

令和5年度 修士論文

XRISM 衛星搭載極低温検出器の
地上・軌道上データを用いた X 線イベント処理最適化

東京大学大学院 理学系研究科天文学専攻
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
海老沢研究室

学籍番号 35-226118

博士前期課程 2 年

望月 雄友

mochizuki@ac.jaxa.jp

2024 年 6 月 17 日

本文書から非公開情報を削除するため、一部の図表を表示していません。

Some materials that should be kept undisclosed are removed in this document.

概要

XRISM (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission) 衛星は、2023年9月6日に種子島宇宙センターから打ち上げられ、地球低軌道周回に投入された。XRISM に搭載される *Resolve* 装置は、X線マイクロカロリメーター検出器を搭載し、幅広いエネルギー範囲 (0.3–12 keV)、高エネルギー分解能 (≤ 7 eV; 6 keV での FWHM)、高検出効率での非分散 X 線分光を達成して、画期的な観測成果を多数上げることが期待されている。10月9日より観測を開始し、立ち上げ運用及び科学観測を実施中である。多くの検証項目で期待通りの性能を確認できている。

この良質かつ未開拓の観測データを活かすため、X線イベントをノイズから識別するイベントスクリーニングが極めて重要である。*Resolve* 装置のように、エネルギー帯域及び X 線フラックスのダイナミックレンジが広い装置ではなおさらである。先行する X 線マイクロカロリメーターミッションである ASTRO-H 衛星 SXS 装置では、イベントスクリーニングのためのいくつかの手法が開発された。これを駆使して低バックグラウンドを達成し、十数個のシグナルイベントからさえも新しい科学成果を得ることに成功した。しかし、SXS 装置は、衛星姿勢制御の不具合で短命に終わり、軌道上データの積分時間は 366 ks にとどまっている。

本論文は、*Resolve* 装置におけるイベントスクリーニングの検証と最適化を主題とする。前代ミッションの SXS 装置に比べ、以下の諸点で質・量ともに凌駕するデータが得られている。

- 地上試験で、較正用地上支援装置を用いた X 線データが約 2 ヶ月分取得された (SXS 装置は約 3 日間)。要求エネルギー帯域 0.3–12 keV を超えて、0.1–25 keV の帯域での X 線データが得られている。
- 地上試験で、冷媒に超流動ヘリウムを用いない無冷媒 (cryogen-free) モードでの X 線データが取得された。
- 地上試験で、クライオスタットの真空蓋 (ゲートバルブ) を開けて全エネルギー帯域をカバーしたデータが取得された。
- 軌道上運用実績は既に 3 ヶ月を超え、バックグラウンドデータの積分時間は 655 ks 得られており、今後も順調に増える見込みである。

これら、地上及び軌道上の豊富だが不均質なデータを処理してできるだけ均質なデータとし、その膨大なデータベースを見渡して最適なデータセットを揃え、イベントスクリーニングの検証と最適化を行った。具体的には以下の 3 つの目標を設定する。

目的 1 個別のスクリーニング項目における条件出しを行う。

目的 2 複数のスクリーニング項目を組み合わせた標準スクリーニングが、装置性能要求を満たすことを検証する。

目的 3 さらに追加スクリーニングで性能拡張を目指す。

個別のスクリーニング項目には、大別して 3 種類 18 項目ある。(1) マイクロカロリメーターのパルス波形に基づくもの (全 7 項目)、(2) 複数イベントの相対時刻差に基づくもの (全 5 項目)、データ取得時間帯に基づくもの (全 6 項目)。全 18 項目のうち本論文では 15 項目を扱う。各項目に対し、最適なデータセットから条件だしを行った。いくつかのスクリーニングは SXS 装置からの新設であり、本論文で検証を行った。また、いくつかについては、SXS 装置で設定されたものより適当な条件を提案した (目的 1)。

更に、スクリーニングの組み合わせを実データに対して適用し、S/N 改善効果を定量評価した。地上での全帯域 (0.3–12 keV) X 線データ、軌道上の地没中ノイズデータ、軌道上の天体観測データを用いた。まず、天体からの X 線イベントを落とさずにノイズイベントを落とす「標準イベントスクリーニング」によって、要求帯域 0.3–12 keV における要求バックグラウンドレベル 2×10^{-3} counts s⁻¹ keV⁻¹ を達成できることを実証した (目的 2)。

更に、信号イベントを多少 (5% 未満) 犠牲にしながらノイズイベントを大幅に落とす「追加イベントスクリーニング」によって、要求帯域 0.3–12 keV におけるバックグラウンドレベルを更に半分にし、かつ、要求外帯域 (0.1–0.3, 12–20 keV) においても低バックグラウンドが達成できることを示した。これにより、コンプトンハンプ

(12-20 keV) やゲートバルブ開後に炭素のスペクトル線 (0.1-0.3 keV) などを用いた科学成果拡張への道を拓いた (目的3)。

Abstract

The XRISM (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission) satellite was launched from the Tanegashima Space Center on September 6, 2023 and was put into low Earth’s orbit. The *Resolve* instrument onboard XRISM is equipped with an X-ray microcalorimeter detector aiming to achieve non-dispersive X-ray spectroscopy with a wide energy range (0.3–12 keV), a high energy resolution (≤ 7 eV; FWHM at 6 keV), and a high throughput. Observations began on October 9. Since then, the detector has been continuously operated through the commissioning and calibration phases. The detector has already met many performance requirements.

To maximize the scientific return of valuable and unexplored observational data, event screening to discriminate X-ray signal events from noise events is crucial. This is especially important for instruments like *Resolve* with a wide dynamic range of energy range and X-ray flux. For the previous X-ray microcalorimeter missions, SXS onboard the ASTRO-H satellite, some items were developed for event screening. As a consequence, a very low background was achieved and new scientific results were obtained even with a dozen events. However, SXS ended its mission early due to the loss of the spacecraft attitude control, yielding only 366 ks exposures of the background data in the orbit.

The subject of this thesis is the event screening for *Resolve*. Compared to the previous SXS mission, *Resolve* has obtained data of better quality and quantity:

- Rich X-ray data sets were obtained during the ground tests using calibration X-ray sources for two months as opposed to three days for SXS. The data covered an energy range of 0.1–25 keV far beyond the required energy range of 0.3–12 keV.
- X-ray data were acquired during ground tests in the cryogen-free mode without using superfluid helium as a coolant.
- X-ray data were obtained during ground tests with the gate valve opened, allowing X-ray observations below $\lesssim 2$ keV.
- In-orbit operation has been ongoing for more than three months. The total background data exposure is now 655 ks, which is expected to grow steadily.

We processed these rich but inhomogeneous data sets to make them as homogeneous as possible. For each screening item, we selected the most appropriate data sets as a sub-sample of the large volume of the database and conducted validation and optimization of the event screening. Specifically, we set up three purposes:

Purpose 1 Optimization of individual screening items.

Purpose 2 Verification that the standard screening, which is a combination of multiple screening, satisfies the performance requirements.

Purpose 3 Pursuit of performance enhancement through additional screening.

Individual event screening consists of three categories with 18 items: (1) those based on the microcalorimeter pulse shapes (7 items), (2) those based on relative time differences among multiple events (5 items), and (3) those based on data acquisition time periods (6 items). Among the 18 items, we investigated 15 items. Separately for each item, we derived the optimum screening conditions based on appropriately chosen data sets. Some screening items were newly introduced for *Resolve*, which we studied. For some other screening items, we proposed screening conditions better than those used for SXS (Purpose 1).

We applied a combination of screening items to the actual data and evaluated the improvement in signal-

to-noise ratio. We used the ground test data covering the entire required energy range (0.3–12 keV), the background data in the orbit taken during the night Earth occultation, and the astronomical data in the orbit with X-rays from celestial sources in 2–12 keV. First, we applied the “standard event screening”, in which noise events are removed conservatively without loss of signal events. We showed that the standard screening achieves the required noise level of 2×10^{-3} counts s^{-1} keV^{-1} in the required energy range of 0.3–12 keV (Purpose 2).

Next, we proposed the “additional event screening”, in which noise events are removed aggressively with some loss (<5%) of signal events. We showed that noise events are further reduced by half of the standard screening in the required energy range and significantly in the extended energy range (0.1–0.3 and 12–20 keV). This will open the possibility of additional science return for the Compton hump (12–20 keV) and Carbon atomic features (0.1–0.3 keV) when the gate valve opens (Purpose 3).

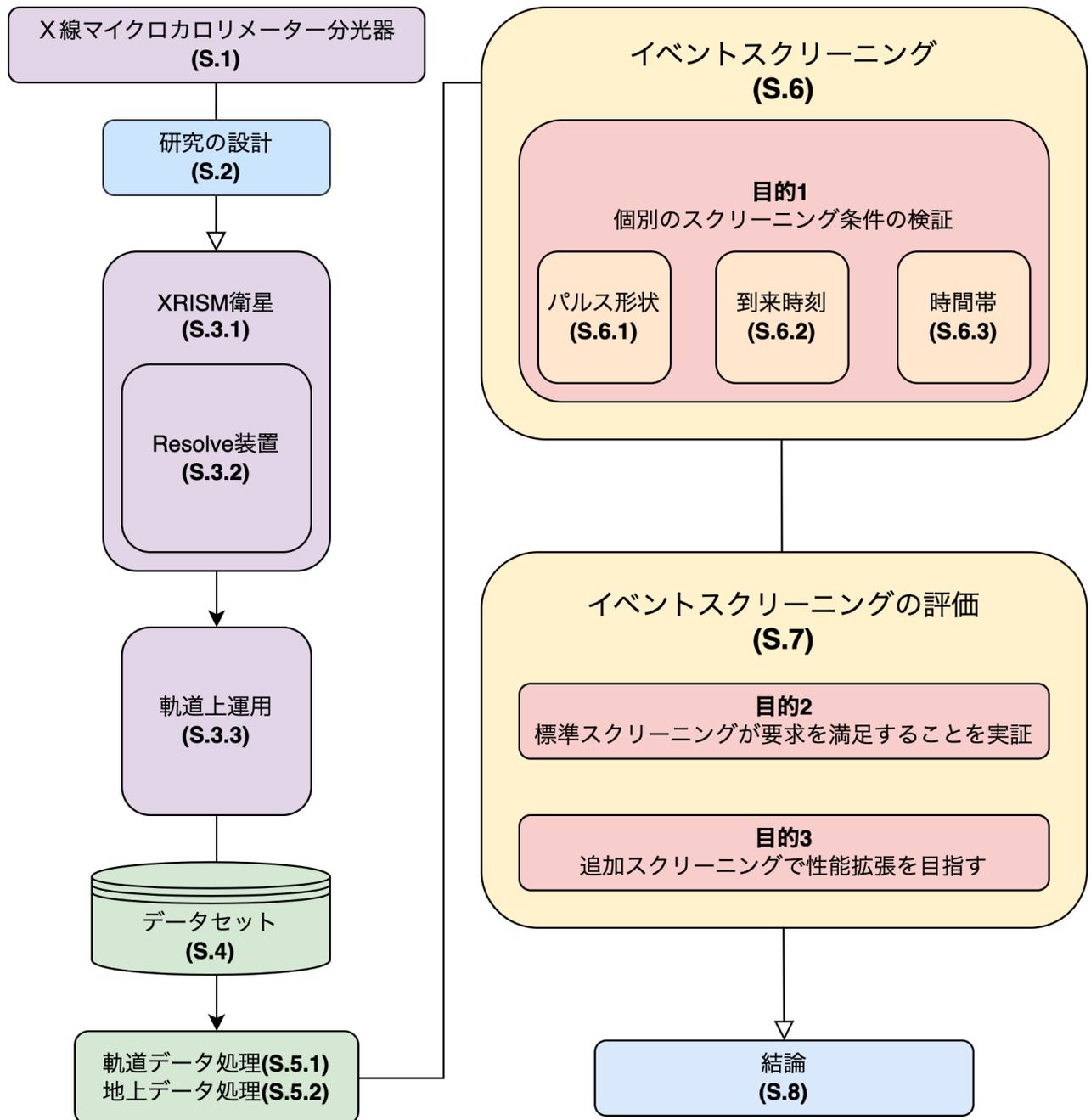


図 1. 本修論の構成。

目次

第 1 章	X 線マイクロカロリメータ分光器	20
1.1	X 線マイクロカロリメータ	21
1.2	SXS 装置	23
1.2.1	運用	23
1.2.2	性能	23
1.2.3	科学成果	25
第 2 章	研究の設計	29
2.1	目的	30
2.2	課題	32
2.3	構成	33
第 3 章	衛星と装置	34
3.1	XRISM 衛星	35
3.2	<i>Resolve</i> 装置	38
3.2.1	検出器	38
3.2.2	信号処理系	39
3.2.2.1	Junction Field Effect Transistor (JFET)	40
3.2.2.2	X-ray Box (XBOX)	41
3.2.2.3	Pulse Shape Processor (PSP)	41
3.2.3	クライオスタット	43
3.2.3.1	シールド	43
3.2.3.2	冷媒	43
3.2.3.3	Gate Valve (GV)	44
3.2.4	冷却系	45
3.2.4.1	スターリング冷凍機	46
3.2.4.2	ジュール・トムソン冷凍機	47
3.2.4.3	Vapor cooling	48
3.2.4.4	断熱消磁冷凍機	48
3.2.5	光学系	49
3.2.5.1	X-ray Mirror Assemblie (XMA)	49
3.2.5.2	Filter Wheel (FW)	51
3.2.6	較正装置 (フライトシステム)	52
3.2.6.1	較正用ピクセルの ^{55}Fe	53

	3.2.6.2	フィルタホイールの ^{55}Fe	54
	3.2.6.3	Modulated X-ray Source (MXS)	54
	3.2.7	較正用装置（地上支援機器）	58
	3.2.7.1	Channel-Cut Crystal Monochromator (CCCM)	58
	3.2.7.2	Modulated X-ray Source (MXS)	60
	3.2.7.3	Rotating Target Source (RTS)	61
3.3		軌道上運用	64
	3.3.1	衛星軌道とコンタクト	64
	3.3.1.1	軌道	64
	3.3.1.2	コンタクト	65
	3.3.2	衛星の指向	68
	3.3.2.1	オイラー角	68
	3.3.2.2	太陽角	69
	3.3.2.3	Visibility	70
	3.3.2.4	地没	72
	3.3.2.5	Star Tracker	74
	3.3.3	軌道上環境	74
	3.3.3.1	South Atlantic Anomaly (SAA)	74
	3.3.3.2	Cut-off Rigidity (COR)	75
	3.3.3.3	太陽ベータ角	77
	3.3.4	<i>Resolve</i> 装置運用	77
	3.3.4.1	ADR リサイクル	77
	3.3.4.2	較正用 X 線照射	78
	3.3.5	dp10	78
第 4 章		データ	81
	4.1	データ種別	82
	4.1.1	HK データ	82
	4.1.2	拡張 HK データ	82
	4.1.3	イベントデータ	83
	4.1.3.1	ピクセルイベント	84
	4.1.3.2	Anti-co イベント	86
	4.1.4	診断データ	87
	4.1.4.1	ベースラインイベント	87
	4.1.4.2	ロストタイムイベント	87
	4.1.4.3	パルスレコード	87
	4.2	データセット	89
	4.2.1	打ち上げ前のデータ	89
	4.2.1.1	サブシステム試験	89
	4.2.1.2	システム試験	95
	4.2.2	打ち上げ後のデータ	100

第 5 章	データ処理	102
5.1	軌道上処理	103
5.1.1	ピクセルイベント処理	103
5.1.1.1	パルス検出	103
5.1.1.2	X線イベントグレード判定	104
5.1.1.3	最適フィルタ処理	107
5.1.1.4	パルス波形処理	109
5.1.2	Anti-co イベント処理	111
5.2	地上処理	114
5.2.1	Pre-pipeline 処理	115
5.2.2	Pipeline 処理	115
5.2.2.1	ステージ 1: 較正	116
5.2.2.2	ステージ 2: スクリーニング	122
5.2.2.3	ステージ 3: QL プロダクトの生成	123
第 6 章	イベントスクリーニング	124
6.1	パルス形状に基づくもの	125
6.1.1	RISE_TIME	126
6.1.1.1	目的	126
6.1.1.2	手法	126
6.1.1.3	結果	126
6.1.1.4	考察と結論	128
6.1.2	TICK_SHIFT	130
6.1.2.1	目的	130
6.1.2.2	手法	130
6.1.2.3	結果	131
6.1.2.4	考察と結論	131
6.1.3	DERIV_MAX	133
6.1.3.1	目的	133
6.1.3.2	手法	133
6.1.3.3	結果	133
6.1.3.4	考察と結論	134
6.1.4	QUICK_DOUBLE	134
6.1.4.1	目的	134
6.1.4.2	手法	135
6.1.4.3	結果	135
6.1.4.4	考察と結論	135
6.1.5	SLOPE_DIFFER	136
6.1.5.1	目的	136
6.1.5.2	手法	136
6.1.5.3	結果	137
6.1.5.4	考察と結論	138

6.1.6	FLAG_CLIPPED	138
6.1.6.1	目的	138
6.1.6.2	手法	138
6.1.6.3	結果	139
6.1.6.4	考察と結論	140
6.1.7	SLOW_PULSE	141
6.1.7.1	目的	141
6.1.7.2	手法	141
6.1.7.3	結果	141
6.1.7.4	考察と結論	142
6.2	到来時刻によるもの	143
6.2.1	相対時刻較正	143
6.2.1.1	目的	143
6.2.1.2	方法	144
6.2.1.3	結果	144
6.2.1.4	考察と結論	152
6.2.2	Anti-co イベント	152
6.2.2.1	目的	152
6.2.2.2	方法	153
6.2.2.3	結果	153
6.2.2.4	考察と結論	155
6.2.3	電氣的クロストークイベント	156
6.2.3.1	目的	156
6.2.3.2	方法	157
6.2.3.3	結果	157
6.2.3.4	考察と結論	159
6.2.4	フレームイベント (1) 宇宙線	161
6.2.4.1	目的	161
6.2.4.2	方法	161
6.2.4.3	結果	162
6.2.4.4	考察と結論	164
6.2.5	フレームイベント (2) X 線	165
6.2.5.1	目的	165
6.2.5.2	方法	165
6.2.5.3	結果	166
6.2.5.4	考察と結論	168
6.2.6	電子反跳イベント	169
6.2.6.1	目的	169
6.2.6.2	方法	169
6.2.6.3	結果	170
6.2.6.4	考察と結論	171
6.3	時間帯によるもの	172

6.3.1	ADR リサイクル	172
6.3.1.1	目的	172
6.3.1.2	方法	172
6.3.1.3	結果	172
6.3.1.4	考察と結論	181
6.3.2	SAA	182
6.3.2.1	目的	182
6.3.2.2	方法	182
6.3.2.3	結果	183
6.3.2.4	考察と結論	185
6.3.3	地没	186
6.3.3.1	目的	186
6.3.3.2	方法	187
6.3.3.3	結果	187
6.3.3.4	考察と結論	189
6.3.4	地球磁場	189
6.3.4.1	目的	189
6.3.4.2	方法	189
6.3.4.3	結果	190
6.3.4.4	考察と結論	191
第 7 章	イベントスクリーニングの評価	193
7.1	実データでの評価	194
7.1.1	目的	194
7.1.2	手法	195
7.1.3	結果	195
7.1.3.1	GVO データのスクリーニング結果	197
7.1.3.2	NGC 4151 データのスクリーニング結果	197
7.1.3.3	LMC X-3 データのスクリーニング結果	198
7.1.3.4	Abell 2319 データのスクリーニング結果	199
7.1.3.5	NXB データのスクリーニング結果	200
7.1.4	考察と結論	201
7.1.4.1	追加スクリーニングによるシグナル評価	201
7.1.4.2	追加スクリーニングによるノイズ評価	202
7.1.4.3	フレームイベントのスクリーニングの評価	204
7.2	要求値との比較	206
第 8 章	結論	208
	改訂履歴	211
	謝辞	212

目次

1	本修論の構成	5
1.1	X線マイクロカロリメータの概略図とX線入社時の温度変化	21
1.2	X線観測機器のエネルギー分解能の比較図	24
1.3	X線分光器の有効面積の比較図	25
1.4	超新星残骸 N132D のエネルギースペクトル	26
1.5	SXS 装置によって超新星残骸 Clab を観測した際の疑似ピクセルイベント	27
1.6	NXB を除去する Rise_time スクリーニング	28
1.7	NXB のエネルギースペクトル	28
3.1	XRISM 衛星	35
3.2	XRISM 衛星の打ち上げの様子	35
3.3	X線マイクロカロリメータのピクセルマップ	38
3.4	X線マイクロカロリメータの配線図	38
3.5	X線マイクロカロリメータと反同時計数検出器の概略図	39
3.6	信号処理系の概略図	39
3.7	検出器アセンブリ	40
3.8	JFET とマイクロカロリメータの配線	41
3.9	デュワーの概略図	43
3.10	ゲートバルブ	44
3.11	GV の透過率測定の結果	45
3.12	冷却系の概略図	45
3.13	スターリング冷凍機の概略図	46
3.14	ADR リサイクル	49
3.15	XMA の概観	49
3.16	XMA の光軸上の有効面積	50
3.17	Resolve-XMA の光軸上の PSF	50
3.18	フィルタの概観	51
3.19	フィルタごとのX線透過率	52
3.20	軌道上 SXS 装置のゲインの時間変動	52
3.21	MXS1 と MXS3 のピクセルごとのカウントレート	53
3.22	軌道上の SXS 装置のゲイン補正後の Mn 輝線	53
3.23	MXS 装置の外観	54
3.24	MXS 装置のX線発生機構	55

3.25	direct source と indirect source の MXS 装置の模式図	56
3.26	SXS 装置による MXS 装置の X 線観測	57
3.27	MX 装置のパルス波形パラメータ	57
3.28	CCCM	58
3.29	SXS 装置における 5.414 keV の X 線の LSF	59
3.30	SXS 装置における 8.0 keV の X 線の LSF	60
3.31	軌道上の <i>Resolve</i> 装置の LSF	60
3.32	Gain curve	61
3.33	RTS を用いた高計数校正の試験の様子	63
3.34	軌道要素の概念図	64
3.35	軌道要素、太陽ベータ角の年変化	65
3.36	衛星コンタクト (1)	66
3.37	衛星コンタクト (2)	67
3.38	衛星コンタクト (2)	68
3.39	XRISM 衛星の太陽角	70
3.40	XRISM 衛星の黄道北極と黄道南極	71
3.41	XRISM 衛星 visibility (1)	71
3.42	XRISM 衛星 visibility (2)	72
3.43	ELV の概念図	73
3.44	XRISM 衛星 2023/11/03 の軌道上の様子	74
3.45	ROSAT 衛星の宇宙線バックグラウンド	75
3.46	450 km の軌道における COR の計算結果	76
3.47	ASTRO-H 衛星のバックグラウンド観測から得られた COR の変化	76
3.48	太陽ベータ角の概念図	77
3.49	軌道上のゲイン校正データ取得	78
3.50	dp10 の出力例	79
4.1	パルスレコードの例	88
4.2	LSF 校正データ	90
4.3	ゲインカーブ校正データ (1) ゲートバルブ閉	91
4.4	ゲインカーブ校正データ (2) ゲートバルブ開	92
5.1	ピクセルイベント <code>adcSample</code> と <code>derivative</code>	104
5.2	イベントグレードの定義	105
5.3	SXS 装置の <code>branching ratio</code>	107
5.4	時系列と周波数空間の平均パルス波形	108
5.5	時系列と周波数空間の最適フィルタリングテンプレート	109
5.6	1k noise	109
5.7	Anti-co イベントのパルス波形	112
5.8	Anti-co イベントのエネルギースペクトル	113
5.9	地上処理の概念図	114
5.10	ゲインヒストリーファイル	121

6.1	SXS 装置の軌道上データから計算されたパルス波形の特徴量のエネルギー依存性	125
6.2	Abell 2319 の RISE_TIME の散布図	126
6.3	Abell 2319 の RISE_TIME が 60 以上の Hp のイベントのパルスレコード	127
6.4	Abell 2319 の RISE_TIME が 40 以下の Hp のイベントのパルスレコード	128
6.5	RISE_TIME のメインランチのガウシアンフィッティング	129
6.6	スクリーニング後の Abell 2319 の RISE_TIME ヒストグラム	129
6.7	Abell 2319 の Δ RISE_TIME と DERIV_MAX / EPI2 の散布図	130
6.8	Abell 2319 の TICK_SHIFT の散布図	131
6.9	LMC X-3 の TICK_SHIFT の散布図	131
6.10	Abell 2319 の TICK_SHIFT が 0 以上かつ DERIV_MAX が 200 より大きいイベントのパルスレコード	132
6.11	Abell 2319 の DERIV_MAX の散布図	134
6.12	QUICK_DOUBLE イベントのパルスレコードの例	135
6.13	Abell 2319 の SLOPE_DIFFER イベントのヒストグラム	136
6.14	Abell 2319 の SLOPE_DIFFER イベントのパルスレコード (1)	137
6.15	Abell 2319 の SLOPE_DIFFER イベントのパルスレコード (2)	138
6.16	RTS16 を用いた地上試験データのエネルギースペクトル	139
6.17	CLIPPED イベントのパルスレコードの例	140
6.18	RTS16 を用いた地上試験データの FWHM	141
6.19	SLOW イベントのパルスレコードの例	142
6.20	到達時間に基づくスクリーニングで最適化するパラメータ	143
6.21	MXS エイジング 畳み込み光度曲線	145
6.22	ピクセル 4 番の MXS エイジング 畳み込み光度曲線と微分波形	145
6.23	ピクセル 4 番の MXS エイジング 畳み込み光度曲線の各グレードの CCF	146
6.24	CCF から計算したグレード間の相対時刻	146
6.25	ピクセルごとの MXS FORCED_MIDRES 畳み込み光度曲線と微分波形	147
6.26	ピクセル 0 番に対する MXS FORCED_MIDRES 畳み込み光度曲線の各ピクセルの CCF	148
6.27	ピクセルの相対時刻	148
6.28	DERIV_MAX ごとの MXS FORCED_MIDRES 畳み込み光度曲線と微分波形	149
6.29	DERIV_MAX = 4000 に対する各 DERIV_MAX の CCF	149
6.30	DERIV_MAX = 4000 を基準としたときの相対時刻。青は最小二乗法によるフィッティング。	150
6.34	b_L が変化したときの微分波形の変化	150
6.31	H グレードイベントのパルスレコードの adcSample と式 5.1 で計算した derivative。	151
6.32	H と L グレードの相対時刻 (1)	151
6.33	H と L グレードの相対時刻 (2)	152
6.35	ピクセルイベントと PSP-A の anti-co イベントとの時間差	154
6.36	ピクセルイベントと PSP-B の anti-co イベントとの時間差 (地上試験データ)	154
6.37	ピクセルイベントと anti-co イベントとの時間差 (イベント閾値 75)	155
6.38	ピクセルイベントと anti-co イベントとの時間差 (イベント閾値 120)	155
6.39	電氣的 クロストークのピクセルマップ	156
6.40	AuL α のサンプル数とエネルギーの散布図。12 番以外の全ピクセルを表示。	157
6.41	Fe K α 蛍光輝線データの時間差と PHA 分布	158
6.42	Au L α 蛍光輝線データの時間差と PHA 分布	158

6.43	Au L β 蛍光輝線データの時間差と PHA 分布	159
6.44	Au L α 蛍光輝線データの片側ピクセルのみの時間差分布	159
6.45	Au L α 蛍光輝線データにおける TICK_SHIFT の度数分布	160
6.46	親イベントと子イベントの時間差の模式図	161
6.47	宇宙線イベントによるフレームイベント分布	163
6.48	宇宙線イベントによるフレームイベント分布のフィッティング結果	164
6.49	ポアソン統計によるフレームイベントのスクリーニング率	165
6.50	Extend source による X 線イベントの到来時刻とエネルギーの散分図	166
6.51	Point source による X 線イベントの到来時刻とエネルギーの散分図	166
6.52	RTS の extend source によるフレームイベント分布	167
6.53	RTS の point source によるフレームイベント分布	168
6.54	フレームイベント分布のフィッティング結果	169
6.55	2022 年月 7 月 29 日から 8 月 2 日のデータのスペクトル	170
6.56	電子反跳イベントのヒストグラム	171
6.57	ADR リサイクル がうまく判定できている例 (He mode)。同一データセットにある場合。	173
6.58	ADR リサイクル がうまく判定できている例 (He mode)。データセットをまたぐ場合。	174
6.59	追加の温度条件を課せば、ADR リサイクル がうまく判定できている例 (He mode)。	175
6.60	ADR リサイクル がうまく判定できていない例 (He mode)。	176
6.61	ADR リサイクル がうまく判定できている例 (CF mode)。同一データセットにある場合。	177
6.62	ADR リサイクル がうまく判定できている例 (CF mode)。データセットをまたぐ場合。	178
6.63	追加の温度条件を課せば、ADR リサイクル がうまく判定できている例 (CF mode)。	179
6.64	軌道データにおける ADR リサイクルの GTI の計算結果	180
6.65	ADR リサイクル中のゲインの変化	180
6.66	軌道上 anti-co イベントの光度曲線 (左) とエネルギースペクトル (右)	182
6.67	横軸を経度、縦軸を緯度としたときの anti-co イベントの分布。	183
6.68	Anti-co カウントレートの度数分布	184
6.69	Anti-co カウントレートごとにスライスしたときの NXB カウントレートの変化	184
6.70	NXB カウントレートの変化と anti-co カウントレートの変化の比較	185
6.71	Anti-co カウントレートと MnK α の FWHM の関係	185
6.72	SAA1 の定義	186
6.73	SAA2 の定義	186
6.74	DYE_ELIV ごとにスライスしたときの NXB カウントレートの変化	187
6.75	カウントレートの変化と DYE_ELIV 値の変化の比較	188
6.76	NTE_ELIV ごとにスライスしたときの NXB カウントレートの変化	188
6.77	カウントレートの変化と NTE_ELIV 値の変化の比較	189
6.78	CORTIME ごとにスライスしたときの NXB カウントレートの変化	190
6.79	NXB カウントレートの変化と COR 値の変化の比較	190
6.80	COR 値と MnK α の FWHM の関係	191
6.81	Resolve 装置の COR 値	191
7.1	GVO データのエネルギースペクトル	197
7.2	NGC 4151 のエネルギースペクトル	197

7.3	LMC X-3 のエネルギースペクトル	198
7.4	Abell 2319 のエネルギースペクトル	199
7.5	NXB のエネルギースペクトル	200
7.6	GVO データのスクリーニングのシグナル評価	201
7.7	天体データのスクリーニングのシグナル評価	202
7.8	天体データと NXB データのスクリーニングの評価	203
7.9	天体データと NXB データのスクリーニングの評価	204
7.10	フレームイベントのスクリーニングの評価	205
7.11	GVO データの観測可能帯域	206

表目次

1.1	SXS 装置の性能要求	23
2.1	0.3 keV 以下の炭素の原子線	30
3.1	<i>Resolve</i> 装置と <i>Xtend</i> 装置の要求性能値	36
3.2	<i>Resolve</i> 装置の主な軌道上立ち上げ実績	37
3.3	PSP CPU カードの役割分担	42
3.4	フィルタホイールの位置とフィルタの種類	51
3.5	MXS 及び FW 装置の構成	55
3.6	CCCM が照射可能な輝線と、そのエネルギー。	59
3.7	RTS の種類。	61
3.8	Red RTS、silver RTS と vacuum RTS のターゲット	62
3.9	RTS16 と 16-slot vacuum RTS のターゲット	62
4.1	ADR リサイクルの判定に用いるパラメータ	82
4.2	EHK ファイル	83
4.3	PL 処理後のピクセルイベントファイル	85
4.4	xa*rs1_(姿勢 ID)0px(フィルタ ID)*.evt のフィルタ ID とその説明	86
4.5	xa*rs1_(姿勢 ID)0px(フィルタ ID)*.evt のとその説明。	86
4.6	PL 処理後の anti-co イベントファイル	86
4.7	地上試験 test campaign	89
4.8	サブシステム試験中の較正項目	90
4.9	TC4 の X 線データ	93
4.10	TC5 の X 線データ	94
4.11	TC6 の X 線データ	95
4.12	TC7 の X 線データ	96
4.13	TC9 の X 線データ	97
4.14	TC10 の X 線データ	97
4.15	MXS direct mode のときのデータセット	98
4.15	MXS indirect mode のときのデータセット	99
4.16	ゲートバルブ開前の軌道上データ	100
5.1	PL 処理の概要	116
5.2	STATUS 値とフラグの関係。	118

5.3	軌道上ゲインに使用できる特性 X 線	119
6.1	$b_{L,p}$ が変化したときの微分波形の分散 σ とそのエラー	152
6.2	b_L が変化した時ときの H グレードとの相対時刻	152
6.3	本研究で用いたデータセット。	157
6.4	フレームに入射しているデータと、フレームに入射していないデータの観測 ID と観測期間	165
6.5	ADR リサイクル 時間計算の結果	173
6.6	SAA1 の定義	186
6.7	SAA2 の定義	186
7.1	追加スクリーニングのための組み合わせ検討項目	194
7.2	スクリーニングの評価に用いたデータセット	195
7.3	スクリーニングの評価に用いたデータセットのカウントレート	196
7.4	GVO データのスクリーニングごとのカウントレート	197
7.5	NGC 4151 のスクリーニングごとのカウントレート	198
7.6	LMC X-3 のスクリーニングごとのカウントレート	198
7.7	Abell 2319 のスクリーニングごとのカウントレート	199
7.8	NXB のスクリーニングごとのカウントレート	200
7.9	0.3–12 keV のバックグラウンドレベル	206
7.10	12–20 keV のバックグラウンドレベル	207
7.11	0.1–0.3 keV のバックグラウンドレベル	207
8.1	SXS 装置と <i>Resolve</i> 装置のイベントスクリーニングの比較	210

第 1 章

X 線マイクロカロリメータ分光器

Contents

1.1	X 線マイクロカロリメータ	21
1.2	SXS 装置	23
1.2.1	運用	23
1.2.2	性能	23
1.2.3	科学成果	25

本章では、X線マイクロカロリメータ分光器の原理と、ASTRO-H 衛星 (ひとみ衛星) に搭載された SXS 装置について述べる。§ 1.1 では、X 線マイクロカロリメータの原理について述べ、§ 1.2 では、SXS 装置の運用、性能、科学成果について述べる。本章の § 1.1 は、井上・小山・高橋・水本 (2018)、御堂岡 (2020)、柏崎 (2023) を参考にして記述した。

1.1 X線マイクロカロリメータ

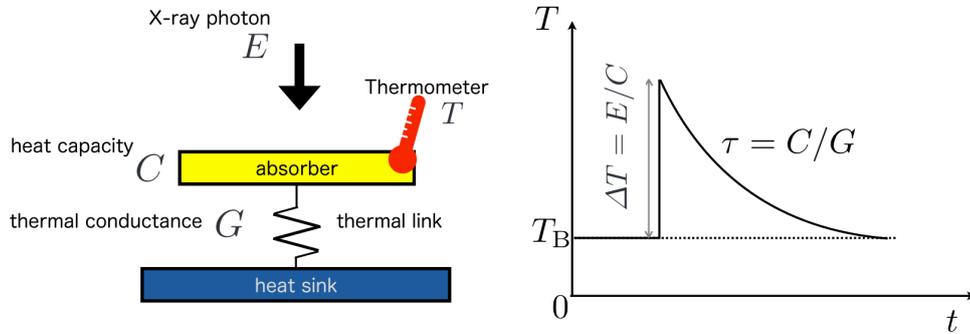


図 1.1. 左：X線マイクロカロリメータの概略図。右：X線が到来したときの温度の時間変化 (Sato, Uchida, and Ishikawa, 2023)。

X線マイクロカロリメータとは、極低温検出器をX線光子検出に用いるもので、高い検出効率とエネルギー分解能を実現できる。衛星プラットフォームでは、ASTRO-E衛星XRS装置 (Porter et al., 2004)、ASTRO-E2衛星XRS2装置 (Kelley et al., 2007)、ASTRO-H衛星SXS装置 (Kelley et al., 2016)、そしてXRISM衛星 *Resolve* 装置 (Ishisaki et al., 2022) で採用された。

検出器は、X線吸収体・半導体型温度計・サーマルリンク・熱浴などによって構成される (図 1.1 左)。X線光子が吸収体に入射すると、光電効果によってX線光子が吸収される。このとき、入射するX線光子のエネルギーを E 、温度変化を ΔT 、吸収体と吸収体の下に接触している温度計の比熱の合計を C とすると、マイクロカロリメータの温度上昇の変化は式 1.1 で与えられる (図 1.1 右)。

$$\Delta T = \frac{E}{C} \quad (1.1)$$

半導体型温度計の抵抗は温度依存性をもつ。半導体の温度感度を式 1.2 のように α という無次元量で評価する。

$$\alpha \equiv \frac{T}{R} \frac{dR}{dT} \quad (1.2)$$

半導体型の温度計は $\alpha = -3$ 程度の感度をもつ。一方で、超伝導遷移端型マイクロカロリメータは、超伝導と常伝導の遷移に伴う抵抗変化によって $\alpha = 1000$ 程度の感度を実現している。感度の絶対値が高ければ、小さな温度変化であっても抵抗が大きく変化する。本論文の対象である *Resolve* 装置は半導体型の温度計を採用している。

オームの法則 $V = IR$ より、バイアス電圧が一定の条件下ならば、抵抗の変化とともに電流も変化する。したがって、電流の変化を読み取ることでX線光子のエネルギーを見積もることができる。なお、*Resolve* 装置のX線マイクロカロリメータの場合は、バイアス電圧が 0.3 V、電流が 10 nA、抵抗が 30 M Ω 程度である。

X線光子が入射すると、吸収体はすばやく熱平衡に達する (熱化する)。吸収体はサーマルリンクによって低温熱浴と繋がれており、上昇した温度をある程度の時間をかけて緩和する。サーマルリンクの熱伝導率を G とおくと、温度変化の時間依存性について式 1.3 が成り立つ。

$$C \frac{d\Delta T}{dt} = -G\Delta T \quad (1.3)$$

ここで時定数 τ を式 1.4 で定義する。

$$\tau = \frac{C}{G} \quad (1.4)$$

式 (1.3) を温度変化について解くと、式 1.5 が導かれる。

$$\Delta T = \Delta T(t=0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.5)$$

ここで、すばやく熱化することから、式 1.1 より、 $\Delta T(t=0) \sim \left(\frac{E}{C}\right)$ となる。パルスの立上り時間の時定数は、吸収体の熱伝導率 G_{abs} と C の比で決まる。したがって、 G_{abs} が大きい方がパルスの立上り時間が短くなる。 G_{abs} は温度に依存する (式 1.6)。

$$G_{\text{abs}} \sim T^{n-1} \quad (1.6)$$

ここで、 n は熱伝導率の指数である。熱伝導を電子が担う場合は、 $n=2$ であり、熱伝導をフォノンが担う場合は、 $n=4$ である。したがって、エネルギーの高いX線光子は、温度上昇が大きいため、熱伝導率を上昇させ、時定数を小さくする。すなわち、吸収体をすばやく熱化し、立上り時間が短くなる。

その後、吸収体の温度は指数関数的に減衰しながら低温熱浴に熱が廃棄される (右図 1.1)。式 (1.1) 及び式 (1.5) から、比熱を小さくすると、温度上昇の変化が大きくなり、温度の減衰が速くなることがわかる。なお、*Resolve* 装置の X 線マイクロカロリメータの場合は、 $C=1 \text{ pJ K}^{-1}$ 、 $G=300 \mu\text{J K}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、 $\tau=3 \text{ ms}$ 程度であり、6 keV の光子 ($E=1 \text{ fJ}$) が1つ入射したときの上昇温度は $\Delta T=1 \text{ mK}$ 程度である。

X 線マイクロカロリメータの温度を T 、ボルツマン定数を k_B とすると、フォノン1個の平均エネルギー ϵ は、式 1.7 で表すことができる。

$$\epsilon = k_B T \quad (1.7)$$

また、X 線マイクロカロリメータの全熱エネルギー U は、式 1.8 である。

$$U = CT \quad (1.8)$$

よって、式 (1.7)、式 (1.8) より、フォノンの数 N は式 1.9 で表すことができる。

$$N = \frac{C}{k_B} \quad (1.9)$$

フォノンがポアソン統計にしたがうと仮定し、1.9 を代入すると、エネルギーのゆらぎ ΔU は、式 1.10 となる。

$$\Delta U = \epsilon\sqrt{N} = \sqrt{kT^2C} \quad (1.10)$$

半値全幅 FWHM はゆらぎ σ を用いると、

$$\text{FWHM} = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} \simeq 2.35\sigma \quad (1.11)$$

である。したがって、温度計の雑音や感度によって決まる現象論的なパラメータを ξ とすると、 $\sigma = \Delta U$ より、エネルギー分解能 ΔE_{FWHM} は、

$$\Delta E_{\text{FWHM}} = 2.35\xi\sqrt{kT^2C} \quad (1.12)$$

となる。 ξ には温度感度に対して $\xi \propto \alpha^{-1/2}$ となることが知られており、温度感度が大きい方がエネルギー分解能が向上する。*Resolve* 装置の場合、 $C=1 \text{ pJ K}^{-1}$ 、 $T=50 \text{ mK}$ を代入して、分解能は大体 4 eV と計算できる。この式 (1.12) から、比熱が小さい方がエネルギー分解能が良いことが確認できる。低温での比熱は、格子比熱 C_l と電子比熱 C_e があり、それぞれ $C_l \propto T^3$ 、 $C_e \propto T$ に比例する。つまり、検出器の温度を低くすることでエネルギー分解能が向上する。これが、検出器を極低温で動作させる所以である。

1.2 SXS 装置

1.2.1 運用

SXS 装置 (Kelley et al., 2016) とは、ASTRO-H 衛星 (Takahashi et al., 2016) に搭載された X 線マイクロカロリメータ検出器である。ASTRO-H 衛星は 2016 年 2 月 17 日に打ち上げに成功した。打ち上げ日を L としそれからの日数を D として、L+D で表す。L+0 に電源を入れ、L+5 に、検出器を 50 mK に冷却し、要求を上回る観測性能を達成した (e.g., Tsujimoto et al., 2017; Fujimoto et al., 2017; Ishisaki et al., 2018; Porter et al., 2018; Shirron et al., 2018; Tsujimoto et al., 2018b)。ところが、L+38 に衛星の姿勢制御系が不能となり*1、惜しくもミッションは早期に終了した。しかし、それ以前にペルセウス銀河団 (Collaboration et al., 2016)、「かに」星雲 (Collaboration et al., 2018)、超新星残骸 N132D (Collaboration et al., 2014) などの観測を行い、X 線マイクロカロリメータの革命的な実力を垣間見るようになった。

1.2.2 性能

表 1.1. SXS 装置の性能要求 (Mitsuda et al., 2010)。

	Requirement	Goal
Energy range	0.3 - 12 keV	
Effective area at 1 keV	160 cm ²	
Effective area at 6 keV	210 cm ²	
Energy resolution	7 eV	4 eV
Array format	6 × 6	
Field of view	2.9' × 2.9'	
Angula resolution	1.7'(HPD)	1.3' (HPD)
Lifetime	3 years	5 years
Time assignment resolution	80 μs	
Maximum counting rate	150 c s ⁻¹ pixel ⁻¹	
Energy-scale calibration accuracy	2 eV	1 eV
Line-spread-function calibration accuracy	2 eV	1 eV

SXS 装置の性能要求を表 1.1 に示す。SXS 装置は 0.3–12 keV の軟 X 線帯域に感度をもつ検出器である。要求値 (Requirement) は、エネルギー分解能 ΔE が 7 eV、時間分解能が 80 μs である。軌道上では、限られたデータで検証できる範囲において、これらの要求をすべて満たす性能を実証した。

エネルギー分解能の指標となる分光能力を $E/\Delta E$ と定義すると、SXS 装置は従来の非分散型分光器である X 線 Charge Coupled Device (CCD) 検出器よりも、鉄 K 殻輝線の 6–7 keV のエネルギー帯域で約 20 倍高いエネルギー分解能をもつ。また、分散型分光器である X 線回折分光器よりも、約 3 倍高いエネルギー分解能をもつ (図 1.2)。

*1 https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/084/shiryo/1371722.htm

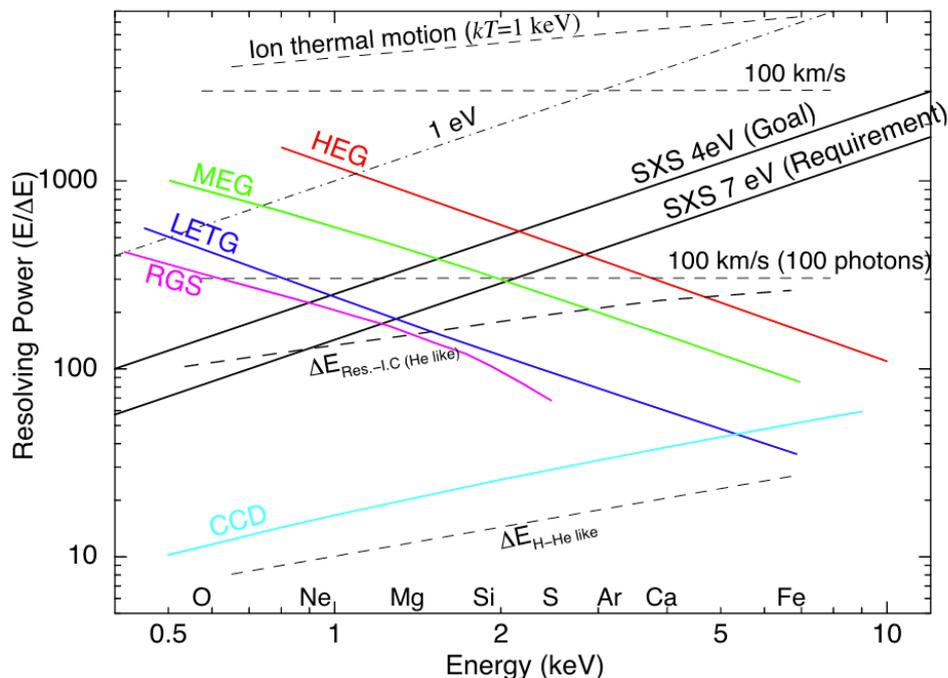


図 1.2. X線観測機器のエネルギー分解能の比較図。HEG、MEG (Markert et al., 1994)、LETG (Brinkman et al., 2000) は Chandra 衛星 (Weisskopf et al., 2000) の回折分光器、RGS (den Herder et al., 2001) は XMM-Newton 衛星 (Jansen et al., 2001) の回折分光器である。横軸にエネルギー、縦軸に resolving power ($E/\Delta E$) をとっている (Mitsuda et al., 2010)。

従来の X 線精密分光観測では、分散型の回折分光器が使用されてきた。しかし、回折分光器による X 線観測はいくつかの欠点が存在する。(i) 有効面積が小さいこと、(ii) 回折分光によって天体の空間情報を失ってしまうこと、(iii) エネルギー帯域幅が狭いことである。対して、SXS 装置は X 線回折分光器よりも約 10 倍の有効面積をもち、非分散型分光器であるため空間情報を失わずに観測することができ、更に、2 桁の広帯域で観測できる (図 1.3)。

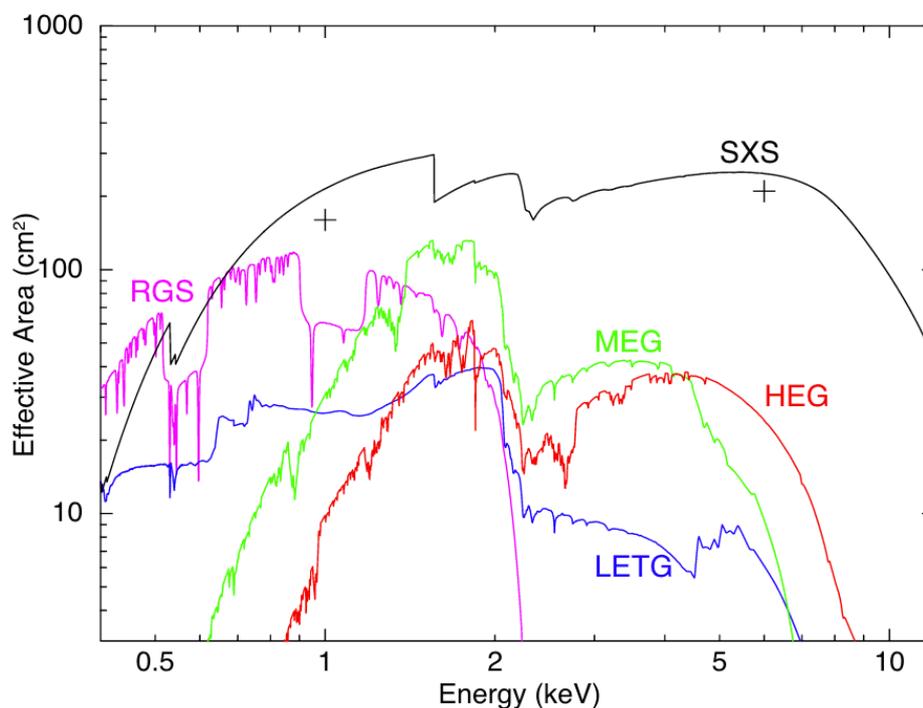


図 1.3. X線分光器の有効面積の比較図。横軸にエネルギー、縦軸に有効面積をとっている (Mitsuda et al., 2010)。

1.2.3 科学成果

SXS 装置によって得られた科学成果のうち、超新星残骸 N132D の観測成果を紹介する。N132D は大マゼラン雲に存在する超新星残骸である。この天体の観測時間はわずか 3.7 ks という短い時間であるにも関わらず、主に高電離の S、Fe の蛍光 K 輝線の検出に成功した (図 1.4)。それぞれのピクセルイベント数は、17 カウントと 16 カウントである。この観測によって、S と Fe のドップラーシフトを推定することに成功し、Fe は非対称な構造によって 800 km s^{-1} の速度で赤方偏移していることがわかった。また、超新星残骸のプラズマの電離平衡状態に制約を与えることにも成功した。

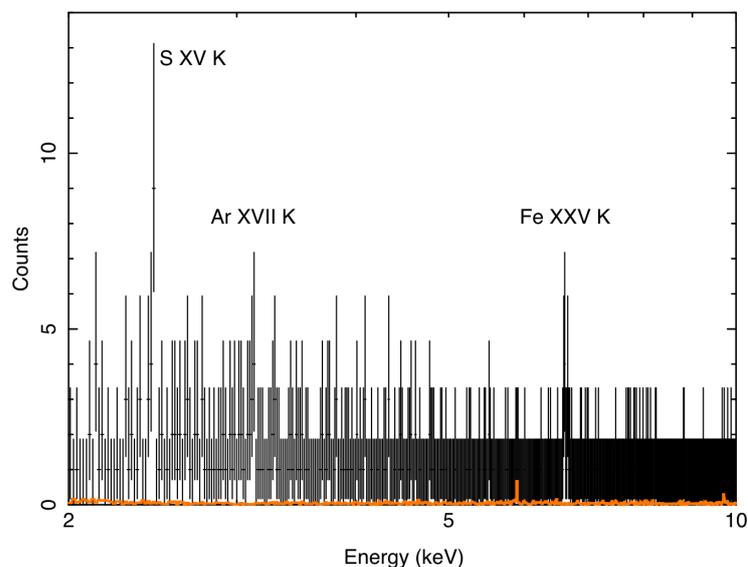


図 1.4. SXS 装置によって観測した超新星残骸 N132D のエネルギースペクトル。黒は天体からの X 線、オレンジが除去された NXB を図示している (Collaboration et al., 2014)。

このような短い時間の観測によっても大きな科学成果をあげられる理由として、SXS 装置が高い検出効率を誇っているだけでなく、バックグラウンド (Non-X-ray Background; NXB) を低くできたことも挙げられる。N132D の観測において、NXB は全イベントの 10% 以下であった。これは、適切なイベントスクリーニングによって、バックグラウンドイベントの除去に成功したためである。得られたバックグラウンドレベルは、「1 分光チャンネル (4.5 eV) に発生するノイズイベントの割合が 1.5 日に 1 つ」、というレベルにまで達する。

図 1.7 に一例を示す。SXS 装置で観測された「かに」星雲観測中のイベントをスクリーニングする。このプロットで、実際の「かに」星雲からの X 線イベントは赤色コントラストで示した場所に集中する。それ以外の場所に存在するイベントはすべてノイズである。このノイズを、フラグを立てたり、このような図上で 2 次元カットしたりしながら、X 線イベントの S/N 比を上げていく。より厳しいスクリーンをすればより S/N が高くなるが、実効観測時間が現象する。そこで、バックグラウンドや分光性能と観測時間のトレードオフをしながら、スクリーニング条件を決める作業が必要になる。このトレードオフは天体の明るさによって変わる。

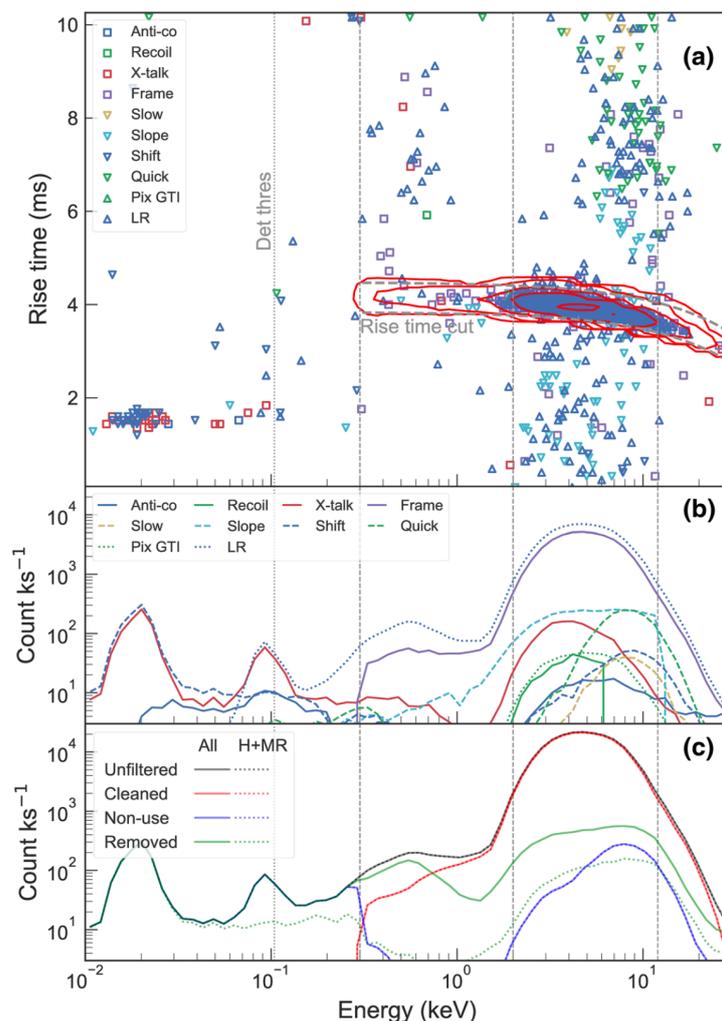


図 1.5. SXS 装置によって超新星残骸 Clab を観測した際の疑似ピクセルイベント (Tsujiimoto et al., 2018b)。

これらの考察を経て、SXS 装置では、X線のエネルギーとX線のパルス波形の立ち上がりの時間からバックグラウンド成分を除去する追加のスクリーニング条件が新たに開発された (図 1.6)。これら最適化されたイベントスクリーニングを、366 ks の軌道上バックグラウンド (地没中) データに適用して評価したところ、スクリーニングがない場合に比べてバックグラウンドイベント数が 7.3% にまで抑制できていることが示された (図 1.7)。

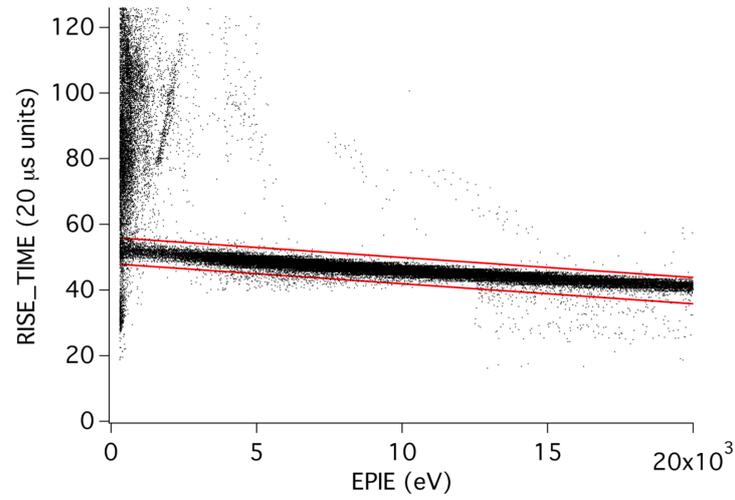


図 1.6. NXB を除去するスクリーニング条件。横軸がエネルギー、縦軸がX線のパルス波形の立ち上がりの時間を表す。赤の実線で囲われた領域を用いることで多くのNXBを除去することができる (Kilbourne et al., 2018b)。

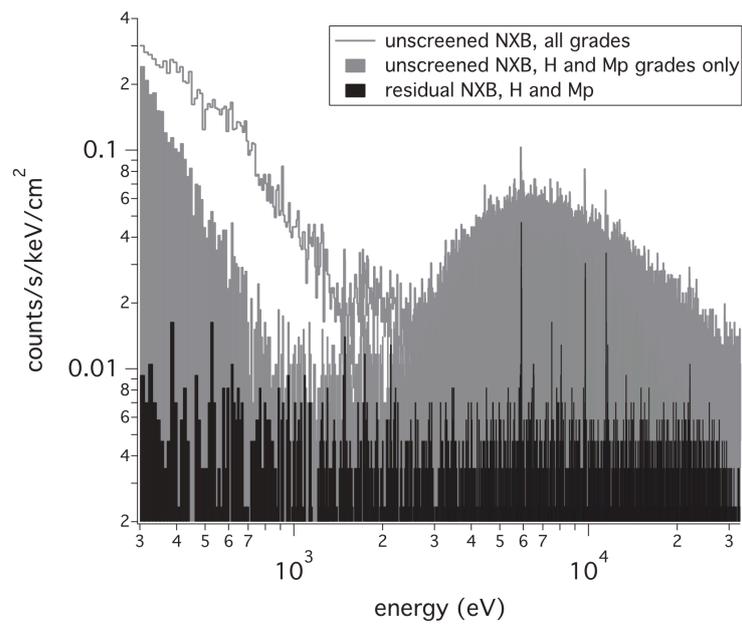


図 1.7. NXB のエネルギースペクトル。スクリーニングをすることで7.3%までNXBを除去できることがわかる (Kilbourne et al., 2018b)。

第 2 章

研究の設計

Contents

2.1	目的	30
2.2	課題	32
2.3	構成	33

本章では、本研究の設計について述べる。§ 2.1 で目的、§ 2.2 で課題、§ 2.3 で構成に分けて記述する。

2.1 目的

§ 1.2.3 で述べたとおり、適切なイベントスクリーニングでバックグラウンドを極めて低くしたことで、短命の SXS 装置の限られたデータからでも大きな科学成果を得た。その後継である XRISM 衛星搭載 *Resolve* 装置でも同様である。また一度決めたイベントスクリーニング条件は、基本的にはミッションを通してすべての観測データに適用され、科学観測データのクオリティが保証される。このように、イベントスクリーニング最適化の重要性は論を俟たない。本研究は、打ち上げ前の地上試験、及び、打ち上げ後の軌道上運用の実データを使って、*Resolve* 装置におけるイベントスクリーニングの最適化を行う。具体的には以下の3つの目的を設定する。

目的1 個別のスクリーニング項目における条件出しを行う。

目的2 複数のスクリーニング項目を組み合わせた標準スクリーニングが、装置性能要求を満たすことを検証する。

目的3 さらに追加スクリーニングで性能拡張を目指す。

目的3においては、12 keV 以上で観測することができるコンプトンハンプや、0.3 keV 以下の炭素の原子線 (表 2.1) を観測するために、要求を超えたエネルギー範囲でのバックグラウンドの低減を目指す。

表 2.1. 0.3 keV 以下の炭素の原子線

エネルギー (keV)	原子線
0.277	C K α
0.284	C K 吸収端
0.304	C _V K β_1
0.307	C _V K β_2

Resolve 装置は SXS 装置とほぼ同一の設計 (Ishisaki et al., 2022) である。SXS 装置のイベントスクリーニングの成果は Calibration document (*Hitomi Instruments Calibration Documents*) としてまとめられており、*Resolve* 装置についてもこれに準拠しながら進めていく。しかし両者には、イベントスクリーニングに関係するいくつかの重要な相違点がある。

- まず、軌道上データの量が多い。SXS 装置は打ち上げ後5日目の2017年2月22日に50 mK 制御を開始した後、同年3月25日に最後のデータが取得されるまで1ヶ月の運用実績があるのみである (Tsujiimoto et al., 2017)。一方、*Resolve* 装置は打ち上げ後約1ヶ月後の2023年10月9日に50 mK 制御を開始した後、SXS 装置の実績を超え、執筆時点ですでに3ヶ月の実績がある。運用は順調に進んでおり、実績が大幅に更新される見込みである。
- 次に、異なる質の軌道上データ (§ 4.2.2) が取得された。SXS 装置は立ち上げ途中で終了したため、最終状態でのデータは取得されていない。例えば、軌道上較正装置である MXS (§ 3.2.6.3) は *Resolve* 装置で初めて取得されたし、クライオスタットの真空蓋であるゲートバルブ (§ 3.2.3) が開いた状態や、寒剤 He を消費した後の“crogen-free”モード運転でのデータも *Resolve* 装置で初めて取得される予定である (ただし、後者2つは現時点では達成されていないので、本研究ではスコープ外とする)。
- 更に、打ち上げ前の地上試験 (§ 4.2.1) で取得した較正データが、質・量ともに大幅に改善した。SXS 装置は開発が難航してスケジュールが逼迫したため、地上での較正データ取得は約3日にとどまり、極めて限定的なデータにとどまった。一方、*Resolve* 装置では、2021年12月から2022年3月にわたって、約1.5ヶ月分の較正データを取得した。これらのデータは、0.3–22 keV の広帯域にわたって、異なる強度、異なるエネ

ルギーの単色 X 線を照射したものであり、軌道上の天体観測では再現できないものである。

4. クライオスタットの真空蓋は 270 μm 厚の Be (Midooka et al., 2021) で 2 keV 以下*1の X 線を吸収する。SXS 装置では地上、軌道上とも、真空蓋を開いた状態での運転はなく、X 線マイクロカロリメータの全帯域 0.3–12 keV でのデータは装置組み上げ状態では存在しない。*Resolve* 装置では、打ち上げ前の 2022 年 2 月に特殊な地上支援装置を用いて真空蓋を外し、X 線を照射する試験を行った。これが、SXS 装置及び *Resolve* 装置を通して現時点で唯一の、2 keV 以下での性能を評価するデータである (§ 4.2.1.1)
5. SXS 装置ではすべての軌道上データが真空蓋閉の状態取得されたため、2 keV 以下の帯域で重要になるイベント処理 (電氣的クロストーク § 6.2.3 や フレームイベント § 6.2.4) の開発が未完成に終わった。*Resolve* 装置では真空蓋を開くことを期して、これらを完成させる必要がある。
6. SXS 装置の実績を踏まえて、イベント処理に関するソフトウェアのアルゴリズムやパラメータが変更された。例えば、断熱消磁冷凍機のリサイクル期間 (この間のイベントはすべて除去される; § 6.3.1) の判定のアルゴリズムが追加されたり (SXS 装置では 17 回のリサイクルだけだったので手動で除去した)、X 線マイクロカロリメータのパルス波形の異常を示すフラグが追加されたり (§ 6.1.6) しており、これらを新たに検証する必要がある。
7. 時期が異なる。SXS 装置と *Resolve* 装置は約 7 年の違いがある。南大西洋放射線異常帯 (SAA; South Atlantic Anomaly; § 6.3.2) は 1 年に西方へ 0.27 度ずれる (楨野, 2013) とされており、再評価が必要である。

このような相違点に留意し、質・量ともに SXS 装置から大幅に改善した *Resolve* 装置のデータを縦横に用いて、イベントスクリーニングの最適化を行う。ここで、打ち上げ前 (§ 4.2.1) 及び打ち上げ後 (§ 4.2.2) のデータを一貫して用いるのが、本研究の大きな特色である。これは、本研究期間中に打ち上げを挟んだため両期間のデータにアクセスできたという幸運もあるが、より重要なのは、両期間のデータを見渡して項目ごとに最適なデータを用いて最適化を検討できるということである。本論文を通して随所に示される。

一貫した同質のデータの準備は、実際には簡単ではない。装置レベルのサブシステム試験・衛星レベルのシステム試験・軌道上運用と、インテグレーションのレベルが上がるに従って、運用主体・データ収集方法・1次データ処理の仕方などが次々と変更になる。更に、データ処理のパイプライン (§ 5.2) は軌道上で通常観測データにのみ適用することを想定しているため、地上試験データ (衛星姿勢や軌道上環境の概念がなかったり、一部のフライト機器が地上支援装置で代替されていたり、起動前だったりする) に対しては基本的に動かない。そこで我々は、地上試験データや軌道上立ち上げ途中のデータでも、通常観測データ用のデータ処理パイプラインが動くように工夫し、できるだけ同質のデータを長期間にわたって構築することにした (Tsujiimoto, 2023)。ただし、検出器のピクセルごとのゲイン変動 (§ 3.2.6) は補正していない。2019 年 12 月の装置レベルの地上試験から開始し、これまでのすべての *Resolve* 装置のデータが打ち上げをまたいでデータベース化されている。この独自のデータセットから、既に多数の重要な成果が得られている (Imamura et al., 2023; Hasebe et al., 2023; Kurihara et al., 2023; Omama et al., 2022; Mizumoto et al., 2022; Kashiwazaki and Tsujimoto, 2023; 今村, 2022; 栗原, 2022; 柏崎, 2023)。筆者は、本研究の一環として、打ち上げ前の地上試験 (装置レベルのサブシステム試験・衛星レベルのシステム試験の両方) に参加し、打ち上げ後は *Resolve* 装置立ち上げ期間中の観測データのパイプライン処理とデータベースへの追加を主導して、異なる期間の運転やデータに精通することに努めた。

*1 実際には広い帯域にわたって緩やかに低下するが、本論文では一律に 2 keV と称する。

2.2 課題

Resolve 装置のイベントスクリーニングは3種類に大別され、それぞれ下記の項目がある。

1. パルス形状に基づくスクリーニング (§ 6.1)。X線マイクロカロリメータは、すべての時系列データを地上にダウンリンクするのではなく、軌道上でパルスを検出して解析し、その特徴量だけをダウンリンクする。X線イベントは、特定の特徴量の組み合わせのパターンを持つので、そのパターンを経験的に見つけながらイベントスクリーニングを行う。
 - (a) パルス立ち上がり時間 (RISE_TIME) (§ 6.1.1)
 - (b) 標準パルス波形からの時間方向のずれ (TICK_SHIFT) (§ 6.1.2)
 - (c) 微分パルスの最大値 (DERIV_MAX) (§ 6.1.3)
 - (d) パルスの重なり (QUICK_DOUBLE) (§ 6.1.4)
 - (e) パルス減衰の遅さ (SLOPE_DIFFER) (§ 6.1.5)
 - (f) パルス波高値のサチュレーション (FLAG_CLIPPED) (§ 6.1.6)
 - (g) パルス増減の遅さ (SLOW_PULSE) (§ 6.1.7)
2. 到達時刻に基づくスクリーニング (§ 6.2)。複数のイベントの相対時刻に基づくスクリーニングである。これは同じ事象で複数のイベントを生じる様々な物理過程により生じる。
 - (a) 反同時計測検出器による veto (§ 6.2.2)
 - (b) 電氣的クロストーク (クロストークがイベントとして検出される場合) (§ 6.2.3)
 - (c) 電氣的クロストーク (クロストークがイベントとして検出されない場合)
 - (d) フレームイベント (§ 6.2.4, (§ 6.2.5))
 - (e) 電子反跳イベント (§ 6.2.6)
3. 時間帯に基づくスクリーニング (§ 6.3)。安定した観測ができる時間帯を Good Time Interval (GTI) と称する。GTI でない時間帯を特定し、条件を設定し、イベントのスクリーニングを行う。
 - (a) 断熱消磁冷凍機のリサイクル (§ 6.3.1)
 - (b) MXS 較正装置の オン・オフ 時間
 - (c) 高計数率天体の観測時における、軌道上 CPU 処理上限に基づく喪失時間
 - (d) 南大西洋放射線異常帯通過 (§ 6.3.2)
 - (e) 地没 (§ 6.3.3)
 - (f) 地球磁場強度 (§ 6.3.4)

これら全 18 項目のうち、15 項目について本研究で扱う。これらは、バックグラウンド低減、実効観測時間の増大、分光性能の安定化の中でトレードオフを行っていく。残り 3 項目 (2-c, 3-b, 3-c) については、それぞれが特殊なデータセットやデータ処理を要し、また別観点のトレードオフも絡む。それぞれ独自の 1 研究を要するため、本研究のスコープ外とする。これらの研究成果は別途発表される予定である。

2.3 構成

本論文の全体像を図 1 に示した。以降、本論文は以下のように進める。

第 3 章

本研究の対象である XRISM 衛星 (§ 3.1) と *Resolve* 装置 (§ 3.2) 及び衛星運用 (§ 3.3) について概観する。

第 4 章

本論文で用いたデータ種類 (§ 4.1) とデータセット (§ 4.2) についてまとめた。

第 5 章

マイクロカロリメーターによるピクセルイベントと、反同時係数検出器によるイベントの処理について、軌道上 (§ 5.1)、地上 (§ 5.2) をまとめた。

第 6 章

本論文の主要部分である。§ 2.2 で列挙した 3 項目、14 細項目のイベントスクリーニングの最適化を行う。

第 7 章

§ 6 によって求めた最適なスクリーニング条件を用いて、軌道上の実データに適用し、バックグラウンドの大きさと安定性を評価する。

第 8 章

本研究のまとめを行う。

地上試験の *Resolve* 装置データセット (§ 4.2) や軌道上から地上まで通したイベント処理の簡潔な一貫した記述 (§ 5) は初めてなので、文献的価値も持つよう記述を行う。また、本論文が XRISM 衛星打ち上げ後、軌道上データを扱う最初の修士論文になるので、衛星軌道上運用についても基本事項をまとめる (§ 3.3)。

なお、本論文の時刻はすべて UTC である。データのパイプライン処理には NASA が管理する X 線天文データ解析パッケージ HEASoft*² の内部リリース版である XRISM_15Jun2023_Build6 と XRISM_15Oct2023_Build7 を用いた。

*² <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/heasoft/>

第3章

衛星と装置

Contents

3.1	XRISM 衛星	35
3.2	<i>Resolve</i> 装置	38
	3.2.1 検出器	38
	3.2.2 信号処理系	39
	3.2.3 クライオスタット	43
	3.2.4 冷却系	45
	3.2.5 光学系	49
	3.2.6 較正装置 (フライトシステム)	52
	3.2.7 較正用装置 (地上支援機器)	58
3.3	軌道上運用	64
	3.3.1 衛星軌道とコンタクト	64
	3.3.2 衛星の指向	68
	3.3.3 軌道上環境	74
	3.3.4 <i>Resolve</i> 装置運用	77
	3.3.5 dp10	78

本章では、XRISM 衛星と、搭載されている *Resolve* 装置について記述する。§ 3.1 では、XRISM 衛星の概要とコミッショニング期の運用を記述した。§ 3.2 では、*Resolve* 装置の原理と較正用装置を記述した。参考にした主な文献は以下の通りである。§ 3.1 は Tashiro et al. 2020; XRISM Science Team 2022、§ 3.2.1 及び § 3.2.2 は Chiao et al. 2016、§ 3.2.3 は Fujimoto et al. 2017; Midooka et al. 2021、§ 3.2.4 は Mitsuda et al. 2014; 田崎 2008、§ 3.2.5 は de Vries et al. 2017; Boissay-Malaquin et al. 2022、§ 3.2.6 は de Vries et al. 2017、§ 3.2.7 は Eckart et al. 2018 を参考にした。§ 3.3 では、軌道上運用の基本的な概念を説明する。

3.1 XRISM 衛星

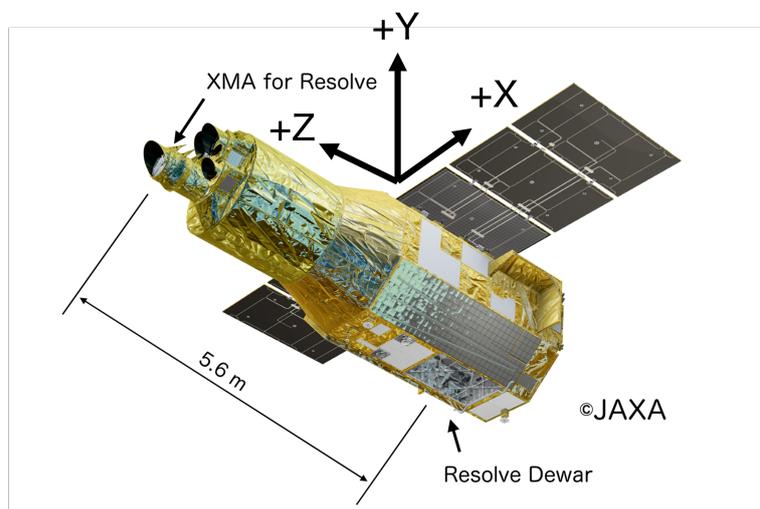


図 3.1. XRISM 衛星。Sato, Uchida, and Ishikawa 2023 を改変。

X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM) は、2016年に打ち上げられた ASTRO-H 衛星の後継ミッションであり、そのミッションによって計画された衛星名である。本ミッションは、JAXA 宇宙科学研究所が主導し、NASA や ESA などと協力して行う国際衛星プロジェクトである。XRISM 衛星は、奥行き 3.1 m、高さ 7.9 m、焦点距離 5.6 m、太陽光パネルを広げたときの幅は 9.2 m あり、重さは 2.3 t である (図 3.1)。2023 年 9 月 7 日午前 8 時 42 分 11 秒 (JST) に種子島宇宙センター大型ロケット発射場から JAXA の H-IIA ロケット 47 号機によって、XRISM 衛星は打ち上げられた (図 3.2)。軌道傾斜角は 31° 、高度は約 575 km の地球周回低軌道衛星である。



図 3.2. H2A ロケットによる XRISM 衛星の打ち上げの様子 (著者撮影)。

XRISM 衛星には、2つの観測装置が搭載されている。*Resolve* 装置はX線マイクロカロリメーター検出器を、

Xtend 装置は X 線 Charge Coupled Device (CCD) 検出器を用いる。それぞれの検出器の特徴を表 3.1 にまとめた。

表 3.1. *Resolve* 装置と *Xtend* 装置の要求性能値 (Tashiro et al., 2020 を改変)。

パラメータ	<i>Resolve</i> 装置	<i>Xtend</i> 装置
ミラー	円錐近似 Wolter I 光学系	
焦点距離	5.6 m	
角度分解能	≤ 1.7 arcmin	
検出器の種類	X 線マイクロカロリメータ	X 線 CCD
有効面積	$\geq 210 \text{ cm}^2(6 \text{ keV})$ $\geq 160 \text{ cm}^2(1 \text{ keV})$	$\geq 300 \text{ cm}^2(6 \text{ keV})$
視野	$2.9 \times 2.9 \text{ arcmin}^2$	$\geq 30 \times 30 \text{ arcmin}^2$
保証エネルギー範囲	0.3 – 12 keV	0.4 – 13 keV
エネルギー分解能 (FWHM)	$\leq 7 \text{ eV} (6 \text{ keV})$	$\leq 250 \text{ eV}(\text{劣化時}) (6 \text{ keV})$
Non X-ray background	$\leq 2 \times 10^{-3} \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$	$\leq 1 \times 10^{-6} \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1} \text{ arcmin}^{-2} \text{ cm}^{-2}$ (5 – 10keV)
タイムタグの精度	$\leq 1 \text{ ms}$	0.25 s

ミッションの目的は、大きく 3 つある。1 つ目は、宇宙の構造形成と銀河団の進化を知ることである。高いエネルギー分解能をもつ *Resolve* 装置と広い視野をもつ *Xtend* 装置を組み合わせた銀河団の観測から、広がった高温プラズマの速度を推定することで、構造形成の手がかりとなるエネルギー輸送を知ることができる。2 つ目は、宇宙のバリオン物質の循環を知ることである。高いエネルギー分解能によって初めて可能となるプラズマ診断によって、超新星爆発によって放出されたバリオンが、どのように再循環しているかを知ることができる。3 つ目は、銀河とその中心の超巨大ブラックホールとの共進化過程の解明である。銀河のバルジの分散速度と、超巨大ブラックホールの質量との間には相関関係があることが示唆されている。しかし、約 10^8 の空間スケールが異なる銀河と超巨大ブラックホールとの間の質量輸送の物理過程がある明らかになっていない。XRISM 衛星によって鉄の高電離輝線や吸収線を高い分解能で観測することで、ブラックホールから放出された物質の運動を調べることができ、共進化過程の解明につながる。

打ち上げ後の日数を L+ で表す。打ち上げから L+3 までは、クリティカルフェーズといい、衛星のバス系の立ち上げや太陽パドルの展開、太陽捕捉のための姿勢制御などが行われた。その後の L+90 までの約 3 ヶ月間がコミッショニングフェーズとして予定された。最初の約 1 ヶ月はバス系の、残りの期間はミッション系の立ち上げと機能試験、各種調整を行う。*Resolve* 装置の実施実績のうち、本論文の内容に関するものを表 3.2 にまとめる。コミッショニングフェーズ終了後は、performance verification (PV) フェーズが開始される。較正用天体観測と、予め決定されたいくつかの天体を観測する。その後、公開天文台になり、プロポーザルによって採択された天体の観測が始まる。

表 3.2. *Resolve* 装置の主な軌道上立ち上げ実績

日付 (UT)	作業
2023/09/06 23:42	打ち上げ
2023/09/06 23:47	He 排気弁開
2023/09/06-09	冷却系立ち上げ
2023/09/08-09	信号処理系立ち上げ
2023/10/07	<i>Resolve</i> 装置コミッショニング 運用開始
2023/10/09	50 mK 運転開始、最初の X 線光子検出
2023/10/09-10/29	機械式冷凍機周波数調整
2023/10/12	較正用 フィルタホイール ^{55}Fe X 線照射開始
2023/10/27	較正用 MXS X 線照射開始
2023/10/31	PSP イベント閾値変更 75 →120
2023/11/04	ゲートバルブを開ける運用をしたが成功していない (1 回目)
2023/11/19	ゲートバルブを開ける運用をしたが成功していない (2 回目)
2023/12/19-24	ゲートバルブを開ける運用をしたが成功していない (3 回目)

3.2 Resolve 装置

3.2.1 検出器

X線マイクロカロリメータ検出器は、金でできたフレームの上に、HgTeの吸収体とSi型半導体の温度計からなる一辺が $814\ \mu\text{m}$ の正方形のピクセルを 6×6 のアレイ状に配列した構成である(図3.3、図3.4)。これらのピクセルそれぞれに、信号を読み出すためのホット/リターン配線のペアがある。合計36ペアの配線の物理的配置の順番に対応した番号がピクセルにつけられている。そのうちの35個のピクセルを用いて天体観測を行う。アレイの外側には較正用に4つのピクセルを設置するスペースがあり、そのうちの1つ(12番ピクセル)に ^{55}Fe の較正線源を常に照射する。

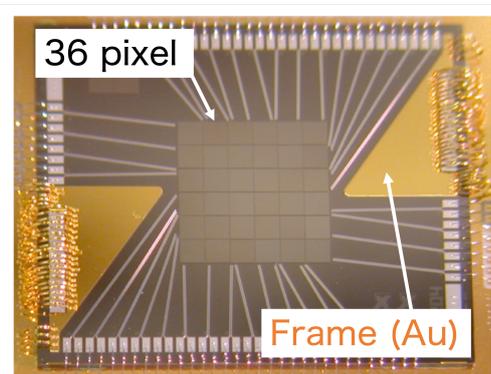


図 3.3. X線マイクロカロリメータのピクセルマップ (Kilbourne et al., 2018a を改変)。

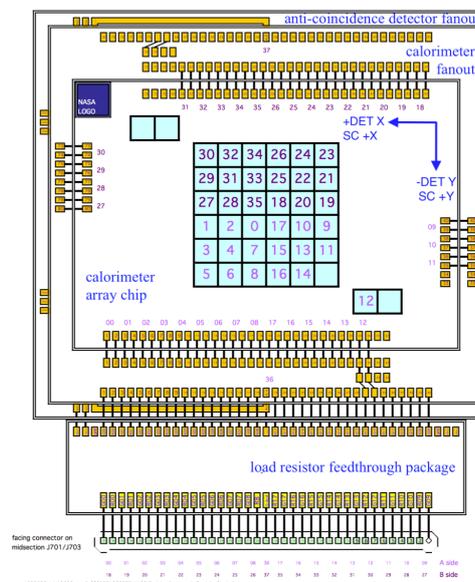


図 3.4. X線マイクロカロリメータの配線図 (Chiao et al., 2016)。

X線マイクロカロリメータの基板の下には、縦と横が $10\ \text{mm}$ 、厚さが $0.5\ \text{mm}$ のSi検出器が設置されている。この検出器をAnti-coincidence detector (anti-co) という(図3.5)。Anti-co検出器は、約 $10\ \text{keV}$ から $6\ \text{MeV}$ のエネルギーデポジットをするイベントを検出する反同時計数検出器である。この検出器によって高エネルギーの宇

宙線イベントに代表されるバックグラウンドイベントを検出し、anti-co イベントとして出力する。Anti-co イベントの時刻と同時刻に検出されたピクセルイベントデータを除去することで、X線マイクロカロリメータのバックグラウンドイベントレートを低減することができる。冗長性のため、検出器 1 つに対して読み出し系は 2 つあり、A, B サイドと呼ぶ。

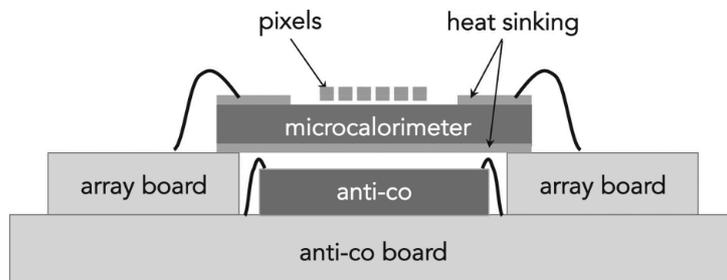


図 3.5. X 線マイクロカロリメータと反同時計数検出器の概略図 (Kilbourne et al., 2018b)。

3.2.2 信号処理系

信号処理系の概念図を図 3.6 に示す。以降の節で、各機器の概要を説明する。

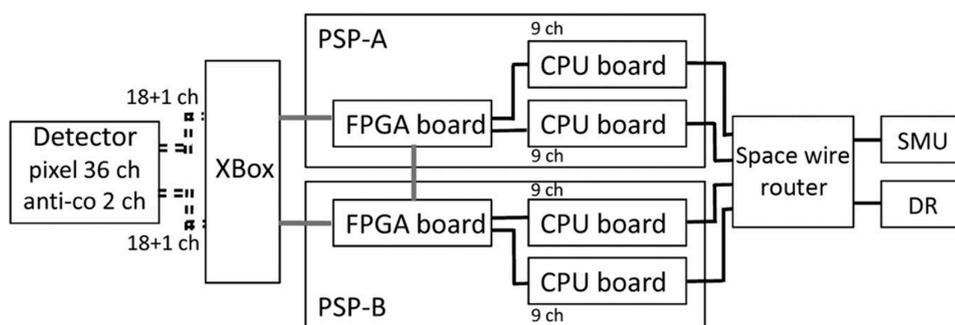


図 3.6. 信号処理系の概略図。36 ピクセルに対応した 36 個のチャンネルと anti-co 検出器の 2 個のチャンネルを半分ずつ XBOX-A/B と PSP-A/B で読み出す (Ishisaki et al., 2022)。

3.2.2.1 Junction Field Effect Transistor (JFET)

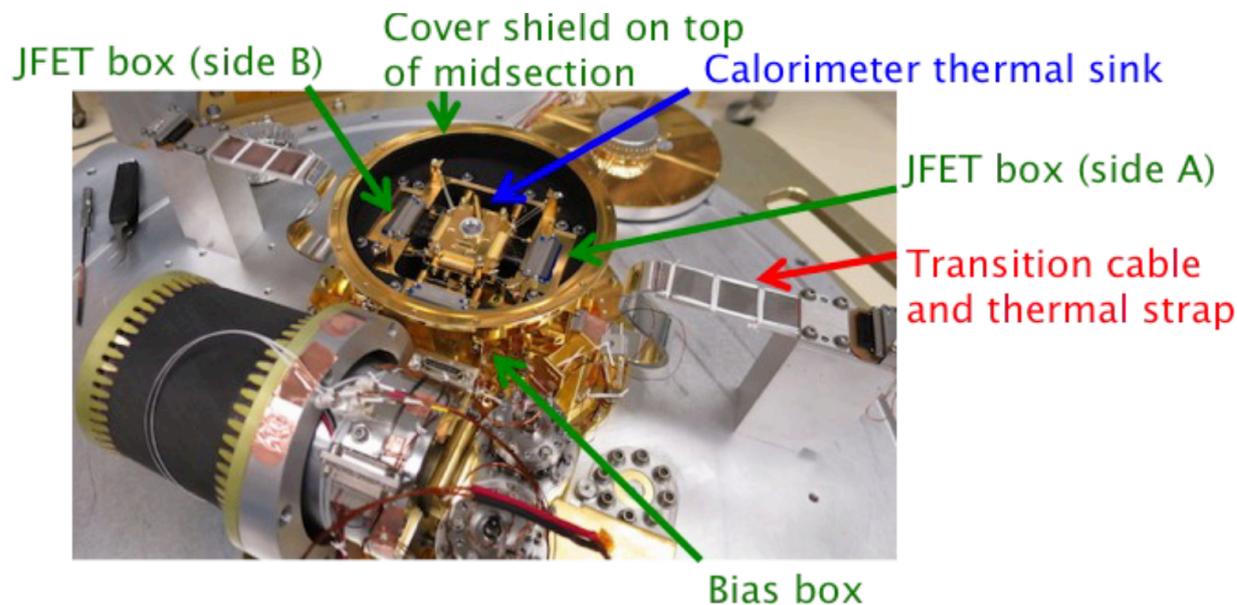


図 3.7. 検出器アセンブリ (Chiao et al., 2016)。

マイクロカロリメーターの 36 ピクセルに対応した 36 個のチャンネルと、anti-co 検出器の 2 個のチャンネルは、それぞれ半分ずつ A side、B side の信号処理系の機器によって処理が行われる (図 3.7)。Junction Field Effect Transistor (JFET) は、マイクロカロリメーターの 36 個のピクセルと anti-co 検出器の信号を読み取り、高インピーダンスから低インピーダンスへの変換をして X-ray Box (XBOX) へアナログ信号を送信する機器である。Resolve 装置に搭載される JFET は、90 K 以上で動作する仕様となっており、実際は 130 K 程度で動作させる。JFET の動作温度はマイクロカロリメーターの 50 mK よりも遥かに高く、JFET の放射熱入力を抑えるために、JFET とマイクロカロリメーターは物理的な距離を離す必要がある。しかし、離れすぎると高インピーダンスの配線が長くなり、信号にノイズが乗ってしまうため、これらのトレードオフを考慮した設計になっている (図 3.8)。

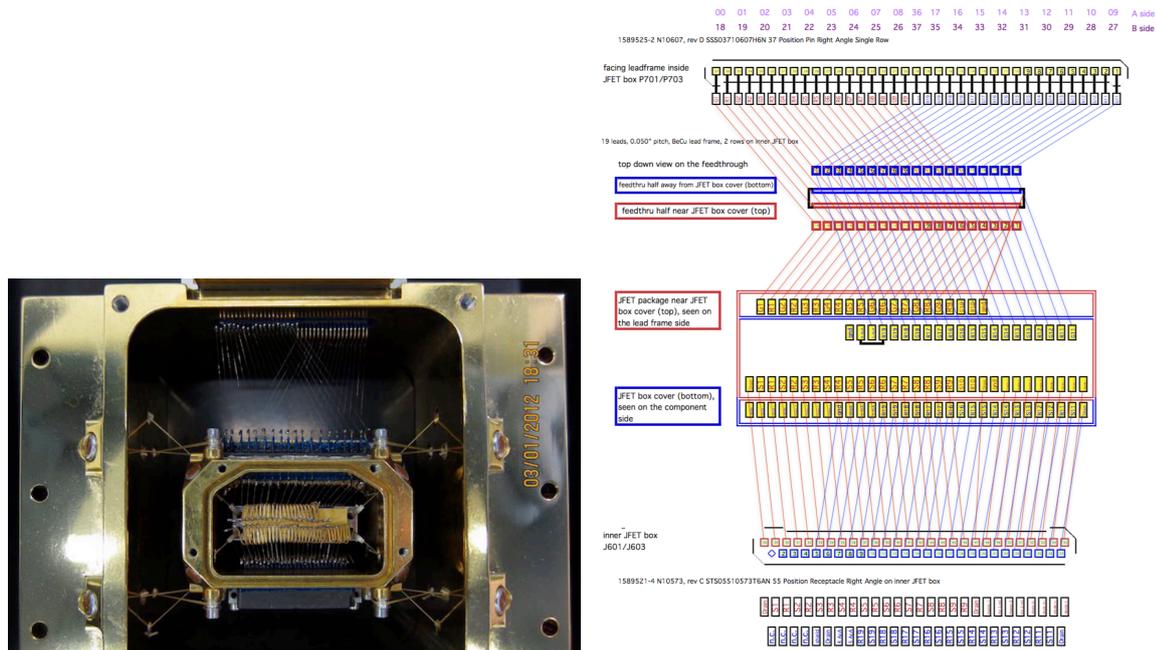


図 3.8. JFET とマイクロカロリメーターの配線 (Chiao et al., 2016).

