

2019年度 修士論文

国際リニアコライダーにおける粒子識別精度向上のための
高時間分解能シリコンセンサー開発に向けた研究

九州大学大学院 理学府 物理学専攻
粒子物理学分野 素粒子実験研究室

出口 遊斗

指導教員 末原 大幹

2020年2月25日



概要

国際リニアコライダー (International Linear Collider, ILC) は、電子と陽電子という素粒子を加速、衝突させることで、ヒッグス粒子・トップクォークなどの精密測定や、標準理論を超えた新物理の探索を目的として計画されている次世代の線形加速器実験である。ILC の粒子衝突点に設置される検出器の 1 つに International Large Detector (ILD) がある。ILD では、粒子衝突時の事象再構成に Particle Flow Algorithm (PFA) と呼ばれる手法を用いる。PFA とは、粒子衝突時に生成される粒子について、粒子の性質に最適な検出器で測定し、解析を行う手法である。この手法を用いるため、ILD の各検出器では、ジェットの中の粒子を個々に分離する必要がある。また、分離した粒子を精度良く同定するため、高精度の粒子識別が要求される。

ILD における荷電粒子の識別は、ガス飛跡検出器 (Time Projection Chamber, TPC) を用いて粒子のエネルギー損失 dE/dx と運動量を測定することで行われる。しかし、この測定方法のみでは、粒子の運動量によっては識別が行えない不感領域が存在する。そこで、粒子のエネルギー損失と運動量に加え、粒子飛行時間 (Time of Flight, ToF) 法を用いた粒子同定法を併用することで、不感領域を無くし、より精度良く粒子識別を行う手法が提案されている。

ILD を構成する検出器の 1 つに、電磁カロリメータ (ECAL) がある。ECAL は TPC の外層に配置される検出器であり、ToF の測定を行う場所として適していると考えられる。この時、ECAL での ToF の時間分解能は 50 ps 程度と非常に高精度な値が要求される。

ECAL の時間分解能の要求値を満たすため、LGAD (Low Gain Avalanche Diode) と呼ばれる内部に増幅機構を持つシリコンセンサーの導入を我々は提案している。LGAD は、従来のセンサーと比べて薄い設計で十分な信号量を取得できるため、電荷収集速度が速く、高い時間分解能を持つセンサーとして知られている。

本論文では、ILD における粒子識別精度向上に向けた、高時間分解能シリコンセンサーの開発に関する研究について報告する。ILD における LGAD プロトタイプの作成に向けて、LGAD と同じ増幅機構を持つ APD (Avalanche Photo Diode) の性能評価を行なった。LGAD には内部構造の違いによってリーチスルーモードとインバースモードと呼ばれるものがある。そのため、リーチスルーモードとインバースモードの APD について、放射線源を用いて基礎特性を評価した。また、東北大学電子光物理学研究センターにおいて APD に陽電子ビームを照射する実験を行い、様々な仕様の APD による粒子ビームに対する応答、検出効率、時間分解能を比較し、LGAD として利用可能かどうかの評価を行なった。

目次

第 1 章	序論	11
1.1	標準理論	11
1.2	国際リニアコライダー計画	11
1.3	ILC の物理	12
1.4	本研究の目的	15
第 2 章	検出器の動作原理と ILC の検出器	16
2.1	粒子と物質の相互作用	16
2.1.1	荷電粒子と物質の相互作用	16
2.1.2	光子と物質の相互作用	18
2.1.3	カスケードシャワー	19
2.2	粒子検出器の動作原理	21
2.2.1	ガス検出器の動作原理	21
2.2.2	シリコン半導体検出器の動作原理	21
2.2.3	シンチレーション検出器の動作原理	22
2.3	International Large Detector	22
2.3.1	PFA	22
2.3.2	崩壊点検出器 (Vertex Detector)	24
2.3.3	ガス飛跡検出器 (TPC)	25
2.3.4	電磁カロリメータ (ECAL)	25
2.3.5	ハドロンカロリメータ (HCAL)	26
2.3.6	ソレノイドコイル	27
2.3.7	ミューオン検出器	27
第 3 章	時間情報を用いた粒子識別	28
3.1	粒子識別	28
3.2	Time of flight	28
第 4 章	高時間分解能センサー	32

4.1	Low Gain Avalanche Diode	32
4.2	Avalanche Photo Diode	33
4.3	APD の先行研究	35
4.4	信号読み出し	36
4.4.1	SKIROC2cms	36
4.4.2	評価基板	38
第 5 章	放射線源等を用いた APD の基礎特性評価	41
5.1	測定セットアップ	41
5.2	放射線源を用いた測定の結果	43
5.2.1	ベータ線源を用いた測定結果	43
5.2.2	ガンマ線源を用いた測定結果	46
5.3	有感領域の測定	48
5.4	TOA の較正	50
5.5	Timewalk 測定	51
5.6	Jitter 測定	53
第 6 章	陽電子ビーム照射実験による APD の性能評価	54
6.1	東北大学電子光物理学研究センター	54
6.2	GeV ガンマ陽電子ビーム	54
6.3	測定セットアップ	55
6.3.1	治具作成	55
6.3.2	測定機器のセットアップ	55
6.4	実験結果	57
6.4.1	基礎特性評価	58
6.4.2	時間分解能	63
第 7 章	考察と今後の展望	67
第 8 章	結論	69
付録 A	^{133}Ba と ^{90}Sr の壊変図	70
付録 B	SKIROC2 Test Board	
	ALTERA Registers	72
付録 C	Test Board 回路図	73
参考文献		87

図目次

1.1	標準理論	12
1.2	ILC の概観図	13
1.3	ヒッグス粒子の反応断面積	13
1.4	ヒッグス生成過程のファインマンダイアグラム	14
2.1	荷電粒子の入射速度とエネルギー損失の相関図	17
2.2	物質と光子の相互作用	18
2.3	鉛中における光子の相互作用の断面積	19
2.4	カロリメータでのカスケードシャワーの模式図	20
2.5	シリコン半導体検出器の動作原理	21
2.6	ILD 概観図	22
2.7	SiD 概観図	22
2.8	ILD の断面の模式図	23
2.9	PFA を用いた反応事象の再構成	23
2.10	従来の解析手法と PFA におけるジェットのエネルギー分解能の比較	24
2.11	SiW-ECAL に用いるシリコン半導体検出器	26
2.12	SiW-ECAL の構造	26
3.1	ILD の TPC における各粒子の運動量と dE/dx の相関図	29
3.2	時間情報を加えた時の粒子識別能	31
4.1	ATLAS グループが開発した LGAD の内部構造	33
4.2	ATLAS グループで開発された LGAD の時間分解能	33
4.3	リーチスルー型内部構造	34
4.4	インバース型内部構造	34
4.5	先行研究における S8664-20K のガンマ線による ADC 分布	35
4.6	SKIROC2cms のアナログ回路図	36
4.7	Memory cell の動作原理	37
4.8	TOA の測定原理	38

4.9	評価基板	39
4.10	LabVIEW での DAQ 画面	40
5.1	センサー基板	42
5.2	放射線源を用いた測定時のセットアップの模式図	42
5.3	測定セットアップを横から見た図	43
5.4	^{90}Sr を用いた測定の各 APD の ADC (High gain)	44
5.5	^{90}Sr を用いた測定の各 APD の ADC (Low gain)	45
5.6	^{90}Sr を用いた測定の S12023-10A の ADC (Low gain)	45
5.7	複数のランダウ分布が組み合わさった時の関数の概形	46
5.8	^{133}Ba を用いた測定の S12023-10A の ADC (Low gain)	46
5.9	^{133}Ba の ADC 分布のフィッティング	47
5.10	SKIROC2cms Low gain における ADC と charge の相関	48
5.11	S12023-10A における印加電圧と Gain の相関	49
5.12	TOA 較正の測定時のセットアップの模式図	50
5.13	ch 30 と ch 33 における TOA と時間の相関	51
5.14	Timewalk が生じる原因を示した図	52
5.15	Timewalk の測定結果	52
5.16	Jitter 測定の結果	53
6.1	東北大学電子光物理学研究センターの概略図	55
6.2	ビーム照射実験のための治具	56
6.3	テストビーム時の測定機器セットアップの概略図	56
6.4	ビームラインに設置した測定機器	57
6.5	測定機器のノイズ対策	57
6.6	S12023-10A の ADC 分布	59
6.7	S8664-10K の ADC 分布	59
6.8	S2384 の ADC 分布	60
6.9	S8664-20K の ADC 分布	60
6.10	S8664-55 の ADC 分布	60
6.11	pkg-10 の ADC 分布	61
6.12	pkg-20 の ADC 分布	61
6.13	同種 APD のうち片方だけにトリガーがかかった時の ADC (High gain) の相関	62
6.14	時間分解能測定時のセットアップ	63
6.15	S2384 の TOA ヒストグラム	64
6.16	S2384 の TOA を時間情報に変換したヒストグラム	64
6.17	TOA rise と TOA fall の相関	65
6.18	S2384 の時間情報の相関と近似直線からの距離のヒストグラム	65

6.19	入射粒子の電荷量が 100 fC 以上のイベントにおける 2 つの同種センサーの時間情報と近似直線からの距離のヒストグラム	66
6.20	S8664-55 の時間情報の相関と近似直線からの距離のヒストグラム	66
A.1	^{133}Ba の壊変図	70
A.2	^{90}Sr の壊変図	71
B.1	FPGA の 8 bit レジスタの一覧	72
C.1	Test Board の回路図	84

表目次

1.1	ILC での測定項目	14
2.1	吸収層の候補と各物質のパラメータ	26
3.1	粒子による $\beta (= v/c)$ の比較	29
3.2	各時間分解能のセンサーにおける 3σ の粒子識別ができる運動量	30
4.1	本論文中の実験で使用した APD	34
4.2	評価基板の端子の名前とその役割	39
5.1	外部からの信号電源電圧	41
5.2	本測定で使用した線源	43
5.3	ベータ線源を使用した測定時の各 APD への印加電圧	44
5.4	各印加電圧におけるコンプトンエッジの位置	48
5.5	S12023-10A の有感領域	49
5.6	Gain に規格値を引用した場合の S12023-10A の有感領域	49
6.1	ビーム照射実験で使用した APD	58
6.2	本実験結果に使用した測定の概要	58
6.3	各 APD の検出効率	62

第1章

序論

1.1 標準理論

素粒子とは、物質を構成する最も基本的な構成要素であり、素粒子物理学とは、物質の構成要素とその間に働く力を記述している。現在の素粒子物理学において最も広く受け入れられている理論として、標準理論がある。標準理論では、物質の構成要素となるフェルミ粒子と力の媒介や質量の起源となるボーズ粒子が存在する。フェルミ粒子は、クォーク ($q = u, d, c, s, t, b$) とレプトン ($e^-, \mu^-, \tau^-, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$) がそれぞれ 3 世代 6 種類ずつ定義されている。一方、ボーズ粒子には、粒子間の力を媒介するゲージボソン (γ, g, Z^0, W^\pm)、物質に質量を与えるヒッグスボソン (H) が定義されている。ゲージボソンによってはたらく力は粒子によって異なり、電場や磁場による電磁相互作用を媒介する光子 γ 、クォーク間に働く力に代表される強い相互作用を媒介するグルーオン g 、クォークやレプトンの種類を変える弱い相互作用を媒介する Z^0 ボソン、 W^\pm ボソンが存在する。フェルミ粒子はスピンの値が $1/2$ の粒子であり、クォークは u, c, t が $2/3$ 、 d, s, b が $-1/3$ の電荷を持っている。また、レプトンは e^-, μ^-, τ^- が -1 の電荷を持ち、ニュートリノである ν_e, ν_μ, ν_τ は電荷を持っていない。一方、ボース粒子のスピンの値は、 γ, g, Z^0, W^\pm が 1 であり、 H が 0 である。また、 γ, g, Z^0, H は電荷を持たず、 W^\pm は ± 1 の電荷を持っている。これらの標準理論を構成する粒子を図 1.1 に示す。

2012 年、歐州原子力開発機構 (CERN)[1] の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) において、ATLAS と CMS という 2 つの検出器によってヒッグスが発見されたことにより、標準理論を構成する全ての粒子が発見された。しかし、ダークマターや物質反物質の非対称性など、標準理論では説明ができない未解決の問題が存在する。これらの問題を説明するために、標準理論を超えた物理理論の提唱や、新物理探索のための実験が世界各地で行われている。

1.2 国際リニアコライダー計画

国際リニアコライダー (ILC) 計画とは、岩手県と宮城県に跨がる北上山地に建設が予定される、全長 20.5 km の次世代線形衝突型加速器実験の計画である。図 1.2 のように、ILC は

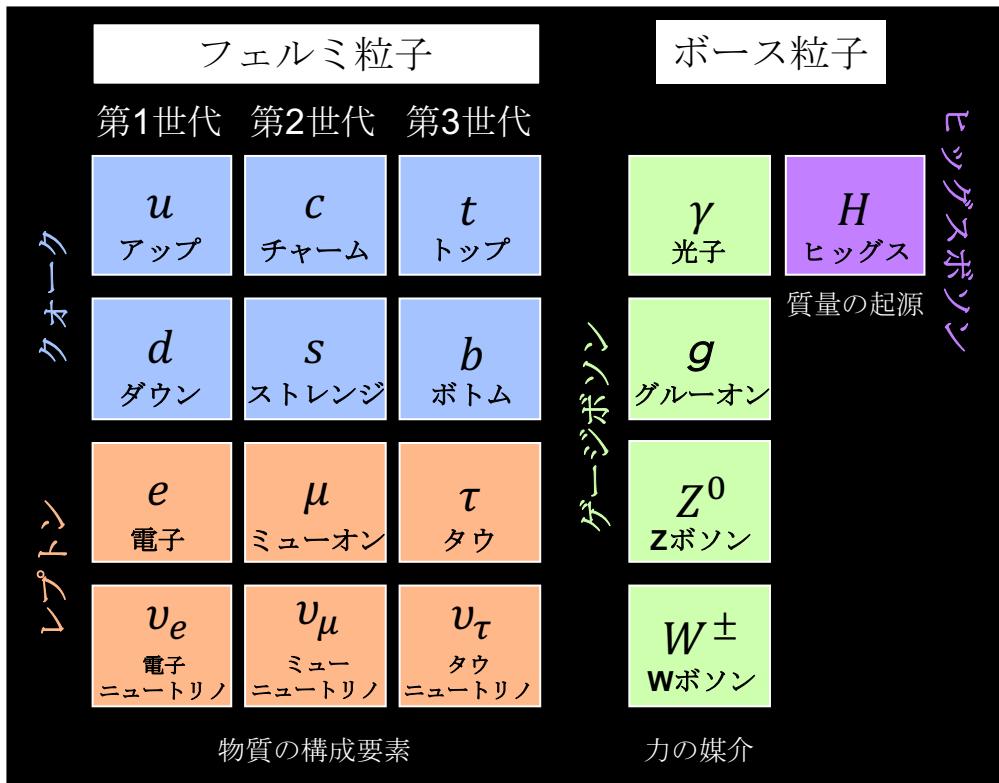


図 1.1 標準理論を構成する粒子

素粒子の 1 つである電子と、その反粒子である陽電子をそれぞれ生成し、光速に近い速度まで加速させ、正面衝突させた時に起こる物理現象を検出器で測定する。重心系エネルギーは、 $\sqrt{s} = 250 \text{ GeV}$ での運転開始が予定されており、将来的には $\sqrt{s} = 1 \text{ TeV}$ までアップグレードが可能である。ILC の特徴として背景事象の少なさが挙げられる。先述の LHC では、陽子同士を衝突させることで、極めて高いエネルギー領域の探索を行うことができる。その一方、陽子には内部構造が存在するため、背景事象となる反応が多く、反応の解析が困難であるという問題がある。ILC で衝突させる電子と陽電子は内部構造を持たない素粒子であるため、背景事象となる反応が少なく、クリーンな環境で衝突現象を観測できる。これにより、ヒッグスをはじめとする粒子の精密な測定を可能にしている。また、ILC は線形加速器であるため、延伸による重心エネルギーのアップグレードが容易であるという特徴がある。前述の通り、ILC では将来的に $\sqrt{s} = 1 \text{ TeV}$ までの運転を想定しており、全長約 50 km まで延伸することが可能である。

1.3 ILC の物理

ILC では背景事象の少ないという特徴から、ヒッグスやトップクォークの精密測定や、暗黒物質や超対称性粒子などの新物理の探索が期待されている。ILC が $\sqrt{s} = 250 \text{ GeV}$ で運転

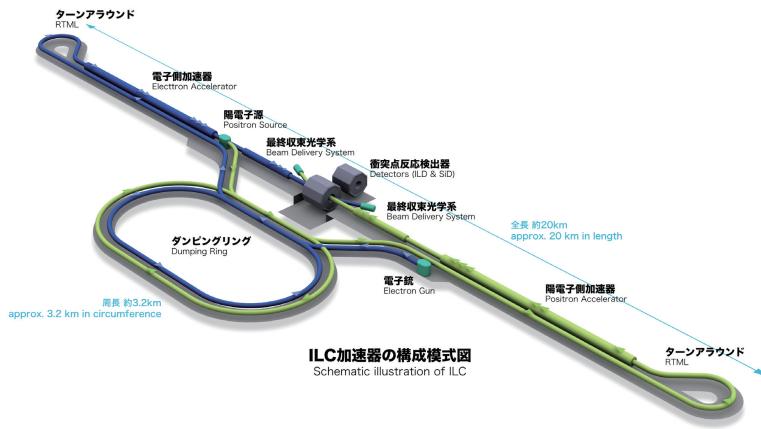


図 1.2 ILC の概観図 [2] 青線が電子、緑線が陽電子を加速させる加速器であり、衝突点に設置された粒子検出器で観測する。

開始する大きな理由として、ヒッグス粒子の生成断面積が挙げられる。図 1.3 で示すように、 $\sqrt{s} = 250 \text{ GeV}$ においてヒッグス粒子の ZH 随伴生成過程（図 1.4）の反応断面積が最大となる。この過程では、ヒッグス粒子を直接測定することなく質量の再構成を行えることから、ヒッグス粒子の精密測定が期待されている。

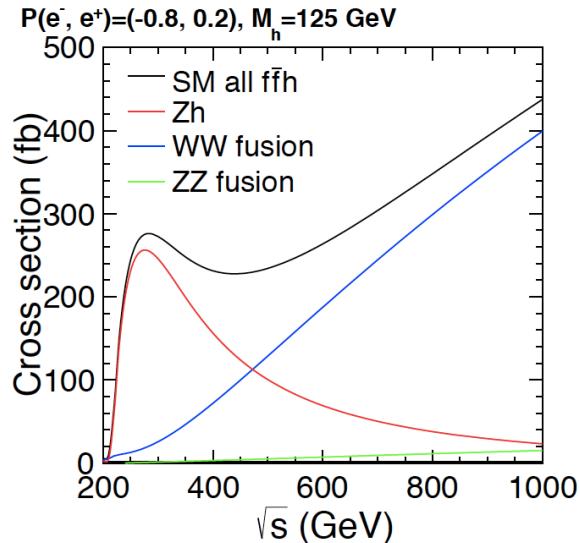


図 1.3 ILC の重心系エネルギーとヒッグス粒子の反応断面積の相関 [3] 赤線が ZH 随伴過程、青線が WW fusion 過程、緑線が ZZ fusion 過程（図 1.4）における反応断面積を示しており、黒線は 3 つの過程の合計を示している。

表 1.1 は、ILC における重心系エネルギーごとの主な反応過程とその反応における測定の目的を示している。 $\sqrt{s} = 250 \text{ GeV}$ で運転を開始し、 $\sqrt{s} = 250 \text{ GeV}$ 以下の反応についての測定を行う。その後段階的に重心系エネルギーを上げながら、各反応についての測定・探索を行なっていくことが予定されている。

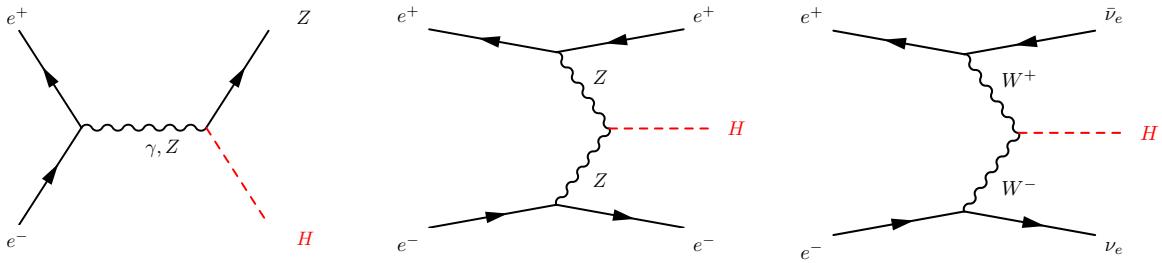


図 1.4 ILC における主なヒッグス生成過程のファインマンダイアグラム
(左図...ZH 隨伴生成過程、中図...WW fusion 過程、右図...ZZ fusion 過程)

表 1.1 ILC における重心系エネルギーごとの主な反応過程とその反応における測定内容 [3]

重心系エネルギー	反応過程	測定内容
91 GeV	$e^+e^- \rightarrow Z$	電弱相互作用の超精密測定
160 GeV	$e^+e^- \rightarrow WW$	W ポソンの質量の超精密測定
250 GeV	$e^+e^- \rightarrow ZH$	ヒッグス粒子の結合定数の精密測定
350-400 GeV	$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$	トップクォークの質量と結合定数の測定
> 350 GeV	$e^+e^- \rightarrow WW$ $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H$	W の結合定数の精密測定 ヒッグス粒子の結合定数の精密測定
500 GeV	$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H$ $e^+e^- \rightarrow ZHH$	トップクォークとヒッグス粒子の結合定数測定 ヒッグス粒子の自己結合
> 500 GeV	$e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ $e^+e^- \rightarrow \tilde{\chi}\tilde{\chi}$ $e^+e^- \rightarrow AH, H^+H^-$	Z' などの新粒子の間接的探索 超対称性粒子の探索 標準理論を超えるヒッグス粒子の探索
$\gtrsim 1000$ GeV	$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}HH$ $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}VV$ $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}t\bar{t}$ $e^+e^- \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^*$	ヒッグス粒子の自己結合 ベクトル粒子に崩壊する複合ヒッグス粒子の探索 トップクォークに崩壊する複合ヒッグス粒子の探索 超対称性粒子の探索

ILC で起こるこのような反応過程の途中で多くのクォークが生成される。このクォーク間に働くポテンシャル $V(r)$ は

$$V(r) \simeq -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr \quad (1.1)$$

r : クォーク間の距離

α_s : 強い相互作用の結合定数

k : 弦定数

と表される。第 2 項の kr とは弦定数 k でクォーク同士が結ばれていることを示しており、 $k \simeq 10^{13}$ GeV/cm と非常に大きな値をとる。そのため、生成されたクォークは分離されるよ

りも、真空中にクォーク反クォーク対を新たに生成して結合することでハドロンを作った方が、必要となるエネルギーが少ない。この過程によって、衝突時に生成されたクォークが多数のハドロンを生成する。このハドロンはクォークの生成方向で生成されるため、粒子群が形成される。この粒子群をジェットと呼ぶ。ILC の反応過程の終状態にはこのジェットが多数生成されるため、ジェット中の粒子を精度良く測定し、反応事象の再構成を行うことが、精密測定や新粒子探索のために重要となる。

1.4 本研究の目的

本研究では、ILC の物理目標を達成するために、検出器の粒子識別精度向上を目的とした高い時間分解能を持つシリコンセンサーの開発を行っている。本論文中では、ILC の検出器用の技術プロトタイプ作成に向けて、検出器に導入予定のシリコンセンサーと同じ構造を持つセンサーの性能評価について報告する。主な評価内容は、複数種類のセンサーの応答や検出効率、センサーの時間分解能である。センサーに読み出し回路を接続し、放射線源での測定やビーム照射実験などを行うことで、上記の内容についての評価を行った。

第 2 章

検出器の動作原理と ILC の検出器

本章では、粒子検出器の基本的な動作原理と ILC の衝突点に設置される粒子検出器について記述する。

2.1 粒子と物質の相互作用

2.1.1 荷電粒子と物質の相互作用

比エネルギー損失

高エネルギーの荷電粒子が物質中を通過する際、物質中の粒子と衝突し相互作用を起こす。この時の荷電粒子における電離および励起による比エネルギー損失は、式 2.1 にある Bethe-Bloch の式に従う。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi\alpha^2\hbar^2q^2n_e}{m_e\beta^2} \left(\ln \frac{2m_ec^2\gamma^2\beta^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta(\gamma)}{2} \right) \quad (2.1)$$

m_e : 荷電粒子の質量 (電子の場合 $0.511 \text{ MeV}/c^2$)

I : 平均電離ポテンシャル

$\beta = v/c$ (c は光速、 v は荷電粒子の速度)

$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$

$n_e = \rho N_A Z/A$

ρ : 物質の密度

N_A : アボガドロ定数 ($6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

Z : 物質の原子番号

A : 物質の原子量

q : 荷電粒子の電荷

α : 微細構造定数 ($\simeq 1/137$)

\hbar : ディラック定数

この式における、右辺第3項の δ は物質中の原子に束縛された電子による電場から受ける遮蔽効果を表している。

式2.1より、荷電粒子の比エネルギー損失 $-dE/dx$ は荷電粒子の入射速度及び入射する物質に依存する。この時 $-dE/dx$ は $\beta \simeq 0.95$ で最小となり、 $\beta > 0.95$ では僅かに増加するものの、図2.1のようにほぼ一定の値をとる。 $\beta \simeq 0.95$ のような最小の比エネルギー損失で物質を通過する粒子を最小電離損失粒子(Minimum Ionization Particle, MIP)と呼ぶ。

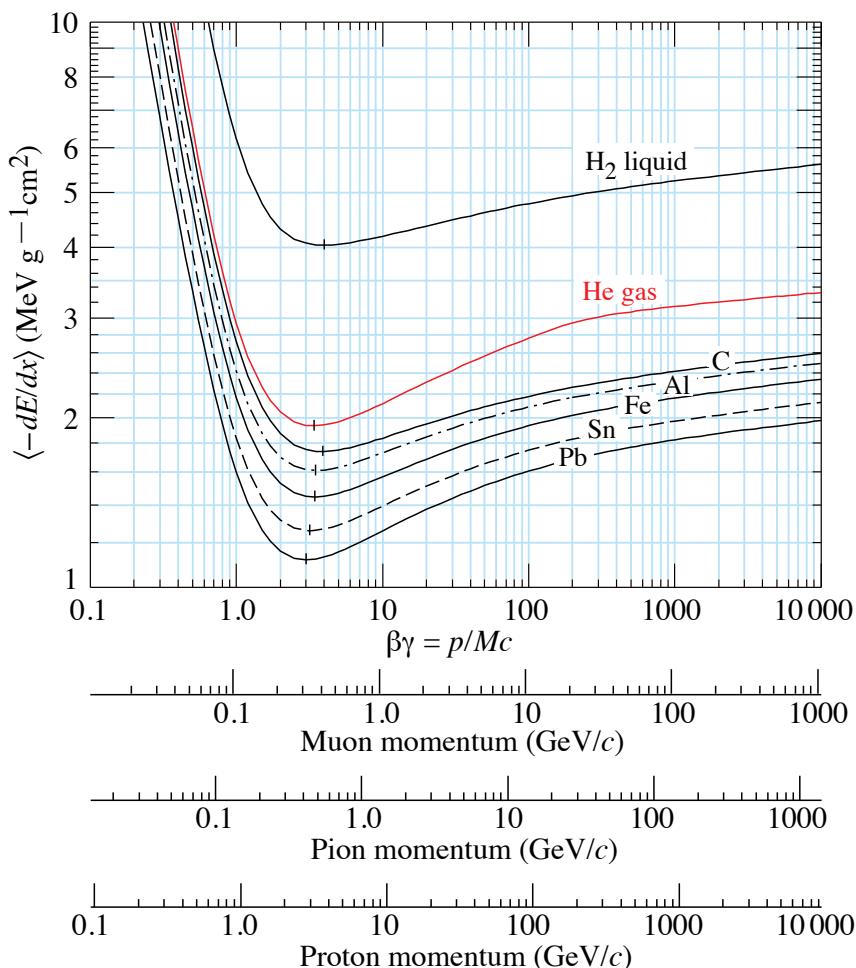


図2.1 各物質における荷電粒子の入射速度とエネルギー損失の相関図 [4](縦軸:エネルギー損失 横軸:速度の変数 $\beta\gamma$ 及び各粒子の運動量)

制動放射

荷電粒子が物質中に入射した時、物質の原子核周りのクーロン場の影響を受け、減速及び進行方向が曲げられる。この際に入射した荷電粒子が電磁波を放出しエネルギーを失う。この現象を制動放射という。制動放射によって荷電粒子が物質中で失う平均エネルギー $-dE/dx$ は

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{brem}^{\ast 1}} = \frac{E}{L_R} \quad (2.2)$$

と表される。 L_R は放射長 (radiation length) と呼ばれる、荷電粒子のエネルギーが制動放射によって $1/e$ に減少するまでの距離を示す量であり、

$$\frac{1}{L_R} = 4 \left(\frac{\hbar}{mc} \right)^2 Z(Z+1) \alpha^3 n_a \ln \left(\frac{183}{Z^{1/3}} \right) \quad (2.3)$$

n_a : 原子の数密度 [原子数/cm³]

と表される。また、入射粒子の初期エネルギーを E_0 とすると、

$$E = E_0 \exp(-x/L_R) \quad (2.4)$$

である。式 2.2、2.3 のように、制動放射は荷電粒子の質量の 2 乗に反比例するため、電子のような比較的軽い粒子において制動放射によるエネルギー損失が特に大きくなる。

2.1.2 光子と物質の相互作用

荷電粒子と同様に、光子も物質中に入射すると物質と相互作用を起こしてエネルギーを落とす。この時の相互作用は、光子のエネルギーの大きさ (E_γ) に依存して

- 光電効果 … 入射光子が原子核に吸収され、そのエネルギーによって原子核に束縛されている電子が飛び出す反応。 $E_\gamma \lesssim 0.5$ MeV で支配的。
- コンプトン散乱 … 入射粒子が原子核に束縛されている電子を弾き飛ばす反応。 $E_\gamma \simeq 0.5\text{-}5$ MeV で支配的。
- 電子陽電子対生成 … 入射光子が原子核近傍のクーロン電場中で消滅し、電子と陽電子を生成する反応。 $E_\gamma \gtrsim 5$ MeV で支配的。

の 3 つの素過程がある。図 2.2 は 3 つの素過程をそれぞれ図示している。また、図 2.3 は鉛中における光子のエネルギーと相互作用の反応断面積を示した図である。

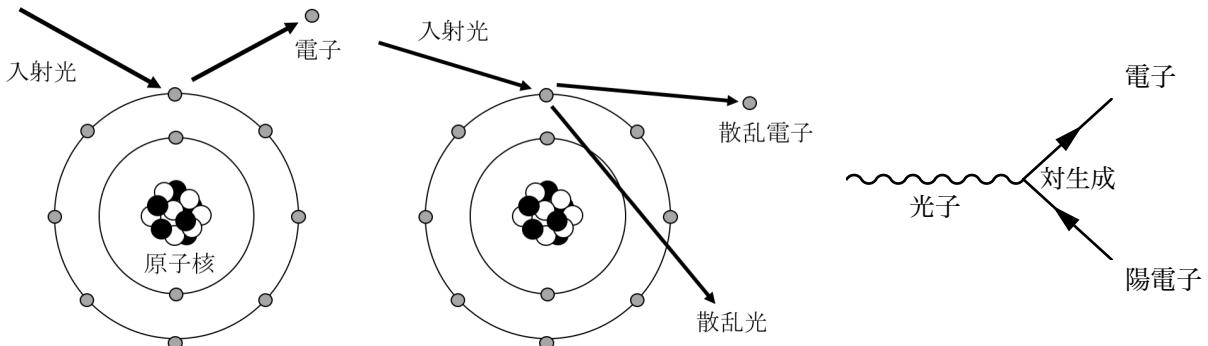


図 2.2 物質と光子の相互作用で起こる反応 (左:光電効果 中:コンプトン散乱 右:対生成)

