

2023 年度修士論文

プリシャワー検出器の検討と
シリコンピクセル検出器の性能評価

奈良女子大学大学院人間文化総合科学研究科
博士前期課程数物科学専攻
高エネルギー物理学研究室

学籍番号：22810053

田頭陽菜

2024 年 3 月 1 日

概 要

茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構で行われている Belle II 実験は SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器で構成される高輝度電子・陽電子衝突実験であり、 B 中間子の生成とその崩壊データから粒子・反粒子の対称性の破れや新たな物理法則を探索している。Belle II 測定器を構成している検出器の 1 つである電磁カロリメーターは、CsI(Tl) 結晶シンチレーターを PIN-PD で読み出しする全吸収型で、50 MeV 程度の低エネルギー γ 線の検出も可能で、エネルギー分解能も高い。その一方で γ 線の到来方向への感度は乏しい。もし、検出可能なエネルギー下限をこれまで通り低く保ったまま、 γ 線の到来方向に対する感度が改良されれば、生成後に数十 cm 飛行してから $\gamma\gamma$ に崩壊する長寿命粒子の検出感度の向上や、衝突点以外のところから来るビームバックグラウンド γ 線を識別・低減するのに効果が大きい。それを目指すアイデアとして、結晶シンチレーターのアクティブ吸収層と電子・陽電子の通過を検出するピクセル型のシリコン検出器層を合わせて 1 層とし、それが 3 層から成るプリシャワー検出器を導入することの有効性を検討している。

Geant4 シミュレーションにおいて入射エネルギー 1000MeV の γ 線が入射するとき、大きさ $50\mu\text{m}$ のピクセルを持つシリコン検出器をバイナリー読み出しすると、角度分解能は約 40mrad であるということがわかった。 $50\mu\text{m}$ のピクセルサイズは、ビーム衝突実験の崩壊点検出器の仕様とほとんど同じである。

そこで、Belle II 崩壊点検出器のアップグレード用に開発中のオプションの 1 つである、DuTiP センサーの動作試験を行った。DuTiP は SOI なるモノリシックピクセル検出器技術を用いたセンサーで、デジタル化に用いるタイマーを 2 つ内蔵して、片方が処理中のときは他方に切り替えて処理することにより、Belle II 実験のような高輝度実験にも耐えることを企図した設計になっている。

そこで、本研究では DuTiP シリーズの初期型である DuTiP1 の荷電粒子の通過を検出する際の性能評価を行った。電子ビームによるテストに先立ち、デジタル回路の論理回路のシミュレーションを行い、DuTiP1 のデータを読み出すファームウェアを構成する新たなモジュールの実装が適切であることを確かめた。また、実験室のテーブルトップでピクセルヒット読み出しと線源からの β 線の検出が可能であるということを確認した。さらに KEK AR テストビームラインでのビームテストを行った。電子ビームを入射したときと入射していないときのピクセルヒットを比較することにより DuTiP1 は GeV 程度の高エネルギー粒子の検出が可能であるということがわかった。これは DuTiP1 では初となる Minimum Ionizing Particle (MIP) の検出である。ビームテストでは直前に配した 2 層の INTPIX4NA なるピクセル検出器が検出した電子の通過に対応する DuTiP1 のピクセル信号を確認した。これらのビームテストの結果から DuTiP1 の検出効率を算出した。DuTiP1 上に外挿した電子通過が期待される位置と DuTiP1 のヒット位置の残差分布の 3σ まで事象数を数えると検出効率は概ね 50 %であった。検出していない約 10%の事象は最大で約 $10\mu\text{s}$ におよぶトリガーのジッターにより DuTiP1 が装備する 7bit タイマーのレンジ外になる事象のためであることが明らかになっている。その他の考え得る要因として、ALPIDE アンプ回路のパラメータの設定やピクセル中での信号電荷収集効率を左右する PDD 電極の構造が最適でない可能性が挙げられ、これらの事柄を再度調査をする必要があることを示した。

目次

第 1 章 序論	2
1.1 研究背景	2
1.2 プリシャワー検出器の先行研究	2
1.3 本論文での研究	3
第 2 章 Belle II 実験	4
2.1 SuperKEKB 加速器	4
2.2 Belle II 測定器	5
2.2.1 崩壊点検出器	6
2.2.2 中央飛跡検出器	7
2.2.3 TOP カウンター	7
2.2.4 エアロゲル RICH カウンター	8
2.2.5 電磁カロリメーター	8
2.2.6 ミュー粒子・中性 K 中間子検出器	9
2.3 Belle II 実験における長寿命 ALP 探索	9
第 3 章 プリシャワー検出器	10
3.1 Belle II の電磁カロリメーターの特徴と暗黒物質探索	10
3.2 開発動機	10
3.3 構成	11
第 4 章 Geant4 シミュレーションのソフトウェア	12
4.1 開発・実行環境	12
4.2 検出器ジオメトリと ROOT 出力	12
4.3 γ 線到来方向の再構成	13
4.3.1 計算方法	13
第 5 章 GEANT4 シミュレーションによる性能評価	16
5.1 0.05 mm 角ピクセルでのエネルギー損失を検出したピクセル数の分布	16
5.2 0.05mm 角ピクセルにおける位置および角度分解能の評価	16
5.2.1 エネルギー損失で重みをつける場合	18
5.2.2 バイナリー読み出しの場合	18
5.2.3 読み出し方法の違いによる比較	18
5.3 様々な条件での比較	20
5.3.1 ピクセルサイズと分解能の関係	20
5.3.2 入射エネルギーと分解能の関係	20
5.3.3 ピクセルのエネルギー損失しきい値の影響	20

5.4	バックグラウンド γ 線削減	20
5.5	暗黒物質探索への期待	20
5.6	まとめ	25
第 6 章	DuTiP	26
6.1	SOI 技術	26
6.2	DuTiP	26
6.3	DuTiP1	27
6.4	アナログ回路	27
6.5	デジタル回路	29
6.6	Belle II 環境下における DuTiP	30
第 7 章	ファームウェアの構造・シミュレーション	31
7.1	開発環境	31
7.2	ファームウェアの構造	31
7.2.1	イベントの処理について	31
7.2.2	データ転送について	32
7.2.3	PC に送受信されるデータ	33
7.3	サブモジュールのシミュレーション	33
7.3.1	DIGITAL_TEST.v のシミュレーション	33
7.3.2	ROLLINGSHUTTLE_RACA.v のシミュレーション	34
第 8 章	セットアップ	37
8.1	サブボード	37
8.2	SEABAS2	38
8.3	空乏層の見積り	38
8.4	セットアップ	39
8.4.1	使用機器	39
8.4.2	トリガー用シンチレーションカウンタ	40
8.4.3	PC タイミングのセットアップ	41
8.4.4	ピクセルヒットの検出	41
8.4.5	荷電粒子の検出	43
第 9 章	試験方法および結果	44
9.1	PC タイミング	44
9.1.1	試験方法	44
9.1.2	結果	44
9.2	ピクセルヒットの確認	45
9.2.1	試験方法	45
9.2.2	結果	45
9.3	荷電粒子検出の確認	46
9.3.1	試験方法	46
9.3.2	結果	46

第 10 章 KEK AR テストビームラインでのビームテスト	48
10.1 KEK AR テストビームラインについて	48
10.2 テストビームでの目的	48
10.3 セットアップ	48
10.3.1 Telescope 用 INTPIX4NA	50
10.4 データ収集について	50
第 11 章 ビームテストでの結果	52
11.1 電子ビームの有無による 픽셀ヒット頻度の変化	52
11.2 検出効率の算出	53
11.2.1 イベントの選択	53
11.2.2 検出効率の求め方	53
11.2.3 アライメント	53
11.2.4 残差分布について	56
11.2.5 XRPIX5 が出すトリガーのタイミング遅延について	56
11.2.6 IP8 と IP9 から外挿するトラックの傾きについて	58
11.2.7 多重散乱の影響について	58
11.2.8 残差分布を許す範囲について	60
11.2.9 パラメータおよび Run 毎の検出効率の関係	60
第 12 章 まとめと今後の課題	63
参考文献	67
付 録 A ALPIDE アンブ回路のパラメータ	69

目 次

2.1	SuperKEKB 加速器の概略図	4
2.2	ナノビーム衝突の概略図。 $2\phi = 83$ mrad で両ビームのバンチが交差し、そのサイ ズ d と同程度まで衝突点ベータ関数を小さくすることを可能にする。	5
2.3	Belle II 測定器の概観図。内部構造がわかるように一部を切り開いて描いたもの。 . . .	5
2.4	崩壊点位置検出器の概要図。構造がわかるよう一部を切り開いて描いたもの。 . . .	6
2.5	DEPFET のピクセル構造の図	6
2.6	TOP カウンター 1 モジュール	7
2.7	エアロゲル RICH カウンター	8
3.1	Belle II 測定器と長寿命粒子となった ALP の飛程イメージ図	10
3.2	プリシャワー検出器のイメージ図。図中左から γ 線が入射すると仮定している。橙 色が BGO のアクティブ吸収層、青色がトラッキング層のシリコン検出器を表す。 それらを 1 層として 3 層を現在の Belle II 測定器に使用している既存の電磁カロリ メーターの直前に置く。	11
4.1	ピクセルの総数が偶数枚・奇数枚のときの入射位置との関係図。水色・青色の正方 形は 1 つのシリコンピクセルを表し、中心にある黄色の丸は γ 線の入射位置を示す。 偶数枚の場合、厳密に検出器の中央に入射するとピクセルの境界と入射位置が一致 している。	13
4.2	γ 線の到来方向の再構成。各層のシリコンピクセル検出器面上で電磁シャワーの中 心位置を求め、最大 3 点を用いた最小二乗法を実行する。	14
5.1	ヒットを検出したピクセル数の分布。0,1,2 層と番号が大きくなると γ 線入射位置 から奥の位置にある。	17
5.2	ピクセルヒットにエネルギー損失で重みをつけて重心を計算することにより各層の シャワー中心を求めたときの再構成した γ 線の入射位置の分布および γ 線運動量ベ クトルの xz 平面内の傾きの分布	18
5.3	バイナリー読み出しでピクセルヒットの重心により各層のシャワー中心を求めたと きの再構成した γ 線の入射位置の分布および γ 線運動量ベクトルの xz 平面内の傾 きの分布。	19
5.4	ピクセルが検出したエネルギー損失の分布。想定される雑音から分離したものを選 ぶため、50 keV 以上のエネルギー損失が生じたことを要求した。	19
5.5	ピクセルサイズと角度分解能 (a, 上段), 位置分解能 (b, 下段) への影響。青色が x 方 向、橙色が y 方向を表し、丸印がエネルギー損失で重みを付ける場合、四角印がバ イナリー読み出しのときの結果を表す。	21

5.6	入射 γ のエネルギーと角度分解能 (a, 上段), 位置分解能 (b, 下段) への影響。青色が x 方向、橙色が y 方向を表し、丸印がエネルギー損失で重みを付ける場合、四角印がバイナリー読み出しのときの結果を表す。	22
5.7	1000 MeV の γ 入射時、ピクセルのエネルギー損失しきい値 (Energy Cut) を変化させたときのエネルギーと角度分解能 (a, 上段), 位置分解能 (b, 下段) への影響。青色が x 方向、橙色が y 方向を表し、丸印がエネルギー損失で重みを付ける場合、四角印がバイナリー読み出しのときの結果を表す。	23
5.8	ビームバックグラウンド発生頻度が高いホットスポットの場所の図 [13]。ビームバックグラウンド発生頻度が高い衝突点から距離約 1.25 m および約 4 m の位置が該当する。	24
5.9	ALP(a) が質量 $m_a = 2 \text{ GeV}/c^2$ を持ち、 $B \rightarrow Ka$ 崩壊で生じてから 40 cm 飛行した後 $a \rightarrow \gamma\gamma$ モードで二つの等しいエネルギーの γ 線に崩壊した場合を B 中間子の静止系で見た模式図。	24
6.1	SOI の構造	26
6.2	DuTiP1 チップの (a) 実機と (b) 回路図。パラメータについては表 6.1 を参照。 . .	27
6.3	ALPIDE アンプの回路図	28
6.4	デジタル回路のブロック図	29
7.1	DuTIP の FW のダイアグラム	32
7.2	DIGITAL_TEST のシミュレーション結果	34
7.3	DIGITAL_TEST のシミュレーション結果の拡大図	35
7.4	ROLLINGSHUTTLE_RACA.v のシミュレーション結果	36
7.5	ROLLINGSHUTTLE_RACA.v のシミュレーション結果の拡大図	36
8.1	DuTiP1 用サブボードの写真。左側の穴が空いている部分の裏にセンサーがある。左端の 2 か所のリモケーブル (同軸ケーブル) レセプタクル端子からはテストパルスの入力とセンサーバイアス電圧をかけるためのものである。	37
8.2	SEABAS2 の写真。左側にある FPGA が User FPGA であり、右側にある FPGA が SiTCP FPGA である。左側にある 4 つのコネクタの内、上 3 つが DuTiP1 のサブボード側のコネクタと嵌合する。また、右側にはイーサネットの接続口があり、ここを通じて PC と接続する。	38
8.3	SEABAS2 とサブボードを接続したときの写真	39
8.4	バイアス電圧に対する空乏層の厚みの見積り	40
8.5	トリガーシンチの構造	41
8.6	PC タイミングのセットアップのブロックダイアグラム	42
8.7	ピクセルヒットの検出のためのブロックダイアグラム	42
8.8	荷電粒子の検出のためのブロックダイアグラム	43
9.1	トリガーパルスの幅を 1 クロックまで狭め、開始時間を 130 クロックに設定して得られた Current のタイミングでのスナップショット。Current の信号線のみでの応答がある。	45

9.2	トリガーパルスの幅を1クロックまで狭め、開始時間を129クロックに設定して得られた Previous のタイミングでのスナップショット。Previous の信号線のみでの応答がある。	46
9.3	レーザーポインターを照射したときのヒットマップ。横軸はピクセルの column 番号、縦軸は row 番号である。	46
9.4	^{90}Sr が発する β 線を直径 1.5 mm の円形開口部を持つコリメーターを通して DuTiP1 に照射して得たヒットマップ。横軸はピクセルの column 番号、縦軸は row 番号である。column 番号が 20~50 かつ row 番号が 20~50 の領域に円形のピクセルヒットの頻度が高くなっているところが認められる。これがコリメーター開口部の寸法と一致することから荷電粒子が検出できることを確認した。	47
10.1	セットアップの写真および概略図。上流側 5 枚の INTPIX4NA と下流側の INTPIX4NA2 枚および DuTiP1 の間の永久磁石は取り外しが可能であり、設置して収集したデータと設置しないで収集したデータがある。	49
11.1	ビームテストでのヒットマップ。(a) 電子ビームを入射しないとき (b) 電子ビームを入射したときを指す。	52
11.2	実際のヒットと外挿したヒットの模式図。解析に使用したデータを収集した際は永久磁石は設置していない。	54
11.3	IP8-IP9 のヒット相関図	55
11.4	IP8-DuTiP1 のヒット相関図	55
11.5	IP9-DuTiP1 のヒット相関図	55
11.6	$\delta_y - x_{\text{hit}}$, $\delta_x - y_{\text{hit}}$ の 2 次元ヒストグラム	56
11.7	残差分布 (a) 垂直方向と (b) 水平方向。フィットは正規分布である。	57
11.8	Trigger latency の測定結果。上のヒストグラムはシンチレーターのディスクリミネーター出力と XRPIX5 が発して USAGI ボードが配信するトリガーパルスの時間差を表す。	57
11.9	トラックの傾きの分布 (a) 外挿したヒット位置が DuTiP1 上にあると示したトラックの傾き (b) DuTiP1 にヒットが見つかったときのトラックの傾き。横軸は xz 平面の傾きを表し、縦軸は yz 平面の傾きを表す。	58
11.10	カットの位置と検出効率の関係。横軸は Run 番号を表す。但し 15 は全ての Run の合計を表す。検出効率の平均は $0\ \mu\text{m}$ から順に 46.2 %, 46.7 %, 48.2 %, 49.8 %, 51.1 %, 52.1 % となる。	59
11.11	3σ と 4σ での検出効率。横軸は Run 番号を表す。但し 15 は全ての Run の合計を表す。検出効率の平均は 3σ から順に 52.1 %, 52.9 % となる。Run9 および Run11 は 2 つとも同じ結果であった。	60
11.12	ALPIDE アンプ回路のパラメータを変えたときの測定結果。横軸は Run 番号を表す。色はパラメータ設定を表す。	62
A.1	パラメータ毎のヒットマップ。パラメータ 1 ではノイズヒットが見られず、パラメータ 2 ではヒットそのものが少ないことがわかった。パラメータ 3 とパラメータ Li ではヒットマップから大きな違いは見られない。	70

表 目 次

6.1	DuTiP1 のパラメータ	28
6.2	ALPIDE アンプ回路の端子名とその機能	29
7.1	上位 8 ビットの内訳。1 または 0 が記されているところはデータの分類のためで、X が記されているところは 2 進数で値の書き込みに使用できるペイロードである。これに続く下位 8bit は全て値の書き込みに使用するペイロードである。	33
7.2	ピクセルデータおよびヒット情報の 16bit の内訳。上位ビットを 8bit~15bit、下位ビットを 0bit~7bit と表す。	34
7.3	DIGITAL_TEST のシミュレーション条件	35
9.1	PC タイミングの結果。応答があれば○、なければ×と表す。TRG1 の開始時間と幅の値の単位はいずれもクロックである	45
10.1	XRPIX5 のパラメータ [23]	50
10.2	INTPIX4NA のパラメータ [23]	50
11.1	並進方向のアライメントの結果（単位は μm ）	54
11.2	Run 番号と ALPIDE アンプ回路のパラメータ。詳細については付録 A に示した値を参照のこと。	61
A.1	ALPIDE アンプ回路のパラメータ一覧。単位は $[\text{mV}]$ である。	69

第1章 序論

1.1 研究背景

暗黒物質が宇宙に存在し、既知の物質の5倍程度存在するのは分かっている。しかし、その詳細な性質は解明されていない。暗黒物質については場の理論で記述する素粒子であったとして、主に以下のようなことがわかっている。

- 電氣的に中性であること
- 宇宙よりも寿命が長いくらいには十分安定していること
- 現時点で宇宙の平均温度と熱平衡から逸脱しない程度に十分に冷たいこと
- 質量が 10^{-22} eV $\sim$ 10^{35} g の間で事実上制限されていないこと

その質量は未知である上に、スピンなどの性質も不明である。つまり、万能な暗黒物質探索の方法は存在していない。そこで、現在はその暗黒物質粒子の性質に応じた様々な探索方法が実践されている。主な例として

- ビーム衝突実験
- 地下に低バックグラウンドの検出器を設置する直接探索実験
- 高エネルギー宇宙 γ 線観測による間接探索

などがある。本研究に関連するビーム衝突実験の場合、暗黒物質として弱電荷がないフェルミオンが存在した場合に標準理論の範疇にある粒子と有限の結合を持ち得ることを活かして探索する。この場合、暗黒物質フェルミオンをラグランジアンに加えただけでは、理論の枠組みが繰り込み可能にならない。この場合、メディエーターと呼ばれる繰り込みを妨げる項を相殺するボソンの導入が一般的に必要となる。一般に、メディエーターは標準理論の粒子と有限な大きさの結合を持ち得る。2章で述べる Belle II 実験のような電子・陽電子衝突を起源としてメディエーターが生成すると、その崩壊モードは検出器に信号が残らない invisible、標準理論のフェルミ粒子・反フェルミ粒子対、 γ 対などが考えられる。 γ 対になる暗黒物質を Axion Like Particle(ALP) と呼んでいる。ALP の中には崩壊するまで数十 cm 程度飛行する長寿命粒子となるものがあり得る。

本研究は、この長寿命粒子となった ALP が γ 対になった事象を検出する感度を、Belle II 実験において向上する可能性を考えることが動機となっている。

1.2 プリシャワー検出器の先行研究

γ 対に崩壊する長寿命粒子の探索感度を高めるため、 γ 線の到来方向を再構成できる検出器を電磁カロリメーターの直前に配置することを考える。これを「プリシャワー検出器」と呼ぶ。現在考えている構造は詳細について3章で述べるように1放射長の厚みを持つ結晶シンチレーターとピ

クセル検出器を合わせたものを1層とし、それを3層重ねたものである。先行研究として Geant4 シミュレーションによる γ 線入射に対する応答の見積が行われた [13][14]。その結果、1 mm 角のシリコンピクセル検出器を用いれば入射 γ 線の到来方向について約 80 mrad の角度分解能が得られると予想された。先行研究ではピクセルのサイズは最小で 1 mm 角までしか調べられていない。また、入射 γ 線のエネルギーは 1000 MeV で垂直入射の場合のみであった。1 mm 角ではピクセルのサイズが角度分解能を制限している可能性が否定できないため、1 mm 角よりも小さいピクセル検出器を導入した場合の評価をする必要がある。

ブリシャワー検出器はアクティブ吸収層とシャワー中の電子・陽電子の通過を検出するトラッキング層の2層から構成されている。トラッキング層のシリコン検出器の候補として SOI 技術を用いて開発された DuTiP があり、6 章で述べる。DuTiP は近年開発が進められているシリコンセンサーで、これまでにアナログ部のシミュレーションや β 線による検出効率の算出が行われた [19]。一方でデジタル回路のシミュレーションや高運動量の荷電粒子、すなわち Minimum Ionizing Particle(以下 MIP) の通過を検出する機能の実証は行われていなかった。

1.3 本論文での研究

本研究では Geant4 シミュレーションを用いてより小さいピクセルサイズでのシミュレーションを行った。このとき、DuTiP1 の仕様に合わせてシリコン検出器がバイナリー読み出しの場合と、エネルギー損失も読み出した場合、その層のシリコンピクセル検出器面上でのシャワー中心位置をピクセルヒットの重心をとって求める場合について、 γ 線の到来方向の角度分解能や入射位置の分解能を比較した。また、それらの結果をもとに、Belle II 実験における長寿命の ALP 探索にもたらされる利点について検討した。

DuTiP1 はファームウェアの論理回路のシミュレーションを行い、作成したモジュールが想定している動作をしていることを確認した。また、DuTiP1 では初となる電子ビームによるテストを行い、MIP を検出する機能を確認した。その結果、今後の開発を進めるにあたり、慎重に検討を重ねるべき観点を明らかにした。

第2章 Belle II実験

Belle II 実験とは、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構で行われている国際共同実験である。SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器から構成されている高度化した第 2 世代の B ファクトリー実験である。2024 年 2 月現在進行中であり、粒子・反粒子の対称性の破れや新たな物理法則の探求を行っている。

2.1 SuperKEKB 加速器

前身である KEKB 加速器を大改造した加速器である。周長約 3 km の加速器であり、7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子を Belle II 測定器の中で衝突させる非対称エネルギー衝突型円形加速器である。この電子・陽電子ビームは LINAC と呼ばれる電子・陽電子線形加速器から入射され、それぞれ反対の向きに周回して衝突点で交差する。KEKB 加速器の性能の 30 倍である $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティを目指し、図 2.2 のようなナノビーム方式を採用した。図中の d がビーム交差領域の幅で、KEKB の 22 mrad よりも大きい 83 mrad で交差し、ビームサイズを絞るベータ関数を KEKB の 1/20 まで小さくすることを想定している。ビーム電流の上昇によるルミノシティ増加分も合わせて、上記の設計ルミノシティを目指す。

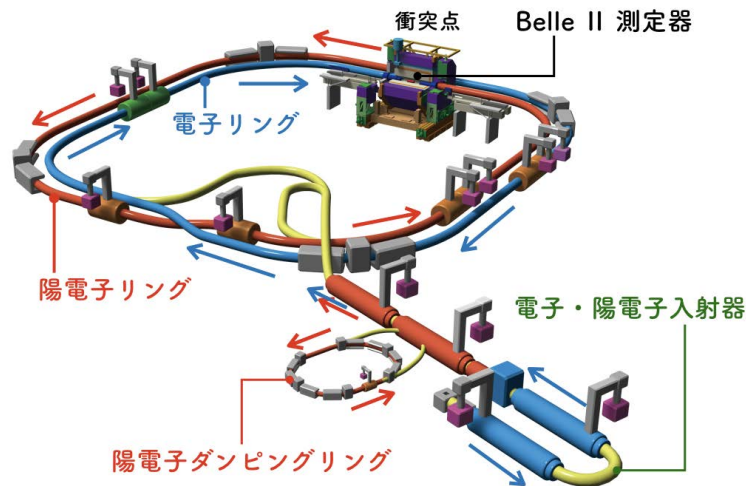


図 2.1: SuperKEKB 加速器の概略図

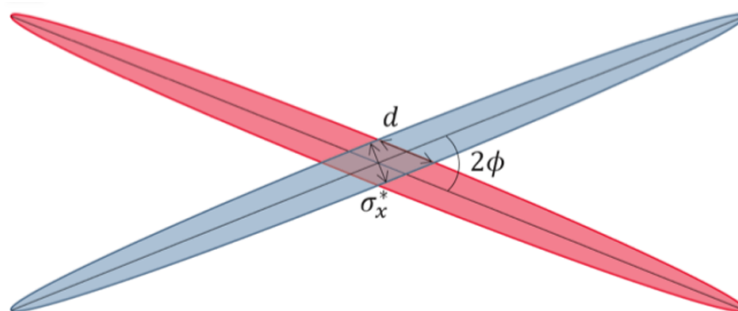


図 2.2: ナノビーム衝突の概略図。 $2\phi = 83 \text{ mrad}$ で両ビームのバンチが交差し、そのサイズ d と同程度まで衝突点ベータ関数を小さくすることを可能にする。

2.2 Belle II 測定器

Belle II 実験で使用されている測定器である。SuperKEKB 加速器の衝突点に位置し、その大きさは幅約 8 m、高さ約 8 m、重さが約 1400 トンで衝突点を覆うように建設された大立体角汎用スペクトロメーターである。測定器システム全体は、異なる対象に合わせた複数種類の検出器で構成されている。図 2.3 はそれぞれの検出器の特徴を含む Belle II 測定器を表す。以下にその各検出器の特徴を記述する。

