

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2018～2019

課題番号：17KK0084

研究課題名（和文）ヒッグス湯川結合で探る素粒子物理の新展開

研究課題名（英文）Measurement of Higgs Yukawa coupling to probe new era of high energy physics

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） 8,800,000円

渡航期間： 20ヶ月

研究成果の概要（和文）：今まで未発見であった、ヒッグス粒子がボトムクォークに崩壊するモードをLHC-ATLAS実験、2017年までのデータを用いて解析を行った結果、5.4の有意度での世界初観測に成功した。また、ヒッグス粒子の主要生成過程の一つであるベクターボソンと随伴生成されるチャンネルも5以上の有意度で世界初観測に成功した。さらに、Run 2全てのデータを解析し、生成されたベクターボソンの横運動量に対して微分断面積測定を行い、誤差30%程度で標準模型と無矛盾であることを明らかにした。この位相空間は標準模型を超える物理に高い感度があり、有効場の理論で考えられる標準模型を超える相互作用パラメータに制限をつけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の重要な成果である、ヒッグス粒子がボトムクォークに崩壊するモードの初観測は、標準模型のパラメータの一つであるヒッグス粒子とボトムクォークの結合が、標準模型の予想通り湯川結合で記述されていることを世界で初めて観測した結果である。これによって、すでに観測されていた崩壊モードと合わせて全ての第3世代クォーク・レプトンと標準模型ヒッグス粒子が結合することが明らかになり、素粒子物理の大きな謎の一つである世代の解明への試金石となった。

研究成果の概要（英文）：The main achievement of this research is the first observation of the interaction of the Higgs boson with bottom quarks.

We searched for the decay of the Standard Model (SM) Higgs boson into a $b\bar{b}$ pair with the production in association with a W or Z boson at the LHC-ATLAS experiment. The study using the partial data of 13 TeV proton-proton collision at Run 2 is performed. An observed significance is 5.4 standard deviations with a combination with other searches for the $H \rightarrow b\bar{b}$. The VH production, which is the one of main production channels is also observed at the 5.3 standard deviations.

In the full Run 2 dataset, we measured differential cross sections as a function of the gauge boson transverse momentum in 30-80% uncertainties and found those are consistent with the SM expectations.

We also constrained several dimension-6 operators in the effective field theory which contains new interactions expected in the beyond SM.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ヒッグス粒子 LHC 湯川結合 ボトムクォーク ガス検出器 MPGD

様式 F - 19 - 2

1. 研究開始当初の背景

(1) LHC-Run 2 実験が重心系エネルギー 13 TeV で 2015 年に始まり、ヒッグス粒子の精密測定、特に結合定数の測定が進められていた。最も崩壊分岐比が大きい、ヒッグス粒子がボトムクォークに崩壊するモードは背景事象が多く、実験的に非常に難しい崩壊モードなため Run 1 では観測できず、Run 2 実験での観測が期待されていた。2016 年までの 36.1fb^{-1} のデータを用いて、有意度 3.6 を得られた。しかしながら背景事象由来の系統誤差が大きく、素粒子物理で“発見”と言われる 5 の統計的有意度に到達するために、さらなる解析の改善により系統誤差を減らす必要があった。

(2) 第 3 世代クォーク・レプトンとヒッグス粒子の結合を確立するのは Run 2 実験の重要な目標であるが、世代の謎により深く迫るためには第 2 世代との結合も観測する必要がある。しかし、第 2 世代クォーク・レプトンとヒッグス粒子の結合は非常に小さく、LHC-ATLAS 実験の高統計データをもってしても非常に困難である。LHC-ATLAS 実験は今後、高輝度 LHC に向けて段階的にアップグレードが予定されており、前方ミュオン検出器をインストールして、カバー領域を現行の $|\eta|=2.7$ から広げる計画がある。そこに配置するミュオン検出器は高レート環境でも高い位置分解能を有し、ある程度大きい領域をカバー出来るコストであることが求められていた。そのため、マイクロパターンガス検出器が一つの解として有望視されていた。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、ヒッグスがボトムクォークに崩壊するモードを有意度 5 以上で観測し、20% の精度でボトムクォークとの結合を測定することを主目的としている。そのためには 36.1fb^{-1} のデータを用いた解析で感度を制限していた検出器・背景事象のモデリング由来の系統誤差、そして背景事象のシミュレーションの統計誤差を低減する必要がある。それらの誤差を精査し、低減する手法を開発する。また、5 以上で有意な信号を観測できた場合、標準模型を超える物理に感度があるヒッグスの横運動量が高い領域の微分断面積を測定し、有効場の理論から標準模型を超える物理で考えうる相互作用パラメータに制限をつけることも目的とする。

