ATLAS実験におけるピクセル検出器の動作特性評価

大阪大学大学院 理学研究科物理学専攻 山中卓研究室 博士課程前期2年

今坂 俊博

平成29年3月1日

概 要

スイス・ジュネーブに位置する欧州原子核研究機構 (CERN) には、Large Hadron Colider (LHC) と呼ばれる陽子陽子衝突型加速器が設置されており、高エネルギーでの粒子の反応を 観測することができる。ATLAS 実験は、LHC の衝突点の一つに設置された ATLAS 検出器 を用いて、ヒッグス粒子の精密測定や標準模型を越えた物理現象の探索を行っている。

ATLAS 検出器の最も陽子陽子衝突点に近い部分には、荷電粒子の飛跡検出のためのピク セル検出器が設置されている。IBL は 2014 年に新たに最内層に挿入されたピクセル検出器 で、既存のピクセル最内層と比較して 3~10 倍程度の放射線損傷を受ける。IBL では、2015 年の運転時に、積分ルミノシティの増加につれて、読み出し ASIC の消費電流値の増加、信 号とノイズを分けるための閾値の測定値の変動、入射粒子がシリコンセンサーに落としたエ ネルギーの情報である Time Over Threshold (ToT) の測定値の変動があった。

本研究の目的の一つは、2016年の運転時のASICの消費電流や閾値、ToTの変動等を調べ、今後IBLが安定して運用していけるのかの見通しを立てることである。その結果、IBL での閾値とToTの変動は穏やかになっていき、今後安定して運転できる見通しであることを確認した。

本研究のもう一つの目的は、なぜ測定した閾値と ToT が変化するのかを調べることであ る。放射線損傷により ASIC の挙動変化を説明する先行研究があるので、ASIC ヘガンマ線 を照射し、回路内の何が変化するか調査した。その結果、ASIC のアナログ回路にかけるバ イアス電圧が変動することがわかった。しかし、その変化量は閾値と ToT の測定値の変動の 原因となり得ない程度小さいという事がわかった。

目 次

| 1.1 LHC/ATLAS 実験 | $ \begin{array}{cccc} $ |
|--|--|
| 1.1.1 ATLAS 検出器 | · · · 7 · · 8 · · 13 |
| 112 内部飛跡検出器 | 8 13 |
| т.т.а ТЭНИЛИЮЛТАНТН | 13 |
| 1.2 FE-I4 | 1.0 |
| 1.3 IBL 検出器の運用上の問題点 | 18 |
| 1.3.1 FE-I4 の消費電流の変化 | 19 |
| 1.3.2 閾値と ToT の変化 | 20 |
| 1.4 本研究の目的 | 20 |
| 第2音 ピクセル検出器 | กก |
| | 44 00 |
| 2.1 C) セル快山鉛の動作原理 | 22 |
| 2.1.1 シリコンを用いる十零体快出品の動作尿理 | 22 |
| 2.1.2 C $/$ | 23 |
| 2.2 ビクセル検出器で使用 9 るセンリー | 24 |
| 2.2.1 7 | 24 |
| 2.2.2 3D センリー | 24 |
| 2.3 ビクセル快出品の 成別 緑損湯 | 25 |
| 2.3.1 ハルク損傷 | 25 |
| 2.3.2 衣囬損傷 | 26 |
| 第3章 IBL の閾値と ToT 測定 | 28 |
| 3.1 閾値と ToT の調整の方法 | 28 |
| 3.1.1 閾値の調整 | 28 |
| 3.1.2 ToT の調整 | 30 |
| 3.1.3 測定と調整の手順 | |
| 3.2 2015 年と 2016 年のの運転中の IBL の振る舞い | 33 |
| 3.2.1 閾値と ToT とノイズの長期変動 | |
| 3.2.2 センサーごとの閾値と ToT とノイズの違い | 37 |
| 3.2.3 ノイズの大きいピクセル数の推移 | 39 |
| 3.2.4 閾値の位置依存性 | 41 |
| 第4章 ガンマ線照射試験 | 45 |
| 4.1 FE-I4の読み出しシステム | . 45 |
| 4.2 放射線損傷による閾値と ToT の変動 | 47 |

| | 4.2.1 バイアス電圧の種類 | 18 |
|-----|-----------------------------------|----|
| 4.3 | セットアップ | 50 |
| | 4.3.1 実験施設 | 50 |
| | 4.3.2 配置 | 50 |
| 4.4 | 結果 | 51 |
| | 4.4.1 線量の評価 | 51 |
| | 4.4.2 FE-I4の消費電流値と閾値および ToT の変動 | 52 |
| | 4.4.3 Vcal の変動 | 55 |
| | 4.4.4 アナログ回路のバイアス電圧値の変動 | 57 |
| | 4.4.5 バイアス電圧値の変動が測定閾値や ToT に与える影響 | 59 |
| 第5章 | 考察と今後の課題 | 36 |
| 5.1 | IBLの閾値と ToT 変動の考察 (| 36 |
| 5.2 | ガンマ線照射試験の考察 | 36 |

第6章 結論

| 18 | 3 |
|----|---|
| | - |
| | 1 |

表目次

| 1.1 | FE-I4の特徴。 | 14 |
|-----|--------------------------------|----|
| 1.2 | コマンドの一覧。[21] | 17 |
| 4.1 | 放射線量の測定結果。 | 52 |
| 4.2 | 今回の照射で用いたバイアス電圧。.............. | 60 |
| 4.3 | 今回の照射で用いたバイアス電圧。.............. | 63 |

図目次

| 1.1 | LHC の簡略図。[2] | 7 |
|------|---|----|
| 1.2 | ATLAS 検出器の構造。[3] | 8 |
| 1.3 | 内部飛跡検出器の構造。[3] | 8 |
| 1.4 | 内部飛跡検出器の配置。[3] | 9 |
| 1.5 | ピクセル検出器の構造。[3] | 10 |
| 1.6 | IBL のインストールの様子。[4] | 10 |
| 1.7 | IBL の挿入の様子 (a) と内部の構造の図 (b)。[5] | 11 |
| 1.8 | ピクセル検出器の断面図の一部。最内層が IBL である。[5] | 12 |
| 1.9 | ピクセル検出器の内部の構造の一部。[5] | 12 |
| 1.10 | ステーブの断面図。[7] | 12 |
| 1.11 | 冷却システムの全体の模式図。[5] | 13 |
| 1.12 | エンタルピー、圧力に対する CO ₂ の相図。[5] | 13 |
| 1.13 | FE-I4 の図。 $[8]$ | 14 |
| 1.14 | FE-I4の信号処理回路図。[8] | 15 |
| 1.15 | ToT の概念図。波形の違いによって ToT は増減する。 | 16 |
| 1.16 | 入射電荷と検出効率の関係の例。 | 18 |
| 1.17 | ATLAS における 2015 年の積分ルミノシティの推移。[9] | 19 |
| 1.18 | 2015 年のデータ収集時の IBL で使用している FE-I4 の消費電流の推移。[10] | 19 |
| 1.19 | 上の図が 2015 年の IBL の閾値の全モジュールの平均値の推移、下の図が閾値 | |
| | の全モジュールに対する RMS を示している。[11] | 20 |
| 1.20 | 上の図が2015年のIBLのToTの全モジュールの平均値の推移、下の図がToT | |
| | の全モジュールに対する RMS を示している。[11] | 20 |
| 2.1 | ダイオード型半導体の模式図。 | 23 |
| 2.2 | ピクセル検出器の断面図。[14] | 23 |
| 2.3 | プラナーセンサーの模式図。[15] | 24 |
| 2.4 | FBK 製の 3D センサーの模式図。[16] | 25 |
| 2.5 | CNM 製の 3D センサーの模式図。[16] | 25 |
| 2.6 | 厚さが 300 μm の n バルクシリコンセンサーの全空乏化電圧と 1 MeV の中性 | |
| | 子数に換算した放射線量との関係。[17] | 26 |
| 2.7 | トランジスタの模式図。ゲート (G) に電圧をかけることにより電荷が誘起さ | |
| | れ、ソース (S) とドレイン (D) 間に電流が流れる仕組みになっている。酸化膜 | |
| | (STI) によって周囲と絶縁されている。[12] | 27 |
| 2.8 | 側方から見た図。図 2.7 の点線部の断面に相当する。[12] | 27 |

| 3.1 | binary search の手順。[21] | 29 |
|------|---|-----|
| 3.2 | GDAC の調整後の閾値の典型的な分布。横軸が測定した閾値の値で、縦軸は | |
| | ピクセル数である。[22] | 29 |
| 3.3 | TDAC の調整後の閾値の典型的な分布。横軸が測定した閾値で、縦軸はピク | |
| | セル数である。[22] | 30 |
| 3.4 | IFDAC 調整後の ToT の典型的な結果。X 軸は IBL の z 方向のモジュールの位 | |
| | 置、Y軸はIBLの | 31 |
| 3.5 | FDAC 調整後の ToT の典型的な結果。X 軸は IBL の z 方向のモジュールの位 | |
| | 置、Y軸はIBLのφ方向のモジュールの位置、Z軸はToTの平均値である。[22] | 31 |
| 3.6 | IBL の消費電流の推移。[23] | 34 |
| 3.7 | IBL の消費電流の推移の拡大図。[23] | 34 |
| 3.8 | 2015,2016 年の IBL における閾値の測定値の推移。 | 35 |
| 3.9 | 2015,2016 年の IBL における ToT の測定値の推移。 | 36 |
| 3.10 | 2015,2016 年の IBL におけるノイズの推移。 | 36 |
| 3.11 | 閾値の変化の速さ[変化/積分ルミノシティ]。 | 37 |
| 3.12 | ToT の変化の速さ [変化/積分ルミノシティ]。 | 37 |
| 3.13 | 2015,2016 年の IBL におけるセンサーの種類ごとの閾値の推移。 | 38 |
| 3.14 | 2015,2016 年の IBL におけるセンサーの種類ごとの ToT の推移。 | 38 |
| 3.15 | 2015,2016 年の IBL におけるセンサーの種類ごとのノイズの推移。 | 39 |
| 3.16 | 2016年のノイズの分布をフィットした図。 | 39 |
| 3.17 | 2015,2016 年の IBL における scan ごとのノイズの分布。 | 40 |
| 3.18 | 2015 年と 2016 年のデータ収集時の IBL におけるノイズが 300e 以上のピクセ | |
| | ル数の割合の推移。 | 41 |
| 3.19 | 2016 年の1回目の調整直前の閾値の二次元分布。 | 42 |
| 3.20 | 2016 年の 2 回目の調整直前の閾値の二次元分布。 | 42 |
| 3.21 | 2016 年の 3 回目の調整直前の閾値の二次元分布。 | 43 |
| 3.22 | 2016 年の 4 回目の調整直前の閾値の二次元分布。 | 43 |
| 3.23 | 2016 年の 5 回目の調整直前の閾値の二次元分布。 | 44 |
| 3.24 | 2016 年の 6 回目の調整直前の閾値の二次元分布。 | 44 |
| 4 1 | | 4 5 |
| 4.1 | FE-14 の読み出しシステムの主体像。 | 45 |
| 4.2 | $FE-14 \geq \text{single chip card}_{\circ}$ | 46 |
| 4.3 | SEABAS2 と daughter board。 | 41 |
| 4.4 | /リ/ン/同辺の凹路凶。 $[8]$ | 49 |
| 4.5 | $_$ $_$ $_$ $_$ $_$ $_$ $_$ $_$ $_$ $_$ | 49 |
| 4.6 | | 51 |
| 4.7 | ホリメナルメタクリエート線里計 (Radix W)。 | 51 |
| 4.8 | 二階酸セルロームノイルム線重計 (FTR-125)。 | 51 |
| 4.9 | FE-14 の凹路の電流値の推移。 領知は測定開始からの時間である。 | 53 |
| 4.10 | 照射中の國祖の半均祖の推移。誤左倖はその KMS を示している。 | 53 |
| 4.11 | 照射中の101の半均値の推移。誤左悴はそのKMSを示している。 | 54 |
| 4.12 | 照射甲のノイスの平均値の推移。誤左棒はその RMS を示している。 | 54 |

