修士論文

ASTRO-H衛星搭載軟X線分光装置SXS デジタル波形処理部の性能実証

埼玉大学大学院 理工学研究科 博士前期課程 物理機能系専攻 物理学コース 田代寺田研究室

山口直

平成26年2月5日

概要

2015年に打ち上げ予定のX線天文衛星 ASTRO-H には、X線マイクロカロリメータ Soft X-ray Spectrometer (SXS)が搭載される。SXS は 36 pixel で構成される受光素子をもち、50 mK の極 低温で動作させることによって、0.3-12 keV のエネルギー範囲で 7 eV (FWHM) 以下のエネル ギー分解能を実現する。これによって、超新星残骸や銀河団などの様々な天体からのX線放射を、 従来を数十倍上回る精度で分光でき、数百 km/s の精度でプラズマの視線方向速度の測定を可能 にする。SXS のセンサー部で検出された信号波形は、アナログ波形処理装置 X-ray Box (XBox) でアナログ/デジタル変換されたのち、デジタル波形処理装置 Pulse Shape Processor (PSP) へと 送られる。PSP は FPGA ボードと CPU ボードから成り、FPGA ボードで XBox から入力された 波形データからの光子イベントを抽出し、続く CPU ボードで光子イベントの品位に応じた弁別 やエネルギーの高精度測定を行う。

PSP はこれまでに、性能実証モデルを用いたすべての試験を完了し、衛星搭載モデル (FM)の 製作、およびその単体での性能検証試験を行ってきた。本論文では、SXS の波形処理系全体の性 能評価試験として、FM を用いて今回初めて実施された、XBox との接続試験とセンサーデータ 処理試験の結果について報告する。最初におこなった接続試験では、XBox から入力される波形 信号と機能維持のための各種情報を、PSP の FPGA ボードで正常に受信できているかを検証す る。本試験で、PSP と XBox の間を流れるすべての信号について測定をおこない、電圧レベルや 信号特性が規定値を満たすことを確認した。一方、センサーデータ処理試験では、PSP によるデ ジタル波形処理性能の評価のため、2013年8月にNASA/GSFCによるセンサーとXBoxを用い た接続試験で取得された波形データを PSP に入力し処理させた。PSP の機能・性能を検証する ため、まず、光子イベントの弁別処理の結果を、NASA/GSFC による実験系での解析結果と比較 し、弁別処理が正常になされていることを確認した。次いで光子エネルギーの測定結果を評価す るため、本試験用に新たに開発した解析ソフトウェアを用いて、Mn-Kα線のスペクトルに対する エネルギー分解能を求めた。その結果、SXS に要求されたエネルギー分解能<7 eV を十分に満 たす 4.41±0.08 eV (FWHM) という値を得た。これは同じデータを NASA/GSFC の実験室系で 評価したエネルギー分解能 4.46±0.01 と誤差の範囲で一致す結果であり、これにより、PSP の搭 載ソフトウェアによるエネルギー測定が要求通りの性能を持っていることを立証できた。

目 次

概要		1
第 1章	X 線天文学と ASTRO-H 衛星	9
1.1	X 線天文学の歴史	9
1.2	次期 X 線天文衛星 ASTRO-H	9
	1.2.1 概要	9
	1.2.2 搭載機器	10
第2章	軟X線分光器SXS	15
2.1	X 線カロリメータ	15
	2.1.1 構造と動作原理	15
	2.1.2 エネルギー分解能	16
	2.1.3 最適フィルタを用いた信号処理	17
2.2	性能要求	18
2.3	システム構成	18
	2.3.1 フィルターホイール部	18
	2.3.2 検出器部	21
	2.3.3 冷却系	22
	2.3.4 信号処理系	23
第3章	デジタル波形処理機器 PSP	25
3.1	性能要求	25
3.2	ハードウェア	28
	3.2.1 MIO ボード	28
	3.2.2 SpaceCard $\vec{x} - \vec{F}$	29
	3.2.3 PSU ボード	30
3.3	通信インターフェイス	32
3.4	信号線	32
	3.4.1 PSP-A/B–XBox-A/B 間の信号線	32
	3.4.2 MIO-A–MIO-B 間の信号線	32
3.5	デジタル波形処理	36

	3.5.1 データ受信とエラーチェック	36
	3.5.2 イベントの検出	38
	3.5.3 グレード付け	43
	3.5.4 波高值解析	45
第4章	FM-PSP-FM-XBox 接続試験	47
4.1	目的	47
4.2	試験機材	47
	4.2.1 PSP-A/B	47
	4.2.2 XBox-A/B	48
	4.2.3 SMU sim light	49
	4.2.4 SpW-GbE	49
	4.2.5 GSTOS用PC	50
4.3	搬入後動作試験	50
	4.3.1 セットアップ	50
	4.3.2 結果	52
4.4	PSP-A/B–XBox-A/B 間の信号試験	52
	4.4.1 セットアップ	52
	4.4.2 結果	54
4.5	MIO-A–MIO-B 間の信号試験	68
第5章	FM センサーデータを用いた性能評価試験	70
5.1	目的	70
5.2	セットアップ	70
5.3	デジタル波形処理性能の評価試験	72
	5.3.1 グレード付けの評価	72
	5.3.2 loResPH スペクトル解析	73
	5.3.3 PHA スペクトル解析	76
	5.3.4 リニアリティー補正	76
	5.3.5 エネルギー分解能の計算	82
第6章	まとめ	86
付録A	各 pixel ごとの FM センサーデータ処理データに対する解析結果	87
謝辞		97

表目次

2.1	SXS-XCS の性能要求。PSP Description Document[12] から引用した。	21
3.1	SXS-PSP の性能要求。PSP Description Document[12] から転載。	26
3.2	SXS サブシステムレベルでの要求 (SSR-XX) と、コンポーネントレベルでの要求	
	(CR-PXX)のまとめ。X 印が CR が SSR と対応する場所を表す。	27
3.3	SpaceCard $\mathcal{O} \times \mathcal{E} \mathcal{Y} - \ldots$	30
3.4	各ボードの電流値の上限値	31
3.5	XBox-A と PSP(MIO-A) 間を流れる LVDS 信号の特性と機能	34
3.6	PSP-A(MIO-A) と PSP-B(MIO-B) 間を流れる LVDS 信号の特性と機能	35
3.7	derivShift と derivHalfLen の関係	40
3.8	テンプレート長さのサンプル数。	45
4.1	電圧測定の結果....................................	51
4.2	PSP–XBox 間信号試験の要求値の表。V_low (V) と V_high (V) はそれぞれ電圧の	
	最大値と最小値を表す。	56
4.3	TLM_CLK と BASE_CLK の電圧レベルと周波数の測定結果	58
4.4	BASE_CLK に対する TLM_CLK の遅延時間の測定結果	58
4.5	SMP_CLK と SCI_ENA の電圧レベルと周波数の測定結果	61
4.6	SMP_CLK に対する SCI_ENA の遅延時間の測定結果	61
4.7	SCI_DAT の電圧レベルと周波数の測定結果	63
4.8	CMD_ENA, CMD_DAT, HK_ENA, HK_DAT の電圧レベルと周波数の測定結果 .	66
4.9	CMD_ENA に対する HK_ENA の遅延時間の測定結果	67
4.10	PSP-A–PSP-B 間の BASE_CLK 信号の遅延時間に対する合否判定表	68
4.11	BASE_CLK (MASTER) に対する BASE_CLK (SLAVE) の遅延時間の測定結果 .	68
5.1	PSP の構造とバージョン	72
5.2	特性 X 線とエネルギー	74

図目次

1.1	電磁波の波長ごとの地表到達度	10
1.2	ASTRO-H 衛星の各検出器における、エネルギーと有効面積の関係	11
1.3	SXI の検出器部	12
1.4	HXI の検出部。水色は BGO 結晶、紫色は Si 半導撮像体素子、緑色は CdTe 半導	
	体撮像素子を表す。	13
1.5	SGD の検出部。水色は BGO 結晶、赤色は Si 検出器、紫色は CdTe 検出器を表す。	14
1.6	ASTRO-H 衛星の搭載検出器	14
2.1	X 線マイクロカロリメータの基本構造	16
2.2	X 線マイクロカロリメータの温度応答	16
2.3	pixe ごとの平均波形、ノイズスペクトル、最適フィルタテンプレート	19
2.4	SXSシステム構成。藤本先生の日本物理学会 2013 年春季年会発表資料 [14] より転	
	載。	20
2.5	XCS の性能実証モデルの外観図	22
2.6	anti-co 検出器の模式図	22
2.7	SXS の冷凍機デザインと熱的構造。藤本先生の 2010 年 SPIE での発表資料 [15] よ	
	り転載。	23
3.1	PSP の構成とネットワーク図。	28
3.2	MIO ボードのブロックダイアグラム	29
3.3	SpaceCard ボードのブロックダイアグラム	30
3.4	PSU ボードのブロックダイアグラム	31
3.5	MIO ボードと XBox 間、および MIO ボード間の LVDS 信号。PSP Description	
	Document[13] から引用。	33
3.6	XBox から受け取る 1 sample 分のサイエンスデータの bit stream。PSP Description	
	Document[12] から転載。	37
3.7	データの分解とエラーチェック手順のフローチャート図。PSP Description Document[12]	
	から転載。	38
3.8	重畳イベントにおける、ファーストパルスとセカンドパルスの模式図	39
3.9	微分計算における、サンプル番号 i と derivHalfLen の関係図	40
3.10	pixel トリガーにおけるパラメータを表した図	42

3.11	セカンドパルス検出におけるパラメータを表した図	44
3.12	グレード付けの定義	45
3.13	カウントレートとグレード付けの関係図。12.5 kHz でテンプレート長さが Short	
	の時のプロットを表す。	46
4.1	PSP-A の外観	47
4.2	PSP-A の構造と、FPGA およびアプリケーションバージョン	47
4.3	PSP-B の外観	48
4.4	PSP-B の構造と、FPGA およびアプリケーションバージョン	48
4.5	FM-XBox の外観。端子の配置と対応は、左列の上から、PSP-A との接続(本試験	
	ではオープン)、XBox-Aのpixel[0]-[8](本試験ではショート)、XBox-Aのpixel[9]-	
	[17](本試験ではショート)、XBox-A の電源、XBox-A/B 共通の GND、PSP-B	
	との接続(本試験ではオープン)、XBox-Bの pixel[0]-[8](本試験ではショート)、	
	XBox-Bの pixel[9]-[17](本試験ではショート)	48
4.6	XDS-DIO の外観。	49
4.7	SMU sim light の外観。	49
4.8	SpW-GbE の外観。	50
4.9	搬入後動作試験の様子	51
4.10	搬入後動作試験のネットワーク系統図	52
4.11	搬入後動作試験の GND 系統図	53
4.12	PSP-XBox 接続試験のネットワーク系統図	54
4.13	PSP-XBox 接続試験試験の GND 系統図	55
4.14	PSP–XBox 間の BASE_CLK と TLM_CLK の測定結果。黄&緑:BASE_CLK、青	
	&赤:TLM_CLK、ピンク:BASE_CLK の差分を表す。オシロスコープの縦軸は	
	500 mV/1 目盛り、横軸は 50 ns/1 目盛りに設定している。	57
4.15	PSP-XBox 間の SMP_CLK と SCI_ENA の測定結果。 黄&緑: SMP_CLK、青&赤:	
	SCLENA、ピンク:SMP_CLK の差分を表す。オシロスコープの縦軸は 500 mV/1	
	目盛り、横軸は左下が 5 $\mu s/1$ 目盛り、それ以外は 20 $\mu s/1$ 目盛りに設定している。	60
4.16	PSP–XBox 間の SCI_DAT の測定結果。黄&緑:TLM_CLK、青&赤:SCI_DAT、	
	ピンク:SCL_DAT の差分を表す。オシロスコープの縦軸は 500 mV/1 目盛り、横	
	軸は左上が 200 ns/1 目盛り、それ以外は 50 ns/1 目盛りに設定している。	62
4.17	PSP–XBox 間の CMD_ENA の信号画像。左が A 系で右が B 系での測定結果。黄	
	&緑:BASE_CLK、青&赤:CMD_ENA、ピンク:CMD_ENA の差分を表す。オ	
	シロスコープの縦軸は 500 mV/1 目盛り、横軸は左が 100 ns/1 目盛り、それ以外	
	は 50 ns/1 目盛りに設定している。	64

4.18	PSP–XBox 間の CMD_DAT の信号画像。左が A 系で右が B 系での測定結果。黄	
	&緑:BASE_CLK、青&赤:CMD_DAT、ピンク:CMD_DAT の差分を表す。オ	
	シロスコープの縦軸は 500 mV/1 目盛り、横軸は 50 ns/1 目盛りに設定している。	65
4.19	PSP-XBox間のHK_ENAの信号画像。 左がA系で右がB系での測定結果。 黄&緑:	
	BASE_CLK、青&赤:HK_ENA、ピンク:HK_ENA の差分を表す。オシロスコー	
	プの縦軸は 500 mV/1 目盛り、横軸は左が 100 ns/1 目盛りで、右が 50 ns/1 目盛	
	りに設定している。	65
4.20	PSP-XBox間のHK_DATの信号画像。 左がA系で右がB系での測定結果。 黄&緑:	
	BASE_CLK、青&赤:HK_DAT、ピンク:HK_DAT の差分を表す。オシロスコー	
	プの縦軸は 500 mV/1 目盛り、横軸は左が 100 ns/1 目盛りで、右が 50 ns/1 目盛	
	りに設定している。	65
4.21	PSP-XBox間のHK_DATの信号画像。 左がA系で右がB系での測定結果。 黄&緑:	
	BASE_CLK、青&赤:HK_DAT、ピンク:HK_DAT の差分を表す。オシロスコー	
	プの縦軸は 500 mV/1 目盛り、横軸は左が 20 ms/1 目盛りで、右が 10 ms/1 目盛	
	りに設定している。	67
4.22	MIO-A/B 間の BASE_CLK 信号の画像。左が A 系を MASTE としたときで、右	
	が B 系を MASTER としたときの測定結果。黄 &緑:BASE_CLK (MASTER)、青	
	&赤:BASE_CLK (SLAVE)、ピンク:BASE_CLK (SLAVE) の差分を表す。オシ	
	ロスコープの縦軸は 500 mV/1 目盛り、横軸は 50 ns/1 目盛りに設定している。 .	69
5.1	FM センサーデータを用いた性能評価試験における波形データの流れ	71
5.2	XDSv2の外観	71
5.3	各グレードのイベント数の比較	73
5.4	各 pixel ごとのグレード分岐比	74
5.5		
	pixel 12 の全トリガーイベントにおける loResPH ヒストクラム。	75
5.6	pixel 12 の全トリガーイベントにおける loResPH ヒストクラム。 loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-Kα 線のエネルギースペクトルと、	75
5.6	pixel 12の全トリガーイベントにおける loResPH ヒストクラム。 loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-K α 線のエネルギースペクトルと、 ガウシアンフィット結果。左が pixel 12 で、右が全 pixel でのヒストグラム。	75 76
5.6 5.7	pixel 12 の全トリガーイベントにおける loResPH ヒストクラム。 loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-Kα 線のエネルギースペクトルと、 ガウシアンフィット結果。左が pixel 12 で、右が全 pixel でのヒストグラム。 Mn-Kα 線の Hp イベントでの PHA ヒストグラム。エネルギーが低い方のピーク	75 76
5.6 5.7	pixel 12 の全トリガーイベントにおける loResPH ヒストクラム。 loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-K α 線のエネルギースペクトルと、 ガウシアンフィット結果。左が pixel 12 で、右が全 pixel でのヒストグラム。 Mn-K α 線の Hp イベントでの PHA ヒストグラム。エネルギーが低い方のピーク が K α 2線で、エネルギーが高い方が K α 1線を表している。	75 76 77
5.65.75.8	pixel 12 の全トリガーイベントにおける loResPH ヒストクラム。 loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-K α 線のエネルギースペクトルと、 ガウシアンフィット結果。左が pixel 12 で、右が全 pixel でのヒストグラム。 Mn-K α 線の Hp イベントでの PHA ヒストグラム。エネルギーが低い方のピーク が K α 2線で、エネルギーが高い方が K α 1線を表している。 フィッティングによって求められた、pixel 12 の Hp イベントでのリニアリティー	75 76 77
5.65.75.8	pixel 12 の全トリガーイベントにおける loResPH ヒストクラム。 loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-K α 線のエネルギースペクトルと、 ガウシアンフィット結果。左が pixel 12 で、右が全 pixel でのヒストグラム。 Mn-K α 線の Hp イベントでの PHA ヒストグラム。エネルギーが低い方のピーク が K α 2線で、エネルギーが高い方が K α 1線を表している。 フィッティングによって求められた、pixel 12 の Hp イベントでのリニアリティー 補正関数。	75 76 77 78
5.65.75.85.9	pixel 12 の全トリガーイベントにおける loResPH ヒストクラム。 loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-K α 線のエネルギースペクトルと、 ガウシアンフィット結果。左が pixel 12 で、右が全 pixel でのヒストグラム。 Mn-K α 線の Hp イベントでの PHA ヒストグラム。エネルギーが低い方のピーク が K α 2線で、エネルギーが高い方が K α 1線を表している。 フィッティングによって求められた、pixel 12 の Hp イベントでのリニアリティー 補正関数。	75 76 77 78 79
 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 	pixel 12の全トリガーイベントにおける loResPH ヒストクラム。 loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-K α 線のエネルギースペクトルと、 ガウシアンフィット結果。左が pixel 12 で、右が全 pixel でのヒストグラム。 Mn-K α 線の Hp イベントでの PHA ヒストグラム。エネルギーが低い方のピーク が K α 2線で、エネルギーが高い方が K α 1線を表している。 フィッティングによって求められた、pixel 12 の Hp イベントでのリニアリティー 補正関数。 リニアリティー補正におけるフィッティングパラメータ a,b の比較。 pixel ごとの、Hp イベントにおける Mn-K α のエネルギーヒストグラム。	 75 76 77 78 79 80
 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 5.11 	pixel 12の全トリガーイベントにおける loResPH ヒストクラム。 loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-K α 線のエネルギースペクトルと、 ガウシアンフィット結果。左が pixel 12 で、右が全 pixel でのヒストグラム。 Mn-K α 線の Hp イベントでの PHA ヒストグラム。エネルギーが低い方のピーク が K α 2線で、エネルギーが高い方が K α 1線を表している。 フィッティングによって求められた、pixel 12 の Hp イベントでのリニアリティー 補正関数。 リニアリティー補正におけるフィッティングパラメータ a,b の比較。 pixel ごとの、Hp イベントにおける Mn-K α のエネルギーヒストグラム。 全 18 pixel での、Hp イベントにおける Mn-K α のエネルギーヒストグラム。	 75 76 77 78 79 80 81
 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 5.11 5.12 	pixel 12の全トリガーイベントにおける loResPH ヒストクラム。 loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-K α 線のエネルギースペクトルと、 ガウシアンフィット結果。左が pixel 12 で、右が全 pixel でのヒストグラム。 Mn-K α 線の Hp イベントでの PHA ヒストグラム。エネルギーが低い方のピーク が K α 2線で、エネルギーが高い方が K α 1線を表している。 フィッティングによって求められた、pixel 12 の Hp イベントでのリニアリティー 補正関数。 リニアリティー補正におけるフィッティングパラメータ a,b の比較。 pixel ごとの、Hp イベントにおける Mn-K α のエネルギーヒストグラム。 全 18 pixel での、Hp イベントにおける Mn-K α のエネルギーヒストグラム。 ベースラインイベントのヒストグラム。赤線は全 pixel でのベースラインヒストグ	 75 76 77 78 79 80 81

