

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800170

研究課題名(和文) 格子QCD計算から導かれる相互作用によるエキゾチック・ハドロンの構造の研究

研究課題名(英文) Hadronic interactions and exotic hadrons from lattice QCD

研究代表者

池田 陽一 (Ikeda, Yoichi)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・特別研究員

研究者番号：90548893

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究において、強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)に基づき直接エキゾチック・ハドロンの構造を探ることを行った。特に近年注目を集めているチャームクォークを含むエキゾチックハドロンの候補について、ハドロン間相互作用を強い相互作用の第一原理計算である格子QCDを用いて導出し、その構造について探った。

本研究では、 $T_{cc}$ 、 $T_{cs}$ と呼ばれるテトラクォークの候補について、また、近年実験で報告された $Z_c(3900)$ について、格子QCDによるハドロン間相互作用を用いた理論解析をとおしてその構造を明らかにした。この構造が実験で得られるスペクトルに与える影響についても議論した。

研究成果の概要(英文)：We study the structures of exotic hadrons on the basis of Quantum Chromodynamics(QCD), which is the fundamental theory of strong interaction in physics. The method to extract the hadronic interactions using lattice QCD is extended to coupled-channel problems and applied to the possible charmed exotic hadrons, and the structures of the exotic hadrons are investigated. In this study, we investigate the hadronic interactions using lattice QCD to search for the candidates of exotic hadrons such as  $T_{cc}$ ,  $T_{cs}$ ,  $Z_c(3900)$  and discuss their structures. Furthermore, we study how those structures affect the experimentally obtained spectra.

研究分野：素粒子・原子核理論

キーワード：格子QCD ハドロン間相互作用 チャームクォーク エキゾチックハドロン

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子であるクォークとグルーオンの力学は強い相互作用の基礎理論である量子色力学 (QCD) により理解される。クォークやグルーオンはそれ単体では観測されず、常にクォークとグルーオンの複合系であるハドロンや原子核として出現する。QCD はゲージ場の非可換性および量子性により、多岐にわたる非自明なハドロンおよび原子核の構造が現れることが期待されている。このようなエキゾチックな構造は実験的に、ストレンジ・クォークやチャーム・クォークを含むハドロンのスペクトルに観測されつつあり、国内外で活発な議論がなされている。しかしながら、理論ではこれまで基礎理論である QCD からではなく、なんらかの有効模型を用いてこれらエキゾチックな構造について解析されてきた。このため、理論解析には有効模型のパラメータの依存性が強く現れるため、確定的な結論を導くことができなかった。有効模型に依らずに、QCD の第一原理計算により直接エキゾチックな構造をもつ粒子の解析を行うことは、当該分野における最重要課題であった。

近年、QCD の第一原理計算である格子 QCD により直接に、核力 (核子間のポテンシャル・相互作用) を導き出した研究が発表され、世界中の注目を集めた [1-1]。この論文では、格子 QCD 計算により Nambu-Bethe-Salpeter (NBS) 波動関数  $\psi_E(\mathbf{r})$  を計算し、Schrödinger 方程式を通じて

$$(H_0 + V)\psi = E\psi \Rightarrow V = E - (H_0\psi)/\psi$$

のようにポテンシャルを導出する方法が提案された。この研究により、核子間の相互作用が強い相互作用の基礎理論である QCD から模型を介さずに導出できつつことが示され、これまで未知であった、核子間の近距離斥力がその構成要素であるクォークの部分的なパウリ排他律にしたがう事が明らかとなった。特に、エキゾチックハドロンが存在するか否かという疑問に答えるためには、近距離部分と遠距離部分の相互作用を統一的に決めることが重要であると考えられるため、格子 QCD から直接ハドロン間の相互作用を導きだし、それを用いたエキゾチックハドロンの候補についての理論解析が期待されていた。

### 文献

[1-1] N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, Phys. Rev. Lett. 99, 022001 (2007).

