

ASTRO-H 衛星搭載 SXS のデジタル信号処理装置による 時刻付け精度の検証

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
久保田拓武

平成 28 年 2 月 5 日

概 要

2016 年 2 月に打ち上げ予定の X 線天文衛星 ASTRO-H には、X 線マイクロカロリメータ「Soft X-ray Spectrometer (SXS)」が搭載される。SXS は受光部である光電吸収体を 50 mK で動作させることで、X 線光子のエネルギーを吸収体の温度上昇として測定する検出器である。温度上昇を数 μ K の精度で測定することで、0.3-12.0 keV の帯域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する。これは今まで使用されてきた X 線 CCD や比例計数管の分解能を数十倍上回る精度である。受光部で計測された温度上昇は電圧信号に変換され、さらに 80 μ 秒ごとにサンプリングされたデジタル波形情報としてデジタル信号処理装置 (Pulse Shape Processor: PSP) へ渡される。PSP は重畳パルスの検出や波形のトリガ時間間隔で分類を行ったあと、テンプレートとの相関をとる最適フィルタ処理によって光子波形の波高と波形の立ち上がり時刻を算出している。サンプリングは PSP に搭載されている水晶発振子からのクロック信号をもとに行っており、光子イベント到来時刻はサンプルとして記録される。クロック信号は、GPS 衛星からの信号をもとに衛星中央計算機から配信される衛星時刻 (Time Indicator: TI) 信号と PSP 内部で対照され、対照表がルックアップテーブルとして保存される。ルックアップテーブルは定期的に読みだされ、光子データとともに地上に送信される。地上処理でテーブルをもとにサンプルカウントとの時刻の対照を行うことで、光子到来時刻を UT で記録できるようになっている。本論文では、衛星に搭載された X 線発生装置からの周期パルス X 線照射試験のデータを用いて、PSP の時刻付けの精度を検証した。

検証は (1) 時刻決定精度と、(2) 入射光子エネルギーに対する相対的なずれの 2 点について行った。(1) については、観測された X 線について χ^2 検定によるパルスの周期探索を行い、指定した周期が見られることを確認したうえで、周期によって畳み込んだ光度曲線を調べた。光度曲線に見られるパルスの位相と照射時刻を比較し、衛星の時刻配信システムと PSP の時刻決定精度を検証した。その結果、衛星の時刻配信経路による遅れと、パルス発生コマンドからパルスが発生するまでの時間差が、すべて設計通りであること、また、PSP の時刻決定精度が要求値である 80 μ 秒以下であることを検証した。さらに (2) については、PSP で用いている微分波形によるイベントトリガを起点として最適フィルタ処理を行うことで、入射光子エネルギーによる波形の違いがイベントトリガ時刻にもたらず系統的な違いがよく補償され、要求値に抑えられていることを検証できた。

目 次

1	X 線天文学と ASTRO-H 衛星	6
1.1	X 線天文学と X 線天文衛星	6
1.2	次世代 X 線天文衛星 ASTRO-H	7
1.2.1	概要	7
1.2.2	搭載機器	7
2	軟 X 線分光撮像検出器 SXS	8
2.1	X 線マイクロカロリメータ	8
2.1.1	構造	9
2.1.2	原理	9
2.1.3	エネルギー分解能	9
2.2	SXS の構造	10
2.2.1	フィルターホイール & MXS	11
2.2.2	検出器系	11
2.2.3	冷凍機系	13
2.2.4	信号処理系	13
2.3	SXS の性能要求	14
3	デジタル信号処理装置 PSP	14
3.1	PSP の性能要求	14
3.2	PSP の構造	14
3.2.1	MIO ボード	15
3.2.2	SpaceCard ボード	15
3.2.3	通信システム	18
3.2.4	クロック	19
3.2.5	信号	20
3.3	データ処理	21
3.3.1	MIO ボード	21
3.3.2	SpaceCard ボード	24
4	時刻配信	27
4.1	SpaceWire	27
4.2	時刻付けシステム	29
4.2.1	Time Indicator: TI	29
4.2.2	Local Time	30
4.3	遅延	30
5	相対時刻精度の検証	31
5.1	目的	31
5.2	方法	31
5.3	セットアップ	32
5.4	結果	32
5.4.1	周期探査	32

5.4.2	畳み込み	34
5.5	考察	34
5.6	まとめ	36
6	トリガタイミングのエネルギー依存性の検証	37
6.1	目的	37
6.2	方法	37
6.3	セットアップ	38
6.4	結果	38
6.4.1	エネルギーヒストグラム	38
6.4.2	立ち上がり時刻の測定	39
6.5	まとめ	39
7	付録	40

表 目 次

2.1	SXS の性能要求 PSP Description Document から引用	15
3.1	PSP の性能要求 PSP Description Document から引用	16
3.2	SXS の性能要求と PSP の性能要求との関わり (x 印は SSR と CR が対応すること を表す)	17
3.3	XBox-PSP の信号 PSP Description Document から引用	20
3.4	derivShift と derivHalfLen の関係 PSP Description Document から引用	23
4.1	SXS の LocalTime	30
5.1	検証に用いたデータ	32
5.2	周期探索結果	32
5.3	立ち上がり時間のずれのピクセル平均 [μ s]	36
5.4	試験ごとの σ_{PSP} [μ s]	36
6.1	検証に用いたデータ	38
6.2	検証に用いたデータ	38
6.3	各帯域の立ち上がり時刻	40

目 次

1.1	電磁波の到達高度と波長の関係	6
1.2	ASTRO-H の地球軌道上でのイメージ (C) JAXA	8
2.1	X 線マイクロカロリメータの構造	9
2.2	吸収体の時間による温度変化	10
2.3	SXS の信号処理の流れ	11
2.4	検出器 (性能実証機) の構造	12
2.5	ピクセルの配置と番号	12
2.6	ピクセルと熱浴とのつながり (すざく)	12
2.7	anti-co 周辺の模式図	13
2.8	Dewer 内部	14
2.9	Dewer の冷却システム	14
3.1	PSP の内部構造	18
3.2	MIO ボードの構造図	18
3.3	SpaceCard ボードの構造図	19
3.4	LVDS	19
3.5	PSP のクロック信号	19
3.6	XBox と MIO 間の接続	20
3.7	sample 1 つの構成 PSP Description Document から引用	21
3.8	パルス検出における状態遷移図	24
3.9	derivative のイメージ	25
3.10	セカンドパルス部分の拡大図と差分	25
3.11	グレードの定義 (C) JAXA	26
3.12	時間空間の平均波形	28
3.13	周波数空間の平均波形	28
3.14	時間空間のノイズ波形	28
3.15	周波数空間のノイズ波形	28
3.16	時間空間のテンプレート波形	28
3.17	周波数空間のテンプレート波形	28
4.1	従来のネットワークと SpaceWire	29
4.2	ASTRO-H のネットワーク	30
5.1	到来時刻揺らぎと畳み込み波形の立ち上がり	31
5.2	SXS 総合試験の周期探査	33
5.3	詳細機能試験の周期探査	33
5.4	熱真空試験の周期探査	33
5.5	SXS 総合試験のイベント到来の様子	34
5.6	詳細機能試験のイベント到来の様子	34
5.7	熱真空試験のイベント到来の様子	35
5.8	SXS 総合試験の畳み込み光度曲線 (pixel=30)	35
5.9	SXS 総合試験の立ち上がりフィッティング	35
5.10	詳細機能試験の畳み込み光度曲線 (pixel=30)	35
5.11	詳細機能試験の立ち上がりフィッティング	35
5.12	熱真空試験の畳み込み光度曲線 (pixel=22)	36

5.13	熱真空試験の立ち上がりフィッティング	36
6.1	トリガ時刻のエネルギー非依存性	37
6.2	熱真空試験のエネルギー分布	38
6.3	2000 < derivmax < 3500	39
6.4	3500 < derivmax < 5000	39
6.5	5000 < derivmax < 8000	39
7.1	SXS 総合試験 pixel1	40
7.2	SXS 総合試験 pixel3	41
7.3	SXS 総合試験 pixel1	41
7.4	SXS 総合試験 pixel6	41
7.5	SXS 総合試験 pixel27	42
7.6	SXS 総合試験 pixel29	42
7.7	SXS 総合試験 pixel30	42
7.8	SXS 総合試験 pixel31	43
7.9	SXS 総合試験 pixel32	43
7.10	詳細機能試験 pixel1	44
7.11	詳細機能試験 pixel3	44
7.12	詳細機能試験 pixel5	45
7.13	詳細機能試験 pixel6	45
7.14	詳細機能試験 pixel27	45
7.15	詳細機能試験 pixel29	46
7.16	詳細機能試験 pixel30	46
7.17	詳細機能試験 pixel31	46
7.18	詳細機能試験 pixel32	47
7.19	熱真空試験 pixel9	47
7.20	熱真空試験 pixel11	48
7.21	熱真空試験 pixel14	48
7.22	熱真空試験 pixel19	48
7.23	熱真空試験 pixel20	49
7.24	熱真空試験 pixel21	49
7.25	熱真空試験 pixel22	49
7.26	熱真空試験 pixel23	50
7.27	熱真空試験 pixel24	50

1 X線天文学とASTRO-H衛星

1.1 X線天文学とX線天文衛星

電磁波は波長の長い方から電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線と呼ばれている。

宇宙からはX線も含め、様々な領域の電磁波が降り注いでいる。しかし、地球の大気に吸収されてしまうものもあり、可視光と一部の赤外線、電波の主に3つの帯域が地上に到達できる。(図1.1)

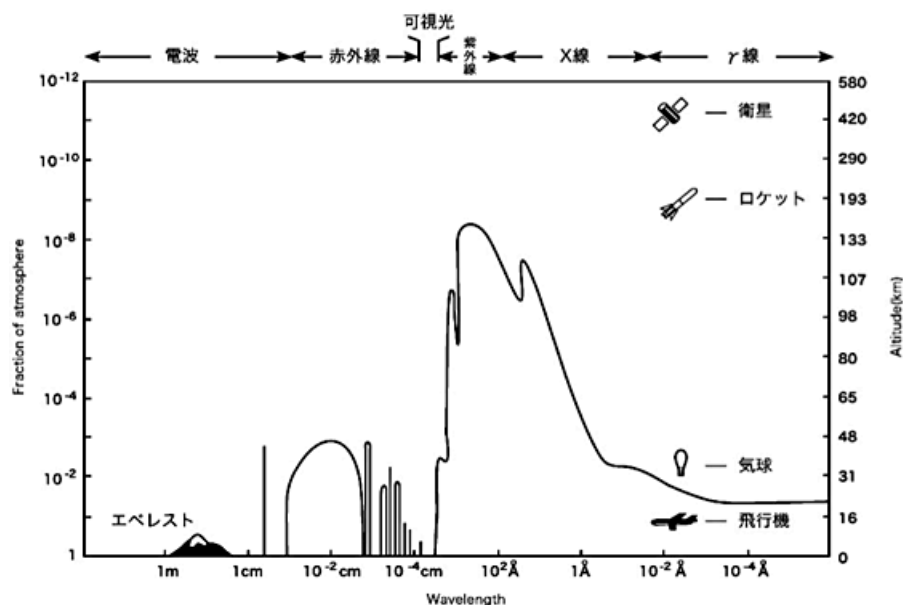


図 1.1: 電磁波の到達高度と波長の関係

X線は波長がおおよそ 10^{-10} m の領域の電磁波である。一般に、光の波長と、それを放射する物体の温度は反比例の関係にあるため、可視光の1万分の1ほどの波長しかないX線は、黒体放射温度にすると、可視光天体である太陽の1万倍の温度、すなわち1千万度の物体から発せられると考えられる。このような地上では実現しえない高いエネルギーをもった天体の観測にX線観測は非常に適しており、中性子星パルサーやブラックホールへの質量降着現象といった高エネルギー天体の観測には欠かせない。

X線天文学の起源は、1962年のリカルドジャコーニらによるロケット実験にさかのぼる。彼らはロケットの先端にガイガー計数管を搭載して打ち上げ、さそり座の方角からやってくるX線の観測に成功した。太陽系外の天体のX線の観測はこれが初めてで、その後の天文学の発展に寄与した彼は2002年にノーベル物理学賞を受賞した。現在はロケットのような短時間の観測ではなく、人工衛星を用いた数年単位での観測が主となっている。

日本はこれまでに5つのX線天文衛星を打ち上げ、さらに今年新たな衛星を打ち上げる予定である。その衛星が次に説明するASTRO-Hである。

1.2 次世代 X 線天文衛星 ASTRO-H

1.2.1 概要

ASTRO-H は 2016 年 2 月に打ち上げ予定の X 線天文衛星で、JAXA を中心に国内外の数多くの大学、研究機関が開発している。全長はおよそ 14 m、重量は 2.5 t とこれまでで最大規模で、世界で初めてとなる 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る。これにより、X 線からガンマ線という広い波長帯域で、銀河団中の数千万度の高温ガスの動き、誕生直後の銀河中心の巨大ブラックホールの様子などを、これまでにないほどの高い感度で観測し、宇宙がどのように進化し今に至るのかを詳しく探ることができる。

1.2.2 搭載機器

ASTRO-H に搭載する各機器について説明する。

軟 X 線分光撮像検出器 (SXS)

SXS は軟 X 線望遠鏡 (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、打ち上げ後に液体ヘリウムが消失する事故があり、観測には使用できなかった。そのため今回成功すれば SXS が世界で初めての観測となる。SXS の概要は第二章で、内部のデジタル信号処理装置 PSP については第三章、時刻付けのバックボーンとなる衛星の通信システム SpaceWire については第四章で詳しく説明する。

軟 X 線撮像検出器 (SXI)

SXI は SXT-I という、SXT-S と同等の望遠鏡をもち、0.4–12.0 keV の X 線を撮像する X 線 CCD 検出器である。大面積の CCD により、 38×38 分角の広視野での観測を可能にする。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上げているほか、空乏層を $200\mu\text{m}$ と厚くすることで高エネルギー側の感度も向上させている。また、検出器を -120°C 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。SXI ではすざく衛星に搭載された XIS を上回る観測が実現できると期待されている。

硬 X 線撮像検出器 (HXI)

HXT は 5–80 keV の帯域の X 線を撮像する検出器で、同等のものが 2 つ搭載される。HXT は硬 X 線望遠鏡 (HXI) を持ち、5–80 keV の帯域の X 線の分光と撮像を行っており、硬 X 線の集光撮像観測を実現する。検出器は Si 半導体 4 層と CdTe 半導体 1 層から構成されたコンプトンカメラである。またバックグラウンド成分の軽減のため、すざくでも搭載された BGO シンチレータによるアクティブシールドが検出器の周囲を囲むように設置される。

軟ガンマ線検出器 (SGD)

SGD は 10–600 keV までの広いエネルギー範囲で、世界最高感度の軟ガンマ線観測を行う。同等のものが 2 つ搭載され、検出器は 32 層の Si 検出器、8 層の CdTe 検出器が設置されている。光子吸収モードとコンプトンモードの二つの観測モードがあり、光子吸収モードは 60 keV 以下の光子について Si 層で光電吸収し、コンプトンモードは 60 keV 以上の光子について Si 層でコンプトン散乱させた光子を CdTe で検出する。SGD は HXI と同様に BGO シンチレータによるアクティブシールドで、荷電粒子のバックグラウンドを機上で除去する。

図 1.2 は ASTRO-H の軌道上でのイメージと、各検出器の配置を示している。位置と名称は以

下のとおりである。

1 : SXT 2 : HXT 3 : SXI 4 : HXI 5 : SXS 6 : SGD

次の章では SXS について詳しく説明する。

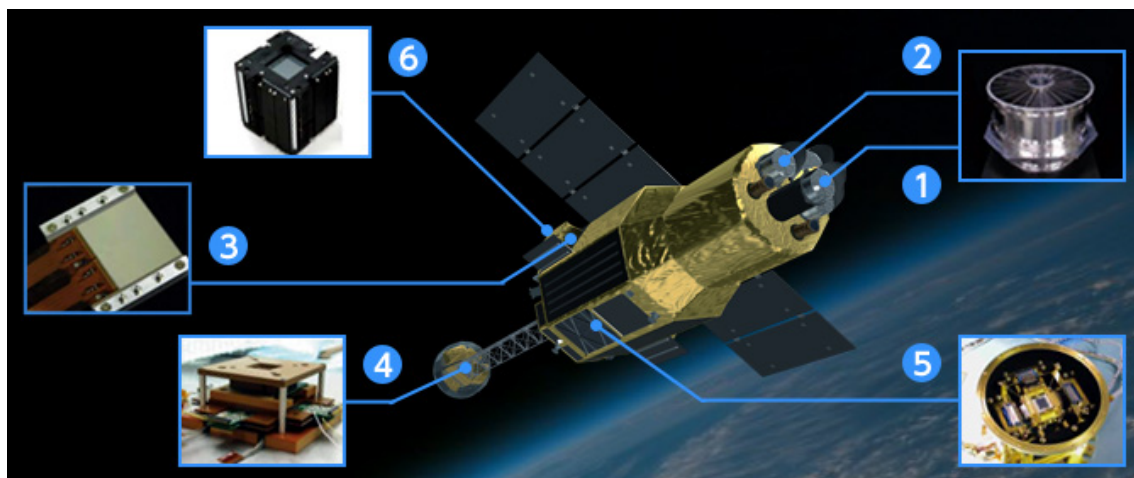


図 1.2: ASTRO-H の地球軌道上でのイメージ (C) JAXA

2 軟 X 線分光撮像検出器 SXS

SXS は JAXA、首都大学東京、金沢大学、立教大学、筑波大学、埼玉大学、ウィスコンシン大学、エール大学、ジュネーブ大学、理化学研究所、物質材料研究機構、NASA/GSFC、SRON の協力で開発されている。SXS の全体図を図 2.3 に示す。この章では内部で検出器として働く X 線マイクロカロリメータと 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

X 線マイクロカロリメータは入射光子のエネルギーを吸収体の温度変化として検出する検出器である。吸収体の温度上昇を正確に測定するため、SXS では検出器を 50 mK という低温にし、熱容量と熱雑音を極力下げた状態で使用する。

これまで衛星に使用されていた比例計数管や X 線 CCD 検出器は、生成エネルギーが一つにつき約 20 eV である電離電子をキャリアとしていた。しかし X 線マイクロカロリメータで発生するキャリアであるフォノンは生成エネルギーが 10^{-6} eV と非常に低いため、同じエネルギーを持つ光子の入射に対し、発生するキャリア数は後者の方が格段に多くなる。これによって統計揺らぎが抑えられ、結果 SXS では 6 keV の光子に対して 5 eV という高いエネルギー分解能を発揮できる。このようなエネルギー分解能を持つ検出器には他に回折格子を用いた分散分光器があるが、エネルギーの高い領域においては分解能が低下してしまうという欠点がある。一方、X 線マイクロカロリメータは高エネルギー帯域でも依然として高いエネルギー分解能を持っているため、宇宙の高エネルギー天体の精密分光に適している。

