

アトラス実験のためのシリコン飛跡検出器のモジュールの性能評価

素粒子物理学 41412018 松尾武

平成14年2月12日

概要

KEKの4GeV/c π^- ビームラインでアトラス実験のためのシリコン飛跡検出器(SCT)モジュールのビームテストを行い、その性能を評価した。シリコンストリップセンサーは実際に実験で使われる最終版、読み出しASICは実際に実験で使われる最終版直前のABCD3T、ハイブリッドも実際に実験で使われる直前のK4バージョンである。モジュールはパレルモジュールとフォワードモジュールの2種類で、各々放射線照射したもの、していないものをテストした。放射線照射は $3 \times 10^{14} p/cm^2$ を照射し、これはLHC実験で10年間に受ける照射量である。

読み出しASIC内での信号波形分析を行った。パルスシェーピング後の平均的なピーキングタイム ~ 20 nsと設計値が確認された。これは、40MHz(25ns毎)のビーム・クロッシング時間よりも小さい値であり、1.25 \sim 10fCの電荷信号の1fC閾値でのタイムウォークを16ns以下にし、ビームタギングを可能にする要請から発している。

位置分解能はストリップのピッチ幅80 μm から期待される分解能23 μm が確認され、バイアス依存性ならびにスレッシュホールド依存性が少ないことが分かった。残差分布はクリーンであり、エレクトロニクス、環境共に低雑音で運転されていることを示している。

収集された電荷量をメディアンチャージで評価した。バイアス依存性の解析から、放射線損傷を与えていないモジュールは150V付近で3.5fCに飽和しているが、放射線損傷を与えたモジュールは450V付近で3.5fCに達するが飽和には達していないように見える。放射線損傷を与えないシリコン基材の全空乏層化電圧は70V程度であり、ストリップ構造及び表面電荷の影響が飽和電圧を上げていると解釈される。放射線損傷を受けた基材の全空乏層化電圧は約300Vと確認されている。また、基材はp型に反転したストリップの電气的分離が悪化していることから、飽和状態に達する電圧は非常に高いことが予想される。にもかかわらず、450V程度で3.5fC程度に達することからLHCで10年間稼働させたとしても支障のないことが確認されたといえる。

目次	3
----	---

目次

1	はじめに	6
1.1	アトラス検出器と LHC の他の検出器	6
1.2	内部検出器	8
2	アトラス実験のための飛跡検出器 (SCT) のモジュール	10
2.1	シリコン半導体検出器	11
2.2	放射線損傷	11
2.3	SCT の特徴	12
2.3.1	マイクロストリップ構造	12
2.3.2	2 値読み出し	13
2.3.3	パレルモジュールとフォワードモジュール	13
3	解析結果	13
3.1	目的	13
3.2	セットアップ	15
3.3	位置分解能の評価	20
3.3.1	ビームの直線の決定	20
3.3.2	位置分解能	20
3.3.3	多重ヒット	27
3.4	読み出し ASIC 内の信号波解析	31
3.4.1	ASIC 内の波高分布の求め方	31
3.5	読み出し ASIC 内の信号波解析の評価	31
3.6	モジュールの検出効率の評価	31
3.6.1	検出効率の決定方法	31
3.6.2	スレッシュホールド 1fC での検出効率の電圧依存性	36
3.6.3	電圧一定での検出効率のスレッシュホールド依存性	36
3.6.4	メディアンチャージのバイアス電圧依存性	44
3.6.5	ノイズオキュパンシーの評価	44
3.6.6	較正スケールに依存しない信号雑音比の電圧依存性の評価	46
4	結論	49
5	謝辞	50

図目次

1	LHC リングと各検出器の位置	9
2	ATLAS 検出器	10
3	内部検出器	11
4	マイクロストリップ構造	12
5	バレルモジュール	14
6	フォワードモジュール	14
7	セットアップ図	17
8	セットアップ図 (写真:冷却箱の中に入っている)	18
9	残差分布	22
10	一様分布へのガウスフィット	23
11	標準偏差と RMS	24
12	位置分解能の電圧依存性	25
13	位置分解能のスレッシュホールド依存性	26
14	平均クラスター幅の定義	28
15	平均のクラスター幅の電圧依存性	29
16	平均のクラスター幅のスレッシュホールド依存性	30
17	様々なスレッシュホールドにおけるトリガからの時間に対する 検出効率	32
18	横軸は時間、縦軸はスレッシュホールド。図 17 の様々なス レッシュホールドに対して 2 次元プロットを行った。	33
19	40ns でのスレッシュホールドに対する検出効率	34
20	ASIC 内のパルスハイト	35
21	efficiency の電圧依存性	37
22	検出効率のスレッシュホールド依存性 (モジュール 1)	38
23	検出効率のスレッシュホールド依存性 (モジュール 2)	39
24	検出効率のスレッシュホールド依存性 (モジュール 3)	40
25	検出効率のスレッシュホールド依存性 (モジュール 4)	41
26	検出効率のスレッシュホールド依存性 (モジュール 5)	42
27	検出効率のスレッシュホールド依存性 (モジュール 6)	43
28	メディアンチャージのバイアス依存性	45
29	40MHz ランダムサンプリング	47
30	ノイズオキュパンシーのスレッシュホールド依存性	47
31	較正スケールに依存しない信号雑音比の電圧依存性	48

表目次

1	パラメタとスキャンした値	16
2	SCT モジュール	17
3	モジュールの種類	19
4	ABCD2T と ABCD3T との違い	19

1 はじめに

現在、素粒子物理学実験の最大のトピックのひとつといえば間違いなく「ヒッグス粒子の探索」が上げられる。このヒッグス粒子というのは「標準理論」で予言されている粒子である。標準理論は現時点までの実験データを矛盾無く説明している理論であり、ヒッグス粒子が発見されればこの理論はより確かなものになる。ヒッグス粒子探索や既知の粒子の緒反応の高い精度の測定及び新粒子の探索を目指した LHC(Large Hadron Collider) 実験が 2006 年からスイスのジュネーブ郊外の CERN(ヨーロッパ合同原子核研究所)において稼働する予定である。LHC は現在ある電子・陽電子衝突型加速器 LEP(Large Electron Positron) 実験で用いていた円周 27km のリングを改造して、重心系エネルギー 14TeV, ルミノシティー $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の陽子・陽子衝突型加速器となる予定である。

LHC の中でも主要な実験装置の 1 つに ATLAS(A Toroidal LHC ApparatuS) 検出器がある。日本を含む全 35ヶ国・150 研究機関が参加している巨大プロジェクトとして、各国で検出器を製作・開発中である。岡山大学は ATLAS 日本グループに属しており、ATLAS においてビーム衝突点付近で生成される荷電粒子の飛跡を検出する役割をもつ SCT(SemiConductor Tracker) モジュールの研究・開発に参加している。

2000 年 12 月に、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構(KEK)の東カウンター実験ホールにおいて、ATLAS 実験に向けて開発中の SCT モジュールのテストが行われ、その解析による性能評価がなされていた。これまでも何回かテストは行われ、前回のテストでは実際に使用する形のモジュールでの性能の評価が行われた。しかし、実際の実験にはモジュールは多数必要でありモジュールは最終版ですとする必要がある。今回のビームテストでは、パーツが量産型、あるいは量産直前型のものを持ちいた最初のテストを行った。

まず最初に、ATLAS 検出器の概要を述べ、次にシリコン半導体検出器の動作原理と SCT におけるその工夫について説明する。そして、ビームテストによる SCT モジュールの解析及びその結果について報告する。

1.1 アトラス検出器と LHC の他の検出器

LHC では図 1 に示すように 4 つの大きな検出器が計画されている。

- LHC-b

- ALICE(A Large Ion Collider Experiment)
- CMS(Compact Muon Spectrometer)
- ATLAS

LHC-b 検出器では、衝突において大量に発生する b クォークを用いて、CP 非保存の物理などを研究する。ALICE 検出器は鉛イオン同士を衝突させ、高エネルギー状態での原子核内におけるクォーク・グルーオン・プラズマの研究を行う。そして、LHCの主目的であるヒッグス粒子等の新粒子の探索を主な目的として作られているのが CMS 検出器、アトラス検出器である。

CMS 検出器は LHC でもっとも高いルミノシティで稼働する検出器である。CMS は主に次の部分からなる。

- ミューオンシステム
- 電磁カロリメーター
- 内部検出器
- ハドロンカロリメーター

ミューオンシステムは中央のバレル部分にドリフトチューブ (DT)、エンドキャップの部分にカソードストリップチェンバー (CSC)、そしてバレル部分とエンドキャップ部分両方にレジスティブパラレルチェンバー (RPC) という 3 つの部分からなる。DT と CSC はミューオンの位置と運動量を正確に測定するために用いられ、一方 RPC はレベル 1 トリガーにすばやく情報を伝えるために用いられている。ハドロンカロリメーターはクォーク、グルーオン、ニュートリノの測定、つまりエネルギー、ジェットの方向ミッシング・トランスバースエネルギーの測定に用いられる。特にミッシング・トランスバースエネルギーは新粒子の発見に重要な示唆をする物理量であり、そのためには $|\eta| \leq 5$ で良い分解能をもつことが重要である。電磁カロリメーターは高密度の鉛タンゲステンを使用し、モリエール半径を小さくして、高エネルギー分解能を達成する工夫を行っている。LHC の初期のロールミノシティにおいて $H \rightarrow \gamma\gamma$ というヒッグス粒子のディスカバリーチャンネルをエンハンスするために、電磁カロリメーターが高分解能であることが重要である。

ATLAS 検出器は全長 46m, 高さ 22m, 重量 15,000 トンという巨大な装置である。その外観を図 2 に示す。

図 2 から分かるように装置は大きく分けて次のパートに分かれており、各パートはそれぞれ多数のサブディテクターで構成されている。ビームラインから近い順に並べて記述すると

- 内部検出器
- カロリメーター
- ミューオン検出器

となる。

内部検出器では生成された粒子の飛跡を精密に測定する。カロリメーター部分では、粒子のエネルギーを測定する。鉛と液体アルゴン検出器のサンドイッチカロリメーターである電磁カロリメーターで電子や光子によるエネルギーを、鉄とプラスチックシンチレーターのサンドイッチカロリメーターであるハドロンカロリメーターでハドロン（陽子や π 中間子など）によるエネルギーをそれぞれ測定する。

ミューオン検出器は μ 粒子を検出する。強い相互作用をせず、電子のように電磁シャワーを発生させない μ 粒子に対し、この最も外側にある検出器を使って同定する。また、 μ 粒子の軌道方向をほぼ直行するように Toroidal Magnet によって磁場がかけられており、 μ 粒子の軌道を曲げ、その運動量を精密に測定する。

1.2 内部検出器

内部検出器は、もっともビーム衝突点に近い部分に配置される。全体にビーム方向に平行に 2Tesla の磁場がかかっており、衝突後に生成される粒子の運動量や崩壊点の高精度測定に耐えうるエレクトロニクスの開発が進められている。

衝突点から近い順に、

- ピクセル検出器
- シリコン半導体飛跡検出器 (SCT)
- Transition Radiation Tracker (TRT)

