

XRISM 衛星搭載 CCD 検出器 Xtend の 軌道上エネルギースケール較正

M225218 阪本 菜月

2024 年 2 月 22 日

概要

X線分光撮像衛星 XRISM とは X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission の略称で、JAXA の 7 番目の X 線天文衛星計画である。2016 年、不具合・破損のため短期間で運用を断念した X 線天文衛星 ASTRO-H (ひとみ) のミッションを引き継いでいる。XRISM は、NASA や ESA の協力のもと 2018 年に計画が開始され、2023 年 9 月に打ち上げが行われた。星や銀河、その間に吹き渡る高温ガス「プラズマ」は X 線を出し輝いているが、XRISM はこのプラズマに含まれる元素の種類や運動の速さを測り、星や銀河、銀河の集団がつくる大規模構造の成り立ちの詳細を明らかにすることを目指す。日本はこれまで、40 年にわたって X 線天文衛星を打ち上げ、世界の X 線天文学に貢献してきた。運用された「はくちょう」「てんま」「ぎんが」「あすか」「すざく」「ひとみ」の 6 機の衛星はいずれもその当時最新の観測装置を搭載し、新しい宇宙の姿を世界に届けてきた。XRISM は、軟 X 線分光撮像に特化し、超高分光を誇る Resolve (X 線マイクロカロリメータ) と分光・撮像を高い水準で両立させ、かつ広い視野を持つ Xtend (X 線 CCD カメラ) を搭載している。「ひとみ」が扉をひらいた超高分解能 X 線分光撮像の世界を開拓することが期待される。本研究では、Resolve を補完し科学成果を最大化する役割を持つ Xtend のエネルギースケール較正について、打ち上げ前の準備や打ち上げ後の実データ解析の詳細を記す。

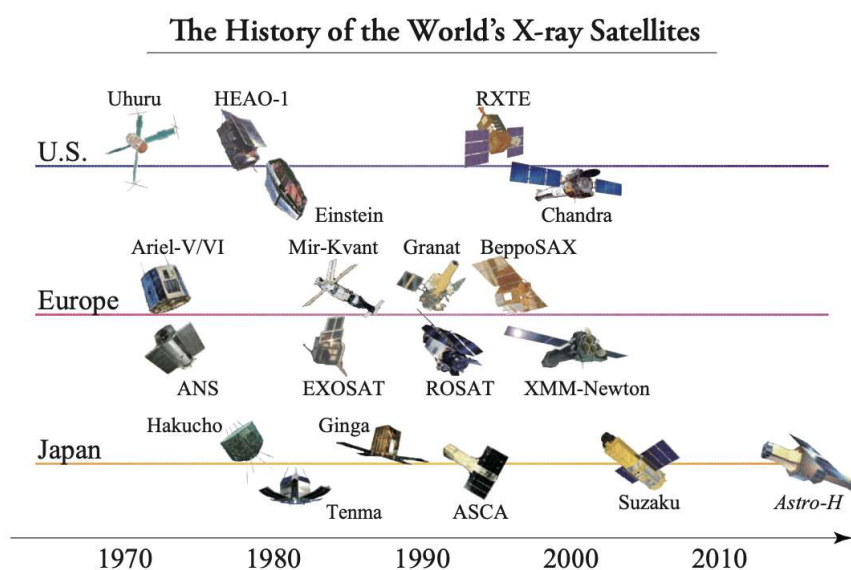


図 1: X 線観測の歴史 ([8] より転載)

目次

第 1 章	序論	1
1.1	XRISM 衛星と CCD 検出器におけるエネルギー較正の必要性	1
1.2	本研究の目的	2
第 2 章	XRISM 衛星搭載 Xtend	3
2.1	XRISM 衛星	3
2.2	軟 X 線撮像装置 Xtend (CCD 検出器)	3
2.2.1	Xtend の概要と性能	4
2.2.2	X 線検出と転送方法	6
第 3 章	Xtend のエネルギー較正	8
3.1	エネルギー較正の概要	8
3.2	各補正の詳細	8
3.2.1	VT 補正	8
3.2.2	Even/ Odd 補正	9
3.2.3	Charge Trail および CTI 補正	9
3.2.4	PI 変換	9
第 4 章	軌道上エネルギー較正に向けた準備	11
4.1	ツールの検証	11
4.1.1	検証に用いたツールおよびデータ	11
4.1.2	検証の結果	12
4.2	ひとみのデータを用いたリハーサル	14
4.2.1	較正線源の解析	18
4.2.2	較正天体 (Perseus) の解析	25
第 5 章	軌道上エネルギー較正の確認	30
5.1	較正線源の解析	30
5.1.1	ゲイン履歴	30
5.1.2	Even/ Odd 補正の確認	33
5.1.3	CTI 補正	34
5.2	較正天体の解析	35
第 6 章	まとめ	36

目次

1	X線観測の歴史 ([8] より転載)	1
1.1	Resolve の分光能力 [4]	1
1.2	X線 CCD 検出器の視野比較 [4]	2
2.1	XRISM 衛星 [3]	3
2.2	Xtend (X線 CCD カメラ) [3]	4
2.3	CCD 番号と配置 [5]	4
2.4	ノーマルモードの画像に 1/8 window の領域を重ねたイメージ [6]	6
2.5	Grade 分布 [7]	7
3.1	ゲイン補正の種類	8
4.1	TIME カラム補正前	12
4.2	TIME カラム補正後	12
4.3	00 (ccd _{id} = 0 && segment = 0) VT 補正 (patch 前)	13
4.4	10 (ccd _{id} = 1 && segment = 0) VT 補正 (patch 前)	13
4.5	00 (ccd _{id} = 0 && segment = 0) VT 補正 (patch 後)	13
4.6	10 (ccd _{id} = 1 && segment = 0) VT 補正 (patch 後)	13
4.7	ひとみ/SXS の分光能力 [10]	14
4.8	4枚の CCD イメージ (検出器座標)	15
4.9	ひとみデータのイベント数比較	15
4.10	横軸が 波高値、縦軸が reproc_cl (ピンク)、reproc_cl2 (青)、event_cl (黒)	16
4.11	ひとみデータの Grade 分布	16
4.12	ひとみデータの exposure time	17
4.13	ひとみデータの telapse	17
4.14	reproc_cl のときのライトカーブ	18
4.15	取り出した較正線源のイメージ	19
4.16	取り出した較正線源のイメージ ID = 0	19
4.17	reproc_cl データ (番号 11) での phas[0] の分布	19
4.18	reproc_cl データ (番号 11) での pi の分布	20
4.19	2016 年 3 月の較正線源の pi 分布	21
4.20	ひとみ衛星 SXI の較正線源のピーク値履歴	21
4.21	ひとみ衛星の CCD ごとのピーク値履歴 (誤差は省略)	22

4.22	ひとみ衛星の ID = 0 のときのピーク値履歴 (誤差も表示)	22
4.23	ひとみ衛星 SXI の較正線源の分解能履歴	22
4.24	ひとみ衛星の CCD ごとの分解能履歴	23
4.25	ひとみ衛星の ID = 0 のときの分解能履歴	23
4.26	ひとみ衛星の Even/ Odd 補正前	23
4.27	ひとみ衛星の Even/ Odd 補正後	23
4.28	ひとみ衛星の Even/ Odd 補正後のピーク値のまとめ	24
4.29	ID = 0 の ACTY 依存性 (CTI 補正前)	24
4.30	ID = 0 の ACTY 依存性 (CTI 補正後)	24
4.31	ひとみ衛星の CTI 補正前の波高値分布	25
4.32	ひとみ衛星の CTI 補正後の波高値分布	25
4.33	ひとみ衛星の CTI 補正の誤差	25
4.34	Perseus の ID = 1 のときのイメージ。較正線源は除いてある	26
4.35	Perseus の鉄輝線付近のスペクトル	26
4.36	Perseus 観測のときのイベント数比較	27
4.37	Perseus の Even/ Odd 補正前	27
4.38	Perseus の Even/ Odd 補正後 (pi)	27
4.39	Perseus の CTI 補正前の波高値 (Phas[0]) 分布の ACTY 依存性	28
4.40	Perseus の CTI 補正後の波高値 (Phas[0]) 分布の ACTY 依存性	28
4.41	Perseus の CTI 補正前 (Phas[0]) の波高値分布。領域内を 2 分割した	28
4.42	Perseus の CTI 補正後 (pi) の波高値分布	28
4.43	Perseus の CTI 補正後のピーク位置。電荷注入行で分割された 80 行内の左右で比較したまとめ	29
5.1	XRISM 衛星 Xtend の較正線源のイメージ	30
5.2	XRISM 衛星 Xtend の較正線源のピーク値履歴	31
5.3	XRISM/ Xtend の CCD ごとの較正線源のピーク値履歴	31
5.4	XRISM/ Xtend の ID = 0 のときのピーク値履歴	31
5.5	応答関数を用いた較正線源のフィッティング結果 (5.5 - 6.3 keV)	32
5.6	XRISM/ Xtend の分解能履歴	33
5.7	XRISM/ Xtend の CCD ごとの分解能履歴	33
5.8	XRISM/ Xtend の ID = 0 のときの分解能履歴	33
5.9	XRISM/ Xtend 較正線源の Even/ Odd 補正前 (Phas[0]) の波高分布	34
5.10	XRISM/ Xtend 較正線源の Even/ Odd 補正後 (pi) の波高分布	34
5.11	XRISM/ Xtend 較正線源の Even/ Odd 補正の誤差	34
5.12	XRISM 較正線源 CTI 補正前	34
5.13	XRISM 較正線源 CTI 補正後	34

第1章 序論

1.1 XRISM 衛星と CCD 検出器におけるエネルギー較正の必要性

波長が $\sim 10^{-11} - 10^{-8}$ m ほどの電磁波を、X 線と呼ぶ。X 線は高い物質透過力を持ち、レントゲン撮影は日常生活にも馴染みがある。エネルギーの高い電磁波である X 線は宇宙の高エネルギー現象を探るのに適しているが、地球の大気は人体の 100 倍も厚く、宇宙からの X 線は地上に到達することができない。そのため X 線観測は大気の外側で行う必要があり、これまで観測ロケットや観測気球、人工衛星などさまざまな手段で行われてきた。

XRISM 衛星は JAXA の 7 番目の X 線天文衛星であり、2023 年 9 月 7 日に打ち上げられた後、現在運用に向けて調整を行なっている。搭載する 2 台の検出器は Resolve (X 線マイクロカロリメータ) と Xtend (X 線 CCD カメラ) と呼ばれるもので、前 X 線天文衛星「ひとみ」の SXS および SXI の仕様を引き継ぐものとなっている。Resolve は軟 X 線分光器であり、X 線が吸収された際のわずかな温度上昇を測ることで高いエネルギー分解能 (≤ 7 eV @6 keV) を持つ。これにより天体の温度や組成などが非常に精密に計測できる。但し視野は 3×3 分角と限られる (図 1.1)。一方、視野の面で Resolve を補完するのが軟 X 線撮像装置、Xtend である。エネルギー分解能こそ Resolve に劣るが (≤ 250 eV @6 keV)、Resolve や他衛星の装置と比べて広い視野 (38×38 分角) を持ち、分光および撮像を行う (図 1.2)。

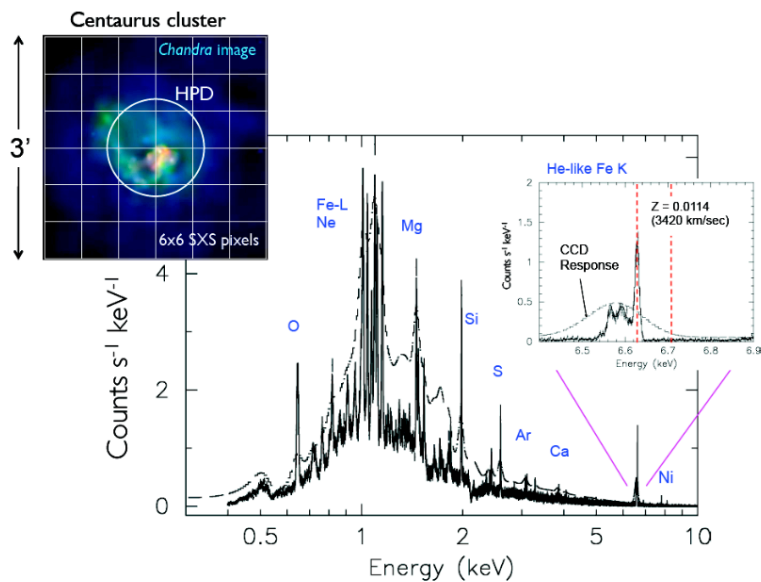


図 1.1: Resolve の分光能力 [4]

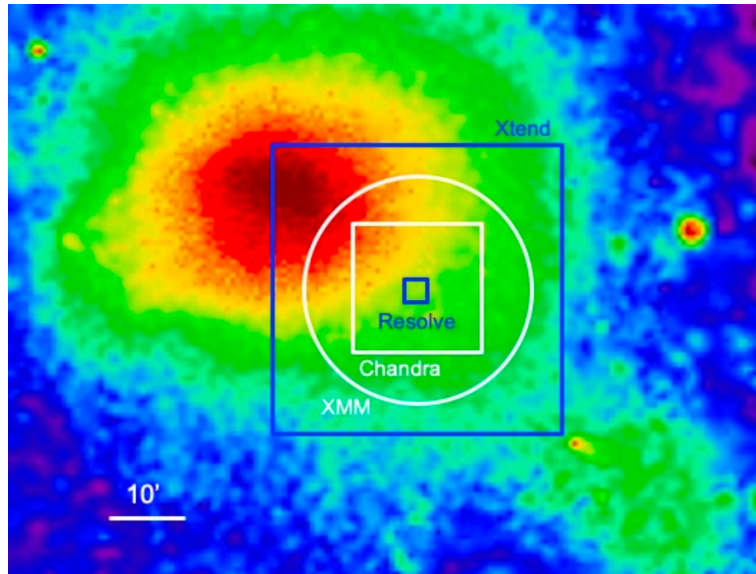


図 1.2: X 線 CCD 検出器の視野比較 [4]

Xtend は 4 枚の CCD (Charge Coupled Device) を配置し、X 線 CCD 検出器として過去最大の視野を実現する。さらに、完全空乏化した裏面照射型の CCD であるために低エネルギー側の検出効率が高いことや、P チャネル型 CCD を採用し空乏層の厚みが増したために高エネルギー側の検出効率も高いことが特徴である。Xtend は Resolve を補完し、また広い視野を活かした観測 (新天体や広がった天体の分光撮像) を行う役割を持ち、エネルギースケールを正確に補正することが重要となる。しかし、P チャネル型 CCD を扱うにあたり、電荷転送非効率 (Charge Transfer Inefficiency; CTI) に注意してエネルギースケールの補正を行う必要がある。その他に読み出し回路の個性や温度依存性を考慮したり、CCD 内での電子雲の広がりに伴う補正も必要となる。