2.1.1 構造

X線マイクロカロリメータの原理を図2.1に示す。X線マイクロカロリメータは、熱浴と温度計につながれた吸収体とが細い熱リンクでつながった形をしている。

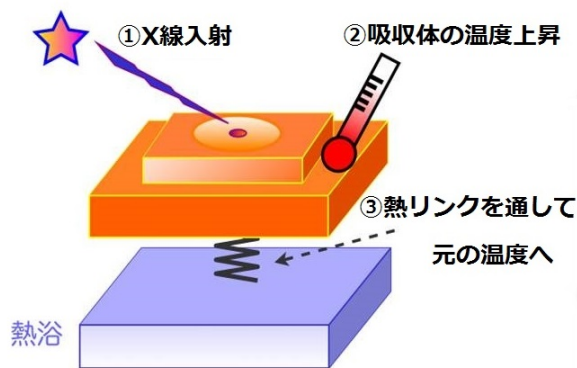


図 2.1: X線マイクロカロリメータの構造

2.1.2 原理

X線マイクロカロリメータの吸収体の温度変化の様子を図2.2に示す。X線のエネルギーを E 、吸収体の熱容量を C とすると、吸収体にX線が入射したときの温度変化 ΔT は

$$\Delta T = \frac{E}{C} \quad (1)$$

となる。この温度変化が温度計で測定されたのち、生じた熱は熱リンクを通して熱浴へとゆっくり逃げていき、元の状態へと戻る。このとき、次の式が成り立つ。

$$C \frac{d\Delta T}{dt} = -G\Delta T \quad (2)$$

これを解くと T は指数関数で表され、減衰の時定数 τ_0 は

$$\tau_0 = \frac{C}{G} \quad (3)$$

と定数で表される。X線マイクロカロリメータの時定数は、一般的にはおよそ 1 ms の大きさとなる。

これより、X線マイクロカロリメータの温度の時間変化は入射光子のエネルギーによらず、 τ_0 を時定数として指数関数的に減衰することがわかる。

2.1.3 エネルギー分解能

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

$$\epsilon = k_B T \quad (4)$$

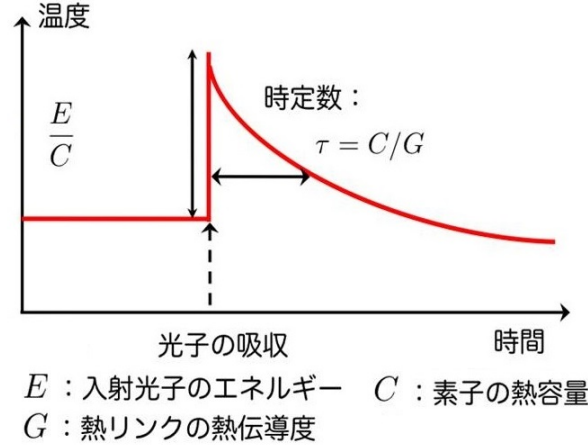


図 2.2: 吸収体の時間による温度変化

である。X線マイクロカロリメータの熱容量を C とするとその内部エネルギー U は

$$U = CT \quad (5)$$

となるので、平均フォノン数 N は

$$N = \frac{U}{\epsilon} = \frac{C}{k_B} T \quad (6)$$

と表せる。この値はポアソン分布に従い $\sqrt{N}$ で揺らいでいる。そのため、内部エネルギーの揺らぎはフォノンの平均エネルギーに $\sqrt{N}$ をかけると求まり

$$\Delta U = \epsilon \sqrt{N} = \sqrt{k_B T^2 C} \quad (7)$$

となる。温度計の状態やノイズによって決まるパラメータ ξ (~ 1) を用いるとエネルギー分解能は FWHM で

$$\Delta E = 2.35 \xi \sqrt{k_B T^2 C} \quad (8)$$

となり、エネルギー分解能を高めるには熱容量 C か温度 T を下げれば良いことが分かる。固体物理学によると低温極限での C は T^3 に比例するので式 8 は

$$\Delta E \propto T^{\frac{5}{2}} \quad (9)$$

となり、最終的には温度を下げることで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 の信号処理系周辺の構造を図 2.3 に示す。本項では SXS のフィルターホイール & MXS、検出器系、冷凍機系、信号処理系について説明する。望遠鏡でとらえられた光子は検出器で検出され、温度計で温度変化として読み取られる。この検出器は多層構造の冷凍機によって 50 mK の極低温に保たれている。検出器で読みだされたデータは X-ray amplifier box (XBox) で主に増幅、A/D 変換されたのち Pulse Shape Processor (PSP) へと送られる。PSP では波形の検出から波高値解析まで一連の光子データ処理が行われる。

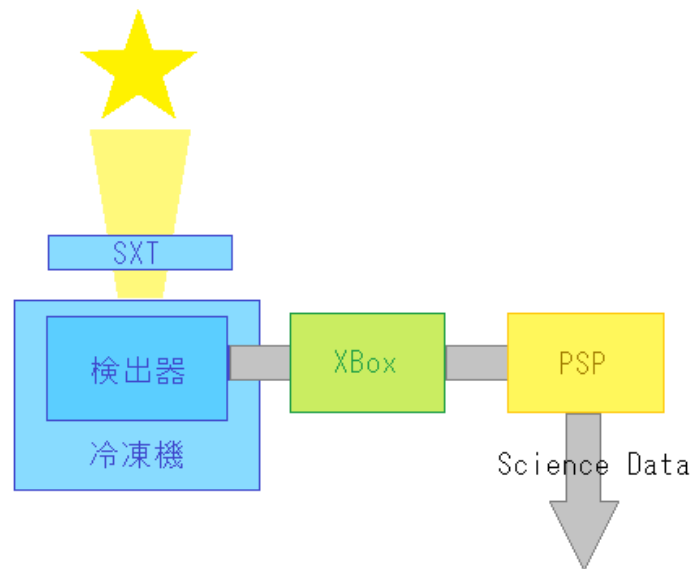


図 2.3: SXS の信号処理の流れ

2.2.1 フィルターホイール & MXS

SXS の X 線マイクロカロリメータの時定数は 10 ms 程度と遅い。そのため、観測する天体によっては光子量が多く、波形が重畳し最適フィルタ処理できなくなってしまう。これを防ぐため、SXS の望遠鏡から検出器までの間にフィルターホイールというものが置かれている。これは入射する X 線のカウントレートを調節する役割を果たしている。フィルターは 6 種類あり、天体によって最適なものを選べるようになっている。

また X 線パルス発生装置 (Modulated X-ray Source:MXS) がフィルターホイール周辺に設置されている。これは紫外線 LED で発生させた光電子を加速させ、ターゲットに当てることで輝線を放出させる装置である。LED を周期的に点滅させることで X 線を周期的に照射することができる。本論分の解析ではターゲットを Cu として X 線パルスを照射したデータを使用している。

2.2.2 検出器系

X 線マイクロカロリメータ

X 線マイクロカロリメータは NASA/ゴダード宇宙飛行センター (GSFC) が中心となって開発している。SXS では吸収体に HgTe に Cd をドープした合金を使用しており、すばくに搭載された HgTe の 1/4 の比熱を持っているため温度変化が大きく、検出性能が格段に上昇したものとなっている。SXS の X 線マイクロカロリメータは一辺が 814 μm の正形状の吸収体が 6×6 の 36 ピクセル存在し、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 個は一辺が約 5 mm の正形状領域内に配置されるが、うち一つ (図 2.5 No.12) は外側に配置されており、 ^{55}Fe を用いた較正線源が照射されている。検出器の構造を図 2.4 に、ピクセルの配置を図 2.5 に、ピクセルと熱浴との連結部分 (すばくで使用されたもの) を図 2.6 に示す。

反同時計数検出器

X 線マイクロカロリメータの下には反同時計数検出器 (anti-coincidence) が存在する。anti-co

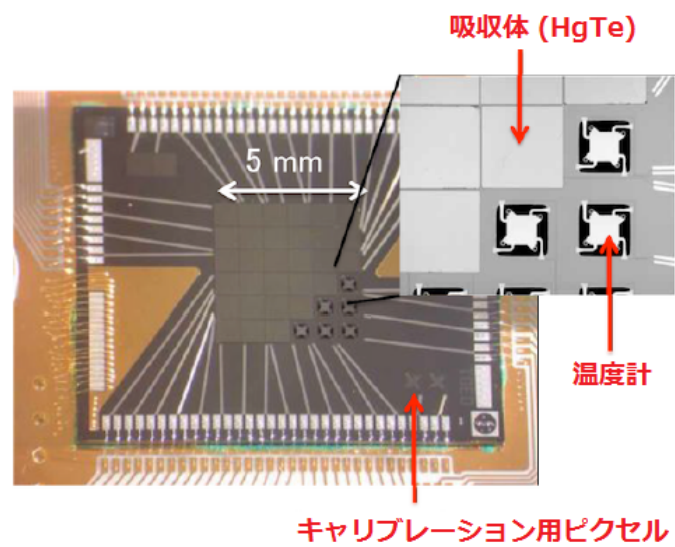


図 2.4: 検出器（性能実証機）の構造

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: ピクセルの配置と番号

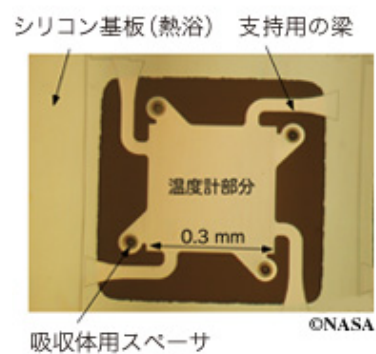


図 2.6: ピクセルと熱浴とのつながり（すざく）

は反同時係数によって検出器を貫く荷電粒子バックグラウンドを除去する役割を果たしている。大きさは一辺が 10 mm の正方形の形をしており、厚さが 500 μm である。X 線マイクロカロリメータと anti-co の配置の様子を図 2.7 に示す。

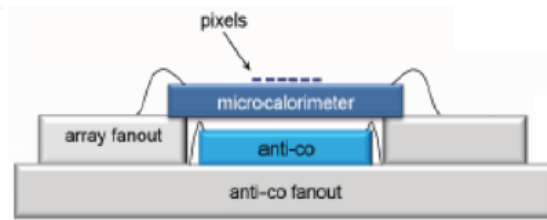


図 2.7: anti-co 周辺の模式図

2.2.3 冷凍機系

SXS では検出器の冷却のため、Dewer と冷凍機を搭載している。Dewer は高さがおおよそ 1.3 m、直径がおおよそ 1 m の大きさで、6 層構造の最深部に検出器が設置されている。Dewer の温度は外側の層から 140 K、100 K、30 K、4.5 K、1.2 K、50 mK と徐々に低温になっており、各層にはそれぞれの温度に適した冷凍機が備えられている。

ASTRO-H のような低地球軌道衛星の内部はおおよそ 290 K になる。Dewer の 30 K の層までは 2 段スターリング冷凍機 (2ST) を 2 台使用して冷却される。2 台はそれぞれ 50 % で運転されていて、1 台が停止した場合はもう片方が 100 % で運転される冗長系をなしている。4.5 K の層では 2ST2 台に加え、4 ヘリウムジュールトムソン冷凍機 ($^4\text{HeJT}$) を 1 台使用し、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。このヘリウムタンクと $^4\text{HeJT}$ 層の間には断熱消磁冷凍機が 1 台あり、ヘリウムがなくなった後は代わりにこの冷凍機が稼動して温度を保つようになる。最深部の層では断熱消磁冷凍機が 2 台設置されていて、最終的に検出器を 50 mK まで冷却する。Dewer の全体の構造を図 2.8 に、冷却システムを図 2.9 に示す。

2.2.4 信号処理系

X-ray amplifier Box (XBox)

XBox は NASA/GSFC が中心に開発を進めているアナログ信号処理装置である。検出器や反同時計数検出器の信号を読み取り、フィルタリングやデジタル変換した後 PSP へ送信する役割を果たしている。その他、信号の増幅や反同時計数検出器への電力供給、増幅器の制御、それらのモニタリングを行っている。XBox は電氣的に同等な XBox-A と XBox-B のそれぞれでカロリメータの 18 ピクセルずつデータの処理を行う。

Pulse Shape Processor (PSP)

PSP は ISAS/JAXA、三菱重工業株式会社、首都大学東京、埼玉大学、立教大学など日本の多くの機関が連携して開発している、SXS のデジタル信号処理装置である。XBox からデジタルデータを受信し、微分波形を用いたイベント検出、最適フィルタ処理を用いた波高値解析等を行い、光子のエネルギーを高精度で計算している。また両機器での時刻同期のため、XBox へ時刻情報の信号を送信している。X 線マイクロカロリメータの高分解能を生かすため、信号処理にも高い質が

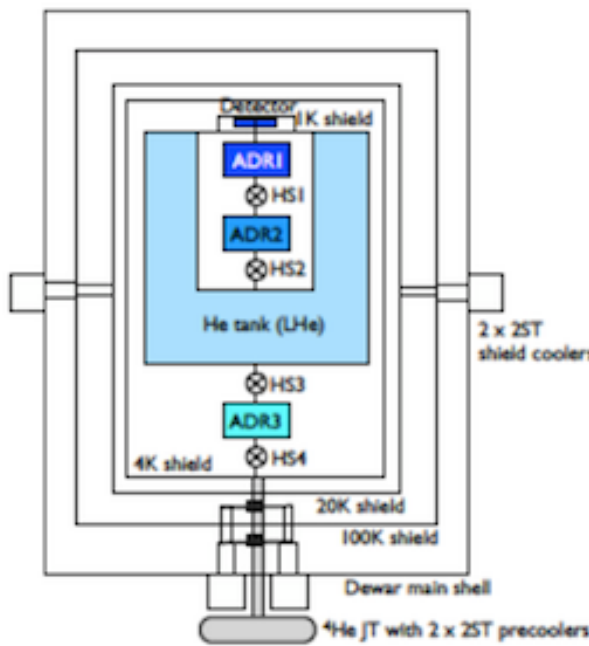


図 2.8: Dewar 内部

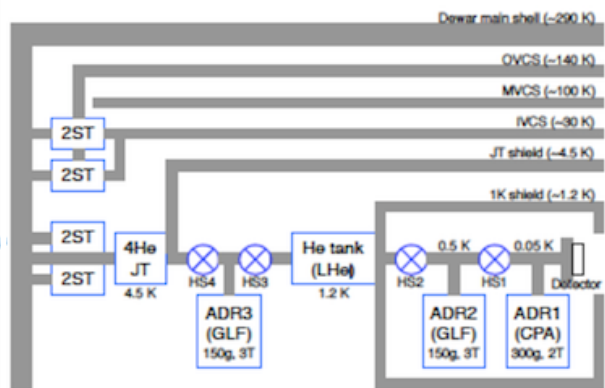


図 2.9: Dewar の冷却システム

求められる。そのため波高値解析を行う PSP は信号処理において特に重要な部分となっている。PSP については次の章でより詳しく説明する。

2.3 SXS の性能要求

SXS の性能要求を表 2.1 に示す。SXS はこの要求値を満たしている必要がある。

3 デジタル信号処理装置 PSP

3.1 PSP の性能要求

SXS の要求のほかに、PSP に対しても性能要求が存在する。これを表 3.1 にまとめた。また、表 3.2 に、SXS の要求と PSP の要求の間の対応をまとめた。

3.2 PSP の構造

図 3.1 に PSP の内部構造を示す。PSP は大きさが $250 \times 350 \times 91.3$ mm、質量が 4.011 kg の直方体型のデジタル信号処理装置で、XBox と同様に冗長系のため、電気的に同等な PSP-A と PSP-B の二つが搭載される。信号処理はその中の MIO ボード $\times 1$ 、SpaceCard ボード $\times 2$ が担っている。X 線マイクロカロリメータの 36 ピクセルのうち No.0-17 を PSP-A が、No.18-35 を PSP-B が処理している。

¹パルスない箇所での ADC sample の二乗平均平方根

²パルスレコード内でパルスサーチしない時間

³衛星から受信する Time Code

⁴ピクセル内の光子検出時刻の差

表 2.1: SXS の性能要求 PSP Description Document から引用

番号	項目	要求	目標
SSR-01	Energy resolution in FWHM (eV)	7	4
SSR-02	Energy range (keV)	0.3-12.0	0.1-16.0
SSR-03	Residual background ($\text{s}^{-1} \text{keV}^{-1}$)	1.5×10^{-3}	1.5×10^{-3}
SSR-04	Field of view (arcmin^2)	2.9×2.9	2.9×2.9
SSR-05	Detector array	6×6	6×6
SSR-06	Angular resolution in HPD (arcmin)	1.7	1.3
SSR-07	Effective area at 1 keV (cm^2)	160	160
	Effective area at 6 keV (cm^2)	210	210
SSR-08	Lifetime (yr)	3	5
SSR-09	Energy scale accuracy (eV)	2	1
	Energy resolution accuracy (eV)	2	1
SSR-10	Count rate par array (s^{-1})	>150	>150
	Count rate per pixel (s^{-1})	>20	>20
SSR-11	Absolute time-assignment accuracy (ms)	10	0.08
	Time-assignment resolution (ms)	0.08	0.08

3.2.1 MIO ボード

図 3.2 に MIO ボードの構造を示す。この中には User-FPGA と SpW-FPGA、水晶発振子、データ保存に使われる SDRAM (64MB) が一つずつ搭載されている。MIO では 20 MHz の水晶発振子から 2 つのクロック Base clock(5MHz), Sampling clock(15.625kHz) を生成している。片方の MIO ボードには親となるクロックがあり、もう片方の MIO のクロックと定期的に同期される。MIO ボードは XBox からのサイエンスデータを受信し、一次処理をしたのち SpW-FPGA から SpaceCard ボードの CPU へとデータを送る他、PSP の時刻付け情報を XBox と同期させる信号や CPU からのコマンドを送ることも行っている。

3.2.2 SpaceCard ボード

図 3.3 に SpaceCard ボードの構造を示す。SpaceCard ボードには CPU と SpW-FPGA、水晶発振子、SDRAM、SRAM、EEPROM が一つずつ搭載されており、LVDS によってデータを両方の MIO ボードや SpaceWire Rooter と送受信できる。SRAM (4MB) はメインプログラム動作用、EEPROM (2MB) はメインプログラム保存用として使われる。SpaceCard ボードは 1 つの MIO ボードに対して 2 つあり、MIO で処理された 18 ピクセル分のデータをさらに半分に分け、それぞれ 9 ピクセルずつ処理を受け持っている。キャリブレーション用の pixel12 は SpaceCard-A1 が担当している。

表 3.1: PSP の性能要求 PSP Description Document から引用

番号	要求
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
CR-P02	12.0 keV まではカバーするダイナミックレンジを持つ (目標値は 16.0 keV)
パルス検出とグレード付け	
CR-P03	ピークの高さが $5 \times (\text{rms noise}^1)$ 以上のパルスを検出する
CR-P04	5 ms を超える間隔を持つ複数のパルスを全て検出する
CR-P05	2 ms を超える間隔で、隣接した波形との波高値の比が 30 未満であるパルスを全て検出する
CR-P06	全イベントに High-Resolution (HR), Medium-Resolution (MR), Low-Resolution (LR) と primary, secondary を組み合わせたグレードをつける
ノイズバジェット	
CR-P07	HR イベント処理でのスペクトル分解能の劣化を 0.5 eV 以下にする
CR-P08	MR イベント処理でのスペクトル分解能の劣化を、HR 分解能より 1 eV (FWHM) 以下にする
CR-P09	LR イベント処理でのスペクトル分解能の劣化を HR 分解能より 10 倍以下にする
最大カウントレート	
CR-P10	$150 \text{ s}^{-1} \text{array}^{-1}$ のイベントレートを処理する
CR-P11	$20 \text{ s}^{-1} \text{pixel}^{-1}$ のイベントレートを処理する
ライブタイム	
CR-P12	全イベントを 2 % 未満の dead time ² で検出する
CR-P13	1 % 未満の精度でライブタイムを決定する
その他	
CR-P15	全てのイベントは 1 ms 未満の絶対時刻 ³ 精度で時刻付けされる
CR-P16	全てのイベントは 80 μs 未満の相対時刻 ⁴ 精度で時刻付けされる
CR-P17	XBox-A と XBox-B 間のサンプリングクロックのずれを 1 μs 未満とする

表 3.2: SXS の性能要求と PSP の性能要求との関わり (x 印は SSR と CR が対応することを表す)

CR	Description	Sub-system requirements (SSR)										
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	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 (2ms)	x						x		x		
P-06	Grading	x										
P-07	HR resolution	x								x		
P-08	MR resolution	x								x		
P-09	LR 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											

