

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 17 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400294

研究課題名(和文) アトラス実験でのヒッグス湯川結合の測定

研究課題名(英文) Measurement of Higgs Yukawa couplings with the ATLAS experiment

研究代表者

原 和彦 (HARA, Kazuhiko)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：20218613

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：2012年にCERN/LHC加速器で発見されたヒッグス粒子が、標準模型が記述する通り万物の素粒子に質量を与える粒子であるか。この研究ではLHC/ATLAS実験装置で得られた25/fbのデータを用いてフェルミオンとの結合(湯川結合)の測定を行った。最も重いレプトンであるタウ粒子に対して、標準模型の予言と観測された事象数の比 $\mu=1.43^{+0.43}_{-0.37}$ となり、約4.5の有意度で湯川結合の存在を示すことができた。ヒッグスが直接崩壊できる最も重いクォークであるボトムクォーク対への崩壊数の測定は、クォークにも質量を与えるかの検証となるが、有意度は1.4に留まり明白な生成の証拠には至っていない。

研究成果の概要(英文)：Whether the Higgs boson, discovered in 2012 at CERN/LHC, generates the masses to all particles as predicted by the Standard Model? We measured the Higgs Yukawa couplings using the 25/fb of data collected by LHC/ATLAS experiment to shed light on this question. Paris of the heaviest lepton, tau, are found to be produced via Higgs at a rate  $\mu=1.43^{+0.43}_{-0.37}$  normalized by the Standard Model. This corresponds to a significance of 4.5 and proves for the first time the existence of the Yukawa coupling for the lepton. For the quark, the search covered the production of b-quark pairs via Higgs. The significance was 1.4 for this mode, and we require more statistics to answer to the question.

研究分野：素粒子物理学(実験)

キーワード：ヒッグス粒子 湯川結合 LHC ATLAS タウレプトン ボトムクォーク

1. 研究開始当初の背景

(1) ヒッグス粒子は 2012 年に CERN 研究所 LHC 加速器における ATLAS および CMS 実験グループにより発見された。発見には、ヒッグス粒子が光子対、Z 粒子対、W 粒子対などのボーズ粒子対に崩壊するモードが主に用いられた。

(2) 本研究は、ヒッグス粒子がフェルミ粒子対に崩壊するモードの測定に関するもので、当時は、統計的にも全く有意な観測結果は得られていなかった。

2. 研究の目的

素粒子に質量を与える BEH 機構およびその場の量子ヒッグス粒子は、元来は力を伝えるボーズ粒子のゲージ対称性を担保する為に導入された。同じヒッグス粒子により、素粒子の標準模型では、フェルミ粒子にも質量を与えるとされている。このヒッグス粒子とフェルミ粒子との結合(湯川結合)を明らかにすることは、素粒子に質量を与える機構を統括的に理解することであり、ヒッグス粒子は標準模型が記述するように「万物の質量起源粒子」であるかを検証することができる。

3. 研究の方法

(1) LHC-ATLAS 実験は 2012 年終了時までに重心系エネルギー 7TeV と 8TeV で合計 25/fb の陽子陽子衝突データを収集した。これらのすべてのデータを用い、解析手法を改善することで、ヒッグスが  $\tau\tau$  粒子対、 $b$ クォーク対に崩壊するモードを用いて湯川結合の測定を行う。これらはヒッグスが崩壊して生成される最も重いレプトンおよびクォークであり、2つの測定を通じてレプトンとクォークそれぞれにヒッグス粒子が質量を与えているかを検証できる。

(2) LHC は 2015 年に重心系エネルギー 13TeV で衝突を再開し、ATLAS 実験は 6/fb のデータを収集した。この統計は有意な観測には不十分ではあるが、トップクォークとの湯川結合を測定する解析方法を検討する。

(3) ATLAS 実験の解析結果はグループ内の合意を得て公表される。また解析には膨大な検討事項が存在し、そのため大学院生を中心に ATLAS 内で解析を分担し他の ATLAS メンバーとも密接な連携の下に遂行する。

