

宇宙ガンマ線観測用新型 Si-Pad 検出器の  
基礎特性測定および性能評価

M140117 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 佐々木茂美

2016年2月10日

## 概要

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まで加速されていると考えられているが、粒子自体を観測することはできないため、ロケットや人工衛星を用いて天体からの X 線ガンマ線放射を観測する必要がある。

2016年2月打ち上げ予定の X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) や将来計画である全天ガンマ線サーベイ構想 CAST ではガンマ線の検出に半導体コンプトンカメラを用いる。コンプトンカメラはコンプトン運動学からガンマ線の情報を得る検出器で、大きく散乱体センサーと吸収体センサーで構成される。ASTRO-H では散乱体センサーとして、エネルギー分解能の高い Si 半導体検出器が用いられ、CAST などの将来構想に向けて新型の検出器も開発されている。本研究では新しく開発された宇宙ガンマ線観測用 Si-Pad 検出器 2 種類について、既製品回路を用いたチャンネルごとの読み出しと専用 ASIC を用いた多チャンネル同時読み出しにより基礎特性を測定し、性能評価を行った。

本研究で用いた Si-Pad 検出器はピクセルのサイズを小さくすることで各ピクセルでの暗電流や容量を小さくし、読み出しノイズの低減を図っている。これによりコンプトンカメラの角度分解能が向上するとともに、従来 $-20^{\circ}\text{C}$ ほどまで冷却する必要があったコンプトンカメラが常温付近でも使用可能になると期待している。また読み出し線の配置を縦一方向 (図 1) にすることで構造の簡易化と読み出し線に依存する容量の均一化が図られており、SGD 用 Si-Pad にみられたピクセルごとの性能差が小さくなると思われる。

2 種類について行ったチャンネルごとの読み出し試験においては、チャンネル同士の間が生じる容量とエネルギー分解能の 2 つについて、チャンネルの位置依存性が小さいことが分かった。またエネルギー分解能の波形整形時定数依存性から電流性ノイズの影響は小さく容量性ノイズの影響が大きいことが分かり、エネルギー分解能の位置依存性が小さいことと矛盾しない結果が得られた。

また 1 種類については半導体検出器読み出し用の ASIC を用いて全チャンネルの同時読み出しも行った。 $-20^{\circ}\text{C}$ でのエネルギー分解能を測定したところ、平均で  $1.5\text{keV}$  となり SGD 用 Si-Pad と比較しても遜色ない性能で、単チャンネル読み出しと同様位置依存性は小さいという結果が得られた。また  $20^{\circ}\text{C}$ でもエネルギー分解能を測定したところ平均で  $1.9\text{keV}$  となり (図 2)、多くのチャンネルが  $20^{\circ}\text{C}$ でもエネルギー分解能  $2.0\text{keV}$  以下を達成していることが分かった。

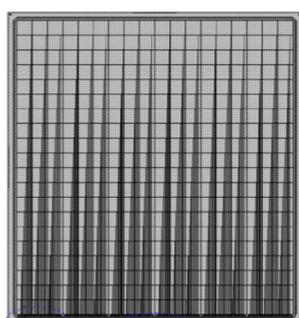


図 1: 新型 Si-Pad(Pad1)。縦  $5.2\text{ cm}$  × 横  $4.7\text{ cm}$  で 1 ピクセルは  $2.6\text{ mm}$  ×  $2.6\text{ mm}$ 。また縦方向に読み出し線が配置されている。

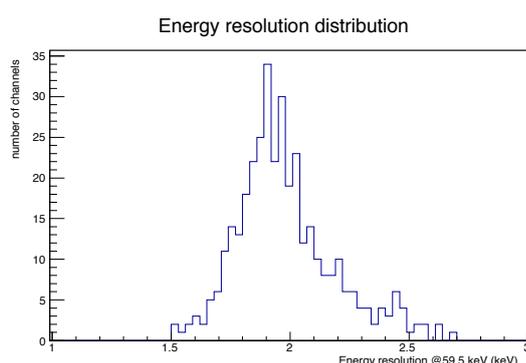


図 2:  $20^{\circ}\text{C}$ での Pad1 のエネルギー分解能頻度分布

# 目次

第 1 章	X 線ガンマ線による宇宙観測	6
1.1	X 線ガンマ線による宇宙観測とその意義	6
1.2	天文衛星による観測計画	6
1.2.1	ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器 (SGD)	7
1.2.2	全天ガンマ線サーベイ計画 CAST	7
1.3	本研究の目的	8
第 2 章	コンプトンカメラと Si-Pad 検出器	9
2.1	コンプトンカメラ	9
2.2	半導体検出器	10
2.2.1	Si 半導体検出器	10
2.2.2	半導体検出器の読み出しノイズ	12
2.3	Si-Pad 検出器	14
2.3.1	SGD 用 Si-Pad 検出器	14
2.3.2	新型 Si-Pad 検出器	16
2.4	ASIC	18
第 3 章	Si-Pad 単体基礎特性測定	20
3.1	測定項目	20
3.2	読み出し用基板作成	20
3.2.1	Pad1 用読み出し用基板作成	20
3.2.2	Pad2 用読み出し用基板作成	22
3.3	実験セットアップ	23
3.3.1	暗電流測定	23
3.3.2	センサー容量測定	23
3.3.3	エネルギー分解能測定	25
3.4	実験結果	26
3.4.1	暗電流	27
3.4.2	センサー容量	28
3.4.3	エネルギー分解能	31
3.5	ノイズの評価	35
3.6	単体基礎特性測定まとめ	37
第 4 章	ASIC による多チャンネル同時測定	38
4.1	読み出しセットアップ	38

4.2 測定結果 . . . . .	39
第 5 章 まとめ	42

# 目次

1	新型 Si-Pad(Pad1)。縦 5.2 cm × 横 4.7 cm で 1 ピクセルは 2.6 mm × 2.6 mm。また縦方向に読み出し線が配置されている。 . . . . .	1
2	20°C での Pad1 のエネルギー分解能頻度分布 . . . . .	1
1.1	各国の主な X 線観測衛星とその運用期間 [1] . . . . .	6
1.2	2000 年前後の主な宇宙観測用 X 線ガンマ線検出器と帯域ごとの感度 [2] . . . . .	7
1.3	ASTRO-H 衛星イメージ図 [1] . . . . .	8
1.4	SGD 模式図 [4] . . . . .	8
1.5	小型科学衛星として打ち上げる場合の CAST の概念図 [5] . . . . .	8
2.1	コンプトンカメラ模式図 . . . . .	9
2.2	コンプトンコーン [14] . . . . .	10
2.3	p-n 接合半導体検出器模式図 . . . . .	11
2.4	Si の反応断面積 [11] . . . . .	11
2.5	複数 ch を持つ検出器の容量 . . . . .	13
2.6	半導体センサーの等価雑音回路 [12] . . . . .	13
2.7	Si-Pad センサー模式図 [6] . . . . .	14
2.8	SGD 搭載 Si-Pad の読み出し線パターン [13] . . . . .	15
2.9	SGD 用 Si-Pad(1 区画分) のエネルギー分解能マップ [15] . . . . .	16
2.10	SGD 用 Si-Pad のエネルギー分解能の温度依存性 [6] . . . . .	16
2.11	各エネルギーでのコンプトン散乱の微分散乱断面積 [18] . . . . .	17
2.12	新型 Si-Pad 検出器読み出しパターン (左 : Pad1(4.77 × 5.21 cm <sup>2</sup> ), 右 : Pad2(4.72 × 4.77 cm <sup>2</sup> )) . . . . .	18
2.13	VATA450.3 における信号処理の流れ [20] . . . . .	19
3.1	Pad1 と製作された読み出し基板 (右下) 左下は自作基板 (読み出しには用いない) . . . . .	21
3.2	Pad1 読み出し用基板設計図 . . . . .	21
3.3	Pad1 でボンディングを行ったピクセル。赤:1 チャンネルとして読み出し可能、黄:1 チャンネルとしての読み出しは不可 . . . . .	21
3.4	製作された Pad2 用読み出し基板 . . . . .	22
3.5	Pad2 読み出し用基板設計図 . . . . .	22
3.6	Pad2 でボンディングを行ったピクセル。赤:1 チャンネルとして読み出し可能、黄:1 チャンネルとしての読み出しは不可 . . . . .	23
3.7	Si-Pad1 読み出しセットアップ . . . . .	24
3.8	Si-Pad2 読み出しセットアップ . . . . .	24

3.9	全体暗電流測定セットアップ	24
3.10	各チャンネル暗電流測定セットアップ	24
3.11	body 容量測定セットアップ	25
3.12	ch 間容量測定セットアップ	25
3.13	ADC スペクトル取得セットアップ	26
3.14	Pad1No.291(図中青色のピクセル)	26
3.15	Pad2No.268(図中緑色のピクセル)	26
3.16	Pad1 全体暗電流の高圧依存性	27
3.17	Pad2 全体暗電流の高圧依存性	27
3.18	Pad1 No.291 の各温度での暗電流の高圧依存性 (黒:20°C、赤:0°C、緑:-20°C)	27
3.19	Pad2 No.268 の各温度での暗電流の高圧依存性 (黒:20°C、赤:0°C、緑:-20°C)	27
3.20	Pad1 暗電流のピクセル位置依存性	28
3.21	Pad2 暗電流のピクセル位置依存性	28
3.22	Pad1 暗電流の温度依存性	28
3.23	Pad2 暗電流の温度依存性	28
3.24	body 容量の高圧依存性。黒:Pad1、赤:Pad2	29
3.25	Pad1 浮遊容量測定用基板	30
3.26	Pad2 浮遊容量測定用基板	30
3.27	Pad1 No.291 の ch 間容量高圧依存性。赤線は浮遊容量	30
3.28	Pad2No.268 の ch 間容量高圧依存性。赤線は浮遊容量	30
3.29	浮遊容量差し引き前の ch 間容量のピクセル位置依存性 (Pad1)	31
3.30	浮遊容量差し引き前の ch 間容量頻度分布 (Pad1)	31
3.31	浮遊容量差し引き前の ch 間容量のピクセル位置依存性 (Pad2)	31
3.32	浮遊容量差し引き前の ch 間容量頻度分布性 (Pad2)	31
3.33	浮遊容量差し引き後の ch 間容量のピクセル位置依存性 (Pad1)	32
3.34	浮遊容量差し引き後の ch 間容量頻度分布 (Pad1)	32
3.35	浮遊容量差し引き後の ch 間容量のピクセル位置依存性 (Pad2)	32
3.36	浮遊容量差し引き後の ch 間容量頻度分布 (Pad2)	32
3.37	<sup>241</sup> Am 線源照射時の ADC スペクトルの例。赤色の線は 59.5keV のピークをガウシアンで フィッティングした結果。	32
3.38	-20°C でのエネルギー分解能のピクセル位置依存性 (Pad1)	33
3.39	-20°C でのエネルギー分解能頻度分布 (Pad1)	33
3.40	-20°C でのエネルギー分解能のピクセル位置依存性 (Pad2)	33
3.41	-20°C でのエネルギー分解能頻度分布 (Pad2)	33
3.42	20°C でのエネルギー分解能のピクセル位置依存性 (Pad1)	34
3.43	20°C でのエネルギー分解能頻度分布 (Pad1)	34
3.44	20°C でのエネルギー分解能のピクセル位置依存性 (Pad2)	34
3.45	20°C でのエネルギー分解能頻度分布 (Pad2)	34
3.46	Pad1 No.291 の 20°C でのエネルギー分解能の shaping time 依存性	35
3.47	Pad1 No.291 の 0°C でのエネルギー分解能の shaping time 依存性	35
3.48	Pad1 No.291 の -20°C でのエネルギー分解能の shaping time 依存性	35

3.49	Pad2 No.268 の 20°C でのエネルギー分解能の shaping time 依存性 . . . . .	36
3.50	Pad2 No.268 の 0°C でのエネルギー分解能の shaping time 依存性 . . . . .	36
3.51	Pad2 No.268 の -20°C でのエネルギー分解能の shaping time 依存性 . . . . .	36
4.1	Si-Pad の ASIC 読み出し実験における信号の流れ。図中緑色の矢印が信号の流れを示す . . .	38
4.2	ASIC 読み出しセットアップ . . . . .	39
4.3	FEC,IFC の入ったアルミケース (図 4.2 右半分) を恒温槽内に収めた様子 . . . . .	39
4.4	取得された 1ch 分の ADC スペクトルの例 (ch75, No.291 に対応) . . . . .	39
4.5	20°C, 300V でのエネルギー分解能の位置依存性 . . . . .	40
4.6	-20°C, 300V でのエネルギー分解能の頻度分布 . . . . .	40
4.7	-20°C, 300V でのエネルギー分解能の位置依存性 . . . . .	40
4.8	20°C, 300V でのエネルギー分解能の頻度分布 . . . . .	40
4.9	SGD 用 Si-Pad を ASIC で読み出した際のエネルギー分解能の温度依存性 [15] . . . . .	41

# 第1章 X線ガンマ線による宇宙観測

## 1.1 X線ガンマ線による宇宙観測とその意義

宇宙空間に存在する様々な天体は電波からガンマ線まで幅広いエネルギーの放射をしている。ブラックホールや中性子星、超新星残骸といった天体では粒子が高エネルギーまで加速されるため、熱的放射だけでなく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なされていると考えられているが、現代の技術ではこのような物理状態を地上で再現することは不可能であるため、高エネルギー天体における粒子の加速機構の解明には天体からの X 線やガンマ線の観測が非常に有用となる。

