

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2015

課題番号：24684016

研究課題名(和文) ヒッグス機構の実験的解明と高速飛跡検出システムの開発・構築

研究課題名(英文) Experimental investigation of Higgs Mechanism and development/construction of Fast Tracking system

研究代表者

寄田 浩平 (YORITA, Kohei)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：60530590

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,500,000円

研究成果の概要(和文)：LHC/ATLAS Run1の全データを用いてH_{ττ}過程の探索を行い、4.5の統計優位度で湯川結合の証拠を得た。これは世界初のフェルミオン湯川結合の存在を示すものであり、信号強度は標準模型と矛盾しなかった。さらに、H_{tt}崩壊過程を使用してトップ湯川結合の測定も行い、ヒッグス機構の包括的な検証を行うことができた。また、高速飛跡再構成トリガー回路(FTK)の開発のためのテストベンチを校内に構築し、回路設計・試験・量産までを全て日本で完遂した(歩留まり100%)。全80台をCERNへ輸送、ATLAS検出器への導入も完了したことで今後の高輝度下でのデータ取得を磐石にすることができた。

研究成果の概要(英文)：We performed the search for H_{ττ} decay mode and finally found the excess over background expectations with an observed significance of 4.5 standard deviations by using LHC/ATLAS Run1 data. It indicates the world first's evidence for fermion-yukawa coupling and signal strength was consistent with the Standard Model prediction. Moreover based on the success of H_{tt} analysis, we extended our activity to the search top quark-Yukawa coupling. By these inclusive searches, The SM Higgs mechanism is considered to be valid in terms of fermion-Yukawa coupling sector within uncertainties. In addition, we built a test bench for Fast tracker R&D in Waseda campus and completed PCB design, prototyping testing, mass production in Japan (yield rate was 100%). 80 boards were transferred to CERN and successfully installed to the ATLAS detector. This achievement would be powerful improvement for data taking at upcoming higher luminosity operation of LHC.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ヒッグス粒子 湯川結合 LHC-ATLAS実験 高速飛跡トリガー ATCA/VME 大容量メモリーASIC

1. 研究開始当初の背景

標準模型には質量と結合定数(湯川結合)の予言能力がないため、ヒッグス機構の真偽は実験で検証するほかに手段がない。したがって、まずは場の実体である「ヒッグス粒子」の発見・棄却が素粒子物理学の最大急務の課題であった。本研究開始当初は、LHC/ATLAS 実験でヒッグス粒子質量 130GeV 付近に小さな兆候(H W 過程)が見え始めている状況であったが、統計的に不十分であり、発見には至っていなかった。そこで本研究は、助成期間中に LHC/ATLAS 実験の Run1 データを用いて、フェルミ粒子の湯川結合(とくに)の単独発見を目標に置いていた。そのため、まずはハドロン崩壊する 粒子トリガーの取得効率の改善、粒子同定率・エネルギー分解能の評価・改善をする必要があった。そのうえで、多変量解析手法を用いて 湯川結合の単独発見し、標準模型の枠組みでのヒッグス機構を検証、さらには新物理探索の感度向上に繋げていくことが大きな課題であった。

一方で、フェルミ粒子の湯川結合をはじめ、さらなるヒッグス機構の検証や新物理探索をするためには、より多くの信号事象、信号取得効率の維持・改善が必須なことは明確な状況であった。そこで高エネルギー・高輝度環境下でも磐石なトリガーシステムを構築するため、事象中の全ての飛跡を(トリガーレベルで)高速に再構成することができる高速飛跡再構成システム(FTK)の開発構築を 2 本目の研究の柱とした。研究開始当初は、システム設計の段階であり、主にシミュレーションを用いた開発研究が進められていたため、本研究期間内で最新エレクトロニクス情報を精査し、FTK システムの設計・試験・量産・挿入を完遂することが急務の課題であった。

