NeXT 衛星搭載

硬X線撮像用両面シリコンストリップ検出器の 性能評価

西野 翔

広島大学理学部物理科学科

B034076

高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

2007/02/09

概 要

宇宙には、人工の加速器をはるかに上回るエネルギーまで粒子を加速する非熱的な加速機構が存在している。これらの加速メカニズムの解明をめざし、2013年の打ち上げを目標に進められている日本の次期X線衛星計画が「NeXT」である。NeXT衛星に搭載されるHXI(硬X線撮像検出器)では、多層膜スーパーミラーという新しい望遠鏡を用いることにより、これまで困難であった硬X線領域5-80keVで初めて高感度撮像観測が可能になる。感度はこれまでより2桁程度、向上すると見込まれる。HXIは両面シリコンストリップ検出器(DSSD)とCdTeピクセル検出器からなるが、どちらも過去に撮像素子として衛星に搭載された経験はない。本研究では、昨年夏に新しく製作された、撮像用DSSDについて性能評価を行った。

まず DSSD を 1ch で読み出し、リーク電流、容量などの基礎特性を調べた。次 に撮像素子としての性能を評価するため、両面全 256 ch を低ノイズ、多チャンネ ルで読み出し、エネルギー分解能、位置分解能が HXIの要求性能を満たすものか を調べた。本研究ではエネルギー分解能の向上をはかるため、Floating バイアス 式の新しい読み出しの方法を用いている。そのため既存のデータ取得システムを 用いることができず、センサーの組み立てから読み出しシステムの立ち上げまで 全てを行った。

目 次

第1章	はじめに	6
1.1	非熱的宇宙と NeXT 衛星	6
1.2	研究の目的	7
第2章	DSSD を用いた X 線検出	9
2.1	両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) の概要.........	9
	2.1.1 半導体検出器	9
	2.1.2 両面シリコンストリップ検出器 (DSSD)	9
2.2	半導体検出器の雑音・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	11
	2.2.1 ノイズ源	11
	2.2.2 半導体検出器のノイズ	11
	2.2.3 DSSD 読み出しに VA64TA を用いた場合のノイズ	12
2.3	硬 X 線撮像観測システム	14
	2.3.1 X 線望遠鏡 HXT	14
	2.3.2 硬 X 線撮像検出器 HXI	16
	2.3.3 DSSD/CdTeの開発の経緯	19
第3章	撮像用 DSSD の基礎特性評価	21
第3章 3.1	撮像用 DSSD の基礎特性評価	21 21
第3章 3.1 3.2	撮像用 DSSD の基礎特性評価	21 21 22
第3章 3.1 3.2 3.3	撮像用 DSSD の基礎特性評価 撮像用 DSSD の特徴 リーク電流測定 容量測定	 21 21 22 24
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4	撮像用 DSSD の基礎特性評価	 21 21 22 24 27
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5	撮像用 DSSD の基礎特性評価 撮像用 DSSD の特徴 リーク電流測定 容量測定 スペクトルの取得 、 今後の撮像用 DSSD 開発	 21 22 24 27 29
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章	撮像用 DSSD の基礎特性評価 2 撮像用 DSSD の特徴	 21 22 24 27 29 31
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1	撮像用 DSSD の基礎特性評価 2 撮像用 DSSD の特徴	 21 21 22 24 27 29 31
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1 4.2	撮像用 DSSD の基礎特性評価 撮像用 DSSD の特徴	 21 21 22 24 27 29 31 32
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1 4.2	撮像用 DSSD の基礎特性評価:撮像用 DSSD の特徴:リーク電流測定:容量測定:スペクトルの取得:今後の撮像用 DSSD 開発:DSSD 多チャンネル読み出し:従来の方法とその問題点:Floating 読み出し:4.2.1システム概要	 21 21 22 24 27 29 31 31 32 32
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1 4.2	撮像用 DSSD の基礎特性評価撮像用 DSSD の特徴リーク電流測定容量測定スペクトルの取得スペクトルの取得今後の撮像用 DSSD 開発DSSD 多チャンネル読み出し従来の方法とその問題点Floating 読み出し4.2.1システム概要4.2.2VA64TA	 21 21 22 24 27 29 31 31 32 32 33
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1 4.2	撮像用 DSSD の基礎特性評価撮像用 DSSD の特徴リーク電流測定マ容量測定スペクトルの取得スペクトルの取得ク後の撮像用 DSSD 開発DSSD 多チャンネル読み出し従来の方法とその問題点Floating 読み出し4.2.1システム概要4.2.2VA64TA4.2.3FEC	 21 21 22 24 27 29 31 31 32 32 33 35
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1 4.2	撮像用 DSSD の基礎特性評価:撮像用 DSSD の特徴:リーク電流測定:容量測定:スペクトルの取得:今後の撮像用 DSSD 開発:DSSD 多チャンネル読み出し:従来の方法とその問題点:4.2.1システム概要4.2.2VA64TA4.2.3FEC4.2.4TKD Card	 21 21 22 24 27 29 31 31 32 33 35 36
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1 4.2	撮像用 DSSD の基礎特性評価 2 撮像用 DSSD の特徴	 21 22 24 27 29 31 32 32 33 35 36 36
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1 4.2	撮像用 DSSD の基礎特性評価 2 撮像用 DSSD の特徴	 21 21 22 24 27 29 31 32 33 35 36 36 37

4.3	読み出しの流れ	38
4.4	装置の組み立て	39
4.5	多チャンネル読み出しの結果	42
	4.5.1 外部トリガによる読み出しシーケンスの実行	42
	4.5.2 TA トリガによるスペクトルの取得	43

 $\mathbf{47}$

第5章 まとめと今後

図目次

1.1	NeXT 衛星に搭載される検出器	7
2.1	DSSD の概略図 左図:Pside 右図:Nside	10
2.2	DSSDの断面図 P ⁺ , N ⁺ ストリップは Al 電極と DC 結合している .	10
2.3	DSSD がもつ容量	12
2.4	DC 結合の 等価回路	13
2.5	全反射鏡、多層膜ミラー、多層膜スーパーミラーの模式図	15
2.6	全反射鏡、多層膜ミラー、多層膜スーパーミラーのエネルギー反射	
	率の比較 $\theta = 0.3$ °	16
2.7	HXIの概念図	17
2.8	Si と CdTe を重ねて用いた場合の検出効率	17
2.9	HXT による集光・結像の概略図	18
2.10	100k 秒の観測時間において、HXI(CdTe) で期待される感度と、過	
	去の衛星に搭載された検出器の感度との比較。縦軸はどの程度の明	
	るさの天体まで検出できるかを表す。(左)連続スペクトルに対して	
	(右) ライン X 線に対して。	19
3.1	3.4cm×3.4cm 撮像用 DSSD	21
3.2	撮像用 DSSD のレイアウト図 (左) Pside (右) Nside 赤丸で囲んだ	
	部分の拡大図を図 3.3 に示す。	22
3.3	Nside ボンディングパッド周辺の拡大図。n-strip の周囲を幅 25 μm	
	の p-stop で囲んでいる	22
3.4	リーク電流測定セットアップ	23
3.5	1ストリップ当りのリーク電流のバイアス依存性	24
3.6	1ストリップ当りのリーク電流の温度依存性	24
3.7	(左)Body Capacitance 測定用セットアップ (右)Pside の Inter-strip	
	Capacitance 測定用セットアップ	25
3.8	Body Capacitance	26
3.9	Inter-strip Capacitance	26
3.10	1 ch 読み出しセットアップ (上)Pside (下)Nside	28
3.11	1 ch 読み出しセットアップ。DSSD はガラスエポキシを用いて製作	
	した治目で因定してある	28

3.12	取得した Am241 のエネルギースペクトル (上)Pside (下)Nside	29
4.1	AC 結合の等価回路。RC-chip を用いている。	31
4.2	Floating システム	33
4.3	VA64TA、 DSSD からワイヤーボンディングされている。 $DSSD$ は	
	片面 128 ch あるため、Pside に 2 つ、Nside に 2 つ用いる	34
4.4	VA64TA のブロック図	34
4.5	VA64TA のレジスタ設定シーケンス	35
4.6	読み出しセットアップ	37
4.7	読み出しの流れ	39
4.8	DSSD と製作した治具の構造	40
4.9	(左)治具を重ねてDSSDを固定している様子。逆サイドも同様にし	
	て FEC を治具に固定する。(右) DSSD から VA64TA へのボンディ	
	ングの詳細	40
4.10	実物の治具とボンディングの様子	41
4.11	レギュレータ回路と Floating の方法。Pside と Nside のレギュレー	
	タ回路は同じもの。	42
4.12	全体の読み出しセットアップ	42
4.13	外部トリガにより取得した 200 イベントのデータ。上からペデスタ	
	ル、ノイズレベル、Pside-ch10のスペクトル、Nside-ch138のスペ	
	クトル。	44
4.14	取得したデータをそのままスペクトルにしたもの。Pside 128ch、	
	Nside 128ch の合計 256ch のスペクトル。	45
4.15	Pside ch48 のスペクトル (左) 取得したそのままのデータ (右) ペデ	
	スタルの補正、コモンモードノイズの除去を行ったもの.....	46
4.16	Nside ch189のスペクトル (左) 取得したそのままのデータ (右) ペデ	
	スタルの補正、コモンモードノイズの除去を行ったもの	46

