

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400273

研究課題名(和文)生成崩壊反応によるチャームバリオン分光の理論研究

研究課題名(英文) Charmed baryons studied by production and decay reactions

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：通常物質は標準模型の6種類のクォークのうち、軽いu、dクォークによってできている。近年加速器実験でこれらの物質を超え、説明困難なキゾチックハドロンが多数発見されるに至り、強い相互作用についての我々の理解が不十分であることが露呈された。本研究ではこの問題の解明に向けより単純なチャームバリオンについて、その生成率、崩壊寿命などの反応課程の理論研究を行った。その結果以下の成果を得た。(1) 様々なチャームバリオンの生成率を予言し、J-PARC実験計画推進に重要な指針を与えた。(2) 生成率と崩壊寿命は構造と密接に関係していることを具体的に示し、今後の構造の理論研究において重要な指針を与えた。

研究成果の概要(英文)：Ordinary matter is made of light u and d quarks which are the two light elements in the standard model. Recent discoveries of many exotic hadrons containing heavy charm quarks and being difficult to explain their properties has opened a question about our understanding of the strong interaction physics. To solve this problem, in this research project, we have studied the simpler particles, charmed baryons, and their properties such as production rates and decay life times. Our achievements are: (1) We have predicted production rates of various charmed baryons, which contributes to the experimental plan at J-PARC. (2) We have clarified the relations between the structure and the rates of productions and decays, which has given a guideline for the future theoretical studies.

研究分野：ハドロン・原子核物理理論

キーワード：ハドロン クォーク 重いフレーバー 生成崩壊反応

## 1. 研究開始当初の背景

2003年にKEK B-factory(B 中間子工場)によって報告されたX(3872)の発見を皮切りに、ハドロンの新粒子X, Y, Z 粒子の発見が相次いだ[1, 2]。もっとも最近では、2015年にCERNのLHCからPcペンタクォークの発見が報告されている[3]。それらは、(1)チャームやボトムのような重いクォークを含む、(2)質量が崩壊チャンネルが開く閾近傍にある、等の特徴をもっている。しかしながら、これらの性質は従来の標準的なハドロンの理論であるクォーク模型によっては説明困難で、その解明が望まれていた。

2009年から2013の5年間にわたって新学術研究「新ハドロン」が実施された。X, Y, Zの新粒子は共鳴状態にあり、その励起エネルギーによってクォーク反クォーク対が生成される。そして新粒子の質量は、それら複数のクォークが再配列しハドロンが緩く結合するハドロン分子模型でよく説明することができた。一方で、高エネルギー反応でも大量に生成されることから、コンパクトなクォーク状態が混合している可能性が強く示唆された。これにより、これらの粒子が従来の理解を超えた、新たな存在形態をもつことが強く示唆された。

一方で、新粒子がなぜ重いチャームクォークを含む領域で多数発見されるのか、ハドロ分子以外の多重クォーク配列はあり得ないのか、などの疑問は残り今後の課題となった。このような状況の中、問題解決のためには、ハドロン中のクォークがどんな相互作用をし、どんな存在形態にあるのかという、最も基本的な問題解決が必要との議論が交わされた。クォークのダイナミクスは本来基礎理論である量子色力学(QCD)によって説明されるべきだが、本研究で対象となる閾近傍にある共鳴現象は、摂動QCDや格子QCDによる数値シミュレーションでも取り扱いが困難である。そのために、量子色力学を基盤とした現象論的な理論と実験によって、重いクォークと軽いクォークが混在する最も単純な系であるチャームバリオンの研究が重要であるとの議論に至った。

## 2. 研究の目的

本研究では、チャームバリオンの性質を調べることによって、クォークがバリオン中でどのように振る舞い、どんな自由度が励起状態を作るのかという基本的な課題に取り組む。本研究はKEK, J-PARCで計画されているチャームバリオン生成、崩壊の実験研究をサポートするという側面も持ち、計画推進に貢献することをも目指している。特にJ-PARC実験で新たに計画される高エネルギー中間子ビームによる生成実験において、欠損質量法によって得られる質量スペクトルから内部情報を引き出す手法の確立を目指す。さらに、重いクォークと軽いクォークが混在することで内部運動が分離する性質

