

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：14501

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：23104004

研究課題名(和文)素粒子標準模型の精密検証で探るテラスケール物理現象

研究課題名(英文)Reserach on particle physics in TeV scale by using precise measurements of Standrad Model

研究代表者

藏重 久弥(Kurashige, Hisaya)

神戸大学・自然科学系先端融合研究環・教授

研究者番号：20205181

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 181,600,000円

研究成果の概要(和文)：本計画研究では、LHC加速器での陽子・陽子衝突実験による重心系7TeV/8TeVで約27fb⁻¹、13TeVで約4fb⁻¹のデータを用いて標準模型を高い精度で検証した。2ボゾン生成断面積測定を約10%の精度で行い、標準模型にない異常3点ゲージ結合カップリングに関して、以前の結果より1桁以上小さい上限値を得た。ジェット生成反応の断面積測定を行い、QCDの計算結果との比較によって、陽子内のパートン分布函数決定につなげた。また、次世代実験のためのミュオン検出器開発については、LHCアップグレードで計画されているATLASミュオン・スモール・ウィールでのMicromegas検出器開発を行った。

研究成果の概要(英文)：We have performed precise measurements on various Standard Model processes in proton-proton collision by using ATLAS detector at LHC accelerator (27fb⁻¹ at 7/8 TeV and 4fb⁻¹ at 13TeV). Cross-section for di-boson productions has been measured with about 10% precision and found to be consistent with theoretical predictions. Therefore, we could get 10 times lower upper limits for strength on anomalous triple gauge couplings. In addition, we have measured cross-section of jet production processes and could obtain parton distribution function in proton by using these results. As for the developments of muon detectors for future collider experiments, we have studied MicroMegas detectors of 'Small-Wheel' for ATLAS upgrade projects.

研究分野：高エネルギー物理学

キーワード：素粒子実験 粒子加速器 陽子・陽子衝突

1. 研究開始当初の背景

(1) 素粒子標準模型は、過去 30 年間の加速器実験により、高い精度で検証されてきた。しかし、模型の重要なキーとなるヒッグス粒子が発見されていなかった。さらに、テラスケール(TeV のエネルギースケール)において、標準模型を超えた新しい素粒子現象の存在が大いに期待されていた。

(2) 2010 年 3 月より大型陽子・陽子衝突型加速器(LHC)は重心系 7TeV での実験を開始した。LHC によって実現する世界最高エネルギーの陽子・陽子衝突からは、高いエネルギーのジェット及び W、Z 粒子等の重い粒子が数多く生成され、テラスケールの素粒子物理反応の研究が可能になった。

2. 研究の目的

(1) アトラス検出器を用い、高統計のデータで測定することによって、未踏のエネルギー領域における標準模型の精密検証を行う。本計画研究及びヒッグス(A01)、トップクォーク(A04)に関する計画研究による結果を合わせることで、標準模型の破れを明らかにし、標準模型を超えた新現象の発見を目指す。これら W/Z を伴うジェット事象、特にボトムクォークの生成事象は、超対称性粒子をはじめとした新粒子直接探査時の背景事象となるため、この研究の結果は新粒子発見の感度を向上に必須である。

(2) 次世代素粒子実験では高いルミノシティ環境での高精度測定が行なわれる。ミュオンは、透過性が高いレプトンであり、膨大な背景事象からの効率的な選別が可能で、精密測定の鍵となる。そこで、新しい技術を応用したミュオン検出器、およびフロントエンド・エレクトロニクスを含めた高度なミュオン・トリガーの技術的開発研究を行い、次世代実験への応用へと繋げる。

3. 研究の方法

(1) 質量が重く、LHC のエネルギー領域では直接生成できない粒子でも、測定結果と理論予想のズレから 10TeV 付近までの範囲で新現象を間接的に探索できる。間接探索と直接探索(A02)の結果を統合することで、新粒子・新現象を多角的に研究する。特にミュオンへの崩壊チャンネルをもちいて、W/Z 粒子の生成断面積、異常 3 点ゲージ結合の測定を行う。

