

ASTRO-H 衛星搭載 X 線 CCD カメラ SXI の 性能評価と較正方法の確立

京都大学大学院 理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻 物理学第二教室

鷲野 遼作

2016 年 1 月 27 日

概要

我々は次期 X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載する軟 X 線撮像検出器 (Soft X-ray Imager: SXI) の開発を行ってきた。SXI では 4 枚の CCD 素子を 2×2 に並べ、 $38' \times 38'$ の広い視野で、0.4–12 keV のエネルギー帯域で撮像分光を行う。ASTRO-H の打ち上げは 2016 年 2 月に迫っている。

CCD の軌道上運用での最大の問題はゲインとエネルギー分解能が経年変化することである。これは、宇宙放射線によって空乏層内に格子欠陥が生じることが原因だと考えられている。入射 X 線が変換された電荷は CCD のピクセル間を転送され、電気信号として読み出される。この際、格子欠陥では電荷の一部がトラップされるため、入射 X 線のエネルギーが正しく再構成できない。この効果を電荷転送損失 (Charge Transfer Inefficiency: CTI) と呼ぶ。CTI を改善する方法の 1 つは、CCD 素子に人工電荷を注入し、電荷トラップを予め埋めておくことで信号電荷の損失を防ぐことである。この「電荷注入法」により、CTI は大幅に改善するが、全くのゼロにすることはできない。X 線入射位置に依存したゲインの変化が残ってしまい、さらなる較正が必要となる。本修士論文では、打ち上げ後のデータ較正を念頭にした地上較正試験の詳細について報告する。

我々は SXI のフライトモデル素子を使用した地上較正試験を 2014 年 8 月から 9 月にかけて行った。この試験では 4 枚の CCD 素子に異なる 3 つのエネルギーの X 線を照射した。取得したデータから素子上に暗電流が周囲より数 % 高くなっている領域を複数見つけた。さらに、その領域では局所的に CTI が著しく悪化していることが分かった。これまでは CTI は素子上で同様だと考えられてきたが、局所的な悪化は X 線エネルギーの測定に非常に大きな不定性をもたらす。そこで、補正手法を大幅に改善し、CTI の空間分布を詳細にモデル化した。その結果、素子全面でのゲインとエネルギー分解能の補正に成功した。この補正方法と較正データは打ち上げ後の ASTRO-H の観測データ処理に用いる予定である。

また CCD から得られるデータから天体のフラックスを知るためには、検出効率の情報が必要である。SXI のカウントマップから検出効率の一様性を調査した。その結果、CCD 素子の構造で決まる検出効率、データ処理で取りこぼされる検出効率の一様性が要求性能を十分に満たすことを確認した。

目次

概要	i
第 1 章 X 線天文学	1
1.1 はじめに	1
1.2 宇宙空間での X 線放射	3
1.3 X 線観測	4
1.3.1 超新星残骸 Kes 17	4
1.3.2 ASTRO-H への展望	5
第 2 章 ASTRO-H	6
2.1 ASTRO-H 概要	6
2.2 搭載検出器	8
2.2.1 X 線望遠鏡	8
2.2.2 軟 X 線分光器	9
2.2.3 軟 X 線撮像検出器	9
2.2.4 硬 X 線撮像検出器	9
2.2.5 軟ガンマ線検出器	9
第 3 章 X 線 CCD	11
3.1 X 線 CCD の構造	11
3.2 X 線検出原理	13
3.2.1 X 線との相互作用	13
3.2.2 CCD 内での電子の運動	14
3.3 表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD	15
3.3.1 表面照射型 CCD (Front-illuminated: FI)	15
3.3.2 裏面照射型 CCD (Back-illuminated: BI)	15
3.4 電荷転送	16
3.4.1 電極の構造	16
3.4.2 電荷転送の方式	17
3.4.3 電荷の読み出し	18

3.4.4	FDA と MOSFET	18
3.4.5	FDA の動作	19
3.4.6	波高値の算出	20
3.5	性能	20
3.5.1	エネルギー分解能	20
3.5.2	ゲイン	21
3.5.3	検出効率	21
3.5.4	ノイズ	21
3.6	電荷転送損失	22
第 4 章	SXI	24
4.1	SXI の開発の流れ	24
4.2	SXI システムの構成	24
4.2.1	CCD 素子	24
4.2.2	SXI-S	28
4.2.3	SXI-CD	30
4.2.4	SXI-PE	30
4.2.5	SXI-DE	30
4.3	SXI でのデータ処理	30
4.3.1	ダークレベルの計算	31
4.3.2	イベントの抽出	32
4.4	SXI における較正	34
4.5	本修士論文の目的と手段	35
第 5 章	FM 素子の地上試験	36
5.1	FM 較正試験のセットアップ	36
5.2	初期データ処理	39
5.2.1	ダウンバーストの除去	39
5.3	使用するデータ	41
第 6 章	電荷転送損失の評価とゲイン補正	43
6.1	従来の CTI 関数による FM 素子での CTI の評価	43
6.2	CTI 異常領域の発見	46
6.3	CTI 関数の改良	55
6.3.1	改良した CTI 関数によるフィット	59
6.4	新しい CTI 関数による CTI パラメータ導出の方法	60
6.4.1	Grade 0 のイベントに対するパラメータ導出	60
6.4.2	Grade 2346 のイベントに対するパラメータ導出	70
6.4.3	補正後のデータのエネルギー分解能の評価	72

6.4.4	1/8 Window mode の CTI 補正	74
6.5	CTI パラメータの温度依存性	77
6.5.1	-120°C と -100°C での Off-spot 領域の CTI 関数	77
6.5.2	-120°C と -100°C での On-spot の CTI 関数	77
6.5.3	Off-spot と On-spot の温度依存性の違い	78
第 7 章	検出効率の一様性の測定	80
7.1	測定目的	80
7.2	全 Grade の SXI カウントマップを用いた一様性の検証	80
7.3	Grade 判定による検出効率	87
7.4	CTI 異常領域における検出効率	92
第 8 章	まとめと今後の課題	94
付録 A	CTI パラメータ導出過程	95
A.1	CCD1AB	96
A.2	CCD1CD	100
A.3	CCD2AB	104
A.4	CCD2CD	108
A.5	CCD3AB	112
A.6	CCD3CD	115
A.7	CCD4AB	118
A.8	CCD4CD	121
付録 B	SXI カウントマップ	124
B.1	全 Grade カウントマップの射影	124
B.2	カウントマップにおける Grade02346/Grade01234567 比	128
謝辞		132
参考文献		133

表目次

4.1	SXI の要求性能	34
5.1	回転型 X 線発生装置で使用したターゲットと発生する蛍光 X 線	37
5.2	-110 °C で取得した Full window mode のデータのフレーム数	39
5.3	今回の解析でダウンバーストを定義した頻度閾値	40
5.4	-110 °C で取得した 1/8 Window AC 読み出しのデータのフレーム数	42
5.5	FM 素子を使用した温度が異なる試験のデータのフレーム数	42
6.1	Off-spot, On-spot, Edge 領域の定義	63
6.2	Off-spot 領域のパラメータ	65
6.3	Edge 領域のパラメータ	66
6.4	On-spot 領域のパラメータ	67
6.5	c_{f0} , c_{s0} , c_{a0} のエネルギー依存性パラメータ	68
6.6	各 CCD に使用した Full window AC 読み出しの g-factor	71
6.7	CTI 補正前後の Mn-K α の中心値、標準偏差、エネルギー分解能	73
7.1	セグメント毎の Grade02346/Grade01234567 比	87
7.2	CTI 異常領域における Grade02346/Grade01234567 比	92

目次

1.1	大気窓	1
1.2	SCO X-1 の発見	2
1.3	X 線天文衛星の歴史	2
1.4	<i>Suzaku</i> による Kes 17 の X 線イメージとスペクトル	5
2.1	ASTRO-H 衛星とその軌道要素	7
2.2	ASTRO-H 衛星の概観	7
2.3	熱真空試験時の ASTRO-H 衛星	7
2.4	歴代 X 線望遠鏡の有効面積の比較	8
3.1	MOS 型半導体の構造	12
3.2	N 型半導体のエネルギーバンド、電荷、電場、電位分布図	13
3.3	表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD の断面構造	15
3.4	電荷転送で用いられる電極構造とクロックパターン	16
3.5	浜松ホトニクス社の CCD の電極の並び方	17
3.6	CCD の転送方式	18
3.7	FDA による電荷読み出しと MOS-FET の構造	19
3.8	CCD で得られるデータにおける各領域の構成	22
3.9	XIS におけるキャリブレーション前のデータの Mn $K\alpha$ の中心値と幅	23
4.1	SXI CCD 素子	25
4.2	2×2 pixel binning の駆動方式	26
4.3	SXI における座標付け	26
4.4	SXI EM 素子における Mn $K\alpha$ の波高値と幅	27
4.5	1/8 Window mode の駆動方式模式図	29
4.6	SXI システムの概観	29
4.7	SXI で用いられる Grade の分類	33
4.8	SXI におけるデータプロセス	35
5.1	FM 較正試験のセットアップ	36

5.2	回転型 X 線発生装置の断面図およびターゲット	37
5.3	回転型 X 線発生装置の X 線照射口と SXI FM 素子の位置関係	38
5.4	CCD2AB で取得した回転型 X 線発生装置の照射 X 線スペクトル	38
5.5	ダウンバーストピクセルと Bad Grade イベント分布の関係	41
5.6	ダウンバーストピクセルのみを除いた時と周囲 7 × 7 ピクセルを除いた時の Grade 分岐比の比較	41
6.1	⁵⁵ Fe を照射したときのスタッキングプロット	44
6.2	Mn K α の波高値の RAWY 依存性	45
6.3	CCD1CD において RAWX 方向に分割した Mn K α の波高値の RAWY 依 存性	47
6.4	図 6.3 の続き。	48
6.5	CCD2AB において RAWX 方向に分割した Mn K α の波高値の RAWY 依 存性	49
6.6	図 6.5 の続き。	50
6.7	FM 素子を用いた試験で得られたダークフレーム	51
6.8	ダークフレームの輝点に対応する列の波高値分布の CTI 関数フィット結果	52
6.9	2014 年 1 月に FM 素子で取得したダークフレーム	53
6.10	2014 年 12 月に FM 素子で取得したダークフレーム	53
6.11	2015 年 6 月に FM 素子で取得したダークフレーム	53
6.12	CCD1CD のダークフレームの輝点に対応する場所の射影	54
6.13	犠牲電荷と信号電荷の転送の模式図	56
6.14	CTI 異常領域が CI 行間にある場合のイベントの Y 座標に依存する Y ₁ , Y ₂ , Y ₃ の定義	57
6.15	CTI 異常領域が CI 行を跨いでいる場合のイベントの Y 座標に依存する Y ₁ , Y ₂ , Y ₃ の定義	58
6.16	修正 CTI 関数によるフィット結果	60
6.17	CCD の物理的な端での波高値の RAWY 依存性	62
6.18	Off-spot, On-spot, Edge 領域の定義	63
6.19	CCD1CD における Off-spot 領域のフィット	65
6.20	CCD1CD における Edge 領域のフィット	66
6.21	CCD1CD における On-spot 領域のフィット	67
6.22	CCD1CD における c_{f0} , c_{s0} , c_{a0} のエネルギー依存性	68
6.23	CCD1CD の m-factor と c_{a0} の X 方向依存性	69
6.24	補正後の Grade 0 の波高値分布	70
6.25	CTI 補正後の CCD1CD の Grade 別波高値分布	71
6.26	g-factor 補正後の CCD1CD の Grade 別波高値分布	71
6.27	g-offset を導入して補正した後の CCD1CD の Grade 別波高値分布	72

6.28	補正前後の ^{55}Fe の CCD1CD による Grade02346 スペクトル	73
6.29	CCD1CD における 1/8 Window mode での Off-spot 領域のフィット結果 .	74
6.30	CCD1CD における 1/8 Window mode での On-spot 領域のフィット結果 .	75
6.31	g-offset 補正後の CCD1CD 1/8 Window mode の Grade 別波高値分布 . .	76
6.32	CTI の温度依存性	78
6.33	CCD1AB におけるの τ の温度依存性	79
7.1	^{55}Fe を照射した時の Mn $K\alpha$, $K\beta$ 輝線バンド (5.4–7.2 keV) の SXI カウン トマップと exposure map	81
7.2	Ge を照射した時の Ge $K\alpha$, $K\beta$ 輝線バンド (9.0–12.0 keV) の SXI カウン トマップと exposure map	82
7.3	LiF を照射した時の F $K\alpha$ 輝線バンド (0.36–1.08 keV) の SXI カウン トマップと exposure map	82
7.4	Mn $K\alpha$, $K\beta$ 輝線バンドのカウントマップを短冊状に分割して射影したプロット	84
7.5	Ge $K\alpha$, $K\beta$ 輝線バンドのカウントマップを短冊状に分割して射影したプロット	85
7.6	F $K\alpha$ 輝線バンドのカウントマップを短冊状に分割して射影したプロット . .	86
7.7	図 7.4、7.5、7.6 の領域	87
7.8	Mn $K\alpha$, $K\beta$ のカウントマップにおける Grade02346/Grade01234567 比 . .	89
7.9	Ge $K\alpha$, $K\beta$ のカウントマップにおける Grade02346/Grade01234567 比 . .	90
7.10	F $K\alpha$ のカウントマップにおける Grade02346/Grade01234567 比	91
7.11	図 7.8 の下 4 つのプロットをビンニングしたもの	92
A.1	CCD1AB における Off-spot 領域	96
A.2	CCD1AB における On-spot 領域	96
A.3	CCD1AB における Edge 領域	96
A.4	CCD1AB における c_{f0} , c_{s0} , c_{a0} のエネルギー依存性	97
A.5	CCD1AB における Edge 領域での c_{f0} , c_{s0} のエネルギー依存性	97
A.6	CCD1AB における m-factor と c_{a0} の X 方向依存性	97
A.7	CCD1CD における Off-spot 領域	100
A.8	CCD1CD における On-spot 領域	100
A.9	CCD1CD における Edge 領域	100
A.10	CCD1CD における c_{f0} , c_{s0} , c_{a0} のエネルギー依存性	101
A.11	CCD1CD における m-factor と c_{a0} の X 方向依存性	101
A.12	CCD2AB における Off-spot 領域	104
A.13	CCD2AB における On-spot 領域	104
A.14	CCD2AB における Edge 領域	104
A.15	CCD2AB における c_{f0} , c_{s0} , c_{a0} のエネルギー依存性	105
A.16	CCD2AB における m-factor と c_{a0} の X 方向依存性	105

A.17	CCD2CD における Off-spot 領域	108
A.18	CCD2CD における On-spot 領域	108
A.19	CCD2CD における Edge 領域	108
A.20	CCD2CD における c_{f0}, c_{s0}, c_{a0} のエネルギー依存性	109
A.21	CCD2CD における m-factor と c_{a0} の X 方向依存性	109
A.22	CCD3AB における Off-spot 領域	112
A.23	CCD3AB における Edge 領域	112
A.24	CCD3AB における c_{f0}, c_{s0} のエネルギー依存性	112
A.25	CCD3AB における m-factor の X 方向依存性	113
A.26	CCD3CD における Off-spot 領域	115
A.27	CCD3CD における Edge 領域	115
A.28	CCD3CD における c_{f0}, c_{s0} のエネルギー依存性	115
A.29	CCD3CD における m-factor の X 方向依存性	116
A.30	CCD4AB における Off-spot 領域	118
A.31	CCD4AB における Edge 領域	118
A.32	CCD4AB における c_{f0}, c_{s0} のエネルギー依存性	118
A.33	CCD4AB における m-factor の X 方向依存性	119
A.34	CCD4CD における Off-spot 領域	121
A.35	CCD4CD における Edge 領域	121
A.36	CCD4CD における c_{f0}, c_{s0} のエネルギー依存性	121
A.37	CCD4CD における m-factor の X 方向依存性	122

第 1 章

X 線天文学

1.1 はじめに

この宇宙がどのように生まれ、どのように進化していくのか。天文学者はその時代における最先端技術を用いた観測を通して遠い宇宙からの微弱な信号を捉え、その答えを探し続けている。我々が住む地球には大気があるため、地表にまで届く電磁波は、可視光と一部の波長の赤外線や電波に限られる (図 1.1)。

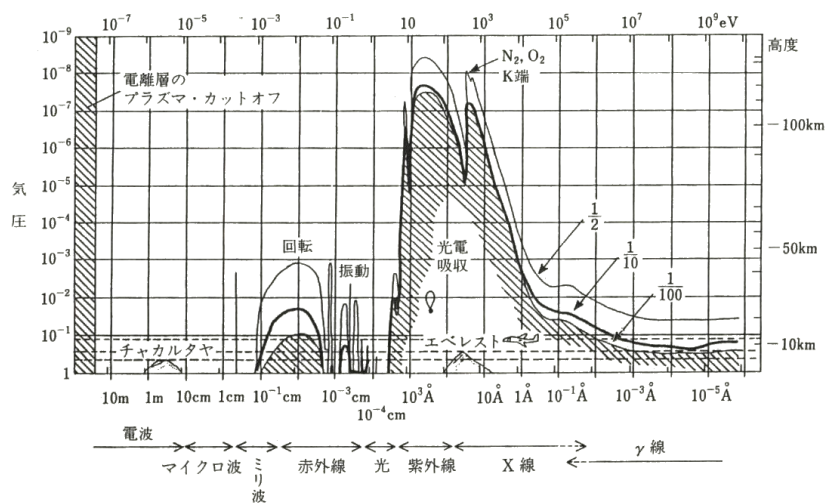


図 1.1 大気の窓

気球、ロケット、人工衛星などの技術の発展により大気の上にも観測機器を運ぶことができるようになると、天文学の範囲は急速に広がった。しかし、当初の天文学者の多くは宇宙は静かで冷たい空間であると考え、宇宙空間に X 線を放射するような超高温の天体が存在するとは思われていなかった。

1962 年、ブルーノ・ロッシとリカルト・ジャコーニは X 線観測用ロケット Aerobee150 を打ち上げ、太陽以外の天体から初めて X 線を発見した [1]。その天体は さそり座にある Sco X-1 という中性子星の連星で、全天で最も明るい X 線天体であった (図 1.2)。またこのデータは全天方向からやってくる宇宙 X 線背景放射の存在も示唆していた。

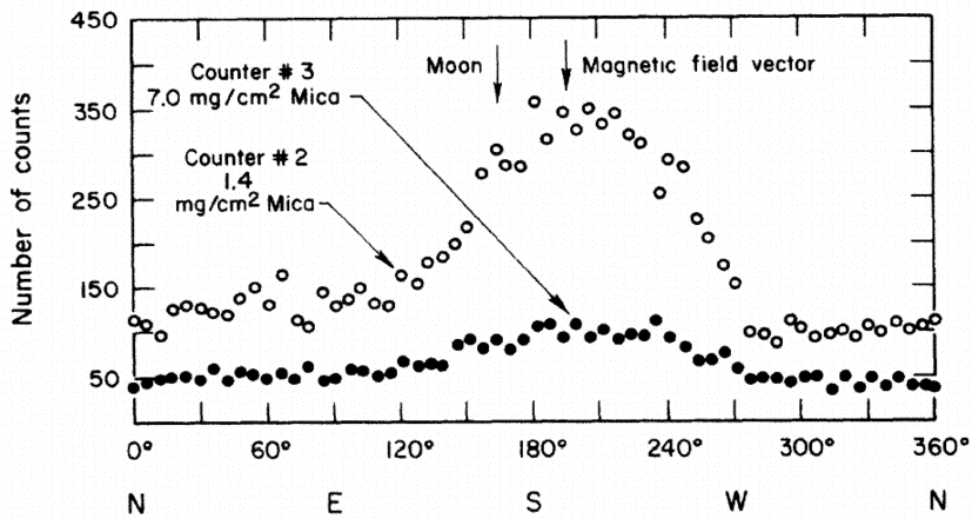


図 1.2 Sco X-1 と宇宙 X 線背景放射の初めての観測 [1]。

この Sco X-1 の発見以降、X 線天文学は急速に発展した。1970 年に世界初の X 線観測衛星 Uhuru が打ち上げられて以来、様々な X 線天文衛星が打ち上げられた (図 1.3)。X 線天文学の物理学に対する最も大きな寄与の一つに、ブラックホール候補天体の発見や銀河団プラズマの発見が挙げられる。さらに今日では、X 線は宇宙空間で観測できる天体の 80 % 以上から放射されていることが知られており、現代天文学のあらゆる天体の理解において、X 線観測が必要不可欠となっている。

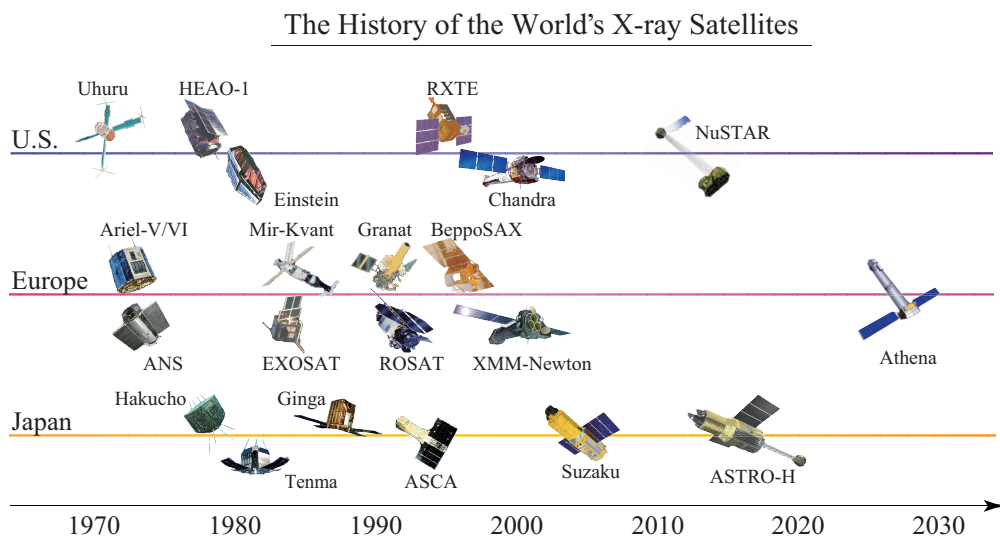


図 1.3 世界の X 線天文衛星の歴史

1.2 宇宙空間での X 線放射

先に述べたとおり宇宙空間における X 線放射源は数多くあるが、放射の物理過程は主に以下のものが挙げられる。

熱制動放射

荷電粒子が加速度を受けた時に放射される電磁波を制動放射と呼ぶ。宇宙空間に存在する熱平衡状態にある光学的に薄い (低密度) プラズマ中で、電子がイオンとクーロン相互作用することで加速度を受けて制動放射をする。これを電子の熱的分布で重ね合わせたものが熱制動放射である。超新星残骸などでは、ショック加熱によりプラズマの温度が $> 10^6$ K に達し、熱制動放射による X 線が放射される。またこの放射はプラズマ中の各元素に特有の輝線放射を伴うことが多く、輝線強度はプラズマ温度、元素組成比、電離度等を反映している。

黒体放射

光学的に厚い (高密度) 熱平衡状態にあるプラズマから放射される電磁波は、プラズマによる吸収と放出がつり合うことで熱平衡状態に達する。このときの光子の分布は光子の放射吸収の素過程によらずプランク分布となり、この放射を黒体放射と呼ぶ。例として高密度天体の降着円盤からの放射は多温度黒体放射の重ね合わせとして表される。これは降着円盤が光学的に厚く、内側の方がより温度が高いためであると考えられている。

シンクロトロン放射

荷電粒子が磁場の中で加速されるとき放射をシンクロトロン放射と呼ぶ。荷電粒子のエネルギー分布が非熱的である (冪型) 場合、シンクロトロン放射のスペクトルも非熱的となる。若い超新星残骸からは、加速された電子 (~ 1 TeV) からのシンクロトロン X 線放射が観測されている。

逆コンプトン散乱

高速で運動する電子が宇宙空間に存在する長波長の光子と逆コンプトン散乱を起こすと、高エネルギーの電磁波を放射する。種となる光子として、宇宙マイクロ波背景放射や星からの光子などがある。天体の磁場が強く、電子密度が高いときには、自ら放射したシンクロトロン放射光が種光子となることもある (Synchrotron-self-Compton radiation)。この場合は種光子がもともと短波長なため、硬 X 線からガンマ線域の非常に高いエネルギーの電磁波を放射する。

非熱的制動放射

非熱的な分布の電子からの制動放射を非熱的制動放射と呼ぶ。比較的古い超新星残骸では非熱的制動放射による非常にフラットな冪の硬 X 線放射が観測されている。

1.3 X線観測

これまで様々な天体で X 線放射が観測され、その背景にある物理過程が研究されてきた。もはやほとんどの天体が X 線を放射していると言っても過言ではなく、本修士論文でその全てを紹介することはできない。そこで私が日本の X 線天文衛星 *Suzaku* を用いて研究を行った、超新星残骸 Kes 17 を例として挙げる [2]。

1.3.1 超新星残骸 Kes 17

超新星爆発では重力崩壊や核燃焼による爆発によって星の構成物質が飛び散り、それらが星間物質と衝突することによって衝撃波が形成される。衝撃波は星からの噴出物や星間物質を加熱し、X 線を放射するほどの超高温のプラズマを形成する。このような爆発した星の痕跡が超新星残骸 (Supernova remnant: SNR) である。その X 線スペクトルは爆発機構や周辺環境を探る重要な手掛かりとなる。

Suzaku の観測成果の一つとして SNR の中からの過電離プラズマの発見がある (e.g., [3])。SNR のプラズマでは、衝撃波が通過したのちにイオンと自由電子が衝突することで電離が進行する。プラズマ密度が低いため、自由電子がイオンに再結合する確率が低く、数万年かけて電離と再結合がつり合う電離平衡状態に達する。この進化過程では常に再結合に比べて電離が優勢な状態にある。過電離プラズマとは再結合過程が優勢なプラズマで、上記の進化過程では説明できない。その形成メカニズムを理解するために、今後より多くの過電離 SNR を発見し、系統的な研究を行う必要がある。

過電離プラズマが見つかったのは全て電波ではシェル状に広がり、X 線では中心に集中している Mixed-Morphology (MM) 型の SNR であった。我々は銀河系内にある MM 型の SNR である G304.6+0.1 (Kes 17) を *Suzaku* で観測した。

図 1.4 左に、*Suzaku*/XIS によって得られた Kes 17 の X 線イメージを示した。この X 線放射の場所ごとの特性を調査するため、中心に集中した放射を先行研究 [4] に習って北部、南部、中央の 3 つの領域に分割した。解析の際には *Suzaku* の特性を最大限に活かすために、バックグラウンドの正確な評価が必要となる。そこで、宇宙背景 X 線放射、銀河リッジ面 X 線放射等の寄与をモデル化し、バックグラウンド領域のスペクトルを再現した。

図 1.4 右に XIS による Kes 17 の北部のスペクトルとフィッティング結果を示した。スペクトルは 1 成分の熱的プラズマ (図中赤線) とバックグラウンドモデル (図中点線) でよく再現でき、非熱的な成分を必要としなかった。先行研究では電離平衡状態にある熱的プラズマと非熱的な成分が必要とされていたが、これはバックグラウンド由来の非熱的成分を除去しきれいでなかったためだと考えられる。また熱的成分については、南部と中央では電離平衡状態にあり、北部では過電離状態にあることが分かった。プラズマの電離状態の違いは輝線エネルギーの微妙な差に現れるので、その正確な測定にはエネルギー分解能の良い検出器が必要である。現行の X 線観測装置のうち最も分光性能の良い *Suzaku* で観測したことで、南北の電離

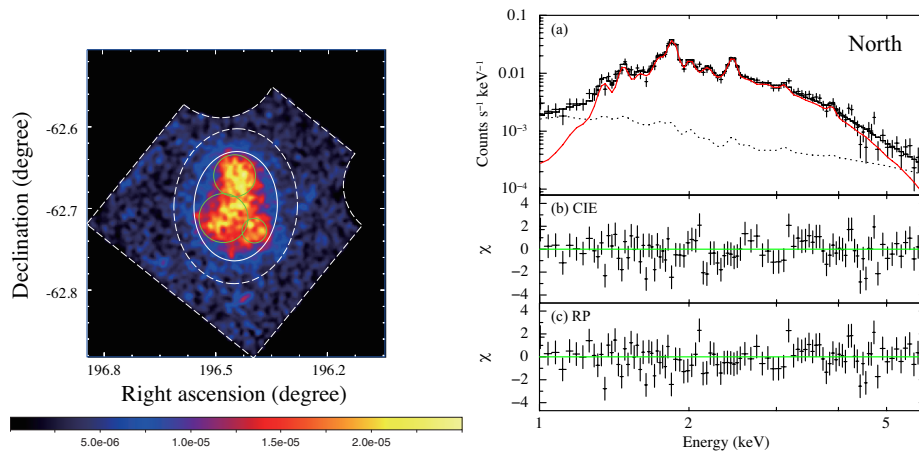


図 1.4 (左) *Suzaku* による Kes 17 の X 線イメージ。(右) (a) Kes 17 の北部領域から抽出したスペクトルとそのフィット結果。赤線が過電離プラズマモデル、黒の点線がバックグラウンドモデル、黒の実線がそれらを足し合わせたものを表す。(b) 電離平衡プラズマモデルとデータの残差。(c) 過電離プラズマモデルとデータの残差。

状態の違いを初めて示すことができた。

赤外線観測から Kes 17 の北部領域には分子雲が存在していることが分かっている [5]。そこで我々は、Kes17 のプラズマが冷たい分子雲と相互作用することで電子温度が急激に低下し、結果として電離非平衡な過電離状態が実現した、という仮説を立てた。実際に分子雲の熱伝導のタイムスケールを見積もった結果、Kes 17 の年齢に対して十分に説明できる。

1.3.2 ASTRO-H への展望

SNR の電離状態はスペクトルの輝線強度やエネルギーに反映されるが、その違いは僅かである。より高いエネルギー分解能を持つ検出器があれば、*Suzaku*/XIS に比べて高い精度で SNR の電離度を決定できる。また Kes 17 においてはプラズマの空間分布を調べることで、その性質の違いが明らかになった。より大きく広がる天体の空間分布を調査するためには、一度に広視野を観測できる検出器が必要となる。それらを併せ持つ衛星が ASTRO-H 衛星であり、打ち上げを間近に控えている*¹。2章では ASTRO-H 衛星の概要について説明する。

*¹ 2016 年 2 月 12 日に種子島宇宙センターより打ち上げ予定。

第 2 章

ASTRO-H

2.1 ASTRO-H 概要

X 線天文衛星 ASTRO-H は日本で 6 番目の X 線天文衛星である。2016 年 2 月に種子島宇宙空間観測所から H-IIA ロケット 30 号機による打ち上げが予定されている。全長は 14 m、重量は 2.7 t と、日本の科学衛星としては過去最大で、その軌道は、高度 ~ 550 km、傾斜角 ~31° の円軌道になっている (図 2.1)。ASTRO-H の目的は、ブラックホールの周辺や超新星爆発など高エネルギーの現象に満ちた極限宇宙の探査・高温プラズマに満たされた銀河団の観測を行い、宇宙の構造やその進化を探ること、とされており (<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/astro-h/>)、2 種類の X 線望遠鏡 (軟 X 線望遠鏡、硬 X 線望遠鏡) と 4 種類の検出器 (軟 X 線分光器、軟 X 線撮像検出器、硬 X 線撮像検出器、軟ガンマ線検出器) が搭載される (図 2.3)。

10 keV 以下の軟 X 線領域では、マイクロカロリメータを用いて 6 keV の X 線に対して 7 eV 以下という高いエネルギー分解能での精密分光観測を行う。これにより元素の微細構造を反映した各種輝線の分離も可能となるため、天体の温度や密度、エネルギーなどの物理状態をこれまでになく精度で測定することができる。また世界で初めて 80 keV までの硬 X 線領域で撮像観測を行い、高エネルギー天体からの非熱的 X 線放射についても威力を発揮する。さらに 0.3 – 600 keV という広エネルギー範囲で観測を行うことで、非熱的放射と熱的放射との関わりを明らかにすることができるようになる。

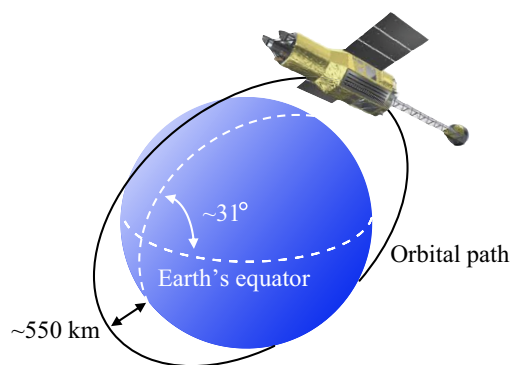


図 2.1 ASTRO-H 衛星とその軌道要素

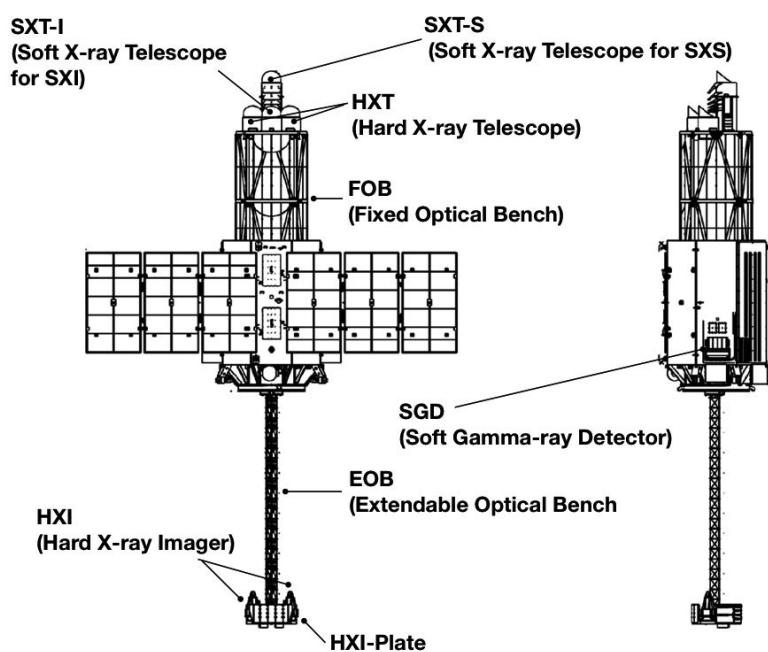


図 2.2 ASTRO-H 衛星の概観 [6]

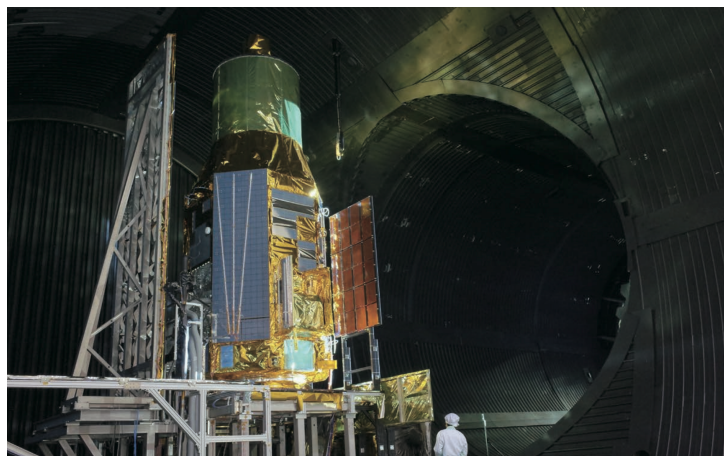


図 2.3 熱真空試験時の ASTRO-H 衛星

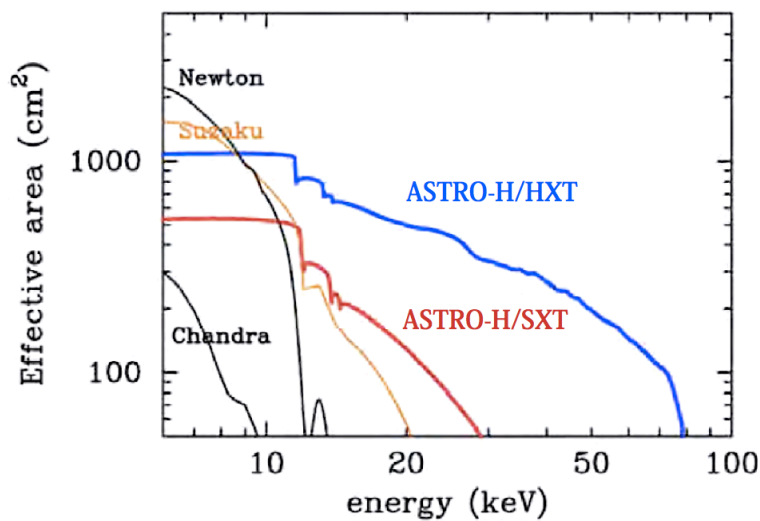


図 2.4 *Chandra*, *XMM-Newton*, *Suzaku* にそれぞれ搭載された X 線望遠鏡と、ASTRO-H/HXT, ASTRO-H/SXT の有効面積の比較

2.2 搭載検出器

2.2.1 X 線望遠鏡

ASTRO-H には軟 X 線望遠鏡と硬 X 線望遠鏡を搭載して広帯域で撮像を行う。軟 X 線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope : SXT) は、軟 X 線領域で集光を行い、軟 X 線分光器 (SXS) と軟 X 線撮像器 (SXI) 用の 2 台が搭載される。反射面には *Suzaku* 衛星の軟 X 線望遠鏡にも使用された金を用いている。

硬 X 線望遠鏡 (Hard X-ray Telescope : HXT) として、名古屋大学が中心として開発したスーパーミラー望遠鏡が搭載される。集光系を持たないコリメータ型やコーディッドマスク型に比べ、ASTRO-H 衛星ではスーパーミラー望遠鏡を用いて X 線を集光することで、低バックグラントでの撮像観測が可能となる。スーパーミラー望遠鏡は反射鏡の表面に白金と炭素の多層膜を蒸着させている。軟 X 線に対しては全反射、硬 X 線に対してはブラッグ反射を行うことで 3–80 keV の X 線を集光することができる。*Chandra*、*XMM-Newton*、*Suzaku*、SXT と HXT の有効面積を歴代の X 線望遠鏡と比較したものが図 2.4 である。スーパーミラー望遠鏡は歴代の X 線望遠鏡に比べると 10 keV を超えるエネルギーに対しても大きな有効面積を持っていることがこの図から分かる。

2.2.2 軟 X 線分光器

軟 X 線分光器 (Soft X-ray Spectrometer : SXS) はマイクロカロリメーター検出器であり、10 keV 以下の軟 X 線領域で分光を行う。SXS は *Suzaku* に搭載された XRS で確立された技術をベースに開発されている。ASTRO-H では *Suzaku*/XRS に比べてピクセルサイズが 815 μm と大きくなっている。この素子に対しても 6 keV におけるエネルギー分解能が 5 eV と要求性能を満たしている。また SXS は 32 個のピクセルから構成されており、視野はおよそ 3 分角となっている。

2.2.3 軟 X 線撮像検出器

軟 X 線撮像検出器 (Soft X-ray Imager : SXI) は 0.4 – 12 keV の軟 X 線領域で撮像分光を行う焦点面検出器である。高い位置分解能を持つ X 線 CCD を 4 素子用いることで、38' \times 38' という広視野を確保しており、撮像能力が低く視野が狭い SXS との相補的な役割を担う。SXI については 4 章で詳述する。

2.2.4 硬 X 線撮像検出器

硬 X 線撮像検出器 (Hard X-ray Imager : HXI) は数 keV–80 keV の硬 X 線に対して撮像分光を行う焦点面検出器であり、2 台の HXT の焦点面それぞれに設置される。HXI はテルル化カドミウム (CdTe) 両面ストリップ検出器で 10 – 80 keV の X 線を検出し、その上部には両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) を 4 枚スタックしており、5 keV 前後から 30 keV までの検出に有効に働く。軟 X 線は DSSD で検出されるのに対して、硬 X 線は DSSD を透過し、CdTe の両面ストリップ検出器で検出されるという構造を持つことで、極めて広いエネルギー範囲で高感度を実現する。

また、10 keV を越えるエネルギー帯域では、バックグラウンドが感度に影響するため、検出器のバックグラウンドを低くすることが必要となる。HXI においては検出部を井戸型の BGO で囲み、反同時計測を実施することで低バックグラウンドを実現しており、HXT の大きな有効面積と組み合わせることで、高い検出感度を実現する

2.2.5 軟ガンマ線検出器

軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector : SGD) は、半導体コンプトンカメラであり、60–600 keV の帯域で高感度観測を実現する。*Suzaku*/HXD に比べて小型であるが、600 keV までのエネルギー範囲において優れた感度をもつ。SGD は高い検出効率、バックグラウンド除去のための優れた角分解能を持つ必要がある。そこで HXI と同時に、エネルギー分解能の高い DSSD とガンマ線に対して高い検出効率を持つ CdTe 半導体検出器を、狭い視野を持つ井戸型 BGO シールドと合わせることで、「狭視野半導体多層コンプトンカメラ」という高感

度ガンマ線検出器を採用する。コンプトン散乱を用いることで、60 keV 以上のエネルギー範囲での偏光観測が可能となる。

第 3 章

X 線 CCD

CCD (Charge Coupled Device) は 1970 年に Bell 研究所の Boyle と Smith によって考案された電荷転送デバイス的一种である。今日ではイメージセンサとして様々な分野で利用されている。CCD は可視光のみならず X 線等の放射線に対しても感度を持つ。さらに位置分解能とエネルギー分解能に優れているため、これまでも *ASCA/SIS*、*Suzaku/XIS*、*Chandra/ACIS*、*XMM-Newton/EPIC* などの X 線天文衛星に搭載され、その主力検出器として数多くの成果を上げてきた。可視光用の CCD と X 線 CCD が大きく異なるのは、可視光よりもエネルギーの高い X 線を透過させずに検出可能とする厚い空乏層と、電荷が少ないイベントを認識するための低いノイズレベルをもつという点である。

3.1 X 線 CCD の構造

X 線 CCD の各ピクセルの構造を大きく 2 つに分けると、MOS ダイオード型と pn 接合型がある。*ASCA/SIS* にて初めて衛星搭載検出器として使用されたのが MOS ダイオードをモザイク状に並べた MOS ダイオード型の CCD である。SXI でも MOS ダイオード型 CCD を使用する。本項では MOS 型を紹介する。

電極金属 (Metal)、酸化物 (Oxide)、半導体 (Semiconductor) を積層することで作られる構造を MOS と呼び、MOS 構造をもつ半導体を MOS 型半導体と呼ぶ (図 3.1)。半導体部分には、表面が空気中で酸化し安定な酸化膜が容易に形成されるという利点から Si がよく用いられる。SXI ではポリシリコンを電極層として積層させたものを使用する。

SXI の検出部には N 型半導体が用いられるため、以下では N 型半導体の MOS 型半導体素子について説明する。半導体に不純物が添加されていない状態でのフェルミ準位を真性フェルミ準位と呼び、そのエネルギーを E_i で表す。真性フェルミ準位は価電子帯 (E_v) と伝導帯 (E_c) の中間の順位に位置する。4 価の Si に 5 価のドナー原子を添加することで電子が多数キャリア、正孔が少数キャリアとなり N 型半導体が作られる。余剰の電子は伝導帯の少し下に位置するドナー準位にあり、容易に伝導電子となることができる。N 型半導体のフェルミ準位 (E_F) はこのドナー準位の影響を受け、真性フェルミ準位よりも高くなる。

MOS 半導体は表面電極に印加する電圧によって、蓄積状態、空乏状態、反転状態という 3

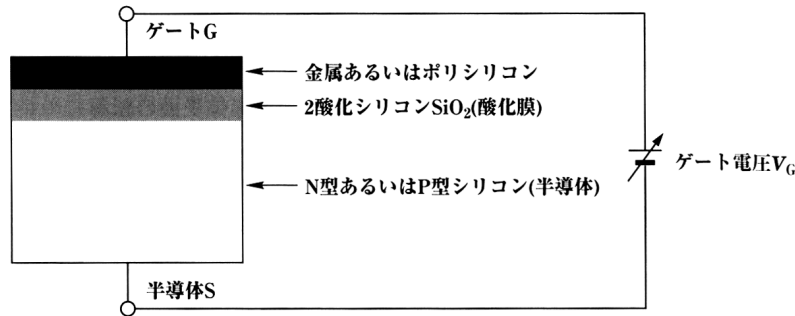


図 3.1 MOS 型半導体の構造

つの状態をとる。(図 3.2)。

1. 蓄積状態

表面電極に正の電圧を印加することで、電極側には負の電荷、半導体側には正の電荷が誘起される。熱平衡時と比べて電極側の酸化膜表面の多数キャリア濃度が高くなった状態を蓄積状態という。

2. 空乏状態

表面電極に負の電圧を印加することで、電極付近からは電子が排斥されることによりキャリアの少ない空乏領域が形成される。この時半導体の反対側には電子が排斥されていない電氣的に中性な領域があり、この領域を中性領域と呼ぶ。

3. 反転状態

表面電極に印加する負の電圧を大きくすればするほど空乏領域が広がる。しかしさらに大きくすると、酸化膜側の半導体界面に正孔が誘起される。さらに電圧をあげるともはや正孔が増えるばかりで半導体での電場は強くならない。この時半導体界面でのフェルミ準位と真性フェルミ準位が逆転しており、電子の濃度よりも正孔の濃度が高くなる。この状態を反転状態と呼ぶ。

半導体表面を原点として半導体の深さの方向に z 軸をとり、空乏層の厚み (z_d) を求める。ドナーを添加した場合には、ドナー濃度を N_D 、素電荷を e として、

$$Q_S = +eN_D z_d \quad (3.1)$$

という電荷が半導体表面に一様に誘起される。このとき半導体表面から z 軸の正の方向に電位 ϕ が発生する。この ϕ は Si の誘電率を ϵ_{Si} とすれば Poisson 方程式、

$$\frac{\partial^2 (\epsilon_{Si} \phi(z))}{\partial z^2} = -eN_D \quad (3.2)$$

を満たす。 $z = z_d$ で電場が 0 となることと、 $z = z_d$ での電位を 0 とする境界条件を課せば、

$$\phi(z) = -\frac{eN_D (z - z_d)^2}{2\epsilon_{Si}} \quad (3.3)$$

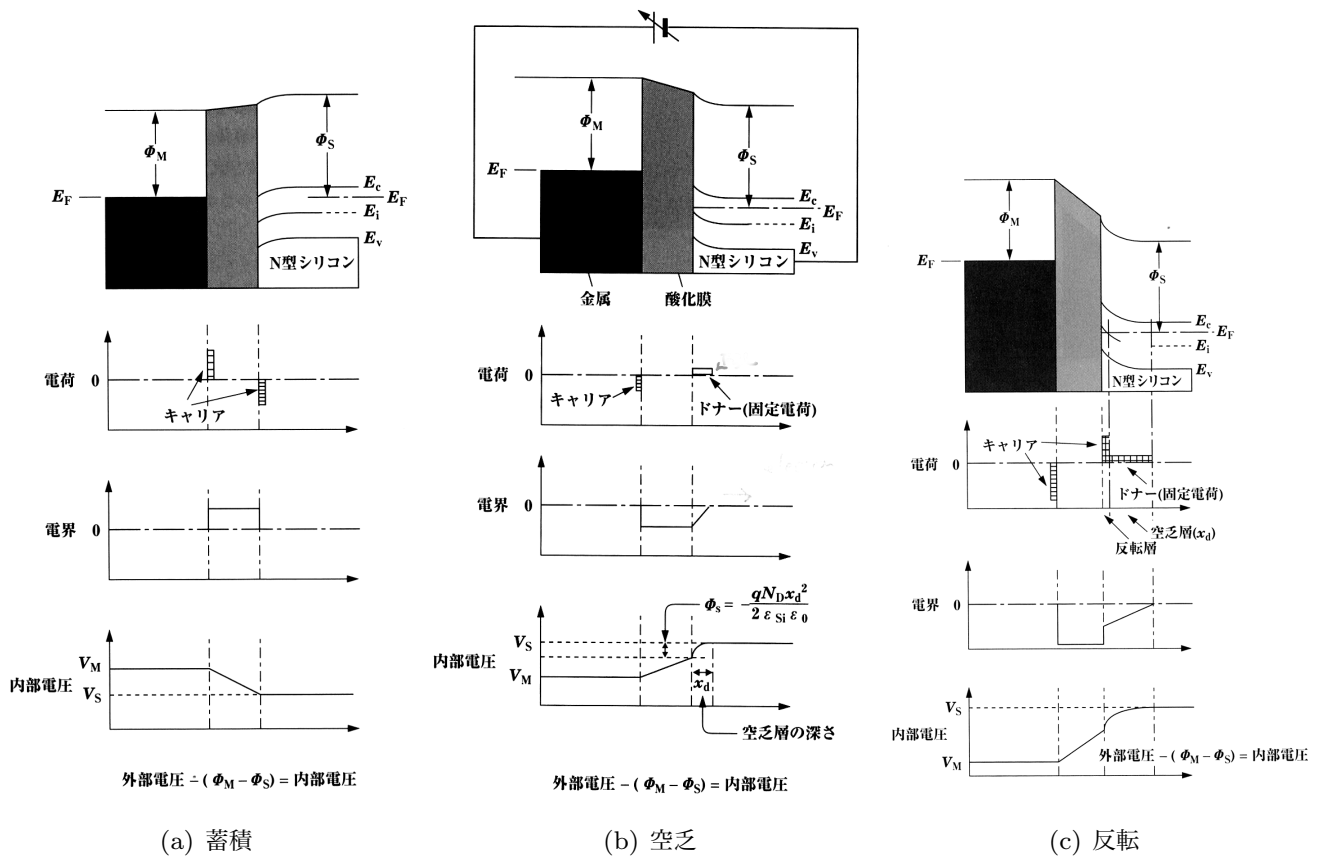


図 3.2 N 型半導体のエネルギーバンド、電荷、電場、電位分布図

となる。半導体表面での電位を $\phi(z = 0) = \phi_S$ と表すと空乏層の厚み z_d を以下の式で表すことができる。

$$z_d = \sqrt{-\frac{2\epsilon\phi_S}{eN_D}} \tag{3.4}$$

空乏層をより厚いものにするためには、ドナー濃度 N_D を小さくすれば良いことが分かる。

3.2 X線検出原理

3.2.1 X線との相互作用

X線は素子内の全ての物質と相互作用する。この中で空乏層に入射したX線は光電吸収を起こし、光電子を発生させる。この電子は運動エネルギーを失うまで周囲の電子を次々に電離させる。Si内での6 keVのX線の場合は～1600個の電子正孔対が発生する。