1.2 本研究の目的

2023 年 9 月に打ち上げられた XRISM 衛星 Xtend 軌道上較正の一助として、エネルギースケール較正を行うことを目的としている。本研究では、その準備のためにひとみ衛星観測データ、XRISM 衛星地上試験データを用いて解析を行なった。また、実際の XRISM 衛星観測データも用い、エネルギースケール較正パラメタの確認を行なった。

第2章 XRISM 衛星搭載 Xtend

2.1 XRISM 衛星

XRISM (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission) 衛星は「あすか」「はくちょう」「てんま」「ぎんが」「すざく」「ひとみ」に続く JAXA の 7 番目の X 線天文衛星で、2023 年 9 月 7 日に種子島宇宙空間観測所から H-(II)A ロケットにより打ち上げられた (図 2.1)。日本名が募集されたが、打ち上げ前の名称である ”X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission” がそのミッションをよく表していることと、「クリズム (XRISM)」の響きが”分光”という意味の「プリズム (prism)」と似ていることから XRISM と呼ばれ続けるようになった。XRISM には、XMA (X-ray Mirror Assembly) と呼ばれる X 線望遠鏡と、Resolve (X 線マイクロカロリメータ) と Xtend (X 線 CCD カメラ) と呼ばれる 2 台の検出器を搭載している。これらの検出器により、0.3-13 keV 帯域を観測予定としている。

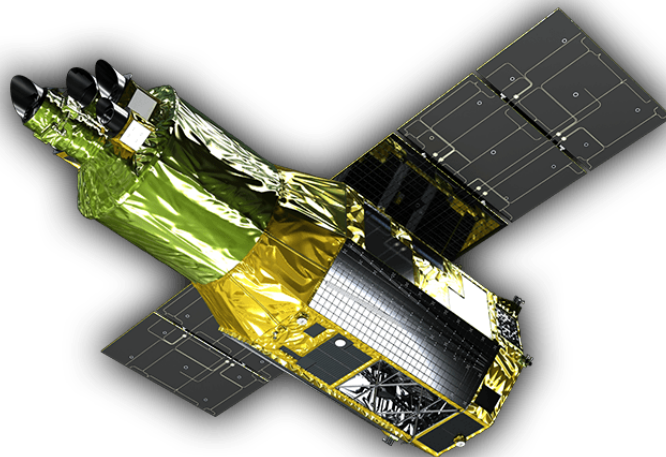


図 2.1: XRISM 衛星 [3]

2.2 軟 X 線撮像装置 Xtend (CCD 検出器)

本研究では、Xtend のエネルギースケールの較正を行う。Xtend は、XMA (X 線望遠鏡) の焦点面に置かれる CCD カメラで、4 枚の CCD が設置されている。図 2.2 は Xtend (X 線 CCD カメラ) の外観である。集光部 (Hood) やボディ、4 つの読み出し口 (compressor) が確認できる。4 枚の CCD は CCD1 - CCD4 と呼ばれ、図 2.3 に示した配置となっている。一方ソフトウェア上では 0 から 3 までの ID 番号がついている

(“CCD ID” が 0 - 3)。本論文では CCD ID 番号で記載する (一部古い図で ID = 0 を CCD0 などと書かれているものがあるがキャプションに注意書きをつけている)。

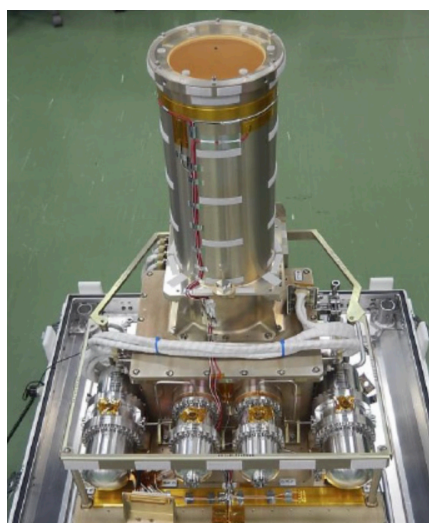


図 2.2: Xtend (X 線 CCD カメラ) [3]

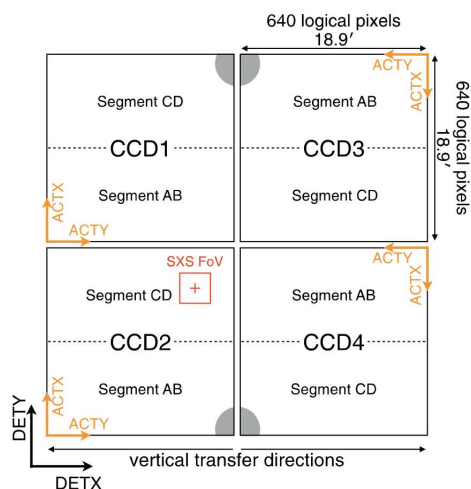


図 2.3: CCD 番号と配置 [5]

Resolve はかつてない超高エネルギー分解能を持つが、視野は 3×3 分角に限られている。超新星残骸や銀河団などの大きく広がった天体を観測するため、Xtend はなるべく広い天空面積のカバーが期待される。Resolve 視野外における天体フラックスを測定し、視野内への漏れ込みを評価することも Xtend の役割である。4 枚の CCD を 2×2 のモザイク状に並べることで、撮像領域は約 $62 \text{ mm} \times 62 \text{ mm}$ となった。これを XMA と組み合わせることにより、 38×38 分角という X 線 CCD 検出器史上最大視野の実現を可能にする。

2.2.1 Xtend の概要と性能

表 2.1 に基本性能を記載する。以下に記載する基本性能は、そのほとんどが「ひとみ」衛星の X 線 CCD 検出器である SXI の仕様を引き継いだものとなっている。

CCD チップ	浜松ホトニクス社製 (P チャンネル型裏面照射 CCD)
チップ面積	約 $31 \text{ mm} \times 31 \text{ mm}$
画素サイズ	$24 \times 24 \mu \text{ m}$
画素数	$1280 \times 1280 \text{ pixels}$
読み出し口数	4
露光時間	約 4 秒 /frame
エネルギー分解能	$250 \text{ eV} @ 6 \text{ keV (EOL)}$
エネルギー帯域	0.4 - 13 keV
視野角	$38 \times 38 \text{ arcmin}$

表 2.1: Xtend 性能 [5]

Xtend は、0.4-13 keV 帯域での撮像、および 5.9 keV で半値幅 (FWHM) で 250 eV 以下のエネルギー分解能での分光を行う。エネルギー帯域は、酸素のバンドを含む 0.4 keV を下限、活動銀河核などの連続 X 線の複数成分を判別するため 13 keV を上限とする。分光機能の面では、He-like, H-like の鉄輝線を判別するため、打ち上げ時に 200 eV (FWHM) @6 keV、軌道上運用で 3 年後 250 eV (FWHM) @6 keV よりも優れた分解能を目指す。

ここで、運用時の動作モードに関し、定義を簡潔にまとめる。

動作モード

- STDBY モード
観測テレメトリ生成を停止している観測停止状態。
- EVENT モード
イベント転送のために用いる通常の観測状態。
- FRAME モード
dframe 以外のフレーム転送のために用いる状態で、主に診断目的で使用する。
- DFRAME モード
ダークフレーム転送のために用いる状態であり、主に診断目的で使用する。

EVENT モードや FRAME モードにおいて、CCD 駆動や読み出し信号処理のタイミングは制御することができる。観測対象の天体の明るさなどを考慮し、以下の 4 つの撮像モードを選択する。いずれのモードも、撮像サイクルは 4 秒である。軌道上較正のパラメタは、回路由来のものは共通だが、電荷転送に関するものは Full window モードと 1/8 Window モードで異なる。

撮像モード

- Full Window No Burs
CCD 全面を読み出すモード。1 撮像サイクル 4 秒のうち、3.9631360 秒は露光時間、残りの時間は撮像領域から蓄積領域への電荷転送に使われる。通常このモードを使用するため、Normal モードとも呼ばれている。
- Full Window 0.1-s Burst
CCD 全面を読み出すが、1 撮像サイクルあたりの露光時間が 0.0605952 秒と短いモード。この間に生成した電荷を読み出す。明るい天体観測の際にパイルアップを抑え、またイベント数が多いことによるテレメトリ飽和、処理時間の超過を防ぐことができる。一方、撮像サイクルのほとんどの時間が dead time となってしまう。
- 1/8 Window No Burst
CCD の縦 1/8 の細長い領域のみを読み出すモード (図 2.4)。1 撮像サイクルの間に 1/8 領域を 8 回読み出すため、露光時間は Full Window No Burst の約 1/8 の 0.4631184 秒となる。点源の天体で有効であり、パイルアップを抑制する効果がある。

- 1/8 Window 0.1-s Burst

1/8 Window で、さらに 1 撮像あたりの露光時間を 0.0605952 秒としたモード。観測効率は約 1/8 になるが、4 つの撮像モードの中で最も明るい天体を観測することが可能。

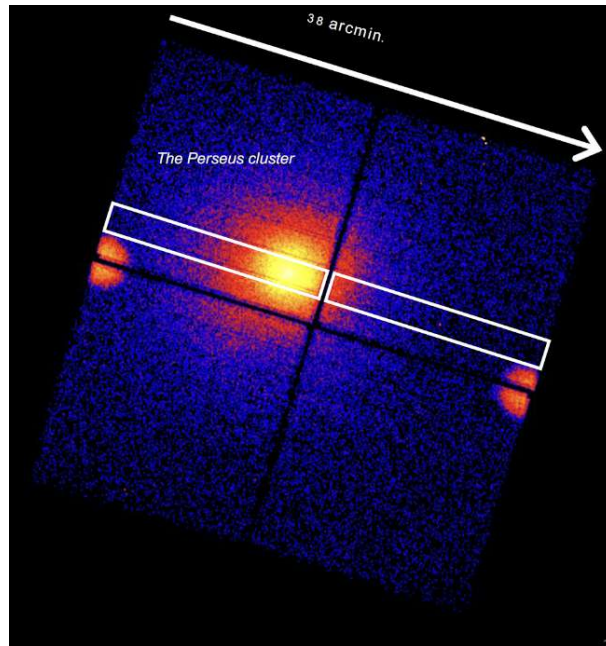


図 2.4: ノーマルモードの画像に 1/8 window の領域を重ねたイメージ [6]

2.2.2 X 線検出と転送方法

宇宙からやってきた X 線は XMA により集光された後、Xtend の CCD (検出器) で光電吸収が起きる。光電子は CCD 中で電離を起こし、入射エネルギーに比例した数の電子が発生する。CCD の各ピクセルに読み出し回路がついていれば位置とエネルギーが分かるが、ピクセル数が 10^6 程度と膨大なため現実的でない。そこで各ピクセルの電荷を隣のピクセルに、まず縦方向に送り、次に横方向に送って読み出しを行う。このとき読み出すタイミングから、ピクセル位置を割り出している。このように、一度貯めた電荷を動かし情報を転送することを電荷転送という。少ない回路で読み出しができる利点があるが、転送の際に取りこぼしが発生することがある。したがって正しいエネルギーを測るためには、補正が重要となってくる (第 3 章参照)。

電極付近に到達した電子雲は、2 次元 Gauss 分布に広がる。1 ピクセルのみの広がり収まる場合をシングルイベントと呼び、電荷を測ることにより入射 X 線のエネルギーを正確に得ることができる。隣接する 2 ピクセル以上に広がった場合は、その分の電荷を足し合わせる。イベントの抽出には grade 判定法が用いられており、図 2.5 のように中心 (最も波高値の高いピクセル) のまわり 5×5 ピクセルの波高値分布に応じて 12 通りに分類される。またエネルギーは 3×3 ピクセルのうち、スレッシュホールドを超えたピクセルの波高値を全て足し合わせて求める。X 線イベントとみなす grade は 0、2、3、4、6 であり、good grade と呼ばれる。 3×3 ピクセルの波高値は全て記録し、地上で補正をかける際に用いる。

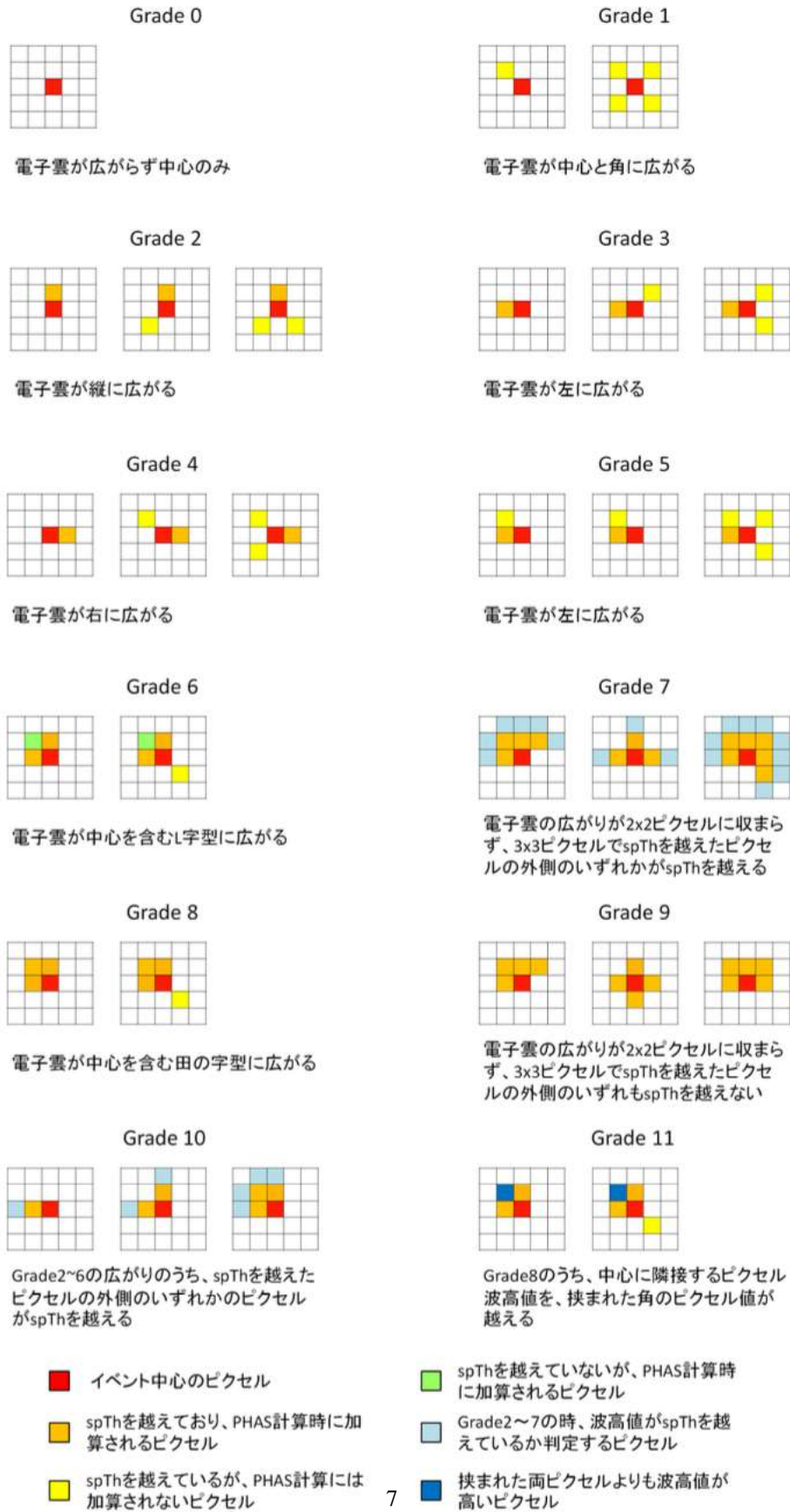


図 2.5: Grade 分布 [7]