5.13	Mn-Kα線(右)とMn-Kβ線(左)のフォークト関数によるフィッティング結果。 赤線がエネルギースペクトルのヒストグラム、青線がローレンツ関数、黒線が自然 幅を持つローレンツ関数をガウス関数でコンボリュートしてフィットした結果であ	
	る。	84
5.14	NASA/GSFC による、FM センサーデータを用いた実験室系試験での Mn-K α 線	
	の解析結果	85
A.1	全トリガーイベントにおける loResPH ヒストグラム。(上)左から pixel 00, pixel	
	01, pixel 02、(真ん中)左から pixel 03, pixel 04, pixel 05、(下)左から pixel 06,	
	pixel 07, pixel 08_{\circ}	87
A.2	全トリガーイベントにおける loResPH ヒストグラム。(上) 左から pixel 09, pixel	
	10, pixel 11、(真ん中)左から pixel 13, pixel 14, pixel 15、(下)左から pixel 16,	
	pixel 17_{\circ}	88
A.3	loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-K α 線のエネルギースペクトル	
	と、ガウシ アンフィット結果。(上) 左から pixel 00, pixel 01, pixel 02、(真ん中)	
	左から pixel 03, pixel 04, pixel 05、(下)左から pixel 06, pixel 07, pixel 08。	89
A.4	loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-K α 線のエネルギースペクトル	
	と、ガウシ アンフィット結果。(上) 左から pixel 09, pixel 10, pixel 11、(真ん中)	
	左から pixel 13, pixel 14, pixel 15、(下)左から pixel 16, pixel 17。	90
A.5	Mn-K α 線の Hp イベントでの PHA ヒストグラム。(上)左から pixel 00, pixel	
	01, pixel 02、(真ん中)左から pixel 03, pixel 04, pixel 05、(下)左から pixel 06,	
	pixel 07, pixel 08_{\circ}	91
A.6	Mn-K α 線の Hp イベントでの PHA ヒストグラム。(上)左から pixel 09, pixel	
	10, pixel 11、(真ん中)左から pixel 13, pixel 14, pixel 15、(下)左から pixel 16,	
	pixel 17°	92
A.7	フィッティングによって求められた、リニアリティー補正関数。(上)左から pixel	
	00, pixel 01, pixel 02、(真ん中)左から pixel 03, pixel 04, pixel 05、(下)左から	
	pixel 06, pixel 07, pixel 08_{\circ}	93
A.8	フィッティングによって求められた、リニアリティー補正関数。(上)左から pixel	
	09, pixel 10, pixel 11、(真ん中)左から pixel 13, pixel 14, pixel 15、(下)左から	
	pixel 16, pixel 17_{\circ}	94

第1章 X線天文学とASTRO-H衛星

1.1 X線天文学の歴史

X線はわれわれが普段見ている可視光や電波などと同じ電磁波の一種である。宇宙には現在分かっているものだけでも、約数万個程のX線で輝く天体が観測されており、宇宙に存在するほとんどの天体や現象は何らかの形でX線を放射していると考えられている。しかし、大気圏外からくるX線は地球の厚い大気によって吸収されてしまい地表に到達することができない(図1.1)したがって宇宙由来のX線の研究には、気球やロケット、人工衛星などを用いた高い高度での観測が必要不可欠であり、これまで数多くのじ人工衛星観測が行われてきた。

X線天文学の誕生は、50年前にまでさかのぼる。初めに宇宙からのX線を観測をしたのは、ブ ルーノ・ロッシに指導されたリカルド・ジャッコーニらであった。1962年、彼らよって打ち上げ られた観測ロケットによって、予想を遥かに超える強度のX線が検出され、それらは後に、さそ り座X-1という天体からの放射であると分かった。その後も、世界各国から様々なX線天文衛星 が打ち上げられ多くの成果を残している。人工衛星を用いたX線観測の始まりは、ブラックホー ル周辺での高エネルギー現象や宇宙の様々な場所での高温ガスの存在など、それまで知られてい なかった宇宙の新しい姿を次々と明らかにし、現在では、可視光、赤外と電波天文学に並ぶ一大 分野へ成長している。

日本はこれまで、1979年打ち上げの「はくちょう」に始まり、「てんま」(1983年打ち上げ)「ぎんが」(同 1987年)「あすか」(同 1993年)、そして、2014年現在も稼働中である「すざく」(同 2005年)と、全部で5台のX線天文衛星を打ち上げている。上記の衛星によって宇宙の高エネルギー現象の研究において、数多くの成果を残してきた。さらに現在では、次世代の衛星として、日本で6番目にあたるX線天文衛星ASTRO-Hの開発が行われている。

1.2 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H

1.2.1 概要

ASTRO-H は 2015 年打ち上げ予定の日本の X 線天文衛星で、JAXA を中心に国内の 25 の大 学、アメリカ、カナダ、ヨーロッパと共に現在開発中である。総重量は 2.5 t、全長は 14 m とな り、「すざく」の 1.5 倍の質量となる。

ASTRO-H は、2 種類の X 線望遠鏡(軟 X 線望遠鏡、硬 X 線望遠鏡)と、3 種類の X 線検出器 (軟 X 線分光器、軟 X 線撮像検出器、硬 X 線撮像検出器)、さらには軟ガンマ検出器を搭載する。



図 1.1: 電磁波の波長ごとの地表到達度

ASTRO-H は、世界で初めての X 線マイクロカロリメータを用いた超高分解能の撮像分光観測を 最大の特徴としながら、軟 X 線撮像装置と硬 X 線検出器での撮像分光観測に、軟ガンマ線検出器 による分光観測を加え、実に、0.3 keV から 600 keV と、3 桁以上にもおよぶ、過去最高の高感度 広帯域観測を行う。ASTRO-H の各検出器機器におけるエネルギーと有効面積の関係を図 1.2 に 示す。

1.2.2 搭載機器

軟 X 線望遠鏡、硬 X 線望遠鏡

ASTRO-H では軟 X 線から硬 X 線までの広帯域での撮像観測を行うため、従来の X 線天文衛 星にも搭載された軟 X 線望遠鏡だけでなく、より高エネルギーの観測を行うための硬 X 線望遠鏡 を搭載する。

軟 X 線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope : SXT) は、軟 X 線分光器用 (SXT-I) と軟 X 線撮像検出 器用 (SXT-S) の 2 台が搭載される。SXT は、反射面が金メッキされたアルミ薄板を同心円状に 203 枚積層し、全反射を利用することで集光結合を行う多層薄板型 X 線望遠鏡で、10 keV 以下で 大きな有効面積を持つ。

一方、硬X線望遠鏡 (Hard X-ray Telescope: HXT) は、名古屋大学が中心となり開発を進め た多層膜スーパーミラー望遠鏡である。スーパーミラーとは薄板の表面に白金と炭素を交互に蒸 着させ積層したもので、10 keV 以下の軟X線に対しては全反射、10 keV 以上の硬X線に対し てはブラッグ反射を行うことで、5-80 keV のX線を集光結像を可能とする。



図 1.2: ASTRO-H 衛星の各検出器における、エネルギーと有効面積の関係

軟 X 線分光器 (Soft X-ray Spectrometer : SXS)

SXS は、SXT とX線マイクロカロリメータ検出器 X-ray Calorimeter System (XCS) からな る高精密分光装置であり、0.3–12 keV のエネルギー領域の観測を担う検出器である。X線マイク ロカロリメータはX線光子の入射によるわずかな温度上昇をエネルギーとして読み出すことで、 非常に高いエネルギー分解能を発揮する。世界初のX線天文観測用のX線マイクロカロリメー タは、2005 年、すざくによって打ち上げられたが、冷却に必要な液体へリウムが事故によって短 時間のうちに蒸発してしまい観測不能となった。ASTRO-H によってX線マイクロカロリメータ を用いた天体観測が行われれば、世界で初の快挙となる。本論文ではSXSのデジタル波形処理部 Pulse Shape Processor (PSP)の性能実証試験を扱う。X線マイクロカロリメータ、及びSXS に ついては2章、デジタル波形処理部 PSP については3章でそれぞれ詳しく述べる。

軟 X 線撮像検出器 (Soft X-ray Imager : SXI)

SXI は 0.4–12 keV までのエネルギー領域をカバーする X 線 CCD 検出器である。4 枚の受光素 子を田の字状に並べ、4 素子合計で 2560 × 2560 pixel、38 × 38 分角の広視野撮像観測を行う(図 1.3 参照)。熱による雑音を低減するため機械式冷凍機で –120 °Cまで冷却して動作させる。また、 SXI は 4 素子すべてで裏面照射型 CCD を採用しており、それにより低エネルギー側の感度の向 上を実現している。さらに、厚い空乏層 (200 μ m)をもち、高エネルギー側においても「すざく」 と比べて数倍の感度を可能にしている。宇宙観測用の X 線 CCD カメラは「あすか」によって初 めて搭載された。その後、「すざく」にも搭載され、現在では X 線天文観測の標準検出器となっている。



図 1.3: SXI の検出器部

硬 X 線撮像検出器 (Hard X-ray Imager : HXI)

HXI は 5-80 keV の硬 X 線帯域において光子の撮像及び分光を行う装置である。HXT の焦点 面は ASTRO-H の最下部に設置され、軌道上で伸展されることにより焦点距離 12 m を維持する。 有効面積を増やし、信頼性を高めるため、完全に同型のものが2 台、衛星上の対称な位置に搭載 される。4 層の Si 半導体と1 層の CdTe 半導体で構成される、全5 層の半導体両面ストリップ素 子を主検出器部とし、それらを取り囲む9つの BGO 結晶シンチレータからなるアクティブシー ルドを搭載する。 Si 半導体はおもに 5-40 keV、CdTe 半導体は8-40 keV の観測エネルギー領域 を受け持つ。Si 半導体は表と裏に直行する読み出しストリップをもうけることで、2 次元の位置 分解能を持たせている。また、4 層を重ねる事で、光電吸収の向上を図るとともに、3 次元の飛跡 を追う事で荷電粒子イベントの分別を行い、バックグラウンドの低減を可能にする。

軟ガンマ検出器 (Soft Gamma-ray Detector : SGD)

SGD は、「狭視野半導体コンプトンカメラ」という概念に基づく高感度ガンマ線検出器であり、 10 keV から 600keV までの極めて広いエネルギー範囲を持つ。HXI と同様、有効面積を増やすた め完全に同型のものが 2 台搭載される。検出部は Si と CdTe の半導体から構成され、それらはコ ンプトンカメラと呼ばれる。32 層の Si 検出器が視線方向と垂直に置かれ、その底面には 8 層の CdTe 検出器、側面に 2 層の CdTe 検出器が置かれる(図 1.5 参照)。さらに、検出器の上部に設置 された BGO の井戸型シールドおよび金属製のファインコリメータにより、36 × 36 分角以下に 絞られた視野に入ってくる光子を個別に検出する。検出部は光電吸収モードとコンプトンモード



図 1.4: HXIの検出部。水色は BGO 結晶、紫色は Si 半導撮像体素子、緑色は CdTe 半導体撮像素 子を表す。

の2つのモードで動作する。光電吸収モードは 60keV 以下で行われ、入射された光子を Si の層 で光電吸収して検出するモードである。一方、コンプトンモードは 60 keV 以上で行われ、入射 された光子が Si の層でコンプトン散乱されたものを、CdTe で検出する。その際、エネルギーの 測定だけでなく、光子の入射時のエネルギーを E1、コンプトン散乱された後のエネルギーを E2、 入射方向と散乱方向のなす角を θ とすると、コンプトン運動学の式

$$\cos\theta = 1 + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} - \frac{m_e c^2}{E_2}$$
(1.1)

により、光子の入射方向を推定でき、粗い撮像を行うことも可能である。



図 1.5: SGDの検出部。水色は BGO 結晶、赤色は Si 検出器、紫色は CdTe 検出器を表す。



図 1.6: ASTRO-H 衛星の搭載検出器

第2章 軟X線分光器 SXS

SXS に搭載される X 線マイクロカロリメータは、その性質上、センサー部を 50 mK の極低温 に冷却し、それによって 7 eV (FWHM) 以下のエネルギー分解能を実現する。また、SXS は低エ ネルギー帯から鉄の K α 輝線を含む高エネルギー帯域までの観測において史上最高のエネルギー 分解能を維持する。本章では、X 線マイクロカロリメータの原理と、SXS への要求・構造につい て述べる。

2.1 X線カロリメータ

2.1.1 構造と動作原理

X線カロリメータの基本構造の模式図を図 2.1 に示す。X線カロリメータは、X線吸収体と温度一定の熱浴、X線吸収体と熱浴を結合するサーマルリンク、さらに吸収体の温度上昇を測定するための温度計で構成される。X線光子が光電効果されると吸収体の温度が上昇し、図 2.2 に示すような温度応答を得る。X線光子のエネルギーを E、吸収体の熱容量を C とすると、吸収体の 温度上昇は

$$\Delta T = \frac{E}{C} \tag{2.1}$$

で決まることになる。この微少な温度の変化を温度計で測定することでエネルギー値を得る。吸 収体と熱浴はサーマルリンクを通してつながっており、吸収体で生じた熱は次第に熱浴へと逃げ ていき、その後、素子の構成で決まる時定数で定常状態に戻る。温度応答の持間はサーマルリン クの熱伝導度 G と、吸収体の熱容量 C を用いて

$$C\frac{d\Delta T}{dT} = -G\Delta T \tag{2.2}$$

という式で表せる。この式を解くと時定数は $\tau_0 = C/G$ と求まる。X線マイクロカロリメータの 温度応答の時間変化は、この時定数に従って指数関数的に減少することになる。式 (2.2) から分か るように、これは吸収体の比熱と C サーマルリンク G によって決まる定数となり、入射 X 線光 子のエネルギーによらないことが分かる。このことは後述する波形処理の過程で使用する波形テ ンプレートを決める上で重要である。



図 2.1: X 線マイクロカロリメータの基本構造 図 2.2: X 線マイクロカロリメータの温度応答

2.1.2 エネルギー分解能

X線カロリメータのエネルギー分解能は、光子検出過程にともなうゆらぎと、読み出された波 形に重畳するノイズによって決まる。これらのゆらぎとノイズの要因は発生源ごとに以下のよう な3つの要因に分けて考えられる。

- (1) 検出器自身に由来する、ゆらぎとノイズ
- (2) 温度計の読み出し回路系のノイズ
- (3) その他の要因によるノイズ(電磁干渉や熱浴の温度揺らぎ等)

(1)のノイズにはさらに、素子の温度揺らぎ (フォノンノイズ) と温度計のノイズ (ジョンソンノ イズ)の2つの要素がある。温度計と電気抵抗の温度変化を利用したものであれば、その電気抵抗 による熱ノイズ (ジョンソンノイズ) は温度計の雑音として避けられないものである。(1)のノイ ズによって決まるエネルギー分解能は直観的に以下のように考えることができる。