Siの蛍光収率は5%であり、ほとんどの場合にオージェ電子が放出される。入射したX線のエネルギーがSiのK殻の結合エネルギーである1.84 keVよりも高い場合、オージェ電子ではなくSi-K α 線(1.74 keV)が放出されることがある。Si-K α 線のSi中の平均自由行程はCCDのピクセルサイズと同程度のスケール(～10 μ m)である。Si-K α 線がCCDの外部へと逃げてしまった場合には、元のピクセルで得られる電荷量はSi-K α の分だけ低くなる。この検出できなかったイベントをエスケープイベントと呼ぶ。また他のピクセルで吸収された場合には、Si-K α とエスケープイベントの2つのイベントとして受かる。

3.2.2 CCD 内での電子の運動

空乏層内で生じた正孔の集まりを正孔雲と呼ぶ。正孔雲は CCD 内部の電場によって電極方向にドリフトする。この時、熱運動によって拡散される。

ドリフト

半導体中の電場 ($E(z)$) は、式 3.3 から

$$E(z) = \frac{eN_D}{\epsilon_{Si}}(z - z_d) \quad (3.5)$$

と書ける。深さ z にある 1 つの正孔は、その有効質量を m_* とすると、

$$m_* \frac{d^2z}{dt^2} = +eE(z) = +\frac{e^2N_D}{\epsilon_{Si}}(z - z_d) \quad (3.6)$$

の力を受けて電極側へドリフト運動する。このドリフト運動で正孔は半導体中の原子から原子へと次々に移動する。原子間を移動するのにかかる時間を τ_c とすると、そのドリフト運動の平均速度 \bar{v} は、

$$\bar{v} = +\frac{eE(z)\tau_c}{m_*} \equiv \mu E = \mu \frac{eN_D}{\epsilon_{Si}}(z - z_d) \quad (3.7)$$

と表すことができる。 μ は電場に対するドリフト速度の比例係数であり、移動度と呼ぶ。X 線が入射して深さ z で生じた正孔雲が電極に到達するまでの時間 t は、

$$t = \frac{\epsilon_{Si}}{\mu e N_D} \ln \frac{z_d}{z_d - z} \quad (3.8)$$

となる。

熱拡散運動

CCD 内で正孔雲の発生によりキャリアが局所的に過剰になると、周囲との濃度差を緩和させるために正孔雲は熱運動によって拡散する。この拡散過程は熱拡散方程式に従うので、正孔の密度を ρ として、

$$\frac{d\rho}{dt} = D\Delta\rho \quad (3.9)$$

とかける。D は拡散定数であり、ボルツマン定数を k_B とすると、アインシュタインの関係、

$$D = \frac{k_B T}{e} \mu = \frac{k_B T \tau_c}{m_*} \quad (3.10)$$

によって表される。 z 軸に垂直な面での拡散は、式 3.9 を解いて、

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) \quad (3.11)$$

というガウス分布となる。 r は、この面内の電荷を中心とする動径方向の距離を表す。以上より、電極に到達するときの正孔雲の広がり σ は、

$$\sigma = \sqrt{2Dt} = \sqrt{2D \frac{\epsilon_{Si}}{\mu e N_D} \ln \frac{z_d}{z_d - z}} \quad (3.12)$$

となる。この熱拡散によって正孔雲が複数のピクセルにまたがる可能性が高くなる。

3.3 表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD

CCD には電極がある表面側から X 線を入射する表面照射型と、その反対側の面から X 線を入射する裏面照射型があり、それぞれで性質が異なる。図 3.3 に表面照射型と裏面照射型の断面構造を示す。

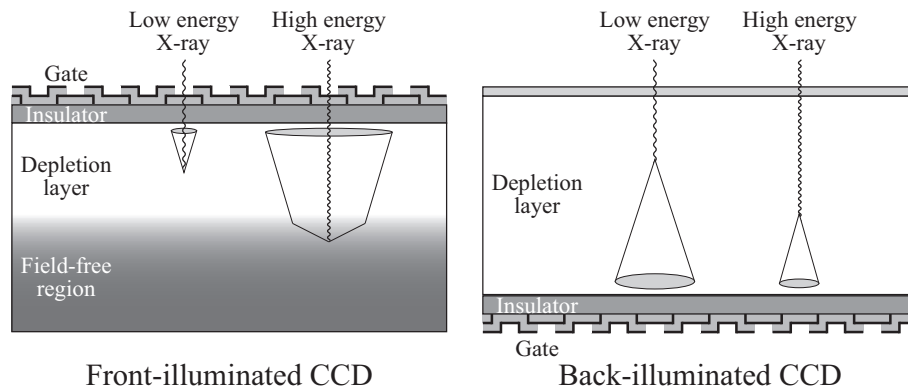


図 3.3 表面照射型 CCD (左) と裏面照射型 CCD (右) の断面構造。

3.3.1 表面照射型 CCD (Front-illuminated: FI)

電極のある表面から X 線を照射する方式で、従来から使用されている一般的な方式である。電極側で軟 X 線が吸収されてしまい、低エネルギーでの検出効率が低下するという欠点がある。さらにまた空乏化されていない中性領域も不感層となるが、電極と反対側から正の電圧を印加し、中性領域の正孔を CCD の裏面に排斥することでこの影響を小さくすることができる。この電圧をバックバイアスと呼ぶ。

3.3.2 裏面照射型 CCD (Back-illuminated: BI)

電極のない裏面から X 線を照射する方式である。電極がないため低エネルギー X 線に対する検出効率が向上する。電極が X 線の入射面と反対側にあるため、中性領域をなくして完全空乏化する必要がある等、加工プロセスが容易でないという欠点がある。

Suzaku/XIS では FI が 3 つ、BI が 1 つの計 4 枚の CCD 素子が使用された。SXI では使用する 4 つの素子全てが BI である。

3.4 電荷転送

各ピクセルに蓄積された電荷は読み出し口まで順に転送され、最終的には電気信号となって取り出される。ここではこの流れについて説明する。

3.4.1 電極の構造

CCD における電荷転送は、電極毎に電圧を変化させ、バケツリレー形式で隣へと電荷を転送することで行われる。以下の3つの方式が用いられる。

(a) 2相方式

1ピクセルを2つの電極で構成する方式。電極の一部に正の電荷をもつ不純物を添加させることによって電極内に階段状のポテンシャルを形成する。SXI で用いられるのはこの方式である。

(b) 3相方式

1ピクセルを3つの電極で構成する方式。それぞれに順番に電圧をかけることにより、ポテンシャル井戸を移動させる。この電圧のかけ方によって逆方向への転送や、蓄積する電極の位置を変更することができる。

(c) バーチャルフェーズ方式

不純物を添加させることにより1ピクセルあたり1つの電極で転送可能にする方式。電極の数を少なくすることにより、軟X線に対して検出効率を高くできるが、電荷の転送方向の変更はできない。

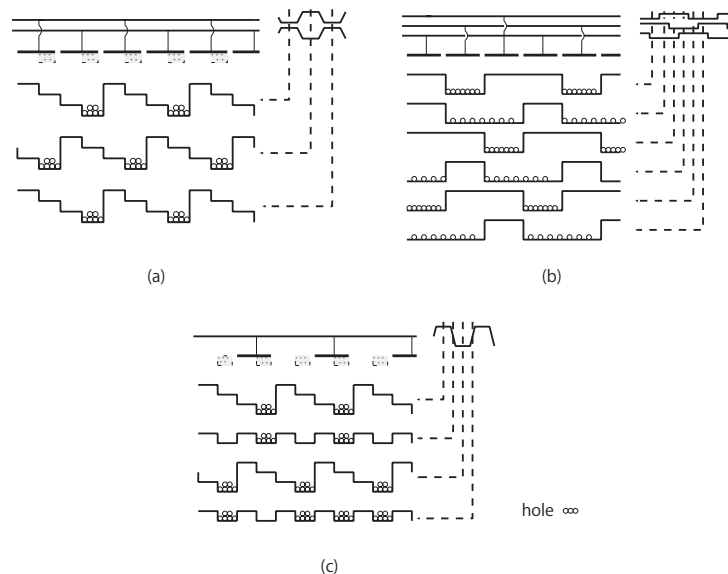


図 3.4 電荷転送で用いられる電極構造とクロックパターン。(a) 2相方式, (b) 3相方式, (c) バーチャルフェーズ方式。

浜松ホトニクス社 CCD における電極の並び方

SXI で使用する浜松ホトニクス社製の CCD 素子における電極の並び方を図 3.5 に示した。縦転送用の 2 相の電極 P1V,P2V を受光部に順番に配置する。またそれとは独立に TG (Transfer Gate) と呼ばれる電極を蓄積領域から横転送レジスタに転送する最後に配置している。TG を P2V と同じクロックで動作させることにより、電荷を横転送レジスタに転送する。また横転送レジスタにも横転送用の電極 P1H,P2H が順番にあり、最後には SG (Summing Gate) と呼ばれる電極を配置している。SG を P2H と同じクロックで動作させることで 1 ピクセルの電荷を読み出す。他にも電極 ISV,IG1V,IG2V,ISH,IG1H,IG2H があり、これらは 4.2.1 節で述べる電荷注入法を行うためのものである。

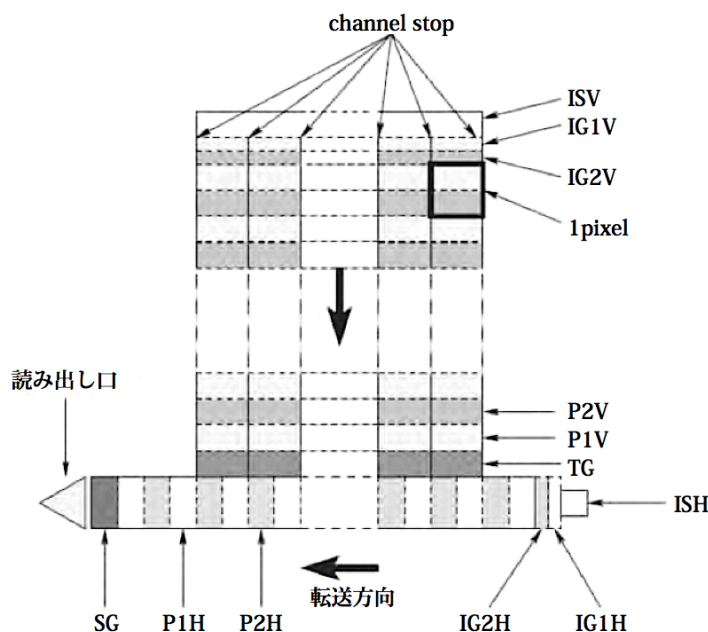


図 3.5 浜松ホトニクス社の CCD の電極の並び方

3.4.2 電荷転送の方式

CCD の転送方法には以下の 3 つがある。このうち SXI では FT 方式を採用している。

(a) Frame Transfer: FT

FT 方式の素子は撮像領域と同じピクセル数の蓄積領域をもつ (図 3.6(a))。蓄積領域には X 線の入射を防ぐためにカバーが被せられる。読み出しは以下のように行う。

1. 一定時間露光し、露光領域の全ての電荷を蓄積領域に転送する。
2. 蓄積領域全体を 1 ピクセル縦転送し、蓄積領域の最下列の電荷を読み出しの横転送レジスタに転送する。
3. 横転送レジスタを 1 ピクセルずつ横転送し、電荷を読み出す。これを横のピクセル

数分繰り返す。

4. 2,3 を繰り返すことにより、全ピクセルの電荷を読み出す。

後述する FFT 方式に比べて露光中にも読み出しができることが利点である。1 の蓄積領域への転送中に露光領域に X 線が入射した場合、そのイベントの位置情報を誤ることもある (Out of time event)。

(b) Full Frame Transfer: FFT

FT 方式の撮像領域と蓄積領域の区別をなくした方式である (図 3.6(b))。蓄積領域が不要なので大きな受光面を実現できることが利点である。しかし露光と読み出しを同時に行うことができず、読み出し中にはシャッターを必要とする。

(c) Inter-line Transfer: IT

IT 方式では各列の間に蓄積領域があり、3 つの方式の中で最も読み出し時間を短くしている (図 3.6(c))。蓄積領域への X 線の入射を防ぐのが難しく、X 線 CCD では使用されていないが、可視光はアルミニウムなどを用いて遮光できるため、ビデオカメラやデジタルカメラにはこの方式が用いられている。

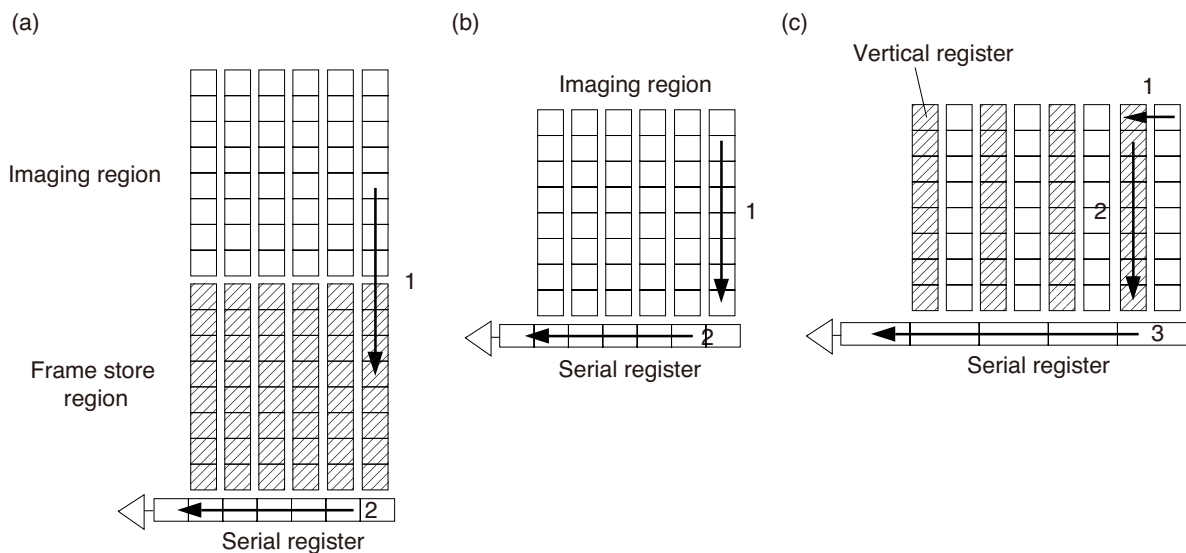


図 3.6 CCD の転送方式。(a) FT, (b) FFT, (c) IT。

3.4.3 電荷の読み出し

3.4.4 FDA と MOSFET

電荷は読み出される際に電圧レベルに変換される。広く使用されている読み出し口での電荷-電圧変換の方法として、FDA (Floating Diffusion Amplifier) と呼ばれるものがある。図 3.7 左に FDA の模式図を示した。FDA は電荷リセット用の MOSFET (MOSFET 1) と電荷-電圧変換用の MOSFET (MOSFET 2) から構成される。

MOS-FET (MOS 型電界効果トランジスタ) の構造を図 3.7 右に示す。ゲートに電圧を印

加していない場合にはゲートの両端のソースとドレインの間には電流は流れない。負の電圧をかけるとゲートにソース・ドレイン内の正孔が引き寄せられ、N型半導体に入る。この正孔によってソース・ドレイン間に電流が流れるようになる。ゲートに印加する電圧によって電流の大きさを調節でき、スイッチや電荷-電圧変換に使用される。

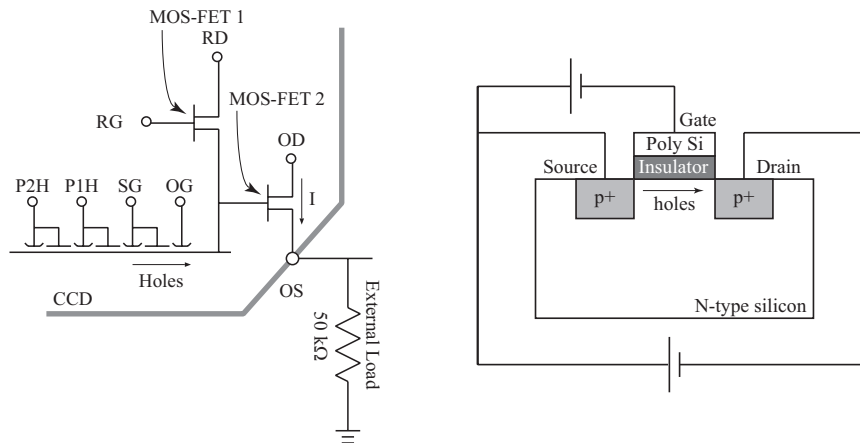


図 3.7 (左) FDA による電荷読み出し。(右) MOS-FET の構造。

3.4.5 FDA の動作

図 3.7 において、MOSFET 1 は FDA の入力 (Output Gate: OG) をソースとし、OG の電荷をリセットするスイッチとなる。MOSFET 2 は OG をゲートとし、OG の電荷を電圧に変換する。MOSFET 1 のゲート、ドレインを Reset Gate (RG)、Reset Drain (RD) と呼び、MOSFET 2 のドレイン、ソースを Output Drain (OD)、Output Source (OS) と呼ぶ。FDA 方式での読み出し方を述べる。

1. SG-Low, RG-Low (Reset)

RG が Low になることで RD と読み出し口が等電位になる。蓄積していた電荷は RD 側へと捨てられる。

2. SG-Low, RG-High (Floating level)

SG からの電荷を待っている状態であり、この時の読み出し口の電位を Floating level と呼ぶ。

3. SG-High, RG-High (Signal level)

SG からの電荷が転送されることで読み出し口の電位が上昇する。この時の読み出し口の電位を Signal level と呼ぶ。

これらの 3 段階で 1 ピクセル分の読み出しとなり、1 から 3 は繰り返される。Signal level と Floating level の差が各ピクセルの出力信号に対応する。これを波高値 (Pulse Height Amplitude: PHA) と呼ぶ。

3.4.6 波高値の算出

波高値の算出方法には以下のものがある。

(a) 多重サンプリング方式

Signal level, Floating level の波高値をそれぞれ ADC (Analog-digital converter) に通してサンプリングした後に、デジタル信号として差し引く方法である。アナログ回路が単純になるという利点があるが、ノイズのキャンセルのために何度もサンプリングを行う。そのため高速の ADC が必要となる。SXI ではこの方式が用いられる。

(b) 積分方式

Signal level, Floating level を積分回路で同じ時間ずつ積分し、差し引く方法。時間積分を行うことでランダムノイズが鈍される。また高速の ADC を必要としない。しかしアナログ回路が複雑になる。XIS ではこの方法が採用された。

(c) 遅延方式

出力信号を 2 つに分けて 1 つを遅らせることで Signal level, Floating level が時間的に重なるように調整した後に両者の差分をとる方法。

3.5 性能

3.5.1 エネルギー分解能

入射した X 線のエネルギーは生成されるキャリアの個数を測定することで決定される。キャリアを 1 個生成するのに必要な平均エネルギーを W とすると、エネルギー E の X 線が入射した際には平均 E/W 個のキャリアが生成される。キャリアの個数の統計揺らぎはポアソン分布よりも有意に小さいことが知られている。その統計揺らぎの標準偏差は

$$\sigma = \sqrt{F \times \frac{E}{W}} \quad (3.13)$$

表される。 F はポアソン分布からのずれを表すファノ因子であり、物質に固有の値をとる (Si で ~ 0.12)。ここに読み出し回路などによる統計揺らぎ以外のノイズ σ_{noise} が加わり、

$$\sigma = \sqrt{F \times \frac{E}{W} + \sigma_{\text{noise}}^2} \quad (3.14)$$

が実質的な標準偏差となる。エネルギー分解能 (ΔE) を半値幅 (Full width half maximum: FWHM) で評価すると、

$$\Delta E = 2 \times \sqrt{2 \log 2} \times W \times \sqrt{F \times \frac{E}{W} + \sigma_{\text{noise}}^2} \quad (3.15)$$

となる。実験的には輝線スペクトルをガウス関数でフィットし、

$$\Delta E [\text{eV}] = 2 \times \sqrt{2 \log 2} \times \text{ゲイン} [\text{eV/ch}] \times \text{標準偏差} [\text{ch}] \quad (3.16)$$

で評価する。

3.5.2 ゲイン

入射した X 線のエネルギーと読み出される波高値との関係である。近似的には一次関数で表すことができるが、厳密には W 値変化や ADC の非線形性などによるばらつきがある。ばらつきを含めてゲインを精度良く見積もることが必要である。

3.5.3 検出効率

入射した X 線の中で X 線として検出されたイベントの割合。低エネルギー側では空乏層までの不感層の厚み、高エネルギー側では不感層の厚みに依存する。空乏層で吸収された X 線が全て X 線イベントとして検出されたとすると、検出効率 $Q(E)$ は

$$Q(E) = \exp\left(-\int \lambda(E, l) dl\right) \times [1 - \exp(-\lambda_{\text{Si}}(E)D)] \quad (3.17)$$

と表すことができる。ここに λ は電極、絶縁層など空乏層までの不感領域の吸収係数、 l は空乏層に達するまでの光子の軌跡に沿った長さ、 λ_{Si} は Si の吸収係数、 D は空乏層の厚さである。

3.5.4 ノイズ

ノイズの原因

CCD で問題となるノイズとしては以下のものが挙げられる。

- 暗電流

素子内に入射する光子が存在しない場合でも、Si 結晶のバンドギャップを越えて電子が励起されることがある。このように蓄積される電荷を暗電流と呼び、1 ピクセルあたりに単位時間で発生する数 ($e^-/\text{pixel}/\text{秒}$) で大きさを表す。暗電流は熱励起によって生じるため、素子を冷却することで低減させることができる。SXI の場合は -110°C に冷却される。なおイベントを抽出する際にはダークレベルを差し引くので (4.3.1 節参照)、ノイズとしてエネルギー分解能を劣化させるのは暗電流のゆらぎである。

- 読み出しノイズ

信号を読み出す際に加わる素子の FET 由来のノイズと、読み出し回路由来のノイズを合わせて読み出しノイズと呼ぶ。ノイズの中では最もエネルギー分解能に影響を与える。

オーバークロックによるノイズ測定

ノイズを評価するためにピクセル数より余分に読み出す。この領域をオーバークロック領域と呼ぶ。図 3.8 に CCD の出力イメージを示した。露光を行った領域を有効画素領域 (Active

Pixel: AP)、横方向の空読み出し領域を水平オーバークロック領域 (Horizontal Overclocked Region: HOC)、縦方向のものを垂直オーバークロック領域 (Vertical Overclocked Region: VOC) と呼ぶ。

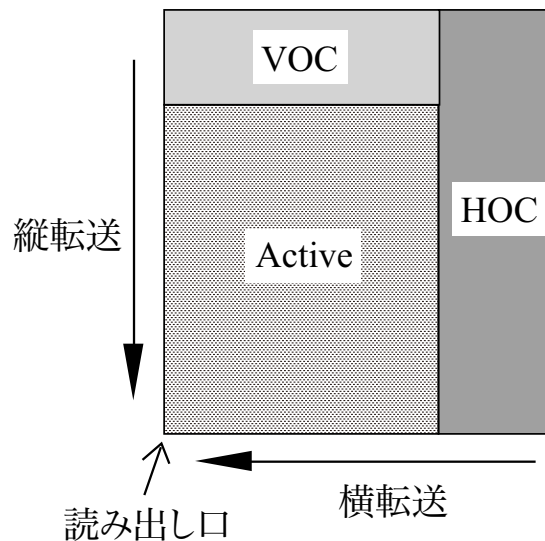


図 3.8 CCD で得られるデータにおける各領域の構成。

各領域の波高値は、読み出し電荷がない場合にもある値のオフセットが出力される。波高値のヒストグラムにはオフセットの位置にピークができ、これを 0 ピークと呼ぶ。

それぞれ HOC に含まれるノイズは横転送でのノイズ、素子の FET 由来のノイズ、読み出し回路のノイズであり、VOC には HOC に含まれるものに加えて縦転送でのノイズが含まれる。さらに有効画素領域には露光中に発生した暗電流が含まれる。

3.6 電荷転送損失

CCD における大きな問題は、製造過程や軌道上の放射線損傷によって格子欠陥などの「電荷トラップ」ができ、これによって転送中に失われる信号電荷の割合が増加することである。1 転送あたりに失う電荷の割合を電荷転送損失 (Charge transfer inefficiency: CTI) と呼ぶ。CTI により、転送回数が多いほどゲインが悪化する。さらに電荷のトラップは確率過程のため、失われる電荷量にはばらつきがあり、その結果エネルギー分解能も悪化する。Suzaku/XIS では CTI を軽減するために、電荷注入法 (Charge Injection: CI) を世界で初めて軌道上で実現した ([8], [9])。図 3.9 は、XIS のキャリブレーション前のデータにおいて、Mn $K\alpha$ の中心値と幅の時間変化をプロットしたものである。打ち上げ直後は ~ 130 eV だったエネルギー分解能が、CTI の増加により打ち上げ 1 年後には ~ 210 eV まで悪化した。しかし CI 導入によりエネルギー分解能は打ち上げ直後と同程度にまで回復した。ASTRO-H/SXI でも CI を導入する。詳細は 4.2.1 節で述べる。

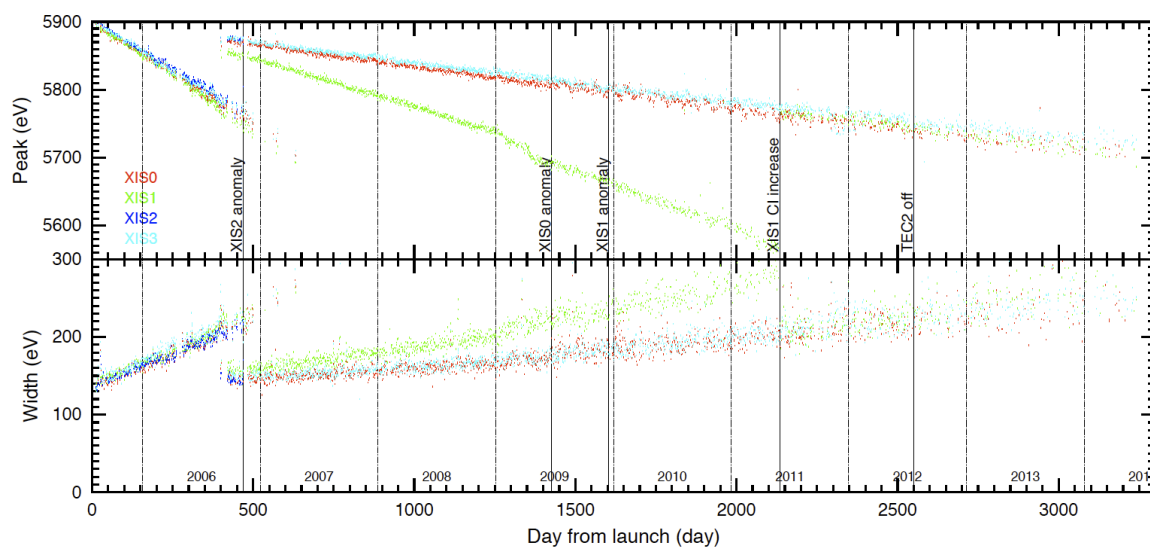


図 3.9 *Suzaku*/XIS におけるキャリブレーション前のデータの Mn $K\alpha$ の中心値と幅。2006 年 8 月 (横軸の 500 付近) に CI を導入し、ゲインとエネルギー分解能が大きく改善した [10]。

第 4 章

SXI

4.1 SXI の開発の流れ

衛星搭載機器の開発は、Bread Board Model (BBM)、Engineering Model (EM)、Flight Model (FM) の順に進められるのが一般的である。BBM は衛星開発の初期段階で製作され、設計の実現性を確認するために用いられる。EM は FM とほぼ同等のもので、地上でさまざまな試験を行って性能を確認するためのものである。機上より過酷な環境で試験する場合もある。FM は実際に宇宙に打ち上げられるもので、地上試験も行うが、EM のような過酷な試験を行わない。

SXI の場合、EM 品は 2011 年度から、FM 品は 2013 年度から製作を開始した。FM 品完成後、単体での試験を行ったのちに、2015 年 4 月に衛星に搭載した。衛星搭載後には、打ち上げ時の振動や軌道上での熱真空環境で性能が変わらないことを各種環境試験で確認した。本修士論文を書いている段階では、衛星は種子島宇宙センターに輸送され、2 月の打ち上げに向けた準備を行っている。

4.2 SXI システムの構成

SXI は SXI-S (S: Sensor)、SXI-PE (PE: Pixel processing Electronics)、SXI-DE (DE: Digital Electronics)、SXI-CD (CD: Cooler Driver) から構成される。この章では SXI に搭載される CCD 素子と、これらの構成要素について説明する。

4.2.1 CCD 素子

SXI に搭載する素子は、浜松ホトニクス社製の P チャンネル型裏面照射 CCD 素子 (PchNeXT4) である。裏面照射型を採用することによって低エネルギー側で高い検出効率を実現し、さらには *Suzaku*/XIS の軌道上での不具合の原因となったマイクロメテオライトに対しても耐性を持つ。入射面には可視光や紫外線の入射を抑制するために Al の薄膜 OBL (Optical Blocking Layer: OBL) を蒸着させている。また空乏層が 200 μm と厚く、高エネルギー側に対しても高い検出効率を確保している。

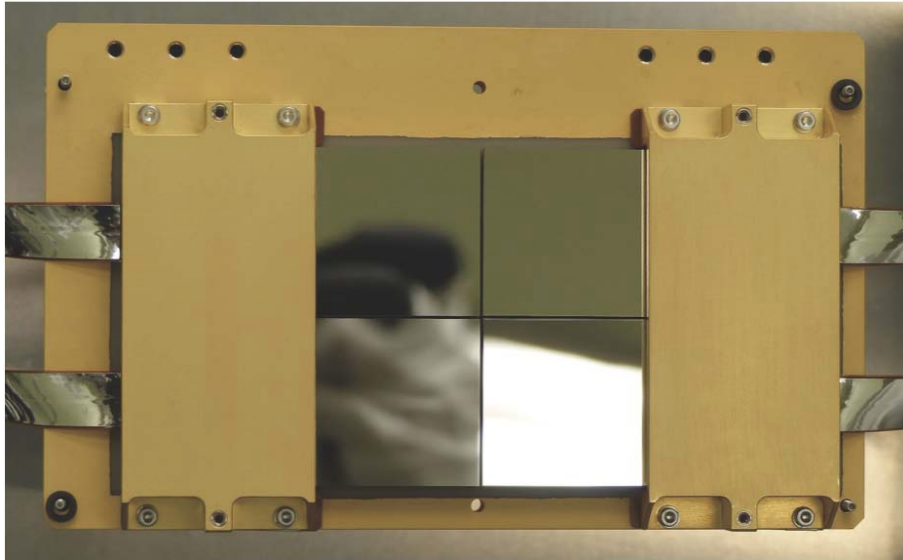


図 4.1 SXI CCD 素子。4 つの素子をモザイク状に配置している。

CCD 素子 4 枚 (それぞれ CCD, CCD2, CCD3, CCD4) をモザイク状に配置しており、その合計の撮像領域は $62\text{ mm} \times 62\text{ mm}$ の面積を持つ (図 4.1)。1 ピクセルは $24\text{ }\mu\text{m}$ 四方であるが、信号は縦方向と横方向にそれぞれ 2 ピクセルずつを加算して処理するビニングを行うことにより、実質 $48\text{ }\mu\text{m}$ 四方となる。得られる画像としては 1280×1280 ピクセルとなる。図 4.2 にビニングの駆動方式を示した。有効画素領域に蓄積された信号電荷を全て読み出すまで以下を繰り返す。

1. まず $24\text{ }\mu\text{m}$ 四方の 1 ピクセルにそれぞれ信号電荷を蓄積する。
2. 2 回連続で縦転送を行い、その 2 ピクセル分の信号電荷を横転送レジスタに加算する。
3. 読み出し口直前にある信号電荷を読み出し口に転送しないように SG をクロッキングせずに 1 回横転送を行う。
4. SG を PH1、PH2 と同期してクロッキングすることで加算した信号電荷を読み出す。このとき縦、横 2 ピクセルずつの計 4 ピクセル分が加算されて読み出される。この 3 と 4 は横転送レジスタに蓄積した電荷を全て読み出すまで繰り返される。

CCD 素子は 2 つのセグメントから構成されており、各セグメントに 2 つずつの読み出しノード (A と B, C と D) がある。動作時には 2 つのノード (A or B, C or D) のみを使用する。図 4.3 に SXI での CCD 素子の配置と、用いられる座標の関係を示した。この図は SXI を上から見下ろした時の配置となっている。RAW 座標はセグメント毎に定義されており、撮像領域のピクセルに対して読み出された順番につけられる。ACT 座標は CCD の撮像領域に対して定義される。RAW 座標とは異なり読み出し方向によらない。DET 座標は実際の CCD 素子の物理的な配置に対応した座標であり、4 枚の素子に共通の座標となっている。

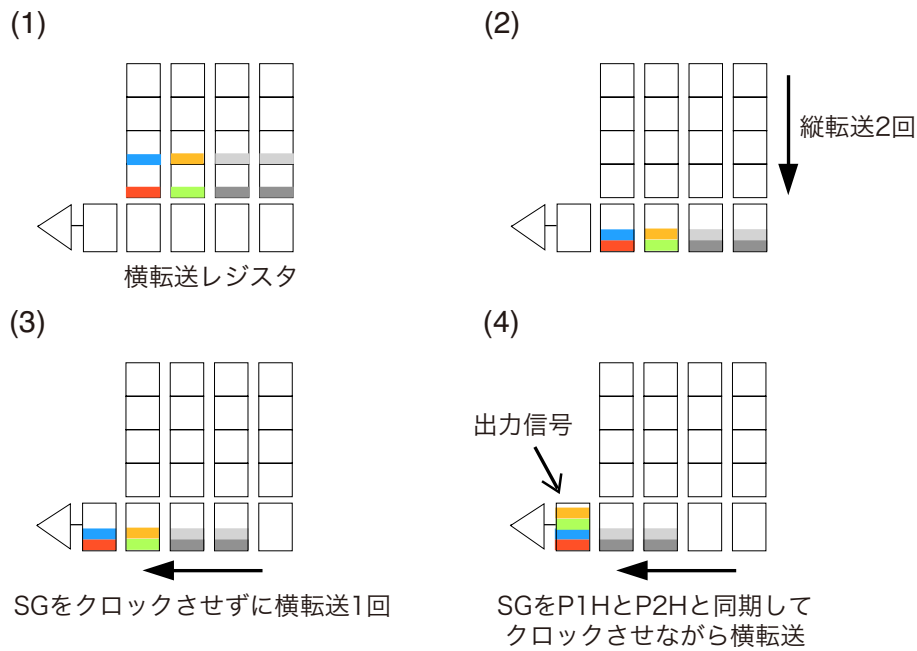


図 4.2 2 × 2 pixel binning の駆動方式

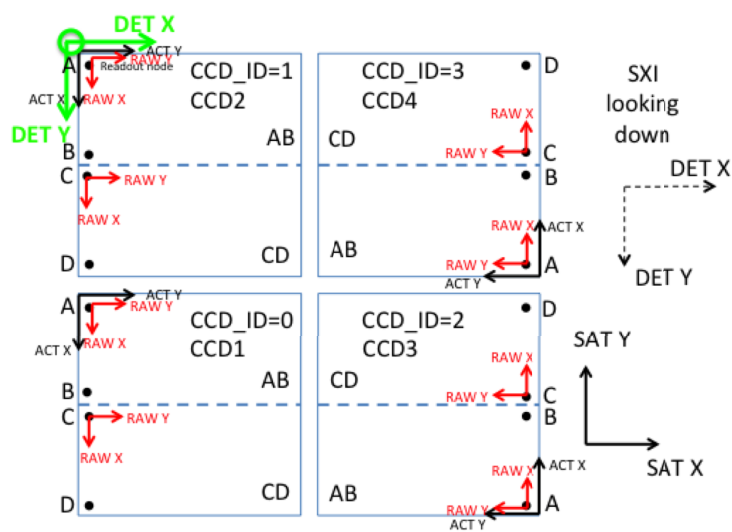


図 4.3 SXI における座標付け [12]

電荷注入機能 (CI)

3.6 節でも述べたように、SXI では電荷転送損失 (CTI) を改善させるために、XIS で導入された電荷注入法 (CI) を採用する。CI では、各列の先頭にあるシリアルレジスタによって、犠牲電荷をあらかじめあるピクセルに注入する。SXI では RAWY=0 行目に注入し、そのあとは 80 行おきに 1 行ずつ注入する。注入された電荷は転送時にトラップを埋めるので、後続の信号電荷はトラップされることなく転送され、CTI の影響が軽減する。しかし CI は同時に別の問題を引き起こす。CI でトラップを埋めた犠牲電荷は後続電荷の転送中にあるタイムス

ケールで離脱し、離脱後は信号電荷がトラップに捕らえられる。このために、電荷注入行から遠ざかるにつれて CTI が悪化し、ゲインも注入行から遠ざかるにつれて悪化する。図 4.4 は SXI の EM 素子での試験結果である。灰色で示した CI-off のデータに比べて、黒色の CI-on のデータはゲインもエネルギー分解能も改善しているが、CTI が電荷注入行から遠ざかるにつれて悪化するため、波高値分布が「のこぎり型」になっている。このようなゲインの場所によるばらつきは、入射 X 線のエネルギー決定精度とエネルギー分解能を悪化させるため、補正する必要がある。

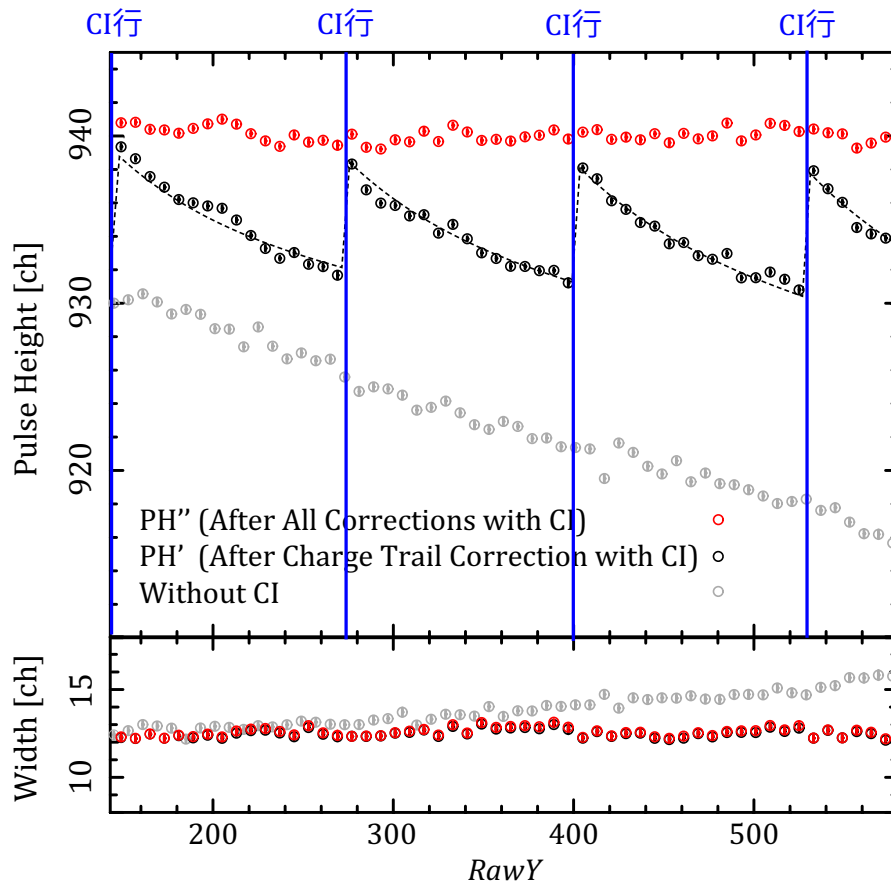


図 4.4 SXI EM 素子における Mn K α の波高値と幅。灰色と黒色のデータはそれぞれ CI-off、CI-on のとき。この実験では 128 行おき (RAWY = 144, 272, 400, 528) に電荷を注入した。黒色の点線はフィットしたモデル (本文参照)。赤色のデータは、フィットしたモデルを用いて黒色ののこぎり型の波高値分布を補正した結果 [11]。

信号電荷が CTI の影響を受けるのは、(1) 撮像領域から蓄積領域に転送する際の高速縦転送、(2) 蓄積領域内で転送する際の低速縦転送、(3) シリアルレジスタで読み出す際の横転送の時である (図 3.6 参照)。(3) はいま無視できるくらい小さいと仮定して (1) と (2) を考える。犠牲電荷が全く注入されない場合 (CI-off) の CTI を c_{f0} 、犠牲電荷がトラップと出会ったときにトラップを埋める確率を p_f 、犠牲電荷がトラップを埋めてから再放出されるまでの典型的な転送回数を τ_f とすると、CI 行から ΔY 行離れたピクセルにある信号電荷が、(1) の過程で受ける CTI (c_f) は、下記のような周期的なのこぎり分布で表される。

$$c_f = c_{f0} \cdot \left\{ 1 - p_f \cdot \exp\left(-\frac{\Delta Y}{\tau_f}\right) \right\} \quad (4.1)$$

(2) の場合の CTI (c_s) も同様に、

$$c_s = c_{s0} \cdot \left\{ 1 - p_s \cdot \exp\left(-\frac{\Delta Y}{\tau_s}\right) \right\} \quad (4.2)$$

と表すことができる。 c_{s0} 、 p_s 、 τ_s はそれぞれ、CI-off の場合に (2) の過程で受ける CTI 量、低速縦転送時に犠牲電荷がトラップを埋める確率と再放出される典型的な転送回数である。入射 X 線でできた信号電荷は、入射位置によって (1) と (2) の転送回数が異なる。Full window mode では、高速縦転送回数は座標によらず 640 回で、低速転送はイベントが検出された ACTY 座標 (Y) と一致する。よって読み出される波高値 PHA' と真の波高値 PHA(0) との関係は以下の式で表される。

$$\text{PHA}' = \text{PHA}(0) \cdot (1 - c_f)^{640} \cdot (1 - c_s)^Y \quad (4.3)$$

図 4.4 に示すように、このモデルは EM 素子の「のこぎり型」波高値分布を再現した (図中の黒色の点線)。さらにフィットしたモデルを用いて、読み出した波高値 PHA' を真の波高値 PHA(0) に変換すると赤色のデータになる。この変換を CTI 補正と呼ぶ。CTI 補正後のデータのゲインのばらつきは、補正前の ~0.5% から ~0.1% に改善した。

観測モード

SXI の観測モードを大きく分けると、Full window mode、1/8 Window mode の 2 種類がある。通常は Full window mode が使用される。

Full window mode

CCD 全面を読み出すモードであり、1 回の撮像での露光時間が 4 秒となっている。

1/8 Window mode

光軸を含む CCD の縦 1/8 に対応する狭い領域のみを読み出すモードであり、Full window mode の 1/8 の露光時間となる 0.5 秒で撮像することができる。観測できる視野は狭くなるが、明るいポイントソースに対してはパイルアップを減らすことができる。1/8 Window mode の駆動方式を図 4.5 に示す。

4.2.2 SXI-S

SXI-S は SXI の主要部であり、カメラボディとアナログ回路、機械式冷凍機から構成されている。図 4.6 に全体の構造を示している。中心部がカメラボディ (SXI-S-BDY) であり、この中に CCD 素子がある。SXI-S-BDY は放射線耐性のために厚さ 10–35 mm のアルミニ

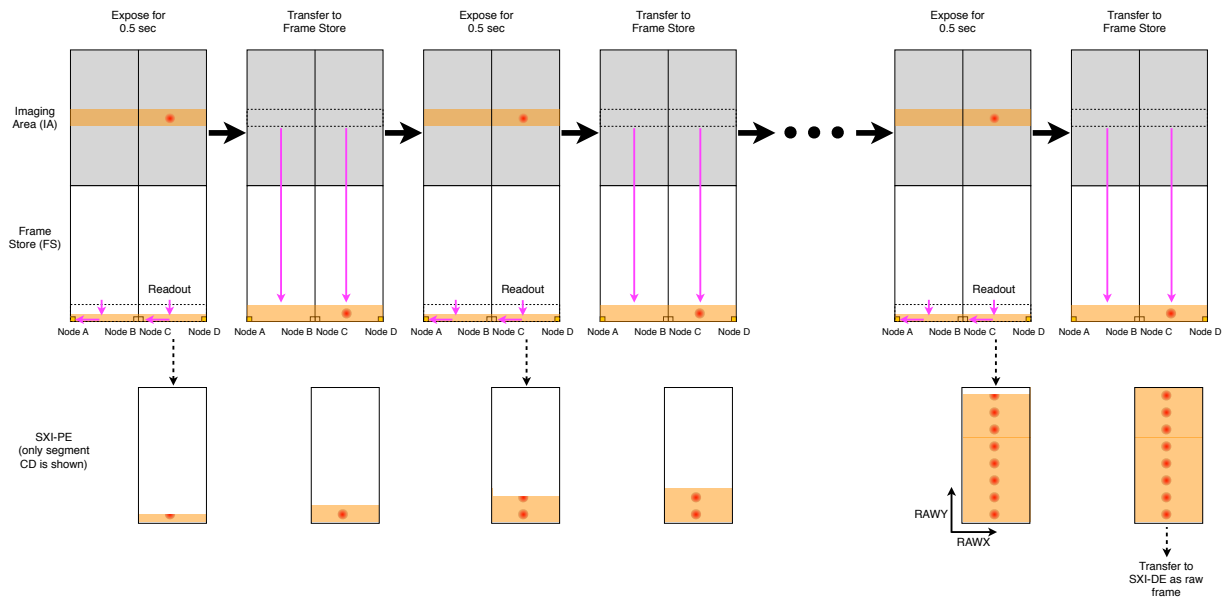


図 4.5 1/8 Window mode の駆動方式模式図 [12]。

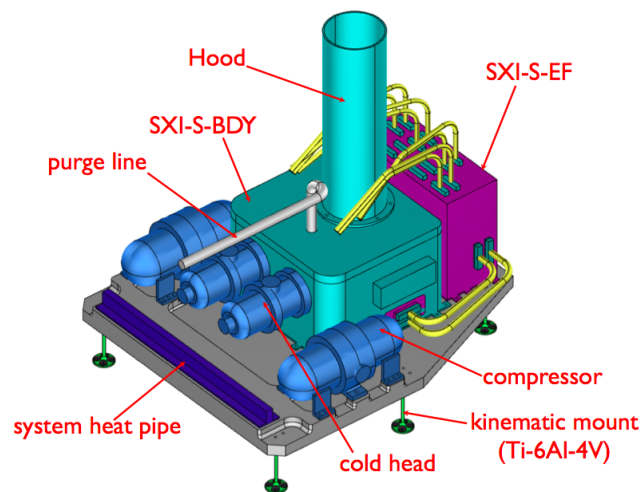


図 4.6 SXI システムの概観 [7]

ウムが使用されている。その内壁をニッケル下地の上に金コーティングすることで、Al-K 蛍光輝線を抑え、また CCD 素子への輻射熱流入を抑えている。

アナログ回路はドライバーボードとビデオボードの2つで構成されている。ドライバーボードは SXI-S-BDY の隣に配置される SXI-S-FE に4枚格納される。SXI-PE からの信号を受け、CCD の駆動のためのアナログ信号を出力し、SXI-S 各部の電圧、温度などの HK 情報の取得を行う。また CCD 素子の温度制御のためのヒーターの制御も行う。ビデオボードは CCD 素子からの微弱なアナログ出力を増幅し、デジタル信号へと変換して出力する。CCD

出力信号への雑音混入をできるだけ防ぐために SXI-S-BDY 内に置くが、ビデオボードからのアウトガスが CCD 素子に付着することがないように CCD 素子とは部屋で区切られている。

SXI では CCD の放射線損傷による劣化の性能への影響を抑制するため、1 段式スターリング冷凍機を使用して素子を -120°C まで冷却する。冷凍機による発熱はヒートパイプを経由して衛星外部のラジエーターで排熱される。冷却性能としては 1 台で十分であるが、待機冗長のために 2 台搭載される。

4.2.3 SXI-CD

SXI-CD は衛星のサイドパネルに置かれ、冷凍機の制御を行う。

4.2.4 SXI-PE

SXI-PE は FPGA を搭載したデジタル基板 MIO (Mission I/O) ボードと電源ユニットから構成される。ここではデータ処理の一部をハードウェアで高速処理する。CCD 駆動のための信号を SXI-S-FE に送り、デジタル信号に変換されたイメージデータを受け取る。そのイメージに対してダークレベルの補正を行った後に X 線イベント候補を判定し、SXI-DE に転送する。さらに SXI-S への電源供給や、ヒーター制御の司令についても担当する。