第3章 Xtend のエネルギー較正

3.1 エネルギー較正の概要

エネルギー較正とは、ゲインのばらつきを補正し、そのうえで単色 X 線に対するパルスハイトの広がり方 (エネルギー応答関数) を求めることをいう。Xtend の軌道上ゲイン補正は、運用時に十分な分光性能を発揮するために有用であり、xtdpi という専用のツールを用いて図 3.1 に示す複数のステップで行う。補正の順番にビデオボード温度 (VT) 補正、Even/Odd 補正、Trail 補正、CTI (gfactor、goffset) 補正、Gain 補正 (Pulse invariant 変換) の全 6 種類である。2.2 で述べたように、電荷転送の際、取りこぼしが生じるため正しいエネルギーを測るための補正を適切に進める必要がある。



図 3.1: ゲイン補正の種類

3.2 各補正の詳細

3.2.1 VT 補正

VT 補正とは、信号処理ボードの温度依存性を補正することである。回路 (ビデオボード) のゲインは温度に依存するため、補正の必要があり、以下の式で表される。

$$C = 1 + \left(\frac{\text{Norm}}{\text{PH}_{\text{ref}}} \right) \times [(\text{VT} - \text{offset})^{\text{index}} - (\text{VT}_{\text{ref}} - \text{offset})^{\text{index}}]$$

このとき、VT は基板温度、 VT_{ref} は基準温度である。Norm、offset、index は較正パラメータである。この補正係数を用いて、PHAS (エネルギー測定に用いる 3 × 3 ピクセルの波高値で 9 つの要素を持つ配列) は以下のように計算される。

$$\text{PHAS}_{\text{corr}} = \frac{\text{PHAS}}{C}$$

3.2.2 Even/ Odd 補正

Even/ Odd 補正とは、CCD に使われるピクセルの偶数行 (even) と奇数行 (Odd) のゲインを揃える補正である。Xtend の信号は、2 つの ADC (Analog to Digital Converter) で独立に処理されたものを読み出す。2 つの ADC を用いることで読み出し速度は倍になるが、ゲインが異なってしまうため、正しく補正する必要がある。波高値の 2 次式で補正している (打ち上げ前の較正パラメータは、0 次、2 次の係数は 0)。

3.2.3 Charge Trail および CTI 補正

CTI (電荷転送非効率: Charge Transfer Inefficiency) とは、電荷量全体に対し 1 回の転送で失われる電荷量の割合のことで、一般に P チャネル型 CCD 検出器では高くなる傾向にある。これは打ち上げ前段階での放射線損傷や、打ち上げ後運用時に宇宙線にさらされることにより生じた、格子欠損に電荷がトラップされることに由来する。とりこぼした電荷が 3×3 ピクセルに収まれば隣接するピクセルの波高値を用いてイベントごとに補正することが可能である。より外側のピクセルにこぼすと情報が失われてしまう。この電荷損失量はイベントごとに知ることができないため、出力された電荷量をもとに、失った電荷の割合を平均的に見積もる。

CTI は、以下の式で定義される。

$$\text{CTI} = \frac{\text{一回の転送で失われる電荷量}}{\text{全電荷量}}$$

したがって CTI が全てのイベントおよびピクセルで一定なら、CTI が無い理想的な場合の波高値を PH_0 とし $\text{PH}_0 = \frac{\text{PH}}{(1 - \text{CTI})^n}$ として補正できる (n は転送回数)。実際には CTI の影響を抑えるため 80 行ごとに電荷注入を行っている。そのため注入行からの距離を ΔY として $\text{PH} = \text{PH}_0(1 - \text{CTI})^{\Delta Y}$ という式で波高値が変化する。そのため CCD 全面に較正線源を照射すると、Y 座標の値 (ACTY) に応じ波高値がノコギリ状に変化する。

CTI に関する補正には 3 種類あり、それぞれ適切な方法で電荷転送の際の取りこぼしを補正する。 3×3 ピクセルの内側の範囲に取りこぼしたものは、記録が残っているためイベントごとの補正が可能である。これは Charge Trail 補正と呼ぶ。詳しくは [7] を参照されたい。 3×3 ピクセルの外に取りこぼしたものは、平均的に補正し、各 grade で「ACTY 依存形状 = ノコギリ構造」をフラットな状態にする。これは gfactor 補正と呼ぶ。この補正後でも grade ごとに波高が異なり、その原因は完全には分かっていない。そこで経験式を用いて grade 間の違いを補正する。これを goffset 補正と呼ぶ。

尚上記は最も基本的な CTI 補正について述べている。実際には撮像領域、蓄積領域で CTI の効き方が異なり、また同じ領域でも転送速度が異なるため、各々の影響に応じた係数を掛け合わせて補正を行う。詳しくは Kanemaru et al 2020 ([9]) を参照のこと。

3.2.4 PI 変換

VT 補正、Even/ Odd 補正、trail 補正、CTI 補正により調整した入力信号の波高値は、最終的に入射 X 線のエネルギーに変換する必要がある。このとき、波高値とエネルギーの対応が各 CCD で揃っていると便利

である。この共通の波高値を Pulse Invariant 変換と呼ぶ。Xtend では、較正線源 ^{55}Fe の輝線エネルギーである 5.90 keV を 982 channel に揃うように変換を行っている。

第4章 軌道上エネルギー較正に向けた準備

4.1 ツールの検証

3章で述べたように、Xtend のゲイン補正には xtdpi というツールが使われ、その正確さは Xtend の分光性能に直結する。私はこの xtdpi の検証 (の一部) を担当した。ここではその検証について述べる。まず 3.2.1 で述べたように VT 補正の補正式は、以下の式である。

$$C = 1 + \left(\frac{\text{Norm}}{\text{PH}_{\text{ref}}} \right) \times [(\text{VT} - \text{offset})^{\text{index}} - (\text{VT}_{\text{ref}} - \text{offset})^{\text{index}}]$$

しかし古いバージョンでは (1) 係数が 0 から 1 に制限され、意図した通りに補正されない (2) 温度の内挿に問題があり、係数の値が大きく異なることがある、という 2 つの問題が知られていた (広島大学水野の報告による)。

4.1.1 検証に用いたツールおよびデータ

2022 年 11 月に、XRISM ソフトウェアの Build5 のパッチがリリースされた。ビデオボード温度 (VT) 補正に関する問題を修正するための、いくつかのアップデートが行われている。このバージョンの検証を責任担当した。検証に用いたツールは、以下のファイルである。

File name (ソースコード一式): XRISM_15Aug2022_Build5_src.tgz

File name (instruction): README_XRISM_Build5.txt

また、Patch は以下のファイルを解凍してインストールした。

File name (パッチファイル一式): patch_28Nov2022_XRISM_15Aug2022_Build5.tgz

このとき、修正箇所は hitomixrism/xrism/xtend/tasks/xtdpi/ 以下 3 つのファイル

xtdpi/xtdpi.par

xtdpi/xtdpilib.cxx

xtdpi/xtdpilib.h

および、hitomixrism/xrism/xtend/tasks/xtdfixpix/ 以下 1 つのファイル

xtdfixpix/xtdfixpixlib.cxx

の 4 箇所であり、適宜コピーして使用した。また補正のために使用したデータは以下である。

Caldbs (キャリブレーションパラメタを格納したファイル群)

- 202101_FM_Subkami_MHI_CALDB_Miyazaki/ah_sxi_gain_20200828v1.fits
- 202101_FM_Subkami_MHI_CALDB_Miyazaki/ah_sxi_vtevnodd_20210114v001.fits
- 202101_FM_Subkami_MHI_CALDB_Miyazaki/xtd_sxi_chtrail_20200830v001.fits
- 202101_FM_Subkami_MHI_CALDB_Miyazaki/xtd_sxi_cti_20200830v001.fits

EVENT file (イベントデータで、地上試験で CCD 全面に ^{55}Fe 線源を照射)

- sxi_FFFevt_addhdr_corrected.fits.gz

HK file (温度情報等のデータ)

- 202012_FM_Subkami_MHI_all_xtd_a0_corrected.hk.gz

ここで、イベントが時刻順に並んでいないと温度の内挿が不正確になるため、イベントファイルの TIME カラムをもとに並べ替えたイベントファイルも準備した。下図 (図 4.1、4.2) は横軸が RunNumber、縦軸が TIME の図であり、左は変更前、右は温度順に変更後を表している。

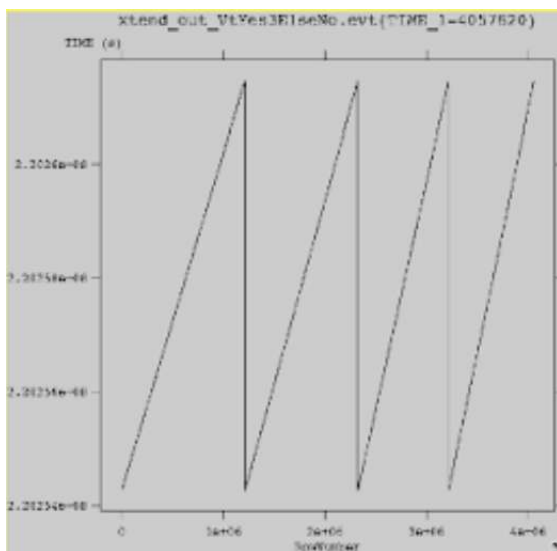


図 4.1: TIME カラム補正前

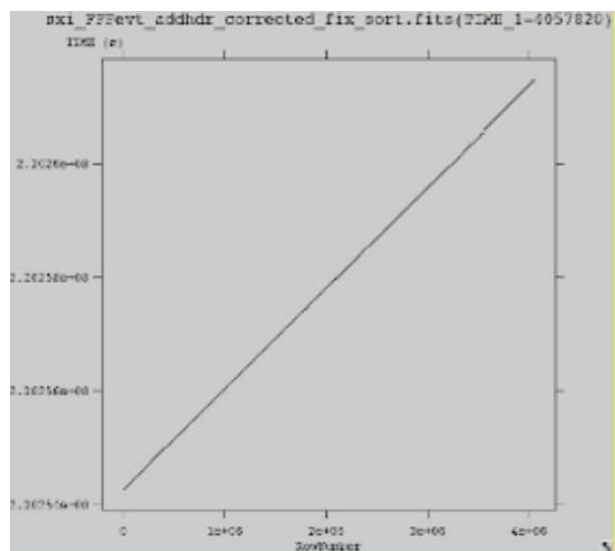


図 4.2: TIME カラム補正後

4.1.2 検証の結果

Patch をかける前の CCD ID 番号 0 番、セグメント番号 0 番 (ccdid = 0 && segment = 0; このコンフィグレーションを以下 "00" と呼称)、およびコンフィグレーション 10 (ccdid = 1 && segment = 0) の図を以下 (図 4.3、4.4) に載せている。横軸は各イベントの 3×3 ピクセルの中央の波高値 (Phas[0]) を、縦軸は xtdpi による補正後の値と、補正式に従い計算した値を表している。このとき縦軸は 0 - 1 の範囲に収まるはずであるが、ccdid = 0 のとき、ccdid = 1 のときともに、1 よりも大きく広がってしまっていた。

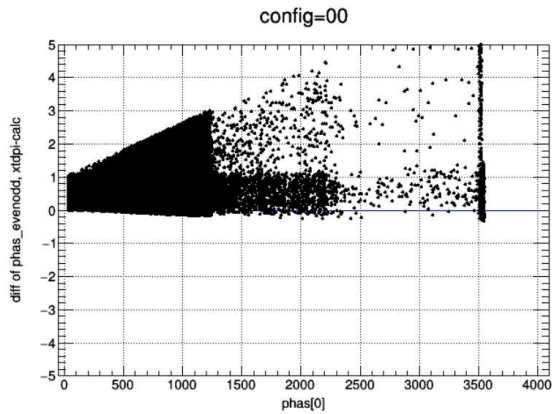


図 4.3: 00 (ccdid = 0 && segment = 0) VT 補正 (patch 前)

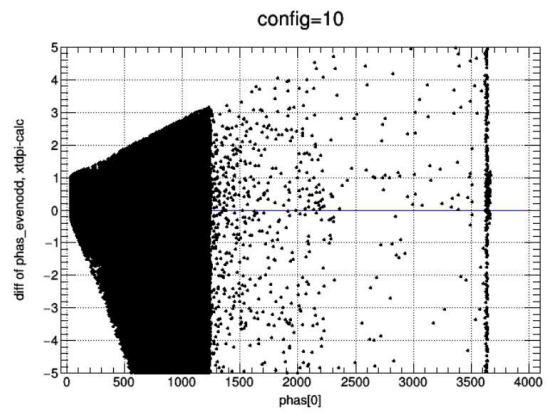


図 4.4: 10 (ccdid = 1 && segment = 0) VT 補正 (patch 前)

CCD ID = 0 で差が 1 より大きくなるのは、補正係数が 1 以下に制限されているため。CCD ID = 1 で差がさらに大きく正負方向にずれるのは、CCD 番号の切り替わりに伴い温度の内挿が不正確になるためである。後者は入力ファイル中のイベントが時刻順に並んでいないのが原因であり、ツールでなく入力の問題と分かったため並べ替えを行なった。前者は patch で対応された部分である。そこで、並べ替えをした入力に対しパッチ後のツールで再度補正をかけたところ、以下のような図 (図 4.5、4.6) となった。左図が 00 (ccdid = 0 && segment = 0)、右図が 10 (ccdid = 1 && segment = 0) となっている。