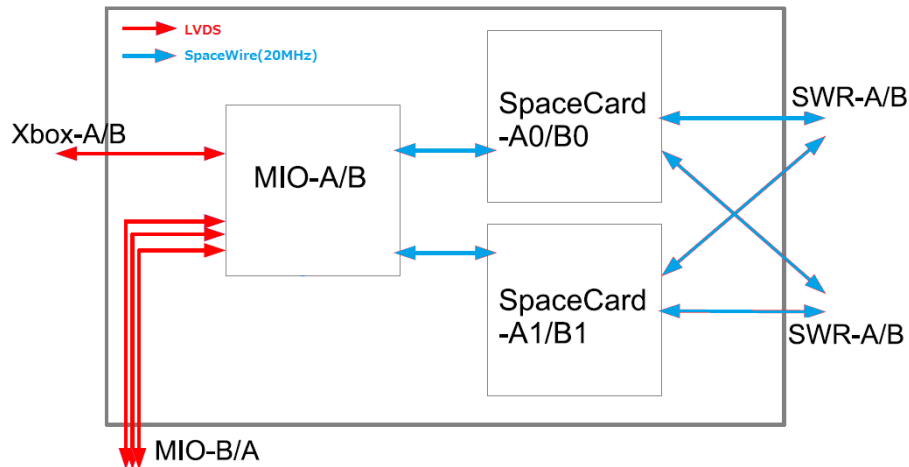


図 3.1: PSP の内部構造

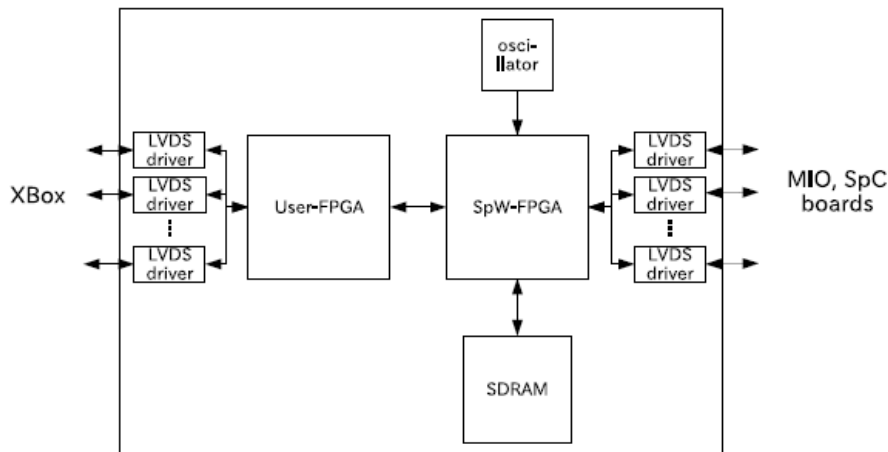


図 3.2: MIO ボードの構造図

3.2.3 通信システム

ASTRO-H では機器内部での信号のやり取りや、PSP と Xbox、ルーターといった機器同士のデータの送受信に Low Voltage Differential Signaling (LVDS) と呼ばれる通信手段を採用している。LVDS は図 3.4 のように、電圧振幅が小さい信号を、2 本の信号線を用いて転送する通信技術である。0.3 V の低電圧を扱っているため、遷移に要する時間が短いという利点を持っている。さらに LVDS は、2 本の信号線に同時に逆位相の信号を送る差動伝送方式という方法をとっている。信号に外来ノイズが入った場合でも、受信者は 2 本の XOR をとることでノイズ成分だけを除去することができるのである。これによって、電圧振幅が小さいことに起因するノイズの影響を軽減させることができ、精度の高いデータをより速く、遠くへ転送することができるようになる。また、逆位相の電流が近接するため、転送による周辺機器への電磁波放射の影響も軽減させることができる。

この LVDS を用いた衛星内の通信プロトコルに SpaceWire というものがある。SpaceWire については次章で説明する。

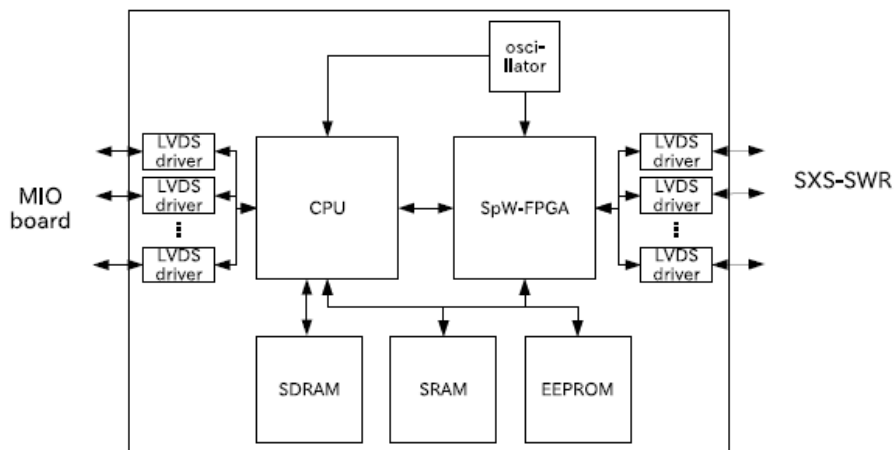


図 3.3: SpaceCard ボードの構造図

•LVDS



図 3.4: LVDS

3.2.4 クロック

MIO ボードには 20 MHz の水晶発振子があり、クロックドライバによってクロック信号が生成される。クロックは PSP の基準となる 5 MHz の Base clock、サンプルの長さを決める 12.5 kHz(15.625 kHz) の Sampling clock の二つがある。Sampling clock は Base clock を元に生成され、デフォルトでは 12.5 kHz である。(図 3.5)

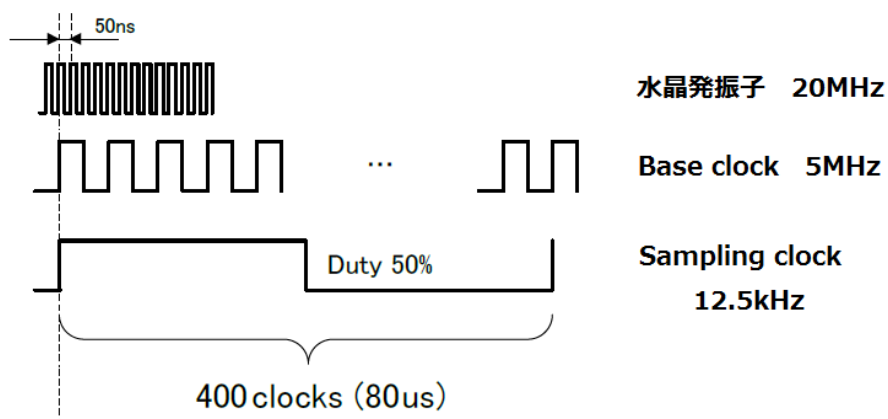


図 3.5: PSP のクロック信号

3.2.5 信号

図 3.6 に XBox と MIO 間の接続を示す。表 3.3 にその間でやりとりされる信号をまとめる。PSP が XBox から受け取る信号はサイエンスデータのほか、定期的に PSP と時刻の同期を行った記録であるハウスキーピングデータ (HK) データがある。PSP は XBox に、同期のためのクロック信号と、SpaceCard から得たコマンドを XBox へと送信している。MIO 同士でもクロックを同期させる信号がやり取りされている。

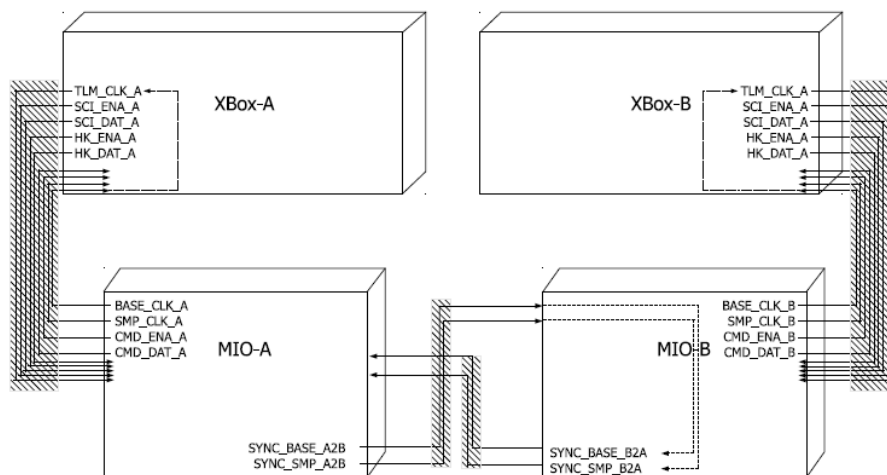


図 3.6: XBox と MIO 間の接続

表 3.3: XBox-PSP の信号 PSP Description Document から引用

XBox から PSP への信号	
TLM.CLK	XBox から得た信号の基準となるクロック
SCI.ENA	SCI.DAT の範囲を決める
SCI.DAT	サイエンスデータ
HK.ENA	HK.DAT の範囲を決める
HK.DAT	ハウスキーピングデータ
PSP から XBox への信号	
BASE.CLK	MIO の Base clock
SMP.CLK	MIO の Sampling clock
CMD.ENA	CMD.DAT の範囲を決める
CMD.DAT	XBox への送信コマンド
MIO-A と MIO-B 間の信号	
SYNC.BASE_A2B(B2A)	MIO 同士の Base clock 同期
SYNC.SMP_A2B(B2A)	MIO 同士の Sampling clock 同期

3.3 データ処理

3.3.1 MIO ボード

MIO ボードで計算を行うのは User-FPGA である。MIO ボードは SpaceCard ボードと比べ、単純計算を速く行うことができるという特徴がある。そのため各 PSP に 1 つあり、2 つの SpaceCard ボードへ 1 次処理したデータが渡される。

受信・エラーチェック

MIO は、XBox に搬送クロックとなる BASE_CLK 信号を送り、同時に波形サンプリングタイミングを SMP_CLK で与える。XBox は、Base Clock を折り返すと同時に、XBox から TLM_CLK, SCI_ENA, SCI_DAT を送信する。データは sample のつながりとして MIO ボードに送信されている。sample とはある時間における全ピクセルと anti-co のデータのまとまりを表している。データはサンプリングクロックの立ち上がりによって 400 bit ずつ区切られる。実質的なデータはそのうちの 312bit で、SCI_ENA の立ち下がりとしち上がりによって sample の開始と終了が判断され分割される。sample の 312 bit は、カロリメータの 18 チャンネル (各 16 bit)、anti-co の 1 チャンネル (16 bit)、sample 数毎にカウントを増加させる sciRecvCnt(8 bit) の 3 種類から構成されている。残りの 88 bit は常に値が 0 の spare bit で、データとしては使用されない。sample の内訳を図 3.7 に示す。

分解が終了したら、各 sample 毎に下記のエラー条件と照らし合わせて sample にフラグ付けが行われる。

- ・ sciLenErrCnt sample の長さが 312bit でない
- ・ sciCntErrCnt sciRecvCnt の増加が +1 になっていない

このいずれかが検知されたとき、対応するエラーカウン트가増加し、sampleErr も 1 となる。

このエラーチェックの後に、sample はピクセルや anti-co ごとに分割される。各チャンネルは 16 bit の長さを持つが、波高値データは先頭の 14 bit 分で、15 bit 目は spare bit、16 bit 目はビット化けの検出用の odd parity になっている。この先頭 14 bit のデータを ADC sample と呼ぶ。spare bit は値が 0 であり、odd parity の値は、ADC sample 内に 1 が奇数個現れるように決まる。odd parity によってそれ以降ビット化けが起きたかどうかを調べることができる。このピクセル、anti-co 毎の分割処理を demultiplex という。

demultiplex が終了した後、データがクリップされているかを確認する。クリップとは、ADC

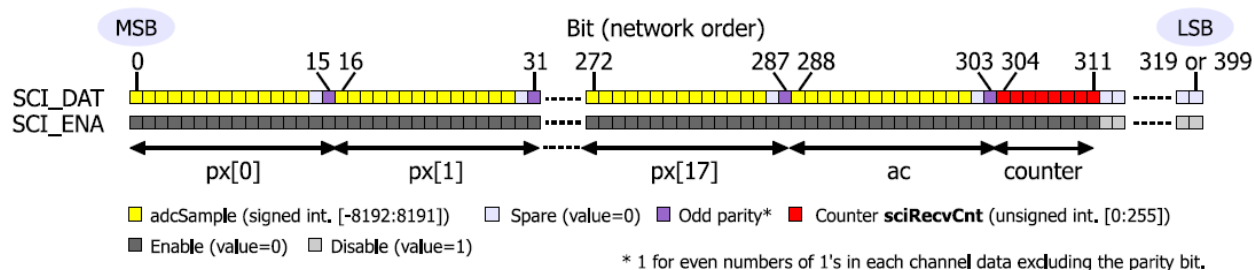


図 3.7: sample 1 つの構成 PSP Description Document から引用

sample が -8192、あるいは 8191 である時につくフラグで、このデータが 14 bit で表現しきれない

ことを表している。クリップされたデータには pxClipCnt がカウントされる。

次に、各データで cannel error のチェックを行う。いずれかのチャンネルで下のエラーが発見された場合、そのエラーカウントが増加し、channelErr も 1 となる。

・ parityErrCnt 18pixel と 1anti-co のどれかに parity エラーがある

この処理が終了すると、ピクセルデータは pxAcSample という名前で pxDelayBuf に、anti-co データは acDelayBuf というバッファにそれぞれ保存される。どちらも 1536 bit のサイズを持つ。

derivative 計算

次に、ADC sample を時間で微分した derivative という値を計算する。SXS の波形の時定数はおおよそ 1 ms ほどであるため、生データよりも derivative を用いれば立ち上がりが早くなり、検出しやすくなる。微分の計算式は以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 \text{derivLong}(i) &= \sum_{i'=0}^{\text{derivHalfLen}-1} \text{pxAdcSample}(i+i') \\
 &\quad - \sum_{i'=-\text{derivHalfLen}}^{-1} \text{pxAdcSample}(i+i') \\
 &= \text{derivLong}(i-1) + \text{pxAdcSample}(i+\text{derivHalfLen}-1) \\
 &\quad - 2\text{pxAdcSample}(i-1) + \text{pxAdcSample}(i-\text{derivHalfLen}-1) \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$\text{derivative}(i) = \frac{\text{derivLong}(i) + 2^{\text{derivShift}-1}}{2^{\text{derivShift}}} \quad (11)$$

ここで derivHalfLen は derivative 計算の長さを決定するパラメータで、0 から 31 までの値をとる (デフォルトは 8)。derivHalfLen=0 のとき derivHalfLen=32 として考える。derivLong は pxAdcSample(i) を起点として、それより前の (derivHalfLen-1) 個のデータに+1 を、後の derivHalfLen 個のデータに-1 をかけて、それらの差分をとることにより計算される。この derivLong は 20 bit で計算された、derivative の全長を表していて、derivative は 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、derivHalfLen の値によって表 3.4 から決まる。

計算の後、pxAdcSample(i) と derivative は Wave Form Ring Buffer (WFRB) に保存される。このバッファは 1 MB の容量をもつ。

パルス検出

WFRB に保存されている derivative のデータを用いて、User-FPGA のステートマシンで検出が行われる。このステートマシンには状態が 6 つあり、それぞれ INIT, STDBY, READY, ARMED, FALL, PEAKFIND という名前がついている。検出の際に現れるステートと、その流れを図 3.8 に示す。

INIT, STDBY: 電源が入るとまず INIT 状態に入る。INIT と STDBY でモジュールの初期化が行われる。

表 3.4: derivShift と derivHalfLen の関係 PSP Description Document から引用

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	$17 \leq \text{derivHalfLen} \leq 32$

READY: 初期化が終わるとこのステートに移る。ここでは derivative の値が閾値 pxPulseThres を超えたときにパルスがトリガされ、次のステートへ遷移する (式 12)。また、トリガされたと同時に LO_RES_PH を求める基準となるベースライン loResBase の計算も行い、TRIG_LP が記録される。

$$\text{derivative} \geq \text{pxPulseThres} \quad (12)$$

ARMED: ここは READY でパルスが検出されたときから始まり、derivative が減少に転じる、すなわち生データで変曲点を迎えるまで続くステートである (式 13)。derivPre はある点の一つ前の derivative の値を表している。ここでは pxAdcSample と derivative の最大値が探され、それぞれ pxAdcSampleMax と derivativeMax へ保存される。もしこのステートで別のイベントが入ってきたとき、データは破棄される。

$$\text{derivative} < \text{derivPre} \quad (13)$$

FALL: このステートは derivative のピークから終了の閾値 pxFallEndThres を下回るまで続く (式 14)。ここでは引き続き pxAdcSampleMax と derivativeMax の最大値が探される。

$$\text{derivative} < \text{pxFallEndThres} \quad (14)$$

derivative はピークを迎えて以降は単調に減少するが、減少の途中で他のイベントが入った場合は再度増加する。入ってきたもう一つのイベントを quick double と呼び、増加量が閾値 pxQuickDoubleThres を超えたときは quickDouble フラグがカウントされる (式 15)。

$$\text{derivative} - \text{derivPre} \leq \text{pxQuickDoubleThres} \quad (15)$$

PEAKFIND: 式 14 を満たした後はこのステートに入り、pxAdcSampleMax の探査のみ行われる。derivativeMax の探査については行われない。ステートは以下の二つのどちらかを満たすまで続き、その条件はいずれも式 16 で表される。。

- ・ **PEAKFIND** ステートが開始してからの sample 数がある一定の長さを超えたとき
- ・ pxAdcSampleMax が更新されたときからの sample 数がある一定の長さを超えたとき

$$\text{pxPFStateCnt} \geq \text{pxPFStateCntMax} \quad (16)$$

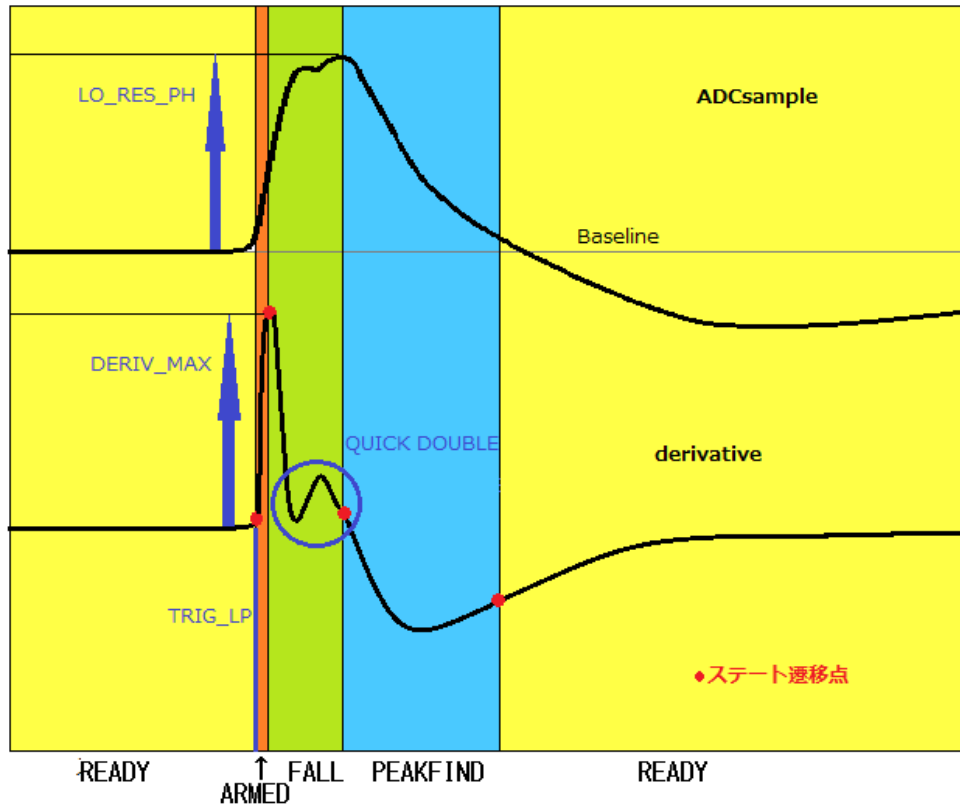


図 3.8: パルス検出における状態遷移図

PEAKFIND が終了したら LO_RES_PH が計算される。これは READY ステートで計算されたベースライン loResBase と derivativeMax との差分によって求まる (式 17)。

$$\text{LO_RES_PH} = \text{derivMax} - \text{loResBase} \quad (17)$$

結果が負になった場合、LO_RES_PH には 0 が格納される。最終的に derivativeMax(16 bit), quick-Double(1 bit), LO_RES_PH(14 bit), TRIG_LP(24 bit) が SDRAM に保存される。