表目次

2.1	HXT の要求性能と目標性能	15
2.2	CdTe,Siの基礎特性、比較のため CdZnTe,Ge についても記載した。	16
2.3	HXIの要求性能	18
3.1	3.4 cm 角 DSSD の仕様	21
3.2	1ch 読み出しに用いた機器	27
4.1	FEC - TKD Card ピンアサイン	35
4.2	TKD Card - IFC ピンアサイン	36
4.3	IFC - I/O Card ピンアサイン	37

第1章 はじめに

1.1 非熱的宇宙とNeXT 衛星

T=2.7 Kの宇宙背景放射をはじめとして、宇宙の多くの現象は静的または準静 的な熱的宇宙の下で起こるよう見える。しかし近年の電波・X線による観測により ブラックホール、銀河団、超新星残骸などの高エネルギー天体から、硬X線・ガ ンマ線の放射が確認されている。これらの放射は、相対論的エネルギーまで加速 された粒子からの放射であり、熱的現象としては説明できない。人工の加速器を はるかに上回るエネルギーまで、粒子を加速する機構が宇宙に存在しているので ある。これらの粒子の加速機構などについては、いまだ謎とされている部分が多 く、それらの解明が我々の研究室のテーマでもある。

加速された高エネルギー粒子は、シンクロトロン放射、逆コンプトン散乱など の過程により、硬X線・ガンマ線を放出する。ASCA, Chandra, Newton などのX 線天文衛星によりさまざまなX線観測が行われてきたが、どれも熱的放射が支配 的である10 keV 以下の軟X線どまりであり、非熱的な成分が見え出す10 keV 以 上の領域では、今まで感度のよい観測が行われてこなかった。この状況を打開す べく昨年打ち上げられたのが「すざく」衛星である。「すざく」には非熱的現象を 観測対象とする HXD(Hard X-ray Detector) という検出器が搭載され、非熱的宇宙 の解明への道を開いた。

さらに、2013年打ち上げを目標とし、JAXA/ISAS を中心に進められている次 期 X 線天文衛星計画が NeXT(New X-ray Telescope) である。NeXT には SGD(軟 ガンマ線検出器)、HXI(硬 X 線撮像検出器)、SXI(軟 X 線撮像検出器)、SXS(高分 散軟 X 線分光撮像検出器)、の4つの検出器が搭載される予定である (図 1.1)。SGD は半導体多層コンプトンカメラという新しい方法を用いた次世代検出器であり、入 射光子の到来方向を厳しく制限することにより、10 - 300 keV の硬 X 線領域にお いて、低バックグラウンドの観測が可能である。HXI は 10 keV - 80 keV の領域 で集光・結像することが可能となった多層膜スーパーミラーという新しい X 線望 遠鏡 (HXT) を利用することにより、硬 X 線領域で初めて、感度の良い撮像観測が 可能になる検出器である。さらに、軟 X 線 (0.3 - 25 keV) で優れた撮像分光性能 を有する SXI(X 線 CCD) と、0.3 - 10 keV の領域において、優れたエネルギー分 解能で分光と撮像を行う SXS が備えられる。SXI、SXS はどちらも軟 X 線望遠鏡 (SXT) の焦点面に置かれ、同様の検出器が「すざく」衛星にも搭載されたという 実績をもつ。



図 1.1: NeXT 衛星に搭載される検出器

NeXT 衛星では、これらの次世代高感度検出器により、非熱的宇宙を探り、エネ ルギー非等分配の過程をあばきだすことを目的とする。

1.2 研究の目的

NeXT 衛星に搭載される検出器 HXI は、非熱的宇宙の解明に向けた主要な検出器 であり、5-30 keVを担当する両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) と、10-80 keVを担当する CdTe ピクセル検出器からなる。DSSD/CdTe ともに、過去に撮像検 出器として衛星に搭載された経験はなく、現在、宇宙科学研究本部 (JAXA/ISAS) ・広島大学・スタンフォード線形加速器センター (SLAC) により共同で開発研究が 進められている。HXI は硬 X 線望遠鏡 (HXT) の焦点面に置かれる検出器である が、望遠鏡の集光能力を最大限に利用するためには、用いられる DSSD は 2 cm 四 方以上の検出器サイズと、250 µm 程度の位置分解能が求められる。今までそのよ うな撮像用の DSSD は製作されてこなかったが、昨年の夏ごろ新しく、HXI での 使用を目的とする、3.4 cm 四方、ストリップ間隔 250 µm、ストリップ数片面 128 本の DSSD が浜松ホトニクスにより製作された。本研究では新しく導入されたこ の DSSD が、撮像素子としての要求性能を満たすものかを評価する。具体的には まず、DSSD を1チャンネルで読み出し、リーク電流や容量などの基礎特性を調べ た。検出器の基礎特性を正しく理解することは、後の性能評価や後段読み出しシ ステムの最適化にとって重要であり、さらに今後のDSSD開発に向けての指針に もなる。次に、DSSD両面から低ノイズで多チャンネルの信号を読み出し、DSSD の撮像素子としての性能を評価した。本研究では、エネルギー分解能の向上をは かるため、Floating バイアス式の新しい読み出し方法を用いた。そのためセンサー の組み立てや、読み出しシステムの立ち上げなども全て行った。DSSD のような 多チャンネルの信号を低雑音で読み出すのは一般に容易ではなく、検出器の原理、 基礎特性はもちろんのこと、読み出しのためのアナログ集積回路、読み出された データを処理するためのディジタル回路、そしてデータ処理の方法など広範囲に わたる知識が必要となった。

第2章 DSSDを用いたX線検出

2.1 両面シリコンストリップ検出器 (DSSD)の概要

2.1.1 半導体検出器

従来はX線・ガンマ線の検出にCsI,NaI,BGOなどのシンチレーション検出器が 用いられてきた。しかしシンチレーション検出器はひとつのキャリアを生成するの に~100 eV 程度のエネルギーを必要とするため、硬X線・軟ガンマ線の領域では キャリアの数は数千個程度にしかならず、Poisson 揺らぎによるエネルギー分解能 の悪化が避けられなかった。そこで最近よく用いられるのが半導体検出器である。 本研究で用いる Si の場合、1 組のキャリア対を生成するのに必要なエネルギーは 3.65 eV であり、キャリア数に十分な統計が得られエネルギー分解能がよくなる。 さらに Si の場合、電子の拡散係数が~40 cm²/s と小さく、電荷収集時間 100 ns 以下では拡散は無視できる。よってセンサーエレメントを小さくすることで、位 置分解能の優れた検出素子をつくることができる。高速応答性~30 ns も重要な特 徴であり、有感時間をかせぐだけでなく、BGO シールドとの反同時係数により、 バックグラウンドを除去するのにも有利である。

2.1.2 両面シリコンストリップ検出器 (DSSD)

両面シリコンストリップ検出器 (Double-sided Silicon Strip Detector:DSSD) と は、もともと素粒子実験における短寿命粒子の検出に使われていたシリコンスト リップ検出器 (SSD) を改良したもので、n型シリコンウエハーの片面に p^+ ストリッ プを、もう片面に n^+ ストリップをそれぞれ直行するようにインプラントしたもの である (図 2.1,2.2)。ストリップの交差する部分がそれぞれ独立したダイオードと して働く。このダイオード構造に逆バイアスをかけると、ストリップ間にキャリ アがほとんど存在しない空乏層と呼ばれる領域が生成され、ここに X 線・ガンマ 線が入射すると、空乏層内の束縛電子は、光電吸収、コンプトン散乱、電子・陽 電子対生成の諸過程によりエネルギーを受け取り、束縛を振り切る。この自由電 子が、入射 X 線のエネルギーに比例する数のホール・電子対を空乏層内につくり 出し、電場によりそれぞれ p^+ ストリップ、 n^+ ストリップに回収されることで、2 次元検出が可能となる。



図 2.1: DSSD の概略図 左図: Pside 右図: Nside



図 2.2: DSSD の断面図 P⁺, N⁺ ストリップは Al 電極と DC 結合している

ストリップ周辺の電場を一様に整えるため、Pside、Nside ともにストリップ全体を、それぞれ p^+ 、 n^+ ガードリングで囲んでいる。Pside のストリップ間はバイアスをかけると、自動的に n^+ 領域がつくられ絶縁される。Nside のストリップ間は、 n^+ ストリップと n-bulk がオーミック接合であるため、そのままでは絶縁されない。そこで p-stop と呼ばれる p^+ のリングで n^+ ストリップを囲むことによりNside はストリップ間の絶縁をとっている。p-stopの構造は、ストリップ間容量の形成や、信号電荷の収集効率に大きく影響を与えるため、多くの考察がなされている。