| 4.13 | 典型的な Vcal の出力。 | 55 |
|------|--|----|
| 4.14 | V _{hi} の平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。 | 56 |
| 4.15 | V _{base} の平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。 | 56 |
| 4.16 | V _{hi} -V _{base} の値の推移。誤差棒はその RMS を示している。 | 57 |
| 4.17 | DisVbn の平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。 | 58 |
| 4.18 | FdacVbn の平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。 | 58 |
| 4.19 | TdacVbp の平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。 | 58 |
| 4.20 | PrmpVbpの平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。 | 58 |
| 4.21 | PrmpVbpfの平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。 | 58 |
| 4.22 | PrmpVbnFolの平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。 | 58 |
| 4.23 | Amp2Vbp の平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。 | 59 |
| 4.24 | Amp2Vbn の平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。 | 59 |
| 4.25 | Amp2VbpFolの平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。 | 59 |
| 4.26 | Amp2Vbpffの平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。 | 59 |
| 4.27 | PrmpVbpfをV ₀ からV _{ind} に変化させたときの測定閾値の差。 | 60 |
| 4.28 | PrmpVbpf を V ₀ から V _{ind} に変化させたときの測定 ToT の差。 | 60 |
| 4.29 | PrmpVbnFolを V ₀ から V _{ind} に変化させたときの測定閾値の差。 | 61 |
| 4.30 | PrmpVbnFolを V ₀ から V _{ind} に変化させたときの測定 ToT の差。 | 61 |
| 4.31 | FdacVbn を V ₀ から V _{ind} に変化させたときの測定閾値の差。 | 61 |
| 4.32 | FdacVbn を V ₀ から V _{ind} に変化させたときの測定 ToT の差。 | 61 |
| 4.33 | Amp2VbpffをV ₀ からV _{ind} に変化させたときの測定閾値の差。 | 61 |
| 4.34 | Amp2VbpffをV ₀ からV _{ind} に変化させたときの測定 ToT の差。 | 61 |
| 4.35 | Amp2Vbp を V ₀ から V _{ind} に変化させたときの測定閾値の差。 | 62 |
| 4.36 | Amp2Vbp を V ₀ から V _{ind} に変化させたときの測定 ToT の差。 | 62 |
| 4.37 | Amp2Vbn を V ₀ から V _{ind} に変化させたときの測定閾値の差。 | 62 |
| 4.38 | Amp2Vbn を V ₀ から V _{ind} に変化させたときの測定 ToT の差。 | 62 |
| 4.39 | Amp2VbpFolをV ₀ からV _{ind} に変化させたときの測定閾値の差。 | 62 |
| 4.40 | Amp2VbpFolをV ₀ からV _{ind} に変化させたときの測定 ToT の差。 | 62 |
| 4.41 | DisVbn を V ₀ から V _{ind} に変化させたときの測定閾値の差。 | 63 |
| 4.42 | DisVbn を V ₀ から V _{ind} に変化させたときの測定 ToT の差。 | 63 |
| 4.43 | PrmpVbp を V ₀ から V _{ind} に変化させたときの測定閾値の差。 | 63 |
| 4.44 | PrmpVbp を V ₀ から V _{ind} に変化させたときの測定 ToT の差。 | 63 |
| 4.45 | バイアス電圧を V1 に設定したときと V0 に設定したときの測定閾値の差。 | 64 |
| 4.46 | バイアス電圧を V2 に設定したときと V0 に設定したときの ToT の差。 | 65 |
| 4.47 | TdacVbp を変化させたときの測定閾値の平均値。誤差棒はその RMS を示し | |
| | ている。 | 65 |
| 4.48 | TdacVbp を変化させたときの ToT の平均値。誤差棒はその RMS を示してい | |
| | る。 | 65 |

第1章 序論

1.1 LHC/ATLAS 実験

Large Hadron Collider (LHC) は、欧州原子核研究機構 (CERN) に建設された周長約 27km の陽子陽子衝突型加速器である。2017 年現在、重心系エネルギー 13TeV で運転することが でき、陽子同士の衝突としては世界最高エネルギーを記録している。瞬間ルミノシティの設計値は 1×10^{34} cm⁻²s⁻¹ であるが、2016 年には設計値を越える 1.37×10^{34} cm⁻²s⁻¹ の瞬間ル ミノシティを達成した [1]。

LHCの概略図を図 1.1 に示す。LHC には陽子陽子衝突地点が4ヶ所あり、陽子同士の衝突 から発生する粒子検出のための検出器が陽子陽子衝突地点付近におかれている。そのうちの 一つが A Troidal ApparatuS (ATLAS)検出器である。ATLAS 検出器を用いて陽子陽子衝突 事象を観測し、標準模型の枠組みを越える物理現象の発見や、ヒッグス粒子の性質の精密な 測定を目指す実験が ATLAS 実験である。



図 1.1: LHCの簡略図。[2]

1.1.1 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は、ビーム軸を中心とした円筒形をした高さ 25m、長さ 44m の検出器である。総重量はおよそ 7000 トンである。ALTAS 検出器の構造は図 1.2 のようになっている。 内側から、内部飛跡検出器、ソレノイド電磁石、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、 トロイド電磁石、ミューオン検出器の順番で各検出器が設置されている。



図 1.2: ATLAS 検出器の構造。[3]

1.1.2 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器の構造を図 1.3 に示す。内側からピクセル検出器、SemiConductor Tracker (SCT)、Transition Radiation Tracker (TRT)の順で構成されている。それぞれの配置を図 1.4 に示す。

内部飛跡検出器は、衝突点で発生した荷電粒子の飛跡を検出する。それぞれの検出器から の情報を元に飛跡を再構成することによって、陽子陽子の衝突点や二次生成粒子の崩壊点の 位置を測定することができる。また、外部にはソレノイド磁石があり、磁場で荷電粒子の飛 跡が曲がることから粒子の運動量を測定できる。

以下では本研究の対象を含むピクセル検出器について述べる。



図 1.3: 内部飛跡検出器の構造。[3]



図 1.4: 内部飛跡検出器の配置。[3]

ピクセル検出器

ピクセル検出器は、内部飛跡検出器の最内層に位置するシリコン検出器である。ピクセル 検出器の構造を図1.5 に示す。円筒状のバレル部が3層、ディスク状のエンドキャップ部が3 層で構成されている。

2014年には、図 1.5 で示されている検出器の内部にバレル状のピクセル検出器である Insertable B-Layer (IBL)を新たにインストールした。インストール時の様子を図 1.6 に示す。 既存のピクセル検出器は FE-I3 と呼ばれる Application Specific Integrated Circuit (ASIC)を 使用しており、ピクセルサイズは 50 × 400 μ m² である。IBL は、FE-I3 と比べ放射線耐性、 データ処理速度等に優れた FE-I4 と呼ばれる ASIC を使用しており、ピクセルサイズは 50 × 250 μ m² である。



図 1.5: ピクセル検出器の構造。[3]



図 1.6: IBL のインストールの様子。[4]

IBL

LHCでは、2019年から Run3としてルミノシティが2×10³⁴cm⁻²s⁻¹の陽子陽子衝突が予定されている。既存のピクセル検出器は1×10³⁴cm⁻²s⁻¹のルミノシティに対応するよう作られているため、Run3のルミノシティではセンサーの1チャンネルあたりの占有率が上昇し、荷電粒子の検出効率の低下や、飛跡の再構成を間違える現象が起こる。特に、既存のピクセル検出器の最内層では、衝突事象の増加によってASICのデータ転送帯域が不足する。以上を補うために、IBLは2014年のシャットダウン時に新たにインストールされた。IBLの挿入によりヒット位置の測定点が増えるため、飛跡や崩壊点の位置分解能の向上が期待できる。また、衝突点により近い位置で粒子を検出できるため、陽子陽子衝突点により近いところのvertexの位置の再構成の性能の向上が見込める。これによって、b粒子を含むBメソンやBバリオンが比較的長寿命であることから、b粒子由来の信号の識別の性能の向上が期待できできる。

IBLは、狭い領域にインストールするためビームパイプと一体となっている。図1.7にIBL の挿入の様子と内部の構造を示す。IBLは、冷却方法やDAQなどほとんどの要素で既存の ピクセル検出器とは独立に作られている。

IBL の構造の模式図を図 1.8、図 1.9 に示す。IBL は、ビーム軸に沿って FE-I4 が 32 個配 置されたステーブと呼ばれる構造体 14 台から構成されており、合計 448 個の FE-I4 を持つ。 ピクセル数は合計で約 1.2×10^7 個である。粒子を検出するためのセンサーとしては、プラ ナーセンサー、3D センサーの 2 種類が使われている。ステーブの断面を図 1.10 に示す。衝 突点に近い側から、FE-I4 の信号を読み出すための module flex、センサー、FE-I4、ステー ブという順の構造になっている。FE-I4 の冷却には、CO₂の液体が気体に変わるときの気化 熱を利用する 2 相 CO₂ 冷却を用いている。CO₂ は気化熱が大きいため少ない流量で効率よ く冷却できる。図 1.11 に IBL の冷却システムの全体像を示す。図 1.12 はエンタルピー、圧 力に対する CO₂ の相図である。図 1.11 の数字で示した場所と、図 1.12 内の数字が示す状態 が対応している。図 1.11 中で示した 1、2、3の順番に CO₂ をモジュール付近まで液体で 送り、モジュール付近では 4、5 のように 2 相状態で冷却する。

IBL が覆う領域は、ビーム軸を中心に半径が 33.25mm、また、 η の領域で | η | < 3.0 であ り、ピクセルの覆う領域である | η | < 2.5 よりも広い領域をカバーしている。

IBL はピクセル検出器のうち最も内側にあるため、他のピクセル検出器と比べ 3~10 倍の 放射線量があると見積もられている。



図 1.7: IBL の挿入の様子 (a) と内部の構造の図 (b)。[5]





図 1.8: ピクセル検出器の断面図の一部。最 内層が IBL である。[5]

図 1.9: ピクセル検出器の内部の構造の一部。 [5]



図 1.10: ステーブの断面図。[7]



図 1.11: 冷却システムの全体の模式図。[5]



図 1.12: エンタルピー、圧力に対する CO₂の相図。[5]

1.2 FE-I4

FE-I4 は、300Mrad の放射線損傷に耐えるよう設計された。FE-I4 の主な特徴を表 1.1 にま とめる。130nm CMOS プロセスで作られており、大きさは 20.2 × 19.8mm² である。250 × 50 μ m² の大きさのピクセルセンサーからの信号を読み出すことができ、ピクセルの総数は 80 × 336=26880 個である。荷電粒子がセンサーを通過した際に生成する電荷量は、Time Over Threshold (ToT) として 4bit のデジタル値で記録される。動作クロックの周波数は 40MHz であり、動作に必要な電圧はアナログ回路 1.5V、デジタル回路で 1.2V である。