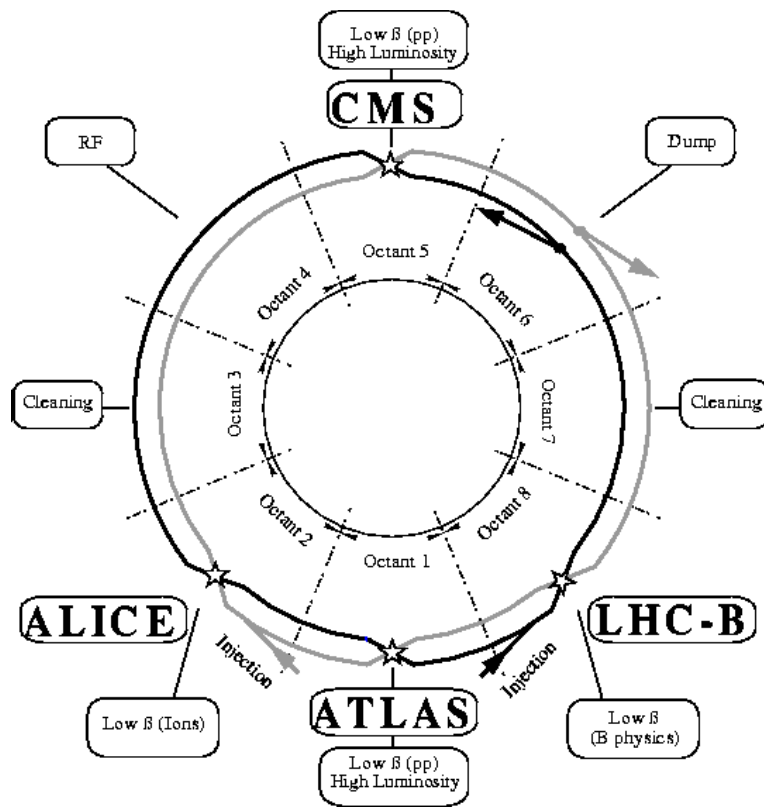


図 1: LHC リングと各検出器の位置

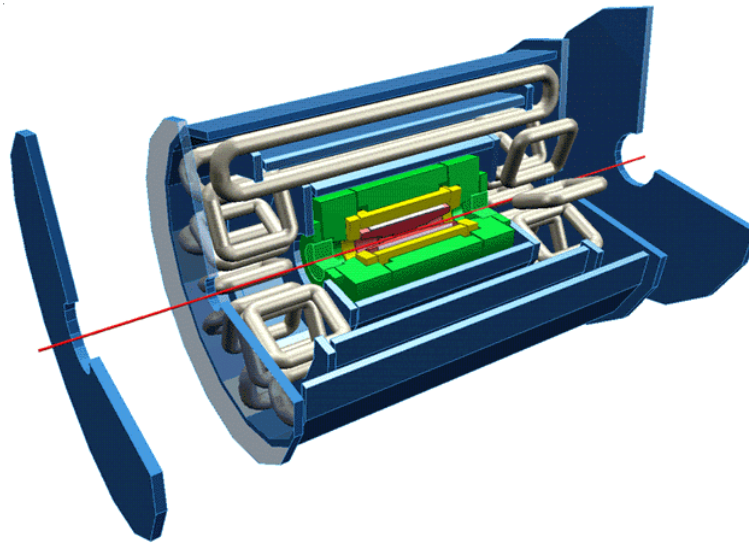


図 2: ATLAS 検出器

というサブディテクターが配置されている。(図3) ピクセル検出器は内部検出器のもっとも内側に位置している。ピクセル検出器は衝突点の近くでクリティカルなトラッキング情報を収集し、セカンダリバーテックスを決定するのが大きな役割である。もっとも放射線があたる場所であり、放射線に強いことも重要である。TRTは内部検出器のもっとも外側に位置し、ストローのような構造になっている。主には電子の識別をする。内部検出器はなるべく物質が少なくなるように設計されているが、それでもゼロになることはない。そのため内部検出器内の物質と相互作用を起こし電子が発生する。このバックグラウンドの電子を識別することが重要でTRTはその役目をになっている。

2 アトラス実験のための飛跡検出器(SCT)のモジュール

ATLAS SCT モジュールの構造は、シリコンマイクロストリップ型半導体検出器である。ここではまず半導体検出器において簡単に触れ、其のあとでSCTの特徴に触れる。

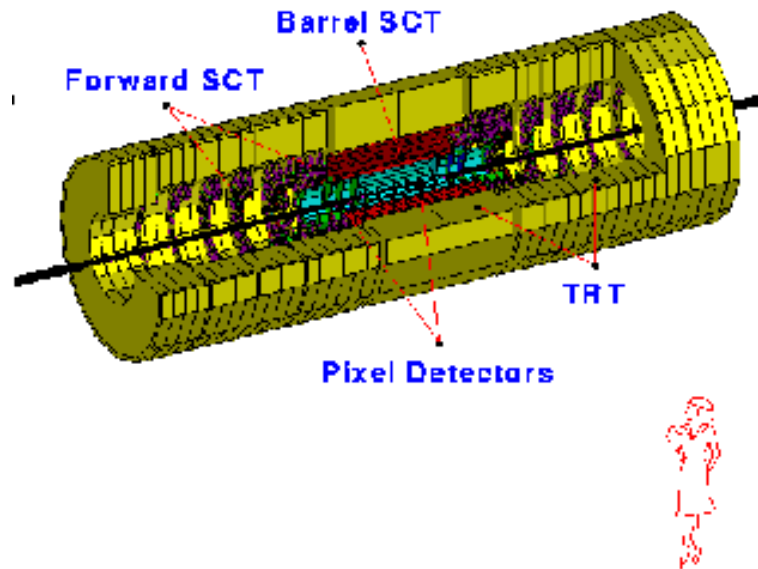


図 3: 内部検出器

2.1 シリコン半導体検出器

シリコン半導体検出器における信号は、荷電粒子が空乏層と呼ばれる領域を通過する際の電離損失により発生する電子・正孔対である。

半導体検出器の利点としては、電子・正孔対を生成するエネルギーが小さいことが挙げられる。ガスチェンバーの動作原理は半導体検出器と良く似ていて、電子・イオン対生成がこれにあたるが、電離するのに必要なエネルギーが 30eV であるのに対し、シリコン半導体検出器が1つの電子・正孔対を生成するのに必要なエネルギーは常温 300K で 3.6eV と10分の1ほどである。これによってエネルギー分解能がよくなるのである。また、電子・正孔対を収集するのに必要な時間が厚さ $300\mu\text{m}$ 以下の検出器では 3ns 以下であるから大量のデータを短時間で扱うSCTにとって実に良い特性である。

2.2 放射線損傷

半導体検出器は放射線損傷によって性能が劣化する。

最も良く見られる現象はフレンケル欠陥と呼ばれるものであり、照射

された粒子によって半導体物質の原子が其の正常な格子位置から変位して作られる。欠陥は生成されたキャリアを捕獲し、収集効率を下げる。また、pn接合にバイアスをかけた場合には、特に電離性放射線が無い場合でもわずかな電流が観測される。これを漏れ電流と呼ぶが、これは放射線損傷によって増加する。漏れ電流は信号のノイズの原因になるが、その増加によって熱を発生する。熱によって漏れ電流は増加し、また熱を出すという熱暴走を起こす。

SCTの設置される場所において、最もビーム衝突点に近いところでは、10年間の実験期間において 3×10^{14} protons/cm² の放射線損傷を受けることが予想されるので、それに耐えうる検出器の開発が進められている。また、漏れ電流による熱の発生を抑えるためにも、実験環境は10年間を通してマイナス7°C以下に保つことが要求されている。

2.3 SCTの特徴

2.3.1 マイクロストリップ構造

nまたはp型半導体の一方をストリップ構造にすると、個々のストリップから信号を読み出すことによって、より精度の高い位置情報を得ることが可能である。SCTでは、nバルクpストリップ読み出しを採用している。また、pストリップとアルミニウム電極の間に酸化層を形成し、漏れ電流を抑えている。(図4)

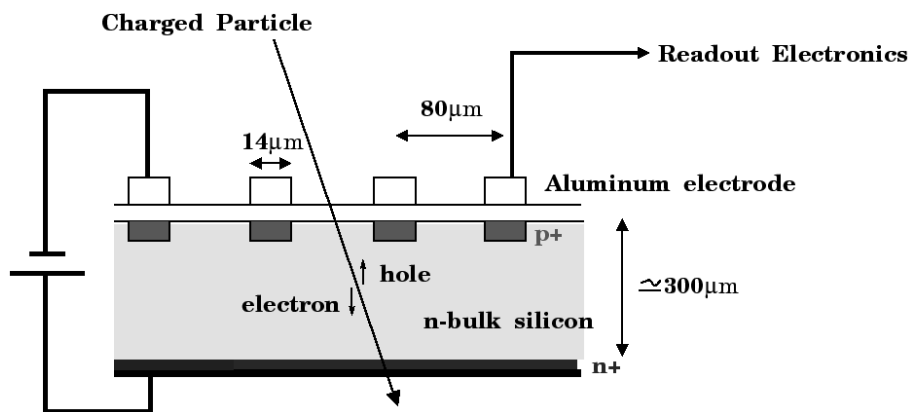


図 4: マイクロストリップ構造

2.3.2 2値読み出し

LHCにおいては陽子-陽子衝突が25nsに一回の頻度で起こり、数百億個の粒子が生成される。大量のデータを高速で扱うために、SCTは各チャンネルから得られる信号に対してスレッシュホールドをかけ、それを越えたものを1、越えなかったものを0とするOn-Off読み出しを行っている。これを2値読み出しと読んでいる。

2.3.3 バレルモジュールとフォワードモジュール

SCTモジュールは2タイプの形状があり、内部検出器に配置される場所の違いからそれぞれバレルモジュール、フォワードモジュールと呼ばれている。

バレルモジュール(図5)はストリップ幅 $14\mu\text{m}$ 、ストリップ間隔 $80\mu\text{m}$ で全部で768ストリップある。 $6.36\text{cm} \times 6.40\text{cm} \times 300\mu\text{m}$ のウェーハを、2枚つなげて12cmストリップ長とする。これを2枚用いて互いに 40mrad の角度をつけて配置した形となっている。これによって、粒子が通過した位置の2次元の情報を得るようにしている。

読み出しエレクトロニクスは、読み出しチップを載せた回路(Hybrid)である。読み出しチップは1つで128ストリップの信号を担当させる。したがって、片面に6つの全12チップが1つのモジュールにある。

一方、フォワードモジュール(図6)の方は円盤状に配置されるようにシリコンウェーハが台形のものを用いる。配置される位置によって異なる3種類のサイズがある。読み出しストリップ数は $768 \times 2 = 1536$ ストリップ、チップ数 $6 \times 2 = 12$ チップというのはバレルモジュールと同じである。

3 解析結果

3.1 目的

本ビームテストの目的は以下の通りである。

- 実際に実験で使われる最終版及び最終版直前のパーツを用いたテスト
- 照射前及びLHC10年分(3×10^{14})照射後のモジュールの評価



図 5: バレルモジュール

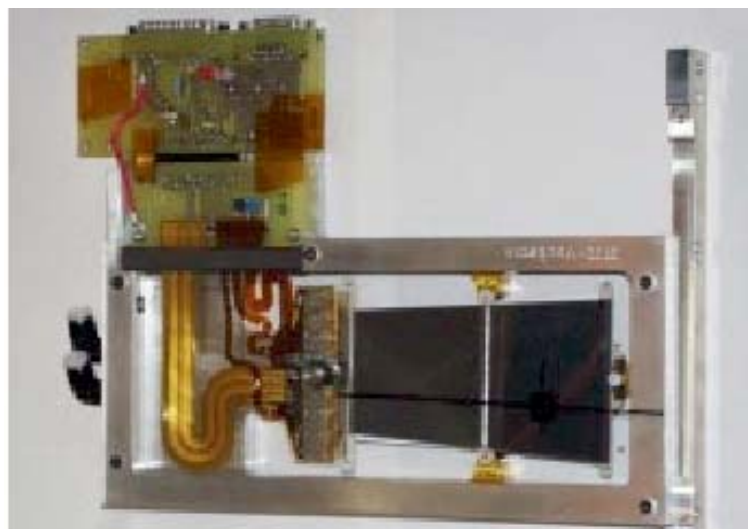


図 6: フォワードモジュール

これまでも何回かビームテストは行われている。前回までの実験ではアトラス検出器に組み込む形、読み出しチップ数 12 チップ、1536 ストリップ、12cm ストリップ長で行われたがモジュールの形にはなっていない [6]。今回の実験ではモジュールの形に加え実際に実験で使う最終版、及び最終版直前のパーツをもちいておこなったということが新しい点である。より実際に近い条件で行われたビームテストである。なお、本解析はアトラス日本グループが開発、製造したバレルモジュールについて解析を行っている。