2. 研究の目的

(1) ヒッグス機構の本質的な解明には、フェルミ粒子の湯川結合の検証が不可欠である。すなわち、lepton や top quark の湯川結合定数の整合性まで検証しなければ、ヒッグス機構の是非を検証することができない。一方で LHC/ATLAS 実験では、H の感度は、 $\tau\tau$ や ZZ 過程に比べて、極端に悪い。これはハドロン崩壊する の実験的観測量が複雑かつ複合的なため、同定効率が低く(誤同定率は高く)、エネルギー分解能が悪い上に、その誤差も大きいことに起因している。また Z 過程からくる物理的背景事象も多いため、最終的な到達感度が悪くなっている。本研究は、これらの問題点を多角的に改善させ、探索実行性を高めることで LHC 実験で困難な H の単独でのヒッグス粒子の発見(又は棄却)とその湯川結合($\gamma\gamma$)の初期測定を達成することを目的としている。

(2) ヒッグス粒子生成過程のような背景事

象に比べて生成断面積が非常に小さい物理現象に対して優位度の高い主張をするためには、十分な統計量が必要となる。実際 H27 年以降の Run2 実験では、LHC 加速器の重心系エネルギーは 13TeV に上げられ、瞬間輝度も $10^{34}(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 以上に増強される予定である。実験側からみた場合、このような高輝度環境下での弱点は明らかにトリガーにある(40MHz の衝突から ~1 秒以内で信号事象を取捨選択し、記録限界である 0(100Hz)に落とす作業をトリガーと呼ぶ)。高輝度化が進むと一衝突当りの観測量が爆発的に増加するため(パイルアップ)、背景事象との区別が付きにくくなる。そのため、通常は記録限界を保持するために興味ある対象(例えば)のエネルギー閾値を単にあげるか、または自動的(ランダム)に事象ごと捨てる方法がとられる。しかし、高い閾値は低い質量領域への感度を下げ、自動的に却下された信号事象は永久に回復不能であるため、物理実行性を直接低下させる。これを解決するため、事象中の全ての飛跡を高速で算出し、同時発生する複数の一次衝突点を再構成する FTK システムの開発・構築を行う。

3. 研究の方法

欧州 CERN の LHC/ATLAS 実験では、2010 年から 2015 年の間に重心系エネルギー 7TeV(2010-2011 年)、8TeV(2012 年)、13TeV(2015 年)で運転し、陽子陽子衝突データを合計で約 30fb⁻¹ を蓄積した。本研究はこれらのデータを用いて解析を行う。まずは、解析の肝となるハドロニック トリガーの評価・改善を Run1/Run2 データを用いて行う。また、終状態が特徴的で発見感度の高い Vector Boson Fusion(VBF)過程を主に抽出し、多変量解析を用いて 湯川結合の単独発見を完遂する。また、標準模型の検証と新粒子精査(重いヒッグス粒子等)のため、2 つのレプトンの崩壊角度を観測量から近似する方法を確立し、ヒッグス粒子の CP 測定手法を提案する。これはとくに H/A の質量が縮退している場合の検証に有効な手法である。

FTK トリガーエレクトロニクス開発の詳細はここでは省略するが、動作原理を簡潔に表現すると“ピンゴゲーム”の原理である。あらかじめ 10 億以上の飛跡パターンと各飛跡のフィット定数を大容量メモリーチップに記憶させておき、ATLAS 内部飛跡検出器からのヒット情報と対応したパターンに対してのみ、運動量や方向を高精度で計算する回路システムである。これを実現させるためには(1)現行トリガーシステムとの干渉を最小化し、(2)高周波の検出器ヒット入力に耐える構造で、(3)全飛跡を数十 μ 秒で高速処理し、(4)高効率・高精度の回路演算を可能にする必要がある。これらを全て解決するためのシステムを開発・構築する。

4. 研究成果

(1)ハドロン崩壊する 粒子のトリガー効率を tag & probe 法 ($Z \rightarrow \tau\tau$) を用いて、精度良く測定した。Run1 から種々の改善 (多変量解析の入力変数の精査や孤立度の調整等) を行い、図 1 のような結果を算出した。Run1 から Run2 への移行で、フェイク率を変えることなく、プラト領域の信号取得効率を 80% 90% に改善することに成功した。

