

LHC-ATLAS 実験 SCT シリコン 飛跡検出器の コミッショニング

岡山大学自然科学研究科数理物理学
高エネルギー物理学研究室

41419130

岡本敦志

平成 21 年 3 月 2 日

概要

2009年に実験が開始される予定のLHC(Large Hadron Collider:大型ハドロン衝突加速器)では、標準理論が予言しているが未発見であるヒッグス粒子の発見が主な目的とされている。LHC実験で起こる事象を観測する汎用検出器の一つであるATLAS検出器は現在地下に移動し、宇宙線を用いたコミショニングが行われている。ATLAS検出器の一部である内部飛跡検出器は粒子の飛跡を検出することを目的としており、ビーム軸方向には2 Tの磁場がかかっている。内部飛跡検出器の一部であるSCT(Semi Conductor tracker)の開発に日本も参加し、岡山大学もそれに携わってきた。

本研究では2008年に行われた宇宙線コミショニングのデータを用いて、SCTのクラスターサイズと入射角の関係を調べた。宇宙線は衝突点からの入射とは違い、様々な入射角での信号を見るのに適している。SCTでは閾値を超えた信号のみがデジタル信号として読みだされる。このときのクラスターサイズを見ることにより、位置分解能や検出効率の評価を行った。また、磁場がかかっている状態では、電荷収集する際に垂直方向に電荷収集されず、ある角度(ホール角)をもって電荷収集される。ホール角を実験から正確に求めることは、位置分解能の精度を保つためにも重要である。ホール角を宇宙線コミショニングから導出し、シミュレーションおよび理論計算と比較した。また、入射角ごとのクラスターサイズをシミュレーションと実データで比較することにより、シミュレーション時の特にデジタイゼーションモデルにおいて重要となるパラメータの値を評価した。

クラスターサイズを比較した結果、クラスターサイズの最小値は実データで約0.5%小さくなった。

入射角と検出効率の関係を調べた結果、入射角70°付近までは、非検出効率は2%以下で一定であることがわかった。

ホール角は実験時の温度や電圧に大きく依存している。今回、温度や電圧などの条件から、ホール角の理論計算を行い、実データと比較した。シミュレーション、実データは5%以内の精度で理論計算とよく一致していることが見出された。

目次

1	ATLAS 実験	5
1.1	LHC 加速器	5
1.2	ATLAS 検出器	5
1.3	内部飛跡検出器	7
2	SCT 飛跡検出器	8
2.1	SCT バレルモジュール	8
2.2	信号読み出し	9
2.2.1	動作原理	9
2.2.2	スペースポイントとクラスターサイズ	11
2.2.3	位置分解能	12
2.3	ホール角	13
2.3.1	ホール角とは	13
2.3.2	ホール角の理論計算	15
2.3.3	ホール角の測定方法	19
3	解析方法	20
3.1	実験から解析までの流れ	20
3.2	宇宙線解析	21
4	デジタイゼーション	23
4.1	デジタイゼーション・パラメータ	23
4.2	電荷収集	23
4.2.1	ホール角	23
4.2.2	ドリフト速度	29
4.3	エレクトロニクス	31
4.4	デジタイゼーション・パラメータのまとめ	31
5	解析結果	33
5.1	宇宙線トラック	33
5.2	クラスターサイズ	34
5.3	Fiducial カット	39
5.4	検出効率と入射角	45
5.5	ホール角の導出	47
6	まとめ	54

図目次

1	CERN 研究所と LHC の航空写真	5
2	ATLAS 検出器	6

3	粒子が痕跡を残す検出器	6
4	内部飛跡検出器	7
5	SCT バレル	8
6	SCT モジュール	9
7	動作原理	10
8	入射角と作られる電荷量	11
9	スペースポイント	11
10	入射角とクラスターサイズ	12
11	クラスターサイズ1とクラスターサイズ2の領域	12
12	クラスターサイズ1および2のときの位置分解能	13
13	ソレノイド	14
14	ホール角	14
15	ホール角とローレンツシフト	15
16	シリコン中での電界とドリフト速度	16
17	上図ドリフトモビリティと不純物濃度の関係。下図ドリフトモビリティと温度の関係。	17
18	シリコン中での電界と正孔のドリフトモビリティ	18
19	電圧とホール角の関係	18
20	磁場がかかっているときの電荷収集とクラスターサイズが最小になるときの入射角	19
21	解析までの流れ	21
22	SCT バレルと宇宙線の入射角	22
23	ストリップ電極からの深さと電界の関係	24
24	ストリップ電極からの深さとホール角の関係	25
25	ホール角とドリフト経路	25
26	シリコン中での電極からの深さ z とローレンツシフト	26
27	電極からの深さ z と電荷収集が完了したときのホール角	27
28	入射角 4.02° のときのローレンツシフト	28
29	入射角と磁場が一様でないときのローレンツシフトの積分平均値	28
30	TCAD シミュレーションによる SCT シリコン内の電界。	29
31	電荷収集時間と電極からの深さの関係	30
32	実データのトラック χ^2/ndf 分布	33
33	シミュレーションのトラック χ^2/ndf 分布	34
34	pt 分布	34
35	SCT モジュールに対する入射角の分布	35
36	磁場がかかっているときのクラスターサイズごとの入射角の分布。	36
37	磁場がかかっていないときのクラスターサイズごとの入射角の分布	36
38	クラスターサイズ分布	37
39	入射角 20° 以内のクラスターサイズ分布	37
40	入射角 20° から 90° の時のクラスターサイズの分布	38
41	別サイドのクラスター	39

42	別サイドの SCT クラスタ (再構成されたトラックから 1mm 以内)	40
43	入射角が 70 °から 90 °のときの別サイドの SCT クラスタ (外挿されたトラックから 1mm 以内)	41
44	SCT モジュールのジオメトリ	41
45	Fiducial カット 前とカットごのクラスタサイズ 0 のトラックのローカル座標	42
46	Fiducial カット後の別サイドの SCT クラスタサイズ分布。	43
47	実データのトラックの位置とヒットの位置の差の分布	44
48	シミュレーションのトラックの位置とヒットの位置の残差分布	44
49	磁場ありのときの入射角と非検出効率の関係	45
50	上の図の拡大図。	46
51	磁場なしのときの入射角と非検出効率の関係	46
52	上の図の拡大図	47
53	実データの入射角とクラスタサイズの平均。	48
54	横軸入射角、縦軸クラスタサイズの平均。	48
55	フィット結果 (± 30 °)	49
56	実データのフィット結果 (ホール角 ± 10 °)	50
57	シミュレーションのフィット結果	50
58	電圧とホール角の計算値との比較	52
59	温度とホール角の計算値との比較。	52
60	ホール角と磁場の関係。	53

はじめに

2009年に実験が開始される予定であるLHC実験では、標準理論で予言されているヒッグス粒子および標準理論を越える超対称性粒子や余剰次元の発見が期待されている。LHC実験で起こる事象を検出するATLAS検出器は、現在地下に移動し、宇宙線によるコミッションが行われている。ATLAS検出器の一部であるSCT(SemiConductor Tracker)は荷電粒子の飛跡を検出し、運動量測定、Bメソンやレプトンの崩壊点測定に貢献する。そのため高い位置分解能が要求される。SCTのストリップ間隔は、 $80\mu\text{m}$ あり、位置分解能は $23\mu\text{m}$ である。しかしこの値はSCTモジュールに対する入射角が垂直でクラスターサイズが1のときのものである。位置分解能はクラスターサイズ、入射角によっても異なるため慎重に調べる必要がある。

また、内部飛跡検出器は実験時にはビーム軸方向に2Tの磁場がかかっているため、ホール角(ローレンツアングル)の効果を考えなければならない。ホール角とは磁場の中で電荷収集する際、ローレンツ力により、電荷の経路が曲げられる時の角度である。ホール角はシミュレーションでは 4° に設定されている。検出器の厚さは $285\mu\text{m}$ であるため、検出される位置と粒子が実際に通過する位置とでは平均して約 $10\mu\text{m}$ のずれが生じる。より正確な飛跡を求めるためには、このずれを補正しなければならない。

LHC実験で起こる事象をより正確に判別するために、シミュレーションでの解析がおこなわれている。シミュレーションで、本実験をより正確に再現するためには、シミュレーション時に設定されている様々なパラメータのチューニングをしなければならない。ホール角もSCT検出器のシミュレーション時に重要となるパラメータの一つである。よって実験からホール角の正確な値を導出し、シミュレーションの値とずれていれば、ホール角もしくはホール角に影響するパラメータのチューニングを行う必要がある。また、ホール角はバイアス電圧、温度、放射線損傷などにも依存しているため、実験条件のモニタリングとしても期待されている。

本研究では2008年に行われた宇宙線コミッションにより、SCTモジュールに対する入射角とクラスターサイズの関係について調べ、ホール角の正確な測定を行うことを目的としている。また、クラスターサイズについてもシミュレーションと実験データを比較し、シミュレーション時のクラスターサイズに関係したパラメータの評価を行う。

第一章ではLHC加速器とATLAS検出器について説明する。第二章では今回解析を行ったSCT飛跡検出器の動作原理、クラスターサイズ、ホール角について説明する。第三章では宇宙線コミッションおよび宇宙線シミュレーションの解析までの流れについて説明する。第四章では、シミュレーションで用いられるデジタイゼーションモデルについての議論を行う。第五章ではクラスターサイズおよびホール角の解析結果について述べたあと考察を行う。第六章ではそれらの結果をまとめる。

1 ATLAS 実験

1.1 LHC 加速器

スイスジュネーブ郊外にある欧州原子核研究機構 (CERN) では大型ハドロン加速器 (LHC) の建設が進められている。2008 年の 9 月、最初のビーム入射に成功し、2009 年に実験が本格的に開始されようとしている。現在はその最終調整の段階である。CERN の位置と LHC の航空写真を図 1 に示す。LHC は世界最大の衝突型円形加速器で、円周は 27 キロメートルある。地下 100 メートルの深さにトンネルが掘られており、そのトンネル内に加速器が設置されている。この加速器で陽子ビームを 7TeV まで加速し、正面衝突させることにより、これまでにない重心系エネルギー 14TeV を実現する。LHC では標準理論で予言されている、ヒッグス粒子や標準理論を超える物理である超対称性粒子、余剰次元などの発見が期待されている。LHC で起こる事象を検出する汎用検出器は ATLAS と CMS の 2 つがある。本研究では岡山大学が参加している ATLAS 実験において解析を行った。



図 1: (左)CERN 研究所の位置。スイスとフランスの国境に位置する。(右)LHC の航空写真。円周 27 キロメートルのトンネルが掘られており、ビーム衝突点に ATLAS や CMS といった検出器が設置されている。

1.2 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器を図 2 に示す。ATLAS とは A Toroidal LHC ApparatuS の略称である。この検出器は全長 (ビーム軸方向の長さ) が約 40 m あり、高さが約 22 m、重量が 7000t に達する。ATLAS 検出器は LHC で起こる物理現象を測定するために様々な検出器を組み合わせた構造になっている。内側から、内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロ

リメータ、 μ 粒子検出器から構成される。これらの検出器はすべてバレル部において円筒形の形をしている。内部飛跡検出器は荷電粒子の飛跡を検出し、運動量を測定することができる。電磁カロリメータでは運動量の高い電子および光子のエネルギーを測定する。ほとんどの電子および光子はこの検出器の中で電磁シャワーを起こして止まる。ハドロンカロリメータでは π^\pm 中間子や陽子、中性子などのハドロンのエネルギーを測定する。これらのハドロンのほとんどは、この検出器でハドロンシャワーを起こし、持っているエネルギーのほとんどを失って止まる。 μ 粒子検出器はミュオンをとらえる検出器で、ミュオンは物質透過力が強いいためいちばん外側に取り付けられている。粒子が痕跡を残す検出器を図3に示す。

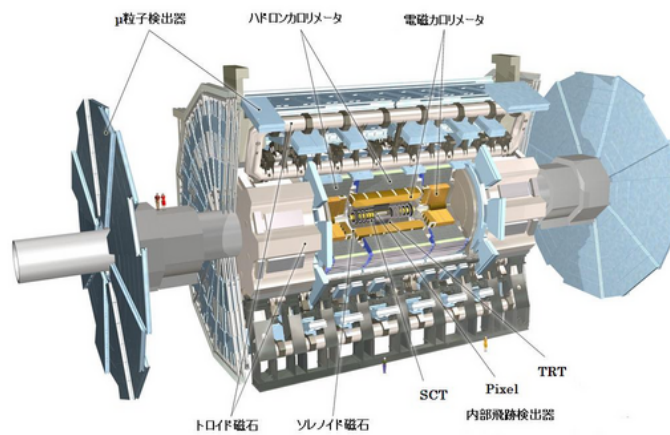


図 2: ATLAS 検出器。外側から、ミュオン検出器、ハドロンカロリメータ、電磁カロリメータ、内部飛跡検出器からなる。

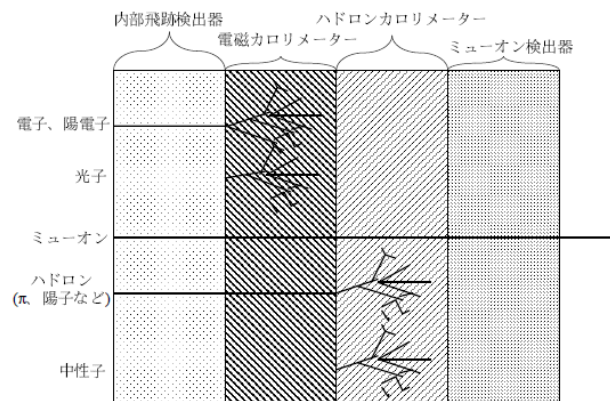


図 3: 粒子が痕跡を残す検出器

1.3 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器の絵を図4に示す。内部飛跡検出器は内側から、Pixel、SCT、TRT(Transition Radiation Tracker)、の3つの検出器からなる。これらの検出器はいずれもバレル(円筒形の部分)とエンドキャップ(バレルの両側にある円盤の部分)からなり、荷電粒子の飛跡を検出することを目的としている。内部飛跡検出器には、2Tの磁場がかかっており、荷電粒子が通過する際にローレンツ力により、その飛跡は曲げられる。この曲率より荷電粒子の運動量を測定することができる。

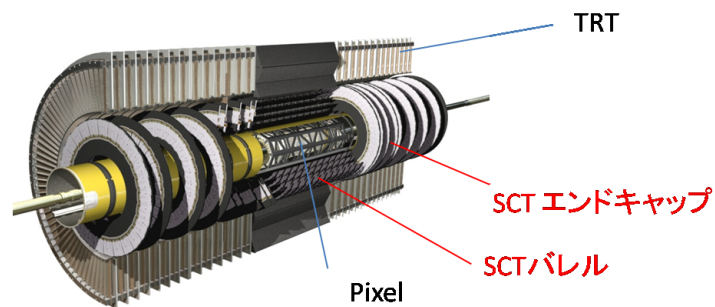


図 4: 内部飛跡検出器。内側から、Pixel、SCT、TRT の3つからなる。

2 SCT 飛跡検出器

2.1 SCT バレルモジュール

SCT(Semi Conductor Tracker) は内部飛跡検出器の一部で TRT と Pixel の間に位置する(図4)。以下では、本研究で解析を行ったバレル部について述べる。円筒形の SCT バレルは4層構造をしていて、半径が一番内側から、30cm、37.4cm、44.7cm、52cm ある。バレルのビーム軸方向の長さは160cmあり、ビーム軸方向には12枚の SCT モジュールが取り付けられている。4層すべて合わせると2112台の SCT バレルモジュールからなる(図5)。

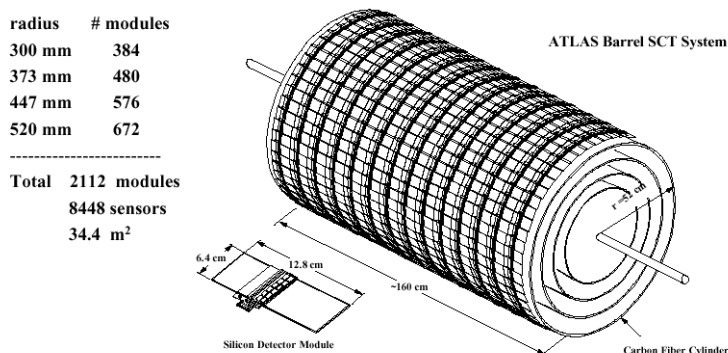


図 5: SCT バレル

SCT バレルモジュールは、4枚のシリコンセンサーが張り合わされている。表に2枚裏に2枚のセンサーが角度40mradで張り合わされている。図6にSCTモジュールを示す。SCTモジュールは大きく分けてシリコンストリップセンサー、ハイブリッド基盤、ベースボードの3つからなる。シリコンストリップセンサーは長さ128mmあり、ビーム軸方向に80 μm 間隔でストリップが768本通っている。粒子が通過した際にこのストリップから信号が読みだされ、表と裏で2次元的な粒子の位置を知ることができる。ハイブリッド基盤にはABCDチップ(ATLAS Binary Chip DMILL)と呼ばれる読み出し用の電気回路がのせられている。1つのABCDチップで128チャンネルの読み出しをおこない、片面で6つ、両面で12個のABCDチップがのせられている。ベースボードはシリコンセンサーの保持、放熱が主な役割である。ベースボードは優れた熱伝導性、電気伝導性を持ち、シリコンセンサーにバイアス電圧をかける役割がある。