このような宇宙からの X 線やガンマ線のほとんどは地球の大気により吸収され地上での観測は困難であるため、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。飛翔体による高エネルギー放射の観測は 1962 年にジャックオーニがロケットで宇宙からの X 線を初めて観測したのが始まりで、1970 年に NASA が打ち上げた UHURU 衛星を皮切りに天文衛星を用いた観測は今日まで大きな発展を遂げている。日本においても 1979 年の「はくちょう」にはじまり、2005 年から 2015 年まで観測を行った「すざく」まで 5 機の X 線天文衛星で観測がなされている。

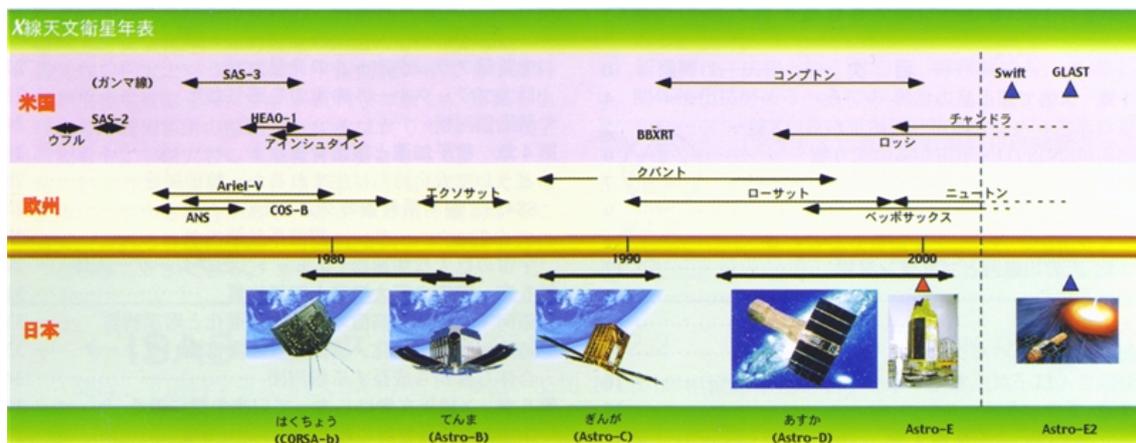


図 1.1: 各国の主な X 線観測衛星とその運用期間 [1]

## 1.2 天文衛星による観測計画

飛躍的に発展して来た X 線天文学ではあるが、図 1.2 に示すように数百 keV から数 MeV にかけての帯域は 1991 年から 2000 年にかけて観測を行った米国の COMPTEL のほかにほとんど観測されておらず、さらに他の帯域に比べ感度が悪い。このような背景からより高感度で MeV 帯域の観測を目指す観測ミッションに次のようなものがある。

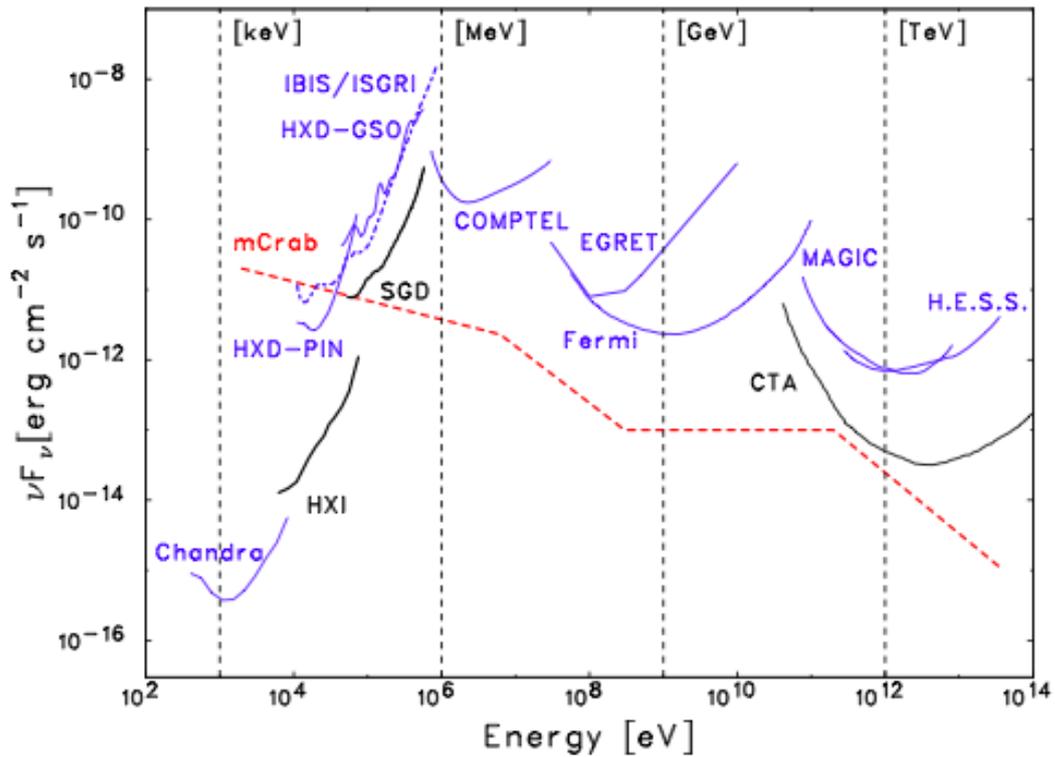


図 1.2: 2000 年前後の主な宇宙観測用 X 線ガンマ線検出器と帯域ごとの感度 [2]

### 1.2.1 ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器 (SGD)

ASTRO-H は 2016 年 2 月打ち上げ予定の次期 X 線国際天文衛星である。ASTRO-H 衛星には軟 X 線撮像検出器 (SXI)、軟 X 線分光検出器 (SXS)、硬 X 線撮像検出器 (HXI)、軟ガンマ線検出器 (SGD) の 4 種類の検出器が搭載されており、0.3keV から 600keV までの広帯域で高感度での観測が可能となる [1]。これらの検出器のうち最も高いエネルギー帯域を観測する SGD は図 1.4 のように主検出部である半導体コンプトンカメラをシールドとして用いる井戸型 BGO の底に配置する「狭視野多層半導体コンプトンカメラ」という我が国独自のコンセプトを採用することにより、70keV から 600keV の sub- MeV 領域を従来より約一桁よい感度で観測できるようになる。また明るい天体に対しては偏光計としても利用が可能であり、天体からのガンマ線偏光を観測することも期待されている。

### 1.2.2 全天ガンマ線サーベイ計画 CAST

ASTRO-H 搭載 SGD 同様、半導体コンプトンカメラを主検出部とする将来構想に CAST (Compton Telescope for Astro and Solar Terrestrial) がある。CAST は精密な観測がなされていない 200keV から 2MeV の帯域の全天サーベイ観測を行い、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 [10]。主検出部には ASTRO-H 衛星 SGD 同様半導体コンプトンカメラが用いられ、観測帯域を sub-MeV に特化することでより小型の検出器で COMPTEL と同等数以上の天体が観測できると期待されている。ま

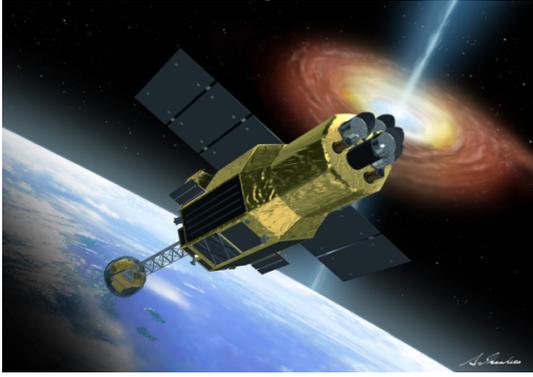


図 1.3: ASTRO-H 衛星イメージ図 [1]

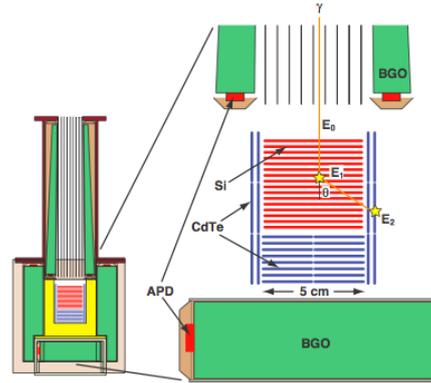


図 1.4: SGD 模式図 [4]

た姿勢制御の要求も高くなるため、大型衛星のサブ機器、もしくは小型の科学衛星として軌道上での全天サーベイ観測を狙う。

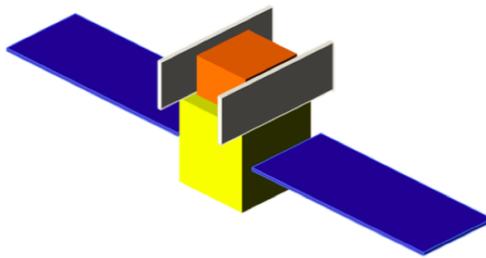


図 1.5: 小型科学衛星として打ち上げる場合の CAST の概念図 [5]

### 1.3 本研究の目的

他の帯域に比べ観測が十分でない sub-MeV から MeV にかけての領域の高感度での観測にむけ、CAST のような新たなミッションが考案されており、それに向けた検出器の開発も進められている。本研究では CAST も含めた宇宙ガンマ線観測の将来計画用に開発された新型の Si-Pad 検出器について、検出器単体での基礎特性を測定し検出器としての性能評価を行った。また読み出し用集積回路を用いた多チャンネル同時読み出しによる測定も行った。

## 第2章 コンプトンカメラと Si-Pad 検出器

### 2.1 コンプトンカメラ

コンプトンカメラは検出器内で生じたコンプトン散乱や光電吸収から、コンプトン運動学を用いて入射した光子の情報を得る検出器である。コンプトンカメラは大きく散乱体センサーと吸収体センサーからなっており、図 2.1 にその模式図を示す。

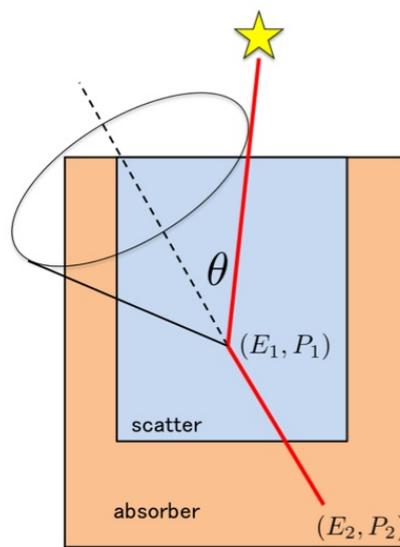


図 2.1: コンプトンカメラ模式図

コンプトンカメラに入射した光子が散乱体センサー内の位置  $P_1$  でコンプトン散乱を、吸収体センサー内の位置  $P_2$  で光電吸収を生じ、それぞれでエネルギー  $E_1$ 、 $E_2$  を失ったとする。コンプトン散乱における散乱角  $\theta$  は  $E_1$ 、 $E_2$  を用いて以下のように表すことができる。ただし  $m_e$  は電子の静止質量、 $c$  は光速である。

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

これにより一つの光子の飛跡から、図 2.1 のように直線  $P_1 P_2$  を軸とし、角  $P_1$  が  $\theta$  の三角錐の表面上 (コンプトンコーン) に光源を制限することができる。また同一光源からの光子を複数観測し、それぞれで得られたコンプトンコーンを重ね合わせる (図 2.2) ことで光源の位置を特定することができる。これをコンプトン再構成と呼ぶ。

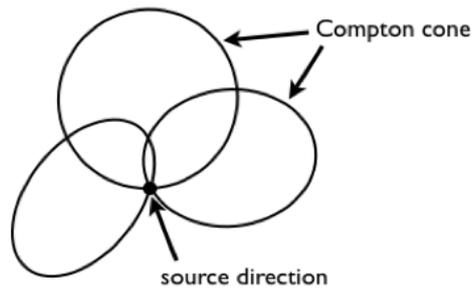


図 2.2: コンプトンコーン [14]

コンプトン再構成には反応位置と反応時に光子が失ったエネルギーが用いられるため、コンプトンカメラの角度分解能、すなわち光子の到来方向の決定精度を向上させるには、高い位置分解能とエネルギー分解能を持つ検出器が必要となる。

## 2.2 半導体検出器

### 2.2.1 Si 半導体検出器

半導体検出器は光子が半導体内に進入した際に励起されるキャリア対を電気信号として読み出す検出器である。半導体検出器は従来 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に比べ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エネルギー分解能が高いという特徴がある。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。

以下 p-n 接合された半導体検出器の読み出し原理について説明する (図 2.3)。p-n 接合された半導体の接合面付近には空乏層というキャリア対の存在しない領域があり、空乏層は逆バイアス電圧をかけることで広がる。空乏層に進入した光子はコンプトン散乱や光電吸収を生じてキャリア対 (電子、正孔) を励起する。このとき励起されるキャリア対の数は光子の失ったエネルギーに比例する。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、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。