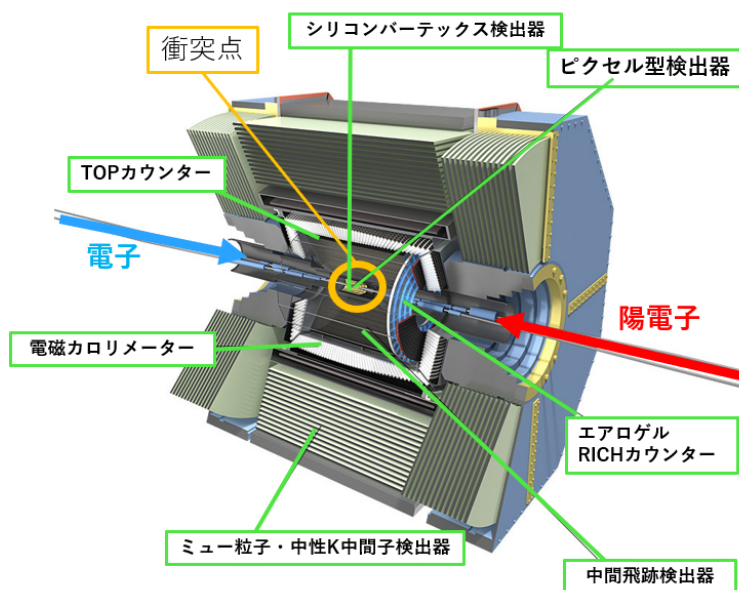


図 2.3: Belle II 測定器の概観図。内部構造がわかるように一部を切り開いて描いたもの。

2.2.1 崩壊点検出器

崩壊点検出器は衝突点に最も近い位置に存在する。シリコンセンサー上に見出したヒットで中央飛跡検出器（2.2.2 節）から再構成された飛跡を外挿したものと一致するものを用いて、 B 中間子の崩壊位置を測定する。Belle II 測定器の崩壊点検出器では、2 層のシリコンピクセルと 4 層の両面シリコンストリップセンサーの合計 6 層で構成される。この 6 層はビーム軸から距離 15 cm までの範囲を占めている。図 2.4 に崩壊点検出器の概略図を示す。

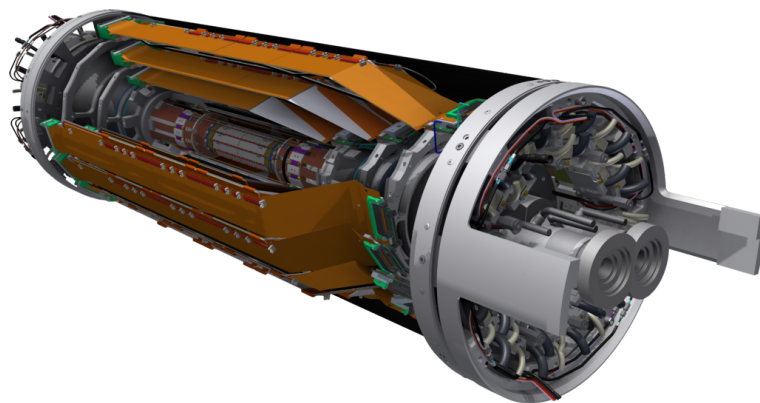


図 2.4: 崩壊点位置検出器の概要図。構造がわかるよう一部を切り開いて描いたもの。

シリコンピクセル検出器

最内 2 層のピクセル型のシリコン検出器である。2023 年夏までは最内 1 層目は全数インストール、2 層目は 1/12 のみインストールであったが 2023 年夏に 2 層とも全数インストールされた。ピクセルサイズは層、位置によって微妙に変わるが最小のもので $55 \times 50 \mu\text{m}^2$ である。DEPFET という構造を採用しており、消費電力が低く、厚みが $50 \mu\text{m}$ と薄いので多重散乱の影響が少ないことが再構成した B 中間子崩壊点の位置分解能を高くする上で貢献している。

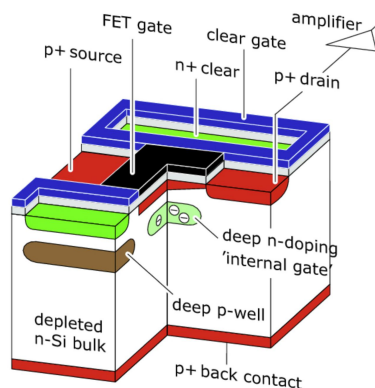


図 2.5: DEPFET のピクセル構造の図

シリコンバーテックス検出器

シリコンピクセル検出器の外側にある。厚み $300\text{ }\mu\text{m}$ の両面シリコンストリップセンサーを用いており、表面に 512 本・裏面に 768 本のストリップが切られている。シリコンバーテックス検出器のセンサーの枚数は 1 層目から順に 14、30、48、80 枚である。

2.2.2 中央飛跡検出器

Belle II 測定器の中央部分に設置される円筒型のドリフトチェンバーである。内側直径が約 32 cm、外側直径が約 226 cm、長さが約 260 cm ある。内部をヘリウムとエタンを 1:1 で混合したガスで満たし、信号読み出しと電場形成を目的に約 56000 本のワイヤーが使用されている。その内訳は直径 $30\text{ }\mu\text{m}$ の金メッキタングステンを使用したセンスワイヤーが 14336 本、直径 $126\text{ }\mu\text{m}$ のアルミニウム合金を使用したフィールドワイヤーが 42240 本である。荷電粒子が検出器を通過するとガス分子が電子と陽イオンに電離する。約 2.5 kV の高電圧を印加したセンスワイヤーと接地したフィールドワイヤーが作る電場に沿って電子がドリフトする。センスワイヤーのごく近傍で電子がガス増幅を起こすことによってセンスワイヤーに電気信号パルスを生じる。中央飛跡検出器ではこうして生じる荷電粒子の通過に伴って生じるセンスワイヤーのヒットから飛跡を再構成し、その磁場中における曲率から運動量を測定する。さらに崩壊点検出器と組み合わせて、粒子の崩壊点の位置を決定するとともに、Belle II 実験全体の飛跡トリガー信号を出すのに用いられる。

2.2.3 TOP カウンター

Belle II 測定器のバレル部の円筒側面に設置されている。Belle 実験のエアロジェルチェレンコフ検出器に代わり、Belle II 実験で導入された新型の検出器で、 π 中間子と K 中間子を識別する。16 台のモジュールで構成されており、それぞれは超高精度に研磨された石英板、MCP-PMT と呼ばれる光検出器と高速読み出しエレクトロニクスで構成される。チェレンコフ光はリング状の光を出し、Belle II の TOP カウンターでは、そのリング状の光を投影するスペースを設ける代わりに表面を高い平滑度で研磨した石英副射体を採用し、その中を全反射で伝わる光路がチェレンコフ光の放射角度に依存して変化するので、端に設置した光検出器で到達時間を精密に測定する。このときの時間分解能は 40 ps 以下である。これにより荷電粒子の種類を識別できる。

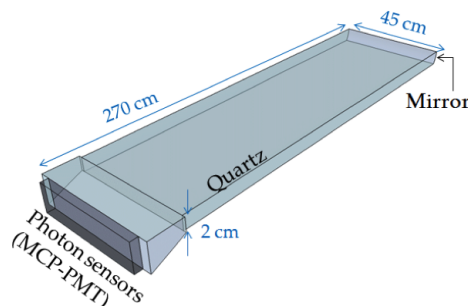


図 2.6: TOP カウンター 1 モジュール

2.2.4 エアロゲル RICH カウンター

前方エンドキャップ部に位置している粒子識別装置である。図 2.7 がその全体図になる。大きさは直径約 2 m、厚さ約 25 cm である。チェレンコフ光が光検出器を配置した面上に作るリングイメージの半径の違いから荷電 K 中間子と荷電 π 中間子を識別する。エアロゲル RICH カウンターでは名前の通り、荷電粒子にチェレンコフ光を出させる輻射体であるシリカエアロゲルを通過し、そのとき発生するチェレンコフ光を HAPD という光検出器で捕えている。要求されている識別能力は B 中間子の稀崩壊モードに含まれる K/π 中間子の最大運動量 $3.5\text{GeV}/c$ で 4σ 以上の分離能力を持つことである。

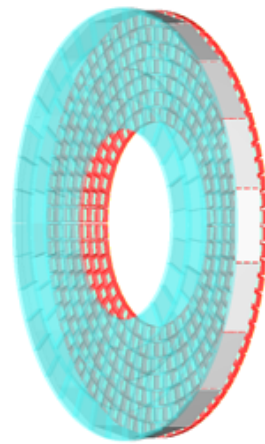


図 2.7: エアロゲル RICH カウンター

2.2.5 電磁カロリメーター

電子や γ 線のエネルギーの測定を行っている。図 2.3 の上下にある白い部分が電磁カロリメーターである。電磁カロリメーターに γ 線や電子・陽電子が入射すると、電子・陽電子対生成や制動放射により電磁シャワーを形成する。Belle II では結晶シンチレーターとして $\text{CsI}(\text{Tl})$ を使い、その中で電磁シャワーを形成する粒子のエネルギー損失により生じるシンチレーション光を PIN-PD で読み出す。この出力を前置増幅器と波形整形回路でアナログ処理した後にサンプリング周波数 1.76 MHz, 18 bit の ADC で波形データをデジタル化する。そこからエネルギー損失とタイミングを波形フィットして求めることによりエネルギーを測定する。Belle II 実験では衝突ビームの重心エネルギーは 10.58 GeV であり、それに対応するため電磁カロリメーターは十数 MeV $\sim$ 7 GeV と広い範囲でエネルギー測定を行う。数十 MeV 程度のエネルギー領域から感度と高いエネルギー分解能が必要なので、全吸収型のカロリメーターを採用している。 $\text{CsI}(\text{Tl})$ 結晶シンチレーターは $5.5 \times 5.5 \times 30 \text{ cm}^3$ の大きさのものを合計で 8736 本使用している。波形フィットにより時間分解能は 100 MeV 以上のエネルギー損失に対して約 10 ns である。

2.2.6 ミュー粒子・中性 K 中間子検出器

ミュー粒子・中性 K 中間子検出器は KLM と呼ばれ、Belle II 測定器の最外部に位置し、広い面積をカバーしている。Belle II 検出器のソレノイドの外側は磁場が外部に漏れないように鉄製フラックスリターンになっている。この部分は約 4.7 cm の鉄板を 14 層、約 4.4 cm の隙間を開けて配置した構造になっている。この隙間にエンドヨーク部とバレル部の最も内側の 3 層はプラスチックシンチレーターとファイバーを介して、ガイガーモードアバランシェフォトダイオードで読み出す検出器を配置しており、それ以外のバレル部は Belle 実験から継承した高抵抗平板検出器 (Resistive Plate Chamber) を使用する。 μ 粒子は物質中では電磁相互作用により電離損失をするのみでフラックスリターンを構成する鉄板を何層も貫通する。荷電ハドロンの場合は強い相互作用を起こして多くの場合ソレノイド外側の最初の鉄板で止まる。この差を利用して μ 粒子を選別することが可能である。

2.3 Belle II 実験における長寿命 ALP 探索

1.1 節で述べたように、アクシオン似粒子 ALP は γ 対に崩壊し、長寿命粒子になり得る。Belle II 実験において、ALP が電磁カロリメーターに到達以前に崩壊すると、そこで生じた γ 線は電磁カロリメーターで検出できる。エネルギー測定だけでなく、もしその方向がわかると衝突点以外からきた γ 線をバックグラウンドとして除くとともに、ALP の飛行距離の事象ごとの変化のため、再構成した γ 対の質量分布が広がってしまう効果を防止し、探索感度を向上できる可能性がある。そこで、本研究では、電磁カロリメーターの性能改良を測るものとしてプリシャワー検出器を検討する。

第3章 プリシャワー検出器

3.1 Belle II の電磁カロリメーターの特徴と暗黒物質探索

現在の Belle II 実験で使用している電磁カロリメーターの大きい特徴として、2.2.5 節で述べたように数十 MeV $\sim$ 7 GeV の広いエネルギー領域に対応していること、カウンターの信号パルスを波形フィットすることにより、エネルギー損失に加えてタイミングも 10 ns 以上の時間分解能で再構成できるという特徴がある。その一方で γ 線の到来方向に対する感度は乏しく、衝突点以外からくるビームバックグラウンド γ 線の識別は困難である。また、1.1 節にあるような数十 cm 進んだ後に γ 線対に崩壊する長寿命粒子となっている ALP の質量を必ずしも正しく再構成できず、分布の上端が現れるまでの統計が必要になる。

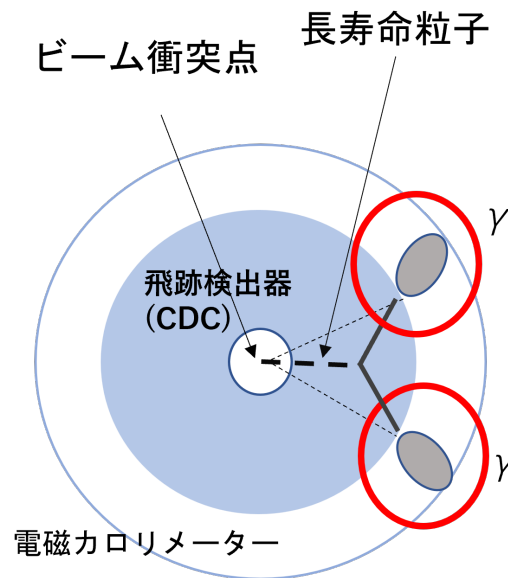


図 3.1: Belle II 測定器と長寿命粒子となった ALP の飛程イメージ図

3.2 開発動機

長寿命粒子となった ALP が数十 cm 飛行してから γ 線対に崩壊しても、現状の Belle II 実験の電磁カロリメーターで γ 線を検出した場合、その運動量ベクトルはビーム衝突点と電磁カロリメーターで検出した電磁シャワーを直線で結んだ方向とみなさざるを得ない。そこで、長寿命粒子となった ALP の探索感度を上げる工夫として、既存の電磁カロリメーターの直前に設置して γ 線の到来方向への感度を持つプリシャワー検出器を検討することにした。

3.3 構成

本研究で検討したプリシャワー検出器は、電磁シャワーを発達させつつ、そのエネルギー損失も測るアクティブ吸収層として BGO 結晶、シャワー中の電子・陽電子の通過を検出するトラッキング層としてピクセル型のシリコン検出器を使用するものである。

プリシャワー検出器のモデルとして図 3.2 に示すように、BGO 結晶とシリコン検出器を 1 層として、それが 3 層から成る検出器を考える。断面積は Belle II 実験の電磁カロリメーターで使用されている CsI(Tl) 結晶の断面と同じ $5.5 \times 5.5 \text{ cm}^2$ とした。厚みは吸収層は 1 放射長である 1.12 cm、トラッキング層は 0.3 mm とした。今日では LYSO, GSO など BGO よりも大光量で発光時間が短い高性能なシンチレーターが存在するが、いずれも BGO と放射長やモリエール半径に顕著な差はないため、シャワーの発達状況を調べるシミュレーションでは代表して BGO としても差し支えない。Belle II 実験での電磁カロリメーターは低エネルギーの γ 線への感度が重要であり、50 MeV や 100 MeV の γ 線では 3 放射長進む間に全吸収されるものもある。よってプリシャワー部分でも γ 線のエネルギーを測定できることが必要で、他の実験でのサンプリング型カロリメーターに使われているような吸収層に鉛やタングステンを使うことは適していないため、このようなアクティブ吸収層を含んだ構成を検討対象とした。

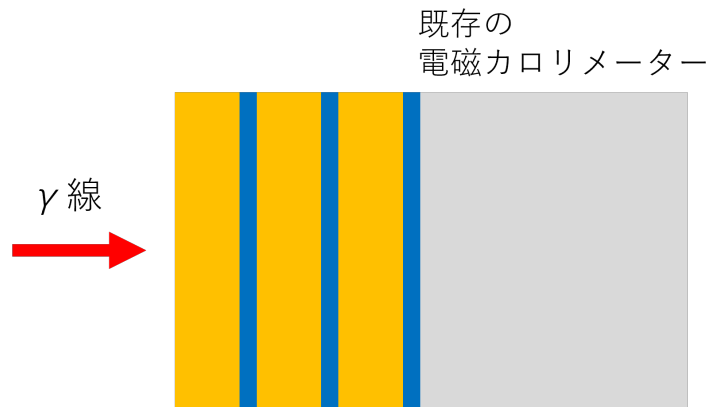


図 3.2: プリシャワー検出器のイメージ図。図中左から γ 線が入射すると仮定している。橙色が BGO のアクティブ吸収層、青色がトラッキング層のシリコン検出器を表す。それらを 1 層として 3 層を現在の Belle II 測定器に使用している既存の電磁カロリメーターの直前に置く。

第4章 Geant4シミュレーションのソフトウェア

前章で述べたプリシャワー検出器の性能の期待値を見積るために実行した Geant4 シミュレーションのソフトウェア環境について述べる。Geant4 は C++ 言語で書かれ、物質のジオメトリと材質を定義し、そこに粒子が入射したときに起こす相互作用をモンテカルロ法で扱うシミュレーションソフトウェアである。

4.1 開発・実行環境

本研究でのシミュレーションで使った Geant4 のバージョンは 10.6 で、解析に使った ROOT のバージョンは 6.18.04 であった。

4.2 検出器ジオメトリと ROOT 出力

本研究では Geant4 を用いてプリシャワー検出器に関するシミュレーションを行い、 γ 線に対して入射位置の分解能や到来方向の角度分解能を見積もった。

シミュレーションで変えた条件は

- シリコン検出器のピクセルの大きさ
- 入射する γ 線のエネルギー
- ピクセルのエネルギー損失しきい値

の以上 3 項目である。一つのシミュレーションデータは γ 線が垂直に入射する場合 10000 事象である。

入射位置は基本的に $5.5 \times 5.5 \text{ cm}^2$ の断面の中心位置としたが、各層のピクセルの総数が偶数または奇数で事情が異なる。図 4.1 のように、奇数枚のときはシンチレーターの断面の中心がピクセルの中心と一致するため、中心位置に入射する。偶数枚の場合は断面の中心位置がピクセルの境界線上になることを考慮して入射位置を中心からピクセルの大きさの半分だけ x および y 座標共にずらして入射を行った。一例として 0.5 mm 角のピクセルの場合、 $(x, y) = (0, 0) \text{ [mm]}$ に入射するのではなく、 $(x, y) = (0.25, 0.25) \text{ [mm]}$ に入射を行った。イベント毎にエネルギー損失があったピクセルの 3 次元座標およびエネルギー損失の値を ROOT ファイルに保存する。

なお、本シミュレーションでは磁場の影響は考慮せず、プリシャワー検出器のみを実装したシミュレーションである。

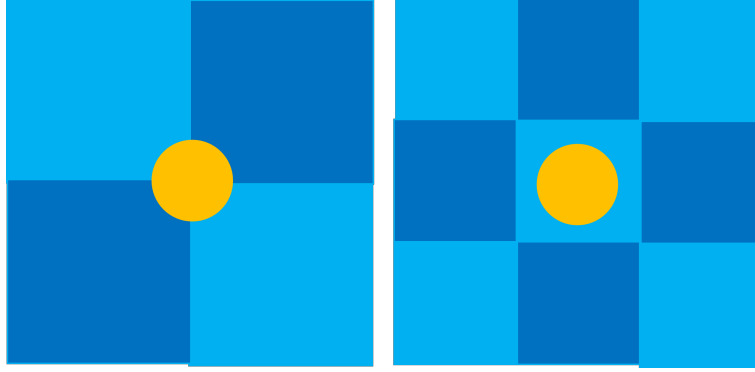


図 4.1: ピクセルの総数が偶数枚・奇数枚のときの入射位置との関係図。水色・青色の正方形は 1 つのシリコンピクセルを表し、中心にある黄色の丸は γ 線の入射位置を示す。偶数枚の場合、厳密に検出器の中央に入射するとピクセルの境界と入射位置が一致している。

4.3 γ 線到来方向の再構成

前節で述べたようにシミュレーション結果を保存した ROOT ファイルからデータ解析の際に取り出す情報は主に 2 つある。「ヒットのあったピクセルの三次元座標」と「そのピクセルが検出したエネルギー損失の値」である。6 章で述べる DuTiP がエネルギー損失を測定しないバイナリー読み出しのシリコンセンサーのため、解析時にはシリコンピクセル検出器上の電磁シャワーの中心を求めるとき「エネルギー損失の値で重みを付けて計算する方法」と「エネルギー損失で重みを付けずに計算する方法」の 2 通りを行って比較した。

それぞれの層での電磁シャワーの中心位置を算出し、電磁シャワーの中心を結ぶように最小二乗法を用いて γ 線の到来方向を再構成する。次の 4.3.1 節でその詳細について述べる。

4.3.1 計算方法

まず、 γ 線の入射位置を $\vec{r}_{\text{in}} = (x_{\text{in}}, y_{\text{in}}, 0)$ とし、その方向を $\vec{V}_{\gamma} = (e_1, e_2, 1)$ とする。各層での電磁シャワーの中心位置を計算する。エネルギー損失の値で重みを付けて電磁シャワーの中心位置を算出するときは式 (4.1) を使い、バイナリー読み出しを想定する場合は式 (4.2) を使って計算を行った。 i 層目での電磁シャワーの中心位置を表すベクトル $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$ は、その層の中でエネルギー損失のあったピクセルを表すインデックスを j として、

$$\vec{r}_i = \frac{\sum_j E_j^{\text{pix}} \vec{q}_j}{\sum_j E_j^{\text{pix}}} \quad (4.1)$$

または

$$\vec{r}_i = \frac{\sum_j \vec{q}_j}{N_{\text{hit}}(i)} \quad (4.2)$$

で与えられる。

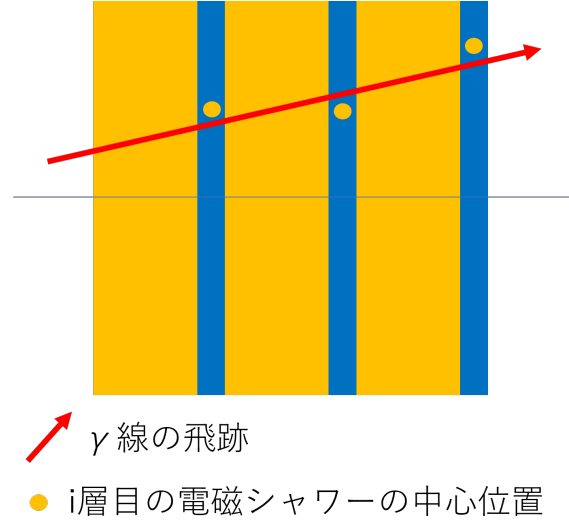


図 4.2: γ 線の到来方向の再構成。各層のシリコンピクセル検出器面上で電磁シャワーの中心位置を求め、最大 3 点を用いた最小二乗法を実行する。

E_j^{pix} は j 番目のピクセル毎のエネルギー損失、 $\vec{q}_j$ はそのピクセルの位置、 $N_{\text{hit}}(i)$ は i 層中のヒットの数を表す。

以降はエネルギー損失の値を読み出す場合も、バイナリー読み出しの場合も計算方法は同じである。

$\vec{r}_i$ と $\vec{r}_0 + \vec{V}_\gamma$ の z 座標が等しくなるベクトル $\vec{V}_i$ は $\vec{V}_i = (z_i e_1 + x_0, z_i e_2 + y_0, z_i)$ と書ける。 $\vec{V}_i$ と $\vec{r}_i$ の距離を $d[i]$ とし、その二乗和を Q とすると式 (4.3) になる。

$$\begin{aligned}
 Q &= \sum_{i=0}^2 d[i]^2 \\
 &= \sum_{i=0}^2 |\vec{V}_i - \vec{r}_i|^2 \\
 &= \sum_{i=0}^2 ((z_i e_1 + x_{\text{in}} - x_i)^2 + (z_i e_2 + y_{\text{in}} - y_i)^2)
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

となる。この Q が最小かつ極小になるとき、 x_0, y_0, e_1, e_2 は以下の式を満たす。

$$\frac{\partial Q}{\partial x_0} = 6x_{\text{in}} - 2\sum x_i + 2e_1 \sum z_i = 0 \tag{4.4}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial y_0} = 6y_{\text{in}} - 2\sum y_i + 2e_2 \sum z_i = 0 \tag{4.5}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial e_1} = 2e_1 \sum z_i^2 - 2\sum x_i z_i + 2x_{\text{in}} \sum z_i = 0 \tag{4.6}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial e_2} = 2e_2 \sum z_i^2 - 2\sum y_i z_i + 2y_{\text{in}} \sum z_i = 0 \tag{4.7}$$

この4元一次方程式を解くと以下ようになる。

$$x_{\text{in}} = \frac{\sum x_i \sum z_i^2 - \sum z_i \sum x_i z_i}{3 \sum z_i^2 - (\sum z_i)^2} \quad (4.8)$$

$$y_{\text{in}} = \frac{\sum y_i \sum z_i^2 - \sum z_i \sum y_i z_i}{3 \sum z_i^2 - (\sum z_i)^2} \quad (4.9)$$

$$e_1 = \frac{3 \sum x_i z_i - \sum x_i \sum z_i}{3 \sum z_i^2 - (\sum z_i)^2} \quad (4.10)$$

$$e_2 = \frac{3 \sum y_i z_i - \sum y_i \sum z_i}{3 \sum z_i^2 - (\sum z_i)^2} \quad (4.11)$$

以上の計算により γ 線の入射位置 $\vec{r}_{\text{in}} = (x_{\text{in}}, y_{\text{in}}, 0)$ と方向ベクトル $\vec{V}_\gamma$ 再構成を行う。本研究ではこのときの入射位置とベクトル $\vec{q}_j$ の x 成分および y 成分を表す e_1 および e_2 の分布の root mean square を入射位置の分解能と角度方向の分解能と定義する。

第5章 GEANT4シミュレーションによる性能評価

本章では4章で述べたシミュレーションを実行した結果について説明する。本章では特記しない場合、1000 MeV の γ 線を入射している。

5.1 0.05 mm 角ピクセルでのエネルギー損失を検出したピクセル数の分布

図 5.1 はそれぞれのイベントの各層でエネルギー損失を検出したピクセルの数の分布を示す。エネルギー損失を検出したピクセル数がゼロの割合は奥の層になるほど減っている。奥の層では電磁シャワーの発達に応じてエネルギー損失を検出したピクセルが複数あるイベント数が多くなる。最後の層でエネルギー損失を検出したピクセル数の平均値は約 5 枚であり、ピクセルの総数が 12100 枚であるので、占有率は平均で 0.04 % である。最大でピクセルが 20 枚程度であり、このときの占有率は 0.1 % 程度まで大きくなる。

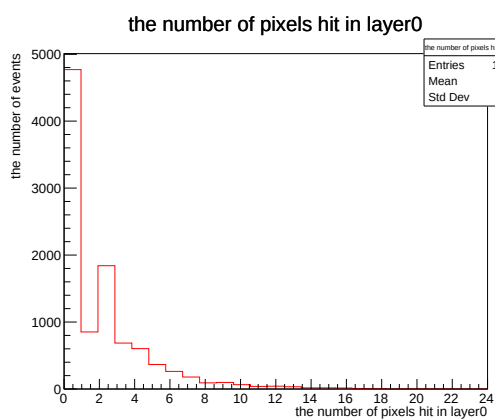
また、電磁シャワーの生成が起こったとき、ほとんどのイベントで複数のピクセルにエネルギー損失がある。それは電子陽電子対生成した電子と陽電子の多重散乱を見積ることにより、以下のよう