3.2.2.2 X-ray Box (XBOX)

X-ray Box (XBOX) とは、マイクロカロリメーター及び anti-co 検出器のバイアス電圧を提供し、検出器の出力をシェイピング、増幅、サンプリングする機器であり、デュワーの外の常温部に設置されている。XBOX は、1つの筐体の中で A と B の2つの系に独立に分かれており、それぞれがマイクロカロリメーターの18ピクセルずつ、及び、anti-co 検出器の1つずつの読み出しを担当する。そのため、片系が故障したとしても、残りの系を用いて半分のピクセルで観測を続けることができる。シェイピングでは、ローパスフィルタ処理をかける。ローパスフィルタ処理とは、ある閾値よりも高い周波数をカットする処理であり、これによって高周波のノイズを除去し、バンド幅を2-3 kHz 以下に制限する。また、サンプリングでは、80 μs (12.5 kHz) に1回パルスを正負14ビットの深度で保存する。ナイキスト周波数は6.25 kHz である。このデジタル信号と XBOX の HK データとが Pulse Shape Processor (PSP) に送られる。

3.2.2.3 Pulse Shape Processor (PSP)

Pulse Shape Processor (PSP) は XBOX から受け取ったデジタル信号を処理する機器である。XBOX 同様 A と B の2つの系に別れている。XBOX と異なり、A と B は別々の筐体で構成される。各筐体は、3種類4枚のボードによって構成される。電源ボード1枚、MIO (FPGA) ボード1枚、SpaceCard (CPU) ボード2枚である。MIO ボードは MIO-A, MIO-B, CPU ボードは SpC-A0, A1, B0, B1 と呼ばれる。PSP-A, PSP-B の2つの筐体が、それぞれ XBOX-A と XBOX-B からの信号を受け取る。すなわち、それぞれがマイクロカロリメーター検出器18チャンネル、anti-co 検出器1チャンネルのデータを処理する。更に、PSP-A の中には、SpC-A0, A1 の中で役割を分担する (表 3.3)。

マイクロカロリメーターで取得した全時系列データ (12.5 kHz \times 16 bit \times 36 チャンネル) のデータレートは 6.9 Mbps = 580 Gb day⁻¹ であり、軌道上のハードディスク容量 (2GB) も地上ダウンリンクのための回線速度 (8 Mbps で1日30分程度) もまったく足りない。そこで、軌道上で時系列データからパルスを検出し、その特徴量を抽出して、それだけをダウンリンクする必要がある (Boyce et al., 1999)。それを担うのが PSP である。そのア

表 3.3. PSP CPU カードの役割分担

番号	カード	筐体	ピクセル	Anti-co	XBOX TC ^e
0	A0 ^a	PSP-A	00-08		yes
1	A1 ^b	PSP-A	09-17	A	no
2	B0 ^c	PSP-B	18-26		yes
3	B1 ^d	PSP-B	27-35	B	no

^a A1 が使用不可時、その機能を追加で代替できる

^b A0 が使用不可時、その機能を追加で代替できる

^c B1 が使用不可時、その機能を追加で代替できる

^d B0 が使用不可時、その機能を追加で代替できる

^e XBOX に対するテレコマ中継機能

ルゴリズムは § 5.1 で述べる。

MIO ボードには、Field Programmable Gate Arrays (FPGA) が搭載されている。FPGA とはプログラミングによって書き換え可能な論理回路であり、単純だが同時性を要求される信号処理に向く。PSP では、XBOX の入力信号の微分計算と、パルスの閾値判定に用いる。PSP に用いられる FPGA は、地上でのみ書き換えできる仕様である。各 MIO ボードが水晶発振子に基づいた 20 MHz のクロックを生成し FPGA を動かす。両 MIO ボード間でクロックを同期することで、マイクロカロリメータ及び anti-co 検出器の 12.5 Hz のサンプリングを同期している。

SpaceCard ボードには Central Processing Unit (CPU) が搭載されており、32 bit の Reduced Instruction Set Computer (RISC) 型プロセッサが採用されている。RISC とは、コンピュータに命令するプロセスの数を減らし、命令内容を単純なものにすることで、処理の高速化を図る CPU である。もっとも、ベースクロックが 60 MHz なので、民生用パソコンなどに比べて遥かに処理速度は遅い。オペレーティングシステムには、Toyohashi OPen Platform for Embedded Real-time Systems (TOPPER) が用いられている。

3.2.3 クライオスタット

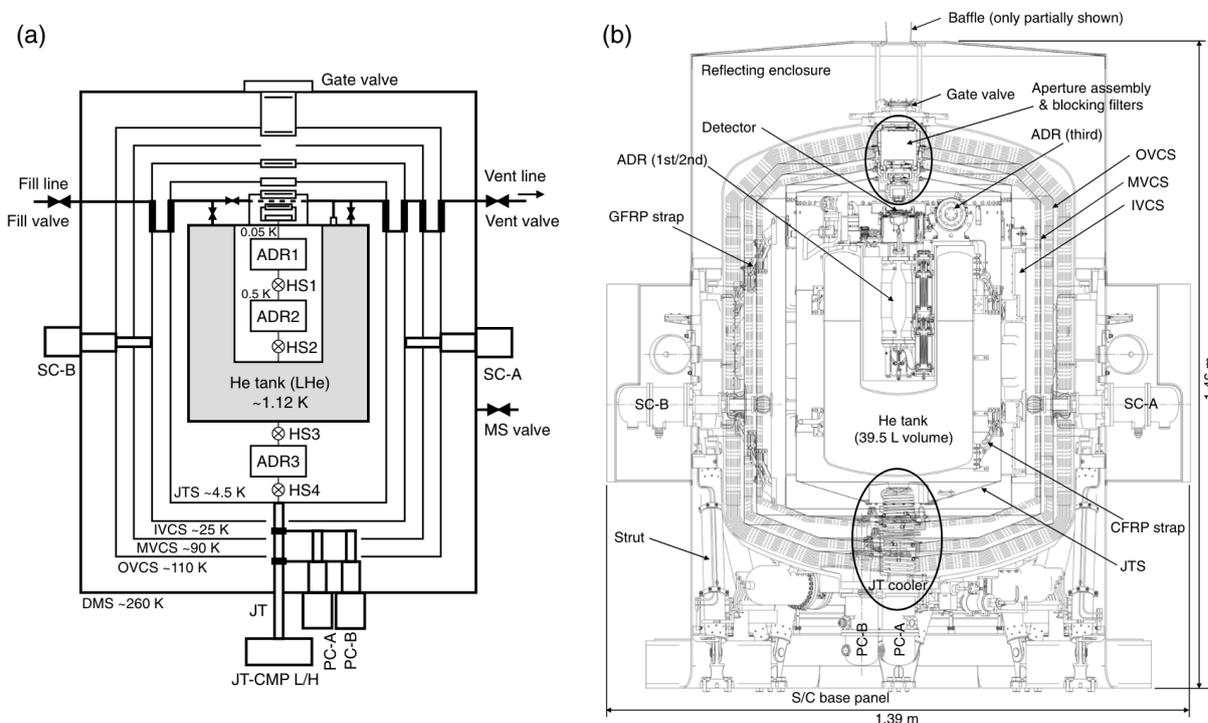


図 3.9. デュワーの概略図 Fujimoto et al., 2017.

クライオスタットとは真空槽のことであり、*Resolve* 装置ではデュワーと呼ばれる。X線マイクロカロリメータを動作させる極低温ステージを生成するため、4つのシールドと真空蓋で構成されたクライオスタットを用いている。このクライオスタットの中に、冷媒と断熱消磁冷凍機を格納している(図3.9)。機械式冷凍機はクライオスタットの外側にあり、冷却部分だけクライオスタットの中に入っている。

3.2.3.1 シールド

4つのシールドは、最外部の Dewar main shield (DMS) と内部の outer, middle, inner vapor-cooled shields (OVCS, MVCS, および IVCS) を用いる。シールド間は、真空かつ断熱材で挟まれており、内部への熱流入を極力抑える設計になっている。

3.2.3.2 冷媒

IVCS から、12本のカーボンファイバー強化プラスチック (CFRP) で 39.5 L のヘリウムタンクをぶら下げている。このタンクに超流動 ^4He を 30 L をいれ、減圧冷却することで 1.12 K の熱アンカーとして用いる。冷媒の寿命は 3-3.9 年であり、このときの動作モードを He mode と呼ぶ。液体 He が枯渇、あるいは液体 He を冷媒として使用できなくなった場合は、3段目の断熱消磁冷凍機で冷却する。このときの動作モードを Cryogen Free (CF) mode と呼ぶ。

3.2.3.3 Gate Valve (GV)



図 3.10. ゲートバルブ (Midooka et al., 2021)。

ゲートバルブ (GV: Gate Valve) とは DMS の X 線開口部に取り付けられている厚さ $270 \mu\text{m}$ の真空蓋である (図 3.10)。地上ではジグを用いて開閉可能である。ただし、開けると大気下で真空が破れるので、通常は閉めた状態であり、開く場合には特別の設備が必要になる。軌道上では 1 回だけ開くことができ、一度開くと閉じるすべはない。GV は、Be とステンレスのメッシュで構成されている。仮に軌道上で開かなくても、 2 keV 以上の X 線は透過するので観測は可能である。

打ち上げ時、及び、打ち上げから約 1 ヶ月間は、GV は閉めたままとする。衛星内部でのコンタミネーション物質の放出が落ち着き準備が整い次第、本格的な X 線観測のために GV を開く予定である。それまでは GV を閉じたまま観測を行う。GV の較正は既に地上試験でおこなわれており (Midooka et al., 2021)、CALibration DataBase (CALDB) の `xa_rsl_gatevalv_*.fits` にその値が格納されている (図 3.11)。

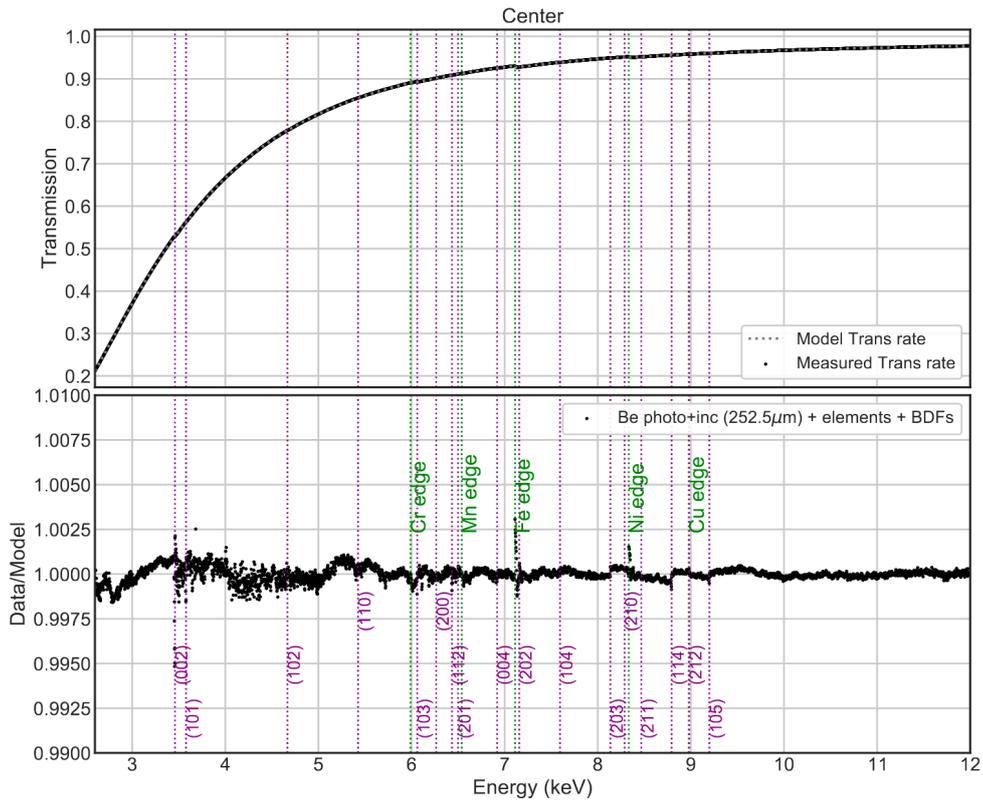


図 3.11. GV (Be 窓部) の透過率測定の結果。上段は透過率のエネルギー依存性、下段は観測データとベストフィットモデルとの比 (Midooka et al., 2021)。

3.2.4 冷却系

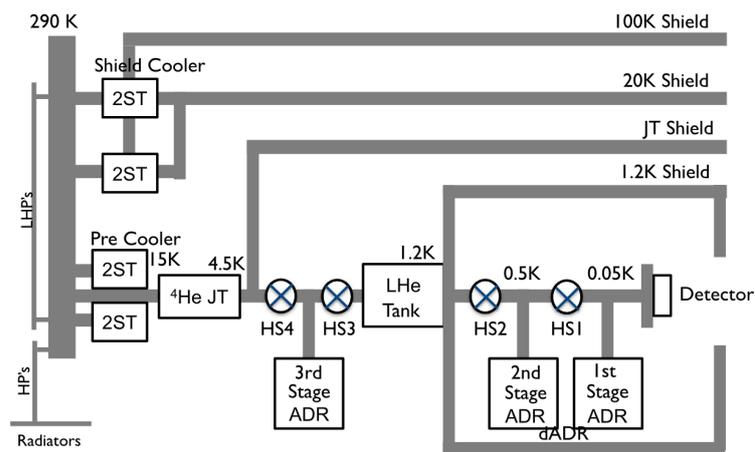


図 3.12. 冷却系の概略図 (Mitsuda et al., 2014)。

X線マイクロカロリメータを 50 mK に冷却するために、デューワー内部の冷媒 (超流動 He) と、2 段スターリング冷凍機、ジュール・トムソン冷凍機、断熱消磁冷凍機による多段冷凍系を組んでいる (図 3.12)。

3.2.4.1 スターリング冷凍機

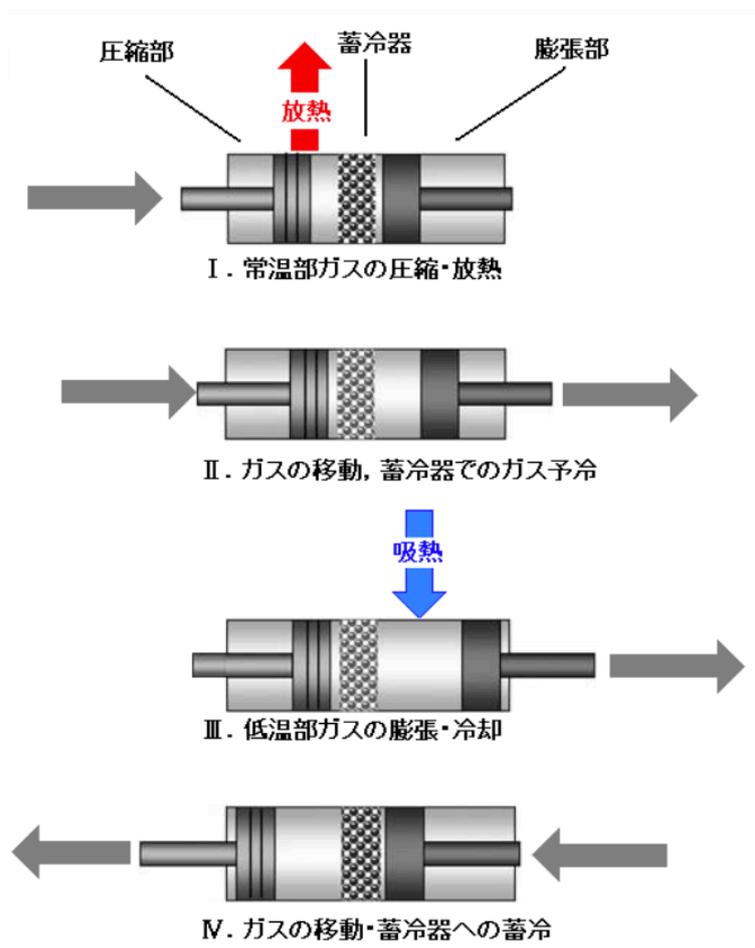


図 3.13. スターリング冷凍機の概略図 (<https://www.jsrae.or.jp/annai/yougo/190.html>).

スターリング冷凍機は圧縮部と膨張部と熱交換部からなる冷凍機である。図 3.13 に、(I)–(IV) までの 4 つの過程を示している。(I) 圧縮部ではピストンに系外から仕事を右に加え、気体を圧縮する。このときに発熱する熱はシリンダー周囲へと除去する。(II) 体積一定のまま膨張部にピストンを右に動かし、圧力を下げる。このときの熱は冷凍機の内部の蓄冷機を通過することによって冷却される。(III) 膨張部のピストンを右に動かし、膨張の仕事を行うことで外部からの熱を吸熱する。(IV) 体積を一定にしながら圧縮部と膨張部を左に動かし、蓄冷機を冷却し、ガス温度が上昇する。

理想気体の 1 サイクルの仕事 W は、圧力 p 、体積 V 、物質質量 n 、気体定数 R 、温度 T を用いると、

$$W = \oint pdV = nRT \oint \frac{dV}{V} = nRT_{I \rightarrow II} \log \left(\frac{V_I}{V_{II}} \right) - nRT_{III \rightarrow IV} \log \left(\frac{V_{IV}}{V_{III}} \right) \quad (3.1)$$

となる。このうち (III) の過程による吸熱量 Q_{cooling} は、

$$Q_{\text{cooling}} = nRT_{III \rightarrow IV} \log \left(\frac{V_{IV}}{V_{III}} \right) \quad (3.2)$$

となる。

Resolve 装置では、DMS を放射冷却によって冷却し、スターリング冷凍機を 2 つ (Shield Cooler A と B) 用いて、DMS 内部のシールドを冷却する。2 段式冷却であり、OVCS と IVCS を冷却する。また、別のスターリング冷凍機を 2 つ (Pre-Cooler A と B) 用いてジュール・トムソン冷凍機の予冷として用いる。

3.2.4.2 ジュール・トムソン冷凍機

断熱性のシリンダーが細孔のある栓によって分かれ、両側にピストン A と B がある系を用意する。ピストン A を押し込み、A 側の気体が B 側に押し出されたとすると、断熱過程の熱力学保存の法則から、内部エネルギーを U 、気体の圧力を p 、気体の体積を V とすると、

$$U_A + p_A V_A = U_B + p_B V_B \quad (3.3)$$

となる。エンタルピー H は、 $H = U + pV$ なので、この系では $dH = 0$ の等エンタルピー過程であることがわかる。

次にエンタルピーの変化量を考えると、エントロピーを S としたとき、

$$\begin{aligned} dH &= dU + pdV + Vdp \\ &= TdS + Vdp \\ &= T \left[\left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial S}{\partial p} \right)_T dp \right] + Vdp \\ &= T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_p dT + \left[V + T \left(\frac{\partial S}{\partial p} \right)_T \right] dp \end{aligned} \quad (3.4)$$

となるため、 $dH = 0$ より、

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H &= - \frac{V + T \left(\frac{\partial S}{\partial p} \right)_T}{T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_p} \\ &= \frac{T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - V}{C_p} \end{aligned} \quad (3.5)$$

となる。ただし、マクスウェルの関係式 $(\partial S/\partial p)_T = -(\partial V/\partial T)_p$ と、定圧熱容量 C_p の定義 $T(\partial S/\partial T)_p$ を用いた。実在気体の状態方程式 $[p + (a/V^2)](V - b) = RT$ より、 a と b は微量として一次の項まで近似すると、

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p &= \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_p^{-1} \\ &= R \left[p \left(+\frac{a}{V^2} + (V - b) \left(-\frac{2a}{V^3} \right) \right) \right]^{-1} \\ &\simeq \frac{V}{T} \left[1 + \frac{1}{V} \left(\frac{2a}{RT} - b \right) \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

となる。これを式 3.5 に代入すると、

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H &= \frac{2a}{C_p RT} \left(1 - \frac{T}{T_i} \right) \\ T_i &\equiv \frac{2a}{Rb} = \frac{27}{4} T_C \end{aligned} \quad (3.7)$$

が成り立つ。 T_i は気体の種類に依存する。この温度よりも低温でジュール・トムソンの系を動かすと、 $\Delta p = p_B - p_A < 0$ より、気体の温度を冷却することができる。*Resolve* 装置では、2 段式スターリング冷凍機による予冷によって 20 K に冷やしているため、 T_i より低温にできる。

ジュール・トムソン冷凍機によってシールドの熱を吸熱し、ジュール・トムソンシールド (JTS) を 4.5 K まで冷却する。これによって、 ^4He のヘリウムタンクへの熱流入を可能な限り抑え、 ^4He の蒸発量を下げることができる。

3.2.4.3 Vapor cooling

Vapor cooling とは、超流動 ^4He の気化によってシールドを冷却する方法である。超流動 ^4He の沸点は、1 気圧では 4 K であるが、ほぼ真空の宇宙空間では蒸気圧曲線に沿って沸点が低下し、1.12 K 程度である。これがヘリウムタンクの温度になる。さらに、超流動 ^4He は潜熱より顕熱のほうが遥かに大きいため、気化したあとにデュワー内部のシールドと熱交換させて外部に排出する。これによりシールドを冷却する。

3.2.4.4 断熱消磁冷凍機

断熱消磁冷凍機 (Adiabatic Demagnetization Refrigeration; ADR) とは、磁性塩中の原子のスピンの整列によるエントロピー増大を利用して温度を下げる冷凍機である。

1 つの独立したスピンからなる系の分配関数 $Z_1(\beta, H)$ は、温度の逆数 $\beta = 1/(kT)$ と磁場 H と磁気モーメント μ_0 を用いると、

$$Z_1(\beta, H) = e^{\beta\mu_0 H} + e^{-\beta\mu_0 H} = 2 \cosh(\beta\mu_0 H) \quad (3.8)$$

となる。これを N 個の独立したスピンの系に拡張すると、分配関数 $Z_N(\beta, H)$ は、

$$Z_N(\beta, H) = \{Z_1(\beta, H)\}^N = \{2 \cosh(\beta\mu_0 H)\}^N \quad (3.9)$$

となる。このときのヘルムホルツの自由エネルギー $F(\beta, H, N)$ は、

$$F(\beta, H, N) = -\frac{1}{\beta} \log Z_N(\beta, H) = -NkT \log \left\{ 2 \cosh \frac{\mu_0 H}{kT} \right\} \quad (3.10)$$

となる。よって、この系のエントロピー $S(\beta, H, N)$ は、

$$S(\beta, H, N) = -\frac{\partial}{\partial T} F(\beta, H, N) = Nk \log \left\{ 2 \cosh \frac{\mu_0 H}{kT} \right\} - \frac{N\mu_0 H}{T} \tanh \frac{\mu_0 H}{kT} \quad (3.11)$$

と導くことができる。外界と熱の出入りがない断熱準静的過程ではエントロピーは不変なので、式 3.11 より、

$$\frac{H}{T} = \text{constant} \quad (3.12)$$

となることがわかる。時間とともにスピンの向きが乱雑になり、磁場は準静的に減少する。したがって式 3.12 より、磁場の減少によって、温度が下がる。この磁場強度を、ソレノイド電流の量を制御することで、吸熱速度を調整し、一定温度を維持する。

2 段目の断熱消磁冷凍機に磁場をかけ、スピンの向きを揃える。これによって発生した熱はヘリウムタンクに排熱する。この磁場を減少させることで、500 mK の冷却ステージを生成する。同様に 1 段目の断熱消磁冷凍機に磁場をかけ、スピンの向きを揃える。これによって発生した熱は 500 mK ステージに排熱する。この磁場を減少させることで、50 mK の冷却ステージを生成する。これがマイクロカロリメータに対する熱浴である。定常的に熱入力するので、それを相殺するようにソレノイド電流を漸減させ、50 mK ステージの温度を安定化させる。ソレノイド電流が 0 付近になると、それ以上温度安定化ができないので、約 1 時間かけて準静的に再び磁化する。これを ADR リサイクルという。軌道上では約 2 日に 1 回程度のリサイクルを行う。図 3.14 に ADR リサイクルの典型的な温度変化とソレノイド電流の変化を示す。

なお、50 mK ステージの温度計の抵抗と電流値は、それぞれ 50 k Ω と 0.1 μA である。発生するジュール熱 P は、 $P = RI^2$ より、0.5 nW 程度である。これは検出器面に対する熱ロードの要求値 270 nW (He mode)、470 nW (CF mode) に比べて十分小さい (Shirron et al., 2018)。

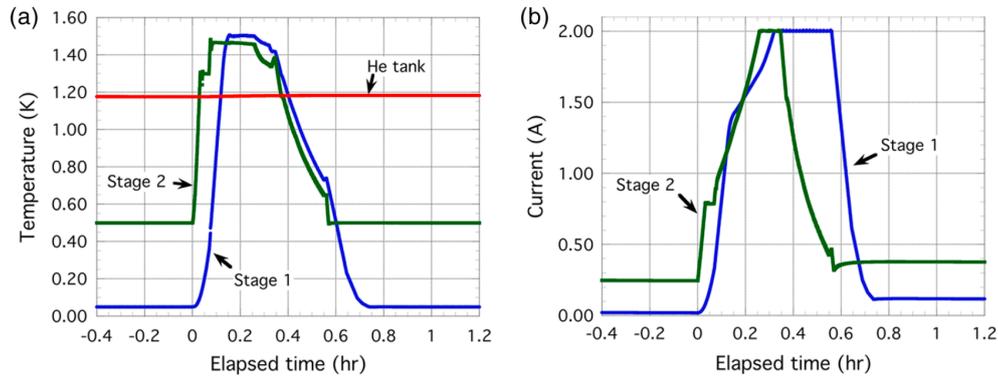


図 3.14. ADR リサイクルの温度変化 (a) とソレノイド電流の変化 (b) (Shirron et al., 2018)。

3.2.5 光学系

3.2.5.1 X-ray Mirror Assemblie (XMA)

X線反射望遠鏡とは、入射X線をミラーで全反射させることで集光する望遠鏡である。X線は金属に対して1よりわずかに小さい屈折率をもっているため、1度以下の角度で金や白金に入射X線を反射させることで集光することができる。天体からの微弱なX線を集光するために、反射鏡を同心円状に何枚も配置する。光軸から外れたX線を集光する際には、像の収差を小さくすることができる Wolter type 1 光学系が用いられる。この光学系は、入射X線を回転放物面と回転双曲面の2つの反射鏡で2回反射させて、焦点を作る。



図 3.15. XMA の概観。右が *Resolve-XMA*、左が *Xtend-XMA* (Boissay-Malaquin et al., 2022)。

X-ray Mirror Assemblie (XMA) とは、XRISM 衛星に搭載されるX線反射望遠鏡である (図 3.15)。Wolter type 1 近似光学系を用いる。*Resolve* 装置と *Xtend* 装置のそれぞれに対応した2つの望遠鏡が搭載される。XMA は、203枚の反射鏡が同心円状に入れ子構造になっている円錐近似 Wolter type 1 望遠鏡である。重量は42.5 kg、直径は45 cm、焦点距離は5.6 mである。光軸上のX線に対する有効面積は、Boissay-Malaquin et al. 2022によって測定されている (図 3.16)。また、結像性能は Point Spread Function (PSF) で評価される。PSF とは、無限遠の点状光源から入射した光が焦点で結像する際に、焦点上にどのような分布になるかを表す関数である。図 3.17 に PSF を示す。

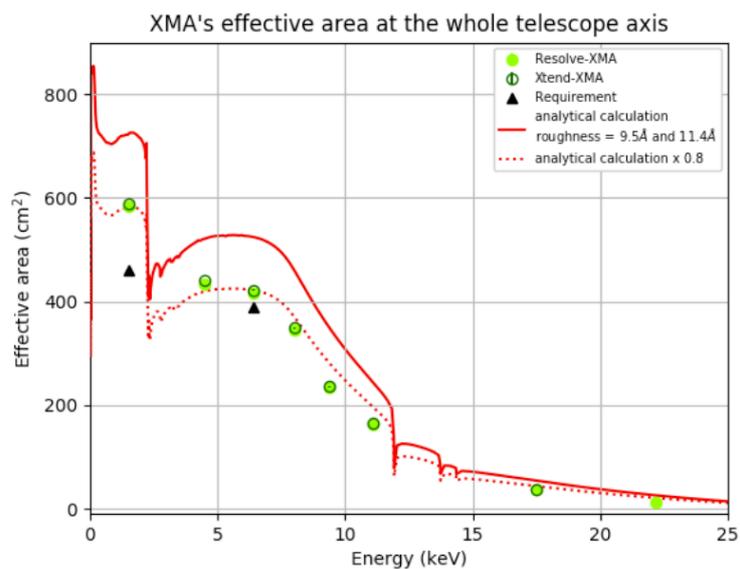


図 3.16. XMA の光軸上の有効面積。赤色の点線が実測値である (Boissay-Malaquin et al., 2022)。

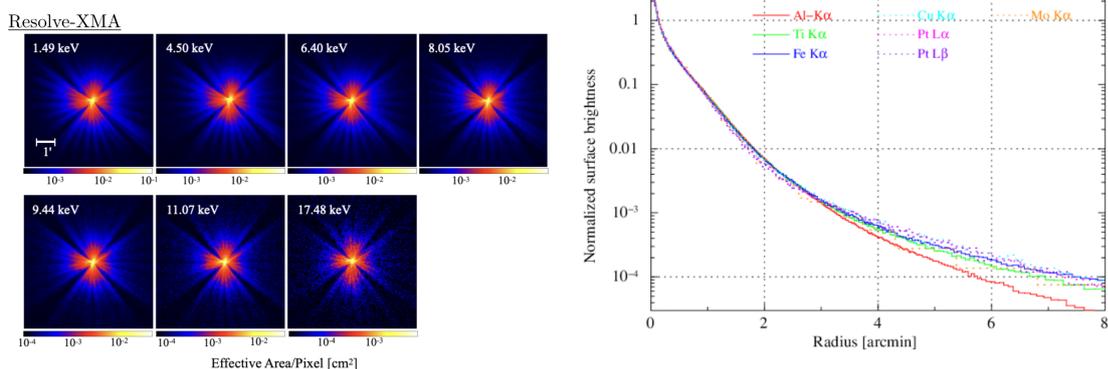


図 3.17. XMA の光軸上の PSF。1.49、4.50、6.40、8.05、9.44、11.07、17.48 keV の蛍光輝線を入射した際の像 (左) と、像の広がり (右)(Tamura et al., 2022)。

3.2.5.2 Filter Wheel (FW)



図 3.18. フィルタホイールの概観 (https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/04/XRISM_s_filterwheel)。

Filter Wheel (FW) とは、X 線光路上検出器上方に 90 cm 離れた場所（デュワーの外側になる）に取り付けられた、回転可能なフィルタセットである（図 3.18）。このホイールには 6 つのフィルタが取り付けられており、観測の用途によって使い分ける。表 3.4 にフィルタホイールの角度に対応したフィルタの種類を示す。

表 3.4. フィルタホイールの位置とフィルタの種類。

位置	角度	フィルタの種類
1	30	Open（フィルタなし）
2	90	Optical blocking フィルタ
3	150	Neutral density フィルタ
4	210	Open（フィルタなし）
5	270	Be フィルタ
6	330	^{55}Fe 較正 X 線源

(i) Open フィルタは、フィルタが取り付けしていない状態である。(ii) Optical フィルタは、ポリイミドという物質でできたフィルタである。ポリイミドは $\text{C}_{22}\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_4$ で構成される密度が 1.43 g cm^{-3} の物質である。X 線に対してほとんど透明であるが、可視光を遮断することができる。(iii) Neutral density フィルタは、X 線の透過率がほぼゼロの Mo で約 24.5% の面積を遮蔽したフィルタである。明るい天体を観測する場合、X 線光子のカウントレートを減衰させることで、適切なダイナミックレンジに調整することができる (§ 5.1.1)。(iv) Be フィルタは、2 keV 以下の X 線を遮断するフィルタである。Neutral density フィルタと同様の理由で使用される。ただし Neutral density フィルタはエネルギー非依存な減衰であるのに対し、Be フィルタはエネルギーに依存する減衰で、軟 X 線帯域に大きな減衰を持つ。(v) 放射性 Fe 源は、 ^{55}Fe が 5 つとりつけられたフィルタであり、軌道上較正線

源として用いる (§ 3.2.6.2)。フィルタごとのX線透過率を図 3.19 に示す。

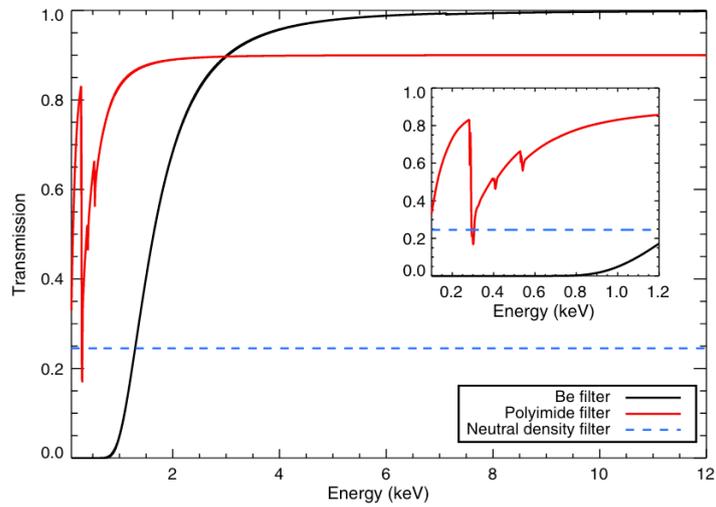


図 3.19. フィルタごとのX線透過率 (Eckart et al., 2018)。

3.2.6 較正装置 (フライトシステム)

マイクロカロリメーターは温度に対する感度が高いため、熱入流量や温度の変動によってゲインが大きく変動する。したがって、観測期間中はピクセルごとに時間変動するゲインを追跡し、適宜補正しなくてはならない (図 3.20)。これをゲイントラッキングという。ゲインの時間変動には、全ピクセル共通の common mode と、ピクセルごとの差分である differential mode がある。これらの両方を、事前にエネルギーが分かっている較正用 X 線源を用いることで較正する。

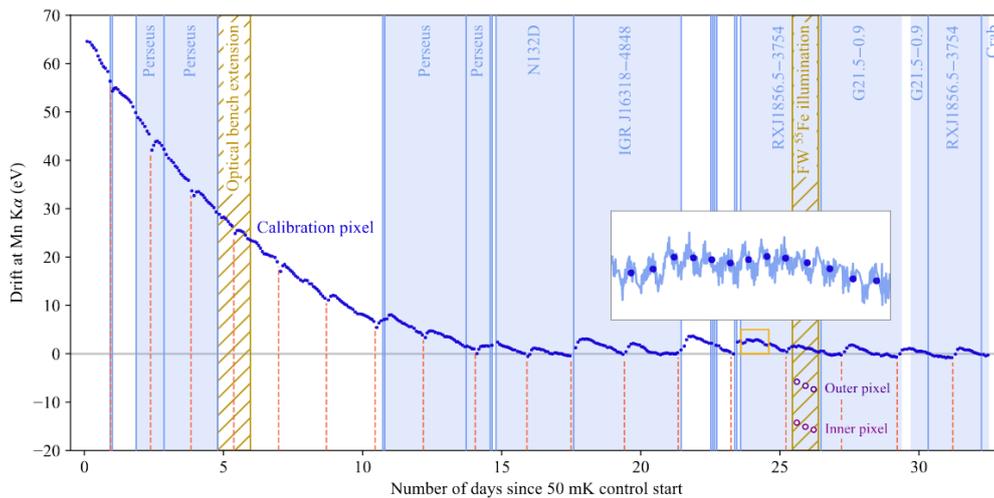


図 3.20. 軌道上 SXS 装置のゲインの時間変動 (Sawada et al., 2022)。横軸は 50 mK 制御を開始してからの日数、縦軸は Mn K α のエネルギーの変動。ADR リサイクルや地球周回など、異なる成分の時間変動からなる。

Resolve 装置は 3 つの較正線源を持っている。(1) 12 番ピクセルの ^{55}Fe 、(2) FW の ^{55}Fe 、(3) Modulated X-ray Source (MXS) である。これらの較正用装置はフライトシステムとして準備されており、地上試験でも軌道上運用でも使用される。軌道上では、(1) を common mode の、(2) もしくは (3) を differential mode のゲイン補正に使

用する。

フィルタホイールの ^{55}Fe と MXS は デュワーの外部にあるため、地上試験の大半及び軌道上運用の初期においては、ゲートバルブの遮蔽（支持構造による）と減衰（ $270\ \mu\text{m}$ 厚の Be 真空窓による; Midooka et al., 2021）を受けることに留意する。また、同じくゲートバルブの遮蔽により、MXS からの X 線は検出器アレイの半分にはしか照射できないことにも注意を要する (図 3.21)。

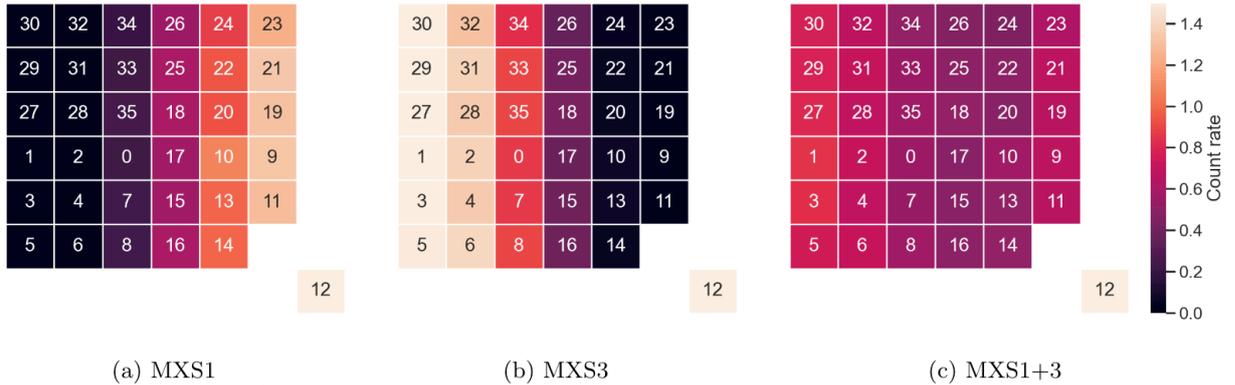


図 3.21. MXS1 と MXS3 のピクセルごとのカウントレート。ゲートバルブ閉の場合、MXS1 と MXS3 のそれぞれが検出器アレイの半分ずつを照射していることがわかる (Omama et al., 2022)。

3.2.6.1 較正用ピクセルの ^{55}Fe

12 番ピクセルは較正用ピクセルとして用いられる。このピクセルの直上に ^{55}Fe 線源が配置されている。 ^{55}Fe は電子捕獲によって Mn に壊変し、Mn $K\alpha$ 、 $K\beta$ 輝線を 5.9 及び 6.4 keV に放射する (図 3.22)。電子捕獲とは、内核電子が核子に捕獲され、陽子と反応することで、中性子と電子ニュートリノを生成する放射性崩壊の一種である。この放射性崩壊による ^{55}Fe の半減期は 2.737 年である。運用中は常に使用する。この較正用ピクセルによって、全ピクセル共通の common mode のゲインの時間変動の補正を行うことができる。

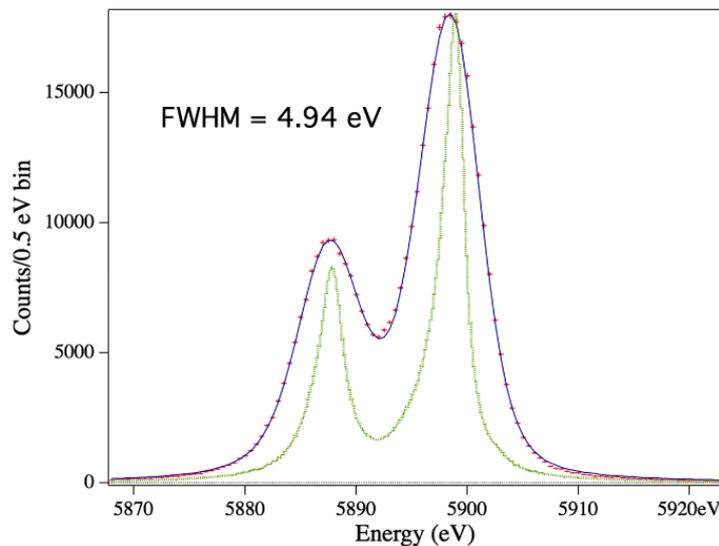


図 3.22. 軌道上の SXS 装置のゲイン補正後の 5.89875 keV の Mn $K\alpha_1$ と 5.88765 keV の Mn $K\alpha_2$ (Leutenegger et al., 2018)。

代表的な Mn $K\alpha$ 輝線の分解能の評価には、8 本のフォクト関数による Mn $K\alpha_1$ と Mn $K\alpha_2$ 輝線の同時 χ^2

フィッティングによって求められる (Hölzer et al., 1997)。フォクト関数 ($V(x; \sigma, \gamma)$) とは、輝線の自然幅を考慮したローレンツ関数 ($L(x; \gamma)$) と検出器による広がり を考慮したガウス関数 ($G(x; \sigma)$) の畳み込み関数である。ローレンツ関数とガウス関数を式 3.13、フォクト関数を式 3.14 に示す。

$$L(x; \gamma) \equiv \frac{\gamma}{\pi(x^2 + \gamma^2)}$$

$$G(x; \sigma) \equiv \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.13)$$

$$V(x; \sigma, \gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x'; \sigma) L(x - x'; \gamma) dx' \quad (3.14)$$

フィッティングにより求めたガウシアン の標準偏差 σ を用いて、分解能の指標として用いる Full Width at Half Maximum (FWHM) を式 3.15 で求める。

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma \quad (3.15)$$

3.2.6.2 フィルタホイール の ^{55}Fe

フィルタホイールに取り付けられている ^{55}Fe は、ホイール回転角を 330 度 (表 3.4) に設定することで、全ピクセルに照射できる。これによって、differential mode のゲイントラッキングを行うことができる。しかし、単一のエネルギーでしか較正ができないことに留意する。

3.2.6.3 Modulated X-ray Source (MXS)

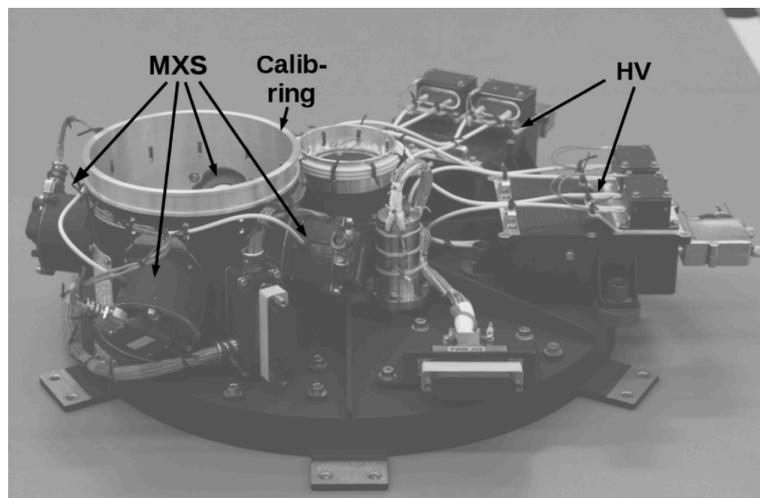


図 3.23. MXS 装置の外観 (de Vries et al., 2017)。

Differential mode のゲイン補正に用いるもう 1 つの較正装置が Modulated X-ray Source (MXS) である (図 3.23)。MXS の X 線発生機構を図 3.24 に図示した。

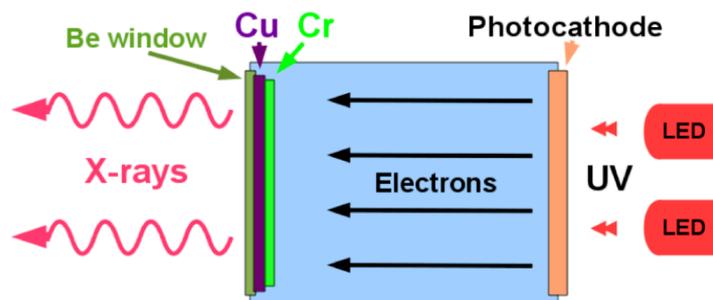


図 3.24. MXS 装置の X 線発生機構 (de Vries et al., 2017)。

2つの light-emitting diodes (LEDs) によって発生させた紫外光をフォトカソードに照射することで、光電効果により真空管に電子を発生させる。この電子を 11.3 kV の高電圧 (High Voltage; HV) によって加速させ、ターゲット金属に照射することで X 線を発生させる。

Differential mode のゲイントラッキングは常に行うことが望ましいが、天体からの X 線とは区別する必要がある。そこで発明された較正装置が MXS である。この装置は、HV ではなく LED のオンとオフを高速で切り替えることで、観測時間中に占める MXS の作動時間の割合 (duty cycle) を 1% 以下に抑えることができる。これによって観測時間のロスを減らし、ゲイン補正と (さらに副産物として) 時刻較正の両方を行うことができるという点で MXS は優れている。ただし、Resolve の場合、オフ時のバックグラウンドや照射時の高係数率にともなう不都合など様々考慮すると、天体観測の前後で MXS を照射するという運用に計画が変更されている。

表 3.5. MXS 及び FW 装置の構成。

系	DCDC	FW	モータードライブ	HV	MXS	Source (ターゲット)
主系	DCDC1		MOT1	HV1	MXS1	direct (CuCr)
					MXS2	indirect(AlMg)
冗長系	DCDC2		MOT2	HV2	MXS3	direct (CuCr)
					MXS4	indirect(AlMg)

MXS は、FW の calibration ring にターゲット金属の異なる 2 種類、合計 4 つが望遠鏡の光軸から 45 度の角度に設置されている。2つの電源系統 (DCDC1、DCDC2) をもつ Filter Wheel Electronics (FWE) によって MXS は制御されている。ターゲット金属の違いによって 2 種類に分かれており (direct と indirect)、冗長系がそれぞれ存在している (表 3.5)。

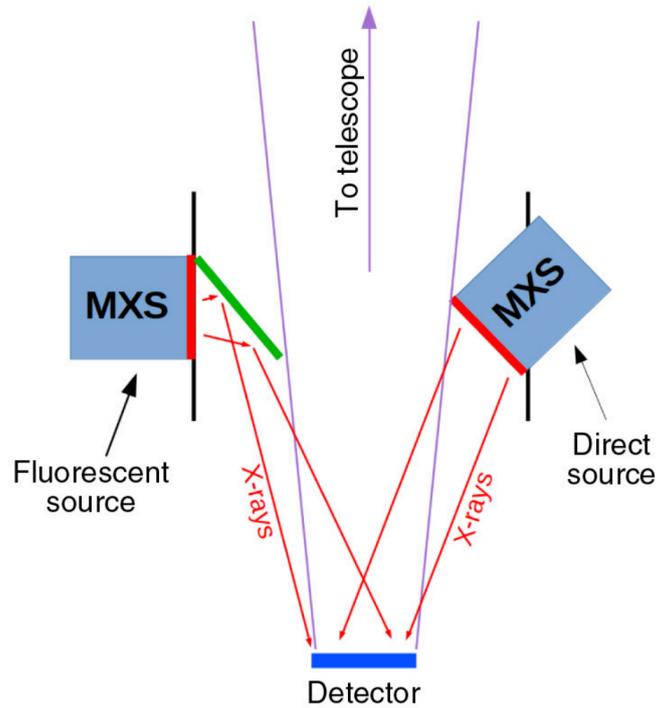


図 3.25. direct source と indirect source の MXS 装置の模式図 (de Vries et al., 2017)。

図 3.25 に 2 種類の MXS の模式図を示す。MXS1 と MXS3 (direct source) は、 $300\ \mu\text{m}$ の Be の窓に蒸着させた $150\ \text{nm}$ の Cu と $25\ \text{nm}$ の Cr のターゲットである。加速した電子をターゲットに衝突させることで、 $11.3\ \text{keV}$ 以下の連続成分の制動放射と、Cu $K\alpha$ ($8.05\ \text{keV}$)、Cu $K\beta$ ($8.90\ \text{keV}$)、Cr $K\alpha$ ($5.41\ \text{keV}$)、Cr $K\beta$ ($5.95\ \text{keV}$) などの特性 X 線を放出する。一方、MXS2 と MXS4 (indirect source) は、Be 窓の外側につけられている Al と Mg がターゲットである。Be 窓によって、真空管内部で発生した $2\ \text{keV}$ 以下の低エネルギーの X 線が遮蔽されるため、外側にターゲットをつけている。Indirect source は、 $1.49\ \text{keV}$ の Al の蛍光 X 線と $1.25\ \text{keV}$ の Mg の蛍光 X 線を発生させる。これらの蛍光収率、すなわち蛍光となって光子が放出される確率は低いため、MXS2 と MXS4 は MXS1 と MXS3 に比べて $100\text{--}1000$ 倍弱い X 線となる。ただし、制動放射成分はないので、輝線だけからなるスペクトルになる。

Direct source によって $2\ \text{keV}$ 以上のゲイン補正を行うことができる。しかし、direct のみでは、 $2\ \text{keV}$ 以下のゲイン補正を行うことができない。幅広いエネルギー帯でゲイン補正を行うためには、indirect source が必要である。2 種類の MXS によって幅の広いエネルギーの較正 X 線を全ピクセルに照射することで、広帯域にわたる非線形のゲイン補正を効率的に行うことができる (図 3.26)。

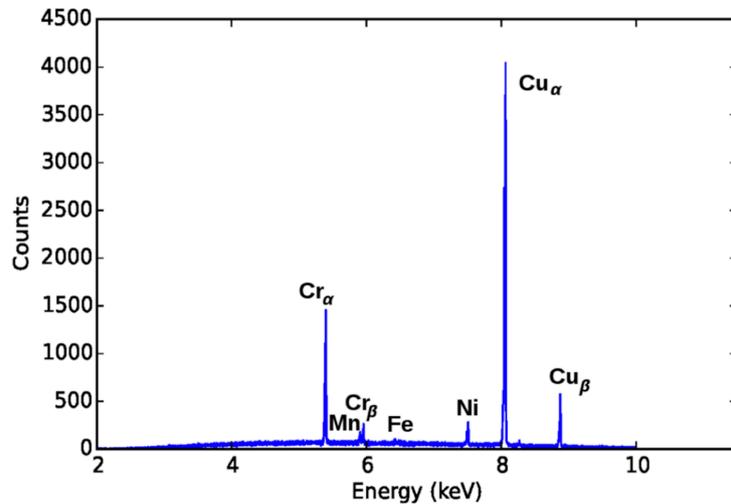


図 3.26. SXS 装置による MXS 装置の X 線観測 (de Vries et al., 2017)。Ni の 7.478 keV と Fe の 6.403 keV と 5.895 keV の弱い ^{55}Mn も生じている。

MXS は LEDs のオンとオフを高速で切り替えることで、X 線パルスを照射する (図 3.27)。X 線パルスは、コマンドで設定される LEDs の 3 つのパラメータによって決定される。これらは *Resolve* 装置 house keeping (HK) ファイル (§ 4.1.1) の HDU5 (HK_SXS_FWE) にも記録される。1 つ目は、図 3.27 の t_{len} に対応する FWE_LEDn_PLS_LEN である。n は MXS1-4 に対応する LEDs の 1-4 の番号を表している。これは、LEDs をオンにしている間の時間であり、MXS1-4 はそれぞれ、15.625-3984.375 ms の間で、15.625 ms 間隔で設定できる。2 つ目は、図 3.27 の t_{spc} に対応する FWE_LEDn_PLS_SPC である。LEDs のオンから次のオンまでの間隔であり、0-15.875 ms の間で、0.125 ms の間隔で設定できる。3 つ目は、LED の電流値に対応する FWE_I_LEDn である。LEDs の電流値は、0-300 mA の間で設定できる。

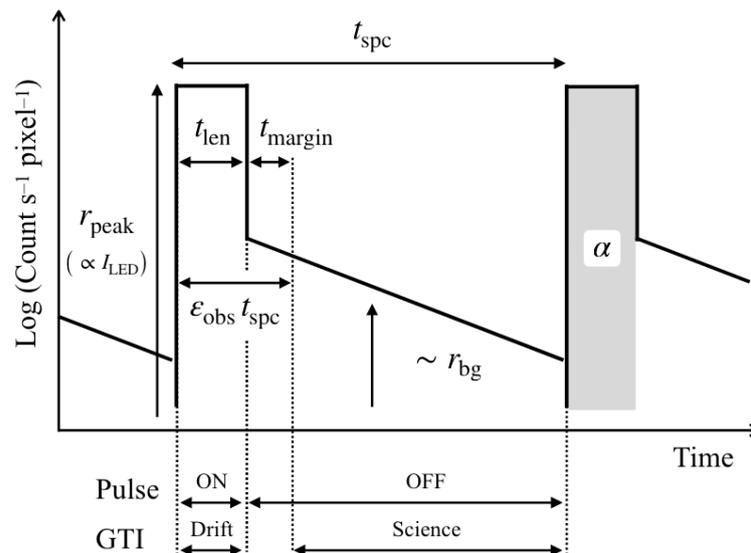


図 3.27. MX 装置のパルス波形パラメータ (Sawada et al., 2022)。

3.2.7 較正用装置（地上支援機器）

地上較正データ取得用に、主に3つの装置を用いる。いずれもGSFCにより内製され、Resolve地上試験で使用された。

3.2.7.1 Channel-Cut Crystal Monochromator (CCCM)

Channel-Cut Crystal Monochromator (CCCM)(Bonse and Hart, 1965)は、できるだけ単色のX線を発生させてline spread function (LSF)を較正するための装置である(図3.28)。X線発生装置(Oxford X-ray Source)で高圧加速電子をターゲットに照射し、制動放射とターゲット原子の特性X線からなるX線を発生させる。この特性X線輝線の1つをできるだけ単色化するため、beam entrance apertureから導入し、二結晶分光器を2つ組み合わせたもので単色化し、beam exit apertureから取り出す。

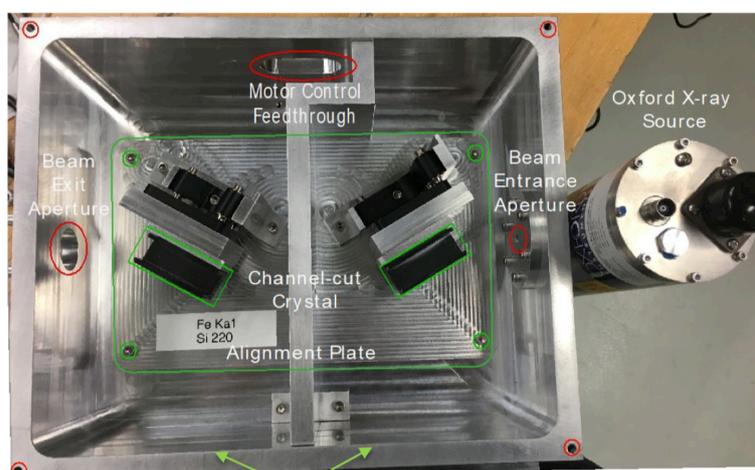


図 3.28. CCCM の画像。

二結晶分光器において、X線回折光が強め合うためのブラッグ反射条件は、X線の波長を λ 、ミラー指数 hkl に対する結晶の面間隔を d_{hkl} 、回折角度を θ とすると、式3.16となる。

$$\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (3.16)$$

したがって、CCCMでは、使用するミラー面を決めると、角度の調整だけで狙う波長の抽出ができる。

XRISM衛星の地上試験で用いられたCCCMにはType AとType Bの2種類がある。Type Aはモーターによって結晶の角度を制御でき、Type Bはボックスに取り付けられたノブによって角度が調整できる。表3.6にCCCMが照射可能な輝線と、そのエネルギーを示す。

表 3.6. CCCM が照射可能な輝線と、そのエネルギー。

輝線	結晶方位	ブラッグ角度	CCCM Type	エネルギー (keV)
Ti K α 1	Si(111)	25.99	A	4.511
Cr K α 1	Si(220)	36.6	B	5.415
Cr K α 1	Si(220)	36.6	A	5.415
Fe K α 1	Si(220)	30.27	A	6.404
Cu K α 1	Si(220)	23.65	A	8.048
Cu K α 1	Si(400)	34.56	B	8.048
Au L α 1	Si(400)	28.04	A	9.713
Au L β 1	Si(400)	23.52	A	11.44

LSF (line spread function) とは、入射した波長によって、出射する光の波長がどの程度広がるかを表す関数である。地上試験では CCCM を用いて LSF を求めている (図 3.29、図 3.30)。軌道上においては、較正用ピクセルを用いて LSF を確認する (図 3.31)。

LSF は、ガウシアンで表される core LSF と低エネルギー側に広がる extended LSF の 2 つに分解される。Extended LSF は、(i) Hg, Te などのエスケープピーク、(ii) Si 蛍光輝線、(iii) electron loss continuum の 3 つの成分の和でモデル化される。エスケープピークとは、入射 X 線が吸収体を構成する Hg や Te に光電吸収された後、ある割合で蛍光 X 線が放出されて検出器外に逃れるため、その分のエネルギーを減じたエネルギーにピークが現れるものである。Si 蛍光輝線は、マイクロカロリメータ検出器の温度計に用いられている Si から生じると考えられている。また、光電子と二次電子の一部が吸収体で熱化せずに検出器外に逃れることで、連続的な応答成分が生まれるが、これを electron loss continuum という。

観測されるエネルギーは、真のエネルギーに検出器の応答行列との積で表される。応答行列は、CALibration DataBase (CALDB) の `xa_rsl_rmfparam_*.fits` に保存されている。

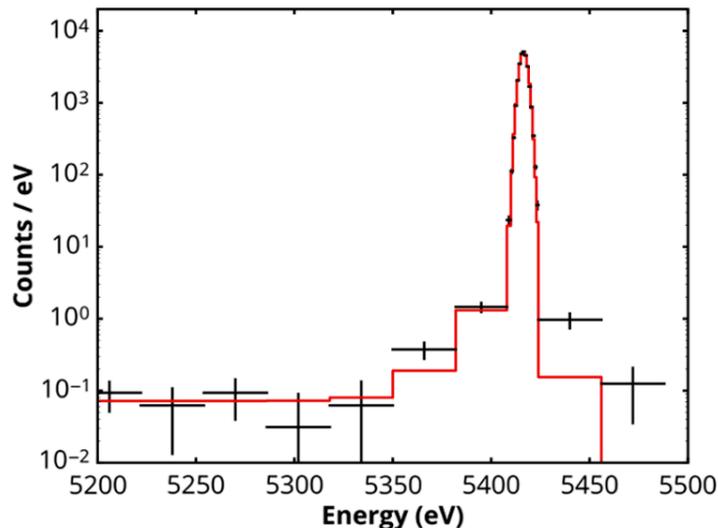


図 3.29. SXS 装置における 5.414 keV の X 線の LSF。黒は観測データ、赤は LSF のモデル。ガウシアンと electron loss continuum をモデル化している (Eckart et al., 2018)。

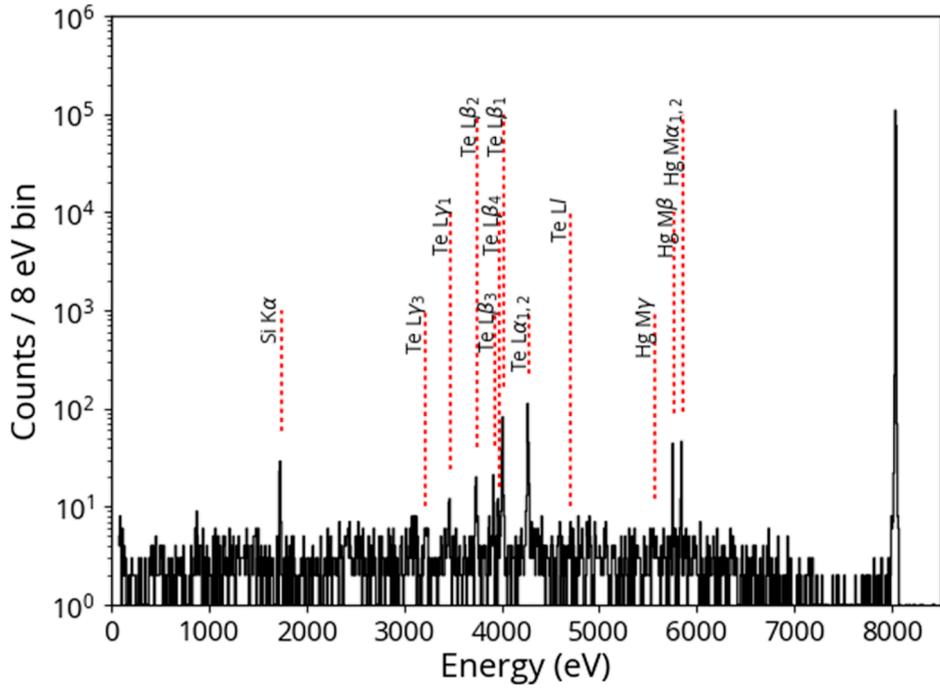


図 3.30. SXS 装置における 8.0 keV の X 線の LSF。低エネルギー側に electron loss continuum と Hg M や Te L のエスケープピーク、Si の蛍光輝線が見える (Eckart et al., 2018)。

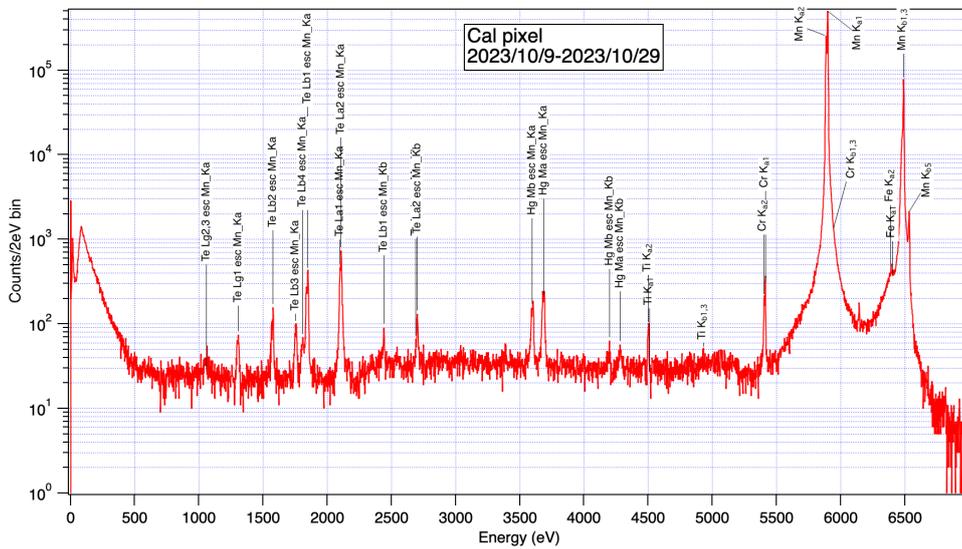


図 3.31. 軌道上の Resolve 装置の LSF (NASA GSFC F. S. Porter 氏提供)。

3.2.7.2 Modulated X-ray Source (MXS)

地上試験では、フライトモデルの MXS の他に 3 つの異なる MXS を用いて較正を行う。フライトモデルの妥当性を確認するエンジニアリングモデルの MXS と、2 種類の地上支援機器の MXS である。MXS の用途は § 3.2.6 に述べたとおりである。

3.2.7.3 Rotating Target Source (RTS)

Rotating Target Source (RTS) とは、できるだけ幅広いエネルギーの X 線をできるだけ同時に発生させてゲイン較正に用いる装置である。X 線発生装置のターゲット原子を多数並べ、それを一定角速度で回転することによって、平均化すれば幅広い帯域に多数の輝線を持つ X 線スペクトルを照射することができる。

マイクロカロリメーターのゲイン（エネルギーと波高値の関係）は非常に非線形（図 3.32）であり、5 ないし 6 次の多項式で表現される。また、このゲインは様々な要因で時間変化し、それをゲイントラッカー（§ 3.2.6）でトラックする（§ 5.2.2.1）。

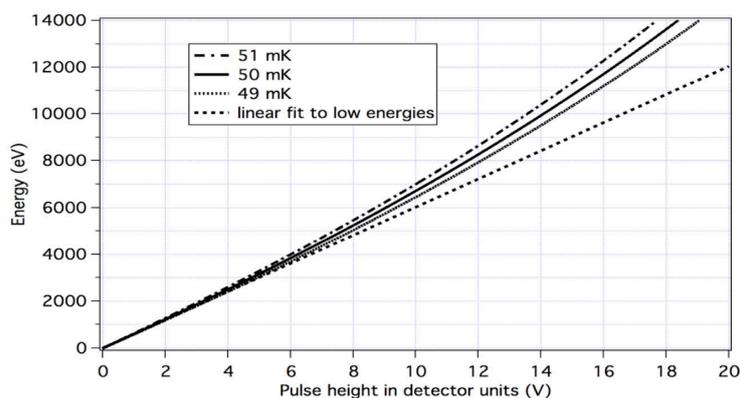


図 3.32. 温度によって変動する pulse height とエネルギーの関係。線形の関係式では表すことができない (Porter et al., 2016)。

RTS には continuum mode と line mode という 2 つのモードが存在し、連続 X 線と蛍光 X 線を選択して、検出器に照射することができる。RTS は red RTS、silver RTS、vacuum RTS、RTS16、16-slot vacuum RTS の計 5 種類が存在している（表 3.7）。Red RTS、silver RTS と vacuum RTS は、最大で 8 種類のターゲットが取り付けられている。Red RTS、silver RTS は連続 X 線と蛍光輝線を照射し、vacuum RTS は蛍光輝線のみを照射する。（表 3.8）。一方、RTS16 と 16-slot vacuum RTS は最大で 16 種類のターゲットが取り付けられている。RTS16 は蛍光輝線のみを照射し、16-slot vacuum RTS は open フィルタがホイールに取り付けられているため、連続 X 線と蛍光輝線の両方を照射することができる（表 3.9）。

Vacuum RTS と 16-slot vacuum RTS は、真空容器に接続して使用できる密封型にしたものである。これらはゲートバルブ開のデュワーに接続して使用する。低エネルギー側（2 keV 以下）のゲインの較正に用いるため、ターゲットも軽元素が多くなっている。

表 3.7. RTS の種類。

コンポーネント	Red	Silver	Vacuum	16-slot
動作環境	大気中	大気中	真空中	大気中
X-ray tube	TruFocus TFS-5110	TruFocus TFS-5110	Oxford Series 5000 P/N 93084	Newton Scientific M47
アノード材質	W	W	Cr	W
ターゲット数	8	8	6	16
モード	Line/ Continuum	Line/ Continuum	Line	Line

表 3.8. Red RTS、silver RTS と vacuum RTS のターゲット。

スロット	Red	Silver	Vacuum
0	Cu	Fe	Blank (Al)
1	Co	KBr	Mn
2	Fe	Cu	NaF
3	KBr	GaAs	Si
4	Mn	Co	MgF ₂
5	GaAs	Cr	KCl(Al とテフロンのコリメーター)
6	KCl	Open (Cu テープに覆われている)	N/A
7	Zn	TiO ₂	N/A

表 3.9. RTS16 と 16-slot vacuum RTS のターゲット。

スロット	RTS16	16-slot vacuum RTS
0	V	Open
1	Ni	LiF
2	Cu	Mg
3	Fe	Si
4	Zn	KCl
5	Sc	CaF ₂
6	Ti	Mo
7	Y	Pd
8	Mn	Ag
9	Cr	Sc
10	Mo	Ti
11	KBr	V
12	RbBr	Fe
13	Co	Co
14	Ge	Cu
15	Ag	Zn

RTS を用いることで、ゲートバルブ閉で 4.5–13.5 keV の X 線を高計数で照射することができるため、ゲイン補正や高計数時の校正試験を行うことが可能となる (図 3.33)。

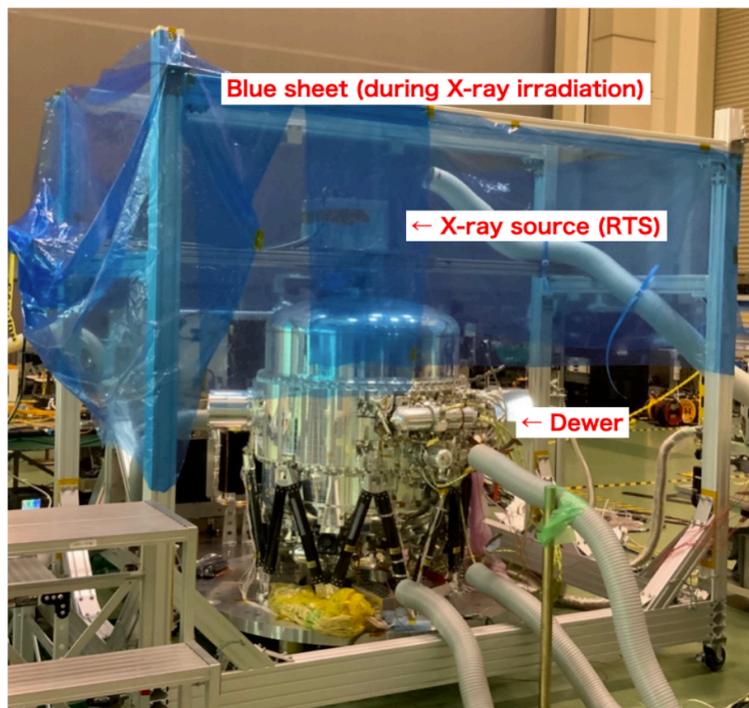


図 3.33. RTS を用いた高計数較正の試験の様子 (Mizumoto et al., 2022)。

3.3 軌道上運用

3.3.1 衛星軌道とコンタクト

3.3.1.1 軌道

XRISM 衛星は、打ち上げから約 14 分後に第二段エンジンから分離し、地球周回軌道に乗った。地球を約 96 分かけて 1 日約 15 回の周回をしている。XRISM 衛星が 1 周する間に、地球の自転により、地球上に写影した衛星の軌道は変化する。地球の自転は 24 時間で 1 回転 (360 度) するため、たとえば 90 分では 22.5 度西へずれる。そのため、XRISM 衛星が元の軌道に戻るためには、約 16 周回必要である。

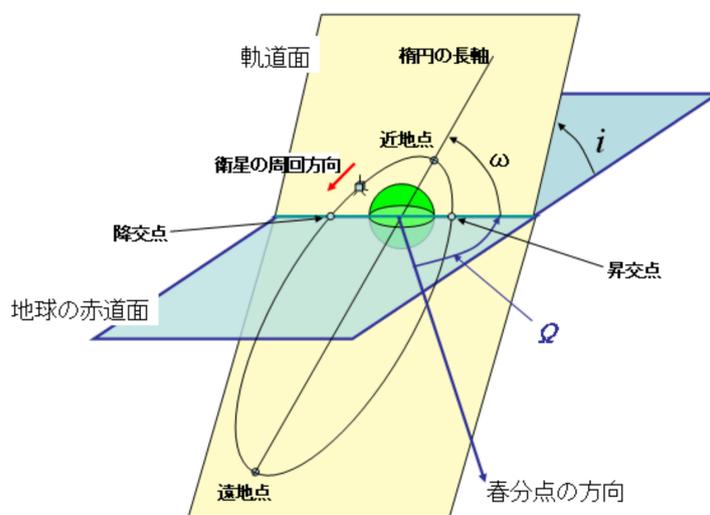


図 3.34. 軌道要素の概念図 (<https://ja.wikipedia.org/wiki/人工衛星の軌道要素>)。

XRISM 衛星の軌道は、地球を回る一般的な物体と同様に、位置と速度を表す 6 つの軌道要素で表される (図 3.34)。この軌道面が慣性空間に対して徐々に回転し、約 55 日で 1 周する (図 3.35)。

1. 軌道長半径 (楕円軌道の長軸の半分)
2. 離心率 (ある軌道の準線の垂線の距離と焦点距離との比)
3. 軌道傾斜角 (衛星と赤道面のなす角)
4. 昇交点赤経 (赤道面と軌道面との交点を昇交点といい、その点の赤経)
5. 近地点引数 (昇交点から近地点のなす角)
6. 近地点通過時刻 (近地点を通過した時刻)

この 6 つの軌道要素を 2 行 7 列にまとめた標準フォーマットを Two Line Elements (TLE) といい、ほとんどの衛星については <https://celestrak.org/satcat/search.php> など公開されている。このデータには、衛星名、衛星固有の識別番号、衛星の時刻 (元期)、合計地球周回数、1 日に地球を周回する回数、空気抵抗値も含まれて、適宜更新される。XRISM 衛星の識別番号は 57800 である。

XRISM

```
1 57800U 23137A 23358.55729512 .00007497 00000+0 59702-3 0 9995
2 57800 31.0053 48.5888 0010047 267.4379 92.5106 14.99018538 16294
```

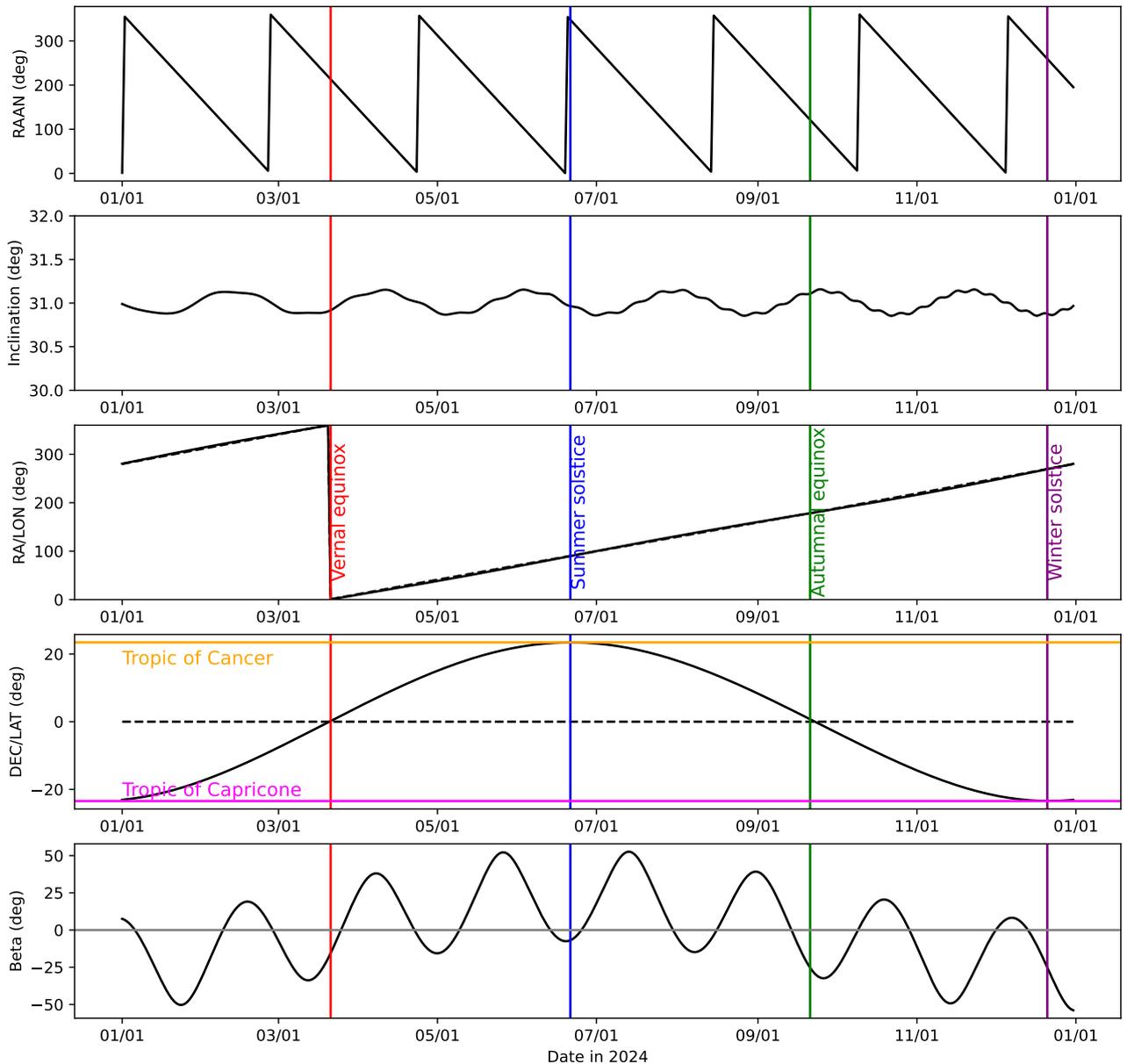


図 3.35. 上から (1) 昇交点赤経 (Right Ascension of Ascending Node =RAAN)、(2) 軌道傾斜角 (incination)、(3) 太陽赤経 (実線)、黄経 (点線)、(4) 太陽赤緯 (実線)、黄緯 (点線)、(5) 太陽ベータ角の 2024 年の変化予測

3.3.1.2 コンタクト

衛星運用は、JAXA 宇宙科学研究所の相模原衛星運用センター (SSOC) で行われる。内之浦宇宙空間観測所 (USC) の 20 メートルもしくは 34 メートルアンテナを主要局、勝浦宇宙通信所 (KTU) を冗長局として 1 日約 5 回のコンタクトを行う。さらに、JAXA のグローバルネットワーク (GN) に属するサンチアゴ局 (SNT)、マスパロマス局 (MSP)、ミンゲニュー局 (MGN) も用いる。また、初期及び緊急運用の際には、NASA の地球近傍ネットワーク (NSN) に属するハワイ局 (USHI)、ハートビーショック局 (HBK)、サンチアゴ局 (SANT) も用いる。USC 及び KTU では X バンド及び S バンドの運用、その他は S バンドのみの運用を行う。これらの局の位置と、XRISM 衛星の軌道を図 3.36 に示す。1 日 15 周回のうち 5 周回に対して USC, KTU 局と SNT 局 からコンタクトできる (図 3.37、図 3.38)。残りの 10 周回は他局からコンタクトできる。コンタクト時間はいずれも約 10 分前

後である。

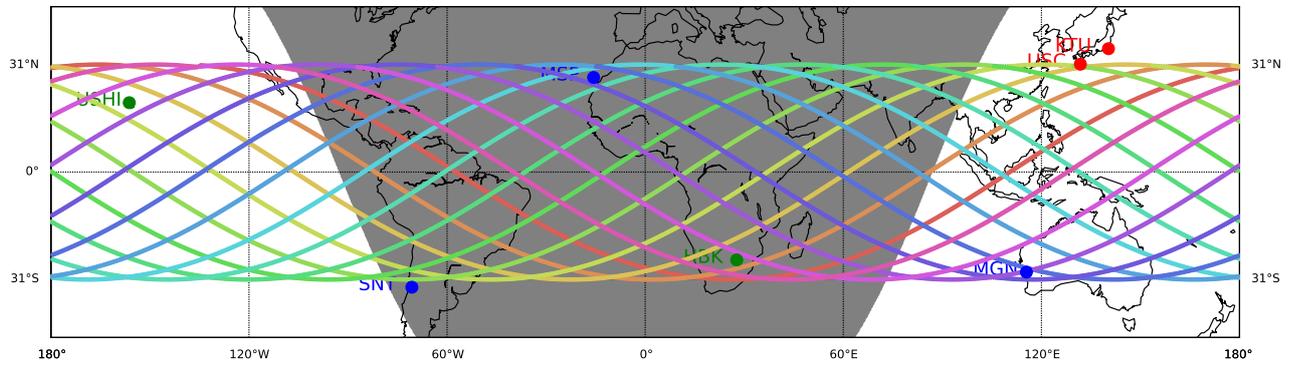


図 3.36. XRISM 運用局（赤色: 主従局、青色 JAXA GN 局、緑色 NASA NSN 局）と 2023 年 12 月 1 日における XRISM 衛星の軌道。周回毎に異なる色で示す。昼夜は 12:00:00 UTC 時点のもの。