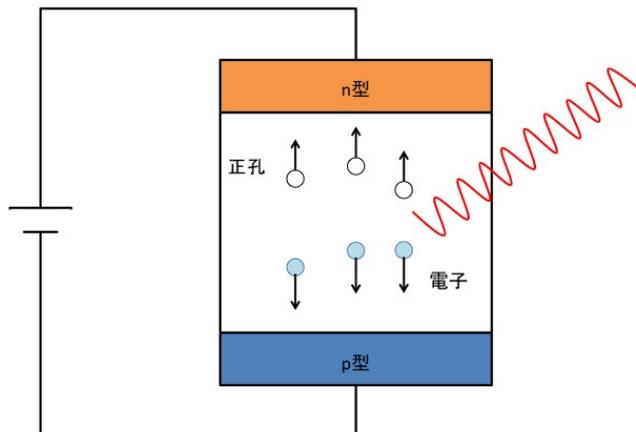


図 2.3: p-n 接合半導体検出器模式図

ASTRO-H 搭載 SGD や CAST 構想のコンプトンカメラの散乱体センサーにはシリコン (Si) 半導体センサーが用いられる。これは SGD や CAST がターゲットとする sub-MeV から MeV のエネルギー帯においては、Si とガンマ線光子との反応でコンプトン散乱が支配的となるからである。図 2.4 はあるエネルギーでの Si と光子の反応断面積を示したものである。約 100keV から数 MeV までの帯域においてコンプトン散乱の断面積が支配的であることが分かる。また Si 半導体は過去に検出器として使用された実績があるため、加工プロセスが整っており改良がし易いという利点もある。

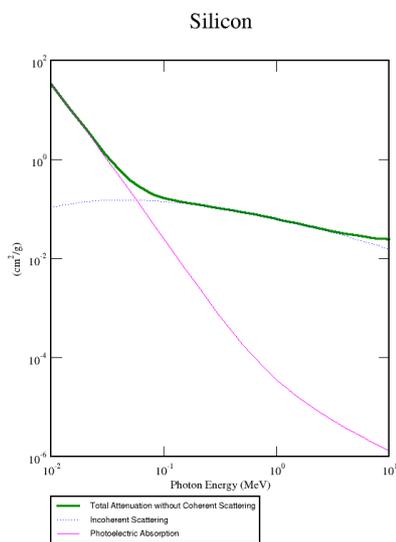


図 2.4: Si の反応断面積 [11]

## 2.2.2 半導体検出器の読み出しノイズ

§2.1 で述べた通りコンプトンカメラの角度分解能は使用する半導体検出器のエネルギー分解能に依存し、半導体検出器のノイズはエネルギー分解能に大きな影響を与える。よって検出器のノイズを低減することでコンプトンカメラの角度分解能を向上させることができる。半導体検出器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

暗電流は熱励起によってキャリア対が半導体内に生じ、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 2.2 のような関係がある。

$$I(T) \propto T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (2.2)$$

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 2.2 からわかるように暗電流は温度に大きく依存するので温度を下げることで暗電流を小さくすることができる。また p-n 半導体検出器は逆バイアス電圧がある程度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。これは熱励起された電子は逆バイアス電圧で加速し、加速した電子が空乏層内の原子の別の電子に衝突することでその電子が励起され、それが繰り返して起こることにより生じる。なので、通常は降伏電圧よりも十分低い逆バイアス電圧をかけて使用する。暗電流は有限個の電子の流れであるので、電子数のゆらぎが信号に混入し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  $\alpha$  を用いて  $N = 2\alpha q I$  と表される。

#### (2) 検出器容量

完全空乏化した半導体検出器の容量は平行板コンデンサの容量の式に近似できることが知られている。この容量は body 容量と呼ばれ次式 2.3 のように表される。

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (2.3)$$

ここで  $\epsilon$  は半導体の誘電率 (Si の場合  $\epsilon = 1.06 \times 10^{-12}$  F/cm)、 $S$  はセンサーの面積、 $d$  は空乏層の厚さである。空乏層は逆バイアス電圧を大きくすることで広がるため body 容量によるノイズを低減するにはなるべく高電圧で動作させることが望ましい。また Si-Pad などの Pad 型検出器のように複数のピクセルを持つ検出器ではそのピクセル同士間にも容量を持ち channel 間容量 (ch 間容量) と呼ばれる。図 2.5 のような検出器の場合 ch 間容量は implant 間隔などに依存し、またピクセル上を通る読み出し線との間に生じる容量も ch 間容量に含まれる。

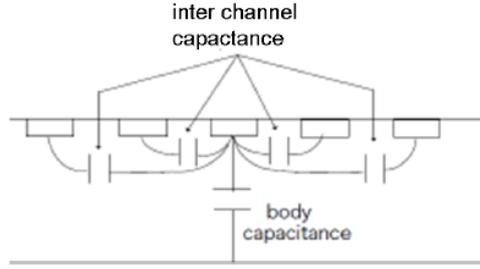


図 2.5: 複数 ch を持つ検出器の容量

暗電流と検出器容量は、検出器から CSA(Charge Sensitive Amplifier:電荷有感型前置増幅器) までの電子回路の性能と合わせて検出器のノイズに影響する。また半導体の構造や不純物のランダム運動に起因する  $1/f$  ノイズも存在する。以下検出器のノイズについて図 2.6 のような等価雑音回路を用いて考える。

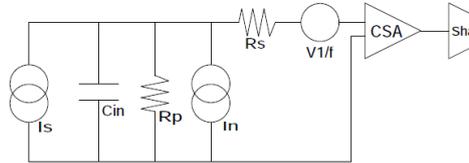


図 2.6: 半導体センサーの等価雑音回路 [12]

図 2.6 において  $I_s$ :X 線による信号電流、 $C_{in}$ :等価入力容量 (検出器の接合容量、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 [6][12]。図 2.6 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 2.4 で表される。

$$\frac{\overline{V_{noise}^2}}{df} = \frac{4k_B T}{\omega^2 C_{in}^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2 C_{in}^2} + 4k_B T R_s + \frac{C_{1/f}}{f} [V^2/Hz] \quad (2.4)$$

第一項、第三項は  $R_p$ 、 $R_s$  によるジョンソンノイズ、第二項は  $I_n$  によるショットノイズ、第四項は  $1/f$  ノイズを表している。エネルギーは先に述べた通り電荷量で測定されるので式 2.4 を等価雑音電荷  $\overline{\Delta E_{RMS}^2}$  で表すと式 2.5 のように書き換えることができる。

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

式 2.5 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  $\tau$  の波形整形をした場合、式 2.5 は波形整形回路の特性で決まる定数  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  を用いて下の式 2.6 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。

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} = \left( \frac{4k_B T}{R_p} + 2qI_n \right) \cdot A_1 \tau + 4k_B T R_s C_{in}^2 \cdot \frac{A_2}{\tau} + \frac{C_{1/f} C_{in}^2}{f} \cdot A_3 [C^2] \quad (2.6)$$

信号に対して理想的なガウシアン整形を行った場合 ( $A_1, A_2, A_3$ ) = (0.6267, 0.6267, 0.5) となる。keV 単位への換算のため  $(2.355\epsilon/10^3/q)^2$  をかけ第三項を定数項とすると、エネルギー分解能は式 2.7 のように近似で

きる。ただし変数の単位はそれぞれ  $R_p(\text{G}\Omega), \tau(\mu\text{sec}), I_n(\text{nA}), C_{in}(\text{pF}), g(\text{mS})$  とする。

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} \simeq \left( 2.86 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{R_p} + 0.58 I_n \right) \tau + \left( 2.0 \times 10^{-2} \cdot \frac{C_{in}^2}{g} \right) / \tau + \text{const.} [\text{keV}^2] \quad (2.7)$$

本実験では  $R_p$  が十分大きいとでき、式 2.7 の第一項は暗電流による項が支配的であることが分かる。また第二項は CSA の容量勾配を表しており  $f(C_{in})^2$  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 2.8 のように表される。

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} \simeq 0.58 I_n \tau + \{f(C_{in})\}^2 / \tau + \text{const.} [\text{keV}^2] \quad (2.8)$$

## 2.3 Si-Pad 検出器

Si-Pad は平板状 n 型 Si ウエハーの片面に  $p^+$  型の pixel 状 implant を配置し、もう片面に  $n^+$  型平板を配置した構造を持つ (図 2.7)。それぞれの  $p^+$  型 implant 上に 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ることができる。

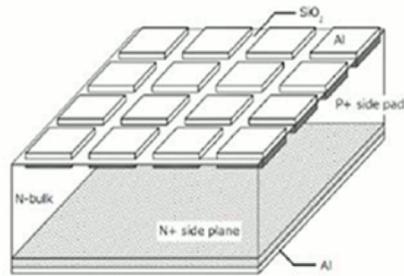


図 2.7: Si-Pad センサー模式図 [6]

### 2.3.1 SGD 用 Si-Pad 検出器

SGD 搭載の Si-Pad は図 2.8 のように  $8 \times 8$  pixel 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。これは SGD 検出器用のコンプトンカメラにはすべての側面に吸収体センサーを配置することを前提とし、構造上読み出し用集積回路を Si-Pad の各 4 隅に設置しなければならなかったからである。SGD 用 Si-Pad 検出器には鏡面对称な 2 種類が存在し、それぞれの  $n^+$  平板を向かい合わせて 2 枚を 1 組として 16 セット (32 枚) が積層されている。これにより 2 枚の読み出し位置をあわせ、高電圧のかかる  $n^+$  から周囲への放電を防ぐようになっている。

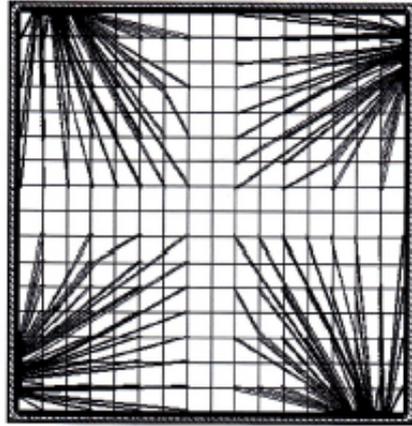


図 2.8: SGD 搭載 Si-Pad の読み出し線パターン [13]

SGD 検出器に対する要求性能は表 2.1 のように定められており、これを満たすように SGD 用 Si-Pad 検出器の要求性能は表 2.2 の通りとなっている。

表 2.1: SGD への要求性能 [2]

Energy range	10 keV - 600 keV
Energy Resolution	< 2 keV (FWHM, at 60 keV)
Effective Area	> 20 cm <sup>2</sup>
FOV	0.6 × 0.6 degree <sup>2</sup>
Timing Resolution	25.6 μs
Operating Temperature	~ -20 C°

過去の実験から SGD 用 Si-Pad 検出器はピクセルの位置によってエネルギー分解能に大きな差があることが知られている。これは読み出し線が集中する箇所(下図 2.9 右下方)で読み出し線によるノイズが大きくなっていることが原因として考えられている。また 20°C 程度の常温においては読み出し線の集中しないピクセルでもエネルギー分解能が約 2.4 keV と悪くなり(下図 2.10)、SGD の要求を満たす性能を発揮するには -10°C 以下といった冷却下で使用する必要がある。

表 2.2: SGD 用 Si-Pad 検出器への要求性能 [4]

Sensor Active Area	5.12 × 5.12 cm <sup>2</sup>
Pixel Area	3.2 × 3.2 mm <sup>2</sup>
number of pixel	16 × 16
Thickness of detector	~0.6 mm
Thickness of depletion layer	0.6 mm
Bias Voltage	230 V
Leakage Current per pixel @ -10 C°	50pA

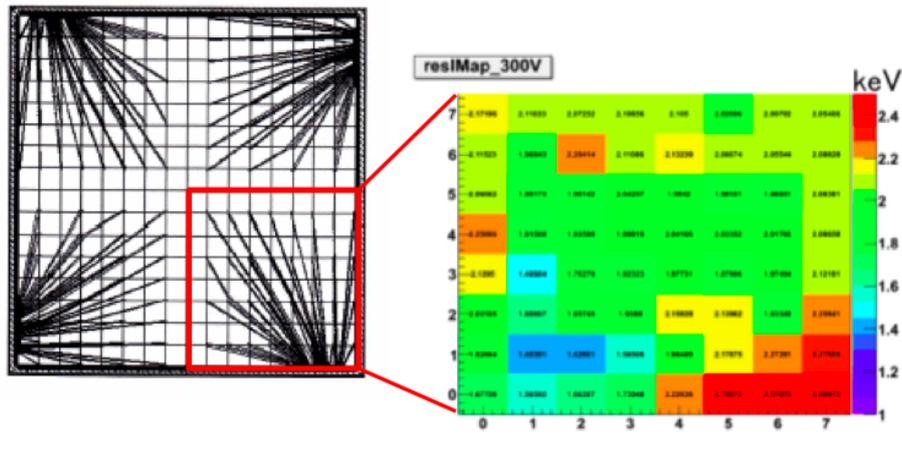


図 2.9: SGD 用 Si-Pad(1 区画分) のエネルギー分解能マップ [15]

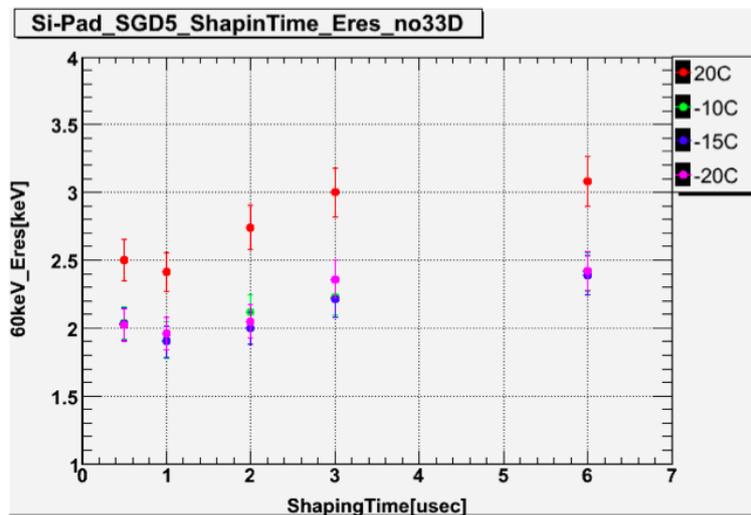


図 2.10: SGD 用 Si-Pad のエネルギー分解能の温度依存性 [6]