(2) 高輝度 LHC の高レート環境でも動作可能なマイクロパターンガス検出器として μ -RWELL の研究開発に取り組む。 μ -RWELL 検出器は、マイクロパターンガス検出器の中でもマイクロメガスのメッシュや GEM のフォイルの様な浮いている構造がある設計ではないため、検出器製造が比較的容易に作製可能である。高エネルギー実験で使用される大面積でも検出器の均一性や安定性が向上する可能性がある。しかしながら、高エネルギー実験環境下での実績は乏しいため、本研究を通して μ -RWELL の基本性能を理解し、検出器性能に重要なパラメータを同定し、高エネルギー実験環境での安定動作への道筋をつける。

3. 研究の方法

(1) まず、2017 年度までに LHC-ATLAS 実験で取得した約 80fb^{-1} の 13TeV 陽子陽子衝突データを用いて、解析を行う。データ量は 2017 年に出版した論文から約 2 倍になり、統計誤差は 2 程度減ることが予想されるが、系統誤差が支配的になっているため、それらを一ずつ精査し、削減することで発見感度 5 を目指す。特に本研究では $ZH \rightarrow l\bar{l}bb$ チャンネルに焦点を当てて解析を行う。このモードは、Z ボソン崩壊由来の 2 つのレプトン（電子またはミュオン）を要求することにより、トリガーが容易で比較的クリーンな信号が得られるため、高統計になると有利になると考えている。また、終状態にニュートリノを含まないため、事象の完全再構成が可能であり、角度分布などヒッグス粒子の運動を詳細に観測することが出来る。

(2) 2次元読み出しが可能な μ -RWELL の試作機を開発しており、その性質を実験で測定することにより検出器のパラメータを決定していく。その際には CERN 施設での高強度線源や X 線照射装置を用いる。

4. 研究成果

(1) 2018 年度は 2017 年までに取得した 13TeV の陽子陽子衝突データ約 80fb^{-1} を解析した。特に $ZH \rightarrow l\bar{l}bb$ チャンネルで重要な背景事象である $\text{top}(t\bar{t}b, Wt)$ 事象のモデリングの系統誤差を減らすために、トップクォークが $e\mu$ 終状態を持つ事象をコントロール領域として、フレーバーの対称性から信号領域 ($ee, \mu\mu$) の事象を完全にデータから見積もる方法を導入した。これによって大きな系統誤差の一つであった top 背景事象の系統誤差をほぼゼロし、コントロール領域の統計誤差に押し込み、今後データの統計が増えるにつれて減らせることが出来ることを実証した。

$ZH \rightarrow l\bar{l}bb$, 2レプトンチャンネルのみで観測された発見感度は 3.4 に到達し、0/1レプトンチャンネルと統計的に統合することで 4.9 の発見感度に到達した。また、ヒッグス粒子がボトムクォークに崩壊するモードを他の生成チャンネルと統合し、解析されていた Run 1 の結果も統合することで 5.4 の統計的有意度でヒッグス粒子とボトムクォークの結合の存在を世界で初めて観測することに成功した。観測した信号強度は、 $\mu_{H \rightarrow bb} = 1.01 \pm 0.20$ で標準模型と無矛盾ということも検証できた。また、他の VH 生成モードと統合し、ヒッグス粒子の主要生成モー

トである VH も統計的有意度 5.3 で世界初観測に成功した。これらの結果は Physics Letters B に出版されており、物理的な価値の重要性から CERN、ATLAS 実験でプレスリリースも行った。この成果は、過去数十年と様々な実験で発見出来なかったヒッグス粒子とボトムクォークの結合を明らかにしただけでなく、今まで観測されていた結果と合わせ、ヒッグス粒子と第 3 世代クォークの結合が標準模型の予想値と現在の測定精度内でよく一致しており、ヒッグス粒子が物質の質量起源となり、クォーク・レプトンの世代の解明の鍵であることを実験的に示した。

