次世代ガンマ線観測衛星GLAST
トラッカー部地上較正試験と性能モニタ

河本 卓也

M032287

広島大学理学研究科物理科学専攻

高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

主査：大杉節　副査：杉立徹

2006年 2月 10日

概 要

ガンマ線領域での宇宙観測は 2000 年にミッションを終えた CGRO 衛星搭載 EGRET 検出器以来なされておらず、その検出天体も約 270 天体と他のエネルギー領域に比べ圧倒的に少ない。2007 年打ち上げ予定の宇宙ガンマ線衛星 GLAST は CGRO の後継機として期待される次世代型衛星であり、日米欧の国際協力で開発が行われている。EGRET と比べ 30 倍の感度と、100 分で全天の 85%を観測可能な広い視野で 10000 個を越える天体を検出できると予想されており、ガンマ線天文学の新時代を担っている。GLAST 衛星の主検出器である LAT(Large Area Telescope) は、シリコンマイクロストリップを用いた飛跡検出器部 (トラッカー) と CsI シンチレータを用いたカロリーメーターからなるタワーを 4×4 で並べたモジュール構造をとり、その回りをプラスチックシンチレーターで覆い宇宙線などの荷電粒子によるバックグラウンドを反同時計数で落とす。

本研究ではトラッカー部の較正試験の一環として、シリコンストリップへの電荷注入や宇宙線を用いた試験で読み出しエレクトロニクスの較正と不良ストリップの評価を行った。シリコンストリップにデポジットした電荷情報の読み出しは TOT(Time Over Threshold) 信号が用いられている (本論文第 3 章参照)。トラッカーの性能を発揮するためには読み出しエレクトロニクスを較正し、TOT 信号とシリコンストリップにデポジットされた電荷量の変換式を正確に求めることが重要である。較正試験で求めた変換式を用いて、宇宙線ミューオンを測定したデータを、TOT 頻度分布 (図 1) からデポジット電荷頻度分布へと変換した (図 1.1)。ランダウ分布に変換でき、ピーク値が理論値の近くに分布していることから、較正試験が正 しく行われていることが確認できた。また、タワーの性能劣化がないことを確 認するため、較正パラメータの変動のモニタを行った。較正試験中のパラメータ変動から較正試験の評価を行うことができ、較正試験用プログラムのバグ発見にもつながった。

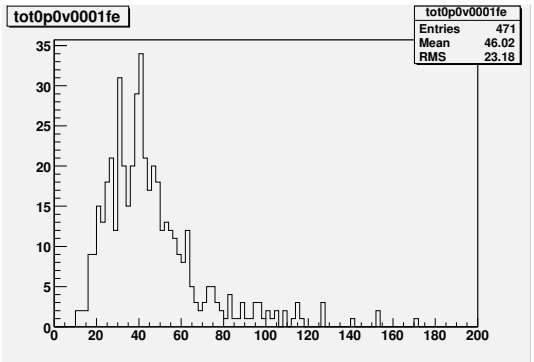

図 1: TOT 頻度分布

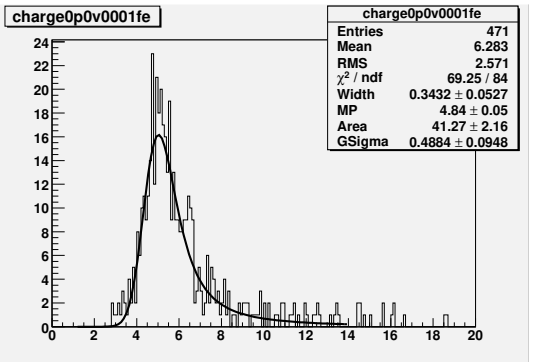

図 2: TOT から変換した電荷頻度分布

目 次

第 1 章　次世代ガンマ線天文衛星 GLAST **3**
1.1 GLAST 計画 3
1.2 GLAST で目指すサイエンス 4

第 2 章　GLAST 衛星搭載検出器の構成 **5**
2.1 ACD 検出器 6
2.2 トラッカー (TKR) 検出器 7
2.3 カロリメータ (CAL) 検出器 8

第 3 章　トラッカー部の詳細 **10**
3.1 トラッカーの仕様 10
3.2 シリコンマイクロストリップ検出器 10
3.2.1 検出原理 11
3.2.2 トラッカーの構成 13
3.3 信号処理回路 15
3.3.1 GTFE 16
3.3.2 GTRC 17
3.3.3 TEM 17
3.3.4 GASU 18
3.4 トラッカー信号読み出し 19
3.4.1 ストリップデータ 19
3.4.2 TOT データ 19
3.5 較正試験の必要性 21

第 4 章　トラッカー部較正試験 **22**
4.1 TOT 較正試験 22
4.1.1 スレッショルド DAC 較正試験 23
4.1.2 TOT ゲイン較正試験 25
4.1.3 チャージスケール較正試験 26
4.2 不良ストリップリストの作成 30
4.2.1 Dead ストリップ 30
4.2.2 Disconnected ストリップ 30
4.2.3 Hot ストリップ 36

第 5 章　TOT キャリブレ– ションパラメ– タの変動モニタ　39
5.1　モニタ試験の目的、およびモニタ項目 39
5.2　スレッショルド DAC 値のモニタ 40
5.2.1　較正試験によるパラメータ変動 42
5.2.2　問題点とその原因 42
5.3　回路ゲイン変動モニタ 44
5.3.1　較正試験によるパラメータ変動 45
5.3.2　全体を通しての考察 46
5.4　TOT ゲイン変動モニタ 46
5.4.1　較正試験によるパラメータ変動 47
5.4.2　チャージスケール変動モニタ 50
5.4.3　全体を通しての考察 50
5.5　不良ストリップモニタ 51
5.5.1　Dead ストリップモニタ 52
5.5.2　Hot ストリップ変動モニタ 52
5.5.3　Disconnected ストリップ変動モニタ 54

第 6 章　まとめ　57

第1章　次世代ガンマ線天文衛星GLAST

1.1　GLAST計画

ガンマ線領域での天体観測は、これまでその検出の難しさから他波長域での観測と比べて遅れをとってきた。紫外線から GeV ガンマ線までの電磁波観測は地球大気との相互作用による影響が大きく地上での観測は不可能であるため、大気圏外に検出器を打ち上げる必要がある。

ガンマ線天文学は 1967 年に打ち上げられた OSO-3 衛星によって幕を開けた。それ以来、2000 年にミッションを終えた CGRO 衛星搭載 EGRET 検出器までに数機のガンマ線衛星が打ち上げられ、約 270 の天体が検出されたが、多波長に比べ検出天体数は少ない。また角度分解能が十分でなく、他波長域で同定されていない。

GLAST 衛星は EGRET 検出器の後継機として 2007 年秋に打ち上げが予定されている次世代ガンマ線衛星である。日本、アメリカ、フランス、ドイツ、イタリア、スウェーデンなどの国際協力からなるプロジェクトで、日本はトラッカー部のシリコンストリップを担当している。現在の最新の技術を搭載しており、これまでのガンマ線衛星を大幅に上回る性能で、10000 を越すガンマ線天体が検出可能であると予測される (図 1.1)。

2006 年 2 月現在、LAT 検出器の組み立ては終了しており、アメリカの SLAC での較正試験が行われ、アメリカの NRL(NavalResearch Laboratory) で行われる環境試験に向けた準備が進められている。

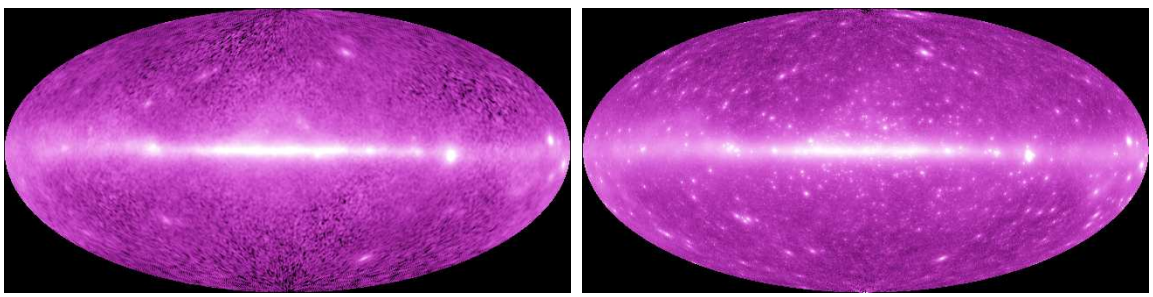

図 1.1: EGRET(左) と GLAST(右) で見たガンマ線宇宙。検出天体数が 271 から 10000 へと増加すると期待される。

1.2 GLASTで目指すサイエンス

GLAST衛星の特徴として、一度に全天の20 %を捉える広い視野と高位置分解能、大有効面積が挙げられ、EGRETを数10倍上回る感度を持つ。この感度を活かし、ガンマ線領域でこれまで観測できなかった天体についての発見が多く期待されている。

これまでのガンマ線観測衛星は角度決定精度が十分でなかったため、銀河面の個々の天体を分離することが難しかった。GLASTではEGRETから大幅に向上した点源の位置分解能によって、これまで分解できなかった銀河天体の検出が可能となり、検出天体数を圧倒的に増やすことが予測されている。それによりパルサーの放射モデルの解明、進化の研究や超新星残骸における粒子加速の現場をおさえることが可能になると考えられている。また銀河面の拡散放射から、陽子の$\pi 0$崩壊によるガンマ線を通じて、宇宙線の分布に迫ることも期待される。

GLASTのもつ広い視野は、一度に全天の20 %を観測することが可能であり、100分の軌道周期で全天のおよそ85 %をカバーすることができる。この視野とMeVからGeVに渡る広いエネルギー範囲を生かし、これまでの多波長同時観測にはなかったスムースな連携が期待される。活動銀河核やブラックホール連星のフレアをGLASTが検知し、他の望遠鏡に知らせることで、多波長観測ではGLASTが中心的な役割を果たす。同時期に日本のすざく衛星が活躍していることから、極めて広範囲のエネルギースペクトルによって、AGNのジェットの起源などに迫ることが可能となる。

このように、GLASTの打ち上げによってガンマ線天文学は新しい時代を迎えようとしている。現在、ガンマ線領域で謎とされている現象が過去のものになる日は近い。

第2章　GLAST衛星搭載検出器の構成

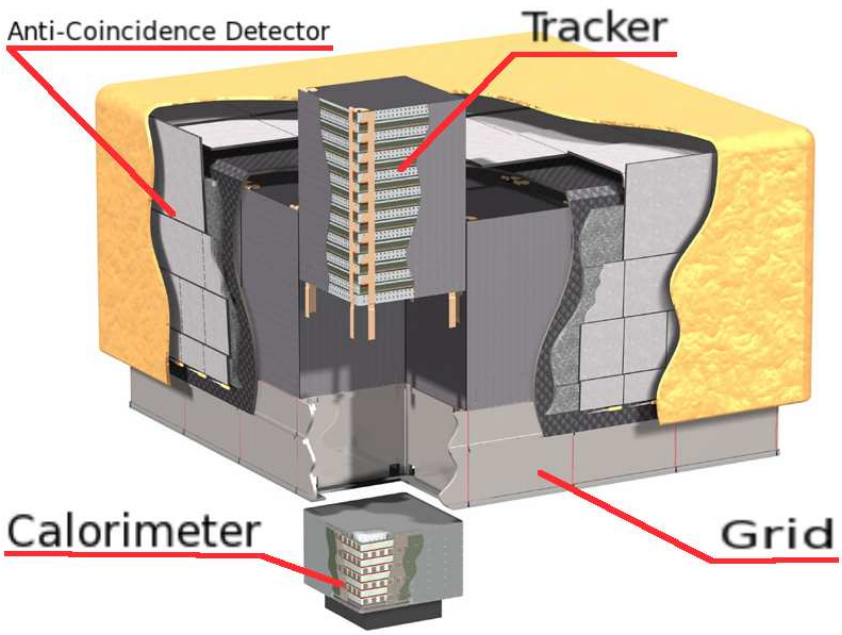

図 2.1: GLAST LAT 検出器の全体図

GLAST 衛星には主検出器である LAT(Large Area Space Telescope) とガンマ線バーストモニタ検出器 GBM(GLAST Burst Monitor) の 2 種類の検出器が搭載される。これらの検出器には高エネルギー加速器実験で培われた最新の技術がふんだんに盛り込まれており、2000 年にミッションを終えたガンマ線観測衛星 CGRO 搭載 EGRET 検出器と比べ格段に性能が向上している。特にトラッカー部に用いられているシリコンストリップ検出器によって位置分解能が大幅に向上しているため、入射ガンマ線の位置決定精度が大幅に良くなっている。

GLAST 衛星の主検出器である LAT 検出器 (図 2.1) は電子陽電子対生成型検出器であり、ガンマ線から光電子対生成によって生成された電子・陽電子の飛跡を追尾し、そのエネルギーを測定することによってガンマ線の到来方向とエネルギーを検出する。30MeV から 300GeV のガンマ線に感度を持ち、ガンマ線の到来方向とエネルギーを測定すると同時に、宇宙線バックグラウンドの除去をおこなう。LAT 検出器は 16 タワーから成るモジュール構造をとっている。モジュール化を行うことで、トリガシステムへの負担を減らし、製作やテストを行い易いといった利点がある。1 つのタワーは入射ガンマ線の到来方向を特定するトラッカー部、ガンマ線のエネルギーを測定するカロリメータ部とその読み

出し回路で構成されている。このタワーを 4×4 で計 16 タワー並べ、グリッドと呼ばれる構造体中に配置し、その回りを ACD(Anti Coincidence Detector) で覆って反同時計数で宇宙線バックグラウンドを除去する。

GBM はガンマ線バーストの発見とスペクトル取得の点で LAT を補充する。NaI と BGO シンチレータによって構成された検出器で、10 keV から 100GeV の 7 桁に渡る広いエネルギー領域でスペクトルを取得することができ、ガンマ線バーストのスペクトルを精度良く見積もることを可能とする。

LAT 検出器と EGRET の性能比較を表 2.1 に示す。有効面積は EGRET のおよそ 5 倍、さらに視野は 4 倍に向上しており、検出天体を 10000 個と圧倒的に増やすことが期待される。本章では、GLAST 衛星の主検出器である LAT の構成要素である ACD、トラッカー、カロリメータについての説明を行う。

	EGRET	GLAST
エネルギーバンド	20 MeV - 30 GeV	20 MeV - 300 GeV
有効面積	1500 cm^2	10000 cm^2 (10 GeV)
視野	0.5 sr	>2.4 sr(全天の 20%)
角度分解能	5.8° (100 MeV)	3.37° (100 MeV)
		0.086° (>10 GeV)
エネルギー分解能	10 %	<10 %
1 イベントデッドタイム	100 ms	<100 μs
位置分解能	$15'$	$<0.4'$
点源位置決定精度	$\sim 1 \times 10^{-7}$ $cm^{-2}s^{-1}$	$<3.0 \times 10^{-9}$ cm^{-2} s^{-1}
検出天体数	271	>10000

表 2.1: EGRET と GLAST の性能比較

2.1 ACD 検出器

ACD(Anti-Coincidence Detector) はプラスチックシンチレータを用いた検出器で、タイルの端やすき間も合わせて、荷電粒子に対して 99.97 %の感度を持つ。LAT 検出器のタワーの上部と側面を覆っており、検出された信号を Veto 信号として用いることで荷電粒子によるバックグランウンドを除去する。高エネルギーガンマ線入射時のカロリメータからのシャワーによる self-veto を防ぐため、プラスチックシンチレータをセグメントに分け合計 89 枚のプラスチックシンチレータタイルで構成されている (図 2.2)。EGRET では 10 GeV でおよそ 50 %の self-veto によるイベント損失があった。その影響を減らし、かつバックグラウンド除去機能を損なわないようにシンチレータの分割を最適化し、10 %以下のイベント損失を実現している。

プラスチックシンチレータからの信号読み出しには読み出し効率の高い PMT を用いて行っており、各シンチレータタイルから検出器側面に設置された PMT までは光ファイバーを用いて検出信号の読み出しを行っている。ガンマ線イベント取得時は、ACD シン

チレータタイルからのヒット信号を Veto 信号として用いるが、トリガ信号として用いることで高エネルギー電子線の観測を行うことも可能である。また、分割されたシンチレータタイルからのヒット信号をそれぞれ独立に用いることで、任意の場所にヒットした信号をトリガ信号として用いるができる。

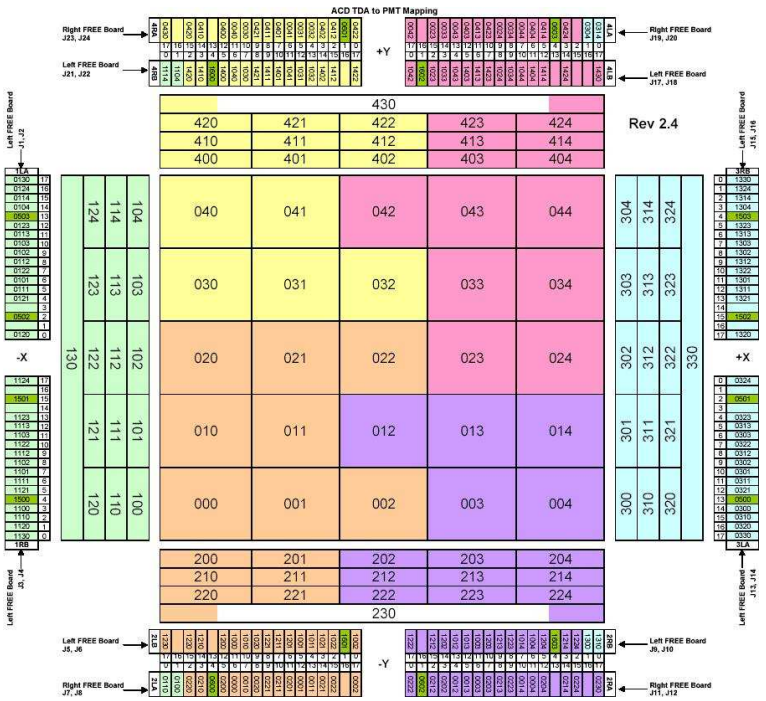

図 2.2: ACD のプラスチックシンチレータタイル分割の様子。self-veto による影響を最小限にするため、タイル分割を最適化している。最外周の細かい記述は読み出し PMT の番号である。

2.2 トラッカー (TKR) 検出器

GLAST 衛星の搭載検出器のうち、入射ガンマ線の到来方向を決定するのがトラッカー (Trackeredector subsystem) である。ガンマ線から生成された電子 · 陽電子対の飛跡を追うことで、入射ガンマ線の到来方向を再構築するものである。

飛跡検出には、これまでのガンマ線観測衛星に搭載されていたスパークチェンバーに変わり、シリコンマイクロストリップ検出器 (SSD) を用いている。SSD は数 100 μm 単位での位置決定精度を持つため、入射ガンマ線の到来方向決定精度が格段に良くなる。また、シリコンストリップの放射線耐性は高エネルギー素粒子実験で確認されているため、宇宙空間での使用に適している。

図 2.3 はトラッカーの外観を示したものである。シリコンストリップなどで構成される、トレーと呼ばれるモジュールを 19 層積み重ねた構造をしており、周りをカーボンファイバの構造体と薄いアルミニウムの膜で覆っている。各トレーからの信号読み出しを行うケーブル (flex-circuit calbe) が確認できる。

全タワーで 100 万チャンネル近くになるシリコンストリップからの信号読み出しは、専用に設計した VLSI を用い、ストリップ毎のヒットの有無とともに TOT(Time Over Threshold) と呼ばれる信号によって行う。TOT はシリコンストリップからの出力信号とあるスレッショルドを比較して出力される信号の長さであり、シリコンストリップにデポジットされた電荷量と 1 対 1 関係にある。TOT 信号を読み出しに用いることで、読み出し回路の簡略化を図っている。TOT 信号についての詳細は 3 章で述べる。

本論文では TOT 信号の較正試験とその変動モニタ及び、不良ストリップのリスト作成と変動のモニタを主内容としており、4 章と 5 章で詳しく述べる。

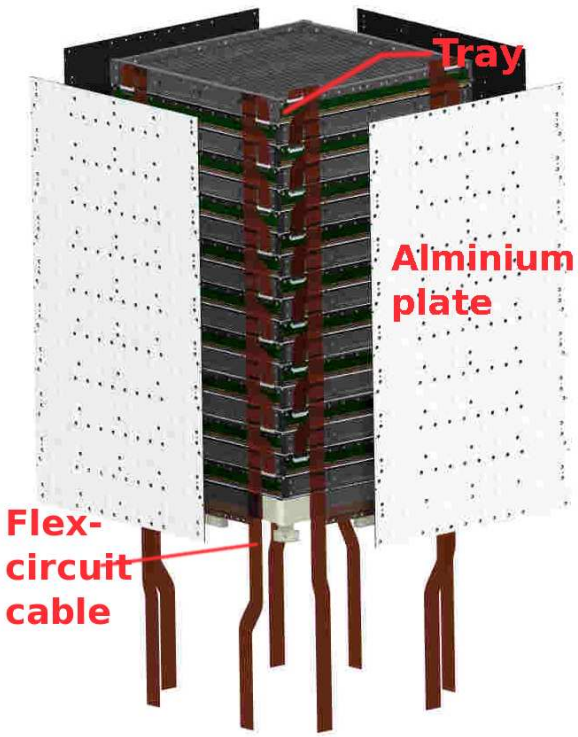

図 2.3: トラッカーの全体図

2.3 カロリメータ (CAL) 検出器

LAT 検出器に入射したガンマ線のエネルギーは最終的に CAL(CALorimeter) で測定される。CAL 検出器には CsI(thallium doped) シンチレータを用いており、その厚さは放射長の 8.5 倍となっている。