(2) 標準模型の検証を可能にするには、陽子内部のパートン分布(PDF)が重要となる。HERA 実験等から数%の精度で PDF が分かっているが、高いエネルギー領域での不定性は大きく、高運動量ジェット生成、W/Z 粒子生成等高い Q^2 領域の素粒子反応から PDF の決定精度を向上させる。

(3) 将来の高ルミノシティ LHC 実験のために、マイクロパターンガスチェンバー等の新しい検出器技術を応用したミュオン検出器の開発研究を行う。同時に、読出エレクト

ロニクスの開発・実用化のための研究を進める。

4. 研究成果

(1) LHC 加速器は陽子・陽子衝突実験を順調に行い、重心系 7TeV/8TeV で約 27fb⁻¹、重心系 13TeV で約 4fb⁻¹ の積分ルミノシティのデータを取得した。本計画研究では、このデータを用いて、標準模型を高い精度で検証し、以下のような研究成果を得た。

W/Z および WW, WZ, ZZ, 2 光子生成断面積測定を約 10% の精度で行い、理論予想値と矛盾しない結果を得た。これらの測定結果から、異常 3 点ゲージ結合カップリングとして、Tevatron/LEP の測定より 1 桁以上小さい上限値を得た。

b-tagging の改良により、高 Pt を持つ Z 粒子の b 崩壊過程や、 B_c^+ 稀崩壊過程の測定を行った。

ジェット生成反応の断面積測定を行い、QCD Next Leading Order プロセスの計算結果との比較によって、PDF 決定につなげた。低 Pt ジェット生成反応の解析も並行して行い、'Underlying event' の性質について明らかにした。

(2) ミュオン検出器開発については、LHC フェーズ 1・アップグレードで計画されている ATLAS ミュオン・スモール・ウィールでの Micromegas 検出器開発を中心に行った。

Micromegas 検出器の電極の構造・製造方法の開発を行い、アノードに高抵抗電極を用いることで、中性子による大きな電離損失に起因する放電を大幅に押さえられることがわかり、プロトタイプ製作を行った。

スモール・ウィール検出器を用いたトリガーのための、トリガーアルゴリズム及びトリガープロセッサの開発を行った。

LHC フェーズ 2・アップグレードで計画されている高ルミノシティ運転におけるミュオン・トリガーの為に、ドリフトチューブを用いたアルゴリズムについて検討を行い、トリガーレートを削減できることを明らかにした。また、そのための高精度 TDC など放射線耐性をもつフロントエンド・エレクトロニクスを開発を行った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 22 件)

[1] "Measurement of the ZZ Production Cross Section in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector."; G Aad, [H. Kurashige](#) et al. (ATLAS Collaboration) Phys. Rev. Lett. **116** (2016) 10181,

