

## 論文の内容の要旨

# Evidence for the Higgs boson decaying to a pair of $b$ quarks ( $b$ クォーク対に崩壊するヒッグス粒子の証拠)

加藤千曲

ヒッグス粒子は標準模型の中で素粒子の質量を説明するために予言された。Large Hadron Collider (LHC) は前人未到の重心系エネルギーで陽子と陽子を衝突させて標準模型を検証する。その結果は標準模型を超える新物理を探索するために重要であり、階層性問題、バリオン数問題、暗黒物質、ニュートリノ質量などの未解決問題を説明する可能性がある。LHC における ATLAS と CMS 実験は 2012 年までの Run1 でヒッグス粒子を発見した [1, 2]。その質量は約 125 GeV であり、その性質はこれまでのところ標準模型と無矛盾である [3]。

しかし、ヒッグス粒子の  $b$  クォーク対への崩壊 ( $H \rightarrow bb$ ) は、背景事象の多さや限られたデータ統計などから Run1 で発見されなかった [4, 5]。  $H \rightarrow bb$  はヒッグス粒子の最も支配的な崩壊であり、標準模型では 58% の崩壊分岐比を持つ。その信号数は標準模型における湯川結合の検証のために重要であり、標準模型を超える新物理にも感度を持つ [6]。例えばヒッグス粒子が暗黒物質に崩壊するモデルなどがあり、超対称性モデルも結合のずれを予言する。

歴史的に、CDF と D0 実験は Tevatron 陽子反陽子衝突データを用いて  $H \rightarrow bb$  を探索し、質量 125 GeV に有意度 2.8 標準偏差の超過を報告した [7]。重心系エネルギーは 1.96 TeV、積分ルミノシティは  $9.7 \text{ fb}^{-1}$  である。ATLAS と CMS 実験は LHC 陽子陽子衝突データを用いて  $H \rightarrow bb$  を探索し、観測(期待)有意度 2.6 (3.7) 標準偏差の超過を報告した [4, 5]。重心系エネルギーは 7, 8 TeV、積分ルミノシティは 5, 20  $\text{fb}^{-1}$  である。しかし、まだ信号強度の測定誤差は大きく、ATLAS と CMS はともに標準模型より低い値を示している。そのため、 $H \rightarrow bb$  は 2015 年からの Run2 の重要課題である。

最も大きい生成断面積を持つヒッグス粒子の生成過程であるグルーオン融合とベクターボソン融合は  $H \rightarrow bb$  探索における感度が低い。これは  $H \rightarrow bb$  が終状態における 2 本の  $b$ -jet として再構成されるため、膨大な生成断面積を持つ multi-jet 背景事象との分離が難しいためである。そのため、第 3 に大きい生成断面積を持つベクターボソンを伴う生成 ( $VH$ ) が、 $H \rightarrow bb$  探索における最も感度の良いチャンネルとなる。このチャンネルでは終状態のミューオンもしくは電子 (lepton) を用いて効率的に信号事象を選び出すことができる。

$VH$  には再構成される lepton の数によって 3 つのチャンネルがある:  $ZH \rightarrow \nu\nu bb$  (0-lepton),  $WH \rightarrow l\nu bb$  (1-lepton),  $ZH \rightarrow ll bb$  (2-lepton)。2-lepton は他のチャンネルに比べて信号数が少ないが、2 つの lepton を用いて multi-jet や  $t\bar{t}$  などの背景事象を抑制できる。さらには、終状態の横運動量 ( $p_T$ ) のバランスを利用してヒッグス粒子の質量分解能を改善できる。本研究は主に 2-lepton を解析し、ATLAS の組み合わせた結果を確認する。ATLAS 検出器で取得された LHC Run2 の陽子陽子衝突データを用いる。重心系エネルギーは 13 TeV、積分ルミノシティは  $36.1 \text{ fb}^{-1}$  である。