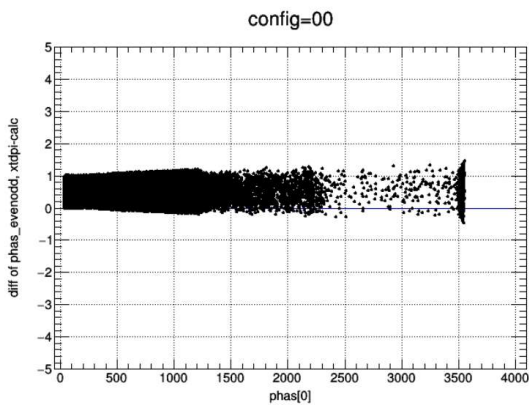


図 4.5: 00 (ccdid = 0 && segment = 0) VT 補正 (patch 後)

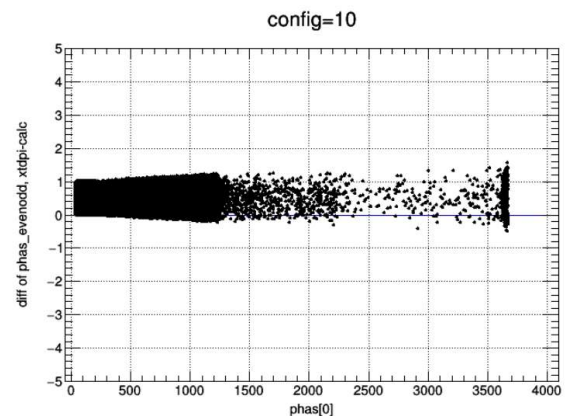


図 4.6: 10 (ccdid = 1 && segment = 0) VT 補正 (patch 後)

縦軸が 0 - 1 の範囲に収まることが期待され、概ね範囲内となっていた。尚、ツールでは波高値を整数化している一方、補正式に基づく計算値では小数のままであるため、1 までの範囲で差が生まれることは問題ない。

以上の操作から、Build5 に対するパッチ (2022 年 11 月版) により、VT 補正が期待通りにかかることを確認できた。この修正は次バージョン (Build 6 以降) に取り込まれている。今後、Even/ Odd などその他の補正に予期せぬ影響を与えていないかの確認も行いたい。

4.2 ひとみのデータを用いたリハーサル

衛星打ち上げ後は、取り付けた較正用線源や素性のよく分かっている較正観測用天体のデータを用いて軌道上較正を行う。XRISM/ Xtend のスムーズな軌道上較正のため、よく似た装置で構成された「ひとみ」衛星のデータでリハーサルを行った。解析での使用データは、ひとみ衛星運用時に Perseus 銀河団を観測した際のデータである。図 4.7 はひとみ衛星 SXS の分光能力を示したものであり、鉄線源が目立って観測されることがわかる。CCD 検出器 (SXI) も同様である。以下では、Perseus を観測した際の天体および較正線源からの鉄線源に注目して解析を進める。

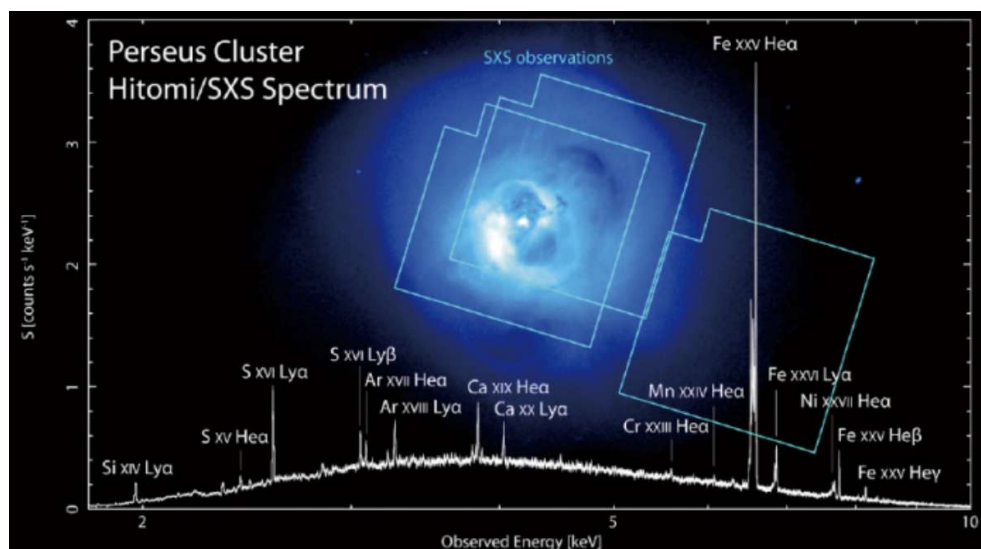


図 4.7: ひとみ/ SXS の分光能力 [10]

図 4.8 は、「ひとみ」SXI を較正する 4 枚の CCD イメージである。中央に大きく確認できる天体が Perseus、各 CCD の角に見られるのが取り付けられている鉄線源である。

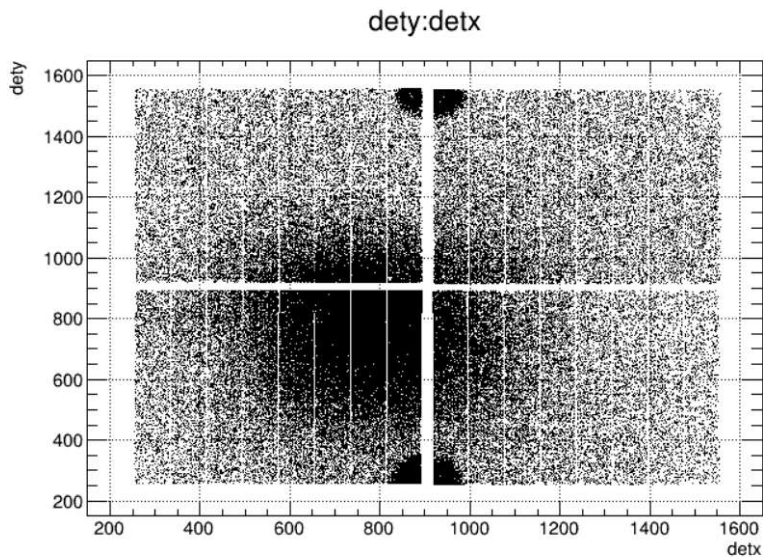


図 4.8: 4 枚の CCD イメージ (検出器座標)

X 線衛星のデータは、様々な補正をかけ、また非 X 線イベントを除く処理を行なった cleaned event が一般の解析に用いられる。ただし「ひとみ」は初期運用中だったため標準的なプロセスで処理をするとイベント数が大きく減少してしまう。図は cleaned イベントのもので、天体・較正線源が綺麗に写っているが、イベント数は不十分である。よって、イベント数を増やすためにフィルターを適宜解除する必要がある。SXI の軌道上較正・運用を述べた論文 (中嶋ほか 2008 [6]) のデータで複数の再プロセスを試しており、まずそれらも含めたデータファイルを解析した。

number of events(イベント数)

	11	21	31	41	51	total
event_uf	5000455	5001447	5001636	5000224	1905858	2.19E07
reproc_uf	5000455	5001447	5001636	5000224	1905858	2.19E07
event_cl	33021	68125	94716	86683	-	282545
reproc_cl	241701	287415	284111	266322	32045	1111594
reproc_cl2	74134	108967	141389	142519	2176	469185

図 4.9: ひとみデータのイベント数比較

上の表 (図 4.9) は、いくつかの種類イベントファイルで、イベント数を比べたものである。また Perseus のデータは複数のファイルに分割され、11、...、51 は異なるファイル (異なる時間のデータ) を示す。表の中で event_uf (unfiltered)、event_cl (cleaned) は標準的なプロセスのもの、reproc_uf (unfiltered)、reproc_cl (cleaned)、reproc_cl2 (cleaned) はイベント数を増やすため [6] で独自のプロセスをかけたものである。

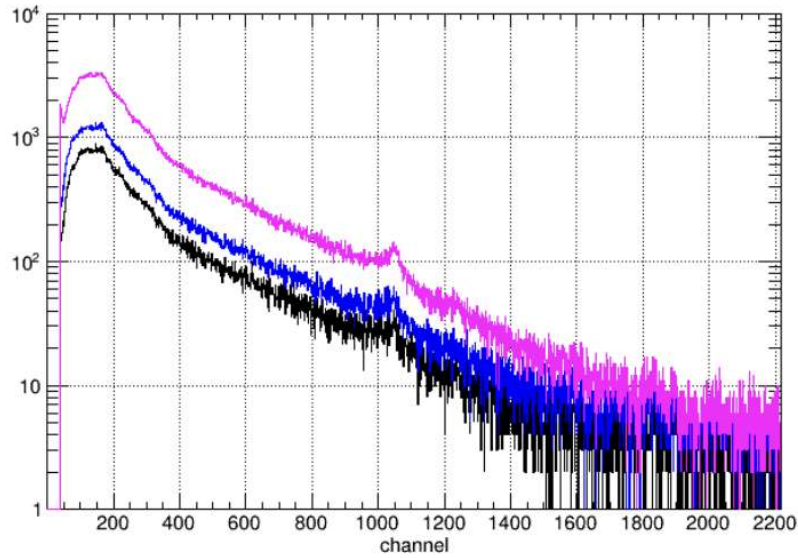


図 4.10: 横軸が 波高値、縦軸が reprocl (ピンク)、reprocl2 (青)、event_cl (黒)

上図 (図 4.10) は横軸が 波高値、縦軸が reprocl (ピンク)、reprocl2 (青)、event_cl (黒) の各々で、全イベントを用いた際の各波高値のカウント数である。event_cl (黒) と比べると、reprocl2 (青) のイベントはおよそ 1.7 倍、reprocl (ピンク) のイベントはおよそ 3.9 倍多くなっている。このとき、Grade 分布は以下になっていた (図 4.11)。

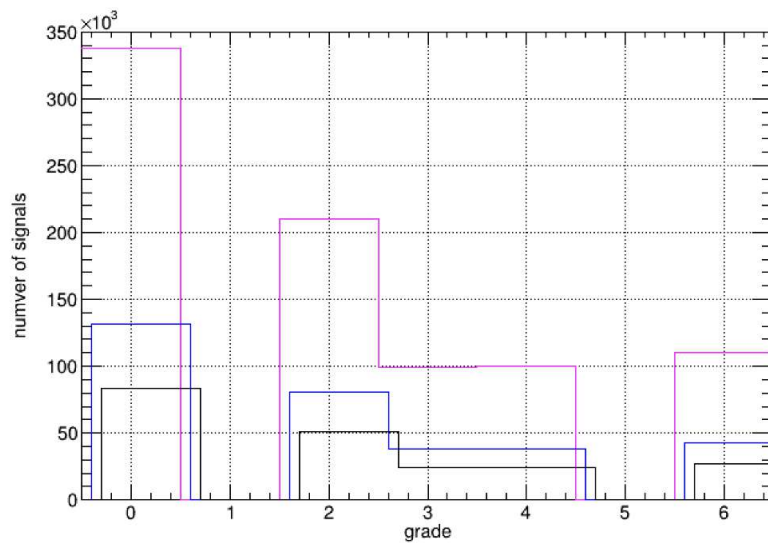


図 4.11: ひとみデータの Grade 分布

グラフから、どのデータの場合にも Grade 0 のシングルピクセルイベントが圧倒的に多く、続いて Grade 2 (電子雲が縦に広がった場合)、Grade 6 (電子雲が中心を含む L 字型に広がった場合) となっていた。また、Grade 3 (電子雲が左に広がった場合)、4 (電子雲が右に広がった場合) は変化が見えにくくなっているが、拡

大してみるとわずかに差が生じていることが確認できた。Grade 分布に不自然なところはなく、再プロセスしたイベントが使用可能と判断できる。

リハーサルの目的の1つは「どれだけの時間観測を行えば、どれだけの精度で議論できるか」をあらかじめ見積もることである。そこで、各イベントファイル中のヘッダの中の exposure time カラム (有効な観測時間を示す)を確認した。

exposure time (unit : s)

	11	21	31	41	51	total
reproc_uf	7043	6302	5836	5354	43732.0	68267
event_cl	466.7	815.4	1103.7	1109.7	-	3495.5
reproc_cl	7043	6302	5836	5354	43732.0	68267
reproc_cl2	3432.0	3431.0	3430.0	3429.0	2659.1	12952.0

図 4.12: ひとみデータの exposure time

この表(図 4.12)を見ると図 4.9 のイベント数と全く比例せず、cleaned イベント(再プロセス)が unfiltered event より長いなど不自然である。そこで telapse カラムについても確認したところ、再プロセスしたデータに関して、exposure time と値が同じになっていた(図 4.13)。

telapse(経過時間)

	11	21	31	41	51	total
event_uf	7043	6302	5836	5354	43732.0	68267
reproc_uf	7043	6302	5836	5354	43732	68267
event_cl	3431.9	3431	3430	3429	-	13721.9
reproc_cl	7043	6302	5836	5354	43732.0	68267
reproc_cl2	3432.0	3431.0	3430.0	3429.0	42967.5	56689.5

図 4.13: ひとみデータの telapse

telapse は途中で観測の中断の有無とは無関係に、観測開始から終了までの時間を示す。このことから、exposure time とイベント数が比例しなかった原因は、exposure time が telapse と同じになっており、途中の観測できていない時間が考慮されていなかったためであると考えられる。確認のため、reproc_cl(再プロセスの cleaned event)を用い、各イベントの TIME カラムを用いてライトカーブを作成した。

