

将来コンプトンカメラ用新型 Si-Pad センサーの基礎特性評価

B090965 白川裕章
高エネルギー宇宙・可視赤外天文学研究室

主査 深沢泰司
副査 大川正典

2014年2月10日

概要

天体からの高エネルギー粒子を観測することは宇宙空間での粒子の加速機構を調べる上で非常に有用である。特に sub-MeV 領域は高温プラズマからの熱的放射が弱まり、制動放射や逆コンプトン散乱といった非熱的放射が支配的になる転換領域とされており、放射の起源を探る上で重要となる。次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載のコンプトンカメラは sub-MeV 領域をターゲットとしており高い精度での観測が期待されている。コンプトンカメラには Si-Pad センサー (下図 1) が用いられ、次世代のコンプトンカメラに向け改良のための研究も進められている。本研究では新たに開発された Si-Pad センサーの暗電流や素子容量などの基礎特性の測定を行うためのセットアップの立ち上げを行い、性能評価を試みた。

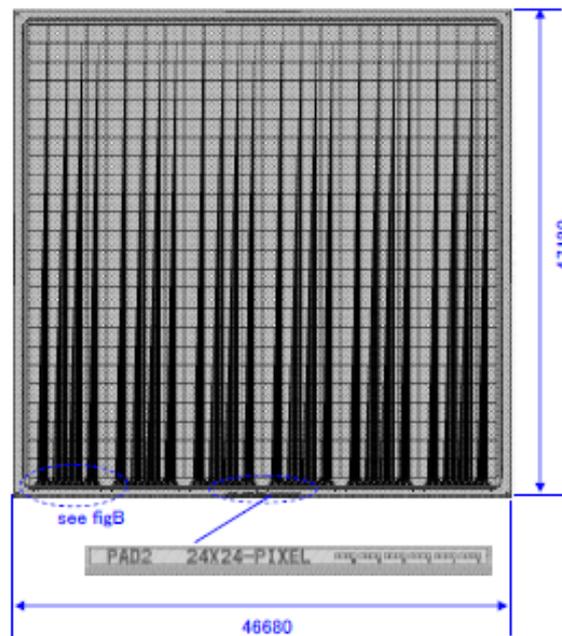


図 1: 新型 Si-Pad センサー

目次

第 1 章	はじめに	4
第 2 章	コンプトンカメラと Si-Pad	7
2.1	コンプトンカメラ	7
2.1.1	コンプトンカメラとは	7
2.1.2	ASTRO-H 搭載 SGD	8
2.1.3	CAST	9
2.2	シリコン半導体センサー	10
2.2.1	シリコンセンサー	10
2.2.2	半導体センサーのノイズ	11
2.2.3	SGD 用 Si-Pad	14
2.2.4	新型 Si-Pad	16
2.2.5	本研究の目的	17
第 3 章	新型 Si-Pad の基礎特性測定	18
3.1	測定項目	18
3.2	測定セットアップ	18
3.2.1	試験用ボードボードの準備	18
3.2.2	ボンディング	19
3.2.3	容量	23
3.2.4	暗電流	23
3.2.5	エネルギー分解能	24
3.3	測定結果	25
3.3.1	容量	25
3.3.2	暗電流	26
3.3.3	エネルギー分解能	27
3.4	考察	32
3.4.1	ch 間容量の向上	32
3.4.2	エネルギー分解能の向上	32
第 4 章	今後	34
4.1	Pad2 に対する追測定	34
4.2	Pad1 に対しての性能評価	34
4.3	多チャンネル読み出し ASIC を用いた測定	34

目次

1	新型 Si-Pad センサー	1
1.1	X 線天文衛星の歴史 [1]	4
1.2	これまでの主な X 線天文衛星で観測されたエネルギー領域とその感度 [2]	5
1.3	ASTRO-H のイメージ図 [3]	6
2.1	コンプトンカメラ断面図 [4]	7
2.2	コンプトンコーン概念図 [5]	8
2.3	SGD 模式図 [7]	9
2.4	CAST の概念図 [8]	9
2.5	半導体センサー概念図 [7]	10
2.6	Si の反応断面積 [9]	11
2.7	複数 ch を持つ検出器の容量 [4]	12
2.8	半導体センサーの等価雑音回路 [10]	13
2.9	Si-Pad センサー模式図 [4]	14
2.10	ガードリング模式図	14
2.11	SGD 搭載 Si-Pad の読み出し線パターン [11]	15
2.12	SGD4 と SGD5 の配置	15
2.13	新型 Si-Pad(左:Pad1 右:Pad2)	16
3.1	Pad2 読み出し線配置	18
3.2	Si-Pad を接着した試験用ボード	19
3.3	読み出し予定だった pixel の配置図	20
3.4	感光基板で作成した接続用パターン	21
3.5	再度作成した接続用パターン	21
3.6	本研究で用いる読み出し用パターン	21
3.7	ボンディングマシン	21
3.8	最終的に読みだした ch	22
3.9	ボンディング後の Si-Pad と読み出し用金属パターン	22
3.10	Si-Pad 測定用の配線後の様子	22
3.11	Body 容量測定セットアップ	23
3.12	ch 間容量測定セットアップ	23
3.13	暗電流測定セットアップ	24
3.14	X 線スペクトル取得	24

3.15 n 側平板-ガードリング間容量測定結果	25
3.16 ch 間容量測定結果	26
3.17 暗電流測定結果	27
3.18 391 番 pixel で取得した X 線スペクトルの例 (-20°C、300V)	28
3.19 15°C での 391 番 pixel のエネルギー分解能の Shaping Time 依存性 (黒:100V、赤:200V、 緑:300V)	29
3.20 -20°C での 391 番 pixel のエネルギー分解能の Shaping Time 依存性 (黒:100V、赤:200V、 緑:300V)	29
3.21 エネルギー分解能の ShapingTime 依存性を理論式でフィッティングした結果 (15 °C)	30
3.22 エネルギー分解能の ShapingTime 依存性を理論式でフィッティングした結果 (-20 °C)	30
3.23 15°C での 444 番 pixel のエネルギー分解能の Shaping Time 依存性 (黒:100V、赤:200V、 緑:300V)	31
3.24 -20°C での 444 番 pixel のエネルギー分解能の Shaping Time 依存性 (黒:100V、赤:200V、 緑:300V)	32

第1章 はじめに

宇宙空間には非常に多くの天体が存在し電波からガンマ線まで幅広い波長領域で輝いている。中でもブラックホールや中性子星、超新星残骸などの天体では粒子が高エネルギーに加速され、シンクロトロン放射やコンプトン散乱といった非熱的放射がされていると考えられている。これらの加速機構を地上実験で再現することは現代の技術では不可能なため、宇宙における粒子の加速機構を解明するには高エネルギー天体の X 線やガンマ線での観測が非常に有用となる。しかし X 線やガンマ線のほとんどは地球大気によって吸収され地上からの観測は困難なため、天文衛星や気球といった飛翔体による観測が必要となる。

X 線天文学は 1962 年ジャックコーニらがロケットでの観測によって宇宙からの X 線を観測したのが始まりとされている。また天文衛星を用いた X 線の観測は 1970 年に NASA が打ち上げた UHURU 以来今日まで大きな発展を遂げている。日本においては 1979 年の「はくちょう」に始まり「てんま」(1983)、「ぎんが」(1987) など 6 機の天文衛星で観測がなされ、現在は 2005 年に打ち上げられた「すざく」が運用中である。

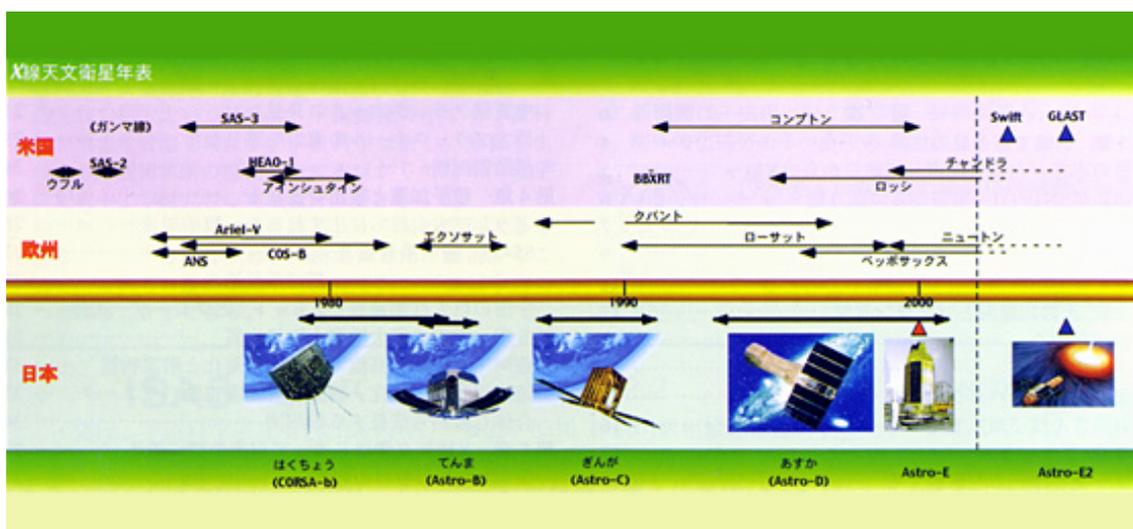


図 1.1: X 線天文衛星の歴史 [1]

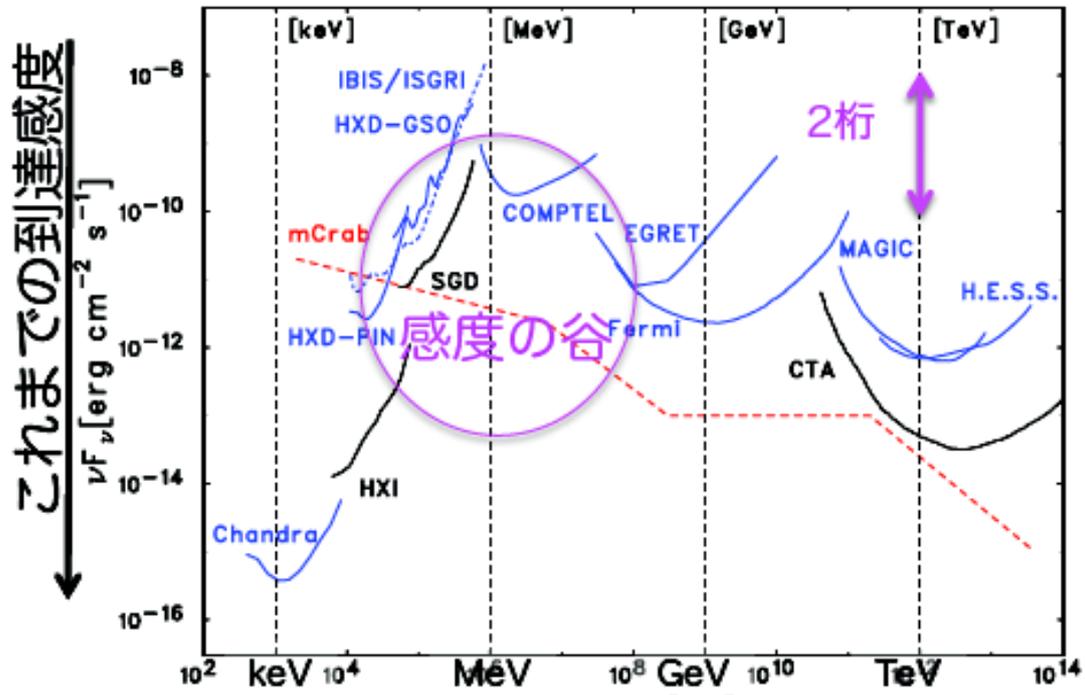


図 1.2: これまでの主な X 線天文衛星で観測されたエネルギー領域とその感度 [2]