4.2.5 SXI-DE

SXI-DE は衛星搭載用のコンピュータであり、SXI のシステム制御と SXI-PE では行わない処理をソフトウェアで柔軟に行う。SXI-PE で判定されたイベント候補の全てが地上の解析に必要な X 線イベントではなく、CPU 処理負荷およびテレメトリ量の制限から、地上に下ろすイベントをさらに選別する必要がある。SXI-DE では SXI-PE へデータ収集の司令を出し、受け取った X 線イベント候補から X 線の情報を選別する機能を持つ。さらに HK 情報や CCD の温度情報の収集、ヒータ制御に必要な演算などもここで行う。

同時に SXI の衛星全体に対するインターフェイスとしても機能し、ASTRO-H の SMU (Satellite Management Unit) や記憶装置 DR (Data Recorder) と繋がっている。

4.3 SXI でのデータ処理

CCD では撮像と分光を同時に行うことができる。入射した X 線の情報を正確に知るためには、読み出される電荷量を正確に測定する必要がある。特に入射 X 線によって生成される電荷雲が複数のピクセルに広がる場合には、その電荷量を復元するために適切なデータ処理が必要となる。SXI では PE, DE によって以下の流れに沿ってデータ処理を行う。

1. CCD から得られる各ピクセルの信号波高値からダークレベルを計算し、差し引く
2. イベント候補を抽出する
3. Grade を判定し、波高値を算出する

4.3.1 ダークレベルの計算

CCD の各ピクセルは X 線が入射していない場合にも、ノイズとあらかじめ CCD に与えるオフセットを出力する。この波高値をダークレベルと呼ぶ。CCD の出力波高値は入射 X 線によるものとダークレベルの合計で表わされるため、X 線の信号を取り出すためにはダークレベルを適切に見積もり、出力波高値から差し引かなければならない。このダークレベルは各ピクセル、各フレームで変動するため、各ピクセルに対するダークレベルを毎フレーム見積もる必要がある。以下ではピクセル波高値を用いてダークレベルを計算する方法を説明する。

計算に必要となるパラメータ

1. darkUpper, darkLower

ダーク値の上限と下限を設定する。2 フレーム目以降のダーク値の計算の際に、ピクセル波高値がこの範囲内であるものだけをダーク値の計算に使用する。

2. lastHUC, marginHUC

ノイズの評価には、横転送の空読み出しの領域である HUC 領域の情報を用いる。lastHUC は最後の HUC 領域の値である。HUC 領域には X 線イベントは検出されないため、有効撮像領域のピクセル波高値が lastHUC よりも低い場合には、ダーク値の計算の際にそのピクセルを以上と判断する。実際には電気的なノイズの影響等で HUC 領域のピクセル値が変化する可能性があり、その場合は上記の見積もりを誤ってしまう。そこで marginHUC というパラメータを導入し、閾値を lastHUC−marginHUC とすることでオフセットの不一致を緩和している。

3. historyParam

ダーク値の時間変化に履歴を持たせ、計算時に重み付けをするパラメータである。

● 1 枚目のフレームに対する処理

1 枚目のフレームは各ピクセルの波高値 (rawValue) を用いてダークの計算を行う。

$$\text{newDarkValue8} = 8 \times \begin{cases} \text{rawValue} & (\text{rawValue} > \text{lastHUC} - \text{marginHUC}) \\ \text{lastHUC} & (\text{rawValue} \leq \text{lastHUC} - \text{marginHUC}) \end{cases}$$

● 2 枚目以降のフレームに対する処理

1 枚目で求めたダーク値を用いてダークを差し引いたピクセル値 imgValue をオフセット iframeoffset を用いて

$$\begin{aligned} \text{imgValue8} &= \text{rawValue} \times 8 - \text{darkValue8} \\ \text{imgValue} &= \text{imgValue8} \div 8 + \text{iframeoffset} \end{aligned}$$

(4.4)

で定義する。

2 枚目以降のダーク値はこの値を条件として、

$$\text{newDarkValue8} = 8 \times \begin{cases} \text{darkValue8} & (\text{imgValue8} > \text{darkUpper} \times 8) \\ & \text{イベントなので使用しない} \\ \text{darkValue8} & (\text{imgValue8} < \text{darkLower} \times 8 \text{ かつ} \\ & \text{rawValue} \leq \text{lastHUC} - \text{marginHUC}) \\ & \text{ピクセル値異常} \\ \text{rawValue} \times 8 & (\text{imgValue8} < \text{darkLower} \times 8 \text{ かつ} \\ & \text{rawValue} > \text{lastHUC} - \text{marginHUC}) \\ & \text{旧ダーク値異常} \\ \text{darkValue8} + \frac{\text{imgValue8}}{\text{historyparam}} & (\text{darkLower} \times 8 \leq \text{imgValue8} \leq \text{darkUpper} \times 8) \\ & \text{ダーク値のアップデート} \end{cases}$$

と計算される。この計算で求められた imgValue を元にして X 線イベントの解析を行う。

4.3.2 イベントの抽出

電荷が電極に到達した時に 1 ピクセル以内に収まっている場合、そのピクセルの電荷を測定すれば入射 X 線のエネルギーを正確に得られる。一方で電荷が隣接するピクセルに広がっていた場合には、それらの電荷を足し合わせる必要がある。他にも軌道上では X 線以外にも高エネルギーの荷電粒子によるイベントがある。この荷電粒子は空乏層を透過し、中性領域で光電吸収を起こす可能性があるが、中性領域は電場が弱く、電極に到達するまでに時間がかかってしまう。その結果電荷雲は大きく広がる。このようなイベントをデータ処理の段階で除去し、X 線イベントだけを抽出する必要がある。その方法として SXI では Grade 判定法を採用する。

Grade 判定

イベントの周囲 5×5 ピクセルの電荷分布を図 4.7 に分類し、識別する。

1. Event threshold lower, Event threshold upper を決め、lower から upper の範囲内の波高値のピクセルをリスト化する。このピクセルの周囲 5×5 ピクセル以内で波高値が最大の場合、これをイベント中心とする。
2. イベント中心の周囲 5×5 ピクセルの波高値が Split threshold を越えると、そのピクセルには中心から電荷が漏れだしたとみなす。
3. Split threshold を越えたピクセルの配置から図 4.7 に従って Grade を判定する。
4. 判定された Grade に従って波高値を計算する。これを入射 X 線の波高値とする。

SXI で用いられる方式では Grade 0,2,3,4,6 を X 線イベント、それ以外を非 X 線イベントとみなす。それぞれを Good Grade, Bad Grade と呼ぶ。本修士論文では Grade 8,9,10,11 を Grade 7 として処理した。

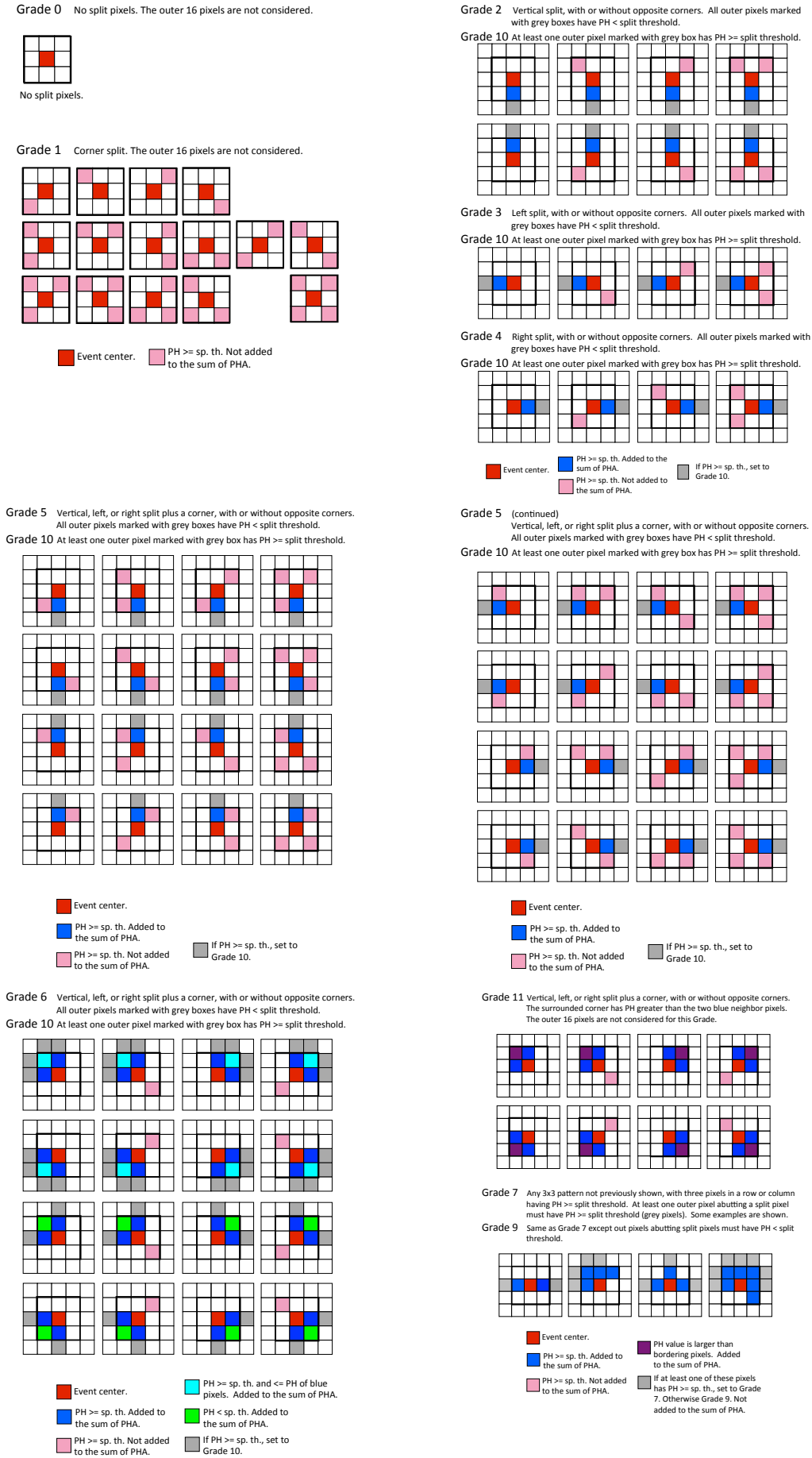


図 4.7 Grade の分類。Grade 0,2,3,4,6 を X 線イベントとみなす。本論文では 8 以上の Grade は全て Grade 7 として処理した。(Soft X-ray Imager (SXI) and Soft X-ray Telescope (SXT-I): Instrument Description and Data processing)

4.4 SXI における較正

打ち上げ後に天体からのデータを解析するには、検出器から出てくるデータを元の X 線のエネルギーやフラックスに変換する較正作業が必要である。そのためには事前に検出器の性能や特性を測定しておく必要がある。例えば CCD で受けた X 線イベントの数を天体のフラックスに変換する際には、検出効率の情報が必要である。他にも SXI の CCD 素子に関する較正に必要な情報として、エネルギー分解能、エネルギーゲイン、グレード分岐比、電荷トレイル、CTI、単色・連続 X 線応答、hotpixel や bad column の位置、素子間の隙間、暗電流、可視光・紫外線阻止能が挙げられる。こうした情報のうち地上で取得できるものについては、打ち上げ前にすべて取得しておく必要がある。

SXI として較正で達成すべき要求値を表 4.1 にまとめた。

表 4.1 SXI の要求性能

	要求値
エネルギー分解能	200 eV (FWHM@5.9 keV)
ゲインのばらつき	0.1 %
有効面積の一様性	5 % (望遠鏡との組み合わせ)

実際に出力された波高値を入射 X 線のエネルギーと対応させるために、以下の順番で較正を行う (図 4.8 下段)。

1. even/odd 補正

SXI では偶数行 (even) のピクセルと奇数行 (odd) のピクセルを 2 つの ADC で独立に処理するためゲインが異なっており、even/odd 間でゲインを調節する。

2. trail 補正

電荷が転送中にトラップされる現象で、CTI よりも再放出されるまでの時間が短いものを電荷トレイルと呼ぶ。後ろの行に漏れだした電荷を再構成する。

3. CTI 補正

CTI を補正し、読み出された電荷量から真の電荷量を決定する。

4. Grade 判定

5.2.1 節で述べた手順で Grade 判定し、X 線イベントを抽出する。

5. ゲイン補正

求められた波高値を入射 X 線のエネルギーと対応づける。

この一連の補正の後に検出効率の補正を行い、入射 X 線のフラックスを決定する。

SXI pipeline process

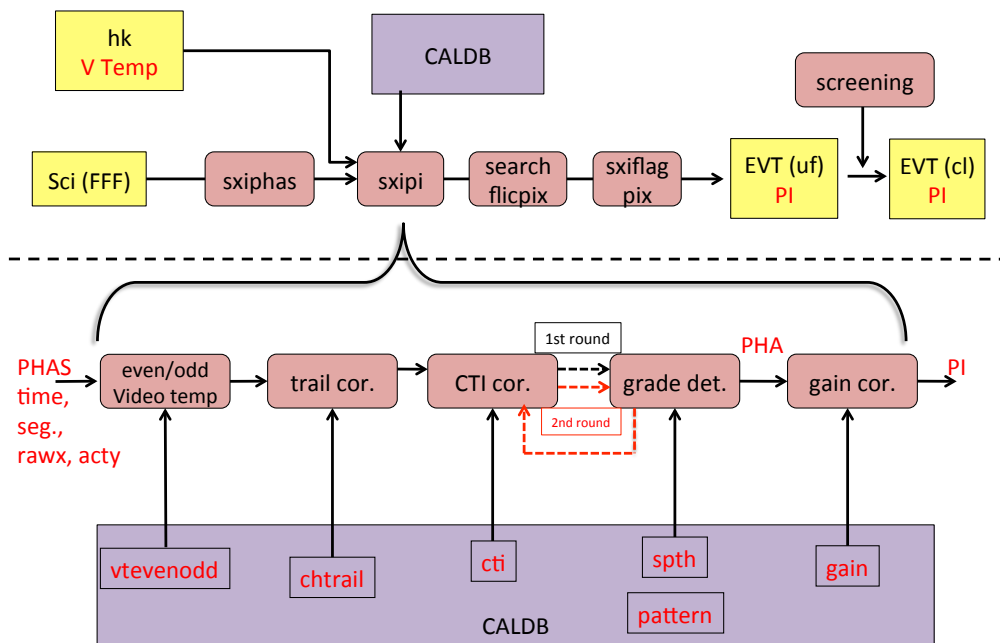


図 4.8 SXI におけるデータプロセス。6 章で扱うのは下段 CTI cor 以降である。

4.5 本修士論文の目的と手段

図 4.8 の下段のうち、even/odd 補正、taril 補正までの方法は既に確立している。本修士論文ではそれ以降の補正方法を確立することを目的とし、さらには検出効率の情報も取得する。具体的には、(1) CTI を測定し、CI によって生じるゲインのばらつきを補正し (6)、(2) CCD 素子上における検出効率の一様性を測定する (7 章)。

そのために FM カメラシステムの地上較正試験を行った。それに加えて、FM カメラを用いた機能試験のデータも解析に用いた。解析には全て even/odd 補正、電荷トレイル補正がされたデータを使用した。なおパラメータ決定の際のフィッティングの誤差は全て 1σ とした。

第 5 章

FM 素子の地上試験

5.1 FM 較正試験のセットアップ

SXI の FM 品を用いた較正試験を 2014 年 8 月から 9 月にかけて京都大学宇宙線研究室内クリーンルームで行った。図 5.1 は実際の試験時のクリーンルーム内の写真であり、右には SXI-S、左にはデータ取得に用いるエレクトロニクスがある。

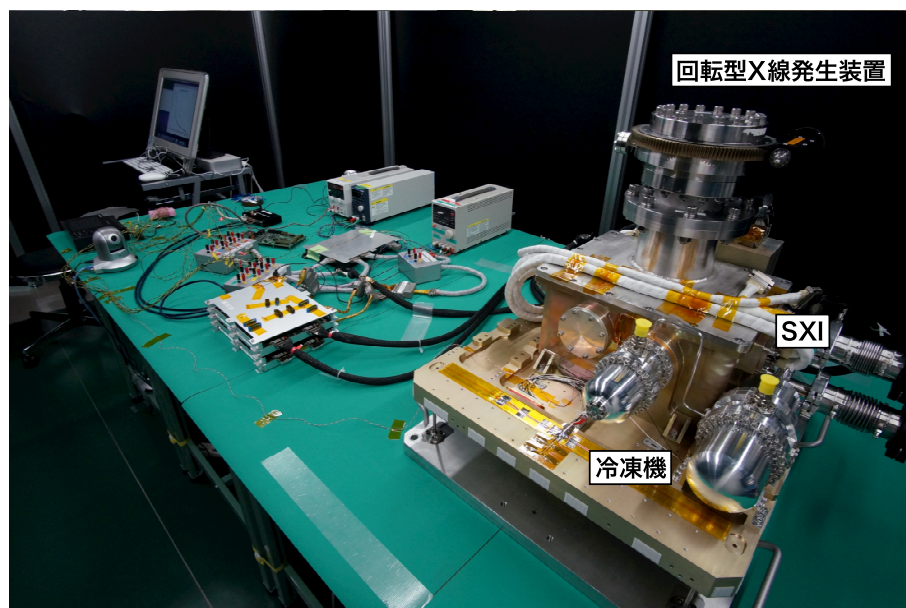


図 5.1 FM 較正試験のセットアップ

FM 較正試験では、連続成分が低く、さまざまなエネルギーの輝線状の X 線を出すような X 線発生装置が必要である。また FM 素子に当てても安全のように、高圧を使うことは避けたい。我々はこれらの性能を満たす回転型 X 線発生装置を開発した (図 5.1)。回転型 X 線発生装置の断面図を図 5.2 に示す。基本的な原理は、1 次粒子として α 線を用い、これをターゲットに当てることで、蛍光 X 線を発生させるものである。 α 線源として ^{241}Am を用いることで、高圧を使うことなく 1 次粒子を発生できる。また、 α 線は電子よりも質量が大きいので、

で、制動放射が少ない。回転導入機により内部のターゲットを固定したステージを回転させることで、真空を破ることなくターゲットを変更し、異なるエネルギーの X 線を照射することができる。今回の試験ではターゲットとして Ge、LiF を使用し、また ^{55}Fe 較正線源も用いた (図 5.2 右、表 5.1)。

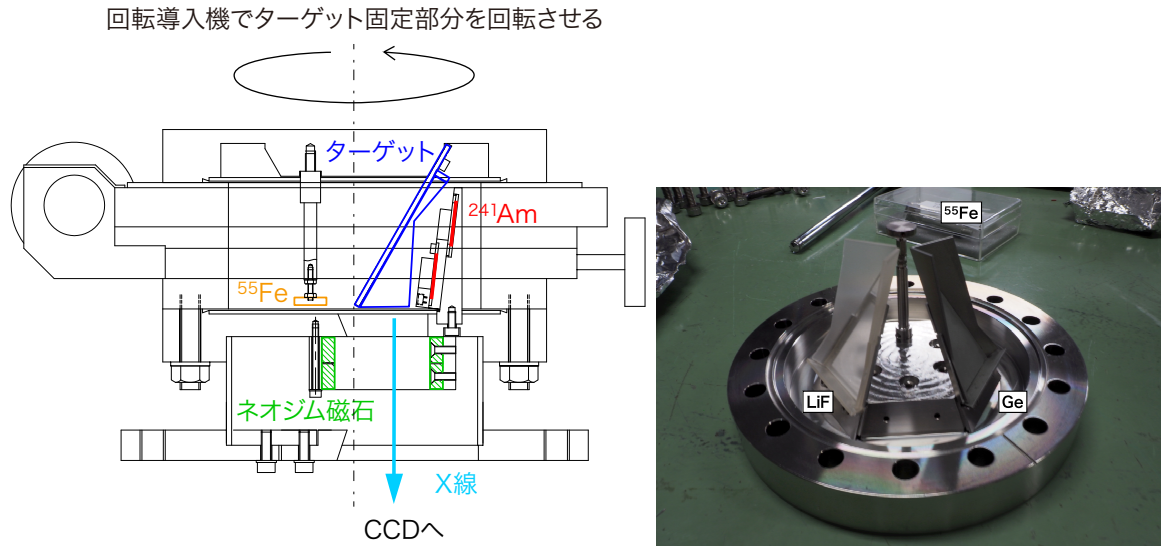


図 5.2 (左) 回転型 X 線発生装置の断面図。(右) 実際に使用したターゲット。

表 5.1 回転型 X 線発生装置で使用したターゲットと発生する蛍光 X 線

ターゲット	蛍光 X 線	エネルギー (keV)
^{55}Fe	Mn-K α	5.90
	Mn-K β	6.50
Ge	Ge-L α	1.19
	Ge-K α	9.89
LiF	Ge-K β	10.98
	F-K α	0.68

図 5.3 左に示したように、窓には磁場の強度が 1 T のネオジム磁石を設置することで、ターゲット由来の散乱電子 (エネルギーはおおよそ 1 keV) が窓を通過することを防ぎ、X 線だけが入射窓を通過して CCD に照射されるように設計してある。また入射窓と CCD 素子の位置関係は図 5.3 右のようになっており、衛星上で望遠鏡の光軸に位置する CCD2 で最もカウントレートが高くなるように設置した。

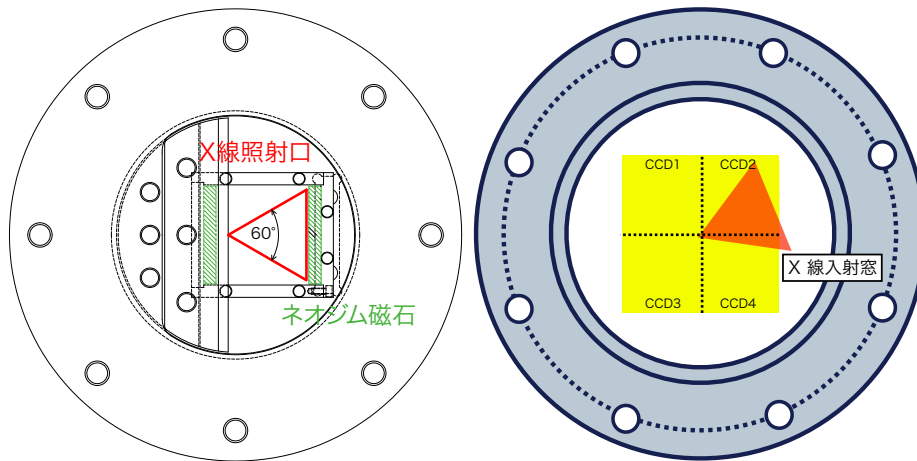


図 5.3 回転型 X 線発生装置の X 線照射口と、SXI FM 素子との位置関係 (上から見下ろした図)

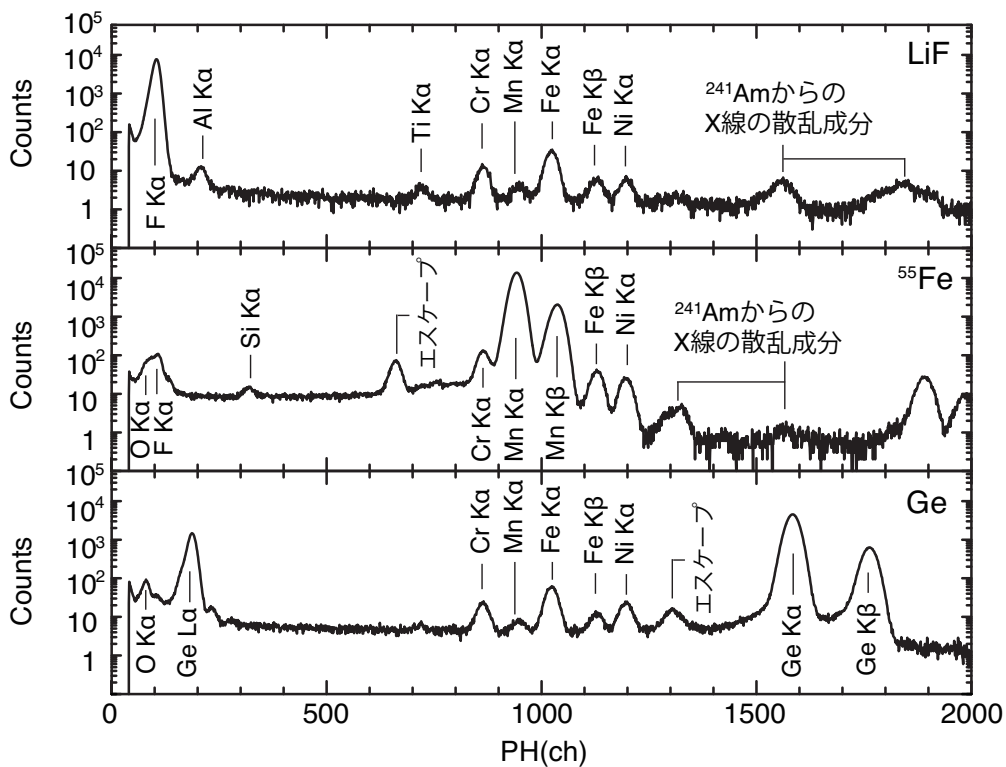


図 5.4 CCD2AB で取得した回転型 X 線発生装置の照射 X 線スペクトル

CCD2AB による回転型 X 線発生装置の照射 X 線のスペクトルを図 5.4 に示す。上から順に LiF, ^{55}Fe , Ge を導入した時のスペクトルであり、ターゲットからの輝線以外にも筐体由来の成分が見えている。

5.2 初期データ処理

取得した Full window mode のデータから、一部のピクセルで X 線イベントのカウントレートが異常に高くなる現象と、一部のピクセル行単位でカウントレートが低くなる現象が見られた。この前者をダウンバースト、後者をダウンストリームと呼び、以降の解析ではそれらを取り除いたデータを使用した。表 5.2 はダウンストリームが生じたフレームを削除したフレーム数の一覧である。CCD1, 2 に比べると、3, 4 で発生する割合が多く、統計数に 2 倍以上の差がある。ダウンストリームの除去についての詳細は [15] を参照されたい。

表 5.2 -110°C で取得した Full window mode のデータのフレーム数

ターゲット	CCD	2014年8月14日	8月15日	8月20日	合計
^{55}Fe	CCD1	6788	-	1748	8536
	CCD2	6786	-	1747	8533
	CCD3	2441	-	227	2668
	CCD4	2439	-	226	2665
Ge	CCD1	-	5543	1738	7281
	CCD2	-	5539	1737	7276
	CCD3	-	2251	695	2946
	CCD4	-	2251	695	2946
LiF	CCD1	6854	-	3648	10502
	CCD2	6849	-	3647	10496
	CCD3	2801	-	557	3358
	CCD4	2799	-	556	3355

5.2.1 ダウンバーストの除去

ダウンバーストは、あるフレームにおいてあるピクセルの rawValue が急激に減少することで、それ以降のそのピクセルのダーク値が小さくなり、常にイベントとして検出され続けてしまうことで起こる。そこでセグメントごとにカウントマップを作成し、その頻度分布を求めポアソン分布を外れたピクセルをダウンバーストと定義する。測定日ごとのカウントマップから、ダウンバーストと定義する頻度閾値を表 5.3 に示した。CTI の評価ではダウンバーストピクセルのみを除去したデータを用いた。

ダーク値はダウンバーストが生じたピクセルだけでなく、その周囲 3×3 ピクセルでも小さくなる。そのため、周囲の 3×3 ピクセルの波高値も高くなる。節で述べたように、SXI の Grade 判定では周囲の 5×5 ピクセルの情報を使用するため、ダウンバーストの周囲 7×7 ピクセルにおいて、真の X 線イベントが非 X 線イベントに誤分類されてしまう可能性がある。

表 5.3 今回の解析でダウンバーストを定義した頻度閾値

ターゲット	CCD	2014年8月14日	8月15日	8月20日
⁵⁵ Fe	CCD1AB	37	-	15
	CCD1CD	37	-	15
	CCD2AB	38	-	15
	CCD2CD	37	-	15
	CCD3AB	17	-	8
	CCD3CD	18	-	6
	CCD4AB	18	-	7
	CCD4CD	18	-	7
Ge	CCD1AB	-	17	10
	CCD1CD	-	16	9
	CCD2AB	-	17	10
	CCD2CD	-	19	11
	CCD3AB	-	10	7
	CCD3CD	-	11	7
	CCD4AB	-	11	7
	CCD4CD	-	11	7
LiF	CCD1AB	17	-	12
	CCD1CD	16	-	11
	CCD2AB	17	-	12
	CCD2CD	17	-	12
	CCD3AB	10	-	6
	CCD3CD	10	-	6
	CCD4AB	11	-	7
	CCD4CD	11	-	7

実際にダウンバーストの周囲 3×3 ピクセルを除いた時の Bad Grade のカウントマップを図 5.5 に示した。線り抜かれた領域の周囲に Bad Grade のイベントが集中していることが分かる。また図 5.6 は、ダウンバーストピクセルのみを除いた場合と、その周囲 7×7 ピクセルも除いた場合の Grade 分岐比を示したものである。非 X 線イベントの割合の増加はカウント数に影響を与えるため、検出効率の測定ではダウンバーストピクセルだけでなくその周囲 7×7 ピクセルを除去した。

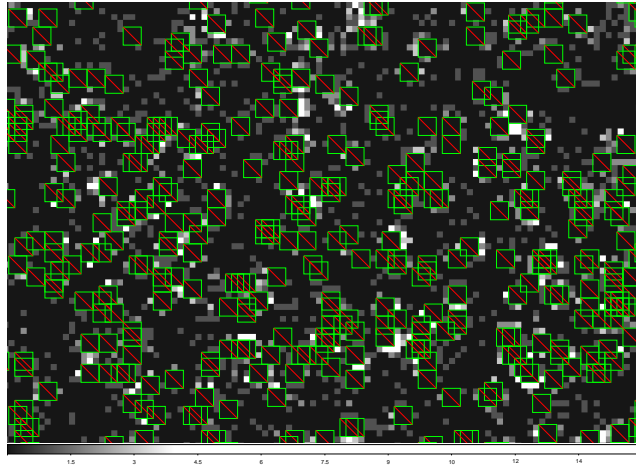


図 5.5 ダウンバーストピクセルと Bad Grade イベント分布の関係。2014 年 8 月 15 日に取得した Ge の Bad Grade のカウントマップからダウンバーストの周囲 3×3 ピクセルを除去したイメージ。取り除いた領域の周囲に Bad Grade が集中していることが分かる。

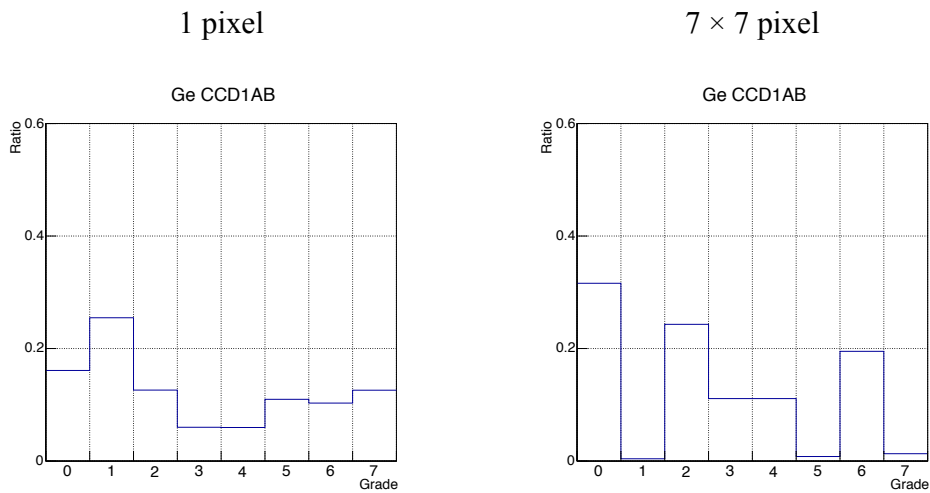


図 5.6 ダウンバーストピクセルのみを除いた時と周囲 7×7 ピクセルを除いた時の Grade 分岐比の比較。後者では、非 X 線イベントと判定された Grade 1, 5, 7 の割合が減り、理想的なグレード分岐比に近づいている。

5.3 使用するデータ

Full window mode のデータとしては、FM 較正試験で得られた表 5.2 のデータを使用した。このデータを元に CTI 補正、検出効率の測定を行った。

また CTI に関しては $1/8$ Window mode のデータ、温度を変えて取得したデータも使用する。それぞれ $1/8$ Window mode と Full window mode の転送回数の違いによる CTI への

影響を調べるため、CTI の温度依存性を調べるためである。表 5.4、5.5 にこれらのデータをまとめた。

表 5.4 $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ で取得した 1/8 Window AC 読み出しのデータのフレーム数

ターゲット	CCD	2014 年 8 月 15 日
^{55}Fe	CCD1	3594
	CCD2	3594

表 5.5 FM 素子を使用した温度が異なる試験のデータのフレーム数

温度	ターゲット	CCD	2014 年 1 月	2014 年 8 月 20 日
$-120\text{ }^{\circ}\text{C}$	^{55}Fe	CCD1	955	
		CCD2	959	
		CCD3	956	
		CCD4	957	
$-100\text{ }^{\circ}\text{C}$	^{55}Fe	CCD1	-	2666
		CCD2	-	2664
		CCD3	-	1344
		CCD4	-	1344

第 6 章

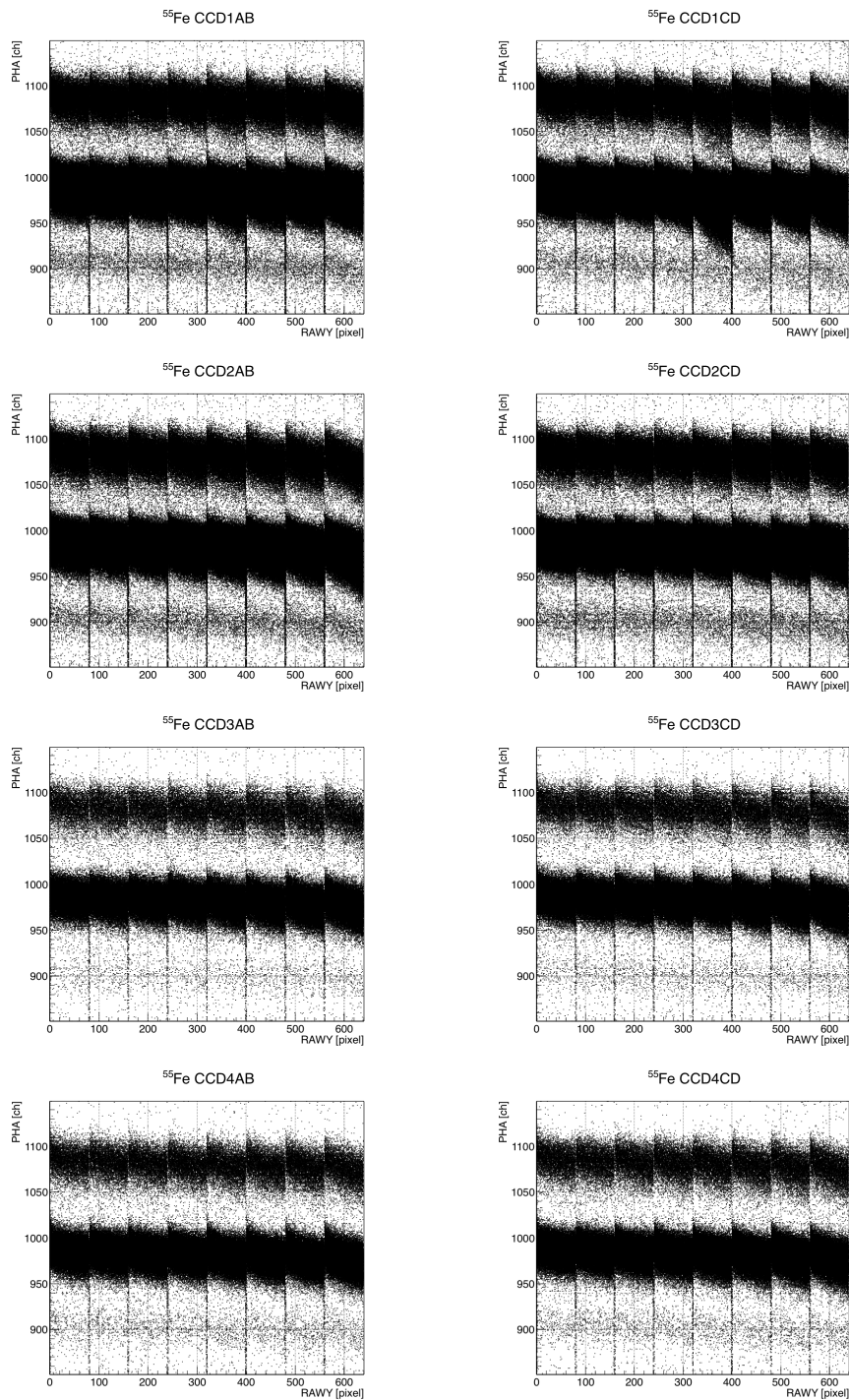
電荷転送損失の評価とゲイン補正

SXI では *Suzaku*/XIS で導入された Charge Injection (CI) を採用する。すでに 4.2.1 節で述べたように、CI はゲインの場所によるばらつきを生じさせる。本章では、まず従来のモデルで、FM 素子の波高値分布をフィットした (6.1 節)。その結果、波高値分布が従来のモデルと合わない場所があることが分かり、そうした領域では局所的に電荷転送損失 (CTI) が著しく増大すること (CTI 異常領域と呼ぶ)、暗電流の高い領域と一致することを発見した (6.2 節)。また CCD の物理的な端 (Edge 領域) でも CTI の増加が見られた。そこで、以下の手順で従来のモデルを大幅に改訂した。まず、最も標準的な観測モード (Full window mode) のデータを用いて新しい CTI 関数の構築を行う (6.3 節)。次に、手順の複雑化を避けるために電荷が 1 ピクセル内に収まったイベント (Grade 0) のみを用いて、この関数のパラメータ導出を行う (6.4.1 節)。6.4.2 節では、電荷が複数のピクセルにまたがったイベント (Grade 2,3,4,6) に関数を拡張するためのパラメータ補正方法を示す。6.4.4 節では、このようにして求めた CTI 関数を用いて、1/8 Window mode (4.2.1 節) の補正が行えるよう CTI パラメータを求めた。さらに、CTI 異常領域の原因を探るために、CTI の温度依存性について調査した (6.5 節)。

6.1 従来の CTI 関数による FM 素子での CTI の評価

図 6.1 は、2014 年 8–9 月に行った FM 較正試験時に、Full window mode で ^{55}Fe を照射した際のスタッキングプロットである。スタッキングプロットとは、すべての Grade 0 イベントの波高値と、イベントを受けたピクセルの RAWY 座標の関係をプロットしたものである。このときの CCD 温度は -110°C であった。PHA=950–1000 ch 付近に Mn $K\alpha$ 輝線、PHA=1050–1100 ch 付近に Mn $K\beta$ 輝線のイベントがある。PHA=900 ch 付近のイベントは回転型 X 線発生装置の筐体から出る Cr $K\alpha$ 輝線によるものである (図 5.4 参照)。

波高値は RAWY が大きくなるにつれて (読み出し口から遠くなるにつれて) 減少し、CI 行直後に回復する。これは、4.2.1 節で述べたとおり、CI 行の犠牲電荷がトラップを埋めることで CTI は減少するが、後続電荷の転送中に犠牲電荷は離脱し、離脱後は信号電荷がトラップに捕らえられるので、CI 行から遠ざかるにつれて CTI が再び増加するためである。また

図 6.1 ^{55}Fe を照射したときのスタッキングプロット

RAWY が大きくなるほど、CI 行から次の CI 行までの波高値減少の傾きが大きくなる傾向が見られる。これは RAWY が大きくなるほど、受ける CTI の影響が大きくなるためと考えられる。というのも、高速縦転送の回数ほどのピクセルでも 640 回である一方、低速縦転送の回数は読み出し口から遠くなるほど多くなるためである。(つまり ACTY 座標分だけ低速

縦転送される)。さらに CTI の値も高速縦転送より低速縦転送のほうが大きい [11]。つまり RAWY が大きくなるほど、低速縦転送による CTI の影響を多く受けるため、波高値減少の傾きが大きくなる。

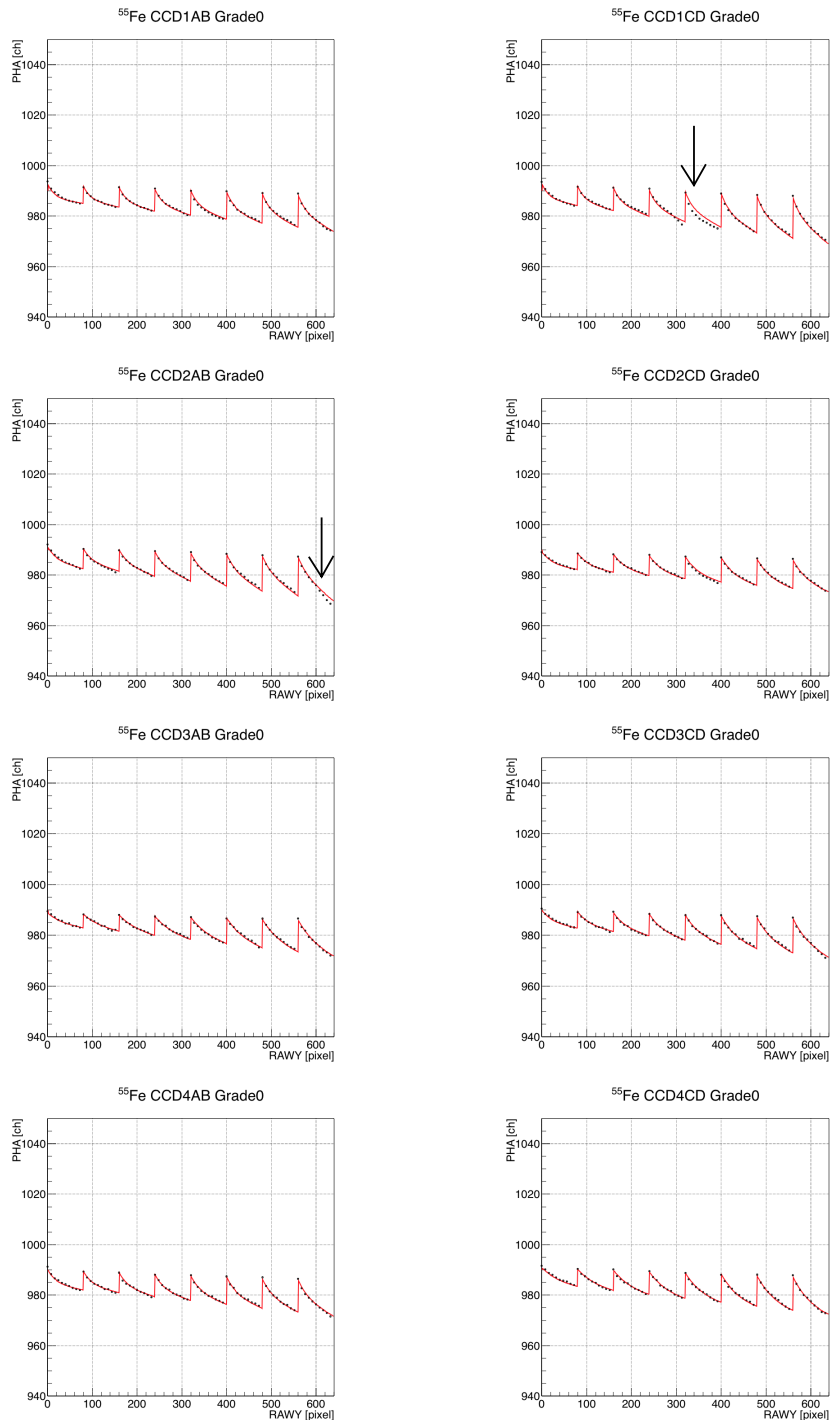


図 6.2 Mn K α の波高値の RAWY 依存性。矢印で示したところは、モデルに対してデータ点が低い値となっている。

CI を行いつつ取得したデータでは、このようなこぎり型のゲインの場所依存性を補正する必要がある。EM 素子で構築した補正モデルが、FM 素子でも有効かどうか調べるため、図 6.1 のイベントを RAWY 方向に 64 分割し、それぞれの領域で作成したスペクトルで、Mn $K\alpha$ の中心値を求めた。この波高値の中心値分布を式 4.3 を用いてフィッティングしたものが図 6.2 である。図 6.2 ではほとんどのセグメントでデータ点とモデルが良く一致しており、FM 素子においても式 4.3 で CTI の効果を説明できることが分かる。

6.2 CTI 異常領域の発見

図 6.2 をよく見ると、CCD1CD の RAWY=300–400 付近や、CCD2AB の RAWY \geq 600 においては局所的にデータ点がモデルよりも低い値となっている（図中の矢印）。この場所では、素子全面に一様に存在する電荷トラップとは別の要因で CTI が増加していることを意味する。この Mn $K\alpha$ のデータで確認された傾向は F $K\alpha$ 及び Ge $K\alpha$ のプロットでも同様に確認された。

この局所的な CTI の増加を詳しく調査するため、CCD1CD と CCD2AB で、セグメント全体を RAWX 方向に短冊状に 64 分割し、それぞれの領域について、図 6.2 と同様のプロットを作成した。すべてのプロットは付録 A を参照されたい。図 6.3 と図 6.4 には CCD1CD の、また図 6.5 と図 6.6 には CCD2AB でのプロットを、40 列ごとに抜粋したものである。

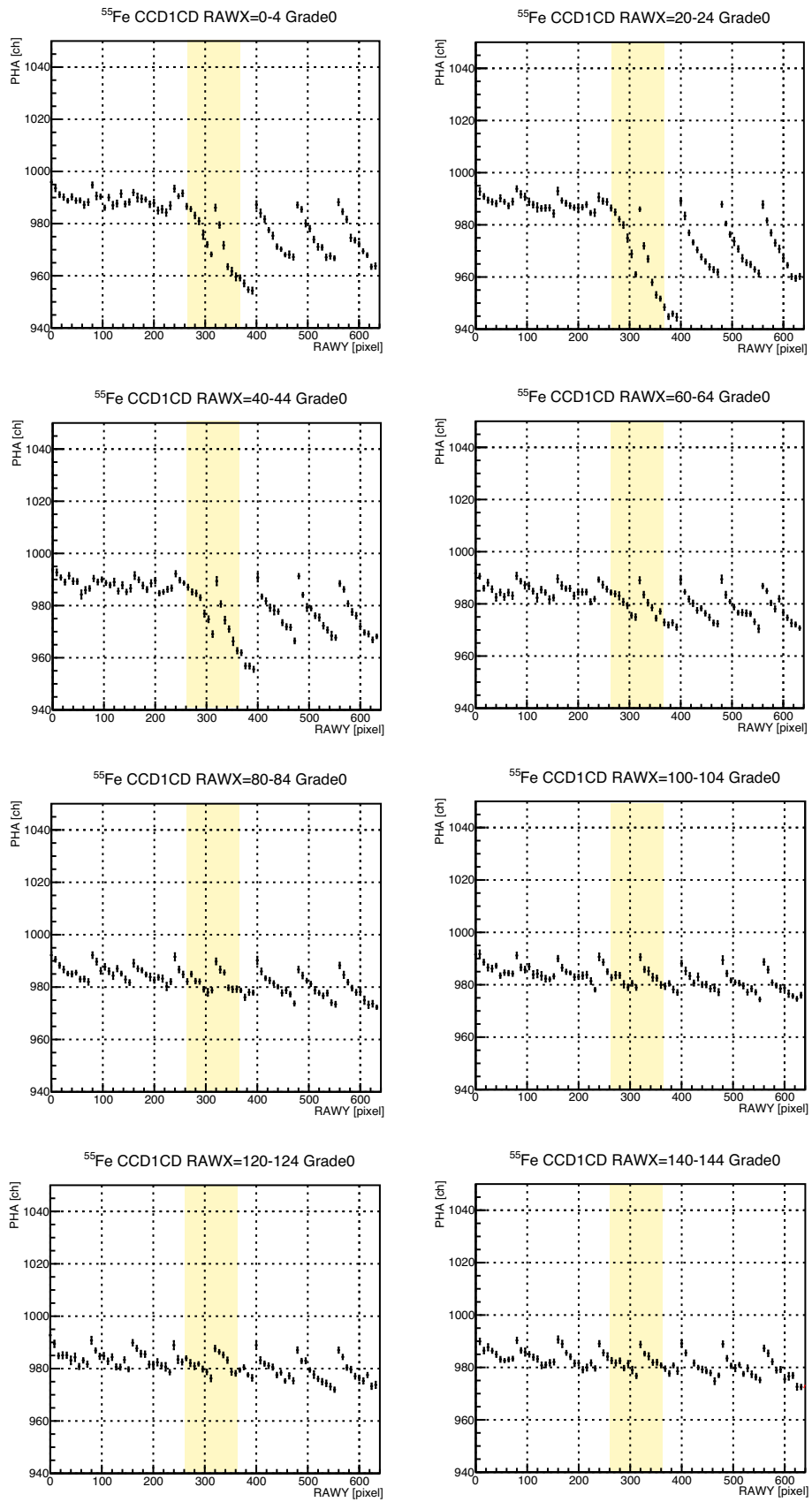


図 6.3 CCD1CD において RAWX 方向に分割した領域での、 $Mn K\alpha$ の波高値の RAWY 依存性。黄色で示した領域は、図 6.2 で局所的に CTI が増加しているのが見つかった領域の RAWY 座標の範囲。

