

令和 3 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05464

研究課題名(和文)LHCにおけるヒッグス結合定数測定のためのトリガーレベル解析

研究課題名(英文)Trigger level analysis for measurement of Higgs couplings at LHC

研究代表者

江成 祐二 (ENARI, YUJI)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：60377968

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：LHCにおけるヒッグス結合定数測定を念頭に置いたトリガーレベル解析手法の基盤を形成するため、物理解析手法の研究とFPGAを用いた実装の2本柱で本研究を遂行した。物理解析の面ではヒッグスがbクオーク対に崩壊するモードの証拠や将来の精密測定における信号モデルの不定性についての知見が得られ、新しい測定手法の方針を固めることができた。FPGAへの実装についても、演算のコアとなるDSPの使用方法や計算遅延時間の制御手法、システムの効率的な制御手法を確立した。また膨大なデータの送受信するための新しい光通信デバイスのテストカードの設計、製作および試験を実施し、実際のシステムの設計および製作の基盤を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は真空は安定であるかという疑問に答えるため、ヒッグス粒子の自己結合定数の測定を目指している。この結合定数は現段階では測定不可能であるが、本研究を発展させ2026年から始まるLHCの高輝度ランにおいて測定が実現できた暁には、宇宙の成り立ちを説明しうる世界初の結果となる。トリガーレベル解析は、まだ実現されておらず、全く新しい解析手法である。この手法を確立することにより、本研究の主目的に限らず他の物理量についても、困難とされる測定の可能性を開くベンチマークとなる。これにより、LHC・アトラス実験において標準模型の裏に潜む物理を展開していく足がかりとなる。

研究成果の概要(英文)：In order to establish fundamental understanding and technique to build up the trigger level analysis on the Higgs coupling constant measurement at LHC, physics analysis and development on FPGA application including data transferring technique are carried out. On the physics analysis, observation of Higgs decays into a pair of b-quarks has been established and precision measurement on Higgs couplings have been performed. On FPAG application, DSP utilization for real time data processing with latency control and efficient way to control FPGA system have been established. In addition, new optical data transmission devicees have been tested with designing a custom-made mezzanine card, which is critical item to realize trigger level analysis to collect all information into a FPGA. With these achievements, all basics to design and build the trigger level analysis for Higgs coupling are established.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ヒッグス LHC トリガー エレクトロニクス開発 FPGA ファームウェア

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

LHC の 2012 年までの実験にて 125 GeV の基本粒子が見つかり、その後の性質測定により予想されているヒッグス粒子と一致することが分かり、標準理論は完成に至った。しかしながら、標準理論は素粒子の最終理論でないことは明らかであり、現在の目標はその背後にある物理の探求にある。素粒子の質量は真空に満たされているヒッグス粒子との相互作用の結合の強度、湯川結合定数により決まり、それが異なるために、フェルミオンの 3 世代が区別される。また、ヒッグス粒子は自己結合することが予想されているが、その測定・検証はされていない。重心系エネルギー 13 TeV で運転している LHC はヒッグスファクトリーであり、現在この課題を進めることができる唯一の加速器である。

LHC の高輝度化計画は 2024 年末から 2 年半かけて加速器と検出器の大幅な改善を施し、その後 10 年程度をかけ、データ量をそれまでの 10 倍に増やし、稀な事象での測定を目指した計画である。本申請はこの検出器側の改善計画の一端を担うものである。ハドロンコライダーで実験を行う上で、まず考えなければならないのは、ターゲットとなる事象を取得・記録する、ということである。これは強い相互作用によるジェット背景事象が膨大であり、ヒッグス粒子の生成する信号事象の 10 の 6 乗ほどの開きがあるためである。ヒッグス粒子が 1 秒間に 1 つの割合で生成されていても、背景事象は 10 の 6 乗事象あり、これはデータ記録の性能 (1 秒に 1000 事象程度) を大幅に超え、事象を取得できないのである。

第 2 世代の湯川結合の理解に必要なヒッグス粒子が 2 つのチャーム・クォーク対に崩壊する事象 ($H \rightarrow cc$)、真空の安定性の解明に不可欠なヒッグス自己結合を含む 2 つのヒッグス粒子が同時にでき、それが 4 つのボトム・クォークに崩壊するような事象 ($HH \rightarrow bbbb$) が使えるようになれば、信号数は今までの 10 倍にできる。しかしながら、終状態に複数のジェットのみ構成される事象は、ジェット背景事象と区別がつかず選別しデータとして残せないで、詳細な解析ができず、これらの重要な物理定数の直接測定の目的が立っていない状況である。