棒状の CsI シンチレータ (2.8 cm×2.0 cm×35.2 cm) を 1 層に 12 本並べ、この層を 8 段互い違いに積み重ねており、合計 96 本のシンチレータを用いている。図 2.4 はカロリメータの外観を示したもので、棒状の CsI シンチレータが互い違いに積み重ねられていることが分かる。

CsI シンチレータは密度が高く放射線阻止能が大きいため、高エネルギー側でのエネルギーバンドの拡大に貢献している。各シンチレータは反射材で覆ってあり、シンチレータ毎に独立して信号読み出しを行う。CsI シンチレータは発光出力が高い (5000e/MeV) ため、各シンチレータからの信号読み出しは相性の良い PIN ダイオードを用いている。シンチレータの両端から信号読み出しを行い、出力光量の比をとることでシンチレータ中でのヒット位置を求めることができる。さらに、3 次元に積み重ねた各々のシンチレータからの位置情報を読み出すことで、ヒットの 3 次元分布を得ることができる。この情報から電子シャワーの形状を調べることで、カロリメータで止め切れない高エネルギーガンマ線 (>100 GeV) のエネルギーも精度良く求めることができる。

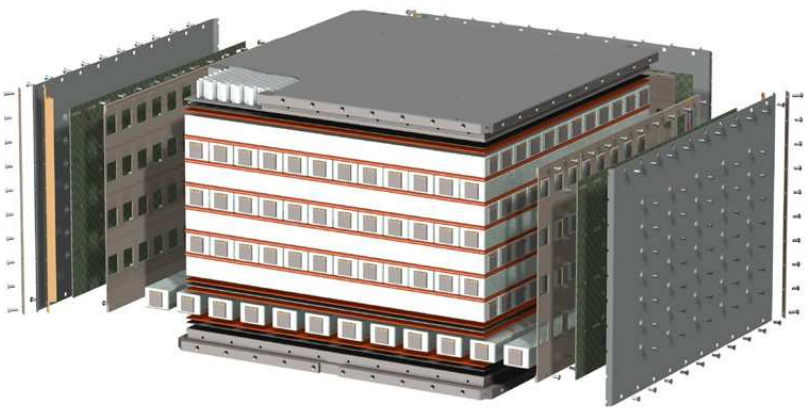

図 2.4: カロリメータの構造

第3章　トラッカー部の詳細

3.1　トラッカーの仕様

消費電力	< 160W
可動温度帯	-15 度から 45 度
ノイズ占有率	1.0×10^{-5}(トリガマスク用)
	5.0×10^{-5}(データマスク用)
デッドタイム	<100 μs
有効面積	10000 cm^2
アスペクト比	0.4

表 3.1: トラッカースペック

GLAST トラッカー検出器の諸元を表 3.1 にまとめる。これまでに例のない約 10000 cm^2 もの大面積のシリコンストリップを用いることで、これまでのスパークチェンバー等のガンマ線検出器と比べて位置分解能が大きく向上しており、数分角の角分解能を実現している。また飛跡検出精度の高いシリコンストリップ用いることで、検出器の高さと幅との比であるアスペクト比を 0.4 に抑えることができるため、2.4 sr という広い視野での観測が可能となった。全タワーで 100 万チャンネル近くあるシリコンストリップからの信号読み出しには専用に開発した VLSI を用いており、全 16 タワーで 160 W という低消費電力な読み出し回路を実現し、衛星の限られた電力を有効利用している。

3.2　シリコンマイクロストリップ検出器

トラッカー部に用いられているシリコンマイクロストリップ検出器は、主に広島大学で開発が行われた [1][2][3]。シリコンストリップ検出器 (SSD:Silicon Strip Detector) の位置分解能はストリップ間の間隔によって決定されるため、これまで EGRET 検出器などで用いられてきたガスチェンバー検出器を大幅に上回る位置分解能を実現するとして期待されている。SSD はこれまで多くの高エネルギー素粒子実験によって放射線耐性が確認されており、宇宙空間での運用は問題なく行える。

GLAST のトラッカーで用いているシリコンストリップ検出器は、n 型シリコンウェハーの上に細い短冊状の p 型半導体を並べて pn 接合ダイオードを形成しており、幅 0.056 mm の p 型シリコンストリップが、1 シリコンウェハー当たり 384 本、0.228 mm 間隔で配置されている (図 3.1)。1 辺が約 87.5 mm あるシリコンストリップウェハーを 4 枚縦に並べ

てウェハー間のギャップ (SSD Gap) をワイヤボンディングでつなぎ、長いシリコンストリップとして読み出しを行う。この 4 枚のウェハーを 4 列並べた、4×4 計 16 枚のシリコンストリップウェハーを 1 枚のレイヤーと呼び、1 レイヤーあたり約 1200 cm^2 の大面積シリコンストリップ検出器として使用する。

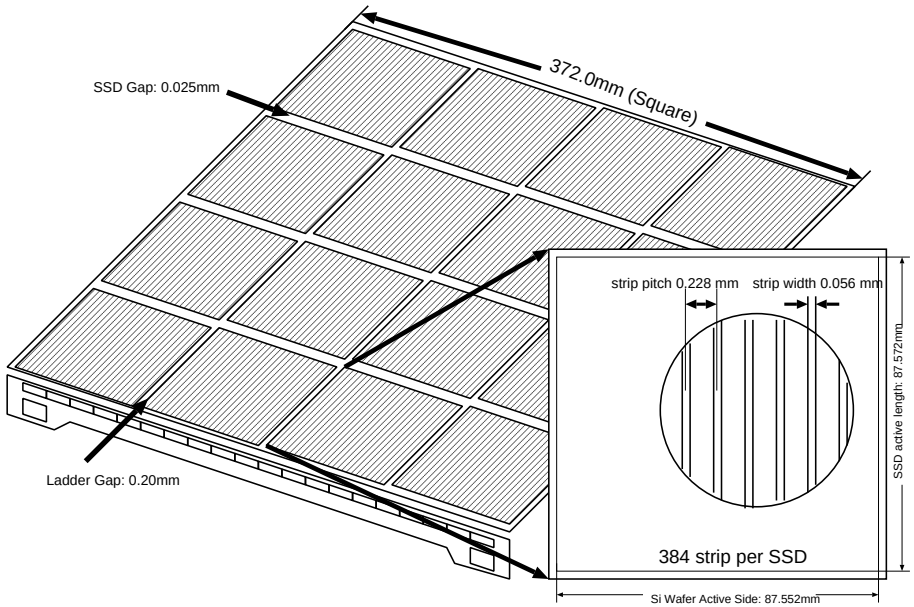

図 3.1: トラッカーシリコンストリップ検出器の 1 レイヤー

トラッカーでは、レイヤー間に配置されたタングステン製のコンバータでガンマ線を電子 · 陽電子対に変換し、それらの軌跡を SSD によって追跡することで入射ガンマ線の到来方向を特定する。SSD 中を荷電粒子が通過すると空乏層がイオン化し、電子 · ホール対が生成される (図 3.2)。この電子は電場に従って n^+ 側に引き寄せられ、ホールは最も近い p^- ストリップに引き寄せられる。その結果シリコンストリップに電荷が流れ込む。このシリコンストリップの位置情報から荷電粒子のヒット位置を求めることができ、出力電荷量から入射荷電粒子のエネルギーと電荷を求めることができる。

3.2.1 検出原理

荷電粒子が物質中を通過する際に損失するエネルギーの平均値は以下のベーテブロッホの式 3.1 で与えられる。

$$-\frac{dE}{dx} = nZz^2 \frac{4\pi\alpha^2(\hbar c)^2}{m_e c^2 \beta^2} \left(ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 \right) \tag{3.1}$$

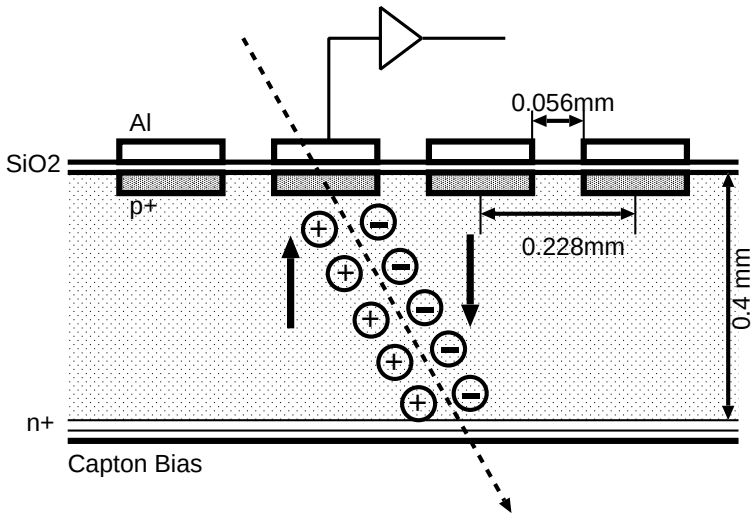

図 3.2: シリコンストリップの断面図

n	物質中の原子密度
Ze	物質原子の電荷
m_e	電子質量
βc	荷電粒子の速度
ze	荷電粒子の電荷
I	励起ポテンシャル

物質中でのエネルギー損失の大きさは粒子の種類に依らず、電荷の二乗に比例し速度の二乗に反比例する。特に粒子の速度 β が 0.96 程度以上になるとエネルギー損失はほぼ一定な最小値をとる。このような粒子を、Minimum Ionizing Particle(MIP) と呼び、電荷の等しい粒子であれば、ほぼ同じ値をとる (図 3.3)。
GLAST で観測される荷電粒子と地上較正試験で用いる宇宙線ミューオンは、光速に近い速度で運動しており MIP と見なすことができる。我々は、厚さ 400 μm のトラッカー SSD を MIP が通過する際の損失エネルギーピーク値を、モンテカルロシミュレータを用いて求めた。ベーテ · ブロッホ式より求めた損失エネルギーの平均値は 6.78 fC であるが、損失エネルギーの分布はランダウ分布と呼ばれる非対称な形をとるため、そのピーク値は 4.92 fC と求まった。第 4 章で述べるトラッカー較正試験では、宇宙線ミューオンを測定しこの損失エネルギーピーク値と比較することで、較正試験用電荷の絶対値を求めている。

また、トラッカーではシリコンストリップにデポジットされたエネルギーを TOT(Time Over Threshold) データを用いて観測する。TOT とはシリコンストリップ出力信号が、あるスレッショルドを越えている時間のことであり、この信号から入射粒子の電荷を求めることができる (3.4 参照)。この TOT を用いて、宇宙線バックグラウンドによるイベントとガンマ線による信号とを区別することができる。図 3.4 は TOT を用いて観測した、ガンマ線イベント (上) と荷電粒子イベント (下) のシリコンストリップへのデポジットエネ

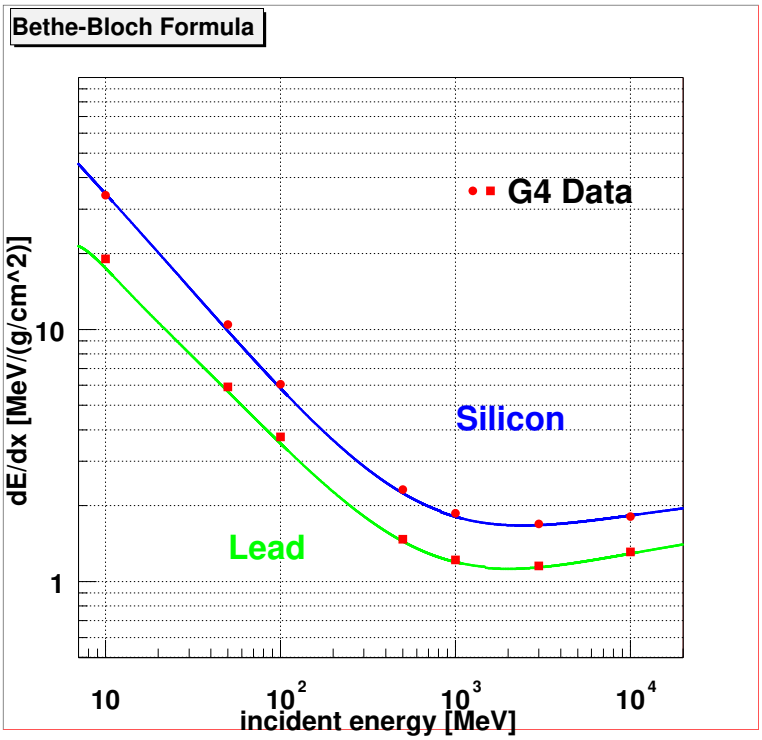

図 3.3: モンテカルロシミュレータで求めた、陽子の入射エネルギー (横軸) と損失エネルギー (縦軸) にベーテ · ブロッホの式を重ねたもの。入射エネルギーが大きくなると損失エネルギーはほぼ一定値となることが分かる。

ルギー分布である。横軸は TOT の長さでシリコンストリップへのデポジット電荷量に対応している。

ガンマ線により生成された電子 · 陽電子対が 1 本のシリコンストリップに入射すると、2MIP に対応するエネルギーをデポジットする。これに対し 1 荷の宇宙線バックグラウンドによるイベントは 1MIP のエネルギーしかデポジットしない。よってデポジットエネルギー分布を調べることで、電子 · 陽電子対の間隔が近く、軌跡上で分離できない場合でも宇宙線バックグラウンドと区別することができる。

3.2.2 トラッカーの構成

図 3.1 で示したシリコンストリップレイヤーを 2 枚重ね、それぞれに MCM(Multi-Chip Module) と呼ばれる読み出し回路とバイアス電源供給用カプトンシートを取り付けて、トレーと呼ばれるモジュールを構成する (図 3.5)。トレーはカーボンフレームとアルミニウム製ハニカムコアを核とし、タングステンコンバータをレイヤー間にはさんだ構造をしている。同一トレーの 2 枚の SSD は同じ方向の位置分解能を持ち、このトレーを 19 層互い違いに積み重ねて、3 次元の位置分解能を持つトラッカーを構成している。最上部と最下部のトレーはそれぞれ下部、上部にのみシリコンストリップが設置されており、1 トラッカーは計 36 シリコンストリップレイヤーからなる。トレーに含まれるコンバータの厚さには 2 種類あり、トラッカー上部から 12 層のトレーには放射長の 3 %の薄いコンバータ

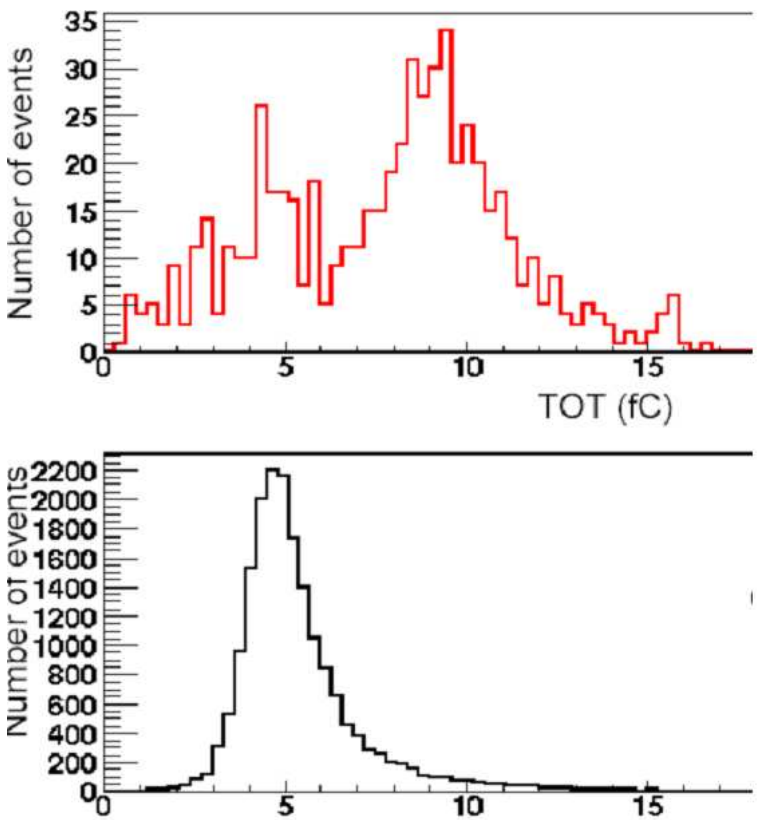

図 3.4: シリコンストリップへのデポジット電荷分布。ガンマ線イベント (上) と、宇宙線バックグラウンドイベント (下)。

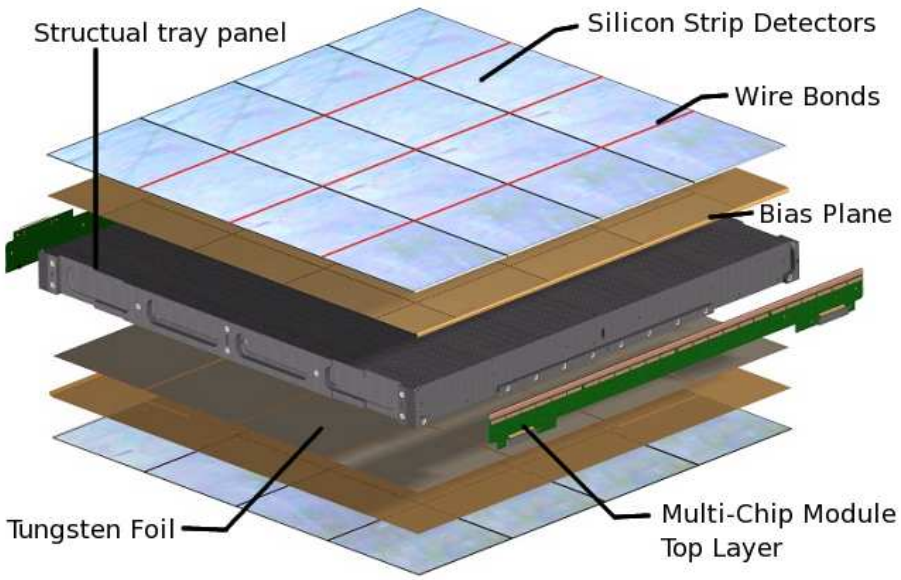

図 3.5: トレーモジュールの構造。1 トラッカーは 19 トレーから成る。

が、次の 4 トレーには放射長で 18 %の厚いコンバータが設置されている。最下部の 3 トレーにはコンバータは設置されていない。

トラッカー上部に設置されているコンバータは、多重散乱による飛跡情報の損失を防ぐために薄いものを用いている。そのため有効面積が小さくなりガンマ線検出効率が低くなるが、トラッカー下部に厚いコンバータを用いることで有効面積の補充を行っている。

3.3 信号処理回路

1 タワーで約 5.5 万チャンネル、全 16 タワーで約 88 万チャンネルあるトラッカーシリコンストリップからの信号読み出しには、専用に設計した ASIC を用いている。各シリコンストリップレイヤーには MCM(Multi-Chip Module) と呼ばれる読み出し回路が設置されており、MCM は 2 つの GTRC(GLAST Tracker Read-out Controller ASIC) と 24 個の GTFE(GLAST TrackerFornt-End ASIC) で構成されている (図 3.6)。1GTFE は 64 本のシリコンストリップからの信号読み出しを行い TOT を出力する。GTRC はレイヤー内の GTFE からの信号を読み出し、TEM(Tower Electronics Module) へと送信を行っている。TEM は、トラッカーとカロリメータから成るタワーモジュールへの電源供給とタワーのコントロールを行っている。TEM は衛星全体のコントロールを行っている GASU(Global-trigger/ACD-module/Signal-distribution Unit) からのコマンドを GTRC へと送信、GTRC からの TOT データからトリガ信号を生成し、GASU へと送信する。

本節ではこれらの信号処理回路についての説明を行う。

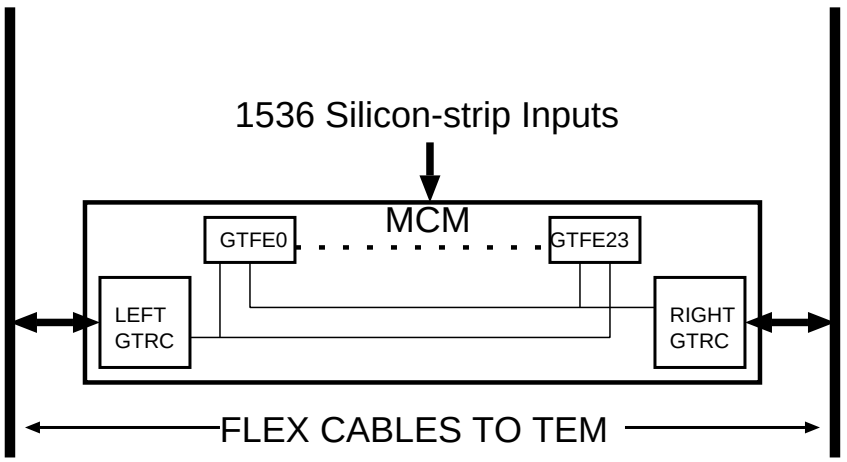

図 3.6: MCM 読み出し回路。1 レイヤーあたり 2 つの GTFE、24 個の GTRC がある。

3.3.1 GTFE

GTFE(GLAST Tracker Front-End ASIC) はシリコンストリップからの出力信号を処理し TOT データを生成、出力する。1GTFE あたり 64 ストリップを担当しており、各シリコンストリップレイヤーに 24 個ある GTFE で 1536 本のシリコンストリップ信号処理を行う。信号処理回路はストリップ毎に独立になっており、それぞれの信号処理回路は、チャージアンプ、整形アンプ、ディスクリミネータで構成されている。この読み出し回路によって、シリコンストリップからの入力信号はトリガ信号とデータ出力信号として出力される (3.4 参照)。

