

CERN180GeV π^+ ビームを用いた
ATLAS シリコン検出器の性能評価

M1479003 井本 昭子

広島大学大学院博士課程前期
理学研究科物理学専攻
高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

平成16年2月10日

概要

物質の最小構成要素はクォークとレプトンの 12 種類の素粒子である。それらの粒子の間では、ゲージ粒子であるグルーオン・光子・W/Z 粒子が交換されて力が生じている。この世界では「標準モデル」とよばれる理論が存在し、それからはずれた現象はまだ 1 つも見つかっていない。しかし、標準モデルになくはならない「ヒッグス粒子」のみが現在の時点でまだ見つかっていない。

CERN 研究所で、2007 年から LHC 加速器が稼働し始める。LHC 計画とは、陽子・陽子衝突をさせて重心系エネルギー 14TeV の高エネルギー領域でヒッグス粒子や超対称性粒子などの未知の粒子を発見し、物質の究極の内部構造と相互作用を探求することが目的である。生成されたヒッグス粒子は瞬時に 2 次粒子に崩壊してしまう。2 次バーテックス標識の決定や精密な飛跡検出は、ヒッグス粒子や超対称性粒子探索のみならず多くの測定で重要である。したがって、より位置精度の良い飛跡検出を行なうために飛跡検出器は衝突点に近い一番内側に設置される。しかし、そのために 10 年間の実験期間中に 3×10^{14} particle/cm² の放射線損傷を受けてしまう。また LHC のバンチ衝突間隔 25ns ごとに数百億個の粒子が生成するので、ATLAS 検出器では荷電粒子の飛跡検出に高速で大量のデータを処理しなければならない。そのためにバイナリー読み出しをするシリコンマイクロストリップ検出器に放射線耐性に優れた ASIC を搭載したものを採用している。このシリコン検出器は 1536 チャンネルの読み出しをするものが全部で 2112 個設置される予定である。放射線損傷を受けたシリコン検出器は性能が劣化してしまうため、そのようなシリコン検出器の振る舞いを調べておく必要がある。

そこで本研究では、2003 年の 5 月に 180GeV の π^+ ビームを用いて、CERN・H8 施設で行なわれたビームテストの解析をした。ビームラインには疑似ラピディティの大きい領域をカバーするエンドキャップタイプと小さい領域をカバーするバレルタイプの 2 種類のシリコン検出器計 12 枚を、同時に π^+ ビームが通過するようにを交互に設置した。その内 7 枚のシリコン検出器には事前に放射線損傷を与えたものを用意した。その前後にはテレスコープ、最前にはトリガーのためにプラスチックシンチレータを設置した。テレスコープヒット情報から reconstruct されたビームと、シリコン検出器のヒット情報から reconstruct された飛跡を比較して解析イベントの選別を行なった。

解析手法は、ビームテストで収集されたデータを offline 時に C++ プログラミングで書かれたマクロを ROOT 上ではしらせることによって結果を得た。位置分解能やシリコンにかけるバイアス電圧と検出効率を調べることにより、放射線損傷を受けたシリコン検出器の性能を評価した。その結果、放射線損傷を与えたものはキャリブレーションスケールに依存しない信号雑音比の値が悪くなることが分かったが、これはシリコン半導体の空乏化が不完全であったと考えられる。しかし、10 年分の放射線損傷を与えたものに関して言えば、バレルタイプには 300V、エンドキャップタイプには 350V のバイアス電圧をかけることによって完全空乏化が成されることが分かった。また、解析に使用できる信号を出すことも確認した

目次

第 1 章	序論	3
第 2 章	ATLAS 実験	5
2.1	LHC 計画	5
2.2	ATLAS 実験	6
2.2.1	ATLAS 実験の目的	6
2.2.2	標準理論ヒッグス	7
2.3	ATLAS 検出器	11
第 3 章	シリコンマイクロストリップ検出器	17
3.1	シリコンセンサーの動作原理	17
3.2	放射線損傷	18
3.3	バレルモジュールとエンドキャップモジュール	19
3.4	ABCD3T チップ	21
第 4 章	ビームテスト	24
4.1	セットアップ	24
4.2	読み出し	27
第 5 章	解析方法	30
5.1	DST フォーマット	30
5.2	イベント選別	31
5.3	位置分解能について	32
5.3.1	residual の定義	33
5.3.2	クラスターの扱い	34
5.4	トラック選別	35
5.5	読み出し ASIC の波高	37
第 6 章	結果と考察	40
6.1	位置分解能	40
6.2	読み出し ASIC の波高分布	41
6.3	ノイズオキュパンシー	45
6.4	検出効率	46

6.5 検出効率のバイアス電圧依存性	48
6.6 S-N 比	50
第7章 まとめ	52
参考文献	54

第1章 序論

物質の基本構成要素である素粒子はどんなものであり、それがどのような法則に従うのか、ミクロな世界の法則を知ることは、いつの時代においても物理学の中心課題の1つである。

ゲルマンのクォーク模型は1980年代に、「標準模型」というゲージ場理論の本質的モデルへと発展、到達した。現代の素粒子論は、一応この標準模型をもって代表されるといってよい。しかし、素粒子の質量の問題をはじめとして、未解決な問題がいくつもあることから、標準模型をもって素粒子が完結するわけではない。

標準模型では、初めゲージ場や基本粒子は質量をもたないものとしてラグランジアンの中に導入され、質量は対称性の破れの結果発生したものと解釈される。対称性の破れを起こさせる目的でヒッグス場とよばれる補助場が仮定されている。ヒッグス場は $SU(2)_L$ の粒子数を担う2重項組の複素スカラー場で、その真空期待値 ν ($\sim 250\text{GeV}$) が対称性を破るとともに質量のスケールを与え、個々の質量の粒子はヒッグス場との結合定数に比例する。対称性の破れたヒッグス場成分はゲージ量子 W^\pm と Z^0 も縦波成分となり、残りの1成分は中性のヒッグス・ボソンとして現れる。

標準模型の中にはヒッグス場の真空期待値 ν や、いろいろな結合定数など、現象論的パラメータがたくさん含まれている。これらのパラメータを全て決定することは、ヒッグス・ボソンの存在の検証とともに、標準模型に残された最後の大きな課題である。現在までは、CERN(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)・LEP 加速器を使って $W \cdot Z$ ボソンの超精密測定や、TEVATRON におけるトップ・クォークの発見などにより、標準モデル理論が高い精度で成立していることが証明された。そこで、標準理論において唯一発見されていないヒッグス・ボソンの発見および標準理論を越える超対称性や新しい相互作用などの発見を目指してLHCの建設が始まった。このLHC加速器の衝突点の内の1つに、ヒッグス粒子探索を主な目的としたATLAS検出器が建設中である。生成されたヒッグス粒子は瞬時に2次粒子に崩壊してしまうために、ATLAS検出器では衝突点に近い場所で、精度の良い飛跡検出を行なうことが可能なように、シリコンマイクロストリップ飛跡検出器を設置する。しかし、衝突点に近いことから、このシリコン検出器は10年間の実験のうちに $3 \times 10^{14} \text{particle/cm}^2$ の放射線を受けてしまう。半導体検出器はその放射線被曝による放射線損傷によってその性能を劣化させてしまうことはよく知られている事実である。したがって、LHC実験が開始されて10年後、放射線損傷を受けたシリコン検出器が支障なく使用できるかどうかを事前に調べておく必要がある。そのために、前もって放射線損傷を与えたシリコン検出器のビームテストが今日までに幾度と行なわれてきた。

2003年5月にもCERN・H8施設で10年分の予想損量 $3 \times 10^{14} \text{particle/cm}^2$ を被曝したものと、5年分の $1.5 \times 10^{14} \text{particle/cm}^2$ の放射線被曝を与えたシリコン検出器の性能評価を目的としたビームテストが行なわれた。また今回のビームテストでは $\sim 1.5\text{T}$ ($\sim 5000\text{A}$) の磁場環境をつく

ることによりビーム軌道を曲げ、そのトラッキング精度の測定も行なわれた。さらに、本番の LHC 実験と同じバンチ衝突間隔である 25ns においても、その電荷収集が十分に成されるかの確認も行なわれた。

そこで本論文では、このビームテストの結果を解析し、主に放射線損傷を受けた検出器の性能についての報告をする。

本論文の構成は以下のとおりである。

第 2 章にまず LHC 計画について簡単にふれる。その後 ATLAS 実験における目的および ATLAS 検出器の構成について述べる。第 3 章では、シリコン検出器の動作原理とその放射線損傷について、さらに実際 ATLAS 検出器に用いられるシリコン検出器の概要とその読み出し用 ASIC チップについて述べる。第 4 章では、今回行なわれたビームテストのセットアップとデータ収集のタイミングについて述べる。第 5 章では、オフライン時の解析において用いるツールキットとその解析手順について説明し、第 6 章でその解析結果、第 7 章にまとめをする。

第2章 ATLAS実験

2.1 LHC計画

LHC(Large Hadron Collider)とは、CERN(欧州原子核研究機構)において行なわれていた電子・陽電子衝突型加速器LEP(Large Electron Positron)実験に用いられていた、周長27kmのトンネルに超伝導磁石を設置した、重心系エネルギー14TeV、の陽子・陽子衝突型加速器であり、2007年より実験を開始、約10年間の稼働を予定としている。

最初の3年間のルミノシティーは $10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、4年後からは $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ に達する予定であり、ビーム衝突頻度は40MHz(25ns)と以前のものとは非常に大きく、また一回のバンチ交差当たりで予想される陽子陽子衝突は平均2-3回である。

以下にLHCの主要パラメータを示す。

LHCの主要パラメータ	
主リングの周長	26.66 km
陽子エネルギー	7.0 TeV
入射エネルギー	450 GeV
ルミノシティー	$10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (最初の3年) $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (4年目から)
バンチ衝突頻度	40MHz
バンチ陽子数	1.1×10^{11} 個
バンチ数	2835 バンチ
バンチ寿命	10 時間
双極電磁石数	1232 台 (長さ 14.2 m)
双極電磁石磁場	8.33 T

LHCでの物理における最大の目的は、電弱相互作用の自発的対称性の破れの解明といえる。標準理論で予想されるヒッグス粒子が存在するならば、1年間の実験により約1-10万個のヒッグス粒子が生成されるであろうとのシミュレーション結果もでていいる。さらに、LHCは従来にない高エネルギーで粒子の衝突が起こるので超対称性粒子などの未知の粒子や新しい相互作用などの出現する可能性も十分あるといえる。

このような多彩な物理を提供してくれるLHCではあるが、高エネルギーかつ高頻度衝突実験であるがゆえに、今まで経験したことのない膨大なバックグラウンドに直面してしまうことになる。したがって、LHC実験における成否は測定器の如何にかかっているといても過言ではない。

LHCには、4ヶ所の衝突点が存在しており、それらの衝突点には、14TeVの重心系衝突エネルギーを活用したTeV領域の素粒子の探索を行なう汎用検出器のATLAS(A Troidal LHC Apparatus)とCMS(The Compact Muon Solenoid)、衝突において大量に生成されたボトムクォークを用いてCP非保存の物理を研究するLHC-B、鉛原子核を高エネルギーで衝突させクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)を実験室で作ろうとするALICE(A Large Ion Collider Experiment)が図2.1のように設置されている。



図 2.1: LHC の全景

2.2 ATLAS 実験

2.2.1 ATLAS 実験の目的

LHCは今までにない高エネルギーでの粒子の衝突が起こるために、トップ・クォークの精密測定、ヒッグス粒子や超対称性粒子の発見など非常に多彩な物理成果が期待されている。一方、衝突頻度も高いために、ボトム・クォークやW粒子やZ粒子などのゲージ・ボソンの質量や崩壊過程の精密測定、QCD精密研究が可能である。

以下に、そのATLAS実験における主要な5つのトピックスを示す。

- 標準理論の精密検証

トップ・クォークの質量や部分崩壊率の測定を通して、標準理論の検証を行なう。また、WW対生成過程の研究を通して、電弱対称性の破れの可能性を探る。

- ヒッグス粒子の発見とその研究

素粒子の質量の起源である考えられているヒッグス粒子の発見は、真空中に凝縮していると考えられているスカラー場の直接的な証拠となる。

- ボトムクォークの精密研究

物質と反物質が非対称に存在していることを説明するとされている「CP 対称性の破れ」を、大量に生成される B メソンを用いて精密に測定する。さらに、ボトム・クォークの稀崩壊現象を探求することは、標準理論を超える新しい物理を提供してくれる可能性があるという点で重要である。

- 超対称性粒子の探索

標準理論を超える新しい素粒子現象を説明する超対称性は、最も有望視されており、ATLAS 実験で発見可能な領域に、数多くの新粒子の存在を予言している。

- QCD の精密研究

高い横運動量を持ったジェット・イベントの生成断面積の測定を通して、 10^{-18}cm の超微細なスケールで、現在、素粒子とされているクォークを観察することが可能となり、さらに内部構造が存在しないかを探求する。

2.2.2 標準理論ヒッグス

相互作用のかたちは、場の量子論（ゲージ場理論）にもとずいている。量子色力学（QCD）とワインバーグ・サラム理論を合わせた「標準理論」は、 1eV の原子の振る舞いから 100GeV までの現象を厳密に計算できる。しかし、原理として用いているゲージ理論が成り立つには、全ての素粒子の質量が厳密にゼロにならないけれども、実験的にクォークやレプトンは質量を持つことが分かっている。そこで「ヒッグス場」の存在を考える。ビッグバンから 10^{-13} 秒後、真空の相転移が起こり、ヒッグス粒子で満たされたヒッグス場とクォークやレプトンが反応し、その結果、質量を持っているように振る舞ってしまうというものである。したがって、ヒッグス粒子の発見はその相転移、すなわち電弱対称性 ($U(1) \times SU(2)$) の破れのメカニズムの理解に非常に重要であるといえる。

ヒッグス粒子の性質は標準モデルを使って計算することはできるが、その質量は計算することができない。しかし、ユニタリー条件の要請から 1TeV 以下であると見積もられている。また、電弱真空の安定性の要求からヒッグス粒子の質量の下限値はトップクォークを越えていなければならないはずである。そこで ATLAS 実験では、 $115\text{GeV} \sim 1\text{TeV}$ の領域でヒッグス粒子の探求を行なう予定である。

図 2.2 に、LHC における標準理論ヒッグス粒子の生成断面積を示す。

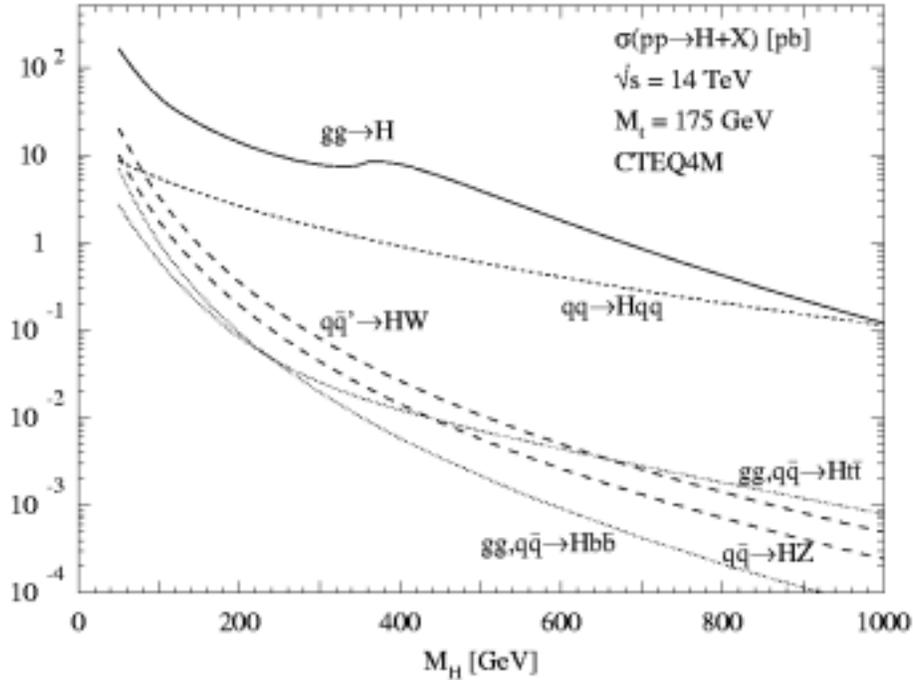


図 2.2: 標準理論ヒッグス粒子の生成断面積

また、陽子陽子衝突において主要な標準理論ヒッグス粒子の生成過程は以下の4つである。

(a) $gg \rightarrow H_{SM}^0$ (gluon fusion)

トップ・クォークやボトムクォークのループを介した過程で、最も断面積が大きい。しかし、ヒッグス粒子は単体で生成されるので、ヒッグス粒子が崩壊してできる粒子以外に大きな横運動量を持つ粒子がなく、バックグラウンドとの選別が厳しい。

(b) $qq \rightarrow qqH_{SM}^0$ (W/Z fusion Process)

2つのクォークから放出されたゲージ・ボソンからヒッグス粒子が生成されている。反応断面積も比較的大きく、ゲージ・ボソンを放出して反跳したクォークに起因する大きな横運動量を持つジェットが2本観測される。

(c) $qq \rightarrow (W/Z)H_{SM}^0$ (W/Z associate production)

クォークペアの対消滅で生成されたゲージ・ボソンから、さらにヒッグス粒子が放射される過程である。終状態にゲージ・ボソン (W/Z) が観測される。

(d) $qq/gg \rightarrow ttH_{SM}^0$ (top associate production)

対生成されたトップ・クォークから、ヒッグス粒子が放出される過程である。トップ・クォークの湯川結合という重要な情報を含んでいる。反応断面積は小さいが、特徴のあるトップ・クォーク・ペアを終状態に含んでいるのでバックグラウンドが少なく、軽いヒッグスには重要な過程であるといえる。

図 2.3 にこれら 4 つのファイマン・ダイアグラムを示す。

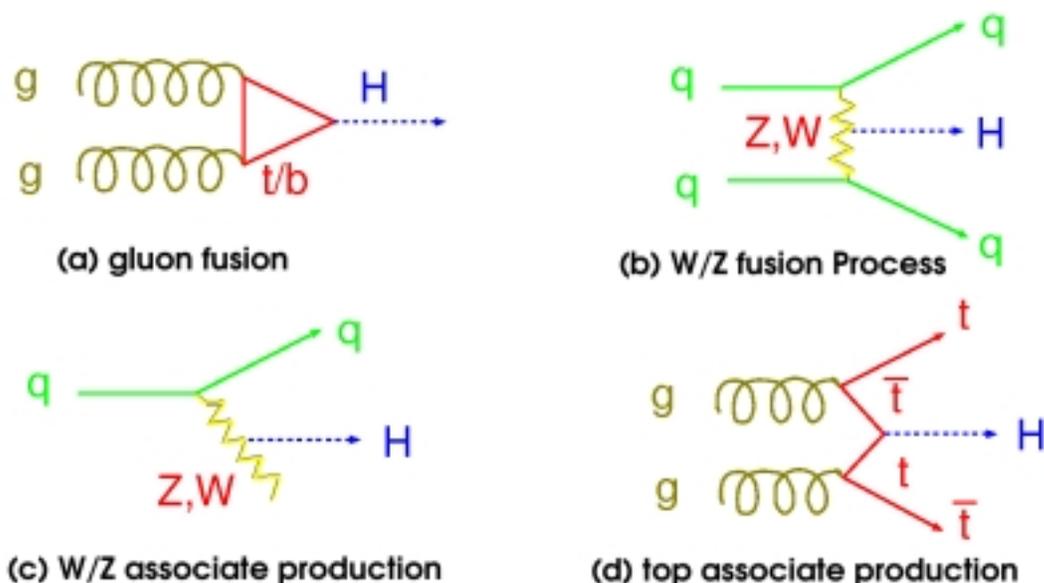


図 2.3: ATLAS における標準理論ヒッグス粒子の生成過程

次に、ヒッグス粒子の崩壊過程について述べていく。

図 2.4 に標準理論ヒッグス粒子崩壊過程の分岐比より、ヒッグス粒子の崩壊はヒッグス粒子の質量に依存していることが分かる。以下、ヒッグス粒子の質量領域にともなう崩壊過程についてそれぞれ述べていく。