## 2. 研究の目的

強い相互作用の基礎理論である QCD は、ゲージ場の非可換性およびその量子性により、多岐にわたる非自明なハドロンおよび原子核の現象を導く。

近年、これまで観測されてきたクォーク 2 個 (中間子)、3 個 (バリオン) を超えて、4 個または 5 個以上からなる新たなハドロン構造、また、通常の原子核とは一線を画す高密度原子核などの探索が活発に行われている。エキゾチック・ハドロンの面白さは、クォーク閉じ込め現象と関連している。これまで発見されている“通常の”ハドロンはクォーク 2 個や 3 個で出来たハドロンとその複合系で理解することができる。一方クォーク 4 個以上から構成されるハドロンが存在すれば、これまでその性質が未知であるカラー電荷を帯びたクォーク間の相互作用の情報が反映されると期待されている。これは、QCD の未解決問題であるカラー閉じ込め現象の解明へ向けた一歩となる。こうしたエキゾチック・ハドロンの少数系力学の全貌を第一原理である QCD に基づき調べ、その構造を明らかにすることは、ハドロン物理学の最重要課題である。特に、ストレンジ・クォークやチャーム・クォークを含むエキゾチック・ハドロンについての多岐にわたるクォーク・フレーバーでのハドロン構造の解析が理論的な急務の課題となっている。

格子 QCD 計算により核力ポテンシャルを導出した方法 [1-1] は、一般のハドロン間の相互作用への拡張が容易である。そこで、格子 QCD 計算によりハドロン間のポテンシャルを求める方法を拡張 (HAL QCD 法) し、エキゾチックハドロンの候補が存在するか否かを第一原理的に調べることにした。ここでは、また、今後のハドロン物理にとって重要になると考えられる、(1) HAL QCD 法により求められたハドロン間ポテンシャルを用いて、(2) エキゾチックハドロンの構造を解析し、(3) その構造がどのように実験データに反映されるかを明らかにするという観点から理論研究をするめることにした。

具体的には、クォーク 4 個から構成されるエキゾチックハドロンであると有効模型 [2-1] により期待されている  $T_{cc}(cc\bar{u}\bar{d})$  や  $T_{cs}(cs\bar{u}\bar{d})$ 、および、BESIII [2-2]、Belle [2-3] などの実験で観測された  $Z_c(3900)(c\bar{c}u\bar{d})$  に関して、HAL QCD 法により QCD に基づくハドロン間相互作用の導出と、それを用いて構造解析を行った。また、エキゾチックハドロンの構造がどのように実験データに反映されるかを明らかにするために、反応計算についても、現在 J-PARC において実験が行われている  $K^-d \rightarrow \pi\Sigma n$  について有効模型のハドロン相互作用を用いて、計算コードの開発を行った。この計算コードを応用し、 $Z_c(3900)$  は実験でピークとして観測されているため、実験データと比べるということも行った。

### 文献

[2-1] H. J. Lipkin, Phys. Lett. B 172, 242 (1986).

[2-2] M. Ablikim *et al.*, Phys. Rev. Lett. 110, 252001 (2013).

[2-3] Z. Q. Liu *et al.*, Phys. Rev. Lett. 110,

### 3. 研究の方法

本研究において、HAL QCD 法 (NBS 波動関数からハドロン間ポテンシャルを導出する方法) を、チャーム・クォークを含むようなハドロンへ適応することを考えている。特に、 $Z_c(3900)$  は、 $\pi J/\psi - \rho \eta_c - \bar{D}D^*$  のチャンネル結合系であるため、HAL QCD 法をチャンネル結合系へと拡張することも行った。この方法は、散乱の S 行列のユニタリー性に基いており、ここで得られるチャンネル結合ポテンシャルは観測量を再現するように決められる。具体的な HAL QCD 法によるチャンネル結合ポテンシャルの導出過程を以下に示す:

- (1) 求めたい状態 (テトラクォークなど) と結合する漸近的なハドロンの散乱状態を同定し、そのハドロン演算子  $\phi_i^\alpha(\mathbf{r})$  ( $i$  = 粒子の番号,  $\alpha$  = ハドロン散乱のチャンネル) を定義する。 $\phi_i^\alpha(\mathbf{r})$  は Heisenberg 表示におけるクォークの演算子 ( $q(\mathbf{r})$ ) により記述されるハドロンの消滅演算子である。
- (2) チャンネル  $\alpha$  における NBS 波動関数の格子 QCD による測定

$$\sqrt{Z_1^\alpha Z_2^\alpha} \psi^\alpha(\mathbf{r}; E) = \sum_{\mathbf{x}} \langle 0 | \phi_1^\alpha(\mathbf{x} + \mathbf{r}) \phi_2^\alpha(\mathbf{x}) | E \rangle .$$

ここで、 $\sqrt{Z_i^\alpha}$  は波動関数の繰り込み定数である。NBS 波動関数の漸近的性質は [3-1] で詳しく調べられており、QCD により導かれる正しい S 行列要素を与えることが証明されている。チャンネル結合系では、波動関数の繰り込み  $\sqrt{Z_i^\alpha}$  も計算し、各チャンネルごとの NBS 波動関数が正しく規格化されるようにする。

- (3) チャンネル結合ポテンシャル  $V^{\alpha,\beta}$  の NBS 波動関数を用いた場の理論での定義

$$\left( \nabla^2 + (k^\alpha)^2 \right) \psi^\alpha(\mathbf{r}; E) = 2\mu^\alpha \sum_{\beta} V^{\alpha,\beta}(\mathbf{r}) \psi^\beta(\mathbf{r}; E) .$$

ここでは、最も一般的な非局所ポテンシャル  $U^{\alpha,\beta}$  を微分展開して得られる最低次の項である局所ポテンシャル  $V^{\alpha,\beta}$  を用いている。この式は Schrödinger 方程式そのものであるように見えるが、ここでの運動量  $k^\alpha$  は相対論的な分散関係を満たすことに注意したい。

- (4) 物理量の計算

得られたポテンシャル  $V^{\alpha,\beta}$  を用いて、Schrödinger 方程式やそれと等価な Lippmann-Schwinger 方程式を解いて得られる S 行列要素は、完全に相対論的であり QCD に基づいた物理量と関連づけられる。

本研究では、 $T_{cc}$  や  $T_{cs}$  の束縛状態が存在するかど

うかを調べるために散乱位相差を計算し、 $Z_c(3900)$  のスペクトルが如何見えるかを不変質量分布の計算を通して議論し、その構造を明らかにするため複素エネルギー平面上の極の位置を計算した。

### 文献

[3-1] S. Aoki, T. Hatsuda and N. Ishii, Prog. Theor. Phys. 123, 89 (2010).

### 4. 研究成果

本研究の主な成果は、QCD から直接ハドロン間相互作用を計算し、少数系厳密計算に繋げることを目指し、テトラクォークの候補である ( $T_{cc}$ ,  $T_{cs}$ ,  $Z_c(3900)$ ) に関する構造の研究を完成させたことである。テトラクォーク存在の可能性を議論するという物理的議論以外にも、本研究では、チャンネル結合ポテンシャルを HAL QCD 法により計算し、それを用いてテトラクォークの構造を持つかどうかを理論解析により明らかにし、さらには実験データと比べるという、これまでにない全く新しい理論研究の道筋を示した。こうした道筋を確立させたことも、非常に重要な研究成果である。この研究には JLDG[4-1] により公開されている PACS-CS Coll.[4-2] が生成した、パイオン質量  $m_\pi$  が 410-700MeV のフル QCD ゲージ配位を用いた。