を利用して、閉じ込められたクォークの運動形態の解明に結びつける。特に3粒子の内部運動である、モードの特徴を確立する理論研究を進め、さらにダイクォーク相関などの基本的な情報を引き出すことを目指す。具体的な項目は以下のとおり。

(1) 生成断面積 - 絶対値の評価 -  
チャームバリオンの生成実験はかつてBrookhavenで行われたが、生成事象は確認できず、断面積の上限が得られるにとどまった[4]。当時の実験技術の制限もあり、それ以降実験はなされてこなかった。中間子ビームによるチャームバリオン生成率の評価は、J-PARCの実験研究計画にあたり欠かせないだけでなく、理論的にも挑戦的な課題である。そこで本研究では、想定される実験でチャームバリオンがどのくらい生成されるのか、その断面積を理論的に予想する。

(2) 生成断面積 - 各状態の生成率 -  
生成断面積は、生成されるチャームバリオンの構造を強く反映し、その種類によって異なるはずである。本研究項目では、理論的に予想される様々なチャームバリオンが生成される割合を求める。

(3) 崩壊  
生成と同様、崩壊率は状態に強く依存する。そこで本研究では、理論的に予想される様々なチャームバリオンの崩壊率を求める。

## 3. 研究の方法

(1) 生成断面積 - 絶対値の評価 -  
J-PARC実験領域におけるチャームバリオン生成を量子色力学から直接求めることは現在のところ不可能である。そこで我々は、高エネルギー反応で成功を収めてきたRegge現象理論を採用することにした。この理論は、粒子の多重交換という物理機構によって、反応断面積のエネルギー依存性をよく説明する。一方で断面積の絶対値を説明することができないという欠点を持つ。これはまさに絶対値を必要とする我々の研究にとって問題であった。

そこで、我々は、データの存在するストレンジバリオンの生成断面積を再現するようにRegge理論のパラメータを決定し、それをチャーム領域に拡張することにした[5, 6]。その際、交換される多重粒子もストレンジを運ぶものからチャームを運ぶものに変換する必要がある。これに対して我々は、KaidalovのRegge軌跡則によって必要な変換を行った。それにより、チャームバリオンの生成断面積を、パラメータを最小限にとどめた形で予言することが可能になった。

(2) 生成断面積 - 各状態の生成率 -  
チャームバリオンの生成率はその状態(構造)に強く依存する。したがって、様々な状態の生成率を系統的に測定することで、構造の情報を抽出することが可能になる。これがJ-PARC実験の大きな利点である。本研究ではチャームバリオンの波動関数をクォーク模

型によって構成し、様々な状態を生成する断面積を系統的に調べることにした[6]。前項と同様このような研究はこれまでに存在しないので、最も簡単な反応機構である1クォーク反応過程に基づいた反応模型を構成し、生成率を計算する。

(3) 崩壊

生成率と同様、崩壊率も強く状態の構造を反映する。崩壊に関する先行研究に対し、我々は状態をヘビークォーク対称性を利用し、内部運動の特徴を明らかにすることにした[7]。崩壊は中間子の放出によって引き起こされる。したがって、軽いクォークと中間子の相互作用をカイラル理論によって決定する。それにより、相互作用の不定性をなくし、構造の研究に焦点を当てることが可能になった。

4. 研究成果

(1) 生成断面積 - 絶対値の評価 - [5,6]

まず Regge 理論によって、ストレンジバリオンの生成実験を再現した。ベクトル Regge 粒子の多重交換が反応機構の主要項となり、断面積のエネルギー依存性を再現することが明らかになった。その上で断面積の絶対値を決めるパラメータを決定した。次に、フレーバーに依存するパラメータをストレンジ領域からチャーム領域に変更することで、チャームバリオンの生成断面積を予測した。チャームクォークを交換する多重粒子群の Regge 軌跡は、Kaidalov の理論によって決定した。これにより、パラメータを最小限にする理論予測が可能になった。その結果、チャームバリオンの生成断面積はストレンジバリオンの1万分の1程度であることを予測した。この研究成果の発表ののち、ドイツの研究グループにより、QCD のハード過程による研究が報告された。彼らの結果は我々の結果を支持するものであり、理論研究の信頼性が強化された。この生成率は、J-PARC 実験で観測できる範囲であり、計画が採択されるにあたって大いに貢献した。