- $80 \text{ GeV} < M_H < 120 \text{ GeV}$
この質量領域では、 $\tau^+\tau^-$ や $c\bar{c}$ への崩壊もあるが、 $H \rightarrow b\bar{b}$ への崩壊が支配的であると言える。しかし、高エネルギーでの陽子陽子衝突から引き起こされる QCD によるバックグラウンド $b\bar{b}$ 生成と区別することは困難なため、比率としては非常に低い $H \rightarrow \gamma\gamma$ に注目する。しかし、ここでも QCD バックグラウンドである $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$ や $g\bar{g} \rightarrow \gamma\gamma$ から生じる γ を $H \rightarrow \gamma\gamma$ と誤認してしまう場合がある。この事態を避けるためにも、エネルギーと分解能が優れた電磁カロリメータが要求される。
- $120 \text{ GeV} < M_H < 190 \text{ GeV}$
この質量領域では、徐々に $H \rightarrow WW$ への分岐比が大きくなり、ヒッグスの質量が 160 GeV になったときにその分岐比はほぼ 100% になる。この質量は W の 2 倍の質量にあたる。 WW への分岐比が増えると同時に $H \rightarrow ZZ$ の分岐比も増えてくるが、 WW を越えることはなく、ほぼ 1:2 の割合で平行していく。
- $190 \text{ GeV} < M_H < 500 \text{ GeV}$
 500 GeV 付近から、 $H \rightarrow t\bar{t}$ への分岐比が出てくるが、 WW や ZZ の分岐比を越えることはない。

- $500 \text{ GeV} < M_H$

M_H が 700 GeV 付近を越えた領域では、ヒッグス粒子の崩壊幅が広がってくるために、分岐比の最も大きい WW への崩壊過程を用いてイベント数を稼ぐことが重要となる。

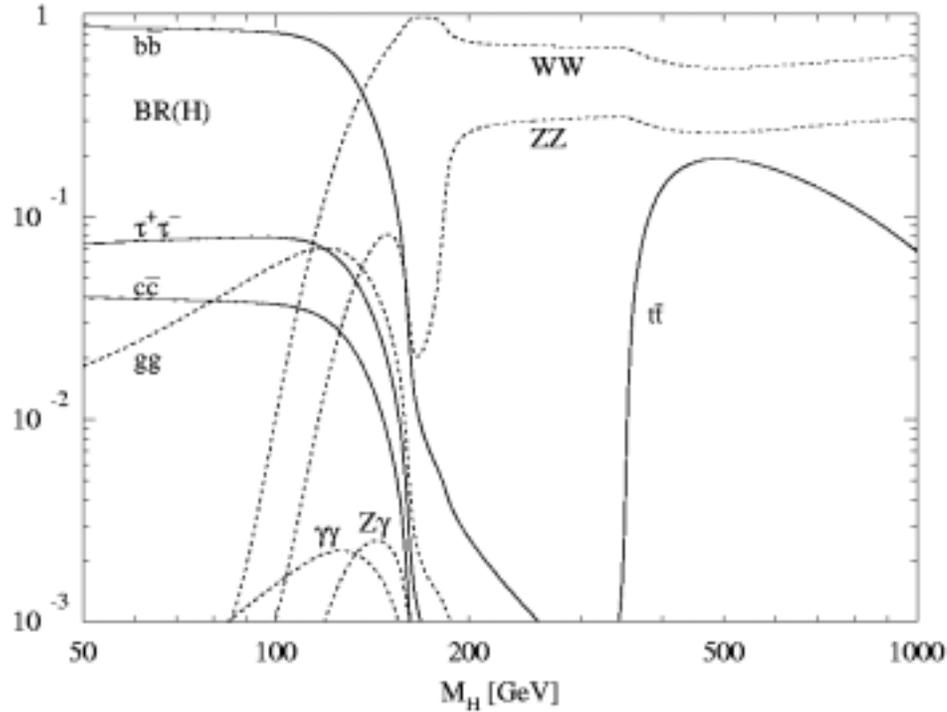


図 2.4: 標準理論ヒッグス粒子の崩壊過程分岐比

最後に、図 2.5 に ATLAS 実験における標準ヒッグス粒子の発見能力を示す。

130 GeV を境に軽い領域では top associate production が重要であり、重い領域では gluon fusion production と $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ が重要になってくる。また、 M_H がほぼ 160 GeV になったときには、 $H \rightarrow WW$ への分岐比が 100% になる。

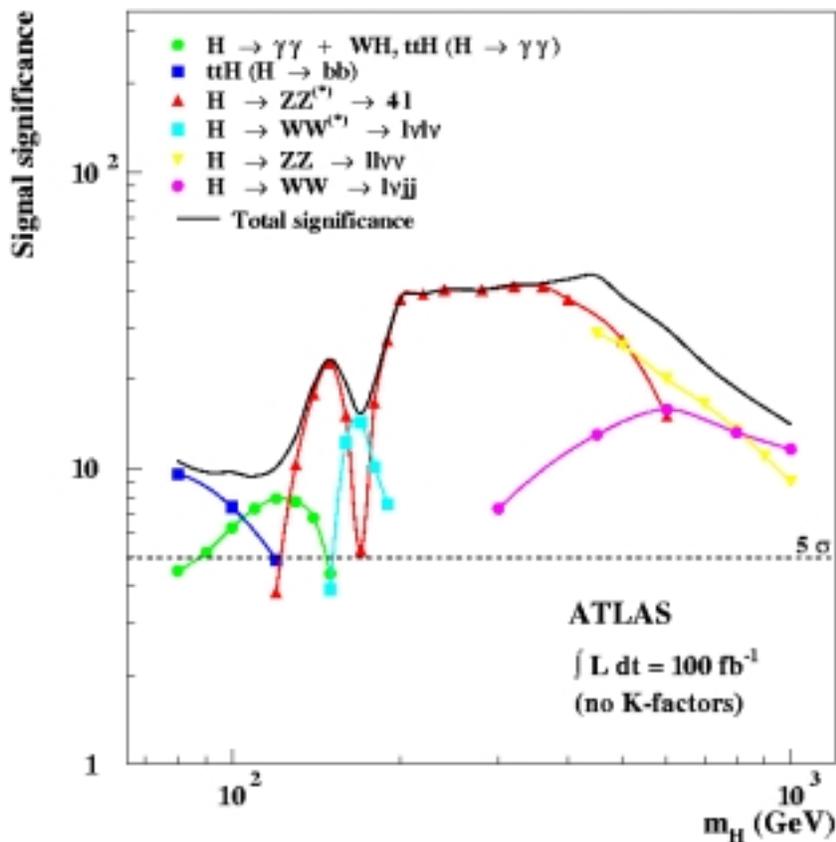


図 2.5: ATLAS のヒッグス発見能力

2.3 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は、直径 $22m$ 、長さ $46m$ 、総重量約 7000 トンという巨大なものであり、欧州・米国・日本など全世界 33 ヶ国から約 1700 人以上の研究者の合同チームによる国際共同実験として建設されている。ATLAS 検出器は LHC の最大ルミノシティにおいても、 e 、 γ 、 μ 、 jet 、 $missing E_t$ 、 b -tagging などできるだけ多くのシグナルをバランスよく確実に取り出せるような設計がなされている。ATLAS 検出器の内側から、内部飛跡検出器、ソレノイド磁石、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミュオン粒子検出器が設置されている。

図 2.6 に ATLAS 検出器の全体図を示す。

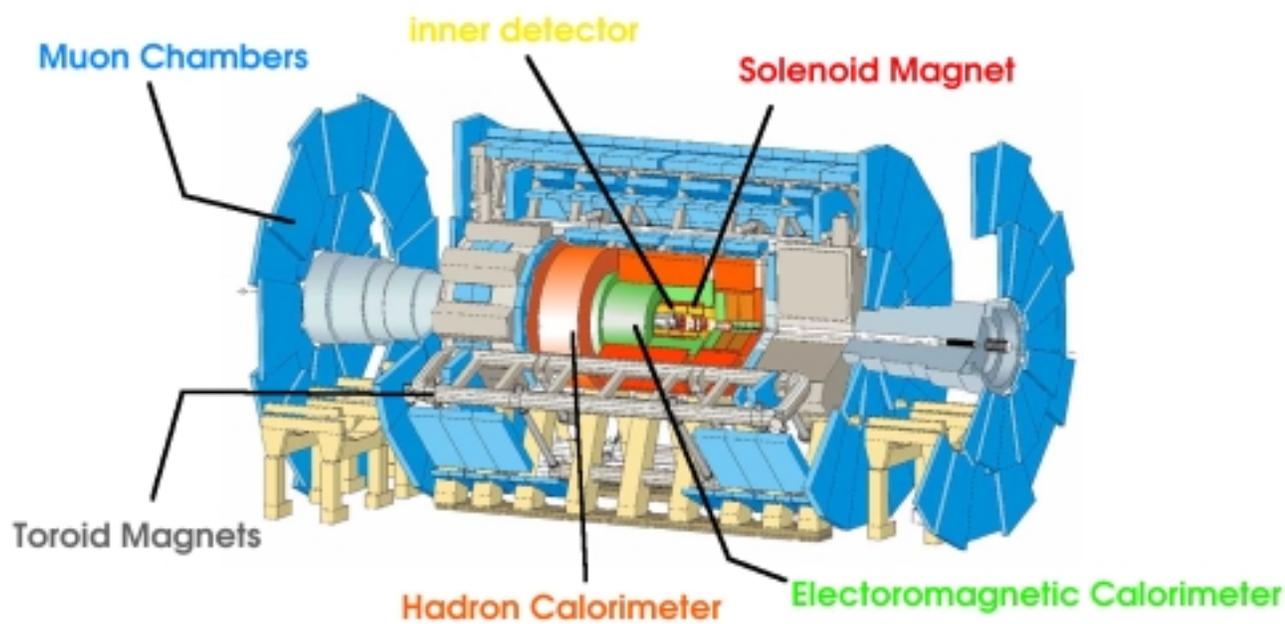


図 2.6: ATLAS 検出器

以下、それらの検出器についてそれぞれ述べる。

内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は ATLAS 検出器と比較すると非常に小さいが、直径 $2.3m$ 、長さ $7m$ の大きさである。この測定器の目的は、荷電粒子の飛跡認識、運動量測定、反応点測定、及び電子識別である。衝突点にもっとも近い位置に設置され、内側から高分解能測定器群として、3層からなるシリコンピクセル検出器 (Pixel)、4層からなるシリコンマイクロストリップ検出器 (SCT:Semiconductor Tracker)、その外側に連続的にサンプリングする飛跡検出器である遷移輻射検出器 (TRT:Transition Radiation Tracker) を置いている (図 2.7)。

ピクセル検出器は一つ一つのピクセルが $50\mu m \times 300\mu m$ の非常に小さな検出器であり、粒子密度の最も高いところに置かれ、その粒子密度の高さに応じた精度をもつことにより、荷電粒子のトラックを検出し精密に反応点測定を行なう。SCT は $23\mu m$ の位置分解能をもち、精度の良い飛跡情報を与える。4層のバレルシリンダーと前後9層のエンドキャップディスクで、 $-2.5 < \eta < 2.5$ の読み出し領域をカバーし、シリコンセンサーの読み出し面積はバレルで $34m^2$ 、エンドキャップで $27m^2$ である。また、シリコン面はシリコンマイクロストリップセンサーと読み出しエレクトロニクスから作られる「モジュール」と呼ばれ

る単位の検出器が使用されている。遷移輻射検出器は、小径 4mm のストロー検出器を多数層積層することによって構成されている。電子などの識別を行なうため、遷移放射を引き起こす物質がストロー検出器の間に挿入されている。さらにその外側に 2 T の超伝導ソレノイド磁石を設置することによって先にも述べた運動量測定が可能となる。内部測定器の大きな問題点は、これらのいずれの検出器も衝突点に近いことから厳しい放射線下に置かれていることと、カロリメータで発生した中性子が内部測定器に戻ってくるアルベルト中性子などによる放射線損傷である。またストロー検出器は 15MHz もの高計数運転に耐えなければならない。しかし、これらについての対策は精力的に行なわれ、解決法はほぼ確立されている。

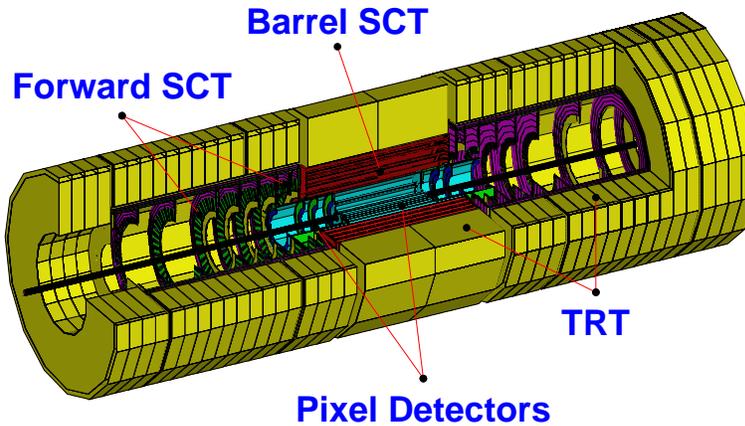


図 2.7: インナー・ディテクター

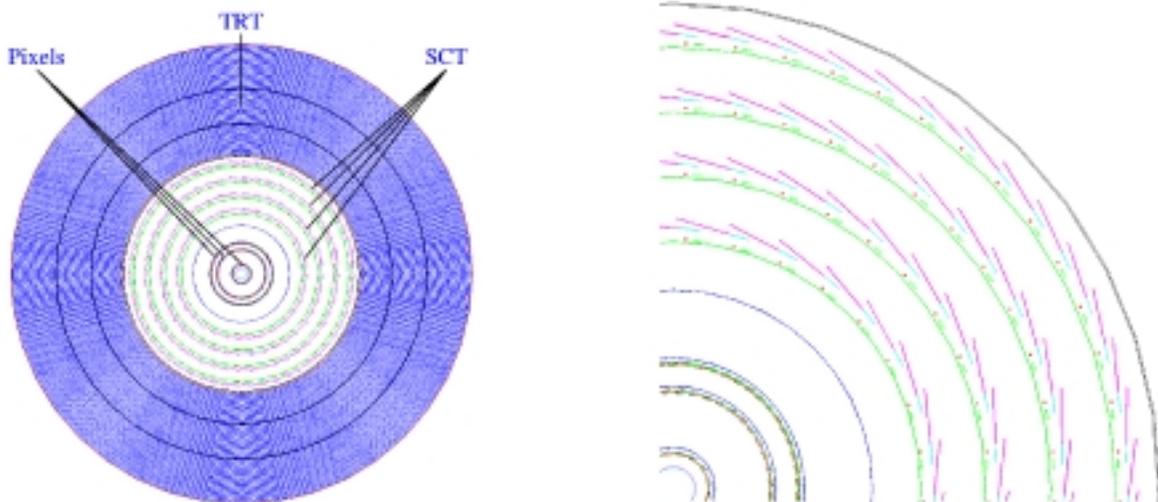


図 2.8: (左) インナーディテクターバレル部 $r\phi$ 方向のシミュレーション (右) SCT バレル部の拡大図

図 2.8 にインナー・ディテクターの $r\phi$ 断面のシミュレーションの図を示す。図中の円が飛跡検出をするそれぞれの層を表している。図の右側は Pixel 検出器と SCT 検出器の部分を拡大したものである。SCT 検出器において、図の緑色はそれぞれの検出器をサポートするものであり、赤い小さい丸で示しているのはパワーケーブルとクーリングのためのものである。ピンク色はシリコンセンサーを表しており、青色は読み出しボードである。また、図 2.9 に 2T の磁場環境における $p_t = 500\text{GeV}$ の荷電粒子に対して期待される運動量分解能を示す。低い p_t で significant が低いのは、半径の大きいところで複合散乱が測定効率を下げ、全体の分解能を制限するからである [1]。

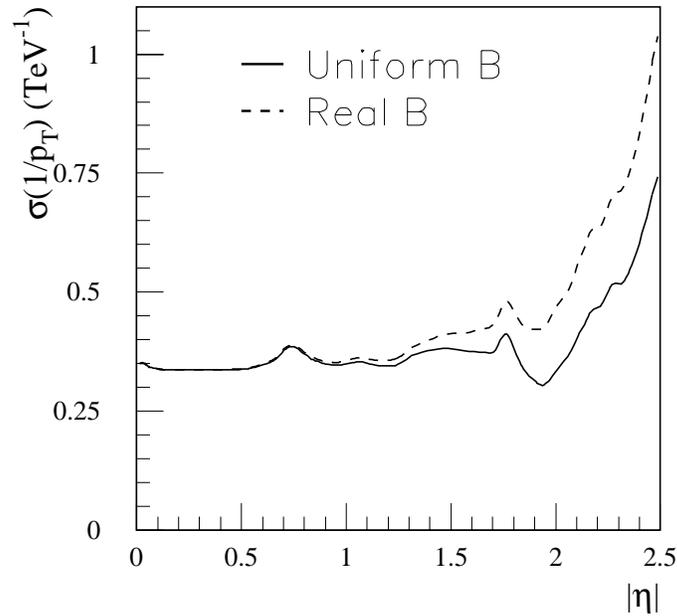


図 2.9: インナー・ディテクター

電磁カロリメータ

電磁カロリメータは、電磁シャワーを起こさせて、 $|\eta| < 3.2$ の広範囲の入射電子・線のエネルギーと位置の測定を行なう検出器である。耐放射線にすぐれており、安定性のよい液体アルゴンカロリメータが使用されている。電極及び鉛吸収体を入射粒子に対して横方向にジグザグさせるアコーディオン型にすることにより、読み出しに伴う浮遊容量を最小にする。さらに、ジェットと電子の識別をよくするために、横方向 (η, ϕ) にセルが細かく分けられ、また縦方向にも数段分けられるという工夫がなされている。初段部の前には同じ形状のサンプラーを置き、電磁シャワーの角度測定とエネルギー補正、及び、 π^0 と γ の識別に用いている。

ハドロン・カロリメータ

ハドロンカロリメータは陽子や π や K 中間子などのハドロンのエネルギーを測定する測定器である。このカロリメータはカバーをする領域によって、前後方の液体アルゴン・カロリメータ、バレル部のタイル・カロリメータの3種類のタイプに分かれる。 $|\eta| < 1.7$ のバレル部は、鉄の吸収体とタイル状のシンチレータ及び波長変換ファイバーからなるタイル状カロリメータであり、一方エンドキャップ部である $1.5 < |\eta| < 3.2$ の領域は放射線強度が高いので、銅吸収体と液体アルゴンの組み合わせのカロリメータを用いている。セルあたりの容量が大きくなるので、電氣的にみて小さくなるように静電変圧構造の電極を採用している。 $3.2 < |\eta| < 4.9$ のフォワード部は粒子が混みあうので、ハドロンシャワーの横広がりを最小にするために吸収体にタンゲステンを用いている。また、フォワード部はさらに放射線強度が高いために、媒体は放射線に強い液体アルゴンを用いている。