図 1.13: FE-I4 の図。[8]

| 表 1.1: | FE-I4 | の特徴。 |
|--------|-------|------|
|--------|-------|------|

| 項目 | 值 | 単位 |
|----------|--------------------|-------------------------------|
| チップの大きさ | 20.0×18.6 | mm^2 |
| ピクセルの大きさ | 250×50 | $\mu { m m}^2$ |
| ピクセル数 | 80×336 | ${\rm column}\times{\rm row}$ |
| 放射線耐性 | 300 | Mrad |
| 作動できる温度 | $-40 \sim +60$ | °C |
| 収集電荷分解能 | 4 | bits |
| クロックの周期 | 160 | MHz |
| データ転送速度 | 40 | Mb/s |
| アナログ電圧 | 1.5 | V |
| デジタル電圧 | 1.2 | V |

FE-I4の信号処理回路の全体像を図1.14に示す。センサーからの信号は図中のQinから入り、2段階のアンプによって増幅および整形される。その後、ディスクリミネータによりヒットとして記録するかどうかを判定している。信号処理回路中のMOSトランジスタにかけるバイアス電圧やディスクリミネータの電圧は、後述するglobal registerに書き込む値を変えることで自由に制御できる。

アンプからの出力の模式図を図 1.15 に示す。アンプからの出力波形は三角形に近似でき るため、入力信号の電荷量の大きさは、アンプの出力が閾値を越えた時間に比例する。そ こで、信号が閾値を越えた時間によって入力信号の電荷量を推定する。この値を Time over Threshold (ToT) と呼ぶ。FE-I4 は 40MHz のクロックで動作しており、その一周期分 (25ns) を単位として ToT を数える。この単位を Bunch Crossing (B.C.) と呼ぶ。



図 1.14: FE-I4 の信号処理回路図。[8]



図 1.15: ToT の概念図。波形の違いによって ToT は増減する。

register

FE-I4 は、FE-I4 内のすべてのピクセルに共通の設定値を保持する global register と、FE-I4 の各ピクセルごとの設定値を保持する pixel register の二種類のレジスタを持つ。global register は、FE-I4 の挙動や通信に関する 81 個の設定を保持する。pixel register は、主にア ナログ回路の挙動を決定する値を設定する 13bit のレジスタである。

制御コマンド

FE-I4 へ送るコマンドは、表 1.2 のように"Trigger"、"Fast"、"Slow"の3つに分けられる。 LV1 は 5bit のコマンドになっており、ヒット情報を読み出す際にすべてのピクセルに発行さ れる。LV1 trigger を受け取ったピクセルは、トリガーが発行された時間に対応するヒットの 情報をバッファから送り出すようになっている。

また、BCR、ECR、CALのトリガーコマンドは、9bitの"Fast"コマンドに分類される。 BCR、ECRは保持しているヒットの情報などを初期化するために使われる。CALコマンド は、FE-I4の動作試験や較正のためにテスト電荷を入力するためのコマンドである。コマン ドが発行されると、選択したピクセルに順次信号が入力される。

"Slow"コマンドは主に global register と pixel register を書き換える際に発行されるコマンドである。

表 1.2: コマンドの一覧。[21]

| Name | Field 1 | Field 2 | | |
|--------------|---------|--------------|---------------------|--------------|
| size (bits): | 5 | 4 | Description | Command Type |
| LV1 | 111011 | 9 7 (| Level 1 Trigger | Trigger |
| BCR | 10110 | 0001 | Bunch Counter Reset | Fast |
| ECR | 10110 | 0010 | Event Counter Reset | Fast |
| CAL | 10110 | 0100 | Calibration Pulse | Fast |
| Slow | 10110 | 1000 | Slow command header | Slow |

閾値の較正

入射粒子の検出効率を高め、かつ誤ってノイズを信号として取得しないようにするために は閾値の調整が必要である。そのためには、設定した閾値が物理的にどれだけの電荷量に なっているか知らなければならない。そこでレジスタに書き込んだ値と実際の閾値との間の 較正が必要となる。以下では、閾値の較正の手順について述べる。

まず、図1.14中のC_{inj1}あるいはC_{inj2}から入力した既値の電荷に対するヒットの有無から 検出効率を測定する。入力電荷量を変化させ、その入力電荷の大きさの関数として検出効率 を描くと、その曲線はS字を描くため、S-curveと呼ばれる。その一例を図1.16に示す。得 られた S-curveを誤差関数を用いた式(1.1)でフィッティングし、検出効率が0.5となるとこ ろを閾値として定義する。また、誤差関数の1σをアナログ回路出力のノイズとみなす。



図 1.16: 入射電荷と検出効率の関係の例。

$$f(Qinj) = \frac{1}{2}(1 + Erf(\frac{Qinj - Qth}{\sqrt{2\sigma}})), \ Erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_{x}^{\infty} e^{-t^{2}}dt$$
(1.1)

Qinj は入力した電荷の大きさ、Qth は閾値、σがノイズをそれぞれ示している。

1.3 IBL 検出器の運用上の問題点

2015 年 6 月に開始した Run 2 から IBL の運用を始めた。図 1.17 の通り、ATLAS では、2015 年の合計で $4.2fb^{-1}$ の陽子陽子衝突がおき、物理データとしては $3.2fb^{-1}$ を記録した。IBL における、Run2 での運用上の問題点を以下にまとめる。



図 1.17: ATLAS における 2015 年の積分ルミノシティの推移。[9]

1.3.1 FE-I4の消費電流の変化

図1.18は2015年のIBLのあるモジュールにおける、FE-I4の消費電流値の推移である。電 流値が階段のように上下しているのは、データを取得している時とデータを取得しない時で 消費電流が違うためである。その違い以外では、長期的に見ると電流値が徐々に増加してい ることがわかる。データ収集中に消費電流値が大きく変動すると、発生する熱量が変化し、 モジュールを固定しているステーブの変形が起きる。また、冷却に用いている CO₂ は液体 で運ばれモジュール付近で2相化することで冷却しているが、消費電流が大きく変動し熱量 が変化すると、2相化せず液体あるいは気体のみの状態でモジュールに運ばれる可能性があ る。その場合気化熱で効率よく冷却できなくなり、温度を制御できなくなる。このような問 題に対しては、データ収集を行うたびに検出器の位置の較正を行ったり、 CO₂ の流入量を 調整する等しなければならない。運転期間中にこれらの作業をタイムリーに行っていく事は 難しい。



図 1.18: 2015年のデータ収集時の IBL で使用している FE-I4 の消費電流の推移。[10]

1.3.2 閾値と ToT の変化

図 1.19 と図 1.20 に 2015 年に測定した閾値と、ある一定の入力電荷に対しての ToT の推移を示す。それぞれの点が、一回の測定に対するすべてのピクセルの平均値である。閾値と ToT を目標値に合わせる調整 (3.1 節で説明)をするごとに色を変えてプロットしている。閾値 値、ToT の目標値はそれぞれ 2500[e]、10[B.C.] である。

積分ルミノシティが大きくなるにつれて、閾値は上昇しており、ToT は減少しているのが 見える。閾値とToT が目標値から大きく変動してしまうと、検出効率の低下や、信号とノイ ズの分離が悪くなる可能性がある。また、入射粒子の落とした電荷量を正確に測定できなく なることにより、位置測定の分解能の理解が難しくなる。



図 1.19: 上の図が 2015 年の IBL の閾値の 全モジュールの平均値の推移、下の図が閾 値の全モジュールに対する RMS を示して いる。[11]



図 1.20: 上の図が 2015 年の IBL の ToT の全モジュールの平均値の推移、下の図が ToT の全モジュールに対する RMS を示し ている。[11]

1.4 本研究の目的

2015年の IBL では、積分ルミノシティの増加につれて、FE-I4 の消費電流が増加し、閾値 と ToT の測定値が変動した。本研究の目的の一つは、2016 年の運転時の FE-I4 の消費電流 や閾値、ToT の変動を調べ、今後 IBL が安定して運用していけるのかの見通しを立てること である。

本研究の二つ目の目的は、なぜ閾値と ToT が変化するのかを調べることである。放射線 損傷により FE-I4 の挙動変化を説明する先行研究があるので [12][13]、FE-I4 ヘガンマ線を照 射し、回路内の何が変化するか調査した。

本論文の構成は、以下の通りである。第2章では、本研究の調査対象である半導体検出器の仕組み、またその放射線損傷の影響についての概略を説明する。第3章ではまずIBLの閾値とToTの値の調整の方法を説明し、その後2016年の閾値とToTの測定結果について述べ

る。第4章では、放射線損傷がFE-I4に与える影響について調査した結果について述べる。 第5章ですべての結果について考察を述べ、第6章で結論を述べる。

第2章 ピクセル検出器

この章では、本研究の研究対象であるピクセル検出器の動作原理と放射線による特性変化について述べる。

2.1 ピクセル検出器の動作原理

半導体検出器は、高エネルギー物理学実験において広く用いられている。ATLAS 検出器 では、内部飛跡検出器中のピクセル検出器と SCT がシリコンをセンサーとして用いている。 この章では、半導体検出器の動作原理について述べ、本研究で用いられるピクセル検出器に ついて述べる。

2.1.1 シリコンを用いる半導体検出器の動作原理

一般に多く用いられる半導体検出器は、p型半導体とn型半導体を接合しセンサーとして 用いる。シリコン検出器の場合、p型半導体とn型半導体は、純粋なシリコンに微少量の3 価と5価の元素を混ぜる事によって作られている。この少量の不純物によって、3価の原子 の周りには価電子が不足し正孔が多くなり、5価の原子の周りには価電子が過剰になる。結 果的に、p型半導体とn型半導体はそれぞれ結晶内に正孔と電子が多い状態になる。p型半 導体とn型半導体を接合すると、接合部に近いところでは、過剰になっていた正孔と電子が 結合し、自由電子と正孔が存在しない空乏層が生まれる。空乏層に荷電粒子が入射すると、 シリコンをイオン化するので、生成された電子正孔対を電気信号として検出することによっ て、荷電粒子を検出できる。また、図2.1のようにn型半導体のほうの電位が高くなるよう に電圧をかけると空乏層を広げることができる。センサー全体で荷電粒子を電気信号として 検出するためには、センサー全体を空乏層にする必要がある。



図 2.1: ダイオード型半導体の模式図。

2.1.2 ピクセル検出器

ピクセル状に配置した信号読み出しのための電極を用い、半導体センサーからの信号を各 電極ごとに読み出す検出器をピクセル検出器と呼ぶ。どのピクセルに信号があったかを読み 出すことによって荷電粒子の入射位置を二次元的に測定できる。また多チャンネルにできる ためストリップ検出器と比べて占有率を下げられる。

ATLAS で使用しているピクセル検出器は、センサーと、センサーからの信号読み出し用 ASIC が分かれているので、センサーと ASIC はバンプボンディングという技術で接続する。 その断面図を図 2.2 に示す。このようにピクセルごとにバンプで電極とセンサーを接続して いる。IBL では、バンプとして SnAg を用いている。



図 2.2: ピクセル検出器の断面図。[14]