本研究の具体的な計算は博士課程大学院生とともに実施し、当該学生はこれによって学位を取得した(Sang-Ho Kim)。

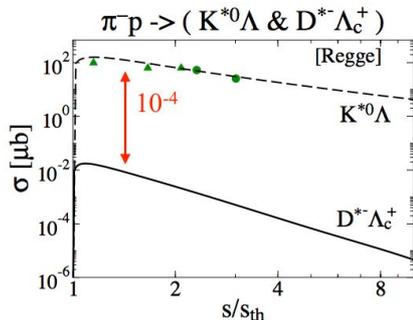


図1：ストレンジバリオンの生成断面積（破線）とチャームバリオンの生成断面積の予測（実線）。緑の点は実験データ[5]。

(2) 生成断面積 - 各状態の生成率 -

前項の結果を受けて、ベクトル Regge 粒子の多重交換による反応模型をクォークレベルで構築した[6]。Regge 粒子群はバリオンのクォーク1個とベクトル型で結合することで、スピン縦偏極移行をもたらす。これは交換される粒子の量子数による選択則であり、以下の結論の一般性を保証する。その結果、(a) 生成断面積は生成される状態に強く依存すること、(b) ヘビークォーク2重項の生成断面積比は、幾何学的な Clebsch-Gordan 係数によって決まり、状態の素性を明らかにする手段になること、(c) 基底状態より第1、2励起状態の生成率がより大きいこと、などを明らかにした。最後の性質は角運動量移行マッチングによるもので、一種の選択則になっている。これにより反応機構を直感的に理解することができる。(d) さらに類似の結果はハイパー核生成で観測されていて、お互いの結果は系のスケールパラメータを変えることで再現され、相似な物理現象であることを明らかにした。今後チャーム生成のデータが取得され、性質の解明を進める上で有用な性質である。(a, b, c) に関する結果を図2に、また、(d)に関する結果を図3に示す。

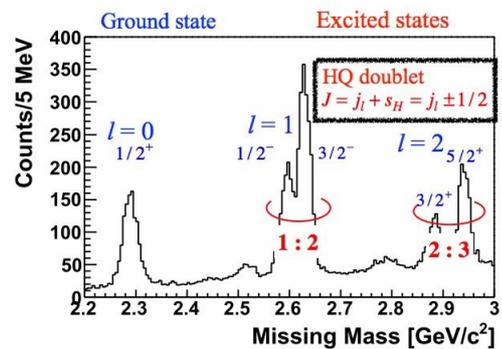


図2：基底状態、第1励起状態、第2励起状態の生成率。第1、第2の2つの状態はヘビークォーク2重項。

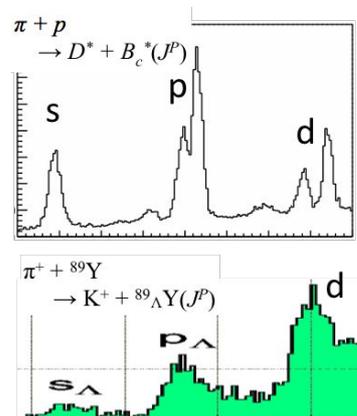


図3：チャームバリオンの生成（上、図2と同じ）とハイパー核生成反応（下）の比較。比較のため横軸のスケールは調整してある。

### (3) 崩壊

クォーク模型によれば、チャームバリオンの負パリティ第1励起領域には7個、正パリティの第1励起領域には19個の状態が存在することが予想されている。これに対して実際に観測されている状態数は限られていて、将来的にはより多くの状態が見つかることが期待される。本課題では、予想される可能なすべての状態に対してパイオン放出を伴う崩壊率を計算した。現存するデータと比較することで、観測されている状態がどの状態なのか、また、今後観測が予想される状態がどこに存在し得るかなどを詳細に検討した。その結果、モードにより寿命が大きく異なることから、寿命の極端に短い状態は観測されない可能性を示した。その上で、現在観測されている状態がモードの励起状態である可能性を強く示唆した[7]。

