超えた場合

$$\text{pxPFStateCntMax} \leq \text{pxPFStateCntMax} \quad (3.8)$$

このステートの最後で LO_RES_PH の計算が行われる。derivative の最大値と READY ステートで計算された Baseline との差分によって求めることができ、以下の式 (3.9) で示される。

$$\text{LO_RES_PH} = \text{deriv_max} - \text{Baseline} \quad (3.9)$$

計算結果が負になった場合は、0 を格納する。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、SDRAM 上の Event Dual Buffer (EDB) に格納される。このステートの後は、再度 READY に戻る。

3.2.2 SpaceCard ボード

SpaceCard ボードでは CPU が演算を行っている。MIO ボードと比較すると、SpaceCard ボードの方が複雑な計算を行うことが可能である。

(e) データ読み出し

まず始めに CPU は、MIO ボードの EDB のトリガ情報を読み出す。EDB の保存領域は 2 面あり、片面で MIO ボードの User-FPGA がデータを書き込んでいる間、CPU はもう片面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 に格納する。1 つのイベント波形データは、トリガされた ADC sample、そこから過去の 219 ADC sample、未来の 874 ADC sample の全 1024ADC sample と定義されている。

(f) セカンドパルス検出

CPU では、pxEvent1stFIFO に格納された全イベントデータの中で、MIO ボードの 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。セカンドパルスは ADC sample と derivative、それぞれ生データから平均波形を引いた差分から探される。セカンドパルス検出の概要を図 3.7 に、計算式を以下に示す。

$$\text{adcSample}_{\text{sub}}(i) = \text{adcSample}(i) - \sum_{n=1}^N \frac{\text{lowResPH}_n}{\text{lowResPH}_{\text{avg}}} \text{adcSample}_{\text{avg}}(i - \Delta i_n) \quad (3.10)$$

$$\text{derivative}_{\text{sub}}(i) = \text{derivative}(i) - \sum_{n=1}^N \frac{\text{dervMax}_n}{\text{dervMax}_{\text{avg}}} \text{derivative}_{\text{avg}}(i - \Delta i_n) \quad (3.11)$$

ここで、 n は波形の番号、 i は波形の中のデータ番号、 $_{\text{sub}}$ は差分、 $_{\text{avg}}$ は平均波形の値を表している。 Δi_n は n 番目の波形の time shift である。time shift とは、生波形と平均波形の間で derivMax の位置を一致させるためのパラメータである。セカンドパルスは $\text{derivative}_{\text{sub}}$ が閾値 pxPulseThres を超えたときトリガされる。

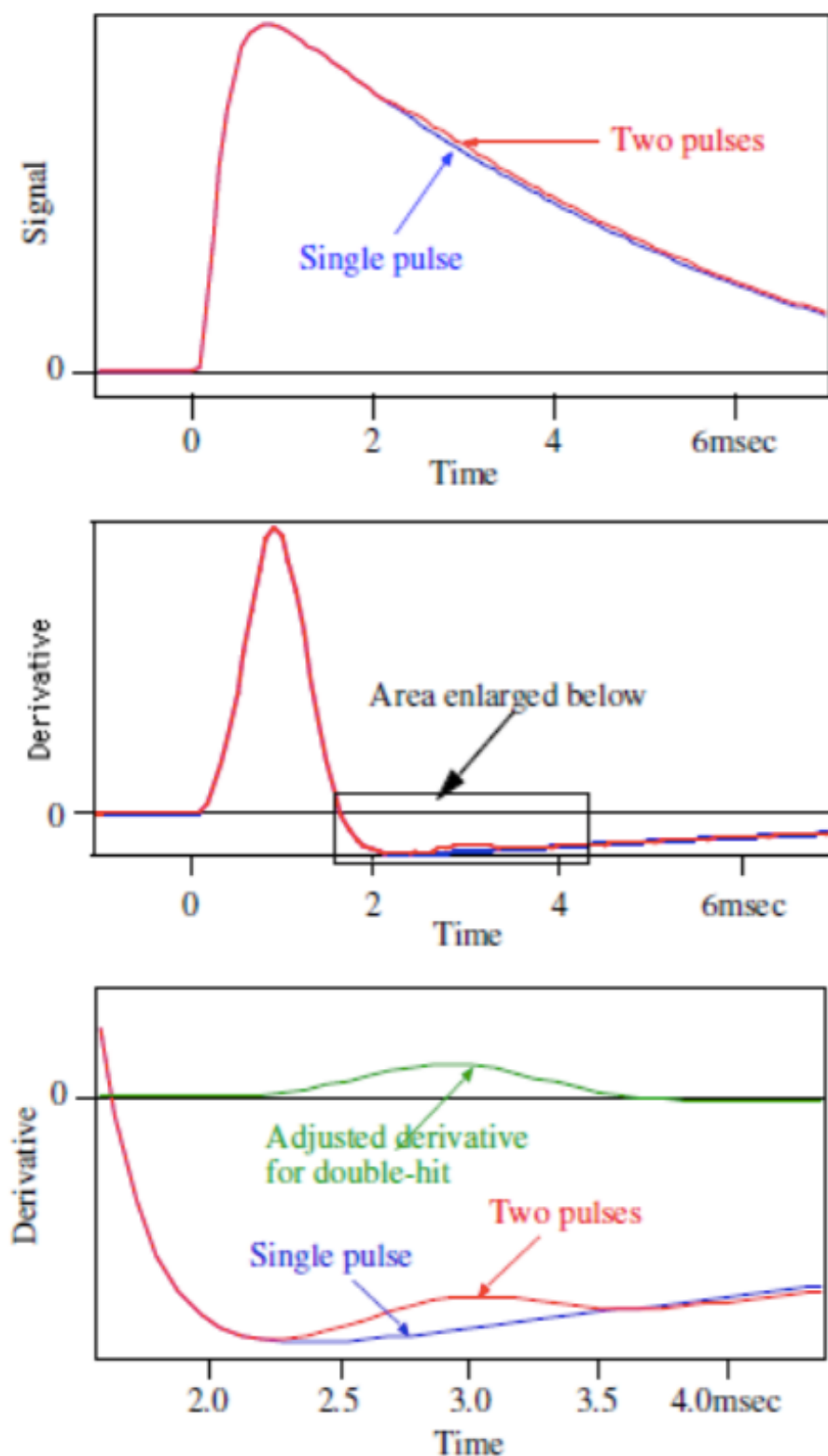


図 3.7: セカンドパルス検出の概要。上図：微分前の波形。赤はセカンドパルスを含み、青は含まない。中央図：上図の微分波形。下図：中央図のセカンドパルス部分を拡大した図。赤 - 愛が緑の波形。 [2]

(g) グレード付け

セカンドパルス検出後、イベントごとにグレード付けという処理が行われる。グレード付けとは、イベントのトリガ時刻とその前後との時間間隔ごとに 3 種類に分類する処理である。グレード付けの定義を図 3.9 に示す。

グレードは High Resolution(HR)、Medium Resolution(MR)、Low Resolution(LR) の 3 種類である。HR イベントは、トリガされた時刻から前後 874 ADC sample の間に他のイベントが入射していないものを指す。同様に、MR イベントは前後 256 ADC sample の間に他のイベントが入射していないものである。どちらにも当てはまらないイベントを LR として処理される。さらにイベントの前後関係によって決定される、前のイベントを primary(p)、後ろのイベント secondary(s) の 2 種類に分類する。この 2 つの分類を組み合わせ、Hp、Mp、Ms、Lp、Ls の 5 種類で分けられ処理される。

イベントのエネルギー分解能は、前後のパルスによる波形の歪みが少ないほど良くなる。よって、時間間隔では High > Midium > Low、前後関係では primary > secondary となる。。High、Medium イベントはこの後、最適フィルタ処理により詳細な波高値解析が行われる。Low イベントは User-FPGA で計算された LO_RES_PH がそのまま波高値として採用される。