目覚ましい発展を遂げてきた X 線天文学ではあるが、図 1.2 からわかるように放射のエネルギーが数十 keV ~ 数 MeV の領域 (sub-MeV 領域) では検出器の感度が低く十分な観測がなされておらず、sub-MeV 領域での高い精度での観測が課題となっている。

2015 年打ち上げ予定の次期 X 線天文衛星 ASTRO-H は SXS(Soft X-ray Spectrometer)、SXI(Soft X-ray Imager)、HXI(Hard X-ray Imager)、SGD(Soft Gamma-ray Detector) の 4 つの検出器を搭載し、sub-MeV 領域も含め軟 X 線からガンマ線までの幅広い帯域での高精度の観測を目指している。また ASTRO-H より将来では全天ガンマ線サーベイ計画 CAST も提案されており、同時に検出機器に関しても開発、研究が進められている。

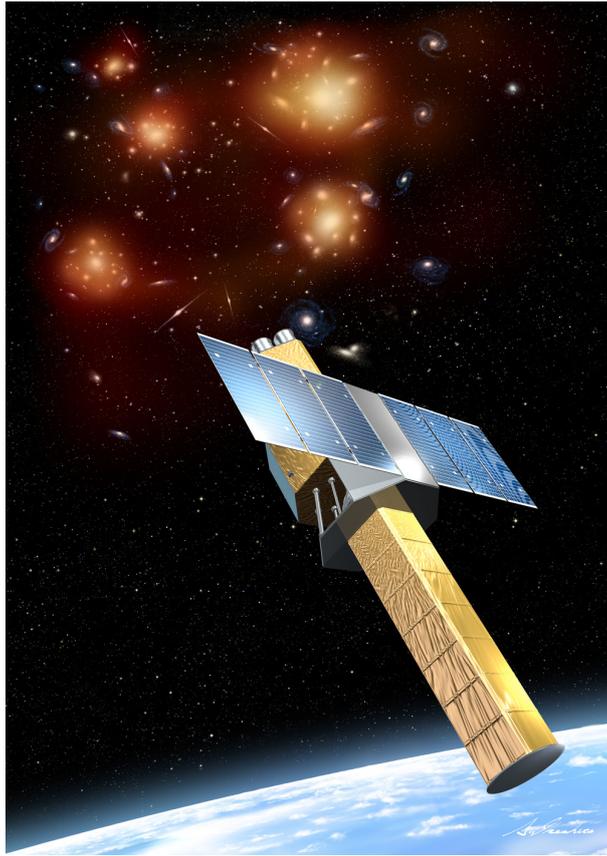


図 1.3: ASTRO-H のイメージ図 [3]

第2章 コンプトンカメラとSi-Pad

2.1 コンプトンカメラ

2.1.1 コンプトンカメラとは

コンプトンカメラは検出器内で生じたコンプトン散乱からガンマ線の情報を得る検出器である。コンプトンカメラは散乱体センサーと吸収体センサーの組み合わせからなっており、図 2.1 にその模式図を示す。

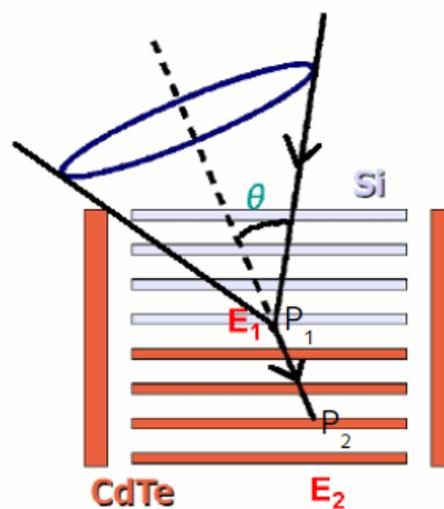


図 2.1: コンプトンカメラ断面図 [4]

入射した光子は散乱体センサーの電子と点 P_1 でコンプトン散乱し、進む方向を θ だけ変える。この時光子はエネルギー E_1 を失う。その後光子は吸収体センサーの点 P_2 で光電吸収を生じエネルギー E_2 を失う。コンプトン散乱の式

$$E_2 = \frac{E_1}{1 + \frac{E_1}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (2.1)$$

からコンプトン散乱角 θ は

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} \quad (2.2)$$

と表すことができる。光子の到来方向は図 2.1 のように直線 $P_1 P_2$ を回転軸にもち、 P_1 を頂点として直線 $P_1 P_2$ と母線のなす角が θ のコンプトンコーンと呼ばれる円錐の側面上に制限することができる。同一のガンマ線源から複数のイベントを得るとそれぞれに対するコンプトンコーンの交点からガンマ線源の位置、すなわち光子の到来方向を決定することができる。(図 2.2)

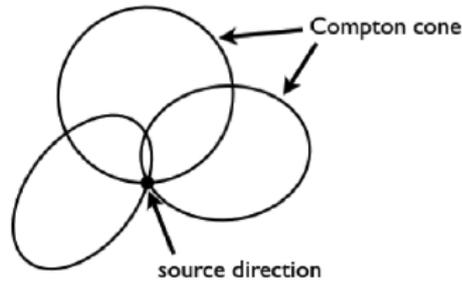


図 2.2: コンプトンコーン概念図 [5]

こうしたコンプトン再構成は測定されたエネルギーと反応位置を用いるため、コンプトンカメラの角度分解能、つまり光子の到来方向の決定精度を向上させるためには、高いエネルギー分解能および位置分解能のセンサーが必要とされる。[4] こうした多層半導体コンプトンカメラは、以下で述べる ASTRO-H 搭載 SGD で宇宙観測に用いられるほか、環境放射線イメージングにも用いられている。[6] さらに ASTRO-H より将来の全天ガンマ線サーベイ計画 CAST にも主検出器として考案されている。

2.1.2 ASTRO-H 搭載 SGD

ASTRO-H には 4 種類の検出器が搭載され、軟 X 線から軟ガンマ線までの幅広いエネルギー帯域での観測が行われる予定である。軟ガンマ線検出器 SGD(Soft Gamma-ray Detector) は 10keV-600keV の帯域をターゲットとしており、同じく ASTRO-H 搭載予定の硬 X 線撮像検出器 HXI と合わせて硬 X 線から軟ガンマ線までの広帯域で高感度での観測を目指す。高感度での観測にはバックグラウンドの低減が不可欠であり、SGD ではバックグラウンド除去のため「井戸型アクティブシールド」と「狭視野多層半導体コンプトンカメラ」を採用している。下図 2.3 に SGD の模式図を示す。図 2.3 に緑色で示されているのが井戸型 BGO アクティブシールドである。アクティブシールドはそれ自身が検出器として動作しており、主検出器との反同時計数をとることで荷電粒子イベントや荷電粒子由来のガンマ線イベントを除去しバックグラウンドの大幅な低減を可能にしている。さらにコンプトンカメラはイメージングに用いられるのではなく、ガンマ線の到来方向をカメラの視野内に制限して視野外から入射するガンマ線や宇宙線によるイベントを徹底的に除去する。井戸型 BGO アクティブシールドは現在軌道上で観測中の X 線天文衛星すざくの HXD 検出器に採用されており、20 - 300keV の帯域では世界でも高いレベルの感度で観測を行なっている。狭視野多層半導体コンプトンカメラは SGD の底の部分に配置される。図 2.3 で赤色で示された散乱体センサーの Si-Pad センサーと青色で示された吸収体センサーの CdTe-Pad センサーから構成されており、32 枚の積層された Si-Pad センサーの側面と底面を CdTe-Pad センサーで囲んでいる。

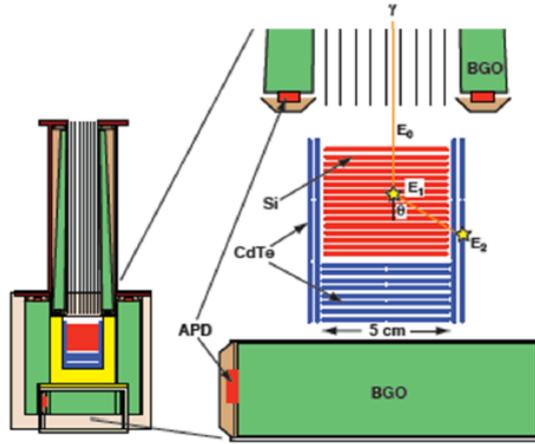


図 2.3: SGD 模式図 [7]

2.1.3 CAST

CAST(Compton Telescope for Astro and Solar Terrestrial) 計画は、ASTRO-H より将来の MeV/sub-MeV 全天サーベイ計画で、未だ高感度観測の存在しない 200keV ~ 2MeV の帯域での全天高感度観測により宇宙の高エネルギー現象の理解を飛躍的に高めることを目的としている。[8]

CAST の主検出器には Si/CdTe コンプトンカメラが用いられる。その高いエネルギー分解能により、2000 年まで 1 ~ 30MeV で全天サーベイを行った COMPTEL に比べ小型で同等以上の性能を実現することができる。また姿勢制御の要求が高くないため大型衛星のサブ機器、もしくは小型科学衛星として軌道に上げ全天を監視することを狙う。

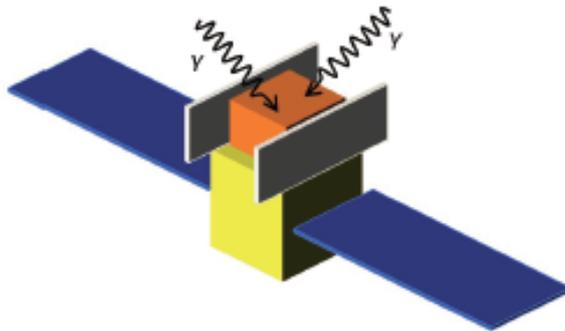


図 2.4: CAST の概念図 [8]

2.2 シリコン半導体センサー

2.2.1 シリコンセンサー

半導体センサーは光子が半導体内に進入した際に励起されたキャリア対を電気信号として読み出すセンサーである。半導体センサーには従来の X 線検出器に用いられていたシンチレーターと光電子増倍管の組み合わせなどと比較して一対のキャリア対を生成するのに必要なエネルギーが小さく、十分なキャリア数を稼ぐことができるため高いエネルギー分解能であるという特徴がある。放射線検出器に用いられる半導体検出器の多くには p 型半導体と n 型半導体を接合した p-n 接合のものが用いられる。p-n 接合された半導体の接合面付近にはキャリア対の存在しない空乏層があり、空乏層は逆バイアス電圧をかけることで広がる。以下簡単に半導体センサーの読み出し原理について説明する(下図 2.5)。空乏層に光子が進入しコンプトン散乱や光電吸収が生じると光子の失ったエネルギーに比例した数のキャリア対が励起される。励起されたキャリアは逆バイアス電圧による電場によって電子は n 側に、ホールは p 側に引き寄せられる。これを電気信号として読み出すことで光子の情報を得ることができる。

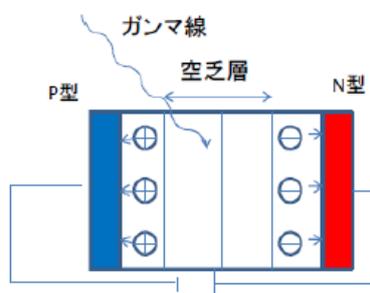


図 2.5: 半導体センサー概念図 [7]

