

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287046

研究課題名(和文) LHC14TeV運転における新粒子探索のためのミュオントリガー開発

研究課題名(英文) Development on muon trigger logics for discovering new particles at the LHC 14 TeV running

研究代表者

山崎 祐司 (Yamazaki, Yuji)

神戸大学・理学研究科・教授

研究者番号：00311126

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、世界最高エネルギー陽子衝突型加速器LHCでのアトラス国際共同実験において、ミュオンを含む散乱事象を効率良く取得するトリガー装置におけるアルゴリズムを改良し、これまで知られていない新しい物理法則を発見するための感度を上げることを目的とした。2014-17年の研究期間中に、新たに利用できるようになった検出器を用いて加速器の改良に伴い増大する衝突頻度に対処し、トリガー頻度を低減させつつ効率を改善することに成功した。またさらなる加速器改良に対応するための検出器を用いたトリガーアルゴリズムを開発し、十分な性能が得られることが分かった。

研究成果の概要(英文)：This research program aims for developing algorithms for the "trigger", which selects the collision events of interest by finding a muon, at the LHC, the highest energy accelerator in the world. The research improved the muon trigger algorithm in the ATLAS experiment, one of the international collaboration at the LHC. The study is meant to increase sensitivity for the new physics search at the LHC. This study has achieved to keep the trigger rate (the data transfer rate) low enough while maintaining the efficiency for preserving the events of interest through various improvements on the muon trigger algorithm. We also have developed a new trigger algorithm for the upgraded detector to be installed during the accelerator shutdown 2019-2020. We have proven that the algorithm has achieved expected performance for the new running period.

研究分野：素粒子実験

キーワード：陽子・陽子衝突 物理 LHC データ取得装置 ミュオン トリガー アルゴリズム開発 標準模型を超える

### 1. 研究開始当初の背景

本研究は欧州 CERN 研究所の最高エネルギー陽子衝突型加速器 LHC における新粒子発見のためのミュオントリガーの開発である。衝突エネルギーが 2012 年までの運転の 8 TeV から 2015 年度からは 13 TeV に上がること (run2), そこで予定されている積算ルミノシティが  $100\text{fb}^{-1}$  を超えることから新物理の探索範囲が大きく広がる。質量の大きい新粒子が衝突により生成され、それが崩壊する過程で軽い粒子と質量があまり変わらず、運動量の低いミュオンが放出される場合の感度を維持・向上したいが、このようなミュオンはバックグラウンドからのトリガー頻度が高く、その取得が難しい。

このようなミュオンを LHC 上のアトラス実験のミュオントリガーでとらえ事象を取得し続けるには、衝突頻度が上がるにつれトリガー頻度も上がるため、対策が必要である。加えて、2019 年 (当初予定) から開始される LHC run3 ではさらに衝突頻度が上がることから、ミュオントリガー検出器を微細ストリップ構造による検出器 NSW (New Small Whell) にアップグレードし、より高頻度の粒子到来に対応できるものとした。

### 2. 研究の目的

- (1) 2015 年から始まるミュオントリガーのうち高段ソフトウェアトリガー (HLT) を改良し、トリガー頻度を減少させる。
- (2) LHC run3 で NSW を用いたトリガーを開発し、これに備える。このために NSW で用いられる微細ストリップ検出器マイクロメガスを宇宙線ミュオンで試験し、性質を理解し、効率的なアルゴリズムを開発する。

### 3. 研究の方法

- (1) 高段ミュオントリガーの頻度削減のため、精密ミュオンチューブであるドリフトチューブのパターン認識の改良、カロリメーターにミュオンがエネルギーを残すことを利用したトリガーの開発、中央飛跡検出器の飛跡情報を高速で演算し、高段ソフトウェアトリガーがプロセスを開始する前に信号を送る Fast Track Trigger の利用、の 3 つの手法を用いて改良する。
- (2) マイクロメガス検出器を宇宙線でテストするテストベンチを作成する。シンチレーターで宇宙線をトリガーシタイミングを与え、マイクロメガス検出器複数枚で位置分解能を測定する。これをもとに高精度の再構成のアルゴリズムを開発する。

### 4. 研究成果

研究計画当初に予想していなかったこととして以下の 2 点がある。

- (a) FTK 計画の遅れ: 研究期間中の 2017 年度までには FTK の試運転等は行われなかった。このため、当初計画していた FTK 開発は行わず、代わりにトリガー頻度削減として前

