

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 18 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800156

研究課題名(和文)高輝度ハドロン加速器実験に用いる初段飛跡トリガーの開発

研究課題名(英文)Development of fast tracking trigger for high luminosity hadron collider

研究代表者

中村 浩二(Nakamura, Koji)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：00554479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：現在運転中および将来建設される高エネルギーハドロン加速器実験は、素粒子物理学実験の発展に非常に重要である。加速器実験の高輝度化に伴い、内部飛跡検出器の改良および大容量のデータを処理するためのエレクトロニクスの開発が必要不可欠である。本研究課題では、大容量のデータ処理に必要な高速エレクトロニクスシステムの開発を目的として、検出器のビーム試験および磁場中での宇宙線テストに用いるエレクトロニクスを開発し、将来の加速器の飛跡トリガーシステム構築の基礎となる研究を行った。

研究成果の概要(英文)：The high energy accelerator hadron colliders which are currently operating or are going to build are necessary experiment for the evolution of elementary particle physics. To make higher luminosity hadron collider, it is necessary to transfer huge data from detectors especially from inner tracking detector which have huge channels. This program aims to develop electronics for such high rate data transfer and fast data processing trigger system for inner tracking detector of future accelerator experiments. Basic electronics of the fast tracking trigger system in future hadron collider are developed.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ATLAS トリガー 飛跡検出器 半導体検出器 ハドロン衝突型加速器 FCC 国際情報交換

### 1. 研究開始当初の背景

近年、高エネルギー・高輝度ハドロン衝突型加速器実験は、電弱相互作用より大きなスケールの物理に対して圧倒的な感度があり、ヒッグス粒子の精密測定および新しい物理の探索に必要不可欠である。しかし、高輝度化に伴う多重衝突頻度の増加が主な原因でトリガー段階での事象選択に高度な技術が要求される。飛跡検出器は多重衝突の背景事象を大きく減らすことを可能とする検出器であるが、チャンネル数が膨大であるため高速読み出しエレクトロニクスの開発、トリガーシステムの開発は極めて挑戦的である。本研究はこれを可能にする半導体検出器を利用したトリガーシステムとそれを入力に用いたパターン適合型の飛跡検出ボードの開発を目的としていた。また、将来のハドロン加速器実験に関する物理ケースの研究や具体的な飛跡検出器のデザインについても本研究の一環として考え、素粒子理論の研究者との会合を持ち理論的背景の動機を固めることも目的としていた。

### 2. 研究の目的

当初の研究背景と比較して大きな変更はないが、高輝度に伴うデータサイズの増加が主な原因で読み出しの高速化が必要不可欠であるという点を重要視する必要があった。この点を加え以下のような研究目的で研究を行った。

(1) ATLAS アップグレード用のピクセル検出器を用いたトリガー取得システムの開発とテスト用トリガーシステムの開発

(2) 5Gbps 程度の高速読み出しを想定したプリント基板の作成と FPGA ボードを用いたビットエラー解析

(3) (1)で開発したトリガーシステムを用いたビーム試験。

(4) 将来のハドロン加速器実験におけるヒッグス自己結合の検出の可能性と観測される新物理モデルの構築。

### 3. 研究の方法

(1)に関しては Virtex 7 FPGA を用いたピクセル検出器のデータ取得システムの開発を行うとともに、磁場中でのピクセル検出



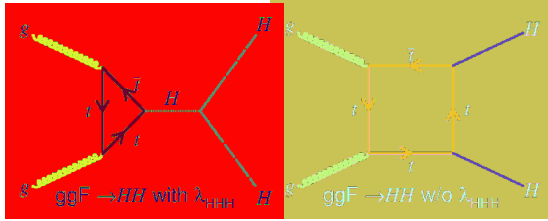
器の動作テストを行った。ATLAS 実験アップグレード用に開発している検出器を用いた性能試験の一環で、宇宙線データを取得するトリガーシステムの開発及び磁場中での性能検査を行った。本実験は、高エネルギー加速器研究機構低温センターの協力のもと 1.6T の磁場出力まで可能な超伝導ソレノイド磁石(下写真)を用いて宇宙線の測定を行った。また、磁場中での半導体検出器は生成した電子正孔ペアが移動する方向が電場の方向からずれる現象(この角度をローレンツ角と呼ぶ)が知られていて飛跡に随伴する信号を読み出したピクセル数の入射角度依存性から、ローレンツ角を測定した。

