

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 29 日現在

機関番号：82118

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：23104002

研究課題名(和文) ヒッグス粒子の発見による素粒子の質量起源の解明

研究課題名(英文) Discovery of the Higgs Particle and Studies toward the Understanding of the Mass-Acquiring-Mechanism of Elementary Particles

研究代表者

徳宿 克夫(TOKUSHUKU, Katsuo)

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・所長

研究者番号：80207547

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 192,600,000円

研究成果の概要(和文)：世界最大エネルギーでの陽子・陽子衝突型加速器LHCで国際実験を推進し、質量約125GeVの新粒子を発見した。質量の精密測定、崩壊比や生成断面積の測定などの結果、この粒子は標準理論で唯一未発見であったヒッグス粒子とよく一致した。本研究で得られた、ヒッグス粒子の質量と、他のヒッグス粒子など標準理論を超える新粒子が発見されていないという実験結果は、これまでの素粒子論・宇宙論に大きな見直しを迫る物となった。もう一つの柱としている測定器開発では、ピクセルセンサーの放射線耐性の理解が進み、素子レイアウトの改善により、将来のヒッグス粒子の精密測定実験のための基本的な要素開発を完了した。

研究成果の概要(英文)：We have performed high-energy proton-proton collision experiment at the Large Hadron Collider(LHC) at CERN and discovered a new particle with the mass around 125 GeV. With careful measurements for its mass, production cross section and branching ratios, we have found that the particle is consistent with the long-sought Higgs particle which the Standard Model(SM) of the particle physics has been predicted. Given its measured mass value and the fact that no other new particles emerged, our results give a significant constraint on building a theory beyond the SM. In parallel to the Higgs analysis, we have developed radiation-hard pixel detector at the future experiment for the further precision measurements. The basic R&D for the pixel detector has been completed. We have identified radiation-weak location in the device and improved the layout.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：素粒子実験 ヒッグス粒子 標準理論 ピクセル検出器 耐放射線検出器 国際研究者交流スイス

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学の根幹をなす「標準理論」では、ヒッグス機構とよばれる対称性の自発的な破れによって素粒子が質量を獲得すると考えられている。標準理論はクォークとレプトンの力学をよく説明するすぐれた理論であり、この対称性の破れの直接的証拠となるヒッグス粒子の探索を、様々な実験で長期にわたって進めてきたが未発見であった。スイス・CERN 研究所では、世界最高エネルギーでの陽子・陽子衝突を実現できる大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) が平成 21 年から稼働を開始した。この加速器は、ヒッグス粒子の発見を目的の一つに掲げて建設され、国際協力でもアトラス実験が組織され、我々のグループも測定器の建設と実験準備を進めてきた。

標準理論が素粒子の力学を上手く説明する一方で、その範囲を超える現象が観測されている。例えば、神岡実験で確立したニュートリノ振動現象であり、また宇宙の大部分を占める暗黒エネルギーや暗黒物質である。これらは、標準理論を超える我々がまだ理解していない自然の枠組みがあることを示唆している。理論的にも、標準理論の枠内ではヒッグスの質量が摂動論的に不安定であると指摘されていた。このため、ヒッグス粒子を発見すればすべてが解決するというわけではないが、ヒッグス粒子の性質を精査することが、これらの問題点を理解する鍵となると考えられていた。

## 2. 研究の目的

(1) LHC での陽子・陽子衝突実験で、ヒッグス粒子を直接発見し、ゲージ対称性の破れと質量の起源の謎の解明を目指す。

(2) 発見したヒッグス粒子が、標準理論の予言するものであるかを精査することで、テラスケールの新しい物理の探索を進める。現在の真空の性質と宇宙の初期に起こった相転移を理解し、宇宙がどのように進化してきたかの知見を得て新しい宇宙像を開拓する。

