

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247040

研究課題名(和文)LHC実験の新局面における素粒子標準模型を超える物理の研究

研究課題名(英文) Study of physics beyond the standard model of elementary particles in new phase of the LHC experiment

研究代表者

東城 順治 (Tojo, Junji)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：70360592

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、欧州合同原子核研究機構(CERN)の大型ハドロン衝突型加速器(LHC)におけるATLAS実験で標準模型(SM)を超える物理(BSM)を探索し、将来計画の準備研究を遂行して、次世代の素粒子物理学を切り拓くことである。重心系エネルギー 13 TeV での衝突実験を遂行し、予定以上のデータ量を蓄積した。シリコン半導体飛跡検出器(SCT)の運転を主導し、最高品質のデータを取得するための較正・運転・維持・管理を行なった。また、高統計を用いたヒッグス粒子の研究・長寿命超対称性粒子の探索・エキゾチック物理の探索を行った。さらに、シリコンピクセル検出器の開発で実機レベルまで完成度を高めた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to explore the next generation particle physics by searching for a new physics beyond the Standard Model (SM) of particle physics at the ATLAS Experiment in the Large Hadron Collider (LHC) at CERN and by preparing for studies on the future experiment. The colliding experiment at the center-of-mass energy of 13 TeV was carried out and the data more than expected was accumulated. We lead the operation of the SemiConductor Tracker (SCT) especially for calibration, operation and maintenance for the best quality data. We also studied Higgs particle properties with high statistics, search for a long-lived supersymmetric particle and an exotic physics. Development of a silicon pixel detector was made at a level of the real detector.

研究分野：素粒子実験

キーワード：素粒子実験 ヒッグス粒子 超対称性

## 1. 研究開始当初の背景

スイス・ジュネーブ郊外にある CERN の LHC 加速器における ATLAS 実験と CMS 実験は、2012 年 7 月 4 日にヒッグス粒子を発見したことを発表した。その実験的発見を受け、電弱ゲージ対称性の自発的破れにより質量を生み出すヒッグス機構の理論的発見に対して、2013 年 10 月 8 日に F. Englert 氏と P. W. Higgs 氏がノーベル物理学賞を共同受賞した。2010 年に LHC 加速器が本格稼働して以来、エネルギーフロンティアの素粒子物理学の世界的研究拠点は CERN である。ATLAS 実験と CMS 実験ではヒッグス粒子の発見を最重要課題とし、2011-2012 年に遂行した重心系エネルギー 7-8 TeV の陽子衝突実験により、その目的の第一段階は達成した。

LHC 加速器における第二段階の目標は、超対称性(SUSY: Supersymmetry)と余剰次元(ED: Extra Dimension)に代表される素粒子標準模型を超える物理(BSM: Beyond the Standard Model)の発見である。それらの発見に至れば時空構造の概念を覆す大発見である。ヒッグス粒子の探索と並行して進めてきた探索において、現在までその兆候はない。LHC 加速器は 2013-2014 年の改修作業の後、2015 年から設計値である 13-14 TeV で再稼働し、エネルギーフロンティアの素粒子物理学は新しい局面を迎える。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、第二段階に突入する LHC 加速器と ATLAS 実験において、ヒッグス粒子の性質の測定と超対称性の直接探索により、BSM 物理を発見することである。2011-2012 年に取得した 7-8 TeV のデータから、ヒッグス粒子の質量  $126 \text{ GeV}/c^2$ 、スピン・パリティは  $0^+$  であり、素粒子標準模型(SM: Standard Model)と無矛盾である。一方、BSM 物理の兆候はこれまで見えていない。特に SUSY については、ヒッグス粒子の質量の制限から、第 1・2 世代の squark が 10 TeV 以上のスケールで、LHC 加速器では到達できない探索領域にある可能性も多くの理論家から示唆されている。この状況を考慮し、2015-2017 年の 13-14 TeV、積分ルミノシティ  $75-100 \text{ fb}^{-1}$  の実験で、有力な探索手法による BSM 物理の発見を目指し、次の目標を掲げる: (1) ヒッグス粒子の性質の測定、(2) SUSY の探索、(3) 将来の BSM 物理探索領域拡張のための準備研究。