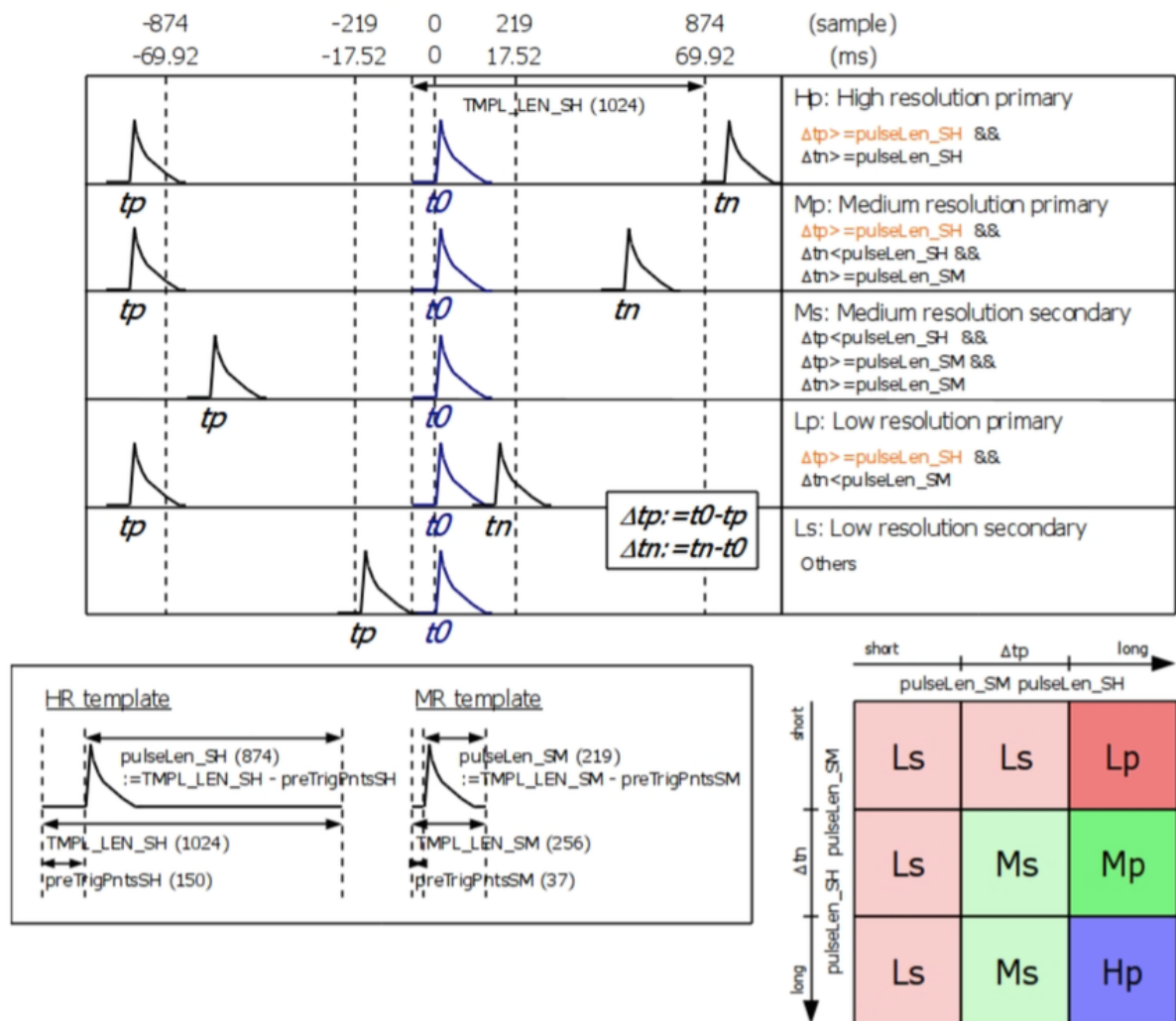


図 3.8: グレードの定義 [2]

(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詳細に計算される。まずその数学的背景について述べる。ノイズのない信号を $S(\omega)$ とノイズのパワースペクトルを $N(\omega)$ と表す。 $S(\omega)$ は規格化されているとする。処理されるデータを $D(\omega)$ とすると、信号の波高値 H を用い

$$D(\omega) = HS(\omega) + N(\omega) \quad (3.12)$$

と分解できる。 H のベストフィットの値は、以下の χ^2 が最小になるように決定される。

$$\chi^2 \equiv \sum_{\omega} \frac{|D(\omega) - HS(\omega)|^2}{|N(\omega)|^2} \quad (3.13)$$

$\frac{\partial}{\partial H} \chi^2 = 0$ から、 H が以下のように求まる

$$H = \frac{\sum_{\omega} \frac{D(\omega)S^*(\omega) + D^*(\omega)S(\omega)}{|N(\omega)|^2}}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2} \quad (3.14)$$

アスタリスクは複素共役を表す。 $D(\omega)$ と $S(\omega)$ は実関数のフーリエ変換であるため、 $D(-\omega) = D^*(\omega)$ 、 $S(-\omega) = S^*(\omega)$ となり

$$D(\omega)S^*(\omega) = D(-\omega)S^*(\omega) = D^*(\omega)S(\omega) \quad (3.15)$$

よって、 H は

$$H = \frac{\sum_{\omega} \frac{D(\omega)S^*(\omega)}{2|N(\omega)|^2}}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2} \quad (3.16)$$

または、

$$H = \frac{\sum_{\omega} \frac{D(\omega)}{S(\omega)} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2} \quad (3.17)$$

式 (3.17) は、 H が $\left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2$ を重みとしたときの $\frac{D(\omega)}{S(\omega)}$ の平均値を表している。ここで、周波数空間でのテンプレート $F(\omega)$ を

$$F(\omega) \equiv \frac{S(\omega)}{|N(\omega)|^2} \frac{1}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2} \quad (3.18)$$

と定義する。これを逆フーリエ変換して時間空間に戻すと、 H が求まる。

$$H = \sum_t D(t)F(t) \quad (3.19)$$

これが最適フィルタ処理である。検出した波形 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、ノイズのない波形 S とクロスコリ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の寄与が抑えられる。

実際のソフトウェア上での処理は、テンプレート波形を固定し、生データの ADC sample を時間軸方向の前後にシフトされることで計算される。この範囲は $-8 \leq j \leq 7$ である。以下の波高値 (PHA(j)) が最大となる j が探される。和はテンプレートの範囲でとられる。

$$\text{PHA}(j) = \sum_i \text{template}(i) \times \text{AdcSample}(i+j) \quad (3.20)$$

この j を TICK_SHIFT という。 j の決定後、上位 3 点に対して内挿法を用い、サンプリングクロックの $1/16$ の分解能で PHA_{peak} と time vernier が計算される。

$$\text{PHA}_{\text{peak}} = \text{PHA}(j) + \frac{1}{8} \left(\frac{\{\text{PHA}(j+1) - \text{PHA}(j-1)\}^2}{2\text{PHA}(j) - \text{PHA}(j+1) - \text{PHA}(j-1)} \right) \quad (3.21)$$

$$\text{time vernier} = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{PHA}(j+1) - \text{PHA}(j-1)}{2\text{PHA}(j) - \text{PHA}(j+1) - \text{PHA}(j-1)} \right) \quad (3.22)$$

(i) テンプレート計算

波高値解析と並行して、最適フィルタ処理で用いられるテンプレートの計算が行われている。テンプレート波形は、(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、単一尾パルスで構成された数百個の波形を平均して作られ、これを平均波形と呼ぶ。ノイズ波形は、バックグラウンド成分を数百個平均して作成される。ノイズの主要成分は、ジョンソンノイズ、フォトンノイズ、読み出しノイズである。実際のノイズのない波形 (平均波形)、ノイズ波形、テンプレート波形をそれぞれ図 3.9、3.10、3.11 に示す。

