

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21105006

研究課題名(和文)多彩なフレーバーがもたらすクォークハドロン物質の新形態に関する理論研究

研究課題名(英文)Theoretical study for the new formation of quarks and hadrons from variety of flavors

研究代表者

保坂 淳(Atsushi, Hosaka)

大阪大学・核物理研究センター・教授

研究者番号：10259872

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 120,200,000円、(間接経費) 36,060,000円

研究成果の概要(和文)：KEKやLHC等の高エネルギー加速器実験施設で相次いで発見されてきた、新しいタイプのハドロンの性質を理論的に解明する研究を行った。強い相互作用の基礎理論である量子色力学に基づき現象を再現し、実験データを説明した。その結果、観測データが、従来の陽子や中間子等とは異なったハドロンの存在を強く示唆していることを示した。また、クォークの閉じ込め機構、QGP相における非摂動ダイナミクス等、量子色力学の基本的な問題においても成果を得た。

若手育成のため、国内アジア圏の若手研究者(主として大学院生)を対象に、毎年計4回研究実践形式のサマースクールを実施した。

研究成果の概要(英文)：We have performed theoretical studies for hadrons of new types which have been observed in high-energy accelerator facilities such as KEK and LHC. Based on Quantum Chromodynamics (QCD), the fundamental theory for the strong interaction, phenomena are described and compared with experimental data. We clarified the mechanism for the generation of the hadrons which have different structure from the well-known nucleons and mesons and that the data indeed indicate the existence of the new hadrons. Furthermore, we have also clarified the fundamental problems of QCD such as confinement and nonperturbative dynamics in the QGP phase.

For education program, we organized a summer school for young researchers mostly for graduate students from domestic and Asian countries, every year and altogether four times.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：エキゾチックハドロン フレーバー 重いクォーク 分子状態 カイラル対称性 閉じ込め

1. 研究開始当初の背景

2003年以降、BelleにおけるDs、X粒子、Z_s(4430)、LEPSにおける $\psi(4130)$ 等のエキゾチックハドロンと呼ばれる新しい存在形態を示唆する観測が相次いだ。2008年末には高統計のデータ解析により $\psi(4130)$ のデータが再確認された。さらに分子構造や強いダイクォーク相関をもった新たな存在形態も議論されている。これらは従来のメソンとバリオンでは説明できない。一方カイラル対称性の自発的な破れに関連し、物質中でハドロンの質量が変化することが観測された。これらの新しい現象をQCDの動力学に基づいて記述する理論解析方法の構築が急務であった。

これらの理論研究には、ハドロン原子核物理の分野の研究者がすでに多く携わっていた。その中には、クォーク模型やカイラル理論などの有効模型を得意とするもの、摂動QCD等、摂動による系統的な計算を得意とするもの、格子QCDによる第一原理計算を得意とするものなど、そのスペクトルは幅広いものがあった。しかし個々の研究は比較的独立に行われていたため、上記目的の達成のために、お互いのより密接な連携が望まれていた。

2. 研究の目的

LEPS2、J-PARC、KEKBで行われるハドロン実験により、膨大なデータの取得が予想されていた。本計画研究ではこれらのデータと第一原理であるQCDに基づいて、ハドロンの新しい存在形態と質量生成の動的機構を解明する理論的手法を確立し説明すると共に、物質の成り立ちに関わる基本的な問題解決に結びつけることを目指した。現象の説明に留まらず新しい現象を予言し、実験研究と有機的に発展できるような理論研究を展開することを目標とした。

3. 研究の方法

実験データと結びついた研究として個々の現象の特徴を捉えることのできる有効理論による研究を行うと同時に、第一原理であるQCDに基づいた数値シミュレーションによって有効理論を検証し、現象に対する理解を進める。素粒子物理、原子核物理、多体問題の研究方法を集約することで、個別の分野ごとの研究では成しえない成果を期待する。具体的に以下の5つの項目の研究を展開する：(1)構成クォーク模型によるハドロン分光、(2)カイラル有効理論による構造と相互作用、(3)摂動QCDによるクォーク分布と破砕関数、(4)散乱・生成・崩壊機構の解明、(5)QCDの第一原理に基づいた研究。以上の研究によって得られた成果をもとに、新たな実験を提案するとともに、質量の起源やクォークの閉じ込めなどの基本的な問題解決に向けた考察を行う。