## 3. 研究の方法

LHC 加速器と ATLAS 実験で BSM 物理の研究を遂行するため、研究方法を大きく次の 2 つに分ける: (1) 2015-2017 年に計画している 13-14 TeV、 $75-100 \text{ fb}^{-1}$  での BSM 物理の研究、(2) LHC 加速器の輝度増強計画後の実験に向けた準備研究。(1)で BSM 物理の発見を目指す、積分ルミノシティで到達できない可能性もある。その場合、2019-2021 年に計画して

いる  $300 \text{ fb}^{-1}$  でも発見が困難になる可能性が高い。(2)の準備研究では、特に新型シリコンピクセル検出器の開発を本研究期間に行う。

## 4. 研究成果

LHC 加速器・ATLAS 実験において、重心系エネルギー 13 TeV での衝突実験を継続的に遂行し、データ収集で予定以上のデータ量を蓄積した。検出器の運転・維持、データ収集と並行して、データ解析も行った。また、LHC 加速器の高輝度化に向けたシリコンピクセル検出器の開発を精力的に進めた。

検出器の運転では、ATLAS 検出器の主要部であるシリコン半導体飛跡検出器(SCT)の運転を主導し、最高性能・品質のデータを取得するための較正・運転・維持・管理を行なった。特に、高輝度化に向けた読み出しチップの制御手法を確立した。オフラインソフトウェアを安定動作させ、今後の維持・管理を強化した。データ解析では、高統計を用いたヒッグス粒子の研究・長寿命超対称性粒子の探索・Exotics 物理の探索を深化させた。ヒッグス粒子の研究では、ヒッグス粒子が Z 粒子対に崩壊し、各 Z 粒子がレプトン(電子・ミューオン)対に崩壊するチャンネルを用い、質量・断面積の測定精度を向上させた。長寿命超対称性粒子の探索では、解析手法を改良して探索感度を向上させ、存在領域を大幅に棄却した。Exotics 物理の探索では、重い中性レプトンの探索を行い、背景事象の評価手法を開発して大幅に解析を発展させた。将来の加速器高輝度化に向けた検出器開発では、シリコンピクセル検出器の組立手法の開発を行なった。シリコンセンサー・読み出しチップをバンプ接合した状態にフレキシブル基板を接着、チップ・基板間のアルミ線ワイヤーボンディングの工程を実機レベルまで完成度を高めた。

## 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 22 件)

M. Aaboud, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Search for heavy ZZ resonances in the  $l^+l^-l^+l^-$  and  $l^+l^-vv$  final states using proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector, Eur. Phys. J. C 78, 293 (2018), 査読有

<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-5686-3>

M. Aaboud, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Measurement of the Higgs boson coupling properties in the  $H \rightarrow ZZ^* 4l$  decay channel at  $\sqrt{s} = 13$

TeV with the ATLAS detector, Eur. Phys. J. C 78, 293 (2018), 查読有  
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-5686-3>

M. Aaboud, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Search for long-lived, massive particles in events with displaced vertices and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV collisions with the ATLAS detector, Phys. Rev. D 97, 52012 (2018), 查読有  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.52012>

M. Aaboud, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], ZZ  $l^+l^-l^+l^-$  cross-section measurements and search for anomalous triple gauge couplings in  $\sqrt{s}=13$  TeV pp collisions with the ATLAS detector, Phys. Rev. D 97, 032005 (2018), 查読有  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.032005>

M. Aaboud, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Measurement of inclusive and differential cross sections in the  $H \rightarrow ZZ^* 4l$  decay channel in pp collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector, JHEP 1710, 132 (2017), 查読有  
[https://doi.org/10.1007/JHEP10\(2017\)132](https://doi.org/10.1007/JHEP10(2017)132)

M. Aaboud, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Performance of the ATLAS Track Reconstruction Algorithms in Dense Environments in LHC Run 2, Eur. Phys. J. C 77, 673 (2017), 查読有  
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5225-7>