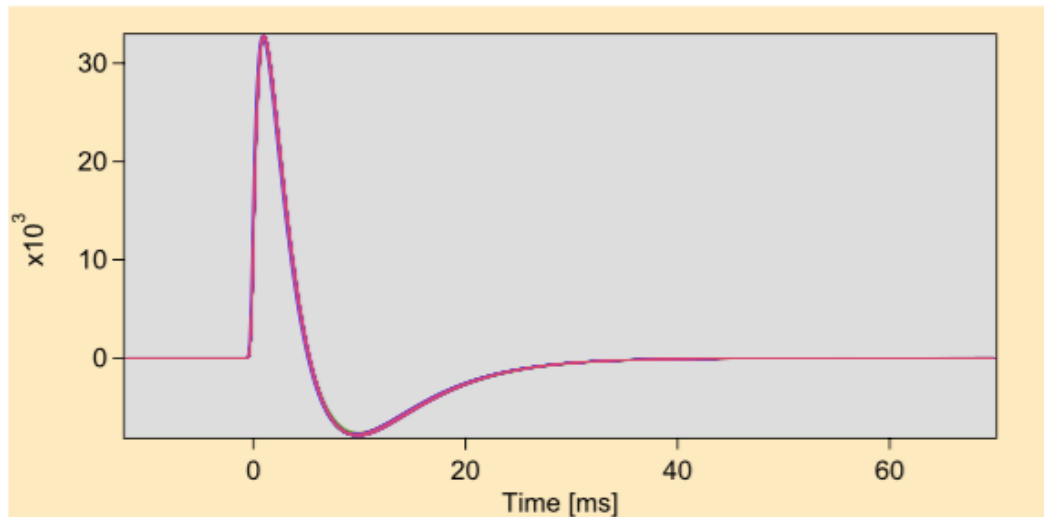


図 3.9: 時間空間でのノイズのない波形 (平均波形) [2]

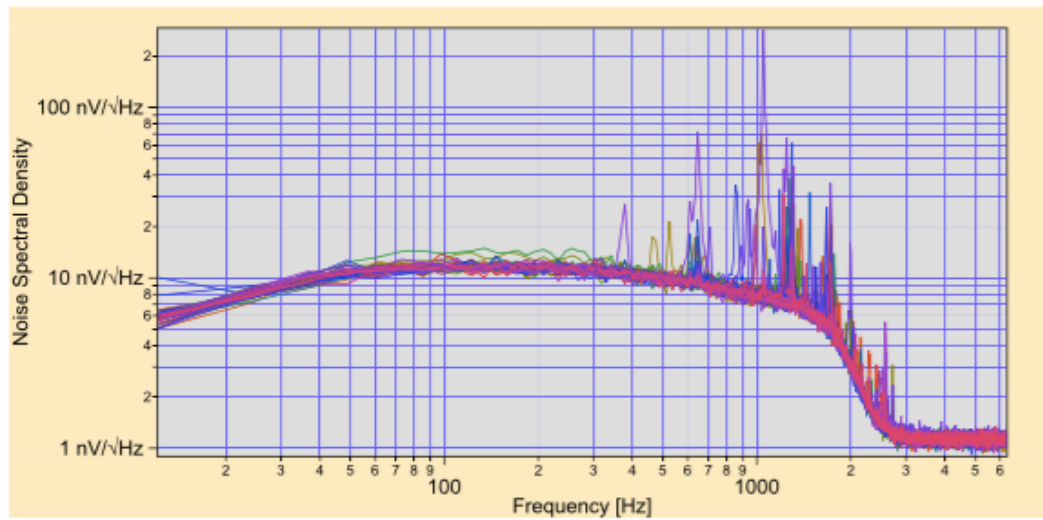


図 3.10: 時間空間でのノイズ波形 [2]

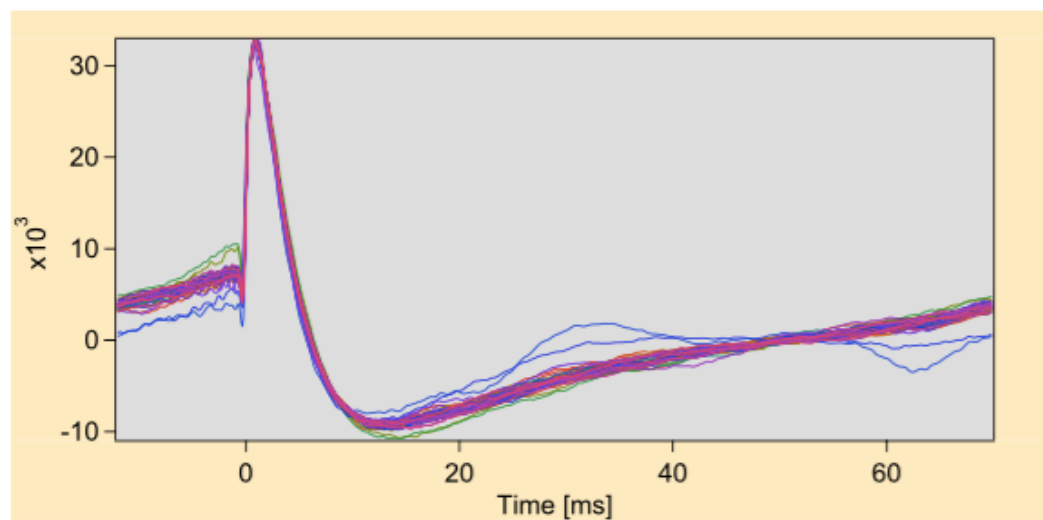


図 3.11: 時間空間でのテンプレート波形 [2]

3.3 正規イベントと非正規イベント

PSP で検出するイベントは、全て使用できるものとは限らない。検出イベントの中でも、正規イベントのみ抜き出したいため除去すべき非正規イベントがある。それらは

- (1) 波形の中に複数のイベントが重畳しているもの
- (2) X 線マイクロカロリメータのピクセル外に X 線光子が入射してきたもの
- (3) 電氣的・熱的なクロストークによるもの

の 3 種類に分けられる。

(1) に該当するものは 3 種類ある。(a) 検出したイベントの時間間隔の短いもの。PSP では正確なエネルギー測定を行うために、最適フィルタ処理用のテンプレート長に合わせて、波形のトリガ時間間隔ごとに 3 種に分類して処理をする。(b) イベントの到来時刻が決定できないほど近接した、イベントの入射直後に入射する別のイベントの検知。(c) 重畳のためテンプレート波形とは立ち上がり時間 (RISE_TIME) の異なるイベントであり、より遅い RISE_TIME を有するもの。

(2) に該当するものは 2 種類ある。(a) 波形の RISE_TIME がテンプレート波形よりも短いもの。PSP ではグレード付けで時間間隔の長い方から 2 つに分類された波形にのみ、最適フィルタ処理を行う。このとき、単一光子イベントと著しく異なる波形の場合、テンプレートを大きくシフトさせなければならない。(b) 波形の RISE_TIME がテンプレート波形よりも遅いもの。

(3) に該当する波形は他とは異なり、急激な温度変化を有し、波高値が小さいことを特徴とする。

3.4 性能要求

SXS の科学目標を達成するために、PSP にも個別の性能要求が設定されている。性能要求のうち、カロリメータの処理に関することのみ示す。これを下記にまとめる。また、SXS の要求のどの項目と対応しているかを表に示す。

エネルギーレンジ

CR-P01 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、打ち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。

CR-P02 12.0 keV まで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 ピークの波高値が $> 5 \times (\text{rms noise})$ のパルスを検出する。

CR-P04 $> 5 \text{ ms}$ の間隔を空けて到来した全てのパルスを検出する。

CR-P05 $> 2 \text{ ms}$ の間隔を空けて到来した全てのパルスを検出する。2 つの連続したパルスは、 $> 1/30$ のコントラストを持つ。

CR-P06 全てのパルスにグレードを付ける。それは、High Resolution(HR)、Medium Resolution(MR)、Low Resolution(LR) のいずれかと、primary、secondary のどちらかを組み合わせたものである。

ノイズバジェット

CR-P07 HR イベント処理はスペクトル分解能の劣化を 0.5 eV 以下にする。

CR-P08 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(FWHM) 以下にする。

CR-P09 LR イベント処理はスペクトル分解能の劣化を、HR イベントの分解能から 10 倍 (FWHM) 以下にする。

最大レート

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

CR-P11 最も明るいピクセルでは $20\text{ s}^{-1}\text{pixel}^{-1}$ のイベントレートで処理する。

ライブタイム

CR-P12 $< 2\%$ の dead time を持つパルスを全て検出する。ここでの dead time とは、パルスレコードの長さの範囲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である。

CR-P13 1% 未満の制度でパルスのライブタイムを決定する。

ライブタイム (anti-co)