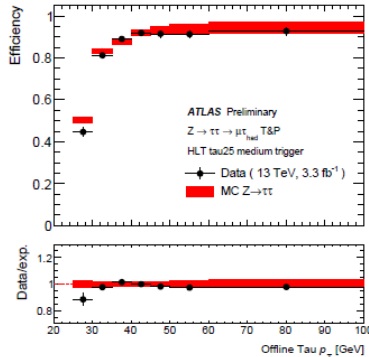


図 1: トリガー効率

(2)全 Run1 実験データを解析し、湯川結合の証拠を得た。の崩壊過程のうち、もっとも感度の高い lepton+hadron 過程に着目し、解析を行った。なかでもフェイク因子法を用いた精度の高い背景事象の算出、多変量解析法の最適化等で中心的な役割を果たした。

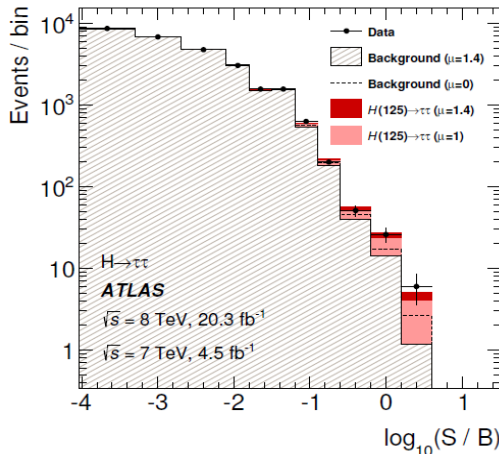


図 2: H 過程の最終結果

図 2 は lep-lep、lep-had、had-had 過程を全て統合した最終結果である。統計的優位度 4.5 (SM 期待値 3.4)で、湯川結合の「証拠」を得ることに成功し、学術論文にまとめた。SM との信号強度比は、 $1.43 \pm 0.43 - 0.37$ であった。これは、ヒッグス粒子がレプトン、またダウタイプ粒子と結合することを示した世界初の結果である。図 3 に示すように S/B で重み付けされた質量分布も多チャンネルと矛盾しないため、標準模型ヒッグス粒子であると結論付けられる (質量測定は今後の課題)。 μ 粒子との結合がこの強度で観測されていないことから、ヒッグス粒子の結合がレプトンユニバーサルティーを破ること (ヒッグス粒子が粒子の質量階層を決定していること) が立証されたということができた。科学的価値の非常に高い成果である。

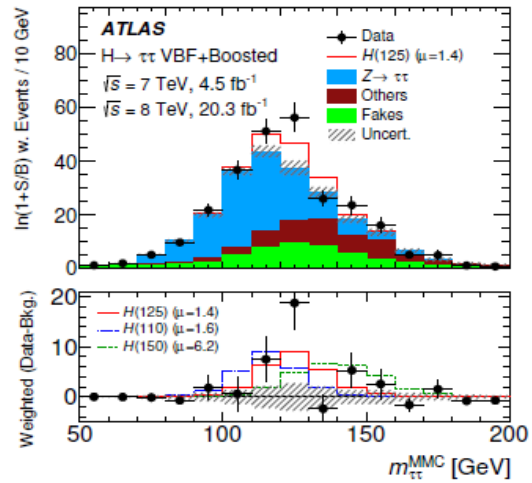


図 3: S/B で重み付けした 質量分布

(3)H 過程を用いた CP 測定
標準模型で予言されているヒッグス粒子は CP-even の粒子だが、その是非は実験的に確認すべき物理対象である。これまで ZZ 過程を用いて CP-odd state を 95% 以上の CL で棄却しているが、本研究では新しく 過程で CP 測定を試みた。超対称性模型に代表されるように、複数のヒッグス粒子が存在する場合、CP-even と CP-odd をフェルミ粒子結合で測定することは非常に重要となる。ただし、から崩壊するニュートリノは測定できないため、インパクトパラメータを用いる方法と荷電 と中性 の成す平面で近似する方法を採用し、Run 1 データに適用した。その結果、56% 信頼度で CP-odd を棄却できることがわかった。これを Run2 に外挿するとおよそ $70 \sim 80 \text{ fb}^{-1}$ のデータ量があれば、95% CL で棄却できる感度があることを算出することができた。