(1), (2)の解析は大学院生を 5 名で分担したが、本年度までに 3 名が博士号を修得した。

4. 研究成果

(1) タウレプトンとの結合

湯川結合の測定においてレプトンの測定で最初に成果を上げることができた。

粒子の崩壊にはハドロン終状態( $h$ )とレプトン終状態( $l$ ;  $l=e, \mu$ )のモードがある。レプトン終状態にはニュートリノが含まれるので  $h$  の事象再構成精度が限定的であ

る一方でハドロン終状態では背景事象となる QCD ジェットの除去が課題となる。信号  $H^+$   $H^-$  に対する最も大きな背景事象は  $Z^+$   $Z^-$  であり、両者は事象選別後に対の不変質量の違いを用いて区別する。そのため、背景事象の除去と質量再構成精度が共に必要となる。図 1 は終状態に 2 つの候補を含む事象の対の質量分布を示す。事象の多くは、 $Z$  の裾であるが、ヒッグスの質量を 125  $\text{GeV}/c^2$  とし標準模型の結合を仮定した場合と矛盾しない超過事象を観測した。

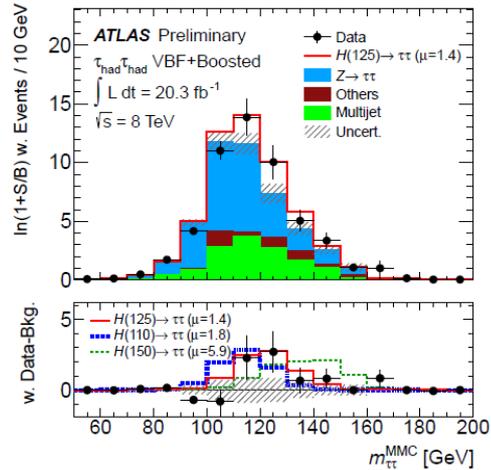


図 1  $\tau\tau$  終状態の候補事象で再構成した不変質量分布。データの分布を標準模型より 1.4 倍多いヒッグスの生成と背景事象の和と比較。(下) 背景事象からの超過分をヒッグスの質量をいくつか変えてフィットした結果

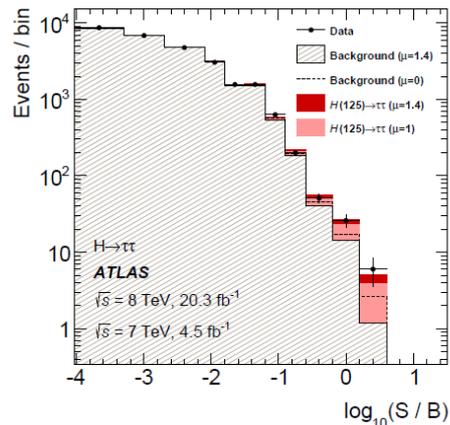


図 2  $H^+$   $H^-$  候補事象を多変数解析における信号期待量とバックグラウンド量比で示す。

この解析では背景事象をより精密に分離棄却するために BDT (= Boosted Decision Tree) などの統計手法を駆使した。終状態に  $h$  と  $l$  の候補を含む事象のヒッグスらしさと背景事象らしさの比 (S/B) で区別した事象数分布を図 2 に示す。S/B > 1 の領域がヒッグス粒子の観測感度が高いが、その領域では背景事象数から明らかな超過を示した。

他の崩壊モードも総合的に評価し、標準模型が予測する生成数に対して観測された事象数の比 ( $\mu$ ) は、 $\mu = 1.43^{+0.43}_{-0.37}$  が測定結果である。この値からヒッグス粒子がレプトンに質量を与えることが約4.5の有意度で観測できた。CMSの結果と合わせるとヒッグスがレプトンへ質量を与えることは確定した。これはヒッグス湯川結合が存在することを初めて示す重要な結論である。

### (2) ボトムクォークとの結合

クォークに対しては  $b$  が観測できる可能性が最も高い。QCDのバックグラウンドが多いため、 $H \rightarrow bb$  単独ではなく、 $W/Z$  粒子が随伴されるモードで  $W$  や  $Z$  が崩壊して発生する高運動量のレプトンをトリガーにすることで探索した。このチャンネルでも多変数解析で信号/バックグラウンド比を最適化する解析法を用いた。