2.2 半導体検出器の雑音

2.2.1 ノイズ源

ここで考えるノイズとは、検出器から送られてきた電気信号にのる揺らぎのこ とである。この揺らぎにより、送られてきた信号が正規の値からずれ、エネルギー 分解能の悪化をもたらす。ノイズ源は大きく分けて、(i)検出器を含む読み出し回 路に内在するもの、(ii)外部から何らかの経路により侵入するもの、の2つがあ る。(i)は検出器のリーク電流や容量などの半導体検出器の基礎特性に大きく関連 するものであり、後のエネルギー分解能の評価に必要であるため、次節で詳しく 考えることにする。(ii)の外来ノイズは侵入経路を調べることにより、効果的に防 ぐことができる。具体的には、検出器と読み出し回路を金属性の箱に入れ電磁波 からシールドする、装置間のケーブルがグラウンドループを作らないようにする、 デジタル電源とアナログ電源を分離し、共通インピーダンスを作らない、アンプ の電源ラインにパスコンを入れる、などが重要である。

2.2.2 半導体検出器のノイズ

検出器およびその読み出し回路に内在するノイズ源として、大きな影響を与えるものに検出器のリーク電流と容量がある。

リーク電流

半導体検出器に逆バイアスをかけたとき、順方向にわずかな電流が流れる。こ の電流をリーク電流と呼ぶ。リーク電流の発生は主に、空乏層内に存在する電子 の熱励起によるものである。電子が熱的に励起されて、半導体のバンドギャップ を超えるエネルギーを得た場合、伝導体に遷移する。これにより生成された電子・ ホール対が、電極間の電場により回収されリーク電流となる。また、用いる半導 体結晶にわずかな不純物が含まれていた場合、これが新たに別の不純物準位をつ くり、リーク電流を増加させる原因になる。検出器に用いる半導体結晶は非常に 高純度であるが、不純物を全く含まない結晶をつくることは現在の技術でも難し い。熱励起によるリーク電流は、

$$I(T) \propto T^2 \exp\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right)$$
 (2.1)

となる。ここで T は温度、 E_g は半導体のエネルギーギャップ、 k_B はボルツマン定数である。リーク電流は温度に依存するので、検出器を低温下で動作させることで、リーク電流の影響は十分減らすことができる。

検出器容量

検出器がもつ容量もエネルギー分解能悪化の主な原因になる。本研究で用いる DSSDには、p側ストリップとn側ストリップの間に形成される Body Capacitance と、隣接するストリップ間に形成される Inter-strip Capacitance が存在する (図 2.3)。



図 2.3: DSSD がもつ容量

Body Capacitance は、おおよそ平行平版のコンデンサで近似できることが知られ ており、DSSD素子の面積S [mm²] と厚みd [μ m] に依存する。Inter-strip Capacitance はストリップ幅W [μ m]、ストリップ間隔P [μ m]、ストリップ長さl [cm] に依存 する。検出器全体の容量 C_d [pF] は Body Capacitance と Inter-strip Capacitance の 和で表され、経験的に以下のよう書ける。

$$C_d = C_{Interstrip} + C_{Body} \tag{2.2}$$

$$= (0.7 + 1.5\frac{W}{P}) \times l + \frac{\varepsilon \frac{s}{d}}{n_{strip}}$$
(2.3)

$$= (0.7 + 1.5\frac{W}{P}) \times l + 1.05\frac{lP}{d} \qquad [pF]$$
(2.4)

ここで、 ε [F/m] は Si の誘電率、 n_{strip} は片面のストリップ本数である。今後新し く DSSD を開発する際は、この経験式を生かして、検出器容量を下げる工夫が必 要である。

2.2.3 DSSD 読み出しに VA64TA を用いた場合のノイズ

上で述べたリーク電流・容量が実際にエネルギー分解能にもたらす影響は、その読み出し回路に強く依存する。本研究では、DSSD からの読み出しに VA64TA

と呼ばれるアナログ LSI を用い、Pside,Nside ともに DC 結合で読み出す (図 2.4)。 4章で詳しく述べるが、VA64TA には 64ch 分の CSA、Shaping Amp などの初段読 み出し回路が備えられている。ここではこのアナログ LSI を用い、DC 結合で読み 出した場合のノイズを考える。



図 2.4: DC 結合の等価回路

検出器・回路ノイズには、主にジョンソンノイズ、ショットノイズがある。ジョ ンソンノイズとは、検出器を含めた回路内の直列の抵抗成分において、電子のラ ンダムな熱励起の分だけ電流が揺らぐために生じるノイズである。等価雑音電荷 (Equivalent Noise Charge : ENC)で表すと、バイアス抵抗 R_{bias} で生じるノイズ ENC_{bias} は、Shaping Amp の時定数を τ として、

$$ENC_{bias}(e^{-}) = 770 \sqrt{\frac{\tau(\mu s)}{R_{bias}(M\Omega)}}$$
(2.5)

で計算される。また、回路内の他の抵抗成分 *R_{in}* によってもジョンソンノイズが 発生しており、以下の式で計算される。

$$ENC_{im}(e^{-}) = 450 \frac{C_d \sqrt{R_{im}(M\Omega)}}{\sqrt{\tau(\mu s)}}$$
(2.6)

次にショットノイズであるが、これは DSSD のリーク電流 I_{lc} が統計的に揺らぐ ことにより生じるノイズであり、

$$ENC_{lc}(e^{-}) = 110\sqrt{I_{lc}\tau(nA\cdot\mu s)}$$
(2.7)

で計算できる。

最後に CSA で生じるノイズであるが、これは CSA にロードされる容量 C_{in} に 依存し、

$$ENC_{amp}(e^{-}) = \frac{k_0 + k_1 C_{in}(pF)}{\sqrt{\tau(\mu s)}}$$
(2.8)

で計算される。ここで k_0 、 k_1 は VA64TA の CSA、Shaping Amplifier によって 独自に決まる定数である。CSA にロードされる容量 C_{in} は、DC 結合で読み出し た場合、検出器容量 C_d のみである。

これらの要因で生じた検出器・読み出し回路系の全ノイズ *ENC*total は、各ノイズ成分の二乗平均で表され、

$$ENC_{total}(e^{-}) = \sqrt{ENC_{bias}^2 + ENC_{im}^2 + ENC_{lc}^2 + ENC_{amp}^2}$$
(2.9)

となる。エネルギー分解能を評価するときは、これらのノイズ成分の他に、検出 器で生成されるキャリア数の Poisson 揺らぎを考慮しなければいけない。

2.3 硬X線撮像観測システム

2.3.1 X線望遠鏡 HXT

NeXT 衛星に搭載される HXT (Hard X-ray Telescope) は硬 X 線領域で初めて集 光・結像を可能とする新しい望遠鏡システムである。宇宙観測において、望遠鏡 を利用することは、撮像観測を可能とするばかりではなく、その有効面積に対し 検出器面積を小さくすることできるので、signal/noiseの比がよくなり感度が飛躍 的に向上する。

10 keV 以下の軟 X 線を集光・結像する X 線望遠鏡は 1990 年代までに実現され たきた。しかしこれらの望遠鏡は、ニッケル、金、プラチナ、イリジウムなどの金 属を用いた全反射鏡である。X 線を全反射させるためには、鏡に対してほとんど平 行に近い角度で X 線を入射させなくてはならないが、10 keV 以上の硬 X 線に対し ては、この角度が 0.1 度程度となり、現実的な光学系を構築することができない。

そこで新しく開発が進められているのが、多層膜スーパーミラーである。多層膜 ミラーとは、X線反射に寄与する重元素層 (Pt,Ir) と、反射には寄与しないスペー サーとしての軽元素層 (C,Si) を 10^{A} 周期で積層したもので、結晶によるブラッグ 反射と同様の原理により、臨界角を超えた角度で入射する X線に対しても、実用 的な反射率を達成することができる (図 2.5)。反射の条件 (ブラッグ条件) は、X線 波長 λ 、周期長 d、入射角 θ 、ブラッグ反射次数 m として、

$$m\lambda = 2d\sin\theta \tag{2.10}$$

または、X線エネルギーを E として、

$$m \cdot \frac{12.39}{E(keV)} = 2d(\mathring{A})\sin\theta \tag{2.11}$$

と書ける。



図 2.5: 全反射鏡、多層膜ミラー、多層膜スーパーミラーの模式図

しかし周期長*d*を一定としたままでは、反射できるX線エネルギーにブラッグ 条件が制限を与える。そこで周期長の異なる多層膜を積み重ね、広いエネルギー 帯域で反射率をもたせたものが多層膜スーパーミラーである。多層膜望遠鏡は名 古屋大学のグループが実績をもち、開発を進めている。図2.6は全反射鏡、多層膜 ミラー、多層膜スーパーミラーの反射率の違いを表したものである。

NeXT 衛星に搭載される予定の望遠鏡 HXT は、Pt/C の組合せの多層膜スーパー ミラーである。高い反射率を達成するために焦点距離は 12 m と長く、伸展式光学 台 (EOB) により支えられる。表 2.3.1 に HXT の要求性能と目標性能を示す。