### 2.3.2 新型 Si-Pad 検出器

§1.2.2 で述べたように CAST 計画のような将来計画においてもコンプトンカメラの主検出部としての利用が検討されており、それに向けた新型センサーの開発も進んでいる。SGD 用 Si-Pad 検出器をベースに新型 Si-Pad 検出器の開発するに当たり以下の課題を考慮する必要があった。

1. SGD は視野をしばった状態で観測を行うため要求性能を満たすが、CAST のような視野をしばらずにより高エネルギー帯域での全天観測を行なうにはさらに高い角度分解能が必要
2. SGD では動作温度を $-20^{\circ}\text{C}$  前後にする必要があったが、地上試験で環境を整えるのが容易でない
3. SGD 用 Si-Pad では読み出しが四隅からのため、読み出し線が集中しノイズが高くなるピクセルが存在する

以上の課題を踏まえ新型 Si-Pad 検出器の開発においては以下のような改良を試みた。

- ピクセルあたりの暗電流、容量を小さくするためピクセルの小型化
- 読み出し線による容量を小さくするため SiO<sub>2</sub> 絶縁層を最大限厚くする
- 読み出しを縦一方向にし、読み出し線による容量の均一化、構造の簡易化を図る

先に述べた課題 1 は両面シリコンストリップ検出器を用いることでも解決できるが、Si-Pad 検出器と異なり両面それぞれに読み出し用集積回路を接続する必要があるため、SGD のように高密度で積層することが難しい。また、より小さなピクセルの Si-Pad 検出器を用いることで解決できるが、読み出すチャンネルの増加に伴い必要な読み出し用集積回路が増加し、消費電力や排熱の問題が生じるため、SGD 同等以上の性能を満たす範囲でピクセルを小型化することとした。また読み出し線を一辺に集めると、読み出し用集積回路を配置することにより全側面に吸収体センサーを配置することはできなくなったが、図 2.11 に示すように CAST のターゲットとする 200 keV - 2 MeV においては前方散乱 (光子の進入方向に対して小角度の散乱) が優勢になるため全側面を散乱体センサーで覆う必要がないため問題ない。

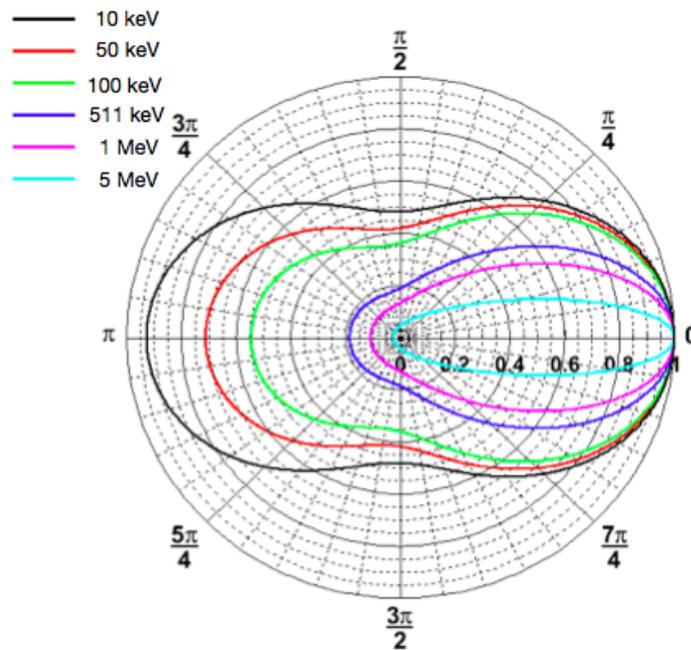


図 2.11: 各エネルギーでのコンプトン散乱の微分散乱断面積 [18]

以上の改良点を踏まえて 2 種類の新型 Si-Pad が開発された。その仕様を表 2.4 に、読み出し線のパターン図を図??に示す。

表 2.3: SGD 用および新型 Si-Pad 検出器の仕様

	SGD	Pad1	Pad2
Sensor size	$5.39 \times 5.39 \text{ cm}^2$	$4.77 \times 5.21 \text{ cm}^2$	$4.72 \times 4.77 \text{ cm}^2$
Pixel size	$3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$	$2.6 \times 2.6 \text{ mm}^2$	$1.9 \times 1.9 \text{ mm}^2$
Number of pixels	16×16	18×20	24×24
Thickness of depletion layer	0.6 mm	0.6 mm	0.6 mm
read out line	四隅	一辺	一辺



図 2.12: 新型 Si-Pad 検出器読み出しパターン (左 : Pad1( $4.77 \times 5.21 \text{ cm}^2$ ), 右 : Pad2( $4.72 \times 4.77 \text{ cm}^2$ ))

## 2.4 ASIC

Pad 型検出器のような多チャンネルの検出器の全チャンネルを同時に読み出す場合、地上における読み出し試験では次章に示すように読み出すチャンネルごとに読み出し用回路などを設けることも不可能ではないが現実的ではない。また人工衛星のように限られたスペース、電力で読み出しを考えるととなおさらである。このように検出器の信号などの大量の情報を同時に処理する回路に特定用途向け集積回路 (Application Specific Integrated Circuit : ASIC) がある。ASIC は開発に時間、コストがかかるため、頻繁に変更の必要がある回路には向かない、一度作成すると修正が困難などの欠点があるが、実装面積の縮小、消費電力の低下、高度な信号処理、大量生産が可能などの利点を持つため、人工衛星での検出器からの信号処理には欠かせないものとなっている。天文観測用 ASIC としては、ノルウェーの GM-Ideas やアメリカ合衆国の SLAC などが共同で低雑音の信号読み出し ASIC 「VATA」シリーズを開発しており [19]、ASTRO-H 搭載 SGD 検出器には同シリーズの VATA450.3 が用いられる。VATA450.3 は 64 チャンネル分の読み出し回路が搭載されており、各チャンネルの回路は大きく増幅、整形を行う VA 部とトリガー信号を生成する TA 部から構成されている。

以下簡単に信号処理の流れを述べる (下図??参照)。検出器で生成された電気信号は各チャンネルの VA 部にある電荷有感型増幅器 (CSA) で増幅され、VA 部の後段回路と TA 部に送られる。TA 部では時定数の短い整形器 (fast shaper) で整形され Discriminator に入力される。ここで指定された閾値以上である場合、

後段回路でトリガー信号が生成され VA 部に送られる。また VA 部の後段回路に進んだ信号は時定数の長い整形器 (slow shaper) で整形され、TA 部からトリガー信号が送られてきた場合にはサンプルホールドされる。各チャンネルでホールドされた信号はクロック信号にあわせて multi plexer から出力され、ADC でデジタル信号へと変換される。

表 2.4: VATA450.3 仕様

Die size	10.0 mm × 6.5 mm
Thickness	~450 $\mu$ m
Number of channels	64

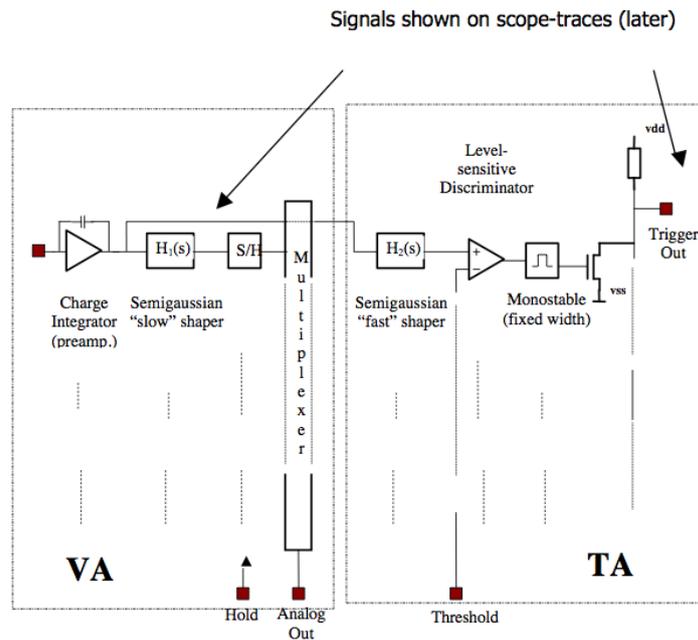


図 2.13: VATA450.3 における信号処理の流れ [20]

## 第3章 Si-Pad 単体基礎特性測定

この章では開発された2種類の新型 Si-Pad に対して1ピクセルごとの読み出しを行い性能評価を行った結果について述べる。

### 3.1 測定項目

§2.2.2 で述べた通り、検出器の性能の指標の一つである角度分解能は位置分解能とエネルギー分解能に依存し、エネルギー分解能はノイズに大きな影響を受ける。よって本実験では検出器の性能評価に際し以下の項目について測定を行う。

1. 暗電流
2. センサー容量
3. エネルギー分解能

### 3.2 読み出し用基板作成

Si-Pad 検出器からの信号を読み出すには検出器と読み出し用回路の間をワイヤボンディングによって電氣的に接続する必要がある。すべてのチャンネルにワイヤボンディングを行い1ピクセルずつ読み出しを行うと時間、コストが膨大になるため、代表的なピクセルを複数選びそれらに対して試験を行った。読み出し用基板の設計はケイ・ティ・システム株式会社と共同で行い、基板作成とワイヤボンディングは同社に依頼した。

#### 3.2.1 Pad1 用読み出し用基板作成

Pad1 の読み出しにあたり企業に基板製作を依頼する以前に自作の基板を用いてボンディングを行い、読み出しを行うことを試みた。Si-Pad 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 を用いてガラスエポキシ製の試験用ボードに貼付け、室温で約1日かけて乾燥させた。その後ハンツマンアドバンストマテリアルズ社製エポキシ系接着剤アラルダイトをもちいて自作基板を貼付けた(図 3.1)。しかし、基板を貼付けた段階で自作基板ではボンディング基板の表面に不均一さや傾きが生じているためボンディングを行うことは厳しいと判断し、自作基板による読み出しを断念した。以上のような経緯から不要な基板が付着した状態から新規読み出し基板の作成を検討する必要があったが、不要基板を切除する際の検出器の破損のリスクを回避するため右の空いている部分に新たに読み出し基板を作成し(図 3.1) ボンディングを行うことにした。ボンディング可能なピクセルのうち下図 3.3 の赤色で示す 11 ピクセルを読み出すこととした。読み出しピクセルの選定に際し、読み出し線の配置がほぼ左右対称であるため縦方向に重きをおいて選定してある。また図 3.3 に黄色で示すすべてのピクセルは基板側ですべて同電位

になるようにボンディングし、電氣的に接続はされているが個別の読み出しはできない状態になっている。白色のピクセルはボンディングを行なっておらず、電氣的に浮いた状態になっている。

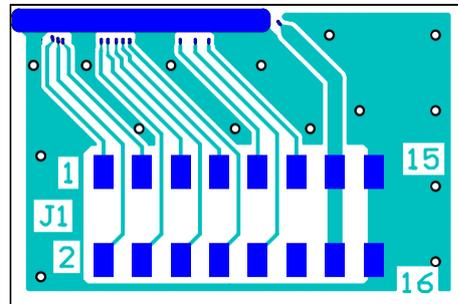


図 3.2: Pad1 読み出し用基板設計図

図 3.1: Pad1 と製作された読み出し基板 (右下) 左下は自作基板 (読み出しには用いない)

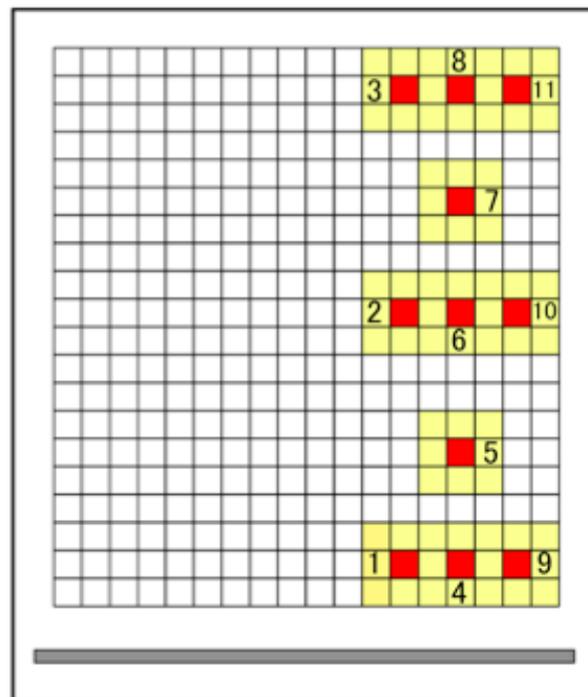


図 3.3: Pad1 でボンディングを行ったピクセル。赤:1 チャンネルとして読み出し可能、黄:1 チャンネルとしての読み出しは不可

### 3.2.2 Pad2 用読み出し用基板作成

Pad2 の読み出し基板作成においても Pad1 同様過去に自作基板を用いた読み出しを試みており、その後市販の基板を用いて読み出しを行った [16]。より詳細な実験を行いたいが、素子の枚数に制限があるため、先の実験で用いた基板から不要部分を切除した上でボンディングを行い、読み出し試験を行なおうとした。不要基板の切除は成功したが、素子の暗電流が大きく上昇しており読み出しが行えなかったため新しい素子を用いて読み出し基板の作成を行うことにした。新しい Pad2 用読み出し基板作成は素子の基板への貼付けも含めてすべてケイ・ティ・システム株式会社に依頼した。素子の基板への貼付けには Panasonic 社製 DBN518S が用いられている。ボンディング可能なピクセルに制限がなかったため基板全体から放射状にまんべんなく読み出すように下図 3.6 の赤色で示す 17 ピクセルを読み出すこととした。また図 3.3 に黄色で示すすべてのピクセルは基板側ですべて同電位になるようにボンディングし、電氣的に接続はされているが個別の読み出しはできない状態になっている。白色のピクセルはボンディングを行なっておらず、電氣的に浮いた状態になっている。