2.2 ピクセル検出器で使用するセンサー

IBL で使われているピクセル検出器のセンサーには、プラナーセンサーと 3D センサーの 2 種類がある。以下ではその二つのセンサーについて述べる。

2.2.1 プラナーセンサー

ここでは IBL で用いている n⁺-in-n センサーについて説明する。n⁺ 型半導体とは、n 型半 導体と比べて不純物の量が多いものを指す。n⁺-in-n 型の場合、バルクが n 型でインプラン トが n⁺ 型、裏面に使用されているのが p 型である (図 2.3)。空乏層は裏面の p·n 接合部から n⁺ インプラントへ向かって広がる。インプラントが n⁺ 型であるため、電子を信号として収 集する。IBL で使用しているセンサーのバルクの厚さは 200 μ m である。製造元はすべて CiS である。



図 2.3: プラナーセンサーの模式図。[15]

2.2.2 3D センサー

3D センサーは比較的新しい技術で作られたセンサーであり、ATLAS 検出器としては IBL で初めて用いられた。バルク部は p型の半導体で作られており、その中に n⁺型の電極ど、 p⁺ 型の電極が棒状に配置されている (図 2.4、図 2.5)。プラナーセンサーと違って、電極が立体 的に配置されているため 3D センサーと呼ばれる。それぞれの電極間に電位差を作り空乏層 化させるため、構造として電極間の距離が短いことから、全空乏層化電圧を小さくできると いう特徴がある。センサーは製造元によって FBK と CNM に分類され、それぞれ異なった構 造のセンサーである。図 2.4 と図 2.5 で示している通り、電極がバルクを完全に貫いている FBK センサーに対して、CNM センサーはバルクを完全には貫いていない。また、電極間の 分離構造は、FBK センサーでは表面全体に p型半導体を打ち込む p-spray 方式を用い、CNM センサーは電極間に p型半導体を部分的にインプラントする p-stop 方式を用いている。IBL で使用しているセンサーのバルクの厚さは 230 µm である。





図 2.4: FBK 製の 3D センサーの模式図。[16] 図 2.5: CNM 製の 3D センサーの模式図。[16]

ピクセル検出器の放射線損傷 2.3

ピクセル検出器は衝突点に最も近い場所におかれており、他の検出器と比べて放射線損 傷による特性変化が顕著である。以下では、放射線損傷の種類とその影響について述べる。 [12]、[18]、[19]を参考文献とした。

バルク損傷 2.3.1

バルク損傷とは、入射粒子との相互作用によってシリコンセンサーのバルク部の結晶構造 が変化することである。格子欠陥には、散乱されたシリコンの原子核が結晶外に出るショッ トキー変換と、散乱されたシリコンの原子核が結晶内に残るフレンケル欠陥の2種類がある。 n型のバルクの場合、放射線による損傷を受けると散乱された原子核が周囲の電子を捕獲す るため、この原子核が不純物として振る舞い実効的にp型の不純物濃度が増加する。

このように不純物濃度が増加すると、不純物がエネルギーバンド構造に新たな準位をつく り、電子や正孔を捕獲・放出して励起状態になりやすくなるため、漏れ電流が増加する。そ れに伴いショットノイズが生じる。

また、n型半導体がp型半導体に変化していく事によって、n型半導体のバルクがp型半 導体のように振る舞う型変換が起こる。型変換後は放射線損傷が増加するにつれて全空乏化 電圧が増加していく (図 2.6)。

また、バルク損傷によって作られた格子欠陥が入射粒子からの電子正孔対を吸収すること によって、電荷収集量が減少する。



図 2.6: 厚さが 300 µm の n バルクシリコンセンサーの全空乏化電圧と 1 MeV の中性子数に 換算した放射線量との関係。[17]

2.3.2 表面損傷

表面損傷は、センサー表面を覆う誘電体等が受ける放射線損傷の総称である。酸化膜内に 入射した荷電粒子によってイオン化が起こると電子正孔対が生成される。大部分は再結合す るが、電子の移動度は20 cm²/V·s と大きいため一部の電子は電極付近に収集される。一方、 正孔の移動度は2×10⁻⁵ cm²/V·s と小さいため、正孔は酸化膜内部にとどまり続ける。こ の正孔が酸化膜とシリコンの境界に集まると、境界面のシリコン側に負の電荷が誘起され、 本来絶縁されるべき部分の絶縁が劣化する。

表面損傷による MOS トランジスタへの影響

FE-I4には、回路内に数多くの MOS トランジスタが使われている。MOS トランジスタは、 動作の基準となるバイアス電圧に応じて電流が流れるような仕組みになっている。MOS ト ランジスタの模式図を図 2.7 と図 2.8 に示す。トランジスタの周囲は STI と呼ばれる酸化膜 で囲まれているが、前節で述べたように酸化膜は放射線によりイオン化され、その結果正に 帯電する。図 2.8 の黄色になっている部分は、酸化膜内部の正孔によってシリコン内に負の 電荷が誘起されている部分を示している。このように負電荷が誘起されると、本来絶縁され ているはずのソース・ドレイン間に電流が流れやすくなる。この漏れ電流の増加はトランジ スタの特性変化をひきおこす。この特性変化が複雑に絡み合い、結果としてアンプやディス クリミネータなどあらゆる回路の挙動を変化させ得る。

トランジスタがさらに放射線損傷を受けると正孔付近にも電子が捕獲されるようになり、 STIの正孔と電気的に打ち消し合う効果が生まれる。そのため、トランジスタの漏れ電流は 一時的に増加した後徐々に小さくなっていく。



図 2.7: トランジスタの模式図。ゲート (G) に電圧をかけることにより電荷が誘起され、ソース (S) とドレイン (D) 間に電流が流れる仕組みになっている。酸化膜 (STI) によって周囲と 絶縁されている。[12]



図 2.8: 側方から見た図。図 2.7 の点線部の断面に相当する。[12]

第3章 IBLの閾値とToT測定

この章では、まず IBL の閾値および ToT の調整の方法と、測定手順、調整手順について 説明する。その後 2015 年と 2016 年の運転時の閾値、ToT そしてノイズの測定結果を示す。 また、その結果についての考察を行う。

3.1 閾値とToTの調整の方法

第2章では、FE-I4には global register と pixel register の二種類のレジスタがあり、それ ぞれを変更する事によって FE-I4 の挙動を制御できると述べた。閾値や ToT の値を調節す るためのレジスタの値をすべてのピクセルで共通にしても、各ピクセルごとに性質の違いが あるため、実際の閾値や ToT の測定値にはばらつきがある。そのため、実験を行う際には pixel register の値を変更し、全てのピクセルの閾値と ToT を目標値に近づけることが必要 である。閾値を調整するための global register は GDAC と呼ばれ、pixel register は TDAC と呼ばれる。また、ToT の調整のための global register は IFDAC と呼ばれ、pixel register は FDAC と呼ばれる。IBL では、運転中の閾値の目標値は 2500e、ToT の目標値は 10B.C. (2015)、8B.C. (2016) である。

3.1.1 閾値の調整

閾値を調整する際は、まず GDAC の値を動かし、ピクセル全体の閾値の平均値を目標値 に近づける。その後 TDAC の値を動かし、各ピクセルの値を目標値に近づける。

GDAC の調整

GDACの値を動かし目標値に閾値を合わせる際に、すべてのGDAC値で閾値を測定する と、測定の回数が多くなり膨大な時間がかかってしまう。そのため、binary search という手 法を用いて GDAC の値を決定する。まず、5bit の register である GDAC の値を 0~32 まで のうち中央の値である 15 に設定する。その後、すべてのピクセルで閾値を測定しその平均 を求める。測定した閾値の平均が目標値よりも小さい場合、GDAC 値を大きくし閾値を上げ る。また閾値が目標値よりも大きい場合、GDAC 値を小さくし閾値を下げる。この操作を繰 り返すことで測定した閾値を目標値に近づける。この操作の手順を図 3.1 に示す。

GDAC 調整後の典型的な閾値の分布を図 3.2 に示す。分散は数百 e 程度となる。



図 3.1: binary search の手順。[21]



図 3.2: GDAC の調整後の閾値の典型的な分布。横軸が測定した閾値の値で、縦軸はピクセル数である。[22]

TDAC の調整

TDACの調整では、5bitの register である TDAC 値を変化させてピクセルごとに閾値を 目標値に合わせる。GDACの調整の際と同様に、binary search を用いて閾値を決定する。 TDACの値を 0~32 までのうち中央の値である 15 に設定し、目標値と比較し TDAC の値を 変化させる。この操作を全てのピクセルごとにおこなう。

TDAC 調整後の典型的な閾値の分布を図 3.3 に示す。分散は 100e 程度になる。



図 3.3: TDAC の調整後の閾値の典型的な分布。横軸が測定した閾値で、縦軸はピクセル数 である。[22]

3.1.2 ToT の調整

ToT の調整についても、閾値の調整と同様に、まずは global register である IFDAC でピ クセル全体の ToT の平均値を目標値に近づけ、その後 pixel register である FADC の値を調 整することで各ピクセルごとに ToT を目標値に近づけていく。

IFDACの調整

ToT を変化させる IFDAC は PrmpVbpf とも呼ばれ、プリアンプのフィードバック電流を 決める 8bit のレジスタである。入射する電荷量は、センサーを貫通する Minimum Ionizing Particle (MIP) が生成する電荷量の最頻値である 16000e とし、この入射電荷量に対して ToT の目標値を決める。11の異なる PrmpVbpf の設定値で ToT を測定し、その結果を式 (3.1) で フィッティングし、ToT が最も目標値に近くなる PrmpVbpf の値を求める。ToT は、電荷を 50 回入射し測定した ToT の平均値をとる。

IFDAC 調整後の ToT の典型的な結果を図 3.4 に示す。

$$ToT = \frac{a}{PrmpVbpf + b}$$
 a, b は任意の定数 (3.1)



図 3.4: IFDAC 調整後の ToT の典型的な結果。X 軸は IBL の z 方向のモジュールの位置、Y 軸は IBL の φ 方向のモジュールの位置、Z 軸は ToT の平均値である。[22]

FDAC 調整

FDACは4bitで、binary searchを用いて測定を行う。TDAC調整と同様に、まずFDACの初期値を0~15のとりうる値の中央値である7と定め、電荷を入射したときのToTを記録し、目標値と比較しFDACの値を変化させる。

FDAC 調整後の ToT の典型的な結果を図 3.5 に示す。



図 3.5: FDAC 調整後の ToT の典型的な結果。X 軸は IBL の z 方向のモジュールの位置、Y 軸は IBL の φ 方向のモジュールの位置、Z 軸は ToT の平均値である。[22]

3.1.3 測定と調整の手順

IBLでは、閾値とToTを目標値に合わせるために定期的に調整を行っている。また、閾値とToTが変動していないかどうかを確認するため、調整よりも高い頻度で定期的に測定だ

けを行っている。調整の際、十分な時間が取れない場合は GDAC と IFDAC による調整を省 略することがある。

測定の手順としては、まずデジタル回路とアナログ回路にそれぞれ信号を入力し、その応 答が返ってくることを確認する。デジタル回路とアナログ回路からの応答を確認した後、閾 値と ToT の測定を行う。