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.088 \log_{10} \frac{x z^2}{X_0 \beta^2} \right] \quad (5.1)$$

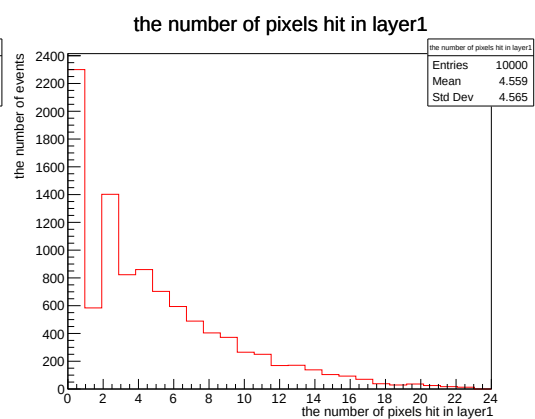
p は入射粒子の運動量、 βc は入射粒子の速さ、 z は入射粒子の電荷の大きさを指す。また、 x は物質の厚み [mm] であり、 X_0 は放射長 [mm] のことを指す。簡単のためにエネルギー 1000 MeV の γ 線から電子と陽電子が生じ、それぞれが $c p = 500 \text{ MeV}$ 、 $\beta = 1$ を持つとする。また、崩壊は吸収層を半分進んだところで起きたとして考え、 $\frac{x}{X_0} = 0.5$ とする。このとき $\theta_0 \simeq 0.02 \text{ rad}$ となる。この角度にアクティブ吸収層の厚みの半分である 5.6 mm をかけると約 0.1 mm となり、ピクセル幅の 2 倍に相当する。これが $\gamma \rightarrow e^+ e^-$ 直後のピクセル検出器面上の電子と陽電子の通過位置の差の平均を与えると考えることができ、ピクセル 1 枚のみにエネルギー損失があるイベントが少ないと考える。

5.2 0.05mm 角ピクセルにおける位置および角度分解能の評価

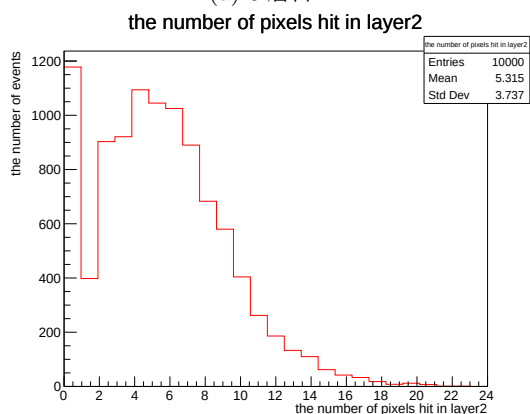
6 章で述べる DuTiP1 のピクセルサイズが $45 \mu\text{m} \times 45 \mu\text{m}$ である。それとほぼ同等な 0.05 mm 角ピクセルの場合に位置分解能や角度分解能の期待値を見積った。既述した通り、ピクセル中のエネルギー損失で重みをつけた重心位置を求めたときと、バイナリー読み出しでピクセルの位置ベクトル重心を求めたときを比較した。



(a) 0 層目



(b) 1 層目



(c) 2 層目

図 5.1: ヒットを検出したピクセル数の分布。0,1,2 層と番号が大きくなると γ 線入射位置から奥の位置にある。

5.2.1 エネルギー損失で重みをつける場合

γ 線を再構成する際にエネルギー損失の値で重みをつけて計算をした場合、再構成した入射位置と角度の分布を図 5.2 に示す。

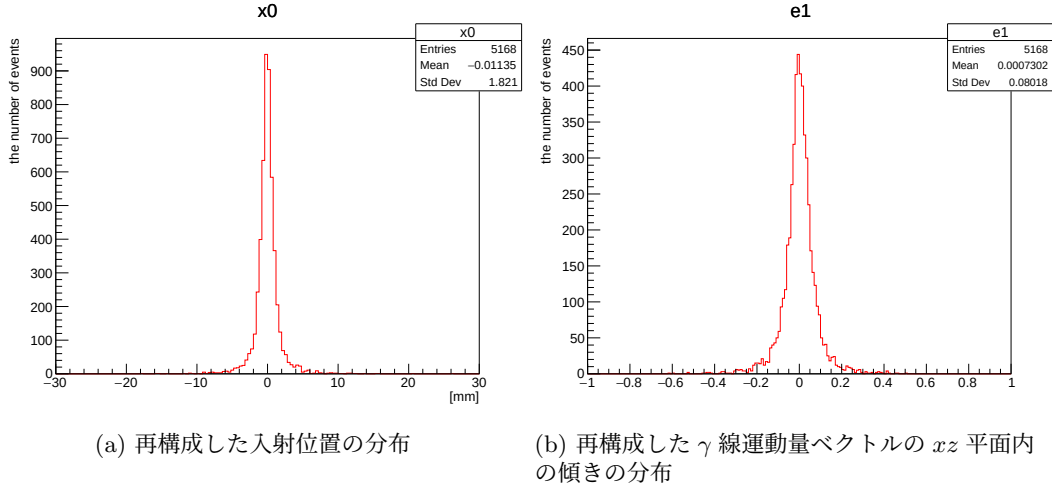


図 5.2: ピクセルヒットにエネルギー損失で重みをつけて重心を計算することにより各層のシャワー中心を求めたときの再構成した γ 線の入射位置の分布および γ 線運動量ベクトルの xz 平面内の傾きの分布

これらの分布の標準偏差 (root mean square) から、位置分解能は 1.8 mm、角度分解能は 80 mrad だということがわかった。

5.2.2 バイナリー読み出しの場合

同様に、 γ 線を再構成する際にエネルギー損失の値で重みをつけないバイナリー読み出しとして計算をした場合は図 5.3 に示す分布になる。位置分解能は 0.9 mm、角度分解能は 40 mrad だということがわかった。

5.2.3 読み出し方法の違いによる比較

バイナリー読み出しで電磁シャワー中心の再構成を行う方がエネルギー損失で重みをつけて行ったときよりも入射位置、到来方向の角度とも分解能が良くなるということがわかった。これはエネルギー損失の分布が関係する。図 5.4 はエネルギー損失を検出したピクセル毎の読み出したエネルギーの分布である。100 keV をピークにランダム分布を作っていることがわかる。この分布によるエネルギー損失の広がりが原因で、電磁シャワーの中心位置を計算するときに本来等価に扱うべき電子・陽電子通過によるヒットに対して、エネルギー損失が大きい方に引っ張られてしまい、結果として真の γ 線運動量ベクトルの外挿に対して、再構成したシャワー中心の位置のばらつきが大きくなったと考えられる。

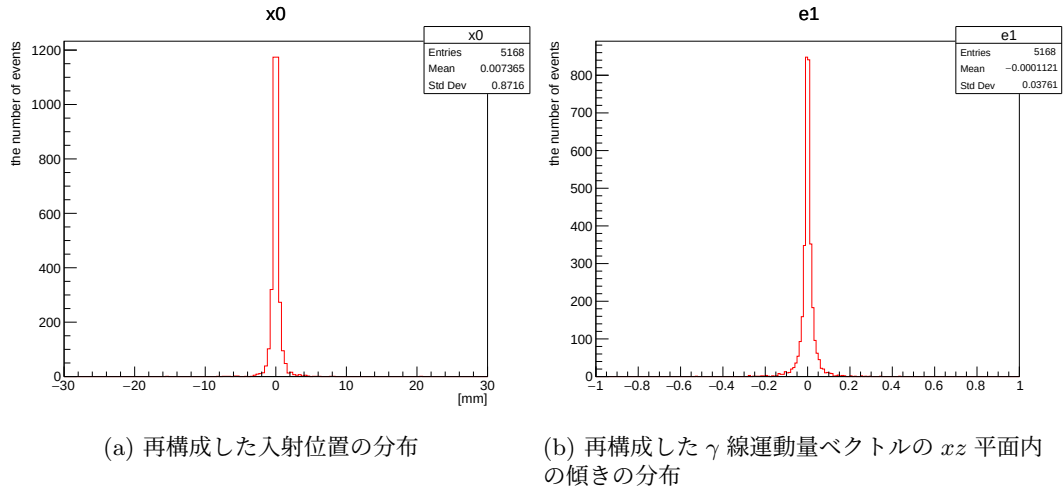


図 5.3: バイナリー読み出しでピクセルヒットの重心により各層のシャワー中心を求めたときの再構成した γ 線の入射位置の分布および γ 線運動量ベクトルの xz 平面内の傾きの分布。

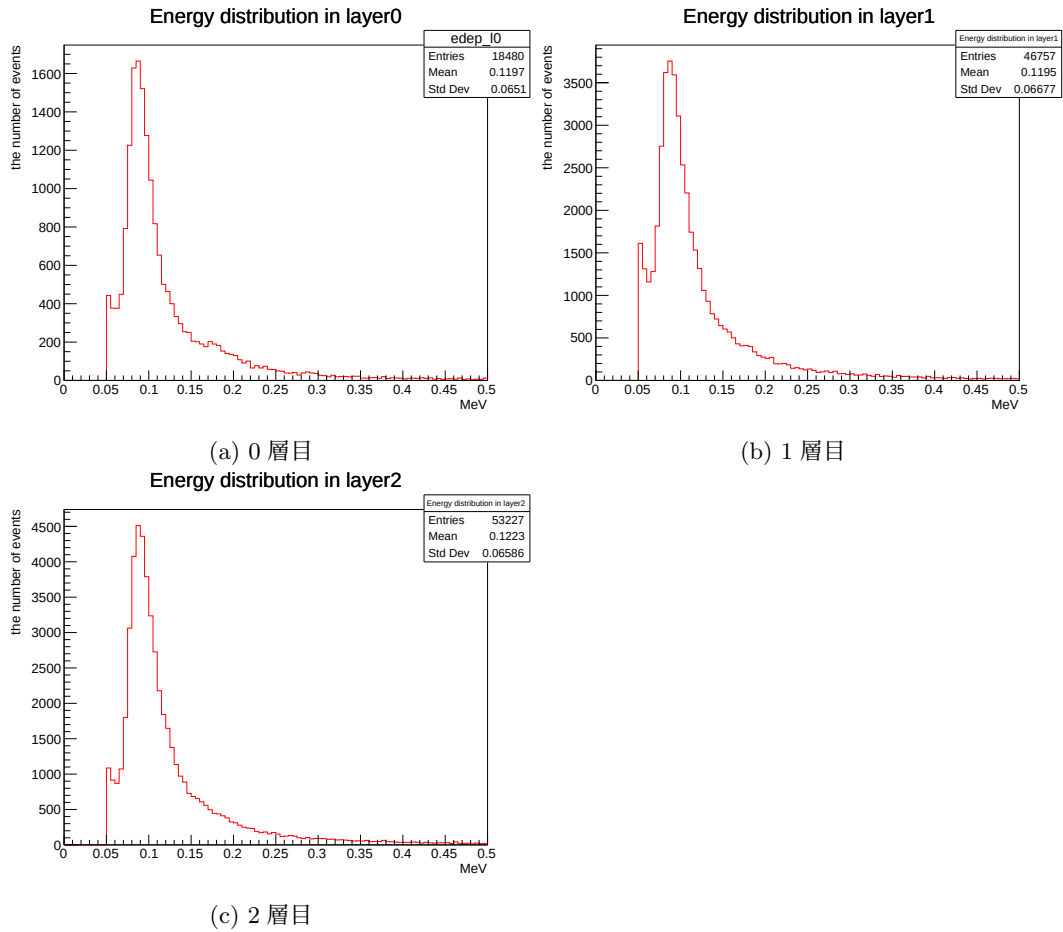


図 5.4: ピクセルが検出したエネルギー損失の分布。想定される雑音から分離したものを選ぶため、50 keV 以上のエネルギー損失が生じたことを要求した。

5.3 様々な条件での比較

ここまでは 0.05 mm 角ピクセルのときのみについて記述してきた。ピクセルサイズ, 入射エネルギー, ピクセルのエネルギー損失しきい値を変えたときに位置分解能や角度分解能にどのような違いが見られたのかについて述べる。

5.3.1 ピクセルサイズと分解能の関係

図 5.5 はピクセルサイズの大きさを変えたときの分解能の違いを表す。0.05 mm 角ピクセルのときと同様に、どの大きさであってもバイナリー読み出しの方が分解能がよくなる。また、ピクセルサイズを小さくした方が位置分解能・角度分解能ともに良い。

5.3.2 入射エネルギーと分解能の関係

0.05 mm 角ピクセルの場合に入射エネルギーを変えたときの再構成した入射位置と到来方向の角度の分解能の変化を図 5.6 に表す。ここでは GeV 級の質量を持つ ALP の崩壊で生じる γ 線を考え、エネルギーを 500 MeV, 1000 MeV, 1500 MeV と変化させた。バイナリー読み出しでは 500 MeV の γ 線に対し、位置分解能と角度分解能はそれぞれ 1.5 mm と 75 mrad であるのに対し、エネルギーが 1500 MeV まで上がるとそれらは 0.8 mm と 35 mrad になる。 γ 線のエネルギー上昇により電磁シャワーを構成する粒子数が増すことと、電磁シャワーのコアが明瞭になるためと考えられる。

5.3.3 ピクセルのエネルギー損失しきい値の影響

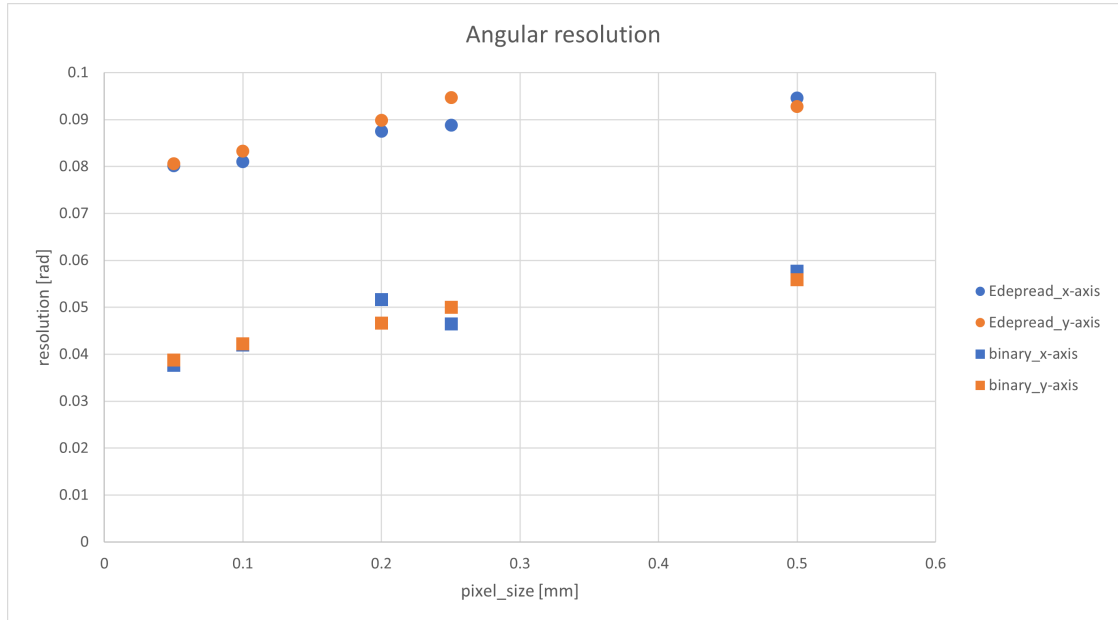
図 5.7 はピクセルのエネルギー損失しきい値を変えたときの位置分解能および角度分解能の変化を表す。入射エネルギーは 1000 MeV である。特にピクセルのエネルギー損失で重みをつけて重心を計算する場合、しきい値を上げると分解能は良くなる。これは図 5.4 で示したように、エネルギー損失はランダウ分布するため、しきい値を上げることで分布の幅が狭くなるからであると考えられる。

5.4 バックグラウンド γ 線削減

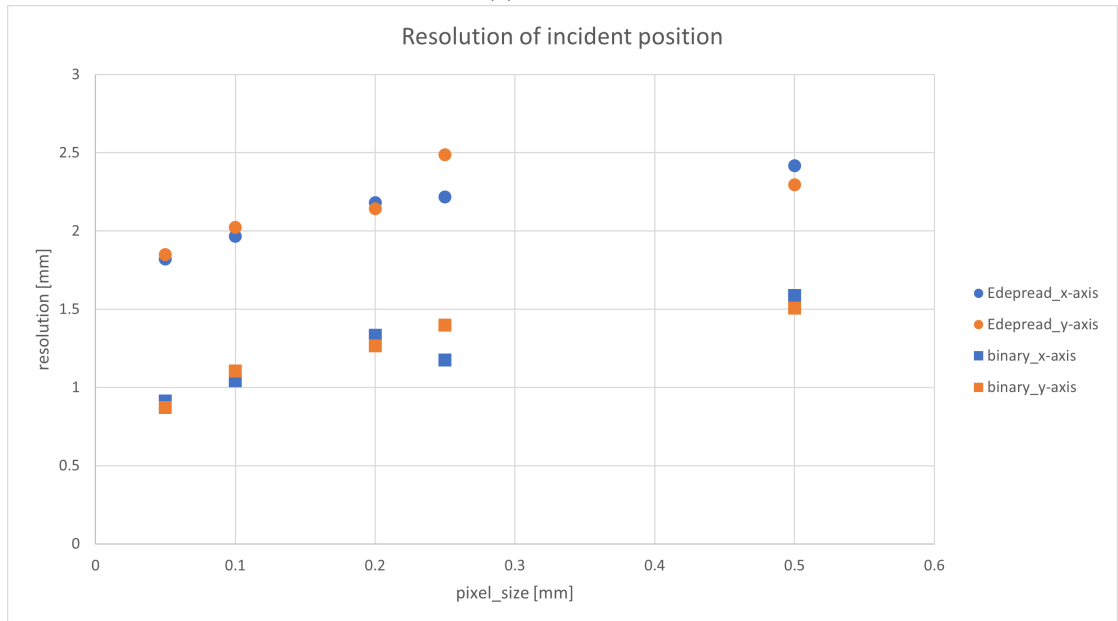
図 5.8 に Belle II 実験でのビームバックグラウンド生成頻度が高いホットスポットの場所を示す。衝突点とホットスポットからの γ 線を分離したい場合、その距離はメートル単位で離れているため、両者の分離は可能であると考えられる。

5.5 暗黒物質探索への期待

図 5.9 に示す例では ALP(a) が質量 $m_a = 2$ GeV であり、 $B \rightarrow Ka$ なる二体崩壊で生成した ALP の崩壊 $a \rightarrow \gamma\gamma$ が 40 cm 飛んだ後に起きた場合を想定している。 B 中間子の静止系で見た二つの γ 線の opening angle は約 98 度となる。この γ 線が電磁カロリメーターの位置まで飛んできたときに衝突点からくる γ 線との角度差は約 10 度である。0.05 mm 角のピクセル検出器かつバイナリー読み出しの場合のシミュレーション結果を参照すると、約 4σ の分離が可能である。

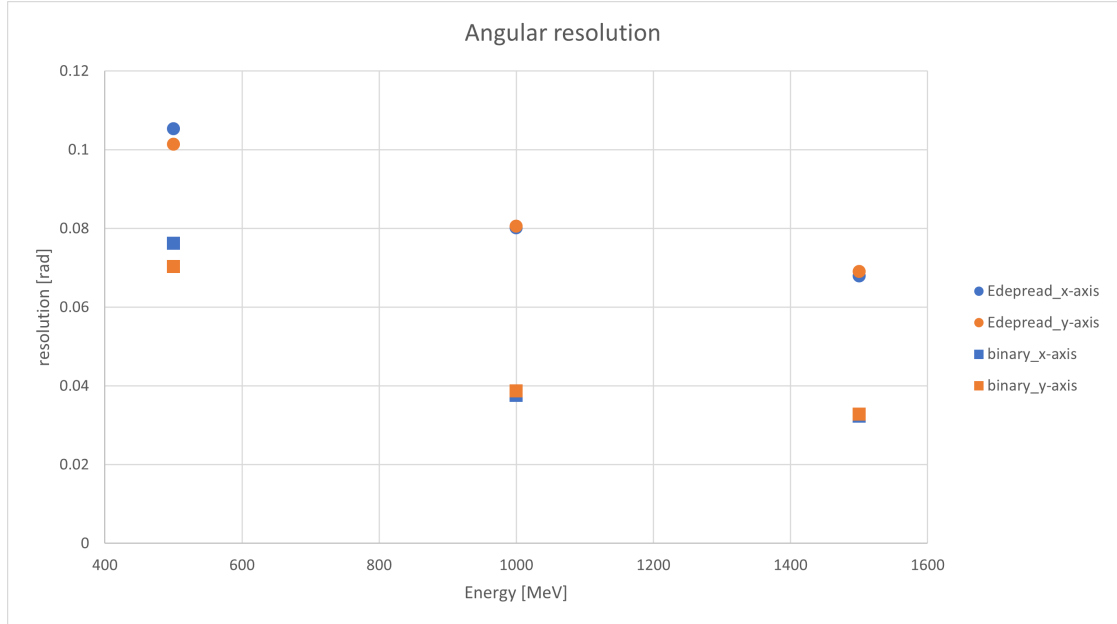


(a) 角度分解能

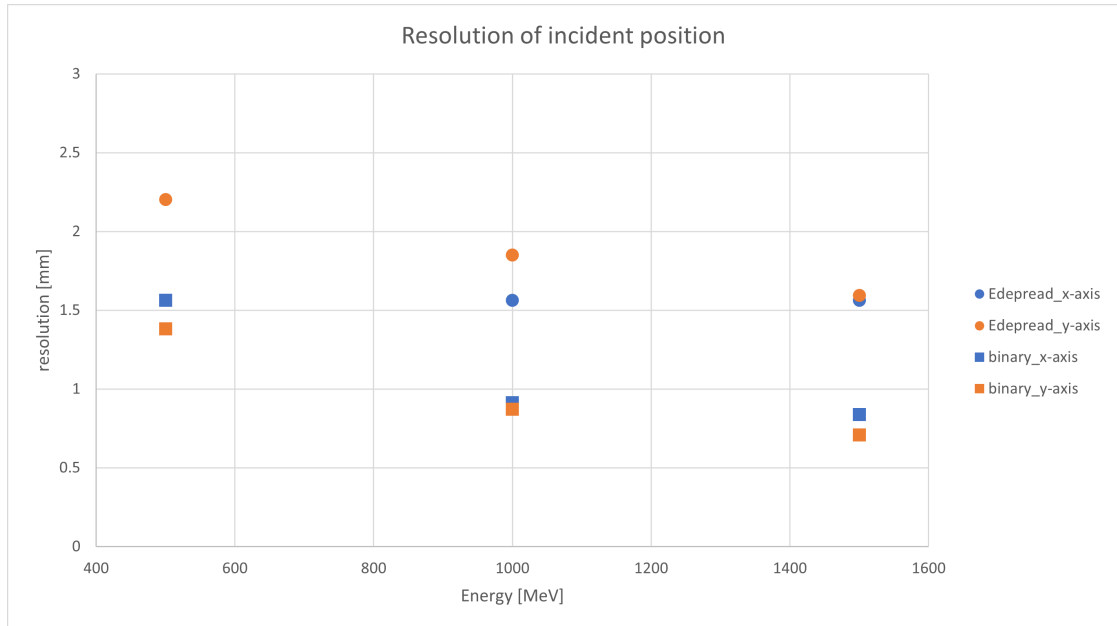


(b) 位置分解能

図 5.5: ピクセルサイズと角度分解能 (a, 上段), 位置分解能 (b, 下段) への影響。青色が x 方向、橙色が y 方向を表し、丸印がエネルギー損失で重みを付ける場合、四角印がバイナリー読み出しのときの結果を表す。

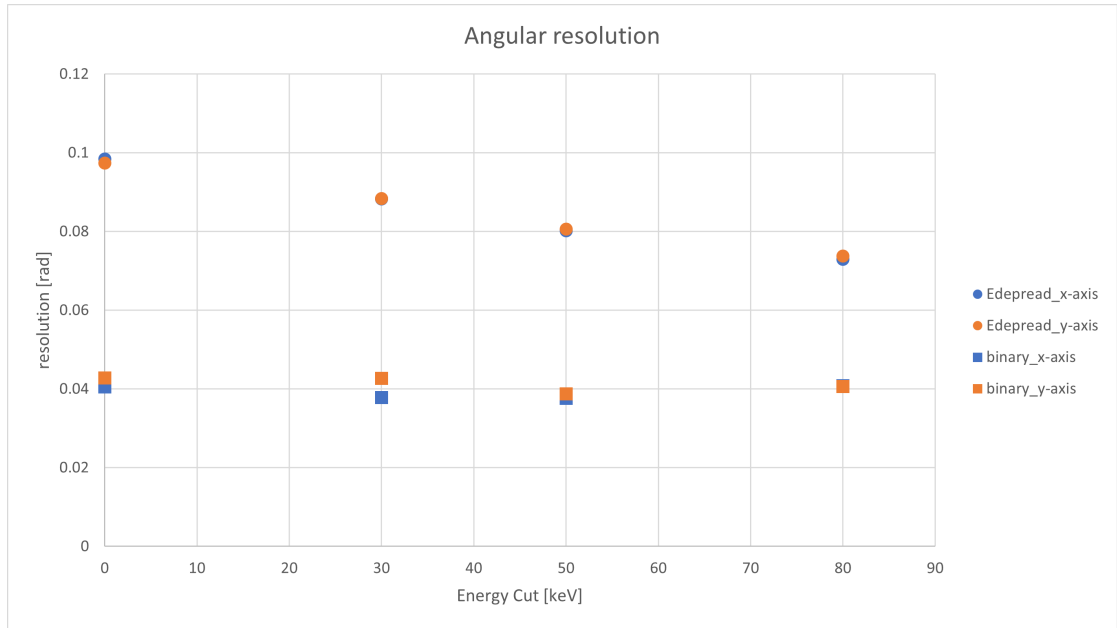


(a) 角度分解能

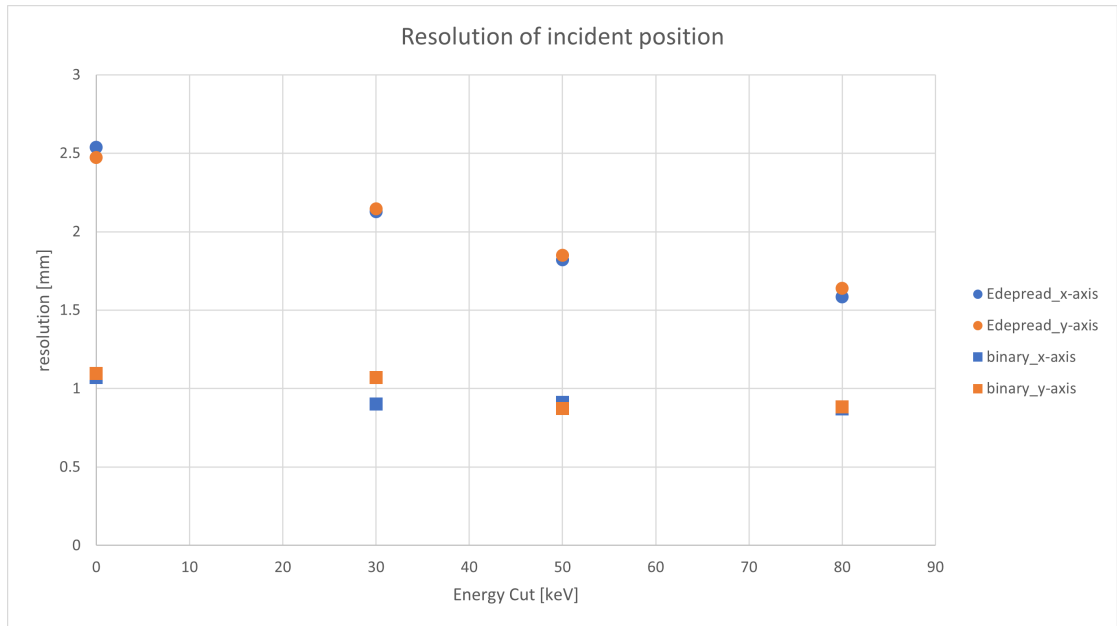


(b) 位置分解能

図 5.6: 入射 γ のエネルギーと角度分解能 (a, 上段), 位置分解能 (b, 下段) への影響。青色が x 方向、橙色が y 方向を表し、丸印がエネルギー損失で重みを付ける場合、四角印がバイナリー読み出しのときの結果を表す。



