

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2011～2015

課題番号：23104005

研究課題名（和文）トップクォークを用いた新しい素粒子現象の探索

研究課題名（英文）Search for the new particles using the top-quark productions and decays

研究代表者

戸本 誠（TOMOTO, Makoto）

名古屋大学・理学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：80432235

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 99,300,000 円

研究成果の概要（和文）：CERNのLHC-ATLAS実験の陽子陽子衝突データを用いて、トップクォーク対生成の総断面積と微分断面積を高精度で測定した。トップクォークの崩壊によるW粒子の偏極度を測定し、トップクォークの崩壊が標準模型のV-A型相互作用によるものと無矛盾であった。以上から、LHCが達成した13TeVの陽子陽子衝突によるトップクォーク対生成に至るまで、摂動QCDが有効理論として機能していることを示した。また、高輝度化するLHC実験に向け、高速飛跡再構成トリガーのATLAS検出器への導入を成功させた。

研究成果の概要（英文）：We measured the total and differential cross-sections of the top-quark pair production precisely, using proton-proton collision of LHC-ATLAS experiment at CERN. We also measured the polarization of the W boson from the top-quark decays and found that our measurements are consistent with the V-A weak interaction predicted by the standard model of the particle physics. From these results, we concluded that the perturbative QCD can explain top-quark pair production up to 13TeV energy scale achieved by LHC. The fast tracking trigger for higher intensity LHC has been successfully introduced into the ATLAS detector.

研究分野：素粒子実験

キーワード：トップクォーク 湯川結合 飛跡トリガー LHC-ATLAS実験 エネルギーフロンティア 国際共同実験
CERN

1. 研究開始当初の背景

(1) 欧州 CERN の LHC 実験における研究は、ヒッグス粒子やテラスケール領域の新たな素粒子の直接発見を目指すと同時に、多量に生成される既知の素粒子の崩壊様式の中に現れる新粒子現象の探索にも挑戦する。LHC は年間 40 万(平成 23 年度)~8000 万(平成 27 年度)の t クォーク対事象生成能力(図 1)を誇る。世界最大の t クォーク工場実験で作られる t クォークの生成・崩壊によって、「直接的」に新しい素粒子を探索するとともに、生成断面積や崩壊分岐比、質量やスピンに代表される t クォークの固有な物理量の精密測定から「間接的」に新しい素粒子現象を発見することができるようになった。

(2) 高エネルギー化、高輝度化が進む高エネルギー加速器実験において、更なる t クォーク研究へと展開させるため、膨大な背景事象の中から t クォーク事象を効率良く選択するトリガー系の開発が急務となる。最新の CMOS-VLSI 技術を駆使した高速プロセッサや大容量メモリを搭載した高速飛跡再構成トリガー(FTK)回路は、数 10 μ 秒内に陽子・陽子衝突による全荷電粒子の飛跡再構成をハードウェア的に実現する。FTK 回路から共有される飛跡の生成点情報によって、t クォーク事象の特徴的な信号である b トリガー、つまり、t クォーク事象選別が可能となる。

2. 研究の目的

(1) t クォーク対生成事象を緻密に研究し、高エネルギー領域における摂動 QCD モデルの有効性を探るとともに、標準模型からのズレの可能性を検証する。素粒子の「質量起源」や「世代構造」の解明に挑み、「真空構造」の理解へと繋げる。

- ① t クォーク対生成断面積を世界最高精度で測定する。
- ② t クォークの生成・崩壊の際に現れる粒子の運動量、方位角度、不変質量、電荷分布などの力学的物理量を詳細に測定し、t クォークの相互作用、結合などの観点から新粒子を探索する。新粒子が t クォーク生成・崩壊関与しているのであれば、その固有性をも明らかにする。
- ③ ttH 過程から t クォークとヒッグス粒子の湯川結合定数を測定する。