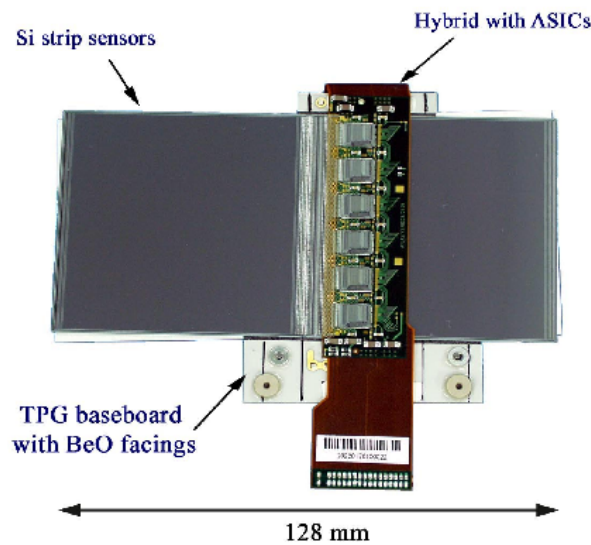


図 6: SCT モジュール。シリコンストリップセンサー、ハイブリッド基盤、ベースボードからなる。

2.2 信号読み出し

2.2.1 動作原理

SCT モジュールに荷電粒子が通過した際の信号が読みだされる模式図を図 7 に示す。シリコンセンサーは、 n 型半導体に p 型半導体を電極としてストリップ状に埋め込んだ構造となっている。信号読み出しは片面で行い、この p 型電極から読みだされる。一方、反対面にはバイアスを加えるための高濃度の n 型電極が形成されている。ここに逆バイアス電圧をかけることにより n 型半導体部に空乏層を作る。空乏層とは、キャリアがまったく存在しない領域のことである。 p 型電極から n バルク全体が空乏化されるとき電圧のことを全空乏化電圧という。SCT の全空乏化電圧は約 70V であり、本実験での電圧は 150V に設定されている。放射線損傷を受けた場合には全空乏化電圧はさらに大きくなり、全空乏化するために 400V 以上の電圧をかけることがある。ここに荷電粒子が通過する際に落とすエネルギーにより電子と正孔のペアができる。 n バルクにかけられた電場により電子と正孔はそれぞれ電極へドリフトし、 p 型電極から信号として読みだされる。ストリップから読みだされた信号は ABCD チップで閾値を超える信号のみが、デジタル信号として読みだされる。LHC 実験では、閾値は通常 $1fC$ に設定されている。

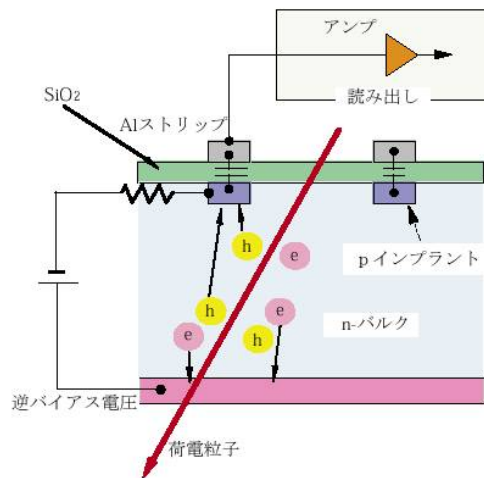


図 7: 入射粒子が失うエネルギーにより電子正孔対ができる。それらは逆バイアス電圧により電極へ収集される。

SCT では入射粒子が失うエネルギーは、ランダウ分布に従う。ランダウ分布ではガウス分布とは違い、エネルギー損失量が高いほうに広がる。MIP (Minimum Ionization particle) では SCT 検出器を通過する際に $80\mu\text{m}$ あたり 80 個の電子正孔対が生成される。SCT センサーに垂直に荷電粒子が通過したとすると、SCT センサーの厚さは $285\mu\text{m}$ なので、22800 個の電子正孔対が生成されることになる。これを電荷に直すと約 3.6fC となる。よって、1 つのストリップに 3.6fC の電荷が収集されたとすると、閾値 1fC は信号を見るには十分な値である。入射角が大きくなると SCT センサーの物質中を通過する距離が大きくなり、作られる電荷も大きくなる。入射角を大きくしていったときの SCT の物質中で作られる電荷量と、ストリップ間隔 $80\mu\text{m}$ あたりに作られる電荷量の計算結果を図 8 に示す。入射角が大きくなるにつれて作られる電荷も大きくなるが、入射角が 15° を超えたあたりから、電子正孔対の作られる領域がストリップ間隔の $80\mu\text{m}$ を超え、1 つのストリップあたりに読みだされる電荷の量は小さくなる。ただしこのときの入射角とはストリップに対して垂直な方向への角度である。ストリップに対して平行な方向への入射角を持った時、ストリップあたりの電荷収集量はこれよりも大きくなる。入射角は、SCT センサーに対して垂直方向を 0° とし、ストリップの方向に対して垂直な方向への角度とする。

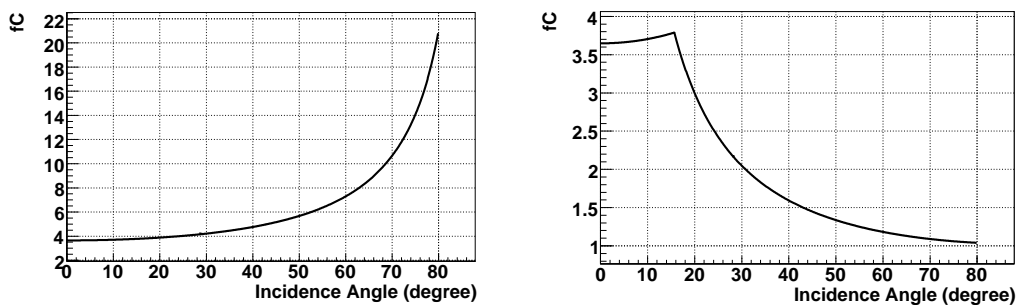


図 8: MIP の入射角 (ストリップに対して垂直な方向) と作られる電荷量 (左図)。ストリップ間隔あたりに作られる電荷量と入射角。ストリップ間隔 ($80\mu\text{m}$) あたりに作られる電荷量は入射角 15° 付近から減少する (右図)。

2.2.2 スペースポイントとクラスターサイズ

2枚のシリコンセンサーは 40mrad 傾いて張り合わされているため、読みだされたストリップの交点から 2 次元的な粒子の通過した位置を検出することができる。この交点のことをスペースポイントと呼ぶ (図 9)。また、複数のストリップが連続してヒットしたときそれらのストリップをまとめてクラスターと呼ぶ。このときスペースポイントは連続したヒットの midpoint との交点で読みだされる。4 層あるバレルのスペースポイントをつなぎ合わせるにより荷電粒子が通過した飛跡は再構成される。

連続してヒットしたストリップの数のことをクラスターサイズという。荷電粒子が SCT センサーに対して垂直に通過した際、ほとんどの場合 1 つのストリップから読みだされる。このときクラスターサイズは最小になる。しかし SCT センサーに対して大きな角度をもって入射したとき、SCT センサー内の広い範囲で電子正孔対が作られ、複数のストリップで電荷収集される。このときクラスターサイズの値も 2、3 と大きくなる (図 10)。

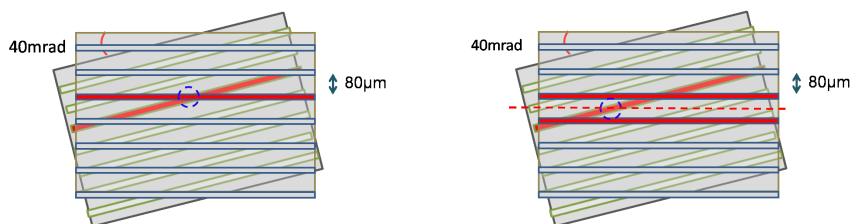


図 9: 読みだされたストリップの交点をスペースポイントとして読みだす (左図)。複数のストリップが連続してヒットしたときその midpoint との交点をスペース・ポイントとする (右図)。

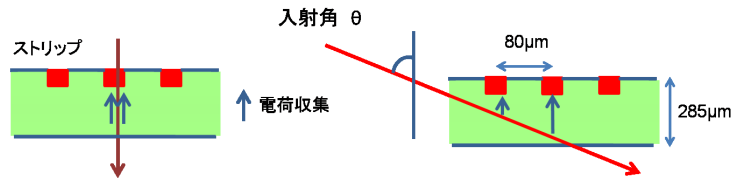


図 10: 垂直に入射したときクラスターサイズは最小になる (左図)。角度をもって入射したときクラスターサイズは大きくなる (右図)。

クラスターサイズと入射角の関係を表したモデルを式 (1) に示す。

$$d = a|\tan(\theta)| + b_{min} \quad (1)$$

このとき d はクラスターサイズ、 θ は入射角、 a は SCT センサーの厚さ、 b_{min} はクラスターサイズの平均の最小値である。 b_{min} は検出効率を良くするためにも 1 以上が望ましい。

2.2.3 位置分解能

SCT の片面の位置分解能は次により計算できる。

$$\sigma^2 = \int_{x_0 - \frac{h}{2}}^{x_0 + \frac{h}{2}} (x - x_0)^2 \frac{dx}{h} = \left(\frac{h}{\sqrt{12}}\right)^2 \quad (2)$$

x_0 はストリップの位置、 x は粒子が通過した位置、 h はストリップ間隔である。この式は x_0 のストリップが読みだされるとき、 $x_0 - \frac{h}{2}$ から $x_0 + \frac{h}{2}$ の間のある点を粒子が通過する確率が $1/h$ で一様であるときの RMS を計算したものである。このときの位置分解能は入射角が 0° 、クラスターサイズがすべて 1 のときのものである。 h を $285\mu m$ とすると、位置分解能は $23\mu m$ となる。しかし、実際はストリップの中間あたりを粒子が通過した際は、クラスターサイズが 2 になる領域が存在する。

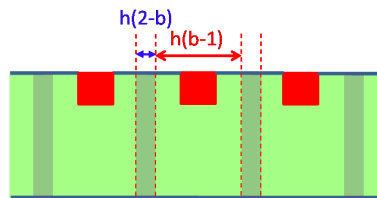


図 11: 粒子が垂直に入射したときストリップの中間あたりではクラスターサイズ 2 になる領域 ($h(2-b)$) が存在する。

クラスターサイズが 2 となるとき、検出される粒子の位置は読みだされた 2 つのストリップの中間となり、このときの位置分解能はクラスターサイズが 1 のときよりもさらに

良くなる。b をクラスターサイズの平均としたとき、クラスターサイズが 1、および 2 として検出される領域は $x_0 \pm h/2 \times (2-b)$ 、 $x_0 \pm h/2 \times (b-1)$ と計算できる。これらの領域から同様にクラスターサイズが 1 のとき、および 2 のときの位置分解能を計算すると、それぞれ、 σ_{c1} 、 σ_{c2} とし、式 (3)(4) で示す。

$$\sigma_{c1}^2 = \int_{x_0 - \frac{h}{2}(2-b)}^{x_0 + \frac{h}{2}(2-b)} (x - x_0)^2 \frac{dx}{h(2-b)} = \left(\frac{h}{\sqrt{12}}(2-b) \right)^2 \quad (3)$$

$$\sigma_{c2}^2 = \int_{x_0 - \frac{h}{2}(b-1)}^{x_0 + \frac{h}{2}(b-1)} (x - x_0)^2 \frac{dx}{h(b-1)} = \left(\frac{h}{\sqrt{12}}(b-1) \right)^2 \quad (4)$$

ただし、これらの位置分解能は荷電粒子が SCT センサーに対して垂直に入射し、 $1 \leq b \leq 2$ のときのものである。クラスターサイズが 1 のとき、および 2 のときのそれぞれにおいて、クラスターサイズの平均値と位置分解能の関係を図 12 に示す。クラスターサイズの平均値が 1.5 のとき全体的に位置分解能は $23 \mu\text{m}$ の半分となる。クラスターサイズの平均値は入射角によっても異なるため、位置分解能は入射角によっても異なる。

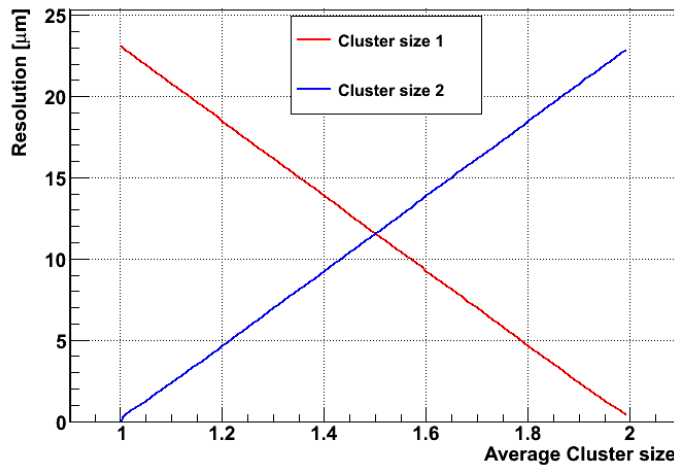


図 12: 横軸クラスターサイズの平均値と縦軸位置分解能。

2.3 ホール角

2.3.1 ホール角とは

内部飛跡検出器に磁場がかかっていないとき、シリコン内部でできた電子正孔対は電界に従い、電極方向にまっすぐ電荷収集される。しかし、LHC 実験では内部飛跡検出器に 2T の磁場がかかっている。磁場は内部飛跡検出器を取り巻くソレノイドによって、ビーム軸方向にかけられている。ソレノイドの写真を図 13 に示す。このとき SCT にはストリップと平行な方向に磁場がかけられることになる。シリコンセンサーに電子正孔対ができ電

荷収集される際、ローレンツ力によりその経路は曲げられる (図 14)。このときの電荷収集される角度をホール角という (または、ローレンツ角ともいう)。内部飛跡検出器が地下に移動しコミッショニングが始まってから、実験時のホール角の正確な値はまだ求められていない。温度や電圧、磁場にもよるが、ホール角はシミュレーションでは約 4° に設定されている。センサーが $285\mu\text{m}$ 、ホール角 4° の角度をもって電荷収集したとき、検出される粒子の位置と、実際に通過する粒子の位置とでは、平均 $10\mu\text{m}$ のずれが生じる (ローレンツシフト)。ホール角と、ローレンツシフトの関係を図 15 に示す。このときのローレンツシフトは $285/2 \times \tan\theta_L$ で求めた。

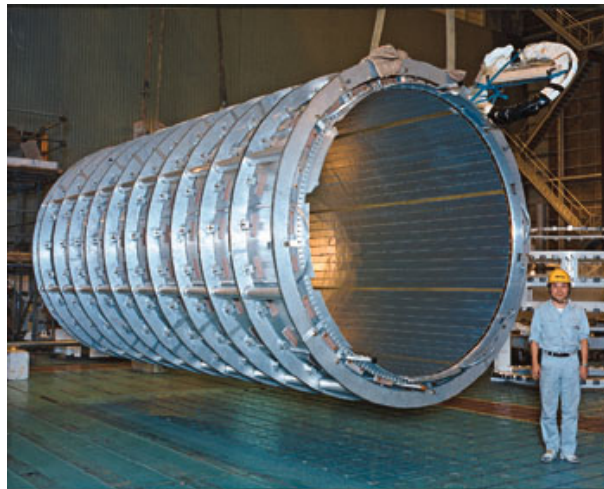


図 13: ソレノイド磁石。内部飛跡検出器と電磁カロリメータの間に設置される。

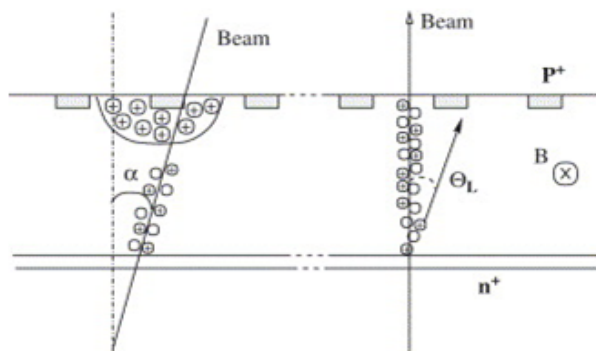


図 14: 磁場がかかっていないとき (左) と、磁場がかかっているとき (右) の電荷収集の仕方。磁場がかかっているとき、ある角度 θ_L をもって電荷収集される。

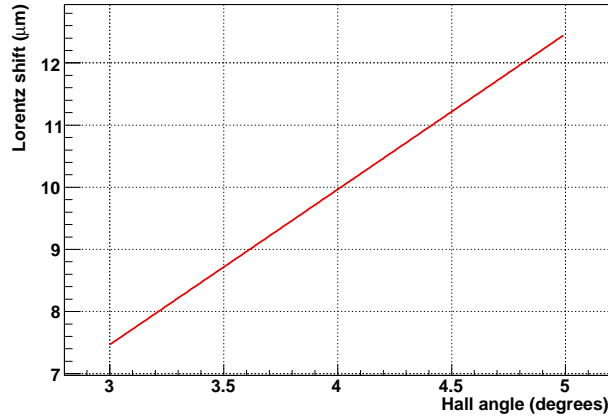


図 15: ホール角とローレンツシフト

2.3.2 ホール角の理論計算

ホール角の計算式を以下に示す。

$$\tan \theta_L = \mu_H B = r \mu_d B \quad (5)$$

このとき、 θ_L はホール角、 μ_H はホール・モビリティ、 μ_d はドリフト・モビリティである。また、 r 電界はホール・ファクターと呼ばれるものである。ドリフトモビリティは以下のモデル式で近似される。また、ここで使われるパラメータを表に示す [6]。

$$\mu_d = \frac{v_s/E_c}{[1 + (E/E_c)^\beta]^{1/\beta}} \quad (6)$$

	Electrons	Holes
$v_s (cm s^{-1})$	$1.53 \cdot 10^9 \cdot T^{-0.87}$	$1.62 \cdot 10^8 \cdot T^{-0.52}$
$E_c (V cm^{-1})$	$1.01 \cdot T^{1.55}$	$1.24 \cdot T^{1.68}$
β	$2.57 \cdot 10^{-2} \cdot T^{0.66}$	$0.46 \cdot T^{0.17}$
r	$1.13 + 0.0008 \cdot (T - 273)$	$0.72 - 0.0005 \cdot (T - 273)$