以上の研究成果は学術論文のほか、国際会議などの招待講演で発表された。

### 参考文献

- [1] S.K. Choi et al., Phys.Rev.Lett. 91, 262001 (2003).
- [2] Atsushi Hosaka, Toru Iijima, Kenkichi Miyabayashi, Yoshihide Sakai, Shigehiro Yasui, PTEP 2016 (2016) no.6, 062C01.
- [3] R. Aaij et al. [LHCb Collaboration], Phys.Rev.Lett. 115, 072001 (2015).
- [4] J.H. Christenson, E. Hummel, G.A. Kreiter, J. Sculli, and P. Yamin, Phys.Rev.Lett. 55, 154 (1985).
- [5] S.H. Kim, A. Hosaka, H.C. Kim, Phys.Rev. D92 (2015) no.9, 094021
- [6] Sang-Ho Kim, Atsushi Hosaka, Hyun-Chul Kim, Hiroyuki Noumi, and Kotaro Shirotori, PTEP, 2014(10), 103D01 (2014).
- [7] Nagahiro et al, Phys.Rev. D95, 014023 (2017); J. Arifi, H. Nagahiro, A. Hosaka, arXiv:1704.00464, To be published in Phys Rev D (2017).

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計20件)

1. A.J. Arifi, H. Nagahiro, A. Hosaka, Three-Body Decay of  $\Lambda_c^*(2595)$  and  $\Lambda_c^*(2625)$  with Consideration of  $\Sigma_c(2455)\pi$  and  $\Sigma_c^*(2520)\pi$  in Intermediate States, arXiv:1704.00464 [hep-ph]. To be published in Phys. Rev. D
2. G. Fejos, A. Hosaka, Mesonic and nucleon fluctuation effects at finite baryon density, arXiv:1701.03717 [hep-ph], To be published in Phys. Rev. D
3. Atsushi Hosaka, Tetsuo Hyodo,

Kazutaka Sudoh, Yasuhiro Yamaguchi, Shigehiro Yasui, Heavy Hadrons in Nuclear Matter, arXiv:1606.08685 [hep-ph], To be published in Prog. Part. Nucl. Phys.

4. Hua-Xing Chen, Qiang Mao, Wei Chen, Atsushi Hosaka, Xiang Liu, Shi-Lin Zhu. Decay properties of P-wave charmed baryons from light-cone QCD sum rules arXiv:1703.07703 [hep-ph]. 10.1103/PhysRevD.95.094008. Phys.Rev. D95 (2017) no.9, 094008.

5. Hua-Xing Chen, Qiang Mao, Atsushi Hosaka, Xiang Liu, Shi-Lin Zhu, D-wave charmed and bottomed baryons from QCD sum rules arXiv:1611.02677 [hep-ph]. 10.1103/PhysRevD.94.114016. Phys.Rev. D94 (2016) no.11, 114016.

6. Shuntaro Sakai, Atsushi Hosaka, Hideko Nagahiro, Effect of the final state interaction of  $\eta'$ N on the  $\eta'$  photoproduction off the nucleon arXiv:1611.02156 [nucl-th]. 10.1103/PhysRevC.95.045206. Phys.Rev. C95 (2017) no.4, 045206.

7. Hideko Nagahiro, Shigehiro Yasui, Atsushi Hosaka, Makoto Oka, Hiroyuki Noumi, Structure of charmed baryons studied by pionic decays arXiv:1609.01085 [hep-ph]. 10.1103/PhysRevD.95.014023. Phys.Rev. D95 (2017) no.1, 014023.

8. Sang-Ho Kim, Hyun-Chul Kim, Atsushi Hosaka,  $K0\Lambda$  and  $D-\Lambda c^+$  production induced by pion beams off the nucleon arXiv:1608.06394 [hep-ph]. 10.1103/PhysRevD.94.094025. Phys.Rev. D94 (2016) no.9, 094025.

9. Atsushi Hosaka et al., Production and decay of charmed baryons 10.1016/j.nuclphysa.2016.05.009. Nucl.Phys. A954 (2016) 341-351.