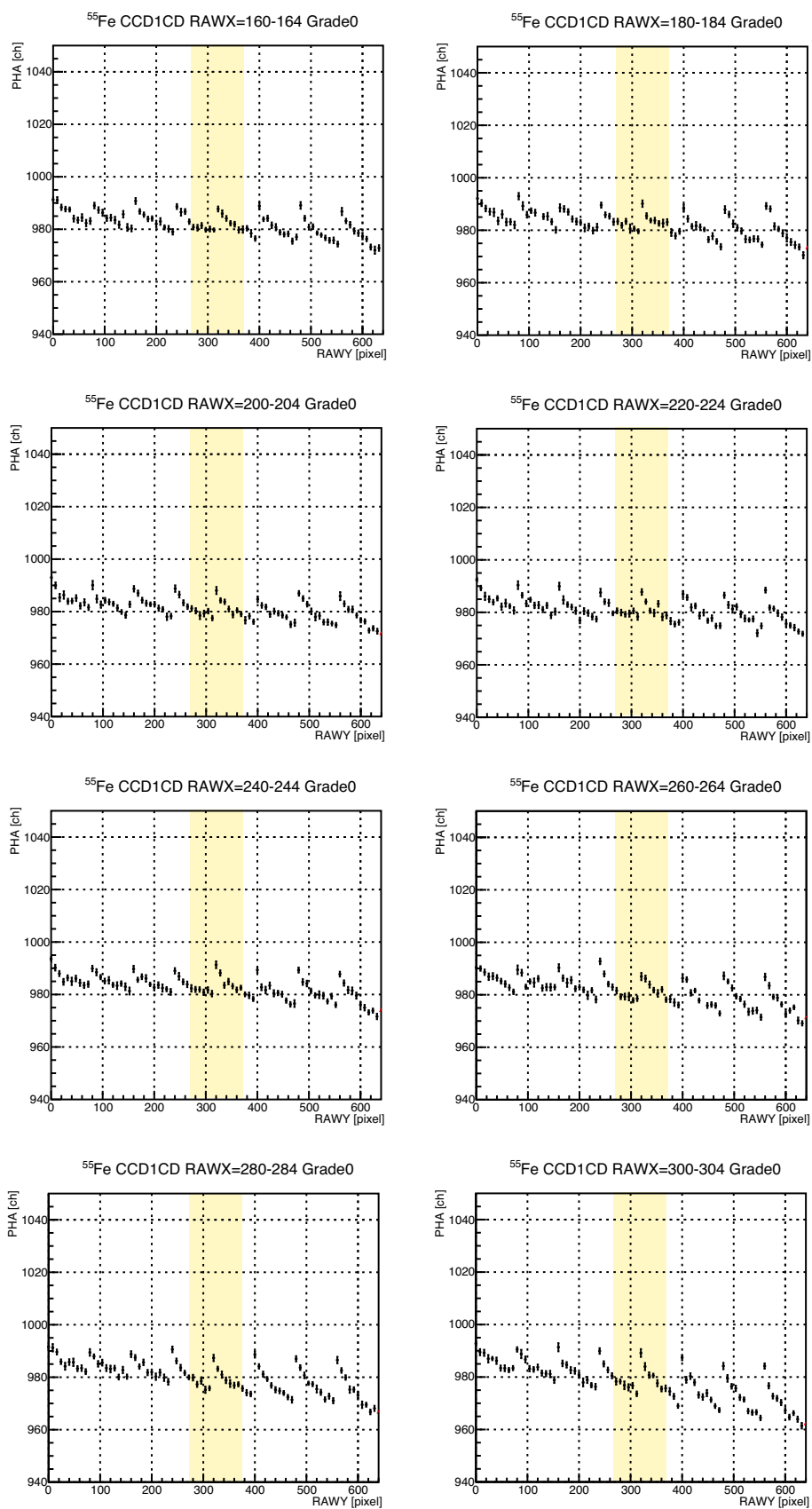


図 6.4 図 6.3 の続き。

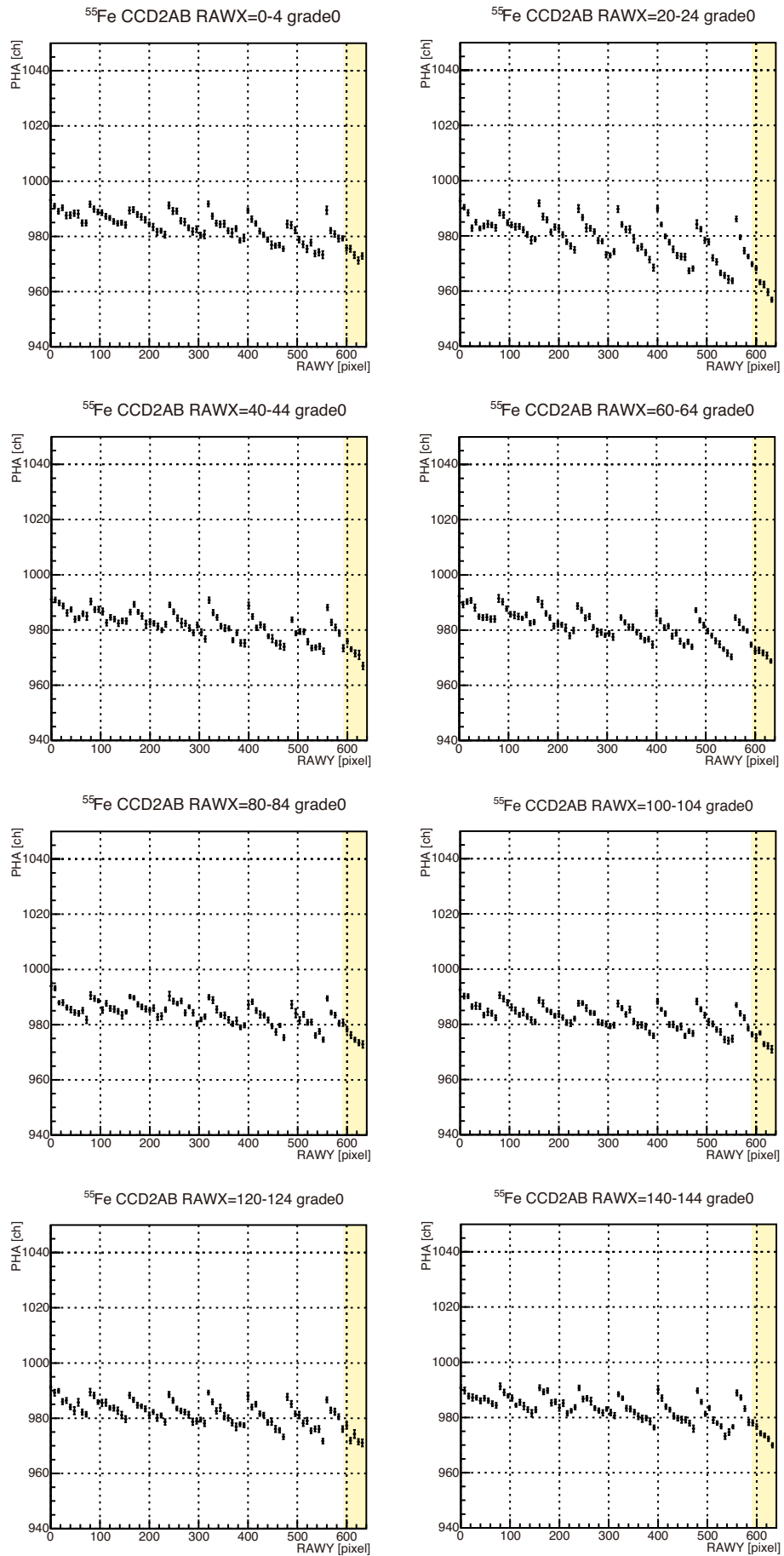


図 6.5 CCD2AB において RAWX 方向に分割した領域での、Mn $\text{K}\alpha$ の波高値の RAWY 依存性。黄色で示した領域は、図 6.2 で局所的に CTI が増加しているのが見つかった領域の RAWY 座標の範囲。

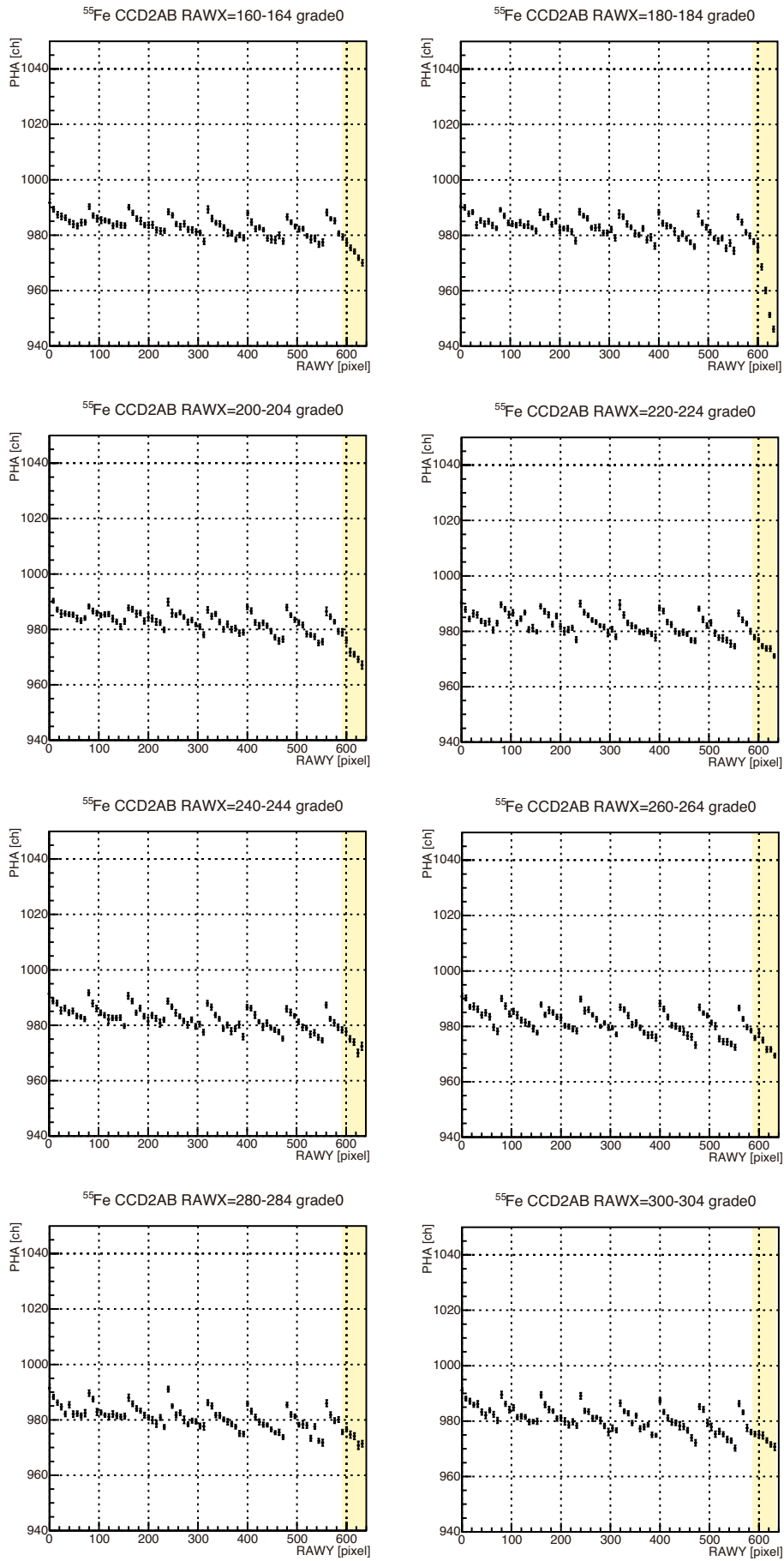


図 6.6 図 6.5 の続き。

図 6.2 で見つかった、CCD1CD の RAWY=300–400 において CTI が局所的に増加する現象は、RAWX<80 で顕著であり、それ以外の領域で著しい増加は見られない。また同様に、CCD2AB の RAWY \geq 600 での CTI 増加は、140 <RAWX< 220 で顕著である。つまり、CCD1CD と CCD2AB における CTI の局所的増加は、それぞれ、(0 <RAWX< 80, 300 <RAWY< 400) の領域と、(140 <RAWX< 220, 600 <RAWY< 640) の領域に見られる。

該当領域に異常がないかを調べるために、図 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 に示したデータを取得した際のダークイメージを作成した (図 6.7)。どのセグメントについても読み出し口に近い列ほどダークの波高値が高くなっているが、これは読み出しエレクトロニクスによる影響で、素子の状態が物理的に異なる訳ではない。しかしその効果以外に、CCD1CD と CCD2AB に波高値が周囲に比べて数十 ch 程度高くなっている輝点が見つかった。輝点の場所は、CTI が局所的に悪化している領域とほぼ一致している。さらに CCD1AB には、CCD1CD から連続しているように見える輝点があり、CCD2CD にも小さな輝点が見つかった。一方で CCD3AB/CD、CCD4AB/CD ではそのような領域は見つからなかった。

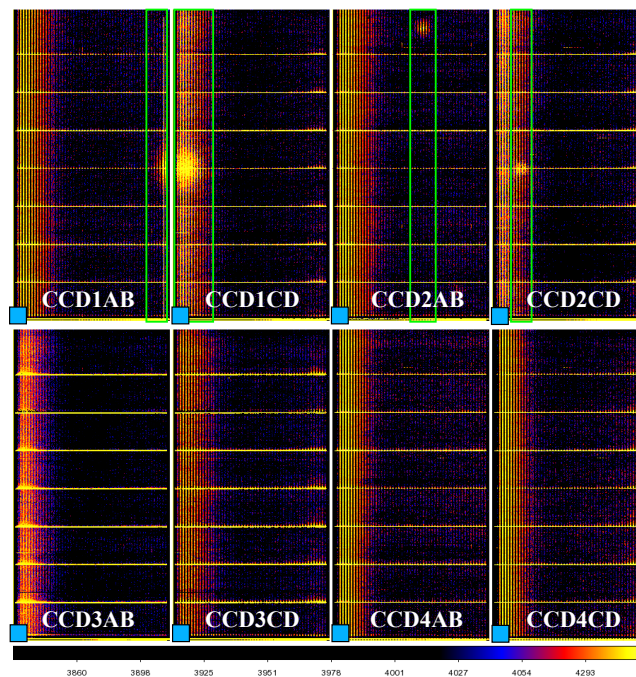


図 6.7 FM 素子を用いた試験で得られたダークフレーム。CCD1、2 に輝点が見つかり、緑の四角形で囲われた列を抽出した。水色の四角で示したのは、読み出し口の位置。

これらの輝点と局所的な CTI 悪化の相関を詳しく調査するために、図 6.7 の緑の四角形で示した、ダークイメージ上の輝点がある位置に対応する列のみを抽出し、図 6.2 と同様に、Mn K α 輝線の波高値の中心値と転送回数の関係をプロットした。図 6.8 に結果を示す。式 4.3 によるフィット結果を赤線で表示しているが、輝点に対応する位置では波高値が著しく減少しており、従来の CTI 関数では説明できない。セグメント全体のプロット (図 6.2) では、CCD1AB と CCD2CD に異常は見られなかったが、このように領域を分割すると、輝点

に対応するところで CTI が局所的に増加していることが分かる。以上より、CCD1AB/CD と CCD2AB/CD で見られるダークイメージでの輝点と、局所的な CTI 増加は相関していると考えられる。また、図 6.3 の CCD1CD のプロットを見ると、輝点のある座標より RAWY が大きい領域でも CTI が増加しており、輝点より RAWY 座標が小さいときの CI 行間に比べると「のこぎり」分布の傾きが大きくなっている。

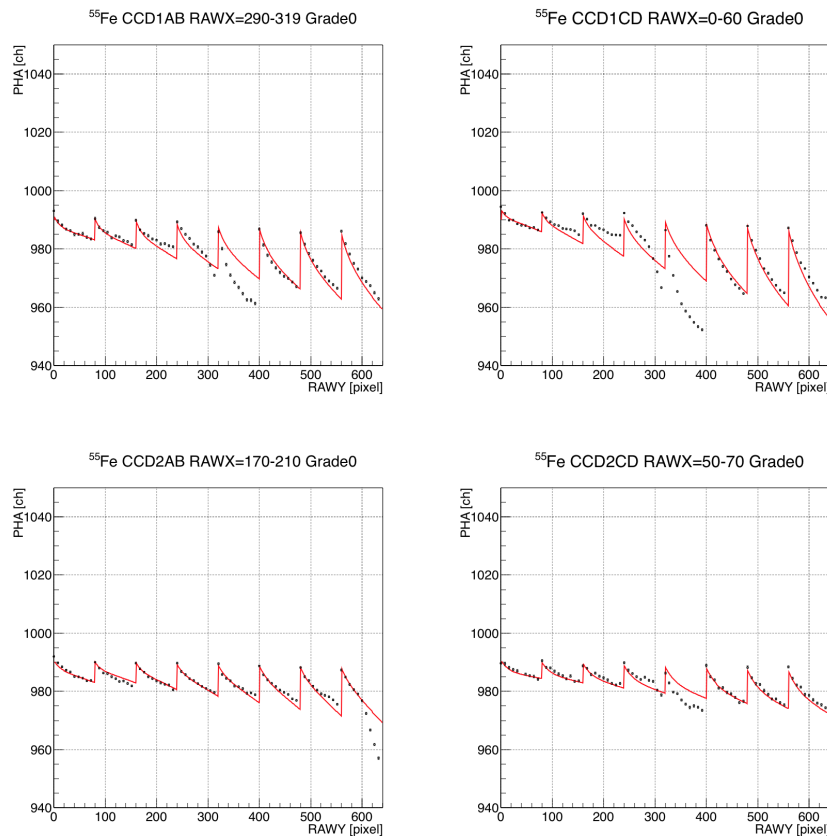


図 6.8 ダークフレームの輝点に対応する列（図 6.7 の緑色の四角領域）の波高値分布の CTI 関数フィット結果。

ダークフレームにおける輝点の有無や大きさの時間変化を調べるため、FM 較正試験（2014 年 8-9 月）の前後、2014 年 1 月、12 月および 2015 年 6 月に取得した FM 素子のダークフレームを調査した。図 6.9, 6.10, 6.11 にそれぞれのイメージをまとめた。どの時点においても CCD1AB/CD 及び CCD2AB/CD の同じ場所に同程度の大きさの輝点が存在しており、その数は変化しておらず、他の場所にも見られないことを確認した。図 6.12 は図 6.9, 6.10, 6.11 のうち CCD1CD の輝点領域を取り出して X 方向に射影したプロットである。輝点におけるダークの増加量も時間変化していないことがわかる。

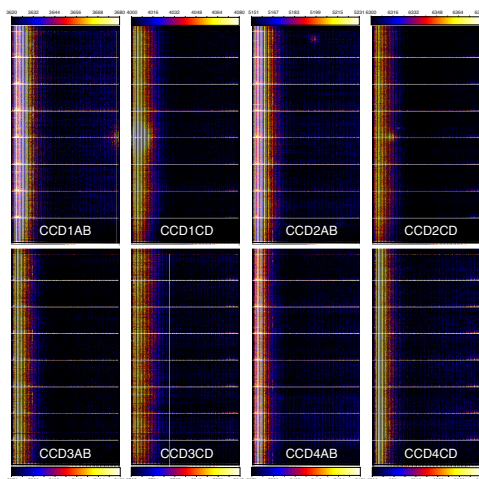


図 6.9 2014 年 1 月に FM 素子で取得したダークフレーム。

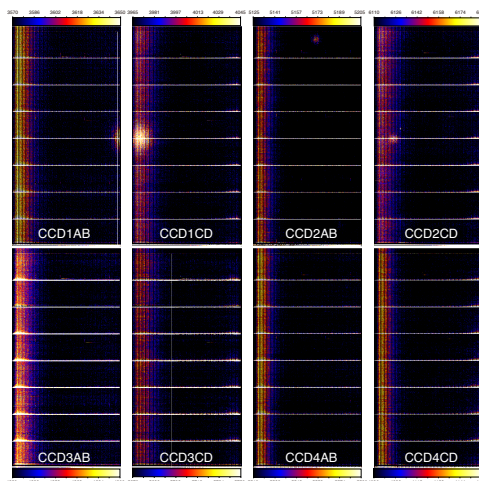


図 6.10 2014 年 12 月に FM 素子で取得したダークフレーム。

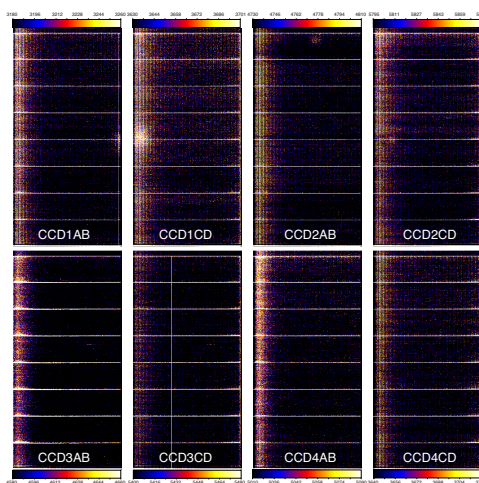


図 6.11 2015 年 6 月に FM 素子で取得したダークフレーム。

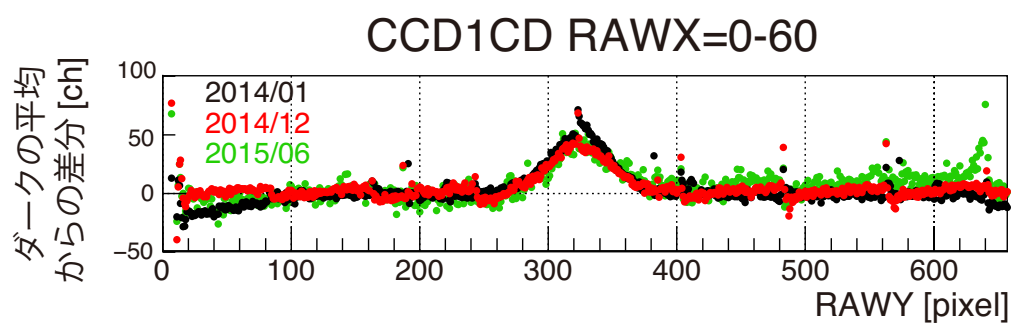


図 6.12 CCD1CD のダークフレームの輝点に対応する場所の射影。

以下では、ダークフレーム上の輝点に相関して CTI が局所的に悪化している領域を CTI 異常領域と呼ぶ。この領域で周囲よりも暗電流が高いには、不純物の存在によってエネルギー準位が変わっていることによる可能性があり、製造プロセスのどこかで金属などに汚染されたと推測することができる。

6.3 CTI 関数の改良

先行研究では素子全面で CTI は一様であると考えられてきた。つまり式 4.1、4.2 における c_{f0} や c_{s0} は素子の場所に依らず同じ値としてモデルを構築していた。しかし、6.2 節 で述べたように、CCD1AB/CD と CCD2AB/CD の特定の領域で CTI が局所的に悪化していることが今回の調査で初めて分かった。そこで CTI 補正に用いるモデルとして、CTI が一様である場合の式 4.3 ではなく、CTI 異常領域を考慮した場所依存性を持つ関数の構築が必要となる。

CTI 異常領域での CTI (c_a) は、単純に他の領域の CTI と程度が異なるものであると考えると、

$$c_a = c_{a0} \cdot \left\{ 1 - p_a \cdot \exp\left(-\frac{\Delta Y}{\tau_a}\right) \right\} \quad (6.1)$$

という c_f 、 c_s と同様の形で書ける。ここで、 c_{a0} 、 p_a 、 τ_a はそれぞれ以下の量を表す。添え字の「a」は異常領域での値であることを示す。

- c_{a0} : CI-off の場合の CTI 異常領域における CTI 量
- p_a : CTI 異常領域で犠牲電荷がトラップを埋める確率
- τ_a : 再放出されるまでの典型的な転送回数

また我々は、CTI の空間分布をより正確に表すためのモデル修正も行った。つまり、CI を行っていても、実際には信号電荷が犠牲電荷の恩恵を受けていない場合があるので、これをモデルに入れる。露光時には、前の露光時に注入された犠牲電荷がすべて再放出されてしまっていると仮定する。犠牲電荷は CI 行よりも読み出し口に近いピクセルのトラップを埋めるが、CI 行より読み出し口から遠いピクセルのトラップを埋めることはできない。図 6.13 のように、CI 行の直後のピクセルとと 6 行後ろのピクセルで X 線が検出されたとする。それぞれでの信号電荷を緑色と青色で示している。緑色の信号電荷は、隣の CI 行が転送の際に埋めたトラップの上を通るので、CI の恩恵を受ける (図中の 2 つ目)。一方、青色の信号電荷は、CI 行に到達するまでの 5 行間分は犠牲電荷で埋められていないトラップを通ることとなり、CI の恩恵を受けない (図中の 2 つ目)。このときの CTI (c_f) は、式 4.1 (異常領域の場合は式 6.1) において、犠牲電荷がトラップを埋める確率が 0、つまり $p_f = 0$ (異常領域の場合は $p_a = 0$) に相当する。しかし、CI 行に到達後は、犠牲電荷が埋めたトラップの上を通るので、CI の恩恵を受ける (図中の 3 つ目)。この場合は従来のモデルのとおり、0 でないある確率 p_f (異常領域では p_a) で犠牲電荷が電荷トラップを埋めている際の CTI を受ける。これまでのモデルでは、確率 p_f は同一セグメント内では場所に依らず一定値を取ると仮定していたが、CTI の空間分布をより正確に表すには、これら 2 つの場合の CTI を区別する必要がある。なお X 線イベントは全て撮像領域で検出されるため、蓄積領域での低速縦転送の CTI (c_s) ではこの効果を考えない。

以上のように、CTI 異常領域での CTI (c_a) と、初めの CI 行に到達するまで $p_f = 0$ (異常

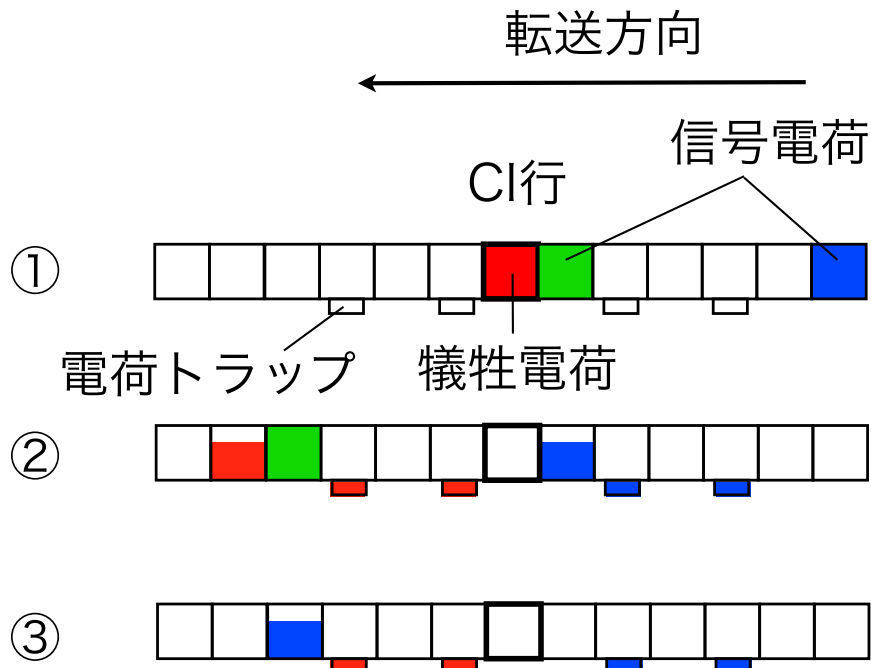


図 6.13 犠牲電荷と信号電荷の転送の様子。犠牲電荷は CI 行より読み出し口に近いピクセルのトラップを埋めるが、読み出し口から遠い方にあるトラップは埋めることができない。緑色の信号電荷は、直前の CI 行が埋めたトラップの上を通ることになり、CI の恩恵を受ける (図の 2 つ目)。一方、青色の信号電荷は、CI 行に到達するまでの 5 行間は、犠牲電荷が埋めていないトラップを通るので、CI の恩恵を受けない (図の 2 つ目)。しかし CI 行に到達したあとは、犠牲電荷が埋めたトラップを通るので、CI の恩恵を受ける (図の 3 つ目)。

領域では $p_a = 0$) であることを考慮すると、式 4.3 は次のように拡張できる。

$$\begin{aligned}
 PHA' = PHA(0) &\times (1 - c_f)^{Y_0} \times (1 - c_f(p = 0))^{Y_1} \\
 &\times (1 - c_a)^{Y_2} \times (1 - c_a(p = 0))^{Y_3} \times (1 - c_s)^{Y_4}
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

Y_0 、 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 はそれぞれ以下の転送回数を表す。

- Y_0 : CI 行を通過した後に通常領域を高速転送される回数
- Y_1 : 初めの CI 行に到達するまでに通常領域を高速転送される回数
- Y_2 : CI 行を通過した後に異常領域を高速転送される回数
- Y_3 : 初めの CI 行に到達するまでに異常領域を高速転送される回数
- Y_4 : 蓄積領域で低速転送される回数

いま、 $ACTY=Y$ の位置にあるピクセルを考えると、Full window mode では高速縦転送が 640 回、低速縦転送が Y 回なので、 Y_0 と Y_4 は

$$\begin{aligned}
 Y_0 &= 640 - (Y_1 + Y_2 + Y_3) \\
 Y_4 &= Y
 \end{aligned}$$

と表すことができる。 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 は、CTI 異常領域とピクセルの位置関係が下記の3つのどれに当てはまるかで、ピクセルの ACTY 座標 (Y) に依存して具体形が異なる。(1) いま考えているピクセルと同じ ACTX 座標に CTI 異常領域がない場合、あるいは ACTY 座標 $< Y$ の領域に CTI 異常領域がない場合、(2) CTI 異常領域が、いま考えているピクセルと同じ ACTX 座標、かつ ACTY 座標 $< Y$ の領域にあって、CI 行間に位置している場合 (3) CTI 異常領域がいま考えているピクセルと同じ ACTX 座標、かつ ACTY 座標 $< Y$ の領域にあって、CI 行を跨いでいる場合。以下ではこの3つの場合を1つずつ検討する。

(1) CTI 異常領域がない場合

この場合は、異常領域を転送される回数はゼロ回なので、 Y_2 と Y_3 は 0 になる。 Y_1 は初めての CI 行に到達するまでに高速転送される回数 (ΔY) である。

$$Y_1 = \Delta Y$$

$$Y_2 = 0$$

$$Y_3 = 0$$

(2) CTI 異常領域が CI 行間にある場合

この場合は、ピクセル、CTI 異常領域、CI 行の位置関係によって、さらに3通りに場合分けされる。CTI 異常領域は $ACTY=A_1-A_2$ に存在すると仮定する。さらに CTI 異常領域が、 $ACTY=I_i$ と $ACTY=I_{i+1}$ にある CI 行の間に位置すると仮定する ($I_i < A_1 < A_2 < I_{i+1}$; 図 6.14)。

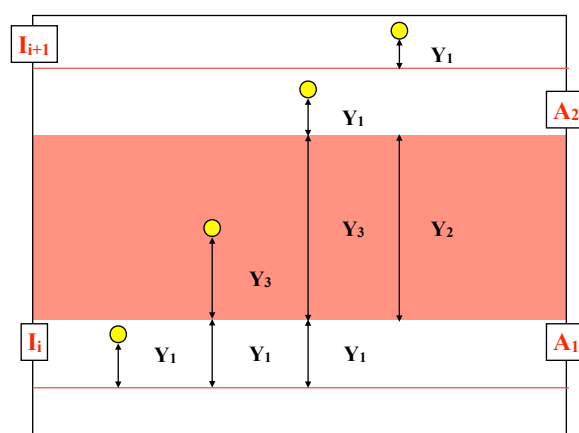


図 6.14 CTI 異常領域が CI 行間にある場合のイベントの Y 座標に依存する Y_1 、 Y_2 、 Y_3 の定義

1. $A_1 < Y < A_2$ の場合

信号電荷は CI の恩恵を受けないまま異常領域で転送され、さらに CI 行 (I_i) に到達するまでに通常領域でも転送される。

$$Y_1 = A_1 - I_i$$

$$Y_2 = 0$$

$$Y_3 = Y - A_1$$

2. $A_2 < Y < I_{i+1}$ の場合

信号電荷は CI の恩恵を受けないまま、まず通常領域で転送され、その後異常領域でも転送され、さらに CI 行 (I_i) に到達するまでに再び通常領域で転送される。

$$Y_1 = (Y - A_2) + (A_1 - I_i)$$

$$Y_2 = 0$$

$$Y_3 = A_2 - A_1$$

3. $I_{i+1} < Y$ の場合

信号電荷は CI の恩恵を受けないまま通常領域で転送されるが、その後 CI 行 ($ACTY=I_{i+1}$ か、それよりも $ACTY$ 座標が大きい CI 行) に到達する。異常領域で転送されるときは、CI の恩恵を受けている。

$$Y_1 = \Delta Y$$

$$Y_2 = A_2 - A_1$$

$$Y_3 = 0$$

(3) CTI 異常領域が CI 行を跨いでいる場合

この場合は、ピクセル、CTI 異常領域、CI 行の位置関係によって、さらに 4 通りに場合分けされる。先ほどと同様、CTI 異常領域は $ACTY=A_1-A_2$ に存在すると仮定する。さらに CTI 異常領域が、 $ACTY=I_i$ と $ACTY=I_{i+3}$ にある CI 行の間に位置していて、かつ $ACTY=I_{i+1}$ と $ACTY=I_{i+2}$ の CI 行は CTI 異常領域に含まれているとする ($I_i < A_1 < I_{i+1} < I_{i+2} < A_2 < I_{i+3}$; 図 6.15)。

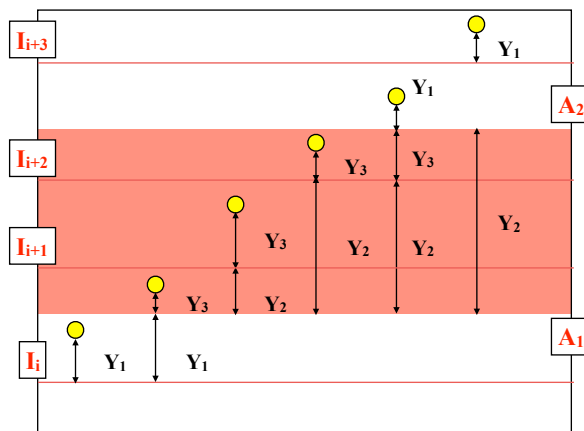


図 6.15 CTI 異常領域が CI 行を跨いでいる場合のイベントの Y 座標に依存する Y_1, Y_2, Y_3 の定義

1. $A_1 < Y < I_{i+1}$ の場合

信号電荷は CI の恩恵を受けないまま異常領域で転送され、さらに CI 行 (I_i) に到達するまでに通常領域でも転送される。

$$Y_1 = A_1 - I_i$$

$$Y_2 = 0$$

$$Y_3 = Y - A_1$$

2. $I_{i+1} < Y < A_2$ の場合

信号電荷は CI の恩恵を受けないまま、異常領域で転送されて CI 行 (I_{i+1}) に到達する。その後は CI の恩恵を受けて異常領域の残り通常領域で転送される。

$$Y_1 = 0$$

$$Y_2 = Y - \Delta Y - A_1$$

$$Y_3 = \Delta Y$$

3. $A_2 < Y < I_{i+3}$ の場合

信号電荷は CI の恩恵を受けないまま、まず通常領域で転送され、その後異常領域でも転送されて CI 行 (I_{i+2}) に到達する。 $Y_1 = Y - A_2$

$$Y_2 = I_{i+2} - A_1$$

$$Y_3 = A_2 - I_{i+2}$$

4. $I_{i+3} < Y$ の場合

信号電荷は CI の恩恵を受けないまま通常領域で転送されるが、その後 CI 行 ($ACTY=I_{i+3}$ か、それよりも ACTY 座標が大きい CI 行) に到達する。異常領域で転送されるときは、CI の恩恵を受けている。

$$Y_1 = \Delta Y$$

$$Y_2 = A_2 - A_1$$

$$Y_3 = 0$$

これらの CTI 異常領域は ACTX 座標によって変化するため、CI 行との位置関係も ACTX 座標に依存する。したがって、 Y_0, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 は ACTX 座標の関数である。

6.3.1 改良した CTI 関数によるフィット

このように新しく定義した CTI 関数、式 6.2 を用いて図 6.8 のデータの再フィットを行った (図 6.16)。CCD1AB/CD 及び CCD2AB/CD はどれも、CTI 異常領域も通常領域もこの関数でよく再現できることが確認できた。

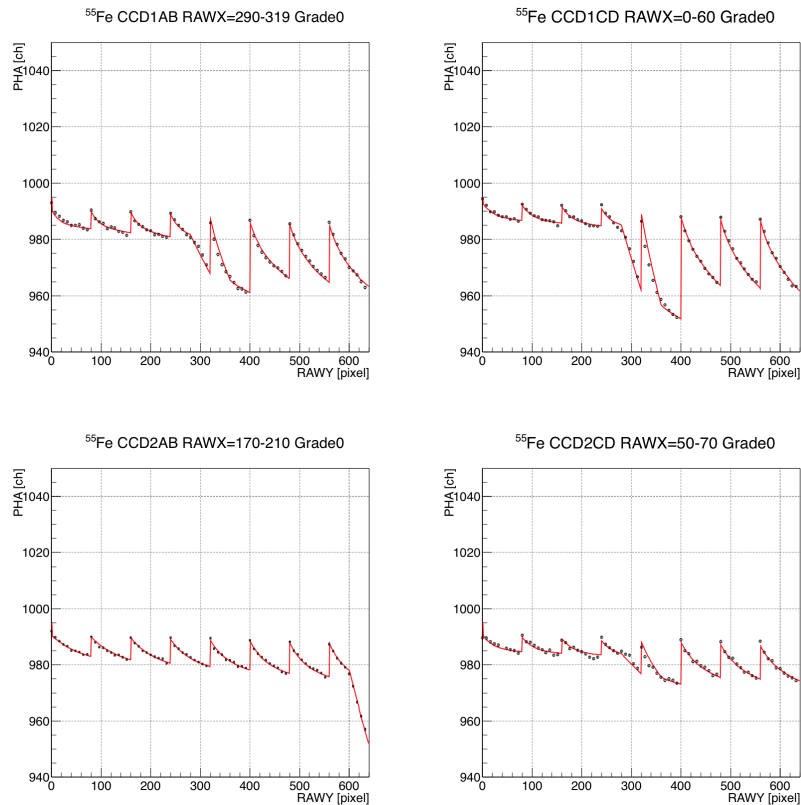


図 6.16 修正 CTI 関数によるフィット結果。

6.4 新しい CTI 関数による CTI パラメータ導出の方法

6.4.1 Grade 0 のイベントに対するパラメータ導出

ここでは 6.3 節で導入した新しい CTI 関数を使用して、各セグメントで CTI を補正するためのパラメータを決める方法を述べる。まずは Grade0 のみでパラメータを決める。それ以外の X 線イベント (Grade 2,3,4,6) のパラメータについては 6.4.2 節で議論する。

理想的には、CCD 素子のピクセル毎にそれぞれのパラメータを決めることが最も正確であるが、較正データの統計の制限からそれはできない。さらに地上での較正のみならず、軌道上でも CCD の経年変化に適応するために較正パラメータを随時変えていくことになるが、軌道上では今回の FM 較正試験に比べて十分なデータを取得することができない。そこで極力少ないパラメータで較正する枠組みを作ることを方針とする。

CTI の場所依存性の大局を調べるために、各セグメントを ACTX 方向に 64 分割 (CCD3 と 4 は統計量が少ないので 32 分割) して波高値プロットを作成したところ (すべてのプロットは付録 A を参照)、CTI 異常領域以外にも、全てのセグメントの CCD の物理的な端付近に相当する場所 (Edge 領域と呼ぶ) で系統的に波高値プロットの傾向が異なることがわかった。図 6.17 に、全てのセグメントにおける、Edge 領域とそれ以外の領域の波高値プロットの比較

を示す。Edge 領域の方が波高値の減少が著しいということは、Edge 領域では RAWY 座標に関係なく CTI が他の領域よりも悪化していることを示す。横転送の方向と関係なく CCD の物理的な端で CTI が増加しているので、横転送における CTI では説明できない。

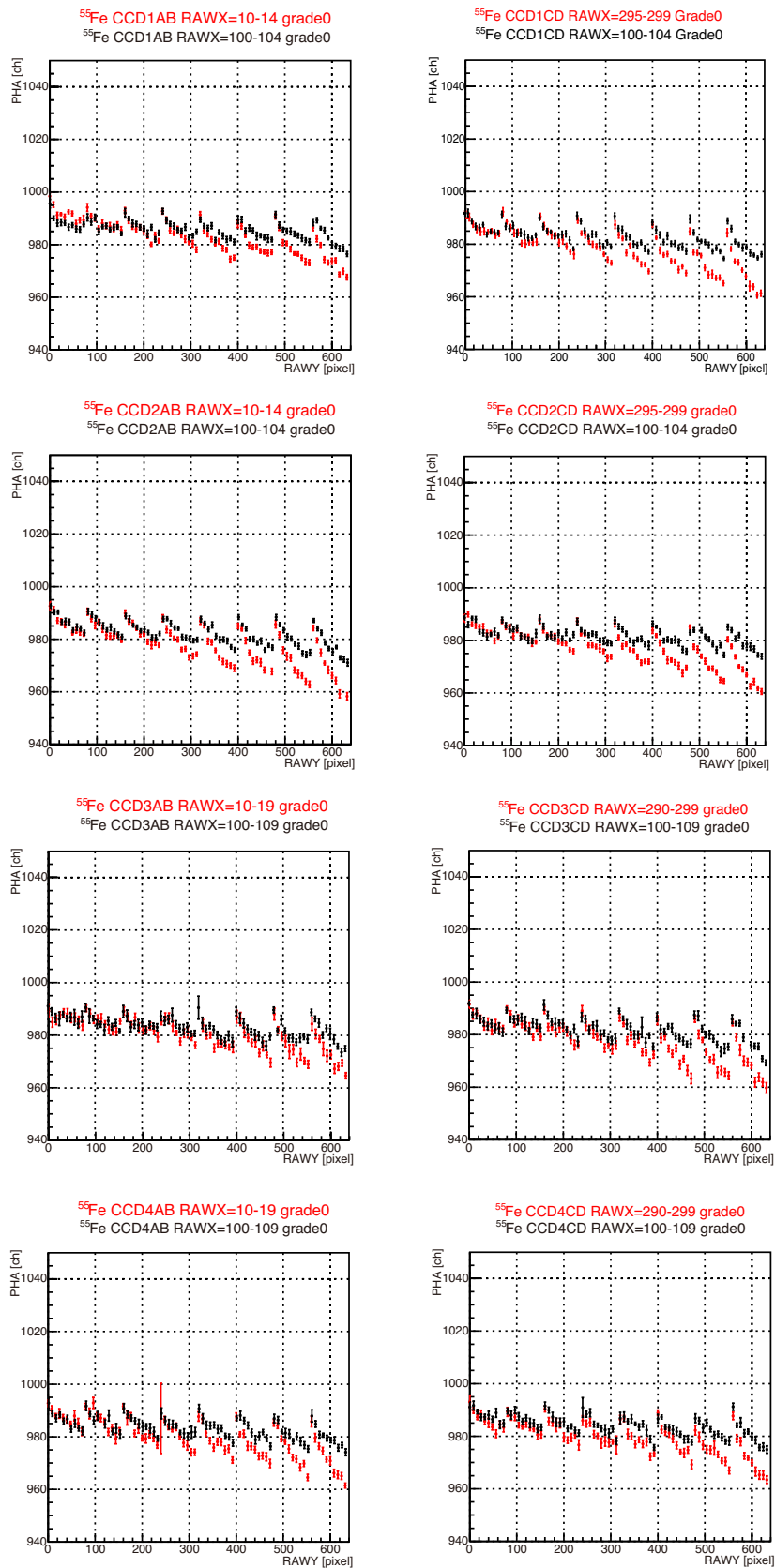


図 6.17 CCD の物理的な端 (Edge 領域; 赤色) とそれ以外の領域 (黒色) の波高値プロットの比較。

CTI パラメータを測定する前にまず、各セグメントを CTI の性質が異なる 3 つの領域、つまり、Edge 領域、CTI 異常領域 (On-spot 領域と呼ぶ)、そのどちらにも含まれていない正

常領域 (Off-spot 領域と呼ぶ) に分割した。図 6.18 に各セグメントでの各領域を示した。それぞれの領域の境界は小分割したプロットの波高値分布の傾向から決めた。表 6.1 に領域境界の座標をまとめた。

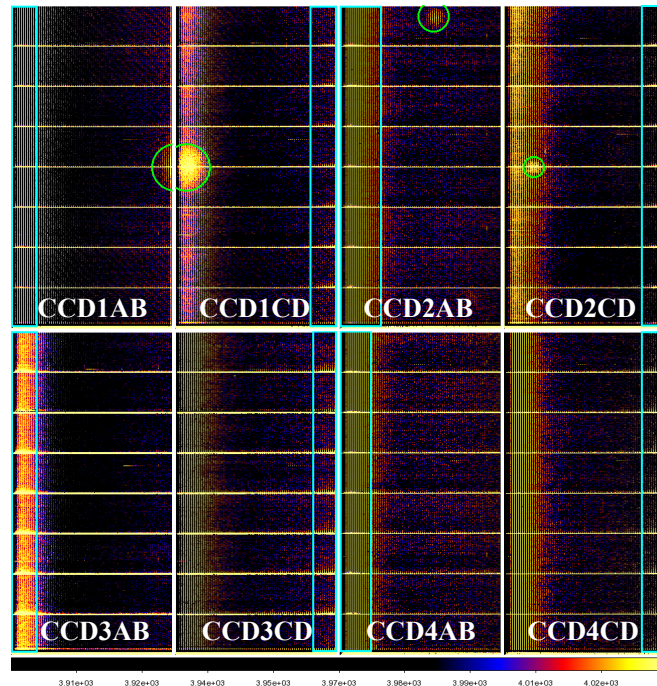


図 6.18 SXI ダークイメージと Off-spot, On-spot, Edge 領域の定義。緑色の丸で囲まれた領域が On-spot 領域、水色の四角で囲まれた領域が Edge 領域、それ以外は Off-spot 領域を示す。

表 6.1 Off-spot, On-spot, Edge 領域の定義

CCD	Edge 領域 (RAWX)	異常領域の中心 (RAWX,RAWY)	異常領域の半径
CCD1AB	0-49	(328,320)	46
CCD1CD	270-319	(22,320)	46
CCD2AB	0-79	(185,620)	30
CCD2CD	275-319	(60,320)	20
CCD3AB	0-49	-	-
CCD3CD	275-319	-	-
CCD4AB	0-59	-	-
CCD4CD	275-319	-	-

各セグメントの CTI パラメータの大まかな導出手順は以下のとおりである。まず、Off-spot 領域でテンプレートとなる波高値プロットを作成し、そのプロットでのパラメータをモデルフィットで決める。また高速転送と低速転送における CTI (c_{f0} , c_{s0}) は転送電荷量によっ

て変化すると考えて、そのエネルギー依存性も求めた。1 つのセグメントの中での性質は共通と考え、Off-spot 領域のテンプレートのパラメータでセグメント内全ての領域を説明することを試みる。つまり、Edge 領域と On-spot 領域でも基本的には Off-spot 領域のパラメータを用いる。ただしそれではプロットを説明できない場合は、Off-spot 領域とは異なるテンプレートパラメータを決める。各セグメントを ACTX 方向に小分割したプロットから、ACTX 方向依存性を測定する。 c_f , c_s の ACTX 方向依存性については、テンプレートパラメータの c_{f0} と c_{s0} (CI の恩恵がない場合の CTI 量) にそれぞれ共通の値 (m-factor と呼ぶ) をかけ算し、m-factor (m) を ACTX 座標の関数とすることで取り入れる。つまり、

$$c_f = m \cdot c_{f0} \cdot \left\{ 1 - p_f \cdot \exp\left(-\frac{\Delta Y}{\tau_f}\right) \right\} \quad (6.3)$$

$$c_s = m \cdot c_{s0} \cdot \left\{ 1 - p_s \cdot \exp\left(-\frac{\Delta Y}{\tau_s}\right) \right\} \quad (6.4)$$

とする。m-factor を導入することで Edge 領域での CTI 増加をうまく説明できるだけでなく、横転送における CTI の影響も補正できる。 c_a については、 c_{a0} を ACTX の関数とした。

以下では例として、CCD1CD について CTI パラメータの具体的な導出手順を説明する。他のセグメントについても、一部の例外はあるが、基本的には同じ手順でパラメータを決めた。CCD1CD 以外の導出過程の図は付録 A にまとめた。

Off-spot 領域での CTI パラメータ

はじめに Off-spot 領域の Mn $K\alpha$ の波高値プロットを、式 6.2 における PHA(0) は適当な値に固定し、それ以外をフリーパラメータとしてフィットすることで c_{f0} , p_f , τ_f , c_{s0} , p_s , τ_s のテンプレートとなる値を決めた (図 6.19)。全てのセグメントでのフィット結果を表 6.2 にまとめた。また図 6.19 に示すように、Ge, LiF のデータも用いて、Ge $K\alpha$ と F $K\alpha$ での c_{f0} , c_{s0} の値も決めた。 p_f , τ_f , p_s , τ_s もフリーにしたが、エネルギーによって値は変化しなかったため、Mn $K\alpha$ で求めた値に固定した。