閾値と ToT の測定をした後、まず閾値の調整を行い、その後 ToT の調整を行う。ToT の 調整をするとアンプのフィードバック電流を変化させることになるので、アンプのゲインが 変動する。このときアンプから出力される波形が変わるため、再度閾値の測定を行うと、先 に調整した時とは違う値が閾値として測定される。そのため、再度閾値の調整をおこなう。 すると、閾値が変わるので今度は ToT が変動する。このため、再度 ToT を調整する。この ように、閾値と ToT の調整はお互いの値に影響を与えるため、それぞれの調整を繰り返し行 う必要がある。IBL の場合、閾値の調整と ToT の調整は、それぞれ合計二回ずつおこなう。

測定の手順

- 1. Digital test FE-I4のデジタル回路にパルスを100回入力し応答を確認する。
- Analog test FE-I4のアナログ回路にパルスを100回入力し応答を確認する。
- Analog ToT
 16000eに相当する電荷をそれぞれのピクセルのアナログ回路に25回入力し、各ピクセルのToTの平均値を求める。
- 4. Threshold scan (short)

入力する電荷の大きさを変えながら、電荷を 50 回それぞれのピクセルに入力し、各ピ クセルごとの閾値を求める。short threshold scan の場合、ピクセルの総数の 1/8 の部 分に電荷を入力する。入力電荷の大きさを決める Vcal の DAC 値は 50 から 300 まで 36 点測定する。

これらの操作をまとめて Monitoring Scan と呼ぶ。

調整の手順

- 1. Monitoring Scan
- 2. GDACの調整
- 3. TDAC の調整
- 4. Threshold scan (short)
- 5. IFDACの調整
- 6. FDACの調整

- 7. TDACの調整
- 8. FDACの調整
- 9. Analog ToT
- Threshold scan(full) short threshold scan とは違い、すべてのピクセルについて閾値の測定を行う。また、 測定する場合の Vcal の config 値は 0 から 300 までの 51 点測定する。その他は short threshold scan と同様である。
- ToT calibration scan 入力する電荷の大きさを変えて ToT の測定を行う。36 点測定する。

3.2 2015年と2016年のの運転中のIBLの振る舞い

図 3.6 に、2015 年と 2016 年の運転中の FE-I4 の消費電流値の推移を示す。図中の点はす べてのモジュールの消費電流値の平均値を示し、緑色の領域はすべてのモジュールにおける 消費電流値の最大値と最小値の広がりを示している。2016 年当初には、消費電流の変動を 抑えるために、-4 ℃から 20 ℃へと温度を上げ、FE-I4 のデジタル回路の電圧値を 1.2V から 1.0V に下げる等の対策を行った。そのため、電流値の変動は 2015 年と比べて小さくなって いる。また、電流値の変動が小さくなったことを受け、温度を 20 ℃から 10 ℃に下げ、デジ タル回路の電圧値を 1.0V から 1.2V へと戻すなど、段階的にもとの状態に近づけるようにし ている。2015 年には、消費電流値が 2.5A 程度まで上昇していたが、2016 年には 1.8A 程度 までしか上昇しておらず、消費電流値の大きな上昇はなかった。

2.3.2節で述べたように、FE-I4内のトランジスタが放射線損傷を受けると漏れ電流が増加 し、アンプやディスクリミネータ等のアナログ回路の挙動が変化する可能性がある。FE-I4 の様々なトランジスタの漏れ電流の増減が消費電流の増減の原因となることから、FE-I4の 消費電流値の変化と閾値とToTの変動には相関がある可能性がある。



Integrated Luminosity in Run 2 [fb⁻¹]

図 3.6: IBL の消費電流の推移。[23]



図 3.7: IBL の消費電流の推移の拡大図。[23]

3.2.1 閾値と ToT とノイズの長期変動

2015年と2016年の閾値、ToT、ノイズのすべてのピクセルにおける平均値の推移を図3.8、 図 3.9、図 3.10 に示す。塗りつぶされた点が2015年の測定点で、中抜きの点が2016年の測 定点である。図中の色は閾値とToTを目標値に調整するごとに変化させている。2015年に は閾値が急速に上昇し、ToT は急速に減少している。2016年の測定では2015年に比べて変
化は穏やかになっているが、2015 年とは逆に、閾値は徐々に減少し、ToT は徐々に増加し ている。また、変化の傾向がかわった時期は閾値、ToT どちらもデータ収集量が 10fb⁻¹ 程 度のところである。それに対して、消費電流の変化の傾向が変わった時期は図 3.7 のように 16fb⁻¹ ごろであり、消費電流と閾値あるいは ToT の間にゆるやかな相関はあるものの、そ の相関は完全ではない。ノイズの値は少しずつ上昇し、2016 年には 20e ほど上昇している。 FE-I4 の仕様ではノイズは 300e 以下となっている [8, p11] が、現在の値は 165e 程度なので、 運用上問題ない。

閾値と ToT の変動の速さを調べるため、閾値あるいは ToT を一度目標値に調節した後、 次の調節をする直前までの複数回の測定値を積分ルミノシティの一次関数でフィットした。 得られた一次関数の傾きを図 3.11 と図 3.12 に示す。図中の各点に付随する横棒はフィットし た範囲を示している。それらの図からわかる通り、閾値と ToT の変動は徐々にゆっくりにな り、その後ほとんど変動しなくなっている。



図 3.8: 2015,2016 年の IBL における閾値の測定値の推移。



図 3.9: 2015,2016 年の IBL における ToT の測定値の推移。



図 3.10: 2015,2016 年の IBL におけるノイズの推移。



図 3.12: ToT の変化の速さ [変化/積分ルミノシティ]。

1

10 Intergrated Luminosity[fb-1]

センサーごとの閾値と ToT とノイズの違い 3.2.2

-3

-4

-5 10⁻¹

図 3.8、図 3.9、図 3.10の結果をセンサーの種類ごとに分けたものを図 3.13、図 3.14、図 3.15 に示す。青い点がプラナーセンサー、赤、緑がそれぞれ CNM、FBK の 3D センサーで の測定結果である。

閾値と ToT については、センサーによる有意な違いは見られなかった。よって、閾値と ToTの変動はセンサーによる効果によるものではない。また、プラナーセンサーと比べて3D センサーのノイズが大きい事がわかった。ノイズの増加量はプラナーセンサーとほぼ同じで あった。最もノイズの高い CNM 製でも 190e 程度であり、FE-I4 の仕様である 300e より十 分小さい。また、2016 年のノイズの増加が一次関数で増えていくと仮定した場合、その傾き はフィットの結果 0.407[[e]/[fb⁻¹]] となり、データ収集量 334fb⁻¹ まで 300e 以下のノイズで運 転できる (図 3.16)。



図 3.13: 2015,2016 年の IBL におけるセンサーの種類ごとの閾値の推移。



図 3.14: 2015,2016 年の IBL におけるセンサーの種類ごとの ToT の推移。



図 3.15: 2015,2016 年の IBL におけるセンサーの種類ごとのノイズの推移。



図 3.16: 2016年のノイズの分布をフィットした図。

3.2.3 ノイズの大きいピクセル数の推移

前節では、ノイズは徐々に増加しているが、運用上は問題が無い程度の上昇であることを 述べた。しかし、仕様である 300e を越えるノイズを持つピクセルもあるので、この節では、 300e 以上のノイズを持つピクセル数を調べた。

図 3.17 は、2015 年と 2016 年のすべてのノイズの測定の結果を重ね書きしたものである。 横軸がノイズの大きさ [e]、縦軸がピクセル数になっている。ほぼすべての測定で大多数のピ クセルはノイズが 300e 以下であるが、300e 以上のノイズを持つピクセルも 0.1% 程度存在す る。そこで、300eを越えるノイズを持つピクセルの割合を調べた。図 3.18 に、全体のピク セル数に対する、ノイズが 300e を越えるピクセル数の割合の推移を示す。色の違いはセン サーの種類の違いを表す。積分ルミノシティが 10fb⁻¹ から 17fb⁻¹ の時に割合が上昇してい るのは温度が 10℃で、デジタル回路の電圧が 1.0V の時期と一致している。17fb⁻¹ 以降は顕 著な変動は無くほぼ一定になっている。そのため、今後も大きな変動は無いと予想する。



図 3.17: 2015,2016 年の IBL における scan ごとのノイズの分布。



図 3.18: 2015 年と 2016 年のデータ収集時の IBL におけるノイズが 300e 以上のピクセル数の 割合の推移。

3.2.4 閾値の位置依存性

IBL では各ステーブごとに冷却を行っているため、ステーブごとに閾値の測定値が変わる 可能性がある。また、特定のモジュールにおいて、FE-I4の何らかの問題により閾値が上昇、 下降している可能性がある。そこで、閾値の推移にモジュールごとの依存性がないかを調べ た。図 3.19 から図 3.24 は 2016 年の測定結果で、閾値の調整直前の閾値の分布を表している。 閾値に z 方向や φ 方向の依存性は見られず、特定のモジュールのみに大きな変動があるとい うことはなかった。



図 3.19: 2016年の1回目の調整直前の閾値の二次元分布。



図 3.20: 2016年の2回目の調整直前の閾値の二次元分布。



図 3.21: 2016 年の3回目の調整直前の閾値の二次元分布。



図 3.22: 2016年の4回目の調整直前の閾値の二次元分布。



図 3.23: 2016年の5回目の調整直前の閾値の二次元分布。



図 3.24: 2016年の6回目の調整直前の閾値の二次元分布。

第4章 ガンマ線照射試験

第3章で見たように、長期間データ収集を続けるとFE-I4の特性が変化し、閾値とToTが 変化することがわかった。しかし、その結果から、回路のどの部分が変化し閾値やToTに影 響を与えているかを知ることは困難である。そのため、センサーのついていないFE-I4にガ ンマ線照射を行い、その変化について調査した。

この章では、ガンマ線照射試験の方法と測定対象、手順、結果について述べる。まず、FE-I4 を動作させるための方法について説明する。

4.1 FE-I4の読み出しシステム

FE-I4 からのデータを PC で取得するため、FE-I4 が搭載された Single Chip Card (SCC) と呼ばれるボードを使用し、さらに Single Chip Card と PC の仲介として SEABAS2 と呼 ばれるデータ収集のための汎用基板を用いた。全体のセットアップを図 4.1 に示す。PC と SEABAS2、SEABAS2 と SCC 間の接続には Ethernet ケーブルを用いる。FE-I4 の挙動を制 御するトリガーやコマンドは、PC からの信号によって SEABAS2 上の FPGA で発行され、 FE-I4 に入力される。また、FE-I4 からのデータは、SEABAS2 上の FPGA で decode され、 TCP 通信で PC に入力される。

以下で、それぞれの基板について説明する。



図 4.1: FE-I4 の読み出しシステムの全体像。

FE-I4 Single Chip Card

Single Chip Card は、FE-I4を搭載した PCB 基板である (図 4.2)。基板と FE-I4 はワイヤ ボンディングで接続されている。このワイヤボンディングを経由して FE-I4 のアナログ部、 デジタル部の電源供給やデータの送受信がなされている。また、FE-I4 は、端にプローブ用 のパッドがついており、回路の状態をモニターすることができる。今回の測定では、アナロ グ回路のバイアス電圧値等を見るため、SCC と FE-I4 のパッドをワイヤボンディングでつな ぎ、SCC 基板経由で読み出せるようにした (青枠部)。また、閾値と ToT の測定の際に用い る図 1.14 中の、今回測定する" Vcal" についても SCC 基板から読み出せるようになっている (赤枠部)。



 \boxtimes 4.2: FE-I4 \succeq single chip card.