(2) FTK 回路の R&D 研究を推進する。本研究では、光ファイバを通して 40MHz の転送速度で送信されるシリコン検出器からのヒット情報を受信し、そのヒット情報をクラスタ化する Input Mezzanine (IM) ボードと呼ばれる回路の開発を行う。FTK トリガーのシミュレーションの構築や FTK トリガーの導入に伴う ATLAS トリガーシステムの改良研究を行い、b トリガー、つまり、t クォーク事象選別の可能性を模索する。

3. 研究の方法

(1) LHC-ATLAS 実験は、2010 年から 2015 年までに重心系エネルギー 7TeV (2010 年、2011 年)、8TeV (2012 年)、13TeV (2015 年)の陽子陽子衝突実験を行い、合計で約 30fb⁻¹ の積分ルミノシティのデータを蓄積した。本研究は、これらのデータを用いる。

t クォークの終状態は、t → Wb の W 粒子の崩壊様式 (μ 粒子か電子とニュートリノ、τ 粒子と τ ニュートリノ、または、クォーク対) で特徴付けられ、2 荷電レプトン (両方の t クォークが電子または μ 粒子に崩壊する)、荷電レプトン+ジェット (片方の t クォークは μ 粒子または電子に崩壊し、もう一方の t クォークはハドロンに崩壊する)、全ジェット (両方の t クォークがハドロンに崩壊する)、τ 粒子崩壊 (どちらか片方の t クォークがタウ粒子に崩壊する) の 4 種類に分類される。t クォークに関する物理解析では、様々な終状態を用いて測定を行い、新物理の間接的な兆候をさぐる。

(2) FTK 回路の R&D 開発は、早稲田大学を中心に推進する。そのためのテストスタンドを早稲田大学に構築し、イタリアなどとの国際共同のもと FTK 回路の開発を行なう。

4. 研究成果

(1) t クォークの精密測定では、研究目的に記した①から③に対応して、以下の研究成果を出した。

- ① t クォーク対生成断面積の精密測定では、7TeV の陽子陽子衝突データを用いて、t クォーク対事象の終状態のうち、2 レプトン事象、τ_{had}-レプトン事象、全ハドロン事象に対する世界最高精度の測定を主導した(図 1)。どの終状態を用いた断面積測定においても一致した結果を得た。荷電ヒッグス粒子に感度がある τ_{had}-レプトン事象でも新物理の兆候は得られなかった。

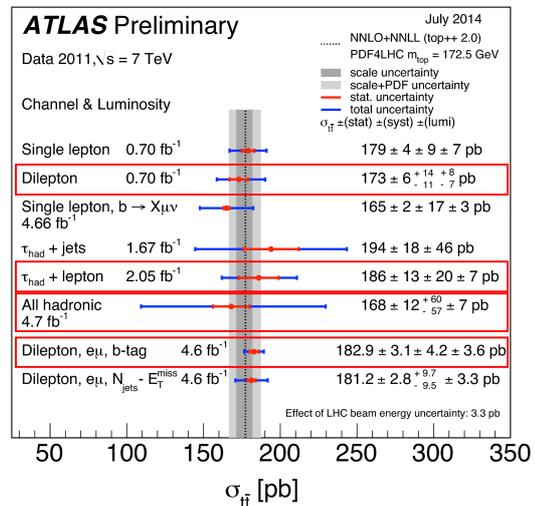


図 1: 様々な終状態を用いて測定した重心系エネルギー 7TeV の時の t クォーク対生成断面積の測定結果のまとめ。赤枠で示される結果は、特に本研究が主導して導出した結果である。

8TeV と 13TeV の陽子陽子衝突実験では、最も測定精度のよい 2 レプトン事象に集中して、t クォーク対生成断面積を測定した。その結果、Tevatron 実験で測定した 2TeV の陽子反陽子衝突による t クォーク対生成から、本研究から出された 7TeV、8TeV、13TeV の陽子陽子衝突による t クォーク対生成に至るまで、摂動 QCD が有効理論として正しく働いていることを示した (図 2)。