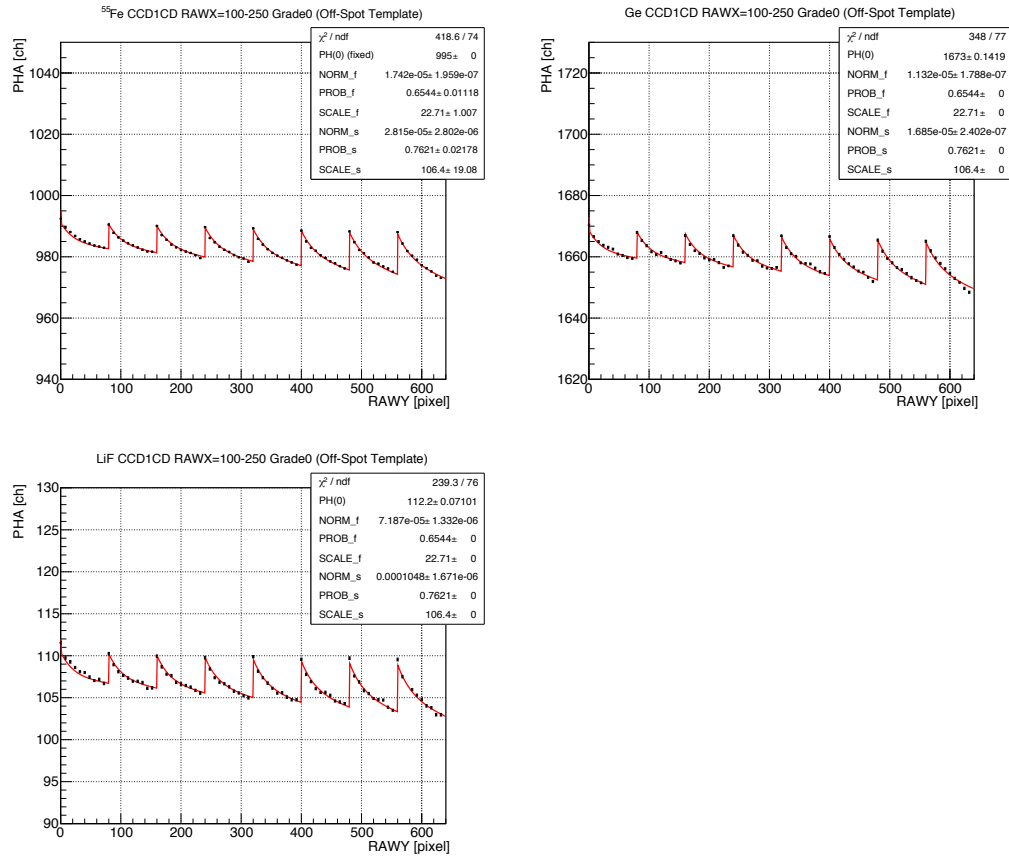


図 6.19 CCD1CD における Off-spot 領域でのフィット

表 6.2 Off-spot 領域のパラメータ

CCD	$c_{f0} (\times 10^{-5})$	$p_f (\times 10^{-1})$	$\tau_f (\times 10^1)$	$c_{s0} (\times 10^{-5})$	$p_s (\times 10^{-1})$	$\tau_s (\times 10^2)$
CCD1AB	1.55 ± 0.02	6.55 ± 0.20	1.98 ± 0.09	2.70 ± 0.38	7.85 ± 0.29	1.42 ± 0.32
CCD1CD	1.74 ± 0.02	6.54 ± 0.11	2.27 ± 0.10	2.82 ± 0.27	7.62 ± 0.22	1.06 ± 0.19
CCD2AB	1.93 ± 0.03	6.25 ± 0.12	2.88 ± 0.16	4.35 ± 0.60	8.50 ± 0.19	1.97 ± 0.37
CCD2CD	1.12 ± 0.02	8.44 ± 0.14	2.63 ± 0.14	3.52 ± 1.14	8.63 ± 0.41	2.44 ± 1.04
CCD3AB	1.66 ± 0.05	4.28 ± 0.18	3.15 ± 0.47	2.79 ± 0.36	8.31 ± 0.20	0.81 ± 0.18
CCD3CD	1.63 ± 0.03	4.90 ± 0.17	2.52 ± 0.24	3.58 ± 0.41	8.64 ± 0.15	1.15 ± 0.20
CCD4AB	1.79 ± 0.03	5.23 ± 0.15	2.23 ± 0.16	4.02 ± 0.54	8.49 ± 0.20	2.01 ± 0.37
CCD4CD	1.59 ± 0.04	6.17 ± 0.17	3.03 ± 0.29	2.93 ± 0.46	7.68 ± 0.33	1.07 ± 0.29

Edge 領域での CTI パラメータ

Edge 領域での Mn K α の波高値分布は、 c_{f0} , p_f , c_{s0} , p_s については Off-spot 領域のテンプレートパラメータに固定し、m-factor, τ_f , τ_s をフリーにすると説明できた。 τ_f , τ_s が Off-spot と Edge 領域で異なる値であるということは、CCD の中心と端では電荷の再放出のタイムスケールが異なることを示唆している。この原因については分かっていない。また CCD1AB では例外的に、 c_{f0} , c_{s0} の 2 つのパラメータについても Edge 領域で別の値が必要となった。Edge 領域のデータ点とそのフィット結果が図 6.20 である。パラメータは表 6.3

にまとめた。

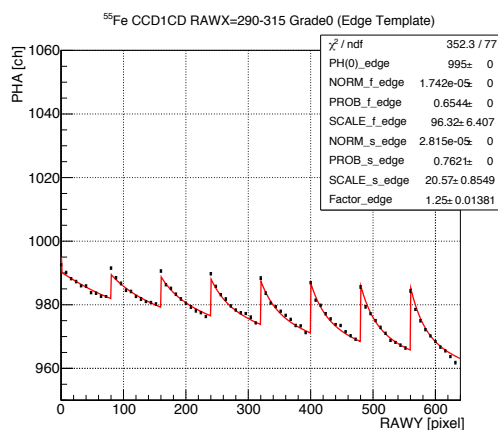


図 6.20 CCD1CD における Edge 領域でのフィット

表 6.3 Edge 領域のパラメータ

CCD	$c_{f0} (\times 10^{-5})$	$c_{s0} (\times 10^{-5})$	$\tau_f (\times 10^1)$	$\tau_s (\times 10^1)$
CCD1AB	0.70 ± 0.04	3.45 ± 0.05	5.09 ± 0.98	2.48 ± 0.12
CCD1CD	-	-	9.63 ± 0.64	2.06 ± 0.09
CCD2AB	-	-	7.40 ± 0.62	3.20 ± 0.14
CCD2CD	-	-	4.27 ± 0.27	2.27 ± 0.08
CCD3AB	-	-	28.8 ± 10.7	2.71 ± 0.20
CCD3CD	-	-	8.72 ± 2.04	3.30 ± 0.28
CCD4AB	-	-	7.77 ± 1.39	2.57 ± 0.19
CCD4CD	-	-	12.5 ± 0.18	3.00 ± 0.23

On-spot 領域での CTI パラメータ

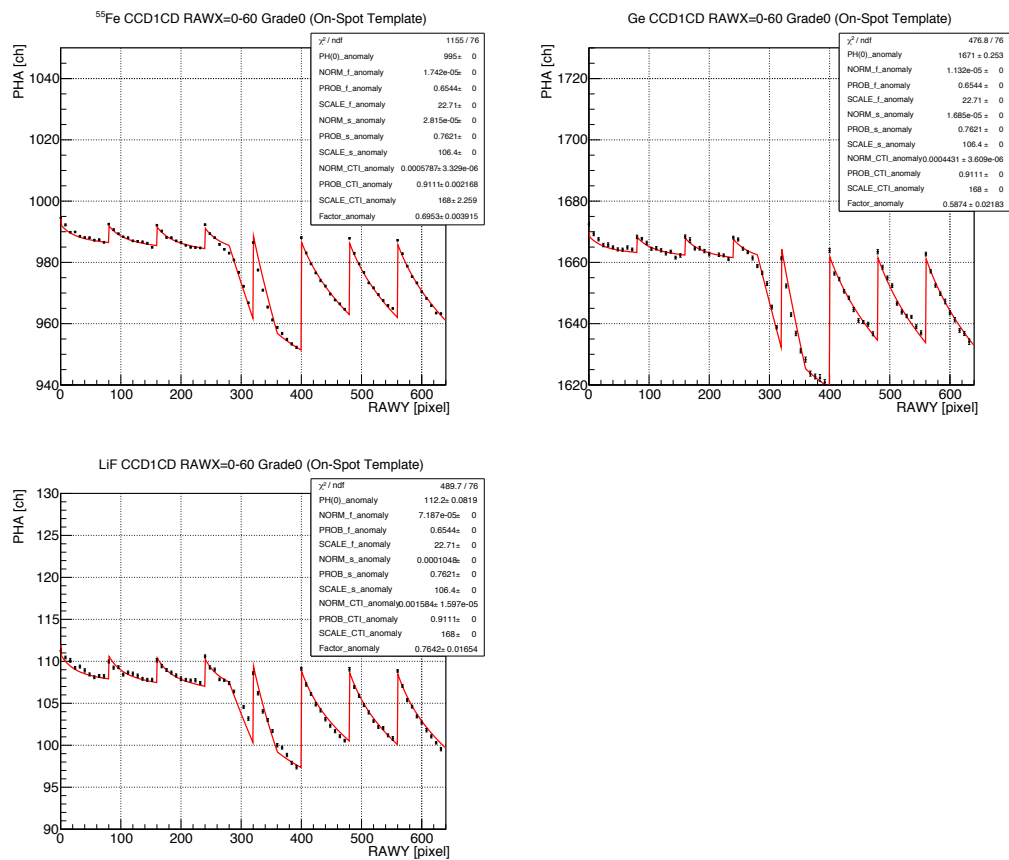


図 6.21 CCD1CD における On-spot 領域でのフィット

On-spot 領域では、 c_f と c_s のパラメータのうち、 c_{f0} , p_f , τ_f , c_{s0} , p_s , τ_s は Off-spot 領域で求めたパラメータは固定し、m-factor はフリーにした上で、 c_a のパラメータ (c_{a0} , p_a , τ_a) をフリーにして Mn $K\alpha$ のデータをフィットした。エネルギー依存性を調べるため、F $K\alpha$ と Ge $K\alpha$ の On-spot 領域のデータも解析した。 p_a と τ_a は、フリーにしてもエネルギーによって値は変化しなかったため、Mn $K\alpha$ で決めた値に固定した。一方 c_{a0} の値はエネルギーによって変化した (図 6.21)。表 6.4 にパラメータをまとめた。

表 6.4 On-spot 領域のパラメータ

CCD	$c_{a0} (\times 10^{-4})$	$p_a (\times 10^{-1})$	$\tau_a (\times 10^2)$
CCD1AB	3.18 ± 0.05	8.62 ± 0.06	1.45 ± 0.05
CCD1CD	5.79 ± 0.03	9.11 ± 0.02	1.68 ± 0.02
CCD2AB	6.05 ± 0.10	-	-
CCD2CD	2.97 ± 0.07	9.71 ± 0.12	1.17 ± 0.07

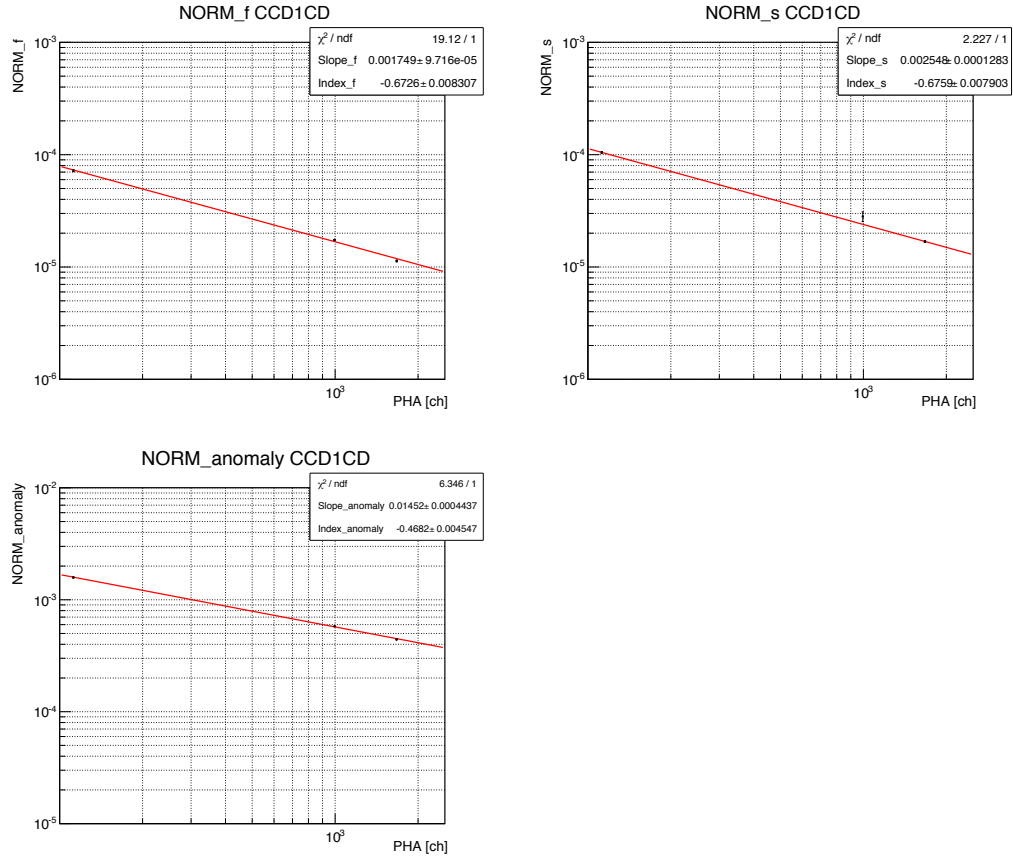


図 6.22 CCD1CD における c_{f0} , c_{s0} , c_{a0} のエネルギー依存性

表 6.5 c_{f0} , c_{s0} , c_{a0} のエネルギー依存性パラメータ

CCD	$\tau_f (\times 10^{-3})$	$\Gamma_f (\times 10^{-1})$	$\tau_s (\times 10^{-3})$	$\Gamma_s (\times 10^{-1})$	$\tau_{anomaly} (\times 10^{-3})$	$\Gamma_a (\times 10^{-1})$
CCD1AB	2.02 ± 0.12	-7.08 ± 0.09	2.71 ± 0.17	-6.92 ± 0.10	14.3 ± 0.88	-5.55 ± 0.10
CCD1CD	1.77 ± 0.10	-6.74 ± 0.09	2.55 ± 0.13	-6.76 ± 0.08	14.5 ± 0.44	-4.68 ± 0.04
CCD2AB	0.97 ± 0.08	-5.69 ± 0.04	2.99 ± 0.19	-6.16 ± 0.10	6.44 ± 0.71	-3.49 ± 0.16
CCD2CD	0.91 ± 0.06	-6.40 ± 0.10	2.36 ± 0.14	-6.13 ± 0.09	9.42 ± 1.26	-5.03 ± 0.20
CCD3AB	0.68 ± 0.18	-5.33 ± 0.38	1.47 ± 0.13	-5.87 ± 0.13	-	-
CCD3CD	1.19 ± 0.17	-6.18 ± 0.21	1.87 ± 0.17	-5.93 ± 0.13	-	-
CCD4AB	1.94 ± 0.16	-6.76 ± 0.13	2.24 ± 0.16	-5.89 ± 0.11	-	-
CCD4CD	0.81 ± 0.09	-5.73 ± 0.17	2.73 ± 0.18	-6.71 ± 0.10	-	-

CTI のエネルギー依存性

Mn $K\alpha$, F $K\alpha$, Ge $K\alpha$ でそれぞれ測定した c_{f0} , c_{s0} , c_{a0} の値から、これらのパラメータのエネルギー依存性を決める。各 CTI (c_i ; $i = f, s, a$) にはエネルギー依存性を

$$c_i = c_{i0} \cdot \left\{ 1 - p_i \cdot \exp\left(-\frac{\Delta Y}{\tau_i}\right) \right\} \times \left(\frac{\text{PHA}'}{\text{PH}_{ref}}\right)^{\Gamma_i} \quad (6.5)$$

という形で導入する。 Γ_i はエネルギー依存性を表す冪である。 PH_{ref} はゲインを 6 eV/ch としたときの Mn- $K\alpha$ の波高値 982 ch である。式 6.5 の Γ_i の値を決めるために各エネ

ギーでの波高値と c_{i0} の値の関係をプロットしてべき乗の関数でフィットした (図 6.22)。

CTI の ACTX 方向依存性

最後に、1 セグメントを ACTX 方向に 64 分割 (CCD3 と 4 は 32 分割) して作成したプロットを用いて m-factor と c_{a0} の ACTX 方向依存性を決める。このときそれぞれの領域でのテンプレートパラメータを固定し、m-factor と c_{a0} のみをフリーパラメータにしてフィットする。

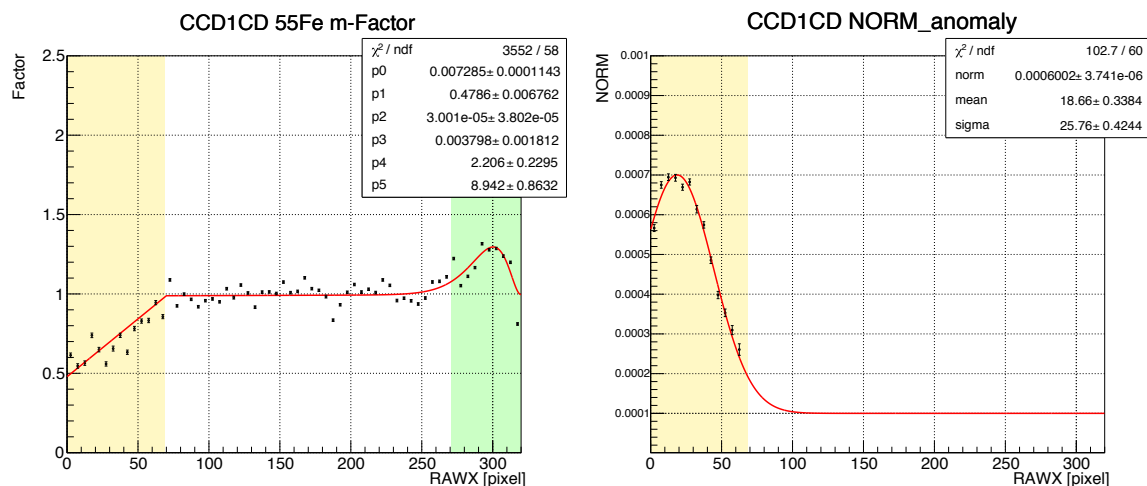


図 6.23 CCD1CD の m-factor (左) と c_{a0} の X 方向依存性 (右)。黄色い四角領域は CTI 異常領域を、緑色の四角領域は Edge 領域を示す。

図 6.23 左が m-factor の ACTX 方向依存性である。Edge 領域 (RAWX=270–319) の m-factor は RAWX=300 付近に向かって増加しており、CTI が増加していることを示す。一方、CTI 異常領域 (RAWX<68) では m-factor が小さくなっている。これは c_a と c_f , c_s を完全には分離できていないためだと考えられる。また図 6.23 右は c_{a0} の ACTX 方向依存性を示す。その傾向は図 6.18 と表 6.1 で定義した CTI 異常領域の中心 (RAWX=22) でピークをもつガウス関数で再現できる。

CTI 補正後のゲインのばらつき

以上の方法で各セグメント、各列毎にパラメータを導出した。そのパラメータを用いて、各イベント中心とその周囲 5×5 ピクセルのそれぞれのピクセルの波高値 (PHA) に対して

$$\begin{aligned} \text{PHA}(0) = \text{PHA}' / [& (1 - c_f)^{Y_0} \times (1 - c_{f,p=0})^{Y_1} \times (1 - c_a)^{Y_2} \\ & \times (1 - c_{a,p=0})^{Y_3} \times (1 - c_s)^{Y_4}] \end{aligned} \quad (6.6)$$

を計算し、真の波高値 PHA(0) を求めた。各ピクセルに対して計算するため、 Y_0, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 も、各イベントに対してではなく、各ピクセルにおける値を使う。

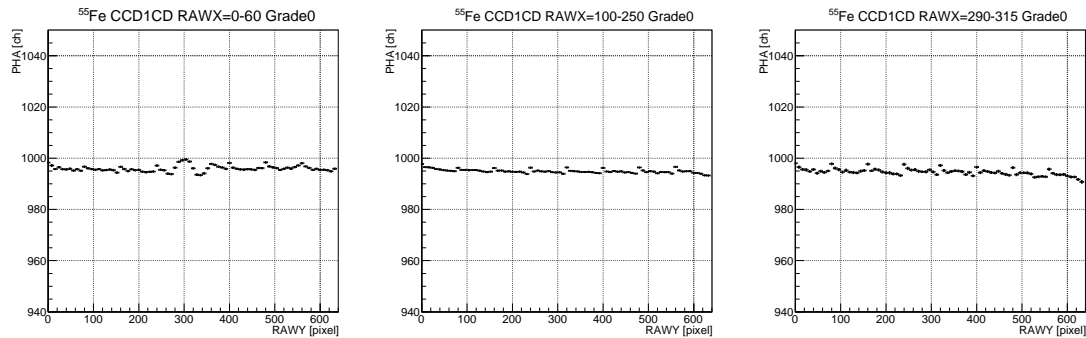


図 6.24 補正後の Grade 0 の波高値分布。左から、On-spot 領域、Off-spot 領域、Edge 領域。

図 6.24 は CCD1CD の ^{55}Fe のデータに CTI 補正を行ったものである。左から On-spot 領域、Off-spot 領域、Edge 領域の補正結果を示している。On-spot 領域におけるゲインのばらつきは、CTI 補正前は 8% と非常に大きかったが、補正後は 0.4% と大きく改善した。また Off-spot 領域でも、補正前に 2% だったばらつきを 0.2% に改善できた。Edge 領域のばらつきも、4% から 0.5% に改善した。ゲインのばらつきに対するキャリブレーションの要求値は 0.1% である。CTI 補正前は要求値を 1 桁以上超えていたが、補正後のゲインのばらつきを 1 桁改善させることができた。しかし要求値には届かなかった。CCD1CD 以外のセグメントに対しても、場所毎に同程度の精度でゲインを補正することに成功した。

6.4.2 Grade 2346 のイベントに対するパラメータ導出

6.4.1 では Grade 0 のイベントのみを議論してきた。この節では、電荷が複数のピクセルにスプリットしたイベント、つまり Grade 2,3,4,6 のイベントの CTI 補正を検討する。Grade 0 で決めたパラメータを使って Grade 2,3,4,6 のイベントの CTI 補正した結果を、図 6.25 に示す。色付きで示した Grade 2,3,4,6 の波高値は右肩上がりに分布している。これは CTI 過補正になっているためである。Grade 2,6 で過補正になる理由は、定性的に以下のように解釈できる。読み出し方向にスプリットした電荷が転送される場合、イベント中心の（読み出し方向に）隣のピクセルピクセルの電荷が電荷トラップを埋めることで擬似的に CI と同じ効果が現れる。これを self-CI と呼び、これによってイベント中心の電荷がトラップされる量が減り、実効的には CTI が小さくなる。Grade 3,4 で過補正になる理由は分かっていない。

過補正にならないようにするため、図 6.25 の各 Grade の分布の傾きから表 6.6 のように Grade 毎に g-factor (g) という量を決めた。g-factor は Grade 2,3,4,6 における CTI と Grade 0 での CTI の比に相当する。それを c_{f0}, c_{s0}, c_{a0} にそれぞれかけ、広がったイベントで CTI が小さくなることを取り入れた。つまり、式 6.6 を以下のように拡張する。

$$c_i = g \cdot c_{i0} \cdot \left\{ 1 - p_i \cdot \exp\left(-\frac{\Delta Y}{\tau_i}\right) \right\} \times \left(\frac{\text{PHA}'}{\text{PH}_{ref}} \right)^{\Gamma_i} \quad (i = f, s, a) \quad (6.7)$$

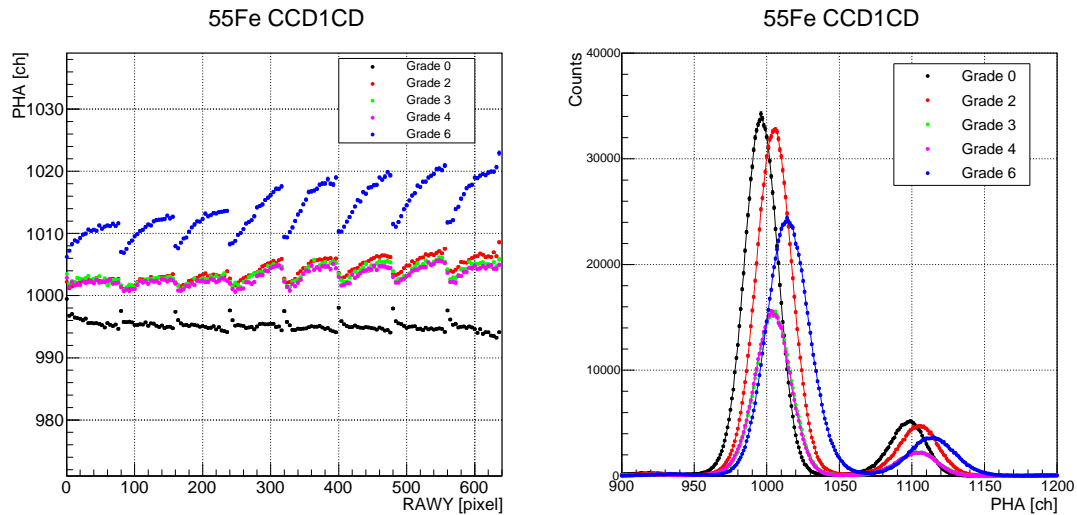


図 6.25 CTI 補正後の CCD1CD の Grade 別波高値分布と Grade 毎のスペクトル

Grade 0 の場合は、 $g = 1$ とし、Grade 2,3,4,6 の場合、表 6.6 に示したそれぞれの Grade における g -factor の値を用いる。

表 6.6 各 CCD に使用した Full window AC 読み出しの g -factor

CCD	Grade0	Grade2	Grade3,4	Grade6
CCD1AB	1.00	0.59	0.66	0.45
CCD1AB 以外	1.00	0.76	0.80	0.58

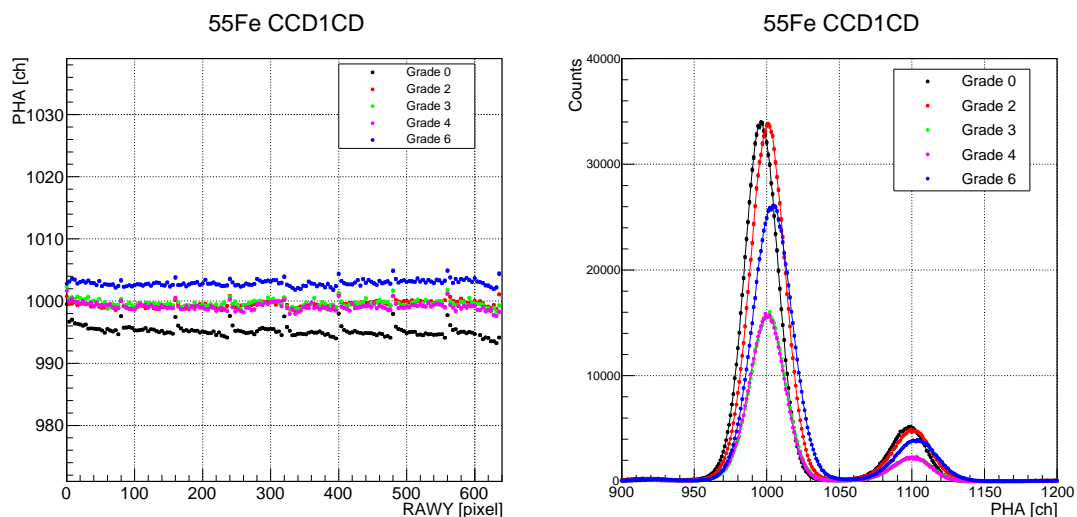


図 6.26 g -factor 補正後の CCD1CD の Grade 別波高値分布

g -factor を取り入れた c_i (式 6.7) と式 6.5 を使って、各ピクセルの波高値を補正した。その結果を図 6.26 に示す。図 6.25 で見られた 右肩上がりの分布を解消することに成功した。しかしゲインが Grade 毎に異なっている。図 6.26 右のスペクトルでも各 Grade で輝線のピー

クの値がずれている。ゲインのオフセットが生じる原因として、大きく薄く広がった電荷雲がピクセルサイズを超えたものの、split threshold は下回ったため、波高値を計算する際に取りこぼしてしまった成分が影響している可能性が考えられる。実際の天体解析では Grade 02346 のイベントを合計して用いるため、Grade 毎のゲインのオフセットはエネルギー分解能を悪化させる。

そこで、FM 較正試験で得られた Mn $K\alpha$ 、Ge $K\alpha$ 、F $K\alpha$ のデータのそれぞれに対して、Grade 6 に対する Grade 0,2,3,4 のピークシフトの値 (g-offset と呼ぶ) をそれぞれ求めた。各 Grade における g-offset のエネルギー依存性は、現象論的に 3 次関数で近似した。g-offset (G_{off}) を用いて式 6.6 を下記のように拡張する。

$$\text{PHA}(0) = \text{PHA}' / [(1 - c_f)^{Y_0} \times (1 - c_{f,p=0})^{Y_1} \times (1 - c_a)^{Y_2} \times (1 - c_{a,p=0})^{Y_3} \times (1 - c_s)^{Y_4}] + G_{\text{off}} \quad (6.8)$$

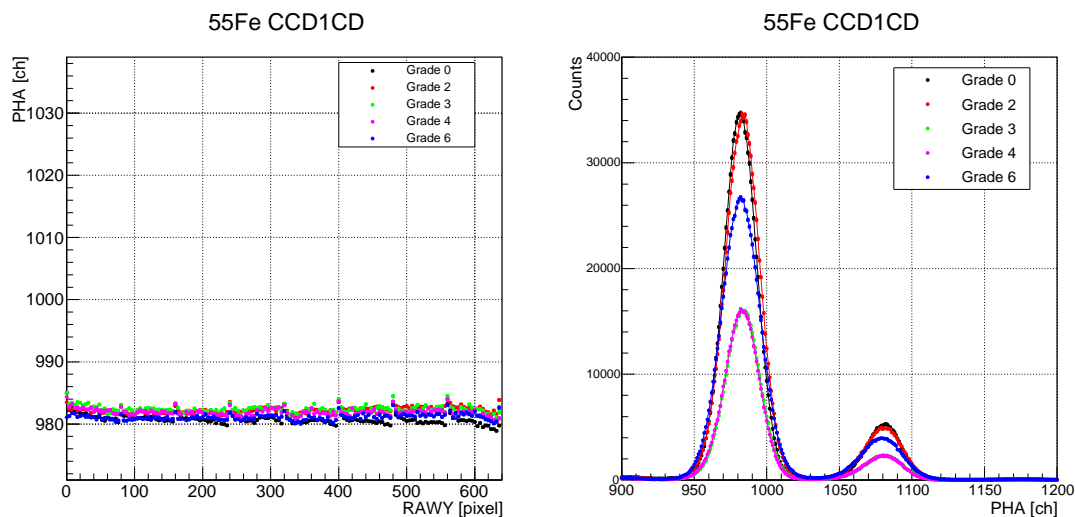


図 6.27 g-offset を導入して補正した後の CCD1CD の Grade 別波高値分布

図 6.27 は、式 6.8 で補正した結果である。Grade 間を中心値も揃っており、エネルギー分解能も改善した。補正前後の比較を 6.4.3 で行う。

6.4.3 補正後のデータのエネルギー分解能の評価

図 6.28 は、CCD1CD における、CTI 補正前 (黒) と、各ピクセルの波高値を式 6.8 を用いて CTI 補正した後 (赤) の Mn $K\alpha$ 、Mn $K\beta$ の Grade02346 合計のスペクトルである。補正後のスペクトルは輝線の幅が細くなっている。表 6.7 は、補正前後の Mn $K\alpha$ 輝線をガウス関数でフィットして求めたエネルギー分解能である。改善幅が最大のセグメントで ~12% であり、その他のセグメントに対してもエネルギー分解能が大幅に改善できたことを確認した。

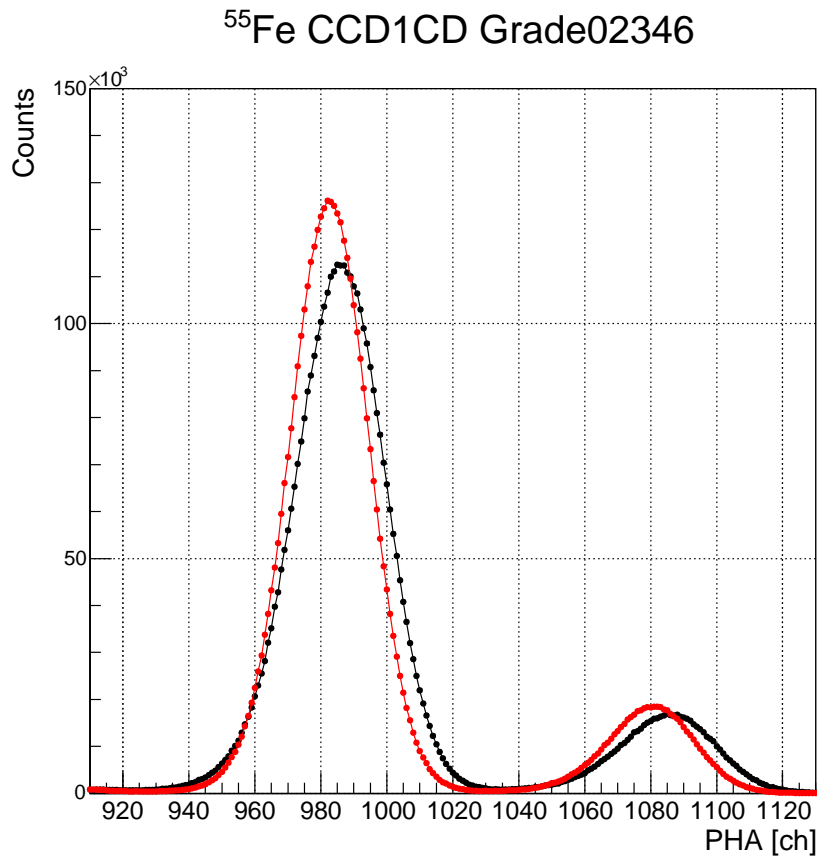


図 6.28 補正前後の ^{55}Fe の CCD1CD による Grade02346 スペクトル。黒が補正前、赤が補正後を表す。

表 6.7 CTI 補正前後の Mn-K α の中心値、標準偏差、エネルギー分解能

CCD		中心値 [ch]	標準偏差 [ch]	エネルギー分解能 [eV]
CCD1AB	補正前	985.32 ± 0.07	13.00 ± 0.05	183.29 ± 0.76
	補正後	980.07 ± 0.07	11.82 ± 0.05	167.57 ± 0.70
CCD1CD	補正前	985.83 ± 0.07	13.78 ± 0.06	194.16 ± 0.82
	補正後	982.50 ± 0.07	12.02 ± 0.05	169.97 ± 0.72
CCD2AB	補正前	984.53 ± 0.07	12.86 ± 0.05	181.44 ± 0.75
	補正後	982.43 ± 0.06	11.70 ± 0.05	165.45 ± 0.69
CCD2CD	補正前	984.76 ± 0.07	12.57 ± 0.05	177.33 ± 0.74
	補正後	982.74 ± 0.07	11.57 ± 0.05	163.60 ± 0.68
CCD3AB	補正前	984.15 ± 0.07	12.58 ± 0.05	177.25 ± 0.76
	補正後	983.06 ± 0.07	11.62 ± 0.05	164.17 ± 0.70
CCD3CD	補正前	984.91 ± 0.07	12.81 ± 0.06	180.68 ± 0.78
	補正後	982.74 ± 0.07	11.67 ± 0.05	164.98 ± 0.71
CCD4AB	補正前	983.76 ± 0.07	12.37 ± 0.06	174.19 ± 0.75
	補正後	982.42 ± 0.06	11.37 ± 0.05	160.69 ± 0.68
CCD4CD	補正前	984.06 ± 0.07	12.50 ± 0.05	176.42 ± 0.76
	補正後	982.22 ± 0.07	11.37 ± 0.05	161.16 ± 0.69

6.4.4 1/8 Window mode の CTI 補正

これまでは Full window mode での CTI について評価してきた。次に 1/8 Window mode (4.2.1 節) の場合の CTI について議論する。1/8 Window mode では CCD の ACTY=460–540 の領域だけを露光させるため、Full window mode の時と読み出しの際の転送回数が異なる。具体的には式 6.2 における Y_0 が、

$$Y_0 = 460 - (Y_1 + Y_2 + Y_3) \tag{6.9}$$

となる。その他の設定は全て Full window mode のものと同じであるとして、1/8 Window mode における CTI を評価した。

ここでも基本的には Full window mode と同じパラメータで説明することを試み、同じ値では説明できないところだけをフィッティングにより決めた。

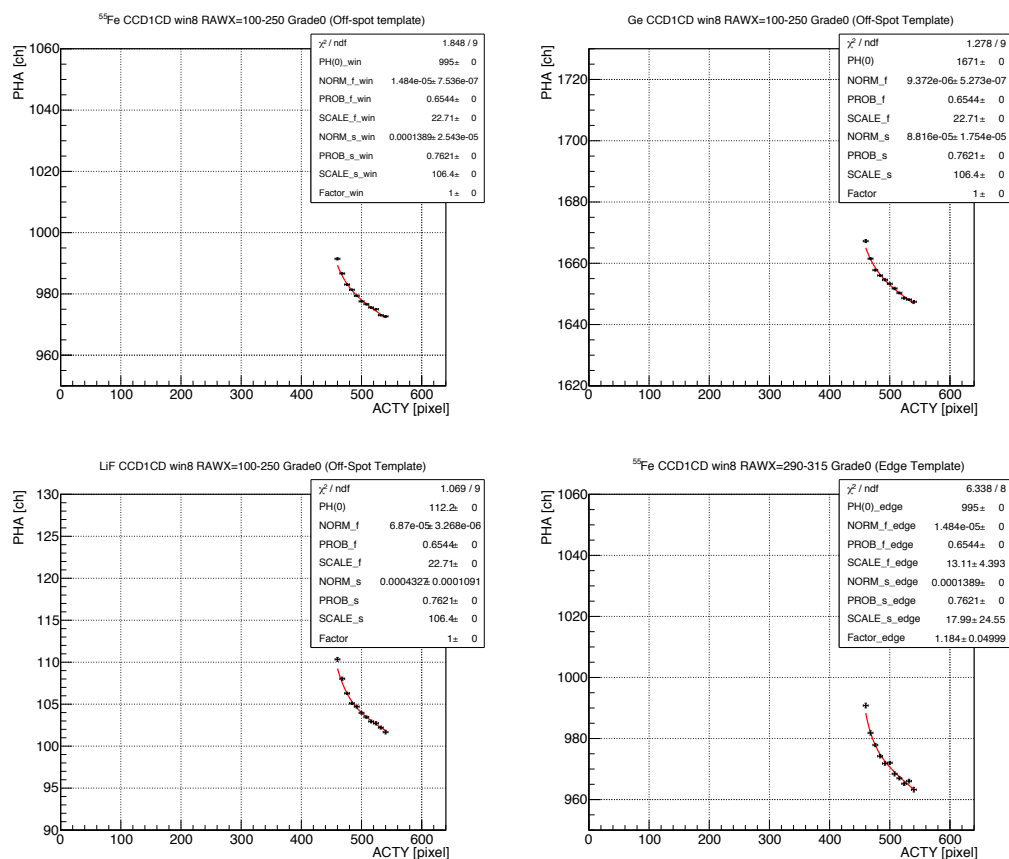


図 6.29 CCD1CD における 1/8 Window mode での Off-spot 領域のフィット結果

図 6.29 には Off-spot 領域の各エネルギーのプロットと、⁵⁵Fe の Edge 領域でのプロットを示した。Off-spot 領域は、Full window mode と同じ c_{f0} 、 c_{s0} では説明できなかったため、1/8 Window mode で新たに値を決めた (c_{f_win} 、 c_{s_win})。その他のパラメータは全て

Full window mode のものと同じで説明できた。1/8 Window mode で新たに決めたパラメータ c_{f_win} 、 c_{s_win} のエネルギー依存性も Full window mode と同様に決めた。また On-spot 領域では CTI 異常関連のパラメータ全てが Full window mode と同じ値で説明できた (図 6.30)。

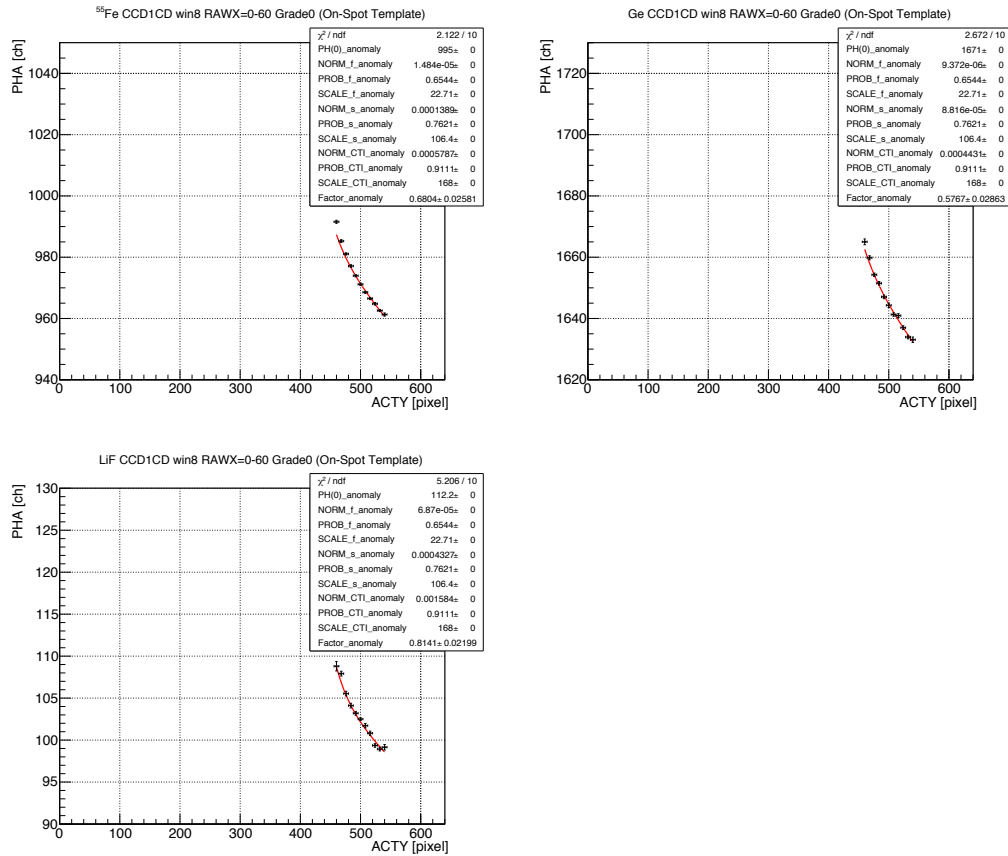


図 6.30 CCD1CD における 1/8 Window mode での On-spot 領域のフィット結果

ACTX 方向依存性は全て Full window mode と同じで再現できることを確認した。さらに g-factor、g-offset についても Full window mode の場合と同様に導出した。全ての CTI 補正を行ったものが図 6.31 である。

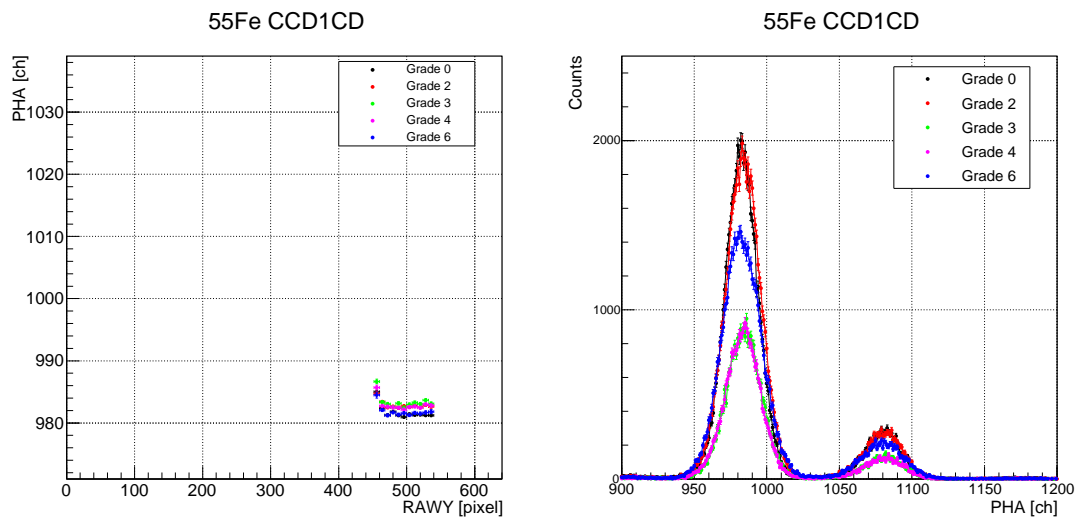


図 6.31 g-offset 補正後の CCD1CD 1/8 Window mode の Grade 別波高値分布

以上から 1/8 Window mode でも Full window mode と同じ枠組みを用いた CTI 補正が有効であることが示された。本修士論文では取り上げないが、ACTX 方向の読み出しを現在の方向と逆向きにした BD 読み出しについても同様の方法でパラメータを決め、較正できることを確認した。

6.5 CTI パラメータの温度依存性

前節までで CTI パラメータの導出に用いたデータはすべて、CCD の温度が -110°C であった。CI によって注入された犠牲電荷がトラップを埋めてから離脱するまでの典型的な転送回数（タイムスケール）は、CCD 素子の温度に依存して変化するため、CCD 温度は CTI に影響する。ASTRO-H 打ち上げ後しばらくは、SXI の CCD 温度は -110°C で運用される予定である。その後の性能の状況によっては冷却温度を変更する可能性がある。この節では、これまでに議論してきた CTI のパラメータの温度依存性を調査する。

前節までで用いた、CCD 温度が -110°C の ^{55}Fe のデータに加えて、CCD 温度が -120°C と -100°C で取得した ^{55}Fe のデータ (表 5.5 参照) を用いた。図 6.32 に各温度での CCD1AB の Off-spot と On-spot での波高値分布を示した。Off-spot のプロットから温度が低いほど「のこぎり」型の傾きは小さく、波高値の減少の割合が小さくなっていることが分かる。また On-spot のデータに対しても同じ傾向が確認できる。

6.5.1 -120°C と -100°C での Off-spot 領域の CTI 関数

まず Off-spot のデータで温度依存性を調べる。 -120°C と -100°C のデータでは、式 6.3、6.4 を下記のように拡張する。

$$c_f = m \cdot c_{f0} \cdot \left\{ 1 - p_f \cdot \exp\left(-\frac{\Delta Y}{s \cdot \tau_f}\right) \right\} \quad (6.10)$$

$$c_s = m \cdot c_{s0} \cdot \left\{ 1 - p_s \cdot \exp\left(-\frac{\Delta Y}{s \cdot \tau_s}\right) \right\} \quad (6.11)$$

ここで、 s, m 以外のすべてのパラメータは -110°C での値に固定した。 s は、 c_f, c_s で共通のパラメータとし、 -110°C では $s = 1$ 、 -120°C 、 -100°C としてフィットした。 m についても、 -110°C では $m = 1$ とし、 -120°C 、 -100°C ではフリーパラメータとした。式 6.10、6.11 を用いてフィットした結果が図 6.32 上の赤線である。さらに横転送の温度依存性を取り入れるために m-factor もフリーにしてフィットした。このフィットで -120°C と -100°C のどちらのデータもよく再現できていることが分かる。

6.5.2 -120°C と -100°C での On-spot の CTI 関数

On-spot 領域では、CTI 異常領域の CTI パラメータ (c_{a0}, p_a, τ_a) のうち、 τ_a を各温度でフリーにしてフィットした。 c_f, c_s は、Off-spot と同じ値に固定した。図 6.32 の赤線がフィット結果である。

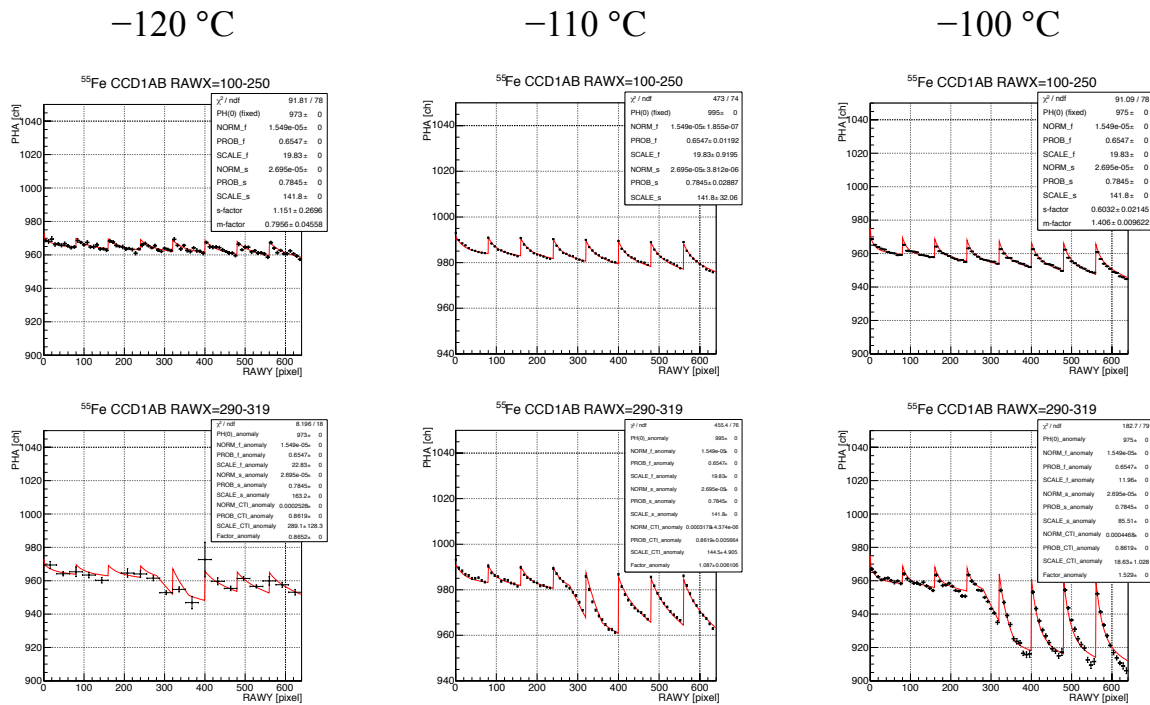


図 6.32 CTI の温度依存性。左から -120°C , -110°C , -100°C でのデータであり、上は Off-spot 領域、下は On-spot 領域でのデータ。赤線はベストフィットのモデル (本文参照)。