4. 研究成果

領域研究発足のきっかけとなった新粒子の多くは、ハドロン分子共鳴の可能性が指摘されてきた。本理論研究では、それらのいくつかは重いクォークを含むハドロンの複合系であること、それらの間にはカイラル対称性の自発的破れに基づく交換力によって実現できることを示した。ハドロンが多様な存在形態を示すかなり一般的な機構を明らかにした。一方で、ハドロン間の相互作用には未知の部分が多く、それらのより完全な理解なくしては、多くの現象を首尾一貫して説明するには至らないことも指摘された。今後の重要な課題である。

以下研究成果の例をいくつか述べる。

(1) X(3872)

D \bar{D}^* 中間子の分子状態に $c\bar{c}$ クォークoniumが少し混合することで、質量や崩壊の性質を説明することができた。敷居近傍のためアイソスピンの破れの重要性が示された(瀧澤・竹内ら PTEP 093D01, 2013)。ハドロンの分子共鳴構造を強く示唆するもので、ハドロンの存在形態に対して新たな視点をもたらした重要な成果である(図1)。

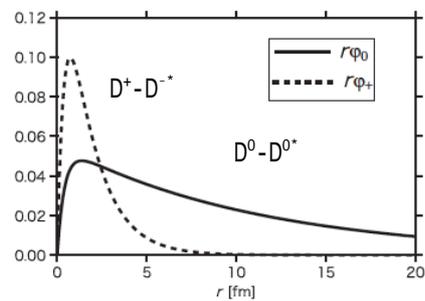


図1. X(3872)状態における、D⁰-D^{0*}(実線)およびD⁺-D^{*-}(破線)波動関数。ハドロンの典型的な大きさ1 fmより大きく広がっている様子がわかる。両者の違いはアイソスピンの破れを表しX(3872)の崩壊の性質を説明する。PTEP 093D01, 2013より転載。

(2) 重いハドロンの分子共鳴

Belleで発見されたZ_b粒子を2個のB中間子の分子状態として記述することで、質量と崩壊の性質を説明することができた。また未知の粒子の存在を予言するとともに(図2)、重いクォーク対称性に基づいた選択則を導出した(大古田、山口、安井、保坂ら、Phys.Rev. D86 (2012) 014004)。チャームより重いボトム領域で、南部の対称性の破れに起因する中間子交換力の重要性を指摘し、実際に分子共鳴状態を構成出来ることを示した点で重要な成果である。

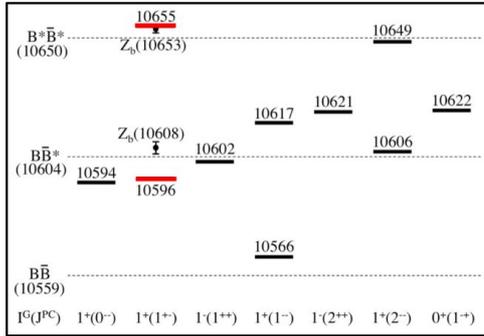


図 2: B(*)-B(*)分子状態で予言される様々な状態。赤線が実験で観測された Z_b 粒子。

(3) 重いクォーク対称性

重いクォークの極限における準位縮退の性質を明らかにし、(1)(2)で実現されている重いハドロン分子状態に適用した。2体系のみならず3体系においても縮退が見られること、そのパターンを明らかにした(図3)。原子核中に重いハドロンを投入するという先駆的研究である(山口、安井、保坂ら, arXiv:1309.4324, Nuclear Physics A に掲載決定)。

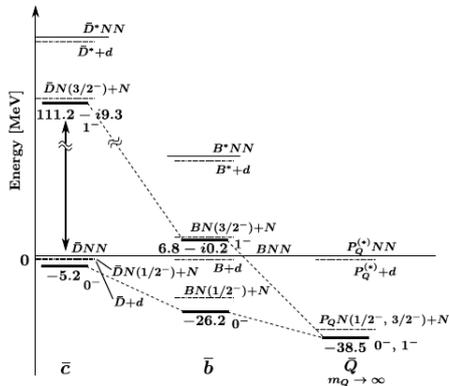


図 3: Dbar-NN 3 体系の束縛状態(左)。D 中間子を B 中間子と無限に重い中間子に置き換えた結果(中央と右)を結ぶことで、重いクォーク極限での準位の縮退状況を示した。