図 3.4: 製作された Pad2 用読み出し基板

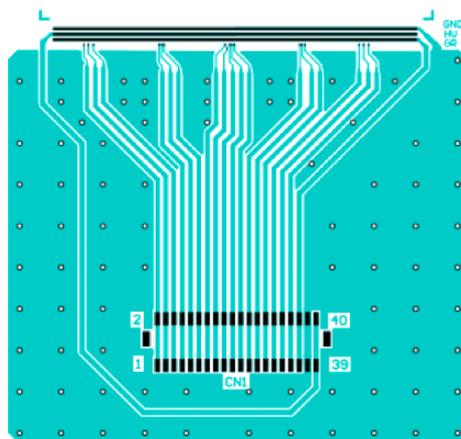


図 3.5: Pad2 読み出し用基板設計図

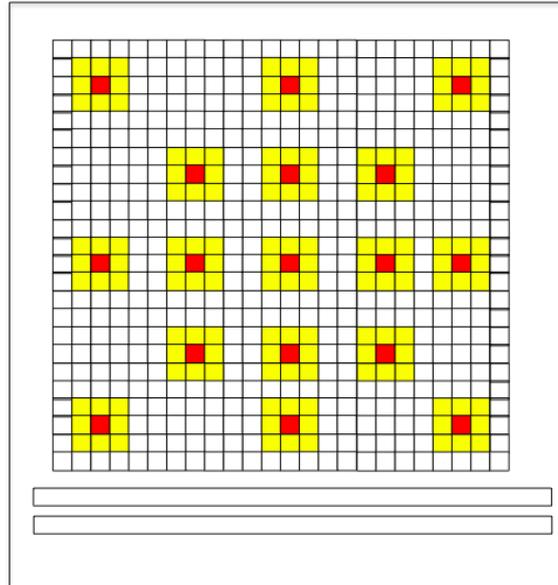


図 3.6: Pad2 でボンディングを行ったピクセル。赤:1 チャンネルとして読み出し可能、黄:1 チャンネルとしての読み出しは不可

### 3.3 実験セットアップ

読み出しを行なう際は外部からのノイズ遮蔽のため下図 3.7、3.8 のようにアルミニウム製のケースに読み出し用基板と前段回路を収め、アルミケースを恒温槽に入れた状態で測定を行なった。

以下測定項目ごとのセットアップを示す。

#### 3.3.1 暗電流測定

暗電流測定は n-sub 平板とピクセルの間に流れる電流を測定する。本研究では n-sub 平板とボンディングを行ったすべてのピクセルおよびガードリングに流れる電流を「全体電流」、n-sub 平板とある 1 ピクセルに流れる電流を「チャンネル (ch) 暗電流」とし、これら 2 項目について測定を行った。暗電流は式 2.2 にあるように大きな温度依存性を持つので、各温度で測定を行った。高圧電源として Keithley2410、電流計として Keithley617 を用い、下図 3.9 および図 3.10 に示すセットアップで測定を行った。また測定中温度を一定に保つため検出器、前段回路を恒温槽に入れ、恒温槽を稼働させた状態で測定を行った。

#### 3.3.2 センサー容量測定

Body 容量は本来 p 側のすべてのピクセルと n 側平板の間に生じる容量を測定するが、本研究ではボンディングしていないピクセルも存在するため、p 側のピクセルを囲うガードリングおよびボンディングしたピクセルと n 側の平板間に生じる容量を測定した。この容量は Body 容量と同様の電圧依存性を示すこと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ピクセルとそれ以外のすべてのピクセルとの間に生じる容量をさすが、周囲 8 ピクセ

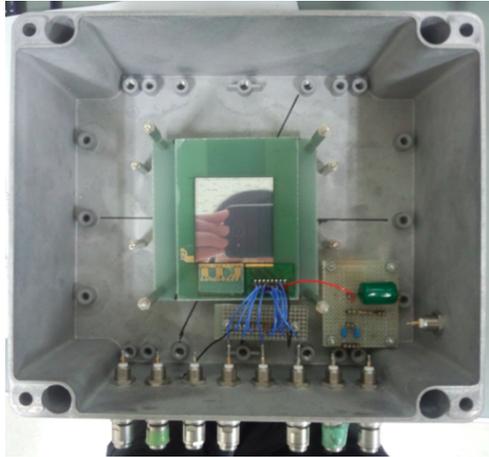


図 3.7: Si-Pad1 読み出しセットアップ



図 3.8: Si-Pad2 読み出しセットアップ

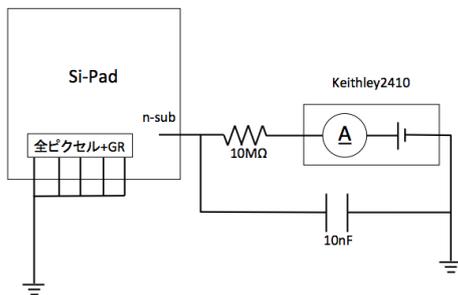


図 3.9: 全体暗電流測定セットアップ

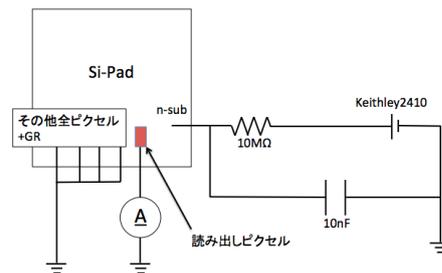


図 3.10: 各チャンネル暗電流測定セットアップ

ルの影響が大きいとしてあるピクセルとその周囲 8 ピクセルとの間に生じる容量を ch 間容量として測定を行った。今回容量の測定には HEWLETTPACKARD 社の HP4284 を用いており、測定周波数は過去の実験 [6] に倣い 100kHz とした。また容量の温度依存性は十分小さいので 20°C でのみ測定を行った。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。

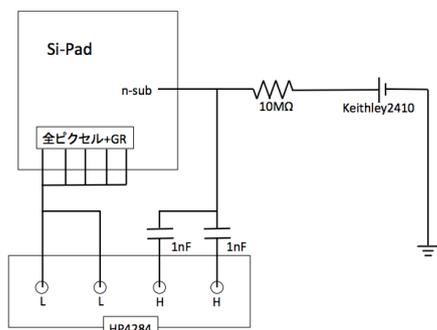


図 3.11: body 容量測定セットアップ

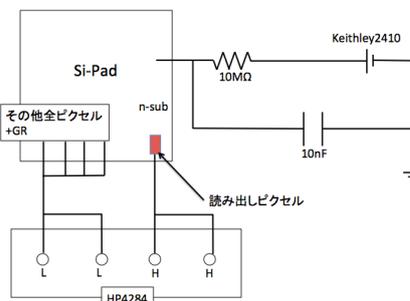


図 3.12: ch 間容量測定セットアップ

### 3.3.3 エネルギー分解能測定

Si-Pad のガンマ線検出器としての性能を検証するため密封線源によってガンマ線を照射し、得られた ADC スペクトルからエネルギー分解能を求めて評価を行った。図 3.13 に ADC スペクトル取得のセットアップを示す。Si-Pad のピクセルから出た信号は前置増幅器 (preAmp, CLEAR-PULSE 社 CP5102(Pad1 測定時), CP580K(Pad2 測定時)) で電圧信号へと変換、増幅される。preAmp には同時にパルサー (CLEAR-PULSE 社 CP9002) から一定のテストパルスを入力し、検出器からの信号と同様に処理されるようにする。preAmp で電圧変換、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整形され、Pocket 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。電流性ノイズの主要因である暗電流に大きな温度依存性があるため 20°C、0°C、-20°C の各温度で測定を行った。検出器、前段回路、preAmp は恒温槽内にて温度を一定に保つようにしたが、恒温槽の振動の読み出しノイズへの影響を無くするためデータ取得中は恒温槽を停止した。

またノイズは波形整形の時定数  $\tau$  に依存するため、 $\tau$  を 0.5、1、2、3、6、10 $\mu$ s の 6 段階に変化させて測定を行い、式 2.8 でフィッティングすることにより電流性ノイズ、容量性ノイズそれぞれの全体へ寄与を考察した。

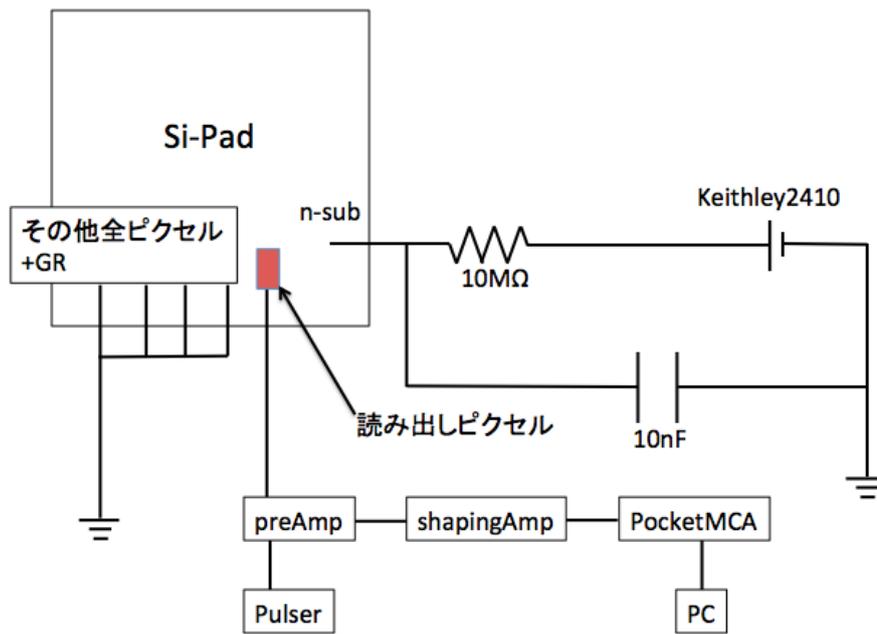


図 3.13: ADC スペクトル取得セットアップ

### 3.4 実験結果

以下 1pixel を測定した結果については全体の傾向とともに平均的なピクセルと考えられる Pad1No.291(下図 3.14 青色)、Pad2No.268(下図 3.15 緑色) について詳細な結果を述べる。

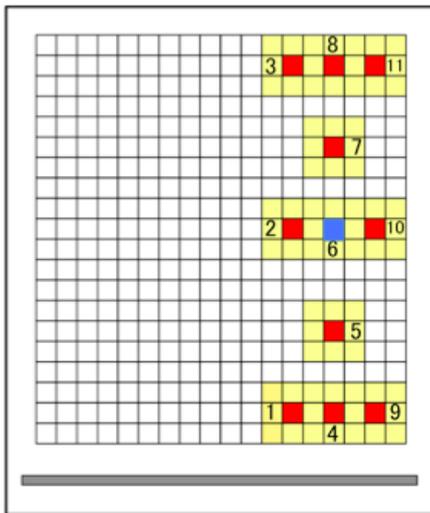


図 3.14: Pad1No.291(図中青色のピクセル)

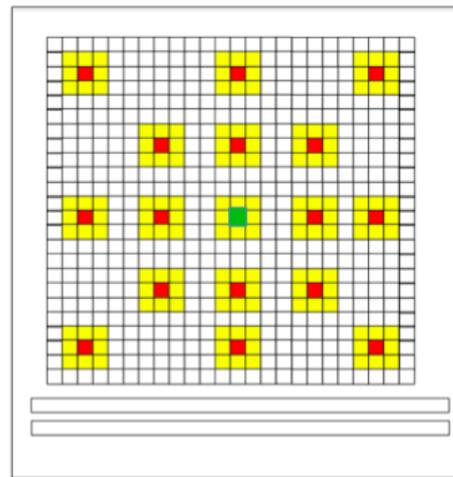


図 3.15: Pad2No.268(図中緑色のピクセル)

### 3.4.1 暗電流

#### 全体暗電流

n-sub 平板とボンディングされたすべてのピクセルおよびガードリングに流れる電流の高圧依存性を調べた。下図に 20°C での測定結果を示す。印加電圧が 300V 以下では Pad1, Pad2 とも break down は起きていないため、高圧が 300V 以下であれば問題なく動作することが分かる。