6.5.3 Off-spot と On-spot の温度依存性の違い

図 6.33 に、 -110°C での s の値に対して、 -120°C と -100°C での s の比をプロットした。また、 -110°C での τ_a の値に対する、 -120°C と -100°C での値の比もプロットした。Off-spot 領域での s の温度依存性は、On-spot 領域の τ_a のそれとは異なっている。電荷が再放出されるタイムスケール τ は $\tau \propto \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right)$ で表される [13]。ここで、 ΔE はトラップのエネルギー準位、 k はボルツマン定数、 T は CCD の温度である。Off-spot 領域と On-spot 領域で τ の温度依存性が異なっていることは、各領域でエネルギー準位が異なっていることを示している。実際、図 6.33 から、Off-spot 領域と CTI 異常領域でのトラップのエネルギー準位はそれぞれ $\sim 0.1\text{ eV}$, $\sim 0.5\text{ eV}$ と求まる。CTI 異常領域とそれ以外の領域でトラップのエネルギー準位が有意に異なるという結果は、CCD 素子製造プロセスの際の金属汚染によって電荷転送損失が悪化するという 6.2 節で挙げた可能性を支持する。

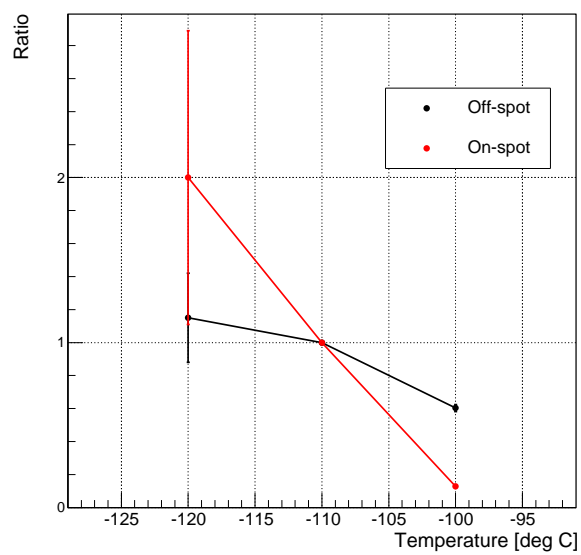


図 6.33 CCD1AB における τ の温度依存性。黒が Off-spot での τ_f, τ_s の値、赤が CTI 異常領域での τ_a の値。-110°C での値で規格化している。

第 7 章

検出効率の一様性の測定

7.1 測定目的

X 線イベントの数から天体のフラックスを知るためには、検出効率 (QE) の情報が必要である。SXI の CCD 素子において、QE がセグメント内で一様かどうかは自明ではない。例えば、不感層や空乏層の厚みが場所によって変化している場合である。不感層の変化は特に軟 X 線に対する QE に、空乏層の厚みの変化は主に硬 X 線に対する QE に影響する。

CCD 素子の構造等の物理的な性質で決まる QE 以外にも、イベント判定時に X 線イベントを取りこぼしてしまうことが考えられる。入射 X 線によるイベントでも、Grade 判定の際に非 X 線イベントとして判定されてしまうイベントが一定数存在する。転送回数が多いほど取りこぼす信号電荷の数が高くなるので、読み出し口から遠いピクセルのイベントでは、真の Grade とは異なる Grade に分類されてしまい、結果的に QE が下がる可能性がある。

また 3 つ目に挙げられるのは、6 章で議論した CTI 異常領域で QE が変化している可能性である。例えば、CTI 異常領域の読み出しノイズが周囲より高ければ、Grade 判定の際に X 線イベントが非 X 線イベントとして判定される割合が周囲よりも多くなるため、QE が局所的に下がる可能性がある。

本章では QE の非一様性がないか、物理的な厚みによる QE の非一様性、Grade 付けによる QE の非一様、CTI 異常領域に関連する非一様性にわけて検証した。

7.2 全 Grade の SXI カウントマップを用いた一様性の検証

まずは CCD 素子の構造で決まる検出効率の一様性を調査するために、全 Grade のイベントで作成したカウントマップを用いて解析を行う。5.2 節で述べたように、ダウンバーストピクセルがあると、その周囲 3×3 ピクセルの波高値も高くなって Bad Grade の割合が増える傾向がある。結果的にダウンバーストは X 線のカウントレートに影響を与える。Grade 判定は周囲 5×5 ピクセルで行うため、ダウンバーストピクセルと、その周囲 7×7 ピクセルを除いたデータを使用した。さらにここでは CCD 素子を 4 枚並べて同時に取得されたデータから

CCD 毎の差を比較する必要があるため、座標を実際の素子の配置を再現する DET 座標に統一する。以下に示すカウントマップは全て SXI を下から見上げたものに対応する。また回転型 X 線発生装置からの X 線は完全に単色ではなく、構成物 (主にステンレス) からの輝線や散乱ガンマ線の影響もあるため、 ^{55}Fe 、Ge、LiF のデータのうち、それぞれ Mn $K\alpha$ 、 $K\beta$ 線、Ge $K\alpha$ 、 $K\beta$ 線、F $K\alpha$ 線のエネルギー帯域、つまり 5.4–7.2 keV、9.0–12.0 keV、0.36–1.08 keV のイベントのみを用いて解析を行う。

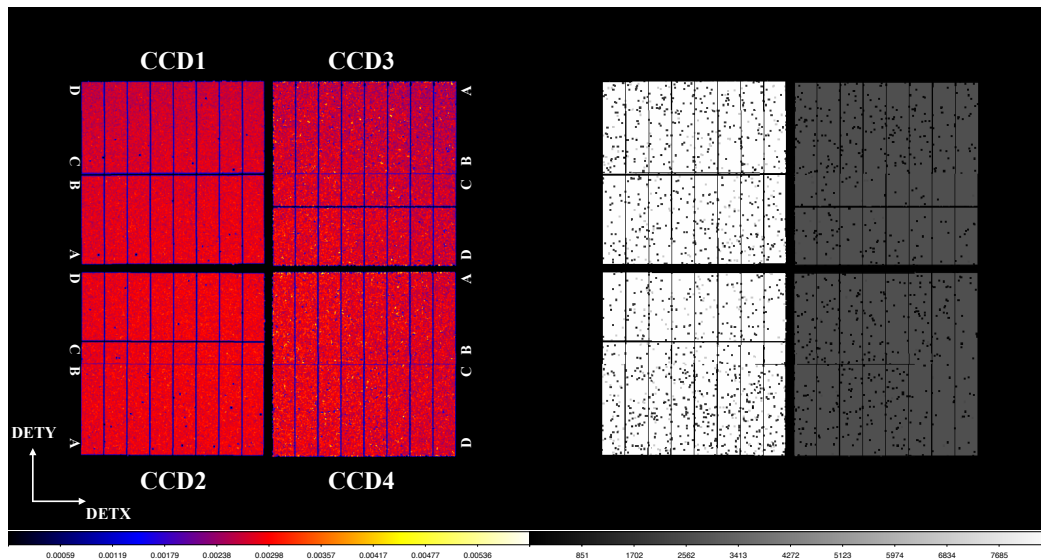


図 7.1 左: ^{55}Fe を照射した時の Mn $K\alpha$ 、 $K\beta$ 輝線バンド (5.4–7.2 keV の SXI カウントマップ)。右:左図を作成するときに用いた exposure map。ダウンバーストピクセルとその周囲 7×7 ピクセルを除いた。グレースケールの数字はそのピクセルにおいて有効なフレーム数に対応する。

図 7.1 右は ^{55}Fe を取得した際の exposure map である。ダウンバーストとその周囲 7×7 ピクセルを除き、各ピクセルで実際に露光されたフレーム数を示したものである。CCD3 と CCD4 が暗いのは 5.1 節のダウンストリームの影響でフレーム数が少なくなっているからである。また縦 (行) と横 (列) の方向で 0 フレームになっているのは、それぞれ CI 行と、正常に機能していない Bad column に対応する。こうした領域は実際に軌道上で観測する際にも除外される。全 Grade を合計した生のカウントマップをこの exposure map で割り算することで、1 フレームあたりのカウント数で規格化した図 7.1 左が得られた。 ^{55}Fe は X 線放射源としてはほぼ点源であり、回転型 X 線発生装置の構造を考慮しても、 ^{55}Fe からの X 線は遮られることなく 4 つの CCD 素子のどの場所にも直接照射される。したがって、 ^{55}Fe の真下にある CCD2CD にカウント数のピークのある、ほぼ一様な分布になる。

^{55}Fe と同様に、Ge、LiF の全 Grade のデータを用いて、exposure map と、Ge $K\alpha$ 、 $K\beta$ 輝線バンド (9.0–12.0 keV) および F $K\alpha$ 輝線バンド (0.36–1.08 keV) のカウントマップを作成した (図 7.2, 7.3)。図 7.2 右で、CCD2CD 以外で有効なフレーム数が少ないのは、Ge のデータ取得時ではダウンバーストが生じたピクセル数が他のデータよりも多く (全ピクセルの

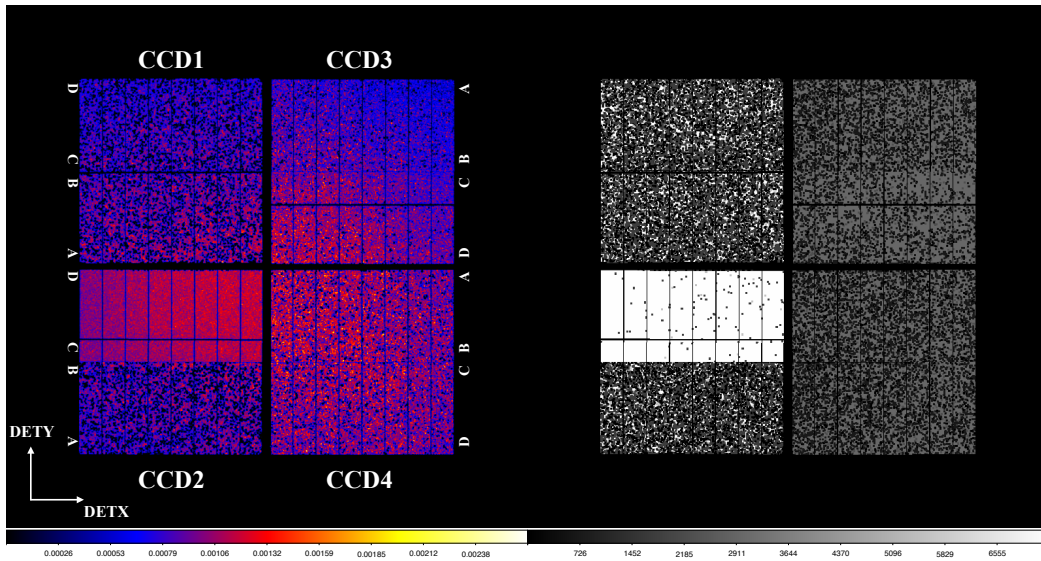


図 7.2 左:Ge を照射した時の Ge $K\alpha$, $K\beta$ 輝線バンド (9.0–12.0 keV) の SXI カウントマップ。右:ダウンバーストピクセルの周囲 7×7 ピクセルを除いた exposure map。グレースケールの数字はそのピクセルにおいて有効なフレーム数に対応。

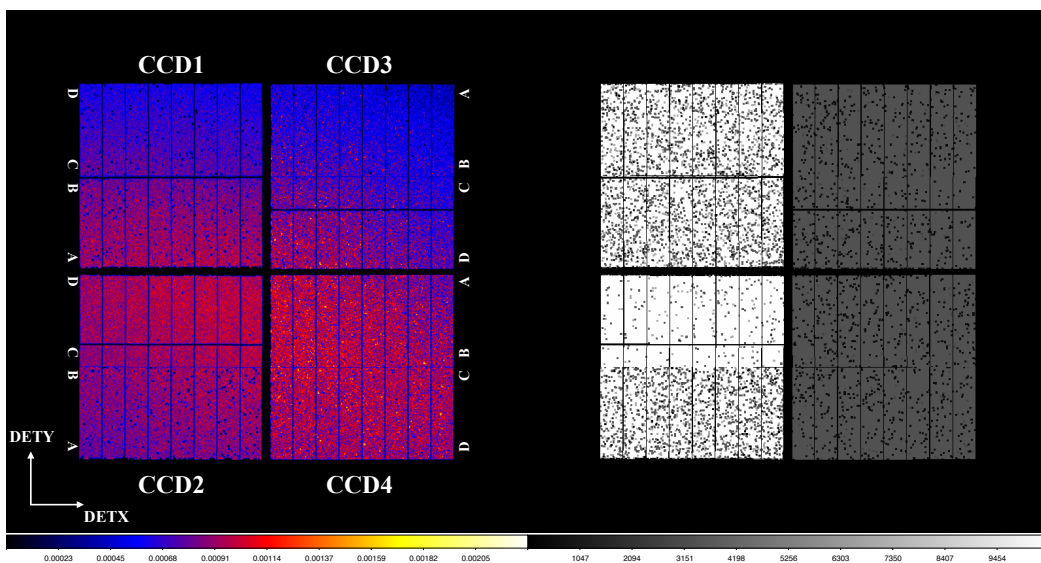


図 7.3 左:LiF を照射した時の F $K\alpha$ 輝線バンド (0.36–1.08 keV) の SXI カウントマップ。右:ダウンバーストピクセルの周囲 7×7 ピクセルを除いた exposure map。グレースケールの数字はそのピクセルにおいて有効なフレーム数に対応。

78 % しか解析に使用できない)、そのほとんどが CCD2CD 以外に分布しているためである。

Ge と LiF では、ターゲットと回転型 X 線発生装置の構造から、4 枚の CCD 素子のどの場所でもターゲット面がすべて見えるというわけではない。回転型 X 線発生装置内での散乱は考えないとすると、CCD 上のある場所で受ける X 線の強度は、その場所から見えるターゲット面がターゲット全体に対して何割なのかに比例する。見えるターゲット領域は、三角形の

X線照射窓や窓の近くにあるネオジウム磁石に隠されることで小さくなるため、X線の強度は、CCD上の場所によって複雑に変化する。大きな傾向としては、回転型X線発生装置のX線照射窓（三角形の窓）から方位角方向に遠ざかるほど、届くX線は少なくなる。本実験では、CCD2の真上に回転型X線発生装置のX線照射窓があるのでCCD2が最も明るく、その対角に位置するCCD3が最も暗い。実際、両素子のカウントレートは2倍程度異なる。

一方でターゲットは点源ではないので、X線照射窓やネオジウム磁石に隠されることによるX線の強度変化は連続的である。したがって、隣り合うCCDのQEが等しければ、どの方向にカウントレートを射影してもCCD間で連続的に繋がるのが期待される。また、局所的にQEの悪い領域がなければ、素子内のカウントレートも連続的に変化すると考えられる。連続的に変化しているかどうかを調べるために、図7.1, 7.2, 7.3をそれぞれX方向に16分割し、それぞれの分割領域をY方向に射影した。また同様にY方向にも16分割し、X方向に射影した。図7.4, 7.5, 7.6は、図7.7に示した領域の射影マップである（全ての領域での射影は付録Bに掲載）。各列、各行で、射影時に足し合わされたピクセル数が異なるため、それぞれピクセル数で規格化した。ここではこれらの分布を近似的に1次元ガウス関数を用いて射影プロットをフィットした。図7.4, 7.5, 7.6のそれぞれの図の上にはそのフィット結果、下にはデータとモデルとの差を示してある。3つのエネルギーバンドのどの場所においてもCCDとCCDの境界に値するDETY(あるいはDETX)=600-700付近に段差は見られず、CCD間でQEが一致していることが確認できた。6章で見つけたCTI異常領域においても、局所的な構造は見られなかった。

一方、GeのDETY射影のプロットでは、DETYの大きいところでカウントレートが高くなっているように見える。これが、フィットしたガウス関数が実際のX線カウントマップと異なるせいなのか、実際にCCDのQEが高くなっているかは、このデータだけでは区別できない。すでにQEがわかっている検出器で、回転型X線装置から照射されたX線の強度と分布を調べる必要がある。今後、回転型X線装置を検出効率が既知であるSDD(Silicon Drift Detector)に照射し、場所ごとのX線強度分布を測定する予定である。

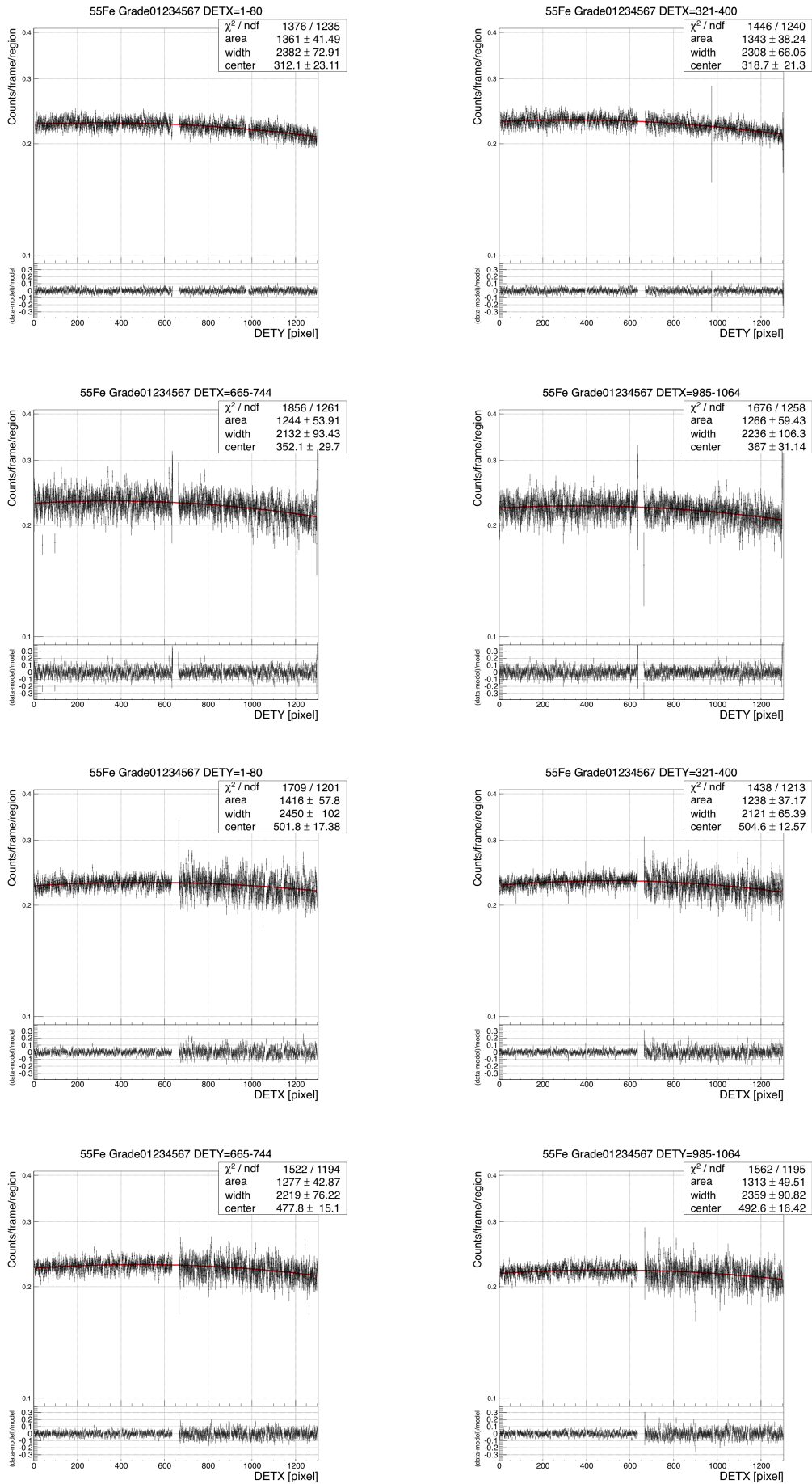


図 7.4 Mn $K\alpha$, $K\beta$ 輝線バンドのカウンタマップを短冊状に分割して射影したプロット。

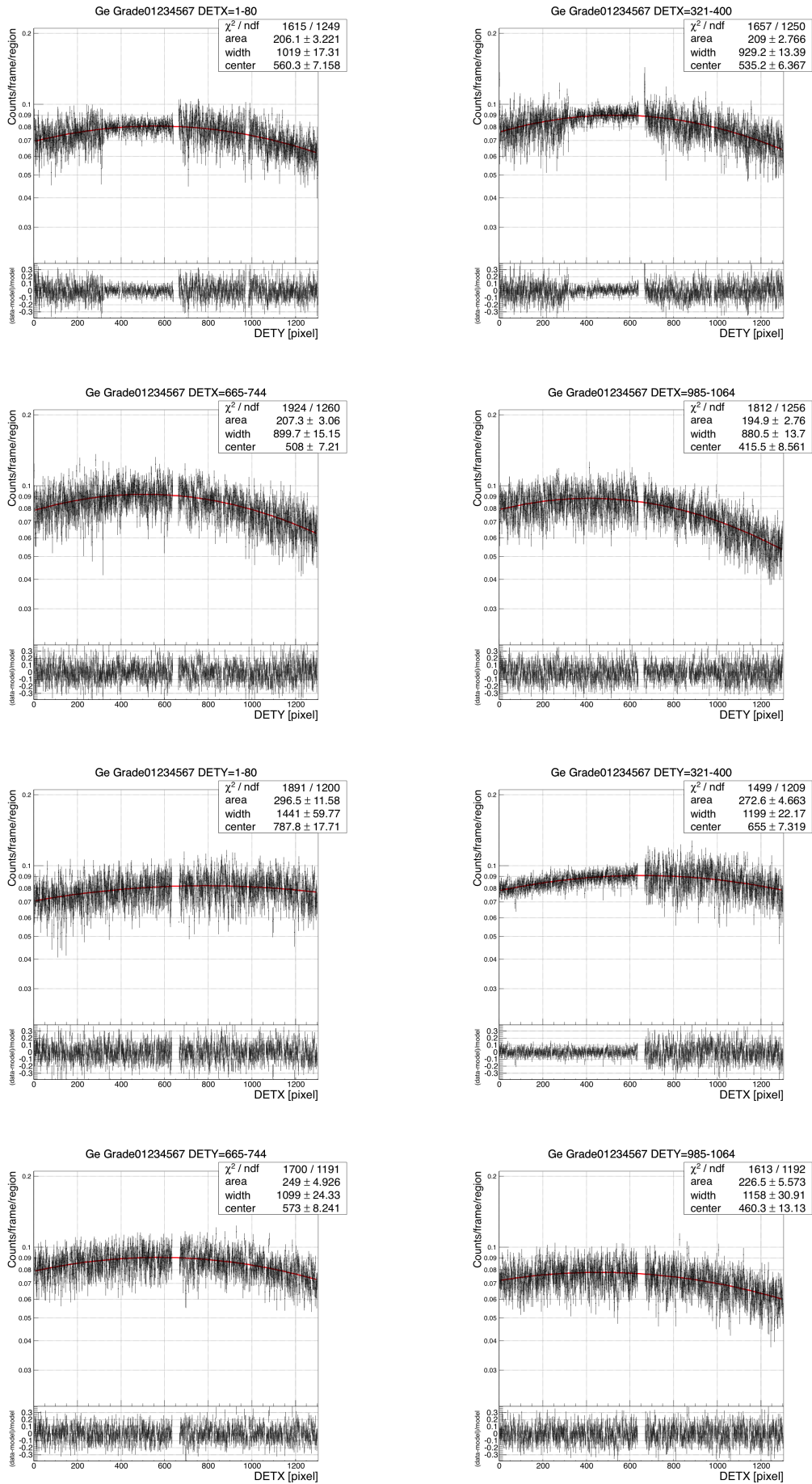


図 7.5 Ge $K\alpha$, $K\beta$ 輝線バンドのカウントマップを短冊状に分割して射影したプロット。

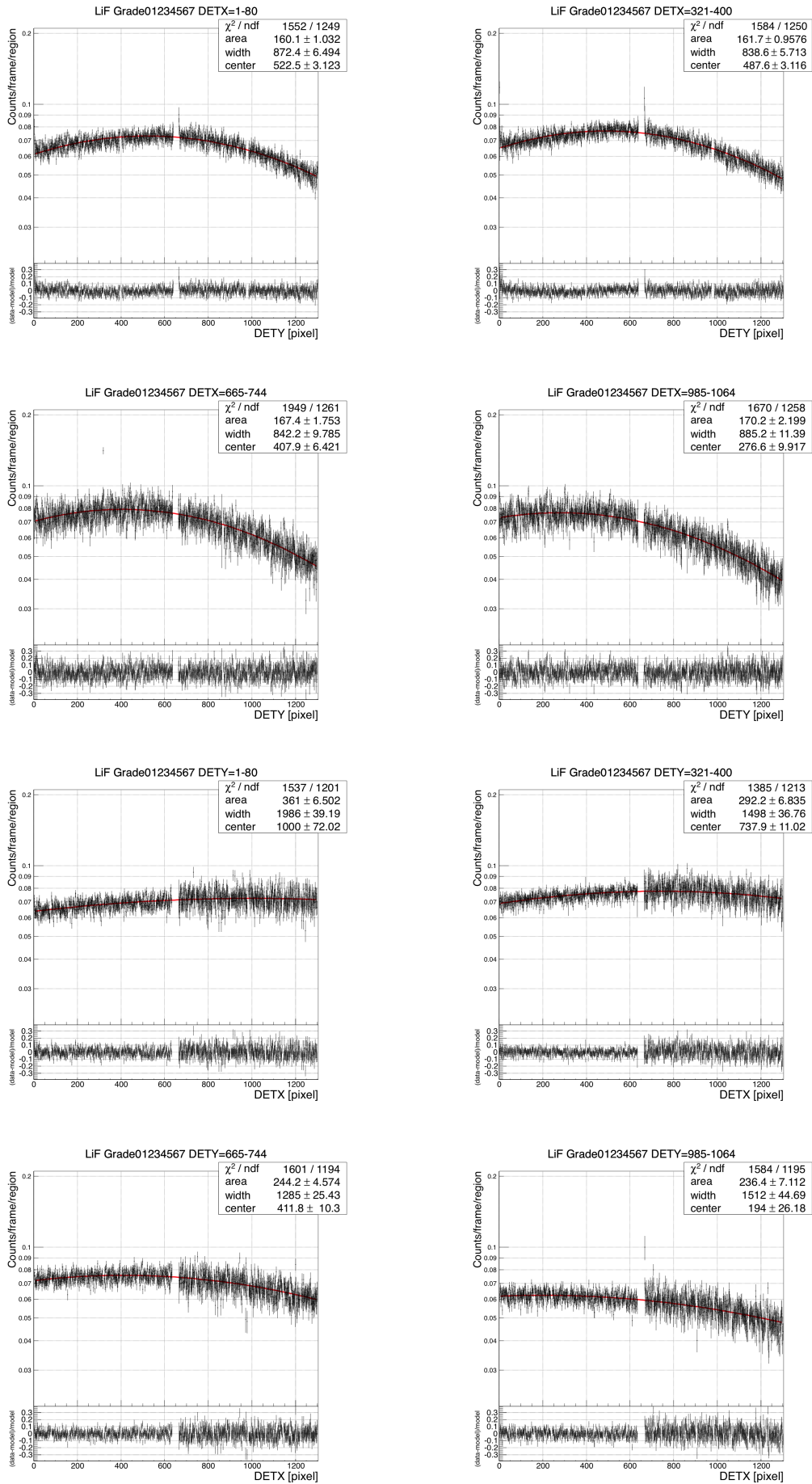


図 7.6 F K α 輝線バンドのカウントマップを短冊状に分割して射影したプロット。

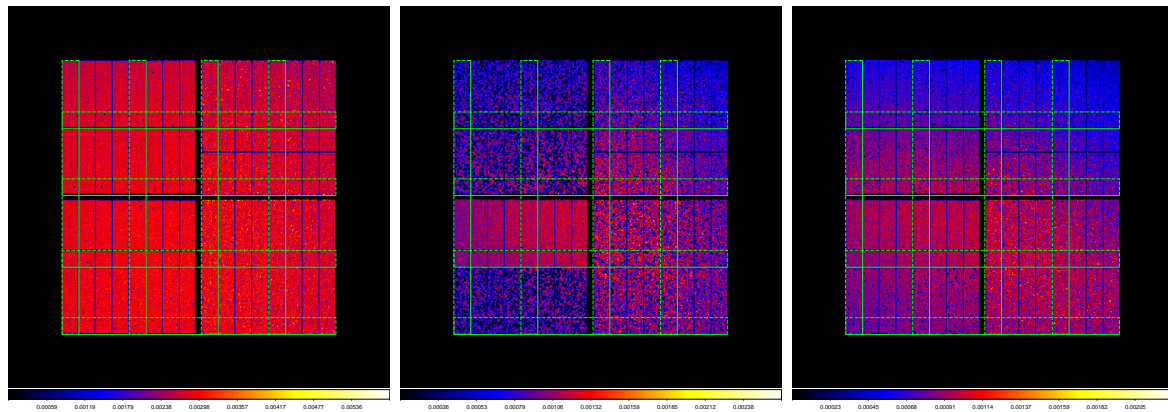


図 7.7 左から Mn K α , K β , Ge K α , K β , F K α 輝線バンドのカウントマップを表す。それぞれの緑色の四角で囲まれた領域が図 7.4, 7.5, 7.6 の領域に対応する。

7.3 Grade 判定による検出効率

Grade 判定の際に取りこぼしてしまう X 線イベントの割合を調べるために、セグメント毎に Good Grade (Grade 0,2,3,4,6) と全 Grade のカウント数をそれぞれ計算し、その比をとったものを表 7.1 にまとめた。

表 7.1 セグメント毎の Grade02346/Grade01234567 比

セグメント	Mn K α , K β (5.4–7.2 keV)	Ge K α , K β (9.0–12.0 keV)	F K α (0.36–1.08 keV)
CCD1AB	0.98026 \pm 0.00012	0.98150 \pm 0.00023	0.99000 \pm 0.00013
CCD1CD	0.98175 \pm 0.00011	0.98356 \pm 0.00022	0.99053 \pm 0.00013
CCD2AB	0.97980 \pm 0.00007	0.98585 \pm 0.00012	0.99025 \pm 0.00008
CCD2CD	0.97812 \pm 0.00007	0.98261 \pm 0.00014	0.98952 \pm 0.00008
CCD3AB	0.97703 \pm 0.00013	0.98174 \pm 0.00023	0.98808 \pm 0.00017
CCD3CD	0.97437 \pm 0.00014	0.97783 \pm 0.00026	0.98652 \pm 0.00017
CCD4AB	0.97354 \pm 0.00008	0.97412 \pm 0.00026	0.98736 \pm 0.00010
CCD4CD	0.97691 \pm 0.00007	0.97824 \pm 0.00024	0.98831 \pm 0.00009

どのエネルギー、どのセグメントでも、1–2 % 程度の Bad Grade が存在している。地上試験では、宇宙線によるイベントはほとんど起きないので、これらの Bad Grade は、本来は X 線イベントであるにもかかわらず Bad Grade に誤分類されてしまったイベントと考えられる。イベント判定の際には、読み出しノイズや暗電流のゆらぎ (~ 5 ch) を X 線起因の電荷と誤認しないために、split threshold を読み出しノイズの 3σ にあたる 15 ch として解析を行っている。しかしある確率でノイズが split threshold を超えてしまう場合が存在する。そのため、本来は Good Grade であるイベントでも、読み出しノイズのゆらぎによって、より広がったイベントと認識され、Bad Grade に誤分類される可能性がある。別の可能性として、イベント中心のピクセルの電荷が周辺のピクセルに漏れだしたものの、split threshold は超えなかったため取りこぼしてしまっている場合もある。そういった漏れだし電荷のあるピクセ

ルでは、ノイズのゆらぎとの足し算で split threshold を超えてしまう確率が高くなり、その結果、イベントが Bad Grade に分類される確率が高くなる。

表 7.1 において F $K\alpha$ での Good Grade の割合は、どのセグメントでも、Mn $K\alpha$, $K\beta$ や Ge $K\alpha$, $K\beta$ に比べて多くなっている。Mn $K\alpha$, $K\beta$ や Ge $K\alpha$, $K\beta$ といった硬 X 線では生成される電荷量が多いため、漏れだす電荷も多く、そのため Bad Grade に分類される割合が高くなると考えられる。一方、F $K\alpha$ のような軟 X 線では生成される電荷量が少なく、この影響は小さいだろう。

Grade 判定による QE の場所ごとの変化を調べるために、全イベントに対する Good Grade 比を出した。その方法として、まず Good Grade に対しても 7.2 と同様に X、Y 方向に 16 分割して射影した。全イベントに対する Good Grade イベントの比を見るために、それぞれのプロットを同じ領域の全 Grade のプロットで割った。Mn $K\alpha$, $K\beta$ 、Ge $K\alpha$, $K\beta$ 、F $K\alpha$ での結果を、それぞれ図 7.8, 7.9, 7.10 に示す。Grade 判定で取りこぼす X 線イベントの割合が場所に依らないなら、このプロットは同じエネルギーであればセグメント内で同じ値になる。

しかし、最も統計の良い Mn $K\alpha$, $K\beta$ の DETX 方向に射影したプロットを見ると、わずかに中心に向かって Good Grade 比が下がっているように見える。そこで、この分布のビンニングを図 7.11 のように行った。すると、端に比べて中心は QE が $\sim 0.5\%$ 下がっていた。このプロットは 2 つの CCD 素子にまたがっており、左半分のデータは左方向に縦転送され、右半分のデータは反対に右方向に転送されて読み出される。プロットで中心で Good Grade 比が下がっているということは、転送回数が多いほど Bad Grade となる割合が増えることを示している。その原因は、本章の初めで述べたように、転送回数が多いほど CTI の影響で取りこぼす信号電荷の割合が高くなるので、読み出し口から遠いピクセルのイベントでは、Good Grade イベントが Bad Grade に誤判定される可能性が高くなるためだろう。

さらに図 7.8 右上の DETX=321-400 のプロットを見ると、DETY=1000 付近 (矢印) で周囲より 1% 程度低くなっている。この場所は 6 章で議論した CCD1CD での CTI 異常領域に対応する。Ge $K\alpha$, $K\beta$ 、F $K\alpha$ のデータについても同じ場所で同じ傾向が確認された (図 7.9 右上、7.10 右上)。このことは、CTI 異常領域ではどの入射エネルギーにおいても Good Grade の割合が低い、つまり QE が低いことを示している。次の節では CTI 異常領域での QE をさらに調査する。

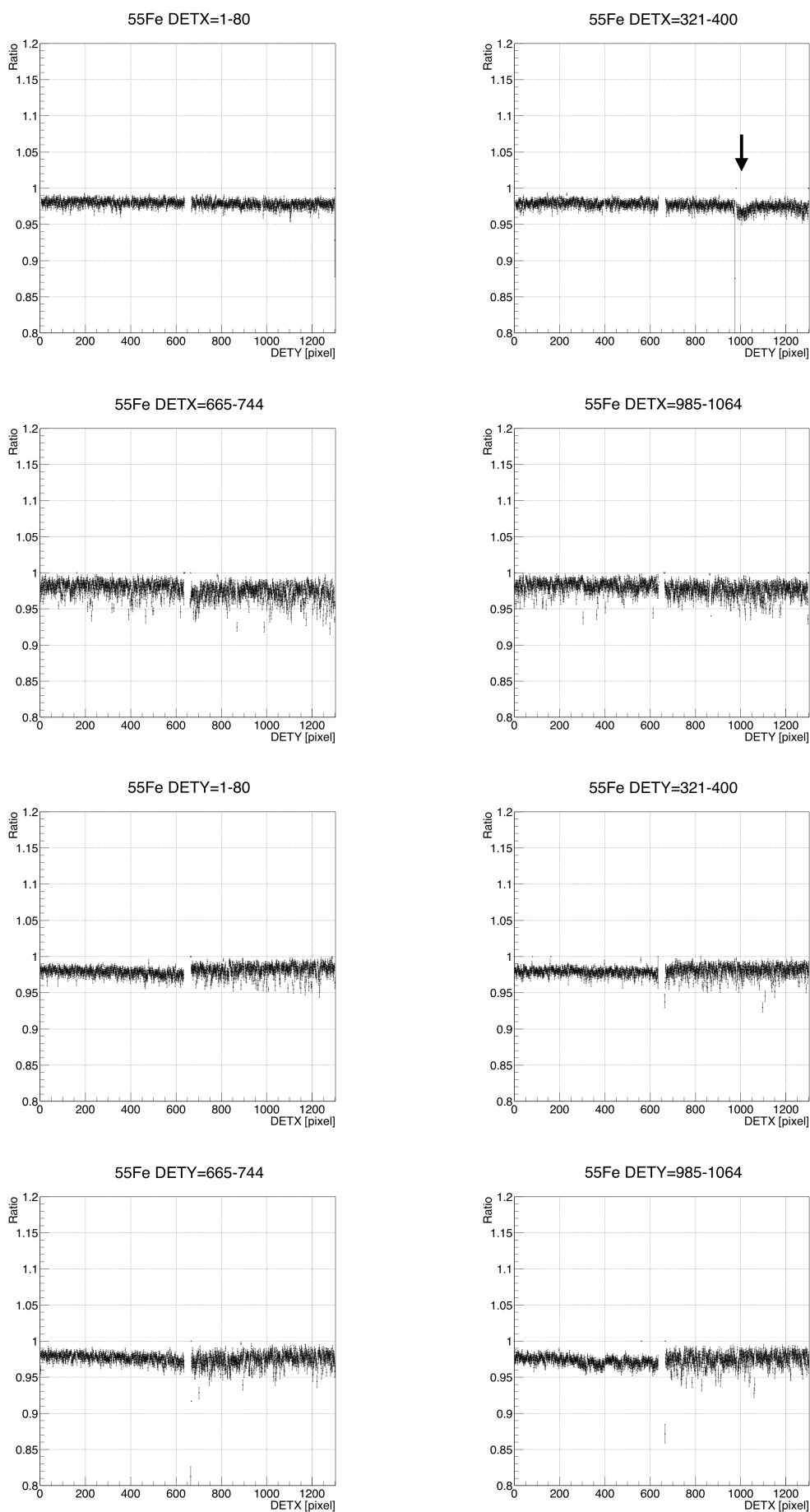


図 7.8 Mn $K\alpha$, $K\beta$ のカウントマップにおける Grade02346/Grade01234567 比。

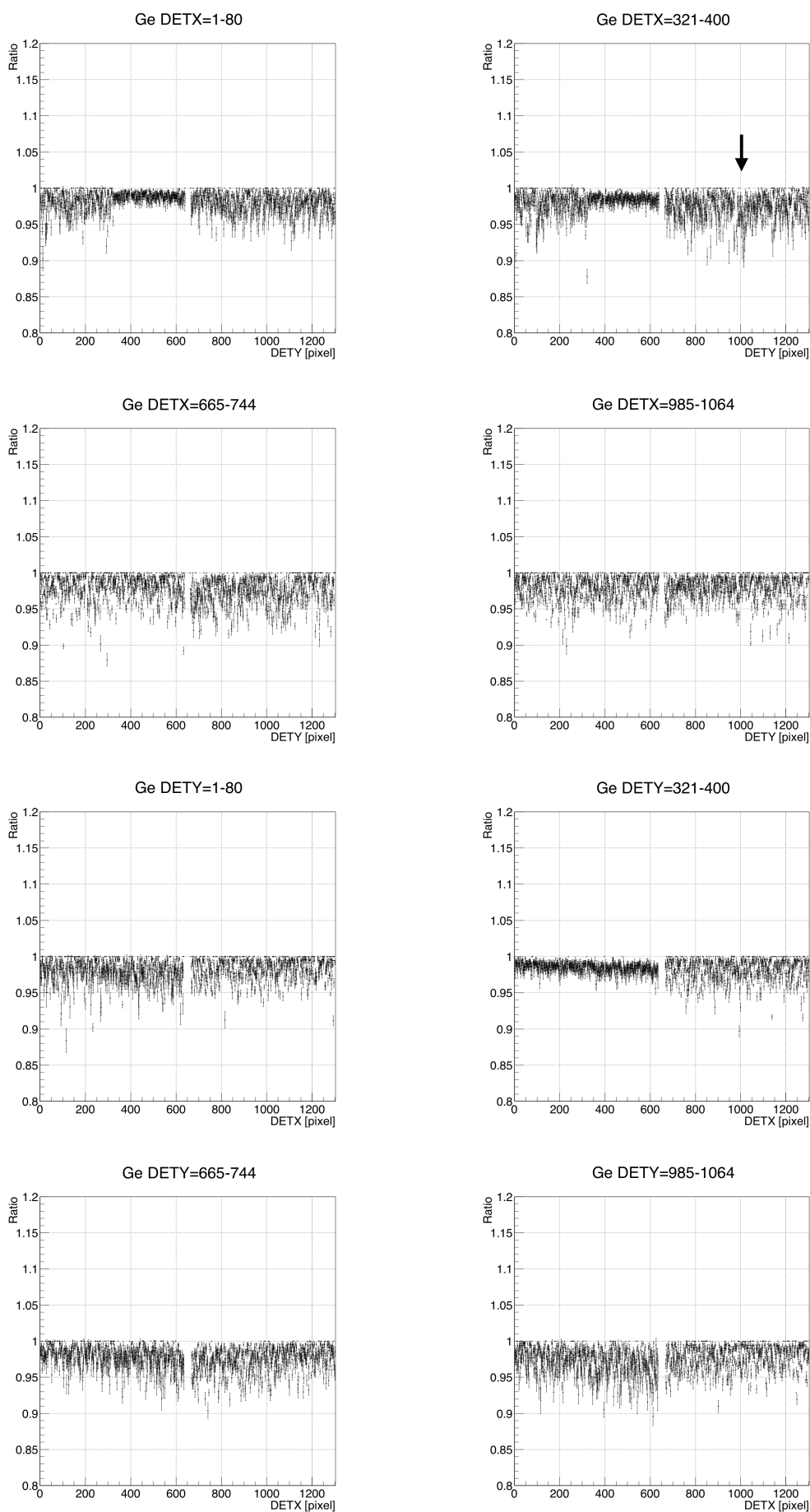


図 7.9 Ge $K\alpha$, $K\beta$ のカウントマップにおける Grade02346/Grade01234567 比。

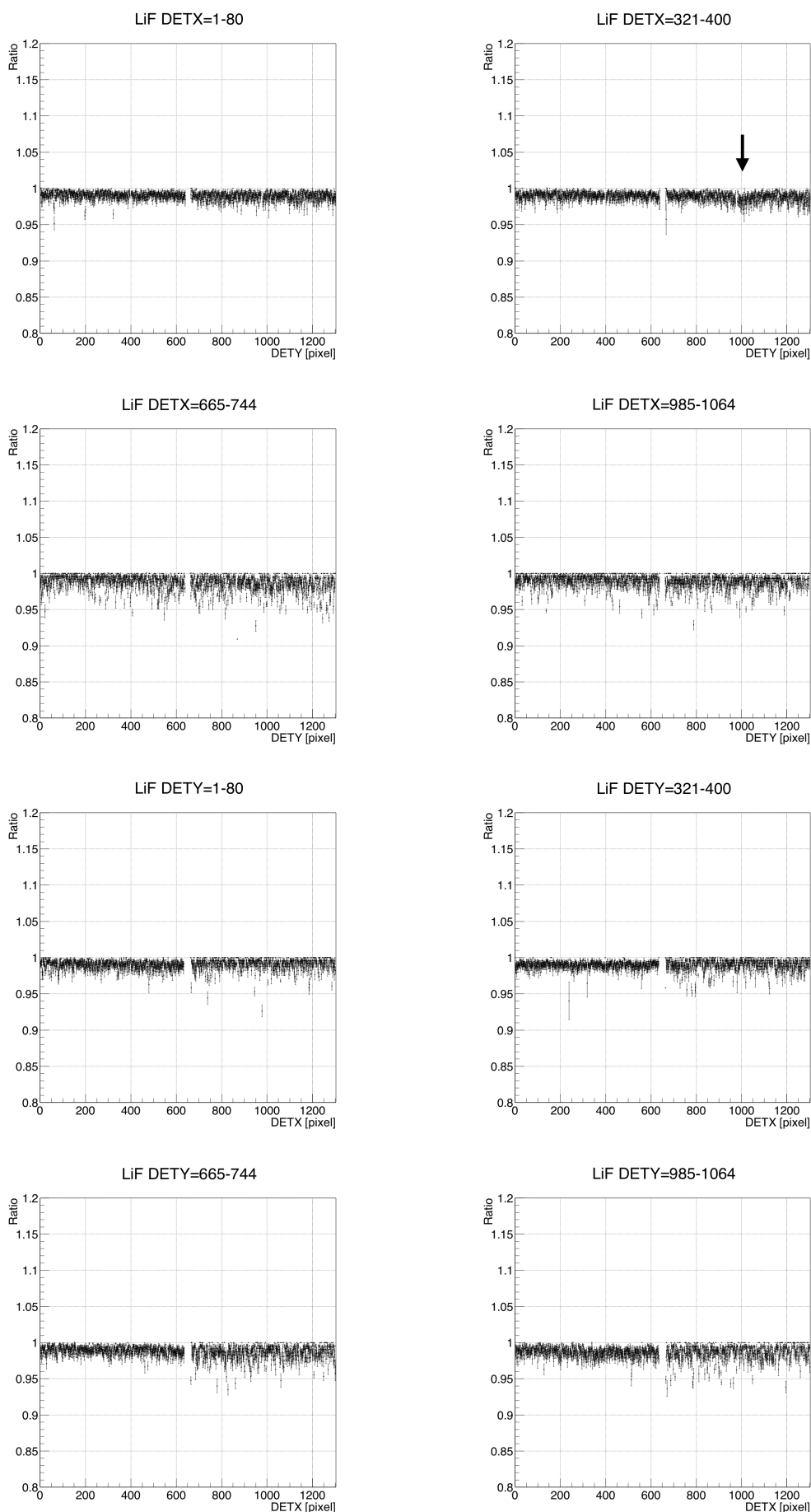


図 7.10 F K α のカウントマップにおける Grade02346/Grade01234567 比。

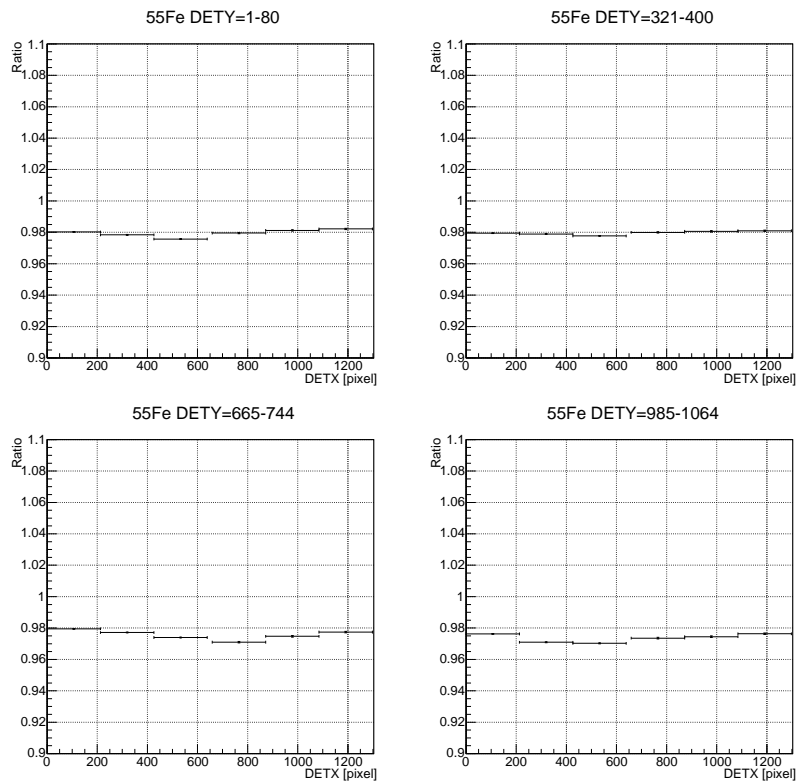


図 7.11 図 7.8 の下 4 つのプロットをビンニングしたもの。

7.4 CTI 異常領域における検出効率

7.3 節において、CTI 異常領域では QE が低くなる傾向をみつけた。そこで、CCD1AB/CD, CCD2AB/CD に存在するすべての CTI 異常領域における、全 Grade に対する Good Grade の比を調べた。結果を表 7.2 にまとめた。参考のため、表 7.1 に示したセグメント全体の平均も再掲している。