(4) 高次ベクトル中間子

ホログラフィック有効模型により核子の形状因子を解析し、高次ベクトル中間子の影響を解析した(図4, 原田ら, Phys.Rev. D83 (2011) 11404)。有効理論の高次効果を検証する可能性を持つ興味深い結果である。

(5) カイラル対称性と閉じ込め機構

QCDの数値シミュレーションと(格子QCD)解析的な方法によって、カイラル対称性の破れが低エネルギーモードの性質に依存する一方、閉じ込めポテンシャルは低エネルギーモードには依存しないことを示した。(図5)カイラル対称性の破れと、閉じ込めの機構を解明するための重要な手がかりを与えた。(菅沼ら, Phys.Rev. D86 (2012) 034510)。

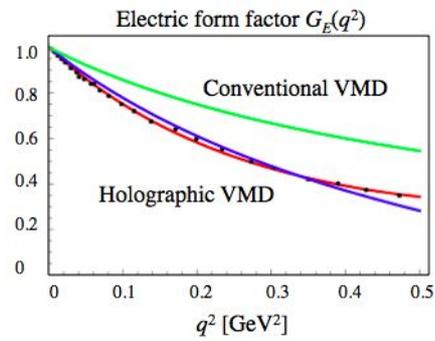


図 4: 核子の形状因子。従来のモデル(緑)と比べホログラフィックモデルでは改善され、重いベクトル中間子の効果の重要性を示している。

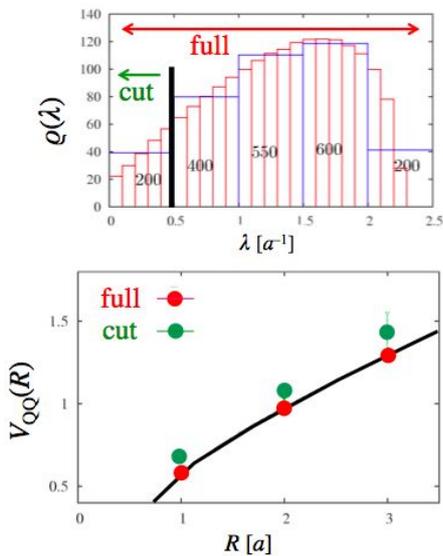


図 5: 格子 QCD で計算された Dirac モード分布とクォーク間ポテンシャル。低エネルギーモードをカットしても(緑)クォークポテンシャルはほとんど影響を受けないことを示している。

(6) 高エネルギー反応

反応断面積に見られるクォークカウンティング則により、粒子のエキゾチックな性質を調べる方法を提案した(図6, 関原、川村、熊野ら, Phys.Rev. D88 (2013) 034010)。粒子の素性を模型によらず特定できる重要な指標になる。

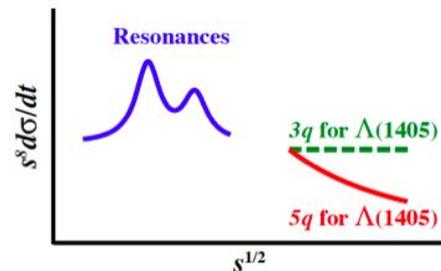


図 6: p → K (1405) 反応の反応率。(1405)の構造により高エネルギーでの反応率が変わることを示している(緑と赤)。

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](査読付き原著論文 94 件中 34 件を表示)