CR-P14 dead time は 1 イベント当たり 5 ms 未満でなければならない。

その他

CR-P15 全てのイベントは 1 ms 未満の絶対時刻制度で時刻付けされる。ここでの絶対時刻制度とは、衛星から送信されるタイムコードによって定義される。

CR-P16 全てのイベントは $80\text{ }\mu\text{s}$ 未満の相対時刻制度で時刻付けされる。異なるピクセル間の絶対時刻の差として定義される。

CR-P17 XBox-A と XBox-B 間のサンプリングクロックのずれを $1\text{ }\mu\text{s}$ 未満とする。

表 3.2: SXS の性能要求と PSP の性能要求との対応 [2]

CR	Description	Sub-system requirements (SSR)										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P-01	Energy range		x									
P-02	Dynamic range		x							x		
P-03	Detection threshold	x	x	x						x		
P-04	Duplicated pulse(5 ms)	x						x		x		
P-05	Duplicated pulse(2 ms)	x						x		x		
P-06	Grading	x										
P-07	H resolution	x								x		
P-08	M resolution	x								x		
P-09	L resolution											
P-10	Array max rate										x	
P-11	Pixel max rate										x	
P-12	Pixel dead time	x						x				
P-13	Live time-accuracy											
P-14	Anti-co dead time			x								
P-15	Absolute timing											x
P-16	Relative timing											x
P-17	Clock sync											

第4章 光子弁別の検証

4.1 目的

3.3 節で述べたように、PSP で検出するイベントは、除去すべき非正規イベントを含んでいる。検出イベントの中でも、正規イベントのみ抜き出すことが必要である。そのため、上述のような特徴をもつ非正規イベント群を確認する。これを 3.3 節での、(1),(2),(3) の特徴で分類除去し、必要な X 線光子イベントを選択する。

4.2 試験設定

本論文で用いたデータは、MXS を用いて 2015 年 5 月～6 月につくば宇宙センターで行った MXS 照射実験のものである。約 2 ヶ月の試験のうち解析に用いたのは、6 月 26 日～6 月 28 日までとられた 2 日間のデータである。較正線源としては Cu の特性 X 線を使用している。MXS を照射しているピクセルはいくつかあるが、その中でも最も検出イベントの多かったピクセル 23 にのみ焦点を当て、検証を進めていく。

4.3 解析結果

まず、イベント波形の立ち上がり時間 RISE_TIME とエネルギーに比例する derivative の最大値 DERIV_MAX との相関を確認する。横軸を DERIV_MAX、縦軸を RISE_TIME、カラーバーをカウント数とする 2 次元ヒストグラムを図 4.1 に示す。

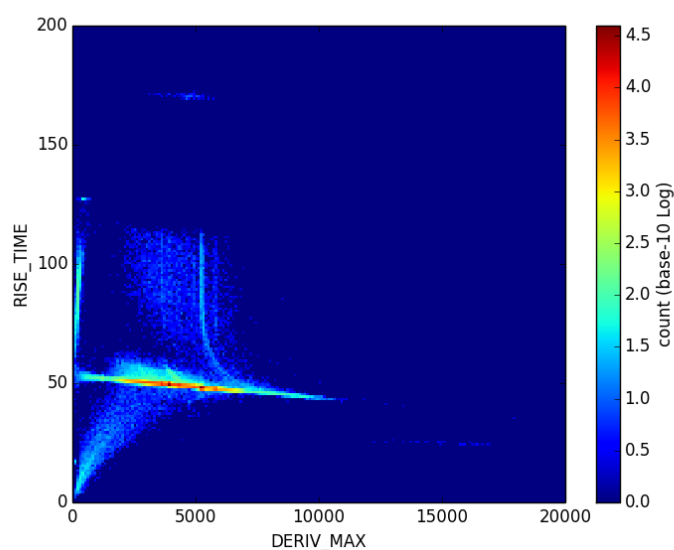


図 4.1: ピクセル 23 での DERIV_MAX vs RISE_TIME の相関

RISE_TIME はエネルギーに依存しないため、本来ならばこの相関をとったとき RISE_TIME=50 bins で一定になるはずである。しかし、複数の枝分かれ (ブランチ) が確認できた。これが非正規イベントであると考えられる。それぞれのブランチを 3 つのパラメータによって分類する。

また、DERIV_MAX のヒストグラムも作成する。これから、特性 X 線成分以外の非正規イベントが、4 つのパラメータによるセレクションによってどれだけ除去されるのかを確認していく。

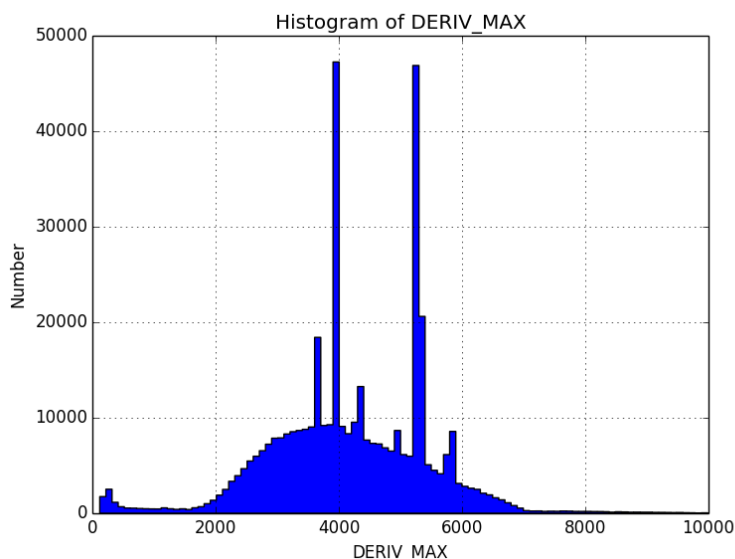


図 4.2: ピクセル 23 の DERIV_MAX のヒストグラム

4.3.1 グレードによる分類

まず初めに、イベント波形の中に複数のイベントが重畳することによって起こる影響について考える。検出イベントの時間間隔が短いと、前後のイベントの影響を受け波形の形が変化してしまう場合がある。それを分類するためにグレードによる 5 つの分類を行い、図 4.4 ~4.7 に示す。