SEABAS2

SEABAS2は、KEKで開発されたデータ収集用汎用基板であり、本実験ではFE-I4とPC の通信に使用する (図 4.3)。FE-I4 との通信は daughter board を介して行う。図 4.3 の通り SEABAS2の基板には二つの FPGA が搭載されている。一つには TCP/IP によって PC と通 信するための SiTCP が実装されている。もう一つには、FE-I4 を制御するためのファーム ウェアが実装されている。本実験では、データ収集に関して、J. J. Teoh 氏が開発したもの [21] を元に、廣瀬穣氏が開発したファームウェアとソフトウェア [25] を使用した。



SEABAS2

⊠ 4.3: SEABAS2 \succeq daughter board_o

4.2 放射線損傷による閾値とToTの変動

2.3.2節で、トランジスタは放射線損傷によって特性が変化することを述べた。FE-I4内の アナログ回路の中には多くのトランジスタが使われているため、放射線損傷でトランジスタ の特性が変化することにより内部のバイアス電圧値や消費電流値等が変化する可能性がある。 このようなトランジスタの特性変化により閾値あるいは ToT の測定値が変動する原因は、以 下の3つに分類できる。

- 閾値を決めるコンパレータの参照電圧の変化
- アンプのゲインの変化
- Vcal 出力の変化

上記の内、どれが原因となっているかを特定するため、今回の試験では、アナログ回路の バイアス電圧値、閾値とToTの測定の際の入力電荷の大きさを決めるVcalの値、閾値とToT を定期的にモニターしながらガンマ線を照射した。これらの値が変動するか、もし変動があ る場合どの程度閾値と ToT に影響を与えるかを調査する。

4.2.1 バイアス電圧の種類

図1.14で示した回路の詳細図が図4.4と図4.5である。図4.4がプリアンプ部分、図4.5が二 段目のアンプとディスクリミネータ部分の図を示している。1.2節で述べたように、FE-I4の registerの値を変更することによって、それぞれのトランジスタに印加する電圧を調節できる。 今回の照射では、図4.4、図4.5で示した回路の中のPrmpVbp、PrmpVbpf、PrmpVbnFol、 Amp2Vbpf、Amp2Vbp、Amp2VbpFol、Amp2Vbn、DisVbn、TdacVbp、FdacVbnの電圧 値が照射によって変化するか測定した。

DisVbnは、ディスクリミネータのバイアス電流値を決める DAC である。TdacVbpは、 閾値を決める DAC (図 4.5 中の V_{thGlobal})の値を変更したときに閾値がどれだけ変化するの かを決める DAC である。PrmpVbpf、Amp2Vbpfは、それぞれプリアンプと二段目アンプ のフィードバック電流を制御しており、FdacVbn と共に増幅された信号の波形を変化させ る DAC である。PrmpVbp はプリアンプ本体のバイアス電圧を決める DAC であり、FE-I4 のアナログ回路の消費電流値に影響を与える。Amp2Vbp、Amp2Vbn は、それぞれ二段目 のアンプの PMOS と NMOS のトランジスタにかけるバイアス電圧を決める DAC である。 PrmpVbnFol、Amp2VbpFol はそれぞれプリアンプ、二段目アンプの出力のベースラインを決 める DAC であり、回路がアンプとして適切に動作するような電圧値を供給する役割がある。

これらのバイアス電圧の変化は閾値と ToT に影響を与えるため、今回の実験では、以上の9種類のバイアス電圧を測定した。



図 4.4: プリアンプ周辺の回路図。[8]



図 4.5: 二段目アンプとディスクリミネータの回路図。[8]

4.3 セットアップ

4.3.1 実験施設

大阪大学産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設で 2016 年 11 月 29 日の 10 時 15 分 から 11 時 15 分の間にガンマ線照射を行った。照射に使った線源は円柱形の ⁶⁰Co 線源で、線 源の大きさは 200mmL × 20mm (強度は 167.7TBq (2016 年 10 月 1 日)[24] である。⁶⁰Co は ⁶⁰Ni ヘベータ崩壊し、そののち ⁶⁰Ni がガンマ崩壊して 1.17MeV と 1.33MeV の二つのガンマ 線を放出する。このガンマ線を利用し FE-I4 へ放射線損傷を与える。

4.3.2 配置

照射した際の FE-I4 周辺の様子を図 4.6 に示す。中央に立っている棒は、コバルト線源と 同じ大きさのダミーであり、照射の際はこの図で示されているダミーと同じ場所にコバルト 線源が置かれた。左右に固定されているのは2種類の線量計である。今回の実験では、厚さ 1.5mm のポリメチルメタクリエート線量計 (Radix W) と厚さ 125 µm の三酢酸セルロース フィルム線量計 (FTR-125)を使用した。両方とも吸光度の変化から放射線量を見積もる仕組 みになっており、図 4.6 中の左右のフレームに固定した。線量計と FE-I4 は、床とそれぞれ の中心が 10cm、線源との距離が 5cm となるように配置した。

DisVbn などの今回モニターすべき FE-I4 のアナログ回路内のバイアス電圧値は、受動プ ローブで測定した。受動プローブからの信号は Single Chip Card 経由で BNC ケーブルによっ て照射室外に引き出され、3 台のオシロスコープで測定した。また、取得したオシロスコー プの波形は、南條創氏の開発したソフトウェア [26] を使用し PC に記録した。



図 4.6: FE-I4の配置図。



図 4.7: ポリメチルメタクリエート線量計 (Radix W)。



図 4.8: 三酢酸セルロースフィルム線量計 (FTR-125)。

4.4 結果

4.4.1 線量の評価

前述の通り、放射線量の測定には、Radix W と FTR-125 を用いた。大きさはどちらも幅 10mm×長さ 40mm とし、FTR-125 は、Radix W と同じ厚さになるように 12 枚重ねた。線 量の測定結果を表 4.1 にまとめた。線源に近いものから順に FTR-125 1~FTR-125 12 とし た。その結果、radix W と FTR-125 での放射線量の測定値は、FTR-125 の測定値の RMS を 誤差とする場合、誤差内で一致する。

2015年の IBL の照射量は約 4.3fb⁻¹ ~ 1.21Mrad ([5] [27] からの計算より 1fb⁻¹ あたり 0.282 Mrad) であり、今回の照射量は 2015 年に IBL が受けた放射線量にほぼ等しい。

| 公王,1,从初和全学历史相不。 | | | |
|-----------------|-------------------|--|--|
| 項目 | 線量 [Mrad] | | |
| radix W | 1.24 | | |
| FTR-125 1 | 1.22 | | |
| FTR-125 2 | 1.36 | | |
| FTR-125 3 | 1.29 | | |
| FTR-125 4 | 1.11 | | |
| FTR-125 5 | 1.25 | | |
| FTR-125 6 | 1.34 | | |
| FTR-125 7 | 1.37 | | |
| FTR-125 8 | 1.36 | | |
| FTR-125 9 | 1.35 | | |
| FTR-125 10 | 1.36 | | |
| FTR-125 11 | 1.42 | | |
| FTR-125 12 | 1.17 | | |
| FTR-125 の平均 | $1.30 {\pm} 0.09$ | | |

表 4.1: 放射線量の測定結果。

4.4.2 FE-I4 の消費電流値と閾値および ToT の変動

一時間の照射の結果、FE-I4のアナログ部の消費電流 (VDDA) とデジタル部の消費電流 (VDDD)の両方が変化した。その結果を図 4.9 に示す。2015年のデータ収集中に IBL で見ら れた振るまいと同様に、照射とともに電流値が上昇し、その後徐々に減少している。105分 あたりで急激に電流が下がっているのは照射をやめた時間に対応している。照射をやめると 電流値は時間とともに照射前の値に近づいていく。

また、定期的に測定した閾値、ToT、ノイズの照射中の推移をそれぞれ図 4.10、図 4.11、 図 4.12 に示した。今回の照射では、閾値の測定を 5000e 以下の範囲で行っていたが、その上 限を超えて閾値が上昇してしまったため、閾値を測定できなかったピクセルが数多くあった。 そのため、図 4.10、図 4.11、図 4.12 では閾値を測定することができた 14 個のピクセルにつ いての平均の値をプロットした。

VDDA と VDDD が上昇しているときは閾値も上昇し、VDDA と VDDD の合計の消費電 流値が下降し始める照射開始 70 分後頃から閾値も下降している。この結果から、測定した閾 値は放射線照射によって変動することがわかった。また、ToT については、照射開始後から 測定値が下がり始め、その後、消費電流値が下がり始めるときにさらに減少している。よっ て、IBL での推移の仕方とは異なるが、放射線照射により ToT が変動することがわかった。



図 4.9: FE-I4の回路の電流値の推移。横軸は測定開始からの時間である。



図 4.10: 照射中の閾値の平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。



図 4.11: 照射中の ToT の平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。



図 4.12: 照射中のノイズの平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。

4.4.3 Vcal の変動

FE-I4のアナログ回路試験及び較正のためにテスト電荷を入力するためのVcalは、その出力波高が入力電荷の大きさを決めるため、その変化が閾値とToTに影響を与える。今回の測定では、ガンマ線照射によるVcalの変化を調査した。Vcalの典型的な出力を図4.13に示す。最も高い部分の電圧値 (V_{hi})が、入力電荷の大きさを決める register である plsrDACの設定値に対応している。解析の際は、図4.13 中のTime > 0の領域で、0.1V以上の電圧値の平均を V_{base} と定義した。



図 4.13: 典型的な Vcal の出力。

照射中の V_{hi} の推移を図 4.14 に、 V_{base} の推移を図 4.15 に示す。今回の測定では、閾値の 測定と ToT の測定を交互に行っており、その両方で Vcal を記録している。図 4.14 と図 4.15 では、その両方での記録を描いている。Vcal の設定値は、照射前の V_{hi} が約 11.4V (入力電 荷にして 3000e) になるように決め、照射中レジスタの設定値は変更しなかった。図 4.14 と 図 4.15 からわかるように、 V_{hi} の値は 0.12V 程度から 0.18V 程度まで上昇し、およそ 73~80 分で最大になった後、少しずつ減少している。 V_{base} も同様に変化している。アンプに入力さ れる電荷の大きさは $V_{hi}-V_{base}$ に比例するので、Vcal の変化を評価する際は、 V_{hi} と V_{base} の 差を見るべきである。そこで、 $V_{hi}-V_{base}$ の推移を図 4.16 に示す。閾値の測定時と ToT の測 定時ではベースラインにわずかな違いがあるため、その違いが図 4.16 で顕著に現れている。 ただし、その差は 0.005V 程度である。図 4.10 から、照射前の閾値の測定値は~2000e 程度 で、照射中の 70 分周辺では閾値が~4500e まで上昇している。よって、Vcal の変化のみか ら閾値の変化が起こると考えた場合、 $V_{hi}-V_{base}$ の値は照射前と照射中の 70 分周辺で約 2 倍 強程度になっていなければならない。照射前後での $V_{hi}-V_{base}$ の変化は 1.1 倍程度しかない ので、Vcal の変動だけで照射中の閾値の測定値の変化を説明することはできない。