コンプトンカメラに用いられる散乱体センサーにはシリコン (Si) が用いられている。これは X 線、ガンマ線と Si の反応でコンプトン散乱が支配的となるからである。下図 2.6 は NIST のホームページから引用した Si と光子の反応の反応断面積を示したものである。青色はコンプトン散乱の反応断面積、桃色は光電吸収の反応断面積、緑色はそれらの合計を示している。Si は光子のエネルギーが 50keV 程度からコンプトン散乱の反応断面積が支配的となり X 線やガンマ線を観測するコンプトンカメラの散乱体センサーに適していると言える。

またコンプトンカメラの角度分解能は、原子核に束縛された電子が運動量を持っていることにより散乱される電子のエネルギーにゆらぎが生じる Doppler broadening という現象にも左右されるが、Si はその影響も小さいという点でコンプトンカメラのセンサーに適している。

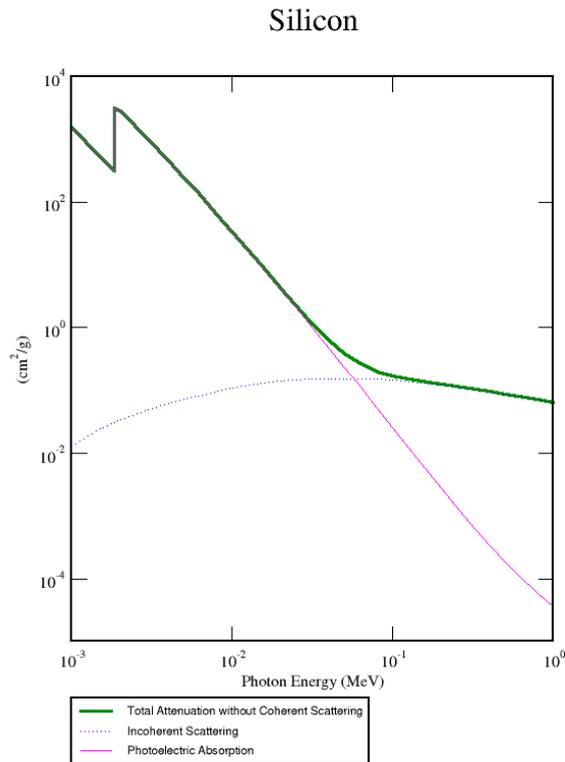


図 2.6: Si の反応断面積 [9]

2.2.2 半導体センサーのノイズ

§2.1.1 で述べた通りコンプトンカメラの角度分解能はそれに用いられる半導体センサーのエネルギー分解能に左右され、半導体センサーのノイズはエネルギー分解能に大きな影響を与えるため、センサーのノイズを低減することはコンプトンカメラの角度分解能の向上につながる。半導体センサーのノイズは主に次の2つに起因する。

1. 暗電流
2. センサー容量

(1) 暗電流

暗電流は半導体内でキャリア対が熱励起によって生じ、それが電流として検出される現象である。暗電流 I と絶対温度 T には式 2.3 のような関係がある。

$$I(T) \propto T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (2.3)$$

ここで 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。式 2.3 からわかるように暗電流は温度に大きく依存するため、温度を下げることによって暗電流値を下げる事が可能である。

また p-n 接合を用いた半導体センサーは逆バイアス電圧が大きくなると暗電流値が急激に大きくなる降伏現象 (ブレイクダウン現象) が起きる。熱励起された電子は逆バイアス電圧で加速するが、その加速した電子が空乏層内の原子の電子に衝突することで電子が励起され、それが繰り返して起こることで暗電流の降伏現象が生じる。暗電流は有限個の電子の流れであるため、電子数のゆらぎが信号に混入してノイズの原因となる。これはショットノイズと呼ばれ、流れる電流が I のときノイズパワー N は素電荷 q 、係数 α を用いて $N = 2\alpha qI$ と表される。

(2) センサー容量

完全空乏化した半導体センサーは平行板コンデンサの容量の式に近似した容量を持つことが知られている。この容量は body 容量と呼ばれ次式 2.4 のように表される。

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (2.4)$$

ここで ϵ は半導体の誘電率 (Si の場合 $\epsilon = 1.06 \times 10^{-12} \text{F/cm}$)、 S はセンサーの面積、 d は空乏層の厚さである。§2.2.1 でも述べたように空乏層は逆バイアス電圧を大きくすることで広がるので、body 容量によるノイズを低減させるためになるべく高電圧で動作させることが望ましい。

また §2.2.3 や §2.2.4 で述べる検出器のように複数の ch を持つ検出器においてはその ch 間にも容量を持ち ch 間容量と呼ばれる。図 2.7 のような検出器の場合 ch 間容量は implant の幅や間隔に依存し、また pixel 上を通る読み出し線との間の容量も ch 間容量に含まれる。

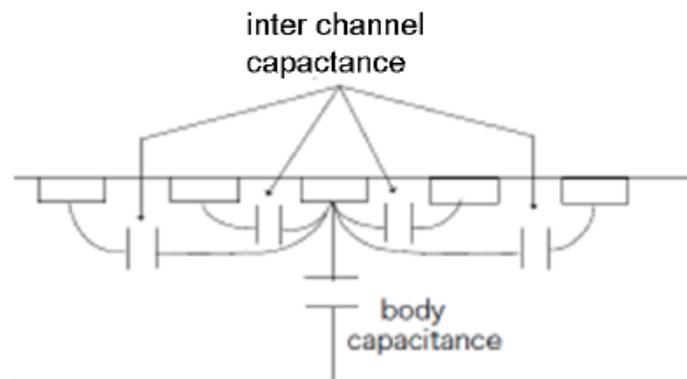


図 2.7: 複数 ch を持つ検出器の容量 [4]

これらの暗電流とセンサー容量は、センサーから CSA (Charge Sensitive Amplifier: 電荷有感型前置増幅器) までの初段電子回路系の性能と合わせセンサーのノイズに影響する。また半導体の不純物のランダム運動や構造に依存する $1/f$ ノイズも存在する。

以下センサーのノイズについて図 2.8 のような等価雑音回路を用いて考える。

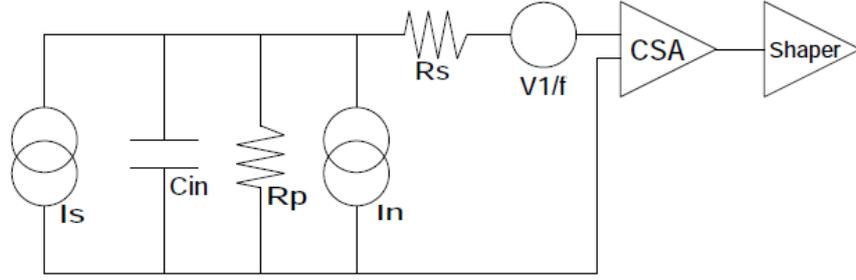


図 2.8: 半導体センサーの等価雑音回路 [10]

図 2.8 において I_s : X 線による信号電流、 C_{in} : 等価入力容量 (センサーの接合容量、ケーブル、初段 FET の入力容量)、 R_p : 等価並列抵抗 (CSA の帰還抵抗、高圧電源の負荷抵抗)、 R_s : 等価直列抵抗 ($\equiv A/g$, $A=0.5 \sim 0.7$, g : 初段 FET の相互コンダクタンス)、 I_n : 暗電流、 $V_{1/f} = C_{1/f}/f$: $1/f$ ノイズ ($C_{1/f}$ は係数) を表す。[4][10] 図 2.8 の等価回路における全雑音電圧のパワースペクトルは次式 2.5 で表される。

$$\frac{\overline{V_{noise}^2}}{df} = \frac{4k_B T}{\omega^2 C_{in}^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2 C_{in}^2} + 4k_B T R_s + \frac{C_{1/f}}{f} [V^2/Hz] \quad (2.5)$$

上式において第一項、第三項が R_p 、 R_s によるジョンソンノイズ、第二項が I_n によるショットノイズ、第四項が $1/f$ ノイズを表している。エネルギーは電荷量で測定されるので式 2.5 を等価雑音電荷 $\overline{\Delta E_{RMS}^2}$ を用いて表すと式 2.6 のように書き換えることができる。

$$\frac{\overline{\Delta E_{RMS}^2}}{df} = \frac{4k_B T}{\omega^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2} + 4k_B T R_s C_{in}^2 + \frac{C_{1/f} C_{in}^2}{f} [C^2/Hz] \quad (2.6)$$

式 2.6 から初段回路の雑音強度は周波数依存性を持つので、適当なフィルターをかけて波形整形を行うことで信号とノイズの強度比を最適化することができる。時定数 τ の波形整形をした場合、式 2.6 は波形整形回路のフィルター特性で決まる定数 A_1 、 A_2 、 A_3 を用いて下の式 2.7 のように書き換えることができる。ただし簡単のため $\omega/2\pi \sim f \sim \Delta f \sim 1/\tau$ としてある。

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} = \left(\frac{4k_B T}{R_p} + 2qI_n \right) \cdot A_1 \tau + 4k_B T R_s C_{in}^2 \cdot \frac{A_2}{\tau} + \frac{C_{1/f} C_{in}^2}{f} \cdot A_3 [C^2] \quad (2.7)$$

信号に対して理想的なガウシアン整形 (CR - $(RC)^2$) を行った場合 (A_1, A_2, A_3) = (0.6267, 0.6267, 0.5) となる。今回は原因のわかりにくい式 2.7 の第三項を無視することとする。Si センサーのエネルギー分解能は keV 単位で表されることが多いので、換算のため $(2.355\epsilon/10^3/q)^2$ をかけると、-15 でのエネルギー分解能は式 2.8 のように近似できる。ただし変数の単位はそれぞれ R_p (G Ω), τ (μ sec), I_n (nA), C_{in} (pF), g (mS) とする。

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} \simeq \left(2.86 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{R_p} + 0.58I_n \right) \tau + \left(2.0 \times 10^{-2} \cdot \frac{C_{in}^2}{g} \right) / \tau [keV^2] \quad (2.8)$$

本実験では R_p が十分大きいとできるので式 2.8 の第一項は暗電流による項が支配的となる。また第二項は CSA の容量勾配を表し $f(C_{in})^2$ の形で表すことができるので本実験でのノイズは下の式 2.9 のように表される。

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} \simeq 0.58I_n \tau + \{f(C_{in})\}^2 / \tau [keV^2] \quad (2.9)$$

2.2.3 SGD 用 Si-Pad

ASTRO-H 搭載 SGD のコンプトンカメラの散乱体センサーには図 2.9 のような Si 半導体を用いた Pad 型センサー (Si-Pad) が用いられている。

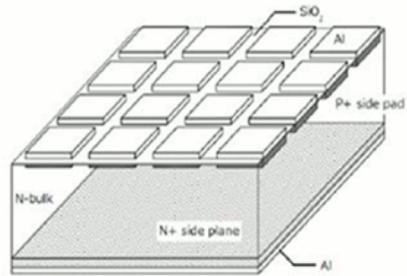


図 2.9: Si-Pad センサー模式図 [4]

Si-Pad は平板状の n 型 Si ウエハーの片面に p⁺ 型の pixel 状 implant を配置し、その対面に n⁺ 型平板を配置した構造を持つ。p⁺ 型 implant 上にはそれぞれ Al 電極が DC 接合されており読み出し線を介して信号を読み出すことができる。また pixel の周囲は pixel の電場を一定にするためのガードリングで囲まれている。(下図 2.10 で赤色で示された部分)