- (1)  $T_{cc}(= cc\bar{u}\bar{d})$ ,  $T_{cs}(= cs\bar{u}\bar{d})$  の構造

中間子-中間子系 ( $DD, DD^*, \bar{K}D, \bar{K}D^*$ ) の散乱を格子 QCD により行い、 $T_{cc}$ ,  $T_{cs}$  に関するハドロン間相互作用を HAL QCD 法により調べた。ここで得られる結果は、これまで未知であったハドロン間の近距離部分の相互作用の情報も含めて、ハドロン間相互作用の全貌が直接 QCD から導かれることになる。特に、テトラクォークが存在するかどうかは、近距離のカラー・スピン力の引力の存在が重要であることが有効模型により指摘されている。

図 1 に示すように、カラー・スピン力を用いた有効模型で予言されるようなアイソスピン  $I=0$  チャンネルの引力と  $I=1$  チャンネルの斥力が現れることが、本研究により第一原理計算から明らかになった。また、HAL QCD 法により得られた相互作用を用いて、位相差および散乱長を計算した。この解析から、 $m_\pi \simeq 400-700\text{MeV}$  に於いてはテトラクォークが束縛状態として現れないことが理解された。一方で、クォーク質量を小さくするにつれ、引力が大きくなる傾向も見られ、物理的なパイオン質量での格子 QCD 計算により、 $T_{cc}$  や  $T_{cs}$  といったエキゾチック・ハドロンが現れる可能性があることも指摘した。

- (2)  $Z_c(3900)$  の構造・生成反応の計算

$Z_c(3900)$  は BESIII および Belle 実験において、 $Y(4260) \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$  崩壊の  $\pi^\pm J/\psi$  不変質量分布に 3.9 GeV 付近のピークとして観測された。このピークが物理的状态に対応するものであれば、

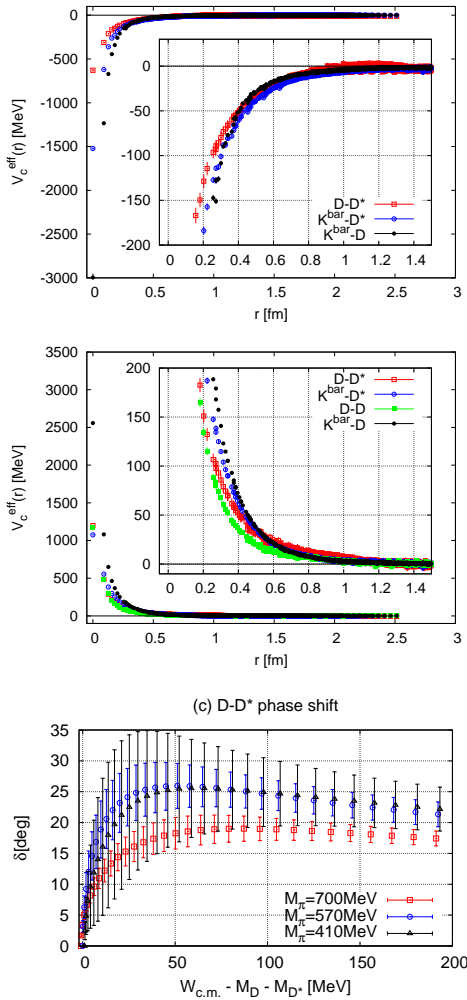


Figure 1:  $m_\pi \simeq 410$  MeV における中間子間ポテンシャルと  $DD^*$  散乱位相差. (上)  $I = 0$  チャンネル, (中)  $I = 1$  チャンネル, (下)  $DD^*$  散乱位相差.