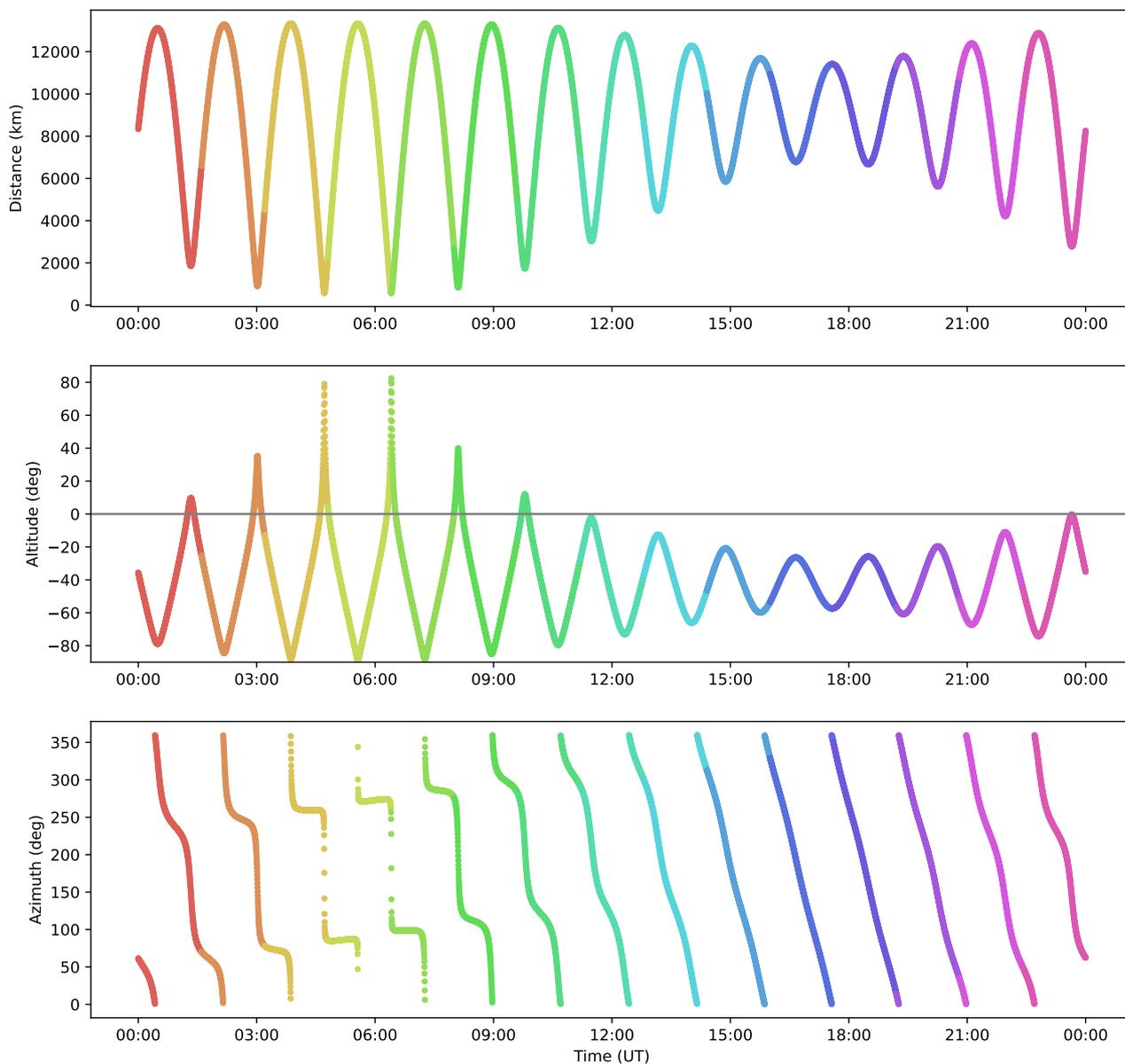


図 3.37. 2023 年 12 月 1 日における、USC 局から見た XRISM 衛星までの距離 (上)、高度 (中)、及び方位角 (下)。天頂付近の通過時に方位角が急激に変化する。色は図 3.36 と同じ。

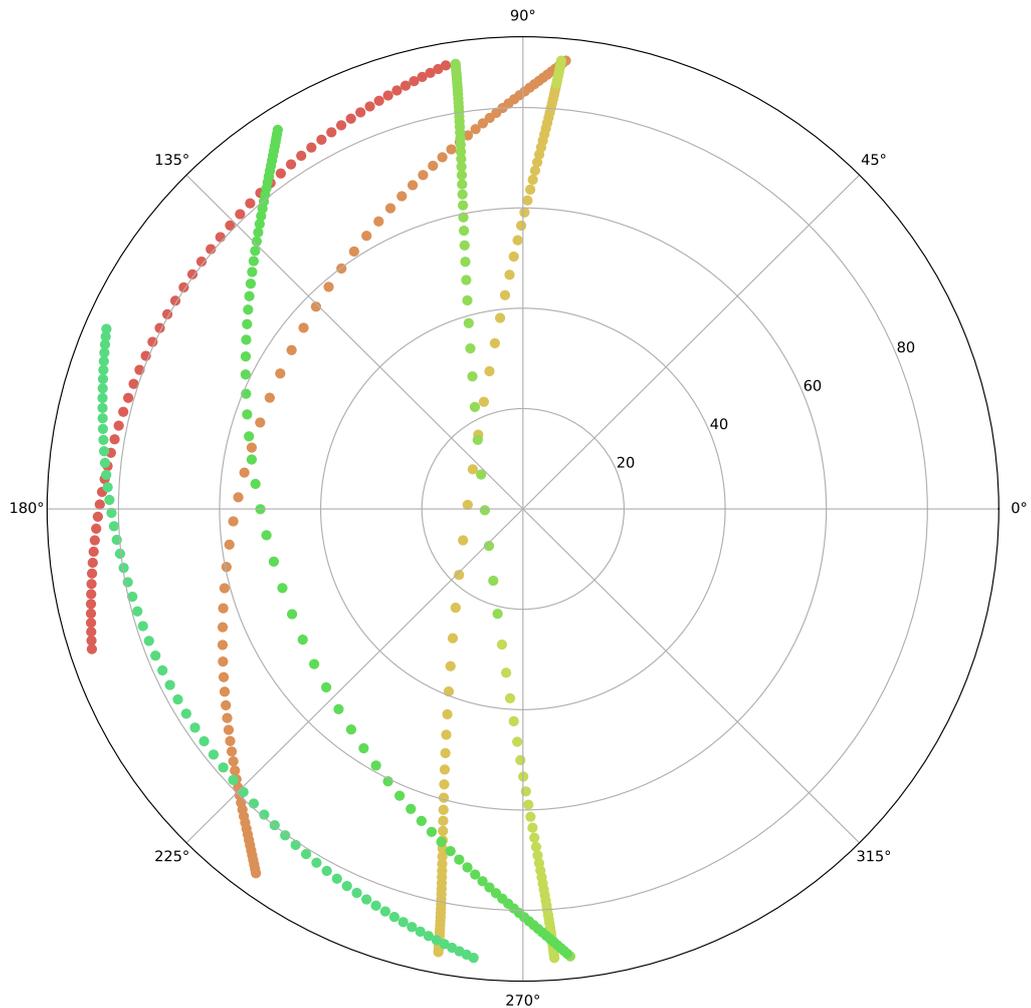


図 3.38. 2023 年 12 月 1 日における、USC 局から見た XRISM 衛星衛星の高度と方位角。コンタクト可能な 6 周回を示した。色は図 3.36 と同じ。

3.3.2 衛星の指向

3.3.2.1 オイラー角

衛星の指向方向は 3 つのオイラー角 (ϕ, θ, ψ) で表現される。衛星の X, Y, Z 軸は図 3.1 のように定義される。 Y 軸が太陽電池パネルの法線方向、 Z 軸が望遠鏡の指向方向である。まず、 X 軸を春分点 (RA=0) 方向、 Z 軸を赤道座標北極に揃える。ここから、まず、 Z 軸を中心として ϕ 回転し目標天体の赤経 RA にあわせる。これで衛星座標が $X'-Y'-Z'$ になったとして、次に Y' 軸を中心として θ 回転し目標天体の赤緯 DEC にあわせる。これで衛星座標が $X''-Y''-Z''$ になったとして、次に Z'' 軸を中心として ψ 回転し、視野角 (ROLL) をあわせる。オイラー角度と RA, DEC, ROLL は以下の関係にある。

$$RA = \phi \tag{3.17}$$

$$DEC = \frac{\pi}{2} - \theta \tag{3.18}$$

$$ROLL = \frac{\pi}{2} - \psi \tag{3.19}$$

ここで、 X, Y, Z 軸回りに α だけ回転させる行列は以下の通りである。

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

$$R_y(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

$$R_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

従って、 X - Y - Z でのベクトルを Euler 角 (ϕ, θ, ψ) で回転させるには次の行列を施せばよい。

$$R(\phi, \theta, \psi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

XRISM 衛星主構体は8枚のサイドパネル (SP1-8) よりなり、SP1 の法線方向が $+X$ 、SP3 (太陽電池パネルと平行) の法線方向が $+Y$ 、望遠鏡の方向が $+Z$ である。SP i の法線方向を \vec{e}_i とすると、

$$\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_4 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_5 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_6 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_7 = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_8 = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \end{pmatrix}$$

であり、また望遠鏡の指向方向の単位ベクトルは

$$\vec{e}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

となる。試しに \vec{e}_z を回転させると、

$$R(\phi, \theta, \psi)\vec{e}_z = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \text{DEC} \cos \text{RA} \\ \cos \text{DEC} \sin \text{RA} \\ \sin \text{DEC} \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

となって、極座標系の単位ベクトルに合致することがわかる。通常の極座標は北極からの角度、DEC は赤道からの角度をとることに注意されたい。

3.3.2.2 太陽角

衛星の姿勢決定で最も重要なものは太陽角である。発電量を確保するため、太陽電池パネルの法線方向を、衛星から太陽への単位ベクトル (\vec{s}) から 30 度以内にする必要がある。太陽角 (Sun angle) は以下で得られる。

$$\text{Sun angle} = \arccos(R(\phi, \theta, \psi)\vec{e}_3, \vec{s}) \quad (3.25)$$

太陽への単位ベクトルは、python のモジュール `skyfield` ^{*1} などを用いて簡単に計算でき、図 3.35 のように変化する。

ここで、Sun angle が 30 度以下の場合、ROLL に調整余力が生まれるので、拡散天体などの観測のために視野角の方向が調整可能になる。ROLL を特に指定する必要がない点源の場合は、太陽角を最も小さくするように要請

*1 <https://rhodesmill.org/skyfield/>

すれば ROLL は一意に決まる。すなわち、天体方向の単位ベクトルを $\vec{n} = R(\phi, \theta, \psi)\vec{e}_z$ として、 \vec{s} と \vec{n} のはる平面に $R(\phi, \theta, \psi)\vec{e}_3$ が乗るように ψ を決める。数式で書くと、 ϕ 、 θ を決めた上で、

$$([\vec{s}, \vec{n}], R(\phi, \theta, \psi)\vec{e}_3) = 0 \quad (3.26)$$

を満たす ψ を決めればよい。ここで $[\]$ はベクトルの外積、 $()$ は内積である。解は一般に2つあるので、式 3.25 に従って計算した太陽角が小さい方を選択する (図 3.39)。

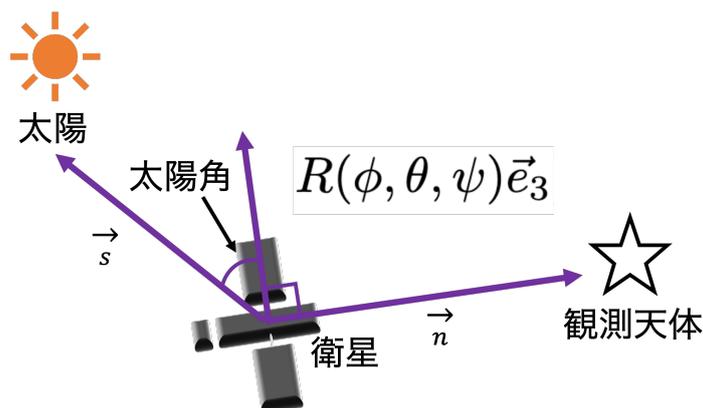


図 3.39. XRISM 衛星の太陽角。

3.3.2.3 Visibility

太陽角制限のため、XRISM 衛星は任意の時刻に任意の方向を指向することはできない。太陽角を 30 度以内にした上で、SP3 の法線ベクトルのまわりに $0-2\pi$ 回転させて指向できる方向が観測可能領域である (図 3.41、3.42)。従って、

- 黄道北極 (NEP; North Ecliptic Pole)、黄道南極 (SEP; South Ecliptic Pole) 付近は常に観測可能 (図 3.40)。
- 半年間隔で観測可能領域は繰り返す。
- 夏の天体は、春と秋に見やすい。たとえば銀河中心はいて座にあるので、春と秋に XRISM 衛星の visibility がある。これは地上と位相が 90 度ずれているので、地上望遠鏡との同時観測を計画する場合は注意を要する。

天体の RA, DEC を決めれば、viewing^{*2} で観測可能時期を調べることができる。

^{*2} <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/Tools/viewing/viewing.pl>

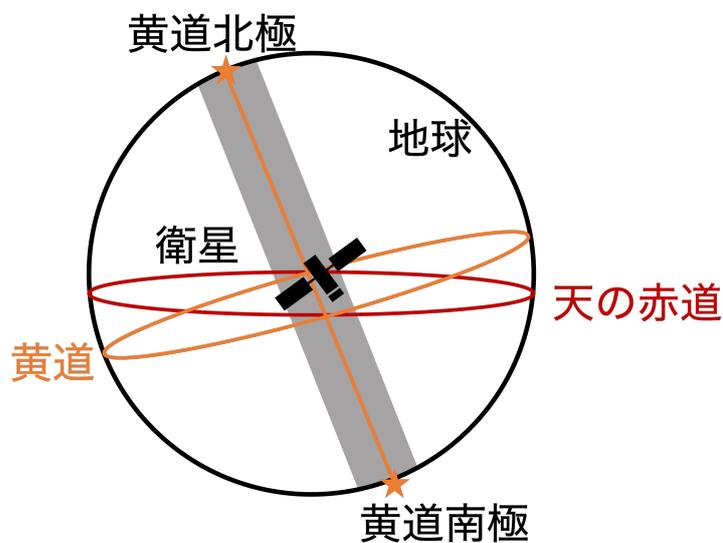


図 3.40. XRISM 衛星の黄道北極と黄道南極。グレーの領域は衛星が観測可能な範囲を表す。

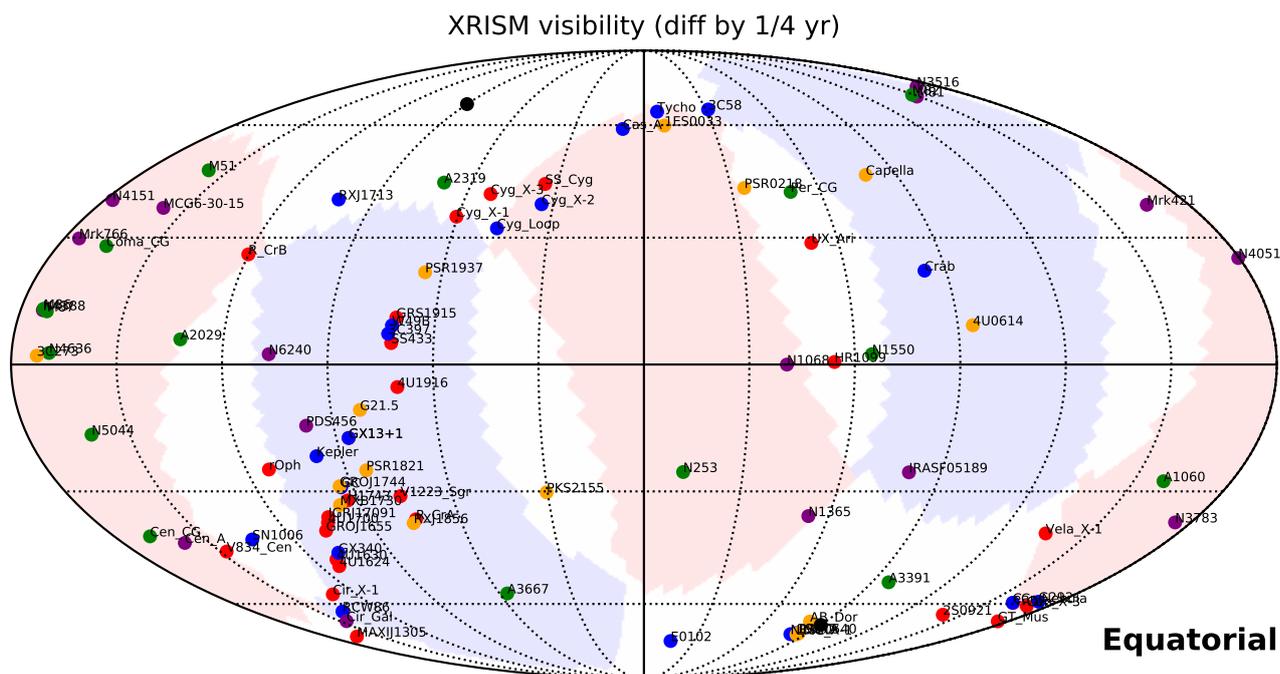


図 3.41. XRISM 衛星 visibility. 座標は赤道座標。赤色が1月1日、青色が4月1日に見える領域。白色はどちらも見えるか（黒丸で示した NEP、SEP の周辺）、もしくはどちらも見えないか（それ以外）である。XRISM 衛星 PV フェイズの天体の位置を示した。領域がギザギザなのは、healpix の分割を粗く設定したためである。

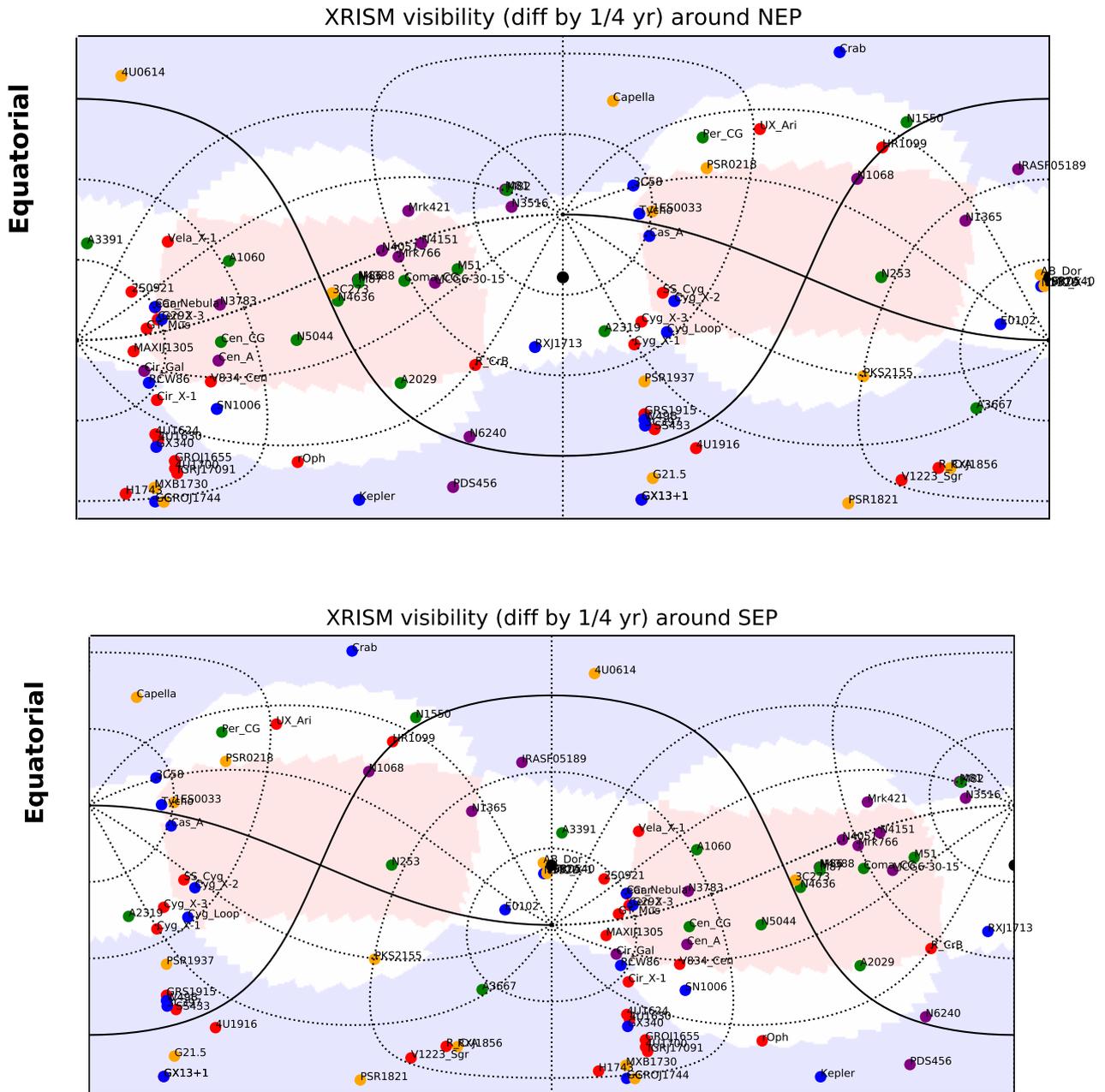


図 3.42. 図 3.41 と同じ。上が NEP、下が SEP を中心とした visibility である。

3.3.2.4 地没

衛星の指向方向に地球が入る場合がある。これを地没という。XRISM 衛星のような低軌道衛星は、地没の時間が多く存在する。その割合は、指向方向や時期に依存する。

地球縁からの角度を Earth elevation (地球離角) という。昼地球からの角度を DaY Earth elevation (DYE_ELV)、夜地球からの角度を NighT Earth elevation (NTE_ELV) と呼ぶ (図 3.43)。DYE_ELV, NTE_ELV がある閾値より

も小さいときは観測には使用しない。一般に、地球アルベドなどの影響を受ける昼地球の elevation のほうが高い閾値が設定される。一方、地没中（特に夜地球）の期間は、バックグラウンドデータを取得するのに最適である。Elevation がある閾値より小さいものを使用する。

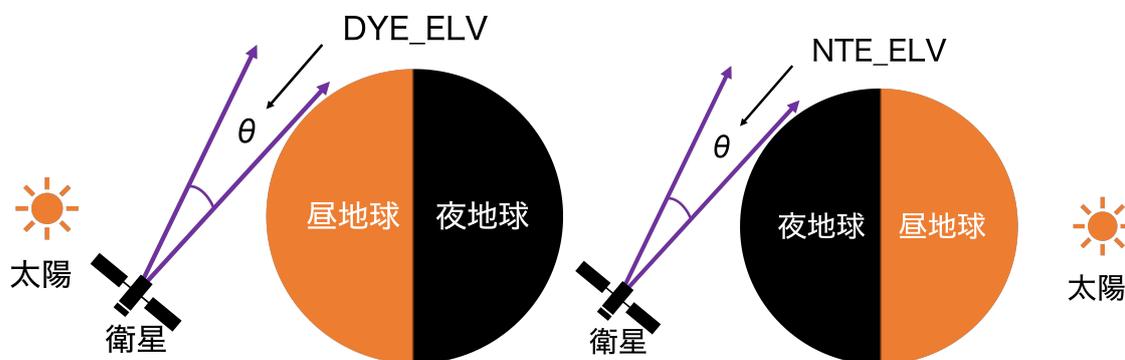


図 3.43. (左) DYE_ELV、(右) NTE_ELV の概念図。

実際の 2023 年 11 月 3 日のデータを図 3.44 に示す。図 3.44 は 5 つの図からなる。それぞれ、

1. RA、DEC、ROLL
2. +Z 方向の elevation と太陽高度
3. Cut-off Rigidity (COR)
4. South Atlantic Anomaly (SAA)
5. SP3 からの太陽の θ と ϕ

である。RA、DEC、ROLL の時間変化から、15:30 頃に衛星の姿勢変更 (マヌーバ) が行われていることがわかる。

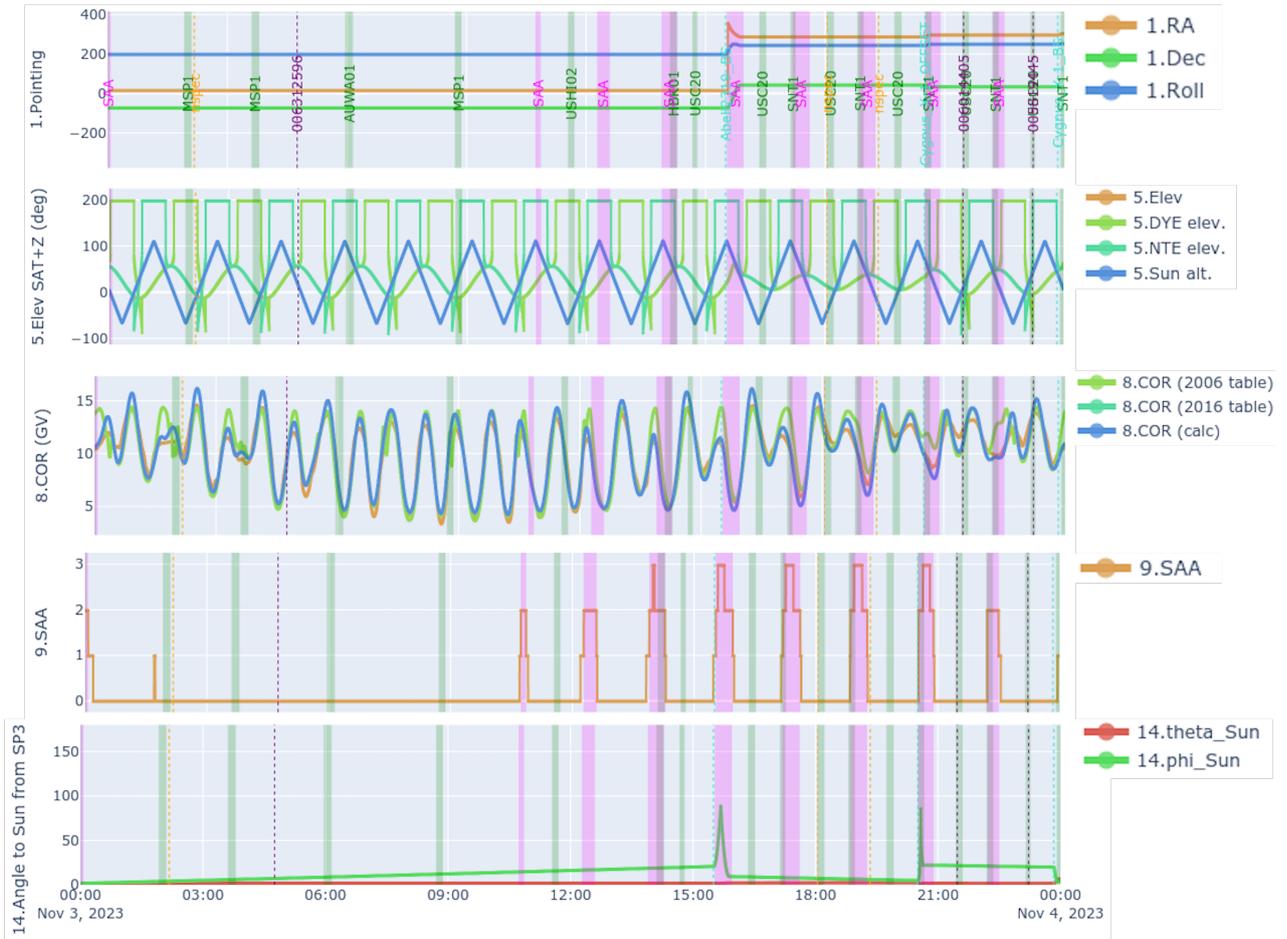


図 3.44. XRISM 衛星 2023/11/03 の軌道上の様子。

3.3.2.5 Star Tracker

XRISM 衛星には3台のスタートラッカー (STT) が搭載されている。それぞれ異なる方向を向いており、これらが天空を観測して星カタログとのマッチすることで軌道上での衛星姿勢制御を行う。3台のうち2台が使用可能な状態にあることが、要求姿勢決定精度を満たすために必要である。3つの STT の衛星座標における方向ベクトルは以下である。

$$\vec{s}_1 = \begin{pmatrix} +0.073386891 \\ +0.157378700 \\ +0.984807750 \end{pmatrix}, \vec{s}_2 = \begin{pmatrix} -0.17298739 \\ -0.01513444 \\ +0.98480775 \end{pmatrix}, \vec{s}_3 = \begin{pmatrix} +0.09960050 \\ -0.14224426 \\ +0.98480775 \end{pmatrix}$$

3.3.3 軌道上環境

3.3.3.1 South Atlantic Anomaly (SAA)

宇宙線 (荷電粒子) は、地球の磁場によって運動が拘束される。このとき、地表から約 10000–20000 km の電子を中心としたトーラス状の構造と、約 2000–5000 km の陽子を中心としたトーラス状の構造の二重構造を作る。このような帯域をヴァン・アレン帯という。したがって、この帯域よりも高度が低い軌道をもつ低軌道周回衛星は宇宙線の影響を受けづらい。しかし、地軸と地磁気軸のずれがあるので、南大西洋付近にてヴァン・アレン帯が 300–400 km まで下がる。この領域を South Atlantic Anomaly (SAA) という。SAA は、地球の磁場が弱く、宇

宇宙線が地球近傍まで到達しやすくなる。したがって、XRISM 衛星のような高度の衛星が SAA 領域に入ると、宇宙線イベントが急増する (図 3.45)。

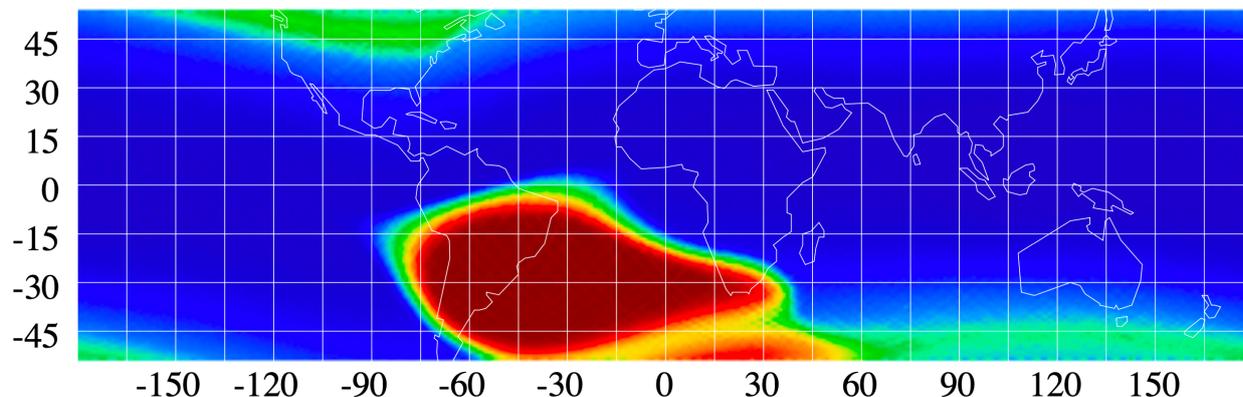


図 3.45. ROSAT 衛星の宇宙線バックグラウンド。横軸は経度、縦軸は緯度を表し、ヒートマップはバックグラウンドイベント数を表す。南大西洋の地域でカウント数が多い地域があることがわかる (https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/gallery/misc_saad.html)。

XRISM 衛星は、地球約 16 周回ごとに、連続して 7 周回、SAA 領域に 10–20 分入る。SAA 通過中、*Xtend* 装置は宇宙線イベントの増加による装置の異常を避けるために検出器バイアス電源を落とすなどの処置をとる。一方 *Resolve* 装置では、検出器は観測を継続する。一般に質の良いデータを得ることは難しいが、X線マイクロカロリメータ検出器の下に設置されている反同時係数検出器を用いて検出された宇宙線イベントのスクリーニングをするなどして、観測データとして限定的に用いることもできる。SAA 領域は年単位で変化するので、*Resolve* 装置用の SAA 両謂を定義する必要がある。これは本論文で行う (§ 6.3.2)。

3.3.3.2 Cut-off Rigidity (COR)

Cut-off Rigidity (COR) とは、宇宙線に対する地球磁場の捕捉能力の指標である。単位は入射する宇宙線のエネルギー (GeV) と電荷 (C) を用いて、GeV/C (GV) が用いられる。COR が分かれば、地球磁場によるシールドを超えて衛星に到達する宇宙線の影響を知ることができ、ノイズの少ない観測データを選択することができる。図 3.46 に、450 km の軌道における COR の計算結果を示す。図 3.45 と比較すると、SAA 領域と COR には必ずしも相関がないことが分かる。

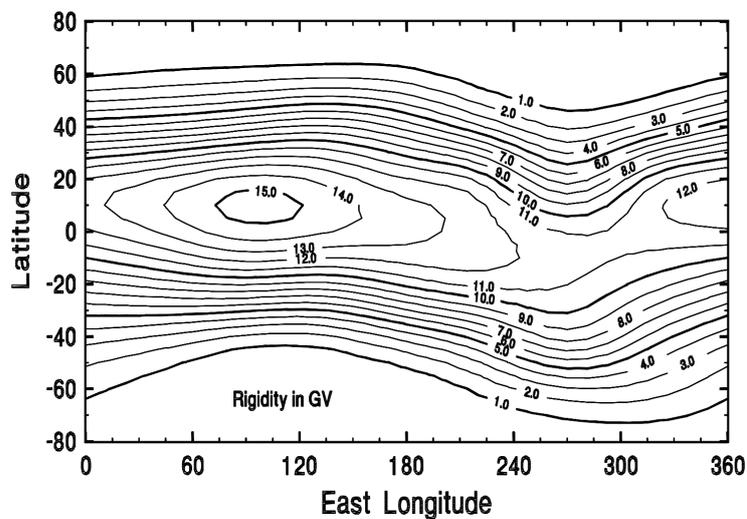


図 3.46. 450 km の軌道における COR の計算結果 (Smart and Shea, 2005)。

ASTRO-H 衛星の 366 ks のバッググラウンド観測からエネルギーバンドごとの COR が変化したときのバッググラウンドのカウンtrate の変化が調べられている (図 3.47)。図 3.47 から、COR が大きくなると、バッググラウンドのカウンtrate が減少することが分かる。

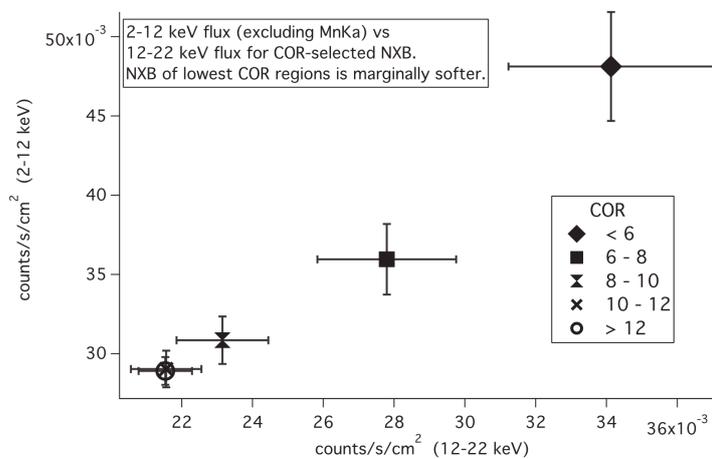


図 3.47. ASTRO-H 衛星のバッググラウンド観測から得られた COR の変化 (Kilbourne et al., 2018b)。

3.3.3.3 太陽ベータ角

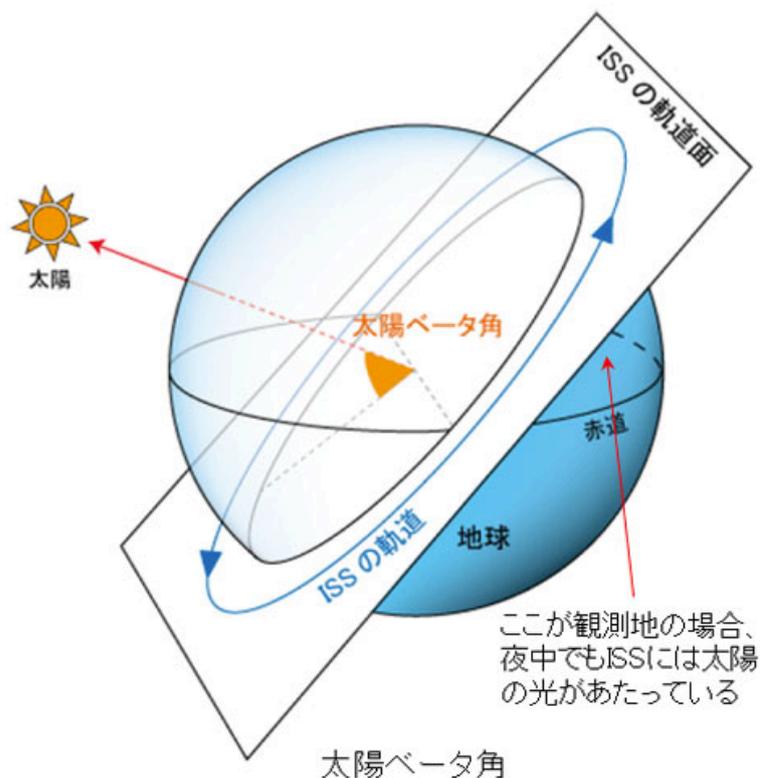


図 3.48. 太陽ベータ角の概念図 (ISS の場合) <https://fanfun.jaxa.jp/faq/detail/9583.html>.

SAA, COR は近地球軌道衛星の宇宙線環境の指標であるが、太陽ベータ角は熱環境の指標として最も重要なものである。衛星は太陽、地球アルベド、地球赤外放射などから得た熱入力を、深宇宙に対して排熱する熱システムである。外部に対する熱出入力はすべて放射によって伝搬される。

太陽ベータ角は衛星の軌道面と太陽方向とのなす角である (図 3.48)。軌道面と黄道面の成す角度ではないことに注意を要する。ベータ角度が大きいと衛星が日照である時間が長く、日陰である時間が短くなる。ベータ角の絶対値が最低 (0) の時、日照と日陰の時間がほぼ同じになる。ベータ角 (β) は以下で得られる。

$$\sin \beta = \cos \Gamma \sin \Omega \sin i - \sin \Gamma \cos \epsilon \cos \Omega \sin i + \sin \Gamma \sin \epsilon \cos i \quad (3.27)$$

ここで、 Γ が太陽の黄道経度、 Ω が衛星軌道面の昇交点の赤道経度 (RAAN)、 i が軌道傾斜角、 ϵ が赤道面と黄道面の成す角度である。図 3.35 にベータ角の年変化を示す。XRISM 衛星の場合、 $|\beta| < i + \epsilon = 31 + 23.45$ 度の値をとる。 Γ が 1 年に 1 回、 Ω が 1 年に 6.5 回周回するので、その差分である β は 7.5 回周回する。これが、太陽の南北回帰線の周回で変調される。

3.3.4 Resolve 装置運用

3.3.4.1 ADR リサイクル

ADR リサイクルとは、断熱消磁冷凍機を継続的に運転するために磁性塩の再磁化を行う運用である (§ 3.2.4)。これによって検出器温度が 50 mK を大きく超えるため、この期間中のデータを観測に使うことはできない。軌道上では、約 0.8 時間のリサイクル時間で約 44 時間の 50 mK 保持ができる。

3.3.4.2 較正用 X 線照射

天体観測の前後、ADR リサイクルに一度、更に追加で NTE 2 回に 1 回の頻度で、differential gain の補正用途に較正用 X 線照射を行う。ゲートバルブ閉の状態では FW ^{55}Fe を用い、ゲートバルブが開いた後は MXS を用いる予定である。図 3.49 に 2023 年 12 月 28 日の例を示す。1 つ目のパネルが指向方向で、前日の終わりからマヌーバ（指向方向の変更）が継続していることがわかる。2 つ目のパネルが、ADR のソレノイド電流である（CAMC が第 1 段、WAMC が第 2 段、HAMC が第 3 段）。前 2 者の変化から 9:00 前後に ADR リサイクルが行われたことを示す。4 つ目のパネルが Earth elevation である。夜地球は NTE_ELV が 0 以下になる時間帯である。これらを元にして、FW の ^{55}Fe を照射する時間を決めている。3 つ目のパネルが FW の回転位置で、210 度で OPN2、330 度で ^{55}Fe であることを示す。(i) 観測の最初、(ii) ADR リサイクル前後、(iii) 2 回に 1 回の NTE 通過中、に FW ^{55}Fe が照射されていることがわかる。

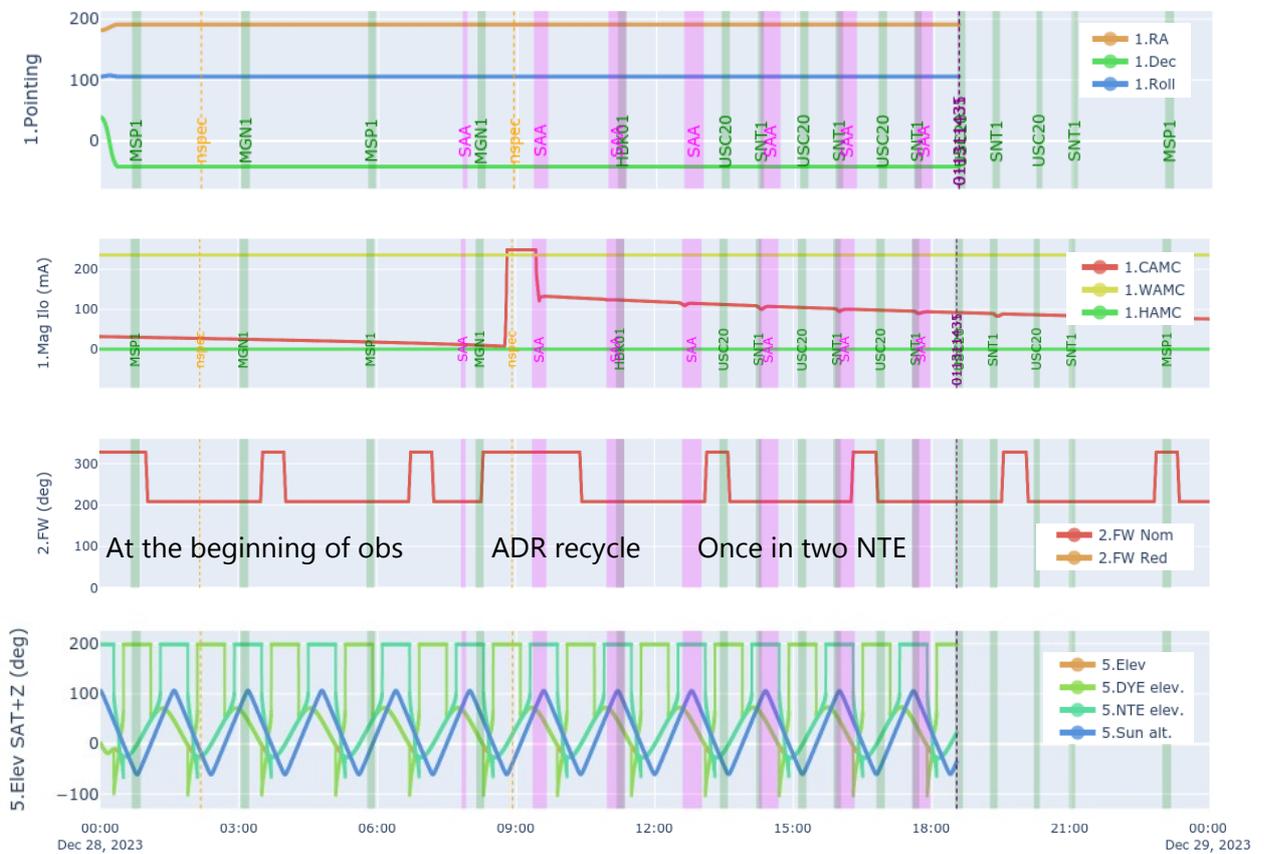


図 3.49. 軌道上のゲイン較正データ取得。

3.3.5 dp10

上記の概念をすべて取り込んで図示したものが dp10 と呼ばれるグラフである (図 3.50)。日本の X 線天文衛星で「はくちょう」以来長年使用されており、XRISM 衛星の運用でも毎日作成され使用される。

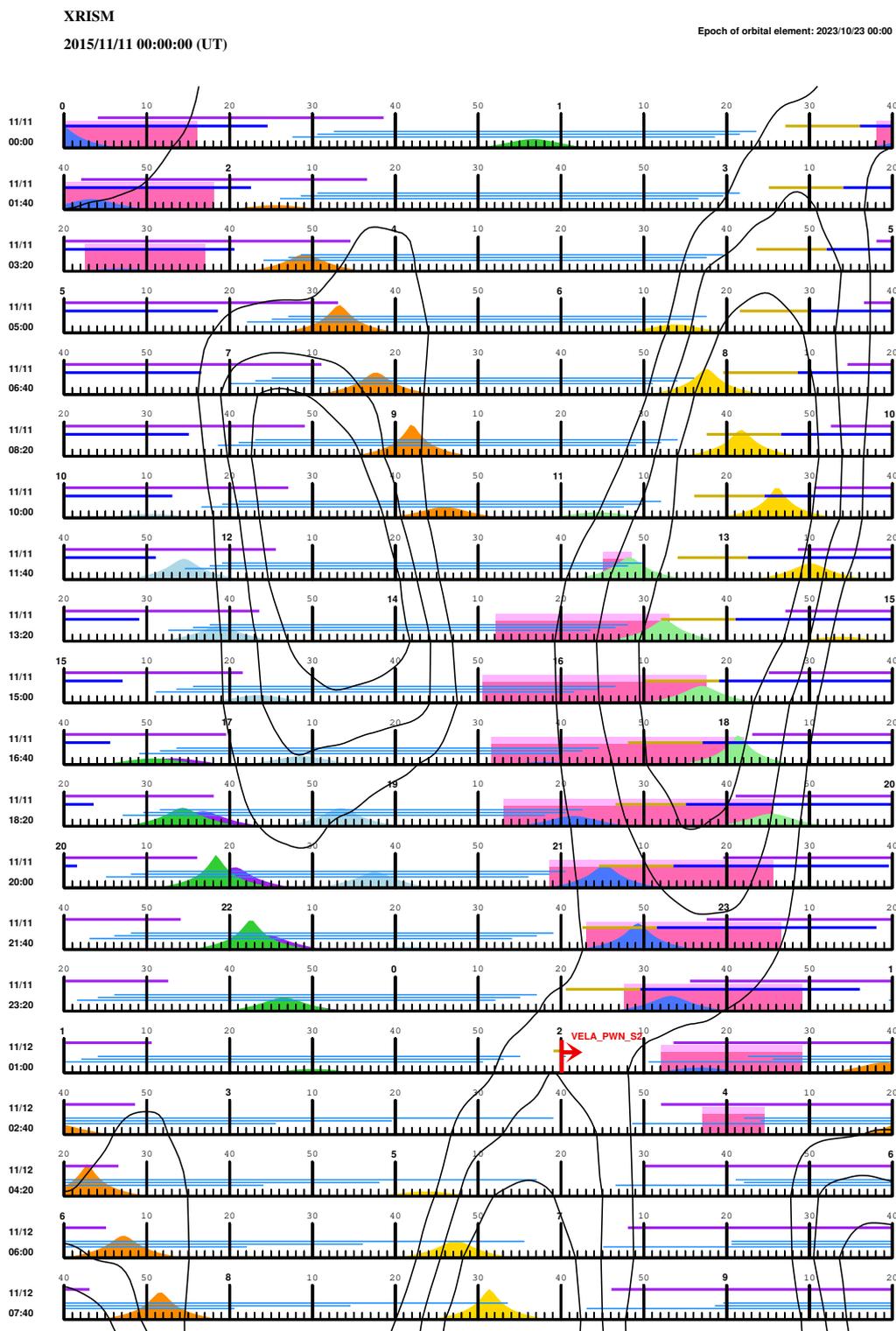


図 3.50. XRISM 衛星の軌道に対する dp10 の出力例 (2023 年 11 月 11 日)。

dp10 は以下の情報を含む。

山形は地上局から見た衛星のエレベーション (図 3.38) を表す。色の違いは、地上局を表す。

- USC : lime green

- KTU : purple
- SMT : royal blue
- MSP : dark orange
- MGN : gold
- USHI : light blue
- HBK : light green
- それ以外 : gray

太い桃色の帯は、SAA 領域をあらわす。

その他の線は、以下をあらわす。

- 太い線の上側の紫色は衛星日陰
- 太い線の下側の黄色は昼地球地没
- 太い線の下側の紺色は夜地球地没
- 下側の3本の細い線のうち、一番上は、STT1 の使用可能期間
- 下側の3本の細い線のうち、中央は、STT2 の使用可能期間
- 下側の3本の細い線のうち、一番下は、STT3 の使用可能期間
- 黒の等高線は、COR

マヌーバは橙色矢印で示される。

第 4 章

データ

Contents

4.1	データ種別	82
4.1.1	HK データ	82
4.1.2	拡張 HK データ	82
4.1.3	イベントデータ	83
4.1.4	診断データ	87
4.2	データセット	89
4.2.1	打ち上げ前のデータ	89
4.2.2	打ち上げ後のデータ	100

本章では、本論文に関連するデータの概要とデータセットについて記述する。§ 4.1 では、データ種別ごとに、HK データ (§ 4.1.1)、拡張 HK データ (§ 4.1.2)、イベントデータ (§ 4.1.3)、診断データ (§ 4.1.4) について概説する。次に、§ 4.2 にて、地上試験 (§ 4.2.1) と軌道上 (§ 4.2.2) の X 線照射データセットをまとめる。

4.1 データ種別

4.1.1 HK データ

House keeping (HK) データとは、衛星の状態が記録されているファイルである。バス機器は `xa*gen_a0.hk?`、ミッション機器 *Resolve* は `xa*rsl_a0.hk?` というファイルで提供される。項目は膨大にある。一例として、ADR リサイクル (§ 6.3.1) の判定に用いたパラメータをまとめた (表 4.1)。

表 4.1. ADR リサイクルの判定に用いるパラメータ。

HDU 6	Col	Name	説明
HK_SXS_COOLERS	94	ADRC_CAMC_MAG_HI_I_CAL	高ダイナミックレンジ用の1段ADRのソレノイドコイルの電流値
	97	ADRC_CAMC_MAG_LO_I_CAL	低ダイナミックレンジ用の1段ADRのソレノイドコイルの電流値
	146	ADRC_WAMC_MAG_HI_I_CAL	高ダイナミックレンジ用の2段ADRのソレノイドコイルの電流値
	149	ADRC_WAMC_MAG_LO_I_CAL	低ダイナミックレンジ用の2段ADRのソレノイドコイルの電流値
	197	ADRC_HAMC_MAG_HI_I_CAL	高ダイナミックレンジ用の3段ADRのソレノイドコイルの電流値
	200	ADRC_HAMC_MAG_LO_I_CAL	低ダイナミックレンジ用の3段ADRのソレノイドコイルの電流値
HDU 7	Col	Name	説明
HK_SXS_TEMP	121	CAMC_CTL	コントロールしている1段ADRの温度
	122	CAMC_MON	モニターしている1段ADRの温度
	124	WAMC_CTL	コントロールしている1段ADRの温度
	125	WAMC_MON	モニターしている1段ADRの温度
	127	HAMC_CTL	コントロールしている1段ADRの温度
	128	HAMC_MON	モニターしている1段ADRの温度
	130	ADRC_CT_CTL_FLUC	コントロール温度のRoot Mean Squar (RMS)
	131	ADRC_CT_MON_FLUC	モニター温度のRoot Mean Squar (RMS)

4.1.2 拡張 HK データ

衛星のテレメトリには含まれないが、データをダウンリンクした後、衛星の軌道を決定した上で付加情報を追加したものが Extended House keeping (EHK) ファイル (`xa*.ehk`) として提供される。EHK ファイルのパラメータをまとめた (表 4.2)。

表 4.2. EHK ファイルの HDU2 (EHK) の中のパラメータ。

HDU 2	Col	Name	説明
	1	TIME	衛星の時刻
	2	YYYYMMDD	年*10000+月*100+日
	3	HHMMSS	時*10000+分*100+秒
	4	EULER1	衛星のオイラー角度phi
	5	EULER2	衛星のオイラー角度theta
	6	EULER3	衛星のオイラー角度psi
	7	QUAT1	四元数 i
	8	QUAT2	四元数 j
	9	QUAT3	四元数 k
	10	QUAT4	四元数 w
	11	RA	R.A.(J2000)
	12	DEC	DEC.(J2000)
	13	ROLL	ロール角
	14	RSL_RA_PNT	Resolveの光軸のR.A.
	15	RSL_DEC_PNT	Resolveの光軸のDEC.
	16	XTD_RA_PNT	Xtendの光軸のR.A.
	17	XTD_DEC_PNT	Xtendの光軸のDEC.
	18	DLT_RA	平均R.A.からのずれ
	19	DLT_DEC	平均DEC.からのずれ
	20	DLT_ROLL	平均ロール角からのずれ
	21	ANG_DIST	目標位置から視野中心の角距離からのずれ
	22	SAT_ALT	地球表面からの衛星の高度
	23	SAT_LON	衛星の経度
	24	SAT_LAT	衛星の緯度
	25	ELV	Earth elevation
	26	DYE_ELV	Day earth elevation
	27	NTE_ELV	Night earth elevation
EHK	28	SUN_ALT	地平線からの太陽角度
	29	T_DY_NT	衛星の昼夜が切り替わった後の経過時間
	30	TN_DY_NT	衛星の昼夜が切り替わるまでの時間
	31	COR	Old tableのcut off rigidity
	32	COR2	2006年04月21日 tableのcut off rigidity
	33	COR3	2016年01月01日 tableのcut off rigidity
	34	CORTIME	Computed tableのcut off rigidity
	35	SAA	0から3の段階で示したSouth Atlantic Anomaly通過状態
	36	T_SAA	SAA通過からの時刻
	37	TN_SAA	次のSAA通過までの時刻
	41	SAA_SXI	XTENDのSAAの領域内は1、そうでない場合は0が書かれる
	42	T_SAA_SXI	XTENDのSAA通過からの時刻
	43	TN_SAA_SXI	XTENDの次のSAA通過までの時刻
	44	SAA_SXS	ResolveのSAAの領域内は1、そうでない場合は0が書かれる
	45	T_SAA_SXS	ResolveのSAA通過からの時刻
	46	TN_SAA_SXS	Resolveの次のSAA通過までの時刻
	47	SAA2_SXI	XTENDのSAA2の領域内は1、そうでない場合は0が書かれる
	48	T_SAA2_SXI	XTENDのSAA2の通過からの時刻
	49	TN_SAA2_SXI	XTENDの次のSAA2の通過までの時刻
	50	SAA2_SXS	ResolveのSAA2の領域内は1、そうでない場合は0が書かれる
	51	T_SAA2_SXS	ResolveのSAA2の通過からの時刻
	52	TN_SAA2_SXS	Resolveの次のSAA2の通過までの時刻
	53	ZGMAG_ANG	地磁気のz軸の角度
	54	ZGMAG_PHI	地磁気のロール角
	55	ZE_ANG	地球の中心方向に対するz軸の角度
	56	ZE_PHI	地球の中心方向に対するz軸のロール角
	57	MZELV	負のz軸のearth elevation
	58	MZDYE_ELV	負のz軸のday earth elevation
	59	MZNTE_ELV	負のz軸のnight earth elevation

4.1.3 イベントデータ

本節では、PL 処理後のイベントデータの FITS ファイルのパラメータをまとめた。ピクセルイベントと anti-co イベントに大別される。ピクセルイベントとは、マイクロカロリメータ検出器の各ピクセルからのイベントを

まとめたデータである。Anti-co イベントとは、anti-co 検出器のイベントをまとめたデータである。それぞれ、`xa*rsl_a0px_cl.evt` と、`xa*rsl_a0ac_cl.evt` というファイルに格納されている。イベントごとに、表 4.3、4.6 に示す特徴量が記録される。これらの特徴量の計算方法については、§ 5.1、§ 5.2 に記述する。

4.1.3.1 ピクセルイベント

ピクセルイベントファイル `xa*rsl_a0px_cl.evt` のイベントカラムのパラメータを表 4.3 にまとめた。Status については § 5.2.2 で説明する。

表 4.3. PL 処理後のピクセルイベントファイルの HDU2 (EVENTS) の中のパラメータ。

HDU 2	Col	Name	説明
	1	TIME	2019/1/1/00:00からの経過時刻。
	2	TRIGTIME	パルスがあるスレッシュホールドを超えたときの時刻。
	3	S_TIME	SIRIUSによって計算されたテレメトリーデータの送信時刻。
	4	L32TI	衛星組込ネットワークSpaseWireによるカウンタ値。
	5	CATEGORY	データレコーダーの優先順位。
	6	ADU_CNT	パケットカウンタ。
	7	PSP_ID	PSP IDであるA0、A1、B0、B1に対応している0から3の整数。
	8	FORMAT_VER	0から255に対応したイベントテレメトリーのフォーマットバージョン。
	9	WFRB_WRITE_LP	WFRBへの現在のラップ (6ビット) とポインタ (18ビット)。
	10	WFRB_SAMPLE_CNT	WFRBの現在のラップ開始時のSAMPLECNTのラッチ値。
	11	NUM_ELEM	1パケットの中のイベント数
	12	SUM_LOST_CNT	1パケットの中のロストイベント数
	13	ITYPE	イベントグレードであるHp、Mp、Ms、Lp、Ls、BL、ELに対応している0から6の整数値。
	14	TYPE	イベントグレードであるHp、Mp、Ms、Lp、Ls、BL、EL。
	15	IPIX	PSP IDに対応した0から17のピクセル番号。
	16	PIXEL	0から35のピクセル番号。
	17	TRIG_LP	イベントがトリガーされた WFRB への 6 ビットラップと 18 ビットポインタ。
	18	QUICK_DOUBLE	QUICK_DOUBLEイベントならば1、そうでない場合は0が書かれる。
	19	SLOPE_DIFFER	SLOPE_DIFFERイベントならば1、そうでない場合は0が書かれる。
	20	LO_RES_PH	最適フィルタによらないLグレードイベントも求めるパルスハイト。
	21	FLAG_CLIPPED	波高値が閾値を超えているときは1、それ以外は0が書かれる。
	22	DERIV_MAX	微分したパルス波形の最大値。
	23	RISE_TIME	1/4 sampleを単位としたパルスの立ち上がり時間。
	24	TICK_SHIFT	最適フィルタリングテンプレートによるフィッティング波形と、元のパルス波形とのずれ。
	25	TIME_VERNIER	0から15bitまでのサブサンプル分解能で決めた到来時刻サブサンプル部分。
	26	PHA	Pulse Height Amplitude。
	27	FLAGS	QUICK_DOUBLE*32 + SLOPE_DIFFER*16 + ITYPE
EVENTS	28	EL_LOST_CNT	TYPE=ELとなったロストイベントの数
	29	EL_REASON	TYPE=ELになった理由。0:EDB overflow, 1:1st FIFO overflow, 2:pulse data in WFRB lostが書かれる。
	30	EL_STOP_LP	イベントロストが回復した WFRB への 6 ビットのラップと 18 ビットのポインタ。
	31	PREV_INTERVAL	前のイベントからのサンプル数。
	32	NEXT_INTERVAL	次のイベントまでのサンプル数。
	33	SAMPLECNT	TIMEを計算するために用いるサンプル数。
	34	SAMPLECNTTRIG	パルス波形があるスレッシュホールドを超えたときのサンプル数。
	35	ACTX	1ピクセル上のX座標。
	36	ACTY	1ピクセル上のY座標。
	37	DETX	検出器上のX座標。
	38	DETY	検出器上のY座標。
	39	FOCX	焦点面上のX座標。
	40	FOCY	焦点面上のY座標。
	41	X	天体の空の位置のX座標。Xは西が正、東が負。
	42	Y	天体の空の位置のY座標。Yは北が正、南が負。
	43	UPI	PHAとエネルギーを線形関係と仮定して求めたエネルギー。
	44	EPI	PHAから計算したエネルギー。
	45	EPI2	PHA2から計算したエネルギー。
	46	PI	EPI2を0.5 eV=1 channelに変換したもの
	47	INDEX	親イベントとセカンダリーイベントにつくフラグ。
	48	GROUPS	INDEXフラグのうち、親イベントにつくフラグ。
	49	CTMULT	電氣的クロストークイベントの記録。
	50	STATUS	イベントフラグ。
	51	PROC_STATUS	良くないテレメトリーや値の記録。0がclean イベントを示す。
	52	CTMULT2	2次電氣的クロストークの記録。
	53	SEQ	セカンダリーイベント群の各イベントにつく番号。
	54	TEMP	ゲイン温度。
	55	PHA2	Msをトラッキングした後のPHA。

ピクセルイベントファイルのファイル名には、観測時の姿勢とフィルタホイールの位置が含まれている。フィルタホイールの位置は、`xa*rsl_(姿勢 ID)0px(フィルタ ID)*.evt` のファイル名の4桁のフィルタ ID に書き込まれている。`xa*rsl_(姿勢 ID)0px(フィルタ ID)*.evt` のフィルタホイール ID とその説明を表 4.4 に示す。また、観測時の姿勢は、アルファベット 1 文字で姿勢 ID に書き込まれている。姿勢 ID とその説明を表 4.5 に示す。

表 4.4. `xa*rs1_(姿勢 ID)0px(フィルタ ID)*.evt` のフィルタ ID とその説明。フィルタ ID の 3 桁目は 0 が通常モード、1 が forced mid-res モードによるデータを示す。

フィルタ ID	説明
0?00	フィルタホイール回転中
1?00	OPEN フィルタ
2?00	Optical blocking フィルタ
3?00	Neutral density フィルタ
4?00	Be フィルタ
5?00	^{55}Fe 較正 X 線源

表 4.5. `xa*rs1_(姿勢 ID)0px(フィルタ ID)*.evt` のとその説明。

姿勢 ID	説明
s	マヌーバ中
p	ポインティング中
a	マヌーバ中またはポインティング中

4.1.3.2 Anti-co イベント

Anti-co イベントファイル `xa*rs1_a0ac_c1.evt` のイベントカラムのパラメータを表 4.6 にまとめた。

表 4.6. PL 処理後の anti-co イベントファイルの HDU2 (EVENTS) の中のパラメータ。

HDU 2	Col	Name	説明
	1	TIME	2019/1/1/00:00からの経過時刻。
	2	S_TIME	SIRIUSによって計算されたテレメトリーデータの送信時刻。
	3	L32TI	衛星組込ネットワークSpaseWireによるカウンタ値。
	4	CATEGORY	データレコーダーの優先順位。
	5	ADU_CNT	パケットカウンタ。
	6	PSP_ID	PSP IDであるA0、A1、B0、B1に対応している0から3の整数。
	7	FORMAT_VER	0から255に対応したイベントテレメトリーのフォーマットバージョン。
	8	WFRB_WRITE_LP	WFRBへの現在のラップ (6ビット) とポインタ (18ビット)。
	9	WFRB_SAMPLE_CNT	WFRBの現在のラップ開始時のSAMPLECNTのラッチ値。
	10	NUM_ELEM	1パケットの中のイベント数。
	11	ADC_SAMPLE_PEDESTAL	アンチコデータのADCサンプルのゼロレベル。
	12	AC_ITYPE	イベントグレードであるAC、BL、EL、PEに対応している0から3の整数値。
EVENTS	13	AC_TYPE	イベントグレードであるAC、BL、EL、PE。
	14	FLG_EVENT_LOST	ロストイベントならば1、そうでない場合は0が書かれる。
	15	FLG_BASELINE	ベースラインイベントならば1、そうでない場合は0が書かれる。
	16	DURATION	パルス波形があるスレッシュホールドを超えたときのパルスのサンプル数。
	17	TRIG_LP	イベントがトリガーされた WFRB への 6 ビットラップと 18 ビットポインタ。
	18	FLG_PARITY_ERR	XBOXからPSPへビットストリームを転送する際に、パリティエラーが含まれていることを示すフラッグ。
	19	TRIG_LAP_LSB	イベントが発生したWFRBのビットラップ。
	20	ADC_SAMPLE_MAX	パルスのADCサンプルの最大値 (-8192~8191)。
	21	EL_LOST_CNT	TYPE=ELとなったロストイベントの数
	22	PHA	Pulse Height Amplitude。
	23	PI	PHAから計算したエネルギーチャンネル。
	24	SAMPLECNT	TIMEを計算するために用いるサンプル数。
	25	PROC_STATUS	良くないテレメトリーや値の記録。0がclean イベントをさす。

4.1.4 診断データ

ノイズに関する診断データは、今村, 2022 § 4.2.2 を参照のこと。ここでは、イベントやパルス波形に関する診断データを述べる。

4.1.4.1 ベースラインイベント

ベースラインイベントとは、イベントがない状態での検出器の性能を評価するための疑似イベントである。X線マイクロカロリメーター検出器と anti-co 検出器には、ともにベースラインイベントが存在するが、その定義は異なる。

X線マイクロカロリメーター検出器のベースラインイベントは、X線パルスがないノイズ・レコードに対して最適フィルタリング処理を行ったものである。このような処理を行うことで、検出器ノイズがエネルギー分解能に与える影響を評価することができる。軌道上で CPU リソースに余裕がある時に、すべてのピクセルからベースラインイベントが取得、計算、保存される。xa*rs1_a0px_uf.evt というファイルに、通常のイベントと同じ形式で保存される。ITYPE=5 として識別される。

Anti-co 検出器のベースラインイベントは、ランダムにサンプルしたものである。大半はイベントがない時刻でのサンプルになるので、ノイズレベルの診断に使える。xa*rs1_a0ac_uf.evt というファイルに、通常のイベントと同じ形式で保存される。ITYPE=1 として識別される。

4.1.4.2 ロストタイムイベント

ロストタイムイベントは、イベント処理できなかった時間帯を出力するための疑似イベントである。X線マイクロカロリメーター検出器に存在する。PSP において、X線パルスの検出は FPGA で、最適フィルタ処理は CPU で行う (§ 5.1)。入射するカウントレートが高くなると、非同期処理である後者がおいつかなくなる。これを“PSP limit”と称する。この時、FPGA で検出したイベントを保持するバッファ（イベントデュアルバッファ）、あるいは、XBOX から受信した検出器の波形データ（波形リングバッファ）を一度に廃棄して、その廃棄時間帯の開始、終了時刻、及び捨てたイベントの数（イベントバッファの場合）だけを保存する。xa*rs1_a0px_uf.evt というファイルに、通常のイベントと同じ形式で保存される。ITYPE=6 として識別される。

なお、地上試験において *Resolve* 装置の PSP limit が測定されている (Mizumoto et al., 2022)。CPU 使用率が式 4.1 によって計算することができ、これが 100% を超えると“PSP limit”に達する。

$$\text{CPU 使用率} = \sum_{\text{pixel}} \sum_{\text{grade}} a_{g,p} * r_{g,p} + c \quad (4.1)$$

ここで、 $r_{g,p}$ はグレード g 、ピクセル p のカウントレートであり、これらを係数 a, c で線型結合してモデル化している。ここで、CPU 1つあたり9個のピクセルを処理するので、その総和をとる。おおむね、100 mCrab 相当のカウントレートが入射した時に、PSP limit に達する。

4.1.4.3 パルスレコード

パルスレコードとは、X線パルスの時系列データ（波形）を保存したデータである。1パルスにつき、1024 sample の波形とその微分波形を、2k sample 分のデータとして保存する。地上試験では、基本的に常時、衛星との通信がされているので、すべてのX線パルスのパルスレコードを保存して回収できる。軌道上では、保存レートを大幅に低減しており、更にデータレコーダのディスクオータを上回った分が上書きされたり、テレメトリとしてすべてが回収できなかったりする。

マイクロカロリメーターピクセルのパルスレコードは、xa*rs1_a0pxpr_uf.evt というファイルに格納される。

Anti-co 検出器のパルスレコードは存在しない。このファイルの HDU2 (EVENTS) の 43 列目の PULSAREC に、パルスレコードが格納されている。パルスレコードの例を図 4.1 に示す。

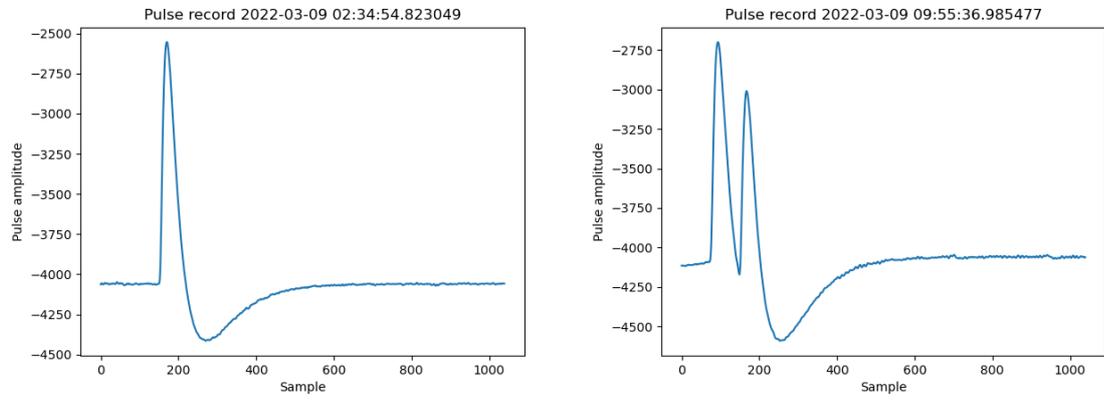


図 4.1. パルスレコードの例。左:シングルパルス、右:ダブルパルス。

4.2 データセット

4.2.1 打ち上げ前のデータ

地上試験では、*Resolve* 装置単独で試験を行うサブシステム試験の後に、衛星搭載後に試験を行うシステム試験を行った。1回の冷却試験を test campaign (TC) と称する。*Resolve* 装置は、合計 17 回の冷却試験を行ったが、うち TC4 以前の TC1, TC2, TC2.1, TC1A, TC2A, TC3 は省略する。本論文で扱うデータは TC4 以降に取得されたものである (表 4.7)。TC4–TC5 のサブシステム試験では、地上支援機器の較正装置を用いて *Resolve* 装置の較正試験がつくば宇宙センターにて行われた。TC6–TC10 のシステム試験では、*Resolve* 装置を衛星に搭載した状態での試験が行われた。TC11 は打ち上げ前の射場作業である。*Resolve* 装置の運転モードは、He mode が基本で、TC5, TC9 の一部で cryogen-free (CF) mode の運転を実施した。

表 4.7. 地上試験 test campaign

TC	開始	終了	場所	レベル	モード	目的
TC4	2021/10	2021/12	筑波	サブシステム	He	サブシステム機能・性能試験、較正試験
TC5	2022/01	2022/03	筑波	サブシステム	He, CF	サブシステム機能・性能試験、較正試験
TC6	2022/04	2022/06	筑波	システム	He	環境試験前電気試験
TC7	2022/07	2022/08	筑波	システム	He	衛星熱真空試験
TC8	2022/09	2022/12	筑波	システム	He	衛星機械試験
TC9	2022/01	2022/02	筑波	システム	He, CF	環境試験後電気試験
TC10	2022/03	2022/04	種子島	システム	He	輸送後電気試験
TC11	2022/08	2022/09	種子島	システム	He	打ち上げ

4.2.1.1 サブシステム試験

本項では、サブシステム試験 (TC4–TC5) の X 線照射データをまとめた。ただし TC4 については、フライト用波形テンプレートの使用が開始された 2021 年 12 月以降のデータをまとめている。目的、X 線源に加えて、各データのシーケンス番号を OBSID として、その開始時刻と終了時刻をそれぞれ、start time、stop time として示す。He mode と CF mode のデータをそれぞれ、He、CF として MODE のカラムに示し、ゲートバルブの開閉 (open または close) を GV のカラムに示した (表 4.9、表 4.10)。

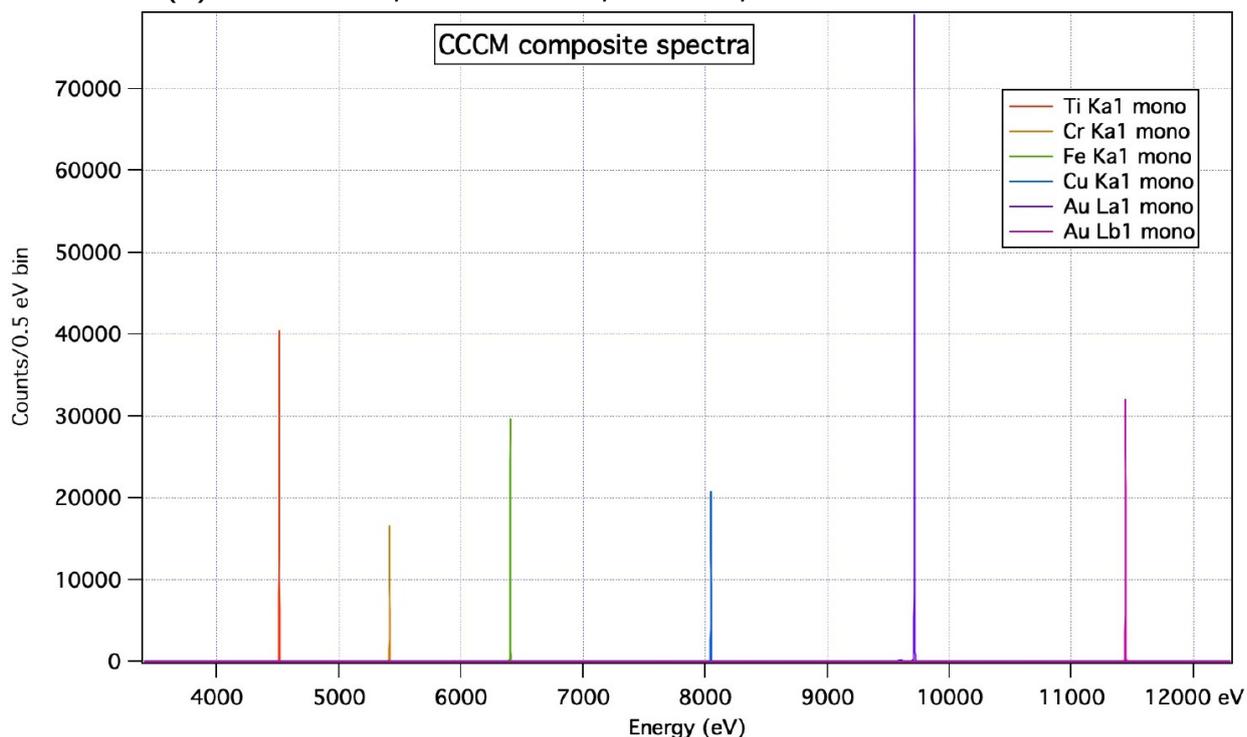
運転モードと取得した較正データを表 4.8 に示す。主な取得データは以下の通りである。輝線の高係数率データや 12 keV 以上の輝線データなどは軌道上で取得できない。また、軌道上でゲートバルブが開くまでは、2 keV 以下の X 線イベントは地上試験データのみである。本論文では、これらのデータを駆使して様々なイベントスクリーニングの条件を決めていく (§ 6)。

- LSF : CCCM を用いて純度の高い単色 X 線を照射し、line spread function を導出する (図 4.2)。
- ゲインカーブ : 49 mK、50 mK、51 mK それぞれにおいて、RTS を用いて多色の線スペクトルを取得し、ゲインカーブを導出する (図 4.3、図 4.4)。
- 高測数率 : 高強度の X 線を照射し、PSP の CPU によるピクセルイベントの処理の限界値、pile up の影響評価、クロストークによるエネルギー分解能などを測定している。(Mizumoto et al., 2022)。

表 4.8. サブシステム試験中の校正項目

Mode	GV	測定項目
He	Close	ゲインカーブ, LSF, 高係数率
CF	Close	ゲインカーブ, LSF, 高係数率
He	Open	ゲインカーブ
CF	Open	(試験なし)

(a) He mode, closed GV, CCCM, LSF



(b) CF mode, closed GV, CCCM, LSF

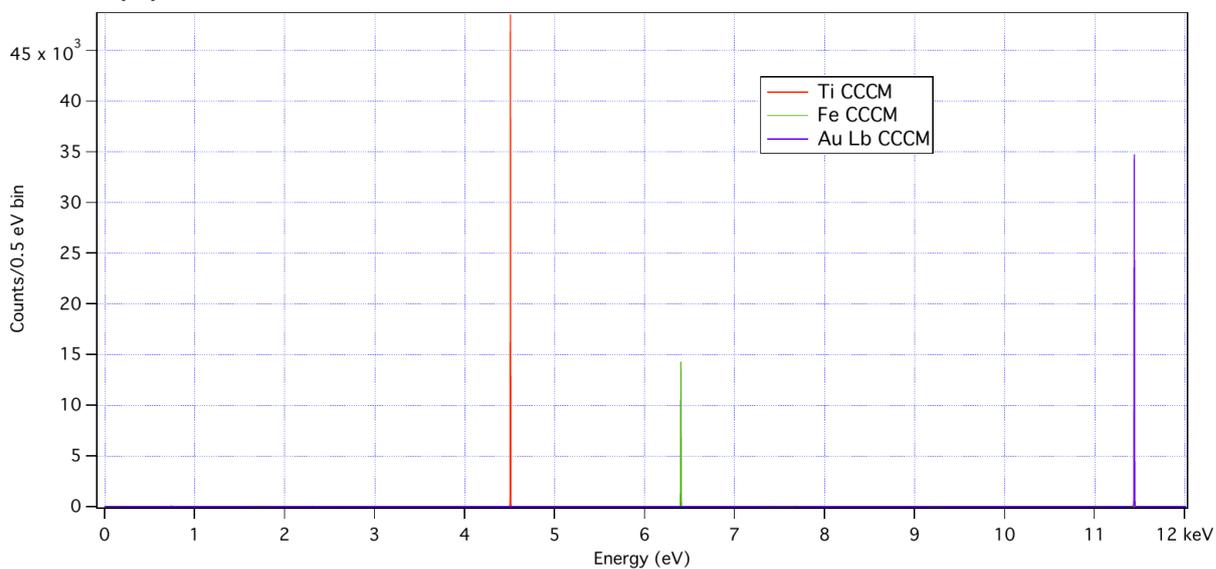


図 4.2. LSF 校正データ。NASA GSFC M. A. Leutenegger 氏提供。

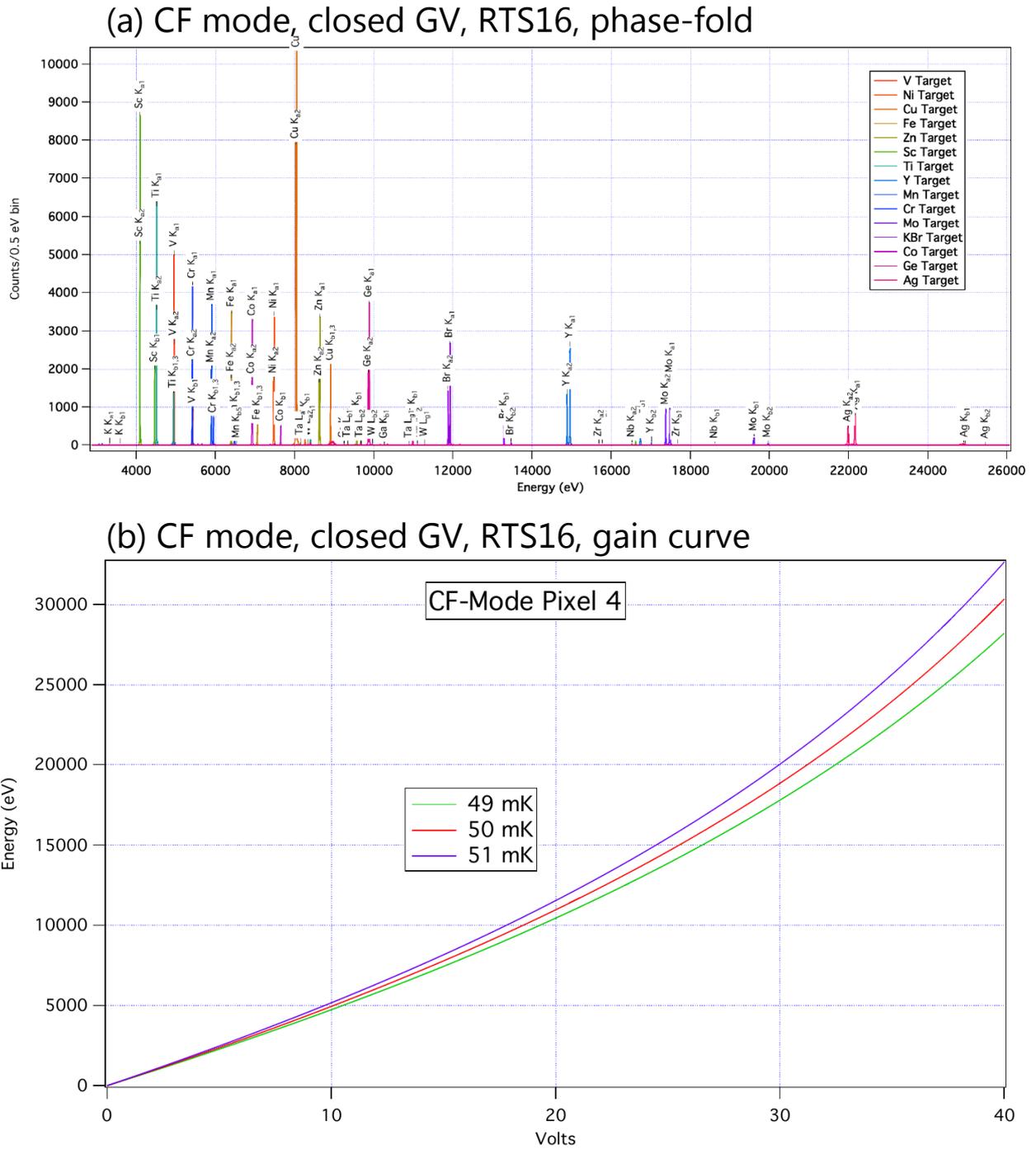


図 4.3. ゲインカーブ校正データ (1) ゲートバルブ閉 (4-25 keV)。LLNL M. E. Eckart 氏、NASA GSFC F. S. Porter 氏提供。

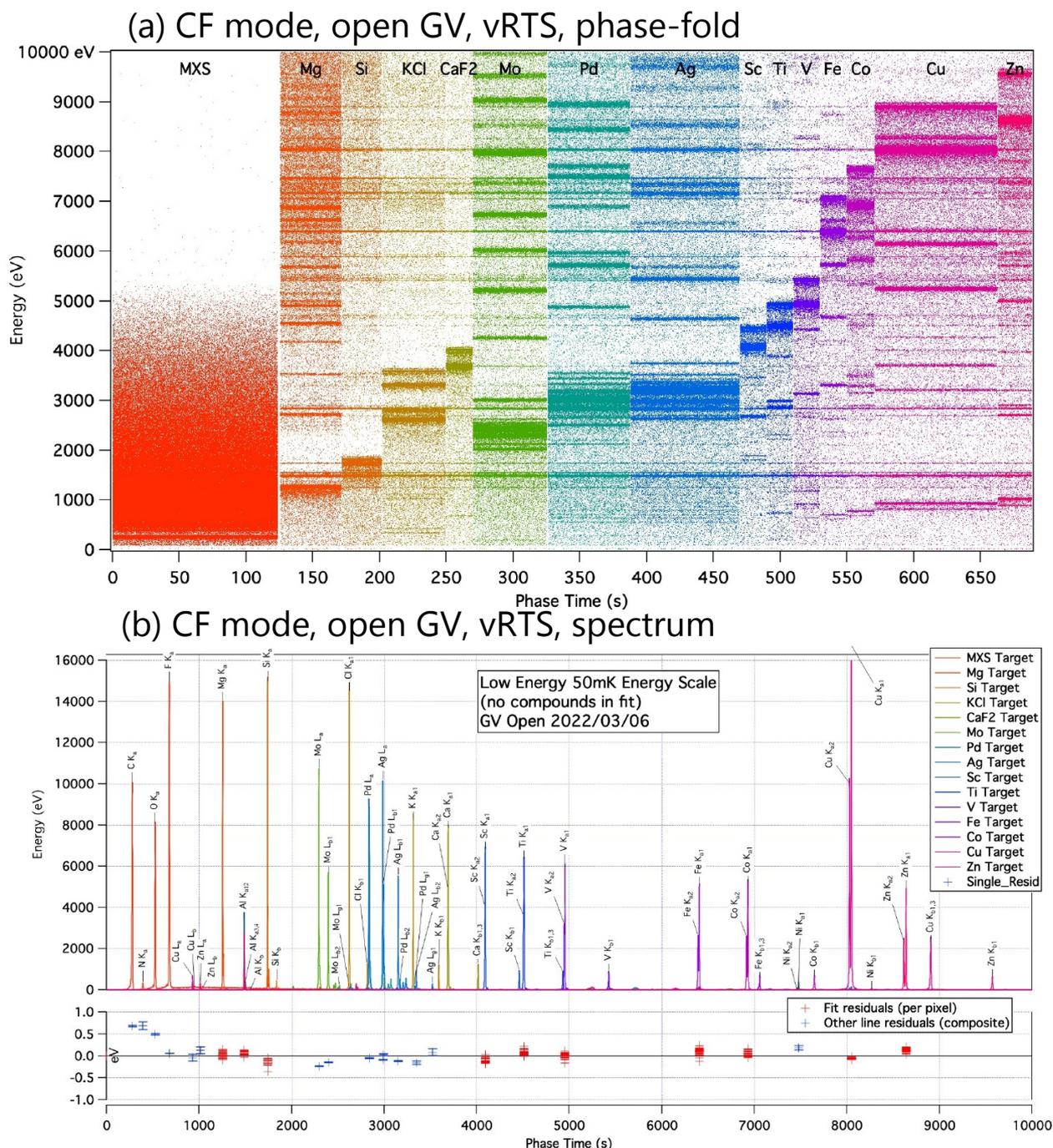


図 4.4. ゲインカーブ校正データ (2) ゲートバルブ開 (0–12 keV)。LLNL M. E. Eckart 氏、NASA GSFC F. S. Porter 氏提供。