(3) ヒッグス粒子の精査にあたっては、高エネルギーで生成される短寿命の粒子の同定が重要になり、このためにはより精度の高い飛跡検出器を導入することが望ましい。平成 29 年あるいは 31 年頃にアトラス測定器の飛跡検出器入れ替えが検討されているので、この研究では、新しいピクセル型飛跡検出器の開発を物理の研究と並行して進め、将来のエネルギーフロンティア実験への道筋を立てる。

## 3. 研究の方法

平成 21 年から始まった LHC での陽子・陽子衝突実験を、ほぼ研究期間の 5 年間を通して遂行する。取得したデータからヒッグス粒子の探索を進め、発見できた場合はその性質を精査する。研究開始時点での予定では、重心系エネルギー 7TeV での衝突実験から始め、平成 24 年までに積分ルミノシティ  $5\text{--}7\text{fb}^{-1}$  が得

られると想定していた。その後平成 25 年に LHC の運転を 1 年停止し、衝突エネルギーを設計値の 14TeV に上げるための準備を行い、平成 26-27 年の実験では設計値である重心系エネルギー 14TeV で、合わせて  $100\text{fb}^{-1}$  近く収集すると想定した。標準理論のヒッグス粒子が存在するのであれば、研究期間に発見を迅速に確認した上で、その性質の測定ができる。もし、ヒッグス粒子の徴候がない場合には、標準理論の考え方が違っていることになり、素粒子物理学に大きな波紋を投じることになると考えていた。

測定器開発では、n-in-p 型のピクセル検出器を製作し、外国のグループが開発した読み出しチップと接合 (バンプボンディング) をして、性能を調べる。特に放射線損傷の影響を定量的に研究し、バイアス電圧の安定供給の性能などを調べる。狭いバンプボンディング間隔 ( $50\mu\text{m}$  あるいはそれ以下) での安定接合技術をつかむ。

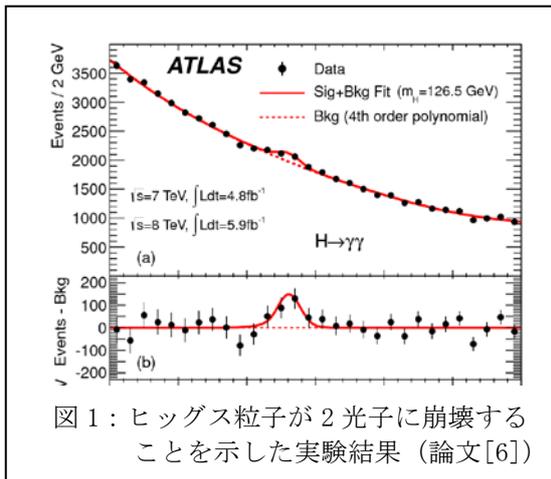
ピクセルセンサーのデザインでは、将来のヒッグス精密測定のためにどのようなサイズのピクセルが必要かを、シミュレーションをもとに検討を行う。アトラス実験グループ全体の動きを見ながら、次世代検出器の必要パラメータ (ピクセルの形状、厚さなど) の検討をする。

## 4. 研究成果

実際の LHC の運転は、目標をはるかに超えて積分ルミノシティを得ることができ、既に平成 23 年中に 7TeV で  $5\text{fb}^{-1}$ 、平成 24 年には重心エネルギーを 8TeV に上げて  $23\text{fb}^{-1}$  のデータを収集できた。

これらのデータにより、平成 24 年 7 月に質量 125GeV 付近に新粒子を発見し、その崩壊のパターンからこれがヒッグス粒子であることを確信した (論文 [5, 6], 図 1)。LHC スケジュールは 8TeV 運転での実験を当初の予定より少し長くし、このエネルギーでの衝突データから、ヒッグスの性質をできるだけ引き出す方向で予定を修正した。その分平成 25-26 年度は加速器と測定器の改修のための長期シャットダウンとすることになった。これにより、以下に述べるようにヒッグス粒子に関して多くの知見を研究期間内に得ることができた。