(a) 角度分解能



(b) 位置分解能

図 5.7: 1000 MeV の γ 入射時、ピクセルのエネルギー損失しきい値 (Energy Cut) を変化させたときのエネルギーと角度分解能 (a, 上段), 位置分解能 (b, 下段) への影響。青色が x 方向、橙色が y 方向を表し、丸印がエネルギー損失で重みを付ける場合、四角印がバイナリー読み出しのときの結果を表す。

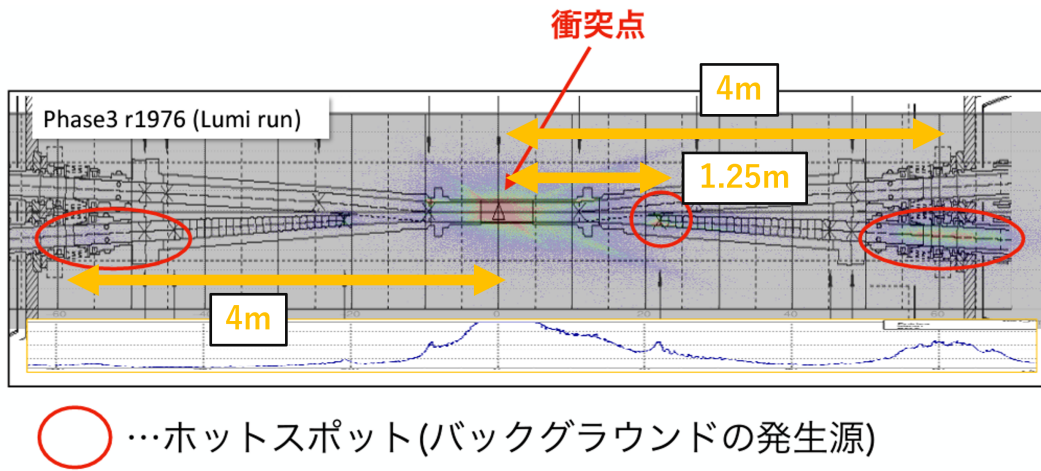


図 5.8: ビームバックグラウンド発生頻度が高いホットスポットの場所の図 [13]。ビームバックグラウンド発生頻度が高い衝突点から距離約 1.25 m および約 4 m の位置が該当する。

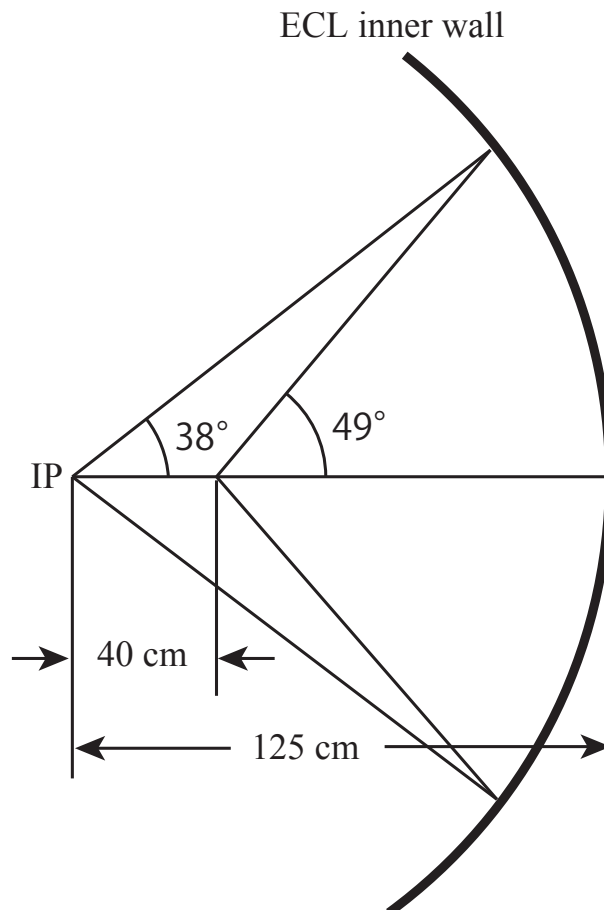


図 5.9: ALP(a) が質量 $m_a = 2 \text{ GeV}/c^2$ を持ち、 $B \rightarrow Ka$ 崩壊で生じてから 40 cm 飛行した後に $a \rightarrow \gamma\gamma$ モードで二つの等しいエネルギーの γ 線に崩壊した場合を B 中間子の静止系で見た模式図。

5.6 まとめ

これらのシミュレーションの結果から、プリシャワー検出器において、電磁シャワー中の電子・陽電子の通過を検出するシリコンピクセル検出器に求められる条件として以下の内容が挙げられることがわかった。

- ピクセルサイズは $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 程度の崩壊点検出器に用いられるのと同程度の細かさを持つこと
- 荷電粒子の通過による信号はバイナリー読み出しで良い

第6章 DuTiP

DuTiP とは、Belle II 検出器のアップグレード向けに SOI 技術を用いて設計されたピクセル型シリコン検出器のことである。5 章より、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 角ピクセルの場合、約 40 mrad の精度で γ 線の到来方向が識別できるということがわかった。この $50\text{ }\mu\text{m}$ 角ピクセルというのは Belle II 測定器の崩壊点検出器で用いるピクセルサイズと同程度である。よって、Belle II 実験の崩壊点検出器のアップグレードオプションの 1 つである DuTiP について動作試験および性能評価を行った。

6.1 SOI 技術

SOI は Silicon-On-Insulator の略称である。SOI センサーは同一チップ上にセンサー部分と初段電子回路が形成されている。モノリシックで、薄型であり、低消費電力といった特徴がある。また、その構造は回路層とセンサー層が絶縁体の BOX 層で挟まれている。回路層は CMOS 技術を用いて形成され、各ピクセルに複雑な機能を実装し、高性能の信号処理を実現している。モノリシック構造により、SOI センサーは各ピクセルにメモリを搭載し、グローバルシャッター読み出しモードをはじめ、ピクセル回路設計の工夫によりいくつかの複雑な機能を実行できる。素粒子実験だけでなく、宇宙分野や医療用カメラなど、その用途也多岐に渡る。

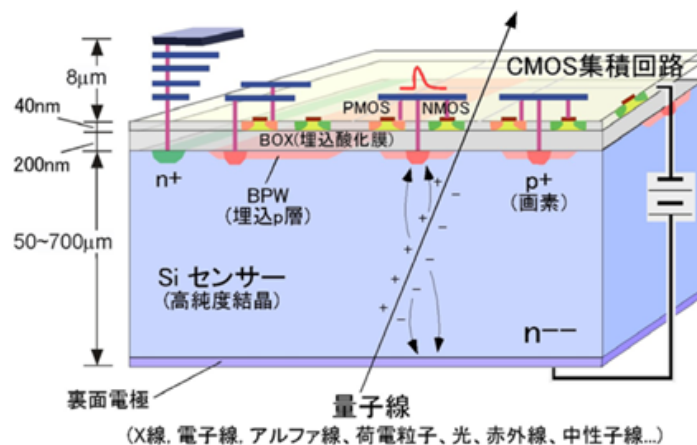


図 6.1: SOI の構造

6.2 DuTiP

DuTiP は Belle II 実験の崩壊点検出器アップグレード向けに開発されているピクセル型シリコン検出器である。DuTiP は Dual-Timer-Pixel から名付けられ、その名の通り信号のデジタル化に

用いる 7bit タイマーを 2 つ搭載しているのが特徴である。バイナリー読み出しを採用しており、アナログ回路が 1/3, デジタル回路が 2/3 を占める。それらの詳細は 6.4 節および 6.5 節にて述べる。

6.3 DuTiP1

これまでにサブミットされた DuTiP のバージョンは 3 種類あり、本研究では DuTiP1 と呼ばれる一番最初のバージョンを使用した。このピクセルには DuTiP のコンセプトの全機能が含まれ、ピクセル性能を評価するために開発された。

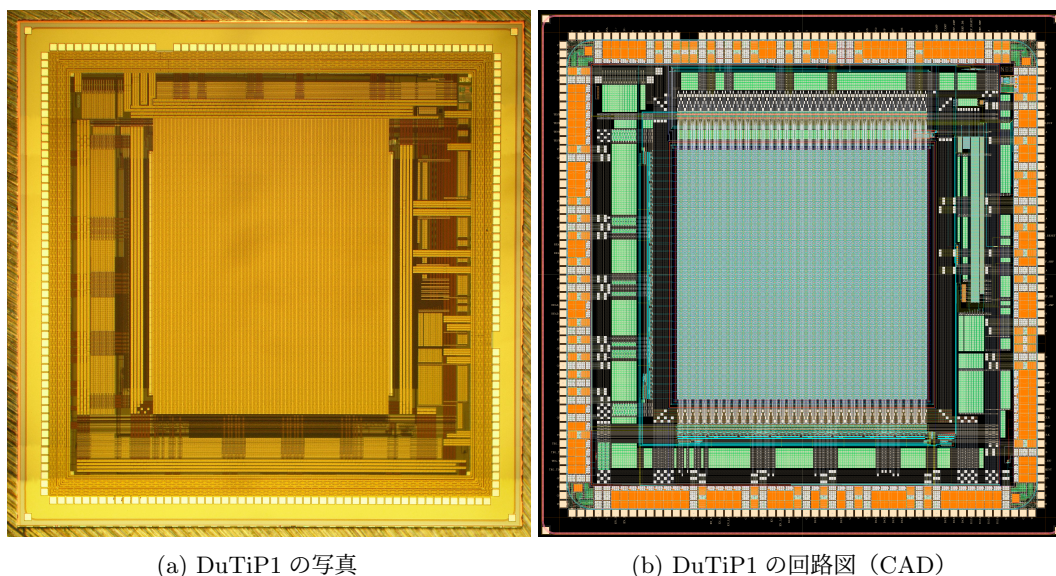


図 6.2: DuTiP1 チップの (a) 実機と (b) 回路図。パラメータについては表 6.1 を参照。

DuTiP1 の主なパラメータを表 6.1 に示す。DuTiP1 では 64×64 ピクセル配列の一部でのみ TEST_HIT を出力することができるピクセルを持つ。TEST_HIT とはデジタル回路の動作試験用に疑似ヒット信号を受けつけ、応答を出力する機能である。本研究では 9.1 節の Previous, Current のタイミング試験で使用した。60 $\times$ 60 ピクセルがノーマルピクセルとして実装されており、荷電粒子の検出はこの領域でのみ行うことができる。TEST_HIT が一部のピクセルでのみ実装された理由は、多くのピクセルが同時に動作すると予期しない動作をする恐れがあったからである。なお、DuTiP3 では全ピクセルで TEST_HIT が実装される予定である。

6.4 アナログ回路

DuTiP のアナログ回路は ALICE ITS アップグレード用に開発された ALPIDE チップのアンプを SOI プロセス向けに改変したものを採用しており、低消費電力で動作させることができる。回路図は図 6.3、設定パラメータ役割は表 6.2 に示す。それぞれの電圧値は任意に設定することができる。

表 6.1: DuTiP1 のパラメータ

パラメータ	値
Wafer	Single-SOI P-type
Wafer の厚み	310 μm (final:60 μm)
Wafer の抵抗率	FZP 5.87-7.93 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$
チップサイズ	6.0 mm $\times$ 6.0 mm
有感領域	2.9 mm $\times$ 2.9 mm
ピクセルアレイ	64 $\times$ 64
ピクセルサイズ	45 μm $\times$ 45 μm
ピクセル関数	ALPIDE タイプアンプ 7 bit カウンター $\times$ 2 トリガーメモリ $\times$ 2 previous, current タイミング $\times$ 2
消費電力	18 mW/ cm^2

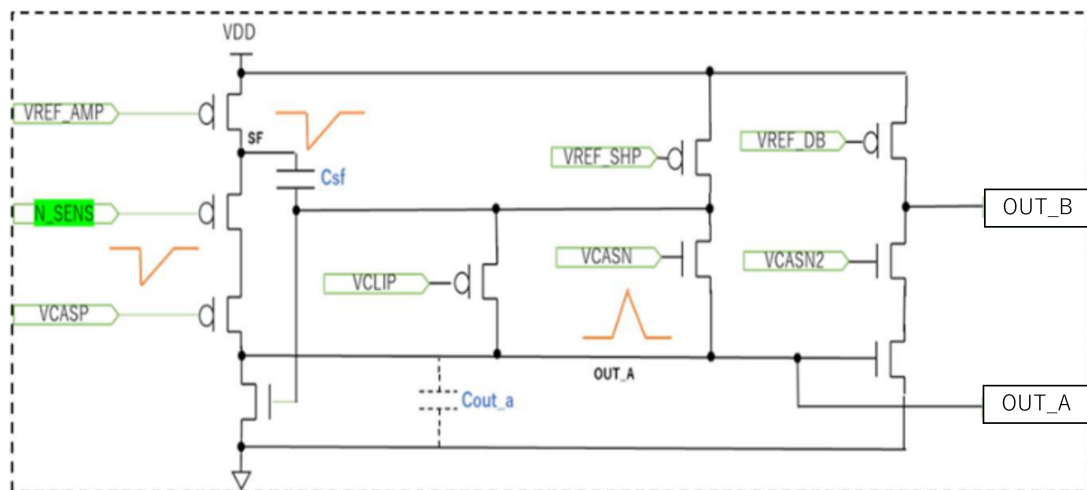


図 6.3: ALPIDE アンプの回路図

表 6.2: ALPIDE アンプ回路の端子名とその機能

端子名	機能
VDIODE	入力リセット電流
VREF_RESET	入力リセット電流
VREF_AMP	初段電流
N_SENS	入力
VCASP	P オン電流
VCLIP	クリッピング電圧
VREF_SHP	フィードバック電流
VCASN	OUTA baseline
VREF_DB	スレッシュホールド電流
VCASN2	N オン電圧
OUT_B	デジタル出力
OUT_A	アナログ出力

6.5 デジタル回路

デジタル回路部のブロック図を図 6.4 に示す。デジタル回路全体は基本クロックの入力により同期して動作する。後述するテストビーム実験では、FPGA を操作する ISE ツールにより、150 MHz の 1/8 の周波数である 18.75 MHz の基本クロックでデジタル回路部を駆動した。アナログ回路を通った信号は Synchronizer に入る。ここで検出した信号を 1 クロック幅に形成する。次に Sequencer で Timer を動かし始める。DuTiP は 2 つのタイマーを内蔵しており、その内の 1 つを動かし始める。このとき、いずれのタイマーも動いていないときは先に Time counter1 を動かし始め、既に Time counter1 が動いているときは Time counter2 を動かし始める。Time counter は 7 bit の最終 bit のクロックとトリガー信号がパルス幅の範囲でコインシデンスした場合は Previous、コインシデンスが 1 クロック遅延した場合は Current のタイミングとしてヒット情報を該当するメモリーに保持する。タイマーが 1 つ動作中にもう一つトリガーが来ても、もう 1 つのタイマーでヒット情報を取得することにより、高レートに耐えることが可能である。

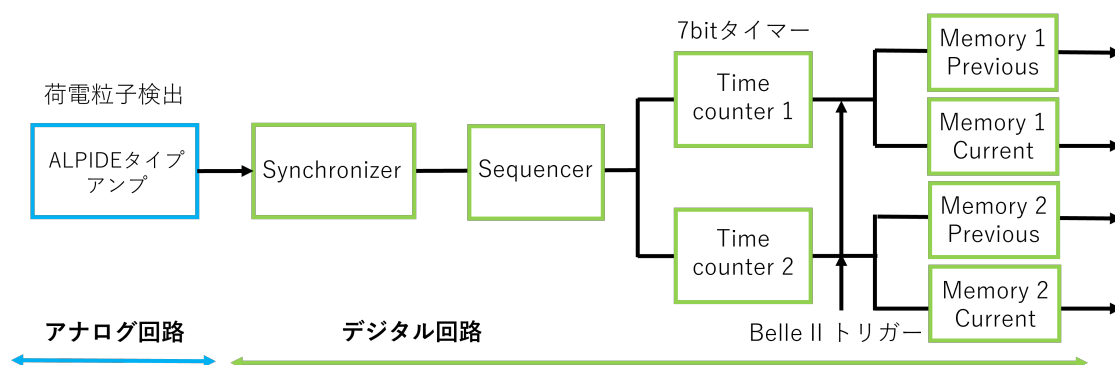


図 6.4: デジタル回路のブロック図

6.6 Belle II 環境下における DuTiP

SuperKEKB のルミノシティ向上に伴って、不可避免的にビームバックグラウンドが増加する。Belle II 実験のアップグレードを起案するときは、初期に設計値ルミノシティである $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の状況下で動作するオプションが選択されたのに対して、5 倍のルミノシティ向上が実現した場合に対応可能なものを示すことが指針になっている。ピクセル検出器の課題として、ルミノシティ上昇に伴ってビームバックグラウンドが増加しても荷電粒子の飛跡検出の性能を維持する必要がある。予想されるヒットレートは約 113 MHz/cm^2 で、このときのヒット占有率を 1% 以下にする必要がある。現在の PXD の読み出しとは異なり、ヒットを個別に選択して読み出せるグローバルシャッター読み出しを採用することでピクセルヒットを処理にかかる時間を短縮し、占有率を飛跡検出性能を維持するレベルまで低減することを可能にする。

信号読み出しを制御する際に留意すべきはヒットのロス、あるいは誤ったヒットの発生への対処である。既述したように、DuTiP は設計値では 16 MHz クロックで駆動する 7 bit タイマーをデジタル化に使用するので、荷電粒子の通過によりピクセルが鳴ってからデジタル化した情報を読み出せるようになるまで $7.94 \mu\text{sec}$ を要する。Belle II 実験トリガーシステムのレイテンシーは約 $5 \mu\text{sec}$ なので、DuTiP があるイベントを処理中に次のトリガーパルスが到着することはあり得る。その際の読み出しヒットのロスをなくすため、2 つのタイマーを装備することは既に述べた。また、送られてくるトリガーの時間ジッターがヒットのロスや誤ったヒットの発生につながることもあり得るが、これは Previous と Current の 2 つのタイミングメカニズムにより対処する。以上の工夫により、DuTiP は Belle II 実験をアップグレードした環境下で機能する設計となっている。

第7章 ファームウェアの構造・シミュレーション

DuTiP1をはじめ、センサーとして動作するピクセルに、アナログおよびデジタル回路が一体で作られているモノリシックピクセル検出器では、チップの出力が既にデジタルデータであり、それを受けて後段のデータ収集PCに送る処理を行う論理を既述したファームウェア（FW）をFPGA（Field Programmable Gate Array）にインストールして使用する。本章ではDuTiP1の読み出しを制御するためにFPGAにインストールするFWとそのFWのシミュレーションについて述べる。

7.1 開発環境

8章で後述するように、DuTiP1はサブボードに搭載して、それを接続したSEABAS2上のFPGAを介して読み出す。これがXilinx社virtex-5型FPGAなのでそれに適合するよう本研究でのFWの開発はWindows10(Fujitsu PRIMERGY TX1310 M3)にISE14.7をインストールして行った。

7.2 ファームウェアの構造

DuTiP1のFWの構造は図7.1のようになっている。DuTiP1のFWはverilog言語を用いて書かれており、SEABAS2_DUTIP.vをトップモジュールとした複数のサブモジュールで構成されている。本研究ではDuTiP1向けに新たに追加された「DIGITAL_TEST.v」と「ROLLINGSHUTTLE_RACA.v」という2つのサブモジュールについて変更・シミュレーションを行った。それぞれの詳細は7.3.1節、7.3.2節で述べる。なお、その他のサブモジュールはSOFISTなどこれまでSOIグループで開発されたFWがベースとなって作成されている。

全てのモジュールは18.75 MHzで共通のクロックで駆動される。Belle IIのトリガーに合致するのは16 MHzであるが、ISEで作ることができるクロックの選択肢に16MHzクロックまたは16を公約数に持つ周波数が存在しない。よって、150MHzクロック信号を8分割することで、16MHzクロックに値が近い18.75 MHzのクロックを使用することにした。

7.2.1 イベントの処理について

FPGAはトリガー信号を受信すると当該イベントの処理を開始する。トリガーを受信して以降、DuTiP1のデジタル部を駆動するのと同じ18.75 MHzのクロックをカウントする。その数はcnt_Nなる変数に書き込んでクロックごとに値をインクリメントする。このcnt_Nが5000まではピクセルヒットのデータを読み出す前に当該イベントについて行うべき処理を行う。この間はmask3bなる信号をON=1にセットし、DIGITAL_TEST.vなるモジュールを呼び出す。トリガーパルス

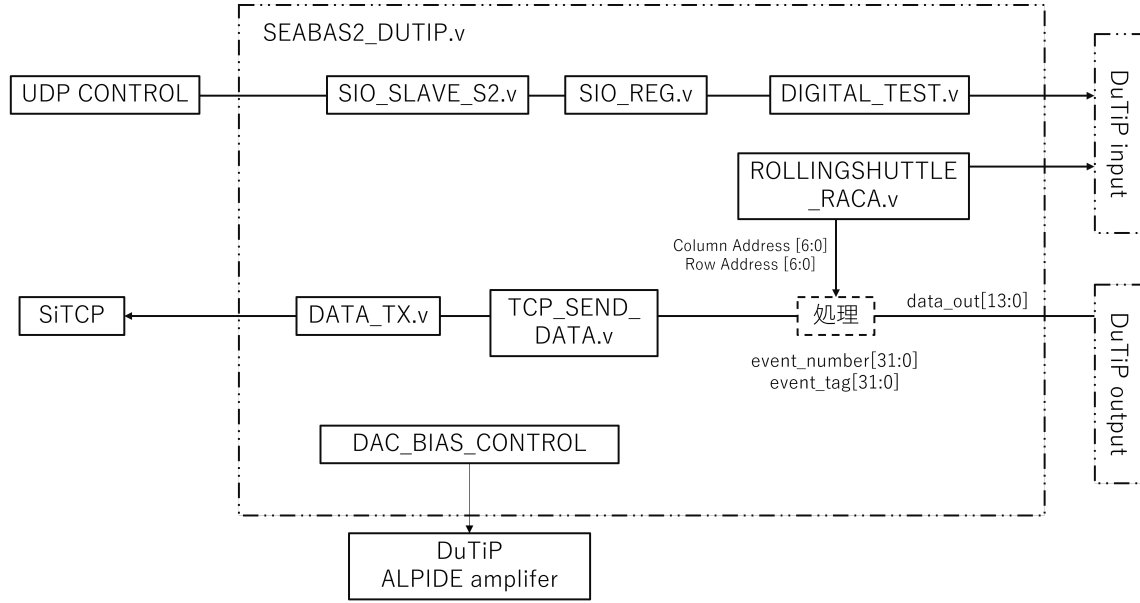


図 7.1: DuTiP の FW のダイアグラム

のリーディングエッジ（開始）とトレーリングエッジ（終了）をクロック数で指定して与えるので、DIGITAL_TEST.v は、まずそれに従ってトリガーパルスを DuTiP1 に向け送り出す。さらに event_number と event_tag の二つの変数の値をセットする。event_number はデータ収集サイクルを開始してからトリガー信号を受信するたびにインクリメントするものである。外部の同一クロックを複数の読み出しボードに一齐に配信するようなセットアップの場合、event_tag はそのクロックの数をカウントした値を保持して、外部クロックパルスごとに継続的にインクリメントする。したがって複数の読み出しボードで構成するセットアップでデータ収集を行う場合に、event_tag の値または event_tag の差が一致することを要求して複数の生データをスキャンすることにより、同一イベントと判断できるイベントを抽出して連結する処理（イベントの build up）が可能になる。

cnt_N の値が 5001 に達したら mask3b の信号を OFF=0 にセットし、ROLLINGSHUTTER_RACA.v を呼び出す。ROLLINGSHUTTER_RACA.v は全てのピクセルアレイをスキャンを行う。ローリングシャッター読み出しに相当することを行うため、モジュール名を ROLLINGSHUTTER_RACA.v とした。読み出し終わったらクリア信号を DuTiP1 に向けて送信し、次のイベントの到来を待つ。この過程で読み出したピクセルヒットのデータは、後述するように 16bit=2Byte ブロックの単位で FIFO(First-In-First-Out) を介し、Ethernet 経由でデータ収集用 PC に送られる。DuTiP1 の開発段階にある本研究では外部トリガーを受信したら全てのピクセルから順番にデータを読み出しているが、最終的にビーム衝突実験で使用する際にはヒットがあったピクセルだけを効率的に読み出す方式とする計画である。

7.2.2 データ転送について

DuTiP1 と PC 間のデータ転送には TCP と UDP が使用されている。TCP は FPGA から PC にデータを転送する際に使用し、UDP はその逆の PC から FPGA にデータを送信する際に使用する。DuTiP1 からやってくるピクセルヒット 1 つあたり 14bit の data_out は、トップモジュールで