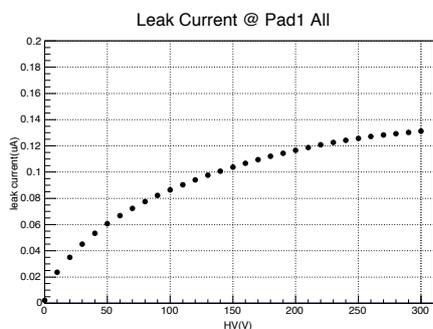


図 3.16: Pad1 全体暗電流の高圧依存性

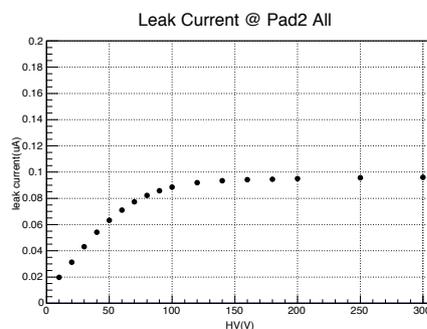


図 3.17: Pad2 全体暗電流の高圧依存性

#### ch 暗電流

n-sub 平板とあるピクセルの間に流れる電流について各温度での高圧依存性を測定した結果を図 3.18、図 3.19 に示す。読み出しを行ったすべてのチャンネル (Pad1:11ch, Pad2:17ch) において 300V まで break down の兆候は見られなかった。

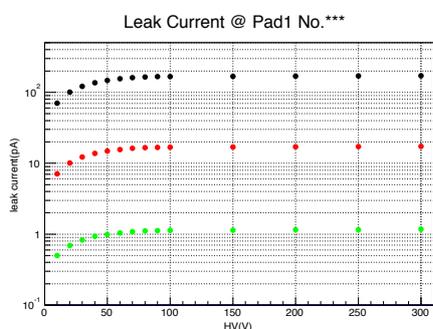


図 3.18: Pad1 No.291 の各温度での暗電流の高圧依存性 (黒:20°C、赤:0°C、緑:-20°C)

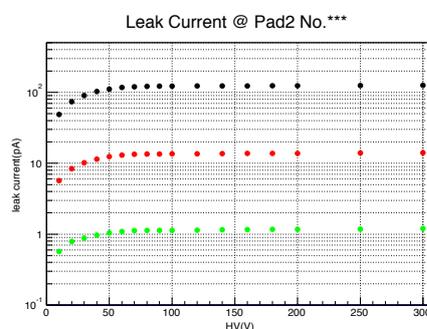


図 3.19: Pad2 No.268 の各温度での暗電流の高圧依存性 (黒:20°C、赤:0°C、緑:-20°C)

また読み出しを行った全ピクセルについて 20°C、300V 印加時の電流値を各ピクセルの位置に示すと図 3.20、図 3.21 のようになった。Pad1 の測定結果では読み出し位置から遠いピクセルで値が大きく、その他のピクセルでは大きな差はない傾向が見られているが、Pad2 の測定結果では同様の傾向は見られず明らかな位置依存性は見られない。このことから Pad1 で電流値が大きいピクセルも位置に依存した傾向ではなく、ピクセルの個性によるものではないかと考えられる。単位面積 (1mm<sup>2</sup>) あたりの電流値は Pad1 では 23.6~38.4pA(上端の極端に大きいものでは 158,239pA)、Pad2 では 24.4~59.6pA となっており概ね同じに



ているからと考えられる。またボンディングを行なっているピクセルが半面に偏った Pad1 で測定値が小さく、全体的にボンディングを行なった Pad2 で大きな値を示すことから、ボンディングを行なっていないピクセルのうち、ボンディングされたピクセルに近い領域では対面の n-sub 平板との間にも容量が生じており、その影響が結果に表れているものと思われる。また図から Pad1 では約 100V から、Pad2 では約 150V から容量値がほぼ一定となっており、この前後で検出器が完全に空乏化したと思われる。よって印加電圧は 150V 以上であることが望ましいことが分かる。

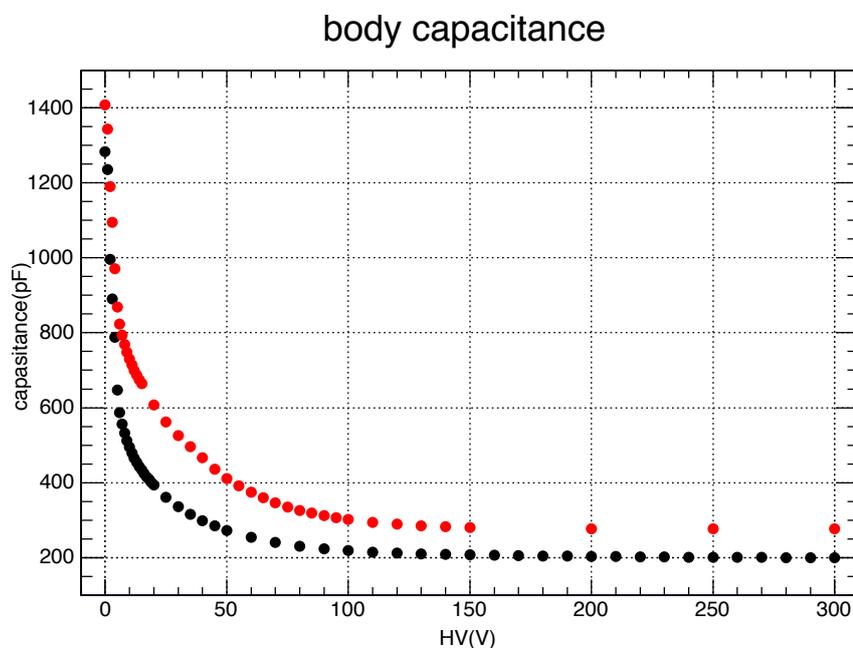


図 3.24: body 容量の高圧依存性。黒:Pad1、赤:Pad2

### ch 間容量

あるピクセルとボンディングを行なったすべてのピクセルおよびガードリングとの間に生じる容量である ch 間容量を測定した。測定の際、読み出し基板など周囲のものとの間に生じる浮遊容量もあわせて計測されるため、下図 3.25 および 3.26 のような読み出しに用いる基板と同等の基板に ch 間容量を測定した際に用いた読み出し用ケーブルを接続し、ch 間容量測定と同じセットアップで浮遊容量を測定した。浮遊容量は Pad1 で 3.3-4.8pF、Pad2 で 10.0-13.8pF であり、それを測定結果から差し引くと、ch 間容量は Pad1 で 6.0-7.4pF、Pad2 で 4.9-7.9pF となった。

下図 3.27 および 3.28 に ch 間容量の高圧依存性を示す。ch 間容量は 5V 前後で極小値を取るが、100V 以上の高圧であれば容量はほぼ一定値を取る。

また読み出しを行ったピクセルについて 20°C、300V 印加時の ch 容量を各ピクセルの位置に示すと図 3.33、図 3.35 のようになった。§でも述べた通り、新型 Si-Pad 検出器は読み出し線の配置を縦一方向にすることにより容量の均一化が図られており、今回の結果からは改良が成功しているといえるであろう。

SGD 用 Si-Pad では body 容量と ch 間容量をあわせた 1 ピクセルあたりの容量が 8.71~21.38pF とピクセル間で大きな差が生じており、読み出し線の集中する端のピクセルにおいては目標性能となる 1 ピクセルあたり <10pF を達成できないピクセルもあったが [6]、新型 Si-Pad2 種類においては Pad1 で 7.22~8.58pF、

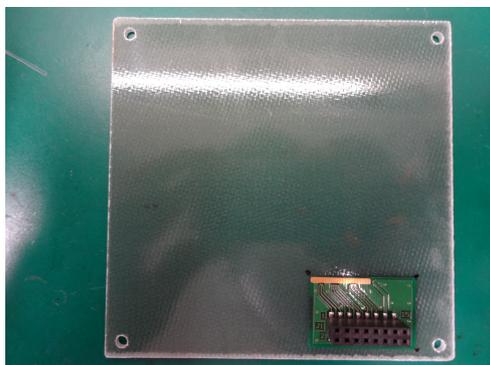


図 3.25: Pad1 浮遊容量測定用基板

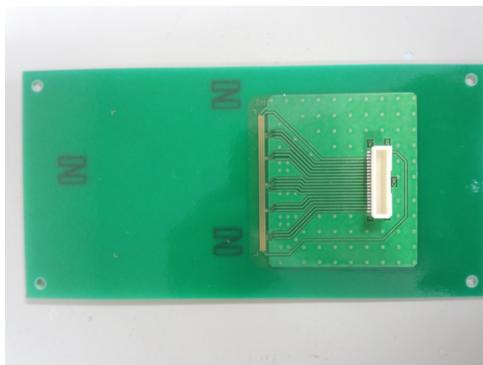


図 3.26: Pad2 浮遊容量測定用基板

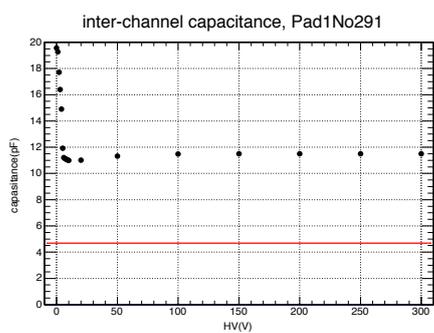


図 3.27: Pad1 No.291 の ch 間容量高圧依存性。赤線は浮遊容量

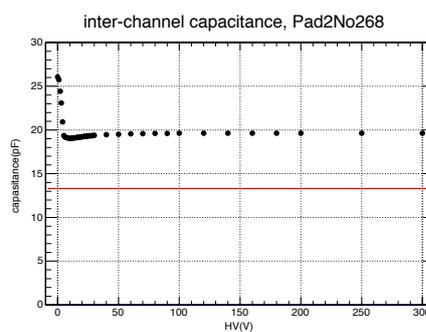


図 3.28: Pad2No.268 の ch 間容量高圧依存性。赤線は浮遊容量



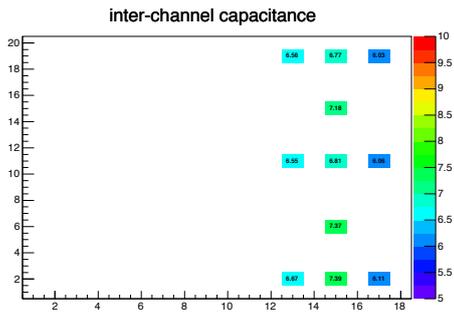


図 3.33: 浮遊容量差し引き後の ch 間容量のピクセル位置依存性 (Pad1)

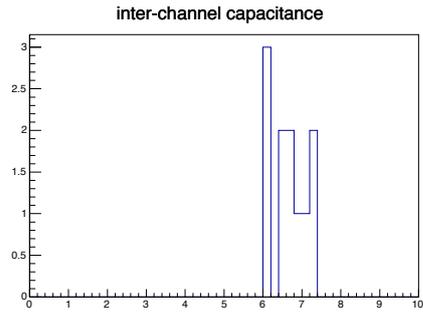


図 3.34: 浮遊容量差し引き後の ch 間容量頻度分布 (Pad1)

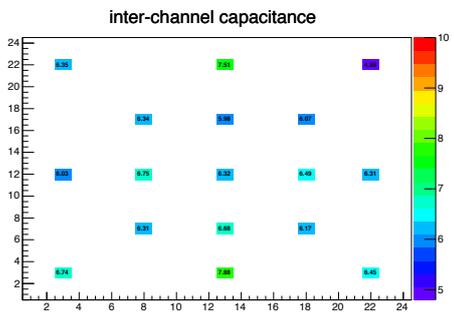


図 3.35: 浮遊容量差し引き後の ch 間容量のピクセル位置依存性 (Pad2)

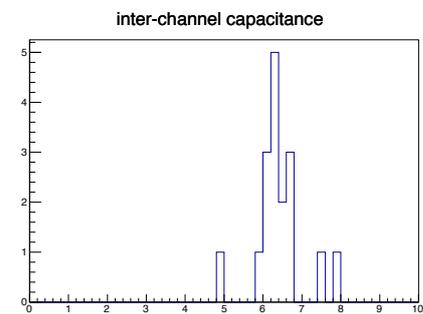


図 3.36: 浮遊容量差し引き後の ch 間容量頻度分布 (Pad2)

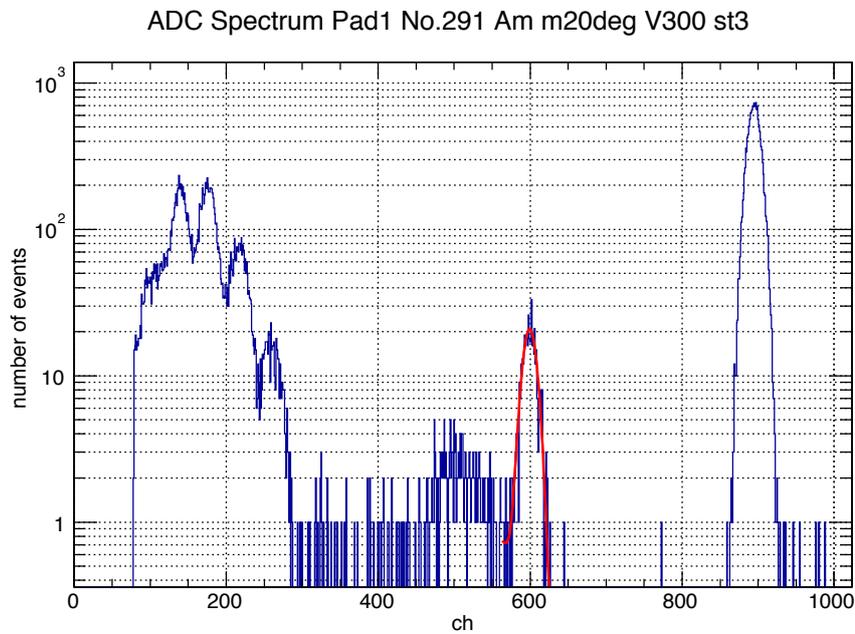


図 3.37:  $^{241}\text{Am}$  線源照射時の ADC スペクトルの例。赤色の線は 59.5keV のピークをガウシアンでフィッティングした結果。