*1 制動放射は英語で bremsstrahlung

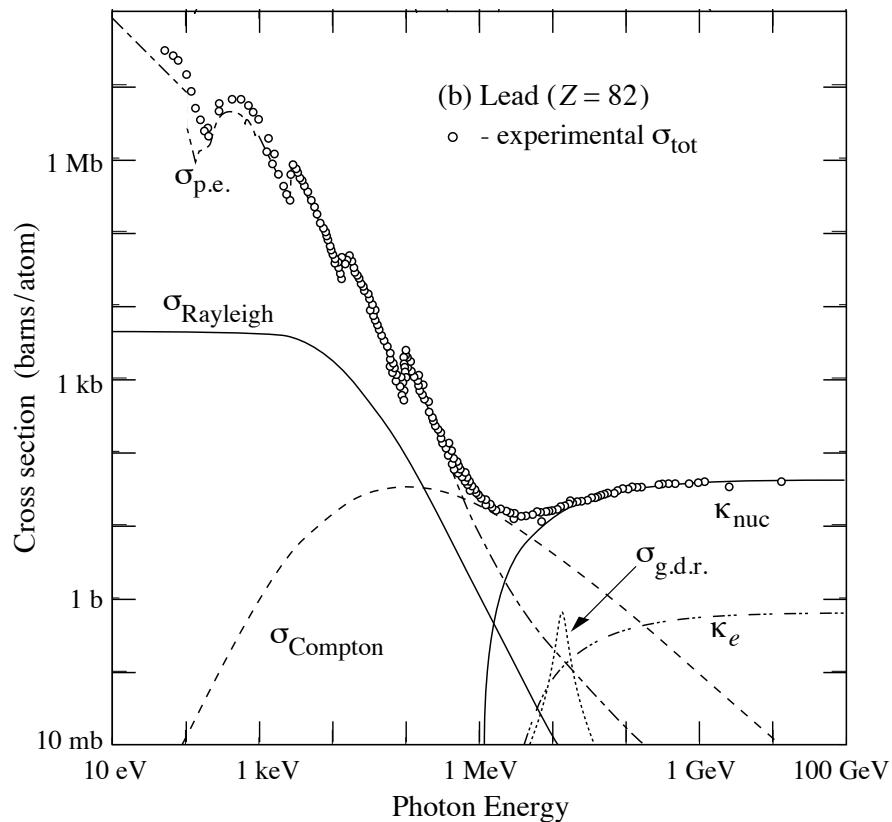


図 2.3 鉛中における物質と光子の相互作用 [4] 光電効果の反応断面積は $\sigma_{\text{p.e.}}$ 、コンプトン散乱の反応断面積は σ_{Compton} 、電子陽電子対生成の反応断面積は $\kappa_{\text{nuc}}, \kappa_e$

2.1.3 カスケードシャワー

高エネルギー粒子が物質中で相互作用する場合、前節のようなエネルギー損失が起こるとともに、多数の二次粒子が生成される。この二次粒子がさらに物質との相互作用を起こすことで、あるエネルギーを下回るまで雪崩的に粒子を生成する現象が起こる。この現象をカスケードシャワーと呼ぶ。図 2.4 は、後述するカロリメータと呼ばれる粒子のカスケードシャワーを利用して入射粒子のエネルギーを測定する検出器でのシャワーの様子を表している。以下では、電磁相互作用によって発生する電磁シャワーと強い相互作用によって発生するハドロンシャワーについて記述する。

電磁シャワー

電磁シャワーは電磁相互作用を起こす粒子によって発生するシャワーであり、主に電子や光子が入射した際の制動放射や電子陽電子対生成によって生成される。生成された二次粒子がさらに粒子を生成していくが、一定以下までエネルギーを落とすことで、電離損失や光電効果、コンプトン散乱といった現象が支配的になる。これらの現象では新たに粒子は生成されず、エネルギー損失のみ起こるため、急速にエネルギーを失い、電磁シャワーの発達が止まる。

電磁シャワーの形状は、シャワーの奥行き方向と横方向の 2 つの式から表すことができる。

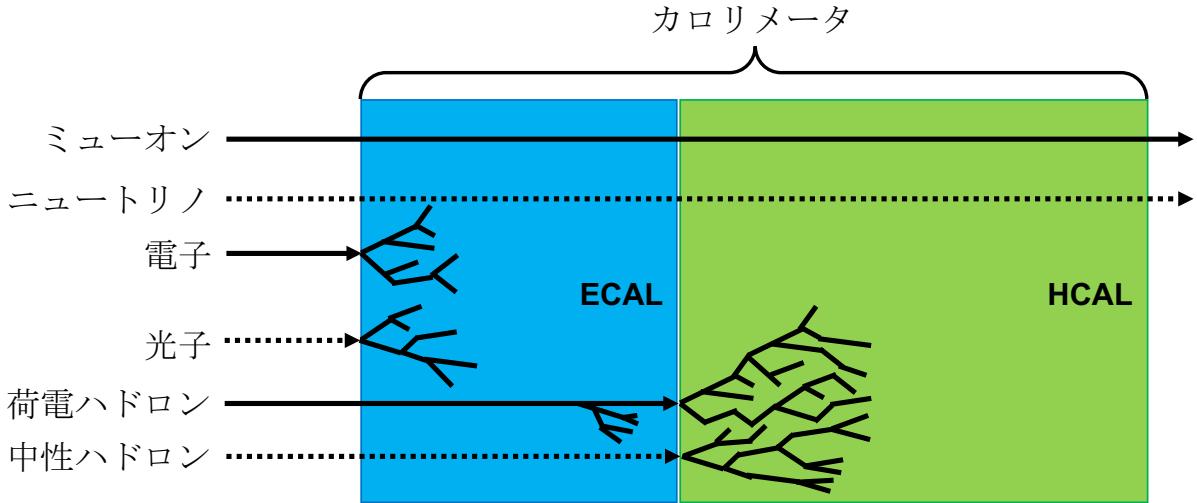


図 2.4 各入射粒子のカロリメータでのカスケードシャワーの模式図

奥行き方向について、シャワーの発達が最大となる深さ t_{\max} は

$$t_{\max} = \ln \frac{E_0}{E_c} + t_0 \quad (2.5)$$

と表すことができる。ここで、 E_0 は入射粒子のエネルギー、 E_c は電離によるエネルギー損失と制動放射によるエネルギー損失が等しくなる点（臨界エネルギー）である。また t_0 は定数であり、電子の場合 $t_0 = -0.5$ 、光子の場合 $t_0 = +0.5$ となる。一方、横方向については、シャワーのエネルギーの 90% が入る半径を表すモリエール半径 R_M を用いて

$$R_M = \frac{E_s}{E_c} L_R \quad (2.6)$$

で表される。 $E_s = mc^2 \sqrt{4\pi/\alpha}$ MeV であり、電子の時は $E_s = 21.2$ MeV となる。式 2.6 から分かるように、電磁シャワーの横方向の広がりは、入射粒子のエネルギーには依存しない。 R_M の値が小さいほど、電磁シャワーの広がりが小さくなるため、より小さいサイズのカロリメータで入射粒子のエネルギーを測定できることになる。

ハドロンシャワー

高エネルギーのハドロンが物質中に入射すると、物質中の原子核との強い相互作用によって、 π 中間子などの二次粒子を生成する。電磁シャワー同様、二次粒子がさらに粒子を生成することで、ハドロンシャワーが発生する。また一部のハドロンはガンマ線や電子と陽電子に崩壊することで、電磁シャワーも引き起こす。ハドロンシャワーにおいては、シャワーの奥行き方向の長さを表すために原子核相互作用長 λ が用いられ、

$$\lambda = \frac{A}{N_a \rho} \sigma_{tot} \quad (2.7)$$

と表される。ここで、 ρ は物質の密度、 σ_{tot} は入射粒子の原子核との全ての反応の断面積の和である。一般的に $\lambda \gg L_R$ であるため、ハドロンカロリメータは電磁カロリメータよりも大

きく作られる。

2.2 粒子検出器の動作原理

2.2.1 ガス検出器の動作原理

荷電粒子が気体の中を通過すると、気体分子が荷電粒子によって電離され、陽イオンと電子が生成される。この陽イオンと電子がそれぞれの陰極と陽極で電気信号として収集することで、入射した放射線の数やエネルギーを測定することができる。この原理を利用して粒子を検出する主な検出器として、電離による電流から測定を行う電離箱、電気パルスの信号で測定を行う比例計数管、ガイガーミュラー(GM)計数管が挙げられる。後述の ILD で使用されるガス飛跡検出器は比例計数管と同様の動作原理を持つ。

2.2.2 シリコン半導体検出器の動作原理

図 2.5 に示すように、シリコン半導体検出器は、p 層、n 層、空乏層と呼ばれる 3 つの層で主に構成されている。p 層とは、第 14 族元素であるシリコンの結晶に第 13 族元素のホウ素などを加えることで、正の電荷(正孔)を持つ層である。一方 n 層とは、第 15 族元素のリンなどを加えることで、負の電荷(電子)を持つ層である。この 2 層を接合させ、電圧をかけることで、各層の自由電荷は両極に引き寄せられる。これによって、p 層と n 層の間に自由電荷のない空乏層が生じる。この空乏層に粒子が入射すると、飛跡に沿って電子-正孔対が発生し、両極にドリフトすることでパルス電流が流れる。この信号から、入射した粒子の数や検出器中で落としたエネルギーを得ることができる。シリコン半導体検出器は空乏層の領域が有感領域となるため、空乏層の厚みに比例して信号量が大きくなる。この時に得られる信号量から、入射粒子のエネルギーを測定する。

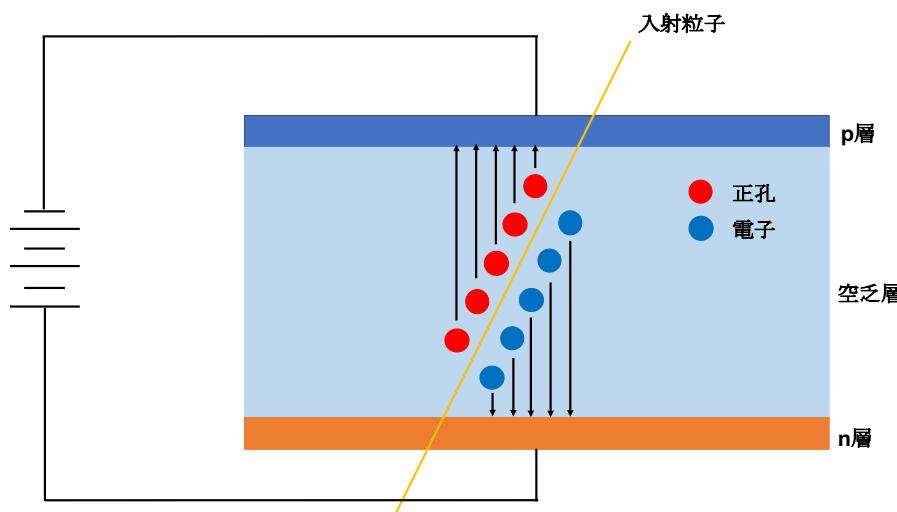


図 2.5 シリコン半導体検出器の動作原理

2.2.3 シンチレーション検出器の動作原理

荷電粒子が固体または液体の中を通過すると、物質中の分子が励起される。この励起された分子が再び基底状態に戻る時、励起状態と基底状態のエネルギーの差を光として放出する。この光を電気信号として検出することで粒子の検出を行う。この時の光の強度から入射粒子のエネルギーを測定することができる。このように粒子によって励起が起き、蛍光する物質のことをシンチレータと言い。この原理を用いて粒子を検出する装置をシンチレーション検出器と言う。

2.3 International Large Detector

International Large Detector (ILD) は、ILC の衝突点検出器の 1 つである。ILC ではこの ILD と Silicon Detector (SiD) の 2 つの衝突点検出器を push-pull 方式でスライドさせ、一つの衝突点を共有する予定である。図 2.6 と図 2.7 は ILD[5] と SiD[5] の概観図を示している。SiD は北米が中心となって開発を進めており、主にシリコン検出器で構成されているのが最大の特徴である。一方、ILD は欧州とアジアが中心となって開発を進めており、飛跡検出器としてガス検出器 (Time Projection Chamber, TPC) を用いるのが SiD と大きく違う点である。また、両検出器とも後述する Particle Flow Algorithm (PFA) と呼ばれる事象再構成の手法に適した構造になっている。

図 2.8 は ILD の断面を模式した図 [5] であり、ILD の各構成が記載されている。以下では PFA と本論文と関わりのある ILD を構成する各検出層について記述する。

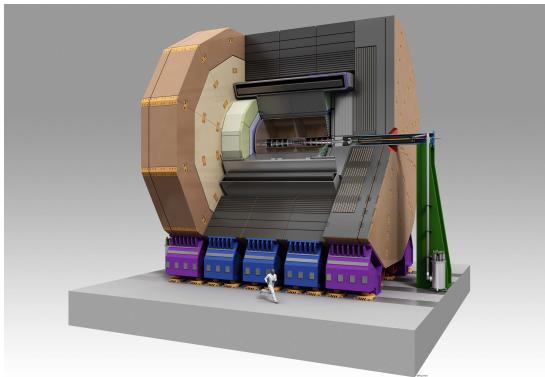


図 2.6 ILD 概観図

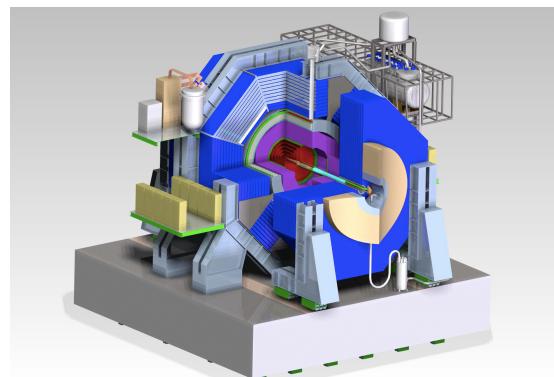


図 2.7 SiD 概観図

2.3.1 PFA

前述のように、ILC の反応過程では多数のジェットが生成される。1.3 節に記述したような特定の物理現象の超精密測定や新粒子探索のためには、これらのジェット中の粒子を精度良く測定することが非常に重要となる。ILC ではジェットの再構成を行うために PFA と呼ばれる

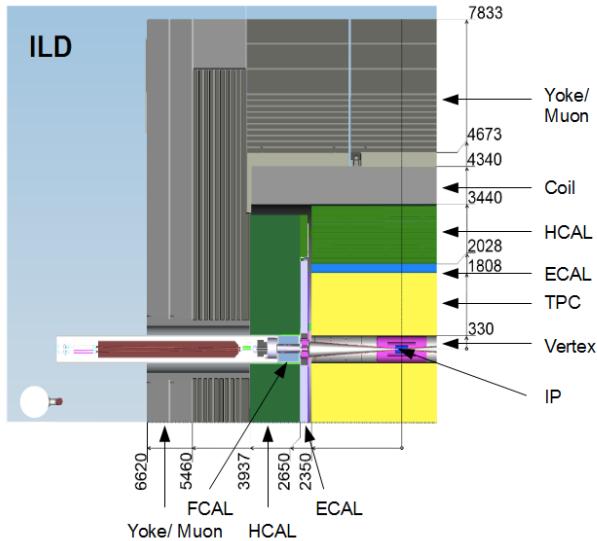


図 2.8 ILD の断面の模式図

手法を用いる。

PFA ではジェット中の粒子を識別し、粒子の種類に最も適した検出器でエネルギーや運動量の測定を重複なく行う手法である。ILD ではソレノイドコイルが使用されているため、荷電粒子の軌道は曲線になる。この軌道を飛跡検出器で検出することで、荷電粒子の運動量を測定する。一方光子や中性ハドロンなどの中性粒子は、飛跡検出器を用いることができないため、カロリメータでエネルギーの測定を行う。

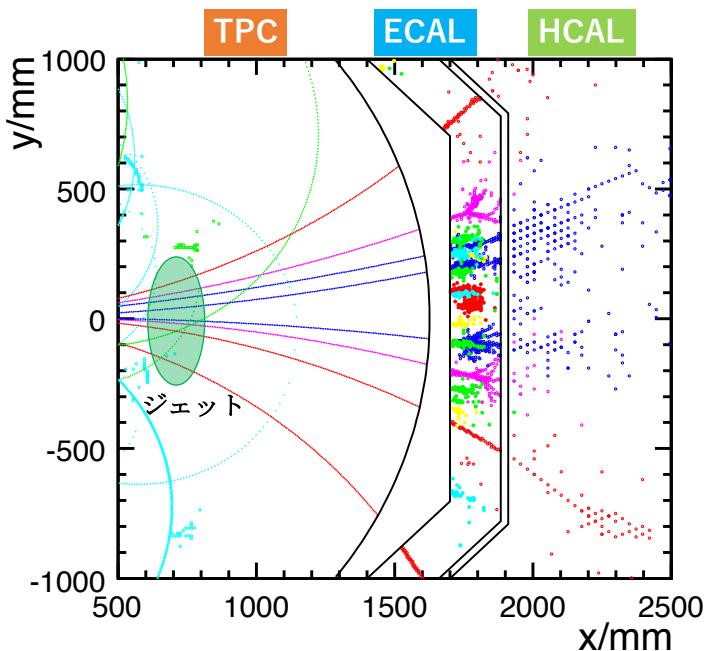


図 2.9 ILD 検出器における PFA を用いた反応事象の再構成のシミュレーション [6] [7] 各線が粒子の 1 個に対応しており、粒子の種類によって異なる色で示されている。

図 2.9 は、ILD 検出器における PFA を用いた反応事象の再構成のシミュレーションを行なった結果の図である。飛跡検出器とカロリメータのシャワーからジェット中の粒子を分離・識別する。これにより、カロリメータ中のシャワーが荷電粒子起因であるか中性粒子起因であるかが特定できるため、カロリメータのエネルギー計算から荷電粒子起因のものを除外することができる。従来は、粒子のエネルギー測定はカロリメータのみで行う、あるいは測定値から荷電粒子起因のエネルギーの予測値を引く手法がとられていた。これらに対して、PFA によるエネルギー測定では高精度な粒子識別が可能になる。図 2.10 は、従来の解析手法と PFA におけるジェットのエネルギー分解能の比較したものである。赤線が従来の手法である電磁カロリメータとハドロンカロリメータでのエネルギー損失の合計からジェットエネルギーを求める手法、青線が ILD のカロリメータのみでエネルギー測定を行う手法、黒実線が PFA でエネルギー測定を行なった場合のエネルギー分解能を表している。ILD では 3 ~ 4% のエネルギー分解能が求められており、PFA を用いることでその要求を満たすことができる。また、黒破線は PFA における粒子の分離ミスの度合い (confusion term) を表している。

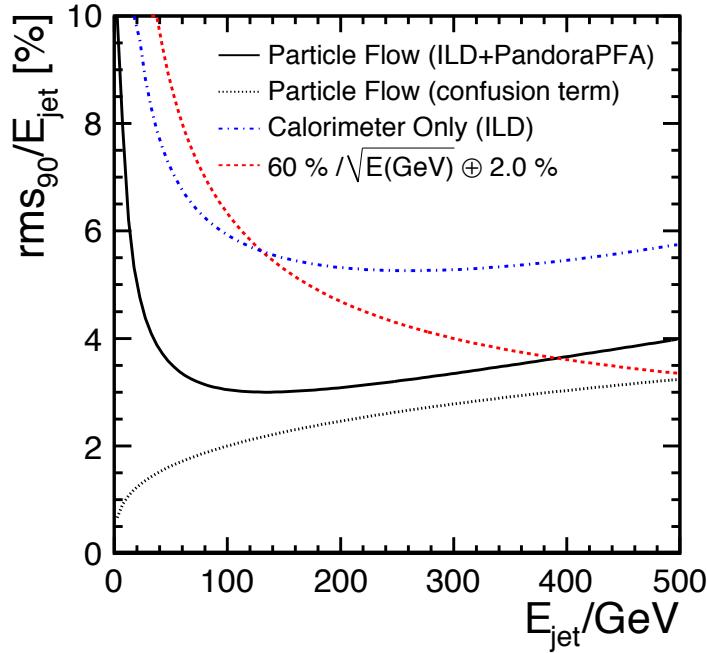


図 2.10 従来の解析手法と PFA におけるジェットのエネルギー分解能の比較 [6] 赤線が従来の手法である電磁カロリメータとハドロンカロリメータでのエネルギー損失の合計からジェットエネルギーを求める手法、青線が ILD のカロリメータのみでエネルギー測定を行う手法、黒実線が PFA でエネルギー測定を行なった場合のエネルギー分解能、黒破線が PFA における粒子の分離ミスの度合い (confusion term) を表している。

2.3.2 崩壊点検出器 (Vertex Detector)

崩壊点検出器は電子と陽電子の衝突点に最も近い位置に設置される半導体検出器である。崩壊点と荷電粒子の飛跡を再構成するために、半導体検出器はピクセル状になっている。崩壊点

検出器では、 B 中間子や D 中間子といった衝突点近くで崩壊する粒子の崩壊点を測定することができる。これによりヒッグス粒子の解析において重要なジェットのフレーバー（クォークの種類や数による数）を測定することができる。

2.3.3 ガス飛跡検出器 (TPC)

TPC は 2.2 節のガス飛跡検出器のうち比例計数管にあたる検出器である。ILD の TPC では、アルゴンを主体とする混合気体を用いて粒子の飛跡を検出する。荷電粒子が通過すると、その飛跡に沿ってガスがイオン化する。この時生じる電子をビーム軸方向 (z 軸方向) にドリフトさせ、 xy 平面に設置されたエンドキャップ上の検出器で読み出す。この時読み出した電子の電荷量から、通過粒子のエネルギー損失 dE/dx を得る。また、ドリフト時間から粒子の z 軸情報を得ることで、粒子の飛跡を三次元再構成を行う。また、ILD にはソレノイドコイルによって磁場がかけられているため、荷電粒子の飛跡は曲線を描く。この曲線の曲率半径 R と磁場 B から、

$$p[\text{GeV}] = 0.3 \cdot B[\text{T}] \cdot R[\text{m}] \quad (2.8)$$

の式を用いて通過粒子の運動量測定を行う。

ILD において TPC を用いる利点として

- 構造物が少なく粒子の軌道上の物質量が少ない。
- 一飛跡あたりの測定点が多く、飛跡再構成と dE/dx 測定の精度が高い。
- 信号収集のための電場と運動量測定のための磁場がほぼ平行のため、ドリフト中の信号電子の拡散が抑えられ、高位置分解能を達成できる。

の 3 点が挙げられる。

2.3.4 電磁カロリメータ (ECAL)

ECAL は、光子のエネルギーを測定するための検出器である。光子と物質の相互作用を利用し、電磁シャワーを発生させることでエネルギーの測定を行う。ILD の電磁カロリメータの候補の一つとして、シリコンタンクスチタン電磁カロリメータ (SiW-ECAL) が挙げられる。SiW-ECAL は吸収層と検出層を交互に数十層重ねたサンプリング型と呼ばれる構造を採用している。吸収層では、入射粒子に電磁シャワーを発生させるため、重い金属を使用する必要がある。表 2.1 は、吸収層の候補となる物質と各物質における相互作用長 λ 、放射長 L_R 、モリエール半径 R_M の比較したものである。ILD の ECAL には PFA を用いるに当たって、

- 高精細であること
- サンプリング比^{*2}が大きいこと
- シャワーの広がりが小さいこと

^{*2} (検出層で落とすエネルギー)/(吸収層で落とすエネルギー)

- ECAL からのシャワーの漏れが少ないこと
- 相互作用長が長く放射長が短いこと

という要求がある。このためモリエール半径 R_M が小さく、 λ/L_R が大きいタンゲステンを吸収層に採用している。

表 2.1 吸収層の候補と各物質における相互作用長 λ 、放射長 L_R 、モリエール半径 R_M の比較 [6]

物質	λ/cm	L_R/cm	R_M/cm	λ/L_R
鉄 (Fe)	16.8	1.76	1.69	9.5
銅 (Cu)	15.1	1.43	1.52	10.6
タンゲステン (W)	9.6	0.35	0.93	27.4
鉛 (Pb)	17.1	0.56	1.00	30.5

一方検出層では、シリコン半導体検出器（図 2.11）を使用する。このシリコン半導体検出器は $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$ のピクセルが 16×16 個並んでおり、PFA が要求する高精細な分解能を実現している。図 2.12 はタンゲステンの吸収層、シリコン半導体検出器の検出層及びその他の構造を模式している。シリコン半導体検出器は導電性の接着剤によって回路基板 (Print Circuit Board, PCB) と接着されており、PCB を通して信号読み出しが行われる。

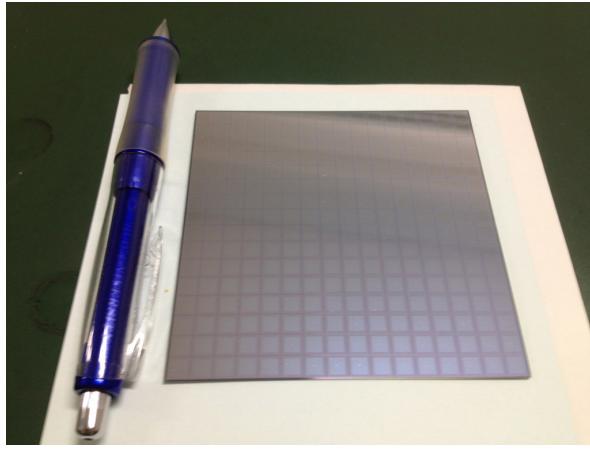


図 2.11 SiW-ECAL に用いるシリコン半導体検出器

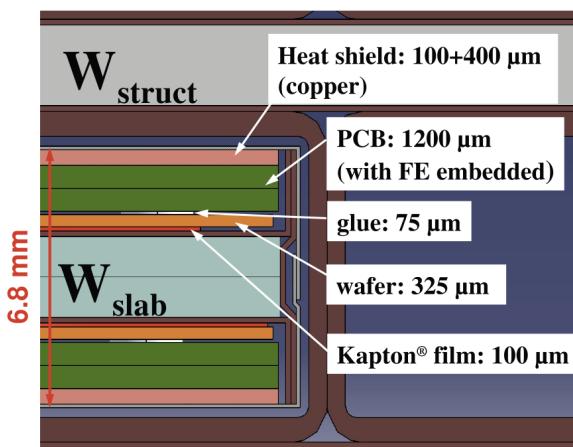


図 2.12 SiW-ECAL の構造 [5]

2.3.5 ハドロンカロリメータ (HCAL)

HCAL は、中性ハドロンのエネルギーを測定するための検出器である。ECAL と同様に、ハドロンシャワーを発生させるための吸収層と、シャワーのエネルギー測定を行うための検出層を交互に並べたサンプリング型の使用が予定されている。2.1.3 節の通り、ハドロンの相互作用長の方が光子の放射長よりも長いため、ECAL よりも大きく作られる。

2.3.6 ソレノイドコイル

ILD では、カロリメータの外側に超電導ソレノイドコイルが設置される。直径 6.88 m、長さ 2.45 m のソレノイドコイルを 3 つ設置することで、ビーム軸方向に中心磁場が最大で 4 T(通常運転時は 3.5 T) の磁場を作ることができる。この磁場によって荷電粒子の軌道が曲げられるため、TPC での運動量測定が可能となる。

2.3.7 ミューオン検出器

ミューオン検出器は、文字通りミューオンを検出するための装置であり、ILD の最外層に設置される。ミューオンは質量が大きく、電磁相互作用以外の相互作用をほとんどしないため、内層の検出器やソレノイドコイルを貫通してくる。貫通力の高いミューオンの検出のため、リターンヨークと呼ばれる鉄の吸収層と検出層を 14 cm 間隔でそれぞれ 10 層、さらに外側に 60 cm 間隔で 3 層設置される予定である。

第3章

時間情報を用いた粒子識別

本章では、ILD で行う粒子識別の手法と、その手法に時間情報を加えることで識別精度の向上を図る提案について記述する。

3.1 粒子識別

ILDにおいて、荷電粒子の粒子識別は TPC でのエネルギー損失と運動量の測定によって行われる。図 3.1 は、ILD の TPC における、粒子のエネルギー損失と運動量の相関を表した図である。物質中の荷電粒子のエネルギー損失はほぼ同じ分布になるものの、横軸の運動量は粒子の質量に依存するため、分布に差が生まれる。これによって、TPC で得られたエネルギー損失と運動量から粒子識別を行うことができる。しかし、図からも分かるように、 dE/dx と運動量が全く同じになる点（各粒子を示す線の交点）が存在する。ECAL で電磁シャワーを起こす電子やミューオン検出器で検出されるミューオンは、 dE/dx と運動量が全く同じになった場合でも他の粒子との識別が可能であるが、ハドロンではこのような別の手法での粒子識別を行うことができないため、 π 中間子や K 中間子、陽子の識別には不感領域が存在することになる。こうした粒子の識別は、ジェットのフレーバータグを行う上で重要となる。

3.2 Time of flight

Time of Flight (ToF) は粒子の飛行時間を示している。入射粒子の任意の飛行距離 d における ToF を測定することで、入射粒子の速度 v は

$$v = d/\text{ToF} \quad (3.1)$$

で求めることができる。また、入射粒子の速度は質量 m と運動量 p から、

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{m}{E} = \frac{p}{\sqrt{m^2 + p^2}} \quad (3.2)$$

で求めることができる。つまり、ToF と運動量を測定することで入射粒子の質量を求めることができ、粒子識別ができる。 π 中間子と K 中間子の識別を例とすると、ToF の精度を 50 ps

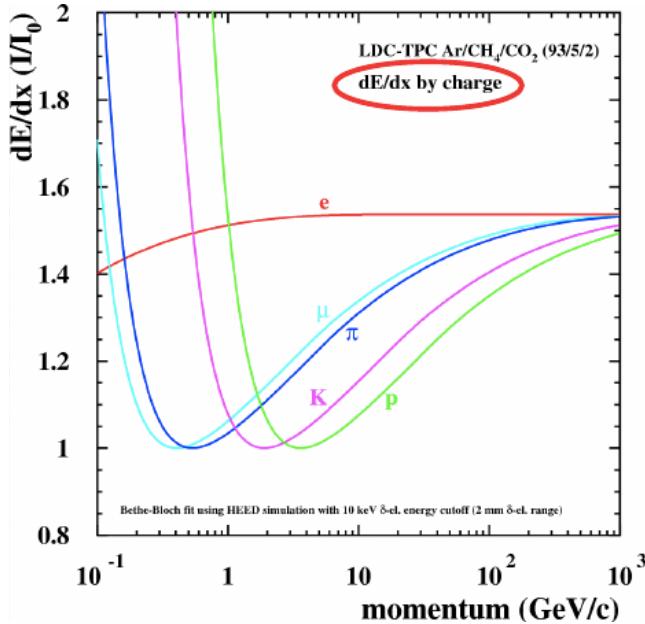


図 3.1 ILD の TPC における各粒子の運動量と dE/dx の関係 [8] (赤:電子、水色:ミュー μ 、青: π 中間子、桃: K 中間子、緑:陽子) 各線の交点は、それぞれの粒子の運動量と dE/dx が一致する点であるため、粒子識別が行えない。

とした時、 3σ で分離することを考えると、

$$\Delta m^2 = 2(m^2 + p^2) \frac{\sigma(\text{ToF})}{\text{ToF}} \sim 2p^2 \frac{\sigma(\text{ToF})}{\text{ToF}} < \frac{(m_K^2 - m_\pi^2)}{3} \quad (3.3)$$

となる。これを計算することで、 3σ で分離することができる運動量の最大値は、

$$p_{\max} < \sqrt{\frac{(m_K^2 - m_\pi^2)}{6 \cdot \sigma(\text{ToF})} \cdot \frac{d}{c}} \quad (3.4)$$

となる。

表 3.1 は π 中間子、 K 中間子、陽子の質量とそれぞれの粒子が $5 \text{ GeV}/c$ の時の $\beta (= v/c)$ の値を比較したものである。 $5 \text{ GeV}/c$ の粒子の識別を行うためには、この β の差を分離できる分解能が必要となる。

