

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800147

研究課題名(和文) 格子QCDにおける有限体積効果を1%以下に抑えるためのパイ中間子有効理論の解析

研究課題名(英文) Application of pion effective theory to lattice QCD for controlling the finite volume effect at 1% level

研究代表者

深谷 英則 (Fukaya, Hidenori)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：70435676

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、格子QCD数値計算の主要な系統誤差である有限体積効果を精度よくコントロールすることである。私たちは、中間子のゼロ運動量モードをコントロールし、1%程度の精度でパイ中間子の形状因子を抽出するには、4fm程度の格子による数値計算があれば可能であることを示した。さらにこの成果を数値計算に応用、誤差の範囲で実験値との一致が確認された。また、Dirac 演算子の固有値分布のうち、あらかじめ有限体積効果が小さいとわかっている領域を逆算してもとめ、その分布とBanks-Casher関係式を比較することにより、中心値の1.8%の精度でカイラル凝縮を精密計算することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The goal of this study is to control finite volume effect in lattice QCD, which is one of main systematic uncertainties. We found by controlling the zero-momentum modes, that 4fm lattice size is enough to extract pion form factor with its uncertainty below 1%. We apply this result to lattice QCD simulations and determined the pion electromagnetic radius, which agrees with the experiment. We also computed the chiral condensate by measuring the Dirac eigenvalue density compared to the Banks-Casher relation in a region we found that the finite volume effect is small using chiral perturbation theory. Our estimate for the statistical and systematic uncertainty of our result is only 1.8%.

研究分野：素粒子論、特に格子QCD

キーワード：カイラル摂動論 格子QCD

### 1. 研究開始当初の背景

CERN の大型ハドロン衝突型加速器(LHC)で Higgs 粒子が発見されたが、その振る舞いは素粒子標準模型と無矛盾である。一方、暗黒物質やニュートリノ振動の実験結果により、標準模型を超える新しい物理の存在も確実と言える。このような状況では、素粒子実験、理論の双方を用いて、素粒子標準模型を精密に検証し、実験と理論のわずかな差異を探ることで、新しい物理への糸口をつかむ、ボトムアップ型の研究が重要である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、強い相互作用を記述する量子色力学(QCD)を精密に理論計算するため、格子 QCD 数値計算の主要な系統誤差である有限体積効果を精度よくコントロールすることにある。

### 3. 研究の方法

中間子有効理論を用いて各種物理量の有限体積効果を逆算、その主な原因となるゼロ運動量モードを相殺するような測定方法を開発し、格子 QCD 数値計算に応用、精密理論計算に役立てる。

### 4. 研究成果

1%程度の精度でパイ中間子の形状因子を抽出するには、4fm 程度の格子による数値計算があれば、可能であることを示した。これは従来考えられてきた見積もりよりも小さく、パイ中間子のゼロ運動量モードの寄与を抑えることの重要性を示すものである。

上記の成果を数値計算に応用、1.8fm の格子 QCD 数値計算結果を解析、この大きさでは系統誤差が 10%を超えてしまうものの、その誤差の範囲で実験値との一致が確認された。

さらに、Dirac 演算子の固有値分布のうち、有限体積効果が小さいとあらかじめわかっている領域を使って、カイラル凝縮を精密計算することに成功した。カイラル対称性を保つメビウスドメインウォールを用い、大規模数値計算を実行、カイラル極限、連続極限、統計誤差の合計を中心値 1.8%の精度でコントロール、カイラル凝縮の値を決定した。また、有限体積効果をキャンセルする相関関数の比をとる方法で解析している、D 中間子のセミレプトニック崩壊の研究も細かい格子での解析が進み、国際会議 "34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016)"にて最新の結果を発表した。また、QCD のトポロジー感受率についても、中間子の質量と崩壊定数かけたものの 2 乗との比をとることで、有限体積効果を大幅にキャンセルできることが、カイラル摂動論の解析によってわかり、数 %の精度での決定を近日中に発表できる見込みである。

### 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 8 件)全て査読あり。

1. Finite temperature study of the axial U(1) symmetry on the lattice with overlap fermion formulation, G. Cossu, S. Aoki, Hidenori Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru and J. -I. Noaki, Phys. Rev. D 87 No. 11, June 2013, 114514(1-12)  
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.114514