超伝導ソレノイド

ATLAS では 2 T のソレノイド磁場を内部飛跡検出器にかけて、荷電粒子の運動量測定を行なう。磁場のリターンヨークとしては、タイル型ハドロンカロリメータを吸収体に用いる。コイルは電磁カロリメータの内部に置かれているので、 e や γ に対するエネルギー分解能を悪くしないように物質量をいかに少なくするかが最大の課題であるといえる。そのために、ソレノイドとバレル部液体アルゴンカロリメータの真空容器を共有している。

μ 粒子検出器

μ 粒子は、LHC 実験においてほとんどすべての重要な物理に関わっており、しかもカロリメータの中で反応することなく外までつき抜けてくるために、LHC の非常に厳しい実験環境の中でもきれいな信号を取り出すことが可能である。したがって μ 検出器は測定器の一番外側に設置されている。ATLAS では、stand-alone でも μ 粒子の測定を精度良く行なえるように、空芯の超伝導トロイド磁石を使用している。これは多重散乱の効果を最小に抑えることができ、さらに μ 粒子の測定可能なラピディティ領域を広くとることができるので、内側の測定器と独立させることができるという利点もある。 μ 粒子検出器は精密位置測定用に MDT(Monitored Drift Tube) と CSC(Cathod Strip Chamber) で、反応の種類を見極めるトリガーとして、RPC(Resistive Plate Chamber) と TGC(Thin Gap Chamber) から成っている。

DAQ システム

LHC では陽子衝突が毎秒 10 億回起こり数百億個の粒子が作られる。実験装置にセットされた 1 千万チャンネル以上 (シリコン検出器のみで 640 万チャンネル) の粒子検出器は、発生する 2 次粒子の飛跡とエネルギーを測定して電気信号に変換する。重要なイベント

のデータのみが瞬時にオンライン選別されて計算機に送られる。蓄積されるデータ量は 10^{15} バイトにのぼる。測定は日本で発明された TMC 回路により微小時間間隔 20ns の精度で連続でなされる。 $0.5\mu\text{m}$ CMOS 技術が使われており、 9mm 角のチップに約 30 万個のトランジスターが組み込まれている。

トリガー・データ収集システム

LHC の最高ルミノシティでは、各ビーム交差毎 (25ns) に平均 20 個のイベントがオーバーラップして発生する。測定器からのデータは膨大なものであり、興味あるイベントを効率よく選別、収集する必要がある。そのために ATLAS では 3 段階のトリガー・システムを採用している。

- レベル 1 ... トリガーのための信号が各測定器サブシステムで処理された後、全体のトリガー決定回路へと送られ、そこでイベントをアクセプトするかどうかを 25ns 毎に判断される。ここまでの $2\mu\text{s}$ の間、それぞれのサブシステムのデータは、パイプラインに保持されている。
- レベル 2 ... RoI (Region of Interest) と呼ばれる、トリガーを生じた測定器内の地点を含む一部の領域のデータのみが判定に使われる。
- レベル 3 ... イベントビルダーにより、各測定器のサブシステムからのデータがイベント毎にまとめられ、数百台のコンピュータに振り分けられる。そこでそれぞれ独立に解析され、ソフトウェアによるフィルタリングが行なわれる。ここにおけるデータ転送レートは毎秒 1G バイトを越えると予想されるので、非常に大規模なネットワークのスイッチが必要になる。このようにして選別されたイベントのデータはさらに下流のネットワークを通じて記録装置に送られる。

第3章 シリコンマイクロストリップ検出器

3.1 シリコンセンサーの動作原理

ここでは、2.3節で紹介したインナー・ディテクターの3つの検出器のうちの1つ、シリコンマイクロストリップ飛跡検出器について説明する。

純度の高いシリコンの結晶は電気をほとんど通さないが、結晶中に不純物を混ぜることによって電気伝導性は急激に上昇する。したがってSCTでは、シリコンウエハーの片面にのみ不純物(ホウ素)濃度の高いp型シリコンをストリップ状に埋め込んでおり、アルミニウムとSiO₂の絶縁幕をはさんでAC結合している。このときの不純物濃度は、シリコン 10¹³ 原子/cm³ で約500Ωcmの比抵抗に相当する。一方の面には、逆バイアス電圧を加えるための電極用としてn型高濃度シリコン層が全面に形成されており、結晶の片面にはアルミニウムが蒸着されている。

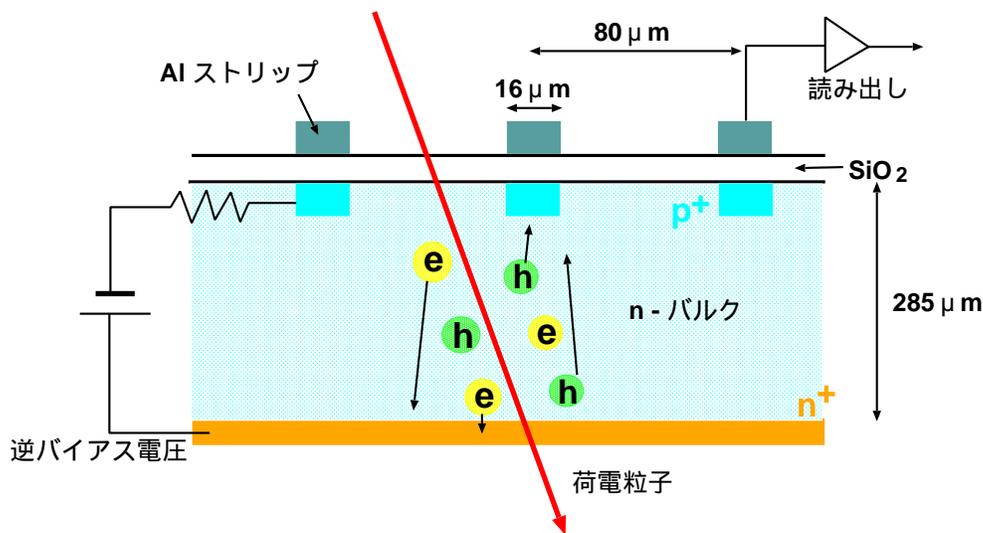


図 3.1: シリコンマイクロストリップ構造

ストリップ側に負の電圧を加えることにより生じた電場によってn型シリコンウエハー中のキャリアを電極に移動させ空乏層をつくる。この状態でシリコンセンサー中に荷電粒子が通過すると、電子・ホール対が形成され、これらは逆バイアスの電場により電極に集められる。このときの電子の速度は10⁷cm/s程度であり、0.1cmの距離にわたってキャリアを収集するのに必要な時間は10ns以下である。信号を出力したストリップの位置から荷電粒子の位置を一次元

的に決定することができる。

図 3.1 にシリコンマイクロストリップの断面図を示す。

3.2 放射線損傷

シリコン半導体検出器は、エネルギー分解能が優れている上に、小型化可能、かつ比較的早いタイミング特性を示すという利点を持っているが、欠点として放射線損傷による性能の劣化を起こしやすいことがあげられる。これは、シリコン結晶を通過した放射線の破壊効果によって格子に損傷がもたらされることによる。

放射線損傷の中でもっともよくみられるものはフレンケル欠陥であり、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。フレンケル欠陥とは、正規の位置の原子が欠けたものを「空格子」と呼ばれる点欠陥、構成原子が余分に正規の位置の間に割り込んだものを「格子間原子」としたときに、この2つが対で形成されたときのことをいう(図 3.2)。入射粒子により生成されたキャリアを捕獲し、電荷収集効率を低下させる。また、電荷キャリアを収集するためにかかる数 100V のバイアス電圧を必要とするが、電離性放射線がない場合でもわずかな電流が観測される。これを漏れ電流と言うが、この漏れ電流中に必然的に生じるランダムなゆらぎが多くの場合ノイズの原因となる。しかも、これは放射線損傷によって増加し、増加した漏れ電流は熱を引き起こす。さらに熱はまた漏れ電流を誘発するといった熱暴走を起こしてしまう。

ATLAS 検出器において、SCT バレルモジュールはビーム衝突点に近いところから順に 300mm、370mm、450mm、525mm と設置されるので、10 年間の実験期間で 3×10^{14} particle/cm² の放射線を受けてしまうと予想されている。したがって、先述した漏れ電流の熱暴走を抑えるためと反アニーリング効果を遅くするために、実験環境は 10 年間をとおしてマイナス 7°C 未満に保たれることが要求される。

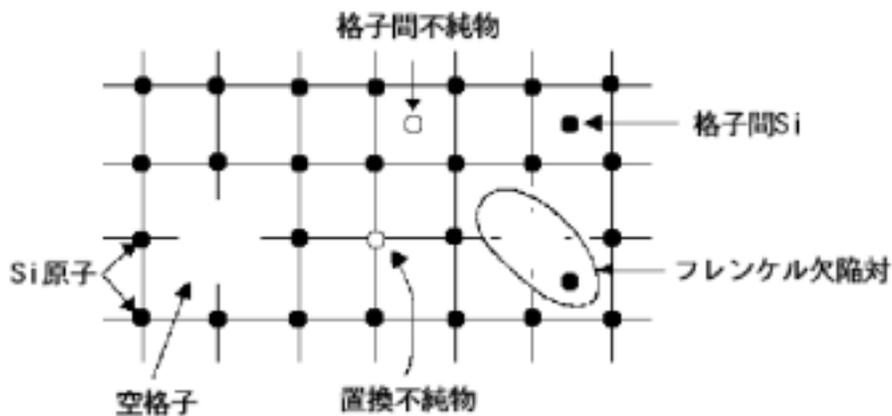


図 3.2: フレンケル欠陥格子

3.3 バレルモジュールとエンドキャップモジュール

インナーディテクターに使われる SCT モジュールにはバレルモジュールとエンドキャップモジュールの 2 種類がある。図 3.2 にそれらの 2 つのモジュールを示したが、ビームテストには写真のような容器にモジュールは固定され、プラスチックの窓をつけた上で実際のビームラインに設置された。

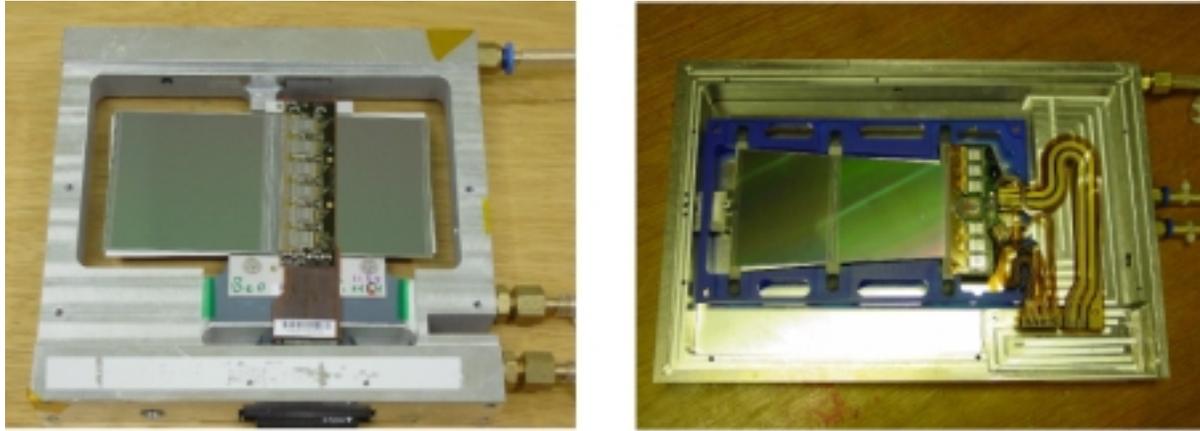


図 3.3: (左) バレルモジュール (右) エンドキャップモジュール

バレルモジュール (図 3.3(左)) はストリップ幅 $16\mu\text{m}$ 、ストリップ間隔 $80\mu\text{m}$ で、ストリップは全部で 768 ストリップある。シリコンセンサーの大きさは $63.96\text{mm} \times 63.96\text{mm}$ で、厚さは $285\mu\text{m}$ である。このウエハーを 2 枚つなげて 12cm のストリップ長とする。シリコンウエハーは先にも述べたように、このままでは荷電粒子の通過位置を一次元的にしか決定できないので、このシリコンウエハーをさらに 2 枚、ステレオ角 40mrad の角度をつけてベースボードの表裏から接着することによって、荷電粒子の位置を 2 次元的に決定することができる。バレルモジュールの構造を図 3.4 に示す。また、シリコンセンサーの仕様を表 3.1 に示す [13]。

読み出しエレクトロニクスは、ATLAS、SCT 用の ASIC として作られた放射線耐性に優れた ABCD3T チップを使用しており、このチップをシリコンセンサー 4 枚分で計 12 個をフレックスハイブリッド基板に搭載している。このフレックスハイブリッド基板はシリコン面を橋渡すようにして巻かれている (図 3.5)。読み出しの ASIC などの電気回路とは反対の面に接着されているカーボンカーボンによる伝熱基板は、ベースボードに備え付けられたベリリアの補強板に接着されている。前節で述べたように、シリコンセンサーの暗電流による熱暴走を起こさないようにシリコンセンサーや ASIC からの熱を効率よく取り除くために、このようなモジュール化が適用された [18]。また、ABCD3T チップはチップ当たり 128 チャンネルのストリップ信号を読みとる。また、LHC のバンチ衝突が 40MHz であるのに対して、このチップは 50MHz のクロックでも作動することが可能である。

一方、エンドキャップモジュール (図 3.3(右)) の方は、前後方に円盤上に設置されることから、形状は台形のシリコンウエハーをしている。また、設置される場所によって 3 種類の異な

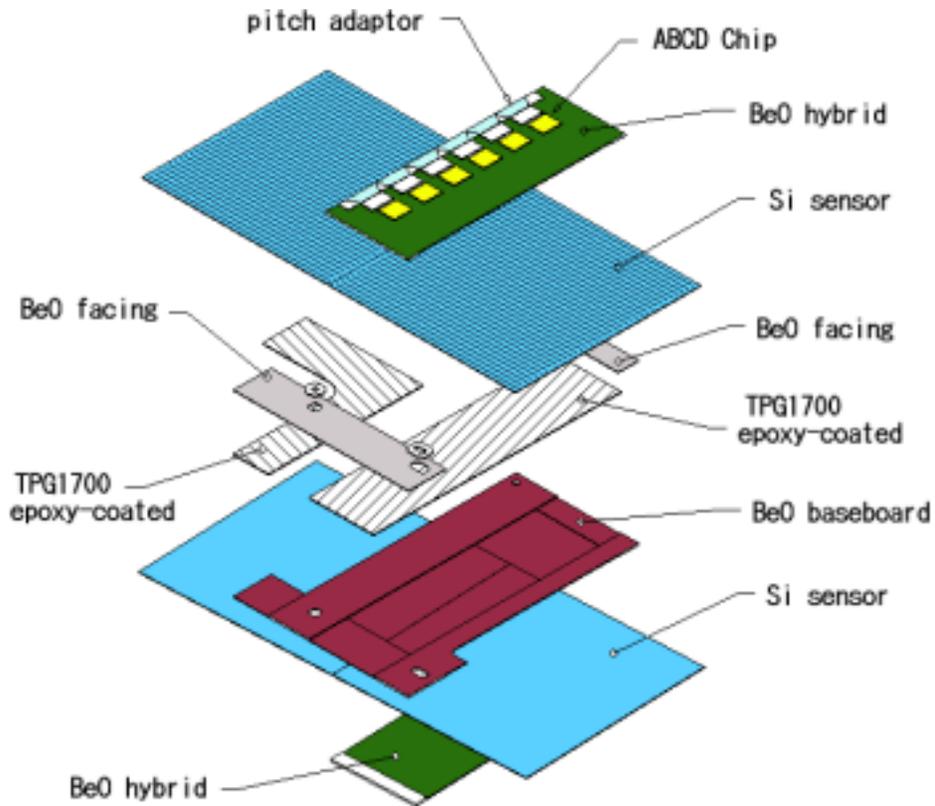


図 3.4: SCT バレルモジュールの構造

るサイズがある。読み出しストリップの数やチップの数はバレルモジュールと同じである。

また、LHCにおける陽子陽子衝突の頻度は $25ns$ 毎にあり、その度に数百億個の粒子が生成されるので、大量のデータを高速で取り扱わなければならない。そのため、SCTでの信号の読み出しは、各チャンネルに対してある閾値を決め、それを越えたものを1、越えないものを0とするバイナリー読み出しを採用している。

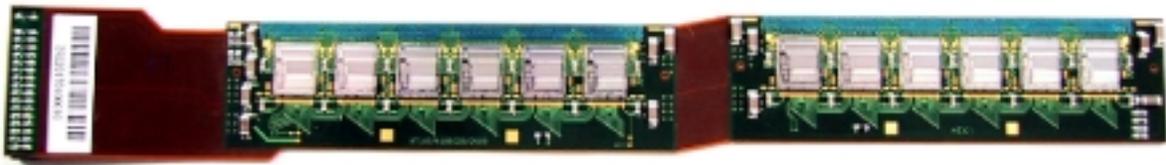


図 3.5: チップを搭載したフレックスハイブリッド基板

センサーのタイプ	p-in-n 型、AC カップリング、一面読み出し
厚さ	285 ± 15 μm
サイズ	63.6 mm × 54.0 mm
バルク	n タイプ (抵抗:4k Ωcm)
ストリップタイプ	p ⁺
ストリップピッチ	80 μm
ストリップ幅	16 μm
ストリップ数	768 ストリップ
ストリップ AC カップリング	SiO ₂ pF/cm
interstrip 容量	1.5pF/cm (350V、100kHz)
初期空乏電圧	150V
ステレオ角	40mrad

表 3.1: シリコンセンサーの主な仕様

3.4 ABCD3T チップ

ここでは、先に述べた読み出し用のチップである ABCD3T チップのバイナリー読み出しの原理について触れる [6]。

ABCD3T のデザインのベースは ABCD2T プロトタイプチップである。構造やコアな部分の全ブロックに変更はされていないが、放射線に十分耐える新しいデザインに改良された。

バイナリー読み出しを採用している SCT のチップは、1 つで 128 ストリップ分の信号の処理を賄わなければならない。そのチップの簡単なブロック図を図 3.6 に示す。主な機能ブロックは、フロントエンド、入力レジスタ、パイプライン、読み出しバッファ、コマンドデコーダー、読み出しロジック、スレッシュホールドとキャリブレーションコントロールである。

128 ストリップからの入力信号は、まずフロントエンドブロックでアナログ信号からデジタル信号に変えられる。ここでは、まずプリアンプによって信号は増幅され、その信号の波形は整形される。この後、コンパレータによってノイズと信号が分離され、次のブロックへ渡される。次のブロックには入力レジスタとマスクレジスタがある。入力レジスタは入力データを受け取り、パイプラインに一定幅のパルスを送るものであり、マスクレジスタは悪いチャンネルやノイズの大きいチャンネルを使わないようにして、必要のないデータ量を減らすことができる。さらに、マスクレジスタはパイプラインテストのときのテストパルスを送信することもできる。

パイプラインは、128 チャンネル分のデジタルパイプライン、FIFO 回路で構成されている。FIFO は 'barrel store' という手段をとっており、これは書き込みポインタと読み込みポインタの 2 つの循環型ポインタによりアドレスされるものである。LHC 実験ではバンチ衝突間隔が 25ns なので、高速での信号処理が要求される。その際、まず一旦トリガーされたシリコンの情報パイプラインに蓄積され、その後電磁力ロリメータや μ 粒子検出器で意味のあるイベン