表 1: ドリフトモビリティの計算に使われるパラメータ

このとき、 T は絶対温度、 E は電界である。これらすべてのパラメータが温度に依存していることがわかる。 r も温度に依存しているが、その依存性は小さい。

ドリフト・モビリティはドリフト速度と電界の比例係数として知られている。シリコン中での電子、正孔それぞれのドリフト速度と電界の関係を図 16 に示す。電界が小さい時 ($10^2 V/cm$ 以下) シリコン中でのドリフト・モビリティは一定となる。しかし、電界が大きくなるにつれて、ドリフトモビリティは一定ではなくなり、小さくなる (図 18)。SCT 内での電界が一様であると仮定したとき、SCT センサー内の電界は $5263(V/cm)$ と計算できる。この電界付近でのドリフトモビリティは電界に対して一定ではなく、大きく電界に依存している (図 18)。また、ドリフトモビリティは温度にも大きく依存している。よって、ホール角もまた電界と温度に大きく依存しているということがいえる。次に、ドリフトモビリティの温度への依存性と、不純物濃度への依存性を図 17 に示す。また、ドリフトモビリティの電界への依存性を図 18 に示す。

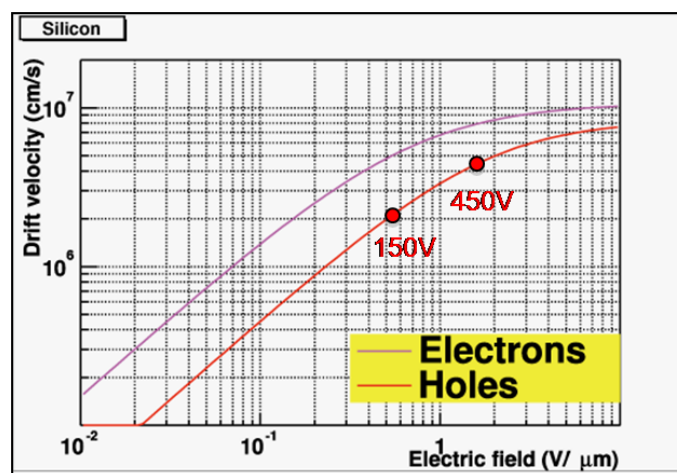


図 16: シリコン中での電界と電子、正孔のドリフト速度。150V、450V の点はそれぞれ SCT が全空乏化されて電界が一様と仮定したときの電界である。

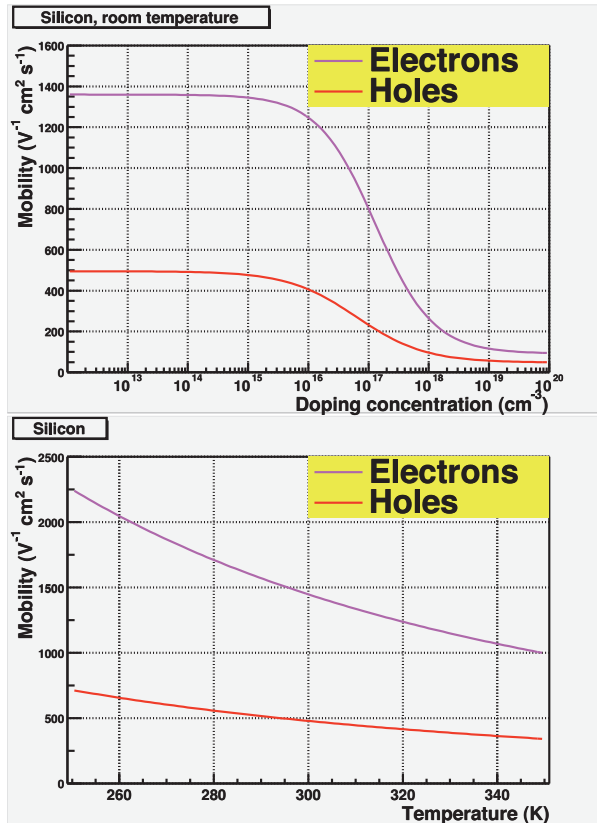


図 17: 上図ドリフトモビリティと不純物濃度の関係。下図ドリフトモビリティと温度の関係。

不純物濃度は $10^{15}/cm^3$ あたりからドリフトモビリティは変化する。不純物濃度は実験時には放射線損傷により変化する。SCT シリコンの p 型半導体に埋め込まれている不純物濃度は約 $10^{12}/cm^3$ である。よって上の図からドリフトモビリティの不純物濃度への依存は小さい。

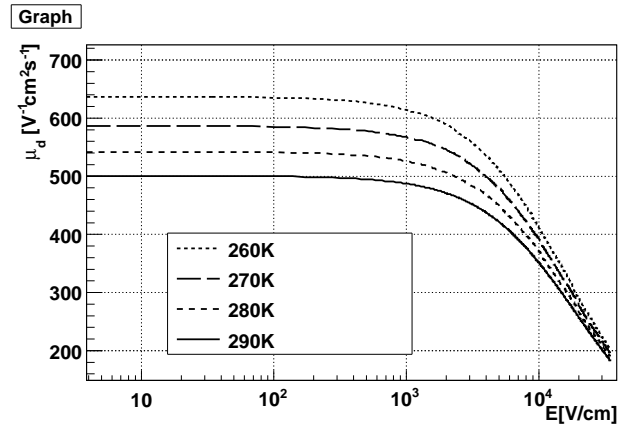


図 18: シリコン中での電界と正孔の温度ごとのドリフトモビリティ。破線は SCT センサーが 150V で全空乏化したときのシリコン内の電界。

ドリフトモビリティのモデル式を用いたホール角の計算結果と電界の関係を 19 に示す。

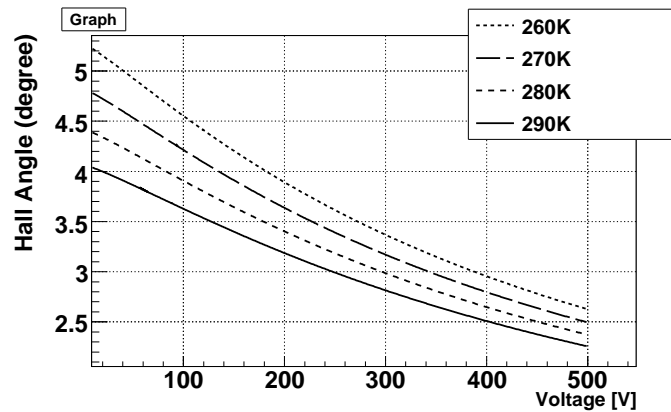


図 19: 電圧とホール角の関係。電圧、もしくは温度によりホール角の値は大きく異なる。

上の図からもわかるようにホール角は温度にも大きく依存している。

電圧 150 V、温度 273 K でのホール角の電界と温度の依存度はそれぞれ、 $\partial\theta_L/\partial T = 0.027$ (°/K)、 $\partial\theta_L/\partial V$ は 0.005 (°/V) と計算できる。電圧は放射線損傷時には全空乏化のため 450 V にまで上げる必要がある。また、センサーの温度は実験条件等で、変わってくる。これらの条件の違いによるホール角の違いが理論計算と一致しているのかどうか詳しく調べる必要がある。

2.3.3 ホール角の測定方法

ホール角とクラスターサイズは密接な関係にある。まず内部秘跡検出器に磁場がかかっていないとき、クラスターサイズの平均値は入射角が 0° のときに最少となる (式 1)。しかし、磁場がかかっているとき、クラスターサイズは 0° のときに最少とならず、ホール角の角度で入射したときに最少となる (図 20)。磁場がかかっているときの入射角とクラスターサイズの関係についてのモデル式を式 7 に示す [2]。

$$d = a|\tan(\theta) - \tan(\theta_L)| + b_{min} \quad (7)$$

今回、宇宙線コミッションングのデータを用いてクラスターサイズと入射角の関係を調べた。そして、クラスターサイズの最小値とそのときの入射角を求め、それをホール角として導出した。

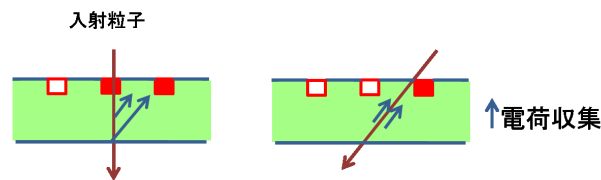


図 20: 磁場がかかっているときの電荷収集 (左図)。クラスターサイズが最小になるときの荷電粒子の入射 (右図)。ホール角の角度で粒子が入射したとき、入射した方向に電荷収集されるため、クラスターサイズは最小となる。

3 解析方法

3.1 実験から解析までの流れ

実データもしくはシミュレーションによる実験から解析までの流れを図 21 に示す [8]。これらのプロセスはすべて ATHENA と呼ばれるソフトウェア群で行われる。縦の Generation から、Digitization までのプロセスはシミュレーションのみで行われるプロセスである。Real Data の解析は Reconstruction から行われる。シミュレーションでは、まず Generation でイベント生成のシミュレーションが行われる。本研究では衝突実験によるイベント生成シミュレーションのデータは用いず、宇宙線イベント生成によるデータを用いた。Simulation では Generation で発生した粒子が検出機内を通過するときに起こる現象 (エネルギーロス、 dE/dx など) を計算する。SCT では荷電粒子が通過した際にシリコン内に電子正孔対が生成される。この検出器シミュレーションは Geant4 と呼ばれるシミュレーターが使われている。

Digitization(デジタイゼーション) では検出器シミュレーションで起こった現象によって、検出器がどのように振る舞うのかを再現する。つまり、デジタイゼーションによって検出器の振る舞いを再現する。SCT では検出器シミュレーションで生成された電子正孔対の電荷収集を行い、ABCD チップで行われる増幅、デジタル信号への変換などを再現する。ここでは、電荷収集や増幅などの振る舞いをより正確に再現するために必要なパラメータがいくつか設定されており、それらのパラメータに従ってデジタイゼーションは行われる。本研究ではこれらのパラメータの評価を行うことを目的としている。

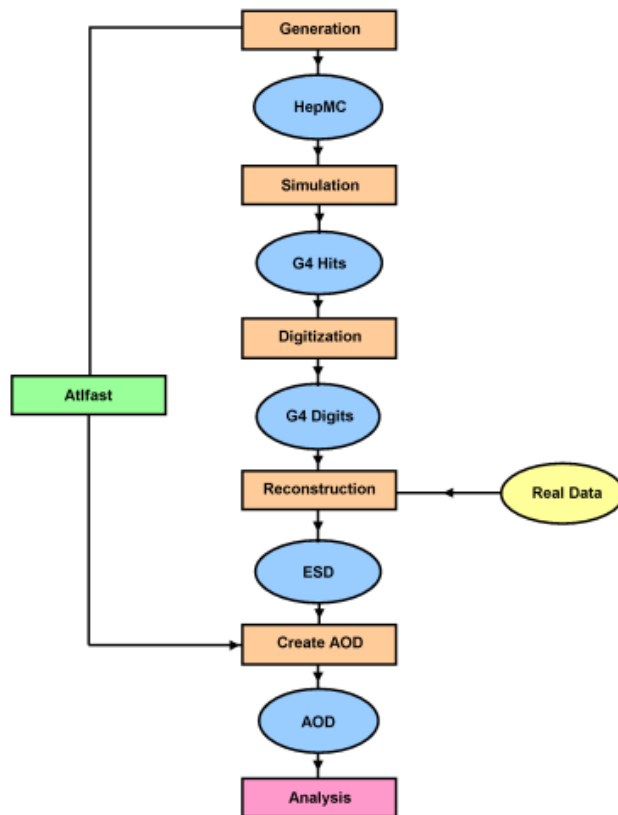


図 21: 解析までの流れ

Reconstruction では、検出器から読み出された信号から、荷電粒子の飛跡、運動量、エネルギーなど物理解析に必要な情報を再構成する。そこから作られる、ESD(Event Summary Data) や AOD(Analysis Object Data) が物理解析に用いられる。

3.2 宇宙線解析

本研究では実データ、シミュレーションともに宇宙線データを解析した。宇宙線は SCT モジュールに対して様々な角度で入射するため、入射角とクラスターサイズの関係を探るのに適している。SCT バレルに宇宙線が通過し、そのトラックの SCT モジュールに対する入射角とクラスターの図を図 (22) に示す。

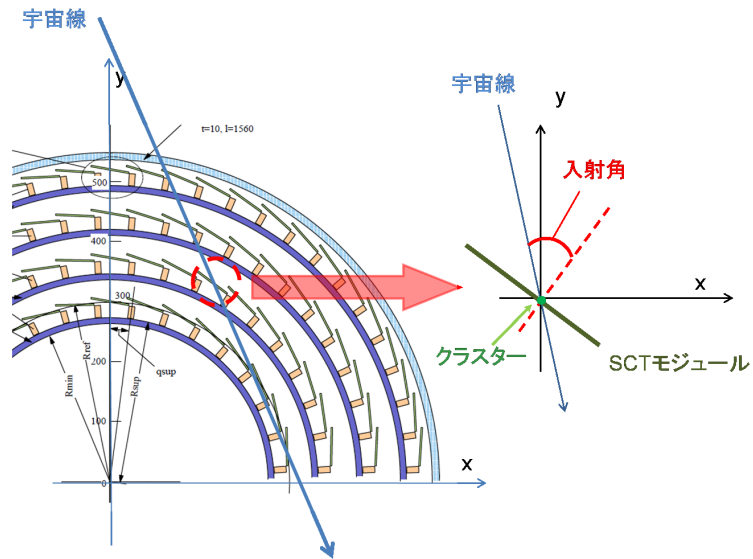


図 22: SCT バレルと宇宙線の入射角。ビーム軸を z 軸とし、 x - y 平面における入射角を計算した。

解析に用いた実データおよび、シミュレーションでの実験条件を以下のテーブルにまとめる。

	実データ (Run 92160)	シミュレーション
実験日時 (スタート)	2008 年 10 月 25 日 17:30(スイス)	
実験日時 (ストップ)	2008 年 10 月 26 日 12:51(スイス)	
スレッシュホールド	1.0fC	1.0fC
バイアス電圧	150V	150V
センサー温度	4.6 ± 1	-7

表 2: 実データとシミュレーションの実験条件。実データのセンサー温度は 4.6 ± 1 、シミュレーションでは 7 。

4 デジタイゼーション

4.1 デジタイゼーション・パラメータ

本研究の目的の一つはクラスターサイズと入射角の関係を見ることによってデジタイゼーション時に設定されているパラメータの値を評価することである。この章ではクラスターサイズ、およびホール角に関係したデジタイゼーション・パラメータについて議論する。デジタイゼーションの時に設定されたパラメータの値を以下の表 3 に示す。

パラメーター	値
シリコンセンサーの厚さ	$285\mu m$
シリコンセンサーの温度	-7
スレッシュホールド	$1.0fC$
全空乏化電圧	70V
バイアス電圧	150 V
ノイズ	1586e
ABCD ピーキングタイム	21ns
隣のストリップへの電荷のロス	10 %
Backplane への電荷のロス	7 %
ホール角	4.02°
シリコン表面でのドリフト速度 $t_s(\text{mid} - \text{strip})$	10ns
ドリフトモビリティ μ_d (正孔)	$485.8\text{cm}^2/Vs$
ホールモビリティ μ_H (正孔)	$351.4\text{cm}^2/Vs$

表 3: デジタイゼーション時のパラメータ。これらの値は ATHENA(バージョン 14.4.0) で設定されているものである。

SCT デジタイゼーションは大きく分けて 2 つのプロセスからなる。1 つはシリコン内で荷電粒子が通過した際にできた電子正孔対の電極への電荷収集。2 つめは ABCD チップでの増幅、およびデジタル変換である。

4.2 電荷収集

4.2.1 ホール角

デジタイゼーションモデルでは SCT 内の電界 ($150V/285\mu m$) が一定であり、ホール角もまた、SCT シリコン内では一定であると近似されている。しかし実際の SCT 内の電界は一定ではない。ホール角は、電界に依存している。また、電荷収集時間を考える上でも、電界の分布は重要となる。SCT センサー内の電界は、コンデンサの場合と違い一様ではなく、電極付近に近づくにつれて大きくなる。ここでは電界が一様とき、電界が電極からの距離に依存するモデルとで比較を行った。SCT 内の電界が一様ではないときの電界のモデル式を以下に示す [1]。

$$E_z = \frac{V_B + V_D}{d} - 2\frac{V_D}{d^2}z \quad (8)$$

このとき E_z は電界、 V_D は全空乏化電圧、 V_B はバイアス電圧、 d はシリコンの厚さ、 z はシリコンのストリップ電極からの深さである。さらにストリップは $80\mu m$ 間隔で埋め込まれているため、ストリップ付近では水平方向の電界が一定ではなく、ストリップの間では電界は小さくストリップ近傍では極端に電界が大きくなる。しかし、この効果は小さいと考え上の式には入っていない。この計算式を用いて、 $V_D = 70V$ 、 $V_B = 150V$ 、 $d = 285\mu m$ 、のときの深さと電界の関係を計算した結果を図 23 に示す。