この後は READY ステートに戻り、再度イベント検出されるまで待機する。

3.3.2 SpaceCard ボード

SpaceCard ボードでは CPU が演算を行う。SpaceCard ボードは MIO ボードより複雑な計算を行うことができる。

セカンドパルス検出

User-FPGA ではファーストパルスのみ検出していたが、CPU ではさらにセカンドパルスの探索が行われる。セカンドパルスは ADC sample も derivative も、生データから平均波形を引いた差分を使って探索される。以下にその計算式を示す。

$$\text{adcSample}_{\text{sub}}(i) = \text{adcSample}(i) - \sum_{n=1}^N \frac{\text{lowResPH}_n}{\text{lowResPH}_{\text{avg}}} \text{adcSample}_{\text{avg}}(i - \Delta i_n) \quad (18)$$

$$\text{derivative}_{\text{sub}}(i) = \text{derivative}(i) - \sum_{n=1}^N \frac{\text{derivMax}_n}{\text{derivMax}_{\text{avg}}} \text{derivative}_{\text{avg}}(i - \Delta i_n) \quad (19)$$

ここで、 n は波形の番号を表し、 i は波形の中のデータの番号を表す。 $_{sub}$ の下付き文字は差分を、 $_{avg}$ 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 は、生波形と平均波形との間で derivMax の位置を合わせるためのパラメータである。セカンドパルスは $derivative_{sub}(i)$ が閾値 $pxPulseThres$ を超えたときにトリガされる (式 20)。

$$derivative_{sub} > pxPulseThres \quad (20)$$

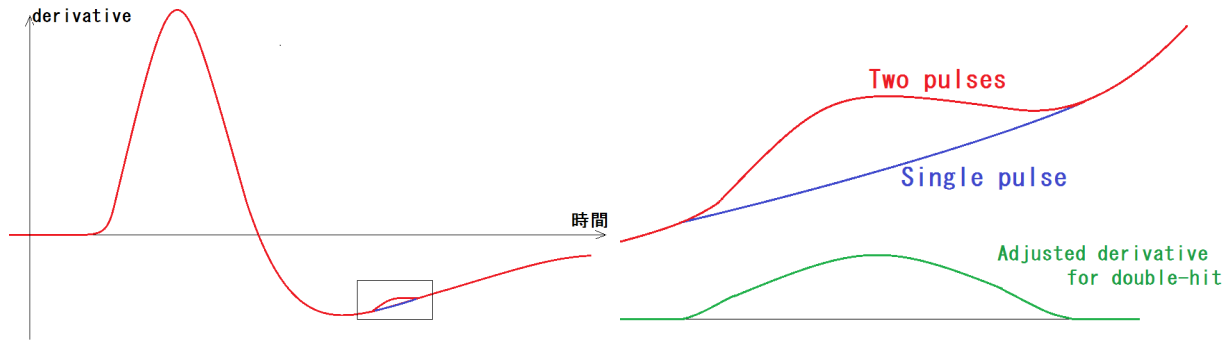


図 3.9: derivative のイメージ

図 3.10: セカンドパルス部分の拡大図と差分

グレード付け

次に、CPU はイベントごとにグレード付けという処理を行う。グレード付けとは、あるイベントに対しそのイベントのトリガ時刻と、前後のイベントのトリガ時刻との間隔によって、そのイベントを分類する処理のことをいう。

グレード付けには2つの分類方法があり、まず1つ目は時間間隔によって決まる High Resolution (HR), Meddium Resolution (MR), Low Resolution (LR) の3種類である。HR は、トリガ時刻から前後 874ADC sample の間隔に他のイベントがトリガされていないイベントを表す。同様に MR は前後 219ADC sample にトリガがないイベントを表し、LR の場合はこれらに当てはまらないものが分類される。

2つ目は波形の前後関係によって決まる分類で、前のイベントを primary(p)、後ろのイベントを secondary(s) として2種類に分けている。グレード付けは最終的にこの2つの分類を組み合わせ付けてられ、Hp, Mp, Ms, Lp, Ls の5種類で分けている。この他に、ノイズ波形の作成に使用する Base Line(BL) というグレードも存在する。これはイベントがない時のデータを表している。

イベントのエネルギー分解能は、他のイベントによる重なりが少ないものほど良くなる。そのためエネルギー分解能は、時間間隔による分類では High > Meddium > Low となり、また前後関係では primary > secondary となる。High と Meddium のイベントについては、以降の最適フィルタ処理でより詳細な波高値解析が行われる。一方 Low に分類されたイベントはこの処理はされず、User-FPGA で計算された LO_RES_PH の値が波高値として採用される。グレードの定義を図 3.11 に示す。

波高値解析

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ってより正確に計算される。ノイズのない信号のパワースペクトルを $S(\omega)$ 、ノイズのパワースペクトルを $N(\omega)$ で表す。 $S(\omega)$ は規格化されているとするとデータのパワースペクトル $D(\omega)$ は波高値 H を用いて

$$D(\omega) = HS(\omega) + N(\omega) \quad (21)$$

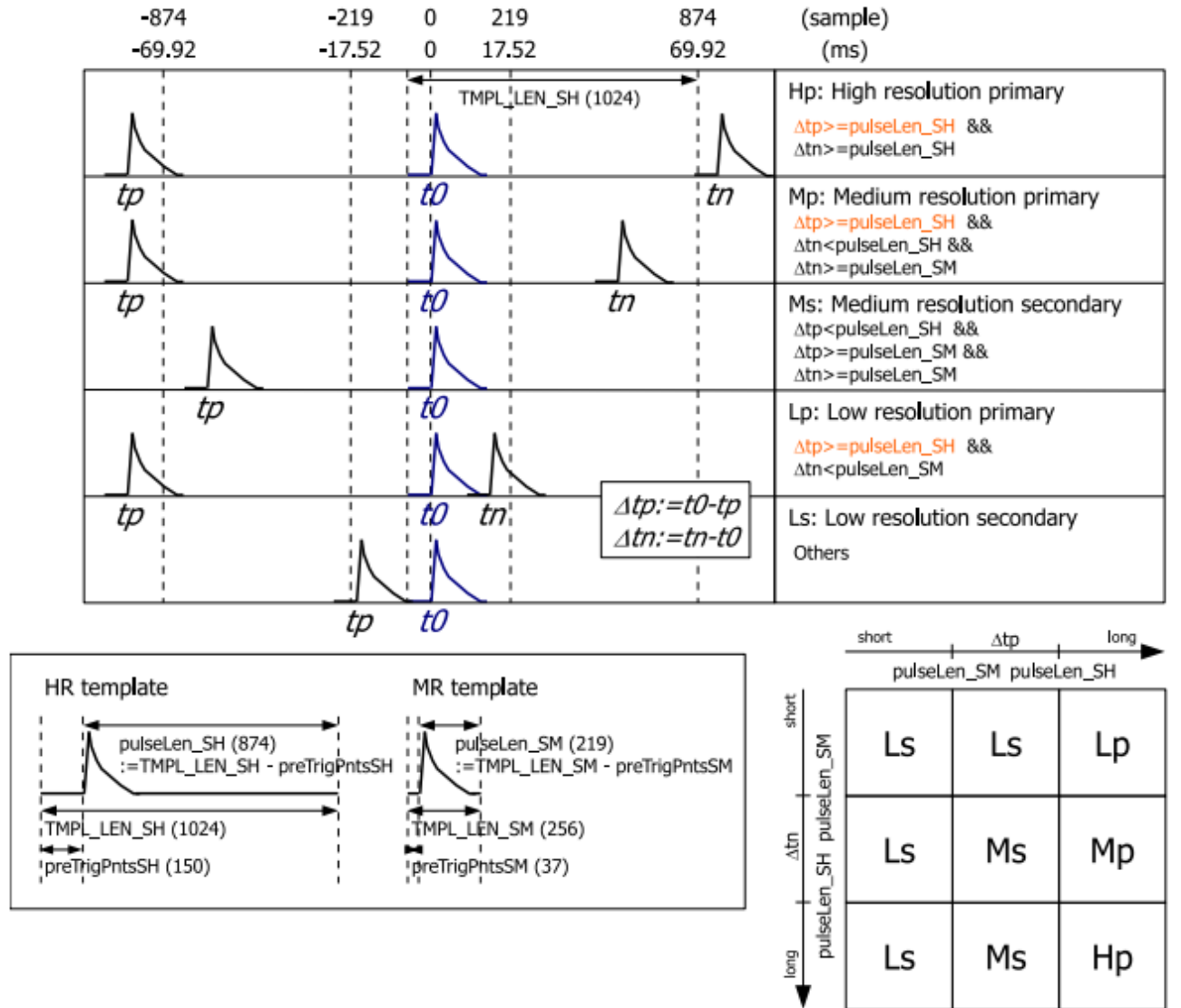


図 3.11: グレードの定義 (C) JAXA

のような形で分けることができる。 H を求めるためには、以下の χ^2 が最小になるよう決められる。

$$\chi^2 \equiv \sum_{\omega} \frac{|D(\omega) - HS(\omega)|^2}{|N(\omega)|^2} \quad (22)$$

H は $\chi^2 = 0$ から、 H は以下の式で与えられる。

$$H = \frac{\sum_{\omega} \frac{D(\omega)S^*(\omega) + D^*(\omega)S(\omega)}{2|N(\omega)|^2}}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2} \quad (23)$$

は複素共役を表している。 $D(\omega), S(\omega)$ は実関数のフーリエ変換なので $D(-\omega) = D^(\omega), S(-\omega) = S^*(\omega)$ となり

$$D(\omega)S^*(\omega) = D(-\omega)S^*(-\omega) = D^*(\omega)S(\omega) \quad (24)$$

ゆえに

$$\begin{aligned}
 H &= \frac{\sum_{\omega} \frac{D(\omega)S^*(\omega)}{|N(\omega)|^2}}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2} \\
 &= \frac{\sum_{\omega} \frac{D(\omega)}{S(\omega)} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2}
 \end{aligned} \tag{25}$$

式 25 は H が $\left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|$ 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、 $F(\omega)$ を

$$F(t) \equiv \frac{S(\omega)}{|N(\omega)|^2} \frac{1}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2} \tag{26}$$

と定義する。 $F(\omega)$ を最適フィルタのテンプレートと呼ぶ。これを逆フーリエ変換して時間空間に戻してやると H が求まる。

$$H = \sum_t D(t)F(t) \tag{27}$$

実際の処理ではテンプレート波形を固定し、生データの ADC sample を $-8 \leq j \leq 7$ の範囲で平行移動させ、以下の 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る。

$$\text{PHA}(j) = \sum_i \text{template}(i) \times \text{adcSample}(i + j) \tag{28}$$

j が決まったら、次は上位 3 点に対して内挿法を用いて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。

$$\text{PHA}_{\text{peak}} = \text{PHA}(j) + \frac{1}{8} \left(\frac{\{\text{PHA}(j+1) - \text{PHA}(j-1)\}^2}{2\text{PHA}(j) - \text{PHA}(j+1) - \text{PHA}(j-1)} \right) \tag{29}$$

$$\text{time vernier} = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{PHA}(j+1) - \text{PHA}(j-1)}{2\text{PHA}(j) - \text{PHA}(j+1) - \text{PHA}(j-1)} \right) \tag{30}$$

テンプレート計算

SpaceCard では波高値解析と並行して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 S と N の二つから作られる。 S は単一パルスで構成された数百個の波形を平均して作ることができ、これを平均波形と呼んでいる。一方 N はバックグラウンド成分を数百個平均して作られる。それぞれの波形を図 3.12～3.17 に示す。

図 3.15 と図 3.17 を見ると、ノイズの影響が大きい周波数帯域ではテンプレートの寄与が抑えられていることが分かる。

4 時刻配信

4.1 SpaceWire

SpaceWire は ASTRO-H で採用されている、LVDS による人工衛星用の通信規格である。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、そのたびに規格の策定や開発期間

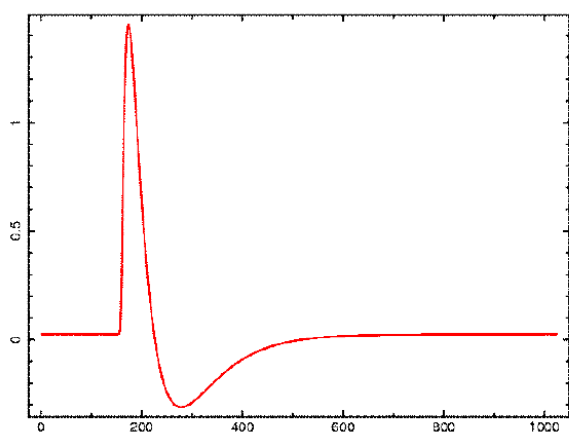


図 3.12: 時間空間の平均波形

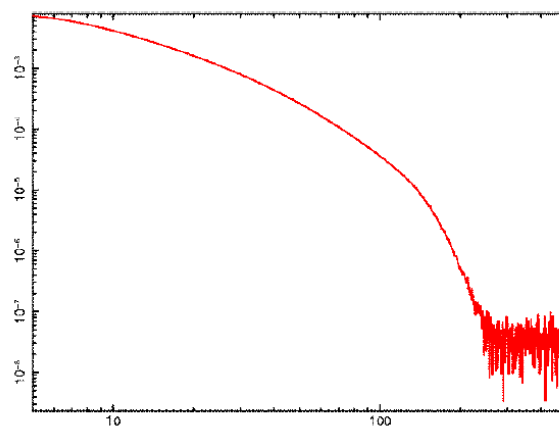


図 3.13: 周波数空間の平均波形

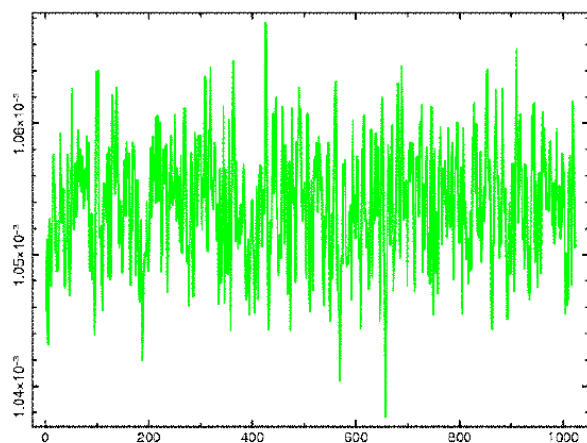


図 3.14: 時間空間のノイズ波形

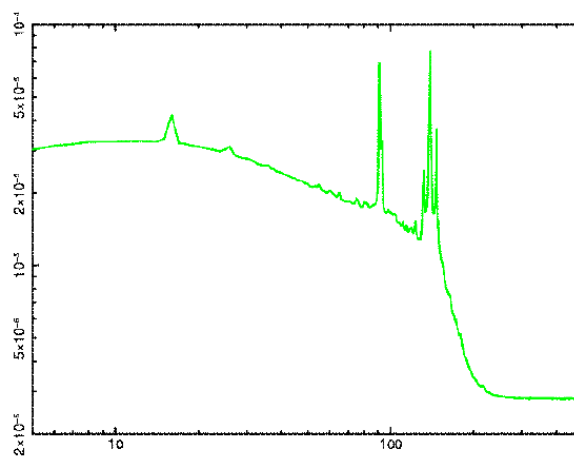


図 3.15: 周波数空間のノイズ波形

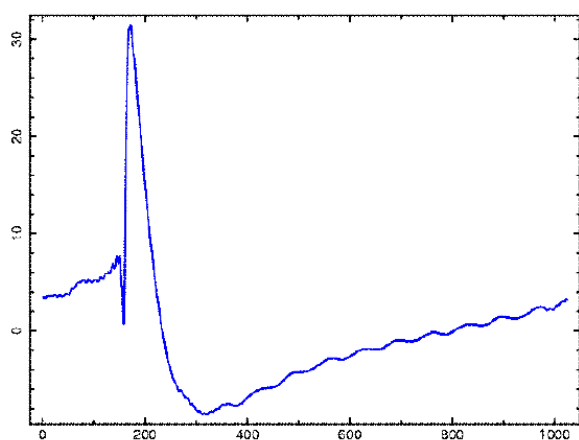


図 3.16: 時間空間のテンプレート波形

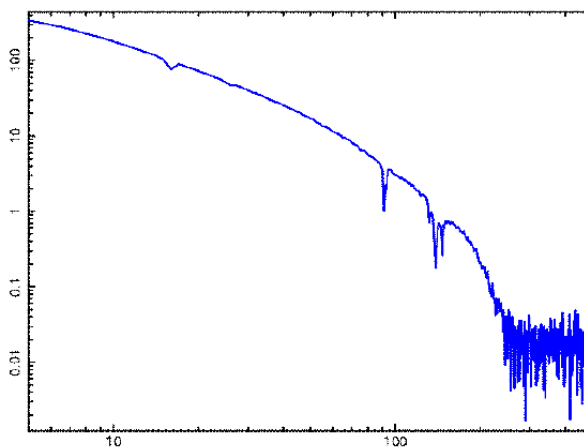


図 3.17: 周波数空間のテンプレート波形

を必要としていた。SpaceWire はこういった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。2009 年に打ち上げられたいぶき衛星で軌道上の通信に初めて成功した。従来のネットワークと SpaceWire のネットワークを図 4.1 に示す。SpaceWire は図のようにルーターを複数用いて様々な通信経路を選択することができるため、従来のシステムと比べ冗長系が組みやすく、信頼性が大きく向上している。また、SpaceWire を標準規格として統一することにより、使いやすく、保守しやすいという更なるメリットが生まれる。

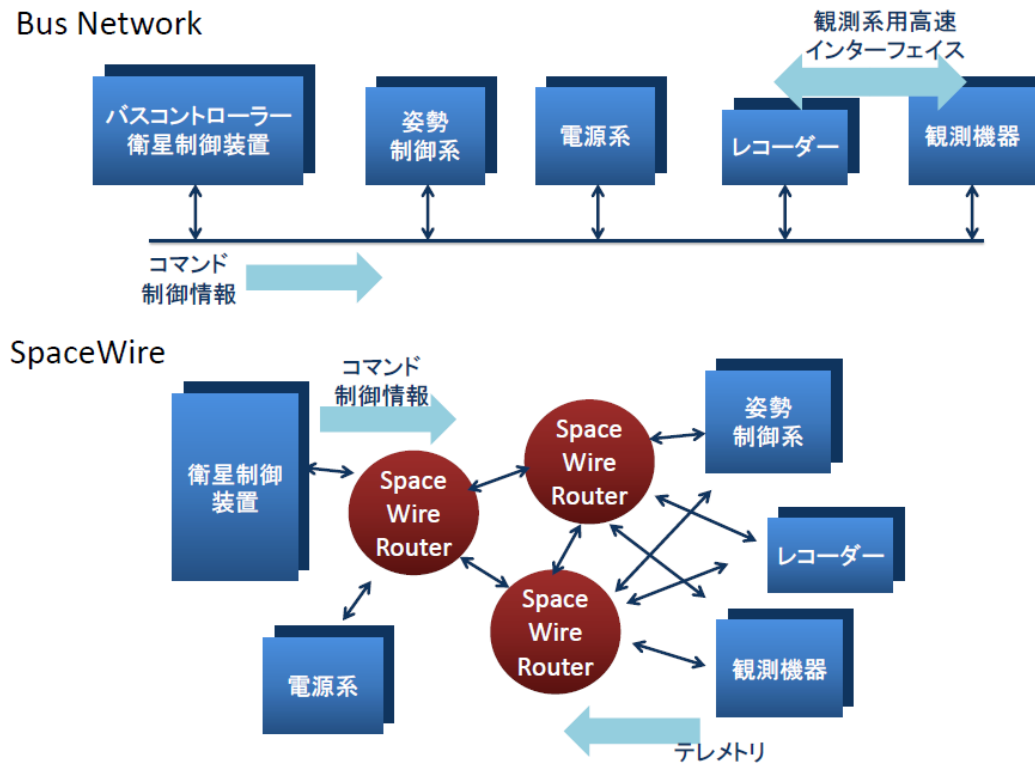


図 4.1: 従来のネットワークと SpaceWire

4.2 時刻付けシステム

ASTRO-H では GPS 衛星からの時刻情報は GPS Receiver (GPSR) が受信し、中央制御コンピュータである Satellite Management Unit (SMU) へ送られる。SMU では Time Indicator (TI) という、衛星内で使用される時刻として SpaceWire Router (SWR) を通じ各検出器に配信している。GPSR から各検出器に至るまでの経路を 4.2 に示す。