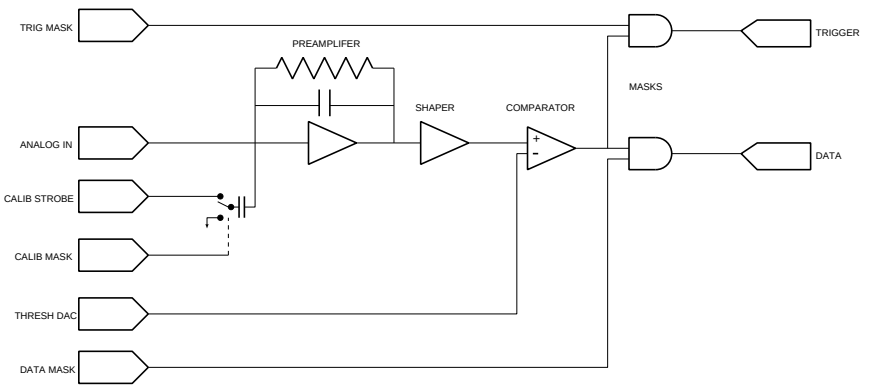

図 3.7: GTFE 読み出し回路。1 チャンネルの構成

図 3.7 は 1 チャンネルあたりの読み出し回路を示したものである。ディスクリミネータからの TOT 出力は、トリガ信号とデータ出力信号の 2 つの目的に用いられる。トリガ信号、データ信号はそれぞれ、トリガマスク、データマスクと同期をとり、GTRC へと出力される。これら 2 つのマスクは、Hot ストリップからのノイズ出力を規制するもので、較正試験で求められた Hot ストリップリストを参照して行われる。(4 章参照)

各 GTFE はトリガ信号出力を 2 つずつ (右方向、左方向) 持っており、MCM の両端にある GTRC に向けて出力される。それぞれ左端 GTFE から右 GTRC、右端 GTFE から左

GTRC へと全 GTFE を経由して出力される。このとき各 GTFE からのトリガ信号は論理和をとられ、両端の GTRC に FAST-OR 信号として入力する。

各 GTFE に 1 つずつあるスレッショルド DAC とキャリブレーション DAC は、7 ビットの DAC レジスタからのデジタル信号を電圧に変換し出力する。スレッショルド DAC の出力はディスクリミネータのスレッショルド決定に用いられ、キャリブレーション DAC 出力は較正試験で用いる注入電荷を生成する。それぞれの入力 DAC 値と出力電圧は以下のように High、Low2 つの出力モードで決定される。

Low:スレッショルド DAC 出力電圧 (mV)	$= 4.5 + 4.5 \times$ DAC 値
High:スレッショルド DAC 出力電圧 (mV)	$= 12.9 + 12.9 \times$ DAC 値
Low:キャリブレーション DAC 出力電圧 (mV)	$= 1.57 + 1.53 \times$DAC 値
High:キャリブレーション DAC 出力電圧 (mV)	$= 15.0 + 14.6 \times$DAC 値

キャリブレーション DAC 出力電圧は、各チャンネル毎に 46 fF のキャパシタによって電荷信号へと変換され、較正試験用電荷としてチャージアンプに注入される。キャリブレーション DAC 出力はキャリブレーションマスクによってコントロールされており、1 チャンネル毎に電荷注入を規制できる。

3.3.2 GTRC

GTRC(GLAST Tracker Read-out Controller) は各シリコンストリップレイヤーに 2 つあり、TEM と GTFE との間のインターフェイスとしての役割を担っている。TEM からのコマンドを GTFE へと送信、GTFE からのトリガ信号を TEM へと送信を行い、またストリップデータ読み出しの制御を行っている。それぞれの GTRC はレイヤー内の 24 個全ての GTFE と交信可能であるが、通常はそれぞれ 12GTFE からの信号読み出しを担当している。その読み出し GTFE の分配は自由に設定することができ、どちらかの GTRC が故障した場合にはもう一方から全 GTFE の信号を読み出すことで信頼性を高めている。

GTRC は GTFE からの FAST-OR 信号を受信すると、その信号の立ち上りを検出して TREQ(Trigger Request) 信号を生成、TEM へと出力する。この信号は TEM(3.3.3) と GASU(3.3.4) で処理され、グローバルトリガが生成される。

GTRC は TEM からの TACK(Trigger ACKnowledge) 信号を受け取ると、各 GTFE へと送信し GTFE からの TOT の測定が始まる。TOT は FAST-OR 信号の立ち下がりまで測定され、50 ns のクロックでカウントし、ディジタル信号に変換される。次に、GTRC は TEM からのデータ転送開始信号 (TOKEN) を受けると、ストリップデータ (3.4.1) と TOT データ (3.4.2) がひとつのセットとして読み出される。この TOKEN と呼ばれる信号はトラッカーの各レイヤーのボトムからトップに向けて順に送信され、各レイヤーのデータが順に TEM へと送信される。

3.3.3 TEM

TEM(Tower Electoric Module) はトラッカーとカロリメータで構成されるタワーの信号読み出しと電源供給、GASU(3.3.4 参照) との通信を行っているモジュールである。各タワーに 1 つ設置されており、カロリメータの下部に位置している。

トラッカーの各シリコンストリップレイヤーからの信号読み出しは、2 本のケーブルで繋がっている GTRC を経由して行われる。TEM は各レイヤーの GTRC で生成された FAST-OR 信号を受けとると、3-in-a-row と呼ばれる条件を課し、TREQ(Trigger REQuest) 信号を生成する。3-in-a-row とは、ノイズの影響を受けず信頼性の高い荷電粒子の飛跡を見付けるためのトリガ条件で、3 組以上の連続したシリコンストリップレイヤー (3X、3Y) でヒットが観測された場合にのみデータを取得するものである。このようにして生成されたトラッカーの TREQ 信号は GASU へと送信され、他検出器からの TREQ 信号と照し合せて、全検出器へのトリガ信号であるグローバルトリガ出力が決定される。

TEM は GASU からのグローバルトリガ信号を受け取ると、全レイヤーの GTRC へ TACK(Trigger ACKnowledge) 信号を送信する。続いて信号読み出しコマンド (TOKEN) を送信し、GTRC から各レイヤーのヒット情報を受信する。レイヤーからのヒット情報には、レイヤー内で論理和をとった TOT データと、ヒットの観測されたシリコンストリップ ID の情報が含まれている。

3.3.4 GASU

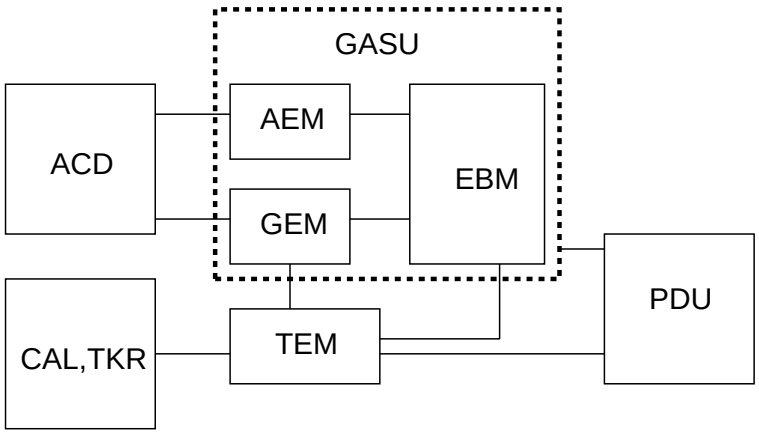

図 3.8: LAT 検出器の主な構成要素

GASU(Global-trigger/ACD-module/Signal-distribution Unit) は GLAST の全検出器のコントロールを行っている装置で、EBM(Event Builder Module)、AEM(Anti-Coincidence Detector Electronics Module) と GEM(GLAST Electronics Module) で構成されている (図 3.8)。PDU(Power Distribution Unit) は、各モジュールへの電源を供給している装置である。

各検出器でヒットが観測されると、検出器の読み出し回路は TREQ(Trigger REQueset) 信号を生成し、GASU へと送信する。GASU では各検出器からの TREQ 信号を受信すると、データ取得目的によって異なる条件でグローバルトリガを生成する。ガンマ線イベント取得時のグローバルトリガは、ACD からの TREQ 信号をベト信号として用い、トラッカーとカロリメータからの TREQ 信号との同期をとることで生成される。このグローバルトリガ信号は各検出器へと送信され、データ取得が開始される。

各検出器からの TREQ 信号は同一イベントによるものあっても、検出器の特性によって GASU への到着時刻に違いがある。そのため、GASU はグローバルトリガ生成条件の判別を行う際に各 TREQ 信号のタイミングを揃えるための、トリガウインドと呼ばれる待ち時間を設けている。ACD とトラッカーからの出力信号はほぼ同時刻に到着するが、カロリメータからの出力信号はその蛍光特性から信号到着が遅れる。通常トリガウインドは 250 ns に設定されている。

3.4 トラッカー信号読み出し

通常、半導体検出器の信号パルスハイトの計測には ADC(Analog Digital Converter) が用いられるが、人工衛星に搭載する検出器では重量制限、電力制限、容量制限等の制約により全タワーで約 88 万チャンネルあるトラッカーの読み出しに用いることは難しい。そこで GLAST トラッカーでは、より簡易なパルスハイト計測方法として、TOT(Time Over Threshold) と呼ばれるデータを用いて読み出しを行っている。TOT の長さは、シリコンストリップ中で荷電粒子が損失したエネルギーと 1 対 1 の関係があり、TOT を用いることでシリコンストリップにデポジットされた電荷量を見積もることができる。この TOT データと、ヒットのあったストリップ番号を読み出すことで荷電粒子の飛跡とデポジットされたエネルギー情報を得ることができる。

3.4.1 ストリップデータ

各シリコンストリップレイヤーには 1536 本のシリコンストリップがあり、それぞれ 0 から 1535 までのシリコンストリップ ID がふられている。ストリップでヒットが検出されると各 GTFE はそのストリップ ID を GTRC へと送信する。このときに送信されるデータは、次節で述べる TOT データと常に同時に読み出される。

3.4.2 TOT データ

シリコンストリップにデポジットされた電荷量の情報は TOT(Time Over THreshold) と呼ばれるデータによって出力される。TOT データは GTFE で生成される。GTRC では 50 ns のクロックによってカウントし、ディジタル信号に変換して TEM へと送信される。

TOT データ生成に用いられるチャージアンプから整形アンプ、ディスクリミネータまでの読み出し回路 (図 3.7) は各チャンネルごとに独立しており、1GTFE 内に 64 チャンネル存在する。まず、シリコンストリップにデポジットされた電荷は電流信号として出力され、チャージアンプで電圧信号へと変換される。チャージアンプのゲインは、0.092 pF のフィードバックキャパシタで決定され、1MIP(4.92 fC) の入力電荷に対し約 57 mV の出力電圧を得る。次に、この信号を RC-CR 整形アンプへ入力し整形する。整形アンプのピーキングタイムは 1.5 μsec に設計されている。整形アンプ出力は 1 fC の入力電荷に対し約 80 mV であるが、入力電荷と出力電圧の関係は線形ではなく、入力電荷が大きくなるにつれ出力電圧と入力電荷との比が大きくなる傾向がある。整形アンプの出力信号はディス

クリミネータに入力され、TOT が生成される。ディスクリミネータのスレッショルドは、7 ビットスレッショルド DAC によって決定される。トラッカーの仕様では、TOT ディスクリミネータのスレッショルドは 1.4 fC(約 0.25 MIP に相当) の入力電荷に対応する整形アンプ出力電圧に設定されており、これは約 140mV に対応する。スレッショルド DAC は各 GTFE に 1 つあり、同 GTFE 内の 64 チャンネルのディスクリミネータスレッショルドを決定している。

図 3.9 は整形アンプ出力信号からの TOT データ生成の様子を示したものである。整形アンプからの出力信号は、ディスクリミネータのスレッショルドと比較され FAST-OR 信号として出力される。実際に TOT データとして読み出しが行われるのはグローバルトリガ信号より生成された TACK 信号を GTFE が受信してからである。つまり TOT の長さは TACK 信号を受け取ってから、整形アンプ出力信号がスレッショルドレベルを下回るまでの時間になる。整形アンプからの出力信号がスレッショルドを越えてから TACK を受信するまでの時間の遅れを TACK-delay と呼んでいる。この遅れは読み出し回路での信号処理に伴うもので、TOT のゲインに影響を与える。

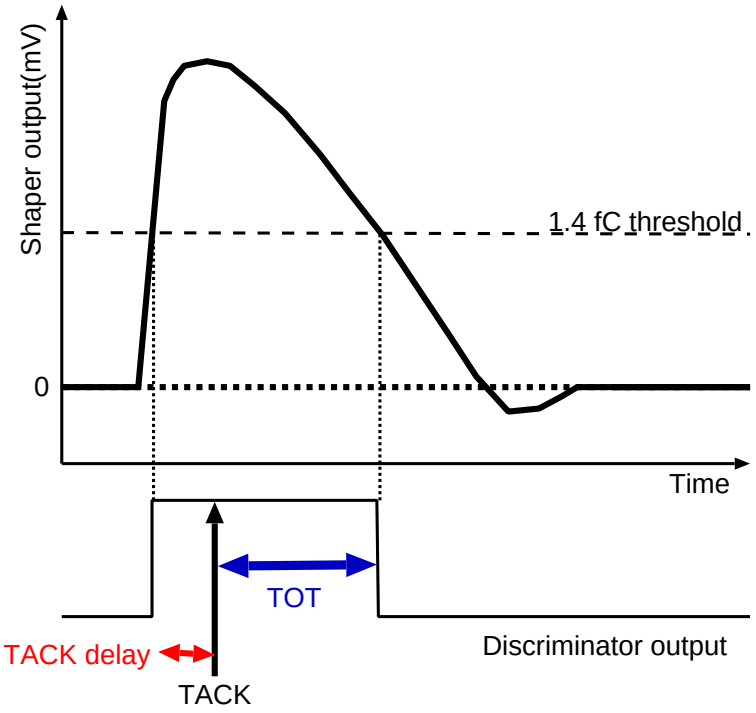

図 3.9: 整形アンプ出力からの TOT データ生成

3.5 較正試験の必要性

本章で述べた手順によって TOT データの生成、読み出しが行われる。TOT 出力のゲインは TOT ディスクリミネータのスレッショルドおよびチャージアンプのゲインと整形アンプのフォールタイム等に依存する。各スレッショルド DAC ごと、つまり GTFE ごとに TOT ディスクリミネータのスレッショルドがばらつきを持つため、各 GTFE 間のスレッショルド DAC 出力値のばらつきをなくし TOT ゲインを一定にすることが重要である。また、チャージアンプ、整形アンプの個性のため各チャンネルごとに入力電荷量と出力 TOT データの比がばらつきを持つので、TOT から入射電荷量を求める際の TOT-電荷量変換式を各チャンネル毎に補正する必要がある。これらのパラメータ補正をトラッカー部較正試験で行った。

本論文はこのトラッカー部較正試験と、較正パラメータの変動モニタが主内容である。較正試験については 4 章で、較正パラメータのモニタについては 5 章で詳しく説明する。

第4章　トラッカー部較正試験

GLAST 衛星のトラッカー検出器は、ガンマ線を検出しその到来方向を決定する衛星検出器の核となる装置である。対生成により生じた電子 · 陽電子がシリコンストリップにデポジットしたエネルギーと、その位置情報から入射ガンマ線の到来方向を再構築する。トラッカーの性能を発揮するためには、読み出し回路の較正を行い、ストリップ毎にシリコンストリップにデポジットされた電荷と TOT との関係式を正確に求めること、不良ストリップのリストを作成することが重要であり、さらに位置情報を読み出す際にはタワーのアライメント較正も重要となる。
本章では、私が SLAC で行ったトラッカー部較正試験の TOT 較正試験と不良ストリップのリスト作成について説明する。

4.1　TOT 較正試験

シリコンストリップに入射した電荷量と出力 TOT 信号の長さはおおむね比例する。その比を TOT ゲインと呼ぶ。TOT ゲインは、各ストリップごとに独立なチャージアンプおよび整形アンプのゲインとフォールタイム、TOT ディスクリミネータのスレッショルドによって決定される。ここでチャージアンプと整形アンプのゲインは各チャンネルごとにばらつくため、TOT ゲインはチャンネル毎に求める必要がある。また TOT ディスクリミネータのスレッショルドは、スレッショルド DAC の出力電圧によって決定される。スレッショルド DAC は各 GTFE に 1 つあり、64 チャンネルのスレッショルドを決定しているため、これを GTFE 間で一定に設定することが均等な TOT ゲインを得るために重要である。また、これらの較正試験に用いるテスト用電荷は、電荷注入用の DAC(キャリブレーション DAC) からの電圧信号をコンデンサーで受けることで得る。この注入電荷の大きさも、各キャリブレーション DAC 出力電圧とコンデンサー容量によって不定性をもつので、較正試験で出力値を補正する必要がある。
以上をまとめると、TOT ゲインは以下の 3 パラメータによって決定されることになる。
(1) 読み出し回路のゲイン
(2)TOT ディスクリミネータのスレッショルド (スレッショルド DAC)
(3) 較正試験用注入電荷量 (キャリブレーション DAC、VA 変換用コンデンサー容量)
TOT ゲインはこれらの要素が絡み合って決まるため、較正試験を繰り返し行い、各要素を独立に求め、最適化する必要がある。構成試験は次の手順で行った。

1. スレッショルド DAC 較正試験 (2) を求める。

スレッショルド DAC は、デジタル信号を電圧信号へ変換し TOT ディスクリミネータのスレッショルド値へと入力する。スレッショルド DAC の出力を規定値にそろえるため、キャリブレーション DAC からの注入電荷を用いて較正試験を行う。

スレッショルドの規定値は 1.4 fC の入力電荷に対する出力電圧の大きさであり、スレッショルド DAC 毎にばらつく。キャリブレーション DAC から 1.4 fC の電荷注入を行い、スレッショルド DAC の値を変えスキャンを行うことで、対応するスレッショルド DAC デジタル値を求める。ここでは (1)(3) の影響力が大きく残った状態で (2) を求める。

2. TOT ゲイン較正試験 (1) を求める。

   TOT 出力信号から入射電荷量を見積もるための関数、TOT ゲイン関数をキャリブレーション DAC からの注入電荷を用いて求める。

   TOT ゲインは各チャンネルごとにばらつくため、1 チャンネルごとに電荷注入を行い TOT-注入電荷カーブを得、TOT の二次関数でフィッティングを行う。この段階では (3) の影響が強く残っている。

3. 注入電荷較正試験 (3) を求める。

   キャリブレーション DAC からの注入電荷の絶対量を求めるため、宇宙線ミューオンによる電荷ピークを用いて較正試験を行う。

4. end2end 較正試験

   以上の手順でキャリブレーション DAC からの注入電荷の絶対値を求めた。この値を用いてキャリブレーション DAC からの注入電荷の大きさを補正し、上までで述べた較正試験を繰り返し行うことで、TOT の較正を精度良く行うことができる。TOT ゲインの値に寄与するパラメータ、システムを変化させた場合も再度較正試験を行う必要があり、以上の手順を繰り返し行う。

4.1.1 スレッショルド DAC 較正試験

TOT ディスクリミネータのスレッショルドを決定するスレッショルド DAC 出力は、TOT ゲインを決定する重要なパラメータである。各 GTFE ASIC に 1 つのスレッショルド DAC があり、DAC ひとつあたり 64 チャンネルのスレッショルドを決定している。トラッカーの仕様ではこの値を 1.4 fC の入射電荷に対応する波高と定めているが、実際にはスレッショルド DAC 毎に出力電圧がばらつくため各スレッショルド DAC ごとの最適なスレッショルド値を求める必要がある。

スレッショルド DAC は TEM から送られたデジタル値を電圧値に変換し、TOT ディスクリミネータのスレッショルドをコントロールしている。スレッショルド DAC 較正試験ではキャリブレーション DAC からの 1.4 fC 注入電荷を用いて、以下のようにスレッショ

ルド DAC 値を決定する。

1 チャンネルごとに 50 回、1.4 fC の電荷注入を行い、TOT 出力が有った回数の割合 (オキュパンシーと呼ぶ) を求める。スレッショルド DAC 値を変えながらオキュパンシーを計算し、スレッショルド DAC 値-オキュパンシーのプロットを作成する。図 4.1 は 1 レイヤー 1536 チャンネルについて、スレッショルド DAC 値とオキュパンシーの関係をプロットしたものである。

