

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247038

研究課題名(和文) 第3世代クォークを用いたヒッグス機構の全貌解明と新物理探索

研究課題名(英文) Research of Higgs mechanism and search for New Physics using the 3rd generation quarks

研究代表者

花垣 和則 (Hanagaki, Kazunori)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：40448072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、第3世代のクォークをプローブとして、素粒子の質量の起源と考えられているヒッグス機構の全貌解明を目指すものである。同時に、ヒッグス機構の検証を高い精度で実施することにより、標準模型を超える新物理現象がないかを探索した。その結果、ヒッグス粒子とボトムクォークの結合、ヒッグス粒子とトップクォークの結合を観測し、第3世代クォークの質量もヒッグス機構により生成されていることを解明した。また、ヒッグス場の構造を決定するために不可欠であるヒッグスの自己結合測定を目指して、将来計画で使用するためのシリコンピクセル検出器の開発を行い、実機の大量生産直前の段階にまで研究を進めた。

研究成果の概要(英文)：This research aims to reveal the mechanism of particle mass generation using the 3rd generation quarks as the probe. At the same time we searched for new physics beyond the Standard Model by conducting precise measurements of Higgs properties. We observed the direct couplings of Higgs to bottom quark and top quark, indicating that the mass of the 3rd generation quarks is generated by the Higgs mechanism as the massive gauge bosons, W and Z. In addition, the measurement of Higgs self-coupling is necessary to fully understand the Higgs mechanism and the shape of Higgs potential. In order to prepare for such self-coupling measurement, we developed silicon pixel detector for the future hadron collider experiment. The development went on smoothly as planned. The basic technical development is almost finished, and the phase moved into the mass production from the development.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：ヒッグス 第3世代クォーク 湯川結合 シリコン検出器

## 1. 研究開始当初の背景

2012年にヒッグスボソンが発見され、力を媒介する粒子であるWとZの質量の起源がヒッグス場による動的なものであるらしい、ということがわかった。しかし、ヒッグスボソンに関する測定精度は低く、ヒッグス機構の精密検証にはいたっていない。特に、物質を構成する粒子であるフェルミオンの質量の起源については実験的な検証はまだされていない。

ヒッグスボソンは、ゲージ対称性により要求されたとはいえ、ヒッグスボソンの導入には指導原理がなく必然性もないゆえ、標準模型の中で綻びがあるとすれば、ヒッグス経路である可能性が高いと考えられていた。ヒッグスが新物理への窓となっている可能性が盛んに議論された。

ヒッグス機構の全貌解明には、ヒッグス場自身の形を理解する必要があり、そのためには、ヒッグスの自己結合定数測定が不可欠である。その測定のためには、LHCの高輝度化が必要で、そのための準備が加速器、検出器双方で開始されていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、世界最高エネルギーの陽子・陽子衝突実験(LHC)にて第3世代クォークをプローブとし、ヒッグス機構の全貌を解明することと、素粒子標準模型の枠外の現象の探索である。ATLAS実験に参画し、ヒッグスと第3世代クォークとの結合を直接検証し、さらに、超対称性の発見を目指した。並行して、2026年に運転開始を予定しているLHCの高輝度化(HL-LHC)において、ヒッグスの自己結合定数を測定すべく、HL-LHCで必要となる高放射線耐性のシリコン検出器を開発する。

## 3. 研究の方法

### H→bb崩壊事象の探索:

WあるいはZを伴い生成されたヒッグスボソンがボトムクォーク対に崩壊していないか検証する。終状態にボトムクォーク起源のジェットが2個存在することから、ボトムクォークジェット同定が解析の鍵を握る。また、ボトムクォークジェット2個から再構築した不変質量分布に、ヒッグスボソンの崩壊によるピークがないかを探すことになるので、背景事象との分離のためには、ジェットのエネルギー分解能の向上が重要な役割を果たす。そこで、本研究では、ボトムクォークジェット同定効率の測定と、ボトムクォークジェットのエネルギー分解能の測定を実施した。また、実データを用いるなどして系統誤差を抑える工夫をこらし、背景事象の見積もりを高い精度で行った。

### ttH生成事象の探索:

トップクォーク対を伴いヒッグスボソンが同時に生成される事象がないかを探索する。ヒッグスボソンのどの崩壊モードを使うかで解析の方針が大きく変わる。本研究では、統計量は少ないものの、不変質量分布中に綺麗なピークが存在する(はずの)2光子終状態を解析に使った。分岐比の大きい崩壊過程は、系統誤差が支配的になり、統計を増やしても精度がよくなるを見越して、ヒッグスボソンの2光子への崩壊過程を利用した。