1. "Strategies for an accurate determination of the $X(3872)$ energy from QCD lattice simulations", E. J. Garzon, R. Molina, A. Hosaka and E. Oset, Phys. Rev. D 89, 014504 (2014) 査読有
2. "Quark Scalar, Axial and Pseudoscalar Charges in the Schwinger-Dyson Formalism", *N. Yamanaka, S. Imai, T.M. Doi and H. Suganuma, Phys. Rev. D89 074017:1-26 (2014) 査読有
3. "Lattice QCD Analysis of the Polyakov Loop in terms of Dirac Eigenmodes", *T. Iritani and H. Suganuma, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014 3, 033B03:1-20 (2014) 査読有
4. "Analytical Relation between Confinement and Chiral Symmetry Breaking in terms of Polyakov Loop and Dirac Eigenmodes in Odd-Number Lattice QCD", *H. Suganuma, T.M. Doi and T. Iritani, Proc. of Sci. (QCD-TNT-III) 042:1-12 (2014) 査読有
5. "Analytical Relation between Quark Confinement and Chiral Symmetry Breaking in Odd-number Lattice QCD", *H. Suganuma, T.M. Doi and T. Iritani, Eur. Phys. J. Web of Conf. Vol. 71 (8 pages)(2014) 査読有
6. "Analytical Relation between Quark Confinement and Chiral Symmetry Breaking in QCD", *H. Suganuma, T.M. Doi and T. Iritani, Proc. of Sci. (Hadron 2013) 121:1-5 (2014) 査読有
7. "Lattice QCD Study for Relation between Confinement and Chiral Symmetry Breaking on Temporally Odd-number Lattice", *T.M. Doi, H. Suganuma and T. Iritani, Proc. of Sci. (Hadron 2013) 122:1-5 (2014) 査読有
8. "Quark Tensor and Axial Charges within the Schwinger-Dyson Formalism", *N. Yamanaka, T.M. Doi, S. Imai and H. Suganuma, Proc. of Sci. (Hadron 2013) 123:1-5 (2014) 査読有
9. "A Non-perturbative Effect of Gluons for Scalar Diquark in the Schwinger-Dyson Formalism", *S. Imai and H. Suganuma, Proc. of Sci. (Hadron 2013) (2014) 148:1-5 (2014) 査読有
10. "Radiative $X(3872)$ Decays in Charmonium-Molecule Hybrid Model," *Makoto Takizawa and Sachiko Takeuchi, and Kiyotaka Shimizu, Few Body Syst. 10.1007/s00601-014-0830-6, 1-4 (2014) 査読有
11. "Tomography of exotic hadrons in high-energy exclusive processes", H. Kawamura, S. Kumano, Phys. Rev. D 89 (2014) 054007, 1-13. 査読有
12. "Studies of exotic hadrons by high-energy exclusive reactions", H. Kawamura, S. Kumano, T. Sekihara, JPS Conf. Proc., 013043 (2014) 1-4. 査読有
13. "Enhancement of Chiral Symmetry Breaking from the Pion condensation at finite isospin chemical potential in a holographic QCD model", Hiroki Nishihara, Masayasu Harada, Phys.Rev. D89 (2014) 076001:1-8 査読有
14. Role of vector and pseudoscalar mesons in understanding $1=1/2^- N^*$ and resonances", K. P. Khemchandani, A. Martinez Torres, H. Nagahiro and A. Hosaka, Phys. Rev. D 88, 114016 (2013) 査読有
15. "Composite and elementary nature of a resonance in the sigma model", H. Nagahiro and A. Hosaka, Phys. Rev. C 88, 055203 (2013) 査読有
16. "Spin degeneracy in multi-hadron systems with a heavy quark", S. Yasui, K. Sudoh, Y. Yamaguchi, S. Ohkoda, A. Hosaka and T. Hyodo, Phys. Lett. B 727, 185 (2013) 査読有
17. "Hadronic molecules for charmed and bottom baryons near thresholds", Y. Yamaguchi, S. Ohkoda, S. Yasui and A. Hosaka, Phys. Rev. D 87, no. 7, 074019 (2013) 査読有
18. " K^* photoproduction off the proton target with baryon resonances", S.-H. Kim, S.-i. Nam, A. Hosaka and H.-C. Kim, Phys. Rev. D 88, 054012 (2013) 査読有
19. "Gluon Propagators in Maximally Abelian Gauge in SU(3) Lattice QCD", *S. Gongyo and H. Suganuma, Phys. Rev. D87 074506:1-12 (2013) 査読有
20. "Quark Tensor Charge and Electric Dipole Moment within the Schwinger-Dyson Formalism", *N. Yamanaka, T.M. Doi, S. Imai and H. Suganuma, Phys. Rev. D88 074036:1-14 (2013) 査読有
21. "Analytical Relation between the Polyakov Loop and Dirac Eigenvalues in Temporally Odd-number Lattice QCD", *H. Suganuma, T.M. Doi and T. Iritani,

Proc. of Sci. (Lattice 2013) 374:1-7 (2013) 査読有

22. "A Direct Relation between Confinement and Chiral Symmetry Breaking in Temporally Odd-number Lattice QCD", *T.M. Doi, H. Suganuma and T. Iritani, Proc. of Sci. (Lattice 2013) 375:1-7 (2013) 査読有