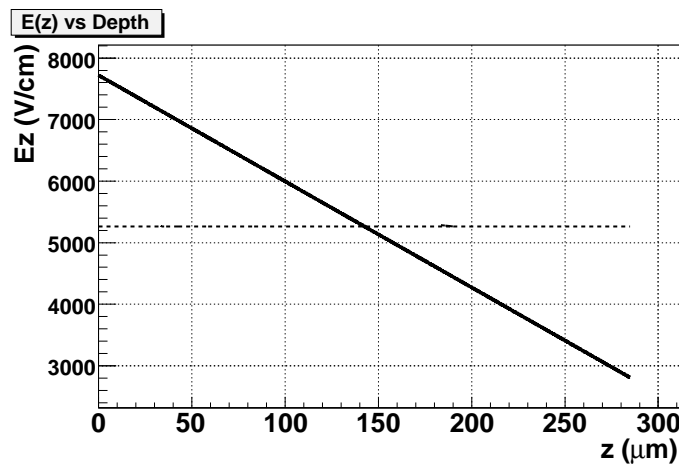


図 23: ストリップ電極からの深さと電界の関係。破線は電界が一定 ($150V/285\mu m$) と近似したモデル。

シリコン中の深さで電界が異なる場合、電界に依存するドリフトモビリティも異なる。よってホール角もストリップ電極からの深さによって異なる。温度が 7 のときのこのモデルから計算できるシリコン中での電極からの深さとホール角の値を図 24 に示す。

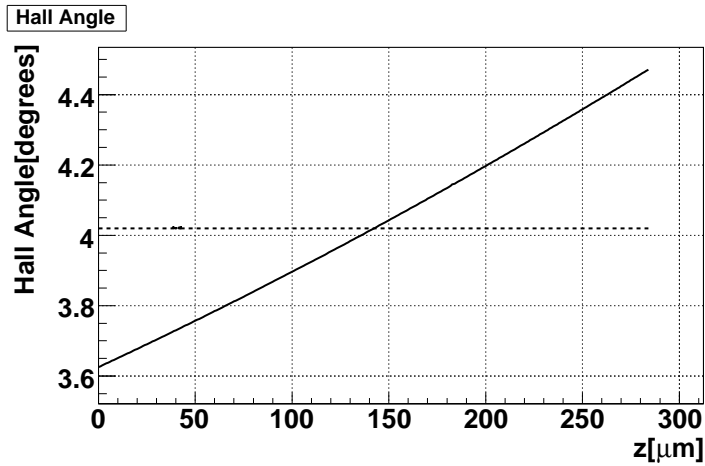


図 24: ストリップ電極からの深さとホール角の関係。破線は電界が一定のモデル。

ホール角 θ_L は電極から深いところでは大きな値 ($\theta_L > 4.4^\circ$) となり、逆に電極に近いところでは小さな値 ($\theta_L < 3.7^\circ$) となる。よって電極から遠いところでできた電荷は初め大きな角度で電荷収集されるが、電極に近づくにつれてその角度は小さくなる。深さにより、ホール角は最大で約 0.8° の違いがある。作られた電荷が移動する経路を図 25 で示す。

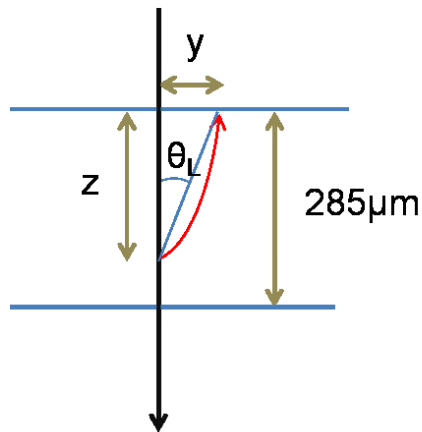


図 25: ホール角とドリフト経路。赤矢印がドリフト経路 y がローレンツシフト。

ここで、深さでの電界の違いから、電極ストリップからの深さ z のときのローレンツシフト y 、および深さ z でできた電荷の電荷収集が完了したときのホール角 $\langle \theta_L \rangle$ を計算した。計算式を以下に示す。

$$y = \int_0^z \tan \theta'_L dx \quad (9)$$

$$\langle \tan\theta_L \rangle = \frac{y}{\int_0^z dx} \quad (10)$$

この式から計算した深さ z のときのローレンツシフト、ホール角の図を図 26、27 に示す。これらもまた、電界を一定 ($150\text{V}/285\mu\text{m}$) としたときと、電界がストリップ電極からの深さによって変化するときとを比較した。電界が一定のときのローレンツシフトの積分平均値は $9.98 \mu\text{m}$ 、電界が深さによって異なるときのローレンツシフトは $9.64 \mu\text{m}$ と計算でき、電界の違いによるローレンツシフトの大きな違いは見られなかった。電荷収集が完了したときのホール角は、もっとも深いところと最も浅いところだが約 0.4° の違いが見られた。さらに積分平均を求めると、 3.82° と計算でき、シミュレーションで設定されているホール角 4.02° よりも約 0.2° 小さくなるがホール角の系統誤差を 5% とするとするとその範囲内になる。

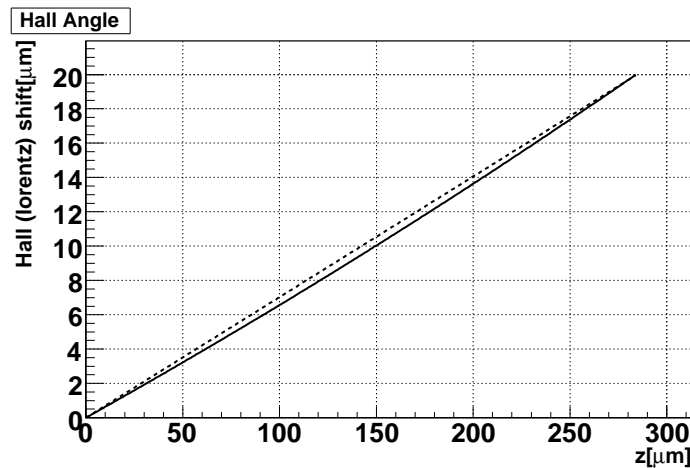


図 26: シリコン中での電極からの深さとローレンツシフト。温度 -7° 、電圧 150V で計算。破線は電界一様としたとき ($150\text{V}/285\mu\text{m}$)。実線は電界が深さによって違うときのローレンツシフト。

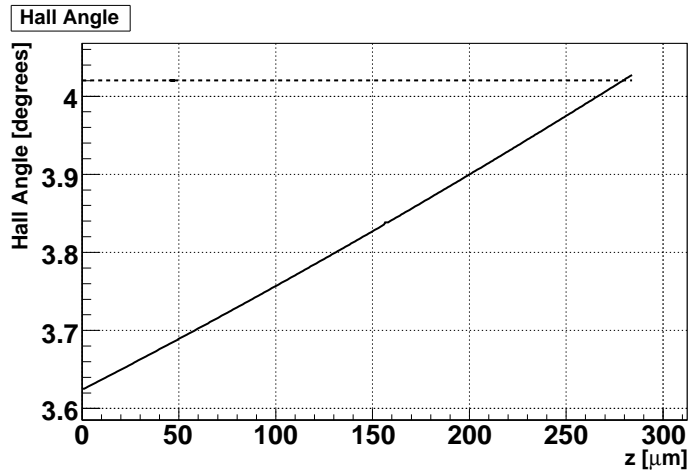


図 27: 電極からの深さ z と電荷収集が完了したときのホール角。破線は、電界一様モデル。これを更に積分して平均を求めると、 3.82° となる。

ローレン・ツシフトは、入射粒子がホール角の角度をもって入射したときに最も小さくなる。そこで入射粒子が入射角 θ を持って入射した時のローレンツシフトを計算した。

$$y = \int_0^z (\tan \theta'_L - \tan \theta) dx \quad (11)$$

入射粒子が 4.02° のときのローレンツシフトの計算結果を図 28 に示す。電界が一様のモデルでは入射角とホール角が一致するときローレンツシフトは深さによらず一定で 0 となる。しかし、電界が一様ではないモデルでは SCT シリコンのちょうど中間で $0.5 \mu\text{m}$ ほど小さくなる。このときの積分平均値は $-0.33 \mu\text{m}$ となった。電界が一様でないときの入射粒子の入射角とローレンツシフトの積分平均値を図 29 に示す。ローレンツシフトの積分平均が 0° となる時の入射角は 3.86° となった。この値もまた、ホール角の系統誤差の範囲内となる。電界一様モデルと、電界が一様でないモデルでは実験で測定されるホール角としては大きな違いは見られない。

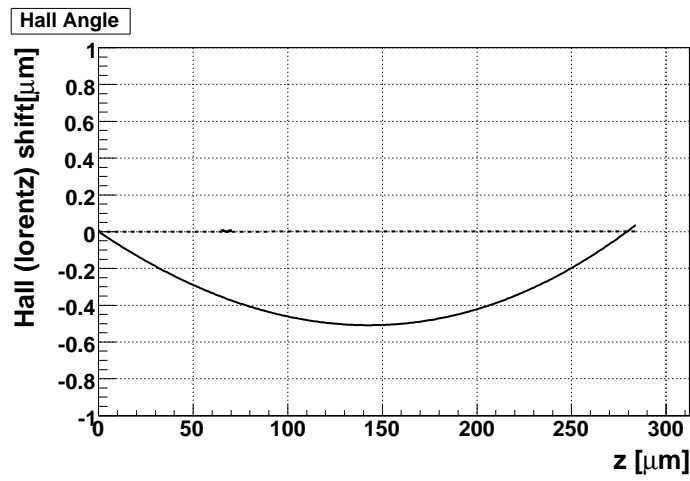


図 28: 入射角 4.02 °のときのローレンツシフト。破線、電界一様モデル。

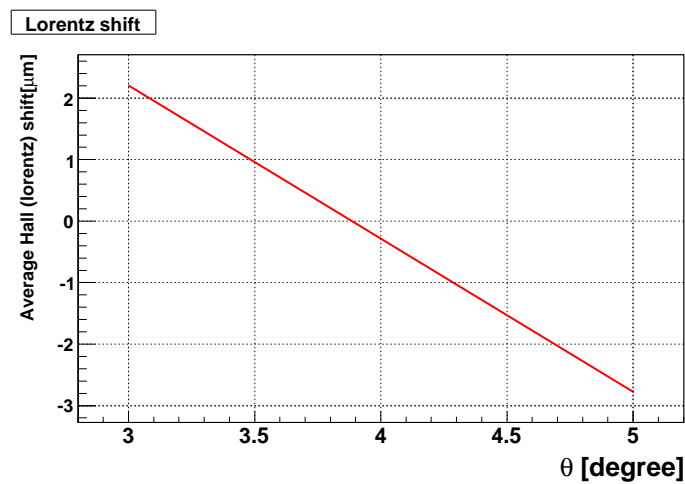


図 29: 入射角と磁場が一様でないときのローレンツシフトの積分平均値。

次に、TCAD シミュレーションによる SCT シリコン内の電界の図を以下に示す。

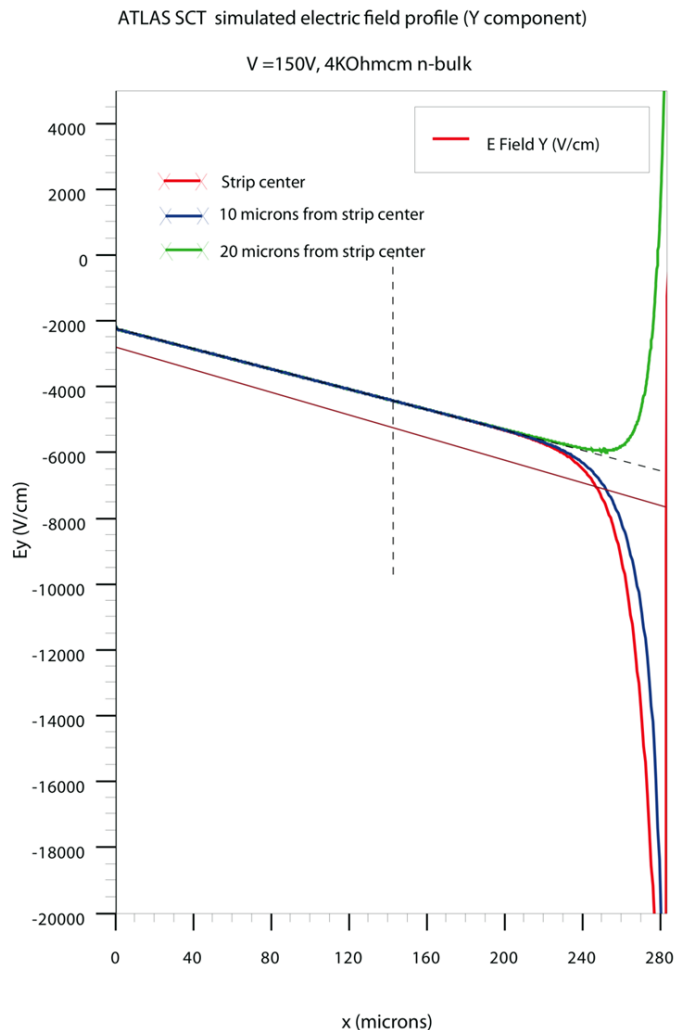


図 30: TCAD シミュレーションによる SCT シリコン内の電界。茶色の線はデジタルイゼーションモデルにおける SCT シリコン内の電界。電界の符号はマイナスで表示。ストリップ電極付近を除きデジタルイゼーションモデルよりも全体的に電界は小さい。

このシミュレーションではストリップ電極の急激な電界の上昇が、再現されている。このモデルに従うと、SCT シリコン中心付近での電界は小さくなり、ホール角はデジタルイゼーションモデルで計算される値よりも大きくなる (約 0.15°)。

4.2.2 ドリフト速度

ストリップ電極からの深さによって電界が異なる時、もう一つ重要となるパラメータがドリフトモビリティである。デジタルイゼーションではドリフト・モビリティもストリップ電極からの深さ z によらず一定と設定されている。深さによってドリフト・モビリティが違うとき電荷収集速度もまた深さによって異なる。デジタルイゼーションで用いられてい

る電荷収集時間と電極からの深さのモデル式および計算結果を以下に示す [1]。このときの計算は温度-7、電圧 150 V、全空乏化電圧 70 V の時のものである。

$$t_p(z) = \frac{d^2}{2\mu_D V_D} \ln \left(\frac{V_B + V_D}{V_B + V_D - 2V_D z/d} \right) \quad (12)$$

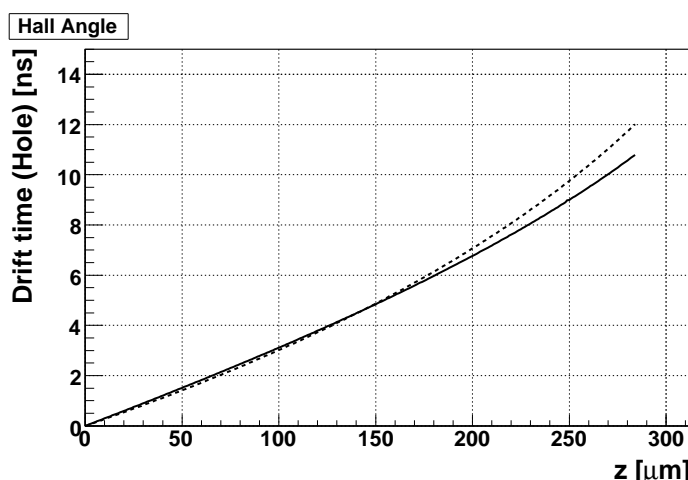


図 31: 電荷収集時間とストリップ電極からの電荷収集時間の関係。破線は電界が深さで一樣のモデル。

デジタイゼーションモデルでは最も深いところからの電荷収集時間は約 12ns かかる。赤線の電界が一樣ではないときのドリフトモビリティは式 (6) と式 (8) を代入した。この図から電界が一樣ではないモデルは電界一樣モデルよりも電荷収集速度が速く、電極から最も遠い電荷の収集時間は 11ns 以下であることがわかる。これは電界が一樣ではないモデルでは電極から最も深いところで電界は小さくなり、ドリフトモビリティが大きくなる効果が大きいためと考えられる。

電荷収集時間を考えるとき SCT モジュールに対して垂直方向とは別に水平方向への電荷収集速度も考慮に入れなければならない。デジタイゼーションモデルでは垂直方向への電荷収集を終えた後、シリコンセンサの表面に到達した電荷は設定された水平方向への電荷収集速度に従い電荷収集される。このときのシリコンの表面を移動する電荷収集速度 t_s はストリップの間からストリップ ($40\mu m$) まで 10ns と設定されている。よって、合計の電荷収集時間は $t_p + t_s$ と言える。デジタイゼーションモデルでは最大で約 22ns 電荷収集に時間がかかり、電界が一樣ではないモデルでは最大 21ns の電荷収集時間がかかる。電界が一樣ではないモデルと、電界が一樣なモデルでは電荷収集時間は大きく変わらない。

電荷収集の時間が多くかかるほど電荷の拡散の効果を考慮に入れなければならない。拡散はデジタイゼーションではガウス分布でランダムに振り分けられる。この拡散の は時間の関数としてシミュレーションされる [1]。

$$\sigma = \sqrt{Dt} \quad (13)$$

$$D = \frac{kT\mu}{q} \quad (14)$$

このときのDはアインシュタイン方程式で表される。拡散の σ は \sqrt{t} に比例して大きくなる。

4.3 エレクトロニクス

ストリップから読み出された信号はアンプによってパルス波形が形成される。デジタルイゼーションモデルでアンプから形成される信号は以下の式に従う [1]。

$$A(t) = \sum Q_i a(t - t_i) \quad (15)$$

$$a(t) = C \left(\frac{t}{\tau}\right)^3 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (16)$$