10. V. Dmitrašinović, Hua-Xing Chen, Atsushi Hosaka, Baryon fields with  $UL(3)\times UR(3)$  chiral symmetry. V. Pion-nucleon and kaon-nucleon  $\Sigma$  terms 10.1103/PhysRevC.93.065208. Phys.Rev. C93 (2016) no.6, 065208.

11. Sang-Ho Kim, Hyun-Chul Kim, Atsushi Hosaka, Heavy pentaquark states  $Pc(4380)$  and  $Pc(4450)$  in the  $J/\psi$  production induced by pion beams off the nucleon

arXiv:1605.02919 [hep-ph].  
10.1016/j.physletb.2016.10.061.  
Phys.Lett. B763 (2016) 358-364.

12. Takashi Ezo, Atsushi Hosaka,  
Kaon-Nucleon systems and their  
interactions in the Skyrme model  
arXiv:1605.01203 [nucl-th].  
10.1103/PhysRevD.94.034022.  
Phys.Rev. D94 (2016) no.3, 034022.

13. G. Fejos, A. Hosaka, Thermal  
properties and evolution of the UA(1)  
factor for 2+1 flavors  
arXiv:1604.05982 [hep-ph].  
10.1103/PhysRevD.94.036005.  
Phys.Rev. D94 (2016) no.3, 036005.

14. Atsushi Hosaka, Toru Iijima, Kenkichi  
Miyabayashi, Yoshihide Sakai, Shigehiro  
Yasui, Exotic hadrons with heavy flavors: X,  
Y, Z, and related states  
arXiv:1603.09229 [hep-ph].  
10.1093/ptep/ptw045.  
PTEP 2016 (2016) no.6, 062C01.

15. Qiang Mao, Hua-Xing Chen, Wei Chen,  
Atsushi Hosaka, Xiang Liu, Shi-Lin Zhu,  
QCD sum rule calculation for P-wave  
bottom baryons  
arXiv:1510.05267 [hep-ph].  
10.1103/PhysRevD.92.114007.  
Phys.Rev. D92 (2015) no.11, 114007.

16. Tetsuya Yoshida, Emiko Hiyama,  
Atsushi Hosaka, Makoto Oka, Katsunori  
Sadato, Spectrum of heavy baryons in the  
quark model  
arXiv:1510.01067 [hep-ph].  
10.1103/PhysRevD.92.114029.  
Phys.Rev. D92 (2015) no.11, 114029.

17. Sang-Ho Kim, Atsushi Hosaka,  
Hyun-Chul Kim, Hiroyuki Noumi,  
Production of strange and charmed  
baryons in pion induced reactions  
arXiv:1509.03567 [hep-ph].  
10.1103/PhysRevD.92.094021.  
Phys.Rev. D92 (2015) no.9, 094021.

18. Hua-Xing Chen, Wei Chen, Qiang Mao,  
Atsushi Hosaka, Xiang Liu, Shi-Lin Zhu,  
P-wave charmed baryons from QCD sum  
rules  
arXiv:1502.01103 [hep-ph].  
10.1103/PhysRevD.91.054034.  
Phys.Rev. D91 (2015) no.5, 054034.

19. Hideko Nagahiro, Atsushi Hosaka,  
Elementarity of composite systems

arXiv:1406.3684 [hep-ph].  
10.1103/PhysRevC.90.065201.  
Phys.Rev. C90 (2014) no.6, 065201.

20. Sang-Ho Kim, Atsushi Hosaka,  
Hyun-Chul Kim, Hiroyuki Noumi, Kotaro  
Shirotori, Pion induced Reactions for  
Charmed Baryons  
arXiv:1405.3445 [hep-ph].  
10.1093/ptep/ptu131.  
PTEP 2014 (2014) no.10, 103D01.