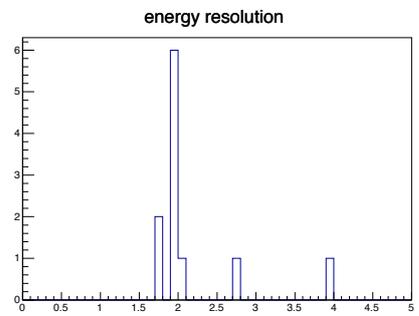
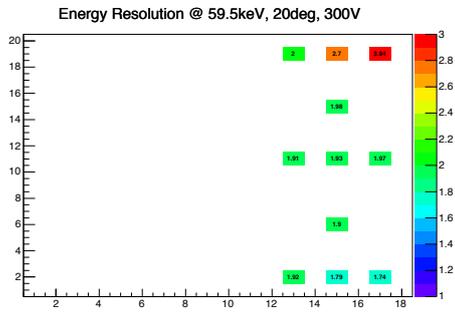


図 3.42: 20°C でのエネルギー分解能のピクセル位置 図 3.43: 20°C でのエネルギー分解能頻度分布 (Pad1) 依存性 (Pad1)

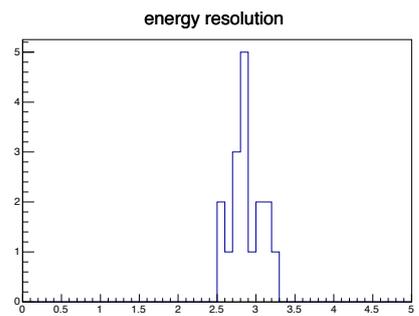
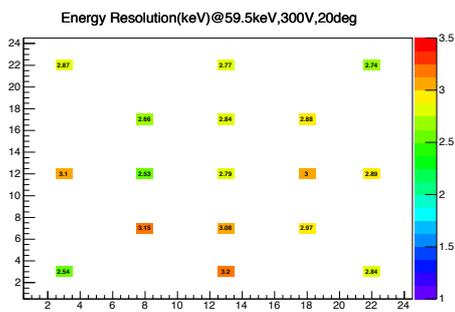


図 3.44: 20°C でのエネルギー分解能のピクセル位置 図 3.45: 20°C でのエネルギー分解能頻度分布 (Pad2) 依存性 (Pad2)

乗せされた状態で読み出しが行われるので、以上のことを踏まえると Pad2 での分解能悪化は浮遊容量による性能悪化が主な原因ではないかと考えられる。

### 3.5 ノイズの評価

エネルギー分解能の shaping time 依存性を調べ、得られた結果を式 2.8 でフィッティングすることにより電流性ノイズ、容量性ノイズそれぞれの全体への寄与を調べた。図 3.46-3.48 に Pad1 No.291、図 3.49-3.51 に Pad2 No.268 についての結果を示す。黒点はスペクトルから得られたエネルギー分解能を示し、それを式 2.8 でフィッティングした結果が赤線である。またフィッティング結果のうち電流成分である第一項を緑の実線、容量成分である第二項と第三項の和を青の実線で示し、暗電流および容量の測定結果から求まる理論曲線を各色の破線で示した。

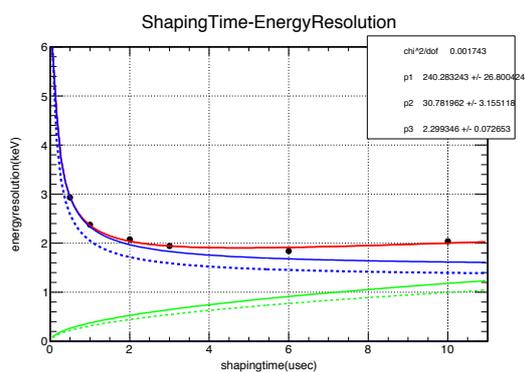


図 3.46: Pad1 No.291 の 20°C でのエネルギー分解能の shaping time 依存性

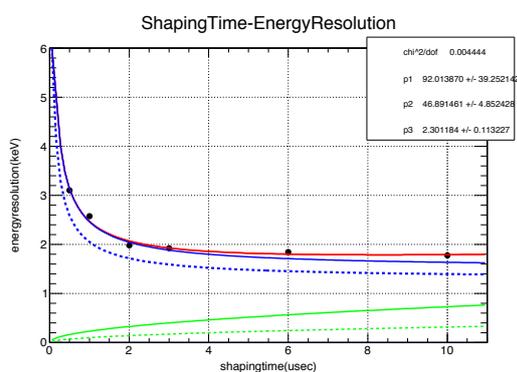


図 3.47: Pad1 No.291 の 0°C でのエネルギー分解能の shaping time 依存性

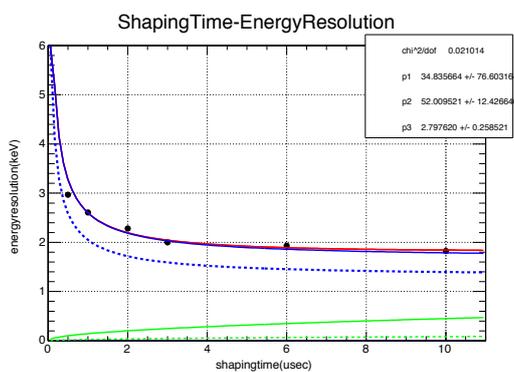


図 3.48: Pad1 No.291 の -20°C でのエネルギー分解能の shaping time 依存性

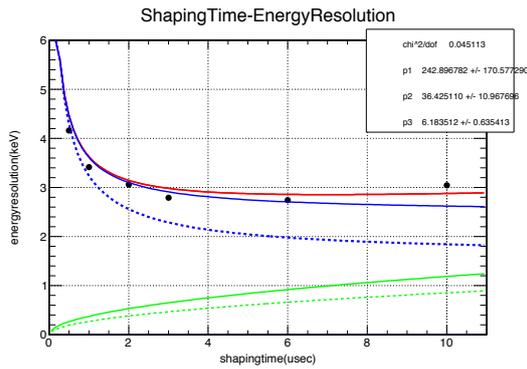


図 3.49: Pad2 No.268 の 20°C でのエネルギー分解能の shaping time 依存性

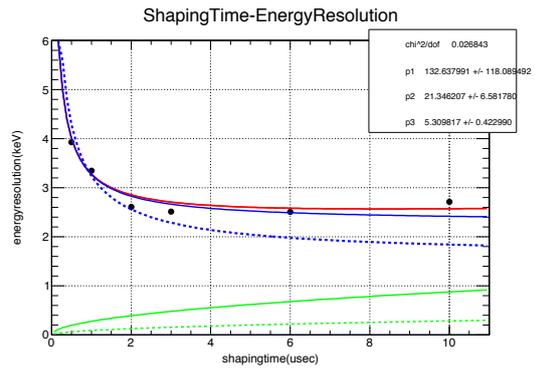


図 3.50: Pad2 No.268 の 0°C でのエネルギー分解能の shaping time 依存性

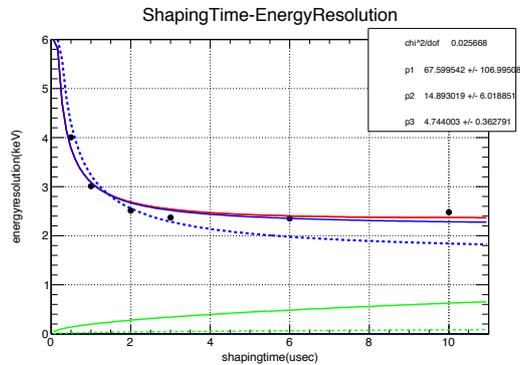


図 3.51: Pad2 No.268 の -20°C でのエネルギー分解能の shaping time 依存性

表 3.1 に暗電流、容量について、フィッティング結果から予想される値と、実際の測定結果をそれぞれ示す。

表 3.1: フィッティングから得られた暗電流  $I_e$ 、容量  $C_e$  と実測値  $I_m$ 、 $C_m$  の比較

T (°C)	Pad1				Pad2			
	$I_e$ (pA)	$I_m$ (pA)	$C_e$ (pF)	$C_m$ (pF)	$I_e$ (pA)	$I_m$ (pA)	$C_e$ (pF)	$C_m$ (pF)
20	240±30	171.3	31±3	12.69	200 ± 200	125.6	40 ± 10	20.27
0	90±40	17.25	47±5	12.69	130 ± 100	14.04	21±7	20.27
-20	30±80	1.18	50±10	12.69	70±100	1.20	15±6	20.27

Pad1, Pad2 ともにノイズ全体に対する容量成分(青)の寄与が大きいことが分かる。また電流成分(緑)の温度変化も見えており、低温での全体への寄与は非常に小さいことが分かる。

### 3.6 単体基礎特性測定まとめ

本章では新型 Si-Pad 検出器に対し 1 ピクセルごとに暗電流、検出器容量、エネルギー分解能の測定を行ない、以下のような結果を得た。

- 暗電流の高圧依存性の測定結果から 300V まで break down の兆候は見られず、これ以下の電圧であれば問題なく動作する。また SGD 用 Si-Pad 検出器と単位面積あたりの暗電流値を比較を行い、測定のばらつきが想定範囲内であることが確認された。
- body 容量測定結果から Pad1 で 100V から、Pad2 で 150V からほぼ一定となり完全空乏化していることが示唆されるため、動作電圧は 150V 以上が望ましい。測定結果は予想値に比べ小さな値になっているが、すべてのピクセルをボンディングしていないことによる影響だと考えられる。
- ch 間容量測定により Pad1 で 6.03~7.39pF、Pad2 で 4.88~7.88pF となり、SGD のようなピクセルの位置に依存した容量値の違いは見られなくなった。読み出し線を縦一方向に配置したことによる容量の均一化に成功したと言える。
- エネルギー分解能測定から Pad1 では-20°C で各ピクセルの分解能は 1.7-1.9keV となり、SGD 用 Si-Pad と比較しても遜色ない性能であることが分かった。また 20°C での測定結果から多くのピクセルで ~2keV となっており、SGD が冷却下で目標とする性能を常温でも達成していることがわかった。Pad2 の測定結果は、Pad1 に比べ分解能が悪い結果となっているが、測定セットアップの浮遊容量によるものだと考えられる。また SGD 用 Si-Pad に見られたピクセルの位置に依存した性能の差は小さくなった。
- エネルギー分解能の shaping time 依存性を調べることにより、ノイズ全体に対する暗電流および容量の寄与を調べ、いずれの温度においても容量の寄与が大きいことが分かった。

## 第4章 ASICによる多チャンネル同時測定

2種類の新型 Si-Pad のうち Pad1 について、宇宙科学研究所で開発されていた専用の集積回路用読み出し基板が製造され、ASIC とともにボンディングされたものが完成したため、Pad1 について ASIC による多チャンネル同時読み出し試験を行った。セットアップの立ち上げおよび読み出し試験は名古屋大学で行なった。

### 4.1 読み出しセットアップ

読み出しセットアップの模式図を下図 4.1 に示す。

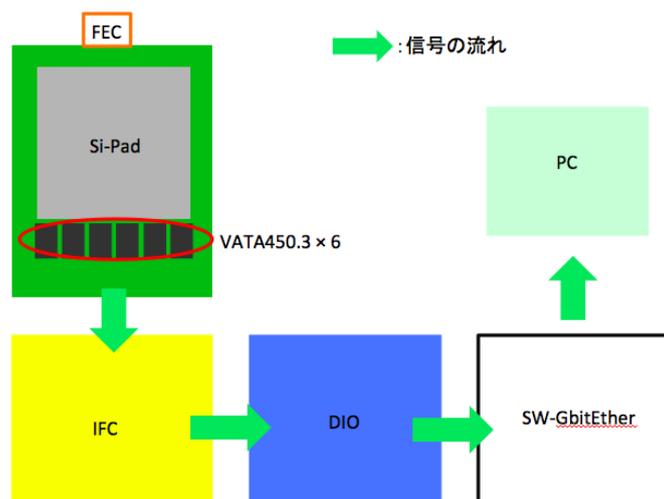


図 4.1: Si-Pad の ASIC 読み出し実験における信号の流れ。図中緑色の矢印が信号の流れを示す

Si-Pad の各ピクセルで生成された電気信号は Front End Card(FEC) 上の ASIC(VATA450.3) に入力される。1 枚の ASIC で 64ch の読み出しが可能であるのに対し、Pad1 は 1 枚 360 ピクセルで構成されるため、FEC には ASIC を 6 枚設置し、各 ch がピクセルの読み出しパッドとボンディングされている。また各 ASIC の両端 2ch(6 枚で 24ch) は Si-Pad とボンディングしていないため、後段の FPGA での信号処理の際には接続されていない ch を無視して処理を行なうように設定してある。ASIC で増幅、整形、AD 変換された信号は IFC で DIO ボード上の FPGA 回路に適した信号レベルに変換され FPGA で記述された読み出しロジックに従って読み出される。本試験で用いられた FPGA からの出力は、世界の通信衛星等搭載機器の標準通信規格として開発・整備が進められている SpaceWire 規格で行なわれるため、その出力を PC の通信規格のひとつである Ether-net 規格に変換し、PC と通信を行なう SW-GbitEther を通じて PC にデータが取り込まれる。実際に読み出しを行なう際は図 4.2 にあるように FEC と IFC、DIO ボードと