(4) トップクォーク湯川結合の測定

当初予定を超えてトップクォークの湯川結合の検証に研究を展開することができた。まず、 $t\bar{t}H$ all jets+ 過程を用いた解析を新たに提案した。これが発見できれば、きれいな ヒッグス質量の山が確認できる貴重な過程である。解析はトリガー選択から始まり、バックグラウンドモデル、事象選択の最適化など多岐に渡る。終状態にレプトン類を含まないため、QCD-多ジェット事象や $t\bar{t}b\bar{b}$ 事象等の背景事象が無視できないため、様々なトポロジー情報やヒッグス質量を再構成することで、効果的に背景事象を除去することで S/B を向上させた。特に、ヒッグス質量再構成時における組み合わせの不定性や、崩壊起源の によるエネルギー不定性が小さいことによって、ヒッグス質量分布における信号・背景事象の分離能力が高かった。結果として他チャンネルと遜色無い信号感度を得られることがわかった。一方、マルチレプトン過程による $t\bar{t}H$ 探索も

同時に進展させた。最終的に、Run2 初期データから期待される結果として標準模型の 15.4 倍@95% CL の上限値を得た。

(5) 高速飛跡再構成システム FTK の開発構築

本研究では、特に FTK システムの最上流でシリコン検出器から 40MHz の高速通信で送信されるヒット情報を受信し、クラスタ化する機能をもつ受信カードの設計開発を行い、数々の試験を経て、最終版実機(図 4)を製作し、80 台の量産を行った(図 5)。2015 年、開発・設計・量産・試験まで首尾一貫して行った受信部の回路基板 80 台を CERN に輸送した。パターン記憶用の大容量 ASIC の製造も完了し、CERN 現地にて全システムの統合動作試験をするに至った。また各検出器から FTK へのファイバリングも全て完了している。



図 4：設計製作した最終版の 12 層基板回路

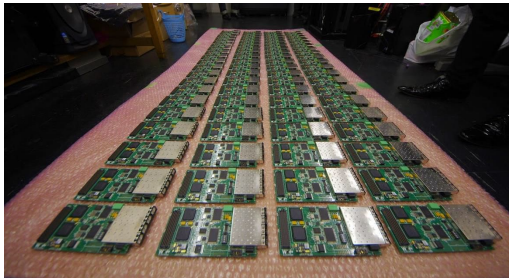


図 5：80 台量産（歩留まり 100%）

一方で、本研究で主導して構築を進めている実運転対応のパターンバンク・フィット定数の生成（ビームスポットや検出器状況等を反映）も完了し、2016 年度中の実運転に備え、万全の体制を整えることができた。

FTK 実運転に向けて、実際の運転環境に即した飛跡パターン、フィット定数の準備・改善（実機に対応したパターンバンク・フィット定数の生成、LHC ビーム位置の変化による影響の見積もり(図 6) 実機の各挿入段階でのリソースに対応したパターンバンク生成)を行った。

2016 年の運用時に対しては、使用する領域に特化してパターンを生成することで、高い飛跡再構成率を保てることを示した。また、その他にも、FTK の飛跡情報を ATLAS 共通で使用しているシミュレーションデータサンプルに実装し、FTK の飛跡を実際に使用する環境を整えた。、b に関して、FTK の飛跡情報を使用したトリガーチェーンを構築する

ための研究が終盤を迎えている。

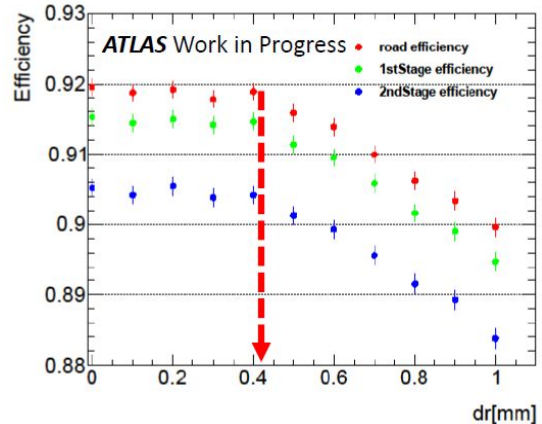


図 6：再構成率のビームスポット依存性

最終的に、ATLAS 検出器への導入も完了したことで、当初研究計画の完遂、また、今後の高輝度下でのデータ取得を磐石にすることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 22 件)