図 4.14: V_{hi}の平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。



図 4.15: V_{base}の平均値の推移。誤差棒はその RMS を示している。



図 4.16: V_{hi}-V_{base}の値の推移。誤差棒はその RMS を示している。

4.4.4 アナログ回路のバイアス電圧値の変動

FE-I4のアナログ回路のバイアス電圧は、アンプのゲインや閾値の電圧を決めているため、 その変化が閾値とToTに影響を与える。今回の測定では、ガンマ線照射によるアナログ回路 のバイアス電圧の変化を調査した。図4.4と図4.5で示したDisVbnなどのアナログ回路のバ イアス電圧値の変化をそれぞれ図4.17~図4.26に示した。図中の各点はオシロスコープか らの出力波形のすべての点の平均値であり、誤差棒はRMSを示している。PrmpVbpfで測 定値が滑らかに変化せず大きく上下しているのは、閾値の測定時とToTの測定時では設定 値が異なるためである。

PMOSのトランジスタに入力している電圧値 (Vbp) は、照射後に低下し、照射を続けると 徐々に上昇に転じる。NMOSのトランジスタに入力している電圧値 (Vbn) は、Vbp とは逆 で、照射後上昇するがその後下降に転じる。この変化が閾値の測定値にどの程度影響を与え うるのかを次節で評価する。



図 4.17: DisVbn の平均値の推移。誤差棒は その RMS を示している。



図 4.19: TdacVbp の平均値の推移。誤差棒 はその RMS を示している。



図 4.21: PrmpVbpfの平均値の推移。誤差棒 はその RMS を示している。



図 4.18: FdacVbn の平均値の推移。誤差棒 はその RMS を示している。



図 4.20: PrmpVbp の平均値の推移。誤差棒 はその RMS を示している。



図 4.22: PrmpVbnFolの平均値の推移。誤差 棒はその RMS を示している。



図 4.23: Amp2Vbpの平均値の推移。誤差棒 はその RMS を示している。



図 4.25: Amp2VbpFolの平均値の推移。誤 差棒はその RMS を示している。



図 4.24: Amp2Vbn の平均値の推移。誤差棒 はその RMS を示している。



図 4.26: Amp2Vbpffの平均値の推移。誤差 棒はその RMS を示している。

4.4.5 バイアス電圧値の変動が測定閾値や ToT に与える影響

前節で見たように、アナログ回路のバイアス電圧値がガンマ線照射により変化することが わかった。この節では、その変化が閾値や ToT の測定値の変動の原因になりうるかどうかを 評価する。

まずは、DisVbn などの個々のバイアス電圧の測定値の変化が閾値と ToT の測定値にどの 程度影響を与えるのかを確かめる。最初に任意の DAC 設定値を選び、その設定値の時の照射 後のバイアス電圧値を表 4.2 の「 V_{0} 」に示す。表中の値は、オシロスコープから取得した波 高の平均であり、その RMSを誤差とした。次に、参照のために照射中の点として、測定開始 から 53 分経過時の状態を選ぶ。このときのそれぞれのバイアス電圧値が表 4.2 中の「 V_{ref} 」 である。このとき、測定した閾値は 2000e から 4000e まで変化している。この変化の大きさ を個々のバイアス電圧の変化で説明できるのかを調べるため、照射後にバイアス電圧が V_{ref} に近づくような DAC 設定値を探し、その設定のもとで閾値と ToT の測定を行った。ここで は、調査するレジスタ以外は V_0 を与える DAC 設定値を使った。このように、個別にバイ アス電圧を変えて閾値と ToT の測定を行ったときの電圧値が表 4.2 中の「 V_{ind} 」である。狙 い通り V_{ref} と、 V_{ind} はほぼ一致している。TdacVbp については、いかなるレジスタの値を 使っても電圧を調節することができなかったため、測定は行わなかった。

| register 名 | $V_0[V]$ | $V_{ref}[V]$ | $V_{ind}[V]$ |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| PrmpVbpf(閾値測定時) | 1.142 ± 0.008 | 1.126 ± 0.000 | 1.127 ± 0.008 |
| PrmpVbpf(ToT 測定時) | $1.142 {\pm} 0.008$ | $1.188 {\pm} 0.008$ | $1.186{\pm}0.008$ |
| PrmpVbnFol | $0.3136{\pm}0.0078$ | $0.3283 {\pm} 0.0075$ | $0.3267 {\pm} 0.0074$ |
| FdacVbn | $0.4199 {\pm} 0.0076$ | $0.4297 {\pm} 0.0078$ | $0.4293{\pm}0.0077$ |
| AmpVbpff | $0.9194{\pm}0.0076$ | $0.9126 {\pm} 0.0073$ | $0.9138 {\pm} 0.0073$ |
| Amp2Vbp | $1.071 {\pm} 0.0083$ | $1.051 {\pm} 0.007$ | $1.050{\pm}0.0071$ |
| Amp2Vbn | $0.2985{\pm}0.0078$ | $0.3166 {\pm} 0.0077$ | $0.3171 {\pm} 0.0077$ |
| Amp2VbpFol | $1.168 {\pm} 0.0073$ | $1.159 {\pm} 0.006$ | $0.1151 {\pm} 0.0066$ |
| TdacVbp | $1.060{\pm}0.0078$ | $1.046{\pm}0.0074$ | 測定できない |
| DisVbn | $0.5571 {\pm} 0.0116$ | $0.5735 {\pm} 0.0125$ | $0.5735 {\pm} 0.0055$ |
| PrmpVbp | $1.082 {\pm} 0.0053$ | $1.071 {\pm} 0.0052$ | $1.070 {\pm} 0.0052$ |

表 4.2: 今回の照射で用いたバイアス電圧。

閾値および ToT に関して、バイアス電圧が V_0 の時の測定値と V_{ind} のときの測定値との差 を図 4.27 から図 4.44 に示す。横軸はそれぞれ閾値 [e],ToT[B.C.] で、縦軸はピクセル数であ る。バイアス電圧を V_0 から V_{ind} にすることで、測定した閾値の最大の変化は 1000e 程度、 ToT は 0.6B.C. 程度であった。この中で、測定した閾値と ToT に大きな影響を与えるものの 候補として、閾値の差の平均が 100 以上となるバイアス電圧を選ぶ。それに当てはまるもの は PrmpVbpf、FdacVbn、Amp2Vbp、Amp2Vbn、DisVbn の 5 つであった。これらのバイ アス電圧をすべて同時に V_{ind} に合わせることによって、閾値と ToT の測定値がどれくらい 変化するかを次に調べた。



図 4.27: PrmpVbpfをV₀からV_{ind}に変化さ せたときの測定閾値の差。



図 4.28: PrmpVbpfをV₀からV_{ind}に変化さ せたときの測定 ToT の差。



図 4.29: PrmpVbnFolをV₀からV_{ind}に変化 させたときの測定閾値の差。



図 4.30: PrmpVbnFolをV₀からV_{ind}に変化 させたときの測定 ToT の差。



図 4.31: FdacVbn を V₀ から V_{ind} に変化さ せたときの測定閾値の差。



図 4.32: FdacVbn を V₀ から V_{ind} に変化さ せたときの測定 ToT の差。



図 4.33: Amp2Vbpff を V₀ から V_{ind} に変化 させたときの測定閾値の差。



図 4.34: Amp2Vbpff を V₀ から V_{ind} に変化 させたときの測定 ToT の差。



図 4.35: Amp2Vbp を V₀ から V_{ind} に変化さ せたときの測定閾値の差。



図 4.36: Amp2Vbp を V₀ から V_{ind} に変化さ せたときの測定 ToT の差。



図 4.37: Amp2Vbn を V₀ から V_{ind} に変化さ せたときの測定閾値の差。



図 4.38: Amp2Vbn を V₀ から V_{ind} に変化さ せたときの測定 ToT の差。



図 4.39: Amp2VbpFolをV₀からV_{ind}に変化 させたときの測定閾値の差。



図 4.40: Amp2VbpFolをV₀からV_{ind}に変化 させたときの測定 ToT の差。



図 4.41: DisVbn を V₀ から V_{ind} に変化させ たときの測定閾値の差。



図 4.42: DisVbn を V₀ から V_{ind} に変化させ たときの測定 ToT の差。



図 4.43: PrmpVbp を V₀ から V_{ind} に変化さ せたときの測定閾値の差。



図 4.44: PrmpVbp を V₀ から V_{ind} に変化さ せたときの測定 ToT の差。

表 4.3: 今回の照射で用いたバイアス電圧。

| register 名 | $V_{ref}[V]$ | V ₁ (閾値測定時)[V] | V ₂ (ToT 測定時)[V] |
|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| PrmpVbpf | $1.126 \pm 0.000 / 1.188 \pm 0.008$ | 1.126 ± 0.008 | 1.187 ± 0.008 |
| $\operatorname{FdacVbn}$ | $0.4297 {\pm} 0.0078$ | $0.4298{\pm}0.0077$ | $0.4302 {\pm} 0.008$ |
| Amp2Vbp | $1.051 {\pm} 0.007$ | $1.051 {\pm} 0.007$ | $1.051{\pm}0.007$ |
| Amp2Vbn | $0.3166 {\pm} 0.0077$ | $0.3172 {\pm} 0.0077$ | $0.3173 {\pm} 0.008$ |
| DisVbn | $0.5735 {\pm} 0.0125$ | $0.5713 {\pm} 0.0110$ | $0.5715 {\pm} 0.0115$ |

上記5種類のバイアス電圧値が V_{ref} に近づくよう設定したときの測定値 V_1 (閾値測定時) と V_2 (ToT 測定時)を表 4.3 にまとめる。バイアス電圧を V_1 あるいは V_2 に設定した時と V_0 に設定したときの閾値とToT の測定値の差を図 4.45、図 4.46 に示す。

照射の際は閾値が 2000e ほど上昇し、ToT は 2.5B.C. 程減少していたが、この結果では閾値は平均で 876e 程減少し、ToT の変動は照射時の変動の 1/4 程度である 0.655B.C. ほどの減

少であった。よって、今回調べた9種類のバイアス電圧の変化だけで閾値やToTの測定値の 変化を説明する事はできない。

また、 $V_1 \in V_{ref}$ に近づけることができなかった TdacVbp について考慮する。図 4.47 と 4.48 は、閾値と ToT の TdacVbp 依存性を見たものである。TdacVbp の V_0 の値は 1.060V、 V_{ref} の電圧値は 1.046V であるが、仮に TdacVbp のバイアス電圧を 1.046V にできたとする と、図 4.47 から閾値は V_0 のときより低くなり、図 4.48 から ToT は大きくなることがわか る。これは照射時の閾値と ToT の変化の向きとは逆であり、TdacVbp の変動では照射時の 閾値と ToT の変化を説明できない。



図 4.45: バイアス電圧を V₁ に設定したときと V₀ に設定したときの測定閾値の差。



図 4.46: バイアス電圧を V₂ に設定したときと V₀ に設定したときの ToT の差。



図 4.47: TdacVbp を変化させたときの測定 閾値の平均値。誤差棒はその RMS を示して いる。



図 4.48: TdacVbp を変化させたときの ToT の平均値。誤差棒はその RMS を示している。

第5章 考察と今後の課題

この章では研究全体の考察と今後の課題を述べる。

5.1 IBLの閾値とToT 変動の考察

第3章の結果では、2016年には、積分ルミノシティが10fb⁻¹付近でFE-I4の消費電流は 上昇から下降に転じており、積分ルミノシティが16fb⁻¹付近で閾値は上昇から下降に、ToT は下降から上昇に転じた。また、16fb⁻¹以降消費電流はほとんど変動していないのにもかか わらず、閾値とToTの変動は続いている。この理由について考察する。