表 4.9. TC4 の X線データ。

	目的	X線源	Start time	Stop time	He/CF	GV	OBSID
1	セットアップ	MnK α of RTS16	2021/12/13 23:00	2021/12/14 04:13	He	close	[097086650, '097086700', '097086710']
2	50mK ゲイン校正	RTS16	2021/12/14 05:05	2021/12/15 23:00	He	close	[097086710, '097086720', '097086730', '097086740', '097086750', '097086800', '097086810', '097086820', '097086830', '097086840', '097086850']
3	49mK ゲイン校正	RTS16	2021/12/16 06:40	2021/12/18 06:45	He	close	[097086910, '097086920', '097086930', '097086940', '097086950', '097087000', '097087010', '097087020', '097087030', '097087040', '097087050', '097087100', '097087110']
4	51mK ゲイン校正	RTS16	2021/12/18 07:17	2021/12/20 07:36	He	close	[097087110, '097087120', '097087130', '097087140', '097087150', '097087200', '097087210', '097087220', '097087230', '097087240', '097087250', '097087300', '097087310']
5	49.5 mK ゲイン校正	RTS16	2021/12/20 07:40	2021/12/21 01:15	He	close	[097087310, '097087320', '097087330', '097087340', '097087350', '097087400']

表 4.10. TC5 の X線データ。

	目的	X線源	Start time	Stop time	He/CF	GV	OBSID
1	セットアップ	MnK α of RTS16	2022/01/30 07:40	2022/01/30 23:00	He	close	'097091410', '097091420', '097091430', '097091440', '097091450'
2	LSF較正	TiK α of RTS16	2022/01/31 05:00	2022/01/31 12:45	He	close	'097091510', '097091520', '097091530'
3	LSF較正	CuK α of CCCM	2022/01/31 23:00	2022/02/01 01:48	He	close	'097091550', '097091600'
4	LSF較正	FeK α of CCCM	2022/02/01 05:00	2022/02/01 11:00	He	close	'097091610', '097091620'
5	LSF較正	AuL α of CCCM	2022/02/01 11:50	2022/02/02 03:30	He	close	'097091620', '097091630', '097091640', '097091650', '097091700'
6	LSF較正	CrK α of CCCM	2022/02/02 03:55	2022/02/02 13:25	He	close	'097091700', '097091710', '097091720', '097091730'
7	LSF較正	AuL β of CCCM	2022/02/02 14:00	2022/02/03 01:40	He	close	'097091730', '097091740', '097091750', '097091800'
8	ADR リサイクルの確認	MnK α of RTS16	2022/02/06 01:15	2022/02/09 01:10	CF	close	'097092100', '097092110', '097092120', '097092130', '097092140', '097092150', '097092200', '097092210', '097092220', '097092230', '097092240', '097092250', '097092300', '097092310', '097092320', '097092330', '097092340', '097092350', '097092400'
9	高測数率	Cr/Ni rotation	2022/02/10 02:13	2022/02/11 02:23	CF	close	'097092500', '097092510', '097092520', '097092530', '097092540', '097092550', '097092600'
10	CF データの取得	MnK α of RTS16	2022/02/11 09:00	2022/02/12 00:25	CF	close	'097092620', '097092630', '097092640', '097092650', '097092700'
11	CF データの取得	KBr of RTS16	2022/02/12 00:30	2022/02/12 03:20	CF	close	'097092700'
12	CF データの取得	Cr/Mn/Cu/KBr rotation	2022/02/12 04:52	2022/02/12 23:00	CF	close	'097092710', '097092720', '097092730', '097092740', '097092750'
13	LSF較正	AuL β of CCCM	2022/02/13 09:00	2022/02/14 00:45	CF	close	'097092820', '097092830', '097092840', '097092850', '097092900'
14	LSF較正	FeK α of CCCM	2022/02/14 01:25	2022/02/14 04:40	CF	close	'097092900', '097092910'
15	LSF較正	TiK α of RTS16	2022/02/14 05:30	2022/02/14 13:10	CF	close	'097092910', '097092920', '097092930'
16	50mK ゲイン較正	RTS16	2022/02/14 14:05	2022/02/16 08:40	CF	close	'097092930', '097092940', '097092950', '097093000', '097093010', '097093020', '097093030', '097093040', '097093050', '097093100', '097093110', '097093120'
17	49mK ゲイン較正	RTS16	2022/02/16 11:30	2022/02/18 05:10	CF	close	'097093120', '097093130', '097093140', '097093150', '097093200', '097093210', '097093220', '097093230', '097093240', '097093250', '097093300', '097093310'
18	51mK ゲイン較正	RTS16	2022/02/18 05:30	2022/02/20 00:54	CF	close	'097093310', '097093320', '097093330', '097093340', '097093350', '097093400', '097093410', '097093420', '097093430', '097093440', '097093450', '097093500'
19	高測数率	RTS16	2022/02/20 02:35	2022/02/20 09:15	CF	close	'097093500', '097093510', '097093520'
20	高測数率	CCCM	2022/02/21 02:00	2022/02/21 07:15	CF	close	'097093600', '097093610'
21	高測数率	vRTS/MXS	2022/03/03 01:10	2022/03/03 02:50	He	close	'097094600'
22	高測数率	vRTS/MXS	2022/03/03 05:20	2022/03/03 08:10	He	close	'097094610', '097094620'
23	高測数率	vRTS/MXS	2022/03/03 09:15	2022/03/04 00:40	He	close	'097094620', '097094630', '097094640', '097094650', '097094700'
24	GV開データの取得	vRTS/MXS	2022/03/04 01:30	2022/03/04 03:20	He	open	'097094700'
25	GV開データの取得	MXS	2022/03/04 05:09	2022/03/04 09:09	He	open	'097094710', '097094720'
26	50mK ゲイン較正	vRTS	2022/03/04 10:40	2022/03/05 22:00	He	open	'097094720', '097094730', '097094740', '097094750', '097094800', '097094810', '097094820', '097094830', '097094840', '097094850'
27	49mK ゲイン較正	vRTS	2022/03/05 22:50	2022/03/07 03:35	He	open	'097094850', '097094900', '097094910', '097094920', '097094930', '097094940', '097094950', '097095000'
28	51mK ゲイン較正	vRTS	2022/03/07 04:45	2022/03/08 09:20	He	open	'097095010', '097095020', '097095030', '097095040', '097095050', '097095100', '097095110', '097095120'
29	Ms補正	KCl of vRTS	2022/03/08 10:30	2022/03/09 00:30	He	open	'097095120', '097095130', '097095140', '097095150', '097095200'
30	Ms補正	KCl of vRTS	2022/03/09 00:48	2022/03/09 04:00	He	open	'097095200', '097095210'
31	GV開データの取得	MXS	2022/03/09 04:05	2022/03/09 23:00	He	open	'097095210', '097095220', '097095230', '097095240', '097095250'

4.2.1.2 システム試験

本項では、システム試験 (TC6–TC11) のX線照射データをまとめた (表 4.11、表 4.12、表 4.13、表 4.14)。TC7 については、熱真空試験の温度状態も同時にまとめている。また、真空排気前に長時間のバックグラウンドデータを取得したので、それも追記した。

また、MXS が 1000 s 以上作動しているときのフィルタホイール、LED 番号、FWE_LEDn_PLS_LEN と FWE_LEDn_PLS_SPC と FWE_I_LEDn (図 3.27 参照) をまとめた (表 4.15、表 4.15)。TC6 では、電磁干渉・微小擾乱干渉試験での検出器性能測定も行った。それぞれ、栗原 2022、Hasebe et al. 2023 を参照されたい。

表 4.11. TC6 のX線データ。

	目的	X線源	Start time	Stop time	He/CF	GV	OBSID
1	Cool down データの取得	FW 55Fe	2022/06/05 10:25	2022/06/05 10:45	He	close	[098006620]
2	EMI、微小擾乱試験	MXS(RED)	2022/06/09 07:30	2022/06/09 10:20	He	close	[098007010', '098007020]
3	EMI、微小擾乱試験	MXS(NOM)	2022/06/09 10:50	2022/06/10 01:15	He	close	[098007020', '098007030', '098007040', '098007050', '098007100]
4	EMI、微小擾乱試験	MXS(NOM)	2022/06/10 07:00	2022/06/10 09:35	He	close	[098007110', '098007120]
5	EMI、微小擾乱試験	MXS(RED)	2022/06/10 10:00	2022/06/11 00:40	He	close	[098007120', '098007130', '098007140', '098007150', '098007200]
6	MXS 試験 (long spacing)	MXS(RED)	2022/06/11 08:21	2022/06/11 10:21	He	close	[098007220]
7	MXS 試験 (long spacing)	MXS(NOM)	2022/06/11 10:50	2022/06/12 01:50	He	close	[098007220', '098007230', '098007240', '098007250', '098007300]
8	性能確認	MXS(NOM)	2022/06/12 12:20	2022/06/13 00:55	He	close	[098007330', '098007340', '098007350', '098007400]
9	性能確認	MXS(RED)	2022/06/13 03:00	2022/06/13 06:30	He	close	[098007400', '098007410]
10	性能確認	MXS(NOM)	2022/06/13 11:42	2022/06/13 23:12	He	close	[098007420', '098007430', '098007440', '098007450]
11	性能確認	MXS(RED)	2022/06/14 12:55	2022/06/15 01:00	He	close	[098007530', '098007540', '098007550', '098007600]
12	性能確認	MXS(NOM)	2022/06/15 11:23	2022/06/16 00:40	He	close	[098007620', '098007630', '098007640', '098007650', '098007700]
13	性能確認	MXS(RED)	2022/06/16 07:35	2022/06/17 00:47	He	close	[098007710', '098007720', '098007730', '098007740', '098007750', '098007800]

表 4.12. TC7 の X線データ。

	目的	X線源	Start time	Stop time	He/CF	GV	熱真空状態	OBSID
1	性能確認	FW 55Fe	2022/07/25 09:40	2022/07/26 00:30	He	close	なし	[098011620', '098011630', '098011640', '098011650', '098011700']
2	Forced midres 試験	MXS1	2022/07/26 09:30	2022/07/27 00:30	He	close	なし	[098011720', '098011730', '098011740', '098011750', '098011800']
3	Forced midres 試験	MXS3	2022/07/27 11:50	2022/07/28 00:40	He	close	なし	[098011820', '098011830', '098011840', '098011850', '098011900']
								[098011900', '098011910', '098011920', '098011930', '098011940', '098011950', '098012000', '098012010', '098012020', '098012030', '098012040', '098012050', '098012100', '098012110', '098012120', '098012130', '098012140', '098012150', '098012200', '098012210', '098012220', '098012230', '098012240', '098012250', '098012300', '098012310', '098012320', '098012330', '098012340', '098012350', '098012400', '098012410', '098012420', '098012430', '098012440', '098012450', '098012500']
4	Long background dataの取得	なし	2022/07/28 00:40	2022/08/04 00:39	He	close	なし	[098012750', '098012800', '098012810', '098012820', '098012830', '098012840', '098012850', '098012900', '098012910', '098012920', '098012930', '098012940']
4	性能確認	FW 55Fe	2022/08/05 20:17	2022/08/07 18:10	He	close	HOT	[098013150', '098013200', '098013210', '098013220']
5	MXS 試験	MXS1	2022/08/09 20:30	2022/08/10 11:30	He	close	COLD	[098013230', '098013240', '098013250]
6	MXS 試験 (aging)	MXS1, 55Fe	2022/08/10 13:30	2022/08/10 23:30	He	close	COLD	[098013250', '098013300]
7	Mid grade較正	MXS1, 55Fe	2022/08/10 23:30	2022/08/11 01:30	He	close	COLD	[098013310', '098013320', '098013330]
8	MXS 試験 (aging)	MXS1, 55Fe	2022/08/11 06:48	2022/08/11 15:31	He	close	COLD	[098013330', '098013340', '098013350]
9	MXS 試験 (dim)	MXS1	2022/08/11 15:31	2022/08/11 20:31	He	close	COLD	[098013350', '098013400]
10	Mid grade較正	MXS1, 55Fe	2022/08/11 20:31	2022/08/12 01:15	He	close	COLD	[098013400', '098013410', '098013420']
11	性能確認	FW 55Fe	2022/08/12 01:20	2022/08/12 10:10	He	close	COLD	[098013500', '098013600]
12	性能確認	FW 55Fe	2022/08/13 22:30	2022/08/14 02:30	He	close	HOT	[098013600', '098013610', '098013620', '098013630']
13	MXS 試験 (mid)	MXS1, 55Fe	2022/08/14 02:30	2022/08/14 13:33	He	close	HOT	[098013630', '098013640', '098013650', '098013700', '098013710', '098013720', '098013730']
14	MXS 試験 (mid)	MXS1, 55Fe	2022/08/14 14:39	2022/08/15 12:45	He	close	COLD	[098013730', '098013740', '098013750', '098013800', '098013810']
15	MXS 試験 (mid)	MXS3, 55Fe	2022/08/15 13:50	2022/08/16 04:17	He	close	COLD	[098013810', '098013820', '098013830', '098013840', '098013850', '098013900', '098013910', '098013920']
16	MXS 試験 (mid)	MXS3, 55Fe	2022/08/16 05:21	2022/08/17 09:45	He	close	COLD	[098013920', '098013930', '098013940', '098013950', '098014000', '098014010', '098014020', '098014030', '098014040', '098014050', '098014100', '098014110', '098014120', '098014130']
17	性能確認	FW 55Fe	2022/08/17 09:45	2022/08/19 15:00	He	close	HOT	[098014150', '098014200', '098014210']
18	性能確認	FW 55Fe	2022/08/19 20:30	2022/08/20 05:00	He	close	HOT	[098014220', '098014230', '098014240']
19	MXS 試験 (dim)	MXS1, 55Fe	2022/08/20 11:20	2022/08/20 17:45	He	close	HOT	[098014240', '098014250]
20	MXS 試験 (bright)	MXS1, 55Fe	2022/08/20 18:04	2022/08/20 20:07	He	close	COLD	[098014250']
21	MXS 試験 (wide length)	MXS1	2022/08/20 20:20	2022/08/20 23:10	He	close	COLD	[098014250', '098014300', '098014310']
22	MXS 試験 (bright)	MXS1, 55Fe	2022/08/20 23:23	2022/08/21 07:59	He	close	COLD	[098014320', '098014330', '098014340', '098014350']
23	性能確認	FW 55Fe	2022/08/21 08:40	2022/08/21 21:14	He	close	COLD	[098014430', '098014440', '098014450', '098014500', '098014510', '098014520']
24	性能確認	FW 55Fe	2022/08/22 15:00	2022/08/23 08:05	He	close	COLD	[098014530', '098014540', '098014550', '098014600']
25	性能確認	FW 55Fe	2022/08/23 15:00	2022/08/24 00:30	He	close	COLD	[098014600', '098014610]
26	MXS 試験 (super dim)	MXS1, 55Fe	2022/08/24 00:30	2022/08/24 04:00	He	close	COLD	[098014600', '098014610', '098014620]
27	MXS 試験 (long spacing)	MXS1, 55Fe	2022/08/24 04:00	2022/08/24 08:15	He	close	COLD	[098014620', '098014630]
28	MXS 試験 (super dim)	MXS1, 55Fe	2022/08/24 09:23	2022/08/24 15:36	He	close	HOT	[098014640', '098014650]
29	MXS 試験 (wide length)	MXS3, 55Fe	2022/08/24 18:05	2022/08/24 23:03	He	close	HOT	[098014650', '098014700', '098014710]
30	MXS 試験 (bright)	MXS3, 55Fe	2022/08/24 23:15	2022/08/25 05:35	He	close	HOT	[098014710', '098014720]
31	MXS 試験 (super dim)	MXS3, 55Fe	2022/08/25 05:49	2022/08/25 09:05	He	close	HOT	[098014720', '098014730', '098014740', '098014750', '098014800']
32	MXS 試験 (long spacing)	MXS3	2022/08/25 09:49	2022/08/26 00:05	He	close	HOT	[098014800']
33	MXS 試験	MXS4	2022/08/26 00:50	2022/08/26 02:00	He	close	HOT	[098014950]
34	MXS 試験	MXS2	2022/08/27 20:15	2022/08/27 22:02	He	close	COLD	[098014950]
35	MXS 試験	MXS4	2022/08/27 22:02	2022/08/27 23:28	He	close	COLD	[098015010', '098015020', '098015030]
36	性能確認	FW 55Fe	2022/08/28 05:30	2022/08/28 13:00	He	close	COLD	[098015030']
37	MXS 試験	MXS4	2022/08/28 13:23	2022/08/28 15:45	He	close	COLD	

表 4.13. TC9 の X線データ。

	目的	X線源	Start time	Stop time	He/CF	GV	OBSID
1	性能確認	FW 55Fe	2023/02/06 05:10	2023/02/06 21:00	He	close	['098031210', '098031220', '098031230', '098031240', '098031250']
2	性能確認	FW 55Fe	2023/02/06 23:00	2023/02/07 01:13	He	close	['098031250', '098031300']
3	性能確認	FW 55Fe	2023/02/07 23:00	2023/02/08 02:15	He	close	['098031350', '098031400']
4	性能確認	FW 55Fe	2023/02/08 11:53	2023/02/09 00:35	He	close	['098031420', '098031430', '098031440', '098031450', '098031500']
5	性能確認	FW 55Fe	2023/02/09 17:23	2023/02/10 02:07	He	close	['098031540', '098031550', '098031600']
6	性能確認	FW 55Fe	2023/02/10 14:15	2023/02/11 01:03	He	close	['098031630', '098031640', '098031650', '098031700']
7	性能確認	FW 55Fe	2023/02/12 09:00	2023/02/13 02:07	CF	close	['098031820', '098031830', '098031840', '098031850', '098031900']
8	性能確認	FW 55Fe	2023/02/13 08:15	2023/02/14 23:00	CF	close	['098031920', '098031930', '098031940', '098031950', '098032000', '098032010', '098032020', '098032030', '098032040', '098032050']

表 4.14. TC10 の X線データ。

	目的	X線源	Start time	Stop time	He/CF	GV	OBSID
1	性能確認	FW 55Fe	2023/03/25 16:23	2023/03/25 18:45	He	close	['098035940']
2	性能確認	FW 55Fe	2023/03/26 17:40	2023/03/26 21:00	He	close	['098036040', '098036050']
3	性能確認	FW 55Fe	2023/03/27 09:18	2023/03/28 00:39	He	close	['098036120', '098036130', '098036140', '098036150', '098036200']
4	性能確認	FW 55Fe	2023/03/28 08:17	2023/03/28 23:00	He	close	['098036220', '098036230', '098036240', '098036250']
5	性能確認	FW 55Fe	2023/03/29 15:20	2023/03/30 02:13	He	close	['098036330', '098036340', '098036350', '098036400']
6	性能確認	FW 55Fe	2023/03/30 19:08	2023/03/31 04:00	He	close	['098036440', '098036450', '098036500', '098036510']

表 4.15. MXS direct mode のときのデータセット。

Side	フィルタ	LED番号	Start time	Stop time	正味の時間(s)	LED_PLS_LEN	LED_PLS_SPC	LLED	GV	He/CF	OBSID	
1	リダundant	OPEN	3	2022/06/09 08:19:20	2022/06/09 10:23:17	7437	1	93.75	1.38	close	He	[098007020', '098007030', '098007040', '098007050', '098007100', '098007110', '098007120']
2	ノミナル	OPEN	1	2022/06/09 10:52:57	2022/06/10 09:37:25	81868	1	93.75	1.34	close	He	[098007120', '098007130', '098007140', '098007150', '098007200']
3	リダundant	OPEN	3	2022/06/10 09:56:32	2022/06/11 00:37:37	52864	1	93.75	1.38	close	He	[098007220', '098007230', '098007240', '098007250', '098007300']
4	リダundant	OPEN	3	2022/06/11 08:21:52	2022/06/11 10:24:16	7342	1	1562.5	0.93	close	He	[098007330', '098007340', '098007350', '098007400']
5	ノミナル	OPEN	1	2022/06/11 10:45:39	2022/06/12 01:37:43	53524	1	1562.5	1.03	close	He	[098007400', '098007410']
6	ノミナル	OPEN	1	2022/06/12 12:53:04	2022/06/13 00:53:21	43216	1	93.75	1.34	close	He	[098007420', '098007430', '098007440', '098007450']
7	リダundant	OPEN	3	2022/06/13 03:36:54	2022/06/13 06:34:12	10637	1	140.625	2.60	close	He	[098007530', '098007540', '098007550', '098007600']
8	ノミナル	OPEN	1	2022/06/13 11:37:28	2022/06/13 23:03:03	41134	1	140.625	2.55	close	He	[098007620', '098007630', '098007640', '098007650', '098007700']
9	リダundant	OPEN	3	2022/06/14 12:54:12	2022/06/15 00:48:36	42863	1	93.75	1.38	close	He	[098007720', '098007730', '098007740', '098007750', '098007800']
10	ノミナル	OPEN	1	2022/06/15 11:58:11	2022/06/16 00:38:33	45621	1	1562.5	1.03	close	He	[098011720', '098011730', '098011740', '098011750', '098011800']
11	リダundant	OPEN	3	2022/06/16 08:03:45	2022/06/17 00:47:13	60207	1	1562.5	0.93	close	He	[098011820', '098011830', '098011840', '098011850', '098011900']
12	ノミナル	OPEN	1	2022/07/26 09:19:08	2022/07/27 00:32:59	54831	1	93.75	1.34	close	He	[098013150', '098013200', '098013210', '098013220', '098013230']
13	リダundant	OPEN	3	2022/07/27 11:42:50	2022/07/28 00:43:07	46817	1	93.75	1.38	close	He	[098013230', '098013240', '098013250']
14	ノミナル	FW 55Fe	1	2022/08/09 21:06:32	2022/08/10 12:55:37	56945	15.875	31.25	1.49	close	He	[098013300', '098013310', '098013320', '098013330']
15	ノミナル	FW 55Fe	1	2022/08/10 13:34:47	2022/08/10 23:33:41	35933	1	468.75	4.23	close	He	[098013330', '098013340', '098013350']
16	ノミナル	FW 55Fe	1	2022/08/11 00:15:31	2022/08/11 01:29:56	4464	1	468.75	4.23	close	He	[098013350', '098013400']
17	ノミナル	FW 55Fe	1	2022/08/11 06:42:49	2022/08/11 15:31:00	31691	15.875	31.25	1.49	close	He	[098013600', '098013610', '098013620', '098013630']
18	ノミナル	OPEN	1	2022/08/11 15:32:02	2022/08/11 20:31:00	17937	1	78.125	1.64	close	He	[098013630', '098013640', '098013650']
19	ノミナル	OPEN	1	2022/08/11 20:32:02	2022/08/12 01:12:55	16852	1	468.75	4.23	close	He	[098013700', '098013710', '098013720', '098013730']
20	ノミナル	FW 55Fe	1	2022/08/14 03:15:34	2022/08/14 13:43:38	37684	1	656.25	1.34	close	He	
21	ノミナル	FW 55Fe	1	2022/08/14 14:31:30	2022/08/15 12:41:52	79821	1	468.75	1.95	close	He	

22	リダンダント	FW 55Fe	3	2022/08/15 13:38:26	2022/08/16 04:17:33	52747	0.5	656.25	1.84	close	He	['098013730', '098013740', '098013750', '098013800', '098013810']
23	リダンダント	FW 55Fe	3	2022/08/16 05:21:30	2022/08/17 09:08:31	100022	1	468.75	1.38	close	He	['098013810', '098013820', '098013830', '098013840', '098013850', '098013900', '098013910', '098013920']
24	ノミナル	FW 55Fe	1	2022/08/20 11:53:12	2022/08/20 20:07:20	29648	1	468.75	1.91	close	He	['098014220', '098014230', '098014240', '098014250']
25	ノミナル	FW 55Fe	1	2022/08/20 20:20:10	2022/08/20 23:09:53	10182	2	937.5	1.96	close	He	['098014250']
26	ノミナル	FW 55Fe	1	2022/08/20 23:23:06	2022/08/20 23:59:59	2213	1	78.125	1.34	close	He	['098014250']
27	ノミナル	FW 55Fe	1	2022/08/24 00:48:35	2022/08/24 03:59:58	11482	1	468.75	1.05	close	He	['098014600']
28	ノミナル	OPEN	1	2022/08/24 04:33:43	2022/08/24 07:59:58	12375	1	1562.5	1.49	close	He	['098014610']
29	リダンダント	FW 55Fe	3	2022/08/25 00:00:00	2022/08/25 03:59:58	14397	0.5	78.125	1.84	close	He	['098014700']
30	リダンダント	FW 55Fe	3	2022/08/25 08:00:00	2022/08/25 09:05:45	3944	1	468.75	0.93	close	He	['098014720']
31	リダンダント	OPEN	3	2022/08/25 09:49:10	2022/08/26 00:50:16	54065	1	1562.5	1.38	close	He	['098014720', '098014730', '098014740', '098014750', '098014800']
32	リダンダント	FW 55Fe	3	2022/08/24 09:21:51	2022/08/24 15:36:56	22505	1	468.75	1.08	close	He	['098014620', '098014630']
33	リダンダント	FW 55Fe	3	2022/08/24 15:52:43	2022/08/24 18:33:49	9666	1	703.125	2.60	close	He	['098014630', '098014640']
34	リダンダント	FW 55Fe	3	2022/08/24 18:48:58	2022/08/24 23:03:12	15253	2	937.5	1.38	close	He	['098014640', '098014650']
35	リダンダント	FW 55Fe	3	2022/08/24 23:16:02	2022/08/25 05:34:53	22731	0.5	78.125	1.84	close	He	['098014650', '098014700', '098014710']
36	リダンダント	OPEN	3	2022/08/25 12:00:00	2022/08/25 23:59:58	43198	1	1562.5	1.38	close	He	['098014730', '098014740', '098014750']
37	ノミナル	FW 55Fe	1	2023/02/07 14:00:10	2023/02/07 14:42:03	2513	1.5	93.75	4.99	close	He	['098031330']
38	ノミナル	FW 55Fe	1	2023/02/07 15:08:57	2023/02/07 16:19:08	4211	1	468.75	2.71	close	He	['098031330', '098031340']
39	ノミナル	OPEN	1	2023/02/07 16:55:43	2023/02/07 20:36:36	13253	0.875	78.125	0.42	close	He	['098031340', '098031350']
40	ノミナル	OPEN	1	2023/02/07 20:52:38	2023/02/07 21:54:12	3694	0.875	78.125	0.42	close	He	['098031350']
41	ノミナル	OPEN	1	2023/02/07 22:05:33	2023/02/07 22:25:19	1186	0	0	0.00	close	He	['098031350']
42	ノミナル	OPEN	1	2023/02/07 22:38:44	2023/02/08 00:00:01	4877	0.875	78.125	0.42	close	He	['098031350', '098031400']
43	ノミナル	OPEN	1	2023/03/30 08:59:00	2023/03/30 09:46:57	2877	0.875	531.25	0.42	close	He	['098036420']

表 4.15. MXS indirect mode のときのデータセット。

	Side	フィルタ	LED番号	Start time	Stop time	正味の時間	LED_PLS_LEN	LED_PLS_SPC	I_LED	GV	He/CF	OBSID
1	ノミナル	OPEN	2	2022/08/28 20:15:35	2022/08/28 22:02:17	6401	3.125	15.625	17.96	close	He	['098015050']
2	リダンダント	OPEN	4	2022/08/29 13:22:03	2022/08/29 15:33:41	7897	3.125	15.625	9.09	close	He	['098015130']

4.2.2 打ち上げ後のデータ

打ち上げ後のコミッションング期間中のデータセットをまとめた(表 4.16)。各データのシークエンス番号を QL OBSID としている。BS (Blank Sky) とは、天体が視野にないときのデータである。主にノイズデータを取得して検出器の性能を確認するための指向である。Cor1 とは、衛星の指向方向を微調整したときのデータである。また offset とは、データレコーダの消費を抑制するために明るい天体から一時的に退避させたときのデータである。

表 4.16. ゲートバルブ開前の軌道上データ。較正源の列は、c が連続、i が間欠照射を示す。

	Target	Start time	Stop time	FW Fe55	MXS1	MXS3	QLOBSID
1	BS	2023/10/06 09:00	2023/10/09 01:59				00300535A, 00310355A, 00320355A
2	Abell2319_BS	2023/10/09 01:59	2023/10/11 09:04				00320355B, 00330355A, 00340356A,
		2023/10/11 09:04	2023/10/12 07:23	i			00350216A
		2023/10/12 07:23	2023/10/13 23:50	c			00360216A, 00370217A
3	Abell2319	2023/10/14 07:25	2023/10/15 05:44	i			00380037A
		2023/10/15 05:44	2023/10/16 05:45	c			00390037A
		2023/10/16 05:45	2023/10/17 01:28	i			00400037A
4	Abell2319_Cor1	2023/10/17 01:28	2023/10/18 04:04	i			00412257A
		2023/10/18 04:04	2023/10/19 05:47	c			00412257B
		2023/10/19 05:47	2023/10/19 23:45	i			00422258A
5	Abell2319	2023/10/19 23:45	2023/10/20 05:48				00422258B
		2023/10/20 05:48	2023/10/21 05:54	i			00432259A
		2023/10/21 05:54	2023/10/23 20:30				00442118A, 00452118A, 00462119A
6	Abell2319_BS	2023/10/23 20:29	2023/10/27 00:48				00462119B, 00471939A, 00481939A,
		2023/10/27 00:48	2023/10/28 23:06		i		00501940A, 00511759A
		2023/10/28 23:06	2023/10/29 23:07				00521759A
		2023/10/29 23:07	2023/10/31 13:50	i	i		00531800A, 00541619A, 00561620A
7	1E0102.2-7219	2023/11/01 13:50	2023/11/03 15:30	i	i		00561620B, 00571620A
8	Abell2319_BS	2023/11/03 15:30	2023/11/03 20:29	i			00571620B
9	Cygnus_X-1	2023/11/03 20:29	2023/11/03 23:49	i	i		00571620C, 00581944A
10	Cygnus_X-1_BS	2023/11/03 23:49	2023/11/04 14:00				00581944B
11	Cygnus_X-1	2023/11/04 14:00	2023/11/04 21:40				00581944C, 00591439A
12	1E0102.2-7219	2023/11/04 21:40	2023/11/05 19:47		i		00591439B
13	Abell2319_BS	2023/11/06 13:10	2023/11/07 19:40	i	i		00611259A
14	PKS_0745-19	2023/11/08 18:07	2023/11/10 18:07	i	i		00631259A, 00641300A
		2023/11/10 18:07	2023/11/11 12:00	c	i		00651119A
15	Abell2319_BS	2023/11/11 12:00	2023/11/12 16:27	c	i		00651119B, 00661119A
		2023/11/13 16:29	2023/11/14 10:25				00680939A
		2023/11/15 14:46	2023/11/16 12:05				00700939A
16	LMC_X-3	2023/11/16 12:05	2023/11/17 13:50				00700939B, 00710939A
17	AO_Psc	2023/11/17 13:50	2023/11/19 13:06				00710939B, 00720758A, 00731303A,
							00731303B
18	Z_Cam	2023/11/19 13:06	2023/11/20 13:06	i	i		00740758A, 00740758B
19	1E0102.2-7219	2023/11/20 13:06	2023/11/21 11:25	i	i		00750618A, 00750618B
20	LMC_X-3	2023/11/21 11:25	2023/11/23 01:19				00760617A, 00760617B, 00770618A
21	Eta_Carinae	2023/11/23 01:19	2023/11/24 11:25				00770618B, 00780618A, 00780618B
22	PSR_B1937+21	2023/11/24 11:25	2023/11/30 08:04				00790437A, 00790437B, 00800437A,
							00810437A, 00820256A, 00830259A,
							00840256A, 00840256B

23	LMC_X-3	2023/11/30 08:04	2023/12/03 06:23			00850116A, 00860115A, 00870115A, 00870115B
24	NGC4151	2023/12/03 06:23	2023/12/04 06:25	i		00880115A, 00880115B
25	N132D	2023/12/04 06:25	2023/12/07 04:42	i		00882334A, 00892334A, 00902333A, 00902333B
26	PKS2155-304	2023/12/07 04:42	2023/12/10 03:00	i		00912334A, 00922152A, 00932152A, 00932152B
27	N132D	2023/12/10 03:00	2023/12/12 01:19	i		00942152A, 00952011A, 00952011B
28	Cas_A_SE	2023/12/12 01:19	2023/12/16 23:39			00962155A, 00991830A, 00972011A, 01001829A, 00982011A, 01001829B
29	Cas_A_NW	2023/12/16 23:39	2023/12/20 21:55			01011829A, 01041648A, 01041648B
30	RESOLVE_THERM1	2023/12/20 21:55	2023/12/21 21:58	c		01051650A, 01051650B
31	RESOLVE_THERM2	2023/12/21 21:58	2023/12/22 20:16	c		01061650A, 01061650B
32	RESOLVE_THERM3	2023/12/22 20:16	2023/12/23 20:14	c		01071509A, 01071509B
33	RESOLVE_THERM4	2023/12/23 20:14	2023/12/24 20:16	c		01081508A, 01081508B
34	RESOLVE_THERM5	2023/12/24 20:16	2023/12/24 23:00	i		01091325A
35	1E0102.2-7219	2023/12/24 23:00	2023/12/26 17:10	i		01091325B, 01101324A
36	NGC4151	2023/12/26 17:10	2023/12/28 00:00	i		01101324B, 01111324A, 01121324A
37	Centaurus_Cluster	2023/12/28 00:00	2024/01/04 00:00	i		01121324B, 01131143A, 01141142A, 01151142A, 01161142A, 01171000A, 01181000A, 01191000A
38	Vela_X-1	2024/01/04 00:00	2024/01/06 00:00	i		01191000B, 01191000C, 01200819A, 01200819B, 01200819C, 01200819D, 01210818A, 01210818B
39	3C273	2024/01/06 00:00	2024/01/08 14:39	i		01210818C, 01220817A, 01230817A, 01240636A
40	Abell2029	2024/01/08 14:39	2024/01/15 00:00	i		01240636B, 01240636C, 01250638A, 01250638B, 01250638C, 01260637A, 01260637B, 01270457A, 01280456A, 01280456B
41	Abell2319_BS	2024/01/15 00:00	2024/01/21 00:30	c		01300454B, 01310454A, 01320313A, 01330312A, 01340131A, 01350127A, 01360127A
42	Perseus	2024/01/21 00:30	2024/01/29 16:58	i		01360127B, 01360127B, 01370127A, 01370127B, 01382345A, 01390126A, 01402344B, 01402344C, 01412203A, 01412202A, 01412202B, 01422201A, 01432200A, 01442019A
43	V834_Cen	2024/01/29 16:58	2024/02/02 08:15	i		01442019B, 01452018A, 01462017A, 01472017A, 01481835A
44	Tycho_NW	2024/02/02 08:15	2024/02/05 22:42	i		01481835B, 01491834A, 01501834A, 01511653A, 01521651A
45	MCG-6-30-15	2024/02/05 22:42	2024/02/08 11:16	i		01521651B, 01531651A, 01541650A
46	Circinus_Galaxy	2024/02/08 11:16	2024/02/12 18:32	i		01541650B, 01551509A, 01561507A, 01571507A, 01581326A

第 5 章

データ処理

Contents

5.1	軌道上処理	103
5.1.1	ピクセルイベント処理	103
5.1.2	Anti-co イベント処理	111
5.2	地上処理	114
5.2.1	Pre-pipeline 処理	115
5.2.2	Pipeline 処理	115

本章では、*Resolve* 装置によって観測したイベントデータの処理について記述する。§ 5.1 で軌道上処理、§ 5.2 で地上処理に分けて記述する。§ 5.1 では Ishisaki et al. 2018、Kilbourne et al. 2018b、Groom, Mikhov, and Striganov 2001 を参考にした。§ 5.2 では Terada et al. 2021、Eguchi et al. 2022、Doyle et al. 2022、阿部 2010、神頭 2010 を参考にした。

5.1 軌道上処理

本節では、マイクロカロリメータのピクセルイベントと、anti-co イベントの軌道上処理について述べる。

5.1.1 ピクセルイベント処理

5.1.1.1 パルス検出

PSP の MIO (FPGA) ボードは XBOX から 16 bit × 12.5 kHz × 18 チャンネル (MIO ボード 1 枚あたり) のデジタルデータを受け取る。16 bit のうち、14 bit がマイクロカロリメータのアナログ出力をバイポーラ 14 ビットでデジタル化したものである (残り 2 bit はパリティと未使用)。これを `adcSample` と呼ぶ。まず、この時間微分 `derivative` を以下のように計算する。`derivative` を用いることで、波形のオフセットを 0 にすることができる。微分は 8 sample 幅のボックスカーフィルタをかけることで行う。すなわち、時刻 i sample での微分値は以下で計算する。

$$\text{derivative}(i) = \sum_{i'=0}^7 \text{adcSample}(i + i') - \sum_{i'=-8}^{-1} \text{adcSample}(i + i') \quad (5.1)$$

`adcSample` と `derivative` の典型的な時間変動を図 5.1 に示し、パルス波形の各時刻を以下に示す。

- t_0 : `derivative` が閾値を超えて検出される時刻
- t_1 : `derivative` が最大値をとる時刻
- t_2 : t_1 の後の `derivative` のゼロクロス時刻
- t_3 : `derivative` が最小値をとる時刻
- t_4 : t_3 の後に `derivative` が正の値をとる時刻
- t_5 : t_4 の後に `derivative` が極大値をとる時刻
- t_6 : `adcSample` が最大値をとる時刻
- t_7 : `adcSample` が最小値をとる時刻

それぞれ特徴的な立ち上がりと減衰の時間スケールは、`adcSample` が約 2 ms と 3 ms、`derivative` が 2 ms と 1.2 ms である。いずれもピークの後は深く長いアンダーシュートが続く。`derivative` がイベント検出の閾値 (地上試験及び軌道上 2023/10/31 までは 75、それ以降は 120 に設定された; 表 3.2) を超えた時にイベント検出となる。これらの処理は FPGA で行う。

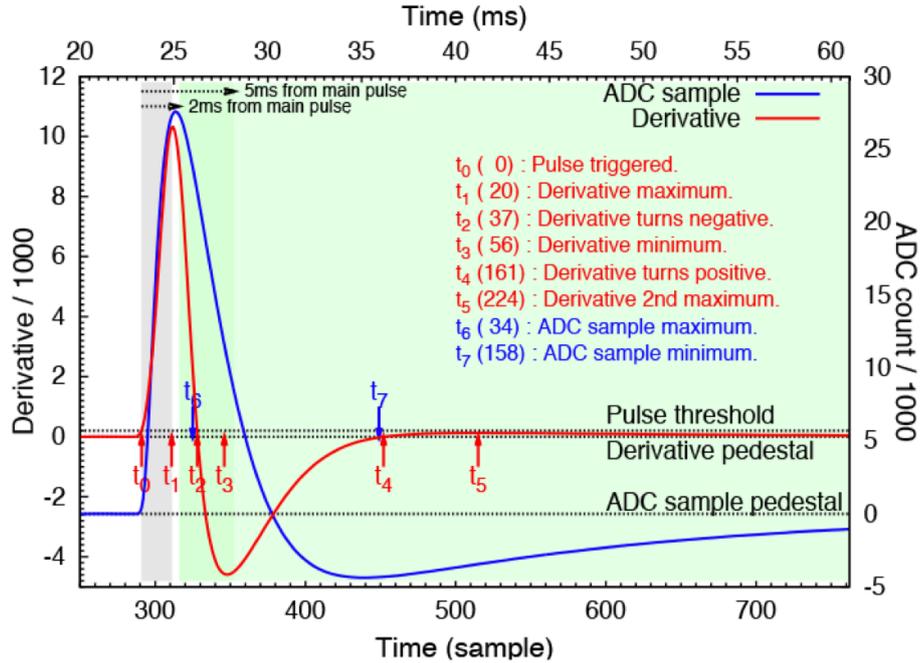


図 5.1. ピクセルイベントの生波形 (adcSample) とその微分波形 (derivative)。 $t_2 \neq t_6$ であるのは、この図では式 5.2 による位相遅延を補償していないからである。

更に、CPU を用いてセカンダリーイベントの検出を行う。セカンダリーイベントとは、プライマリーパルスが立ち下がる前に検出されたイベントである。このイベントの検出は、パルス波形からプライマリーイベントに規格化された標準波形を引いた残差波形を用いて行われる。残差波形は、通常のパルス波形と同じと仮定している。この仮定により、残差波形 $adcSample_{sub}$ と残差波形の微分波形 $derivative_{sub}$ は、それぞれ式 5.2 と式 5.3 で表される。

$$adcSample_{sub}(i) = adcSample(i) - \sum_{n=0}^N \frac{LO_RES_PH_n}{LO_RES_PH_{ave}} adcSample_{ave}(i - \Delta i_n) \quad (5.2)$$

$$derivative_{sub}(i) = derivative(i) - \sum_{n=0}^N \frac{DERIV_MAX_n}{DERIV_MAX_{ave}} derivative_{ave}(i - \Delta i_n) \quad (5.3)$$

ここで $adcSample(i)$ と $derivative(i)$ は、観測されたパルス波形と微分波形、 $LO_RES_PH_n$ と $DERIV_MAX_n$ は n 番目のパルスの LO_RES_PH と $DERIV_MAX$ を示す。 $adcSample_{ave}$ と $LO_RES_PH_{ave}$ と $DERIV_MAX_{ave}$ は、平均パルスと、その LO_RES_PH と $DERIV_MAX$ 、 N はパルスの数、 Δi_n は、 n 番目のパルス波形のタイムシフトである (§ 5.1.1.4 で説明する)。タイムシフトは、微分値が最大となる時刻がパルスとテンプレートの間で同じになるように決定される。セカンダリーパルスは、 $derivative_{sub}(i)$ が閾値を超えたときにトリガーされる。通常はプライマリーパルスと同じ閾値が用いられる。直前のパルスの微分値が最大となった時刻から 2 つ目のセカンダリーパルスをトリガーするまでのサンプル間は、セカンダリーパルスの探索は行われない。

5.1.1.2 X線イベントグレード判定

X線イベントグレードとは、マイクロカロリメータ検出器の同じピクセルの中で、検出した 1 個前のピクセルイベントと 1 個後のピクセルイベントとの間隔によって決まるフラグである (図 5.2)。間隔が長いほど、パルスが時間的に独立するため、エネルギー決定精度が高い。

イベントグレードには、エネルギー決定精度が高い順に、High resolution primary (Hp)、Mid resolution primary (Mp)、Mid resolution secondary (Ms)、Low resolution primary (Lp)、Low resolution secondary (Ls) の5種類が存在し、それぞれピクセルイベントファイルの TYPE と ITYPE に書き込まれている (表 4.3)。サイエンス目的によってどのグレードのイベントを使うか選択できる。精密分光に用いることができるのは、Hp, Mp, (Ms) グレードまでである。

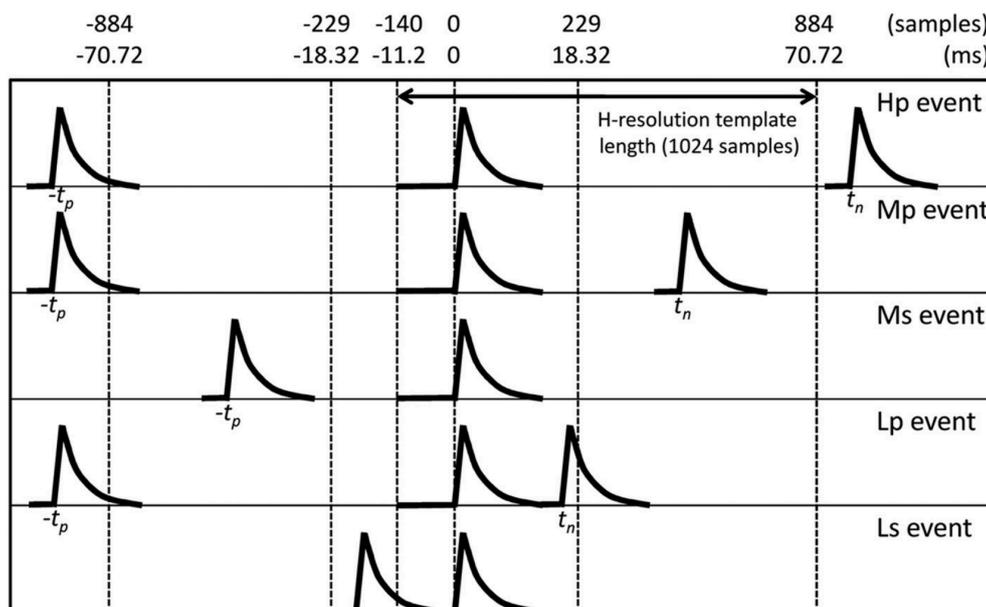


図 5.2. イベントグレードの定義 (Ishisaki et al., 2018)。

1 sample を $80 \mu\text{s}$ (12.5 kHz) で定義し、グレード分けの間隔を以下のように分類する (図 5.2)。

- Hp 1 個前のピクセルイベント到来時刻が 1024 sample 以上離れ、かつ、次のピクセルイベントパルスの到来時刻よりも 1024 sample 以上離れるとき、そのピクセルイベントを Hp として分類する。このイベントグレードは、high resolution template による最適フィルタリング処理が行われる。
- Mp 1 個前のピクセルイベントパルス到来時刻が 1024 sample 以上離れ、かつ、次のピクセルイベントパルスの到来時刻が 229 sample 以上 884 sample 未満離れるとき、そのピクセルイベントを Mp として分類する。このイベントグレードは、mid resolution template による最適フィルタリング処理が行われる。
- Ms 1 個前のピクセルイベントパルスの到来時刻が 229 sample 以上 884 sample 未満離れる時、その X 線イベントを Ms として分類する。このイベントグレードは、mid resolution template による最適フィルタリング処理が行われる。
- Lp 1 個前のピクセルイベントパルスの到来時刻が 1024 sample 以上離れ、かつ、次のピクセルイベントパルスの到来時刻が 229 sample 未満であったとき、そのピクセルイベントを Lp として分類する。このイベントグレードは、最適フィルタリング処理は行わず、到来時刻にはパルスの極大値の時刻を、エネルギーには `adcSample` 値の最大値を用いる。
- Ls 1 個前のピクセルイベントパルスの到来時刻が 229 sample 未満のとき、そのピクセルイベントを Ls として分類する。このイベントグレードは、最適フィルタリング処理は行わず、到来時刻にはパルスの極大値の時刻を、エネルギーには `adcSample` 値の最大値を用いる。

X 線イベントグレードは、X 線カウントレートが大きくなるに従って、全体のイベント数に対するグレードの割

合が変わる。この割合を Branching Ratio (BR) と呼ぶ。BR の理論式は、式 5.8 で表される。

$$\mathbf{Hp} : \exp(-2\nu\Delta t_{\text{HR}}) \quad (5.4)$$

$$\mathbf{Mp} : \exp(-\nu\Delta t_{\text{HR}}) \{ \exp(-\nu\Delta t_{\text{MR}}) - \exp(-\nu\Delta t_{\text{HR}}) \} \quad (5.5)$$

$$\mathbf{Ms} : \exp(-\nu\Delta t_{\text{MR}}) (\exp(-\nu\Delta t_{\text{MR}}) - \exp(-\nu\Delta t_{\text{HR}})) \quad (5.6)$$

$$\mathbf{Lp} : \exp(-\nu\Delta t_{\text{HR}}) \{ 1 - \exp(-\nu\Delta t_{\text{MR}}) \} \quad (5.7)$$

$$\mathbf{Ls} : \{ 1 - \exp(-\nu\Delta t_{\text{MR}}) \} \{ 1 + \exp(-\nu\Delta t_{\text{MR}}) - \exp(-\nu\Delta t_{\text{HR}}) \} \quad (5.8)$$

ν は X 線光子の平均カウントレートであり、ポアソン統計に従うとする。 Δt_{HR} と、 Δt_{MR} は、それぞれ high resolution template と mid resolution template のサンプルサイズ (1024 sample と、256 sample) から、パルス検知前のサンプル数 (150 sample と、37 sample) を引いた値である。SXS 装置の軌道上の BR は、理論式とよく一致していることが確認されている (図 5.3)。

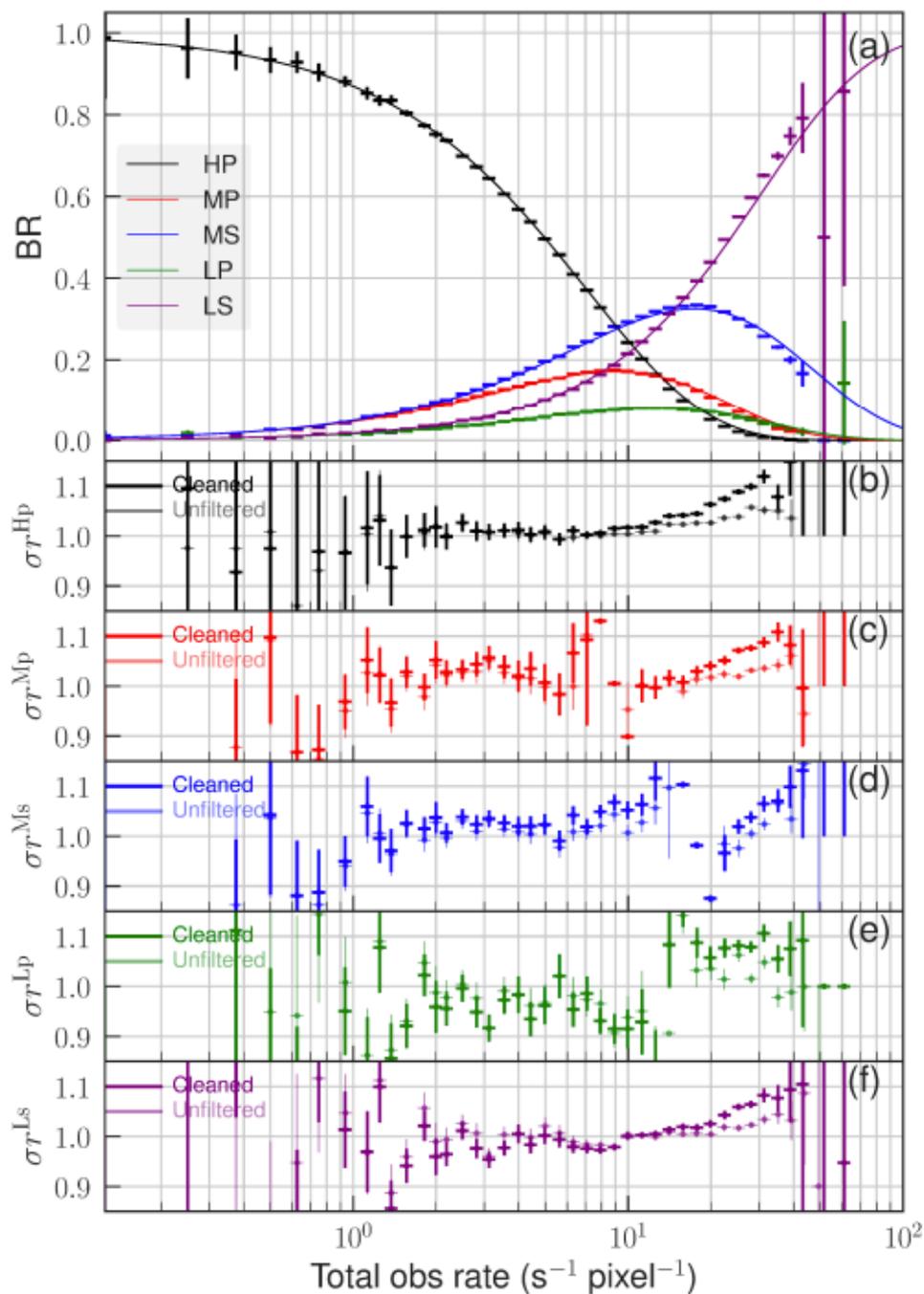


図 5.3. SXS 装置の軌道上データの BR と理論式との残差 (Tsujiimoto et al., 2018b)。

5.1.1.3 最適フィルタ処理

衛星プラットフォームの場合、通信データ容量の制約が厳しいため、データを軌道上で処理し、その特徴量だけをダウンリンクする。このときに用いられるのが最適フィルタリング処理である。観測データのフーリエ変換を $D(\omega)$ 、パルスのテンプレートである平均パルス波形のフーリエ変換を $S(\omega)$ 、ノイズのフーリエ変換を $N(\omega)$ 、パルスの推定値を H とおくと、以下の式が成り立つ。

$$D(\omega) = HS(\omega) + N(\omega) \tag{5.9}$$

$S(\omega)$ と $N(\omega)$ は事前にわかっているため、最適な H を知ることができれば実際に近いデータ $HS(\omega)$ を得ることができる。そのため最小二乗法を用いる。

$$\chi^2 = \sum_{\omega} \frac{|D(\omega) - HS(\omega)|^2}{|N(\omega)|^2} \tag{5.10}$$

この χ^2 を最小にすればよいので、 $\frac{\partial}{\partial H}\chi^2 = 0$ の極小値となる H は、 $S(\omega)$ 、 $N(\omega)$

$$H = \frac{\sum_{\omega} \frac{D(\omega)S^*(\omega) + D^*(\omega)S(\omega)}{2|N(\omega)|^2}}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2} \tag{5.11}$$

となる。このときに最適フィルタテンプレート $F(\omega)$ を

$$F(\omega) = \frac{S(\omega)}{|N(\omega)|^2} \frac{1}{\sum_{\omega} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2} \tag{5.12}$$

と定義すると、極小値となる H は、

$$H = \sum_{\omega} \frac{D(\omega)F^*(\omega) + D^*(\omega)F(\omega)}{2} \tag{5.13}$$

となり、 $D(\omega)$ と $F(\omega)$ を逆フーリエ変換をすると、

$$H = \sum_t D(t)F(t) \tag{5.14}$$

となる。最適フィルタテンプレート $F(t)$ によってシグナルノイズ比で重み付けをしているため、最適な H を求めることができる。

$S(t, \omega)$ (図 5.4)、 $F(t, \omega)$ (図 5.5)、 $N(t, \omega)$ (図 5.6) は、地上試験で決定したものをミッションを通して用いる。これらは、ピクセルごとに決定されている。また、平均パルス波形は、high (H) resolution、mid (M) resolution grade の 2 種類が用意されており、X線イベントグレードによって使い分ける。

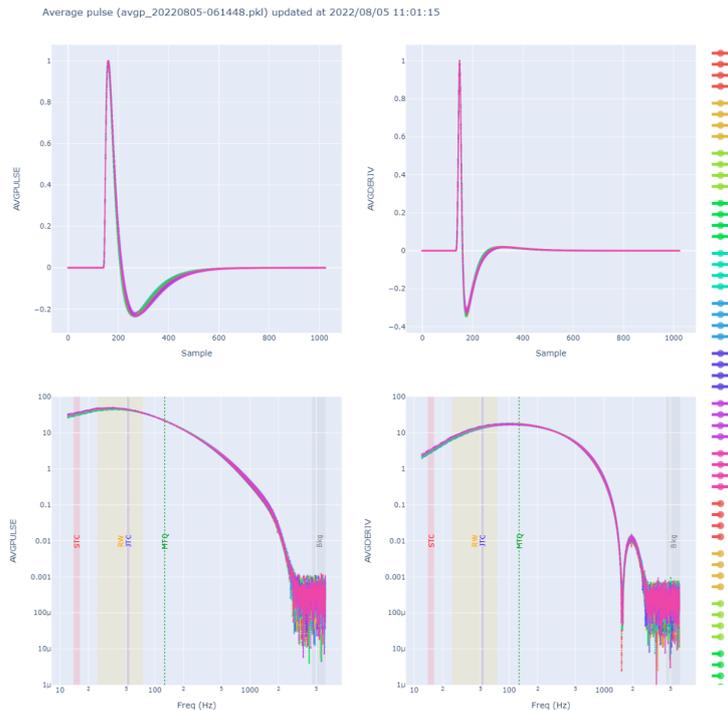


図 5.4. 地上試験データから作成した時系列と周波数空間の平均パルス波形左が adcSample 、右が derivative 。

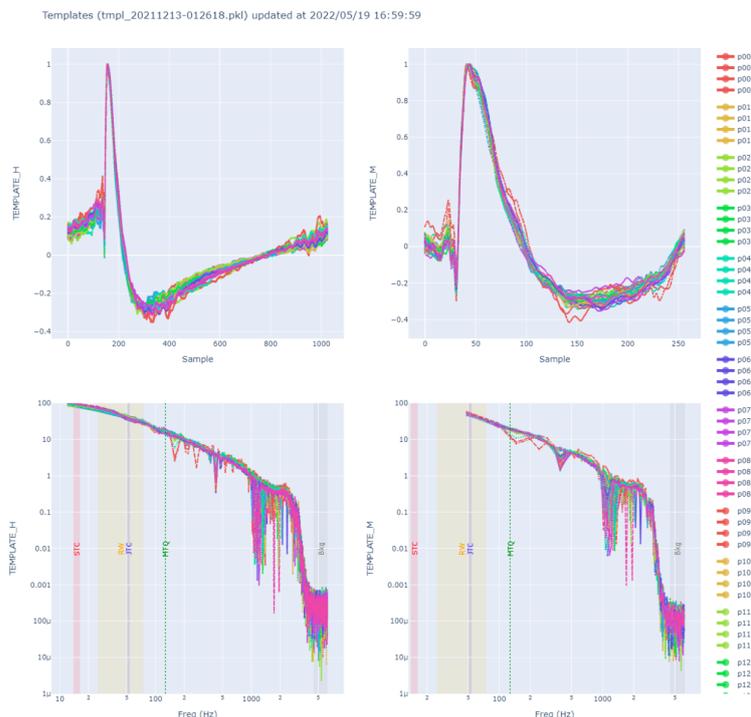


図 5.5. 地上試験データから作成した時系列と周波数空間の最適フィルタリングテンプレート。左が H、右が M グレード。

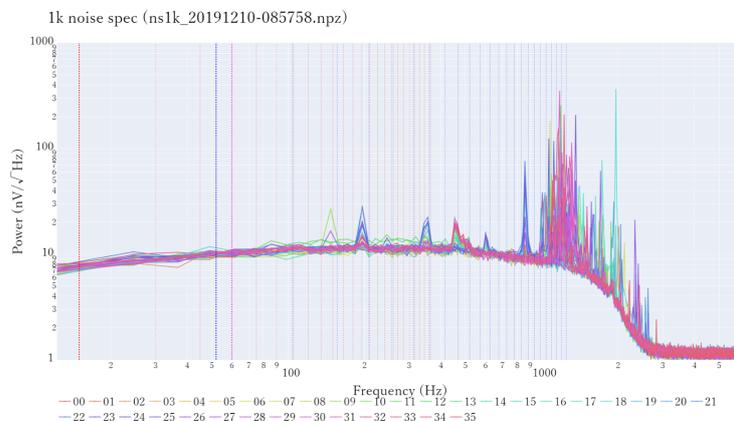


図 5.6. 地上試験データから作成した 1k noise。

5.1.1.4 パルス波形処理

§ 5.1.1.1 で示したアルゴリズムに従って軌道上で検出されたパルスに対し、`adcSample` およびその `derivative` (図 5.1) から以下の特徴量を軌道上で計算し、イベントファイルとして地上にダウンロードされる。

■ `LO_RES_PH` と `DERIV_MAX` `adcSample` の最大値 (図 5.1 の `adcSample(t6)`) とパルス前の平均値の差が `LO_RES_PH`、`derivative` の最大値が `DERIV_MAX` (図 5.1 の `derivative(t1)`) である。いずれもパルスの波高値を表す指標である。どちらも X線のエネルギーによる温度上昇によって変化するパルスの波高値に依存しており、X線のエネルギーが高いほど、これらの値は大きい値をとる。これらの値は、イベントファイルの HDU2 (EVENTS) に書き込まれる。

■RISE_TIME 立ち上がり時間は、微分値が最大となる時刻から、微分値が FallEndThres よりも小さくなるまでの時間として定義される。ここで FallEndThres は 0 であり、ゼロクロス時刻と同等である。立ち上がり時間は、DERIV_MAX を用いて、式 5.15 で計算される。

$$\text{RISE_TIME} = \left\{ t_{\text{DM}} - \frac{1}{2} \left(\frac{\text{derivative}(t_{\text{DM}} + 1) - \text{derivative}(t_{\text{DM}} - 1)}{\text{derivative}(t_{\text{DM}} + 1) + \text{derivative}(t_{\text{DM}} - 1) - 2\text{derivative}(t_{\text{DM}})} \right) \right\} - \left\{ t_{\text{FE}} - \left(1 - \frac{\text{derivative}(t_{\text{FE}} - 1) - \text{FallEndThres}}{\text{derivative}(t_{\text{FE}}) - \text{derivative}(t_{\text{FE}} - 1)} \right) \right\} \quad (5.15)$$

ここで、derivative は微分波形、 t_{DM} は derivative の極大値の時刻 (図 5.1 の (t_1))、 t_{FE} は derivative が 0 の時刻をあらわす (図 5.1 の (t_2))。高い X 線のエネルギーが到来すると、吸収体はすばやく熱化するため、立ち上がり時間は短くなる。

■TICK_SHIFT TICK_SHIFT とは、パルス波形をテンプレート波形でフィッティングする際に、テンプレートを時間方向にどの程度シフトしてフィッティングを行ったかを表す値である。この値は、ピクセルイベントファイル HDU2 (EVENTS) の TICK_SHIFT に書き込まれている。PSP によって計算され、1 sample (80 μ s) の単位をもつ -8 から +7 までの整数値をとる。0 点は、0.1-20 keV の X 線イベントがちょうどビット数に収まるように決められた。ただし、以下の場合には、TICK_SHIFT の値が決められた値をもつ。これらの場合は、TICK_SHIFT による時刻補正は行わない。

- ピクセルイベントが low grade のとき、及び anti-co イベントに対しては、テンプレートフィッティングを行わないため、TICK_SHIFT は 0 とする。
- テンプレートを正方向にどれだけシフトしてもフィッティングができないときは、TICK_SHIFT は +7 をとる
- テンプレートを負方向にどれだけシフトしてもフィッティングができないときは、TICK_SHIFT は -8 をとる

■PHA と TIME_VERNIER Pulse Height Amplitude (PHA) とは式 5.16 によって計算される特徴量である。

$$\text{PHA}(j) = \sum_{i=0}^{\text{テンプレートの長さ}-1} \text{template}(i) \times \text{adcSample}(i + j) \quad (5.16)$$

TICK_SHIFT の間で、パルスを j sample ずつ時間的に前後にシフトさせることによって計算される。各シフトにおいて、PHA 値は $\text{PHA}(j)$ として計算される。ある j で PHA の最大値が見つかったら、直前と直後の値を用いて、PHA が局所的に時間の 2 次多項式で近似されると仮定し、サンプリング周波数のサブ整数分解能である 1/16 sample で、微調整された PHA (PHA_{peak}) と、TIME_VERNIER が計算される (式 5.17、式 5.18)。 PHA_{peak} は、ピクセルイベントファイル HDU2 (EVENTS) の PHA に書き込まれている。

$$\text{PHA}_{\text{peak}} = \text{PHA}(j) + \frac{1}{8} \left(\frac{\{\text{PHA}(j+1) - \text{PHA}(j-1)\}^2}{2\text{PHA}(j) - \text{PHA}(j+1) - \text{PHA}(j-1)} \right), \quad (5.17)$$

$$\text{TIME_VERNIER} = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{PHA}(j+1) - \text{PHA}(j-1)}{2\text{PHA}(j) - \text{PHA}(j+1) - \text{PHA}(j-1)} \right). \quad (5.18)$$

■TIME パルス波形の微分をとった derivative のパルス閾値を超えたときの時刻をイベント到来時の生の時刻として定義し、ピクセルイベントファイルの SAMPLECNTTRIG に書き込まれる (図 5.1 の (t_0))。ピクセルイベント

は、ピクセルやイベントグレードによって系統的なずれが生じる (§ 6.2.1)。このずれを補正した時刻がピクセルイベントファイルの SAMPLECNT に書き込まれる。これら、SAMPLECNT と SAMPLECNTTRIG の時刻は PSP の内部カウンターによって計測された時間である。TICK_SHIFT と TIME_VERNIER を加え、XRISM 衛星のミッション時刻に補正した時間をそれぞれ、ピクセルイベントファイル HDU2 (EVENTS) の TIME と TRIGTIME に書き込まれている。XRISM 衛星のミッション時刻は、2019 年 1 月 1 日からのうるう秒を含まない積算秒数である。

■QUICK_DOUBLE 通常、derivative が立ち上がってから、ある時間まで微分値 (derivative) の値は単調に減少し続けることが予想される。しかし、ごくまれにこの状態の間に別のパルスが到達する場合があります、derivative が増加することがある。このイベントを QUICK_DOUBLE イベントと呼ぶ。QUICK_DOUBLE イベントのフラグは、derivative の値が前の値よりも閾値だけ大きくなったときに 1 にセットされ、ピクセルイベントファイル HDU2 (EVENTS) の QUICK_DOUBLE に書き込まれる。

■SLOW_PULSE SLOW_PULSE とは、以下のいずれかの条件を満たすパルス信号のフラグである。

- 微分波形の最大時刻 - トリガー時刻 > SLOPE_DETECT_LEN
- 微分波形のゼロクロス時刻 - トリガー時刻 > 2 SLOPE_DETECT_LEN

SLOPE_DETECT_LEN は 20 に設定されている。このフラグは primary グレード (Hp, Mp, Lp) のイベントのみにつけられる。主に secondary グレード (Ms, Ls) を対象とする SLOPE_DIFFER (下述) と相補的である。このフラグは後で追加されたため、RISE_TIME (8 ビット) の MSB を間借りして登録される。すなわち、RISE_TIME > 127 の場合、SLOW_PULSE フラグが 1 になると解釈される。

■SLOPE_DIFFER セカンダリーパルスの検索時、平均パルスが不正確なタイムシフトで減算されるときに、偽の二次パルスがあらわれることがある。このような偽のパルスは、通常のパルスよりもアップ・ダウンのタイムスケールが遅いという特徴がある。このようなイベントを SLOPE_DIFFER イベントと呼ぶ。このとき、SLOPE_DIFFER イベントのフラグは 1 にセットされ、ピクセルイベントファイル HDU2 (EVENTS) の SLOPE_DIFFER に書き込まれる。アップタイムは最大微分のエポックからトリガーまでの時間で測定され、ダウンタイムは最大微分のエポックから FALL 状態の終了までの時間で測定される。アップタイムとダウンタイムの両方が slope_detect_len より小さいパルスはセカンダリーパルスとして認識される。偽のセカンダリーパルスが発生した場合は、偽パルスが収束するのを待った後、次の 2 次パルスの探索を再開する。ただし、高エネルギー側では、真のパルスが SLOPE_DIFFER イベントと判定されることがあることに留意する。

5.1.2 Anti-co イベント処理

Anti-co 検出器のパルス波形は、最適フィルタリング処理を行わない。Anti-co イベントの検出条件は、式 5.19 で定義される。

$$\text{adcSample} - \text{acAdcSamplePedestal} > \text{acPulseThres} \quad (5.19)$$

ここで、(acAdcSamplePedestal, acPulseThres) は、PSP-A で (-6616, 25)、PSP-B で (-6615, 25) を用いている。

検出された anti-co 検出器のパルス波形を図 5.7 に示す。この中で、宇宙線イベントであると判断される基準は、パルスの波高値が 71 より大きいサンプルが 2 つ以上連続してくる場合と定義する。すなわち、PHA が 71 より大きく、DURATION が 2 より大きいときである。

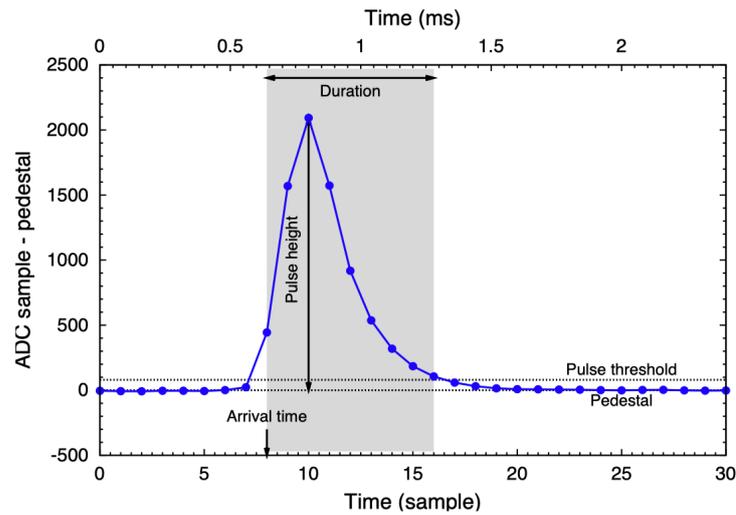


図 5.7. Anti-co イベントのパルス波形。

Anti-co 検出器は1つであるが、読み出しは2つある。それぞれの信号はPSPのAとBで同じように処理される。PSP-Aの中で、PSP-A0かPSP-A1のCPUで処理する。通常はPSP-A0である。Bも同様である。これらの情報は、ラベルに応じた整数値 (A0=0、A1=1、B0=2、B1=3) が anti-co イベントファイルの PSP_ID に書き込まれている。

Anti-co イベントには、ピクセルイベントのようにイベントグレードがラベリングされている。このグレードは、AC、BL、ELの3種類が存在し、anti-co イベントファイルの AC_TYPE と AC_ITYPE に書き込まれている。Anti-co イベントはAC、ベースラインイベントはBL、ロストタイムイベントはELである。

Anti-co 検出器のエネルギースペクトルを図5.8に示す。Anti-co イベントのエネルギーは、適当な係数 a 、 b を用いて、PHAの1次式 ($a + b \cdot \text{PHA}$) によって計算されている。xa_rsl_gainant_*.fitsのHDU2のGAINカラムにはPSP-A0とB0の2行があり、COEF0列、COEF1列にそれぞれの係数 a 、 b が格納されている。PSP-A0の a と b は、それぞれ、0.1874、0.4274であり、PSP-B0の a と b は、それぞれ、-0.2772、0.4265である。たとえば、Anti-co イベントの閾値である $\text{PHA} = 25$ のときは、PSP-A0のエネルギーは、10.9 keV、PSP-B0のエネルギーは、10.4 keVであり、宇宙線イベントとみなす閾値である $\text{PHA} = 71$ のとき、PSP-A0のエネルギーは、30.5 keV、PSP-B0のエネルギーは、30.0 keVである。エネルギー分解能は60 keVで約4.6 keVである。ノイズの実効値(ベースライン分解能)は0.77 keVである。

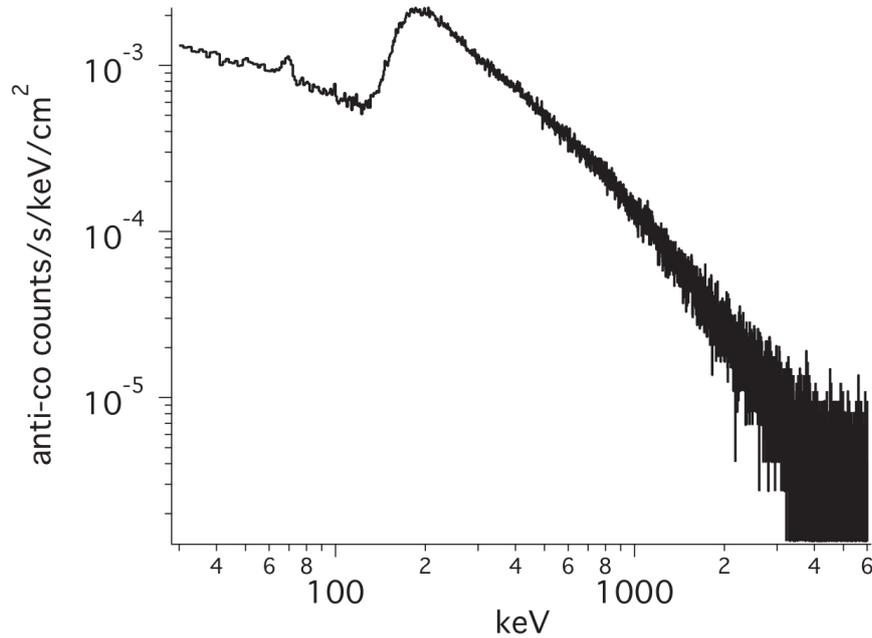


図 5.8. SXS 装置の軌道上 anti-co イベントのエネルギースペクトル Kilbourne et al., 2018b

Anti-co 検出器のエネルギースペクトルには 2 つの盛り上がりを確認することができる。1 つ目は、宇宙線イベントが anti-co 背面の金でできたヒートシンクに照射することで生じる 69 keV の Au K α の蛍光輝線である。2 つ目は、約 200 keV の盛り上がりである。宇宙線イベントのような相対論的粒子は、物質を通過する際に主に電離損失でエネルギーを徐々にデポジットする。この場合、検出器内部の経路長に比例してエネルギーを損失すると近似する。単位経路長 x あたりの損失エネルギー E とすると、その率を阻止力 $S(E)$ と呼び、

$$S(E) = -\frac{dE}{\rho dx} [\text{MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}] \quad (5.20)$$

と定義する。ここで ρ は物質の密度である。阻止力が最小値をとるときのエネルギーをもつ粒子を Minimum Ionizing Particle (MIP) と呼ぶ。すなわち、MIP は、物質を通過する際にデポジットするエネルギーが最小の粒子である。*Resolve* 装置の anti-co 検出器のような Si 検出器に対しては、宇宙線ミューオンや電子が MIP になる。これらに対する Si の阻止力 $S(E)$ は約 $2 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}$ である (Eidelman et al., 2004)。Anti-co 検出器の Si の密度 ρ が約 2 g cm^{-3} 、宇宙線粒子の最短距離となる検出器の厚さ d が 0.05 cm なので、anti-co 検出器にデポジットするエネルギー E_{MIP} は、

$$E_{\text{MIP}} = S(E)\rho d \sim 200 \text{ keV} \quad (5.21)$$

となる。これが anti-co スペクトルに見られる約 200 keV をピークを形成する。

5.2 地上処理

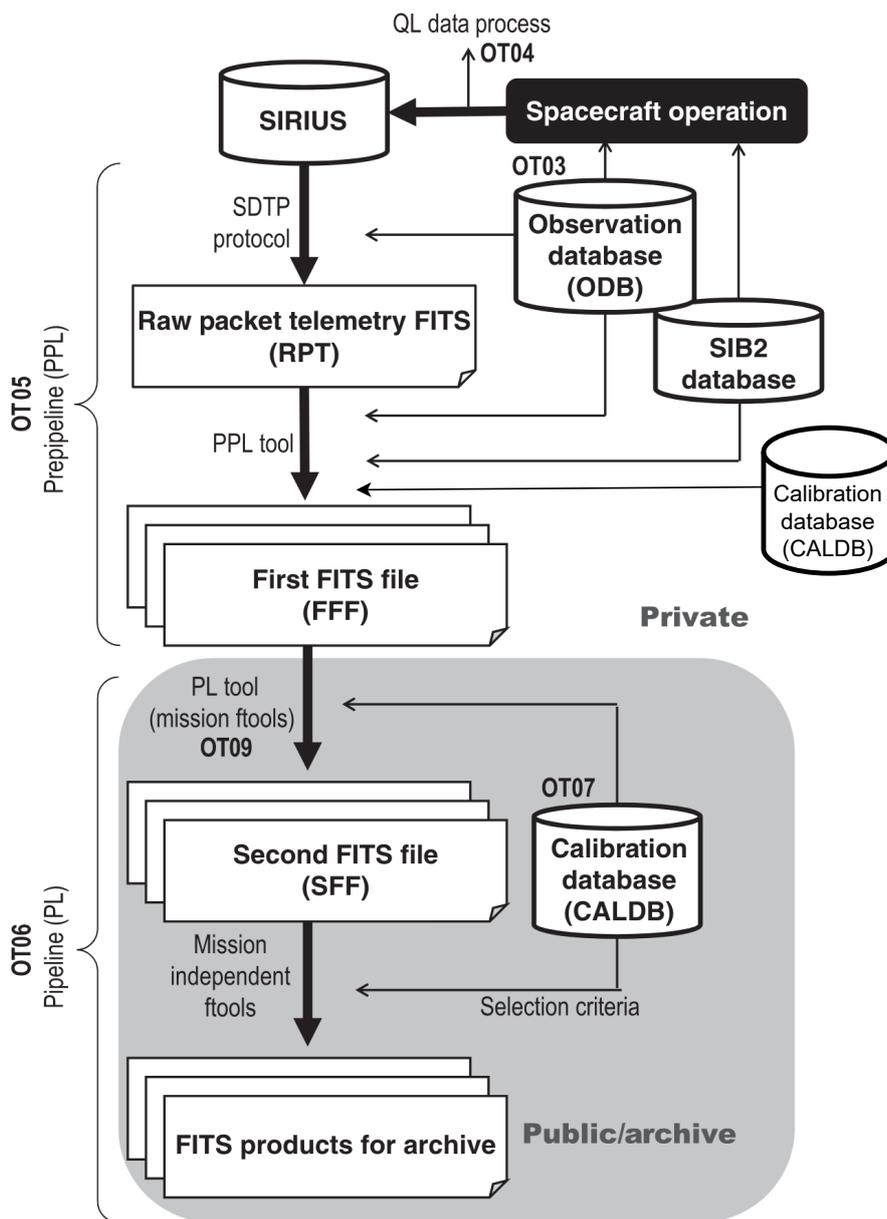


図 5.9. 地上処理の概念図 (Terada et al. 2021 を改変)。

地上処理の概念図を図 5.9 に示す。地上処理は、いくつかの段階に分けて行われる。それぞれの段階の出力を L0-3 products と呼ぶ。それぞれ、大まかには以下のように分類される。

L0 products Raw Packet Telemetry (RPT) ファイル。衛星受信テレメトリをマージ、時刻ソートし、FITS 形式にしたもの。

L1 products First FITS file (FFF) ファイル。RPT ファイルで、生値を工学値に変換したもの。

L2 products Second FITS file (SFF) ファイル。FFF に対して、CALDB を用いて工学値を物理値に変換したものの。イベントスクリーニングやゲイン補正を施した cleaned event list も含まれる。

L3 products X 線イメージ、スペクトル、ライトカーブなど、科学用途に用いるファイル。

レベル 0 からレベル 1 への処理を Pre-PipeLine 処理 (PPL)、レベル 1 からレベル 2、3 への処理を PipeLine 処理 (PL) と呼ぶ。それぞれ、JAXA 側と NASA 側で実行する。

5.2.1 Pre-pipeline 処理

Pre-PipeLine 処理 (PPL) は、衛星が地上局に送信するデータ (= テレメトリーデータ) から、FITS フォーマットファイルに保存する処理である。

レベル 0 では、Raw Packet TelemeTry (RPT) の生成を行う。RPT とは、衛星から送信されたテレメトリーデータを、時系列順に並べたバイナリーデータである。テレメトリーデータは、JAXA 宇宙科学研究所にあるテレメトリーデータベース (SIRIUS) に保存される。SIRIUS では、衛星の運用中に受信したテレメトリーデータの保管を行う。テレメトリーデータは必ずしも時間順に並んでいるとは限らないため、ソートも行われる。

レベル 1 では、First FITS File (FFF) の生成を行う。テレメトリーデータには、衛星機器の状態を表す House Keeping (HK) データと、検出器による観測データ (イベントデータ) に大別される。受信データは、生値をエンコードしたバイナリーデータであるため、SIB2 データベースなどを元に工学値データに変換する。較正データベース (CALDB) に基づく物理値変換は次段階の PL 処理で行うが、イベント時刻の補正だけはこの段階で行う。

5.2.2 Pipeline 処理

Pipeline 処理 (PL) は、Pre-pipeline 処理で作成された FFF をもとに、較正データベース (CALDB) に基づく物理値への変換を行い、標準的なイベントスクリーニングを実施し、科学目的用途にユーザに配布する X 線イベントファイルや付属ファイルを生成する処理である。

レベル 2 では、Second FITS File (SFF) の生成を行う。SFF とは、PL によって較正データベース (CALDB) に基づく物理値への変換を行い、標準的なイベントスクリーニングがかけられた後の FITS ファイルである。SFF を生成する処理には HEASoft に同梱された `xpipeline` というコマンドで一括して行う。

レベル 3 では、科学目的に使用できる X 線イメージ、ライトカーブ、スペクトルなどを生成する。

`xpipeline` は、主に 3 つの部品がある。(i) `xafilter`、(ii) `xtdpipeline`、(iii) `rsllpipeline` である。(i) `xafilter` とは、ミッション機器 (*Resolve* 装置, *Xtend* 装置) に依存しない処理を司る。これで、MKF (make filter) ファイルと EHK (extended HK) ファイルが作成される。MKF ファイルとは、衛星/ミッション機器の状態が記録されている general/mission HK ファイルを元に、GTI によるイベントスクリーニングをするための情報を抽出したものである。EHK ファイルとは、衛星テレメトリーデータに姿勢及び軌道情報を加味して得られるデータを格納する。South Atlantic Anomaly (SAA)、Cut-off-rigidity (COR)、地球縁までの各距離 (Earth elevation) などが含まれる。一方、(ii) `xtdpipeline`、(iii) `rsllpipeline` は、それぞれ、*Xtend* 装置、*Resolve* 装置固有のパイプライン処理を行う。以下、*Resolve* 装置のパイプライン処理である、`rsllpipeline` について説明する。

`rsllpipeline` は 2 つの主要なステージに分けられる。1 つ目が較正、2 つ目がイベントスクリーニングである。その後、3 つ目のステージの処理によって、Quick Look (QL) プロダクト (level 3) の生成が行われる。ここで、QL プロダクトとは、イベントファイル、スペクトル、ライトカーブ、イメージなどの、ユーザがデータを簡便に閲覧できるプロダクトである。各ステップは多数の個別タスクからなる。これらが順番に実行される。各タスクの処理を表 5.1 にまとめた。以下、`rsllpipeline` を構成する各タスクについて説明する。

表 5.1. PL 処理の概要。ステージ 1 と 2 の処理は、`rslpipeline` によって行われる。

ステージ番号	処理の順番	処理	説明
1	1	<code>gtiinvert</code>	観測使用不可能な時間帯を反転させ、観測使用可能な時間帯のGTIを作成
	2	<code>rslctsfluct</code>	断熱消磁冷凍機の制御温度計を読み取り、温度変動を計算
	3	<code>rsladrgti</code>	ADR リサイクルの時間帯の計算
	4	<code>rslmxsgti</code>	MXSが動いている時間帯の計算
	5	<code>ftmgtime</code>	GTIの合体
	6	<code>rslanticopi</code>	Anti-co検出器のPIを計算する
	7	<code>coordevt</code>	座標の決定
	8	<code>rslplsclip</code>	LO_RES_PH に基づいて、PHAが閾値を超えたときにフラグをつける
	9	<code>rslflagpix</code>	STATUSフラグをつける
	10	<code>rslsecid</code>	セカンダリーイベントの再計算
	11	<code>rslgain</code>	Gain History File (GHF)の計算
	12	<code>rslpha2pi</code>	GHFからPHAをEPIに変換
	13	<code>rslflagpix</code>	STATUSフラグをつける
	14	<code>rslsecid</code>	セカンダリーイベントの再計算
	15	<code>rslseccor</code>	MsグレードイベントのPHA2を再計算
	16	<code>rslpha2pi</code>	GHFからPHA2をEPI2に変換
2	1	<code>ahgtigen</code>	EHKとMKFファイルからGTIを作成する
	2	<code>ahscreen</code>	イベントデータをスクリーニングする
3	1	<code>rslmkrmf</code>	Redistribution Matrix File (RMF)またはReSPonse (RSP)を作成する
	2	<code>xaarfgen</code>	Ancillary Response File (ARF)を作成する
	3	<code>rslnxbgen</code>	Non X-ray Background (NXB)スペクトルを作成する
	4	<code>extractor</code>	イベントファイルからイベント、イメージ、スペクトル、ライトカーブを生成する
	5	<code>ximage</code>	イメージの表示
	6	<code>lcurve</code>	ライトカーブの表示
	7	<code>xspec</code>	スペクトルの表示