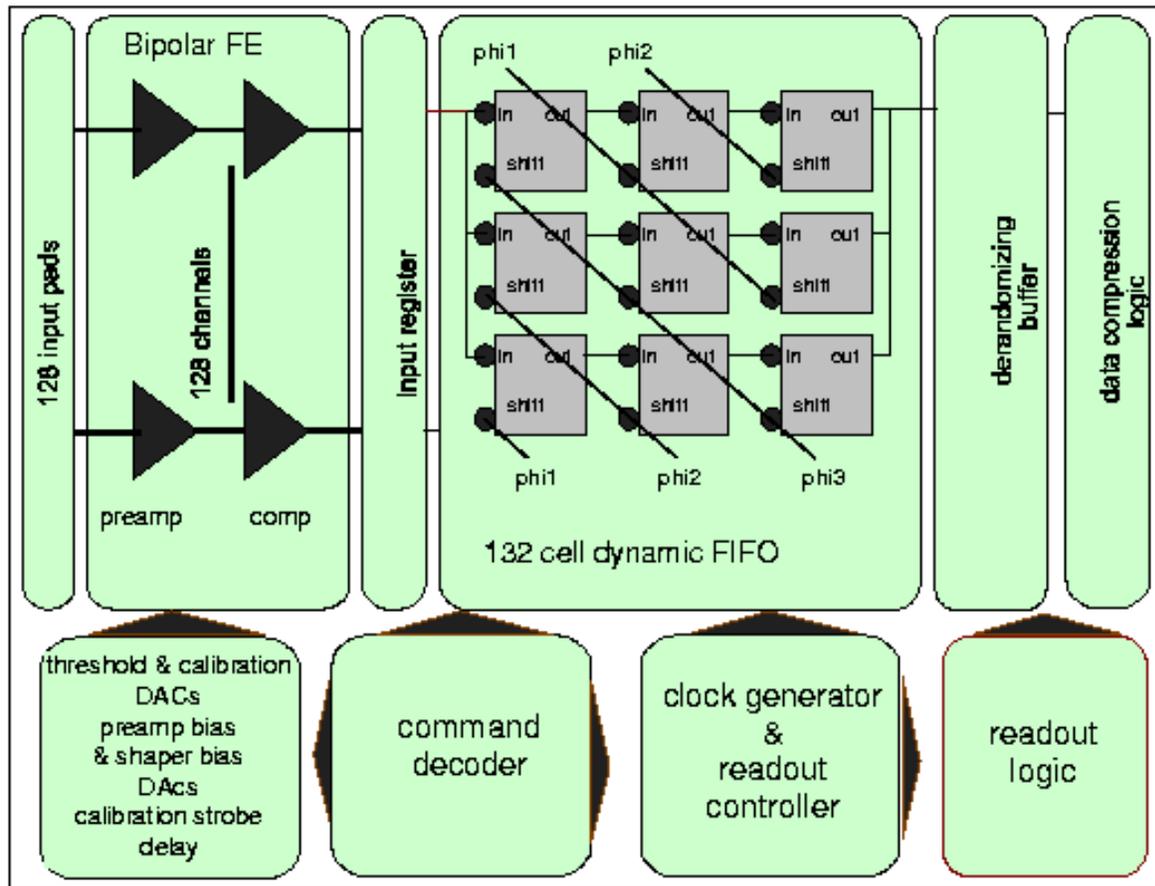


図 3.6: ABCD3T チップのブロック図

トとされたイベントのみを読み込み、それ以前に蓄積された情報は消去されるといった仕組みである。書き込みポインタは読み込みポインタを追い越して上書きすることができ、そのときは'Overflow flag'がセットされる。逆に、読み込みポインタは書き込みポインタを追い越すことはできず、もし追い付いたときには、'EMPTY flag'がセットされる。これにより、データのないときにバッファを読み出そうとするのを防ぐと同時に情報の高速処理を可能とした。

データ圧縮ロジック

データ圧縮ロジックは、それぞれのイベントに対してチップの読み出すデータのビット数を減らすために使われている。データ圧縮ロジックは、それぞれのチャンネルに対して順番に3ビットのデータのヒットパターンをつくる。それぞれの3ビットのグループは4つの選択肢と比較され、パターンが基準に合ったとき、チャンネルからのヒットパターンは読み出し回路に送られる。もしそうでなければ、チャンネルから送られてくるデータはなく、次のチャンネルからのヒットパターンを考える。この過程は、全128チャンネルからのヒットパターンが存在する限り繰り返される。

以下に、その4つの選択されるモードを示す。

モード	選択基準の名前	ヒットパターン	使用例
00	Hit	1XX or X1X or XX1	検出器のアライメント
01	Level	X1X	通常データテイキング
10	Edge	01X	通常データテイキング
11	Test	XXX	テストモード

(Xは'0'か'1'のいずれか)

データ圧縮ロジックは、データ選択基準とマッチするヒットパターンを持つものが見つかるまで順番に全チャンネルを通してスキャンを始める。もしそのようなヒットパターンが見つかったら、'datavalid'信号とチャンネルアドレスを送る。このロジックは、読み出しロジックが'next'信号を出すまで待っている。もし次のヒットが隣りのチャンネルなら、'adj'信号が前のチャンネルより送られてくる。ヒットがなくなりデータの最後には、'end'の信号を送ることで、そのチップから読み出すべきデータが最後であることを知らせる。

以下の3つの場合

- チップがSEND_IDモードのとき
- 読み出しバッファに'error flag'がセットされたとき
- 読み出しバッファに'overflow flag'がセットされたとき

データ圧縮ロジックは読み出しバッファからデータを送る必要はないが、読み出しバッファからこの情報を送り出すためにバッファから3ビット分読み出す必要がある。

第4章 ビームテスト

4.1 セットアップ

ビームテストは2003年5月に、CERNのH8施設で行なわれた。使用したビームは、まずSPS(Super Proton Synchrotron)リングを用いて陽子を $400\text{GeV}/c$ まで加速させターゲットにあて、生成された2次粒子である π^+ をベンディングマグネットにより $180\text{GeV}/c$ に選別されたビームを使用した。使用したモジュールについては表4.1に記す。ここでいう補正值とは、ビームテスト前のキャリブレーション段階における、それぞれのSCTモジュールの厚さの補正である。シリコン検出器は、同じ荷電粒子が通過しても、その厚さに比例して生成される電子・ホール対の数が変わってしまうため、厚さの違いによる出力信号の大きさの差をなくすためのこの補正は解析の際に必要である。また、DAQ番号10は*reference*モジュールと呼ばれ、わずかにタイミングをミスしているSCTモジュールをテレスコープのコインシデンスを調整するためのもので、実験の間は常に閾値(以下、スレッシュホールド)は $1.0fC$ 、バイアス電圧は $150V$ に設定されている。

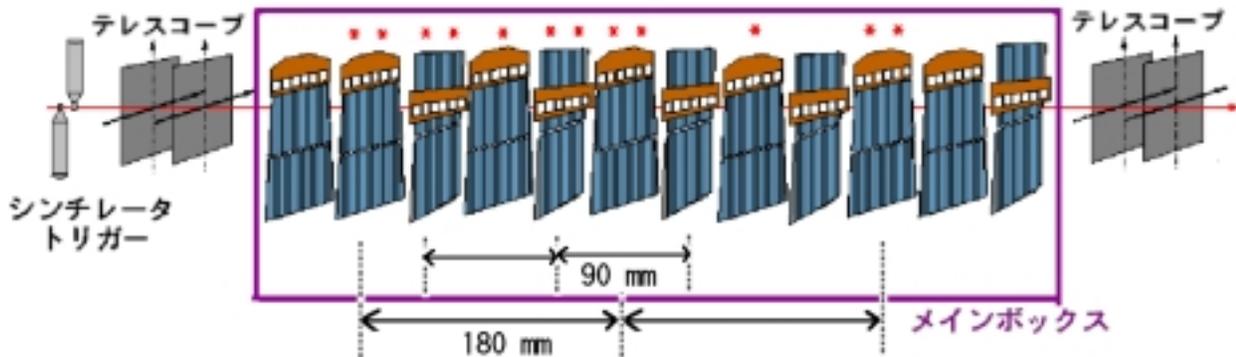


図 4.1: セットアップ図

モジュール	タイプ	DAQ 番号	補正值
K5_312**	エンドキャップ	0	1.113
20220330200003**	バレル	1	1.051
K5_303*	エンドキャップ	2	1.171
20220170200153**	バレル	3	1.060
K5_503**	エンドキャップ	4	1.030
20220040200018	バレル	5	1.027
K5_310*	エンドキャップ	6	1.095
20220170200447	バレル	7	1.089
K5_504**	エンドキャップ	8	1.030
K5_306	エンドキャップ	9	1.095
20220170200010	バレル (reference)	10	1.089
K5_513	エンドキャップ	11	1.040

表 4.1: 使用したモジュールの種類

今回のビームテストに用いた SCT モジュールは計 12 枚。そのうちバレルモジュールで放射線被曝 10 年分の 3×10^{14} particle/cm² を与えたものが 2 枚、与えていないものが 4 枚の計 6 枚、エンドキャップモジュールのうち、放射線被曝を 10 年分与えたものは 3 枚、5 年分の 1.5×10^{14} particle/cm² を与えたものは 2 枚、与えていないものが 1 枚で計 6 枚である。以下、図においてアスタリスク (*) のついているものは放射線損傷を与えたものを表し、それぞれ 2 個は 10 年分、1 個は 5 年分とする。これらの SCT モジュールのセットアップの図を図 4.1 に示す。また、今回の放射線被曝は CERN 内にある PS(Proton Synchrotron) 施設で事前に行なわれた。

ビームはまず最前に置かれたシンチレータ・トリガーカウンターを通過する。トリガーは、2 組のシンチレータを $1.5\text{cm} \times 1.5\text{cm}$ ずつ重ねて、その領域を通過した π^+ ビームのみ採用とした (図 4.2(左))。その後、同じシリコン検出器からできているテレスコープを 2 枚通過した後、SCT モジュールがセットされているメインボックスを通過、最後に前方に置かれたものと同じシリコン検出器で作られたテレスコープを 2 枚通過する。このテレスコープは、面積 $3.2\text{cm} \times 3.2\text{cm}$ で SCT モジュールと比較すると小さいが、ビームスポットのサイズ $0.5\text{cm} \times 1.0\text{cm}$ と比較すると、十分な大きさである。さらに、 $5\mu\text{m}$ の非常によい位置分解能を持ち、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 次元情報を得ることができる。テレスコープは解析に使う SCT ヒット情報の選別の際に非常に大事なものである。詳細は後でふれる。メインボックス内の SCT モジュール間隔は 90mm 、基本的にはバレルモジュールとエンドキャップモジュールは交互に設置されている。したがって、バレルモジュールどうしの間隔は 90mm 、10 年分、及び 5 年分の放射線損傷を与えたエンドキャップモジュールどうしの間隔は 180mm ということになる。この理由としては、本番の LHC 実験におけるバレルモジュールの設置間隔

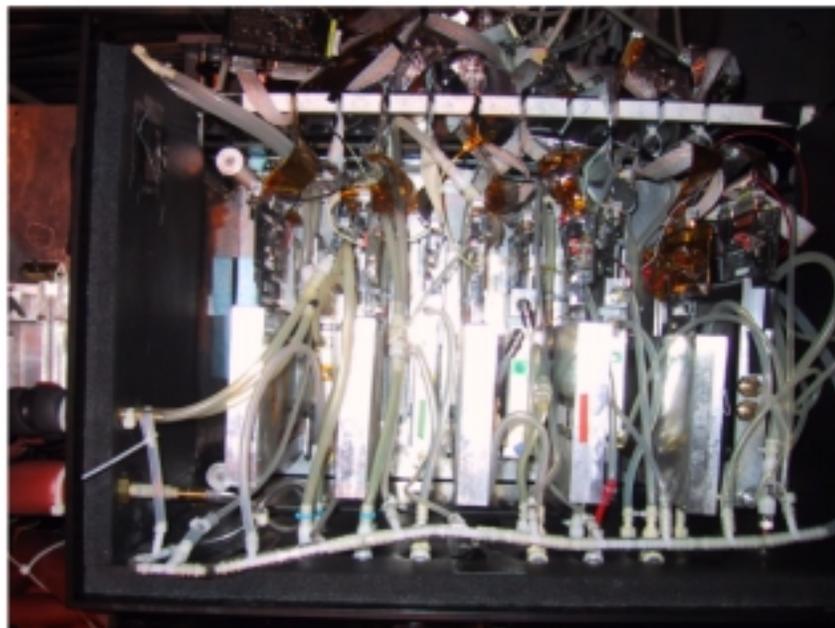
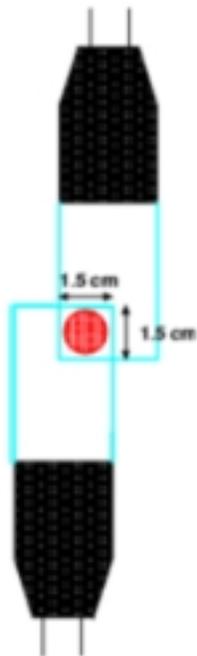


図 4.2: (左) シンチレータトリガー (右) メインボックス内部

は 73mm 、エンドキャップモジュールは 188mm であり、この間隔にできるだけ近付け、本番に近い状態でのトラッキング情報を得ようとするための試みである。

メインボックス内に設置されている SCT モジュールは、3 章、図 3.3 に示した通りである。SCT モジュールが固定されている容器の右側についている一番上のチューブはドライ窒素ガスを入れるためのもので、これは温度差により容器内部の結露を防止するためのものである。また、下 2 つのチューブは冷却用のものである。冷却する理由としては、3.2 節ですでに述べた。冷却は 3 つのチラを使用した。2 つのチラで分担しモジュールを冷却し、もう 1 つのチラでメインボックス内を冷やした。チラの温度は実験中はマイナス 20 度にセットした。実際のメインボックス内部の写真を図 4.2(右) に示す。ビームは向かって左から右に行っており、写真上部のケーブルは SCT モジュールそれぞれに対する読み出しケーブルとパワーケーブルである。

図 4.3 は、メインボックス及びテレスコープがマグネット内にスライドさせたときのものである。マグネットの直径は約 160cm 、磁場は最大 $\sim 1.5\text{T}$ ($\sim 5000\text{A}$) かけられ、磁場の向きは向かって上から下向きである。インナーディテクターの外側にはソレノイド磁石が設置されることはすでにふれた。この磁場の向きは、エンドキャップモジュールに対して本番と同じ向きに磁場がかかるようにと考慮されたものである。

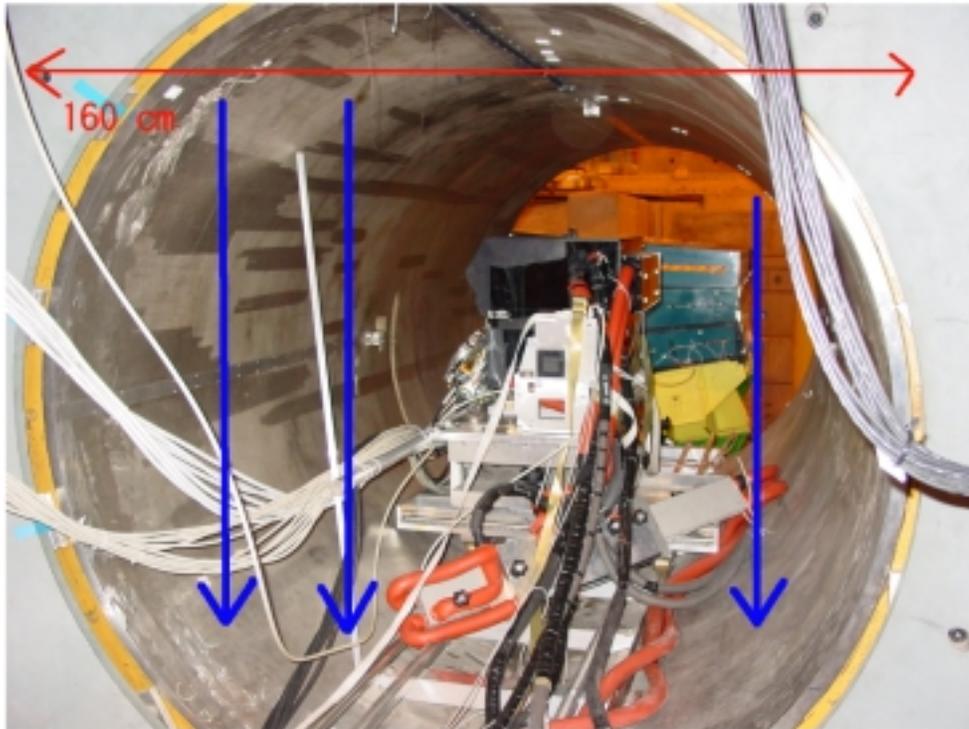


図 4.3: マグネット内のメインボックス

4.2 読み出し

今回のビームテスト期間中に、本番の LHC 実験と同じバンチ衝突間隔の 40MHz に相当する 25ns のビームも出した。これは、SPS リングにおいて 43kHz の軌道周波数を持つ。この 40MHz のバンチクロックは、LHC の TTC システムというものを經由して加速器のコントロールから H8 ビームライン内の SCT トリガーやコントロールロジックに使われる NIM レベルに変換される。この 40MHz のバンチクロックは、CLOAC (Clock and Control module) の外部クロック入力を經由して SCT システムを動作させたり、SLOG (slow command generators) によって detector module に分配されたりする。これは、synchronicity の読み出しクロックを保證するシステムであり、その任意の位相遅延は cable delay によって調整されている。

図 4.4 に、そのバンチ構造、ビーム軌道カウンターとビームトリガーの関係を示す。

43kHz のビーム軌道シグナルは、CLOAC の外部 BC (a Bunch Crossing Counter) Reset 入力を使って BC Reset コマンドをモジュールのフロント・エンド ASICs に送信するトリガーとして使われている。粒子のバンチの列はいろいろな遅延をもってやってきているので、トリガー・シンチレータからのそれぞれのコインシデンスは、ABCD チップのパイプラインに対して補正をするためにいろいろな遅延を加えた後で Level 1 Accepts (L1As) の CLOAC によって送信を行なう。最後の BC Reset 後からのバンチ交差の数や L1As の数がそれぞれのイベントに対して ABCD チップ内でカウントされ、ABCD ヘッダー内に組み込まれる。この情報は、イベン

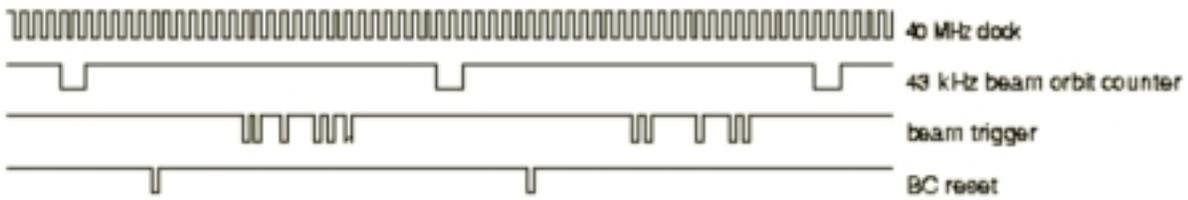


図 4.4: バンチ構造とその読み出し

トのタイムスタンプを形成したり、SCT モジュールやテレスコープからのバイナリー読み出しの synchronicity を確実なものにするオフライン時に使われる。