性能項目	要求性能	目標性能
有効面積	$500 \text{ cm}^2(30 \text{ keV})$	750 cm^2
エネルギー範囲	0.5 - $60~{\rm keV}$	0.5 - $80~{\rm keV}$
空間分解能	60 秒角 (HPD)	30 秒角 (HPD)
視野	8 分角 (30 keV)	8分角 ($30 keV$)

表 2.1: HXT の要求性能と目標性能



図 2.6: 全反射鏡、多層膜ミラー、多層膜スーパーミラーのエネルギー反射率の比 較 *θ* = 0.3 °

2.3.2 硬 X 線撮像検出器 HXI

硬X線撮像検出器 (Hard X-ray Imager: HXI) は、HXT の焦点面に置かれ、5-80 keV という広いエネルギー領域において撮像観測を行う。検出器は図2.7 に示す ように DSSD 数枚と CdTe ピクセル検出器からなるハイブリッド型であり、5 keV から 30 keV までのエネルギー領域を上方の DSSD が、10 keV から 80 keV までの エネルギー領域を CdTe ピクセル検出器が担当する。CdTe は硬 X 線領域まで、ほ ぼ 100%近い検出効率をもっているが、低エネルギー側にバックグラウンド光子を 作りやすい。そこで低エネルギー側は、原子番号の小さい Si (DSSD) を用いるこ とで、低エネルギー側のバックグラウンドを低くできる。Si (DSSD) は硬 X 線領 域ではほとんど吸収されず透明であるので、図 2.8 のように CdTe と滑らかな入れ 替わりが可能である。これにより、HXI は広い帯域で効率のよい検出ができる。

	原子番号	密度	比抵抗	バンドギャップ	ϵ
	Ζ	$[g/cm^3]$	$[\Omega cm]$	[eV]	[eV]
CdTe	48/52	5.85	1×10^9	1.4	4.43
CdZnTe	48/30/52	5.81	3×10^{10}	1.6	4.6
Si	14	2.33	1×10^3	1.12	3.61
Ge	32	5.33	1×10^2	0.72	2.98

表 2.2: CdTe,Si の基礎特性、比較のため CdZnTe,Ge についても記載した。 ϵ : 一対の電子・ホール対をつくるのに必要なエネルギー



図 2.8: Si と CdTe を重ねて用いた場合の検出効率

硬 X 線望遠鏡のもつ 8 分角の視野をカバーするために、DSSD / CdTe は 2 cm 四 方を超える検出器サイズが求められる。また、望遠鏡は HPD(Half Power Diameter) で 30 秒角の空間分解能をもつため、望遠鏡の焦点距離を 12 m として考えると、少 なくとも 2 mm 以下の位置分解能、すなわち 2 mm 以下のストリップ間隔が必要 となる (図 2.9)。さらに望遠鏡により結ばれる像の形を正確に捕らえて、天体の位置決定精度を高めるためには、3 - 5 秒角の空間分解能すなわち 250 µm 程度のストリップ間隔が求められる。



図 2.9: HXT による集光・結像の概略図 (ストリップ間隔) = 12 m × 30 秒角 ~ 2 mm

DSSD は撮像の他にも、天体からのエネルギースペクトルを取得することができ る。スペクトル中に現れる輝線や吸収線により、天体や天体周辺の元素組成を知る ことができ、またそれらのドップラーシフトを調べることにより、X線を放射・吸 収する物質の運動速度を求めることもできる。これらを精度よく調べるには、検出 器のエネルギー分解能が優れていることが条件になる。さらにエネルギー分解能 が優れていることは同時に、検出できるX線エネルギーの下限を決める threshold level が低いことを意味するので、検出器のエネルギー帯域を広げることにもつな がる。表 2.3.2 に HXI の要求性能を示す。

性能項目	要求性能
エネルギー範囲	5 - 80 keV
エネルギー分解能	< 1.5 keV (FWHM, 60 keV)
検出器視野	5 × 5 分角以上
検出器 BGD	1 - 3 × 10 ⁻⁴ cts s ⁻¹ cm ⁻² keV ⁻¹ 以下

表 2.3: HXIの要求性能

10 keV を超える硬 X 線領域では、宇宙線が直接検出器と反応したり、衛星や検 出器周辺で反応を起こした結果生じる 2 次 X 線などによるバックグラウンド (Non X-ray Background) が検出器の感度を決定する。そこで HXI では低バックグラウ ンド化を実現するため、「すざく」衛星 HXD で性能が実証された BGO 井戸型シー ルドが採用される。BGO シールドは阻止能に優れているため、視野外から侵入す る X 線やガンマ線、宇宙線の数を制限する。さらにシールド自身をアクティブに し、検出器との反同時計数をとることで、シールドや検出部からのコンプトン散 乱イベントや放射化イベントについても除去することができる。



図 2.10: 100k 秒の観測時間において、HXI(CdTe)で期待される感度と、過去の衛星に搭載された検出器の感度との比較。縦軸はどの程度の明るさの天体まで検出できるかを表す。(左)連続スペクトルに対して(右)ラインX線に対して。

2.3.3 DSSD/CdTeの開発の経緯

DSSD は素粒子実験のため開発され、現在でも広く使用されているが、HXI に 用いられるような、高いエネルギー分解能をもつ検出器は実現されてこなかった。 そこで宇宙研 (JAXA/ISAS)、広島大学、SLAC、浜松ホトニクスにより共同で、 低容量で高位置分解能、高エネルギー分解能をもつDSSDの開発が進められた。開 発はまず半導体多層コンプトンカメラに用いる DSSD について進められた。コン プトンカメラの空間分解能は、検出器のエネルギー分解能によって決められるの で、用いる DSSD は特に低雑音であることが要求される。さらに昨年夏ごろには、 HXI に用いるための、ストリップ間隔の狭い撮像用 DSSD が初めて製作された。 現在では製作技術はほぼ確立していて、エネルギー分解能が 1.5keV 以下の DSSD を作ることは容易になった。開発は、浜松ホトニクスの4インチウエハー上に複 数の検出器素子を同時にレイアウトして製作するマルチジョブ方式で行われ、素 子一種類あたりの開発コストを下げる工夫がなされた。 CdTeは比較的大きな原子番号 (Z=48/52)をもち、NaIシンチレーターをしのぐ 高い検出効率をもつ。1970年代から精力的に開発研究が進められたが、大面積で 一様な結晶をつくるのは困難であり、電荷転送においても問題があったため、し ばらくは現実的な検出器として実現されなかった。最近ようやく国内外で、実用 可能な CdTe 検出器がつくられるようになり、新しい半導体材料として注目され ている。宇宙研/ACRORAD 社により開発された CdTe 検出器は、単結晶 CdTe ウ エハーの Te 面にインジウム電極を蒸着したものを陽極として用い、陰極にはプラ チナ電極がメッキされている。CdTe は塩素を用いて補償された P 型半導体であ り、インジウム電極との間に高いショットキー障壁をもたらす。これがダイオード としての特性をもち、X 線検出が可能となる。こうして製作された ACRORAD 社 の CdTe 検出器は、非常に高いエネルギー分解能を達成し、HXIの要求を十分満 たすものとなった。

第3章 撮像用DSSDの基礎特性評価

3.1 撮像用 DSSD の特徴

昨年夏、新しく撮像用の 3.4 cm角 DSSD が浜松ホトニクスにより製作された。 DSSD を撮像用として用いる場合、ストリップ間隔が直接ピクセルサイズを決め る。そのためコンプトンカメラなどに用いる DSSD に比べて、ストリップ間隔は 狭く、ストリップ本数は多くなってるのが特徴である。表 3.1 cm角 DSSD の仕様をまとめた。p-stop は n⁺ ストリップを囲うようなリング状の構造であり、 Al 電極は p⁺/n⁺ ストリップ上に直接取り付けられている。

表 3.1: 3.4 cm 角 DSSD の仕様

本体サイズ	: 3.4 cm \times 3.4 cm
本体厚さ	: 300 μm
ストリップサイズ	: 3.16 cm \times 130 $\mu \rm{m}$
ストリップ間隔	: 250 μm
片面チャンネル数	: 128 本
ボンディングパッドサイズ	: 300 $\mu \mathrm{m}$ \times 100 $\mu \mathrm{m}$
Al電極幅	: 150 $\mu {\rm m}$
Nside P-stop 幅	: 25 μm



図 3.1: 3.4cm×3.4cm 撮像用 DSSD



図 3.2: 撮像用 DSSD のレイアウト図 (左) Pside (右) Nside 赤丸で囲んだ部分の 拡大図を図 3.3 に示す。



図 3.3: Nside ボンディングパッド周辺の拡大図。n-strip の周囲を幅 25 µm の p-stop で囲んでいる

3.2 リーク電流測定

DSSD の Pside 128 ch のほぼ中央に位置する ch 55 について、バイアス電圧を変 化させながら1ストリップ当りのリーク電流を測定した。ch 55 は、境界条件が他 と異なる両端のストリップ以外から無作為に選んだものである。セットアップを 図 3.4 に示す。測定は微小電流計 Keithley 617(東陽テクニカ)を用い、20、10