表 3.1 $5 \text{ GeV}/c$ での粒子による $\beta (= v/c)$ の比較

粒子	質量	$5 \text{ GeV}/c$ での $\beta (= v/c)$
π 中間子	$139 \text{ MeV}/c^2$	0.9996
K 中間子	$494 \text{ MeV}/c^2$	0.9951
陽子	$938 \text{ MeV}/c^2$	0.9829

ToF センサーを ECAL に設置することを考えた場合、図 2.8 のように崩壊点から ECAL までの距離は約 2.0-2.5 m である。崩壊点から 45 度方向での粒子検出を仮定すると、粒子の飛

行距離は約 3.0 m となる。表 3.2 は粒子の飛行距離 (d) を 3.0 m と仮定した時に、時間分解能が 100 ps、50 ps、10 ps のセンサーで 3σ の粒子識別ができる運動量を式 3.4 を用いて求めたものである。

表 3.2 各時間分解能のセンサーにおける 3σ の粒子識別ができる運動量

識別する粒子	時間分解能	3σ で識別できる運動量
π 中間子/ K 中間子	100 ps	1.94 GeV/c
	50 ps	2.74 GeV/c
	10 ps	6.12 GeV/c
K 中間子/陽子	100 ps	3.26 GeV/c
	50 ps	4.60 GeV/c
	10 ps	10.29 GeV/c

図 3.2 は、ILD の測定器において π 中間子と K 中間子の識別及び K 中間子と陽子の識別を、それぞれエネルギー損失 dE/dx のみ・ToF (時間分解能:50 ps) のみ・ dE/dx と ToF の両方で行なった時の識別能力をシミュレーションしたものある。横軸は粒子の運動量を表しており、縦軸は粒子識別の精度 (σ) に相当する separation power を表している。3.1 節の通り、 dE/dx のみでの粒子識別では separation power が 0 になる点が存在している。一方、本シミュレーションにおける ToF での粒子識別では、粒子の運動量が 5 GeV/c 付近までは、 dE/dx での粒子識別よりも識別能力が高い。これらの粒子識別方法を組み合わせることによって、粒子識別の不感領域を無くしつつ、識別精度の全体的な向上を図ることができる。そのため、我々は高い時間分解能を持つセンサーの開発を行っている。

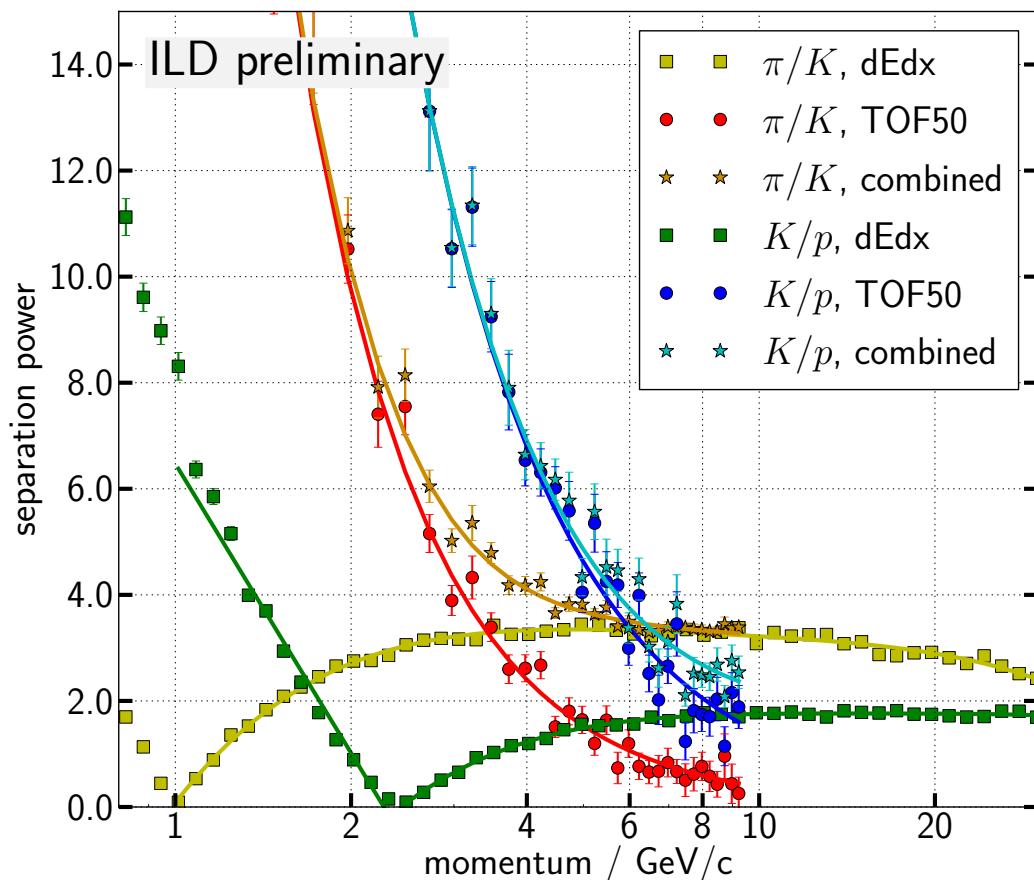


図 3.2 π 中間子/ K 中間子の粒子識別を、 dE/dx のみ (黄)・ToF (時間分解能:50 ps) のみ (赤)・ $dE/dx+ToF$ (橙) で行なった時の separation power 及び K 中間子/陽子の粒子識別を dE/dx のみ (緑)・ToF (時間分解能:50 ps) のみ (青)・ $dE/dx+ToF$ (水色) で粒子識別した時の separation power[9]

第 4 章

高時間分解能センサー

本章では、ILD の ECAL において粒子識別精度を向上させるために、高い時間分解能を持つシリコンセンサーの導入を提案し、シリコンセンサーからの信号読み出しに使用するセットアップについても記述する。

4.1 Low Gain Avalanche Diode

高時間分解能センサーとして、Low Gain Avalanche Diode (LGAD) の導入を提案する。LGAD は内部に増幅機構を持ったシリコンセンサーである。2.2 節で述べたように、シリコンセンサーにおいて入射粒子によって空乏層内に発生した電子-正孔対は、シリコンセンサーに印加された電圧による電場でドリフトされる。この時、ドリフトする電子がさらに電離し、電子-正孔対を生成するように十分な電場を印加することで、信号読み出しを行う N^+ 層の直下に形成された高濃度の P^+ 層において、電荷増幅を起こさせる。この増幅過程は、入射粒子によって生成された電子から次々に電子が生成されていく様子から、電子なだれ (avalanche) 増幅という。

図 4.1 は LGAD の内部構造を示した図である。LGAD は内部に増幅機構を持つため、信号が生成される空乏層が薄い設計であっても、十分な信号量を得ることができる。そのため、電子-正孔対が生成されてから信号読み出しが行われるまでの時間が早く、高い時間分解能を得ることができる。シリコン中の電子の移動速度は、十分高い電圧を印加した時に飽和する。この飽和速度は 10^5 m/s 程度 [10] であるため、 10^{-4} m の厚みのセンサーにおいて、入射粒子によって生成された電荷を全て収集するために必要な時間は 1 ns 以下となる。

時間分解能は、これに加えて増幅機構のゲインやノイズなどと関係する。信号の増幅率を上げる、もしくはノイズを抑えることで、信号取得に十分な量の電荷を電荷収集時間より短い時間で収集することが可能になる。

現在計画が進行中の、LHC をアップグレードした HL-LHC において、ATLAS グループでは、多重衝突事象 (pileup) の除去への応用を目的として LGAD の開発研究が行われている。図 4.2 は ATLAS グループによる LGAD の時間分解能の測定結果である。120 GeV の π 中

電子のビームを用いて、LGAD の増倍率 (gain) と時間分解能を求めた結果を示している。この実験では、26 ps の時間分解能が得られている。[12]

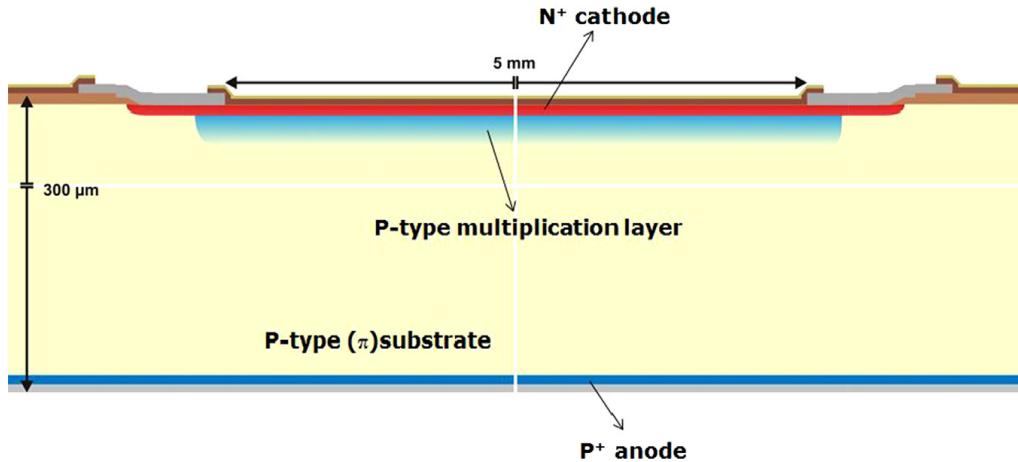


図 4.1 ATLAS グループが開発した LGAD の内部構造 [11]

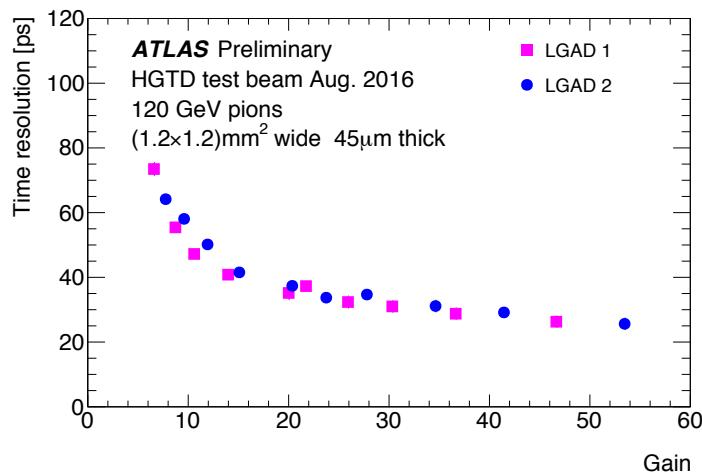


図 4.2 ATLAS グループで開発された 2 枚の LGAD センサー (受光面積: $1.2 \times 1.2 \text{ mm}^2$ 厚さ: 約 $45 \mu\text{m}$) の時間分解能 [12] この測定から 26 ps の時間分解能が得られた。

4.2 Avalanche Photo Diode

Avalanche Photo Diode (APD) は LGAD と同じように内部にアバランシェ増幅機構を持つ光検出器である。APD には、内部構造の違いによってリーチスルー型とインバース型がある。図 4.3 と図 4.4 はそれぞれの型の APD の内部構造を示した図である。リーチスルー型は 4.1 節で説明した LGAD とほぼ同じ内部構造を持っているのに対し、インバース型はリーチスルー型と逆に P 側入射構造となっている。また、アバランシェ増幅を起こす領域がセンサーの下層に配置されている。この構造により、インバース型ではリーチスルー型よりも Gain の一様性が高いという利点がある。

我々が ILD での ToF 測定のために検出したいのはエネルギーの高い荷電粒子であり、入射したほとんどの粒子はセンサーを貫通する。一方 APD は光検出器であり、可視光領域のようなほとんどがセンサー表面で吸収される光の検出を行うことが想定されている。そのため、APD の放射線検出器としての性能についてはまだ理解されていない部分が多い。本研究では、インバース型の LGAD の製作に向けて、リーチスルー型とインバース型の APD の放射線検出器としての基礎特性を評価し、ILC の検出器に実装する LGAD として利用可能かどうかの評価を行なった。

本研究では浜松ホトニクス社製の APD を数種類使用して測定を行なった。表 4.1 は、本研究で使用した APD の一覧 [13][14] である。 V_{br} は各 APD の降伏電圧 (breakdown voltage) であり、この電圧値付近まで電圧を印加することで、入射粒子に対して電子-正孔対が発生し、信号読み出しが行える。

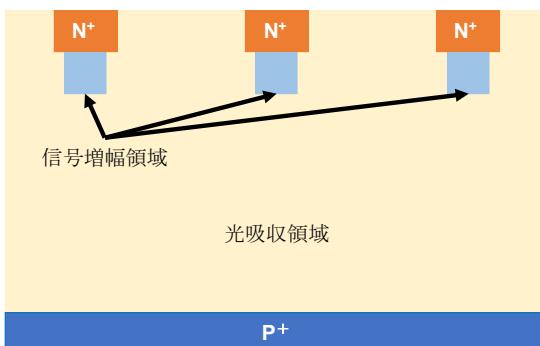


図 4.3 リーチスルート型内部構造



図 4.4 インバース型内部構造

表 4.1 本論文中の実験で使用した APD

APD serial No.	タイプ	V_{br} [V]	受光面の大きさ
S12023-10A	リーチスルート	139 V	ϕ 1 mm
S8664-10K	インバース	417 V	ϕ 1 mm
pkg-10	リーチスルート	約 250 V	ϕ 1 mm
pkg-20	リーチスルート	約 120 V	ϕ 1 mm
S3884	リーチスルート	159 V	ϕ 1.5 mm
S2384	リーチスルート	189 V	ϕ 3 mm
S8664-20K	インバース	425 V	ϕ 2 mm
S8664-55	インバース	433 V	5×5 mm ²

4.3 APD の先行研究

前述のように APD は光検出器として広く利用されているが、放射線検出器としての性能は未知の部分が多い。ここでは、九州大学で行われた S8664-20K の有感領域の測定を先行研究 [15] として紹介する。有感領域とは、APD における光吸収領域及び信号増幅領域のことを指している。先行研究では、ガンマ線源 ^{133}Ba 及びパルスレーザーを用いて、APD への印加電圧と APD の増幅率の関係を測定(図 4.5)した。また、ベータ線源 ^{90}Sr を使用してセンサーの ADC 分布を取得し、ADC 分布のピーク位置と APD の増幅率からセンサーの有感領域の導出を行なった。この研究では、S8664-20K の有感領域は数十 μm になるという見積もりになった。

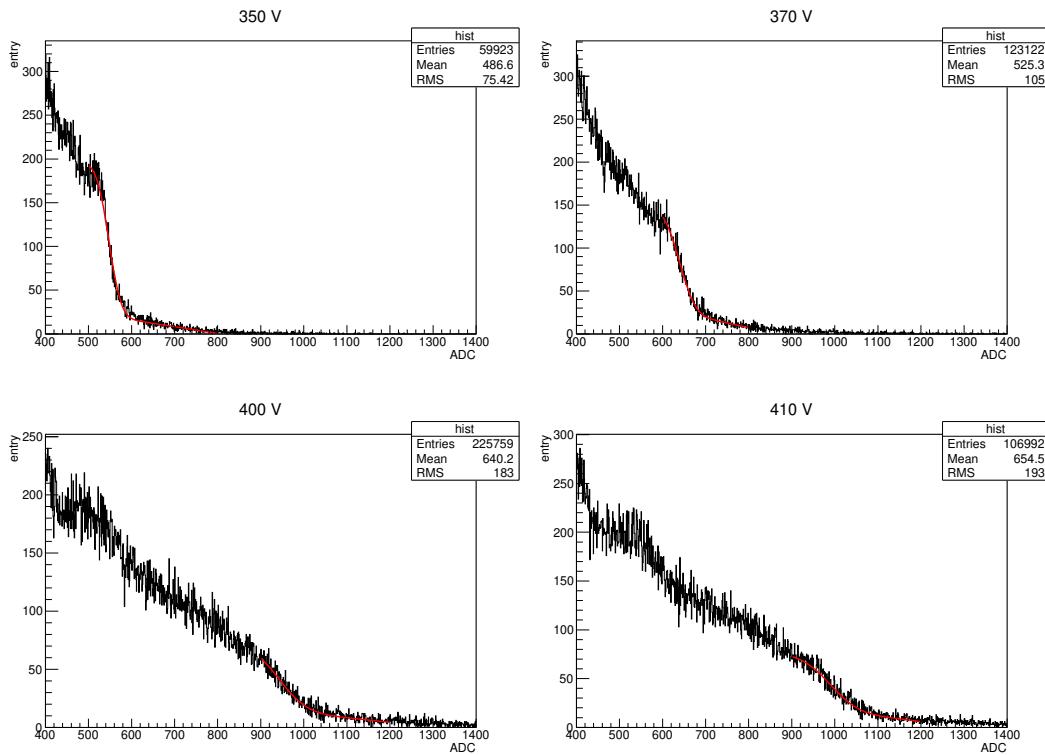


図 4.5 先行研究における S8664-20K のガンマ線による ADC 分布 印加電圧を 350 V, 370 V, 400 V, 410 V と増加させることで、コンプトン散乱によるカウント減少位置が ADC 値の高い方にシフトしていくことを確認している。

本研究では、先行研究とは異なる信号読み出し機器を使用することで、ADC 分布に加えて時間情報の測定も行った。また ADC 分布においても、センサーの信号処理時の閾値をあげることで、よりエネルギーの高い領域についての ADC 分布の取得を行なった。

4.4 信号読み出し

APD に入射した粒子のエネルギーやタイミングといった情報を適切に取り出すためには、APD で生成される電気信号を適切に読み出す必要がある。この時、アナログ信号である APD の電気信号をデジタル信号に変換して PC へと送らなければならない。本研究では、APD からの信号を読み出しとアナログ信号からデジタル信号への変換のために、SKIROC2cms と呼ばれる集積回路 (Application Specific Integrated Circuit, ASIC) 及び評価基板と呼ばれる ASIC の性能評価用の評価基板を使用した。

4.4.1 SKIROC2cms

SKIROC2cms はシリコン半導体検出器からの信号読み出しを行うために、フランスの Omega/IN2P3 グループ [16] によって開発された ASIC である。SKIROC シリーズは、SiWECAL における膨大な数のチャンネルからの信号読み出しの回路をコンパクト化するために開発された 64 チャンネルの ASIC である。本研究では SKIROC2cms を用いて APD からの信号読み出しを行なった。

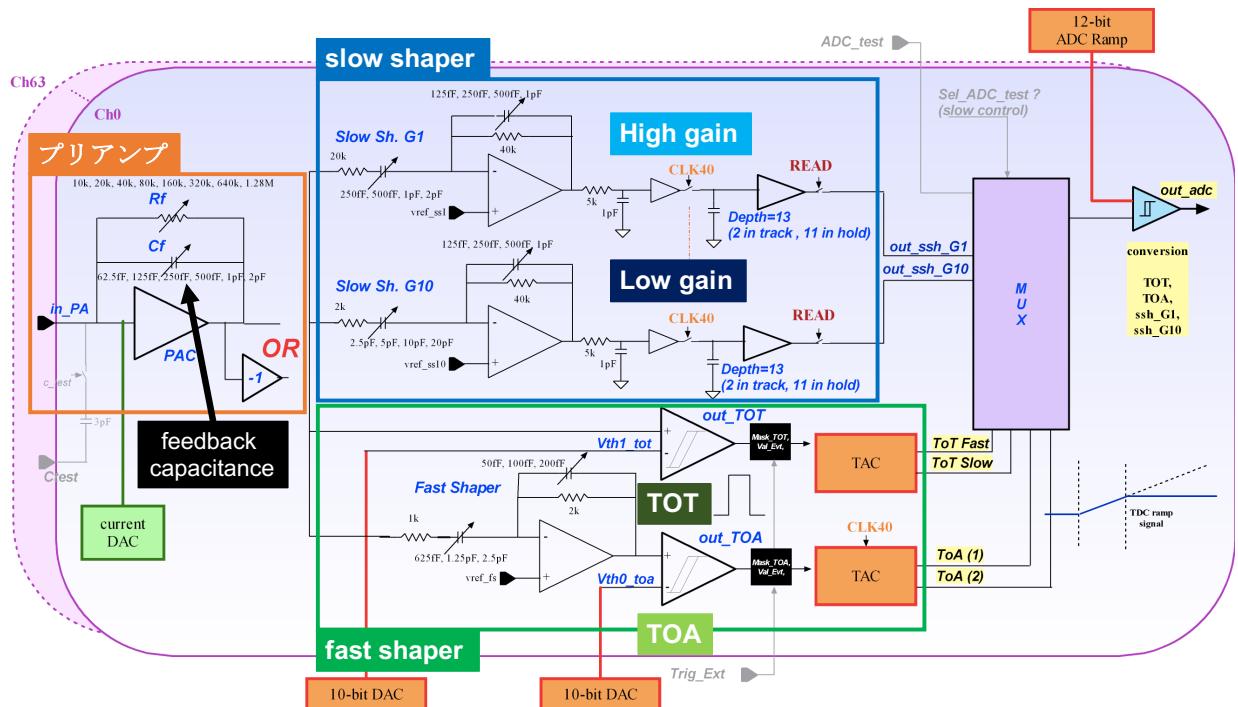


図 4.6 SKIROC2cms のアナログ回路図

図 4.6 は SKIROC2cms のアナログ信号の処理を行う回路を示している。SKIROC2cms に入力された信号はまずプリアンプと呼ばれる信号増幅回路によって増幅される。この時の増幅率は、プリアンプの帰還容量で調節することができる。また、SKIROC2cms はプリアンプで極性を反転させて出力する機構が備わっている。増幅された信号は fast shaper と slow

shaper と呼ばれる整形増幅器に分割して送られる。fast shaper の信号は、時間情報である Time Over Thereshold (TOT) と Time Of Arrival (TOA) を取得するために用いる。TOT とは信号が任意の閾値を超えていた時間のことであり、信号の波高に比例するため信号強度の測定に使用する。TOA とは信号が任意の閾値を超えたタイミングを示す時間情報である。TOT と TOA では、それぞれで設定した任意の閾値を超えた時にデジタルパルスを出力でき、測定のトリガーに用いることができる。一方 slow shaper では、信号の強度を増幅率が 10 の High gain と増幅率が 1 の Low gain でそれぞれ取得する。slow shaper に入った信号の情報は、13 個ある Memory cell (図 4.7) に記録される。このようにして記録された情報は、データ収集をストップさせる信号を入れることで、マルチプレクサー (MUX) に送られ、チャンネル順に wilkinson 型 12bitADC によってデジタル情報に変換され、メモリに保存される。その後保存されたデジタル情報は、外部からの読み出し開始信号を受けて、PC へ送信される。SKIROC2cms は、全 64 ch のうちいずれか 1 ch で TOA トリガーがかかった際に、任意の時間 (2.5 - 157.5 ns) 遅延したパルス信号を生成する機構が備わっている。本研究では、このパルス信号をデータ収集のストップ信号としてデータ収集を行った。

fast shaper の閾値やプリアンプの極性などの ASIC の挙動の調整は、ASIC のスローコントロールレジスタへの書き込みによって行う。我々は LabVIEW[17] 上に実装された制御ソフトウェアを行い、Field-Programmable Gate Array (FPGA) を通してスローコントロールの書き換えを行っている。

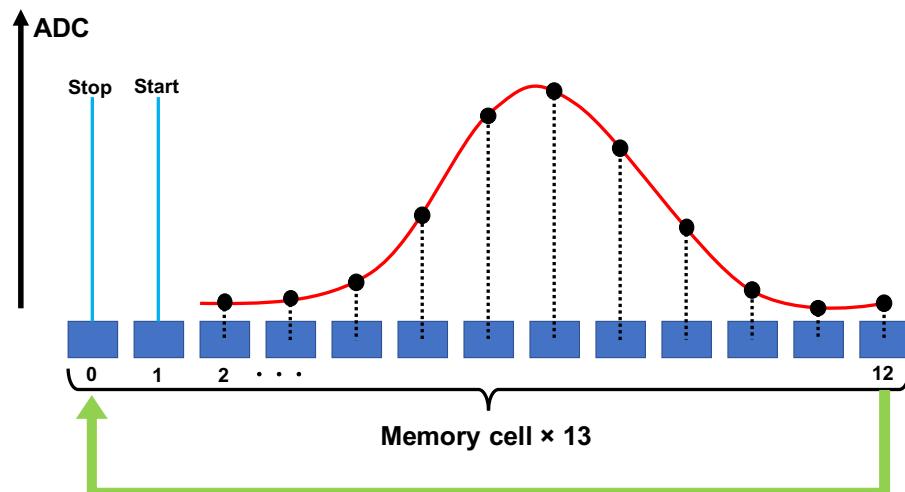


図 4.7 Memory cell の動作原理 Start 信号によって ADC 情報の取得が開始され、内部クロック (40 MHz) に合わせて ADC 情報を 13 個の Memory cell に記録し続け、Stop 信号によって取得を止める。Start と Stop の位置は信号が来るタイミングによって任意に決まり、Memory cell 12 まで埋まると 0 へと戻る。Start と Stop 位置の ADC 値は利用できないため、実質 11 個の Memory cell 分のリングバッファとなっている。

TOA は閾値を超えた信号について、次節で記述する評価基板上のパルス発生装置から FPGA を介して供給される内部クロックとの時間差を時間情報として取得している。内部クロックは 40 MHz と 50.52 MHz が備わっている。図 4.8 は TOA の測定原理を模式し

たものである。Clk40 (緑線) は 40 MHz の内部クロックを表しており、TOA の値はトリガー (青線) がかかってから次のクロック信号の立ち上がりまでの時間に対応している。また SKIROC2cms では内部クロックの立ち下がりまでの時間も同時に測定しており、立ち上がりまでの時間情報を TOA rise、立ち下がりまでの時間情報を TOA fall という。

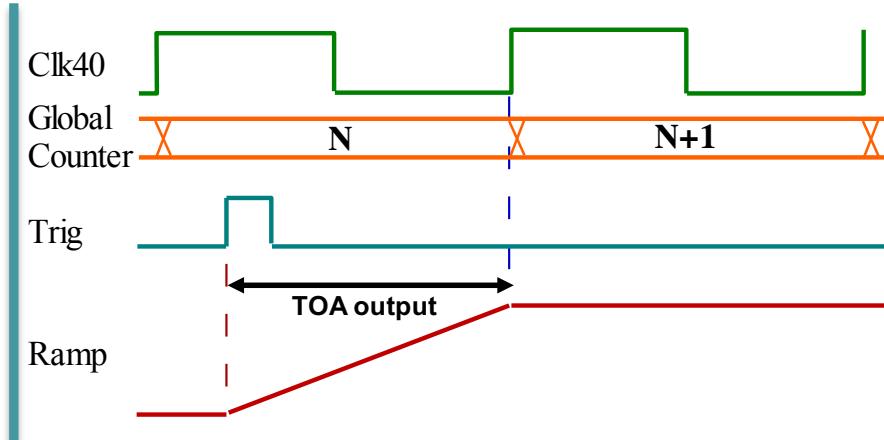


図 4.8 TOA の測定原理 緑線が内部クロック (40 MHz) を表しており、トリガー (青線) がかかると次のクロック信号の間まで電荷が溜まっていく (赤線)。この溜まった電荷量から TOA が得られる。

4.4.2 評価基板

評価基板とは、SKIROC2cms などの SKIROC シリーズの ASIC 性能評価を行うために、フランスの Omega/IN2P3 グループによって開発され、九州大学で改良された回路基板 [18](図 4.9) である。本研究では、シリコンセンサーからの信号を読み出すために、SKIROC2cms が実装された評価基板 (Testboard#6) を使用する。

評価基板は動作のために +6.5 V と -7.5 V の電圧をかける必要がある。評価基板には FPGA も実装されており、内部クロックや評価基板から出力される信号、評価基板に入力する信号の処理を行なっている。また、評価基板と PC の接続は USB で行う。

評価基板には、外部からの信号を入力するための端子や内部の信号を出力するための端子が備わっている。評価基板は時間情報の基準として通常は内部クロックを使用するが、外部からクロック信号を入れることもできる。また、センサーなどを接続して、センサーの信号を読み出すこともできるが、パルスジェネレーターなどの信号発生装置からの信号を擬似信号として入力することもできる。これらの端子には便宜的に名前が付けられている。表 4.2 は本研究で使用した端子とその役割をまとめたものである。以下本論文中では、これらの端子の名称を使用する。

この基板を用いたデータ取得 (Data Acquisition, DAQ) には主に 2 つの方法がある。1 つ目は LabVIEW スクリプトを用いる方法である。図 4.10 は LabVIEW 上での DAQ 画面の画像である。このように取得したデータが視覚的にわかりやすく示されるという長所がある一

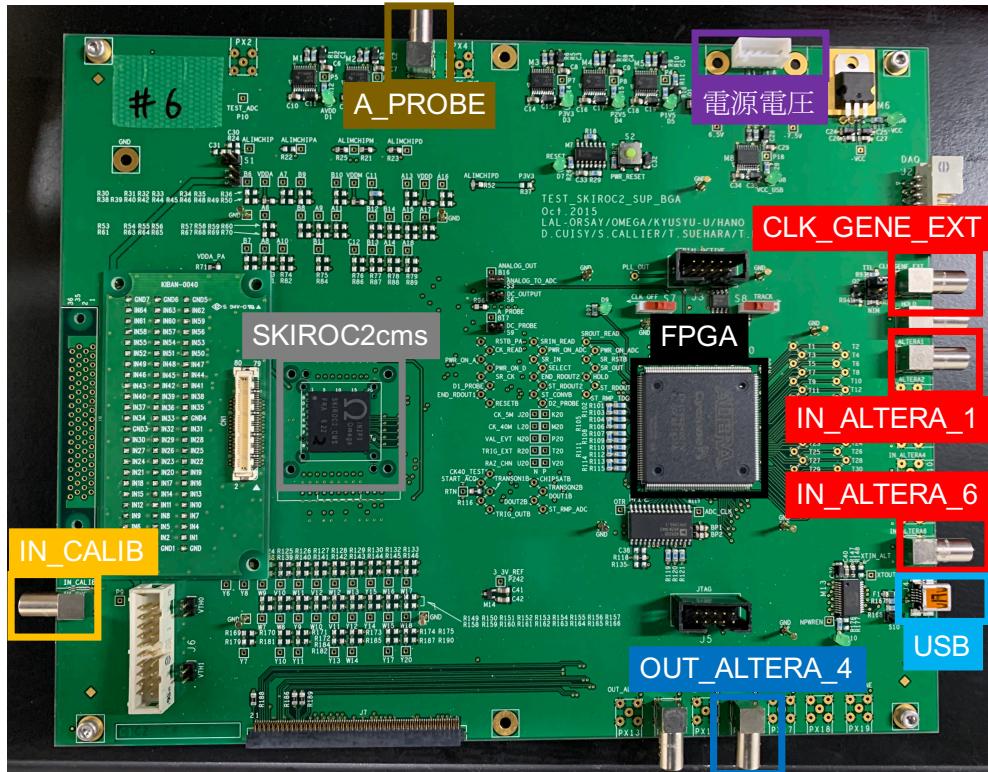


図 4.9 評価基板 (図中の中央部に SKIROC2cms が半田付けされている)

表 4.2 評価基板の端子の名前とその役割

端子の名称	入力する信号及び出力される信号
CLK_GENE_EXT	外部からのクロック信号を入力するための端子
IN_ALTERA_1	データ収集を止める信号を入力するための端子
IN_ALTERA_6	データ収集を開始する信号を入力するための端子
OUT_ALTERA_4	ASIC の持つ 64 チャンネルのうち 1 チャンネル以上でトリガーがかかった際にパルス信号を出力する端子
IN_CALIB	擬似信号を入力するための端子
A_PROBE	ASIC 内部でのアナログ信号を指定して出力できる端子

方、基本的な動作を手動で行う必要がある。また、LabVIEW であらかじめ用意されている解析の方法でしかデータを扱うことができないという短所もある。2 つ目は C++ コードを用いる方法である。評価基板上の ASIC や FPGA のパラメータや設定は複数の 8 bit のレジスタと呼ばれる記憶素子によって表される。そのため、特定のレジスタの値を書き換えることで、ASIC や FPGA の設定を変えることが可能である。この方法では、測定内容に応じた C++ コードを作成し ASIC や FPGA の制御を行うことで、パラメータの変更などを自動で行いながら DAQ を行うことができる。