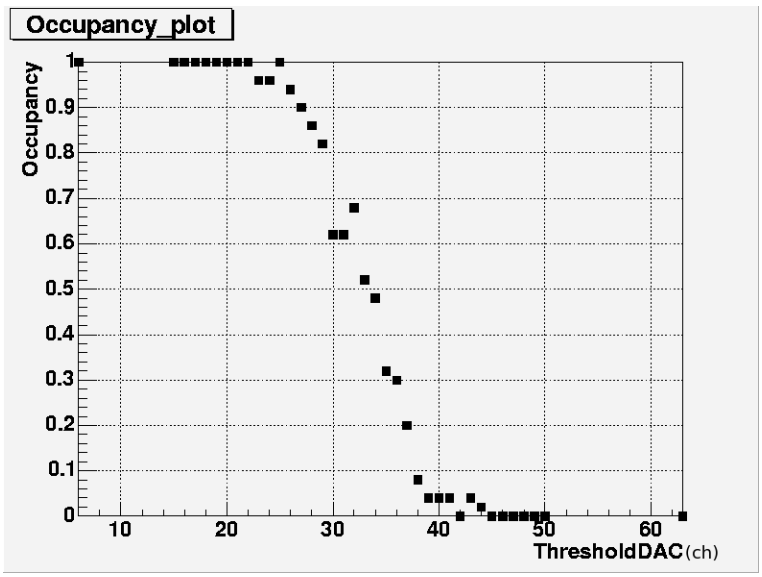

図 4.1: ストリップオキュパンシーの変化。erfc 関数でフィットを行う。

理論的にはオキュパンシー値が 1.4 fC に対応する DAC 値で 1 から 0 に鋭く変化するが、実際には回路ノイズの影響があり、スレッショルド値の周りでなめらかに変化する。スレッショルド DAC 値を求めるため、このオキュパンシーカーブを erfc 関数でフィッティングした。erfc 関数はガウス分布を積分した形の相補誤差関数であり、

$$erfc(x - x_0) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-(t-x_0)^2} dt = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-(t-x_0)^2} dt \tag{4.1}$$

のように表せる。

フィッティングの結果よりガウス分布の中心値 x_0 を求め、チャンネルごとのスレッショルド DAC 値とする。結果をチャンネル毎にプロットしたものが図 4.2 である。同 GTFE 内の 64 ストリップは、同じスレッショルド DAC によってスレッショルドが決定されるので、64 ストリップでスレッショルド DAC 値の平均を計算し、それをスレッショルド DAC の最適値とする。DAC 値は整数値のみを取り得るため、求めた平均値を四捨五入によって整数値にする。タワー 1 のレイヤー Y16 について、各 GTFE ごとにスレッショルド DAC 値の最適値を求めプロットしたものが図 4.3 である。各 GTFE 毎に約 ± 8 %のばらつきがあることがわかる。

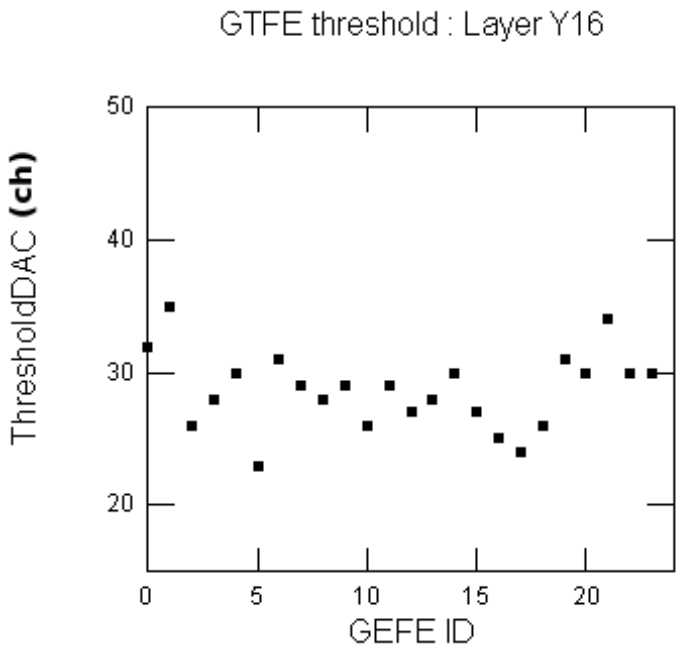

図 4.2: 各ストリップ毎のスレッショルド DAC 値分布

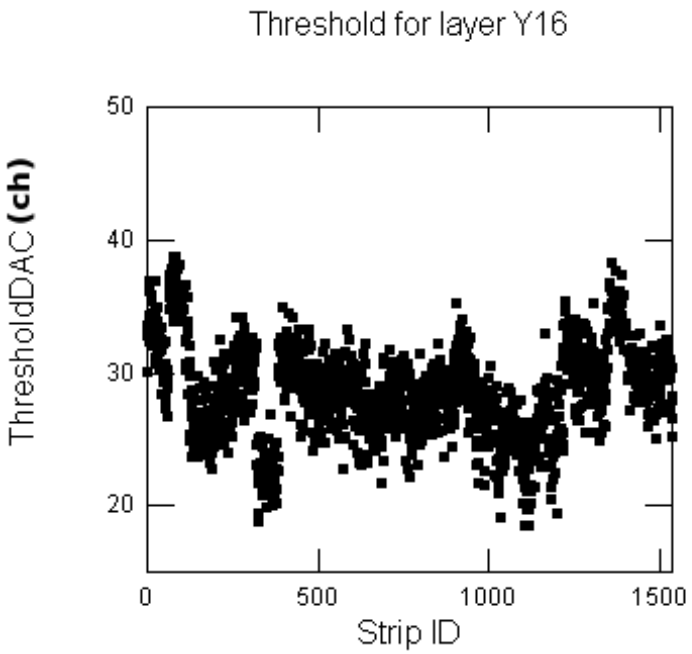

図 4.3: GTFE 毎に求めたスレッショルド DAC 値分布

4.1.2 TOT ゲイン較正試験

トラッカーではシリコンストリップにデポジットした電荷量を測定することで、シリコンストリップにデポジットしたエネルギーを求めることができる。この機能を用いることで、ガンマ線イベントと荷電粒子によるバックグラウンドイベントの分別を行うことがで

きる (3 章参照)。

各シリコンストリップにデポジットされた電荷量を正確に見積もるためには、TOT と入射電荷との関係式を精度良く求めることが重要である。TOT ゲイン較正試験では、キャリブレーション DAC からの注入電荷を用いて入射電荷と出力 TOT との関係式を求める。各チャンネルごとに回路ゲインによる TOT ゲインのばらつきがあるので、1 チャンネルごとに TOT ゲイン較正試験を行う必要がある。

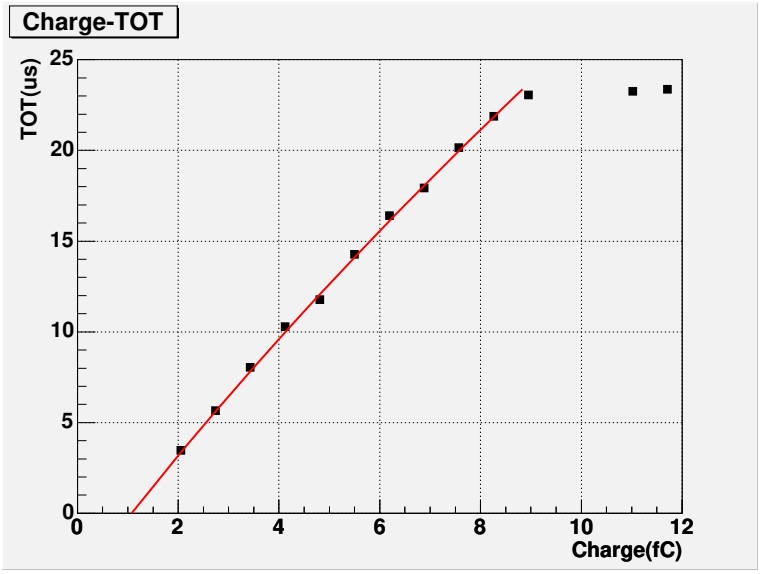

図 4.4: TOT-キャリブレーション DAC プロット

図 4.4 は TOT と注入電荷の測定値をプロットしたものである。

較正試験用電荷注入を行うキャリブレーションストロボは、最長値が 512 クロックカウント、25.6 μs と決まっており、これを越える較正試験は行えない。

この TOT-電荷プロットを TOT の二次関数で以下のようにフィッティングした (赤線)。フィッティングの範囲は、TOT$<$ 23.0μs とした。

$$\mathrm{Charge} = \mathrm{p0} + \mathrm{p1}\times\ \mathrm{TOT} + \mathrm{p2}\times\ \mathrm{TOT}^2$$

p0: Intercept
p1: Gain
p2: Quadra

これらのフィッティングパラメータを用いて、5 章でトラッカー性能モニタをおこなった。

4.1.3 チャージスケール較正試験

ここまでの較正試験では、キャリブレーション DAC からの電圧信号をコンデンサーで受け、電流信号へと変換した信号を使用してきた。これはビーム試験や宇宙線を用いた試験と比べて統計精度を用意に上げることができる点や、試験を行いたい部分に任意の大き

さの電荷を注入できるといった利点があるからである。しかし実際に注入される電荷量には、キャリブレーション DAC からの出力電圧の設計値からのばらつきと、コンデンサー容量の不定性によって、理論値と実際に注入される電荷量に誤差が生じている。精度の高い較正試験を行うため、シリコンストリップが出力する絶対電荷量がより正確に求まる宇宙線ミューオンを用いて、キャリブレーション DAC からの注入電荷量を較正した。

キャリブレーション DAC は各 GTFE に 1 つずつあり、64 チャンネル毎に同じ DAC 出力を使用している。VA 変換用コンデンサーは各チャンネル毎にあり、キャリブレーション DAC 出力電圧を各チャンネルで独立に電流へと変換する。このとき、コンデンサー容量の不定性によって、チャンネル毎に出力電流値がばらつきを持つ。つまり較正試験に用いる注入電荷は、GTFE 毎のばらつきと、ストリップ毎のばらつきを持つ。各チャンネル毎にミューオンを用いた較正試験を行えばチャンネル毎のばらつきを排除できるが、膨大な数のストリップがあるため 1 タワーあたり約 10 日のデータ取得を必要とする。この試験は現実的でないため、GTFE 内 64 チャンネルの出力電荷平均値とミューオンピークとを比較し、キャリブレーション DAC の較正を行った。
ミューオンを測定し、同一 GTFE 内の 64 チャンネルからの TOT 出力信号の頻度分布をプロットしたものが図 4.5 である。

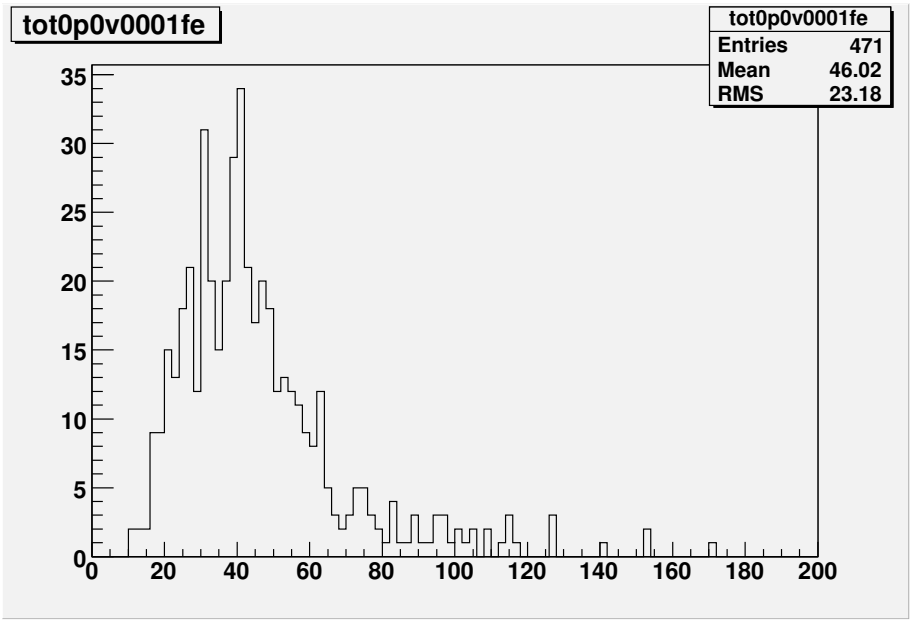

図 4.5: ミューオン測定 TOT 出力値 (カウント) 分布。同一 GTFE 内

TOT 信号の分布は各ストリップごとのチャンネルゲインの不定性を含み、電荷量の分布より広がってしまっている。この分布を、TOT ゲイン較正試験で求めた各チャンネルごとの変換式を用いて、シリコンストリップへのデポジット電荷量分布に変換した。ここで変換の精度を上げるため、デポジット電荷量のミューオン入射角依存の補正を行った。
荷電粒子が物質中にデポジットする電荷量はその物質中の軌跡の長さ、すなわち荷電粒子の入射角に依存する。トラッカーの出力からは、3 次元のヒット情報を得ることができ、

そのヒット位置から軌跡を再構築することでミューオンのシリコンストリップへの入射角を知ることができ、軌跡の長さを求めることができる。しかし実際のシリコンストリップでは、デポジットされた電荷が複数のシリコンストリップに分散する、チャージシェアリング効果があるためシリコンストリップで観測される電荷量は理論値と異なる。そこで我々はモンテカルロシミュレーションによって荷電粒子の入射角 θ とデポジット電荷量の関係式を以下のように求めた。

$$\text{補正電荷} = \frac{\text{電荷}}{1 + 0.729 \times (1 - cos\theta)} \tag{4.2}$$

各チャンネルごとの TOT-電荷変換式と、ミューオンの入射角を用いた角度依存補正式 (4.2) を用いて、図 4.5 をデポジット電荷の頻度分布に変換したものが図 4.6 である。薄い物質中での荷電粒子の損失エネルギーはランダウ分布に従うことが知られている。しかし、実際の分布はノイズによる影響で各イベントごとにガウス分布で広がる。そのため、得られた分布をガウス分布で convolution したランダウ分布で図 4.6 の曲線のようにフィッティングを行った。トラッカーシリコンストリップの厚さは 400 μs で、ランダウ分布のピーク値は理論値で 4.92 fC である。フィッティングの結果、ランダウ分布のピークは理論値の近くに位置しており、フィッティング、較正試験が想定通り行われていることが分かる。また、ランダウ分布の平均値は理論値より 6.4 fC であり、平均値も精度良く求まっていることが分かる。このランダウ分布のピーク値とキャリブレーション DAC による注入電荷との比をチャージスケールとして各キャリブレーション DAC ごとに求め、次回からの較正試験の際に補正値として用いることで、より精度の高い較正試験を行うことが可能となる。

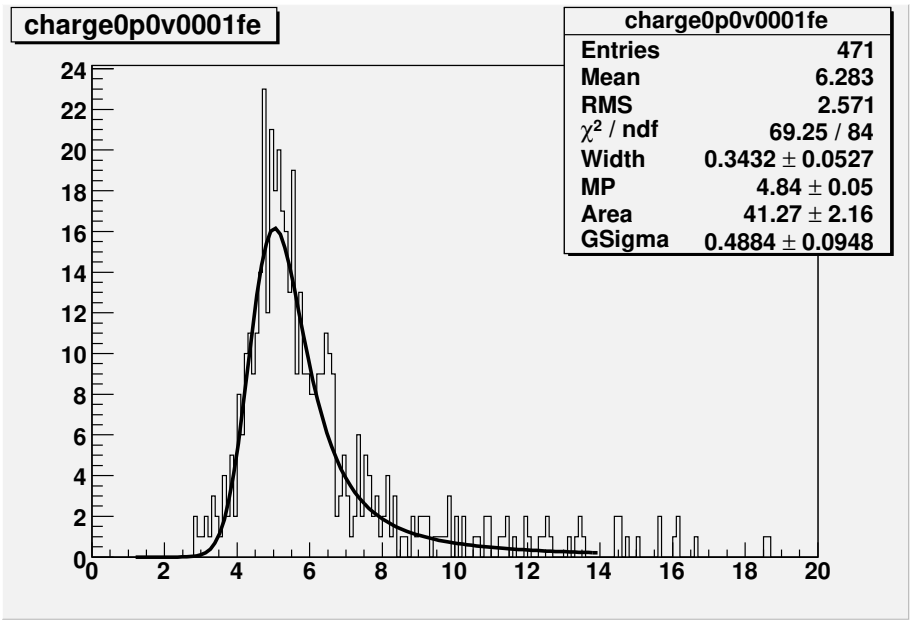

図 4.6: ミューオンピーク値 (fC) の分布。ランダウ関数でフィッティングを行った。

図 4.7 は較正試験前後でのスレッショルド DAC 値の分布を比較したものである。上のプロットは最初に行われた較正試験でスレッショルド DAC 値を求めた結果であり、下はミューオンデータを用いてキャリブレーション DAC の較正を行った後のプロットである。較正試験の結果、各 GTFE(64 チャンネル) 毎の分散が小さくなっていることが分かる。

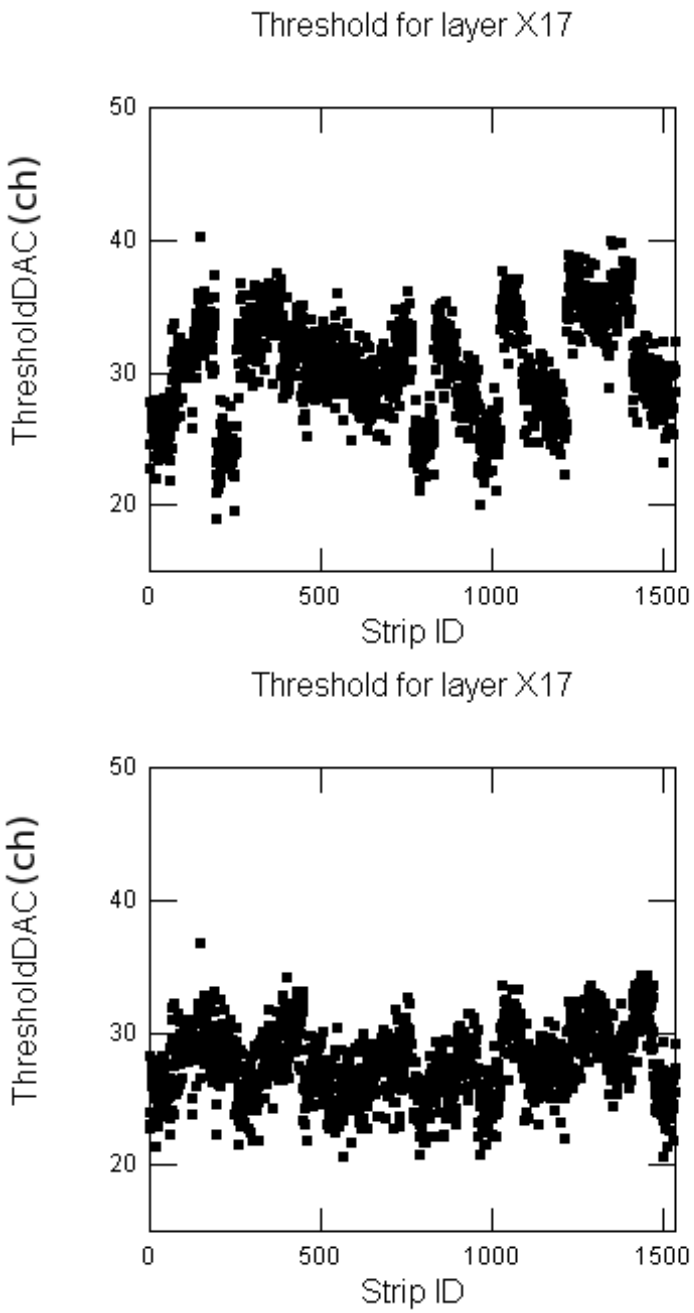

図 4.7: 較正試験前 (上) と試験後 (下) のスレッショルド DAC 値分布。値の分散が小さくなっている。

4.2 不良ストリップリストの作成

16 タワー全体で 100 万チャンネル近くになるシリコンストリップはそのすべてが正常に動作するわけではない。そこで、データ取得、データ解析のために不良ストリップをリストアップしておく必要がある。較正試験では、不良ストリップを、Dead、Hot、Disconnected の 3 種類に分類しリストを作成した。

Dead ストリップは読み出し回路の不良により、シリコンストリップからの信号が観測されなかったストリップと定義している。見付かった dead ストリップは電子陽電子対飛跡の再構築を行う際、飛跡途中でヒットが見付からなかった場合に参照される。

Hot ストリップは電気的ノイズが多いストリップと定義している。データ容量が制限される人工衛星において不必要にデータ量を増やすので、Hot ストリップからの出力はマスクし、読み出しを行わない。

1 枚のシリコンストリップレイヤーは 4×4 枚のシリコンストリップウェハー (SSD) から成っており、シリーズに 4 枚のウェハー間をワイヤボンディングでつなぎ、1 本の長いシリコンストリップとして読み出している。このワイヤボンディングに不良があり、シリコンストリップの途中から信号が読み出せなくなっているストリップを Disconnected ストリップと定義する。Dead ストリップ同様、軌跡の再構築の際に参照される。