〔学会発表〕(計 20 件)  
以下は全て国際学会で招待講演を受けた発表。

1. Atsushi Hosaka  
Structure of charmed baryons and their  
productions  
Asian Pacific Few Body Physics, 2014 年 04  
月 07 日~2014 年 04 月 11 日, Adelaide,  
Australia

2. Atsushi Hosaka  
Productions and decays of charmed  
baryons  
The 8th APCTP- BLTP JINR Workshop,  
2014 年 06 月 29 日~2014 年 07 月 04 日, Jeju,  
Korea

3. Atsushi Hosaka  
Productions of charmed baryons  
Mini workshop at JPARCII, 2014, 2014 年  
08 月 07 日~2014 年 08 月 09 日, Tokai,  
Japan

4. Atsushi Hosaka  
Charmed baryons  
Physics at J- PARC/ HaPhy, 2014 年 10 月  
30 日~2014 年 10 月 31 日, Pohang, Korea

5. Atsushi Hosaka  
Charmed baryons and their productions at  
J- PARC  
Workshop " Charm Hadron and Nuclear  
Physics", 2014 年 11 月 10 日~2014 年 11 月  
11 日, TITech, Tokyo, Japan

6. Atsushi Hosaka  
Productions and decays of charmed  
baryons  
Progress on J- PARC hadron physics in  
2014, 2014 年 11 月 30 日~2014 年 12 月 01  
日, Tokai, Japan

7. Atsushi Hosaka  
Charmed baryons  
Bound states in QCD, 2015 年 03 月 24 日  
~2015 年 03 月 27 日, St. Goar, Germany

8. Atsushi Hosaka  
Charmed baryons and their interactions  
QCD Exotics, 2015年06月08日~2015年  
06月12日、山東大学、済南、中国

9. Atsushi Hosaka  
Heavy Baryons: Structure, Productions  
and Decays  
The 9th APCTP- BLTP JINR Joint  
Workshop in Kazakhstan, 2015年06月29  
日~2015年07月03日, Almaty, Kazakhstan

10. Atsushi Hosaka  
Charmed baryons and their interactions  
Hadron Nuclear Physics 2015, 2015年07  
月07日~2015年07月11日, Krabi,  
Thailand

11. Atsushi Hosaka  
Charmed baryons and their interactions  
Workshop Heavy flavor and CP violation,  
2015年07月22日~2015年07月25日,  
Lanzhou University, Lanzhou, China

12. Atsushi Hosaka  
Quark Dynamics of Charmed Baryons  
CKOR- JPARC WORKSHOP, 2015年08月  
24日~2015年08月26日, Haeunde hotel,  
Pusan, Korea

13. Atsushi Hosaka  
CharmedBaryons andTheirInteractions  
HYP2015, 2015年09月07日~2015年09  
月11日, 東北大学、仙台、日本

14. Atsushi Hosaka  
CharmedBaryons andTheirInteractions  
NUFRA2015, 2015年10月05日~2015年  
10月10日, Kemer, Turkey

15. Atsushi Hosaka  
Quark model for hadrons (baryons)  
7th J-PARC Theory Workshop 2016, 2016  
年02月24日~2016年02月27日,  
Yongpyong, Korea

16. Atsushi Hosaka  
Productions and decays of charmed  
baryons  
Workshop on J- PARC hadron physics,  
2016年03月02日~2016年03月04日, KEK  
東海キャンパス、東海、茨城

17. Atsushi Hosaka  
Production and decay of charmed baryons  
Baryons 2016, 2016年05月16日~2016年  
05月20日, Tallahassee, Florida, USA

18. Atsushi Hosaka  
Production and decay of charmed baryons

J-PARC workshop at Inha, 2016年06月07  
日~2016年06月10日, Incheon, korea

19. Atsushi Hosaka  
Heavy baryon spectroscopy studied by  
productions and decays  
HINT2016, 2016年12月05日~2016年12  
月08日, J-PARC, Ibaraki, Japan

20. Atsushi Hosaka  
Charmed baryons — productions and  
decays —  
KEK theory center workshop on Hadron  
and Nuclear Physics in 2017, 2017年01  
月07日~2017年01月10日, KEK, Tsukuba,  
Japan

〔図書〕(計1件)

保坂 淳  
パリティー, Vol30, No.06「エキゾチック粒子  
の発見とハドロン物理」, 丸善出版、2015年

〔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 特になし

## 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 なし

### (3)連携研究者

岡 真(OKA, Makoto)  
東京工業大学・理工学研究科・教授  
研究者番号: 60144606

野海 博之(NOUMI, Hiroyuki)

大阪大学・核物理研究センター・教授  
研究者番号: 10222192

### (4)研究協力者 なし