

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

所属・著者:上野一誠

日付:第一版 120210

## 概要

2014年打ち上げ予定の次期 X 線観測衛星 ASTRO-H は、ブラックホールの周辺や超新星爆発など高エネルギーの現象に満ちた極限宇宙の探査・高温プラズマに満たされた銀河団の観測を行うことを目的とした衛星である。その ASTRO-H に搭載される検出器 SGD は、主に狭視野多層半導体コンプトンカメラと BGO アクティブシールドから構成されており、10-600keV のエネルギー領域において従来より一桁以上良い感度を目指している。

狭視野多層半導体コンプトンカメラは、Si を用いた散乱部と CdTe を用いた吸収部に分かれていてコンプトン運動学を利用し、入射した光子のエネルギーと位置情報を用いて光子の到来方向を予測する。そして、吸収部の Si 検出器には、Pad 型の Si 半導体検出器 (Si-Pad) を用いる。

その Si-Pad は、衛星軌道上で宇宙線によって放射線損傷を起こす。本論文では、放射線損傷によって起こる性能への影響を見るため、衛星運用期間受けるであろう量のガンマ線を Si-Pad に照射しその性能が SGD の要求性能を満たしているかを検証した。また、過去の Si-Pad の実験で見られた高電圧を印可したときの急激に増加した暗電流が徐々に降下する現象も測定を行い考察した。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>高エネルギー天文学と次期 X 線天文衛星 ASTRO-H</b>	<b>6</b>
1.1	次期 X 線天文衛星 ASTRO-H	6
1.2	軟ガンマ線検出器 SGD	8
1.3	Si センサー	9
1.3.1	Si-Pad センサー	10
1.3.2	半導体センサーのノイズ	11
1.4	SGD に要求される性能	15
1.5	これまでの Si-Pad センサーの開発経緯	15
1.6	論文の目的	16
<b>第 2 章</b>	<b>放射線損傷の測定</b>	<b>17</b>
2.1	放射線による Si-pad への影響	17
2.2	実験のセットアップ	17
2.2.1	使用する Si-Pad センサー	17
2.2.2	測定するピクセル	20
2.3	放射線照射	22
2.4	照射量依存性の測定	25
2.4.1	暗電流	25
2.4.2	容量	27
2.4.3	エネルギー分解能	28
2.5	放射線損傷による分解能への影響のまとめ	37
<b>第 3 章</b>	<b>Si-pad の高電圧印加時での暗電流の振る舞い</b>	<b>38</b>
3.1	検証項目	38
3.1.1	ブレイクダウン	38
3.1.2	トレーニングエフェクト	38
3.2	実験のセットアップ	40
3.3	測定結果	41
3.3.1	ブレイクダウン	41
3.3.2	トレーニングエフェクト	44
3.3.3	ブレイクダウン電圧値の上昇	45
3.4	高印加電圧での暗電流の振る舞いのまとめ	46
<b>第 4 章</b>	<b>今後の課題</b>	<b>47</b>

# 目次

1.1	ASTRO-H のイメージ図 [1]	7
1.2	ASTRO-H の観測エネルギー範囲 [2]	7
1.3	SGD の断面図	8
1.4	コンプトンカメラの概念図	9
1.5	シリコン、カドテルと光子の相互作用	10
1.6	Si-Pad センサーの構造	10
1.7	Si-Pad センサーの読み出し原理	11
1.8	半導体センサーの等価雑音回路	11
1.9	PreAMP(5102 型) の容量勾配	13
1.10	pad 間の容量 [6]	14
1.11	ピクセルと引出し線の容量 [3]	14
2.1	放射線損傷による新たなエネルギーギャップの形成 [3]	18
2.2	SGD4 の Si-Pad のデザイン	18
2.3	直径 200mm の Si 単結晶 [7]	19
2.4	SGD4 と SGD5 の引出し線のデザイン	19
2.5	コンプトンカメラでの SGD4 と SGD5 の配置例	20
2.6	四つの隅に引出し線とボンディングする治具が設置されている (ロット 2 の SGD4)	20
2.7	引出し線とピクセルを読み出す基盤がボンディングしてある	21
2.8	SGD4 の読み出し可能なピクセル	21
2.9	Nside と HV をかける基盤がボンディングしてある	21
2.10	線源からの距離 30cm の時の照射のセットアップ	23
2.11	高さに対する照射量の分布 [9]	24
2.12	積算照射量 10krad 照射したときの写真	24
2.13	1 つのピクセルの暗電流値を測定するセットアップ	25
2.14	積算照射量 5krad のロット 1 の SGD4 の区画 a の暗電流値に対する照射量依存性	26
2.15	ロット 1 の SGD4 の区画 a のピクセル番号 3,5,7 の暗電流温度依存性	26
2.16	ロット 1 の SGD4 の区画 a のピクセル番号 3,5,7 照射に対する $E_t - E_i$	27
2.17	ピクセルとピクセルの間に放射線が照射され損傷を起こすイメージ	27
2.18	pad 間容量のセットアップ	28
2.19	ロット 1 の SGD4 の区画 a の pad 間容量に対する照射量依存性	28
2.20	スペクトル測定のセットアップ	29
2.21	ロット 1 の SGD4 を積算照射量 6krad 照射した後の区画 a のピクセル番号 3 のスペクトル	30

2.22	ロット 1 の SGD4 の区画 a の照射に対するエネルギー分解能	30
2.23	ロット 1 の SGD4 の区画 a の照射に対する電流性ノイズの理論値	31
2.24	ロット 1 の SGD4 の区画 a の照射に対する容量性ノイズの理論値	32
2.25	ロット 1 の SGD4 の区画 a の照射に対するエネルギー分解能の理論値	32
2.26	ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の区画 a,b,c,d のピクセル番号 3 の ShapingTime に対するエネルギー分解能	33
2.27	ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の区画 a のピクセル番号 3 の ShapingTime に対するエネルギー分解能をフィッティングしたもの	33
2.28	ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の区画 b のピクセル番号 3 の ShapingTime に対するエネルギー分解能をフィッティングしたもの	33
2.29	ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の区画 c のピクセル番号 3 の ShapingTime に対するエネルギー分解能をフィッティングしたもの	34
2.30	ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の区画 d のピクセル番号 3 の ShapingTime に対するエネルギー分解能をフィッティングしたもの	34
2.31	テストパルスのエネルギー分解能の Shaping Time 依存性	35
2.32	テストパルスのエネルギー分解能の Shaping Time 依存性をフィッティングしたもの	35
2.33	ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の区画 a のピクセル番号 3 の ShapingTime に対するエネルギー分解能をフィッティングしたもの	36
2.34	ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の区画 b のピクセル番号 3 の ShapingTime に対するエネルギー分解能をフィッティングしたもの	36
2.35	ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の区画 c のピクセル番号 3 の ShapingTime に対するエネルギー分解能をフィッティングしたもの	36
2.36	ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の区画 d のピクセル番号 3 の ShapingTime に対するエネルギー分解能をフィッティングしたもの	36
3.1	なだれ増倍の起きる過程 ( $E_C$ : 伝導帯下端のエネルギー、 $E_V$ : 価電子帯上端のエネルギー、 $\epsilon$ : 電界)[7]	39
3.2	2krad 照射時の HV と暗電流値の時間変化 [3]	39
3.3	ピクセルの端で Micro-discharge が起きる様子の概念図 [3]	40
3.4	全ピクセルの暗電流値を測定するセットアップ	40
3.5	PFM の SGD5 の積算照射量が 20krad の時の I-V 特性	41
3.6	ロット 1 の SGD4 の積算照射量が 0krad の時の I-V 特性 (温度 20 °C)	41
3.7	ロット 1 の SGD4 の積算照射量が 2krad の時の I-V 特性 (温度-15 °C)	41
3.8	ロット 1 の SGD4 の積算照射量が 6krad の時の I-V 特性 (温度 20 °C)	42
3.9	ロット 1 の SGD4 の積算照射量が 10krad の時の I-V 特性 (温度-15 °C)	42
3.10	ロット 1 の SGD4 の積算照射量が 20krad の時のアニーリング後すぐに測定した I-V 特性 (温度-15 °C)	42
3.11	ロット 1 の SGD4 の積算照射量が 20krad の時の最初の I-V 特性測定から 3 日後に測定した I-V 特性 (温度-15 °C)	42
3.12	ロット 1 の SGD4 のブレークダウン電圧値に対する照射量依存性	43

3.13	ロット1のSGD4の積算照射量が2kradの時のトレーニングエフェクト (温度-15℃) . . . . .	44
3.14	ロット1のSGD4の積算照射量が6kradの時のトレーニングエフェクト (温度20℃) . . . . .	44
3.15	ロット1のSGD4の積算照射量が10kradの時のトレーニングエフェクト (温度-15℃) . . . . .	44
3.16	ロット1のSGD4の積算照射量が20kradの時のトレーニングエフェクト (温度-15℃) . . . . .	44
3.17	ロット1のSGD4の積算照射量が20kradの時のI-V特性 (温度-15℃) . . . . .	45



# 第1章 高エネルギー天文学と次期 X 線天文衛星 ASTRO-H

宇宙には様々な天体や星間物質が存在し、それらは様々な波長によって光を出し輝いている。その中でも、ブラックホール、中性子星などの高エネルギー天体は、X 線やガンマ線領域で強く非熱的放射をしていると考えられている。この X 線やガンマ線はエネルギーが高く星間物質での吸収や散乱が受けにくいという性質をもつために、高エネルギー天体の観測には適している波長と言える。しかし、X 線やガンマ線は地球の大気によって吸収を受けるため地上での観測は困難とされている。よって、人工衛星などによる宇宙空間での観測が必要である。

そして、X 線観測のための人工衛星は様々な国で開発が行われ、現在活躍しているものには NASA の Chandra 衛星や ESA の XMM-Newton 衛星などがある。日本においてもそれは同じで多くの衛星が打ち上げられていて今はすぎくが活躍している。そして、現在日本では今までよりも、より感度の良い観測を実現できる X 線観測衛星の開発を行っている。それが次期 X 線天文衛星 ASTRO-H である。この ASTRO-H については次で詳しく紹介していく。

## 1.1 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H

ASTRO-H とは、ブラックホールの周辺や超新星爆発など高エネルギーの現象に満ちた極限宇宙の探査や高温プラズマに満たされた銀河団の観測を行い、宇宙の構造やその進化を探ることを目的とした 2014 年打ち上げ予定の次期 X 線天文衛星である。この ASTRO-H には、高分散 X 線分光検出器 SXS(Soft X-ray Spectrometer)、軟 X 線撮像検出器 SXI(Soft X-ray Imager)、硬 X 線撮像検出器 HXI(Hard X-ray Imager)、軟ガンマ線検出器 SGD(Soft gamma-ray Detector) といった 4 つの検出器が搭載される予定である。それぞれの検出器について簡単に説明をすると、SXS は測定エネルギー範囲が 0.3-10keV のマイクロカロリメータを用いた 4-7eV のエネルギー分解能を持つ超精密分光器である。これによって、X 線でしか観測できない銀河団の高温ガスの乱流や銀河団の衝突速度などが測定可能である。SXI は、測定エネルギー範囲が 0.5-12keV の広視野の軟 X 線イメージカメラである。軟 X 線望遠鏡で集光された光を広視野の CCD で受けて分光をする。HXI は、測定エネルギー範囲が 5-80keV の硬 X 線イメージカメラである。10 – 80keV までの領域を担う CdTI ピクセル検出器の上部に、5-30keV までの領域を担う 4 層の両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) を配置し、その周りを井戸型 BGO シールドで囲む事で高感度の検出器となっている。SGD は、測定エネルギー範囲が 10-600keV のコンプトンカメラを用いた狭視野軟ガンマ線検出器である。この SGD については次で詳しく紹介をする。

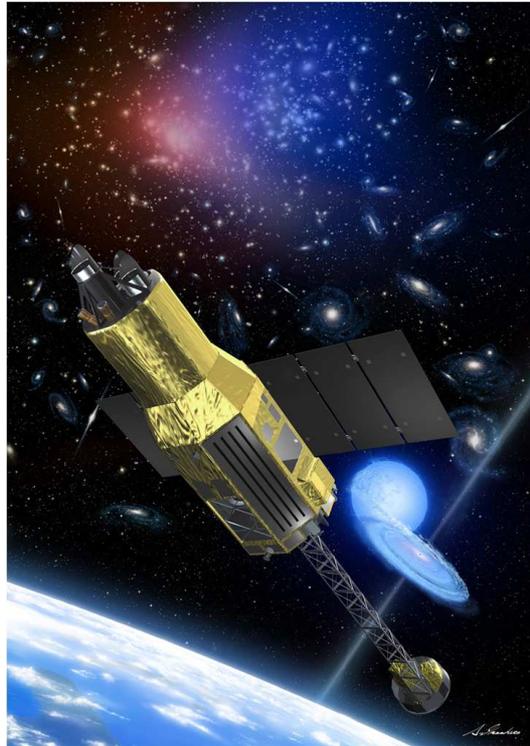


図 1.1: ASTRO-H のイメージ図 [1]

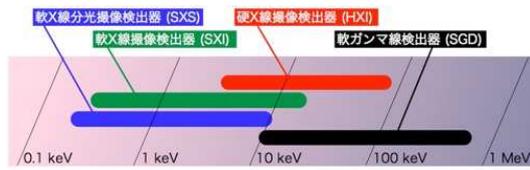


図 1.2: ASTRO-H の観測エネルギー範囲 [2]

## 1.2 軟ガンマ線検出器 SGD

軟ガンマ線検出器 SGD とは、エネルギー帯域が 10-600keV の軟ガンマ線の領域をターゲットとしている検出器である。この SGD は、広帯域かつ高感度の観測を目指しており、それを実現するためには軌道上でのバックグラウンドレベルを低くすることが不可欠である。そのため、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が採用されている。図 1.3 に SGD の断面図を示す。

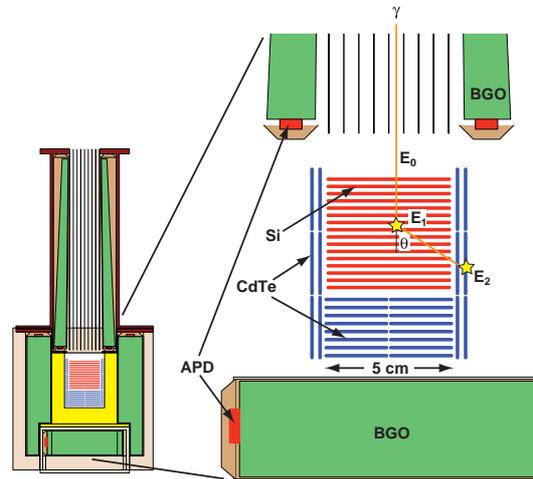


図 1.3: SGD の断面図

井戸型アクティブシールドは、すざく衛星搭載硬 X 線検出器 HXD で使用されているバックグラウンド除去技術である。SGD では、コンプトンカメラからなる主検出部を、井戸型 BGO 結晶シンチレータによるアクティブシールドで囲んだ構造をしている。アクティブシールドはそれ自体を検出器として動作させ、主検出器と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することで、バックグラウンドを大きく低減させることを可能にしている。