平成 27 年度に重心系 13TeV で実験を再開した。加速器の調整が時間かかったが  $3\text{fb}^{-1}$  のデータを収集でき、高いエネルギー衝突エネルギーで、125GeV のヒッグス粒子の確認を進めるとともに、さらに別のヒッグス粒子が存在しないかという探索を開始することができた。加速器・実験装置の面では長期シャットダウンでの改善により、今後の 3 年間でこのエネルギーで  $100\text{fb}^{-1}$  のデータをためられる見通しとともに、ヒッグス粒子の性質の精査に関しても解析手法等を期間内に確立することができた。



まず得られた全体像を簡単にまとめると、発見した新粒子は、標準理論の予想するヒッグス粒子の性質と非常によくあっており、測定精度の範囲内では有意なずれは見られていない、そして複数のヒッグス粒子があるかどうかの探索も進めているが有意な発見はなかった、という結論になる。

本研究の大きな成果は

- ヒッグス機構を伴う標準理論の正しさを確立した。
- ヒッグス粒子の質量は約 125GeV で、様々な崩壊モードを観測できる領域であり、これによって、ヒッグス粒子の精査が、標準理論を超える理論を構築するための重要な実験手段となることを示した。
- 一方で、これまで標準理論を超える現象を理解する直接的なヒントはヒッグス粒子の測定及び、新粒子の探索のどちらからも得られておらず、研究当初考えていたよりはテラスケールの物理を理解することが単純でないことがわかった。標準理論が非常に高いエネルギーまで成り立つという可能性もあり、これまでの素粒子論・宇宙論的に大きな見直しを迫る実験的結果を与えた。

以下にこれまでにわかったヒッグス粒子の性質をより詳しく述べる。新粒子の発見後、この粒子のスピン・パリティの解析を行い、ヒッグス粒子と同じで、スピンはゼロで正のパリティとほぼ確定し、この時点でヒッグス粒子であると確信した (論文[4])。

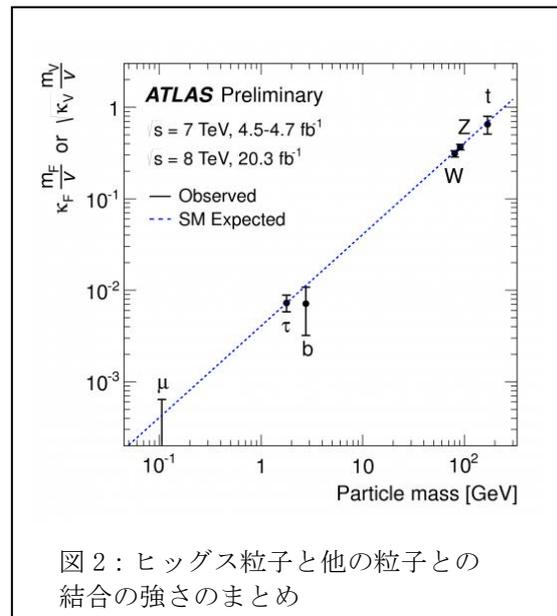
全データを使った各崩壊モードでの解析と、超対称性粒子等で予想される他のヒッグス粒子の探索が進み、ほぼすべての解析が終了し論文として発表した。W, Z 及び  $\gamma$  への崩壊は確立し、フェルミ粒子への崩壊に関しては  $\tau$  への崩壊が  $4.5\sigma$  で観測できている (論文[3])。一方で  $\mu$  への崩壊は  $\tau$  と同レベルでは観測されないことは確定でき

ており、この粒子が二つのレプトン (二つの世代) を区別することを実験的に示し、ここでもヒッグス粒子の特質を明らかにした。

ボトムへの崩壊や、トップクォークとの随伴生成の探索も進めている。これらのモードでは、標準理論のヒッグスと無矛盾であることを示すことができています。各粒子への崩壊をまとめたのを図 2 に示し、各粒子との結合の強さが質量と強く関係するという、ヒッグス粒子の特徴をよく捉えている。