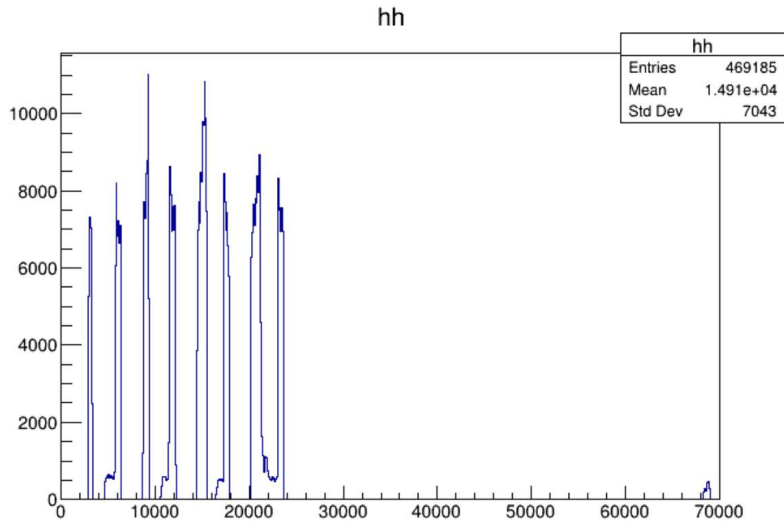


図 4.14: reproc_cl のときのライトカーブ

ライトカーブ (図 4.14) の最初と最後の点を見てみると、およそ 68000 秒。一方、fits ファイルの `telapse` (11 - 51) を調べてみると、68267 秒であった。ライトカーブから、`telapse`の方がデータファイルの中身と整合しており、`exposure time`の方が間違っていることが確認できた。これ以降の解析は、`cleaned` イベントの中でイベント数の一番多い `reproc_cl` (ピンク) のデータを用いて行うこととする。また有効観測時間はヘッダ中の `exposure` ではなく、上図ライトカーブからおおよその値を見積もることとする。

4.2.1 較正線源の解析

打ち上げ前の較正パラメタ (波高値-エネルギー変換や各種補正のパラメタ) は、地上試験のデータを用いて決める。地上試験データは CCD 全面に線源を照射しており、精度よくゲインや分解能、その他較正パラメタ算出することができ、初期値を決定する。一方、軌道上較正は CCD の角に取り付けた較正線源と較正用天体のデータを用いる。較正線源は精度よくパラメタの確認をするため、較正天体は CCD 全面でパラメタの確認を行うために必要である。そのリハーサルとしてまず、ひとみ衛星のデータ (`reproc_cl`) より較正線源 (鉄線源) の箇所を抜き出して解析を行った。図 4.15、4.16 はそのイメージである。

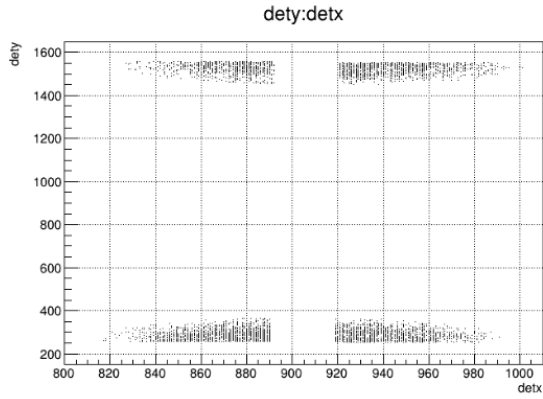


図 4.15: 取り出した較正線源のイメージ

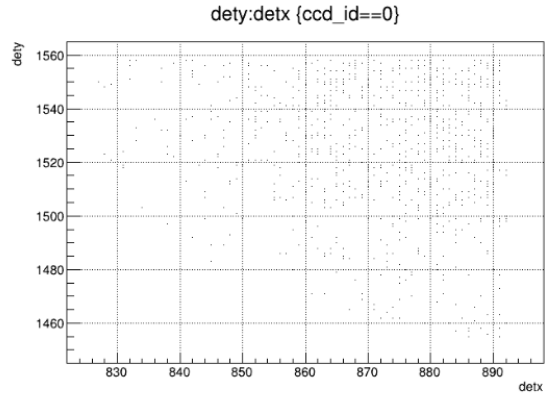
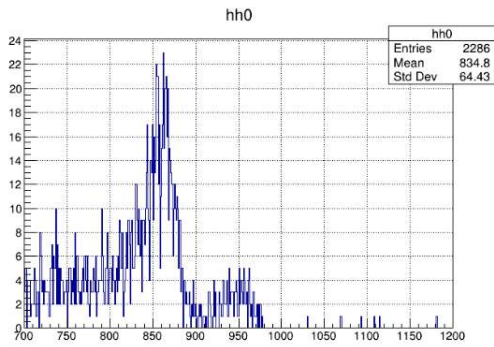
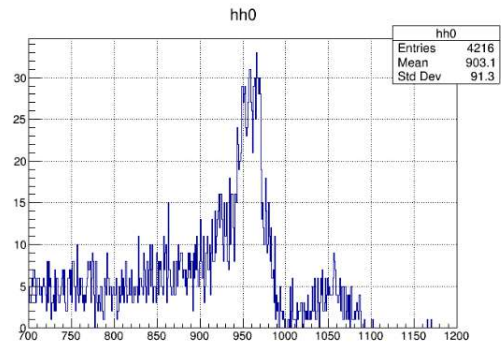


図 4.16: 取り出した較正線源のイメージ ID = 0

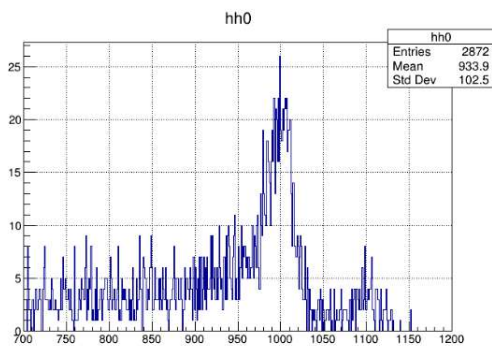
左図は CCD ごとに抜き出した較正線源、右図は cccdid が 0 の場合のみ抜き出した図である。このとき、ピーク位置を確認するため、 3×3 の中央のピクセルの波高値 (Phas[0]) を CCD ごとに横軸 channel、縦軸 イベント数のグラフを作成した (図 4.17)。



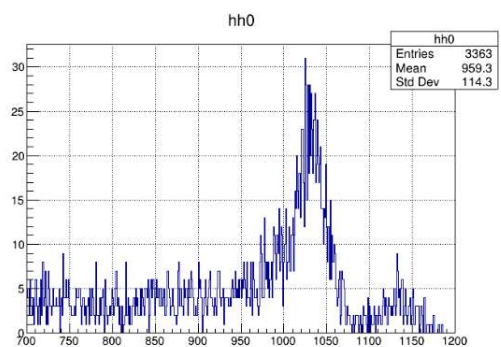
(a) ID = 0 のとき、横軸 phas[0] のグラフ



(b) ID = 1 のとき、横軸 phas[0] のグラフ



(c) ID = 2 のとき、横軸 phas[0] のグラフ



(d) ID = 3 のとき、横軸 phas[0] のグラフ

図 4.17: reproc_cl データ (番号 11) での phas[0] の分布

4 枚の図は、順に CCD の ID が 0、1、2、3 のときとなっている。このときピーク位置は ~ 870 ch、 ~ 960

ch、~1000 ch、~1030 ch と異っており、これはデータ 11 に限らず 21 - 51 のときも同様の振る舞いをしていた。つまり補正前の波高値である phas[0] の時点で、ゲインは揃っていないことが確認できる。この後、補正後の最終的な波高値である pi の分布での出力に変えるとゲインが約 980 ch に揃っていることが確認できた (図 4.18)。

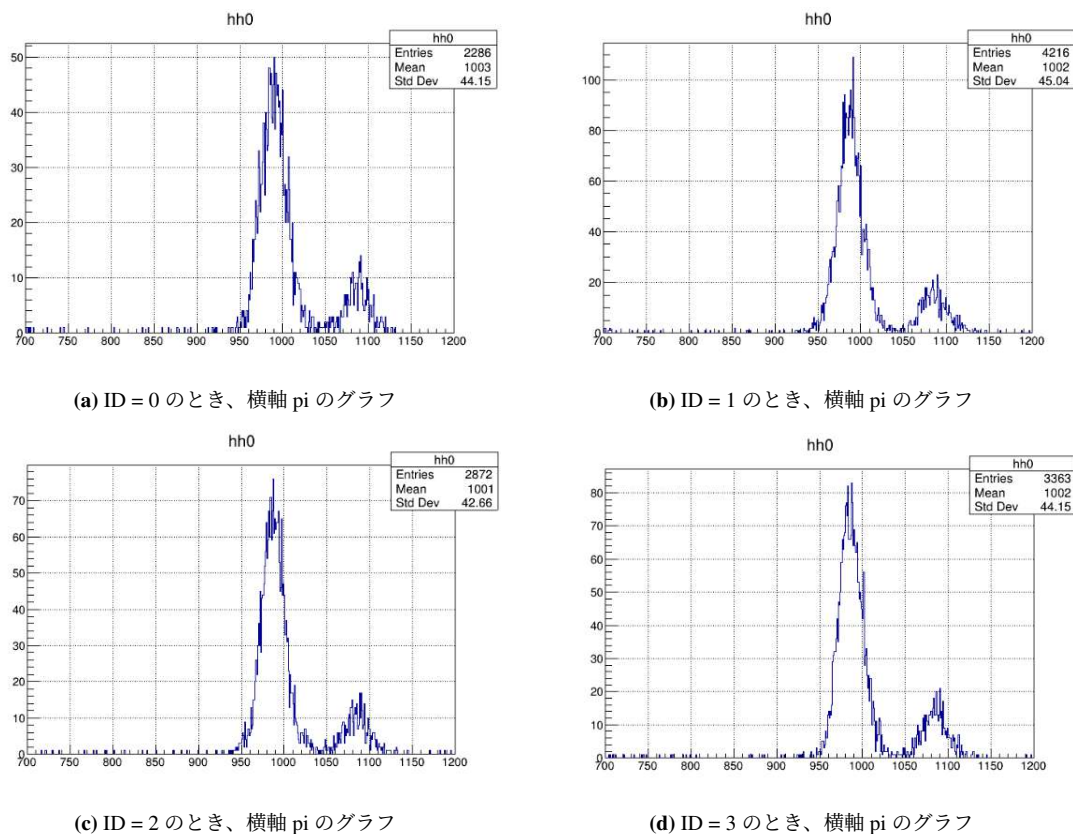


図 4.18: reprocl データ (番号 11) での pi の分布

ゲインおよび分解能の履歴

軌道上でのゲインの安定性を見るためには、較正線源のゲインの履歴を追うことになる。リハーサルとして「ひとみ」のデータで同様の作業を行なった。具体的には、NASA のページより取得した較正線源のデータを用いて行う。観測日は以下の通りである。観測日ごとの観測時間は異なり、イベント数も同じではない。

- ah100042010sxi_a0100003f0_fe.evt.gz (2016.03.10)
- ah100042040sxi_a1100003f0_fe.evt.gz (2016.03.13)
- ah100043010sxi_a110000430_fe.evt.gz (2016.03.16)
- ah100050010sxi_a0100004b0_fe.evt.gz (2016.03.19)
- ah100050040sxi_a0100004b0_fe.evt.gz (2016.03.22)

• ah100044010sxi_a0120004e0_fe.evt.gz (2016.03.25)

最初のデータである ah100042010sxi_a0100003f0_fe.evt.gz のとき、CCD ごとに pi の分布を比較してみた (図 4.19)。

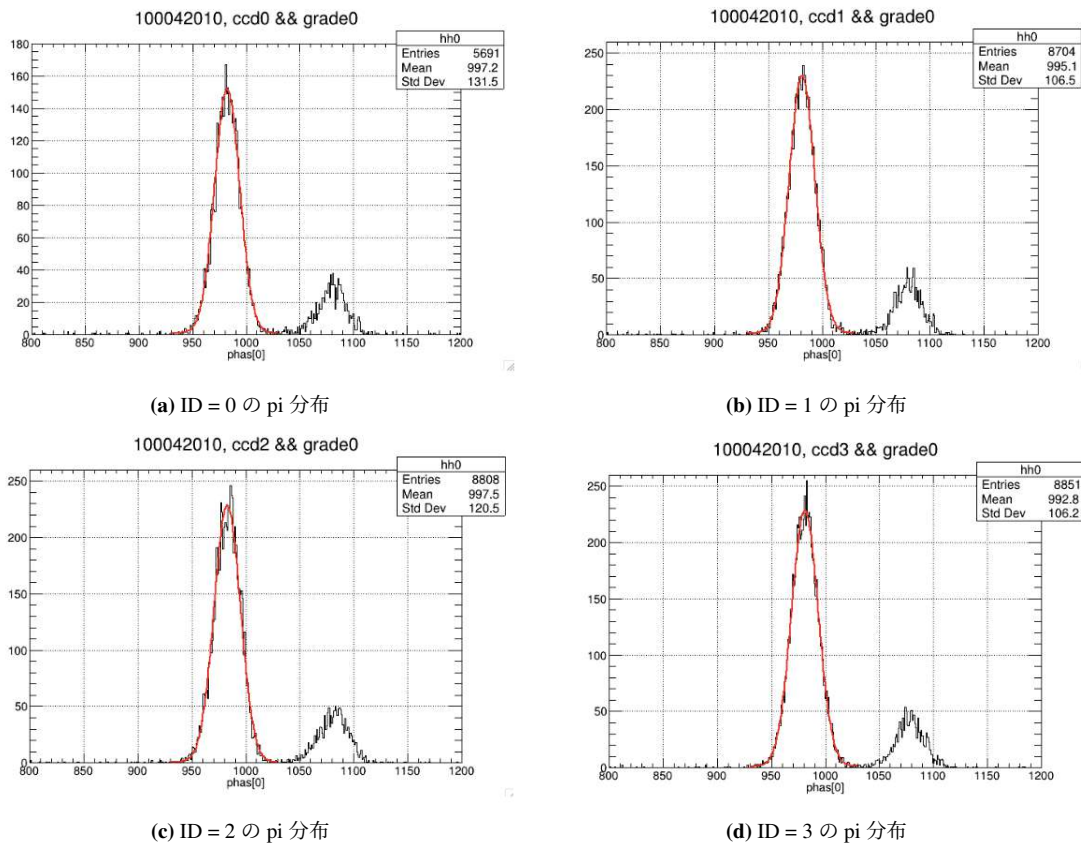


図 4.19: 2016 年 3 月の較正線源の pi 分布

ID = 0 で、若干イベント数が少なくなっている。ガウシアンでフィットして、ピーク値を比較した。

	ccd0	ccd1	ccd2	ccd3
42010(3/10)	982.10±0.18	981.18±0.15	982.74±0.15	980.96±0.15
42040(3/13)	982.53±0.36	980.73±0.48	983.45±0.25	982.71±0.33
43010(3/16)	981.93±0.61	981.47±0.45	982.79±0.43	980.14±0.48
50010(3/19)	980.72±0.20	980.28±0.16	981.76±0.18	979.54±0.16
50040(3/22)	980.04±0.22	979.88±0.19	981.77±0.19	980.10±0.21
44010(3/25)	- (entry0)	- (entry0)	982.47±0.30	979.50±0.28