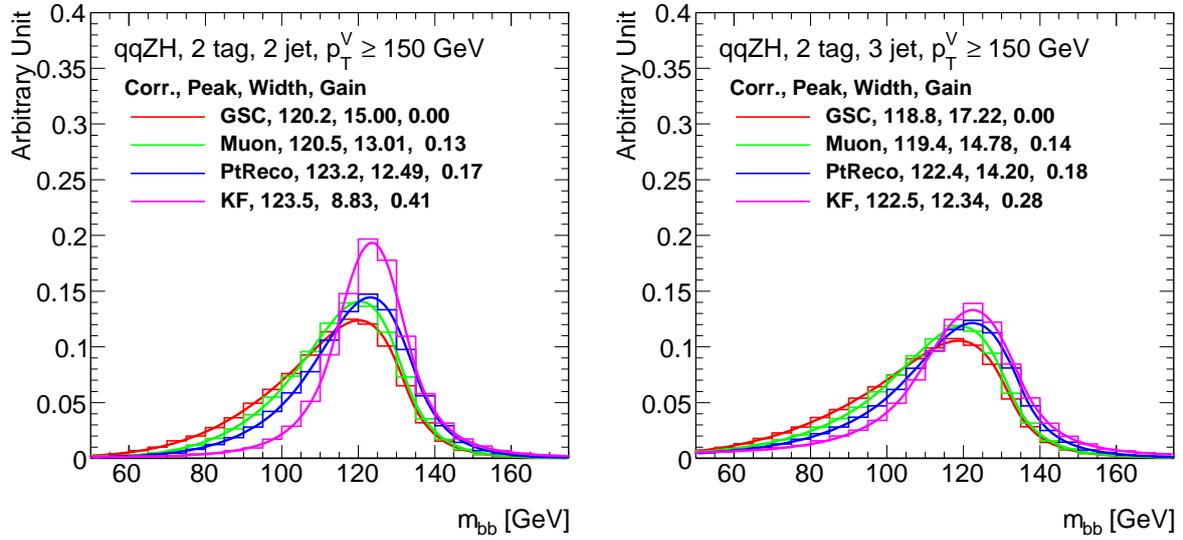


図1 ヒッグス粒子の質量分解能.  $Z$  の  $p_T$  が 150 GeV 以上の領域で, 2 本の jet を持つ事象 (左) と 3 本以上の jet を持つ事象 (右) である. 赤線は標準的な jet のエネルギー較正である. 緑線はミュオン補正である. 青線は  $p_T$  依存補正である. 桃線は Kinematic Fit である.

データ取得では lepton を用いたトリガーが重要になる. 陽子陽子衝突のほとんどは multi-jet 背景事象であり, すべての事象を記録することはできない. そのため, 終状態に lepton を持つ事象を選び出してデータを取得する必要がある. ATLAS の第一段階エンドキャップミュオントリガーは, 検出器のヒット情報を用いて高い運動量のミュオンを持つ事象を選び出す. しかし, 1 部の検出器は Run1 で損傷し使えない状態になっていた. そこで, 2012 年から Run2 用の検出器を製作し, 2014 年から検出器の交換や試験運転などを行った. その結果, 約 90% のトリガー効率を達成し, 2016 年までのデータ取得に成功した.

データ解析では事象選別として 2 つの lepton と 2 本の  $b$ -jet を要求する. 2 つの lepton から求めた質量は約 91 GeV の  $Z$  粒子の質量であることを要求する.  $b$ -jet 識別は第 2 崩壊点などの情報を用いて効率 70%, 純度 97% 程度で選び出す. 本研究では, 多変量解析で感度を約 20% 改善し, カット解析で結果の妥当性を確認する. また,  $Z$  の  $p_T$  が高く, 2 本の jet を持つ領域の感度が高いため,  $Z$  の  $p_T$  や jet の数で事象を分類する. 事象選別後に残るの主要な背景事象は  $Z$ +jets と  $t\bar{t}$  である.  $Z$ +jets は最終分離変数の sideband 領域,  $t\bar{t}$  は 2 つの lepton がミュオンと電子 1 つずつの領域, のデータとシミュレーションを用いて見積もった.

$H \rightarrow b\bar{b}$  の信号は 2 本の  $b$ -jet から求めた質量 ( $m_{bb}$ ) 分布における超過として観測される可能性がある. しかし, 標準的な jet のエネルギー較正では  $b$ -jet のエネルギーは低く測定され, ヒッグス粒子の質量分解能が悪化してしまう. そこで  $b$ -jet のエネルギー補正を研究した. まず, セミレプトニック崩壊由来のミュオンを  $b$ -jet に足すことで, カロリメーターで測定されないエネルギーを補正した (ミュオン補正). さらに,  $p_T$  による平均的な応答補正により,  $b$ -jet の広がりなどによる低い応答を補正した ( $p_T$  依存補正). また, 2-lepton チャンネルでは終状態の  $p_T$  のバランスを利用して  $b$ -jet のエネルギー分解能を改善した (Kinematic Fit). これらの補正の結果, 図 1 に示すように, ヒッグス粒子の質量分解能を最大約 40% 改善した.