M. Aaboud, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Reconstruction of primary vertices at the ATLAS experiment in Run 1 proton-proton collisions at the LHC, Eur. Phys. J. C 77, 332 (2017), 查読有  
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-4887-5>

M. Aaboud, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Measurement of charged-particle distributions sensitive to the underlying event in  $\sqrt{s} = 13$  TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector at the LHC, JHEP 1703, 157 (2017), 查読有

[http://dx.doi.org/10.1007/JHEP03\(2017\)157](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP03(2017)157)

G. Add, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS and CMS Collaboration], Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC pp collision data at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV, JHEP 1608, 104 (2016), 查読有  
[http://dx.doi.org/10.1007/JHEP08\(2016\)045](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP08(2016)045)

M. Aaboud, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Measurement of fiducial and differential cross sections of gluon-fusion production of Higgs bosons decaying to  $WW^* \nu\bar{\nu}$  with the ATLAS detector at  $\sqrt{s} = 8$  TeV, JHEP 1608, 104 (2016), 查読有  
[http://dx.doi.org/10.1007/JHEP08\(2016\)104](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP08(2016)104)

M. Aaboud, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Search for new phenomena in different-flavour high-mass dilepton final states in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector, Eur. Phys. J. C 76, 541 (2016), 查読有  
<http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4385-1>

M. Aaboud, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector, Eur. Phys. J. C 76, 392 (2016), 查読有  
<http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4184-8>

G. Add, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Measurements of the Higgs boson production and decay rates and coupling strengths using pp collision data at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV in the ATLAS experiment, Eur. Phys. J. C 76, 6 (2016), 查読有  
<http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3769-y>

G. Add, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Constraints on new phenomena via Higgs boson couplings and invisible decays with the ATLAS detector, JHEP 11, 206 (2015), 查読有  
[http://dx.doi.org/10.1007/JHEP11\(2015\)206](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP11(2015)206)

[15\)206](#)

G. Add, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Measurements of the Total and Differential Higgs Boson Production Cross Sections Combining the  $H \rightarrow \gamma\gamma$  and  $H \rightarrow ZZ^* 4l$  Decay Channels at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS Detector, Phys. Rev. Lett. 115, 91801 (2015), 査読有

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.091801>

G. Add, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Search for massive, long-lived particles using multitrack displaced vertices or displaced lepton pairs in pp collision at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS Detector, Phys. Rev. D. 92, 12010 (2015), 査読有

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.92.072004>

G. Add, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Measurements of Higgs boson production and coupling in the four-lepton channel in pp collisions at center-of-mass energies of 7 and 8 TeV with the ATLAS detector, Phys. Rev. D. 91, 12006 (2015), 査読有

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.92.072004>

G. Add, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Fiducial and differential cross sections of Higgs boson production measured in the four-lepton decay channel in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector, Phys. Lett. B 738, 234 (2015), 査読有

<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2014.09.054>

G. Add, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using LHC run 1 data, Eur. Phys. J. C 74, 3017 (2014), 査読有

<http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-014-3071-4>

G. Add, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Measurement of the Higgs boson mass from the  $H \rightarrow \gamma\gamma$  and  $H \rightarrow ZZ^* 4l$  channels with the ATLAS detector using 25 fb<sup>-1</sup> of pp collision data, Phys. Rev. D. 90, 52004 (2014), 査読有

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.90.052004>

[90.052004](#)

21 G. Add, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Operation and performance of the ATLAS semiconductor tracker, JINST 9, P08009 (2014), 査読有

<http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/9/08/P08009>

22 G. Add, K. Kawagoe, H. Otono, S. Oda, Y. Takubo, J. Tojo et al. [ATLAS Collaboration], Electron reconstruction and identification efficiency measurements with the ATLAS detector using the 2011 LHC proton-proton collision data, Eur. Phys. J. C 74, 2941 (2014), 査読有

<http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-014-2941-0>

[学会発表](計 22 件)

音野瑛俊 他、LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるビーム衝突点から離れて崩壊する新粒子の探索、日本物理学会第 73 回年次大会、2018

