

令和 4 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K14287

研究課題名（和文）格子QCDハドロン間相互作用によるエキゾチック・ハドロンの構造と生成の研究

研究課題名（英文）Study of exotic hadrons using lattice QCD

研究代表者

池田 陽一 (Ikeda, Yoichi)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：90548893

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：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・ハドロンの構造を解明する研究を行った。チャームクォークを含むエキゾチックハドロンの候補である $Z_c(3900)$ 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り、実験データとの整合性を確かめた。また、エキゾチックハドロンの候補は散乱状態の閾値付近にピークとして観測されることから、これまでにハドロン構造が明らかになっている、二核子系およびパイ中間子核子系において、散乱理論に忠実な教師データを作成し、深層学習を用いて共鳴状態を実験データから分類することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2000年代に入り、陽子や中性子に代表される通常のハドロンとは一線を画す構造を持つと期待されるエキゾチックハドロンの候補が次々と報告された。量子色力学が作り出すハドロン現象の抱負さに第一原理計算を用いて、その構造と実験データとの整合性を確かめることができた。また、機械学習を用いることで、富岳などで行われている第一原理計算をより加速することが可能になる結果も得た。それにより、ハドロン物理を基盤にした核物理や初期宇宙の理解などの進展が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We study the structures of exotic hadrons using the first-principles calculation 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 and production reactions of the exotic hadrons are investigated. In this study, we investigate the hadronic interactions on the lattice to search for the candidates of exotic hadrons such as  $Z_c(3900)$  and discuss the structures. Furthermore, we study how those structures affect the experimentally obtained spectra. We also employ the deep learning to classify the quantum states of hadrons.

研究分野：原子核理論

キーワード：格子QCD エキゾチックハドロン ハドロン間相互作用 機械学習 深層学習

## 1. 研究開始当初の背景

本研究はハドロン共鳴の構造、特にストレンジクォーク、チャームクォークなどの重いクォークを含むハドロンの諸性質を、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD を用いて研究するものである。これらの粒子は初期宇宙においてクォーク物質からハドロン物質へと創発が起こる過程において存在し、その過程で重要な役割を果たすと考えられている。また強い相互作用が内包する非自明な真空構造の理解にもつながる。2003 年に KEK の Belle 実験で報告された X(3872) 粒子を皮切りに、その後世界各国の大型加速器からエキゾチックハドロンの候補の報告が相次いだ。これらは通常のクォーク 2 個・3 個からなる中性子やバリオンとは異なり、不安定な共鳴状態であり、その性質はクォーク模型などの有効理論や格子 QCD によって説明することが困難であった。本研究では、格子 QCD からハドロン間相互作用を導出する HAL QCD 法と散乱理論を融合させ、共鳴状態を取り扱うことができる枠組みで、エキゾチックハドロンの構造および、その生成反応について議論した。

## 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。2003 年の KEK Belle 実験におけるエキゾチックハドロン X(3872) の報告以降、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、および、その生成メカニズムの解明は理論的な急務の課題である。エキゾチックハドロンは、クォーク閉じ込め現象と関連しており、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が、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が重要であり、これらの議論を進める。また、これらのエキゾチックハドロンの候補は、実験的には、散乱状態の閾値近傍に不変質量分布のピークとして観測される。実験で得られたピークが全てエキゾチックハドロンの粒子状態に対応する訳ではないため、閾値近傍の散乱振幅に基づく量子状態の分類を機械学習を用いて行い、格子 QCD 計算へとつなぐことで効率的に粒子構造の解明につながる。そのため、本研究では量子状態を分類することが可能な機械学習コードの開発も進めた。

## 3. 研究の方法

### (1) HAL QCD 法を用いたハドロン間相互作用の導出と構造決定

ハドロン散乱の位相差に忠実なポテンシャルを計算する方法である HAL QCD 法(Nambu-Bethe-Salpeter 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した。特に、 $Z_c(3900)$  について、 $J/\psi - c - DD^*$  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し、それぞれのチャンネルの NBS 波動関数を格子 QCD 計算により測定した。

得られたチャンネル結合 2 体散乱の散乱振幅を複素エネルギー平面へ解析接続し、その極の位置から量子状態の判別を行った。結果、 $Z_c(3900)$  は粒子の共鳴状態ではなく、散乱閾値が開くことによる S 波散乱振幅の特異性である threshold cusp であることが分かった。

実験において、 $Z_c(3900)$  は  $Y(4260)$  の 3 体崩壊における  $J/\psi$  の不変質量分布のピークとして観測されているため、これとの直接比較には、質量の軽い中間子を扱うことが可能となる相対論的運動学にマッチしたチャンネル結合ポテンシャルを導出する必要がある。この NBS 波動関数から、予言される散乱振幅はそのままに、相対論的運動学を満たすポテンシャルの導出方法を構築した。