4.2.1 Time Indicator: TI

SMU は TI を作成、各検出器に配信している。TI は 38bit からなる 64Hz の信号で、1 秒以下を表す下位 6bit を Time Code と呼んでいる。上位 32bit は秒以上を表し、Upper 32bit TI (U32TI) と呼ばれる。

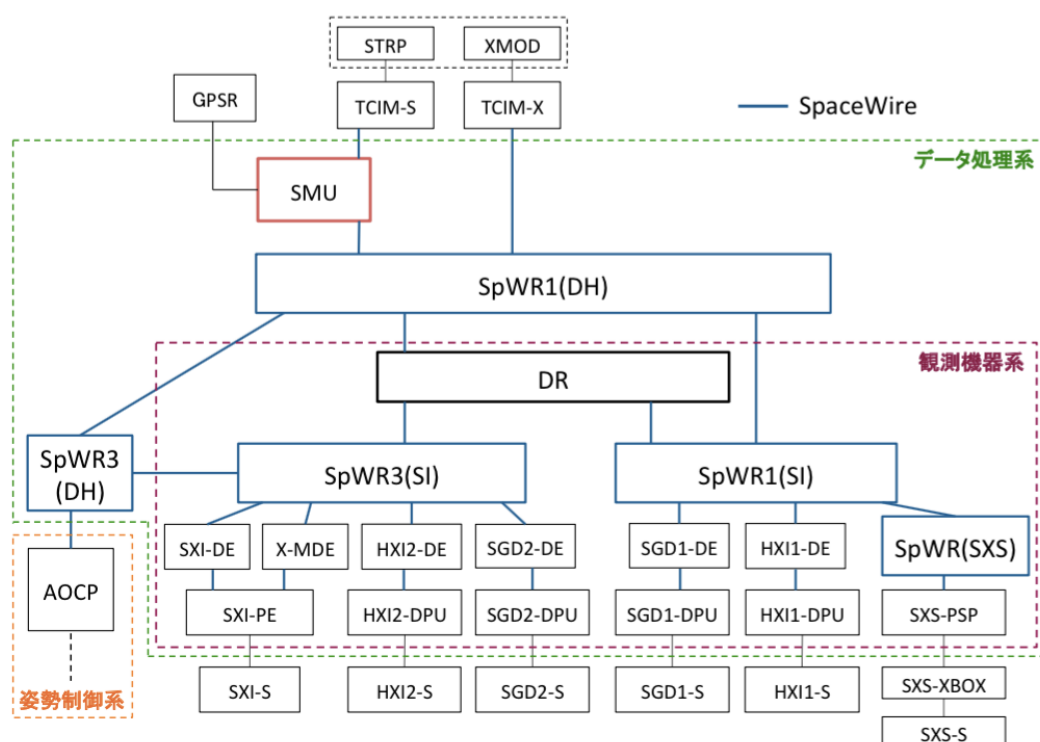


図 4.2: ASTRO-H のネットワーク

4.2.2 Local Time

TI の時間分解能は $1/64s=15.625ms$ であるため、時刻付けの要求を満たすことができない。しかし、各検出器には TI より時間分解能のよいカウンタがそれぞれ搭載されており、自身で時刻情報を記録することができる。Local Time は独立にカウントされるため、TI とラッチしなければならない。定期的にラッチされるものをハウスキーピング (HK) データ、イベントが到来したときにラッチされるものをイベントデータと呼び区別している。Local Time の時間分解能と bit 数を表 4.1 に示す。PSP ではこの照合データを look up table として記録しており、テレメトリとして SMU を通じ地上へと送信している。

表 4.1: SXS の LocalTime		
種類	時間分解能	bit 数
HK	$80 \mu s$	32
Event	$20 \mu s$	16

4.3 遅延

信号の送受信にはケーブルの伝送性能やノードごとの処理時間などによって遅延が生じる。この遅延には 2 種類あり、一つは固定遅延、もう一つをジッター呼ぶ。固定遅延はノードやケーブルの物理的性能に起因する遅延のことで、系統的なものとして評価できるため、地上で較正する

ことで影響を軽減できる。一方ジッターとは、TimeCode の転送にかかる待機時間のことを表している。TimeCode はほかの信号に割り込んで配信できる最優先コードであるが、データ配信後に挿入しなければならないため、最大 10bit の待機時間が発生する。ジッターはこのランダムに発生する待機時間によって発生するため校正できず、時刻精度悪化の要因となっている。

5 相対時刻精度の検証

5.1 目的

PSP は表 3.1 の CR-P16 より、相対時刻精度が $80 \mu\text{s}$ 以内でなければならない。相対時刻とは同一ピクセル内での X 線検出時刻のことである。相対時刻精度が要求値を下回るかを確かめる。

5.2 方法

相対時刻精度を調べるため、MXS による周期的な X 線照射データを使用する。LED が点灯してから最初の光子が検出されるまでの時間は、LED の応答時間、検出器から PSP までの時刻配信にかかる遅延、PSP の時刻付け精度の 3 つによってゆらぐとされている。そこで、LED 点灯時刻を起点としてデータを周期ごとに区切り、重ね合わせて、一つの大きなパルスを作る。光子一つ一つの到来時刻の揺らぎは、この重ね合わせたパルスが立ち上がるまでに要する時間が反映している。(図 5.1) 立ち上がりの時間から、PSP の時刻付け精度を求め、要求値と比較する。解析

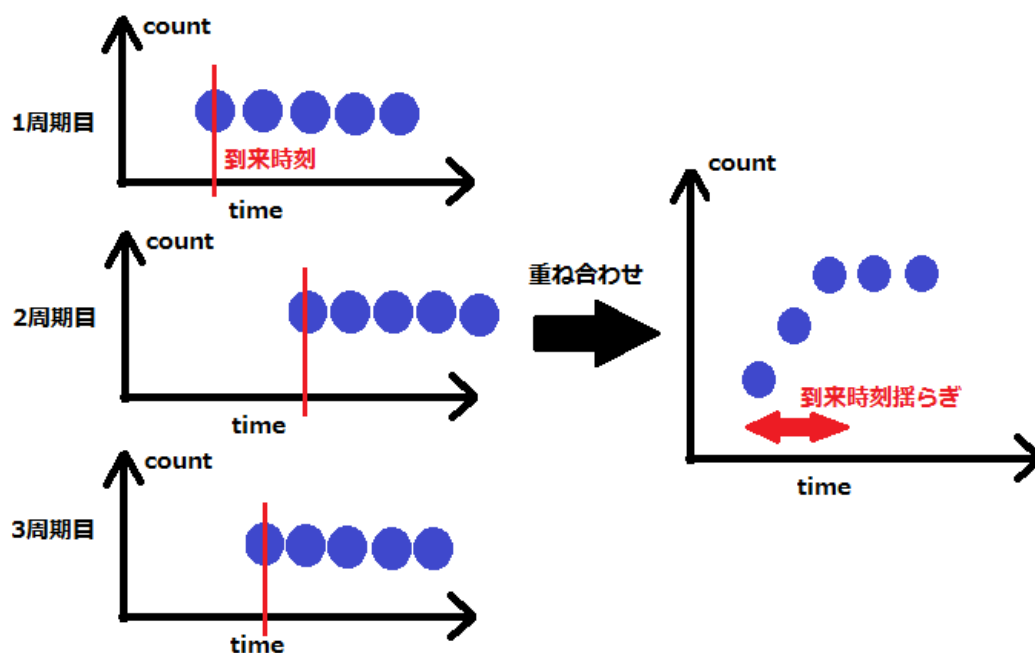


図 5.1: 到来時刻揺らぎと畳み込み波形の立ち上がり

の手順をまとめると以下の二つとなる。

1. 周期探査

畳み込み光度曲線の作成のため、まずパルス発生装置と、実際に得られたデータとの周期を比較し、畳み込む周期を決定する。この探索は χ^2 検定を用いて行われる。

2. 畳み込み

周期が決定した後、照射時刻を始点としてデータの光度曲線をこの周期で畳み込み、パルスの立ち上がり時間を fitting して調べる。次に、この時間と衛星の時刻配信精度や LED の応答時間から PSP 時刻付け精度を計算し、要求される遅れと比較する。

5.3 セットアップ

使用したデータは表 5.1 のとおりである。

表 5.1: 検証に用いたデータ			
試験名	試験日	パルス周期 [ms]	パルス幅 [ms]
SXS 総合試験	2015 年 5 月 19 日	78.125	15.875
詳細機能試験	2015 年 5 月 22 日	78.125	15.875
熱真空試験	2015 年 6 月 26 日	62.5	5

5.4 結果

5.4.1 周期探索

周期探索は χ^2 検定を使用して行われる。データの光度曲線を様々な周期で畳み込み、その波形を直線でフィッティングする。もし周期が一致した場合、畳み込んだ光度曲線は強いピークを形成するため、直線でフィッティングすると χ^2 の値は大きくなる。しかし、周期が妥当でなかった場合、畳み込んだ光度曲線は平坦な形を作るため、 χ^2 の値は小さくなる。これを利用して最適な周期を探索し、パルス発生装置の設定値と比較する。

図??~5.4 は探索で得られた結果を表すグラフである。横軸が Offset とのずれ、縦軸が χ^2 の値を表している。 χ^2 が最も高いときの周期が Best Period で、この値とパルス発生装置の周期の設定値とが一致するかを分解能を $1\mu\text{s}$ として調べた。結果が表 5.2 である。最も χ^2 の値が大きい周期はいずれも設定値と一致した。光度曲線作成では畳み込みにこの設定値を使用する。

表 5.2: 周期探索結果	
試験名	χ^2_{peak}
SXS 総合試験	2.6×10^5
詳細機能試験	1.2×10^5
熱真空試験	2.7×10^6

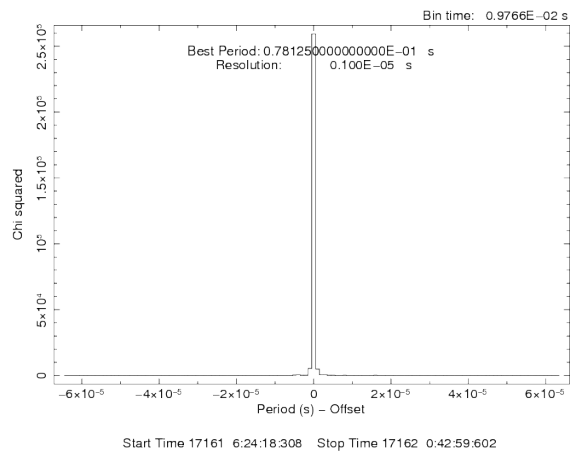


図 5.2: SXS 総合試験の周期探索

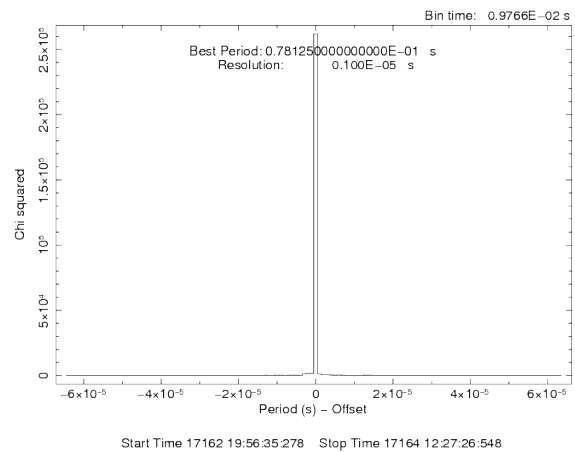


図 5.3: 詳細機能試験の周期探索

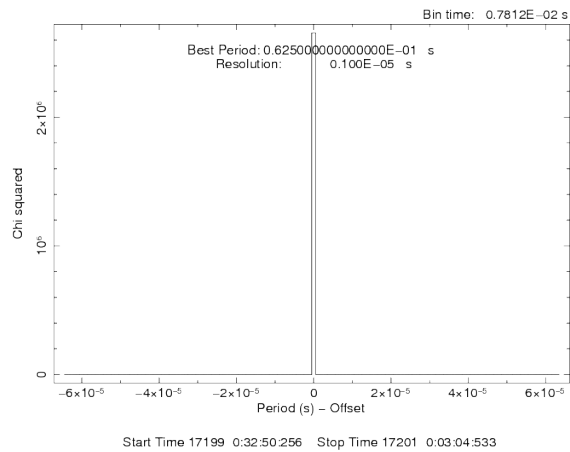


図 5.4: 熱真空試験の周期探索

5.4.2 畳み込み

各試験のイベント到来を表すグラフを図??～図??に示す。横軸は照射開始時刻からの周期で、図では3周期分を表示させている。縦軸はカウントで、光子が到来した時刻に1になる。X線は周期的に照射されているので、一定間隔で $count = 1$ に点が出現する。畳み込み光度曲線はこれを周期で分割し重ね合わせることで作ることができる。畳み込み光度曲線と立ち上がりのガウシアンフィッティング結果の一部を図5.8～5.13に示す（他は付録を参照）。横軸は周期で、図では2周期分を表示させている。縦軸は1binあたりのカウント数を表している。立ち上がり時間の計算にはフィッティングしたガウシアン 1σ の値を使用した。表5.4は立ち上がり時間のピクセル平均をとった結果である。

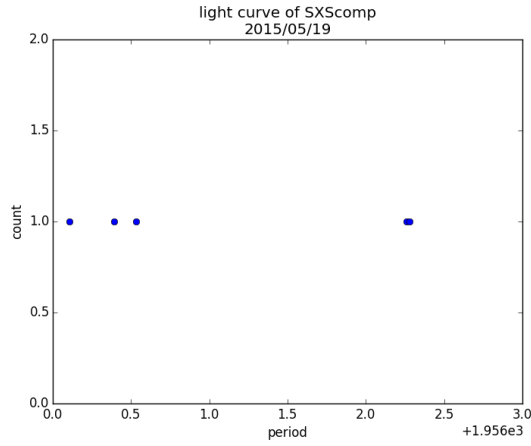


図 5.5: SXS 総合試験のイベント到来の様子

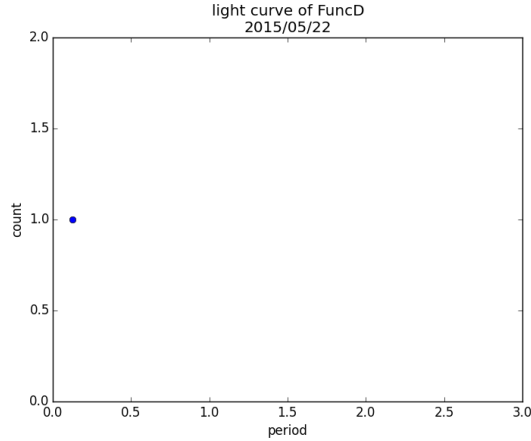


図 5.6: 詳細機能試験のイベント到来の様子

5.5 考察

表5.4で計算したパルスの立ち上がり時間を σ_{rise} とすると以下の式を満たす。

$$\sigma_{rise}^2 = \sigma_{PSP}^2 + \sigma_{LED}^2 + \sigma_{SpW}^2 \quad (31)$$

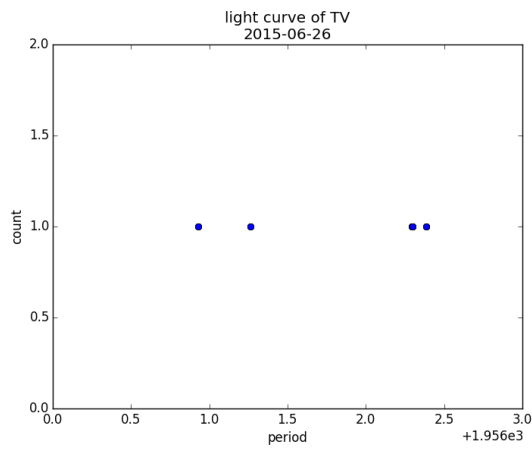


図 5.7: 熱真空試験のイベント到来の様子

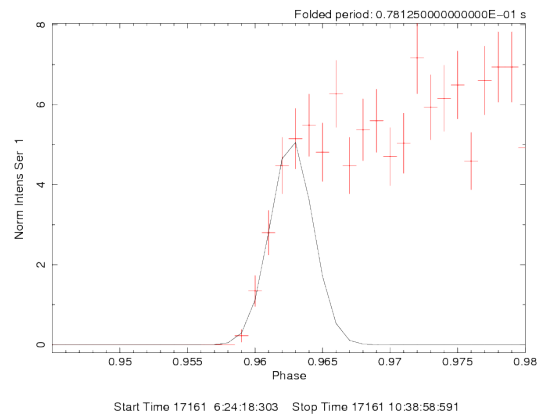
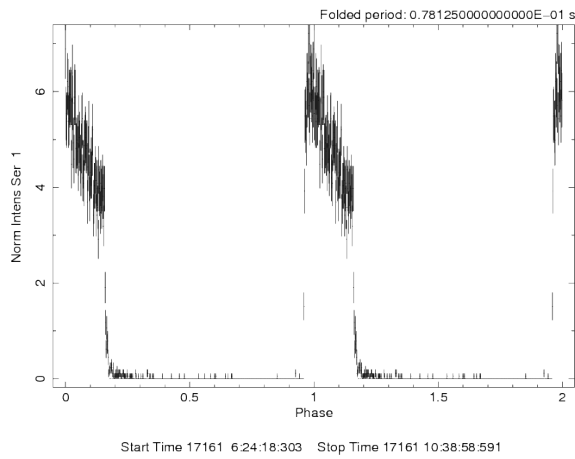


図 5.8: SXS 総合試験の畳み込み光度曲線 (pixel=30) 図 5.9: SXS 総合試験の立ち上がりフィッティング

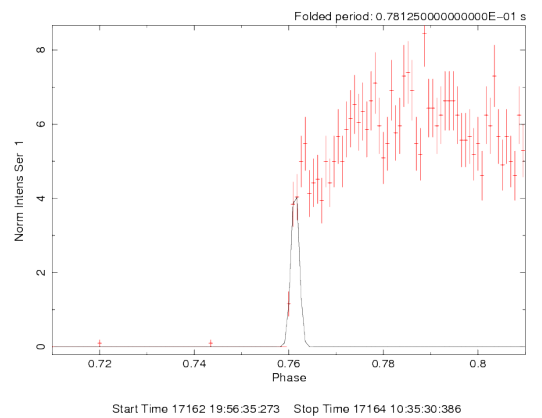
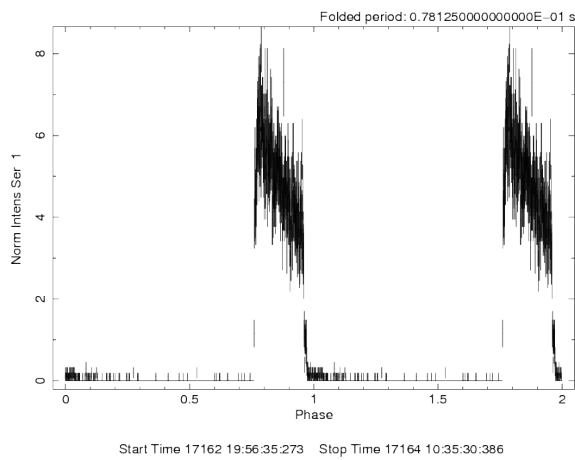