図 4.20: ひとみ衛星 SXI の較正線源のピーク値履歴

2 週間の観測で、ピーク値およそ ~980 ch となっていた。

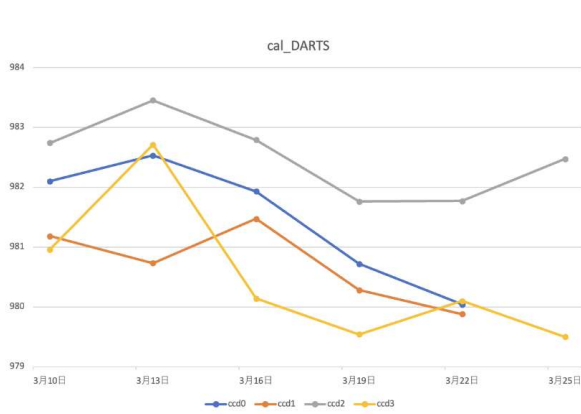


図 4.21: ひとみ衛星の CCD ごとのピーク値履歴 (誤差は省略)

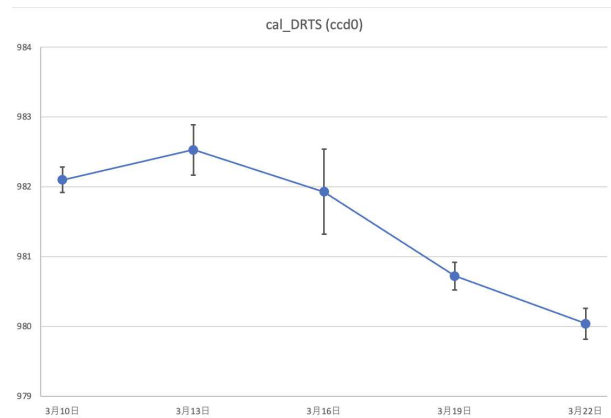


図 4.22: ひとみ衛星の ID=0 のときのピーク値履歴 (誤差も表示)

得られた結果をグラフにしたものが図 4.21 で、ID=0 (青)、1 (橙)、2 (灰)、3 (黄) で表している。図 4.22 は、ID=0 のときのみ取り出した誤差の範囲付きのグラフである。グラフにして見てみると、2 週間でわずかにピーク値が低くなっていることがわかる。3 月 13 日、3 月 16 日の誤差が大きくなっているが、これは観測時間が短く、イベント数が小さくなっていたためである。また、同じデータを用いて分解能を調べた。結果を表とグラフ (図 4.23 4.25) にまとめた。

	ccd0	ccd1	ccd2	ccd3
42010(3/10)	11.73±0.15	11.99±0.12	12.19±0.12	12.44±0.13
42040(3/13)	11.41±0.31	11.97±0.41	12.01±0.22	11.90±0.27
43010(3/16)	11.20±0.79	12.05±0.45	11.81±0.35	11.79±0.48
50010(3/19)	11.49±0.17	11.98±0.13	12.14±0.15	12.21±0.13
50040(3/22)	11.50±0.18	11.95±0.15	12.02±0.16	12.20±0.17
44010(3/25)	- (entry0)	- (entry0)	11.84±0.25	11.88±0.23

図 4.23: ひとみ衛星 SXI の較正線源の分解能履歴

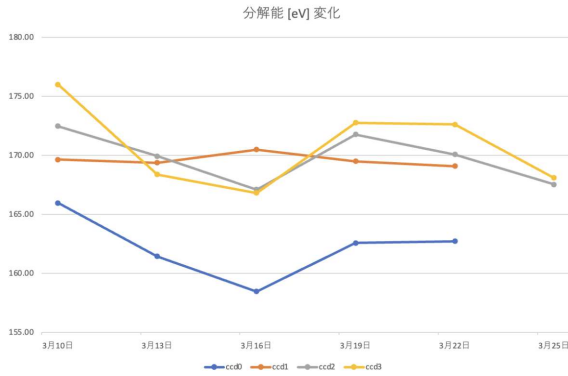


図 4.24: ひとみ衛星の CCD ごとの分解能履歴

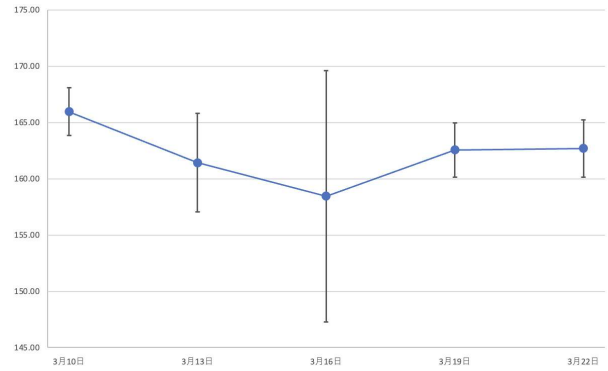


図 4.25: ひとみ衛星の ID = 0 のときの分解能履歴

表では channel 単位でガウシアン標準偏差をまとめ、グラフでは eV (電子ボルト) 単位の半値幅を示した。多くが ~170 eV であり、2 週間程度ではほとんど変化がないことが確認できた。

Even/Odd 補正の確認

続いて Even/Odd 補正の確認を行った。ここでは Perseus の観測データを用い、reproc_cl のデータから較正線源の範囲を取り出して行った。

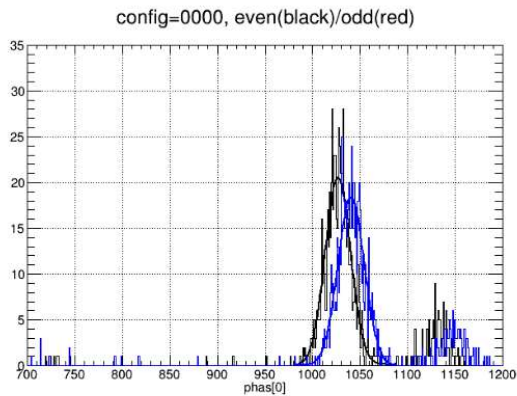


図 4.26: ひとみ衛星の Even/Odd 補正前

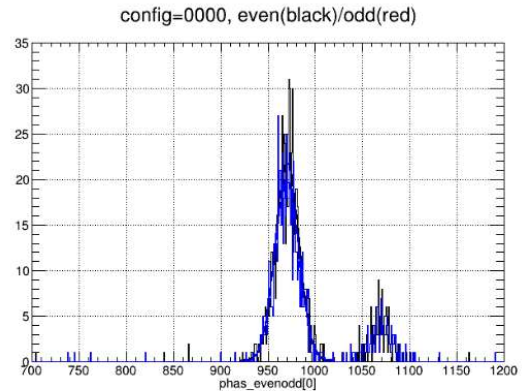


図 4.27: ひとみ衛星の Even/Odd 補正後

ID = 0, segment = 0 の場合の、Phas[0] の値 (つまり補正前) を偶数行・奇数行で並べたのが図 4.26、pi (補正後) が図 4.27 となっている。even (黒) と odd (青、タイトルは赤と誤記) のグラフが、補正後には揃っており、またゲインも ~980 ch と正しく補正できていることがわかる。

	even_after	odd_after	誤差の差分
ccdid0	967.9±0.7	967.5±0.7	0.4±1.0
ccdid1	968.9±0.5	970.6±0.5	1.7±0.7
ccdid2	967.5±0.5	969.5±0.5	2.0±0.7
ccdid3	970.3±0.5	969.8±0.5	0.5±0.7

図 4.28: ひとみ衛星の Even/Odd 補正後のピーク値のまとめ

4 枚の CCD で同様の解析を行なった。結果を表 (図 4.28) にまとめた。ID = 0、3 に関しては偶数行・奇数行の差分は誤差以下となっている。ID = 1、2 は統計誤差よりやや大きいですが、2 ch (ピーク値の 0.2 %) であり、実用上十分な精度で補正できている。

CTI の確認

CTI 補正 (第 3 章を参照) は、転送の際 3 x 3 ピクセルの外にこぼしたものを平均的に補正し、各 grade で「ACTY 依存形状 = ノコギリ構造」をフラットな状態にする補正である。図 4.29、4.30 は Perseus データで較正線源部に対し、CTI 補正の前後で ACTY 依存性がどう変化するかを示している。CCD の ID は 0 番で、Phas[0] (補正前の波高) と pi (補正後の波高) 分布の ACTY 依存性を示している。

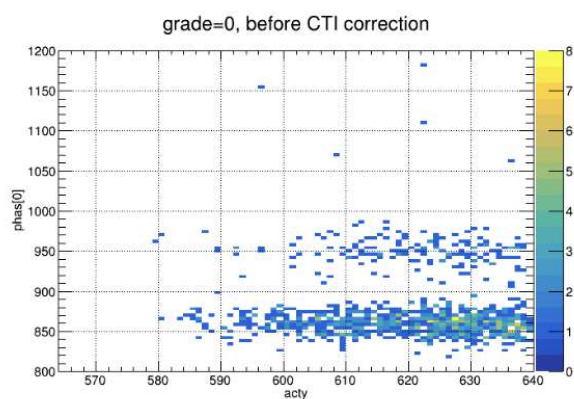


図 4.29: ID = 0 の ACTY 依存性 (CTI 補正前)

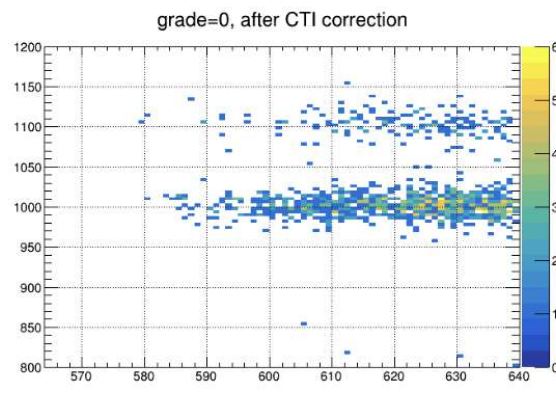


図 4.30: ID = 0 の ACTY 依存性 (CTI 補正後)

補正の前後で比較すると、ピークが 980 ch 近くにきていることが確認できる。またこのとき、横軸 acty を 564 - 602、602 - 640 の 2 つに分け左右でピーク位置に違いがないか (正しく CTI 補正ができているか) を確認した (図 4.31、図 4.32)。

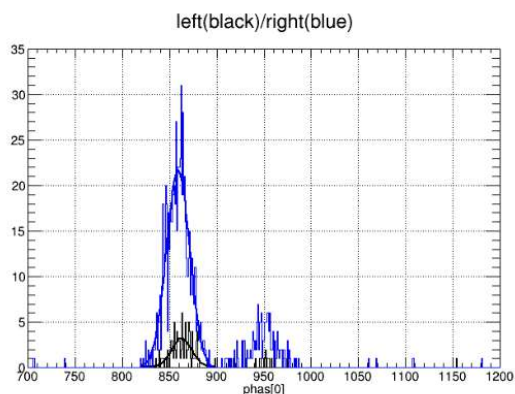


図 4.31: ひとみ衛星の CTI 補正前の波高値分布

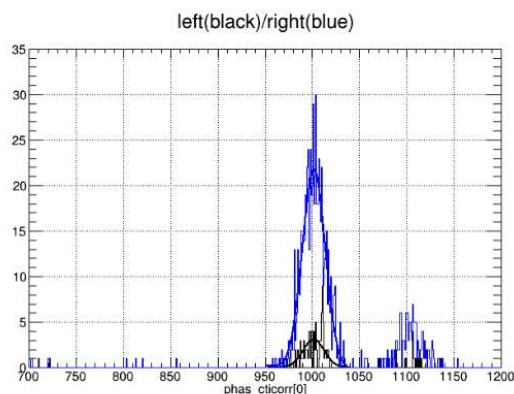


図 4.32: ひとみ衛星の CTI 補正後の波高値分布

左図が補正前の 564 -602 (青、左側)、602 - 640(黒、右側)、右図が補正後の 564 -602 (青、左側)、602 - 640(黒、右側) の波高分布である。ガウシアンでフィットしたところ、補正後のピークの違いは 0.2 ± 1.3 ch であった。4 枚の CCD に対し同様の結果を表 (図 4.33) にまとめる。

	left_after	right_after	誤差の差分
ccdid0	1001.6 \pm 1.2	1001.8 \pm 0.5	0.2 \pm 1.3
ccdid1	1005.7 \pm 0.7	1003.8 \pm 0.4	1.9 \pm 0.8
ccdid2	998.1 \pm 0.7	996.0 \pm 0.4	2.1 \pm 0.8
ccdid3	1002.8 \pm 0.4	1000.0 \pm 0.4	2.8 \pm 0.6

図 4.33: ひとみ衛星の CTI 補正の誤差

表から、統計誤差以上にずれている箇所もあるが、最大でも 3 ch (ピーク値の 0.3 %) 以下であり、十分な精度で補正できていることが分かる。

4.2.2 較正天体 (Perseus) の解析

較正天体 (Perseus) は信号の強度は弱いですが、CCD の広い領域を調べることができる。較正天体の解析では、reproc_cl のデータ (11 - 41) から較正線源の箇所をくり抜いた。天体が多く見えている CCD が ID = 1 となる (図 4.8 参照)。特に ID = 1 のときのイメージを図 4.34 に載せている。

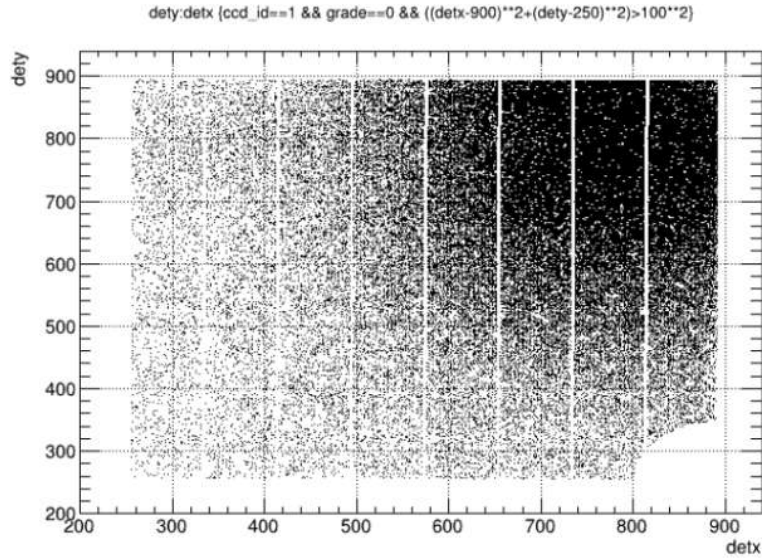


図 4.34: Perseus の ID = 1 のときのイメージ。較正線源は除いてある

イベント数の見積もり

較正天体からの信号は連続成分 (高温プラズマの電子による熱的制動放射) と輝線 (様々な元素の特性 X 線) からなり、検出器較正に適した輝線の強度は必ずしも大きくはない。そこで実データ (ID = 1) をもとにイベント数を見積もった。鉄輝線付近のスペクトルをガウシアン + 1 次式でフィッティングをかけた結果を図 4.35 に示す。