5.2.2.1 ステージ 1: 較正

■`rslctsfluct` 50 mK レベルの制御に用いる温度計の読み値の `rms ADRC_CT_MON_FLUC` を計算するタスクである。温度計は2種類あり、1つは制御用、1つはモニター用である。制御用は、断熱消磁冷凍機を用いたPID制御の入力に用い、モニター用はその応答を確認するためのものである。各種類が主従冗長を持つ。したがって全部で4つの温度計が搭載されている。このうちどの2つを用いるかは、リレーで切り替えられる。

■`rsladrgti` ADR リサイクルのGTIを計算するパイプラインである。ADR リサイクルの始まりは、HK1ファイルに書き込まれている `ADRC_CAMC_PID_SEL` の値によって判断する。この値は、1段目のADRの温度を50 mKに制御するためのProportional-Integral-Differential (PID) Controllerの状態を表す値であり、0から5、8から15までの整数値をとる。3より大きい整数値がPID制御を表す。制御が始まった時刻をADRリサイクルの始まりと判断する。

一方で、温度が下がり、温度変動が任意の閾値以下となったときにADRリサイクルの終わりと判断する。これは、`ADRC_CAMC_PID_SEL` の値が3以下かつ、`ADRC_CT_MON_FLUC` の値が`rsladrgti`の入力パラメータである`fluctthr`(デフォルト値は1.1 mK)以下となったときである。`ADRC_CT_MON_FLUC`は`rslctsfluct`のパイプラインで計算される温度変動成分である。したがって温度変動をADRリサイクルの終わりの時間の判定に用いている。ただし、`ADRC_CT_MON_FLUC`が計算されない場合は、`ADRC_CAMC_PID_SEL`の値のみで判断する。

ADRリサイクルの終わりの時間がOBSIDのTSTOPを超える場合は、ADRリサイクルの終わりの時間をTSTOP

として、次の OBSID の ADR リサイクルの始まりの時間を TSTART とする。また、入力パラメータである `adrmode` には、He mode または CF mode によって、それぞれ HELIUM または CRYOFREE を入力する。これらは ADR リサイクルの判定には使用されず、出力ファイルに書き込まれる。

このタスクのアルゴリズム及びパラメータの妥当性は § 6.3.1 で検証する。

■`rslmxsgti` 観測期間中に MXS が使われていたときに、MXS の GTI を計算するタスクである。MXS の GTI は 2 種類存在する。1 つ目は、オペレーション中に MXS が使用されていた時間である `coarse gti`、2 つ目は MXS が X 線を照射するごとの正味の X 線照射時間の GTI である `fine gti` である。`rslmxsgti` では、この 2 種類をそれぞれ計算し、GTI ファイルを出力する。

■`rslanticopi` Anti-co イベントのエネルギーを計算するタスクである。Anti-co 検出器によって検出されたイベントの PHA と PI 値を計算し、`anti-co` イベントファイルの PHA と PI 列に書き込む。PHA は `adcSample` の最大値から `pedestal` 値を引き算する。PI は CALDB に格納されたゲイン多項式の係数を PHA に演算して計算する。

■`coordevt` 座標系を変換するタスクである。イベントファイルと、望遠鏡の座標系を表す `telescope definition (teldef)` ファイルを入力として、焦点面座標系や赤道座標系に変換し、ピクセルイベントファイルの座標列に書き込む。

■`rslplsclip` `LO_RES_PH` を元に、パルスが最大値を超えてサチュレーションしているかを推定し、これしているイベントに対し `FLAG_CLIPPED` を 1 とする。これは、パルス波形に基づくフラグであり、本来軌道上で行うべき作業である。設計確定後に追加されたので、地上でフラグ付けをしている。

このタスクのアルゴリズム及びパラメータの妥当性は § 6.1.6 で検証する。

■`rslflagpix` 各イベントにフラグをつけるタスクである。フラグは、ピクセルイベントファイルの 16 bit のビットマスクである `STATUS` 列に書き込まれる (表 5.2)。なお、ビットマスクは 0 始まり、ソフトウェアの扱いは 1 始まりであることに注意を要する (`STATUS[3]` というスクリーニングは `anti-co` 同時イベントのフラグに対して働く)。各ビットごとのアルゴリズムに基づいてフラグがたてられる。アルゴリズムのパラメータは CALDB ファイルに格納されている。

表 5.2. STATUS 値とフラグの関係 (Sato, Uchida, and Ishikawa 2023 を改変)。

bit	フラグ	説明
0	STATUS[1]	GTI に入るイベント
1	STATUS[2]	ピクセル GTI に入るイベント
2	STATUS[3]	Anti-co 検出器との同時イベント
3	STATUS[4]	フレームイベント
4	STATUS[5]	12 番ピクセルとの同時イベント
5	STATUS[6]	12 番ピクセルによる電子反跳イベント
6	STATUS[7]	電氣的クロストークイベント (イベントとして検知)
7	STATUS[8]	PHA が最も大きい電氣的クロストークイベント (イベントとして検知)
8	STATUS[9]	MXS GTI (direct mode、afterglow を含む) 中のイベント
9	STATUS[10]	MXS GTI (direct mode、afterglow のみを含む) 中のイベント
10	STATUS[11]	MXS GTI (indirect mode、afterglow を含む) 中のイベント
11	STATUS[12]	MXS GTI (indirect mode、afterglow のみを含む) 中のイベント
12	STATUS[13]	電氣的クロストークイベント (イベントとして検知されない)
13	STATUS[14]	PHA が最も大きい電氣的クロストークイベント (イベントとして検知されない)
14	STATUS[15]	予備
15	STATUS[16]	予備

以下、フラグについて概説する。GTI に入るイベントは STATUS[1] フラグがセットされる。ピクセル GTI にも入るイベントは STATUS[2] フラグもセットされる。

Anti-co イベントと同時の X 線イベントには STATUS[3] フラグがセットされる。同時の定義と最適化は § 6.2.2 で示す。他の X 線イベントと同時のイベントは STATUS[4] フラグがセットされる。同時の定義と最適化は § 6.2.4 で示す。12 番ピクセルの X 線イベントと同時のイベントは STATUS[5] フラグがセットされる。さらに電子反跳イベントのエネルギー条件を満たせば STATUS[6] フラグもセットされる。同時の定義と最適化は § 6.2.5 で示す。

(電氣的) クロストークイベント (§ 6.2.3) とは、あるピクセルに入射した X 線 (親) のエネルギーの一部が極低温段の読み出し配線間の容量性結合によって隣のピクセルにもれ出す (子) ことである。子イベントが閾値を超えてイベントとして認識されるかされないかによって、ショートクロストークとロングクロストークに分けられる。ショートクロストークは親と子イベントの間の時間差、ロングクロストークは親と (その子イベントが干渉している可能性がある) 親イベントの間の時間差に基づく。それぞれの時間差条件を満たせば STATUS[7]、STATUS[13] フラグがセットされ、更に時間差内のイベントの中でエネルギーが最も大きいものに STATUS[8]、STATUS[14] フラグがセットされる。

STATUS フラグが 9–12 までは、MXS 照射中のイベントにフラグがつく。MXS が direct か indirect か、afterglow 期間を含むか含まないか (§ 3.2.6.3) で 4 ビット消費される。STATUS フラグ 15–16 ビット目は予備のフラグであり、現在は使用されていない。

STATUS[3,4,5,6,7,8] のアルゴリズム及びパラメータの妥当性は § 6.2 で検証する。

■rs1secid ピクセルイベントのセカンダリーイベントを同定するタスクである。到来時刻差からプライマリーイベントとセカンダリーイベントを関連付ける。プライマリーイベントとセカンダリーイベントは、INDEX 列に番号が書き込まれる。そのうちのプライマリーイベントには、GROUPED 列にフラグがつき、セカンダリーイベント群は、各セカンダリーイベントのグレードが数列として SEQ 列に書き込まれる。9 つ以上のセカンダリーイベント群がある場合は、SEQ 列には、999 の値が書き込まれる。セカンダリーイベントがない時には、GROUPED 列 2 は、前

のイベントの GROUPED の負の値が入力され、SEQ 列には、NULL が入力される。

■**rslgain** ピクセルのエネルギーゲインを計算するタスクであり、PL 処理の中で最も重要なものである。*Resolve* 装置のエネルギーゲインは顕著な時間変動を示す (図 3.20)。また、ピクセル毎にも異なる。これを補正しないと、高い分光性能は得られない。そこで、較正 X 線源の特性 X 線を用いて時々刻々ゲインを補正する。もっとも、較正 X 線源は天体観測の邪魔になるので、間欠的に照射する (§ 3.3.4.2)。

さて、X 線マイクロカロリメータのゲインカーブの非線形性 (図 4.3) から、ゲインの補正がエネルギー毎に必要なように思えるが、実効温度の 1 パラメータで表現できることが知られている (Porter et al., 2016)。そのため、熱浴の温度を 49, 50, 51 mK に設定してゲインカーブを取得し (図 4.3)、それを CALDB に登録する。実際の観測データは、それら内挿によりゲイン補正する。

実際に使用できる X 線輝線は表 5.3 の通りである。12 番ピクセルを用いたゲイン補正は common mode (全ピクセル共通) の補正のみである。他の較正 X 線源は differential mode (各ピクセル個別) のゲイン補正が可能である。各特性 X 線のラインプロファイルは CALDB に登録されている。

表 5.3. 軌道上ゲインに使用できる特性 X 線

方法 (calmethod)	特性 X 線 (linetocorrect)	補正ゲイン
Cal-pix (12 番ピクセル)	Mn K α , Mn K β	Common
Fe55 (FWE)	Mn K α Mn K β	Differential
MXS (direct)	Mn K α , Mn K β , Cu K α , Cu K β , Cr K α , Cr K β	Differential
MXS (indirect)	Al K α , Al K β , Mg K α , Mg K β	Differential

まず、calmethod と linetocorrect を選択した後、そのエネルギー付近のスペクトルをある時間、ピクセル毎 (differential mode の場合) に作成し、フィッティングもしくは平均値からエネルギーのシフト量を求める。これを実効温度に換算され、ゲインヒストリーファイルに出力される。これを各時刻で行って、時間変動を緩慢な関数で表現する。シフト導出に用いるイベントは、Hp かつ cleaned events かつ指定された GTI ファイルの時間内のものである。イベントを集積する時間は、一定数のイベントがたまるまで、もしくは設定最長時間に達するまでである。多くの選択はパラメータで変更可能である。

ゲインヒストリーファイルには以下の内容が書き込まれる。2023 年 12 月 15 日から 21 日のゲインヒストリーファイルを可視化したものを図 5.10 に示す。

- TIME (ゲイン計算時の中間時間)
- PIXEL (ピクセル番号)
- COR_FIT (スペクトルフィットからのエネルギー補正係数)
- COR_AVE (スペクトル平均からのエネルギー補正係数)
- CHISQ (スペクトルフィットの換算カイ二乗値)
- AVGUNBIN (ビニング前のイベントの平均エネルギー)
- AVGBIN (重み付けされたスペクトル平均エネルギー)
- AVGFIT (スペクトルフィットからの平均エネルギー)
- SHIFT (スペクトルフィットされたエネルギーシフト)
- SCALE (スペクトルフィットされたスケール係数)
- BGRND (スペクトルフィットされた背景)
- WIDTH (スペクトルフィットされた幅)
- TELAPSE (スペクトル内の最初と最後のイベントの時間差)

- EXPOSURE (GTI を使用して計算された合計時間)
- NEVENT (イベントの総数)
- BINMESH (エネルギービンの数)
- SPECTRUM (ビンングされたカウント数)
- FITPROF (理論プロファイル)
- TEMP_FIT (AVGFIT 列を使用して求めた PHA から導出された温度)
- TEMP_AVE (AVGBIN 列を使用して求めた平均 PHA から導出された温度)

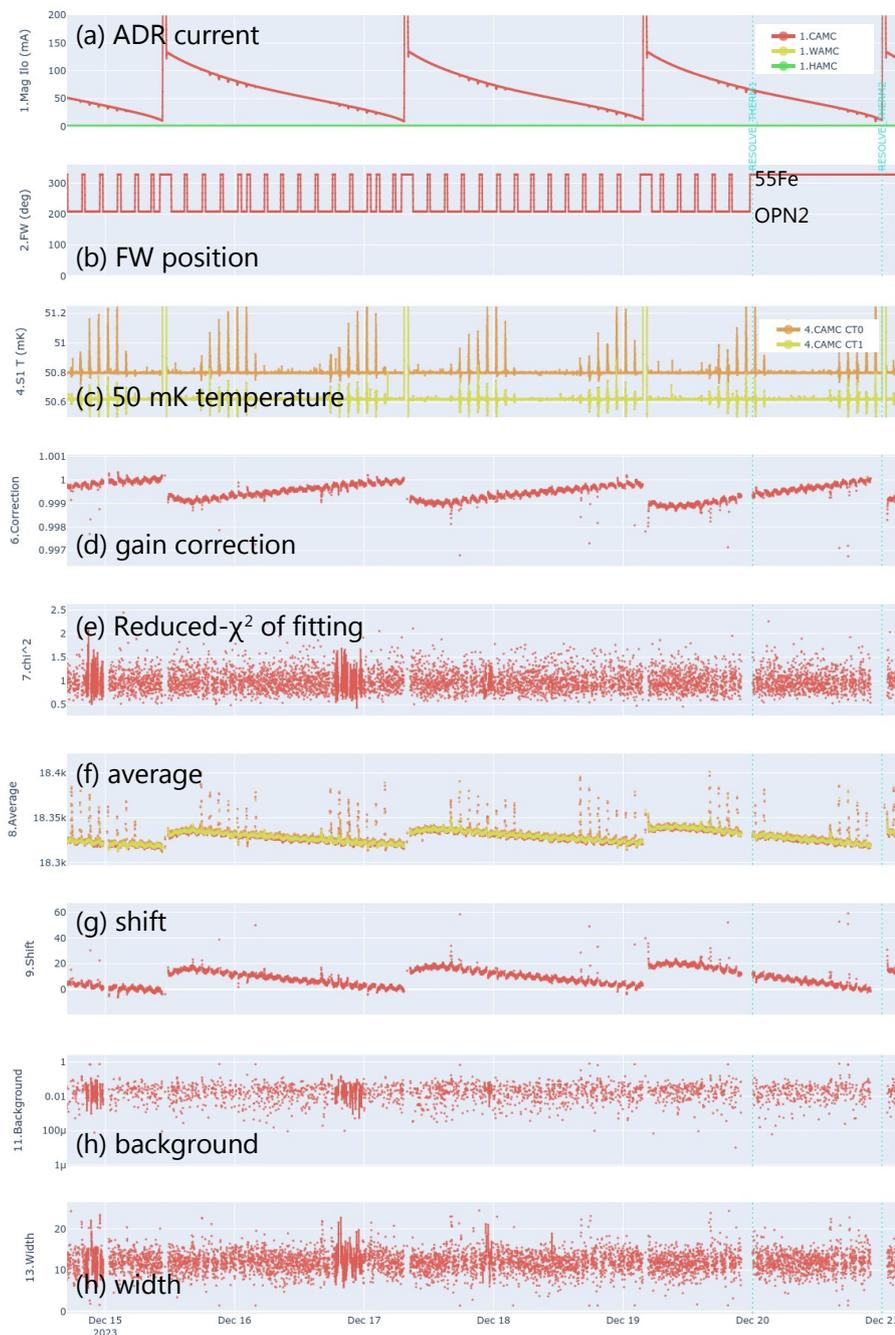


図 5.10. ゲインヒストリーファイル。上から (a) ADR のソレノイド電流、(b) FW の位置、(c) 50 mK 温度（スパイクは SAA 通過によるもの）、(d)–(h) フィッティングパラメータである。この例は 12 番ピクセルを用いた common mode だけのゲイン補正である。このデータは、FW ⁵⁵Fe の間欠照射がなされているので、differential mode のゲイン補正も可能である。

■ **rslpha2pi** ピクセルイベントのエネルギーを計算するタスクである。ゲインヒストリーファイルを入力ファイルとして、**driftfile** パラメータに入力して、計算を行う。PL 処理内では、**rslpha2pi** は 2 回実行される。1 回目は、PHA 列からエネルギーを計算し、EPI (単位 eV) に書き込む。2 回目は、**rslseccor** (後述) によって補正されたセカンダリーイベントのイベントの波高値 **PHA2** からエネルギーを計算し、EPI2 (単位 eV) に書き込む。**calcupi=yes** のときには、UPI 列が計算される。この値は、**tempidx** パラメータで定義された単一の温度に対する

ゲインファイルを使用し、ゲインドリフトを補正しない。

PI の値は、EPI2 の値を使用して、`offset` と `binwidth` パラメータによって計算される (式 5.22)。

$$PI = \frac{EPI2 - offset}{binwidth} + 1.0 \quad (5.22)$$

ここで `offset=0.5`、`binwidth=0.5` がデフォルト値である。ピクセルイベントの PI は 0 から 59999 までの範囲で、各チャンネルの幅は 0.5 eV である。したがって、EPI2 が NULL の場合や負の値をもった場合、PI の値は NULL に設定される。また、PI が 59999 を超える場合、PI は 59999 に設定される。しかし、ベースラインイベントの場合、PI の値は -16384 から 16383 の間の値をとることに留意する。計算されたベースラインイベントの PI がこの範囲外にある場合は、その PI の値は NULL に設定される。

■`rslseccor` Ms グレードイベントの PHA 値を補正するタスクである。`rslsecid` によって同定された、セカンダリーイベントのグループ (GROUPS) を読み取り、Ms グレードイベントの PHA 列の値を補正する。

5.2.2.2 ステージ 2: スクリーニング

■`ahgtigen` GTI の作成と結合を行うタスクである。CALDB ファイル (`xa_gen_select_*.fits`) の EHK 条件を読み込み、EHK ファイルをスクリーニングした GTI ファイルを出力する。科学観測に用いるデータは PIXELALL のラベルがつけられた以下のすべての条件を満たす GTI を使用する。

- `ANG_DIST < 1.5` : 目標位置から *Resolve* 視野中心の角距離が 1.5 分未満
- `SAA_SXS==0` : SAA の外側
- `ELV>5` : 地球離角度が 5 度以上
- `DYE_ELV>5` : 昼地球離角度が 5 度以上

一方、バックグラウンドデータの蓄積には PIXELNXB のラベルがつけられた以下のすべての条件を満たす GTI を使用する。

- `SAA_SXS==0` : SAA の外側
- `ELV<-5` : 地球離角度が -5 度以下

これらのパラメータの妥当性は § 6.3 で検証する。

以上により生成された GTI、正常観測中であることを保証する GTI、及びステージ 1 で計算された GTI を結合し、最終的な GTI ファイルを作成する。

■`ahscreen` イベントファイルのスクリーニングを行うタスクである。`ahscreen` は、`ahgtigen` で作成された GTI ファイルによる GTI スクリーニングと、CALDB ファイル (`xa_gen_select_*.fits`) の HDU2 SELECT の PIXELALL の条件を読み込み、ピクセルイベントのイベントスクリーニングを行う。これらのパラメータの妥当性は § 6.2 で検証する。

- `ITYPE<5` : ベースライン (§ 4.1.4.1)、ロストタイム (§ 4.1.4.2) イベントを除く
- `SLOPE_DIFFER==b0 || PI>22000` : PI が 22000 以下で `SLOPE_DIFFER` フラグがついているイベントを除く
- `QUICK_DOUBLE==b0` : `QUICK_DOUBLE` フラグがついているイベントを除く
- `STATUS[3]==b0` : `STATUS[3]` (anti-co 反同時) フラグがついているイベントを除く
- `STATUS[6]==b0` : `STATUS[4]` (電子反跳) フラグがついているイベントを除く
- `STATUS[2]==b0` : `STATUS[2]` (ピクセル GTI 内) フラグがついているイベントを除く
- `PI>200` : PI が 200 以下のイベントを除く

- RISE_TIME<127 : RISE_TIME が 127 以上 (SLOW_PULSE) のイベントを除く
- PIXEL!=12 : 12 番ピクセルのイベントをすべて除く
- TICK_SHIFT>-8&&TICK_SHIFT<7 : TICK_SHIFT が -8 か 7 のものを除く。

5.2.2.3 ステージ 3: QL プロダクトの生成

■**rslmkrmf** イベントファイルを元に、検出器の応答関数 Redistribution Matrix Function (RMF) を生成するタスクである。観測されるスペクトルは、真のスペクトルにを重畳したものである。グレードごとに応答が異なるので、イベントファイルの情報を元に、グレードごとのイベント数で重み付けした RMF を出力する。

■**xaarfgen** Ancillary Response File (ARF) とは、望遠鏡の有効面積に検出器の量子効率などを乗算した応答関数である。**xaarfgen** タスクは、**xaxmaarfgen** タスクを実行するスクリプトで、*Resolve* 装置または *Xtend* 装置の ARF ファイルを作成する。

入力ファイルは、**xaexmap** タスクによって作成された露光マップファイルである。入力パラメータは、ソース領域と、X 線望遠鏡を通じて光子の経路をシミュレートするタスクである **xrtraytrace** の出力ファイルである。**xrtraytrace** は、検出器の面積と検出器の効率を計算するために使用される。このときシミュレートする光子数は入力パラメータ **numphoton** によって制御することができ、**numphoton** は (全光子数/姿勢ビンの数/有効エネルギー範囲) によって決定される。*Resolve* 装置は 0.3–30 keV のエネルギー範囲、*Xtend* 装置は 0.03–24 keV のエネルギー範囲で、全光子数は 300 万個程度に設定することが推奨される。

■**rslnxbgen** **rslnxbgen** タスクは、*Resolve* 装置の Non X-ray Background (NXB) の PI スペクトルを生成する。NXB スペクトルは、GTI と領域でスクリーニングされた後、入力パラメータである **sortcol** で指定された COR のヒストグラムを使用して重み付けされる。出力される NXB スペクトルは、300 日以上統計をデフォルト値としてもつ。

EHK ファイルには複数のタイプの COR 値が格納されている。経験的に導出された値は、列 COR、COR2、または COR3 に格納されている。入力パラメータである **sortcol** によって使用する COR の種類を選択することができ、COR3 が *Resolve* 装置のデフォルト値であり、推奨されている。

■**extractor** イベントファイルから、イメージ、ライトカーブ、スペクトルを生成するタスクである。**extractor** は、**ahscreen** で作成されたイベントファイルを入力として、イメージ、ライトカーブ、スペクトルを生成する。

■**ximage** イメージファイルからイメージを表示するソフトウェアである。

■**lcurve** ライトカーブファイルからライトカーブを表示するソフトウェアである。

■**xspec** スペクトルファイル (ソース及びバックグラウンド)、RMF、ARF からスペクトルを表示し、スペクトル解析に使用するソフトウェアである (Arnaud, 1996)。

第 6 章

イベントスクリーニング

Contents

6.1	パルス形状に基づくもの	125
6.1.1	RISE_TIME	126
6.1.2	TICK_SHIFT	130
6.1.3	DERIV_MAX	133
6.1.4	QUICK_DOUBLE	134
6.1.5	SLOPE_DIFFER	136
6.1.6	FLAG_CLIPPED	138
6.1.7	SLOW_PULSE	141
6.2	到来時刻によるもの	143
6.2.1	相対時刻較正	143
6.2.2	Anti-co イベント	152
6.2.3	電氣的クロストークイベント	156
6.2.4	フレームイベント (1) 宇宙線	161
6.2.5	フレームイベント (2) X 線	165
6.2.6	電子反跳イベント	169
6.3	時間帯によるもの	172
6.3.1	ADR リサイクル	172
6.3.2	SAA	182
6.3.3	地没	186
6.3.4	地球磁場	189

本章では、最適な X 線イベントスクリーニング条件を調べる。スクリーニング種別に応じた最適の *Resolve* 装置地上及び軌道上データを用いて、パラメータを最適化する。スクリーニングは 3 つに大別できる。それぞれ (i) パルス形状に基づくもの (§ 6.1)、(ii) 到達時間に基づくもの (§ 6.2)、(iii) 時間帯に基づくもの (§ 6.3) に分けて記述する。各項目に対し、(1) 目的、(2) 手法、(3) 結果、(4) 考察と結論を示す。

6.1 パルス形状に基づくもの

本節では、パルス形状に基づく最適なスクリーニング条件を決定することを目的とする。PSP によってパルス波形処理が行われ、パルス波形の特徴量が計算される (§ 5.1.1)。SXS 装置の軌道上データから、これらの特徴量 (RISE_TIME、DERIV_MAX、TICK_SHIFT) には特徴的なエネルギー依存性があることが確認されている (図 6.1)。

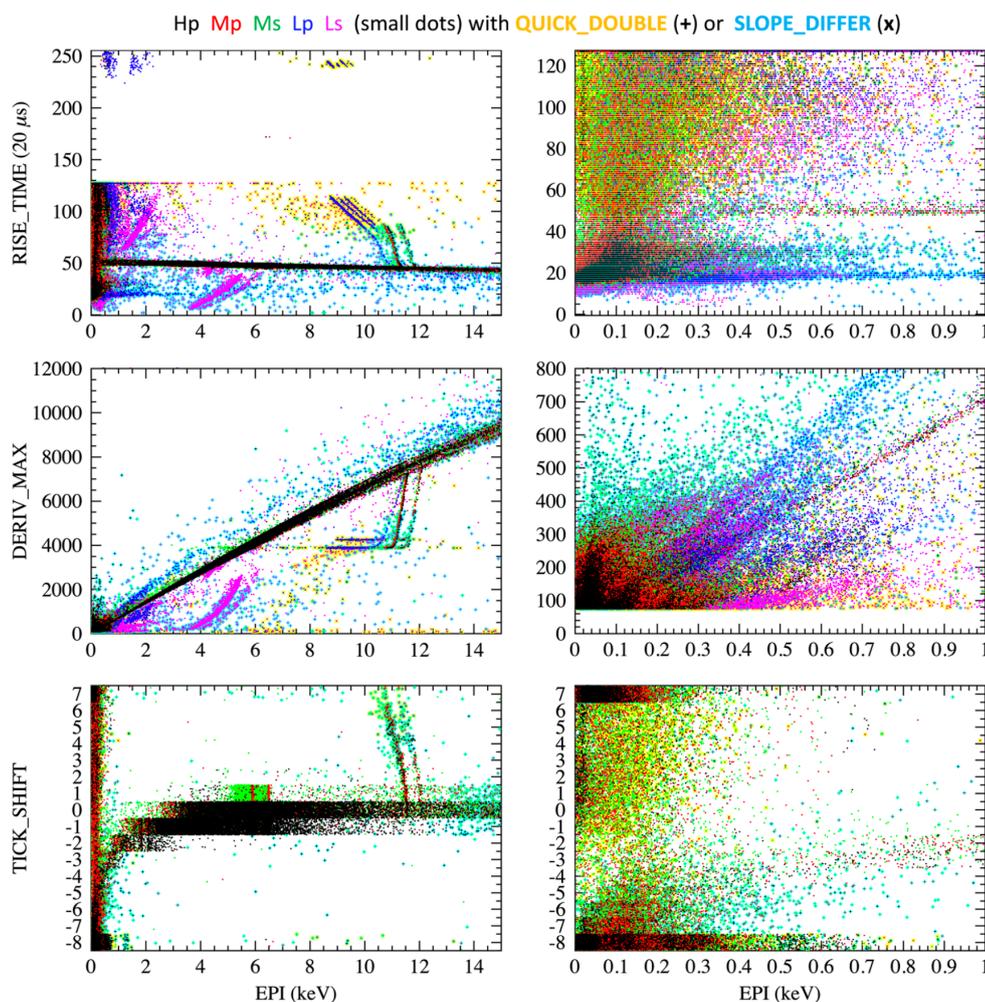


図 6.1. SXS 装置の軌道上データから計算されたパルス波形の特徴量のエネルギー依存性 (Ishisaki et al., 2018)。

このうち、SXS 装置では、ピクセルイベントの立ち上がり時間 (RISE_TIME) とエネルギー (EPI2) の依存性を用いて、追加のイベントスクリーニングが行われ (図 1.6)、Non X-ray Background (NXB) のイベント数が減少することが確認された (図 1.7)。このように、パルス形状に基づくスクリーニングは、X 線イベントを残しながらノイズイベントをできる限り除外するために有効な手段である。

本研究では、Resolve 装置のパルス形状に基づく最適なスクリーニング条件を、軌道上データを用いて決定することを目的とする。2023 年 10 月 14 日 07 時 25 分から 10 月 23 日 20 時 30 分までの Abell 2319 のデータセットを用いた (表 4.16)。X 線が多い天体のデータセットを用いることで、スクリーニングで残すべきイベントの分布を明確にする目的である。また、ゲートバルブ閉のデータセットを用いることで、2 keV 以下の低エネルギー帯域はすべてノイズイベントとみなせ、パルス形状に基づくスクリーニング条件の評価が可能となる。また、いくつかの

イベントのパルスレコード (§ 4.1.4.3) を確認することで、実際のパルス波形を確認し、意図通りのスクリーニングができていないかも確認する。

6.1.1 RISE_TIME

6.1.1.1 目的

まず、パルスの立ち上がり時間 (RISE_TIME) を用いた最適なスクリーニング条件を決定する。X線パルス波形の形はイベントのエネルギーに依存しているため、X線エネルギーの特徴量である EPI2 もしくは DERIV_MAX と RISE_TIME に相関が期待される。そこで、両者の相関を元にスクリーニング条件を設定する。

6.1.1.2 手法

Abell 2319 観測データのパイプラインによって生成した cleaned イベントデータの EPI2 と RISE_TIME、DERIV_MAX と RISE_TIME の分布を元にスクリーニング条件を決める。

6.1.1.3 結果

EPI2 と RISE_TIME、DERIV_MAX と RISE_TIME の関係を図 6.2 に示す。両者とも、Abell 2319 からの X 線イベントによる分布がメインブランチとして明確に確認できる。ともに同様の分布を示す。前者において、1 keV 以下および 20 keV 以上のイベントがノイズである。1 keV 以下の低エネルギー側では、RISE_TIME が 60 以上及び 40 以下としてノイズが分布していることがわかる。

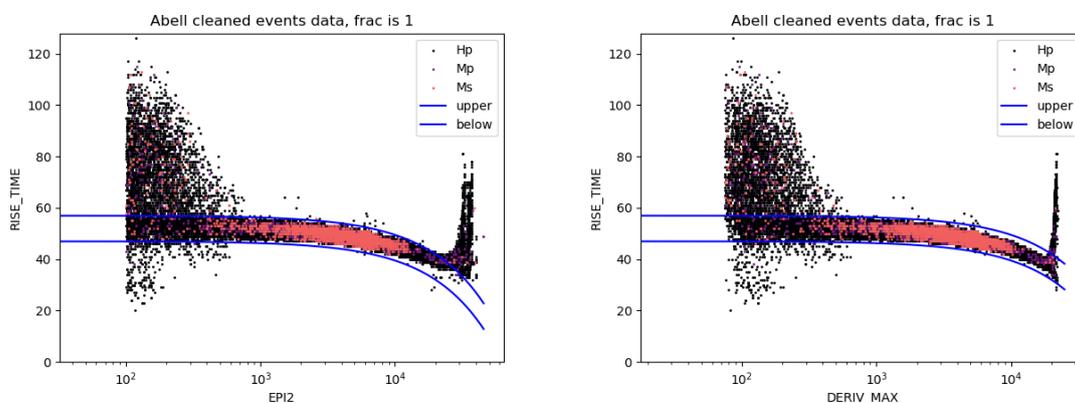


図 6.2. Abell 2319 の RISE_TIME の H、M grade のイベント散布図。左:EPI2、右:DERIV_MAX。青の実線はスクリーニング条件を表している。

そこで、RISE_TIME が 60 以上のイベントと、40 以下のイベントをいくつか取り出して、パルスレコードを確認した (図 6.3、図 6.4)。これらはいずれも Hp グレードのイベントと期待される波形 (図 4.1 の左図参照) ではなく、ノイズイベントであることがわかる。

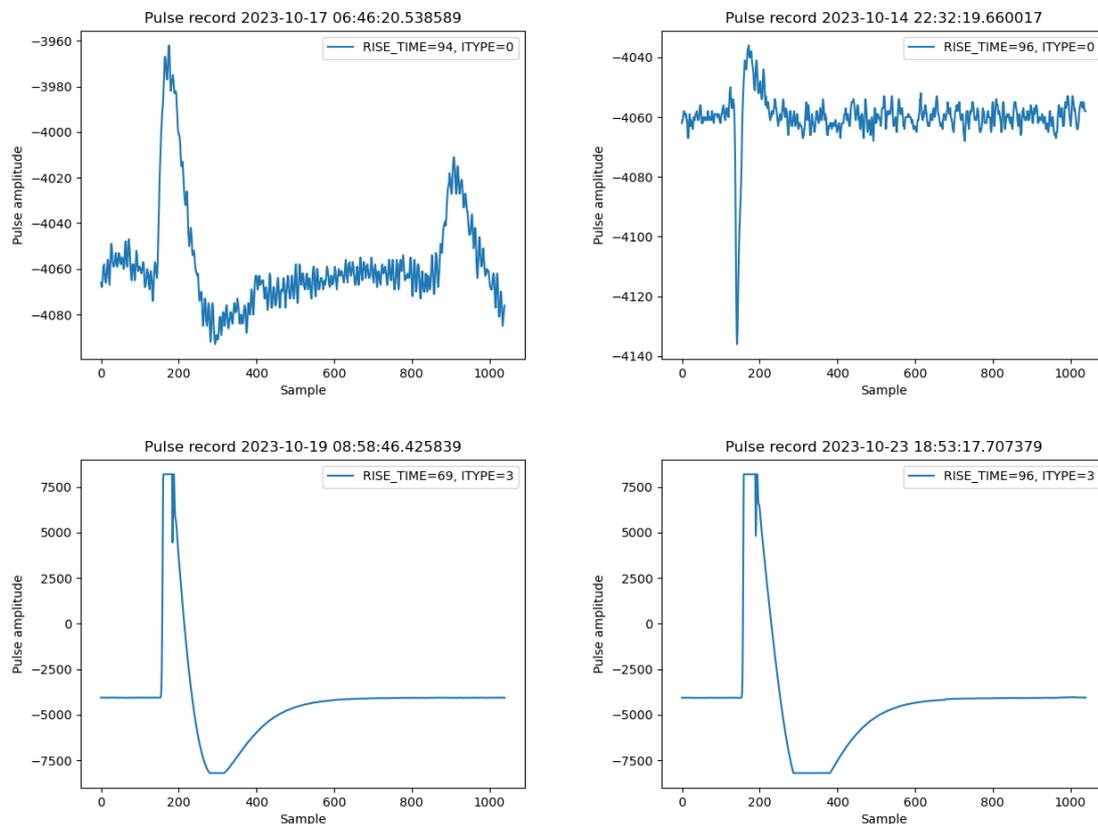


図 6.3. Abell 2319 の RISE_TIME が 60 以上の Hp のイベントのパルスレコード。

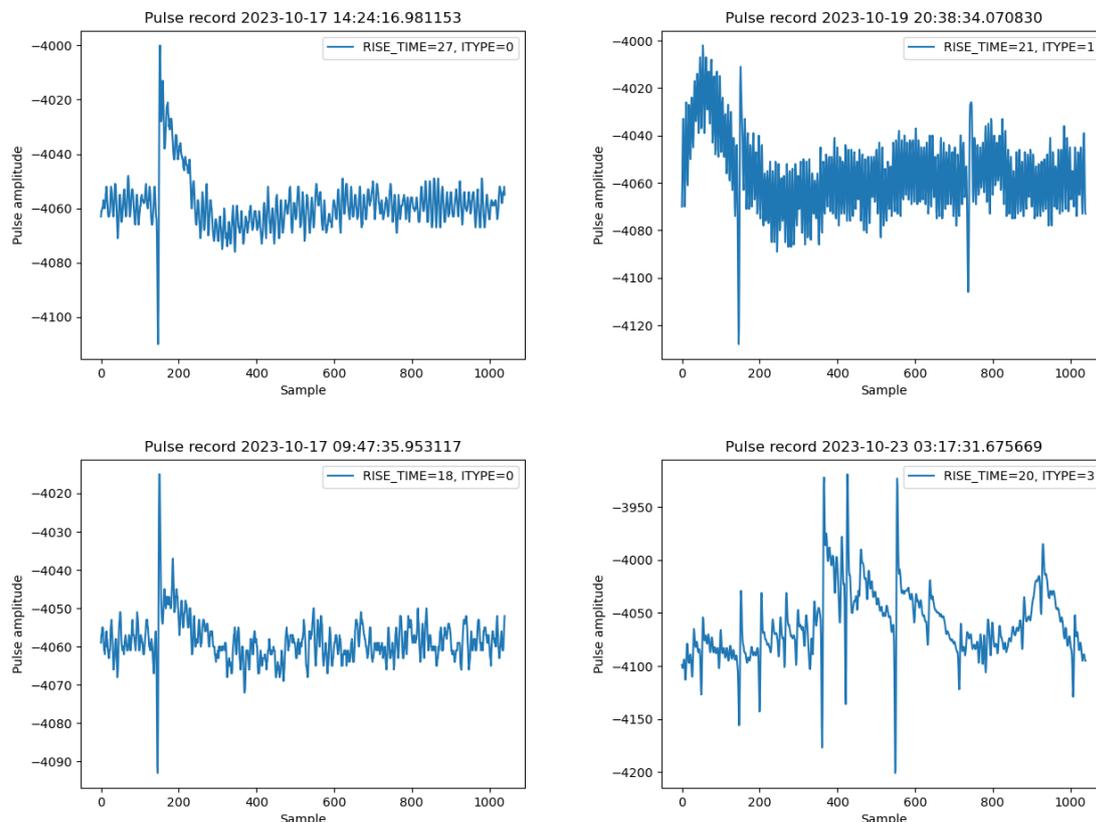


図 6.4. Abell 2319 の RISE_TIME が 40 以下の Hp のイベントのパルスレコード。

次に X 線イベントが大半を占めるメインブランチの領域を定義する。線形関係を想定して、

$$\text{RISE_TIME} = a \times (\text{EPI2 または DERIV_MAX}) + b \quad (6.1)$$

とし、メインブランチをできるだけ包含するように定義すると、EPI2、DERIV_MAX 共通で、 $a = -0.00075$ 、 $b = 57$ (上限) $b = 47$ (下側) と求めた。これは、メインブランチがガウシアン分布に従うと仮定すると、 $b = 52$ がメインブランチのピークであり、 $1\sigma = 1.2$ である。したがって、 $b = 57$ (上限) $b = 47$ (下側) がそれぞれ、ピークから約 $\pm 4\sigma$ の値である (図 6.5)。

6.1.1.4 考察と結論

EPI2 と RISE_TIME、DERIV_MAX と RISE_TIME の関係を元に、有効なイベントスクリーニングができるとわかった。SXS 装置でへ前者を用いていたが、両者の優劣を比較する。まず DERIV_MAX と RISE_TIME の方が関係の線形性が高く、同じ条件で 1 keV 以下及び 20 keV 以上のノイズが落とせていることがわかる。次に、ノイズイベントがより多い 1 keV 以下において、両者に違いがあるか調べた (図 6.6)。両者に顕著な違いはなく、どちらを用いてもよい。

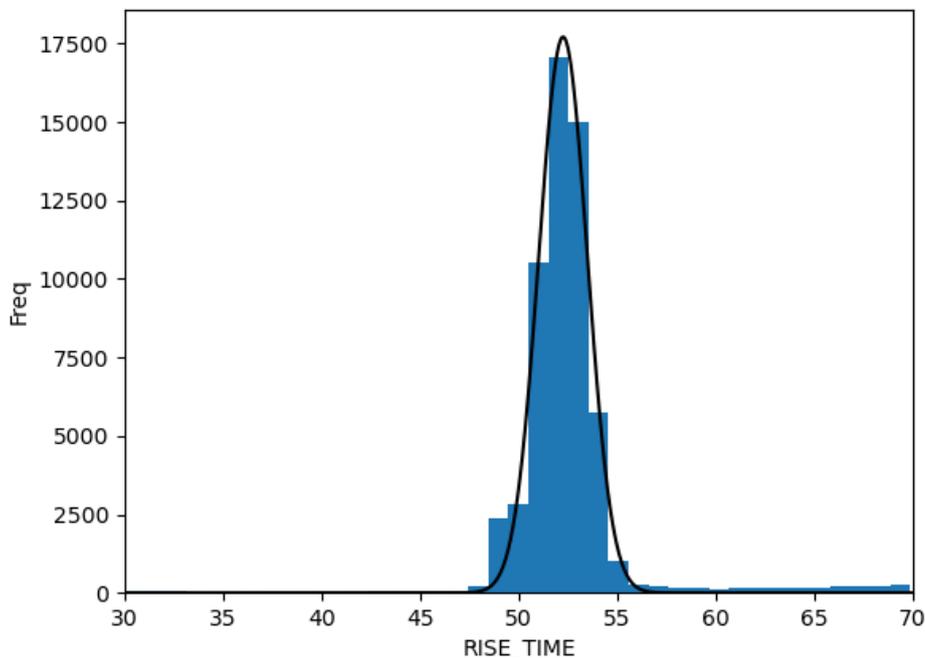


図 6.5. RISE_TIME のメインブランチのガウシアンフィッティング。

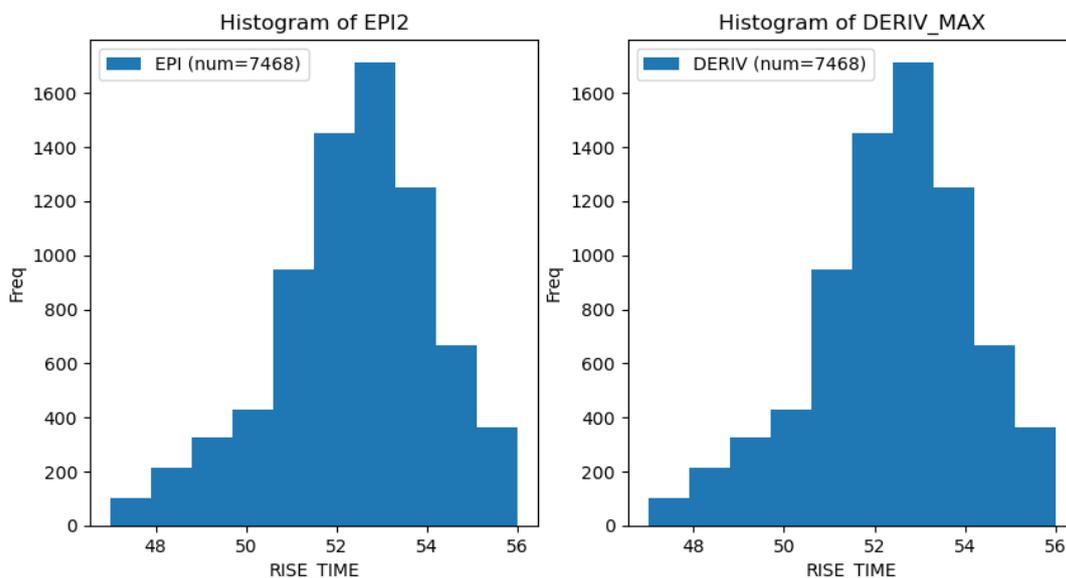


図 6.6. スクリーニング後の Abell 2319 の RISE_TIME ヒストグラム。左:EPI2、右:DERIV_MAX。

以上の考察により、ここでは DERIV_MAX と RISE_TIME を元にしたスクリーニングを提案する。条件は式 6.2 である。

$$(RISE_TIME + 0.00075 * DERIV_MAX) < 57 \&\& (RISE_TIME + 0.00075 * DERIV_MAX) > 47 \quad (6.2)$$

また、RISE_TIME のスクリーニング条件として、DERIV_MAX と EPI2 の比を用いることもできる。ΔRISE_TIME

をメインブランチのピークからの差分として $\text{DERIV_MAX}/\text{EPI2}$ に対する関係をプロットすると、図 6.7 のようになった。

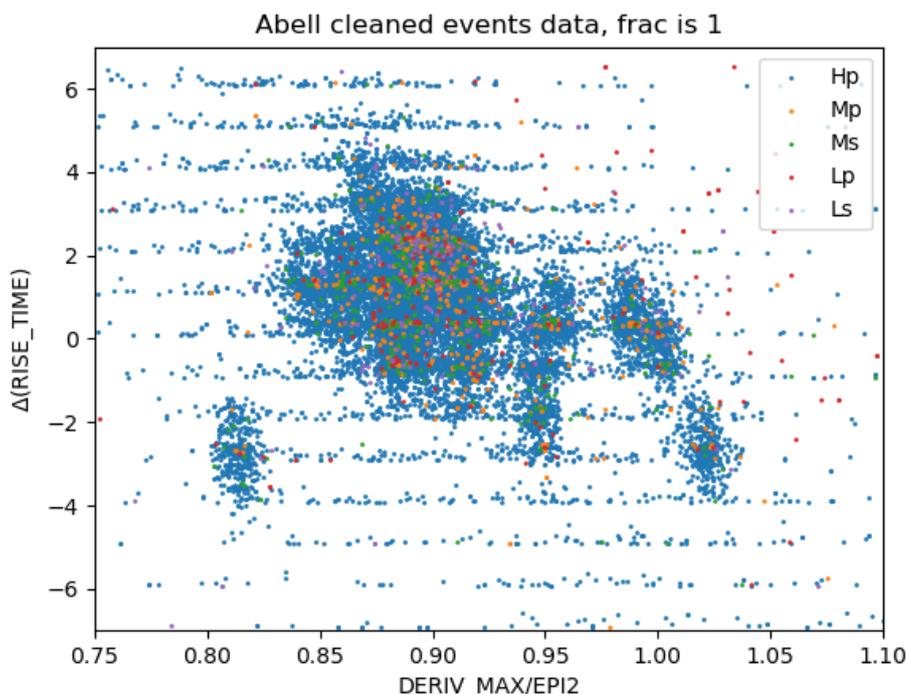


図 6.7. Abell 2319 の $\Delta\text{RISE_TIME}$ と $\text{DERIV_MAX} / \text{EPI2}$ の散布図。

図 6.7 から、 $\Delta\text{RISE_TIME}$ が ± 5 以内のときかつ、 $\text{DERIV_MAX} / \text{EPI2}$ の値が 0.8 以上かつ 1.05 以下のイベントが集中していることがわかる。この場合、 RISE_TIME の最適なスクリーニング条件は以下ようになる。

$$\begin{aligned} &\Delta\text{RISE_TIME} \text{ が } \pm 5 \text{ 以内} \&\& \\ &\text{DERIV_MAX と EPI2 の比が } 0.8 \text{ 以上かつ } 1.05 \text{ 以下} \end{aligned} \quad (6.3)$$

6.1.2 TICK_SHIFT

6.1.2.1 目的

本節では、 TICK_SHIFT の最適なスクリーニング条件を決定することを目的とする。基本的に TICK_SHIFT 値単独でスクリーニングをかければよいが、更に何らかの相関関係を見い出せば、更に効率のよいスクリーニングができる可能性がある。X線パルス波形の形はイベントのエネルギーに依存しているため、X線の EPI2 もしくは DERIV_MAX と TICK_SHIFT に相関が期待される。そこで、 EPI2 もしくは DERIV_MAX と TICK_SHIFT の分布を作成し、スクリーニング条件を推定した。

6.1.2.2 手法

本研究では、Abell 2319 と LMC X-3 のパイプラインによって生成した cleaned イベントデータの EPI2 と TICK_SHIFT 、 DERIV_MAX と TICK_SHIFT の分布図を作成し、どのような相関関係があるかを調べた (図 6.8)。 TICK_SHIFT は、イベント閾値の設定によって変化するため、イベント閾値が 75 である Abell 2319 のデータセットと、イベント閾値が 120 である LMC X-3 のデータセットを用いている。このとき、 TICK_SHIFT の値は、

TICK_SHIFT に ± 0.5 の値をランダムに足した値を用いている。更に、パルスレコード (§ 4.1.4.3) を確認することでパルス波形が期待通りであるか判断し、スクリーニング条件を推定した。

6.1.2.3 結果

図 6.8 から、EPI2 もしくは DERIV_MAX と TICK_SHIFT の関係にはトレンドがあることが分かる。低エネルギー側では、対数関数で表され、高エネルギー側では TICK_SHIFT のステップ関数で表現できることが分かる。

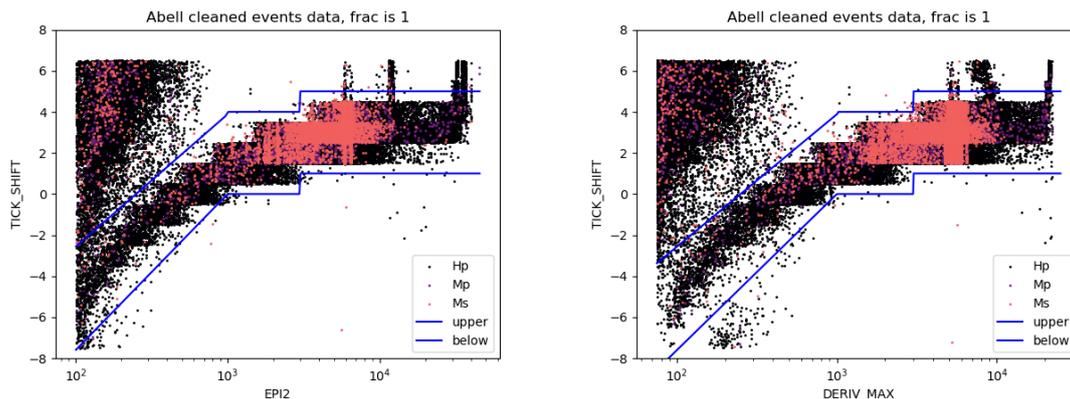


図 6.8. Abell 2319 の TICK_SHIFT の Hp と Mid grade のイベント散布図。左:EPI2、右:DERIV_MAX。青の実線はスクリーニング条件を表している。

図 6.9 に LMC X-3 の TICK_SHIFT と EPI2 もしくは DERIV_MAX の分布を示す。全エネルギー帯域でステップ関数のような関係が見られる。

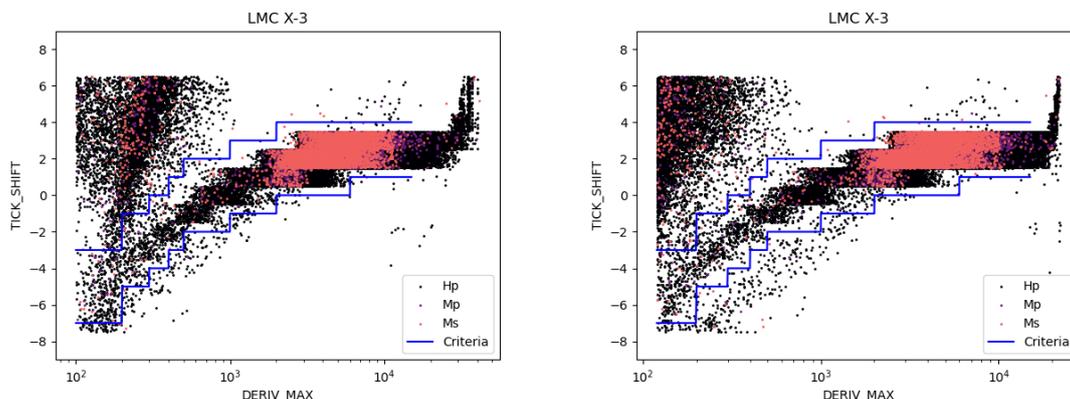


図 6.9. LMC X-3 の TICK_SHIFT の Hp と Mid grade のイベント散布図。左:EPI2、右:DERIV_MAX。青の実線はスクリーニング条件を表している。

6.1.2.4 考察と結論

図の左上にノイズと思わしきイベントが多く分布している。ここから、TICK_SHIFT が 0 以上のイベントかつ、DERIV_MAX が 200 より大きいときのイベントのパルスレコードを確認した。代表的なパルスレコードを図 6.10 に示した。いずれも X 線イベントで期待される波形ではなく、ノイズイベントであることがわかる。

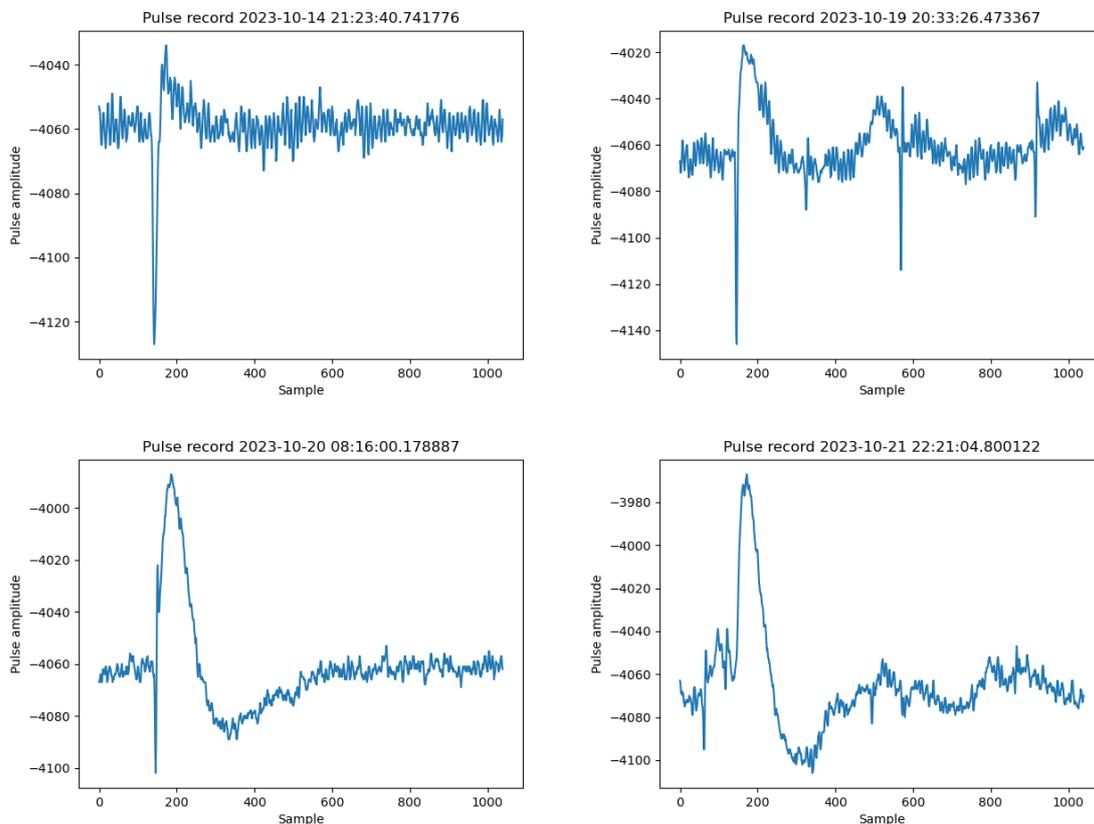


図 6.10. Abell 2319 の TICK_SHIFT が 0 以上かつ DERIV_MAX が 200 より大きいイベントのパルスレコード。

TICK_SHIFT のスクリーニング条件として 2 つが考えられる。1 つ目は、必須の条件で、テンプレートフィッティングが通常通り行われなかった、TICK_SHIFT が -8 、 $+7$ の値を除くことである。したがって、TICK_SHIFT がのスクリーニング条件は、式 6.4 とすることができる。

$$\text{TICK_SHIFT} > -8 \ \&\& \ \text{TICK_SHIFT} < 7 \tag{6.4}$$

図 6.8 では、すでに式 6.4 の条件でスクリーニングを行っている。

2 つ目は、選択可能な条件で、EPI2 もしくは DERIV_MAX との相関関係を利用したスクリーニングである。TICK_SHIFT のエネルギー依存性と DERIV_MAX 依存性の両方を調べた結果、RISE_TIME と同様に、高エネルギー側で DERIV_MAX 依存性がよりノイズイベントをメインブランチから分けていることが分かった。したがって、

TICK_SHIFT がのスクリーニング条件は、式 6.5 とすることができる。

イベント閾値が 75 の場合:

```
((TICK_SHIFT < 5)&&(TICK_SHIFT > 1))||(DERIV_MAX < 3000))&&
((TICK_SHIFT < 4)&&(TICK_SHIFT > 0))||(DERIV_MAX >= 3000)||(DERIV_MAX < 1000))&&
(((TICK_SHIFT < 2.8 * log(0.004 * DERIV_MAX))&&
(TICK_SHIFT > 3.3 * log(0.001 * DERIV_MAX))))||(DERIV_MAX >= 1000))
```

イベント閾値が 120 の場合:

```
((TICK_SHIFT < 4)&&(TICK_SHIFT > 1))||(DERIV_MAX >= 15000)||(DERIV_MAX < 6000))&&
(((TICK_SHIFT < 4)&&(TICK_SHIFT > 0))||(DERIV_MAX >= 6000)||(DERIV_MAX < 2000))&& (6.5)
(((TICK_SHIFT < 3)&&(TICK_SHIFT > -1))||(DERIV_MAX >= 2000)||(DERIV_MAX < 1000))&&
(((TICK_SHIFT < 2)&&(TICK_SHIFT > -2))||(DERIV_MAX >= 1000)||(DERIV_MAX < 500))&&
(((TICK_SHIFT < 1)&&(TICK_SHIFT > -3))||(DERIV_MAX >= 500)||(DERIV_MAX < 400))&&
(((TICK_SHIFT < 0)&&(TICK_SHIFT > -4))||(DERIV_MAX >= 400)||(DERIV_MAX < 300))&&
(((TICK_SHIFT < -1)&&(TICK_SHIFT > -5))||(DERIV_MAX >= 300)||(DERIV_MAX < 200))&&
(((TICK_SHIFT < -3)&&(TICK_SHIFT > -7))||(DERIV_MAX >= 200)||(DERIV_MAX < 100))&&
(((TICK_SHIFT < -4)&&(TICK_SHIFT > -8))||(DERIV_MAX >= 100))
```

以上より、TICK_SHIFT の最適なスクリーニング条件は、式 6.4 (必須) 6.5 (選択) となる。

6.1.3 DERIV_MAX

6.1.3.1 目的

本節では、DERIV_MAX の最適なスクリーニング条件を決定することを目的とする。そこで、EPI2 と DERIV_MAX の分布を作成し、スクリーニング条件を推定した。

6.1.3.2 手法

本研究では、Abell 2319 のパイプラインによって生成した cleaned イベントデータの EPI2 と DERIV_MAX 分布を作成し、どのような相関関係があるかを調べた (図 6.2)。また、パルスレコード (§ 4.1.4.3) を確認することでパルス波形が期待通りであるか判断し、スクリーニング条件を推定した。

6.1.3.3 結果

EPI2 と DERIV_MAX の分布を図 6.11 に示した。青の実線は、EPI2 と DERIV_MAX の線形関数 (式 6.6) を図示したものである。線形関数の傾き a は、上限の関数が $a = 1.1$ 、下限の関数が $a = 0.69$ と定めた。

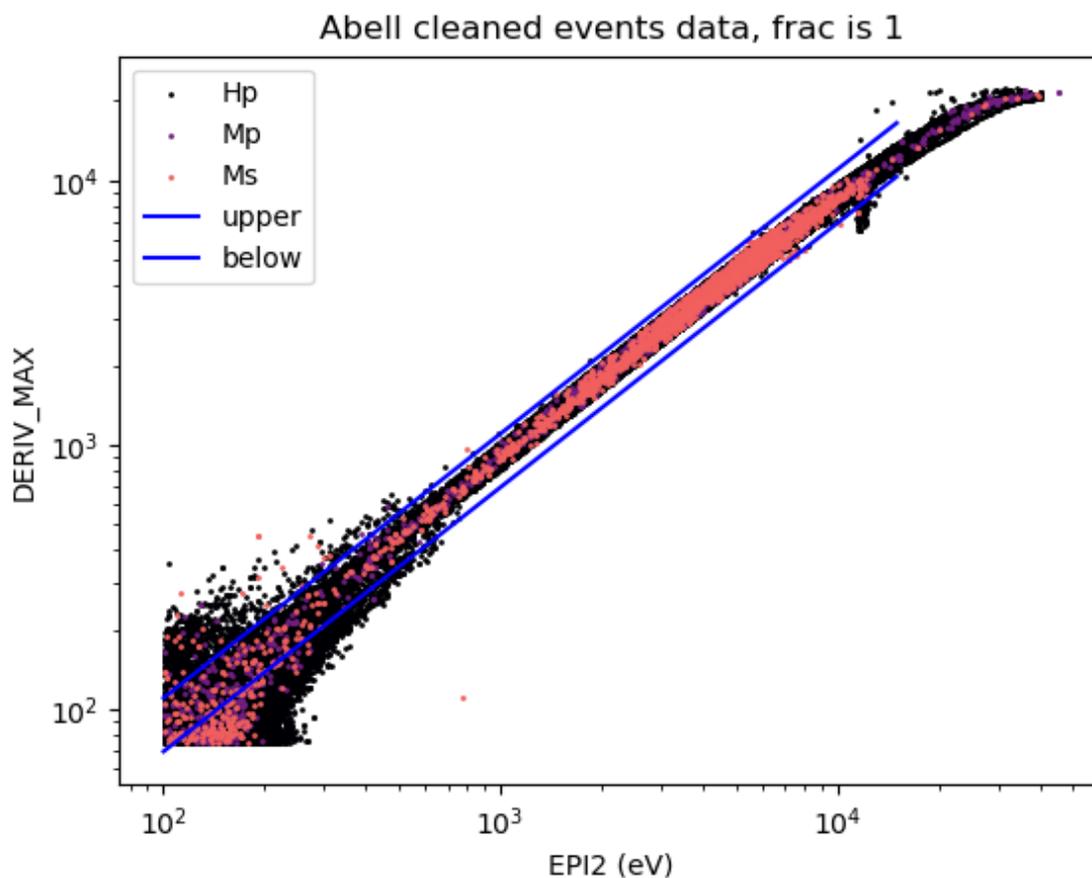


図 6.11. Abell 2319 の DERIV_MAX の Hp と Mid grade のイベント散布図。青の実線はスクリーニング条件を表している。

$$\text{DERIV_MAX} = a \times \text{EPI2} \quad (6.6)$$

図 6.11 から、EPI2 と DERIV_MAX の関係は、15 keV まで線形関数で表され、15 keV 以上では、非線形関数となっていることがわかる。そして、1 keV 以下でとくにメインブランチから外れたイベントが多いことがわかる。

6.1.3.4 考察と結論

以上より、DERIV_MAX の最適なスクリーニング条件は、式 6.7 となる。

$$\begin{aligned} & (\text{DERIV_MAX} < (1.1 * \text{EPI2})) \&\& \\ & (\text{DERIV_MAX} > (0.69 * \text{EPI2})) \|(\text{EPI2} > 15000) \end{aligned} \quad (6.7)$$

6.1.4 QUICK_DOUBLE

6.1.4.1 目的

本節では、QUICK_DOUBLE の最適なスクリーニング条件を決定することを目的とする。QUICK_DOUBLE イベントとは、通常、微分波形が立ち上がってから減少する間に別のパルスが到達したときのイベントである (§ 5.1.2)。

6.1.4.2 手法

QUICK_DOUBLE イベントのパルスレコードを確認した。

6.1.4.3 結果

図 6.12 に、QUICK_DOUBLE イベントのパルスレコードの例を示した。

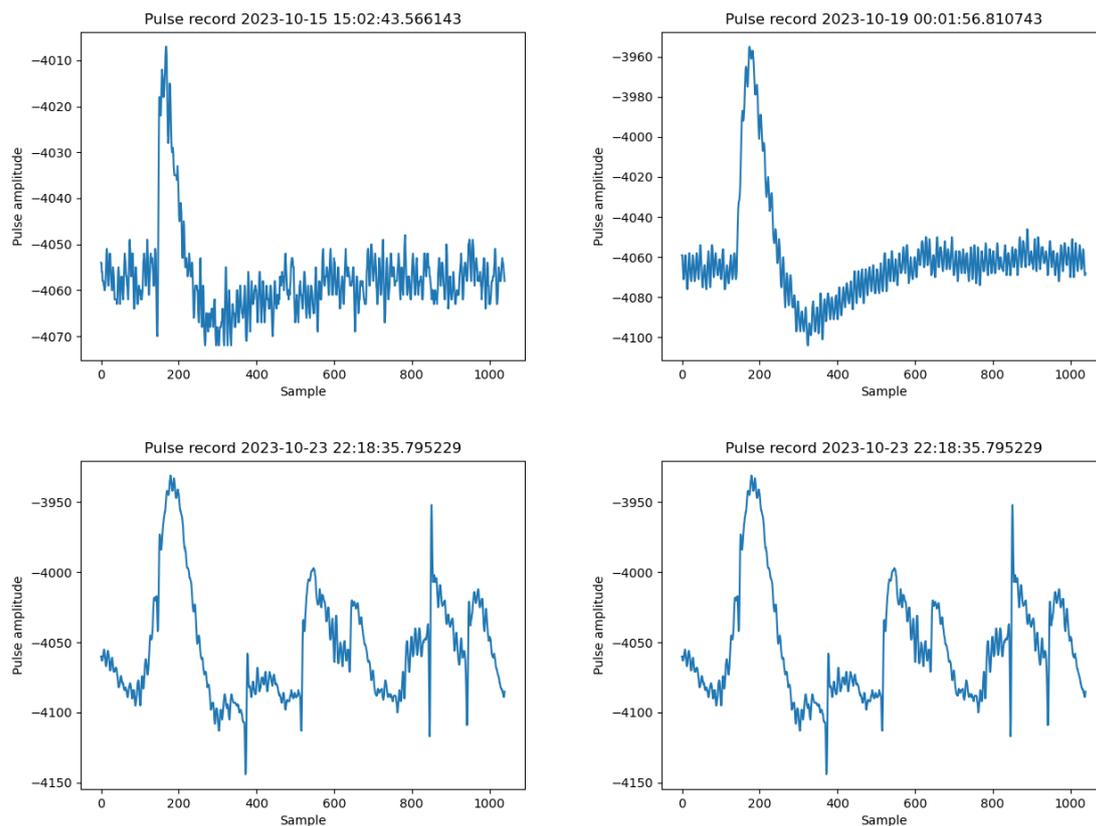


図 6.12. QUICK_DOUBLE イベントのパルスレコードの例。

図 6.12 より、QUICK_DOUBLE イベントは、パルス波形が正常ではないことがわかる。

6.1.4.4 考察と結論

QUICK_DOUBLE イベントは、分解能の劣化だけでなく、到達時間が不定であるため、すべて取り除くことが望ましい。そのため、QUICK_DOUBLE のスクリーニング条件は、式 6.8 となった。

$$\text{QUICK_DOUBLE} == \text{b0} \quad (6.8)$$

ただし、b0 はバイナリーのフラグが立っていないことを表す。

6.1.5 SLOPE_DIFFER

6.1.5.1 目的

本節では、SLOPE_DIFFER の最適なスクリーニング条件を決定することを目的とする。SLOPE_DIFFER イベントとは、セカンダリーパルスの検索時に平均パルスが不正確なタイムシフトで減算されるときのパルスである (§ 5.1.2)。SLOPE_DIFFER イベントは、エネルギーが低いイベントでは、偽のイベントである一方で、エネルギーが高いイベントでは、真のイベントである可能性がある。これは、平均パルスが 5.9 keV の Mn $K\alpha$ X 線イベントを元に作られているため非常にエネルギーの高い X 線イベントではスケールリングしても引き残りが生じるためである。

6.1.5.2 手法

Abell 2319 のパイプラインによって生成した uncleaned イベントデータの PI と SLOPE_DIFFER イベントの分布を作成し、SLOPE_DIFFER フラグとエネルギーとの関係性を調べた (図 6.13)。

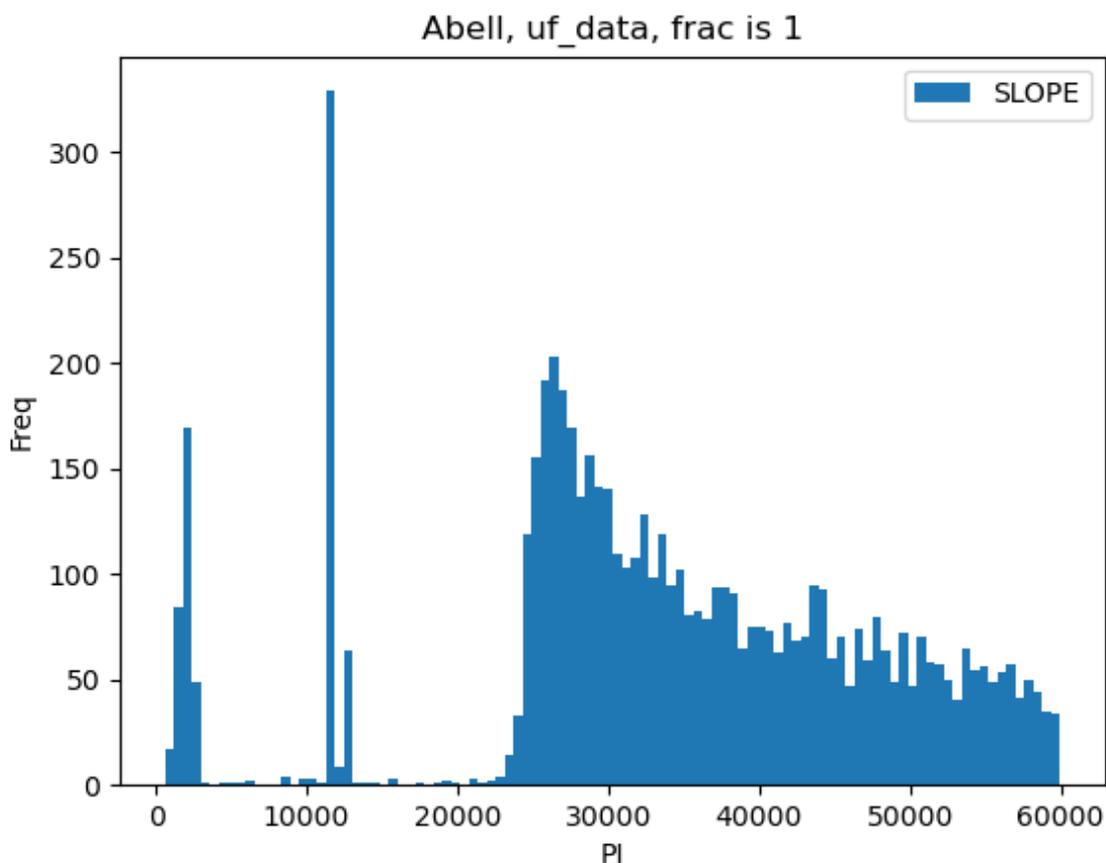


図 6.13. Abell 2319 の SLOPE_DIFFER イベントのヒストグラム。

図 6.13 から、PI が 22000 未満と 22000 以上に分布していることがわかる。

6.1.5.3 結果

図 6.13 から、PI が 22000 未満と 22000 以上のパルスレコードを確認した (図 6.14、図 6.15)。

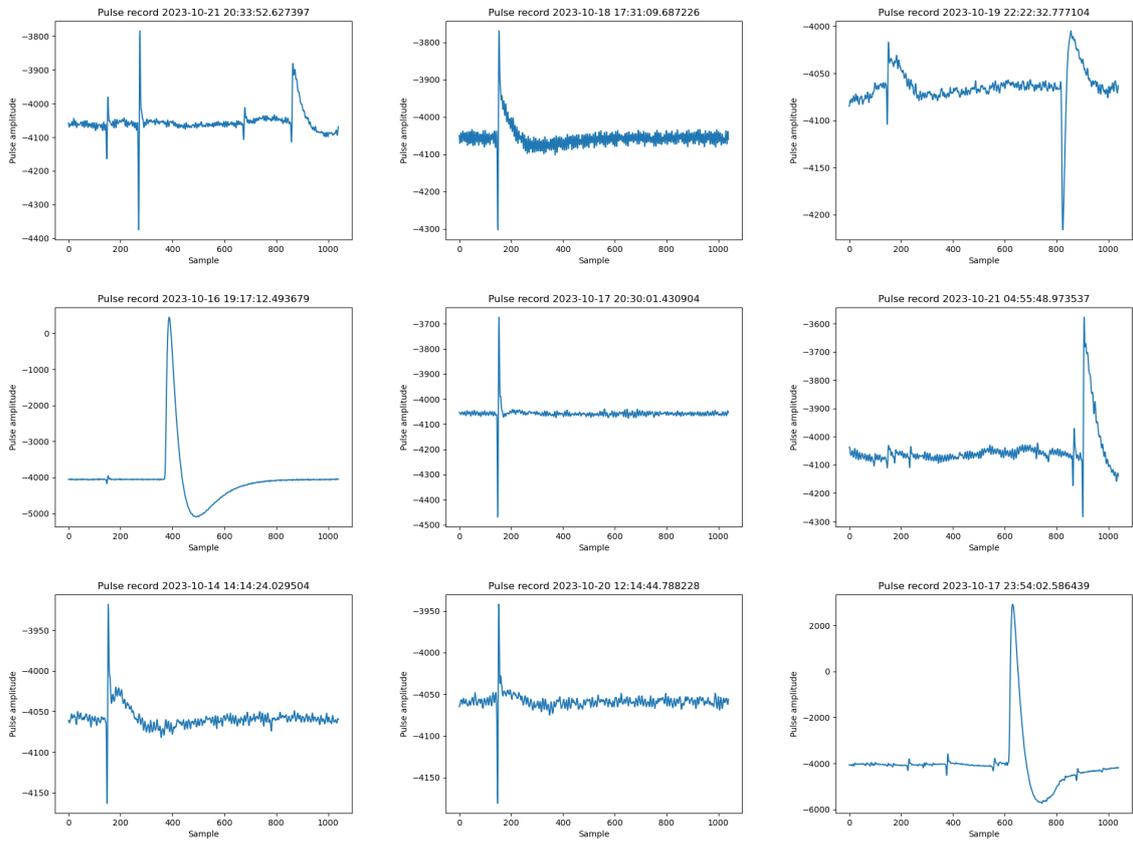


図 6.14. Abell 2319 の SLOPE_DIFFER イベントの PI が 22000 未満のパルスレコード。

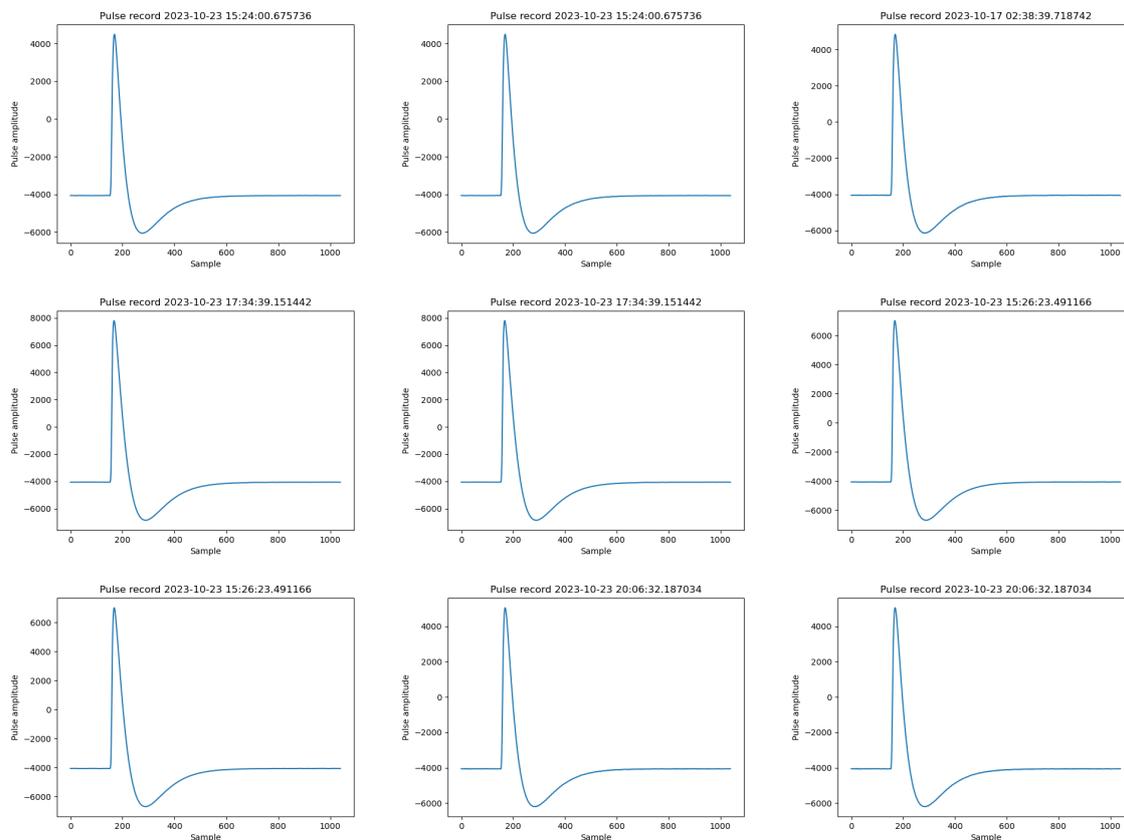


図 6.15. Abell 2319 の SLOPE_DIFFER イベントの PI が 22000 以上のパルスレコード。

PI が 22000 未満のイベントのパルスレコード (図 6.14) の大部分は正常ではないことがわかる。一方、PI が 22000 以上のイベントのパルスレコード (図 6.15) は正常であることがわかる。

6.1.5.4 考察と結論

図 6.14、図 6.15 より、SLOPE_DIFFER のスクリーニング条件は、式 6.9 となった。

$$\text{SLOPE_DIFFER} == \text{b0} \parallel \text{PI} > 22000 \quad (6.9)$$

6.1.6 FLAG_CLIPPED

6.1.6.1 目的

本節では、CLIPPED イベントの最適なスクリーニング条件を決定することを目的とする。CLIPPED イベントとは、パルスが ADC の最大値を超え FLAG_CLIPPED フラグが立っているイベントである (§ 5.2.2.1)。そのため CLIPPED イベントは、その他のフラグと異なり、本来のピクセルイベントであることに留意する。CLIPPED イベントは高エネルギーのイベントで起こりやすい。

6.1.6.2 手法

高エネルギー帯での X 線が照射されているデータを用いて調べる。そこで、RTS16 を用いた 2022 年 02 月 14 日 14 時 05 分から 02 月 16 日 08 時 40 分までの地上試験データを用いて、そのスクリーニング条件を調べた。ここには Ag の $K\alpha_1$ 22.2 keV、 $K\beta_1$ 24.9 keV までの特性 X 線が含まれる。

6.1.6.3 結果

図 6.16 に、RTS16 を用いた地上試験データのエネルギースペクトルを示した。

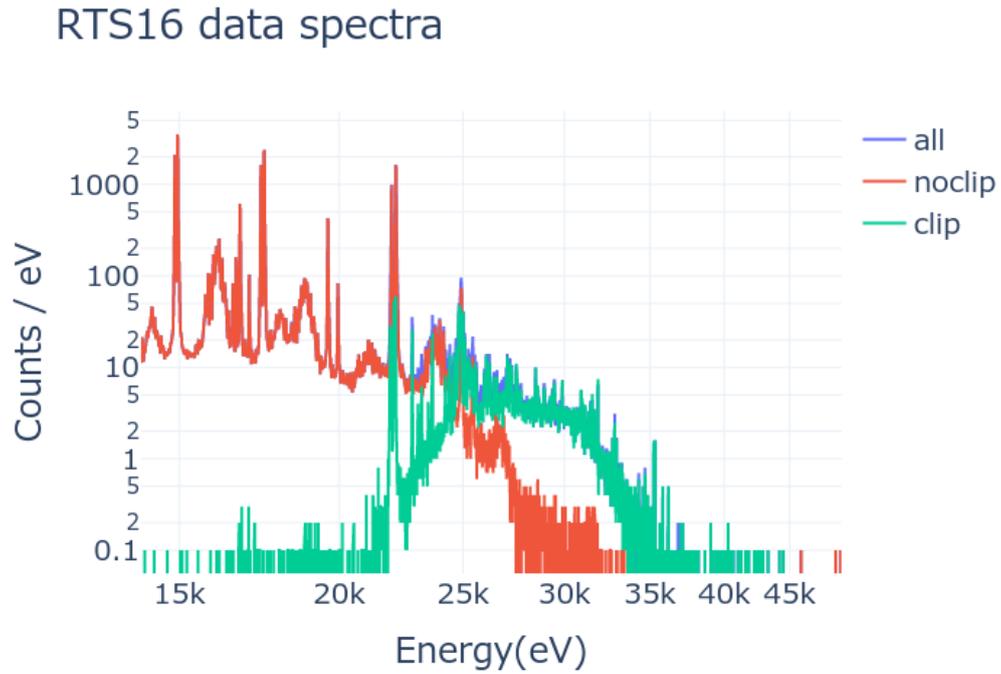


図 6.16. RTS16 を用いた地上試験データのエネルギースペクトル。青：全エネルギーバンドのすべてのイベント、赤：FLAG_CLIPPED が立っていないイベント、緑：FLAG_CLIPPED が立っているイベント。

図 6.16 より、FLAG_CLIPPED が立っているイベントは、14 keV 以上のイベントであることがわかる。

図 6.17 に、CLIPPED イベントのパルスレコードの例を示した。

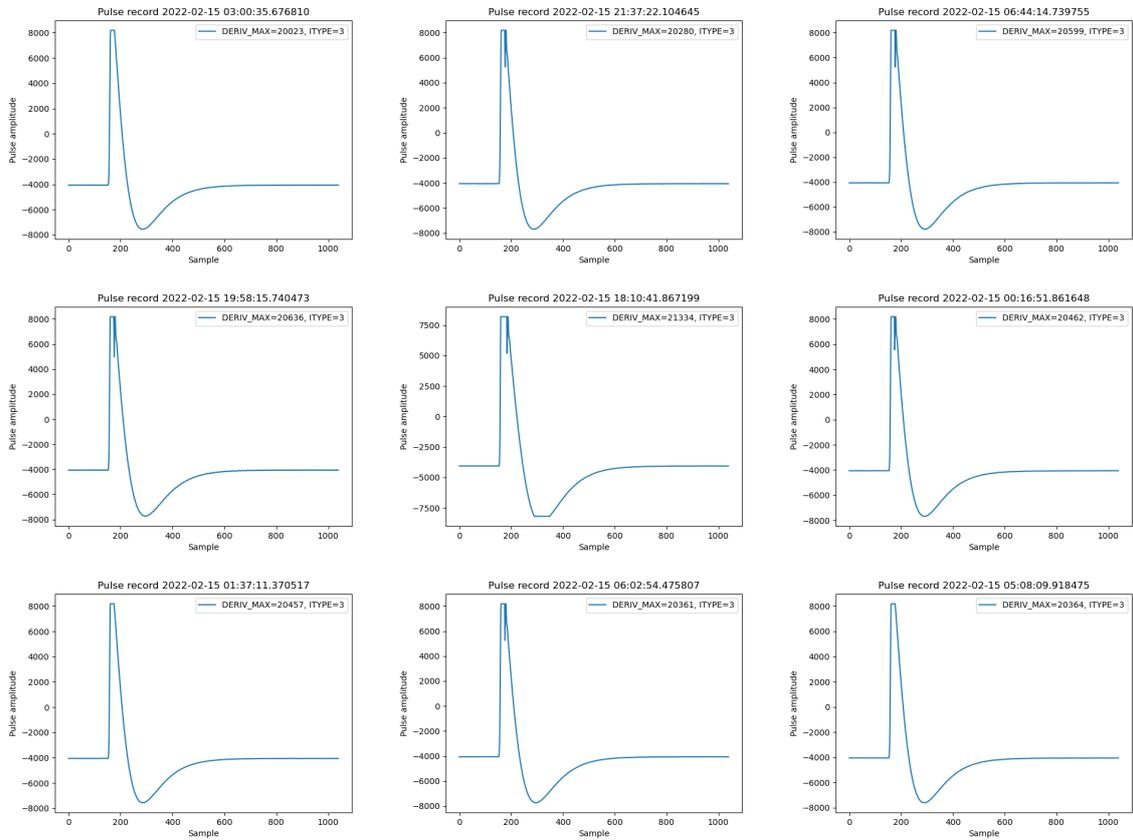


図 6.17. CLIPPED イベントのパルスレコードの例。

図 6.17 より、CLIPPED イベントは、パルスが ADC 上限値に到達していることがわかる。

6.1.6.4 考察と結論

そこで、すべてのイベントと、CLIPPED イベントを除いたイベントについて、Y $K\alpha_1$ 線 (15.0 keV)、Mo $K\alpha_1$ 線 (17.5 keV)、Ag $K\alpha_1$ (22.2 keV) 線の FWHM を比較した (図 6.18)。