図 5.10: 詳細機能試験の畳み込み光度曲線 (pixel=30) 図 5.11: 詳細機能試験の立ち上がりフィッティング

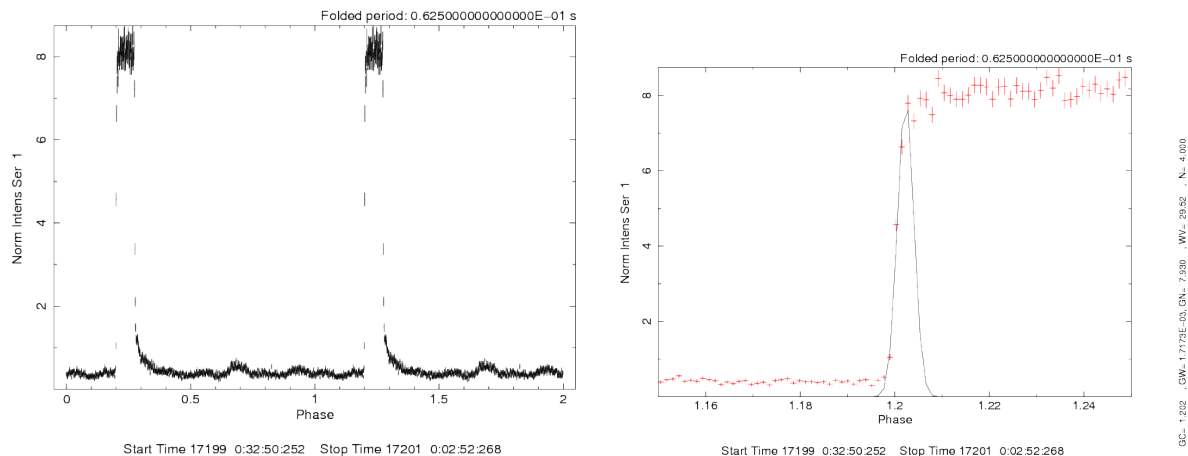


図 5.12: 熱真空試験の畳み込み光度曲線 (pixel=22) 図 5.13: 熱真空試験の立ち上がりフィッティング

表 5.3: 立ち上がり時間のずれのピクセル平均 [μs]

SXS 総合試験	詳細機能試験	熱真空試験
124.2	104.0	111.4

σ_{PSP} : PSP の時刻付け精度 σ_{LED} : LED の応答時間 σ_{SpW} : SpW の時刻付け精度

ここで、試験では $\sigma_{\text{LED}} \sim 100 \mu\text{s}$ のパルス発生装置を使用している。また σ_{SpW} は試験ではパルス発生装置と PSP で同じ Time Code を使用しており、実験から $< 2 \mu\text{s}$ と小さいため無視できる (中谷修論 2016 を参照)。よって σ_{PSP} は次のようになる。

$$\sigma_{\text{PSP}} = \sqrt{\sigma_{\text{rise}}^2 - \sigma_{\text{LED}}^2} \quad (32)$$

$\sigma_{\text{LED}} = 100 \mu\text{s}$ と仮定すると表 5.4 となり、 σ_{PSP} はいずれの試験でも PSP の要求値 $80 \mu\text{s}$ を下回る結果となった。

表 5.4: 試験ごとの σ_{PSP} [μs]

SXS 総合試験	詳細機能試験	熱真空試験
59.5	28.6	49.0

5.6 まとめ

各試験のデータについて周期探索を行い、得られた周期が X 線発生装置の設定値と同じことを確認した。その後イベントデータを周期で畳み込んだ光度曲線を作成し、ピクセル内で X 線検出時刻の時刻ずれを検証。結果、この検出時刻のずれは PSP の相対時刻精度である $80 \mu\text{s}$ の範囲内に収まっていることが確かめられた。よって、時刻付けは要求の範囲で正しく行われていることがわかった。

6 トリガタイミングのエネルギー依存性の検証

6.1 目的

X線マイクロカロリメータの構造から、イベント波形は時定数が一定の指数関数を描く。したがって、波形はエネルギーに対して相似であることがわかる。そのため、あらかじめテンプレートに対し、波高値の一定割合の点でトリガ時刻設定しておけば、最適フィルタ処理前後でもその時刻が変化することがない。すなわち、トリガ時刻にエネルギー依存性はないということである。図 6.1 はこの原理のイメージである。PSP ではこの方法で時刻決定されているため、エネルギー依存性を調べ、相対時刻精度要求と比較することで有意な差が現れないことを確認する。

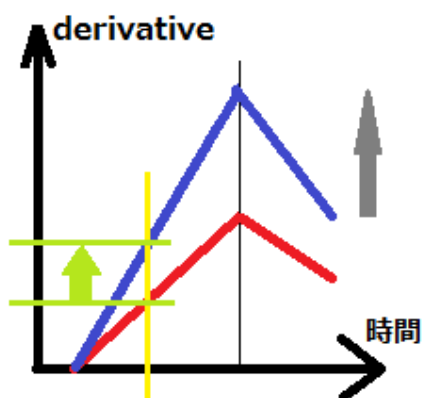


図 6.1: トリガ時刻のエネルギー非依存性

6.2 方法

以下の手順で行う。

1. エネルギーヒストグラム作成

まずイベントを derivative の最大値 derivmax でヒストグラムを作る。derivmax はエネルギーと対応しているためこれはエネルギースペクトルとなる。この分布を調べ、どの範囲ごとに帯域を区切るかを決定する。熱真空試験では照射線源に Cu を使用しており、エネルギーはそのピークの周囲に広がった分布をとることが予想される。

2. 畳み込み光度曲線作成

次に分割したエネルギー帯域ごとに光度曲線を畳み込む。この際、各帯域で畳み込みの開始時刻を統一しておく必要がある。開始時刻はパルス発生装置の LED-on の信号が送られた時間とし、bin 数を 62500 とした。

3. delay 計算

畳み込み光度曲線の立ち上がり時刻をそれぞれの帯域で測定し、時刻のずれを調べ要求値と比較する。

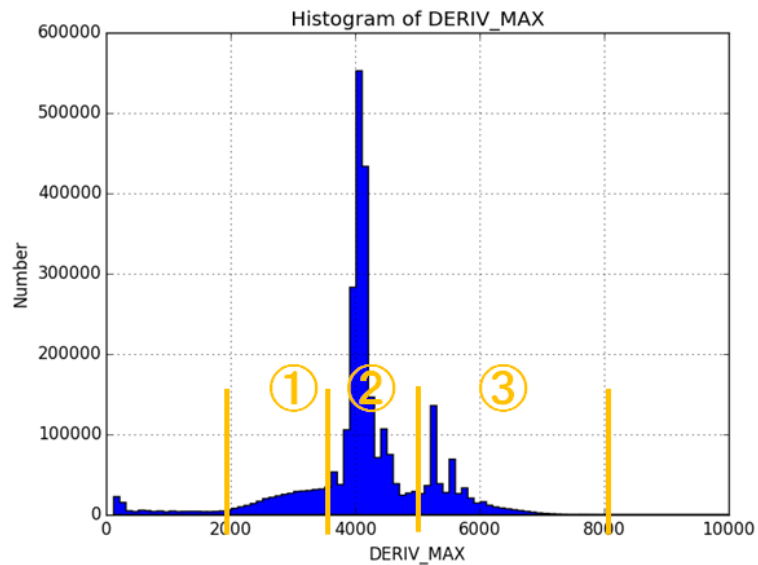


図 6.2: 熱真空試験のエネルギー分布

6.3 セットアップ

データは図 6.1 の通り、前章の熱真空試験のデータを使用する。ピクセル 12 は校正用の鉄 55 線源が常時照射されており、周期性がないため除いた。

表 6.1: 検証に用いたデータ

試験名	試験日	パルス周期 [ms]	パルス幅 [ms]	pixel
熱真空試験	2015 年 6 月 26 日	62.5	5	not12

6.4 結果

6.4.1 エネルギーヒストグラム

SXS 総合試験のデータのエネルギー分布は図 6.2 のようになった。エネルギー帯域を表 6.2 のように区分した。

表 6.2: 検証に用いたデータ

derivmax
$2000 < \text{derivmax} < 3500$
$3500 < \text{derivmax} < 5000$
$5000 < \text{derivmax} < 8000$

6.4.2 立ち上がり時刻の測定

立ち上がり時刻をピークの bin のカウント数の 50 % と定義した。3 つの結果が図 6.3～6.5 と表 6.3 である。

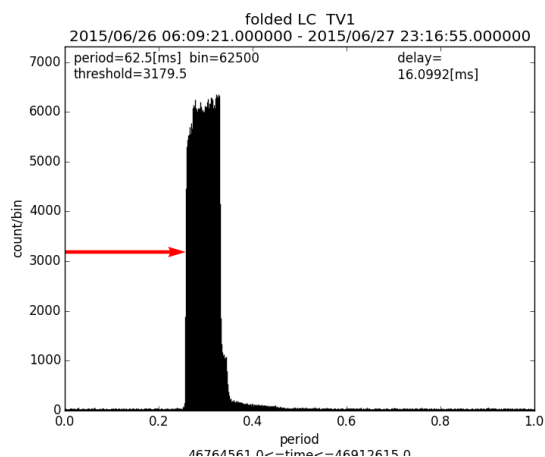


図 6.3: $2000 < \text{derivmax} < 3500$

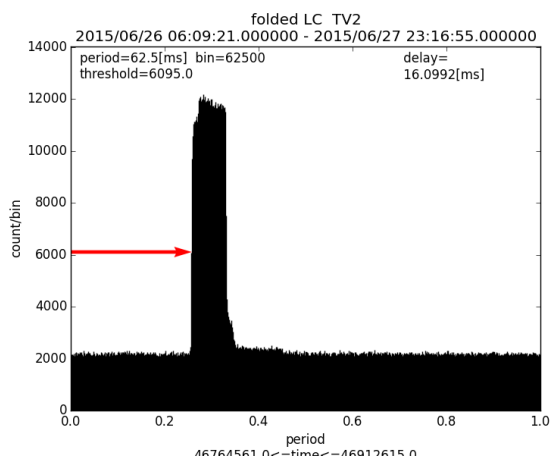


図 6.4: $3500 < \text{derivmax} < 5000$

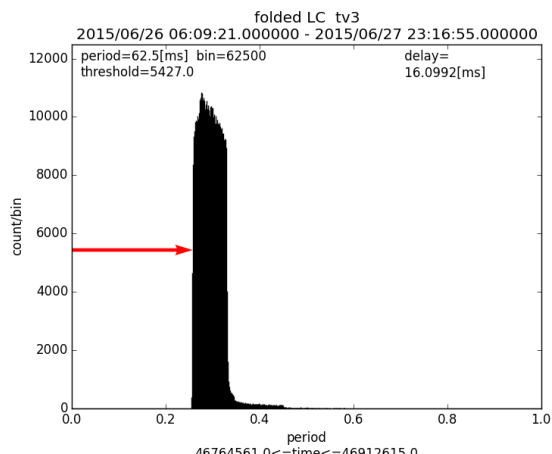


図 6.5: $5000 < \text{derivmax} < 8000$

結果、 $1\mu\text{s}$ の時間分解能でずれが見られず、 $\sigma = 0$ だった。これは要求値 $80\mu\text{s}$ を満たしており、エネルギー依存性はないことが確かめられた。

6.5 まとめ

熱真空試験のデータについて、エネルギースペクトルから 3 つの帯域に分割し、それぞれで開始時刻をそろえ、畳み込み光度曲線を作った。パルスの立ち上がりをピークの 50 % と設定し、照射開始時刻からの遅れを各帯域で測定、トリガ時刻とエネルギーの非依存性を確かめた。結果、 $1\mu\text{s}$ を上回るずれは確認されなかった。これは PSP の時刻精度 $80\mu\text{s}$ を下回るの、トリガ時刻はエネルギーに依存していないことがわかった。

表 6.3: 各帯域の立ち上がり時刻
立ち上がり時刻 [μ s]

16.0992
16.0992
19.0992

7 付録

畳み込み光度曲線と fitting の結果の図を以下にまとめる。SXS 総合試験と詳細機能試験はピクセル 1,3,5,6,27,29,30,31,32
熱真空試験はピクセル 9,11,14,19,20,21,22,23,24 である。