ここで開発した方法を用いて、格子 QCD データから計算された  $Y(4260)$  の 3 体崩壊による不変質量分布と、実験で得られたものを直接比較した。

### (2) 閾値近傍の量子状態を分類するための深層学習法の開発

チャームクォークを含むようなエキゾチックハドロンの候補は、散乱閾値付近に観測されることがほとんどである。また、格子 QCD 計算の経験から、散乱閾値付近には粒子状態と言える共鳴状態でなくとも、S 波の散乱振幅の特異性からピークを再現できることが分かった。より効率的に格子 QCD 計算を進めることができるように、深層学習を用いて散乱振幅の閾値付近における

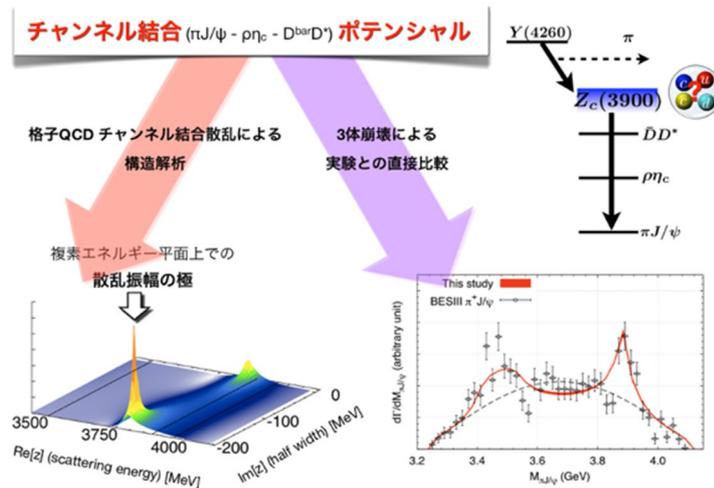
極の分類を行うプログラムを開発した。

2 核子単チャンネル散乱の閾値付近極の分類、および、2 体 N チャンネル結合散乱の量子状態の分類を、深層学習(人工ニューラルネット)を用いて調べた。特に、チャンネル結合散乱には、カリキュラム・ラーニングが有効であることが分かり、この方法を用いたコード開発を行い、実験データへ適用した。

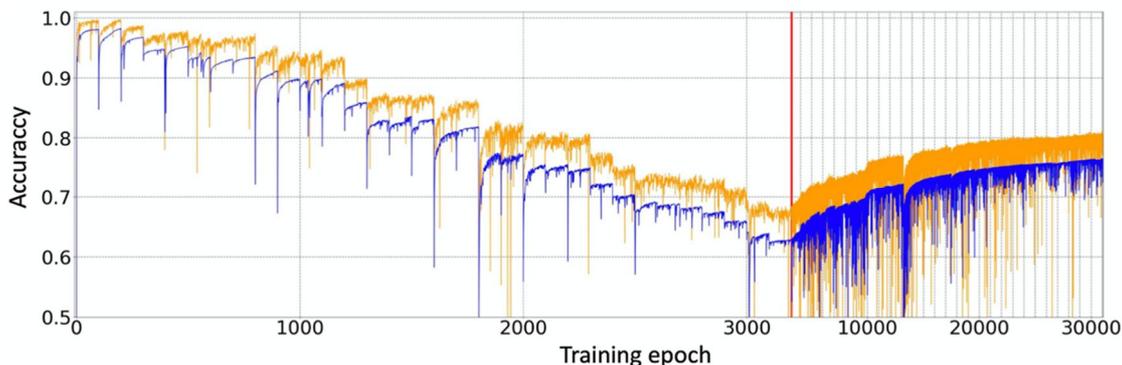
#### 4. 研究成果

これまでに、格子QCDのHAL QCD法による、 $Z_c(3900)$ に関する  $J/\psi - \rho c - DD^*$ のチャンネル結合ポテンシャルが  $m = 410-700$  MeV の質量領域で得られていた。また、このチャンネル結合ポテンシャルにより計算された散乱振幅の解析を通して、 $Z_c(3900)$ は粒子状態に対応するような共鳴状態ではなく、散乱閾値におけるS波散乱振幅の特異性に基づく threshold cusp であることが理解されていた。粒子状態でないにも関わらず、実験で報告されたようなピークが現れるのかという問い答えるため、実験との比較を行った。