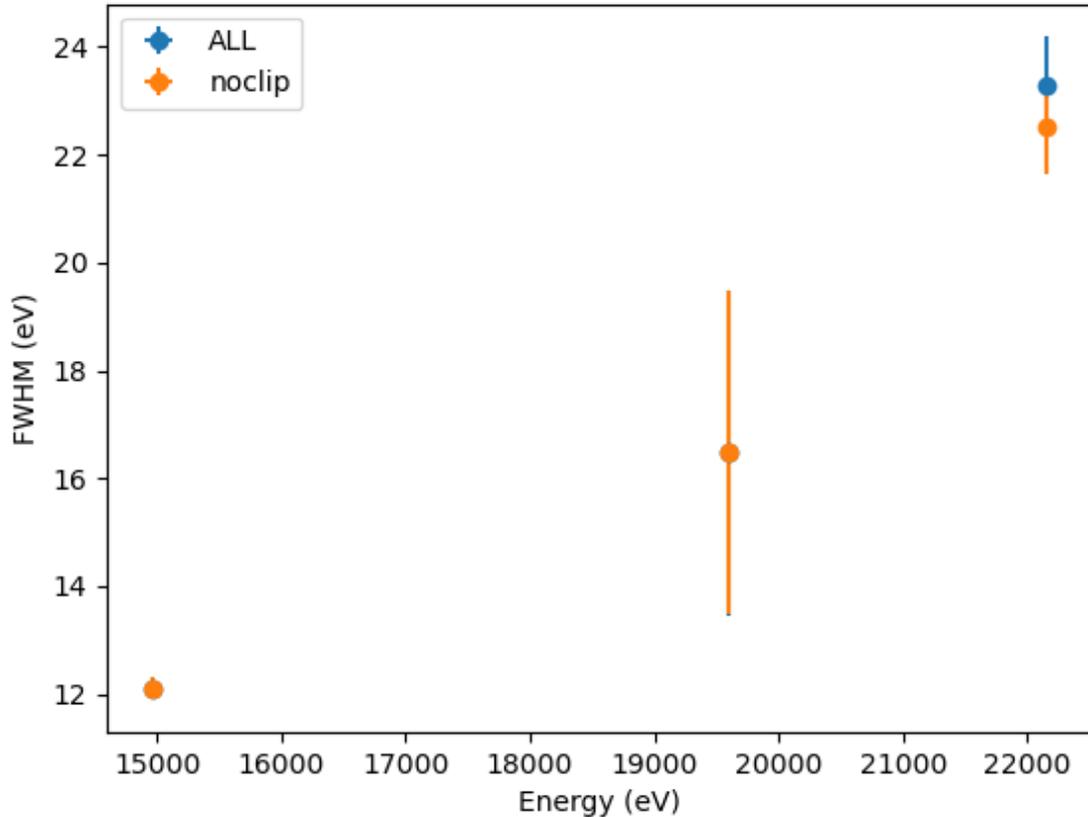


図 6.18. RTS16 を用いた地上試験データの FWHM。

図 6.18 より、FLAG_CLIPPED が立っているイベントは、20 keV 以上の分解能にやや影響を及ぼすことがわかる。しかし、このエネルギー帯は望遠鏡のミラー (XMA) の集光能力が低く、実質的に問題にはならない。もっとも、このスクリーニングをかけても、要求帯域 0.3–12 keV (表 3.1) では影響はないので、式 6.10 のスクリーニングをかけることを提案する。

$$\text{FLAG_CLIPPED} == \text{b0} \quad (6.10)$$

6.1.7 SLOW_PULSE

6.1.7.1 目的

本節では、SLOW イベントの最適なスクリーニング条件を決定することを目的とする。SLOW イベントとは、微分波形の立ち上がりたち下がりが異常に長い SLOW_PULSE フラグが立っているイベントである (§ 5.1.1.4)。

6.1.7.2 手法

軌道上データから SLOW イベントのパルスレコードを確認した。

6.1.7.3 結果

図 6.19 に、SLOW イベントのパルスレコードの例を示した。

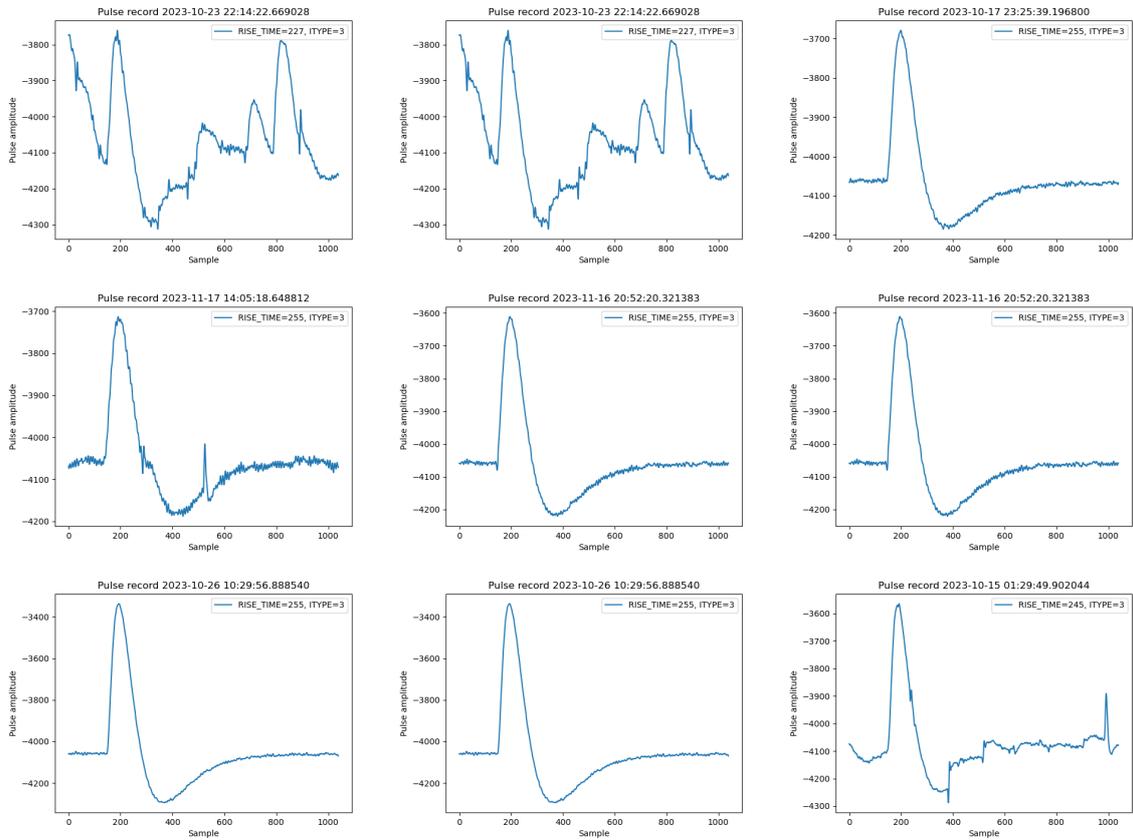


図 6.19. SLOW イベントのプルズレコードの例。

図 6.19 より、大部分の SLOW イベントは、パルス波形が正常ではないことがわかる。

6.1.7.4 考察と結論

Slow イベントは、分解能の劣化だけでなく、到達時間が不定であるため、すべて取り除くことが望ましい。そのため、SLOW イベントのスクリーニング条件は、式 6.11 となった。

$$\text{RISE_TIME} < 127 \tag{6.11}$$

6.2 到来時刻によるもの

本説では、イベント到来時刻に基づく最適なスクリーニング条件を決定することを目的とする。複数のイベントの到来時刻差に基づく処理である。マイクロカロリメータには、天体からのX線イベントだけではなく、それに起因した疑似ピクセルイベントや宇宙線イベントも検出してしまう。これらは、現象に応じて特徴的なイベント到来時刻差を示すので、それを利用してスクリーニングをする。

まず、イベント相対時刻の較正 (§ 6.2.1) を行う。このパラメータは `xa_rsl_coefitime_*.fits` の HDU3 ARRCOEFS に格納される。これに基づいてイベント時刻付けをやり直し、独自のイベントファイルを生成して以下の現象の解析を行う。

Anti-co イベント (§ 6.2.2) 反同時検出器である anti-co 検出器を用いた宇宙線イベントの除去

クロストーク (§ 6.2.3) あるピクセルに到来した X 線イベントの一部のエネルギーが隣のピクセルに伝搬することで生じる疑似イベントの除去

フレームイベント 検出器面のフレームに宇宙線 (§ 6.2.4) もしくは X 線 (§ 6.2.5) があたったときの疑似イベントの除去

電子反跳イベント (§ 6.2.6) あるピクセルの X 線吸収で生じたエネルギーの一部を電子が持ち出して別のピクセルで熱化する場合のイベントの除去

これらのスクリーニング条件は、イベント間の相対時刻に基づくので、その時間ウィンドウがパラメータになる (図 6.20)。これらの値は CALDB の `xa_rsl_coefitime_*.fits` の HDU2 DELTIMES に格納される。

なお、マイクロカロリメータのイベント閾値は、本論文で扱う範囲の地上試験 (表 4.7) 及び軌道上の 2023 年 10 月 31 日 (表 3.2) までは 75 であったが、それ以降 120 に変更された。相対時刻較正は閾値が 75 のデータを用いて実施された。閾値を 120 に変更することで相対時刻が変化するので、これについても調査する。

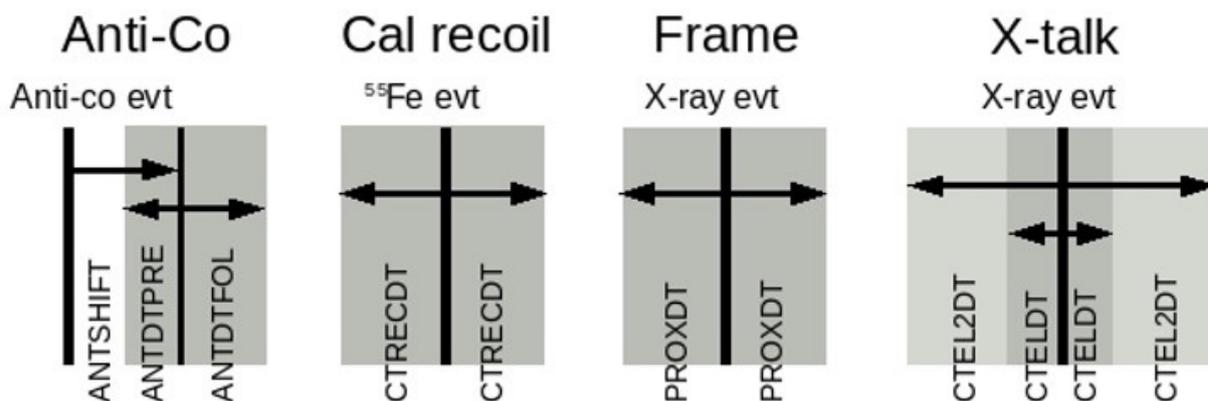


図 6.20. 到達時間に基づくスクリーニングで最適化するパラメータ。

6.2.1 相対時刻較正

6.2.1.1 目的

Resolve 装置のピクセルイベントは、H, M グレードについては最適フィルタ処理を行う。これにより到来時刻がサブサンプル (5 μ s) の分解能で決定される。しかし、パルス形状で PHA と RISE_TIME との関係が非線形であり、

エネルギーが増加するにつれて RISE_TIME が減少する傾向が存在する (e.g., Kilbourne et al., 2018b; Ishisaki et al., 2018)。また、最適フィルタ処理に用いるテンプレートがピクセルごとに異なる。更に L グレードでは全く異なる時刻付けを行う (§ 5.1)。これらより、グレードごと、ピクセルごとの到来時刻の補正の必要性が発生する。

そこで、立ち上がり時間の特徴量として RISE_TIME、エネルギーの特徴量として DERIV_MAX を用いて、到来時刻の補正を行うことにする。それらを線形結合して、補正量 (単位は sample = 80 μ s) を

$$dt_{g,p}(\text{RISE_TIME}, \text{DERIV_MAX}) = a_{g,p} \frac{(\text{RISE_TIME})}{4} + b_{g,p}(\text{DERIV_MAX}) + c_{g,p} + d \quad (6.12)$$

とする。ここで $a_{g,p}$ 、 $b_{g,p}$ がそれぞれ RISE_TIME、DERIV_MAX にかかる係数で、 $c_{g,p}$ が定数である。いずれもグレード (g)、ピクセル (p) ごとに違う値をとり得る。また d は絶対時刻を補正するものであり、3.58 sample (XRISM Calibration Database) を用いる。また、通常の PPL 処理をしたイベントファイルでは、SXS 装置での a , b , c パラメータに基づいたイベント時刻補正がされてしまっているので、これを一旦元にもどしたイベントファイルを生成して使用する。

これで、 a , b , c 係数が 3 個、 g が 5 個 (Hp, Mp, Ms, Lp, Ls)、 p が 36 個で、合計 540 個のパラメータがある。これは多すぎるので、SXS 装置に準じて簡略化する。まず、RISE_TIME と DERIV_MAX の間には強い相関関係があるので $a_{g,p} = 0$ とする。次に、 $b_{g,p} = b_g$ とする。すなわち b 係数のピクセル依存性を考慮しない。また、 $b_M = b_{Mp} = b_{Ms}$ 、 $b_L = b_{Lp} = b_{Ls}$ とする。すなわち、Mp と Ms もしくは Lp と Ms の b 係数の違いはないとする。最後に、 $c_{M,p} = c_{Mp,p} = c_{Ms,p}$ 、 $c_{L,p} = c_{Lp,p} = c_{Ls,p}$ とする。すなわち Mp と Ms もしくは Lp と Ms の c 係数の違いは、同じピクセル内なら、ないとする。これでパラメータ数が 112 に減った。ピクセル 0 番、Hp グレードのイベントを原点として、それに対する相対時刻を決めていく。

Omama et al. (2022) は、地上試験データの中で MXS が照射されている間の X 線光度曲線を折りたたみ、MXS の立ち上がりと立ち下りの時間が、ピクセルと DERIV_MAX によって変化することから、H グレードの b_H 係数と $c_{H,p}$ 係数 (37 個) を求めた。本研究では、残りのパラメータを求める。

6.2.1.2 方法

パラメータを 3 つのグループに分ける。

1. H, M, L グレード間の c 係数の差 (1 個)
2. M グレードの b_M 係数と $c_{M,p}$ 係数 (37 個)
3. L グレードの b_L 係数と $c_{L,p}$ 係数 (37 個)

1, 2 については MXS (§ 3.2.6.3) のデータを、3 についてはパルスレコード (§ 4.1.4.3) のデータを用いる。なお、MXS を用いる場合は、照射されないピクセル 12 番について何も制限をつけられないので、残りの 35 ピクセルの平均値とした。後述するとうに、ピクセル 12 番の相対誤差の分布は他のピクセルと変わらない (図) ことから、結果をもって正当化される (図 6.35、図 6.44 など)。

6.2.1.3 結果

■H, M, L グレード間の c 係数の差 イベント相対時刻付けの基準は、ピクセル 0 番の H グレードのイベントに設定している。しかし、下記に述べる M, L グレードの相対時刻較正については、それぞれ、ピクセル 0 番の M, L グレードのイベントに対する補正しかしていない。従って、グレード間の相対時刻補正量を求めておく必要がある。

これを MXS のデータを用いて行う。データセットの必要条件は、3 種類のグレードがある程度のカウント数を持つことである。通常、MXS の照射は H グレードのカウントレートなどを基準に最適化されるため M, L グレードのイベントは少ない。しかし、唯一、MXS1 のエイジングを行ったときだけ、非常に高いカウントレートで照射した。これを用いる。ここでエイジングとは、使用初期での LED 電流の経年変化が大きく観測計画が立てにく

くなるので、打ち上げ前に予めエイジングをして変化量大きい初期を経過しておくために実施した作業である。MXS1 についてのみ、TC7 の熱真空試験で行った。データと LED の設定は以下の通り。

- ノミナルサイド, LED1
- 2022/08/11 06:52 – 15:31
- PLS_SPC = 0.03125 s
- PLS_LEN = 0.015875 s
- LED_I_SET = 1.49 mA

このデータセットを用い、DERIV_MAX が 4000–8000 のイベントに絞って 畳み込み光度曲線 をグレードごとに作成した (図 6.21)。期待通り、L グレードのイベントの数が多くあることがわかる。また、Mp と Ms、Lp と Ls グレードはそれぞれ同じ立ち上がりと立ち下がり時刻をもっていると近似することができる。グレード間の c 係数の差は、どのピクセルでも同じと仮定して、グレードがもっとも一様に分布しているピクセル4番のデータを用いることにする。

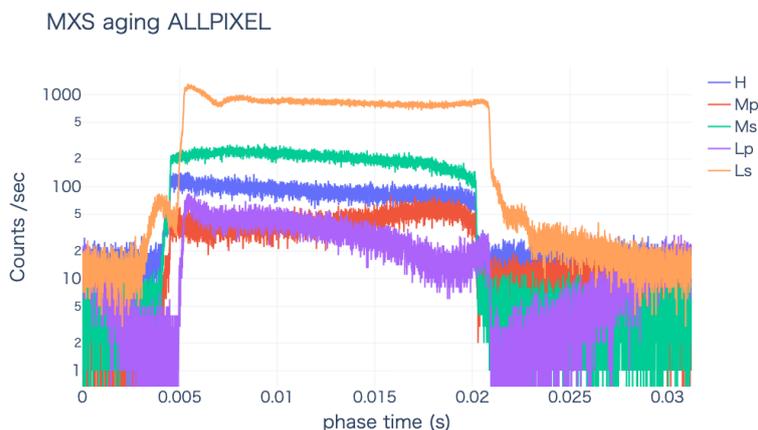


図 6.21. MXS エイジング data のすべてのピクセルにおいて、グレードごとに作成した畳み込み光度曲線。

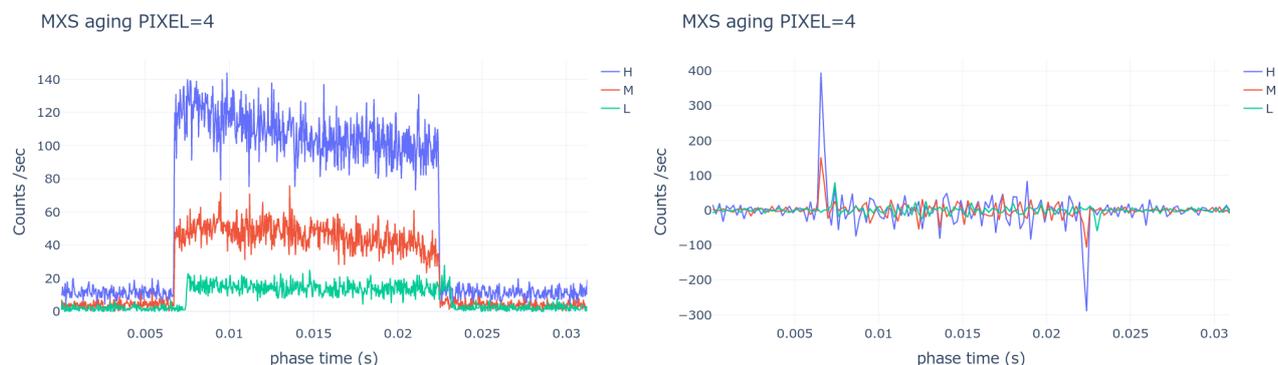


図 6.22. ピクセル 4 番のグレードごとの MXS エイジング 畳み込み光度曲線 (左) と、その微分波形 (右)。

ピクセル 4 番だけを取り出した畳み込み光度曲線 が図 6.22 (左) であり、これを微分したのが図 6.22 (右) である。これに対して、相互相関関数 (Cross Correlation Function; CCF) を計算した。CCF とは、2 つの信号 f 、 g

の相関を計算するために用いられる関数であり、式 6.13 となる。

$$CCF(t) = \sum_{\tau} f(\tau)g(t - \tau) \tag{6.13}$$

H グレードを基準として CCF を計算すると、図 6.23 のようになる。

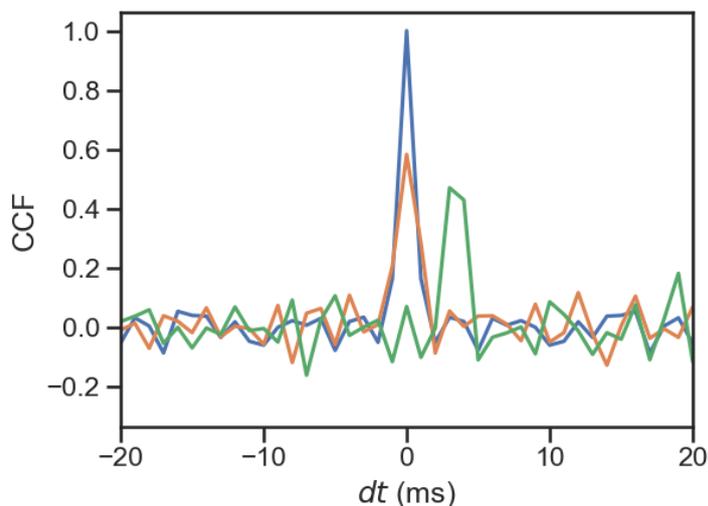


図 6.23. ピクセル 4 番の MXS エイジング 曇み込み光度曲線の各グレードの CCF。

タイムラグを評価するため CCF をローレンツ関数でフィッティングし、CCF が最大となる時間差を得た。その結果、 $c_{M,4} = 0.03 \pm 0.06$ ms、 $c_{L,4} = 0.72 \pm 0.11$ ms と推定した (図 6.24)。エラーは、ローレンチアの幅と、ピークの位置の不確かさから求めた。有効数字 2 桁として、 $c_{H,p} = 0$ ms、 $c_{M,p} = 0$ ms、 $c_{L,p} = 0.72$ ms を採用する。

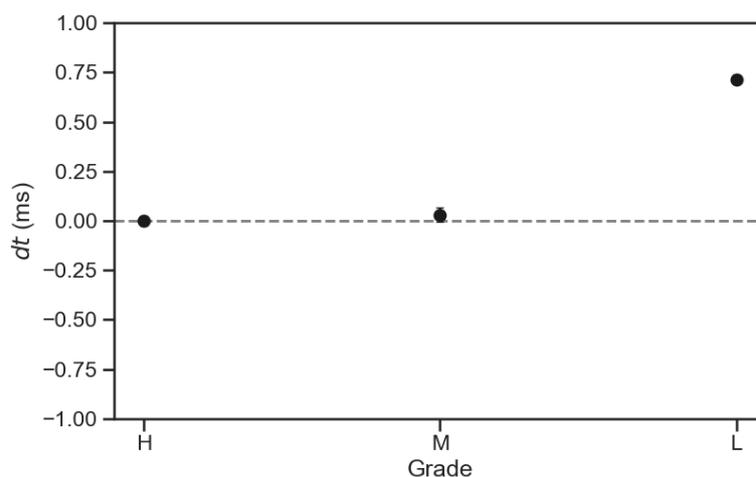


図 6.24. CCF から計算したグレード間の相対時刻。

■ M グレードの b_M 係数と $c_{M,p}$ 係数 次に M グレードイベントの b 、 c 係数を求める。図 5.3 に示したとおり、M グレードのイベントを蓄積するのは非常に困難である。ほとんどのカウントレート域で、H もしくは L グレードが支配的になるためである。そこで、PSP では、H グレードのイベントを強制的に M グレードとして処理する、す

なわち H グレード用ではなく M グレード用のテンプレート (図 5.5) を用いて最適フィルタ処理を行うオプション FORCED_MIDRES が設けられている。このオプションで取得した MXS のデータが地上試験時 (TC7) に唯一存在するので、これを使用する。

- ノミナルサイド, LED1
- 2022/07/26 09:30 – 2022/07/27 00:30
- PLS_SPC = 0.09375 s
- PLS_LEN = 1 s
- LED_I_SET = 1.34 mA

- リダナントサイド, LED3
- 2022/07/27 11:50 – 2022/07/28 00:40
- PLS_SPC = 0.09375 s
- PLS_LEN = 1 s
- LED_I_SET = 1.38 mA

まず、 $c_{M,p}$ を推定する。ノミナルサイド と リダナントサイド のイベントを合算した後 (両サイドの相対誤差は十分小さい)、7.5–8.5 keV に絞って 畳み込み光度曲線 とその微分波形 (図 6.25) を計算した。更に CCF (図 6.26) を求め、ピクセル 0 番に対する他ピクセルの到来時刻の差を導出した。

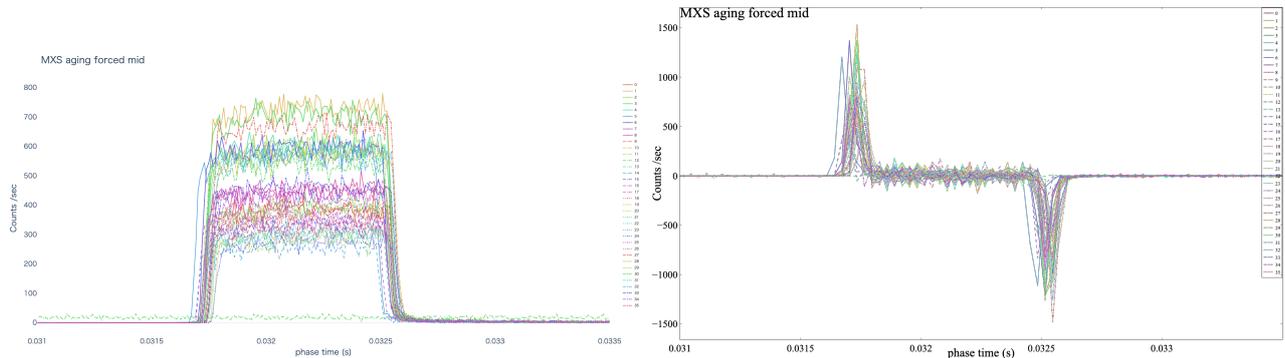


図 6.25. ピクセルごとの MXS FORCED_MIDRES 畳み込み光度曲線 (左) と、その微分波形 (右)。

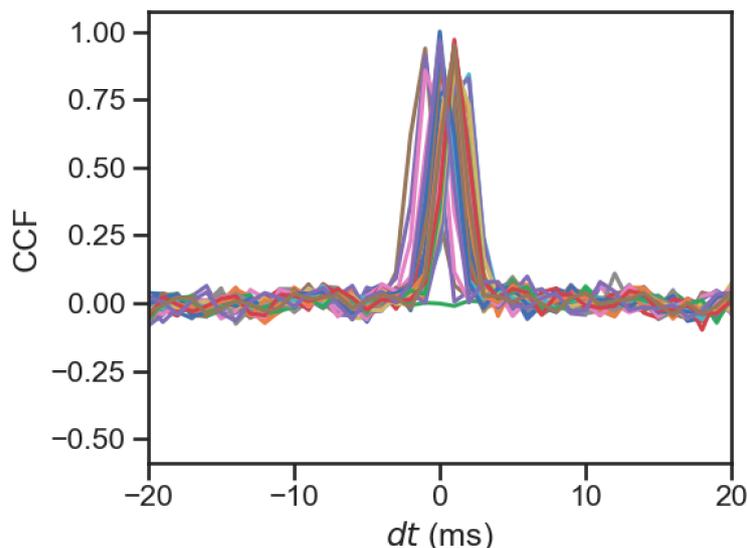


図 6.26. ピクセル 0 番に対する MXS FORCED_MIDRES 曇み込み光度曲線の各ピクセルの CCF。

これで得た $c_{M,p}$ を赤、Omama et al., 2022 で求めた $c_{H,p}$ を黒でプロットすると図 6.27 のようになる。 $c_{M,p}$ はシステマティックに 0.005 ms 程度大きい、誤差の範囲で $c_{M,p} \sim c_{H,p}$ であることがわかる。M グレードのテンプレートは H グレードのテンプレートを切り取っただけであり、到来時刻はテンプレートの前半部分だけで決まるので、これは妥当な結果である。従って、 $c_{M,p} = c_{H,p}$ 、すなわちピクセルごとに c 係数は H グレードと M グレードで同じ、とする。

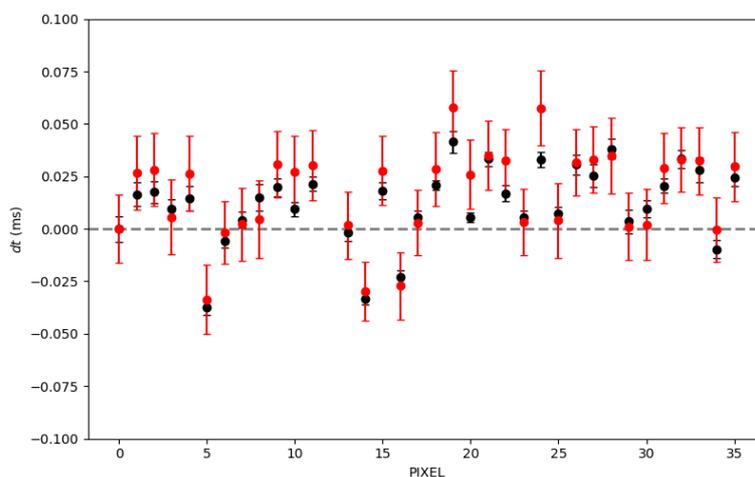


図 6.27. ピクセルの相対時刻。黒が $c_{H,p}$ (Omama et al., 2022)、赤が $c_{M,p}$ 。

次に、 $b_{M,p}$ を求める。 $c_{M,p}$ を補正したデータに対して、DERIV_MAX の依存性を確認するために、DERIV_MAX を 4000 から 8000 まで 15 等分し、 $c_{M,p}$ と同様の解析を行った (図 6.28、図 6.29)。

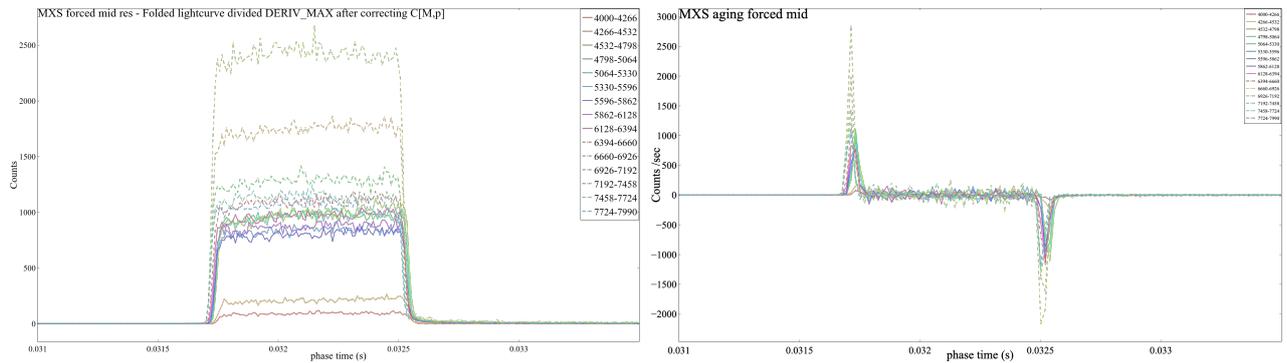


図 6.28. DERIV_MAX ごとの MXS FORCED_MIDRES 畳み込み光度曲線 (左) と、その微分波形 (右)。

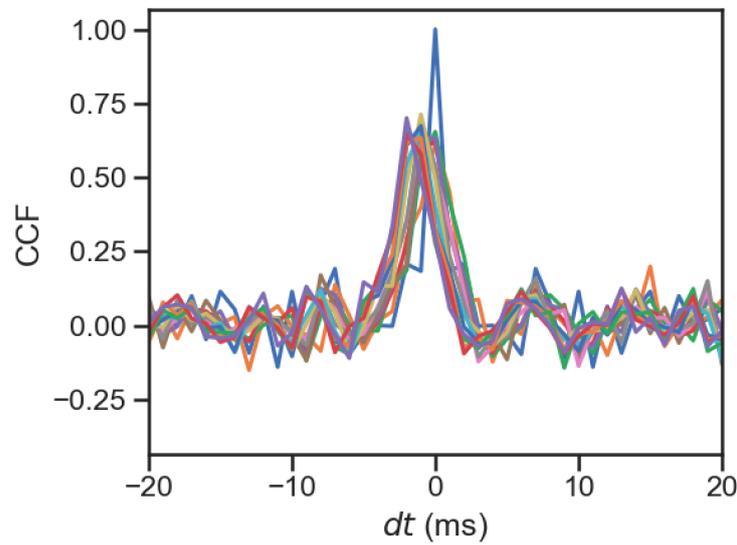


図 6.29. DERIV_MAX = 4000 に対する各 DERIV_MAX の CCF

DERIV_MAX = 4000 に対する各 DERIV_MAX の CCF。

以上より求めた、DERIV_MAX = 4000 を基準としたときの相対時刻を図 6.30 にプロットした。一次関数 $dt = b * \text{DERIV_MAX} + \text{オフセット}$ でフィットすると、相関係数は -0.99 、 p 値は 10^{-12} となり、負の相関が有意に存在していることが分かる。この傾きが、 b_M である。よって、 $b_M = -1.2 \pm 0.1 \times 10^{-4} \text{ sample/DERIV_MAX}$ と推定することができた。

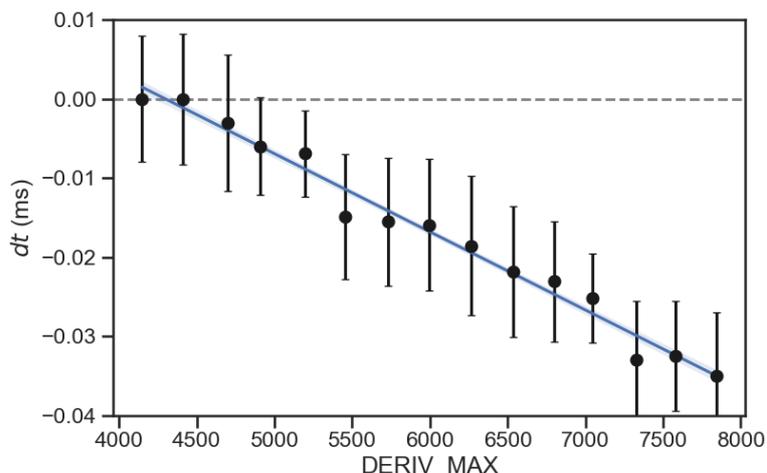


図 6.30. DERIV_MAX = 4000 を基準としたときの相対時刻。青は最小二乗法によるフィッティング。

■L グレードの b_L 係数と $c_{L,p}$ 係数 最後に、L グレードの b 、 c 係数を求める。これも MXS のエイジングのデータが使えそうに見えるが、そうではない。なぜなら、地上でのエイジングは、念の為 ノミナルサイド しか行っておらず、ゲートパルス閉状態ではアレイの全面に照射できないからである (図 3.21)。他に MXS の適切なデータはないので、パルスレコード (§ 4.1.4.3) を用いたまったく別の手法を用いることにする。

L グレードイベントの到来時刻は、H 及び M グレードとは異なり最適フィルタ処理をしないので、単純に微分波形が最大になるサンプル点を 1 sample の分解能 ($80 \mu s$) で決めている。パルスレコードには `adcSample` の時系列が保存されているので、式 5.1 に従って `derivative` を計算することができる。その例を図 6.31 に示す。

ここで、H グレードのパルスレコードをたくさん取り出してその時刻を求める。TICK_SHIFT の補正は PSP が軌道上で行っているので TIME_VERNIER の補正をすればよい。次に、そのパルスが L グレードだったとしたらつけられる到来時刻を求める。これは `derivative` が最大値となる時刻である。両者の引き算が H グレードに対する L グレードの時間差であるとする。

ピクセル 0 からパルスレコードを収集して、`derivMax` の関数として H と L グレードの時間差を表示すると図 6.32 のようになった。`derivMax` によらず H と L の時間差がほぼ一定であるということは、H と L が同じ `derivMax` 依存性、すなわち $b_H = b_L$ であることを意味する。また、これをピクセルごとに計算すると図 6.33 のようである。時間差は $0.80 \pm 0.037 \text{ ms}$ に収まっている。

念の為、 $b_H = b_L$ の妥当性を MXS のデータでも検証する。 b_L が $-b_H$ 、 0 、 $+b_H$ のいずれかを仮定して補正し、エイジングのデータを用いて MXS の畳み込み光度曲線とその微分を作成した (図 6.34)。ここでは L グレードのイベント数が最も多い 33 番ピクセルを使用した。

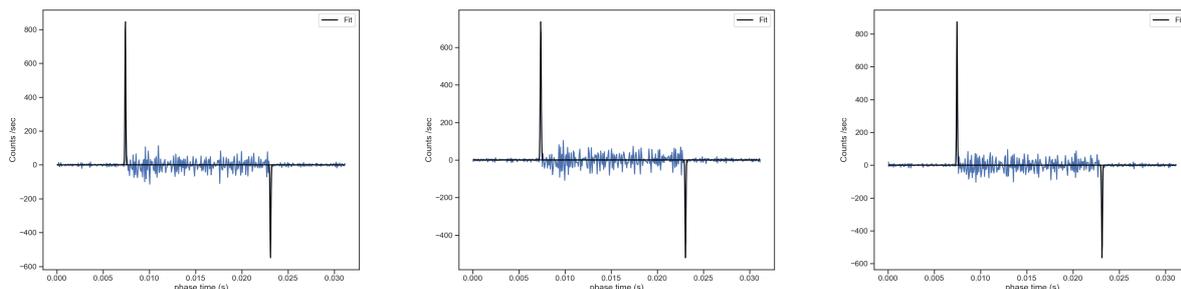
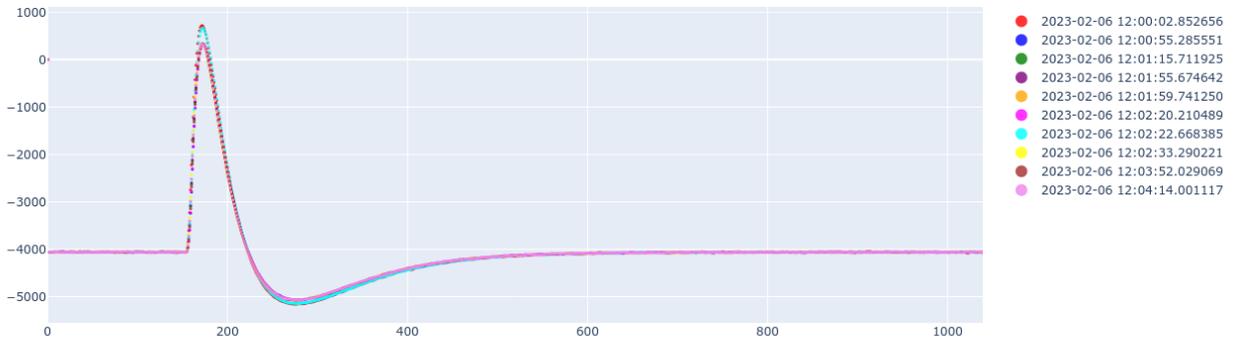


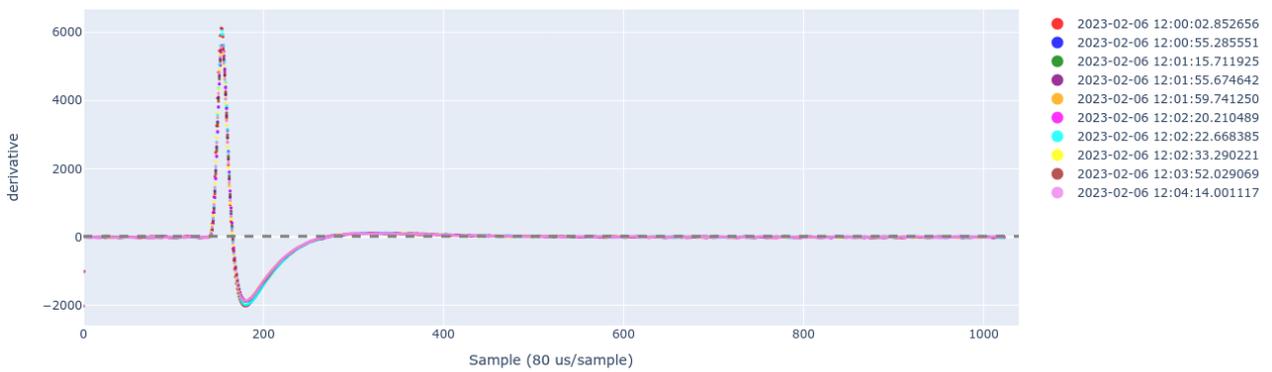
図 6.34. b_L が変化したときの微分波形の変化。左が $-b_H$ 、中央が 0 、右が $+b_H$ のとき。

Pulse records in /data1/tsujimot/Data/Resolve/20230304/fits/pr_p00_dT_TC9.pkl



(a) adcSample

Pulse records in /data1/tsujimot/Data/Resolve/20230304/fits/pr_p00_dT_TC9.pkl



(b) derivative

図 6.31. H グレードイベントのパルスレコードの `adcSample` と式 5.1 で計算した `derivative`。

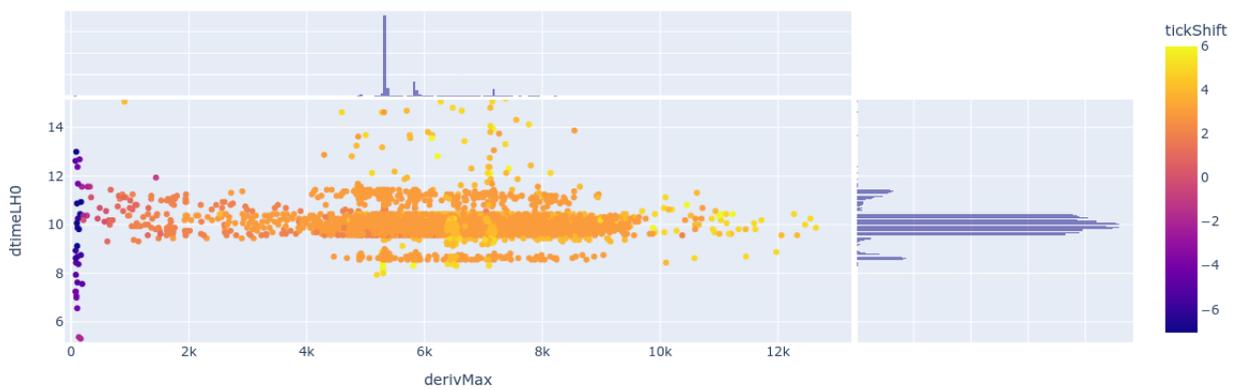


図 6.32. 地上試験 TC9 で取得したピクセル 0 のパルスレコードを用いて計算した H と L グレードの時間差を `DERIV_Max` ごとに表示したもの。

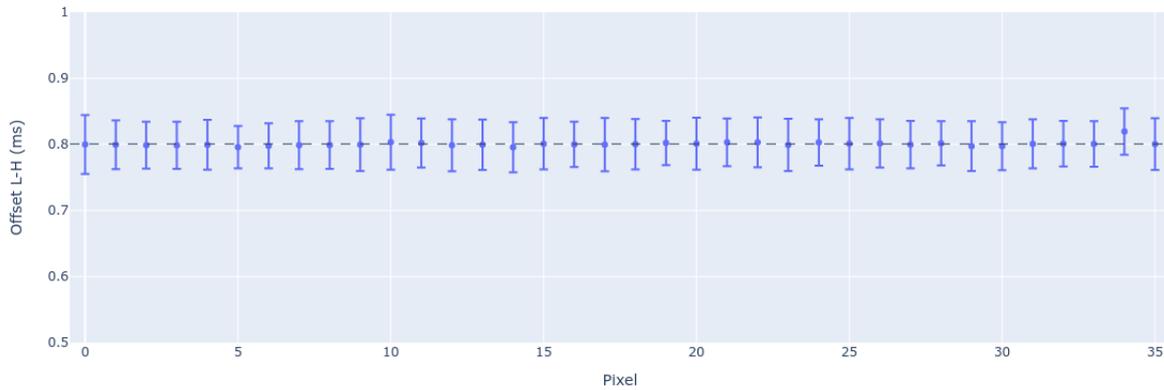


図 6.33. 地上試験 TC9 で取得したすべてのピクセルのパルスレコードを用いて計算した H と L グレードの時間差。

図 6.34 より、微分波形をガウシアンでフィッティングし、ピーク幅を求めた。その結果を表 6.1 となった。さらに、CCF をそれぞれ計算し、ピーク位置の相対時刻を求めた (表 6.2)。真の b_L は、ピーク幅が最も狭く、ピーク位置の相対時刻のエラーが最も小さくなるときである。よって、 $b_L = +b_H$ が選択される。

表 6.1. $b_{L,p}$ が変化したときの微分波形の分散 σ とそのエラー

	b_L	σ	エラー
1	$-b_H$	44 μs	2 μs
2	0	49 μs	3 μs
3	$+b_H$	43 μs	2 μs

表 6.2. b_L が変化したときの H グレードとの相対時刻

	b_L	c_L システムティック	c_L エラー
1	$-b_{H,p}$	0.65 ms	0.02 ms
2	0	0.68 ms	0.22 ms
3	$+b_{H,p}$	0.71 ms	0.001 ms

6.2.1.4 考察と結論

上述により、すべての 112 個のパラメータを求めた。パラメータ値の妥当性は、今後実施される軌道上時刻較正で最終的に検証される。

6.2.2 Anti-co イベント

6.2.2.1 目的

Anti-co 検出器は、その名の通り、反同時計測による宇宙線イベントの除去を行う。SXS 装置では、ピクセルイベントと anti-co イベントの到来時刻を比較すると、反同時イベントであるにも関わらず時間差が生じることが分かっていた (*Hitomi Instruments Calibration Documents*)。これは、マイクロカロリメーターでのみ行われる最適フィルタなどの信号処理により位相遅延が生じるためと理解されている。Resolve 装置でも同様であると期待さ

れる。

本研究では、地上試験データと軌道上データの両方を用いて、反同時のウィンドウ (anti-co ウィンドウ) を求める。Anti-co ウィンドウは、ANTSHIFT、ANTDTPRE、ANTDTFOL の3種類で記述されており、それぞれ anti-co イベント分布のピーク、anti-co ウィンドウの負の時間幅、anti-co ウィンドウの正の時間幅を表す (図 6.20)。これらの値は CALDB ファイルの、`xa_rsl_coefitime_*.fits` の HDU2 DELTIMES に記述される。

6.2.2.2 方法

まず、使用するデータセットを揃える。地上試験データでは TC5, 6, 7, 9 の全てのスクリーニングをしていない unfiltered イベントのデータを用いる。検出器面温度が 50 mK に制御され、温度ゆらぎが $2.5 \mu\text{K}$ を下回る時間帯を用いる。軌道上データでは、10月9日から12月6日の unfiltered イベントのデータを用いる。ここから、ADR リサイクル 以外の時間帯を用いる。

ピクセルイベントに対して、以下のスクリーニングを行う。

- `ITYPE = 0` (Hp のみ)
- `PHA > 0`
- `RISE_TIME > 0`
- `PIXEL \neq 12`
- `DERIV_MAX > 0`
- `-7 < TICK_SHIFT < 7`

Anti-co イベントに対して、以下のスクリーニングを行う。A 系 (`PSP_ID=1`) と B 系 (`PSP_ID=3`) で結果が同じとは限らないので、別々に扱う。

- `AC_TYPE = AC`
- `PHA \geq 71`
- `DURATION \geq 2`
- `PSP_ID = 1 or 3`

Anti-co イベントに対して、最も時間的に近接するピクセルイベントを探し、それらの `SAMPLECNT` の差分を計算 (anti-co イベントを相対時刻原点とする) し、頻度分布を求めた。

6.2.2.3 結果

■地上試験データ PSP-A, PSP-B ごとに調査し、その結果をそれぞれ図 6.35、図 6.36 に示す。ピクセルごとに大きな違いはないが、17 及び 35 番ピクセルはやや分布が異なる。これは、これらのピクセルが anti-co チャンネルとクロストーク (§ 6.2.3) するためである。すべてのピクセルを合わせた分布 (右側) で評価する。

得られた時間差の分布に対してガウシアン + 定数のモデルでフィッティングを行った。分布の平均値は、PSP-A、PSP-B で違いはなく、 -1.99 ± 0.01 sample となった。これを ANTSHIFT の値とした。また、図 6.35、6.36 から、分布が正負にほぼ対称の広がりを持っていることが分かる。したがって、ANTDTPRE と ANDTFOL は同じでよい。ガウシアンと定数の大小関係が逆転する点を分布の広がりとし、マージンを 2 倍とると、 ± 3 sample となった。

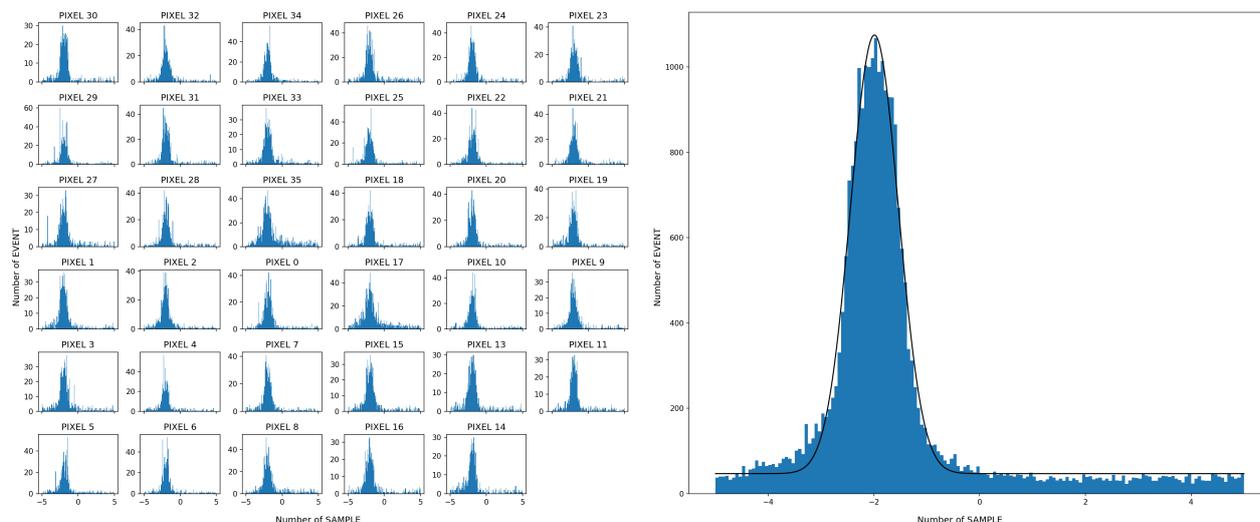


図 6.35. 各ピクセルイベントと PSP-A の anti-co イベントとの時間差。横軸は時間差（1 sample が 80 μ s）、縦軸はイベント数を示している。左：各ピクセルの分布、右：全てのピクセルの合体。

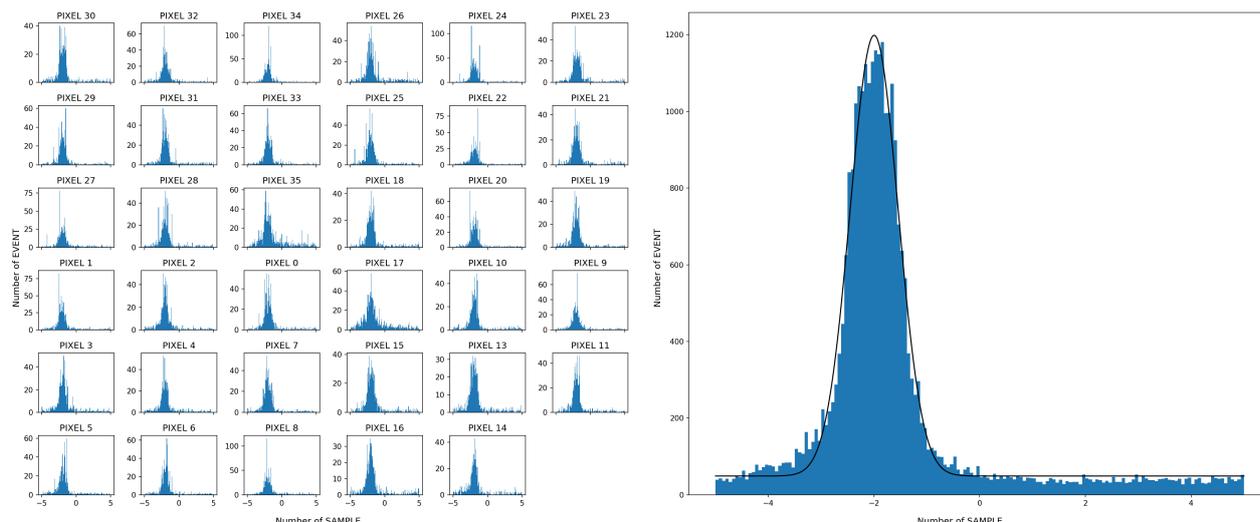


図 6.36. 各ピクセルの X 線イベントと PSP-B の anti-co イベントとの時間差（地上試験データ）。横軸は時間差（1 sample が 80 μ s）、縦軸はイベント数を示している。左：各ピクセルの分布、右：全てのピクセルの合体。

■軌道上データ 地上試験データの結果から PSP-A、PSP-B に違いがないことが分かったため、PSP-A についてのみ調べた。ただし、イベント閾値 75 (2023 年 10 月 31 日以前) と 120 (2023 年 10 月 31 日以降) のデータは分けて扱う。それぞれ、図 6.37、6.38 に結果を示す。

地上試験データと同様に、得られた時間差の分布に対してガウシアン + 定数のモデルでフィッティングを行うことで、分布を定量化した。分布の平均値は、イベント閾値 75、120 の場合、それぞれ、 -1.860 ± 0.004 sample と -1.859 ± 0.004 sample となった。それぞれの分布の平均値に有意な違いはないが、地上試験の分布の平均値とは、有意な違いは存在する。ただし、その差は、ウィンドウ サイズに比べて十分に小さい。

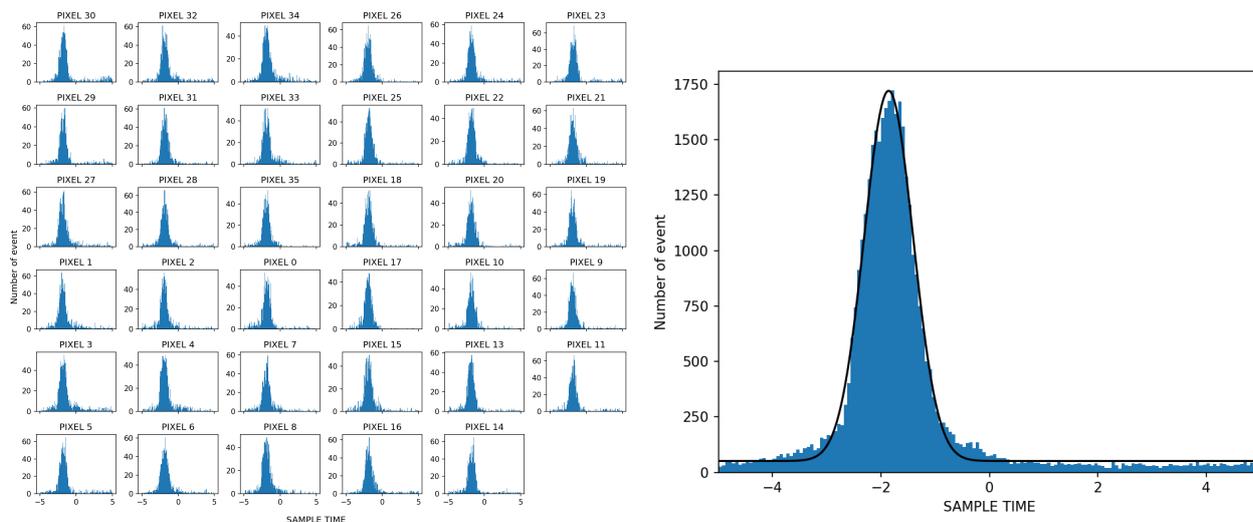


図 6.37. 各ピクセルイベントと anti-co イベントとの時間差 (イベント閾値 75)。横軸は時間差 (1 sample が 80 μ s)、縦軸はイベント数を示している (軌道上データ)。左: 各ピクセルの分布、右: 全てのピクセルの合体。

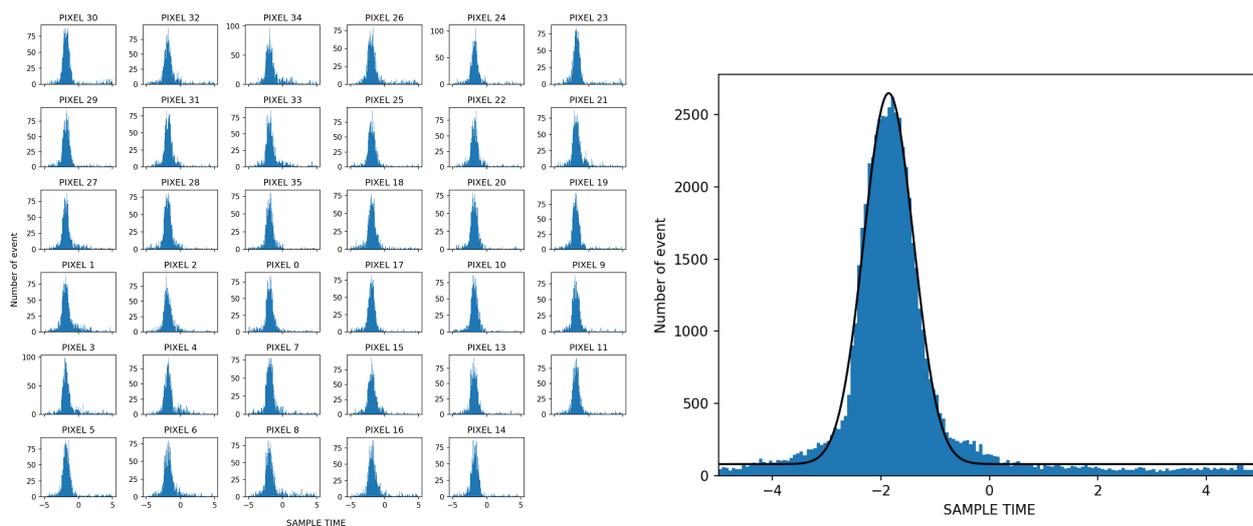


図 6.38. 各ピクセルのX線イベントと anti-co イベントとの時間差 (イベント閾値 120)。横軸は時間差 (1 sample が 80 μ s)、縦軸はイベント数を示している (軌道上データ)。左: 各ピクセルの分布、右: 全てのピクセルの合体。

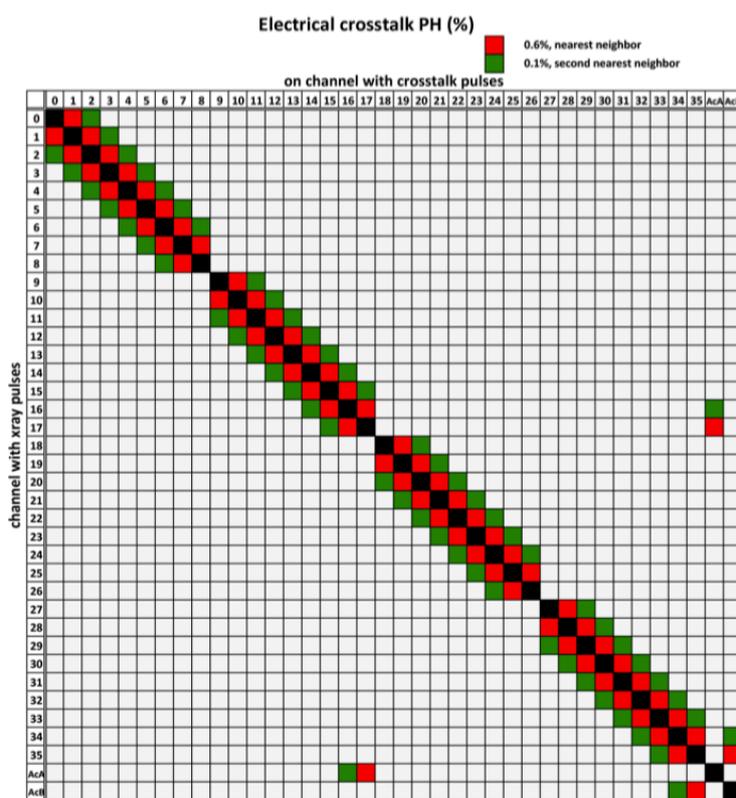
6.2.2.4 考察と結論

上記の結果から、(1) PSP-A, PSP-B、(2) イベント閾値 75、120 のいずれの場合も、同じ anti-co ウィンドウの値で対応できると結論する。その値は、ANTSHIFT が -2 sample、ANTDTPRE と ANTDTFOL が 3 sample でよい。SXS 装置で用いられ、現在の CALDB に入っている ANTSHIFT、ANTDTPRE、ANTDTFOL の値はそれぞれ、6.25 sample、6.25 sample、 -6.25 sample である。これより anti-co ウィンドウのサイズを小さくできることを示した。

6.2.3 電氣的クロストークイベント

6.2.3.1 目的

クロストークとは、ピクセル間で信号が混線する現象である。Resolve の場合、主に2種類のクロストークが知られる。1つは電気信号によって生じる電氣的クロストーク、もう1つは熱によって生じる熱的クロストークである。ここでは前者を扱う。電氣的クロストークは、検出器から JFET の間の高インピーダンス信号線で発生する (§ 3.2.1)。あるピクセルで X 線が検出され、その読み出し線に電気信号が発生する。この時、信号線間には静電容量があるため誘電的に結合し、隣の信号線にも信号が発生する。容量性結合なので、時間微分したような波形になる。そのまた隣の信号線にまで影響が及ぶ場合もある。元となった X 線信号を親イベント、電氣的クロストークによって発生したイベントを子イベントと呼ぶことにする。また、隣の信号線での子イベントを1次、その隣の信号線の子イベントを2次と呼ぶ。



Channel map for electrical crosstalks. Listed in legend are nominal raw PH fractions.

図 6.39. 電氣的クロストークのピクセルマップ。縦軸は黒色の親イベントに対応したピクセル番号と anti-co、横軸は赤色が1次電氣的クロストークイベント、緑色が2次電氣的クロストークイベントに対応したピクセル番号を示している。(NASA GSFC C. A. Kilbourne 氏提供)

図 6.39 より、隣同士のピクセルに電氣的クロストークが生じていることがわかる。カロリメーターの配線の図 3.8 より、 i 番ピクセルに対して、 $i \pm 1$ 番ピクセルにクロストークが発生する。ただし、 $9n$ 番のピクセルは $9n + 1$ 番のみ、 $9n - 1$ 番のピクセルは $9n - 1$ 番のみである。Anti-co A side, B side は、それぞれ 17 番、35 番ピクセルに電氣的クロストークを引き起こす。

1次電氣的クロストークイベントは親イベントの約 0.6% の PHA、2次電氣的クロストークイベントは親イベントの約 0.1% の PHA をもつと見積もられている。したがって、電氣的クロストークイベントは親イベントよりも

低エネルギーに生じる。実際、SXS 装置における「かに」星雲の観測データにおいて、電気的 クロストークイベントは、1 keV 以下に発生していることが軌道上で確かめられている (Tsujiimoto et al., 2018a)。

6.2.3.2 方法

クロストークイベントを抽出するには親イベントのエネルギーが一定のものが望ましい。そこで、LSF の較正に用いた地上試験データを用いる (表 6.3)。CCCM (§ 3.2.7.1) で単色化した X 線を照射しており、3つの異なるエネルギーのデータがあるので、親イベントのエネルギー依存性も調査できる。

表 6.3. 本研究で用いたデータセット。

	OBSID	期間	輝線	エネルギー (keV)
1	097091610	2022/02/01 04:00 – 2022/02/01 08:00	Fe K α	6.4
2	097091650	2022/02/01 20:00 – 2022/02/02 00:00	Au L α	9.7
3	097091750	2022/02/02 20:00 – 2022/02/03 00:00	Au L β	11.4

これらのデータセットに対して、`rslgain` と `rslpha2pi` によってゲイン補正と、エネルギー (EPI2) が計算がされている PL の中間ファイルを用いた。以後、解析には H、M、L のグレードを用い、較正用の 12 番ピクセルを除いた全ピクセルを用いる。これらから、クロストークの親子ペアのイベントを抽出し、それらの時間差とエネルギー比を調べる。

6.2.3.3 結果

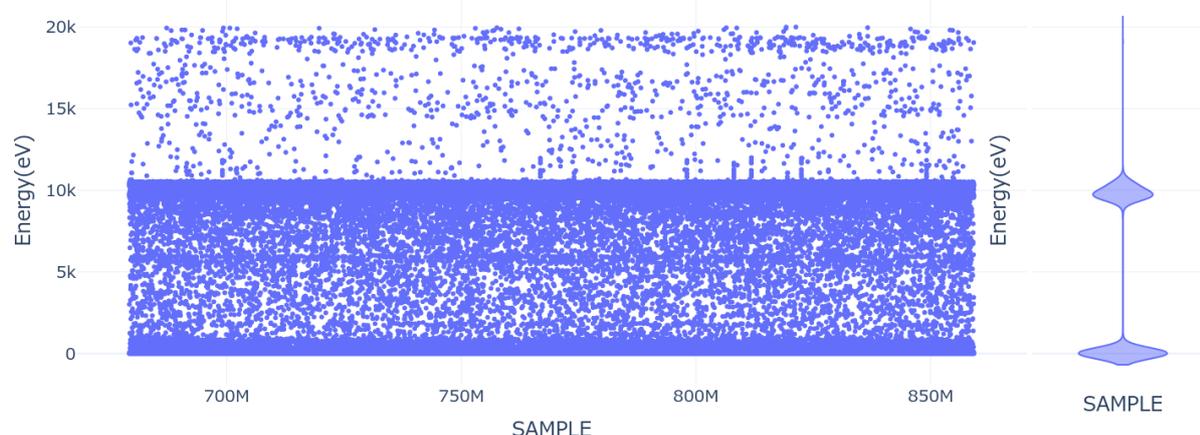


図 6.40. AuL α のサンプル数とエネルギーの散布図。12 番以外の全ピクセルを表示。

まず、電気的 クロストークイベントを判定するために、親イベントと子イベントの組み合わせを同定する。例えば、データ 2 の場合、全イベントの EPI2 と `SAMPLECNT` をプロットすると図 6.40 のようになる。9.7 keV の Au L α 蛍光輝線のエネルギーにイベントが集中している一方で、150 eV 以下の低エネルギー帯域にもイベントが集中していることが分かる。この低エネルギーのイベントが、9.7 keV の親イベントによって引き起こされたクロストークの子イベントであると考えられる。

そこで、親イベントを蛍光輝線のエネルギー ± 1 keV の範囲の Hp グレードイベント、子イベントを 150 eV 以下のエネルギーのイベントの中から抽出する。このようにして、すべての親イベントに対し、子イベントを隣同士のピクセルから探してペアとし、以下を求めた。

- 親イベントから子イベントの到来時刻を引いた時間差の分布。
- 子イベントの PHA に対する親イベントの PHA の比 (pharatio) の分布。

■ データ 1 (Fe K α 蛍光輝線) 図 6.41。

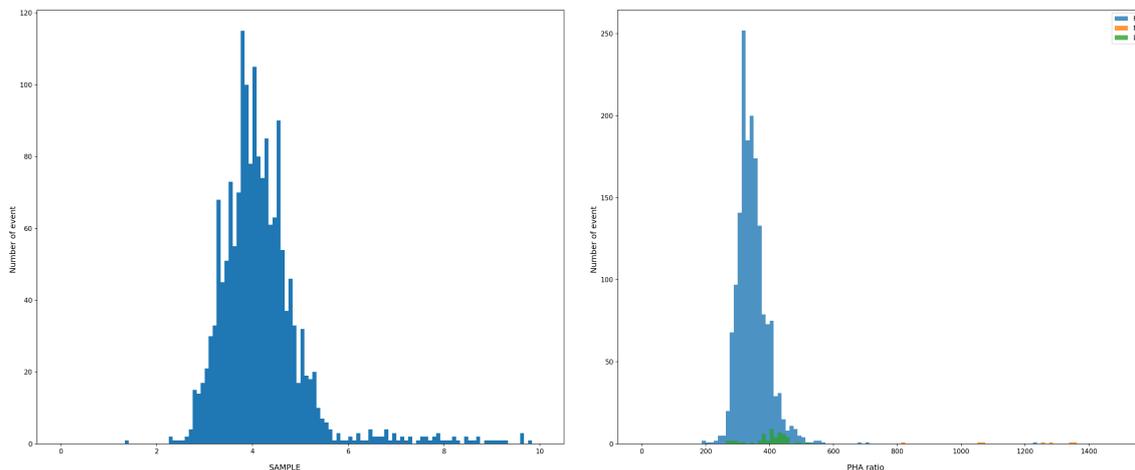


図 6.41. Fe K α 蛍光輝線のデータ 1 について、左：親イベントから子イベントの時間を引いた時間差、右：子イベントの PHA に対する親イベントの PHA の比の分布。色の違いは子イベントのグレードの違いを表す。

■ データ 2 (Au L α 蛍光輝線) 図 6.42。

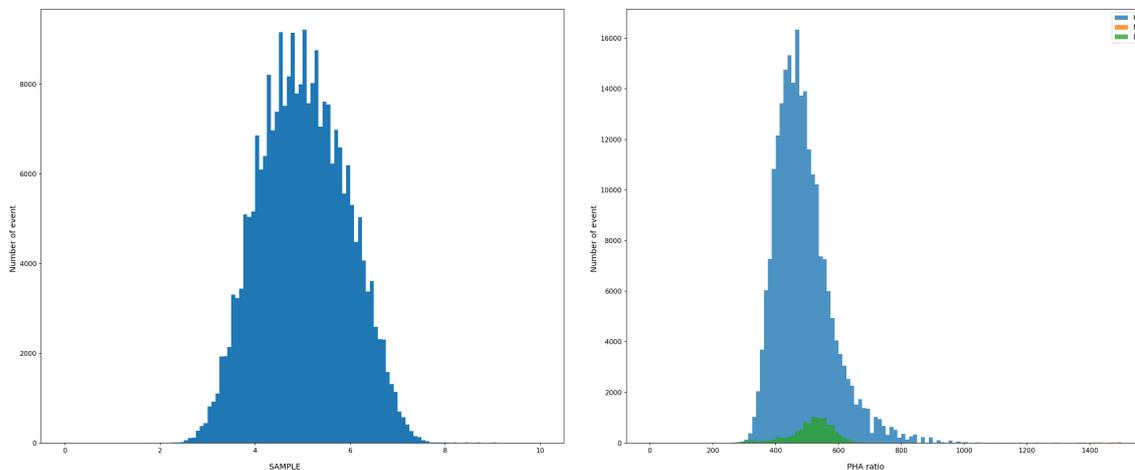


図 6.42. Au L α 蛍光輝線のデータ 2 について、左：親イベントから子イベントの時間を引いた時間差、右：子イベントの PHA に対する親イベントの PHA の比の分布。色の違いは子イベントのグレードの違いを表す。

■ データ 3 (Au L β 蛍光輝線) 図 6.43。

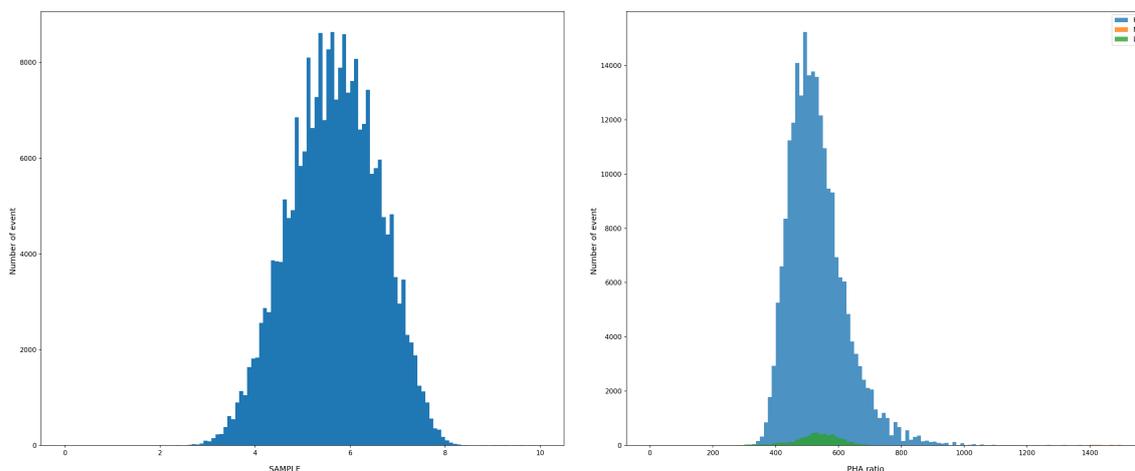


図 6.43. Au L β 蛍光輝線のデータ 3 について、左：親イベントから子イベントの時間を引いた時間差、右：子イベントの PHA に対する親イベントの PHA の比の分布。色の違いは子イベントのグレードの違いを表す。

6.2.3.4 考察と結論

■電氣的クロストークイベント抽出の妥当性 まず、クロストークイベント抽出の妥当性を調べるために、子イベントを、親イベントの隣のピクセル番号が増える方向に限定した、親イベントから子イベントの時間を引いた時間差 (図 6.44 の左図) と、親イベントの隣のピクセル番号が減る方向に限定した親イベントから子イベントの時間を引いた時間差 (図 6.44 の右図) を求めた。その結果、 $9n$ 番のピクセルは $9n + 1$ 番のピクセル、 $9n - 1$ 番のピクセルは $9n - 2$ 番のピクセルにのみクロストークを引き起こすことが確認できた。これは、図 6.39 から予測されるクロストークの顕著な特徴である。これより、本研究でのクロストークイベントの抽出は妥当であると判断できる。

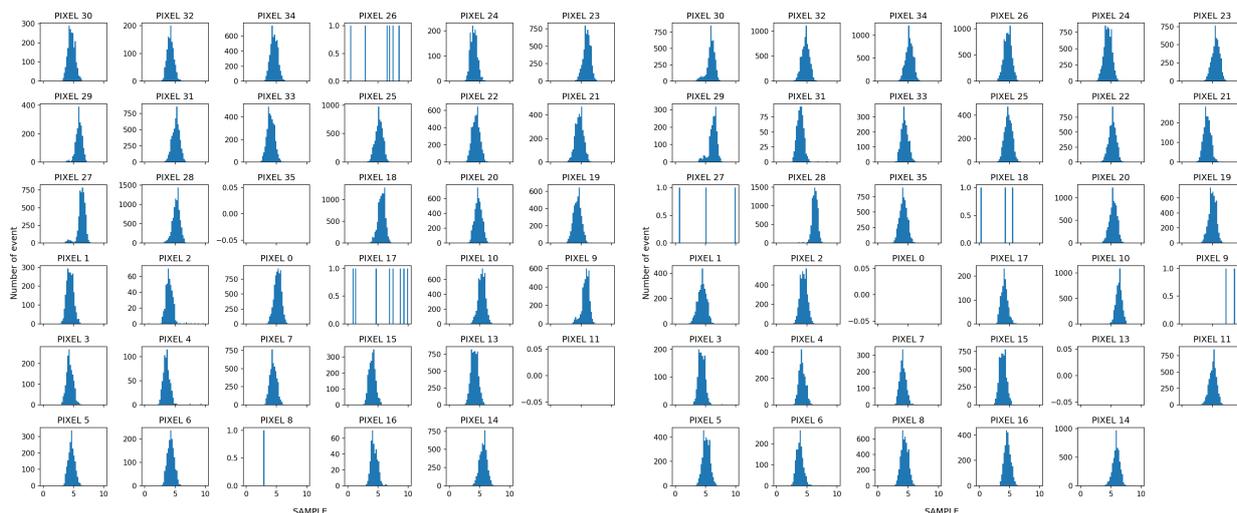


図 6.44. Au L α 蛍光輝線のデータ 2 について片側の隣のピクセルの、左：親イベントのピクセル番号の正の隣の子イベントの時間を引いた時間差、右：親イベントのピクセル番号の負の隣の子イベントの時間を引いた時間差。

■時間差 次に時間差について考察する。子イベントは親イベントによる影響によって引き起こされるため、因果関係から、子イベントの時間は親イベントの時間よりも遅れるはずである。しかし、図 6.41、図 6.42、図 6.43 の左図から、親イベントは子イベントよりも時間が遅れていることが分かる。

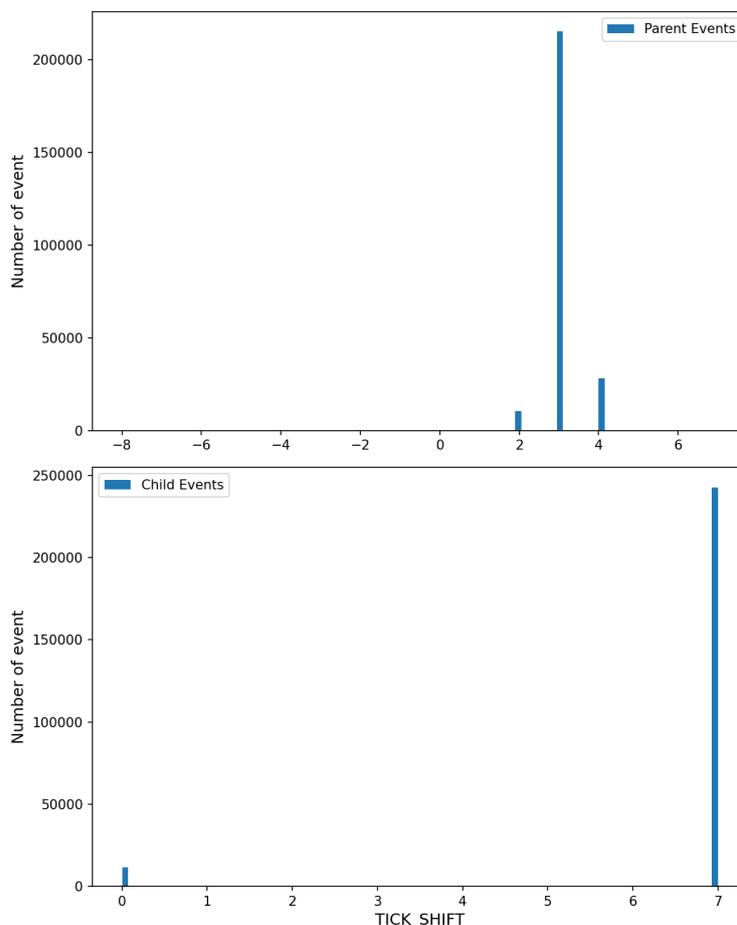


図 6.45. Au $L\alpha$ 蛍光輝線データにおける TICK_SHIFT の度数分布。上：親イベント、下：子イベント。

この理由は、典型的な TICK_SHIFT の値が、親イベントと子イベントで異なることにある。図 6.41 は、Au $L\alpha$ 蛍光輝線のデータ 2 における親イベントと子イベントそれぞれの TICK_SHIFT の度数分布である。親イベントの TICK_SHIFT は、2-4 であるのに対して、子イベントの TICK_SHIFT はほとんどが 7、0 が少し存在していることがわかる。

軌道上データ処理 (§ 5.1) により、TICK_SHIFT が -7 から 6 までの値は時刻が補正されるが、-8 と 7 の場合は時刻の補正が行われない。さらに、子イベントの度数分布の TICK_SHIFT が 0 の値をもつ X 線光子は L グレードであり、時刻の付け方が異なる。したがって、親イベントは 2-4 sample の補正が行われるが、子イベントの補正は行われない。これにより、親イベントの到達時間が子イベントの到達時間よりも遅れた時刻がつけられてしまう。これが見かけ上の因果関係が逆転する理由である。ただし、これを考慮したウィンドウを設定すればよいので、これを修正する必要はない。

図 6.41、図 6.42、図 6.43 より、親イベントのエネルギーが増加するに従って、時間差の分布の中心値が大きくなることがわかる。最も低いエネルギーの Fe $K\alpha$ 蛍光輝線（データ 1）から最も高いエネルギーの Au $L\beta$ 蛍光輝線（データ 3）を包含するには、2 sample 以上、9 sample 以下のウィンドウであればよい。親イベントとしては、Fe $K\alpha$ 蛍光輝線より低いエネルギーの場合の子イベントはイベント閾値にかからず子イベントとして認識されない。また $L\beta$ 蛍光輝線より高いエネルギーの親イベントは天体観測ではほとんど受からない。したがって、2-9 sample のウィンドウは、天体観測データのスクリーニングとして適当である。

■PHA 比 最後に、子イベントの PHA に対する親イベントの PHA の比を考察する。時間差と同じ議論で、親イベントの範囲は $AuL\beta$ から $Fe K\alpha$ まででよいとして、範囲を設定する。図 6.41、図 6.42、図 6.43 の右図より、PHA 比は 200 以上とすることにより、更に有効性の高いスクリーニング条件を設定できる。

■結論 クロストークイベントは、時間差、PHA 比において特徴的な分布を示すことがわかった。以下の条件でスクリーニングすることを提案する。これは現行の `rslflagpix` のアルゴリズムやパラメタリゼーションと異なるので、実装可能性について議論を要する。

1. 親イベントと子イベントが隣接するピクセルにある（ただし、クワドラントをまたぐものは除く）
2. 親イベントに対し、子イベントが `cteldt_minimum = 2 sample` から `cteldt_maximum = 9 sample` の範囲にある（図 6.46）。
3. 子イベントの PHA に対する親イベントの PHA の比が 200 以上である。

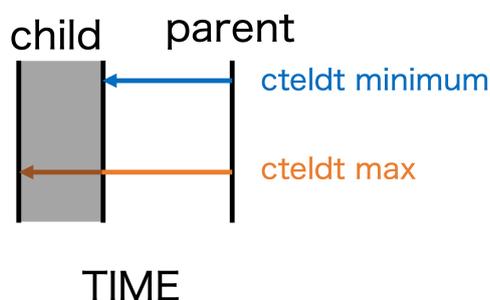


図 6.46. 親イベントと子イベントの時間差の模式図

6.2.4 フレームイベント (1) 宇宙線

6.2.4.1 目的

本節では、フレームイベント最適なスクリーニング条件を決定することを目的とする。フレームイベントとは、マイクロカロリメーターのピクセルが配置されている外側のフレーム部分（図 3.3）に宇宙線がヒットし、これによる発生熱が拡散してピクセルで信号が受かる、熱的なクロストークイベントである。そのため、フレームイベントは、ある時間内に複数のピクセルで同時に検出されるという特徴がある。

なお、SXS 装置による 366 ks のバックグラウンド観測の解析によって、宇宙線イベントによって生じるフレームイベントが調べられ (Kilbourne et al., 2018b)、ほとんどが立ち上がりが遅くエネルギーが低いイベントであることが報告されている。

6.2.4.2 方法

宇宙線イベントによるフレームイベントを調べるため、宇宙線イベントレートの高い軌道上データを用いる。宇宙線以外のノイズイベントが少ないデータを用いることが適当である。そこで、打ち上げから 12 月 6 日までのゲートバルブ閉のデータセット（表 4.16）を用い、一般的なイベントスクリーニング (`xa_gen_select_*.fits` の `PIXELALL`) をかけた後に、以下の条件で更に絞り込んでイベントを抽出した。

- 2 次元イベントスクリーニング (§ 6.1; `RISE_TIME` スクリーニング (式 6.2) と `TICK_SHIFT` スクリーニング (式 6.4, 式 6.5))
- 較正 X 線源 FW の ^{55}Fe 及び MXS が照射されている時間を除く

- SAA 通過時間を除く
- 地没中のデータに限定 ($ELV < 0$)

すべてのイベントに対し、一定時間 (± 10 sample) 内部に到来したイベントをすべて抽出し、その時間差とウィンドウに入ったイベントの個数を調べた。イベント A と B の到来時刻をそれぞれ t_A 、 t_B とすると、 $t_A - t_B$ と $t_B - t_A$ の両方を数えあげている。従って、時間差分布は正負対称になる。また、ウィンドウに入ったイベントの個数 (`same_pix_number`) は自身は含まず少なくとも別の1つのイベントがあるので、個数は1以上になる。