図 4.5 は今回のビームテストの読み出しに使われた NIM の写真である。左の写真は、シンチレータトリガーからシリコン検出器間の時間を測る TDC、テレスコープの読み出しをそれぞれ行なうモジュール、SLOG、CLOAC、SCT モジュールの読み出しを管理し、メモリーを行なう MuSTARD のモジュールである。SLOG と MuSTARD は 1 つでそれぞれ 6 つ SCT モジュールを管理することができる。右の写真は、SCT モジュールの読み出しを担うハイブリッドの動作をさせるためにかかる Low Voltage(LV) と、全空乏化をさせるためにシリコンセンサーにかける High Voltage(HV) のモジュールである。この LV モジュールは 1 つで 2 つの SCT モジュールを、HV モジュールは 1 つで 4 つのモジュールを負担している。

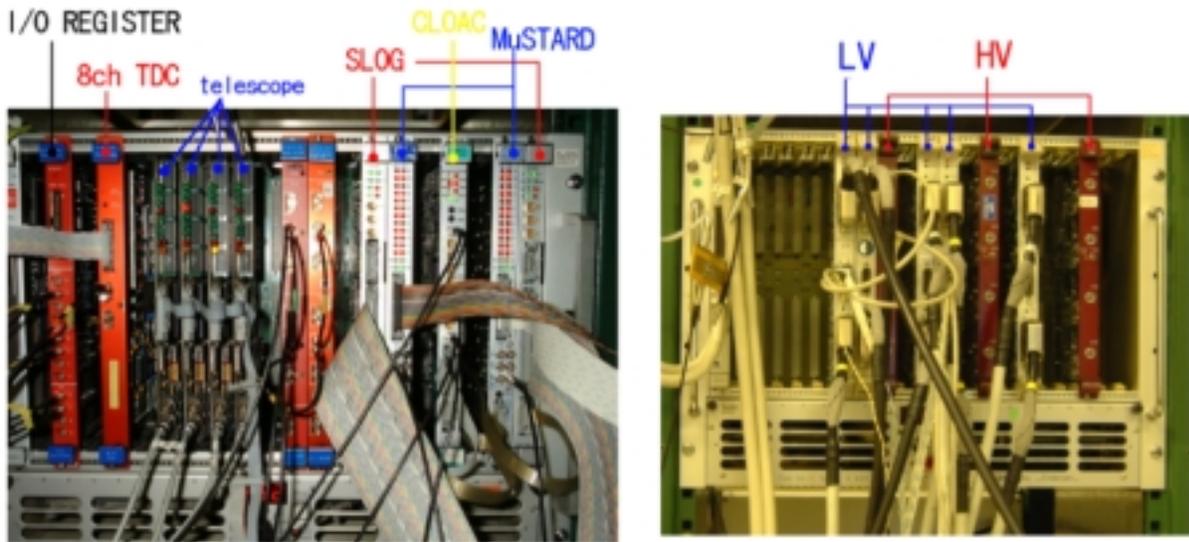


図 4.5: (左)CLOAC、SLOG のモジュール (右)HV と LV のモジュール

asynchronous ビームテストのときは、シンチレータからのトリガー信号から分かる粒子の到着とクロック間のランダムな遅延は、高い分解能をもつ TDC(a Time to Digital Converter) に

よって定期的に測定される。この TDC の情報は、offline 時の解析で波高分布のピークをサンプルするときの時間間隔を選別するときなどに使われる。図 4.6 はシンチレータ・トリガーとシステムクロック間の遅延を asynchronous beam の時と synchronous beam の場合を TDC で測定した分布を表している。TDC は $1ns$ 毎にカウントしている。この分布は、バレルモジュール 0018 のもので、スレッシュホールドは $1.0fC$ 、バイアス電圧は左は $150V$ 、右は $200V$ かけたものである。完璧な synchronous beam の時、分布はデルタピークになるのに対して、今回のビームテストにおける synchronous beam は右図でも分かるように、非常に狭い幅のピークを持っていることが分かる。このピークの幅は $1ns$ のオーダーであり、非常に質の良い synchronous beam がでていたことが分かる。

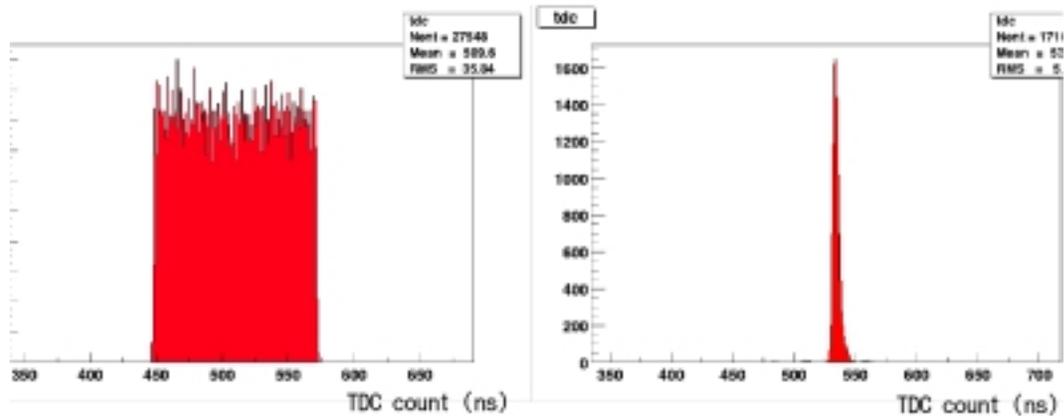


図 4.6: (左)Asynchronous beam (右)Synchronous beam の TDC 出力

第5章 解析方法

今回の解析には、近年の SCT ビームテストにおいて、オンラインの解析及びその後の精密解析を主に担当している、バレンシア解析グループの使用している解析方法を用いた。従来のビームテストの解析には、アライメント作業やその他データエラーのチェックなどの手間がかかっていたが、この解析方法では新しく DST フォーマット というものを導入することによって、これらの手間を省くことができる [3]。この DST フォーマットは、オフライン時にビームテストの生データをもとに改めて解析用に作られるものである。以下、この DST フォーマットについて述べる。

5.1 DST フォーマット

解析に用いる DST ファイルには、*DST TTree*、*runInformation*、*aligns* の3つのオブジェクトが含まれており、この DST ファイルに存在する 'DST event' は、実際のビームテストのイベントに対応するものである。実際の解析には ROOT を使い、その際 C++ プログラミングで書かれたマクロを ROOT 上ではしらせることになる。

まず、*runInformation* にはそれぞれのイベントのランナンバー、スレッシュールド、バイアス電圧などのデータパラメータの情報を含んでいる。そして、DST フォーマットの最大の特徴である *DST TTree* は、あるイベントそれぞれに対して、図 5.1 のようにいくつかのブロックに簡単に振り分けられる。

まず、初めのブロックにはイベントの変数が含まれている。例えば、生データにおけるイベントの総数 (*EventNo*)、TDC のイベントカウンター (*tdcCnt*)、望遠鏡のイベントカウンター (*iramCnt*)、また *OKFlag* とはフラグが 1 にセットされた場合いわゆる 'よい' イベントということを指し、それに対して *NoiseFlag* とはビームイベントかノイズイベントかを指すものである。

次のブロックは、あるシングル SCT モジュールにおける全クラスターに対する情報がそれぞれ含まれている。それぞれのクラスターは 3 ビットで 1 クロックサイクルの情報を与える。そのクロックサイクルを越える信号は、異なるタイムピンを持つ 2 つの離れたクラスターとして認識される。クラスターの場所を表すチャンネルは、そのクラスターを構成する最も小さいチャンネルで決定される。またブロック中の *Xlocal* とは、クラスターの中心とその面のストリップ 0 の距離を表す。以上のことは次のブロックの望遠鏡にも言える。

また、それぞれのイベントのトラックは 4 枚の望遠鏡のヒットによって再構成される。そのトラックについては最後のブロックに含まれている。トラックフィットの良さを表す χ^2

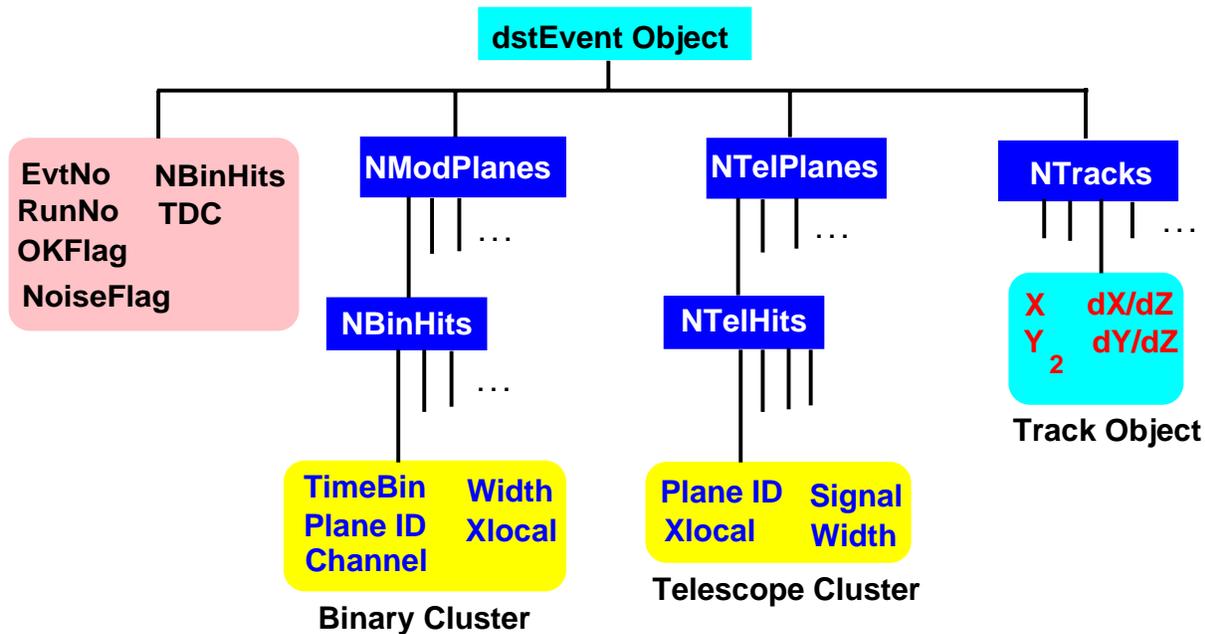


図 5.1: DST TTree の構造

は、ノイズヒットや多重散乱などによるヒットから再構成されるトラックを除去するために使われる。

このようなトラックを再構成する前の推定段階において、それぞれのモジュール面に対して高精度なアライメントをしなければならない。そのために DST ファイルを構成する最後のオブジェクトである *align* が必要となってくる。この *align* を用いてアライメントされたもので、実際の ROOT での解析に使う *dst file* がそれぞれの *run* に対して作られる。

5.2 イベント選別

解析を始める前にまずすべきことは、解析に用いるイベントの選別である。それにはまず、SCT モジュールからのバイナリー情報が解析用イベントとして使えるかを選別する必要がある。その選別方法は、以下の条件を満たすことである。

- テレスコープで正確なトラックを再構成している
この条件を課すことによって、テレスコープからはずれたものや2次トラックを除去することができる。
- ある制限内で、まっすぐかつビーム軸に平行なもの
この条件は、メインボックスよりも前にビームライン上に置かれたその他の物質によって生じた多重散乱のトラックを除去することができる。

- 少なくともアンカーモジュールの一面が efficient なもの

この条件は、synchronicity などでデータが壊れてしまったものを除去できる。ここでいう efficient とは、アンカーモジュールの *OKFlag* が 1 であるときのことをいう。

- テレスコープで 8 個以下のヒットがあるもの

この条件は、ビームライン上の他の物質によって生じた second charged track による hard interaction の効果を減らすことができる。

以上の条件でカットされるイベントはもちろん少ないのだが、‘fake’トラックを確実に作り、除去している。このようにして選別されたイベントが解析に使われる。

5.3 位置分解能について

前節のようにして選別されたイベントを用いて、シングル SCT モジュールの位置分解能をもとめる。まず、ストリップ間隔 $80\mu m$ のシリコンストリップ検出器の期待される位置分解能について考える。今、図 5.2 のようにピッチ間隔を p 、ある任意のストリップの位置を μ とする。この時、それぞれのストリップの信号読み出し確率はストリップを中心として $\pm \frac{p}{2}$ の範囲で一様である。

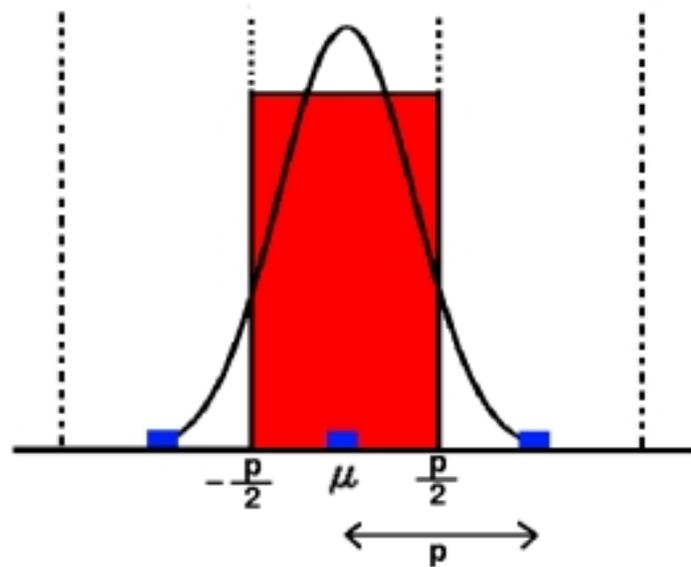


図 5.2: 位置様分布の標準偏差

この一様分布にガウスフィットをしたときの標準偏差 (σ) が理想的な位置分解能であり、式は次のとおりである。

$$\sigma^2 = \frac{\int_{-\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2}} dx (x-\mu)^2}{\int_{-\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2}} dx}$$

このとき簡単にするために $\mu = 0$ とすると、 $\sigma = \frac{p}{\sqrt{12}}$ となり、 $80\mu\text{m}$ のピッチ幅で、一様分布の場合の期待される位置分解能は $\sim 23\mu\text{m}$ となる。

5.3.1 residual の定義

実際の SCT モジュールの位置分解能は、residual マップというものより得られる。residual マップとは、4 枚の望遠鏡から再構成されたトラックと SCT モジュールのバイナリー読み出し情報と比較することによって作られる。以下、その手順を示す。

- 4 枚の望遠鏡のヒット情報よりトラックを再構成する (4.3.2 節)。
- 望遠鏡によって作られたトラックの SCT モジュールの通過位置と、実際の SCT モジュールのバイナリー読み出しによるヒット位置との差をマップする (residual マップ)。
- 得られた residual マップにガウス・フィットを施し、 σ の値、つまり位置分解能の値を得る。

図 5.3 にその概念図を簡単に示す。

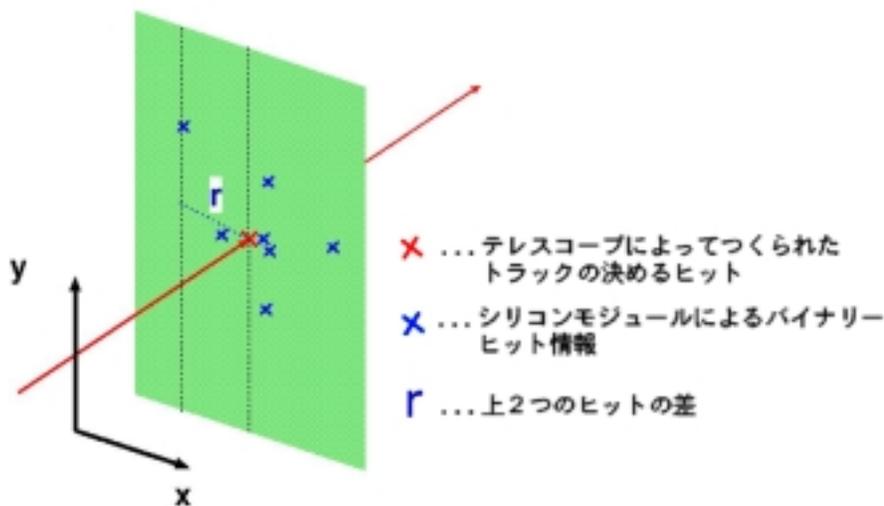


図 5.3: residual の定義

図は、ある任意のシングル SCT モジュールに望遠鏡の作ったトラックが通過していることを示している。赤いバツ印はトラックの通過した点、青いバツは実際に SCT モジュール

ルのヒットした点を表している。residualはその2つの点の差のことをいう。シングルSCTモジュールは先述したように1次元読み出ししかできないので、この差は直線距離ではなく、ヒット情報のあったストリップの差ということになる。図中の r が実質の residual の値になる。この residual の値は、望遠鏡から再構成されたトラックとSCTのヒット位置との差であるので、望遠鏡のエラーは含まれていない。この差が $150\mu\text{m}$ 以内(望遠鏡のストリップの3ピッチ分の長さに相当) $OKFlag = 1$ 、 $NoiseFlag \neq 1$ 、かつ、SCTバイナリー読み出しが完全なトラックを形成したときのみ、そのイベントは検出効率をもとめるときのような解析に用いられる。トラック選別については5.4節で詳しく述べる。

5.3.2 クラスターの扱い

クラスターとはビームが1度通過する際に、複数のチャンネルが信号を出すことをいう。仮にこのクラスターの幅が大きい場合、位置分解能が悪くなっていしまうことは用意に想像できる。したがって、位置分解能を議論する前にクラスターについての評価をする必要がある。

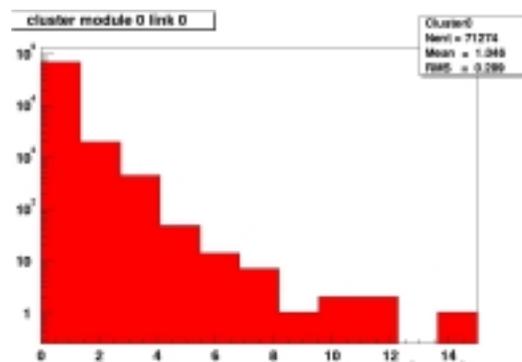


図 5.4: クラスターマップ (K5_312**)

図 5.4 は、エンドキャップモジュール (K5_312**) で、スレッシュホールド 1.0fC、バイアス電圧は 350V でスキャンしたときのクラスターマップである。横軸はクラスターのストリップ数、縦軸は頻度をあらわしている。グラフからも分かるように、2つ以上のストリップが信号を出すものもいくらか存在することが分かる。これは、ビームが2つのストリップのちょうど真ん中を通過した時に2つのストリップが信号を出すものの他に、ビームライン上のSCTモジュールよりも前方に設置された他の物質(例えば望遠鏡など)によって生じた多重散乱による影響であると考えられる。しかし、2つ以上のストリップが信号を出すものは5%以下であり、また他のモジュールに関しても同じ結果が得られた。したがって、位置分解能の精度のクラスターによる影響は十分無視できる値といえるので、以下、クラスターについてのカットは行わずに解析を行っていく。

5.4 トラック選別

この節では 5.3.1 項でふれたように、検出効率などの解析に用いられるトラックの選別方法について述べる。

トラックを再構成するには、まず 40mrad ずらした 2 枚のモジュールのヒット情報を組み合わせて X、Y 座標をもとめなければならない。その前に、トラックを決める際のグローバル座標系を定義する必要がある。