この節では不良ストリップの定義とリストアップの方法について説明する。

4.2.1 Dead ストリップ

Dead ストリップは、較正試験用電荷を読み出し回路に注入し、回路ゲインを測定することで見積もる。キャリブレーション DAC からの電荷をチャージアンプ、整形アンプに注入し、4.1 式の erfc 関数を用いて回路ゲイン値を求める。求めたゲイン値を 1 レイヤー、つまり 1536 ストリップ分プロットしたものが図 4.8 である。直接読み出し回路に電荷を注入し、シリコンストリップを経由せず信号を読み出すことでシリコンストリップの不良である disconnected ストリップと区別できる。

GLAST では、回路ゲインが 50mV/fC より低いストリップを dead ストリップと定義している。回路ゲインの平均値は全タワー平均で約 103 mV/fC、RMS は約 13 %となっている。フライトモデル全 16 タワーで Dead ストリップのリストアップしたところ、0.05%のストリップが dead ストリップとなった。最も dead ストリップが多く見付かったレイヤーでも dead ストリップ率 2%未満と非常に良い結果となっている。

4.2.2 Disconnected ストリップ

disconnected に分類されるストリップが示す挙動には数種類ある。不良場所、不良の種類により以下の 4 種類に分類した。

1. discconected

   シリコンストリップと読み出し回路間をつなぐワイヤボンディングに不良があるストリップ。通常のストリップと比べノイズが非常に低いがゼロではない。

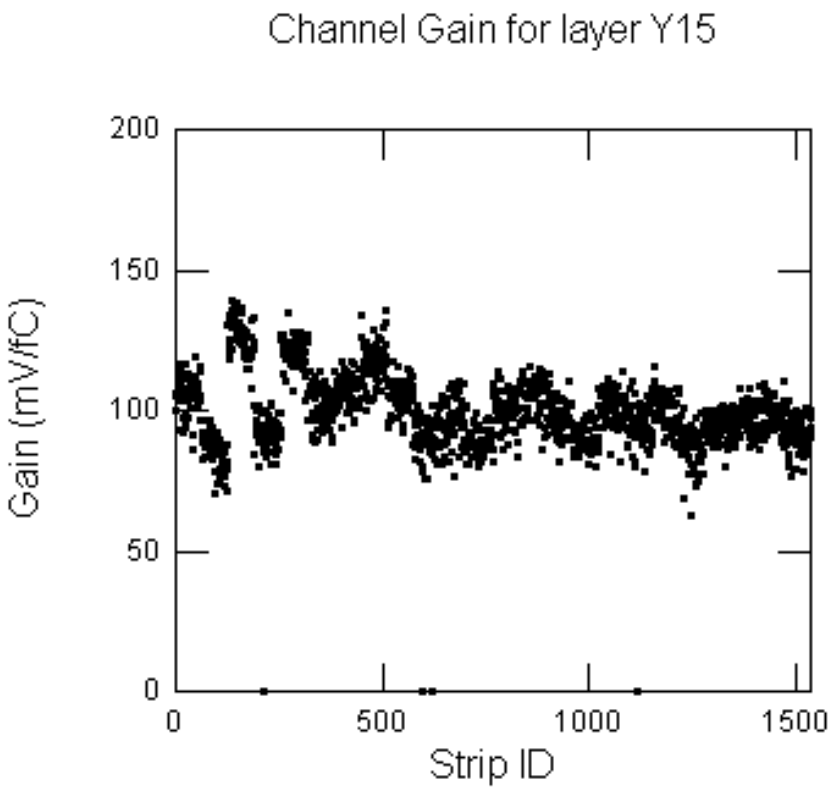

図 4.8: ストリップの回路ゲインプロット。StripID = 214, 596, 618, 1115 が dead ストリップとして分類されている。

2. partially disconnected

   シリコンストリップウエハー (SSD) 間のワイヤボンディング不良によってストリップの途中から読み出せなくなっている。シリコンストリップへのヒットを SSD 別にみると不良箇所以降の SSD のヒットがゼロになる。

3. intermittently disconnected

   同一レイヤー内の他ストリップと比較してヒット数が少ないストリップ。ワイヤボンディングが切れかかっていることによる不良であると考えられる。

4. intermittently partially disconnected

   シリコンストリップの途中から intermittently disconnected ストリップになっており、SSD ごとのヒット数分布から判別する。

	ウエハー別ヒット数			
	SSD 0	SSD 1	SSD 2	SSD 3
Disconnected	0	0	0	0
Partially disconnected	45	43	0	0
Intermittently disconnected	5	3	4	7
Partially intermittently disconnected	37	25	5	0

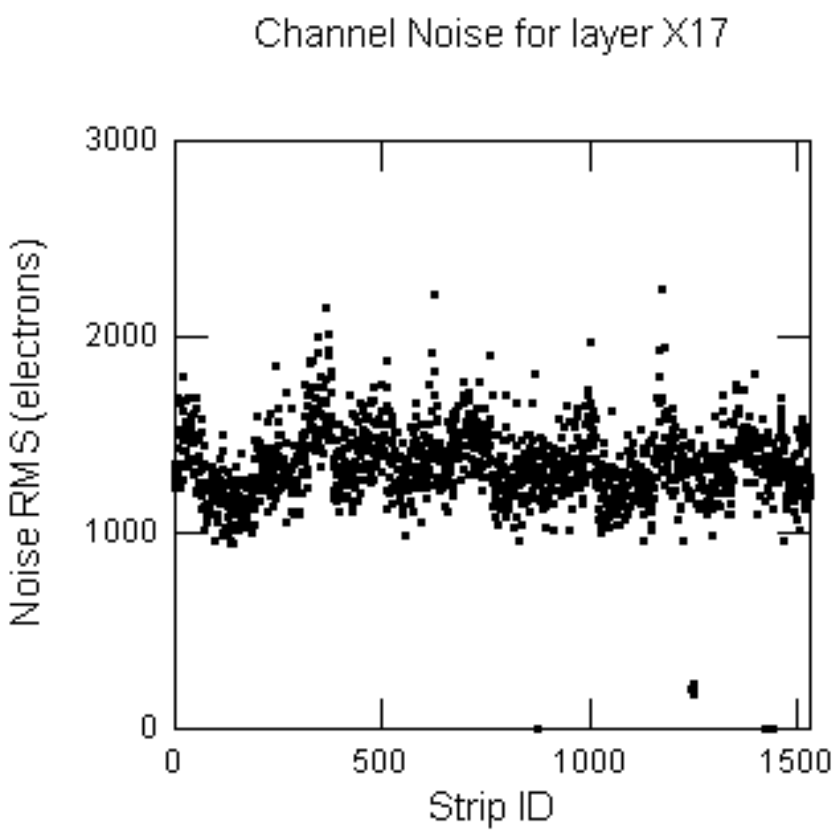

図 4.9: 各ストリップのノイズレベル。StripID = 1249, 1251, 1252, 1253, 1254, 1255 はノイズが異常に低く disconnected ストリップとして分類されている。Noise RMS = 0 は Dead ストリップである。

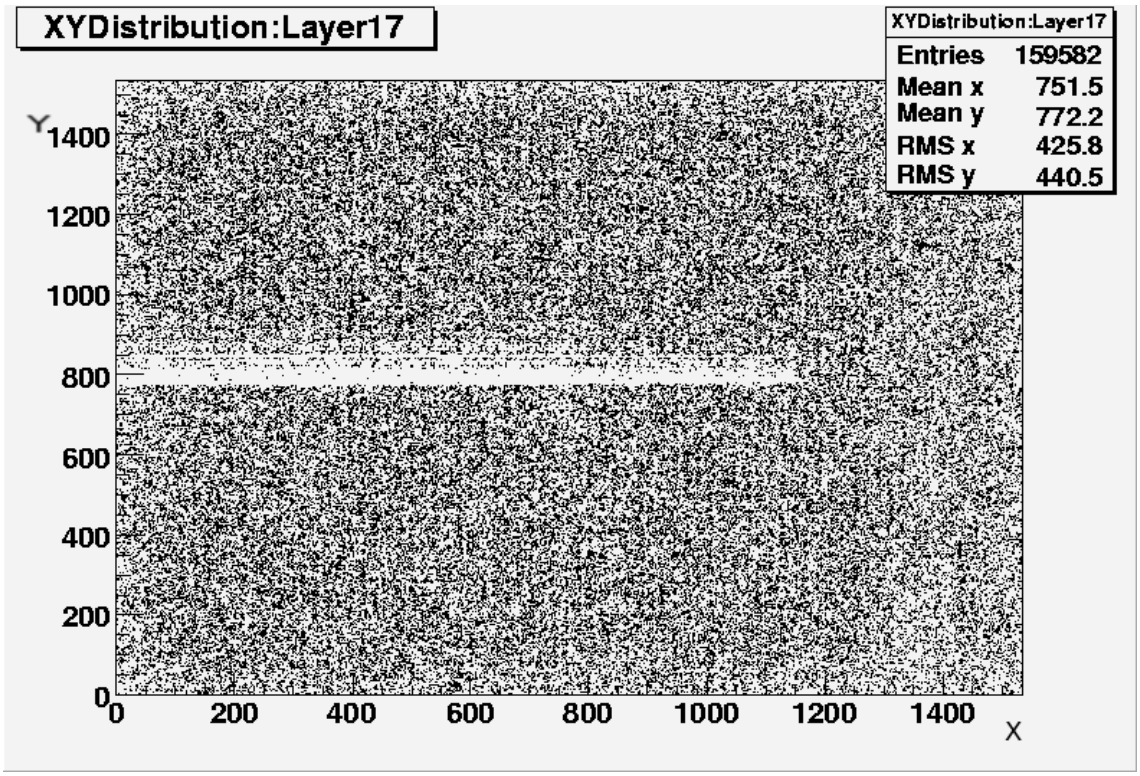

図 4.10: タワー A のミューオンヒット XY 分布。Y800 付近に固まって Partially disconnected ストリップが見られる。

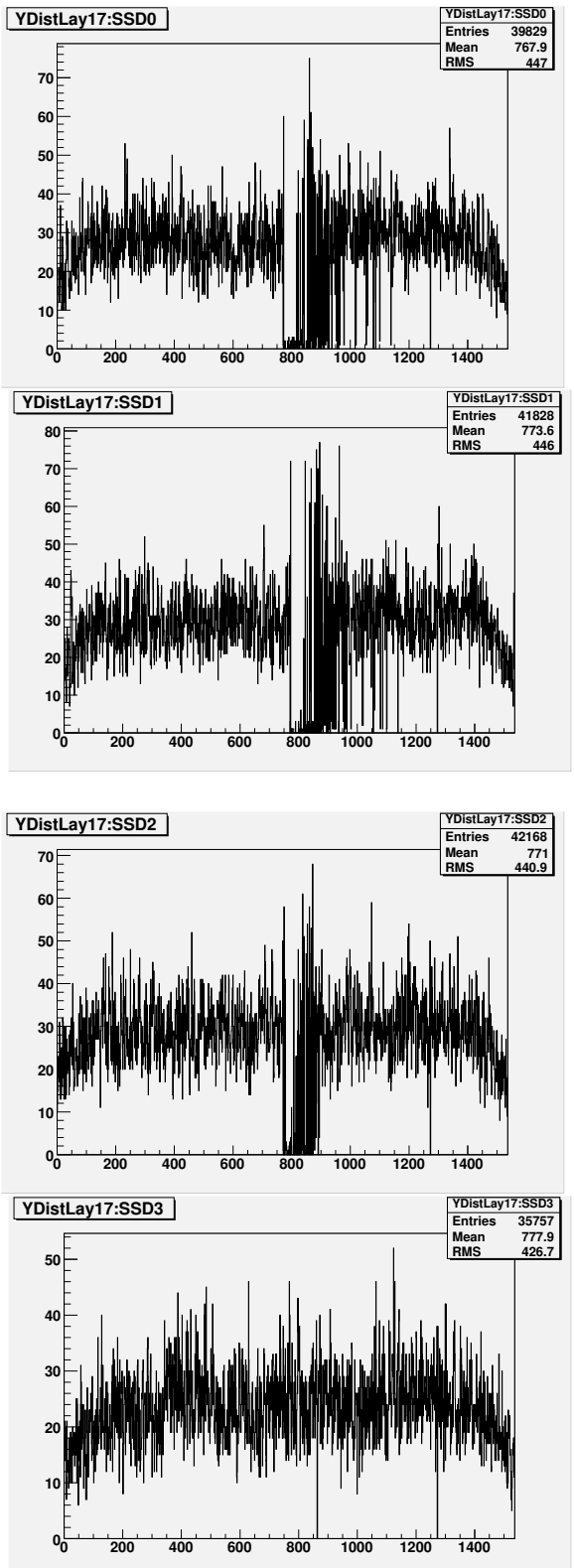

図 4.11: 図 4.10 のミューオンヒット分布を SSD ごとに分割し、Y 軸方向に投影したもの。上から、読み出し回路から遠い順になっている。ストリップ ID:800 から 1200 の多くが、SSD 間でワイヤボンディングが切れている様子が分かる。

図 4.9 は各ストリップのノイズレベルをプロットしたものである。この図でノイズが異常に低いが 0 ではないストリップが Disconnected と分類される。次に、Partially disconnected ストリップのリストアップを宇宙線ミューオンの測定結果を用いて行った。XY2 枚のシリコンストリップレイヤーからのヒット位置情報を用いて 2 次元分布を見ると図 4.10 のようになる。これを各シリコンストリップウェハーごとに切り取ったものが図 4.11 である。この分布から Partially disconnected ストリップを簡単に見積もることができる。
Partially intermittently disconnected ストリップは、ワイヤボンディングの不良箇所以遠でもヒット数が 0 にならないのが特徴で、他の不良ストリップと比べ分類が難しい。我々はポアソン分布の確率変数を用いてこれらの Disconnected ストリップの見積もりを行った。読み出し回路に近い側のシリコンストリップウェハー (SSD) から順に、次の SSD ヒット数の実現する確率を計算した。λ を読み出し回路に近い側の SSD のヒットの平均値とすると、この SSD より遠い位置にある SSD でのヒット数 x は、ワイヤボンディングが全て切れていなければ、

$$f(x) = \frac{e^{-\lambda}\lambda^{x}}{x!} \tag{4.3}$$

4.3 式のようなポアソン分布に従う。この式に従い、実現確率が 10^{-5} 以下という非常に低い値ならば Partially intermittently disconnected ストリップであると定義した。この 10^{-5} というスレッショルドは、経験値より求めたものである。

Intermittently disconnected ストリップは、1 本のストリップ全体を通しヒット数の変化がなく SSD ごとの比較では見積もることが難しい。我々は SSD ごとのミューオンヒットのレイヤー平均値を比較に用いた。この平均値を λ、SSD のヒット数を x として 4.3 式でポアソン分布による確率を計算した。スレッショルドを経験値から $10^{-3.5}$ として、確率がスレッショルドより低くなるストリップを Intermittently disconnected ストリップとして定義した。

以上のようにして disconnected ストリップの見積りを行った。その結果、全タワー平均で、0.3%のストリップが disconnected であると分類され、全 576 レイヤー中 12 レイヤーで 2%以上の disconnected ストリップが見付かった。ガンマ線や粒子によるシリコンストリップへのヒットは、シリコン中の電荷の拡がりによって 1 レイヤーあたり数ストリップのヒットがあることが少なくない。そのため 2%の disconnected ストリップによって 2%のヒットが検出できないことにはならず、Disconnected ストリップ以外のストリップへのヒットからヒット情報を得ることができる。

トラッカー製造の初期段階では、完成後の熱サイクル試験で、-15 度から 45 度の範囲で試験を行っていた。これは問題点の洗い出しのため、意図的にトラッカースペック (最高 30 度) を上回る温度となっている。その結果、コンバータの厚いトレイで、タングステンと構造体のアルミニウムの膨張収縮率の違いによってトレイが歪み、シリコンストリップウェハー間のワイヤボンディングが剥がれるという現象が確認されている。また初期段階は、ワイヤボンディング間の絶縁を目的としてワイヤボンディングを保護剤で覆っていた。この保護剤によってワイヤボンディングに柔軟性がなくなり、ウェハー間の変位を吸

収できず、ワイヤボンディングがまとめて剥がれている様子も確認されている。

4 号機 (TkrFM2) 以降のトラッカー製造では、熱サイクルを 0 度から 30 度までとし、ワイヤボンディングを覆っていた保護剤もコーティングスプレーで代用することで、上記のような不良は観測されていない。

4.2.3 Hot ストリップ

人工衛星での観測では地上と通信できるデータ量に限りがあるため、取得するデータ量が制限される。Hot ストリップからのノイズイベントによる、不必要なデータ量の増加を防ぐため、Hot ストリップのリストを作成する必要がある。Hot ストリップのリストは、データ取得時にマスクとして使用される。マスクには 2 種類あり、トリガレートを制限するトリガマスクとデータ量を制限するデータマスクによってデータ量の制限を行っている。

トリガマスクは、トリガマスク用 Hot ストリップリストを参照し、Hot ストリップによるトリガレートの上昇を抑える。各シリコンストリップからのデータ出力を制限するデータマスクは、データマスク用 Hot ストリップリストを参照し、ノイズイベントによってデータ容量の不必要な増加を防ぐ。

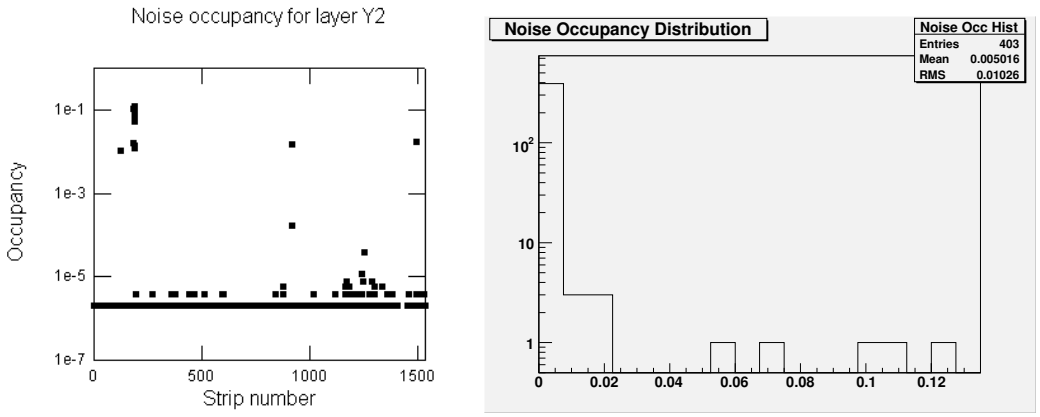

図 4.12: ランダムトリガでのデータ取得によって求めたノイズ占有率。ストリップのオキュパンシー分布 (左) と 1 レイヤーでのオキュパンシーの頻度分布 (右)

図 4.12 はストリップのノイズ占有率をプロットしたものである。ノイズ占有率 (noise occupancy) とはトリガをランダムに出力してデータを取得し、その出力データから、ヒットがある割合を求めたもので、ヒット回数をランダムトリガの回数で割った値をノイズ占有率とする。つまりノイズイベントが受かる確率である。実際には、このときに受かるヒットの内の多くは宇宙線によるものであり、図 4.12 で、オキュパンシー 1×10^{-6} 近に分布している。これらよりもはるかにオキュパンシーの高いストリップが、ノイズによるヒット数の多い Hot ストリップであり、以下の条件をもとにリストアップを行った。

1. データマスク

データ容量を制限するデータマスクの条件は、フライトソフトウェアのデータ容量制限によって決まり、タワーで平均した 1 ストリップあたりのノイズ占有率が、5.0×10^{-5} 以下と定義されている。

2. トリガマスク

   トリガレートを制限するトリガマスクに用いる Hot ストリップは、トリガによるデッドタイムが 8% 以下というトラッカースペックによって定義される。トリガー信号の幅は、1.6 μs なのでトリガーレートは、50kHz と決まる。ストリップオキュパンシーとトリガレートの関係の測定結果 (図 4.13) から最適値を求め、レイヤー平均ノイズ占有率が 1.0×10^{-5} 以下と定義されている。

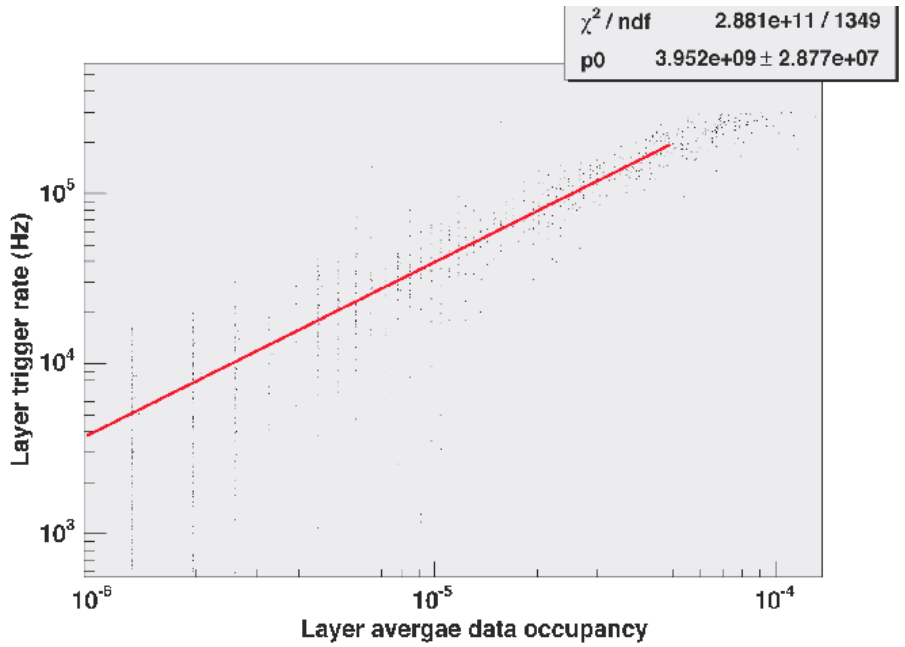

図 4.13: オキュパンシーとトリガレートプロットの測定結果

上の定義を用いて、Hot ストリップを除いたノイズ占有率の平均が条件を満たすように Hot ストリップ候補を見積もった。Hot ストリップを安定して見積もるため、過去のデータをすべて解析し検証に用いた。Hot ストリップは不安定なものが多く、ときに Hot ストリップとして分類されないこともある。そのため、最高 26 データある過去の測定結果の中で、10%以上の確率で Hot ストリップ候補としてみなされたストリップを Hot ストリップとし、分類に安定性を持たせている。