ボルツマン定数 k_B を用いると、温度 T の物質中でのフォノン 1 個がもつ平均エネルギーは $\epsilon = k_B T$ と表せる。また、熱容量 C の受光素子全体が持つ内部エネルギーは CT と書けるので、 平均フォノン数 N はそれらの値を用いて、

$$N = \frac{CT}{k_B T} = \frac{C}{k_B} \tag{2.3}$$

となる。フォノン数の揺らぎはポアソン分布に従うため
 \sqrt{N} となり、したがってフォノン数の揺らぎによる素子のエネルギーの揺らぎは

$$\Delta E \sim \sqrt{\frac{CT}{k_B T}} k_B T = \sqrt{k_B C T^2} \tag{2.4}$$

となる。X線光子による温度上昇はTに比べると小さいので、検出器の温度Tがそのままエネ ルギー分解能の見積もりになる。さらに、素子の熱揺らぎと温度計の熱ノイズを考慮してエネル

$$\Delta E = 2.35\xi \sqrt{k_B C T^2} \tag{2.5}$$

となる。ここで、 ξ はバイアス条件や温度計の感度によって決まるパラメータであり、温度計として半導体温度計を使用したとすると、その値は~2の値を持つ。エネルギー分解能を向上させるためには、式 (2.5) から分かるように、素子の温度*T*を極低温にして、熱容量*C*を小さくすればよいことになる。SXSでは、素子の温度を 50 mK の極低温に冷却することで、エネルギー分解能 $\Delta E < 7eV$ (FWHM)を達成する。

2.1.3 最適フィルタを用いた信号処理

カロリメータは原理的に優れたエネルギー分解能を達成できるが、その実現のためにはノイズ 対策だけではなく、信号処理の方法についても考慮する必要がある。

X線検出器は通常、波形のピーク値とベースラインの値の引き算で波高値を求めるが、これは 波形に重畳するノイズに影響を受けるため、必ずしも正確な波高値とはならない。SXSでは、複 数のサンプルの平均波形とノイズスペクトルから作られるテンプレートをあらかじめ持っておき、 そのテンプレートを実際の波形データにフィッティングすることで波高値を求める。この方法は 最適フィルタ処理と呼ばれ、これによって S/N の改善を行うことができる。以下に、SXS の信号 処理で使用されている最適フィルタについて詳しく説明する。

2.1.1 節で述べたように、X 線カロリメータの温度応答の時定数はエネルギーによらず素子の構成によってのみ決決定される。最適フィルタ処理では、X 線パルス波形が波高値を除いて同じ形で表せることを仮定し、これを $A \times S(t)$ とする。S(t) が規格化されたパルス波形で、A は波高値である。これを周波数空間について考え、パルス波形とノイズのパワースペクトルをそれぞれ $S(\omega), N(\omega)$ とする。このときノイズを含む実データ $D(\omega)$ は、

$$D(\omega) = H \times S(\omega) + N(\omega)$$
(2.6)

と書ける。最適な波高値の推定値 Η は、上記の *D*(ω) とパルス波形のモデルとの差を最小にする ことで得られる。それは、

$$\chi^2 \equiv \sum \frac{|D(\omega) - H \times S(\omega)|^2}{N^2(\omega)}$$
(2.7)

で定義される。 χ^2 の微分が0になるような H は、

$$H = \frac{\sum \frac{D(\omega)S^*(\omega) + D^*(\omega)S(\omega)}{2|N(\omega)|^2}}{\sum \left|\frac{S(\omega)}{N(\omega)}\right|^2}$$
(2.8)

で与えられる。 $D(\omega) \ge S(\omega)$ は実関数なので、 $D^*(\omega) = D(-\omega)$ 、 $S^*(\omega) = S(-\omega)$ であるため、

$$\sum \frac{D(\omega)S^*(\omega)}{2|N(\omega)|^2} = \sum \frac{D(-\omega)S^*(-\omega)}{2|N(\omega)|^2} = \sum \frac{D^*(\omega)S(\omega)}{2|N(\omega)|^2}$$
(2.9)

が成り立つ。したがって、Hは、

$$H = \frac{\sum \frac{D(\omega)S^*(\omega)}{|N(\omega)|^2}}{\sum \left|\frac{S(\omega)}{N(\omega)}\right|^2}$$
(2.10)

$$= \frac{\sum \frac{D(\omega)}{S(\omega)} \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2}{\sum \left| \frac{S(\omega)}{N(\omega)} \right|^2}$$
(2.11)

と書ける。これを時間空間に戻すと、

$$H = \sum D(t) \times F(t) \tag{2.12}$$

ここで F(t) は最適フィルタテンプレートで、 $S(\omega)/N^2(\omega)$ をフーリエ変換したものである。した がって最適フィルタを求めるためには、平均パルス波形 $S(\omega)$ と、ノイズパワースペクトル $N^2(\omega)$ を用意すればよいことになる。ノイズがホワイトノイズの場合、すなわち周波数空間でフラット な場合は、最適フィルタテンプレートは平均パルス波形と一致する。

2.2 性能要求

この節では、SXS に与えられている性能要求を表 2.1 に示す。詳しくは SXS-XCS description document [12] に記載されている。

2.3 システム構成

SXS のシステム構成を図 2.2 に示す。SXS は大きく分けて、フィルターホイール部、検出器部、 冷凍機部、波形処理部からなる。X 線天体からの光子は SXT からフィルターホイールを通して、 冷凍機によって 50 mK に冷却された検出器部に集光される。その後、XCS で検出された波形信 号はアナログ信号処理系 (X-ray Box : XBox) によるアナログ・デジタル変換ののち、デジタル信 号処理系 (Pulse Shape Processor : PSP) によって、入射 X 線光子のイベント付けや、詳細なエ ネルギー決定がなされる。その後、PSP で処理された X 線光子についての情報はサイエンスデー タとしてまとめられ、SpaceWire Router を通り衛星管制装置へと送られる。図 2.4 に SXS のシ ステム構成の図を載せる。

2.3.1 フィルターホイール部

前節で述べたようにカロリメータ信号の減衰時間は、素子の熱容量*C*とサーマルリンクの熱伝 導度*G*によって、

$$\tau_0 = C/G \tag{2.13}$$



平均パルス波形 S(t)



ノイズパワースペクトル $N(\omega)$



最適フィルタテンプレート F(t)

図 2.3: pixe ごとの平均波形、ノイズスペクトル、最適フィルタテンプレート 19



図 2.4: SXS システム構成。藤本先生の日本物理学会 2013 年春季年会発表資料 [14] より転載。

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

表 2.1: SXS-XCS の性能要求。PSP Description Document[12] から引用した。

と求められる。SXSに使用されているカロリメータ検出器は₇₀が約10 msec と遅いため、10 msec 以内の時間差で光子が入力すると、波形が重畳してしまい前述の最適フィルタ処理が破綻する。そのため、SXT と SXS の間に X 線光子の入射数を制限するためのフィルターを設置し、明るい X 線天体を見る際には、そのフィルターによって入射光子のカウントレートを調整する。ASTRO-H には観測の目的や対象の種類によって変更できる6 種類のフィルターから成るフィルターホイールが搭載される。

2.3.2 検出器部

X 線吸収体

XCS は NASA/GSFC (Goddard Space Flight Center) によって開発されている。X 線吸収体 が 6×6 の全 36 pixel がアレイ状に並べられ、四隅の内の1つを除いた 35 pixel が観測に使われ る。温度計にはシリコン半導体温度計を使用する。また、キャリブレーション用の pixel がアレ イの外側に設置され、⁵⁵Fe の較正線源を照射することで 36 番目の pixel データとして読み出され る。図 2.5 に XCS の外観図を載せる。



図 2.5: XCS の性能実証モデルの外観図

反同時計数検出器

SXSは、宇宙線などの荷電粒のバックグラウンド除去のために反同時計数検出器 (anti-coincidence) を搭載する。反同時計数検出器はシリコンの PIN 型検出器で、大きさは 10 mm×10 mm、厚さは 500 µm である。Anti-co 検出器はカロリメータアレイの下に設置され、カロリメータと Anti-co 検出器で同時にトリガーがかかったとき、その信号を除外することで宇宙線由来のバックグラウ ンドを軽減できる。



図 2.6: anti-co 検出器の模式図

2.3.3 冷却系

すでに述べたように、X線カロリメータは素子を極低温に冷却することで、非常に優れたエネ ルギー分解能を達成する。そのため ASTRO-H では、5 mm×5 mm の検出器部の冷却に、高さ約 1.3 m、直径約1 m にもなる冷凍機を用いる。SXS の冷却系の詳しい構造を図 2.7 に示す。冷凍 機は、main shell, 100 K, 20 K, 4 K, 1 K の 5 層で構成される。20 K までの冷却は 2 段スターリ ング冷凍機 (2ST) を 2 台用いて行われる。1 対のそれぞれの 2ST は通常時は 50 %の能力で運転 している。もし片方が動作しなくなった場合は、残った方が 100 %で運転される。4 K までの冷 却は 2ST が 2 台と 4 He ジュールトムソン冷凍機 (4 HeJT)1 台、1 K までは超流動 He(LHe) が冷 却を行う。さらに、超流動 He がなくなったときのために、He タンクと 4 HeJT の間に 3 段目の ADR を設置している。そして、1 K 層内部にある 2 段式断熱消磁冷凍機 (ADR) によって検出器 は 50 mK の超低温まで冷却される。



図 2.7: SXS の冷凍機デザインと熱的構造。藤本先生の 2010 年 SPIE での発表資料 [15] より転載。

2.3.4 信号処理系

DIST

Distributor (DIST) は衛星のバス電源を SXS の各機器へ分配する電源供給装置である。バス電 源から供給される 32.5–52.0 V の非安定化電源を変圧し、各機器に用意されている Power Supply Unit (PSU) と呼ばれる電源供給用の基板へと供給する。DIST はさらに、電流値の監視機能を 持っており、異常があった場合には電源供給を自動的に止める機能を持つ。

SpaceWire Router

SpaceWire Router は PSP と衛星管理装置の間のデータの中継を行う、衛星ネットワークハブ である。ASTRO-H の衛星ネットワークには、科学衛星の統一規格プロトコルである SpaceWire 規格が使用される。SpaceWire 規格を使用することで、衛星ネットワークの設計にかかる手間と コストを削減することが可能になる。PSP は、SpaceWire 規格を採用した SpaceWire Router を 通すことで、衛星管理装置やデータ記憶装置とのやり取りを行う。

XBox

XBox は検出器と PSP の間に位置するアナログ処理装置であり、NASA/GSFC が開発を担当し ている。XBox は独立した 2 系統 (XBox-A と XBox-B) からなり、1 系統で全チャンネルの半分ず つ、カロリメータアレイの 18 チャンネルと反同時計数検出器の 1 チャンネルを処理する。XBox は、イベントのサンプリング、波形信号の整形・増幅、アナログ・デジタル変換を行う。デジタル 変換された信号は Low Voltage Differential Signaling (LVDS) により PSP へと送られる。また、 信号処理機能のほかに、検出器へかかる電圧の制御や、温度・電圧の監視を行う。

\mathbf{PSP}

PSP は、SXS のデジタル信号処理を担当する装置である。PSP は、XBox から送信されるデジ タル波形データを受信し、微分波形を用いたイベントのグレード付けや、最適フィルタ処理によ る光子のエネルギーの高精度測定を行う。PSP は、ISAS/JAXA, 三菱重工業, 首都大学東京, 埼 玉大学, 立教大学が共同で開発をおこなっている。

第3章 デジタル波形処理機器 PSP

SXS は原理的に非常に優れたエネルギー分解能を実現するが、XBox からの波形データの正常 な受け取りや、波高値決定の際の正しいデジタル信号処理が行わなければ、結果としてエネルギー 分解能を劣化させてしまうことになる。そのため、PSP は SXS の性能を発揮するための要とな る、非常に重要な機器となる。本章では、本論文の試験対象である PSP に課せられる性能要求や ハードウェア構成、さらに PSP で行われるデジタル波形処理について述べる。

3.1 性能要求

前章で SXS システムの性能要求について述べたが、PSP 単体レベルに対しても性能要求が与 えられている。表 3.1 に、PSP のデジタル波形処理に与えられる性能要求を示す。さらに、SXS システムレベルへの要求 (SSR-XX) と、PSP への要求 (CR-PXX) の対応を表 3.2 示す。

番号	要求
エネルギー領域	
CR-P01	0.3–12.0 keV のエネルギー ¹ 帯域のイベントを検出する
CR-P02	12.0 keV をカバーするダイナミックレンジ ² を持つ
パルス検出とグレード付け	
CR-P03	ピークの波高値が 5 × (rms noise) 以上のイベントを検出する。 ³
CR-P04	5 ms 以上間隔をあけて到来したすべてのイベントを検出する
CR-P05	2 ms 以上間隔をあけて到来し、隣り合った 2 つの波形の波高値の比
	が 30 以下であるすべてのパルスを検出する
CR-P06	すべてのイベントに対して、High-Resolution (HR), Medium-
	Resolution (MR), Low-Resolution (LR) \mathcal{E} , primary, secondary \mathcal{O}
	組み合せで決まるグレード付けを行う
ノイズバジェット	
CR-P07	HR イベント処理によるスペクトル分解能の劣化を 0.5 eV 以下に抑
	える
CR-P08	MR イベント処理によるスペクトル分解能の劣化を、HR 分解能よ
	り 1 eV(FWHM) 以下に抑える
CR-P09	LR イベント処理によるスペクトル分解能の劣化を、HR 分解能より
	10 倍以下に抑える
最大カウントレート	
CR-P10	150 s ⁻¹ array ⁻¹ のイベントレートを処理する
CR-P11	20 s ⁻¹ pixel ⁻¹ のイベントレートを処理する
ライブタイム	
CR-P12	全てのイベントを、2%未満のデットタイム ⁴ で検出する
CR-P13	1%未満の精度でイベント検出のライブタイムを決定する

表 3.1: SXS-PSP の性能要求。PSP Description Document[12] から転載。

¹エネルギー帯域は、キャリブレーションでの波高値とエネルギーの線形関係におけるベストフィットで決まる 2 目標は 16.0 keV

³rms noise とは、パルスのない状態での ADC sample の二乗平均平方根の値をさす ⁴デットタイムとは、パルスレコードの範囲内の、パルスサーチを行わない時間をさす

表 3.2: SXS サブシステムレベルでの要求 (SSR-XX) と、コンポーネントレベルでの要求 (CR-PXX) のまとめ。X 印が CR が SSR と対応する場所を表す。

CR	Description		Sub-system requirements (SSR)									
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
P-01	Energy range		х									
P-02	Dynamic range		х							х		
P-03	Detection threshold	х	х	х						х		
P-04	Duplicated pulse (5 ms)	х						х		х		
P-05	Duplicated pulse (2 ms)	х						х		х		
P-06	Grading	х										
P-07	HR resolution	х								х		
P-08	MR resolution	х								х		
P-09	LR resolution											
P-10	Array max rate										х	
P-11	Pixel max rate										х	
P-12	Pixel dead time	х						х				
P-13	Live time accuracy											

3.2 ハードウェア

PSP は PSP-A と PSP-B の電気的に同等な 2 系統をもち、それぞれ MIO ボード 1 枚, SpaceCard ボード 2 枚, Power Supply Unit (PSU) ボード 1 枚で構成される。MIO ボートと SpaceCard ボー ドは他の ASTRO-H 機器で共通に使用されるハードウェアであり、それぞれの機器ごとに異なる 構成で使用される。また、PSP に搭載される PSU ボードは PSP の構成に応じて調整されている が、基本的には ASTRO-H のほとんどのデジタル機器で使用されているものと共通である。

PSP は1系統でそれぞれ、カロリメータ検出器 18 チャンネルと Anti-co 検出器 1 チャンネルに ついての処理を担当し、両系統を同期させることで全 pixel 分のデータを処理する。PSP の構成 とネットワークの図を以下に示す(図 3.1)。



図 3.1: PSP の構成とネットワーク図。

3.2.1 MIOボード

MIO ボードのブロックダイアグラムを図 3.2 に示す。MIO は他の機器との LVDS 通信を駆動す るための電流源 (LVDS driver)、PSU ボードからの電源電圧/電流を制御する regulator をもつ。 MIO ボードには SpaceWire FPGA と User FPGA の 2 つの FPGA が搭載されている。SpaceWire FPGA は SpaceWire 通信とデータ保存用のメモリーである SDRAM へのアクセスを担当してお り、このロジックは全機器で同じアルゴリズムが使用される。一方で、User FPGA は各観測機器 ごとで専用の機能を持ったアルゴリズムを構築でき、こここでは PSP 用に設計されたロジックが 搭載されている。FPGA は Actel Corporation 社製のものを使用し、耐宇宙環境用で書き込み不 可なものとなっている。

MIO ボードには 20 MHz の水晶発振子 (oscillator) と内部クロックを生成するための clock driver が搭載される。User FPGA と SpaceWire FPGA はバス接続され、SpaceWire FPGA によって 20 MHz の通信速度で SpaceCard と通信を行う。また、MIO ボードは 64 M byte の SDRAM を 搭載している。この SDRAM には Error Detection And Correction(EDAC) というメモリー保護 機能が装備され、宇宙線対策のためにビットエラー訂正機能を持つ。



図 3.2: MIO ボードのブロックダイアグラム

3.2.2 SpaceCard $\vec{\pi} - \vec{F}$

SpaceCard ボードは SpaceWire FPGA と SOI-SoC (三菱重工が開発したマイクロプロセッサ) で構成される。SpaceWire FPGA は SDRAM へのアクセスと SpaceWire 通信を制御し、すべて の観測機器で共通のロジックが使用される。オペレーションシステム,ミドルウェア, Application Programming Interface (API) は ASTRO-H の全機器で共通となっているが、各タスクのうち、 観測機に固有の処理をするものは、User Application と呼ばれ、ここでは PSP 用に設計される。 SpaceCard ボードのブロックダイアグラムを図 3.3 に示す。SpaceCard ボードは MIO ボードと 同等の SpaceWire FPGA を持ち、LVDS 通信と RAM アクセスを担う。MIO と異なる点として、 SpaceCard は CPU を搭載している。CPU には MHI が製造した SH4-compatible 32-bit RISC processor が使用され、60 MHzのクロックで動作し、オペレーティングシステムとして TOPPERS が使用されている。また、データ保存用のメモリーとして、EEPROM (512 k byte), SRAM, SDRAM の3 つを搭載する。それぞれのサイズや使用用途を表 3.3 に示す。