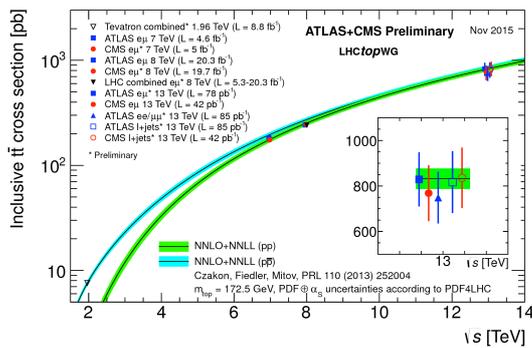


図 2: 重心系エネルギーの関数とする t クォーク対生成断面積の測定結果。

- ② t → Wb 崩壊の W 粒子の偏極度測定では、t クォークから崩壊した荷電レプトンと b クォークの角度差を通じて、W 粒子の 3 種類の偏極度 (F_L , F_0 , F_R) を測定した。この結果から、V-A 型の弱い相互作用によって t クォークが崩壊する時の偏極度である $F_0 = 0.687 \pm 0.005$, $F_R = 0.0017 \pm 0.0001$ ($F_L = 1 - F_0 - F_R$) と無矛盾であることを示した (図 3)。

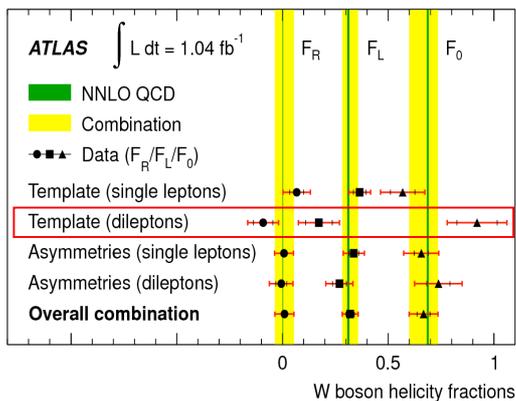


図 3: W 粒子偏極度測定のまとめ。本研究は、赤枠で示される 2 レプトン事象による測定を主導した。

- ③ LHC 実験による多量の t クォーク対生成事象数のおかげで、包含的 t クォーク対生成断面積測定の実験的精度は理論の予言能力を上回り始めた。そこで、t クォーク対の普遍質量や運動量、ラピディティを関数とする t クォーク対生成微分断面積の測定や、t クォーク対に随伴して生成される粒子の種別ごとに終状態を分類する tt+X (X は、光子、W 粒子、Z 粒子、ジェットなど)断面積の測定などのより詳

細な測定へと t クォーク物理を発展させている。

また、他の計画研究との連携を強化して④から⑥に示される研究成果を得た。

- ④ ヒッグス粒子の発見がされ、計画研究 A01 と連携して、ヒッグス粒子の t クォークとの随伴生成過程 (ttH 過程) の生成断面積の測定を開始した。これにより、将来の LHC 実験において最重要課題の一つとなるヒッグス粒子と t クォークとの間の湯川結合の直接測定をこれから日本グループが主導することができる。
- ⑤ トップクォーク対生成事象の再構成は、W 粒子と b クォークの再構成が不可欠である。計画研究 A03 との共同研究によって、良質のトップクォーク対生成事象を取得した。
- ⑥ トップクォーク対生成事象は、ヒッグス粒子の測定や新物理探索における主なバックグラウンドとなる。例えば、ヒッグス粒子の発見の中で重要な終状態の一つであった $pp \rightarrow H+2 \text{ jets} \rightarrow WW+2 \text{ jets} \rightarrow l\nu l\nu+2 \text{ jets}$ 過程 (l は電子または μ 粒子) の主な背景事象数の導出を本計画研究が行い、計画研究 A01 のヒッグス粒子発見に貢献した。同様に、計画研究 A02 の超対称性粒子や余剰次元粒子の探索においても、t クォークによる背景事象数の導出に本計画研究が大きく貢献した。