データマスク用 Hot ストリップリストは上の方法で見積もった結果、TkrFM7 で 3 ストリップが、TkrFM11 で 4 ストリップが Hot ストリップとして分類された。これら 2 タワーについて、データマスク用 Hot ストリップを除いてノイズ占有率の平均値を再度求めた。その結果、両タワーで 1 回ずつスレッショルドを上回った。しかし両タワー共、1.45×10^{-5} 以下で収まっており、他のノイズ占有率の低いタワーで相殺されるため、問題無いと言え

る。

同様の方法を用いてトリガーマスク用の Hot ストリップをリストアップした。その結果、全レイヤーの内約 20 %のレイヤーがスレッショルドを越え、430 ストリップが Hot ストリップとなった。これらの Hot ストリップを除き、平均ノイズ占有率を再度求めた結果、依然約 3 %のレイヤーがスレッショルドを大きく越えた。これは、挙動の特に不安定なストリップ (図 4.14) によるものである。これらのストリップも Hot ストリップとして分類するため、新しく条件を導入した。1 ストリップあたりのオキュパンシーが、$1536 * 10^{-5}$ を一度でも越えた場合、Hot ストリップとみなすというもので、このスレッショルド値は、1 ストリップのノイズ占有率のみでレイヤーの制限値を越える値である。こうして分類された Hot ストリップを除いて平均ノイズオキュパンシーを求めた結果、スレッショルドを越えるレイヤーはわずか 6 レイヤーとなり、1.0×10^{-5} のスレッショルドに対して、1.1×10^{-5} 以下におさまっている。

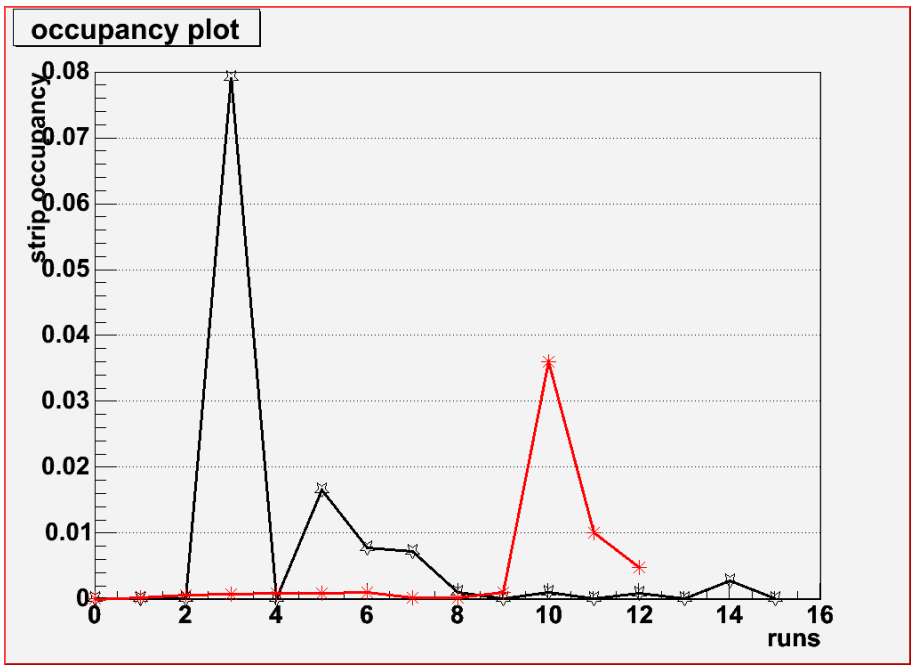

図 4.14: 挙動の特に不安定なストリップの例。横軸データ取得 ID、縦軸はストリップノイズ占有率

第5章　TOTキャリブレ− ションパラメ− タの変動モニタ

トラッカーフライトモデルの初号機がイタリアのピサで完成し、アメリカの SLAC に送られたのが 2005 年 1 月である。それ以来 1 年以上に渡り、新たに完成したタワーの受け入れ試験や較正試験をくりかえしてきた。この長い試験期間でタワー性能に変化がないことを確認するため、較正試験を行ったパラメータの値の変動のモニタを行い、パラメータの変動を理解するとともに、タワー性能の変化を評価した。さらに 2006 年 2 月からアメリカの NRL(Naval Research Laboratory) で行われる予定である熱真空試験と振動テストでの性能評価に用いる基準の確立を目指した。

5.1　モニタ試験の目的、およびモニタ項目

今回私は 3 章で述べたスレッショルド DAC 値、TOT 読み出し回路ゲイン、TOT-電荷変換式パラメータの較正と、不良ストリップのリストアップに引き続き、それらの変動モニタを行った。較正試験は試験条件が変わる毎に繰り返しおこなわれ、較正試験の精度を高めている。本節では、各パラメータについてパラメータ平均値とその RMS の各較正試験毎の変動モニタを行った。較正パラメータの変動をモニタすることで較正試験が問題無く行われていることの確認ができ、タワー性能に変化があった場合の発見につながる。また、不良ストリップはタワー性能に大きく影響を与えるため、その増減を知ることは重要である。さらにモニタの手法を確立することで、NRL で行われる環境試験前後で性能に劣化がないかを調べる方法の確立につながる。

較正パラメータのモニタではタワ− 1(3 号機) のデータを用いて解析を行った。タワ− ID は初号機から、タワ− A、B、1、2 とふられ、タワ− 15 までとなっている (タワ− 8 はビ− ム試験用である)。初号機の 2 つのタワーのデータ量が最も多いが、通常の較正試験の進行にない試験も行われている。本章では純粋な較正試験の効果を検証するためタワ− 1 の結果を用いた。他のタワーに関してもモニタを行った結果、タワ− 1 と同様な変動を示していることが分かっている。
ここでは各較正パラメータのタワー全体での平均値と、3 通りの RMS の値についてモニタを行った。スレッショルド DAC の結果を例として、図 5.1 に示し説明する。各々のプロットの横軸は較正試験 ID となっており、試験が行われた順序に対応している。4 つあるプロットについて以下に説明する。

1. パラメータのタワー平均値 (左上プロット)

パラメータの平均値を、調査をおこなったタワー全体で求め、時間変動モニタを行ったもの。較正試験によるパラメータ調整の結果が大きく反映される。

2. 各 GTFE 内の RMS(右上プロット)

   各 GTFE 内、64 チャンネルでパラメータ値の RMS を求め、そのタワー全体での平均値を求めた値。GTFE 内でのパラメータのばらつきを表す値で、これを GTFE RMS と呼ぶ。同一 GTFE 内では、較正試験で補正を行うスレッショルド DAC、キャリブレーション DAC を共有しているので、較正試験の効果は反映されず、GTFE 内の性能変化が現れる。

3. 各シリコンストリップレイヤー内の RMS(左下プロット)

   1 レイヤー内の 1536 チャンネルについてパラメータ値の RMS を求め、1 タワー 36 レイヤーで平均値を求めた値。レイヤー RMS と呼ぶ。較正試験が正しく行なわれると、各 GTFE 間のパラメータ値のばらつきが小さくなるので、較正試験がうまく行われているか否かの指標となる。

4. タワー全体の RMS(プロット右下)

   タワー内の全チャンネルについて、パラメータ値の RMS を求めた値。これをタワー RMS と呼ぶ。レイヤー RMS と同様、較正試験の効果によって RMS が小さくなると考えられる。また各レイヤーの性能は同等と考えられるため、レイヤー RMS と同じ変動を示すことが予想される。逆にレイヤー内の RMS と比較することで、予期せぬ問題点の発見にもつながる。

5.2 スレッショルド DAC 値のモニタ

スレッショルド DAC 値は TOT ディスクリミネータのスレッショルドを決定する値で、TOT ゲインを決定する重要なパラメータである。各スレッショルド DAC は、キャリブレーション DAC からの注入電荷を用いて、1.4 fC の入力電荷量に対する読み出し回路の出力電圧に較正される。本節では、スレッショルド DAC 値とその RMS の変動をモニタし、較正試験によるパラメータへの影響を解析した。スレッショルド DAC 較正試験で用いられる注入電荷は各較正試験の最後に較正されるため、各タワーで最初に行われる受け入れ試験では注入電荷量は較正されていない。つまり、実際の電荷量とは違う値が用いられており、その値は各キャリブレーション DAC ごとにばらつきをもつ。その後の試験では較正された注入電荷を用いるので、較正試験が問題無く行われれば、電荷量は較正され各キャリブレーション DAC ごとのばらつきも解消される。

モニタ結果を図 5.1 に示す。横軸の各々のデータ取得目的について説明する。

run0:トラッカー受け入れ試験 (2005/4/29)
: イタリアで製造されたトラッカーが SLAC に到着して最初に行った試験で、輸送前後でタワー性能に変化が無いことを確かめることが目的である。他の較正試験を行

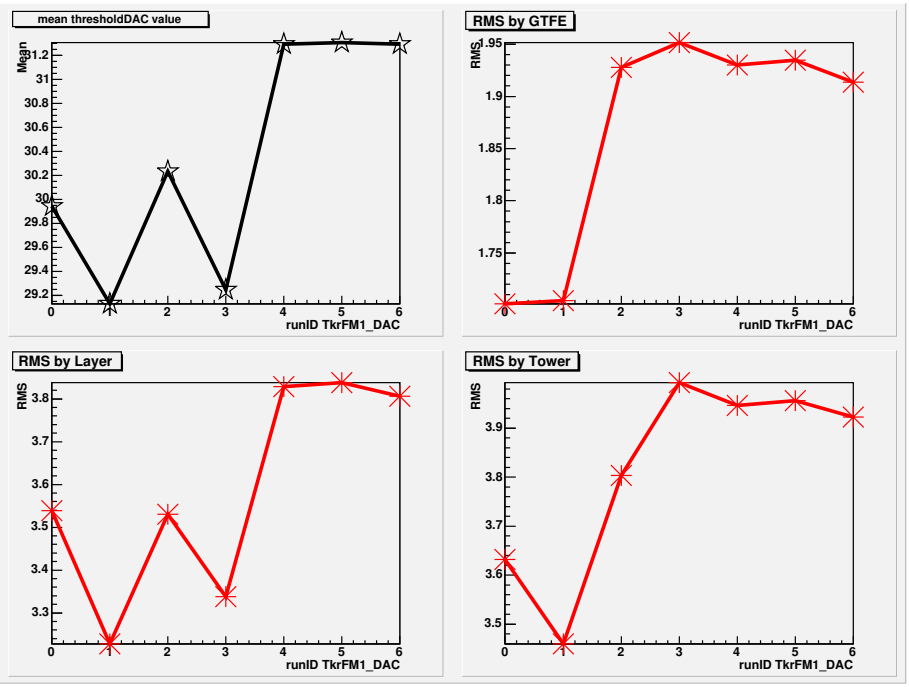

図 5.1: タワー 1 スレッショルド DAC 平均値と RMS の変動。横軸はデータ取得時期、縦軸は DAC 値。

う前にまずスレッショルド DAC 値を求めた。電荷注入 DAC の較正試験を行う前なのでチャージスケールは適用されていない。

run1:チャージスケール適用後試験 (2005/4/30)
キャリブレーション DAC 較正試験で求めた電荷注入 DAC の出力値と実電荷との比を用いて、再度スレッショルド DAC の較正試験を行ったもの。

run2:TOT ディスクリミネータのディレイ、TEM 変更 (2005/6/2)
TOT 取得タイミングの最適化を行い、再度スレッショルド DAC 値を求めた。このときトラッカーをコントロールしているモジュールである TEM がフライトモデルへと変更されている。

run3:チャージスケール較正後 (2005/7/7)
TOT 取得タイミング変更に伴い、注入電荷のチャージスケールも変化する。そこで、チャージスケールを新たに求め直したうえで、再度スレッショルド DAC の較正試験を行った。

run4:6 タワー組合せ試験 (2005/7/15)
タワー A、B、1、2、3、5 の 6 タワーで行った試験。

run5:8 タワー組合せ試験 (2005/8/18)
新たに完成したタワー 4、6 を足し合わせて行った試験。

run6:16 タワー組合せ試験 (2006/1/10)

全 16 タワー完成し、組み合わせて行った試験。

5.2.1 較正試験によるパラメータ変動

スレッショルド DAC 平均値の変動は ±1 DAC 程であり、そのエラーはタワー RMS の結果よりおよそ 0.012 DAC となるため、DAC 平均値の変動は十分有意である。run0 から run1 では注入電荷量の較正試験の効果が表れており、レイヤー RMS、タワー RMS とも値が小さくなっている。これは注入電荷に用いる各キャリブレーション DAC 間のばらつきが較正されたためである。DAC 値の平均も小さくなっているが、これは実際の電荷量が較正前では較正後に比べて大きかったことを示している。
run1 から run2 では DAC 平均値、RMS 平均値とも大きくなっている。これは、run1 の後、TOT 読み出しタイミング (TACK) が変化していることによるものである。較正試験では較正試験用のトリガを用いてデータ取得にを行っている。ここでは整形アンプ出力信号のピーク値を捉えるべく、トリガタイミングの最適化をはかった。トリガタイミングを 0.2 μs 遅らせた結果、TOT ゲインが大きくなり、その影響でスレッショルド DAC 値が大きくなっている。また TEM の変更による供給電圧の変化や、TOT ゲインが変化したことによって注入電荷の補正値が狂い、その結果として RMS が大きくなっている。
run2 から run3 では、新たに求め直した注入電荷の補正値を適用しているため、DAC 値は小さくなり、RMS もタワー RMS を除いて再び小さくなっている。本来であれば DAC 値は各 GTFE 単位でまとまった変動をし、レイヤーの RMS と、タワー RMS は同じ変動をすることが予測される。しかし、両者を比較すると、レイヤー RMS は小さくなっているのに対し、タワー RMS は変化していない。このことに関しては後で考察することにする。
run4 以降はパラメータの変更は無く、各値とも安定して推移している。つまりタワーの Integration に伴うパタメータ変動はないことが確認できた。

5.2.2 問題点とその原因

このスレッショルド DAC モニタの結果から、問題点が 2 つ見付かった。

RMS の上昇

本来なら較正前と比較して較正後の RMS は小さくなっていると考えられる。DAC 値が大きくなっていることを考慮しても RMS は初期値より大きくなっており、較正試験がうまくおこなわれていることが確認できない。

レイヤー RMS とタワー RMS の変動の違い

本来ならばシリコンストリップレイヤー間に変動の違い、性能の差はなく、レイヤー RMS とタワー RMS とは同様の変動をみせるはずだが、異なる変動を示している。

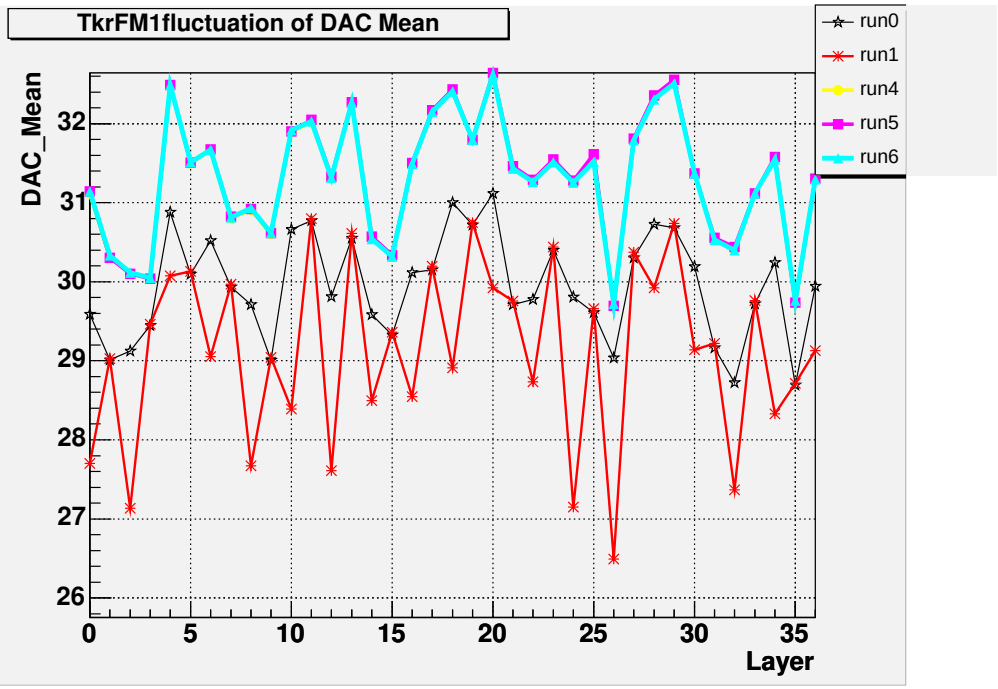

図 5.2: タワー 1 各レイヤーごとのスレッショルド DAC 平均値変動モニタ

これら 2 点の原因を探るため、各レイヤーごとに DAC 値の変動をプロットしたものが図 5.2 である。これを見ると run0 から run1 で注入電荷量が較正されているはずだが、1 レイヤーおきにしか DAC 値が変化していないことが分かる。run2、run3 でも同様にな現象が起こっている (見やすさのためプロットからは割愛した)。run4 以降は run0 の結果をそのまま上にシフトした形になっており、3run とも線が完全に重なっており、全く変動していない。この上へのシフトは TOT 読み出しタイミングの変化によるものである。

この報告を受け、SLAC のトラッカー チーム が調査を行ったところ、これは較正試験を行うスクリプトのバグによるものであることが明らかになった。

run1 と run2 で用いられている較正試験用のスクリプトでは、注入電荷較正試験で求めた注入電荷の補正値が、1 レイヤーおきにしかスレッショルド DAC 較正試験に反映されないというバグが確認された。また run3 から run4 では、用いるスクリプトが新しくなっておりこれに伴ってプロットの形も変化している。このとき、新しいバグによって注入電荷の補正値が全レイヤーに関して適用されないという現象が起きている。そのため各レイヤーの DAC 平均値分布は、較正を行う前と同じ分布となってしまった。

トラッカーのスペックでは各 GTFE 内のディスクリミネータスレッショルド RMS が 10%以下と定義されている。スレッショルド DAC モニタを行った結果、GTFE RMS は約 6 %で安定して推移しており、スペックを満たしていることが分かった。レイヤー RMS、タワー RMS は共に約 12 %で安定して推移している。較正試験スクリプトのバグが修正された後の試験では、RMS がさらに減少することが期待される。

5.3　回路ゲイン変動モニタ

続いて各シリコンストリップチャンネルごとに独立である読み出し回路、チャージアンプと整形アンプのゲイン (回路ゲインと呼ぶ) の変動をモニタした。回路ゲインとはキャリブレーション DAC からの注入電荷と整形アンプの出力電圧の比のことであるが、電力事情から回路較正を極限まで単純化しているため出力電圧を直接測定する手段を持たない (図 3.7 参照)。そこで、4.1.1 で述べた方法を用いて出力電圧に対応するスレッショルド DAC 値を求め、それを電圧値へと変換した。この試験の第一の目的は Dead ストリップを見つけ出すことであり、この回路ゲインの計算値にはスレッショルド DAC とキャリブレーション DAC の較正試験の結果は反映されていない。つまり、純粋な回路ゲインの変動を示している。

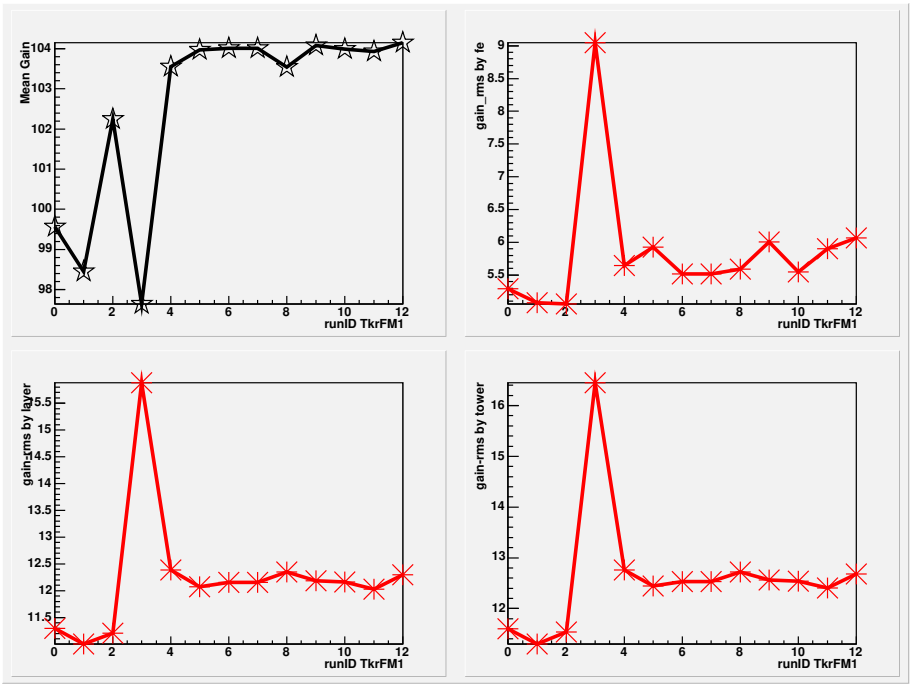

図 5.3: タワー 1 の回路ゲイン値と RMS の変動

図 5.3 に回路ゲインのモニタ結果を示す。個々の試験の内容は以下の通りである。

run0:タワー 1 受け入れ試験 (2005/4/28)
　最初の回路ゲイン測定。
　回路電圧:2.65 V

run1:(2005/5/12)
　回路電圧:2.57 V

run2:TEM 変更、グリッドへ挿入 (2005/5/27)
　タワー をグリッドに挿入して行った試験。信号の読み出しは GASU を経由して行われるためタイミングが変化する。