6.2.4.3 結果

ウィンドウに入ったイベントの個数 (`same_pix_number`) が $n = 1, 2, \dots, 34$ 以上になるフレームイベント候補に対して、時間差の頻度分布を作成した。この分布をローレンチアン+定数のモデル

$$\frac{\gamma}{\pi(x^2 + \gamma^2)} + C \quad (6.14)$$

でフィットした結果と合わせて示す (図 6.47)。

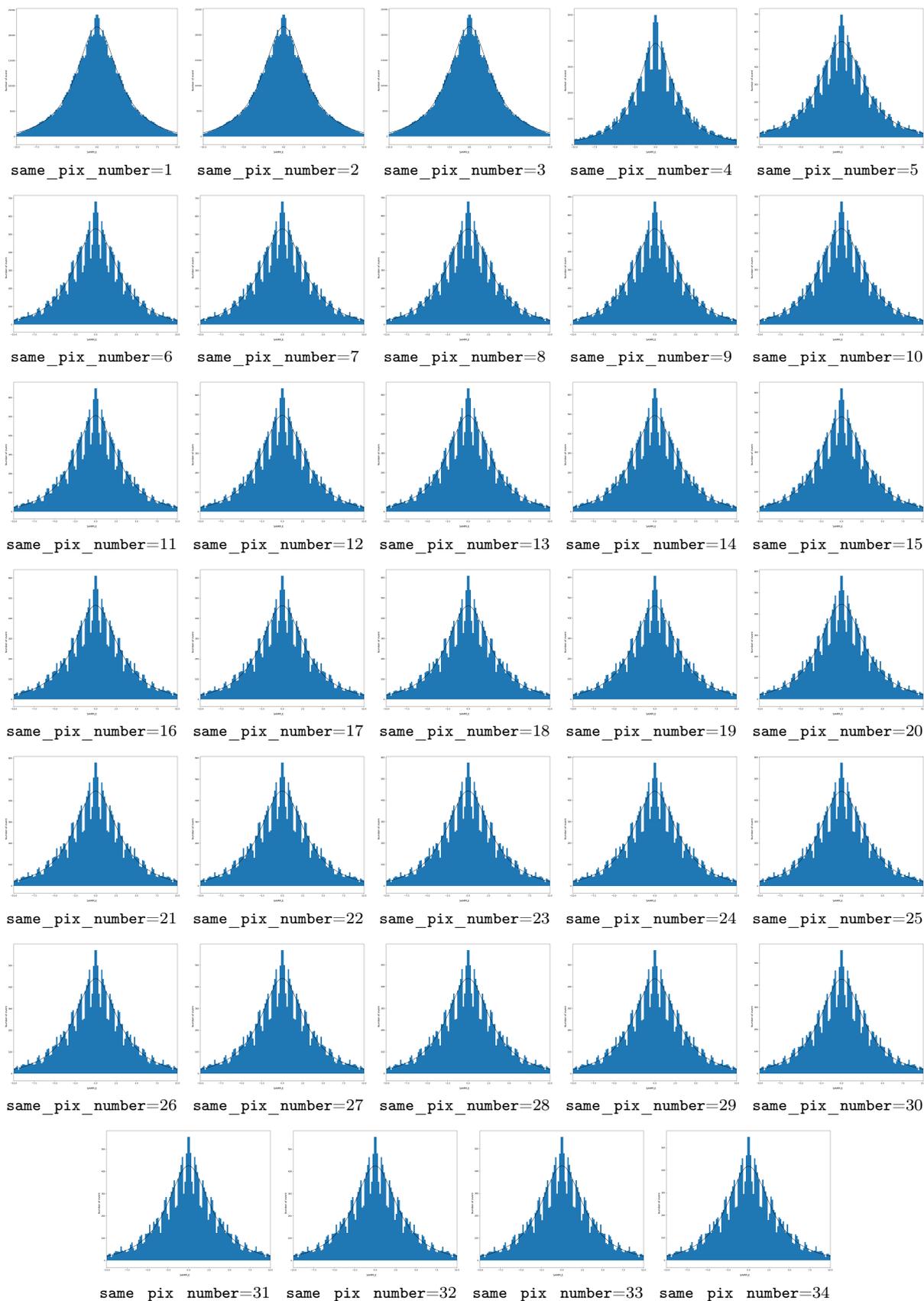


図 6.47. フレームに入射しているデータの中でカウント数が 100 以上のヒストグラム。左から same_pix_number が 1,2,3,...,33,34 の場合のヒストグラムである。黒の実線はフィッティング関数を表している。

6.2.4.4 考察と結論

時間差の分布は左右対称で、ウィンドウの幅は ± 9 sample (SXS 装置に基づいた現在の CALDB の値) で問題ないと判断する。

same_pix_number について、値が大きくなるとフレームイベントとして認定される数が少なくなる。その最適値を得るため、same_pix_number の関数としてベストフィットの積分値の変化を図 6.48 に示した。フレームイベントと、偶然にも時間ウィンドウの中に入ってしまったピクセルイベントは same_pix_number が増えると減る傾向にあるがフレームイベントは、same_pix_number が 4 以下のときはほとんど変化がない。すなわち、フレームイベントは大半が 4 つ (自身を含めて 5 つ) のイベント群からなることがわかる。

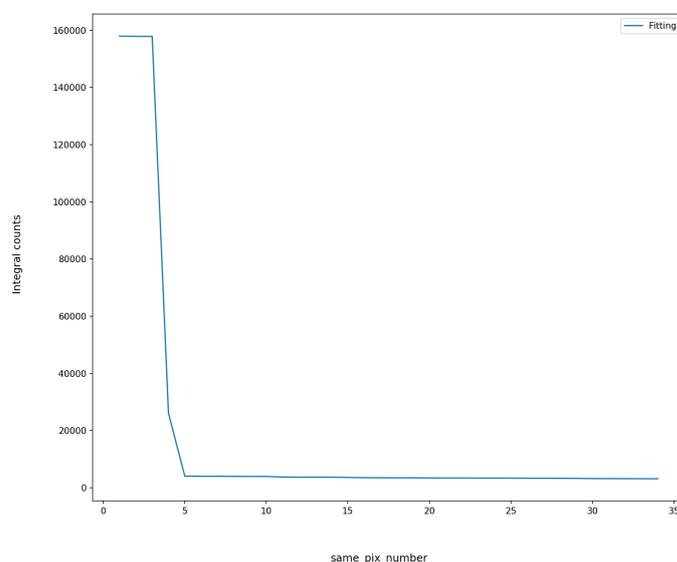


図 6.48. 宇宙線イベントによるフレームイベントとバッググラウンドイベントの分布

これらより、フレームイベントのスクリーニング条件は以下を提案する。

1. ウィンドウの幅は ± 9 sample (SXS 装置に基づいた現在の CALDB の値) で問題ない
2. 更にフレームイベントを効率的に落とすには、「ウィンドウ内にあるイベントの数が 3 個 (自分自身を含めて 4 個) 以上である」という追加条件を課すことができる。

フレームイベントのスクリーニングは、クロストーク (§ 6.2.3) や 電子反跳 (§ 6.2.4) イベントとは異なり、エネルギーやピクセル情報を用いず、時間差のみに基づく。従って、高カウントレート天体の観測の場合は、偽陽性で条件に合致した真の X 線イベントを除去してしまう可能性が非常に大きくなる。2 つ目の追加条件は、それを抑制する上で有効であると考えられる。天体からのカウントレートを、アレイ全体で νs^{-1} とする。ポアソン統計を考えて、フレームイベントのウィンドウ幅 $\Delta t = 9 \times 2 \text{ sample} = 1.44 \text{ ms}$ にイベントが k 個到来する確率は、

$$P(X = k) = \frac{(\nu \Delta t)^k e^{-\nu \Delta t}}{k!} \quad (6.15)$$

である。 $k \geq k_{\text{th}}$ にてフレームイベントスクリーニングで落とされるとすると、その総数は

$$N(k_{\text{th}}) = \sum_{k_{\text{th}}}^{\infty} k P(X = k) = \nu \Delta t - \sum_0^{k_{\text{th}}-1} k P(X = k) \quad (6.16)$$

であり、全カウント $\nu\Delta t$ 個に占める割合は

$$f(k_{th}) = \frac{N(k_{th})}{\nu\Delta t} \tag{6.17}$$

となる。図 6.49 に ν を変えたときの k_{th} ごとの $f(k_{th})$ を示す。これにより、 k_{th} を 2 (現在のスクリーニング条件) から 5 に変更することの有効性が評価できる。例えば「かに」星雲の約半分のカウントレート (1000 s^{-1}) の天体に対して、 $k_{th} = 2$ だと 80% 程度の光子を失うが、 $k_{th} = 5$ だと 5% 程度ですむ。

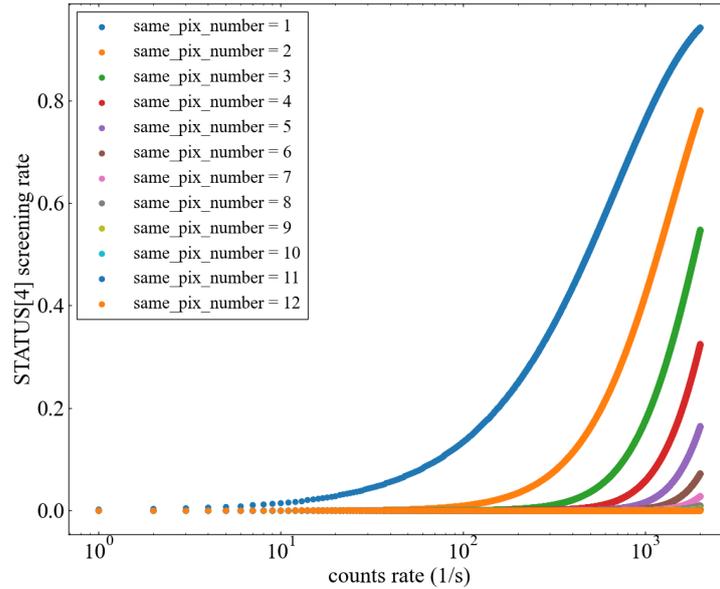


図 6.49. ポアソン統計によるフレームイベントのスクリーニング率。横軸は天体のカウントレート、縦軸は全体のカウント数に対するフレームイベントのスクリーニングカウント数の割合を示す。

6.2.5 フレームイベント (2) X 線

6.2.5.1 目的

本節では、これまで調査されなかった、ピクセルイベントによって生じるフレームイベントについて考察する。これは、X 線がフレームにあたった時に、宇宙線と同じく、発生熱が拡散してピクセルで信号が受かる、というものを想定している。

6.2.5.2 方法

データセットとして、地上試験 TC5 で取得した高カウントレート X 線照射データを用いる (表 6.4)。データが 2 つあり、1 つはコリメータで X 線ビームをしぼって点源放射を模擬したもの (point source)、もう 1 つは絞らずに拡散放射のように照射したもの (extended source) である。前者と異なり、後者では多くの X 線がフレーム部分で吸収されるので、その差異を調べることにする。

表 6.4. フレームに入射しているデータと、フレームに入射していないデータの観測 ID と観測期間。Extend が X 線源が広がっており、point は X 線源が絞られている。

	OBSID	期間	Source の種類
1	097093500	2022/02/20 00:00–04:00	Extend
2	097093610	2022/02/21 04:00–08:00	Point

各データのスペクトルをグレードごとにプロットしたものが図 6.50、図 6.51 である。本解析では全ての X 線グレードのイベントを解析に用いている。データ解析手法は、宇宙線のフレームイベント (§ 6.2.4.2) と同じである。

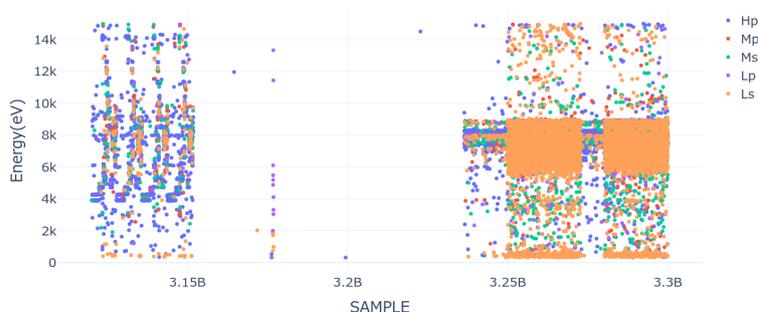


図 6.50. Extend source による X 線イベントの到来時刻とエネルギーの散分図



図 6.51. Point source による X 線イベントの到来時刻とエネルギーの散分図

6.2.5.3 結果

■Extended source ウィンドウに入ったイベントの個数 (`same_pix_number`) が $n = 1, 2, \dots, 34$ 以上になるフレームイベント候補に対して、時間差の頻度分布を作成した。この分布をガウシアン+定数のモデル (式 6.18) でフィットした結果と合わせて示す (図 6.52)。

$$A \exp \left\{ -\frac{(x - \nu)^2}{2\sigma^2} \right\} + C \tag{6.18}$$

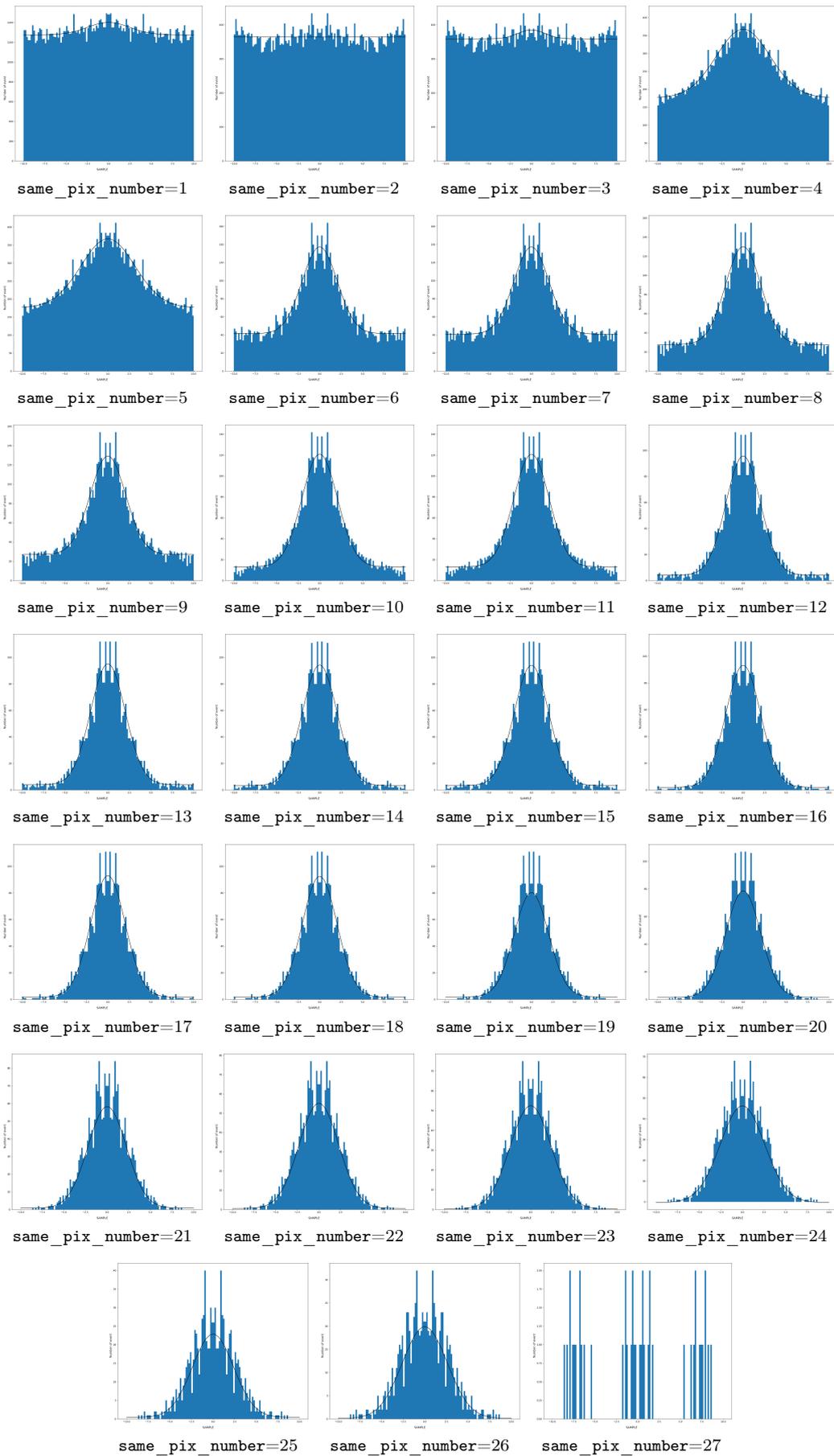


図 6.52. フレームに入射しているデータの中でカウント数が 100 以上のヒストグラム。左から same_pix_number が 1, 2, 3, ... ,26, 27 の場合のヒストグラムである。黒の実線はフィッティング関数を表している。

■Point source 同様の解析を行い、結果を図 6.53 に示す。

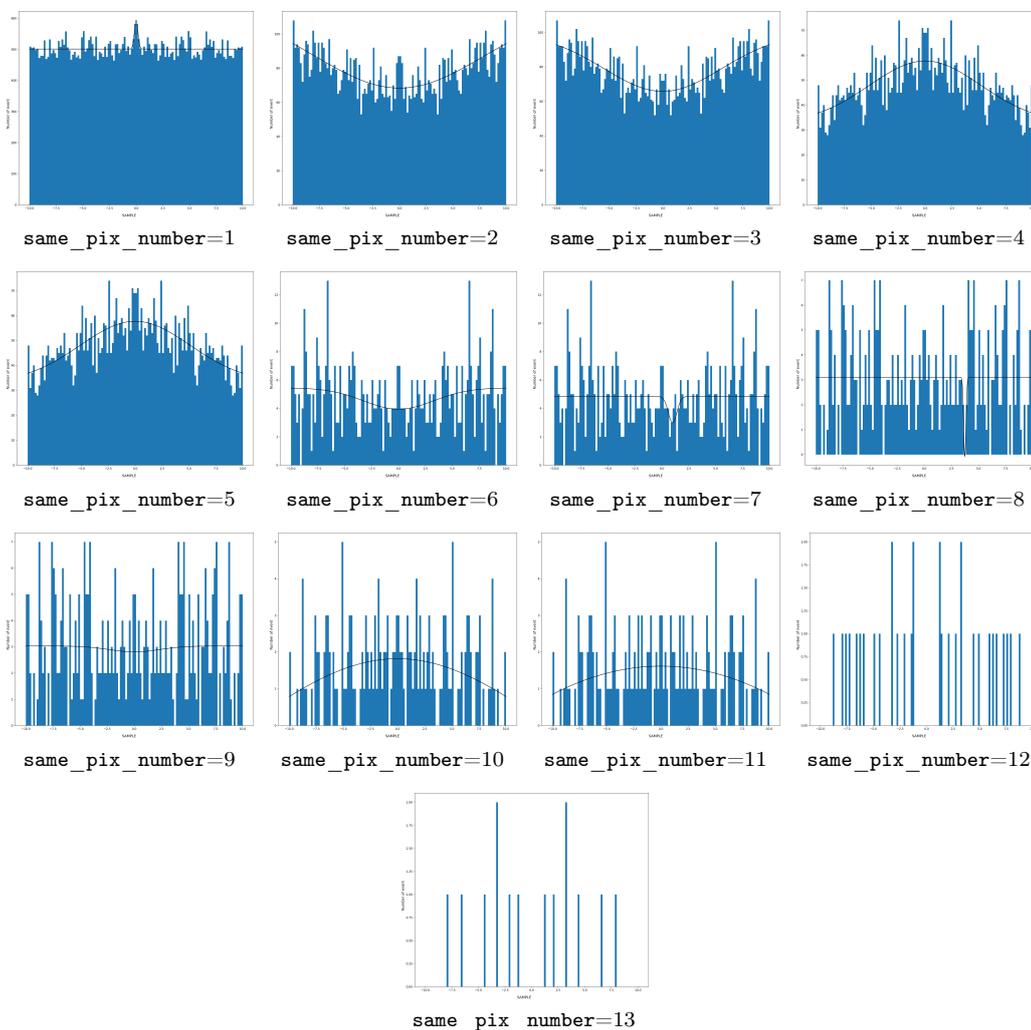


図 6.53. フレームに入射していないデータの中でカウント数が 100 以上のヒストグラム。左から same_pix_number が 1,2,3,...,12,13 の場合のヒストグラムである。黒の実線はフィッティング関数を表している。

6.2.5.4 考察と結論

まず、extended source の場合は same_pix_number が 4-26 において明確なピークが見られるが point source の場合は 4, 5 を除いて見られない。X 線によるフレームイベントが実際に存在すると考えられる。次に、宇宙線のフレームイベント (§ 6.2.4) の結果と比較すると、分布の定数成分（偶然にウィンドウに入ったイベント数）が圧倒的に多い。すなわち、X 線フレームイベントはあるにしても、真の X 線イベントに対する割合は非常に小さいことがわかる。

宇宙線のフレームイベント (§ 6.2.4) と同様に、same_pix_number の関数としてベストフィットのガウシアンの高さと定数成分の変化を図 6.54 に示した。Extend source による定数成分は same_pix_number が増えるにつれて、減っていくが、ガウシアンの高さ（フレームイベント）は same_pix_number が 12 未満まではその傾向はない。したがって、same_pix_number が 12 以上のイベントのときが、バックグラウンドを抑えつつ、X 線フレームイベントを抽出するための最適なパラメータであることが分かる。

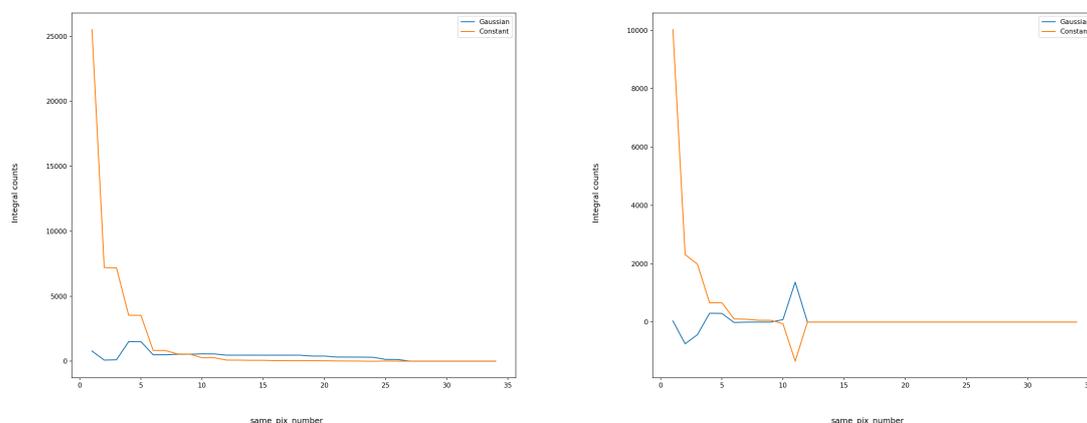


図 6.54. RTS の extend source(左) と point source(右) によるフレームイベントとバックグラウンドイベントの分布

結論としては、X 線によるフレームイベントも存在するが、真の X 線イベントに対して数が十分少ないので、スクリーニングする必要はないと考える。もしスクリーニングすれば、偶然ウィンドウにはいった真の X 線イベントを落とすことになるので副作用のほうが大きい。もし、拡散 X 線放射の観測などで X 線フレームイベントをスクリーニングする必要があるれば、フレームイベントのウィンドウに入っているイベントの数が 13 以上にすることを提案する。

6.2.6 電子反跳イベント

6.2.6.1 目的

電子反跳イベントとは、マイクロカロリメーターのあるピクセルに入射した X 線による光電効果によって発生した電子が反跳して別のピクセルにエネルギーの一部を落とすイベントである。ここでは、電子反跳イベントを引き起こす元の X 線イベントを親イベント、反跳した電子によるイベントを子イベントと呼ぶことにする。これらのイベントには、一般的に、以下の特徴が予想される。

1. 親イベントと子イベントのエネルギーを合算すると本来の X 線エネルギーになる。
2. 子イベントは、親イベントと時間的に近接している。
3. 子イベントは、親イベントと物理的に近いピクセルに生じやすい。

このうち、2、3の特徴は他のスクリーニング (§ 6.2.3 クロストークや § 6.2.4 のフレームイベント) と重なるので、電子反跳イベントを特徴付けるのは 1 である。親イベントのエネルギーは一般に制限できない。しかし、ピクセル 12 番だけは、 ^{55}Fe の X 線だけが常に照射されているので、制限可能である。従って、電子反跳イベントのスクリーニングは、ピクセル 12 番が親イベントになる場合にのみ実施される。ここでは、親子の時間的な近接具合を調べ、その時間ウィンドウを決めることを目的とする。パラメータは CTRECDT である (図 6.20)。この値は CALDB ファイルの、`xa_rsl_coefitime_*.fits` の HDU2 DELTIMES に記述される。

6.2.6.2 方法

12 番ピクセルの電子反跳イベントを抽出するためには、その他のピクセルに X 線が可能な限り照射されないデータを用いることが適当である。そこで、地上試験データから、熱真空試験前の X 線バックグラウンドのみの 2022 年 7 月 29 日から 8 月 2 日までのデータセットを用いた (表 4.12)。ただし、12 番ピクセルのイベントを用い、かつ、エネルギーを基準に用いるため、ゲイン補正が完了したがスクリーニングがなされていない PL の中間ファイ

ルを用いた。

これらのデータセットによるスペクトルは図 6.55 のようになり、他のピクセルに比べて紫色の 12 番ピクセルのイベントが支配的であることが分かる。12 番ピクセルには、5.9 keV の $\text{MnK}\alpha$ と 6.4 keV の $\text{MnK}\beta$ が支配的に検出されている。また、パイルアップイベント（2つのイベントが時間的にほぼ一致するため1つのイベントとみなされる）も存在し、2倍のエネルギーを持つ。

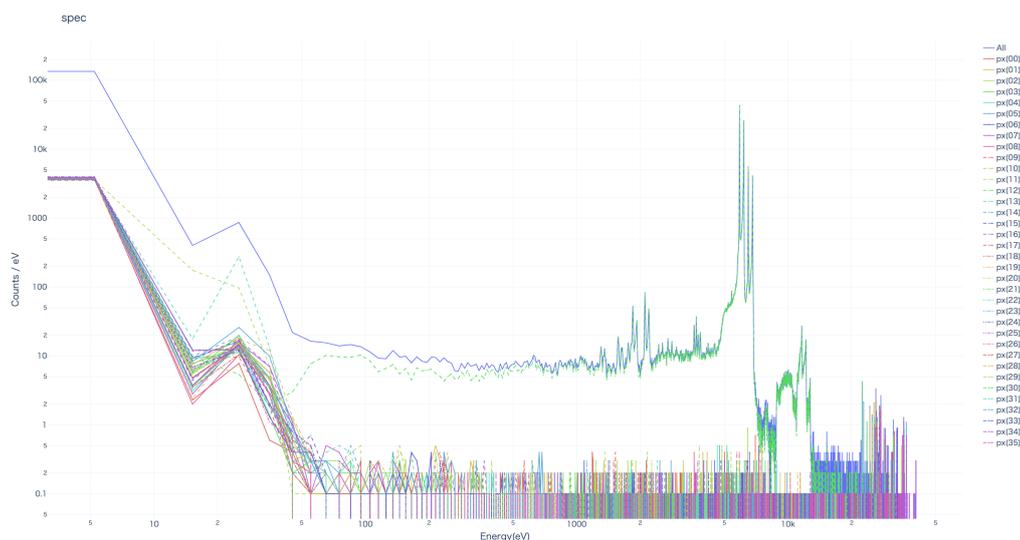


図 6.55. 2022 年月 7 月 29 日から 8 月 2 日までのデータセットの合計スペクトル。12 番ピクセルが卓越していることがわかる。

これらのデータセットに対して以下のアルゴリズムで電子反跳イベントを抽出した。

- 12 番ピクセルの親イベントに対して、最も時間的に近接するイベントを 12 番ピクセル以外から探して子イベントとする。
- 親イベント、子イベント、親イベントと子イベントのエネルギーの和はそれぞれ $\text{Mn K}\beta$ (6.4 keV) のエネルギー以下のものを取り出す。

6.2.6.3 結果

子イベントから親イベントの到来時刻を引いた時間差のヒストグラムを図 6.56 に示す。ピクセル毎の大きな変化は見られない。12 番ピクセルとその他のピクセルとの物理的な距離は遠い (図 3.8) ため、これは妥当である。ピクセル 11 番、13 番は、12 番からのクロストークイベント (§ 6.2.3 もあるはずであるが、これは明確には見えない。そこで、すべてのピクセルを足し合わせた分布を作成した。

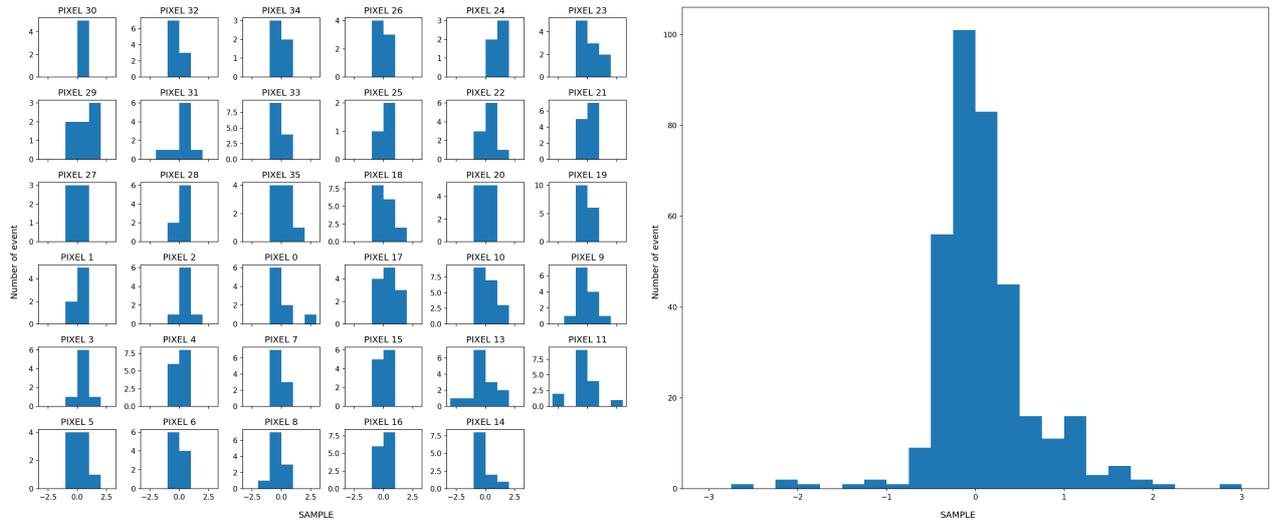


図 6.56. 電子反跳イベントのヒストグラム。左：各ピクセルの分布、右：ピクセルを足し合わせた分布。

6.2.6.4 考察と結論

分布は 0 を中心としたシングルピークである。正負の非対称性は残るものの、マージン込で ± 3 sample 程度のウィンドウ幅で十分である。故に、以下の条件をすべて満たすイベントを電子反跳イベントとみなし、子イベントを除去するとよい。

1. 親イベントが 12 番ピクセル、子イベントが 12 番ピクセル以外のピクセルである。
2. 親イベント、子イベント、親イベントと子イベントのエネルギーの和はそれぞれ $Mn K\beta$ のエネルギー以下
3. 親イベントと子イベントの到来時刻の差が ± 3 sample ($240 \mu s$) 以内である。

条件 1, 2 は `rslflagpix` で実装されている。条件 3 はパラメータとして実装され、その値は `CTRECDT = 3 sample` が適当である。SXS 装置の `CTRECDT` も 3 sample であることから、変更の必要はないと結論する。

6.3 時間帯によるもの

本章で扱うのは、時間帯に基づくイベントスクリーニングである。条件を設定してその条件に合致する時間を Good Time Interval (GTI) と定義してイベントスクリーニングを行う。

6.3.1 ADR リサイクル

6.3.1.1 目的

ADR リサイクル 中は 50 mK の温度制御が行われなため、その期間中のデータを天体解析のために使うことはできない。したがって、ADR リサイクル の始まりと終わりの時間を決める必要がある。この計算には、`rsladrgti` というタスクを用いる。アルゴリズムは § 5.2.2 に示した。ここでは、実データを用いて、`rsladrgti` が正常に ADR リサイクルの時間を求めることができているかどうかを検証する。検証に用いたデータセットは以下である。

- 地上試験データである TC5, 6, 7, 9 の全データ (§ 4.2.1)。全部で 85 回の ADR リサイクル (うち、CF mode が 32 回)。
- 軌道データである 2023 年 10 月 11 日から 10 月 29 日までのデータ (§ 4.2.2)。全部で 16 回の ADR リサイクル。

6.3.1.2 方法

すべての ADR リサイクル に対し、HK ファイルに対して `rsladrgti` を施し、ADR リサイクル の GTI ファイルを得る。この時間帯の関連する HK データを図示し、実行結果が § 3.2.4 に記述した挙動になっているかを目視で確認する。なお、He mode、CF mode で ADR リサイクル のアルゴリズムや挙動が異なるため別々に検証する必要がある。地上試験のうち、TC5 と TC9 に CF mode の ADR リサイクル が含まれる (表 4.7)。残りはすべて He mode である。

6.3.1.3 結果

■地上試験データ 図 6.57、6.58、6.59、6.61、6.62、6.63 にいくつかの代表的な結果を示す。各パネルで横軸が時間、縦軸が上から以下の通りである。また縦の 2 本の黒線が、ADR リサイクル 開始、終了時を表す。

- 赤 ; 1 段目の ADR の低温側の温度 (CAMC_CTO)
- 緑 ; 1 段目の ADR のソレノイド電流 (CAMC_MAG_LO_I)
- 桃 ; PID 制御モード (CAMC_PID_SENSOR_SEL)
- 青 ; 1 段目の ADR の低温側の温度のゆらぎ (ADRC_CT_CTL_FLUC)

主に以下の観点に着目して確認した。なお、ここではマイクロカロリメータのゲインの安定性は確認項目としていない。ゲイン変動補正の方法が最終化されていないためである。

- ADR リサイクルの始まりと終わりの時間が正しく計算できているか？
- データセット (OBSID) をまたいでも機能するか？
- 温度が不安定な場合でも機能するか？

結果を表 6.5 にまとめる。

表 6.5. ADR リサイクル 時間計算の結果。

	地上試験 (85 リサイクル)		軌道上データ (16 リサイクル)
	He mode	CF mode	He mode
1 Good ADR Cut	31	23	16
2 ADR リサイクルがデータセットをまたぐとき	13	7	0
3 温度条件が必要なとき	9	2	0
4 Not Good ADR cut	数個	0	0

例 1; 単一の OBSID の中でうまくいっている場合 (He mode) 図 6.57。

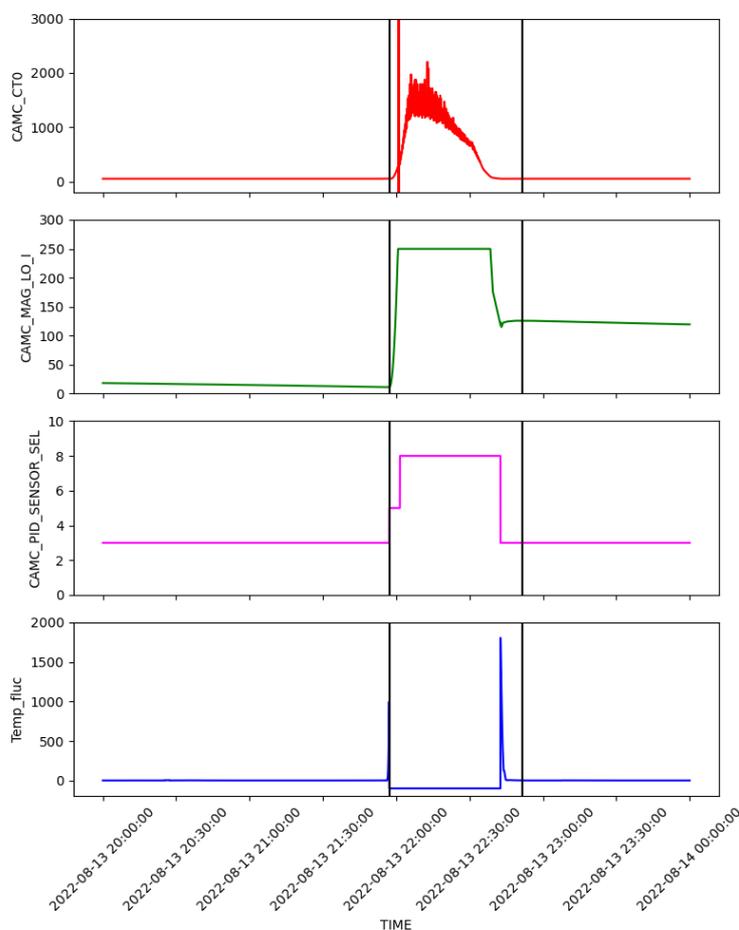


図 6.57. ADR リサイクル がうまく判定できている例 (He mode)。同一データセットにある場合。

例 2; OBSID をまたいでうまくいっている場合 (He mode) 図 6.58。異なる OBSID をまたいで移行する場合でも、ADR リサイクル が適切に判定されてることが確認できる。

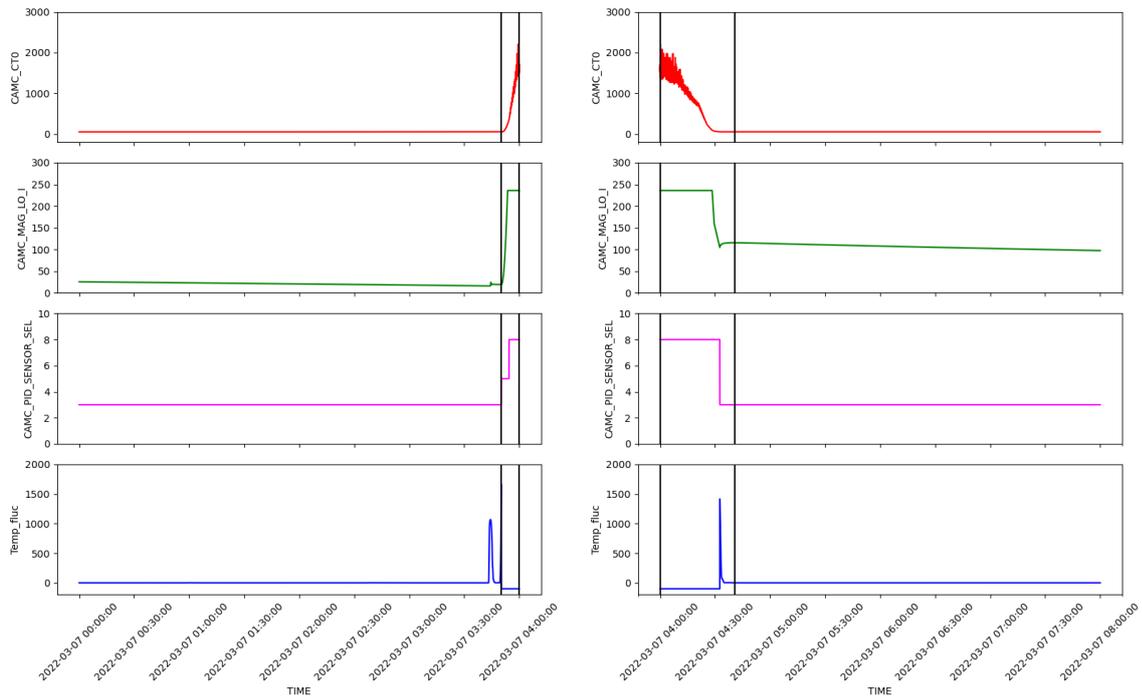


図 6.58. ADR リサイクル がうまく判定できている例 (He mode)。データセットをまたぐ場合。

例3; 追加の温度条件が必要である場合 (He mode) 図 6.59。ADR リサイクルの時間は計算できているが、観測データとして用いるには、追加で温度条件のスクリーニング (48 mK–52 mK) を適用する必要がある。これは、一般スクリーニングでなされるので結果的には問題ない。

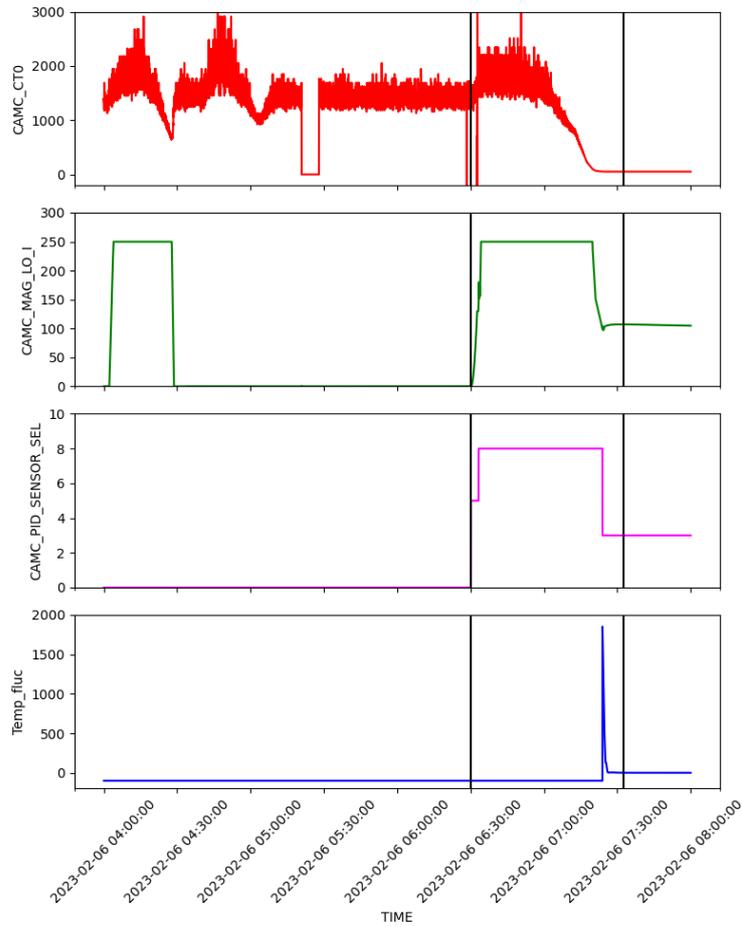


図 6.59. 追加の温度条件を課せば、ADR リサイクル がうまく判定できている例 (He mode)。

例 4; うまくいっていない例 (He mode) 図 6.60。50 mK に達した後に通常より長い時間が ADR リサイクル 中と判定されてしまっている。これは、温度ゆらぎがなかなか閾値以下にならなかったためである。これを解決するには、閾値 (fluctthr) を上げることが必要になる。しかし、このデータは非常に特殊な状況 (衛星熱真空試験の最初の ADR リサイクル) であり、一般的な条件を導くのはふさわしくないのとおりあえず無視する。

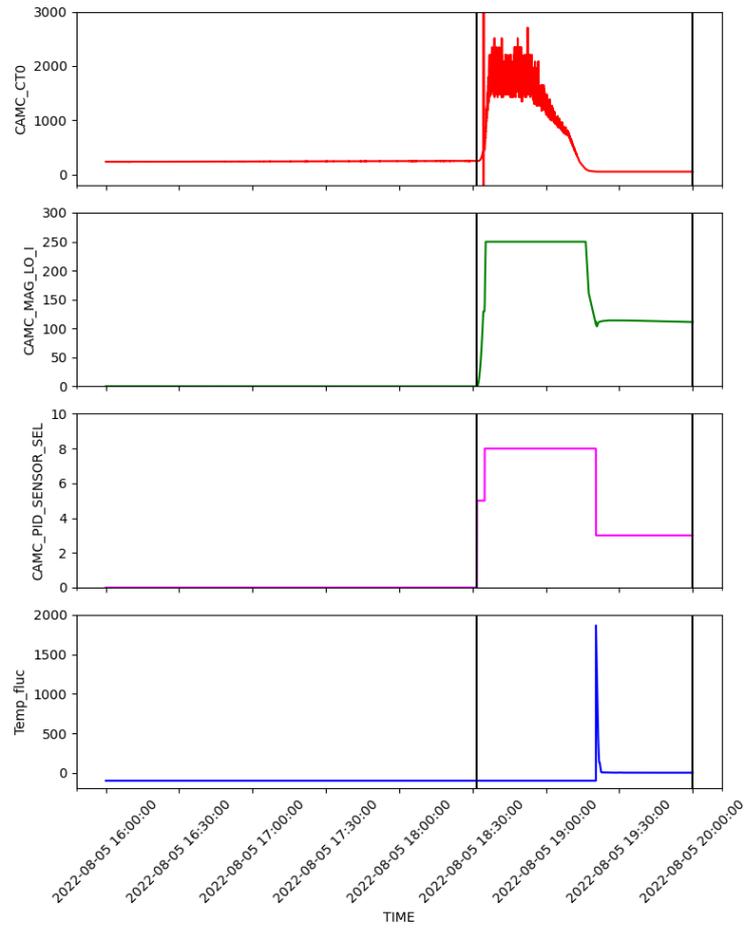


図 6.60. ADR リサイクル がうまく判定できていない例 (He mode)。

以下 CF mode においても He mode と同様の結果を得た。

例 5; 単一の OBSID の中でうまくいっている場合 (CF mode) 図 6.61。

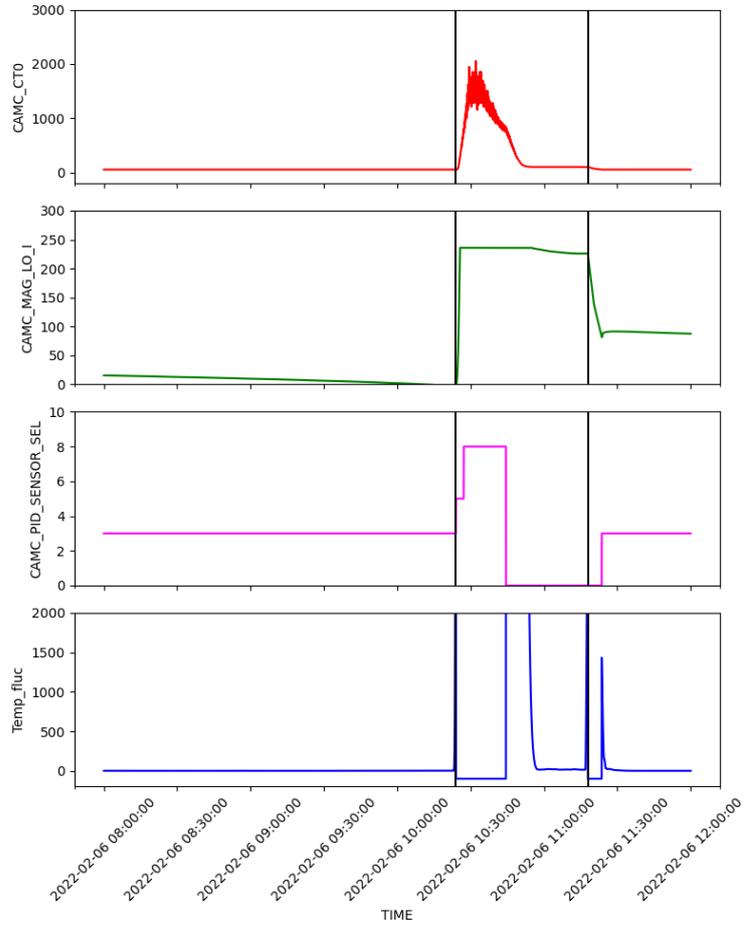


図 6.61. ADR リサイクル がうまく判定できている例 (CF mode)。同一データセットにある場合。

例 6 ; OBSID をまたいでもうまくいっている場合 (CF mode) 図 6.62。

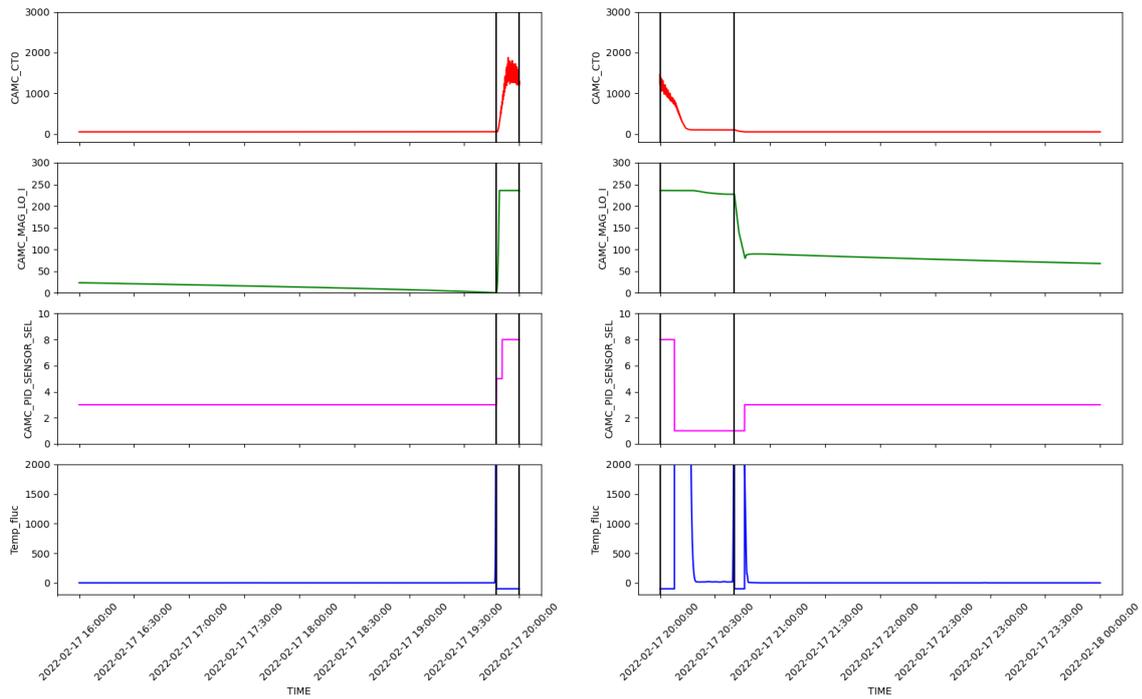


図 6.62. ADR リサイクル がうまく判定できている例 (CF mode)。データセットをまたぐ場合。

例 7；追加の温度条件が必要である場合 (CF mode) 図 6.63。

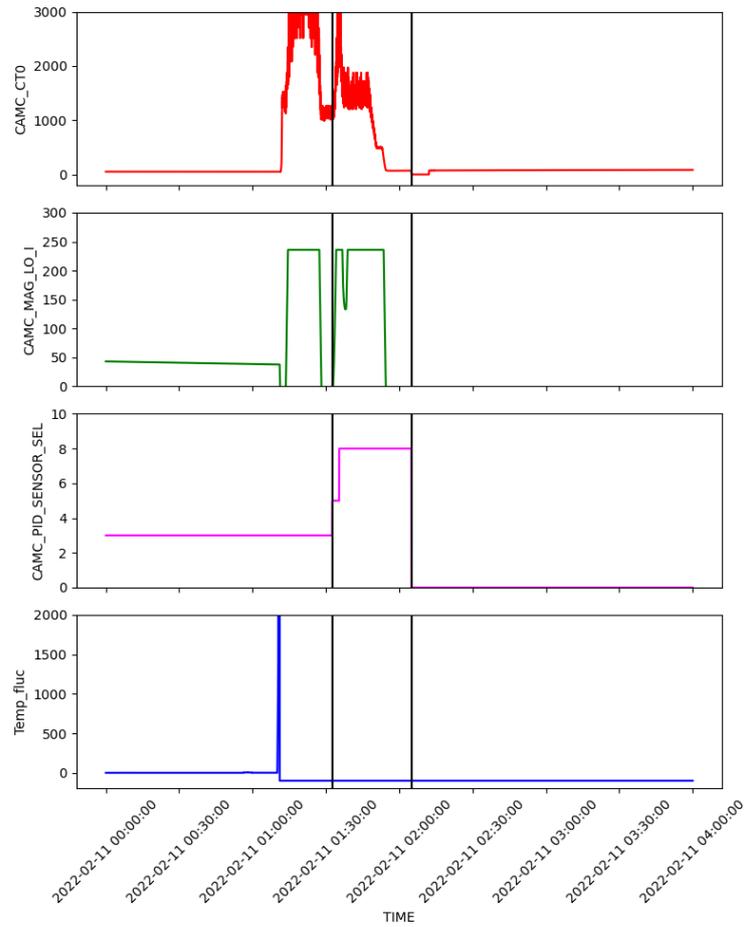


図 6.63. 追加の温度条件を課せば、ADR リサイクル がうまく判定できている例 (CF mode)。

■軌道上データ すべてのデータにおいて、`rsladrgti` が正常に ADR リサイクルの GTI を計算することができている。その一つの例を図 6.64 に示す。

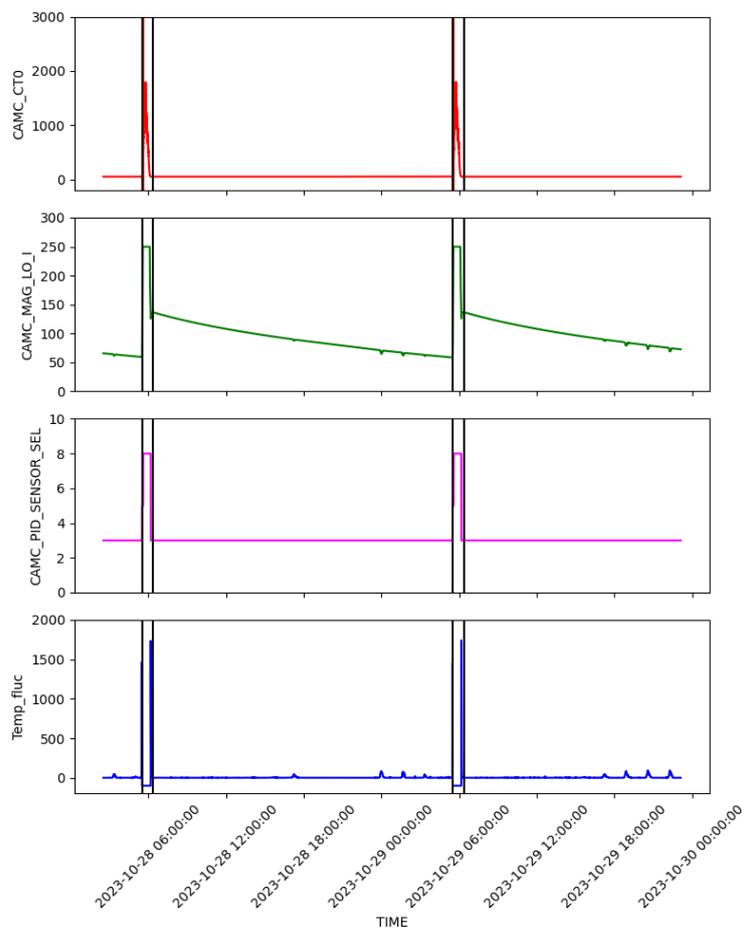


図 6.64. 軌道データにおける ADR リサイクルの GTI の計算結果。

ADR リサイクルの GTI と、MnK α のエネルギー変化を図 6.65 に示す。その結果、ADR リサイクルの終わりの時間から、ゲインが安定するまでに約 13 分かかっていることが分かる。

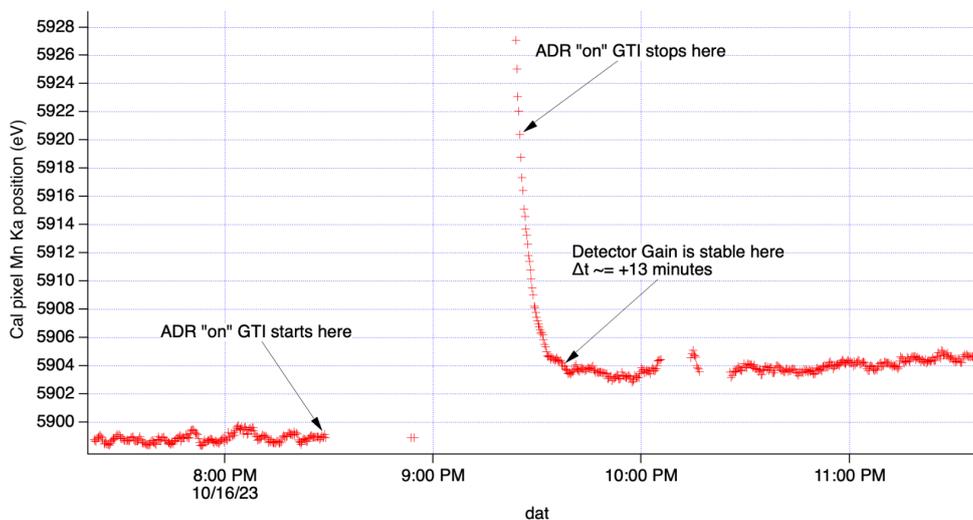


図 6.65. ADR リサイクル中のゲインの変化。ADR リサイクルの GTI と、MnK α のゲイン変化を示す (NASA GSFC F. Scott Porter 氏提供)。

6.3.1.4 考察と結論

rsladrgti は適切なアルゴリズムで ADR リサイクルの GTI を計算することができていると結論する。地上試験データでは、(1) 一部の ADR リサイクルで GTI の計算がうまくいっていない例があったが (例 4)、例外的なので一般化はしない。(2) 追加の温度条件 (50 mK ステージの温度が 48–52 mK) が必要なものがあるが、これは一般スクリーニング条件に入っているので問題ない。軌道上データでは、全て問題なく判定できている。従って、PID 制御モードと 50 mK 温度のゆらぎに基づく ADR GTI の判定アルゴリズムは問題ないと判断する。ただし、実際に問題になるのは、検出器のゲインの安定性である。これは上記の判定で得た GTI より更に 10 分程度かかることが知られている (図 6.65)。従って、実際のイベントスクリーニングでは、

- 上述で設定した ADR recycle 終了時刻
- 上述で設定した ADR recycle 開始時刻から一定時間 (4300 秒) 足した時刻

のうち遅い方を ADR recycle GTI の終了時刻とすることに改定された。

6.3.2 SAA

6.3.2.1 目的

South Atlantic Anomaly (SAA) 通過中のデータは、宇宙線イベントが急激に増加するため、天体解析に用いるデータとしては除く。SAA の領域は年単位で変化し、また検出器によっても感度が異なる。幸い、*Resolve* 装置は宇宙線イベントを検出するための anti-co 検出器を搭載しているため、これを用いて SAA 領域の定義を行う。SAA 領域の定義は、信号帯雑音比を最も良くすることができる SAA1 (厳し目のカット) と、安定性を重視した SAA2 (緩目のカット) の2種類が用意され、ともに CALDB に登録される。それぞれ CALDB ファイルの `xa_gen_saa_*.fits` の HDU2 SAA_VERTICES と HDU3 SAA2_VERTICES に登録される。

6.3.2.2 方法

使用するデータセットは、検出器バイアス電圧がかかり、ゲインが安定し始めた 2023 年 10 月 11 日から 12 月 6 日までの anti-co イベントである。PPL 処理で生成された `uncleaned` イベントに `rslanticopi` のみを適用して作成したイベントファイルを用いた。ここから、宇宙線イベントを抽出するために、以下の条件でイベントを抽出した。

- AC_TYPE = AC (anti-co イベントのみを抽出)
- PSP_ID = 1 (PSP-A のみ抽出)
- PHA \geq 71
- DURATION \geq 2

まず、anti-co イベントの光度曲線とエネルギースペクトルは図 6.66 のようである。SAA 通過中に急激にカウントレートが上昇することがわかる。

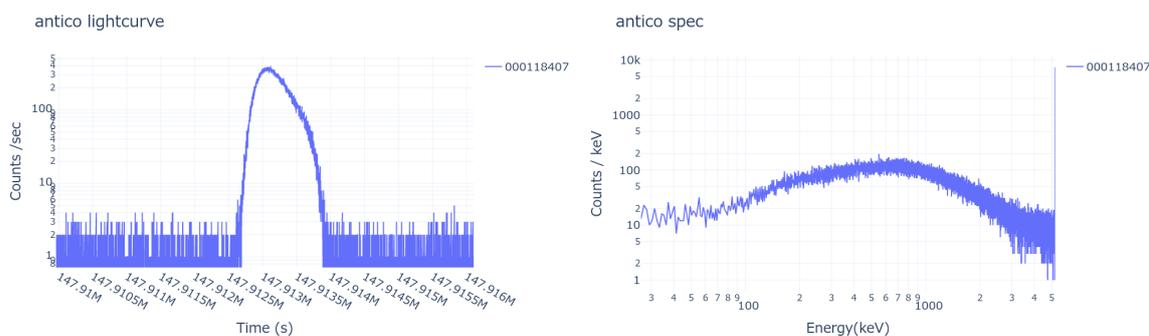


図 6.66. 軌道上 anti-co イベントの光度曲線 (左) とエネルギースペクトル (右)。

ある時刻における XRISM 衛星直下の地球表面の緯度経度は拡張 HK ファイルから得られる。Anti-co イベントのライトカーブを 1 秒ごとにビンニングし、緯度・経度の情報と組み合わせて、それぞれ 2 度 \times 2 度のメッシュで可視化した (図 6.67)。カラーマップは anti-co イベントのカウントレートを対数で表している。SXS 装置で用いられた SAA 領域 (CALDB ファイルの `xa_gen_saa_20190101v001.fits` に登録されている) をオレンジ (SAA1) とマゼンタ (SAA2) の実線で示した。

なお、ここではイベントスクリーニングのための SAA 領域を定義するのが目的であるが、衛星運用にも SAA 領域が必要である。SAA に入る時 (SAA in) と出る時 (SAA out) に MXS の HV をオフして オン するなどの運用が必要なためである。これは SXS 装置の SAA 領域定義に基づいて行われている。実際に SAA in (黒点) と

SAA out (灰色点) の運用時での緯度経度をプロットすると、anti-co カウントレートの高い領域を包含していることがわかる。

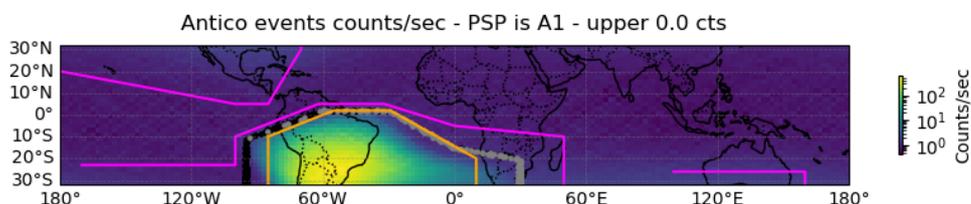


図 6.67. 横軸を経度、縦軸を緯度としたときの anti-co イベントの分布。

Resolve 装置の anti-co 検出器のカウントレートマップ (図 6.67) は SXS 装置の anti-co 検出器から求めた SAA 領域はやや西寄りにずれていることがわかる。また ROSAT の SAA 実測値 (図 3.45) から西寄りにずれている。年単位の変動があると推測される。そこで *Resolve* 装置の SAA 領域を新たに定義することにするのが本項の作業である。

用いるデータは、既知のノイズイベントをできる限り除外するため、一般的なイベントスクリーニング (`xa_gen_select_*.fits` の HDU2 SELECT の PIXELALL) をかけた後に、以下の条件で更に絞り込んでイベントを抽出した。

- 2次元イベントスクリーニング (§ 6.1; RISE_TIME スクリーニングと TICK_SHIFT スクリーニング)
- 較正 X 線源 ^{55}Fe 及び MXS が照射されている時間を除く
- 地没中のデータに限定 ($\text{ELV} < 0$)

SAA 領域を再定義するため anti-co カウントレートの関数として以下のメトリックを調べる。

1. エネルギーバンド毎のカウントレート
2. 較正用 12 番ピクセルの ^{55}Fe のエネルギー分解能

これにより 科学目的に使用できる anti-co カウントレートの閾値を求め、これから SAA 領域を定義する。

6.3.2.3 結果

■エネルギーバンド毎のカウントレート このメトリックの評価では、上述の条件に加えて更に、較正用ピクセルとそのクロストークの影響を除くため、ピクセル 11、12、13 のイベントを除外した。まず、anti-co のカウントレートを 0-1、1-2、2-3、3-4、4-5、5-7、7-10、10-20、20-50、50-100、100-200、200-1000 s^{-1} にスライスした。Anti-co カウントレートの度数分布にある偏りを考慮した (図 6.68)。スライス毎のスペクトルを図 6.69 に示す。

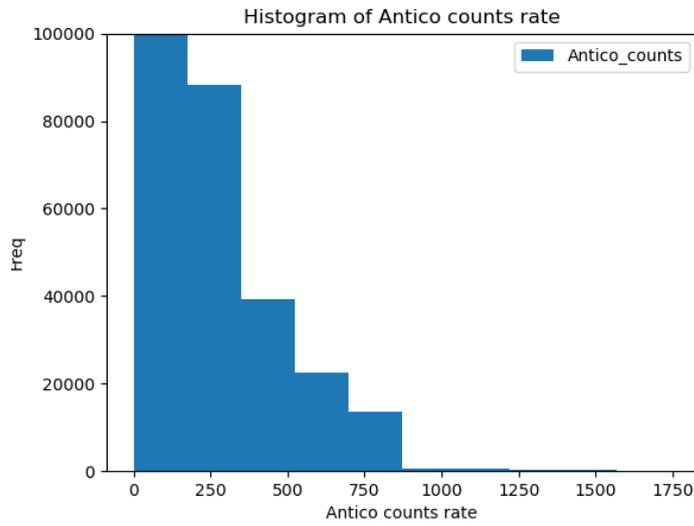


図 6.68. Anti-co カウントレートの度数分布。

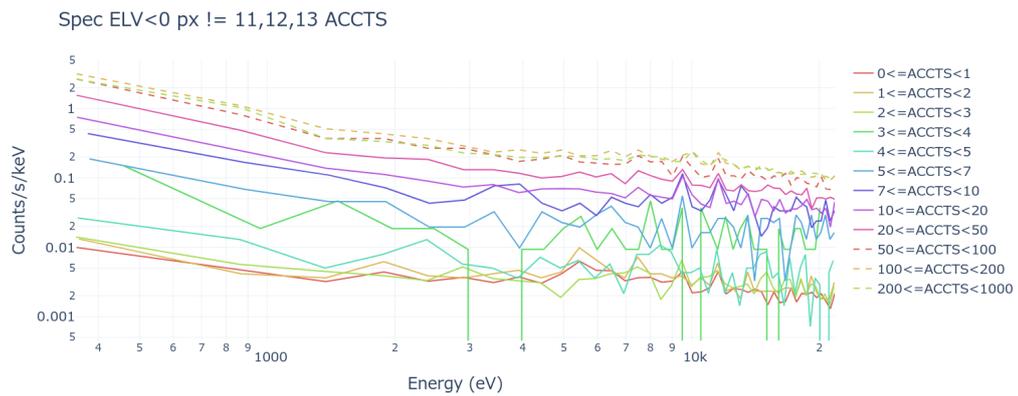


図 6.69. Anti-co カウントレートごとにスライスしたときの NXB カウントレートの変化。カラーは、anti-co カウントレートの変化を示す。

次に、エネルギーバンドごとのカウントレートを求めた (図 6.70)。エネルギーバンドは、0.1–2 keV、2–12 keV、12–22 keV の 3 つを選択した。2–12 keV がゲートバルブ閉状態の X 線帯域である。

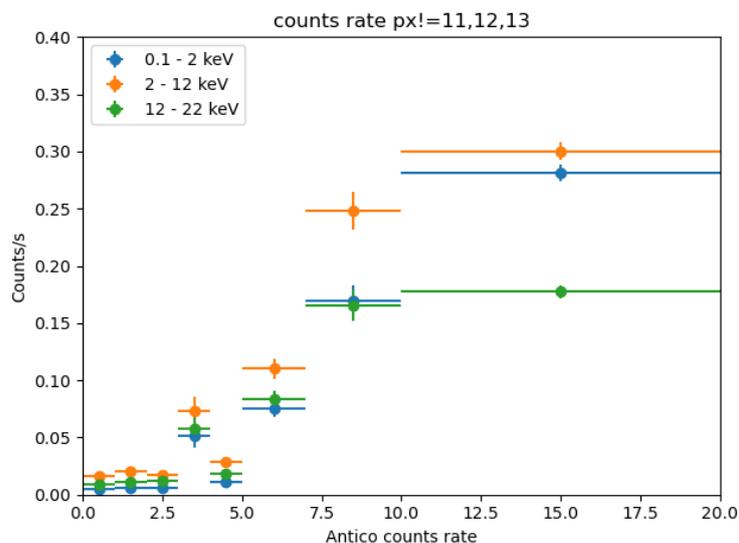


図 6.70. NXB カウントレートの変化と anti-co カウントレートの変化の比較。横軸が anti-co カウントレート、縦軸が NXB カウントレートの変化を示す。

■校正用 12 番ピクセルの ^{55}Fe のエネルギー分解能 このメトリックの評価では、上述の条件に加えて更に、校正用ピクセルだけのイベントファイルを作成した。Anti-co rate のスライス毎に Mn $K\alpha$ の FWHM を導出し、図 6.71 に示す。

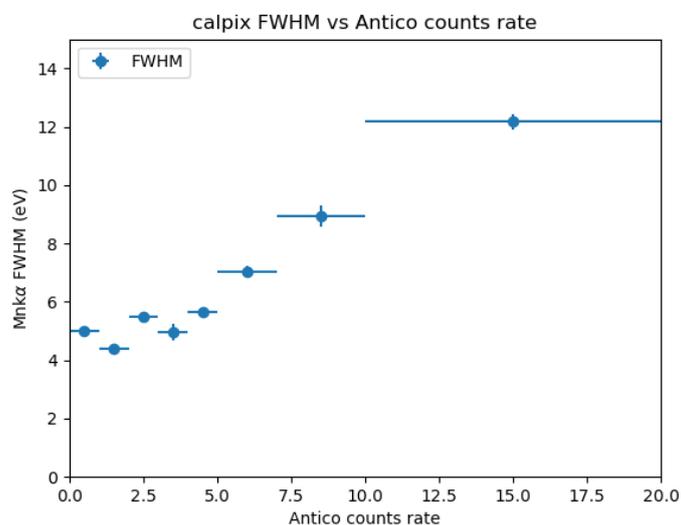


図 6.71. Anti-co カウントレートと MnKα の FWHM の関係。横軸が anti-co カウントレート、縦軸が MnKα の FWHM を示している。

6.3.2.4 考察と結論

図 6.70 と図 6.71 から、anti-co カウントレートが 3 s^{-1} 以下では、NXB カウントレートの変化はほとんどなく、anti-co カウントレートが 5 を超えると、NXB カウントレートが増加し、Mn $K\alpha$ の FWHM が増加することが分かる。そこで、本研究では、anti-co カウントレートが 3 s^{-1} を超える最小凸領域を SAA1 (図 6.72)、 1 s^{-1} を超える時を SAA2 (図 6.73) と定義することを提案する。最小凸領域は、python の凸包アルゴリズム

scipy.spatial.ConvexHull を用いて求めた。青い線で示した SAA1 と SAA2 の定義を表 6.6 と表 6.7 に示す。また、SAA2 に対する SAA1 の割合は、約 32% である。

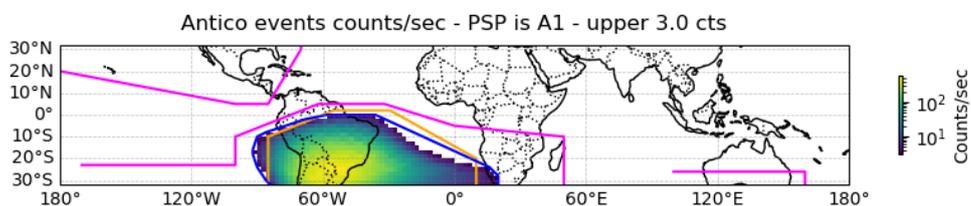


図 6.72. 青い線で表した SAA1 の定義。

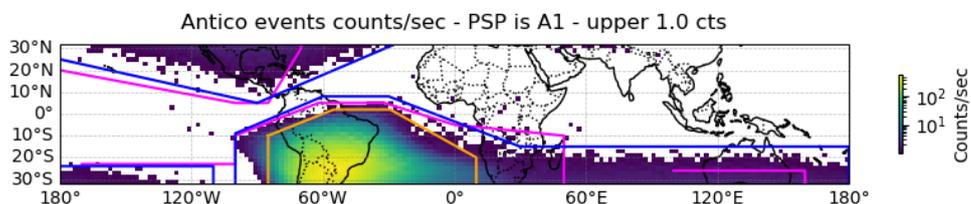


図 6.73. 青い線で表した SAA2 の定義。

表 6.6. SAA1 の定義。

LON (deg)	-84	-86	-90	-92	-92	-90	-86	-68	-58	-36	16	20	20
LAT (deg)	-32	-30	-24	-18	-16	-10	-8	-2	0	0	-24	-28	-32

表 6.7. SAA2 の定義。3つの領域が存在する。

LON (deg)	-100	-100	-60	-30	30	180	180
LAT (deg)	-35	-9	8	8	-15	-15	-35

LON (deg)	-110	-110	-180	-180
LAT (deg)	-35	-24	-24	-35

LON (deg)	-20	-90	-180
LAT (deg)	35	5	25

6.3.3 地没

6.3.3.1 目的

地球からの離角の関数としてバックグラウンドレベルを評価する。昼地球 (図 3.43 の左図)、夜地球 (図 3.43 の右図) に分けて評価する。イベントスクリーニングの基準は2つある。1つ目は X 線イベントに対する基準で、離角を閾値以上に設定する。2つ目は地没データを用いた NXB イベントに対する基準で、離角を閾値以下に設定す

る。これらの条件は、CALDB ファイルの `xa_gen_select_*.fits` の HDU2 SELECT の PIXELALL と PIXELNXB に登録される。

6.3.3.2 方法

使用するデータセットは、打ち上げから 2023 年 12 月 6 日までのゲートバルブ閉のデータセットである (表 4.16)。既知のノイズイベントをできる限り除外するため、一般的なイベントスクリーニング (`xa_gen_select_*.fits` の PIXELALL) をかけた後に、以下の条件で更に絞り込んでイベントを抽出した。

- 2 次元イベントスクリーニング (§ 6.1; RISE_TIME スクリーニングと TICK_SHIFT スクリーニング)
- 較正 X 線源 FW の ^{55}Fe 及び MXS が照射されている時間を除く
- SAA 通過時間を除く
- 較正用ピクセルとそのクロストークの影響を除くため、ピクセル 11、12、13 のイベントを除外

ある時刻における DYE_ELV と NTE_ELV を拡張 HK ファイルから求め、それらの値で区切って以下のメトリックの変化を調べた。

1. エネルギーバンド毎のカウントレート

6.3.3.3 結果

■ 昼地球離角に対するエネルギーバンド毎のカウントレート まず、DYE_ELV を -5 度から 10 度まで 15 等分した。スライス毎のスペクトルを図 6.74 に示す。

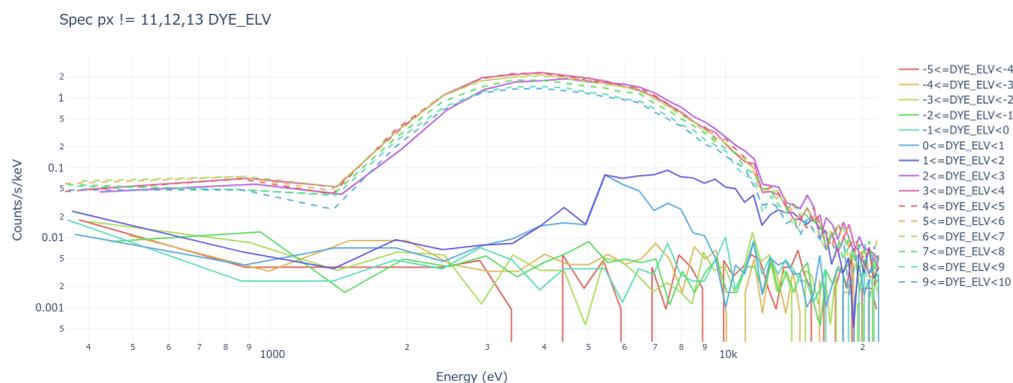


図 6.74. DYE_ELV ごとにスライスしたときの NXB カウントレートの変化。カラーは、DYE_ELV の変化を示す。

エネルギーバンドごとのカウントレートを求めた (図 6.75)。エネルギーバンドは、 0.1 – 2 keV、 2 – 12 keV、 12 – 22 keV の 3 つを選択した。 2 – 12 keV がゲートバルブ閉状態の X 線帯域である。

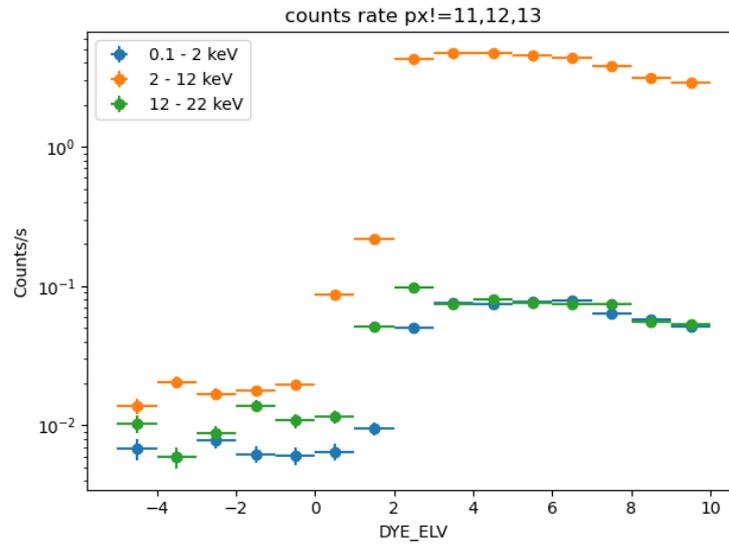


図 6.75. カウントレートの変化と DYE_ELV 値の変化の比較。横軸が DYE_ELV 値、縦軸がカウントレートを示す。

■夜地球離角に対するエネルギーバンド毎のカウントレート 次に、NTE_ELV を -5 度から 10 度まで 15 等分した。スライス毎のスペクトルを図 6.76 に示す。

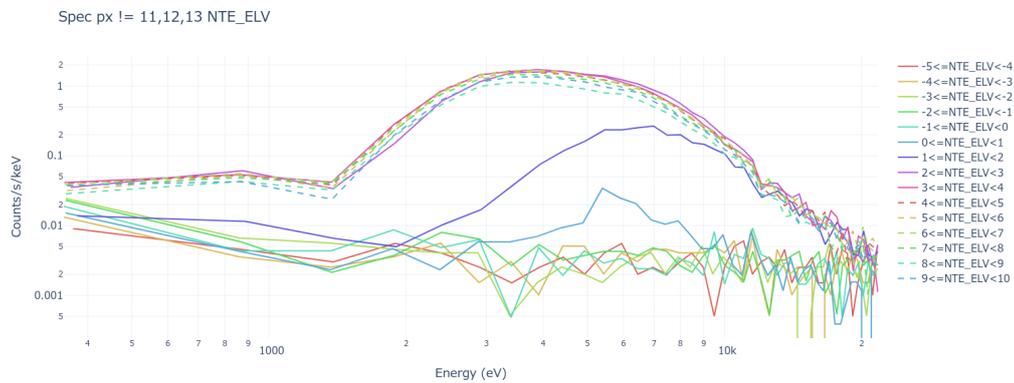


図 6.76. NTE_ELV ごとにスライスしたときの NXB カウントレートの変化。カラーは、NTE_ELV の変化を示す。

エネルギーバンドごとのカウントレートを求めた (図 6.77)。エネルギーバンドは、0.1-2 keV、2-12 keV、12-22 keV の 3 つを選択した。2-12 keV がゲートバルブ閉状態の X 線帯域である。

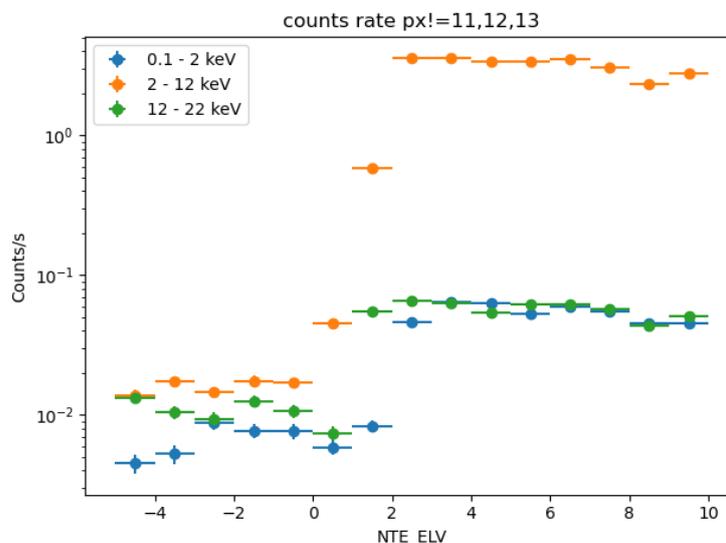


図 6.77. カウントレートの変化と NTE_ELV 値の変化の比較。横軸が NTE_ELV 値、縦軸がカウントレートを示す。

6.3.3.4 考察と結論

図 6.75 と図 6.77 から、DYE_ELV と NTE_ELV のどちらも、0–5 度の間でカウントレートが上昇することがわかる。これは、地没がなくなる $ELV > 0$ で X 線前景、背景放射が入ってくるからと考えられる。また、DYE_ELV と NTE_ELV には明確な違いは見られない。ゲートバルブ閉の状態では、地球アルベドなどの効果が見られないためと考えられる。

これらより、以下のスクリーニング条件を提案する。

- X 線イベントスクリーニングに対しては、DYE_ELV、NTE_ELV ともに 5 度以上
- NXB イベントスクリーニングに対しては、DYE_ELV、NTE_ELV ともに 0 度以下

これらは SXS 装置での基準と同じである。

6.3.4 地球磁場

6.3.4.1 目的

Cut-off Rigidity (COR) は、地球磁場によって宇宙線が遮蔽される割合を表す。その分布は図 3.46 に示した。本研究では、COR の関数としてバックグラウンドレベルを評価し、イベントスクリーニングの基準を定める。

6.3.4.2 方法

使用するデータセットは、打ち上げから 2023 年 12 月 6 日までのゲートバルブ閉のデータセットである (表 4.16)。既知のノイズイベントをできる限り除外するため、一般的なイベントスクリーニング (`xa_gen_select_* .fits` の HDU2 SELECT の PIXELALL) をかけた後に、以下の条件で更に絞り込んでイベントを抽出した。COR 値は SAA 領域と異なるため SAA とは独立に行う必要がある。そのため、SAA 領域も除外した。

- 2 次元イベントスクリーニング (§ 6.1; RISE_TIME スクリーニングと TICK_SHIFT スクリーニング)
- 較正 X 線源 FW の ^{55}Fe 及び MXS が照射されている時間を除く
- SAA 通過時間を除く

- 地没中のデータに限定 (ELV < 0)

ある時刻における COR を拡張 HK ファイルから求め、COR の値で区切って以下の2つのメトリックの変化を調べた。

1. エネルギーバンド毎のカウントレート
2. 校正用 12 番ピクセルの ^{55}Fe のエネルギー分解能

6.3.4.3 結果

■エネルギーバンド毎のカウントレート このメトリックの評価では、上述の条件に加えて更に、校正用ピクセルとそのクロストークの影響を除くため、ピクセル 11、12、13 のイベントを除外した。COR は 0-6、6-8、8-10、10-12、12 GV 以上でスライスした。スライス毎のスペクトルを図 6.78 に示す。

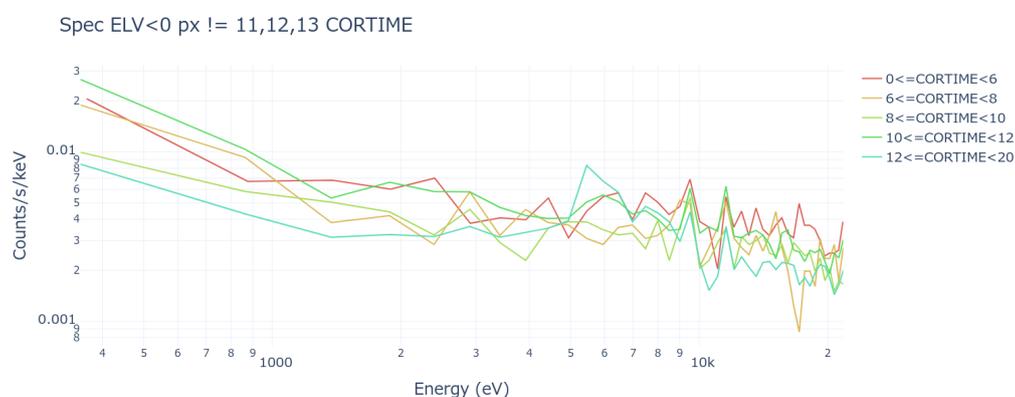


図 6.78. COR TIME ごとにスライスしたときの NXB カウントレートの変化。カラーは、COR TIME の変化を示す。

次に、エネルギーバンドごとのカウントレートを求めた (図 6.79)。エネルギーバンドは、0.1-2 keV、2-12 keV、12-22 keV の 3 つを選択した。2-12 keV がゲートバルブ閉状態の X 線帯域である。

