

MPPCの小型衛星応用を見据えたノイズ低減対策の研究

広島大学 理学部 物理科学科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B155485 久富 章平

主査：大野 雅功

副査：山本 一博

平成31年2月28日

概要

近年、数 10cm クラスの小型衛星技術が飛躍的に進んだことで、低コスト、短時間で科学技術に足る小型衛星が開発され始めており、多目的な観測が可能な宇宙観測の技術転換点を迎えようとしている。我々は光子計数デバイスとして浜松ホトニクス社で開発されている MPPC(Multi-Pixel-Photon-Counter) の小型衛星利用を見据えた研究を行なっている。MPPC はコンパクト (6mm × 6mm)、低電力 (~100V) で駆動できることで小型衛星に適したデバイスであるが、宇宙利用の経験が乏しく、特に図 1 に示すように宇宙環境下における放射線損傷によりノイズが増大することから観測性能が劣化することが懸念されており、軌道上でのノイズ低減が喫緊の課題である。本研究では、MPPC を冷却することでノイズ低減できる点に着目し、コンパクトで機械振動の影響を無視できるペルチェ素子を用いて MPPC の冷却を試みた。

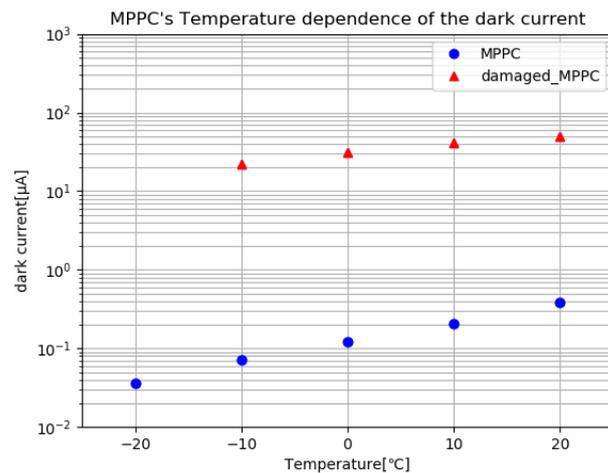


図 1: 放射線損傷無し (丸) 有り (三角) の MPPC の暗電流の温度依存性。放射線損傷により暗電流は増大するが冷却することで改善が見込まれる

目次

第 1 章	序論	6
1.1	X 線・ガンマ線観測	6
1.2	小型衛星観測の開闢	6
1.3	様々な光検出器	8
1.3.1	フォトダイオード (PD)	8
1.3.2	アバランシェフォトダイオード (APD)	9
1.3.3	光電子増倍管 (PMT)	9
1.3.4	MPPC(Multi-Pixel-Photon-Counter)	10
1.4	MPPC の放射線損傷	11
1.5	本研究の目的	12
第 2 章	MPPC のノイズ成分とその対策	13
2.1	半導体検出器のノイズ成分	13
2.2	暗電流の温度依存性	16
2.3	シェーピングタイムによるノイズ除去	17
2.4	MPPC の放射線損傷に対する対策	18
第 3 章	MPPC の基礎特性実験	19
3.1	MPPC とシンチレータ	19
3.1.1	MPPC 素子について	19
3.1.2	シンチレータ	21
3.2	実験セットアップ	22
3.2.1	MPPC 読み出し回路の製作	23
3.2.2	前置増幅器 (PreAmp)	24
3.2.3	整形増幅器 (Shaping Amp)	25
3.2.4	Analog to Digital Converter(ADC)	26
3.3	基礎特性の測定	26
3.3.1	増倍率 (ゲイン) の温度依存性	26
3.3.2	暗電流の温度依存性	32
3.4	基礎特性測定のとまとめ	35
第 4 章	ペルチェ素子による MPPC の冷却実験	36
4.1	ペルチェ素子について導入	36
4.2	ペルチェ素子の動作確認	36
4.3	ペルチェ素子による MPPC の冷却	38
4.3.1	恒温槽内でのペルチェ素子の動作確認	40
4.4	ペルチェ素子による放射線損傷した MPPC の冷却	42
4.5	ペルチェ素子実験のとまとめ	43

第 5 章 ノイズフィルタによるノイズ低減	44
5.1 シェーピングタイムの最適化	44
第 6 章 まとめと今後の課題	50

目 次

1	放射線損傷無し(丸)有り(三角)のMPPCの暗電流の温度依存性。放射線損傷により暗電流は増大するが冷却することで改善が見込まれる	1
1.1	シンチレータを用いた X 線・ガンマ線検出器の概略図	6
1.2	2003 に東工大によって打ち上げられた小型衛星の CUTE-1[3]	7
1.3	電子に対しての PD のバンド図	8
1.4	APD の構造 [1]	9
1.5	PMT の構造 [14]	10
1.6	MPPC の等価回路 [1]	10
1.7	MPPC の信号波形の様子 (p.e. は検出した光量を表す)[1]	10
1.8	印加電圧と暗電流の関係。100rad(左)と3krad(右)の2通りの照射量のMPPCに対してそれぞれいくつかの照射後経過時間について示してある。	11
1.9	各MPPCでの陽子ビーム照射前と照射後での ^{241}Am のパルス波高分布の様子	12
2.1	エネルギー分解能の定義	13
2.2	エネルギー分解能の良し悪しの比較図	13
2.3	johnson noise 導出のための図	15
2.4	MPPC の温度と暗電流の関係 (MPPC 受光面サイズ 3mm , ピクセルピッチ 50 μm)	17
2.5	有感時間 τ を変化させたときのノイズの変化。左図は 20 度、右図は-20 度のときを表す [12]	17
2.6	有感時間 τ を変化させたときのエネルギー分解能の変化。左図は 20 度、右図は-20 度のときを表す [12]	18
3.1	本実験で用いた MPPC(S13360-6050CS) の外形図 (上面図:左、側面図:中) 及び実際の写真 (右)[13]	19
3.2	開口率の定義の概念図	20
3.3	検出効率の波長依存性 (型番:S13360-6050CS)[17]	21
3.4	降伏電圧の概念図	21
3.5	MPPC に CsI シンチレータをセットする手順の概略図	23
3.6	実験セットアップの概略図 (左)、実際の実験セットアップの様子 (右)	23
3.7	MPPC の読み出し回路の回路図 (左) と実際に製作した回路 (右) の様子	24
3.8	電荷有感型増幅器の概略図	24
3.9	前置増幅器から出力された信号波形の概念図	25
3.10	パイルアップ (pileup) 現象の様子	25
3.11	CR-(RC) n 整形回路の回路図	25
3.12	各素子・機器通過ごとの信号波形の推移	26
3.13	ADC での変換の仕組みの概念図	26
3.14	20 $^{\circ}\text{C}$ の時のスペクトル	28
3.15	10 $^{\circ}\text{C}$ の時のスペクトル	28
3.16	0 $^{\circ}\text{C}$ の時のスペクトル	28

3.17	-10 °Cの時のスペクトル	28
3.18	-20 °Cの時のスペクトル	28
3.19	相対ゲインの温度依存性	30
3.20	ゲインの温度依存性の参考資料 [13]	30
3.21	CsI(Tl) シンチレータの温度依存性の参考資料 [18]	31
3.22	補正後のゲインの温度依存性のグラフ	32
3.23	逆電圧-ゲインの関係 (左) とゲインを一定下での周辺温度-逆電圧の関係 (右) 受光面サイズ 1mm, ピクセルピッチ 10 μ m	33
3.24	各温度と調節した peak 位置	33
3.25	温度と逆電圧の関係 (ゲイン一定)	33
3.26	V_{Bias} が一定のときと可変 (ゲイン一定となる条件を満たすこと) の条件での暗電流の温度依 存性	34
3.27	放射線損傷有り (三角) と放射線損傷無し (丸) の暗電流の温度依存性の図	34
3.28	暗電流の温度依存性の物理的考察のためのバンド構造の概略図	35
4.1	ペルチェ素子の基本構造 (左)、ペルチェ素子のバンド図 (右)	36
4.2	ペルチェ素子の動作確認の概念図	37
4.3	ペルチェ素子の動作確認のための実際のセットアップの図	37
4.4	ペルチェ素子の冷却面と放熱面の温度推移 (左) と、消費した電力の時間推移 (右)	38
4.5	MPPC 周辺のセットアップ概念図 (左) と実際の写真 (右)	39
4.6	ペルチェ素子の温度変化の様子 (左)、ペルチェ素子あるいは恒温槽で冷却したときの MPPC の暗電流の温度依存性 (右)	40
4.7	恒温槽内でのペルチェ素子の動作確認の概略図	41
4.8	恒温槽の外側の外観。正面 (左図) と側方 (右図) から見た様子	41
4.9	恒温槽内部のセットアップの様子	41
4.10	ペルチェ素子の冷却面と放熱面の温度推移 (左) と、消費した電力の時間推移 (右)	42
4.11	ペルチェ素子の温度変化の様子 (左)、ペルチェ素子あるいは恒温槽で冷却したときの放射線 損傷した MPPC の暗電流の温度依存性 (右)	43
5.1	実験セットアップの概略図 (左)、実際の実験セットアップの様子 (右)	44
5.2	放射線損傷していない MPPC(左) と放射線損傷した MPPC(右) の $\tau = 0.5 \mu$ s の時のスペ クトル	45
5.3	放射線損傷していない MPPC(左) と放射線損傷した MPPC(右) の $\tau = 1 \mu$ s の時のスペク トル	45
5.4	放射線損傷していない MPPC(左) と放射線損傷した MPPC(右) の $\tau = 2 \mu$ s の時のスペク トル	46
5.5	放射線損傷していない MPPC(左) と放射線損傷した MPPC(右) の $\tau = 3 \mu$ s の時のスペク トル	46
5.6	放射線損傷していない MPPC(左) と放射線損傷した MPPC(右) の $\tau = 6 \mu$ s の時のスペク トル	46
5.7	放射線損傷していない MPPC(左) と放射線損傷した MPPC(右) の $\tau = 10 \mu$ s の時のスペク トル	47
5.8	放射線損傷無し (丸) と放射線損傷有り (三角) の MPPC のエネルギー分解能のシェーピング タイム依存性の図	48

表 目 次

1.1	大型衛星と小型衛星の比較	8
1.2	様々な光検出器のスペックの比較 [7]	11
1.3	陽子を照射した 4 つの MPPC サンプルについて [8]	11
3.1	使用した MPPC のスペック [17]	19
3.2	代表的な有機シンチレータと無機シンチレータの特性 [2]	22
3.3	各素子の規格、理論値、実測値、規格の誤差範囲についての表	23
3.4	使用した放射線源と放出される主なガンマ線エネルギーについて [16]	27
3.5	各線源での光電吸収ピークのフィッティング結果	29
3.6	CsI(Tl) シンチレータの 20 °C での光量を基準にした時の各温度での光量の割合	31
4.1	恒温槽とペルチェ素子で冷却した時の暗電流の減少の評価	40
4.2	恒温槽とペルチェ素子で冷却した時の暗電流の減少の評価	43
5.1	放射線損傷が無い MPPC と放射線損傷が有る MPPC での ^{137}Cs の光電吸収ピークのフィット結果	47

第1章 序論

1.1 X線・ガンマ線観測

宇宙には様々な天体現象があり、天体からの光(電磁波)を観測することで物理描像を解明していく。観測する電磁波の波長によって同じ天体でも見えてくるものは異なってくる。例えば、可視光・赤外線は、恒星の光によってエネルギーを得た分子雲ガスやチリなどが赤外線帯域の波長を出しているため星形成領域などの解明には重要な波長帯の電磁波である。また、遠くの天体の光はドップラー効果によって波長が伸び、遠方銀河などの光は赤外線帯域で見えるため、遠方天体の観測においても赤外線観測は重要である。一方、X線では銀河やブラックホールの中心近傍にある高温のプラズマの分布や銀河の進化について、ガンマ線では、原子核の崩壊プロセスや相対論的速度まで加速された荷電粒子からの放射を観測することで、宇宙空間の元素組成比や高エネルギー天体(ブラックホールや活動銀河核など)における粒子の加速機構などについて調べることができる。今回着目するX線・ガンマ線は地球の大気に吸収されてしまうため観測するためには人工衛星を飛ばし、宇宙空間でこれらを観測する必要がある。また、X線・ガンマ線を観測する検出器としては、ガス検出器やマイクロカロリメータ、シンチレーション検出器など様々な検出器がある。ガス検出器は、ガスの封入された検出器に放射線が入射すると、封入された気体分子が放射線によって電離し、電離してできた陽子と電子を電気信号として観測して放射線のエネルギーを測定する検出器である。マイクロカロリメータは、X線が入射すると温度が上昇し、温度の上昇分で入射放射線のエネルギーが分かるという仕組みの検出器である。本研究では、最後に紹介したシンチレーション検出器を用いた。原理としては放射線がシンチレータに入射するとシンチレータ内の結晶格子の電子が励起され、入射した放射線のエネルギーに比例したシンチレーション光子が発生し、半導体検出器などの光検出器などで電気信号に変え読み出すという仕組みである。概略図を図1.1に示した。

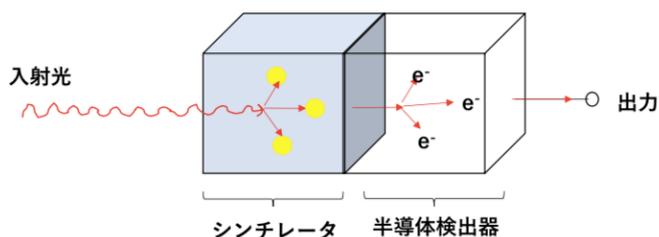


図 1.1: シンチレータを用いた X 線・ガンマ線検出器の概略図

1.2 小型衛星観測の開闢

従来までは、衛星観測といえば、数トン程度の重さがある大型衛星での観測が主流であったが、近年小型衛星による観測が活発になってきており、頻繁に開発・運用が行われている。小型衛星とは、典型的に 500kg 程度の衛星のことでさらに、1~100kg 程度の衛星は超小型衛星とも呼ばれる。我が国でも 2003 年に東京工

業大学によって学生主体のミッションとして、1辺10cm、重さ1kgの超小型衛星「CUTE1」が打ち上げられ、続く「CUTE-1.7APD」(2008)、「TUBAME」(2014)も打ち上げに成功し、放射線検出器も搭載するなど、一部の衛星は現在も運用が続けられている。世界中でも小型衛星を用いた技術発展は急速に進んでおり、ヨーロッパにおいても $10 \times 10 \times 30\text{cm}^3$ サイズの小型衛星を用いた技術実証衛星 VZLUSAT-1(Urban et al.2017)や中国において学生主体のプロジェクトとしてガンマ線バースト観測を目的とした $10 \times 10 \times 5\text{cm}^3$ の衛星を多数打ち上げる GRID 計画など、すでに実施されているものも多い。また今後小型衛星で科学観測を行おうとするプロジェクトも10を超えるほど提案準備が進んでおり、小型衛星を科学観測へと用いるニーズは日々高まってきていると言える。大学だけでなく、小型衛星利用は一般企業も参画しており、日本においてはキャノンが2017年に独自の小型衛星1号機の打ち上げに成功しており、今後の事業化を目論んでいる。世界中でも小型衛星開発を提供するベンチャー企業が増えてきている。(OneWeb 社:米国、Spaceety 社:中国など)従来までの大型衛星と比較して小型衛星で観測するメリットとしては、価格の安さや開発期間の短さがあげられる。大型衛星が数百億も開発費がかかるのに対し、小型衛星・超小型衛星は数億~50億程度にコストが抑えられる。また、大型衛星では、失敗の確率を少しでも下げるため様々な審査基準も厳しく開発期間が長くなる(5~10年)ことが多いが、小型衛星では、数年程度で開発できる。そのため、コストと開発期間の面から多くの小型衛星を生産し、多数機による広範囲・高頻度観測などが可能となる。具体的には、海水温のモニタや災害地域などの情報収集などにも役立つのではないかと期待されている。表1で大型衛星と小型衛星について様々な項目を比較した。また、年々性能が向上してきており科学分野での貢献も期待されるようになってきた。しかし、サイズが小型になった分搭載される検出器などの機器はサイズもコンパクトで省電力であるという要求性能を満たす必要がある。[15]次のセクションでは、様々な搭載機器の中でも光検出器に着目し、それぞれの特色について説明した。

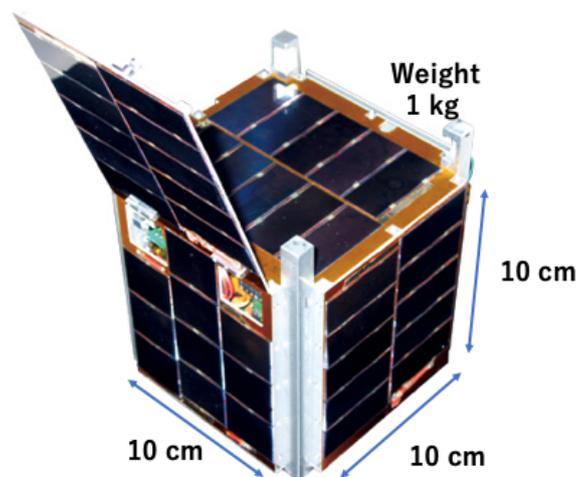


図 1.2: 2003 に東工大によって打ち上げられた小型衛星の CUTE-1[3]

表 1.1: 大型衛星と小型衛星の比較

	大型衛星	小型・超小型衛星
サイズ(一辺の長さ)	10m ~ 数 10m	数 10cm ~ 1m 程度
重量	1 ~ 5t	50 ~ 500kg
コスト	数百億円	数億円
開発期間	5 ~ 10 年	数年
特徴	長寿命・安定的な運用	・局所的な観測 ・開発コストが安いので 多数機による多頻度観測
主な事業団体	政府機関	大学やベンチャー企業

1.3 様々な光検出器

1.1.1, 1.2 で述べたとおり、小型衛星ではガンマ線バーストなど X 線・ガンマ線を観測しており、X 線・ガンマ線を観測する方法の一つとしてシンチレーション検出器(シンチレータ + 光検出器)がある。衛星が小型化することによって、シンチレーション検出器を構成する光検出器もサイズや消費電力などの様々な制約がある。本節では、これまで光検出器として使われてきた様々な検出器の原理を説明し、小型衛星に対する有用性を示す。

1.3.1 フォトダイオード (PD)

フォトダイオード (PD) とは、光を照射するとそれを電気信号に変えて検出する素子である。PD は n 型半導体と p 型半導体を接合した構造になっており、接合部には空乏層ができる。空乏層を広げ感度を向上させるために逆電圧を素子に印加する。その状態で空乏層にエネルギーギャップを超える光が入射すると、価電子帯の電子が伝導体へ励起し、さらに P 層にマイナス、N 層にプラスが印加されているので、入射放射線によって発生した電子と正孔がそれに従い移動する。空乏層内でできた電子-正孔対は、電界によって移動し光電流として検出される。図 1.3 に PD のバンド構造を示す。PD は動作電圧が低く、量子効率(入射光子に対してどれだけの電子-正孔対が発生するかの割合)が高いのが特長である。しかし、PD は動作電圧は 100V 程度で後述の PMT よりは低いが増幅機構がないため、シンチレータで発生する光量が少ないとノイズに対して弱い。

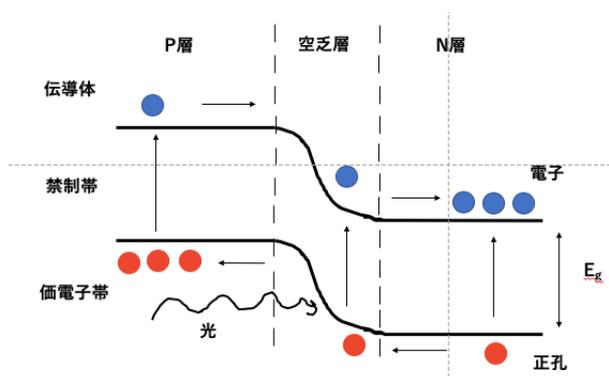


図 1.3: 電子に対しての PD のバンド図

1.3.2 アバランシェフォトダイオード (APD)

アバランシェフォトダイオード (APD) は基本構造は PD と同じだが、P 層と N 層の間にアバランシェ層という強い電界があり増幅を促す層があるのが特徴である。具体的には、光が入射し PN 接合部で発生した電子-正孔対は、アバランシェ層の電界で加速されエネルギーを得る。そして、ある程度エネルギーを蓄積したキャリアがアバランシェ層の結晶格子に衝突すると再び電子-正孔対が発生し、以下これを繰り返すことによって高い増幅率 (~100 倍) を得ることができ微弱な信号も測定できるようになっている。図 1.4 にその様子を示す。また、APD には 2 つのモードがある。ノーマルモード (降伏電圧以下の電圧で作動) の APD では、印加電圧に応じて増幅率 (~数百倍) は上がり、シグナルの大きさと入射光量には線形的な関係になる。一方 APD をガイガーモード (降伏電圧以上の電圧で作動) で作動させると、アバランシェ層でガイガー放電を起こし、増幅率は ($10^5 \sim 10^6$) にもなる。またシグナルの大きさは入射光量によらず変化しない。[6] APD では、ガイガーモードでは、高い増倍率を得られるが、入射光量に対して出力のシグナルが比例しないので単一の APD では、入射した光子数がわからないため、通常単一 APD の場合は通常モードで入射光子を増幅して運用する。ガイガーモードで利用する場合については後で述べる。

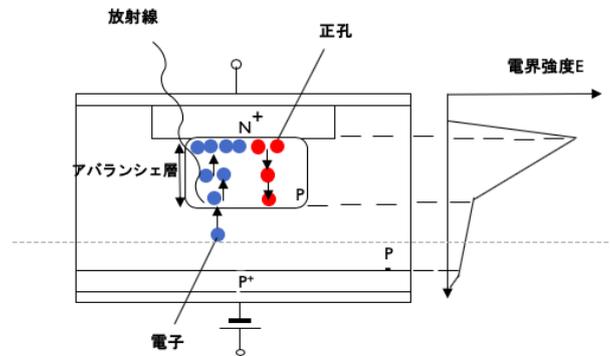


図 1.4: APD の構造 [1]

1.3.3 光電子増倍管 (PMT)

光電子増倍管 (PMT) は主に 2 つの構造からなっている。1 つはシンチレータから放出された光子 (~3eV) を光電効果の原理を用いて光電子を発生させる光電陰極であり、もう一つは、発生した電子を増倍させるための電子増倍器 (ダイノード) である。流れとしては、入射した光が光電面の電子を励起させ光電子を発生させる。発生した光電子が集束電極で加速され、ダイノードに衝突し二次電子が放出される。放出された二次電子もまたダイノードにぶつかる。以下これを繰り返し最終的には $10^5 \sim 10^6$ 倍に増幅され陽極から取り出される。図 1.5 にその様子を示した。この高い増幅率により PMT を使えば微弱な光も取り出すことができる。しかし、動作電圧は 500V~1800V と高く、また量子効率 (入射した光子数に対して発生した電子の数の比) は光電面に使用する材料のいわゆる仕事関数 (2eV 前後) によって 20 ~ 30% と低めになっている。[2][4]

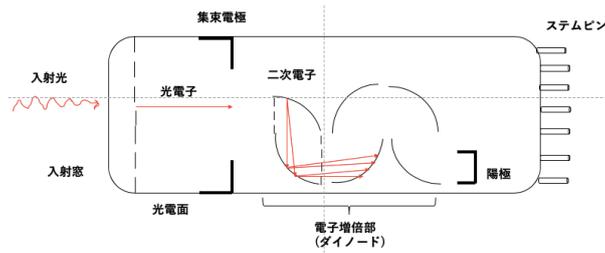


図 1.5: PMT の構造 [14]

1.3.4 MPPC(Multi-Pixel-Photon-Counter)

本研究で用いる MPPC(Multi-Pixel-Photon-Counter) は、小型で動作電圧 ($\sim 80V$) が低く、増幅率 ($10^5 \sim 10^6$) も高く、量子効率も良い ($\sim 80\%$) という近年登場した新しいタイプの光子計測デバイスである。MPPC の構造としてはガイガーモード APD とクエンチング抵抗の直列接続の組み合わせを、1 ピクセルとして多数のピクセルが並列に接続された構造である。図 1.6 に MPPC の等価回路を示した。1 ピクセルが光子検出時に出力する電荷は以下の式で表せる。 Q_{pixel} は 1 ピクセルの出力電荷、 V は印加電圧、 V_{BR} は降伏電圧を表す。

$$Q_{pixel} = C_{pixel}(V - V_{BR})$$

ガイガーモードでは C_{pixel} は一定なので Q_{pixel} も一定である。また、ガイガーモードでは、電子だけではなく正孔も放電によって増倍され、ある時点でクエンチング抵抗に電流が流れることで電圧降下が起こり、降伏電圧を下回った時点でガイガー放電が止まる。基本動作としては、MPPC は光子検出時に電荷パルスを出力するが、複数のピクセルに同時に光子が検出された場合、光子を検出したピクセル数によってパルスの高さが変わるので、そこから光量 (p.e.) が求められる。図 1.7 に MPPC の光子検出時の電荷パルス波形を示した。[1][4][6]

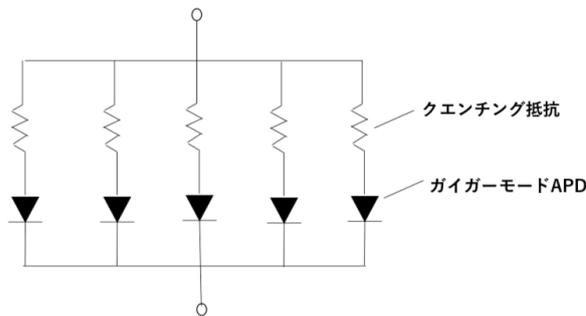


図 1.6: MPPC の等価回路 [1]

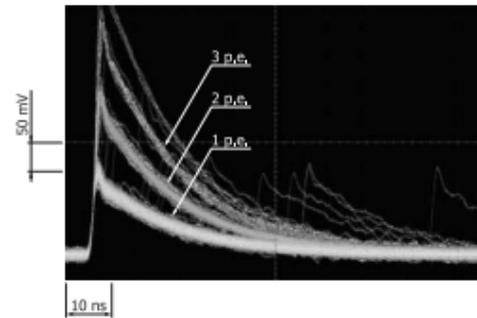


図 1.7: MPPC の信号波形の様子 (p.e. は検出した光量を表す)[1]

最後にそれぞれの光検出器の性能を表 1.2 にまとめた。以下の表 1.2 に示す。

表 1.2 を見比べると、サイズ、消費電力などの観点から小型衛星に搭載する検出器としては、MPPC が有望な光検出器となりうると言えるだろう。しかし、MPPC には、小型衛星搭載を見据えるにあたって課題もある。次の章で詳しく説明する。

表 1.2: 様々な光検出器のスペックの比較 [7]

光検出器の種類	サイズ (一辺の長さ)[mm]	動作電圧 [V]	増倍率	量子効率 [%]
フォトダイオード (PD)	0.1~30	~100	1	~80
アバランシェフォトダイオード (APD)	0.04 ~10	~400	1~100	~80
光電子増倍管 (PMT)	10~760	500 ~1800	$10^5 \sim 10^8$	20~30
MPPC	1~6	~80	$10^5 \sim 10^6$	~80

1.4 MPPC の放射線損傷

衛星の軌道条件によっては、宇宙空間あるいは、地球の磁場構造が弱くなるエリアである南大西洋異常帯 (SAA:South Atlantic Anomaly) において荷電粒子や中性子などの多数の放射線にさらされる。つまり、搭載している光検出器である MPPC も多数の放射線にさらされるということである。MPPC には、放射線により損傷し、ノイズが増大して性能が劣化することが知られている。Zhengwei Li,et.al.(2016)[8] では、放射線損傷した MPPC の性能の劣化について説明しており、以下に論文の要旨を示す。この論文では、MPPC(S10362-33-050C) に 23MeV の陽子ビームを 4 つのサンプル MPPC 照射量を変えて照射し、その後様々な物理量を測定している。以下の表にサンプルごとの陽子ビーム照射量を記述した表を示す。表の ϕ_p は照射された陽子ビームの単位面積あたりのフラックスを、D(dose) は照射量を表す。また、照射量の単位 Gy は rad[J/kg] でも表せ、1rad = 0.01Gy の関係式が成り立つ。

表 1.3: 陽子を照射した 4 つの MPPC サンプルについて [8]

Sample	$\phi_p [cm^{-2}]$	D[Gy]
4847	1×10^8	0.31
4848	2×10^8	0.62
4849	4×10^8	1.2
4851	1×10^{10}	31

図 1.8 に陽子ビームを照射した MPPC の暗電流とバイアス電圧の関係をいくつかの照射後経過時間について示した。

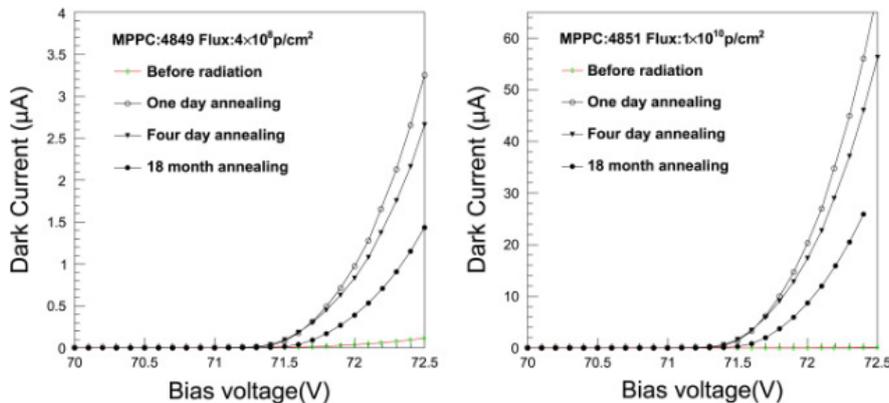


図 1.8: 印加電圧と暗電流の関係。100rad(左) と 3krad(右) の 2 通りの照射量の MPPC に対してそれぞれいくつかの照射後経過時間について示してある。

図 1.8 を見ると、どの MPPC でも陽子ビーム照射前よりも照射後の方が暗電流が増加していることがわか

る。また、もっとも陽子の照射量が多かった 3krad 照射した MPPC は照射前の 100 倍程度にも暗電流が増えている。図 1.9 に放射線損傷前後における ^{241}Am のエネルギースペクトルの比較を表す。

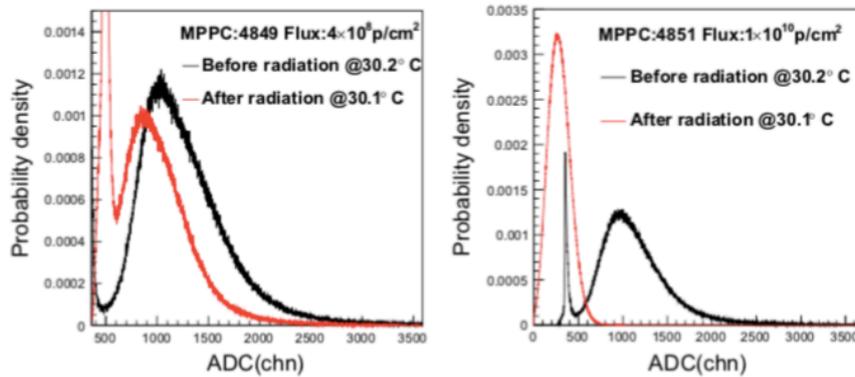


図 1.9: 各 MPPC での陽子ビーム照射前と照射後での ^{241}Am のパルス波高分布の様子

図 9 を見ると、陽子の照射量が多くなる程、ノイズ成分が大きくなっており、ピークもだんだんノイズに埋もれていく様子が見て取れる。ここまで示した先行研究結果は、通常科学観測で用いる衛星軌道において、1 年間 (もしくは 1 ヶ月) 運用した際に想定される被曝量に相当する。すなわち、衛星軌道上でわずか一年 (1 ヶ月) 運用するだけで放射線損傷によりその性能を著しく損なうということになり、従来の性能を生かすことができない。したがって、放射線損傷の影響を軽減するための何らかの対策が必要であると言える。

1.5 本研究の目的

近年、小型衛星開発が活発化しており、小型衛星での多目的な観測、科学的な貢献が期待されている。衛星サイズが小型化されることにより、搭載される測定機器もサイズや電力などの要求性能を満たすものであるものが求められる。こと光検出器においては、サイズが小さく ($\sim 6\text{mm} \times 6\text{mm}$)、動作電力も小さく ($\sim 100\text{V}$)、検出効率も良い MPPC が有望な素子として注目されている。しかし、MPPC は放射線による損傷でノイズが増大し観測性能が劣化してしまう。そのため、軌道上でいかにノイズを低減させるのかが重要となる。本研究では、MPPC のノイズの 1 つである暗電流が温度が低いほど小さくなるという性質に着目し、MPPC を冷却することで暗電流を低減させることを試みた。具体的には、小型で省電力で駆動でき、かつ半導体検出器のノイズ源となりうる振動のない (駆動部分のない) 熱電素子であるペルチェ素子で MPPC を冷却し、暗電流を低減させられるかを調べた。また、放射線損傷した MPPC も同様にペルチェ素子で冷却し暗電流が減少するか調べた。また、ノイズの周波数特性に着目し、ノイズが低減できないかを調べ評価することも本研究の目的とした。

第2章 MPPCのノイズ成分とその対策

2.1 半導体検出器のノイズ成分

本研究の目的である、放射線損傷後のMPPCのノイズ低減について検討するために、どのようなノイズ成分が放射線損傷後のMPPCのノイズの主な原因になっているか把握するために、まずはMPPC、つまり半導体検出器のノイズ成分について以下で詳しく説明する。

エネルギー分解能

放射線スペクトル測定において使用している検出器の性能を決める指標としてはエネルギー分解能がある。定義を以下の式(2.1)と図2.2に示した。 σ は標準偏差、FWHM(Full Width at Half Maximum)は半値幅、 H_0 はエネルギースペクトルにおける最大波高値に対応するエネルギー、 R はエネルギー分解能を表す。

$$R = \frac{FWHM}{H_0} \times 100[\%] \quad (2.1)$$

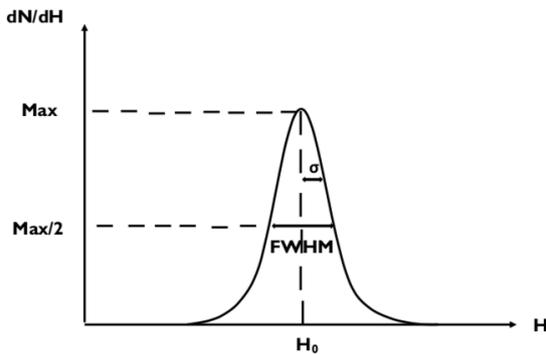


図 2.1: エネルギー分解能の定義

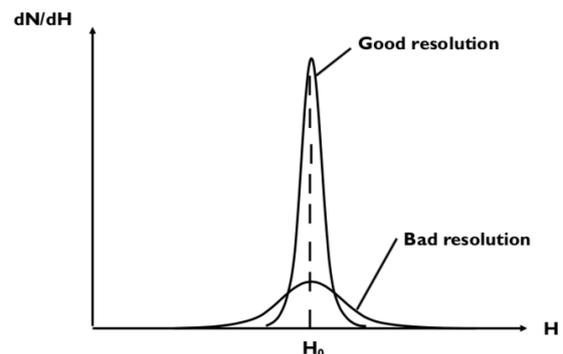


図 2.2: エネルギー分解能の良し悪しの比較図

図 2.2 に示した通り、入射した放射線のエネルギーを詳細に調べるには、エネルギー分解能が小さいほど良い。つまり、この分布の幅が狭いほど放射線のエネルギーを区別する能力の高い優れた検出器といえる。[2]

半導体検出器におけるノイズ源としては主に、回路によるノイズと半導体素子 (PD や APD など) によるノイズ、キャリアの統計限界によるノイズがある。それらのノイズの合計が分解能の劣化程度を決める。以下の式(3.2)に示した。なお、 $(FWHM)_{circuit}^2$ は回路系ノイズ、 $(FWHM)_{sc-elem}^2$ は半導体素子によるノイズ、 $(FWHM)_{stat}$ はキャリアの統計揺らぎに起因するノイズを表す。ただし、本研究では、放射線損傷によるノイズ増加に着目するので、以後前2項に着目して議論する。回路(暗電流)ノイズが支配的であるため、以後前2項に着目して議論する。

$$(FWHM)_{total}^2 = (FWHM)_{circuit}^2 + (FWHM)_{sc-elem}^2 + (FWHM)_{stat}^2 \quad (2.2)$$

さらに、回路系ノイズにも詳しく見ると、複数のノイズ源があり半導体素子も同様である。以下それらについて詳しく説明する。

Johnson noise

Johnson noise は、信号処理回路内のキャリアが熱的に揺らぐことにより、熱雑音電圧が素子の両端に発生し信号検出の妨げとなるノイズである。このノイズは外系と熱的に相互作用する抵抗などの素子で発生する。Johnson noise を導出するために図 2.3 に示したように、片方の抵抗にノイズ源となる V があり、導線 (インピーダンス $Z_0 = \sqrt{L/C}$) によりもうひとつの抵抗と繋いだ系を考える。(ただし、この系では、外部と熱的相互作用するのは抵抗のみであり、導線はリアクタンス 0 とする。)

今、各抵抗の両端を同時に短絡するとノイズ源 V から発生した電圧波は導線上で定在波として存在する。導線上を定在波として存在する条件は、導線の長さを l 電圧波の波長を λ 、自然数を n とすると、

$$l = \frac{n \lambda}{2}$$

とかける。電圧波の伝搬速度を c^* とすると、 $c^* = \nu \lambda$ より

$$\nu = \frac{nc^*}{2l}$$

この式より周波数帯域 $\Delta \nu$ で取りうる周波数の選択肢は $2l \Delta \nu / c^*$ 個である。また、電磁波の電場には、自由度が 2 であるためある周波数帯域のモードの数は

$$N_\nu = \frac{4l}{c^*} \Delta \nu$$

となる。またエネルギー等分配則より、1 自由度あたり $1/2 k_B T$ のエネルギーを持つので抵抗 A から放出されるエネルギーは

$$N_\nu * \frac{1}{2} k_B T = \frac{2k_B T l}{c^*} \Delta \nu$$

とかける。さらに上記のエネルギーは長さ l の導線に蓄えられたエネルギーであり、 $1/c^*$ 時間のエネルギーを溜めている。つまり、単位時間あたりのエネルギー P を求めるには $1/c^*$ で割ればよい。

$$P = 2k_B T \Delta \nu$$

上記の P は二つの抵抗によるものなので抵抗 A の単位時間あたりのエネルギー P_A は、

$$P_A = k_B T \Delta \nu \tag{2.3}$$

となる。これは導線をつないでいれば抵抗 B で全て消費される。雑音電圧 V で式を書き換えると、抵抗 B には $V/2$ 電圧がかかるので

$$\frac{V^2}{4R} = k_B T \Delta \nu$$

よって熱雑音電圧 V は、

$$V = \sqrt{4k_B R T \Delta \nu}$$

となる。[10]

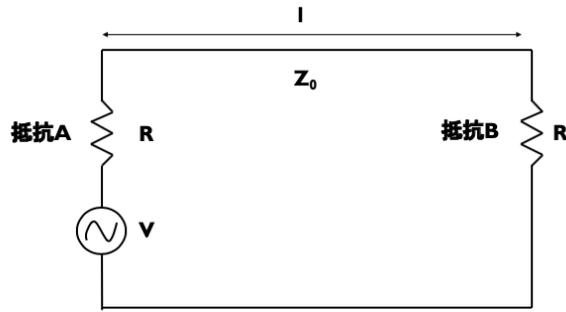


図 2.3: johnson noise 導出のための図

Shot noise

電流の元となっている電子のようなキャリアが、確率的に揺らぐことによって発生するノイズが、ショットノイズである。その揺らぎはポアソン分布に従うことが知られており、特に粒子数が少ないときにその影響は顕著になる。素電荷 e のキャリアの定常電流 I が時間 τ 流れていると仮定すると、キャリアの粒子数 N は、

$$N = \frac{I \tau}{e}$$

となる。統計的揺らぎ δN は、ポアソン分布の標準偏差 \sqrt{N} となるので、

$$\delta N = \sqrt{N} = \sqrt{\frac{I \tau}{e}}$$

上記の式より定常電流の揺らぎ、すなわちショットノイズ δI_{shot} は以下のように書ける。

$$\delta I_{shot} = \frac{\delta N e}{\tau}$$

$$\delta I_{shot} = \sqrt{\frac{I e}{\tau}}$$

ここで、一般に電子回路では、周波数帯域に制限があるので、時間 τ を周波数 f に変換し、ショットノイズを Δf の周波数帯域での定常電流の揺らぎであると考えてみる。いま、時間 τ で定常電流 I の値が変化するので、

$$\Delta f = \frac{1}{2 \tau}$$

という関係が成り立ち、ショットノイズは

$$\delta I_{shot} = \sqrt{2 I e \Delta f}$$

と書ける。ショットノイズは、MPPC に放射線が入射し、発生した電子-正孔対が原因となるノイズ源である。キャリアの統計数が多くなるほどこのノイズは減少していくため、量子効率の高い素子ほど、ショットノイズを抑えることができる。

1/f noise

1/f ノイズとは、ノイズのパワーが周波数に反比例するノイズのことである。回路素子で見られ、格子欠陥による構造の乱れによって発生しているのではないかとされているが、現在も議論がなされている。また、エレクトロニクスだけでなく自然界でも、川のせせらぎ音やろうそくの炎の揺れ方などに見られる。これは、主に MPPC を構成する APD によるノイズである。

回路系ノイズ

回路系ノイズ δ_{noise} は、回路のパラメータを用いて以下の式 (2.4) のように書ける。

$$\delta_{noise}^2 = 2q(I_{ds}/M^2 + I_{db}F) \tau + 4kTR_s(C_{tot}^2/M^2)1/\tau \quad (2.4)$$

ただし、 q は素電荷、 I_{ds} は表面リーク電流、 I_{db} は、p 層のバルク電流、 F は、過剰雑音計数、 τ は増幅器の有感時間、 T は絶対温度、 R_s は、プリアンプの雑音抵抗、 C_{tot} は、APD とプリアンプのコンデンサの容量の合計値を表す。よって、MPPC 読み出し回路による雑音は、暗電流性雑音と容量性雑音と 2 つが主な原因である。暗電流成分には、表面リーク電流とバルク電流に大別される。以下の 2.2 で説明する。回路雑音 δ_{noise} をできるだけ低減することが精度の良い測定には肝要である。[11]

2.2 暗電流の温度依存性

暗電流とは、光検出器に光が入射していないのにも関わらず流れる電流のことである。MPPC における暗電流の原因としては主に 2 つある。1 つ目は、半導体素子内部で発生するバルク電流で、2 つ目は素子の表面で発生する表面リーク電流である。バルク電流は、MPPC を構成する半導体素子内部での電子-正孔対の熱励起によって発生する電流である。ガイガーモードの APD では、高い増倍率により、このバルク電流によるノイズ成分も増倍されてしまう。よって MPPC においてはこのバルク電流が支配的となる。表面リーク電流とは、半導体素子の表面が汚染されることで、導通してしまう部分ができしまい本来流れることのない部分に電流が流れてしまうことによる電流である。表面リーク電流は、増倍に関与しない電流なので、MPPC においてはその寄与は小さい。上記を定量的に評価した MPPC を構成する APD の暗電流によるショットノイズは、以下の式 (2.5) で表される。

$$I_n^2 = 2q(I_L + I_{br})BM^2F + 2qI_{sl}B \quad (2.5)$$

ただし、 q は素電荷、 I_L は像倍率が 1 のときの光電流、 I_{br} は増倍に関わるバルク電流、 B は帯域幅、 M は増倍率、 F は過剰雑音係数、 I_{sl} は増倍されない表面リーク電流を表す。[1] 前述した暗電流 I_{br} には温度依存性があり、半導体光検出器では、以下の式 (2.5) で表されることが知られている。 $(E_g$ はエネルギーギャップ、 k_B はボルツマン定数、 T は温度を表す)

$$I_{br} \propto T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (2.6)$$

式 (2.6) と図 2.4 を見てもわかる通り、暗電流を減らすには光検出器を冷却するのが有用な対策と言える。次の節では、別のノイズ対策についても説明する。

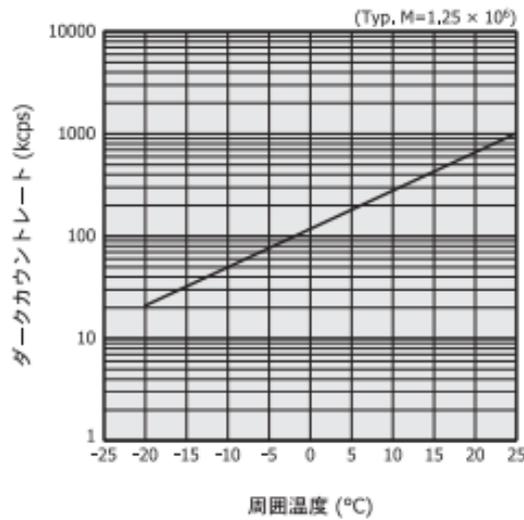


図 2.4: MPPC の温度と暗電流の関係 (MPPC 受光面サイズ 3mm , ピクセルピッチ 50 μ m)

2.3 シェーピングタイムによるノイズ除去

式 (2.4) に示した、回路ノイズ δ_{noise} を減らす方法として、ノイズの式に含まれている shaping time(有感時間) τ を変化させることでノイズを低減するという方法もある。第 3 章で詳しく説明するが、MPPC の出力信号は電荷パルスであり、一般に電荷有感型前置増幅器で電圧信号へと変換し、パルス整形を行い、波形を整形するのであるが、パルス整形時にシェーピングタイム τ を変化させることでノイズカットを実現することができる。パルス整形するときのシェーピングタイム τ は、電荷収集を確実にを行うため、基本的に使用するシンチレータの減衰時間より長い有感時間を持つ必要がある。図 2.5 には、参考資料として R.Sato,et.al(2016) で CsI(Tl) シンチレータ読み出しで MPPC の温度 20 度と-20 度の時にシェーピングタイム τ を変化させた時のノイズ成分がどのように変化するかを示した。図 2.5 の dark noise は暗電流由来のノイズ、capacitance noise は容量性由来ノイズを表す。2つのノイズの合計である total noise が最小になるシェーピングタイム τ が最適な時間である。図 6 には各エネルギーごとの線源を用いて、スペクトルを測定し、求めたエネルギー分解能が有感時間 τ によってどのように変化するかを示している。図 2.5、図 2.6 によって温度ごとに最適なシェーピングタイム τ は変化していることがわかる。これは、冷却することで暗電流のノイズへの寄与が容量性ノイズに対して相対的に下がることで容量性ノイズがノイズの主成分になったからであると考えられる。このようにノイズに寄与する成分の性質が変化すると、シェーピングタイムもその度に最適化しないと性能を最大化できないことがわかる。

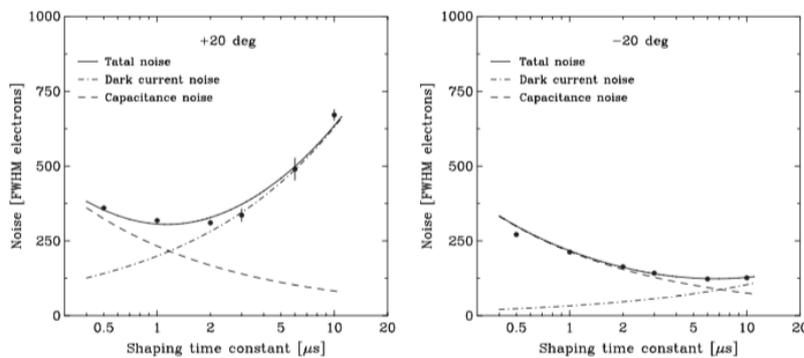


図 2.5: 有感時間 τ を変化させたときのノイズの変化。左図は 20 度、右図は-20 度のときを表す [12]

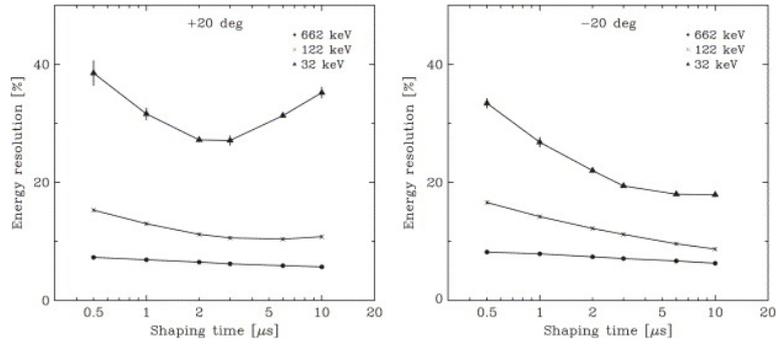


図 2.6: 有感時間 τ を変化させたときのエネルギー分解能の変化。左図は 20 度、右図は -20 度のときを表す [12]

2.4 MPPC の放射線損傷に対する対策

ここまでで、半導体検出器の性能を決定づける要因として、半導体のノイズ成分とそのシェーピングタイム依存性について示した。半導体検出器のノイズ成分のうち、MPPC で重要となる暗電流成分については、検出器を冷却することでその影響を低減できることが分かった。また、信号整形におけるシェーピングタイムも、ノイズ成分が変化するとき最適化することで検出器の性能を引き出すことができることを示した。放射線損傷することで、1.4 節で示したように MPPC の暗電流成分は劇的に増大し、検出器性能を損なってしまうことが想定される。この際、放射線損傷によるノイズ増加を低減する方策として、1) 検出器を冷却することで暗電流そのものを減少させるノイズ低減に繋げる。2) 放射線損傷による暗電流の増加により、最適なシェーピングタイムが変化する可能性があることに着目し、シェーピングタイムを再び最適化する。上記の 2 通りについて本研究で検討する。1) については、一般的に実験室で用いる恒温槽は巨大であるため、小型衛星には当然搭載不可能である。したがって、小型衛星に搭載可能性のあるコンパクトで省電力である冷却デバイスの検討が必須である。そこで本研究では、コンパクトで省電力化の可能性のある熱電素子であるペルチェ素子を用いて MPPC を冷却し、恒温槽で冷却した場合と同様のノイズ性能が実現できるかどうかを調べる。2) については、実際に放射線損傷を被った MPPC を用いて、CsI シンチレータからのガンマ線信号を読み出し、エネルギー分解能を最適化できるシェーピングタイムを調べる。

第3章 MPPCの基礎特性実験

3.1 MPPCとシンチレータ

本章では、本研究の目的である MPPC の暗電流成分低減のために、まずは MPPC の基礎特性を理解する実験を行う。ここでは、MPPC の小型衛星利用を見据えて、ガンマ線をシンチレータで検出し、そのシンチレーション光を MPPC で計数する検出器系を構築した。まず、MPPC とシンチレータの詳細について説明する。

3.1.1 MPPC 素子について

MPPC 素子は、優れた検出効率をもち、広い感度波長帯域を持つ光子計数デバイスである。その仕組みについては、以下で詳細に説明する。また、MPPC はサイズが大きいほど光量も多く獲得できる。そのため、本実験においてはサイズが大きい 6mm × 6mm の MPPC を使用した。使用した MPPC のスペックについては表 3.1 に示した。

表 3.1: 使用した MPPC のスペック [17]

型番	受光面サイズ [mm]	ピクセルピッチ [μ m]	検出効率 [%]	降伏電圧 [V]	暗電流 @25 °C [μ A]
S13360 - 6050CS	6 × 6	50	40	53 ± 5	0.501

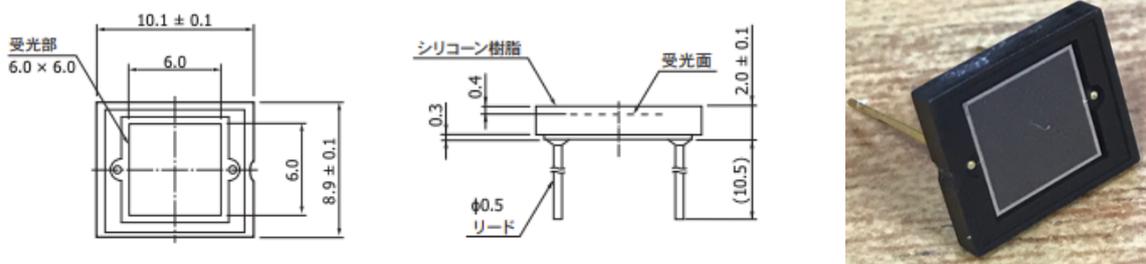


図 3.1: 本実験で用いた MPPC(S13360-6050CS) の外形図 (上面図:左、側面図:中) 及び実際の写真 (右)[13]

量子効率 QE

量子効率 QE(Quantum-Efficiency:QE) は、入射した光子の数 N_{photon} と、検出器で発生した電子-正孔対の数 $N_{elec,hole}$ の比で定義される。定義式を式 (3.1) に示した。また、量子効率 QE には波長依存性がある。

$$QE = \frac{N_{elec,hole}}{N_{photon}} \times 100[\%] \quad (3.1)$$

開口率 Fg

開口率 F_g とは 1 ピクセルの中で受光部分が占める割合のことである。以下の式 (3.2) に定義式を図 2

に概念図を示した。 S_{total} は 1 ピクセルの全体の面積、 S_{actv} は有感領域の面積を表す。

$$F_g = \frac{S_{actv}}{S_{total}} \times 100[\%] \quad (3.2)$$

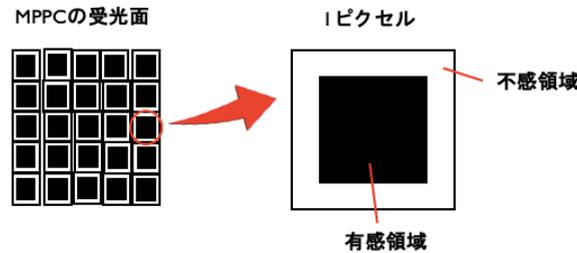


図 3.2: 開口率の定義の概念図

アバランシェ確率 P_a

アバランシェ確率 P_a とは、フォトンが入射したピクセル数 N_{pixel} に対して励起したピクセル N_{excit} がどれだけあるのかを表す。以下の式 (3.3) に示した。

$$P_a = \frac{N_{excit}}{N_{pixel}} \quad (3.3)$$

検出効率 (PDE)

検出効率 (Photon Detection efficiency:PDE) は、入射した光子のうち、検出される光子はどれだけであることを示したものである。PDE は前述の 3 つの要素の積で定義される。以下の式 (3.4) に示した。また、PDE は、要素に QE を含むため波長依存性があり、図 3 に示すように λ が 460 nm あたりが最も感度が良い。これは、後述するシンチレータの蛍光によるシンシレーション光の波長に近く、入射した放射線により発生したシンチレーション光子をより多く MPPC で検出できる仕組みとなっている。[1]

$$PDE = \frac{N_{carria}}{N_{photon}} = QE \times F_g \times P_a \quad (3.4)$$

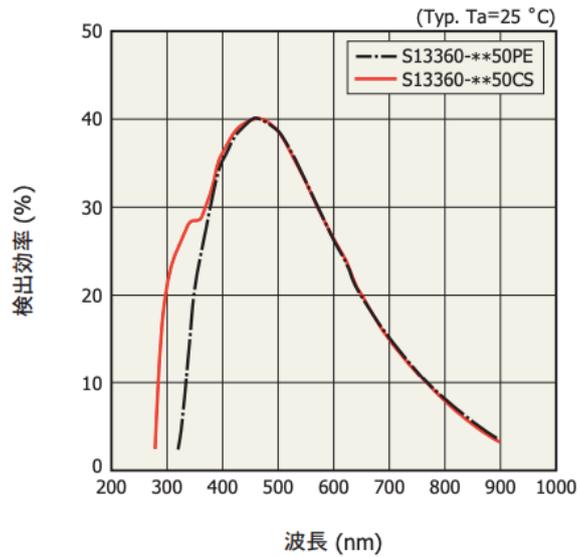


図 3.3: 検出効率の波長依存性 (型番:S13360-6050CS)[17]

降伏電圧

降伏電圧とは英語で Breakdown 電圧という。これは、PN 接合された半導体素子において逆方向に電圧をかけていき、ある電圧を超えた時に電流が流れ始めるその場所のことを言う。MPPC では、この降伏電圧を超える逆電圧をかけることによって、ガイガーモードになり、アバランシェ増倍が起こり高い増倍率を得ることができる。そのため本実験では、ガイガーモードで動作させるため常に降伏電圧以上の電圧を印加させる。

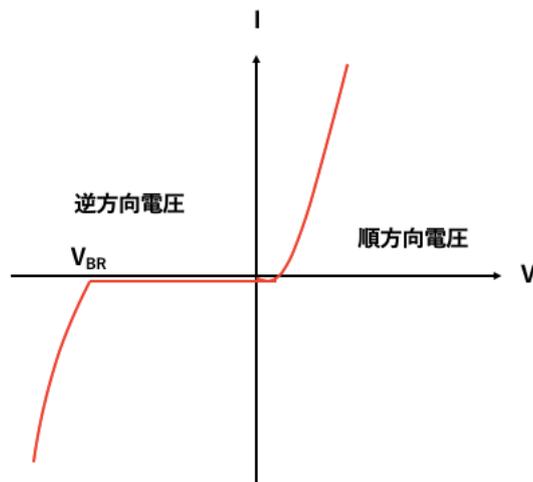


図 3.4: 降伏電圧の概念図

3.1.2 シンチレータ

シンチレータとは、放射線が入射すると入射放射線のエネルギーに比例したシンチレーション光(可視光)を再放射する物質であり、シンチレーション光子数を計数することで、入射放射線のエネルギーを知ることができる。一般的なシンチレータの性質としては以下があげられる。

- 入射した放射線を高いシンチレーション効率で可視光に変換できる
- 入射放射線のエネルギーと出力される光子の関係は広いエネルギー範囲に渡ってよい線形性を示す
- 発生したシンチレーション光の減衰時間が短く、高い計数率まで一光子ごとの計測が可能である。
- 自身のシンチレーション光に対する吸収、散乱を起こさず、自己吸収による損失が少ない。

また、シンチレータには、有機シンチレータと無機シンチレータがある。表 3.2 に有機・無機シンチレータの具体例を示す。有機シンチレータは減衰時間が短いので時間分解能には優れているが、発光量が少ない。一方、無機シンチレータは発光が多く、原子番号 Z が大きく密度も大きいため X 線・ガンマ線の測定には向いている。しかし、減衰時間は一般に長い。衛星にシンチレーション検出器を搭載する際、小型衛星ではサイズが小さく、検出器が搭載可能なスペースも限られている。そのため、限られたスペースでより多くの光量を獲得することが、小型衛星での放射線測定において肝要になる。本研究では、シンチレータの中でも絶対発光量の多い CsI(Tl) を用いてガンマ線を検出し、発生したシンチレーション光子をコンパクトで低電力で動作する MPPC で計数する検出器を構成し、その基礎特性を調べる。

表 3.2: 代表的な有機シンチレータと無機シンチレータの特性 [2]

種類	名称	絶対発光量 [フォトン/MeV]	減衰時間 [μ s]	最高放出波長 [nm]
有機シンチレータ	NE102A(プラスチックシンチレータ)	10,000	0.002	423
無機シンチレータ	$Bi_4Ge_3O_{12}$ (BGO)	8,200	0.3	480
無機シンチレータ	NaI(Tl)	38,000	0.23	415
無機シンチレータ	CsI(Tl)	65,000	0.68(64%)	540

3.2 実験セットアップ

図 3.6 に本実験における基本的なセットアップを示す。本実験では、1cm 角立方体の CsI(Tl) 結晶を 6 mm \times 6 mm の有感領域を持つ MPPC(S13360-6050CS) で読み出すセットアップを構築した。まずシンチレータは、Enhanced Specular Reflector(ESR) と呼ばれる反射シート 1 重で覆うことで、発生したシンチレーション光子が外部へ逃げ出さないようにした。ESR はカプトンテープで固定し、機械的安定性を確保した。CsI(Tl) と MPPC は光学グリス (GE 東芝シリコン OKEN6262A) を介して接触させ、バルカータープで固定することで全反射の影響を緩和し、速やかに光子が MPPC が入力されるようにした。CsI(Tl) シンチレータと MPPC のセットアップ概略図を図 3.5 に示す。MPPC には降伏電圧以上のバイアス電圧を印加する必要があるが、本実験では、暗電流もモニタできるソースメータ (KEITHLEY 2410) を用いてバイアス電圧 $V_{Bias} = 54.5$ V を印加した。MPPC では、検出した光子数に応じた大きさの電流を出力する。発生した電荷を前置増幅器 (CLEAR-PULSE PREAMPLIFIER MODEL 506E) より増幅、電圧信号へと変換する。さらに、整形増幅器 (ORTEC 571) によって増幅、整形を行うことでノイズを低減し (シェーピングタイム $\tau = 1 \mu$ s)、最終的にアナログ・デジタルコンバーター (AMPTEK MCA8000D) によりデジタル信号に変換した電圧信号の波高値情報をパソコンに転送する。この波高値は入射ガンマ線のエネルギーに比例しているため、この波高値を解析することで入射ガンマ線のエネルギースペクトルを得ることができる。以下で使用した機器の各々の仕組みについて説明する。

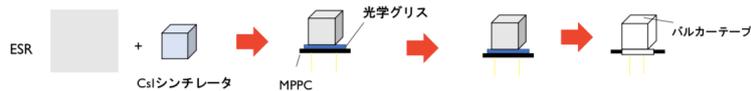


図 3.5: MPPC に CsI シンチレータをセットする手順の概略図

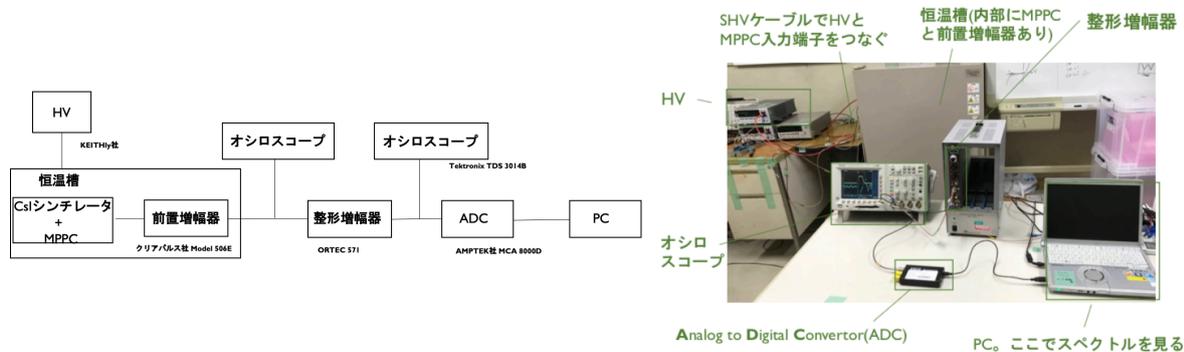


図 3.6: 実験セットアップの概略図 (左)、実際の実験セットアップの様子 (右)

3.2.1 MPPC 読み出し回路の製作

本章では、MPPC の基本特性を理解するために 2 つの基礎実験を行なった。その実験を始める前にまず、はじめに浜松ホトニクス製の MPPC 読み出し用の回路図を参考にしながら、MPPC の読み出し回路を製作した。回路に使用した素子は表 3.3 に示した。また、読み出し回路の回路図と実際に製作した回路は図 7 に示した。この回路の HV(電源側) のコンデンサ・抵抗はいわゆるローパスフィルタであり、電源からの高周波数ノイズ成分をカットする役割を持っている。今回図 7 に示すように信号読み出し側にも同様にフィルタ回路を設けることで、より読み出しノイズを低減させることを試みた。それぞれフィルタ回路に用いた抵抗、コンデンサ素子、パラメータを表に示す。実際に製作した回路は、図 3.7 に示すようにアルミ箱に収めることによって静電遮蔽も行なっている。

表 3.3: 各素子の規格、理論値、実測値、規格の誤差範囲についての表

品名	品番号	理論値	実測値	規格の誤差範囲 [%]	備考
MFS1/4CC1001F	491 - 1386	1.000 k Ω	0.9996 Ω	± 1	R_1
MFS1/4CC1001F	491 - 1386	1.000 k Ω	1.0000 Ω	± 1	R_2
RPER11H104K2K1A01B	318 - 1998	0.1 μ F	NA	± 10	C_1
RPER11H104K2K1A01B	318 - 1998	0.1 μ F	NA	± 10	C_2

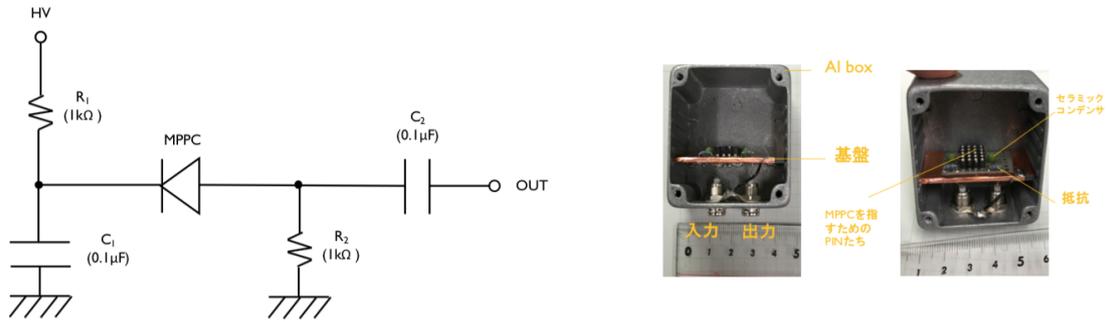


図 3.7: MPPC の読み出し回路の回路図 (左) と実際に製作した回路 (右) の様子

3.2.2 前置増幅器 (PreAmp)

MPPC の出力信号は電荷 Q に対応したパルスとして出力され、出力インピーダンスも高くそのまま低インピーダンスの処理回路に繋げると、波形が崩れやすい。よって検出器とその後の処理回路の間に前置増幅器 (preamplifier) を入れることにより、その時に微小な電荷パルスが積分され、電圧信号となり、低インピーダンスでその後の処理回路に出力されるので望ましい。近年では、電荷有感型前置増幅器が使われており、図 3.8 にその仕組みを示した。 A はアンプの増幅率を C_i は入力静電容量を表す。また、信号対雑音比 (S/N) を極力小さくするため、検出器の近くに前置増幅器を置く。

$$A \gg (C_i + C_f)/C_f$$

を仮定すると、

$$V_{\text{out}} = -AV_{\text{in}}$$

$$V_{\text{out}} = -A \frac{Q}{C_i + (A + 1)C_f}$$

$$V_{\text{out}} \simeq -\frac{Q}{C_f}$$

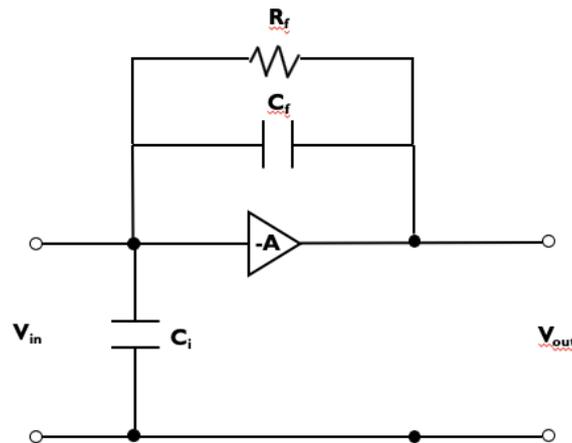


図 3.8: 電荷有感型増幅器の概略図

3.2.3 整形増幅器 (Shaping Amp)

図 3.9 に示したような前置増幅器から出力される信号波形の波高値は入射ガンマ線のエネルギー情報を含むため、この波高値を解析することが以降の信号処理において重要である。ここで信号にノイズが含まれていると計測する波高値に不定性が生じるとともに測定可能な下限エネルギーも限られてしまう。よって波高値解析を行う前に波形整形をおこなうことで特定の周波数帯域だけを通過させ、ノイズ低減を行うとともに、信号減衰時間を短くすることで図 3.10 に示すようなパイルアップの効果を低減する。

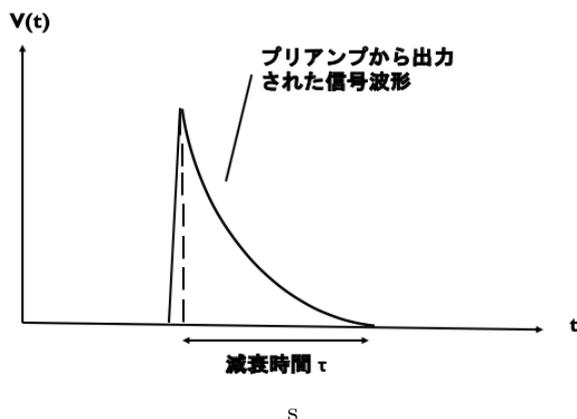


図 3.9: 前置増幅器から出力された信号波形の概念図

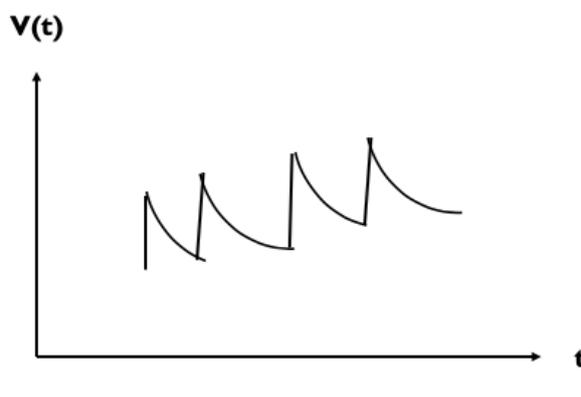


図 3.10: パイルアップ (pileup) 現象の様子

パルス波形を整形する際、一般的なパルス整形回路は、第 2 章で述べた通り、CR 回路などの微分回路と RC 回路などの積分回路を組み合わせていることが多い。なぜ組み合わせるのかというと、CR 微分回路のみでは、パルスの最大波高の持続時間が短いため、peak 波高分析が難しいこと。加えて、CR 微分回路は、ハイパスフィルタであり、高周波数ノイズ成分はカットできないからなどの理由がある。今回の実験で使用した整形増幅器 (Shaping Amp) では、ガウス整形、あるいは $CR - (RC)^n$ 回路という、同じ定数時間の CR 微分回路と n 個の RC 積分回路を組み合わせたもので出力波形がガウス関数のパルス波形になっている。信号対雑音比 (S/N) が優れているため半導体検出器を使った測定系でよく用いられる。出力波形 V_{out} は以下の式 (3.5) のようになり、回路図と信号波形の推移の概念図をそれぞれ図 3.11 と図 3.12 に示した。また、図 11 の増幅器は入力インピーダンスが極めて高く、また出力インピーダンスが 0 に近い増幅器で、CR 回路と RC 回路が別の回路に影響を与えないようにインピーダンス隔離する役割がある。

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{n!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^n e^{-t/\tau} \quad (3.5)$$

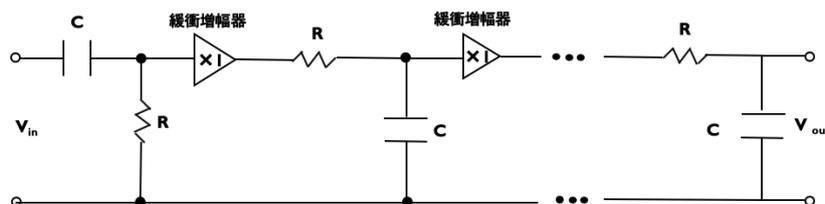


図 3.11: $CR - (RC)^n$ 整形回路の回路図

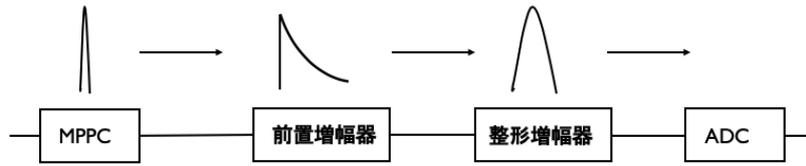


図 3.12: 各素子・機器通過ごとの信号波形の推移

3.2.4 Analog to Digital Converter(ADC)

A-D変換器 (Analog to Digital Converter:ADC) とは、連続的なアナログ信号をあるで切り分け、離散的なデジタル信号に変換する機器である。具体的な変換手順としては、まず標本化 (サンプリング) といひ、アナログ信号をある時間幅 ΔT で区切り読み込む。この時、元のアナログ信号の周波数が $0 \sim f_0$ の帯域の周波数を持つとして、 $\Delta T \leq \frac{1}{2f_0}$ の関係を満たす標本化間隔 ΔT を設定しないとデジタル信号に変換したときに元の信号の情報が失われてしまう (標本化定理) という注意点がある。2つ目にするのは、量子化である。量子化とは、読み込んだ標本化された値を、デジタル信号に変換できるように切り捨てや丸めることである。この時、量子化によって発生する誤差をなるべく小さくすることが肝要である。最後に行うのは符号化といひ、量子化されて得られた値を 0 か 1 で表す n 進数のデジタル信号にすることである。bit 数が多いほど ADC は詳細な値まで表現できるので、bit 数の多い ADC は分解能が良いと言える。本実験で用いた ADC(MCA8000D) は 100 MHz で入力信号をサンプリングし、計測した波高値を 16bit の分解能でヒストグラム化する。

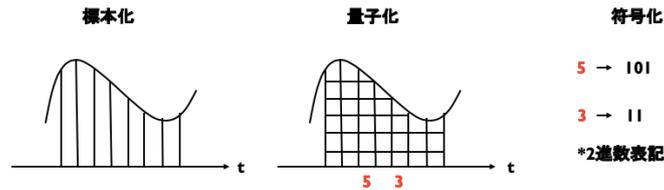


図 3.13: ADC での変換の仕組みの概念図

3.3 基礎特性の測定

ここでは、以下の項目について測定することで MPPC の基礎特性を理解することを目的とする。1つ目は「増倍率 (ゲイン) の温度依存性」でもう一つは、「暗電流の温度依存性」である。まず1つ目について、MPPC は温度にはより増倍率 (ゲイン) が変化するという特性があることが知られている。温度によるゲインの変化を把握することは、検出器で計測された波高値分布から入社ガンマ線のエネルギー分布を知るためのエネルギー校正するといった意味でも重要である。2つ目の暗電流は、MPPC のノイズ特性に大きく影響する要素であり、暗電流が小さいほどより低いエネルギー側もみることができ、精度のよい観測ができる。暗電流にも温度依存性があり、本基礎実験で実際に測定し、その性質を調べていく事を目的とする。

3.3.1 増倍率 (ゲイン) の温度依存性

実験概要

MPPC は構成するピクセルの APD により、ゲインに温度依存性がある。宇宙空間で小型衛星でのエネルギー校正を正確に行うためには、MPPC の温度依存性を知ることは重要である。MPPC の増倍

率 (絶対ゲイン:G) は、1 ピクセルが1 フォトンを検出したときに発生する出力パルスの電荷 Q_{pixel} を素電荷 $e(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})$ で割った値で定義される。式 (3.6) に定義式を示す。

$$G = \frac{Q_{pixel}}{e} \quad (3.6)$$

絶対ゲインが高いことによって、微弱な放射線であっても増倍されてノイズに埋もれずに信号を得ることができる。この絶対ゲインを測定するのは様々な測定条件が必要であるため一般的に簡単ではない。そこで本研究では、実際に放射線源からのガンマ線のエネルギーを様々な温度条件下で測定することで得られるスペクトルピークの変化を相対的に評価することで、温度による相対ゲインの変化を調べることにした。相対ゲインの定義を以下の式 (3.7) に示す。

ただし、 $Peak_t$ は任意の温度の時の Peak 値を $Peak_{20^\circ\text{C}}$ は、 20°C の時の Peak 値を表す。

$$G_{rel} = \frac{Peak_t}{Peak_{20^\circ\text{C}}} \quad (3.7)$$

また、誤差は誤差伝搬の式より、以下の式 (3.8) から求めた。

$$(\Delta G_{rel})^2 = \left(\frac{\partial G_{rel}}{\partial Peak_t}\right)^2 (\Delta Peak_t)^2 + \left(\frac{\partial G_{rel}}{\partial Peak_{20^\circ\text{C}}}\right)^2 (\Delta Peak_{20^\circ\text{C}})^2 \quad (3.8)$$

測定・解析方法

線源として ^{241}Am と ^{109}Cd を用いた。これらの放射線源が放出するガンマ線のエネルギーのうち、放出割合が高く、本実験で用いたエネルギーについて表 3.4 に示した。実験のセットアップは 2 節と同様に行い、一定のバイアス電圧 $V_{Bias}=54.5 \text{ V}$ を MPPC に印加した。また、温度については $20^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ まで 10°C 間隔ごとに恒温槽を用いて制御した。温度変化が MPPC に伝わり恒温槽の温度と MPPC の温度が平衡になるまで時間を要するので、恒温槽の温度変化させてから 2 時間半後にスペクトル測定を開始した。測定時間は 1800s である。また、線源を置かずに、環境放射線 (BG:Background) も調べ評価した。また、スペクトル解析に用いたソフトウェアは、ROOT version 5-34-34 であり、動作環境は、Ubuntu 18.04.1 LTS である。

表 3.4: 使用した放射線源と放出される主なガンマ線エネルギーについて [16]

線源の種類	エネルギー [keV]	放出割合 [%]
^{241}Am	59.5	35.9
^{109}Cd	88.0	3.6
	22.2	85.2

結果～相対ゲインの温度依存性～

線源を置き測定したスペクトルピークは以下の図のようになった。図 3.14～図 3.18 を見ると、どの温度でも ^{241}Am の 59.5 keV、 ^{109}Cd の 22.2 keV、88.0 keV の光電吸収ピークが確認できる。また、温度が下がるごとに各ピーク位置がチャンネル値の大きい方に移動している、つまりゲインが温度が下がるにつれ、増大しているのがわかる。このピークチャンネルの温度変化を調べることで相対ゲインの温度依存性を評価できる。

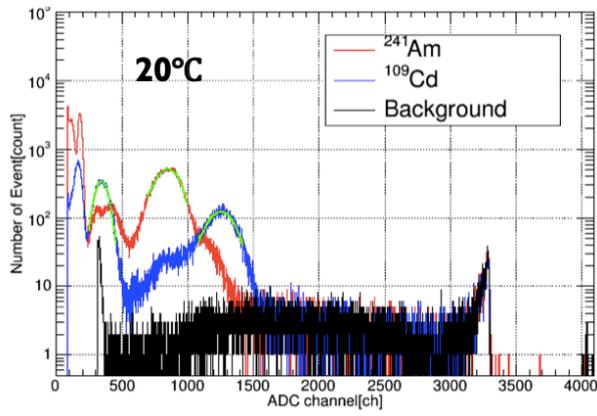


図 3.14: 20 °Cの時のスペクトル

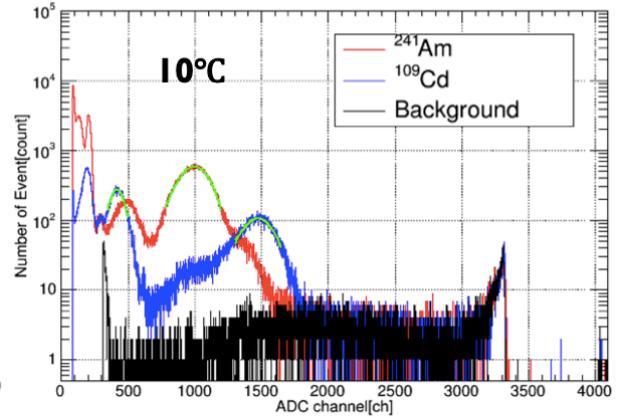


図 3.15: 10 °Cの時のスペクトル

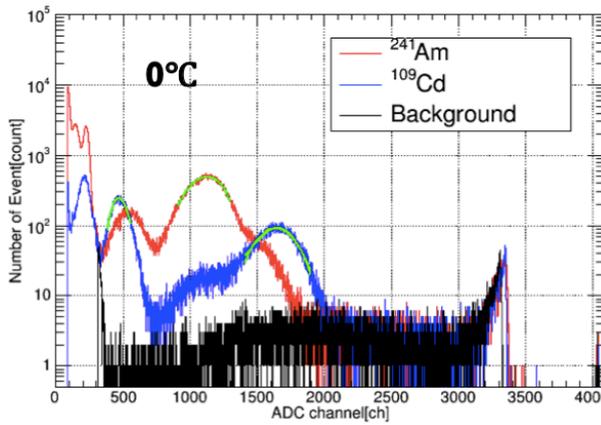


図 3.16: 0 °Cの時のスペクトル

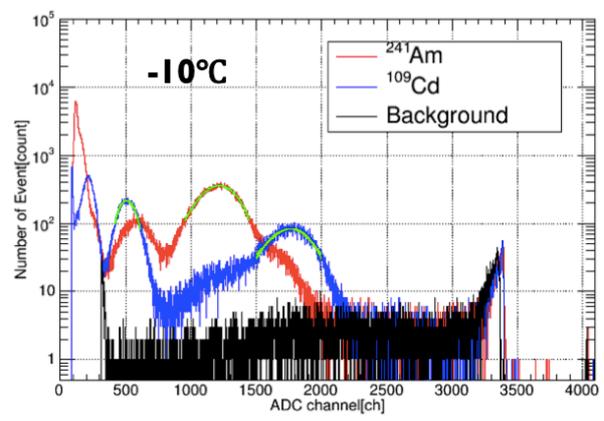


図 3.17: -10 °Cの時のスペクトル

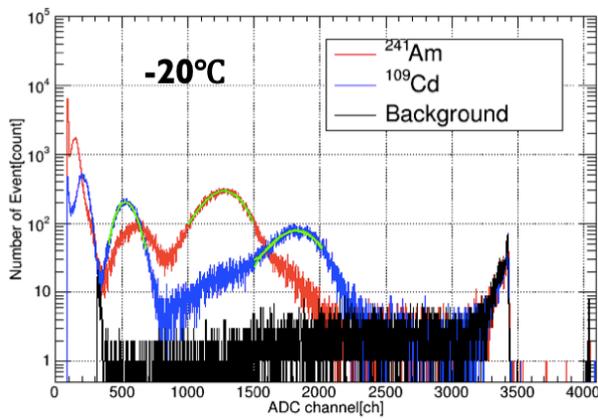


図 3.18: -20 °Cの時のスペクトル

光電吸収ピーク値の温度による変化を定量的に評価するため、ガウス関数によるフィッティングを行なった。ガウス関数は以下の式 (3.9) に示した。 ch_{peak} はピークの ch 値を、 σ は標準偏差を表す。

$$f(ch) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(ch - ch_{peak})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3.9)$$

また、フィッティングでの当てはまり具合は χ^2 検定を用いて評価した。表 3.5 のようにフィッティングにより各温度での線源の peak 位置の定量的なデータが得られる。

表 3.5: 各線源での光電吸収ピークのフィッティング結果

ガンマ線のエネルギー	温度 [°C]	peak[ch]	err[ch]	χ^2 / dof
$^{241}\text{Am}(59.5\text{keV})$	20	860.4	1.7	1.00
	10	1003.0	1.2	1.05
	0	1150	4	1.07
	-10	1227	2	0.91
	-20	1284	3	1.22
$^{109}\text{Cd}(22.2\text{keV})$	20	343.7	0.7	1.34
	10	418	2	1.14
	0	468	2	1.06
	-10	495	3	0.85
	-20	527.5	1.5	1.02
$^{109}\text{Cd}(88.0\text{keV})$	20	1270	3	1.17
	10	1488	4	0.97
	0	1664	3	0.90
	-10	1789	6	1.02
	-20	1853	16	1.02

表 3.5 に示した結果から式 (3.7) で定義した相対ゲインを求め、温度に対してプロットすると以下の図 19 に示したように、温度が下がるほどゲインが上がるという関係が見られる。定量的には、20 °C に比べ-20 °C では、約 50% ゲインが大きくなっている。

考察 ゲインが温度が高くなるほど小さくなるのは、MPPC を構成するガイガーモードの APD の増倍に関わるアバランシェ層が原因であると思われる。アバランシェ層での増倍は、放射線が入射し発生した電子-正孔対は、アバランシェ層の強い電界で十分加速され、エネルギーを得る。そして、アバランシェ層の結晶格子に衝突し、さらに電子-正孔対を生む。以下同様の過程が繰り返され、高い増倍率を生み出すことができる。しかし、温度が高い場合は、アバランシェ層の格子の熱振動が大きくなり、キャリアが十分加速される前に結晶格子に衝突する確率が高くなる。よって、発生する電子-正孔対が少なくなり、結果としてゲインが小さくなる。

また、図 3.19 を見ると、0~20 °C あたりまでは温度に対して、ゲインが線形的に変化しているが、0 °C 以下あたりから非線形的な振る舞いをしている。図 3.20 に示した浜松ホトニクス製のゲインと周辺温度の関係を示した参考資料からは、少なくとも表示範囲内では非線形性が確認できない。前述の格子振動

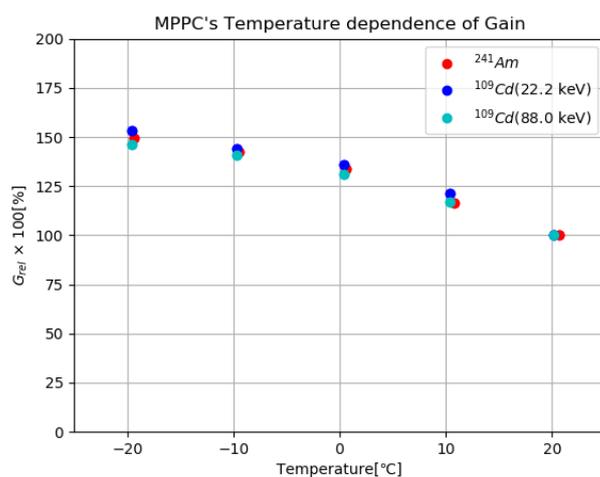


図 3.19: 相対ゲインの温度依存性

が低温側での非線形性が積極的な理由とは言えないと考えた。そこでこの原因として、Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc. の参考資料である図 27 に示したように CsI(Tl) シンチレータには発光量の温度依存性があるので、低温側では、ゲインが非線形的に変化したと考えた。CsI(Tl) シンチレータには、入射放射線量が一定でも温度が低くなるほど蛍光による発光量が少なくなる性質がある。また、20 °C の時を基準として、発光量の温度依存性を定量化したのが表 3.6 である。

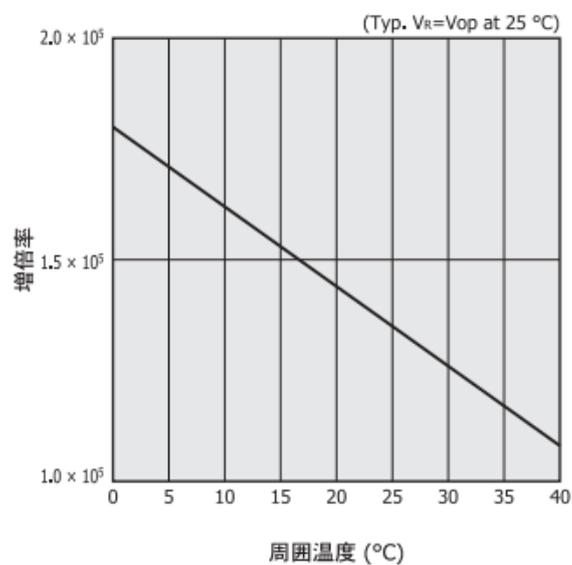


図 3.20: ゲインの温度依存性の参考資料 [13]

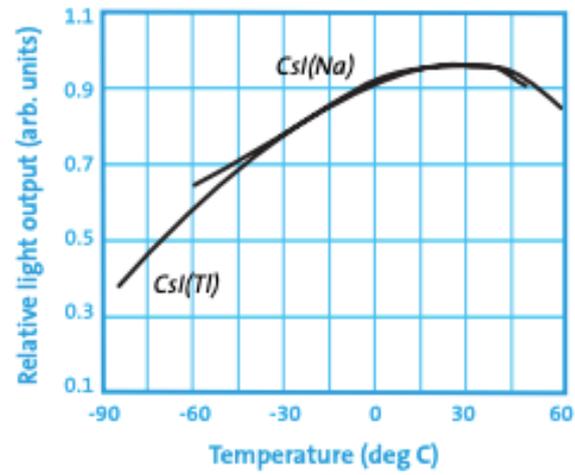


図 3.21: CsI(Tl) シンチレータの温度依存性の参考資料 [18]

表 3.6: CsI(Tl) シンチレータの 20 °C での光量を基準にした時の各温度での光量の割合

温度 [°C]	光量の比 [%]
20	100
10	93
0	91
-10	88
-20	83

表 3.6 を元に、CsI(Tl) シンチレータ発光量の温度依存性の効果を補正して、MPPC のゲインの温度依存性を抽出したのが図 3.22 であり、ほぼ線形の関係に従うことが分かった。

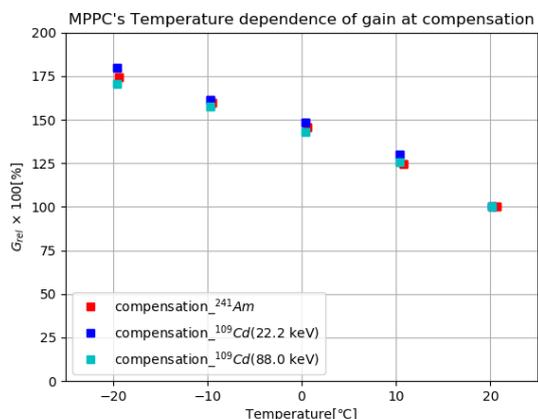


図 3.22: 補正後のゲインの温度依存性のグラフ

3.3.2 暗電流の温度依存性

実験概要

暗電流にも温度依存性があり、測定によって確かめその性質を理解する事を目的とした。また、逆電圧 V_{Bias} を一定にして測定したときと、ゲインが一定になるように、逆電圧を変化させて測定した時でどのように違いがうまれるのかを比較した。さらに、200MeV の陽子ビームを 100rad(上空で 1ヶ月程度運用させたときに想定される吸収線量に相当) 照射して放射線損傷させた MPPC においても同様に恒温槽で温度を変化させ、暗電流がどのように変化するのかを調べた。

測定・解析方法

実験条件は、ゲインの温度依存性測定のとおり同様に行なった。暗電流は HV でモニタしたが、値の変化が激しかったので設定で 50 回平均を出力する設定に変更した状態で、5 回目視で確認した暗電流の値を記録した。また、得られた暗電流の誤差 ϵ_d は以下の式 (3.10) を用いて求めた。ただし、 n はデータ数、 I_d^i は各測定ごとの暗電流、 \bar{I}_d は測定した暗電流の平均値を表す。

$$\epsilon_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (I_d^i - \bar{I}_d)^2} \quad (3.10)$$

また、ゲインを一定にするために逆電圧を変化させたが、これは、ゲインに逆電圧依存性があるという背景に基づく。参考資料として示した図 3.23 の浜松ホトニクス資料を見ると、逆電圧が下がるほど増倍率も下がっている様子が見て取れる。そのため、ゲインを一定に保つには、温度が変化したときは逆電圧もそれに合わせて変化させる必要がある。本実験では、ゲインを合わせる基準として、シンチレータをつけた状態で ^{109}Cd 線源の 22.2 keV と 88.0 keV のピーク位置を合わせることでゲインを一定に保つ手法をとった。以下に各温度ごとの合わせた peak 位置と、ゲインを合わせるために各温度ごとに調節した逆電圧のグラフを示した。

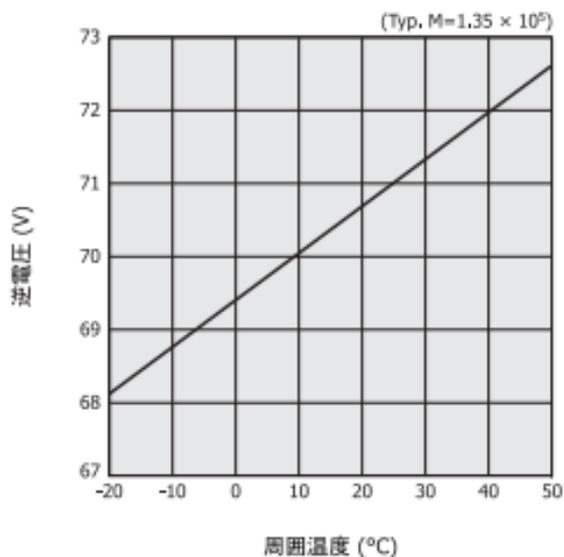
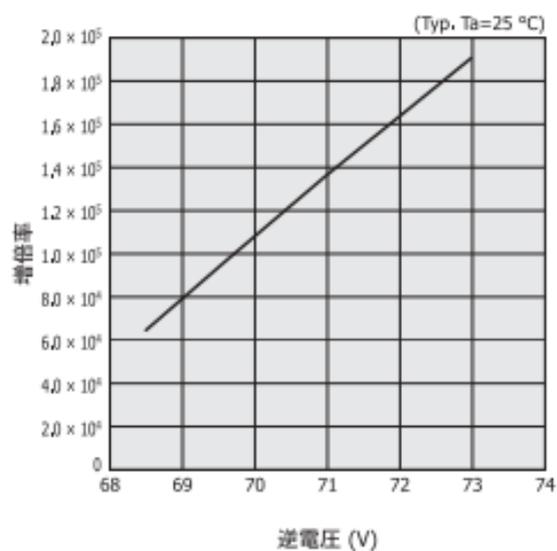


図 3.23: 逆電圧-ゲインの関係 (左) とゲインを一定下での周辺温度-逆電圧の関係 (右) 受光面サイズ 1mm, ピクセルピッチ $10\text{ }\mu\text{m}$

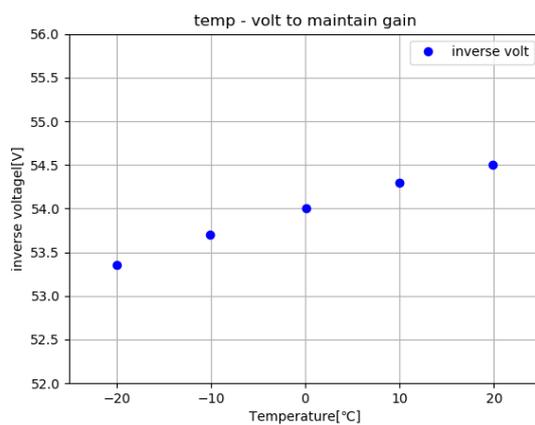
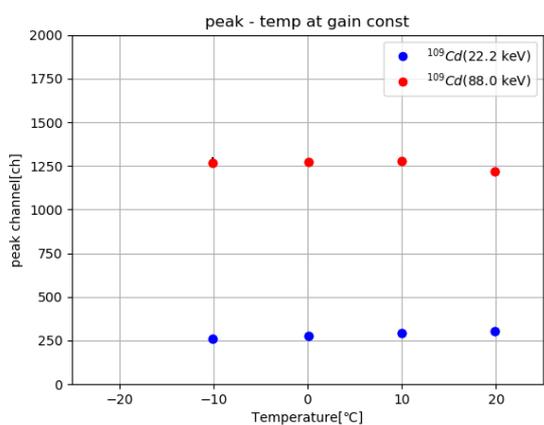


図 3.24: 各温度と調節した peak 位置

図 3.25: 温度と逆電圧の関係 (ゲイン一定)

結果

逆電圧 V_{Bias} を一定にした時とそうでない場合のときの暗電流の温度依存性のグラフは以下の図 3.26 のようになった。MPPC は放射線損傷していない MPPC を使用した。図を見ると、温度が低くなるほど、暗電流が減少していることが分かった。また、ゲインを一定にして暗電流を測定した場合はより暗電流が下がっていることがわかった。

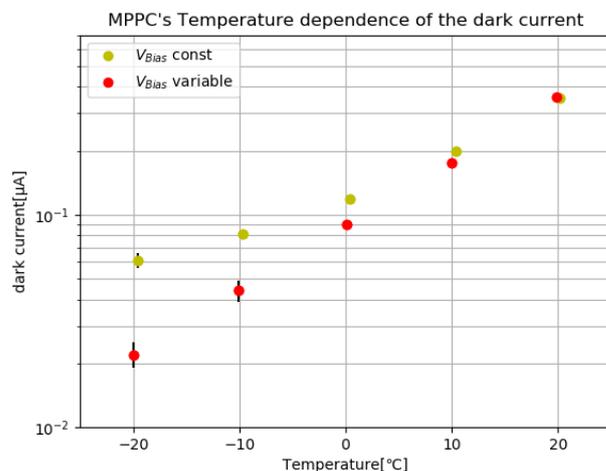


図 3.26: V_{Bias} が一定のときと可変 (ゲイン一定となる条件を満たすこと) の条件での暗電流の温度依存性

また、放射線損傷した MPPC と放射線損傷していない MPPC での暗電流の温度依存性を以下の図 3.27 に示した。放射線損傷していない MPPC では、20 度のときの暗電流と比較して -20 度では、1/10 程度暗電流が減少していた。放射線損傷している MPPC では、暗電流が放射線損傷していない MPPC に比べて 100 倍ほど暗電流が増えている。放射線損傷した MPPC では、暗電流の減少度合いは緩やかになっているものの冷却により暗電流減少が見込まれることが確認できた。

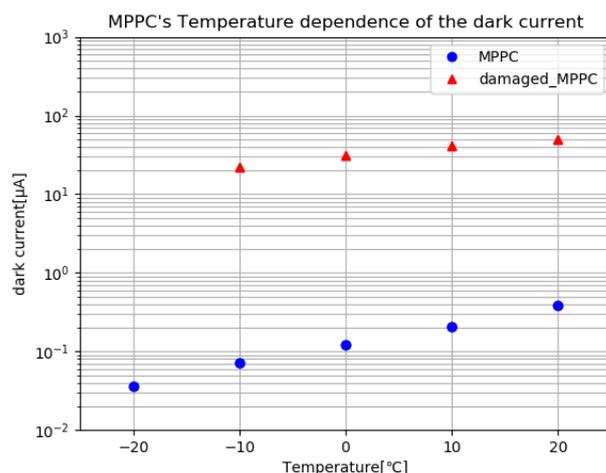


図 3.27: 放射線損傷有り (三角) と放射線損傷無し (丸) の暗電流の温度依存性の図

考察

MPPC の暗電流が温度と正の相関関係があるのは、以下のような物理的背景があると考えられる。具

体的には、MPPCはAPDがマルチピクセル化された素子であり、APDは半導体素子なので、その性質は半導体の特性をもつ。図34に示したように、価電子帯の電子が熱によってエネルギーギャップを超え、伝導帯に遷移すること流れる電流がMPPCにおける暗電流である。高温になる程、熱励起しやすくなる。逆に低温では減少すると考えられる。これは、2章で示した暗電流であるバルク電流 I_{br} の温度依存性の理論式である

$$I_{br} \propto T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

で表現できる。ゲインを一定にすると semi-log で直線になったことから理論式で示した指数関数の形になっていることを確認した。ゲインを一定にした方が特に低温側でより暗電流が小さくなったのは、ゲインを一定にするために逆電圧を下げたためであると考えられる。MPPCには、暗電流に逆電圧依存性もあり、逆電圧が小さくなる程暗電流も減るのでその影響が見られていると解釈できる。また、温度に対してゲインが線形的に変化しており、線形的にゲイン制御できる可能性があると言える。



図 3.28: 暗電流の温度依存性の物理的考察のためのバンド構造の概略図

3.4 基礎特性測定のまとめ

基礎特性測定より、MPPCはゲインが温度に対して、動作推奨温度範囲ではゲインが線形的に変化することが分かった。また、暗電流は温度を下げるほど減少するので、ノイズ対策としてMPPCを冷却することは有用な手段であることが確認できた。

第4章 ペルチェ素子によるMPPCの冷却実験

第3章では、MPPCの基礎特性についての実験を行い、特に電流性ノイズである暗電流は、MPPCの温度が低いほど低減できることが分かった。つまり、MPPCを冷却した方が放射線のエネルギー測定精度が良くなると言える。本研究ではサイズも小さく、省電力で、かつ駆動部分がないため騒音ノイズが発生しないペルチェ素子をMPPC冷却に応用できないかに着目した。以下、4.1では、ペルチェ素子の仕組みについて、4.2では、ペルチェ素子の基礎特性について動作確認を行い確かめた。4.3では、MPPCの暗電流をペルチェ素子の冷却で低減できるのかを調べた。また、4.3では100radの放射線により放射線損傷したMPPCをペルチェ素子で冷却し暗電流がどのように変化するかを調べた。

4.1 ペルチェ素子について導入

本実験では、MPPCの冷却するための素子としてペルチェ素子を用いているが、その仕組みについて説明する。ペルチェ素子とは、ペルチェ効果という異なる2つの金属(半導体)を接合させ電流を流すと接合部で片側では、吸熱が起こり、反対側では発熱が起こるといった仕組みである。図4.1にペルチェモジュールの基本構造とバンド図を示した。では、具体的にどのようにして放熱・吸熱のプロセスが起こっているのかを以下で詳しく説明する。吸熱面の金属は、N型半導体に接しており、金属の伝導帯の電子がN型半導体の伝導帯に励起される時に吸熱する。そして、N型半導体の伝導帯の電子が金属の伝導帯に遷移する時にエネルギー準位が下がり発熱する。さらに、金属の伝導帯を流れている電子は、P型半導体の正孔に落ち込み発熱するという仕組みである。

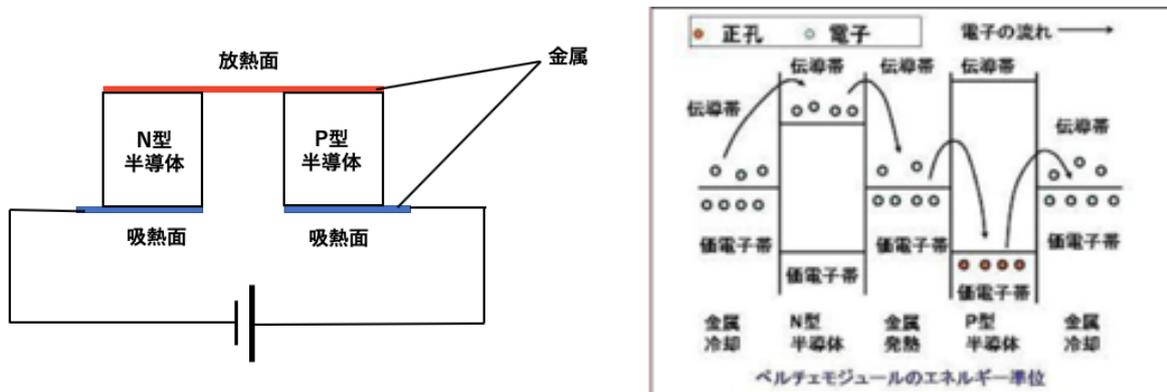


図 4.1: ペルチェ素子の基本構造 (左)、ペルチェ素子のバンド図 (右)

ペルチェ素子は上述のような仕組みとなっている。4.2では、小型衛星で利用できるのかという背景にも基づき、冷却性能と消費電力がどの程度であるかを、実際にペルチェ素子に電圧を印加して調べた。

4.2 ペルチェ素子の動作確認

実験概要

まず、実験で使用するペルチェ素子がどのような性能をもっているのか、またその性質を理解する

ため、動作確認を行なった。使用したペルチェ素子 (TES1-12705) については以下に示す。サイズは 30mm × 30mm であり、暑さは 2.9 mm のペルチェモジュールである。ペルチェ素子は電流を流すことで片面は温度が低下し、もう片面は温度が上昇するという性質をもつ素子である。よって、放熱機構を設けることで放熱面の熱を逃がすことが良い冷却性能を保つ上で肝要である。本実験では、CPUクーラーを用いた放熱機構を作成し、使用したペルチェ素子の性能を評価することを目的とした。

測定方法

実験セットアップは図 4.2.4.3 に概略図と実際の測定時の写真を示した。ペルチェ素子 (TES1-12705 30 mm × 30mm) を使用した。まず、放熱面からの熱をより多く逃がすため、机の上に Al 金属板 (HA2230 200 mm × 300mm) を敷いた。次に放熱させる方法として CPUクーラーに用いられるファンを代用し、ペルチェ素子の放熱面を空冷によって熱を逃がす方法をとった。ファンの中央部には、熱伝導をよくするため銅板 (HC1136 50 mm × 50mm) をおき、隙間に熱伝導グリス (AK-450-5g, 熱伝導率 9.24W/m · K) を塗り、空気の層による熱伝導性の低下を防いだ。また、冷却面と放熱面の温度を測定してペルチェ素子の温度差を見るために、ペルチェ素子の冷却面と放熱面付近の銅板に温度計を設置した。ここで、限られた空間における継続した温度モニタを実現するために、K 型熱電対を用いた温度モニタを自作した。市販の K 型熱電対プローブを、冷接点補償機能を有した熱電対デジタルコンバータ MAX31855 モジュールに接続し、最大 1800 °C から -270 °C までの範囲を符号付き 14bit 分解能 (~0.25 °C) で計測、デジタル変換する。データは raspberry pi3 modelB を用いたシリアル送信により一定時間ごとに読み出され、リアルタイムにグラフ表示するとともに、データとしても保存できる。なお、計測において空気の影響を極力減らすため、ペルチェ素子の空気に接する面は発砲スチロールで覆った。次に具体的な測定方法を示す。

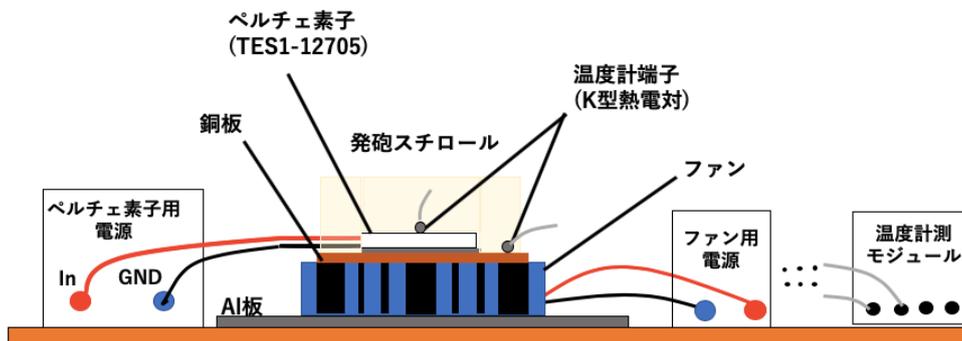


図 4.2: ペルチェ素子の動作確認の概念図



図 4.3: ペルチェ素子の動作確認のための実際のセットアップの図

前述のセットアップの状態、まず、ファン用に使用した電源 (PW18-1.8AQ) に 12V,0.06A をファンに印加させ、ファンを駆動した。そしてペルチェ素子に使用した電源 (PLE-18-2) から 1 分ごとに電圧を 1 V を印加し、温度計測モジュールを用いて冷却面と放熱面の温度推移を記録した。この温度計測モジュールは 1s ごとに温度分解能 0.25℃ の性能をもつ。合計測定時間は 10 分である。また、ペルチェ素子に印加した電圧・電流値を記録し、ペルチェ素子の駆動に消費した電力についても記録し、評価した。

結果

冷却面と放熱面については、時間ごとの温度の推移と消費した電力については以下の図 4.4 に示した。図を見ると、最大で 30℃ の温度差が発生していることが分かった。また、消費電力を省みなければ、5℃ 程度まで常圧下において冷却できることが本実験によって分かった。測定開始から 8 分程度たつと、冷却面の温度はほとんど下がらなくなり、逆に放熱面の温度がさらに上昇した。

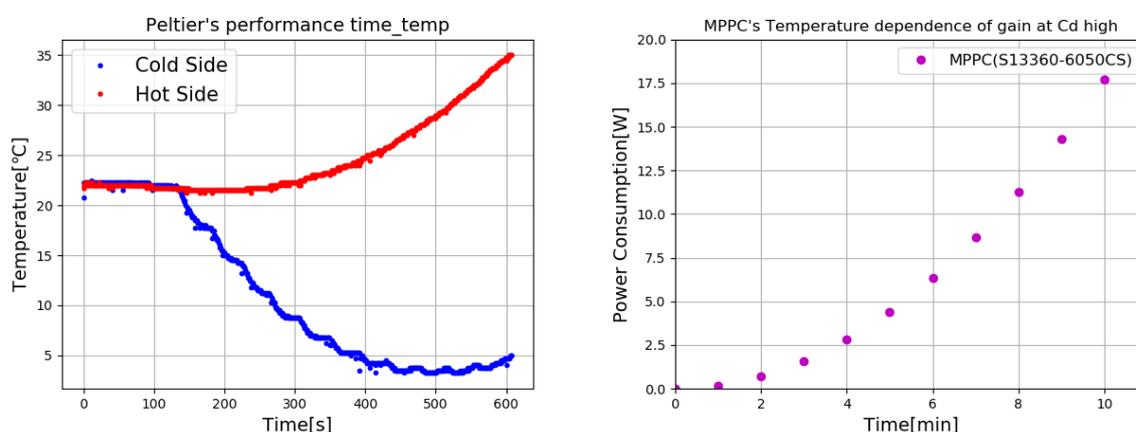


図 4.4: ペルチェ素子の冷却面と放熱面の温度推移 (左) と、消費した電力の時間推移 (右)

考察

用いたペルチェ素子 (TES1-12705) の仕様によれば、電力 16 W 時に、温度差は 68℃ になることが予想される。本実験では、使用した電源装置の限界から 9W 程度までしか電力供給しなかったが、得られた最大温度差は 30℃ 程度であり、これは素子の仕様に対して大きく矛盾しておらず、ペルチェ素子は問題なく動作していると考えられる。一方、9 W 以上電力を供給した場合においては、放熱面の温度上昇が顕著となり、冷却面が放熱面の温度上昇に追従し、温度差がつかない状況が見られた。これは、発砲スチロールで断熱対策を施したとはいえ、放熱面の熱量が空気を介して冷却面に回り込んできたためであると考えられ、現状のセットアップではこれ以上の温度差をつけることは難しいと言える。[19]

4.3 ペルチェ素子による MPPC の冷却

実験概要

4.2 からペルチェ素子を常圧下で用いる場合、5℃ 程度まで最大で冷却できることが分かった。ペルチェ素子の冷却性能が確認できたので、実際にペルチェ素子を用いて MPPC を冷却し、3 章で実験し

たように恒温槽で冷却した場合と同じように冷却ができるかを実験した。具体的な評価項目としては、ペルチェ素子で MPPC を冷却できるのかという点と、ペルチェ素子で冷却した場合に、ノイズの暗電流成分が減少するかという点である。ただし、4.2 では、机上でペルチェ素子の動作確認を行なったため、3 章の実験環境である恒温槽でもペルチェ素子が同程度の冷却性能を示すのかを以下の 4.3.1 の実験で確認した。また、3 章の MPPC の暗電流の温度依存性の基礎実験の際には、Al 箱に MPPC を入れて暗電流を測定したが、今回の実験では、ペルチェ素子で MPPC を冷やす際にサイズの観点から、Al 箱の外に MPPC を出して測定した。環境ノイズの影響を検証するため、Al 箱の蓋を開けた状態で MPPC の暗電流を 本実験前に測定し、暗電流の変化を評価したが蓋を閉めた場合と有意に差は見られなかったため、蓋を開けたことによる環境ノイズの影響は本実験において小さいと判断した。以下実際にペルチェ素子で MPPC を冷却する実験セットアップや実験方法を説明する。

測定方法

ペルチェ素子で放射線損傷していない MPPC(S13360-6050CS) の暗電流の温度依存性の測定を行なった。実験セットアップは、基本的には、第 3 章の基礎実験と同じであるが、MPPC の受光面を直接ペルチェ素子で冷却するために、Al 箱内部の読み出し回路から配線を延長することで MPPC を箱の外部へ取り出して測定を行なった。図 4.5 に全体の概念図と実際の MPPC 周辺についての図を示した。図にも示した通り、MPPC は箱から出して、受光面保護のためにカプトンテープを巻き、カプトンテープ越しに熱伝導が良くなるように熱伝導グリス (AK-450-5g , 熱伝導率 9.24W/m・K) を塗り熱伝導性を良くした。本実験では、MPPC をペルチェ素子で冷却した場合の暗電流の振る舞いを計測するとともに、出力信号に異常がないか確認した。そこで、MPPC に $V_{Bias}=54.5\text{ V}$ を印加し、動作させながら、ペルチェ素子で温度変化させるとともに、出力信号を整形時定数 $1\ \mu\text{ s}$ で整形した出力信号も同時にモニタする。MPPC の受光面の裏側に K 型熱電対を貼り付け、温度をモニタし、暗電流と MPPC の関係を調べた。

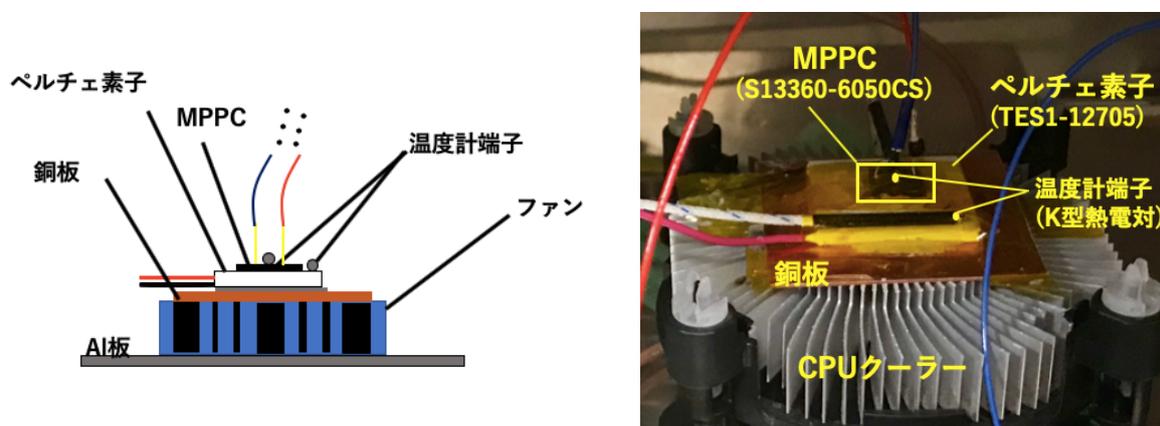


図 4.5: MPPC 周辺のセットアップ概念図 (左) と実際の写真 (右)