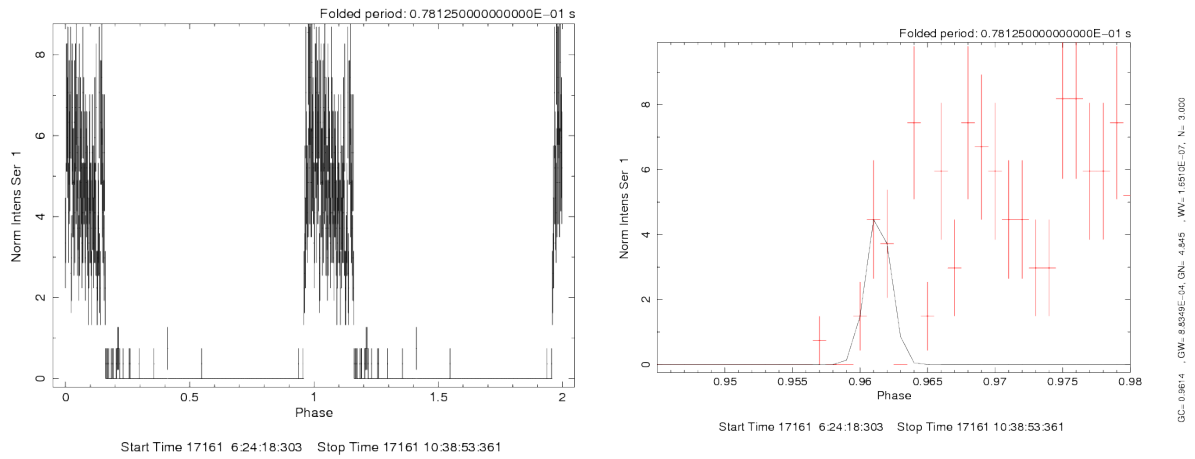


図 7.1: SXS 総合試験 pixel1

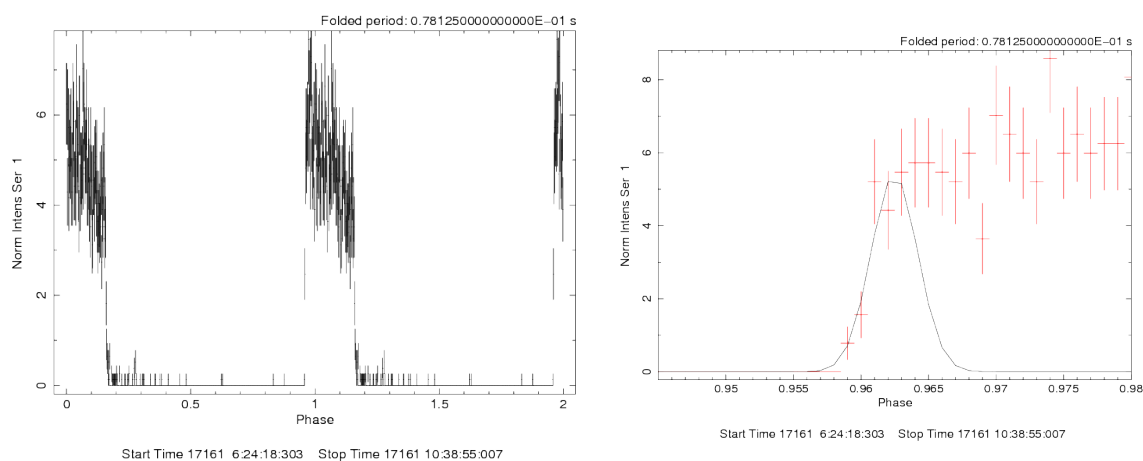


図 7.2: SXS 総合試験 pixel3

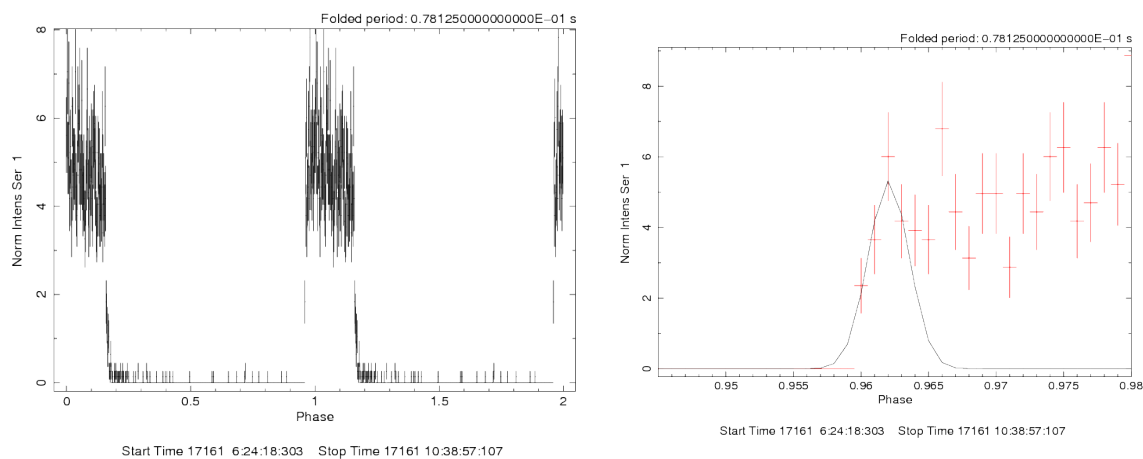


図 7.3: SXS 総合試験 pixel1

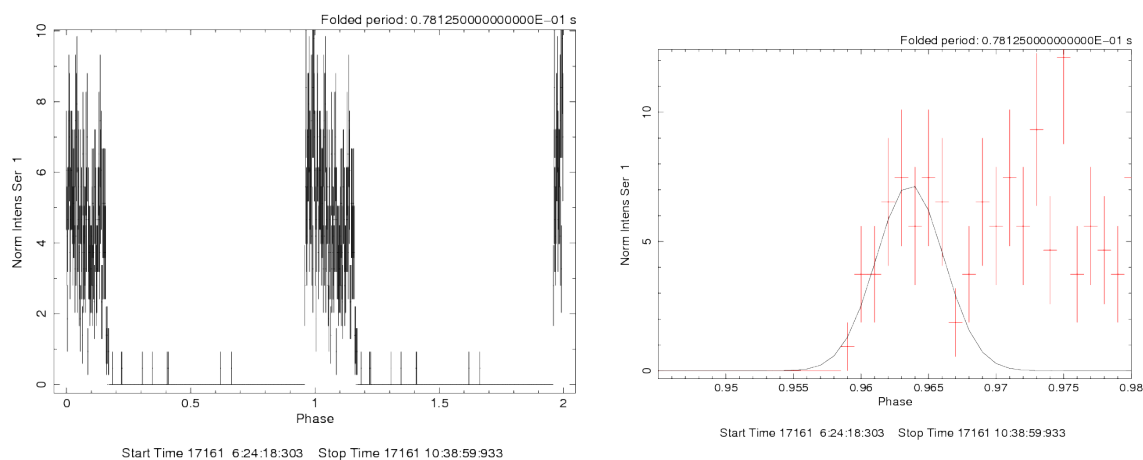


図 7.4: SXS 総合試験 pixel6

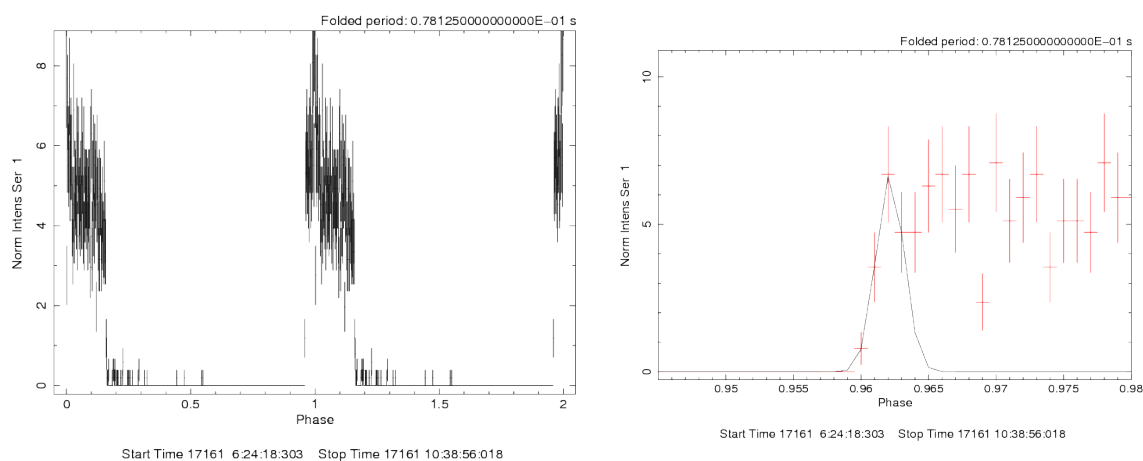


図 7.5: SXS 総合試験 pixel27

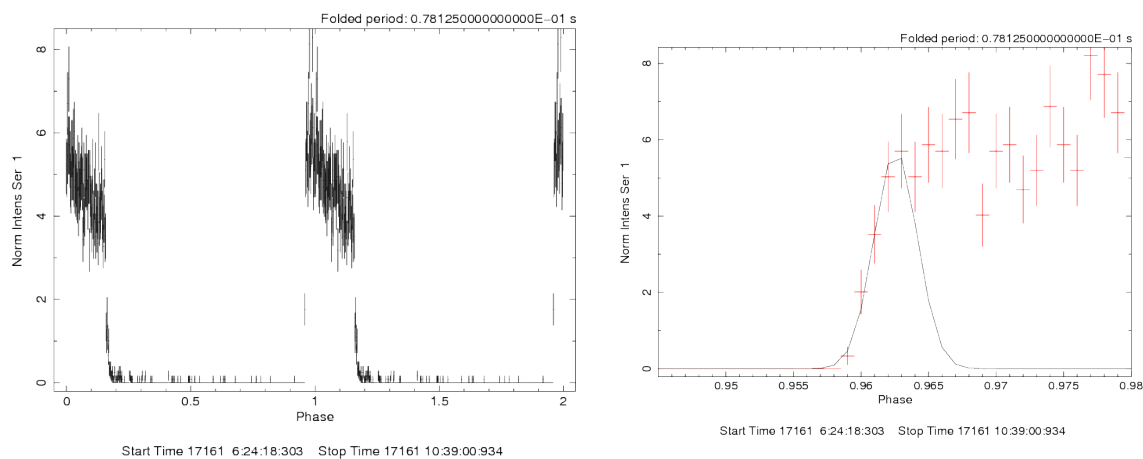


図 7.6: SXS 総合試験 pixel29

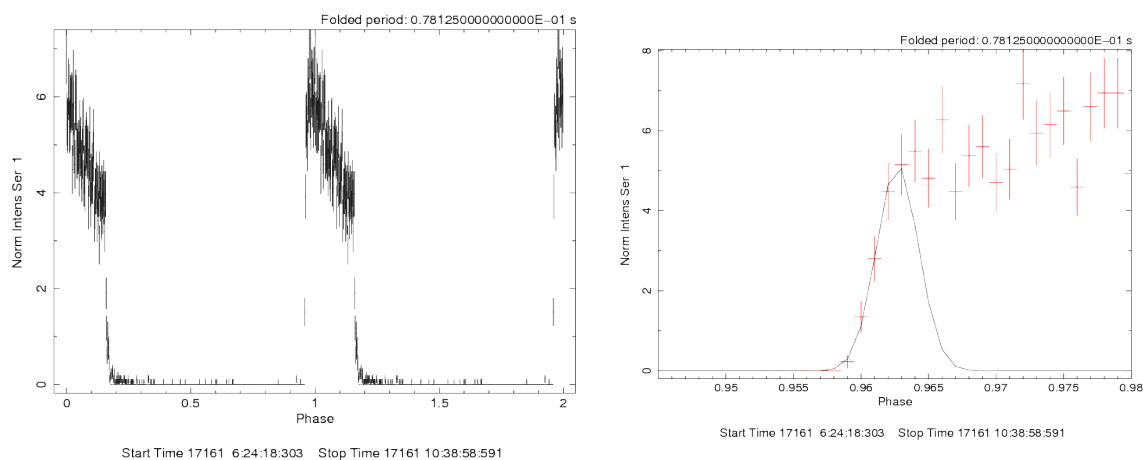


図 7.7: SXS 総合試験 pixel30

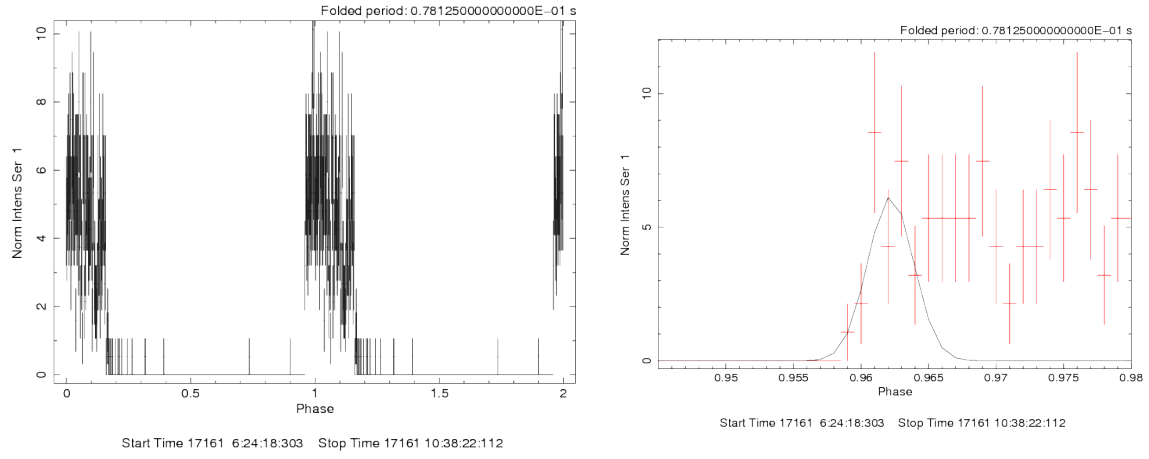


図 7.8: SXS 総合試験 pixel31

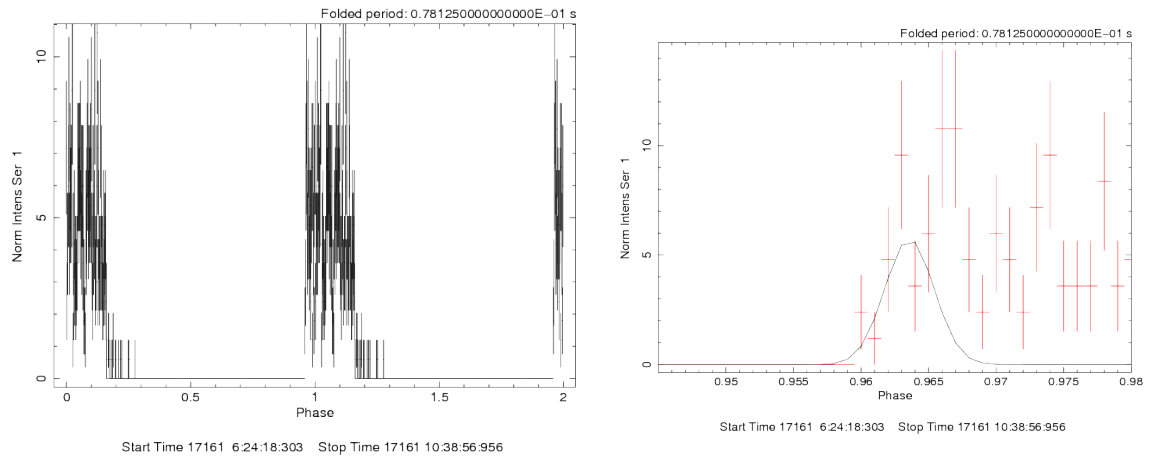


図 7.9: SXS 総合試験 pixel32

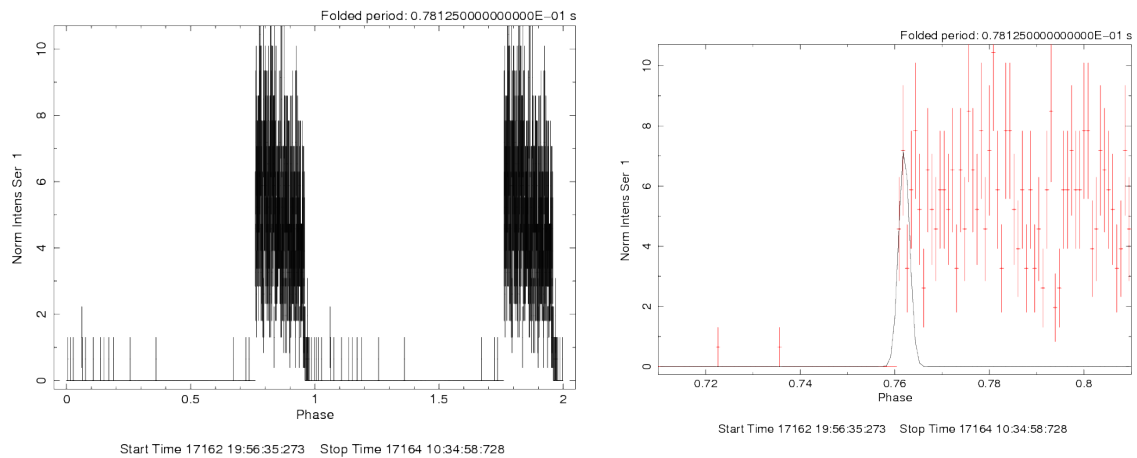


図 7.10: 詳細機能試験 pixel1

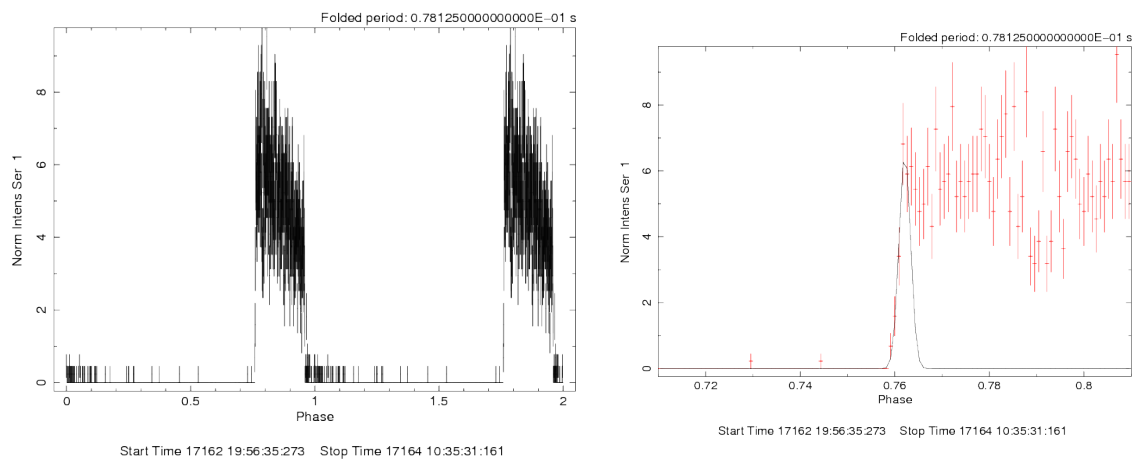


図 7.11: 詳細機能試験 pixel3

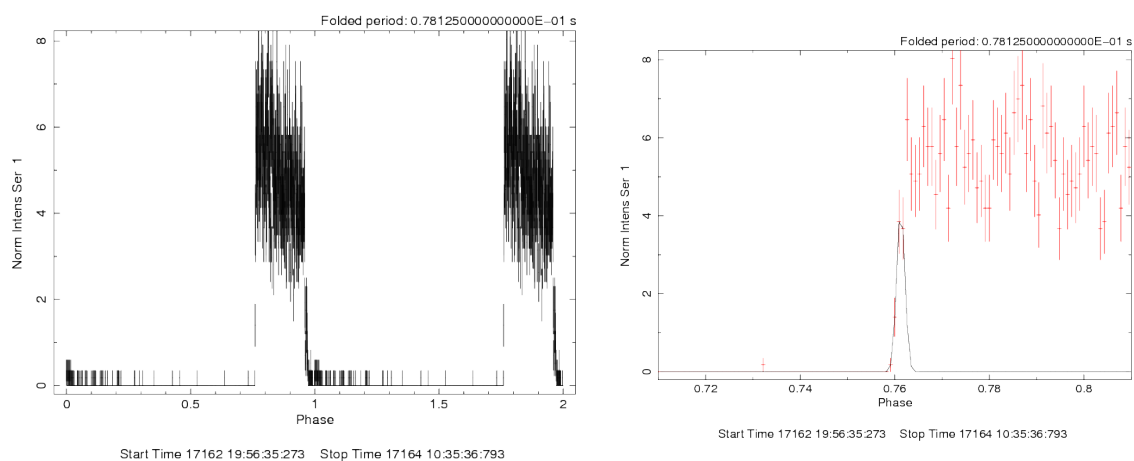


図 7.12: 詳細機能試験 pixel5

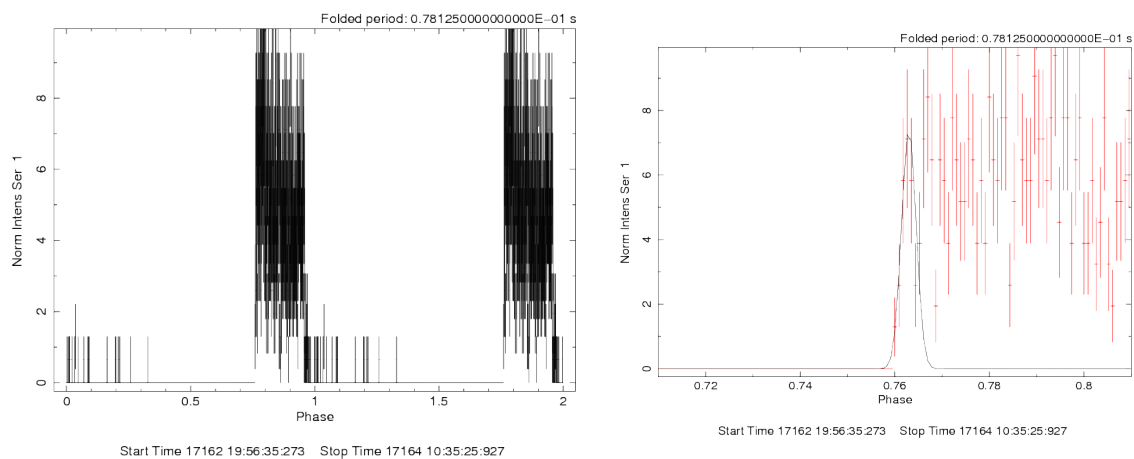


図 7.13: 詳細機能試験 pixel6

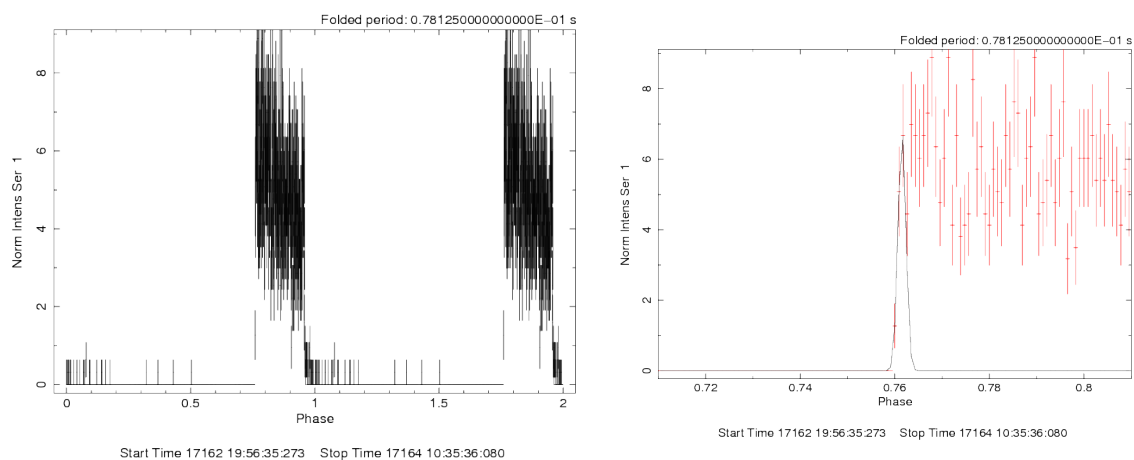