X 軸、Y 軸の定義

図 5.5 は、2 つのストリップ間隔 $80\mu\text{m}$ のストリップが、ステレオ角 40mrad (図では α) で交差して、短辺 $\frac{p}{\cos\frac{\alpha}{2}}$ 、長辺 $\frac{p}{\sin\frac{\alpha}{2}}$ のひし形を作っている図を表している (ただし、 p はストリップピッチ $18\mu\text{m}$)。

このひし形の短軸をグローバル座標の X 軸、長軸をグローバル座標の Y 軸とする。

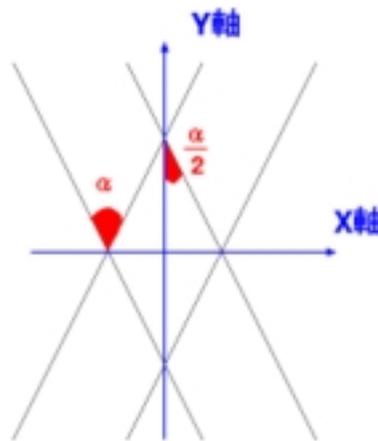


図 5.5: X 軸、Y 軸の定義

このようにして定められた X、Y 軸に対して、全ての SCT モジュールからのバイナリー情報からのみの情報からそれぞれの X、Y 座標点が決まり、要求された数の座標点を作られた時に初めてトラック候補が作られる。そのトラック候補の χ^2 がある値よりも小さかった時に、その候補トラックは解析用のトラックとして受け入れられる [5]。

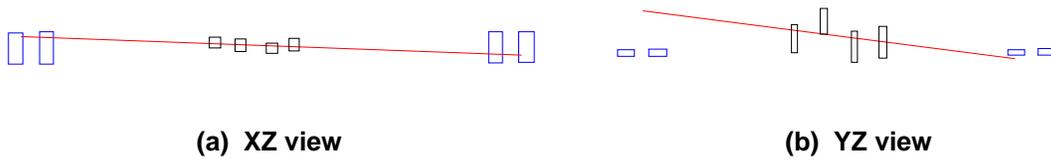
以下、例を示しながらトラック選別の定義を明確にしていく。

例

以下の 4 つの例は典型的なイベントである。ビーム軸を Z 軸として、それぞれの例に対して XZ 面と YZ 面について示している。図中の青い長方形は望遠鏡、黒い長方形は

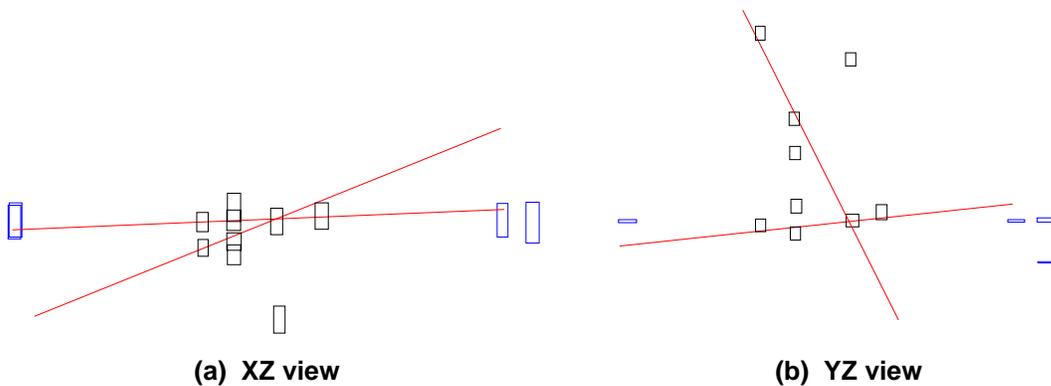
SCT モジュールの XY の位置を示しており、長方形のサイズは位置のエラーを表している。SCT モジュールのヒットから再構成されたトラックは直線で描かれてある。

● 例 1



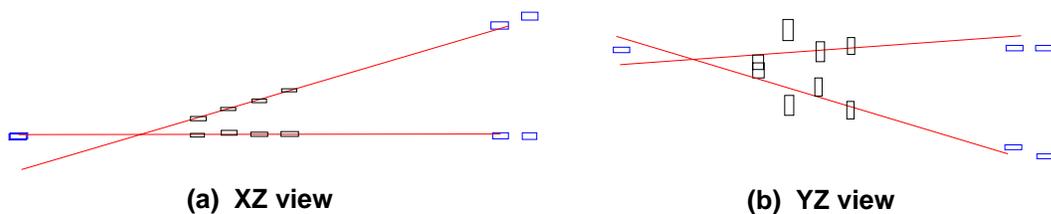
これは、望遠鏡と SCT モジュールからシングルトラックが検出された例である。ノイズやその他の不適切なヒットが一つもなく、非常にはっきりした完璧なトラックが再構成されている。

● 例 2



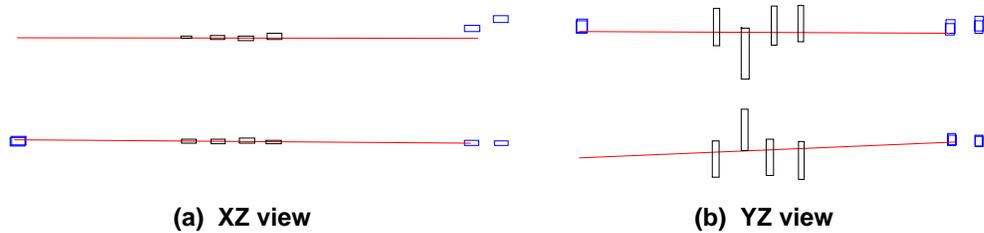
この例はスレッシュホールドを低く設定され、ノイズによって不適切なヒットが多く存在するときのものである。図は、正確に再構成されたトラックを除いて、1つの適切なヒットと3つの不適切なヒットから再構成された'fake'トラックを表している。

● 例 3



これは例 2 と違って、本物の粒子がトラックを形成している例である。トラックの内部で相互作用を起こしているという非常に稀なものである。 π^+ ビームの衝突が原子から電子をたたき出して、本物の 2 次トラックをつくり出している。しかし、この 2 次トラックは望遠鏡を外れているので、解析段階で除去することができる。

• 例 4



これも、本物のトラックが2つ平行に存在するときの例である。この場合のトラックの見分け方は、 $z=0$ (一番前方に設置されている望遠鏡の位置)に注目すると、2次トラックは望遠鏡を外れているので、望遠鏡はこれらのうちの片方のみを再構成する。

5.5 読み出しASICの波高

SCT モジュールはバイナリー読み出しのため波高分布をADCを用いて直接もとめることができない。したがって、波高分布を見るためには間接的にもとめる必要がある。

図5.6にTDCによる、様々なスレッシュホールドに関してトリガーからの時間に対する検出効率を示した。この図に対してある時間領域を適当に決め、その領域での平均値をそのスレッシュホールドでの検出効率とした。さらにその検出効率が50%になる時のスレッシュホールドをメディアアンチャージとし、その値を波高とした。正確なメディアアンチャージを引き出すためにフィッティングを行なうが、その際のフィッティング関数について、以下述べる。

最小2乗フィッティング方法

未知パラメータ μ 、 σ がある値 μ_0 、 σ_0 である場合の2乗誤差を数値的に計算する関数を以下に示す。

$$err(\mu_0, \sigma_0) = \sum_{i=1}^N (n(\mu_0, \sigma_0, x_i) - y_i)^2$$

ただし、フィッティングさせるデータを x 、そのときの回答確率を y としている。カーブフィッティングを行なう際に、 x と y で定義される以下のような正規累積分布関数が良く当てはまることが知られている。

$$y \approx n(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt$$

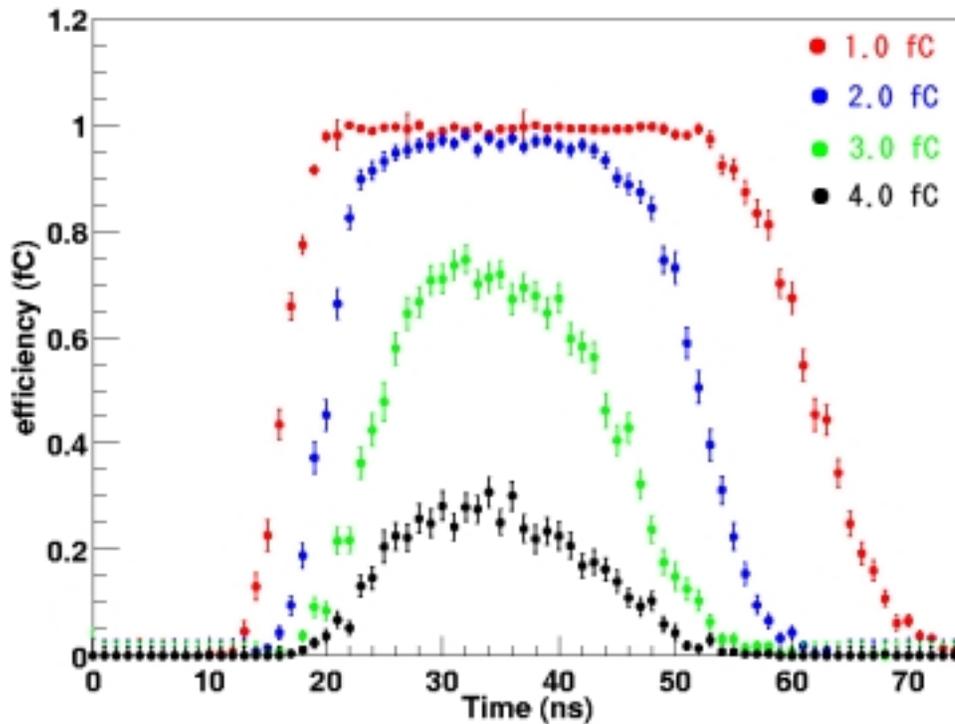


図 5.6: 様々なスレッシュホールドに関するトリガーからの時間に対する検出効率

2乗誤差 $err(\mu, \sigma)$ が最小になるように μ_0, σ_0 を変動させる。この関数の大域的最小点をもとめ極小点を探す。その際、初期値として適当な数値を与えておけば関数は収束し、数値的に μ や σ をもとめることができる。ここで、エラー関数

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$$

とすると、 $n(\mu_0, \sigma_0, x_i)$ は

$$n(\mu, \sigma, x) = \frac{1}{2} \left(1 + erf\left(\frac{x - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right)$$

となる。

実は今回のフィッティングにはこの関数をベースとして、さらなる精度向上のために少し変化させて用いているが、その精度良いフィッティングから正確なメディアンチャージをもとめることができた。

図 5.7 にバイアス電圧を一定にし、スレッシュホールドを様々に変化させた時の検出効率 (以下、Scurve) とそのときのメディアンチャージの概念図を示す。

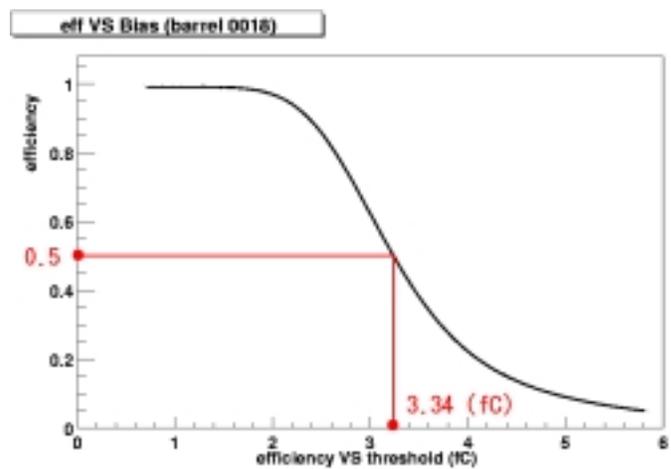


図 5.7: Scurve とメディアンチャージの概念図：バレルモジュール (0018)、バイアス電圧 150V のプロット。このときのメディアンチャージの値は 3.34(fC)

第6章 結果と考察

6.1 位置分解能

位置分解能は、5.3.1項ですでに述べたようにして residual マップを作り、ガウスフィットを施したときの σ の値とした。図 6.1 の residual マップはエンドキャップモジュール (K5_312**) で、スレッシュホールド 1.0fC バイアス電圧 350V でスキャンしたものである。residual マップの形状がガウス関数の形をしておらずやや四角い形状であることは、先に述べたようにストリップ検出器の読み出し確率が一様分布になることから当然であるといえる。この時の σ の値は 25.26 であった。同じ条件のもとで他のモジュールの σ の値とエラーを表 6.1 にまとめた。このときのエラーは系統誤差は含まれていないフィッティングの際の統計誤差のみのものである。ただし、このスキャンを行なったとき、K5_306 と K5_513 のモジュールはまだ設置されていなかったため結果はない。また、reference モジュールであるバレルモジュール (20220170200010) は、常に一定のスレッシュホールド、バイアス電圧をかけているので以降の解析には用いていない。また、バイアス電圧は放射線損傷を与えたモジュールには 350V、与えていないモジュールには 150V をかけた。

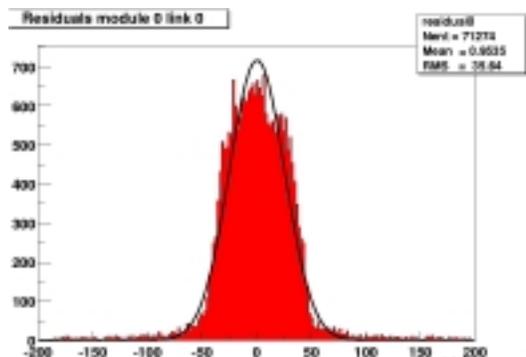


図 6.1: residual マップへのガウスフィット (K5_312**)

また図 6.2 に、放射線損傷を与えたモジュールには 350V、与えていないモジュールには 150V のバイアス電圧をそれぞれかけたときの σ のスレッシュホールド依存性のグラフを示す。左にはバレルモジュール、右にはエンドキャップモジュールをまとめてプロットしている。スレッシュホールドの低いところ、及び高いところで σ の値は悪くなっていることが分かる。この理由としては、まずスレッシュホールドの低いところはノイズが多くその影響であるといえ、またスレッシュホールドを上げれば上げるほどカウント数は減少していき、エラーの値が大きくなる。したがって、一

モジュール	バイアス電圧 (V)	σ	エラー
K5_312**	350	25.26	0.02
20220330200003**	350	26.32	0.13
K5_303*	350	25.32	0.11
20220170200153**	350	27.30	0.14
K5_503**	350	28.51	0.24
20220040200018	150	25.38	0.12
K5_310*	350	24.73	0.11
20220170200447	150	25.18	0.12
K5_504**	350	26.94	0.17

表 6.1: σ の結果 (1.0fC)

見 σ の値は良さそうではあるが、エラーの値が多くなっている 3~4fC あたりからは信頼性がないといえる。表 6.1 の σ の値は、 σ の期待値 $\sim 23\mu\text{m}$ よりもやや悪い値となっているが、これは先述したようにまだ少しノイズの影響が残っているように思われる。これらのことを考慮に入れると、最も良い σ の値は $1.5 \sim 2.5 \text{ fC}$ であると言え、期待される位置分解能に十分近い値が得られていることが分かる。

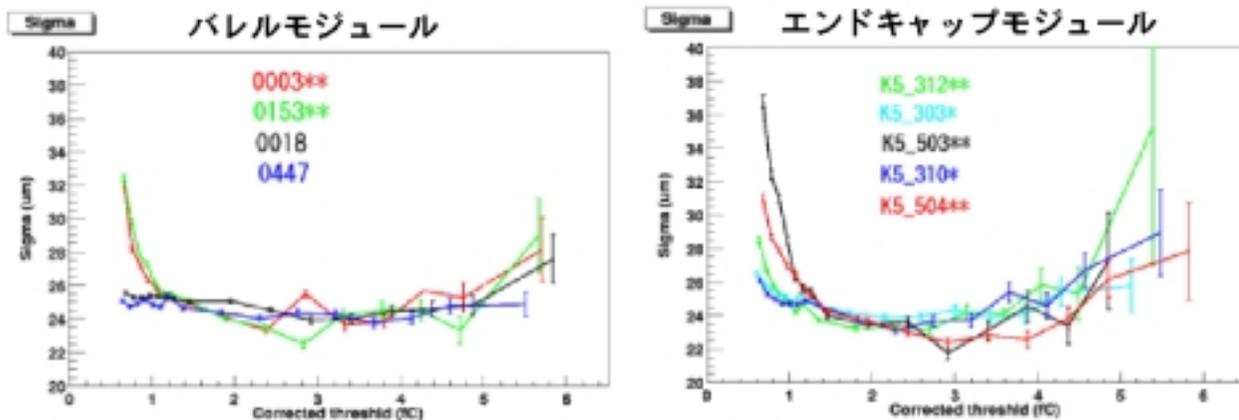


図 6.2: σ のスレッシュホールドへの依存性 (150V/350V)

6.2 読み出し ASIC の波高分布

それぞれのモジュールに対して、5.5 節のような方法で 1ns 毎に波高を調べてプロットした波高分布を図 6.3 に示す。このときバイアス電圧を放射線損傷を与えたのものに対しては 350V、与えていないものに対しては 150V をかけている。

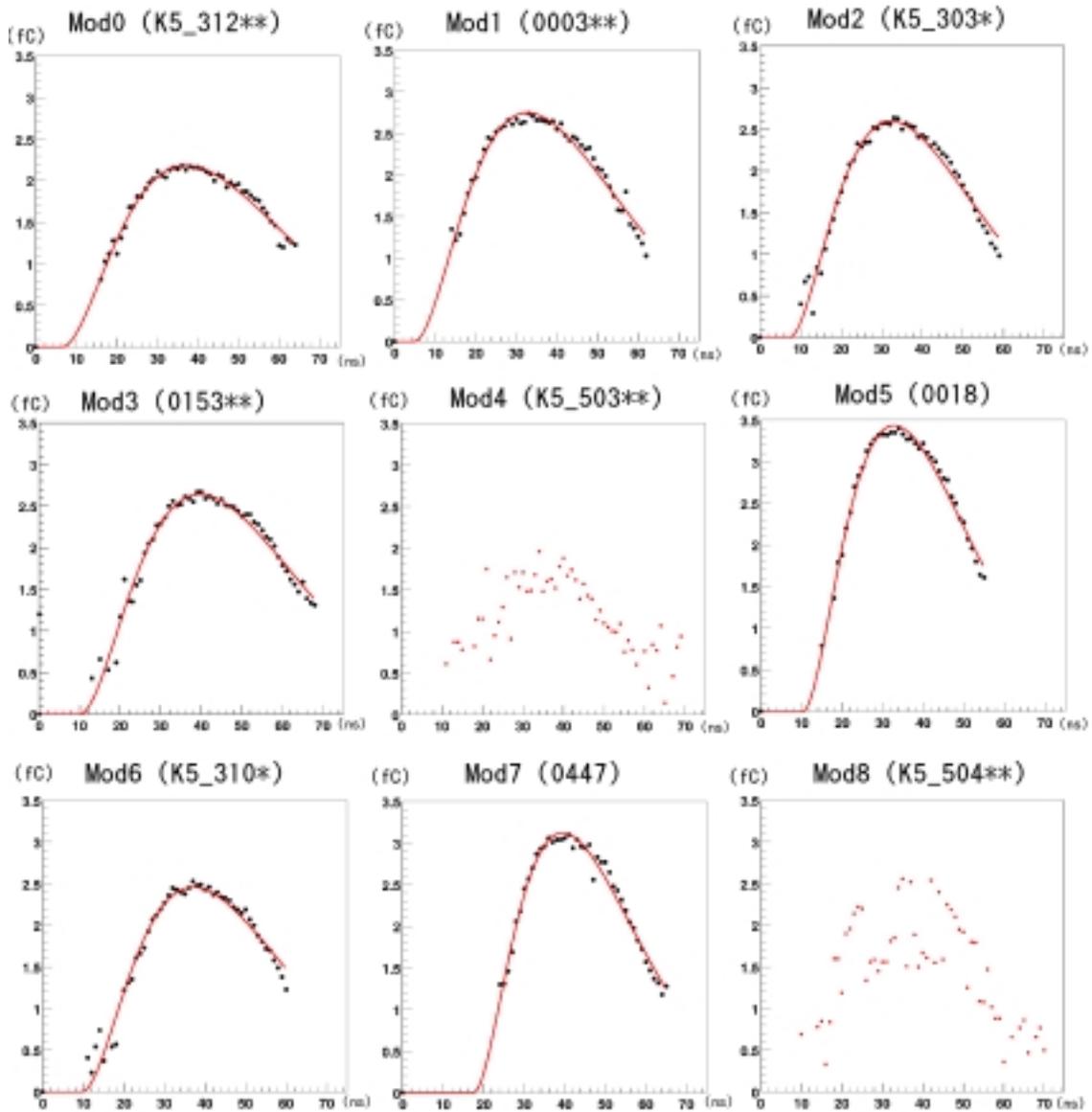


図 6.3: ASIC 内の波高分布 縦軸：メディアンチャージ (fC) 横軸：時間 (ns)