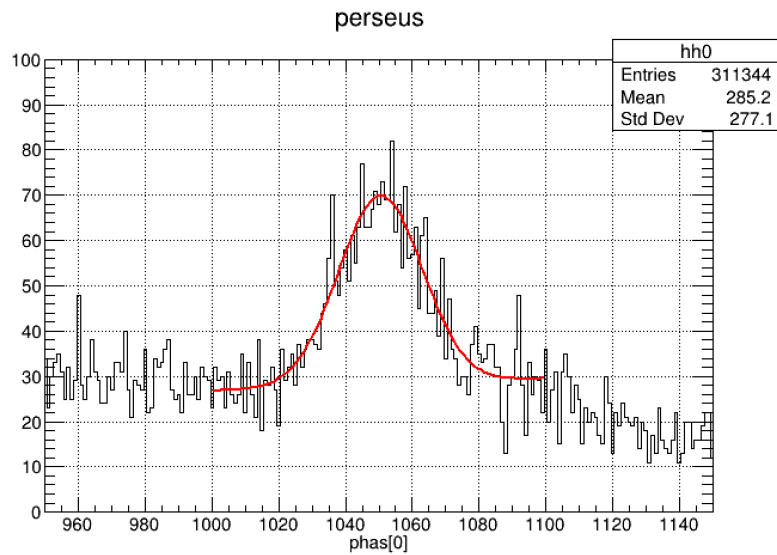


図 4.35: Perseus の鉄輝線付近のスペクトル

ガウシアンの高さ(41.7)と σ (12.6)よりイベント数が面積として求まり、得られたイベントは1312.9となった。ライトカーブから見積もられた Perseus の観測時間は21400秒であったため、1 ks 見れば~60 イベントが得られることがわかった。XRISM で推定されている Perseus の観測時間40 ks では、~2400 イベント観測が可能ということになる。

Even/Odd 補正の確認

4枚の CCD 全てに対し、較正線源と同様に Even/Odd 補正の確認をした。イベント数を表(図4.36)にまとめる。天体の含まれる ID=1 とそれ以外とでは、イベント数に大きく差が生じている。

evenodd(evenのみ)

	ピークのイベント数	ピークの差の精度	ccd1との比
ccd0	120.27	-	0.14
ccd1	847.75	1.16±1.17 channel 0.11 %	1
ccd2	56.71	-	0.07
ccd3	178.67	-	0.21

図 4.36: Perseus 観測のときのイベント数比較

ID = 1 のときの結果を図 4.37、4.38 に示す。

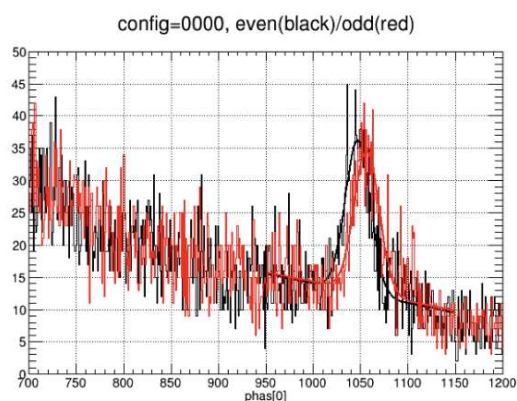


図 4.37: Perseus の Even/Odd 補正前

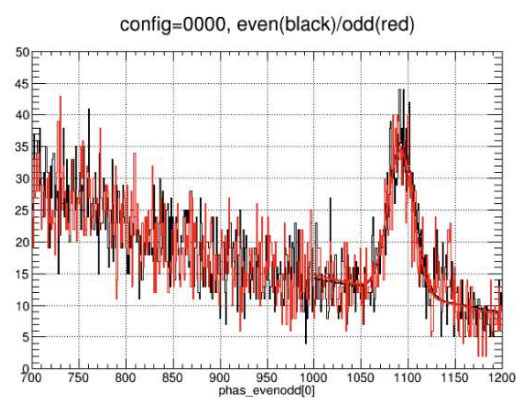


図 4.38: Perseus の Even/Odd 補正後 (pi)

左図が補正前、右図が補正後である。pi 分布では、even と odd は正しく補正され重なっていることが分かる。精度は0.1%と十分良い。したがって較正線源で4枚の CCD の Even/Odd 補正を確認し、Perseus で1枚の CCD のほぼ全面を確認することが可能である。

CTI の確認

CTI 補正の確認も、較正線源のときと同様に行った。ID = 1 の結果を図 4.39、4.40 に示す。

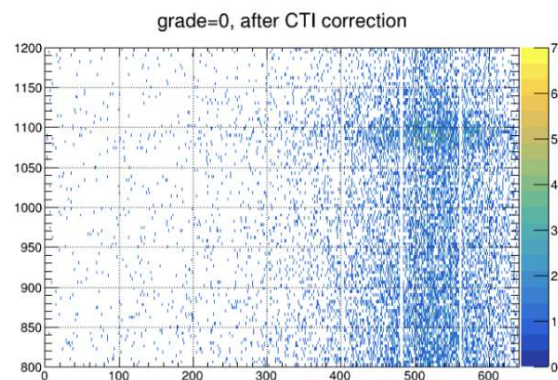
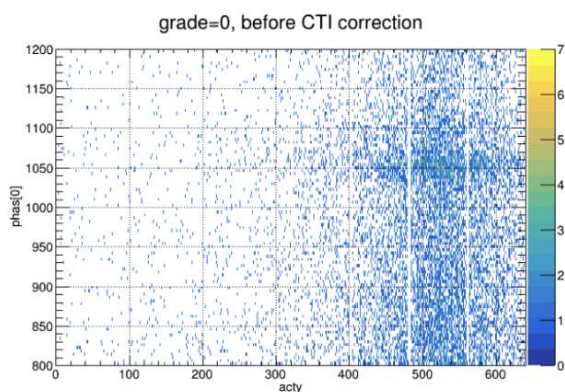


図 4.39: Perseus の CTI 補正前の波高値 (Phas[0]) 分布の ACTY 依存性 図 4.40: Perseus の CTI 補正後の波高値 (Phas[0]) 分布の ACTY 依存性

左図が補正前、右図が補正後である。電荷注入のため 80 行ごとに分かれている。天体からの信号の多い右側 3 つの領域を、さらに左側と右側に分割してピーク値の差を求めた。ID = 1 のとき、404-442, 442-480 の補正前後の結果を図 4.41、4.42 に示す。

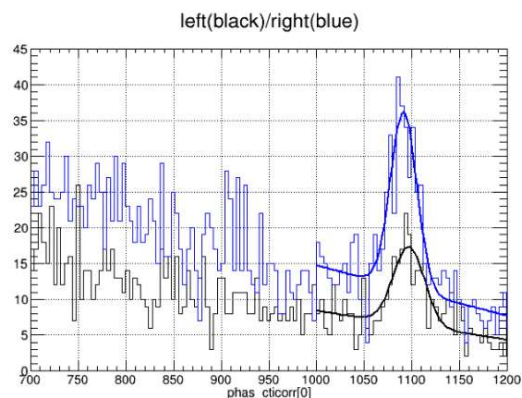
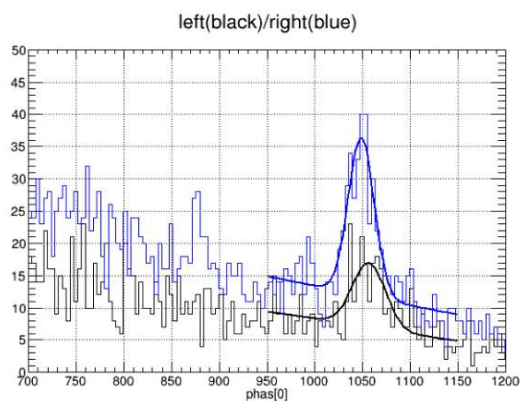


図 4.41: Perseus の CTI 補正前 (Phas[0]) の波高値分布。領域内を 2 分割した

図 4.42: Perseus の CTI 補正後 (pi) の波高値分布

CTI_histogram (ccd1d1)

	ピーク値	ピークの差の精度
404-442, 442-480	1096.97±3.62 1091.36±1.56	5.61±3.94 channel 0.51 %
484-522, 522-560	1094.04±1.28 1091.05±1.39	2.99±1.89 channel 0.17 %
564-602, 602-640	1093.13±1.28 1093.55±2.16	0.42±2.51 channel 0.04 %

図 4.43: Perseus の CTI 補正後のピーク位置。電荷注入行で分割された 80 行内の左右で比較したまとめ

ガウシアン + 1 次式でフィットして得られたピークの値と表 (図 4.43) にまとめる。ピークの差は 0.5 % またはそれ以下であり、統計誤差と同程度である。電荷注入行で分割された複数の領域に対し十分な精度で CTI 補正の確認ができることが分かった。

第5章 軌道上エネルギー較正の確認

5.1 較正線源の解析

XRISM 衛星打ち上げ後、実際に較正線源のデータを扱えるようになった。得られたデータは検出器の動作・健全性の確認のために簡易的なプロセスをかけることが日々行われ、また正式な公開データとするため正規のプロセスが数日 1 週間後にかけてられる。検出器チームは日々の運用を担当しているため、簡易プロセスのデータを主に扱う。一方私は科学運用チームの一員として、プロセスの検証も含め、正規プロセスがかけられたデータの解析を担当した。正規プロセス後の較正線源データのイメージは以下ようになっており、較正線源の箇所が確認できる。

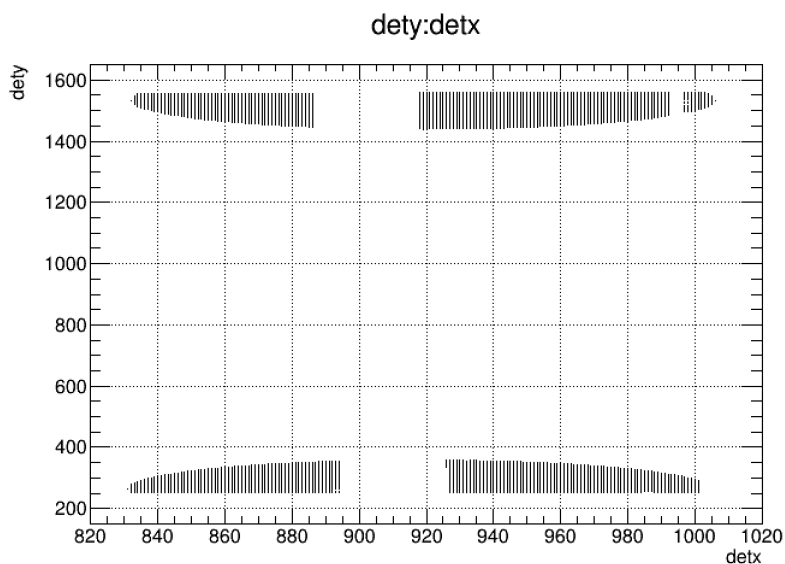


図 5.1: XRISM 衛星 Xtd の較正線源のイメージ

5.1.1 ゲイン履歴

ひとみ衛星のデータを用いたりハーサルと同様、ゲイン履歴を追う。用いたファイル名と観測日は以下の通り。観測日ごとの観測時間は異なり、イベント数も同じではない。

- xa000103000xtd_a030000050_fe.evt.gz (2023.10.19)
- xa000104000xtd_a030000050_fe.evt.gz (2023.10.23)
- xa000104100xtd_a030000050_fe.evt.gz (2023.10.26)

- xa000104200xtd_a030000050_fe.evt.gz (2023.10.29)
- xa000105000xtd_a030000050_fe.evt.gz (2023.11.01)
- xa000112000xtd_a030000050_fe.evt.gz (2023.10.08)

	ccdid0	ccdid1	ccdid2	ccdid3
103000(10/19)	990.00±0.47	978.13±0.17	979.41±0.27	978.52±0.32
104000(10/23)	987.70±0.21	977.72±0.20	979.68±0.12	978.63±0.14
104100(10/26)	987.45±0.23	977.71±0.22	979.62±0.13	978.13±0.15
104200(10/29)	986.93±0.24	977.79±0.22	979.40±0.13	978.57±0.15
105000(11/01)	986.29±0.07	976.15±0.59	977.54±0.37	975.57±0.42
112000(11/08)	927.55±0.73	975.81±0.85	978.07±0.36	976.62±0.44

図 5.2: XRISM 衛星 Xtend の較正線源のピーク値履歴

シングルピクセルイベント (Grade 0) の全補正後の波高 (pi) 分布のピーク値を表 (図 5.2) にまとめた。これをグラフにしたところ図 5.3、5.4 のようになっていた。

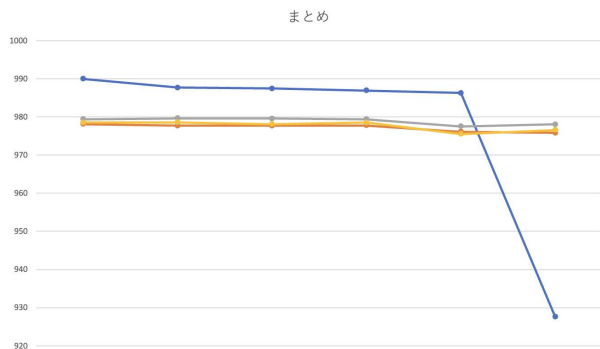
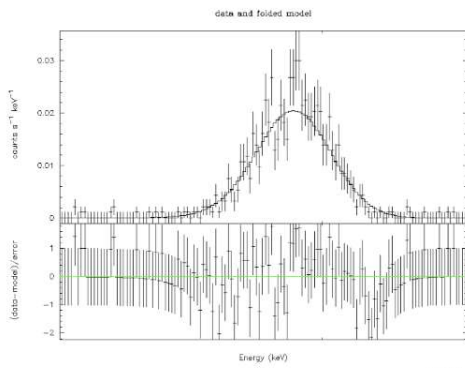