消費電流はFE-I4 内のいくつものトランジスタの漏れ電流の影響が重なり合って決まって いるが、一方、閾値とToTはアナログ回路の一部のトランジスタのみの影響を受ける。よっ て消費電流の推移と閾値やToTの推移は似た傾向を示すものの、完全には一致しない。ま た、2.3.2節で述べたように、トランジスタの漏れ電流は、放射線損傷を受けると増加し、そ の後減少すると予想できる。ガンマ線照射実験の結果から、図 4.9 のように、確かに FE-I4 の消費電流が放射線損傷を受けるごとに増加し、その後減少している事を確認した。このこ とと、放射線損傷が進むごとに IBL の閾値と ToT の変化が小さくなり増減の変化の向きが 逆転している事から、閾値と ToT の変動に影響を与えているトランジスタは現在漏れ電流 が小さくなる時期に達していると考える。そのため、今後は閾値と ToT の変動は穏やかにな ると予想する。

5.2 ガンマ線照射試験の考察

ガンマ線照射試験の結果、アナログ回路に入力する Vcal とバイアス電圧の変化だけでは 閾値と ToT の測定値の変化を説明できないことがわかった。閾値と ToT 測定値変化の原因 として何が考えられるか、またそれをどう確かめるのかについて述べる。

Vcalの変化が大きくないことがわかったため、原因としては、アンプのゲインの変化、閾 値の変化そのものの2つの可能性が残る。アンプのゲインの変動について考える。今回の照 射結果から、バイアス電圧の変化による影響は少ないということがわかった。しかし、放射 線を受ける事で漏れ電流が変化し、その影響でアンプの特性が変化する可能性がある。アン プのフィードバック電流を決めるトランジスタの漏れ電流が増加すれば、アンプのゲインが 下がるため、測定した閾値は上昇し測定した ToT は下降する。今回照射した FE-I4 の消費電 流は、ほぼ照射前の値に戻っているにもかかわらず、閾値と ToT は照射前の値と違うことか ら、部分的にアナログ回路内の一部のもれ電流が大きくなっており、その影響が閾値と ToT の変化の原因となっている可能性がある。また、閾値の変化については、今回の照射で測定 したアナログ回路内のバイアス電圧がすべて有意に変化したため、閾値の電圧が変化する可 能性はあると考える。しかし、閾値の電圧の変化自体が今回測定したバイアス電圧の変化と 同程度だと仮定すると、実験の結果バイアス電圧の変動は10%程度なので、今回の照射実験 での閾値とToTの変動を説明できるほど、閾値とToTに大きな影響は与えないと予想する。

これらの仮説を確かめるには、FE-I4の An_Out と呼ばれるパッドからアンプの出力波形 と閾値の電圧を直接読み出せばよい。しかし、このパッドはモニター用として FE-I4の端の ピクセルの出力を見る仕様になっているにもかかわらず、FE-I4の config の仕様のバグのた め、電荷を入力するピクセルと An_Out でモニターするピクセルを同じものに設定すること ができない。そのため、現状では An_Out に出力を出せていない。この問題を解消するため に、例えば、FE-I4のセンサーとの接合部分に薄いシートと金属板を接着し、外部の電源と AC 接続することにより擬似的に FE-I4 へ電荷を入力する方法を提案する。

第6章 結論

本研究では、2015 年と 2016 年の IBL の閾値と ToT の変動を調査し、今後 IBL を安定し て運用していけるのかを調べた。その結果、2016 年の閾値と ToT の変動は 2015 年の変動と 比べて小さくなっていることがわかった。また、積分ルミノシティが増加するにつれて、消 費電流は上昇した後下降し、測定した閾値は上昇した後下降し、測定した ToT は下降した 後上昇した。ノイズの多いピクセル数に増加傾向は無く、安定して低い値であることを確認 した。また、閾値と ToT の変化にセンサーの種類の依存性と位置依存性が無いことを示し た。ノイズの増加を一次関数でフィットした結果、2017 年からは 334fb⁻¹ までノイズの平均 が 300e 以下で運転できると見積もった。以上から、データ収集量が 150fb⁻¹ を予定している Run2 では、少なくとも IBL の運用に問題が無いと結論づけた。

また、閾値とToTの変化の原因を調査するためFE-I4 ヘガンマ線照射を行い、閾値とToT 測定時の入射電荷量の大きさとアナログ回路のバイアス電圧の変化を調べた。その結果、入 力電荷量とバイアス電圧の変化だけで閾値とToTの変化を説明できない事がわかった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、山中卓教授には実験に関する様々な知識や考え方のみならず、 研究に対する姿勢や素粒子実験の大変さや面白さを教えていただきました。ありがとうござ います。

指導教官である花垣和則教授には、研究生活の最初から最後にわたって研究の進め方や考 え方について仔細にわたりさまざまな指導をしていただきました。思い返すと、自分の理解 が足りていなかったり、実験の段取りがまずかったり等様々な点でご迷惑をおかけしたよう に思いますが、それでも熱心に指導して頂いたように感じました。心より感謝申し上げます。

また、南條創准教授にはガンマ線照射実験の段取りについて熱心な指導をしていただきま した。また、実験にあたってあらゆる事に備える事、セットアップするにあたってどう考え るべきかについて教えていただきました。大変感謝致します。

また、KEK の海野義信さん、池上陽一さん、中村浩二さんには FE-I4 等のシリコンセン サーについて様々なご指摘を頂きました。また、ITK ミーティングで議論を交わし合う姿を 見て非常に勉強になりました。

KEK の近藤敬比古さん、九州大学の音野瑛俊さんには、SCT の解析についてアドバイス を頂きました。九州大学の織田勧さん、調翔平さんには解析の細かい部分まで非常に丁寧に 教えていただきました。

また、九州大学の東城 順治さんには、ワイヤボンディングの際に段取り等含め様々な点で お世話になりました。

KEK の田窪洋介さんには主にピクセルの解析についての方向性等に関して様々なアドバイスを頂きました。

ATLAS 大阪グループのスタッフである山口洋平さんには、SCT の解析や GRID の登録の 際など諸々お世話になりました。山口さんの話を聞いて ATLAS 実験について興味を持ち、 より深く理解する事が出来ました。

ATLAS 大阪グループの先輩である、矢島和希さん、山内洋子さんには、実験に関するコードの書き方や出張の段取り等様々な事を教えていただきました。JiaJian Teoh さんには、FE-I4 について様々な助言をしていただきました。また、さまざまな質問にも真剣に考えていただきました。遠藤理樹さんには、SCT の解析について、就職後にも関わらず助言を頂きました。また、石島直樹さん、荒井泰貴さん、渡邊誠さんには研究についての様々な助言を頂きました。

総研大の東野聡さんには monitoring tool やその他の検出器のこと、現在の ATLAS の状況 等様々なアドバイスを頂きました。いろいろと御手間をかけさせてしまったように思います が、おかげさまで研究をよりよくすすめることができました。

元 ATLAS 大阪グループの廣瀬穣さんには、FE-I4 の動作について非常に丁寧に教えてい ただきました。 後輩の澤田恭範くん、山元大生くんには、研究について刺激を受け、またたわいない話に つきあってもらったりもしました。

同期の原口弘さん、森哲平くんがいてくれたおかげで、研究生活を楽しく送る事が出来ました。

山中研究室の現旧メンバーである外川学助教授、小寺克茂さん、小野峻さん、佐藤和史さん、村山理恵さん、杉山泰之さん、辻嶺二さん、礒江麻衣さん、宮崎康一さん、西宮隼人くん、佐藤友太くんには、実験グループは違いますが、研究について、またその他のことについて多くの事を学ばせて頂きました。

4年生の大西裕二くん、原宜広くん、真利共生くんが研究に望む姿は大変励みになりました。

秘書の川原希恵さん、藤阪千衣さんには事務手続き等で大変お世話になりました。

ここにすべては書ききれませんが、私の研究を支えてくださったすべての皆様、心から感 謝申し上げます。ありがとうございました。


[1] LuminosityPublicResultsRun2

https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/ LuminosityPublicResultsRun2

- [2] Overall view of lhc experiments. http://cds.cern.ch/record/841555.
- [3] The ATLAS Collaboration, [The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider], JINST 3 S08003 (2008).
- [4] IBL installation into the ATLAS Experiment https://cds.cern.ch/record/2138466?ln=ja
- [5] ATLAS Collaboration, [Insertable B-Layer Technical Design Report.CERN-LHCC-2010-0013],

https://cds.cern.ch/record/1291633/files/ATLAS-TDR-019.pdf

- [6] 新ATLAS ピクセル最内層「IBL」の建設http://www.jahep.org/hepnews/2014/14-2-1-ATLASIBL.pdf
- [7] B. Verlaat et al., [The ATLAS IBL CO2 Cooling System], ATL-INDET-PROC-2016-013(2016).
- [8] FE-I4 Collaboration, [The FE-I4B Integrated Circuit Guide], Version 2.3 (2012). https://indico.cern.ch/event/261840/contributions/1594374/attachments/ 462649/641213/FE-I4B_V2.3.pdf.
- [9] ATLAS collaboration, [Atlas Experiment Public Results],(2015), https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic
- [10] ATLAS collaboration, [Drift of IBL LV current and its consequence in IBL distortion], (ATLAS Public Results 2015), https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/PIX-2015-007/.
- [11] ATLAS collaboration, [2015 IBL Calibration], (ATLAS Public Results 2016), https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/PIX-2016-005/.

- [12] M. Backhaus, [Parametrization of the radiation induced leakage current increase of NMOS transistors],arXiv:1610.01887v1(2016).
- [13] Results from the ATLAS IBL low voltage current task force X-ray irradiation campaigns https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/PIX-2015-008/
- [14] G.Aad et al., [ATLALS pixel detector electronics and sensors], JINST 3 P07007 (2008).
- [15] T.Bergauer, [Lectures on Silicon Detector in High Energy Physics, IPM 1st Detector School], Teheran.
- [16] The ATLAS IBL Collaboration, Prototype ATLAS IBL Modules using the FE-I4A Front-EndReadout Chip, arXiv:1209.1906 [physics.ins-det].
- [17] L. Rossi, P. Fischer, T. Rohe, N. Wermes, Pixel Detectors. Springer, Berlin Heidelberg (2006).
- [18] 山口 大貴,[HL-LHC アトラス検出器アップグレードに向けた新構造プラナーピクセル検 出器の性能評価],東京工業大学修士論文 (2014)
- [19] 荒井 泰貴, [ATLAS 実験アップグレード用ピクセル検出器 の性能評価], 大阪大学修士 論文 (2015)
- [20] IblDetectorCalibrationManual.

https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/IblDetectorCalibrationManual

- [21] Teoh Jia Jian, [Development of SiTCP Based Readout System for The ATLAS Pixel Detector Upgrade], Master thesis, Osaka University (2012).
- [22] M. Kretz on behalf of the ATLAS collaboration, [Performance Evaluation of the ATLAS IBL Calibration], ATL-INDET-PROC-2015-002, (2015).
- [23] ATLAS Collaboration, [Compilation of approved ATLAS pixel detector results], https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/PIX-2016-006.
- [24] 大阪大学産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設.http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/rl/
- [25] SEABAS DAQ Page for ATLAS Pixel Upgrade.

https://svnweb.cern.ch/trac/seabaspixeldaq

[26] OscilloscopeLAN.

http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/nanjo/pukiwiki/index.php?
OscilloscopeLAN

[27] RadiationBackgroundSimulationsPhase0

https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/RadiationBackgroundSimulationsPhase0