コンプトンカメラは、コンプトン運動学を用いて反応位置とデポジットエネルギーを測定し、光子の来る方向を推定してバックグラウンドと天体信号を区別する装置である。SGD のコンプトンカメラでは、大きく分けて Si で出来ている散乱部と CdTe で出来ている吸収部に分かれている。図 1.4 にその概念図を示す。

構造としては、Si センサーが 32 枚と CdTe が Bottom に 8 枚と Side に 24 枚から成り立つコンプトンカメラをなしており SGD ではこれが 3 つで一つのユニットを形成している。この SGD が ASTRO-H の側面の 2 箇所に搭載される。入射光子は、最初、散乱部で散乱し反跳電子のエネルギー  $E_1$  を失う。そして、散乱光子は吸収部で光電吸収されエネルギー  $E_2$  を失う。散乱部でのコンプトン散乱角を  $\theta$  とするとコンプトン散乱の式

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

より、コンプトン散乱角  $\theta$  が求まる。さらに、入射光子のエネルギー  $E_m$  は、センサーで得られたエネルギーの和  $E_m = E_1 + E_2$  によって求めることができる。

これらの散乱部でのコンプトン散乱と吸収部での光電吸収の反応位置と式 1.1 から求めたコンプトン散

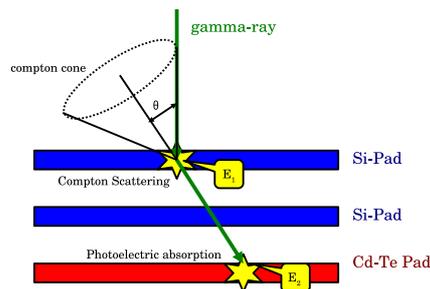


図 1.4: コンプトンカメラの概念図

乱角によって光子のくる方向を円環で制限できる。特に、散乱角  $\theta$  によって決定される円錐は光子のソースが存在しうる領域で、コンプトンコーン (compton cone) と呼ぶ。そして、同一の線源から複数の光子が検出されれば、それら光子の円環が重なり合う交点から線源の位置を特定することができる。

### 1.3 Si センサー

Si センサーについて簡単に説明しておく。半導体センサーは、放射線が通過することにより電離され生成された電子-正孔対電気信号を読み取ることにより入射光子の情報を得るセンサーである。半導体センサーは、物質との相互作用によって生成される電子を直接測定することが可能であり、他のシンチレーション検出器などと比べ、エネルギー分解能に優れ、位置も測定できる。よって、放射線のエネルギーと位置を測定するのに向いている。

そして、その半導体センサーの中でも、Si が選ばれたのには2つの理由がある。

一つ目としては、Si は、半導体の中でも炭素に次いで原子番号が小さいためである。コンプトンカメラの角度分解能は Doppler Broadening という電子の軌道運動によって光子のエネルギー分解能が悪くなる現象によって左右されるのだが、これは原子番号が小さくなるほど影響は小さくなる。よって、原子番号の小さい Si は適していると言える。

もう一つの理由としては、Si が数 10keV から数 100keV のエネルギー光子に対してコンプトン散乱が支配的であるためである。これは、SGD のエネルギー領域である 10keV から 600keV に合うためコンプトンカメラの散乱体として向いていると言える。図 1.5 に Si、CdTe と光子の相互作用を示す。図 1.5 を見ると Si はコンプトン散乱体として CdTe は光子吸収体として適していることが分かる。

ASTRO-H では、多チャンネル Si センサーが用いられている。それは、コンプトンカメラの Si センサーでは、上で説明したように位置情報を読み取ることが重要で、多チャンネルのセンサーを用いることで検出したチャンネルをみて位置情報を正確に知ることが出来るためである。さらに、多チャンネル Si センサーには、ストリップ型センサー (DSSD) とパッド型センサー (Si-Pad) がある。DSSD は構造の特性上、Si-Pad よりも位置分解能とエネルギー分解能が良いが、構造が複雑であるため製造工程に難がある。Si-Pad は DSSD と比べ性能はやや劣るが、SGD が目標として目指している性能を十分達成できる。よって、Si センサーを

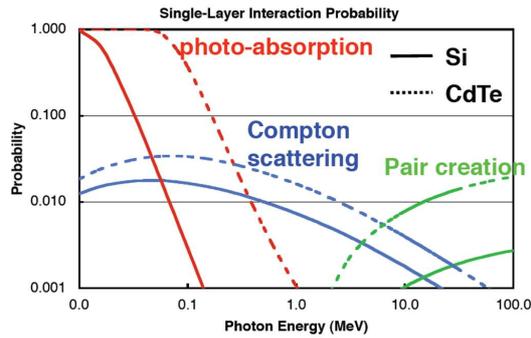


図 1.5: シリコン、カドテルと光子の相互作用

多く使用するコンプトンカメラでは、構造がより簡単なため機器に組みやすい点とコストが低い点を考慮し、Si-Pad センサーを用いることになった。

### 1.3.1 Si-Pad センサー

本研究で扱う SGD のコンプトンカメラに採用されているパッド型 Si 検出器である Si-Pad センサーについて説明をする。Si-Pad センサーの構造は図 1.6 のようになっている。

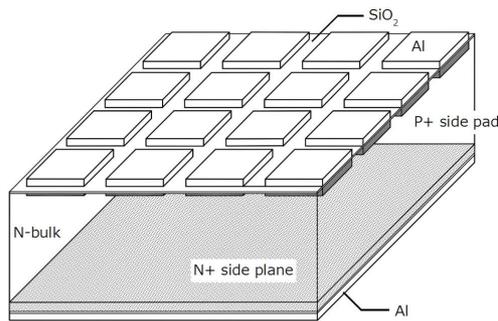


図 1.6: Si-Pad センサーの構造

構造としては、正孔を多く持っている p 型半導体がピクセル状に敷き詰められている面と電子を多く持っている n 型半導体の平板の 2 つの部分で成り立っていて、p-n 間にはキャリアがほとんど存在しない空乏層が形成されている。Pside 側の各ピクセルには電気信号を読み出すための DC 結合された Al 電極が引き出し線として付けられており、ピクセルの Al 電極がついている以外の部分は SiO<sub>2</sub> の絶縁層で覆われていて他のピクセルとつながらないようになっている。さらに、Pside 側の電場を一様に揃えるため全ピクセルを囲むようにガードリングが設置されている。

Si-Pad の X 線検出原理としては、逆バイアス電圧がかけられている空乏層に光子が入射したとする。すると、空乏層では入ってきた光子により光電吸収、コンプトン散乱などによって束縛されていた電子が励起し、空乏層内に入射光子のエネルギーに比例した数の電子・正孔が発生する。そして、出来た電子・正孔は

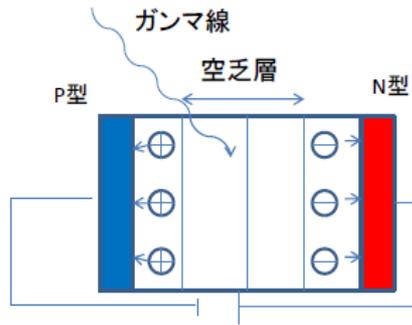


図 1.7: Si-Pad センサーの読み出し原理

空乏層内の電場により、電子はNside側に正孔はPside側にそれぞれ引き寄せられ、Pside側の各ピクセルの引出し線を通じて電気信号として読み出されることにより、入射光子がSiセンサー上におとしたエネルギーと二次元的な位置情報を得る。

### 1.3.2 半導体センサーのノイズ

コンプトンカメラの角度分解能は、半導体センサーのエネルギー分解能によって性能が決まる。そしてそのエネルギー分解能は、半導体センサーのノイズに大きく影響される。ここでは、半導体センサーのノイズにおいてどの成分が大きく影響を及ぼすのかについて考える。

そこで、図 1.8 のような等価雑音回路を考える。

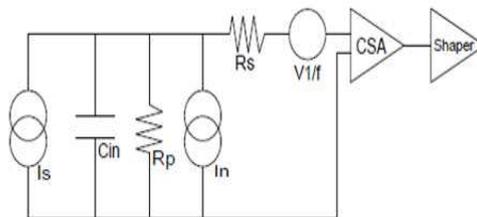


図 1.8: 半導体センサーの等価雑音回路

図 1.8 において、 $I_s$ :入射放射線による信号電流、 $C_{in}$ :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 の相互インダクタンス)、 $I_n$ :暗電流、 $V_{1/f}$ : $1/f$  ノイズを表している。[3]

全雑音電圧のパワースペクトルは、

$$\overline{\frac{V_{noise}^2}{df}} = \frac{4k_B T}{\omega^2 C_{in}^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2 C_{in}^2} + 4k_B T R_s + \frac{V_{1/f}}{d} [v^2/H_z] \quad (1.2)$$

となる。この式において、第一項と第三項が Johnson noise、第二項が shot noise、第四項が 1/f noise の和である。エネルギーは、等価雑音電荷  $\overline{\Delta E_{RMS}^2}$  で表す。(1/f ノイズは周波数に反比例するため) その係数を  $C_{1/f}$  とする。時定数  $\tau_s$  の波形整形回路において、ある波形整形を行ったときの雑音の大きさを、等価雑音電荷で表すと、

$$\overline{\frac{\Delta E_{RMS}^2}{df}} = \frac{4k_B T}{\omega^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2} + 4k_B T R_s C_{in}^2 + \frac{C_{1/f} C_{in}^2}{f} [C^2/H_z] \quad (1.3)$$

となる。(  $V_{1/f}$  は周波数に反比例するので、1/f noise を大きさを表す比例係数  $C_{1/f}$  によって置き換えている。) 初段回路の雑音強度は周波数依存性を持つためフィルターをかけて波形整形を行うと S/N を最適化できることがこの式を見ると明らかである。さらに、簡単のために、 $\omega/2\pi \sim f \sim \Delta f \sim 1/\tau$  ( $\tau$  は波形整形の時定数) として、ガウシアン整形を行ってみると、

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} = \left( \frac{4K_B T}{R_p} + 2qI_n \right) \cdot A_1 \tau + 4k_B T R_s C_{in}^2 \cdot \frac{A_2}{\tau} + \frac{C_{1/f} C_{in}^2}{f} \cdot A_3 [e^2] \quad (1.4)$$

となる。(  $A_1 A_2 A_3$  は波形整形回路のフィルター特性で決まる係数であり理想的なガウシアン ( $CR - RC^n$ 、 $n \rightarrow \infty$ ) に対しては、 $(A_1, A_2, A_3) = (0.6267, 0.6267, 0.5)$  である。) )

式 1.4 を Si センサーのエネルギー分解能に換算するため  $(2.355\epsilon/10^3/q)^2$  をかけて原因の分かりにくい第 3 項を用いずに温度-15 °C ( $T=270K$ ) で近似をすると ( $\epsilon = 3.64[eV]$ ,  $q = 1.6 \times 10^{-19}[J/eV]$ )

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} \simeq (2.86 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{R_p} + 0.65I_n) \tau + (2.0 \times 10^{-2} \cdot \frac{C_{in}^2}{g}) / \tau [keV^2] \quad (1.5)$$

ここで変数の単位は、 $R_p(G \Omega)$ ,  $\tau(\mu sec)$ ,  $I_n(nA)$ ,  $C_{in}(pF)$ ,  $g(mS)$  である。式 1.5 において、第 1 項目が電流依存性、第 2 項目が容量依存性をしめしている。[4]

本実験で、 $R_p$  は PreAMP の抵抗に相当しその抵抗は 1M  $\Omega$  なので第 1 項目は  $I_n$  が支配する。また、第 2 項目に関しては、式 1.4 の第 3 項の形より  $\{f(C_{in})\}^2$  と書き表すことができ、これは容量勾配を表している。従って、図 1.9 のように用いた PreAMP の横軸に容量、縦軸にエネルギー分解能のグラフを作ること、そのグラフに Body 容量と pad 間容量を足し合わせた値を照らし合わせるにより容量によるノイズの大きさが分かる。つまり、本実験では Si-Pad センサーのノイズは次の式 1.6 で表すことができる。

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} \simeq 0.65I_n \tau + \{f(C_{in})\}^2 [keV^2] \quad (1.6)$$

具体的に、エネルギー分解能に影響する暗電流と容量について説明をする。

- 暗電流

半導体検出器に逆バイアスがかかった状態で、空乏層領域の電子が熱励起によりエネルギーギャップを超え伝導体に遷移されると電子-正孔対が生成されて、それが微弱な電流として検出される。これが、暗電流である。

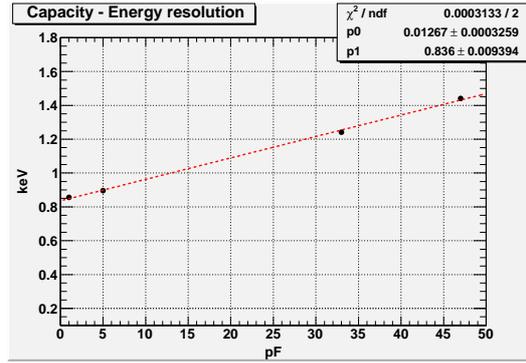


図 1.9: PreAMP(5102 型) の容量勾配

そして、暗電流  $I$  は温度  $T$  と次のような関係を持つ。

$$I(T) \propto T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (1.7)$$

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 1.7 をみると分かるように暗電流は温度に大きく依存しており、温度を下げることにより暗電流値を抑えることが可能である。そのため、Si-Pad の SGD での運用温度は  $-15^\circ\text{C}$  に設定されている。

また、暗電流は半導体内にドナーやアクセプタ以外の不純物が含まれていることや結晶の構造に乱れがあることによっても暗電流を増加させる。これは、バンドギャップ中に新たなエネルギー準位が形成され電子などが伝導体へ遷移することを誘発するためである。しかし、Si-Pad のような構造が複雑なものは、結晶を高純度なもの使っているものの加工を行う際に不純物や結晶に欠陥が残ってしまう。このような暗電流を表面暗電流といい、表面暗電流と熱によるバルクからの暗電流のどちらが大きき寄与してくるかは製造や構造によって決まる。

- 容量

Si-Pad の容量には、2 種類の容量がある。一つは、Body 容量と呼ばれるもので Si-Pad のような p-n 接合を用いた半導体では、Pside の半導体と Nside の半導体が平板コンデンサーであるように扱えるため、次の式で Body 容量は表せる。

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (1.8)$$

ここで、 $C$  は Body 容量、 $S$  はセンサーの面積、 $d$  は空乏層の厚さである。

二つ目は、pad 間容量というもので、図 1.10 のように一つのピクセルに対し隣合うピクセルとの容量など pad 間で発生する容量のことである。さらに、この pad 間容量には引出し線が発生させる容量も加わる。それを表したものが図 1.11 である。これは、図 1.11 のようにピクセルの上を通る引出し線とピクセルとでコンデンサーのようになり、数  $\sim 30\text{pF}$  の容量が発生すると考えられている。