方ミュオン検出器 CSC を用いたアルゴリズム開発、およびこれまで利用されていなかった中間層検出器 (Extended Endcap: EE 検出器) を用いた改良を行った。これらの検出器の位置を図 1 に示す。

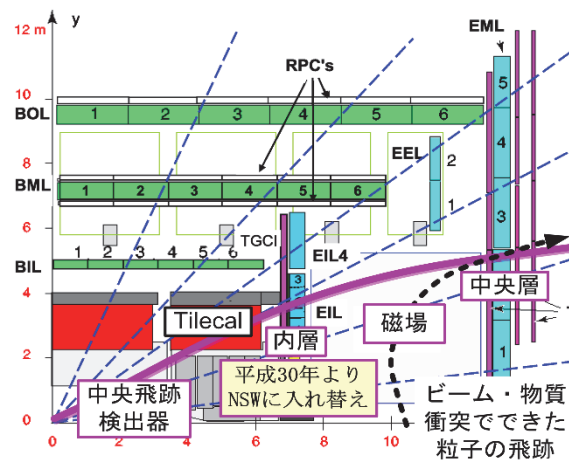


図 1: アトラス実験とミュオン検出器。内層は実際には平成 31 年度、32 年度の加速器シャットダウン中に NSW に入れ替える。

- (b) Run3 およびミュオントリガーアップグレード計画の遅れ: 研究計画当初では NSW 検出器は期間内に完成し、期間終了の 2018 年度から設置作業の予定であった。LHC run2 をルミノシティ蓄積のために 2018 年度 (研究期間終了後) までとしたこと、また NSW の検出器製作が遅れていることから、NSW 検出器のシミュレーションデータが後回しになり、検出器全体ではなくマイクロメガス単体とアップグレード前の検出器の組み合わせのシミュレーションしか用意されなかった。このため、下の(10)に述べる NSW トリガーの開発では、もう一つの NSW 検出器である sTGC を含めた開発はできなかった。

本研究での成果は以下のとおりである。

- (1) ドリフトチューブパターン認識の改良  
ドリフトチューブ (MDT, Monitored Drift Tube) によるミュオンの飛跡検出は、ドリフト距離が長くその間に前後の衝突からのパイルアップが起きやすいことから、衝突からの粒子と関係ないフェイクヒットの影響を受けやすい。また、ミュオンが検出器の要素と散乱し電子を放出する過程 (いわゆるデルタ線) との区別も難しい。このため、ある検出器層 (厚さ 30 センチメートル程度) 内の飛跡 (以下、トラックセグメント) の傾きの算出が実際と大きく異なることが多かった。これを複数の検出器間の傾きの関係などから減らした (学会発表②)。また、飛跡と関係ないヒットをフィット時の  $\chi^2$  から判定して除いた (図 2)。

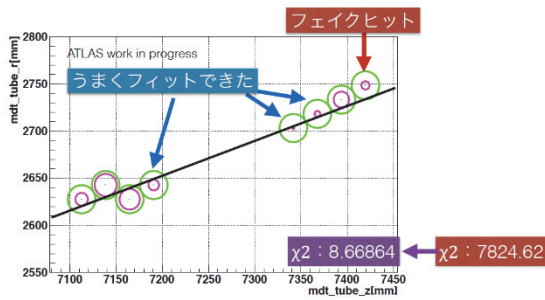


図 2：ドリフトチューブの共通接線からトラックセグメントを求める様子。フェイクヒットを除くとよい  $\chi^2$  が得られる例。

さらに飛跡の地場中での曲率を複数の指標で判定し、その結果を統計的に結合して分解能を向上させた。その結果、トリガーしきい値付近での横運動量に対する立ち上がりがよくなり、また高い運動量での効率が向上した(学会発表⑦, 図 3)。

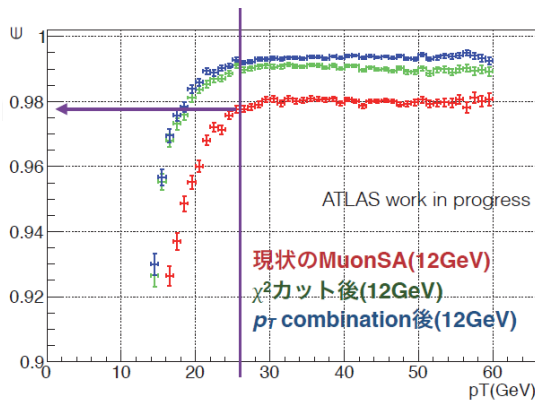


図 3：ミュオントリガーの効率をミュオンの横運動量の関数として示したもの。

(2) TileCal カロリメーターによるミュオントリガー頻度の削減 (学会発表③)