$Z_c(3900)$ は $Y(4260)$ の3体崩壊における  $J/\psi$  の不変質量分布のピークとして観測されているため、3体計算に、中間子を扱うことが可能となる相対論的運動学を取り入れることができる枠組みを開発し、 $Y(4260)$ の3体崩壊の崩壊振幅を計算した。これにより、threshold cusp のシナリオは、右図のように、実験と良く整合することが確かめられた[1]。さらに富岳における物理的クォーク質量を持つチャームハドロン間相互作用の計算を行うコード開発も行い、富岳での計算が進んでいる。



エキゾチックハドロン候補は、 $Z_c(3900)$ のように散乱閾値の付近にピークとして観測される。本研究では、それらのピークがどのような量子状態に分類されるのか、あらかじめ判別することで今後のHAL QCD法を用いた計算を効率的に行うことができるよう、深層学習による散乱振幅の解析を世界に先駆けて行った。閾値付近に極を持つことが知られている2核子(NN)単チャンネル散乱振幅およびチャンネル結合N散乱について、機械学習を行った。この機械学習では、NN散乱の極の分類については1MeV程度の精度を達成し[2]、チャンネル結合散乱については、下図のようにカリキュラム・ラーニングを用いて段階的に学習を進めて行き、最終的に4つの極について、4枚のリーマンシート内での分類を可能にした[3]。これらの方法は、今後3粒子系へと拡張していく予定である。



[1] Yoichi Ikeda, The tetraquark candidate  $Z_c(3900)$  from dynamical lattice QCD simulations, J. Phys. G **45**, no. 2, 024002 (19pages) (2018).

[2] Denny Lane B. Sombillo, Yoichi Ikeda, Toru Sato, Atsushi Hosaka, Classifying the pole of an amplitude using a deep neural network, Phys. Rev. D **102**, no. 1, 016024 (2020).

[3] D. L. B. Sombillo, Y. Ikeda, T. Sato and A. Hosaka, Model independent analysis of coupled-channel scattering: A deep learning approach, Phys. Rev. D **104**, no.3, 036001 (2021).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sombillo Denny Lane B., Ikeda Yoichi, Sato Toru, Hosaka Atsushi	4. 巻 62
2. 論文標題 Classifying Near-Threshold Enhancement Using Deep Neural Network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 52
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00601-021-01642-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sombillo Denny Lane B., Ikeda Yoichi, Sato Toru, Hosaka Atsushi	4. 巻 104
2. 論文標題 Model independent analysis of coupled-channel scattering: A deep learning approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 36001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.104.036001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Denny Lane B. Sombillo, Yoichi Ikeda, Toru Sato, Atsushi Hosaka	4. 巻 102
2. 論文標題 Classifying the pole of an amplitude using a deep neural network	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 16024
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.102.016024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Miyamoto Takaya, Aoki Sinya, Doi Takumi, Gongyo Shinya, Hatsuda Tetsuo, Ikeda Yoichi, Inoue Takashi, Iritani Takumi, Ishii Noriyoshi, Kawai Daisuke, Murano Keiko, Nemura Hidekatsu, Sasaki Kenji	4. 巻 971
2. 論文標題 $\Lambda_c N$ interaction from lattice QCD and its application to $\Lambda_c$ hypernuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 113 ~ 129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nuclphysa.2018.01.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoichi Ikeda	4. 巻 175
2. 論文標題 Tetraquark candidate $Z_c(3900)$ from coupled-channel scattering - how to extract hadronic interactions? -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web Conference	6. 最初と最後の頁 1023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817501023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoichi Ikeda	4. 巻 45
2. 論文標題 The tetraquark candidate $Z_c(3900)$ from dynamical lattice QCD simulations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics G	6. 最初と最後の頁 24002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6471/aa9afd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計7件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 池田陽一
2. 発表標題 ニューラルネットワークによるS行列の極の分類 (I)
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会(オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoichi Ikeda
2. 発表標題 Lattice QCD analysis of charmed tetraquark candidates
3. 学会等名 the International Molecule-type Workshop "Frontiers in Lattice QCD and related topics" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoichi Ikeda
2. 発表標題 Exotic hadrons from lattice
3. 学会等名 シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて (QUCS 2019) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Ikeda
2. 発表標題 Hadron interactions from lattice QCD -- application to hadron resonances --
3. 学会等名 5th APS-JPS Joint Meeting (HAW18) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Ikeda
2. 発表標題 Hadron interactions from lattice QCD -- application to hadron resonances --
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Few-Body Problems in Physics (FB22) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoichi Ikeda
2. 発表標題 Tetraquark candidate $Z_c(3900)$ from coupled-channel scattering - how to extract hadronic interactions? -
3. 学会等名 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoichi Ikeda
2. 発表標題 Coupled-channel scattering on the lattice and its application to Zc(3900)
3. 学会等名 XVII International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関