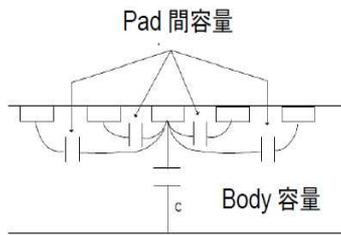


図 1.10: pad 間の容量 [6]

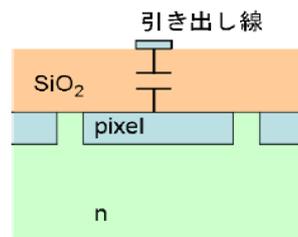


図 1.11: ピクセルと引き出し線の容量 [3]

## 1.4 SGD に要求される性能

SGD には、科学目標として次のようなものが掲げられている。[3]

- 数個の若い超新星残骸「すざく」より 100 倍良い感度で硬 X 線分光観測し、電子のエネルギー分布を導出する。
- 2-10keV での強度がかに星雲の 1/1000 であり、ベき 1.7 の放射をもつ超巨大ブラックホールを 600KeV 以下の帯域で 10 個以上観測する。

これらの目標を達成するために、SGD に要求される性能を次の表 1.1 で示す。

エネルギー領域	10-600keV
観測範囲	0.5° -1°
角度分解能	40°
エネルギー分解能	2keV@40keV

表 1.1: SGD への要求性能

この SGD への要求性能を達成するために Si-Pad では次の表 1.2 のような性能と表 1.3 の仕様を目標とする。

エネルギー分解能	2keV@40keV
ブレイクダウン電圧値	<-300V

表 1.2: Si-Pad の目標性能

センサー領域	$5.39 \times 5.39cm^2$
有効面積	$5.12 \times 5.12cm^2$
1 ピクセル面積	$3.2 \times 3.2mm^2$
厚さ	0.6mm
空乏化電圧	<-250V
1 ピクセル暗電流	< 50pA @ -10 °C
読み出し線幅	8 $\mu$ m
読み出し線の厚さ	4.5 $\mu$ m

表 1.3: Si-Pad の仕様 [5]

## 1.5 これまでの Si-Pad センサーの開発経緯

これまでに行われた Si-Pad センサーの開発経緯について説明をする。  
まず最初に、エンジニアリングモデル (EM) と呼ばれる Si-Pad が開発され、その Si-Pad について広島大学の

道津、朴やSLACの田中氏が基礎特性評価を行った。その結果、ピクセル上を通る引出し線とBondingPadに無視のできない容量が発生することが明らかになり、その改善を行う必要があることが分かった。

これらを改善するためにプロトタイプフライトモデル(PFM)と呼ばれる新たなモデルのSi-Padが開発され、試験用に10枚製作された。改良点としては、引出し線とピクセル間の絶縁層の厚さを1.5倍にし、ワイヤボディングがピクセルからガードリング上に移された。その結果、引出し線の容量への寄与をほぼ計算通りに減らすことができた。しかし、それとは別に温度-15度下のガンマ線照射前とガンマ線照射後に、高電圧を印可したとき暗電流値が跳ね上がる現象(ブレイクダウン)が起こり、さらにそのままHVを一定にしておく暗電流が降下していく現象が見られた。これらの現象は道津の実験では明らかにならなかった。

そして、プロトタイプフライトモデル(PFM)は性能として問題はなかったため同じ仕様のフライトモデル(FM)という衛星搭載用モデルをSi結晶のロット2本から製作され、2012年1月現在の時点で333枚が納入済みである。今回、本実験ではこのFMのSi-Padに対し放射線損傷の影響による性能変化の検証を行うとともに、道津の実験で見られた高電圧を印可したときの暗電流の振る舞いについても実験を行い問題を検証していく。

## 1.6 論文の目的

今まで道津や朴らが試験を行って、Si-PadセンサーはEM,PFM,FMと改良が成された。そして、それらを受けて出来上がった最終のモデルである実際に衛星に搭載予定のFMのSi-Padセンサーに対して、本論文では、放射線損傷によって起こる性能への影響を見るため、衛星運用期間受けるであろう量のガンマ線をSi-Padに照射しその性能がSGDの要求性能を満たしているかを検証、衛星搭載として問題ないことを確かめる。

## 第2章 放射線損傷の測定

ASTRO-Hが運用される軌道上では、宇宙線と呼ばれる高エネルギーの放射線が飛び交っていて、半導体検出器はこの宇宙線によって放射線損傷を起こす。そのため、この章ではまず測定に用いるSi-Padと実験のセットアップについてに説明する。そして、Si-Padが放射線損傷によってどれほど性能へ影響を及ぼすかを測定し、またその性能がSGDの要求性能を満たしているかを検証していく。

### 2.1 放射線によるSi-padへの影響

Si-Padのような半導体に対して、放射線が起す損傷の効果には2つある。それは、バルク効果と呼ばれるものと表面効果と呼ばれるものである。

まず、バルク効果とは、半導体が放射線による損傷を受けることで半導体中の原子がその元の位置から変化し、元原子があった位置に空格子点と変化して新たな位置に入った元の原子とで電子を捕獲するようになり暗電流などの増加を引き起こすというものである。これは、フレンケル欠陥とも言う。

次に表面効果について説明をする。Si-PadセンサーのPisde側のピクセルの表面には直に直電流が流れることを防ぐために酸化膜である $SiO_2$ 層がある。その酸化膜は放射線を受けると電離を起こって局所電場を作り、酸化膜とピクセルの境界面で電離した電子の捕獲が起こり、結果的に暗電流の増加などにつながる。[8]

バルク効果、表面効果のどちらにしても、図2.1のように半導体のエネルギーギャップ中において新たなエネルギーギャップが形成されることにより電子のトラップが起こりやすくなり暗電流の増加につながる。よって、本実験では暗電流の測定が重要であると言える。

Siセンサーがバルクへの損傷を起こすか表面への損傷を起こすかは照射する放射線による。プロトンの照射では、バルクへの損傷がほとんどであり、ガンマ線の照射では、表面の損傷がほとんどである。2011年5月に広島大学の朴がPFMのSGD4のSi-Padセンサーにプロトン照射を行った。衛星の軌道上での約13年分に相当する粒子を照射した。一方、 $^{60}Co$ ガンマ線照射は2010-2011年に道津がPFM品に対して行った。どちらも暗電流が2-3倍増加したがその寄与は運用する上で問題のないという結果を得た。そのため本論文では、表面への損傷による性能への寄与を確かめるために $^{60}Co$ をもちいてガンマ線照射を行う。

### 2.2 実験のセットアップ

#### 2.2.1 使用するSi-Padセンサー

ここでは、今回の実験で用いたSi-Padセンサーについて説明をする。FMのSi-Padは、2つのロットから全330枚を製作されたわけだが、本実験では浜松ホトニクス社が製作して測定した全Si-Padの中から特に性能が悪かった暗電流値が高いものを選びだし、そのSi-Padが要求の性能を満たしているかを検証し満た

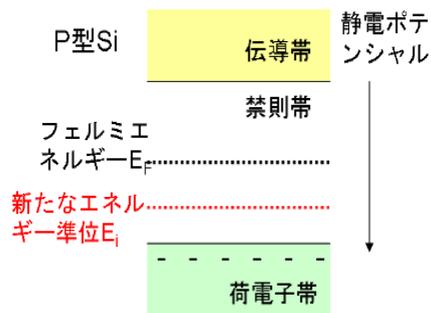


図 2.1: 放射線損傷による新たなエネルギーギャップの形成 [3]

していれば、他の Si-Pad も要求性能を満たしていると判断する。よって、最初に製作されたロットからは 1 枚、後から製作されたロットから 2 枚の暗電流値が高かった Si-Pad センサーを選びだし試験を行う。本論文では最初に製作されたロットから選び出した 1 枚について試験を行った。

- Si-Pad の構造

Si-Pad センサーの基本的な構造としては、センサーの縦横が 53.9mm × 53.9mm の正方形の形をしており、その中に 3.2mm × 3.2mm の大きさの pad ピクセルが 16 × 16 の配置で 256 ピクセル敷き詰められている。そして、その各ピクセルには電気信号を読み出すための Al の引出しが付いており、図 2.2 のようにピクセルを 8 × 8 で一区画とし、その区画の引出し線は区画の隅に集められているデザインになっている。本論文では、4 つ区画をそれぞれ a、b、c、d 区画と呼ぶことにする。

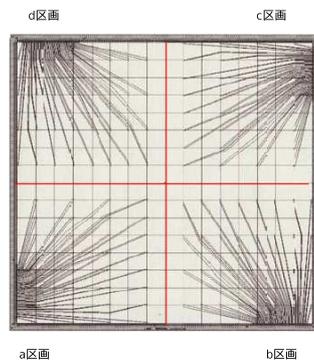


図 2.2: SGD4 の Si-Pad のデザイン

- ロット

Si-Pad センサーは、図 2.3 のように一つの大きな Si 結晶から切り出して作る。実際に ASTRO-H に搭載されるフライトモデルでは、これを二本作り SGD に必要な枚数の Si-pad を生産する。そして、

最初に作られるロット (本論文ではロット 1 と呼ぶ) とその次に作られるロット (ロット 2 と呼ぶ) からそれぞれ Si-Pad センサーを選び、その Si-Pad センサーが SGD が要求する性能満たしているかを試験する。今回、本論文で用いたのはロット 1 の Si-Pad センサーである。

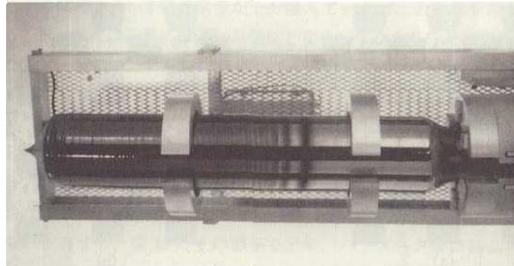


図 2.3: 直径 200mm の Si 単結晶 [7]

- 引出し線のデザイン

上の Si-Pad センサーの基本仕様で説明をした引出し線のデザインには、SGD4 と SGD5 という二種類のデザインがある。図 2.4 に、その二種類のデザインを示す。

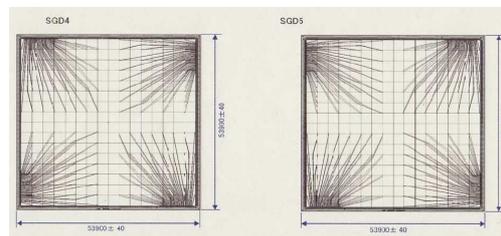


図 2.4: SGD4 と SGD5 の引出し線のデザイン

なぜ、デザインが2種類あるのかを説明する。SGD で用いられる Si-Pad センサーは限られたスペースでより多くの Si-Pad センサーを重ねてより多くの入射光子の情報を得たい。そのため、図??のように一つのトレイに裏表で Si-pad センサーを配置する。こうすることで高い電圧をかける n 型面をトレイ内側で向かい合わせて外から見えなくして放電しないようにしている。また、a、b、c、d のそれぞれの区画の隅に集まった引出し線から信号を読むのだが、片方 Si-Pad センサーの引出し線を裏に配置した時、表に配置した Si-Pad センサーと引出し線の位置が一緒になるようにすることで、区

画の隅の同じ位置から同型の ASIC で読み出すことを可能にしている。そして、今回、本論文で用いたのはロット 1 からは SGD4 のデザインの Si-Pad センサーである。

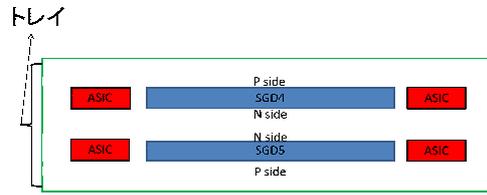


図 2.5: コンプトンカメラでの SGD4 と SGD5 の配置例

### 2.2.2 測定するピクセル

今回の実験において、Si-Pad センサーの読み出しを行うピクセルについて説明する。読み出しは、図 2.7 のように Si-Pad センサーのそれぞれの区画の隅に集まった引出し線とパターンがプリントされてる基板をワイヤボンディングすることで外部とつないで行っている。本実験では、パターンがプリントされてる基板のデザイン上、1 区画から読み出せるピクセルは 7 つとなっており、他のピクセルは GND に落とすようにボンディングされている。SGD4 と SGD5 の読み出せるピクセルは、それぞれ図 2.8 と図??のようになっている。それぞれのピクセルに 1 から 7 までの番号を割り振っている。SGD4 と SGD5 では裏表で張り合わせた時に同じ位置に来るピクセルを選択した。

あと、全ピクセルの電場を揃えるために Pside の周囲を囲ってある GuardRing を GND に落とし、さらに逆バイアスをつけるため Nside に HV をかけられるようボンディングを行った。

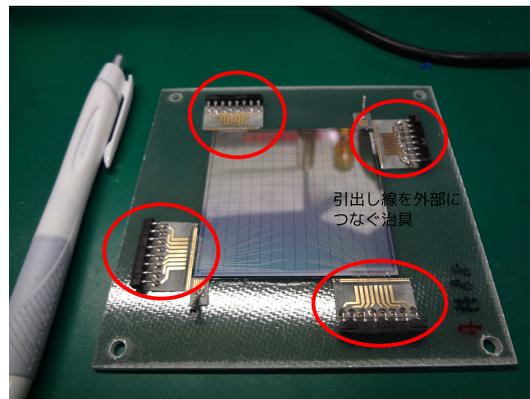


図 2.6: 四つの隅に引出し線とボンディングする治具が設置されている (ロット 2 の SGD4)

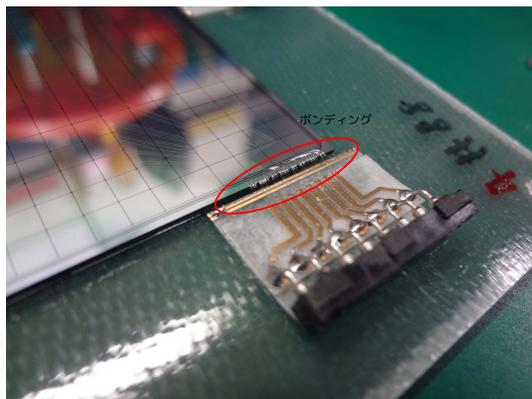


図 2.7: 引出し線とピクセルを読み出す基盤がボンディングしてある

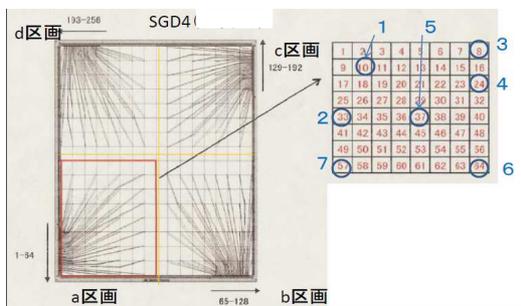


図 2.8: SGD4 の読み出し可能なピクセル

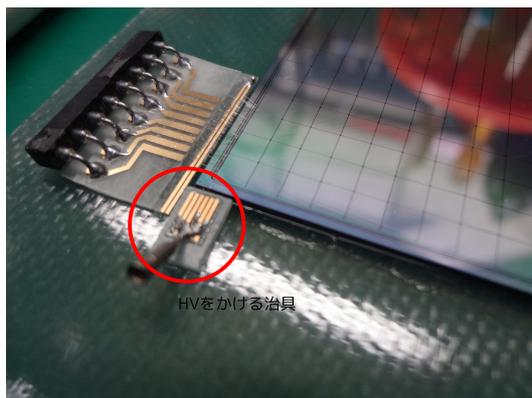


図 2.9: Nside と HV をかける基盤がボンディングしてある

## 2.3 放射線照射

Si-Pad センサーの放射線による損傷の影響を検証するための照射量と照射のセットアップについて説明する。まず照射量についてだが、衛星の軌道上において最も Si-Pad センサーに影響を与えられられるのは、南大西洋異常帯における荷電粒子である。よって、本実験では南大西洋異常帯における荷電粒子の 1 年間の照射量である 0.5krad に安全ファクターとして 4 倍し、1 年間に Si-Pad センサーが軌道上で受ける照射量を 2krad として照射を行う。