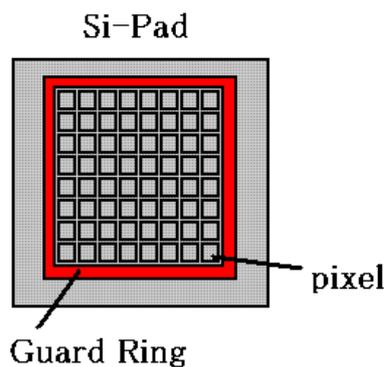


図 2.10: ガードリング模式図

SGD 搭載の Si-Pad は図 2.11 のように 8×8pixel を 1 区画とし、検出器の中心を回転の対称として 4 回対称に読み出し線が配置されている (SGD4)。

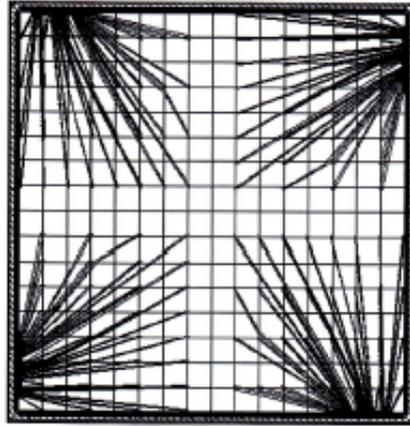


図 2.11: SGD 搭載 Si-Pad の読み出し線パターン [11]

SGD 搭載コンプトンカメラには SGD4 と、読み出し線パターンが SGD4 と鏡面对称な Si-Pad(SGD5) を 2 枚 1 組として 16 組 (32 枚) が積層されている。この際 2 枚の n^+ 型平板の面を内側にし裏表で重ねる (図 2.12)。こうすることで高い電圧のかかる n^+ 型の面から外部への放電を防ぐとともに、2 枚の読み出し位置を合わせ回路に接続しやすくしている。[7]

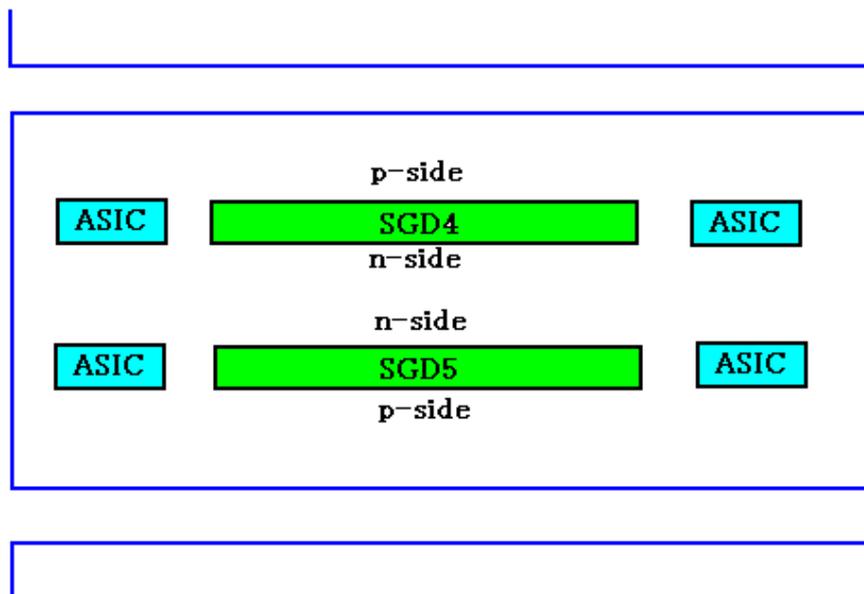


図 2.12: SGD4 と SGD5 の配置

2.2.4 新型 Si-Pad

今回開発された Si-Pad は 2 種類ありそれぞれ読み出し線のパターンや pixel のサイズが異なる。新型 Si-Pad の構造は図 2.9 に示した SGD 搭載 Si-Pad の構造と基本的に同じである。新型 Si-Pad と SGD 搭載 Si-Pad の主な違いに以下のようなものがある。

1. 読み出し線パターン
2. pixel の大きさ
3. SiO₂ 絶縁層の厚さ

(1) 読み出し線パターン

新型 Si-Pad の読み出し線のパターンは下図 2.13 とおりである。

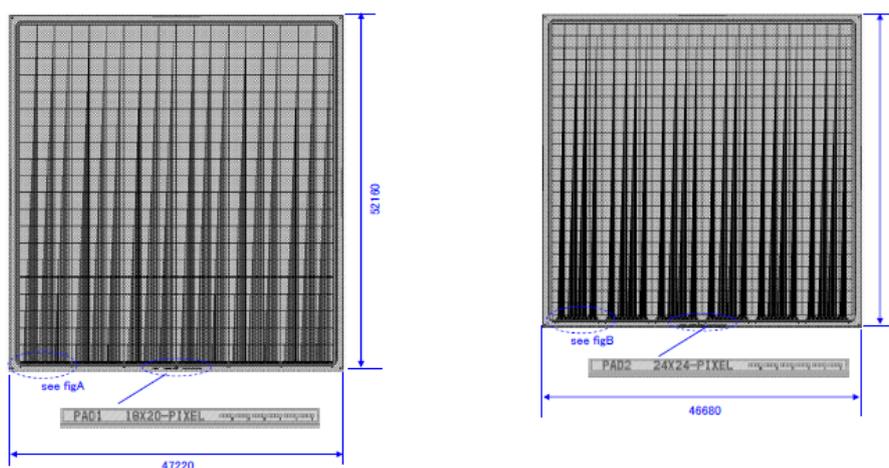


図 2.13: 新型 Si-Pad(左:Pad1 右:Pad2)

SGD の Si-Pad が四隅から読み出しを行っていたのに対し、新型は一辺から読み出しを行う。これは SGD の場合読み出し系を四隅に取り付ける必要があり構造が複雑になるので、構造を少しでも簡単なもののできないか検証するためである。

(2) pixel の大きさ

SGD の Si-Pad の pixel が 3.2×3.2 mm であったのに対し、新型は Pad1 が 2.6×2.6mm、Pad2 が 1.9×1.9mm と小さくなっており Si-Pad の位置分解能が向上する。§2.1.1 でも述べた通り Si-Pad の位置分解能はコンプトンカメラの角度分解能に関係するためコンプトンカメラの角度分解能の向上が見込まれる。

(3) SiO₂ 絶縁層の厚さ

新型は SGD の 1.5 μ m に比べ Si-Pad 表面の SiO₂ 絶縁層が厚くなっている。これによって読み出し線までの距離が大きくなり読み出し線による容量が小さくなる。§2.2.2 でも述べた通り検出器の容量を小さくすることで容量性ノイズを抑えエネルギー分解能を向上させることができるので、コンプトンカメラの角度分解能の向上につながる。

2.2.5 本研究の目的

これまでに述べたように次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載のコンプトンカメラは sub-MeV 領域をターゲットとしており高い精度での観測が期待されている。コンプトンカメラに用いられる Si-Pad センサーは次世代のコンプトンカメラに向けた改良のための研究も進められている。本研究では新たに開発された Si-Pad センサーのうち 1 種類に対し、暗電流や素子容量などの基礎特性の測定を行うためのセットアップの立ち上げを行い、その性能評価を試みた。

第3章 新型 Si-Pad の基礎特性測定

この章では §2.2.4 に示した 2 種類の新型 Si-Pad のうち Pad2 の基礎特性測定のためのセットアップの立ち上げと測定、またその性能評価について述べる。今回測定に用いた Si-Pad の主な仕様を表に示す。

センサー領域	4.72 × 4.67 cm ²
有効面積	4.56 × 4.56 cm ²
1pixel 面積	1.9 × 1.9 mm ²
pixel 数	24 × 24
厚さ	0.6 mm

表 3.1: Pad2 仕様

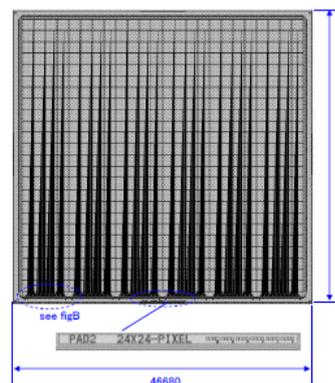


図 3.1: Pad2 読み出し線配置

3.1 測定項目

新型 Si-Pad は SGD の Si-Pad からの仕様変更による容量の低減、またそれを含めノイズの低減によるエネルギー分解能の向上が見込まれている。それらを検証するため、本研究における測定項目は大きく以下の 3 項目とする。

1. センサー容量
2. 暗電流
3. X 線読み出しにおけるエネルギー分解能

3.2 測定セットアップ

3.2.1 試験用ボードボードの準備

Si-Pad の基礎特性の測定は Si-Pad を試験用ボードに接着した状態で行うため、試験用ボードの作成と、Si-Pad の試験用ボードへの接着を行った。試験用ボードは厚さ 1.6mm のガラスエポキシ基板を 10×10cm² に切り出し、その四隅に固定用のネジ穴をあけて作成した。Si-Pad の接着にはモメンティブ・パフォーマ

ンス・マテリアルズ社のシリコン混合物接着剤 YE5822 を用いた。YE5822 は (A)(B) の 2 種類からなり体積比 (A):(B)=10:1 で混合したものを試験用ボードに均一に塗り、その上に Si-Pad を接着して室温で約 1 日乾燥させた。

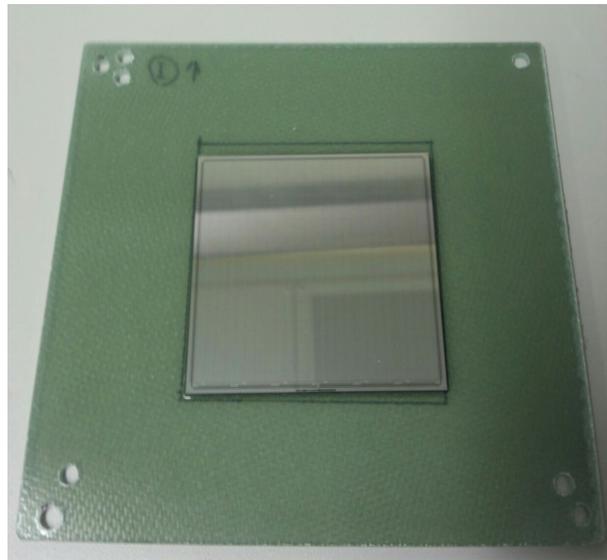


図 3.2: Si-Pad を接着した試験用ボード

3.2.2 ボンディング

Si-Pad の各 pixel で発生した信号は読み出し線を通じてセンサー端のボンディング Pad から読み出すことができ、測定を行うにはボンディング Pad と読み出し回路をワイヤボンディングする必要がある。本研究ではボンディング Pad と計測機器等接続用の金属パターンの間をボンディングしてある。