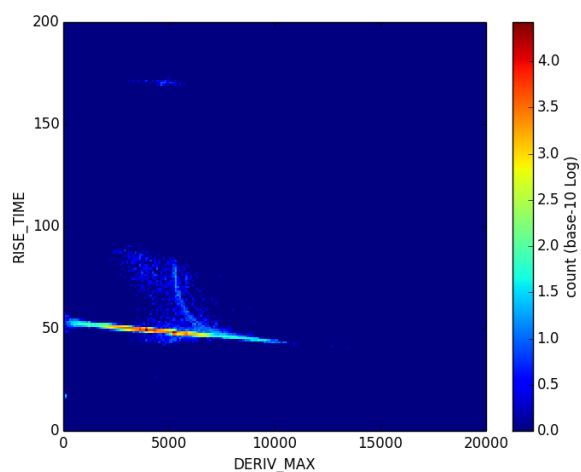


図 4.3: Hp イベントのみ

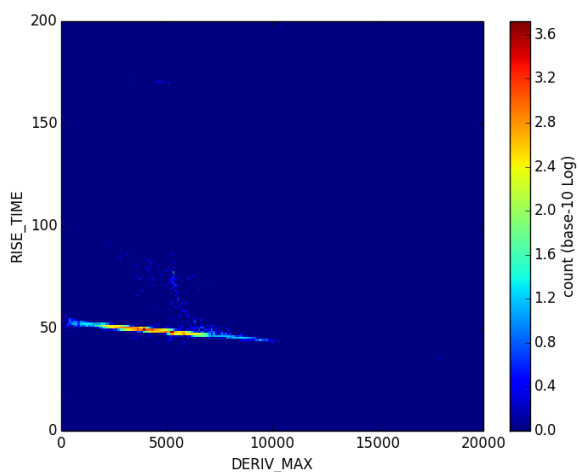


図 4.4: Mp イベントのみ

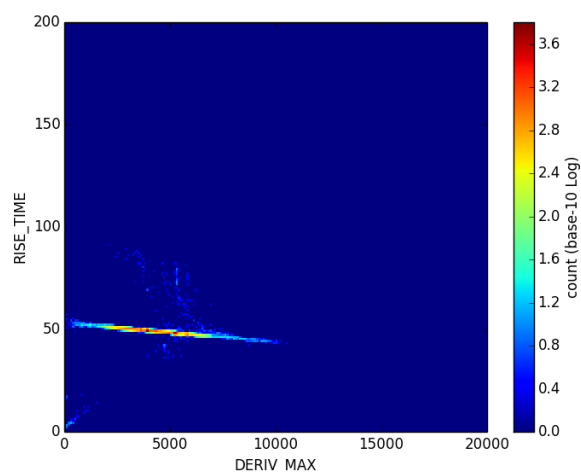


図 4.5: Ms イベントのみ

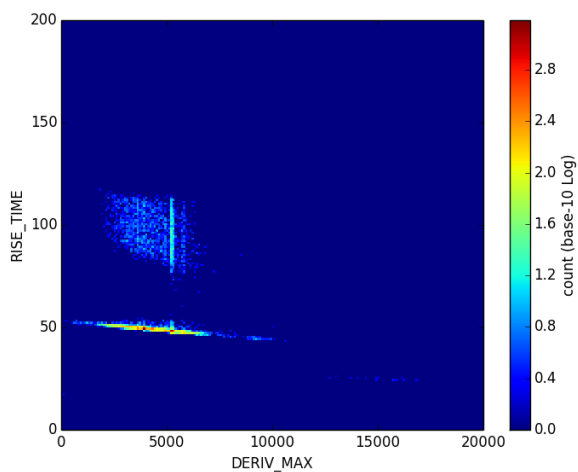


図 4.6: Lp イベントのみ

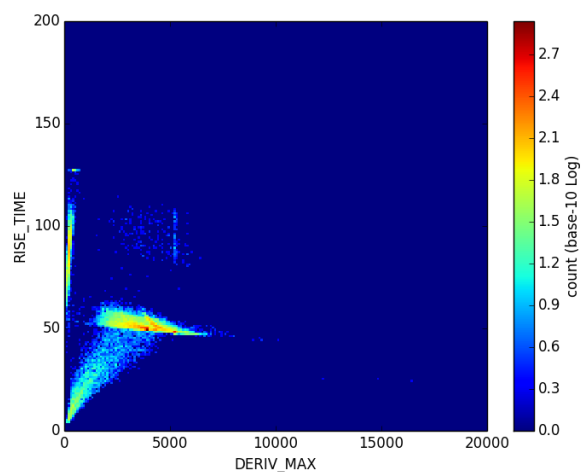


図 4.7: Ls イベントのみ

その結果、 L_p と L_s でそれぞれ大きなブランチが確認でき、除去すべき対象であることがわかる。 M_p 、 M_s は H_p と同様な、 $RISE_TIME=50$ bins のラインと少しのブランチがあることが確認できる。しかし、前後のイベントの影響のより少ないものは H_p イベントであるので、 H_p イベントのみを採用し、 M_p 、 M_s イベントは除去する。

また、 H_p イベントのみの $DERIV_MAX$ のヒストグラムと図 4.2 を比較する。その結果、 $DERIV_MAX=2000\sim7000$ のノイズ成分が小さくなったことがわかった。

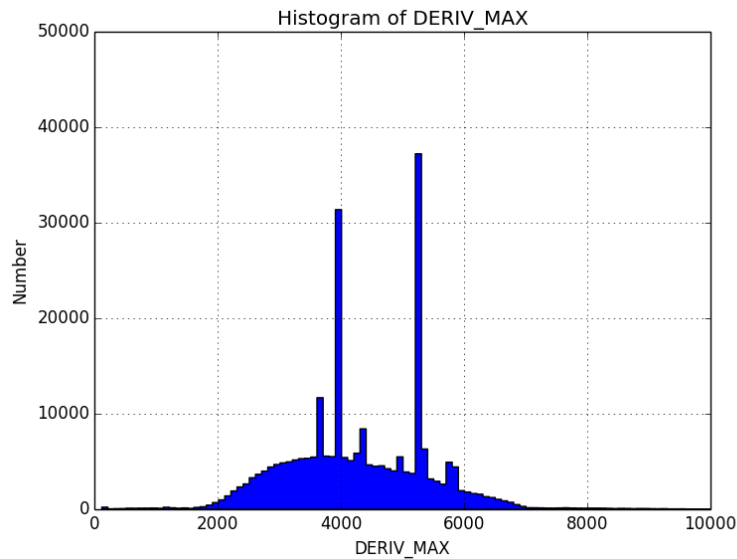


図 4.8: H_p イベントのみの $DERIV_MAX$ のヒストグラム

4.3.2 QUICK_DOUBLE と SLOPE_DIFFER による分類

次に、グレードで分類できないほどイベントの時間間隔が短いものについて検証する。イベント波形の減衰の途中で他のイベントの入射した場合に付けられる、 $QUICK_DOUBLE$ フラグイベントが原因であると考ええる。 $QUICK_DOUBLE$ イベントを抜いたイベントを図 4.9、 $QUICK_DOUBLE$ イベントのみを抜き出したものを図 4.10 に示す。

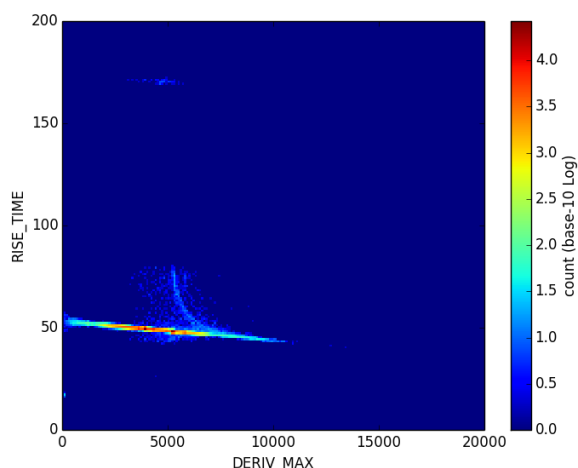


図 4.9: QUICK_DOUBLE イベントを抜いたイベント

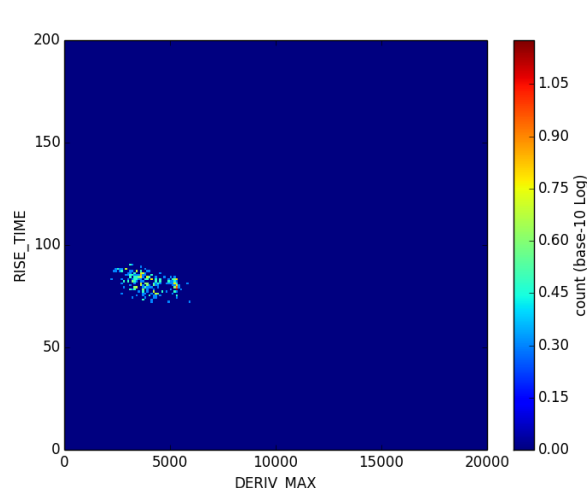


図 4.10: QUICK_DOUBLE イベントのみ

この結果 QUICK_DOUBLE イベントは、DERIV_MAX=2000~6000、RISE_TIME=60~100 の領域に集中して発生していることがわかった。この考察については 4.4 節です。これは除去すべきイベントである。

次に、SLOPE_DIFFER イベントについて考える。このイベントは、最適フィルタ処理でのテンプレート波形とは波形の傾きが異なるものに付けられるフラグである。この原因としては、QUICK_DOUBLE と同様に前後のイベントの時間間隔が非常に短いゆえに、1つの波形として処理されてしまい傾きが変化してしまった場合、クロストークによる場合など考えられる。SLOPE_DIFFER イベントを抜いたイベントを図 4.11、SLOPE_DIFFER イベントのみを抜き出したものを図 4.12 に示す。