表 3.3: SpaceCard のメモリー									
Type	Size/	#of	#of	Total	EDAC	用途			
	piece(b)	pieces	set	(MB)					
EEPROM	$512K \times 8$	4+1	1	2	no	メインプログラムの保存用			
SRAM	$512K \times 8$	4 + 1	2	4	no	メインプログラムの動作用			
SDRAM	$16 \text{K} \times 16$	2 + 1	1	64	yes	データ保存用			



図 3.3: SpaceCard ボードのブロックダイアグラム

3.2.3 PSUボード

PSU のブロックダイアグラムを図 3.4 に示す。PSU ボードは DIST から供給されたバス電源 (1次電源)を、ボード (2次電源)を通して他の3つのボードに供給する。2次電源はコマンド無 しで供給される。32.5 - 52 V のレンジの直流 1 次電圧を 2 つの DC/DC コンバータで+3.3 V と ± 12 V に変換する。3.3 V は MIO ボードと SpaceCard ボードに送られ、各ボード内で 1.5 V に 変換されて使われる。12 V は MIO ボードに送られ、3.3 V 電源のカレントリミッタに使われる。

PSU ボードは1次・2次電源の両方で電源のノイズを低減するフィルタを持つ。上限電流はFET スイッチと呼ばれるトランジスタを用いたスイッチを用いて制御される。もし電流値が上限値を 超えると、電源は自動的にオフになりコマンドでFET スイッチがオンになるまでその状態が維持 される。

MIO ボードは、PSU ボードの FET スイッチを使用し、SpaceCard ボードと MIO ボード (自分 自身を含めた) への 2 次電源の on/off を制御する。MIO ボードは過電流を防ぐため電流値をモニ ターする。電流値の上限値を表 3.4 に示す。



図 3.4: PSU ボードのブロックダイアグラム

Card	V_2^{a}	$I_2^{(\min)b}$	$I_2^{(\max)_c}$	$t_{\rm break}^{\rm d}$
	(V)	(mA)	(mA)	(ms)
MIO-A/B	3.3	1086	3258	5
SpaceCard-A/B0	3.3	1105	3315	5
SpaceCard-A/B1	3.3	1105	3315	5

表 3.4: 各ボードの電流値の上限値

^a The secondary output voltage.

^b The minimum secondary output voltage.

^c The maximum secondary output voltage, at which the current limit is set.

^d The powe break time in the primary power at overcurrent.

3.3 通信インターフェイス

PSP は XBox や SpaceWire Router などの周辺機器との通信や、PSP を構成する、MIO ボー ド, SpaceCard ボード, PSU ボードとの通信に LVDS 規格を使用している。LVDS は 2 本の信号 線を使用して逆位相の信号を送信し、受信側で両者を比較することでデータのやり取りを行う差 動信号システムである。使用する 2 本の信号線として、信号線同士を縒り合わせたツイストペア ケーブルを用いることで、単なる平行線よりも電磁波ノイズの放射量を減らすことができる。ま た、ASTRO-H に使用される LVDS は信号振幅が 300 mV と低いために信号の立ち上がり/立ち 下がりが速く、その結果として高速通信を可能にする。

PSP は MIO ボード上に搭載された LVDS driver を用いて、XBox から送信される LVDS 信号 を受信する。その後、PSP 内の MIO ボードと SpaceCard ボードでデジタル処理されたデータは パケット情報として変換され、後段の SpaceWire Router へと送られる。

3.4 信号線

3.4.1 PSP-A/B-XBox-A/B間の信号線

MIO-A は XBox-A と、MIO-B は XBox-B と、それぞれ9つのペアーの信号線を持つ LVDS ケー ブルによって接続される (図 3.5)。それぞれの信号線は PSP と XBox の波形データのやり取りや、 PSP から XBox への衛星制御データの送信、また、XBox から PSP への衛星情報データの送信な どに使用される。

BASE_CLK は PSP の基準となる 5 MHz のクロック信号であり、PSP 側から XBox へと送信 される。XBox は、PSP から受け取った BASE_CLK と XBox の基準クロックである TLM_CLK との同期を行い、TLM_CLK を PSP へと送り返す。また、PSP は波形データのサンプリング レートを決める SMP_CLK というクロック信号を XBox へと送信する。SMP_CLK は周波数と して 12.5 kHz と 15.625 kHz の 2 つを持っており、初期値は 12.5 kHz に設定されている。XBox は 受け取った SMP_CLK で決まるサンプリングレートで、波形データの長さを決める SCI_ENA と実際の波形データである SCI_DAT を PSP へと送信する。さらに、PSP は、衛星制御データ を CMD_ENA と CMD_DAT として XBox へと送信し、XBox が衛星情報データを HK_ENA と HK_DAT として PSP へと送信する。以下に、PSP-XBox 間の 9 つの信号線の特性と、各信 号の機能を示す (表 3.5)。

3.4.2 MIO-A-MIO-B間の信号線

PSP-A の MIO-A と PSP-B の MIO-B 間を接続する信号線は、3 本搭載される。そのうちの2 本は MIO-A/B 間のクロック同期用に使用され、残りの1 本は SpaceWire 通信の冗長系として使 用される。PSP では A 系と B 系でクロックを同期させるために、2 枚の MIO のうちどちらかが MASTER となり、水晶振動子からクロックの生成を行い、もう一方の MIO は、SLAVE として



図 3.5: MIO ボードと XBox 間、および MIO ボード間の LVDS 信号。PSP Description Document[13] から引用。

LVDS 信号で MASTER からのクロックを受け取り、それを動作クロックとして利用することで 同期を実現する。

クロック同期線は MIO-A と MIO-B 間にループをなすように接続されている。この信号線は、 MASTER からの基準クロックである **SYNC_BASE_A2B** とサンプリングクロック **SYNC_SMP_A2B** (ここでは A 系が MASTER であるとする)を SLAVE ボードへと送るのに使用される。SLAVE は 受け取ったクロック信号と自らの持つ **BASE_CLK** と **SMP_CLK** とを同期させ、その後 MAS-TER へ **SYNC_BASE_B2A** と **SYNC_SMP_B2A** としてクロック信号を返送する。それぞれ の信号名および機能を表 3.6 に示す。

信号名1	周波数	電流値	電圧値	機能
	(Hz)	(mA)	(V)	
(From PSP to XBox)				
BASE_CLK_A+	$5 \mathrm{M}$	3.4	1.65	MIO からの信号の基準となるクロック
BASE_CLK_A-	$5 \mathrm{M}$	3.4	1.65	
SMP_CLK_A+	$12.5^2 \mathrm{K}$	3.4	1.65	XBox のサンプリングクロック
$SMP_CLK_A -$	$12.5^2 \mathrm{K}$	3.4	1.65	
CMD_ENA_A+	-	3.4	1.65	CMD_DAT の Enable/disable 信号
CMD_ENA_A	-	3.4	1.65	
$CMD_DAT_A +$	-	3.4	1.65	XBox へのコマンド信号
CMD_DAT_A-	-	3.4	1.65	
(From XBox to PSP)				
TLM_CLK_A+	5 M	3.4	1.65	XBox からの信号の基準となるクロック
$\mathbf{TLM}_{-}\mathbf{CLK}_{-}\mathbf{A}-$	$5 \mathrm{M}$	3.4	1.65	
SCI_ENA_A+	$12.5^2 \mathrm{K}$	3.4	1.65	SCI_DAT の Enable/disable 信号
$SCI_ENA_A -$	$12.5^2 \mathrm{~K}$	3.4	1.65	
SCI_DAT_A+	-	3.4	1.65	XBox からのサイエンスデータ
$SCI_DAT_A -$	-	3.4	1.65	
$HK_ENA_A +$	-	3.4	1.65	HK_DAT の Enable/disable 信号
HK_ENA_A-	-	3.4	1.65	
HK_DAT_A+	-	3.4	1.65	XBox からの HK データ
HK_DAT_A-	-	3.4	1.65	

表 3.5: XBox-A と PSP(MIO-A) 間を流れる LVDS 信号の特性と機能

^{*a}この表における LVDS 信号名は、A 系の*場合のものである。B 系の場合は信号名の_A を_B に変換する。 ^{*b*}SMP_CLK の周波数は 12.5 kHz (デフォルト値) と 15.625 kHz がある。</sup>

表 3.6: PSP-A(MIO-A) と PSP-B(MIO-B) 間を流れる LVDS 信号の特性と機能

$_{\rm acc}$ 表 3.6: PSP-A(MIO-A) と PSP-B(MIO-B) 间を流れる LVDS 信号の特性と機能						
信号名	周 波 数	電流值	電圧値	機能		
	(Hz)	(mA)	(V)			
(From MIO-A to MIO-B)						
SYNC_BASE_A2B+	$5 \mathrm{M}$	3.4	1.65	MIO-A からの BASE_CLK		
$\mathbf{SYNC}_{-}\mathbf{BASE}_{-}\mathbf{A2B}-$	$5 \mathrm{M}$	3.4	1.65			
SYNC_SMP_A2B+	$12.5^1 \mathrm{K}$	3.4	1.65	MIO-A からの SMP_CLK		
SYNC_SMP_A2B-	$12.5^1 \mathrm{~K}$	3.4	1.65			
(From MIO-B to MIO-A)						
$SYNC_BASE_B2A +$	$5 \mathrm{M}$	3.4	1.65	MIO-B からの BASE_CLK		
SYNC_BASE_B2A-	$5 \mathrm{M}$	3.4	1.65			
SYNC_SMP_B2A+	$12.5^1 \mathrm{K}$	3.4	1.65	MIO-B からの SMP_CLK		
SYNC_SMP_B2A-	$12.5^1 { m K}$	3.4	1.65			

^a周波数は 12.5 kHz(default) と 15.625 kHz がある。
3.5 デジタル波形処理

PSP の波形処理は、MIO ボードと SpaceCard ボードを用いて行われる。まず MIO で、XBox から送られる波形データを受信し、チャンネル毎に分解する。さらに、各チャンネルで独立にエ ラーのチェックを行った後、波形データを pixel 保存用のバッファに記録する。その後、バッファ に保存された波形データを使って微分波形 (derivative) を計算し、その結果を波形保存用のバッ ファに保存する。微分計算の結果は常に監視され、FPGA のステートマシンによってイベントの 検出が行われる。

MIO での処理を終えると、波形データは SpaceCard へと送られる。先に述べたように、短い 間隔で複数の光子が入射すると、波形が重畳によって最適フィルタ処理が破綻し、エネルギー分 解能が劣化してしまう。PSP では重畳波形による分解能の劣化を軽減するために、セカンドパル スの検出やグレード付けを行う。その後、最適フィルタ処理を用いた波高値解析によって入射光 子のエネルギーを決定する。

データ受信とエラーチェックについては 3.5.1、イベントの検出については 3.5.2、グレード付け は 3.5.3、波高値解析については 3.4.4 で詳しく述べる。

3.5.1 データ受信とエラーチェック

XBox から送られる波形データは LVDS 通信によって MIO へ送られる。PSP は MIO の User FPGA でデータの受信、チャンネルごとに分解、sample およびチャンネル単位でのエラーのチェッ ク、Clip のチェック、データの保存を行う。データ処理のフローチャートを図 3.7 に示す。

データの分解

XBox からの1 sample 分のデータは、SCI_DAT, SCI_ENA として MIO に送信される。1sample は、18 pixel と1 anti-co チャンネル、sample ごとにカウントアップする sciRecvnt カウンター (8 bit)、spare bit から構成される。MIO ではチャンネルごとで独立に処理を行うために、sample をチャンネルごとに分解する。各チャンネルのデータは、adcSample 14 bit、spare bit、 parity bit で構成される (図 3.6)。1 sample 分のデータは 12.5 または 15.625 kHz の SMP_CLK に同期して 送信され、SCI_ENA の立ち下がりが新しい sample のスタートを表す。SCI_ENA の立ち下が りは、その時の SMP_CLK の立ち上がりから $20.0 \pm 0.8\mu s$ に送信される。また、BASE_CLK のカウント数 n によって、

$sciEnaDelayLower \le n < sciEnaDelayUpper$ (3.1)

で定義される time window で、SCI_ENA の立ち下がりの検出を行う。



図 3.6: XBox から受け取る 1 sample 分のサイエンスデータの bit stream。PSP Description Document[12] から転載。

sample errors チェック

MIO では上記の分解処理と共に、受け取ったすべての sample に対して" sample errors" のチェッ クを行う。このエラーは sample 単位のエラーであり、チャンネル単位のものではない。 sample エ ラーが検出されると、それぞれのタイプに応じたエラーカウントがカウントアップし、sampleErr フラグが "1"となる。以下にエラーカウント名とそのエラーカウントが増加する条件を示す。

- sciLenErrCnt : SCI_ENA=0の長さで決まる sample の長さが 312 bit でない
- sciLenErrCnt: time window(式 3.1) で決まる範囲の中に sample がない
- sciCntErrCnt: sciRecvCnt 値の増加が+1 でない

Clip のチェック

19 チャンネルに分解されたデータに対して、adcSample の値がクリップされているかを調べ る。クリップとは、入力信号が表現可能な値を超えたことを意味する。adcSample の値が –8192 か 8191 のどちらかのとき、そのデータはクリップされていることを示す。クリップされた pixel データは、pxClipCnt でカウントされ、anti-co チャンネルも同様に acClipCnt でカウントさ れる。

Channel errors のチェック

19 チャンネルに分解されたデータに対して、"channel errors"のチェックを行う。channel errors はチャンネルごとに割り当てられる。もし 18 pixel と 1 anti-co チャンネルのどれかでエラーが検 出されると、エラーカウントが増加し、channelErr フラグが "1"となる。以下にエラーカウン ト名とそのエラーカウントが増加する条件を示す。

• parityErrCnt: 18 pixel と 1 anti-co チャンネルで中に parity エラーがある

データの保存

pixel データは **pxDelayBuf** と呼ばれる一次記憶領域に **pxAdcSample** として保存される。 **pxDelayBuf** は、1536 bits (= 96 samples(**pxDelayBuf**) × 16 bit sample⁻¹)のサイズを持 つバッファーである。anti-co データは **acDelayBuf** に保存される。**acDelayBuf** のサイズは **pxDelayBuf** と同様のサイズを持つ。





図 3.7: データの分解とエラーチェック手順のフローチャート図。PSP Description Document[12] から転載。

3.5.2 イベントの検出

イベントの検出は、データの分解の後、pxDelayBuf に保存された pxAdcSample を使用し て行われる。重畳イベントにおいて、初めに到来したイベントをファーストパルス、二番目以降 に到来したイベントをセカンドパルスとする(図 3.8)。イベントの検出は、MIO によるファース トパルス検出と、CPUによるセカンドパルス検出の2つの手順で行われる。まず、MIO でイベ ント波形についての時間微分を計算し、その微分値 (derivative) がしきい値を超えた時にイベン トにトリガーをかける。その後、SpaceCard によって、イベント波形から平均波形を引き算する ことによりセカンドパルスの検出を行う。以下にそれらの詳細について記す。



図 3.8: 重畳イベントにおける、ファーストパルスとセカンドパルスの模式図

微分波形 (derivative) の計算

derivative はすべての pxAdcSample について計算される。*i* 番目の derivative(*i*) は、前後 の pxAdcSample についての差分をとることで計算される。これにより、pxAdcSample が立 ち上がった時に早い立ち上がりを持つような微分波形を計算し、後段の処理であるイベント検出 に使用する。微分の計算式は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \operatorname{derivLong}(i) &= \left(\sum_{i'=0}^{\operatorname{derivHalfLen}-1} \operatorname{pxAdcSmple}(i+i') \right) \\ &= -\left(\sum_{(i')=-\operatorname{derivHalfLen}}^{-1} \operatorname{pxAdcSmple}(i+i') \right) \\ &= \operatorname{derivLong}(i-1) + \operatorname{pxAdcSmaple}(i+\operatorname{derivHalfLen}-1) \\ &= -2\operatorname{pxAdcSmaple}(i-1) + \operatorname{pxAdcSmaple}(i-\operatorname{derivHalfLen}-1) \end{aligned}$$

$$\mathbf{derivative}(i) = (\mathbf{derivLong}(i) + 2^{\mathbf{derivShift}-1})/2^{\mathbf{derivShift}}$$
(3.2)

ここで、derivHalfLen (0....31; デフォルト値は 8) は derivative 計算に用いるデータ数の長さ を決めるパラメータである。pxAdcSample(*i*)を基準にし、前の (derivHalfLen – 1) 分の長さ のデータに+1、後ろの derivHalfLen 分の長さのデータに - 1 の重みをそれぞれかけ合わせる。 図 3.9 に derivHalfLen の概略図を示す。

微分値は初めに derivLong として 20 bit 長さで計算され、その後に、derivHalfLen で決ま る、derivShift によって bit シフトされ、derivative として保存される。表 3.7 に derivShift と derivative の関係を示す。



図 3.9: 微分計算における、サンプル番号 *i* と derivHalfLen の関係図

表 3.7: derivShi	ft と	derivHalfLen	の関係
-----------------	------	--------------	-----