2. 研究の目的

現段階で測定の糸口が見つからない、第 2 世代のクォーク、チャーム・クォークとヒッグス粒子の結合定数、およびヒッグスの自己結合定数を LHC の高輝度運転で得られる 3000 fb^{-1} のデータを用いて測定を目指すという研究である。データが取捨選択される前に解析し、情報を残すという「トリガーレベル解析」の導入により、現在まで不可能とされる、ヒッグスの結合定数測定が実現可能である事を示す。これはすべての情報が最初に集まるハードウェアレベルでのトリガー段階で行う必要があり、高密度・高速通信を行う光通信素子のテスト、およびリアルタイム演算法の開発を進める。

3. 研究の方法

今まで不可能であるとされ、考慮していなかった解析モードを対象とするので、基本的な信号事象の再構成方法は勿論のこと、考えられていなかった背景事象の有無や系統誤差の詳細など洗い出しが必須である。物理解析モデルの構築とその実行に必要な FPGA 上の計算資源の見積もりに尽力する。ここでは大きく分けて次の 2 つがターゲットになる。

(A) トリガーレベル解析の物理解析モデルの構築と検証

(B) ハードウェアを用いたリアルタイム演算法の確立と実証

これら 2 つを平行に進め、トリガーレベル解析の有意性と実現可能である事を示す。(A) については、現在までに取得されたデータを用いたヒッグス結合定数の測定を進める。結果を出すと共に、系統誤差の評価を行い、データ量が増えた時に何が主な誤差になるかを評価する。この評価には $H \rightarrow bb$ 及び $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊モードにおいて実際の測定を行う。

(B) については、ハードウェア上で使用するリアルタイム演算のファームウェア開発がカギとなる。ここで評価の対象となるのは、FPGA に要請される性能、演算リソース (乗算器 (DSP) やメモリーブロックの数など) がどのくらいになり、それが実現可能かである。リアルタイム演算のコアとして FPGA に搭載されている DSP の使用方法が肝要である。エネルギー演算アルゴリズムとして Optimal filtering を導入、乗算と加算から構成する計算ブロックを実装し、FPGA の計算資源の使用率、および演算にかかる遅延時間 (Latency) を測定する。この計算資源の見積もりにより、いくつかの解析が可能か、どこにボトルネックができるのか、ということを実証的に評価する。また、実際のシステムでは膨大なデータを 1 つの FPGA に集積するためのデータ転送パーツの開発も必要で、それには新しい光通信デバイスのテストを行う。これは新デバイスを搭載するためのボード基盤の設計・製作を含むハードウェアテストである。具体的には Intel 社 Arria-10 FPGA を搭載した評価キットで使用できるメザニカードを製作し、検証を進めた。

4. 研究成果

上記の A および B の研究目的それぞれについて成果を以下に纏める。

(a-1) $H \rightarrow bb$ モード解析

一番大きな成果として、ヒッグス粒子が二つのボトムクォークに崩壊するモードを実験的に世界で初めて 3σ の有意度を超える兆候(Observation)を得ることができた。これは重心系エネルギー13 TeVにおいて2017年までに蓄積された 80 fb^{-1} のデータの VH 生成過程に特化した解析の結果である[1]。図1の VH, H \rightarrow のヒストグラムが示すのは二つの b ジェットから再構成した不変質量が 125 GeV にピークを作っている様子である。これはトリガーレベル解析にとっても非常に重要なベンチマーク解析となり、大きなマイルストーンが達成できたと言ってよい。この他にもトップクォークとの結合定数の直接測定を目指した ttH 生成過程に特化した解析においても、2018年までに蓄積された 140 fb^{-1} のデータを用い、 3σ の精度で信号強度測定をした暫定公式結果を得た[2]。

(a-2) H $\rightarrow\gamma\gamma$ モード解析

この解析モードはすべてのヒッグス粒子生成プロセスを系統的に評価が可能である。ヒッグス粒子の結合定数の精密測定においてボトルネックになることはないか、という観点で評価方法を検討した。これには背景事象の理解は勿論のこと、信号事象の記述における理論不定性を含めて研究していく必要がある。上記の VH, ttH 生成過程に加え、ggH および VBF 生成過程も含め、付随するジェットの数、またヒッグス粒子の横運動量の関数で信号領域を 80 個定義し、それぞれの領域で信号強度を測定した。これらの信号領域を設定することにより不定性が生じ、領域間の相関も含めて系統誤差を評価しなければならない。これらを導出し、暫定的な公式結果を得た。図2に示すのがその結果である[3]。現在論文投稿に向け、結果の精査を進めている。