ASTRO-H の運用期間が 5 年間であるため、照射は積算照射量をロット 1 の SGD4 では 2krad, 6krad, 10krad, 20krad となるように行い、照射後に暗電流、容量、分解能を見ていくこととする。

照射量の計算方法について説明する。まず、照射には、 $^{60}\text{Co}$  の線源を用いる。用いる  $^{60}\text{Co}$  は、1997 年 4 月で強度 370[TBq][9] なので、照射を行った 2011 年 10 月の線源の強度  $L$  は半減期の式

$$L = L_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{(t/T)} \quad (2.1)$$

より、求まる。ここで、 $L_0$  は 1997 年 4 月での線源の強度、 $t$  は経過した時間、 $T$  は  $^{60}\text{Co}$  の半減期 (=5.3 年) で、これらを用いて計算すると 2011 年 10 月の線源の強度  $L$  は 55.5[TBq] である。照射量を求めるには、 $^{60}\text{Co}$  の光子が Si-Pad センサーにどれだけエネルギーを落とすかを考えなければならない。そこで、まず光子が入射したときの光電吸収の検出効率

$$\frac{N}{N_0} = 1 - e^{-k \rho d} \quad (2.2)$$

表すことができる。ここで、 $N$  は検出数、 $N_0$  は入射光子数、 $k$  は反応断面積 ( $^{60}\text{Co}$  の 1173keV に対して  $= 5.9 \times 10^{-2}[\text{cm}^2/\text{g}][10]$ )、 $\rho$  は Si の密度 ( $= 2.32[\text{g}/\text{cm}^3]$ )、 $d$  は Si-Pad センサーの厚さ ( $= 0.06[\text{cm}]$ ) である。この式 2.2 から、光子が Si-Pad センサーに落とすエネルギー  $E_d[\text{eV}/\text{sec}]$  は

$$E_d = N(1 - e^{-k \rho d}) \times E \quad (2.3)$$

と表せる。 $E$  は  $^{60}\text{Co}$  がコンプトン散乱により落とす 1173keV と 1330keV のエネルギーで、散乱角が約 30-40° の時にその反応断面積が最大になる。そして、散乱角が約 60° でその反応断面積が平均となるためその値を用いて  $E \simeq 570[\text{keV}]$  としている。そして、検出数  $N[\text{個}/\text{sec}]$  は、Si-Pad センサーの大きさ  $D(= 5.39 \times 5.39 \times 10^2[\text{mm}^2])$ 、 $^{60}\text{Co}$  のラインの放出率  $P(1173\text{keV}1330\text{keV}$  共に 1.0)、線源から Si-Pad センサーへの距離  $D$ (ここでは 300mm とする) を用いて

$$N = \frac{SLP}{4 \pi D^2} \times 2 \quad (2.4)$$

と表せ、最後にかかっている 2 倍は  $^{60}\text{Co}$  では 1173keV と 1330keV の二つが崩壊することを考慮したものである。 $N = 2.85 \times 10^{11}[\text{個}/\text{sec}]$  となる。

この求めた  $N$  を式 2.3 に代入すると

$$E_d = 1.33 \times 10^{15} \quad (2.5)$$

と求まる。この  $E_d$  を Si-Pad センサーの質量  $m(= 5.39 \times 5.39 \times 10^2[\text{mm}^2] \times 2.32 \times 10^{-3}[\text{kg}/\text{cm}^3] \times 0.6[\text{mm}])$  で割ると

$$E_d/m = 3.29 \times 10^{17}[\text{eV}/\text{Kg} \cdot \text{sec}] = 5.28[\text{rad}/\text{sec}] \quad (2.6)$$

が必要照射量となる。

つまり、線源から Si-Pad センサーへの距離  $D = 300[mm]$  のとき、1krad 照射するには

$$1000[rad] \div 5.28[rad/sec] = 189.39[sec] = 3.16[min] \quad (2.7)$$

というように約 3 分間照射を行えば良いことになる。

照射は、広島大学大学院工学研究科放射線総合実験棟で遠藤氏の協力のもと、林、朴らとともに、以下の表 2.1 の日程で行った

照射日	照射量	積算照射量
5月6日	+2krad	2krad
10月21日	+4krad	6krad
11月17日	+4krad	10krad
1月12日	+10krad	20krad

表 2.1: ロット 1 の SGD4 の照射日程

照射時のセットアップについて説明する。線源からの距離 30cm にしての照射のセットアップは図 2.10 のようになっている。Si-Pad センサーの床からの高さは、図 2.11(縦軸が照射量、横軸が床からの試料の高さ)が示すように床からの高さに対する照射量のピークが 15cm になるため、Si-Pad センサーの中心がちょうど 15cm になるようにセットアップしている。これは、Si-Pad センサーのパッド上での照射量のばらつきを抑え、できるだけ照射量を一様にするためである。

そして、照射中は SGD での運用環境に近づけるため HV を 250V をかけて、空乏化させた状態で照射を行った。

なお、照射後すぐは照射によって活性化された電子などにより電流が増加しているため、それらが安定するまで約 3 - 7 日間アニールを行い、電流の変動がほとんどなくなってから測定を行った。

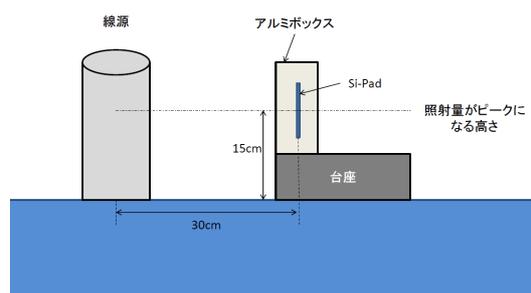


図 2.10: 線源からの距離 30cm の時の照射のセットアップ

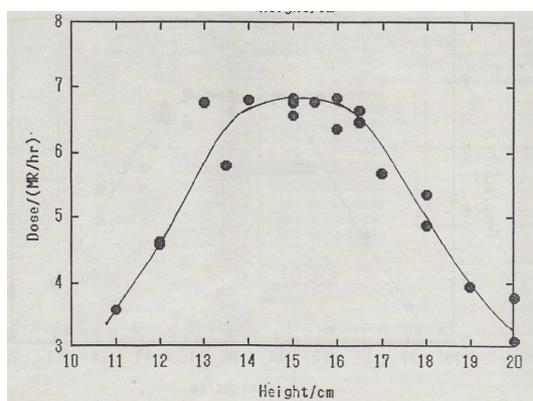


図 2.11: 高さに対する照射量の分布 [9]

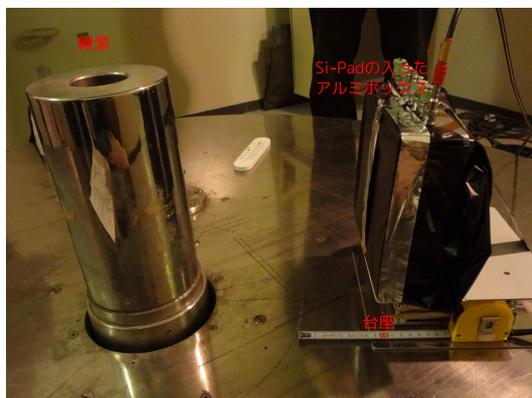


図 2.12: 積算照射量 10krad 照射したときの写真

## 2.4 照射量依存性の測定

### 2.4.1 暗電流

2.1 で述べたように、暗電流はバルク損傷と表面損傷という二つの放射線損傷により増加されることが予想される。そして、式 1.4 にあるように暗電流は shot noise に寄与し結果的にセンサーのエネルギー分解能を悪くさせる。そのため、照射ごとに HV をかけた状態で暗電流の変化を見ていくことは Si-Pad センサーに要求されるエネルギー分解能を達成しているかを確認する上で重要と言える。

また、暗電流は温度に大きく影響するため Si-Pad センサーの温度を変えて暗電流を測定することも非常に有用であり、さらに暗電流の温度依存性のグラフを以下の式 2.8 でフィットすることで本来のフェルミ順位と損傷によって新たに出来たエネルギー準位の差を求めることが出来る。[11] これを照射ごとに求めて比較することで照射による損傷の度合いがみれるはずである。

$$J_{gen} = J_0 T^2 \frac{e^{-E_g/(2kT)}}{e^{(E_t-E_i)/kT} + r e^{-(E_t-E_i)/kT}} \quad (2.8)$$

実際行った測定について説明する。照射ごとに Si-Pad センサーを入れたアルミボックスを恒温槽に入れて温度を変えて HV を Si-Pad センサー運用 HV 値 250V かけた状態で暗電流値を測定した。測定温度は、Si-Pad センサー運用温度 -15 °C の他に -10, -5, 5, 10 °C で行い、測定したピクセルは、図 2.8、?? の区画 a のピクセル 7 つと参考に区画 b, c, d のピクセル番号 3, 5, 7 をそれぞれ測定した。測定のセットアップは、図 2.13 に示す。この測定では、KEITHLEY 487 を高圧電源兼電流計として用いた。

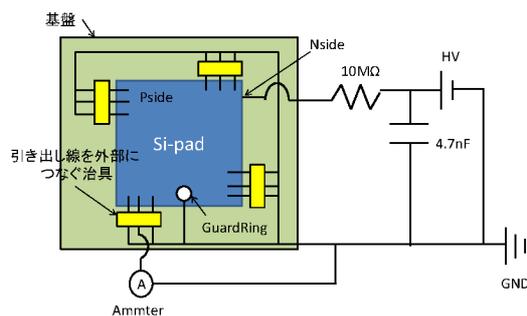


図 2.13: 1 つのピクセルの暗電流値を測定するセットアップ

- 暗電流の照射量依存性

図 2.14 は、ロット 1 の SGD4 の積算照射量に対する暗電流の変化をまとめたグラフである。対照ピクセルは、区画 a のピクセル番号 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 の 7 つである。

図 2.14 をみると、積算照射量が増えるにつれて明らかに暗電流が増えているのが見て取れる。また、よく見るとその増加の傾向は単純な比例関係にはなっておらず照射量が増えていく毎に増加の割合は減少していることが分かる。これは、過去の実験 [11] や道津の実験 [3] でも見られた傾向である。

- 暗電流の温度依存性

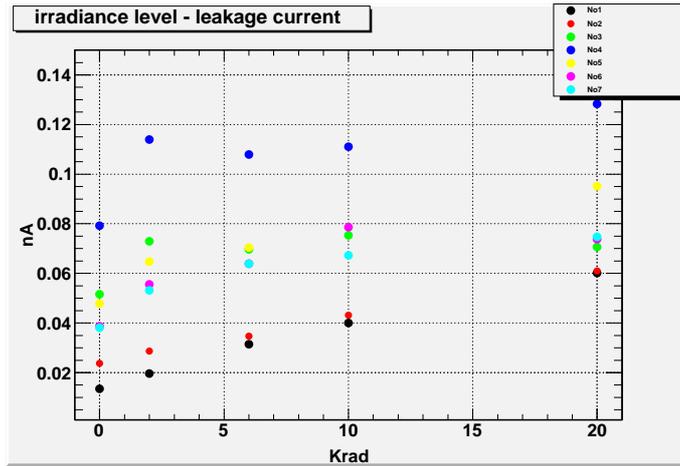


図 2.14: 積算照射量 5krad のロット 1 の SGD4 の区画 a の暗電流値に対する照射量依存性

先に説明をしたように温度毎に暗電流を測定し、式 2.8 でフィッティングを行うことにより照射による損傷の度合いが分かる。そこで、図 2.15 のようにフィッティングを行い、照射毎に本来のフェルミ準位と損傷による新たなエネルギー準位の差  $E_t - E_i$  を求め、グラフにまとめた。それが、図 2.16 である。対照ピクセルは区画 a のピクセル番号 3,5,7 である。

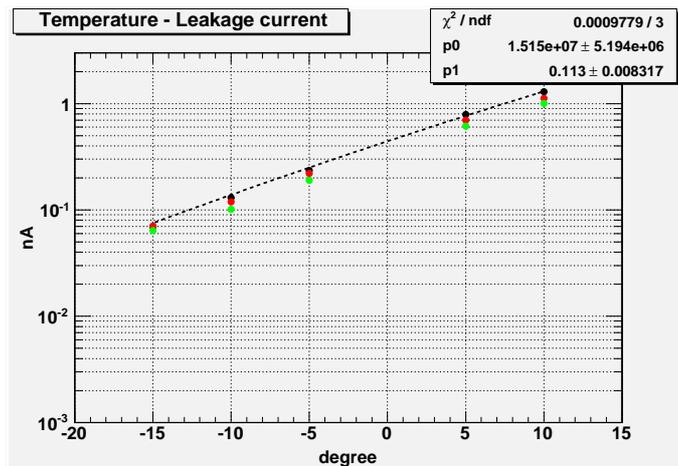


図 2.15: ロット 1 の SGD4 の区画 a のピクセル番号 3,5,7 の暗電流温度依存性

2.1 で説明したように、ガンマ線照射により Si-Pad センサーは表面損傷を起こす。積算照射量が増えて損傷が大きくなるにつれて新たなエネルギー準位  $E_i$  も大きくなり  $E_t - E_i$  は小さくなると予想をしていたが、図 2.16 からはそのような傾向は見られなかった。