もう一つの LHC 実験である CMS 実験との共同解析も進み、0.2%精度の質量測定を達成した (論文[2])。結合定数に関する共同研究も暫定結果を平成 25 年の国際会議で発表し、平成 28 年 6 月に論文投稿した。

発見したヒッグス粒子に加えて、新たな荷電及び中性ヒッグス粒子の探索も行った。残念ながら新しい粒子の兆候は得られていない。13TeV の衝突データで二光子への崩壊モードで 750GeV 付近にやや超過がみられることを、平成 27 年 12 月のセミナーで公表し、大きな反響をよんでいるが、まだ統計的には有意でなく、これが今後のデータ収集と共にどうなるかが楽しみである。



ピクセル検出器の開発では、半導体素子自体の開発とともに、放射線照射テスト時の被ばくを軽減するために自動化するシステムを構築するなど、開発環境を大きく改善した。バイアス電圧の配線レイアウト等を替えた試作機を作りテストを繰り返すことで、放射線損傷後 飛跡検出効率が落ちる原因を究明し、放射線損傷後でも検出効率 99%を維持している事をビームテストで確認した (論文[1], 図 3)。

また、薄型センサー／薄型読み出しチップ（厚み 150/150  $\mu\text{m}$ ）の接合（バンプボンディング）においても、バンプ接合不良を発生させる原因を特定し安定した接合技術を確認した。

これらにより、将来の高輝度 LHC でのヒッグス粒子の精密測定に導入するピクセル検出器の開発を基本的な部分を完了することができた。

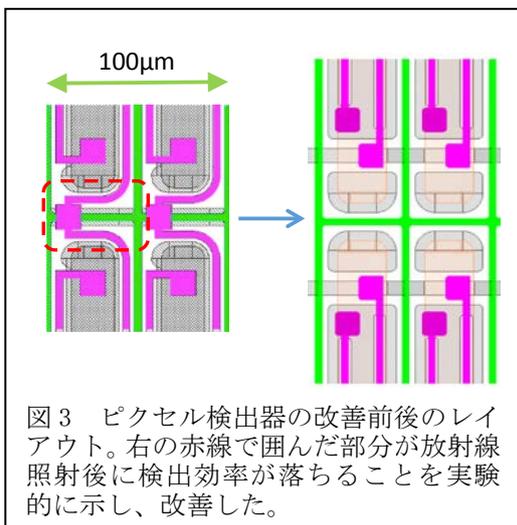


図 3 ピクセル検出器の改善前後のレイアウト。右の赤線で囲んだ部分が放射線照射後に検出効率が落ちることを実験的に示し、改善した。

## 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 90 件）

（主な物のみ掲載：ATLAS Collaboration の論文には、研究代表者・研究分担者・連携研究者をすべて含む）

[1] Development of  $n^+$ -in-p planar pixel sensors for very high radiation environments, designed to retain high efficiency after irradiation.” ; Y. Unno et al. to be published in Nucl. Instru. Meth. A (2016), 査読有、DOI:10.1016/j.nima.2016.04.039

[2] “Combined measurement of the Higgs Boson mass in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with the ATLAS and CMS experiments” ; (The ATLAS and CMS Collaboration) Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 191803 査読有、DOI:10.1103/PhysRevLett.114.191803

[3] “Evidence for the Higgs-boson Yukawa coupling to tau leptons with the ATLAS detector” ; G Aad et al. (ATLAS Collaboration) JHEP 04 (2015) 117 査読有、DOI:10.1007/JHEP04(2015)117

[4] “Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data” ; G Aad et al. (ATLAS Collaboration) Phys. Lett. B738 (2013) 120-144 査読有、

DOI:10.1016/j.physletb.2013.08.026

[5] “A Massive Particle Consistent with the Standard Model Higgs Boson observed with the ATLAS Detector at the Large Hadron Collider” ; G.Aad, et al. (ATLAS Collaboration), Science 338 (2012) 1232005 査読有、DOI:10.1126/science.1232005

[6] “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC” ; G.Aad et al. (ATLAS Collaboration) Phys. Lett. B716 (2012) 1-29 査読有、DOI:10.1016/j.physletb.2012.08.020

〔学会発表〕（計 77 件）  
（主な物のみ掲載）

[1] “New ATLAS Higgs physics results” , T. Masubuchi, CERN Seminar 7/Oct/2015, CERN, Geneva (Switzerland).

[2] “Planar p-type pixel and strip sensors development for HL-LHC in Japan” Y. Unno, 9th “Trento” Workshop on Advanced Silicon Radiation Detectors, 26-28/Feb/2014, Genova (Italy).

[3] “Mass measurement in  $H \rightarrow \gamma \gamma$  in ATLAS” , Y. Yamaguchi, Higgs Hunting 2013, 25/July/2013 LAL, Paris (France).

[4] “Searches for a Light Higgs boson at ATLAS” T. Masubuchi, Physics at LHC (pLHC2012), 4-9/June/2012 TRIUMF, Vancouver (Canada).

〔図書〕（計 3 件）  
（主な物のみ掲載）

[1] Y. Unno et al. Elsevier B.V. “Proceedings, 6th International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging (PIXEL2012) Inawashiro, Japan, September 3-7, 2012”、2013 年、総ページ数 334 ページ

〔産業財産権〕  
○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

[1] 「宇宙の物質はどのようにできたのか 素粒子から生命へ」、日本物理学会（編集）（徳宿克夫、他）、日本評論社。（日本物理学会主催の一般シンポジウム講演（2013 年 8 月））

[2] 一般向け講演会「科学と音楽の饗宴」2012

年 11 月 10 日 (茨城県つくば市ノバホール)  
「質量の起源とヒッグス粒子—理論と実験の成果」 小林誠、徳宿克夫 約 800 名が参加

[3]一般向け講演会「世紀の大ニュース『ヒッグス粒子』って何?」2012年9月1日(茨城県つくば市筑波大学春日キャンパス春日講堂) 金信弘、原和彦 約 200 名が参加

ホームページ等

ATLAS 実験日本グループの Web

<http://atlas.kek.jp/index.html>

ATLAS 実験の一般向け Web (英語)

<http://atlas.ch/>

ATLAS 実験の物理成果の Web (英語)

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

徳宿 克夫 (TOKUSHUKU, Katsuo)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・所長

研究者番号: 80207547

### (2) 研究分担者

海野 義信 (UNNO, Yoshinobu)

高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・名誉教授

研究者番号: 40151956

受川 史彦 (UKEGAWA, Fumihiko)

筑波大学・数理物質科学研究科・教授

研究者番号: 10312795

### (3) 連携研究者

津野 総司 (TSUNO, Soshi)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号: 30451834

増淵 達也 (MASUBUCHI, Tatsuya)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任助教

研究者番号: 20512148

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

原 和彦 (HARA, Kazuhiko)

筑波大学・数理物質科学研究科・講師

研究者番号: 20218613

岩崎 博行 (IWASAKI, Hiroyuki) H23-26

高エネルギー加速器研究機構・その他部局

等・名誉教授

研究者番号: 40151724

高嶋 隆一 (TAKASHIMA, Ryuichi) H23-26

京都教育大学・教育学部・准教授

研究者番号: 60163200

佐藤 構二 (SATO, Koji) H26-27

筑波大学・数理物質科学研究科・講師

研究者番号: 30422190

大川 英希 (OKAWA Hideki) H27

筑波大学・数理物質科学研究科・助教

研究者番号: 10746960