(2) FTK トリガーでは、IM 回路系の設計、プロトタイプ回路の製作、ATCA 規格で実装されるマザーボードとの接続テストを早稲田大学が行った。さらに、FTK の回路要素を開発する世界中の大学・研究機関が CERN に集結して全回路要素を繋ぎ合わせる FTK 回路の統合テストを実施し、早稲田大学が開発する回路が量産要請を満たしていることを確認した。これらの成果によって、80 台の IM ボードの量産を開始し、本計画研究によって構築したテストスタンドを用いて、量産中に起きた諸問題のフィードバックを行い、量産を完遂することができた。一方で、シミュレーションの構築や FTK 導入による ATLAS トリガーシステムの改良研究など、ハードウェア・ソフトウェア双方で実質的な成果を上げることができた。



図 4: 本研究で製作した最終版の IM ボード。

また、KEKの長野は、 μ 粒子、電子・光子、ジェットを主とする LHC-ATLAS 実験の全トリガーを統括し、興味ある物理事象の検出効率を高く保ったまま、トリガーレートを低く維持するアルゴリズムの開発を行った。その結果、 t クォーク対生成事象の取得に用いる μ 粒子トリガーや電子トリガーの運動量閾値を 25GeV 程度の低い値に保ち続けることに成功している。長野は LHC-ATLAS 実験の全トリガーの統括者として活躍している。

将来のハドロンコライダーにおいてトリガーは特に重要な開発要素であり、本計画研究によって FTK 回路を構築し、現在の LHC 実験のルミノシティにて耐えられるトリガーを構築した。計画研究 A01、A03、A06 などの研究と合わせて、将来の実験の主要な実験開発要素をカバーすることができた。

最後に、本研究が進める世界最前線の研究を通じて、若手研究者の育成に貢献した。本研究で貢献した若手研究者の多くが国内外の大学・研究機関で別の職を得て異動している。また、名古屋大学、大阪大学、早稲田大学、総研大などから、 t クォークの解析や FTK を主題として博士(理学)を取得し、国内外の大学・研究機関で研究者として活躍している。

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計 20 件)

(注) "The ATLAS collaboration"の著者は、およそ三千名の国際共同研究者がアルファベット順で並んでおり、著者順に意味を持たない。その著者に中には本研究の代表者、分担者、連携研究者全員がアルファベット順に含まれている。ここでは、本研究の貢献度が特に高いもののみを掲載している。

- [1] "Measurement of the differential cross section of highly boosted top quarks as a function of their transverse momentum in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collision using the ATLAS detector", The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 93 (2016) 32009
- [2] "Development of a sub-nanosecond time-to-digital converter based on a field-programmable gate array", Y. Sano, M. Tomoto, Y. Horii, O. Sasaki, et.al, JINST 11 (2016) C03053
- [3] "Design of a hardware track finder (Fast Tracker) for the ATLAS trigger", V. Cavaliere, K. Yorita, et al., JINST 11 (2015) C02056
- [4] "Measurement of the top pair production cross section in 8 TeV proton-proton collision using

- kinematic information in the lepton + jets final state with ATLAS", The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 91 (2015) 112013
- [5] "Measurement of the top-quark mass in the fully hadronic decay channel from ATLAS data at $\sqrt{s}=7$ TeV", The ATLAS collaboration, Eur. Phys. J. C (2015) 75:158
- [6] "Performance of the ATLAS muon trigger in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV", The ATLAS collaboration, Eur. Phys. J. C (2015) 75:120
- [7] "Measurement of the tt production cross-section using $e\mu$ events with b-tagged jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS detector", The ATLAS collaboration, Eur. Phys. J. C 74 (2014) 3109
- [8] "Measurement of normalized differential cross sections for tt production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector", The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 90 (2014) 072004
- [9] "A study of heavy flavor quarks produced in association with top quark pairs at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector", The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 89 (2014) 072012
- [10] "Measurements of top quark pair relative differential cross-sections with ATLAS in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", The ATLAS collaboration, Eur. Phys. J. C 73 (2013) 2261
- [11] "Search for tt resonances in the lepton plus jets final state with ATLAS using 4.7 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 88 (2013) 012004
- [12] "Measurement of top quark polarization in top-antitop events from proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector", The ATLAS collaboration, Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 232002
- [13] "A fast hardware tracker for the ATLAS trigger system", N. Kimura, K. Yorita, et al., Nucl. Instr. Meth. A 731 (2013) 224-228
- [14] "A fast hardware tracker for the ATLAS trigger system", J. Anderson, K. Yorita, et al., Nucl. Instr. Meth. A 718 (2013) 258-259
- [15] "Measurement of W boson polarization in top quark decays with the ATLAS detector", The ATLAS collaboration, J. High Energy Phys. 1206 (2012) 088