DOI:10.1103/PhysRevLett.116.061102

[2] "Measurement of four-jet differential

- cross sections in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions using the ATLAS detector.”; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al.(ATLAS Collaboration) JHEP **12** (2015) 105, DOI : 10.1007/JHEP12(2015)105
- [3] “Study of the $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ and $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ decays with the ATLAS detector.”; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al.(ATLAS Collaboration) Eur. Phys. J. **C76** (2016) 4, DOI:10.1140/epjc/s10052-015-3743-8
- [4] “Measurement of colour flow with the jet pull angle in tt events using the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV.”; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al.(ATLAS Collaboration) Phys. Lett. **B750** (2015) 475-493, doi:10.1016/j.physletb.2015.09.051
- [5] “Evidence of $W\gamma\gamma$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV and limits on anomalous quartic gauge couplings with the ATLAS detector.”; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al. (ATLAS Collaboration) Phys. Rev. Lett. **115** (2015) 031802, DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.031802
- [6] “Measurement of three-jet production cross-sections in pp collisions at 7 TeV centre-of-mass energy using the ATLAS detector.”; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al. (ATLAS Collaboration) Eur. Phys. J. **C75** (2015) 228, DOI: 10.1140/epjc/s10052-015-3363-3
- [7] “Measurement of the $WW+WZ$ cross section and limits on anomalous triple gauge couplings using final states with one lepton, missing energy, and two jets with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV.” ; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al. (ATLAS Collaboration) JHEP **01** (2015) 049, DOI: 10.1007/JHEP01(2015)049
- [8] “Measurements of the W production cross sections in association with jets with the ATLAS detector.” ; G Aad et al. (ATLAS Collaboration) Eur. Phys. J. **C75** (2015) 82, DOI: 10.1140/epjc/s10052-015-3262-7
- [9] “A measurement of the ratio of the production cross sections for W and Z bosons in association with jets with the ATLAS detector.” ; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al. (ATLAS Collaboration) Eur. Phys. J. **C74** (2014) 3168, DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-3168-9
- [10] “Evidence of electroweak production of $WWjj$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector.”; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al. (ATLAS Collaboration) Phys. Rev. Lett. **113** (2014) 141803, DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.141803
- [11] “ Measurement of the cross section of high transverse momentum $Z \rightarrow bb$ production in proton– proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector.” ; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al. (ATLAS Collaboration) Phys. Lett. **B738** (2014) 25-43, DOI: 10.1016/j.physletb.2014.09.020
- [12] “Measurement of the $4l$ Cross Section at the Z Resonance and Determination of the Branching Fraction of $Z \rightarrow 4l$ in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with ATLAS.” ; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al. (ATLAS Collaboration) Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 231806, DOI:

- 10.1103/PhysRevLett.112. 231806
- [13] “Measurement of the underlying event in jet events from 7 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector.” ; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al. (ATLAS Collaboration) Eur. Phys. J. **C74** (2014) 2965, DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-2965-5
- [14] “Measurement of the electroweak production of dijets in association with a Z-boson and distributions sensitive to vector boson fusion in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector.” ; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al. (ATLAS Collaboration) JHEP **04** (2014) 031, DOI: 10.1007/ JHEP04(2014)031
- [15] “Measurement of dijet cross sections in pp collisions at 7 TeV centre-of-mass energy using the ATLAS detector.”; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al. (ATLAS Collaboration) JHEP **05** (2014) 059, DOI: 10.1007/ JHEP05(2014)059
- [16] “Measurement of the cross-section for W boson production in association with b-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector.”; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al. (ATLAS Collaboration) JHEP **06** (2013) 084, DOI: 10.1007/ JHEP06(2013)084
- [17] “Measurement of ZZ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV and limits on anomalous ZZZ and ZZ γ couplings with the ATLAS detector.”; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al. (ATLAS Collaboration) JHEP **03** (2013) 128, DOI: 10.1007/ JHEP03(2013)128
- [18] “Measurement of the production cross section of jets in association with a Z boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector.” ; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al. (ATLAS Collaboration) JHEP **07** (2013) 032, DOI: 10.1007/ JHEP07(2013)032
- [19] “Measurement of the inclusive jet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV and comparison to the inclusive jet cross section at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector.”; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al. (ATLAS Collaboration) Eur. Phys. J. **C73** (2013) 2509, DOI: 10.1140/epjc/s10052-013-2509-4
- [20] “Measurement of W γ and Z γ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV and limits on anomalous triple gauge couplings with the ATLAS detector.” ; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al.(ATLAS Collaboration) Phys. Lett. **B717** (2012) 49-69, doi:10.1016/j.physletb.2012.09.017
- [21] “Measurement of the WW cross section in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at ATLAS and limits on anomalous gauge couplings.”; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al.(ATLAS Collaboration) Phys. Lett. **B712** (2012) 289-308, doi:10.1016/j.physletb.2012.05.003
- [22] “Measurement of the polarisation of W bosons produced at large momentum transfer in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment at the LHC.”; G Aad, [H.Kurashhige](#) et al.(ATLAS Collaboration) Eur. Phys. J. **C72** (2012) 2001, DOI: 10.1140/epjc/s10052-012-2001-6