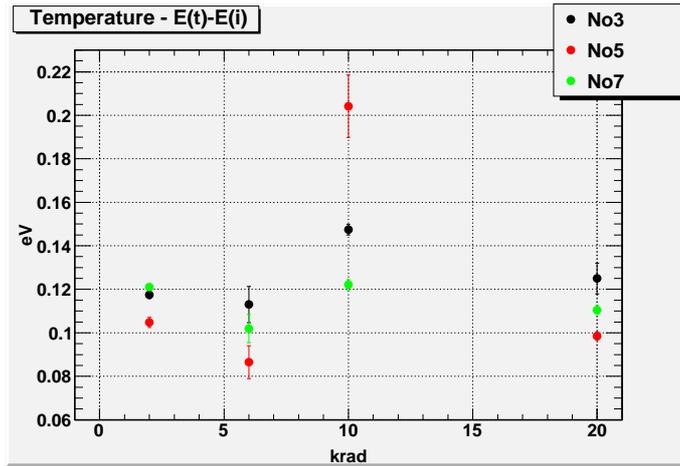


図 2.16: ロット 1 の SGD4 の区画 a のピクセル番号 3,5,7 照射に対する  $E_t - E_i$

## 2.4.2 容量

2.1 で容量のことが触れられていないように、照射が容量に及ぼす大きな影響はないと理論的には考えられている。だが、式 1.4 のように、容量のもまたセンサーのエネルギー分解能に影響する要因の一つである以上、その測定と検証が必要である。まず容量のノイズには Body 容量と pad 間容量があるが、本実験では照射ごとに pad 間容量を測定することとする。その理由としては、Si-Pad センサーの Pside のピクセルとピクセルの間には図 1.6 のように  $SiO_2$  の隙間があり、図 2.17 のようにその隙間にガンマ線が照射されることで表面損傷を起こし、 $SiO_2$  が他の物質に変化することで容量が変化するかを確認するためである。

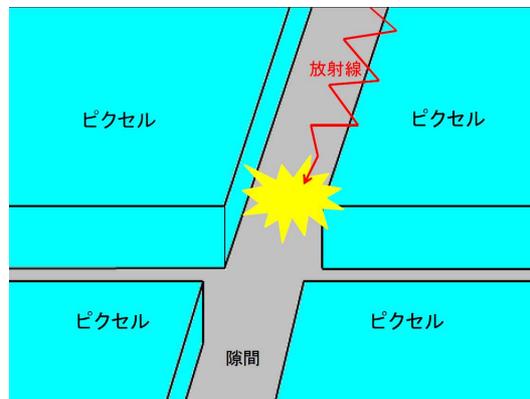


図 2.17: ピクセルとピクセルの間に放射線が照射され損傷を起こすイメージ

容量の測定は、温度に依存しないため室温で行い HV を 250V かけて測定した。測定したピクセルは、暗電流の時と同様に、区画 a のピクセル 7 つと参考に区画 b,c,d のピクセル番号 3,5,7 をそれぞれ測定した。図 2.18 に容量測定のセットアップを示す。容量計には、HEWLETPACKARD 4284A を用いた。

図 2.19 は、ロット 1 の SGD4 の積算照射量に対する容量の変化をまとめたグラフである。対照ピクセル

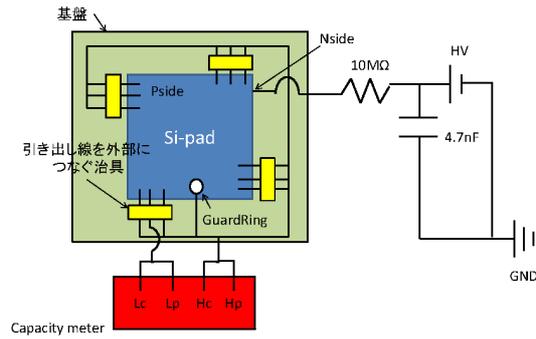


図 2.18: pad 間容量のセットアップ

は、区画 a のピクセル番号 1,2,3,4,5,6,7 の 7 つである。

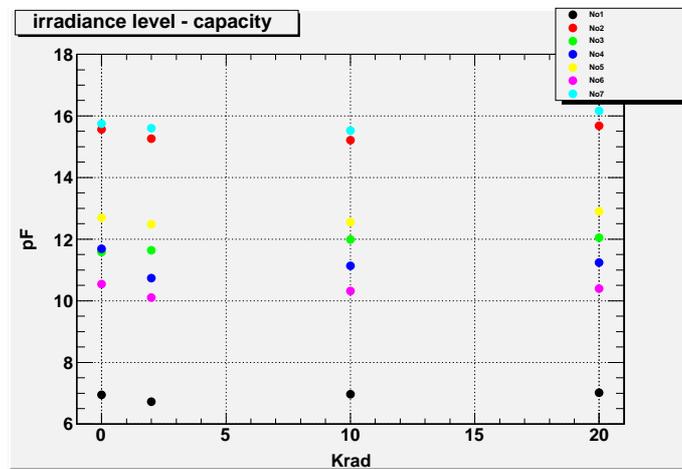


図 2.19: ロット 1 の SGD4 の区画 a の pad 間容量に対する照射量依存性

測定して得た結果の図 2.19 からは、照射によって pad 間容量の変化は見られなかった。よって、照射によつての pad 間容量への影響はないと言える。

また、くわしく図 2.19 を見てやると、引出し線が多く集中しているピクセルの pad 間容量が高いことに気がつく。これは 1.3.2 で説明したように、pad 間容量が pad と pad の容量に加えて引出し線と Pside のピクセルの間の容量も含まれるため、引出し線が多く通っているピクセルは pad 間容量が上を通過している引出し線が少ないピクセルより大きくなってしまふからである。

### 2.4.3 エネルギー分解能

Si-Pad には、エネルギー分解能を 2keV 以下にするという要求性能がある。故に、エネルギー分解能の測定は、最終的に本実験で扱った Si-Pad センサーが SGD に運用される上で問題がないかを判断するのに

非常に重要なことと言える。また、1.3.2で説明したように暗電流と容量がエネルギー分解能にどれほど影響を及ぼしているかをみるためにもこの測定は有用と言える。

SGDでは、専用LSIでSi-Padセンサーは読み出されるのでエネルギー分解能の評価はLSIとともに行わなければならない。しかし、LSIはすぐに使えないのでここでは放射線損傷によって影響を受ける電流性ノイズ (Shot noise) を評価する。

X線の読み出しの測定には、 $^{241}\text{Am}$ を用いてSi-padの運用環境である温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、HV250Vをかけて測定を行った。測定したピクセルは、暗電流、容量の時と同様に区画aのピクセル7つと参考に区画b,c,dのピクセル番号3,5,7をそれぞれ測定した。図2.20に実験のセットアップを示す。

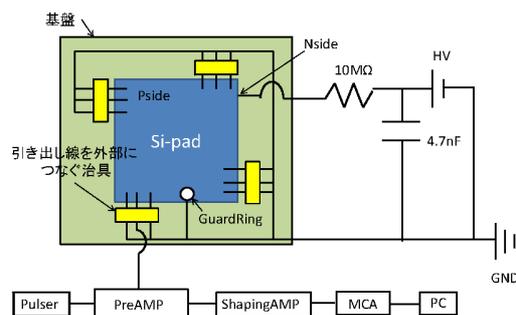


図 2.20: スペクトル測定の設定アップ

Si-PadセンサーのP sideから読み出したホール信号は、まずPreAMPで増幅し電気信号に変換される。PreAMPにはPulserを接続しテストパルスを入力している。PreAMPから出た信号は、その次のノイズフィルターの役割であるShapingAMPで極端なピークの信号をガウシアン整形する。その後、入力したパルス波高値をアナログデジタル変換するためにMCAを通しPCへスペクトル情報を取りこむ。用いている機器の型番は、PreAMP: CLEAR PULSE社 5102, Pulser: CLEAR PULSE社 9002, ShapingAMP: ORTEC社 571, MCA: AMPTEK社 MCA8000Aである。

Shaping time  $\tau$  に関しては、0kradの時に $\tau$ を変えて測定を行って最もエネルギー分解能の良かった $\tau = 3[\mu\text{sec}]$ で値を固定して測定を行う。

図2.21に、取得したスペクトルの例を示す。これは、ロット1のSGD4を積算照射量3krad照射した後の区画aのピクセル番号3のスペクトルである。

図2.21のスペクトルで赤くフィットしてあるところが、 $^{241}\text{Am}$ の59.5keVのエネルギーピークで、このように59.5keVのエネルギーピークをフィットしその値からエネルギー分解能を計算した。

- エネルギー分解能の照射量依存性

図2.22は、ロット1のSGD4の積算照射量に対するエネルギー分解能の変化をまとめたグラフである。対照ピクセルは、区画aのピクセル番号1,2,3,4,5,6,7の7つである。

この図2.22を見ると、徐々にエネルギー分解能は上がっていている傾向にあると言える。20kradの時のエネルギー分解能は10kradの時のエネルギー分解能と比べ全体的に下がっているものの0,2,6kradの時と比べると明らかに高い値になっている。その増加量は、照射前と20krad照射後とで約0.2keV前後である。

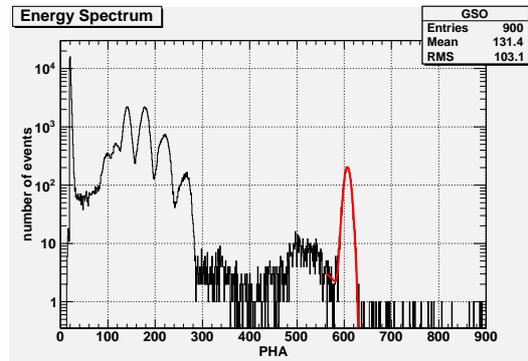


図 2.21: ロット 1 の SGD4 を積算照射量 6krad 照射した後の区画 a のピクセル番号 3 のスペクトル

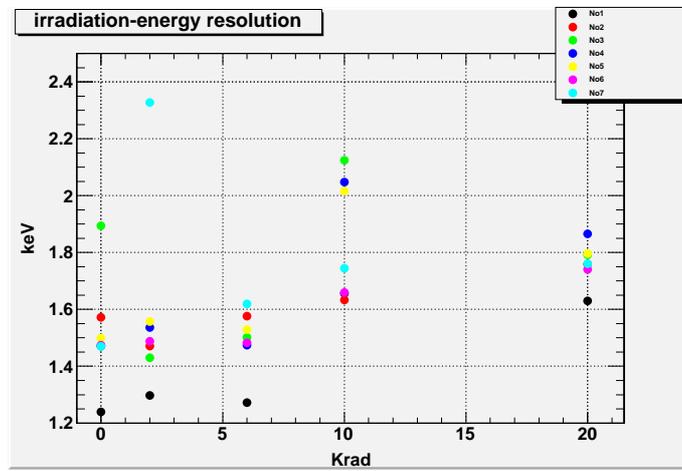


図 2.22: ロット 1 の SGD4 の区画 a の照射に対するエネルギー分解能

エネルギー分解能が照射量が増えるにつれて増加しているのは、2.4.1 で照射量が増えるに連れて暗電流も増加していることより電流性ノイズの増加が効いているためであると思われる、以下では定量的に検証していく。

- エネルギー分解能の照射量依存性の理論値

式 1.6 を用いて 2.4.1,2.4.2 で得た測定値を用いて予想されるエネルギー分解能を計算する。ここで  $I_n$  : 測定した暗電流値,  $\tau$  : *ShapingTime* ( $= 3 \mu sec$ ),  $f(C_{in})$ : 図 1.9 の Body 容量+測定した pad 間容量の容量に相当する容量性ノイズである。Body 容量は、式 1.8 より完全空乏化した状態で

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \sim 443[pF] \quad (2.9)$$

となる。これは、ピクセル 256 個分の容量なのでピクセル 1 個分  $443 \div 256 = 1.73[pF]$  として計算する。よって、容量性ノイズ  $f(C_{in})$  は、図 1.9 の容量勾配より

$$f(C_{in}) = 0.01267x + 0.836[k\epsilon V] \quad (2.10)$$

と求められる関数で求まる。ここで、 $x[pF]$  は Body 容量 ( $=1.73pF$ )+測定した pad 間容量の容量である。

ロット 1 の SGD4 の区画 a について、式 1.5 の第 1 項目の電流性ノイズと第 2 項目が容量性ノイズを照射毎に計算したものが図 2.23 と 2.24 になる。

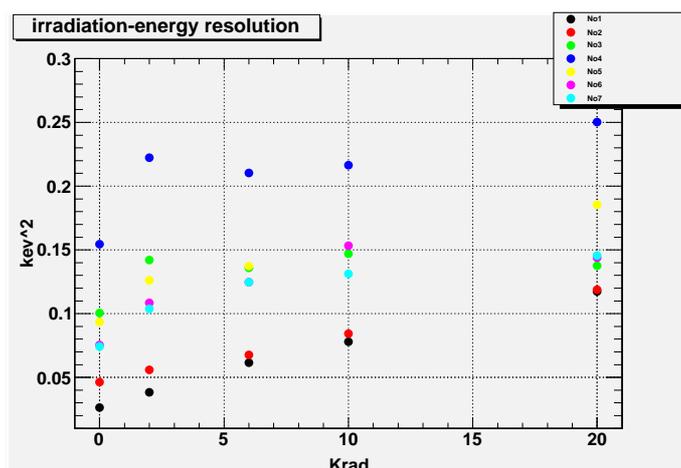


図 2.23: ロット 1 の SGD4 の区画 a の照射に対する電流性ノイズの理論値

そして、これらを足し合わせたものが図 2.25 の予想される照射に対するエネルギー分解能になる。

しかし、図 2.25 の理論値は実際測定した値と大きくかけ離れてしまっている。これは、式 1.6 では回路中の浮遊容量や外来ノイズを加味しておらず、それが分解能に大きく影響していると思われる。そのため、次に Shaping Time 依存性を調べて電流性ノイズを抽出してみる。