このとき、 $A(t)$ がアンプからのアウトプット信号、 Q_i 電荷収集された電荷量である。Cは規格化するための定数であり、 $(e/3)^3$ と設定される。 $a(t)$ が最も大きくなる点($t = 3\tau$)をピーキング・タイムと呼ぶ。アンプで最も重要となるパラメータはこのABCDピーキングタイムである。ABCDピーキングタイムはSCTシリコンでの電荷収集時間に対応したものでなければならない。ABCDピーキングタイムの設定が小さいとき形成されたパルスは波形の振幅が収集した電荷量よりも小さくなってしまふ。逆に大きすぎるとパルスの処理に時間が多くかかってしまふ。

また、ストリップの間での電荷は2つのストリップチャンネルから同時に読み出される(クロストーク)。ここでクロストークの効果を含んだパラメータ K を用いて上の式は書き換えられる [1]。 K は10%に設定されている。

$$B(t) = \frac{1}{2}K \sum Q_i b(t - t_i) \quad (17)$$

$$b(t) = C_2 \left(\frac{t}{\tau}\right)^3 e^{-\frac{t}{\tau}} \left(3 - \frac{t}{\tau}\right) \quad (18)$$

パラメータ K はクラスターサイズに直接的に効いてくる最もわかりやすいパラメータである。このときのピーキングタイムは $t = (3 - \sqrt{3})\tau$ となり、クロストークの効果を含んでいない時のピーキングタイム(3τ)よりも小さくなる。SCTデジタルイゼーションではこのときのピーキングタイムは21nsに設定されている。

4.4 デジタルイゼーション・パラメータのまとめ

この章ではデジタルイゼーションモデルにおけるパラメータについて議論を行った。これまでの議論をいかにまとめる。

- SCTシリコンのストリップ電極からの深さによる電界の違いを考慮したとき、ホール角はその深さにより異なる。その平均をデジタイゼーションモデルと比較するとホール角は約0.2小さくなる。
- SCTシリコンのストリップ電極からの深さによる電界の違いを考慮したとき、クラスターサイズが最少となる時の入射角はデジタイゼーションモデルよりも約0.15小さくなる。
- TCADシミュレーションにおけるホール角の計算ではデジタイゼーションモデルよりも約0.15大きくなる。
- SCTシリコンのストリップ電極からの深さによる電界の違いを考慮したとき、電荷収集速度は大きな違いは見られない(約1ns)。
- クラスターサイズに影響するパラメータとしては電荷収集する際の拡散、クロストーク効果パラメータK、ABCDピーキングタイムなどが考えられる。

5 解析結果

5.1 宇宙線トラック

宇宙線データ解析は2008年に実施された宇宙線コミッションにおけるデータ（実データ）と、宇宙線シミュレーションデータを用いた。内部飛跡検出器に2Tの磁場あり・なしの場合について解析を行った。

以下の式の χ を最小化するように、最適なトラックのフィットを行う。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(r_i^2)}{\sigma_i^2} \quad (19)$$

ここで σ は位置分解能、 r_i はヒット（クラスター）位置とSCTモジュール表面におけるトラックの位置との距離である。今回解析した宇宙線実データ、シミュレーションの磁場あり、磁場なしにおける自由度あたりの $\chi^2(\chi^2/ndf)$ を以下の図で示す。

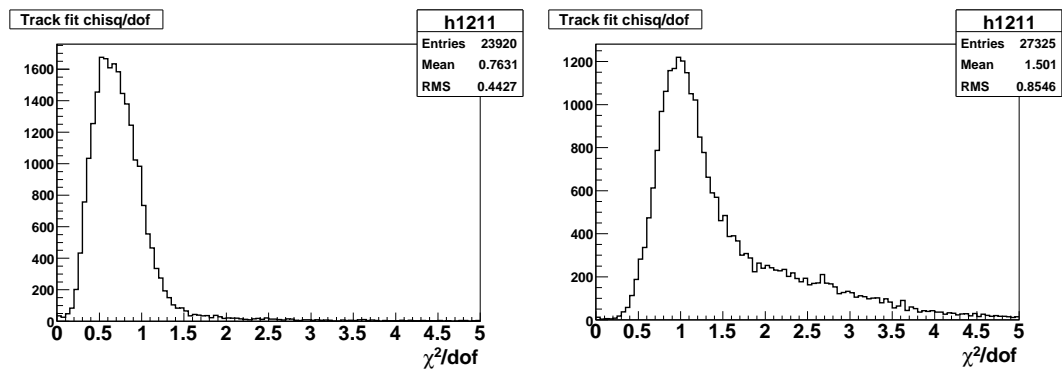


図 32: 実データのトラック χ^2/ndf 分布。左図磁場あり。右図磁場なし。

いずれも $\chi^2(\chi^2/ndf)$ は1付近で最も大きな値となっている。宇宙線実データ、磁場ありにおいてはトラックフィットの精度はさらに良い。次に磁場がかかっているときのトラックの横運動量 pt の分布を図 34 に示す。

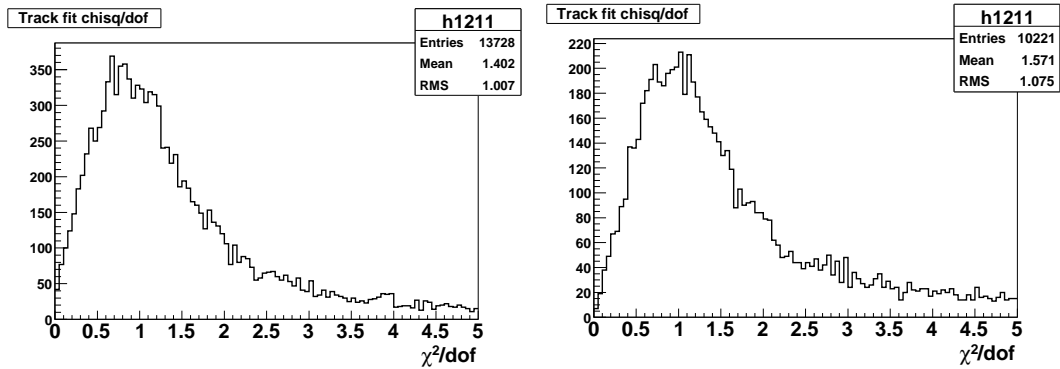


図 33: シミュレーションのトラック χ^2/ndf 分布。左図磁場あり、右図磁場なし。

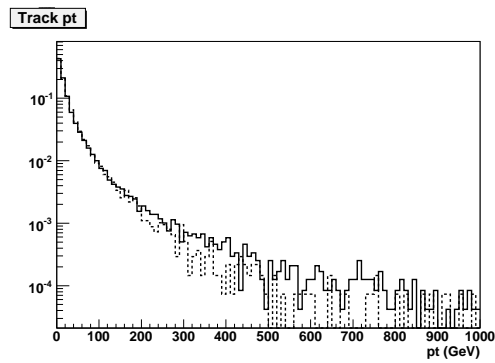


図 34: pt 分布。実線は実データ、破線はシミュレーション。縦軸は積分値 1 で規格化。

5.2 クラスタサイズ

クラスタサイズは入射角に大きく依存する。今回行った宇宙線コミッショニング、および宇宙線シミュレーションの SCT モジュールに対する入射角の分布を図 35 に示す。

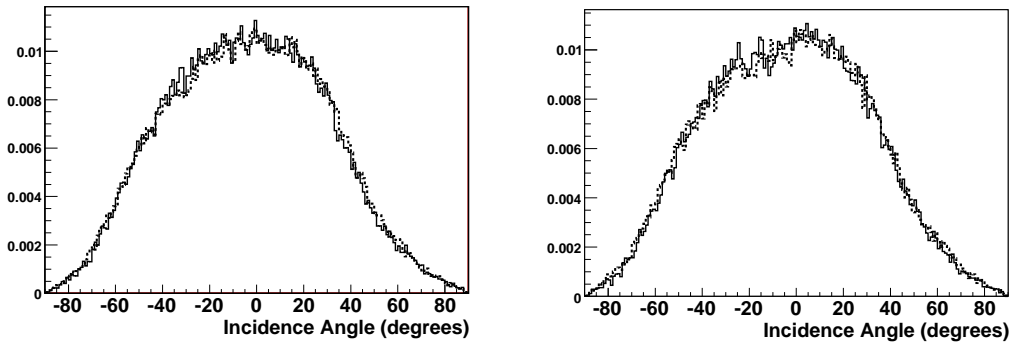


図 35: SCT モジュールに対する入射角の分布。左図は内部飛跡検出器に磁場がかかっているときの分布。右図は磁場がかかっていないときの分布。実線は実データ、破線はシミュレーション。縦軸は規格化されている。

縦軸は積分値 1 として規格化した。今後入射角やクラスターサイズ分布を実データとシミュレーションで比較するとき縦軸はすべて規格化した。上の図からシミュレーションと実データの入射角分布はよく一致している。また、磁場がかかっているときとかかかっていないときに入射角分布に大きな違いは見られない。入射角分布が 0° を中心に左右対称となっていないのは SCT パレルのジオメトリによるものと考えられる。SCT パレルモジュールはビーム軸を中心とする円筒型をしているが、個々の SCT モジュールは円筒型の接線から約 11° の傾きを持って設置されている。

次に磁場がかかっているときと磁場がかかっていないときのクラスターサイズごとの入射角の分布を図 36 および図 37 に示す。磁場がかかっていないときはクラスターサイズが 1 の時の入射角は 0° 付近が最も多くなる。磁場がかかっているときにはクラスターサイズ=1 で最も多い入射角は 0° 付近から少し (約 4°) ずれる。これは磁場がかかっているときはホール角をもって入射するときに最もクラスターサイズが小さくなるからである。クラスターサイズ=1 は入射角が大きくなるにつれて少なくなるが、 50° を過ぎたあたりから一定、あるいは大きくなる。これは 50° を過ぎたあたりから、入射粒子が複数のストリップを横切るため、一つのストリップあたりに収集される電荷が $1fC$ の閾値を超えず、ヒットは連続せずまばらになるためと考えられる。 40° から 60° 付近ではシミュレーションの方がクラスターサイズ=1 が実データより多くなる (約 1.5 倍)。クラスターサイズ=2 は 25° 付近、クラスターサイズ=3 は 40° 付近、クラスターサイズ=4 は 50° 付近で最も多くなる。

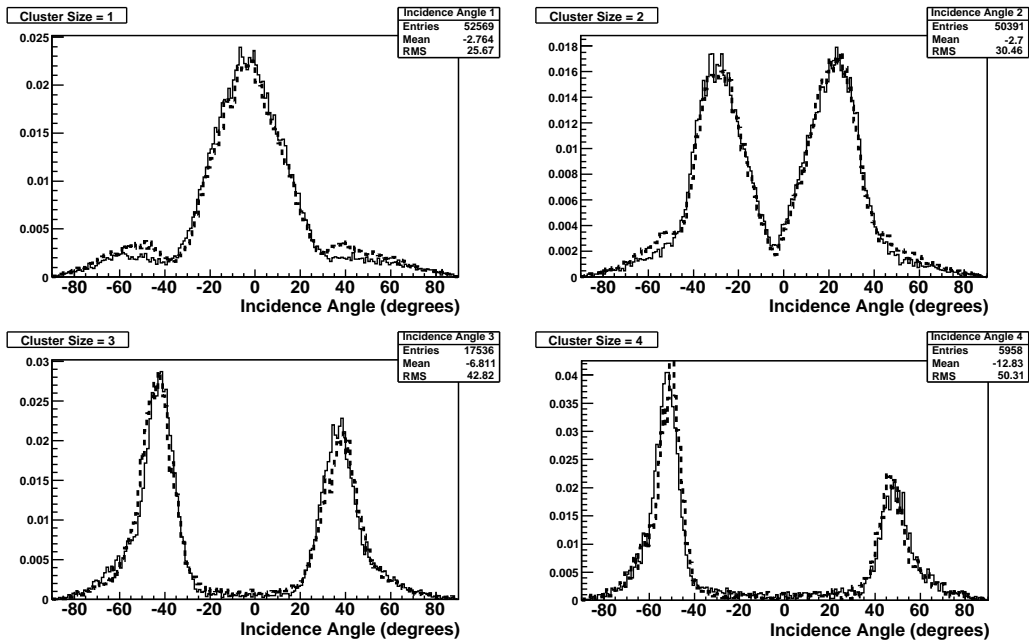


図 36: 磁場がかかっているときのクラスターサイズごとの入射角の分布。左上はクラスターサイズ1、右上は2、左下は3、右下は4。実線は実データ。破線はシミュレーション。

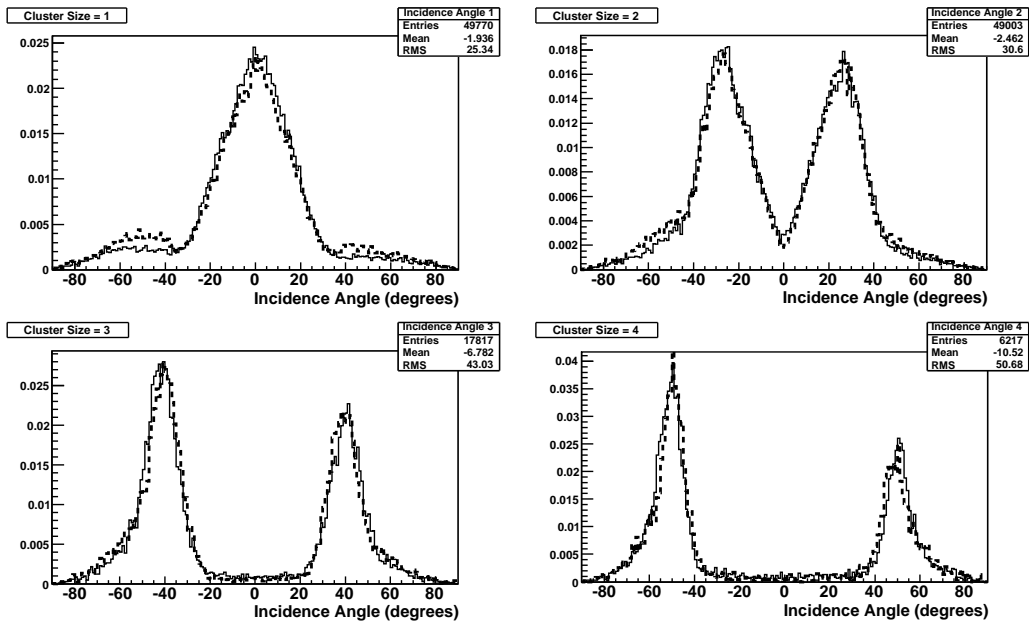


図 37: 磁場がかかっていないときのクラスターサイズごとの入射角の分布。左上はクラスターサイズ1、右上は2、左下は3、右下は4。実線は実データ、破線はシミュレーション

シミュレーションと実データのクラスターサイズ分布の比較を (図 38) に示す。このとき入射角でカットを入れない場合、入射角 $\theta < 20^\circ$ 、 $20^\circ < \theta < 90^\circ$ でカットを入れた場