〔学会発表〕(計 15 件)

- [1] 前田順平, 「 ATLAS実験状況」, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月21日, 東北学院大学 (宮城県, 仙台市)
- [2] 山口洋平, 「標準模型とヒッグス」, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月21日, 東北学院大学 (宮城県, 仙台市)
- [3] 岸本巴, “Higgs boson interactions with the gauge sector”, Higgs Coupling 2015, 2015年10月12日, Durham(英国)
- [4] 清水志真, “First Standard Model Results at 13TeV, ATLAS”, Brookhaven Forum, 2015年10月8日, Upton (米国)
- [5] 袁麗, “What we have learned about the Higgs boson from the bosonic decay channels and more inclusive combinations of data”, EPS-HEP 2015, European Physical Society Conference on High Energy Physics, 2015年7月24日, ウィーン (オーストリア)
- [6] 山口洋平, “Latest results on Higgs final-states with photons in ATLAS”, PHOTON 2015, 2015年6月15日, BINP, ノボシビルスク (ロシア)
- [7] 山崎祐司, “Overview of recent ATLAS results and preparation for Run-2”, 韓国物理学会韓日合同セッション, 2015年4月23日, 大田, 大韓民国
- [8] 藏重久弥, “Highlight of Results from ATLAS at LHC” (招待講演), 26th International Conference on Nuclear Tracks in Solids, 2014年9月15日 神戸大学(兵庫県, 神戸市)
- [9] 清水志真, “Latest results on multi-jets production, and beyond-DGLAP (BFKL, saturation) studies with jets”, Jet vetoes and multiplicity observables, 2014年7月17日, Durham (英国)
- [10] 花垣和則, “Search for the Higgs boson in fermionic channels using the ATLAS

detector”, PASCOS2013, 19th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology, 2013年11月21日, 台北 (台湾)

- [11] 清水志真, “Experimental Jets and Photon results”, ATLAS Standard Model Workshop, 2013年9月21日, ボストン (米国)
- [12] 袁麗, “Recent electroweak measurements at the LHC”, Rencontres du Vietnam: windows on the universe 2013, 2013年8月14日, Quy Nhon (ベトナム)
- [13] 清水志真, “Measurement of the flavour composition of dijet events in pp collisions with ATLAS”, XXI. International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS 2013), 2013年4月24日, マルセイユ (フランス)
- [14] 袁麗, “QCD di-photon cross-section measurement and $H \rightarrow \gamma \gamma$ analysis with 2010 data in ATLAS”, 6th workshop of the France China Particle Physics Laboratory, 2013年3月27日, 南京大学(中国)
- [15] 松下崇, “Onia production at ATLAS”, PLHC2012, Physics at LHC 2012, 2012年6月7日, バンクーバー (カナダ)

〔図書〕(計 2 件)

- [1] 山崎祐司, 戸本誠, 花垣和則, 「ヒッグス粒子のを見つけ方; 質量の起源を追う」, 丸善, 2012, ISBN 978462108617
- [2] “Micropattern detector conference goes east”, Atsuhiko Ochi., CERN Courier, March 2012, 27-29

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

主催シンポジウム, 講演会

- [1] 一般公開講演会「LHC 実験にて新粒子(ヒッグス粒子?)発見」, 神戸大学百年記念館, 2012年9月22日, (出席者約200名)
- [2] 一般公開講演会「LHC 実験にて新粒子(ヒッグス粒子?)発見」, 大阪大学中之島センター, 2012年8月26日, (出席者約100名)
- [3] 一般向け解説会「LHC 実験にて新粒子(ヒッグス粒子?)発見」, 大阪大学豊中キャンパス理学部D棟D501, 2012年7月21日(出席者約200名, ニコニコ生放送による中継あり)
- [4] 特別講演会「LHCにおけるヒッグス粒子探索-素粒子標準模型と質量の起源-」, 神戸大学理学研究科, 2012年7月13日(出席者約120名)
- [5] “Workshop on LHC Physics”, KUBEC(Bruxelles, Belgique), 8-9 Sep. 2012, (出席者20名)