表 7.2 CTI 異常領域における Grade02346/Grade01234567 比

セグメント	領域	Mn $K\alpha, K\beta$ (5.4–7.2 keV)	Ge $K\alpha, K\beta$ (9.0–12.0 keV)	F $K\alpha$ (0.36–1.08 keV)
CCD1AB	CTI 異常	0.97710 ± 0.00066	0.98041 ± 0.00221	0.98815 ± 0.00086
	全体	0.98026 ± 0.00012	0.98150 ± 0.00023	0.99000 ± 0.00013
CCD1CD	CTI 異常	0.96898 ± 0.00042	0.97153 ± 0.00137	0.98463 ± 0.00055
	全体	0.98175 ± 0.00011	0.98356 ± 0.00022	0.99053 ± 0.00013
CCD2AB	CTI 異常	0.97841 ± 0.00047	0.97483 ± 0.00189	0.98932 ± 0.00059
	全体	0.97980 ± 0.00007	0.98585 ± 0.00012	0.99025 ± 0.00008
CCD2CD	CTI 異常	0.97720 ± 0.00071	0.98651 ± 0.00094	0.98961 ± 0.00076
	全体	0.97812 ± 0.00007	0.98261 ± 0.00014	0.98952 ± 0.00008

CCD1CD では、CTI 異常領域での Bad Grade の割合は、どのエネルギーでも全体に比べて 0.3–0.5% 高くなっている。また CCD2AB の異常領域でも 0.1–0.5% 高くなっている。一

方、CCD1AB、CCD2CD は、エネルギーによっては必ずしも Bad Grade の割合が高くなるわけではない。

本章では、Good Grade 比の射影プロットから、読み出し口から遠い領域の QE (Good Grade 比) は、読み出し口に近い領域に比べて $\sim 0.5\%$ 下がっていることがわかった。また CTI 異常領域でも QE が周囲に比べて最大 0.5% 下がることがわかった。一方、QE の一様性の要求値は 5% である。したがって今回の測定で FM 素子が要求値を十分満たすことを定量的に実証した。

第 8 章

まとめと今後の課題

ASTRO-H 衛星搭載 X 線 CCD カメラ SXI の地上較正試験を 2014 年 8-9 月に京都大学宇宙線研究室で行った。我々が開発した回転型 X 線発生装置を使用し、FM 素子に ^{55}Fe 、Ge、LiF からの X 線を照射した。そのデータから電荷転送損失 (CTI) を評価および補正し、検出効率の一様性を測定した。

CTI

- FM 素子の波高値分布から CTI が局所的に増大する領域 (CTI 異常領域) を発見した。その異常領域の場所が、周囲より暗電流の高い領域と一致することを突き止めた。
- 異常領域での CTI にも対応できる CTI 関数を新たに構築した。この関数を用いた補正により、ゲインのばらつきを 1 桁改善した。
- 電荷の広がり合わせた補正を行ったことで、エネルギー分解能が補正前と比べて最大で 12% 改善した。
- CTI の温度依存性から、CTI 異常が不純物によるものである可能性を示した。
- 今回求めた較正データは、打ち上げ後の経年劣化に伴い更新が必要になる。軌道上では観測時間の制限から較正に十分なデータを取得することはできないため、本研究で確立した補正方法を打ち上げ後の観測データ処理に用いる予定である。

検出効率の一様性

- SXI のカウントマップを用いて、CCD 素子の構造で決まる検出効率が CCD 間で一定であることを定量的に示した。
- X 線イベントと非 X 線イベントの割合の空間分布を調査した。CTI 異常領域では非 X 線イベントの割合が高くなっていることを明らかにしたが、この非一様性は要求値に比べて十分小さいことを示した。
- 今後検出効率の絶対値を求めるために、既知の検出効率を持つ検出器を用いて回転型 X 線発生装置の場所ごとのフラックスを知り、SXI で得られたカウントレートと比較する必要がある。

付録 A

CTI パラメータ導出過程

A.1 CCD1AB

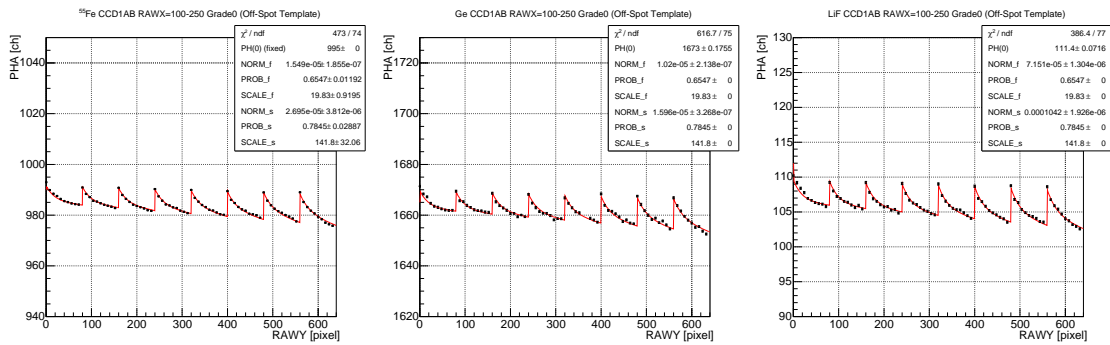


図 A.1 CCD1AB における Off-spot 領域

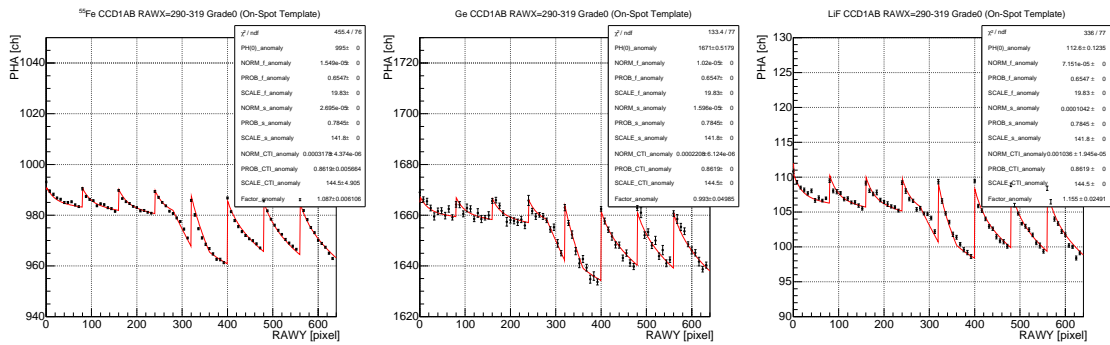


図 A.2 CCD1AB における On-spot 領域

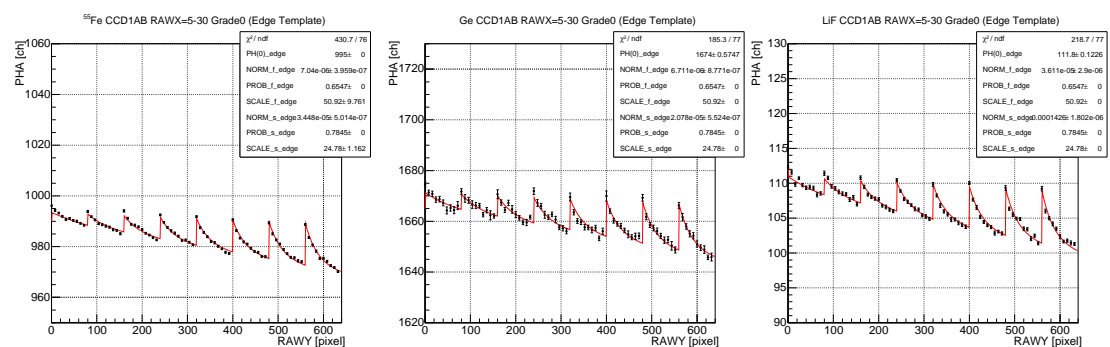


図 A.3 CCD1AB における Edge 領域

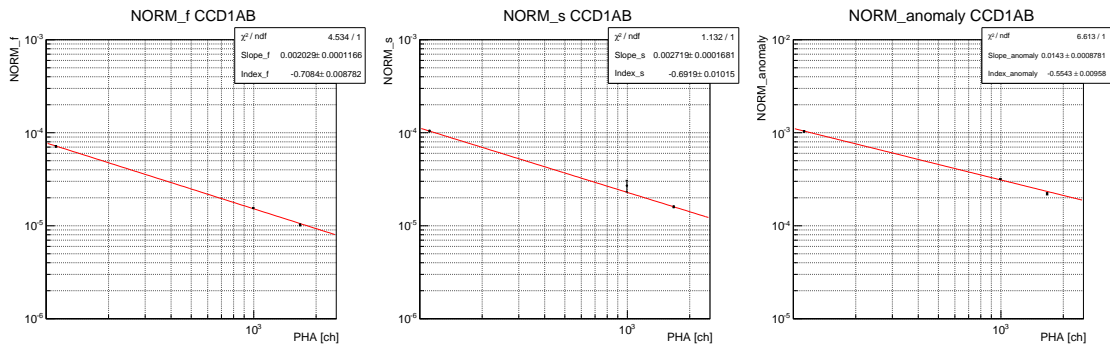


図 A.4 CCD1AB における c_{f0} , c_{s0} , c_{a0} のエネルギー依存性

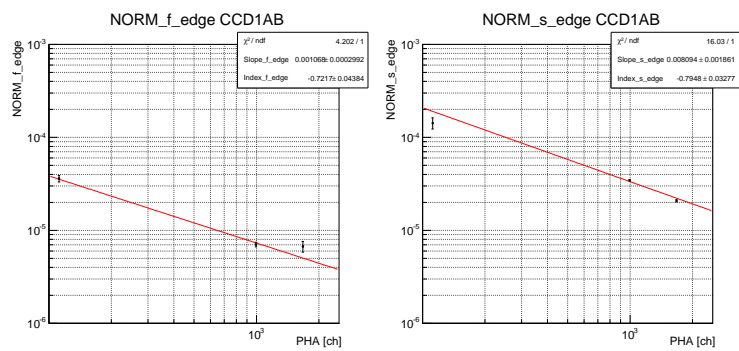


図 A.5 CCD1AB における Edge 領域での c_{f0} , c_{s0} のエネルギー依存性

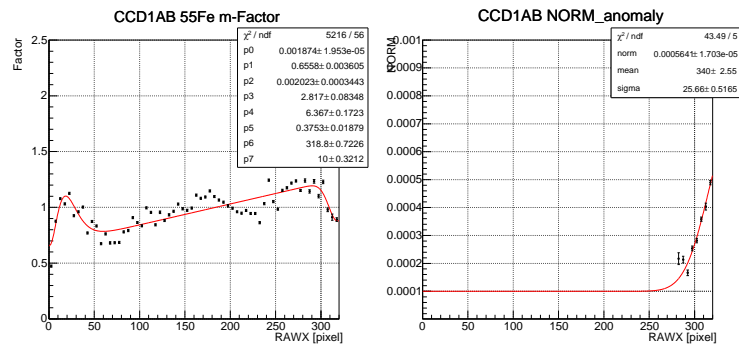
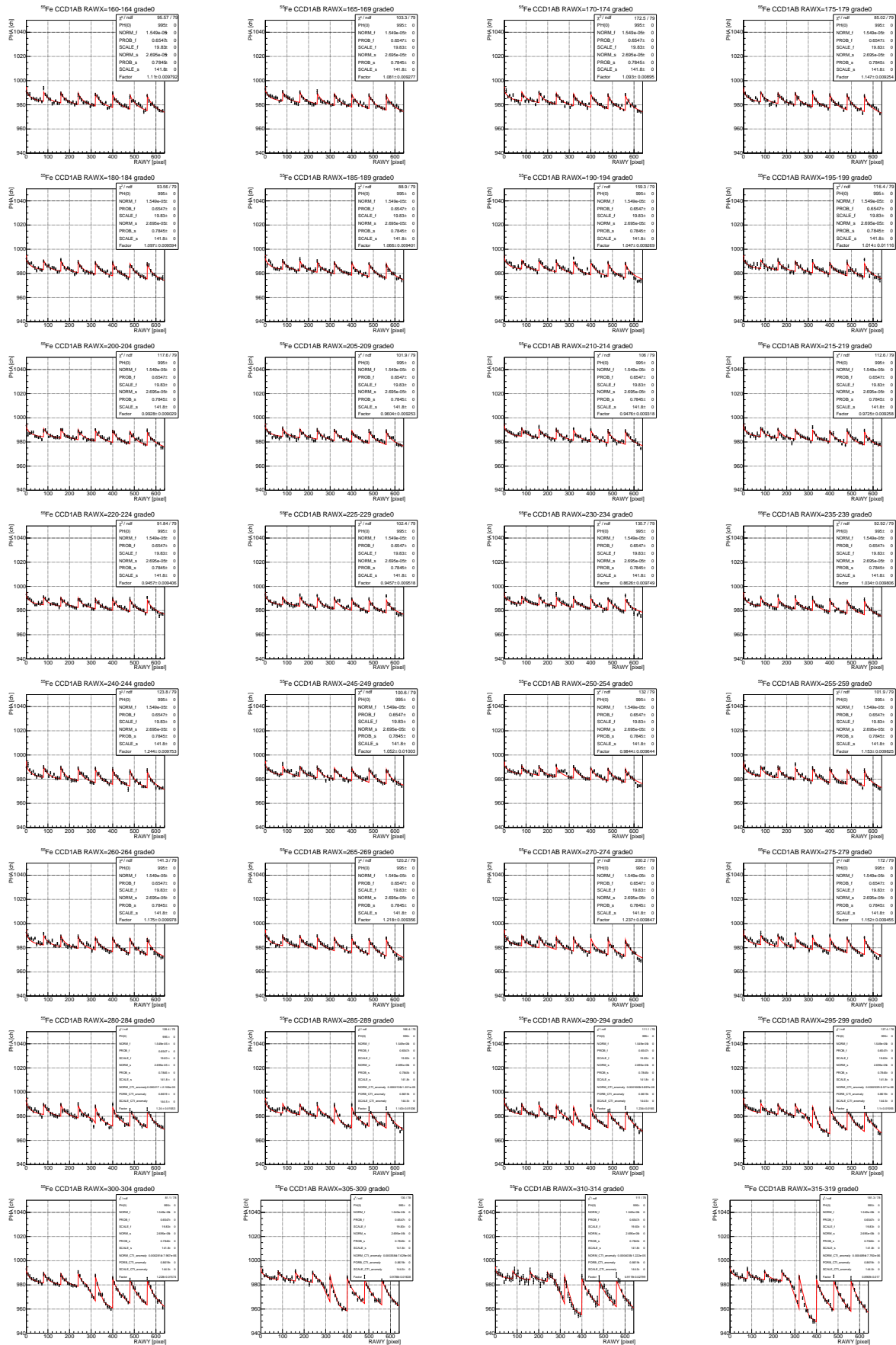


図 A.6 CCD1AB における m-factor と c_{a0} の X 方向依存性



A.2 CCD1CD

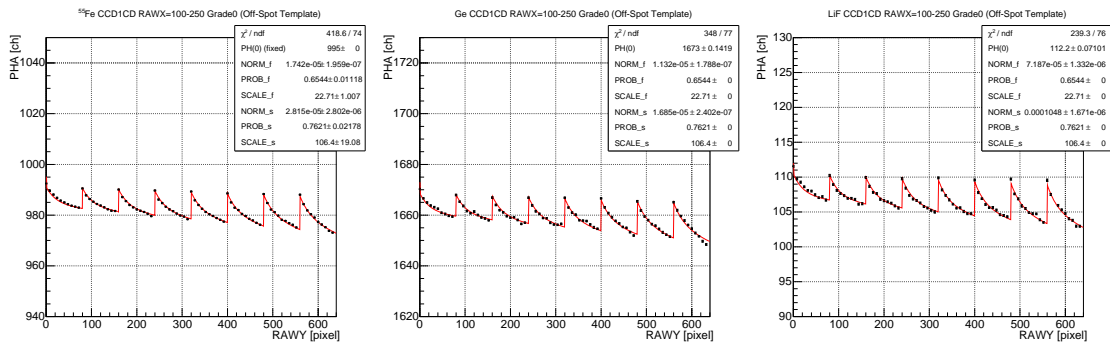


図 A.7 CCD1CD における Off-spot 領域

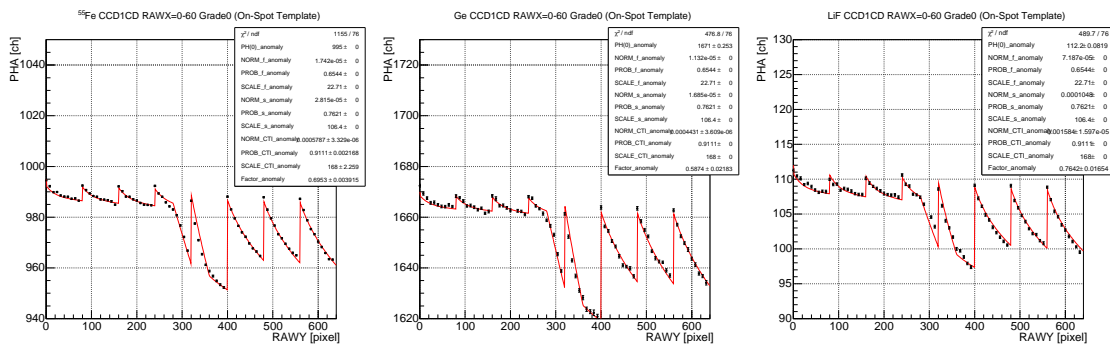


図 A.8 CCD1CD における On-spot 領域

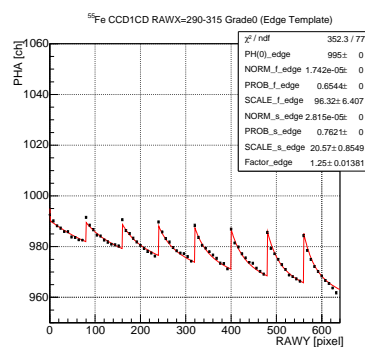


図 A.9 CCD1CD における Edge 領域

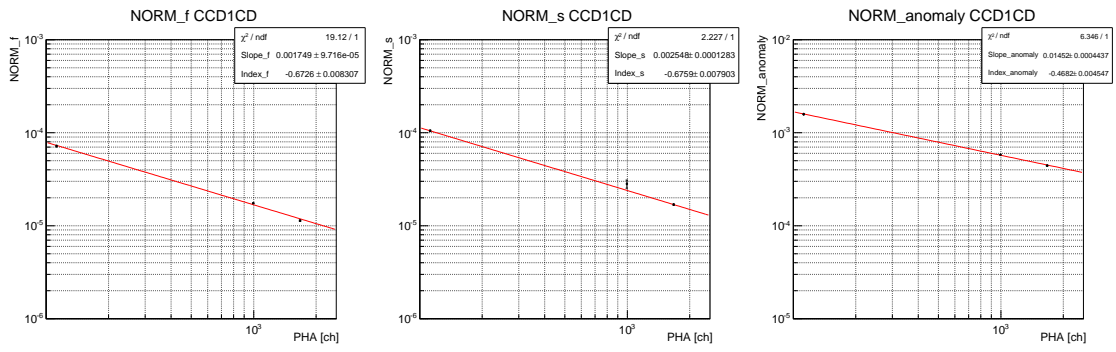


図 A.10 CCD1CD における c_{f0} , c_{s0} , c_{a0} のエネルギー依存性

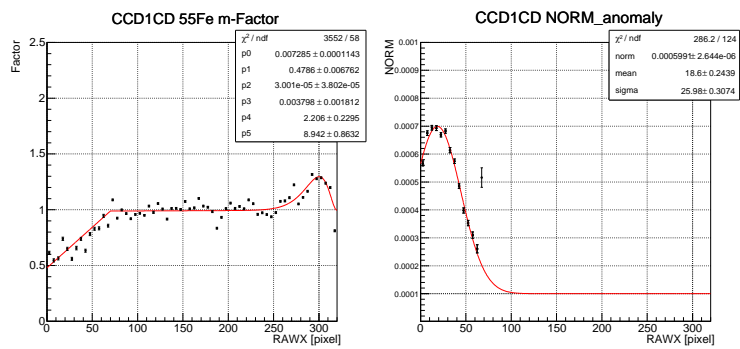
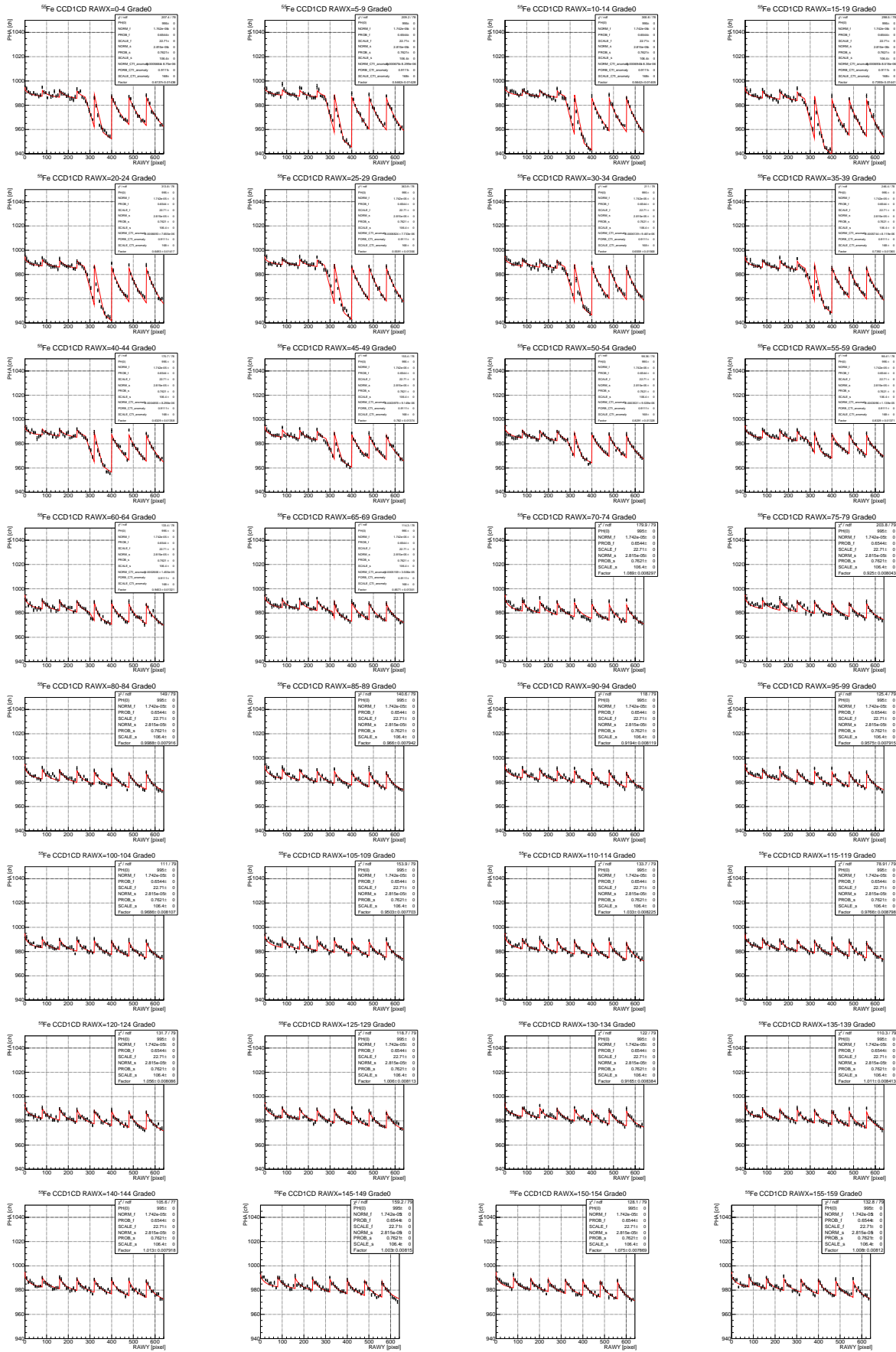
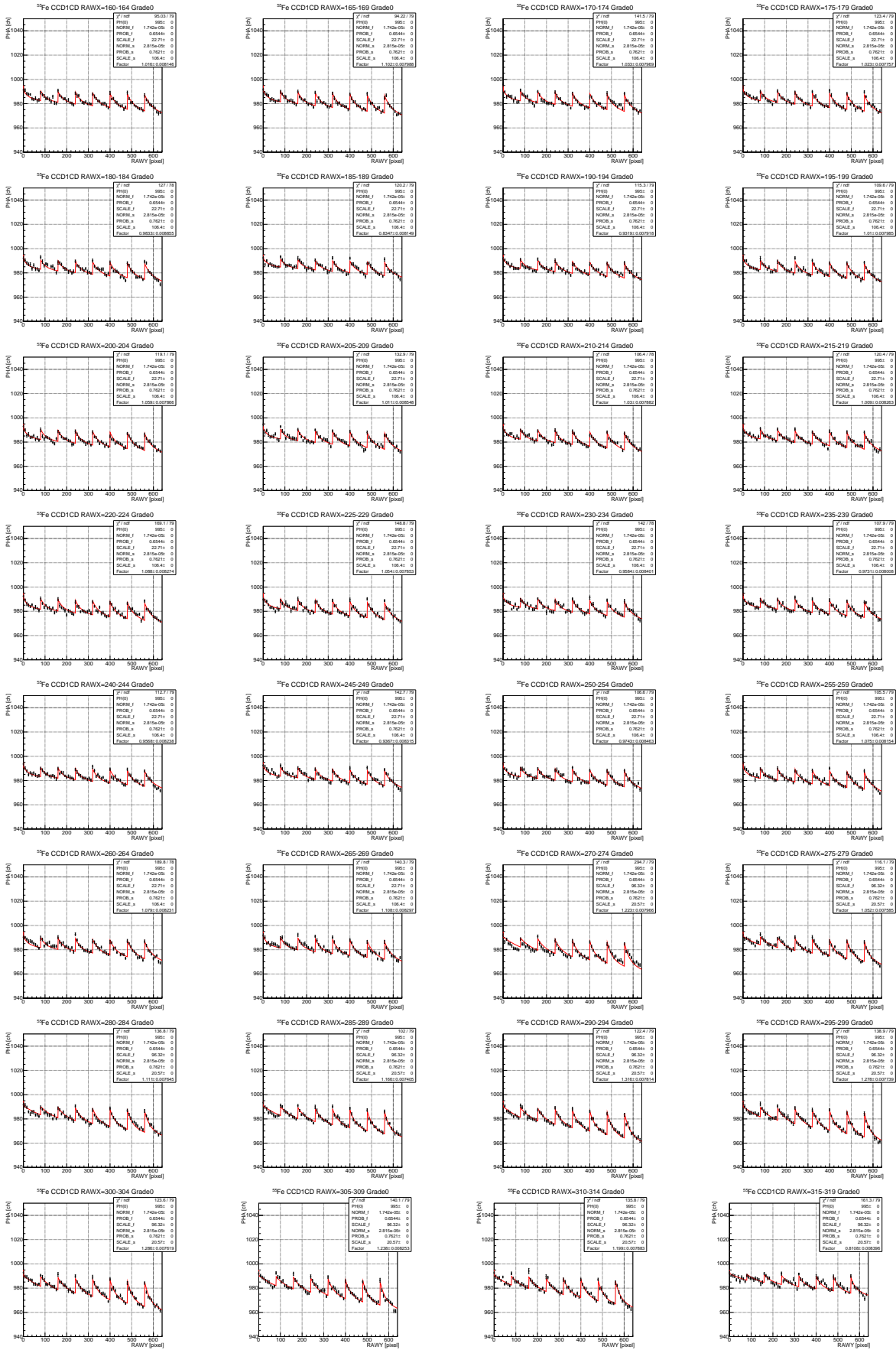


図 A.11 CCD1CD における m-factor と c_{a0} の X 方向依存性





A.3 CCD2AB

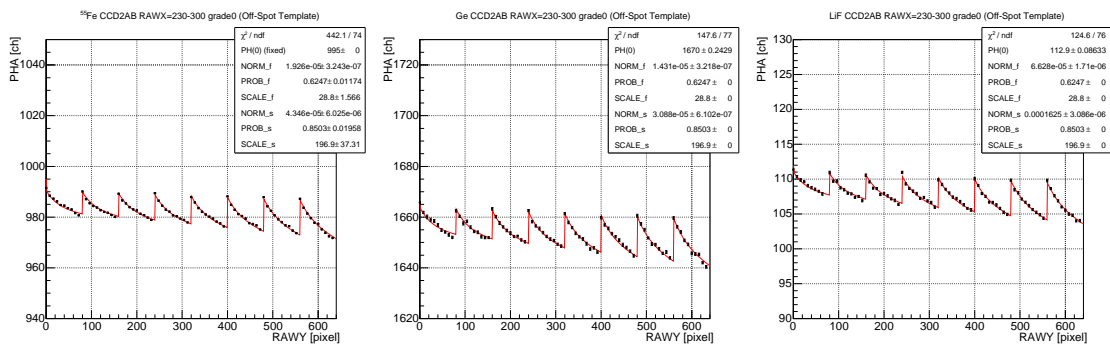


図 A.12 CCD2AB における Off-spot 領域

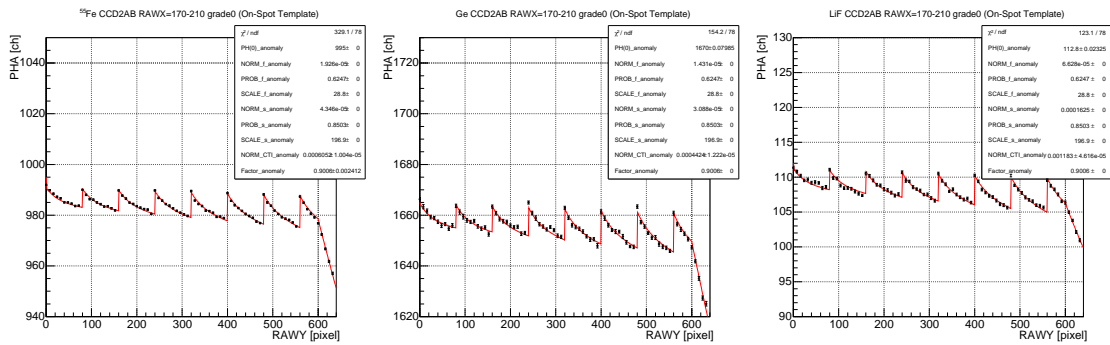


図 A.13 CCD2AB における On-spot 領域

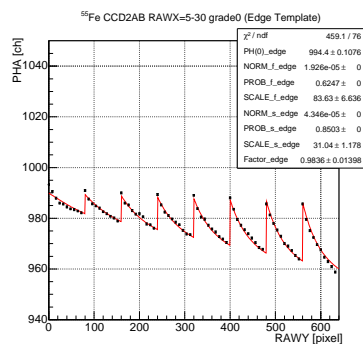


図 A.14 CCD2AB における Edge 領域

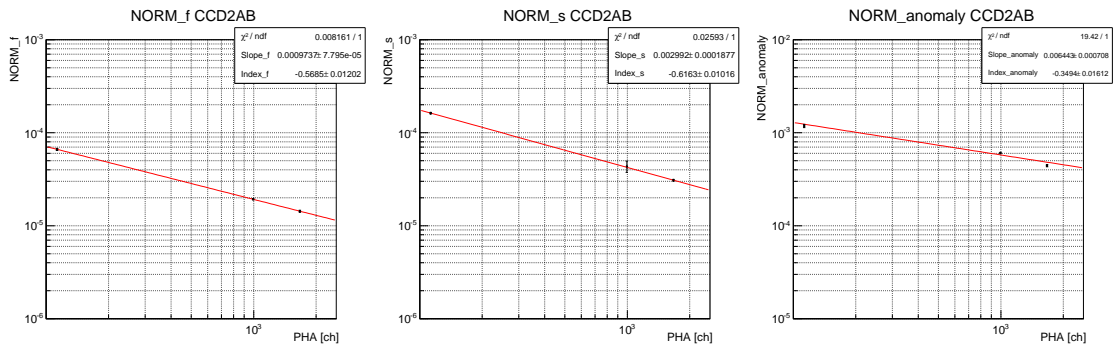


図 A.15 CCD2AB における c_{f0} , c_{s0} , c_{a0} のエネルギー依存性

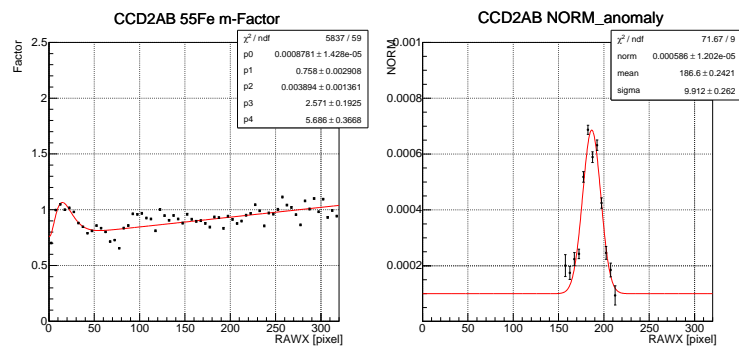
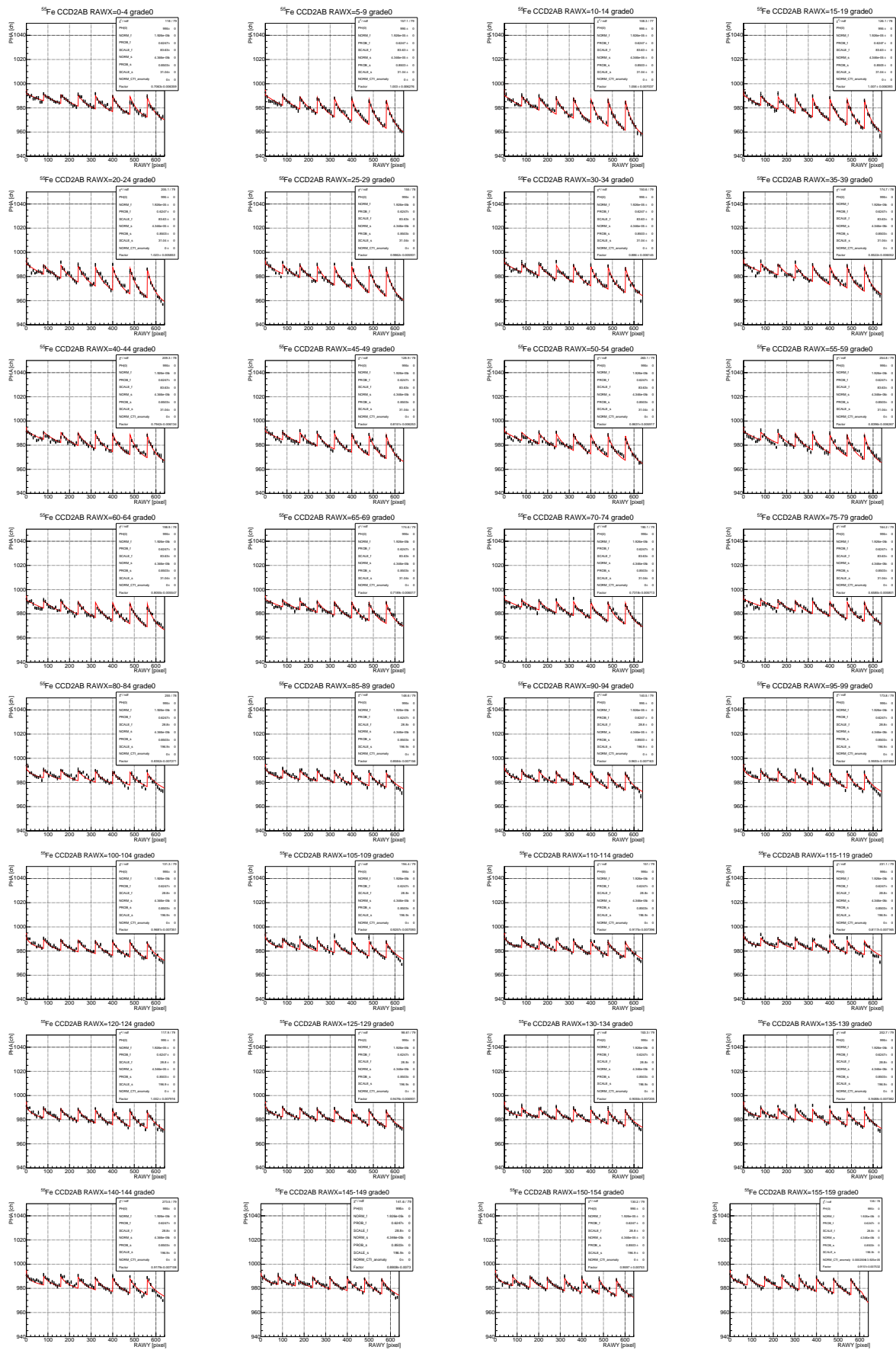
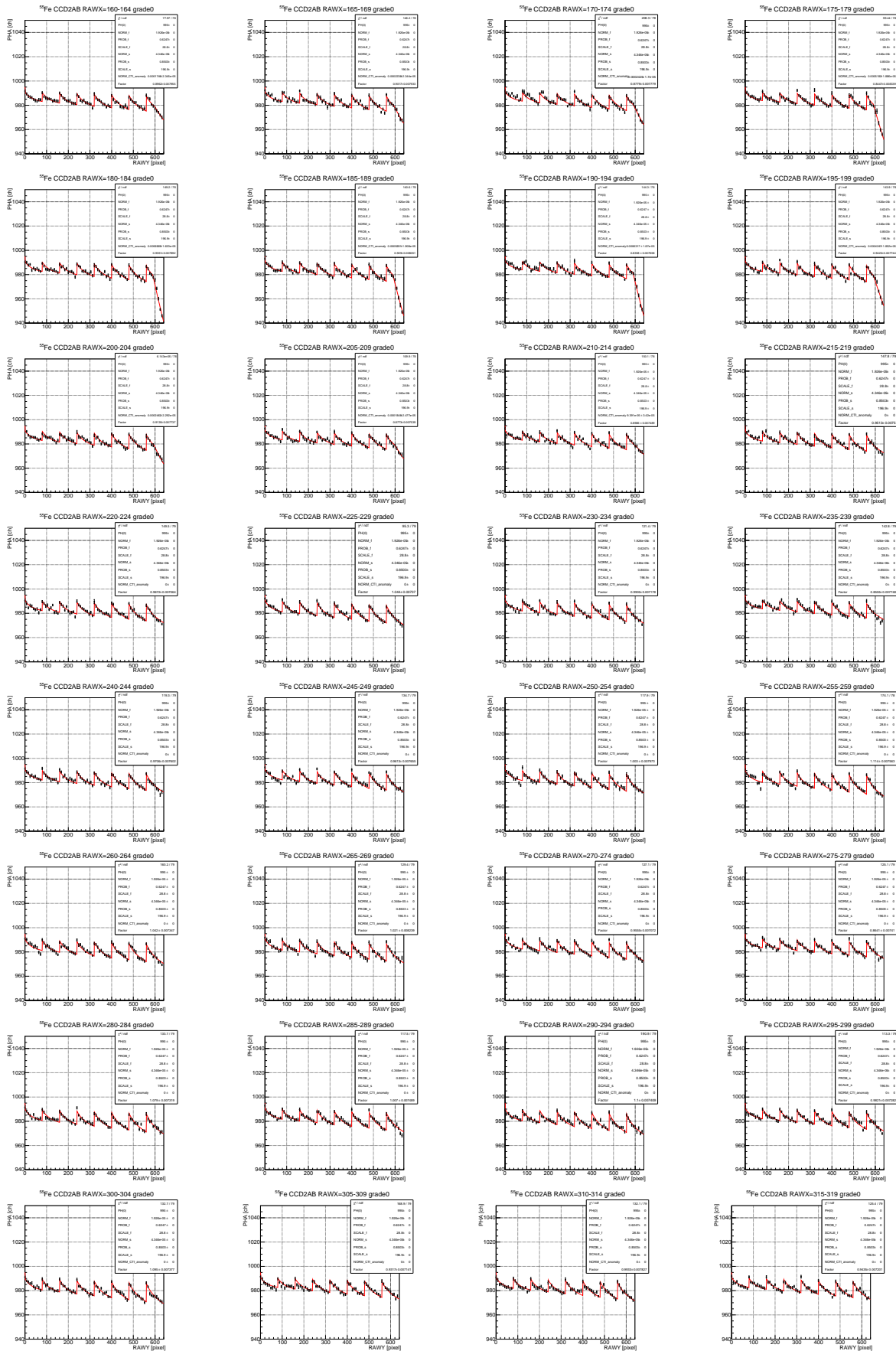


図 A.16 CCD2AB における m-factor と c_{a0} の X 方向依存性





A.4 CCD2CD

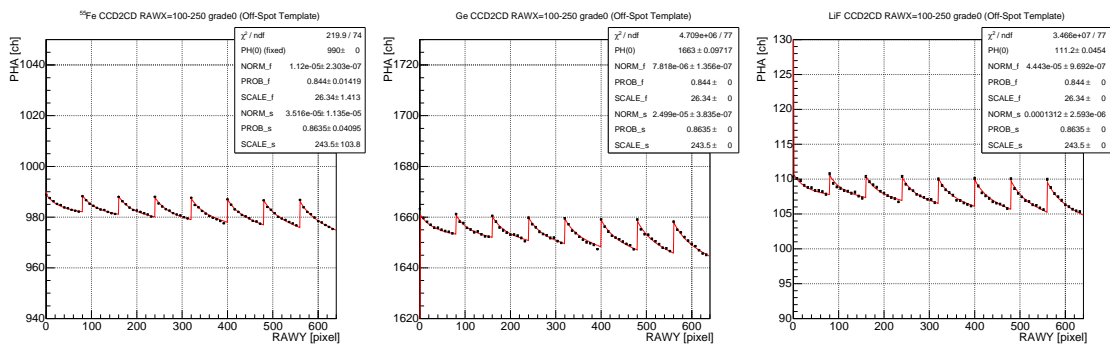


図 A.17 CCD2CD における Off-spot 領域

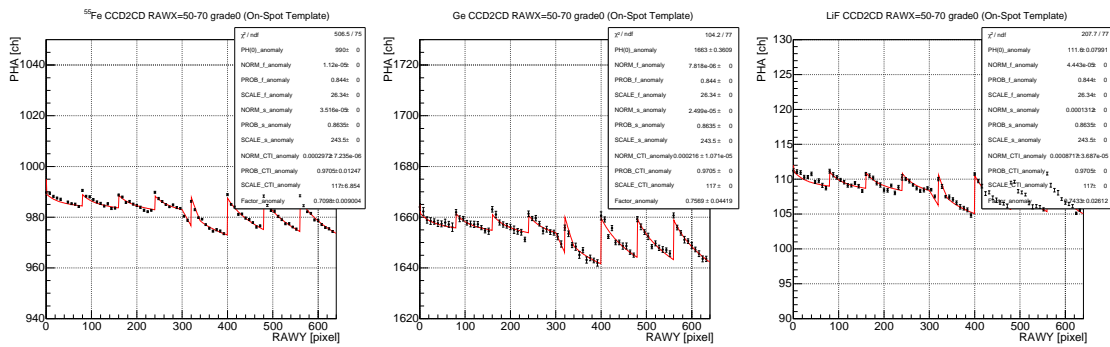


図 A.18 CCD2CD における On-spot 領域

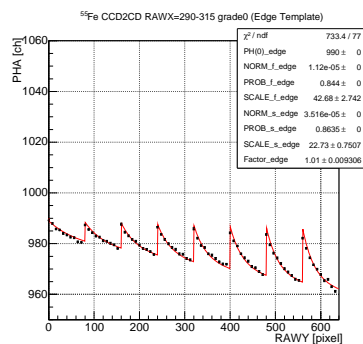


図 A.19 CCD2CD における Edge 領域

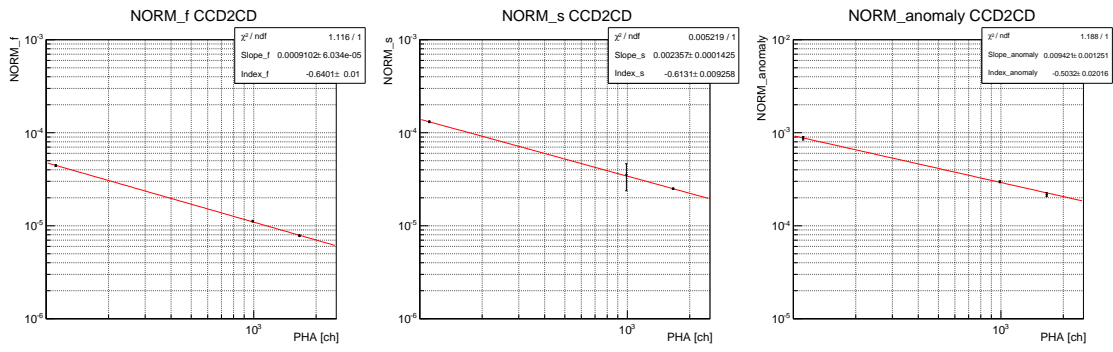


図 A.20 CCD2CD における c_{f0} , c_{s0} , c_{a0} のエネルギー依存性

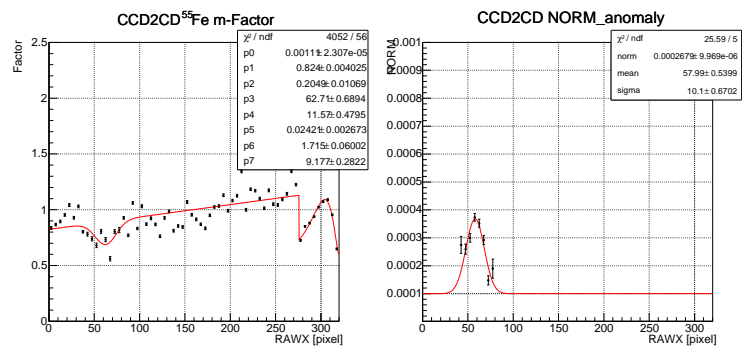
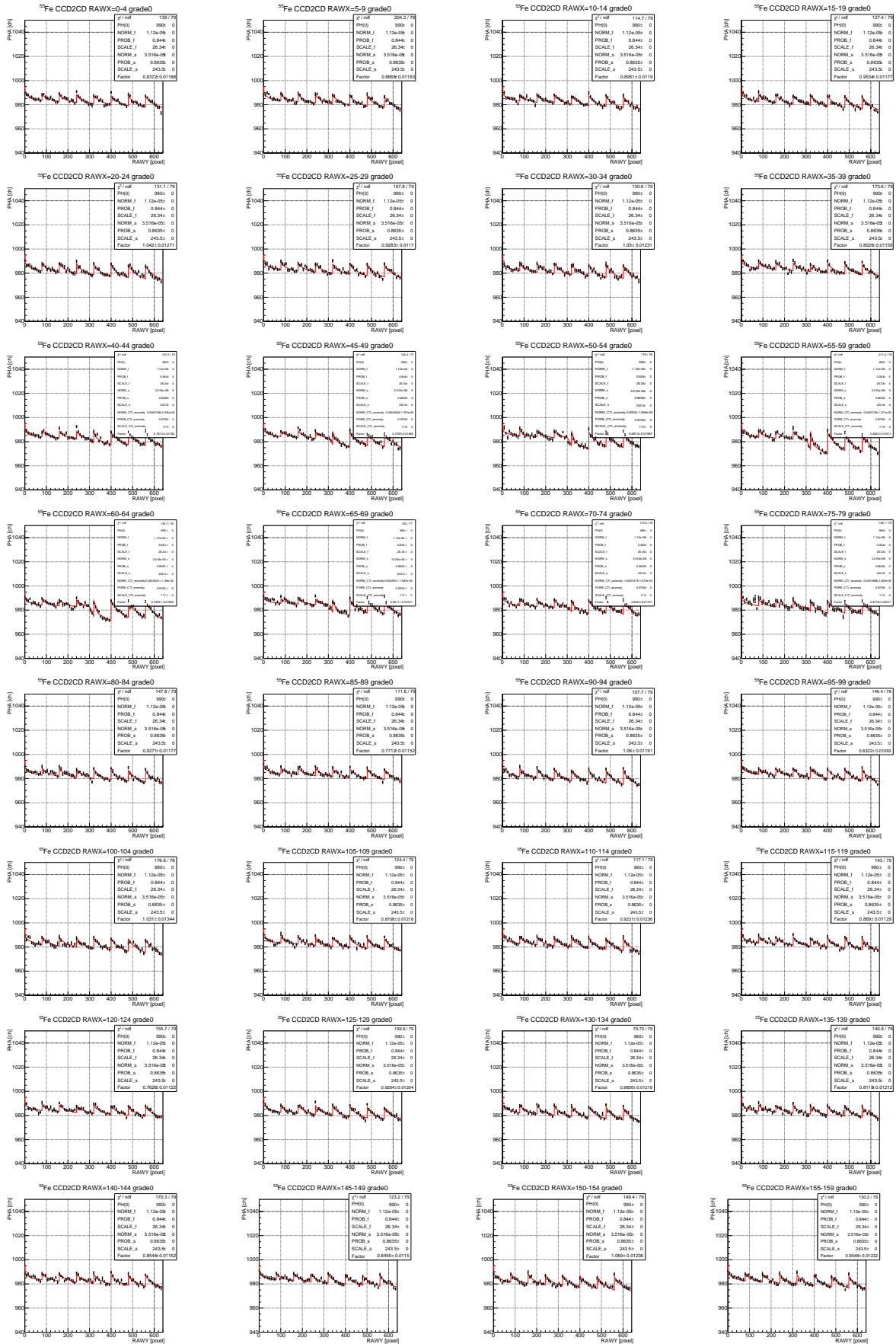
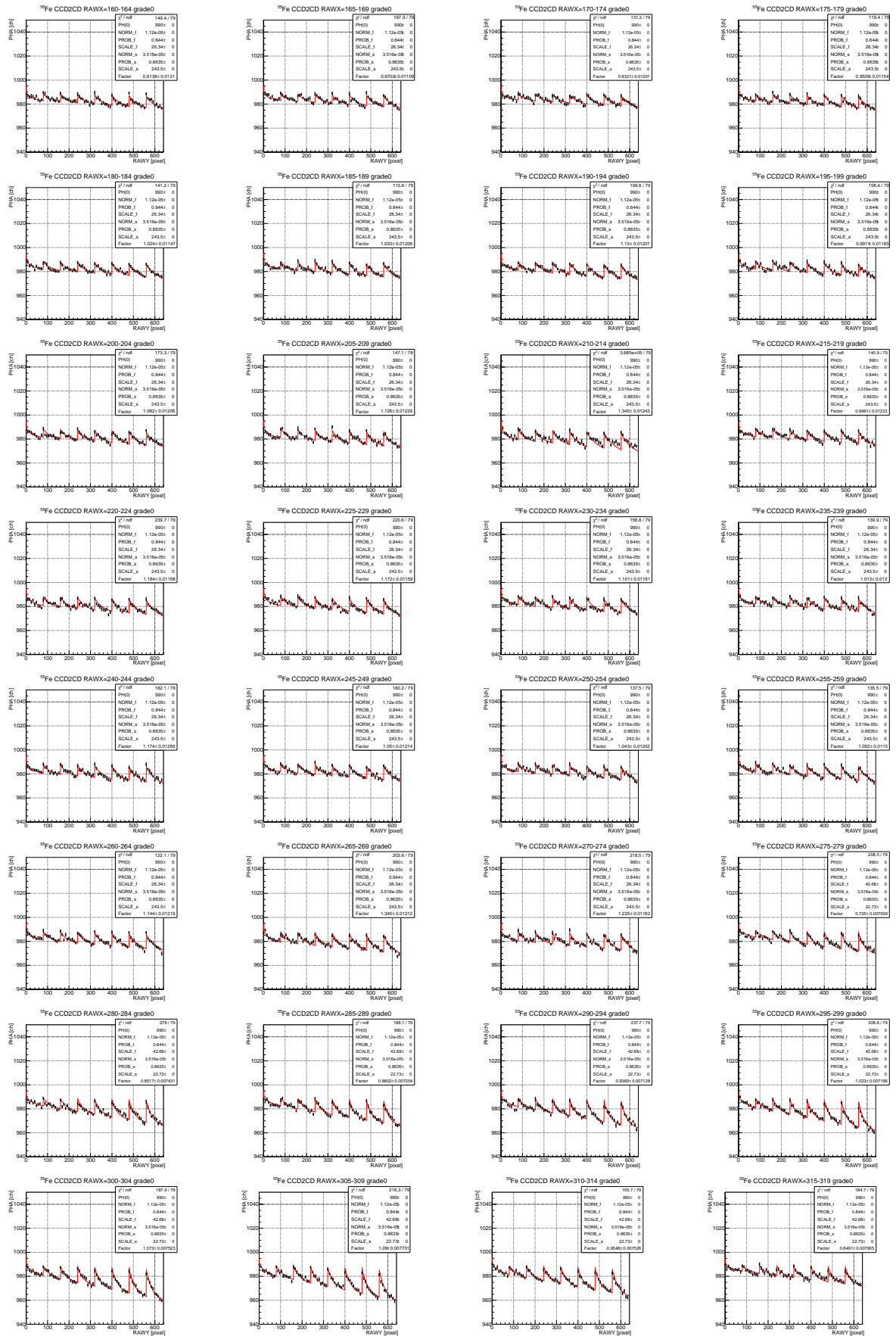