図 5.3: XRISM/ Xtend の CCD ごとの較正線源のピーク値履歴

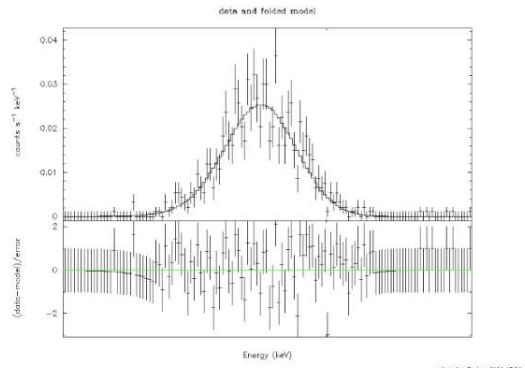


図 5.4: XRISM/ Xtend の ID = 0 のときのピーク値履歴

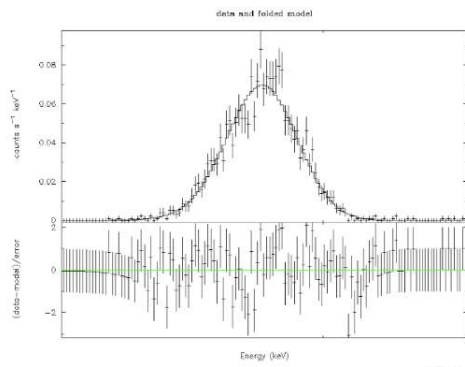
図 5.3 は、ID = 0 (青)、1 (橙)、2 (灰)、3 (黄) で表している。図 5.4 は、ID = 0 のときのみ取り出した誤差の範囲付きのグラフである。全体で見ると、ID = 0 が若干ピーク値が高くなっていることがわかる。また、ID = 0 のとき、11 月 8 日の時点でピーク値が極端に低くなっていたが、これはこのタイミングで ID = 0、1 と 2、3 で異なるモードでの観測に切り替えられたことが原因でプロセスが正しくかけられていない可能性がある。この点は引き続き確認する。日々の健全性確認でその後ゲインの大幅な低下は見られておらず、検出器動作としては問題はない。



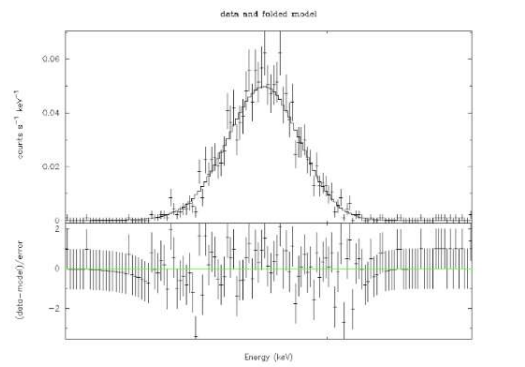
(a) ID = 0 のとき



(b) ID = 1 のとき



(c) ID = 2 のとき



(d) ID = 3 のとき

図 5.5: 応答関数を用いた較正線源のフィッティング結果 (5.5 - 6.3 keV)

実際のデータ解析はレスポンスを用い、エネルギー空間で行う。そこで公開予定のツール (xtdrmf というコマンド) を用いてレスポンスを作成し、エネルギー空間でガウシアンでフィットした。結果を図 5.5 にまとめる。前述の結果と同様に、ID = 0 のとき若干ピーク値が大きくなったことが確認できた。

また、pi 分布で分解能を比較すると、以下のようになっていた (図 5.6 - 5.8)。

	ccd0	ccd1	ccd2	ccd3
103000(10/19)	11.12±0.40	12.75±0.06	11.47±0.22	11.55±0.26
104000(10/23)	11.74±0.20	12.10±0.17	10.99±0.09	11.23±0.11
104100(10/26)	11.51±0.20	12.03±0.17	11.09±0.11	11.54±0.12
104200(10/29)	12.04±0.21	12.23±0.18	11.17±0.10	11.24±0.13
105000(11/01)	12.24±0.03	12.44±0.49	12.11±0.21	12.09±0.34
112000(11/08)	11.65±0.74	12.77±0.14	11.33±0.29	11.61±0.35

図 5.6: XRISM/ Xtend の分解能履歴

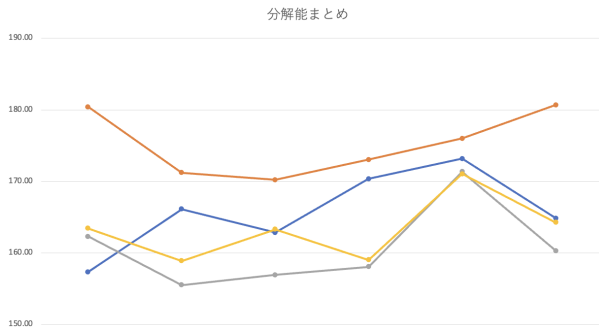


図 5.7: XRISM/ Xtend の CCD ごとの分解能履歴

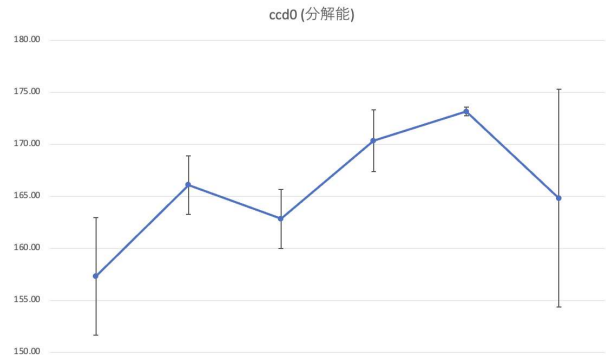


図 5.8: XRISM/ Xtend の ID = 0 のときの分解能履歴

ピークのと看同様、図 5.7 は ID = 0 (青)、1 (橙)、2 (灰)、3 (黄) で表している。図 5.8 は、ID = 0 のときのみ取り出した誤差の範囲付きのグラフである。半値幅に換算し、単位を eV に直すとおよそ ~170 eV であり、要求性能を満たしていること、2 週間程度ではほとんど変化がないことが確認できた。しかし ID = 1 のとき、他の CCD と比べ若干分解能が悪くなっていた。これもレスポンスを調べると、ID = 0、2、3 のときの標準偏差 (検出器のエネルギー分解能を考慮した、信号固有の輝線幅) がほぼ 0 であったのに対し、ID = 1 のとき ~0.014 keV となっていることが確認できた。CCD 間のピークのずれ (~10 ch)、分解能のずれ (~14 eV) ともにわずかであり、検出器の動作・較正パラメタ・プロセスの統一的な性能に大きな問題はないことが分かった。今後軌道上較正を進めることで、更なる向上も期待される。

5.1.2 Even/ Odd 補正の確認

最初の較正線源データ (xa000103000xtd_a030000050_fe.evt.gz) を用い、Even/ Odd 補正の確認を行った (図 5.9 - 5.11)。

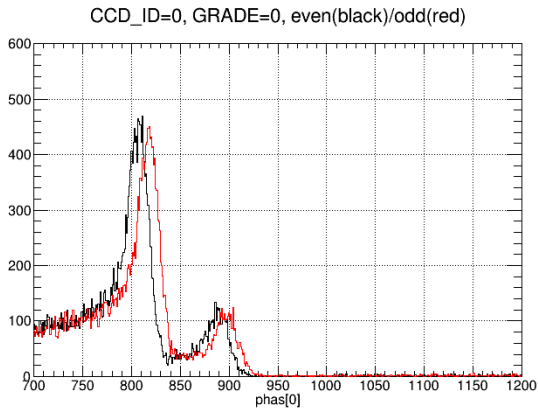


図 5.9: XRISM/ Xtend 較正線源の Even/Odd 補正前 (Phas[0]) の波高分布

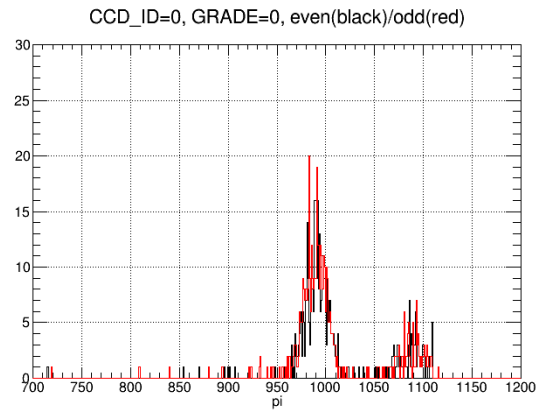


図 5.10: XRISM/ Xtend 較正線源の Even/Odd 補正後 (pi) の波高分布

	ccd0	ccd1	ccd2	ccd3
even (black)	991.94±0.05	981.55±0.75	979.93±0.38	979.54±0.45
odd (red)	989.86±0.64	976.86±0.65	979.40±0.04	977.73±0.38

図 5.11: XRISM/ Xtend 較正線源の Even/Odd 補正の誤差

補正前は Even/Odd でずれていたが、補正後にはずれがなくなり、 ~ 2 ch (0.2%) で一致していることが確認できた。このとき Phas[0] と pi でイベントが大きく異なる点について現在初期運用中のためであると考えているが、今後精査する。

5.1.3 CTI 補正

xa000103000xtd_a030000050_fe.evt.gz のとき、CTI 補正の確認を行った (図 5.12、5.13)。

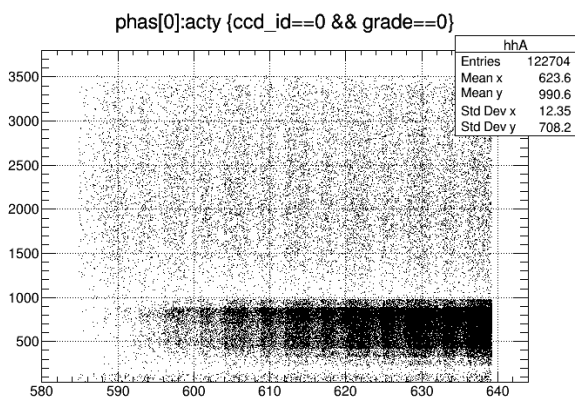


図 5.12: XRISM 較正線源 CTI 補正前

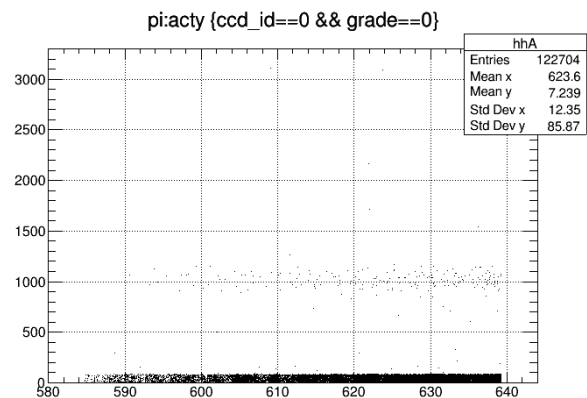


図 5.13: XRISM 較正線源 CTI 補正後

図 5.12 は ACTY (横軸) ごとの CTI 補正前の波高値 Phas[0] の分布で、CCD_ID は 0、grade は 0 である。図 5.13 は波高値 (pi) に対し同様の図になっている。CTI 補正で ACTY によらず ~1000 ch に揃っていることが分かった。定量的な解析は、今後行う。

5.2 較正天体の解析

XRISM 衛星は打ち上げ後、Resolve のゲートバルブ (保護膜) が未だ開いていない状況である。ゲートバルブにより低いエネルギーの X 線は吸収されてしまうため、較正天体の観測時期や時間を変更して観測を行っている。現時点で、E0102 (超新星残骸) を観測しており、低エネルギーのエネルギー較正に使う可能性を考えている。また、将来的に Perseus や、低いエネルギーラインが観測でき、かつサイズの大きな Cygnus loop の観測を期待している。

第6章 まとめ

XRISM 衛星搭載 Xtend のエネルギースケールに関し、打ち上げ前のツールの検証および「ひとみ」のデータを用いた軌道上較正のリハーサルを行った。ツールの検証では、xtdpi の温度補正部の修正 (patch) 後に正しく動作することを確認し、また「ひとみ」データでは較正線源の履歴を追う作業と較正用天体 (Perseus 銀河団) を用い広い範囲でゲイン補正の確認をするリハーサルを行った。そのうえで打ち上げ後に較正線源のデータを用い、ゲインの履歴を調べた。実データの解析から、3 週間程度でのピーク値・分解能にほとんど差はなく、エネルギー分解能も要求性能を満たしており、プロセスを含め統合的な性能に大きな問題がないことを確認できた。ID = 0 のときゲインが 10 ch (0.2 % ほど) 低くなっていたことや、ID = 1 のとき若干分解能が悪くなっていることも分かった。今後は、軌道上較正を進めることで改善を目指す。

謝辞

修士論文の執筆にあたり、水野先生をはじめ、研究室や XRISM/ Xtend のメンバーなど、多くのみなさまからお力添えをいただきました。また、つくば宇宙センターにて熱真空試験に参加させていただいた際は、富田さん、金丸さん、内山さん、信川さんに大変お世話になりました。ありがとうございました。XRISM 衛星を間近で見られたことがとても印象に残っています。今年度は XRISM 衛星を搭載した H-(II)A ロケットの打ち上げが無事成功し、X 線観測の歴史において重要な 1 年であったと感じています。短い間でしたが、この貴重な瞬間に立ち会えたことをとても幸せに思います。今後も、XRISM 衛星の活躍を期待しています。

参考文献

- [1] 小山勝二・嶺重 慎 [編] (2007) 「ブラックホールと高エネルギー現象」, 『シリーズ 現代の天文学 第 8 巻』.
- [2] 井上一・小山勝二・高橋忠幸・水本好彦 [編] (2008) 「宇宙の観測 (Ⅲ) -高エネルギー天文学」, 『シリーズ 現代の天文学 第 17 巻』.
- [3] X 線分光撮像衛星 XRISM, web ページ <https://www.xrism.jaxa.jp/>, (2024.01.30).
- [4] XRISM Quick Reference, 2020-10-06 Version 1 (N. Ota, T. Mizuno, H. Uchiyama, the XRISM SOC-PVO team).
- [5] X 線分光撮像衛星 (XRISM) 衛星運用説明書 (SOOH) Vol.11 Xtend 説明編/データ編 (XARM-SD-210074), 日本電気株式会社, P1 版 2021 年 12 月 15 日.
- [6] Hiroshi NAKAJIMA et al. (2018) 「In-orbit performance of the soft X-ray imaging system aboard Hitomi (ASTRO-H)」 PASJ 70, 21
- [7] 磯田依里 (2016) 「ASTRO-H 衛星搭載軟 X 線撮像検出器 SXI におけるエネルギー較正の研究」 (宮崎大学修士論文).
- [8] 信川久実子 (2013) 「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載予定 CCD 検出器 (SXI) の性能評価の研究」 (京都大学修士論文).
- [9] Yoshiaki KANEMARU et al. (2020) 「Experimental studies on the charge transfer inefficiency of CCD developed for the soft X-ray imaging telescope Xtend aboard the XRISM satellite」 NIMA 984, 164646
- [10] 宇宙科学研究所 「ひとみ」の科学成果, <https://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/190924.html>, (2024.02.12).