データ送信 enable 信号を出して、TCP_SEND_DATA.v と DATA_TX.v に渡す。この enable 信号は event_number と event_tag の送信の際にも使われている。14bit のデータに 0 または 1 の値を取るトリガー信号とあわせ、最上位を 0 にセットした 16bit 情報は上位 8bit、下位 8bit の 8bit×2 パケットに変換し、FIFO で SiTCP へ送り出す。SiTCP は高エネルギー物理学実験のために開発されたネットワークプロセッサで、FPGA 上に実装し、ソフトウェアの介在なしに Ethernet 上の高速データ転送を実現するものである。SiTCP のクロックは 150 MHz で動いており、FPGA FIFO のプロトコルに合わせて 8bit ごとのパケットに変換している。

7.2.3 PC に送受信されるデータ

7.2.2 節でも述べたように、PC へのデータ送信は 8bit のパケットを 2 つ送信する。上位 8bit を上位ビット、下位 8bit を下位ビットと呼ぶ。トリガーが来たあと、送信する内容およびデータを送信する順番は event_number、event_tag、ピクセルデータおよびヒット情報（Dual-timer のため、ピクセルデータとヒット情報は 2 トリガー分の 2 回）で、それら 3 種類が上位ビットの上位 3bit または 1bit で分類ができるようになっている。event_number と event_tag は 32bit で定義されているが、一度に送信できるのは 16bit であり、そのうち 3bit は表 7.1 にあるようにデータパケットの種類を区別するのに必要なもので、それぞれ 1 クロックの間隔を入れながら、3 回に分けて送信している。3 回目の送信のときに余る bit 枠については 0 を入れている。詳細について表 7.1 と表 7.2 に示す。

表 7.1: 上位 8 ビットの内訳。1 または 0 が記されているところはデータの分類のためで、X が記されているところは 2 進数で値の書き込みに使用できるペイロードである。これに続く下位 8bit は全て値の書き込みに使用するペイロードである。

名称	上位ビットの内訳
event_number	100X_XXXX
event_tag	101X_XXXX
ピクセルデータおよびヒット情報	0XXX_XXXX

7.3 サブモジュールのシミュレーション

DIGITAL_TEST.v と ROLLINGSHUTTLE_RACA.v を ISE に内蔵されているシミュレーションツール (ISim) を用いて論理回路のシミュレーションを行った。FW を FPGA にインストールする前にデバッグと動作確認をすることが目的である。

7.3.1 DIGITAL_TEST.v のシミュレーション

このモジュールでは 2 種のトリガーの出力、event_tag、event_number の出力、TEST_HIT の出力を行っている。mask3b の信号を ON にする時間、トリガーと TEST_HIT の開始時間とその幅を PC から入力する。このとき、トリガー 1 と 2 についてはそれぞれ個別に決められる。図 7.2 は

表 7.2: ピクセルデータおよびヒット情報の 16bit の内訳。上位ビットを 8bit～15bit、下位ビットを 0bit～7bit と表す。

項目	bit
column address(6bit)	0～5bit
row address(6bit)	8～13bit
current_hit 1 → current のときにヒット、0 → ヒットがなし	6bit
previous_hit 1 → previous のときにヒット、0 → ヒットがなし	7bit
TRG_number 0 → トリガー 1、1 → トリガー 2 でのピクセルスキャン	14bit

そのシミュレーションの結果である。TRG1、TRG2、TEST_HIT の条件は表 7.3 に示す。なお、TEST_HIT は 0～3 番まで選択することが可能であり、ピクセルの 4Column 毎に入力することが可能である。指定した番号のところに TEST_HIT が入力されていることがわかった。このシミュレーションではわかりやすいようにトリガー 1、トリガー 2 の開始時間はずらしている。また、図 7.3 は図 7.2 を拡大させたものである。event_number と event_tag が 1 クロックの間隔を開けながら 2 種合わせて 6 回適切に送信されていることが確認できた。

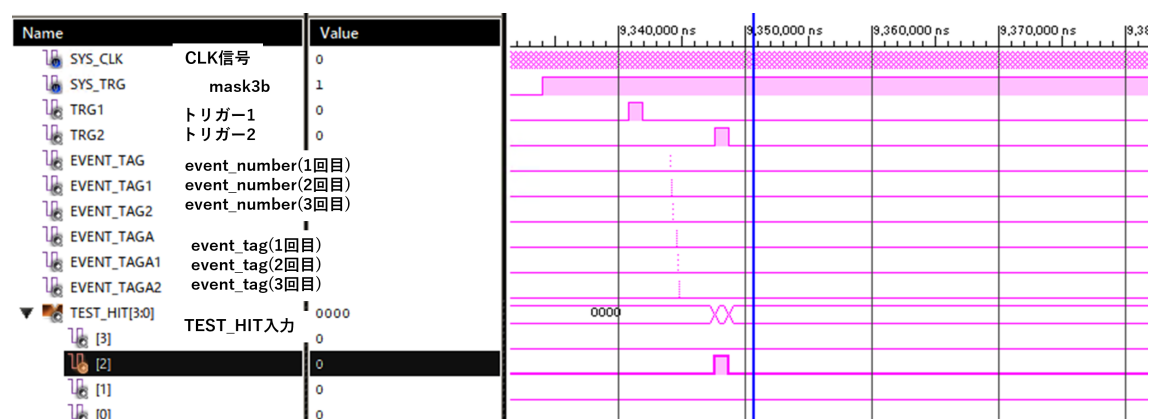


図 7.2: DIGITAL_TEST のシミュレーション結果

7.3.2 ROLLINGSHUTTLE_RACA.v のシミュレーション

このモジュールではピクセルアレイのスキャンを行う。図 7.4 にその結果を載せた。NRST_X が 1 (実際には NOT になっているので逆向き) のときにはピクセルのスキャンが行われず、0 になったときにピクセルのスキャンが行われているのは意図した通りである。また、適切なタイミングで READ1,2 と CLR1,2 も入力されている。図 7.5 は図 7.4 を拡大させたもので、ピクセルの切り替

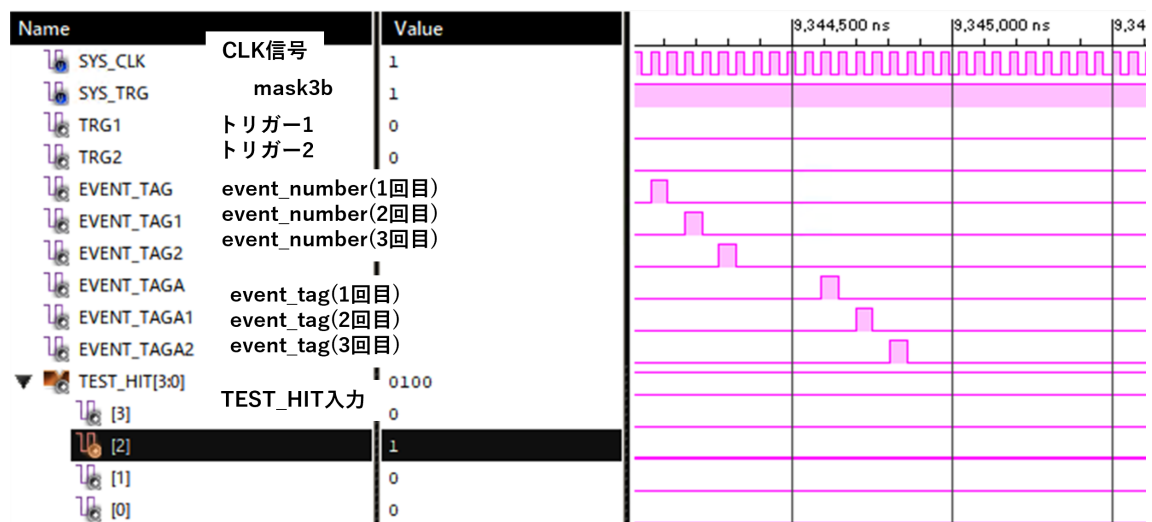


図 7.3: DIGITAL_TEST のシミュレーション結果の拡大図

表 7.3: DIGITAL_TEST のシミュレーション条件

名称	数値 [CLK]
トリガー 1 の開始時刻	128
トリガー 1 の幅	20
トリガー 2 の開始時刻	256
トリガー 2 の幅	20
TEST_HIT の番号	2
TEST_HIT の開始時刻	256
TEST_HIT の幅	20

わりを制御している EN_LATCH_CA_X および EN_LATCH_RA_X の立ち上がりに合わせてピクセルが切り替わっている。

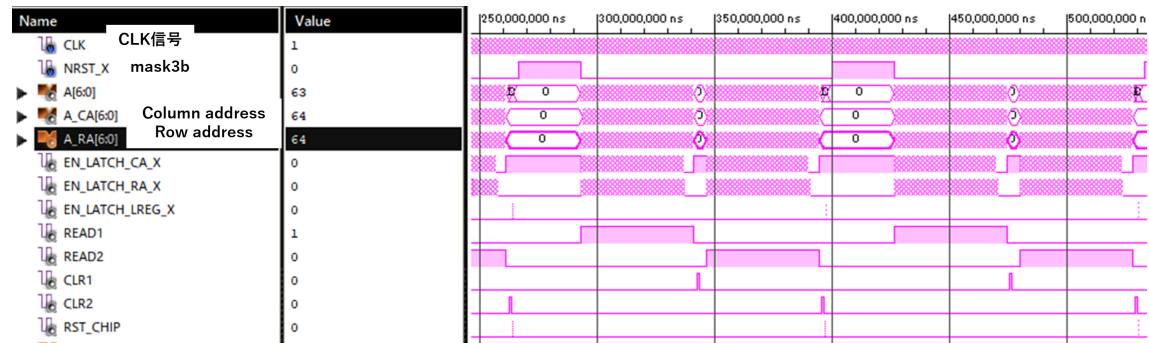


図 7.4: ROLLINGSHUTTLE_RACA.v のシミュレーション結果

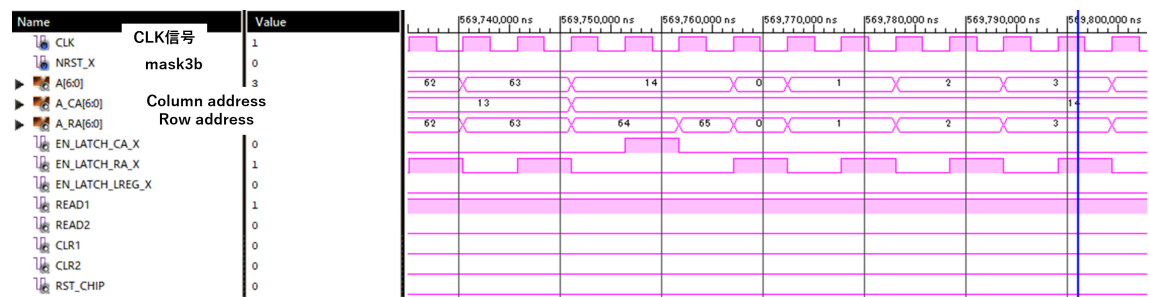


図 7.5: ROLLINGSHUTTLE_RACA.v のシミュレーション結果の拡大図

こうして、ピクセルヒットのデータを読み出す FPGA の動作に必要な FW の 2 つのモジュール、DIGITAL_TEST.v と ROLLINGSHUTTLE_RACA.v が機能する目途が経ったので、8.4 章で述べるセットアップで 9 章および 10 章に述べる荷電粒子検出テスト実験を進めることにした。

第8章 セットアップ

9章および10章で述べる実験のセットアップについて記載する。DuTiP1はサブボードに搭載し、それをSEABAS2なる読み出しボードに接続する。

8.1 サブボード

サブボード(図8.1)はDuTiP1を直接搭載し、後段のSEABAS2との通信によりピクセルヒットのデータを送る。サブボードをSEABAS2に接続すると図8.3のようになる。SEABAS2とサブボードは該当するコネクタが嵌合して接続し、DuTiP1との論理割り当てを行う。また、SEABAS2からの3.3Vの電源電圧をDuTiP1のデジタル部の電源電圧である1.8Vに変換してチップに供給するとともにDuTiP1のアナログ部、つまりアンプやセンサーバイアスにさまざまな電圧と電流の調整を行う。センサーの空乏層の厚みを左右するセンサーバイアス電圧は0~200Vの範囲で可変で、本研究では150Vを印加した。

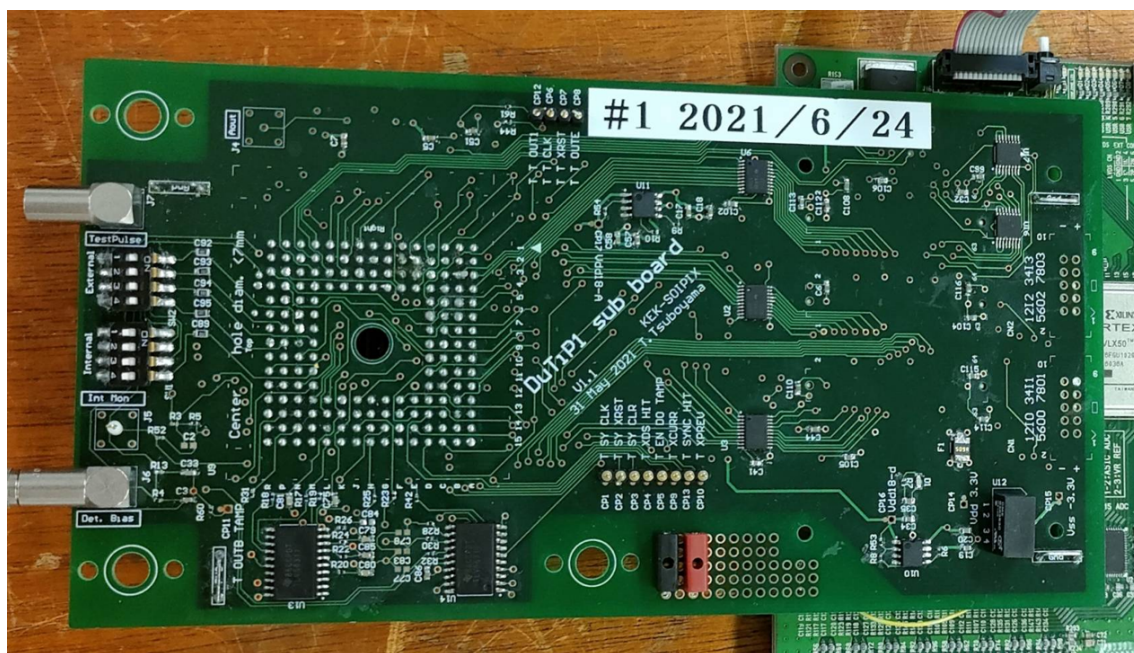


図 8.1: DuTiP1 用サブボードの写真。左側の穴が空いている部分の裏にセンサーがある。左端の2か所のリモケーブル(同軸ケーブル)レセプタクル端子からはテストパルスの入力とセンサーバイアス電圧をかけるためのものである。

8.2 SEABAS2

SEABAS2 (図 8.2) とは SOI EvAluation BoArd with SiTCP の略であり、2つの FPGA を内蔵する汎用 PCB ボードである。2つの FPGA は Xilinx 社製 virtex4 と virtex5 で、前者は SiTCP を駆動し、PC とイーサネットを介したデータのやり取りを行う。後者は User FPGA で、ユーザーが FW を書くことで自由に制御方法を決めることが出来る。User FPGA が受け取ったピクセルヒットのデータは SiTCP FPGA に送信され、PC にイーサネットケーブルを通じて送信される。

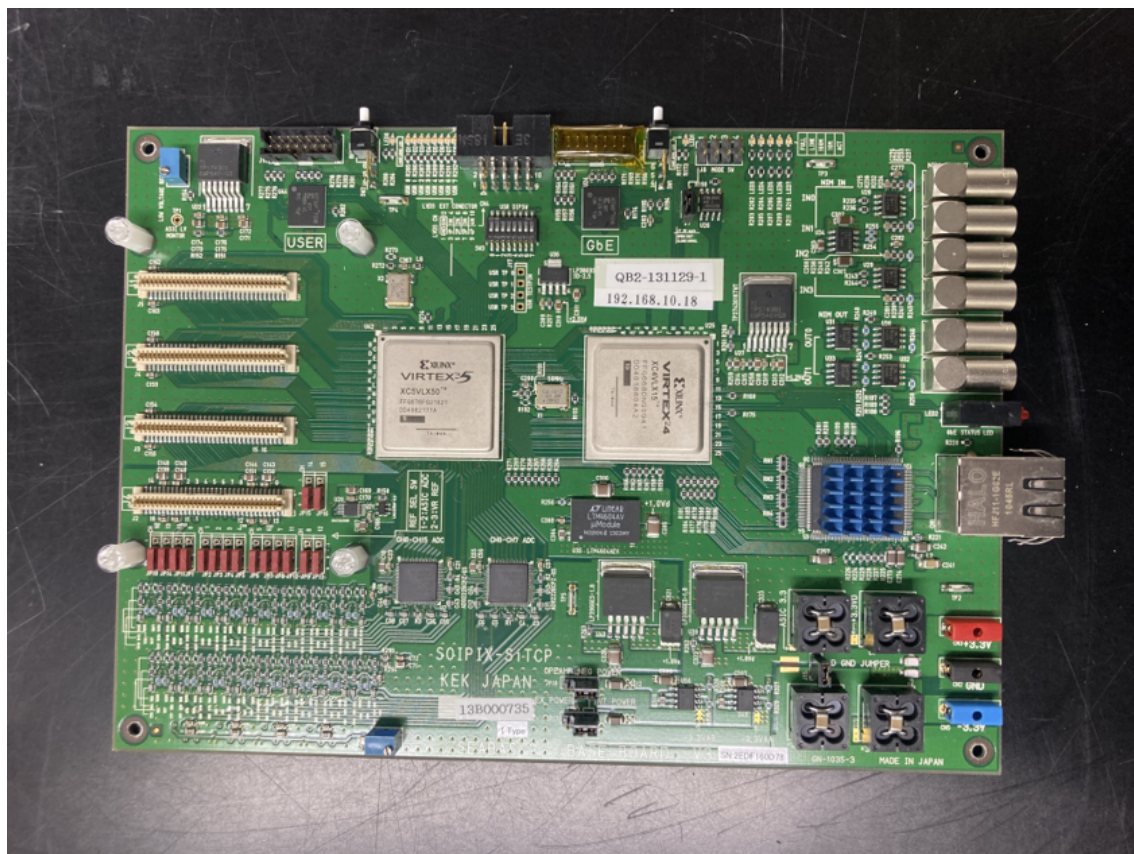


図 8.2: SEABAS2 の写真。左側にある FPGA が User FPGA であり、右側にある FPGA が SiTCP FPGA である。左側にある 4 つのコネクタの内、上 3 つが DuTiP1 のサブボード側のコネクタと嵌合する。また、右側にはイーサネットの接続口があり、ここを通じて PC と接続する。

8.3 空乏層の見積り

本研究ではピクセル有感領域に空乏層を作るためのセンサーバイアス電圧を 150 V に設定した。空乏層は電子も正孔もない領域であり、半導体検出器ではこの空乏層に荷電粒子が通過することで電子・正孔対が生成され、これらの移動により電極に信号が発生し、その電荷を読み出すことで通過位置を算出する。つまり、空乏層が十分にあることが重要である。DuTiP1 の厚みは 300 μm で

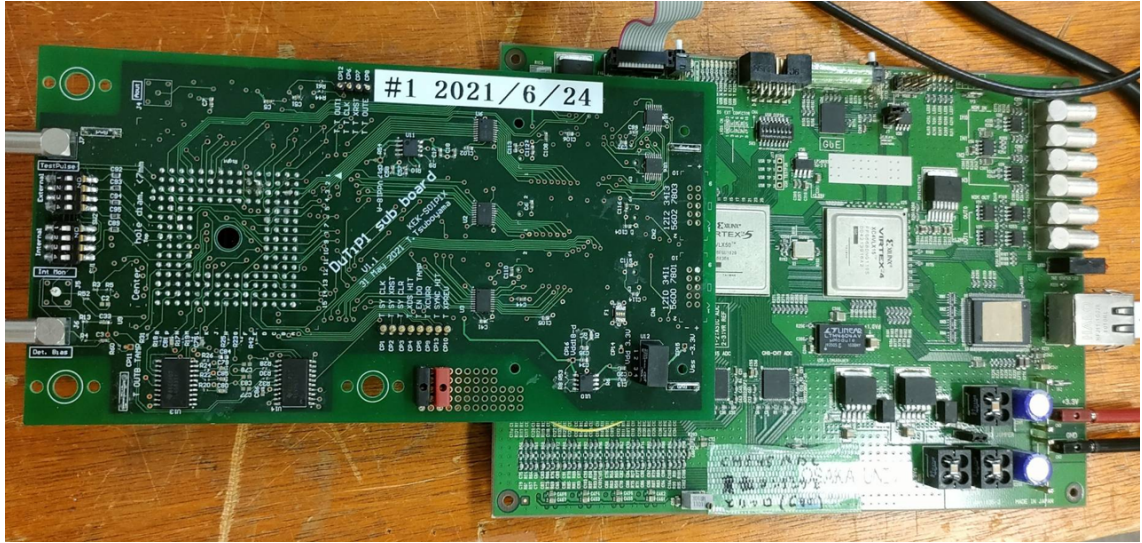


図 8.3: SEABAS2 とサブボードを接続したときの写真

あるので、センサーバイアス電圧が 150 V が適切であるか算出した。空乏層の厚み d を求める式は

$$d = \sqrt{2\Omega\epsilon\mu_e(V_{\text{bias}} + \varphi_{\text{bi}})} \quad (8.1)$$

である。 Ω は抵抗率 (5780~7930 [k Ω ·cm])、 ϵ は誘電率 (1.05 [pF/cm])、 μ_e は電子易動度 (500 [(cm/s)/(V/cm)])、 V_{bias} はセンサーバイアスの電圧 ([V])、 φ_{bi} は内蔵電位 (0.7 [V]) を表す。センサーバイアス電圧を 0 V~200 V のときの空乏層の厚みを計算した結果を図 8.4 に示す。抵抗率に幅があり、チップごとの個別の値を直接測定するのは不可能であるため、空乏層の厚みはそれぞれのバイアス電圧に対して下限値と上限値を算出している。下限の場合でもセンサーバイアス電圧が 150 V のとき、空乏層の厚みはセンサーの物理的な厚みである 300 μm に達していることから、全空乏化していると考えられる。

8.4 セットアップ

9 章に記載する実験では 3 種類 (PC タイミング・ピクセルヒットの検出・荷電粒子の検出) の実験を行った。それぞれセットアップの細部が異なるのでそれぞれについて述べる。

8.4.1 使用機器

使用した機器一覧を以下に羅列する。

- PC 本体：Fujitsu PRIMERGY TX1310 M3 × 2 台
Linux：Rocky Linux 9
Windows：Windows 10
FW の作成と FPGA へのインストールは Windows 10PC で行い、アナログ回路のパラメータ設定やデータの収集を Linux で行う。

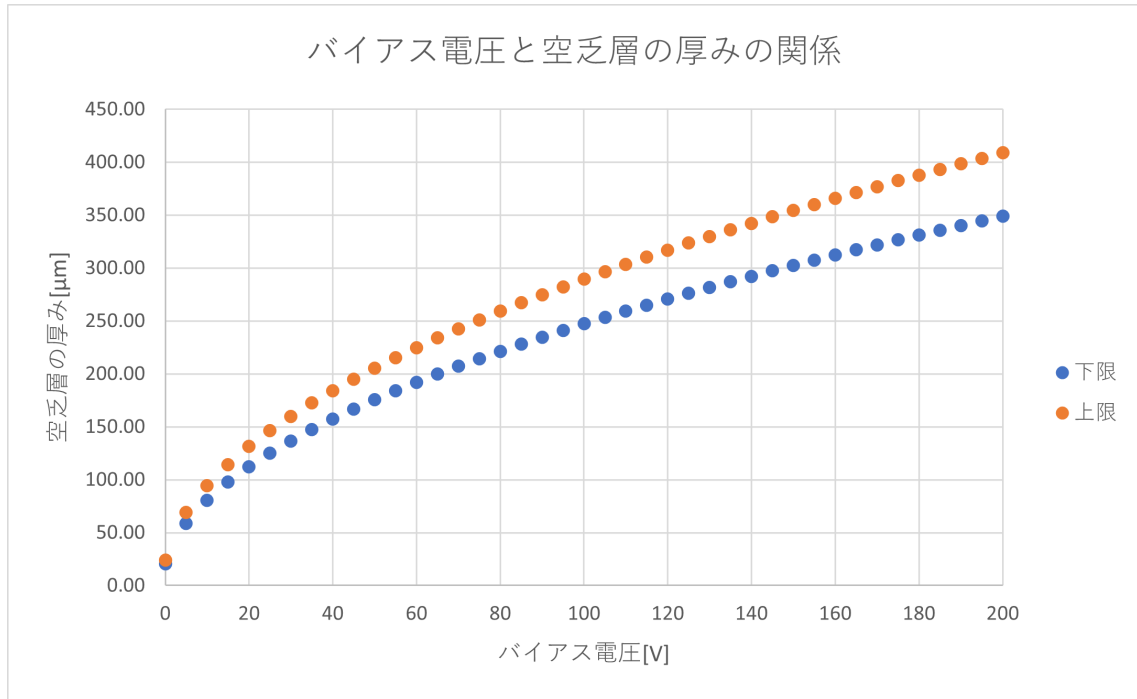


図 8.4: バイアス電圧に対する空乏層の厚みの見積り

- 電源：TEXIO REGULATED DC POWER SUPPLY PW18-1.3ATS
- ソースメーター：KEITHLEY 2612B SYSTEM SourceMeter
センサーバイアス電圧供給用に用いる。
- Xilinx のケーブル：XILINX Platform Cable USB II
WindowsPC から FPGA に FW をインストールする際に使用する。
- オシロスコープ：Tektronix 5 SERIES MIXED SIGNAL OSCILLOSCOPE MSO56
- PMT：Hamamatsu H8643
 $\phi = 1$ インチ、で-1500 V 印加した。詳細については 8.4.2 節で述べる。

8.4.2 トリガー用シンチレーションカウンター

DuTiP1 の荷電粒子通過に対する応答を調べるには、DuTiP1 を通過する荷電粒子を検出した別の検出器によるトリガー信号を入れる必要があり、本研究のテーブルトップにおける測定では光電子増倍管 (PMT) にシンチレーターをつけたシンチレーションカウンターをトリガーに利用した。DuTiP1 の有効エリア約 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ よりも広い $1 \times 1 \text{ cm}^2$ の面積を持つ厚さ 5 mm のシンチレーターを、 $1.8 \times 1.8 \times 3.0 \text{ cm}^3$ のライトガイドを介して、2 インチ径の PMT にオプティカルセメントで接着した構成とした。ただし、 β 線源を用いてテーブルトップで DuTiP1 を試験するとき、チップ上の限られたスポットを選択するよう鉛製のコリメーターを使用した。コリメーターは直径 1.5 cm 深さ 10 mm のほぼ半球形の窪みの先に $\phi = 1.5 \text{ mm}$ の穴が開けられており、全体の大きさは $2.0 \times 2.0 \times 2.0 \text{ cm}^3$ である。