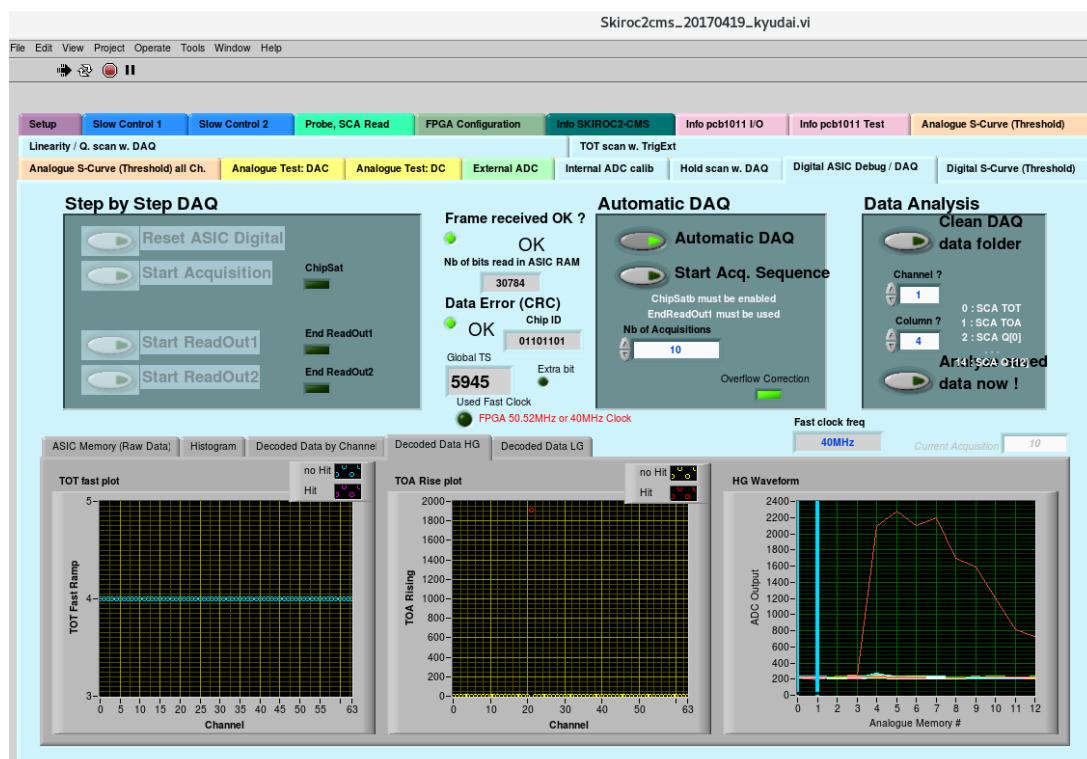


図 4.10 LabVIEW での DAQ 画面

第 5 章

放射線源等を用いた APD の基礎特性評価

本章では、九州大学で行った放射線源による APD の基礎特性評価および、実験機器によって生じる誤差測定の手法とその結果について記述する。

5.1 測定セットアップ

放射線源を用いた測定では、第 4 章で記述した評価基板を用いて APD の基礎特性評価を行った。評価基板上にセンサー基板(図 5.1)を接続し、さらにセンサー基板上に APD を実装することで、APD の信号の読み出しを行なった。このように接続することで、センサー基板上の APD の信号が評価基板の ASIC の特定のチャンネルで処理される。処理されるチャンネルは、図中の中央部にある 8 組の金属パッドのうちいずれか 1 組を導通させることで選択できる。

図 5.2 は本測定時のセットアップを模式的に表した図である。はじめに、Start Acquisition 信号を評価基板に入れることで、評価基板でのデータ取得を開始する。その後、前述のように評価基板には、ASIC の持つ 64 チャンネルのうち 1 チャンネル以上に閾値を超える信号が入ると、評価基板の OUT_ALTERA_4 から信号が出る機能があるため、OUT_ALTERA_4 からの信号を同じく評価基板上のデータ取得を止めるための IN_ALTERA_1 に入れている。外部から Testboard への信号の詳細は表 5.1 に記載している。

表 5.1 外部からへの信号及び電源電圧の詳細

Testboard 電源電圧	+6.5 V, -7.5 V
APD 電源電圧	可変(APD の種類に応じて設定)
Start Acquisition 信号	Pulse, 10 Hz, 3.3 V(Offset : 1.65 V)

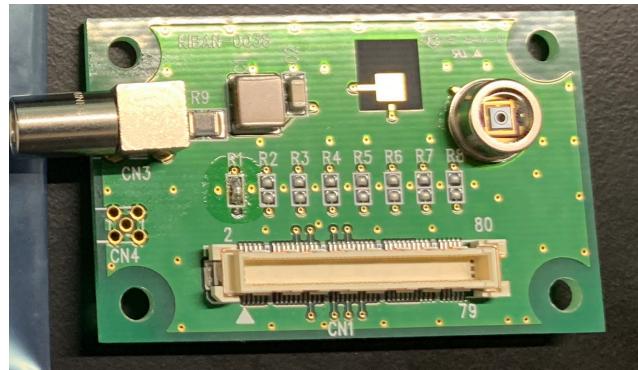


図 5.1 評価基板に接続するセンサー基板 図中の右上には APD が実装されており、図中の中心部に R1-R8 のいずれかを導通させることで、センサーの信号を ASIC のどのチャンネルで処理するかを変えることができる。この図では R1 が半田付けによって導通されている。

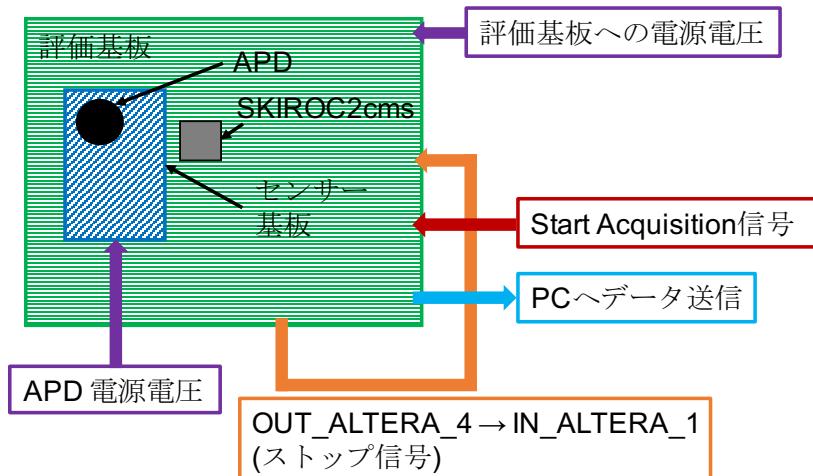


図 5.2 放射線源を用いた測定時のセットアップを模式した図

放射線源はガンマ線源 ^{133}Ba とベータ線源 ^{90}Sr を使用した。本測定で使用した線源について表 5.2 に示す。ガンマ線源を用いた測定では、線源からのガンマ線とシリコンが相互作用を起こす。 ^{133}Ba から放出されるガンマ線のエネルギーはほとんど 500 keV 以下であるため、電子陽電子対生成はほとんど起こらず、光電効果やコンプトン散乱による効果が見られると考えられる。シリコンとガンマ線の反応においては、約 100 keV 以下においては光電効果が支配的であり、200-400 keV の領域ではコンプトン散乱による反応が見られるようになる。一方 ^{90}Sr からはエネルギーの高いベータ線（最大 2.28 MeV）が放出されるため、ほとんどの場合で検出器を貫通する。 ^{133}Ba と ^{90}Sr の崩壊とその時のエネルギーの詳細は付録 A に記載している。

本測定では、ノイズ対策と遮光のために APD を接続した評価基板をアルミニウム製の箱に入れて測定を行なった。図 5.3 は測定時の線源や APD の配置や距離を模式したものである。アルミニウムの箱には、APD が位置する場所に穴が空いており、放射線源が直上におけるようになっている。また放射線源はアルミニウムの箱の上にコリメータとして穴の空いた真鍮の

表 5.2 本測定で使用した線源

核種	半減期	放射能 [Bq]
⁹⁰ Sr	28.9 年	約 9.5×10^3
¹³³ Ba	10.5 年	約 6.7×10^5

板を挟み、その上に置いて測定を行った。この時の放射線源と APD との距離は約 10 mm である。

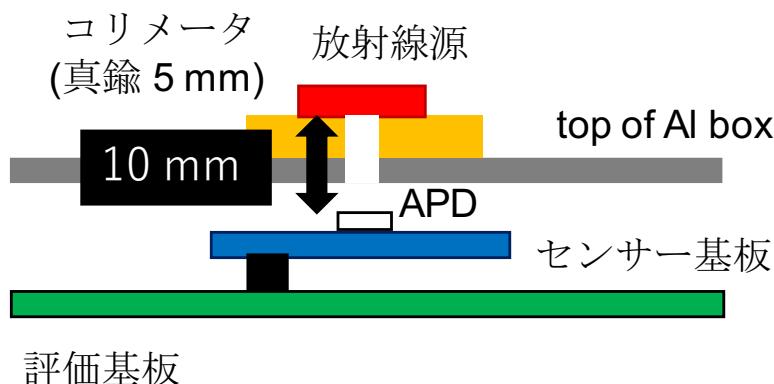


図 5.3 測定セットアップを横から見た図

5.2 放射線源を用いた測定の結果

5.2.1 ベータ線源を用いた測定結果

ベータ線源を使用した測定時の各 APD に印加した電圧値を表 5.3 に示す。この電圧値は各 APD の降伏電圧 V_{br} とした時、 $V_{br} - 10[V]$ である。ただし、S8664-55 については電圧値が $V_{br} - 10[V]$ でノイズの影響が大きかったため、電圧値をさらに落として 415 V での測定を行った。図 5.4 と図 5.5 は、表 4.1 に示した全ての APD に対してベータ線源を当てた際の ADC の High gain と Low gain の応答を評価したものである。図 5.4 から分かるように、High gain では ADC 値 2200 付近で信号が飽和している。これは High gain ではこれより大きな信号に感度を持っていないことを示している。一方 Low gain のヒストグラムでは、High gain で起きているような飽和現象は起きておらず、大きい信号に対する APD の応答が確認できる。

これらのヒストグラムの比較から、インバース型の APD よりもリーチスルーモードの APD の方が得られる ADC 値が平均的に大きく、増倍率が高いという結果が得られた。また、受光面積の一番大きい S8664-55 は他のインバース型の APD よりも増倍率が高いという結果になつたが、これは閾値のズレによるものの可能性も考えられる。他の APD では受光面積による顕

表 5.3 ベータ線源を使用した測定時の各 APD への印加電圧

APD No.	印加電圧 [V]
S12023-10A	129
S8664-10K	407
pkg-10	240
pkg-20	110
S2384	149
S3884	179
S8664-20K	415
S8664-55	415

著な違いは見られなかった。

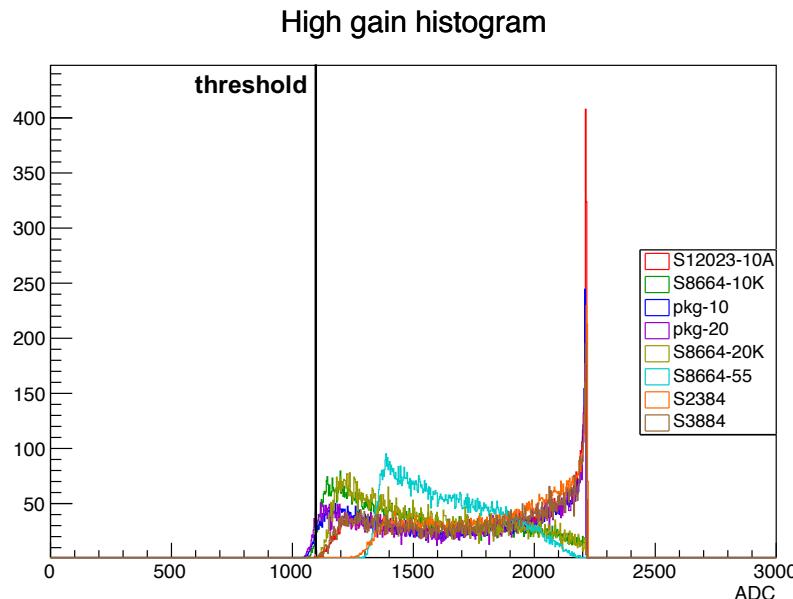


図 5.4 ^{90}Sr を用いた測定の各 APD の ADC (High gain) ADC の閾値 (threshold) が 1100 付近に設定されている。

図 5.6 は、図 5.5 のヒストグラムのうちの S12023-10A のみを抜き出したものである。このヒストグラムにおいて ADC 値が 500-600 のあたりでカウント数が減少する部分を確認できた。この現象は、APD の増倍率のばらつきによるものであると考えられる。ベータ線源による ADC 値の分布は、理想的にはランダウ分布になる。APD の増倍率が一様であれば、1 つのランダウ分布が得られるが、ADC の増倍率にばらつきがある場合、複数のランダウ分布が組み合わさった分布になる。図 5.7 は複数のランダウ分布が組み合わさった時の ADC 分布の概形を示している。この時、増倍率のばらつきのうち高い増倍率でのランダウ分布がの効果によって、ADC カウントの減少が起こると考えられる。

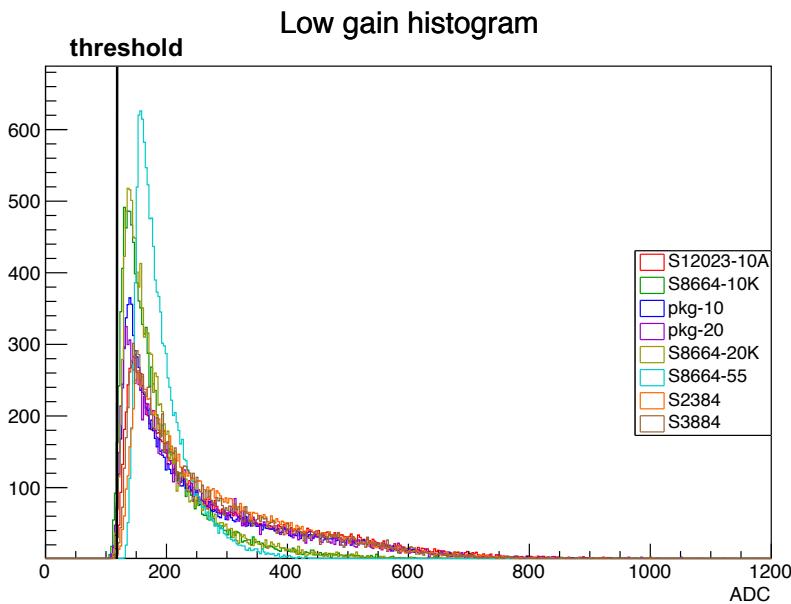


図 5.5 ^{90}Sr を用いた測定の各 APD の ADC (Low gain) ADC の閾値 (threshold) が 120 付近に設定されている。

この位置を特定するため、図 5.6 のようにフィッティングを行った。フィッティング関数 $f(x)$ は誤差関数と一次元関数を組み合わせた

$$f(x) = \frac{2a}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x-\mu}{\sigma}}^{\infty} e^{-t^2} dt + bx + c \quad (5.1)$$

を用いてフィッティングを行った。この位置を用いて、5.3 節では S12023-10A の有感領域を求める。

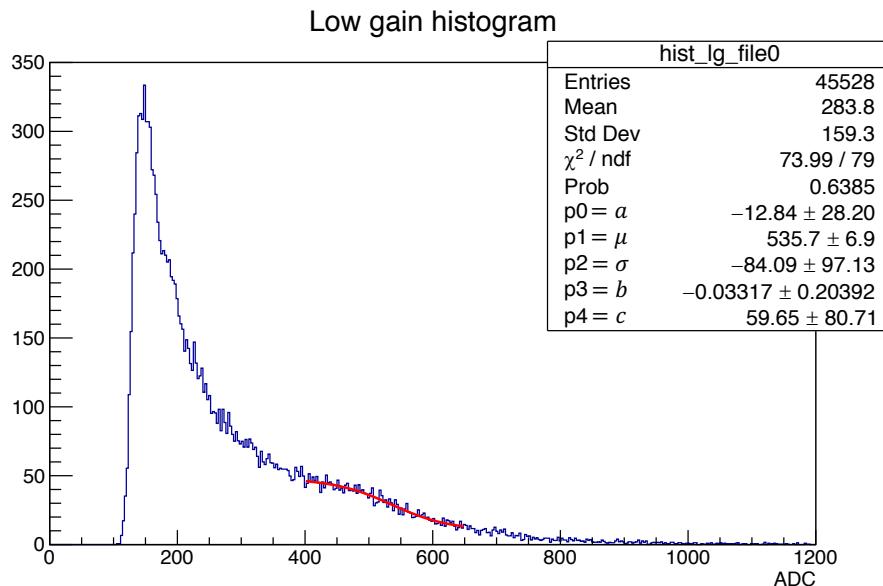


図 5.6 ^{90}Sr を用いた測定の S12023-10A の ADC (Low gain) フィッティング関数のパラメータ a, μ, σ, b, c はそれぞれ p_0, p_1, p_2, p_3, p_4 に対応している。

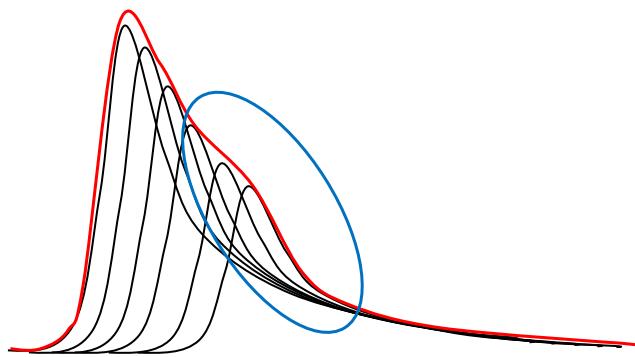


図 5.7 複数のランダウ分布が組み合わさった時の関数の概形 増倍率ごとのランダウ分布(黒線)が組み合わさることで赤線のようなADC分布になる。この時、高い増倍率によるランダウ分布の効果でADCカウントの減少(青枠)ができる。

5.2.2 ガンマ線源を用いた測定結果

図 5.8 は S12023-10A の APD に対して、印加電圧を変えながらガンマ線源 ^{133}Ba を当てた時の ADC (Low gain) の分布である。これらの図より、各分布で ADC カウントが急激に減少する場所があることが確認できる。また、印加電圧を上げていくことで APD の増倍率が上がり、ADC カウントが減少する場所が ADC 値の大きい方にシフトしていることが分かる。

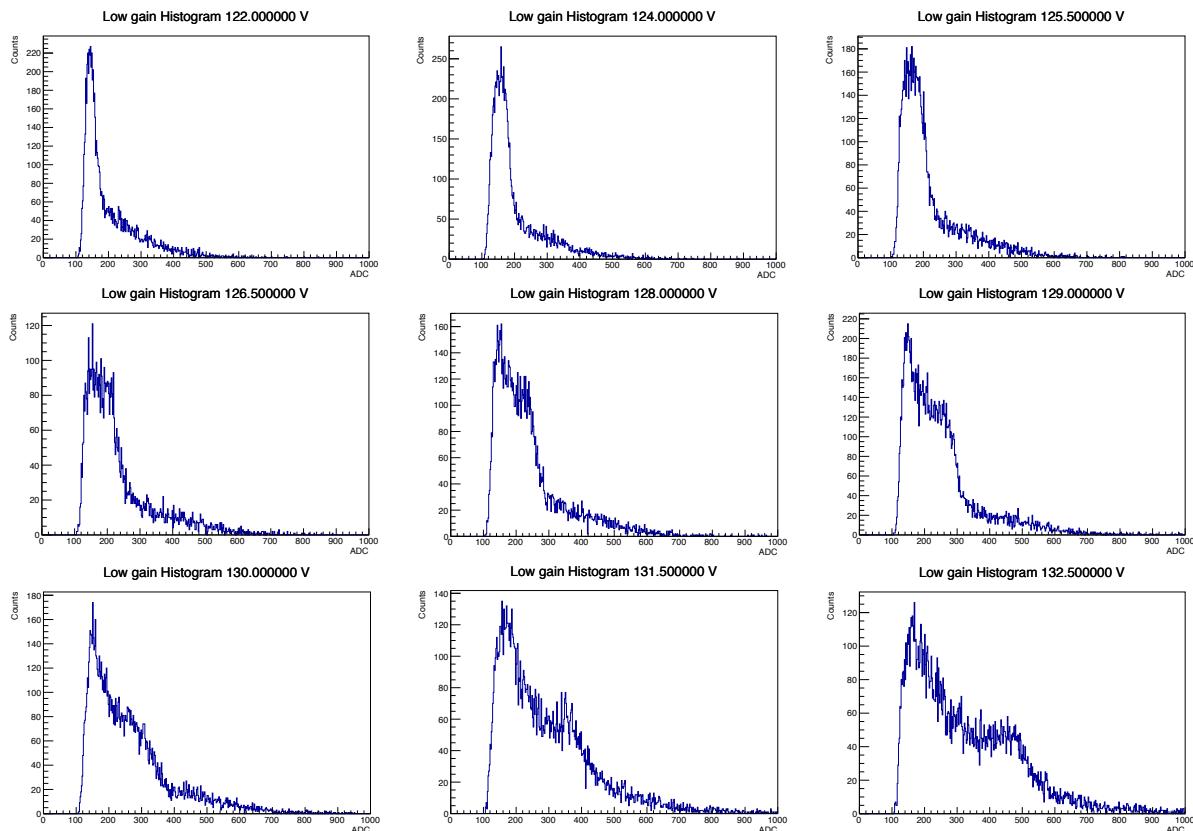


図 5.8 S12023-10A における ^{133}Ba での ADC (Low gain) 分布 APDへの印加電圧 122-132.5 V

ADC カウントが減少している場所について、 ^{133}Ba のスペクトルから 207 keV のコンプトンエッジであると考えられる。この場所についてベータ線源の測定時に用いたフィッティング関数（式 5.1）と同様の関数でフィッティングを行なった。図 5.9 は印加電圧 129 V の ADC 分布に対してフィッティングを行った結果である。この時の誤差関数の中央値（誤差関数のパラメータ： μ ）をコンプトンエッジの位置とした。このようにして取得した各印加電圧時のコンプトンエッジに対応する ADC 値は表 5.4 のようになった。この値から APD の Gain を求めることができる。

入射粒子がシリコンの中で 1 対の電子-正孔対を作るのに必要な電離エネルギーは 3.62 eV である。あるエネルギーを持つ入射粒子が APD で全てのエネルギーを落とす場合、APD で生成される電子-正孔対の数は入射粒子のエネルギーを 3.62 で割った数になる。一方、APD で検出する電子の数は ADC から計算することができる。図 5.10 は SKIROC2cms に Low Gain における ADC の値と Charge の相関である。 τ は slow shaper の shaping time を表しており、本測定では $\tau = 40$ ns で測定を行なった。図 5.10 から得られる $\tau = 40$ ns の直線の傾きを a とすると、 μ/a で収集した電荷量が分かる。これを電気素量 e で割ることで、APD で検出する電子の数が求めることができる。Gain とは入射粒子が生成する電子がセンサーで検出するまでに増幅された割合であるため、

$$\text{Gain} = \frac{\mu}{a} \cdot \frac{1}{e} \cdot \frac{3.62 \text{ eV}}{2.07 \times 10^5 \text{ eV}} \quad (5.2)$$

で求めることができる。

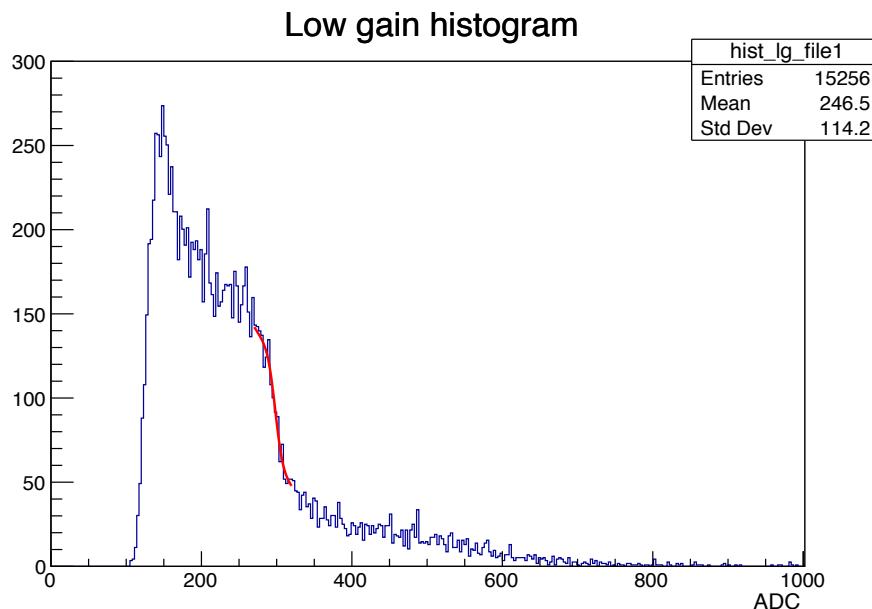
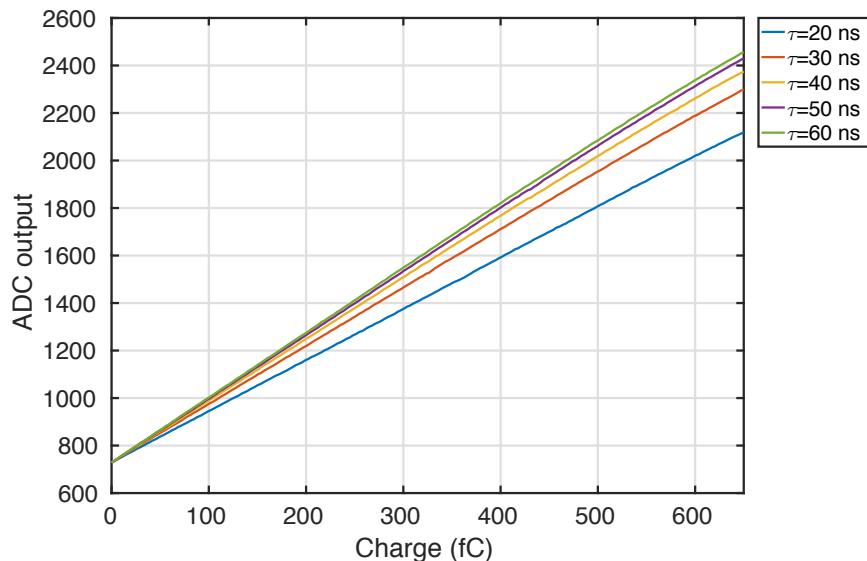


図 5.9 S12023-10A における ^{133}Ba での ADC (Low gain) 分布フィッティング結果 本図は印加電圧は 129 V のものである。

図 5.11 は各印加電圧における Gain を求めた結果である。印加電圧を増加させると Gain が

表 5.4 各印加電圧におけるコンプトンエッジの位置

印加電圧 [V]	コンプトンエッジの ADC 値
122	158.875
124	183.691
125.5	208.638
126.5	224.032
128	258.568
129	298.162
130	325.425
131.5	426.233
132.5	513.996

図 5.10 SKIROC2cms Low gain における ADC と charge の相関 (τ は slow shaper の shaping time を表している。)

指數関数的に上昇していくことが確認できる。

5.3 有感領域の測定

5.2 節の結果を用いることで、APD の有感領域 (Active thickness) の測定を行なった。本論文では、ベータ線源を用いた測定の結果において、S12023-10A の最大 Gain によるランダウ分布の効果が確認できたため、S12023-10A についての有感領域の測定を行なった。

図 2.1 に示したように、MIP のエネルギーを超えた粒子のエネルギー損失はほぼ一定の値になる。そのため、ベータ線はほとんど MIP のように振る舞うと考えてよい。MIP の粒子が

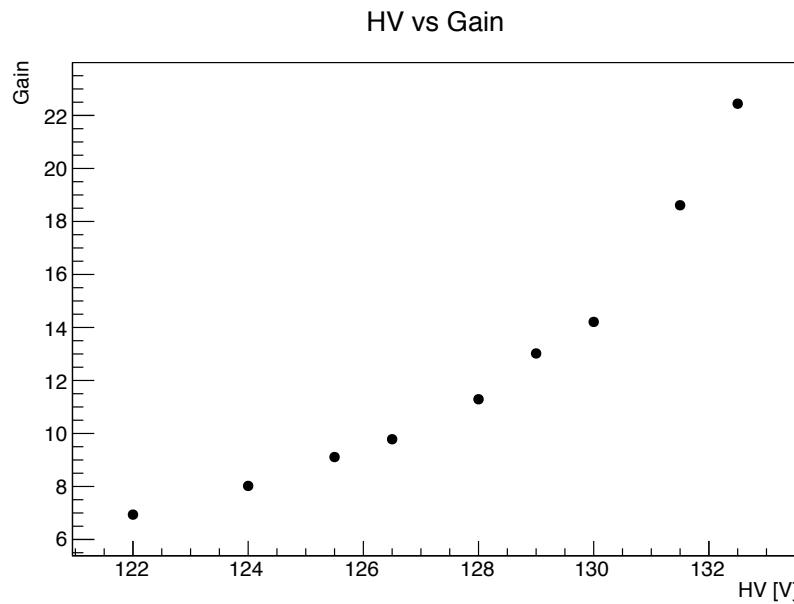


図 5.11 S12023-10A における印加電圧と Gain の相関

1 μm 厚のシリコンで落とすエネルギーは 3.73×10^2 eV である。これらから、APD の有感領域は

$$\text{Active thickness} = \frac{\mu}{a} \cdot \frac{1}{\text{Gain}} \cdot \frac{3.62}{3.73 \times 10^2} \cdot \frac{1}{e} \quad (5.3)$$

で求めることができる。 μ はベータ線源での測定結果から、Gain はガンマ線源の測定結果から得られたものを入れると、

表 5.5 S12023-10A の有感領域

印加電圧 [V]	Gain	Active thickness [μm]
129	13.02	~ 1000

という結果が得られる。しかし、APD の有感領域は数十 μm であるとされている。この結果の考察として、Gain の測定値が小さいことが挙げられる。浜松ホトニクスの規格 [13] によれば、 $V_{\text{br}} = 139$ V の S12023-10A に 129 V を印加した時の Gain は 500-1000 であるとされている。Gain がこの値であると仮定すると、Active thickness は

表 5.6 Gain に規格値を引用した場合の S12023-10A の有感領域

印加電圧 [V]	Gain (規格値)	Active thickness [μm]
129	500-1000	13-26

という結果になる。

本結果における Active thickness の差は Gain の大きさの違いに起因しており、Gain の違いは、ガンマ線による相互作用が空乏層ではないところで起きていることが考えられる。

5.4 TOA の較正

4.4 節で説明した SKIROC2cmsにおいて、測定で得られる TOA の値は、時間情報を表しているものの TOA の値をそのまま時間の値として読むことはできない。そのため、TOA の値と時間の値の関係をあらかじめ知っておく必要がある。本研究では、データ取得開始から任意の時間遅らせた信号を入力した時の TOA の値を調べることで、TOA と時間との関係を求めた。

測定は図 5.12 のようなセットアップを行った。本測定では、データ取得開始から入力信号が来るまでの時間を調整可能にするため、FPGA の内部クロックではなく外部から同周波数のパルス信号 (40 MHz) を入れた。この信号と同期させ、任意の時間遅延させたパルス信号 (10 Hz) を入力することで、測定を行った。これらの同期信号は KEYSIGHT 33622A[19] を使用して出力した。各信号は SKIROC2cms の全 64 チャンネル (ch 0~63) のうち、ch 27, 30, 33, 36, 39 の 5 チャンネルに信号を入力した。SKIROC2cms は ch ごとにわずかに誤差があるため、5 チャンネルのうち特定の 1 チャンネルの TOA 分布の中央値を基準として、各チャンネルにおける TOA の値の中央値の補正を行った。その後 5 チャンネルの全イベントの TOA をガウス関数でフィットすることで、任意の時間遅延させた信号に対する TOA の値を求めた。今回 TOA の較正では ch 30 と ch 33 を基準とした場合の結果を求めた。