3.2 セットアップ

ビームテストは 2000 年 12 月に、つくば市にある高エネルギー加速器研究機構の 12GeV 陽子シンクロトロン π^2 ビームラインにおいて、4GeV/c の π^- ビームを用いて行った。そのセットアップを図 7 に示す。図 7 中の Telescope A, B, C と称しているのは、ビームの通過位置を決定するために用いた検出器である。Telescope もまたシリコンマイクロストリップ検出器で、面積 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ で読み出しストリップ間隔 $50\mu\text{m}$ 、厚さ $300\mu\text{m}$ のウエハを使用し、これを 2 枚 90° ずらして配置することにより、通過した荷電粒子の 2 次元情報を得る。アナログ読み出しで、その分解能は $5\mu\text{m}$ である。

図 8 のように、テスト検出器及び Telescope はともに冷却箱の中にセットされ、実際のアトラス実験とほぼ同様の -10°C の状態に保って実験を行った。冷却箱の上流と下流にセットしたシンチレーションカウンターによってトリガーをかけ、そのときのテスト検出器および Telescope からの信号を読む。

イベント収集において、各バイアス電圧・読み出し信号にかけるスレッショールドの値をかえながらデータ収集を行った。スキャンポイントは表 1 に示してある。各スキャンポイントにおいてそれぞれ 10000 イベント集めた。

放射線損傷を与えた Module 3, Module 4 については、放射線損傷を与えていないものよりもバイアス電圧を高め設定してある。これは、損傷をあたえることによって全空乏層化電圧が増加するためである。

最もビームの下流に配置されている Anchor と称しているものはバレルモジュールである。このモジュールはほんのわずかにタイミングをミスしているテスト検出器と Telescope のコインシデンスを調整するために用

放射線照射した モジュールのバイアス電圧 [V]	150,200,250,300,325, 350,375,400,450,475,500
放射線照射したモジュール のスレッシュホルド [fC]	0.7,0.8,0.9,1.0,1.1, 1.2,1.3,1.5, 1.7,2.0,2.3,2.5,2.8, 3.0,3.5,3.8,4.0,4.5,5.0,5.5,6.0
放射線照射していない モジュールのバイアス電圧 [V]	25,50,75,100,125,150, 175,200,225,250,275
放射線照射していないモジュールの スレッシュホルド [fC]	0.7,0.8,0.9,1.0,1.1, 1.2,1.3,1.5,1.7,2.0,2.3, 2.5,2.8,3.0,3.5,3.8,4.0, 4.5,5.0,5.5,6.0

表 1: パラメタとスキャンした値

いられている。実験の間、Anchorにかかるバイアスは150Vに固定した。

今回のビームテストには基本的にチップにABCD3Tをつかっているが、モジュールに対する工夫(ダブルデッカー、シンメタライズ、後述)がModule number 1, 2でなされている。また、今回のビームテストの目的としてABCD3Tという新しいバージョンでのテストという項目が掲げられているが、前バージョンのABCD2Tとの違いを表4に示している。モジュール番号1にはダブルデッカー、モジュール番号2にはシンメタライズのモジュールを使用している。それらの説明は表3にある。なぜシンメタライズを試したのかは次の通りである。

ABCDチップは、最新の半導体技術、SOIウェーハを使用している。SOIでは、基材のシリコンが基本的に表面の回路部分から絶縁されており、裏面に何もしなければ裏面も酸化シリコンで覆われ、絶縁された導電体が表面回路の下にあることになる。この導電体を通して入力出力のフィードバックが起り発振する可能性がある。このフィードバックループを消すには、導体をグラウンドに落すことであり、導電接触を取るため裏面を金属処理しハイブリッドのグラウンドと接続する。薄くする理由は、シリコン基材は抵抗があり、基材とハイブリッドグラウンドとの接触抵抗を下げるためである。

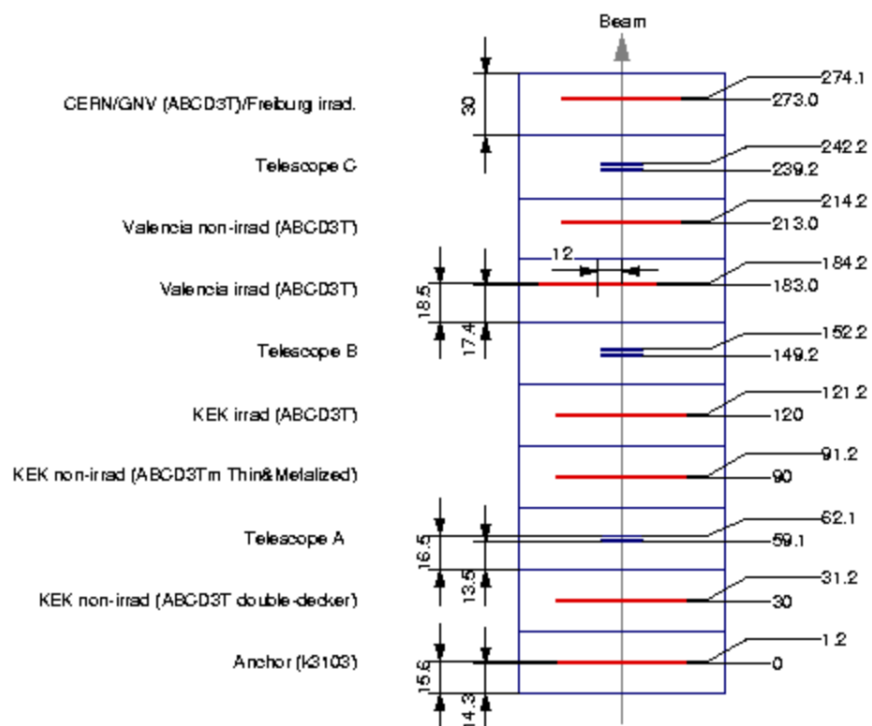


図 7: セットアップ図

モジュール番号	状態	モジュールの型
1		バレル
2		バレル
3	放射線照射有	バレル
4	放射線照射有	フォワード
5		フォワード
6		フォワード

表 2: SCT モジュール

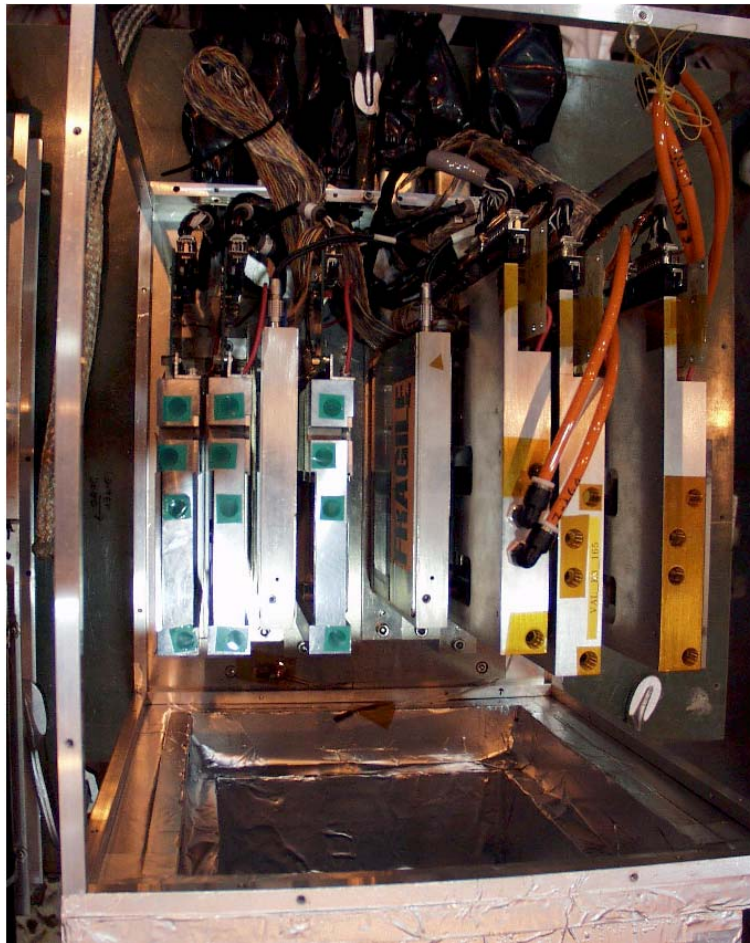


図 8: セットアップ図 (写真:冷却箱の中に入っている)

モジュールの種類	説明
ダブルデッカー	500 μm の厚さ。裏側になんの加工もしていないので石英(酸化シリコン)が剥き出し。酸化シリコンによって絶縁されている。チップの脇にパスコンがついている。早い電力供給のため電圧が低下するのを防ぐためについている。
シンメタライズ	抵抗を少なくするため裏面を金属で表面処理している(グラウンドに接地)。厚さ300~350 μm ぐらい。

表 3: モジュールの種類

チップバージョン	説明
ABCD2T	各チャンネルごとにスレッシュホールドを微妙に決めるトリム回路が入っている。トリムするステップ、すなわちデジタル-アナログ変換の係数は固定。
ABCD3T	ABCD2T チップのトリム回路のデジタル-アナログ変換の係数を4段階に選択できるように追加。これは、放射線損傷を受けた後、デジタル-アナログ変換の係数がかわってしまうので、これを補償するためである。ABCD3T _m というのはシンメタライズ のモジュールにつけるチップ(基本バージョンのABCD3Tよりチップを薄くしている)をとりあえずこう読んでいる。

表 4: ABCD2T と ABCD3T との違い

3.3 位置分解能の評価

3.3.1 ビームの直線の決定

ビームの直線の出し方は3台の望遠鏡を用いて行う。望遠鏡のヒット情報から、

- まず、望遠鏡 0,2 の 2 台のデータで直線を出す。
- その直線から得られる望遠鏡 1 における通過位置と、実際にヒットした望遠鏡 1 の通過位置との差を出す。
- 各望遠鏡に複数の通過位置の情報があれば、差が最も小さいものを選ぶ。

その差が、 $150\mu\text{m}$ 以内 (望遠鏡のストリップの 3 ピッチ分の長さ) にあり、かつ同時に Anchor Module でも同じことが言えたのなら、良い直線であるとしてその後の解析に用いる。両面 (xy) ともにその条件を満たさなかった場合は、そのときのイベントは解析に用いない。

3.3.2 位置分解能

望遠鏡から算出したテスト検出器のビームの通過位置と、実際にヒットのあったテスト検出器のヒット点との残差をとる。これを同じ条件下で行ったイベント数だけ繰り返し、残差分布を作成する。

次に望遠鏡により算出された通過位置から前後 5 ストリップの領域を考え、其の中にヒット点がなかったイベントを除く。

これをガウスフィットさせて得られた標準偏差を位置分解能とする (図 9)。しかし、これは期待される一様分布の位置分解能 $\frac{80}{\sqrt{12}} \sim 23\mu\text{m}$ より悪い値になる。これについて以下の原因が考えられ、それぞれに対して補正をおこなった。

まず、図 7 を見るとモジュール 1,6 は望遠鏡の外にある。よってこのテスト検出器のヒット点と比較する望遠鏡から算出された点は二つの点を結ぶ直線を外挿した点である。他のテスト検出器は望遠鏡の間にある。ビームはテスト検出器あるいは望遠鏡で多重散乱を起こす可能性があるので直線を外挿した点とヒット点と比較しているモジュール 1,6 はほかのテスト検出器よりも位置分解能が悪くなると考えられる。よってモジュール 1,6 に対して多重散乱の効果を検討した。

また、

分布は一様分布(図10の黒線)になるはずである。そして本来欲しい値は一様分布のRMSである。しかし、解析の段階でその一様分布にガウスフィット(図10の赤線)をして、その標準偏差を位置分解能としている。ガウス分布はRMSと標準偏差は同じ値であるが、一様分布のRMSとそれにフィットした標準偏差の値は当然異なるはずである。であるから、標準偏差をRMSに変換した。方法は以下の通りである。まず、様々なRMSの値に関してガウスフィットを行う。そのときのRMSと標準偏差をプロットする。そして、それに直線をフィットした。その直線を標準偏差をRMSに変換する関数とした(図11)。

図12にスレッシュホールド1fC一定での位置分解能の電圧依存性を示した。放射線損傷がないものに関しては、期待される位置分解能 $23\mu\text{m}$ の値が得られた。放射線損傷があるものに関しては放射線損傷がないものよりも位置分解能がよくなっている。これはストリップの多重ヒットの影響である。電圧が50V以下に下がると位置分解能が良くなっているがこれはストリップの有感領域がせまくなるからである。位置分解能はよくなるが検出効率は低くなる。

図13に電圧一定での位置分解能のスレッシュホールド依存性を示した。放射線損傷がないものに関しては電圧は200V、放射線損傷があるものに関しては電圧は450Vである。スレッシュホールド1fC辺りでは期待される位置分解能 $23\mu\text{m}$ に近い値である。また、スレッシュホールドが高いところと低いところで位置分解能が良くなっている。これは以下の理由によると思われる。

まず、スレッシュホールドが高いところで位置分解能が良くなっているのはストリップの有感領域が狭くなるからである。これによって位置分解能は良くなるけれども、検出効率(エフィシエンシー)は下がる。スレッシュホールドが低いところで位置分解能が良くなるのはストリップの多重ヒットが増えるためである。

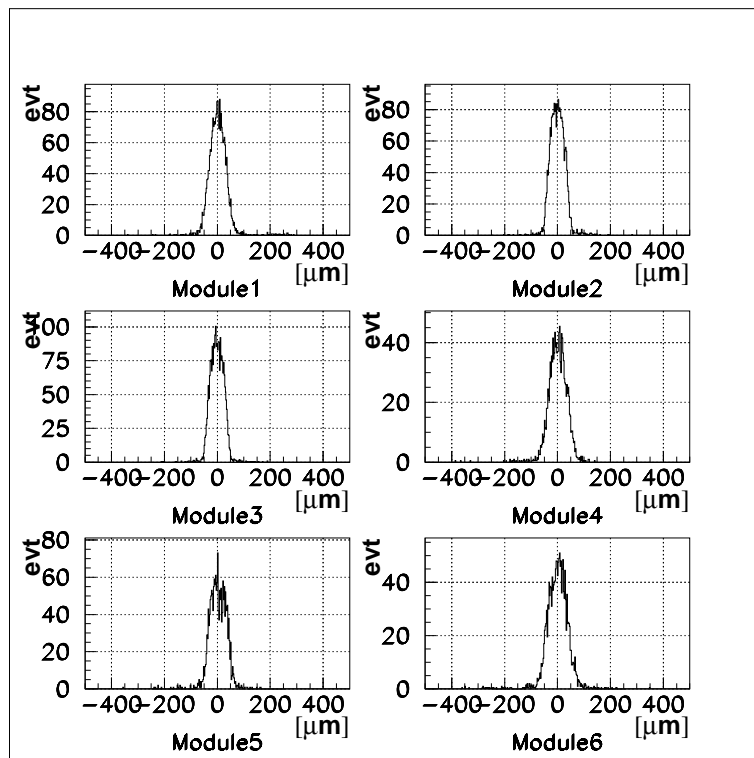


图 9: 残差分布

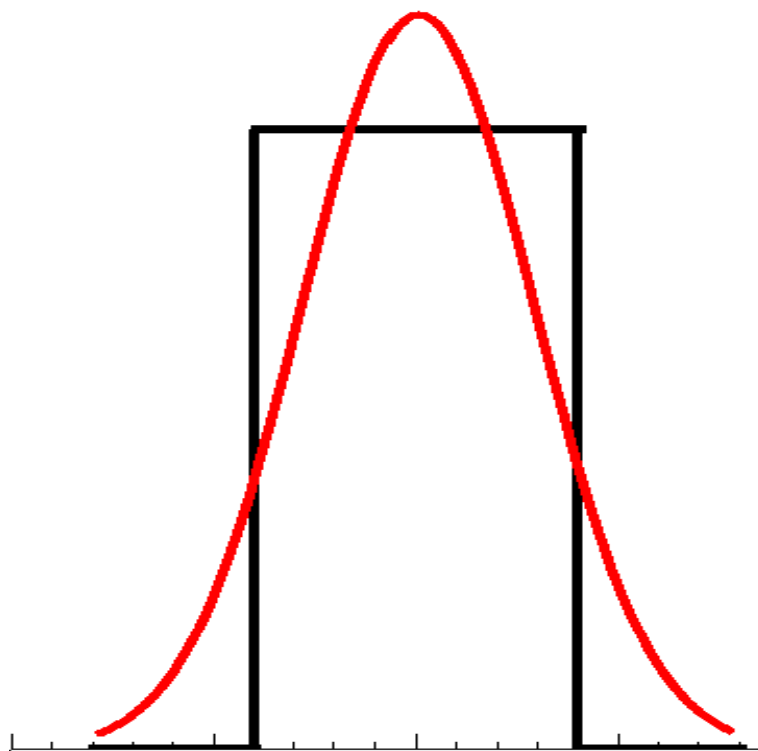


図 10: 一様分布へのガウスフィット

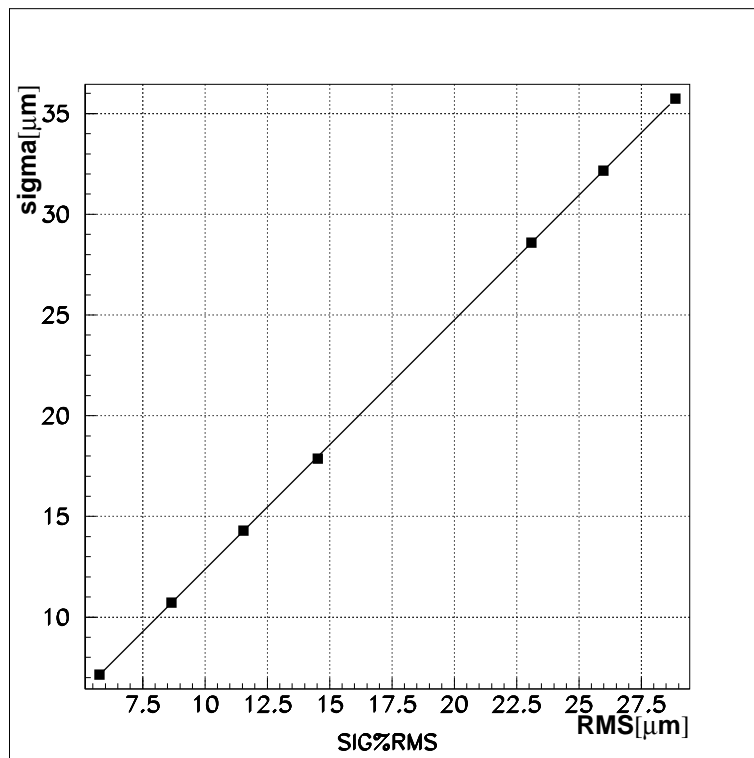


図 11: 標準偏差と RMS

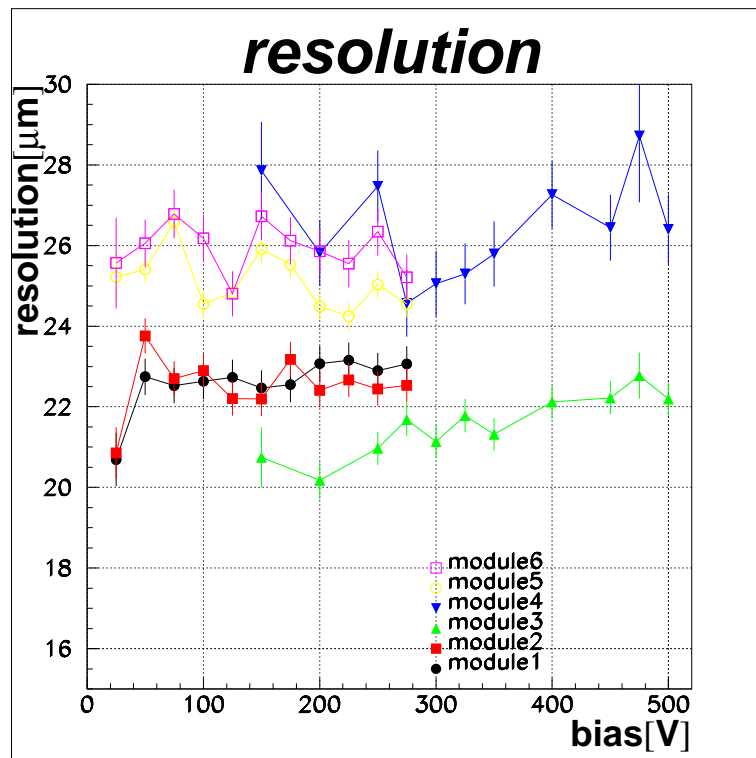


図 12: 位置分解能の電圧依存性

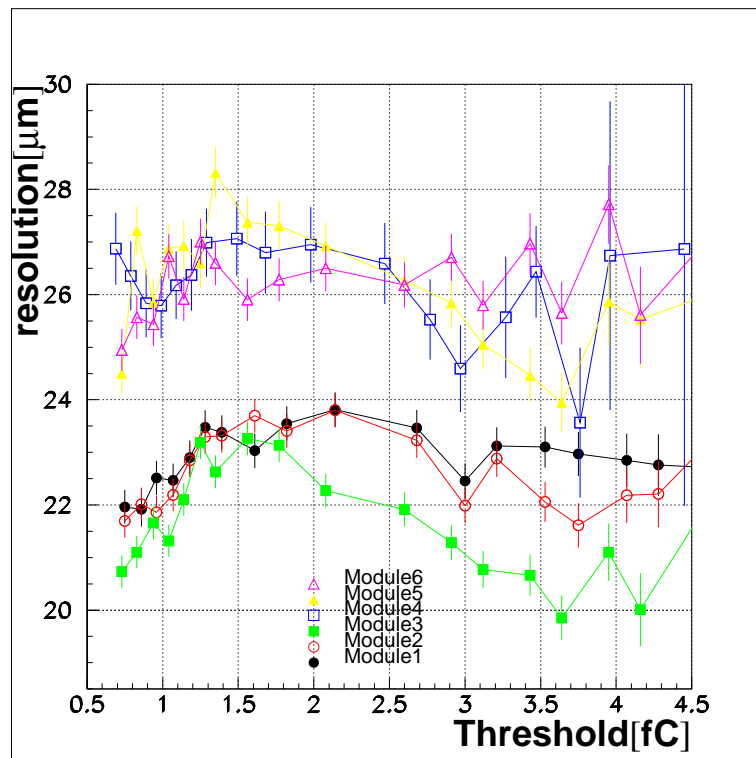


図 13: 位置分解能のスレッシュホルド依存性

3.3.3 多重ヒット

前にマルチヒットの場合のクラスタ点の決定の仕方について書いたが、ここではシングルヒットとマルチヒットの数の割合について評価する。この評価の指標として平均のクラスター幅を定義する。その定義は以下の通りである。

- 平均のクラスター幅 (MCW) の定義

図 14 はマルチヒットの数をあらわしたものである。2 はダブルヒット、つまりストリップの連続した 2 つにヒットがあったことを示している。図 14 でいうと

$$MCW = \sum_i h_i \times n_i$$

h_i : ヒットしたストリップ数

n_i : イベント数

によって与えられる。

平均のクラスター幅の電圧依存性を図 15 にしめた。電圧に関してはほとんど依存性は見られないが、放射線損傷がないテスト検出器よりも放射線損傷があるテスト検出器のほうが多重ヒットの割合が大きいといえる。

平均のクラスター幅のスレッシュホールド依存性を図 16 に示した。こちらは放射線損傷があるかどうかによって違いはみられないが、どちらもスレッシュホールドが低くなると多重ヒットの割合が増えている。

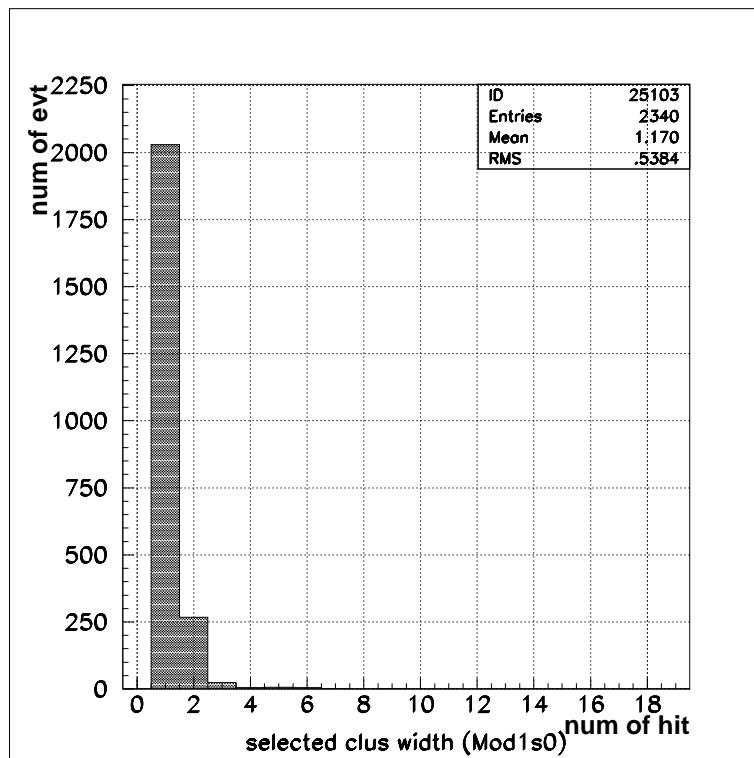


図 14: 平均クラスター幅の定義

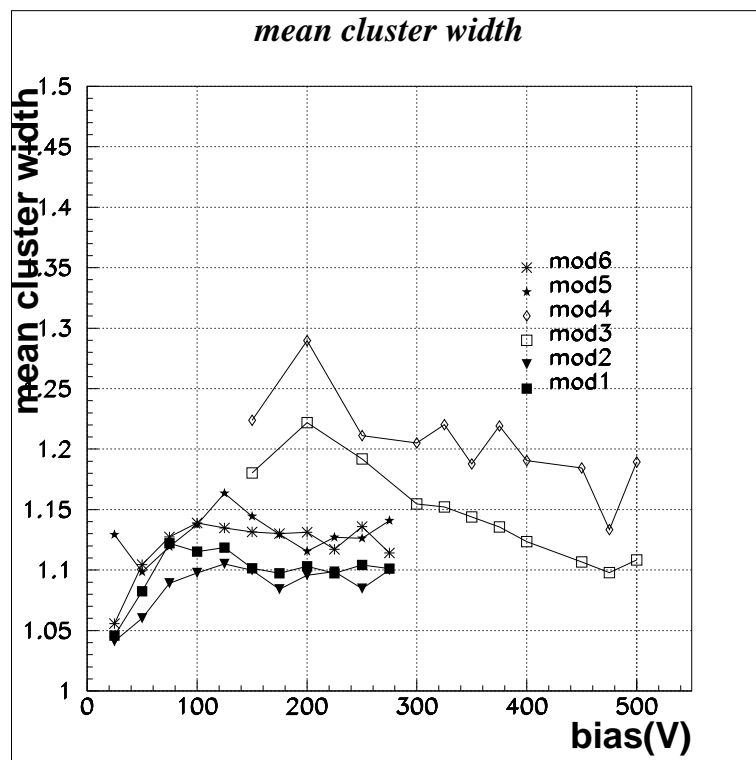


図 15: 平均のクラスター幅の電圧依存性

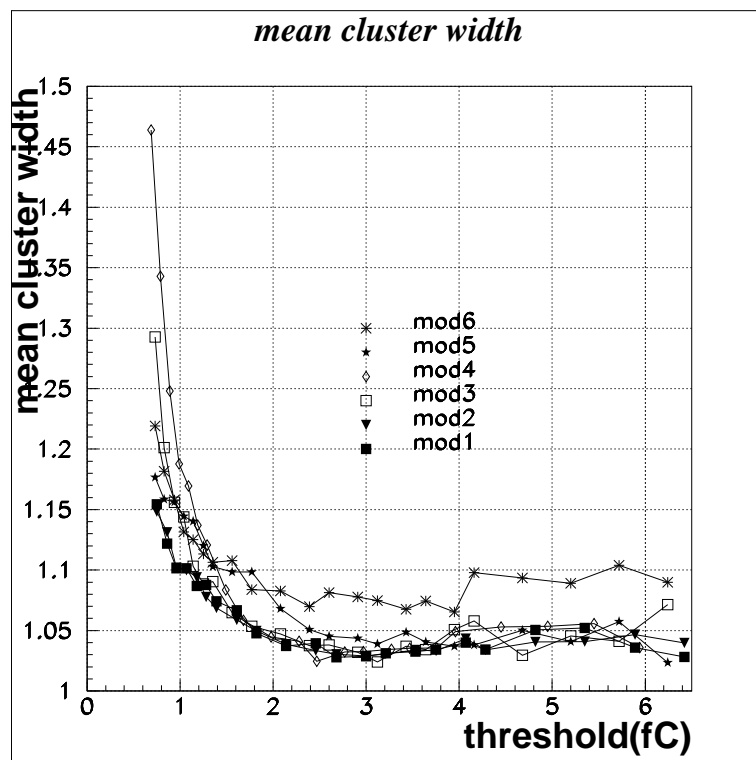


図 16: 平均のクラスター幅のスレッシュホルド依存性

3.4 読み出し ASIC 内の信号波解析

3.4.1 ASIC 内の波高分布の求め方

SCT モジュールは高速化のために電子-正孔対からくるアナログ波形信号を、スレッシュホールドを越えたか否かでデジタル読み出しを行っている。よって ASIC 内の波高分布は直接見ることはできない。よってつぎのような方法で波高分布を間接的に求めた。

まず、図 17 に様々なスレッシュホールドに対してトリガからの時間に対する検出効率を示した。それらを 2 次元プロットにまとめたものが図 18 である。それを各時間に対して、スレッシュホールドに対する検出効率を図 19 に示す。そして、検出効率 50% のスレッシュホールドを波高とした。時間に対する波高を求めると図 20 のようになる。

3.5 読み出し ASIC 内の信号波解析の評価

図 20 に ASIC 内の波高分布を示した。アトラス検出器は 25ns 毎にビームが衝突する。したがって、ピーキングタイムが 25ns 以上だとどのビームが衝突したときにできた粒子なのかをタグすることが困難になる。テスト検出器の読み出し ASIC のピーキングタイムは設計値が 20ns である。これは $1.25 \sim 10.0 fC$ の電荷信号のスレッシュホールド 1fC でのタイムウォークを 16ns 以下にしタギングを可能にするという要請から来ている。図 20 を見ると、どのテスト検出器もピーキングタイムはだいたい 20ns くらいになっていることがわかり、設計値通りになっていることが確認できた。

3.6 モジュールの検出効率の評価

3.6.1 検出効率の決定方法

検出器を通過する荷電粒子の検出効率の決定方法を述べる [6]。モジュール上の粒子の通過位置はテレスコープにより決定されている。この通過位置から前後 5 ストリップの領域を考え、其の中にクラスタ中心点があれば、モジュールは粒子を検出したとする。実際にあるクラスタ中心点の数を N_{Exp} 、上の条件を満たしたクラスタ中心点の数を N_{Real} と置けば、1 イベントでの検出効率 ϵ は次のようにあらわされる。

$$\epsilon = \frac{N_{\text{Real}}}{N_{\text{Exp}}}$$

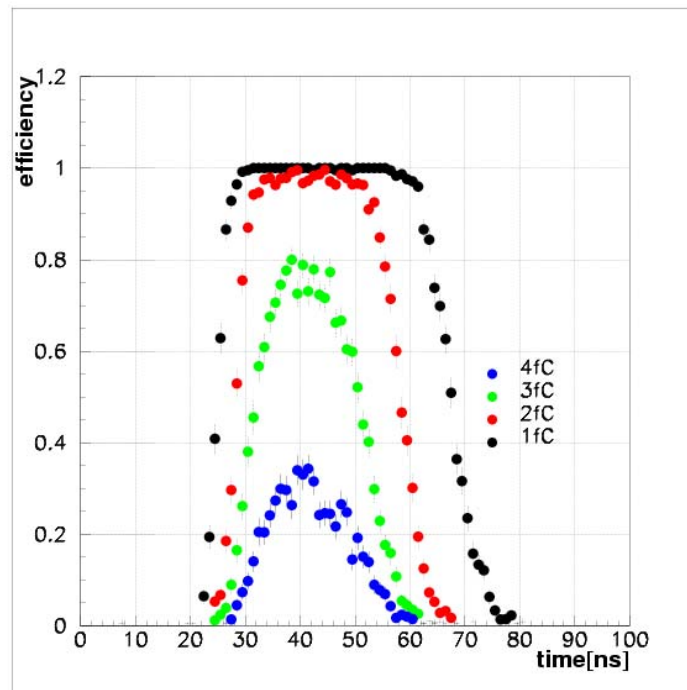


図 17: 様々なスレッシュホールドにおけるトリガからの時間に対する検出効率

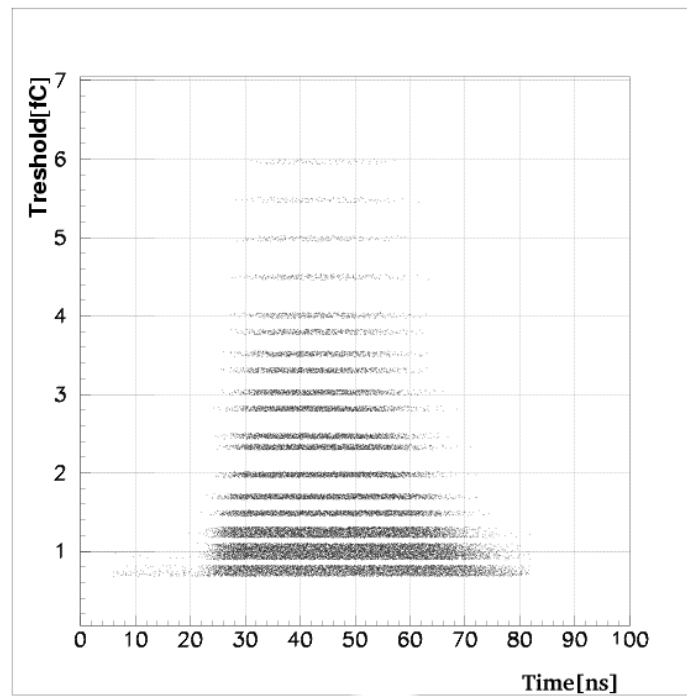


図 18: 横軸は時間、縦軸はスレッシュホルド。図 17 の様々なスレッシュホルドに対して 2 次元プロットを行った。

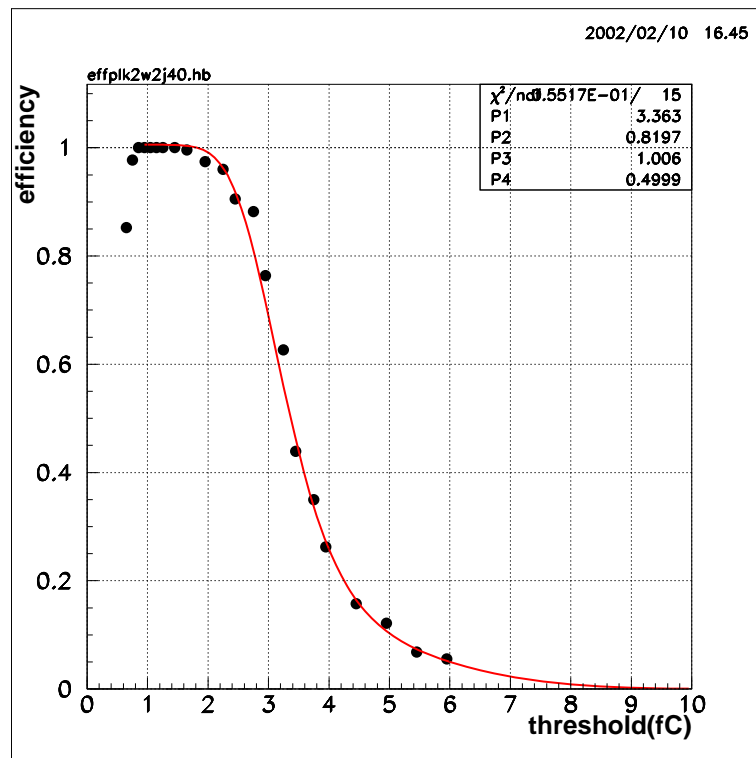


図 19: 40ns でのスレッシュホールドに対する検出効率

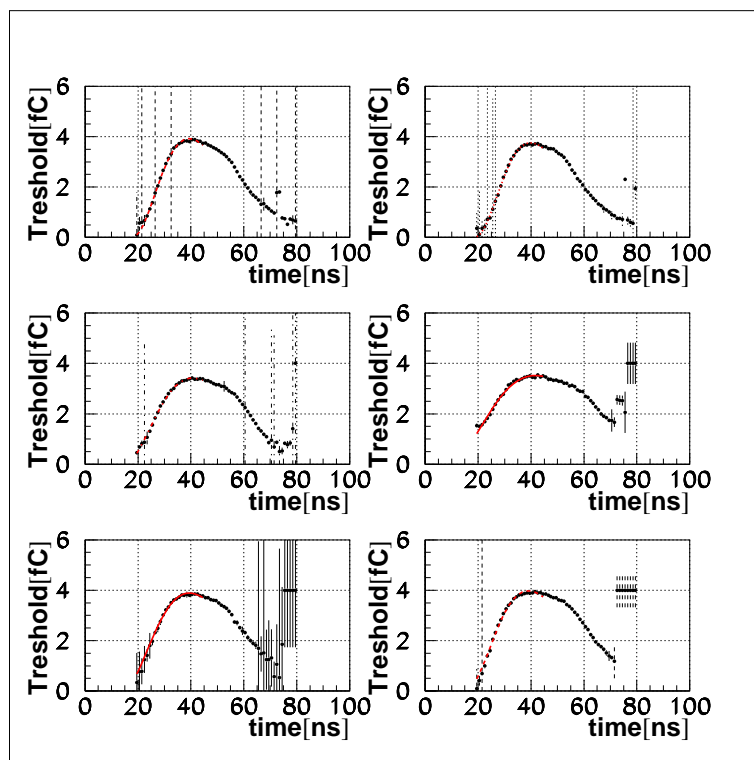


図 20: ASIC 内のパルスハイト

クラスタ中心点は1つしかないので、上記の式における N_{Real} の取りうる値は1か0かである。イベント数 i だけこれを繰り返し、次の式から検出効率 (ϵ) を定めた。

$$\epsilon = \sum_{i=1}^n \frac{(N_{\text{Real}})_i}{(N_{\text{Exp}})_i}$$

誤差に関してであるが、 N_{Real} は先に述べた通り二項分布

$$P(r) = {}_{\text{Exp}} C_r \epsilon^{E_{\text{Exp}}} (1 - \epsilon)^{N_{\text{Exp}} - r}$$

に従うので、その分散は $N_{\text{Exp}} \epsilon (1 - \epsilon)$ となる。よって、検出効率の分散は

$$\sigma = \sqrt{\text{Var}\left(\frac{N_{\text{Real}}}{N_{\text{Exp}}}\right)} = \sqrt{\frac{N_{\text{Exp}} \epsilon (1 - \epsilon)}{N_{\text{Exp}}^2}} = \frac{\sqrt{N_{\text{Exp}} \epsilon (1 - \epsilon)}}{N_{\text{Exp}}}$$

となる。

3.6.2 スレッシュホールド 1fC での検出効率の電圧依存性

図 21 にスレッシュホールド 1fC での検出効率の電圧依存性を示している。この図から放射線損傷を与えていないテスト検出器では電圧 100V 以上で放射線損傷を与えたテスト検出器では電圧 300V 以上でそれぞれ検出効率 99

3.6.3 電圧一定での検出効率のスレッシュホールド依存性

実際の実験におけるデータ収集は、ある一点でのスレッシュホールドで固定して行う予定であり、その値は 1fC 付近である。グラフを図 22、図 23、図 24、図 25、図 26、図 27 にしめた。1fC での検出効率をみると放射線損傷を与えていないモジュールでは 70V 以上、放射線損傷を与えたモジュールについては 300V 以上でいずれも 99% 以上の検出効率をしめしていることが分かる。実際のアトラス実験では放射線損傷を与えていないモジュールでは 150V で、放射線損傷を与えたモジュールでは 300V~400V で稼働する予定であるのでよい結果といえる。

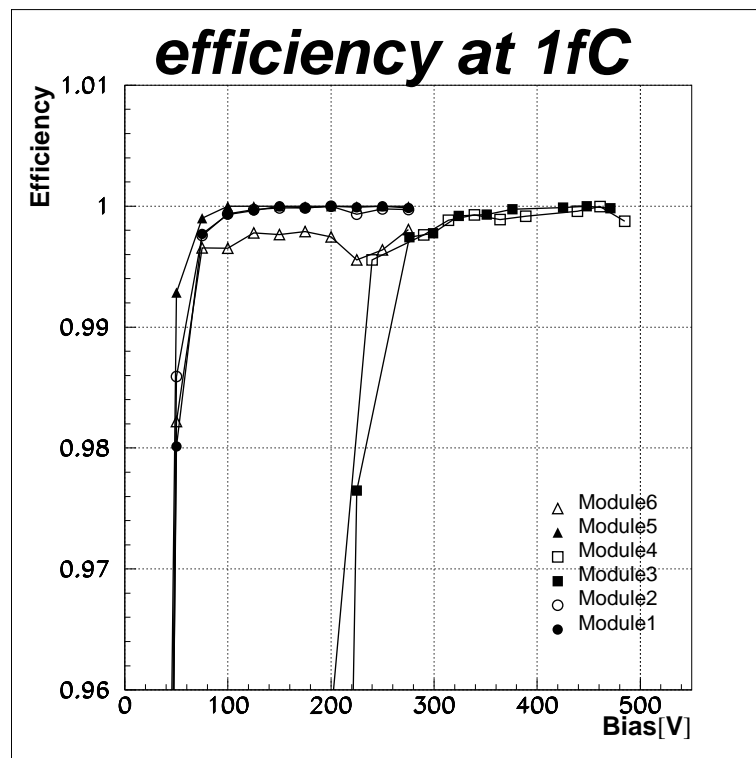


図 21: efficiency の電圧依存性

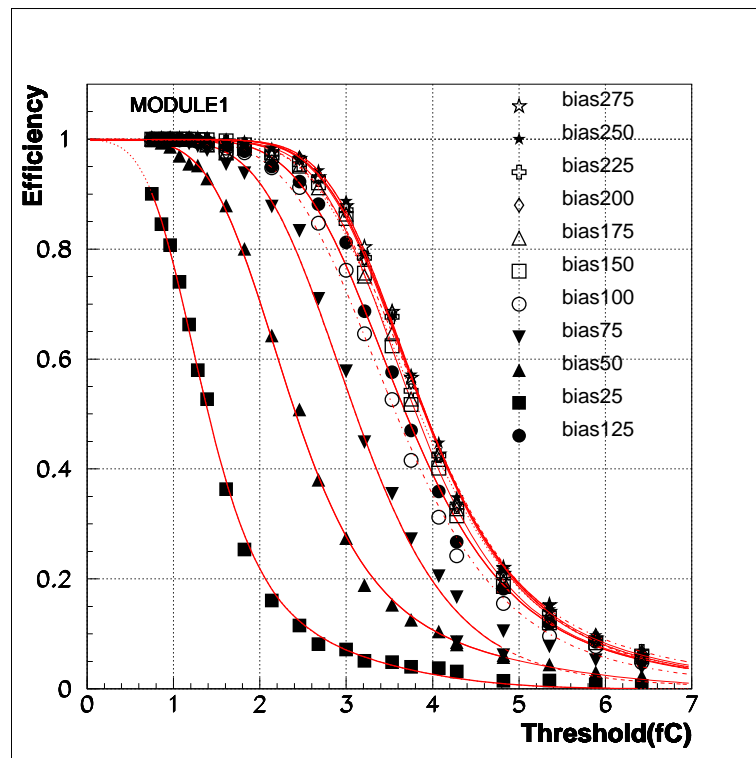


図 22: 検出効率のスレッシュホルド依存性 (モジュール 1)

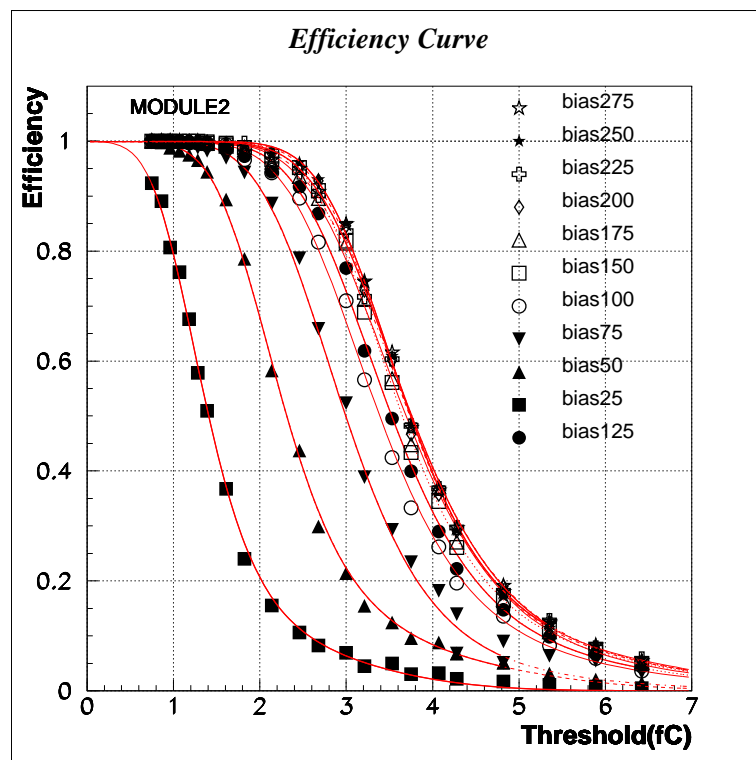


図 23: 検出効率のスレッシュホルド依存性 (モジュール 2)

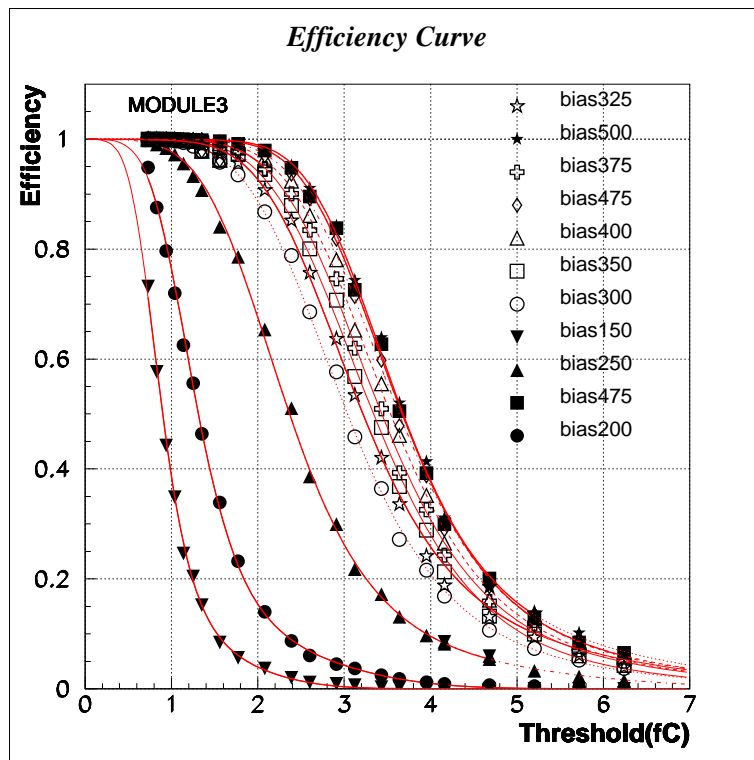


図 24: 検出効率のスレッシュホルド依存性 (モジュール3)

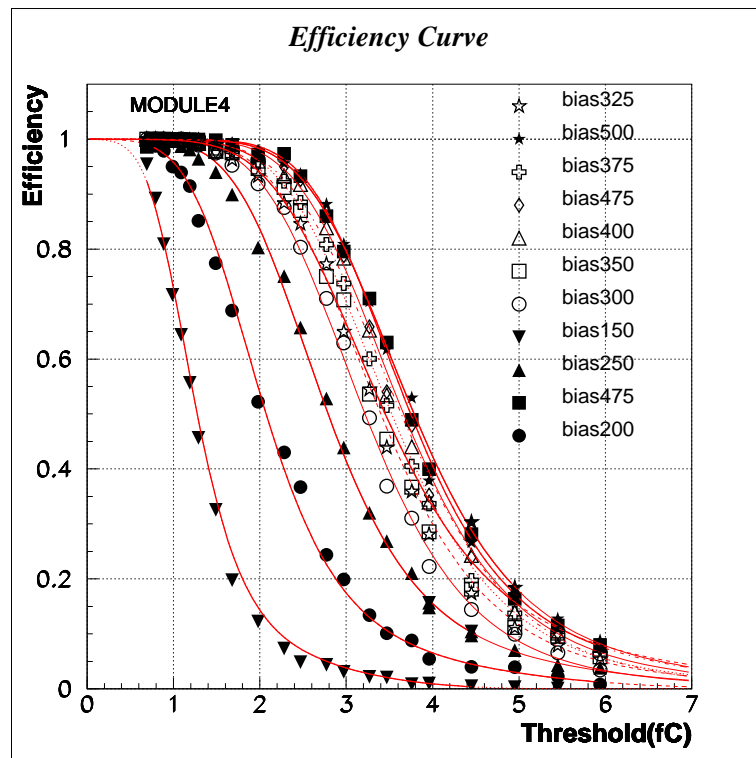


図 25: 検出効率のスレッシュホルド依存性 (モジュール4)

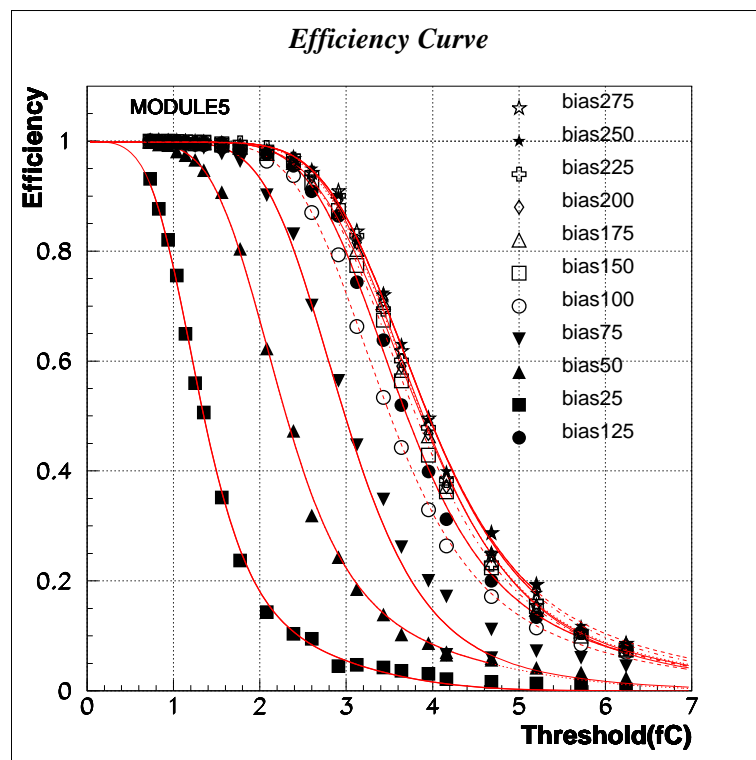


図 26: 検出効率のスレッシュホルド依存性 (モジュール 5)

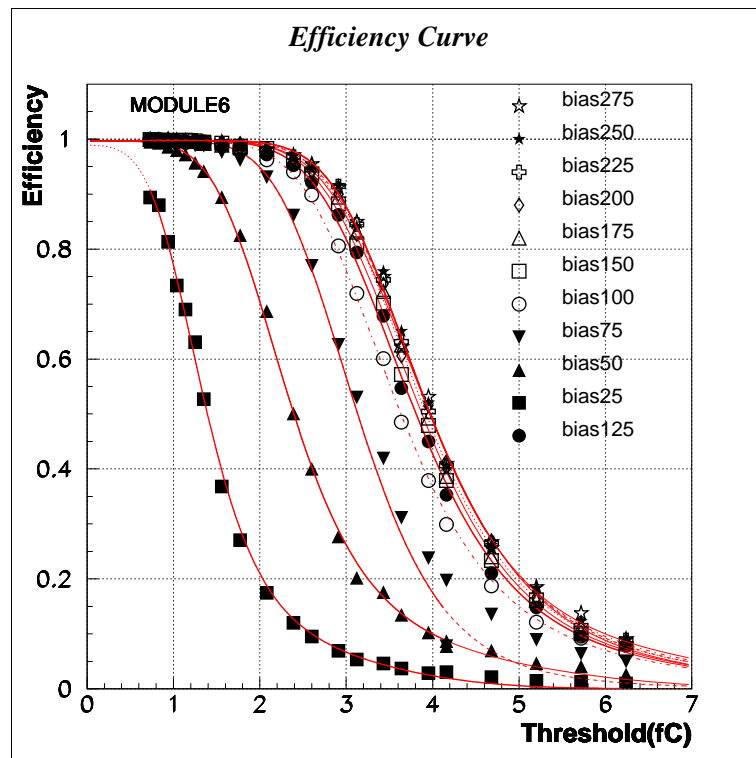


図 27: 検出効率のスレッシュホルド依存性 (モジュール6)

3.6.4 メディアンチャージのバイアス電圧依存性

あるスレッシュホールドにおける検出効率は、そのスレッシュホールド以上の大きさをもつすべての信号の積分形であるので、検出効率が 50% のスレッシュホールドの値が波高分布におけるメディアンチャージになる。

一般に、薄い物質中を通過する荷電粒子のエネルギー損失はランダウ分布に従うので、得られたプロットをランダウ分布でフィットし、検出効率 50% のスレッシュホールドの値を出す。これらから、そのときにかけていたバイアス電圧依存性を知ることが可能になる。

検出効率のスレッシュホールド依存性をあらわす分布図 22~27 から、各バイアス電圧ごとにメディアンチャージの値を出し、縦軸にメディアンチャージの値を、横軸にバイアス電圧をとり、その依存性を評価した。図 28 にこれを示す。高バイアスになるにしたがって、曲線の変化はだんだん緩やかになり、一定の値に近づく。検出器が全空乏層化電圧 70V に達した後は、検出効率がそれほど変化しなくなることをあらわしている。図をみると放射線損傷を与えていないモジュールでは 130V より高い電圧では $3.7\text{fC}\sim 4.0\text{fC}$ で一定の値に近づいて来ていることが分かる。放射線損傷を与えたモジュールでは飽和には達していないが 3.7fC 程になってきている。

3.6.5 ノイズオキュパンシーの評価

LHC 実験と同様、このビームテストでも 40MHz ランダム・サンプリングでおこなっている。つまり 25ns 毎にデータを検出器に読み込んでいる。これは LHC 実験では 25ns ごとにビームが衝突するため、どのビームのデータかをタグする必要が生じるからである。図 29 に概念図をしめしている。タイミング 1,2,3 で読み込んでいる。タイミング 1 の後の 25ns はタイミング 1 にタグできる。しかし、今回ビームテストを行った高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 12GeVPS の π^- ビームラインは約 2 秒周期でビームが衝突する。よって、ビームが来ていないときのテスト検出器のヒット情報のデータをとることによってテスト検出器の電氣的なノイズを評価できる。トリガーはテスト検出器群の上流と下流におき、ビームとの同期を取った。

トリガーからタイミング 2 でビームが当たったことが言えれば、タイミング 1 はビームがあたる 25ns 前の情報である。このタイミング 1 の時間を 0ns とし 15ns より前の時間のデータを用いてノイズの評価を行った。

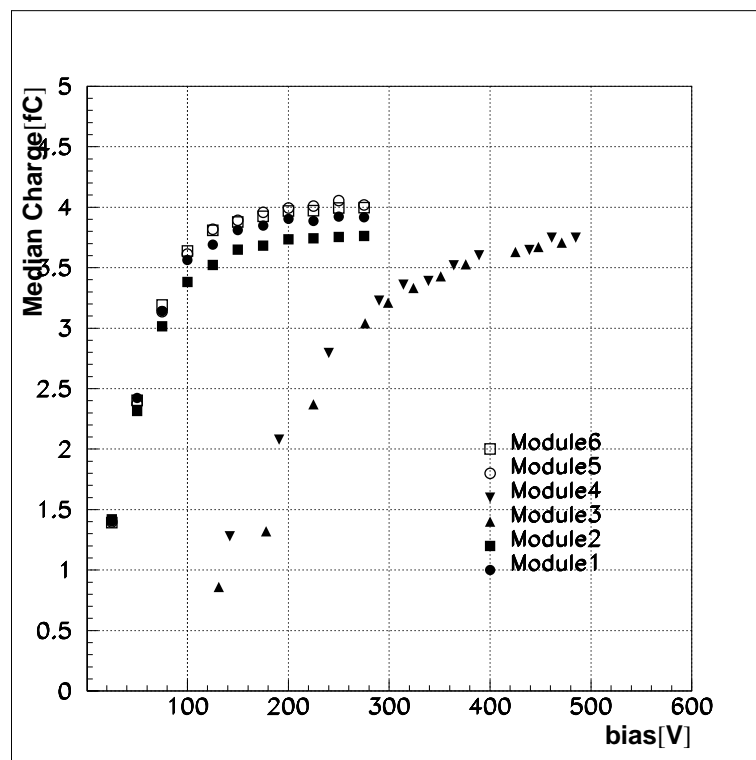


図 28: メディアンチャージのバイアス依存性

位置分解能のところでヒットがあったとする条件を決めるとき、テレスコープの通過位置より算出されたストリップから前後 5 ストリップ内にテスト検出器のヒットがあればそれをヒットとみなす、とした。ノイズの評価では、その 2 倍の前後 10 ストリップの外にヒットがあればそれをノイズのヒットとみなすとした。図 30 にノイズオキュパンシーのスレッシュホールド依存性を示した。スレッシュホールドの低いところでエレクトロニクスノイズが見られる。テスト検出器に要請されるノイズオキュパンシーはバレルモジュールにおいてスレッシュホールド 1fC で放射線損傷を与えていないものに関しては 1×10^{-4} 、放射線損傷を与えたものにかんしては 1×10^{-3} である。なぜ、この数値かという理由は以下の通りである。

まず、本物のトラックによるオキュパンシーがある。これがシミュレーションによれば 5×10^{-3} 程度ある。したがってノイズによるオキュパンシーはこれ以下にする必要がある。テスト検出器によって取られたデータは後処理の為に送信しなければならない。データが多すぎるとデッドタイムが発生する。どれだけのデータ量をどれだけのスピードで送ればデッドタイムがなくなるか。それが 5×10^{-3} 程度ならよい。そして放射線損傷を受けるとノイズが増加する。よって値を一桁下げておく。図 30 をみるとその要請を満たしていることが分かる。

ノイズオキュパンシーとスレッシュホールドの関係は次の式で近似される。

$$occupancy(q) \propto \exp \frac{q^2}{2\sigma^2}$$

ここで σ はアンプの Equivalent-Noise-Charge(ENC)、 q はスレッシュホールドである。これを図 30 にフィットした。

3.6.6 較正スケールに依存しない信号雑音比の電圧依存性の評価

チップの較正用のキャパシタンスの大きさには個体によって誤差、つまり不確定性がある。それをキャンセルするためにメディアンチャージをオキュパンシーで割った値、S/N ratio によってキャリブレーションスケールに依存しない信号雑音比を評価する。その電圧依存性を示したものが図 31 である。

放射線損傷を与えていないモジュールでは $S/N > 14$ 、放射線損傷を与えたモジュールでは $S/N > 9$ (bias > 350V) となっていることが分かる。ここで実用に耐える経験値というものを我々は知っていてその値がほしい

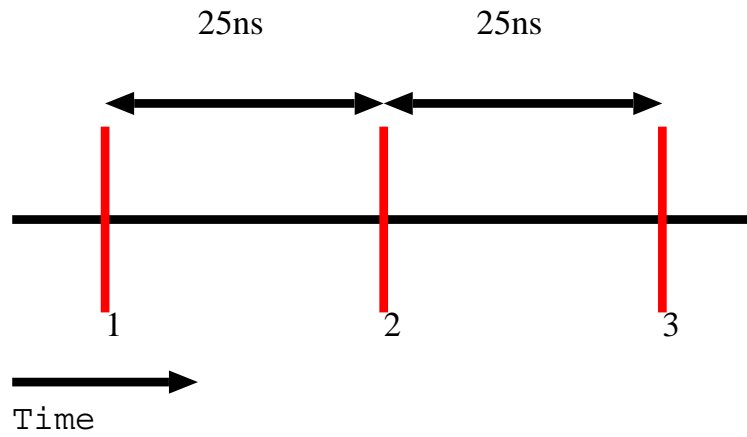


図 29: 40MHz ランダムサンプリング

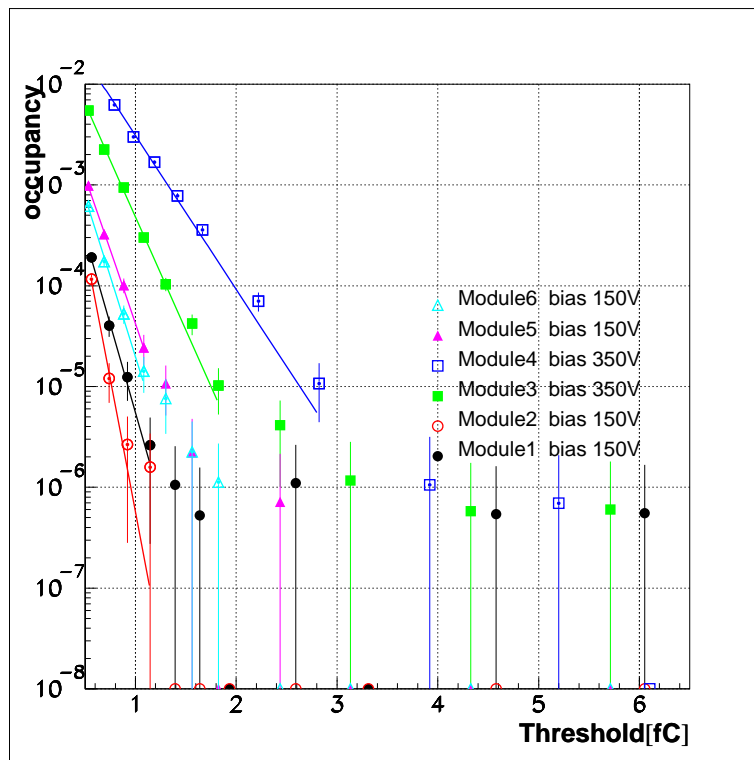


図 30: ノイズオキュパンシーのスレッシュホルド依存性

9である。よって、アトラス10年分の照射量を与えた後でもこのテスト検出器は十分動作することが分かる。

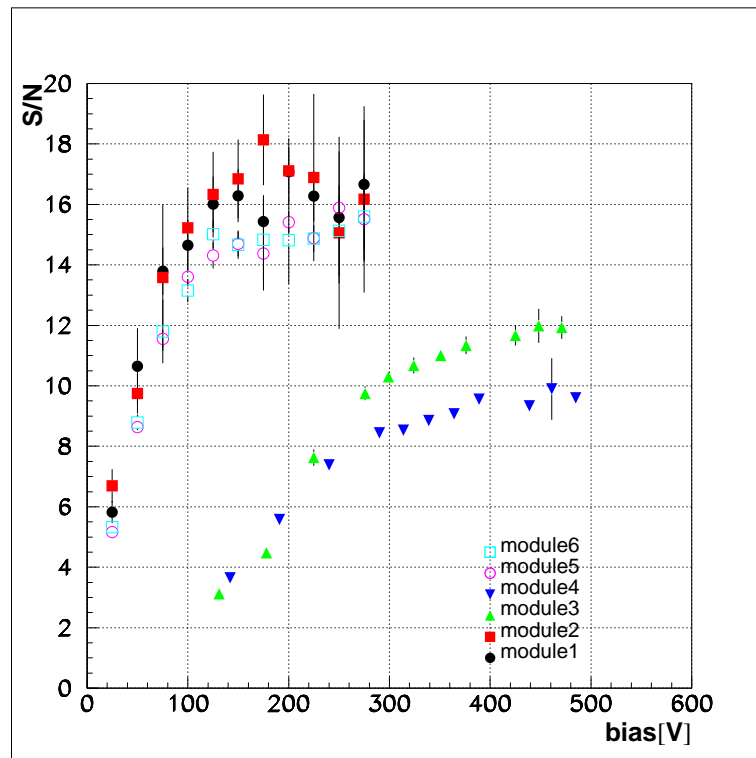


図 31: 較正スケールに依存しない信号雑音比の電圧依存性

4 結論

2000年12月高エネルギー加速器研究機構において、 $4\text{GeV}/c\pi^-$ ビームを用いて行われたアトラス SCT モジュールのビームテストを行い、得られたデータを解析して、検出器の性能を評価した。今回のビームテストは、量産及び量産直前のパーツを用いて行った最初の実験である。

位置分解の評価を行った。放射線損傷を与えていないモジュールは $80\mu\text{m}$ ピッチの一樣分布から期待される位置分解能 $23\mu\text{m}$ を与えた。

読み出し ASIC 内の信号波解析を行った。ピーキングタイムは約 20ns であり、設計値とほぼ同じ値であることを確認した。

検出効率について評価した。検出効率のスレッシュホールド依存性はアトラス実験で使用される 1fC のスレッシュホールドにおいて検出効率が 99% 以上であった。また、電圧依存性は放射線損傷を与えていないモジュールについては 150V 、放射線損傷を与えたモジュールについては $350\text{V}\sim 400\text{V}$ で検出効率が 99% であることが分かった。どちらも大変良好であるといえる。

モジュールに LHC 実験 10 年間で受ける放射線量 $3 \times 10^{14} \text{ protons}/\text{cm}^2$ を当てた後でも、 S/N はバイアス電圧 350V で 10 より大きく、実用に耐える 9 を満足していることがわかった。

5 謝辞

指導教官である岡山大学・中野逸夫教授にはアトラスのビームテストへの参加、そしてデータ解析の機会を与えて下さいました。高い水準の場で研究がしたいという私のわがままを聞き、その機会をつくって頂くために大変な尽力をつくして頂きました。

岡山大学・田中礼三郎助教授にはビームテストにおいて実験の方法、考え方など教えて頂きました。また、それを自ら実践されているのをみて多くの影響を受けました。

高エネルギー加速器研究機構(KEK)・海野義信助教授には、私がKEKで研究している間、解析の手法、データから物理現象を想像するかといった極めて実践的な指導を賜りました。

以前のビームテストの解析をされた橋崎徹先輩には、この解析を始めるに当って知っておかなければならないことを、本人の経験から語ってくださったので大変参考になりました。

また、解析結果を見て、鋭い指摘、アドバイスをくれた博士前期課程2年越野俊充君、乗松健治君には大変感謝しています。

我々の実験は多くの人々の協力が無ければ遂行できません。この実験を共に行った各大学、研究機関の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] William R.Leo,"Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments",Springer-Verlag,1994
- [2] G.F.Knoll,"Radiation Detection and Mesurement Third Edition",John Wiley & Suns, Inc., 2000
- [3] P.R.Bevington,"Data reduction and error analysis for the physical sciences", New York,McGraw-Hill,1992
- [4] S.M.Sze,"Physsics of Semiconductor Devices",John Wiley & Suns. Inc.,1981
- [5] CERN Program Library PAW Reference
- [6] 橋崎徹,"ATLAS SCT モジュールの性能評価",岡山大学修士論文,2001
- [7] B.W.Kernighan,D.M.Ritchie,"The C Programming Language",Prentice Hall,1988

口頭発表

松尾武, 海野義信, 中野逸夫, 田中礼三郎, 高力孝近藤敬比古, 寺田進, 池上陽一, 氏家宣彦高島隆一, 原和彦, 岩田洋世, 大杉節
"KEK 12GeV PS でのビームテストによる ATLAS SCT モジュールの性能評価"
日本物理学会秋期大会,2001年9月22日~25日, 沖縄国際大学

論文発表

Y.Unno,T.Matuo,T.Hashizaki,T.Akimoto,J.Bernabeu,Z.Dolezal,L.Eklund,
K.Hara,Y.Ikegami,Y.Iwata,Y.Kato,C.Ketterer,H.Kobayashi,T.Kohriki,
T.Kondo,T.Koshino,J.Ludwig,T.Masuda,G.Moorhead,I.Nakano,K.Norimatsu,
T.Ohsugi,K.Runge,S.Shinma,R.Takashima,R.Tanaka,N.Tanimoto,S.Terada,
N.Ujiie,M.Vos,K.Yamanaka,and T.Yamashita
"Beamtest of Non-irradiated and Irradiated ATLAS SCT Microstrip
Modules at KEK"; IEEE trans.Nucl.Scie