回路電圧:2.74 V(以後一定)

run3:(2005/6/2)

run4:TOT 読み出しタイミング変更 (2005/6/20)
TACK を 3.0 μs から 3.2 μs へと変更した。

run5: 6 タワー組合せ試験 (2005/7/12)
タワー A、B、1、2、3、5 の 6 タワーで行った試験。

run6:6 タワー試験 (2005/7/14)

run7:6 タワー試験 (2005/7/14)

run8:1 タワー読み出し (2005/7/20)

run9:8 タワー 組合せ試験 (2005/8/11)
新しくタワー 4、6 を足し合わせて行った試験。

run10:10 タワー組合せ試験 (2005/9/28)
新しくタワー 7、9 を足し合わせて行った試験。

run11:10 タワー試験 (2005/9/28)

run12:16 タワー組合せ試験 (2005/10/26) 全 16 タワー 完成し、組み合わせて行った試験。

run13:16 タワー試験 (2005/12/21)

5.3.1 較正試験によるパラメータ変動

図 5.3 の左上プロット、回路ゲイン平均値の変動をみると、run4 まで DAC 値で ± 3 程度の変動を繰り返していることが分かる。回路ゲインのエラー は、DAC 値で約 0.07 であり、変動の大きさはエラー に対して十分有意である。

run0、1、2 では回路ゲインの平均値が増減している。この増減と同じように回路に供給される電圧値も変動しており、回路ゲインが回路電圧に依存して変動していることが分かる。また run2 からは GASU を通した信号読み出しを行っており、整形アンプからの出力信号をディスクリミネータに入射するタイミングが変化している。これによってディスクリミネータに入射する整形アンプ出力電圧が変化し、回路ゲインに影響を与える。run2 ではこの影響による回路ゲインの変化も現れている。
run3 では、回路ゲインの平均値が小さくなり、3 種類の RMS がどれも大きくなっている。この原因は明らかでないが、この run では観測された回路ゲインのノイズ値が他の run より大きくなっている。
run4 では TACK と呼ばれる読み出しタイミングが変化しており、この影響によって回路ゲインが大きくなっている。回路ゲイン値は run4 以降大きな変動はなく、run3 で大きくなっていた RMS 値も run4 からは小さくなり、その後安定して推移している。

5.3.2　全体を通しての考察

回路ゲイン平均値の変動を見ると、初期値と run4 以降の値で約 4 %の値の上昇が見られる。これは TOT 読みだしタイミングと、回路に供給される電圧が変化したことによって回路ゲインが上昇した結果と考えられる。run4 以降の回路ゲイン平均値には大きな変化はなく、タワーの Integration 試験による影響は見受けられない。

RMS は 3 プロット共に同様な変動をしており、run4 以降は初期値より高い値で推移している。この上昇は 3 プロット共におよそ 4 %であり、回路ゲインとの比をとるとほぼ一定値で推移している。この結果から、シリコンストリップ読み出し回路の性能変化、劣化はないと言える。なお、このモニタの主目的である Dead ストリップの変動モニタについては他の不良ストリップのモニタと合わせ、5.5 で述べる。

5.4　TOT ゲイン変動モニタ

TOT ゲイン較正試験 (4.1.2) でシリコンストリップにデポジットした電荷量と出力 TOT 信号の長さの関係式 (5.1) を求めた。本節では、この TOT - 入射電荷量変換式のパラメータ p0、p1、p2 の変動をそれぞれ調べた。これらのパラメータは較正試験の結果を反映して変動をする。
TOT 出力信号の長さは、スレッショルド DAC の出力値と、TOT 信号読み出しタイミングの影響を受けて変動する。また、較正試験に用いる注入電荷の大きさがスレッショルド DAC 値に影響を与えるため、TOT 出力信号の長さにも影響する。つまり、TOT ゲインはこれらの要素が相互作用しあって決定されている。
本節では、TOT - 電荷変換式の各パラメ- タについての変動モニタを行った。図 5.4 は p0 の変動を、図 5.5 は p1 の変動を、図 5.6 は p2 の変動をそれぞれ示したものである。また、注入電荷量と TOT 信号から変換した電荷量との比であるチャージスケ- ルについての変動モニタも行った。以下にパラメタと TOT との関係式を再掲する。

$$\text{注入電荷}\ (fC) = p0 + p1 \times TOT + p2 \times TOT^2 \tag{5.1}$$

p0:　intercept
p1:　slope
p2:　quadra

以下に各 run のデータ取得目的について述べる。

run0:トラッカ- 受け入れ試験 (2005/4/29)

run1:チャ- ジスケ- ル適用 (2005/4/30)
　　キャリブレーション DAC 較正値導入して行った試験。

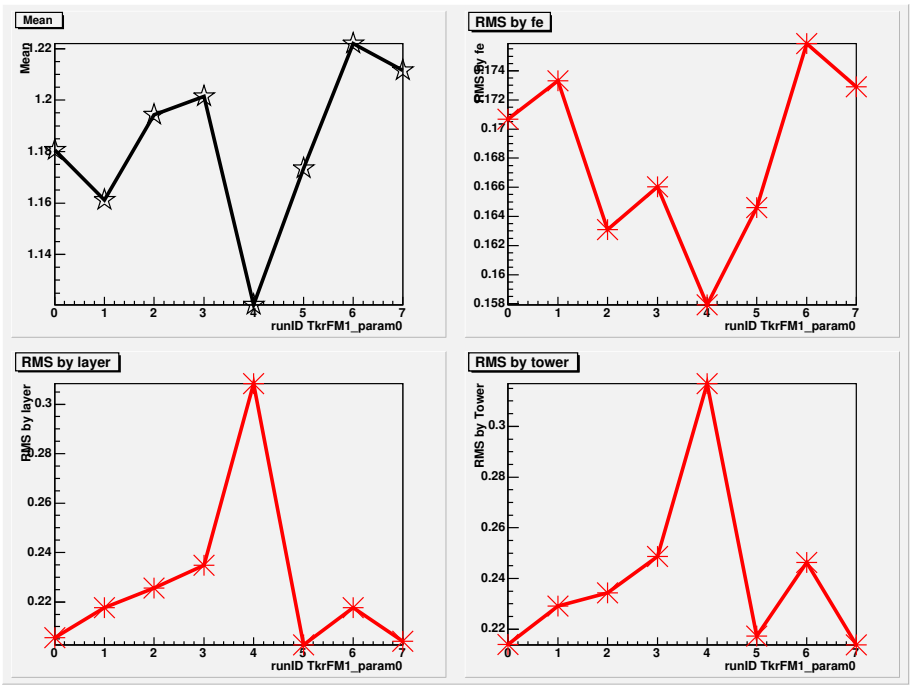

図 5.4: タワー 1 p0(切片) 変動

run2:TEM 変更、グリッドへ挿入 (2005/7/6)
　タワー をグリッドに挿入して行った試験。信号読み出しは GASU を通して行われる。

run3:(2005/7/7)

run4:6 タワー 組み合わせ試験 (2005/7/14)
　タワー A、B、1、2、3、5 の 6 タワー で行った試験。TOT 読み出しタイミング変更。

run5:8 タワー 組み合わせ試験 (2005/8/19)
　新たに完成したタワー 4、6 を足し合わせて行った試験。

run6:16 タワー組み合わせ試験 (2006/1/10)
　全タワー 完成して行った試験。

run7:16 タワー 試験 (2006/1/12)

5.4.1 較正試験によるパラメータ変動

5.1 式で、p0 は TOT が 0 のときのキャリブレーション DAC 値、つまりスレッショルド DAC 値に相当し、p1 は回路ゲイン、p2 は回路ゲインの非線形性の影響を示している。これら 3 パラメータについて、較正試験中の変動をモニタした。各パラメータの変化が他のパラメータに影響を与える。また、その変化が時間差でも影響を与えるため、パラメータ

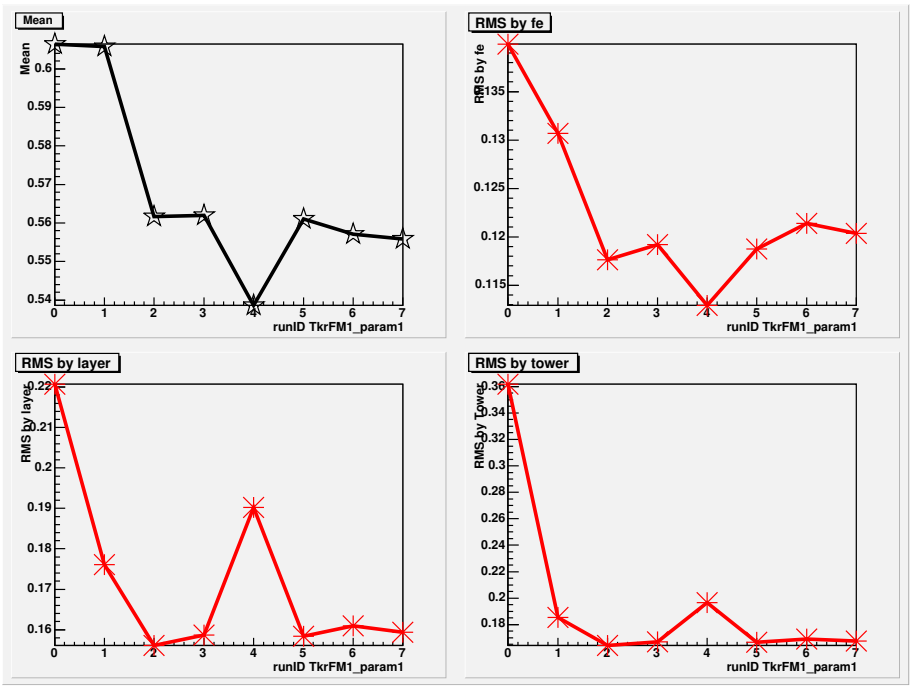

図 5.5: タワー 1 p1(傾き) 変動

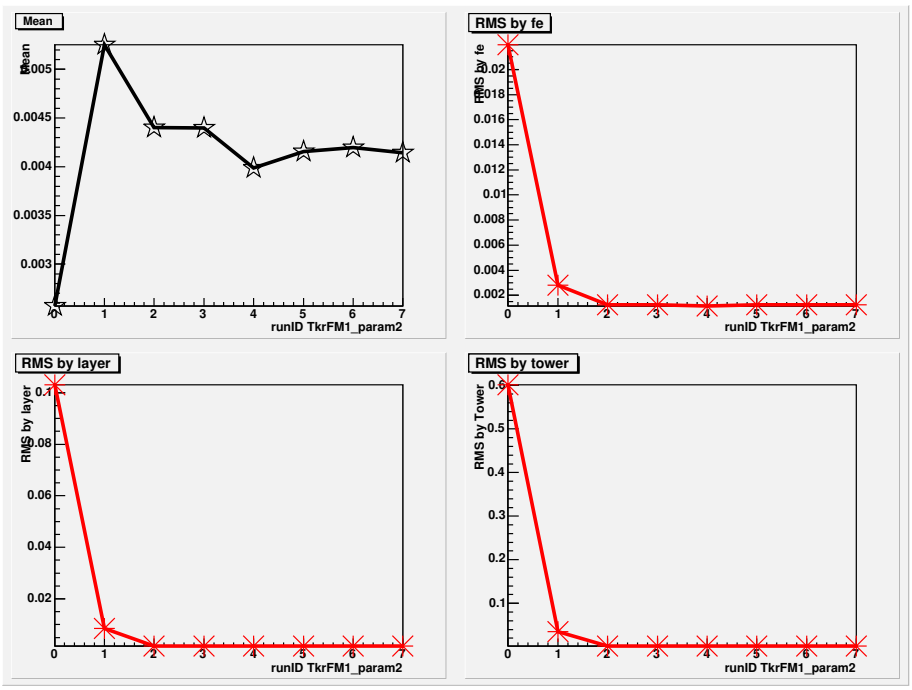

図 5.6: タワー 1 p2(二次項) 変動

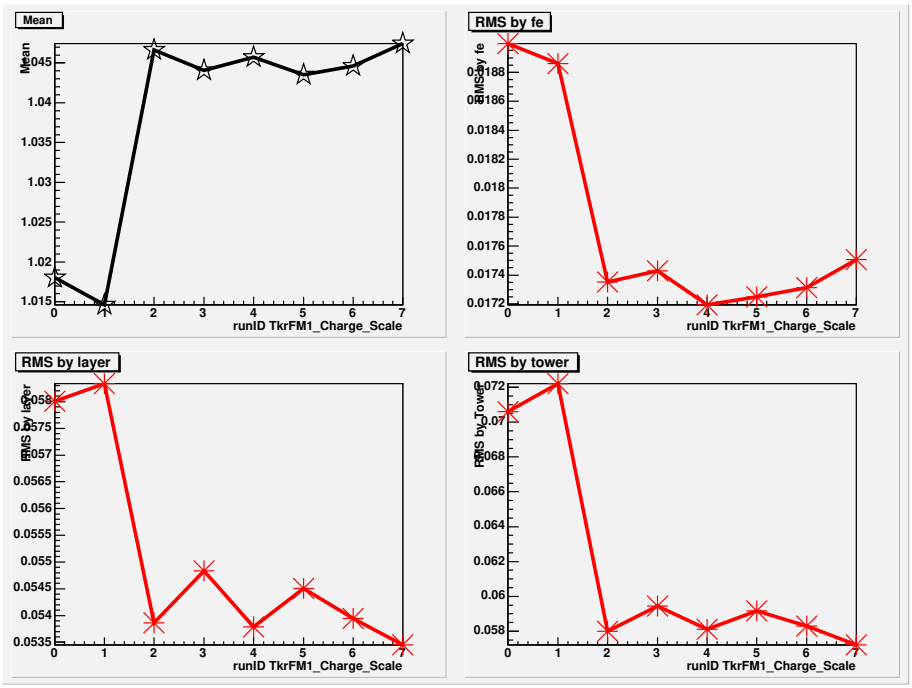

図 5.7: タワー 1 チャージスケール変動

の変動は複雑なものとなっている。

図 5.4 は p0 の変動をプロットしたものである。p0 平均値の変動はエラーに対して十分有意であり、±4 %程度の変動を繰り返している。run4 では平均値、RMS 共に大きく変動している。これは TOT 読み出しタイミングの変更によるものと考えられ、run5 以降の較正試験でこの影響が補正され、元の値に近付いている。しかし、その後もパラメータ変動は収束しておらず、複雑な変動をしているが、同条件で較正試験を繰り返し行うことで、一定値に収束していくと考えられる。

図 5.5 は p1 の変動をプロットしたものである。p1 の平均値の変動はエラーに対して有意であり、回路ゲインの影響を受けて変動していると考えられる。RMS 値は run0 から run1、2 へと小さくなっており、平均値との比をとっても有意な変動である。これはスレッショルド DAC 較正試験によってスレッショルド DAC のばらつきが小さくなったためであり、run2 で注入電荷を用いたスレッショルド DAC 較正が行われているため、さらに RMS は小さくなっている。

run4 では TOT 読み出しタイミング変更の影響を受け、p1 平均値が小さくなっているが、その後較正されて元の値に戻っている。p1 平均値は約 0.56 で安定して推移していると言える。

図 5.6 は p2 の変動をプロットしたものである。p2 平均値は ± エラーに対し有意な変動をしている。RMS は非常に小さい値で一定となっており、平均値も安定して推移していると言える。

5.4.2　チャージスケール変動モニタ

図 5.7 はチャージスケールの変動を示している。ここで用いるチャージスケールは次の様に求めている。電荷注入を行って求めた出力 TOT 値を 5.1 へ代入し入射電荷量へ再度変換する。注入電荷量をこうして求めた電荷量で割った値をチャージスケールとして定義している。ここで、比較に用いた注入電荷量は MIP のデポジット電荷量に近い 4.482 fC を用いている。このチャージスケールからフィッティングの確かさを確認することができる。全ての較正試験が想定通り進めば、チャージスケールの平均値は 1 に収束し、RMS も小さい値で一定に収束するはずである。
チャージスケール平均値の変動を見ると、run2 で大きくなっているが、その後はほぼ一定値で安定している。同じタイミングで RMS は小さくなっている。ここまで、p0、p1、p2 の変動を見てきたが、チャージスケールの変動からフィッティング関数が精度良く、安定して求まっていることが分かった。

5.4.3　全体を通しての考察

TOT フィッティングパラメータは、各較正パラメータと複雑に相互作用をしており、今回の解析では平均値が一定値に収束することはなかった。今後、同一条件で較正試験を繰り返し行うことである一定値に収束すると考えられる。また、RMS 値はパラメータ変動による変動はあるものの、最終的には初期値と同じ、もしくは低い値に収まっており、回路の性能劣化は観測されなかった。

5.5　不良ストリップモニタ

4 章で述べたトラッカー較正試験で、不良ストリップを、Dead、Hot、Disconnected の 3 種類に分類しリストを作成した。不良ストリップ数の変化はタワー性能に大きく影響を与える。そこで本節では、トラッカー性能変化を定量化するため、不良ストリップリストの時間変化を較正試験で用いた分類別にモニタし、トラッカーに性能劣化が無いことを確認した。

図 5.8 は 16 タワーについて各タワー最初に行われた試験からの総不良ストリップ数の時間増減をモニタしたものである。この総不良ストリップ数は、3 種類の不良ストリップ数の総和を求めたもので、この変動には各不良カテゴリ間の移動はカウントされていない。最も変動の大きいタワー A で、25 ストリップの増加となっている。これでも 1 タワーのストリップ数の約 0.05 %であり、総不良ストリップ数の変動は非常に小さく安定していると言える。

本節では各不良ストリップ分類ごとに変動モニタを行った結果を示す。

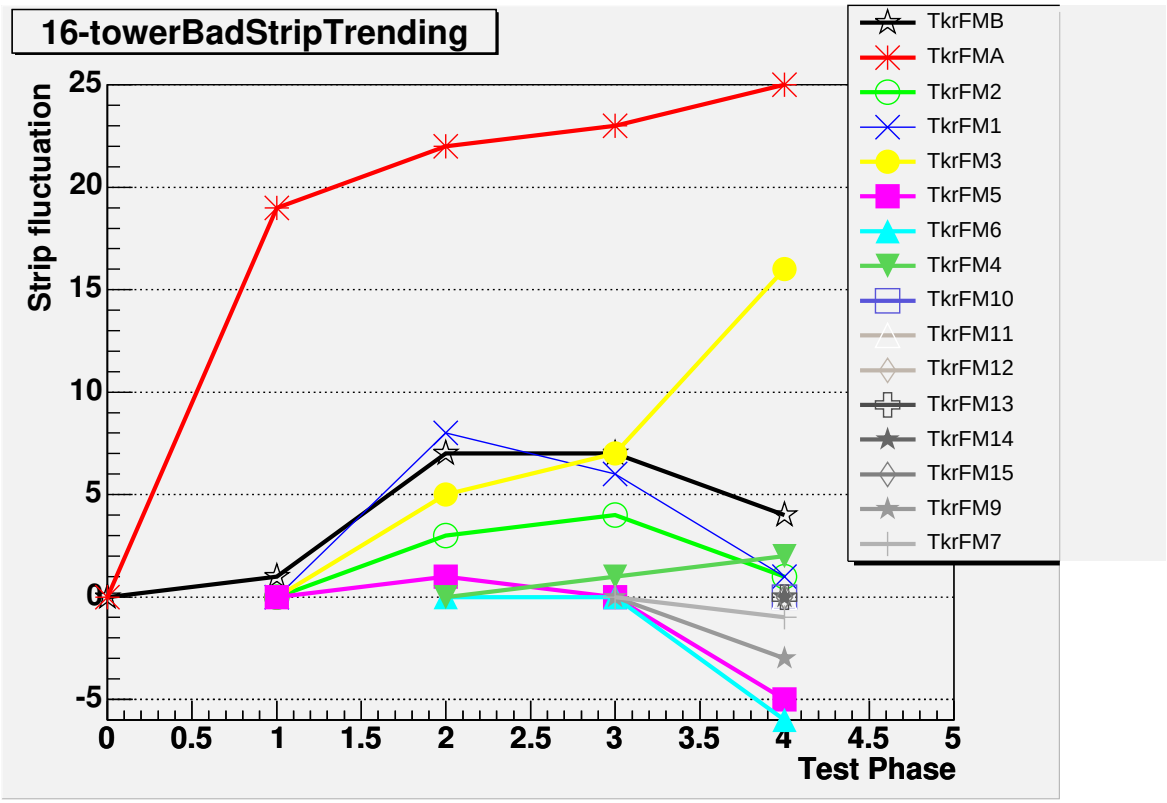

図 5.8: 各タワー最初の試験からの総不良ストリップ数の増減

5.5.1 Dead ストリップモニタ

図 5.9 は各タワー毎の Dead ストリップ数の総和の変動をプロットしたものである。横軸は、表 5.1 に示すように新しいタワーの完成毎に行われた試験の結果を表している。Dead ストリップ数のタワー平均値は約 30 ストリップ (0.05 %) であり、最も Dead ストリップの多いタワー 6 においても、Dead ストリップ率はおよそ 0.2 %となっている。
図 5.10 は各タワーの Dead ストリップ数の最初の試験からの増減を示したものである。タワー A、B は最初の試験で Dead ストリップが確認されなかったが、Test Phase1 からはそれぞれ、18 ストリップ、6 ストリップが Dead として分類されている。これらのストリップは、当初 Disconnected ストリップに分類されていたものである。Test Phase2 以後はタワー A のストリップはそのまま Dead として、タワー B のストリップは再び Disconnected として分類されている。その他のストリップに関しては変動はほとんどなく非常に安定しており、性能劣化は見られない。Dead ストリップは読み出し回路の不良によるもので、この結果から較正試験中の回路性能劣化が無かったことが分かった。