24	48	72	96	120	144	168	192	216	240	264	288	312	336	360	384	408	432	456	480	504	528	552	576
23	47	71	95	119	143	167	191	215	239	263	287	311	335	359	383	407	431	455	479	503	527	551	575
22	46	70	94	118	142	166	190	214	238	262	286	310	334	358	382	406	430	454	478	502	526	550	574
21	45	69	93	117	141	165	189	213	237	261	285	309	333	357	381	405	429	453	477	501	525	549	573
20	44	68	92	116	140	164	188	212	236	260	284	308	332	356	380	404	428	452	476	500	524	548	572
19	43	67	91	115	139	163	187	211	235	259	283	307	331	355	379	403	427	451	475	499	523	547	571
18	42	66	90	114	138	162	186	210	234	258	282	306	330	354	378	402	426	450	474	498	522	546	570
17	41	65	89	113	137	161	185	209	233	257	281	305	329	353	377	401	425	449	473	497	521	545	569
16	40	64	88	112	136	160	184	208	232	256	280	304	328	352	376	400	424	448	472	496	520	544	568
15	39	63	87	111	135	159	183	207	231	255	279	303	327	351	375	399	423	447	471	495	519	543	567
14	38	62	86	110	134	158	182	206	230	254	278	302	326	350	374	398	422	446	470	494	518	542	566
13	37	61	85	109	133	157	181	205	229	253	277	301	325	349	373	397	421	445	469	493	517	541	565
12	36	60	84	108	132	156	180	204	228	252	276	300	324	348	372	396	420	444	468	492	516	540	564
11	35	59	83	107	131	155	179	203	227	251	275	299	323	347	371	395	419	443	467	491	515	539	563
10	34	58	82	106	130	154	178	202	226	250	274	298	322	346	370	394	418	442	466	490	514	538	562
9	33	57	81	105	129	153	177	201	225	249	273	297	321	345	369	393	417	441	465	489	513	537	561
8	32	56	80	104	128	152	176	200	224	248	272	296	320	344	368	392	416	440	464	488	512	536	560
7	31	55	79	103	127	151	175	199	223	247	271	295	319	343	367	391	415	439	463	487	511	535	559
6	30	54	78	102	126	150	174	198	222	246	270	294	318	342	366	390	414	438	462	486	510	534	558
5	29	53	77	101	125	149	173	197	221	245	269	293	317	341	365	389	413	437	461	485	509	533	557
4	28	52	76	100	124	148	172	196	220	244	268	292	316	340	364	388	412	436	460	484	508	532	556
3	27	51	75	99	123	147	171	195	219	243	267	291	315	339	363	387	411	435	459	483	507	531	555
2	26	50	74	98	122	146	170	194	218	242	266	290	314	338	362	386	410	434	458	482	506	530	554
1	25	49	73	97	121	145	169	193	217	241	265	289	313	337	361	385	409	433	457	481	505	529	553

図 3.3: 読み出し予定だった pixel の配置図

当初は図 3.3 に示す pixel からの読み出しを予定していたため、接続用パターンは感光プリント基板を用いて作成したもの(図 3.4)を用いるつもりであった。しかし金属部は酸化しにくい金が望ましい、表面の金属の厚さが一定であることが望ましいという理由から再度図 3.5 のような接続用パターンを作成した。だがボンディング箇所ですら水平でない場所がある、ボンディングが長かつ複雑になると指摘を受け、Sunhayato 社 SSP-52 を切り出したもの(図 3.6)を用いる事になった。これに伴い読み出し可能な pixel は図 3.8 に示す 10 カ所となった。ただし 445 番と 467 番の pixel はボンディングはされているが、同一パターンにボンディングしてあるため単一 pixel としての情報を取り出すことはできない。ボンディングは宇宙科学研究所高橋研究室のボンディングマシンを用いて行った。

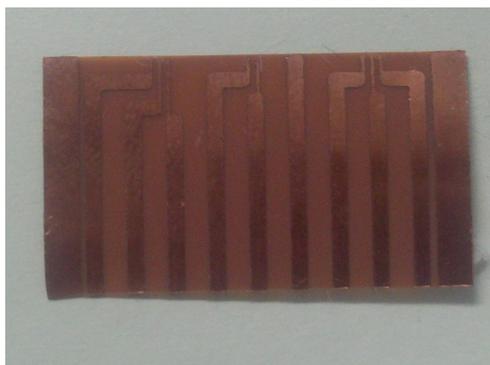


図 3.4: 感光基板で作成した接続用パターン

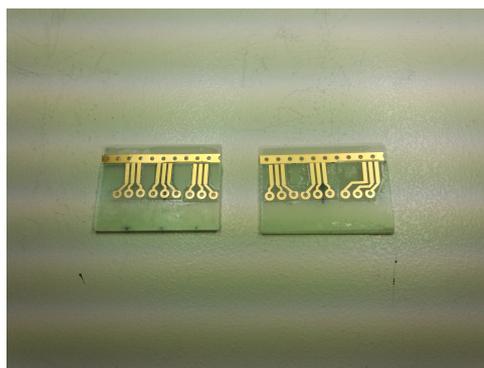


図 3.5: 再度作成した接続用パターン



図 3.6: 本研究で用いる読み出し用パターン



図 3.7: ボンディングマシン

24	48	72	96	120	144	168	192	216	240	264	288	312	336	360	384	408	432	456	480	504	528	552	576
23	47	71	95	119	143	167	191	215	239	263	287	311	335	359	383	407	431	455	479	503	527	551	575
22	46	70	94	118	142	166	190	214	238	262	286	310	334	358	382	406	430	454	478	502	526	550	574
21	45	69	93	117	141	165	189	213	237	261	285	309	333	357	381	405	429	453	477	501	525	549	573
20	44	68	92	116	140	164	188	212	236	260	284	308	332	356	380	404	428	452	476	500	524	548	572
19	43	67	91	115	139	163	187	211	235	259	283	307	331	355	379	403	427	451	475	499	523	547	571
18	42	66	90	114	138	162	186	210	234	258	282	306	330	354	378	402	426	450	474	498	522	546	570
17	41	65	89	113	137	161	185	209	233	257	281	305	329	353	377	401	425	449	473	497	521	545	569
16	40	64	88	112	136	160	184	208	232	256	280	304	328	352	376	400	424	448	472	496	520	544	568
15	39	63	87	111	135	159	183	207	231	255	279	303	327	351	375	399	423	447	471	495	519	543	567
14	38	62	86	110	134	158	182	206	230	254	278	302	326	350	374	398	422	446	470	494	518	542	566
13	37	61	85	109	133	157	181	205	229	253	277	301	325	349	373	397	421	445	469	493	517	541	565
12	36	60	84	108	132	156	180	204	228	252	276	300	324	348	372	396	420	444	468	492	516	540	564
11	35	59	83	107	131	155	179	203	227	251	275	299	323	347	371	395	419	443	467	491	515	539	563
10	34	58	82	106	130	154	178	202	226	250	274	298	322	346	370	394	418	442	466	490	514	538	562
9	33	57	81	105	129	153	177	201	225	249	273	297	321	345	369	393	417	441	465	489	513	537	561
8	32	56	80	104	128	152	176	200	224	248	272	296	320	344	368	392	416	440	464	488	512	536	560
7	31	55	79	103	127	151	175	199	223	247	271	295	319	343	367	391	415	439	463	487	511	535	559
6	30	54	78	102	126	150	174	198	222	246	270	294	318	342	366	390	414	438	462	486	510	534	558
5	29	53	77	101	125	149	173	197	221	245	269	293	317	341	365	389	413	437	461	485	509	533	557
4	28	52	76	100	124	148	172	196	220	244	268	292	316	340	364	388	412	436	460	484	508	532	556
3	27	51	75	99	123	147	171	195	219	243	267	291	315	339	363	387	411	435	459	483	507	531	555
2	26	50	74	98	122	146	170	194	218	242	266	290	314	338	362	386	410	434	458	482	506	530	554
1	25	49	73	97	121	145	169	193	217	241	265	289	313	337	361	385	409	433	457	481	505	529	553

図 3.8: 最終的に読みだした ch

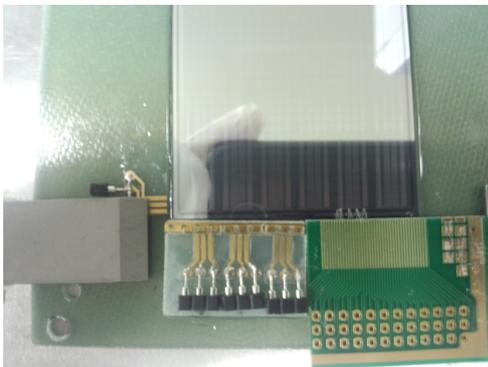


図 3.9: ボンディング後の Si-Pad と読み出し用金属パターン

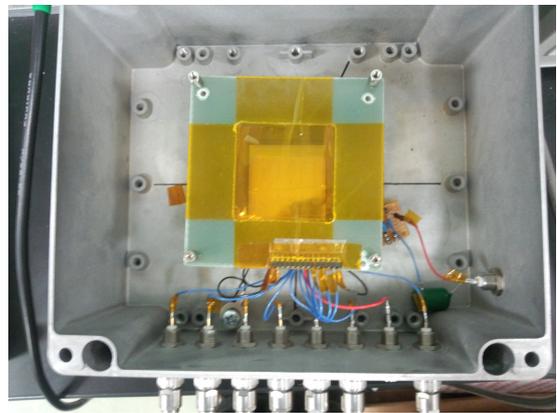


図 3.10: Si-Pad 測定用の配線後の様子

3.2.3 容量

§2.2.2でも述べた通りセンサー容量はセンサーのノイズに大きな影響を与えるため性能評価を行う上で測定が必要となる。センサー容量には Body 容量と ch 間容量があり、それぞれについて測定を行う。容量測定には HEWLETTPACKARD 社の HP4284 を用いた。Body 容量測定は本来 p 側のすべての pixel と n 側平板の間に生じる容量を測定するが、本研究では接続パターンの都合上すべての pixel をボンディングすることができなかつたため、p 側の pixel を囲うガードリングと n 側の平板間に生じる容量を測定した。この容量は Body 容量と同じような振る舞いをする事が知られているので、この容量を測定することで Body 容量の特性を知ることができる。また ch 間容量についても本来はある ch と、それ以外のすべての ch との間に生じる容量を測定すべきであるが、周囲 8pixel 以外との間に生じる容量は無視できるとして、ある ch とその周囲 8pixel との間に生じる容量を ch 間容量として測定を行った。以下図 3.11 に Body 容量測定、図 3.12 に ch 間容量測定の設定アップを示す。

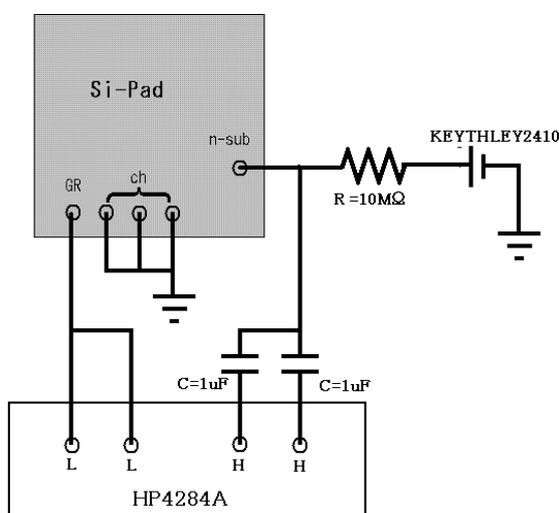


図 3.11: Body 容量測定セットアップ

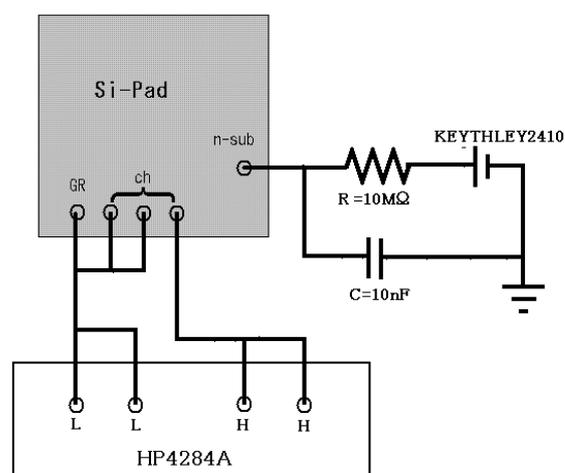


図 3.12: ch 間容量測定セットアップ

3.2.4 暗電流

暗電流はセンサーのノイズに大きな影響を与えるため性能評価を行う上で測定を行う必要がある。下図 3.13 に暗電流測定の設定アップを示す。現セットアップでは、ほとんどの p 側 pixel は電氣的に浮いているため、ガードリングと n 側平板の間を流れる電流が、Si-Pad の p 側と n 側の間に流れる電流とほぼ等しいことからガードリングと n 側平板の間に流れる電流を全 pixel 数 (576) で割ったものを 1pixel に流れる暗電流とする。