高段ミュオントリガーは初段(レベル1)トリガーで選別されたミュオン候補に対してさらなる選別をするが、特にバレル部とエンドキャップ部の境界(項目(4)の図参照)でミュオンでない粒子が飛跡を残し、運動量の高いミュオンのようにふるまうことがわかっている。このようにいわゆるフェイクミュオンはカロリメーターにエネルギーを落とすのに対し、フェイクはエネルギーが小さい。これを利用してミュオンの純度を上げるアルゴリズムを開発したところ、フェイクミュオンをこの領域で 17% 削減できることが分かった。

(3) run2 データでの運転状況確認とミュオントリガーアルゴリズム中のパラメーターの最適化

Run1 で低い横運動量のミュオンに対する

トリガー効率が低いという問題があり、そのしきい値のチューニングを Run1 実データを用いて行い、それが Run2 で動作することを確かめた(学会発表④)。またミュオンのセグメントの角度情報から横運動量を計算する際のパラメーターを実データで求め、シミュレーションとのずれを吸収して運動量分解能を向上させ、トリガー効率を高めた(学会発表⑤)。その結果、高いトリガー効率で run2 が運転できていることが確かめられた(雑誌論文 ②)。

(4) EE 検出器による再構成精度の向上 (学会発表⑤, ⑥)

前述のようにミュオンの飛跡をある検出器層で計測する際、その向きは再構成はフェイクヒットにより大きく間違えることがある。一方でセグメントの位置はより正しく求まる。このことから、曲率を角度ではなく 3 層のセグメントの位置で算出すると運動量の測定精度が上がる。ここでは run2 で新たに挿入された EE 検出器(図 4)を用いて曲率を求めた。これによりこれまで運動量分解能の非常に悪かったバレル(図 4 の BI, BM, BO 検出器がカバーする領域)・エンドキャップ境界領域の運動量分解能を大幅に改善し、レートを

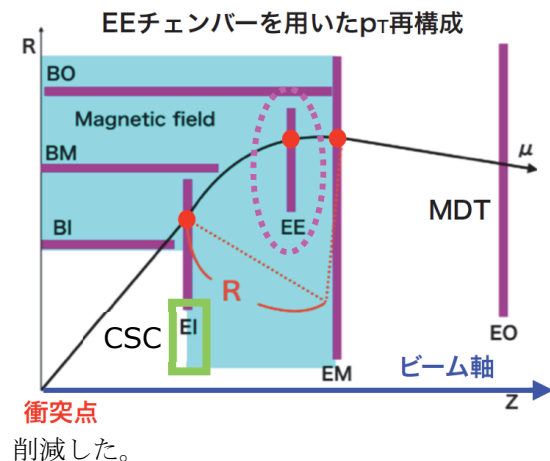


図 4：EE チェンバー, CSC チェンバーの位置と 3 点測定による曲率再構成の概念図。

(5) バレル・エンドキャップ境界領域での効率向上 (学会発表⑩)

バレル領域のミュオンの中には、電荷に応じてエンドキャップ用の検出器(図 4 中の EI)を通るものがある。これまでのアルゴリズムはそれを考慮していなかったため、効率が低下していた。これを改善した。

(6) バレル領域での検出効率向上

アトラス検出器のバレル領域でのミュオントリガー検出効率低下の原因の一つは、精密飛跡検出器である MDT のヒット数が十分でないことによりトラックセグメントが求まらないことである。このときトリガー用飛跡検出器 RPC の情報で補完できないか調べた。そ



の結果, RPC 情報はトリガー用として十分な運動量精度を持ち, 効率を若干向上させることがわかった (学会発表⑦)。

(7) マイクロメガス検出器のミュオン飛跡位置再構成アルゴリズム開発



NSW に用いられるマイクロメガス検出器の最構成アルゴリズム開発のための基礎データを, 左の写真の装置で取得した。このデータを用いて位置測定を行ったと (学会発表⑧)。さらにその後の装置改良 (多重散乱イベントの除去), データ解析改良

(ドリフト速度の影響を検出器に入射する角度の概算で除く) などの細かなソフトウェア改良により, 高運動量のミュオンであれば予想通りの位置測定精度が出ることが分かった。