2. Computation of the electromagnetic pion form factor from lattice QCD in the regime, Hidenori Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru and J. Noaki Phys. Rev. D 90 No. 3, August 2014 034506(1-5)  
DOI: 10.1103/PhysRevD.90.034506

3. Extracting the electromagnetic pion form factor from QCD in a finite volume, Hidenori Fukaya and Takashi Suzuki PRD 90 No. 11, December 114508(1-8)  
DOI: 10.1103/PhysRevD.90.114508

4. Renormalization of Extended QCD2 Hidenori Fukaya, Ryou Yamamura Prog. Theor. Exp. Phys.103B05 No.10, October 2015 1-20  
DOI: 10.1093/ptep/ptv142

5. meson mass from topological charge density correlator in QCD, Hidenori Fukaya, S. Aoki, G. Cossu, S. Hashimoto, T. Kaneko and J. Noaki Phys. Rev. D92 No.11, December 2015 111501(1-5)  
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.111501

6. Violation of chirality of the Mobius domain-wall Dirac operator from the eigenmodes, Guido Cossu, Hidenori Fukaya, Akio Tomiyap, S. Hashimoto, Phys. Rev. D 93 No.3, February 2016 034507(1-12)  
DOI: 10.1103/PhysRevD.93.034507

7. Renormalization of domain-wall bilinear operators with short-distance current correlators, M. Tomii, G. Cossu, B. Fahy, Hidenori Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki [JLQCD collaboration] Phys. Rev. D 94 No. 5, September 2016 054504(1-17)  
DOI: 10.1103/PhysRevD.94.054504

8. Stochastic calculation of the Dirac spectrum on the lattice and a determination of chiral condensate in 2+1-flavor QCD, Guido Cossu, Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto, Takashi Kaneko, Jun-Ichi

Noaki, Prog. Theor. Exp. Phys. 2016 No. 9, September 2016 093B06(1-17)  
DOI: 10.1093/ptep/ptw129  
〔学会発表〕(計 21 件)

1. 発表表題 Domain-wall/Overlap reweighting,  
著者名/発表者名 Hidenori Fukaya  
学会等名 31st International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)  
発表場所 Johannes Gutenberg University, Mainz, Germany  
年月日 20130729-20130803
2. 発表表題 Finite volume scaling of the electro-magnetic pion form factor in the epsilon regime  
著者名/発表者名 Takashi Suzuki  
学会等名 31st International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)  
発表場所 Johannes Gutenberg University, Mainz, Germany  
年月日 20130729-20130803
3. 発表表題 Topology density correlator on dynamical domain-wall ensembles with nearly frozen topological charge  
著者名/発表者名 Hidenori Fukaya, S. Aoki, G. Cossu, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki  
学会等名 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014)  
発表場所 Columbia University, NewYork(USA)  
年月日 2014-06-23 - 2014-06-28
4. 発表表題 Domain-wall/Overlap reweighting  
著者名/発表者名 深谷英則  
学会等名 日本物理学会第 69 回年次大会  
発表場所 東海大学  
年月日 20140327-20140330
5. 発表表題 Extracting the eta-prime meson mass from the gluonic correlators in lattice QCD  
著者名/発表者名 Hidenori Fukaya  
学会等名 Hadrons and Hadron Interactions in QCD (HHI QCD2015)  
発表場所 京都大学基礎物理学研究所(京都市)  
年月日 2015-03-18 - 2015-03-18
6. 発表表題 Extracting the meson mass from gluonic correlators from a short Wilson flow  
著者名/発表者名 Hidenori Fukaya  
学会等名 日本物理学会 第 70 回年次大会  
発表場所 早稲田大学(東京都)  
年月日 2015-03-21 - 2015-03-24
7. 発表表題 Extracting (pion) form

factors from finite volume lattices  
著者名/発表者名 H. Fukaya for JLQCD collaboration  
学会等名 The 8th International Workshop on Chiral Dynamics 2015  
発表場所 Pisa  
年月日 2015-06-29 - 2015-07-03