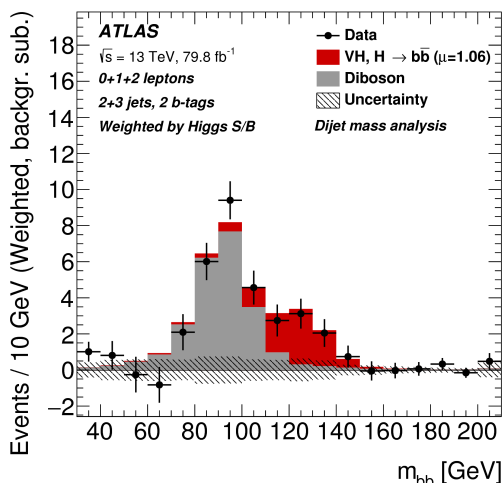


図 1 観測された 2 つの b-ジェットから再構成された質量分布 (0/1/2 レプトンチャンネルの信号背景事象比で重み付けされている)

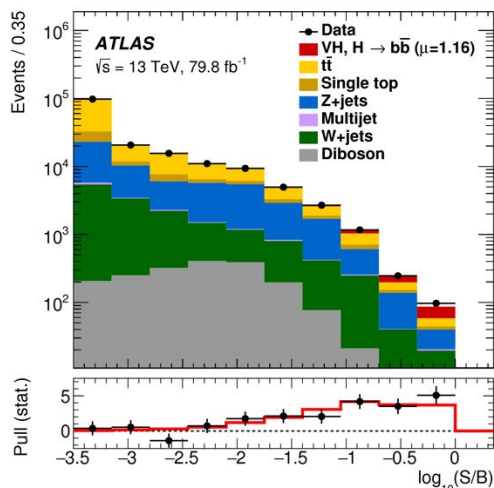


図 2 観測されたデータを信号背景事象比で並び替えた分布。下のパネルでデータと標準模型 ($\mu=1.16$) の分布を比較

また、VH 生成モードの初観測からベクターボソンの横運動量の微分断面積測定が可能になり、標準模型を超える物理感度が高い高横運動量を持つヒッグス粒子の位相空間の測定も世界で初めて行った。測定結果は、JHEP で出版された。さらに、この結果から微分断面積測定に重要な系統誤差も明らかになり Run 2 全データを用いる解析に向けて改善点も確認することが出来た。

2019 年度は、2018 年までに取得した Run 2 全データ約 140fb^{-1} を用いて解析を行い、更に重要な系統誤差や物理感度を向上させるため解析を行った。

特に 2 レプトンチャンネルでは前年度有用性を示したデータで top 背景事象を見積もる方法がさらなる高統計データで有用性が認められ、デフォルトの方法として採用された。また、理論起源の系統誤差を一切見積もる必要がなくなり、複雑な統計処理を簡潔に出来る方法としても評価された。さらに、今まで注目されていなかった Z ボソンの偏極情報を使いヒッグスの信号と Z+jets の背景事象の分離性能を向上できることも示し、感度改善に貢献した (図 3, 4)。

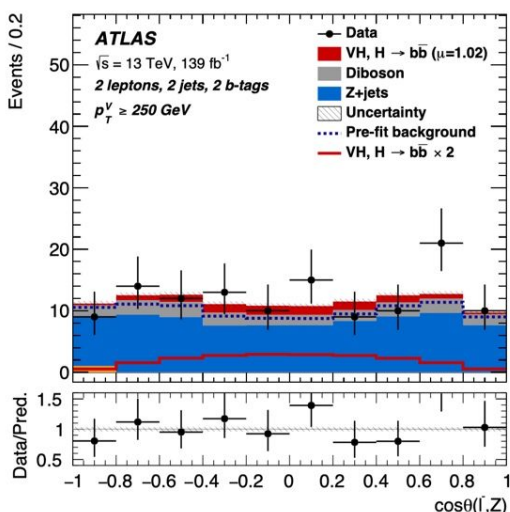


図 3 Run 2 全データで解析したときの Z の偏極を表す変数。信号事象と Z+jets 背景事象の分布の差を最終変数である機械学習 (BDT) のインプットとして使っている