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

微分の計算を終えると、計算に使用された **pxAdcSample**(*i*) と、計算された **derinvative** の 値は Wave Form Ring Buffer (WFRB) に保存される。WFRB は 1 Mbyte (= 262144 samples × (pxAdcSample 16 bit + derivative 16 bit)) のサイズをもつ波形データ保存用のバッファである。

ファーストパルスの検出

ファーストパルスの検出は、WFRB 上の derivative を用いて、MIO の User FPGA で定義さ れたステートマシンによって行われる。ステートマシンは、INIT, STDBY, READY, ARMED, FALL, PEAKFIND の6つの状態をもつ。 **INIT**, **STDBY**:電源が ON になると INIT に入る。INIT, STDBY によってモジュールの初期 化を行う。

READY: モジュールの初期化が終了すると、READY に移行する。このステートでは derivative の値がしきい値をこえたときトリガーをかける (derivative > pxPulseThres)。一度 sample *i* でイベントが検出されると、low-resolusion pluse height (loResPH) のベースライン loResBase を以下の式で計算する。

$$loResBase = \frac{1}{2pxOffsetAvgLenPow} \times \left(\sum_{i'=pxOffsetAvgGap+1} pxAdcSample(i+i') + 2^{pxOffsetAvgLenPow - 1} \right)$$
(3.3)

また、trigPtr と trigLap がそれぞれ WritePtrPre と WriteLapPre を使用して記録される。 <u>ARMED</u>: ARMED は READY の終了後から始まり、derivative が減少に転じるまで (derivative < derivPre) 続くステートである。ここでは、pxAdcSample と derivative の最大値を探 し、その値が pxAdcSampleMax と derivativeMax にそれぞれ保存される。

FALL: FALL は ARMED の終わりから、derivative がしきい値を下回るまで (derivative > pxFallEndThres) 続くステートである。このステートでは、pxAdcSampleMax と derivativeMax の 2 つの最大値の検索が継続して行われる。その間は derivative の値は単調減少する ことになるが、まれに FALL の途中に他のイベントが入ると、derivative 値は増加することになる。これらは" quick double"イベントと呼ばれ、derivative が前の値よりしきい値で大きくなっ たとき (derivative - derivPre ≥ pxQuikDoubleThres) quikDouble フラグが"1"となる。FALL の後、pxPFInhibitFlag=0 だったら PEAKFIND に移行し、pxPFInhibitFlag=1 だっ たら、READY に移行する。

PEAKFIND: このステートでは pxAdcSampleMax の検索が行われる。derivativeMax に ついては行われない。PEAKFIND は以下に示す 2 つの条件が満たされるまで継続される。

- PEAKFINDの始まりから数えた時の sample 数が、定められた長さを超えたとき。(pxPF-StateCnt ≥ pxPFStateCntMax)
- (2) 最後に pxAdcSampleMax を決めたときからの sample 数が、定められた長さを超えたと
 き。(pxPFStateCnt ≥ pxPFStateCntMax)

PEAKFIND (**pxPFInhibitFlag**=0)か、FALL (**pxPFInhibitFlag**=1)が終了したあと、**loRe-sPH** を、**pxAdcSampleMax** と **loResBase** の差分で求める。計算によって求まった **loResPH** がマイナスの値をとるとき、その値を0とする。

その後ステートは READY に移行し、次のイベントをまつことになる。イベントの検出は READY でのみ行われることになる。もし、ステートマシンが ARMED にあるときにもう 1 つのイベント が入るとそのイベントは破棄される。FALL 時に他のイベントが検出されると quickDouble フ

ラグが "1"となる。また、PEAKFIND で他のイベントが入ると pxAdcSampleMax の値が不 適切に書き換えられる可能性がある。これらのケースはユーザーアプリケーションによって再計 算される。



図 3.10: pixel トリガーにおけるパラメータを表した図

セカンドパルスの検出

MIO の User FPGA ではファーストパルスの探査のみが実行される。User FPGA でファーストパルス探査を終えたのち、SpaceCard の CPU によってセカンドパルスの検出を行う。

セカンドパルスの検出は、生波形からその平均波形を引いた差分波形を用いて行われる。ここで、 adcSample と derivative は波高値 (normalization) と時間のずれの違いを除いて相似であると仮定し ている。以下に計算式を示す。計算された差分を、それぞれ adcSample_{sub}(*i*) と derivative_{sub}(*i*) とすると、

$$\mathbf{adcSample}_{\mathbf{sub}}(i) = \mathbf{adcSample}(i) - \sum_{n=1}^{N} \frac{\mathbf{lowResPH}_{n}}{\mathbf{lowResPH}_{\mathbf{avg}}} \mathbf{adcSmaple}_{\mathbf{avg}}(i - \Delta i_{n})(3.4)$$

$$\mathbf{derivative}_{\mathbf{sub}}(i) = \mathbf{derivative}(i) - \sum_{n=1}^{N} \frac{\mathbf{derivMax}_{n}}{\mathbf{lderivMax}_{\mathbf{avg}}} \mathbf{derivative}_{\mathbf{avg}}(i - \Delta i_{n}) \quad (3.5)$$

ここで、adcSample(i) と derivative(i) は、生波形の adcSample と derivative であり、lowResPH_n と derivMax_n は n 番目の波形の lowResPH と derivMax、さらに、lowResPH_{avg} と lderivMax_{avg} は平均波形の lowResPH と derivMax から得られる。N は処理するイベントの番号で、 Δi_n は n 番目のイベントの time shift である。time shift は derivative の最大値が生波形とテンプレー トの間で同じになるように決定される。

上記の計算と共に、derivative_{sub}(*i*)の監視が行われ、その値がしきい値 (pxPluseThres)を こえた時にセカンドパルスとして検出される。セカンドパルス探査に用いられるパラメータを図 3.11 に示す。

前のイベントの derivative の最大値から **second_trig_gap_len** で決まる sample までの間 (黄色 の範囲)、セカンドパルスの探査は実行されない。**second_trig_gap_len**+1から **second_trig_use_len** の sample 数までの間 (緑色の範囲) で、**derivative**_{sub}(*i*) が **pxPluseThres** をこえたときセカン ドパルスとして検出される。

3.5.3 グレード付け

すべての pixel イベントは、隣の波形との時間差によって決まる、High, Medium, Low と primary, secondary の組み合せでグレード付けされる。したがって、グレードは良いものから順に、 High primary (Hp), Medium-primary (Mp), Medium-secondary (Ms), Low-primary (Lp), Lowsecondary (Ls) となる。HR は検出された時刻から、(TMPL_LEN_[S|L]H – PreTrigPnts[S|L]H)で決まる sample 数の間に他の光子が入射しないイベントとして定義される。TMPL_LEN_[S|L]H と PreTrigPnts[S|L]H はそれぞれ、Hp イベントのテンプレートの全長さと、前の波形までの 長さを表し、共に Short と Long の 2 つの長さを持つ。(表 3.8)。MR は検出された時刻から TMPL_LEN_[S|L]M – PreTrigPnts[S|L]M で決まる sample の間に他の光子が入射しない イベントである。TMPL_LEN_[S|L]M と PreTrigPnts[S|L]M についても同様に、それぞれ、 Mp イベントのテンプレートの全長さと、前の波形までの長さを表す。それ以外のイベントは LR として記録される。グレード付けの定義を図 3.12 に示す。

それぞれのグレード付けの比率は、入射 X 線光子のカウントレート (counts / s) によって決め られる。イベントのカウントレートが増えると、それに伴い Hp や Mp のイベント数は減少する。



図 3.11: セカンドパルス検出におけるパラメータを表した図

イベントのカウントレートとグレード分岐比の関係式以は以下のように表せる。

 $\mathbf{Hp} : \exp(-2\nu\Delta t_{\mathrm{HR}}) \tag{3.6}$

 $\mathbf{Mp} : \exp(-\nu\Delta t_{\mathrm{HR}}) \{ \exp(-\nu\Delta t_{\mathrm{MR}}) - \exp(-\nu\Delta t_{\mathrm{HR}}) \}$ (3.7)

- $\mathbf{Ms} : \exp(-\nu\Delta t_{\mathrm{MR}}) \{ \exp(-\nu\Delta t_{\mathrm{MR}}) \exp(-\nu\Delta t_{\mathrm{HR}}) \}$ (3.8)
- $\mathbf{Lp} : \exp(-\nu\Delta t_{\mathrm{HR}})\{1 \exp(-\nu\Delta t_{\mathrm{MR}})\}$ (3.9)
- Ls : $\{1 \exp(-\nu\Delta t_{\rm MR})\}\{1 + \exp(-\nu\Delta t_{\rm MR}) \exp(-\nu\Delta t_{\rm HR})\}$ (3.10)

ここで、 Δt_{Hp} と Δt_{Hp} は、それぞれ TMPL_LEN_[S|L]H と TMPL_LEN_[S|L]M を時間に変換した値である。図 3.13 に上記の関係式をもとにプロットした、カウントレートとグレード分岐比のグラフを載せる。



図 3.12: グレード付けの定義

表 3.8: テンプレート長さのサンプル数。

長さ ¹	$TMPL_LEN_[X]H$	TMPL_LEN_[X]M	$PreTrigPnts_{-}[X]H$	$PreTrigPnts_{-}[X]M$
$Short(\mathbf{X=S})^1$	1024	256	150	37
$\mathrm{Long}\;(\mathbf{X}{=}\mathbf{L})$	2048	512	300	75

^a1sample は 80 µs (12.5 kHz) か 64 µs (15.625 kHz) の時間長さを持つ。

^bデフォルトは Short。

3.5.4 波高値解析

PSP は 2.1.3 で述べた最適フィルタリング処理を用いて、入射 X 線光子のエネルギーを PHA として保存する。その計算は User Application によって行われる。それぞれのグレードごとの計算式を以下に示す。



図 3.13: カウントレートとグレード付けの関係図。12.5 kHz でテンプレート長さが Short の時の プロットを表す。

Hp, Mp, Ms イベント

PHA はテンプレート adcSample の cross-correlation によって計算される。cross-correlation と は、 $-8 \ge j \ge 7$ の間で、テンプレートに対して生波形をシフトし、PHA の最大値の時の j を見 つける方法である。

$$PHA(j) = \sum_{i=0}^{\text{template_len}-1} template(i) \times adcSmaple(i+j)$$
(3.11)

ここで、template_len はテンプレート長である。

jが決定されると、PHA_{peak} と time vernier は以下に示す計算式で、サンプリングクロックの 1/16 の分解能で計算される。

$$PHA_{peak} = PHA(j) + \frac{1}{8} \left(\frac{\{PHA(j+1) - PHA(j-1)\}^2}{2PHA(j) - PHA(j+1) - PHA(j-1)} \right)$$
(3.12)

time vernier =
$$\frac{1}{2} \left(\frac{\text{PHA}(j+1) - \text{PHA}(j-1)}{2\text{PHA}(j) - PHA(j+1) - \text{PHA}(j-1)} \right)$$
(3.13)

Lp, Ls イベント

Lp, Ls グレードのイベントの場合は、PHA は low-resolution PH と同じ値をとり、time vernier は 0 とする。

第4章 FM-PSP-FM-XBox 接続試験

4.1 目的

PSP はこれまでに、性能実証モデル (Engineering model: EM) を用いた試験をすべて完了し、 FPGA の仕様を確定した。2014 年現在は、衛星搭載モデル (Flight model: FM) の製作を終え、 その単体試験を行っている。また、XBox と XCS も NASA/GSFC による FM 製作の段階を終え、 単体試験が進められている。単体試験で動作の確認をしたのち、それぞれの機器が正常に通信を 行えるかを、実際に両機器を接続して確かめる試験を行う。

本章では、2013年8月5日–9日にNASA/GSFCで行った、FM 品を用いては今回初めてとなる、XBox と PSP の接続試験の結果について報告する。本試験では、XBox と PSP の間に流れる すべての信号についての測定を行い、その信号特性が要求値を満たすことを確かめ、試験に使用 した FM 候補 User FPGA が要求通りの性能を持つことを実証する。

4.2 試験機材

4.2.1 PSP-A/B

本試験では、FM-XBox との接続試験のために、FM 候補の User FPGA バージョンを搭載した PSP-B と、これまでの試験で性能実証を終えた User FPGA バージョンを搭載した PSP-A 系 を用いて試験を行った。また、PSP の電源供給には SXS-DIST の代わりとして、直流安定化電源(型番:MatsusadaP4K-80M)を使用した。PSP-A/Bの外観と、それぞれのボード構成を以下に示す。



図 4.1: PSP-A の外観

Board	Name	Version
MIO-A	User FPGA	0x0102_0416
	SpaceWire FPGA	$0x0102_020A$
SpaceCard-A0	CPU IF FPGA	0x0102_010D
	User アプリケーション	130723
SpaceCard-A1	CPU IF FPGA	0x0102_010D
	User アプリケーション	130723

図 4.2: PSP-A の構造と、FPGA およびアプリケーションバージョン



Board	Name	Version
MIO-A	User FPGA	0x0102_0419 (最新)
	SpaceWire FPGA	$0x0102_020A$
SpaceCard-A0	CPU IF FPGA	$0 \times 0102_{-}010 B$
	User アプリケーション	130723
SpaceCard-A1	CPU IF FPGA	$0 \ge 0102_{-}0105$
	User アプリケーション	130202

図 4.3: PSP-B の外観

図 4.4: PSP-B の構造と、	、FPGA およびアプリケーション	バージョン
--------------------	-------------------	-------

4.2.2 XBox-A/B

NASA/GSFCによって準備された FM-XBox は、XBox-A/Bの2系統のボードを内蔵する構造 になっており、それぞれのボードで全 36 pixel を処理することができる。FM-XBox の外観を図 4.5 に載せる。今回、センサーデータ入力端子には端子間を短絡させるコネクタを接続した。ま た、センサーバイアスなどの出力はすべてオープンとした。また、XBox への電源供給には GSFC が用意した直流安定化電源を使用した。



図 4.5: FM-XBox の外観。端子の配置と対応は、左列の上から、PSP-A との接続(本試験では オープン)、XBox-A の pixel[0]-[8](本試験ではショート)、XBox-A の pixel[9]-[17](本試験では ショート)、XBox-A の電源、XBox-A/B 共通の GND、PSP-B との接続(本試験ではオープン)、 XBox-B の pixel[0]-[8](本試験ではショート)、XBox-B の pixel[9]-[17](本試験ではショート)

XDS-DIO #1/2

XDS-DIO (XBox Digital Simulator for Digital I/O Board) は XBox を模擬した装置で、波形 データや機器の状態情報の送出機能を持つ。波形データは内部の SDRAM にあらかじめ書き込ん でおき、LVDS を通して送出する。ハードウェアとして、シマフジ電機製の DIO ボードを使用することを想定している。本試験では、firmware バージョン XDSDIO_20130624c.msc を使用した。



図 4.6: XDS-DIO の外観。

4.2.3 SMU sim light

SMU sim light とは、衛星管理装置 SMU (Satellite Management Unit) を模擬した装置である。 地上系から送られてくるコマンドを解釈し、SpaceWire Router を通して PSP へ送信する機能を 持つ。



図 4.7: SMU sim light の外観。

4.2.4 SpW-GbE

SpW-GbE (SpaceWire-to-GigabitEther) は、シマフジ電機により開発された SpaceWire と TCP/IP の変換を行う機器である。この機器により、ユーザーが PC 上で SpaceWire パケットの 送受信を行うことができる。また、リンク速度は10.4-125 Mbps の間で変えることができる。



図 4.8: SpW-GbE の外観。

4.2.5 GSTOS 用 PC

GSTOS (Generic Spacecraft Test and Operations Software) は人工衛星の試験と運用に使用される汎用のソフトウェア群で、SIB2 (Spacecraft Information Base version2) と呼ばれる、衛星に関する情報を格納したデータベースに基づいて動作し、衛星の状態監視や制御を行う。

4.3 搬入後動作試験

4.3.1 セットアップ

まず、本試験において基準となる GND (factory GND) と以下の測定点との電圧を測定した。

- ・ テーブルタップの return & hot
- 直流安定化電源の return & hot
- PSP-A/Bのフレーム GND

電圧測定の結果を表 4.1 に示す。

電源電圧の確認後、XDS-DIO #1/2を用いて波形データを PSP へと入力し、PSP が GSFC への搬入後に正常に動作するかを試験した。試験の様子を図 4.9 に載せる。本試験では、SpaceCard-A0/B0 の FPGA ポートと SpaceCard-A1/B1 の FPGA ポートを接続している。また、リンク状態を模擬するため、SpaceCard-A1/B1 の FPGA ポート同士を接続した。波形処理は SpaceCard-A0/B0 でのみ実施する。XDS-DIO #1/2 を用いた搬入後動作試験のネットワーク系統図と GND 系統図を図 4.10 と 4.11 に示す。

表 4.1: 電圧測定の結果						
測定点	機器	項目	結果			
テーブルタップ		factory GND - return	$0.255 { m V}$			
		factory GND - hot	$121.8~\mathrm{V}$			
直流安定化電源	PSP-A	factory GND - return	0.0 mV			
		factory GND - hot	$44.6~\mathrm{V}$			
	PSP-B	factory GND - return	$0.0 \mathrm{mV}$			
		factory GND - hot	$44.6~\mathrm{V}$			
	XDS-DIO #1	factory GND - return	$0.0 \mathrm{mV}$			
		factory GND - hot	$4.97~\mathrm{V}$			
	XDS-DIO $\#2$	factory GND - return	$0.0 \mathrm{mV}$			
		factory GND - hot	$4.96~\mathrm{V}$			
フレーム GND	PSP-A	factory GND - フレーム GND	0.0 V			
	PSP-B	factory GND - $7 \nu - \Delta$ GND	0.0V			