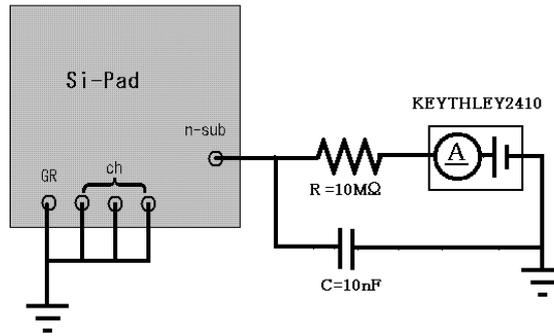


図 3.13: 暗電流測定セットアップ

3.2.5 エネルギー分解能

Si-Pad の X 線検出器としての性能を評価するため、本研究では密封線源の X 線を Si-Pad に照射し、1pixel からの信号を読み出して X 線スペクトルを取得して得られたスペクトルからエネルギー分解能を求め評価を行う。下図 3.14 に X 線スペクトル取得のセットアップを示す。Si-Pad の pixel から出た信号は前置増幅器 (PreAMP, CLEAR PULSE 社 CP5102) で電圧信号へと変換・増幅される。PreAMP には同時にパルサー (Pulser, CLEAR PULSE 社 CP9002) から一定のテストパルスを入力する。PreAMP で変換・増幅された信号は整形増幅器 (ShapingAMP, ORTEC571) によってガウシアンに近い形に整形され、MCA (AMPTEC 社 MCA8000A) を通してスペクトル情報として PC へと取り込まれる。

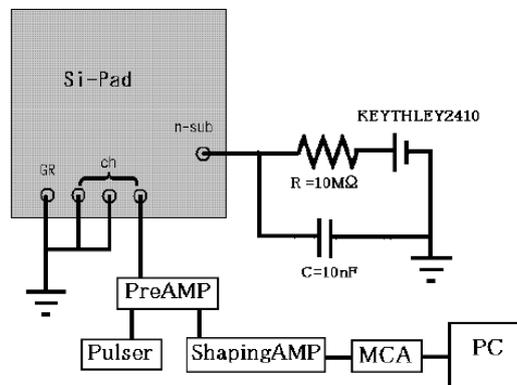


図 3.14: X 線スペクトル取得

本研究では X 線照射用の線源に ^{241}Am を使い、エネルギー分解能は 59.5keV のピークから求めた。エネルギー分解能の温度依存性と Shaping Time(波形整形の時定数 τ) 依存性を調べ、§2.2.2 で得られた式 2.9 と比較し評価した。

3.3 測定結果

3.3.1 容量

Body 容量

図 3.11 のように高圧電源に KEITHLEY2410、容量計に HP4284A を用いて n 側平板とガードリングとの間に生じる容量を測定したところ図 3.15 のようになった。

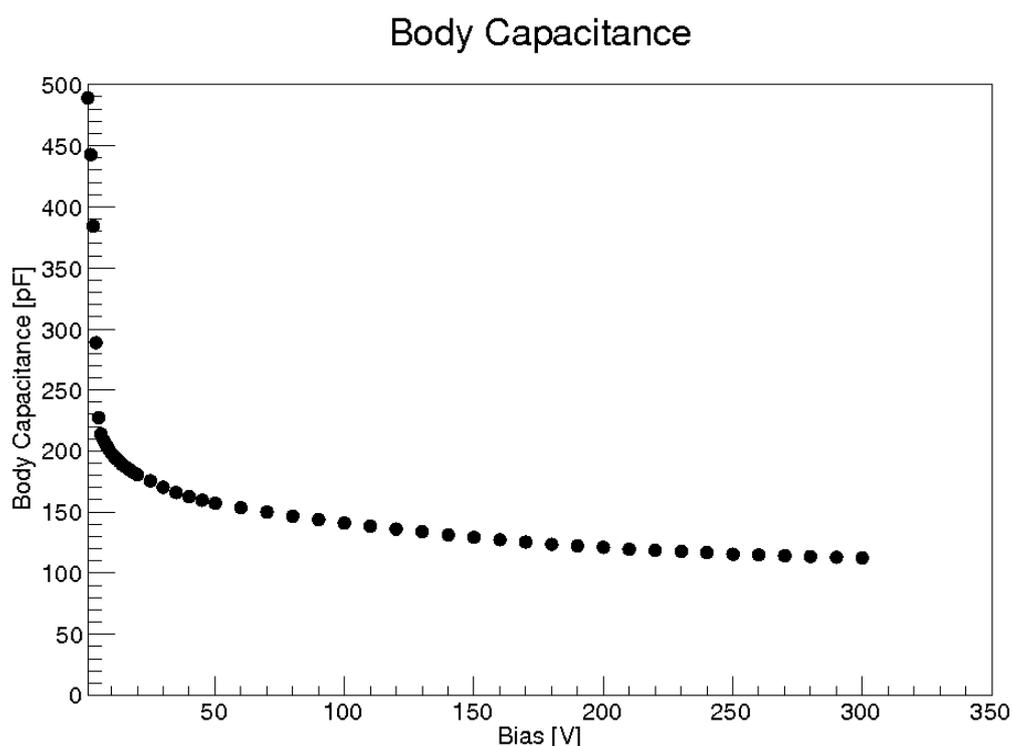


図 3.15: n 側平板-ガードリング間容量測定結果

上图 3.15 において逆バイアス電圧が約 220V 以上では容量の変化があまり見られない。これは逆バイアス電圧で空乏層が広がりきった状態 (完全空乏化) にあるためと考えられる。よって検出器として動作させる場合 220V 以上の電圧をかけることが望ましい。

ch 間容量

図 3.12 のように高圧電源に KEITHLEY2410、容量計に HP4284A を用いて図 3.8 の 444 番 pixel とその周囲の pixel との間に生じる容量を測定したところ図 3.16 のようになった。

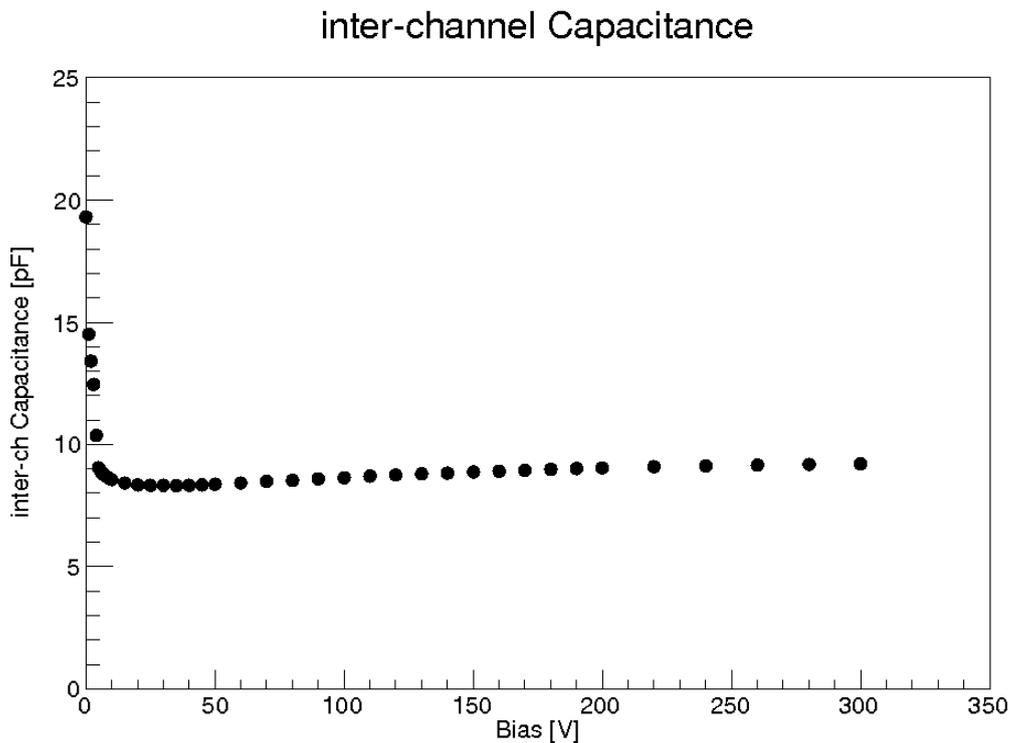


図 3.16: ch 間容量測定結果

ch 間容量についても Body 容量と同じく約 200V 以上で容量の変化が見られない。

3.3.2 暗電流

高圧電源と電流計に KEITHLEY2410 を用いて図 3.13 のようなセットアップで暗電流の測定を行った。また測定温度を一定に保つため Si-Pad をエスペック社の小型環境試験機 Su-641 に入れ、Si-Pad の温度を 20°C、10°C、0°C、-10°C に保った状態で測定を行った。図 3.17 にその結果を示す。ただし図 3.17 においてデータ点の色の違いは温度の違いを示し、黒:20°C, 赤:10°C, 緑:0°C, 青:-10°C での電流値を示す。

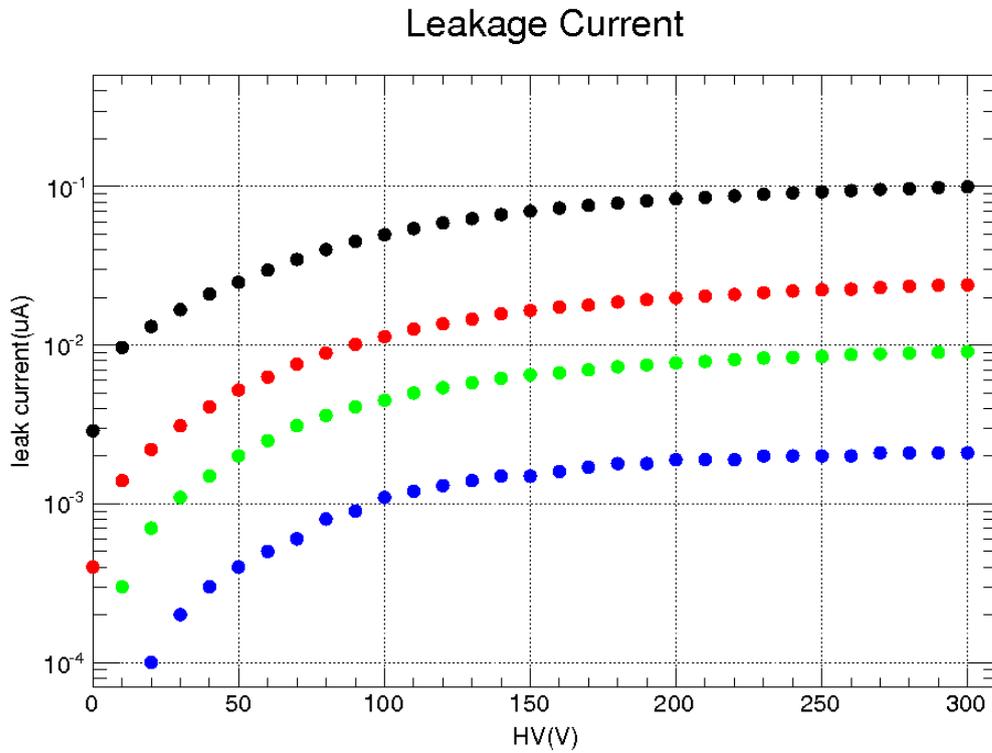


図 3.17: 暗電流測定結果

図 3.17 から 300V までの範囲では暗電流の急激な増加は見られず、ブレイクダウンは起きていないことがわかる。また温度を 20°C 変化させると暗電流が約 1 桁変化することもわかる。