- エネルギー分解能の Shaping Time 依存性

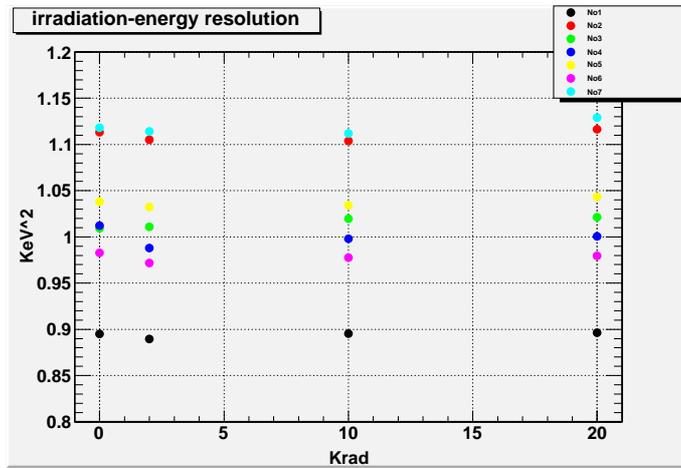


図 2.24: ロット 1 の SGD4 の区画 a の照射に対する容量性ノイズの理論値

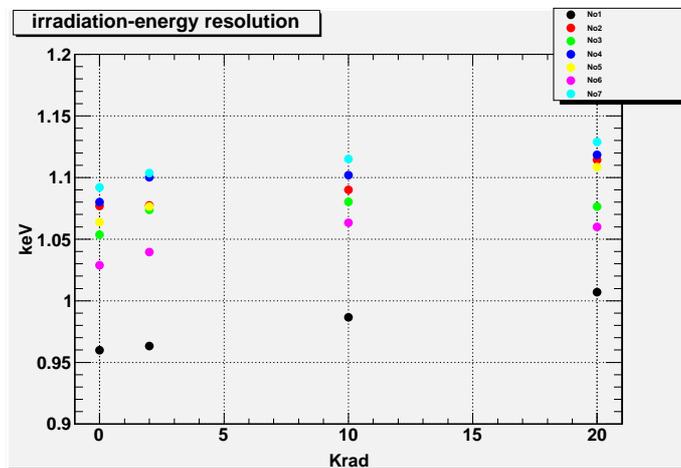


図 2.25: ロット 1 の SGD4 の区画 a の照射に対するエネルギー分解能の理論値

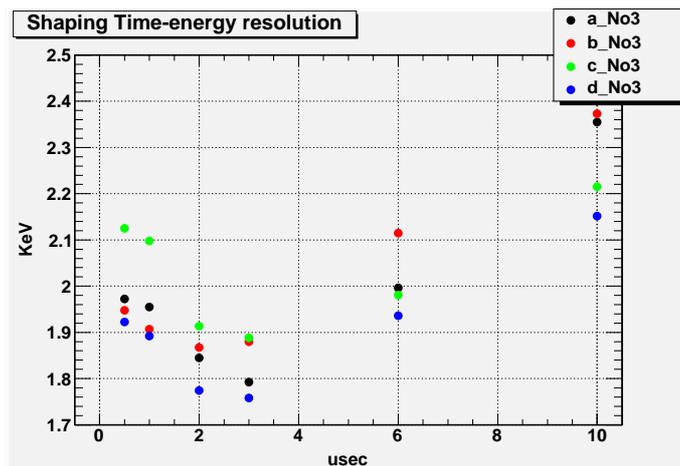


図 2.26: ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の区画 a,b,c,d のピクセル番号 3 の ShapingTime に対するエネルギー分解能

図 2.26 は 20krad 照射後に  $\tau$  の値を変えてスペクトルを取得しエネルギー分解能を算出したものである。対照ピクセルは、区画 a,b,c,d それぞれのピクセル番号 3 の 4 つである。

そして、これらの値をそれぞれエネルギー分解能の式 1.5 に従い  $\tau$  をフィッティングパラメーターとし

$$f(\tau) = \sqrt{A\tau + B/\tau + C} [keV] \quad (2.11)$$

の式でフィッティングを行った。それを図 2.27,2.28,2.29,2.30 に示す。ここで、 $A\tau$ :Shot noise と Johnson noise 合わせた Parallel noise(青線)、 $B/\tau$ :PreAMP の Capacity noise(紫線)、 $C$ :1/f noise(水色線)、 $f(\tau)$ :Parallel noise、Capacity noise、1/f noise を足し合わせたもの(緑線)である。

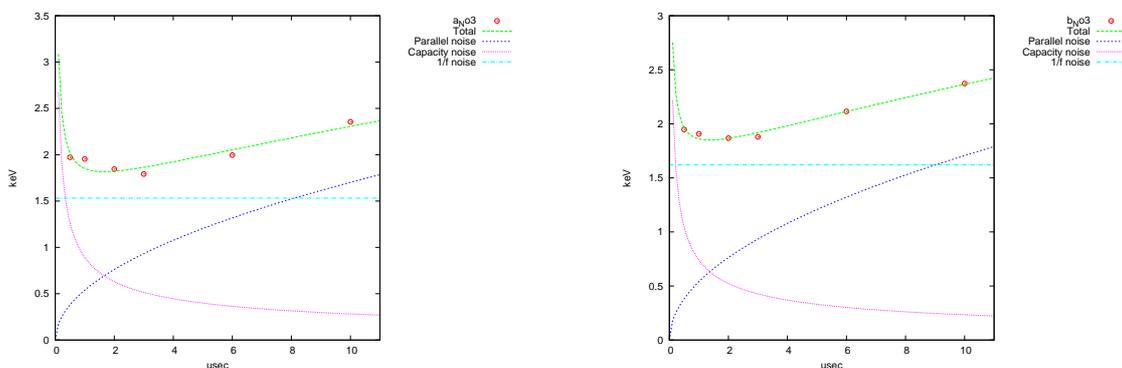


図 2.27: ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時 図 2.28: ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の区画 a のピクセル番号 3 の ShapingTime に対する エネルギー分解能をフィッティングしたもの 区画 b のピクセル番号 3 の ShapingTime に対する エネルギー分解能をフィッティングしたもの

これらの図を見るとフィッティングの Total は測定値と概ね合っていることが分かる。そして、本実験

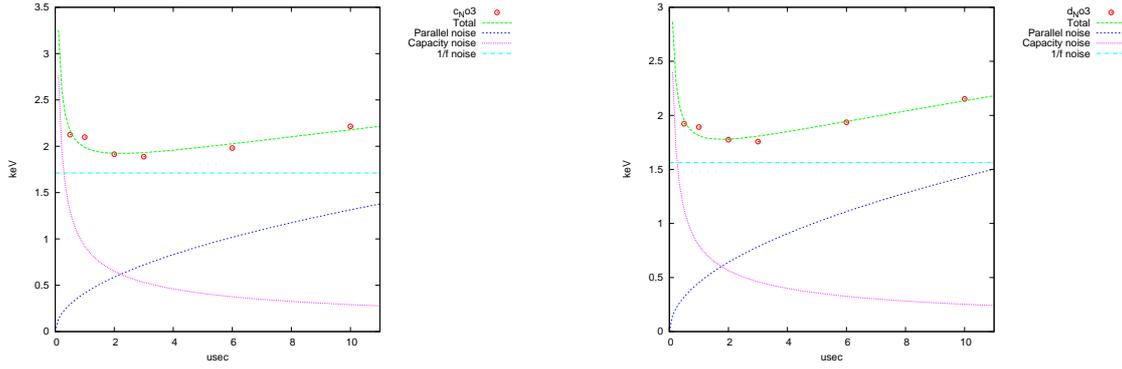


図 2.29: ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の区画 c のピクセル番号 3 の ShapingTime に対するエネルギー分解能をフィッティングしたもの  
 図 2.30: ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の区画 d のピクセル番号 3 の ShapingTime に対するエネルギー分解能をフィッティングしたもの

で設定している  $\tau = 3[\mu\text{sec}]$  に注目を見ると、4 つのどの図を見てもやはり Parallel noise が Capacity noise をうわまっている。

そのため、図の Parallel noise のフィッティングの  $\tau = 3[\mu\text{sec}]$  での値  $ENC_{shot}$  から、エネルギー分解能のノイズ式 1.6 の電流性ノイズの

$$ENC_{shot} = (2.86 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{R_p} + 0.65 I_n) \tau \quad (2.12)$$

の式を用いて予想される暗電流値  $I_n$  を求めた。ここで、Johnson noise は非常に小さいため考慮をしない。Parallel noise のフィッティングから予想される暗電流値を測定値とまとめて表にした。それを表 2.2 に示す。ここで、測定値を  $I$  とした時、予想される暗電流値は係数  $C$  を用いて  $CI$  と表せると仮定する。この  $C$  の値をみることで予想される暗電流値と測定値がどれだけ一致しているかを見ることができる。

ピクセル	測定値 [nA]	フィッティングの理論値 [nA]	C
a 区画の No.3	0.0706	0.326	6.77
b 区画の No.3	0.0959	0.334	5.04
c 区画の No.3	0.0710	0.193	5.18
d 区画の No.3	0.0616	0.236	6.61

表 2.2: ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の暗電流の測定値と理論値

表 2.2 の  $C$  の値を見ると、測定値とフィッティングから求めた予測される値が一致していないことが分かる。SLAC の田中氏の行ったレポート [13] の  $C$  の分布では、 $C$  の値はほとんど 1 になり測定値とフィッティングから求めた予測される値が一致している。よって、式 2.11 でのフィッティングでは Parallel noise に本来の暗電流のノイズに余分な成分が入っていると考えられる。

そこで、PreAMP に Si-Pad を付けない状態で Shaping Time を変えスペクトルをとりテストパルスのエネルギー分解能の Shaping Time 依存性を測定した。それを図 2.31 に示す。

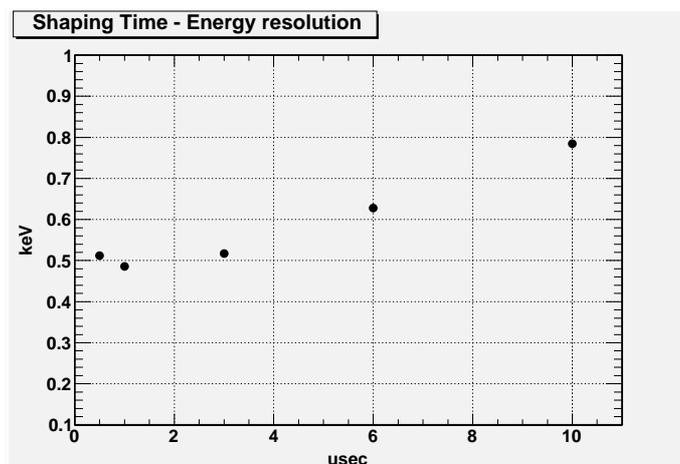


図 2.31: テストパルスのエネルギー分解能の Shaping Time 依存性

さらに、これを式 2.11 でフィットしてすると図 2.32 になる。

この図 2.32 の Capacity noise と 1/f noise は PreAMP に本来から存在するノイズであり、Parallel noise に関しては理想的な回路の場合はほとんど存在しないものである。しかし、この図では Parallel noise と同じく Shaping Time が大きくなるほど増加する成分が存在する。これは、Si-Pad センサー以外の回路でのノイズが発生していることを表している。つまり、このノイズが図 2.27, 2.28, 2.29, 2.30 の電流性ノイズに加わっているためフィッティングから求めた理論値が測定値より大きくなったと予測できる。

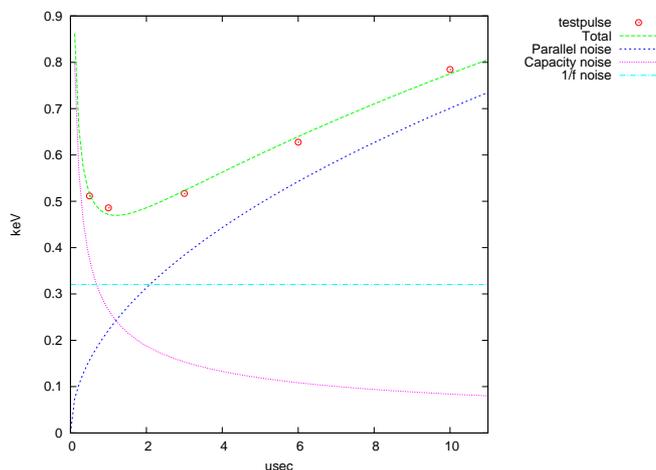


図 2.32: テストパルスのエネルギー分解能の Shaping Time 依存性をフィッティングしたもの

この Si-Pad センサー以外の回路での Parallel ノイズを差し引くため、式 2.11 に Si-Pad センサー以外

の回路での Parallel ノイズ (= 0.0491045 $\tau$ ) を加えて図 2.26 の値を次の式でフィットする。

$$f(\tau) = \sqrt{(A + 0.0491045)\tau + B/\tau + C}[\text{keV}] \quad (2.13)$$

そして、フィットした図が図 2.33,2.34,2.35,2.36 になる。図で *Shapingnoise* と示している黒線が Si-Pad センサー以外の回路での Parallel ノイズ (= 0.0491045 $\tau$ ) である。

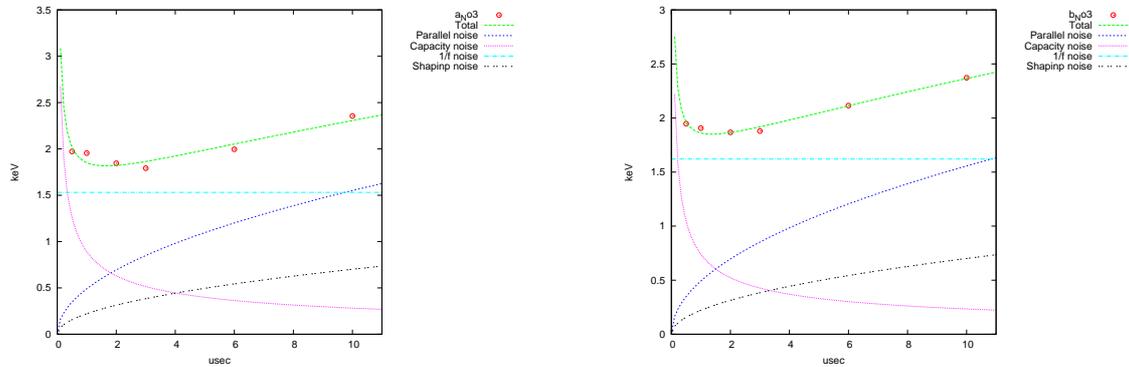


図 2.33: ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時 の区画 a のピクセル番号 3 の ShapingTime に対する エネルギー分解能をフィッティングしたもの  
 図 2.34: ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時 の区画 b のピクセル番号 3 の ShapingTime に対する エネルギー分解能をフィッティングしたもの

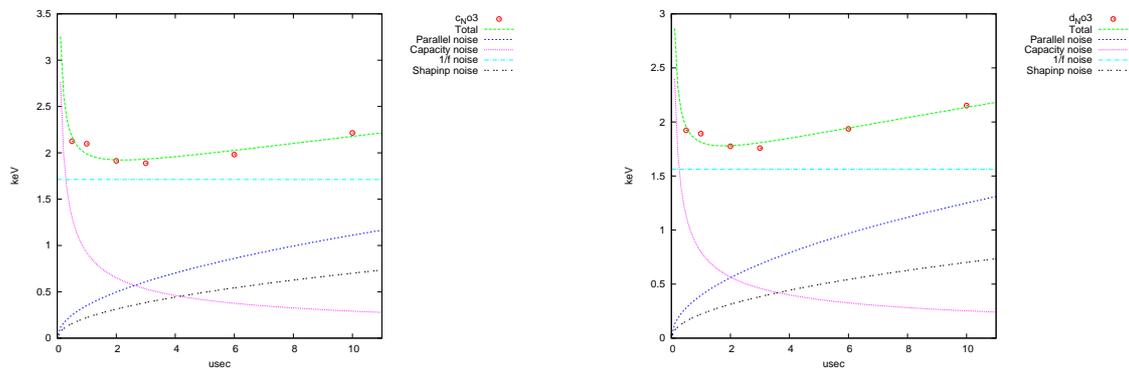


図 2.35: ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時 の区画 c のピクセル番号 3 の ShapingTime に対する エネルギー分解能をフィッティングしたもの  
 図 2.36: ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時 の区画 d のピクセル番号 3 の ShapingTime に対する エネルギー分解能をフィッティングしたもの