合でそれぞれ比較した。

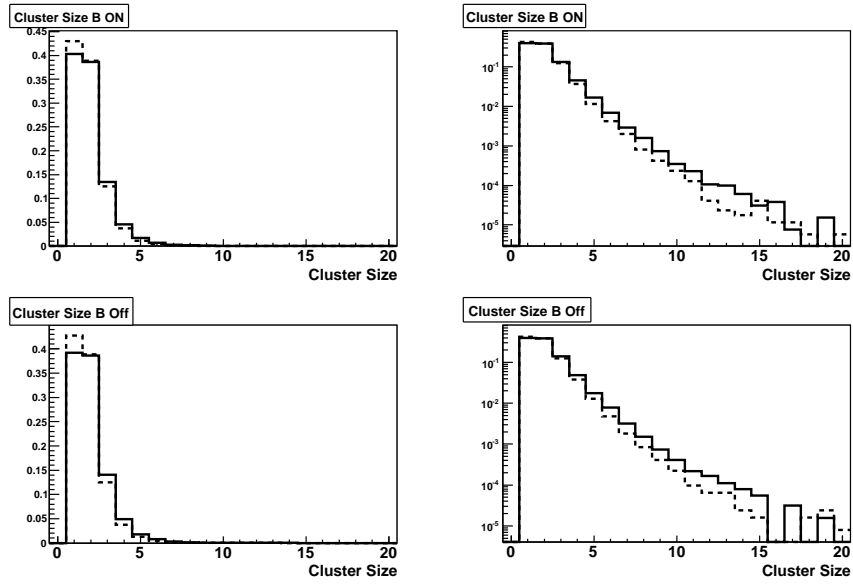


図 38: トラックに付随したクラスターサイズの分布。上図は磁場あり、下図は磁場なし。右図は左図を縦軸対数で表示したもの。実線は実データ破線はシミュレーション。

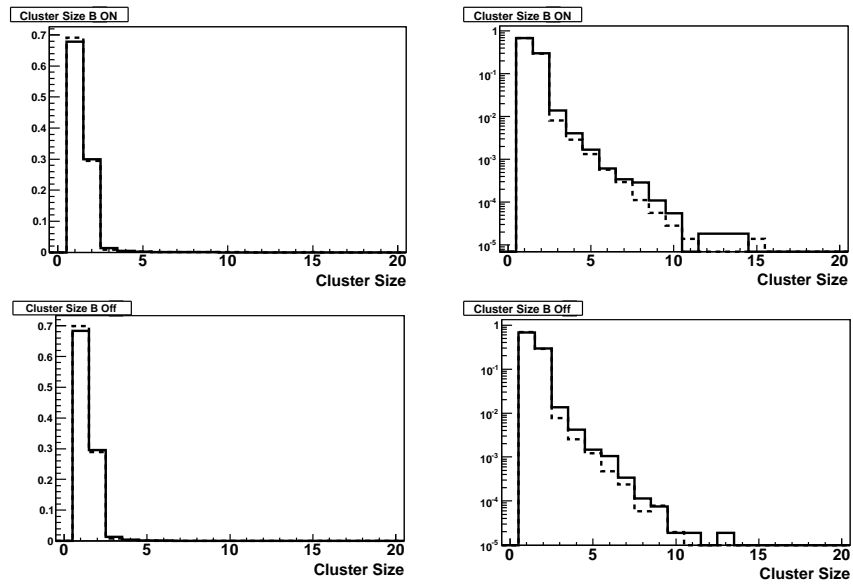


図 39: 入射角 20° 以内のクラスターサイズ分布。上図は磁場あり、下図は磁場なし。右図は左図の対数表示。実線は実データ、破線はシミュレーション。

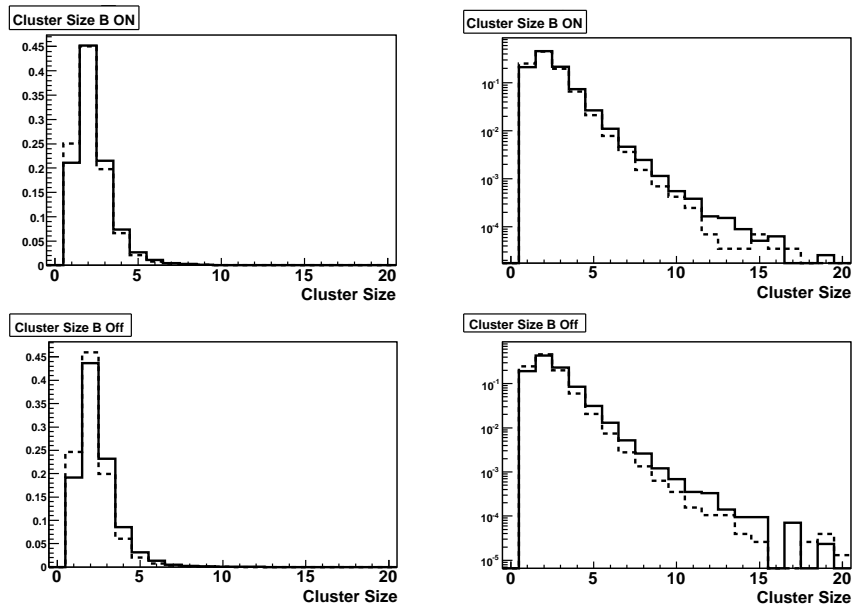


図 40: 入射角 20° から 90° の時のクラスターサイズの分布。上図は磁場あり、下図は磁場なし。右図は縦軸対数表示。実線は実データ、破線はシミュレーション。

クラスターサイズを実データとシミュレーションで比較した結果、入射角でカットを入れない場合クラスターサイズ=1 は、シミュレーションのほうが約 1.1 倍大きい。実データのクラスターサイズの平均値は磁場ありでは 1.94、シミュレーションでは 1.84 となり、0.11 実データのほうがクラスターサイズの平均は大きくなった。入射角 20° 以内、 20° 以上とともに、クラスターサイズの平均は実データのほうが大きな値となった。その差は 20° 以内では小さく (約 0.03)、 20° 以上では大きな値 (約 0.20) となった。磁場ありと磁場なしのそれぞれの入射角のカット条件でのクラスターサイズの平均値を以下の表にまとめる。

	カットなしの クラスターサイズの平均	$< 20^\circ$ "	$20^\circ <$ "	$< 90^\circ$
実データ (磁場あり)	1.94	1.36		2.34
実データ (磁場なし)	1.97	1.35		2.39
シミュレーション (磁場あり)	1.84	1.33		2.17
シミュレーション (磁場なし)	1.85	1.32		2.20

表 4: クラスターサイズの平均値。入射角によるカットあり (20° 以下、 20° 以上) とカットなしで、実データシミュレーションの磁場あり、磁場なしそれぞれを比較した。

5.3 Fiducial カット

SCT シリコンセンサーは 2 枚重ねて貼り付けられているため、SCT モジュールに粒子が通過したとき、通常は同時に 2 つのクラスターが検出される。検出効率とトラックの入射角の関係をみるため、トラックに付随したクラスター（ヒット）があるとき、SCT モジュールのもう片方の面のクラスターに注目した。再構成されたトラックとシリコンの別サイドとの交点から 1mm 以内のクラスターサイズを調べた（図 41）。その時のクラスターサイズを図 42 に示す。

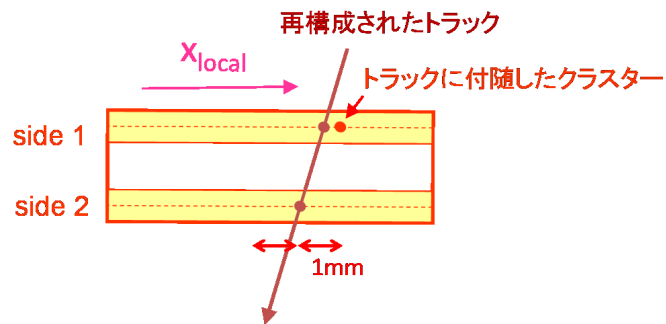


図 41: 別サイドのクラスター。再構成されたトラックの位置と別面シリコンの交点から 1mm 以内のクラスターを探す。

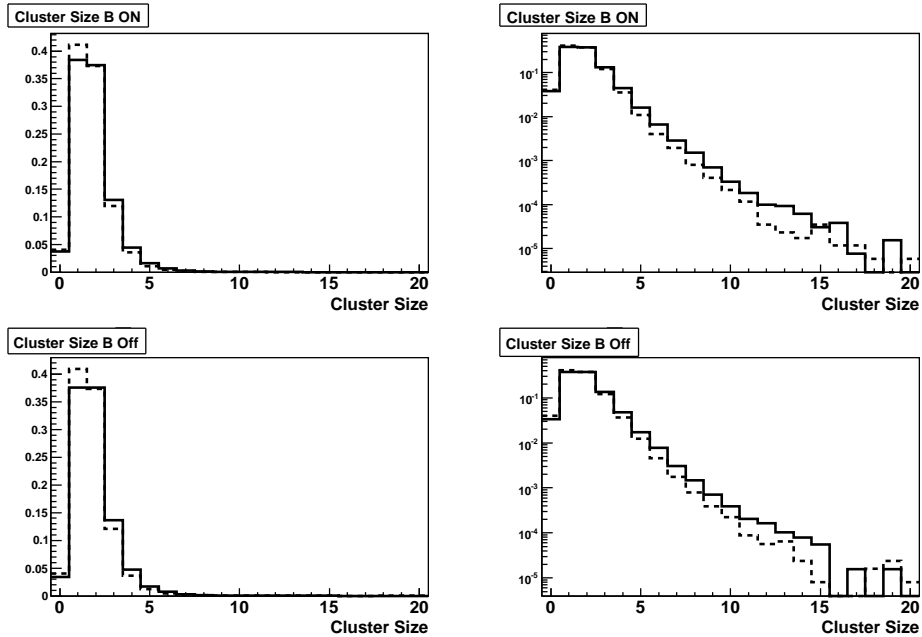


図 42: 別サイドの SCT クラスタ (再構成されたトラックから 1mm 以内)。上図磁場あり、下図磁場なし。右図は左図の対数表示。実線は実データ破線はシミュレーション。

上図からクラスターサイズ 0 が実データシミュレーションともに約 4% みられることがわかる。つまり、非検出効率 (検出されない割合) が 4% あるということになる。

次に入射角が 70° 以上のときの別サイドクラスターサイズ分布を図 43 に示す。入射角が大きい時、別サイドの検出効率はさらに悪くなり、シミュレーション、実データともにクラスターサイズ=0 が約 10% みられる。ここで検出効率が悪くなる要因は、入射粒子が複数のストリップを横切るため一つのストリップあたりに収集される電荷が小さくなり、閾値を超えなくなるためと考えられる。

また、入射粒子はエッジとボンディング付近では検出効率が低下する。この効果をなくすために、SCT モジュールエッジとワイヤーボンディング付近のクラスター (別サイド) をカットした。2 枚重ねられた SCT モジュールの詳細なジオメトリーについて図 44 に示す。

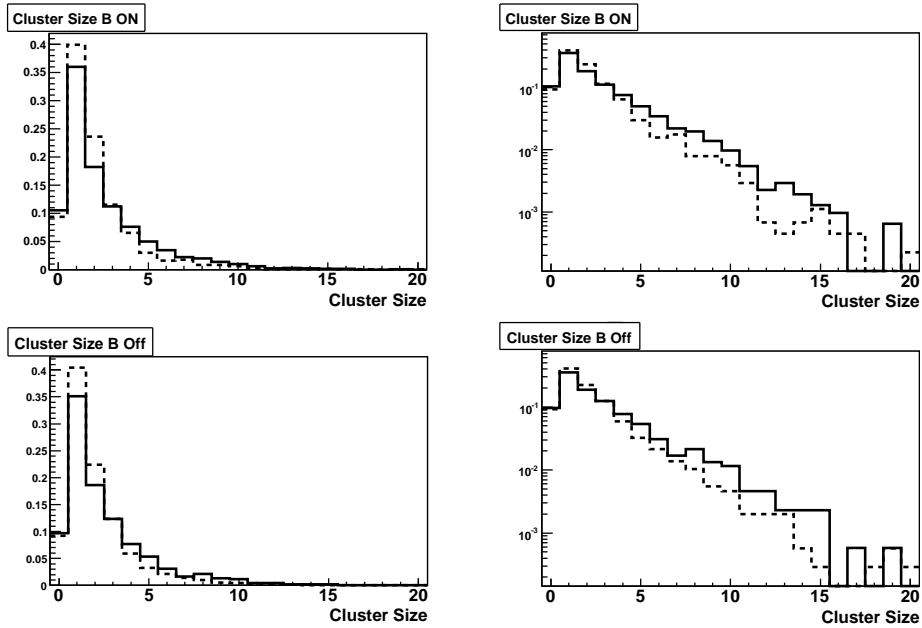


図 43: 入射角が 70 °から 90 °のときの別サイドの SCT クラスタ (外挿されたトラックから 1mm 以内) 上図は磁場あり、下図は磁場なし。

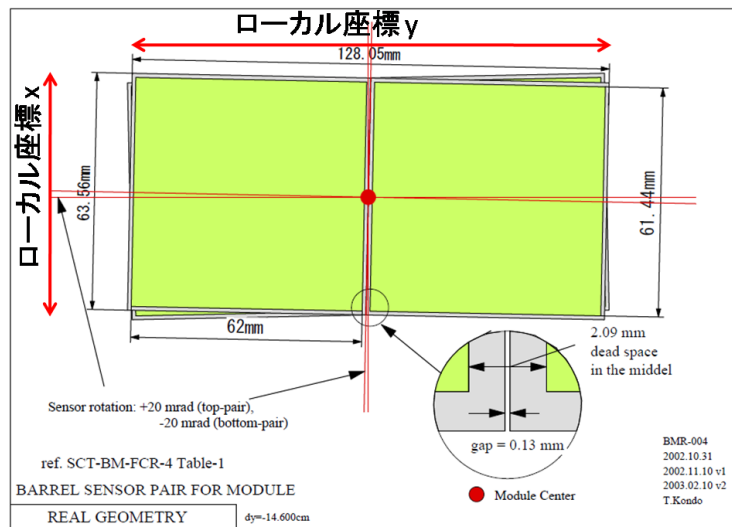


図 44: SCT モジュールのジオメトリー。

SCT シリコンは 40mrad 傾けて貼り付けられているため、2 枚のシリコンが重なっていない領域がある。また、ある入射角をもって入射した粒子はエッジ、ボンディング付近では検出効率 (別サイド) が悪くなる。これらの効果をなくすため、エッジ、ボンディングが

ら約 2mm の幅を持たせて、 $|x| > 28.7\text{mm}$ 、 $|y| > 61.0\text{mm}$ 、 $|y| < 3.0\text{mm}$ 、の領域にあるクラスター（別サイド）をカットした（Fiducial カット）。カット前とカット後のクラスターサイズ=0 のときのトラックの位置（SCT ローカル座標）の分布を図 45 に示す。

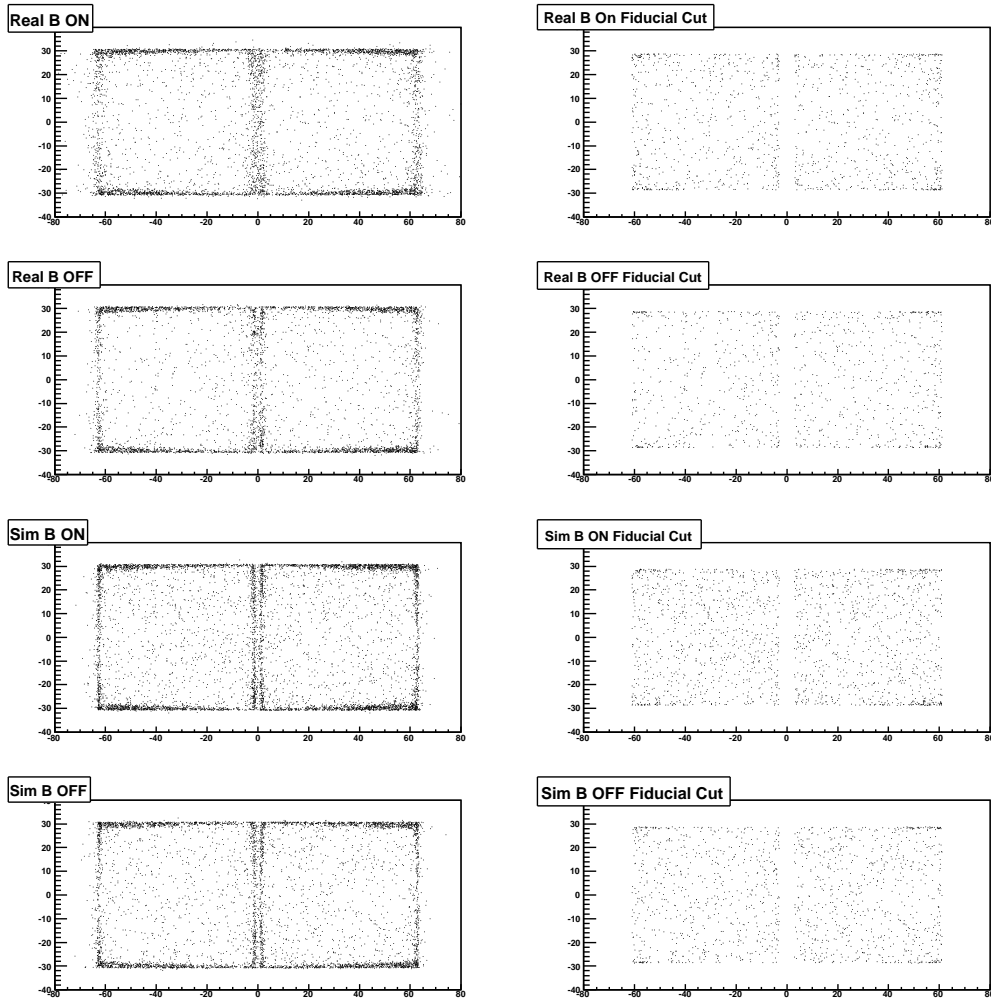


図 45: クラスターサイズ 0 の分布（ローカル座標）。右図は Fiducial カット後のクラスターサイズが 0 の分布。クラスターサイズ=0 のときのトラックの通過した位置。

カット後のクラスターサイズ分布（別サイド）を図 46 に示す。これらの図から、エッジとボンディング付近に多くあるクラスターサイズ 0 がカットされていることがわかる。

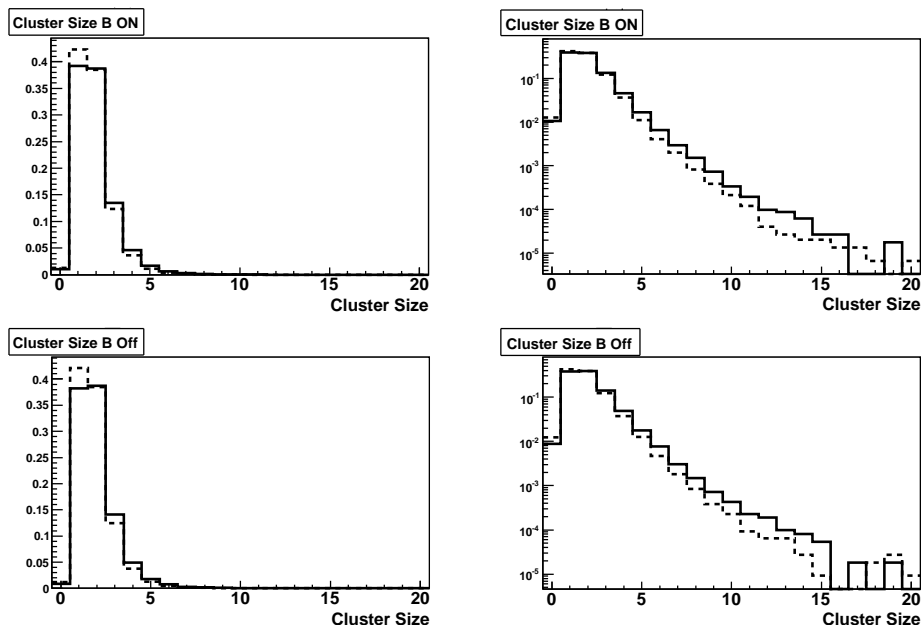


図 46: Fiducial カット後の別サイドの SCT クラスターサイズ分布 (外挿されたトラックから 1mm 以内)。上図は磁場あり、下図は磁場なし。右図は対数表示。赤は実データ、青はシミュレーション。