$Z_c(3900)$  は  $\bar{c}c\bar{u}d$  を最小構成クォークにもつテトラクォーク状態の強い候補である。ピーク位置の 3.9 GeV は  $\bar{D}D^*$  閾値エネルギー (3.87 GeV) の少し上であり、構造の解明には  $\pi J/\psi\text{-}\bar{D}D^*$  チャンネル結合系をあらわに扱う動力学理論が必要であると予想される。しかしながら、これまで  $\pi J/\psi\text{-}\bar{D}D^*$  チャンネル結合相互作用は全くの未知であり、現象論からは物理的背景にせまることができない。このような状況を打破するために、申請者は HAL QCD の方法を  $\pi J/\psi\text{-}\bar{D}D^*$  チャンネル結合系へ拡張し、その相互作用の全貌を調べた。その結果、図 2 に示すように、ポテンシャルの対角成分は非常に弱く、 $Z_c(3900)$  は  $\pi J/\psi$  や  $\bar{D}D^*$  の分子共鳴状態ではないということである。一方で非対角成分は、強い  $\pi J/\psi\text{-}\bar{D}D^*$  結合を示しており、 $Z_c(3900)$  の構造理解に決定的な役割を果たすのは、強い  $\pi J/\psi\text{-}\bar{D}D^*$  結合であることを、本研究は初めて明らかにした。

$Z_c(3900)$  の構造を議論するには、得られたチャン

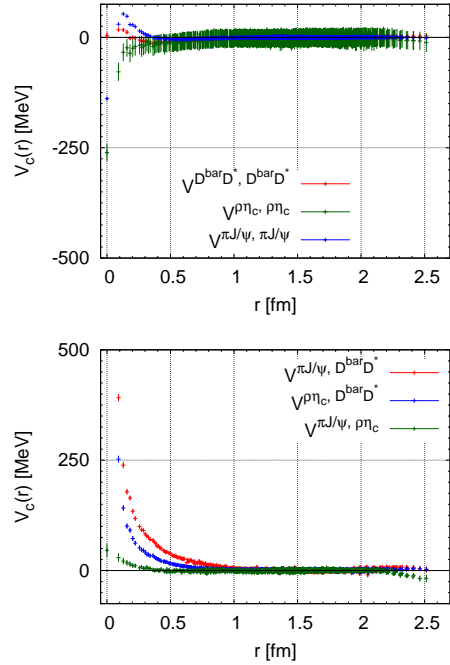


Figure 2:  $m_\pi \simeq 410$  MeV における  $\pi J/\psi\text{-}\rho\eta_c\text{-}\bar{D}D^*$  チャンネル結合中間子間ポテンシャル. (上) 対角成分, (下) 非対角成分.

ネル結合ポテンシャルを用いて  $\pi J/\psi$  および  $\bar{D}D^*$  の散乱振幅の解析を行えば良い。ここでは、 $Z_c(3900)$  の構造を議論するのに最も良い設定である  $\pi J/\psi \rightarrow \pi J/\psi$  などの 2 体散乱の計算を行った。 $\pi J/\psi$  および  $\bar{D}D^*$  の散乱振幅から得られる不変質量分布を図 3(上) に示す。 $\pi J/\psi$  不変質量分布に  $\bar{D}D^*$  閾値より少し高いエネルギーにピークが現れ、 $\bar{D}D^*$  不変質量分布には S 波散乱特有の閾値効果である cusp が現れている。この cusp の起源を探るため、散乱振幅の極の位置を複素エネルギー平面 (非物理的リーマン面) で探した (図 3 (下))。発見された極は、 $\bar{D}D^*$  閾値から低エネルギー側に非常に遠く離れた位置にある仮想状態 (virtual pole) に対応し、 $Z_c(3900)$  は物理的共鳴状態でなく、強い  $\pi J/\psi\text{-}\bar{D}D^*$  結合に誘発された  $\bar{D}D^*$  閾値にあらわれる cusp であると結論される。

上記された結果は QCD からの直接の予言であり、 $Z_c(3900)$  の構造を明らかにした。一方で実験で観測されたピークが何に対応するものであるかを議論することも理論的に重要な課題である。本研究期間に開発してきた三体系の反応計算コードを用いて、 $Y(4260) \rightarrow \pi\pi J/\psi$  反応における  $\pi J/\psi$  不変質量分布の計算を行い実験データと比べた。その結果が図 4 に示している。ここで、破線はポテンシャルの非対角成分が存在しないときの  $\pi J/\psi$  不変質量分布を示している。この解析により、実験で得られたピーク構造は、ポテンシャルの強い非対角成分として現れる  $\pi J/\psi\text{-}\bar{D}D^*$  結合により現れた cusp に