(8) 前方ミュオン検出器 CSC を用いたトリガー頻度の削減 (学会発表⑨, ⑬)  
CSC 検出器は右図の EI 検出器からビーム軸寄りにあるミュオン検出器で, これまでトリガーに用いられていなかった。第 2 層目 (左図の EM) および CSC のトラックセグメントから衝突点からの飛跡の曲がりを求めた (図 5)。

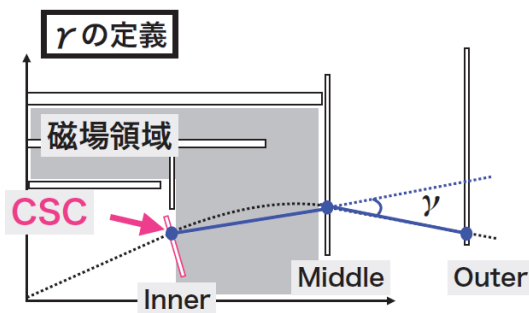


図 5: CSC と 2 層の MDT により曲がり測定する概念図。

これにより, 運動量の精度を劇的に改善した (図 6)。また, CSC にヒットがあることを要求することで, フェイクミュオンをこの角度領域で 65% 削減できることが分かった。これは将来の高段ミュオントリガー, および初段トリガーでも図 4 の EI および CSC を置きかえる NSW を用いることでトリガー頻度を大きく削減できることを示唆する重要

な結果であった。

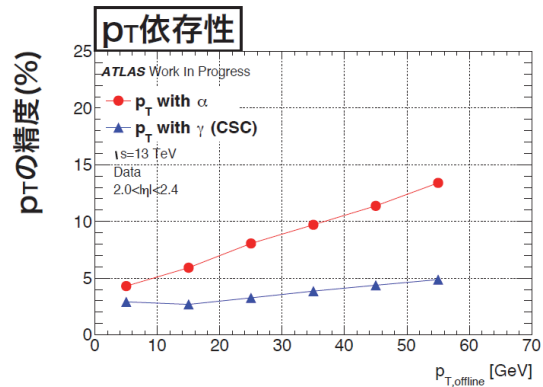


図 6: CSC を用いる前後の再構成精度の比較。

(9) トリガーアルゴリズム開発のためのミュオン検出器におけるフェイクヒット分布の定量的理解 (学会発表⑫)

フェイクヒットは, 前述のようにランダムなパイルアップからの成分, ミュオンからのデルタ線, 加えて散乱のジェットから生成される成分があると考え, これらのうち後者 2 つを定量的に測定し, シミュレーションと比較した。その結果, ジェットはカロリメーターで完全に停止するわけではなくその後方のミュオン検出器に多数のヒットを生成すること, シミュレーションは実際のデータをほぼ再現していることが分かった。ミュオンの一部は重いクォークの崩壊により生成し, ジェットが付随する。このため, ミュオントリガーの開発にはミュオンのみでなくジェットも同時に生成してフェイクヒットを正しく再現する必要があることを示した。

(10) マイクロメガス検出器を用いた高段トリガーアルゴリズムの開発 (学会発表⑭)

(8) で研究したマイクロメガスによるミュオンの通過位置測定を応用し, ミュオン飛跡セグメントを再構成し, ミュオンの横運動量を算定してその性能を MDT による現在の検出器と比較した。マイクロメガスはシミュレーションにより生成した事象を用いた。マイクロメガスによる運動量再構成は分解能は MDT に劣るが, 運動量を大きく間違える, いわゆる分布のテール部分は小さく, トリガー検出器としてよい性能を持っていることを確かめた。さらなるテールの削減が今後の課題である。

(11) 高段ミュオントリガーモニターの開発, データ品質管理 (雑誌論文①, ②)

ミュオントリガーのデータ品質をモニターするプログラムの開発, 維持を行い, run2 におけるデータ取得での問題点を早期に指摘し, データ品質を高く保つことに成功した。結果として高い稼働率でトリガーを運転することにも成功した。

以上のように、この研究ではアトラス実験のミュオントリガーアルゴリズムについて、次の2点を実際のデータで明らかにし、run3でトリガーを改良する準備を整えた。

A) ミュオン検出器のフェイクヒットを削減するには、できるだけたくさんの検出器とのコインシデンスが有効であるが、特にミュオンの位置測定を3点用意し、曲がり測定することが有用であった(上記結果(4),(5),(8))。一方トラックセグメントの向きをMDT検出器で求めると、フェイクヒットの影響が大きく運動量を大きく間違える場合が多いことが分かった(上記結果(1))。