(a) コリメーター



(b) 下から PMT・ライトガイド・シンチレーター



(c) (b) の写真にコリメーターをつけて遮光テープで覆った

図 8.5: トリガーシンチの構造

8.4.3 PC タイミングのセットアップ

Previous と Current のメモリにピクセルヒットを保持するタイミングを、以下 PC タイミングと呼ぶ。それを測定する際のブロックダイアグラムを図 8.6 に示す。DuTiP1 のデジタル部のテストであり、ヒット信号は TEST_HIT を利用した。信号読出 FW の仕様上、外部からのトリガー信号を必要とするので ^{90}Sr をトリガー用シンチレーションカウンターのコリメーター穴に合わせて置き、10Hz 以上の高頻度でトリガーが入るセットアップで実験を行った。

8.4.4 ピクセルヒットの検出

β 線の通過を検出する実験のブロックダイアグラムを図 8.7 に示す。読み出し FW を駆動するトリガーは PC タイミング測定と同様に与え、ピクセル中に電子・正孔対の生成をもたらすよう緑色のレーザーポインターを照射した。これによりトリガーが来た時点でレーザー光によりピクセルに生じていた信号電荷によるヒットが読み出される。 ^{90}Sr 線源を DuTiP1 の直上に、トリガー用シンチレーションカウンターを真下に配置した。

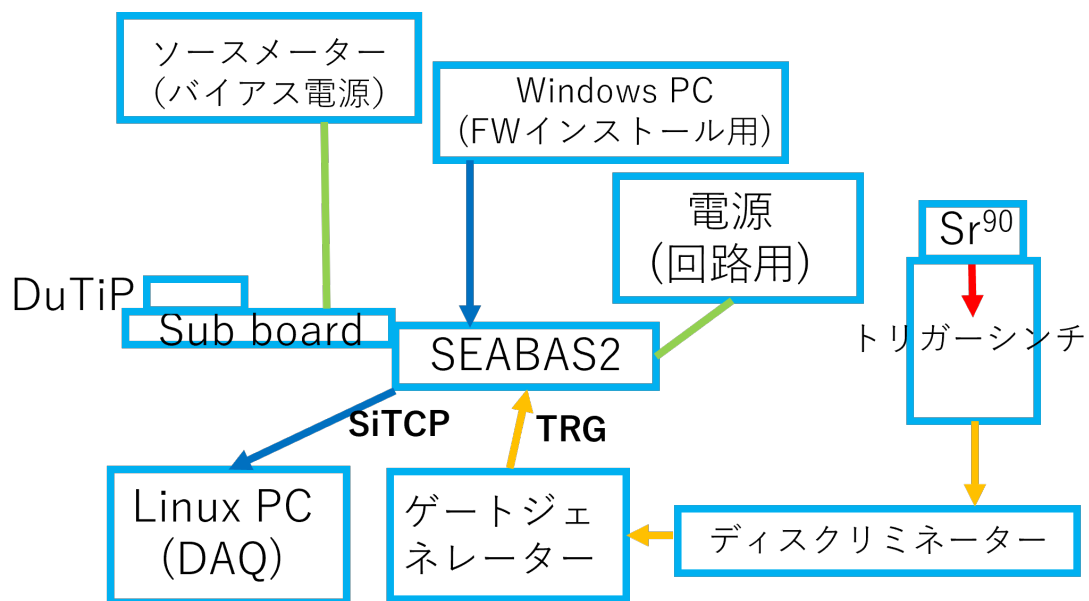


図 8.6: PC タイミングのセットアップのブロックダイアグラム

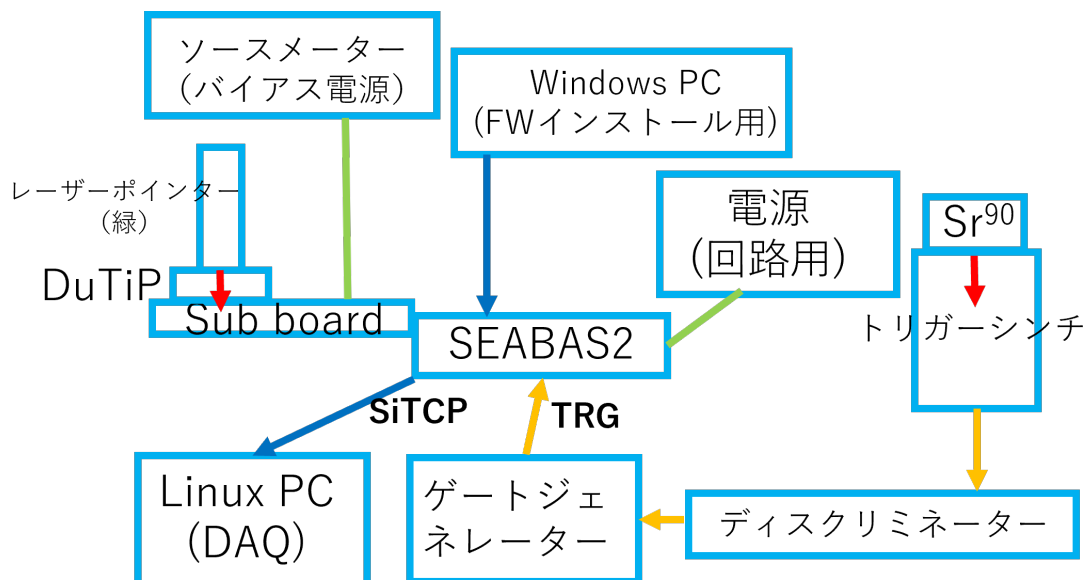


図 8.7: ピクセルヒットの検出のためのブロックダイアグラム

8.4.5 荷電粒子の検出

ブロックダイアグラムは図8.8になる。DuTiP1を貫く荷電粒子を検出できるのかどうかを試験するためのセットアップである。なので、トリガーシンチはサブボードの下に置き、 ^{90}Sr はDuTiP1の上に置いた。

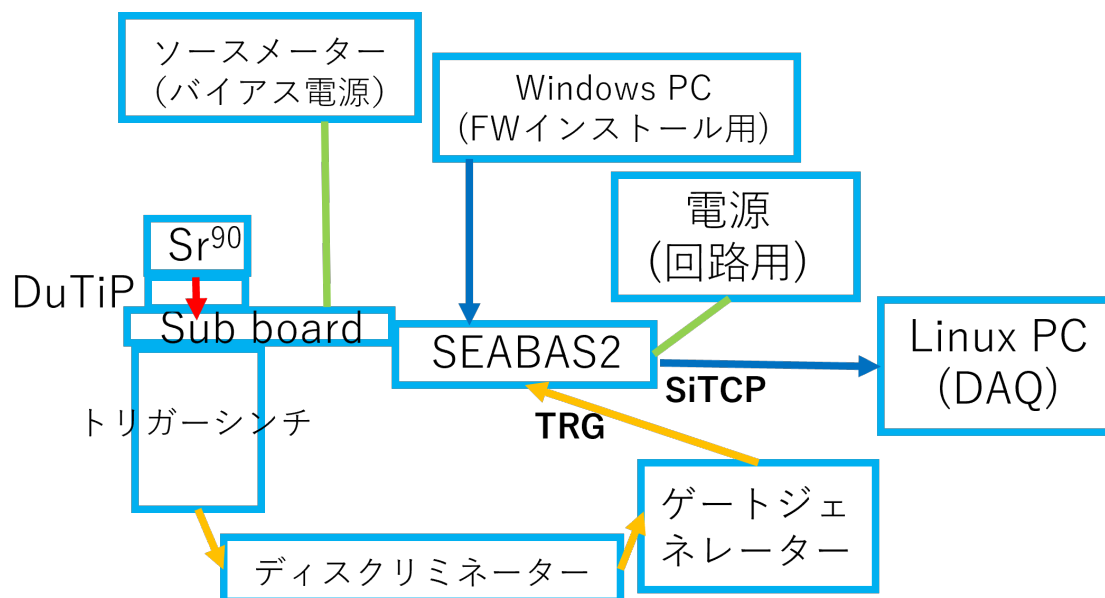


図 8.8: 荷電粒子の検出のためのブロックダイアグラム

次章でテーブルトップで行ったこの3つの試験結果を示す。

第9章 試験方法および結果

前章で述べたテーブルトップにおける DuTiP1 のテスト結果について述べる。本章では特記のない場合、TRG1 および TEST_HIT の開始時間を 1 クロック目、その幅を 256 クロックに設定した。なお、TRG2 については入力していないのでヒットは保存されない。また、ALPIDE アンプ回路のパラメータは付録 A に記載している表のうち Li 氏の博士論文 [19] で最適とされたパラメータで行った。

9.1 PC タイミング

DuTiP は Belle II 実験用のシリコンピクセル検出器として開発されており、イベントトリガーとのタイミング同期は非常に重要である。そこで Previous と Current のタイミング (PC タイミング) の切り替えが企図したように行われているかを確認するために TEST_HIT を入力し、その応答を調べた。DuTiP は 7bit カウンターを内蔵しているため、原理的にはトリガー信号との同期が 127 カウント目であれば Previous に、128 カウント目であれば Current のメモリにデータが格納される。

9.1.1 試験方法

1. テスト対称とするピクセルを選択する。
本試験では $\{\text{column}, \text{row}\} = \{60, 60\}$ で行った。
2. TEST_HIT を入力する。
 $\{\text{column}, \text{row}\} = \{60, 60\}$ での応答を見るため、TEST_HIT は 0 番を選択した。
3. トリガーの開始時間・幅を入力する。
そのときの出力データの応答をオシロスコープで観測した。

Current のタイミングに立ち上がる信号線を data_out0、Previous のタイミングに立ち上がる信号線を data_out1 とし、立ち上がり観測されれば、そのメモリにヒット情報が格納されたと判断する。TRG1 の開始時間およびその幅を変えながら PC タイミングの切り替わるタイミングについて調べた。

9.1.2 結果

それぞれの設定とその結果を表 9.1 にまとめた。信号の幅を最小である 1 クロックまで狭めたときの結果から data_out0(Current) は開始 130 (図 9.1) クロック、data_out1(Previous) は 129 (図 9.2) クロックのタイミングで応答があることがわかった。7bit カウンターなので本来は 127 で data_out1

からの応答が期待されるのに対して、2クロック遅延している。その理由は Time counter の前に Synchronizer と Sequencer の 2 つフリップフロップがあるためだと考えられる。

表 9.1: PC タイミングの結果。応答があれば○、なければ×と表す。TRG1 の開始時間と幅の値の単位はいずれもクロックである

開始時間	幅	data_out0(Current)	data_out1(Previous)
127	8	○	○
127	4	○	○
127	3	×	×
127	2	×	×
128	3	○	○
128	1	×	×
129	2	○	○
129	1	×	○
130	1	○	×
131	1	×	×

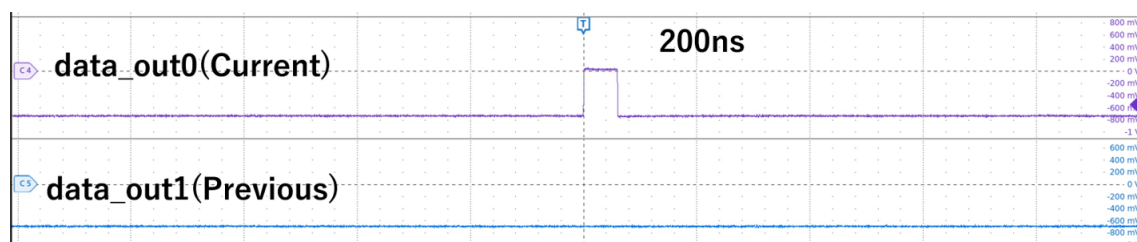


図 9.1: トリガーパルスの幅を 1 クロックまで狭め、開始時間を 130 クロックに設定して得られた Current のタイミングでのスナップショット。Current の信号線のみでの応答がある。

9.2 ピクセルヒットの確認

9.2.1 試験方法

8.4.4 節で述べたセットアップでデータ収集を行った。センサー全面にレーザーポインターを照射した場合とセンサーを半分マスクしてレーザーポインターを照射した場合の 2 つを比較した。

9.2.2 結果

センサー全面にレーザーポインターを照射したときのヒットマップが図 9.3(a)、センサーに半分マスクして照射したときのヒットマップが図 9.3(b) である。ノイジーヒットの位置は微妙に異なるものの全面照射したときにはセンサー全面に反応があり、半分マスクしたときには遮光した半分に

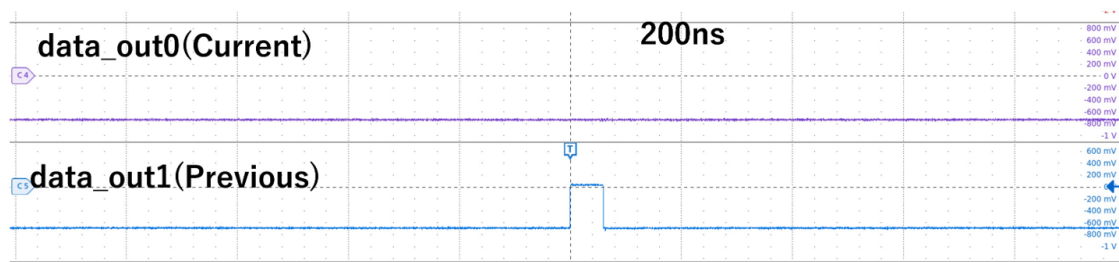


図 9.2: トリガーパルスの幅を 1 クロックまで狭め、開始時間を 129 クロックに設定して得られた Previous のタイミングでのスナップショット。Previous の信号線のみでの応答がある。

応答がなくなっている。以上の結果から DuTiP1 はレーザー光の入射によりピクセル内に電子・正孔対が生じたピクセルヒットを読み出すことができていることがわかった。

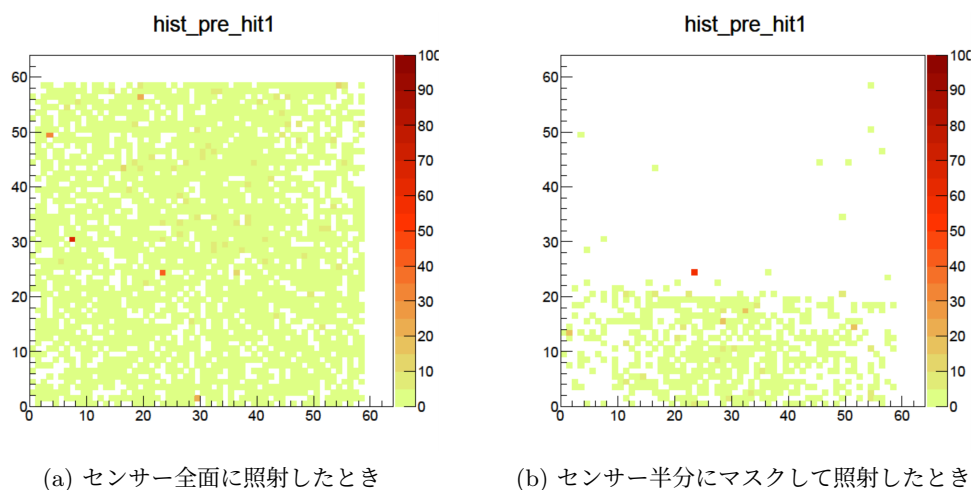


図 9.3: レーザーポインターを照射したときのヒットマップ。横軸はピクセルの column 番号、縦軸は row 番号である。

9.3 荷電粒子検出の確認

9.3.1 試験方法

8.4.5 節で述べたセットアップでデータ収集を行った。使用した放射線源は β 線源 ^{90}Sr である。2023 年 7 月 11 日時点で 1.3 [MBq] であった。 β 線の当たるスポットがコリメーターにより制限されることに対応した領域のピクセルヒットについて、ヒットの頻度の増減が見られるかどうかを試験した。

9.3.2 結果

ヒットマップが図 9.4 である。中心からやや右上付近に直径 30 ピクセル程度の円形をしたヒットの頻度が高くなった領域が存在する。DuTiP は 45 μmm 角のピクセルなので、直径 30 ピクセ

ルの円形はコリメーター開口部の直径 1.5 mm と一致している。したがって DuTiP1 は荷電粒子が検出可能であるということがわかった。

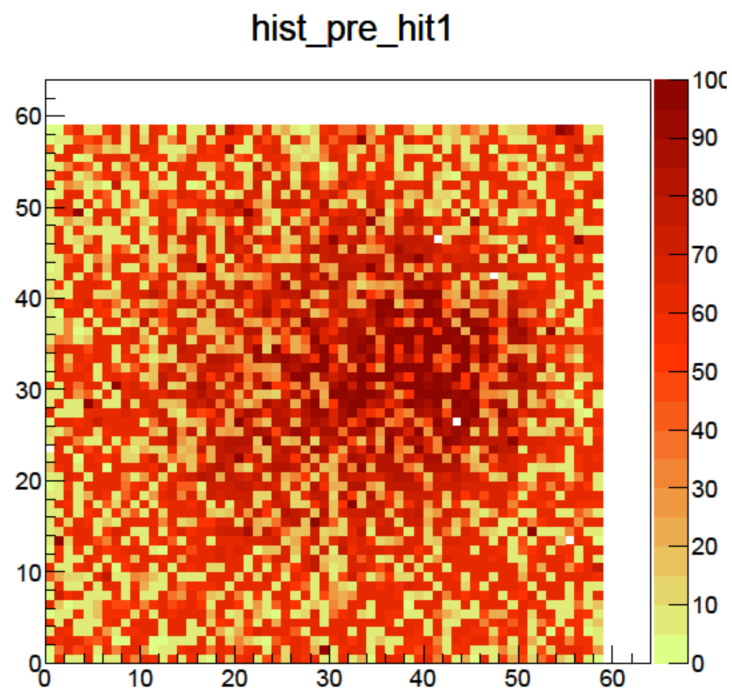


図 9.4: ^{90}Sr が発する β 線を直径 1.5 mm の円形開口部を持つコリメーターを通して DuTiP1 に照射して得たヒットマップ。横軸はピクセルの column 番号、縦軸は row 番号である。column 番号が 20~50 かつ row 番号が 20~50 の領域に円形のピクセルヒットの頻度が高くなっているところが認められる。これがコリメーター開口部の寸法と一致することから荷電粒子が検出できることを確認した。

第10章 KEK AR テストビームラインでの ビームテスト

本章では 2023 年 12 月に行った KEK AR テストビームライン (ARTBL) でのビームテストについて述べる。

10.1 KEK AR テストビームラインについて

ARTBL は高エネルギー加速器研究機構の PF/AR を利用して作られ、2023 年度より大学共同利用のユーザーにも開放された新設のビームラインである。PF/AR に蓄積した電子ビームのハローにワイヤ標的を入れ、生成された γ 線から電子・陽電子対を生成させ、その電子を利用する。エネルギーは 1 GeV $\sim$ 5 GeV までをユーザーが任意に変更することができる。

10.2 テストビームでの目的

SOI テクノロジーを用いて製作されたピクセルセンサーのうち、INTPIX4NA は、ARTBL においてビーム位置をイベント毎にモニターする Telescope システムの構築を目指して開発されているものである。今回のビームテストの目的は INTPIX4NA による Telescope システムに DuTiP1 を組み込み、数 GeV の電子を当て高エネルギー荷電粒子の通過に対する Telescope システムと DuTiP1 の特性を調べることである。本研究では特に DuTiP1 の性能評価について記す。

10.3 セットアップ

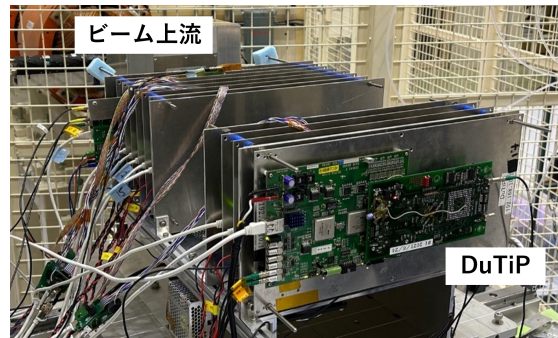
図 10.1 にセットアップした写真および概略図を示す。SOI グループとして、テストビームラインでビーム通過位置を得る Telescope システム開発の一環としてビームテストを行ったため、他の SOI センサー群を DuTiP1 の上流に配置したセットアップとしている。その中でも INTPIX4NA とそれを使って構成されている Telescope については 10.3.1 節で詳細に述べる。本研究では下流側 INTPIX4NA 2 枚のトラック情報を DuTiP1 の性能を評価する解析に用いた。便宜上下流側 2 枚の INTPIX4NA は、上流側から順番に IP8 と IP9 と呼ぶ。INTPIX4NA 同士のセンサー間隔は 32 mm である。また、上流側の最後にあたる 5 枚目の INTPIX4NA と IP8 の間は 252.7 mm で、IP9 と DuTiP1 の間は 53.3 mm である。なお、IP8 および IP9 と DuTiP1 の Column および Row の向きは同じである。

DuTiP1 が最下流に位置している理由は 2 点ある。1 点目は DuTiP1 の FW 調達が最終段階をこなしている時点で、上流側 XRPIX5 と 5 枚の INTPIX5NA および下流側 IP8 と IP9 を組み立てる必要があったこと、2 点目はチップを載せるソケットに穴が開いてなかったため、他のセンサーの前にある物質量を減らすためである。なお、真ん中にある磁石は磁場を用いた運動量測定の可否

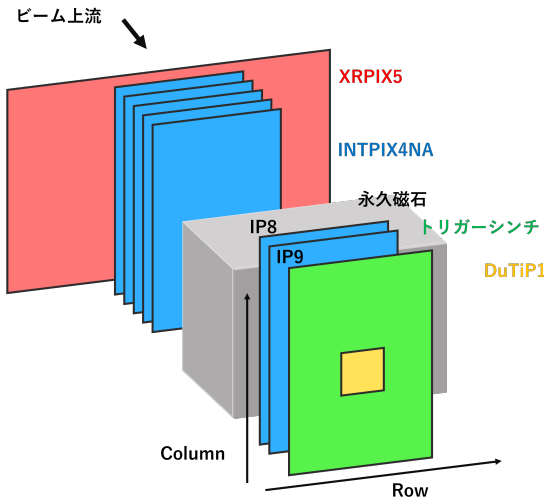
を調べるためのものであるが、本研究の解析に磁石を入れたときのデータは使用していない。

トリガーは XRPIX5 とトリガーシンチの 2 種類がある。XRPIX5 は X 線検出を目的として開発されているセンサーであり、自身がトリガーを出す機能がある。そのパラメーター一覧は表 10.1 であり、本研究で用いた解析用データは全て XRPIX5 をトリガーとして用いた Run である。なお、トリガー範囲を選択することができ、ビームテストのときのトリガー範囲は INTPIX4NA の有感領域に合わせた。

DuTiP1 に直接関係している部分のセットアップは 8.4 節で述べたものに、外部から event_tag を入れるためのリモケーブルが追加されている部分を除けば 8.4 節と同じである。INTPIX4NA とタイムスタンプの同期を行うため、event_tag を数えるためのクロック信号を INTPIX4NA の DAQ 制御ボード (USAGI ボード) から受け取った。そのクロック信号は 1 kHz であった。INTPIX4NA の event_tag も DuTiP1 同様に 32bit である。



(a) セットアップの写真



(b) セットアップの概略図

図 10.1: セットアップの写真および概略図。上流側 5 枚の INTPIX4NA と下流側の INTPIX4NA2 枚および DuTiP1 の間の永久磁石は取り外しが可能であり、設置して収集したデータと設置しないで収集したデータがある。

表 10.1: XRPIX5 のパラメータ [23]

パラメータ	値
Wafer	N-type Floating Zone wafer
センサーの厚み	310 μm
基盤抵抗率	10.1 $\sim$ 12.1 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$
チップサイズ	24.6 mm $\times$ 15.3 mm
有感領域	21.9 mm $\times$ 13.8 mm
ピクセルアレイ	608 $\times$ 384
ピクセルサイズ	36 μm $\times$ 36 μm

10.3.1 Telescope 用 INTPIX4NA

本研究でトラッキングに用いた Telescope は ARTBL 向けに開発が進められている。Telescope に用いられている INTPIX4NA の主なパラメータは表 10.2 になる。解析はゼロサプレッションが実装された IP8 と IP9 でのヒットをトラッキング情報に利用した [23]。ゼロサプレッションとはある閾値を超えたピクセルを seed ピクセルとし、その seed ピクセルの周囲 5×5 ピクセルのみをデータとして読み出すロジックであり、フルフレーム読み出しとは異ってデータサイズを削減できる。テストビームラインでは原則として 1 イベントに電子が 1 つ到来するため 1 回のトリガーで 1 seed ピクセルを読み出す。seed ピクセルを探すための順番は、row を固定して column をスキャンしている。つまり、ゼロサプレッションの場合、row が小さい値のヒット検出が多くなる。

表 10.2: INTPIX4NA のパラメータ [23]

パラメータ	値
Wafer	N-type Floating Zone wafer
センサーの厚み	300 μm
埋込酸化膜層の厚み	140 nm
SOI 回路層厚	40 nm
チップサイズ	15.4 mm $\times$ 10.2 mm
有感領域	14.1 mm $\times$ 8.7 mm
ピクセルアレイ	832 $\times$ 512
ピクセルサイズ	17 μm $\times$ 17 μm

10.4 データ収集について

データ収集は 10000 event を 1 Run として行った。このときの event の定義は XRPIX5 がトリガーを出したときかつそのトリガーが INTPIX4NA が busy ではない、即ち全ての INTPIX4NA がデータの読み出しを終えて次の event の到来を待機している状態にあるときに送られる。そのトリガーを契機にピクセルヒットの情報を読み出す。INTPIX4NA と DuTiP1 のデータ収集サイクルはそれぞれ別のプロセスとして走るため、以下に述べる手順でそれらを走らせ、event_tag による同期した event 抽出を可能にした。データ収集開始時に XRPIX5 のトリガーが出ていない状態

で DuTiP1 のデータ収集サイクルを先行して開始させる。(トリガーが入らないため、最初の event を待つ状態になる。) 続いて、INTPIX4NA および XRPIX5 が一体化されたデータ収集サイクルを開始させる。こうすることで Run の開始即ち一番最初のトリガーが一致し、今後は INTPIX4NA が XRPIX5 からもらったトリガーの全てを DuTiP1 も受け取るので、event_tag によりそれぞれの生データから同一 event の抽出が可能になる。