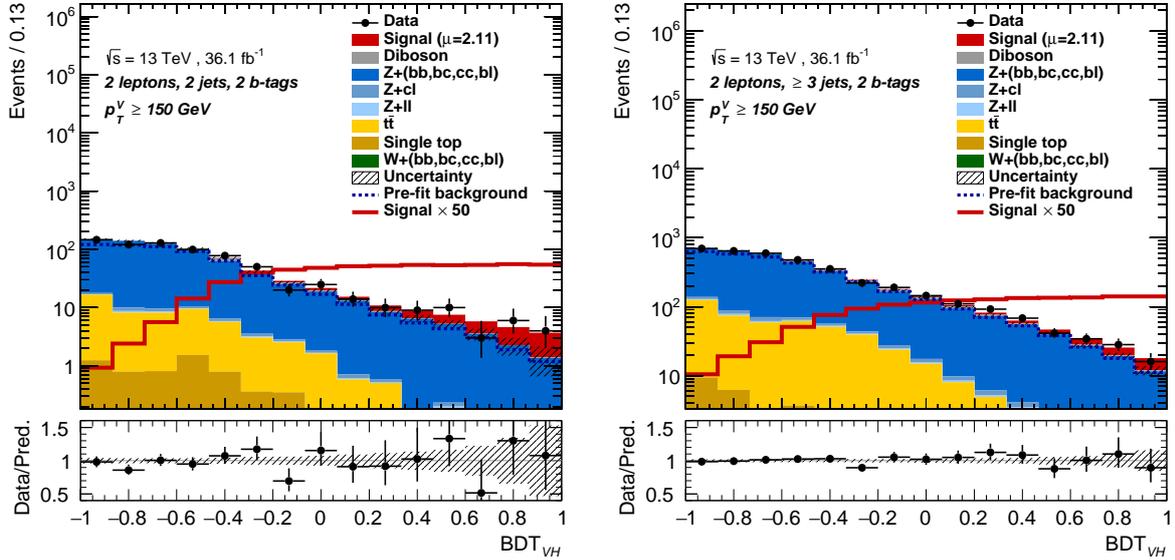


図2 BDT<sub>VH</sub> 分布.  $Z$  の  $p_T$  が  $150 \text{ GeV}$  以上の領域で, 2 本の jet を持つ事象 (左) と 3 本以上の jet を持つ事象 (右) である. 色塗りのヒストグラムは信号と背景事象のシミュレーションを積み重ねたものである. 赤線は信号のシミュレーションを積み重ねなかった場合である. 斜線のバンドは統計誤差と系統誤差を合わせた誤差である. 下のパネルはデータと信号と背景事象のシミュレーションの比である.