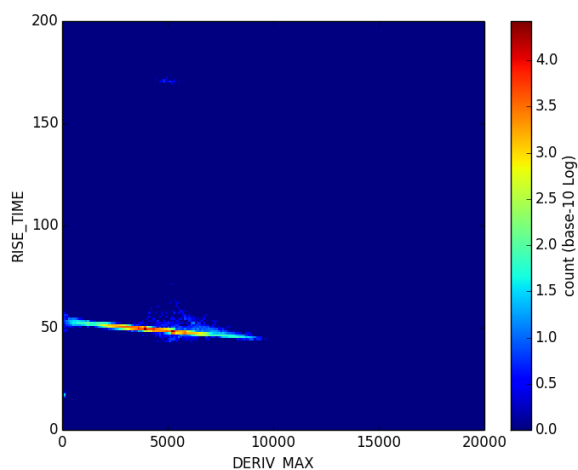


図 4.11: SLOPE_DIFFER イベントを抜いたイベントのみ

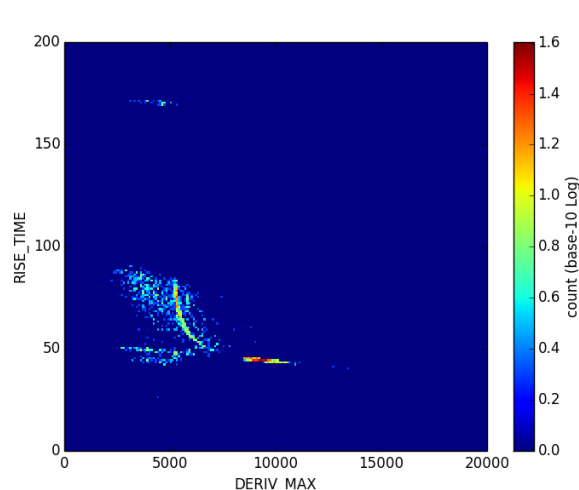


図 4.12: SLOPE_DIFFER イベントのみ

この結果 SLOPE_DIFFER イベントは、大きく分けて 3 箇所に分布していることがわかった。それぞれについての考察は同様に 4.4 節です。これらも除去すべきイベントである。

また、Hp イベントから QUICK_DOUBLE と SLOPE_DIFFER を抜いた DERIV_MAX のヒス

トグラムと図 4.8 を比較する。その結果、若干ではあるが $\text{DERIV_MAX} = 2000 \sim 7000$ のノイズ成分が小さくなったことがわかった。

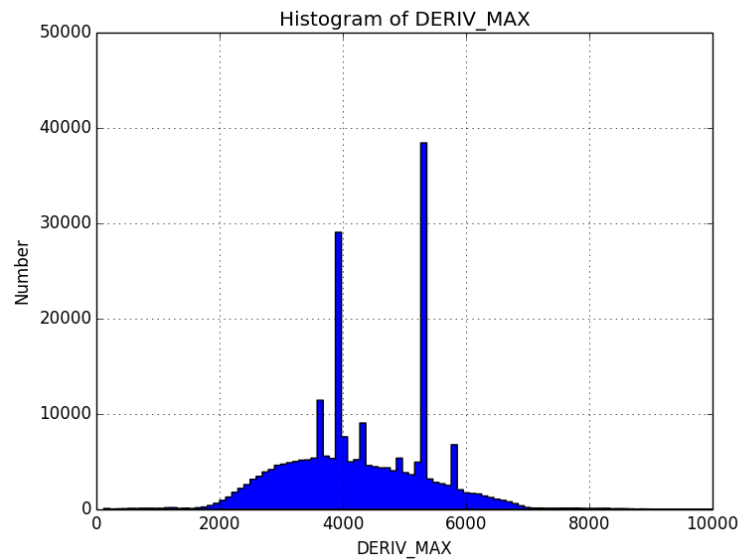


図 4.13: Hp イベントから QUICK_DOUBLE と SLOPE_DIFFER を抜いた DERIV_MAX のヒストグラム

4.3.3 TICK_SHIFT での分類

次に 3.2.2 節で述べた、TICK_SHIFT のフラグで付けられるイベントについて考える。TICK_SHIFT は -8~7 の値をとるため、今回は図 4.14 に示すように 4 つに分割し検証する。それぞれ図 4.15~4.18 に示す。

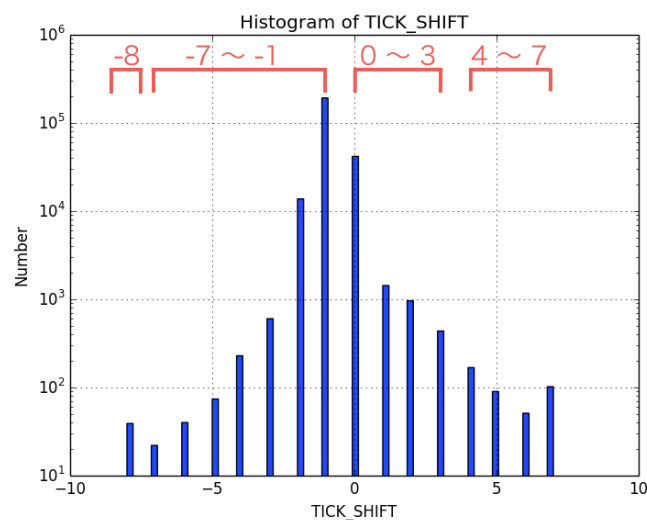


図 4.14: TICK_SHIFT のヒストグラム

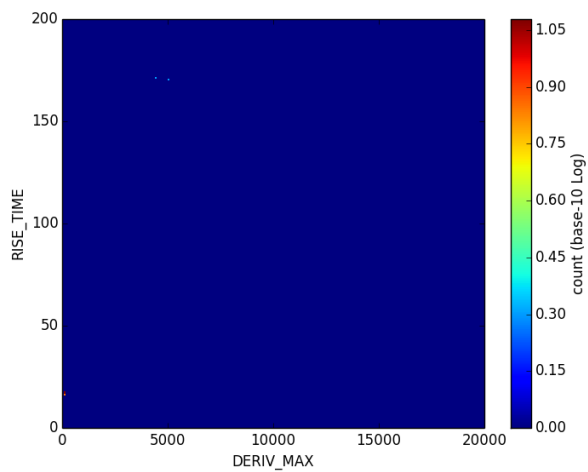


図 4.15: TICK_SHIFT=-8 のイベントのみ

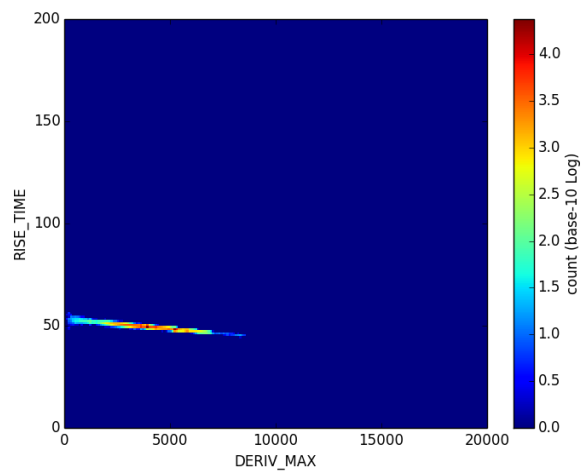


図 4.16: TICK_SHIFT=-7 ~ -1 のイベントのみ

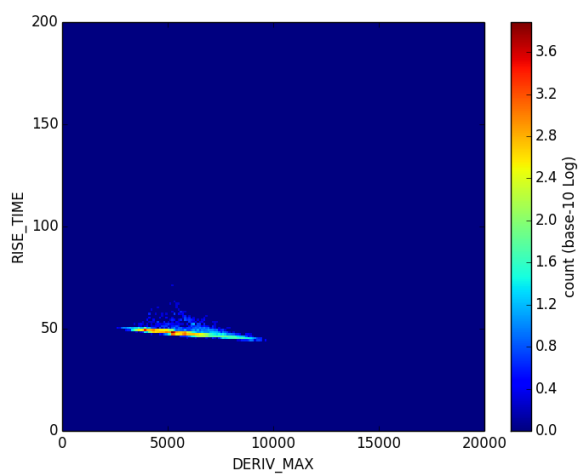


図 4.17: TICK_SHIFT=0 ~ 3 のイベントのみ

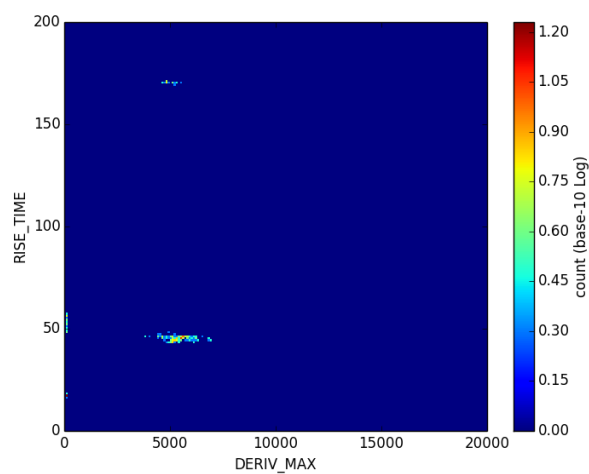


図 4.18: TICK_SHIFT=4 ~ 7 のイベントのみ

この結果、TICK_SHIFT=-7~-1 のイベントのみでセレクションをすることによって、RISE_TIME=50 us で一定のラインのみが抜き出せることが確認できた。その他の 3 つのセレクションについては除去すべきイベントである。同様に 4.4 節で考察する。