第11章 ビームテストでの結果

本章ではビームテストでの結果について述べる。使用しているデータは全て 4 GeV の電子が入射し、永久磁石は設置していないときのデータである。ヒット情報の有無が最重要条件であるため、読み出し動作やトリガー条件での 픽セルヒットの取りこぼしを最小限にするため、DuTiP1 の TRG1 のトリガー条件は開始時間 1 クロック、幅 256 クロックとして、タイマーの時間レンジを全てカバーする設定とした。TRG2 を必要とする状況ではないため TRG2 は入力していない。特に断りがない場合は ALPIDE アンプ回路のパラメータは付録 A に記載しているうち、Li 氏の博士論文 [19] で最適とされた値に設定した。

11.1 電子ビームの有無による 픽セルヒット頻度の変化

今回の ARTBL におけるビームテストは、DuTiP1 を GeV 程度の高エネルギー荷電粒子が通過する条件で行うものとしては最初のものであった。電子ビームを入射せずに USAGI ボードからクロックトリガーを受信して 1Run データ収集を行い、その次に電子ビームを入射しながら通常の 1 Run データ収集を行った。2つの結果を比較した。その結果を図 11.1 に示す。電子ビームを入射していないときはヒットがほとんど見られず、幾つか見られるヒットはセンサーのノイズヒットである。電子ビームを入射しているときは有感領域全体に荷電粒子の通過を示すエントリーが見られる。

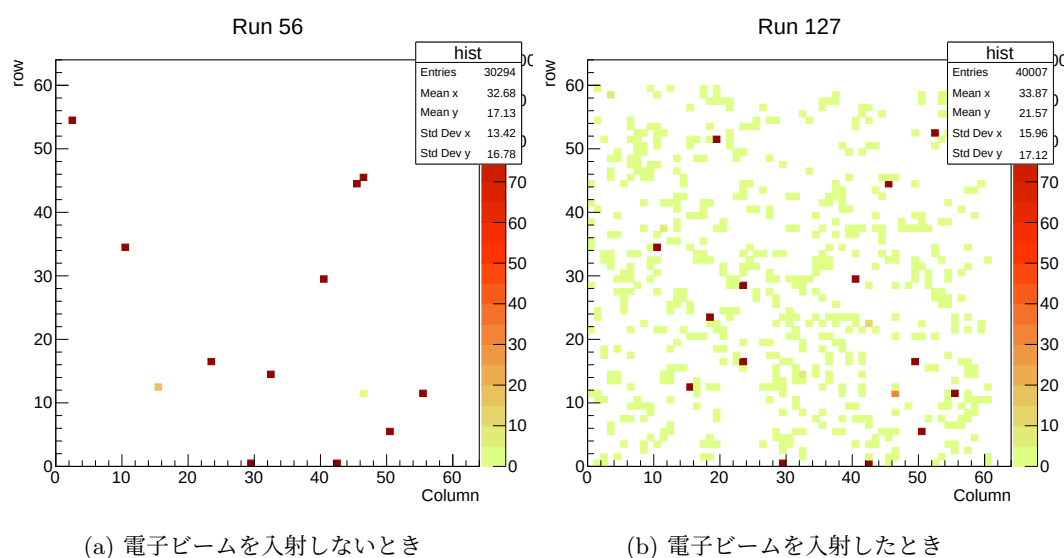


図 11.1: ビームテストでのヒットマップ。(a) 電子ビームを入射しないとき (b) 電子ビームを入射したときを指す。

11.2 検出効率の算出

DuTiP1 ではこれまで実験室で線源からの β 線を用いて検出効率を算出したことはあるが [19]、GeV 程度の高エネルギー荷電粒子を当て、他の検出器がその通過を検知した飛跡の情報を使って検出効率を算出するのは今回のビームテストが初めての取り組みである。

11.2.1 イベントの選択

検出効率は Telescope で荷電粒子の通過を検知したイベントにおける DuTiP1 のヒット情報を基に算出する。別プロセスとして走った Telescope と DuTiP1 の二系統の生データから、同一イベントを抽出するために event_tag に対して条件を課す。DuTiP1 直前の INTPIX4NA2 層にあたる IP8 と IP9 で event_tag が完全に一致していることを要求する。また、IP8 と IP9 で一致した event_tag に対して、DuTiP1 の event_tag は値の差が 2 以下という条件を課す。これは INTPIX4NA と DuTiP1 の生データを詳しく調べたところ、同一イベントと考えられるが両者の間で event_tag が 1 だけ異なるものが厳密に一致するものに対して約 10% 存在することがわかり、それを受け入れるためである。

11.2.2 検出効率の求め方

11.2.1 節の event_tag の条件を 3 枚のセンサーが満たすとき、図 11.2 のように IP8 と IP9 のヒット位置からその 2 点を通る直線を求める。その直線を DuTiP1 上に外挿する。その外挿したヒット位置が DuTiP1 の有感領域に存在する場合を「外挿したヒット」と呼ぶ。その外挿したヒットと DuTiP1 自体が記録したヒット位置を比較する。2 点の残差が後述する適切な範囲にあるとき、DuTiP1 でもヒットが見られたとして「実際のヒット」と呼ぶ。外挿したヒットと実際のヒットが何回あったのかを数えることにより検出効率を算出する。数式で表すと以下になる。

$$\text{検出効率} [\%] = \frac{\text{実際のヒットがあった数}}{\text{外挿したヒットがあった数}} \times 100 \quad (11.1)$$

11.2.3 アライメント

実際のセットアップは厳密にセンサー同士の中心位置が一致していないのでその位置の補正を行う。それをアライメントと呼ぶ。本研究では IP9 をアライメントの基準として、まず並進方向のアライメントを行い、その残差分布から回転方向の補正を行った。

並進方向のアライメント

並進方向のアライメントは以下のような順序で行った。

1. IP8-IP9, IP8-DuTiP, IP9-DuTiP で水平方向と垂直方向のそれぞれに異なるセンサー間のヒット座標の 2 次元ヒストグラムを作成する。
2. 2 センサー間でヒット座標の残差分布を作成し、正規分布でフィットする。

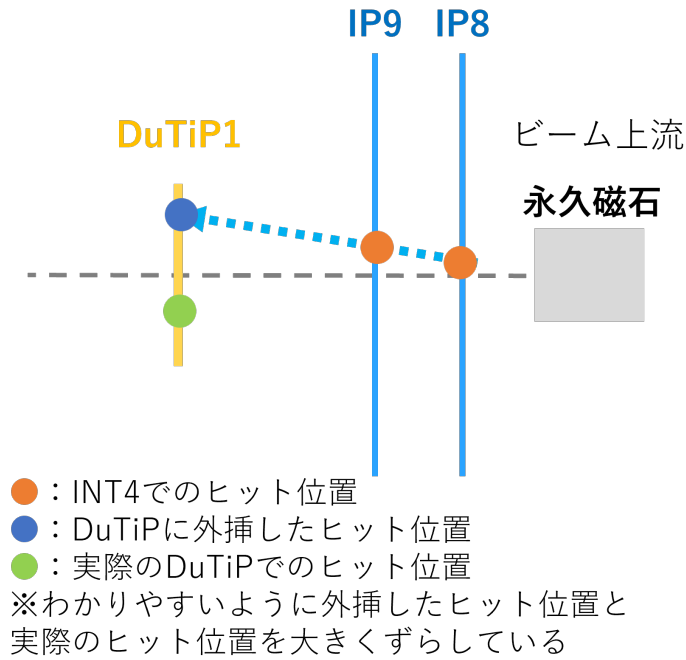


図 11.2: 実際のヒットと外挿したヒットの模式図。解析に使用したデータを収集した際は永久磁石は設置していない。

2. の正規分布の平均値を μ , 標準偏差を σ とおき、残差分布のフィッティング結果から実際のヒットを選ぶ条件を以下のようにする。

$$\mu - 3\sigma \leq \text{イベント毎の残差の値} \leq \mu + 3\sigma$$

3. の条件を課して残ったイベントに対し、1. の 2 次元分布を $y = a + bx$ でフィットする。
2 次元分布の端のところは直線から外れる傾向が見られるので DuTiP1 の有感領域の端から数百 μm はフィットする範囲から除外した。また、その際に傾き b が 1 に対して $\pm 2\sigma$ 以内で一致していることを確認した。

5. そのときの切片 a の値を平行移動分と考えて補正する。

上記 4. で行った $y = a + bx$ の結果とデータ点を重ね書きした 2 次元分布を図 11.3, 11.4, 11.5 に示し、5. の平行移動補正量を表 11.1 に示す。

表 11.1: 並進方向のアライメントの結果 (単位は μm)

方向	IP8-IP9	IP8-DuTiP1	IP9-DuTiP1
垂直方向	-303.8	-5276.3	-4967.3
誤差	2.2	56.9	37.9
水平方向	-152.9	-2771.4	-2671.0
誤差	3.1	51.8	35.2

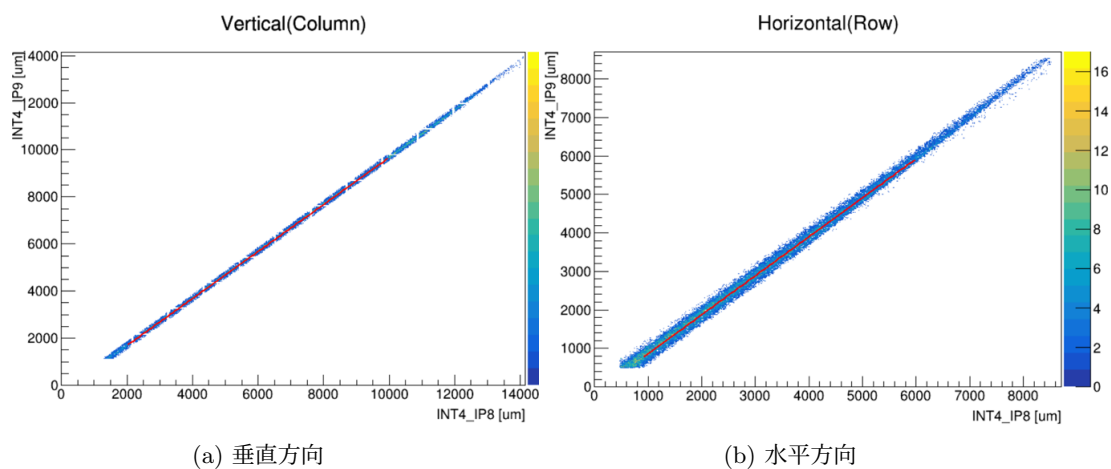


図 11.3: IP8-IP9 のヒット相関図

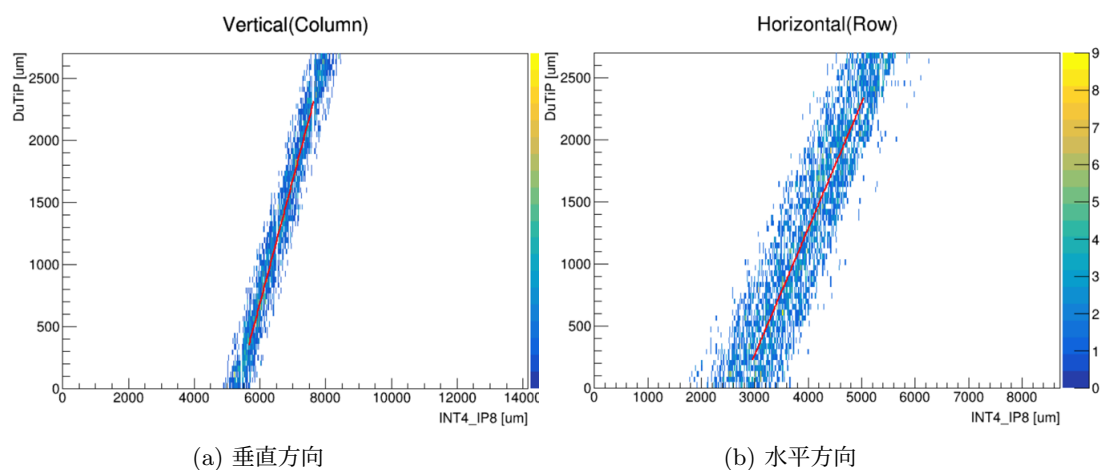


図 11.4: IP8-DuTiP1 のヒット相関図

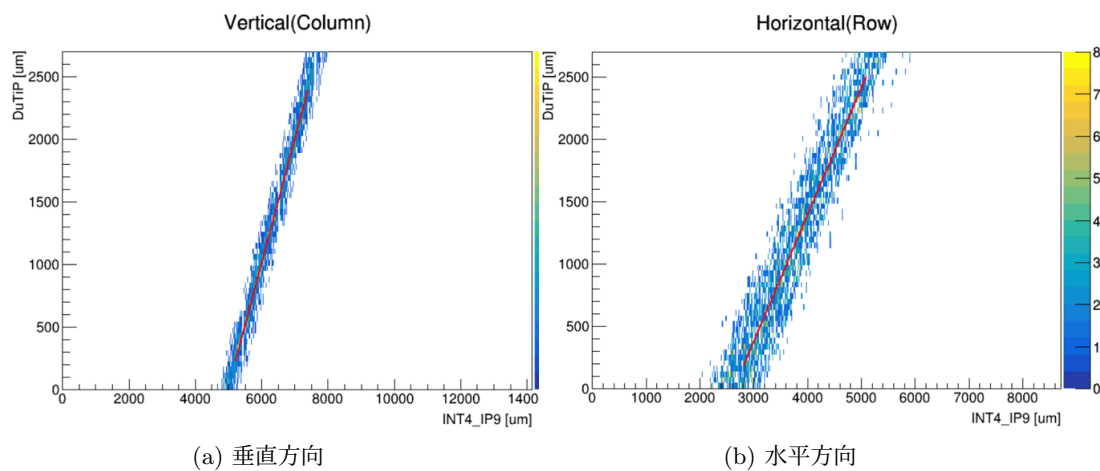


図 11.5: IP9-DuTiP1 のヒット相関図

センサー間の相対的な回転

センサー間の相対的な回転を以下のような順序で確認した。図 11.2 の外挿したヒット位置を $(x_{\text{pre}}, y_{\text{pre}})$ 、実際のヒット位置を $(x_{\text{hit}}, y_{\text{hit}})$ とする。

1. 残差である $\delta_x = x_{\text{pre}} - x_{\text{hit}}$, $\delta_y = y_{\text{pre}} - y_{\text{hit}}$ を出す。
2. $\delta_y - x_{\text{hit}}$, $\delta_x - y_{\text{hit}}$ の 2 次元分布を作成する。
3. その分布を $y = a + bx$ でフィットする。
4. そのとき傾きがセンサー間の相対的な回転を表す。

その結果が図 11.6 となる。傾きは垂直方向に 0.037 rad であり、水平方向には -0.030 rad であった。DuTiP1 中央から有感領域の端までの長さ (1.5 mm) を乗じると $45 \mu\text{m}$ で 1 ピクセル分であり、一般に回転によりヒット位置がずれて見える効果はそれより小さい。したがって検出効率の算出にはこのわずかな傾きによる顕著な影響はないと考えセンサー間の回転に対する補正は行っていない。

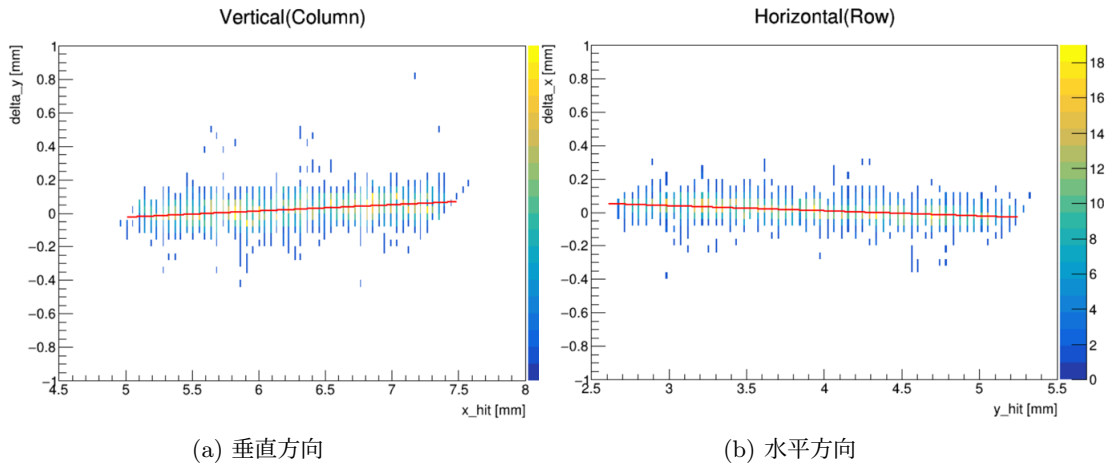


図 11.6: $\delta_y - x_{\text{hit}}$, $\delta_x - y_{\text{hit}}$ の 2 次元ヒストグラム

11.2.4 残差分布について

並進方法のアライメントを行った後の、 δ_x および δ_y 分布を図 11.7 に示す。正規分布でフィットした結果、アライメントを行ったにもかかわらず、その残差分布の平均値が垂直方向ではゼロになっていない。この原因は現状では不明であるが、検出効率の算出に支障をきたすものではないと考えられる。

11.2.5 XRPIX5 が出すトリガーのタイミング遅延について

ARTBL で実施したビームテスト全般にトリガーは最上流においた XRPIX5 が出すものを用いている。XRPIX5 がヒットを検出してから INTPIX4NA がトリガー信号を受け取るまでにかかる時間 (Trigger latency) が測定された [23]。USAGI ボードに接続された XRPIX5 の下流 32 mm の

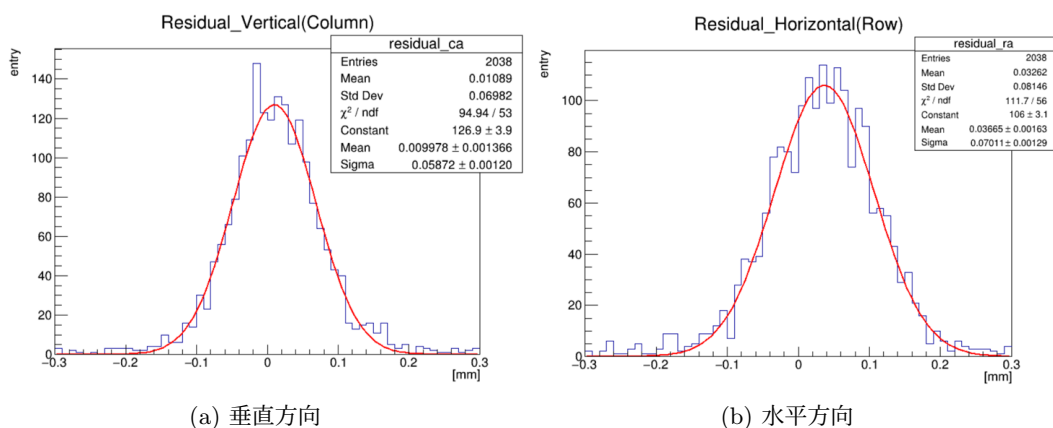


図 11.7: 残差分布 (a) 垂直方向と (b) 水平方向。フィットは正規分布である。

位置に MPPC で読む出す $3.0 \text{ cm} \times 2.0 \text{ cm}$ シンチレーターを設置してオシロスコープで測定を行った。XRPIX5 とシンチレーターのディスクリミネーター出力の時間差は図 11.8 にあるように最大で約 $10 \mu\text{sec}$ となっている。INTPIX4NA の積分時間は $100 \mu\text{sec}$ と長くとしたのに対して、DuTiP1 は 7bit タイマーで 127 カウント目でコインシデンスを取る。18.75 MHz つまり周期 $0.053 \mu\text{sec}$ で動いてる場合、タイミングを受け付ける幅は $6.73 \mu\text{sec}$ である。DuTiP1 のタイマーのレンジが XRPIX5 のトリガーの Trigger latency よりも短い。それゆえ、10 % くらいの確率で DuTiP1 のタイマーのレンジを外れるイベントが発生するので検出効率の評価はそれを考慮する必要がある。

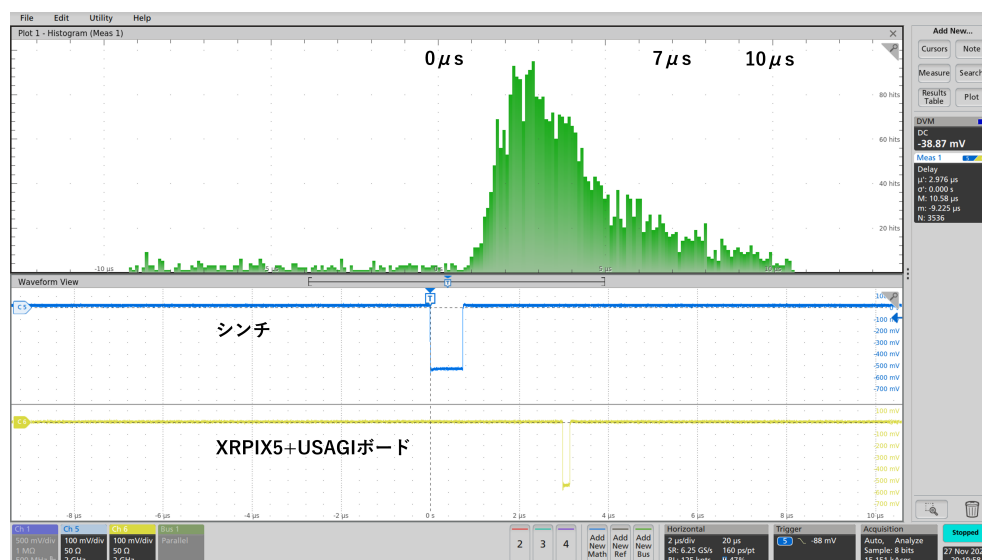
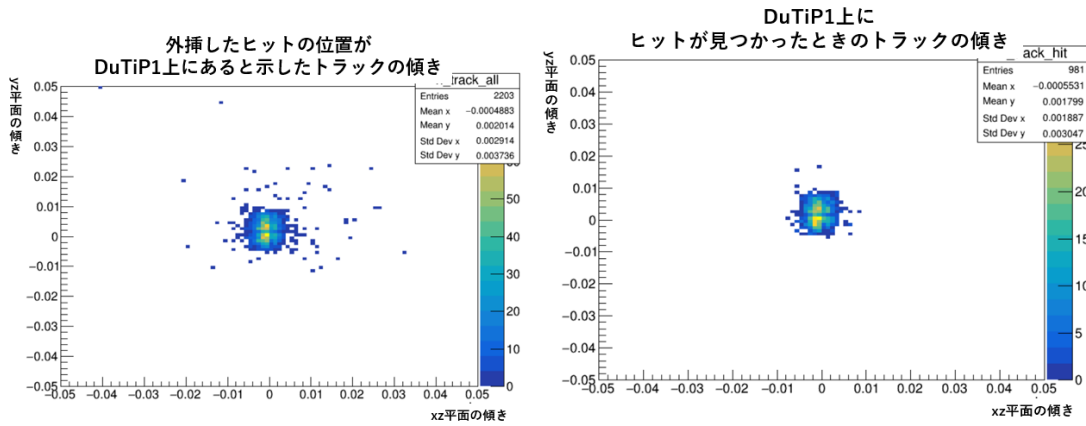


図 11.8: Trigger latency の測定結果。上のヒストグラムはシンチレーターのディスクリミネーター出力と XRPIX5 が発して USAGI ボードが配信するトリガーパルスの時間差を表す。

11.2.6 IP8 と IP9 から外挿するトラックの傾きについて

前述の通り、検出効率を算出するために IP8 および IP9 のヒット位置から DuTiP1 のヒット位置を外挿する。その際のトラックの傾きについて、DuTiP1 上でヒットが見られたときと見られなかったときに比較した。その結果の二次元ヒストグラムを図 11.9 に示す。IP8 と IP9 のヒットはノイズなどの影響で傾きが大きくそれているイベントが一定数あるのがわかる。この影響を考え、トラックの傾きに $-0.005 < xz$ 平面内の傾き < 0.004 および $-0.005 < yz$ 平面内の傾き < 0.008 の制限を課した。



(a) 外挿したヒット位置が DuTiP1 上にあると示したトラックの傾きの分布 (b) DuTiP1 にヒットが見つかったときのトラックの傾きの分布

図 11.9: トラックの傾きの分布 (a) 外挿したヒット位置が DuTiP1 上にあると示したトラックの傾き (b) DuTiP1 にヒットが見つかったときのトラックの傾き。横軸は xz 平面の傾きを表し、縦軸は yz 平面の傾きを表す。

11.2.7 多重散乱の影響について

荷電粒子は物質中を進行する際に多重散乱を起こすため、有限の軌跡の乱れがある。つまり、IP8 と IP9 から外挿して DuTiP1 の端の方でヒットが予想されても、粒子が通過した場所が DuTiP1 の有感領域の外側となる場合があり、ヒットが検出できていないとみなされ、検出効率を過小評価してしまう。それを避けるために、外挿した点が DuTiP1 の端近くのイベントは除くことにする。その除く領域の幅を決めるために 0, 50, 100, 150, 200, 250 μm で検出効率を比較した。実際のヒットとみなす条件は δ_x および δ_y 分布を正規分布でフィッティングしたときの平均値を μ 、標準偏差を σ として $\mu \pm 3\sigma$ の範囲に入ることとした

その結果を図 11.10 に載せる。除く範囲の幅が狭いほど得られた検出効率が悪い傾向がある。これは先に述べたように端の方でのヒット予想位置と比較して、実際のトラックでは外に曲がったイベントがあるからだと考えられる。したがって外挿した飛跡が DuTiP1 上で端からは 250 μm 以上、有感領域の内側に入ることを要求した。