新聞記事

- [1] 朝日新聞, 2015年12月17日
- [2] 東京新聞, 2015年8月10日
- [3] 朝日新聞, 2015年6月11日
- [4] しんぶん赤旗, 2015年6月5日
- [5] “挑む女たち”, 毎日新聞, 2014年1月1日
- [6] 編集委員インタビュー, 神戸新聞, 2014年2月6日
- [7] 日本経済新聞, 2012年9月4日
- [8] 読売新聞, 2012年8月13日
- [9] 週刊まなび, 神戸新聞, 2012年7月29日
- [10] 神戸新聞, 2012年7月5日
- [11] 佐賀新聞, 2011年12月4日

雑誌記事

- [1] 2016年2月 パリティ 理科教育:18歳からの物理「18歳からのヒッグス粒子検出」花垣和則
- [2] 2016年1月 パリティ 物理学, この1年「LHCの重心系エネルギー13TeVへ」花垣和則
- [3] 2015年10月 パリティ「LHCで13TeVの陽子陽子衝突を実現」花垣和則
- [4] 2013年12月 パリティ「ノーベル物理学賞:質量の起源とヒッグス機構」窪田高弘・花垣和則
- [5] 2012年12月 「ヒッグス粒子と見られる新粒子の発見とその意義」, 日本物理教育学会誌「物理教育」Vol. 60-4 山崎祐司
- [6] 2011年10月 生産と技術「誕生直後の宇宙を再現~いよいよ始まった世界最大の加速器実験~」花垣和則

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藏重 久弥 (KURASHIGE, Hisaya)
神戸大学・自然科学系先端融合研究環・教授

研究者番号: 20205181

(2) 研究分担者

山崎 祐司 (YAMAZAKI, Yuji)
神戸大学・理学研究科・教授

研究者番号: 00311126

(3) 研究分担者

花垣 和則 (HANAGAKI, Kazunori)
大阪大学・理学研究科・特任教授

研究者番号: 40448072

(4) 研究分担者

佐々木 修 (SASAKI, Osamu)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号: 30178636

(5) 連携研究者

福永 力 (FUKUNAGA, Chikara)
首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号: 00189961

(6) 連携研究者 (H24~H26 年度)

越智 敦彦 (OCHI, Atsuhiko)
神戸大学・理学研究科・助教

研究者番号: 40335419

(7) 連携研究者

袁 麗 (YUAN, Li)
神戸大学・自然科学系先端融合研究環・学術研究員

(8) 連携研究者 (H25~H27 年度)

清水 志真 (SHIMIZU, Shima)
神戸大学・自然科学系先端融合研究環・助教

研究者番号: 50649168

(9) 連携研究者 (H26~H27 年度)

前田 順平 (MAEDA, Junpei)
神戸大学・自然科学系先端融合研究環・特命助教

研究者番号: 60467024

(10) 連携研究者 (H24 年度)

音野 瑛俊 (OTONO, Hidetoshi)
大阪大学・理学研究科・学術研究員

研究者番号: 20648034

(11) 連携研究者 (H26~27 年度)

山口 洋平 (YAMAGUCHI, Yohei)
大阪大学・理学研究科・学術研究員

研究者番号: 30751119

(12) 協力研究者 (H23~24 年度)

松下 崇 (MATSUSHITA, Takashi)
神戸大学・自然科学系先端融合研究環・助教

(13) 協力研究者

岸本 巴 (Kishimoto Tomoe)
神戸大学・学振特別研究員 (PD)