図 4.9: 搬入後動作試験の様子



図 4.10: 搬入後動作試験のネットワーク系統図

4.3.2 結果

以上のセットアップで XDS-DIO #1/2 と PSP-A/B の接続試験をおこなった。その結果、XBox からのデータ送信によるエラーがでていないことを確認した。また、3.4.1 節で述べた条件によっ てカウントアップされる、sciLenErrCnt, sciCntErrCnt, parityErrCnt のそれぞれのエラー で値が増えていないことを確認し、PSP によるデータ受信が正常に行われていることを確かめた。

4.4 PSP-A/B-XBox-A/B間の信号試験

続いて、FM-XBox と PSP による接続試験を実施した。本試験では、PSP と XBox の間を流れ る 9 つの信号線を確認するために、PSP と XBox の間に BoB (Breakout Box)を挿入して信号波 形をオシロスコープで測定し、その測定値が要求値を満たしているかを検証する。なお、今回の 試験は FM 品を用いては初の SXS 波形処理系の接続試験となる。

4.4.1 セットアップ

本試験でも搬入後動作試験と同様、波形処理は SpaceCard-A0/B0 でのみ実施する。PSP-A-XBox-A 間は、XBox コネクター側に 25pin BoB #1、 PSP-B-XBox-B 間は、XBox コネクター



図 4.11: 搬入後動作試験の GND 系統図

側に 50pin BoB #2 を接続した。PSP-A/B と FM-XBox の接続試験のネットワーク系統図、GND 系統図を図 4.12 と図 4.13 に示す。

PSP-XBox 間の通信にはノイズ対策のため LVDS 通信が使われている。そのため、各信号線 を測定するには(+)の信号と(-)の信号についての測定を行う必要がある。そこで本試験で は 4ch オシロスコープを用いて、BoB で取り出した 2 本の信号線の(+)信号を ch1(黄)と ch3 (青)に、(-)信号を ch2(緑)と ch4(赤)にそれぞれ入力し、ch1と ch2の差分をピンク色で 表示した。ここで、オシロスコープの GND は factory GND に落とした。オシロスコープのキャ プチャー画像で、GND はそれぞれのチャンネルの色に対応した矢印で表されている。



図 4.12: PSP-XBox 接続試験のネットワーク系統図

4.4.2 結果

本測定は、A 系と B 系の間に接続された BoB #1/2 を用いて、A/B 両系の各信号線に対して 行った。また、両系の測定において XBox のデータサンプリングレートを決める SMP_CLK が 12.5 kHz と 15.625 kHz の 2 つの状態についての測定も実施した。なお、信号試験の合否判定に ついては以下の表 4.2 に従い、各信号での測定値が表の要求を満たすとき合格とする。表におい て、N/A と示した項目は要求値として適切な値が設定できないため本測定では合否判定を行わな



図 4.13: PSP-XBox 接続試験試験の GND 系統図

いこととする。以降に、それぞれの信号線についての測定結果をまとめる。

BASE_CLK, TLM_CLK

まず、BASE_CLK と TLM_CLK について測定を行った。BASE_CLK は PSP の動作の基準と なるクロックであり、5 MHz のクロック信号として XBox へと出力される。一方で、TLM_CLK は XBox の基準となるクロックであり、PSP からの BASE_CLK と同期した信号として PSP へと 返送される。本試験では、BASE_CLK と TLM_CLK の電圧値と周波数を測定し、要求値通りの 信号を送信しているかを調べた。また、XBox による TLM_CLK と BASE_CLK との同期が正常 に行われているかの確認を行った。

本試験で得られた BASE_CLK と TLM_CLK のオシロスコープでのキャプチャー画像を載せる (図 4.14)。オシロスコープの測定結果から、信号電圧レベルと信号の立ち上がりの間での遅延時 間を調べた。その結果を表 4.3 と表 4.4 に示す。以上の測定結果から、BASE_CLK と TLM_CLK は共に 5 MHz の周波数のクロック信号を出力しており、V_high と V_low の差分で決まる LVDS 信号の電圧値が設計値である 300 mV になっていることが確認できた。また、BASE_CLK に対す る TLM_CLK 遅延時間を見てみると、A 系の SMP_CLK が 12.5 kHz と 15.625 kHz の時でどち らも 28 ns、B 系は SMP_CLK が 12.5 KHz と 15.625kHz の時でどちらも 32 ns となり、要求値を 満たす結果となった。

(電圧レベルと周波数)			
信号名	$V_{low}(V)$	$V_high (V)$	周波数 (kHz)
BASE_CLK+	0.77 - 1.30	1.16 - 1.60	5000
BASE_CLK-	0.77 - 1.30	1.16 - 1.60	5000
SMP_CLK+	0.77 - 1.30	1.16 - 1.60	12.5
SMP_CLK-	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	12.5
CMD_ENA+	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	N/A
CMD_ENA-	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	N/A
CMD_DAT+	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	N/A
CMD_DAT-	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	N/A
TLM_CLK+	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	5000
TLM_CLK-	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	5000
SCI_ENA+	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	N/A
SCI_ENA-	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	N/A
SCI_DAT+	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	N/A
SCI_DAT-	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	N/A
HK_ENA+	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	N/A
HK_ENA-	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	N/A
HK_DAT+	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	N/A
HK_DAT-	0.77 – 1.30	1.16 - 1.60	N/A
(遅延時間)			
From	То	遅延時間	
BASE_CLK	TLM_CLK	< 50 ns	
SMP_CLK	SCI_ENA	$19.6 < t < 20.16 \ \mu s$	

表 4.2: PSP-XBox 間信号試験の要求値の表。V_low (V) と V_high (V) はそれぞれ電圧の最大値 と最小値を表す。

 $43~\mathrm{ms}$

HK_ENA

CMD_ENA



PSP-A-XBox-A 間の信号画像。左が12.5 kHz、右が15.625 kHzのSMP_CLKでの測定。





PSP-B-XBox-B間の信号画像。左が12.5 kHz、右が15.625 kHzのSMP_CLKでの測定。

図 4.14: PSP-XBox 間の BASE_CLK と TLM_CLK の測定結果。黄&緑: BASE_CLK、青&赤: TLM_CLK、ピンク: BASE_CLK の差分を表す。オシロスコープの縦軸は 500 mV/1 目盛り、横 軸は 50 ns/1 目盛りに設定している。

	$V_{low}(V)$			V_high (V))		周波数	(kHz)	
信号名	要求值	測定值	合否	要求值	測定值	合否	要求值	測定值	合否
(A 系の SMP	(A 系の SMP_CLK が 12.5 kHz のとき)								
$BASE_CLK+$	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	5000	5000	合格
BASE_CLK-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	5000	5000	合格
TLM_CLK+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	5000	5000	合格
TLM_CLK -	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	5000	5000	合格
(A 系の SMP	_CLK が 15.	625 kHz	のとき)	•			•		
$BASE_CLK+$	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	5000	5000	合格
BASE_CLK-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	5000	5000	合格
TLM_CLK+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	5000	5000	合格
TLM_CLK -	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	5000	5000	合格
(B 系の SMP	_CLK が 12.	5 kHz のと	- き)						
$BASE_CLK+$	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	5000	5000	合格
BASE_CLK-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	5000	5000	合格
TLM_CLK+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	5000	5000	合格
TLM_CLK -	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	5000	5000	合格
(B 系の SMP	(B 系の SMP_CLK が 15.625 kHz のとき)								
$BASE_CLK+$	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	5000	5000	合格
BASE_CLK-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	5000	5000	合格
TLM_CLK+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	5000	5000	合格
TLM_CLK-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	5000	5000	合格

表 4.3: TLM_CLK と BASE_CLK の電圧レベルと周波数の測定結果

表 4.4: BASE_CLK に対する TLM_CLK の遅延時間の測定結果

	\mathcal{X} 4.4. DADE_OEK	遅延時間					
試験系	SMP_CLK 周波数 (kHz)	From	То	要求值	測定値	合否	
A系	12.5	BASE_CLK	TLM_CLK	< 50 ns	28 ns	合格	
	15.625	BASE_CLK	TLM_CLK	< 50 ns	28 ns	合格	
B系	12.5	BASE_CLK	TLM_CLK	< 50 ns	32 ns	合格	
	15.625	BASE_CLK	TLM_CLK	< 50 ns	32 ns	合格	

SMP_CLK, SCI_ENA, SCI_DAT

続いて、PSP から送信された SMP_CLK と、XBox からの SCI_ENA と SCI_DAT についての 測定を行った。SMP_CLK は PSP から XBox へと送信されるクロックで、XBox での波形データ のサンプリングレート(12.5 kHz か 15.625 kHz)を決める信号である。SCI_ENA と SCI_DAT は SMP_CLK の周波数で XBox から送信される、波形データとその波形データの長さを決める信 号である。

本試験で得られた SMP_CLK と SCI_ENA のオシロスコープでのキャプチャー画像を載せる(図 4.15)。オシロスコープでの測定結果から、それぞれの信号における電圧レベルと SMP_CLK に 対する SCI_ENA の遅延時間を測定した。以上の測定結果から、両信号において電圧レベルおよ び周波数の値が要求値を満たすことが確認できた。また、SMP_CLK の立ち上がりから SCI_ENA の立ち上がりまでの遅延時間は約 20 μ s であった。これは XBox の仕様で決められている値と一 致する値である。表 4.5 と表 4.6 にそれぞれの信号についての測定結果を示す。

次に、SCI_DAT についての測定を行った。本試験ではセンサーから XBox への入力端子をショー トさせて得られた波形データ(すなわち微小な揺らぎ波形)を PSP へと送信している。本測定で は PSP で受信した SCI_DAT の電圧値の測定を行った。図 4.16 に BASE_CLK と SCI_DAT のオ シロスコープでのキャプチャー画像を載せる。オシロスコープでの測定結果から、SCI_DAT の電 圧レベルが要求値を満たすことが確認できた。



PSP-A-XBox-A 間の信号画像。左が12.5 kHz、右が15.625 kHzのSMP_CLKでの測定。





PSP-B-XBox-B間の信号画像。左が12.5 kHz、右が15.625 kHzのSMP_CLKでの測定。

図 4.15: PSP-XBox 間の SMP_CLK と SCI_ENA の測定結果。黄&緑: SMP_CLK、青&赤: SCI_ENA、ピンク: SMP_CLK の差分を表す。オシロスコープの縦軸は 500 mV/1 目盛り、横軸 は左下が 5 µs/1 目盛り、それ以外は 20 µs/1 目盛りに設定している。

	V_low (V)			V_high (V))		周波数((kHz)	
信号名	要求值	測定値	合否	要求值	測定値	合否	要求值	測定値	合否
(A 系の SMP	_CLK が 12.	5 kHz のる	とき)						
SMP_CLK+	0.77 - 1.30	1.0	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	12.5	12.5	合格
SMP_CLK -	0.77 - 1.30	1.0	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	12.5	12.5	合格
SCI_ENA+	0.77 - 1.30	1.0	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
SCI_ENA-	0.77 - 1.30	1.0	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
(A 系の SMP	_CLK が 15.	625 kHz	のとき)	•					
SMP_CLK+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	15.625	15.625	合格
SMP_CLK -	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	15.625	15.625	合格
SCI_ENA+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
SCI_ENA-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
(B 系の SMP	_CLK が 12.	5 kHz のと	とき)						
SMP_CLK+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	12.5	12.5	合格
SMP_CLK -	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	12.5	12.5	合格
SCI_ENA+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
SCI_ENA-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
(B 系の SMP	(B 系の SMP_CLK が 15.625 kHz のとき)								
SMP_CLK+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	15.625	15.625	合格
SMP_CLK -	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	15.625	15.625	合格
SCI_ENA+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	N/A	N/A	N/A
SCI_ENA-	0.77-1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	N/A	N/A	N/A

表 4.5: SMP_CLK と SCI_ENA の電圧レベルと周波数の測定結果

表 4.6: SMP_CLK に対する SCI_ENA の遅延時間の測定結果

		遅延時間						
試験系	SMP_CLK 周波数 (kHz)	From	То	要求值	測定值	合否		
A系	12.5	BASE_CLK	TLM_CLK	$19.6 < t < 20.16 \mu s$	$20 \ \mu \ s$	合格		
	15.625	BASE_CLK	TLM_CLK	$19.6 < t < 20.16 \mu s$	$20~\mu$ s	合格		
B系	12.5	BASE_CLK	TLM_CLK	$19.6 < t < 20.16 \mu s$	$20 \ \mu \ s$	合格		
	15.625	BASE_CLK	TLM_CLK	$19.6 < t < 20.16 \mu s$	$20~\mu~{\rm s}$	合格		



PSP-A-XBox-A 間の信号画像。左が12.5 kHz、右が15.625 kHzのTLM_CLKでの測定。





PSP-B-XBox-B間の信号画像。左が12.5 kHz、右が15.625 kHzのTLM_CLKでの測定。

図 4.16: PSP-XBox 間の SCI_DAT の測定結果。黄&緑: TLM_CLK、青&赤: SCI_DAT、ピン ク:SCI_DAT の差分を表す。オシロスコープの縦軸は 500 mV/1 目盛り、横軸は左上が 200 ns/1 目盛り、それ以外は 50 ns/1 目盛りに設定している。

	V_low (V)			V_high (V))		周波数	(kHz)	
信号名	要求值	測定値	合否	要求值	測定値	合否	要求值	測定値	合否
(A 系の SMP	_CLK が 12.	5 kHz のる	とき)						
SCI_DAT+	0.77 - 1.30	1.0	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
SCI_DAT-	0.77 - 1.30	1.0	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
(A 系の SMP	_CLK が 15.	625 kHz	のとき)						
SCI_DAT+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
SCI_DAT-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
(B 系の SMP	_CLK が 12.	5 kHz のと	- き)	•					
SCI_DAT+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
SCI_DAT-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
(B 系の SMP	_CLK が 15.	625 kHz	のとき)						
SCI_DAT+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	N/A	N/A	N/A
SCI_DAT-	0.77-1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	N/A	N/A	N/A

表 4.7: SCLDAT の電圧レベルと周波数の測定結果

CMD_ENA, CMD_DAT, HK_ENA, HK_DAT

続いて、CMD_ENA と CMD_DAT、さらに HK_ENA, HK_DAT についての測定を行った。PSP から Send HK All コマンドを送信し、その時の CMD_ENA と CMD_DAT の信号波形と、XBox から返送される HK_ENA と HK_DAT をオシロスコープで測定した。Send HK All コマンドと は、XBox の全ての HK 情報の送信を要求するコマンドである。

本試験で得られた CMD_ENA, CMD_DAT, HK_ENA, HK_DAT の測定のうち、SMP_CLK が 12.5 kHz の時の測定についての波形画像を載せる(図 4.17, 図 4.18, 図 4.19, 図 4.20)。オシロス コープでの測定結果から、それぞれの信号における電圧レベルを調べたところ、全ての信号で要 求値を満たす結果となった。その結果を表 4.8 に載せる。

次に、PSP が Send HK All コマンドを送信してから、PSP へ HK が帰ってくるまでの時間を 測定した。オシロスコープで確認した波形画像のうち、SMP_CLK が 12.5 kHz の時の波形画像を 図 4.21 に載せる。オシロスコープで、PSP のコマンド送信が終了して CMD_ENA が立ち上がっ た瞬間の時間から、XBox が HK 送信を終了し HK_ENA が立ち上がるまでの時間を測定したとこ ろ、A 系 B 系の両方で遅延時間は 42 ms となり、要求値を満たす結果となった。表 4.8 と表 4.11 にそれぞれの信号での電圧値と遅延時間についての測定結果を示す。

以上の結果から、PSP と XBox の間を流れる 9 本の信号全てが要求を満たすことが確認できた。 これにより、PSP と XBox 間の通信が正常に行われていることが実証できた。





図 4.17: PSP-XBox 間の CMD_ENA の信号画像。左が A 系で右が B 系での測定結果。黄&緑: BASE_CLK、青&赤: CMD_ENA、ピンク: CMD_ENA の差分を表す。オシロスコープの縦軸 は 500 mV/1 目盛り、横軸は左が 100 ns/1 目盛り、それ以外は 50 ns/1 目盛りに設定している。

🔆 Agilent Technologies	TUE AUG 06 05:24:07 2013	Agilent Technologies	TUE AUG 06 20:48:13 2013
🖥 5000/ 🚪 5000/ 📲 5000/ 🚆 5000/ 🔆	← 0.0s 50.00R/ Stop # 1.36V	S007/ S 5007/ S 5007/ S 5007/ S 5007/ -☆- 0	0s 50.00%/ Stop f 関 1.24V
	han part and particular a		
	(SX = 355 000ns (F/XX = 27.933MHz (F/XX = 27.933MHz (F/XX = 27.933MHz		Marian Mariana and Andrews
sweards Vig Miller Riseand (4) Mile Anglina Burn) Save to file = scope_4	Nerlan	$b_{abcarding back}^{abc} = e^{i\sigma_{abca}} e^{i\phi_{abca}} d_{abca}^{b} d_{abca} d_{abca} d_{abca}^{b} d_{abca}$	γπΑ _γ λ ^Λ
Save Recall Default	Press to Quick Print	e Mode e Source X Y € 14	250V 0 Y2 V1 Y2