ATLAS 検出器では 25ns 毎にビームが衝突する。したがって信号読み出しのピーキングタイムが遅いと正確な粒子のタグができなくなってしまう。そこで、ピーキングタイムが明確に分かるようにそれぞれの波高分布に ABCD 関数をフィッティングしている。ABCD 関数とは、ABCD3T チップに対する増幅器のレスポンス関数であり、

$$b(t) = A \times a\left(19.1 \times \frac{t-d}{T_p}\right)$$

で表される。ここで、 $t(\text{ns})$ は時間、 A は振幅、 d は遅延、 T_p はエレクトロニクスでのピーキングタイムである。さらに、関数 $a(t)$ は増幅器のレスポンスであるデルタ関数であり、

$$a(t) = -5.83 \times 10^{-3} \times e^{-5 \times 10^{-3} \times t} + (5.26 \times 10^{-4} \times t^2 + 5.54 \times 10^{-4} \times t + 5.83 \times 10^{-3}) \times e^{-0.1 \times t}$$

で表される関数である。

図 6.3 にはそれぞれの波高分布にこの ABCD 関数をフィッティングしているが、波高分布のピークを中心として、左側の立上りは良いフィッティングをしているが、右側の傾斜はややずれる傾向にあるのが特徴である。

この波高分布の結果、K5_503**と K5_504**のモジュールの波高分布がバラついていることが分かる。この原因は、図 6.4 に示したヒットマップのように、ヒットのピークが鮮明に現れている 0447 モジュールに対して、K5_503**、K5_504**のモジュールは、ビームスポットがちょうどチップ不良で信号を読み出せない箇所と重なっており、十分な読み出しが行なえなかったことによる。

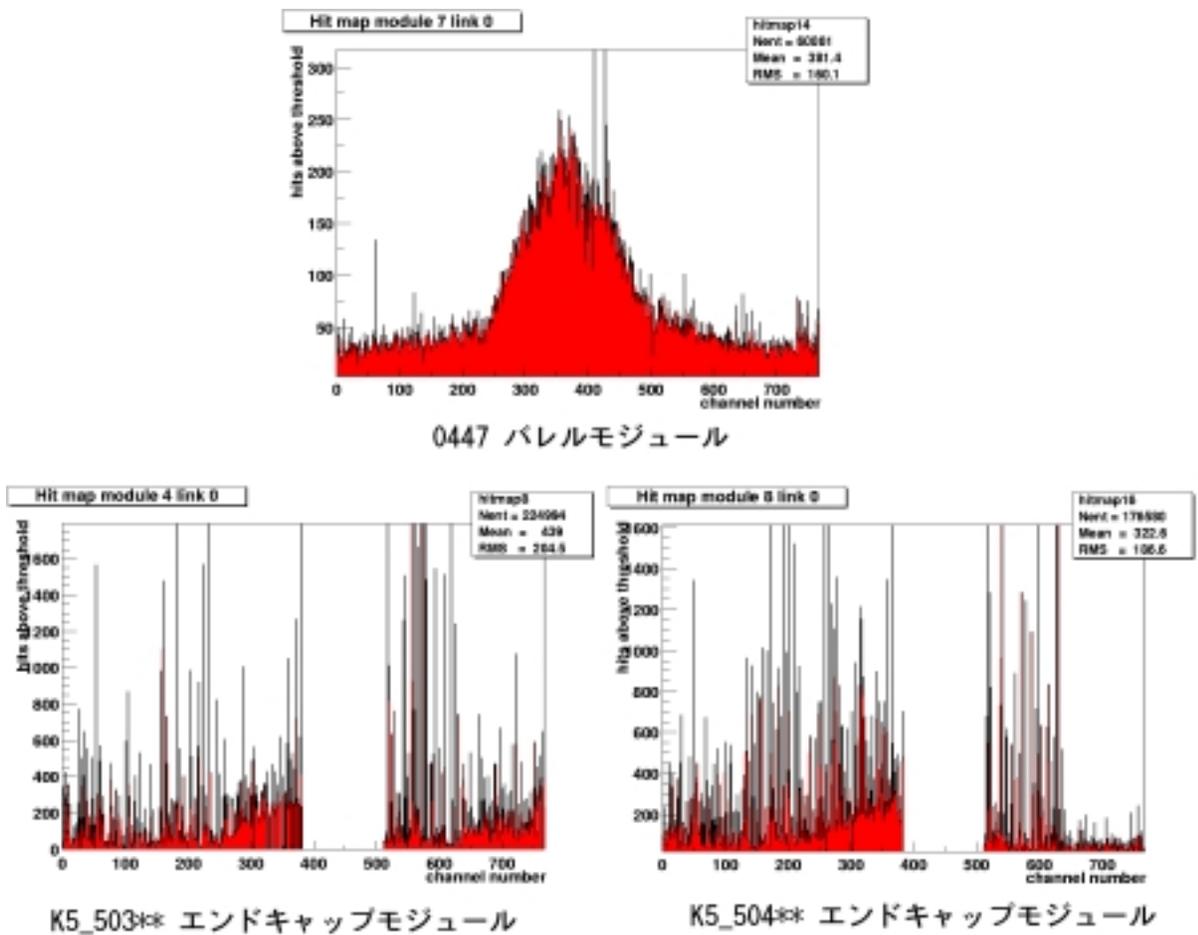


図 6.4: 0447(150V)、K5_503**(350V)、K5_504**(350V) のヒットマップ

そこで、この2つのモジュールに関してビームスポットが読み出しに支障のないチップにあたるように、メインボックスの位置をチップ1つ分(約10mm)ずらし、バイアス電圧を500Vかけたときの波高分布を図6.5に示す。これより、K5_503**とK5_504**の2つのモジュールも、ビームスポットが読み出しできないチップを外れれば、他のモジュールと同様に鮮明な波高分布を得ることができる。

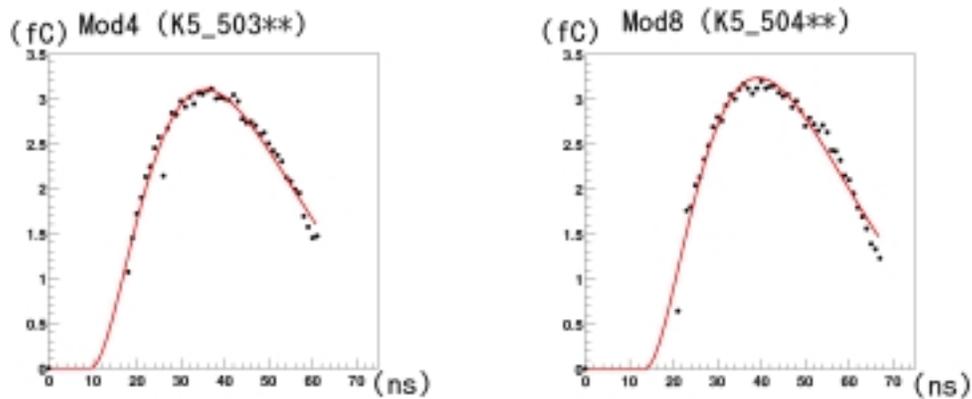


図 6.5: メインボックス移動後の (左) K5_503** (右) K5_504** の波高分布
縦軸：メディアンチャージ (fC) 横軸：時間 (ns)

モジュール	@ 150/350(V)	@ 200/400(V)	@ 300/500(V)
K5_312**	30.56	30.95	28.50
20220330200003**	27.83	29.07	26.65
K5_303*	25.12	25.28	23.38
20220170200153**	29.62	28.58	25.83
K5_503**	-	-	24.13
20220040200018	22.52	21.93	19.61
K5_310*	27.49	26.95	24.78
20220170200447	21.98	21.79	22.35
K5_504**	-	-	25.73

表 6.2: 様々なバイアス電圧におけるピーキングタイム (ns) の結果

バイアス電圧を様々に変えたときのピーキングタイムの結果を表6.2に示す。モジュールにかけたバイアス電圧は表中では「@放射線損傷なし/あり」で表している。この結果より、放射線損傷を受けたモジュールはやや遅い読み出しをしているものの、どのモジュールに関しても十分早い読み出しをすることができることが分かる。また表より分かるように、バイアス電圧をあげていくとピーキングタイムは速くなっていくことも分かる。

6.3 ノイズオキュパンシー

図 6.6 にノイズオキュパンシーのスレッシュホルド依存性を示す。縦軸をノイズオキュパンシー、横軸をスレッシュホルドとしている。図の左は放射線損傷を与えていないバレルモジュール (0447)、真ん中は 5 年分の放射線損傷を与えたエンドキャップモジュール (K5_303*)、右は 10 年分の放射線損傷を与えたバレルモジュール (0153**) である。また、表 6.1 に全モジュールについてのノイズオキュパンシーの値を示す。

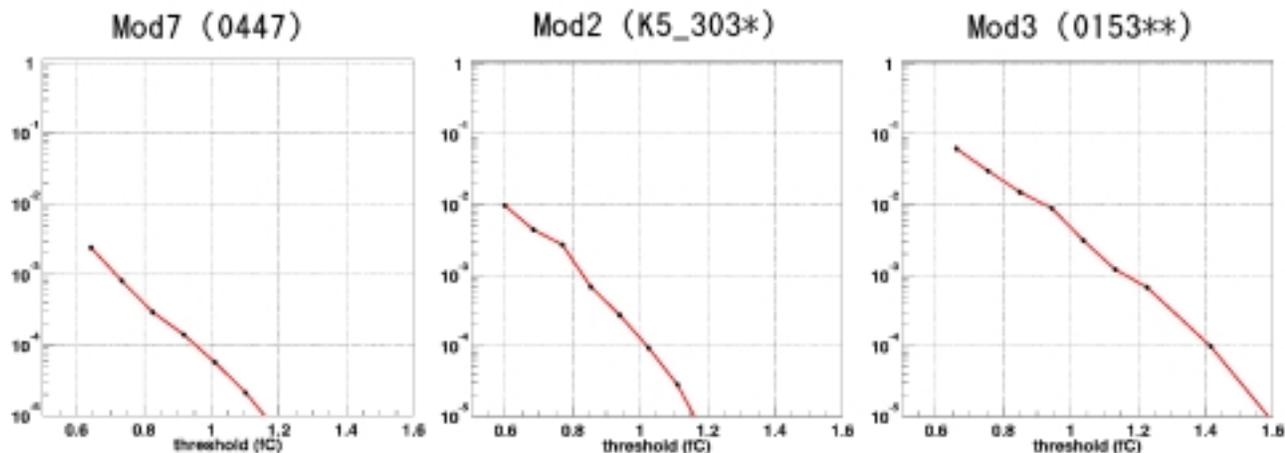


図 6.6: ノイズオキュパンシー (左) non irradiated (0447) (中) half irradiated (K5_303*) (右) full irradiated (0153**)

モジュール	モジュールのタイプ	バイアス電圧 (V)	ノイズオキュパンシー
K5_312**	エンドキャップ	350	5.27×10^{-4}
20220330200003**	バレル	350	8.18×10^{-3}
K5_303*	エンドキャップ	350	1.45×10^{-4}
20220170200153**	バレル	350	5.24×10^{-3}
K5_503**	エンドキャップ	350	8.39×10^{-3}
20220040200018	バレル	150	1.10×10^{-5}
K5_310*	エンドキャップ	350	9.37×10^{-5}
20220170200447	バレル	150	6.61×10^{-5}
K5_504**	エンドキャップ	350	5.79×10^{-3}

表 6.3: ノイズオキュパンシー

本物のトラックによるオキュパンシーがシミュレーションによると 5×10^{-3} 程度である。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。放射線損傷を受けたモ

ジュールは図 6.6 を見ても分かるようにノイズが大きくなる。したがって要求する値を 1 桁下げた 5×10^{-4} 程度とする。表の結果から、その要請を満たしていることが分かる。

6.4 検出効率

全モジュールの Scurve を図 6.7 に示す。横軸は補正スレッシュホールド、縦軸は検出効率である。また、図 6.7 の括弧内はモジュールにかけたバイアス電圧の値を示しており、それぞれ(放射線損傷なし/あり)を示している。実際の実験におけるデータ収集は、1fC のスレッシュホールドの値に固定して行なう予定である。そこで、1fC のスレッシュホールドに注目してそれぞれのプロットを見ていく(表 6.2)。バレルモジュールに関して言えば、放射線損傷を与えたモジュールを含めた全てのモジュールが 150V のバイアス電圧で 99% の検出効率を示している。それに対して、5 枚のエンドキャップモジュールのうち放射線損傷を 10 年分与えた 2 枚のモジュールは他のエンドキャップモジュールと比べてみて、著しく検出効率が悪い。これは、6.1 節でも説明していたように、ちょうど読み出しのできないチップにビームが当たっていたために、十分な信号読み出しができずに検出効率が著しく悪くなったためである。しかし、ビームスポットを読み出しのできるチップに当てるようにしてからは(バイアス電圧:500V)、他のモジュールと同じく 1fC で 99% 以上を示すようになった。また、5 年分の放射線損傷を与えたモジュールに関して言えば、バイアス電圧 350V で 99% の検出効率を示しているのも分かる。実際の ATLAS 実験では、放射線損傷を与えていないモジュールには 150V、与えたモジュールには 300~400V のバイアス電圧をかけて稼働する予定であるので、以上の結果は十分良いと言える。

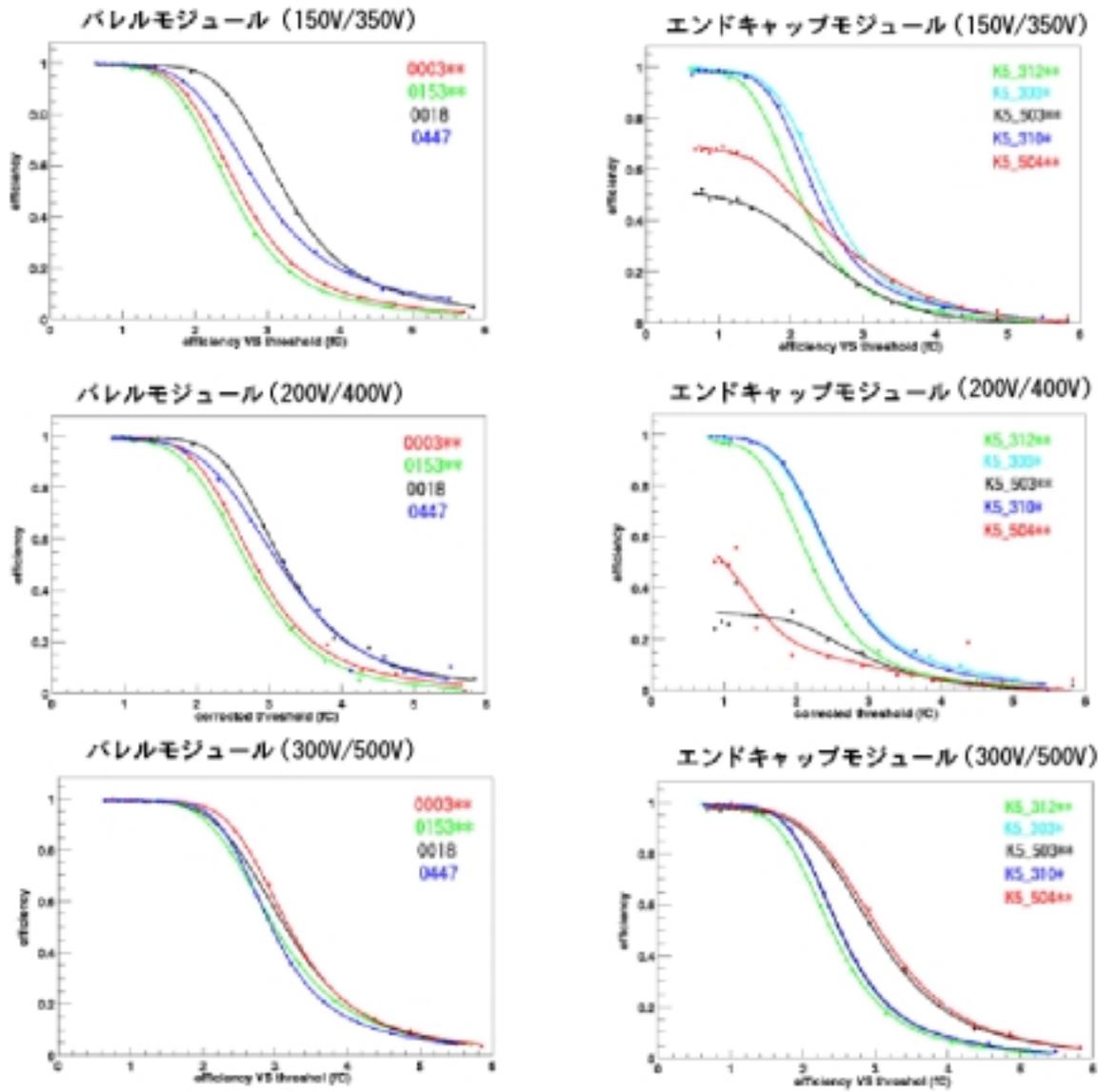


図 6.7: efficiency のスレッシュヨルド依存性

モジュール	バイアス電圧 (V)	検出効率 @ 1fC	メディアンチャージ (fC)
K5_312**	350	98.5	2.4
	500	98.0	2.7
20220330200003**	350	99.5	2.8
	500	99.5	3.1
K5_303*	350	98.8	2.9
	500	99.2	2.9
20220170200153**	350	99.5	2.7
	500	99.5	3.3
K5_503**	350	49.3	1.7
	500	97.4	3.1
20220040200018	150	99.3	3.3
	300	99.5	3.3
K5_310*	350	97.9	2.6
	500	99.0	2.8
20220170200447	150	99.5	3.2
	300	98.5	3.1
K5_504**	350	67.8	1.6
	500	98.3	3.2

