

平成 30 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17633

研究課題名(和文) ATLAS実験におけるヒッグス粒子とフェルミオンの結合定数の精密検証

研究課題名(英文) Measurement of the Yukawa coupling in pp collisions with ATLAS detector

研究代表者

増淵 達也 (Masubuchi, Tatsuya)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：20512148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：LHC-Run2で重心系エネルギー13TeVのデータを用いて、ヒッグス粒子がボトムクォークに崩壊するモードの探索を行なった。2016年までにATLAS実験で蓄積した約36/fbの陽子陽子衝突データでヒッグス粒子がウィークボソンと随伴生成される事象を探索し、発見感度約3.6 $\sigma$ でヒッグス粒子がボトムクォークに崩壊するモードを世界で初観測した。また、信号強度を測定し標準模型の予言値と無矛盾な値を測定した。次世代マイクロパターンガス検出器として有望なマイクロRWell検出器を2次元読み出しが出来るように設計・製作して実際に信号を観測した。

研究成果の概要(英文)：A search for the decay of the Standard model Higgs boson into a bottom quark pair when produced in association with a W or Z boson is performed. The analyzed data, corresponding to an integrated luminosity of approximately 36/fb at a center-of-mass energy of 13 TeV which were collected in the ATLAS detector. An excess of events over the expected background from other Standard Model processes is found with an observed significance 3.5 sigma (an expected significance is 4.0 sigma). The measured signal strength, a ratio of the measured signal yield to the Standard model prediction, was  $0.90 \pm 0.18(\text{stat.}) + 0.21 - 0.19(\text{syst.})$ . That is consistent with the Standard model prediction and an evidence for the Higgs boson decay with bottom quark. The MicroMegas with two dimensional readouts was produced and tested with radioactive sources and cosmic ray. A micro resistive WELL ( $\mu$ -RWELL) with two dimensional readouts was designed and produced. The first signal was observed with the  $\mu$ -RWELL.

研究分野：高エネルギー実験

キーワード：ヒッグス粒子 湯川結合 フェルミオン ミューオン検出器 MPGD

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 2012年7月、LHC Run1 実験で ATLAS、CMS 実験グループによって標準模型で予言されながら未発見であったヒッグス粒子が発見され、素粒子の質量起源が解明されつつあった。Run1 で発見に貢献したチャンネルは、ヒッグス粒子が W や Z ボソン対、光子対に崩壊する比較的終状態がクリーンなモードだった。また、 $\tau$  粒子対に崩壊するモードでも有意な信号を観測していた。しかしながら、ヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊するモードは、標準模型では 58% と最も崩壊分岐比が大きいにも関わらず、背景事象が多く、終状態にジェットを含むため実験的に解析が困難であり、有意な信号が観測されていなかった。

(2) また、ヒッグス粒子がミュオンに崩壊するモードは、崩壊分岐比が非常に小さいため観測は困難で、高統計のデータが必要である。LHC のアップグレードに伴い、ATLAS 検出器の様々なアップグレードも段階的に計画されている。今までカバーされていない前方領域に設置するための新しいミュオン検出器の開発研究が進められており、マイクロパターンガス検出器が有望視されていた。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、標準模型の重要パラメータであるヒッグス粒子とフェルミ粒子の結合定数を測定し、素粒子質量起源の解明を主目的としていた。特に重心系エネルギー 13 TeV で行なわれる LHC-Run2 実験の高統計データを用いて、Run1 で未発見であったヒッグス粒子がボトムクォークに崩壊するモードを初観測し、ヒッグス粒子とボトムクォークの結合定数の存在を示す証拠を掴むことを目標とした。

(2) また、2021 年に始まる LHC-Run3 実験以降で観測が期待されるヒッグス粒子がミュオンに崩壊するモードを捉えるための新しいミュオン検出器の研究開発を行なうことも研究の目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) ヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊するモードの探索では、ヒッグス粒子が Z ボソンと随伴生成される生成過程に着目し、ZH $\rightarrow$ 11bb モードに焦点を当て研究を進める。このモードは Z ボソンが荷電レプトンに崩壊する分岐比のため、信号の生成率は他のチャンネルと比較して少ない。しかし、Z ボソンから崩壊した荷電粒子でクリーンな信号をトリガーできること、また背景事象が少ないなどの利点があり、高統計が見込まれる Run2 では有望なチャンネルになると考えた。Run2 開始当初は、重心系エネルギー・瞬間ルミノシティが上がり、多重衝突が増えるのと、検出器のアップグレードや粒子再構成ア