この Si-Pad センサー以外の回路での Parallel ノイズを差し引いた暗電流の Parallel ノイズの値を先に行ったように式 2.12 を用いて予想される暗電流値を求めて、表 2.3 にまとめた。

Si-Pad センサー以外の回路での Parallel ノイズを差し引いた分  $C$  の値は近づいたものの、理論値とは一致しなかった。これは、Si-Pad センサー以外の回路での Parallel ノイズ以外にも他の成分が Parallel

ピクセル	測定値 [nA]	フィッティングの理論値 [nA]	C
a 区画の No.3	0.0706	0.370	5.24
b 区画の No.3	0.0959	0.373	3.88
c 区画の No.3	0.0710	0.190	2.68
d 区画の No.3	0.0616	0.240	3.90

表 2.3: ロット 1 の SGD4 の積算照射量 20krad の時の暗電流の測定値と理論値

noise に合わさっていることを表している。今回、その成分を抽出してすることはできなかったが、電流性ノイズを評価するため今後より詳しく調べる必要があると思われる。

## 2.5 放射線損傷による分解能への影響のまとめ

- 暗電流は、照射量が増えるにつれて、増加する傾向があると言える。しかし、その増加傾向は、照射量に単純比例するものではなく照射量が増えるにつれ増加の割合は減少していく。暗電流の温度依存性から求めた本来のフェルミ準位と損傷による新たなエネルギー順位との差  $E_t - E_i$  を照射毎に比べて見たところ、有意な相関は見られず損傷の度合いを確認することはできなかった。
- pad 間容量の測定結果では、照射量が増えても容量の増加は見られずガンマ線による損傷はほとんどしないと考えることができる。また、pad 間容量においてはピクセルと引出し線との間に容量が発生することから引出し線が集中しているピクセルは pad 間容量が多いという傾向が見られた。
- エネルギー分解能は、照射量が増えるにつれて増加する傾向が見られた。その増加量としては 20krad 照射して照射を行う前と比べて約 0.2keV 前後である。エネルギー分解能を増加させているであろう電流性ノイズを評価するため、エネルギー分解能の Shaping Time 依存性を調べエネルギー分解能のノイズ式でフィッティングを行ったが電流性ノイズを正しく見積もることは出来なかった。今後、詳しく検証を行い電流性ノイズの正しい見積が必要であると言える。
- エネルギー分解能の大きな増加は ASTRO-H の運用期間に照射される量である 10krad で起きているが、本来照射される量に 4 倍の安全ファクターをかけているため、衛星運用期間ではエネルギー分解能はほとんど変化しないと考えられる。

## 第3章 Si-padの高電圧印加時での暗電流の振る舞い

1.5で簡単に説明をしたように、広島大学の道津がフライトモデルのSi-Pad(ロット1のSGD5)に本論文の実験と同じように照射を行い、照射ごとに測定をした。そして高電圧を印可してのI-V特性を測定し、トレーニングエフェクトと呼ばれる暗電流の回復現象と照射量を増やしていくごとにブレークダウンが起きる電圧値が下がっていくという現象が起こった。道津の実験では、この現象に対して他の素子でも同様の実験を行い詳しく測定を行うことが必要と結論づけられたのを受け、本論文では、照射ごとの性能評価と同時にこの高電圧印可時の暗電流の振る舞いについても測定を行った。

### 3.1 検証項目

#### 3.1.1 ブレークダウン

Si-padのようなp-n接合をした半導体に大きな逆バイアス電圧をかけると、その接合は降伏現象を起こして非常に大きな値の電流が流れる。これをブレークダウンという。このブレークダウンの主な原因であるなだれ増倍について説明する。

図3.1になだれ増倍の起きる過程を示す。p-n接合半導体は逆バイアス電圧がかけられている時、空乏層内で熱励起された電子(1の記号)は逆バイアス電圧がかけられたことによって発生した電界より運動エネルギーを受け取る。そして、電界の強さが強くなるにつれて受け取る運動エネルギーも大きくなりそのエネルギーが十分に大きいと格子原子と衝突をし結合を切って電子-正孔対が生成される(記号の2と2')。生成された電子と正孔は、それぞれ電界からエネルギーを得てさらに新しい電子-正孔を生成する。この過程がなだれのように次々起こることにより、大きな電流が発生する。これがなだれ増倍によるブレークダウンの原理である。[7]

道津の実験において、このブレークダウン電圧値は最初470~480V辺りで起こっていて、照射を行っていくごとにその電圧値は下がっていき、積算照射量が10kradの時には310Vまで下がった。Si-Padは、200V辺りから完全空乏化することからSGDでは250Vで運用されるのだが、ブレークダウン値が下がりこの運用値250V辺りでブレークダウンが起こるとSGDの運用に関わってきしまう。よって、ブレークダウン電圧値の照射による低下を調べることは非常に重要なことと言えよう。

#### 3.1.2 トレーニングエフェクト

図3.2に道津のフライトモデルのロット1SGD4のSi-Padセンサーに積算照射量2krad後に測定したトレーニングエフェクトの様子を示す。温度は-15℃にて測定している。横軸:時間、右縦軸:電圧値、左横軸:

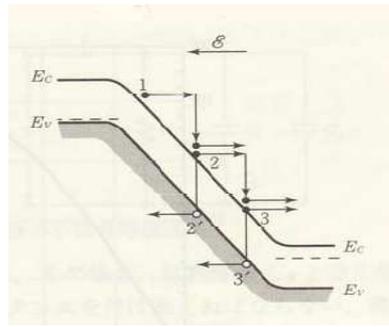


図 3.1: なだれ増倍の起きる過程 ( $E_C$ : 伝導帯下端のエネルギー、 $E_V$ : 価電子帯上端のエネルギー、 $\epsilon$ : 電界)[7]

暗電流値、青線が電圧、紫線が暗電流を表している。このグラフの測定は、暗電流の降下現象を観察するため、ブレークダウンが起ころはじめる 380V で HV 値を上げた後 5 分間一定にし、その後 380V まで電圧を下げるという動作を繰り返しつつ、1V ずつ到達する電圧を上げている。このグラフを見ると HV 値を一定にして時間をおくことで HV を上がった暗電流が降下しているのが見て取れる。これがトレーニングエフェクトである。時間経過によって暗電流が降下していく他に、トレーニングエフェクトにはもう一つ特徴がある。それは、トレーニングエフェクトを測定して数時間おいて再度測定を行うとブレークダウン電圧値が上がると言うことである。道津の測定では、積算照射量 2krad のロッド 1 の SGD4 では、最初 370V 付近でブレークダウンが起こっていたものが数時間後には 470V まで上がっていた。

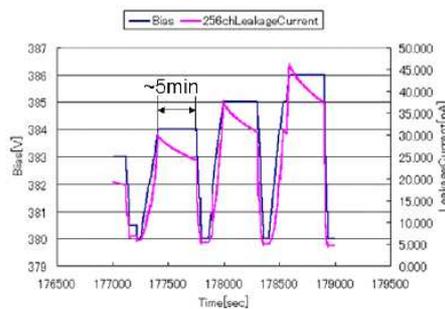


図 3.2: 2krad 照射時の HV と暗電流値の時間変化 [3]

この現象について、道津の修士論文 [3] では次のようにまとめられている。トレーニングエフェクトは、次のような過程によって起きていると考えられる。まず、放射線の照射により Pside のピクセル表面の  $SiO_2$  に正電荷が生じ高電圧がかけられることで電位の低い Pside のピクセル付近に集まる。こうした正電荷は、ピクセルの端の強電場をさらに強め、より低電圧で Micro-discharge [12] が起きる原因となる。暗電流があ

る電圧から急激に増加するのはこの Micro-discharge が起きているためと考えられ、これが測定上はブレークダウンと認識される。この時、図 3.3 のように Pside のピクセルから N-bulk 内に放出された正電荷を中和することでピクセルの端の電場が弱まり、Micro-discharge の発生割合を徐々に減少させていく。これが暗電流の降下現象に結びつく。さらに電場が弱まることで Micro-discharge による暗電流の急激に増加が低電圧で起きにくくなるためトレーニングエフェクトを行って数時間後の測定では、ブレークダウンが起きる電圧が高くなると考えられる。

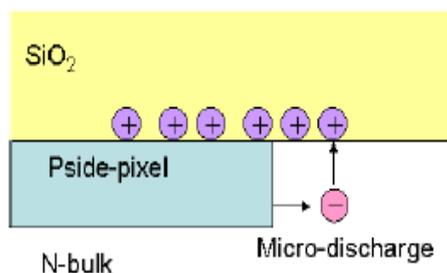


図 3.3: ピクセルの端で Micro-discharge が起きる様子の概念図 [3]

### 3.2 実験のセットアップ

照射ごとのブレークダウンとトレーニングエフェクトの測定セットアップについて説明をする。この検証での測定は、温度-15℃で全てのピクセルを足し合わせた暗電流値を測定した。そのセットアップを図 3.4 に示す。

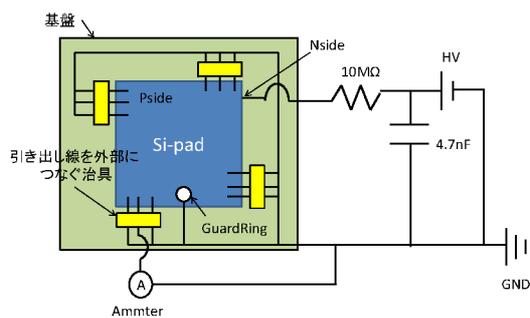


図 3.4: 全ピクセルの暗電流値を測定するセットアップ

### 3.3 測定結果

#### 3.3.1 ブレークダウン

ブレークダウンとは急激な暗電流の増加であるが、どれくらいの増加が見られたときにブレークダウンと判断するかを基準を決める。そこで道津の実験との比較も行うために図 3.5 のように HV を 10V 上げたときにあげる前の暗電流値と 10 % 以上の変化が見られた時、ブレークダウンが起きたと道津と同じ判断基準で測定を行う。

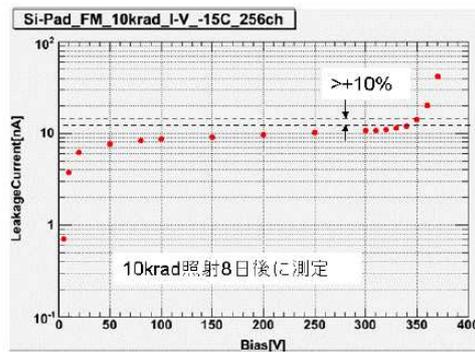


図 3.5: PFM の SGD5 の積算照射量が 20krad の時の I-V 特性

- ブレークダウンの HV 依存性

ロット 1 の SGD4 の積算照射量 0,2,6,10,20krad の後の HV を上げていった時に暗電流がブレークダウンを起こす様子を図 3.6,3.7,3.8,3.9,3.10,3.11 に示す。なお、積算照射量 0krad,6krad は測定の都合により温度-15℃ではなく 20℃で測定を行っている。

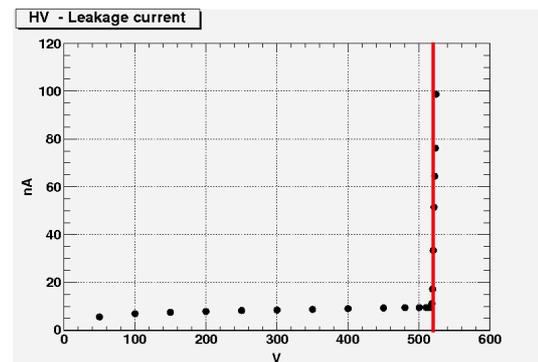
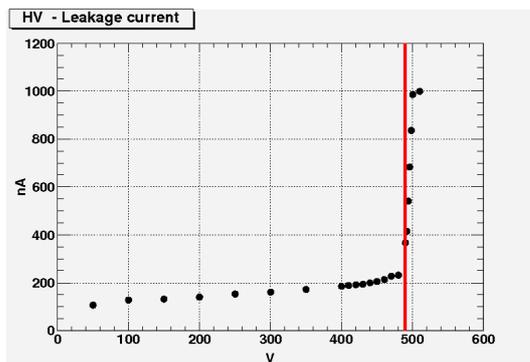


図 3.6: ロット 1 の SGD4 の積算照射量が 0krad の時の I-V 特性 (温度 20℃)  
図 3.7: ロット 1 の SGD4 の積算照射量が 2krad の時の I-V 特性 (温度-15℃)

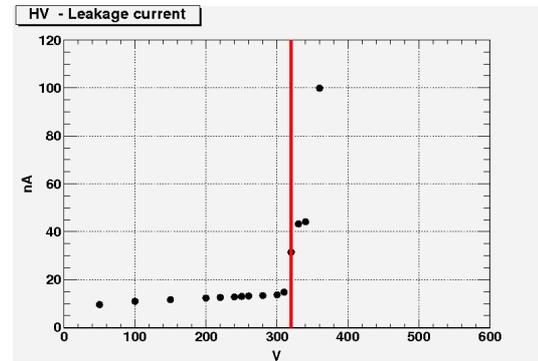
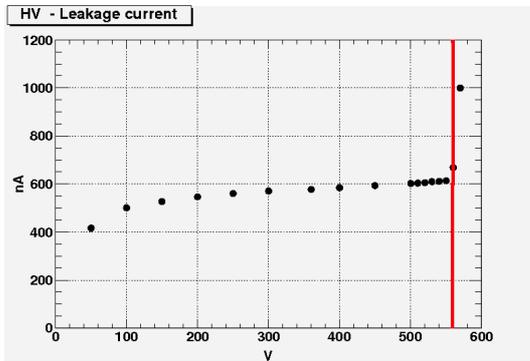


図 3.8: ロット 1 の SGD4 の積算照射量が 6krad の時 図 3.9: ロット 1 の SGD4 の積算照射量が 10krad の時の I-V 特性 (温度 20 °C) 時の I-V 特性 (温度 -15 °C)

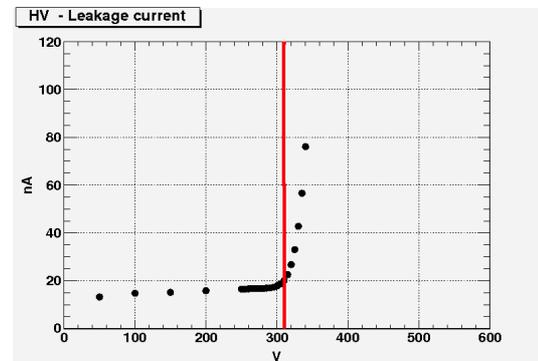
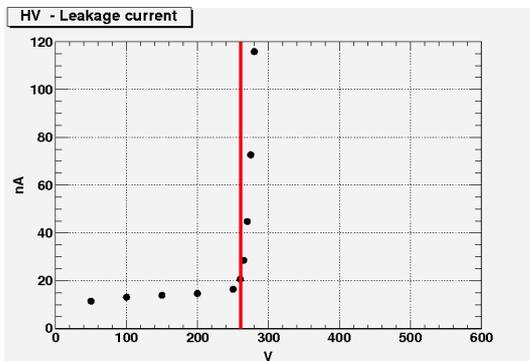