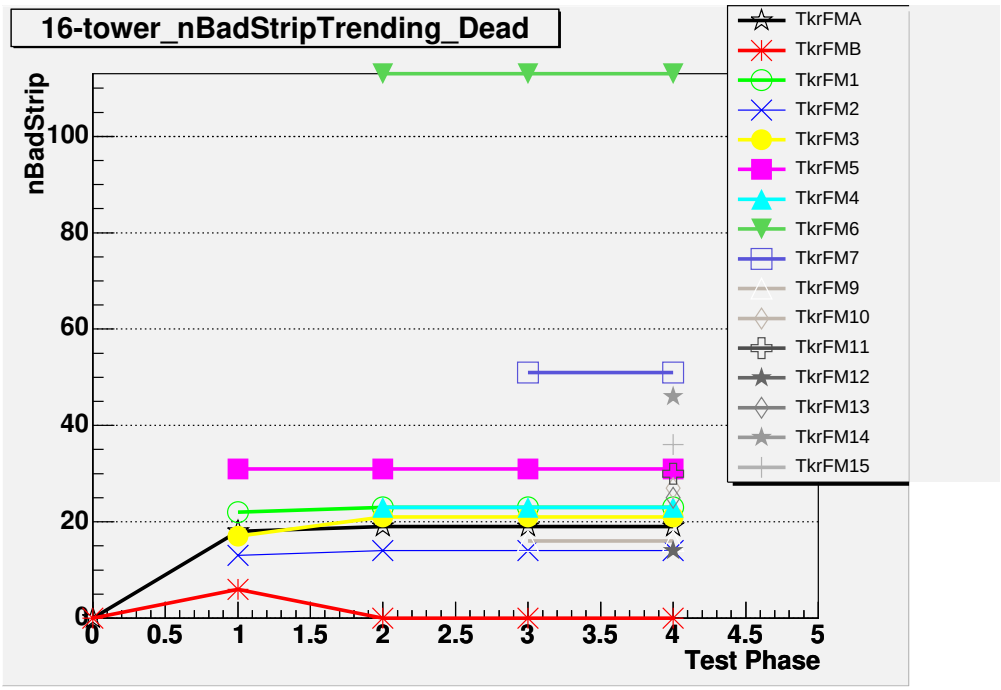

図 5.9: 総 Dead ストリップ数の推移

5.5.2 Hot ストリップ変動モニタ

図 5.11 は Hot ストリップ数の変化を表したプロットである。用いたデータは Dead ストリップのデータと同じ日に取得されたものである。ここで用いている Hot ストリップは、較正試験で求めた Hot ストリップの定義とは違い、ノイズ占有率 1.0×10^{-4} という条件で Hot ストリップの定義を行った。これは Hot ストリップの変遷を追う為であり、スレッ

Test Phase		データ取得日
0	2 タワーテスト	2005 年 4 月
1	4 タワーテスト	2005 年 7 月
2	6 タワーテスト	2005 年 9 月
3	10 タワーテスト	2005 年 9 月
4	16 タワーテスト	2005 年 12 月

表 5.1: データ取得日

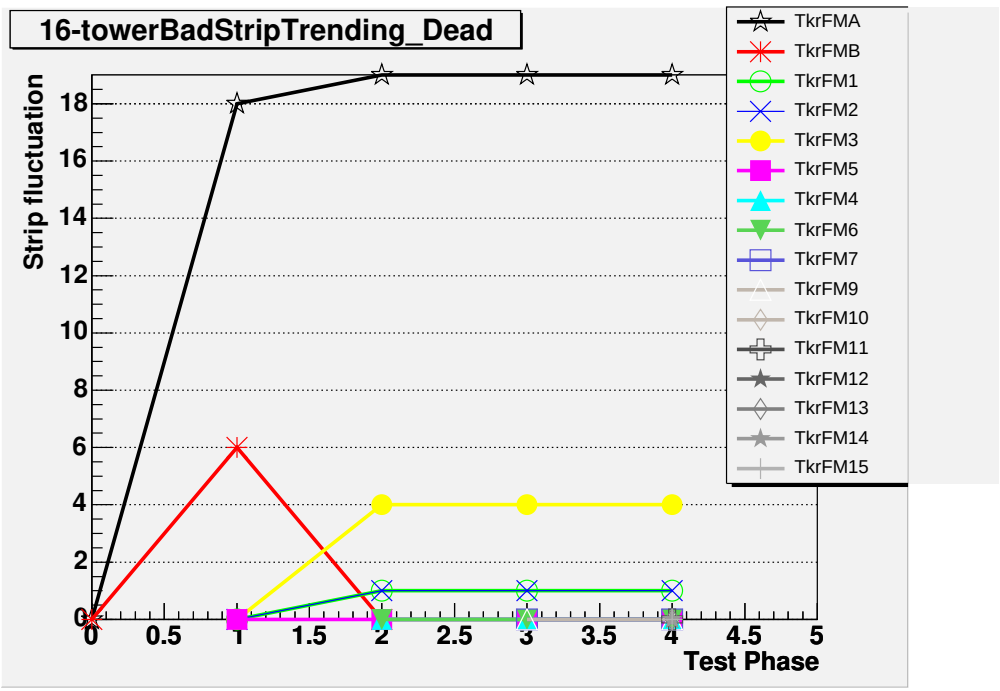

図 5.10: Dead ストリップ数の変化 (各タワー毎に最初の試験からの増減)

ショルドも通常より高い値に設定してある。

この条件で定義された各タワーの総 Hot ストリップ数は最も多いタワー 6 でも、65 ストリップと約 0.1 %に収まっている。
図 5.12 は各タワー毎に Hot ストリップ初期結果からの変化を示したプロットで、全体的に Hot ストリップ数が減少している。これらのストリップの内の多くは、この後 Disconnected ストリップと分類されている。(次節参照) これらの Hot ストリップは、SSD ウエハー間のワイヤボンディングが電気的に不安定であったため Hot ストリップと定義されていたが、試験を繰り返すうちにワイヤボンディングが剥がれてしまったために Disconnected ストリップに変化したものであると考えられる。こうして、Hot ストリップでなくなったストリップの多くが Disconnected ストリップへと変化していることが分かった。これらのストリップを除くと Hot ストリップ数の変化はほとんどなく、性能劣化は確認されなかった。

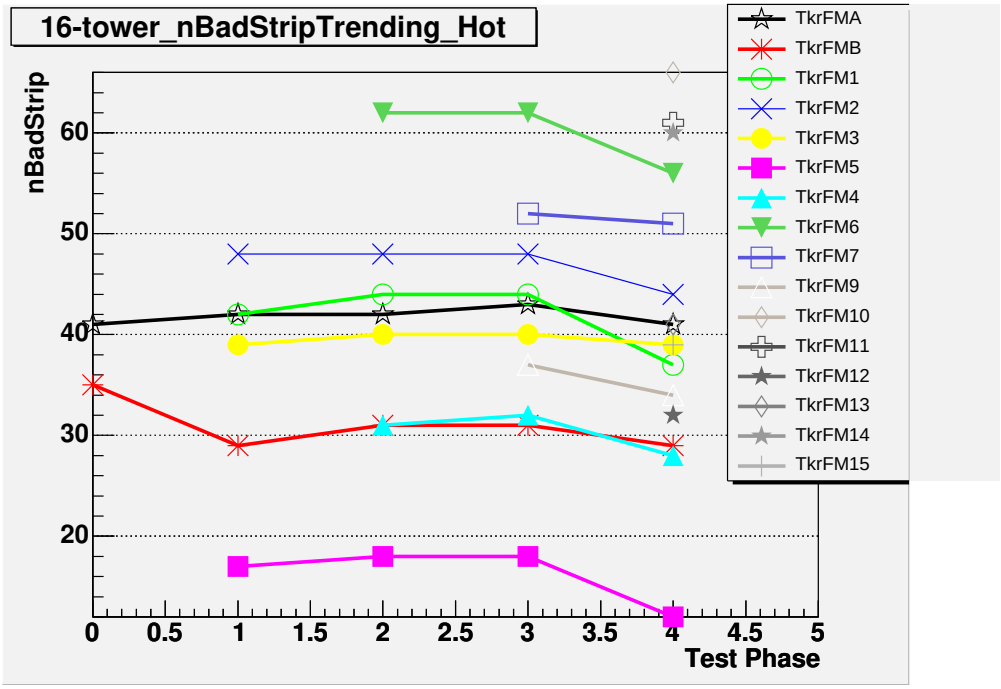

図 5.11: 総 Hot ストリップ数の推移

5.5.3 Disconnected ストリップ変動モニタ

Disconnected ストリップは電荷注入試験と異なり、ミューオン測定データを解析してリストアップを行う。そのため、電荷注入試験とは異なる日程で試験が行われており、試験のタワー構成も異なる (5.2)。

図 5.13 は Disconnected ストリップ数の増減をプロットしたものである。較正試験では Disconnected ストリップを 4 種類の不良に分類したが、ここでは、それら全てあわせたストリップ数についての増減をプロットしている。Disconnected ストリップは全体的に増加

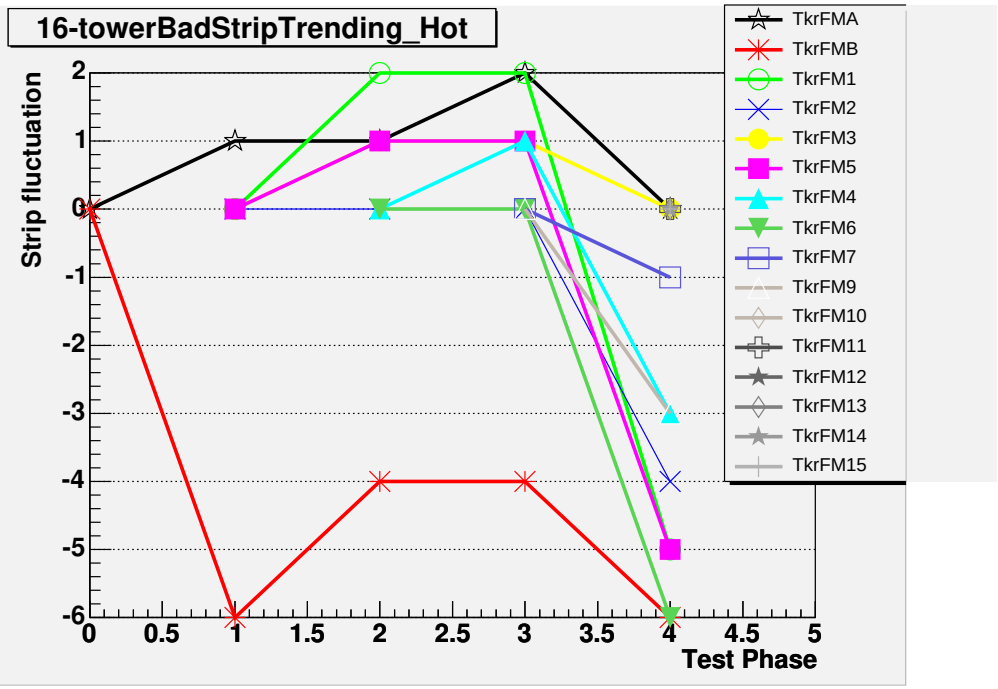

図 5.12: Hot ストリップ数の変化 (各タワーごとに最初の試験からの増減)

Test Phase		データ取得日
0	2 タワーテスト	2005 年 5 月
1	4 タワーテスト	2005 年 6 月
2	6 タワーテスト	2005 年 7 月
3	8 タワーテスト	2005 年 8 月
4	16 タワーテスト	2006 年 1 月

表 5.2: Disconnceted ストリップ、データ取得日

していることがこの結果から分かるが、その増加はおよそ 10 ストリップ程度に収まっている。その多くが Hot ストリップからの異動によるものであり (5.4.2)、不良ストリップ自体が増加しているわけではない。

図 5.14 は総 Disconnected ストリップ数の変動を示したものである。タワー A の Disconnected ストリップ数が最も多く、タワー全体で約 2.5 %の Disconnected ストリップが確認されている。これはトラッカー初号機の製造過程での不具合によるもので、その後のタワーでは改善されていおり、タワー A を除いた Disconnected ストリップの割合は、0.3 %となっている。

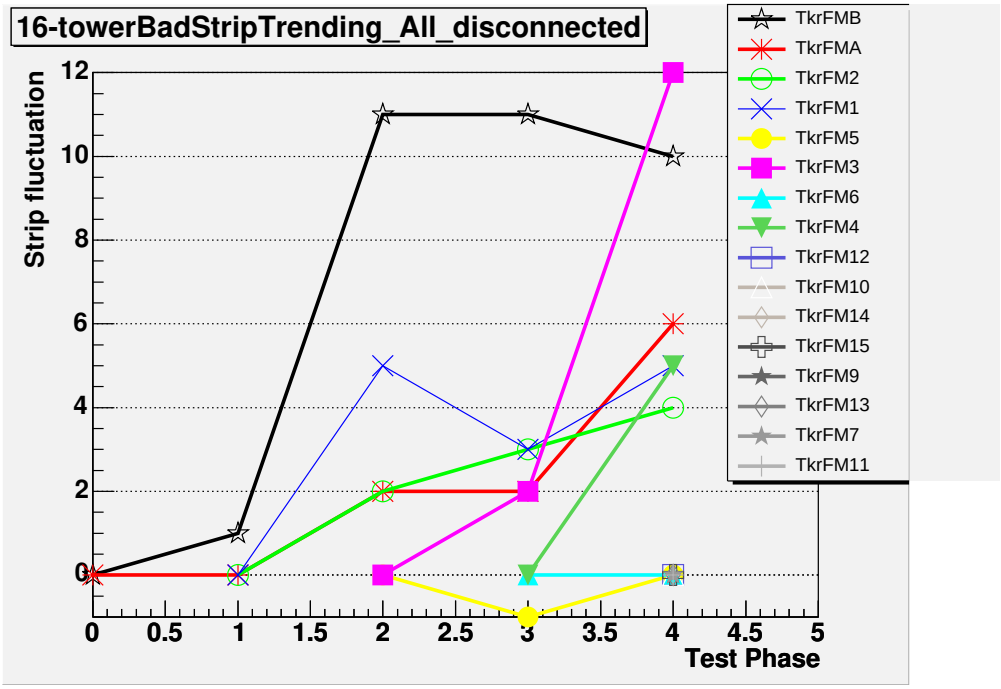

図 5.13: 総 Disconnected ストリップ数の最初の試験からの増減

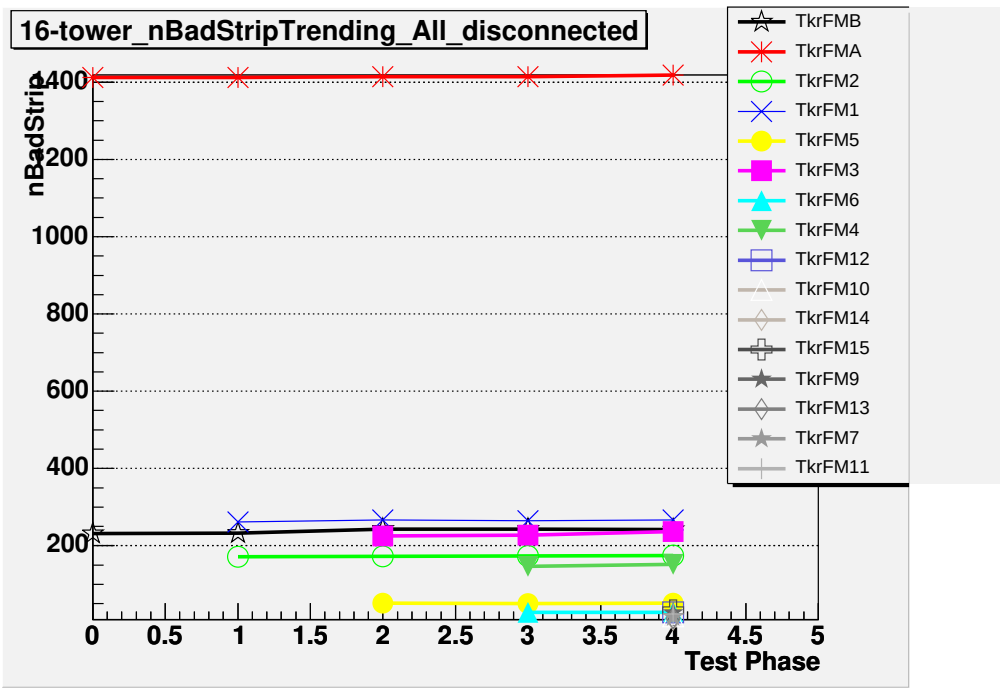

図 5.14: 総 Disconnected ストリップ数の推移

第6章　まとめ

今回私はSLACで行われたGLAST衛星の較正試験に参加し、トラッカー部の較正試験と性能モニタを行った。較正試験では、TOT較正試験と不良ストリップのリスト作成を行った。

TOT較正試験では、トラッカー部のシリコンストリップ検出器からの信号読み出しに用いられているTOT信号から、シリコンストリップへデポジットされた電荷量を正確に見積もること、TOTゲインのばらつきを小さくすることを目的とした。TOTゲインはスレッショルドDACとキャリブレーションDAC、回路ゲインの影響を受けばらつきを持つ。また、これらのパラメータは互いに影響を及ぼし合って変動するため、この影響を排除するために繰り返し試験を行い、より精度の高いパラメータの較正を行った。較正試験の結果、ミューオンを用いた試験でのシリコンストリップへのデポジット電荷分布のピーク値が理論値の周りで精度よく求まり、較正試験が想定通り行われていることが確認された。

不良ストリップのリスト作成では不良の種類によってストリップを3種類に分類した。データ取得の際のマスクに用いるHotストリップと、データ解析の際に用いるDead、Disconnectedストリップである。Hotストリップのリスト作成では、不安定なHotストリップを排除し安定して見積もるために、過去に取得されたノイズ占有率のデータを全て用いて解析を行った。Disconnectedストリップは、disconnected、partially disconnected、intermittently disconnected、partially intermittently disconnectedストリップの4種類に分類し、リストを作成した。Deadストリップは、回路ゲインを用いて求めた。

その結果Dead、Hot、Disconnectedストリップの不良ストリップ率はそれぞれ全16タワー平均で、0.05 %、0.03 %、0.3 %と非常に低い値になっている。

続いて、較正試験で較正したパラメータと不良ストリップのリストの変動モニタを行った。これはトラッカー性能の変化を確認するために行ったもので、SLACにトラッカー初号機が送られてから2005年1月までの約1年間に渡って取得されたデータを解析した。その結果、性能変化や劣化は見受けられず、各パラメータの値は非常に安定していることが分かった。

またこのモニタを行うことで、スレッショルドDAC較正スクリプトのバグの発見につながった。このバグによって、スレッショルドDAC値がうまく較正されておらず、スレッショルドDACのばらつきが一部改善されていないことが分かった。今後行われるバグ修正後の試験では、RMS値が改善さればらつきがさらに小さくなることが期待される。

このタワー性能モニタを通して、較正試験におけるパラメータ変動の解釈とその基準が確立され、これから行われる検出器環境試験での評価に用いられる。

謝辞

本研究を行うにあたり御世話になりました、大杉教授と深沢助教授、水野助手。SLACで御世話になった、田島先生、釜江先生、杉崎さん。また、私の研究生活を支えてくれた研究室みなさん。

最後に、両親へ。
ありがとうございました。

参考文献

[1] 緒方聖 修士論文 (広島大学) 2001

[2] 増田博之 修士論文 (広島大学) 2001

[3] 水嶋浩文 修士論文 (広島大学) 2001

[4] Hiroyasu Tajima. 2006, GLAST Tracker

[5] GLAST LAT Technical Document, https://oraweb.slac.stanford.edu:8080/pls/slacquery/DOCUMENTS.STARTUP?PROJECT=GLAST