ルゴリズムの改善などにより、解析に多くの変更が予想された。そのため、初年度はデータの理解や解析で重要な荷電レプトンの再構成・同定効率の測定、ボトムジェットの同定アルゴリズムの最適化などを計画した。

次年度以降、Run1 の発見感度を超えると予想され、ヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊するモードの探索に本腰を入れる計画であった。解析手法の改善に着手し、再構成されたヒッグス粒子の質量分解能の改善や、背景事象の理解、多変量解析を行い発見感度を向上させ、探索を進めた。

(2) 次世代ミュオン検出器としてマイクロパターンガス検出器に着目し、研究開発を行なった。特に ATLAS 検出器のアップグレードでインストールが計画されている前方領域ではビーム起源の背景事象が多いため、高レート環境下でも安定動作する検出器の選定を行なった。有望なミュオン検出器としてマイクロパターンガス検出器を製作し、宇宙線や線源を用いて性能評価を行なうことを計画した。また、試作機の経験をもとに次世代のマイクロパターンガス検出器の設計・開発研究に着手する計画であった。

## 4. 研究成果

(1) LHC-Run2 の陽子陽子衝突データを用いてヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊するモードの探索を行なった。ZH $\rightarrow$ 11bb モードで重要なレプトントリガーや b-ジェットの同定効率を Run2 初期のデータで較正・最適化し、Run2 の高輝度環境でも性能の低下はなく、シミュレーションで再現できていることも確認した。さらに、b ジェット中の B ハドロンがセミレプトニック崩壊した場合のミュオンを観測し、b ジェットのエネルギーに補正を加えることで b ジェットのエネルギー分解能、ヒッグス粒子の質量分解能を 10% 向上させることが出来た。(論文⑤)

(2) 平成 28 年度には約 13/fb の重心系エネルギー 13 TeV の陽子陽子データを用いてヒッグス粒子がボトムクォークに崩壊するモードを探索した。当初の予想よりデータ量が少なかったため、予想発見感度は  $1.9\sigma$  で実際に観測された感度は  $0.6\sigma$  という結果をまとめ公表した。また、この解析から発見感度を更に向上させるために系統誤差を削減する必要があることが明らかになり、解析の改善点を精査することが出来た。また、ヒッグス粒子の解析で重要な背景事象になる標準模型ダイボソン生成過程 (VZ $\rightarrow$ bb) を  $3\sigma$  の感度で観測することに成功した。(論文⑥)

(3) 平成 29 年度に約 36.1/fb のデータを用いて解析を行なった。特に ZH $\rightarrow$ 11bb モードを用いて発見感度の改善を行なった。信号事象の運動学的性質を用いてヒッグス粒子の質量分

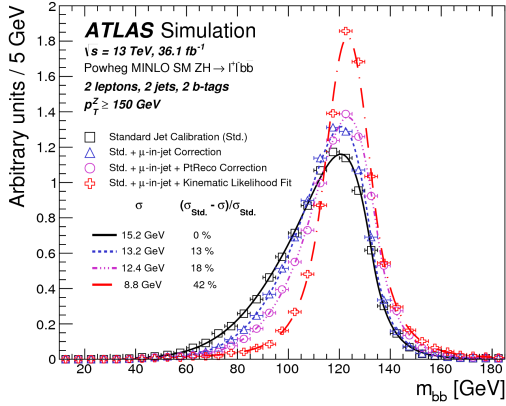


図 1: b ジェットエネルギー補正後のシミュレーションで予想されるヒッグス質量分布

解能を約 40%改善することに成功し、発見感度を約 10%向上させることが出来た。(図 1) また、主要な背景事象の 1 つであるトップクォーク由来の背景事象が荷電粒子のフレーバーに対して対称であることから信号( $e\bar{e}, \mu\bar{\mu}$  事象)に対してコントロール領域( $e\mu, \mu e$  事象)を選択し、トップクォーク由来の背景事象を信号領域と同時推定することで系統誤差を劇的に減らすことに成功した。

他の生成モード( $ZH \rightarrow \nu\nu b\bar{b}$ ,  $WH \rightarrow l\nu b\bar{b}$ )と Run1 の解析を統計的に統合することにより、ヒッグス粒子がボトムクォークに崩壊するモードを発見感度  $3.6\sigma$  で観測することに成功した(予想感度は  $4.0\sigma$ ) (図 2)。また、信号強度(観測された信号数を標準模型の予想値で規格化したもの)の測定も行ない、 $\mu = 0.90 \pm 0.18$  (統計誤差) $^{+0.21}_{-0.19}$  (系統誤差) という標準模型の予言と無矛盾な値を測定することに成功した。

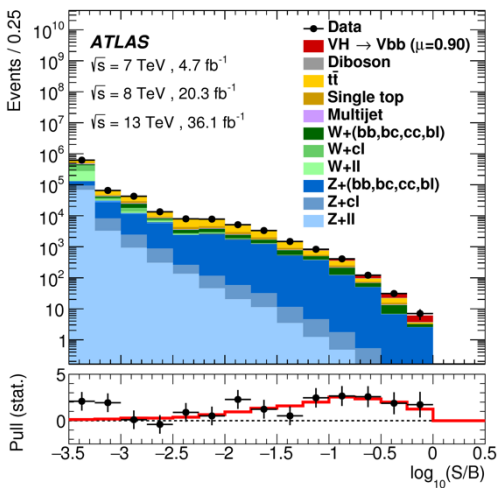


図 2: 全てのチャンネルの信号領域の生成数を  $\log(S/B)$  の関数で表した分布。S は信号事象数、B は背景事象数。

また、信号事象と終状態が同じダイボソン過程も  $5.8\sigma$  の有意度で観測することに成功した。さらに、ヒッグス粒子の質量分布を最終

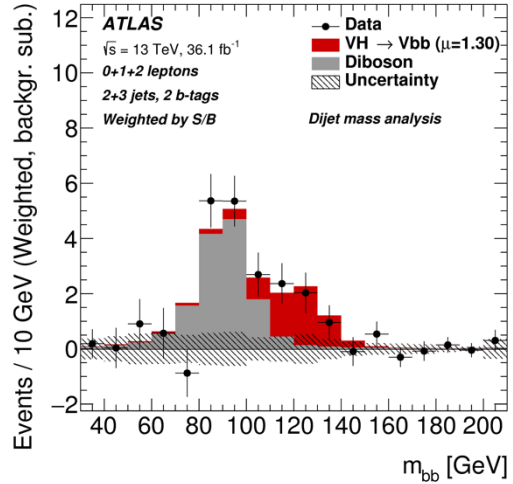


図 3: 観測されたデータから背景事象を差し引いたヒッグス粒子質量分布。信号/背景事象比で重み付けをしてある。

分離変数として解析を行ない、多変量解析と無矛盾な結果が得られることも確認した(図 3)。この成果は論文として出版され、すでに引用数が 50 を超えている。(論文③)

(4) Run2 実験でヒッグス粒子がミューオンに崩壊するモードの探索も行なった。約  $36.1/\text{fb}$  のデータを用いて、生成過程を効率よく選択し信号・背景事象比を改善することに成功し、生成断面積の上限値(95%信頼度)を標準模型の 2.8 倍まで抑えることに成功した。今後 LHC は 2021 年から始まる Run3 で約  $300/\text{fb}$  のデータを蓄積する予定であり、現在の解析感度から Run3 で標準模型の予想生成断面積に到達することがわかった。(論文④)

(5) ATLAS 検出器の前方領域ではインストール可能な場所が限られているのと、高バックグラウンド環境であり、インストールする検出器として、高背景事象レートで検出が可能かつ、高位置分解能を持つ検出器が必要である。その候補として、マイクロメガス検出器を X-Y の 2 次元読み出しが出来るように多層基板技術で製作し、性能評価を行った。Fe55 線源を用いて信号が期待通り見えることを確

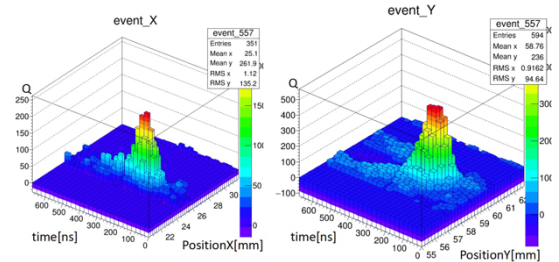


図 4: 2 次元読み出しマイクロメガスで読み出した X 位置と時間分布(左), Y 位置と時間分布(右) 認し、期待されるゲインが得られた。また、宇宙線を用いて 2 次元信号の読み出し、飛跡検

出に成功し、期待された検出器性能が出ることを確認した。

(6) 2次元読み出しのマイクロメガス製作経験から、次世代マイクロパターンガス検出器として有望なマイクロ Resistive-Well( $\mu$ -RWELL)の設計・製作を行なった。この検出器はマイクロメガスのマイクロメッシュのように浮いている検出器部品がなく、製造が比較的容易であること、そして大型実験に応用す