- [16] “Measurement of the top quark pair cross section with ATLAS in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using final states with an electron or a muon and a hadronically decaying tau lepton”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 717 (2012) 89-108
- [17] “Measurement of the cross section for top-quark pair production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector using final states with two high-pT leptons”, The ATLAS collaboration, J. High Energy Phys. 1205 (2012) 059
- [18] “Measurement of the top quark pair production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in dilepton final states with ATLAS”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 707 (2012) 459-477
- [19] “FTK: a Fast Track Trigger for ATLAS”, J. Anderson, K. Yorita, et al., JINST 7 (2012) C10002
- [20] “The FastTracker real time processor and its impact on muon isolation, tau and b-jet online selections at ATLAS”, A. Andreazza, K. Yorita, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 59 (2012) 348-357
- [学会発表] (計 32 件)
- [1] 長野邦浩, ATLAS results on Jet-related physics with V+jets, LHCP 2015, 2015 年 8 月 31 日, St. Petersburg, Russia
- [2] 飯澤知弥, Fast Tracker (FTK), A Hardware Track Finder for the ATLAS Trigger, MOCASST Conference 2015, 2015 年 5 月 14 日, Thessaloniki, Greece
- [3] 三谷貴志, FTK Input Mezzanine and Data Formatter for the Fast Tracker at ATLAS, MOCASST Conference 2015, 2015 年 5 月 14 日, Thessaloniki, Greece
- [4] 猪飼孝, Performance of the ATLAS tau Trigger in Run-II, LHCC2016, 2016 年 3 月 2 日, Geneva, Switzerland
- [5] 壺田浩平, ATLAS 実験 Run1 の成果, 2015 年 3 月, 早稲田大学 (東京)
- [6] 戸本誠, アップグレード全体像, 新学術領域研究会テラスケール物理研究会 2015, 2015 年 12 月 21 日, 東京工業大学 (東京)
- [7] 堀井泰之, Phase II ミューオン, 新学術領域研究会テラスケール物理研究会 2015, 2015 年 12 月 21 日, 東京工業大学 (東京)
- [8] 川出健太郎, Top quark 13TeV 最新成果, 新学術領域研究会テラスケール物理研究会 2015, 2015 年 12 月 21 日, 東京工業大学 (東京)
- [9] 堀井泰之, Triggering Challenge, 2014 年 9 月 19 日, 日本物理学会シンポジウム, 佐賀大学 (佐賀)
- [10] 戸本誠, Top quark Summary & Perspective, テラスケール 2014, 大阪大学 (大阪)
- [11] 堀井泰之, ATLAS 実験におけるレベル 1 ミューオン -Phase 2 へ向けて, テラスケール 2014, 大阪大学 (大阪)
- [12] 桜井雄基, Search for the Higgs boson in fermionic channels using the ATLAS detector, PHENO2014, 2014 年 5 月 5 日, ピッツバーグ
- [13] 木村直樹, A Highly Parallel FPGA Implementation of a 2D-Clustering Algorithm for the ATLAS Fast TRacKer (FTK) Processor, 19th IEEE Real-Time conference, 2014 年 5 月 26 日, 奈良
- [14] 桜井雄基, The ATLAS Tau Trigger performance during Run I and prospects for Run2, LHCP2014, 2014 年 6 月 2 日, ニューヨーク(米国)
- [15] 飯澤知弥, ATLAS FTK: Fast Track Trigger, Vertex2014, 2014 年 9 月 15 日, プラハ (チェコ)
- [16] 壺田浩平, LHC/ATLAS アップグレード, 2013 年 3 月, 広島大学 (シンポジウム講演)
- [17] 戸本誠, LHC 8TeV 実験の成果, 日本物理学会シンポジウム, 2013 年 9 月 21 日, 高知大学 (高知)
- [18] 戸本誠, Measurement of the Higgs boson properties with the ATLAS detector, New Trends in High Energy Physics, 2013 年 9 月 25 日, Crimea, Ukraine
- [19] 戸本誠, Results of LHC-ATLAS 8TeV Run, KMI International Symposium 2013, 2013 年 12 月 11 日, 名古屋大学 (愛知)
- [20] 壺田浩平, LHC の最新結果と今後, LHC-ILC workshop, 2013 年 7 月 10 日, 早稲田大学 (東京)
- [21] 木村直樹, Fast Tracker : A Hardware Real Time Track Finder for the ATLAS Trigger System, IPRD13, 2013 年 10 月 9 日, シエナ (イタリア)
- [22] 壺田浩平, Search for other Higgs at Run2, テラスケール研究会, 2014 年 3 月 25 日, 東京大学(東京)
- [23] 長谷川慧, Search for anomalous top quark production and decay, 24th Rencontres de Blois Particle Physics and Cosmology, 2012 年 5 月 28 日, ブロア (フランス)
- [24] 高橋悠太, Top quark production at ATLAS, PLHC2012, 2012 年 6 月 5 日, バンクーバー (カナダ)