[1] “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”, G.Aad, [K.Yorita](#), et.al., The ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C76(2016) 6 (査読有)

[2] “Identification and energy calibration of hadronically decaying tau leptons with the ATLAS experiment in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV”, G.Aad, [K.Yorita](#), et.al., The ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C75(2015) 303 (査読有)

[3] “Modelling Z processes in ATLAS with tau-embedded Z $\mu\mu$ data”, G.Aad, [K.Yorita](#), et.al., The ATLAS Collaboration, JINST 10 (2015) P09018 (査読有)

[4] “Measurement of the top-quark mass in the fully hadronic decay channel from ATLAS data at $\sqrt{s}=7$ TeV”, G.Aad, [K.Yorita](#), et.al., The ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C75(2015) 158 (査読有)

[5] “Evidence for the Higgs-boson Yukawa coupling to tau leptons with the ATLAS detector”, G.Aad, [K.Yorita](#), et.al., The ATLAS Collaboration, JHEP04 (2015) 117 (査読有)

[6] “Search for the associated production of the Higgs boson with a top quark pair in multilepton final states with the ATLAS detector”, G.Aad, [K.Yorita](#), et.al.,

The ATLAS Collaboration, PLB749 (2015) 519-541 (査読有)

[7] “FTK Input Mezzanine and Data Formatter for the Fast Tracker at ATLAS”, T. Iizawa, K. Yorita, et.al. IEEE Explorer Digital Library, http://mocast.physics.auth.gr/images/NewPapers/PAPER_10F.pdf, 2015 (査読有)

[8] “Fast Tracker (FTK): A Hardware Track Finder for the ATLAS Trigger”, T. Mitani, K. Yorita, et.al. IEEE Explorer Digital Library, http://mocast.physics.auth.gr/images/NewPapers/PAPER_09F.pdf, 2015 (査読有)

[9] “Design of a hardware track finder (Fast Tracker) for the ATLAS trigger”, V. Cavaliere, K. Yorita, et.al. (ATLAS FTK group), JINST 11 (2015) C02056 (査読有)

[10] “A neural network clustering algorithm for the ATLAS silicon pixel detector”, G. Aad, K. Yorita et.al., The ATLAS Collaboration, JHEP 9 (2014) P09009 (査読有)

[11] “Operation and performance of the ATLAS semiconductor tracker”, G. Aad, K. Yorita et.al., The ATLAS Collaboration, CERN-PH-EP-064 (2014) (査読有)

[12] “Search for the Standard Model Higgs Boson in the $H \rightarrow \tau^+ \tau^-$ to lepton-hadron and hadron-hadron Decay Modes with the ATLAS Detector”, Y. Sakurai, Nucl.Phys.Proc.Suppl. 253 (2014) 226 (査読有)

[13] “Search for neutral MSSM Higgs Bosons in the $h/A/H \rightarrow \tau^+ \tau^-$ Decay Mode with the ATLAS Detector”, T. Mitani, Nucl.Phys.Proc.Suppl. 253 (2014) 220 (査読有)

[14] “Fast Tracker: a hardware real time track finder for the ATLAS trigger system”, N. Kimura, K. Yorita et.al., JINST 9 (2014) C04012 (査読有)

[15] “Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data”, G. Aad, K. Yorita et.al., The ATLAS Collaboration, Phys.Lett. B726 (2013) 120-144 (査読有)

[16] “Combination of searches for the Higgs boson using the full CDF data set”, T. Aaltonen, K. Yorita et. al., [CDF Collaboration], Phys. Rev. D 88, 052013 (2013) (査読有)