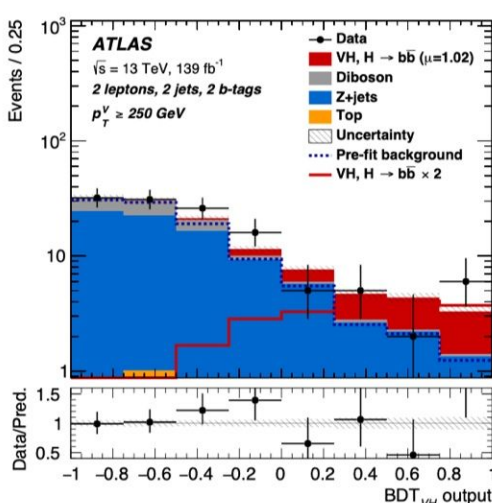


図 4 Run 2 全データで解析した VH \rightarrow llbb チャンネルの最終分離変数 (BDT を使用)。図 3 の偏極変数をインプットに導入したことで、約 7% 感度向上した

VH 0/1 レプトンチャンネルと統合して解析した結果、VH(H→bb)生成・崩壊過程単独で6.7の統計的有意度で信号を観測し、信号強度は $\mu_{VH}^{bb}=1.02^{+0.18}_{-0.17}$ となり約17%の精度で標準模型と一致していることを確認した。さらにZH(WH)生成過程を統計的有意度5.3, (4.0)で観測し、2018年に出版した観測精度を大きく改善することに成功した。また、ベクターボソンの横運動量の関数として微分断面積を測定しZHチャンネルは $75 \text{ GeV} < p_T^V < 150 \text{ GeV}$, $150 \text{ GeV} < p_T^V < 250 \text{ GeV}$, $p_T^V > 250 \text{ GeV}$ の3つの領域で微分断面積を測定し30–80%の精度で標準模型の予想値と無矛盾であることを確認することが出来た(図5)。

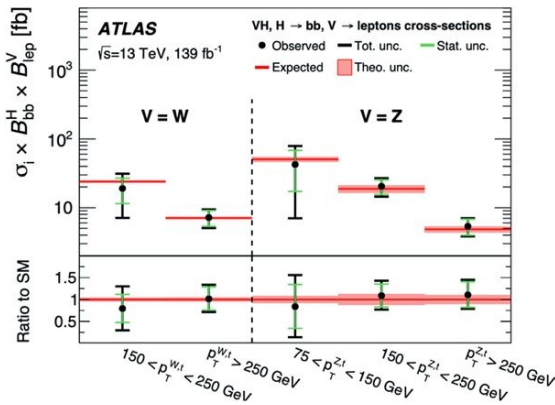


図5 Run 2 全データで解析したときのベクターボソンの横運動量の微分断面積。WボソンとZボソンは別々に測定している

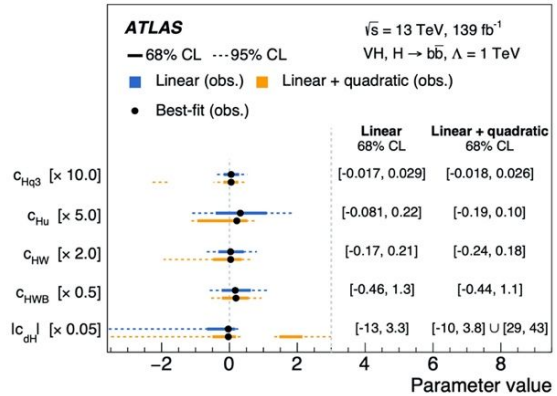


図6 有効場の理論でVHチャンネルに感度があるパラメータに対する制限。0が標準模型を表している

さらに、有効場の理論を標準模型であるdimension-4から拡張し、dimension-6までの標準模型を超える相互作用を導入し、それらのパラメータに対して制限を与えた(図6)。また、更に高いベクターボソンの横運動量領域の感度を上げるために、ヒッグスから崩壊した2つのb-ジェットが1つの大きなジェットとして再構成される位相空間での測定も行い、ベクターボソンの横運動量が400 GeV以上の領域でも断面積が測定でき、有効な方法であることを示した。これらの結果はPreliminaryな結果として公表されており、European Physics Journal C(EPJC)とPhysics Letters B(PLB)に投稿の準備を進めている。