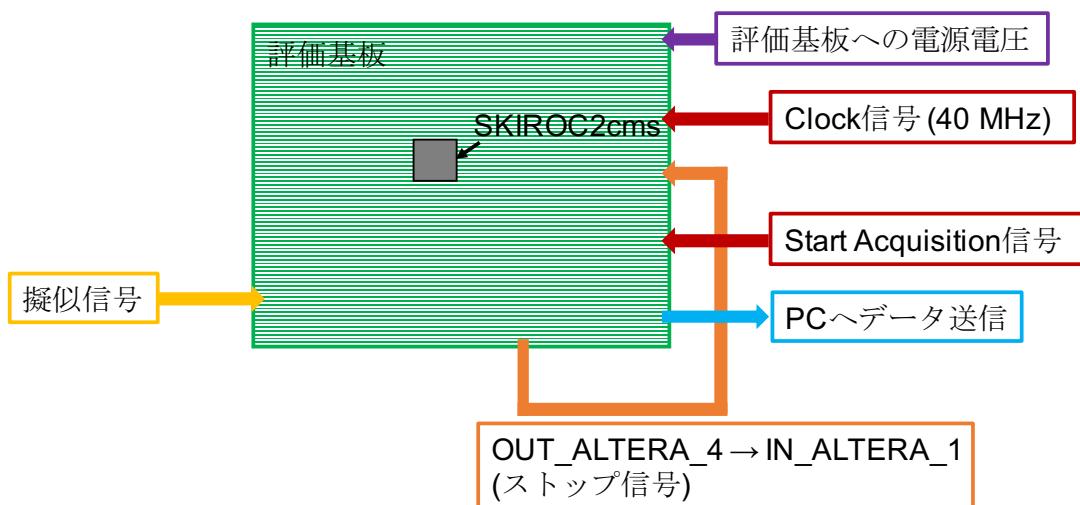


図 5.12 TOA 較正の測定時のセットアップを模式した図

図 5.13 は SKIROC2cms の ch 30, ch 33 における TOA と時間 (ns) の相関を表している。クロック信号が 40 MHz であるため、25 ns ごとに TOA の値がループするようになっている。測定は 0 ns から 35 ns の範囲で主に 5 ns 刻みで行なったが、20 ns から 25 ns にかけて

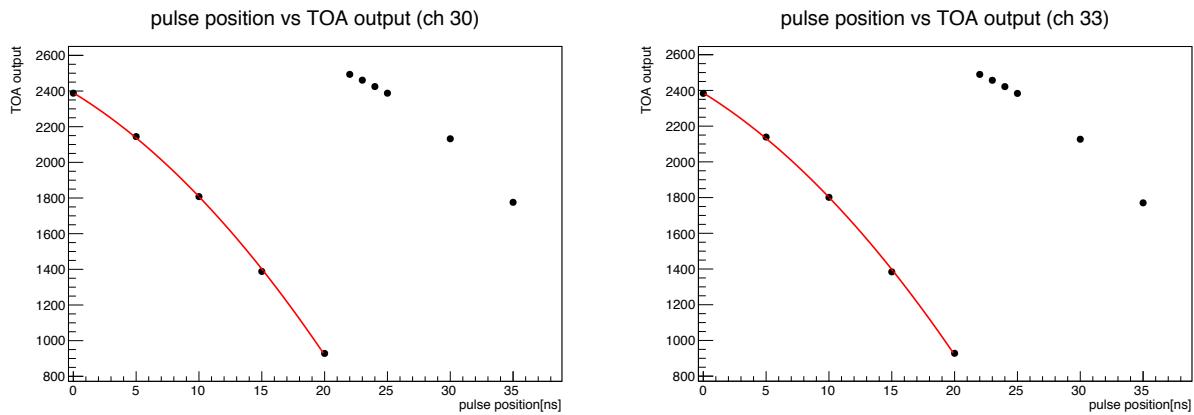


図 5.13 左図:ch 30 における TOA と時間の相関 右図:ch 33 における TOA と時間の相関
どちらも 0 ns から 20 ns の範囲を二次関数でフィッティングしている。

は TOA の値がループする境界にあたるため、22, 23, 24 ns についても測定を行った。

この結果より TOA と時間との関係は二次関数的になっているということが分かった。また、チャンネルによって関係性に多少のばらつきがあることが確認できた。以下の実験で TOA の値を時間に変換する際には、この結果より得られたフィッティング関数を用いて TOA と時間の変換を行う。

5.5 Timewalk 測定

Timewalk とは、入力された信号の大きさによる時間情報の誤差のことである。この誤差は ASIC でのデータ収集の際に発生する。図 5.14 は Timewalk が生じる原因を図示したものである。閾値を超えたタイミングの時間情報が記録されるため、同タイミングに信号が来た場合でも、信号強度が大きく波高の高い信号の方が時間情報が長くなる。時間分解能の測定を行う場合は、このような Timewalk によって生じる誤差を補正する必要がある。本研究では、APD の時間分解能の測定を行う(第 6 章で記述する)ため、Timewalk の測定を行う。

測定のセットアップは TOA の較正を行った時と同様(図 5.12)のセットアップで行った。Timewalk の測定においても、データ収集開始から擬似信号が来るまでの時間を一定にしたいため、外部から擬似信号と周波数を同期させたパルス信号をクロック信号として入れている。本測定では、クロック(40 MHz)に対して 5 ns 遅延させた擬似信号(10 Hz)を入れた。ch 27, 30, 33, 36, 39 の 5 チャンネルに 16 MIP から 75 MIP(1 MIP を 4.2 fC としている)まで擬似信号を入れ、5 チャンネルの全イベントの TOA の値のヒストグラムから得た中央値を各測定点での TOA とした。今回の測定では ch 33 を基準とした結果を SKIROC2cms の Timewalk とした。

図 5.15 は、Timewalk 測定の結果である。入力信号の信号強度が大きくなるに従って TOA の値が収束していく様子が確認できる。第 6 章における時間分解能の評価では、各イベントの ADC 値から入力された Charge を求めることで、Timewalk の効果による誤差を補正して時

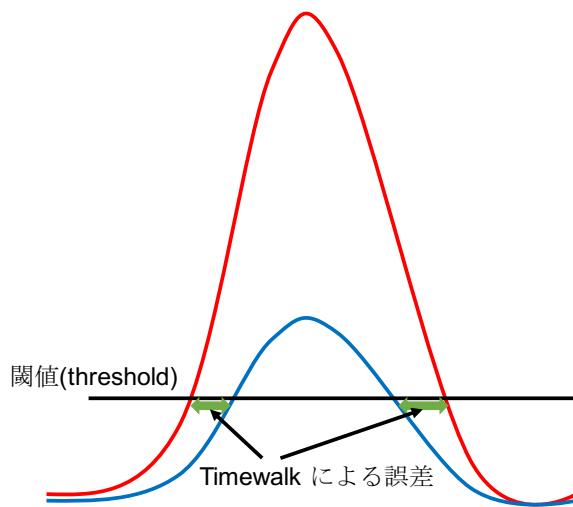


図 5.14 Timewalk が生じる原因を示した図 大きい信号（赤線）の方が小さい信号（青線）より信号が閾値を超えるタイミングが早くなるため時間情報に差が生まれる

間分解能を求める。この時、測定イベントの ADC 値から求めた Charge と図 5.15 の隣り合う点同士を結んだ線分を対応づけることで、Timewalk による TOA の誤差を補正する。

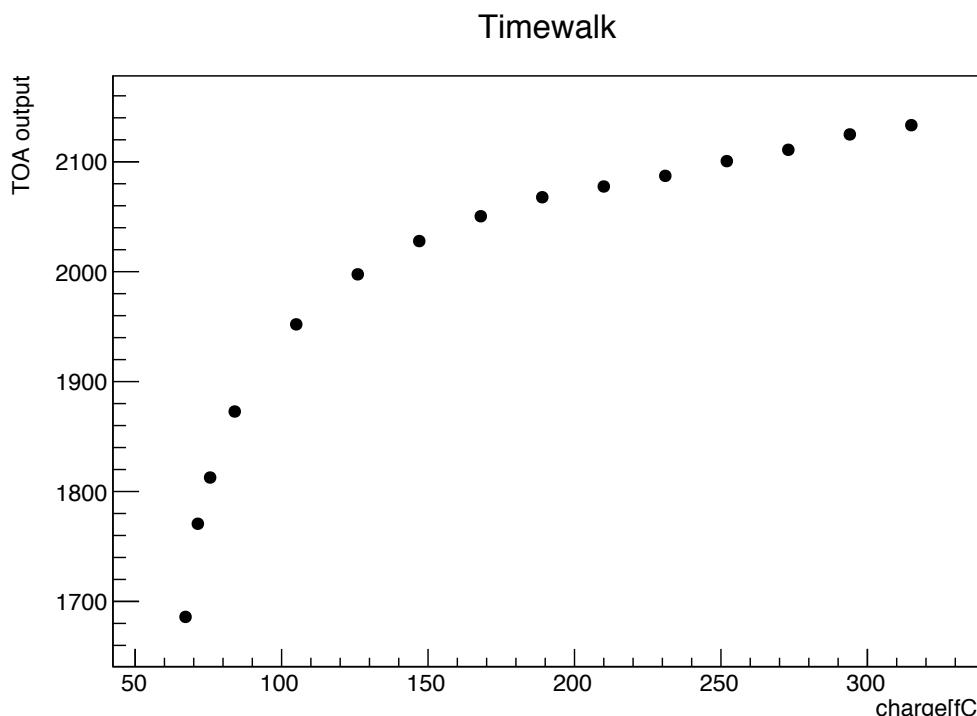


図 5.15 Timewalk の効果を測定したプロット クロック信号から 5 ns 遅延させた信号を Charge を変えながら入力した時の TOA 値の変化を測定した。

5.6 Jitter 測定

Jitter とは、ASIC や評価基板など機器によって生じるランダムな誤差に起因するばらつきである。測定機器に全く同じ信号が入力されたとしても、ASIC や基板などで信号処理を行う過程で取得される信号情報に誤差が生まれる。5.5 節の Timewalk と同様に、時間分解能の測定を行う場合には Jitter による誤差を考慮しておく必要がある。

測定セットアップは TOA 較正の測定と同様のセットアップ(図 5.12)で行なった。擬似信号を入力したチャンネルも Timewalk 測定と同様に ch 27, 30, 33, 36, 39 の 5 チャンネルを使用し、入力した擬似信号は 10 Hz のパルス信号で、17 MIP から 75 MIP までの範囲で測定した。また、Jitter についても ch 33 を基準としたものを SKIROC2cms の Jitter とした。

Charge vs Jitter (RMS 5 channels)

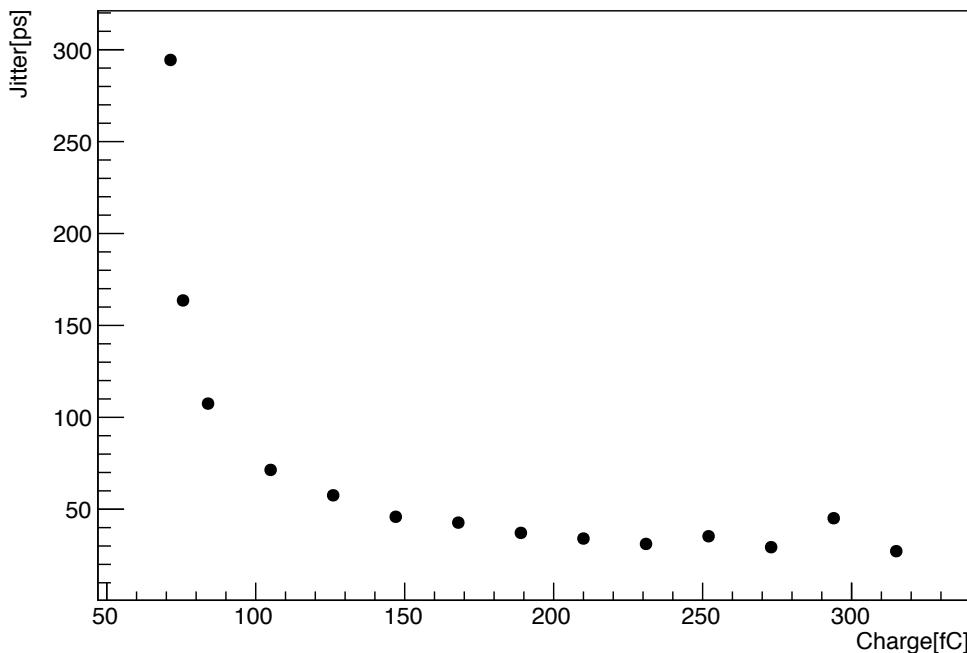


図 5.16 Jitter 測定の結果のプロット 入力信号の Charge を変えながら TOA 値のばらつき (Jitter) を測定した。電荷量が 150 fC 以上の信号でほぼ一定の値をとる。

図 5.16 は、Jitter 測定を行なった結果である。図中の横軸は入力した擬似信号の電荷量、縦軸はその時の Jitter を示している。この測定では、擬似信号を入力した 5 チャンネルのうち特定の 1 チャンネルを基準として、二乗平均平方根 (Root Mean Square, RMS) を取ることで結果を導出した。図 5.16 から分かるように、入力信号の大きいほど Jitter は小さくなっている。また、擬似信号の電荷量が一定以上になると Jitter の値は約 30 ps に収束するということが分かった。Jitter の効果は補正はできないが、時間分解能の測定の際には、この結果に基づいた測定結果のばらつきを考慮する。

第 6 章

陽電子ビーム照射実験による APD の性能評価

本章では、東北大学電子光理学研究センターで行った陽電子ビームを用いた APD の性能評価実験について記述する。実験は、2019 年 11 月 18 日から 11 月 22 日にかけて行った。

6.1 東北大学電子光理学研究センター

東北大学電子光理学研究センターは、宮城県仙台市に位置する東北大学附置の理学研究センターである。2011 年より全国共同利用・共同研究拠点として運営を開始しており、3 つのビームラインを提供している。図 6.1 は東北大学電子光理学研究センターの概略図である。今回の実験では図中の GeV ガンマ照射室を使用して陽電子ビームの照射を行った。

6.2 GeV ガンマ陽電子ビーム

GeV ガンマ照射室では荷電粒子除去用双極電磁石 (RTAGX) を使用することで、最大エネルギー約 1 GeV の電子ビーム及び陽電子ビームを得ることができる。このビームは、入射用線形加速器及びブースター・ストレージリング (BST リング) によって生成される。入射用線形加速器から入射される約 90 MeV の電子を、BST リングで最大約 1.3 GeV まで加速してリング内に貯蔵する。このリング上を周回する電子ビームに炭素ファイバーを挿入することで、制動放射による高エネルギーのガンマ線を GeV ガンマ照射室に入射させる。RTAGX の上流に金属箔が設置できるようになっており、この金属箔によってガンマ線ビームから電子・陽電子対生成を発生させ、RTAGX の磁場で電子ビーム及び陽電子ビームを取り出している。

今回の実験では、陽電子ビームのエネルギーを約 600 MeV に設定し、照射実験を行った。

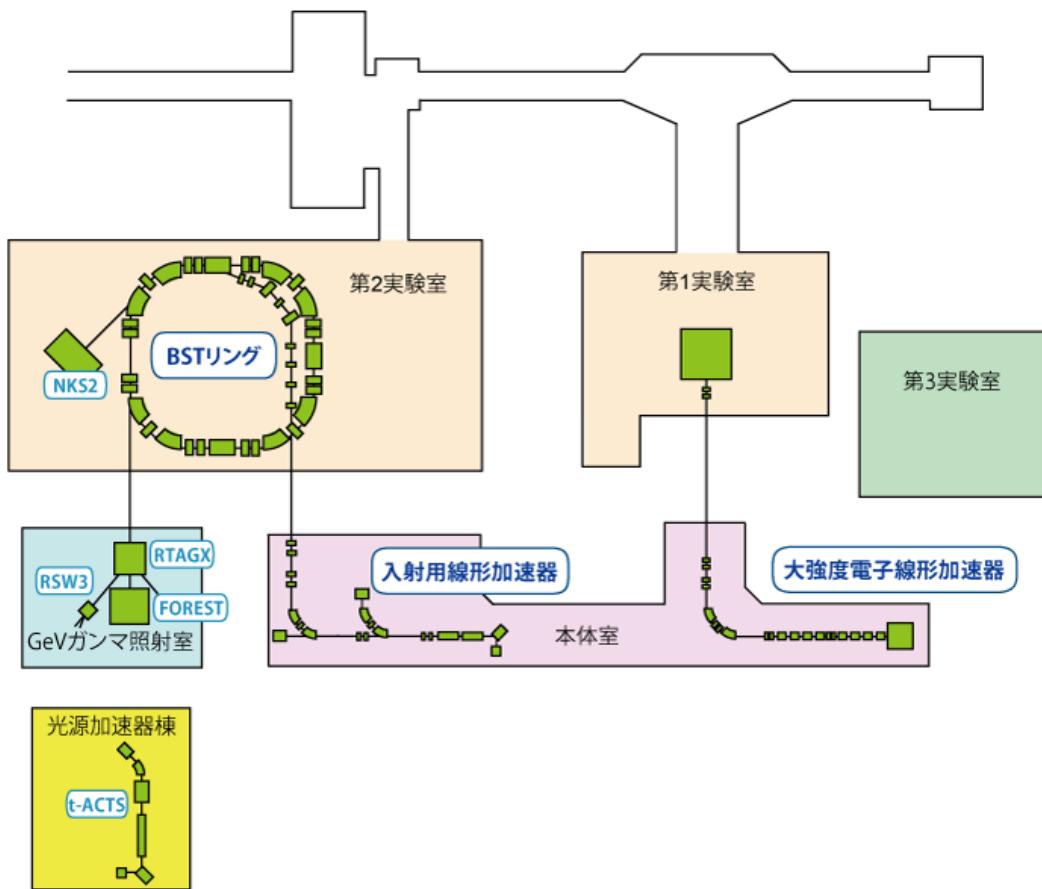


図 6.1 東北大学電子光物理学研究センターの概略図 [20]

6.3 測定セットアップ

6.3.1 治具作成

ビーム照射実験を行うにあたって、評価基板及び APD をビーム方向と垂直な面に固定するために、治具の作成を行った。図 6.2 は組み上げた治具の写真である。アルミフレームを用いて評価基板 3 枚がビームに垂直な面に設置できるような構造になっている。また、ビーム軸の方向を y 方向とすると、ビームとセンサーの位置の調整を行うために、 x 方向と z 方向に可動域 100 mm の自動ステージが取り付けられている。

6.3.2 測定機器のセットアップ

図 6.3 はテストビーム時の測定器セットアップの概略図である。センサー基板はさらに別のセンサー基板と接続することが可能であり、複数枚同時に評価基板に接続することで、複数のセンサーからの信号を同時に読み出すことができる。今回の実験では表 4.1 にある APD を各 2 または 3 個用意し、各測定において 4 ~ 6 個の APD を接続した状態で、陽電子ビームを照

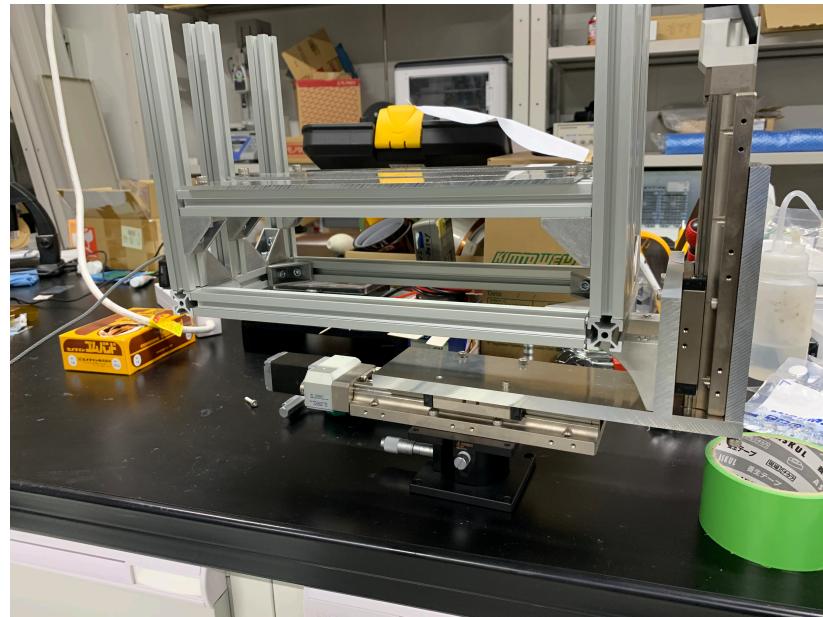


図 6.2 ビーム照射実験のための治具

射する実験を行なった。

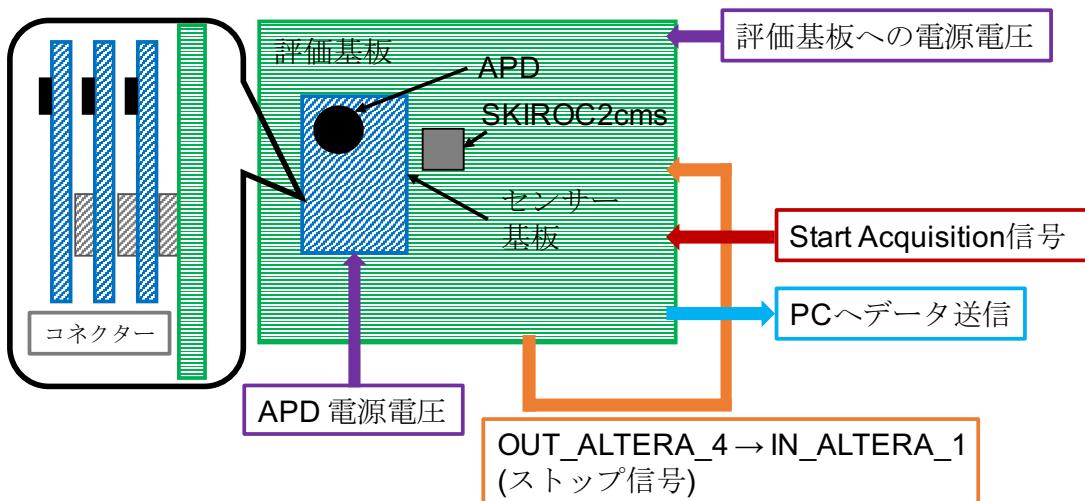


図 6.3 テストビーム時の測定機器セットアップの概略図 センサー基板は重ねることで複数のセンサーを評価基板で同時に読み出すことができる。

図 6.4 は評価基板やセンサーなどを実際にビームラインに設置した時の写真である。図中の左のビームパイプから陽電子ビームが照射される。図中では評価基板は 2 枚設置してあるが、うち 1 枚は別の半導体センサーが接続されており、APD の測定は 1 枚の評価基板で測定を行った。

測定機器のノイズを軽減するために、各センサー基板に接続した APD をアルミナ化ドマイラーで遮光した。また評価基板などの測定機器全体をメッシュシートで覆うことでノイズ対策を行なった。図 6.5 はこれらのノイズ対策を行なった様子の写真である。アルミナ化ドマイラーは薄く光を通してしまうが、二重にすることで光を遮っている。アルミナ化ドマイ

ラーを使用した理由は、ビームライン上の物質量を減らし。ビームの散乱をできる限り抑えるためである。



図 6.4 ビームラインに設置した測定機器



図 6.5 測定機器のノイズ対策 (左図：測定機器を金属布で覆った状態 右図：Connector board 上の APD をアルミナ化ドマイラーで遮光)

6.4 実験結果

はじめに今回のビーム照射実験に使用した APD の種類と各 APD の動作電圧 V_{op} 、接続チャンネルを表 6.1 に示している。同種の APD がそれぞれ 2 ~ 3 個ずつあるため、各 APD の型番の末尾に便宜上の数字をついている。

次に、本実験結果に使用した測定の概要を表 6.2 に示している。本実験では、APD に電圧を印加するための電源電圧の数に限りがあったため、同種の APD には同じ電源電圧を使用

表6.1 ビーム照射実験で使用したAPD

APD serial No.	V_{op}	接続 ch	APD serial No.	V_{op}	接続 ch
S12023-10A-1	124.3 V	ch 27	S8664-55-1	382.7 V	ch 39
S12023-10A-2	125.0 V	ch 30	S8664-55-2	382.9 V	ch 42
S12023-10A-3	120.6 V	ch 36	pkg-10-1	約 230 V	ch 36
S8664-10K-1	376.3 V	ch 33	pkg-10-2	約 230 V	ch 39
S8664-10K-2	377.0 V	ch 39	pkg-10-3	約 230 V	ch 42
S8664-10K-3	375.9 V	ch 42	pkg-20-1	約 110 V	ch 27
S2384-1	140.9 V	ch 30	pkg-20-2	約 110 V	ch 30
S2384-2	143.0 V	ch 33	pkg-20-3	約 110 V	ch 33
S8664-20K-1	379.9 V	ch 39			
S8664-20K-2	376.0 V	ch 42			

した。そのため、同種のAPDで動作電圧が異なる場合、ノイズによる効果を減らすために動作電圧の低い方を基準として印加する電圧値を決定した。

表6.2 本実験結果に使用した測定の概要

測定 No.	接続した APD	印加電圧	測定時間
Run 1	S8664-55-1, S8664-55-2	415 V	160 分
Run 2	S2384-1, S2384-2	145 V	110 分
	S8664-20K-1, S8664-20K-2	400 V	
Run 3	S12023-10A-1, S12023-10A-2, S12023-10A-3	118 V	125 分
	S8664-10K-1, S8664-10K-2, S8664-10K-3	400 V	
Run 4	pkg-10-1, pkg-10-2, pkg-10-3	225 V	135 分
	pkg-20-1, pkg-20-2, pkg-20-3	105 V	

6.4.1 基礎特性評価

陽電子ビーム照射におけるAPDの応答

基礎特性の評価のため、ビームを照射した際の各APDのADCの応答について確認した。図6.6から図6.12は各APDの陽電子ビーム照射におけるHigh gainとLow gainのADC分布である。これらのADC分布はRun1-4で取得したデータのものである。同種のAPDで分布に差があるものは、動作電圧の違いによるGainの差によるものであると考えられる。また、S8664-10K(図6.7)のch 39とpkg-10(図6.11)のch 42に接続したAPDのADC分布が確認できないものは、トリガーがかかったイベントが0であったためである。この理由とし

ては、データ取得時の評価基板や ASIC の不具合によるものであると考えている。

Fast shaper の閾値が第 5 章の線源での測定時よりも低いため、ADC 値の低いイベントが多く、ADC 分布に顕著な差は見られないが、線源での測定と同様、受光面積の大きいものほど Gain が大きく、インバース型よりもリーチスルー型の APD の方が Gain が大きいという結果になった。