[17] “A fast hardware tracker for the

ATLAS trigger system”, J. Anderson, K. Yorita et.al., Nucl.Instrum.Meth. A718 (2013) 258-259 (査読有)

[18] “A fast hardware tracker for the ATLAS trigger system”, N. Kimura for ATLAS TDAQ Collaboration, Nucl.Instrum.Meth. A731 (2013) 224-228 (査読有)

[19] “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”, G. Aad, K. Yorita et.al., The ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29 (査読有)

[20] “Search for the Standard Model Higgs boson in the $H \rightarrow \tau^+ \tau^-$ decay mode in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with ATLAS”, G. Aad, K. Yorita et.al., The ATLAS Collaboration, JHEP09 (2012) 070 (査読有)

[21] “FTK: A fast track trigger at ATLAS”, K. Yorita et.al., JINST 7 (2012) C10002 (査読有)

[22] “The Fast Tracker real time processor and its impact on muon isolation, tau and b-Jet online selections at ATLAS”, K. Yorita et.al., IEEE Trans.Nucl.Sci. 59 (2012) 348-357 (査読有)

〔学会発表〕(計55件)

[1] 飯澤知弥、The Fast Tracker (FTK)、新学術研究会テラスケール物理研究会、2015年12月、東京工業大学

[2] T. Iizawa, K. Yorita et.al., for the ATLAS FTK group, Fast Tracker (FTK) A Hardware Track Finder for the ATLAS Trigger, MOCAS Conference 2015, May, Thessaloniki, Greece

[3] T. Mitani, K. Yorita et.al., for the ATLAS FTK group, FTK Input Mezzanine and Data Formatter for the Fast Tracker at ATLAS, MOCAS Conference 2015, May, Thessaloniki, Greece

[4] 寄田浩平、ATLAS 実験 Run1 の成果、日本物理学会年次大会、2015年3月、早稲田大学

[5] 寄田浩平、ヒッグス粒子の発見とこれからの素粒子物理実験、早稲田大学物理学科創立50周年記念講演会記念講演、2014年11月、早稲田大学

[6] T. Iizawa for the ATLAS FTK collaboration, ATLAS FTK: Fast Track

Trigger, Vertex2014, 2014年9月18日, プラハ(チェコ)

[7]Y. Sakurai for the ATLAS collaboration, The ATLAS Tau Trigger performance during Run1 and prospects for Run2, LHCP2014, 2014年6月4日, ニューヨーク (USA)

[8]N. Kimura for the ATLAS FTK group, A Highly Parallel FPGA Implementation of a 2D-Clustering Algorithm for the ATLAS Fast Tracker (FTK) Processor, 19th IEEE Real-Time conference, 2014年5月24日, 奈良 (奈良県)

[9]Y. Sakurai for the ATLAS collaboration, Search for the Higgs boson in fermionic channels using the ATLAS detector, PHENO2014, 2014年5月9日 ピッツバーグ (USA)

[10]寄田浩平、Search for other Higgs at Run2(+), テラスケール研究会、2014年3月、東京大学

[11]N. Kimura for the ATLAS FTK group, Fast Tracker : A Hardware Real Time Track Finder for the ATLAS Trigger System, IPRD13, 2013年10月, Siena, Italy

[12]寄田浩平、LHC の最新結果と今後、LHC-ILC workshop、2013年7月、早稲田大学

[13]寄田浩平、LHC/ATLAS アップグレード、LHC によるテラスケールの物理の展開(シンポジウム)、日本物理学会年次大会、2013年3月、広島大学

[14]T. Iizawa, FastTracker Performance Using the New Variable Resolution Associative Memory for Atlas, IEEE-NSS2012, 2012年10月, Anaheim, CA, USA

[15]N. Kimura, A Fast Tracker for the ATLAS Trigger System, PIXEL2012, 2012年9月, 猪苗代, 福島県

[16]N. Kimura, Top Quark Production at ATLAS, 16th International Conference in QCD 2012年7月4日, Montpellier, France
(他関連発表39件(省略))

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.kylab.sci.waseda.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寄田浩平 (YORITA, Kohei)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号: 60530590

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし