

ATLAS SCT モジュールの性能評価

数理物理学専攻 414-11-016

橋崎 徹

平成 13 年 2 月 27 日

概要

本研究の目的は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) において $4\text{GeV}/c \pi^-$ ビームを用いて行われた ATLAS SCT モジュールのビームテストで得られたデータを解析し、モジュールの性能を評価することにある。

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) とは、2005 年から CERN (ヨーロッパ合同原子核研究所) で稼働予定の重心系エネルギー 14TeV の陽子 - 陽子衝突型加速器 LHC (Large Hadron Collider) において用いられる測定装置の一つであり、ヒッグス粒子や超対称性粒子などの発見を目指している。そして、SCT (SemiConductor Tracker) モジュールとは、ATLAS の構造の中で最も衝突点に近い Inner Detector の中で使用されるシリコンストリップ検出器であり、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。その形状は、 12cm 長のストリップを 768 本、 $80\mu\text{m}$ 間隔で配置した $63.6\text{mm} \times 128\text{mm}$ シリコンウエハを互いに 40mrad ずらして重ねたもので、読み出しチップ数は 12 個である。各ストリップからのデータの読み出しは、得られたシグナルに対してスレッシュホールド (しきい値) をかけ、それを越えたものをヒット有り、越えなかったものをヒット無しという 2 つの値のみで扱い、大量のデータを高速で処理する。

今までにも SCT モジュールのビームテストは行われているが、読み出しチップが 1 つだけであったり、 6cm 長のウエハを扱ったりなど、部分的なテストであった。今回は ATLAS に組み込むものと同じ形状のものを用いた初のテストである。LHC 実験において 10 年間に受けると予想される $3 \times 10^{14} \text{protons}/\text{cm}^2$ の放射線損傷を与えたもの 1 台を含む計 5 台のモジュールについて、モジュールにかけるバイアス電圧・スレッシュホールドの値をそれぞれ変えながらビームを入射し、得られたデータを用いてオフライン解析を行った。

解析の結果、位置分解能に関しては、スレッシュホールド依存性が $0.8 \sim 3\text{fC}$ までにおいて $26 \pm 1.5\mu\text{m}$ 程しか変化しないことが分かった。放射線損傷を与えたものと同バイアスで比較を行ったところ、損傷後の方が分解能が悪いことが分かった。また、検出効率が 50% になるスレッシュホールド、すなわちミディアンチャージのバイアス依存性を解析した。放射線損傷を与えていないモジュールでは、 130V 付近で約 3.4fC に飽和していくのが見られたが、放射線損傷を与えたモジュールに関しては電荷収集量が低く、 500V をかけても飽和の傾向が見られなかった。また、ミディアンチャージに関してストリップ間領域のストリップ周辺領域に対する比を評価したが、損傷後のものは比が低く、ストリップ間領域での電荷収集量が少ないことが分かった。このことから、センサーまたは読み出しチップ、あるいは両方が放射線損傷に対する要求を満たしていないことが分かり、これは今後の課題となる。

目次

1	はじめに	1
1.1	ATLAS	2
1.2	Inner Detector	4
2	ATLAS SCT モジュール	5
2.1	シリコン半導体検出器	5
2.1.1	半導体検出器	5
2.1.2	pn 接合	5
2.1.3	放射線損傷	6
2.2	SCT の特徴	6
2.2.1	マイクロストリップ構造	6
2.2.2	2 値読み出し	7
2.3	Barrel モジュールと Forward モジュール	7
3	ビームテストの解析	9
3.1	目的	9
3.2	ビームテストのセットアップ	9
3.3	モジュールの位置分解能の評価	12
3.3.1	ビームの直線の決定	12
3.3.2	クラスター中心点の作成	12
3.3.3	位置分解能	13
3.4	モジュールの検出効率	21
3.4.1	検出効率のスレッシュホールド依存性	21
3.4.2	ミディアンチャージのバイアス依存性	27
3.4.3	ストリップ間領域でのミディアンチャージの評価	29
4	結論	31
	謝辞	32
	参考文献	33

表目次

1	Setup Modules	10
2	scan point	10

図目次

1	LHC	3
2	ATLAS Overview	3
3	Inner Detector	4
4	マイクロストリップ構造	6
5	SCT Barrel Module	8
6	SCT Forward Module	8
7	シンチレーターと冷却箱の配置	10
8	冷却箱内の検出器の配置	11
9	テスト検出器のクラスター中心点	12
10	フィッティング	14
11	Module0 の位置分解能	15
12	Module3 の位置分解能	16
13	Module3 における低いバイアスでの位置分解能	17
14	同バイアスでの比較	17
15	Module1 の位置分解能	18
16	Module2 の位置分解能	19
17	Module4 の位置分解能	20
18	Module0 の検出効率	22
19	Module3 の検出効率	23
20	Module1 の検出効率	24
21	Module2 の検出効率	25
22	Module4 の検出効率	26
23	各テスト検出器のメディアンチャージのバイアス依存性	28
24	ストリップ間領域	29
25	ストリップ間領域/ストリップ領域の比	30

1 はじめに

近年の素粒子実験の発展は衝突型加速器に依るところが大きい。加速器技術の進歩に伴い、扱えるビームのエネルギー領域も上昇し、例えば弱い相互作用を媒介する W^\pm , Z^0 粒子は重心系エネルギー 540GeV の陽子・反陽子衝突型加速器である Sp̄pS によって、クォークの第 3 世代に属するトップクォークは重心系エネルギー 1.8TeV の陽子・反陽子衝突型加速器の TEVATRON によって発見され、それまで踏み込むことの出来なかった高いエネルギーの世界に対しても研究の分野が広がりつつある。

そして 2005 年には、スイスのジュネーブ郊外にある CERN (ヨーロッパ合同原子核研究所) において LHC (Large Hadron Collider) が稼動する予定である。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 $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の陽子・陽子衝突型加速器となる予定である。

LHC 実験は、素粒子物理学において、現時点までの実験データを矛盾なく説明している「標準理論」の中で予言されていながらまだ見つかっていない、ヒッグス粒子の探索を主な目的としている。その他にも、超対称性粒子の探索や、既知の粒子 (重いクォークやゲージ粒子) の諸反応の高い精度での測定を目指している。

LHC の中でも主要な実験装置の一つに ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) 検出器があり、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、各国でそのパーツを製作・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。

1999 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 SCT モジュールのビームテストが行われた。ビームテストは過去にも数回あり、ATLAS 実験に向けて改良されていく 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る。ただし、今までのテストは実際に ATLAS で組み込まれる形状のものでなく、読み出しチップが 1 つしか使われていなかったりなどの部分的なパーツの状態での性能評価であった。これらのテストによってその部分の基本的な性能を知ることが可能であるが、実際に使用する形のモジュールでの性能の評価が必要となることは間違いない。今回のテストは、実際に ATLAS に組み込まれる形でのモジュールを使った最初のテストである。

まず最初に、SCT が組み込まれる実験装置である ATLAS と Inner Detector 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 モジュールの解析およびその結果について報告する。

1.1 ATLAS

LHCには、図1に示すように4つの大きな実験装置が計画されている。

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

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 new physics の探索を主な目的として作られているのが CMS 検出器、ATLAS 検出器 [5] 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。その概観を図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、

- Inner Detector
- Calorimeter
- Muon spectrometer

となる。

Inner Detector では生成された粒子の飛跡を精密に測定する。

Calorimeter 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 Electromagnetic Calorimeter 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 Hadron Calorimeter 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。

Muon spectrometer 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 粒子の軌道を検出器方向に曲げ、その運動量を精密に測定する。

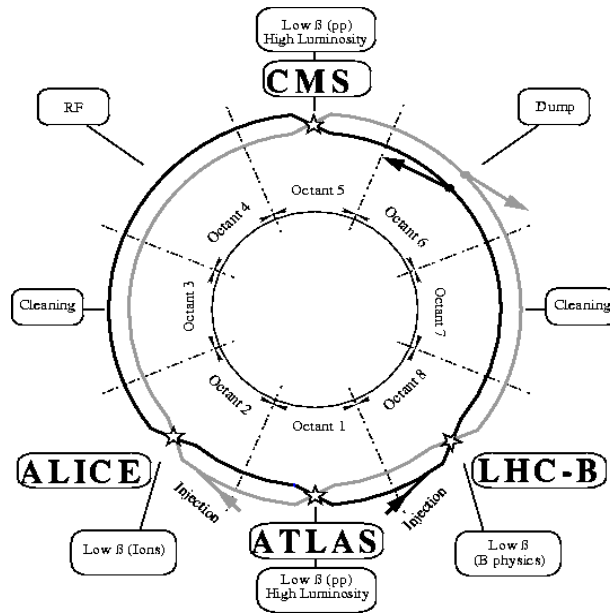


図 1: LHC における実験装置の位置.

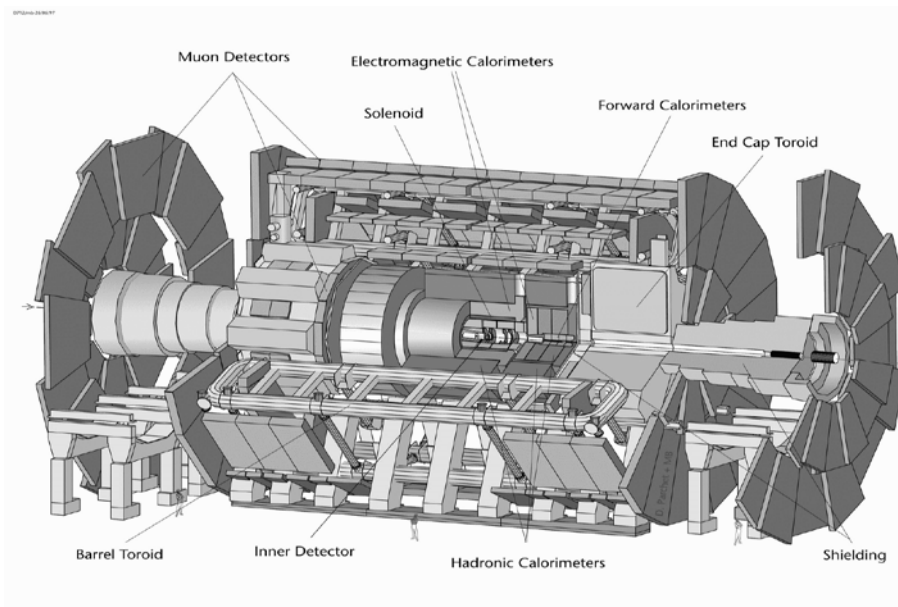


図 2: ATLAS 概観図

1.2 Inner Detector

Inner Detector 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 2T 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を担当している。10 年間の実験期間において、ビームライン付近における過酷な放射線環境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、

- Pixel Detector
- SCT
- Transition Radiation Tracker(TRT)

というサブディテクタ が配置され、衝突によって生成される崩壊点の検出を Pixel Detector が、粒子の飛跡および運動量の検出を SCT と TRT がそれぞれ担当している (図 3)。

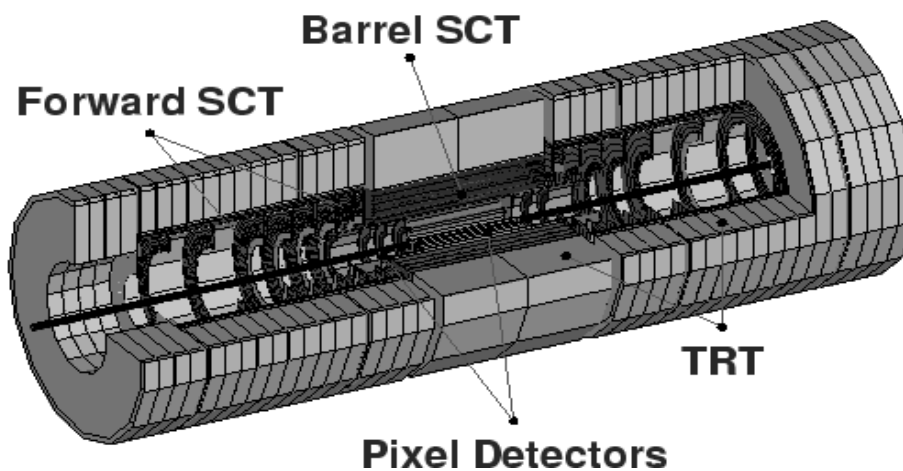


図 3: Inner Detector. 全体としては、直径 2.3m、長さ 7m の筒の形をしている。

2 ATLAS SCT 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、その後で SCT の特徴を述べる。

2.1 シリコン半導体検出器

2.1.1 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（空乏層は後述する）。

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。良く似たプロセスで信号を作るガスチェンバーにおいて電子・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平均約 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、約 3.6eV と 10 分の 1 程度で済むことである。これによって、パルス当たりの信号の数の統計的ゆらぎの全数に対する割合が小さくなる。また応答速度が速いことも挙げられる。信号である電子・正孔対の速度は、印可電界に従って増加し、ある程度のところで飽和する。この飽和速度は 10^7 cm/s 程度であり、これは $300\mu\text{m}$ 以下の距離にわたって電子・正孔対を収集するのに必要な時間が 3ns 以下ということの意味する [2, 3]。

これらの長所は、大量のデータを短時間で扱う SCT にとっては重要なパラメータである。

2.1.2 pn 接合

n 型半導体物質と p 型半導体物質を接合したものの特性について述べる。

n 型半導体と p 型半導体の接合部分では、電子と正孔の密度の違いにより、電子は p 側へ、正孔は n 側のほうへそれぞれ拡散していく。拡散してきた電子をとらえた p 側には過剰の電子を持った負のイオンが、逆に n 側には正のイオンが出来ていく。これは、その結果作られた電界によって、拡散が抑えられる平衡状態になるまで広がっていく。このキャリアのない領域を空乏層という。荷電粒子が通過して空乏層内で生成された電子・正孔対は、電界により空乏領域外へ掃引される。これが電気信号を誘起する。

半導体検出器の有感領域である空乏層は、逆バイアス電圧をかけることによりその幅を広げることが可能である。SCT はウエハ全体を空乏層にすることによって、空乏化されていない不感層領域で生じるノイズをなくしている。また、不感層での低電界領域ではキャリアの速度が小さくなり、信号のパルスの立ち上がりが遅くなるのだが、全空乏化している場合はウエハのどこであってもばらつきのない安定な信号が得られる。

2.1.3 放射線損傷

半導体検出器の長所について述べたが、短所として放射線損傷による性能の劣化を起こしやすいという面がある。

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そ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 [2, 3]。また、pn 接合にバイアスをかけた際には、特に電離性放射線がない場合に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、また熱を出しという熱暴走を起こす [11]。

SCT の設置される場所においても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、それに耐える検出器の開発が進められている [8, 10]。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 未満に保つことが要求されている [6]。

2.2 SCT の特徴

2.2.1 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させることによって、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 (p-in-n) を採用している [2, 7]。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 に示す。

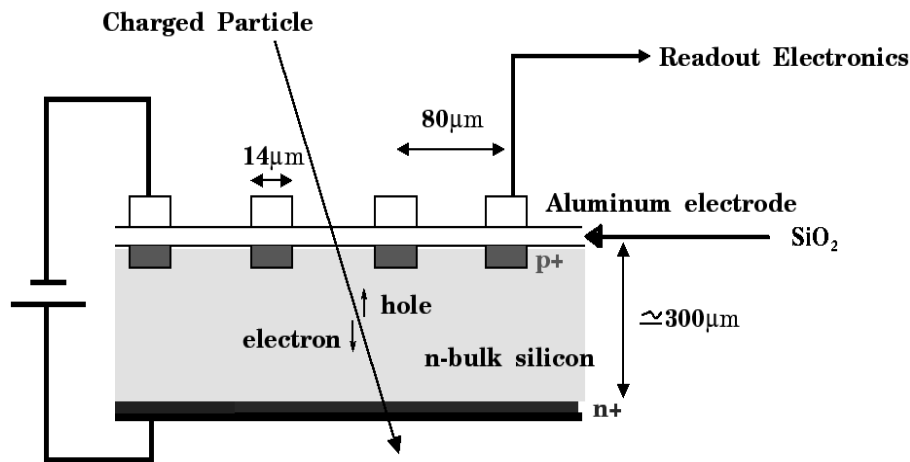


図 4: SCT のマイクロストリップ構造。

2.2.2 2 値読み出し

LHC においては、陽子衝突が毎秒約 40 億回という頻度で起こり、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 readout を行っている。これを 2 値読み出し (binary readout) と呼んでいる。

2.3 Barrel モジュールと Forward モジュール

SCT モジュールは 2 タイプの形状があり、Inner Detector に配置される場所の違いからそれぞれ Barrel Module, Forward Module と呼ばれている。

Barrel Module(図 5) は、ストリップの幅 $14\mu\text{m}$ 、ストリップ間隔 $80\mu\text{m}$ で 768 ストリップある $6.36\text{cm} \times 6.40\text{cm} \times 300\mu\text{m}$ のウエハを、2 枚つなげて 12cm ストリップ長とする。これを 2 枚用いて (つまり、全 1536 ストリップ) 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。従って、片面に 6 つの全 12 チップが一つのモジュールにある。

一方、Forward Module(図 6) の方は、ホイール状に配置されるようにシリコンウエ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 $6 \times 2 = 12$ チップというところは Barrel と同じである。

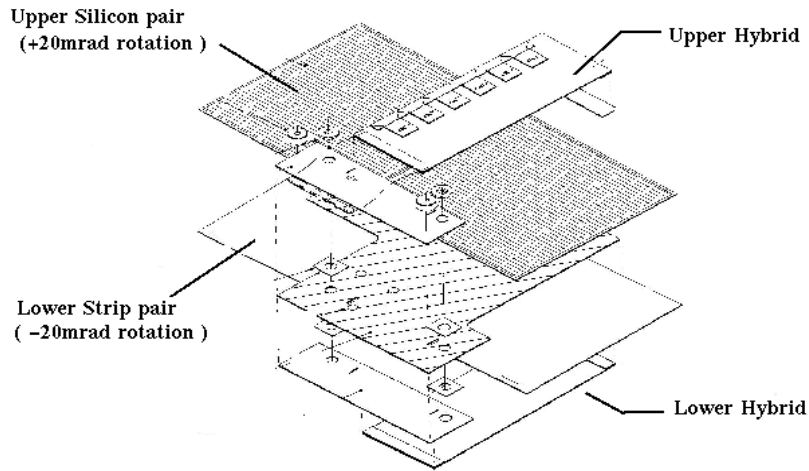


図 5: SCT Barrel Module.

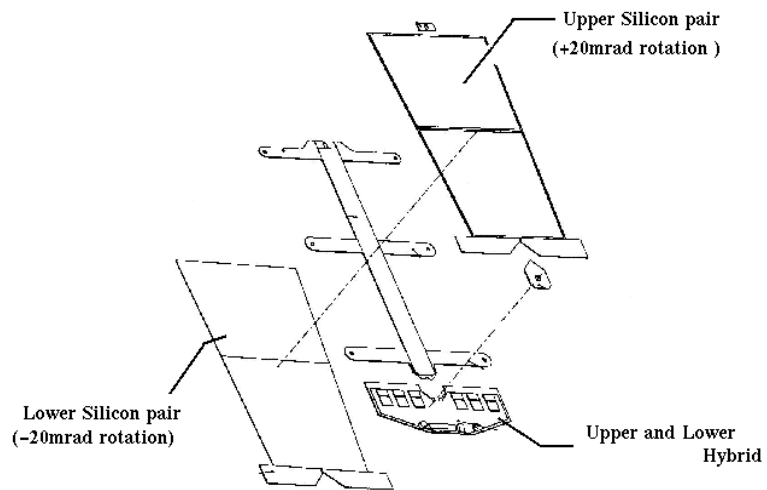


図 6: SCT Forward Module.

3 ビームテストの解析

3.1 目的

今までにも何度か SCT のビームテストは行なわれているが、センサーの部分が片面のみであったり、チップ数が少ないなどの部分的なパーツでのテストであった [8, 12, 13]. それらのテストの解析によって各部分の基本的な性能評価を行うことは可能であるが、ATLAS 検出器に組み込むためのモジュールの性能評価には、実際に使用する完全な状態のモジュールでの性能の評価が必要である.

今回は実際に ATLAS 装置に組み込む形、読み出しチップ数 12 チップ, 1536 ストリップ, 12cm ストリップ長で行なった最初のテストである. また, モジュールの形にはなっていない, つまり実際の実験に組み込まれる形にはなっていないが, LHC 実験において 10 年間に受けると予想される 3×10^{14} protons/cm² の放射線損傷を与えたもの 1 台を含む計 5 台で実験を行った.

3.2 ビームテストのセットアップ

ビームテストは 1999 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 および図 8 に示す.

図 8 の中で Telescope 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半導体検出器で, 面積 2cm \times 2cm, 読み出しストリップ間隔 50 μ m, 厚さ 300 μ m のウエハを使用し, これを 2 枚 90 $^\circ$ 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 μ m である.

図 8 のように, テスト検出器および Telescope はともに冷却箱の中にセットされ, 実際の ATLAS 実験とほぼ同様の -10 $^\circ$ C の状態に保って実験を行った. 冷却箱のビーム上流に配置した 2cm \times 2cm のシンチレーションカウンター S1, S2, S3 および下流の S4 の 4 つのコインシデンスでトリガーをかけ, 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・及び読み出し信号にかけるスレッシュホールドの値をかえながらデータテイキングを行った. スキャンポイントは表 2 に示してある. 各スキャンポイントにおいて, それぞれ 5000 or 10000 イベント集めた.

放射線損傷を与えた Module3 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に設定してある. これは, 損傷を与えることによる全空乏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, 6cm 長, 片面の Barrel モジュールである. このモジュールは, ほんのわずかに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.

Module No.	Status	Module Type	Size	thickness
0		Barrel	12cm 長, 両面	285 μm
1		Forward	12cm 長, 両面	285 μm
2		Barrel	12cm 長, 両面	325 μm
3	Irradiated	Forward	6cm 長, 片面	285 μm
4		Barrel	12cm 長, 両面	285 μm

表 1: テスト検出器

Status	Bias Voltage [V]	Threshold [fC]
Irradiated Module	200, 250, 300, 350, 400, 450, 500	0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0
Non-Irradiated Modules	60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200	0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0

表 2: スレッシュホールドとバイアスの設定値

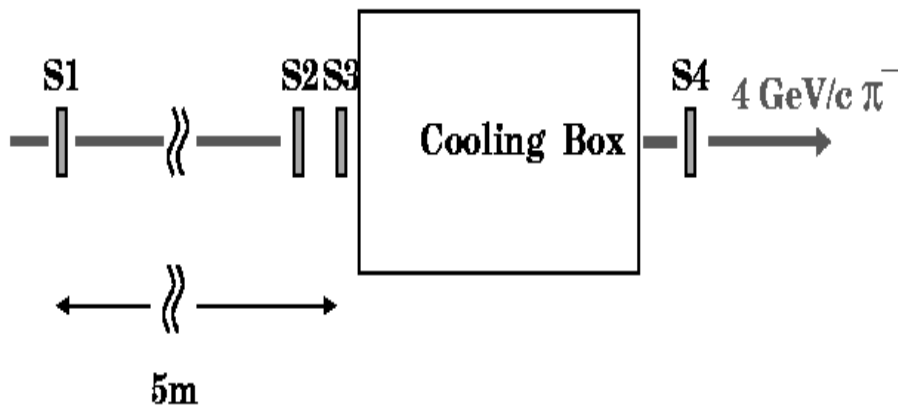


図 7: シンチレーターと冷却箱の配置. S1~S4の4枚のシンチレーションカウンターでトリガーをかける.

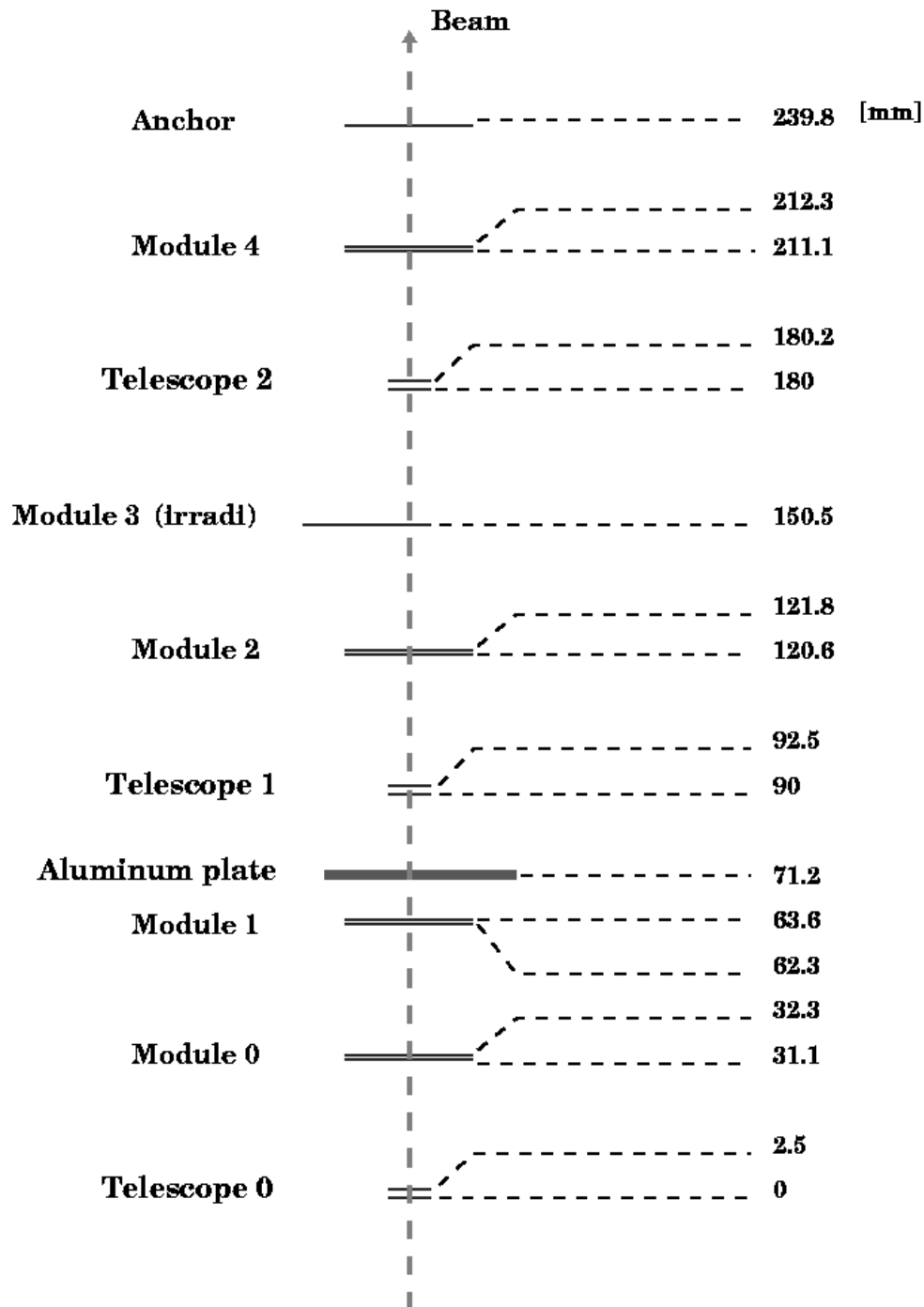


図 8: 冷却箱内の検出器の配置. 中央付近のアルミニウムプレートの厚みは 6mm.

3.3 モジュールの位置分解能の評価

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 Telescope を用いて行う。Telescope のビーム通過位置の情報から、

- まず、Telescope0, 2 の 2 台のデータで直線を出す。
- その直線から得られる Telescope2 の通過位置と、実際に検出した Telescope1 の通過位置との差を出す。
- 各 Telescope に複数の通過位置の情報があれば、差が最も小さなものを選ぶ。

その差が $150\mu\text{m}$ 以内 (Telescope のストリップの 3pitch 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。両面ともに条件を満たさなかった場合は、その時のイベントは用いない。

3.3.2 クラスタ中心点の作成

ビームが 1 度通過する際に、信号を出すチャンネルはほとんどの場合一つだけなのであるが、2 つ以上のチャンネルが信号を出すこともある。要因としては、ビームが 2 つのチャンネルの中間付近を通り、出来たキャリアが 2 つのチャンネルに分かれて検出された場合などが考えられる。このような状況に対して、次のような処理を行い、通過位置を一点に定める：

- チャンネルが 1 つだけなら、そのチャンネルの中心点
- チャンネルが 2 つ以上であれば、その中間の位置

クラスタ中心点は図 9 の様になる。この処置によってテスト検出器におけるビームの通過位置を一つに定める。

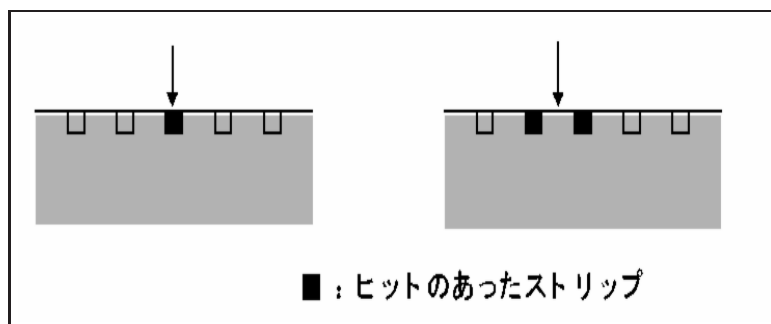


図 9: テスト検出器のクラスタ中心点.

3.3.3 位置分解能

Telescope から算出したテスト検出器上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クラスター中心点との残差をとる。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、Telescope 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、その中にクラスター中心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定義する (図 10)。

縦軸に定義した位置分解能を、横軸にスレッシュホールドをとり、その関係を図 11, 12 に示す。図中において、両面あるテスト検出器のビーム上流側を Link0, 下流側を Link1 と表している。

図 11 に Module0, すなわち放射線損傷を与えていない検出器, 図 12 に Module3, すなわち放射線損傷を与えた検出器のスレッシュホールド依存性を示した。これより, 0.8 ~ 3fC の区間において, 放射線損傷を与えていないものは $26 \pm 1.5 \mu\text{m}$ 程しか位置分解能が変化せず, スレッシュホールド依存性が少ないことが分かる。放射線損傷を与えたテスト検出器に対しても, 同様のことが言える。

特に, バイアス電圧 200V および 250V での位置分解能は, フィッティングの際の標準偏差の上限値を $80 \mu\text{m}$ としているのだが, それでも平均して約 $50 \mu\text{m}$ とかなり大きい (図 13)。

また, 同じ 200V のバイアスで見たときの分解能を, 共に Forward Module である Module1 と Module3 を比較してみた結果を図 14 に示すが, 分解能の差が $40 \mu\text{m}$ 以上もあり明らかに損傷を受けた Module3 の方が分解能が落ちていることが分かった。

Module1, 2, 4 の位置分解能のスレッシュホールド依存性についてそれぞれ図 15, 16, 17 に示す。Module1, 2 に関しては, 読み出しエレクトロニクスの処理が Module1 と異なり, 低い threshold においても大きくノイズを拾ってしまう形になってしまっている。Module4 に関しては全体的に位置分解能が高いのだが, これは Telescope の外側にあるためである。

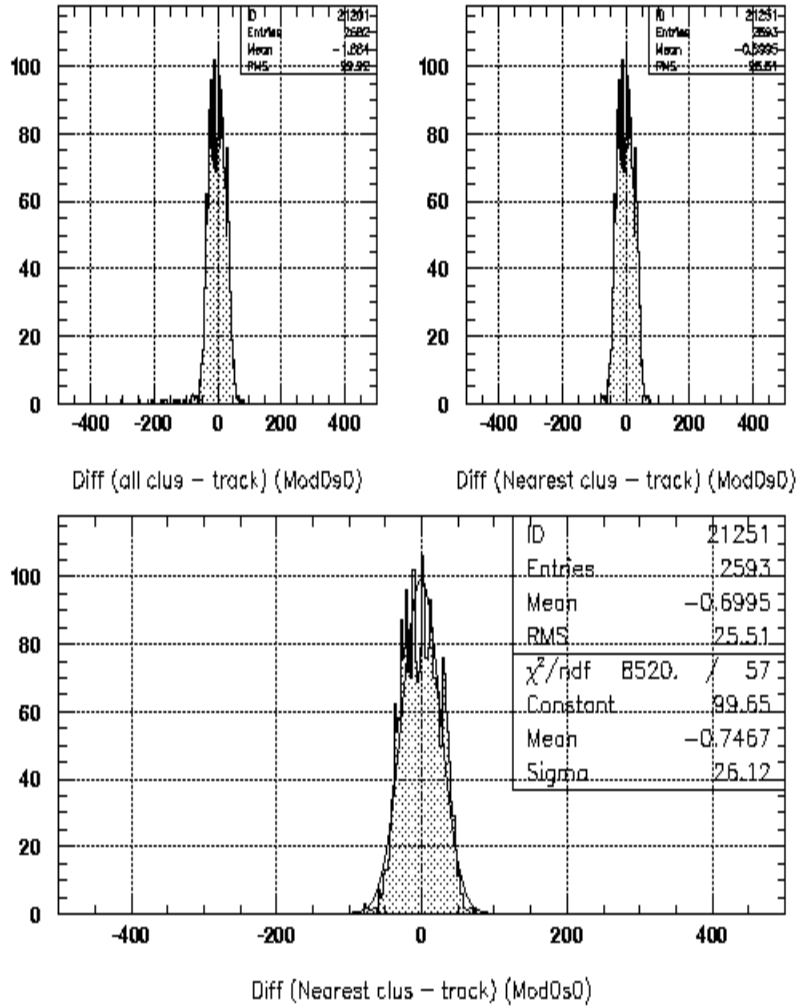


図 10: 位置分解能の決定を表す流れ図. (左上) 全てのクラスター中心点とビーム通過位置の残差分布. (右上) 前後5ストリップの領域での残差分布. (下) 右上図をガウスフィットしたもの.

すべての図において横軸の単位は μm .

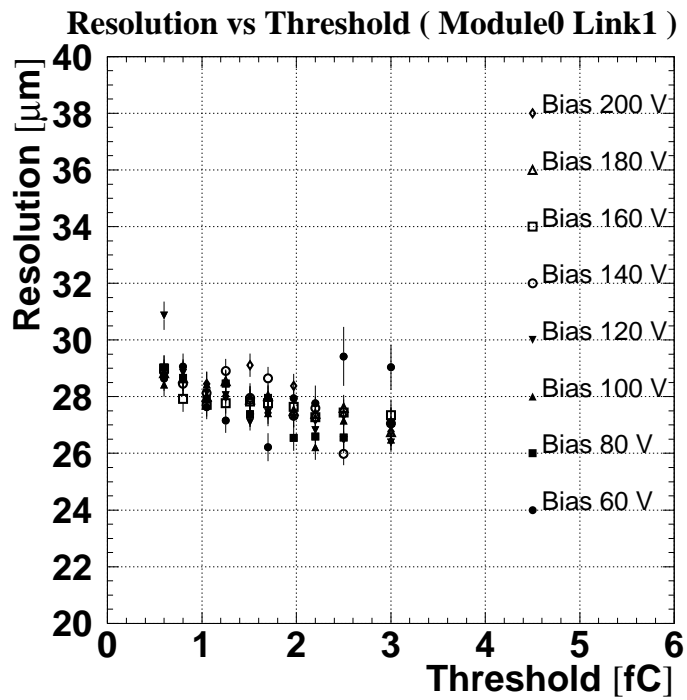
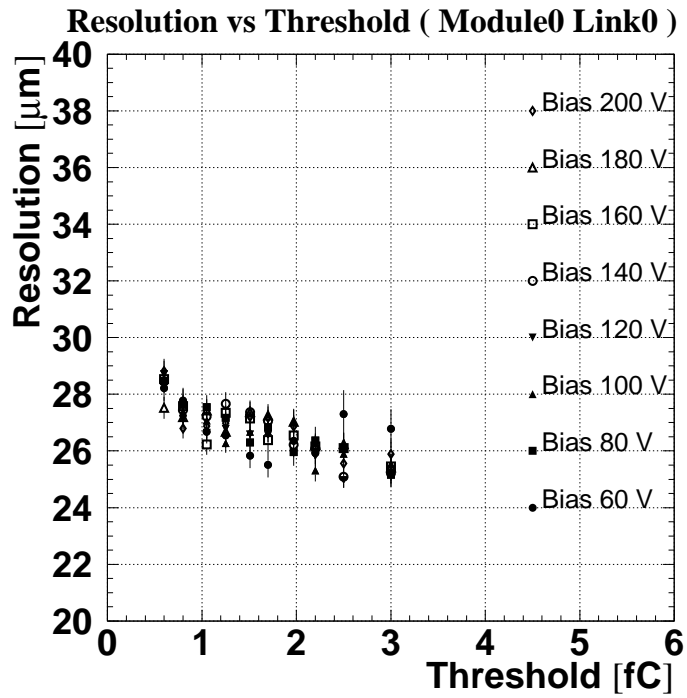


図 11: Module0 の位置分解能.

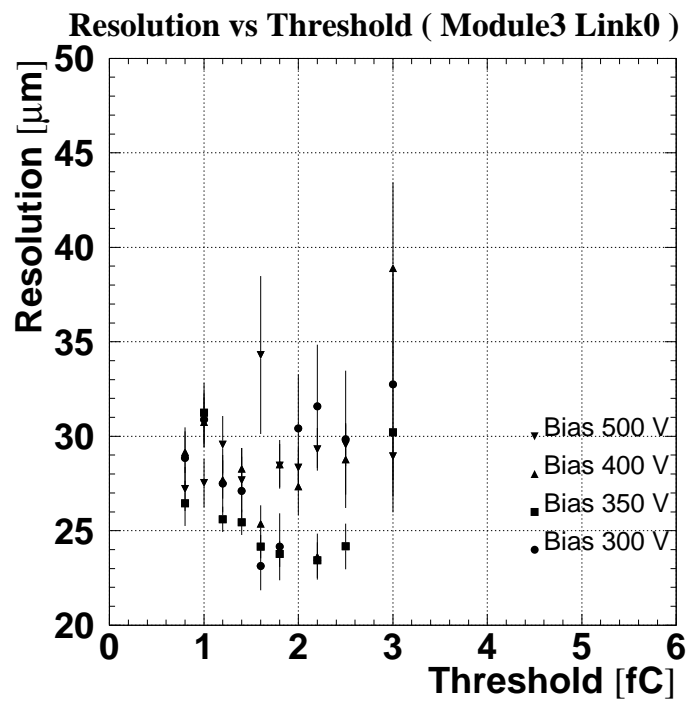


図 12: Module3 の位置分解能.

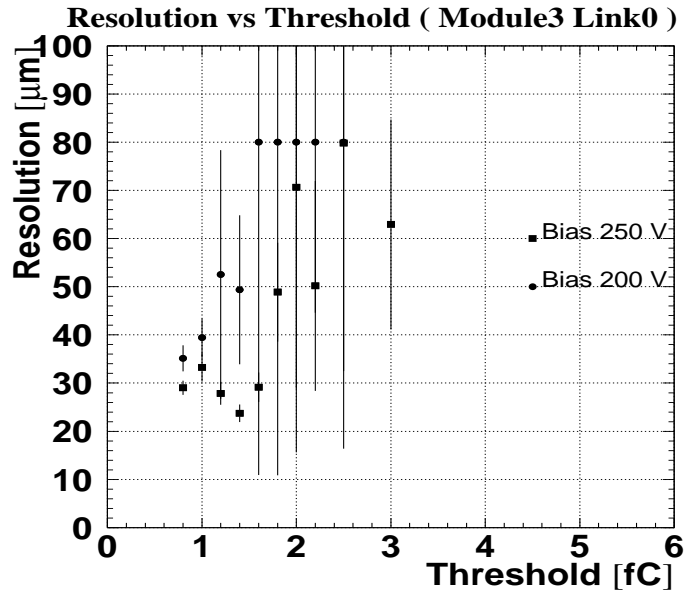


図 13: Module3 における低いバイアスでの位置分解能.

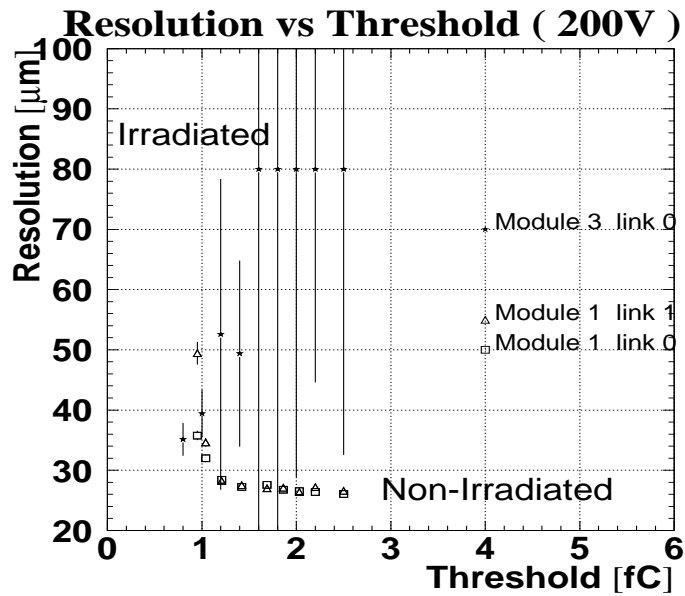


図 14: 200V における位置分解能の比較.

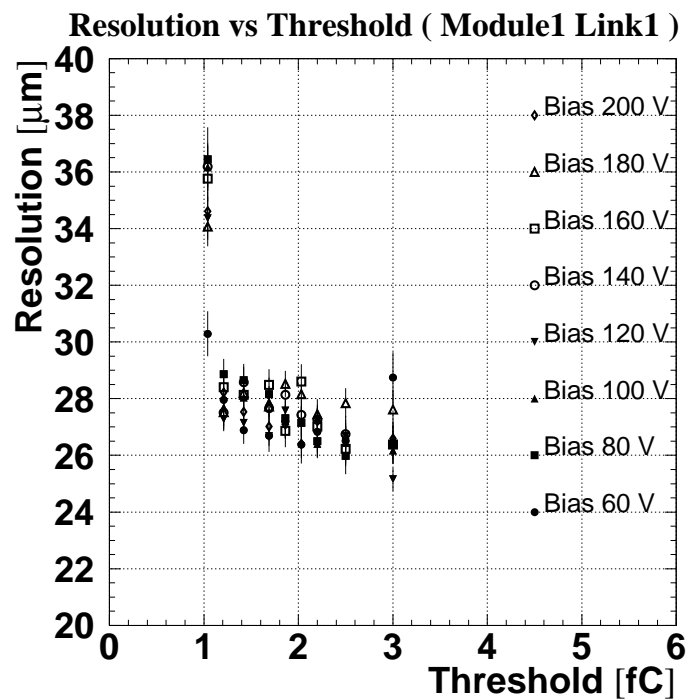
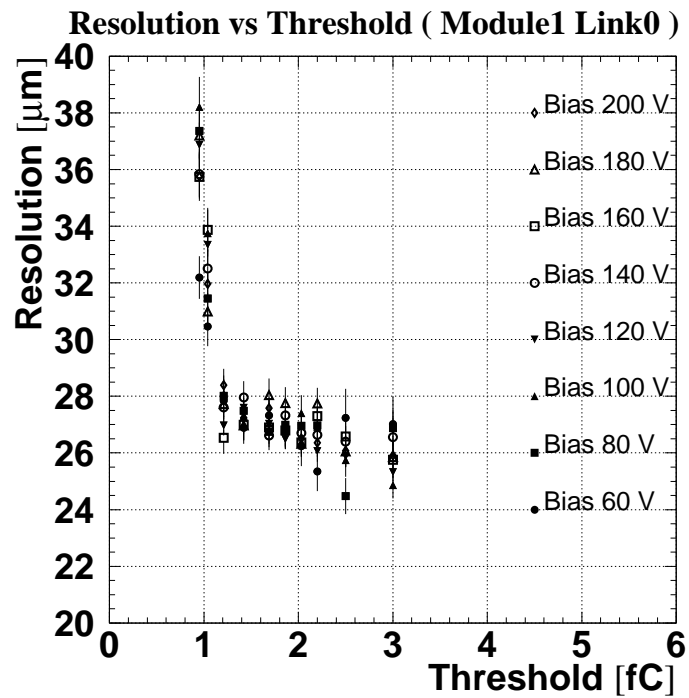


図 15: Module1 のテスト検出器の位置分解能.

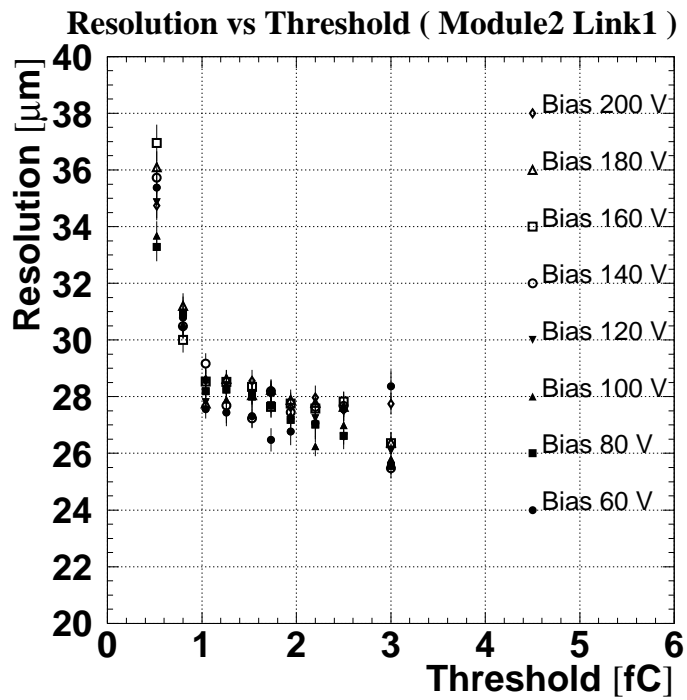
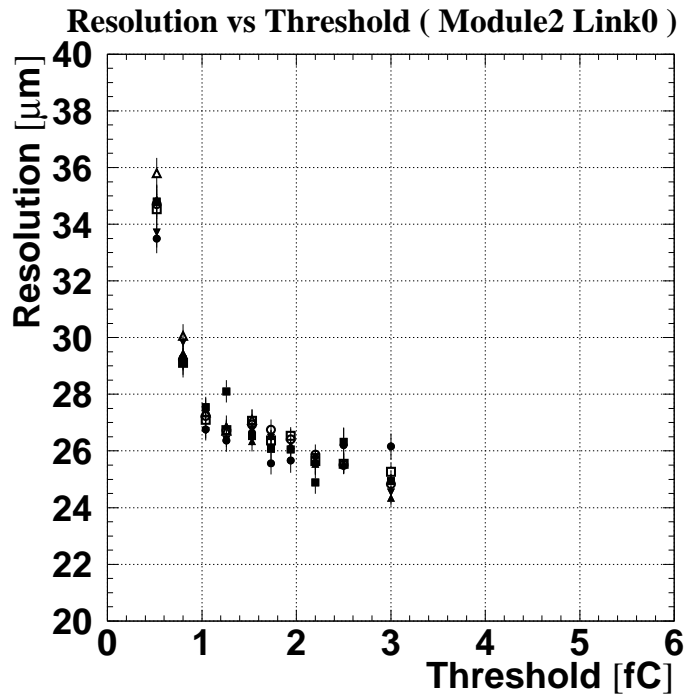


図 16: Module2 のテスト検出器の位置分解能.

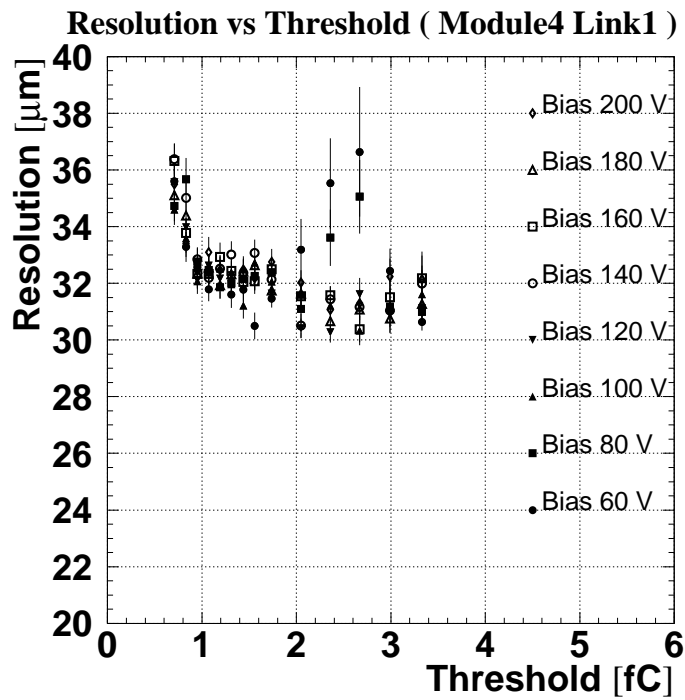
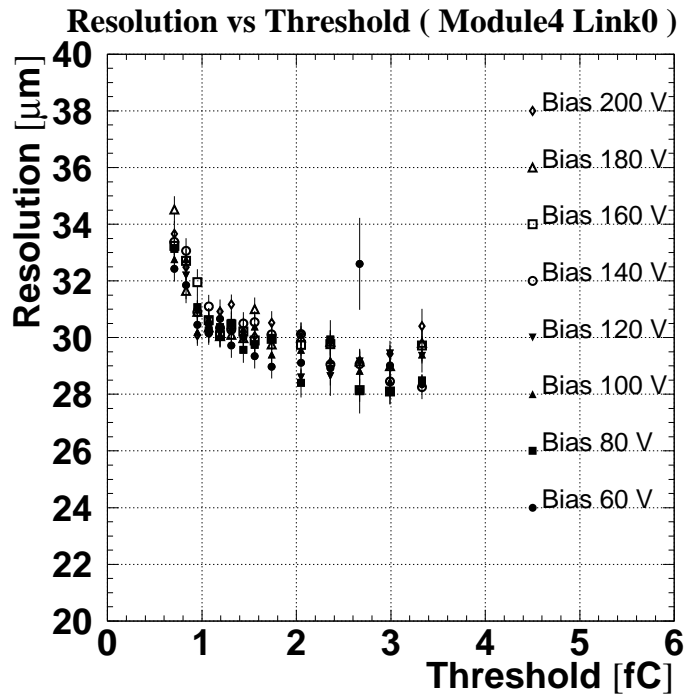


図 17: Module4 のテスト検出器の位置分解能.

3.4 モジュールの検出効率

3.4.1 検出効率のスレッシュホールド依存性

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。

モジュール上の粒子の通過位置は Telescope 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、その中にクラスター中心点があれば、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ー中心点の数を N_{Exp} 、上の条件を満たしたクラスター中心点の数を N_{Real} と置けば、1 イベントでの検出効率 ϵ は次のように表される。

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

クラスター中心点は一つしかないので、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 だけこれをを繰り返し、次の式から検出効率を定めた。

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

誤差に関してであるが、 N_{Real} は先に述べたとおり二項分布

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

に従うので、その分散は $N_{Exp}\epsilon(1 - \epsilon)$ となる。

よって、検出効率の分散は、

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

となる。

グラフから、検出効率の分布を見て取ることが出来る。

実際の実験における SCT のデータテイクは、ある1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 [4]。得られた分布図から、放射線損傷を受けていない Module0 (図 18) においては、検出効率が 98%以上と良好な値を得ていることが分かる。放射線損傷を与えた Module3 (図 19) に関しては、低いバイアス電圧において、例えば 200V においては 40%未満と効率が低い。

Module 1, 2, 4 の検出効率についてそれぞれ図 20, 21, 22 に示す。それぞれ Module1 と同じく高い効率が得られている。

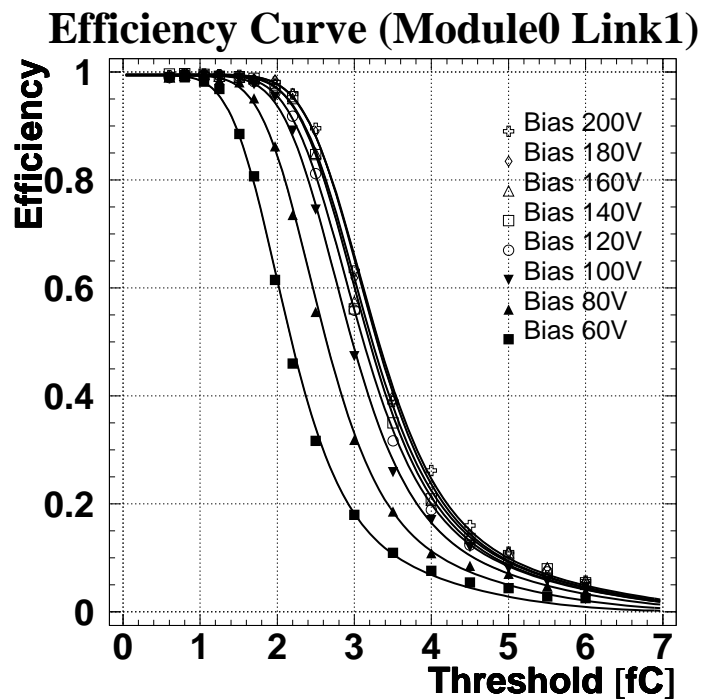
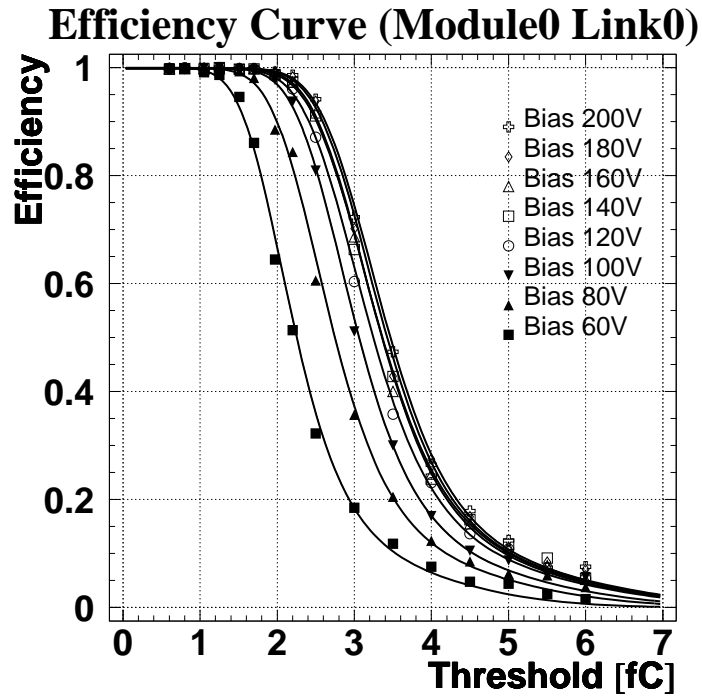


図 18: Module0 の検出効率.

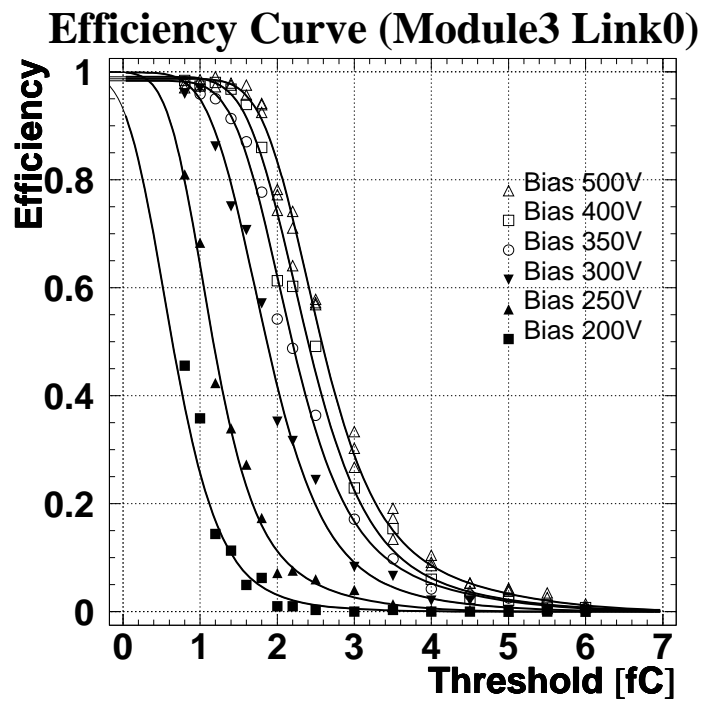


図 19: Module3 の検出効率.

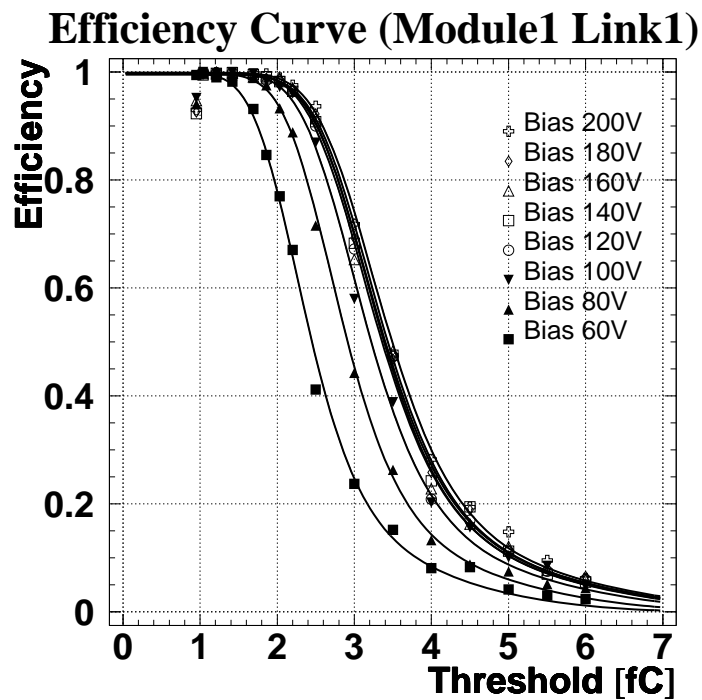
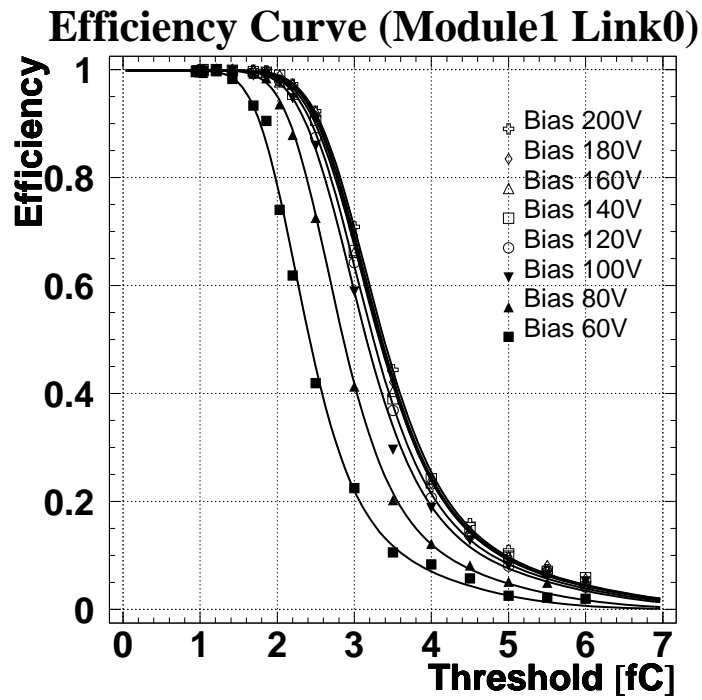


図 20: Module1 の検出効率.

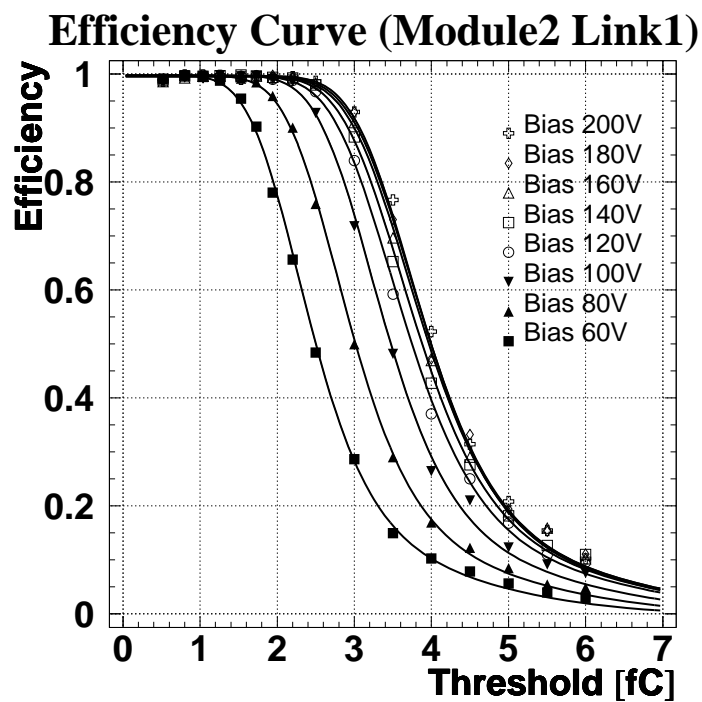
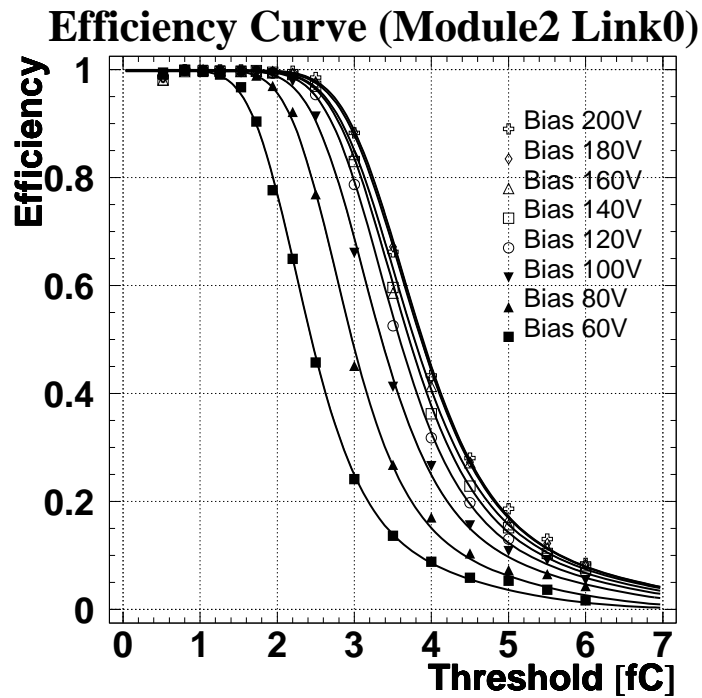


図 21: Module2 の検出効率.

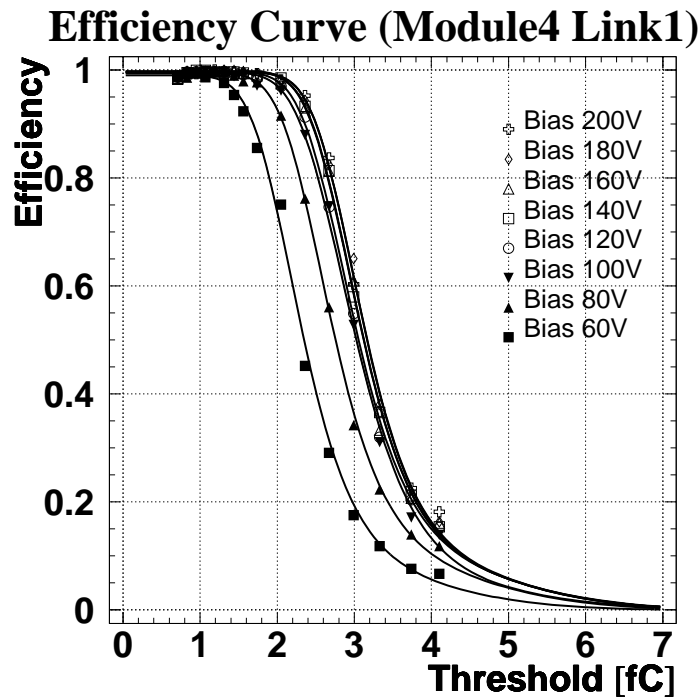
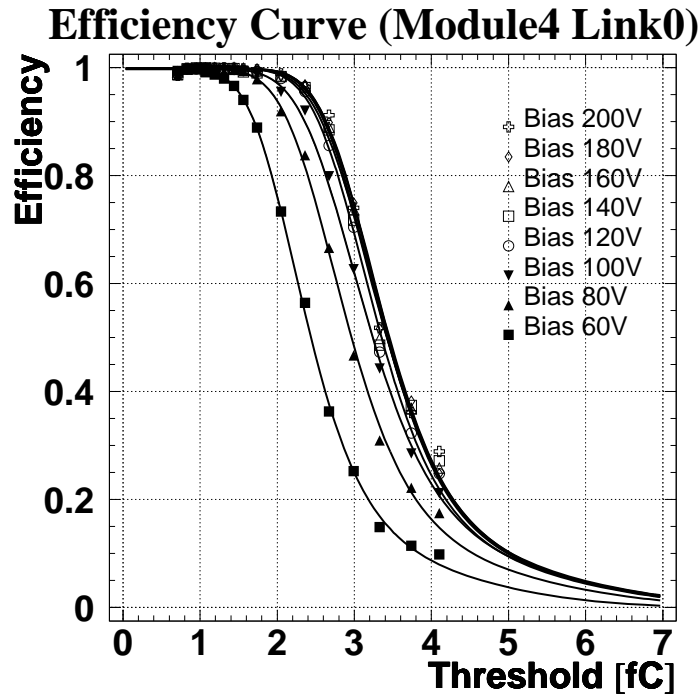


図 22: Module4 の検出効率.

3.4.2 ミディアンチャージのバイアス依存性

この実験で扱っている SCT モジュールは 2 値読み出しを採用しているため、得られる信号のパルスハイトの情報を直接得ることは不可能である。しかし、あるスレッシュホールドにおける efficiency 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ため、efficiency が 50% でのスレッシュホールドの値がパルスハイト分布におけるミディアンチャージになる。

一般に、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、efficiency 50% でのスレッシュホールドの値を出す。これらから、その時にかけていたバイアス電圧依存性を知ることが可能となる。

前の検出効率のスレッシュホールド依存性を表す分布図から、各バイアス電圧ごとにミディアンチャージの値を出し、縦軸にミ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 23 にこれを示す。

Module2 に関しては、厚みが $325\mu\text{m}$ であるため、他と比較するために補正を行っている。バイアスは厚みの 2 乗に、収集電荷は厚みにそれぞれ比例するので、Module2 のバイアスに $(285/325)^2 \approx 0.77$ を、ミディアンチャージに $(285/325) \approx 0.88$ をかけたものをプロットしている。

高バイアスになるに従って、曲線の変化はだんだん緩やかになり、一定の値に近づく。これは、検出器が full-depletion voltage 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表している。

放射線損傷の有無から評価すると、与えていないモジュールはどのモジュールもほぼ同じく、約 130V で 3.4fC 付近に飽和していることが分かった。これにより、検出器を扱う際に 130V 付近で用いることが望ましいと結論できる。与えているものに関しては、500V をかけてみてもまだ飽和状態に至っていない傾向が見られた。

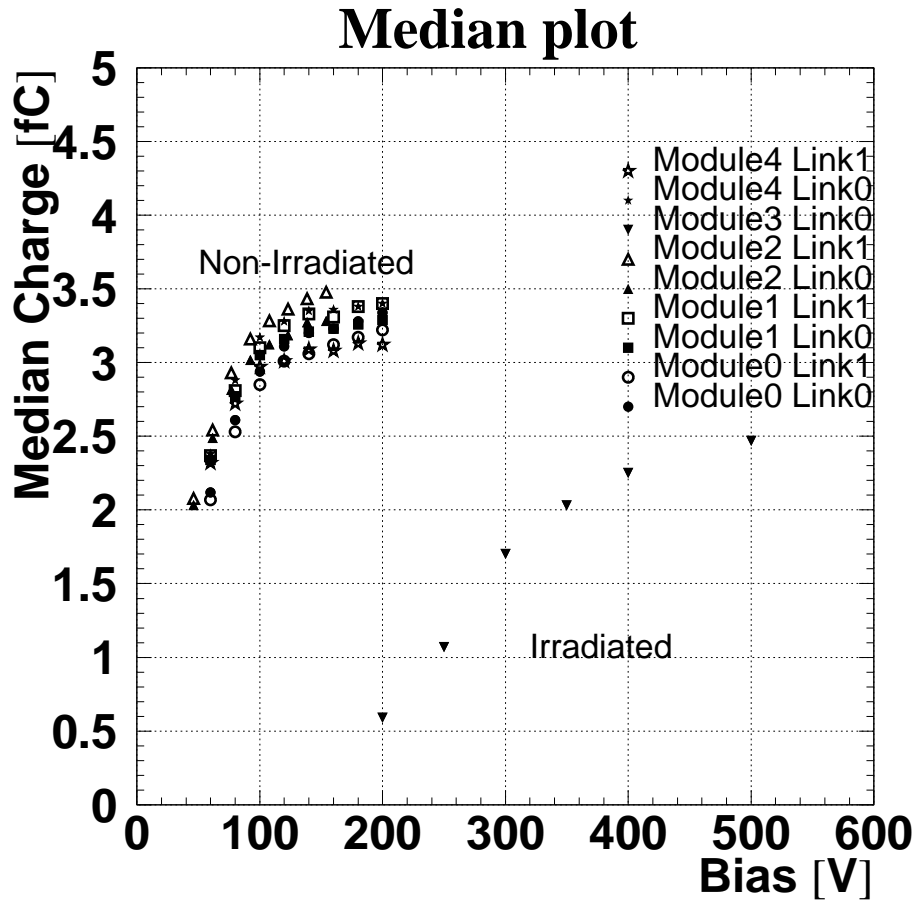


図 23: 各テスト検出器のミディアンチャージのバイアス依存性.

3.4.3 ストリップ間領域でのメディアンチャージの評価

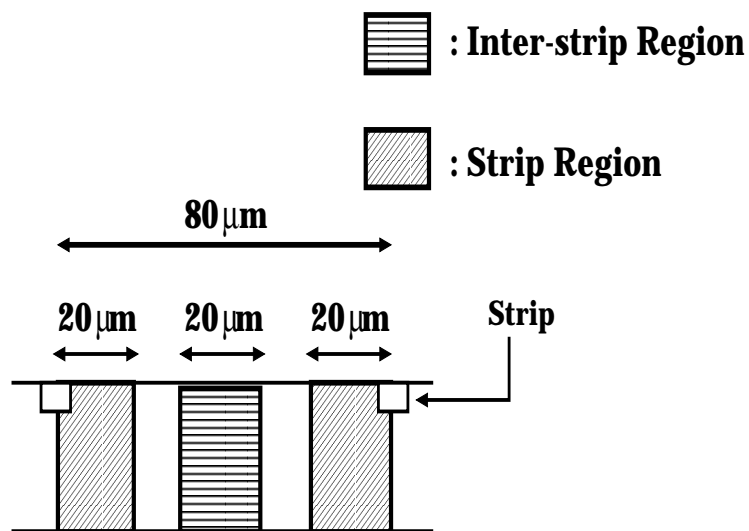


図 24: ストリップ間領域とストリップ領域

入射領域に対してストリップの中心から $\pm 20\mu\text{m}$ をストリップ領域, 中央部分 $20\mu\text{m}$ をストリップ間領域として(図 24)別々に検出効率を測定し, ストリップ間領域のストリップ周辺領域に対するメディアンチャージの比率を求めた. 図 25 に示す.

放射線損傷を与えていない検出器については, まずバイアス電圧に依存せず, ほぼ一定値であることが分かった. 損傷後のモジュールとの比較については, 損傷を与えていないものが約 0.85 ~ 0.9 の間にあるのと比べて 300V 以上のバイアス電圧をかけても比が 0.8 と悪く, 電荷の収集率が低くなっているのが分かる.

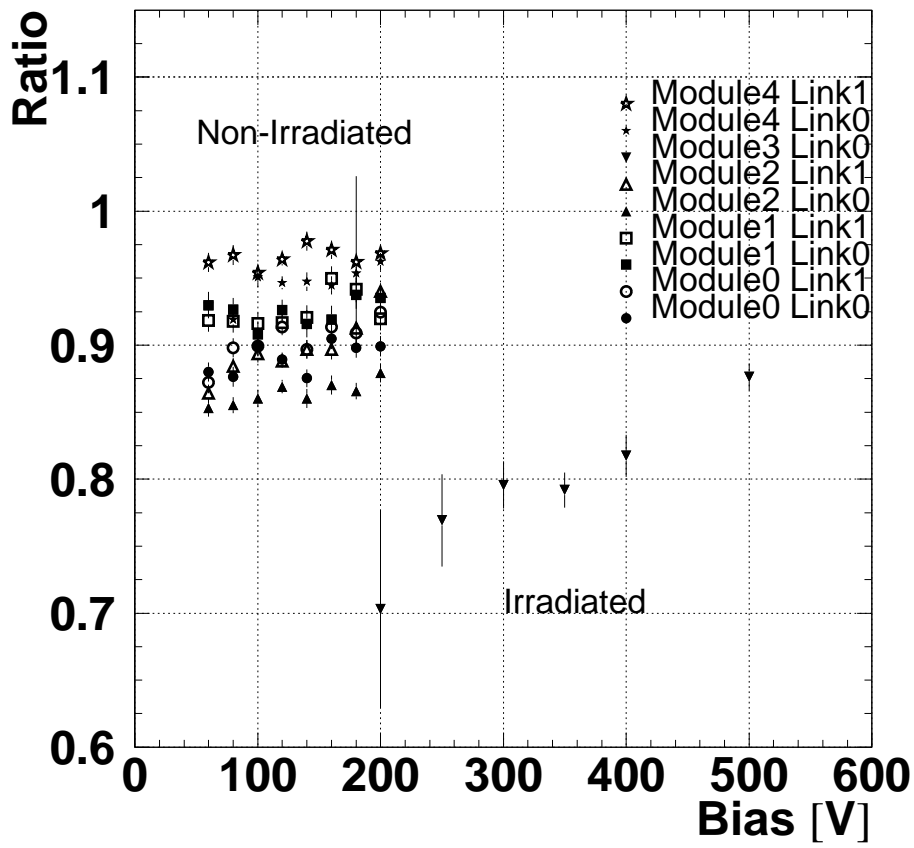


図 25: ストリップ間領域/ストリップ領域のメディアンチャージの比を示した分布図.

4 結論

1999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 ATLAS 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、プロトタイプであるが、シリコンストリップセンサー・読み出しエレクトロニクス・部品・製造方法等と同じくしたフル装備のモジュールを複数台並べて行った最初のテストである。

位置分解能について、放射線損傷を与えていないものは、Module0 を例にとると $0.8 \sim 3.0\text{fC}$ において、 $26 \pm 1.5\ \mu\text{m}$ 程度の变化であり、スレッシュホールド依存性が少なかった。放射線損傷を与えていたモジュールの位置分解能もまた同様なことが言える。また、損傷を与えていないものとの同バイアスでの比較の結果から、分解能の差が $40\ \mu\text{m}$ 以上もあり、かなり落ちていることが言える。

検出効率については、3つのアプローチを行った。

検出効率のスレッシュホールド依存性を示す分布から、放射線損傷を与えていないモジュールにおいては、 1fC 付近において98%以上の値が得られているが、放射線損傷を与えたものに関しては、低いバイアスにおいては電荷収集率が40%以下であり、かなり小さい。

検出効率が50%となるスレッシュホールド、ミディアンチャージのバイアス依存性から、放射線損傷を与えていないモジュールはそれぞれ130V付近において3~3.4fCの辺りで一定になる傾向がみられた。これによって、検出器にかけるバイアスは130V付近を用いることが望ましいと結論づけられる。放射線損傷を与えたModule3については電荷収集量が小さく、バイアス500Vをかけても飽和がみられなかった。

ビームの入射位置に対して、ストリップとストリップの間の領域と、ストリップの周辺領域のそれぞれ別にミディアンチャージを求め、その比を出して分布を見た。放射線損傷を与えていないモジュールでの比は、バイアス電圧によらずほぼ一定であることが分かった。放射線損傷を与えたものに関しては、与えていないモジュールの比0.85~0.9とくらべると0.8付近と低く、ストリップ間に来た信号を拾っておらず、検出効率を下げていることが分かった。

上記の結果から、目的であるフル装備のモジュールの性能は、要求を満たしていたといえる。一方、放射線損傷を与えたModule3に関しては、センサーまたは読み出しチップ、あるいは両方が放射線損傷に対する要求を満たしていないことが分かり、これは今後の課題となる。

謝辞

指導教官である岡山大学・中野逸夫教授には、本研究を進めるきっかけであるビームテスト実験への推薦はもとより、学部4回生の頃から修士課程における今に至るまで、研究者としての在り方・研究の進め方など、あらゆる方面で指導なさってくれたことは感に堪えません。

また、高エネルギー加速器研究機構・海野義信助教授には、ビームテスト実験からオフライン解析において至るところで尽力して頂き、本当にありがとうございました。

岡山大学・田中礼三郎助教授には、この研究内容に対する数々の助言を頂きましたことで、論文の成果が洗練されたことは間違いなく、感謝いたしております。

オフライン解析の方面において、昨年度の解析の経験から様々なことを教えて下さった、研究室の博士後期課程1年・山下智弘先輩や、プログラミングの知識が未熟であった自分を支えてくれた河野行紀先輩、博士後期課程1年・谷本奈穂先輩、自分と同じく修士課程2年の清水佳之君や、岡山大学・宇宙線研究室修士課程2年の小島貴之君達には色々とお世話になりました。

最後に、1999年12月のビームテストの間、共にテストを行った KEK, 各大学の共同実験者の方々に感謝します。

参考文献

- [1] ATLAS detector and physics performance Technical Design Report Volume I, 25 May 1999
- [2] William R.Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments"
- [3] G.F.Knoll, "Radiation Detection and Measurement Third Edition", John Wiley & Sons, Inc., 2000
- [4] Y.Unno et al., "Evaluation of Radiation Damaged P-in-n and N-in-n Silicon Microstrip Detectors", KEK test Experiment
- [5] ATLAS Inner Detector Technical Design Report, CERN/LHCC/97-17, ATLAS TDR 5, 30 April 1997
- [6] Dario Barberis, "ATLAS Inner Detector developments", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A446, pp.331-337,2000
- [7] Y.Unno and On behalf of the ATLAS SCT collaboration, "ATLAS silicon microstrip Semiconductor Tracker (SCT)", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A453, pp.109-120,2000
- [8] L.Andricek et al, "Design and test of radiation hard p^+n silicon strip detectors for the ATLAS SCT", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A439, pp.427-441,2000
- [9] H.-J.Ziock et al, "Temperature dependence of the radiation induced change of dependence voltage in silicon PIN detectors", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A342, pp.96-104,2000
- [10] R.Wheadon, "Radiation tolerance studies of silicon microstrip detectors for LHC", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A342, pp.126-130,1994
- [11] T.Kondo et al, "Thermal simulation of ATLAS barrel SCT modules - I ", ATLAS Internal Note INDET-NO-201, 5 March 1998
- [12] 中尾将志, "ATLAS シリコン半導体の基礎特性", Okayama-Univ. Maste Thesis, 1997
- [13] 山下智弘, "ATLAS SemiConductor Tracker の研究", Okayama-Univ. Master Thesis, 2000

口頭発表

橋崎 徹,

河野行紀, 谷本奈穂, 山下智弘, 清水佳之, 中野逸夫,

佐藤 卓, 増田剛, 山本博基, 岩田洋世, 大杉 節,

荒井信一郎, 小林博和, 下島 真, 原 和彦,

高嶋隆一,

海野義信, 高力 孝, 近藤敬比古, 寺田 進,

池上陽一, 氏家宣彦,

G.Moorhead, J.Ludwig, K.Runge, Z.Dolzal,

” ATLAS SCT シリコンマイクロストリップモジュールのビームテスト”,

日本物理学会第 55 回年会, 平成 12 年 9 月 22 日