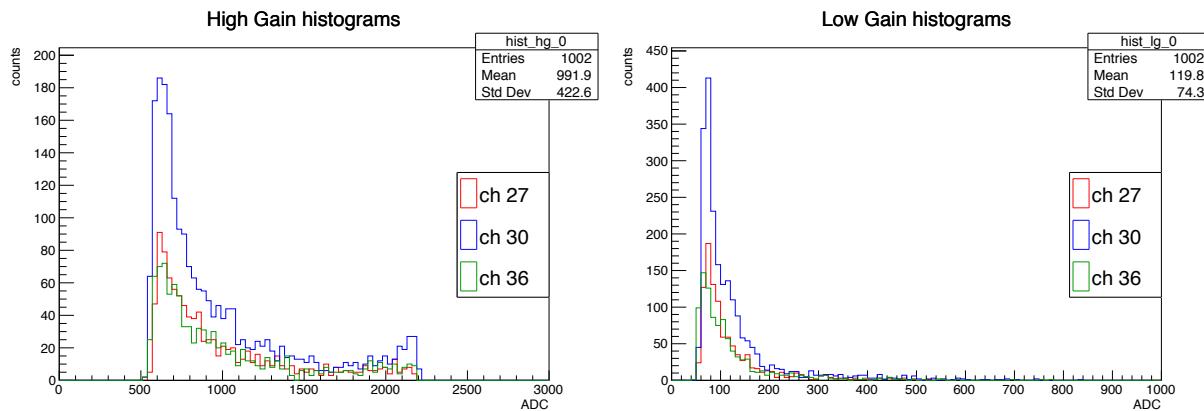


図 6.6 S12023-10A の ADC 分布

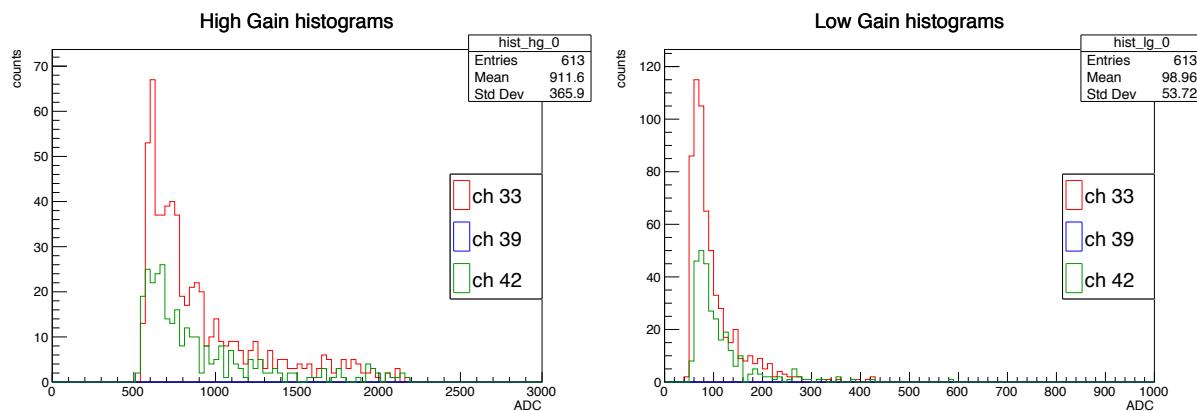


図 6.7 S8664-10K の ADC 分布

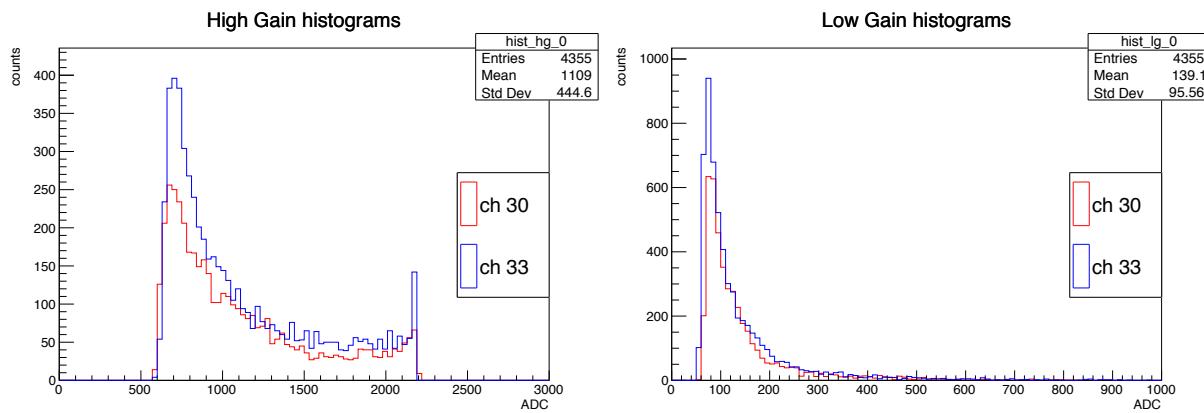


図 6.8 S2384 の ADC 分布

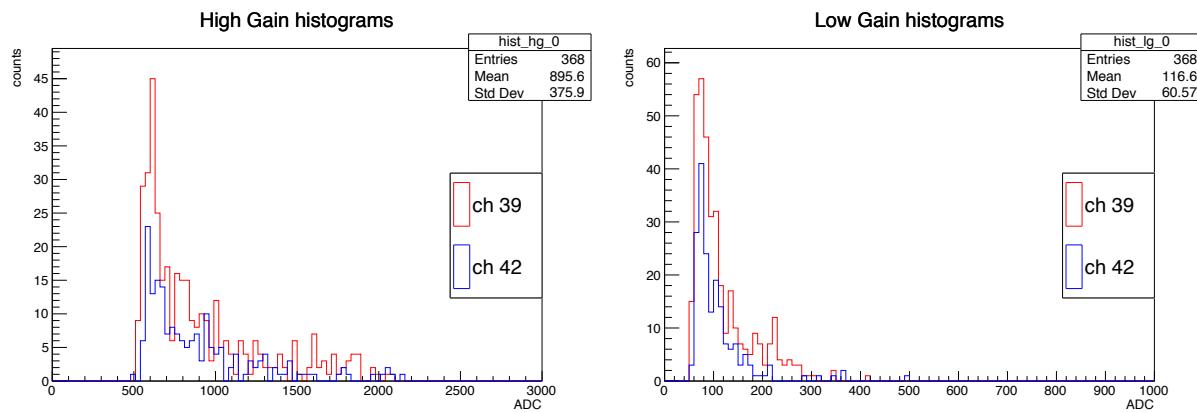


図 6.9 S8664-20K の ADC 分布

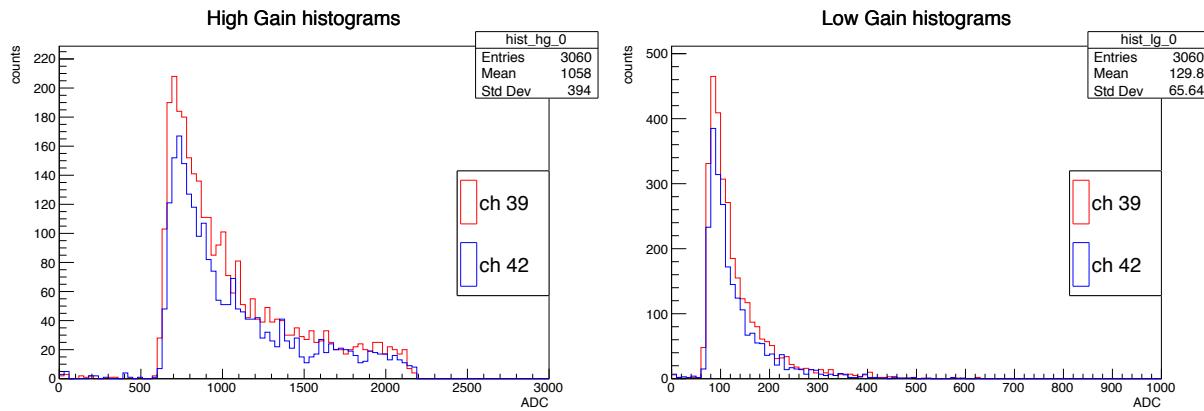


図 6.10 S8664-55 の ADC 分布

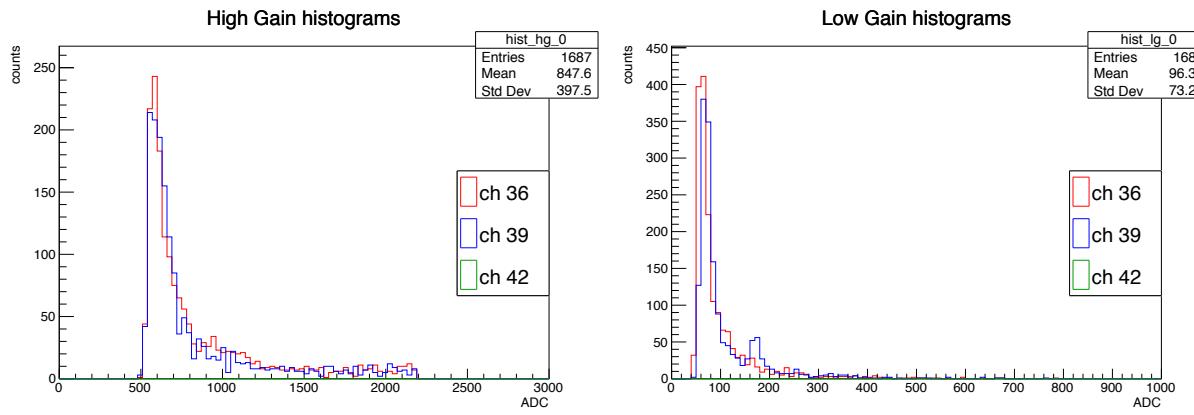


図 6.11 pkg-10 の ADC 分布

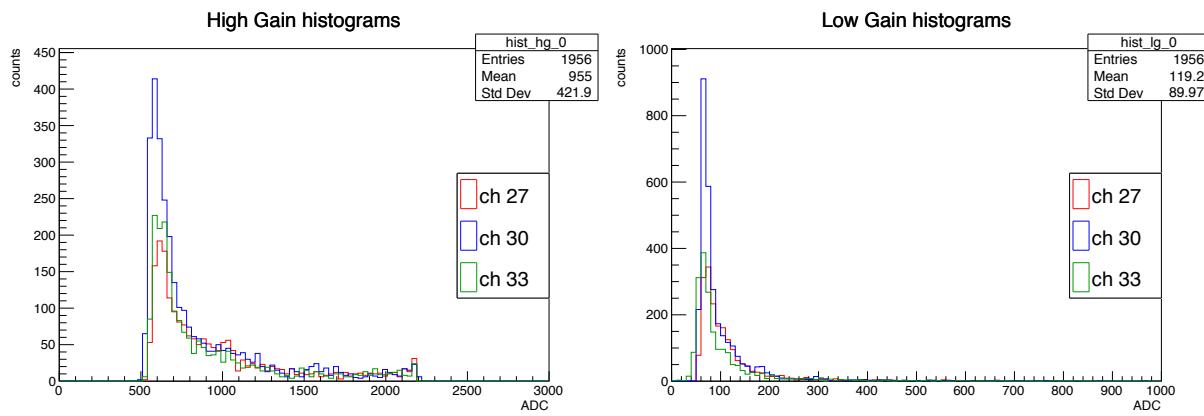


図 6.12 pkg-20 の ADC 分布

検出効率

同種の APD において一方の APD でトリガーがかかった際に、もう一方の APD のトリガーがどの程度割合でかかっているかを見ることで検出効率を求めた。表 6.3 は各 APD の検出効率を求めたものである。本実験では、同種の APD が 2 つまたは 3 つで接続された状態で行なっているため、同種の APD が 2 つの場合は、両方の APD でトリガーがかかったイベントを単体の APD でトリガーがかかったイベントで割ることで検出効率を求めた。一方同種の APD が 3 つ接続されている場合は、単体の APD におけるイベント数の差が小さい 2 つについて着目して、同種の APD が 2 つ接続されている場合と同様の方法で検出効率を求めた。この時の 2 つの APD について、表では APD-1 と APD-2 としている。なお、検出効率は APD-1 と APD-2 でそれぞれ求めた後、平均したものを記述している。

この結果より、S8664-10K、S8664-20K、pkg-10 の検出効率が特に低いことが分かる。この原因として、表 6.2 に示している、各測定において同時に接続した APD との関係性が考えられる。Run 1 を除く各測定では、2 種の APD を同時に測定しており、その時の APD の組み合わせは検出効率が比較的高いものと悪いものが 1 組になっている。本実験の測定では、接

表6.3 各APDの検出効率

APD serial No.	APD-1 イベント数	APD-2 イベント数	同期イベント数	検出効率
S12023-10A	1002	965	147	14.9 %
S8664-10K	613	298	4	0.9 %
S2384	4355	5796	1136	22.4 %
S8664-20K	368	185	2	0.7 %
S8664-55	3060	2327	96	3.6 %
pkg-10	1687	1584	15	0.9 %
pkg-20	1956	3010	219	8.8 %

続チャンネルの1つ以上でトリガーがかかった時にデータ収集を行うため、検出効率が高いAPDの起因して、検出効率の低いAPDのデータ収集に影響が出た可能性がある。

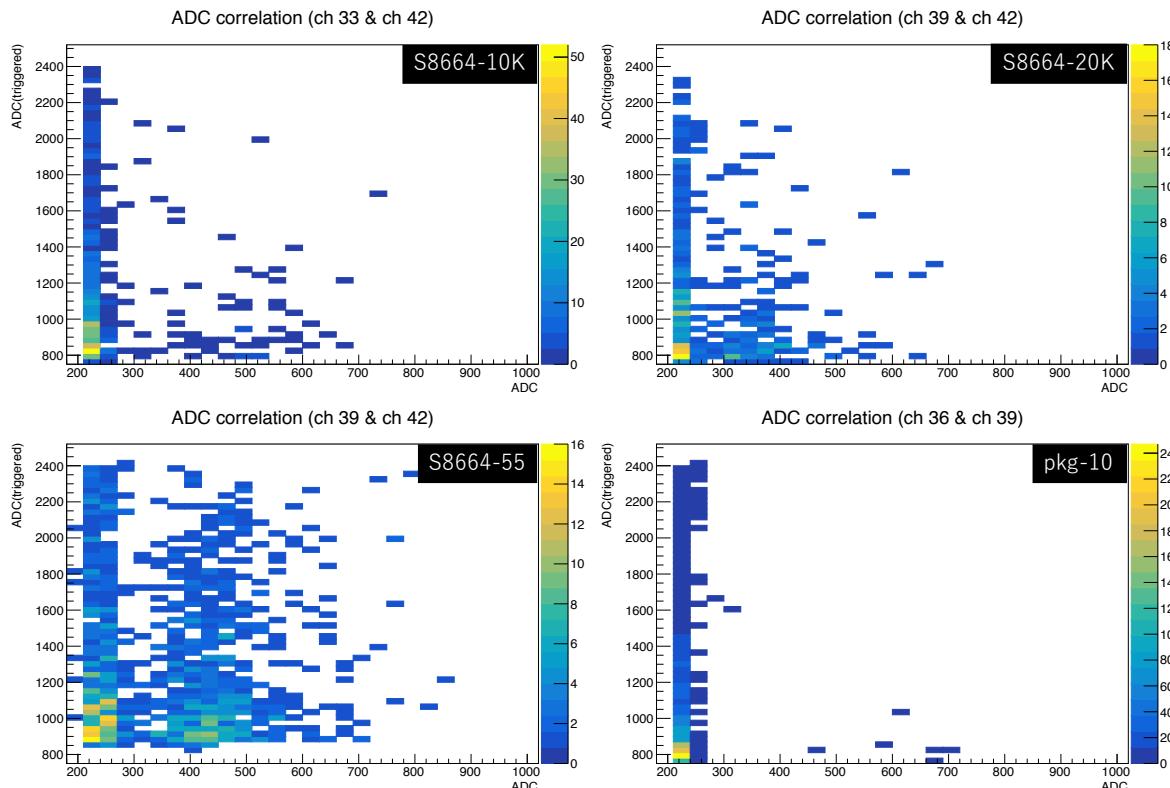


図6.13 同種APDのうち片方だけにトリガーがかかった時のADC(High gain)の相関閾値が約750で設定されているため横軸は750以下の値、縦軸は750以上の値になっている。トリガーがかっていないAPDのADC値が250-750のものは、粒子が入射しているが、閾値を超えずトリガーがかからなかったイベントであると考えられる。

図6.13は検出効率が低かったS8664-10K、S8664-20K、S8664-55、pkg-10について、一方のAPDにのみトリガーがかかった時における、2つのAPDのADC値の相関を示している。この時、横軸がトリガーがかっていないAPDのADC値であり、縦軸がトリガーがかかっ

た APD の ADC 値である。本測定では、SKIROC2cms の fast shaper で設定した閾値を超えた信号に対してトリガーがかかるようになっており、閾値は ADC 値で約 750 のところに設定されている。そのため横軸は 750 以下の値、縦軸は 750 以上の値になっている。粒子が入射していない時の ADC は 220 程度であるため、図のようにトリガーがかからぬいたい APD の ADC 値が 250-750 にあるものは、粒子が入射しているものの、閾値を超えたためトリガーがかからぬいたいイベントであると考えられる。このことから、本測定で設定した閾値も検出効率が低くなる要因であったと考えられる。

また、2 つの APD に対するビーム角度やビームの角度方向への広がりによって、物理的にビームが片方の APD にしかヒットしていない場合も考えられる。

6.4.2 時間分解能

図 6.14 は、S2384 の時間分解能測定時のセットアップを模式した図である。時間分解能の測定は、同種の APD2 つを並べて置き、両方の APD でトリガーがかかったイベントに対して、一方の APD の時間情報を真値とし、もう一方の APD の時間情報と比較することで、時間分解能を求めた。

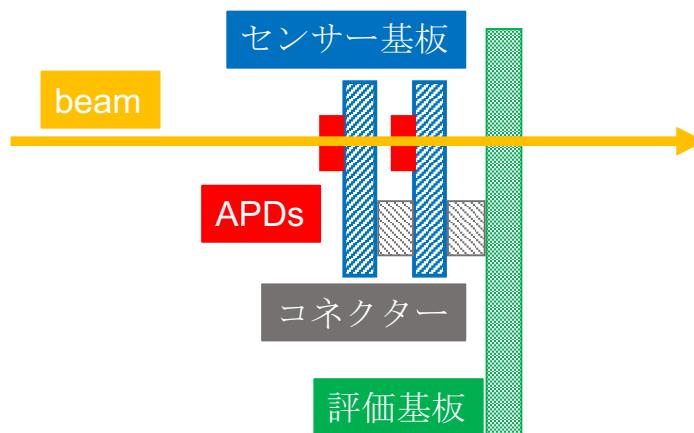


図 6.14 時間分解能測定時のセットアップ 図のように 2 つの APD をビームが貫通したイベントについて、2 つの APD の時間差から時間分解能を導出する。

図 6.15 は ch 30 に接続された S2384-1 と ch 33 に接続された S2384-2 の TOA rise 分布である。これらの TOA 分布において値が大きくなるほどイベント数が大きくなるのは、図 5.13 に示すように TOA と時間の関係が二次関数的であるためだと考えられる。図 6.15 の横軸を TOA から時間に変換したものが図 6.16 である。ここで、両方の APD において、18-19 ns 付近のイベントがほとんど取得できていないことがわかった。

図 6.17 は各 APD の TOA rise と TOA fall の相関である。先述の通り TOA rise では 18-19 ns 付近でイベントが取得できていないことが確認できた。また、TOA fall においても同様に 18-19 ns 付近でのイベント取得ができていないことがわかった。図 5.13 において、18-19 ns に対応する TOA の値は約 1000 である。しかし、図 6.15 に示したように、本測定で

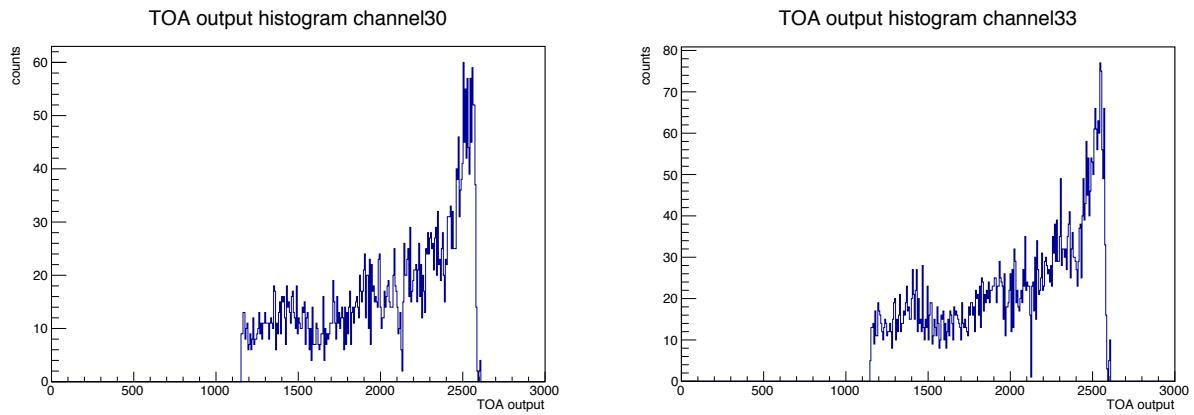


図 6.15 左図 : S2384-1 の TOA ヒストグラム 右図 : S2384-2 の TOA ヒストグラム

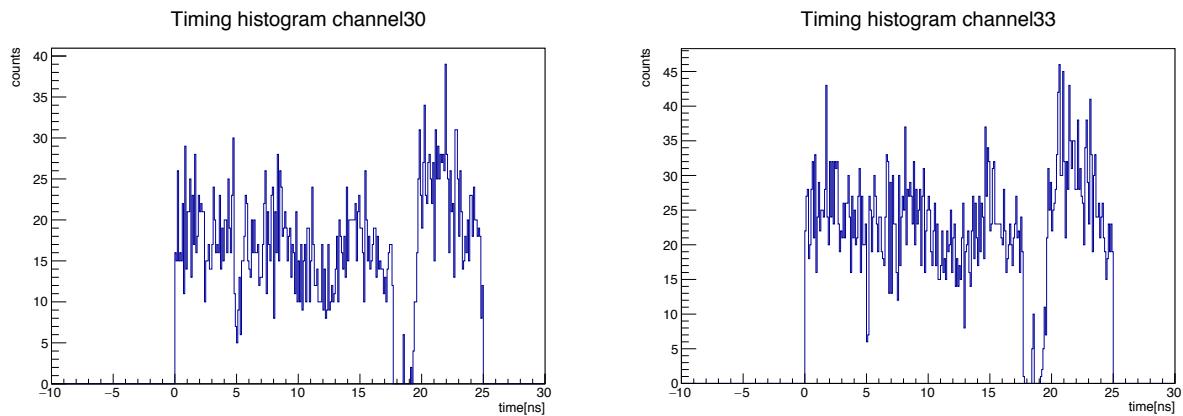


図 6.16 左図 : S2384-1 の信号取得タイミングのヒストグラム 右図 : S2384-1 の信号取得タイミングのヒストグラム 図 6.15 の TOA 値を時間情報に変換したものである。

は TOA の値が約 1100 以下のイベントは取得できていないことが分かる。以上のことから時間分解能測定時には信号取得ができないタイミングが存在していたことがわかった。これは測定を行った環境によるものであると考えられる。

図 6.18 は時間分解能の測定結果を表した図である。左図について、横軸は一方の APD の TOA 値を時間 (ns) に変換したもの、縦軸はもう一方の時間情報の真値とする APD の時間を表している。TOA 値から時間への変換は 5.4 節で求めた TOA と時間の相関を用いて行った。また、これらの時間の値は 5.5 節で求めた Timewalk の効果の補正している。図中の赤線はプロットから得られた一次元の近似直線である。時間分解能は各点と近似直線との距離 (各点と近似直線との垂線) を求め、ヒストグラムにしたもののが右図である。このヒストグラムをガウス関数でフィッティングした時の σ は 678 ± 81 ps である。この結果は、図 6.17 に示したように約 2 ns のイベント取得ができない領域を含んだ結果である。そのため、図 6.18 の左図の縦軸と横軸は約 10% の誤差が見積もる必要がある。よって、得られた時間分解能についてもさらに約 10% の誤差を見積もる必要がある。

一方、ここで求めた時間分解能には 5.6 節の Jitter が考慮されていない。Jitter は入射粒子

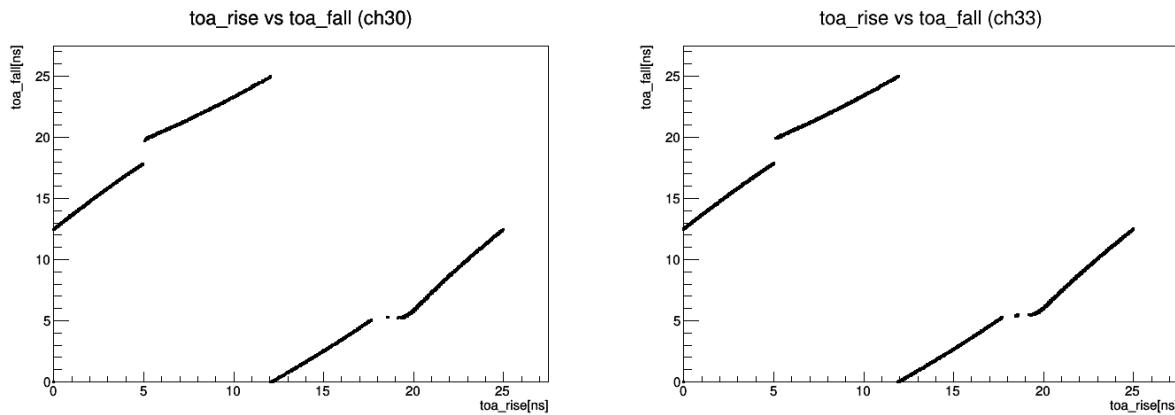


図 6.17 左図 : S2384-1 の TOA rise と TOA fall の相関 右図 : S2384-2 の TOA rise と TOA fall の相関 横軸 TOA rise について、18-19 ns 付近でのイベントが取得できていないことが確認できる。また同様に TOA fall でも同様の現象が起きていているため、18-19 ns 付近は完全に不感領域となっていることが確認できた。

の Charge によって変わるが、Jitter による測定結果のばらつきを 100 ps と仮定した場合、時間分解能は $\sqrt{678^2 - 100^2} = 671$ ps と見積もることができる。

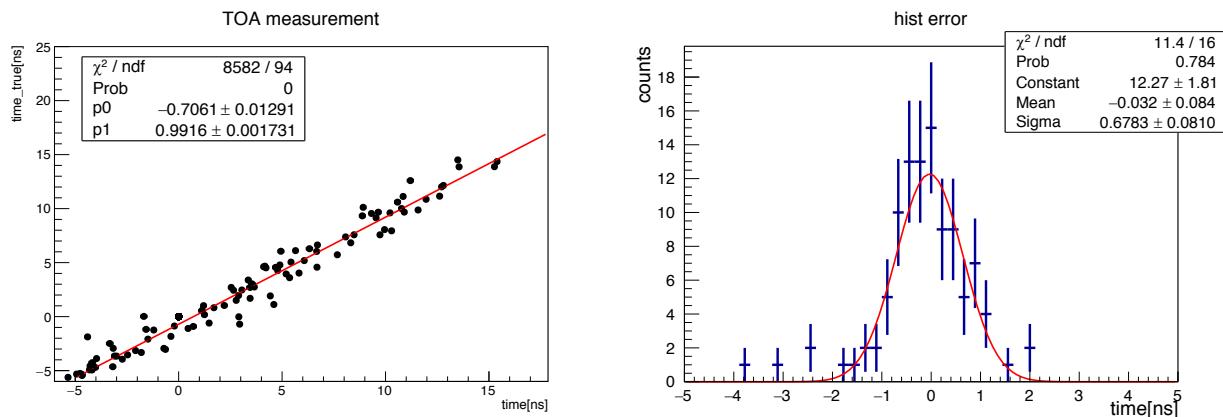


図 6.18 左図 : S2384-1 と S2384-2 の時間情報の相関 右図 : 近似直線からの距離のヒストグラム 左図の各プロットから近似直線に垂線を引いた時の距離をヒストグラムにしたもののが右図である。この時、近似直線より傾きが小さい点からの距離を正、傾きが大きい点からの距離を負としている。

5.5 節の図 5.14 に示したように、入射した信号の強さ (ADC 値) によって TOA の値に誤差が生じ、その差は入力信号の Charge が 100 fC 以下で特に大きくなることが分かっている。このため、Charge が 100 fC 以下のイベントにおける TOA の値は、Timewalk の補正是しているものの、補正前の誤差の大きさに起因する不正確さがあると考えられる。そのため、入力信号の Charge が 100 fC 以上という条件で解析を行った。その結果を図 6.19 に示している。イベント数は減ったものの、真値からの差は少くなり、時間分解能は 385 ± 94 ps という結果が得られた。また、100 fC 以上の信号の Jitter を 50 ps とした仮定した時、時間分解能は $\sqrt{385^2 - 50^2} = 382$ ps と見積もることができる。

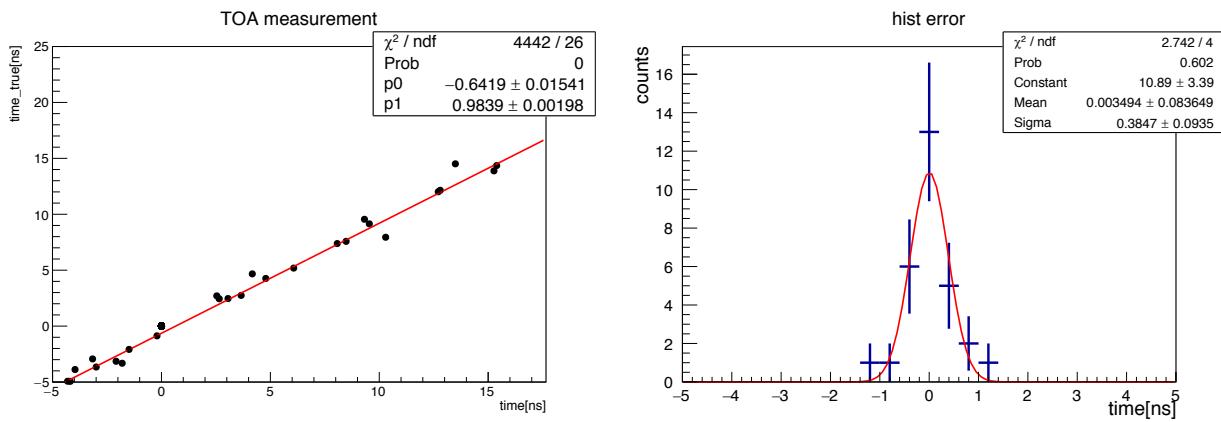


図 6.19 入射粒子の電荷量が両方の APD で 100 fC 以上のイベントにおける 2 つの同種センサーの時間情報（左図）と近似直線からの距離のヒストグラム（右図）

この結果について、センサーの Gain は、入射粒子がセンサーの中心部を通過したものと端部を通過したもので異なると考えられている。Timewalk の補正は ADC 値によって補正の度合いが決まるため、Gain が一様で無い場合、補正が不十分もしくは必要以上にかけられることがある。そのため、両方の APD で十分な電荷収集が行えていると考えられるイベントのみでの解析結果（図 6.19）では、より高い分解能が得られたと考える。

図 6.20 は S8664-55 について同様の解析手法で時間分解能を求めた結果である。この結果より、S8664-55 における時間分解能は 479 ± 142 ps という結果が得られた。しかし、S8664-55 では、ch 39 に接続した S8664-55-1 と ch 42 に接続した S8664-55-2 の両方でトリガーがかかったイベントの数が少なく、時間分解能を求める上で十分な統計量ではないと考えている。

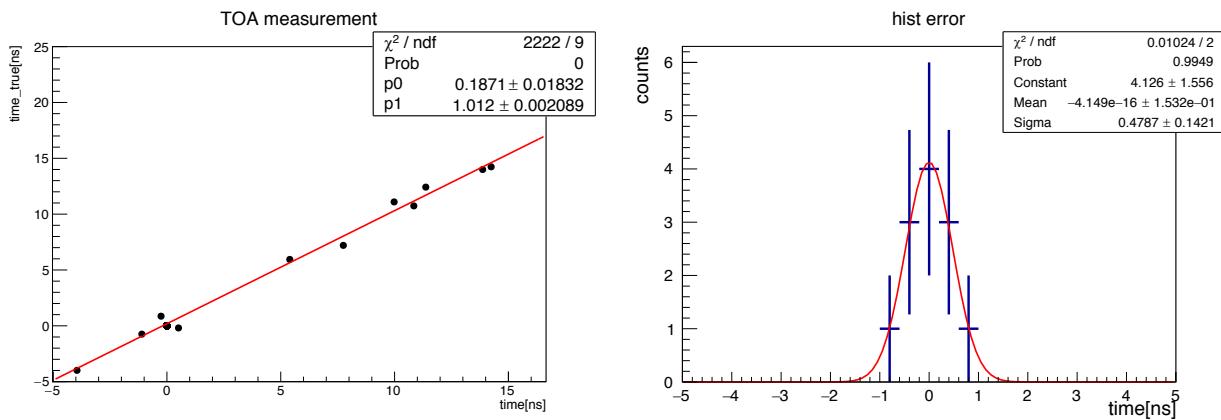


図 6.20 左図：S8664-55-1 と S8664-55-2 の時間情報の相関 右図：近似直線からの距離のヒストグラム

第7章

考察と今後の展望

APD の有感領域について

今回の研究では、予想される有感領域と大きく異なる結果が得られた。この原因として、ガンマ線源 ^{133}Ba を用いて測定した APD のゲインに起因するものであると考えている。APD のゲインは入射粒子がセンサーの中心部に入射した場合と端部に入射した場合で異なると考えられている。また、空乏層ではない領域でガンマ線が相互作用を起こした場合、ゲインは低くなると考えられる。本研究においてガンマ線源での測定で APD のゲインが、想定されるゲインよりも低かったのはこれらが原因として考えられる。

測定に使用した線源も改善の余地がある。本研究では ^{133}Ba を使用したが、 ^{133}Ba からのガンマ線ではエネルギーが高く、APD の空乏層で相互作用を起こすガンマ線の割合が少なく、適切に信号增幅が行われていないイベントが多いことが考えられる。そのため、よりエネルギーの低いガンマ線を放出する ^{55}Fe などの線源を使用することで、適切に信号增幅されたイベント数を増やすことができると考えている。

今後の展望としては、センサーにおける入射位置とゲインの依存性を測定し、入射位置によってゲインがどの程度ばらつくのかを確認することが挙げられる。この測定は、入射位置を把握するために、レーザーを使用した測定や位置感度の高いセンサーを前後に設置した測定が考えられる。

APD の検出効率について

本実験結果では、いくつかの APD において検出効率が非常に低い値となった。この結果については、前述の通り同時に接続した APD による影響、SKIROC2cms で設定した閾値が原因として挙げられる。陽電子ビーム照射実験においては、接続した APD のうち 1 つ以上でトリガーがかかるとデータ収集を行う測定セットアップであったため、ノイズ起因によるトリガーを十分に抑えることができる閾値を設定した。今後の測定では、検出効率を重点的に測定する測定時間を設け、1 種の APD について閾値を可能な限り下げた状態で測定する必要があると考えられる。

APD の時間分解能について

本結果は、九州大学の高時間分解能シリコンセンサーの研究において、初めて時間分解能に導出した結果である。しかし、ILD で要求される時間分解能 50 ps を達成する結果は得られなかった。時間分解能測定の改善点としては、まず統計数を増やすこと挙げられる。6.4 節の時間分解能の結果に示したように、ADC が一定の値よりも大きいイベントのみで時間分解能の導出を行うと、より測定誤差が少なくなることがわかった。そのため、ADC 値でカットをかけても十分にイベントが残る程度の測定を行うことで、より高い時間分解能が得られると考えられる。

センサーにおける入射位置とゲインの依存性がある場合、ADC 値によって Timewalk を補正する時間分解能の測定にも影響がある。そのため、こちらの測定でも位置感度の高いセンサーを用いて入射位置を特定し、特定の入射位置の信号のみで時間分解能を求めるという測定方法も今後の展望として考えられる。

本研究全体における今後の展望

九州大学の高時間分解能センサー開発の今後の展望として、ILC 用の LGAD プロトタイプの作成が挙げられる。本研究を含む APD の特性などをもとに、今後浜松ホトニクスと共同で開発を行なっていく予定である。また信号読み出しの ASIC として、TOA などの時間情報の取得に長けた ALTIROC と呼ばれる ASIC を導入することも検討している。