23. "Lattice QCD Study for Stringy Excitation and Role of UV Gluons", *H. Ueda, T.M. Doi, S. Fujibayashi, S. Tsutsui, T. Iritani and H. Suganuma, Proc. of Sci. (Confinement X) 046:1-8 (2013) 査読有

24. "SU(3) Lattice QCD Study of the Gluon Propagator in Maximally Abelian Gauge: Off-diagonal Gluon Mass Generation and Infrared Abelian Dominance", *S. Gongyo, T. Iritani and H. Suganuma, Proc. of Sci. (Confinement X) 050:1-8 (2013) 査読有

25. "Polyakov Loop Analysis with Dirac-mode Expansion", *T. Iritani, S. Gongyo and H. Suganuma, Proc. of Sci. (Confinement X) 053:1-8 (2013) 査読有

26. "Lattice QCD Study of Confinement and Chiral Symmetry Breaking with Dirac-mode Expansion", *H. Suganuma, S. Gongyo and T. Iritani, Proc. of Sci. (Confinement X) 081:1-8 (2013) 査読有

27. "The isospin mixing in the X(3872) decay spectrum," *Sachiko Takeuchi, Makoto Takizawa, and Kiyotaka Shimizu, Few Body Syst. 10.1007/s00601-013-0784-0,1-5, (2013) 査読有

28. "X(3872) as a hybrid state of charmonium and the hadronic molecule," *Makoto Takizawa and Sachiko Takeuchi, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2013, 093D01,1-18,(2013) 査読有

29. "Charmonium and meson-molecule hybrid tetraquarks: Vector meson width and the isospin breaking in the X(3872) decay," *Sachiko Takeuchi, Kiyotaka Shimizu and Makoto Takizawa, Few Body Syst. 54, 419-423, (2013) 査読有

30. "The charmonium-molecule hybrid structure of the X(3872)," *Makoto Takizawa and Sachiko Takeuchi, and Kiyotaka Shimizu, Few Body Syst. 54, 415-418 (2013) 査読有

31. "Determination of exotic hadron structure by constituent-counting rule for hard exclusive processes", H. Kawamura, S. Kumano, T. Sekihara, Phys. Rev. D88 (2013) 034010, 1-12. 査読有

32. "B factory book "Physics of the B factories", QCD-related physics, fragmentation", F. Anulli,

R.Seidl, S. Kumano (2013) in press. 査読有

33. "Parity doubling structure of nucleon at non-zero density in the holographic mean field theory", Bing-Ran He, Masayasu Harada, Phys.Rev. D88 (2013) 095007:1-9 査読有

34. "Dense Baryonic Matter in Hidden Local Symmetry Approach: Half-Skyrmions and Nucleon Mass", Yong-Liang Ma, Masayasu Harada, Hyun Kyu Lee, Yongseok Oh, Byung-Yoon Park and Mannque Rho, Physical Review D 88, 014016:1-12 (2013) 査読有

他多数

{学会発表}招待講演45件中19件を表示)

1. Atsushi Hosaka, "Structure of charmed baryons and their productions studied at JPARC", The 3rd Korea-Japan Workshop on Nuclear and Hadron Physics at J-PARC, Incheon, Korea, March 20-21, 2014
2. Atsushi Hosaka, "Exotic Hadrons with heavy quarks", Workshop on QCD, Hirscheg, Austria, Jan. 13-17, 2014
3. Atsushi Hosaka, "Hadrons with heavy quarks", FJNSP-LIA workshop, Paris, France, Sept. 30-Oct. 3 2013
4. Atsushi Hosaka, "Hadronic molecules with heavy quarks", Baikal workshop, Jul. 15-19, Russia, 2013
5. Atsushi Hosaka, "Hadronic molecules with heavy quarks", Baikal workshop, Jul. 15-19, Russia, 2013
6. Atsushi Hosaka, "Photoproduction of (ss) meson", Nstar workshop, Peniscola, Valencia, Spain, May 27-30, 2013
7. Hideo Suganuma, "Analytical Relation between Confinement and Chiral Symmetry Breaking in terms of Polyakov Loop and Dirac Eigenmodes in Odd-Number Lattice QCD", QCD-TNT-III International Workshop on "From Quarks and Gluons to Hadronic Matter: A bridge too far?" ECT*, Trento, Italy, 2-6 September 2013
8. S. Kumano, "Flavor structure of the light-quark sea in nucleons and possible J-PARC projects", Workshop on Flavor Structure of the Nucleon Sea, ECT*, Trento, Italy, July 1 - 5, 2013.
9. "Tensor structure of the deuteron and Nuclear structure functions", Workshop on Nuclear Structure and Dynamics at Short Distances, University of Washington, Seattle, USA, Feb.11 - 22, 2013.