図3は、この解析法で  $H \rightarrow bb$  が存在しないと仮定した場合に、生成断面積に対してどの程度の制限を与えられるかを、シミュレーションで評価した期待値(破線)およびその精度を1, 2の帯として示している。逆に点線は標準模型の  $H \rightarrow bb$  が存在する場合の予想値である。データはその中間(黒点)に位置し、 $H \rightarrow bb$  が存在するという統計的有意度は  $125.36 \text{ GeV}/c^2$  の質量では1.4に留まった。で  $H \rightarrow bb$  があれば期待される2.6を下回り、標準模型の期待される事象数の観測に至らなかった。統計的に標準模型とも湯川結合が存在しないと矛盾しない。

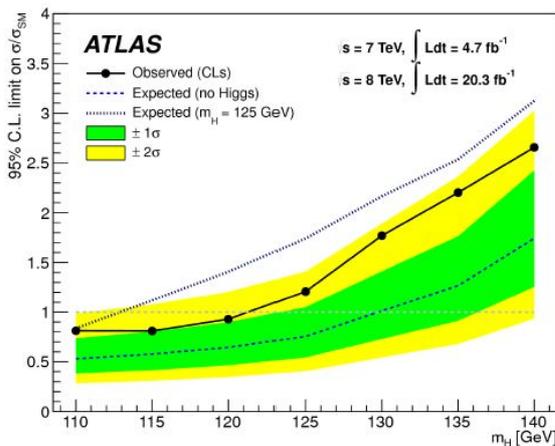
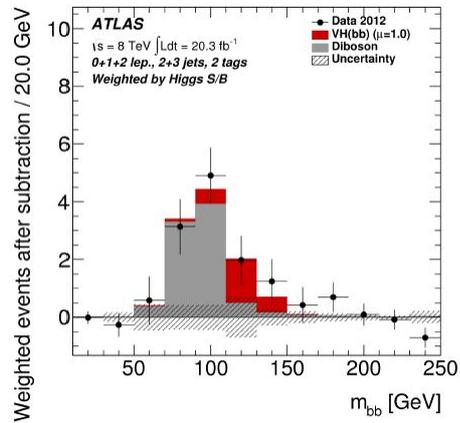


図3  $H \rightarrow bb$  が存在しない場合の期待される生成断面積の上限値(破線) 1, 2の不確かさを色で示す。存在する場合の標準模型期待値(点線)に対して測定値(黒点)は中間に位置した。

図4は  $bb$  候補事象の対の不変質量分布を、背景事象であるボゾン対( $WW, WZ, ZZ$ ) 生成と比較した8 TeVの衝突データの結果である。この分布からは両者の一致度は良い。しかし7 TeVのデータも統合した最終結果では  $H \rightarrow bb$  生成断面積は標準模型の期待値で規格化して



$\mu = 0.52 \pm 0.32$  (統計不確かさ)  $\pm 0.24$  (系統不確かさ) にとどまった。今後より統計量を増やした測定が不可欠である。

図4  $H \rightarrow bb$  探索のためにボゾン対生成以外の背景事象を差し引いた不変質量分布と8 TeVでのデータ(点)の比較。赤は標準模型で期待される  $H \rightarrow bb$  分布。

### (3) ATLASでの湯川結合とゲージ結合結果

ATLAS実験では、すべてのヒッグス崩壊モードを統合した断面積比は  $\mu = 1.18^{+0.15}_{-0.14}$  と測定し、標準模型と一致した結果を得た。

図5にはこれらの他のヒッグスの崩壊モードを含めた標準模型で規格化したボゾンとフェルミオン結合定数の測定のまとめを示す。これらの結合は崩壊過程および生成過程からも測定される。

ヒッグスの発見チャンネルである  $\gamma\gamma$  対、 $Z$  対、 $W$  対による解析からボゾンとのゲージ結合  $k_V$  が1と矛盾ないことが示されている。また、フェルミオンとの湯川結合については今回の  $\tau\tau$  対や  $b$  対それぞれから  $k_F$  は1もしくは-1と矛盾ないことを示すことができた。 $\tau\tau$  対では生成にトップクォークが関与する為、その結果との整合性を考慮すると  $k_F$  は1が好まれる。