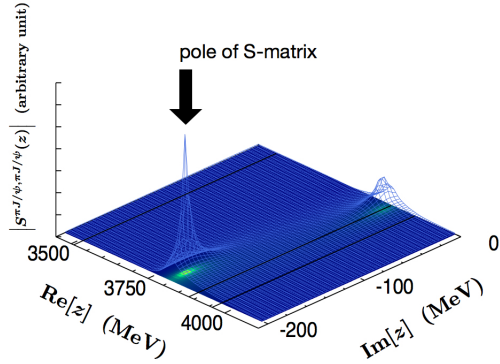
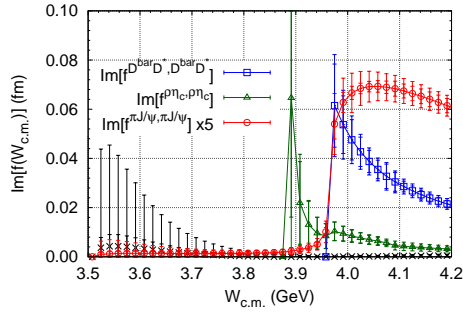


Figure 3: HAL QCD 法により求められたチャンネル結合中間子間ポテンシャルを用いて計算された物理量. (上)  $\pi J/\psi$ ,  $p\eta_c$ ,  $\bar{D}D^*$  の不変質量分布, (下) S 行列の複素エネルギー平面上での極の位置.

より理解されることが第一原理計算により明らかになった。

## 文献

- [4-1] International / Japan Lattice Data Grid (ILDG/JLDG), see, *i.e.* <http://www.jldg.org/>.  
 [4-2] PACS-CS Collaboration: S. Aoki, et al., Phys. Rev. D79 (2009) 034503.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 6 件)

- [1] S. Ohnishi, Y. Ikeda, T. Hyodo and W. Weise, “Structure of the  $\Lambda(1405)$  and the  $K^-d \rightarrow \pi\Sigma n$  reaction,” 査読あり, Phys. Rev. C **93**, no. 2, 025207, pp. 1-12 (2016). doi:10.1103/PhysRevC.93.025207  
 [2] K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii and K. Murano (HAL QCD Collaboration), “Coupled channel approach to strangeness  $S = -2$  baryon-bayron interactions in Lattice QCD,” 査読あり, PTEP **2015**, no. 11, 113B01, pp. 1-18 (2015). doi:10.1093/ptep/ptv144

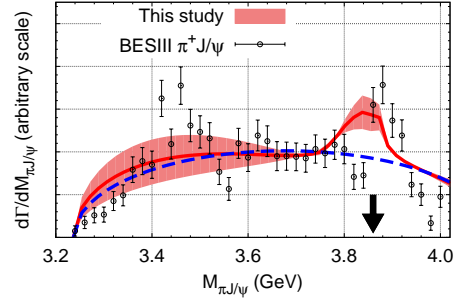


Figure 4: HAL QCD 法により求められたチャンネル結合中間子間ポテンシャルを用いて計算された物理量.  $Y(4260) \rightarrow \pi\pi J/\psi$  反応における  $\pi J/\psi$  不変質量分布.

- [3] Y. Ikeda, B. Charron, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura and K. Sasaki (HAL QCD Collaboration), “Charmed Tetraquarks Tcc and Tcs from Dynamical Lattice QCD Simulations,” 査読あり, Phys. Lett. B **729**, pp. 85 – 90 (2014). doi:10.1016/j.physletb.2014.01.002  
 [4] Y. Ikeda [HAL QCD Collaboration], “Search for possible bound Tcc and Tcs on the lattice,” 査読あり, PoS LATTICE2013, 261, pp. 1-7 (2013).