10. "New Approaches to In-medium spectral function -- Holographic Mean-Field Theory for Baryon Many-Body Systems --", Invited talk given by M.~Harada at "Electromagnetic Probes of Strongly Interacting Matter: Status and Future of Low-Mass Lepton-Pair Spectroscopy" (May 20 - 24, 2013, ECT*, Trento, Italy)

11. "Holographic Mean-Field Theory for Baryon Many-Body Systems", Invited talk given by M.~Harada at 4th Year of APCTP-WCU Focus program "From dense matter to compact stars in QCD and in hQCD", (April 14 - 24, 2013, APCTP, Pohang, Korea)

12. Atsushi Hosaka, "Exotic hadrons with heavy quarks", Bled workshop, Ljubiana, Serbia, Jul. 2-6, 2012

13. Atsushi Hosaka, "Exotic hadrons with heavy quarks", Invited session at KPS meeting, Daejeon, Korea, April 24-27, 2012

14. "High-energy hadron physics at J-PARC", Workshop on physics at the high-momentum beam line, KEK, Japan, August 2, 2012.

15. "Internal structure of hadrons in two-photon processes", Workshop on QCD in two-photon process, Academia Sinica, Taiwan, October 2-4, 2012.

16. "Studies of internal structure of exotic hadrons by fragmentation", functions, S. Kumano, Workshop on Fragmentation Functions and QCD 2012, Riken, Wako, Japan, November 9 - 11, 2012.

17. "Holographic Mean-Field Theory for Baryon Many-Body Systems", Invited talk given by M.~Harada at WCU Mini-workshop on "holographic landscape of dense matter", (October 11, 2012, Hanyang University, Seoul, Korea).

18. "Study of exotic hadrons in effective models for chiral doubling of charmed mesons", Invited talk given by M.~Harada at Heavy Quark Hadrons at J-PARC 2012 (June 18-22, 2012, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan),

19. "Progress on skyrmion matter from hidden local symmetry", Invited talk given by Y. L. Ma at 4th Year of APCTP-WCU Focus program "From dense matter to compact stars in QCD and in hQCD", (April 14 - 24, 2013, APCTP, Pohang, Korea)

他多数

[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://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/public/new_hadron/

6. 研究組織

(1)研究代表者

保坂 淳 (HOSAKA, Atsushi)

大阪大学・核物理研究センター(教授)

研究者番号: 10259872

(2)研究分担者

菅沼秀夫 (SUGANUMA, Hideo)

京都大学・理学研究科(准教授)

研究者番号: 10291452

原田正康 (HARADA, Masayasu)

名古屋大学・理学研究科(教授)

研究者番号: 40311716

森松 治 (MORIMATSU, Osamu)

KEK・素粒子原子核研究所(准教授)

研究者番号: 60210184

竹内幸子 (TAKEUCHI, Sachiko)

日本社会事業大学社会福祉学部(教授)

研究者番号: 90251503

(3)連携研究者

国広悌二 (KUNIHIRO, Teiji)

京都大学・理学研究科(教授)

研究者番号: 20153314

岡 真 (OKA, Makoto)

東京工業大学・理工学研究科(教授)

研究者番号: 60144606

熊野 俊三 (KUMANO, Shunzo)

KEK・素粒子原子核研究所(教授)

研究者番号: 10253577

斉藤 晃一 (SAITO, Koichi)

東京理科大学・理工学部(教授)

研究者番号: 40170500

瀧澤 誠 (TAKIZAWA, Makoto)

昭和薬科大学・薬学部(講師)

研究者番号: 90297044

慈道 大介 (JIDO, Daisuke)

首都大学東京・都市教養学部(准教授)

研究者番号: 30402811

土手 昭伸 (DOTE, Akinobu)

KEK・素粒子原子核研究所(研究機関講師)

研究者番号: 90450361