(a-3) HH \rightarrow 4b 解析

また実際にトリガーレベル解析の課題である二つのヒッグス粒子を作る共鳴状態の探索を、終状態に4つのボトムクォークからなるモードについて進めている。信号の力学的振る舞いの理解、そして背景事象の見積もり方などの研究を進め、日本物理学会において報告している。

(a-4) 国際会議 Higgs couplings 2018

ヒッグス粒子に関連した物理を議論するための国際会議、Higgs Couplings 2018を11月末に東京において5日間の日程で主催した。主な参加者は海外から Higgs の物理の研究者で、理論家と実験家を合わせて125名であった。上記の結果の議論も含め、最新結果の共有および問題点の洗い出しや改善手法に至るまで、理論と実験の両面で非常に活発な議論を交わすことができた。

上記の解析結果は本研究が目指しているトリガーレベル解析の基盤を形成するものである。解析過程から得られた理解・知見をベースに実際の導入に向けて更なる改善を進めている。

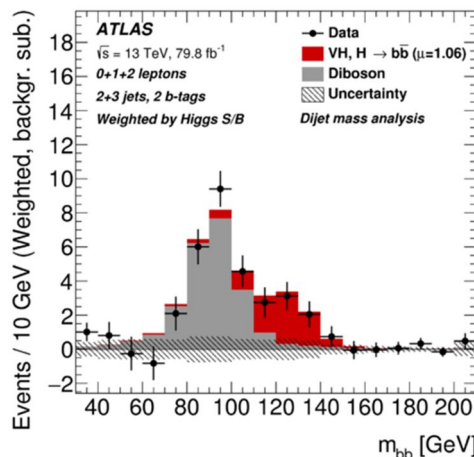


図1. ヒッグス粒子が2つのボトムクォークに崩壊するモードの証拠。薄色(赤色)ヒストグラムがデータから抽出した質量125 GeVのヒッグス粒子を示す。標準理論からの予想と誤差の範囲で一致している[1]。

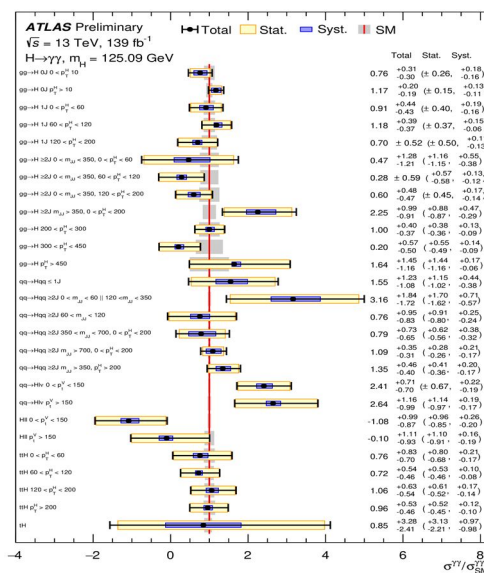


図2. ヒッグス粒子が2つの光子に崩壊するモードを使った詳細解析結果[3]。

<引用文献>

- [1] "Observation of the H \rightarrow bb decays and VH production with the ATLAS detector", Aaboud M., Enari. Y et. al. (The ATLAS collaboration), Phys. Lett. B 786 (2018), 59.
- [2] "Measurement of the Higgs boson decaying to b-quarks produced in association with a top-quark pair in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector", ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2020-058
- [3] "Measurement of the properties of Higgs boson production at $\sqrt{s}=13$ TeV in the H \rightarrow bb channel using 139 fb $^{-1}$ of pp collision data with the ATLAS experiment". ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2020-026

(B-1) FPGA を用いたリアルタイム演算のファームウェア開発

リアルタイム演算のコアとして FPGA に搭載されている DSP の使用方法の研究を Intel Arria-10 FPGA を用いて行った。40 MHz でサンプリングされた波形データからエネルギーを算出する Optimal filtering アルゴリズムを実装した。具体的には 18x19 ビットの固定小数点シストリックモードで DSP ブロックをベースクロック 240 MHz で稼働させた。実装した演算は $E = \sum_{n=1}^5 (a_n D_n)$ である。 d_n がサンプルで係数 a_n は事前に算出したパラメータであり、これはエネルギー算出の方法であるだけでなく、Neural Network などの機械学習の実装でも使用される演算の核である。DSP の利用率と計算遅延時間の効率化を考え、6 つの演算を 1 つのストリームで扱っている。性能評価は 62 ストリームを並列に実装し、FPGA 上のリソース使用量、また評価キットでの実機試験を通して行った。複雑な計算はこの乗算項の数が多いのでその依存性も確認した。その結果を表 1 にまとめた。データの流れるをうまく制御することにより、乗算項の数を増やしても遅延時間は変わらず 87.5 ns に抑えることに成功した。この計算結果に間違いが無いかを FPGA シミュレーションで確認、また実機でもあらかじめ計算した結果と照らし合わせるジェネレータ・チェッカーブロックを整備し、長時間安定性も確認した。