### シリコン検出器開発:

センサー、および、信号読み出し用ICとのバンプボンディングは浜松ホトニクスと共同開発する。本研究では、特に試作品の性能評価に重点を置く。まずは、試作品の性能評価を行うために、ビームテスト等で粒子が評価対象のどこに入射したかを測定するためのテレスコープを開発した。目標は、位置分解能 $5\mu\text{m}$ 以下、データ収集レート数 $10\text{kHz}$ と設定した。合わせて、ビームの位置および形状をモニターするためのファイバートラッカーを制作した。実際の性能評価においては、放射線源を使い、バンプボンディングの歩留まりの評価、電荷収集量とTime Over Thresholdの較正等を実施。検出効率の評価のためには、CERNおよびFermilabの高運動量ビームラインでビームテストを実施した。

## 4. 研究成果

WおよびZを伴い生成されたヒッグスボソンがボトムクォーク対に崩壊する事象を $3.5\sigma$ の有意度で観測した。測定精度は30%で、その精度内で標準模型の予言値と一致していた。CMS実験グループも同様の結果を出していることを勘案すると、ボトムクォークの質量がヒッグス機構により生成されていることを強く示唆する。

トップクォーク対を伴いヒッグスボソンが生成される事象をATLASグループは観測した。本研究グループが推進したのは、ヒッグスボソンが2つの光子に崩壊するモードであるが、その崩壊過程単独では、統計的に有意な信号を観測するには至らなかった。しかしながら、本研究期間終了後に、統計量を増やした解析結果を公表し、その解析ではttH生成を $6\sigma$ を超える有意度で観測した。2光子への崩壊過程だけでも、 $3\sigma$ を超えた。この結果は、トップクォークの質量がヒッグス機構により生成されていること=湯川結合の存在を直接検証したことになる。他のフェルミオンよりも桁違いに重いトップクォークの質量も、ボトムクォークあるいは $\tau$ と同様の仕組みで生成されていることを示した。

これまでに $\tau$ の湯川結合が実験的に直接検証されていたことを踏まえると、本研究に

よる、トップおよびボトムクォークの湯川結合の検証(示唆)は、第3世代フェルミオンの質量起源を解明したと言ってもよく、ヒッグス機構の全貌解明に向けて大きなマイルストーンとなった。今後は、ボトムクォークの湯川結合の測定精度向上に加えて、第2世代フェルミオンの湯川結合の検証が大きな課題となる。世代の謎解明に向けて前進が期待される。

また、さらなる測定精度の向上により、標準模型からのズレを検証することが素粒子物理学にとっての喫緊の課題でもある。本研究では、超対称性の寄与などを検証するには至らなかったが、新物理の寄与を観測するためのマイルストーンともなった。

シリコン検出器開発においては、大きな進展が3つあった。1つ目は、n-in-p型センサーの開発である。 $1 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 程度の放射線を受けても、検出効率の大きな劣化のないセンサーを開発することに成功した。ビームテストの結果を設計に最大限フィードバックすることで、バイアス構造の配置などを最適化することで、放射線耐性を上げることに成功した。

2つ目は、バンプボンディング技術の大幅な向上である。研究開始前は、SnAgによるフラックスなしの接続は不可能であったが、現在は、フラックスなしのSnAg接続が可能で、しかも、センサーおよびICの厚さを $150 \mu\text{m}$ まで薄くしてもバンプボンディングできるまでに技術開発が進んだ。

3つ目は、バンプボンディングされたセンサーをフレキシブル基板に搭載する手法を確立しつつある点である。

これらを総合すると、検出器開発のフェーズから大量生産に向けたフェーズに意向しつつあり、HL-LHCに向けたATLAS検出器アップグレードの技術設計仕様書の完成に大きな貢献を果たした。

## 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24件)

- ① M. Aaboud, K. Hanagaki, et al. (ATLAS Collaboration), “Evidence for the associated production of the Higgs boson and a top quark pair with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D97 (2018) 72003, 査読有, 10.1103/PhysRevD97.072003
- ② M. Aaboud, K. Hanagaki, et al. (ATLAS Collaboration), “Search for dark matter in association with a Higgs boson decaying to bb-quarks in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B765 (2017), 11-31, 査読有

10.1016/j.physletb.2016.11.035

- ③ M. Aaboud, K. Hanagaki, et al. (ATLAS Collaboration), “Search for the standard model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into a bb pair in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 97 (2018), 72016, 査読有, 10.1103/PhysRevD.97.072016
- ④ K. Hamaguchi, K. Nakayama, Y. Tang, “Gravitino/Axino as Decaying Dark Matter and Cosmological Tensions”, Phys. Lett. B772 (2017), 415-419, 査読有, 10.1016/j.physletb.2017.06.071
- ⑤ N. Haba, H. Umeeda, T. Yamada, “Semialigned two Higgs doublet model”, Phys. Rev. D97 (2018), 35004, 査読有, 10.1103/PhysRevD.97.035004
- ⑥ M. Aaboud, K. Hanagaki, et al. (ATLAS Collaboration), “Evidence for the  $H \rightarrow \text{bb}$  decay with the ATLAS detector”, JHEP 12 (2017), 24, 査読有 10.1007/JHEP12(2017)024
- ⑦ M. Aaboud, K. Hanagaki, et al. (ATLAS Collaboration), “Search for the Standard Model Higgs boson produced by vector-boson fusion and decaying to bottom quarks in  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  pp collisions with the ATLAS detector”, JHEP 11 (2016), 112, 査読有 10.1007/JHEP11(2016)112
- ⑧ M. Aaboud, K. Hanagaki, et al. (ATLAS Collaboration), “Search for the Standard Model Higgs boson decaying into bb produced in association with top quarks decaying hadronically in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector”, JHEP 5 (2016), 160, 査読有 10.1007/JHEP05(2016)160
- ⑨ M. Aaboud, K. Hanagaki, et al. (ATLAS and CMS Collaboration), “Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC pp collision data at  $\sqrt{s} = 7$  and  $8 \text{ TeV}$ ”, JHEP 8 (2016), 45, 査読有 10.1007/JHEP08(2016)045
- ⑩ Y. Unno, K. Hanagaki, et al., “Development of n-in-p planar sensors for extremely high radiation environments, designed to retain high efficiency after irradiation”, Nucl. Instrum. Meth. A831 (2016), 122-132, 査読有 10.1016/j.nima.2016.04.039
- ⑪ K.J. Bae, K. Hamaguchi, T. Moroi, K. Yanagi, “Probing the origin of 750

- GeV diphoton excess with the precision measurements at the ILC”, Phys. Lett. B759 (2016), 575-582, 査読有 10.1016/j.physletb.2016.06.026
- ⑫ N. Haba, H. Ishida, N. Okada, Y. Yamaguchi, “Vacuum stability and naturalness in type-II seesaw”, Eur. Phys. J. C76 (2016), 333, 査読有 10.1140/epjc/s10052-016-4180-z
- ⑬ G. Aad, K. Hanagaki, et al. (ATLAS and CMS Collaboration), “Combined Measurement of the Higgs Boson Mass in pp Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with the ATLAS and CMS Experiments”, Phys. Rev. Lett. 114 (2015), 191803, 査読有 10.1103/PhysRevLett.114.191803
- ⑭ G. Aad, K. Hanagaki, et al. (ATLAS Collaboration), “Study of the spin and parity of the Higgs boson decays with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C75 (2015), 476, 査読有 10.1140/epjc/s10062-015-3685-1
- ⑮ G. Aad, K. Hanagaki, et al. (ATLAS Collaboration), “Measurements of the Higgs boson production and decay rate and coupling strengths using pp collision data at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV in the ATLAS experiment”, Eur. Phys. J. C76 (2016), 6, 査読有 10.1140/epjc/s10052-015-3769-y
- ⑯ N. Haba, H. Ishida, N. Okada and Y. Yamaguchi, “Bosonic seesaw mechanism in a classically conformal extension of the Standard Model”, Phys. Lett. B754 (2016), 349-352 査読有 10.1016/j.physletb.2016.01.050
- ⑰ K. Hamaguchi, and K. Ishikawa, “Prospects for Higgs and Z resonant Neutralino Dark Matter”, Phys. Rev. D93 (2016), 55009 査読有 10.1102/PhysRevD.93.05509
- ⑱ G. Aad, K. Hanagaki, et al. (ATLAS Collaboration), “Search for Higgs Pair Production in the  $\gamma\gamma b\bar{b}$  Final State Using pp Collision Data at  $\sqrt{s} = 8$  TeV from the ATLAS Detector”, Phys. Rev. Lett. 144 (2015), 081802, 査読有 10.1103/PhysRevLett.144.081802
- ⑲ G. Aad, K. Hanagaki, et al. (ATLAS Collaboration), “Search for the bb decay of the Standard Model Higgs boson in associated (W/Z)H production with ATLAS detector”, JHEP 1501 (2015) 069-1, 査読有 10.1007/JHEP01(2015)069
- ⑳ A. Clark, M. Endo, K. Hanagaki, et al., “Double-sided super-module R&D for the ATLAS tracker at HL-LHC – A summary”, Nucl. Instrum. Meth., A765 (2014), 91-96, 査読有 10.1016/j.nima.2014.05.010
- 21 G. Aad, K. Hanagaki, et al. (ATLAS Collaboration), “Search for the Standard Model Higgs boson decay to  $\mu\mu$  with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B738 (2014), 68-86, 査読有 10.1016/j.physletb.2014.09.008
- 22 G. Aad, K. Hanagaki, et al. (ATLAS Collaboration), “Operation and performance of the ATLAS semiconductor tracker”, JINST, 9 (2014), P08009-1, 査読有 10.1088/1748-0221/9/08/P08009
- 23 N. Haba, H. Ishida, K. Kaneta, and R. Takahashi, “Vanishing Higgs potential at the Planck scale in a single extension of the standard model”, Phys. Rev. D90 (2014), 036006-1, 査読有 10.1103/PhysRevD.90.036006
- 24 K. Hamaguchi, M. Ibe, T. Yanagida, and N. Yokozawa, “Testing the Minimal Direct Gauge Mediation at the LHC”, Phys. Rev. D 90 (2014), 015027-1, 査読有 10.1103/PhysRevD.90.015027
- [学会発表] (計 32 件)
- ① 東野聡, 花垣和則, 他, ”LHC-ATLAS 実験における 2 光子に崩壊するヒッグス粒子の ttH 生成過程探索“, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2017.3.22-3.25, 東京理科大学(千葉県)
- ② 東野聡, 花垣和則, 他, ”LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるヒッグス粒子の 2 光子崩壊事象での ttH 生成過程探索“, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017.9.12-9.15, 宇都宮大学(栃木県)
- ③ 矢島和樹, 花垣和則, 他, ”LHC-ATLAS 実験ピクセル検出器データ読み出しシステムアップグレード“, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017.9.12-9.15, 宇都宮大学(栃木県)
- ④ K. Hamaguchi, “Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model” (招待講演), Moriond Electroweak 2018, LaThuile (イタリア)
- ⑤ 山田敏史, 波場直之, ”Classically scale invariant extension of the Standard Model and strong dynamics“, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017.9.12-9.15, 宇都宮大学(栃木県)
- ⑥ 東野聡, 花垣和則, 他, ”LHC-ATLAS 実験における ttH 過程で生成するヒッグス粒子の 2 光子崩壊事象の探索“, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017.3.17-3.20, 大阪大学(大阪府)
- ⑦ 矢島和樹, 花垣和則, 他, ”LHC-ATLAS

- 実験におけるピクセル検出器のデータ読み出しシステムアップグレード“, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017.3.17-3.20, 大阪大学 (大阪府)
- ⑧ 石島直樹, 花垣和則, 他, ”LHC-ATLAS 実験における  $WH \rightarrow l \nu bb$  崩壊過程を用いたヒッグス粒子の測定“, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017.3.17-3.20, 大阪大学 (大阪府)
- ⑨ 今坂俊博, 花垣和則, 他, ”ATLAS 実験におけるピクセル検出器の動作特性評価“, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017.3.17-3.20, 大阪大学 (大阪府)
- ⑩ 東野聡, 花垣和則, 他, ”ATLAS 実験ピクセル検出器の読み出しタイミングの調整“, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016.9.21-9.24, 宮崎大学 (宮崎県)
- ⑪ 石島直樹, 花垣和則, 他, ”LHC-ATLAS 実験における  $WH \rightarrow l \nu bb$  崩壊過程を用いたヒッグス粒子の探索~系統誤差の評価と最新結果~“, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016.9.21-9.24, 宮崎大学 (宮崎県)
- ⑫ 今坂俊博, 花垣和則, 他, ”ATLAS 実験におけるピクセル検出器の動作特性評価“, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016.9.21-9.24, 宮崎大学 (宮崎県)
- ⑬ 濱口幸一, ”LHC の最新結果を踏まえた TeV コライダーによる新物理探索”(招待講演), 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016.9.21-9.24, 宮崎大学 (宮崎県)
- ⑭ 波場直之, 石田裕之, 岡田宣親, 山口達也, ”Radiative EW symmetry breaking with a scalar singlet extension” 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016.9.21-9.24, 宮崎大学 (宮崎県)
- ⑮ J.J. Teoh, K. Hanagaki, et al. (ATLAS Collaboration), ”Mono-Higgs: An Innovative Way to Search for Dark Matter at ATLAS (poster)”, Lake Louise Winter Institute 2016, 2016.2.27-2.13, アルバータ (カナダ)
- ⑯ 矢島和希, 花垣和則, 他, ”ATLAS アップグレード用シリコン検出器の性能評価のためのテレスコープ検出器の開発“, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016.3.19-3.22, 東北大学 (宮城県)
- ⑰ 山内洋子, 花垣和則, 他, ”ATLAS アップグレード用シリコン検出器の試験のためのテレスコープ検出器の性能評価“, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016.3.19-3.22, 東北大学 (宮城県)
- ⑱ 石島直樹, 花垣和則, 他, ”LHC-ATLAS 実験における  $H \rightarrow bb$  探索のための b-jet energy measurement “物理学会第 71 回年次大会, 2016.3.19-3.22, 東北大学 (宮城県)
- ⑲ 石島直樹, 花垣和則, 他, ”LHC-ATLAS 実験 Run2 における  $WH \rightarrow l \nu bb$  崩壊過程での背景事象の評価“, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015.9.25-9.28, 大阪市立大学 (大阪府)
- ⑳ 山内洋子, 花垣和則, 他, ”ATLAS アップグレード用シリコン検出器試験用テレスコープの性能評価“, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015.9.25-9.28, 大阪市立大学 (大阪府)
- 21 矢島直樹, 花垣和則, 他, ”ATLAS アップグレード用シリコン検出器の性能評価に用いるテレスコープ検出器の開発“, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015.9.25-9.28, 大阪市立大学 (大阪府)
- 22 波場直之, 山口達也, ”Vacuum stability in classical conformal U(1) extended model”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015.9.25-9.28, 大阪市立大学 (大阪府)
- 23 濱口幸一, ”Diphoton Excess and Running Coupling Constant”, Beyond the Standard Model in Okinawa 2016, OIST (沖縄県)
- 24 山内洋子, 花垣和則, 他, ”ATLAS アップグレード用シリコン検出器開発のためのビーム試験用テレスコープの性能評価“, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015.3.21-3.24, 早稲田大学 (東京都)
- 25 荒井泰貴, 花垣和則, 他, ”ATLAS 実験アップグレード用ピクセル検出器の性能評価“, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015.3.21-3.24, 早稲田大学 (東京都)
- 26 矢島和希, 花垣和則, 他, ”ATLAS 実験アップグレード用シリコン検出器試験のためのテレスコープ検出器 DAQ システムの開発“, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015.3.21-3.24, 早稲田大学 (東京都)
- 27 石島直樹, 花垣和則, 他, ”LHC-ATLAS 実験における  $WH \rightarrow l \nu bb$  崩壊過程での背景事象の見積もり“, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015.3.21-3.24, 早稲田大学 (東京都)
- 28 濱口幸一, ”SUSY Dark Matter”, Dark Matter: Astrophysical probes, Laboratory test, Theory aspects, 2015.2.2-2.27, ミュンヘン (ドイツ)
- 29 波場直之, 金田邦男, 高橋亮, 山口達也, ”Higgs mass from Planck scale boundary conditions with gravity”, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014.9.18-9.21, 佐賀大学 (佐賀県)
- 30 波場直之, 金田邦男, 高橋亮, ”Planck scale boundary conditions in the standard model with single scalar dark matter”, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014.9.18-9.21, 佐賀大学 (佐賀県)
- 31 荒井泰貴, 花垣和則, 他, ”ATLAS 実験アップグレード用ピクセル検出器の性能評価“, 日本物理学会 2014 年秋季大

- 会, 2014.9.18-9.21, 佐賀大学 (佐賀県)  
32 花垣和則, ”HL-LHC 実験の展望” (招待講演), 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014.9.18-9.21, 佐賀大学 (佐賀県)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

<http://atlas.kek.jp/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

花垣和則 (HANAGAKI, Kazunori)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授  
研究者番号 : 40448072

### (2) 研究分担者

波場直之 (HABA, Naoyuki)  
島根大学・総合理工学研究科・教授  
研究者番号 : 00293803

山中卓 (YAMANAKA, Taku)  
大阪大学・理学研究科・教授  
研究者番号 : 20243157  
(平成 28 年度より研究分担者)

濱口幸一 (HAMAGUCHI, Koichi)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号 : 80431899