、0 、-10 の温度の下で行った。

測定結果を図 3.5 に示す。60 V を超えた付近から、リーク電流は一定値をとる。 これは60 V の逆バイアスで素子が完全空乏化していることを表している。一般的 な半導体ダイオード検出器には、逆バイアス電圧がある値を越えたとき、リーク 電流が急激に増加するという降伏現象(なだれ降伏 or ツェナー降伏)がみられる。 降伏現象により素子が破壊されることがあるので注意が必要であるが、測定を行っ



図 3.4: リーク電流測定セットアップ

た0~300 Vではこのような現象は見られなかった。

図 3.6 は 10 V、50 V、100 V におけるリーク電流の温度依存性を示したものであ る。リーク電流の対数値が温度の逆数に比例するのは、一般的な半導体デバイスの 特徴である。グラフの傾きから式 (2.1)を用いて計算した Siのエネルギーギャップ E_g は 1.26 eV 程度であり、実際の値 1.12 eV とおおよその一致が見られる。リー ク電流はバルクで熱的に励起される電子によるものであるから、単純にはバルク の体積に比例した値になると考えられる。実際に多チャンネル読み出しを行う -10

、100 V でのリーク電流値は、12.8 pA であり、この値は用いた DSSD のサイズ から考えて妥当なものであった。



図 3.5: 1 ストリップ当りのリーク電流のバイアス依存性



図 3.6:1ストリップ当りのリーク電流の温度依存性

3.3 容量測定

DSSD がもつ容量には、2.2.2 で述べたように Body Capacitance と Inter-strip Capacitance があるが、これらについてバイアス電圧依存を調べた。測定には容量 計測器 HP4284A を用いた。この計測器では検出器に送る正弦波と、通り抜けてき た正弦波とを比較し、インピーダンス Z と波の位相のずれθから検出器の容量成 分を求めることができる。DSSD は容量成分の他に抵抗成分をもつので、測定に は容量・抵抗並列モードを用い、入力周波数は1 MHz とした。測定セットアップ は図 3.7 のとおりである。Inter-strip Capacitance は Pside セットアップのみを描 いたが、Nside も同様である。



図 3.7: (左)Body Capacitance 測定用セットアップ (右)Pside の Inter-strip Capacitance 測定用セットアップ

図 3.8 は Body Capacitance の測定結果である。60 V まではバイアス電圧が大き くなるにつれて空乏層が広がり、容量が減少していくのが分かる。60 V を超えた あたりから、容量は一定値をとるようになるが、これはバルクが完全空乏化して いることを示す。100 V での容量値 *C*_{body.total} は 337.4 pF であり、DSSD を平行平 板コンデンサとみなして計算した値

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} = 1.05 \times 10^{-10} [F/m] \times \frac{(31.6mm)^2}{300\mu m} \sim 349 \ [pF]$$
(3.1)

とよく合っている (2.2.2 参照)。

Inter-strip Capacitance の測定結果は図 3.9 に示した。Pside は完全空乏化する 60V 以降で一定値 $C_{interstrip(P)}$ をとり 4.8 pF である。Nside は 60 V を超えてもす ぐに一定値をとらず、バイアス電圧の増加に伴い徐々に容量を落としている。これ は n⁺ ストリップを囲んでいる P⁺-stop の形状に強く関連した現象である。Nside の 100V での容量 $C_{interstrip(N)}$ は 7.0 pF であり、構造がシンプルな Pside よりも大 きな値をとる。このことから Nside よりも Pside でより良いエネルギー分解能が達 成できると予想できる。

以上の測定から、バイアス電圧 100 V における P / Nside の全容量は、

$$C_{total} = \frac{C_{body.total}}{n_{strip}} + C_{interstrip(P/N)}$$
(3.2)

$$= \begin{cases} \frac{337.4pF}{128} + 4.8pF \sim 7.4 \ [pF] & (Pside) \\ \frac{337.4pF}{128} + 7.0pF \sim 9.6 \ [pF] & (Nside) \end{cases}$$
(3.3)

となる。ここで n_{strip} とは片面のストリップ本数であり、今回のDSSDでは 128本である。p-stop 構造をもたない Pside の容量について、経験式 (2.2)~(2.4)を用いて計算すると、7.4 pF となって実測値と一致した。



⊠ 3.8: Body Capacitance



⊠ 3.9: Inter-strip Capacitance

3.4 スペクトルの取得

Pside / Nside の1 ch 読み出しによるエネルギースペクトルの取得を行った。読 み出したチャンネルは、Pside ch55、Nside ch77 であり、両方とも全体のほぼ中央 に位置するストリップである。用いた線源は²⁴¹Am であり、放射する X 線エネル ギーは低いほうから 13.9 keV、17.6 keV、21.0 keV、26.3 keV、59.5 keV である。 読み出しセットアップを図 3.10 に示す。P / N のいずれから読み出す場合も、Pside のストリップを GND に落とし、Nside ストリップには GND に対し+100V の電圧 をかけた。このとき読み出しストリップと、その他の周辺のストリップは同電位 になるようにしている。測定時は DSSD、PreAmp までを恒温槽の中に入れ、-10 に保っている。使用したモジュールは以下にまとめた。

表 3.2: 1ch 読み出しに用いた機器

PreAmp	:	CLEAR-PULSE 5102
Shaping Amp	:	CLEAR-PULSE 4417
ADC/MCA	:	Amptek MCA8000A
Bias supply	:	CLEAR-PULSE E6625

取得した P / Nside のスペクトルを図 3.12 に示す。Pside の ²⁴¹Am 59.5 keV に おけるエネルギー分解能は FWHM (Full Width Half Maximum) で 1.3 keV であ リ、目標値を達成している。測定したリーク電流と容量から予想されるエネルギー 分解能は 1 keV 程度であるので、用いた CSA や Shaping Amp から余分にノイズが のっていると考えられる。検出できる X 線エネルギーの最低値を決める threshold level は 5 keV 以下となっていて、これも HXI の要求を満たしている。5 ~ 10 keV や 30 ~ 55 keV あたりにもカウントがあるが、これらは隣り合うストリップや周 辺部と信号電荷を分け合ったイベントや、コンプトン散乱イベントであると考え られる。

Nside でよい分解能が出ないのは今に始まったことではないが、²⁴¹Am 59.5 keV でのエネルギー分解能が FWHM 3.1 keV、threshold level も 5 keV を上回るという 好ましくない結果である。DSSD を撮像素子として使用する場合、2 次元検出が必 要であるから、HXI の要求帯域 5 - 80 keV を実現するためには、Nside の threshold level を 5 keV 以下に下げることが必要である。

Nside のエネルギー分解能悪化は Inter-strip Capacitance が大きいことが主な 原因であると考えられるが、測定した容量から予想される分解能 ~1.5 keV より もずっと悪い。この 1ch 読み出しでは AC 結合された PreAmp を用いているが、 PreAmp 内のカップリングコンデンサの値は 1000 pF 程度であるので電荷収集効 率は 95%以上あり、エネルギー分解能悪化にはそれほど影響していないと思われ る。今後、この結果について詳細な評価が必要であるが、次章の Floating システ



図 3.10: 1 ch 読み出しセットアップ (上)Pside (下)Nside



図 3.11: 1 ch 読み出しセットアップ。DSSD はガラスエポキシを用いて製作した治 具で固定してある

ム (Pside / Nside ともに DC 結合で読み出せる) と、低ノイズアナログ LSI を用い た多チャンネル読み出しで、どれだけ良いエネルギー分解能を出せるかが、本研 究で最も重要なポイントになる。



図 3.12: 取得した Am241 のエネルギースペクトル (上)Pside (下)Nside

3.5 今後の撮像用 DSSD 開発

今回の測定により、エネルギー分解能悪化に大きく影響するのは、リーク電流 ではなく容量であることが分かった。低温下(-10)で検出器を動作させた場合、 リーク電流がエネルギー分解能悪化にもたらす影響は、全体の高々数%である。よっ て今後新しく DSSD を開発する際には、できるだけ容量を小さくするような工夫が必要である。

まずはBody Capacitance であるが、これは平行平板コンデンサで良く近似でき ることが確認された。よってDSSDの厚みを増すことでBody Capacitanceの値を 下げることが可能である。さらにDSSDの厚みを増せば、検出領域(空乏層)の厚 みも増すので、高エネルギー側でのX線検出効率も上がり有利である。なお現在 コンプトンカメラ用の0.5 mm 厚 DSSDの評価が別に進められており、正常に動 作することが確認されている。