図 4.18: PSP-XBox 間の CMD_DAT の信号画像。左が A 系で右が B 系での測定結果。黄&緑: BASE_CLK、青&赤: CMD_DAT、ピンク: CMD_DAT の差分を表す。オシロスコープの縦軸は 500 mV/1 目盛り、横軸は 50 ns/1 目盛りに設定している。





図 4.19: PSP-XBox 間の HK_ENA の信号画像。左が A 系で右が B 系での測定結果。黄&緑: BASE_CLK、青&赤:HK_ENA、ピンク:HK_ENA の差分を表す。オシロスコープの縦軸は 500 mV/1 目盛り、横軸は左が 100 ns/1 目盛りで、右が 50 ns/1 目盛りに設定している。



図 4.20: PSP-XBox 間の HK_DAT の信号画像。左が A 系で右が B 系での測定結果。黄&緑: BASE_CLK、青&赤:HK_DAT、ピンク:HK_DAT の差分を表す。オシロスコープの縦軸は 500 mV/1 目盛り、横軸は左が 100 ns/1 目盛りで、右が 50 ns/1 目盛りに設定している。

	表 4.8:	CMD_ENA,	CMD_DAT.	HK_ENA,	HK_DAT の電圧レイ	ベルと周波数の測定結
--	--------	----------	----------	---------	--------------	------------

	$V_{low}(V)$		V_high (V)			周波数 (kHz)			
信号名	要求值	測定值	合否	要求值	測定値	合否	要求值	測定値	合否
(A 系の SMP	_CLK が 12.	5 kHz のる	とき)						
CMD_ENA+	0.77 - 1.30	1.0	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
CMD_ENA-	0.77 - 1.30	1.0	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
CMD_DAT+	0.77 - 1.30	1.0	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
CMD_DAT-	0.77 - 1.30	1.0	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
HK_ENA+	0.77 - 1.30	1.0	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
HK_ENA-	0.77 - 1.30	1.0	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
HK_DAT+	0.77 - 1.30	1.0	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
HK_DAT-	0.77 - 1.30	1.0	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
(A 系の SMP	_CLK が 15.	625 kHz	のとき)						
CMD_ENA+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
CMD_ENA-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
CMD_DAT+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
CMD_DAT-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
HK_ENA+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
HK_ENA-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
$HK_DAT +$	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
HK_DAT-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
(B 系の SMP	_CLK が 12.5	5 kHzのと	- き)						
CMD_ENA+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
CMD_ENA-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
$CMD_DAT +$	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	N/A	N/A	N/A
CMD_DAT-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	N/A	N/A	N/A
HK_ENA+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
HK_ENA-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.4	合格	N/A	N/A	N/A
HK_DAT+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.3	合格	N/A	N/A	N/A
HK_DAT-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.3	合格	N/A	N/A	N/A
(B 系の SMP	_CLK が 15.0	625 kHz 🖉	のとき)	1	1	1			
CMD_ENA+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	N/A	N/A	N/A
CMD_ENA-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	N/A	N/A	N/A
$CMD_DAT +$	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	N/A	N/A	N/A
CMD_DAT-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	N/A	N/A	N/A
HK_ENA+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	N/A	N/A	N/A
HK_ENA-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	N/A	N/A	N/A
HK_DAT+	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	N/A	N/A	N/A
HK_DAT-	0.77 - 1.30	1.1	合格	1.16 - 1.60	1.5	合格	N/A	N/A	N/A



図 4.21: PSP-XBox 間の HK_DAT の信号画像。左が A 系で右が B 系での測定結果。黄&緑: BASE_CLK、青&赤:HK_DAT、ピンク:HK_DAT の差分を表す。オシロスコープの縦軸は 500 mV/1 目盛り、横軸は左が 20 ms/1 目盛りで、右が 10 ms/1 目盛りに設定している。

		遅延時間				
試験系	SMP_CLK 周波数 (kHz)	From	То	要求值	測定值	合否
A系	12.5	CMD_ENA	HK_ENA	$43 \mathrm{ms}$	$42 \mathrm{ms}$	合格
	15.625	CMD_ENA	HK_ENA	$43 \mathrm{ms}$	$42 \mathrm{ms}$	合格
B系	12.5	CMD_ENA	HK_ENA	$43 \mathrm{ms}$	$42 \mathrm{ms}$	合格
	15.625	CMD_ENA	HK_ENA	$43 \mathrm{ms}$	$42 \mathrm{ms}$	合格

表 4.9: CMD_ENA に対する HK_ENA の遅延時間の測定結果

4.5 MIO-A-MIO-B間の信号試験

次に、PSP-AのMIO-AとPSP-BのMIO-BのそれぞれでBASE_CLKを測定し、MASTERと SLAVE 間でどのくらいBASE_CLK 信号が遅延するかを調べた。本試験では、MIO-AとMIO-B で搭載する User FPGAのバージョンが異なるために、どちらをMASTER にするかで信号の遅 延時間が変化する。以下に、PSP-A/BをそれぞれMASTER にしたときのBASE_CLKの遅延時 間に対する要求値をまとめた。MHI による本試験では表 4.10 をもとに合否の判定を行う。なお 本試験では、遅延時間の要求値として、MIH によって行われた、0x0102_0416 と 0x0102_0419の それぞれの MIO バージョンでのBASE_CLK と SYNC_BASE の遅延時間測定結果の値を用いて いる。

オシロスコープで測定した MIO-A/B 間の BASE_CLK の波形画像が図 4.22 である。MASTER 側の BASE_CLK の立ち上がりから SLAVE 側の BASE_CLK の立ち上がりまでの時間を測定する と、A 系が MASTER の時は 32 ns、B 系が MASTER の時は 17 ns となった。これは要求値を満 たす値である。したがって、MIO-A/B 間での BASE_CLK の同期が正常に行われていることが確 認できた。

以上の試験により、本試験で使用した FM 候補の User FPGA が要求通りの性能を実証することが確認できた。これにより、本試験で使用した FM 候補の User FPGA を FM-User FPGA として確定した。

表 4.10: PSP-A-PSP-B 間の BASE_CLK 信号の遅延時間に対する合否判定表

MASTER	From	То	Time (s)
PSP-A	BASE_CLK(PSP-A)	BASE_CLK(PSP-B)	5.316 < t < 44.506 ns
PSP-B	$BASE_CLK(PSP-B)$	$BASE_CLK(PSP-A)$	$6.394 < t < 41.264~{\rm ns}$

表 4.11: BASE_CLK (MASTER) に対する BASE_CLK (SLAVE) の遅延時間の測定結果

	遅延時間				
MASTER	From	То	要求值	測定值	合否
PSP-A	BASE_CLK (MASTER)	BASE_CLK (SLAVE)	5.316 < t < 44.506 ns	32 ns	合格
PSP-B	BASE_CLK (MASTER)	BASE_CLK (SLAVE)	6.394 < t < 41.264 ns	$17 \mathrm{~ns}$	合格



図 4.22: MIO-A/B 間の BASE_CLK 信号の画像。左が A 系を MASTE としたときで、右が B 系を MASTER としたときの測定結果。黄&緑: BASE_CLK (MASTER)、青&赤: BASE_CLK (SLAVE)、ピンク: BASE_CLK (SLAVE)の差分を表す。オシロスコープの縦軸は 500 mV/1 目 盛り、横軸は 50 ns/1 目盛りに設定している。

第5章 FMセンサーデータを用いた性能評価試験

5.1 **目的**

4章の PSP と XBox を用いた接続試験で、PSP-XBox 間のすべての信号について、信号レベル および信号特性についての要求を満たし、PSP が XBox からの波形データを正常に受信できてい ることを確認した。本章では、NASA/GSFC による FM-XCS と FM-XBox の接続試験で取得さ れた波形データを PSP の実機で処理させ、その出力結果が SXS の性能要求 SSR-01 を満たすこ とを確認する。また、本試験と事前試験として、NASA/GSFC によって実施された PSP シミュ レーターを用いた解析結果と比較を行い、PSP 実機の性能が CR-P07 のノイズバジェットの要求 を満たすかを検証した。

5.2 セットアップ

本試験では、PSP へ入力する波形データとして、2013 年 8 月に実施された、FM-XCS と FM-XBox を用いた NASA/GSFC による事前試験で取得されたデータ(以降、FM センサーデータと する)を用いた。事前試験では、⁵⁵Fe の較正線源を使用し、0.6 counts/s/pixel のカウントレー トで 39 時間照射する試験を行った。本試験では、FM センサーデータを XBox シミュレーター XBox Digital Simulator version2 (XDSv2)を使用して PSP へと入力し、その処理結果について 解析を行った。また、NASA/GSFC 所有の PSP のデジタル処理アルゴリズムを模擬した PSP シ ミュレーターによって事前解析を行った。本試験での波形データの流れを図 5.1 に示す。

XDSv2はNASA/GSFCによって開発された、XBoxからのデジタル信号波形出力を模擬する 機器である。XBox-A, XBox-Bの2系統を1つの筐体に納めることで、全 pixelの波形データ出力 を可能にする。また、XDSv2はストリーミング機能を有し、専用のソフトウェアを内蔵した PC と USB 接続することで、任意の波形データを出力することができる。本試験では FM センサー データを出力させている。

本試験では、XDSv2から出力される FM センサーデータ(全 39 時間分)のうちの約 30 分間の データを PSP へと入力し、A 系のみを使用し、pixel 00~pixel 17 までの 18 pixel 分のデータを 処理した結果について解析を行った。また、サンプリングクロックは 12.5 kHz としている。本試 験で用いる PSP の User FPGA, SpaceWire FPGA, CPU IF FPGA バージョンは、FM-XBox との接続試験において、FM 品として仕様が確定されたものと同等のバージョンを使用した。以 下に、本試験における PSP の構造を表 5.1 に載せる。



図 5.1: FM センサーデータを用いた性能評価試験における波形データの流れ



図 5.2: XDSv2 の外観
ボード名	FPGA 名	バージョン
MIO-A	User FPGA	0x0102_0419
	SpaceWire FPGA	$0\mathrm{x}0102_020\mathrm{A}$
SpaceCard-A0	CPU IF FPGA	0x0102_010D
	User Application	130910-0b
SpaceCard-A1	CPU IF FPGA	$0x0102_010D$
	User Application	130910-0b

---. (+++-)/(- 1)

デジタル波形処理性能の評価試験 5.3

3章で述べたように、PSPのデジタル波形処理は全 pixel で独立に実行されるため、pixel ごと に個性をもつことになる。本章では、まず、各 pixel ごとの処理結果について解析し、すべての pixel で正常な処理が行われているかを調べた。その後、全 pixel 足し合わせたデータについての 解析を行い、PSP のデジタル波形処理性能の評価を行った。本章では、pixel ごとの解析結果とし て特にイベント統計の良かった pixel 12 のデータについてのみ記載した。他の pixel についての 解析結果は付録 A を参照してほしい。

5.3.1 グレード付けの評価

全 pixel での各グレート毎のイベント数とグレード分岐比を図 5.3 と図 5.4 に示す。ここでのグ レード付けは 3.5.3 で述べた方法によって決定されている。較正用である pixel 12 だけが異なる グレード分岐比を示しているが、pixel 12 には Fe の較正線源が常時照射されているためカウント レートが他の pixel に比べて多くなり、それに伴い重畳イベントが発生する割合も増加するためで あると考えられる。以降では pixe 12 を除く pixel についてグレード分岐比の解析を行った。

まず、本試験のカウントレートでの Hp と Mp のイベント比を理論式から求める。NASA/GSFC の事前試験で、FM センサーデータの X 線光子のカウントレートは 0.6 counts/s/pixel と分かっ ており、本試験では、サンプリングクロックと 12.5 kHz、Hp イベントと Mp イベントのテンプ レート長さはそれぞれ Short を使用している。したがって以上の条件から、較正用 pixel を除いた 全 pixel について、(3.6) 式 (3.7) 式を用いて Hp と Mp のグレード分岐比をそれぞれ求めると、

 $R_{\mathrm{Hp}}^{\mathrm{nocal}}$ $= \exp(-2 \times 0.6 \times 1025 \times 80) = 0.90637$ $R_{\rm Mp}^{\rm nocal} = \exp(-0.6 \times 1024 \times 80) \{ \exp(-0.6 \times 256 \times 80) - \exp(-0.6 \times 1024 \times 80) \} = 0.033152$

となる。したがって、Hp イベントに対する Mp イベントの比を $R_{
m Hp/Mp}^{
m nocal}$ とすると、理論曲線から 求まる比は

$$R_{\rm Hp/Mp}^{\rm nocal} \equiv \frac{R_{\rm Hp}^{\rm nocal}}{R_{\rm Mp}^{\rm nocal}} = \frac{0.90637}{0.033152} = 27.340$$
(5.1)

となる。

一方、図 5.3 から、較正用 pixel を除いた全 pixel について、Hp イベントの個数 N^{nocal} における Mp イベントの個数 N^{nocal} の比率を求めると、

$$R_{\rm Hp/Mp}^{\rm nocal}(\rm SU) \equiv \frac{N_{\rm Hp}^{\rm nocal}}{N_{\rm Mp}^{\rm nocal}} = 25.130 \pm 4.0613$$
(5.2)

となる。ここでエラーは 1σ エラーを表している。以上から、PSP 実機による処理結果での Hp に 対する Mp のグレード比は 25.130 ± 4.0613 となり、一方で、PSP のグレード付けにおける理論 式から計算されたグレード比は 27.340 と求まった。これは 1σ エラーの範囲で一致する結果とな り、したがって、PSP 実機によるグレード付けが正常に行われていることが実証できた。

pixel	Hp	Mp	Ms	Lp	Ls
0	1178	44	47	6	9
1	1210	52	52	9	11
2	1304	46	47	9	10
3	1290	55	57	12	12
4	1240	46	53	6	5
5	1215	68	72	10	11
6	1202	52	55	12	11
7	1225	36	39	10	11
8	1206	49	50	7	7
9	1275	52	53	10	9
10	1321	52	55	6	6
11	1243	45	50	5	5
12	4862	2825	4575	1271	2960
13	1169	44	48	14	16
14	1202	53	54	10	10
15	1214	73	75	11	10
16	1253	48	49	12	16
17	1229	42	44	17	17

図 5.3: 各グレードのイベント数の比較

5.3.2 loResPH スペクトル解析

まず初めに、PSP の User FPGA で計算される lowResPH のスペクトル解析を行った。pixel 12 でトリガーされたすべてのイベントでの loResPH ヒストグラムを図 5.5 に示す。使用データの 情報から波形データには Mn-K α と Mn-K β の特性 X 線が含まれていることが分かっている。輝 線のエネルギーと loResPH の値から、pixel 12 では loResPH 値が 2800 chan 付近にある輝線が Mn-K α 線で、3000 chan 付近にある輝線が Mn-K β の輝線であると推測できる。

次に、波高値情報である lowResPH 値を入射 X 線光子のエネルギー値に変換するために以下の 処理を行った。



図 5.4: 各 pixel ごとのグレード分岐比

表 5.2: 特性	X線とエネルギー
特性X線	エネルギー (eV)

Mn-K α	5894.2
Mn-K β	6490.4



図 5.5: pixel 12の全トリガーイベントにおける loResPH ヒストグラム。

理論上、カロリメータの波高値は入射 X 線光子のエネルギーに対して線形の関係を持つ。その ため、入射 X 線光子のエネルギー *E* は、loResPH の値から

$$loResPH = a E$$
(5.3)

という相関関数を用いて算出できる。式 5.3の関係から、Mn-K α 線のエネルギーの値とMn-K α 線に対応する loResPH の値を使用して a の値を求め、loResPH 値をエネルギーの値に変換した。 さらに、得られたエネルギースペクトルから、Mn-K α 線について、ガウス関数でのフィッティン グを行い、pixel 12 での loResPH によるエネルギー分解能を求めた(図 5.6 左)。本試験では、エ ネルギー分解能の指標として、関数の広がりの程度を表す際に使用される、半値全幅 full width at half maximum (FWHM)を用いた。FWHM は、分布が正規分布で与えられるとき、標準偏差 を ~ として、

$$FWHM = 2\sqrt{\ln 2} \ \sigma \simeq 2.3548 \ \sigma \tag{5.4}$$

という式で求められる。この計算式を用いて pixel 12 についてのエネルギー分解能を計算すると、 22.6 eV と求まった。同様にして、全 18 pixel について loResPH のエネルギー変換を行い、ガウ シアンでフィットしてエネルギー分解能を計算すると、20.7±0.29 eV となった(図 5.6 右)。これ は、SXS への性能要求である SSR-01 の要求値を満たしていないため、最適フィルタ処理によっ て求まった波高値を使用して評価をする必要がある。



図 5.6: loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-Kα線のエネルギースペクトルと、ガウシ アンフィット結果。左が pixel 12 で、右が全 pixel でのヒストグラム。

5.3.3 PHA スペクトル解析

続いて、最適フィルタ処理によって求められた PHA についての解析を行った。まず、pixel 12 でトリガーされた全イベントの中から、Hp イベントの PHA を抜き出して Mn-Kα 線に対するヒ ストグラムをプロットした(図 5.7)。ここで、PHA からエネルギーへの変換は、loResPH の時と 同様に、PHA スペクトルの Mn-Kα 線のピークの値を用いて計算した。最適フィルタ処理によっ て求められた PHA を用いることで、原子の軌道角運動量の違いによる Mn-Kα1, Kα2 の 2本の輝 線を分離できていることが分かる。PHA ヒストグラムについての詳しい解析は 5.3.4 で述べる。