(2)に関して ATLAS アップグレード用の読み出し ASIC に対応するため、最大 5Gbps の読み出し速度に対応する読み出し基板、DAQ システムの開発が必要であった。汎用の FPGA ボードを用いて高周波信号の伝送試験を実施した。またフレキシブル基板を用いた読み出し回路の設計も行った。信号伝送は sLVDS や LVDS と呼ばれる差動信号で行われ、高速読み出しを低ビットエラー率で行うには差動インピーダンスの整合が取れた基板の設計が必要不可欠である。基板厚、ライン幅、ライン間距離を調節しインピーダンス整合の取れた回路設計を進めた。これらは FPGA 評価ボードを用いたビットエラー率試験 (IBERT) によってアイダイアグラムの確認を行った。

(3)に関して、(1)(2)で開発したトリガーシステムおよびフレキシブル基板を米国フェルミ国立加速器研究所の 120GeV 陽子ビームを用いてビーム試験を行った。下の写真はビームラインに設置した検出器の様子を示す。ビーム頻度は数 kHz 程度であったがトリガーロジックの確認、ノイズの評価、検出効率、位置分解能の測定まで基礎的な性能試験を行うことができた。



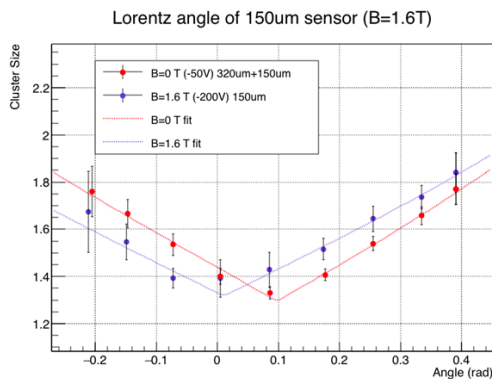
(4)に関して、LHC 実験 Run I データを用いたヒッグス自己結合の解析で観測された  $2.4\sigma$  の超過事象を説明するモデル構築を行った。ヒッグス粒子対が生成する過程はした図の様な主に二種類のファインマン図があり、自己結合を含む過程(左)と含まない過程(右)の干渉により自己結合の大きさを測定することが可能である。LHC Run I



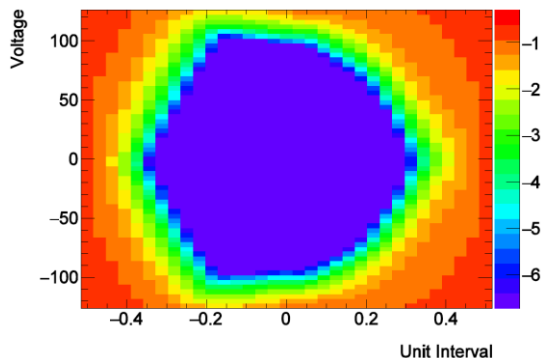
で観測された超過事象は標準理論で予想されるヒッグス対の約 30 倍の生成断面積を持つため新物理の可能性が示唆されている。この超過事象を説明する様々な理論モデルの可能性を素粒子理論の研究者とともに考察した。

#### 4. 研究成果

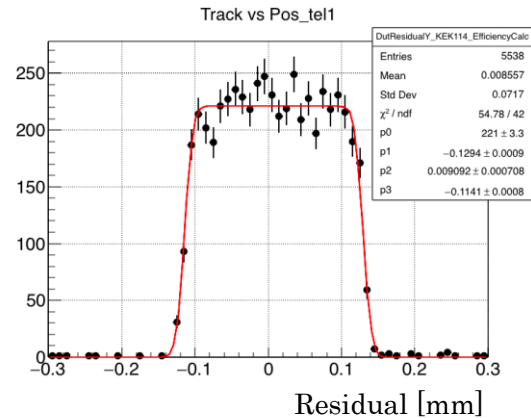
(1) に関しては 10 日ほどのデータ取得を行い 150 $\mu\text{m}$  厚のピクセルセンサーに対してローレンツ角の測定を行った(下図)。クラスターサイズの入射角度依存性を測定することでその最小値がローレンツ角として観測される。磁場無しデータ(赤)に対し、磁場 1.6T の時は  $5.0 \pm 1.7$  度ローレンツ角がシフトしているという結果が得られた。この結果は検出器の誘起電荷を計算したシミュレーション結果と一致している。