図 A.21 CCD2CD における m-factor と c_{a0} の X 方向依存性





A.5 CCD3AB

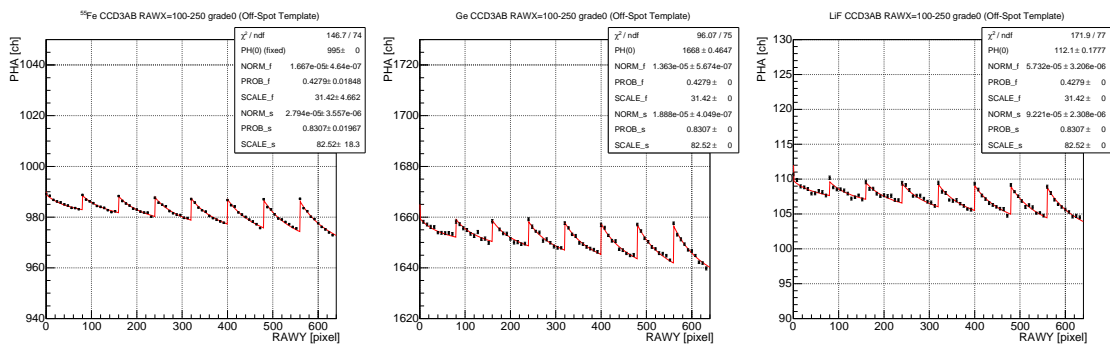


図 A.22 CCD3AB における Off-spot 領域

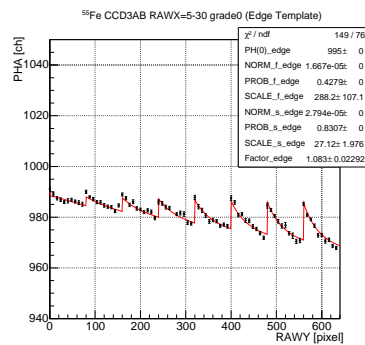


図 A.23 CCD3AB における Edge 領域

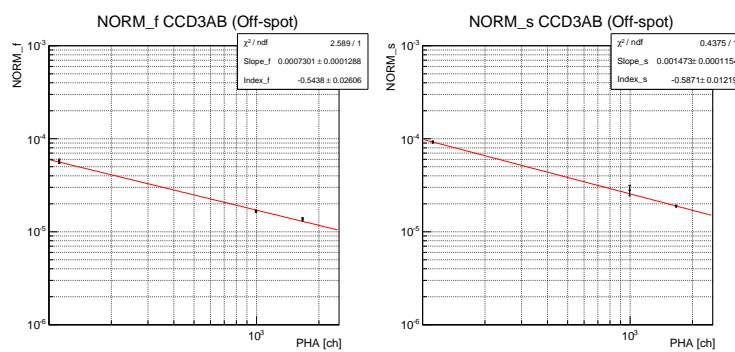


図 A.24 CCD3AB における c_{f0} , c_{s0} のエネルギー依存性

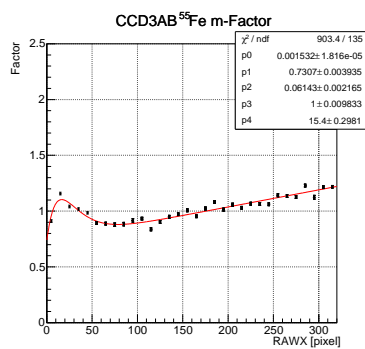
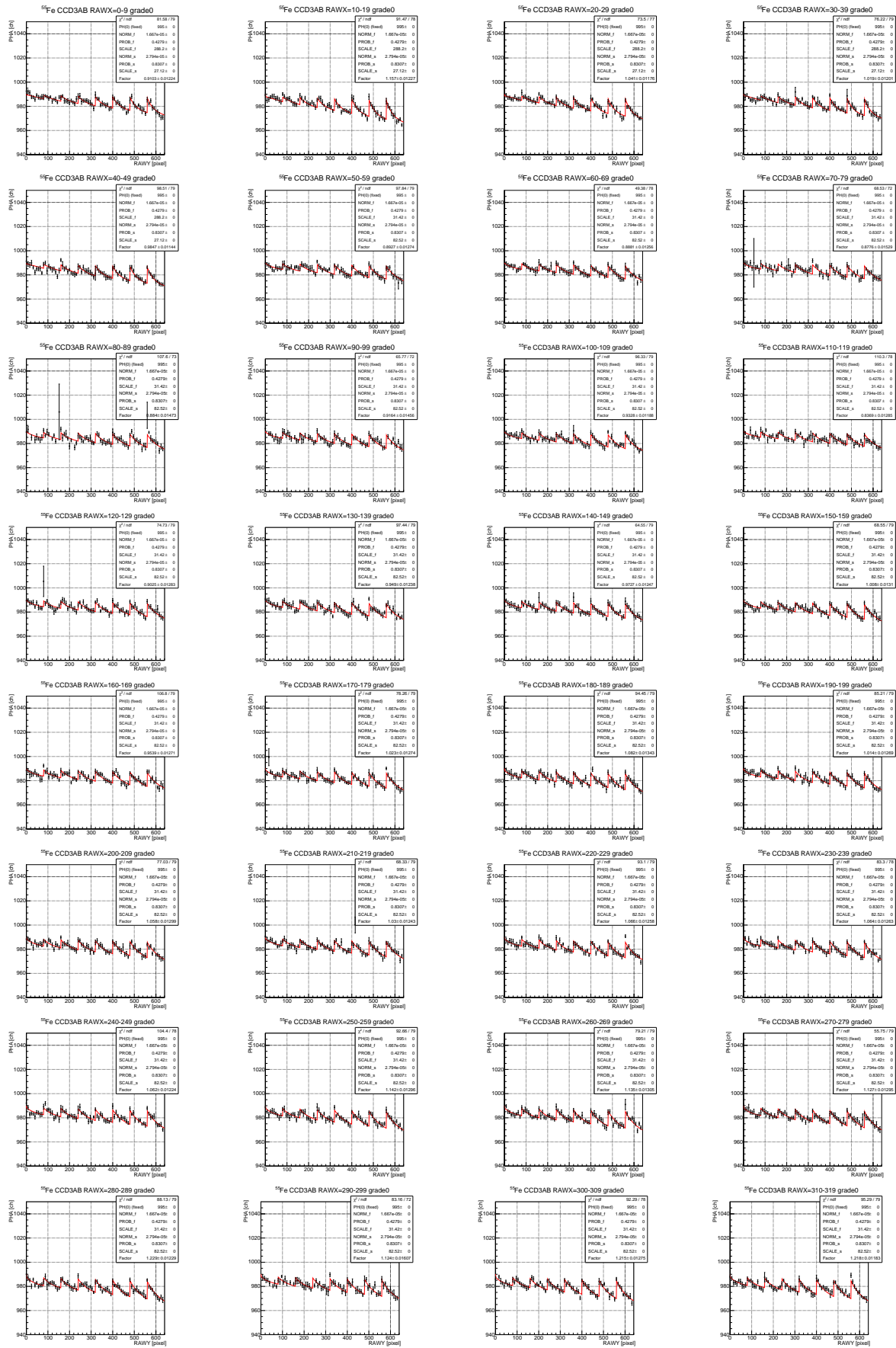


図 A.25 CCD3AB における m-factor の X 方向依存性



A.6 CCD3CD

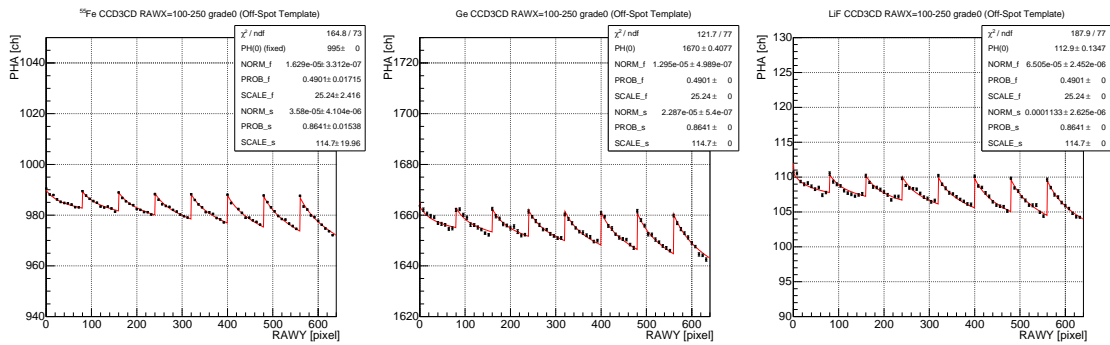


図 A.26 CCD3CD における Off-spot 領域

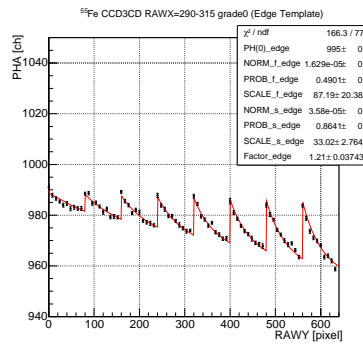


図 A.27 CCD3CD における Edge 領域

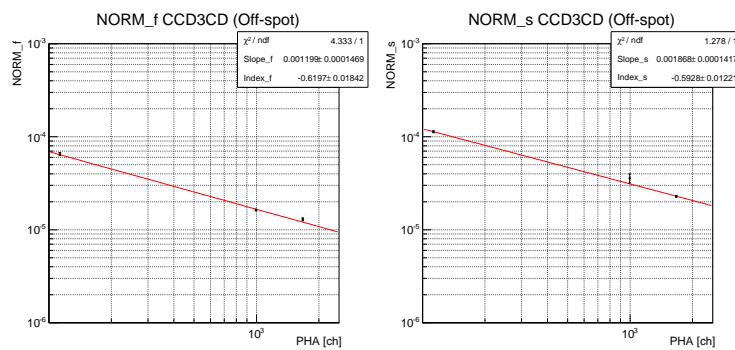


図 A.28 CCD3CD における c_{f0} , c_{s0} のエネルギー依存性

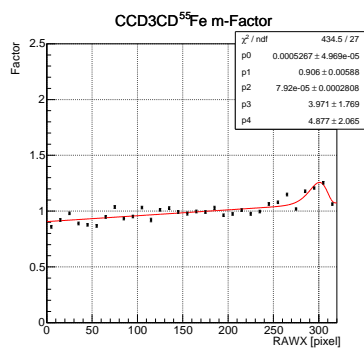
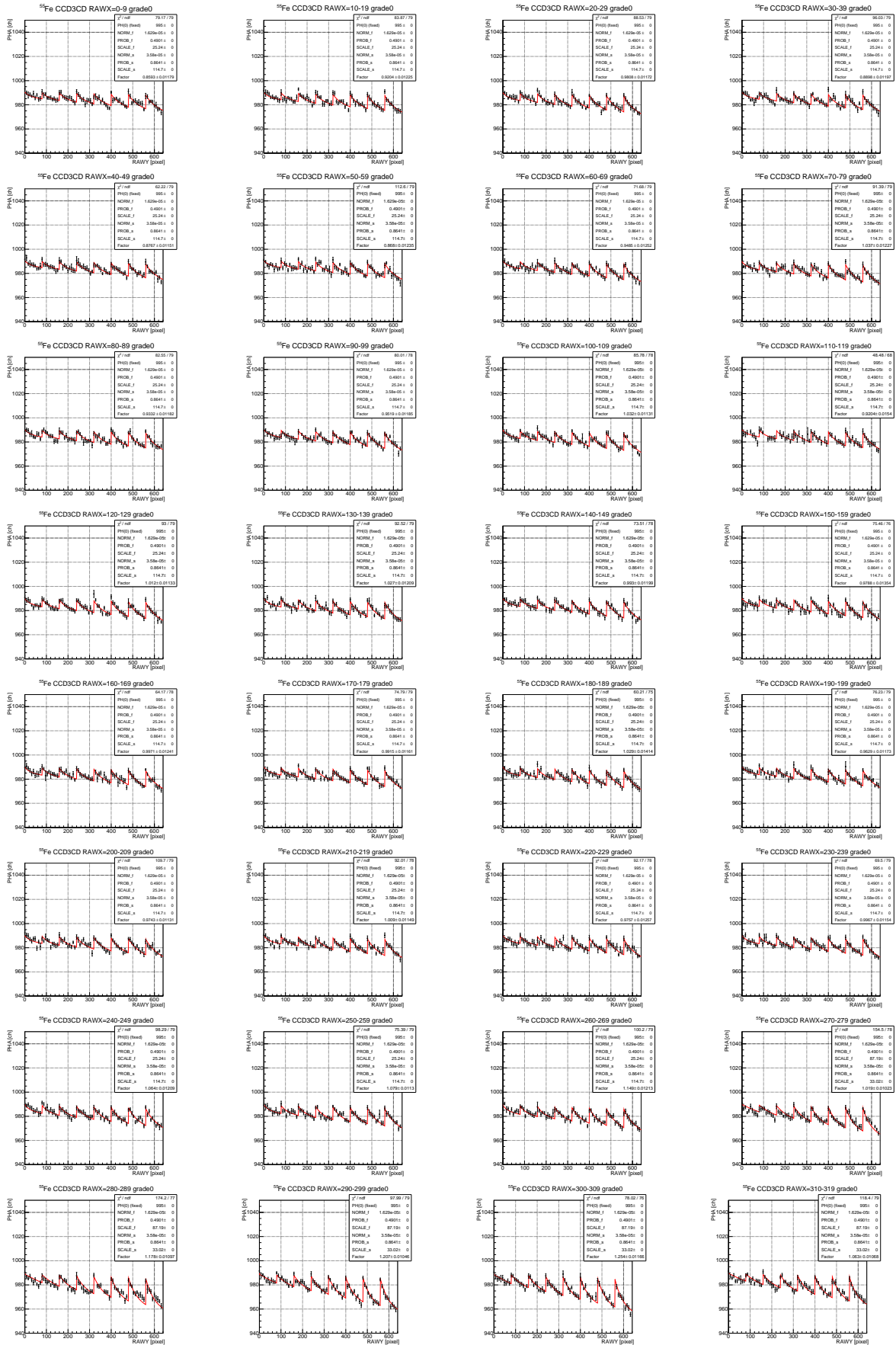


図 A.29 CCD3CD における m-factor の X 方向依存性



A.7 CCD4AB

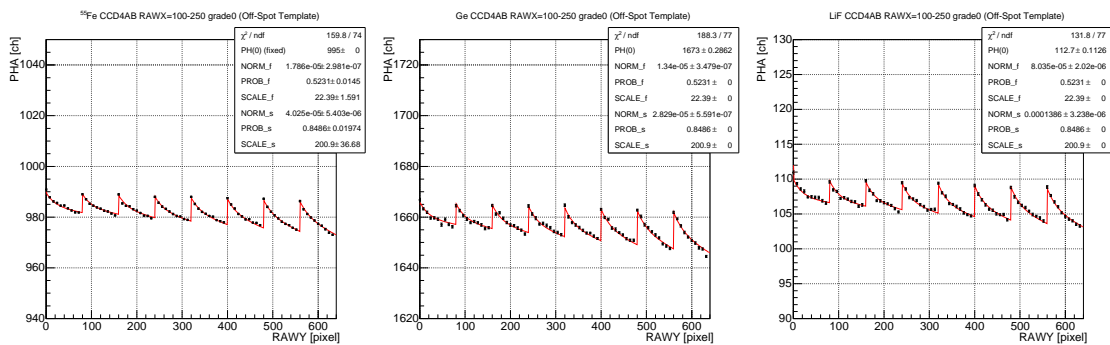


図 A.30 CCD4AB における Off-spot 領域

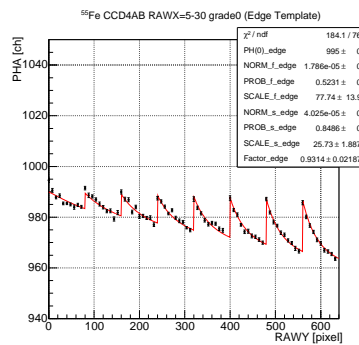


図 A.31 CCD4AB における Edge 領域

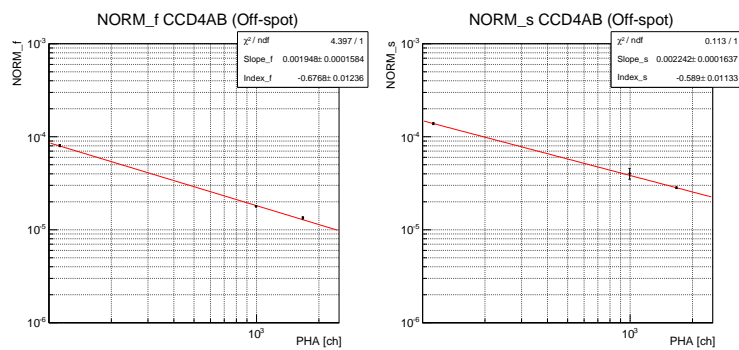


図 A.32 CCD4AB における c_{f0} , c_{s0} のエネルギー依存性

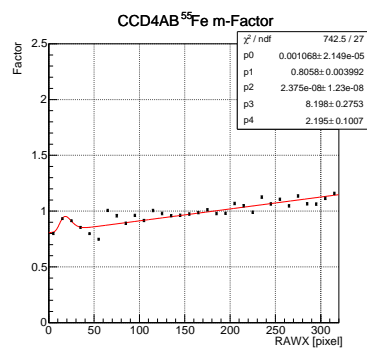
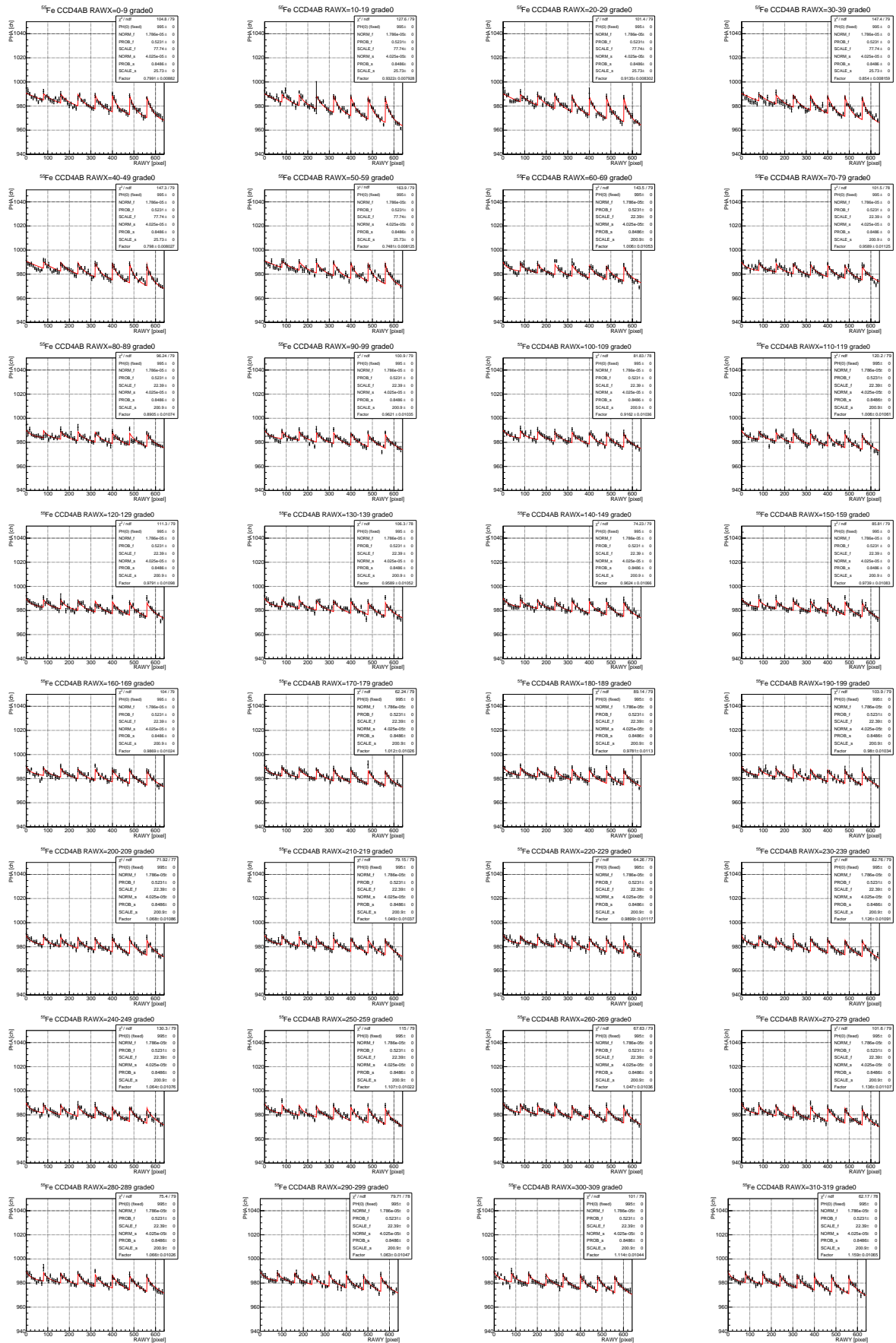


図 A.33 CCD4AB における m-factor の X 方向依存性



A.8 CCD4CD

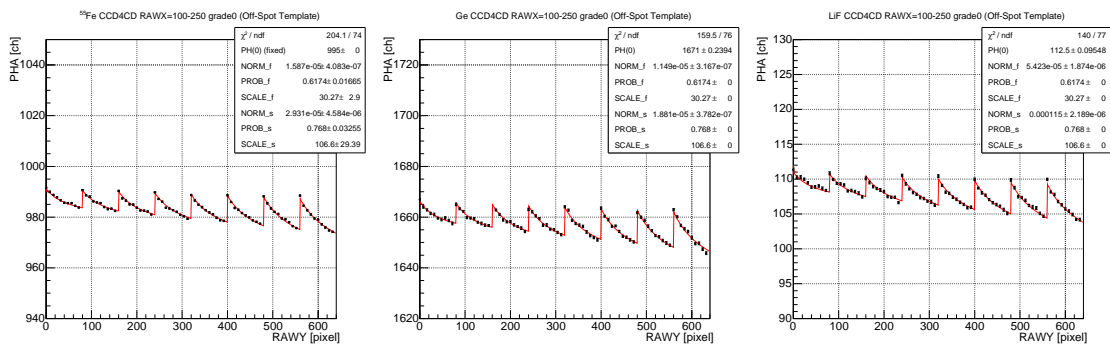


図 A.34 CCD4CD における Off-spot 領域

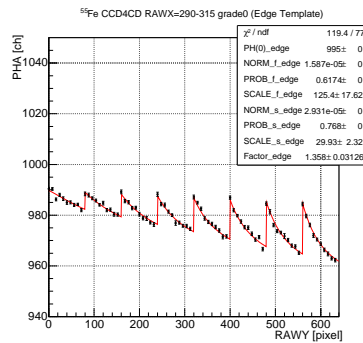


図 A.35 CCD4CD における Edge 領域

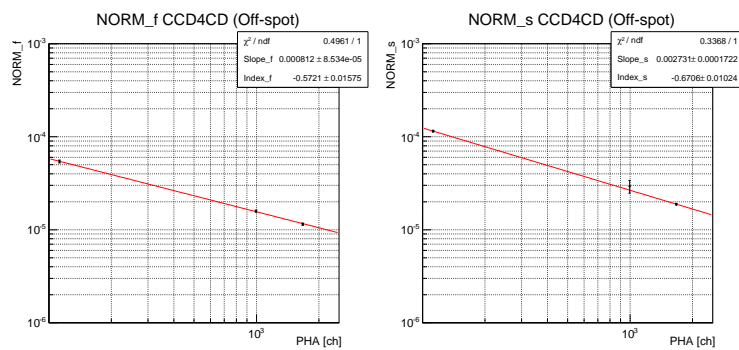


図 A.36 CCD4CD における c_{f0} , c_{s0} のエネルギー依存性

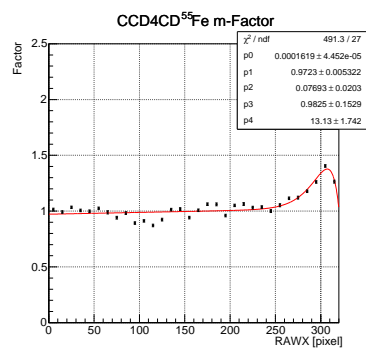


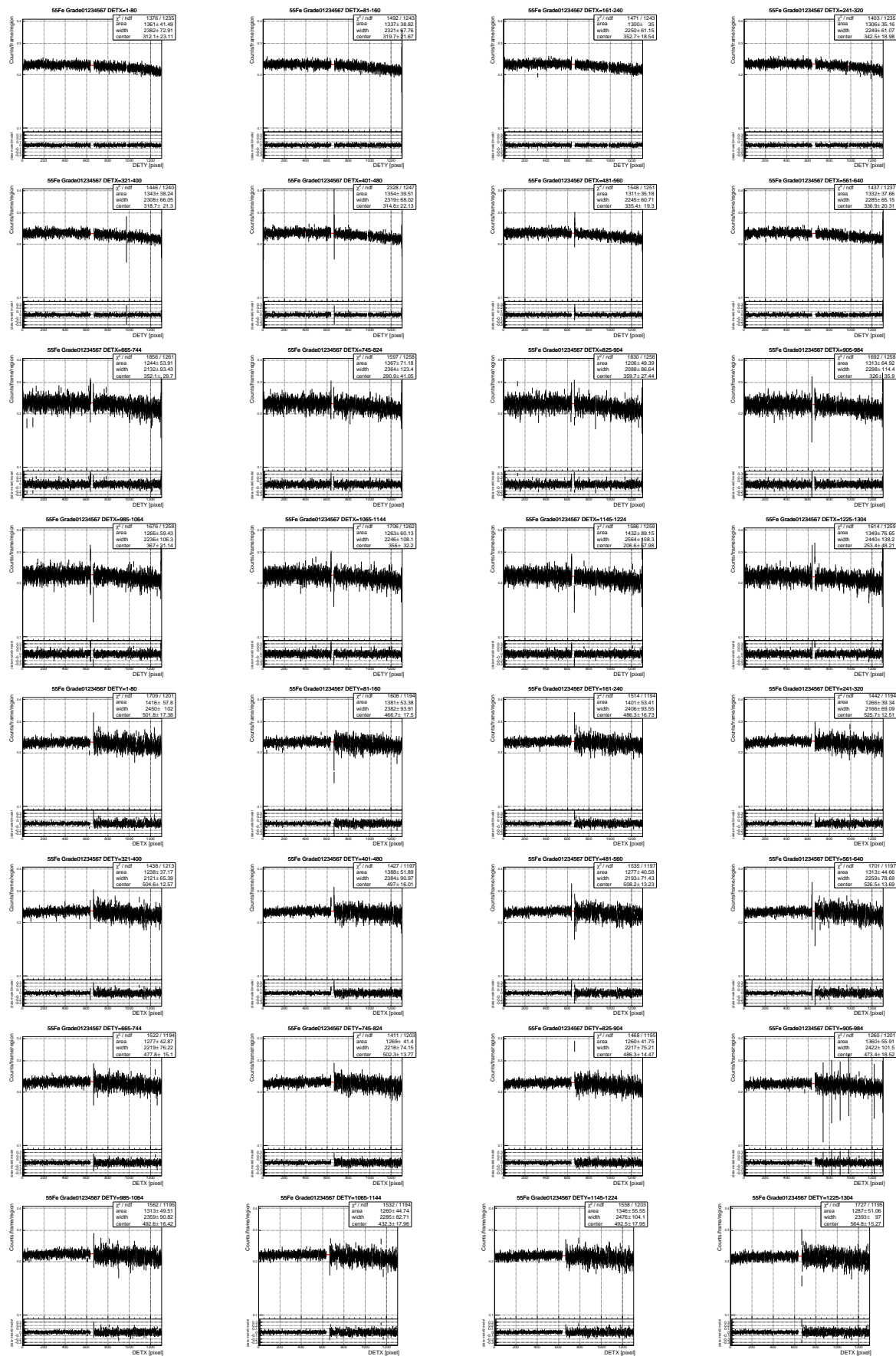
図 A.37 CCD4CD における m-factor の X 方向依存性

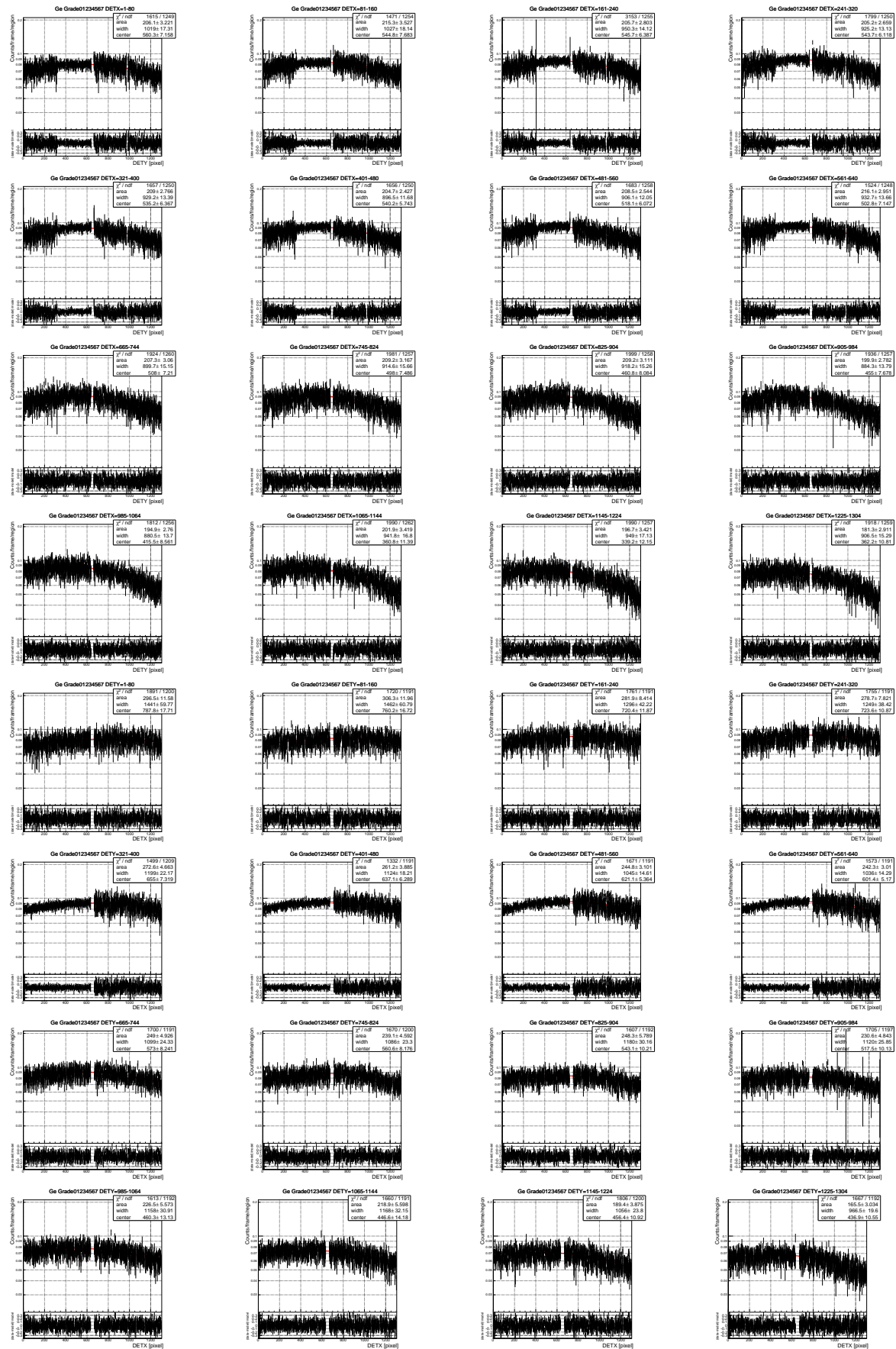
付録 B

SXI カウントマップ

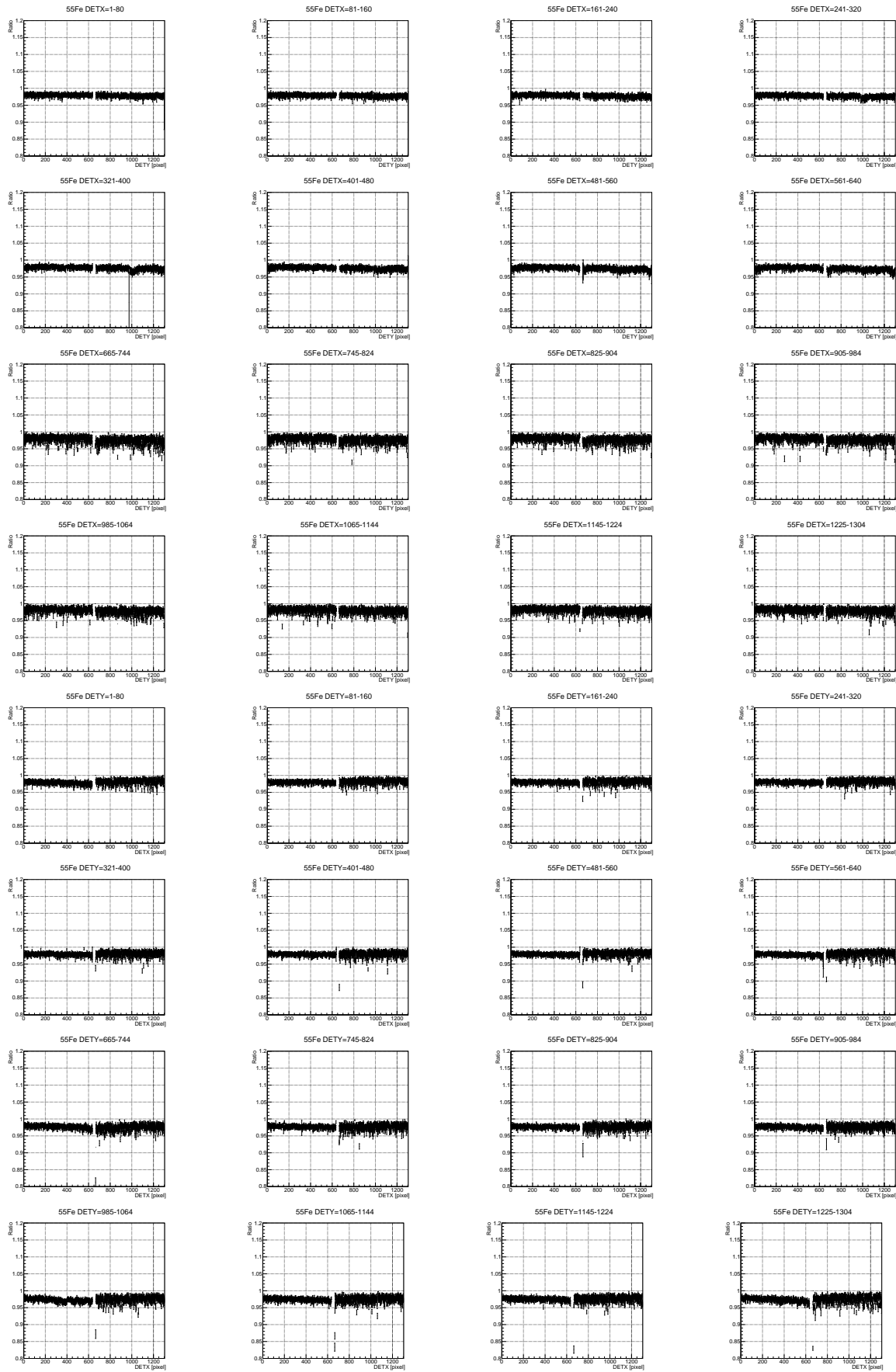
7章で議論した SXI カウントマップの射影をまとめる。分割は全て 16 分割である。

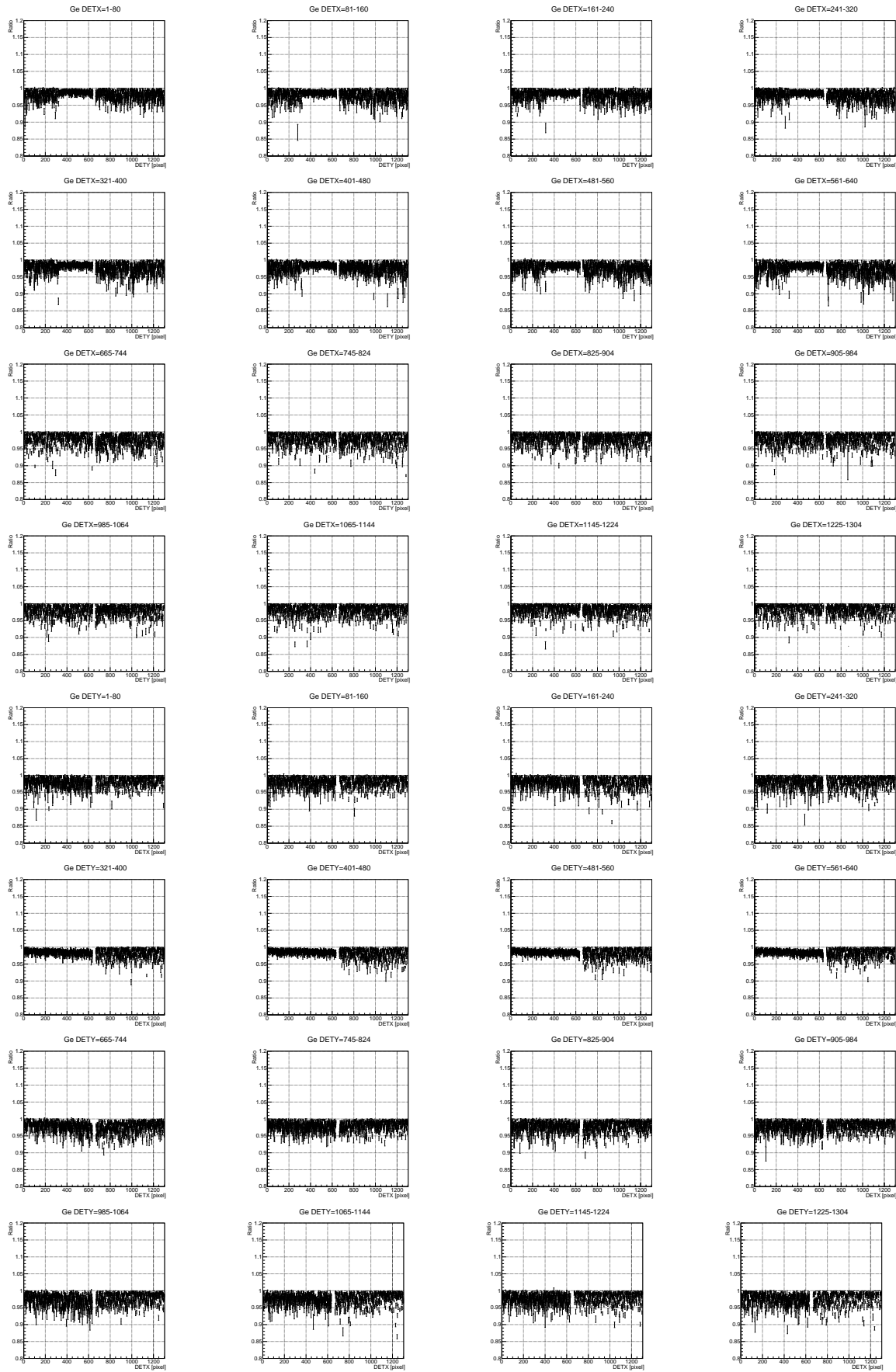
B.1 全 Grade カウントマップの射影

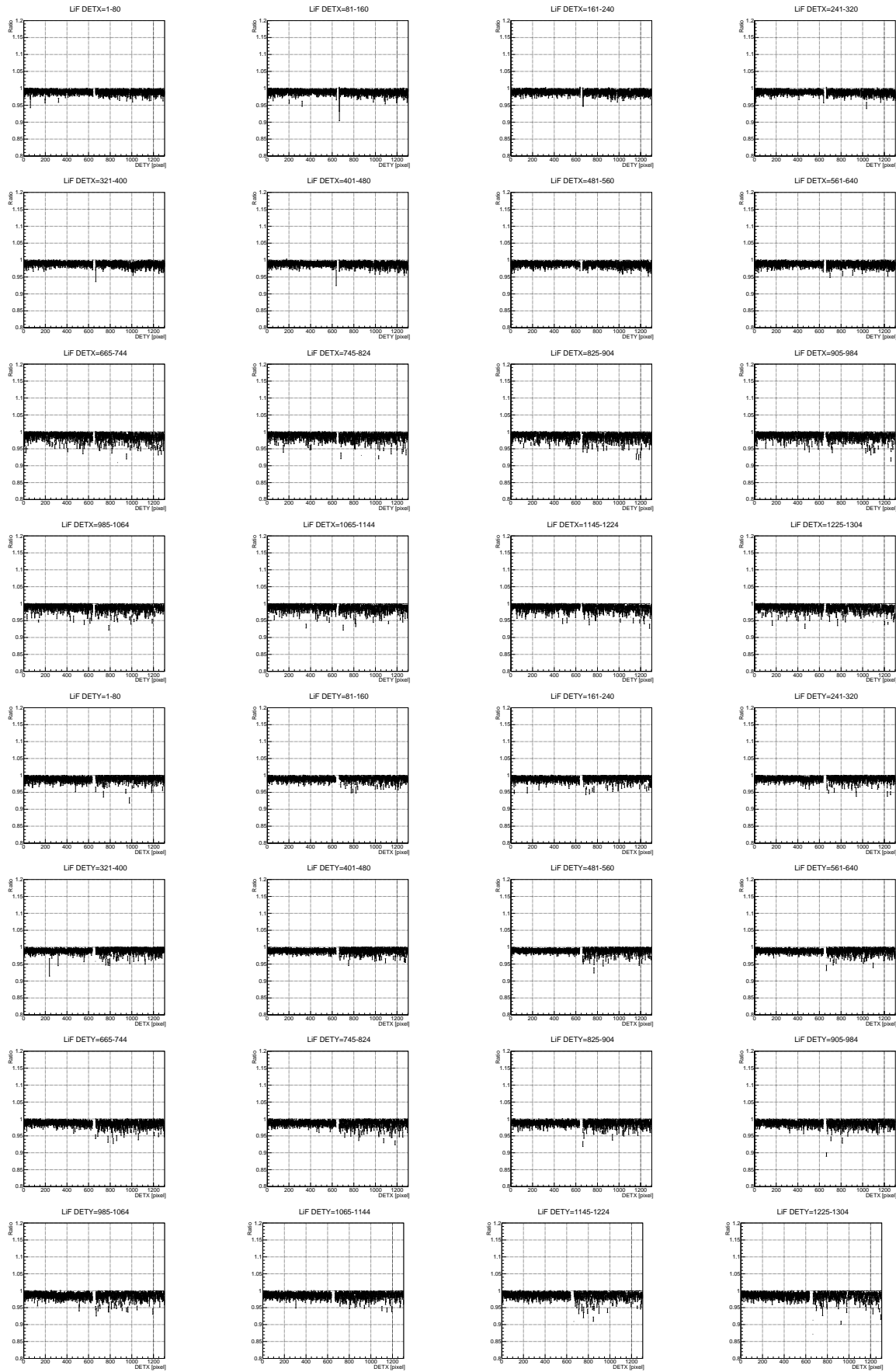




B.2 カウントマップにおける Grade02346/Grade01234567 比







謝辞

本論文は多くの方々のご指導、ご協力があったからこそ、なんとか完成するに至りました。この場をかりて皆様に心より御礼申し上げます。

鶴先生には、実験の方針や進め方、結果の考察などご助言いただきました。田中さんには SXI に関することや統計学の大事さ等、どんなことでも明快に教えていただきました。内田さんは、私の疑問に対していつも一緒に考えてくださり、その度に理解が深まりました。信川さんはいつも御気にかけてくださり、どんなときにも的確なアドバイスをしてくださいました。また河島さんには天体解析、SXI に関して何から何まで教えていただきました。本論文の執筆の際にも本当にお世話になりました。この先ずっと頭が上がりません。

SXI チームの皆様にも感謝いたします。とりわけ森さん、磯田さんをはじめとした宮崎大学の方々には本当にお世話になりました。CTI 補正は大変ではありましたが、今では良い思い出として振り返れます。

研究面以外でも宇宙線研究室の皆様にお世話になることが多々ありました。ありがとうございました。武田さんは様々なイベントを企画してくださいました。松村さんには自らを犠牲にした話題作りで楽しませていただきました。優秀な後輩達からは良い刺激を受けました。同期の存在も大きかったです。竹村君、博士課程でも頑張ってください。宮本君もバリバリ活躍してください。

最後に、ASTRO-H の活躍を心から楽しみにしています。

2016 年 1 月 27 日

参考文献

- [1] Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F. R., & Rossi, B. B. 1962, *Physical Review Letters*, 9, 439
- [2] Washino, R., et al. 2015, *PASJ*,
- [3] Yamaguchi, H., et al. 2009, *ApJL*, 705, L6
- [4] Combi, J. A., et al. 2010, *A&A*, 523, A76
- [5] Reach, W. T., et al. 2006, *AJ*, 131, 1479
- [6] Takahashi, T., et al. 2014, *SPIE*, 9144, 914425
- [7] Tsunemi, H., et al. 2010, *SPIE*, 7732, 773210
- [8] Bautz, M. W., et al. 2004, *SPIE*, 5501, 111
- [9] Uchiyama, H., et al. 2009, *PASJ*, 61, S9
- [10] ISAS/JAXA. NASA/GSFC, "Suzaku Technical Description"
- [11] Nobukawa K. K., et al. 2014, *NIMA*, 765, 269
- [12] ASTRO-H Software and Calibration Team, "Soft X-ray Imager (SXI) and Soft X-ray Telescope (SXT-I): Instrument Description and Data processing", 2015
- [13] Janesick, J. R. 2001, *Scientific charge-coupled devices*, Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, 2001, xvi, 906 p. SPIE Press monograph, PM 83. ISBN 0819436984,
- [14] 信川久実子. 「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 (2013)
- [15] 川口 陽平. 「ASTRO-H 衛星搭載軟 X 線撮像検出器 SXI の地上試験で見られた イベント異常の原因調査」 宮崎大学 修士論文 (2015)
- [16] 武吉司. 「ASTRO-H 衛星搭載軟 X 線撮像検出器 SXI で用いられる X 線 CCD の電荷転送効率の評価」 宮崎大学 修士論文 (2015)