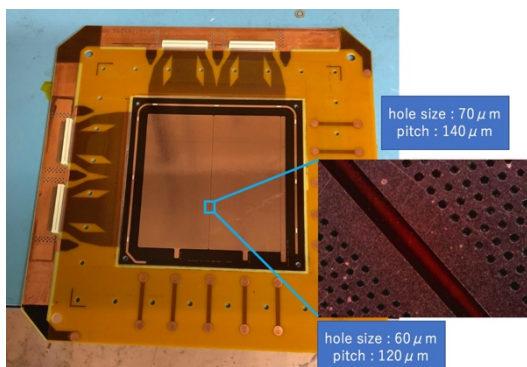


図 5: 制作した 2次元マイクロ RWELL 検出器。

検出器内にパラメータが違う領域を作り性能評価の効率化を可能にした。

る際に重要な、スケラビリティがあると期待されている。本研究で、世界初の 2次元読み出し小型 $\mu$ -RWELL(10cm<sup>2</sup>)を製作した。一つの検出器中に WELL のホールサイズとピッチが違う領域を作り、パラメータの最適化が効率良く出来る設計にし、実際に増幅された信号を確認した。今後さらなる検出器の性能評価が進められる段階まで到達した。

#### 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 6 件)

- ① T.Masubuchi et al., The ATLAS collaboration, “Search for the Decay of the Higgs Boson to Charm Quarks with the ATLAS Experiment”, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 211802, 査読有, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.211802>
- ② T.Masubuchi et al., The ATLAS collaboration, “Search for heavy resonances decaying into a W or Z boson and a Higgs boson in final states with leptons and b-jets in 36 fb<sup>-1</sup> of  $\sqrt{s}=13$  TeV pp collisions with the ATLAS detector”, JHEP 03 (2018) 174, 査読有, [https://doi.org/10.1007/JHEP03\(2018\)174](https://doi.org/10.1007/JHEP03(2018)174)
- ③ T.Masubuchi et al., The ATLAS Collaboration, “Evidence for the H $\rightarrow$ bb $\bar{\bar{b}}$  decay with the ATLAS detector”, Journal of High Energy

Physics 12 (2017) 24, 査読有, [https://doi.org/10.1007/JHEP12\(2017\)024](https://doi.org/10.1007/JHEP12(2017)024)

- ④ T.Masubuchi et al., The ATLAS collaboration, “Search for the Dimuon Decay of the Higgs Boson in pp Collisions at  $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS Detector”, Physical Review Letters 119 (2017) 51802, 査読有, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.051802>
- ⑤ T.Masubuchi et al., The ATLAS collaboration, “Search for a CP-odd Higgs boson decaying Zh in pp collisions at  $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector”, ATLAS conference note (2016), 査読無
- ⑥ T.Masubuchi et al., The ATLAS collaboration, “Search for the Standard Model Higgs boson produced in associated with a vector boson and decaying to bb $\bar{\bar{b}}$  pair in pp collisions at 13 TeV using the ATLAS detector”, ATLAS conference note (2016), 査読無

[学会発表] (計 6 件)

- ① 野口 陽平, 増淵 達也, 他, “LHC ATLAS 実験における VH(H $\rightarrow$ bb)事象の断面積測定に向けた背景事象の系統誤差の削減”, 2018年3月24日, 日本物理学会 2018年 第73会年次大会, 東京理科大学(千葉県野田市)
- ② 又吉 康平, 増淵 達也, 他, “高放射線環境における Micromegas 検出器の動作試験”, 2017年9月13日, 日本物理学会 2017年秋季大会, 宇都宮大学(栃木県宇都宮市)
- ③ 増淵 達也, “LHC-ATLAS 実験における VH $\rightarrow$ bb 事象を用いたヒッグス粒子探索”, 日本物理学会 2017年秋季大会, 2017年9月12日, 宇都宮大学(栃木県宇都宮市)
- ④ 増淵 達也, “LHCでのヒッグス研究の最新結果”, 基研研究会 素粒子物理学の進展 2017(招待講演), 2017年7月31日, 京都大学(京都府京都市)
- ⑤ 加藤 千曲, 増淵 達也, 他, “LHC-ATLAS 実験 Run2における Zh $\rightarrow$ llbb過程を用いた新粒子探索”, 2016年9月22日, 2016年 日本物理学会 2016年第71会年次大会, 東北大学(宮城県仙台市)
- ⑥ 増淵 達也, “Search for CP-odd Higgs boson decaying ZH in ATLAS at LHC Run2”, Beyond the Standard Model Higgs Searches(招待講演), 2016年3月21日, National Tsing Hua University(Taiwan)

[その他]

ホームページ等

<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/research/paper.html>

ATLAS Higgs Physics Public Results  
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/HiggsPublicResults>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

増渕 達也 (MASUBUCHI Tatsuya)  
東京大学・素粒子物理国際研究センター・  
助教  
研究者番号 : 20512148