(2) に関しては厚みを変えた様々な基板や線パターンを製作し 5Gbps の通信をビットエラー率測定やアイダイアグラムで確認した。1.5mm 厚のプリント基板に作成した差動信号のラインでは 10cm ほどの線パターンにおいても信号の劣化は見られなかった。また、フレキシブル基板についても同様の試験を行ったが、接触不良と考えられる劣化が見られて現在調査中である。今後改善した環境でのテストを考えている。



(3) に関して、2017 年 1 月に米国フェルミ研究所にてテストビームを行った。従来の ATLAS ピクセル検出器に用いられている ASIC と ATLAS 検出器のアップグレードに向けたプロトタイプの ASIC、およびストリップ型検出器をビームラインに設置し、位置分解能の測定、検出効率の測定等を行った。位置分解能に関しては、約 9 $\mu\text{m}$  程度で(下図は飛跡と再構成されたヒット位置の残差分布で、二つの誤差関数でフィットしたもの)、検出効率に関しては 99.5%、新しいプロトタイプの ASIC に関しては全面積を積分した検出効率が 70%程度となり現在原因を調査中である。



(4) に関して将来のハドロン加速器実験へ向けた物理ケースの考察も行った。本研究課題の研究目的の一つに高輝度 LHC やその後計画されている高エネルギー LHC や、将来の円形加速器計画(FCC)へ向けた物理ケースの研究があった。最も重要であると考えるヒッグス粒子の自己結合に関する研究を素粒子理論の研究者とともに遂行した。LHC 実験 Run I で確認された自己結合測定の解析における  $2.4\sigma$  の超過事象(ヒッグスベア生成で片方がボトムクォークペア、もう一方が光子ペアに崩壊する過程)が観測されていたため、今後さらに有意な異常自己結合が観測された際の新しい物理モデルに関する論文を投稿し掲載された。本論文では、トップ・ボトムクォークのパートナモデル、テプトクォークモデル、ダイクォークモデル、カラーオンモデルに関して検証を行い観測された超過事象を説明するパラメータ領域を導出した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① (査読有り) “Di-Higgs enhancement by neutral scalar as probe of new colored sector” Koji Nakamura, Kenji Nishiwaki, Kin-ya Oda, Seong Chan Park, Yasuhiro Yamamoto, Eur. Phys.

J. C (2017) 77: 273.

- ② (査読無し)パリティ 2017 年 1 月号  
Vol.32 No.01 ページ “LHC 実験  
13TeV 衝突の行方” 中村浩二
- ③ (査読有り)Evidence for the  
Higgs-boson Yukawa coupling to tau  
leptons with the ATLAS detector, K.  
Nakamura and ATLAS Collaboration,  
Journal of High Energy Physics  
10.1007 (117) 2015
- ④ (査読有り)Irradiation and Testbeam  
of KEK/HPK Planar p-type Pixel  
Modules for HL-LHC, K. Nakamura  
et. al. Journal of Instrumentation 10  
06 C06008 2015

[学会発表] (計 3 件)

- ① Testbeam results of n<sup>+</sup>-in-p planar  
pixel sensor of quad ASIC pixel and  
high momentum resolution pixel  
detector K. Nakamura, International  
Workshop on Semiconductor Pixel  
Detector for Particles and Imaging  
(PIXEL2016) 5-9 September 2016,  
Sestri Levante, Italy.
- ② Fermion Coupling to Higgs in ATLAS,  
K. Nakamura, Higgs Hunting Aug  
31<sup>st</sup>.Sep 2<sup>nd</sup> 2016, LAL, Olsay, France
- ③ International Workshop on  
Semiconductor Pixel Detectors for  
Particles and Imaging (PIXEL2014)  
“Irradiation and Testbeam of  
KEK/HPK Planar p-type Pixel  
Modules for HL-LHC”, K. Nakamura,  
19<sup>th</sup> April 2014, Niagara Falls,  
Canada

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

<http://atlaspc5.kek.jp/do/view/Main/WebHome>

6. 研究組織

(1)研究代表者

中村 浩二 (Nakamura Koji)

高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所

助教

研究者番号 : 00554479

(2)研究分担者

( )

研究者番号 :

(3)連携研究者

( )

研究者番号 :

(4)研究協力者

( )