SW-GbitEther をそれぞれアルミケースに取め、FEC、IFC をおさめたアルミケースは図 4.3 のように恒温槽 (ESPEC 社 MC711) 内で温度調整をした状態で読み出しを行なった。FPGA 制御用ソフトは宇宙科学研

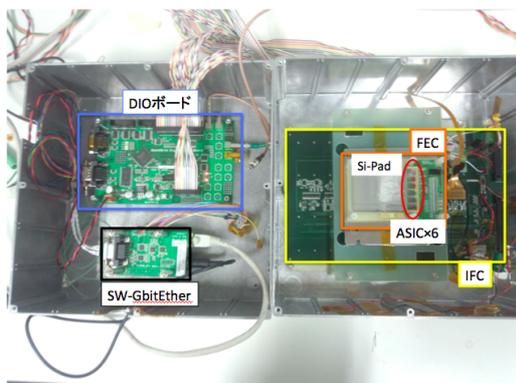


図 4.2: ASIC 読み出しセットアップ

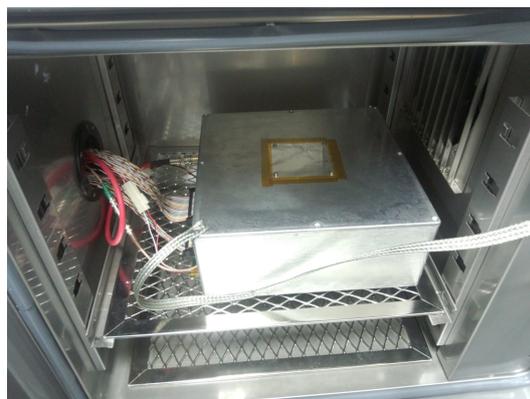


図 4.3: FEC,IFC の入ったアルミケース (図 4.2 右半分) を恒温槽内に収めた様子

究所提供の Vaadread7 を使い、FEC,IFC,DIO ボードの電圧源には GWINSTEK 社 GPD33038 を、Si-Pad 用高電圧源には KEITHLEY2410 をそれぞれ用いた。

## 4.2 測定結果

図 4.4 に Si-Pad への印加電圧 300V、 $-20^{\circ}\text{C}$  で  $^{241}\text{Am}$  を照射した際の ADC スペクトルの例を示す。以下のエネルギー分解能の評価には、単体読み出し試験同様  $^{241}\text{Am}$  の 59.5 keV のピークをガウシアンでフィットして得られた結果を用いることとする。

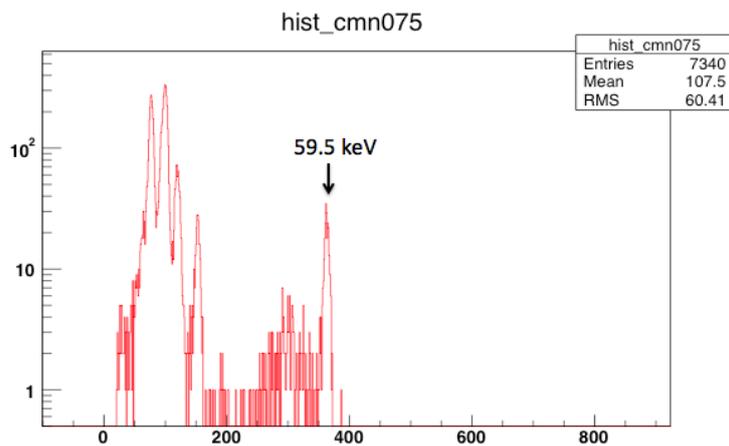


図 4.4: 取得された 1ch 分の ADC スペクトルの例 (ch75, No.291 に対応)

図 4.5 に各ピクセルでのエネルギー分解能を示す。SGD 用 Si-Pad に見られたようなピクセルの位置に依存した性能の差は見えていない。またエネルギー分解能の頻度分布を図 4.6 示す。得られた頻度分布をガウシアンでフィッティングしたところ、エネルギー分解能の平均値は 1.4 keV となり SGD 用 Si-Pad と同等

以上 同様に 20°C で測定した結果を図 4.7 に示す。-20°C の測定同様 SGD 用 Si-Pad のような大きなピクセ

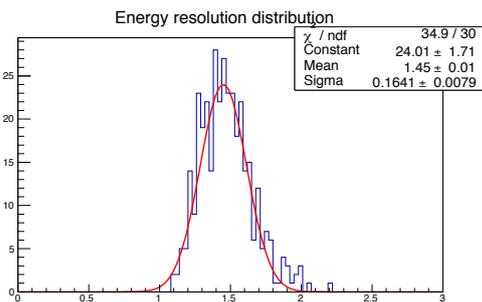
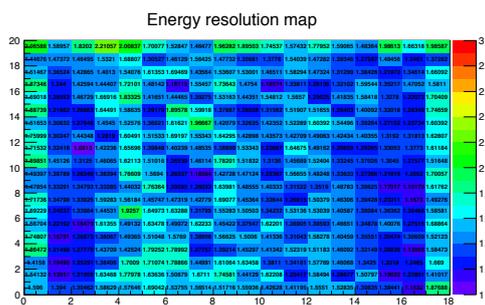


図 4.5: 20°C,300V でのエネルギー分解能の位置依存性 図 4.6: -20°C,300V でのエネルギー分解能の頻度分布

ルの位置依存性は見えていない。またエネルギー分解能の頻度分布 (図 4.8) から平均のエネルギー分解能は ~1.9keV となり、多くのピクセルにおいて冷却することなく SGD の要求性能である 2keV を達成していることがわかった。

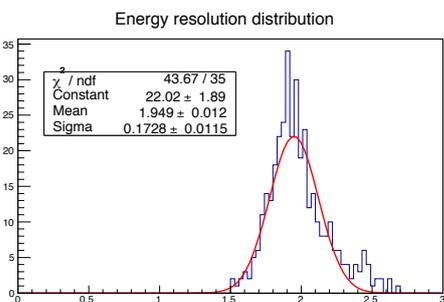
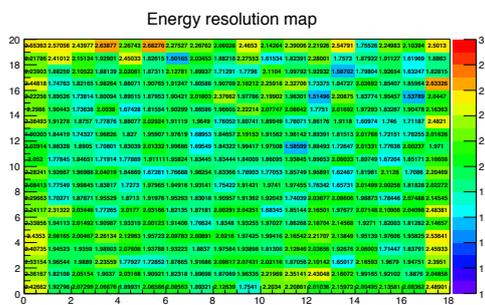


図 4.7: -20°C,300V でのエネルギー分解能の位置依存性 図 4.8: 20°C,300V でのエネルギー分解能の頻度分布

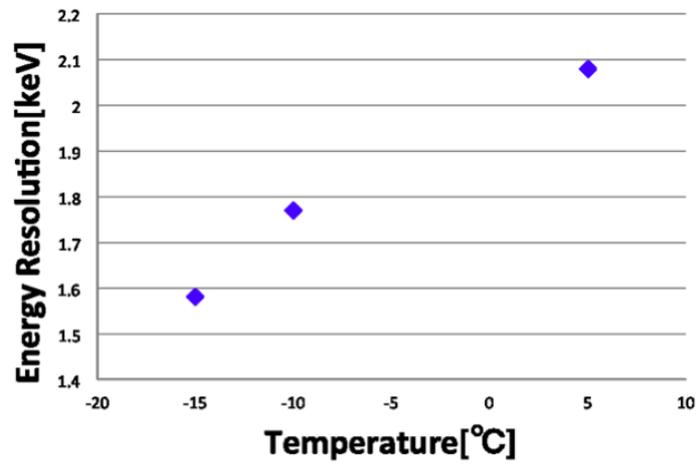


図 4.9: SGD 用 Si-Pad を ASIC で読み出した際のエネルギー分解能の温度依存性 [15]

## 第5章 まとめ

宇宙ガンマ線観測用コンプトンカメラにむけ開発された2種類の新型 Si-Pad について単体読み出し試験および ASIC を用いた多チャンネル同時読み出し試験を行なった。

単体読み出し試験では Pad1、Pad2 それぞれに対し、読み出し用の基板作成からセットアップの立ち上げ、及び1ピクセルごとに暗電流、検出器容量、エネルギー分解能の測定を行ない、以下のような結果を得た。

- 暗電流の高圧依存性の測定結果から 300V 以下の電圧であれば問題なく動作した。SGD 用 Si-Pad 検出器と単位面積あたりの暗電流値を比較により測定の際のばらつきが想定範囲内であることが確認された。
- body 容量測定結果から動作電圧は素子が完全空乏化と思われる 150V 以上が望ましいことがわかった。
- ch 間容量測定から SGD のようなピクセルの位置に依存した容量値の違いは見られなくなり、読み出し線を縦一方向に配置したことによる容量の均一化に成功したと言える。
- Pad1 に対するエネルギー分解能測定から $-20^{\circ}\text{C}$ で各ピクセルの分解能は $1.7\text{--}1.9\text{keV}$ となり、SGD 用 Si-Pad と比較しても遜色ない性能であること、 $20^{\circ}\text{C}$ においても SGD が冷却下で目標とする性能である $2\text{keV}$ を多くのピクセルで達成していることが分かった。また SGD 用 Si-Pad に見られたピクセル位置による大きな性能差は見られない。Pad2 の測定結果は、Pad1 に比べ分解能が悪い結果となっているが、測定セットアップの浮遊容量によるものだと考えられる。
- エネルギー分解能の shaping time 依存性を調べることにより、ノイズ全体に対する暗電流および容量の寄与を調べ、いずれの温度においても容量の寄与が大きいことが分かった。

また Pad1 に対して ASIC による多チャンネル同時読み出し試験を行い以下のような結果を得た。

- $-20^{\circ}\text{C}$ での平均のエネルギー分解能は約 $1.4\text{keV}$ で SGD 用 Si-Pad と同等以上の性能を示す。
- $20^{\circ}\text{C}$ での平均のエネルギー分解能は約 $1.9\text{keV}$ で、SGD 用 Si-Pad が冷却下で目標とする $2\text{keV}$ を常温で達成していることが確認された。
- 低温、常温いずれにおいても SGD 用 Si-Pad に見られるようなピクセルの位置に依存した性能差は見られず、改良は成功していると言える。

今後は Pad2 に対しても Pad1 と同様に ASIC を用いた多チャンネル同時読み出し試験を行なう必要があるため、それに向けて読み出し用 ASIC 及び読み出し用基板を設計する必要がある。その後実際にコンプトンカメラとして組み上げ、コンプトンカメラとしての性能評価を行っていくこととなる。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、研究方針から実験細部まで指導をしていただいた深沢先生にまずお礼を述べたいと思います。ありがとうございます。また広島大での単体試験にあたり相談にのっていただいた大杉先生、ひろたかさん、大野さん、基板作成に協力いただいたケイ・ティ・システム株式会社のみなさま、主に学会発表や名古屋での ASIC 試験に指導、コメントいただいた宇宙研の高橋先生、渡辺さん、武田さん、名古屋大学の田島先生、日々の生活でお世話になった研究室のみなさま、物理事務のみなさま、副査の佐々木先生。みなさまのご協力のおかげでこのように研究結果をまとめきることができました。大変短く拙い文章ではありますが謝辞とさせていただきます。ありがとうございました。

2016年2月10日 白川裕章

## 関連図書

- [1] ASTRO-H 次期 X 線天文衛星,<http://astro-h.isas.jaxa.jp/>
- [2] Takahashi, T. et al., “The ASTRO-H X-ray Observatory”, Proc. SPIE, 8443, 2012
- [3] 日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会資料「天文学・宇宙物理学中規模計画の展望」
- [4] H. Tajima, et al., “Soft Gamma-ray Detector for the ASTRO-H Mission”, SPIE, 7732, pp. 773216-773216 -17, 2010
- [5] 中澤知洋ほか, 小型科学衛星シンポ 2013 発表資料「日本発の全天 MeV/sub-MeV 観測の実現 CAST 計画」
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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)
- [9] 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
- [10] 日本学術会議「2013 中小宇宙観測プロジェクト」
- [11] NIST, XCOM: Photon Cross Sections Database,<http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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
- [15] PARK INCHUN 「Performance evaluation of Flight-Model Si-Pad sensors for Soft Gamma-ray Detector (SGD) onboard ASTRO-H」, 修士論文, 広島大学, 2012
- [16] 白川裕章 「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」, 卒業論文, 広島大学, 2014
- [17] Glenn F.Knoll 「放射線計測ハンドブック (第 3 版)」
- [18] 一戸悠人 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器における コンプトン再構成アルゴリズムの開発」, 修士論文, 東京大学, 2013

[19] 幅田翔 「半導体 X 線検出器開発に向けた ASIC による多チャンネル読み出しシステムの構築」, 卒業論文, 広島大学, 2015

[20] <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=1&resId=0&materialId=1&confId=56207>