第8章

結論

本研究では、国際リニアコライダー計画における ILD 検出器の粒子識別精度向上のために、APD の特性評価と時間分解能の測定を行った。

APD からの収集電荷と時間情報の読み出しを行うため、SKIROC2cms と評価基板を使用して、信号取得を行うセットアップを確立した。これらのセットアップを用いて、ベータ線源⁹⁰Sr とガンマ線源¹³³Ba での測定を行うことで、APD のゲインと有感領域の測定を行った。有感領域の測定値は $\sim 1000 \mu\text{m}$ と想定される有感領域の 50 倍ほどの結果となった。この測定結果より、APD とガンマ線の相互作用において、ガンマ線の入射位置によるゲインのばらつきがあることが示唆される結果となった。

時間分解能の測定では、時間分解能の導出にあたり、SKIROC2cms の TOA の較正や評価基板等の測定機器による Timewalk や Jitter などの補正のための測定を行った。これらの測定結果を踏まえ、東北大学電子光物理学研究センターで行った APD への陽電子ビーム照射測定における S2384 の時間分解能は $618.2 \pm 58.8 \text{ ps}$ であった。この結果は、統計量を増やすことでより精度の良い時間分解能を得ることができると考えている。

付録 A

^{133}Ba と ^{90}Sr の壊変図

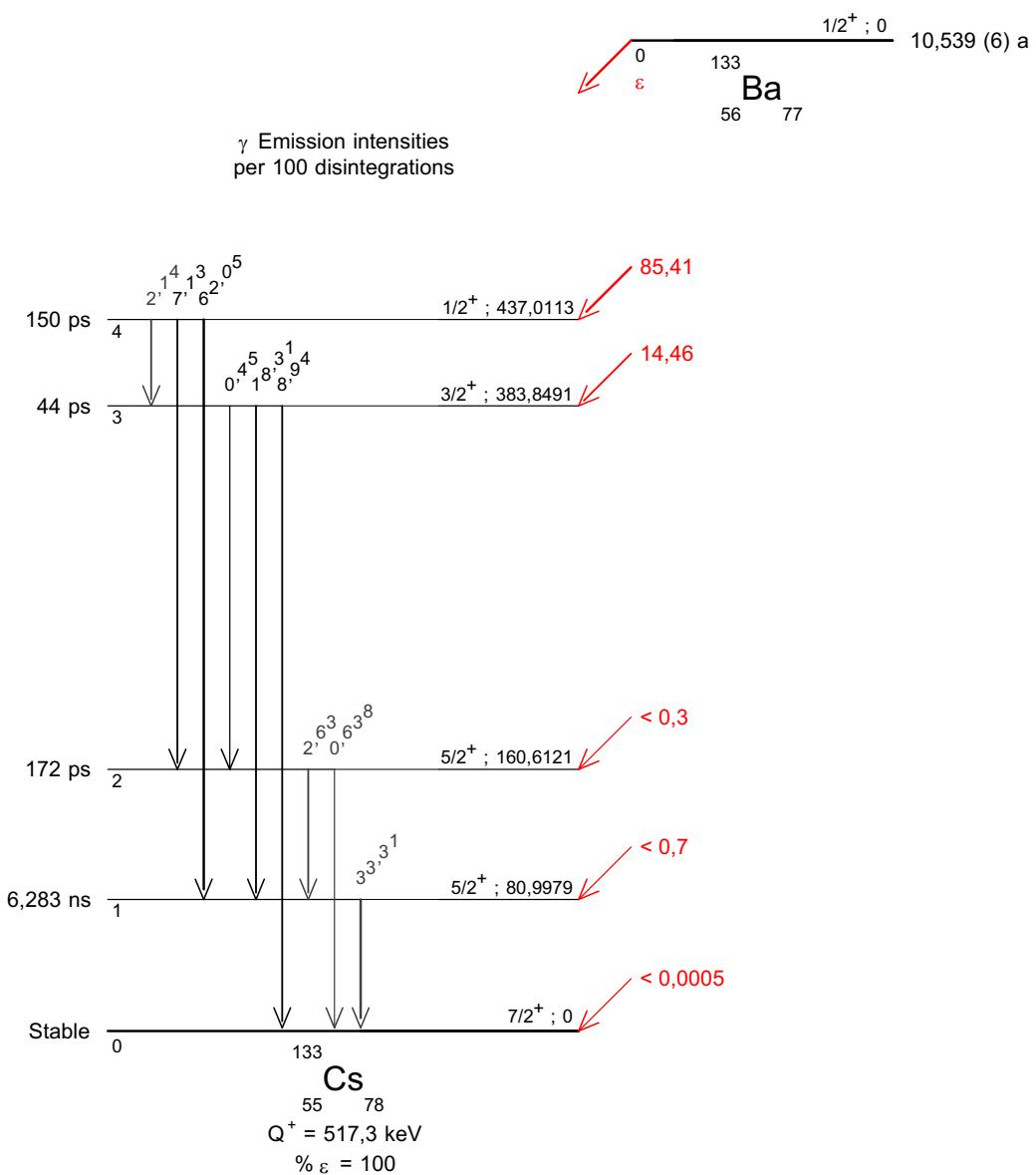
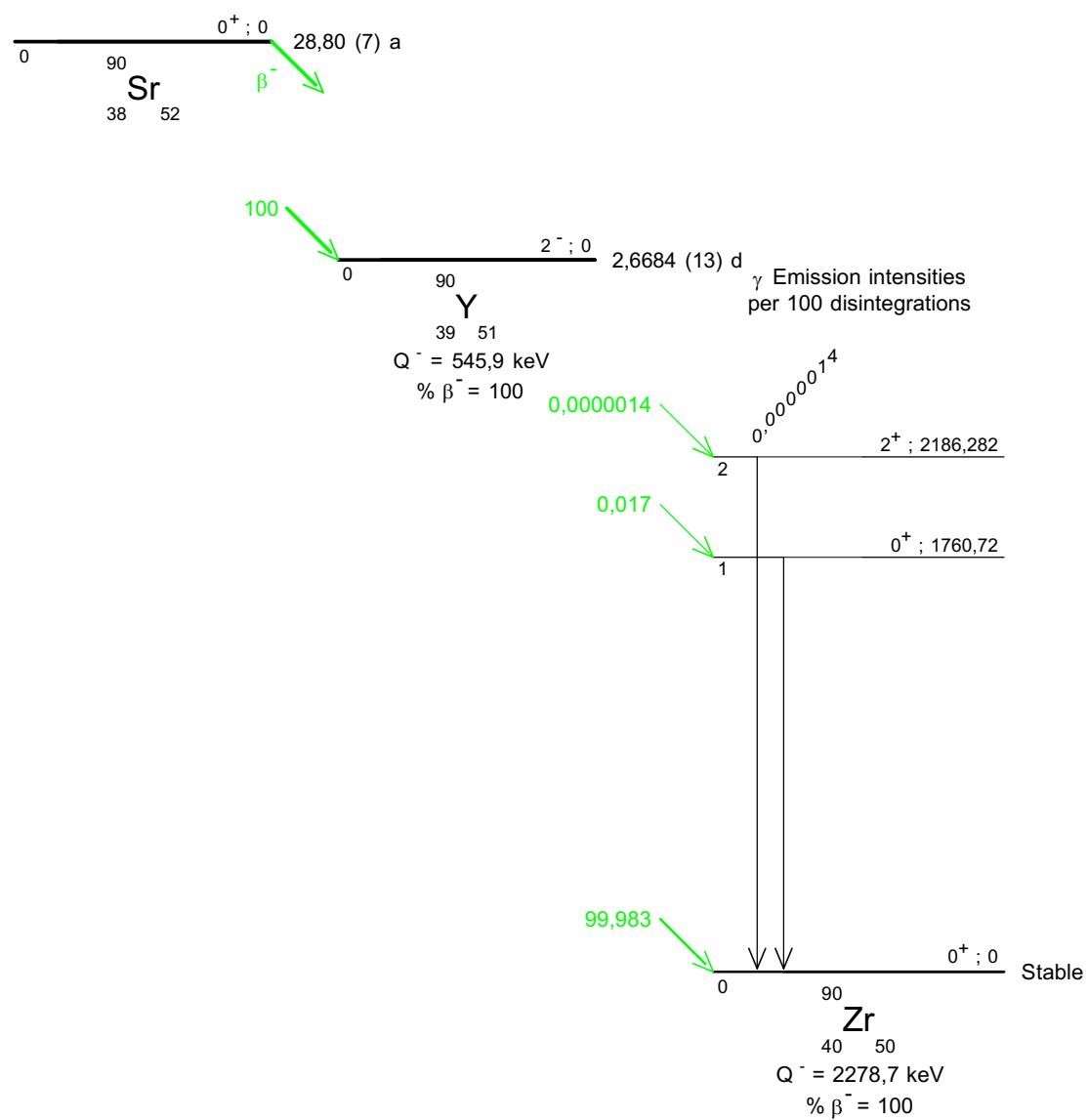


図 A.1 ^{133}Ba の壊変図

図 A.2 ^{90}Sr の壊変図

付録 B

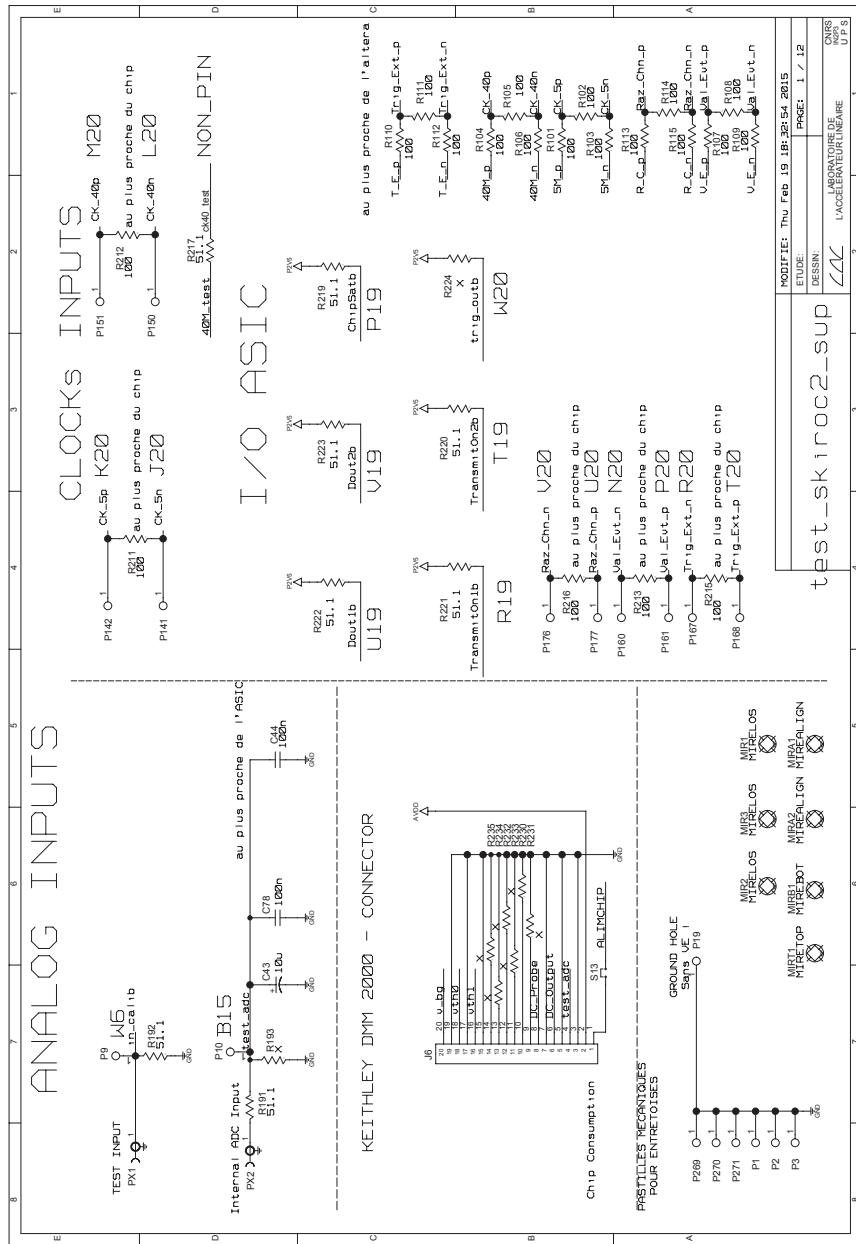
SKIROC2 Test Board ALTERA Registers

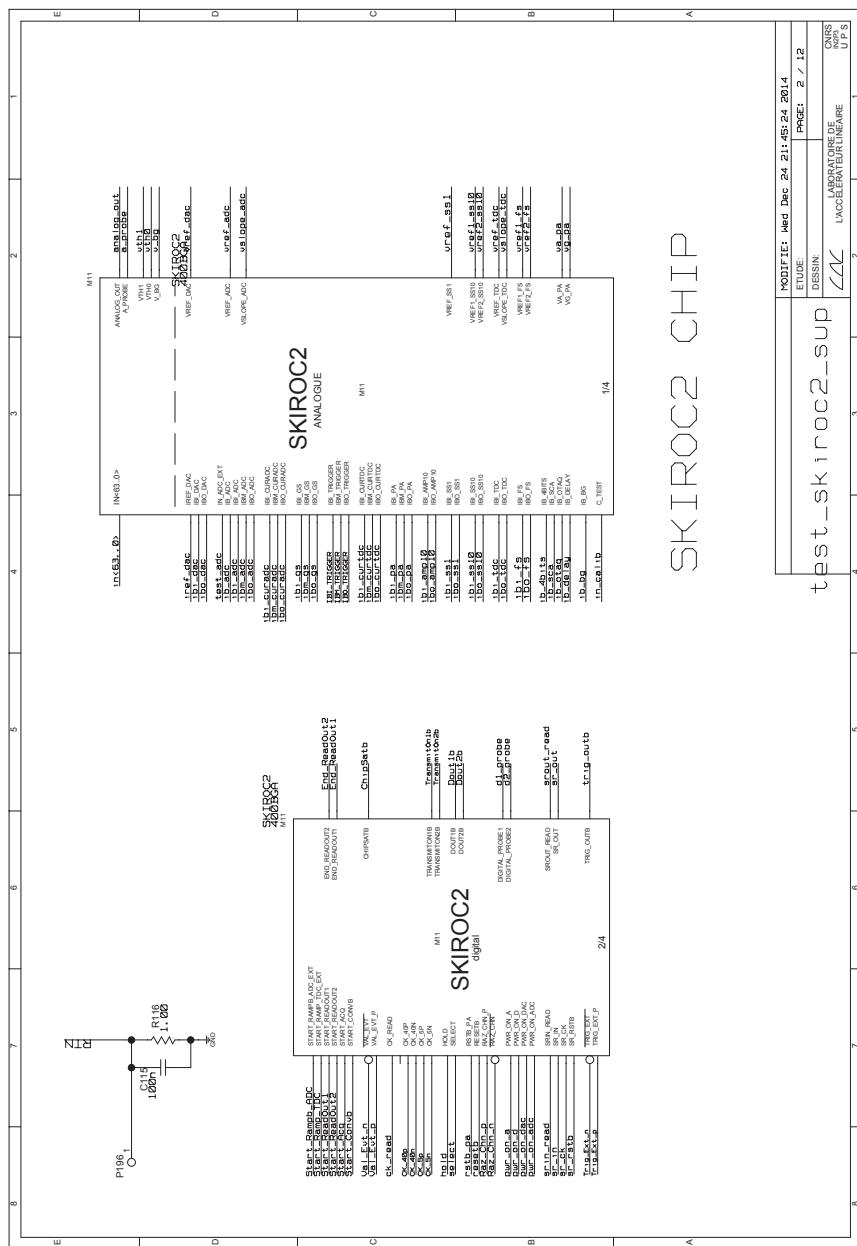
Skiroc2 Test Board ALTERA Registers							
WORD 0				MSB			
bit 0	bit 1	bit 2	bit 3	bit 4	bit 5	bit 6	bit 7
sel_val_ext	Raz_Chn_LV	Val_Evt_LV	sel_trig_ext	en_Internal_link	test_clk_read	test_chk_ar	
Select Data to send to (ASIC) Val_Evt_1' Lemo Conn. In altera2, '0' Val_Evt_LV	'1': Noise Trigger, clear last event	'1': Valid Event	Select Data to send to (ASIC) Trig_Ext_1' Lemo Conn. In altera1, '1' trig_ext_LV	'1': Enable sr_ck, sr_in ck_read, srxn_read, '0' all HI_Z	'1': SCA Read Correlation Test query	'1': SR Register Correlation Test query	
bit 0	bit 1	bit 2	bit 3	bit 4	bit 5	bit 6	bit 7
Ext ADC_SMI speed	StartCycle(config)	resetb	trig_out_polarity	rbt_pa	selected	sr_rstb	
'0': 2.5MHz '1': 5MHz	'1': Start Data (Slow Control, SCA Read or Probe) Shift	'0': Altera Output / ASIC Input : ASIC Digital part Reset	Out_altera3 provides trigger output : OR64, '0' NOR64	'0': Altera Output / ASIC Input : PreAmpReset	'1': Select Probe Register	'0': Altera Output / ASIC Input : Slow Control Register Chain Reset (when selected=1) / Probe and Read Register Chain Reset (when selected=1)	
bit 0	bit 1	bit 2	bit 3	bit 4	bit 5	bit 6	bit 7
StartAcq	Start_ReadOut2 / ForceReadOut	Start_ReadOut1	trig_ext_LV	DAQ mode	Test mode	start_rampb_adc_ext / SelAnalogBackupDp	start_ramp_tdc_ext / SelAnalogBackupTp
'1': Altera Output / ASIC Input : Enable Acquisition	'1': Altera Output / ASIC Input : Start ReadOut Signal	'1': Altera Output / ASIC Input : Start ReadOut Signal	Date send to (ASIC) pwr_on_s : '0' LOW / Lemo Conn. In_altera3, '1' HIGH	'0' manual DAQ, '1' ASIC Trig_ext If Sel_trig_ext = '1'	'1' T mode (40MHz on single ended output) (SK2/SK2A only)	'0' standard mode, '1' T mode (40MHz on single ended output) (SK2/SK2A only)	
bit 0	bit 1	bit 2	bit 3	bit 4	bit 5	bit 6	bit 7
sel_pwr_on_d	sel_pwr_on_a	sel_pwr_on_dsc	sel_pwr_on_dsc	sel_pwr_on_dsc	En Test_Scurve	resetb_Scurve	sdckspeed
Select Data to send to (ASIC) pwr_on_d : '0' LOW / Lemo Conn. In_altera3, '1' HIGH	Select Data to send to (ASIC) pwr_on_a : '0' LOW / Lemo Conn. In_altera3, '1' HIGH	Select Data to send to (ASIC) pwr_on_dsc : '0' LOW / Lemo Conn. In_altera3, '1' HIGH	Select Data to send to (ASIC) pwr_on_dsc : '0' LOW / Lemo Conn. In_altera3, '1' HIGH	'1': Enable Scurve Tests	'0': Reset Counters for Scurve Tests	Slow Clock (MHz) Speed : '0' 2.5MHz, '1' 5MHz	
bit 0	bit 1	bit 2	bit 3	bit 4	bit 5	bit 6	bit 7
ChipSath	End_ReadOut1	End_ReadOut2			checksum read	checksum_ar	
					SCA Read Correlation Test Result	SR Register Test Result	
bit 0	bit 1	bit 2	bit 3	bit 4	bit 5	bit 6	bit 7
40MHz ASIC	sel_ramp_adc	gene_polarity	Nb_scurve_0	Nb_scurve_1	sel_Dout	sel_Transmit	ADC mode
'1': Enable 40MHz Clock to ASIC Clock : '0': no	start_rampb_ADC_ext : '0' LOW / Lemo Conn. In_altera1, '1' word_2[0]	Select CLK_GENE_EXT [TTL] or not(CLK_GENE_EXT) [NMOS]	Set the number of Pulses for Scurve tests: '0' => 200 pulses '1' => 1000 pulses '2' => 10000 pulses '3' => 50000 pulses	'1': Dout1b (for SK2/2A only)	'1': TransmitOn1b ('0': TransmitOn2b, '0': none, '0': Test_internal_ADC)		
bit 0	bit 1	bit 2	bit 3	bit 4	bit 5	bit 6	bit 7
on-test 40M	sel_ramp_tdc	en_test_4M	sel_OR2hold	EN_TimeOut	Chip version		debug mode
'1': Allow Fast clock on test pin 39, '0': no data	start_trig_ext : '0' LOW / Lemo Conn. In_altera1, '1' word_2[1]	'1': Select OR64 delayed as hold command, '0': select HOLD connector.	'1': Enable TimeOut for latched OR64delayed.	'0': SKIROC2ZA chip, '1': SKIROC2-CMS chip	'1': allow to send 1 clk tick on SR_CK or CK_READ		
bit 0	bit 1	bit 2	bit 3	bit 4	bit 5	bit 6	bit 7
Fast Clock (40MHz) Speed : '0' 40MHz, '1' 50.52MHz	used_fast_clock	Sel_ForceGainExt	sel_raz_chm	sel_trig_scurredb	sel_trig_scurve1>	used_slow_clock	
Address 8	Scurve_Pulse_Counter (8-bit) LSB	Scurve_Trigger_Counter (8-bit) LSB	Select Data to send to (ASIC) pwr_on_s : '0' LOW / Lemo Conn. In_altera1, '1' Raz_Chn_Ex	Select Trigger to send to Scurve test : '0' NQ101 (no trigger), '1' D1_Probe (probe), '2' SK2-CMS trig_TOT, '3' (SK2-OR64 / SK2-CMS trig_TOAb)	'0' FPGA internal '1' External connector (SK2CMS only)	'0' FPGA internal 5/2.5MHz ; '1' External connector (SK2/2A only)	
Address 9	Scurve_Pulse_Counter (8-bit) MSB	Scurve_Trigger_Counter (8-bit) MSB					
Address 10	StartADC ReadOut & 0 & Hit (SK2CMS) & ADC OTR & ADC ReadOut [12..8]	ADC ReadOut [8..1]					
Address 11	ADC FIFO1 Empty & ADC FIFO2 Empty & ADC FIFO1 Full & ADC FIFO2 Full & 0 & 0 & Word used in ADC ReadOut [9..8]	ADC FIFO1 Empty & ADC FIFO2 Empty & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0					
Address 12	Start_DAG_Sequence & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0	Start_DAG_Sequence & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0					
Address 13	Word used in ReadOut FIFO [7..0]	Word used in ReadOut FIFO [7..0]					
Address 14	ReadOut FIFO (8-bit)						
Address 15							
Address 16							
Address 17							
Address 18							
Address 19							
Address 20							
Address 21							
Address 22							
Address 23							
Address 24							
Address 25							
Address 26							
Address 27							
Address 28							
Address 29							
Address 30							
Address 31							