Fiducial カット後のクラスターサイズ分布をみると、クラスターサイズ 0 がシミュレーション実データともに約 1% に減少していることがわかる。磁場あり、磁場なしでのシミュレーション、実データの Fiducial カット前とカット後の非検出効率をまとめたものを表に示す。

	Fiducial カット前 の非検出効率 (%)	Fiducial カット後 の非検出効率 (%)
実データ (磁場あり)	3.8	1.1
実データ (磁場なし)	3.4	0.9
シミュレーション (磁場あり)	4.1	1.3
シミュレーション (磁場なし)	4.0	1.2

表 5: Fiducial カット前と、カット後の非検出効率の比較。

Fiducial カット前では非検出効率はシミュレーション、実データともに約 4%。カット後では非検出効率は約 1% まで減少した。また、実データとシミュレーションを比較すると、カット前では実データのほうが非検出効率は約 0.5% 小さい値となった。これは全体的にシミュレーションのほうがクラスターサイズの平均値が小さいので、検出効率も悪くなったと考えられる。

このときの検出効率はアラインメントの影響を受ける。アラインメントとはトラックを再構成するときに検出器の正確な位置をソフトウェアで補正することである。検出器の正確な位置がわかっていないと、再構成されたトラックの位置とクラスター（ヒット）のずれが大きくなり、カット条件である 1mm を超えてしまう。ここで、トラックの位置と検出されたクラスター（ヒット）の位置とのずれの分布（Residual 分布）を以下に示す。

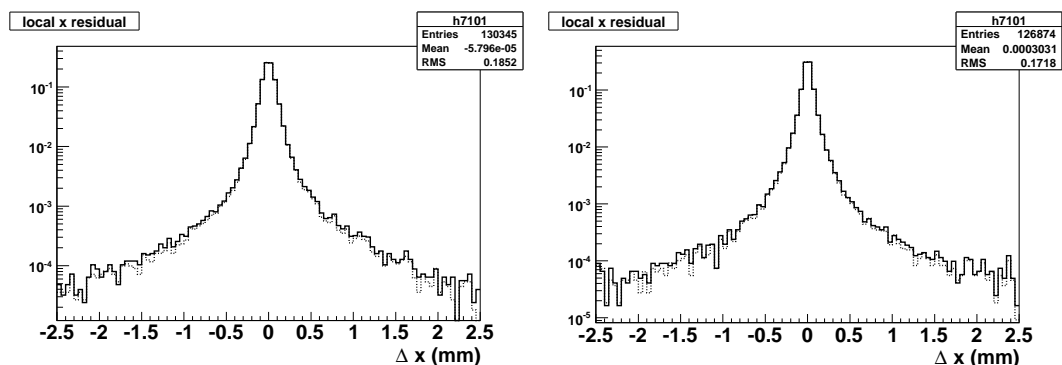


図 47: 実データのトラックの位置とそこから最も近いクラスターの位置の差の分布。破線は Fiducial カット後の残差分布。左図磁場あり、右図磁場なし。

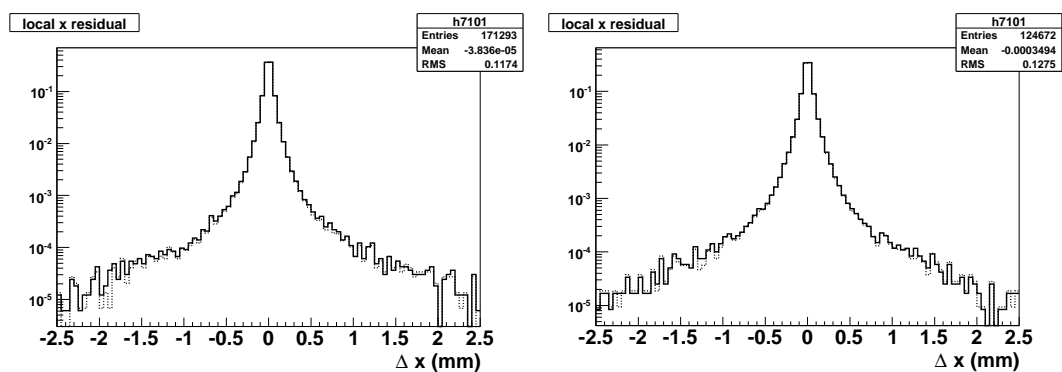


図 48: シミュレーションのトラックの位置とそこから最も近いクラスターの位置の差の分布。破線は Fiducial カット後の残差分布。左図磁場あり、右図磁場なし。

上の図の残差分布（-2.5mm から 2.5mm）の RMS を以下の表にまとめる。

	Fiducial カット前 の RMS(mm)	Fiducial カット後 の RMS(mm)
実データ (磁場あり)	0.19	0.18
実データ (磁場なし)	0.17	0.16
シミュレーション (磁場あり)	0.12	0.11
シミュレーション (磁場なし)	0.13	0.13

表 6: Fiducial カット前とカット後の残差分布の RMS(-0.25mm ~ 0.25mm)

実データの残差分布の RMS は約 0.18mm、シミュレーションの残差分布は約 0.12mm となり、実データの RMS のほうが約 0.06mm 大きい値となった。2008 年の宇宙線 Run における、アラインメントはまだ完全に完了しておらず、アラインメント後の解析は今後の課題となる。Fiducial カット後の残差分布実データでは約 0.01mm 小さくなり、シミュレーションではカット前、カット後でほとんど変わらなかった。Fiducial カットによる残差分布の変化は見られなかった。

5.4 検出効率と入射角

Fiducial カット前と Fiducial カット後の非検出効率の違いを入射角ごとに見て、シミュレーションと実データで比較した。

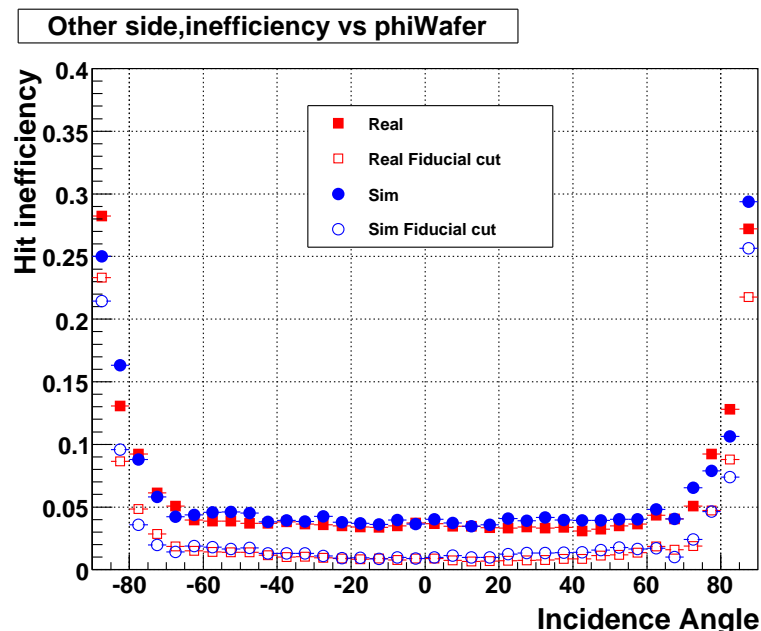


図 49: 磁場ありのときの入射角と非検出効率 (別サイド) の関係。 は実データ はシミュレーション。白抜きはそれぞれ Fiducial カット後の非検出効率。

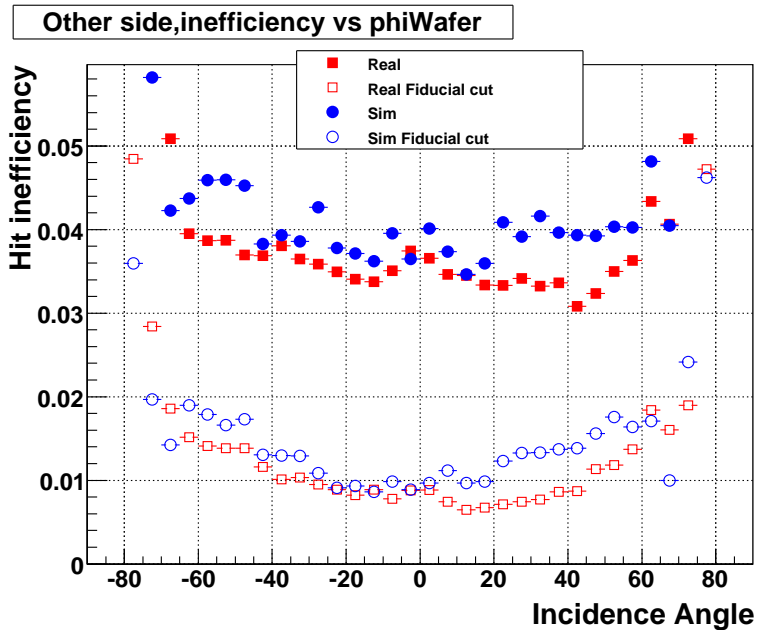


図 50: 図 49 の拡大図

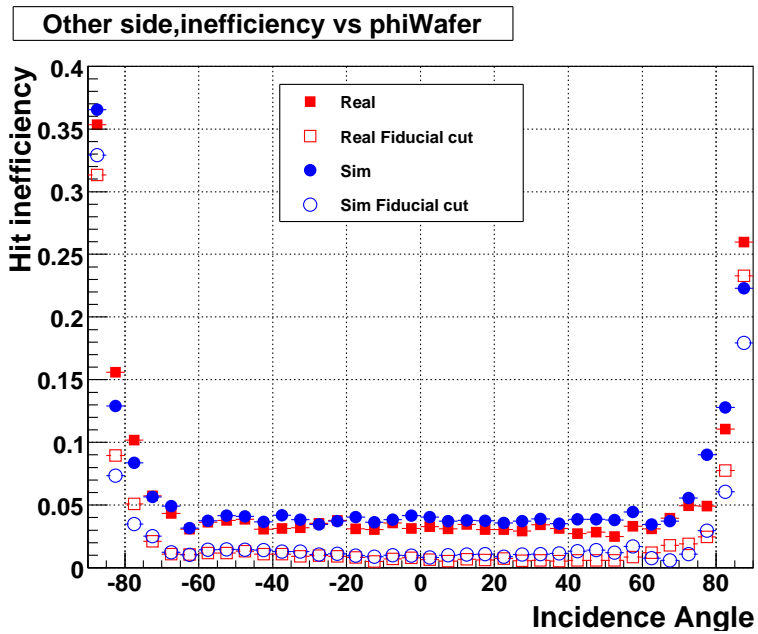


図 51: 磁場なしのときの入射角と非検出効率（別サイド）の関係。 は実データ はシミュレーション。白抜きはそれぞれ Fiducial カット後の非検出効率。

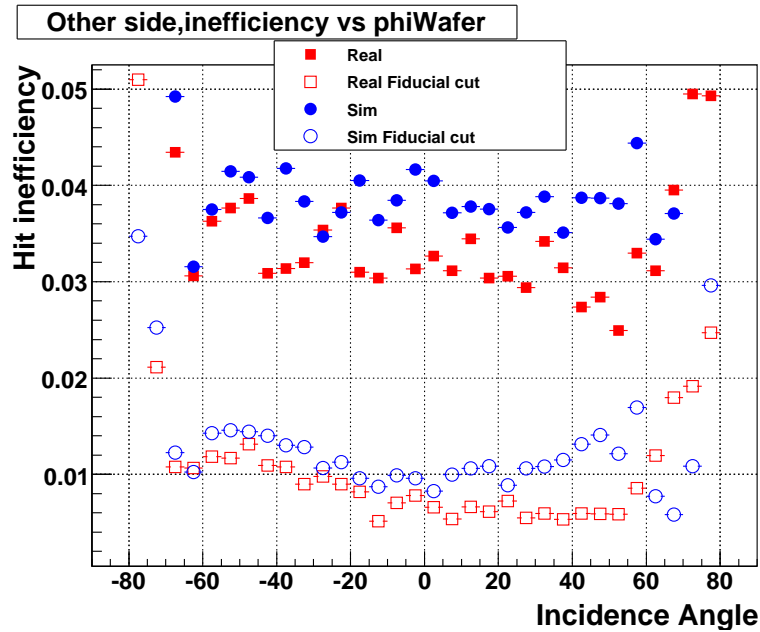


図 52: 図 51 の拡大図

Fiducial カット前カット後ともに検出効率は 70 °付近まで大きな変化はなく、一定である。入射角が 70 °以上になると、非検出効率は FIDucial カット後でも 20 %から 30 %まで悪くなる。Fiducial カット後では、入射角 70 °付近までは、入射角に依らず全体的に検出効率が良くなっている (約 1%)。ここから、エッジとボンディング付近での非検出効率は入射角に依らないということが言える。入射角 70 °以上ではカット後ではカット前より約 5 %検出効率が良くなっている。入射角の大きいところでは、実データよりもシミュレーションのほうが検出効率がよい。

5.5 ホール角の導出

ホールアングルを導出するために入射角とクラスターサイズの平均値の関係を調べ、クラスターサイズが最小値になる時の入射角を調べた。入射角とクラスターサイズの平均値を以下の図に示す。

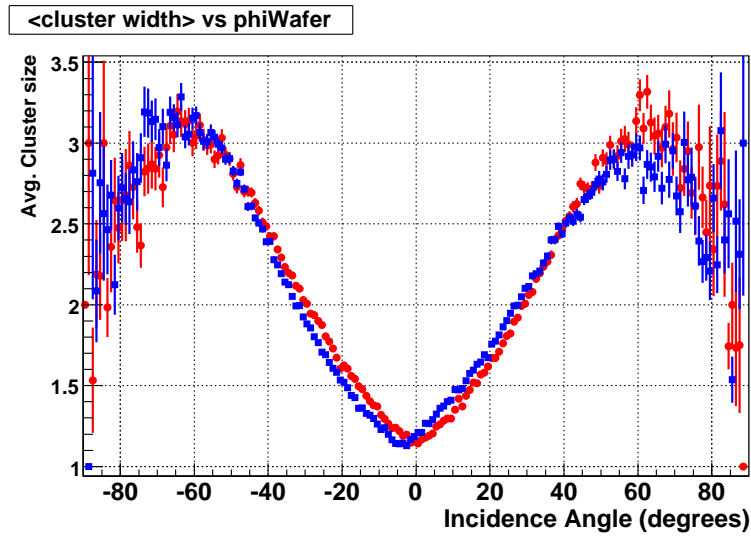


図 53: 実データの横軸入射角と縦軸クラスターサイズの平均。青は磁場あり、赤は磁場なし。磁場ありではクラスターサイズの最小となる時の入射角は0°よりも約4°ずれている。

上の図から磁場がかかっている状態では、クラスターサイズの最小値は入射角0°よりもホール角だけずれている。またこの図から、入射角が60°を超えたあたりから、クラスターサイズの平均値が減少しているのがわかる。次にこの図の実データとシミュレーションを比較した図を示す。

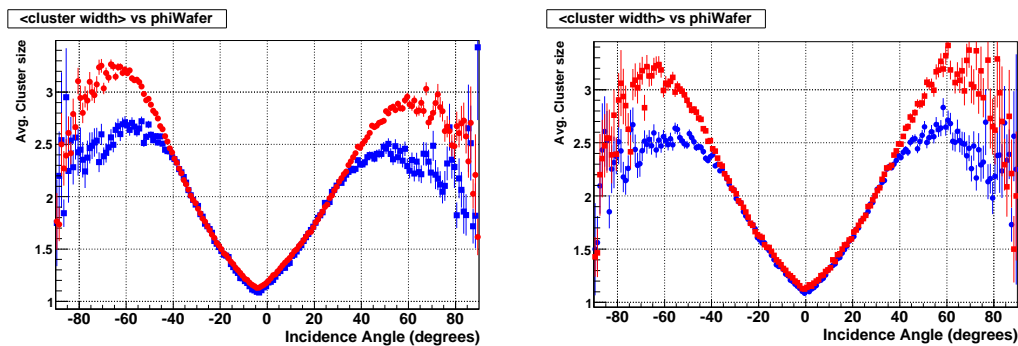


図 54: 横軸入射角、縦軸クラスターサイズの平均。実データとシミュレーションの比較。左図が磁場あり、右図が磁場なし。(赤)が実データ、(青)がシミュレーション

シミュレーションでは入射角40°付近から実データよりもクラスターサイズの平均値が小さくなり、60°付近でその差が最も大きくなる(約0.5)。また、入射角が60°以下ではシミュレーションと実データでよく一致している。ここでクラスターサイズの平均値と入射角の関係を詳しく調べるため以下のフィット関数を使ってフィットを行った。

$$d = \int_{\theta-5\sigma}^{\theta+5\sigma} (a|\tan(\theta) - \tan(\theta_L)| + b) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\theta - \theta')^2}{2\sigma^2}\right) d\theta' \quad (20)$$

この式は入射角とクラスター幅のモデル式 (7) をガウシアンでコンボリューションしたものである。このときのガウシアンは電荷の拡散やミスアラインメントによる誤差を考慮に入れたものである。ここで、 θ_L 、 a 、 b 、 σ をフィッティングパラメータとしてフィットし、そのときの θ_L をホール角として求めた。まず、磁場があるときのホール角を 4° 、磁場がない時のホール角を 0° とし、そこから $\pm 30^\circ$ の領域でフィットを行った。フィットした結果以下の図に示す。