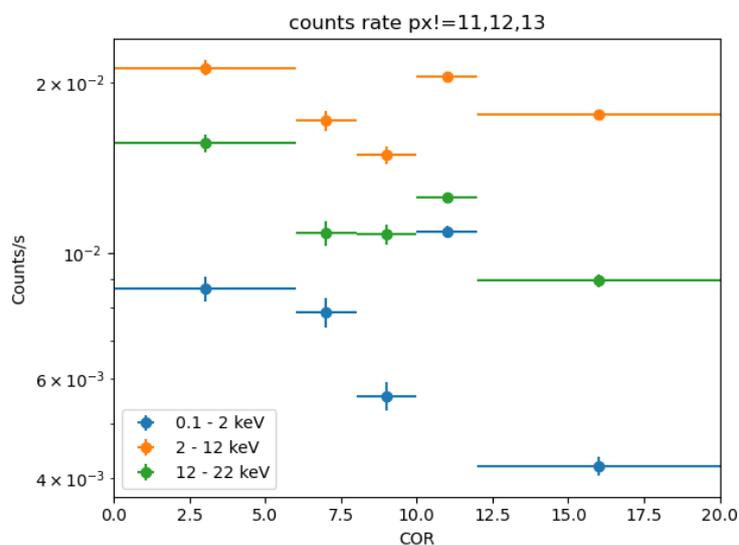


図 6.79. NXB カウントレートの変化と COR 値の変化の比較。横軸が COR 値、縦軸が NXB カウントレートを示す。

■校正用 12 番ピクセルの ^{55}Fe のエネルギー分解能 このメトリックの評価では、上述の条件に加えて更に、校正用ピクセルだけのイベントファイルを作成した。COR のスライス毎に Mn $K\alpha$ の FWHM を導出し、図 6.80 に示す。

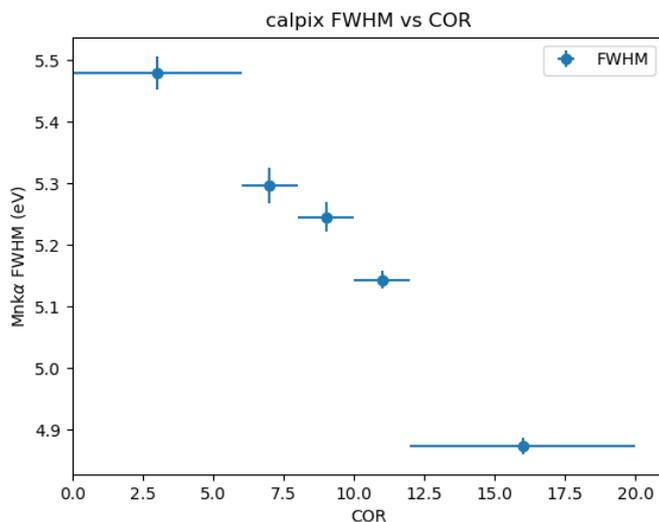


図 6.80. COR 値と Mn $K\alpha$ の FWHM の関係。横軸が COR 値、縦軸が Mn $K\alpha$ の FWHM を示している。

6.3.4.4 考察と結論

図 6.79 と図 6.80 から、COR 値の増加にともなって、カウントレートが減少し、エネルギー分解能が良くなるという定性的には妥当な結果を得た。

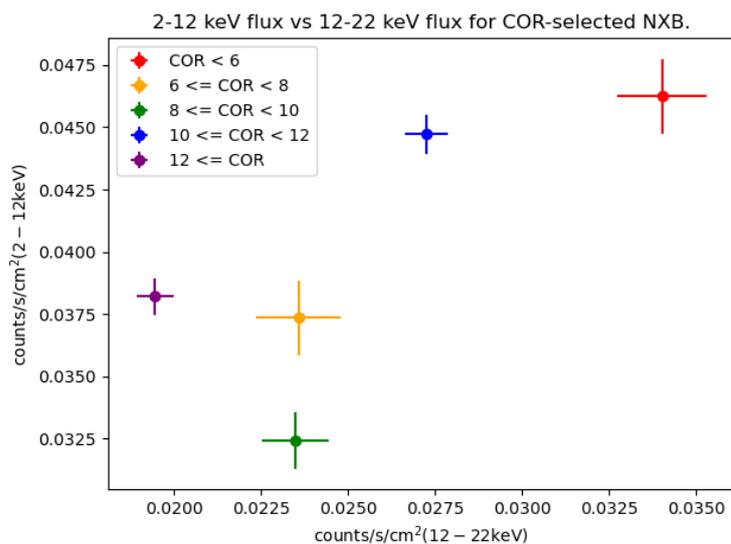


図 6.81. Resolve 装置の COR 値。

ASTRO-H 衛星 SXS 装置の結果 (図 3.47) と比較するために、本研究の結果から同様の図を作成した (図 6.81)。両図の比較から、どちらもカウントレートのオーダーは一致しており、COR による影響はほぼ同じであることが分

かる。これにより、COR に基づくイベントスクリーニングは SXS 装置と同様で問題ないと結論する。すなわち、

- COR 値に基づくスクリーニングは行わない。
- NXB スペクトルを作成する際は、観測ごとの COR の履歴に基づいた重み付けを行う。

第7章

イベントスクリーニングの評価

Contents

7.1	実データでの評価	194
7.1.1	目的	194
7.1.2	手法	195
7.1.3	結果	195
7.1.4	考察と結論	201
7.2	要求値との比較	206

§ 6 では、それぞれのイベントスクリーニング条件を評価した。本章では、それぞれの条件を組み合わせ、実際に X 線シグナルイベントを含むの地上及び軌道上データに適用して効果を確認し (§ 7.1)、性能要求値との比較を行う (§ 7.2)。

7.1 実データでの評価

7.1.1 目的

§ 6 では、目的 1 の「個別のスクリーニング条件の最適化」について、個別のイベントスクリーニングについての評価と条件出しをした。本章では、これらの組み合わせについて評価することで、目的 2 の「標準スクリーニングが要求を満足することを検証」と、目的 3 の「追加スクリーニングで性能拡張を目指す」を行う。

§ 6 では、ノイズイベントがどれくらいスクリーニングされるかという観点で評価を行った。いくつかのスクリーニング条件は、天体の強度にほとんど依存せず、シグナルイベントを落とさず、かつノイズイベントを除去することができる条件である。これらの条件によるスクリーニングを *Resolve* 装置の標準スクリーニングとすることができる。

一方で、いくつかのスクリーニング条件は、天体の強度に強く依存し、ノイズを多く落とすことができるが、それに加えてシグナル (X 線) イベントも落としてしまう。これらの条件によるスクリーニングは追加スクリーニングとして扱い、科学目的に応じて追加で選択的に適用できるものとする。追加スクリーニングの評価を行うために、異なる強度を持ついくつかの天体で確認する。シグナル (X 線) イベントとしては、科学目的に使用される Hp 及び Mp グレードイベントを対象とする。

イベントスクリーニングは、(1) パルス波形に基づくもの (§ 6.1)、(2) 到来時刻によるもの (§ 6.2)、(3) 時間帯によるもの (§ 6.3) があつた。うち (1) のうちフラグに基づくもの、(2) のうち天体カウントレートによらないもの、(3) のすべてのスクリーニングを一律にかけた状態を標準イベントスクリーニングと定義する。さらに、標準イベントスクリーニングから開始し、残りのスクリーニングを追加イベントスクリーニングとして評価を行う (表 7.1)。

表 7.1. 追加スクリーニングのための組み合わせ検討項目。

イベントスクリーニング	追加スクリーニングのための組み合わせ検討
RISE_TIME (§ 6.1.1)	○
TICK_SHIFT (§ 6.1.2)	○
DERIV_MAX (§ 6.1.3)	○
QUICK_DOUBLE (§ 6.1.4)	×
SLOPE_DIFFER (§ 6.1.5)	×
FLAG_CLIPPED (§ 6.1.6)	×
SLOW_PULSE (§ 6.1.7)	×
Anti-co イベント (§ 6.2.2)	×
電氣的クロストークイベント (§ 6.2.3)	(○)
フレームイベント (§ 6.2.4, § 6.2.5)	○
電子反跳イベント (§ 6.2.6)	×
ADR リサイクル (§ 6.3.1)	×
SAA (§ 6.3.2)	×
地没 (§ 6.3.3)	×
地球磁場 (§ 6.3.4)	×

検討する追加イベントスクリーニング条件は以下の通りである。うち、フレームイベントのスクリーニングは、時間ウィンドウに入ったイベントの個数が 2 個以上になるときをスクリーニング条件とする。これは、`same_pix_number` が 1 のときの現状のアルゴリズムに相当している。この場合、電氣的クロストークイベント

は、フレームイベントのスクリーニング条件に含まれるため、フレームイベントと同様に評価する (§ 7.1.4.3)。

- RISE_TIME 対 DERIV_MAX (式 6.2) : rise1 スクリーニング
- Δ RISE_TIME 対 DERIV_MAX/EPI2 (式 6.3) : rise2 スクリーニング
- TICK_SHIFT 対 DERIV_MAX (式 6.5) : tick スクリーニング
- DERIV_MAX 対 EPI2 (式 6.7) : deriv スクリーニング
- フレームイベント : フレームイベント スクリーニング

7.1.2 手法

表 7.2 に示すデータセットを用いる。GVO はゲートバルブ開状態で取得した地上試験の X 線照射データで、2 keV 以下及び 2 keV 以上に強い X 線シグナルを持つ。NGC 4151 (活動銀河核、点源放射)、LMC X-3 (X 線連星、点源放射)、Abell 2319 (銀河団、拡散放射) は、ゲートバルブ閉状態で取得した観測データであり、2 keV 以下はノイズ、2 keV 以上は X 線シグナルとノイズである。X 線シグナルの強度は天体によって異なる。NXB は夜地球で X 線非照射のデータであり、2 keV 以下及び 2 keV 以上ともにノイズとみなせる。

表 7.2. スクリーニングの評価に用いたデータセット。Expoure は、ステージ 2-2 のパイプライン処理 (ahscreen) の中の Good Time Interval (GTI) スクリーニングを行った正味の観測時間である。

Data	Start time	Stop time	Exposure (s)
GVO	2022/03/04 01:30	2022/03/09 23:00	403198
NGC 4151	2023/12/03 06:23	2023/12/04 06:25	39217
LMC X-3	2023/11/16 12:05	2023/11/17 13:50	204107
Abell 2319	2023/11/30 08:04	2023/12/03 06:23	193315
NXB	2023/10/14 07:25	2023/10/23 20:30	650172
	2023/10/11 09:04	2023/12/04 06:25	

7.1.3 結果

表 7.2 のデータセットに対して、ステージ 2-1 の処理 (表 5.1) までのパイプライン処理を適用した。その後、ステージ 2-2 の処理 (ahscreen) の中の Good Time Interval (GTI) スクリーニング処理を行った。この処理は、データセットによって異なる。各データセットに対する GTI スクリーニングは、以下の条件で行った。

(1) GVO データセット

- ADR リサイクルの時間を除く

(2) 天体データセット (NGC 4151、LMC X-3、Abell 2319)

- ELV > 5
- SAA == 0
- ADR リサイクルの時間を除く
- 較正 X 線源 FW の ^{55}Fe 及び MXS が照射されている時間を除く

(3) NXB データセット

- NTE_ELV < 0
- SAA == 0
- ADR リサイクルの時間を除く
- 校正 X 線源 FW の ^{55}Fe 及び MXS が照射されている時間を除く

その後、ステージ 2-2 の標準イベントスクリーニング処理と § 7.2 で示した追加スクリーニング条件を適用した。

1. 赤 (**unscreened**) : ステージ 2-1 までのパイプライン処理後、ステージ 2-2 の GTI スクリーニングを行う。ここで Hp、Mp グレードのみに限定し、校正用 12 番ピクセルのイベントも除去される。
2. 黄 (**status**) : **unscreened** から、ステージ 2-2 の標準イベントスクリーニングを行う。これが標準スクリーニング後のデータとなる。
3. 黄緑 (**frame**) : **status** スクリーン後、フレームイベントのスクリーニングを行う。
4. 緑 (**rise2**) : **status** スクリーン後、RISE_TIME の式 6.3 によるスクリーニングを行う。
5. 水色 (**rise1**) : **status** スクリーン後、RISE_TIME の式 6.2 によるスクリーニングを行う。
6. 青 (**tick**) : **status** スクリーン後、TICK_SHIFT のスクリーニングを行う。
7. 紺 (**deriv**) : **status** スクリーン後、DERIV_MAX のスクリーニングを行う。
8. 紫 (**rise1&tick**) : **rise1** スクリーン後、TICK_SHIFT のスクリーニングを追加で行う。
9. 桃色 (**All2D**) : **rise1&tick** スクリーン後、DERIV_MAX のスクリーニングを追加で行う。
10. 赤色点線 (**All2D+frame**) : **All2D** スクリーン後、フレームイベントのスクリーニングを追加で行う。

unscreened と **status** スクリーニングのカウンtrateを表 7.3 に示す。

表 7.3. スクリーニングの評価に用いたデータセットのカウンtrate。Counts rate は、0.1–2 keV 及び 2–12 keV のカウンtrate counts s⁻¹ である。

Data	unscreened		status	
	Counts rate (0.1-2 keV)	Counts rate (2-12 keV)	Counts rate (0.1-2 keV)	Counts rate (2-12 keV)
GVO	134	106	115	106
NGC 4151	7.82	23.49	0.35	6.80
LMC X-3	6.50	19.87	0.36	6.50
Abell 2319	10.78	17.87	0.49	1.20
NXB	9.68	16.59	0.35	0.10

7.1.3.1 GVO データのスクリーニング結果

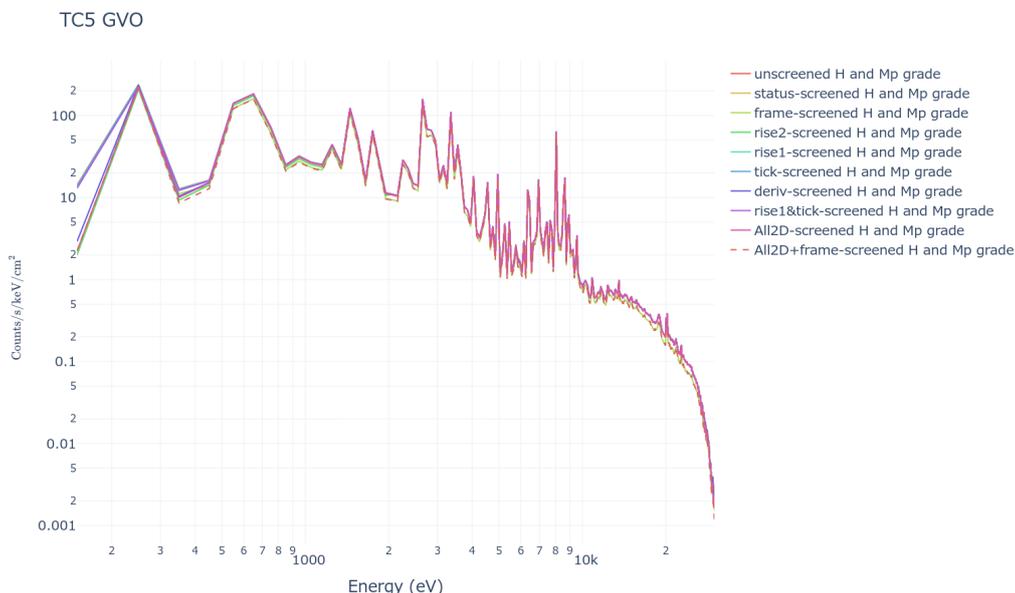


図 7.1. TC5 の 2022 年 3 月 4 日から 3 月 10 日の GVO データのエネルギースペクトル。

表 7.4. GVO データのスクリーニングごとのカウントレート counts s⁻¹。

Data	Screening	Counts rate (0.1-2 keV)	Counts rate (2-12 keV)
GVO	status	115	106
	frame	103	91
	rise2	106	106
	rise1	114	106
	tick	115	105
	deriv	113	105
	rise1&tick	114	105
	All2D	111	105
	All2D+frame	99	90

GVO データのエネルギースペクトルを図 7.1 に示し、0.1-2 keV と 2-12 keV の平均カウントレートを表 7.4 に示した。このデータは vacuum RTS (§ 3.2.7.3) による X線照射が行われたものであり、連続成分といくつかの輝線成分が検出されていることがわかる。

赤色の unscreened と、標準スクリーニングまたは追加スクリーニングを行ったデータとを比較する。スクリーニングの手法に依らず、0.1-12 keV の観測可能帯域全体のカウント数はほとんど変化していないことがわかる。

7.1.3.2 NGC 4151 データのスクリーニング結果

図 7.2. NGC 4151 のエネルギースペクトル。

表 7.5. NGC 4151 のスクリーニングごとのカウントレート counts s^{-1} 。

Data	Screening	Counts rate (0.1-2 keV)	Counts rate (2-12 keV)
NGC 4151	status	0.35	6.80
	frame	0.24	6.77
	rise2	0.06	6.80
	rise1	0.07	6.74
	tick	0.09	6.67
	deriv	0.13	6.78
	rise1&tick	0.06	6.67
	All2D	0.06	6.67
	All2D+frame	0.05	6.64

NGC 4151 のエネルギースペクトルを図 7.2 に示し、0.1–2 keV と 2–12 keV の平均カウントレートを表 7.5 に示した。2–12 keV で天体からの X 線シグナルイベントがある。ただし、赤色スペクトルの 5.9、6.4 keV の輝線は較正ピクセル (12 番) に照射された ^{55}Fe のシグナルである。

赤色の unscreened と、標準スクリーニングまたは追加スクリーニングを行ったデータとを比較する。スクリーニングをかけることによって、0.1–12 keV の観測可能帯域全体のカウント数が大きく減少していることがわかる。一方で、標準スクリーニングまたは追加スクリーニングを行ったデータ同士を比較すると、スクリーニングの手法に依らず、2 keV 以上のカウント数はほとんど変化していないが、スクリーニングの手法によって、2 keV 以下のカウント数は、変化していることがわかる。

7.1.3.3 LMC X-3 データのスクリーニング結果

図 7.3. LMC X-3 のエネルギースペクトル。

表 7.6. LMC X-3 のスクリーニングごとのカウントレート counts s^{-1} 。

Data	Screening	Counts rate (0.1-2 keV)	Counts rate (2-12 keV)
LMC X-3	status	0.36	6.50
	frame	0.29	6.47
	rise2	0.13	6.50
	rise1	0.14	6.45
	tick	0.15	6.36
	deriv	0.18	6.48
	rise1&tick	0.13	6.36
	All2D	0.13	6.36
	All2D+frame	0.12	6.34

LMC X-3 のエネルギースペクトルを図 7.3 に示し、0.1–2 keV と 2–12 keV の平均カウントレートを表 7.6 に示した。2–12 keV で天体からの X 線シグナルイベントがある。ただし、赤色スペクトルの 5.9、6.4 keV の輝線は較正ピクセル (12 番) に照射された ^{55}Fe のシグナルである。

赤色の unscreened と、標準スクリーニングまたは追加スクリーニングを行ったデータとを比較する。スクリーニングをかけることによって、0.1–12 keV の観測可能帯域全体のカウント数が大きく減少していることがわかる。一方で、標準スクリーニングまたは追加スクリーニングを行ったデータ同士を比較すると、スクリーニングの手法に

依らず、2 keV 以上のカウント数はほとんど変化していないが、スクリーニングの手法によって、2 keV 以下のカウント数は、変化していることがわかる。

7.1.3.4 Abell 2319 データのスクリーニング結果

図 7.4. Abell 2319 のエネルギースペクトル。

表 7.7. Abell 2319 のスクリーニングごとのカウントレート counts s⁻¹。

Data	Screening	Counts rate (0.1-2 keV)	Counts rate (2-12 keV)
Abell 2319	status	0.49	1.20
	frame	0.39	1.19
	rise2	0.03	1.20
	rise1	0.05	1.14
	tick	0.07	1.14
	deriv	0.13	1.18
	rise1&tick	0.03	1.14
	All2D	0.03	1.14
	All2D+frame	0.03	1.13

Abell 2319 のエネルギースペクトルを図 7.4 に示し、0.1–2 keV と 2–12 keV の平均カウントレートを表 7.7 に示した。2–12 keV で天体からの X 線シグナルイベントがある。ただし、赤色スペクトルの 5.9、6.4 keV の輝線は較正ピクセル (12 番) に照射された ⁵⁵Fe のシグナルである。

赤色の unscreened と、標準スクリーニングまたは追加スクリーニングを行ったデータとを比較する。スクリーニングをかけることによって、0.1–12 keV の観測可能帯域全体のカウント数が大きく減少していることがわかる。一方で、標準スクリーニングまたは追加スクリーニングを行ったデータ同士を比較すると、スクリーニングの手法に依らず、2 keV 以上のカウント数はほとんど変化していないが、スクリーニングの手法によって、2 keV 以下のカウント数は、変化していることがわかる。

7.1.3.5 NXB データのスクリーニング結果

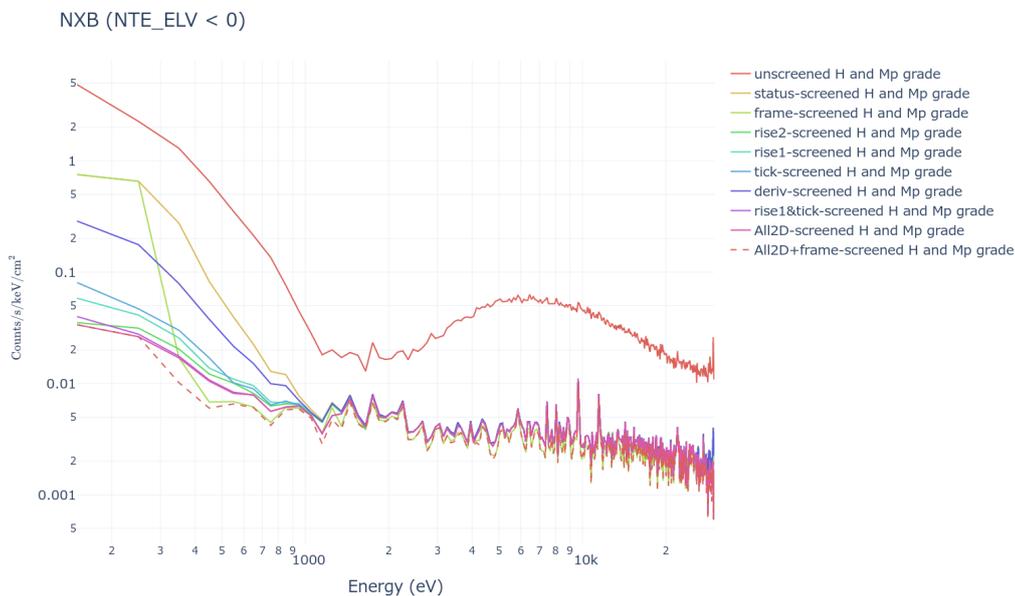


図 7.5. NXB のエネルギースペクトル。

表 7.8. NXB のスクリーニングごとのカウントレート counts s⁻¹。

Data	Screening	Counts rate (0.1-2 keV)	Counts rate (2-12 keV)
NXB	status	0.35	0.10
	frame	0.25	0.09
	rise2	0.02	0.10
	rise1	0.03	0.04
	tick	0.06	0.04
	deriv	0.09	0.08
	rise1&tick	0.02	0.04
	All2D	0.02	0.04
	All2D+frame	0.02	0.03

Non X-ray Background (NXB) と見なすことのできるエネルギースペクトルを図 7.5 に示し、0.1–2 keV と 2–12 keV の平均カウントレートを表 7.8 に示した。天体からの X 線シグナルイベントはない。赤色スペクトルの 5.9、6.4 keV の輝線は較正ピクセル (12 番) に照射された ⁵⁵Fe のシグナルである。

赤色の unscreened と、標準スクリーニングまたは追加スクリーニングを行ったデータとを比較する。スクリーニングをかけることによって、0.1–12 keV の観測可能帯域全体のカウント数が大きく減少していることがわかる。一方で、標準スクリーニングまたは追加スクリーニングを行ったデータ同士を比較すると、スクリーニングの手法に依らず、2 keV 以上のカウント数はほとんど変化していないが、スクリーニングの手法によって、2 keV 以下のカウント数は、変化していることがわかる。

7.1.4 考察と結論

スクリーニングの評価を行うにあたり、以下の方針を進める。

1. まず各追加スクリーニング方法によってシグナルが大幅に減少していないかを評価する。
2. 次にシグナルの減少率が5%以下の追加スクリーニングの中で、最もノイズ成分をスクリーニングする方法を評価する。
3. フレームイベントのスクリーニングによる効果は別途評価する。

7.1.4.1 追加スクリーニングによるシグナル評価

GVO データと天体データを用いて、各スクリーニング方法によってシグナルが大幅に減少していないかを評価する。GVO データは、地上試験による vacuum RTS による X線がノイズ成分より卓越しており、0.1–12 keV の観測可能帯域全体でシグナル成分が主成分であると考えられる。一方で、天体データは、2 keV 以下のエネルギー帯域はノイズ成分が主成分であり、2 keV 以上のエネルギー帯域はシグナル成分とノイズ成分が混在した成分であると考えられる。

§ 7.1.3 より、スクリーニングによって 2 keV 以下のイベントを顕著に減少させていることがわかる。したがって、シグナルの評価には、同じエネルギー帯域である 2 keV 以下にシグナル成分が主成分である GVO データを用いることが適切であると考えられる。GVO のデータセットの 0.1–2 keV のエネルギー帯域にスクリーニングを適用した結果を図 7.6 に示した。ここで、screening-ratio とは、追加スクリーニングをかける前 (status-screened) の平均カウントレートに対する、追加スクリーニングをかけた後の平均カウントレートとの比である。

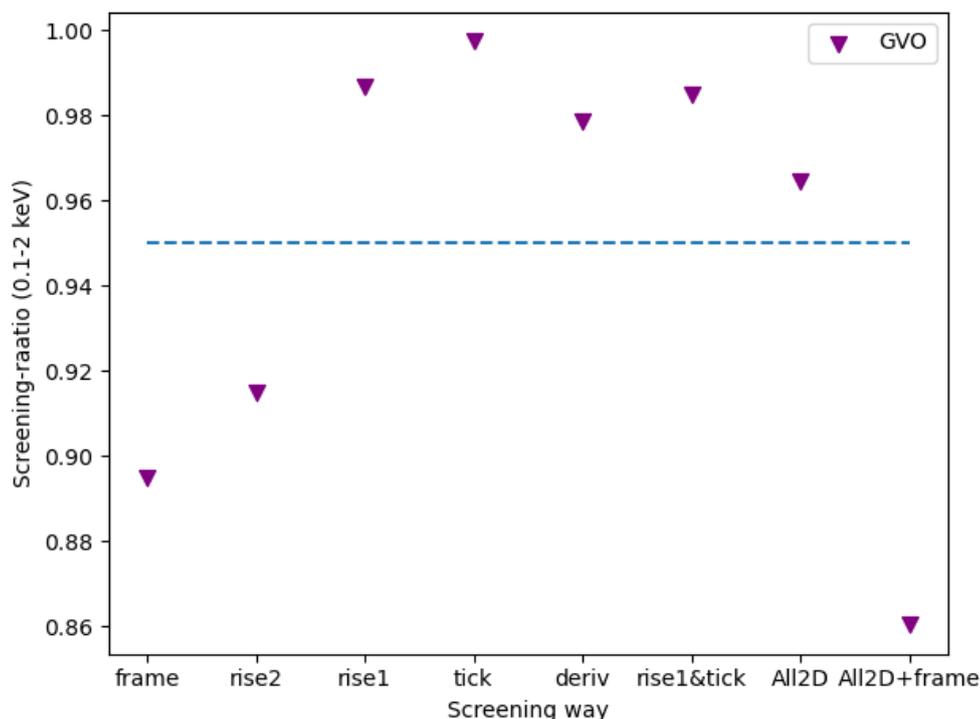


図 7.6. GVO データ (0.1–2 keV) のスクリーニングの評価。横軸は、各スクリーニング方法、縦軸は、そのときの screening-ratio を示す。青の点線は 95% を示している。

図 7.6 から、rise1 スクリーニング、tick スクリーニング、deriv スクリーニング、rise&deriv スクリーニング、All2D スクリーニングは、シグナルの除去率が 5 % 未満であることがわかる。一方で、rise2 スクリーニングとフレームイベントのスクリーニングは、シグナルの除去が 5 % 以上であることがわかる。よって、追加スクリーニングには、rise1 スクリーニング、tick スクリーニング、deriv スクリーニング、rise&deriv スクリーニング、All2D スクリーニングのいずれかを採用すべきである。

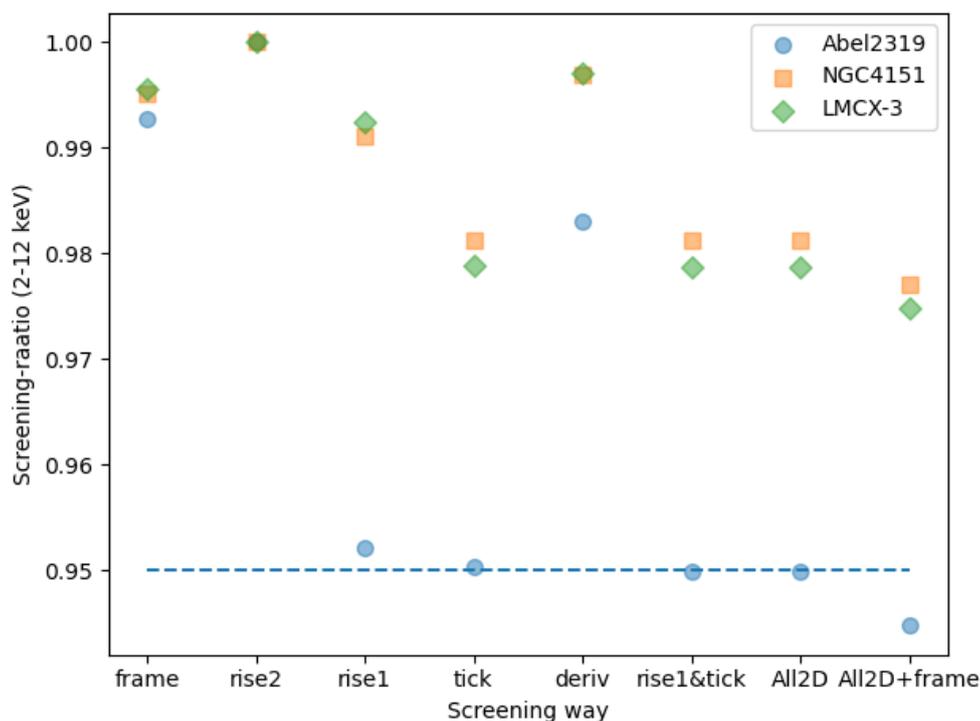


図 7.7. 天体データ (2–12 keV) のスクリーニングのシグナル評価。横軸は、各スクリーニング方法、縦軸は、そのときの screening-ratio を示す。青の点線は 95% を示している。

次に、天体のデータセットの 2–12 keV のエネルギー帯域にスクリーニングを適用した結果を図 7.7 に示す。天体の 2–12 keV はシグナルとノイズが混在している。図 7.7 から、rise1 スクリーニング、tick スクリーニング、deriv スクリーニング、rise&deriv スクリーニング、All2D スクリーニングについて、以下のことがわかる。

- All2D+frame 以外のスクリーニングでは、どの天体に対しても Screening-ratio が 95% 以上であるため、少なくともシグナルの減少は 5% 未満である。
- 比較的明るい天体である NGC 4151、LMC X-3 よりも、比較的暗い Abell 2319 のほうが、Screening-ratio が小さい。これは、Abell 2319 のほうがノイズ成分がより支配的であるためであり、妥当な結果である。

以上より、rise1 スクリーニング、tick スクリーニング、deriv スクリーニング、rise&deriv スクリーニング、All2D スクリーニングのいずれかが追加スクリーニングとして適切であると結論づける。

7.1.4.2 追加スクリーニングによるノイズ評価

次に、天体データセットと NXB データを用いて、rise1 スクリーニング、tick スクリーニング、deriv スクリーニング、rise&deriv スクリーニング、All2D スクリーニングの中で最も良い追加スクリーニング方法を評価する。ノイズ成分である天体観測データ (0.1–2 keV) と NXB データに対して、これらのスクリーニング方法を適用した

結果を図 7.8 に示す。

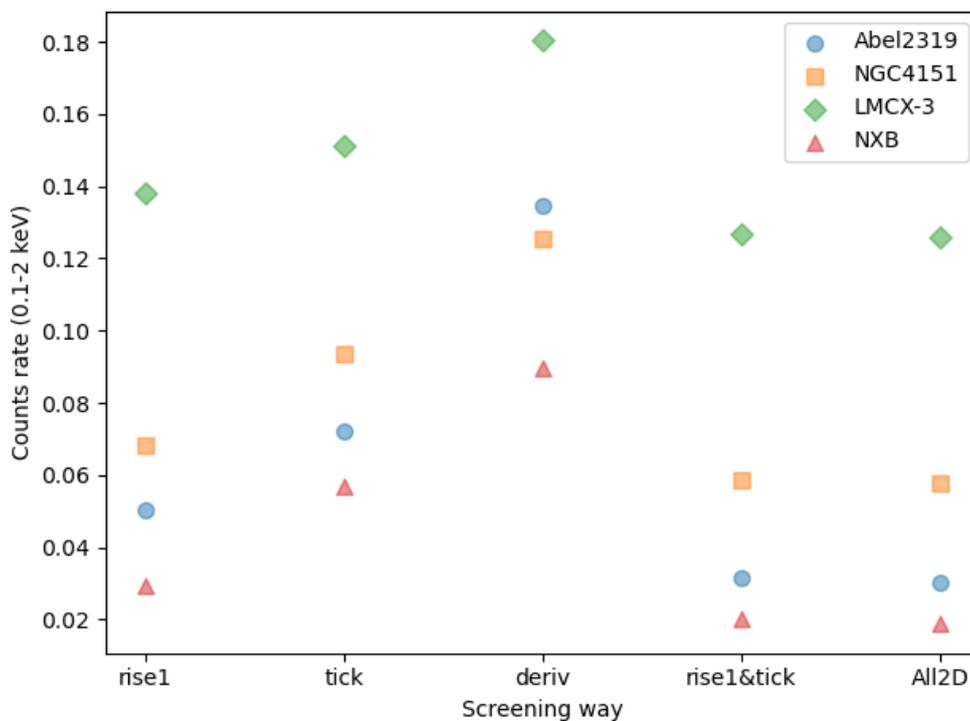


図 7.8. 天体データと NXB データのスクリーニングの評価。横軸は、各スクリーニング方法、縦軸は、0.1-2 keV のカウントレートを示す。

図 7.8 より、スクリーニング方法によるカウントレートを比べると、すべてのデータに対して、All2D スクリーニングが最もノイズ成分をスクリーニングできていることがわかる。次に、All2D スクリーニング後の天体データと NXB データのカウントレートを比較する。2 keV 以下のイベントがすべてノイズイベントなら、両者は同じ程度になるはずであるが、前者の方が高いカウントレートを示している。その乖離は、比較的明るい天体である NGC 4151、LMC X-3 の方が、比較的暗い天体である Abell 2319 より大きい。これは、以下の 2 つの理由によるものと考えられる。

■ゲートパルプ透過 X 線シグナルイベント ゲートパルプの遮蔽は 2 keV 以下で一律に効くわけではなく、実際には 2 keV 以下でもある程度の透過率がある。特に明るく軟らかいスペクトルを持つ LMC X-3 のような天体では 2 keV 以下に透過するシグナルイベントの存在は無視できない。実際、LMC X-3 のスペクトルを見ると (§ 7.1.3.3)、4 keV 以下のソフト成分が卓越しており、1.5-2 keV のエネルギー帯域には天体成分が残っていることがわかる。

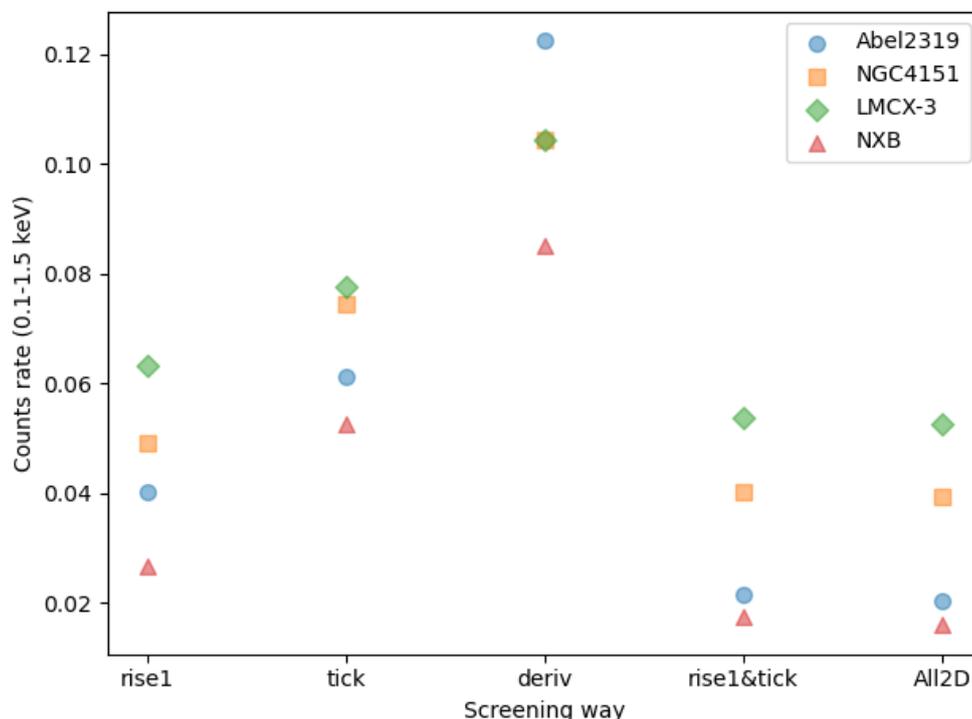


図 7.9. 天体データと NXB データのスクリーニングの評価。横軸は、各スクリーニング方法、縦軸は、0.1–1.5 keV のカウントレートを示す。

そこで、透過シグナルを排除して純粋なノイズ成分を見るために、0.1–1.5 keV のエネルギー帯域に対して、All2D スクリーニングを適用した結果を図 7.9 に示す。図 7.8 と図 7.9 を比べると、天体のカウントレートがより減少し、NXB のカウントレートと近くなっていることが確認できる。

■ X 線シグナルイベントの低エネルギー側再分配イベント もう 1 つの理由は、2 keV 以上の X 線が入射した時に、低エネルギーのチャンネル側へ再分配されるイベントの存在である。ここでは、検出器の応答関数の非対角成分 (§ 3.2.7.1) で表現され、エスケープイベントや、electron loss continuum 成分が含まれる。これらは、真の X 線イベントであり、イベントスクリーニングでは除去されない。また、乗算的な効果であり、入射 X 線の強度に比例する。

SXS 装置による、「かに」星雲の観測から、2 keV 以下のエスケープによる連続成分が ~ 1 counts/s/keV で存在することがわかっている (Tsujiimoto et al., 2018b)。「かに」星雲の平均カウントレートは、 $\sim 2 \times 10^2$ counts/s である。LMC X-3 の 2–12 keV の unscreened のカウントレートは、 ~ 2 counts/s であり、「かに」星雲よりも約 100 倍小さい。したがって、LMC X-3 の再分配イベントの強度は、 $\sim 1 \times 10^{-2}$ counts/s/keV と見積もられる。一方、図 7.9 の All2D スクリーニング後の LMC X-3 のカウントレートは、 1×10^{-2} counts/s/keV である。すなわち、All2D スクリーニング後の成分は、NXB 成分とシグナル再分配イベントの合計で説明できる。

以上より、All2D スクリーニング方法はカウントレートが異なる天体に対しても、同様に効果があることを示しており、All2D スクリーニングを追加スクリーニングとすることを提案する。

7.1.4.3 フレームイベントのスクリーニングの評価

最後に、フレームイベントのスクリーニングの評価を行う。フレームイベントによるシグナルの減少率を評価するために、2–12 keV の帯域の GVO、天体、NXB のデータセットを用いる。フレームイベントのスクリーニングと status スクリーニングとの平均カウントレートの比を天体ごとに評価した結果を図 7.10 に示す。

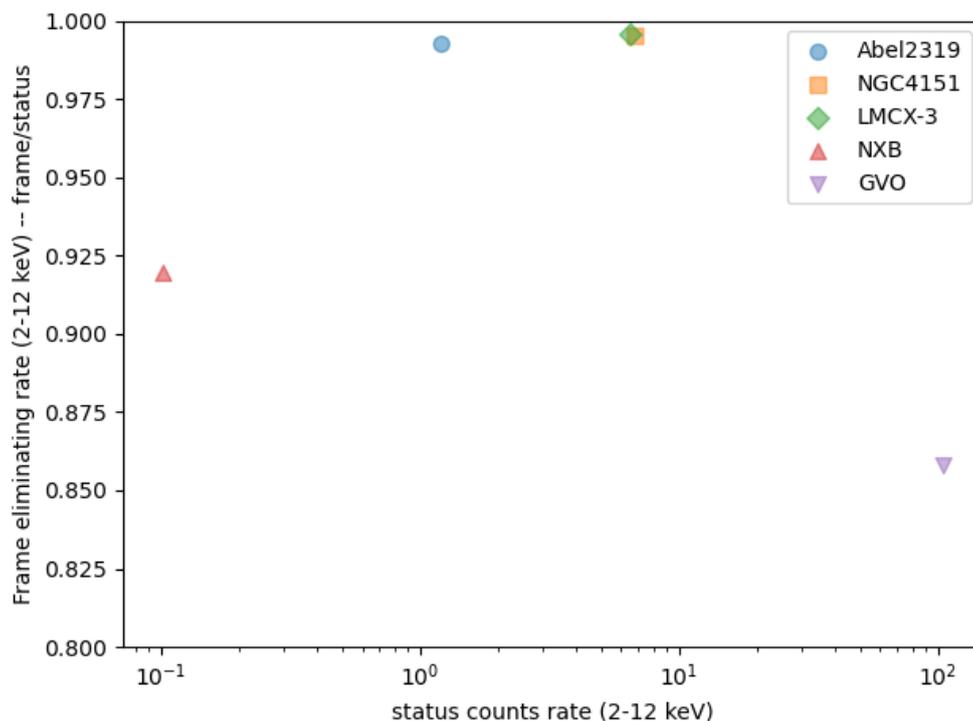


図 7.10. フレームイベントのスクリーニングの評価。横軸は、status スクリーニング後の平均カウントレート、縦軸は、フレームイベントのスクリーニングと status スクリーニングの平均カウントレートとの比を示す。

図 7.10 の縦軸は、天体のカウントレートに依存するフレームイベントのスクリーニングによるイベント除去率を示している。したがって、図 6.49 と比較することで、フレームイベントの妥当性を評価することができる。GVO のデータセットのカウントレートは、 $100 \text{ counts s}^{-1}$ 程度であり、図 7.10 において、~15% のイベント除去率に相当する。これは、図 6.49 と一致している。

一方で、NXB のデータセットのカウントレートは、 $0.1 \text{ counts s}^{-1}$ 程度であり、ほとんどフレームイベントはないはずであるが、図 7.10 において、~7.5% のイベント除去率に相当している。これは、地没の NXB データセットは、他のデータセットと比べて、宇宙線が支配的であるため、全体のカウント数に対する宇宙線によるフレームイベントの割合が他の天体よりも多いことが原因であると考えられる。

以上の結果より、フレームイベントのスクリーニングは、天体のカウントレートに依存することを確認した。§ 6.2.4.4 で予想したとおりである。カウントレートが大きい場合はシグナルを大幅に除去してしまう。従って、もしフレームスクリーニングをかけるなら、天体のカウントレートに応じてフレームイベントのウィンドウに入っているイベントの数 (`same_pix_number`) を変更することが望ましい。

7.2 要求値との比較

§ 7.1 で示したスクリーニングの評価結果から、追加スクリーニングとして All2D スクリーニングの適用が望ましいことを示した。最後に、標準スクリーニングが要求値 (表 3.1) を満たしていること、そして追加スクリーニングが拡張した性能を満たしていることを示す。

表 7.9. 0.3–12 keV のバックグラウンドレベル。

スクリーニング方法	バックグラウンドカウントレート (0.3–12 keV)
スクリーニングなし (unscreened)	$1.5 \times 10^{-2} \text{ countss}^{-1}\text{keV}^{-1}$
標準スクリーニング (status)	$1.8 \times 10^{-3} \text{ countss}^{-1}\text{keV}^{-1}$
追加スクリーニング (All2D)	$1.0 \times 10^{-3} \text{ countss}^{-1}\text{keV}^{-1}$

バックグラウンドの要求値は、0.3–12 keV において $\leq 2 \times 10^{-3} \text{ counts/s/keV}$ である (表 3.1)。本研究によるスクリーニングによって、バックグラウンドレベルがどの程度低下するかを評価するために、NXB データの unscreened (スクリーニングなし)、status (標準) スクリーニング、All2D (追加) スクリーニングによる 0.3–12 keV のカウントレートを表 7.9 に示した。

標準スクリーニングである status スクリーニングによって、バックグラウンドレベルが要求値をみたしていることがわかる。また、追加スクリーニングである All2D スクリーニングをかけることによって、イベントスクリーニングをする前の unscreened データから 93.2%、status スクリーニングから 44.4% のノイズイベントを削減し、要求値の半分程度までバックグラウンドを低下させることができることがわかる。

更に、追加スクリーニングを行った結果、観測可能エネルギー帯域がどの程度変化したかを評価する。0.1–20 keV の幅広い帯域で X 線シグナルイベントを持つ GVO データに対し、追加スクリーニングを適用後のイベント散分図 (RISE_TIME、TICK_SHIFT、DERIV_MAX の特徴量とエネルギー (EPI2) との関係) を図 7.11 に示す。0.1–20 keV の広いエネルギー帯域において、科学目標のために用いる Hp グレードイベント、Mp グレードイベントを抽出できていることがわかり、それ以外の成分はきれいに除去できている。よって、観測可能帯域を要求値の 0.3–12 keV から 0.1–20 keV に拡張できていることが確認された。

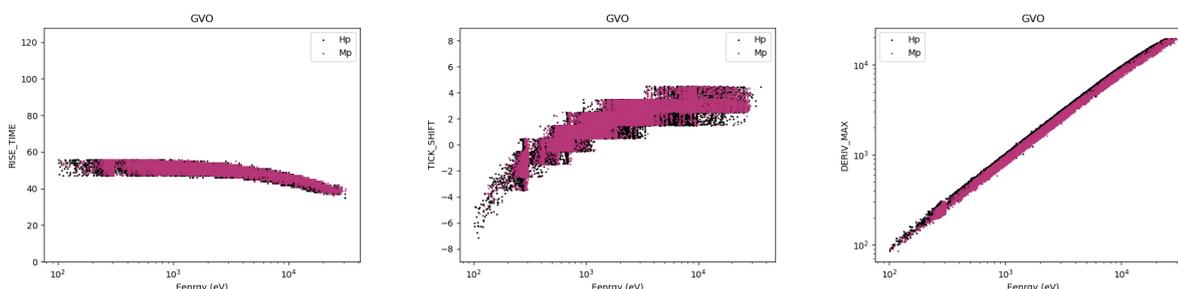


図 7.11. GVO データの観測可能帯域。横軸はエネルギー、縦軸は RISE_TIME (左)、TICK_SHIFT (中央)、DERIV_MAX (右) を示す。実データの 1% をプロットしている。

さらに、追加スクリーニングによる 12–20 keV のバックグラウンドのカウントレートと、0.1–0.3 keV のバックグラウンドのカウントレートをそれぞれ表 7.10 と表 7.11 に示す。

標準スクリーニングによって、12–20 keV のバックグラウンドレベルまで十分に低下させることができることがわかる。また、追加スクリーニングを行うことによって、標準スクリーニングでは落とすことができなかった 0.1–0.3 keV のバックグラウンドを低下させることができることがわかる。追加スクリーニング後の 0.1–0.3 keV の

表 7.10. 12–20 keV のバックグラウンドレベル。

スクリーニング方法	バックグラウンドカウントレート (12–20 keV)
スクリーニングなし (unscreened)	$6.0 \times 10^{-3} \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$
標準スクリーニング (status)	$6.5 \times 10^{-4} \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$
追加スクリーニング (All2D)	$6.4 \times 10^{-4} \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$

表 7.11. 0.1–0.3 keV のバックグラウンドレベル。

スクリーニング方法	バックグラウンドカウントレート (0.1–0.3 keV)
スクリーニングなし (unscreened)	$8.2 \times 10^{-1} \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$
標準スクリーニング (status)	$1.6 \times 10^{-1} \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$
追加スクリーニング (All2D)	$6.9 \times 10^{-3} \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$

バックグラウンドは要求値を上回っているが、この要求値は、0.3–12 keV の要求値であるため、上回っていることは問題ないと考えられる。ゲートバルブ開後に追加スクリーニングを行うことで、炭素の原子線 (表 2.1) の観測可能性が開けた。

第 8 章

結論

§ 2.1 で掲げた本研究の主題「打ち上げ前の地上試験、及び、打ち上げ後の軌道上運用の *Resolve* 装置のデータを使って、*Resolve* 装置におけるイベントスクリーニング」について、以下の 3 つの目標を § 6–§ 7 で達成した。

目的 1 個別のスクリーニング項目における条件出しを行う。

目的 2 複数のスクリーニング項目を組み合わせた標準スクリーニングが、装置性能要求を満たすことを検証する。

目的 3 さらに追加スクリーニングで性能拡張を目指す。

まず目的 1 について、§ 2.2 で掲げた 3 種類 15 項目のイベントスクリーニング課題の結果を以下にまとめる。特に、本研究のオリジナリティになる SXS 装置との比較を表にまとめた (表 8.1)。

1. パルス形状に基づくスクリーニング (§ 6.1).

- (a) パルス立ち上がり時間 (`RISE_TIME`) (§ 6.1.1) ... Abell 2319 のデータを用いて、`RISE_TIME` の最適なスクリーニング条件の決定を目的とした。`DERIV_MAX` と `EPI2` が `RISE_TIME` と相関することを確認し、パルスレコードを調べることで、`RISE_TIME` の 2 種類のスクリーニング条件を決定した (式 6.2、(式 6.3))。このうち、式 6.2 のスクリーニング条件 (SXS 装置から改定) を、標準的に用いることを提案した。
- (b) 標準パルス波形からの時間方向のずれ (`TICK_SHIFT`) (§ 6.1.2) ... Abell 2319 のデータを用いて、`TICK_SHIFT` の最適なスクリーニング条件をの決定を目的とした。`DERIV_MAX` と `EPI2` が `TICK_SHIFT` と相関することを確認し、パルスレコードを調べることで、`TICK_SHIFT` の 2 種類のスクリーニング条件を決定した (式 6.4、式 6.5)。このスクリーニング条件 (SXS 装置から新設) を、標準的に用いることを提案した。
- (c) 微分パルスの最大値 (`DERIV_MAX`) (§ 6.1.3) ... Abell 2319 のデータを用いて、`DERIV_MAX` の最適なスクリーニング条件の決定を目的とした。`DERIV_MAX` と `EPI2` が相関することを確認し、`DERIV_MAX` のスクリーニング条件を決定した (式 6.7)。このスクリーニング条件 (SXS 装置から新設) を標準的に用いることを提案した。
- (d) パルスの重なり (`QUICK_DOUBLE`) (§ 6.1.4) ... Abell 2319 のデータを用いて、`QUICK_DOUBLE` の最適なスクリーニング条件の決定を目的とした。`QUICK_DOUBLE` イベントのパルスレコードを調べることで、`QUICK_DOUBLE` のスクリーニング条件を決定した (式 6.8)。このスクリーニング条件 (SXS 装置と同じ) を標準的に用いることを提案した。
- (e) パルス減衰の遅さ (`SLOPE_DIFFER`) (§ 6.1.5) ... Abell 2319 のデータを用いて、`SLOPE_DIFFER` の最適なスクリーニング条件の決定を目的とした。`SLOPE_DIFFER` と `PI` の分布を確認し、パルスレコードを調べることで、`SLOPE_DIFFER` のスクリーニング条件を決定した (式 6.9)。これらのスクリーニング

条件 (SXS 装置と同じ) を標準的に用いることを提案した。

- (f) パルス波高値のサチュレーション (FLAG_CLIPPED) (§ 6.1.6) ... 地上試験 TC5 の RTS16 を照射したデータを用いて、FLAG_CLIPPED の最適なスクリーニング条件の決定を目的とした。CLIPPED イベントは、14 keV 以上のイベントにつくことを確認した。RTS16 の輝線の分解能を評価することで、FLAG_CLIPPED のスクリーニング条件を決定した (式 6.10)。これらのスクリーニング条件 (SXS 装置から新設) を標準的に用いることを提案した。
- (g) パルス増減の遅さ (SLOW_PULSE) (§ 6.1.7) Abell 2319 のデータを用いて、SLOW_PULSE の最適なスクリーニング条件の決定を目的とした。SLOW イベントのパルスレコードを調べることで、SLOW イベントのスクリーニング条件を決定した (式 6.11)。このスクリーニング条件 (SXS 装置と同じ) を標準的に用いることを提案した。

2. 到達時刻に基づくスクリーニング (§ 6.2)。

- (a) 反同時計測検出器による veto (§ 6.2.2) ... 地上試験 TC5、TC6、TC7、TC9 のすべてのデータ、そして軌道上の 10 月 9 日から 12 月 6 日までのデータを用いて、反同時計測検出器による最適なスクリーニング条件の決定を目的とした。反同時計測検出器によって検出した anti-co イベントと、ピクセルイベントの時間差から、最適な anti-co ウィンドウの値 (SXS 装置から改定) を決定した (ANTSHIFT = -2 sample、ANTDTPRE = 3 sample、ANTDTFOL = 3 sample)。反同時計測検出器によるスクリーニング条件を標準的に用いることを提案した。
- (b) 電氣的クロストーク (クロストークがイベントとして検出される場合) (§ 6.2.3) ... 地上試験 TC5 の CCCM を照射したデータを用いて、電氣的クロストークの最適なスクリーニング条件の決定を目的とした。電氣的クロストークイベントと、それを引き起こす親イベントとの時間差から、最適な電氣的クロストークウィンドウの値を新たに決定した (cteldt_minimum = 2 sample、cteldt_maximum = 9 sample、pharatio = 200)。
- (c) フレームイベント (§ 6.2.4, (§ 6.2.5)) ... 地上試験 TC5 の高カウントレート X 線照射実験によるデータを用いて、X 線によるフレームイベントの最適なスクリーニング条件の決定を目的とした。また、打ち上げから 12 月 4 日まで軌道上データを用いて、宇宙線によるフレームイベントの最適なスクリーニング条件の決定を目的とした。ある時間ウィンドウ内に入ったピクセルイベントをフレームイベントとして、時間ウィンドウの大きさ (PROXD = 9 sample) の決定と、イベント数の値 (same_pix_number) によるスクリーニングを評価した。フレームイベントによるスクリーニング条件は、天体のカウントレートに依存する。従って、もし標準スクリーニングに採用するなら、時間ウィンドウ内に入ったイベント数の条件を適宜変えることを提案した。
- (d) 電子反跳イベント (§ 6.2.6) ... 熱真空試験前の X 線バックグラウンドのみのデータセットを用いて、電子反跳イベントの最適なスクリーニング条件の決定を目的とした。電子反跳イベントと、それを引き起こす親イベントとの時間差から、最適な電子反跳 ウィンドウの値を決定した (CTRECDT = 3 sample)。このスクリーニング条件 (SXS 装置と同じ) を標準的に用いることを提案した。

3. 時間帯に基づくスクリーニング (§ 6.3)。

- (a) 断熱消磁冷凍機のリサイクル (§ 6.3.1) ... すべての地上試験と 10 月 11 日から 10 月 29 日の軌道上データを用いて、断熱消磁冷凍機のリサイクルの GTI が正常に計算されているかどうかを検証した。この結果、rsladrgti によって、正しく GTI が計算されていることを確認した。
- (b) 南大西洋放射線異常帯通過 (§ 6.3.2) ... 10 月 11 日から 12 月 6 日までの軌道上データを用いて、Resolve 装置における最適な南大西洋放射線異常帯の領域を決定した。Anti-co イベントのカウントレートから、厳しめの領域 (図 6.72) と、緩めの領域 (図 6.73) の 2 種類を新たに決定した。南大西洋放射線異常帯によるスクリーニング条件として、厳しめの領域を標準的に用いることを提案した。

- (c) 地球離角 (§ 6.3.3) ... 10月11日から12月6日までの軌道上データを用いて、地球からの離角を関数にバックグラウンドを評価した。その結果、X線イベントスクリーニングでは、地球からの離角が 5° 以上 (SXS装置と同じ) の領域を、NXB イベントスクリーニングに対しては、地球からの離角が 0° 以下 (SXS装置を改定) とするスクリーニング条件を出し、標準的に用いることを提案した。
- (d) 地球磁場強度 (§ 6.3.4) ... 10月11日から12月6日までの軌道上データを用いて、地球磁場によるバックグラウンドと分解能を評価した。その結果、地球磁場による影響は大きくないことを確認した。したがって、地球磁場によるスクリーニングは、SXS装置と同じく、行わないことを提案した。

表 8.1. SXS 装置と Resolve 装置のイベントスクリーニングの比較。

イベントスクリーニング項目	SXS装置	Resolve装置 (本研究)
パルス形状に基づくスクリーニング		
RISE_TIME	あり	RISE_TIMEとDERIV_MAXの関係から改定したスクリーニング条件を提案
TICK_SHIFT	なし	TICK_SHIFTとDERIV_MAXの関係から新たなスクリーニング条件を提案
DERIV_MAX	なし	EPI2とDERIV_MAXの関係から新たなスクリーニング条件を提案
QUICK_DOUBLE	あり	SXS と同じ条件
SLOPE_DIFFER	あり	SXS と同じ条件
FLAG_CLIPPED	なし	すべてのCLIPPEDイベントを除く新たなスクリーニング条件を提案
SLOW_PULSE	あり	SXS と同じ条件
到達時間に基づくスクリーニング		
反時計検出器による veto	あり	改定したanti-co ウィンドウを提案
電氣的クロストーク	あり	新しいクロストークの時間ウィンドウとpharatio値を提案
フレイムイベント	あり	フレイムイベントの時間ウィンドウ内のイベント数の変更を提案
電子反跳イベント	あり	SXS と同じ条件
時間帯に基づくスクリーニング		
断熱消磁冷凍機のリサイクル	なし	rsladrgtiによって計算した時間帯によるスクリーニングを確認
南大西洋放射線異常帯通過	あり	改定したSAA領域における時間帯によるスクリーニングを提案
地没	あり	観測データ及びNXBイベントスクリーニングに用いる地球離角の閾値を決定。 観測データの閾値はSXS と同じ条件、NXBの閾値は変更を提案。
地球磁場強度	なし	SXS と同じく、スクリーニングに使用しない

次に、目的2について、これらのスクリーニングのうち天体強度によらずノイズを落とすものだけを「標準スクリーニング」として組み合わせ、実データに適用してスクリーニング性能の評価を行った。その結果、バックグラウンドの要求値である $2 \times 10^{-3} \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ ($0.3\text{--}12 \text{ keV}$) 以下に収まることを実証した。

最後に、目的3について、天体の信号を多少落とすとしても、バックグラウンドをさらに低くするための「追加スクリーニング」を提案し、実データの適用して性能評価を行った。

その結果、天体の信号の現象を5%未満に抑えながらノイズイベントを要求値の半分の $1 \times 10^{-3} \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ にまで下げることに成功した。また、 $12\text{--}20 \text{ keV}$ のエネルギー帯域でのバックグラウンドレベルと、 $0.1\text{--}0.3 \text{ keV}$ のエネルギー帯域でのバックグラウンドレベルを同様に低下させることにも成功し、実質的な観測可能帯域を $0.1\text{--}20 \text{ keV}$ に拡張できていることを確認した。これによって、追加目標であった、 $12\text{--}20 \text{ keV}$ のコンプトンハンプハンプの観測と、ゲートバルブ開後に炭素の原子線の観測の可能性も開けた。

以上のイベントスクリーニング条件は、地上試験のゲートバルブ開データに対しても検証しているので、今後軌道上でゲートバルブが開いた後も変更なく適用できるはずである。ただし、低エネルギー側の応答が改善するため、地上試験では模擬できなかった地球離角に対する条件 (§ 6.3.3) だけは再評価する必要があるだろう。

改訂履歴

変更日時	改訂履歴
2024/01/21	天文学専攻事務室へ提出
2024/02/16	査読委員の鹿野さまからのコメントを取り込み、天文学専攻事務室へ提出 Anti-co のエネルギー式の誤植を改訂 (§ 5.1.2)
2024/06/04	イベント閾値 120 の TICK_SHIFT スクリーニング式の開発 (§ 6.1.2) SAA 領域ではない地没のピクセルイベントを用いて、軌道上 Anti-co ウィンドウの再解析 (§ 6.2.2) SAA1 領域の Anti-co 閾値を 4 s^{-1} から 3 s^{-1} に変更し、最小凸領域に改訂 (§ 6.3.2)

謝辞

本節では、本研究を進めるにあたり、ご指導頂きました方々に感謝の意を表します。また、地上試験と、XRISM 衛星の打ち上げの際にお世話になりました方々、精神的な支えになった方々にも感謝の意を表します。

指導教官である ISAS の海老沢研教授には、活動銀河核 Mrk 766 の研究について、多くのご指導を頂きました。活動銀河核 Mrk 766 の研究は、私にとって初めての研究テーマであり、共同研究者の福岡教育大学の水本岬希さんとともに毎週打ち合わせを行いました。打ち合わせ中に、ソフトウェアの使い方から、初歩的な質問まで、様々なことを教えて頂きました。また、学会発表の際には、何回も発表練習をして頂きました。また、論文執筆に関しても、ご指導を頂きました。初めて論理的に文章を書くことを学び、本修論を書く上で間違いなく役に立ちました。この研究を通して、*Resolve* 装置で達成すべきサイエンス目標を明確にし、本研究の到達地点を明確にすることができました。さらに、修士論文の発表会の前日、そして当日のお昼にも、プレゼンの練習を見て頂きました。本当にありがとうございました。

本研究を進めるにあたり、ご指導頂きました ISAS の辻本匡弘准教授に深く感謝致します。辻本准教授とは週に 1 回以上の頻度で研究の打ち合わせを行いました。そのおかげで、研究の方向性を迷わずに進めることができました。また、ミーティング以外でも、質問や相談に対して丁寧に答えて頂きました。それだけでなく、申請書や私のその後の研究についても、ご指導を頂きました。この先を見据え、本研究での位置づけを明確にすることで、この研究をなんのためにやり、この解析が今後のなにつなげるのかを明確にすることができました。地上試験の際には、4 回に渡って試験に参加し、実際の試験の様子を体験し、打ち上げ前の衛星の姿を見ることができました。地上試験のコマンドや衛星の状態を試験中のお忙しい中解説して頂きました。これは、本研究を進める上で強い励みとなりました。本修士論文も何度も添削して頂きました。本当にありがとうございました。

地上試験の際には、辻本准教授に加えて、ISAS の藤本龍一さん、JAXA の竹井洋さん、東京都立大学の石崎欣尚さん、JAXA の星野晶夫さんにお世話になりました。星野晶夫さんには地上試験の参加に伴い、つくば宇宙センターの入構手続きをして頂きました。藤本龍一さん、竹井洋さんには、実際の試験の内容、XRISM 衛星の解説をして頂きました。ありがとうございました。

XRISM 衛星の打ち上げでは種子島に行き、打ち上げの様子を見ました。この際に、立教大学の山田真也さんには、XRISM 衛星の打ち上げ運用についての解説をして頂きました。また、Anti-co イベントのカウントレートマップやプログラミングの指導もして頂きました。ありがとうございました。

本研究は、XRISM 衛星のプロジェクトの中で進められており、プロジェクトのメンバーの方々にもお世話になりました。NASA/GSFC の C. A. Kilbourne さんには、本研究で行ったすべての結果において、ご助言を頂きました。そのご助言のおかげで、研究を正しい方向に進めることができました。それだけでなく、SPIE のアブストラクトの添削もしていただきました。ISAS の金丸善朗さんには、主に地上データ処理について、ご助言を頂きました。衛星運用中のお忙しい時期にも関わらず、プリパイプラインとパイプラインの仕組みを教えて頂き、ハウスキーピングデータの提供をして頂きました。これらのおかげで、軌道上の XRISM 衛星のデータを使用することができました。それだけでなく、本研究のコメント、修論のコメントもして頂きました。水本岬希さんには、パイプラインの通り方と、そのコードを教えて頂きました。また、輝線の分解能評価をするためのコードも教えて頂きました。こ

れらのおかげで、XRISM 衛星のパイプラインを理解し、パイプライン処理後のデータを使用することができました。立教大学の澤田真理さんには、プロジェクト内で行われたミーティングにおいて、ご助言を頂きました。また、絶対時刻補正パラメータのデータを提供して頂きました。NASA/GSFC の岡島崇さん、林多佳由さんには、論文を教えるとともに、軌道上データセットを作る上で参考となるデータを提供して頂きました。NASA/GSFC の Michael Loewenstein さんには、CALDB ファイルのアップデート、HEASoft への組込、LSF の較正試験データを提供して頂きました。これにより、Resolve 装置で用いる CALDB ファイルが最新のものになりました。また、Michael Loewenstein さん、MIT の Eric D. Miller さん、埼玉大学の佐藤浩介さんには、NXB の作成に関する議論をしていただき、コメントを頂きました。SRON の Russell Shipman さんには、軌道上における MXS の状態と運用を教える頂きました。NASA/GSFC の F. Scott Porter さんには、ADR リサイクルのゲイン安定性について、図の提供をして頂きました。NASA/GSFC の Maurice A. Leutenegger さんには、地上試験の CF モードの CCCM 較正試験データについて、図の提供をして頂きました。LLNL の Megan E. Eckart には、CLIPPED イベントのパルス閾値について、資料を提供していただきました。ISAS の前田良知さんには、SAA 領域について議論をして頂き、修士論文のコメントをして頂きました。その他、Resolve 装置の開発に関わったすべての方々にも感謝の意を表します。

本修論を査読して頂いた、国立天文台の鹿野良平さんに感謝の意を表します。本修士論文を査読して頂き、多くのコメントを頂きました。発表会の際にも、多くのコメントを頂きました。そのおかげで、本修士論文をより良いものにすることができました。ありがとうございました。

研究室のメンバーの方々にも、お世話になりました。ISAS の小川翔司さんには、日本学術振興会特別研究員 (DC1) の申請書類の相談と添削を何度もして頂きました。ISAS の丹波翼さんには、種子島での打ち上げの際に、試験の様子を教える頂きました。大間々知輝さんには、本修論の 6 章の相対時刻補正の研究において、Hp グレードのデータを提供して頂きました。また、相対時刻補正を行うためのコードを提供して頂きました。これらのおかげで、相対時刻補正の研究を進めることができました。プログラミングの書き方も教える頂きました。富永愛侑さん、栗原明稀さんには、地上試験の参加の際に、つくば宇宙センターの行き方から試験の参加の仕方まで教える頂きました。栗原明稀さんには、本修論の 1 章と 3 章の作成において、一緒に勉強会を開いて勉強をしたり、XRISM 衛星について教える頂きました。それだけでなく、プログラミングのエラーから、研究の様々なことを教える頂きました。宇宙科学研究所での研究生生活を楽しく過ごすことができたのは、栗原さんのおかげです。柏崎未有さんには、本修論の 6 章の ADR リサイクルに関わる HK データについて教える頂きました。Bram Wagemakers さんには、研究の気分転換にジムに連れて行って頂きました。ISAS の秘書の木下礼子さんには、出張の際に、出張の手続きをして頂きました。ありがとうございました。

宇宙科学研究所の先輩、同期、後輩にもお世話になりました。立教大学の林佑さんには最適フィルタリング処理を教える頂きました。同期の山崎研究室の太田瞭さん、坂尾研究室の清水里香さん、その他の同期の方々、6 階・7 階の宇宙物理学系の方々、その他数え切れないほど多くの方々のおかげで、研究やそれ以外の日常生活を楽しく過ごすことができました。ありがとうございました。

本修論、研究を進める上で、精神的な支えとなったの方々にも感謝の意を表します。母、祖母、そしてまわりの親戚の方々には本当に多くのことをして頂きました。当たり前前に生活ができ、研究ができてるのは、母のおかげです。また、岩垂奨学会からの経済支援のおかげで研究に専念することができました。ありがとうございました。

最後に、本研究を進めるにあたり、ご指導頂きました方々、お世話になりました方々、本当にありがとうございました。

参考文献

- Hitomi Instruments Calibration Documents* (). URL: https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/hitomi/calib/hitomi_caldb_docs.html.
- XRISM Calibration Database* (). URL: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xrism/calib/index.html>.
- Arnaud, K. A. (Jan. 1996). “XSPEC: The First Ten Years”. In: 101, p. 17.
- Boissay-Malaquin, R. et al. (Aug. 2022). “Ground Calibration of the X-Ray Mirror Assembly for the X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM) I-measurement Setup and Effective Area”. In: 12181, 121811U. DOI: 10.1117/12.2627563.
- Bonse, U. and M. Hart (Aug. 1965). “AN X-RAY INTERFEROMETER WITH LONG SEPARATED INTERFERING BEAM PATHS”. In: *Applied Physics Letters* 7.4, pp. 99–100. DOI: 10.1063/1.1754330.
- Boyce, K. R. et al. (Oct. 1999). “Design and Performance of the ASTRO-E/XRS Signal Processing System”. In: *EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy X*. Vol. 3765. SPIE, pp. 741–750. DOI: 10.1117/12.366557.
- Brinkman, B. C. et al. (July 2000). “Description and Performance of the Low-Energy Transmission Grating Spectrometer on Board Chandra”. In: 4012, pp. 81–90. DOI: 10.1117/12.391599.
- Chiao, M. P. et al. (July 2016). “System Design and Implementation of the Detector Assembly for the Astro-H Soft x-Ray Spectrometer”. In: *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*. Ed. by J.-W. A. Den Herder, T. Takahashi, and M. Bautz. Edinburgh, United Kingdom, p. 99053M. DOI: 10.1117/12.2231897.
- Collaboration, H. et al. (2014). “Hitomi Observations of the LMC SNR N132D: Highly Redshifted X-ray Emission from Iron Ejecta”. In: *Publications of the Astronomical Society of Japan* 70.2, pp. 1–19. DOI: 10.1093/pasj/psx151. arXiv: 1712.02365v1.
- Collaboration, H. et al. (July 2016). “The Quiescent Intracluster Medium in the Core of the Perseus Cluster”. In: *Nature* 535.7610, pp. 117–121. DOI: 10.1038/nature18627.
- Collaboration, H. et al. (Mar. 2018). “Search for Thermal X-ray Features from the Crab Nebula with the Hitomi Soft X-ray Spectrometer*”. In: *Publications of the Astronomical Society of Japan* 70.2. DOI: 10.1093/pasj/psx072.
- de Vries, C. P. et al. (Oct. 2017). “Calibration Sources and Filters of the Soft X-Ray Spectrometer Instrument on the Hitomi Spacecraft”. In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 4.01, p. 1. DOI: 10.1117/1.jatis.4.1.011204.
- den Herder, J. W. et al. (Jan. 2001). “The Reflection Grating Spectrometer on Board XMM-Newton”. In: *Astronomy and Astrophysics* 365, pp. L7–L17. DOI: 10.1051/0004-6361:20000058.
- Doyle, T. F. et al. (Aug. 2022). “The XRISM Pipeline Software System: Connecting Continents, Processes, Testing, and Scientists”. In: *Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray*. Vol. 12181. SPIE, pp. 1495–1506. DOI: 10.1117/12.2629103.

- Eckart, M. E. et al. (Apr. 2018). “Ground Calibration of the Astro-H (Hitomi) Soft x-Ray Spectrometer”. In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 4.02, p. 1. DOI: 10.1117/1.jatis.4.2.021406.
- Eguchi, S. et al. (Aug. 2022). “Xappl: Software Framework for the XRISM Pre-Pipeline”. In: *Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray*. Vol. 12181. SPIE, pp. 1507–1513. DOI: 10.1117/12.2629316.
- Eidelman, S. et al. (July 2004). “Review of Particle Physics”. In: *Physics Letters B*. Review of Particle Physics 592.1, pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.physletb.2004.06.001.
- Fujimoto, R. et al. (Dec. 2017). “Performance of the Helium Dewar and the Cryocoolers of the Hitomi Soft X-Ray Spectrometer”. In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 4.01, p. 1. DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.011208.
- Groom, D. E., N. V. Mokhov, and S. I. Striganov (July 2001). “MUON STOPPING POWER AND RANGE TABLES 10 MeV–100 TeV”. In: *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 78.2, pp. 183–356. DOI: 10.1006/adnd.2001.0861.
- Hasebe, T. et al. (Mar. 2023). “Ground Test Results of the Micro-Vibration Interference for the x-Ray Microcalorimeter Onboard XRISM”. In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 9.01. DOI: 10.1117/1.JATIS.9.1.014003. arXiv: 2303.01006 [astro-ph].
- Hölzer, G. et al. (Dec. 1997). “ $K\alpha_{1,2}$ and $K\beta_{1,3}$ x-Ray Emission Lines of the 3d Transition Metals”. In: *Physical Review A* 56, pp. 4554–4568. DOI: 10.1103/PhysRevA.56.4554.
- Imamura, R. et al. (June 2023). “Mechanical Cryocooler Noise Observed in the Ground Testing of the Resolve X-ray Microcalorimeter Onboard XRISM”. In: *Journal of Low Temperature Physics* 211.5-6, pp. 426–433. DOI: 10.1007/s10909-022-02935-1. arXiv: 2303.01004 [astro-ph].
- Ishisaki, Y. et al. (Mar. 2018). “In-Flight Performance of Pulse-Processing System of the ASTRO-H/Hitomi Soft x-Ray Spectrometer”. In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 4.1, p. 011217. DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.011217.
- Ishisaki, Y. et al. (Aug. 2022). “Status of Resolve Instrument Onboard X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)”. In: *Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray*. Ed. by J.-W. A. Den Herder, K. Nakazawa, and S. Nikzad. Montréal, Canada: SPIE, p. 66. DOI: 10.1117/12.2630654.
- Jansen, F. et al. (Jan. 2001). “XMM-Newton Observatory. I. The Spacecraft and Operations”. In: *Astronomy and Astrophysics* 365, pp. L1–L6. DOI: 10.1051/0004-6361:20000036.
- Kashiwazaki, M. and M. Tsujimoto (Feb. 2023). “機械学習を用いた XRISM 衛星搭載極低温検出器の異常検知アルゴリズムの検討”. In: *2022年度宇宙科学情報解析シンポジウム*.
- Kelley, R. L. et al. (Jan. 2007). “The Suzaku High Resolution X-Ray Spectrometer”. In: *Publications of the Astronomical Society of Japan* 59, pp. 77–112. DOI: 10.1093/pasj/59.sp1.S77.
- Kelley, R. L. et al. (July 2016). “The Astro-H High Resolution Soft x-Ray Spectrometer”. In: 9905, p. 99050V. DOI: 10.1117/12.2232509.
- Kilbourne, C. A. et al. (Feb. 2018a). “Design, Implementation, and Performance of the Astro-H SXS Calorimeter Array and Anticoincidence Detector”. In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 4.01, p. 1. DOI: 10.1117/1.jatis.4.1.011214.
- Kilbourne, C. A. et al. (Mar. 2018b). “In-Flight Calibration of Hitomi Soft X-ray Spectrometer. (1) Background”. In: *Publications of the Astronomical Society of Japan* 70.2. DOI: 10.1093/pasj/psx139.

- Kurihara, M. et al. (Mar. 2023). “Ground Test Results of the Electromagnetic Interference for the X-Ray Microcalorimeter Onboard XRISM”. In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 9.01. DOI: 10.1117/1.JATIS.9.1.018004.
- Leutenegger, M. A. et al. (Mar. 2018). “In-Flight Verification of the Calibration and Performance of the ASTRO-H (Hitomi) Soft X-ray Spectrometer”. In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 4.02, p. 1. DOI: 10.1117/1.jatis.4.2.021407.
- Markert, T. H. et al. (Sept. 1994). “High-Energy Transmission Grating Spectrometer for the Advanced X-ray Astrophysics Facility (AXAF)”. In: 2280, pp. 168–180. DOI: 10.1117/12.186812.
- Midooka, T. et al. (Apr. 2021). “X-Ray Transmission Calibration of the Gate Valve for the x-Ray Astronomy Satellite XRISM”. In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 7, p. 028005. DOI: 10.1117/1.JATIS.7.2.028005.
- Mitsuda, K. et al. (July 2010). “The High-Resolution x-Ray Microcalorimeter Spectrometer System for the SXS on ASTRO-H”. In: *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*. Ed. by M. Arnaud, S. S. Murray, and T. Takahashi. San Diego, California, USA, p. 773211. DOI: 10.1117/12.856778.
- Mitsuda, K. et al. (July 2014). “Soft X-Ray Spectrometer (SXS): The High-Resolution Cryogenic Spectrometer Onboard ASTRO-H”. In: *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*. Ed. by T. Takahashi, J.-W. A. Den Herder, and M. Bautz. Montréal, Quebec, Canada, 91442A. DOI: 10.1117/12.2057199.
- Mizumoto, M. et al. (Aug. 2022). “High Count Rate Effects in Event Processing for XRISM/Resolve x-Ray Microcalorimeter”. In: *Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray*. Ed. by J.-W. A. Den Herder, K. Nakazawa, and S. Nikzad. Montréal, Canada: SPIE, p. 264. DOI: 10.1117/12.2628784.
- Omama, T. et al. (Aug. 2022). “Relative Timing Calibration of the Resolve X-Ray Microcalorimeter Onboard XRISM Using the Modulated x-Ray Source”. In: *Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray*. Ed. by J.-W. A. Den Herder, K. Nakazawa, and S. Nikzad. Montréal, Canada: SPIE, p. 267. DOI: 10.1117/12.2629753.
- Porter, F. S. et al. (Oct. 2004). “The Astro-E2 X-ray Spectrometer/EBIT Microcalorimeter x-Ray Spectrometer”. In: *Review of Scientific Instruments, Volume 75, Issue 10, pp. 3772-3774 (2004)*. 75.10, p. 3772. DOI: 10.1063/1.1781758.
- Porter, F. S. et al. (July 2016). “Temporal Gain Correction for X-ray Calorimeter Spectrometers”. In: *Journal of Low Temperature Physics* 184.1-2, pp. 498–504. DOI: 10.1007/s10909-016-1503-2.
- Porter, F. S. et al. (Feb. 2018). “In-Flight Performance of the Soft x-Ray Spectrometer Detector System on Astro-H”. In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 4.01, p. 1. DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.011218.
- Sato, K., Y. Uchida, and K. Ishikawa (Mar. 2023). *Hitomi/XRISM Micro-Calorimeter*. arXiv: 2303.01642 [astro-ph].
- Sawada, M. et al. (Aug. 2022). “Pulse Parameters Optimization of the Modulated X-Ray Sources for the Resolve Microcalorimeter Spectrometer on XRISM”. In: *Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray*. Ed. by J.-W. A. Den Herder, K. Nakazawa, and S. Nikzad. Montréal, Canada: SPIE, p. 269. DOI: 10.1117/12.2630133.
- Shirron, P. J. et al. (Apr. 2018). “Design and On-Orbit Operation of the Soft x-Ray Spectrometer Adiabatic Demagnetization Refrigerator on the Hitomi Observatory”. In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 4, p. 021403. DOI: 10.1117/1.JATIS.4.2.021403.

- Smart, D. and M. Shea (Jan. 2005). “A Review of Geomagnetic Cutoff Rigidities for Earth-Orbiting Spacecraft”. In: *Advances in Space Research* 36.10, pp. 2012–2020. DOI: 10.1016/j.asr.2004.09.015.
- Takahashi, T. et al. (July 2016). “The ASTRO-H (Hitomi) x-Ray Astronomy Satellite”. In: *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*. Ed. by J.-W. A. Den Herder, T. Takahashi, and M. Bautz. Edinburgh, United Kingdom, 99050U. DOI: 10.1117/12.2232379.
- Tamura, K. et al. (Aug. 2022). “Ground Calibration of the X-Ray Mirror Assembly for the X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM) II: Imaging Performance and Stray Light”. In: *Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray*. Ed. by J.-W. A. Den Herder, K. Nakazawa, and S. Nikzad. Montréal, Canada: SPIE, p. 69. DOI: 10.1117/12.2629534.
- Tashiro, M. S. et al. (Dec. 2020). “Status of X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)”. In: *Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray*. Ed. by J.-W. A. Den Herder, K. Nakazawa, and S. Nikzad. Online Only, United States: SPIE, p. 176. DOI: 10.1117/12.2565812.
- Terada, Y. et al. (July 2021). “Detailed Design of the Science Operations for the XRISM Mission”. In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 7.3, p. 037001. DOI: 10.1117/1.JATIS.7.3.037001.
- Tsujimoto, M. et al. (Nov. 2017). “In-Orbit Operation of the Soft x-Ray Spectrometer Onboard the Hitomi Satellite”. In: *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 4.01, p. 1. DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.011205.
- Tsujimoto, M. et al. (Nov. 2018a). “In-Orbit Performance of the Digital Electronics for the X-Ray Microcalorimeter Onboard the Hitomi Satellite”. In: *Journal of Low Temperature Physics* 193.3-4, pp. 505–511. DOI: 10.1007/s10909-018-1861-z.
- Tsujimoto, M. et al. (Mar. 2018b). “In-Flight Calibration of Hitomi Soft X-ray Spectrometer (3) Effective Area”. In: *Publications of the Astronomical Society of Japan* 70.2. DOI: 10.1093/pasj/psy008. arXiv: 1801.02104 [astro-ph].
- Tsujimoto, M. (Feb. 2023). “Development of the data monitor system of the Resolve instrument onboard the XRISM satellite”. In: 宇宙航空研究開発機構研究開発報告: 宇宙科学情報解析論文誌: 第 12 号 JAXA-RR-22-009, pp. 1–6.
- Weisskopf, M. C. et al. (July 2000). “Chandra X-ray Observatory (CXO): Overview”. In: 4012, pp. 2–16. DOI: 10.1117/12.391545.
- XRISM Science Team (Feb. 2022). “XRISM Quick Reference”. In: arXiv:2202.05399. arXiv: 2202.05399 [astro-ph].
- 井上・小山・高橋・水本 (2018). 宇宙の観測 3 — 高エネルギー天文学 —. 日本評論社.
- 今村 (2022). “XRISM 衛星搭載極低温検出器における微小擾乱干渉の影響評価と低減”. MA thesis. 愛媛大学大学院 理工学研究科 数理物質科学専攻 物理科学コース 高エネルギー天文学グループ.
- 御堂岡 (2020). “X 線天文衛星 XRISM の初期観測データ解析に向けた地上試験 — 極低温検出器に用いる真空蓋の X 線透過率較正 —”. MA thesis. 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻.
- 柏崎 (2023). “機械学習を用いた XRISM 衛星搭載極低温検出器の異常検知アルゴリズムの開発”. MA thesis. 横浜国立大学 理工学部 数物・電子情報系学科 物理工学教育プログラム.
- 栗原 (2022). “XRISM 衛星搭載極低温検出器における電磁干渉の影響評価と低減”. MA thesis. 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻.
- 楨野 (Mar. 2013). “宇宙放射線の観測”. In: 宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-12-007, pp. 1–210.
- 田崎 (2008). 統計力学 1. 培風館.

- 神頭 (2010). “ASTRO-H 衛星における時刻付けシステムの開発”. MA thesis. 埼玉大学 理工学研究科 物理機能系 専攻 物理学コース.
- 阿部 (2010). “ASTRO-H 衛星搭載 軟 X 線分光器 SXS の 波形処理システム PSP の開発”. MA thesis. 首都大学 東京大学院 理工学研究科 物理学専攻.