サンプル数	DSP block	遅延時間
4	248	87.5 ns
6	372	87.5 ns
14	868	87.5 ns

表 1. 加算と乗算を組み合わせたロジックの実装テスト結果 6 つを 1 ストリームとして、62 ストリームを並列に実装した時の DSP と遅延時間の関係。

(B-2) IPbus を使用した外部から FPGA 上のレジスタへのアクセス

トリガーレベル解析では FPGA 上でのリアルタイム処理したデータをどのように読み出すか、また物理解析可能な形で記録する手法の確立とその検証が重要である。本研究で実走したのは IP bus と呼ばれる LHC の実験グループが共同で開発したプロトコルで、最大 10 Gbps の UDP 通信でのデータ送受信が可能である。イーサネット経由で PC と接続、IP と MAC アドレスを指定することにより FPGA 上のレジスタにどのようにアクセスするか制御する。ファームウェアおよび PC 側のソフトウェアを実装し、FPGA のレジスタにアクセスすることにより FPGA の振る舞いの制御およびデータの読出しを行い、実際のトリガーレベル解析での仕様にも耐えうることを確認した。この機能を用いて上記のテストを円滑に行うことができた。

(B-3) 次期高速通信デバイスのテスト用メザニカードの製作及び試験

実際のシステムでは数百本にも及ぶ光ファイバーを扱うことになる。これに対応するための新しい光通信デバイス Samtec 社製の Firefly トランシーバのテストを行うためのメザニカードを製作、試験を行った。Firefly はヒートシンクと 12 レーンの光通信トランスミッタ(TX)またはレシーバ(RX)がモジュール化されている。今まで使用してきた Broadcom 社製 MicroPOD と比べ最大通信速度が 28 Gbps と速く、集積度も 20% 程高い。今回は Arria10 FPGA の評価キットに搭載し試験するために HPC FMC コネクタと Firefly 一組、そしてベースクロックおよびクロックジッタークリーナを搭載したメザニカードを設計した。高速通信の Differential ペア信号線を多数扱うため、基盤は 10 層構成となり、PCB 材にはパナソニック社の MEGTRON6 を使用した。最終的な基盤厚みは 2.021 mm であった。

製作したボードに Firefly を装着し、実際のデータ転送試験を行っている写真を図 2 に示す。このテストではメザニカード 2 枚を評価キットに設置し、24 本のファイバーを用いたループバックテストを行った。表 2 にまとめた通り、転送速度 6.25 Gbps ではすべてのファイバーで PRBS-31 での転送試験において転送エラーが 10 の -14 乗 bit 以下であることが確認できたが、転送速度 12.5 Gbps のデータ転送では問題が見つかった。この製作・通信テスト結果は物理学会において発表し、この問

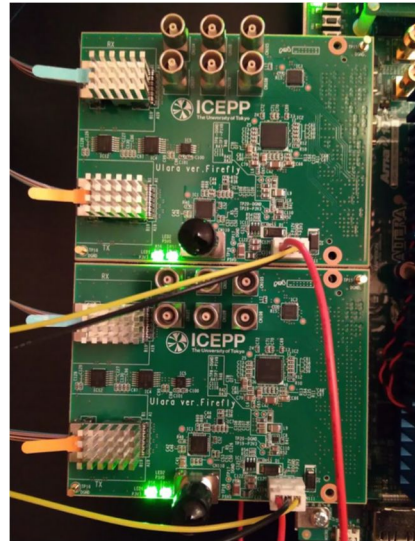


図 2. 設計・製作した Samtec Firefly を搭載したメザニカードを試験している様子。

転送速度	PRBS-7	PRBS-31
6.25 Gbps	Pass	Pass
12.5 Gbps	Pass	Fail

表 2. 製作したメザニカードでのデータ転送試験テスト結果。各テストにおいて 10 の 14 乗 bit の転送を 24 レーン同時に行い、エラーが無いことを要求した。今後の課題も明らかになった。

題解決に向けた有益なフィードバックを得ることができた。これは FPGA のトランシーバの使い方に問題があることも判明し、この解決が今後の課題となったが、ボード製作のノウハウ、テスト手法など様々な面で知見の蓄積ができた。