表 6.4: 1fC での検出効率とメディアンチャージ

6.5 検出効率のバイアス電圧依存性

この節では、前節で述べたメディアンチャージのバイアス電圧依存性について評価する。図 6.8、9、10、11 に、スレッシュホールドを様々に変えたバイアス電圧に対する検出効率を示した。このプロットから、シリコン検出器を全空乏化するのに必要なバイアス電圧を知ることができる。放射線損傷を与えていないモジュールは、バイアス電圧に関係なく、検出効率 99% の値を示している。つまり、バイアス 100V 以下で検出器は全空乏化されていることが分かる。それに対して、放射線損傷を与えたモジュールは、低いバイアス電圧では検出効率が悪く、これは検出器の全空乏化が充分成されていないことを意味する。しかし、高バイアスになるにつれて検出効率の値は良くなっていき、一定の値に近付いていく。10 年分の放射線損傷を与えたバレルモジュールは 300V、エンドキャップモジュールは 350V のバイアス電圧を与えれば全空乏化ができることが分かる。それに対して、5 年分の放射線損傷をあたえたものは、200~250V のバイアスをかければ充分全空乏化できる。

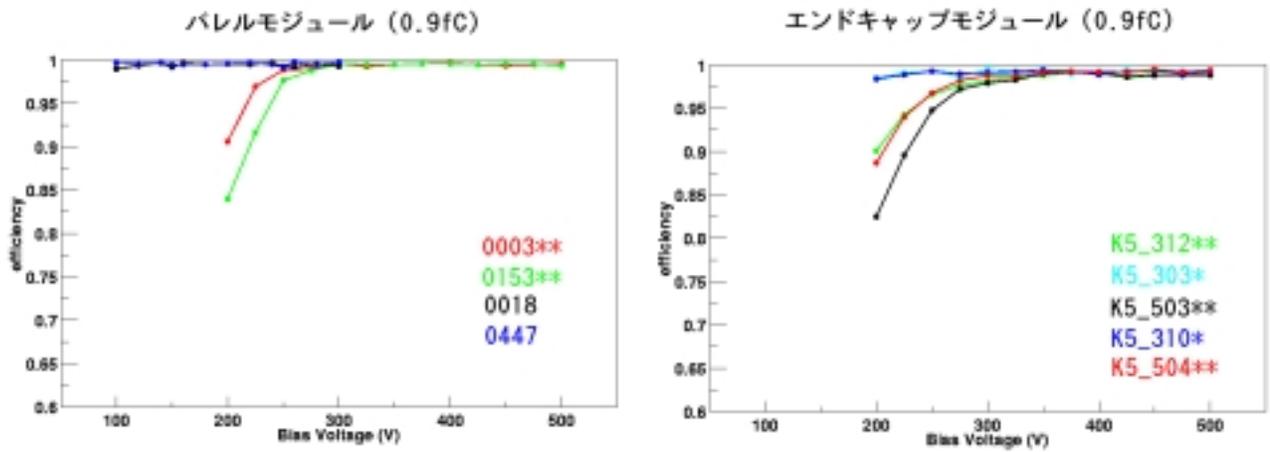


図 6.8: efficiency のバイアス電圧依存性 : 0.9(fC)

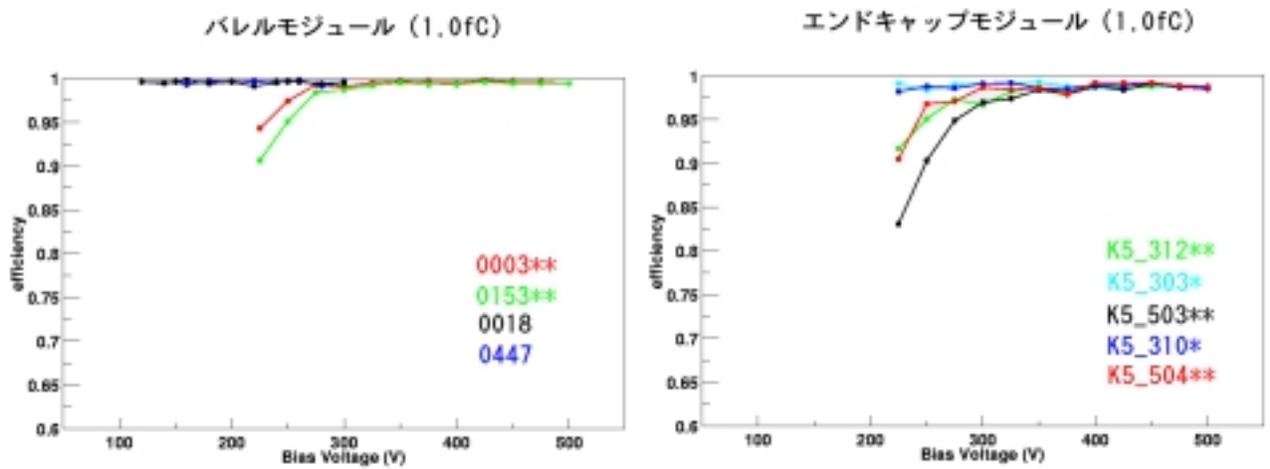


図 6.9: efficiency のバイアス電圧依存性 : 1.0(fC)

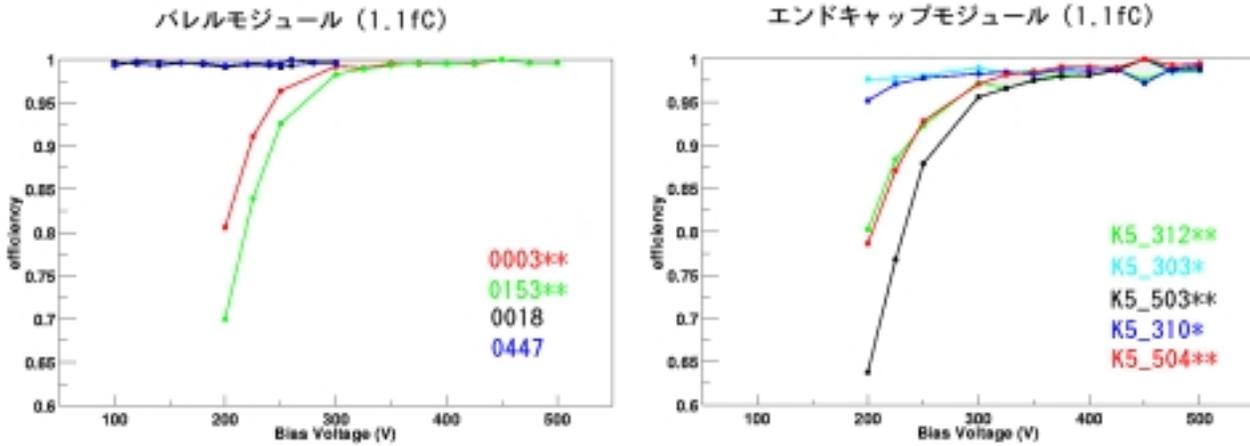


図 6.10: efficiency のバイアス電圧依存性 : 1.1(fC)

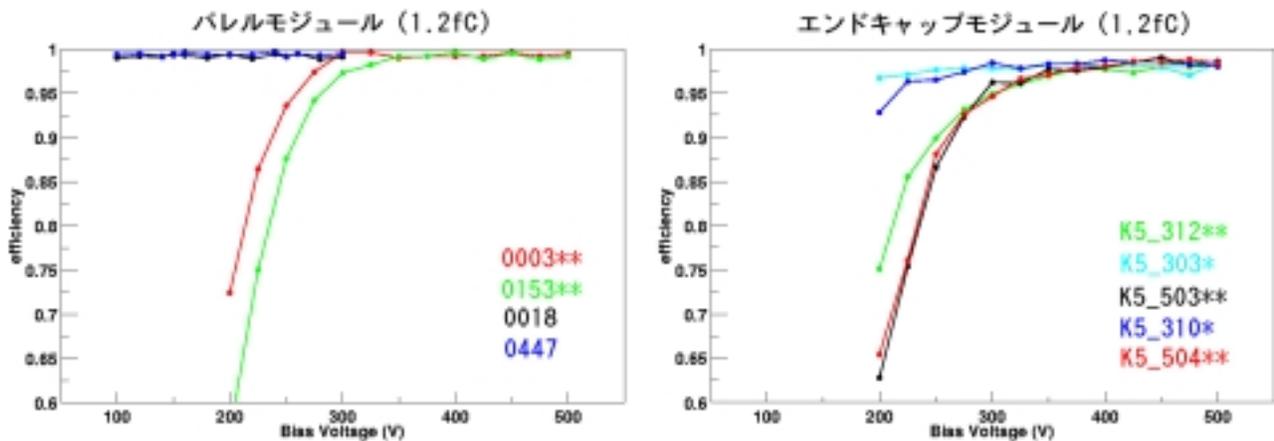


図 6.11: efficiency のバイアス電圧依存性 : 1.2(fC)

6.6 S-N 比

チップの校正用のキャパシタンスの大きさには個体によって不確実性がある、そこで、キャリブレーションスケールに依存しない信号雑音比（以下、S/N(signal to noise) 比）を考える。このときのノイズとは、ヒットマップよりピークの存在するチップのノイズのことであり、そのノイズはビームテストを行なう前のキャリブレーションによってチップごとに調べている。S/N 比の値は、6.3 節でもとめたメディアンチャージをこのノイズで割った値である。パレルモジュールとエンドキャップモジュールについての S/N 比のプロットを図 6.9 に示す。

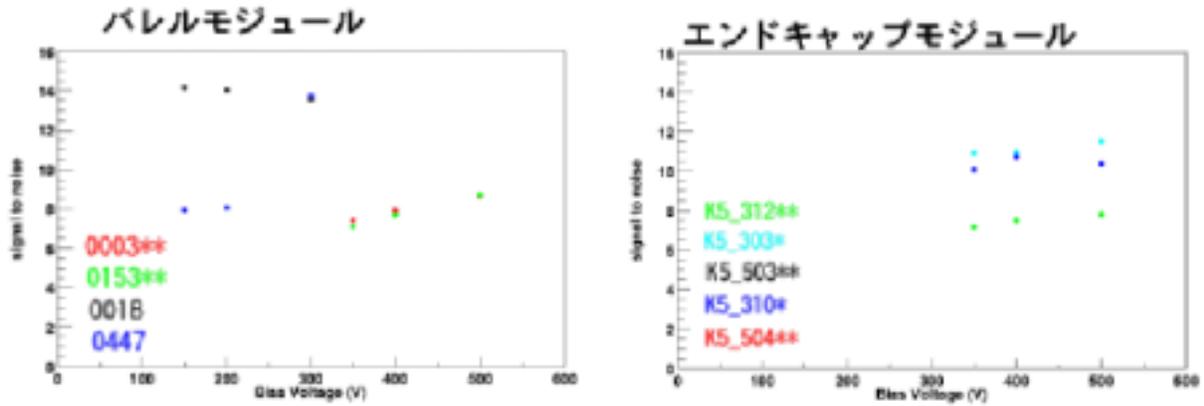


図 6.12: シグナル・ノイズ比

放射線損傷を与えたモジュールは、緩やかに上昇し一定値に定まる傾向にある。一般にバイアス電圧をあげると、ノイズ・シグナルともに増加するが、このS/N値が大きくなるということから検出器がノイズよりもシグナルの方を効率良く読み込んでいることが分かる。つまりこの理由として、シリコン検出器の全空乏化が十分に成されているのかが起因しているといえる。放射線損傷を与えていないバレルモジュールのS/N値は13、放射線損傷を10年分与えたものはバレルモジュール、エンドキャップモジュールともに6~7、5年分の損傷を与えたモジュールは10となっていることが分かる。ヒッグス生成などの物理的に意味のあるイベントはエネルギーが高く、minimum ionizing particle であるといえる。今回のビームテストのシグナルの大きさはLHC実験とほぼ同じであることから、この程度のSN比の値であれば、十分シグナルが読み出せていることがいえる。ここで、バレルモジュール 0447 が他と比べおかしな振る舞いをしていることが分かる。このモジュールは、ASIC 段階のDAQテストの際、ICの不良の1つLGS(Large Gain Spread)であることが分かっている。これは、Gainが通常40~60mV/fCであるのに対して0~70mV/fCと広がっているものである。この結果を見る限り、バレルモジュール 0447 に関しては300V以上のバイアス電圧をかけることにより、正常に使用できることが分かる。また、エンドキャップモジュールのK5_503**とK5_504**は、先述したようにビームスポットがちょうどチップ不良で信号を読み出すことのできない場所に当たっていたためキャリブレーション時にそのチップのノイズを測ることができなかつたため、S/N値をだすことができなかった。

第7章 まとめ

2003年5月、CERN・H8施設において180GeVc π^+ ビームを用いて、ATLAS検出器での飛跡検出を目的としたSCTモジュールのビームテストを行なった。そのとき得られたデータをオフライン時に解析をし、SCT検出器の性能を評価した。今回のビームテストでは、LHC実験開始から10年間にSCTモジュールが受けると予想される 3×10^{14} particle/cm² の放射線被曝を与えたモジュールと5年間に受けると予想される 1.5×10^{14} particle/cm² の放射線被曝を与えたモジュールをテストした。また今回の解析には、新しくDSTフォーマットを使用して解析を行なった。

位置分解能については、1.5~2.5fCのスレッシュホールドで、80 μ mピッチの一様分布から期待される23 μ mの位置分解能に十分近い値を得た。また読み出しASICの波高分布において、ATLAS検出器でビームが25ns毎に衝突するのに対して、いずれのモジュールにおいても十分速いピーキングタイムであることを確認した。検出効率については、チップ不良のない場所にビームスポットが存在すれば、いずれのモジュールにおいても99%に近い検出効率を得られた。また、10年分の放射線被曝を与えたバレルモジュールに関しては300V、エンドキャップモジュールに関しては350V、5年分の放射線被曝を与えたエンドキャップモジュールに関しては200~250V、放射線損傷を受けていないモジュールに関しては100V以下のバイアスをかければシリコンの全空乏化ができ、いずれも99%に近い検出効率を得ることが分かった。またSN比に関しては、放射線損傷を与えていないモジュールは13、5年分の被曝を与えたモジュールは10、10年分の被曝を与えたモジュールは6~7の結果を得た。この値は、LHC実験開始10年後においてSCTモジュールは支障なく使用できる値である。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの人の助言をいただきました。

広島大学・大杉節教授には、アトラスビームテストへの参加の機会を与えてくださいました。広島大学・岩田洋世先生には、シリコン検出器やビームテストに関しての基礎を一から教えていただいただけでなく、CERN 滞在中には、慣れない海外での日々の生活においても細やかな気を配っていただいたお蔭で、集中してビームテストに参加をすることができました。深く感謝致します。また、今回のビームテストでは、他大学の学生にもかかわらず京都教育大学・高嶋隆一先生、岡山大学・田中礼三朗先生には大変お世話になりました。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の海野義信先生には、まずビームテストの解析をする機会を与您いただきました。また、解析を行なう上での基本的知識を忙しい傍ら丁寧なご指導をしていただきました。私にとってこのような研究に携わることができたことは人生において本当に貴重なものとなりました。また KEK の池上先生には、SCT モジュールの DAQ のシステムや NIM モジュールの基本知識について、なかなか理解できない私に何度も丁寧に説明をしてくださいました。ビームテストでは、メルボルン大学の Gareth.Moorhead 先生にビームテストを行なううえでの実践的なアプローチの仕方を学ぶことができました。バレンシア大学の Marcel Vos、Jose Enrique Garcia、Sergio Gonzalez Sevilla の 3 人には、CERN 滞在中だけでなく帰国後も、英語力の乏しい私に対して根気強くかつ丁寧に解析方法を伝授してくださいました。正直、どのように感謝をすればいいのか分からないくらいです。さらに、ヒッグスの勉強を始めるきっかけを与えて下さった icepp・浅井祥仁先生と KEK・神前純一先生には大変お世話になりました。私が大学に入学して以来、ヒッグス解析を行っていたときが一番、純粋物理を深く考え、素粒子の神秘を感じていたときだった気がします。

研究室の日々の生活でも同じく多くの人達に支えられてきました。

同期の上田君、大野君、富永君、中本君には、それぞれの研究について熱く語ってもらうことにより、違った分野の研究に興味、関心を持つことができました。また日々の生活でも「大学生」として満喫でき、私的なこともいろいろ相談できる貴重な仲間であったと個人的に思っています。3年間という研究生生活をともにできたことを嬉しく思っています。また、ドクターの川埜さんと後輩の阿部さんには、私の集中力の切れたときなどいろいろご迷惑をかけたと思います。感謝をするとともにお詫びもしなければなりません。また、1年間という短いあいだではありましたが、修論、卒論の追い込み時期を一緒に乗り切った研究室の4年生の人達には、いろいろ励まされることもありました。研究室配属以来、体調不良が重なり気がめいているときでも、気兼ねなく研究室に顔を出せたのは、皆さんのつくっていた研究室の雰囲気にあると思っています。本当にありがとうございました。

最後に、大学研究生生活を送る間いつも私の精神的な支えになってくれた家族に心から感謝します。ありがとう。

関連図書

- [1] ATLAS INNER DETECTOR TECHNICAL DESIGN REPORT *I*
- [2] ATLAS INNER DETECTOR TECHNICAL DESIGN REPORT *II*
- [3] J.E.Garcia Navarro, M.Vos, “Introduction to SCT Test Beam DST format”, October 2002
- [4] M.Vos, et al., “Beam tests of ATLAS SCT silicon strip detector prototypes; an overview of recent results”, November 2003
- [5] M.Vos, et al., “A study of the tracking performance of irradiated SCT prototypes using test beam data.”, March 2003
- [6] Project Specification, Project Name:ABCD3T Version:V1.2, July 2000
- [7] Jose.Enrique.Garcia, et al., “Comparison of beam test results for irradiated SCT modules”, September 2002
- [8] A.J.Barr, et al., “Beamtests of ATLAS SCT Modules in August and October 2001”
- [9] T.Akimoto, et al., “Beam study of irradiated ATLAS-SCT prototypes”, 2002
- [10] A.Barr, et al., “Results from an LHC-structured beamtest of SCT prototype modules”
- [11] Szymon Gadomski, et al., “Measurement of amplifier pulse shapes in SCT modules using a laser setup”, September 2001
- [12] A.Barr, et al., “Beamtests of Prototype ATLAS SCT Modules at CERN H8 in June and August 2000”, January 2001
- [13] T.Kondo, et al., “Construction and performance of the ATLAS silicon microstrip barrel modules”
- [14] Y.Unno, et al., “Beamtest of Non-irradiated and Irradiated ATLAS SCT Microstrip Modules at KEK”
- [15] Y.Unno, et al., “ATLAS Silicon Microstrip Semiconductor Tracker (SCT)”
- [16] 橋崎 徹, “ATLAS SCT モジュールの性能評価”, 岡山大学, 修士論文, 2001 2

- [17] 松尾 武, “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性能評価”, 岡山大学, 修士論文,2002 2
- [18] 秋元 崇, “アトラスバレル SCT 用量産モジュールの品質保証のシステム”, 筑波大学, 修士論文,2002 2
- [19] 松本 悠, “ATLAS 実験における ttH production を用いた Yukawa Coupling 測定の研究”, 東京大学, 修士論文,2003 2
- [20] 宇野 進吾, “宇宙硬 X 線撮像用低ノイズ両面シリコンストリップ検出器の開発”, 広島大学, 修士論文,2003 2
- [21] ROOT Reference Guide (<http://root.cern.ch/root/Reference.html>).