〔学会発表〕 (計 2 5 件)

- [1] Y. Ikeda, “Status of Lattice QCD Simulations for Normal and Exotic Hadrons,” 12th International Conference on Low Energy Antiproton Physics(LEAP2016), March 6–11, 2016, Kanazawa-Kagekiza, Kanazawa, Japan. (招待講演)  
 [2] Y. Ikeda, “Search for Tetraquarks from lattice QCD simulation,” International Workshop on “Critical Stability in Few-Body Systems,” Feb. 1–5, 2016, RIKEN, Wako, Saitama, Japan. (招待講演)  
 [3] Y. Ikeda, “Lattice QCD study of  $Z_c(3900)$ ,” The 31st Reimei WorkShop on Hadron Physics in Extreme Conditions at J-PARC, Jan. 18–20, 2016, JAEA, Tokai, Ibaraki, Japan. (招待講演)  
 [4] Y. Ikeda, “Structure of  $Z_c(3900)$  from lattice QCD,” Frontiers in hadron and nuclear physics with strangeness and charm, Oct. 19 – 23, 2015, ECT\*, Trento, Italy. (招待講演)

- [5] Y. Ikeda, “On the structure of  $Z_c(3900)$  from lattice QCD,” The 10th International Workshop on the Physics of Excited Nucleons (NSTAR2015), May. 25 - 28, 2015, Suita Campus, Osaka Univ., Osaka, Japan. (招待講演)
- [6] Y. Ikeda, “Structure of Charmed Tetraquarks from LQCD,” Long-term workshop on “Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2015 (HHIQCD2015),” Mar. 2 - 6, 2015, Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto Univ., Kyoto, Japan. (招待講演)
- [7] Y. Ikeda, “Structure of Charmed Tetraquarks from LQCD,” Workshop on “Multi-Hadron and Nonlocal Matrix Elements in Lattice QCD,” Feb. 5 - 6, 2015, Brookhaven National Laboratory, New York, USA. (招待講演)
- [8] Y. Ikeda, “Inter-quark potentials derived from Nambu-Bethe-Sapleter amplitudes on the lattice,” Workshop “Charm Hadron and Nuclear Physics” Nov. 10 - 12, 2014, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan. (招待講演)
- [9] Y. Ikeda, “Exploring structure of Lambda(1405),” Physics at J-PARC, Charm, Neutrino, Strangeness, and Spin, Oct. 30 - 31, 2014, Pohang, Korea. (招待講演)
- [10] Y. Ikeda, “Hadronic interactions and exotic hadrons from lattice QCD,” Advances and perspectives in computational nuclear physics, Oct. 5 - 7, 2014, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA. (招待講演)
- [11] Y. Ikeda, “Lattice QCD survey of spectroscopy and hadron interactions,” International Conference on Exotic Atoms and Related Topics - EXA2014, Sep. 15 - 19, 2014, Vienna, Austria. (招待講演)
- [12] Y. Ikeda, “Hadron interactions and exotic hadrons on the lattice,” XIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum, Sep. 8 -12, 2014, Saint-Petersburg, Russia. (招待講演)
- [13] Y. Ikeda, “Charmed Tetraquarks and Meson-Meson Interactions from LQCD,” Second workshop on “Structure and production of charmed baryons” Aug. 7 - 9, 2014, KEK Tokai, Ibaraki, Japan. (招待講演)
- [14] Y. Ikeda, “Search for exotic hadrons on the lattice,” 6th Asia-Pacific Conference on Few-body Problems in Physics (APFB2014), Apr. 7 - 11, 2014, Hahndorf, Australia. (招待講演)
- [15] Y. Ikeda, “Interaction between nucleon and negative-parity Lambda from flavour SU(3) LQCD simulation,” “Strangeness in the Universe?” – Theoretical and experimental progress and challenges – Oct. 21 - 25, 2013, ECT\*, Trento, Italy. (招待講演)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

池田 陽一 (IKEDA Yoichi)

国立研究開発法人理化学研究所・

仁科加速器研究センター・特別研究員

研究者番号：90548893