また、Hp イベントから QUICK_DOUBLE と SLOPE_DIFFER を抜き、TICK_SHIFT=-7~-1 のみを抜き出した DERIV_MAX のヒストグラムと、初めの図 4.2 を比較する。その結果、特性 X 線成分のカウントも減ってしまっているが、DERIV_MAX = 2000~7000 のノイズ成分が小さくなっていることがわかる。

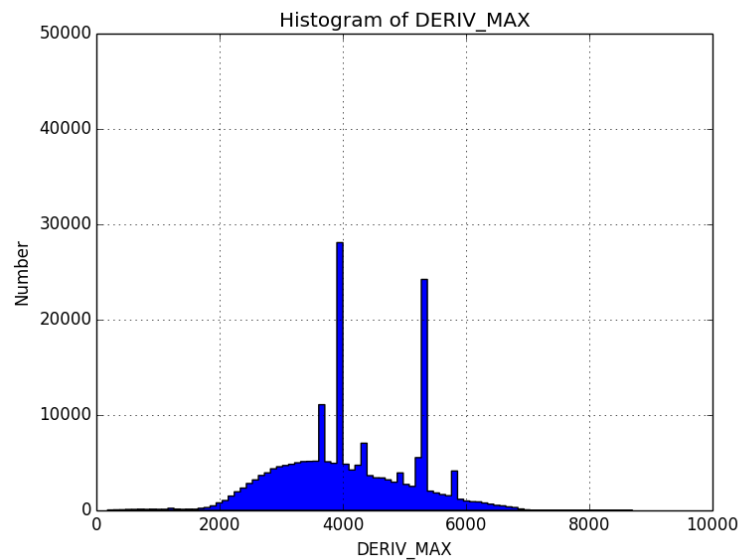


図 4.19: Hp イベントから QUICK_DOUBLE と SLOPE_DIFFER を抜き、TICK_SHIFT=-7~-1 のみを抜き出した DERIV_MAX のヒストグラム

4.4 考察

前節の結果より、ブランチの領域を (A) ~ (H) に分割した図を 4.20 に示す。それぞれの領域について、どのパラメータで分類したのか、前後のイベント間隔について表 4.1 にまとめる。それぞれの領域におけるブランチ要因についての考察は、高橋卒論 [8] を参照する。

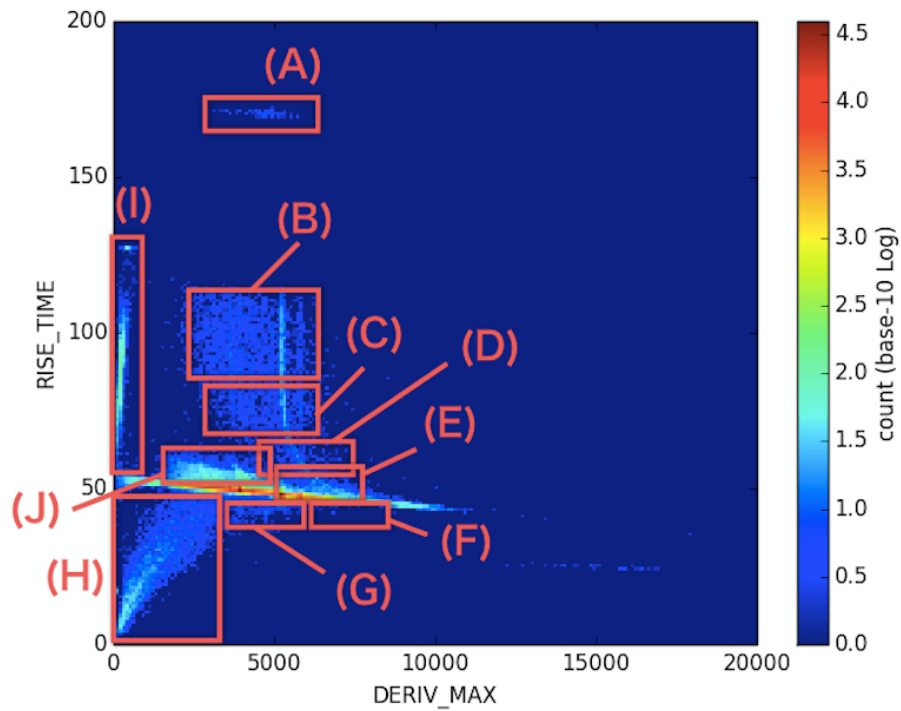


図 4.20: DERIV_MAX vs RISE_TIME の 2 次元ヒストグラム

表 4.1: 各ブランチ領域についての分類結果

領域	分類パラメータ	イベント間隔 [ms]
(A)	SLOPE_DIFFER, TICK_SHIFT = -8, 4~7	0.88
(B)	Lp, Ls	1.28
(C)	QUICK_DOUBLE	1.2
(D)	SLOPE_DIFFER	0.8
(E)	TICK_SHIFT = 0~3	0.96
(F)	TICK_SHIFT = 4~7	-
(G)	SLOPE_DIFFER	0.64
(H)	Ls	1.28
(I)	Ls	1.36
(J)	Ls	1.36

さらに、セレクションの前後で検出イベントをどれだけ除去したかについて評価した。MXS を起源とする $\text{Cu-K}\alpha$ 線のイベントのみを抜き出し、PHA のヒストグラムを作成した。図 4.21~4.24 に示す。