図 3.10: ロット 1 の SGD4 の積算照射量が 20krad の 図 3.11: ロット 1 の SGD4 の積算照射量が 20krad の時のアニーリング後すぐに測定した I-V 特性 (温度 -15 °C 時の最初の I-V 特性測定から 3 日後に測定した I-V 特性 (温度 -15 °C))

図の赤線は HV を 10V 変化させたときに暗電流が 10 %の変動した時の電圧である。10krad の図 3.9 を見ると一度 320V でブレークダウンが起こった後、340-350V 付近で一旦暗電流値が落ち着いてその後また暗電流値が跳ね上がっている。これは、トレーニングエフェクトにより起こったブレークダウンが 340-350V 付近で一度  $SiO_2$  の静電荷がなまされ Micro-discharge が起こりにくくなったが、更なる HV の印可で電場が強められ再びブレークダウンが起こり暗電流が急激に増加したと考えられる。20krad の最初の測定からの数日たった後のブレークダウン電圧値の変化については 3.3.3 にて詳しく述べる。

- ブレークダウンの照射量依存性

図 3.12 に照射量に対するブレークダウン電圧値をまとめたグラフを示す。

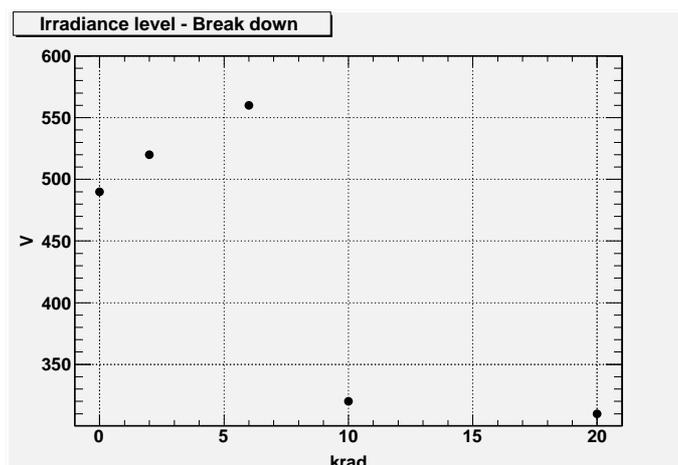


図 3.12: ロット 1 の SGD4 のブレークダウン電圧値に対する照射量依存性

図 3.12 をみると、6krad から 10krad にかけて明らかなブレークダウンが起きる電圧値の降下が見られた。このような現象は道津の測定でも確認されていて、道津の測定した PFM の SGD5 でも 10krad を境に急激なブレークダウン電圧値の降下が見られた。この事から、Si-Pad センサーはガンマ線の照射量が 10krad を超えるとブレークダウンが起きる電圧値が大幅に降下するという傾向があると言える。

ブレークダウンが何を引き金としてなだれ現象を引き起こしているかを調べるため積算照射量 20krad のロット 1 の SGD4 において、まず、Pside のあるピクセルが早めにブレークダウンを起こしそれが引き金となり他のピクセルをブレークダウンさせているのではないかと疑い、ロット 1 の SGD4 で読み出し可能な 28 ピクセルすべてを一つずつ図 2.13 のセットアップで暗電流測定した。温度は -15℃、HV は 500V までかけて測定した。その結果、28 ピクセルすべて HV500V までブレークダウンを起こさなかった。よって、この 28 ピクセル以外のところでブレークダウンしていると考えられる。

ブレークダウンが下がると SGD で運用される電圧値 250V でもブレークダウンが起きてしまい SGD の観測に支障をきたす恐れがあるため、今後、ロット 2 の新しい素子も測定しこの傾向があるかを検証していくことは非常に重要と言える。

しかし、ロット1のSGD4に関してはブレイクダウンが起きる電圧値が下がった後でも、ブレイクダウン電圧値は300Vを超えているため要求性能を満たしていると言える。

### 3.3.2 トレーニングエフェクト

トレーニングエフェクトの測定に関しても、道津との結果を比較するためにブレイクダウンが起こりはじめる領域でHV値を上げた後5分間一定にし、その後ブレイクダウンが起きないHVまで電圧を下げるという動作を繰り返しつつ、1Vずつ到達する電圧を上げていくという測定を行う。

積算照射量2,6,10,20kradでのトレーニングエフェクトを道津と同じ方法で測定したものを図3.13,3.14,3.15,3.16,に示す。但し、6kradについては都合上温度20℃で測定し、0kradに関しては測定を行っていない。図の青線は暗電流値、赤の点線はかけているHV値で、軸に関しては横軸は時間、左縦軸は暗電流値、右縦軸はHV値となっている。

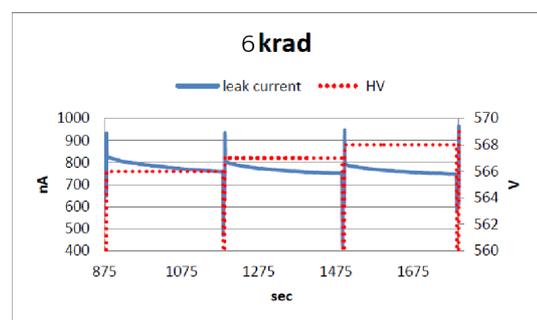
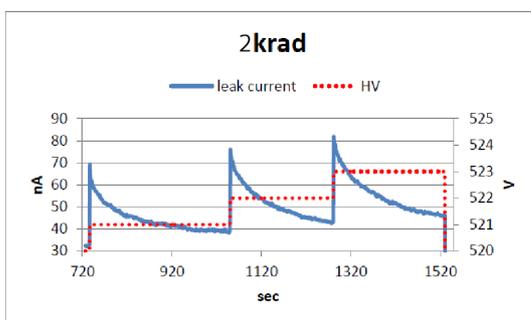


図 3.13: ロット1のSGD4の積算照射量が2kradの時のトレーニングエフェクト (温度-15℃)

図 3.14: ロット1のSGD4の積算照射量が6kradの時のトレーニングエフェクト (温度20℃)

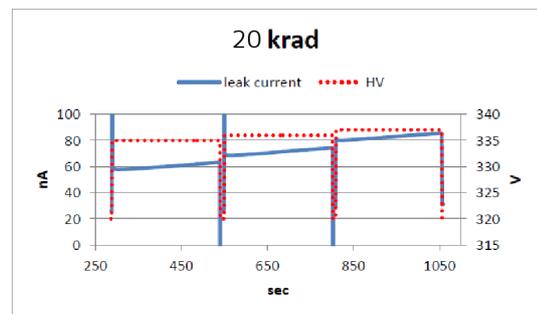
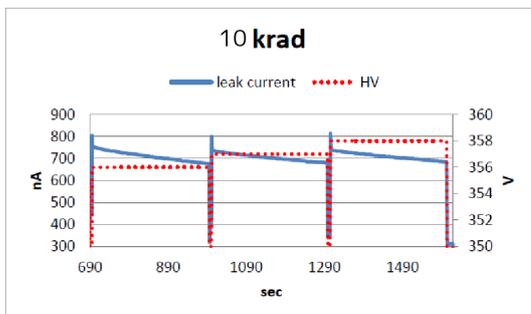


図 3.15: ロット1のSGD4の積算照射量が10kradの時のトレーニングエフェクト (温度-15℃)

図 3.16: ロット1のSGD4の積算照射量が20kradの時のトレーニングエフェクト (温度-15℃)

2,6,10kradの測定では、道津と同じようにブレイクダウンが起こした後、電圧一定で放置することにより暗電流値の降下現象が見られている。しかし、20kradに関しては暗電流は降下せず、トレーニングエフェクトが確認できなかった。積算照射量20kradの時のトレーニングエフェクトの測定は、別の測定のた

めにブレークダウンを多く起こさせてから2日後に行った。そのため、3.1.2で説明をしたように Pside のピクセル表面の  $SiO_2$  に正電荷が何回もブレークダウンを起こすことにより中和され、Micro-discharge がほとんど起きないくらいに電場が弱められたためトレーニングエフェクトが起きなくなったと予想される。都合上、データはとれなかったが積算照射量が10kradの時にブレークダウンを多く起こしてからトレーニングエフェクトを測定した際にも20kradの時と同様に暗電流は降下せずトレーニングエフェクトは確認できなかった。

### 3.3.3 ブレークダウン電圧値の上昇

3.3.1での積算照射量20krad照射後のブレークダウンが起こる電圧値が日をあけて測定を行った時に上がっていたという現象は、最初のころ  $SiO_2$  に集まった正電荷によって電場が強められ起きていた Micro-discharge が何回もブレークダウンさせられたことで今までよりもより大きな電圧をかけて電場を強めないと Micro-discharge が起きなくなったのが原因と思われる。

この様子を見るため、積算照射量20kradのロット1のSGD4のアニーリングが終了してからブレークダウンをみるため測定したI-V特性を日にち別に比べてみた。それが図3.17である。図3.17の黒点がアニーリング終わった日に測ったもので、赤点と緑点がアニーリングが終了してからそれぞれ4日後と19日後に測定した値である。

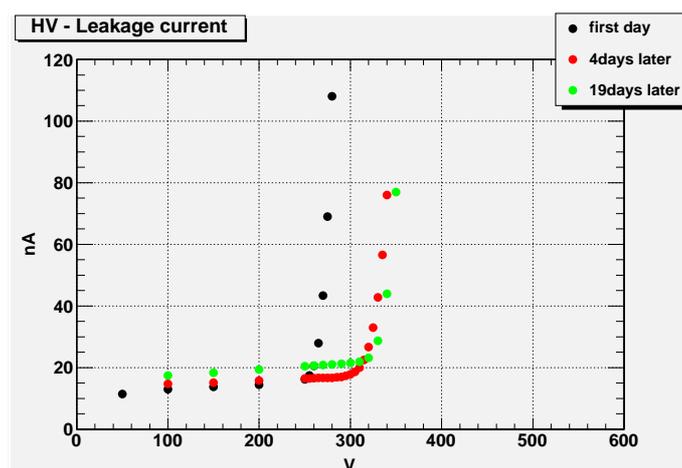


図 3.17: ロット1のSGD4の積算照射量が20kradの時のI-V特性(温度-15℃)

これを見てやると、トレーニングエフェクトが起きなくなったアニーリング終了から4日後以降はブレークダウン電圧値はほとんど変化していないことから、ブレーク電圧値の上昇はブレークダウンを繰り返したことによって  $SiO_2$  の正電荷が中和されたことが原因であると言える。

アニーリングから4日後と19日後のデータを見たところブレークダウンが起きる電圧値がほとんど変化していないことから、Si-PadセンサーのPsideの  $SiO_2$  の正電荷は何回もブレークダウンを起こしたことによりほとんどが中和され、Micro-discharge は起こりにくくなっていると考えられる。よって、今後この20krad照射を行ったロット1のSGD4をブレークダウンさせてもブレークダウンが起こる電圧値はほとんど変化しないと予測できる。

### 3.4 高印加電圧での暗電流の振る舞いのまとめ

- ブレークダウンが起こる電圧値は、照射量が10krad以上ではやく200V以上下がった。これは、道津の行った実験でも同様であるため照射量が10kradをこえるとブレークダウンが起こる電圧が下がる傾向があると考えられる。
- トレーニングエフェクトは、各照射量毎で見られたが多くブレークダウンを引き起こすと次の照射を行うまでトレーニングエフェクトは確認できなくなった。それと同時にトレーニングエフェクトが確認できなくなってからブレークダウンが起こる電圧値を測定したところ、トレーニングエフェクトが見られていた時よりも高くなることが分かった。しかし、そのブレークダウン電圧値の増加は、ブレークダウンを多く起こせばずっと上昇するわけではなく、あるところで頭打ちになる。

## 第4章 今後の課題

今後としては、12月上旬に ISAS でボンディングを行ったロット2のSGD4とSGD5に本論文で行ったガンマ線照射を行い測定していく。その上で、詳しく検証を行うべきこととして、まず、ロット1のSGD4で照射量が増えるにつれてエネルギー分解能が悪くなったのだが、その傾向がロット2のSGD4とSGD5でも見られるのかを検証する。もし、エネルギー分解能の悪化が見られた場合、その影響によってSGD運用にどれほどの影響を与えるかを調べることも非常に重要であると言える。また、今回正確に見積もることが出来なかったエネルギー分解能に影響を及ぼしていると考えられる電流性ノイズの理論値を計算することについても早急に行う必要があるであろう。

そして、もう一つ重要な点として、ロット2のSGD4とSGD5に照射を行っていった時にブレイクダウンが起こる電圧値は変化するのか、また、変化したとしたらPFMのSGD5やロット1のSGD4のように10kradでブレイクダウン電圧値が下がっているかを調べることである。また、ロット1のSGD4では20kradで多くブレイクダウンを起こした後トレーニングエフェクトが見えなくなりブレイクダウン電圧値が上がったが、ロット2のSGD4とSGD5ではどうなのか、さらに、他の照射量でもそのような現象は起きるのかを検証することは重要であると言える。

**謝辞** 本研究を行うにあたり協力していただいたすべての方に感謝致します。深沢先生には、本研究

を進めるに辺り日頃より丁寧にご指導して頂き非常に感謝しております。ありがとうございました。また、D 林さんには私が研究で悩んでいることにまるで自分のことのように一緒に考えてくださり、私が納得をするまでご指導をして頂きました。ありがとうございました。そして、朴さんには私が Si-Pad について研究することが決まってからずっと何から何まで丁寧にご指導して頂き、私がかたく研究が進まず悩んでいる時いつも励ましていただきました。ありがとうございました。

## 関連図書

- [1] <http://chandra.harvard.edu>
- [2] [http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/OskXrayTlabHP/ASTRO-H\\_SXI.html](http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/OskXrayTlabHP/ASTRO-H_SXI.html)
- [3] 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、2011
- [4] 中本達也 「多層シリコンストリップと BGO・アクティブシール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
- [5] ASTRO-H SGD team, ASTRO-H Soft Gamma-ray Detector Preliminary Design Review
- [6] <http://www-heaf.hepl.hiroshima-u.ac.jp/gakkai/tenmon0903/matsuoka0903.pdf>
- [7] S.M. ジー、半導体デバイス (第 2 版) —基礎理論とプロセス技術—
- [8] グレン F. ノル、放射線計測ハンドブック (第 3 版)
- [9] Murataka et al., Dose Rate Estimation Around a  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray Irradiation Source by Means of  $^{115}\text{In}$  Photoactivation, 2009
- [10] XCOM:Photon Cross Sections Database, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.htmlk>
- [11] Kaneko et al., Improvement of Radiation Hardness of Double-Sided Silicon Strip Detector for Belle SVD Upgrade, 2002, IEEE
- [12] T.Ohsugi et al. , Micro-discharge at strip edge of silicon microstrip sensors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1996
- [13] T.Tanaka,Si-pad VATA450 Noise, HXI/SGDteam report, KIPAC/Stanford