結果

温度計端子はペルチェ素子の冷却面と MPPC の受光面の反対の面 (足がある方) につけている。モニタした温度は以下の図のようになっている。また、ペルチェ素子で求めた、放射線損傷していない暗電流の温度依存性と恒温槽で冷却した場合の暗電流の温度依存性を比較した。MPPC は $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ あたりまで冷却することができた。また、ペルチェ素子動作中にオシロスコープでモニタした信号出力波形には目立ったノイズ等は確認できず、ペルチェ素子で MPPC を問題なく冷却することができたといえる。

図から、 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度幅において、暗電流の減少度合いを ΔI_{dark} と定義すると、恒温槽での冷却した場合とペルチェ素子で冷却した場合を以下の表 4.1 のようになった。

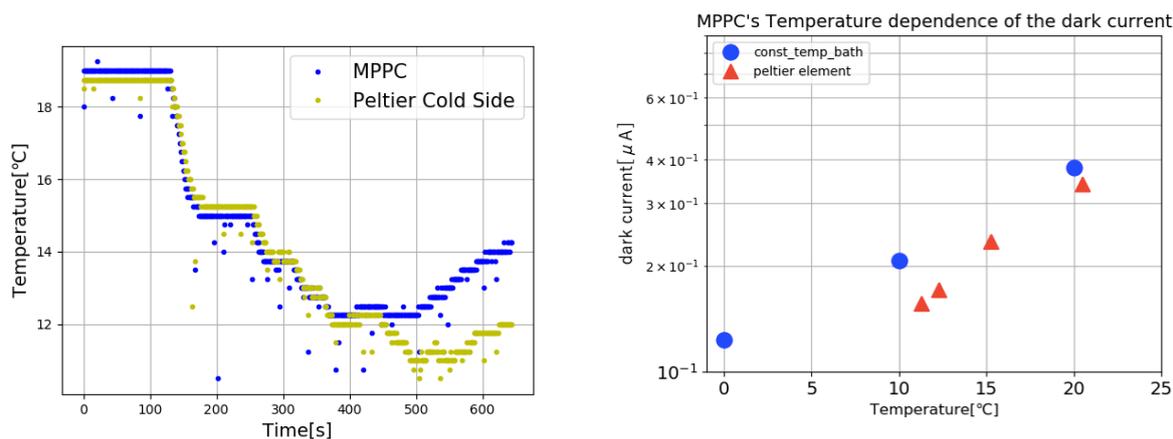


図 4.6: ペルチエ素子の温度変化の様子 (左)、ペルチエ素子あるいは恒温槽で冷却したときの MPPC の暗電流の温度依存性 (右)

表 4.1: 恒温槽とペルチエ素子で冷却した時の暗電流の減少の評価

種類	$\Delta I_{dark} [\mu A]$
恒温槽	0.173
ペルチエ素子	0.190

考察

MPPC をペルチエ素子で冷却すると 11 °C あたりまでしか冷えず、動作確認した時のように最大で冷却面が 5 °C にまで達しなかった。この原因としては、動作確認の時は、ペルチエ素子の空気に接する面を発砲スチロールで覆い、放熱面からの熱の回り込みを防いだが、MPPC をペルチエ素子で冷却した際は、発砲スチロールで囲んでいなかったため熱の回り込みにより本来よりも温度が下がらなかったのではないかと考えた。

4.3.1 恒温槽内でのペルチエ素子の動作確認

MPPC を冷却する本実験の予備実験として、恒温槽 (ESPEC CORP. LU-113) 内でペルチエ素子の動作確認を行い、冷却性能を評価することで測定系を変えたことによるペルチエ素子の冷却性能に変化が出るかを調べた。以下に実験の詳細を示す。

測定方法

実験のセットアップは、概略図を図 4.7 に、実際の写真を図 4.8,4.9 に示した。各電源・温度モジュールは測定に影響しないよう、恒温槽の外に配置した。測定方法は、4.3.1 と同様、1 分ごとに電圧を 1V ずつ上げながら印加させ、温度変化の推移を温度モジュールで記録した。温度計端子は、ペルチエ素子の冷却面と放熱面の銅板に装着して測定した。また消費電力も同様に測定した。

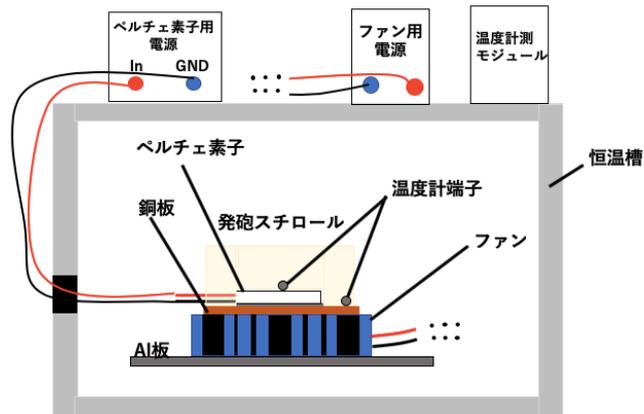


図 4.7: 恒温槽内でのペルチェ素子の動作確認の概略図

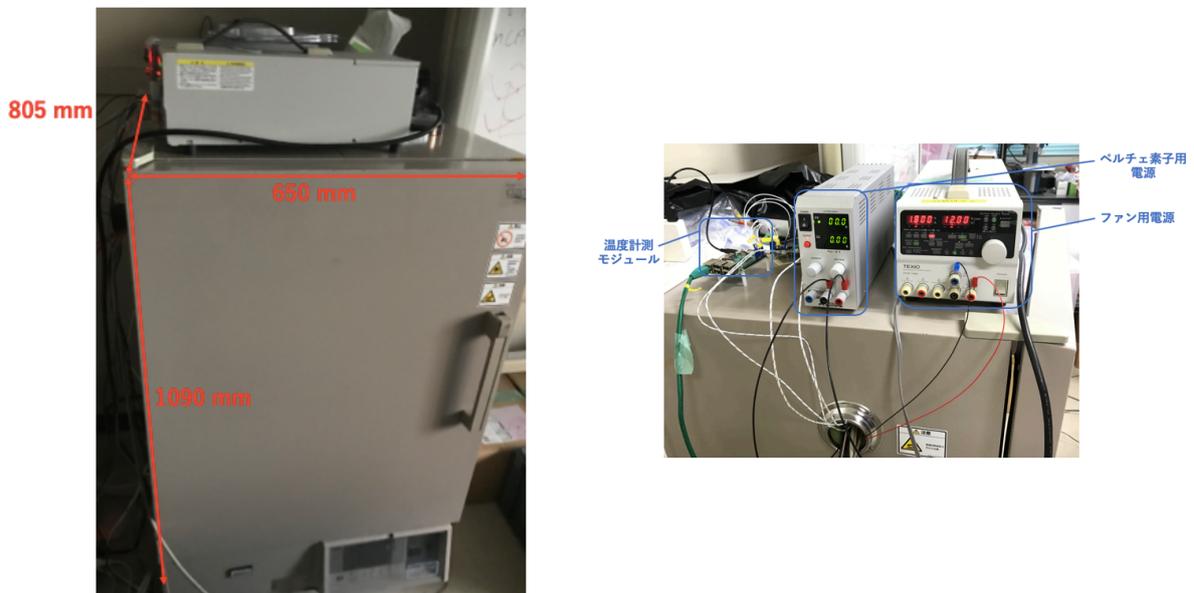


図 4.8: 恒温槽の外側の外観。正面 (左図) と側方 (右図) から見た様子

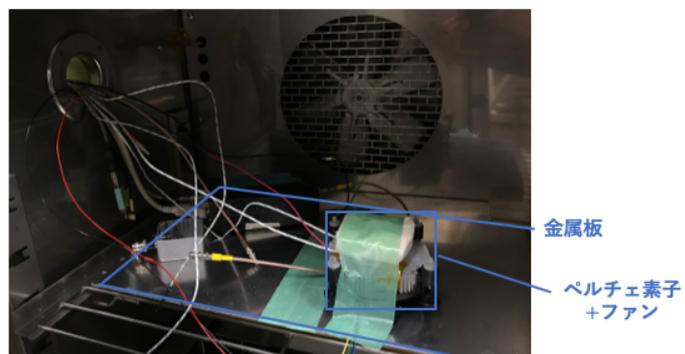


図 4.9: 恒温槽内部のセットアップの様子

結果

冷却面と放熱面の測定結果は以下の図 4.10 のようになり、冷却面は最大で 5℃程度まで下がり、温度差も最大で 30℃程度あり、測定系を机上から恒温槽に移動させたことによる影響は小さいといえそうである。

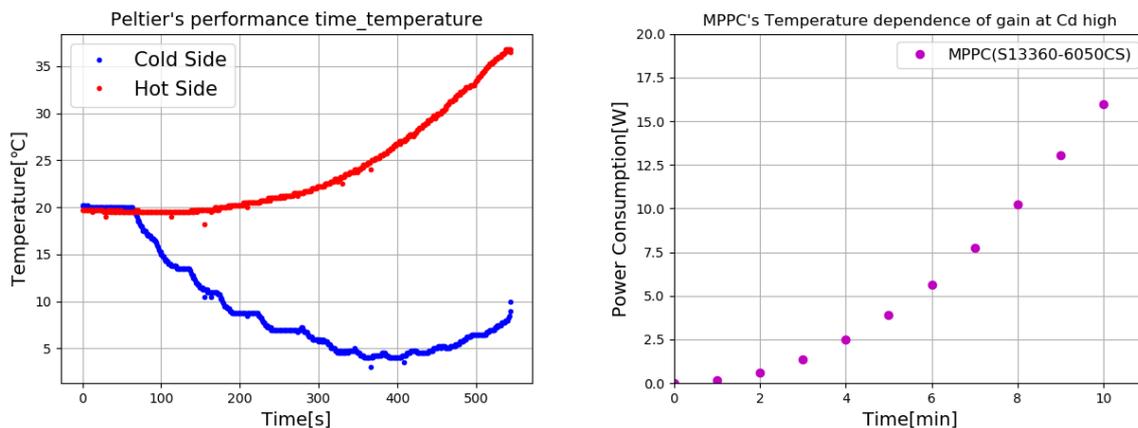


図 4.10: ペルチェ素子の冷却面と放熱面の温度推移 (左) と、消費した電力の時間推移 (右)

4.4 ペルチェ素子による放射線損傷した MPPC の冷却

実験概要

4.4 では、放射線照射した MPPC を 4.3 と同様のセットアップで、ペルチェ素子で冷却し、暗電流が低減できるかを調べた。また、第 3 章の基礎実験で恒温槽を用いて放射線照射した MPPC を冷却した場合と比べて、ペルチェ素子の冷却性能が恒温槽の冷却性能と比較してどの程度であるかを見た。バイアス電圧は $V_{Bias} = 54.5 \text{ V}$ で、シェーピングタイム $\tau = 1 \mu\text{s}$ である。測定方法も 4.3 と同様である。ペルチェ素子での冷却下で温度 $T = 18.75 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $15.25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $12.25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $11.0 \text{ }^\circ\text{C}$ の時に暗電流を測定した。

結果

ペルチェ素子の冷却面と放射線照射した MPPC につけた温度計が記録した温度変化の様子は図 4.11 の左に示し、放射線照射した MPPC の暗電流を恒温槽で冷却した場合とペルチェ素子で冷却した場合の暗電流の値の比較は図 4.11 の右に示した。

図から $20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ の温度幅において、放射線照射した MPPC の暗電流の減少度合いを ΔI_{dark} と定義すると恒温槽で冷却した場合と、ペルチェ素子で冷却した場合を比較した結果を以下の表に示した。

考察

表より暗電流の減少度合いはペルチェ素子の方が大きいように図と表を見ると見える。この原因

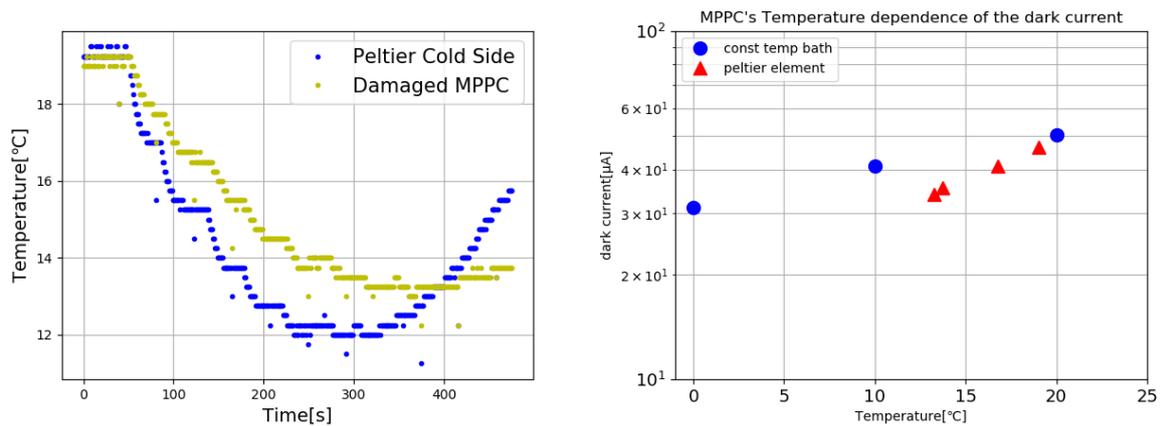


図 4.11: ペルチエ素子の温度変化の様子 (左)、ペルチエ素子あるいは恒温槽で冷却したときの放射線損傷した MPPC の暗電流の温度依存性 (右)

表 4.2: 恒温槽とペルチエ素子で冷却した時の暗電流の減少の評価

種類	$\Delta I_{dark} [\mu A]$
恒温槽	9.32
ペルチエ素子	19.8

として測定するとき、MPPC 本体の温度を参照していたが、MPPC 素子内での熱伝導の関係で受光面付近の温度の方が MPPC につけた温度計よりも低いため、暗電流がより低く見積もられている可能性がある。

4.5 ペルチエ素子実験のまとめ

4.3、4.4 で示したように放射線損傷していない MPPC と放射線損傷した MPPC はどちらも、ペルチエ素子で冷却して、恒温槽と同程度あるいは、それ以上の冷却性能を達成することができた。また、常圧下では、ペルチエ素子が 10 度程度まで最大で冷えることが分かった。しかし、小型衛星搭載を見据えるには、消費電力が今の実験では、最大 8W 程度と大きいので、以下に省電力でペルチエ素子を冷却するかという課題が浮き彫りになった。(小型衛星は使える電力は 1W 未満) 空気がペルチエの性能に影響を与えている可能性があるため、真空化で実験を行うのも有効な対策の可能性の一つになる可能性があると考えられる。

第5章 ノイズフィルタによるノイズ低減

第4章では、ペルチェ素子で冷却することによって電流性ノイズである暗電流の低減を試みた。第5章では、第2章の2.3で述べたように、暗電流は温度によって変化するため最適なノイズシェーピングタイム τ も温度によって変化する可能性がある。また、MPPCの放射線損傷によってノイズ特性が変わる可能性があると考え、放射線損傷していないMPPC(S13360-6050CS)と200MeVの陽子ビームで100rad照射され、放射線損傷したMPPCについて以下の実験でノイズが最小になるような最適なシェーピングタイムについてを調べる実験を行なった。

5.1 シェーピングタイムの最適化

実験概要

整形増幅器のシェーピングタイム τ を変化させることによるノイズ低減の程度を評価するために、放射線源から放出されるガンマ線を検出した際の光電吸収ピークからエネルギー分解能を求め、エネルギー分解能のシェーピングタイム依存性を評価した。放射線損傷していないMPPCと放射線損傷したMPPCで同様の測定を行い、結果に違いが出るかを比較した。本実験では、 1cm^3 サイズのCsI(Tl)シンチレータをMPPCに取り付け、スペクトルを計測した。エネルギー分解能を評価する観点から、単一のエネルギーのガンマ線を放出する放射線源が本測定に適している。そこで本実験では、 ^{137}Cs から放出される662 keVガンマ線を用いてエネルギー分解能を評価する。

測定方法

実験セットアップは以下の図5.1の通りである。第3章で行なった基礎実験とセットアップは同じで、MPPCはA1箱内に格納し、蓋も閉めてある。線源を恒温槽に入れ、温度は 20°C に設定し、図の整形増幅器のシェーピングタイム $\tau=0.5, 1, 2, 3, 6, 10\ \mu\text{s}$ で変化させ、662keVのガンマ線のエネルギースペクトルを計測した。なお、これまでの実験と同じ V_{Bias} では、662keVガンマ線の信号は前置増幅器でサチュレーションしてしまうために、 $V_{Bias} = 53.0\text{V}$ に設定し、像倍率を下げて計測を行なった。

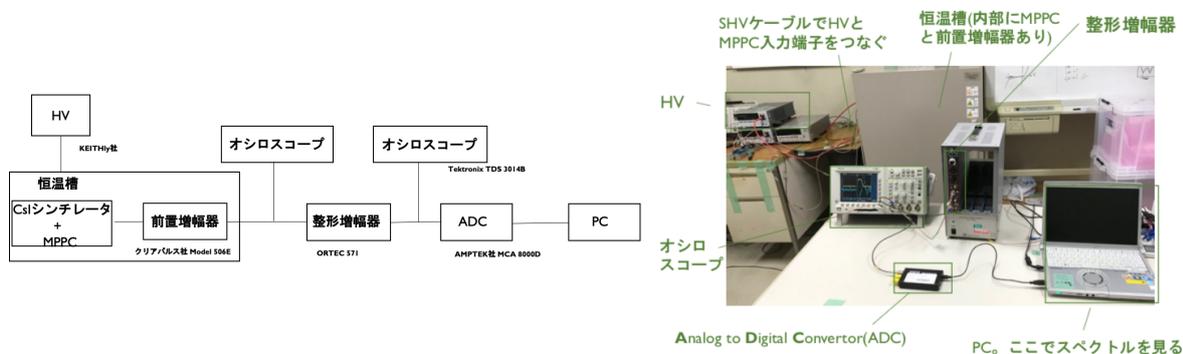


図 5.1: 実験セットアップの概略図(左)、実際の実験セットアップの様子(右)