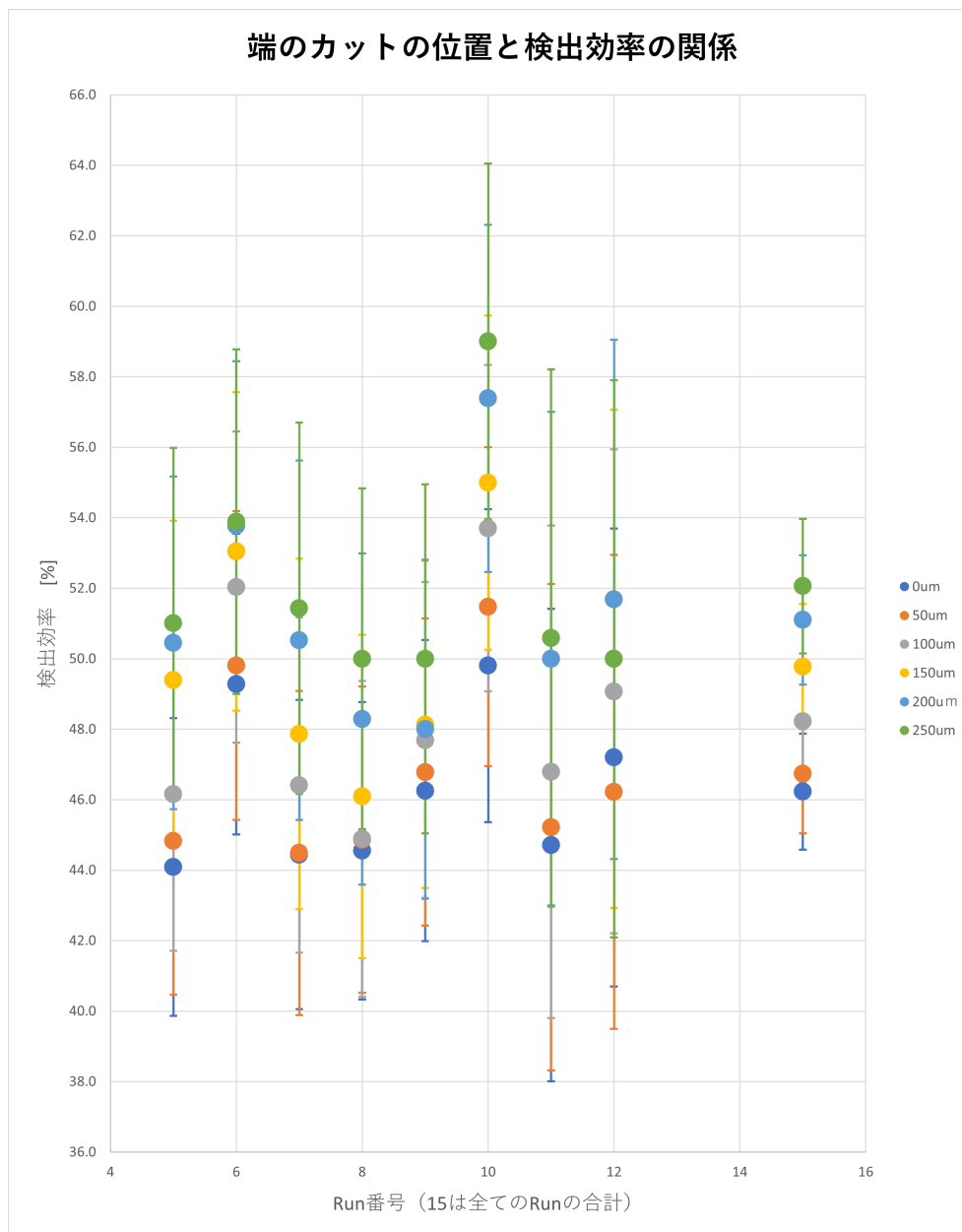


図 11.10: カットの位置と検出効率の関係。横軸は Run 番号を表す。但し 15 は全ての Run での合計を表す。検出効率の平均は $0\text{ }\mu\text{m}$ から順に 46.2 %, 46.7 %, 48.2 %, 49.8 %, 51.1 %, 52.1 % となる。

11.2.8 残差分布を許す範囲について

11.2.7 節では実際のヒットとみなす条件を δ_x, δ_y の $\mu \pm 3\sigma$ の範囲で行った。これを $\mu \pm 4\sigma$ に広げた場合と比較した結果を図 11.11 に示す。3 σ と 4 σ のときの結果から DuTiP1 は 3 σ の外側に正規分布で説明しきれない寄与が平均 1 %程度存在することがわかる。

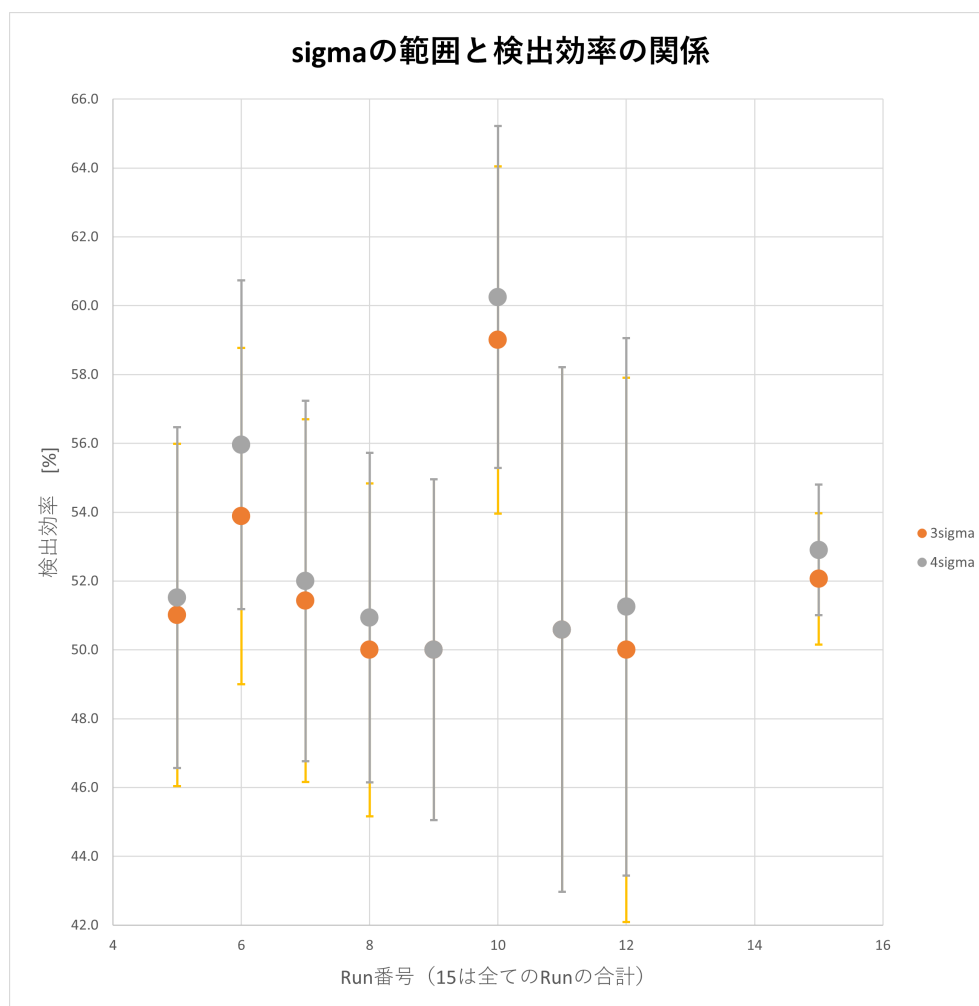


図 11.11: 3 σ と 4 σ での検出効率。横軸は Run 番号を表す。但し 15 は全ての Run での合計を表す。検出効率の平均は 3 σ から順に 52.1 %, 52.9 % となる。Run9 および Run11 は 2 つとも同じ結果であった。

11.2.9 パラメータおよび Run 毎の検出効率の関係

次に、ALPIDE アンプ回路のパラメータを変えたときと Run 毎の検出効率の関係を比較する。それぞれの Run 番号とそのときの ALPIDE アンプ回路のパラメータは表 11.2 に示す。なお、ALPIDE アンプ回路のパラメータ一覧は付録 A に記載している。ヒットとみなす条件はこれまでと同様である。結果を図 11.12 に示す。

この結果からわかることは同じパラメータであれば誤差の範囲内で一致している。また、パラメータ 2 での検出効率が特に低い。これは入力リセット電流を決めている VDIODE の値が低いためだと考えられる。

検出効率が低くなった原因としては ALPIDE アンプが消費電力を減らすため MOSFET トランジスタを弱反転領域で動作させる設計のため、そのバイアス電圧の変化による増幅率の変化が大きいこと、またピクセルの容量が想定している 3 fF よりも大きい可能性があること、信号電荷収集効率を左右する PDD 電極の構造が最適でない可能性があることなどが挙げられる。今後はこうした観点の調査を行い、荷電粒子の通過に対して 100 % 近い検出効率を実施する条件を確立する必要がある。

表 11.2: Run 番号と ALPIDE アンプ回路のパラメータ。詳細については付録 A に示した値を参照のこと。

Run 番号	ALPIDE パラメータ
1	1
2	2
3	2
4	3
5	Li
6	Li
7	Li
8	Li
9	Li
10	Li
11	Li
12	Li

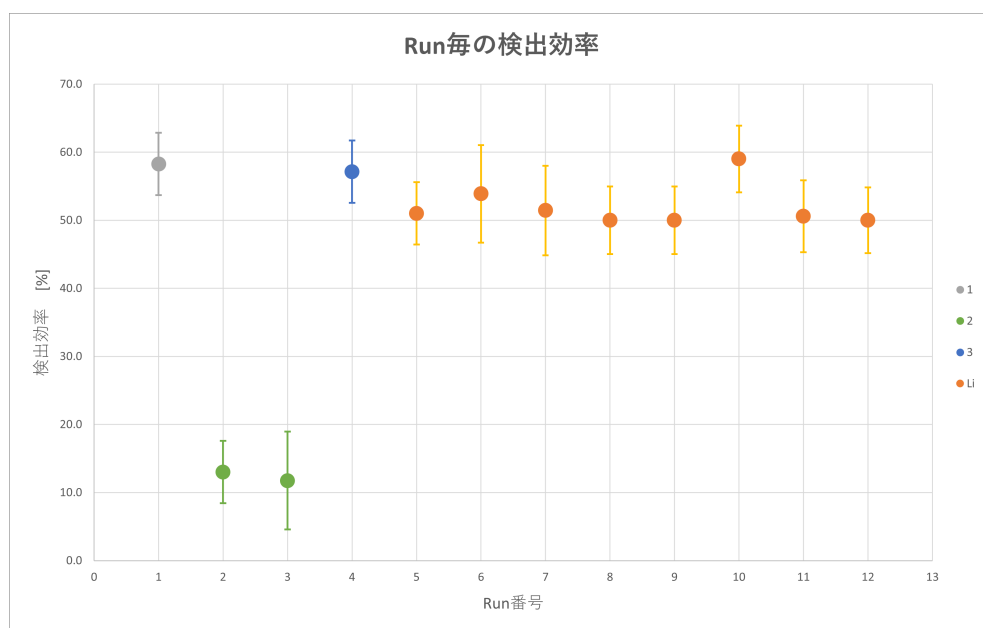


図 11.12: ALPIDE アンプ回路のパラメータを変えたときの測定結果。横軸は Run 番号を表す。色はパラメータ設定を表す。

第12章 まとめと今後の課題

暗黒物質はその詳細がわからないため、様々な方法を用いて探索が行われている。本研究では Belle II 実験における $\gamma\gamma$ に崩壊する長寿命粒子の ALP の探索を検討した。現在の Belle II 実験の電磁カロリメーターは数十 MeV $\sim$ 7GeV の広いエネルギーの γ 線を検出する機能はある一方でその到来方向はあまりよくわからない。そのために衝突点以外からのビームバックグラウンド γ 線を識別する能力が困難である。そのため、もし、 γ 線の到来方向が分かり、ビームバックグラウンド γ 線を除去することができれば、数十 cm 進んだあとに γ 線対に崩壊する長寿命粒子となっている ALP の再構成した ALP の質量分布の幅を小さくする可能性がある。そこで本研究では電磁カロリメーターの性能改良を測るものとしてプリシャワー検出器を検討した。

本研究で考えているプリシャワー検出器のモデルは電磁シャワーを発達させつつ、エネルギー損失も測るアクティブ吸収層として BGO、電子・陽電子の通過位置を検出するトラッキング層としてピクセル型のシリコン検出器を考えている。Belle II 実験の電磁カロリメーターは先に述べたように低エネルギー γ 線への感度も必要なため、 γ 線のエネルギーが測定できるアクティブ吸収層を含んだ構成にしている。Geant4 を用いてプリシャワー検出器のシミュレーションを行ったところ、50 μ m 角のピクセル検出器のだとバイナリー読み出しの場合で角度分解能が約 40 mrad ということがわかった。エネルギー損失で重みをつけて角度分解能を算出した場合、約 80 mrad とバイナリー読み出しよりも悪くなる。これは、エネルギー損失の分布がランダウ分布を作っているためヒットに対してエネルギー損失が大きい方に引っ張られてしまい、結果として γ 線運動量ベクトルがばらついてしまったと考えられる。もし、プリシャワー検出器で 40 mrad の精度で γ 線の入射方向を算出できるとバックグラウンド γ 線削減に対する効果は十分にあると期待できる。また、暗黒物質探索に対する効果は 2 GeV の ALP が 40 cm 進んでから崩壊する場合において、バイナリー読み出しの場合だと約 4σ の分離が可能である。

プリシャワー検出器はこれまでの電磁カロリメーターの技術だけでなく、半導体検出器の技術も必要不可欠である。プリシャワー検出器に用いるピクセル型シリコン検出器の候補に Belle II 崩壊点検出器のアップグレード用に開発中のオプションの 1 つである DuTiP がある。DuTiP は 7bit タイマーを 2 つもつバイナリー読み出しのピクセル型検出器である。デジタル化に用いるタイマーを 2 つ内蔵して、一方が処理中のときは他方に切り替えて処理することで、Belle II 実験のような高輝度実験に耐えることができ、今後ミノシティが向上しても十分に機能すると考えられている検出器である。本研究では DuTiP1 を試験した。実験室では FW のシミュレーションだけでなく、そのヒット検出機能についても試験した結果、DuTiP1 は荷電粒子を検出することが可能であるという結果を得た。

実験室のテーブルトップの結果を受けて、KEK AR テストビームラインでビームテストを行った。このビームテストでは DuTiP1 が高エネルギー荷電粒子の検出が可能であるということを初めて示した。また、KEK AR テストビームライン向けに開発されている Telescope のトラック情報から検出効率についても算出した。多重散乱の影響を考え DuTiP1 に対して端から 250 μ m のヒットは加味しないという条件を課し、残差分布の 3σ までを実際のヒットだとみなすと検出効率は概ね 50 %であるということがわかった。トリガーに使用した XRPIX5 の Trigger latency (最大で約

10 μ sec) と DuTiP1F が Belle II 向けに開発されている 7bit タイマーであることを考えると 10 % くらいは検出できないイベントが生じてしまう。他にも検出効率が低かった原因として、ALPIDE アンプ回路のパラメータの設定やピクセル中で信号電荷を集める効率を左右する PDD 電極の構造など、最適化されているか再度調査をする必要があることを示した。

本研究の今後の展望として、Geant4 シミュレーションはより多様な条件について包括的にを行っていく必要がある。入射条件に対しては、垂直入射以外をするといった方法や入射位置を大きくずらしてみるなどといったことがある。また、それだけではなく実際に Belle II 測定器にプリシャワー検出器を入れた場合のシミュレーションを行う必要もある。プリシャワー検出器によって得られる利点や他の検出器への影響も見積もる必要がある。

DuTiP1 はビームテストの結果から位置分解能を算出する。また、ファームウェアをステートマシン形式のものに変更し、ソフトウェアをそれに準拠するものに改変するなどの改善が考えられる。そして、ALPIDE アンプ回路のパラメータ設定とピクセルの電荷収集効率の可能な改善を試みる取り組みが考えられる。

謝辞

この場をお借りして、お世話になりました皆様にお礼申し上げます。

はじめに、研究室の宮林謙吉先生・下村真弥先生・蜂谷崇先生・住澤一高さんに感謝申し上げます。指導教員の宮林先生には本研究を進めるにあたり多くのことをご教授いただき、大変お世話になりました。わからないことがあったときは親身に相談に乗ってくださり、研究を進めるにあたって大変勉強になりました。また、KEK の出張のみならず、研究会やワークショップなど様々な経験をさせていただきました。研究面のみならず、自分の価値観を広げる貴重な機会だったと思っています。学部時代からの3年間、本当にありがとうございました。研究室の下村先生には大学院に進学してからは直接お会いできる機会は多くはなかったですが、ミーティングの際には発表やその内容についてご指導いただきありがとうございました。蜂谷先生には特にソフトウェアの面で大変お世話になりました。シミュレーションを進める中で行き詰った際にコードを見て頂いたりサポートしていただきました。また、ミーティングの際にもソフトウェアのみならず、DuTiP1の研究でもたくさんのアドバイスをご提案いただきました。蜂谷先生のご尽力がなければここまで研究を進めることができなかったと思います。本当にありがとうございました。住澤さんも下村先生同様、直接お会いできる機会は多くなかったですが、ミーティングのときにはプログラミングや解析へのアドバイスをいただきました。研究を進める上で大変勉強になりました。ありがとうございました。

また、SOI グループの皆様にも感謝申し上げます。KEK の坪山透さん、都立産技高専の山田美帆さんには DuTiP1 の性能評価をするにあたって、ビームテストを行うまで多くの助言をいただきました。お二人が毎日富士実験室まで来てくださり、些細な質問にも答えてくださったおかげでビームテストを迎えられたと思います。本当にありがとうございました。また、ビームテストの解析をするにあたり、KEK の石川明正さんには多くのアドバイスを頂戴しました。検出器の本格的な解析を行うのはビームテストが初めてで右往左往することもありましたが、その都度結果を確認していただきありがとうございました。また、お三方には研究のみならず研究会の発表や学会の概要などの添削もしていただきました。本当にありがとうございました。

ビームテストの際には筑波大学の大森匠さんにもお世話になりました。同期だからこそ聞けた些細な質問が数多くありました。個人的には SOI 研究会の際に駅から東京理科大までの直線の道で迷ったのが楽しい思い出の1つになってます。今後は直前にも確認しないといけないという大事な教訓になりました。原先生の演奏会も楽しかったですね。（原先生ありがとうございました。）本当にありがとうございました。そして宮崎大学の武田彩希さんには DuTiP1 の FW を改造するにあたりアドバイスを頂戴しただけでなく、ビームテストでは DAQ を一緒にしました。SOI 研究会のときも含めて、たくさんの楽しい話をしてくださりありがとうございました。そして、KEK の中村浩二さんにも感謝申し上げます。ビームテスト直前の急なタイミングにも関わらず DuTiP1 のワイヤーボンディングを引き受けてくださりました。非常に貴重な経験をさせていただきました。ありがとうございました。

また、KEK の出張に際し、費用を負担してくださった KEK 素核研・Belle グループの皆様、出張でお世話になった全ての皆様にもお礼申し上げます。何事もなく KEK の出張を終えることがで

きたのはサポートしてくださった全ての皆様のおかげです。ありがとうございました。

3年間の研究生生活を共に過ごした研究室のメンバーにも感謝申し上げます。同期の今井さん、杉山さん、波多さん、渡部さんとは些細なことでも笑い合ったり、ミラノの風を浴びに行ったりと、共に過ごした時間はとても楽しかったです。後輩の皆さんも雑談に付き合ってくださいたりとありがとうございました。

そして、これまで育ててくれた両親、生活を共にしてきた3人の弟達に感謝申し上げます。これまでの25年間、大きな不自由なく学業生活を終えることができたのは両親のおかげです。経済面・生活面ともにサポートしていただきありがとうございました。

最後に、本研究を進めるにあたりお世話になった全ての皆様に改めて感謝申し上げるとともに謝辞とさせていただきます。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Belle II 実験ホームページ
<https://belle2pb.kek.jp/Detector/>
- [2] B. Paschen et al, "Belle II pixel detector: Performance of final DEPFET modules"
- [3] Belle II 実験のシリコンバーテックス検出器のラダー製作が遂に完了
<https://www.ipmu.jp/ja/20180528-SVD-ladders>
- [4] Belle II 実験 中央飛跡検出器 CDC のインストール完了
<https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2016/10/belle2-cdc-installation/>
- [5] 谷口七重 高エネルギーニュース
https://www.jahep.org/hepnews/2013/13-4-3-BelleII_CDC.pdf
- [6] Belle II 実験 TOP カウンターのインストール完了
<https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2016/05/belle2-top-detector-installation/>
- [7] 第7回：TOP カウンター（Belle II 実験）（2014 年 6 月）
<https://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/blog/2014/04/22/spotlight07/>
- [8] BelleII Aerogel RICH 検出器の建設と運転
<https://www.jahep.org/hepnews/2019/19-2-2-arich.pdf>
- [9] BelleII 電磁カロリメーター（ECL）
<https://www.jahep.org/hepnews/2014/14-2-6-BelleIIECL.pdf>
- [10] BelleII KLM
<https://www.jahep.org/hepnews/2014/14-1-4-BelleIIKLM.pdf>
- [11] 松本重貴 「素粒子物理学の将来と暗黒物質探査 パリティ 2019 年 1 月号」
- [12] Torben Ferber 「Prospects for long-lived particle searches at Belle II.」
<https://docs.belle2.org/record/2581>
- [13] 五屋郁美 卒業論文「シリコンピクセルを用いたプリシャワー検出器の Geant4 シミュレーションによる検討」奈良女子大学 (2021 年)
- [14] 今野つかさ 卒業論文「Geant4 シミュレーションによるプリシャワー検出器の検討」奈良女子大学 (2020 年)
- [15] Particle Data Group
<https://pdg.lbl.gov/2023/reviews/rpp2023-rev-passage-particles-matter.pdf>

- [16] SOIPIX Research
<https://rd.kek.jp/project/soi/research.html>
- [17] SOIPIX group 内部向け Confluence ページ
- [18] 高柳武浩 DuTiP Pixel アンプシミュレーションまとめ SOI グループ内部資料 2022 年 10 月 3 日
- [19] Li Taohan 博士論文「Study of the SOI pixel sensor for the Belle II vertex detector system upgrade (Belle II 崩壊点検出器システムのアップグレードに向けた SOI ピクセルセンサーの研究)」東北大学 (2023 年)
- [20] Akimasa Ishikawa et al., "New pixel detector concept DuTiP for Belle II upgrade and the ILC with an SOI technology "
- [21] 坪山透「総研大実習 テーマ A6 シリコンセンサーの基礎」
<https://research.kek.jp/people/tsuboy/20090601-soukendai/soukendai-jisshuu.pdf>
- [22] KEK AR テストビームライン
<https://itdc.kek.jp/testBeamLine/index.html>
- [23] 大森匠 修士論文 (令和 6 年 3 月修士 (理学) 学位取得見込み)「GeV 電子ビームに最適化した SOI ピクセル検出器 INTPIX4NA を用いたテレスコープシステムの開発」筑波大学 (2024 年)
- [24] Kenkichi Miyabayashi, private communication.

付 録 A ALPIDE アンプ回路のパラメータ

ALPIDE アンプ回路のパラメータ一覧 (表 A.1) およびヒットマップ (図 A.1) を示す。Li パラメータは先行研究により最適化されたパラメータのことを指す [19]。Sim_v1, Sim_v2 はシミュレーションで最適とされているパラメータのことである。

表 A.1: ALPIDE アンプ回路のパラメータ一覧。単位は [mV] である。

端子名 / 名称	Sim_v1	Sim_v2	Li	1	2	3
VDIODE	700	700	1300	1300	700	1300
VREF_RESET	1096	1096	750	750	1096	750
VREF_AMP	1166	1166	1166	1166	1166	1166
VCASP	400	400	50	50	400	400
VCLIP	300	500	308	308	300	308
VREF_SHP	1140	1140	1140	1140	1140	1140
VCASN	700	1100	1500	1100	1100	1500
VREF_DB	1166	1166	1166	1166	1166	1166
VCASN2	1000	1000	1800	1800	1000	1800

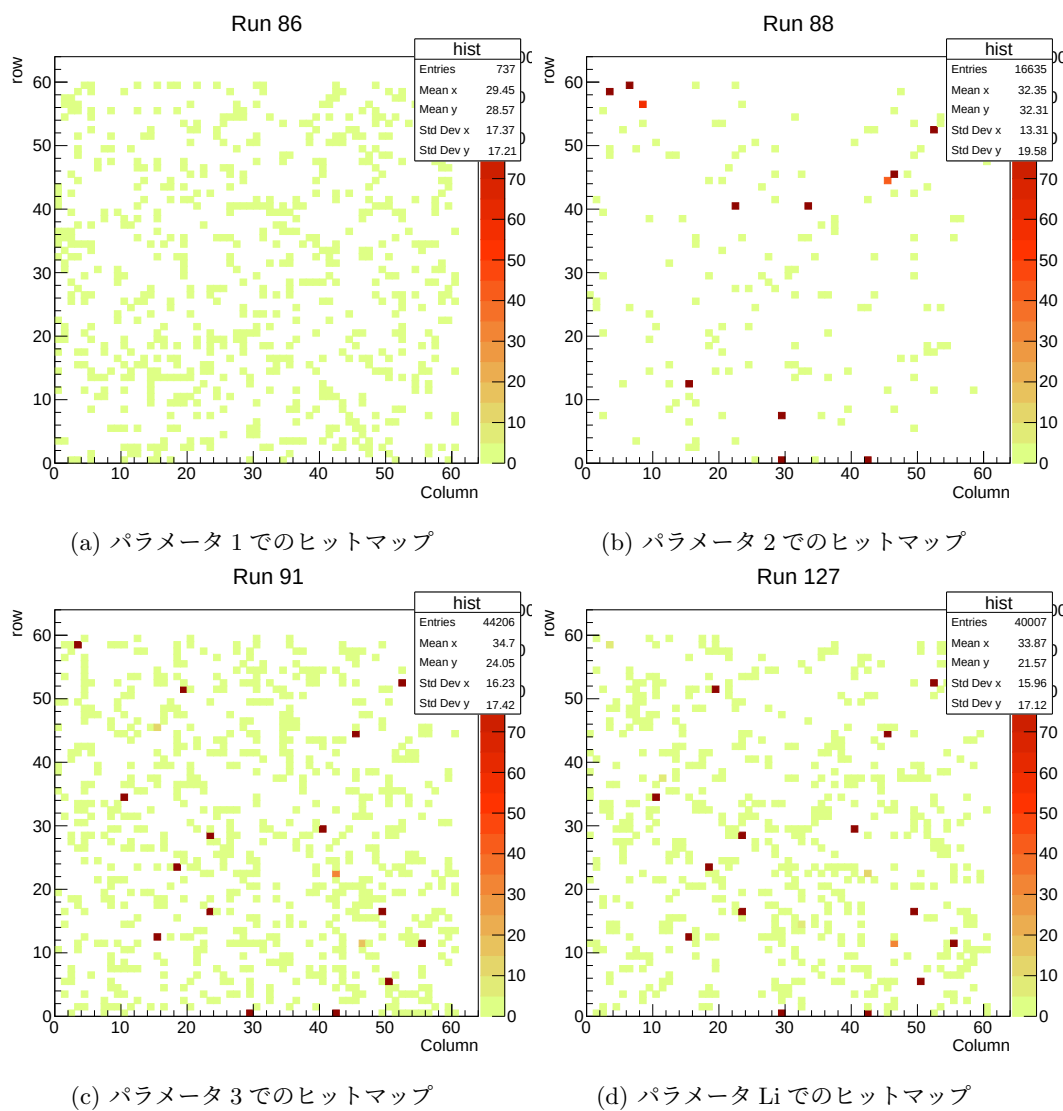


図 A.1: パラメータ毎のヒットマップ。パラメータ 1 ではノイズヒットが見られず、パラメータ 2 ではヒットそのものが少ないことがわかった。パラメータ 3 とパラメータ Li ではヒットマップから大きな違いは見られない。