3.3.3 エネルギー分解能

X 線スペクトルの取得

図 3.14 のようなセットアップで X 線スペクトルの取得を行った。X 線照射用の密封線源には ^{241}Am を用いた。また測定温度を一定に保つため Si-Pad と密封線源をエスペック社の小型環境試験機 Su-641 に入れ、15°C、-20°C に温度を保った状態でスペクトルの取得を行った。図 3.18 に得られたスペクトルの一例を示す。

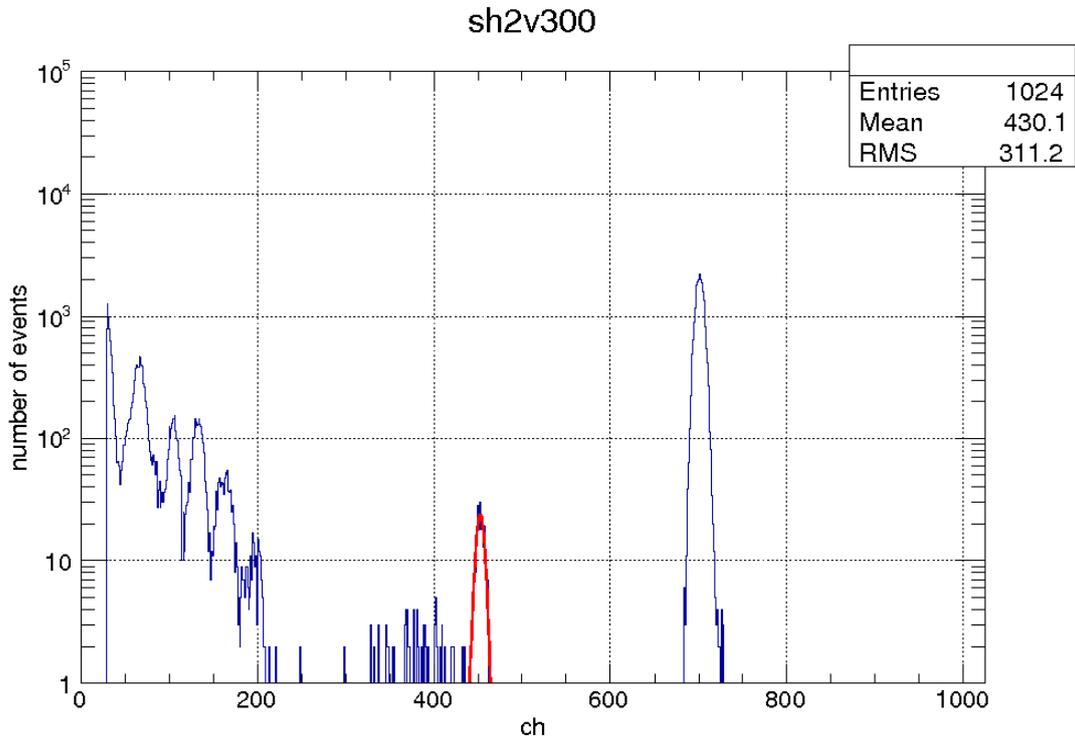


図 3.18: 391 番 pixel で取得した X 線スペクトルの例 (-20°C、300V)

エネルギー分解能の Shaping Time 依存性

X 線スペクトル取得の際、エネルギー分解能の Shaping Time(波形整形の時定数 τ) 依存性によりノイズ解析を行うため、ShapingAMP で Shaping Time を変化させながらスペクトルの取得を行った。図 3.19 に 15°C での、図 3.20 に -20°C での Shaping Time と 391 番 pixel のエネルギー分解能の関係図を示す。ただし図 3.19、図 3.20 においてデータ点の色の違いは逆バイアス電圧の違いであり、それぞれ黒:100V、赤:200V、緑:300V でのデータを表す。

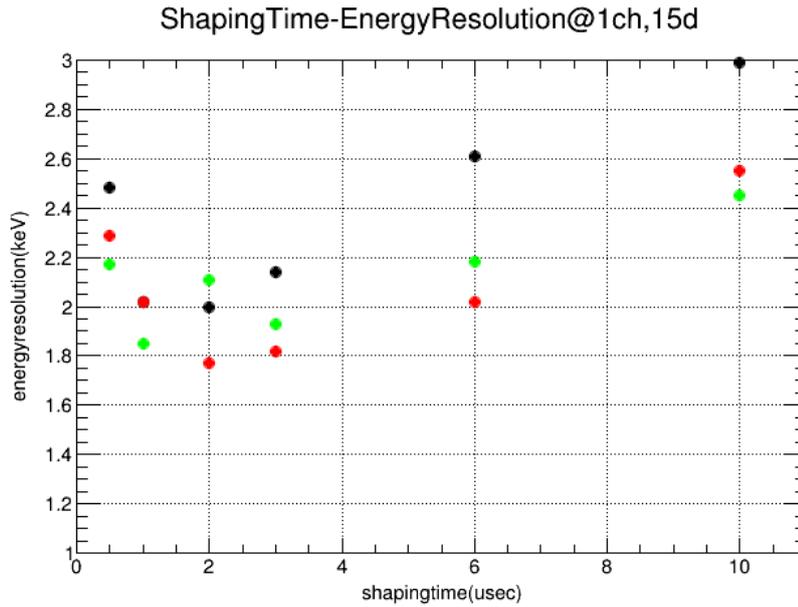


図 3.19: 15°C での 391 番 pixel のエネルギー分解能の Shaping Time 依存性 (黒:100V、赤:200V、緑:300V)

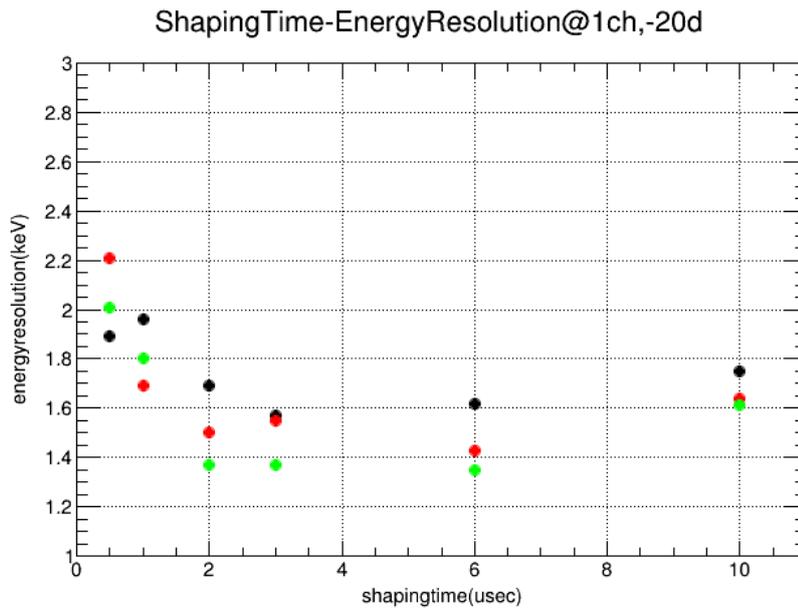


図 3.20: -20°C での 391 番 pixel のエネルギー分解能の Shaping Time 依存性 (黒:100V、赤:200V、緑:300V)

図 3.19、図 3.20 とも、Shaping Time が小さい領域ではエネルギー分解能が減少し、大きい領域では増加する傾向がある。これは式 2.9 の形から Shaping Time が小さい領域では容量性ノイズが、大きい領域では暗電流によるショットノイズがエネルギー分解能に大きく影響しているからだと考えられる。図 3.21、3.22 に図 3.19、3.20 のうち逆バイアス電圧が 300V の場合のデータ (上図の緑色の点) を、式 2.9 で表されるノ

イズに適当なホワイトノイズを加えたもの ($p_0\tau + p_1/\tau + p_2$, p_0, p_1, p_2 はパラメータ, τ は Shaping Time) でフィッティングした結果を示す。ただし実線の色はそれぞれ赤:フィッティングした結果、青:容量性ノイズ、緑:暗電流によるショットノイズ、桃:ホワイトノイズである。

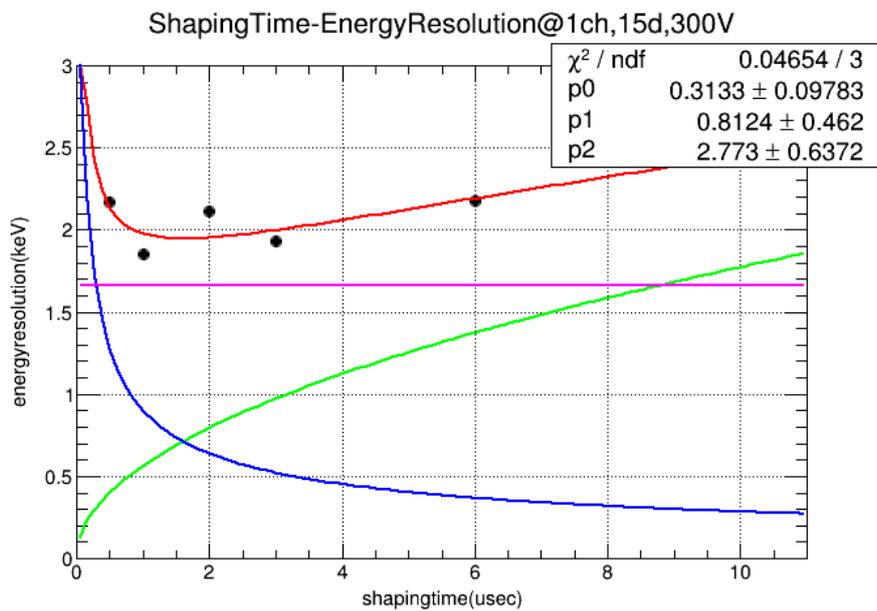


図 3.21: エネルギー分解能の ShapingTime 依存性を理論式でフィッティングした結果 (15 °C)

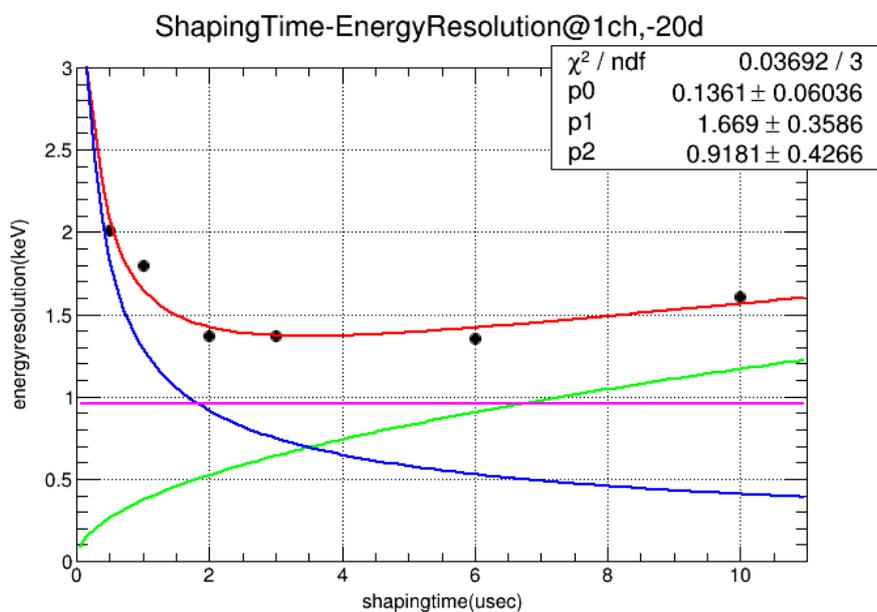


図 3.22: エネルギー分解能の ShapingTime 依存性を理論式でフィッティングした結果 (-20 °C)