次に Inter-strip Capacitance であるが、これは主にストリップ幅、ストリップ間 隔に依存し、経験式 (2.2)~(2.4) で表される。しかし今回のような撮像用 DSSD の ストリップ幅、ストリップ間隔は、硬 X 線望遠鏡の性能を最大限引き出すように デザインされているため、容量を下げることだけを考えて、安易にデザインを変更 することはできない。新しい DSSD の開発には、まず使用目的を考えた上で、経 験式 (2.2)~(2.4) を生かしたストリップデザインが要求される。

第4章 DSSD多チャンネル読み出し

4.1 従来の方法とその問題点

従来はDSSDの多チャンネル読み出しに、IDEAS 社により製作された VADAQ と呼ばれる汎用データ取得システムを利用していた。VADAQ はパラレルポート を介して PC と接続し、LabView による付属の制御ソフトウェアを用いて、パラ メータの調整やデータの取得を行う。しかし VADAQ は、そのサイズ、消費電力、 データ転送速度などの面から衛星への搭載は難しい。もともと VADAQ は衛星へ の搭載を考慮して開発されたものではないのである。

さらに VADAQ を用いる場合、P/Nside のどちらかを、AC 結合で読み出さな ければならない (DSSD の場合、Pside を DC 結合で、Nside を AC 結合で読み出 すことが多い)。そのため従来は読み出すストリップと、CSA を含むアナログ LSI の間に RC-chip を用いて AC 結合していた (図 4.1)。RC-chip とはシリコン基板表 面に、バイアス抵抗 R_{bias} と、カップリングコンデンサ C_c を実装したものである。 RC-chip はその構造上、カップリングコンデンサ以外にも、容量 C_{rc} をもつ。



図 4.1: AC 結合の等価回路。RC-chip を用いている。

DSSD で生成された信号電荷は、AC 結合の場合、これらの容量 C_c 、 C_{rc} と検出 器容量 C_d に分配されるので、CSA の電荷収集効率は、

$$\rho = \frac{C_c}{C_c + C_d + C_{rc}} \tag{4.1}$$

となる。 C_d 、 C_{rc} はともに数 pFのオーダーであるから、もし C_c を数 1000 pF 程度 の大きな値にできるなら、電荷収集効率 ρ は1に近くなり問題ない。しかし RC-chip に実装できる C_c の容量は数 10 pF 程度のため、電荷収集効率は悪くなる。過去の 典型的な ρ の値としては \sim 0.7 程度で、Nside のエネルギー分解能の著しい悪化は、 避けられなかった。さらに RC-chip は衛星への搭載を考えたとき、高密度実装の 弊害にもなる。

これらの理由から VADAQ の利用には限界があり、衛星への搭載を強く意識した、新しい読み出しシステムが必要となった。

4.2 Floating 読み出し

4.2.1 システム概要

新しい読み出しシステムとして JAXA/ISAS、クリアパルスにより開発されたの が、Floating 読み出しシステムである。この方法では RC-chip を用いず、P/Nside 両方から DC 読み出しが可能になるため、従来にくらべて Nside で飛躍的にエネ ルギー分解能が向上すると見込まれる。

図4.2がFloatingシステムの概略図である。DSSDからの信号はFEC (HT-4A:MHI 三菱重工業) に搭載された VA64TA (VA64TA2:IDEAS) に入る。VA64TA には 64 ch 分の初段読み出し回路が実装されている。その後 TKD Card (ST-4:MHI) を介 して、ADC が搭載された IFC (80038:CLEAR-PULSE) に入る。出力されたデータ は I/O Card を経由して VME-DP (80057:CLEAR-PULSE) で処理された後、PC に転送される。このように全ての読み出し回路を一つの基板にまとめず、役割ご とにモジュール化する工夫を行っている。これにより他の検出器を用いる場合で も最小限の変更で対応でき、開発コストの削減につながる。各部の詳細について は後で述べることにする。

従来の VADAQ を用いたシステムでは、VA64TA やその他の回路、バイアスの GND を全て共通にする必要があった。そのため 100 V のバイアスをかける Nside で は、RC-chip を用いて AC 結合する以外読み出しの方法がなかった。新しい Floating システムでは、Nside の VA64TA、FEC、TKD Card、IFC の GND を、DSSD に 印加する電圧と同じ 100V で統一する。この方法により Nside は GND 100 V の下 で、DC 読み出しすることができるようになる。Pside は従来と同じように、GND 0 V の下で読み出す。IFC と I/O Card の通信はフォトカプラを用いるため、IFC 以 降は P / Nside は同じ GND をとることができる。フォトカプラは発光素子と受光 素子からなり光によって信号を伝達するので前後は電気的に絶縁される。VA64TA は、自身の GND に対して+1.5 V と-2.0 V の動作電圧があれば、正常に動作する ので V_{dd} +101.5 V、 V_{ss} -98.0 V を入力する。

Nside の GND 100 V は、電源ケーブルと回路上の配線だけでとられるので、こ の孤立した GND をいかに安定させられるかが重要である。また読み出し回路にお ける深刻なショートは、検出器全体の故障につながるので注意が必要である。



図 4.2: Floating システム

4.2.2 VA64TA

一般にDSSDからの読み出しチャンネルは、片面100chを超えることも多い。衛 星への搭載を考えると、これらのチャンネルすべてに、単体の CSA、Shaping Amp などの読み出し装置を用いることは、スペース、消費電力などの面から現実的でな い。そこで DSSD 読み出しには、多チャンネル読み出し可能なアナログ LSI が用い られる。アナログ LSI として要求されることは、コンパクトであること、低消費電 力であること、低ノイズであることなどである。本研究では、ノルウェーの IDEAS 社、JAXA/ISAS、SLAC により開発された VA64TA と呼ばれる LSI を用いる (図 4.3)。VA64TA は近年よく用いられている 32ch 読み出し LSI である VA32TA を拡 張したもので、サイズ 6.985 mm × 6.020 mm、厚さ 725 μm と、非常にコンパクト でありながら、64 ch 分の初段読み出し回路を備えている。さらに1 ch 当りの消費 電力は、250 μW と非常に低電力になっている。この値は VA32TA の消費電力 (1 ch 当り 6.3 mW) を大きく下回る。VA64TA の読み出し回路は、VA part と TA part の2つの系統に分けられる (図 4.4)。VA part では CSA、Slow Shaper、Sample & Hold 回路により ADC に入力するための信号を生成し、64 ch Multi-Plexer を用い て出力する。TA part では Fast Shaper、Discriminator により、トリガ信号を生成 する。VA64TAの各種パラメータはPCから送られる 360 bit シフトレジスタの値 により調整される (図 4.5)。



図 4.3: VA64TA、 DSSD からワイヤーボンディングされている。DSSD は片面 128 ch あるため、Pside に 2 つ、Nside に 2 つ用いる



図 4.4: VA64TA のブロック図

検出器と CSA を DC 結合した場合、検出器からのリーク電流が大きいと、直接 CSA に流れ込んでノイズの原因になることがある。そこで VA64TA には、リーク 電流と同じ電流値を、CSA のフィードバック抵抗に逆向きに流すことで、リーク 電流の影響をキャンセルする電流補償機能が備えられている。

また、宇宙空間で LSI を使用する場合は、宇宙線の飛来によりレジスタのビットが反転し、誤った情報に書き換えられる SEU (Single Event Upset) が起こり得る。これを防止するために、1bit につき 3 つのレジスタを設け、多数決判断をする方法をとっている。



図 4.5: VA64TA のレジスタ設定シーケンス

4.2.3 FEC

FEC (Front - end Card) には、VA64TA が2つ搭載され、DSSD からワイヤボ ンディングで接続される。その他に、VA64TA にアナログ電圧、デジタル電圧を 与えるために用いるバイアス抵抗やフィルタ、テストパルスの電圧値を電荷量に変 換するためのコンデンサなどが実装されている。後段の IFC に 34pin の Half-pitch Flat-cable を用いて接続される。

01	GND	13	Hold-b	24	Tb
02	Clkin	14	Hold	25	Cal
03	Regin	15	GND	27	Vfp
04	Regout	16	AVDD	29	mbias
05	Readback	17	AVSS	30	Vthr
06	Shift-out-b	18	AVSS	31	GND-ref
07	Load	19	Outp	34	GND
08	Dreset	20	Outm		
09	Ckb	21	GND		
10	Ck	22	Seub		
12	Shift-in-b	23	Ta		

表 4.1: FEC - TKD Card ピンアサイン

4.2.4 TKD Card

先の FEC は MHI (三菱重工業) によって製作され、後段の IFC、I/O Card は クリアパルスによって製作された。そこでこれらを仲介する Card が必要になり、 TKD Card がつくられた。VA64TA を動作させるために必要な電圧 V_{dd} +1.5V、 V_{ss} -2.0V は、ここから供給される。また VA64TA の動作には mbias 500 μ A が必 要である。この mbias や V_{thr} 、 V_{fp} 、Cal の値を微調整するための 4ch デジタルポ テンショメータも搭載してある。