研究代表者は、2019年までATLAS Higgs bb解析グループのコンピナーを務め、ヒッグス粒子がボトムクォークに崩壊するモードの初観測を手動した。また、Run 2全データを用いた解析では解析グループの責任者・論文の編集者を務め、100名規模の大きな国際解析グループを主導的な立場で研究を推進することが出来た。

また、2019年にはHbb WorkshopのInternational Organizing Committeeのメンバーとしてワークショップを主催し、成功させた(図7)。



図7 ATLAS Hbb Workshopの集合写真

(2)2次元読み出し μ -RWEELL検出器の性能評価を線源などの放射線源を用いて進めた。ガスはマイクロメガスで経験があるAr:CO₂=97:3%を用いた。今後、検出器パラメータを決めるためにはもう少し検出器起源のノイズを落とす必要があることがわかり、実験を進めている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 ATLAS Collaboration (T. Masubuchi et al.)	4. 巻 786
2. 論文標題 Observation of $H \rightarrow b\bar{b}$ decays and VH production with the ATLAS detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 59 ~ 86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.09.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 ATLAS Collaboration (T. Masubuchi et al.)	4. 巻 98
2. 論文標題 Search for Higgs bosons produced via vector-boson fusion and decaying into bottom quark pairs in $s=13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 52003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.052003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 ATLAS Collaboration (T. Masubuchi et al.)	4. 巻 2019
2. 論文標題 Measurement of VH , $H \rightarrow b\bar{b}$ production as a function of the vector-boson transverse momentum in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. High Energ. Phys	6. 最初と最後の頁 141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/JHEP05(2019)141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 ATLAS Collaboration	4. 巻 ATLAS-CONF-2020-007
2. 論文標題 Measurement of the associated production of a Higgs boson decaying to b-quarks with a vector boson at high transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ATLAS Conference Note	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 ATLAS Collaboration	4. 巻 ATLAS-CONF-2020-006
2. 論文標題 Measurements of WH and ZH production in the H bb decay channel in pp collisions at 13TeV with the ATLAS detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ATLAS Conference Note	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計9件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 増淵達也
2. 発表標題 LHC ATLAS実験第2期運転の完了を受けたヒッグス測定と新物理探索の最新結果
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuya Masubuchi
2. 発表標題 Recent Results and Future Prospects of Higgs Physics at the LHC
3. 学会等名 The 4th International Workshop on Higgs as Probe of New Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuya Masubuchi
2. 発表標題 Measurements and searches of Higgs boson decays to two fermions
3. 学会等名 CIPANP 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuya Masubuchi
2. 発表標題 VH->bb Status
3. 学会等名 ATLAS Collaboration Week (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 増淵達也
2. 発表標題 LHC Higgs最新結果
3. 学会等名 新テラスケール研究会 ~ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学の新展開~ (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuya Masubuchi
2. 発表標題 Introduction and Goal of Hbb workshop 2019
3. 学会等名 ATLAS Hbb workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野口陽平
2. 発表標題 LHC ATLAS実験における VH (H bb)事象の断面積測定
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野口陽平
2. 発表標題 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削減
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野口陽平
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験 Run2における $H \rightarrow bb$ 崩壊の探索と測定
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>プレスリリース Long-sought decay of Higgs boson observed https://home.cern/news/press-release/physics/long-sought-decay-higgs-boson-observed ヒッグス粒子とボトムクォークの結合、ついに初観測 物質の質量起源の解明 http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/information/20180828.html</p> <p>ATLAS $H \rightarrow bb$ Workshop, Genova 14-17 May 2019, International Organising Committee http://web.ge.infn.it/hbb/</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	De Oliveila Rui (De Oliveila Rui)	欧州原子核研究機構・Experimental Physics・Permanent Staff	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	Dao Valerio (Dao Valerio)	欧州原子核研究機構・Experimental Physics・Research Fellow	