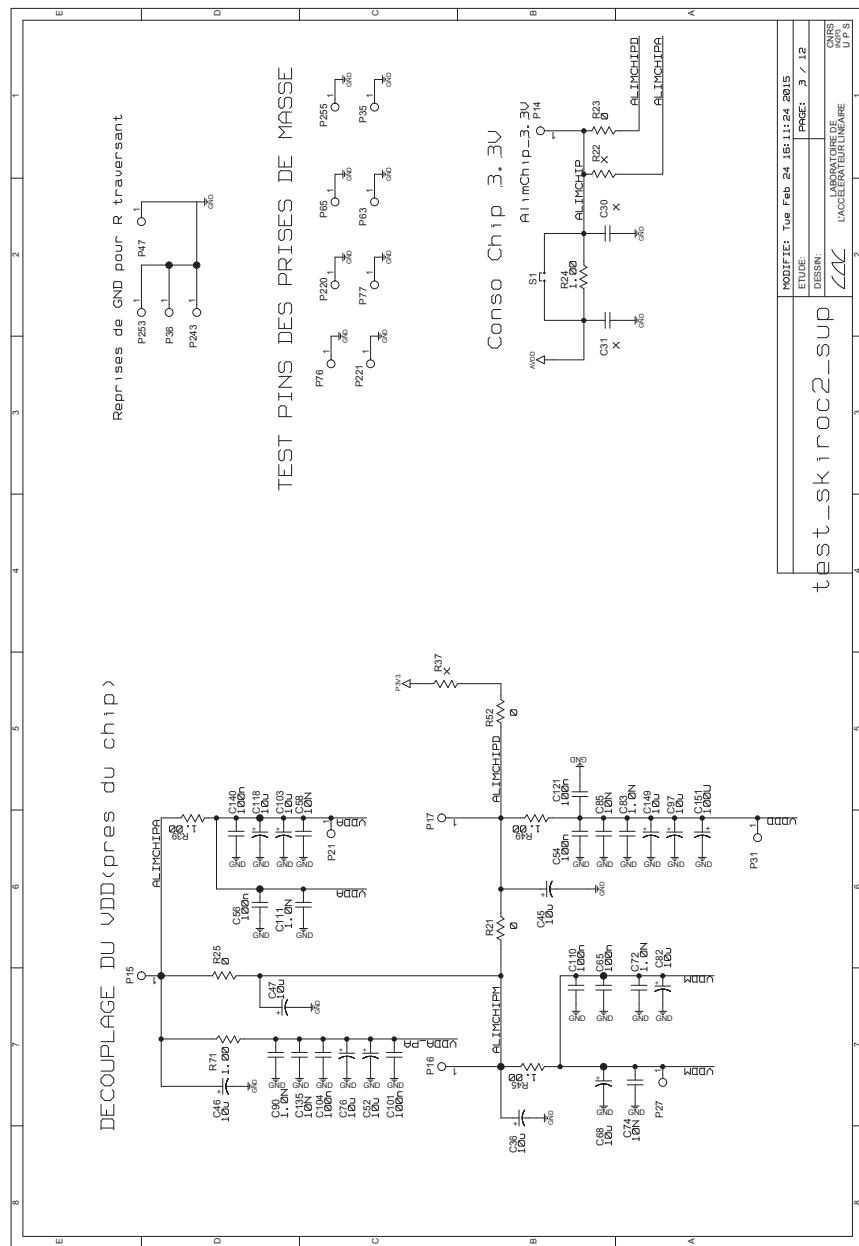
図 B.1 FPGA の 8 bit レジスタの一覧

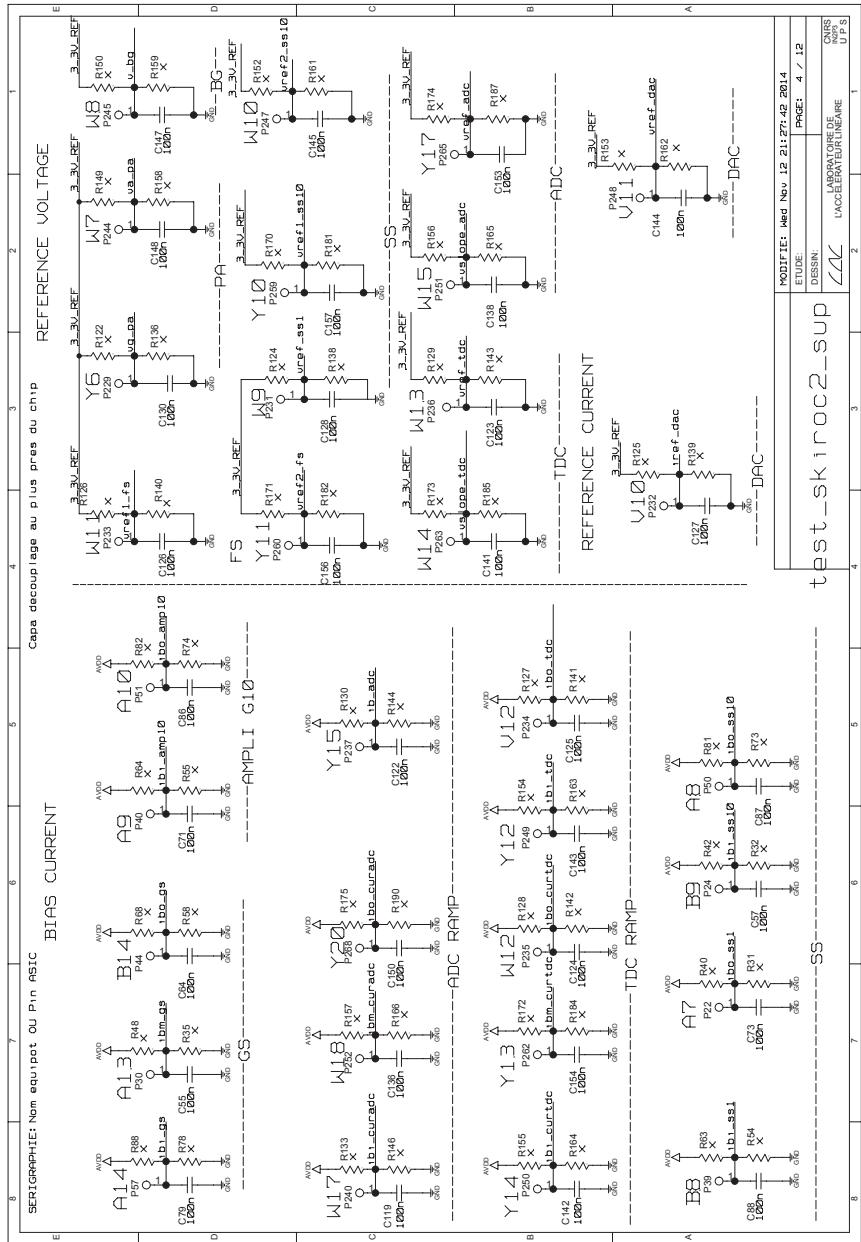
付録 C

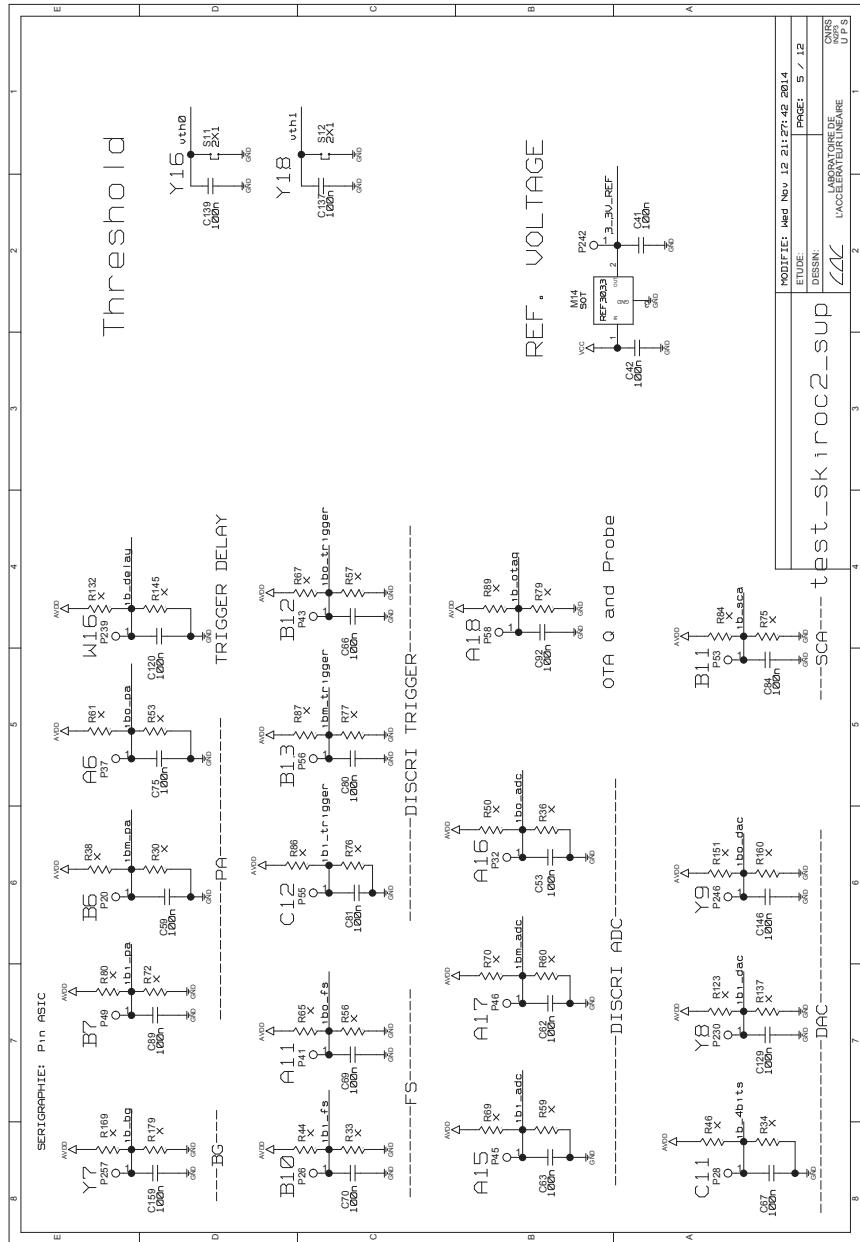
Test Board 回路図

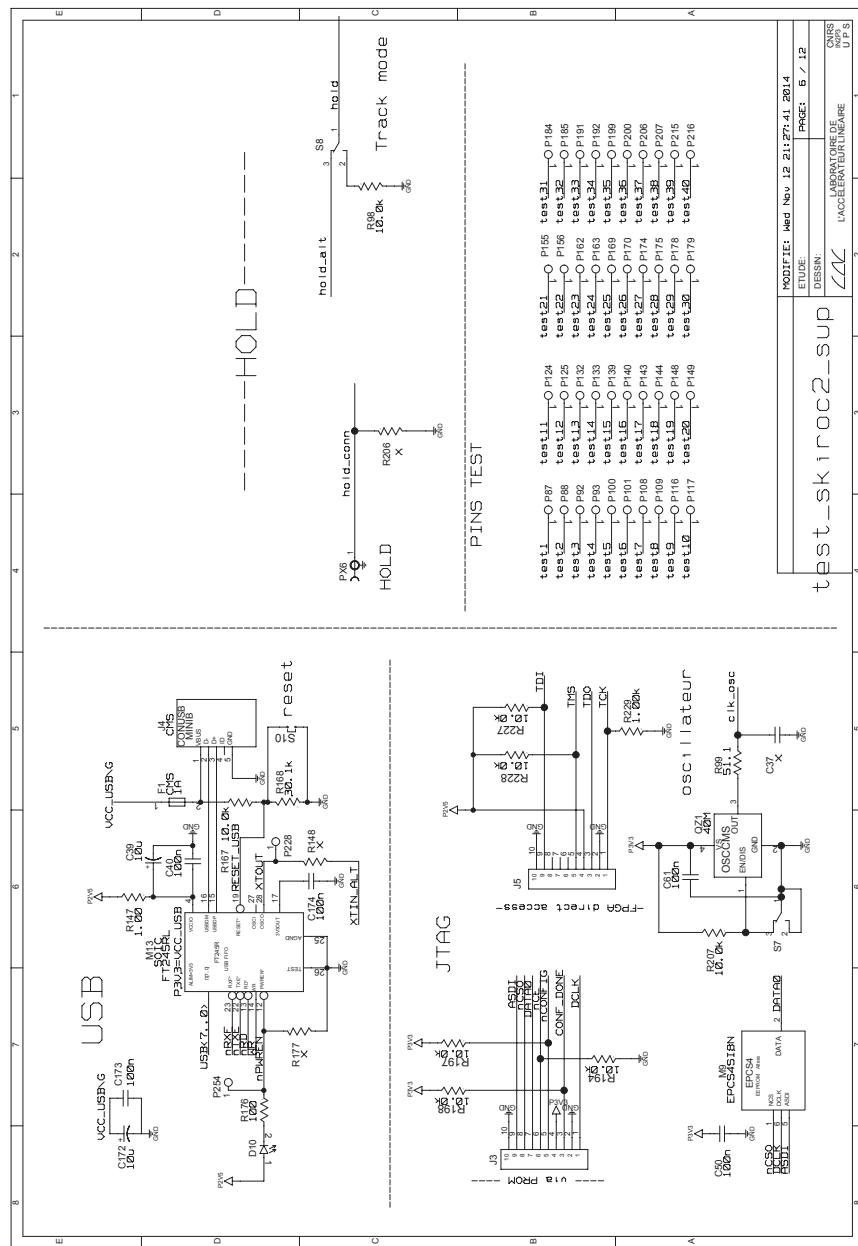


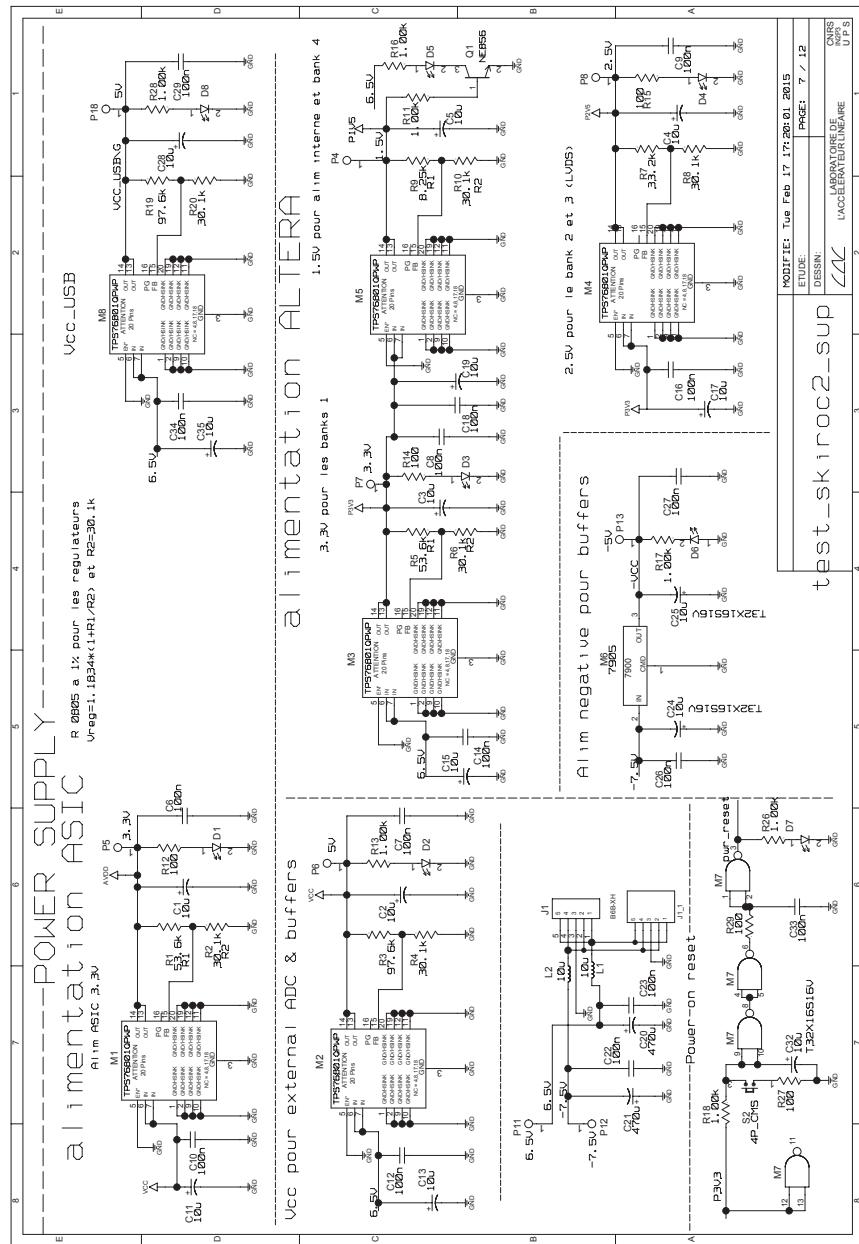


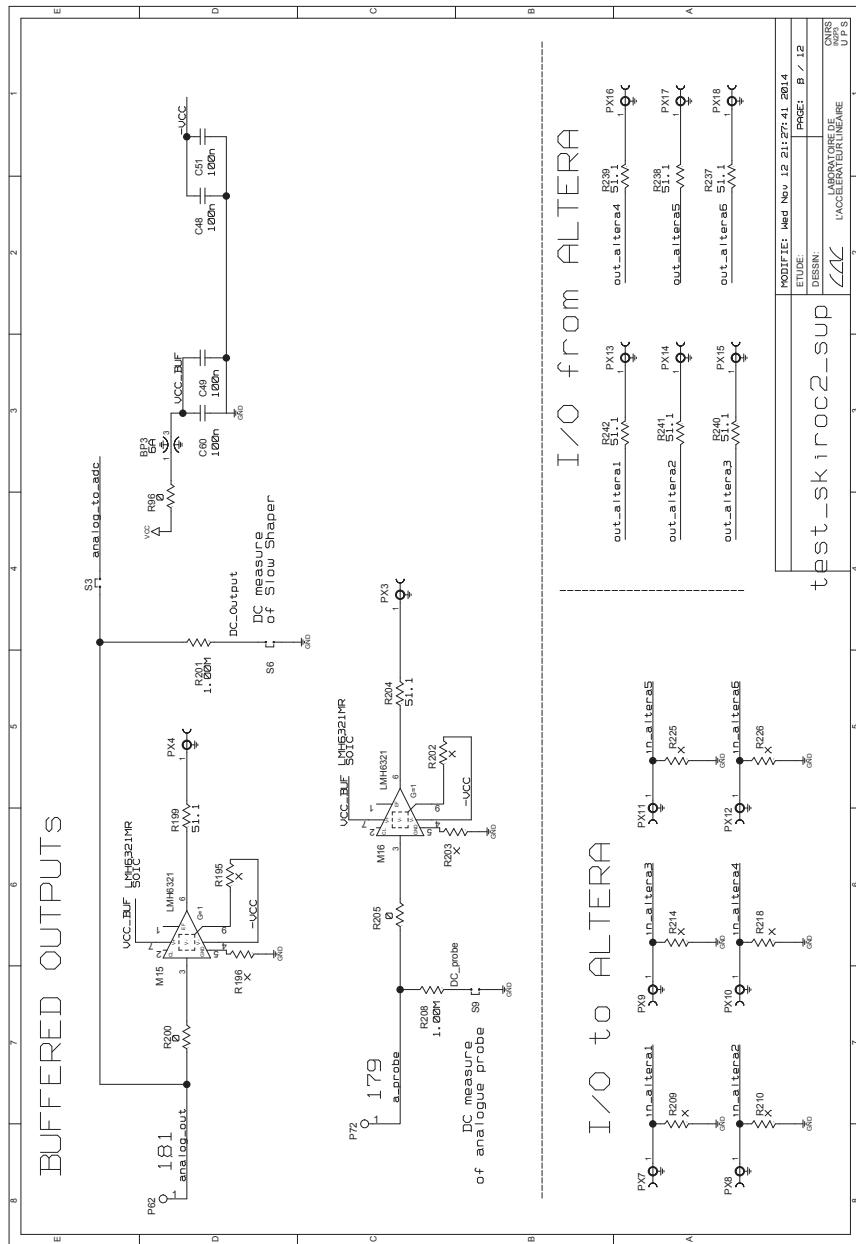


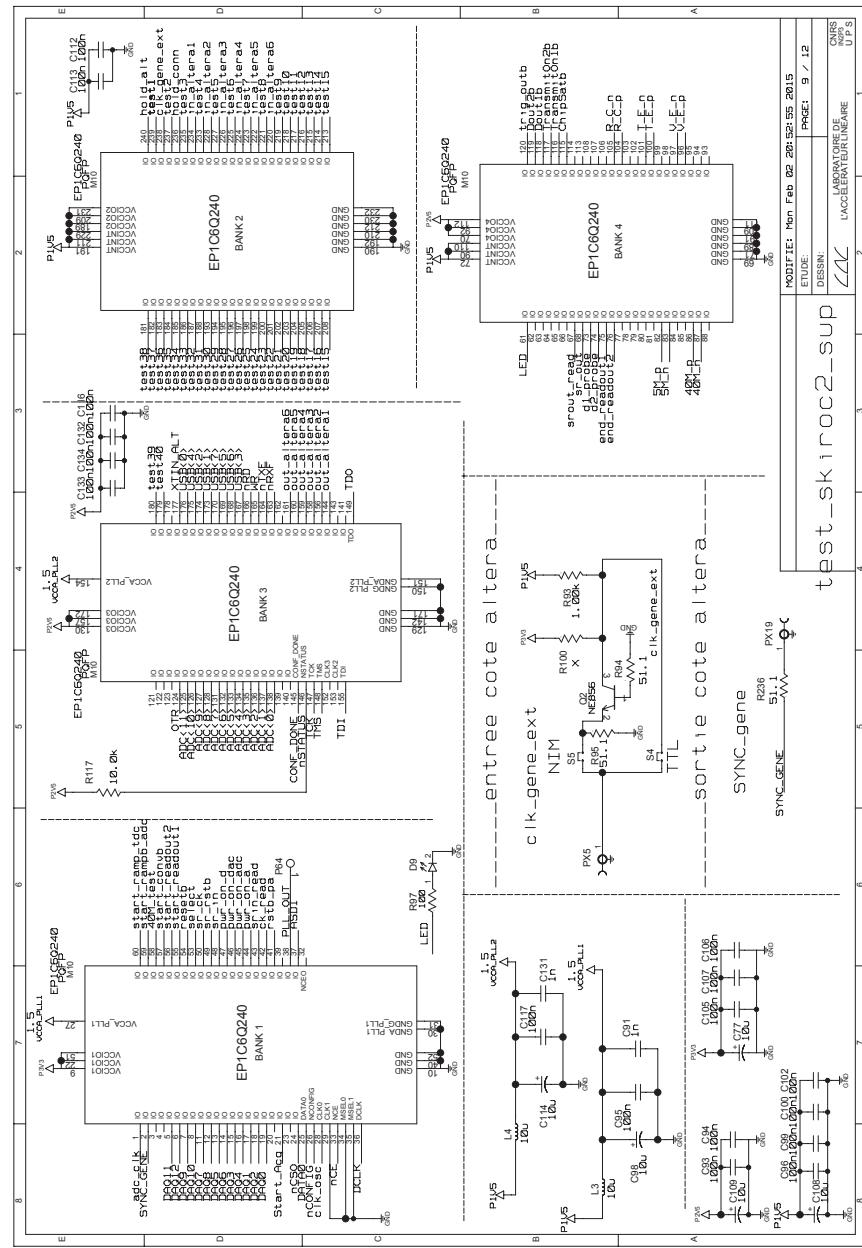


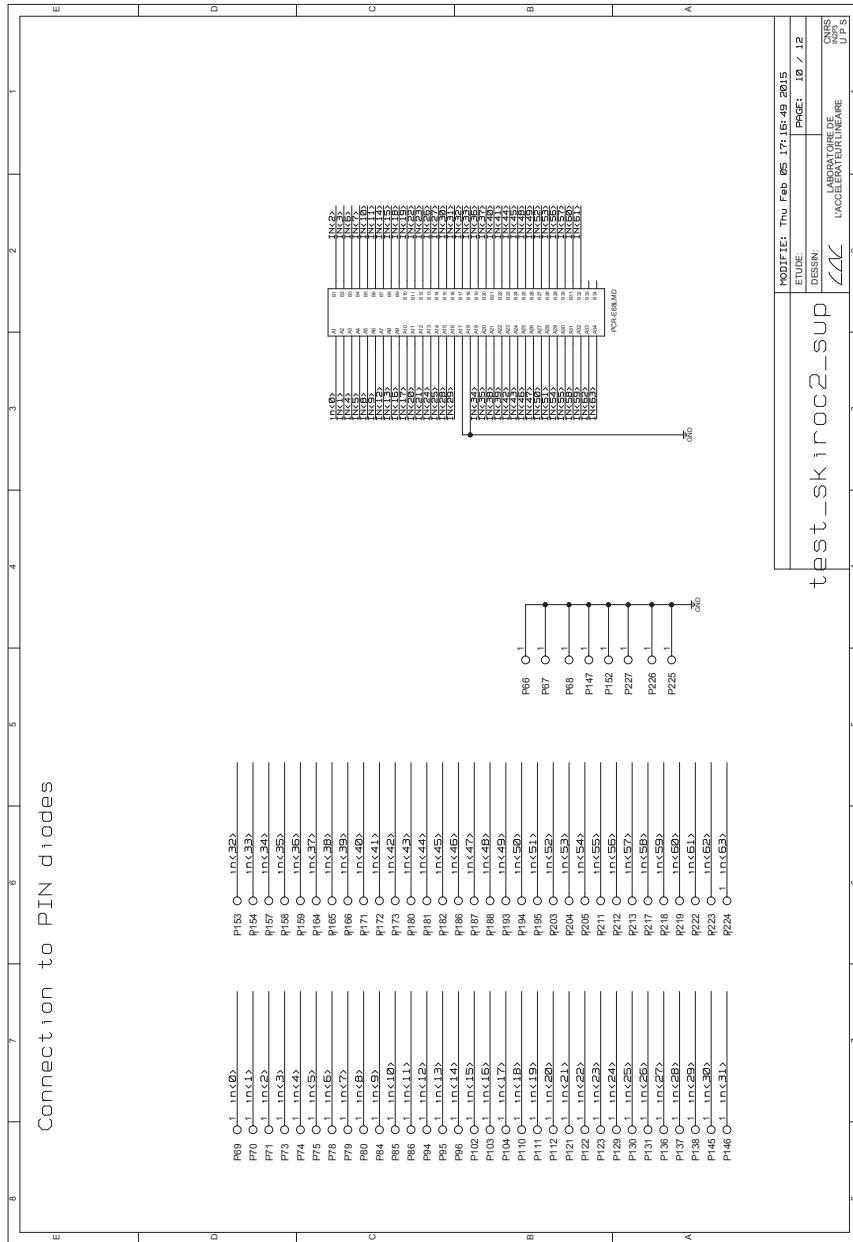


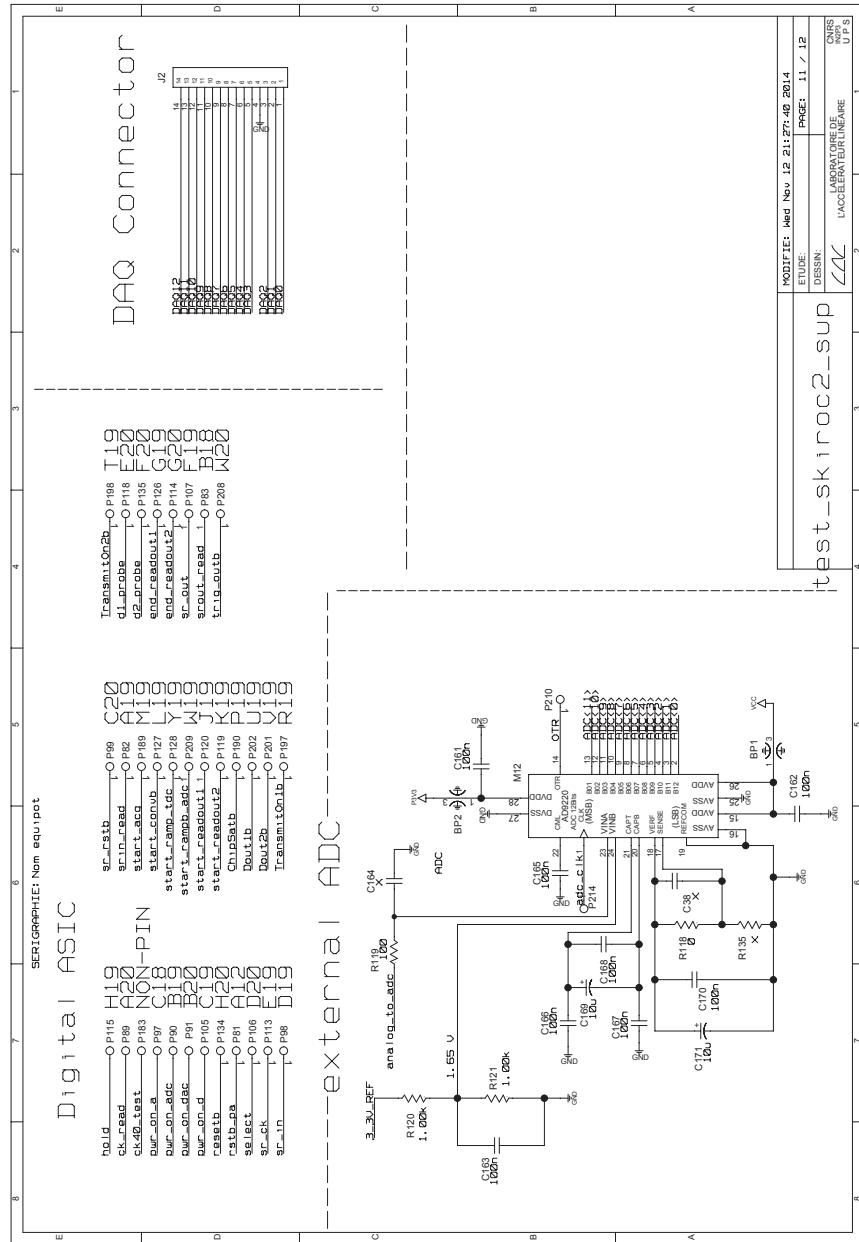












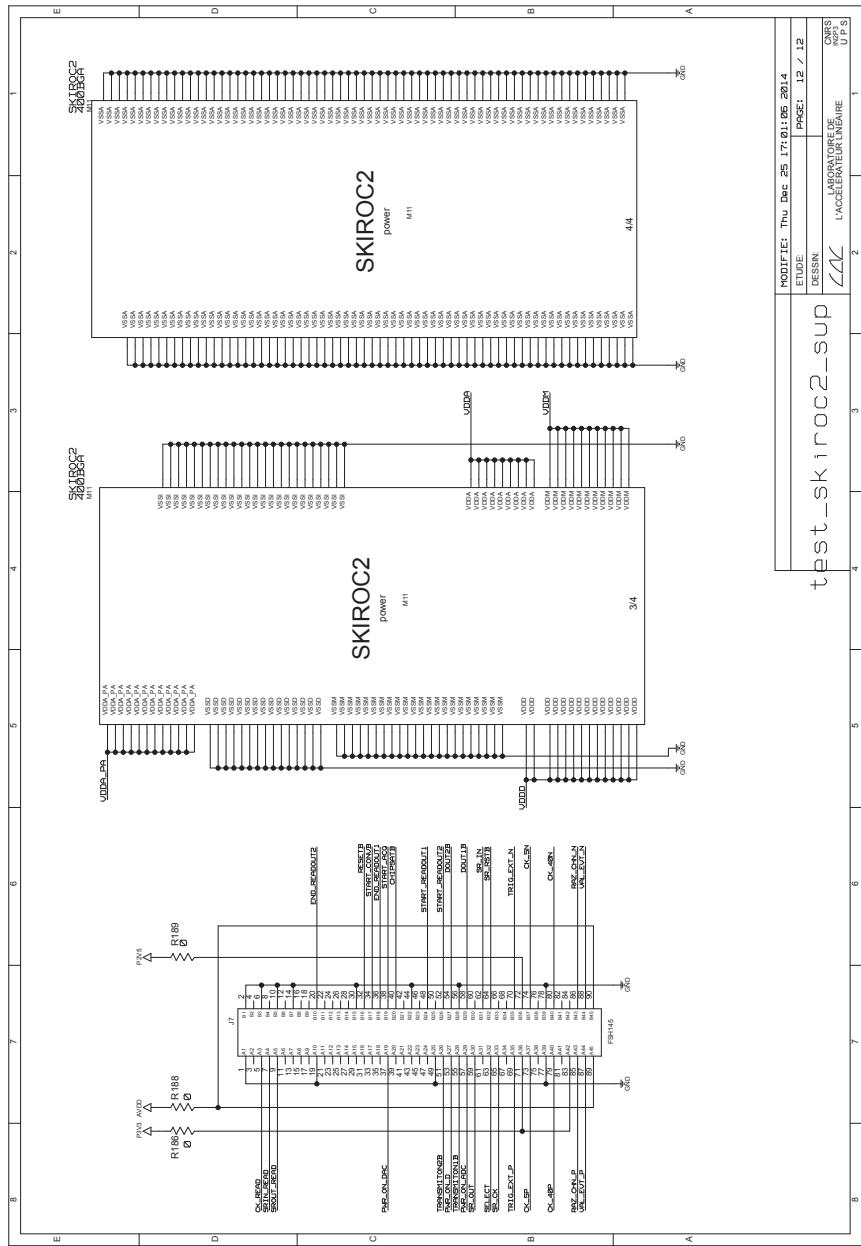


図 C.1 Test Board の回路図

謝辞

本研究を進めるにあたりまして、多くの方々からのご支援とご指導をいただきましたことをこの場を借りて感謝を申し上げます。

指導教員である末原大幹助教には、本研究を進めるにあたって特に手厚くサポートしていただきました。日頃の研究における疑問点の解決やアドバイスはもちろん、国内外での実験や学会発表への参加の機会を与えていただきました。またその度に、発表資料の推敲や発表練習など一つ一つ丁寧にご指導いただきました。ありがとうございます。川越清以教授には、学部生の頃よりゼミなどを通じて素粒子物理の基礎を教えていただきました。また、研究の進捗報告などにおいても多くの助言を頂きました。ありがとうございます。吉岡瑞樹准教授には、ILC の会議運営などにおいて特にお世話になりました。東城順次准教授には、修士 1 年時のサマーチャレンジ TA 業務にて、特にお世話になりました。また、学部 3 年時の物理学ゼミナールにおいても手厚いご指導をいただきました。ありがとうございます。織田勧助教、音野瑛俊助教には学内の TA 業務や論文紹介、研究報告において的確な指摘・指導をいただきました。山中隆志特任助教には、研究室のサーバー管理など、研究活動を快適に行う環境を整えていただきました。小林大特任助教には、居室での些細な話から実験室での研究の深刻な問題点に至るまで、幅広く話を聞いてくださいり、相談に乗ってくださいました。時折行う研究内容に関する活発な議論は、取り組んでいる研究の垣根を越えた人との議論や情報共有の大切さを学ぶことができました。中居勇樹技術職員には、特に学部 4 年時の実験指導でお世話になりました。あの時の丁寧なご指導によって、実験・解析に必要な技術と視点を学ぶことができました。重松さおり氏には、放射線従事に関わる手続きをはじめとする各種事務手続きをしてくださいました。そのおかげで研究活動に打ち込むことができたと感じています。また、ILC の会議運営などにおいても多大なる協力をしていただきました。ありがとうございます。豊村和子氏にも、短い期間ではありましたが、各種事務手続きのサポートをしていただきました。また、福岡で開催した ILC の国際会議の運営において特にお世話になりました。

物理学事務室の皆様には、研究活動を行うにあたって必要な様々な事務手続きについて全面的なサポートをしていただきました。特に私は出張が多くいたため、その度の出張報告や旅費精算の対応をしていただきました。事務室の皆様の迅速な対応のおかげで、研究活動を快適に行うことができました。ありがとうございます。

山城大知氏、関谷泉氏には、ILC グループの先輩としてお世話になりました。本論文とは直接関係ありませんが、お二人の修士論文の内容を引き継ぐ形で取り組んだ研究もあり、修士

論文やその他の資料を参考にさせていただきました。同じく ILC グループの先輩である森涼介氏、三浦裕氏には実験機器の操作や研究内容についての引き継ぎなど多くのご指導をいただきました。また、就職活動に関して ES の添削や面接等のアドバイスをいただき、大変感謝しております。後輩の後藤輝一君には、真面目に研究に打ち込む姿に刺激を受けました。それに対し、あまり有用な助言等をすることができなかつたと感じています。研究インターンとして九州大学に来た Eloise Mestre には、短い間でしたが共に研究できたことを嬉しく思っています。私の英語力が拙く、コミュニケーションに苦労したこともありましたが、真摯に聞いてくれました。おかげで僅かながら英語能力が鍛えられました。

研究室の先輩である、大石航氏、調翔平氏、角直幸氏、高田秀佐氏、野口恭平氏、古賀淳氏、山口尚輝氏、宮崎祐太氏、竹内佑甫氏には日頃より研究についてはもちろんのこと、様々な面で多くの助言や助力をいただきました。行き詰った際に声をかけてくださった先輩方のおかげでこの論文の執筆ができたと感じております。ありがとうございます。

同期にあたる彌吉拓哉氏とは、研究室での生活はもとより、食事や麻雀など私生活でも共にする時間が多く、仲良くしてもらいました。川島僚介氏には、研究・授業などにおいてとても頼りにさせていただきました。持つべきものは頼れる同期であると痛感しました。牧瀬壮氏には、私の雑なコミュニケーションに毎度お付き合いいただいたことを、この場を借りて謝罪とお礼申し上げます。上杉悠人氏とは、出張など研究活動に関して特に共に行動することが多く、互いに助け合ったと感じています。

研究室の後輩にあたる来見田君、莊司君、松本君、矢野君、姚君、濱住君、久原さん、岩津君、松崎君、嶋津君、岩下君には、研究グループは違えど、それぞれの研究に邁進する姿を見て、自身の研究活動の励みにしていました。ありがとうございます。

また研究活動には直接関係していませんが、日頃より仲良くしてくれた物理学科の同期や大学のサークルの友人、その他の友人達へもこの場で感謝の気持ちを記したいと思います。彼らのおかげで、日々楽しく過ごすことができました。ありがとうございます。

最後に、私がこの道を進むことをあらゆる面でサポートし、全力で応援してくれた両親への感謝の気持ちを示し、この論文の結びといたします。

参考文献

- [1] 欧州原子力研究機構 ホームページ. <https://home.cern>.
- [2] Ties Behnke, et al. The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 1: Executive Summary. 2013.
- [3] Howard Baer, Tim Barklow, Keisuke Fujii, Yuanning Gao, Andre Hoang, Shinya Kanemura, Jenny List, Heather E. Logan, Andrei Nomerotski, Maxim Perelstein, et al. The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 2: Physics. 2013.
- [4] M. Tanabashi et al. Review of particle physics. *Phys. Rev. D*, Vol. 98, p. 030001, Aug 2018.
- [5] Halina Abramowicz, et al. The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 4: Detectors. 2013.
- [6] M. A. Thomson. Particle Flow Calorimetry and the PandoraPFA Algorithm. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A611, pp. 25–40, 2009.
- [7] International Large Detector ホームページ. <https://www.ilcild.org>.
- [8] Uli Einhaus, Uwe Krämer, and Paul Malek. Studies on Particle Identification with dE/dx for the ILD TPC. In *International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS 2018) Arlington, Texas, USA, October 22-26, 2018*, 2019.
- [9] Uli Einhaus. Particle ID Performance with dE/dx and TOF. ILD Benchmarking Days Arlington, Texas, USA, October 19-21, 2018.
- [10] Frank Hartmann. *Evaluation of Silicon Sensor Technology in Particle Physics*. Springer, 2nd edition, 2017.
- [11] G. Pellegrini, et al. Technology developments and first measurements of Low Gain Avalanche Detectors (LGAD) for high energy physics applications. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A765, pp. 12–16, 2014.
- [12] Thomas G. McCarthy. Upgrade of the ATLAS Liquid Argon Calorimeters for the High-Luminosity LHC. In *Proceedings, 2016 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference: NSS/MIC 2016: Strasbourg, France*, p. 8069859, 2016.
- [13] 浜松ホトニクス ”リーチスルー型 APD カタログ”. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s8664_series_kapd1012j.pdf.

- [14] 浜松ホトニクス ”インバース型 APD カタログ”. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12023-02/etc_kapd1007j.pdf.
- [15] 森涼介. 国際リニアコライダーのための高位置時間分解能シリコンセンサーの開発研究. 九州大学 修士論文.
- [16] Omega グループ ホームページ. <https://portail.polytechnique.edu/omega/fr>.
- [17] NATIONAL INSTRUMENT LabVIEW ホームページ. <https://www.ni.com/ja-jp/shop/labview.html>.
- [18] T. Suehara, et al. Performance study of SKIROC2/A ASIC for ILD Si-W ECAL. *JINST*, Vol. 13, No. 03, p. C03015, 2018.
- [19] KEYSIGHT 33600A シリーズ. <https://www.keysight.com/jp/ja/assets/7018-04123/data-sheets/5991-3272.pdf>.
- [20] 東北大学電子光理学センター ホームページ. <https://www.lns.tohoku.ac.jp>.