01	HOLD	15	SHIFTIN	29	AVDD
02	HOLD-B	16	SHIFTIN-B	30	AVDD
03	DRESET-B	17	SHIFTOUT	31	AGND
04	DERESET	18	SHIFTOUT-B	32	AGND
05	CK-B	19	REGOUT	33	AVSS
06	CK	20	TESTP	34	AVSS
07	TRIG	21	DEVERR-B	35	SIGGND
08	OCRET	22	OCRET	36	SIGGND
09	OCRET	23	DVDD	37	OUTP
10	READEND-B	24	DVDD	38	OUTM
11	REGIN	25	DGND	39	SIGGND
12	READBACK	26	DGND	40	SIGGND
13	REGCK	27	DVSS		
14	REGCS	28	DVSS		

表 4.2: TKD Card - IFC ピンアサイン

4.2.5 IFC

IFC (Inter-face Card)には、12bit ADC が備えられている。VA64TA から差動 電流出力されたアナログ信号は電圧値に変換され、この12bit ADC で AD 変換さ れる。後段の I/O Card との通信にはフォトカプラが用いられる。4本の単線によ るデジタル信号の高速通信が可能であり、これにより IFC と I/O Card は電気的に 絶縁される。また IFC には FPGA が装着さていて、I/O Card からの命令を受け、 FEC のレジスタ設定シーケンスや VA64TA の読み出しシーケンスを実行する。

表 4.3: IFC - I/O Card ピンアサイン

SDI	IFC へのデータ入力
SCK	IFC へのクロック入力
SDO	IFC からのデータ出力
TRIG	IFC からのトリガ出力
VL	電源 +3.3 V or +5 V
VLRET	電源 0 V

4.2.6 I/O Card

IFC と後段の VME-DP(Data Processor) との接続に I/O Card が用いられる。 I/O Card には、ワンショット回路、FPGA が実装され、トリガ入力を受けて FEC の HOLD タイミングを生成し、IFC 読み出しシーケンスを IFC に送る。また、読 み出したデータの高速差動シリアル通信での DP への転送、DP からのコマンドの IFC への送信などを行う。



図 4.6: 読み出しセットアップ

4.3 読み出しの流れ

読み出しの流れを図 4.7 に簡単にまとめた。まず DSSD に X 線が入射し、空乏層 で生成されたホール/電子群がそれぞれ P / N ストリップに回収される。回収され た電荷は VA64TA に搭載された CSA に入力され、電圧値に変換された後、Fast-Shaper、Slow-Shaper で波形整形される。Fast / Slow -Shaper は波形整形の時定 数が異なるため、Gaussian のピークが立つまでに要する時間が異なる。

先にピークが立つ Fast-Shaper で整形された信号は、Discriminator において、ある決められた電圧値 V_{th} と比較される。もし入力された信号が V_{th} よりも小さければノイズであるとみなし、そのイベントは捨てられる。もし V_{th} よりも大きければ Discriminator を通過した後、Pside 全 128 ch で OR され、TA トリガが出力される。TA トリガは P / Nside どちらから生成することも可能である。

出力されたトリガは、PsideのI/O Card 上にある FPGA に取り込まれる。Pside の FPGA は、ある遅延をかけて Pside の全チャンネルを Sample Hold する命令を Pside の VA64TA に送る。それと同時に Nside の I/O Card にトリガを送る。トリガ を受けた Nside の I/O Card 上にある FPGA は、直ちに Nside の VA64TA に Nside 全チャンネルを Sample Hold する命令を送る。ちょうどそのころ Slow-Shaper に入 力された波形整形された信号がピークをむかえているので、これにより Slow-Shaper で整形された波形は、P / Nside 全チャンネル同時に Peak Hold される。

Hold された信号は、その後 I/O Card からの読み出しクロックに同期して、Multi-Plexer から 1 ch ずつ差動電流出力される。この差動電流は IFC 上で順に電圧値に 変換された後、12bit ADC に入力され AD 変換される。ここから出力されるディ ジタルデータは、I/O Card を経由して VME-DP(CP80057 PMT-Data Processor) に送られる。VME-DP は送られてきたデータを処理した後、VME BUS を通して PC などへ転送する。最終的に得られるデータは 1 ch 当り 16 bit + ヘッダ 16 bit の計 32 bit に詰め込まれていて、前の 16 bit には ADC 出力の波高値が、ヘッダ 16 bit にはチャンネル番号などのデータ自身に関する情報が書き込まれている。ま た、VA64TA 上での CSA フィードバック抵抗値 V_{fp} や Discriminator の V_{thr} など、 各種パラメーターの設定は全て、PC 上でレジスタ値を設定したプログラムを実行 することにより行う。



図 4.7: 読み出しの流れ

4.4 装置の組み立て

既存のデータ取得システムに頼らない今回の新しい読み出しシステムでは、DSSD 1枚と各モジュールから出発して、検出器全体を組み上げなければいけない。始めに VA64TA が搭載された FEC が正常に動作するかを、IDEAS 社の VATA Controller を用いてテストした。VATA Controller は VADAQ と同様の汎用データ取得シス テムであり、衛星に搭載する読み出しシステムには不向きであるが、このような FEC(VA64TA)の動作テストに対しては非常に便利である。FEC にテストパルス を入力し、全チャンネルについて正常に出力されていることをオシロスコープで 確認した。また各チャンネルのノイズレベルを調べ、正常な値であることを確認 した。

次にDSSDのストリップ上にあるパッドから、FEC に搭載された VA64TA への ワイヤボンディングを行った。チャンネル数は Pside 128、Nside 128 の合計 256本 である。VA64TA はそのチャンネル数の多さから、ボンディングパッド間のピッチ が 91.2 µm と非常に狭い。そのため隣り合うパッドとショートしないように、慎 重なボンディングを行う必要があった。VA64TA にはガードリングを落とすため の GND 用パッドが用意されていないため、FEC の横に銅テープを張り付け、こ こにガードリングを落とすことにした。この銅テープは後で TKD Card の GND ピンとケーブルで接続する。DSSD と FEC は、ガラスエポキシを材料に製作した 治具により固定してある (図 4.8、4.9)。



図 4.8: DSSD と製作した治具の構造



図 4.9: (左) 治具を重ねて DSSD を固定している様子。逆サイドも同様にして FEC を治具に固定する。(右) DSSD から VA64TA へのボンディングの詳細

その次にピンアサインに注意しながら、各モジュール (FEC、TKD Card、IFC、



図 4.10: 実物の治具とボンディングの様子

I/O Card) を接続した。Pside と Nside の I/O Card は互いにトリガをやりとりす るので、直接ケーブルでつなげられるように配線を施した。これらのモジュール、 DSSD を支える治具などは全て、振動対策としてネジでケースに固定してある。 ケースは厚いアルミのものを選び、外来ノイズからシールドするようにした。

VA64TA に供給する電圧は、0 V (Pside) または 100 V (Nside) の GND に対して V_{dd} +1.5 V、V_{ss} -2.0 V を正確に与える必要があるので、安定した電源が必要であ る。そのためにアルカリ乾電池 (fresh Glay 単1型 MITSUBISHI)を用いて GND、 GND ± 6.0 V の電位差を与える電源装置をつくり、3 端子レギュレータ (正電圧 LM317、負電圧 LM337: National Semiconductor 社)を用いて、安定した動作電 圧が供給されるようにした (図 4.11)。レギュレータは入力電圧が多少変動しても、 出力電圧を一定に保つことができる。出力電圧の値は回路内の可変抵抗の値を変え ることで調整できるが、おおよそ GND ± 3 V になるように調整して、TKD Card に入力した。入力された GND ± 3 V の電圧は、TKD Card のデジタルポテンショ メータで適切な値 V_{dd} +1.5 V、V_{ss} -2.0 V に調整され、VA64TA に供給される。 なおフローティング電圧の 100 V は、電源装置 KEITHLEY237 (東陽テクニカ) に より与えた。全体の読み出しセットアップを図 4.12 に示す。



図 4.11: レギュレータ回路と Floating の方法。Pside と Nside のレギュレータ回路 は同じもの。



図 4.12: 全体の読み出しセットアップ

4.5 多チャンネル読み出しの結果

4.5.1 外部トリガによる読み出しシーケンスの実行

実際にスペクトルの取得を行うときは、P or Nside の VA64TA で生成される TA トリガにより読み出しシーケンスを開始するが、ここでは VME-DP からの外部ト

リガにより読み出しシーケンスを開始させ、データを取得した。線源を何も当てず にデータを取得することで、無信号状態でのノイズレベルを調べることができる。 図 4.13 は室温 (15) で 200 イベント取得したものであり、上からペデスタル、 ノイズレベル、Pside-ch10 のスペクトル、Nside-ch138 のスペクトルである。Psidech10 と Nside-ch138 は各サイド両端のストリップを除いて無作為に選んだもので ある。ペデスタルとは ADC チャンネルの零点からのずれ (オフセット) であり、各 チャンネルで決まった値をもつ。ノイズレベルは各チャンネルの無信号スペクト ルを Gaussian でフィットしたときの半値幅で表される。ペデスタルとノイズレベ ルの横軸はチャンネル番号であり、中央から左寄りは Pside のチャンネル、右寄り は Nside のチャンネルを表している。