調翔平、織田勲、音野瑛俊、川越清以、東城順治 他、LHC-ATLAS 実験における長寿命中性レプトンの探索、本物理学会第 73 回年次大会、2018

小林大、東城順治 他、LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用新型シリコンピクセル検出器の組み立て工程の開発、日本物理学会第 73 回年次大会、2018

山口尚輝、東城順治 他、LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用新型シリコンピクセル検出器組み立てにおける接着剤と封止材の塗布手法の開発、日本物理学会第 73 回年次大会、2018

家田晋輔、東城順治 他、LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用新型シリコンピクセル検出器の放熱についての評価、日本物理学会第 73 回年次大会、2018

藤野主一、東城順治 他、LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用新型シリコンピクセル検出器の組み立てに用いる部材の放射線耐性の評価、日本物理学会第 73 回年次大会、2018

Hidetoshi Otono, ATLAS results on searches for long-lived particles, Aspen 2018 - The Particle Frontier, 2018

調翔平、織田勲、音野瑛俊、川越清以、東城順治 他、LHC-ATLAS 実験における長寿命中性レプトンの探索に向けた背景事象の研究、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017

山口尚輝、東城順治 他、LHC-ATLAS 実験アップグレードに向けた新型シリコンピクセル検出器の組立手法の開発、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017

音野瑛俊、ATLAS 実験運転状況と 13TeV データを使った SUSY 探索、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017

調翔平、織田勸、音野瑛俊、川越清以、東城順治、LHC-ATLAS 実験における長寿命中性レプトンの発見感度の研究、日本物理学会第 72 回年次大会、2017

Susumu Oda, Couplings and mass with 13 TeV data and expectations, 52nd Rencontres de Moriond EW 2017, 2017  
織田勸、2016 年 LHC13TeV 実験:実験状況と SM/Higgs 測定、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016

音野瑛俊 他、LHC における SUSY ダークマターの新しい探索提案、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016

調翔平、織田勸、音野瑛俊、川越清以、田窪陽介、東城順治 他、ATLAS 実験におけるシリコン半導体飛跡検出器の検出効率に関する研究、日本物理学会第 72 回年次大会、2016

織田勸、LHC-ATLAS 実験における  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$  チャンネルを用いたヒッグス粒子の測定、日本物理学会第 72 回年次大会、2016

Hidetoshi Otono, Searches for New Physics in Unconventional Signatures at ATLAS, Rencontres de Moriond on QCD and High Energy Interactions, 2016

音野瑛俊、LHC/ATLAS の現状、新学術領域研究会 テラスケール 2015 先端加速器 LHC が切り拓く テラスケールの素粒子物理学、2015

Susumu Oda, Study of Higgs boson production in bosonic decay channels at the LHC (including off-shell production), Rencontres de Blois on Particle Physics and Cosmology, 2015  
Hidetoshi Otono, Prospects of Higgs and SM measurement at HL-LHC, Next steps in the Energy Frontier - Hadron Colliders, 2014

21 音野瑛俊、LHC-ATLAS 実験におけるビーム衝突点から離れて崩壊する新粒子の探索、日本物理学会第 70 回年次大会、2015

22 織田勸、Higgs Boson - summary & perspective -, 新学術領域研究会 テラスケール 2014 先端加速器 LHC が切り拓く テラスケールの素粒子物理学、2014

〔図書〕(計 0 件)

〔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://epp.phys.kyushu-u.ac.jp/index.ph>

p?ATLAS

6 . 研究組織

(1)研究代表者

東城 順治 (TOJO, Junji)  
九州大学・理学研究院・准教授  
研究者番号: 70360592

(2)連携研究者

川越 清以 (Kawagoe, Kiyotomo)  
九州大学・理学研究院・教授  
研究者番号: 40183785

織田 勸 (Oda, Susumu)  
九州大学・理学研究院・助教  
研究者番号: 10613515

音野 瑛俊 (Otono, Hidetoshi)  
九州大学・先端素粒子物理研究センター・助教  
研究者番号: 20648034

田窪 洋介 (Takubo, Yosuke)  
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: 50423124