- [25] 青木雅人, Top Quark Production at the LHC, Moriond QCD 2013, 2013年3月9日, LaThuile, Italy
- [26] 飯澤知弥, Fast Tracker Performance Using the New Variable Resolution Associative Memory for ATLAS, IEEE-NSS2012, 2012年10月29日, Anaheim, USA
- [27] 木村直樹, A Fast Tracker for the ATLAS trigger system, PIXEL 2012, 2012年9月3日, 猪苗代 (福島)
- [28] 木村直樹, Top Quark Production at ATLAS, 16th International Conference in Quantum Chromo Dynamics, 2012年7月2日, Montpellier, France
- [29] 青木雅人, Top&SM の精密測定, 日本物理学会企画講演, 2013年3月25日, 広島大学(広島)
- [30] 奥村恭幸, Top cross section measurement at ATLAS, XIX International Workshop on Deep Inelastic Scattering and Related Subjects, 2011年4月14日, Newport News, USA
- [31] 奥村恭幸, Achievements of LHC-ATLAS, KEK Theory meeting on Particle Physics Phenomenology, 2012年2月27日, KEK (茨城)
- [32] 戸本誠, Top quark and Higgs boson physics at LHC-ATLAS, KMI Inauguration Conference on Quest for the Origin of Particle and the Universe, 2011年10月25日, 名古屋大学 (愛知)

[図書] (計1件)

戸本誠、花垣和則、山崎祐司、丸善出版、ヒッグス粒子の見つけ方 質量の起源を追う、2012年、136

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0件)
- 取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/terascale/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

戸本 誠 (TOMOTO, Makoto)
名古屋大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：80432235

(2) 研究分担者

寄田浩平 (YORITA, Kohei)
早稲田大学・理工学術院・准教授
研究者番号：60530590

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

(3) 連携研究者

長坂康史 (NAGASAKA, Yasushi)
広島工業大学・情報学部・教授
研究者番号：20299655

下島真 (SHIMOJIMA, Makoto)
長崎総合科学大学・情報学部・教授
研究者番号：80302347