5.3.4 リニアリティー補正

ここまでに行った解析では、エネルギーと PHA が線形関係¹をもつと仮定してエネルギー変換 を行っていたが、実際には、入射 X 線光子のエネルギーが高くなると、エネルギーに対するゲイ ンゆらぎの影響で分解能が劣化することが知られている。PSP は最適フィルタ処理により、入射 X 線光子のエネルギーに相当する波形の波高値 (PHA) を高い精度で決定できるが、その後、PHA の値を正しくエネルギー値に変換しなければならない。そこで、エネルギーに対するゲインゆら ぎの影響を考慮し、先の解析で得られたエネルギーの値に、2 次以上の関数でエネルギー変換を 行うリニアリティー補正を加える。本試験では、リニアリティー補正関数を以下のように求めた。 PHA とエネルギーの関係式として、PHA の Mn-Kα1 と Mn-Kβ のピーク、さらにそれぞれの



図 5.7: Mn-Kα 線の Hp イベントでの PHA ヒストグラム。エネルギーが低い方のピークが Kα2 線で、エネルギーが高い方が Kα1 線を表している。

ピークに対応するエネルギーの値を用いて、その2点を通るような2次関数、

$$PHA = a E^2 + b E \tag{5.5}$$

を考え、aとbに対してフィッティングを行う。以下にフィッティングによって得られた、pixel 12 でのリニアリティー補正関数を載せる(図 5.8)。今回の解析では pixel 12の Hp イベントについ てリニアリティー補正を行っている。

また、全 18 pixel の Hp イベントに対してフィッティングを行い、各 pixel ごとの a,b 値の比較 図を図 5.9 に示す。

¹線形関係とはy = ax + bのような一次関数で与えられる関係のことである



図 5.8: フィッティングによって求められた、pixel 12の Hp イベントでのリニアリティー補正関数。



図 5.9: リニアリティー補正におけるフィッティングパラメータ a,b の比較。

次に、全 pixel に対してリニアリティー補正を施し、Mn-Kα線のエネルギーヒストグラムをプ ロットした。各 pixel ごとの Mn-Kα線のエネルギーヒストグラムを図 5.10 に示す。さらに、そ れらのヒストグラムを全 pixel について足し合わせて得られたエネルギーヒストグラムを図 5.11 に示す。



図 5.10: pixel ごとの、Hp イベントにおける Mn-K α のエネルギーヒストグラム。



図 5.11: 全 18 pixel での、Hp イベントにおける Mn-Kα のエネルギーヒストグラム。

5.3.5 エネルギー分解能の計算

本節では、PSP のデジタル波形処理における、光子エネルギーの測定結果を評価するために、 まず、ノイズのエネルギー揺らぎを表すベースライン分解能を計算し、続いて、前節で得られた 全 pixel での Hp イベントのヒストグラムデータを用いて、Mn-Ka 線に対するエネルギー分解能 を求めた。さらに、FM センサーデータを用いた NASA/GSFC の実験室系での解析結果との比較 を行い、PSP の波形処理が正常に行われているかの評価を行った。

ベースライン分解能

カロリメータのエネルギー分解能は、ベースライン分解能によって制限される。カロリメータ 検出器は、X線光子が入射していない間でも、温度計や受光素子からの信号読み出し装置による ノイズ揺らぎ受けている。それらのノイズ揺らぎをエネルギーの揺らぎとして表したのがベース ライン分解能である。そのため波高値測定では、それらのベースライン揺らぎに加えて、入射 X 線光子固有のノイズが含まれることになるため、実際のエネルギー分解能はベースライン分解能 に比べて劣化する場合が多い。

本解析では PSP のトリガーデータの内、ベースラインイベントとして処理された全 pixel 分の データを使用し、PHA の値からエネルギー分解能を求めた。PHA からエネルギーへの変換は、 前節で求められたリニアリティー補正関数を用いて行った。図 5.12 が、ベースラインイベントの ヒストグラムである。赤線は全 pixel のベースラインイベントヒストグラム、黒線がガウス関数 でのフィッティング結果を表す。この結果からベースライン分解能は 3.5±0.1 eV と求まった。



図 5.12: ベースラインイベントのヒストグラム。赤線は全 pixel でのベースラインヒストグラム、 黒線はガウス関数でのフィッティング結果である。

$Mn-K\alpha, K\beta$ 線に対するエネルギー分解能

続いて、PSPのデジタル処理性能の評価を行うために、Mn-Kα線とMn-Kβ線でのエネルギー 分解能を求めた。Mn-Kα線とMn-Kβ線についてのフィッティングは、フォークト (Voigt) 関数 を用いて実行される。フォークト関数は、実測のスペクルをフィットするときによく使用される 関数で、ガウス関数

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$
(5.6)

とローレンツ関数

$$g(x) = \frac{1}{\pi} \frac{\beta}{\beta^2 + (x - \alpha)^2}$$
(5.7)

の畳み込み

$$h(z) = \sum_{n} g(z-n)f(n)$$
(5.8)

で与えられる関数である。式 5.6 で、 μ はガウス分布の平均値、 σ は分散、式 5.7 で、a はローレ ンツ分布の平均値、 α は半値半幅 half width at half maximum (HWHM) をそれぞれ表す。上記 のフォークト関数による Mn-K α 線と Mn-K β 線でのフィット結果を図 5.13 に示す。それぞれ、右 が Mn-K α 線、左が Mn-K β 線のヒストグラムを表す。特性 X 線は、電子の軌道間遷移によって 放出され、特に、L 殻から K 殻への遷移によって生じる特性 X 線は K α 線、また、その外の外 殻軌道である M 殻から K 殻への遷移によって放射されるものを K β 線と呼んでいる。また同じ K α 線でも外殻の L 殻の 2p 軌道がスピン分裂を起こし、L 2 と L 3 に分かれているために 2 本の特 性 X 線が観測される。そこでこれらのうち強度の強い L 3 からの遷移を特に K α 1 線、L 2 からの 遷移を K α 2 線としてさらに細かく名称をつけている。

Mn-Kα線は、Kα1 に 6 本、Kα2 に 2 本の計 8 本、Mn-Kβ線は、計 5 本のフォークト関数の重 ね合わせでフィットした。これにより、Mn-Kα線でのエネルギー分解能について、SXS への性能 要求 SSR-01 であるエネルギー分解能 <7 eV を十分に満たす、 4.41 ± 0.08 eV という結果を得た。 さらに Mn-Kβ線でのエネルギー分解能は、 3.3 ± 0.2 eV と求まった。ここで、エラーの範囲は 1σ の値を使用している。

次に、FM センサーデータを用いた NASA/GSFC の実験室系での測定結果と、本試験で得られ た解析結果についての比較を行い、PSP の搭載ソフトウェアによるデジタル波形処理機能が、要 求通りの動作をしているかを確認した。NASA/GSFC の実験室系の測定には、PSP と同等のデ ジタル処理アルゴリズムを搭載した PSP シミュレーターが使用された。その解析結果によると、 Mn-Ka線でのエネルギー分解能は 4.46 ± 0.01 eV となった(図 5.14)。ここでのフィッティング は最小自乗法によって行われ、エラーの範囲は 1 σ でもとめた値を使用している。以上の結果か ら、PSP の実機での処理による劣化は最大で 0.4 eV となり、PSP への性能要求 CR-P07 である、 Hp イベント処理によるスペクトル分解能の劣化 < 0.5 eV を満たす結果となった。これにより、 PSP の搭載ソフトウェアでのエネルギー測定が要求通りの性能を持っていることが実証できた。



図 5.13: Mn-Kα線(右)とMn-Kβ線(左)のフォークト関数によるフィッティング結果。赤線 がエネルギースペクトルのヒストグラム、青線がローレンツ関数、黒線が自然幅を持つローレン ツ関数をガウス関数でコンボリュートしてフィットした結果である。



図 5.14: NASA/GSFC による、FM センサーデータを用いた実験室系試験での Mn-Kα 線の解析 結果

第6章 まとめ

本論文では、現在開発中のX線天文衛星ASTRO-Hに搭載される、軟X線分光装置SXSのデジタル波形処理装置PSPについての性能実証試験を行った。

まず、衛星搭載品の実機を用いては初となる XBox-PSP の接続試験を行った。接続試験では、 両機器間のすべての信号線について、オシロスコープを用いた測定を行い、信号の電圧レベルや 周波数などの信号特性が、要求値を満たす事を確認した。以上の結果から、PSP と XBox の通信 が正常に行われていることを実証した。

次に、PSP のデジタル波形処理性能の評価試験として、2013 年 8 月に NASA/GSFC による FM-XCS と FM-XBox の接続試験で得られた FM センサーデータを FM と同等の PSP で処理さ せ、その出力結果についての解析を行った。

まず、本試験で得られたグレード付け結果と理論式から求まるグレード分岐比との比較を行 い、PSP 実機によるグレード付けが正常に実施されているかを検証した。実機での処理結果か ら較正用 pixel を除いた全 pixel について、Hp イベントに対する Mp イベントの比を求めると、 $R_{\rm Hp/Mp}^{\rm nocal}({\rm SU}) = 25.130 \pm 4.0613$ となった。また、理論式から、Hp と Mp のグレード分岐比を求 めたところ $R_{\rm Hp/Mp}^{\rm nocal} = 27.340$ となり、本試験の結果と誤差の範囲で一致する結果を得た。これに より、PSP によるグレード付けが正常に行われていることが実証できた。

次に、PSP の搭載ソフトウェアでのエネルギー測定に対する評価を行った。まず、全 pixel での Hp イベントについて Mn-K α 線ヒストグラムをプロットし、フォークト関数を用いたフィッティ ングを行った。その結果、SXS の性能要求 SSR-01 であるエネルギー分解能 <7 eV を十分に満た す、4.41±0.08 eV という結果を得た。さらに、FM センサーデータを用いた NASA/GSFC の実 験室系で得られたエネルギー分解能 4.46±0.01 eV と、本試験で得られた解析結果についての比 較を行った。その結果、PSP 実機での処理による劣化は最大で 0.4 eV となり、PSP への性能要求 CR-P07 である、Hp イベント処理によるスペクトル分解能の劣化 < 0.5 eV を満たす結果となっ た。これにより、PSP の搭載ソフトウェアでのエネルギー測定が要求通りの性能を持っているこ とが実証できた。

86

付録A 各pixel ごとのFMセンサーデータ処理 データに対する解析結果



図 A.1: 全トリガーイベントにおける loResPH ヒストグラム。(上) 左から pixel 00, pixel 01, pixel 02、(真ん中) 左から pixel 03, pixel 04, pixel 05、(下) 左から pixel 06, pixel 07, pixel 08。



図 A.2: 全トリガーイベントにおける loResPH ヒストグラム。(上) 左から pixel 09, pixel 10, pixel 11、(真ん中) 左から pixel 13, pixel 14, pixel 15、(下) 左から pixel 16, pixel 17。



図 A.3: loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-K α 線のエネルギースペクトルと、ガウ シ アンフィット結果。(上) 左から pixel 00, pixel 01, pixel 02、(真ん中) 左から pixel 03, pixel 04, pixel 05、(下) 左から pixel 06, pixel 07, pixel 08。



図 A.4: loResPH をエネルギーに変換して得られた Mn-K α 線のエネルギースペクトルと、ガウ シ アンフィット結果。(上) 左から pixel 09, pixel 10, pixel 11、(真ん中) 左から pixel 13, pixel 14, pixel 15、(下) 左から pixel 16, pixel 17。



図 A.5: Mn-K α 線の Hp イベントでの PHA ヒストグラム。(上) 左から pixel 00, pixel 01, pixel 02、(真ん中) 左から pixel 03, pixel 04, pixel 05、(下) 左から pixel 06, pixel 07, pixel 08。



図 A.6: Mn-K α 線の Hp イベントでの PHA ヒストグラム。(上) 左から pixel 09, pixel 10, pixel 11、(真ん中) 左から pixel 13, pixel 14, pixel 15、(下) 左から pixel 16, pixel 17。



図 A.7: フィッティングによって求められた、リニアリティー補正関数。(上) 左から pixel 00, pixel 01, pixel 02、(真ん中) 左から pixel 03, pixel 04, pixel 05、(下) 左から pixel 06, pixel 07, pixel 08。



図 A.8: フィッティングによって求められた、リニアリティー補正関数。(上) 左から pixel 09, pixel 10, pixel 11、(真ん中) 左から pixel 13, pixel 14, pixel 15、(下) 左から pixel 16, pixel 17。

関連図書

- [1] 萩原利士成:「撮像型 X 線 TES マイクロカロリメータのデジタルのデジタル信号処理」, 修士論文,東京大学,2007
- [2] 瀬田裕美:「ASTRO-H 衛星搭載 X 線マイクロカロリメータ用デジタル信号処理系の設計」, 修士論文, 埼玉大学, 2009
- [3] 下田優弥: 「ASTRO-H 衛星搭載 SXS デジタル信号処理系の設計実証モデルによる性能評価」, 修士論文, 埼玉大学, 2011
- [4] 阿部祐輝:「ASTRO-H 搭載軟 X 線分光装置 SXS の波形処理システム PSP の開発」,修士 論文,首都大学東京, 2011
- [5] 神頭知美:「ASTRO-H 衛星における時刻付けシステムの開発」, 修士論文, 埼玉大学, 2010
- [6] 武田佐和子:「ASTRO-H 衛星搭載 SXS デジタル波形処理部の性能実証機の評価試験」,修 士論文,埼玉大学, 2013
- [7] 下田優弥:「X 線天文衛星「Astro-H」搭載マイクロカロリメータのデジタル信号処理系にお ける Pulse の最適微分方法について」,卒業論文,埼玉大学,2009
- [8] 朝比奈正人:「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載共通デジタル処理回路の通信速度測定」, 卒業論文, 埼玉大学, 2010
- [9] 武田佐和子:「次世代 X 線天文衛星搭載マイクロカロリメータのデジタル波形処理部におけ る最適な微分フィルタの開発」,卒業論文,埼玉大学,2011
- [10] 山口直:「次世代 X 線マイクロカロリメータのための最適微分フィルタの実装」, 卒業論文, 埼玉大学, 2012
- [11] ISAS:「科学衛星 ASTRO-EII 中間報告書 (第 2 分冊)」, ISAS, 2005
- [12] K. Mitsuda and Y. Takei : 「SXS-XCS Description Document」, JAXA-XCS-001 v03, 2010
- [13] M. Tsujimoto and M. Tashiro : $\lceil \text{Pulse Shape Processor}$ (PSP) Description Document \rfloor , JAXAXCS-E-007, 2013

- [14] 藤本龍一: 「ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS の開発の現状 (V)」, 日本物理学会 2013 年春季年会発表資料, 2013
- [15] 藤本龍一:「Cooling system for the Soft1 X-ray Spectrometer (SXS) onboard ASTRO -H」, SPIE2010 年発表資料, 2010
- [16] 井上一, 小山勝二, 高橋忠幸, 水本好彦編, 『宇宙の観測 III――高エネルギー天文学』, シリー ズ現代の天文学 17, 日本評論社, 2008

謝辞

まず初めに、本論文の作成にいたるまでの長い間、いろいろとご指導頂いた田代先生、寺田先 生、そして研究室の諸先輩方や同期の皆様、及び後輩の皆様、それら研究室のすべての方々にこ の場を借りて心から感謝いたします。

田代先生には、PSP の試験を通して日頃から大変お世話になりました。人工衛星開発という非 常に夢のある現場に同行させて頂いたことは、これから先、決して忘れることのないであろう大 変貴重な経験となりました。また、学会資料や論文の作成の際には添削をしていただき、その都 度、文章のまとめ方について勉強をさせていただきました。本当にありがとうございました。

寺田先生には、特に SpaceWire 実験にて、貴重なご助言とご指導を頂きました。筑波で行った試験において、責任感のある試験を任せていただいたことは、自分にとって大変貴重な経験となりました。本当にありがとうございました。

PSP の皆様には特に、学生生活や実験などを通して、多くのことを学ばせていただきました。 下田さんには、何度も論文や学会資料の添削を頂きました。自分の文章を見て、一向に文章能力 が成長していないなと感じたことと思います。その節は大変ご迷惑をかけました。また、研究生 活以外にもたくさんお世話になりました。特に、海外の実験に行くときになどは、分からない事 だらけの自分はいつも助けて頂いていました。これからは社会人となりますが、また一緒に飲み にいけたら幸いです。本当にありがとうございました。

武田さんには、直属の先輩として3年間大変お世話になりました。そのなかでも特に、研究の 姿勢については多くの事を学ばせて頂きました。ひとつの仕事を細部にまで気を使い丁寧に行う 姿は、面倒くさがりな自分からすれば理想の姿でした。これからは、すこしでもその理想に近づ けるように頑張っていきたいと思います。本当にありがとうございました。

他にも ASTRO-H プロジェク関係者の皆様、特に首都大学東京の石崎先生、ISAS/JAXA の辻 本先生、金沢大学の藤本先生、立教大学の瀬田さんには大変お世話になりました。ASTRO-H 衛 星の打ち上げ現場に立ち会えない事はとても心残りですが、これからの皆様のご活躍を心より願っ ております。本当にありがとうございました。

そして最後に、本日にいたるまで大学での6年間を共に過ごし、修士として研究に励んできた 同期のみなさんには、本当に感謝の気持ちで一杯です。この研究室での生活をみんなと過ごせた ことは、良い思い出としてこれからもずっと心に残っていくと思います。これからそれぞれ社会 人になりますが、また定期的に集まれたら嬉しいなと思っています。本当にありがとうございま した。