結果

^{137}Cs の放射線損傷していないMPPCと放射線損傷したMPPCで比較してみる。以下の図に示し

た。

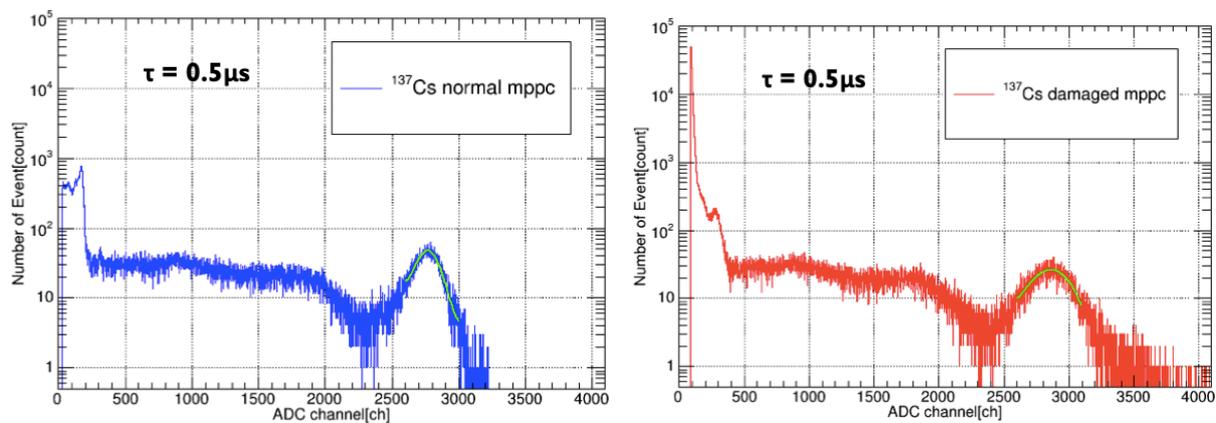


図 5.2: 放射線損傷していない MPPC(左) と放射線損傷した MPPC(右) の $\tau = 0.5 \mu s$ の時のスペクトル

得られたスペクトルを見ると、 ^{137}Cs の光電吸収ピークをガウス関数でフィッティングする。ガウス関数は以下の式 (1) に示した。 ch_{peak} はピークの ch 値を、 σ は標準偏差を表す。

$$f(ch) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(ch - ch_{peak})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5.1)$$

フィッティングによって得られた結果を以下の表 1 に示す。

ここで、表 1 から得られた値からエネルギー分解能を求め、シェーピングタイムに対してエネルギー

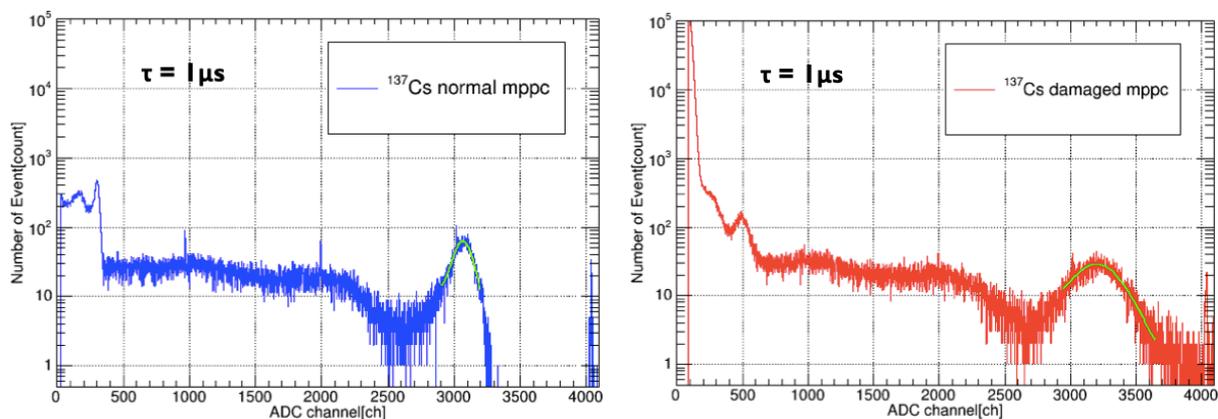


図 5.3: 放射線損傷していない MPPC(左) と放射線損傷した MPPC(右) の $\tau = 1 \mu s$ の時のスペクトル

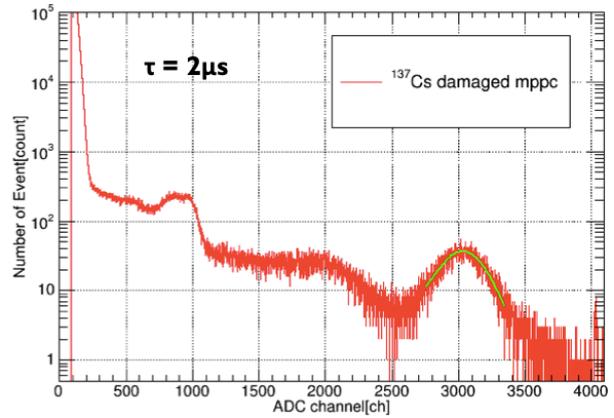
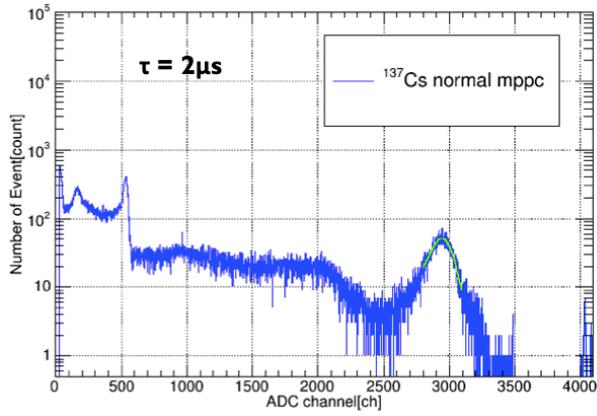


図 5.4: 放射線損傷していない MPPC(左) と放射線損傷した MPPC(右) の $\tau = 2 \mu s$ の時のスペクトル

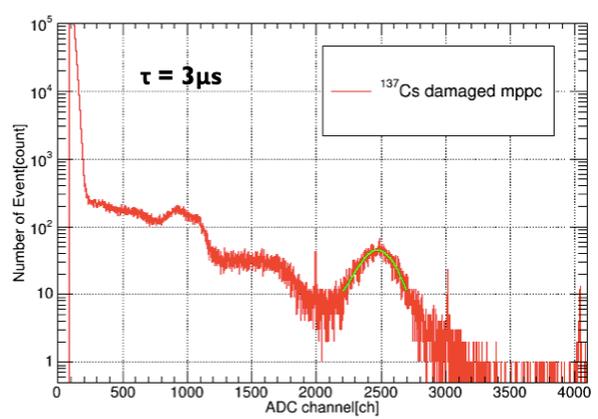
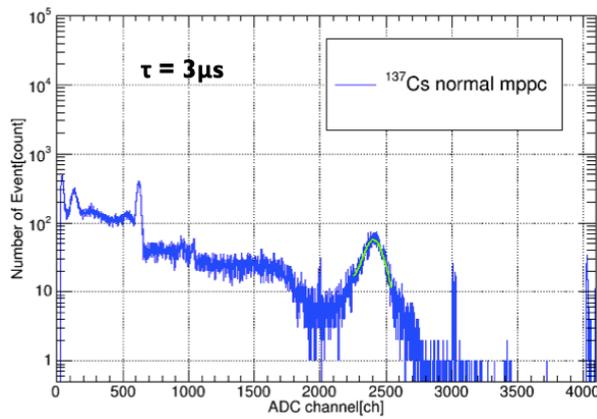


図 5.5: 放射線損傷していない MPPC(左) と放射線損傷した MPPC(右) の $\tau = 3 \mu s$ の時のスペクトル

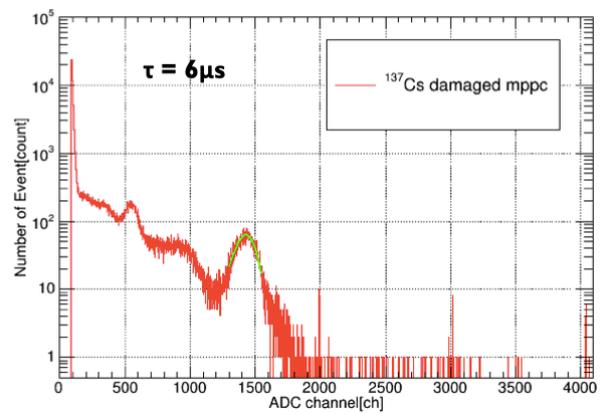
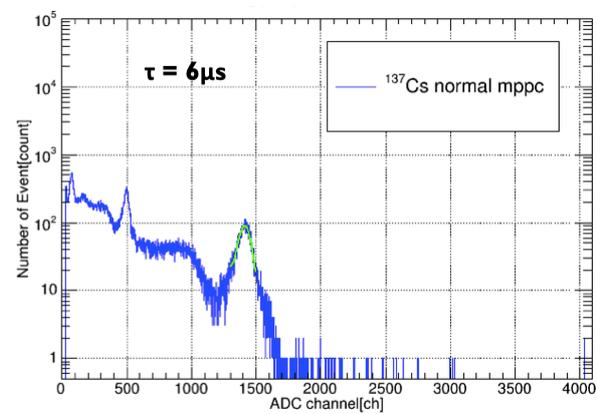


図 5.6: 放射線損傷していない MPPC(左) と放射線損傷した MPPC(右) の $\tau = 6 \mu s$ の時のスペクトル

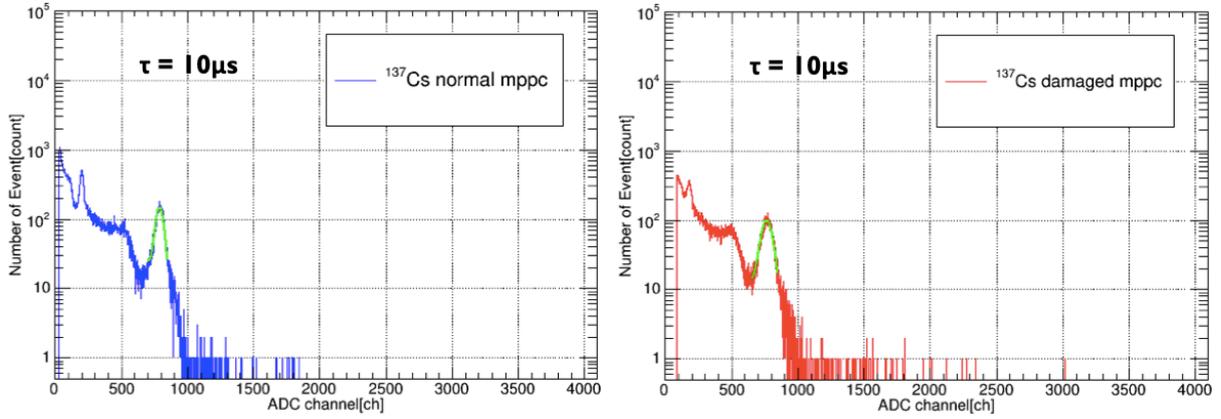


図 5.7: 放射線損傷していない MPPC(左) と放射線損傷した MPPC(右) の $\tau = 10 \mu s$ の時のスペクトル

表 5.1: 放射線損傷が無い MPPC と放射線損傷が有る MPPC での ^{137}Cs の光電吸収ピークのフィット結果

MPPC の状態	シェーピングタイム τ [μs]	peak[ch]	$peak_{err}$ [ch]	σ [ch]	σ_{err} [ch]
放射線損傷 無し	0.5	2771.8	1.6	77	2
	1	3069.9	1.2	63	2
	2	2947.1	1.7	72	4
	3	2408.7	1.5	62.9	2.5
	6	1417	1	43.1	1.6
	10	792.4	0.6	28.3	0.8
放射線損傷 有り	0.5	2871	5	155	15
	1	3203	3	164	9
	2	3053	3	146	6
	3	2477	3	127	6
	6	1434	2	75	6
	10	768.7	0.8	39.7	1.1

分解能がどのように推移するかを図に示した。エネルギー分解能は以下の式 (5.2) で定義した。(ただし、FWHM は半値幅を表し、 $FWHM = 2 \sigma \sqrt{2 \ln 2}$ と書ける。)

$$\Delta E = \frac{FWHM}{Peak} \times 100 \quad (5.2)$$

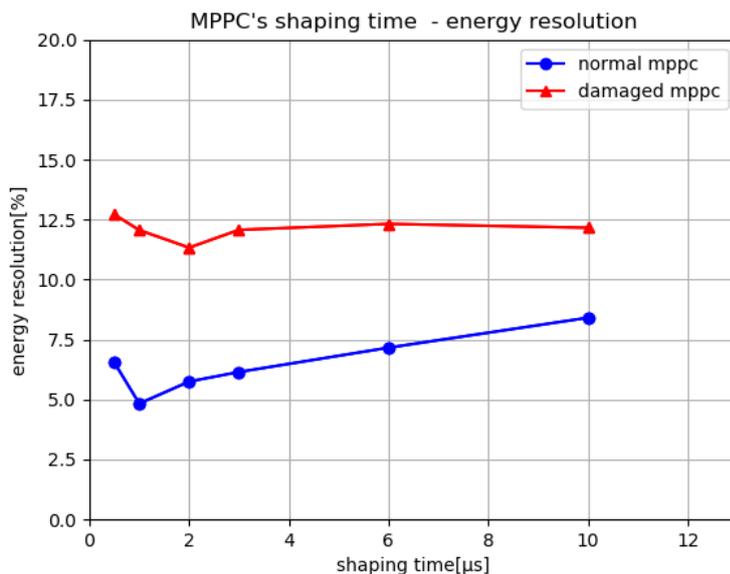


図 5.8: 放射線損傷無し (丸) と放射線損傷有り (三角) の MPPC のエネルギー分解能のシェーピングタイム依存性の図

図 5.8 より放射線損傷によって、全体的にエネルギー分解能が劣化し、観測性能が劣化していることがわかる。放射線損傷していない MPPC では、 $1 \mu s$ が最もエネルギー分解能が良いのに対し、放射線損傷している MPPC では、 $2 \mu s$ が最もエネルギー分解能が良い。すなわち、最適なシェーピングタイムが MPPC の放射線損傷によって変化していることが見て取れる。

考察

放射線損傷していない MPPC が $1 \mu\text{s}$ で最もエネルギー分解能が小さくなるのは、CsI(Tl) シンチレータの発光の減衰時間が典型的には $1 \mu\text{s}$ であるため、十分に電荷が収集されて、S/N 比がよくなっているためであると考えられる。また、 $1 \mu\text{s}$ より早いと、電荷収集が完全には終わらないため光量が少なくなり、S/N が悪くなるのではないかと考えた。また、シェーピングタイムが長くなると、増倍されたバルク電流 (暗電流) によるノイズを取り込んでしまうためエネルギー分解能が悪くなるのではないとも言える。放射線損傷すると最適シェーピングタイムが変化するのは、放射線損傷で MPPC の構造に変化があり (格子欠損など) ノイズ特性が変わったからではないかと捉えている。今後、さらに考察する必要があるだろう。

まとめ

^{137}Cs を用いて 20°C における最適なシェーピング τ が放射線損傷によってどのように変わるかを測定し、放射線損傷が無い MPPC は最適シェーピングタイム $\tau=1 \mu\text{s}$ で、放射線損傷が有る MPPC は最適シェーピングタイム $\tau=2 \mu\text{s}$ という結果が得られた。放射線損傷によりノイズ特性が変わった可能性があると言える。今後は、他の温度あるいは、別の線源も用いて上記の内容を検証していく。

第6章 まとめと今後の課題

1,2章で述べたように、MPPCは近年の活発化する小型衛星観測で、サイズ、消費電力等の面で優れた光検出器として搭載が期待されている素子である。しかし、MPPCは衛星軌道上で荷電粒子などの放射線に晒されることで、ノイズが増大し観測性能が劣化することが知られている。そのため、増大したノイズを低減することは精度の良い観測のためにも肝要である。ノイズ低減対策としては、2章に示したように、ノイズ成分の暗電流の温度依存性に着目して冷却により低減する方法と整形増幅器のシェーピングタイムを最適にする方法を本実験では検証した。MPPCの電流性ノイズである暗電流は、温度依存性があり第3章の基礎実験で実際に確認でき、冷却することがノイズ低減に有用だと分かった。第4章では、コンパクトで省電力なペルチェ素子を試験的に冷却する素子として用い、11℃まで常圧下でMPPCを冷却することに成功し冷却性能は恒温槽を用いた場合と有意な差はなかった。今回の実験では、単一のペルチェ素子を用いて実験したが、ペルチェ素子を多段に組み合わせてMPPCを冷却しその性能を評価する実験を今後行う予定である。また、新たに今回測定していなかったペルチェ素子による熱ノイズも定量的に評価する予定である。また、5章では、 ^{137}Cs を用いて20℃のシェーピングタイム τ を変化させ、放射線損傷していないMPPCと放射線損傷したMPPCのエネルギー分解能がどのように変化するかを実験で確かめた。実験の結果放射線損傷の有無で最適なシェーピングタイムが変化していることが分かった。今後他の温度条件における振る舞いを調べるとともに、シェーピングタイムが変化した要因をノイズの周波数特性という観点からも検討し、デジタルフィルタなどを利用したより精緻なシェーピングによりノイズ低減できないか検討する。

謝辞

本研究テーマはとてもやりがいがあり、このような興味深いテーマを選んでいただいた深澤先生に感謝しています。指導教官である大野先生は、右も左もはじめ分からなかった私に本当に様々な助力・助言をしていただきました。大野先生の手助けのおかげでなんとか研究をまとめることができました。本当にありがとうございます。高橋先生、秋田谷先生には研究についての様々な助言していただき、かつ質問にも丁寧に対応していただきました。感謝申し上げます。また、同じ研究室のD1の内田さん、M2の今里さん、鳥越さん、M1の平出さん、高木さん、木村さんなど多くの研究室の先輩方・同期に勉強面でのサポートや精神的に厳しい時は、励ましてくださりやり遂げることができました。ありがとうございます。

関連図書

- [1] 浜松ホトニクス社 「光半導体ハンドブック」 2009 年
- [2] Glenn F. Knoll 「放射線計測ハンドブック (第 4 版)」 2013 年 オーム社
- [3] 小型衛星「CUTE-1」のイメージ
<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cute-i>
- [4] 中岡 竜也「プラスチックシンチレータと MPPC を組み合わせた天体偏光 X 線検出器の検討」 2014 年
広島大学卒業論文
- [5] https://www.hamamatsu.com/sp/hq/mktg-LP/201707_pmt/PDF/PMT_handbook_v4J.pdf
- [6] 信原 岳「新型光検出器 MPPC の開発」 2006 年 京都大学 修士論文
- [7] 宇井崇紘「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」 2010 年
広島大学 卒業論文
- [8] Zhengwei Li, et al., Nucl. Instrum. Methods A 822 (2016) 63-70
- [9] 後藤国広「ASTRO-H 衛星搭載アクティブシールドの信号処理における デジタルフィルタの最適化および性能評価」 2013 年 広島大学修士論文
- [10] <http://kats.issp.u-tokyo.ac.jp/kats/electroniccircuit/note11.pdf>
- [11] M. Moszyński, et al. Nucl. Instrum. Methods A 485 (2002) 504-521
- [12] R. Sato, et al., Nucl. Instrum. Methods A 556 (2016) 535-542
- [13] 浜松ホトニクス社 「光半導体ハンドブック」 サイト
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/03_handbook.pdf
- [14] https://www.hamamatsu.com/sp/hq/mktg-LP/201707_pmt/PDF/PMT_handbook_v4J.pdf
- [15] http://www.nanosat.jp/1st/files/10th.AM/Presentation_Nakasuka.pdf
- [16] Table of Isotopes - Nuclear Data
<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/index.asp>
- [17] MPPC S13360-6050CS のデータシート
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_kapd1052j.pdf
- [18] サンゴバン社 シンチレータの温度依存性に関する文献
<https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/ind>
- [19] ペルチェ素子 (TES-12705) スペックシート
<http://akizukidenshi.com/catalog/g/gI-00484/>