フィッティング結果と式 2.9 から温度が 15 と -20 の場合それぞれについて暗電流とセンサー容量を求

めると以下の表 3.3.3 のようになった。ただし容量勾配 $f(C_{in})$ は、上野が過去に用いたものと同じ CSA を用いたため、上野が求めた $f(C_{in}) = p_0 C_{in} + p_1$ 、 $p_0 = 0.0127 \pm 0.0003$ 、 $p_1 = 0.836 \pm 0.009$ を用いた。[7]

	I_n [nA]		C_{in} [pF]	
	フィッティング	測定値	フィッティング	測定値
15	0.5 ± 0.1	0.11	5 ± 40	9.63
-20	0.2 ± 0.1	0.0039	40 ± 20	9.63

表 3.2: Pad2 のノイズから求めた暗電流とセンサー容量

フィッティングから得られる暗電流、センサー容量と実際測定で得られた結果は大きく異なっており何か別のノイズが影響している可能性がある。

また図 3.19 と図 3.20 において Shaping Time が大きい領域でのグラフの傾きを比較した時、図 3.19 のほうが傾きが大きい。これも高温での暗電流値が大きくそれによるショットノイズが大きいことによるものだと考えられる。

同様の測定を 444 番 pixel で行ったところ図 3.23、図 3.24 のような結果が得られた。

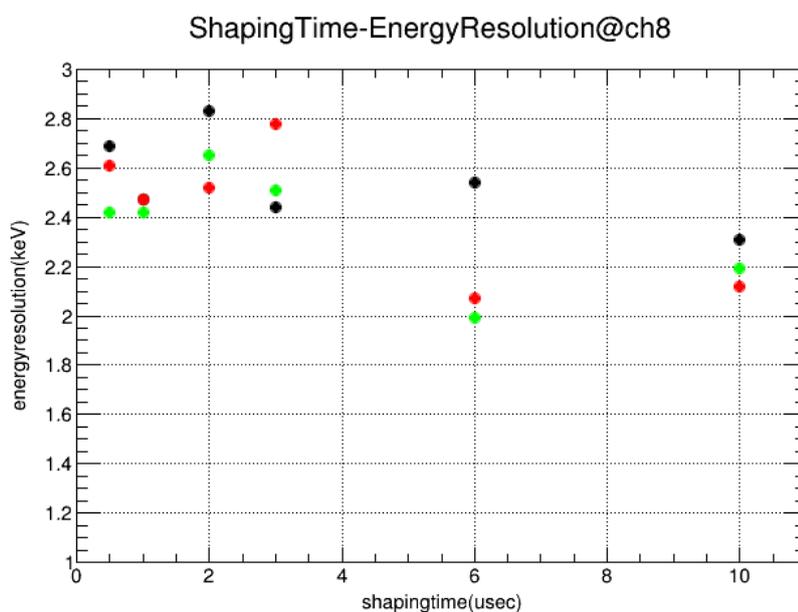


図 3.23: 15°C での 444 番 pixel のエネルギー分解能の Shaping Time 依存性 (黒:100V、赤:200V、緑:300V)

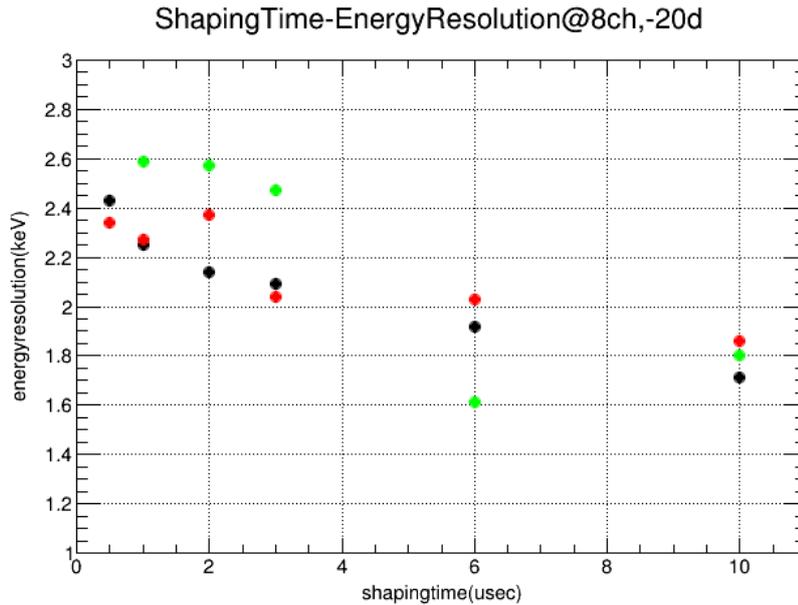


図 3.24: -20°C での 444 番 pixel のエネルギー分解能の Shaping Time 依存性 (黒:100V、赤:200V、緑:300V)

本来この pixel でも先に示した 391 番 pixel と同じような結果が得られると考えていたがこの pixel ではそのような傾向は見られなかった。原因は不明であり現在調査中であるが、全体的にノイズが大きいの、外来ノイズがのってしまったか、測定系の浮遊容量が大きかったためと考えられる。

3.4 考察

3.4.1 ch 間容量の向上

§2.2.4 で述べた通り、新型シリコンパッドでは絶縁用 SiO_2 層が SGD コンプトンカメラ用のものに比べ厚くなり、Si-Pad 上の電極から読み出し線までの距離が大きくなるため ch 間容量が小さくなり、容量性ノイズの低減が期待されている。過去に広島大学の道津や上野が SGD 用のものに対して同様の実験を行っており [4][7]、ch 間容量は $7 \sim 20\text{pF}$ 程度の値で一定となることがわかっている。本研究では図 3.16 の通り 9pF 程度で一定となっている。今回測定された容量の多くは周囲の物体との間に生じる浮遊容量の影響を受けている可能性があり、また、多くのグラウンドに落としていない pixel の影響も考えられるので今後セットアップの改善を図っていく。

3.4.2 エネルギー分解能の向上

上でも述べた通り新型 Si-Pad では ch 間容量が小さくなることによる容量性ノイズの低減が期待されるため、エネルギー分解能の向上が見込まれる。エネルギー分解能についても過去に広島大学の道津や上野が SGD 用のものに対して同様の実験を行なっている。[4][7] 先行研究では良い値で $1.2 \sim 1.9\text{keV}$ となっていたが、今回 391 番 pixel で測定された最も良い値は 1.4keV 程度であり、この結果だけ見ると SGD のもの

に比べ格段に良くなっているとは言いがたい。しかし容量の定量的評価ができていないことや、測定ができている pixel が一点だけであることなどを考慮すると良くなっているかの判断をすることも難しい。今後容量の定量的評価を行った上で多チャンネルで測定を行うことで評価できると考えられる。

第4章 今後

今後の課題として大きく以下の3つが挙げられる。

1. 本研究で扱った Pad2 に対する追測定
2. 本研究では扱わなかった Pad1 に対しての性能評価
3. 多チャンネル読み出し ASIC を用いた測定

4.1 Pad2 に対する追測定

本研究では ch 間容量の評価において浮遊容量を測定していなかったため定量的な評価を行うことができなかった。Si-Pad 以外本研究で用いたものと同様にセットアップしたものをを用いれば浮遊容量の測定が可能であると考えられるので、その測定結果を用いて ch 間容量を定量的に評価し、またその値を用いてエネルギー分解能について評価を行う。また §3.4.1 でも述べたが、No.444 のエネルギー分解能も図 3.19、図 3.20 のような傾向が見られると予想されたが、本研究での実験においてはそのようなデータが得られなかった。現段階では原因不明のため調査を行う必要がある。さらに読み出しを行えなかった他の pixel に対しても読み出しを行えるようにする。

4.2 Pad1 に対しての性能評価

§2.2.4 にも示したが本研究で扱った Pad2 とは別に Pad1 という新型 Si-Pad が開発されている。これに対して Pad2 と同様に性能評価を行う。この際 Pad2 では読み出し用の金属パターンの制限により読み出し可能な pixel が少なくなってしまうため、Pad1 の測定専用読み出し基板を設計、外注し、より多くの pixel に対して本研究と同様の測定を行いたいと考える。

4.3 多チャンネル読み出し ASIC を用いた測定

ASIC は多チャンネルからの信号に対し信号増幅、波形整形、Analog-Digital 変換を施し、低ノイズでの読み出しを行うことができる回路である。SGD 用コンプトンカメラにおいても ASIC での読み出しを行っているため Si-Pad と ASIC の組み合わせでの測定は有用である。

謝辞

本論文を作成するにあたって、指導教官の深沢先生には大変お世話になりました。学内での研究のみならず、出張先からの電話やメールでの相談にも丁寧に対応していただき、先生のご指導おかげでなんとか論文にまとめることができました。またチューターとして1年生の頃から日常生活や成績、進路についても面倒を見ていただき、深沢先生には大学生活のほとんどでお世話になりました。本当にありがとうございました。セミナーでお世話になった大杉先生、吉田先生をはじめ研究室のスタッフの皆様。ご指導いただいた内容が研究をすすめる上で何度も私を助けてくれました。研究から私生活までいろいろお世話になった学生のみなさま。特に中村さん、上野さん、古井くんには卒論のテーマが決まった秋以降質問をしては教えてもらい、実験をすればアドバイスもしくは手伝いをしてもらいと非常にお世話になりました。4年生のみなさま。全員進学なのでこれからはいろいろあると思いますがもう2年間よろしくおねがいします。宇宙科学研究所の高橋先生、渡辺さん、武田さん、林さん、内田さん、谷口さん。何度も作業をさせていただくのと同うのみならず、遅くまで作業を見ていただいたり、相談に乗っていただいたりと大変お世話になりました。副査の大川先生、物理科学科事務の皆様。皆様のおかげで無事卒業論文として書き上げることができました。ありがとうございました。

拙文ではありますが、本文をもって謝辞とさせていただきます。

2014年2月10日 白川裕章

関連図書

- [1] 日本の宇宙開発の歴史, http://www.isas.jaxa.jp/j/japan_s_history/chapter06/02/06.shtml
- [2] 中澤知洋ほか 「日本発の全天 MeV/sub-MeV 観測の実現 CAST 計画」
- [3] ASTRO-H 次期 X 線天文衛星,<http://astro-h.isas.jaxa.jp/>
- [4] 道津匡平 「X 線衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ線観測装置用 Si-Pad センサーの基礎特性評価」, 修士論文, 広島大学, 2010
- [5] 小高裕和 「Si/CdTe 半導体コンプトンカメラ試作機の開発と性能評価」, 修士論文, 東京大学, 2008
- [6] 日本物理学会誌 vol.68, p382 (2013) 「コンプトンカメラで放射性物質の飛散状況を可視化する」, 高橋, 渡辺, 武田 (ISAS/JAXA)
- [7] 上野一誠 「ASTRO-H 搭載宇宙軟ガンマ線観測用 Si センサーの軌道上放射線損傷による影響」, 卒業論文, 広島大学, 2012
- [8] 日本学術会議 「2013 中小宇宙観測プロジェクト」
- [9] NIST, XCOM: Photon Cross Sections Database,<http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>
- [10] 花畑義隆 「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載アクティブシールドの基礎特性評価とデジタル信号処理の検討」, 修士論文, 広島大学, 2010
- [11] 古井俊也 「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載コンプトンカメラの搭載同等品の性能評価」, 卒業論文, 広島大学, 2013