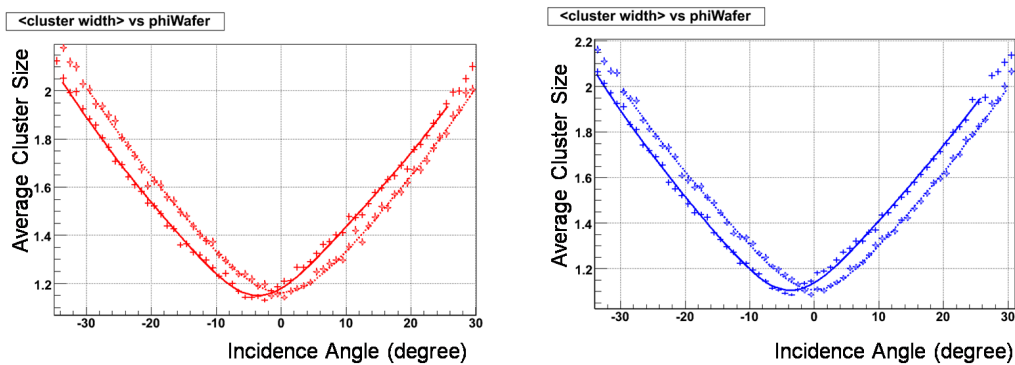


図 55: ホール角から $\pm 30^\circ$ の範囲でフィットした結果。左図実データ、右図シミュレーション。実線磁場あり、破線磁場なしのフィット。

このときのホール角は実データでは $3.61 \pm 0.07^\circ$ 、シミュレーションでは $3.70 \pm 0.06^\circ$ となった。さらにクラスターサイズの小さい領域を詳しく調べるために、ホール角から $\pm 10^\circ$ でフィットを行った。

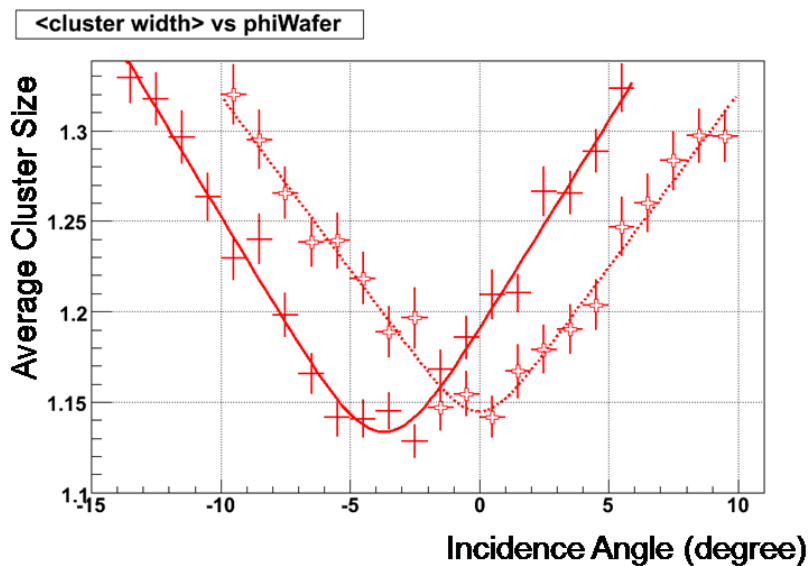


図 56: 実データのフィット結果。ホール角から $\pm 10^\circ$ でフィットした。実線が磁場あり、破線が磁場なしのフィット。

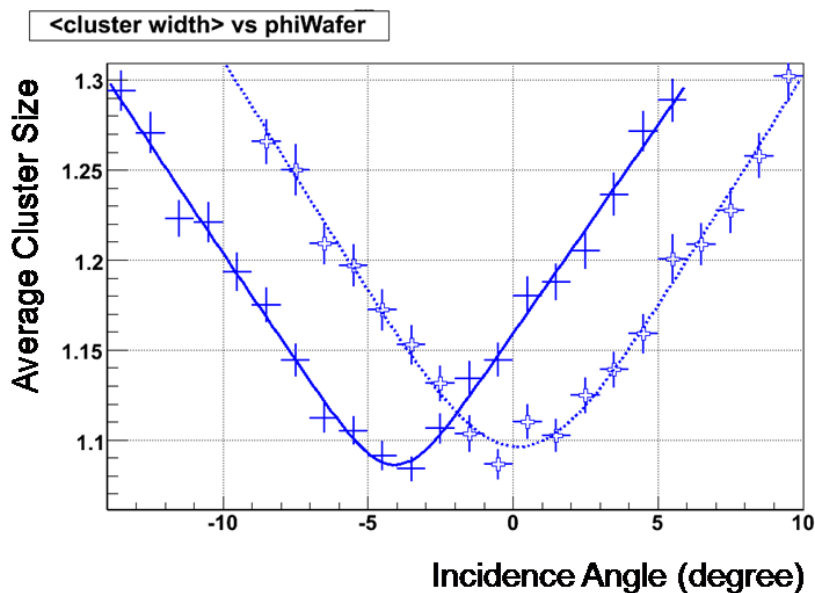


図 57: シミュレーションのフィット結果 ($\pm 10^\circ$)。実線は磁場あり、点線は磁場なし。

ホール角 $\pm 10^\circ$ でフィットした結果求めたホール角 θ_L とクラスターサイズの最小値を以下の表にまとめる。また、フィット時の a 、 b 、 σ の値を表 8 に示す。

	θ_L (°)	クラスターサイズの最小値
実データ (磁場あり)	-3.70 ± 0.10	1.13 ± 0.01
実データ (磁場なし)	0.04 ± 0.19	1.15 ± 0.01
シミュレーション (磁場あり)	-4.08 ± 0.10	1.09 ± 0.01
シミュレーション (磁場なし)	0.16 ± 0.12	1.10 ± 0.01

表 7: フィット結果

	a	σ	χ^2/dof
実データ (磁場あり)	1.31 ± 0.06	1.51 ± 0.15	14.2/16
実データ (磁場なし)	1.08 ± 0.09	1.03 ± 0.92	8.4/16
シミュレーション (磁場あり)	1.32 ± 0.05	1.16 ± 0.20	10.6/16
シミュレーション (磁場なし)	1.44 ± 0.11	2.19 ± 0.67	10.2/16

表 8: フィットパラメータ

クラスターサイズの最小値は実データがシミュレーションより約 0.05 大きな値となり、ホール角は実データが -3.70 ± 0.10 °、シミュレーションでは -4.08 ± 0.10 °となった。この差は実験時の温度の違いによるものと思われる。温度 260K から 290K における、バイアス電圧とホール角のモデル計算と測定した実データおよびシミュレーションの比較を図 58 に示す。ただしここでいうモデル計算とは SCT シリコン内の電界を一様としたときのモデルである。

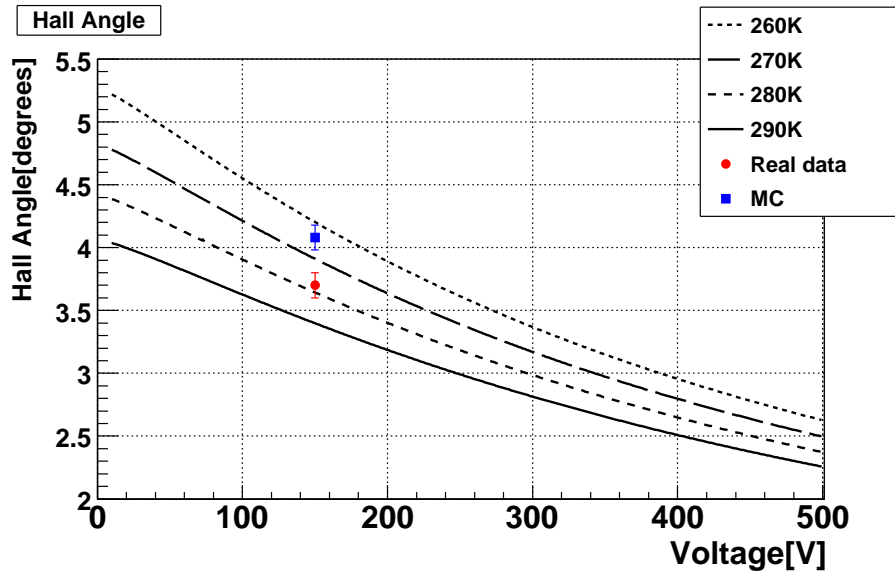


図 58: この図は横軸バイアス電圧、縦軸ホール角で 260K から 290K までのそれぞれのホール角計算モデルと実データ（丸）、シミュレーション（四角）とを比較したものである。

シミュレーションでは温度は 7 に設定されており、実データ測定時の温度は 4.6 ± 1 である。温度とホール角の計算モデルとの比較を図 59 に示す。

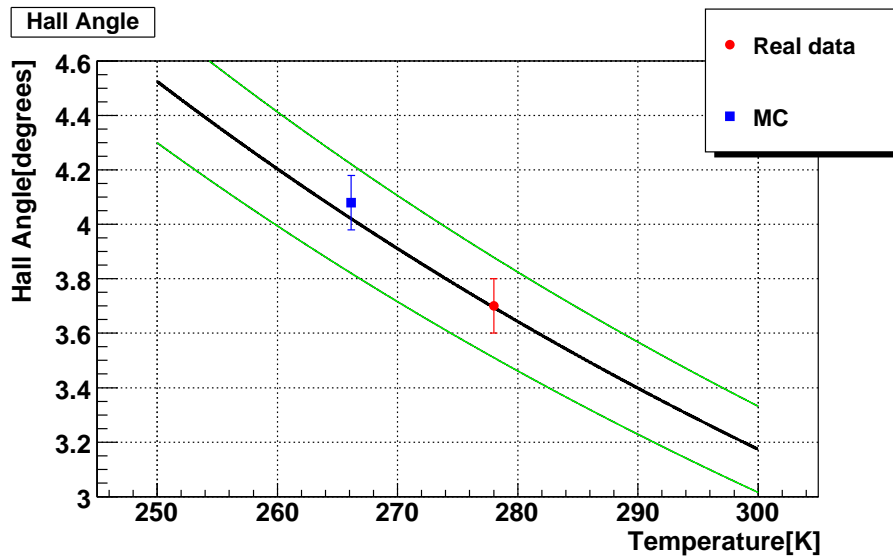


図 59: 計算値との比較。横軸温度、縦軸ホール角。実線は計算値、系統誤差 5% の幅をもつ。シミュレーションの温度は 7、実データは 4.6 とした。

上の図から計算値と測定結果はよく一致していることがわかる。また、過去に測定されたホール角の値と比較し、磁場とホール角の関係をモデル計算と比較した [3][4]。

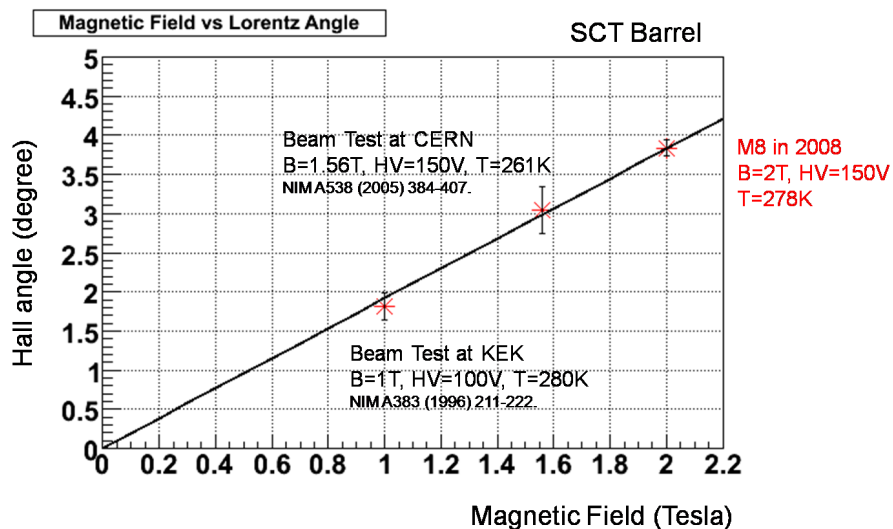


図 60: ホール角の計算値と過去のデータとの比較。横軸磁場、縦軸ホール角。実線はモデル計算値

ただし、以前に測定されたホール角は温度、バイアス電圧、がそれぞれ異なるため、測定された条件でのホール角の計算値と、273K、150V における計算値との差を補正した。上の図より、以前測定された、ホール角、今回測定されたホール角ともにモデル計算とよく一致している。

6 まとめ

2008年に行われた宇宙線コミッションングデータを用いてSCTバレルシリコン飛跡検出器の解析を行った。クラスターサイズと入射角の関係を調べ、デジタイゼーションパラメータの評価、ホール角の導出を行った。

クラスターサイズ解析の結果は、クラスターサイズの最小値はシミュレーションと実データでは約0.04の差があり、その差は小さい。入射角が60°以上でクラスターサイズの差はそれより大きくなる(約0.5)。入射角20°以下ではクラスターサイズはシミュレーションと実データでよく一致している。クラスターサイズに影響するデジタイゼーションパラメータとしてクロストークKが考えられる。SCTモジュールのエッジとワイヤーボンディングの非検出効率の大きい領域をカットした結果、非検出効率は4%から、1%に減少した。また、入射角と非検出効率の関係を調べた結果入射角70°付近まで非検出効率は一定(約1%)であるということがわかった。

ホール角の温度、電圧、磁場への依存性を調べた。ホール角を導出した結果、150V、 4.6 ± 1 という実験条件でホール角 $\theta_L = -3.70 \pm 0.10^\circ$ という値を得た。この値は、デジタイゼーションで用いられているモデルによる計算と、よく一致していた。

今後の課題としては、実データとシミュレーションでのクラスターサイズの違いによる物理解析への影響を調べること。また実データと合うようにデジタイゼーションパラメータのチューニングを行うこと。アラインメントされたデータで、ホール角やクラスターサイズに変化があるか調べること。バイアス電圧の異なるデータで解析することなどである。

謝辞

本研究を進めるに当たって、たくさんの方々に御指導していただきました。指導教官である田中礼三郎先生には直接多くの指導していただきました。心より感謝致します。また、中野逸夫先生、作田誠先生には多くの助言をしていただきました。

アトラス日本グループの先生方にも研究を通して大変お世話になりました。海野義信先生、高力孝先生には、SCT ミーティングにて数々の助言をいただきました。また、花垣和則先生、高嶋隆一先生には、研究面におけるご指導だけでなく CERN 滞在時に食事に誘ってくれたり、大変お世話になりました。本当に良い思い出として残っています。

ケンブリッジ大学の Richard Batley 氏からは解析コードをいただきました。メールによる質問にも丁寧に答えてくれました。

また、研究室の先輩である美馬覚さん、内藤大輔さんには解析方法について多くのご指導をしていただきました。深く感謝致します。

大阪大学の同期である、石川迪雄君、広瀬穰君達と CERN で過ごした日々はとても楽しい思い出として残っています。研究室の後輩である、山口琢也君は研究でつまずいた時、一緒になって考えてくれました。

これらの多くの方々に支えられて論文を作成することができました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] S.Gadomski, "Model of the SCT detectors and electronics for the ATLAS simulation using Geant4", ATLAS note, ATL-SOFT-2001-005, 22.07.2001.
- [2] T.Lari, "Lorentz angle variation with electric field for ATLAS silicon detectors", ATLAS note, ATL-INDET-2001-004, 11.04.2001.
- [3] Y.Unno et al., "Beam tests of a double-sided silicon strip detector with fast binary readout electronics before and after proton-irradiation", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 383, Number 1, 1 December 1996, pp. 211-222(12)
- [4] F. Campabadal *et al.*, "Beam tests of ATLAS SCT silicon strip detector modules", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 538 (2005) 384-407.
- [5] I.Gorelov *et al.*, "A measurement of Lorentz angle and spatial resolution of radiation hard silicon pixel sensors", CERN-EP/2001-32 4 April 2001.
- [6] C.Jacoboni *et al.*, "A review of some charge transport properties of silicon", Solid State Electronics, 2977, Vol 20, pp. 77-89.
- [7] ATLAS Collaboration, INNER DETECTOR Technical Design Report. CERN/LHCC/97-16 ATLAS TDR 4, APR 1997.
- [8] SteveLloyd, Running the Full Chain,
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/WorkBookFullChain>
- [9] The ATLAS Collaboration, G Aad *et al.*, "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider", 2008 JINST 3 S08003.
- [10] A. Abdesselam *et al.*, "The integration and engineering of the ATLAS Semiconductor Tracker barrel", Oct 2008. 67pp., Published in JINST 3:10006,2008.
- [11] E. Abat *et al.*, "Combined performance tests before installation of the ATLAS Semiconductor and Transition Radiation Tracking Detectors" Aug 2008. 67pp. Published in JINST 3:P08003,2008.
- [12] A. Ahmad *et al.*, "The silicon microstrip sensors of the ATLAS semiconductor tracker", Instr. Meth. A578 (2007) 98-118.
- [13] A. Abdesselam *et al.*, "The Barrel Modules of the ATLAS Semiconductor Tracker" Nucl. Instr. Meth. A568 (2006) 642-671.
- [14] F. Campabadal *et al.*, W. Dabrowski (corresponding author) "Design and performance of the ABCD3TA ASIC for readout of silicon strip detectors in the ATLAS semiconductor tracker" NIM A552, Issue 3, 1 November 2005, Pages 292-328.