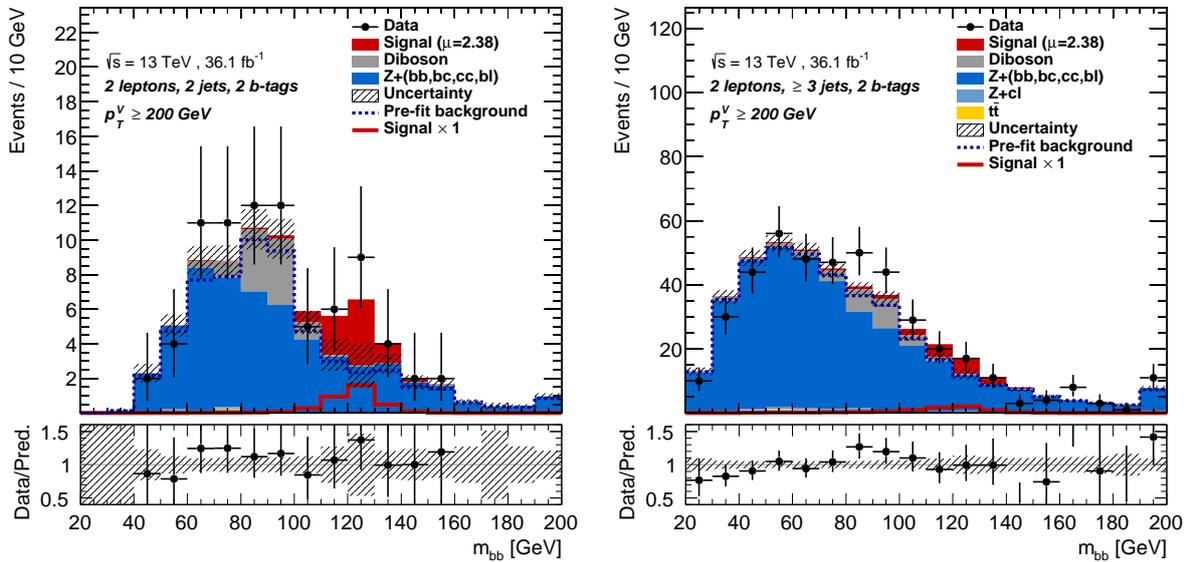


図3  $m_{bb}$  分布.  $Z$  の  $p_T$  が  $150 \text{ GeV}$  以上の領域で, 2 本の jet を持つ事象 (左) と 3 本以上の jet を持つ事象 (右) である. 色塗りのヒストグラムは信号と背景事象のシミュレーションを積み重ねたものである. 赤線は信号のシミュレーションを積み重ねなかった場合である. 斜線のバンドは統計誤差と系統誤差を合わせた誤差である. 下のパネルはデータと信号と背景事象のシミュレーションの比である.

統計解析では、統計誤差や  $b$ -jet 識別効率などの実験系統誤差、信号と背景事象のシミュレーションの系統誤差を考慮して最尤推定を行った。図 2 に多変量解析を用いた分離変数 ( $\text{BDT}_{VH}$ ) 分布を示す。観測 (期待) 有意度 3.6 (1.9) 標準偏差の超過を発見した。信号強度は  $\mu = 2.11^{+0.50}_{-0.48}$  (stat.)  $^{+0.65}_{-0.47}$  (syst.) である。また、カット解析で結果の妥当性を確認した。図 3 に  $m_{bb}$  分布を示す。観測 (期待) 有意度 3.4 (1.6) 標準偏差の超過を発見した。信号強度は  $\mu = 2.38^{+0.62}_{-0.59}$  (stat.)  $^{+0.75}_{-0.53}$  (syst.) である。さらに、diboson 背景事象を信号としてみなした場合の多変量解析で結果の妥当性を確認した。観測 (期待) 有意度は 3.5 (3.5) 標準偏差である。信号強度は  $\mu = 0.96^{+0.19}_{-0.19}$  (stat.)  $^{+0.26}_{-0.22}$  (syst.) である。最終的に、ATLAS の  $VH$  0, 1, 2-lepton チャンネルの Run1 と Run2 の解析を組み合わせた結果 [8], 観測 (期待) 有意度は 3.6 (4.0) 標準偏差である。信号強度は  $0.90^{+0.18}_{-0.18}$  (stat.)  $^{+0.21}_{-0.19}$  (syst.) である。この結果は標準模型と無矛盾である。

## 参考文献

- [1] The ATLAS Collaboration. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. 2012. doi: 10.1016/j.physletb.2012.08.020.
- [2] The CMS Collaboration. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. 2012. doi: 10.1016/j.physletb.2012.08.021.
- [3] C. Patrignani and Particle Data Group. Review of Particle Physics. *Chinese Physics C*, 40 (10):100001, 2016. URL <http://stacks.iop.org/1674-1137/40/i=10/a=100001>.
- [4] ATLAS Collaboration. Search for the  $b\bar{b}$  decay of the Standard Model Higgs boson in associated ( $w/z$ ) $h$  production with the ATLAS detector. 2014. doi: 10.1007/JHEP01(2015)069.
- [5] CMS Collaboration. Search for the standard model Higgs boson produced in association with a W or a Z boson and decaying to bottom quarks. 2013. doi: 10.1103/PhysRevD.89.012003.
- [6] ATLAS Collaboration. Constraints on new phenomena via Higgs boson couplings and invisible decays with the atlas detector. 2015. doi: 10.1007/JHEP11(2015)206.
- [7] CDF Collaboration and D0 Collaboration. Evidence for a particle produced in association with weak bosons and decaying to a bottom-antibottom quark pair in Higgs boson searches at the Tevatron. 2012. doi: 10.1103/PhysRevLett.109.071804.
- [8] ATLAS Collaboration. Evidence for the  $h \rightarrow b\bar{b}$  decay with the ATLAS detector, 2017. URL <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/HIGG-2016-29/>.