B) NSWのマイクロメガス検出器は、調べた限りではトラックの向きも間違えにくい。これはドリフトチューブにおいて共通接線を探するときの不定性がないからである。これによりrun3で性能のいいトリガーが構築できることを示した。

## 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2件)

① G. Aad, 石塚正基, 長野邦浩, 越智敦彦, 山崎祐司, 他 ATLAS Collaboration, “Performance of the ATLAS muon trigger in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV, European Physical Journal C, 75(2015)120-151 (査読あり)

② M. Aaboud, 石塚正基, 長野邦浩, 越智敦彦, 山崎祐司, 他 ATLAS Collaboration, “Performance of the ATLAS trigger system in 2015”, European Physical Journal C (2017) 317 (53 ページ)

[学会発表] (計14件)

① 山崎祐司, 「Status of ATLAS and LHC」, 第1回 ATLAS+BelleII 研究会 (招待講演), 2014年11月25日, 東京大学理学研究科小柴ホール

② 陳叶, 「ATLAS 実験におけるハイレベルミュオントリガーの飛跡再構成の改良と性能評価」, 日本物理学会年次大会, 2015年3月23日, 早稲田大学早稲田キャンパス

③ 細川 健人, 「LHC-ATLAS 実験におけるハドロンカロリメーターのミュオントリガーへの応用」 2015年9月27日, 日本物理学会 2015年秋季大会, 大阪市立大学

④ 西原 佑, 「LHC-ATLAS 実験 Run2 データを用いた HLT ミュオントリガーの横運動量しきい値の最適化」, 2015年9月27日, 日本物理学会 2015年秋季大会, 大阪市立大学

⑤ 田中雅大, 「LHC-ATLAS 実験レベル2 ミュオントリガーシステムにおける飛跡再構成アルゴリズムの改良と Run2 データを用いた性能評価」, 2015年9月27日, 日本物理学会 2015年秋季大会, 大阪市立大学

⑥ 田中雅大, 「LHC-ATLAS 実験 Run2 データを用いたハイレベルミュオントリガーにおける横運動量再構成方法の改良」, 2016年3月19日, 日本物理学会 2016年年会, 東北学院大学

⑦ 陳叶, 「LHC-ATLAS 実験のハイレベルトリガーにおける前方ミュオンの飛跡フィットの改良」, 2016年3月22日, 日本物理学会 2016年年会, 東北学院大学

⑧ 斎藤大起, 「宇宙線を用いた MicroMEGAS の位置分解能の抵抗膜構造による依存性の測定」, 2016年9月21日, 日本物理学会 2016年秋季大会, 宮崎大学

⑨ 野口陽平, 「LHC-ATLAS 実験ハイレベルトリガーにおけるフォワード部でのミュオンの飛跡再構成法の改良」, 2016年9月21日, 日本物理学会 2016年秋季大会, 宮崎大学

⑩ 本田卓也, 「LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるハイレベルミュオントリガーのヒットパターン選択の最適化と性能評価」, 2016年9月21日, 日本物理学会 2016年秋季大会, 宮崎大学

⑪ 矢沢友貴孝, 「LHC-ATLAS 実験 Run-2 ハイレベルトリガーにおけるフォワード部でのミュオンの飛跡再構成法の改良」, 2017年3月18日, 日本物理学会年次大会, 大阪大学

⑫ 若宮光太郎, 「LHC-ATLAS 実験におけるミュオン検出器でのフェイクヒットの成因研究」, 2017年3月20日, 日本物理学会年次大会, 大阪大学

⑬ 野口陽平, 「LHC-ATLAS 実験 Run-2 ハイレベルトリガーにおけるフォワード部でのミュオンの飛跡再構成法の改良」, 2017年3月20日, 日本物理学会年次大会, 大阪大学

⑭ 若宮光太郎, 「LHC-ATLAS 実験のミュオン検出器アップグレードに対応したハイレベルトリガーの開発」, 2018年2月20日, 第24回東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウム, 白馬

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山崎 祐司 (YAMAZAKI, Yuji)  
神戸大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 00311126

### (2) 連携研究者

長野 邦浩 (NAGANO, Kunihiro)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授  
研究者番号: 90391705  
石塚 正基 (ISHITSUKA, Masaki)  
東京理科大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 40533196  
越智 敦彦 (OCHI, Atsuhiko)  
神戸大学・理学研究科・准教授  
研究者番号: 40335419