当初は図 4.13 よりも高いノイズレベルを示していたが、Pside の GND と Nside の GND の間にバイパスコンデンサを入れることで、両サイドともにノイズレベル が半減した。その後、検出器を恒温槽の中で-10 まで冷やしたところ、リーク電 流は減少するにも関わらず、ノイズレベルが大きく減少することはなかった。こ れは DSSD の潜在的なノイズではなく、読み出し系が拾う外来ノイズが支配的に なっていることを示唆する。今後詳細にノイズ源を調べ、ノイズレベルを下げる ことが必要である。

4.5.2 TA トリガによるスペクトルの取得

次にVA64TA からのTA トリガにより読み出しシーケンスを開始させ、10万イ ベントのデータを取得した。Pside からのTA トリガ出力がうまくいかなかったの で、ここではNside からTA トリガを出力することにした。Nside はPside よりも threshold level が高いため、Nside からTA トリガを出力する場合、低エネルギー側 でのイベントに対してトリガ出力ができなくなる。最終的には原因を調べ、Pside からTA トリガを出力させる予定である。線源は²⁴¹Am (13.9 keV, 17.6 keV, 21.0 keV, 26.3 keV, 59.5 keV)を用い、温度は -10 の下で行った。

図4.14は、取得したデータをそのままスペクトルにしたものである。Pside 128ch、 Nside 128ch の合計 256ch について正しく読み出しが行われていることを確認で きた。

次に図 4.14 のスペクトルから、ペデスタルの補正と、コモンモードノイズの除 去を行った。ペデスタルとは前章で述べたとおり、各チャンネルで決まった値をも つ零点からのずれ (オフセット) である。コモンモードノイズとは、あるチャンネ ルでイベントが起こったときに、その影響で同じ VA64TA 上にある全チャンネル が同相で揺らぐために生じ、各イベントごとに、全チャンネル (同じ VA64TA チッ プ上) で共通の値をもつ。

これらの作業を行う前後のスペクトルとして、Pside ch48 を図 4.15 に、Nside ch189 を図 4.16 に示す。左が取得したデータをそのままスペクトルにしたもので あり、右がペデスタルの補正、コモンモードノイズの除去を行ったあとのスペクト



図 4.13: 外部トリガにより取得した 200 イベントのデータ。上からペデスタル、ノ イズレベル、Pside-ch10 のスペクトル、Nside-ch138 のスペクトル。

ルである。補正後は ADCch 0 の位置にあるノイズのカウントがきれいな Gaussian になっている。

ADCch250 辺りにあるカウントが²⁴¹Am の 59.5 keV である。DSSD(Si) は 59.5 keV の高エネルギーのX 線に対しては、検出効率が非常に低いため数イベントし か捕まらない結果となった。検出効率の高い 13.9 keV, 17.6 keV, 21.0 keV, 26.3 keV は、今の段階ではノイズに埋もれて全く確認することができない。エネルギー 分解能は²⁴¹Am 59.5 keV に対し、Pside 9 keV 程度 (FWHM)、Nside 14 keV 程度 (FWHM) であり、threshold level は Pside 17 keV 程度、Nside 36 keV 程度である。



図 4.14: 取得したデータをそのままスペクトルにしたもの。Pside 128ch、Nside 128ch の合計 256ch のスペクトル。

読み出しのシステムから考えると3章の1ch 読み出しよりも優れた結果がでると期待できるので、今後徹底したノイズ除去を行い、threshold level(目標値: P/Nside ともに5 keV 以下)の確認、エネルギー分解能(目標値: P/Nside ともに1.5 keV 以下)の評価などをしなければいけない。



図 4.15: Pside ch48 のスペクトル (左) 取得したそのままのデータ (右) ペデスタル の補正、コモンモードノイズの除去を行ったもの



図 4.16: Nside ch189 のスペクトル (左) 取得したそのままのデータ (右) ペデスタ ルの補正、コモンモードノイズの除去を行ったもの

第5章 まとめと今後

本研究では、昨年新しく製作されたストリップ間隔が狭く、ストリップ数の多 い 300µm 厚 DSSD についての性能評価を行なった。まず DSSD の基礎特性として リーク電流と容量を測定し、DSSD のサイズやストリップデザインに対して妥当 な値であることを確認した。さらに P / N の各サイドについて単体の PreAmp、 Shaping Amp、ADC/MCA を用いて 1 ch 読み出しを行ない、²⁴¹Am のスペクト ルを取得した。エネルギー分解能は²⁴¹Am の 60 keV に対し Pside 1.3 keV、Nside 3.1 keV であった。Nside で若干ノイズレベル高かったものの、HXI の要求性能を おおよそ満たす素子であることを確認した。

次にDSSDの多チャンネル読み出しに向けてセットアップの組み立てを行なった。本研究では既存のデータ取得システムを用いず、Floating バイアス式の新しい読み出しシステムを用いたため、DSSD と VA64TA 間のワイヤボンディングから始め、モジュールの組み立てなどの全てを行なった。Floating 読み出しシステムは、過去に数例しか行なわれていない新しい技術であるため、手探りで進む状況であったが、多チャンネルで読み出すことに成功した。しかしノイズレベルが非常に高く、DSSD の性能を評価できる状況には至っていない。

今後は、継続してこの研究テーマを続ける予定である。まずは徹底したノイズ対 策が必要である。今の時点ではノイズ源は不明であるが、ケーブルの配線など読み 出しセットアップについて、もう一度見直す必要がありそうである。また VA64TA の各種設定値が適切でないために、信号がノイジーになっている可能性があるの で、パラメータの調整をしっかりと行う必要がある。ノイズレベルが低下した後 は再度スペクトルを取得して、エネルギー分解能などの評価を行なう。さらに取 得したスペクトルからイメージを作成して、位置分解能などDSSDの撮像素子と しての性能を評価したい。

謝辞

まず M2 の安田さんに心から感謝します。安田さんには DSSD の研究が始まっ た当初から実験方法など細かく教えて頂き、出張中は生活の世話までして頂きま した。ありがとうございます。大杉先生には DSSD の基礎特性について教えて頂 き、また宇宙の多波長観測に向けて、素晴しい研究室の土台を用意して頂いたこ とに深く感謝いたします。深沢先生には、本研究において全面的に指導して頂き ました。また今後の研究生活に対して、正しい道を与えられたと確信しています。 ありがとうございます。M1 の田中さんは、自分の研究に対しいつも的確な指摘を して頂きました。事務の石井さん、上原さんには各種手続きでお世話になりまし た。ありがとうございます。

宇宙科学研究本部・高橋研究室のみなさまに深く感謝いたします。D1の武田さんには、忙しい中DSSDのFloating 読み出しに関して、とても丁寧に指導していただきました。武田さんなしではこの研究は進められませんでした。実験で困ったとき M1の石川さんにも助けて頂きました。中澤先生には出張中、ずっと自転車を貸して頂いて非常に助かりました。また HXI について色々教えて頂きました。ありがとうございます。

最後になりますが、広島大学・高エネルギー宇宙研究室のスタッフのみなさま、 学生のみなさまに心から感謝いたします。今年度限りで研究室を去る川埜さん、江 川さん、千代延さん、あゆみさん、山本さん、てつくん、一年は短かったですが 本当に有難うございました。みなさんと過ごした研究室生活は本当に楽しかった のです。この先また何度も会えると信じていますので、そのときはまたお酒を飲 みながらロコモコなんてどうでしょうか。

参考文献

- [1] 武田伸一郎 「Si/CdTe コンプトンカメラのための高分解能両面シリコンスト リップ検出器の性能評価」、修士論文 東京大学、2006
- [2] 次期 X 線天文衛星計画ワーキンググループ「NeXT 計画提案書」、2005
- [3] 中本達也「多層シリコンストリップとBGO・フォトダイオードを用いた宇宙 軟ガンマ線コンプトンカメラの開発」、修士論文広島大学、2004
- [4] 田中琢也「宇宙 X 線観測用放射線検出器多チャンネル読み出しシステムの開発」、卒業論文 広島大学、2006
- [5] ideas VA64TA2 PRELIMINARY DOCUMENTATION J
- [6] 井上北斗 「2次元アナログ LSI を用いた硬 X 線撮像検出器の開発」、修士論 文 東京大学、2004
- [7] Y.Iwata et al, "Optimal P-stop Pattern for the N-Side Strip Isolation of Silicon Microstrip Detectors" IEEE Trans.Nucl.sci 1998
- [8] H.Tajima, "Optimization of geometry of thick X-ray detector"
- H.Tajima et al, "Low noise double-sided silicon strip detector for multiple-Compton gamma-ray telescope, SPIE, Vol.4851, 2002
- [10] 高橋忠幸 「NeXT 衛星搭載ハイブリッドカメラ用 CdTe ピクセル硬 X 線撮像 素子」
- [11] 高橋忠幸「CdTe/CdZnTeを用いた硬X線・ガンマ線イメージングセンサー」、 放射線 Vol.32 No.1、2006