研究成果のまとめ

LHC おけるヒッグス結合定数のためのトリガーレベル解析の準備として、物理解析手法の研究と FPGA を用いた実装の 2 本柱で本研究を進めてきた。物理解析の面では $H \rightarrow bb$ 崩壊モードの証拠や将来の精密測定における信号モデルの不定性についての知見が得られ、測定手法の方針を固めることができた。FPGA への実装についても、演算のコアとなる DSP の使用方法や計算遅延時間の制御手法を取得、FPGA のレジスタへのアクセス手法を確立することができた。またこの手法のカギとなる膨大なデータの送受信するための光通信デバイスを扱うためのボード設計と実装試験手法を取得でき、実際のシステムの設計および製作の基盤ができたと認識している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Aaboud M. , Enari. Y, et. al. (The ATLAS collaboration)	4. 巻 786
2. 論文標題 Observation of H bb 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) 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 Aaboud M. et. al. (The ATLAS collaboration)	4. 巻 2017
2. 論文標題 Evidence for the H bb decay with the ATLAS detector	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 024-092
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2017)024	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

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 大石玲誉, 田中純一, 江成祐二, 宇野健太, 井口竜之介
2. 発表標題 LHC-ATLAS RUN3実験に向けたLATOMEファームウェアの検証とベースラインの補正機構の検証
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 林田翔太, 中浜優, 戸本誠, 佐野祐太, 江成祐二, 奥村恭幸, 寺師弘二
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験Run-2における4b終状態を用いたヒッグス対生成事象探索の感度評価
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, 隅田土詞, 増淵達也, 江成祐二, 奥村恭幸
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よる新物理の探索可能性
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 R. Oishi, Y. Enari et. al.
2. 発表標題 LHC-ATLAS Phase-1 upgrade: Firmware validation for real time digital processing for new trigger readout system of the Liquid Argon calorimeter
3. 学会等名 Calorimeter for the High Energy Frontier 2019 (Fukuoka, Japan) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大石玲誉, 田中純一, 江成祐二, 宇野健太, 井口竜之介
2. 発表標題 ATLAS LArカロリメーター トリガーアップグレード: 実機を用いたエネルギー計算機構の検証
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井口竜之介, 江成祐二, 増淵達也, 奥村恭幸, 田中純一
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験Run2における $t\bar{t}H, H \rightarrow bb$ 過程の信号強度測定精度の見積もり
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuji Enari
2. 発表標題 Evidence for Higgs boson production in decays to two b-quarks using the ATLAS detector
3. 学会等名 XXXIX International Conference on High Energy Physics (ICHEP2019) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuji Enari
2. 発表標題 The Phase-1 Trigger Readout Electronics Upgrade of the ATLAS Liquid Argon Calorimeter
3. 学会等名 CALOR 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大石令誉、田中純一、江成祐二、宇野健太、井口竜之介
2. 発表標題 ATLAS LArカロリメーター アップグレード：LATOME読み出しファームウェアの研究開発
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井口竜之介、江成祐二、奥村恭幸、増淵達也、田中純一
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験Run2におけるttH,H->bb過程を用いたトップ粒子湯川結合の測定のための系統誤差削減手法の開発
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 Y. Enari, F. Filthaut
2. 発表標題 Feedback and overview from physics group
3. 学会等名 ATLAS Joint Flavour Tagging and H->bb Workshop 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井口竜之介, 宇野健太, 楊易霖, 江成祐二, 田中純一
2. 発表標題 ATLAS LArカロリメータアップグレード: バックエンドにおける信号処理のためのシステム開発
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 本多俊介, 原和彦, 中村浩二, 江成祐二, 堀井泰之
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験Run2におけるH->bb崩壊過程でのヒッグス粒子tH生成過程探索
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐野祐太, 戸本誠, 中浜優, 矢島和希, 花垣和則, 奥村恭幸, 江成祐二, 寺師弘二
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験Run-2における2つのジェットと4bクォークの終状態を用いた重いヒッグス粒子の探索
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Higgs Coupling 2018
<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/hc2018/>

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
研究協力者	田中 純一 (Tanaka Junichi)	東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計2件

国際研究集会 Higgs Couplings 2018	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 ATLAS LAr week 2018	開催年 2018年～2018年

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
スイス	CERN			
フランス	LAPP, IN2P3	CPPM, IN2P3	CEA Saclay	
米国	BNL (Brookhaven National Laboratory)	Columbia University	Stony Brook New York state University	他2機関
ドイツ	Technische University Dresden			