図 7.14: 詳細機能試験 pixel27

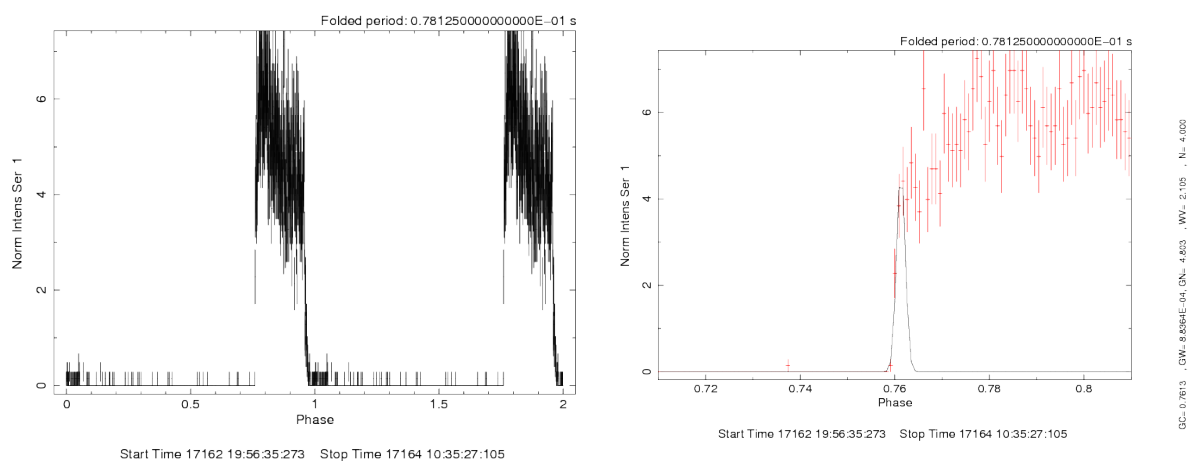


図 7.15: 詳細機能試験 pixel29

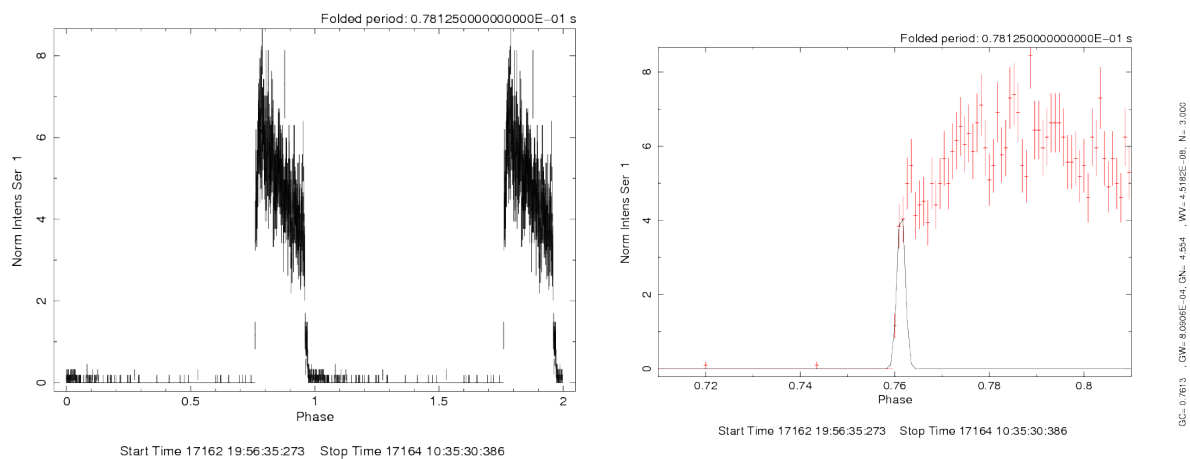


図 7.16: 詳細機能試験 pixel30

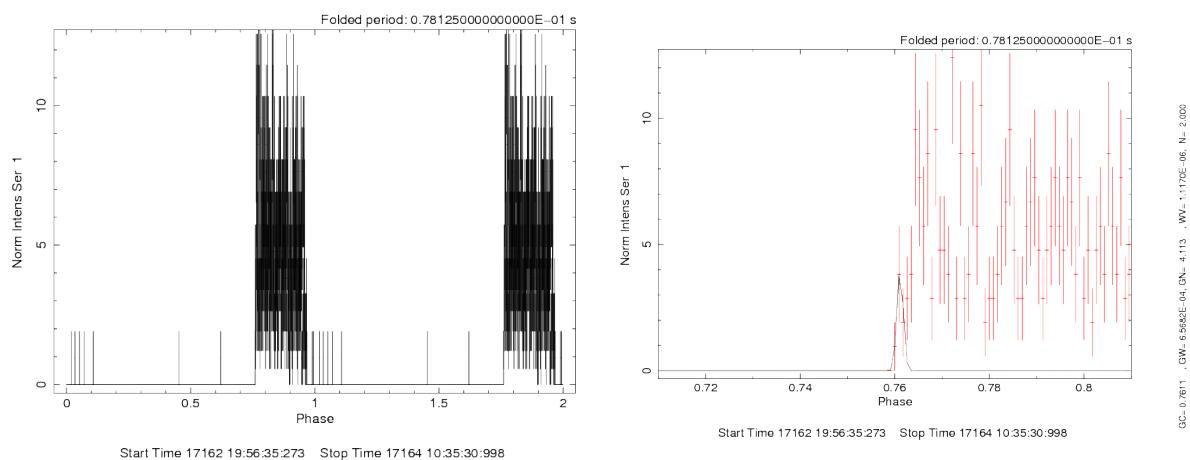


図 7.17: 詳細機能試験 pixel31

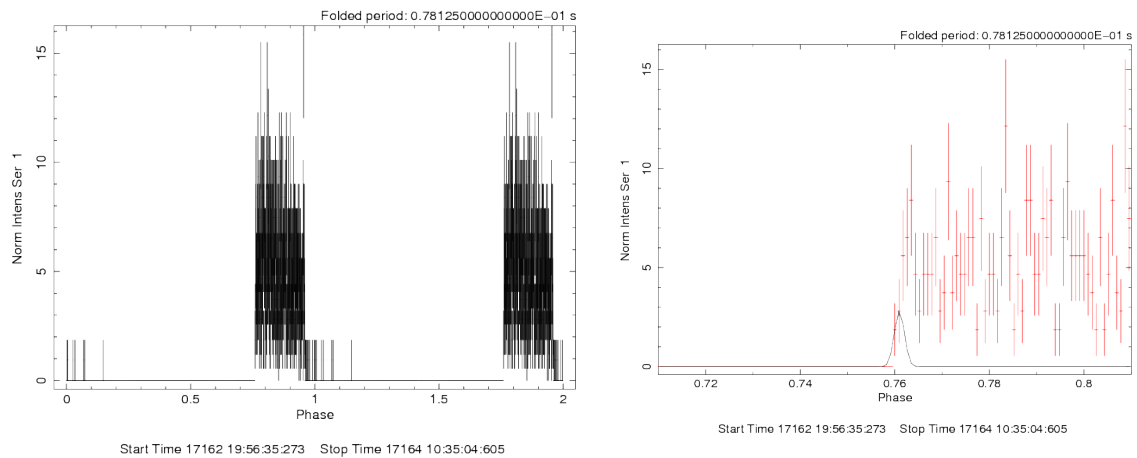


図 7.18: 詳細機能試験 pixel32

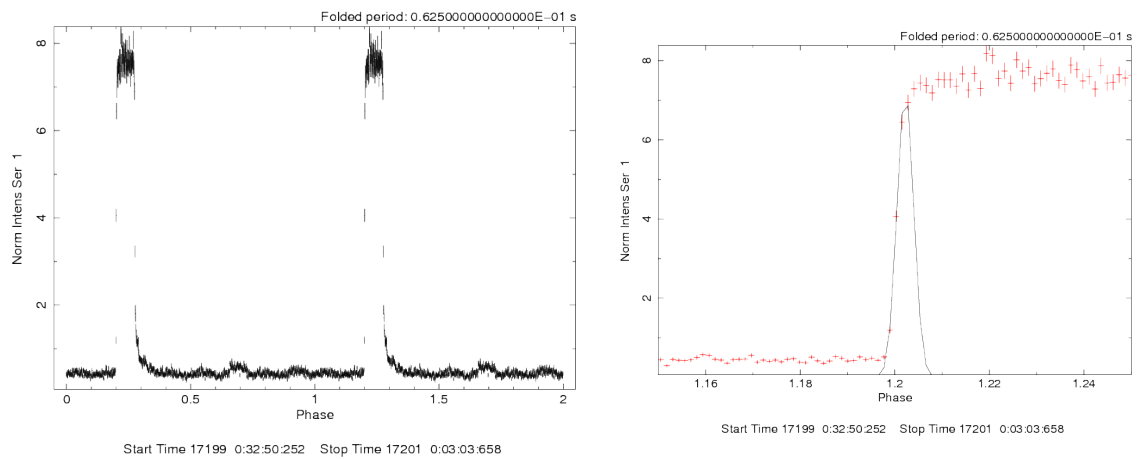


図 7.19: 熱真空試験 pixel9

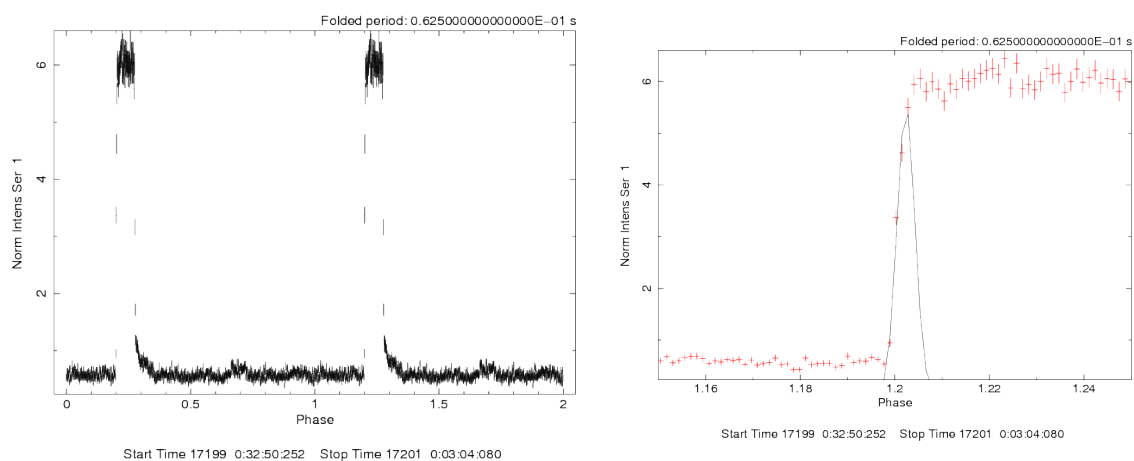


図 7.20: 熱真空試験 pixel11

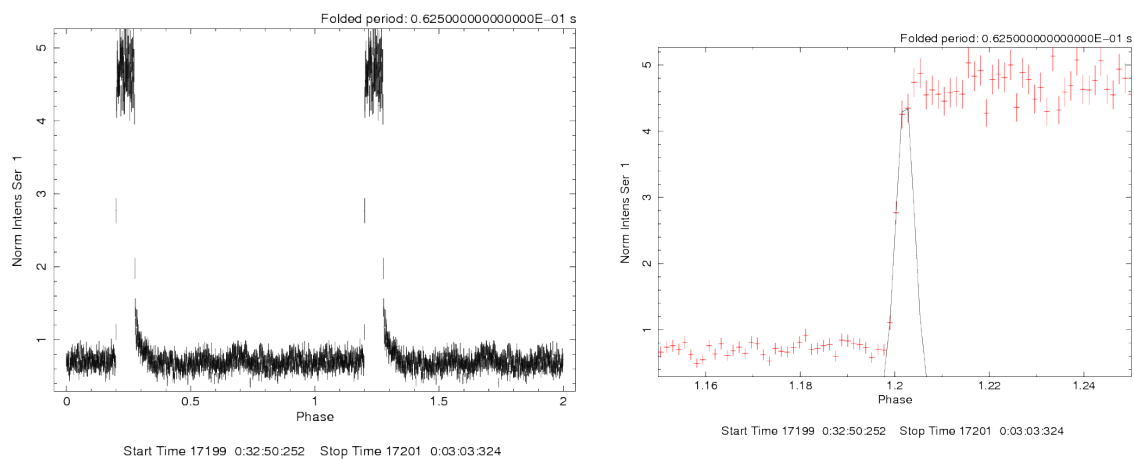


図 7.21: 熱真空試験 pixel14

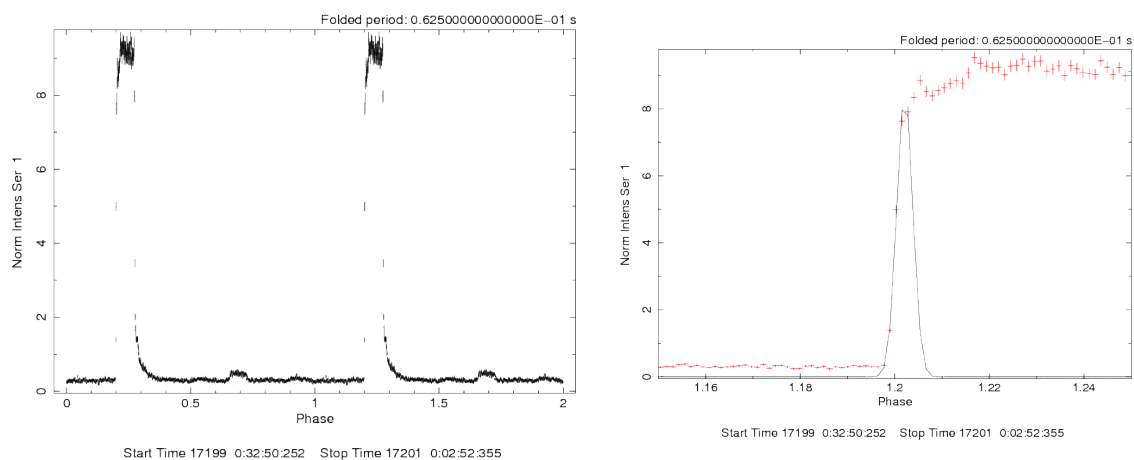


図 7.22: 熱真空試験 pixel19

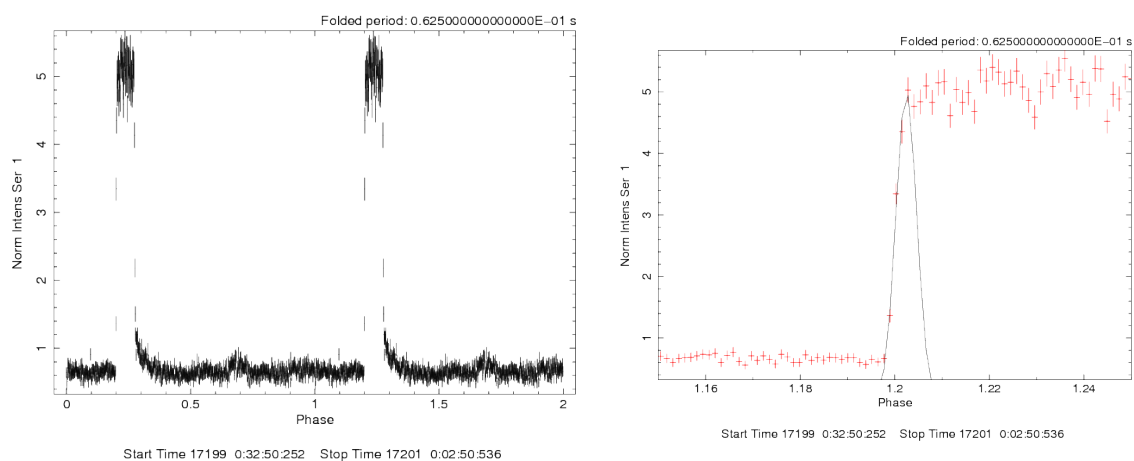


図 7.23: 熱真空試験 pixel20

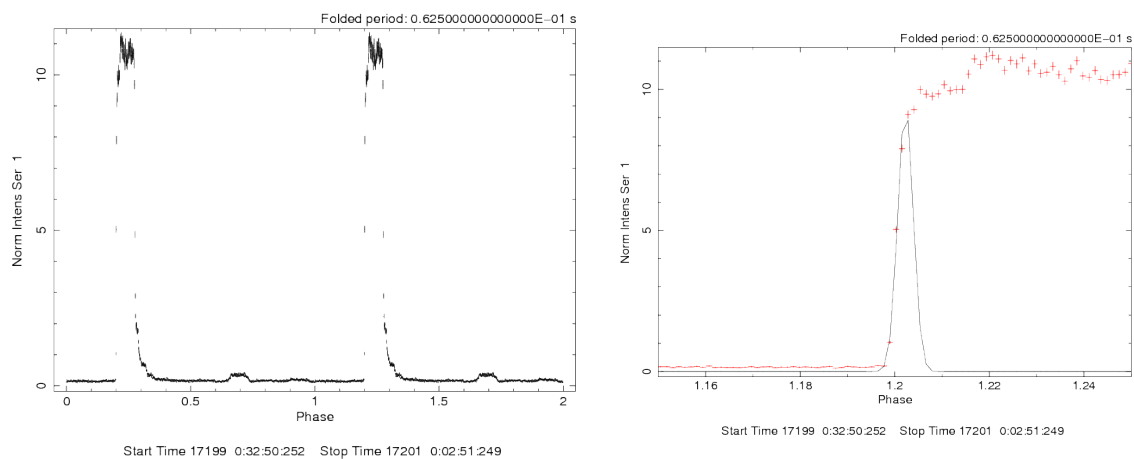


図 7.24: 熱真空試験 pixel21

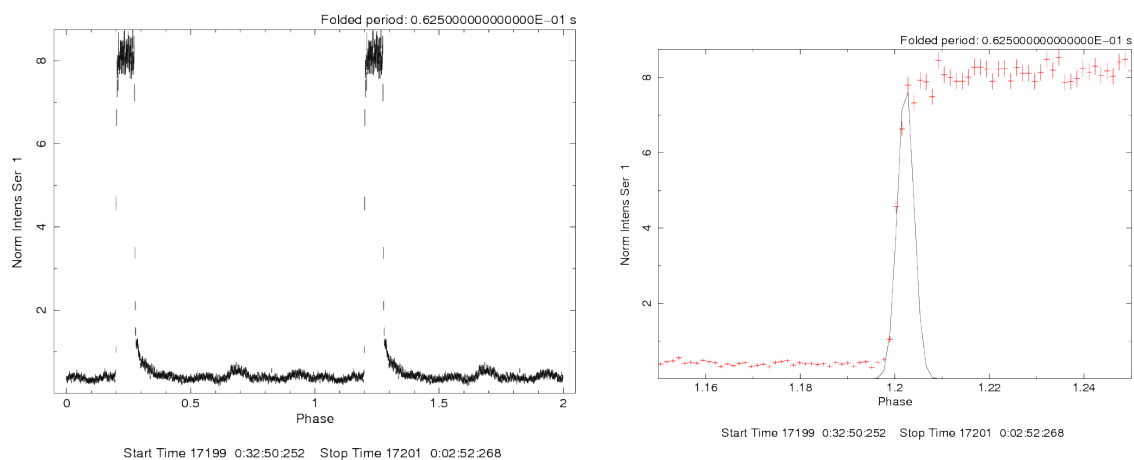


図 7.25: 熱真空試験 pixel22

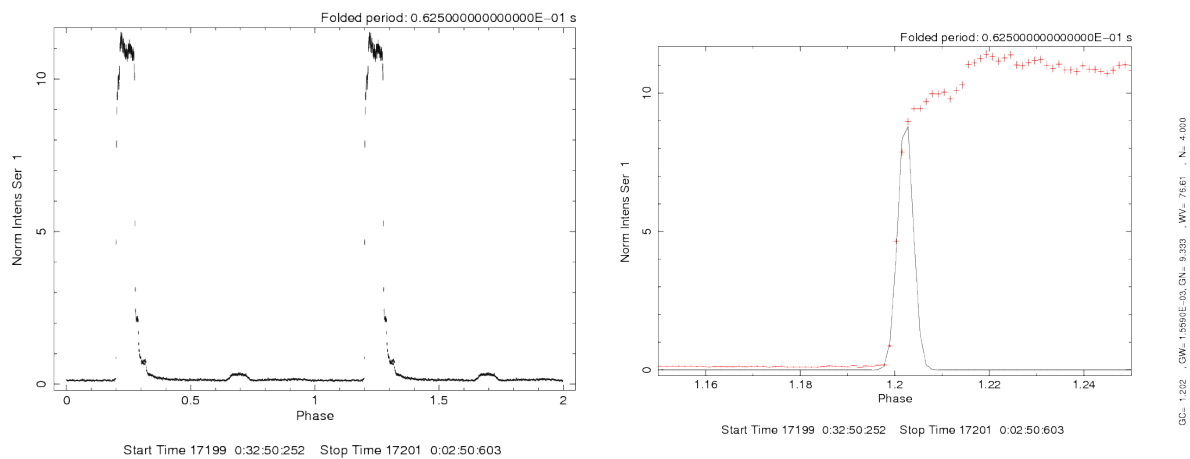


図 7.26: 熱真空試験 pixel23

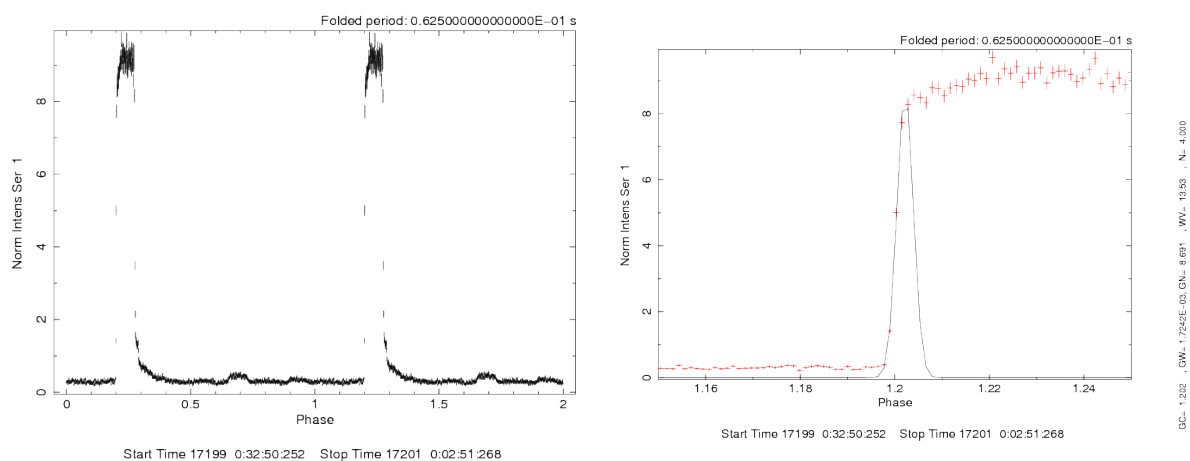


図 7.27: 熱真空試験 pixel24