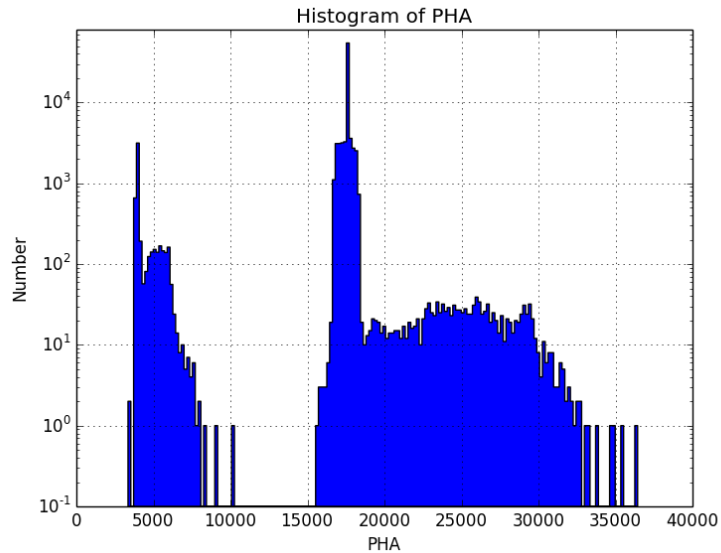


図 4.21: セレクション前の PHA ヒストグラム

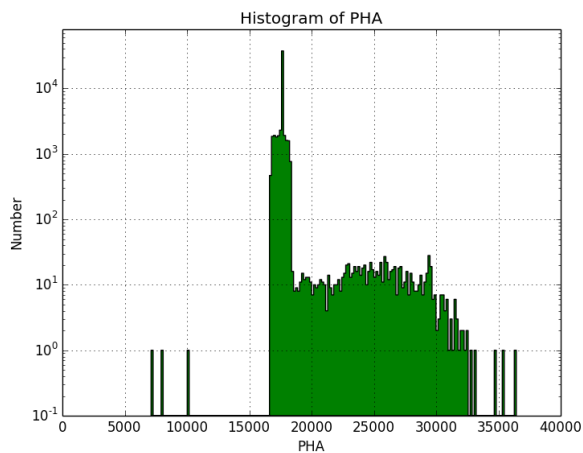


図 4.22: Hp イベントのみの PHA ヒストグラム

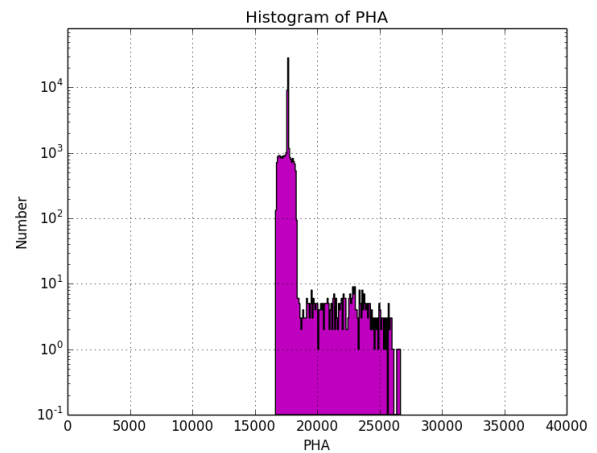


図 4.23: Hp イベントから QUICK_DOUBLE と SLOPE_DIFFER を抜いた PHA ヒストグラム

図 4.21 から図 4.24 で、検出イベント数は 53.8 % 除去していた。また、S/N 比で評価をすると、約 2.6 倍向上した。

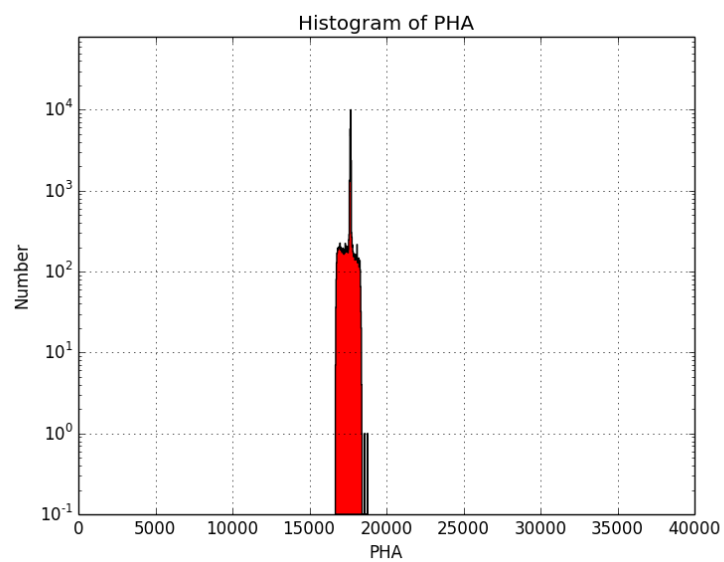


図 4.24: Hp イベントから QUICK_DOUBLE と SLOPE_DIFFER を抜き、TICK_SHIFT=-7~-1 のみを抜き出した PHA ヒストグラム

第5章 まとめ

X 線天文衛星ひとみは、入射 X 線の光子エネルギー吸収体の温度上昇として測定する X 線マイクロカロリメータを搭載する。デジタル化された温度波形は、PSP へ渡され、X 線イベントの検出と光子エネルギーの測定を行う。PSP で検出するイベントは、除去すべき非正規イベントを含んでいる。検出イベントの中でも、正規イベントのみ抜き出すことが必要である。そのため、非正規イベント群を確認したのち除去し、必要な X 線光子イベントを選択する必要がある。

本論文では、衛星に搭載された MXS を用いて行った MXS 照射実験でのデータを用いた。80 us ~ 140 us の RISE_TIME を示すイベントを選ぶことによって、必要な X 線光子イベントを選択できた。MXS を起源とする Cu- $k\alpha$ 線イベントで評価したところ、検出イベント数は 53.8 % 除去した。また、S/N 比は約 2.6 倍向上したことを確認した。

参考文献

- [1] JAXA, 「X 線天文衛星「ASTRO-H」プレスキット」, 2016
- [2] M. Tsujimoto and M. Tashiro, 「Pulse Shape Processor (PSP) Description Document」, 2016
- [3] 久保田拓武, 「ASTRO-H 衛星搭載 SXS のデジタル信号処理装置による時刻付け制度の検証」, 修士論文, 埼玉大学, 2016
- [4] 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, 「X 線天文衛星 ASTRO-H 実験計画書」, 2015
- [5] 中谷創平, 「ASTRO-H 衛星搭載機器における 時刻決定精度の地上較正試験」, 修士論文, 埼玉大学, 2016
- [6] 三井翔平, 「X 線マイクロカロリメータの信号波形の分類と X 線光子の弁別」, 卒業論文, 埼玉大学, 2016
- [7] 武田佐和子, 「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」, 修士論文, 埼玉大学, 2013
- [8] 高橋海斗, 「ひとみ衛星搭載波形処理装置における波形信号の弁別検証」, 卒業論文, 埼玉大学, 2017
- [9] 山口直, 「ASTRO-H 衛星搭載 X 線分光装置 SXS デジタル波形処理部の性能実証」, 修士論文, 埼玉大学, 2014
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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

謝辞

本修士論文を執筆するにあたり、ご協力くださった方々に深く感謝申し上げます。修士1年からの2年間ご指導頂きました田代先生と寺田先生には、大変お世話になりました。人工衛星開発の最前線で携わることができ、優秀な研究者の方々と実験や解析を行ったことは非常に貴重な経験でした。一生忘れません。ひとみ衛星が運用中止になってしまい、自分の修士論文はどうなってしまうのだろうと約1年前の私は絶望していましたが、ここまで形にすることができたのは先生方のおかげです。本当にありがとうございました。

私の所属したSXSチームの皆さまにも大変お世話になりました。特に、首都大学東京の石崎先生、ISASの辻本先生と小山さんには天文学会の資料や解析会議などで多くのアドバイスを頂きました。資料の作り方も解析のやり方も分かっていなかった私が、ここまで成長することができたのは皆さまのおかげです。

また、研究室の学生の皆さまにも大変お世話になりました。特に、武田さんにはSXSもPSPも何もわからない私に一から丁寧に教えて頂きました。男性ばかりの研究室で女性の先輩がいることはとても安心感があり、相談もしやすかったです。ありがとうございました。久保田さんは、研究室に全然出回らないにもかかわらず、解析会議の時にはしっかり資料が出来上がっていたので、いつ作業をしているのかいつも不思議でした。そんなゆさを持つ久保田さんが居たからこそ、ひとみ衛星打ち上げまで解析に追われて辛かった時期も楽しく過ごせたのだと思います。ありがとうございました。また飲み会ひらいてください。ひとみ衛星がダメそうという時期にPSPチームに入ってくれた高橋くん。高橋くんはとても賢く、時には私が教えてもらうこともありました。ギャグは本当にくだらなかったけれど、私にうつってしまうくらいにはやっぱり面白かったです。同期の矢部くんとは、本当にたくさん話しました。趣味の話から愚痴まで何でも話すことのできる存在はとても大きかったです。秋の天文学会は思い返してみれば、ただの修了旅行でしたね。最初のカメラは是非うちの会社のものをどうぞ。そのカメラを持って47都道府県制覇してくれたら嬉しいです、なんて。これからも飲みましょう。大清水くんは、私のだる絡みにいつも付き合ってくれました。夜型の私は研究室で大清水くんと何夜共に過ごしたのか、数え切れませんね。色々ありがとう、マーベル映画見たらいちいち感想報告しますね。この研究室は、なかなか私を女子扱いしてくれない人たちが多かったですが、これも私らしい過ごし方だったのだと思います。居心地が良く、楽しかったです。

最後になりましたが、大学院に進学させて頂き、ここまで自分を支え続けてくれた家族に感謝の意を表して謝辞と致します。