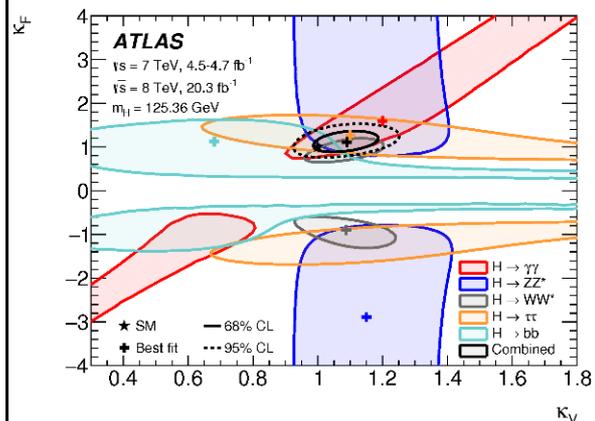


図5 ATLAS実験によるヒッグス崩壊モード毎のボゾン ( $k_V$  横軸) とフェルミオン ( $k_F$  縦軸) 結合定数で示す。標準模型による予想値(1, 1)に対し、 $bb$  とともに矛盾しないが  $k_F = -1$  も排除しきれない。

### (4) 今後の展望

LHC実験は2015年度から13 TeVで再開され新

たなデータ収集を継続している。特にボトムに対しては統計数を増やすことで2016年度のデータにより湯川結合の存否を確定できると期待できる。また、トップクォーク対を随伴するヒッグスを測定することでトップ湯川結合を直接測定し、それに関しても知見が得られることも期待できる。現在、大学院生2名がボトムおよびトップ湯川結合をそれぞれの研究を課題として取り組んでいる。

#### 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3件)

*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*, ATLAS Collaboration (G. Aad, K. Hara, et al.)977番目/2827名, EPJC(accepted) 2016 Jan. 査読有, DOI: 10.1140/epjc/s10052-015-3769-y

*Evidence for the Higgs-boson Yukawa coupling to tau leptons with the ATLAS detector*, ATLAS Collaboration (G. Aad, K. Hara, et al.) 1001番目/2885名, JHEP 04 (2015)117査読有.  
DOI: 10.1007/JHEP04(2015)117.

*Search for the bb decay of the Standard Model Higgs boson in associated (W/Z)H production with the ATLAS detector*, ATLAS Collaboration (G. Aad, K. Hara, et al.)1011番目/2892名, JHEP 01 (2015)069.査読有. DOI: 10.1007/JHEP01(2015)069.

〔学会発表〕(計4件)

伊藤史哲、金信弘、受川史彦、原和彦、佐藤構二、大川英希、山口洋平、LHC-ATLAS実験Run2におけるWH  $1\text{v}bb$ 崩壊過程でのトップクォーク対背景事象除去法の改善、日本物理学会第71回年会、2016年3月19日(土)~22日(火)東北学院大学 泉キャンパス(宮城県仙台市)

木内健司、原和彦：LHC-ATLAS 実験における**b**クォーク対に崩壊する標準模型ヒッグス粒子の探索、日本物理学会2014 年秋季大会(2014 年9 月18 日-21 日)、佐賀大学本庄キャンパス(佐賀県佐賀市)。

淵遼亮、受川史彦、原和彦、金信弘、塙慶太：LHC-ATLAS 実験における  $H \rightarrow hh$   $bb$  崩壊チャンネルでのHeavy Higgsの探索、日本物理学会2014 年秋季大会(2014 年9 月18 日-21 日)、佐賀大学本庄キャンパス(佐賀県佐賀市)。

木内健司、江成祐二、永井義一、音野瑛俊、原和彦、金信弘、受川史彦：LHC-ATLAS 実験における  $ZH \rightarrow bb$  過程を用いた標準模型ヒッグス粒子の探索、日本物理学会2013 年会秋季大会(2013 年9 月20 日-23 日)、高知大学朝倉キャンパス(高知県高知市)。

〔その他〕

ホームページ等

<http://hep-www.px.tsukuba.ac.jp/~hara/YukawaCouple.html>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

原 和彦 (HARA, Kazuhiko)  
筑波大学・数理物質系・准教授  
研究者番号：20218613