8. 発表表題 On the axial U(1) symmetry at finite temperature  
著者名/発表者名 G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, J. Noaki, A. Tomiya (JLQCD collaboration)  
学会等名 The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory  
発表場所 Kobe International Conference Center, Kobe, Japan  
年月日 2015-07-14 - 2015-07-18
9. 発表表題 Renormalization of two-dimensional XQCD  
著者名/発表者名 H. Fukaya and R. Yamamura  
学会等名 The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory  
発表場所 Kobe International Conference Center, Kobe, Japan  
年月日 2015-07-14 - 2015-07-18
10. 発表表題 Extracting the eta' meson mass from gluonic correlators in lattice QCD  
著者名/発表者名 H. Fukaya, G. Cossu, S. Hashimoto, T. Kaneko (JLQCD collaboration)  
学会等名 The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory  
発表場所 Kobe International Conference Center, Kobe, Japan  
年月日 2015-07-14 - 2015-07-18
11. 発表表題 D meson semileptonic decays from lattice QCD with chiral fermions  
著者名/発表者名 T. Suzuki, Y-G. Cho, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki  
学会等名 The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory  
発表場所 Kobe International Conference Center, Kobe, Japan  
年月日 2015-07-14 - 2015-07-18
12. 発表表題 Topology in lattice QCD  
著者名/発表者名 H. Fukaya for JLQCD collaboration  
学会等名 Symposium on 'Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015)'  
発表場所 Nara Prefectural New Public Hall, Nara  
年月日 2015-11-04 - 2015-11-08

13. 発表表題 部分空間で計算したゼロ温度および有限温度 QCD におけるトポロジー感受率

著者名/発表者名 深谷英則 for JLQCD collaboration

学会等名 日本物理学会第 7 1 回年次大会

発表場所 東北学院大学

年月日 2016-03-19 - 2016-03-22

14. 発表表題 有限温度 QCD における  $U(1)$  カイラルアノマリー

著者名/発表者名 深谷英則 for JLQCD collaboration

学会等名 日本物理学会第 7 1 回年次大会

発表場所 東北学院大学

年月日 2016-03-19 - 2016-03-22

15. 発表表題 格子 QCD 数値計算による D メソン崩壊過程に関する CKM 行列要素の決定  
著者名/発表者名 鈴木貴志, 金子隆志, 趙栄貴, 野秋淳一, 橋本省二, 深谷英則 [ほか JLQCD collaboration]

学会等名 日本物理学会第 7 1 回年次大会

発表場所 東北学院大学

年月日 2016-03-19 - 2016-03-22

16. 発表表題 Six-dimensional regularization of chiral gauge theories on a lattice 1

著者名/発表者名 Hidenori Fukaya, Tetsuya Onogi, Shota Yamamoto, Ryo Yamamura

学会等名 34th International Symposium on Lattice Field Theory (国際学会)

発表場所 University of Southampton, UK.

年月日 2016 年 07 月 24 日~ 2016 年 07 月 30 日

17. 発表表題 Six-dimensional regularization of chiral gauge theories on a lattice 2

著者名/発表者名 Hidenori Fukaya, Tetsuya Onogi, Shota Yamamoto, Ryo Yamamura

学会等名 34th International Symposium on Lattice Field Theory (国際学会)

発表場所 University of Southampton, UK.

年月日 2016 年 07 月 24 日~ 2016 年 07 月 30 日

18. 発表表題 Six-dimensional regularization of chiral gauge theories on a lattice

著者名/発表者名 Hidenori Fukaya

学会等名 KEK Theory Workshop 2016(招待講演)(国際学会)

発表場所 KEK Theory Center, Tsukuba

年月日 2016 年 12 月 06 日~ 2016 年 12 月 09 日

19. 発表表題 6次元格子を用いたカイラルゲージ理論の定式化 1 著者名/発表者名 Hidenori Fukaya, Tetsuya Onogi, Shota Yamamoto, Ryo Yamamura

学会等名 日本物理学会 2016 年秋季大会

発表場所 宮崎大学

年月日 2016 年 09 月 21 日~ 2016 年 09 月 24 日

20. 発表表題 6次元格子を用いたカイラルゲージ理論の定式化 2

著者名/発表者名 Hidenori Fukaya, Tetsuya Onogi, Shota Yamamoto, Ryo Yamamura

学会等名 日本物理学会 2016 年秋季大会

発表場所 宮崎大学

年月日 2016 年 09 月 21 日~ 2016 年 09 月 24 日

21. 発表表題 D meson semileptonic decays in lattice QCD with Moebius domain-wall quarks

著者名/発表者名 T. Kaneko, B. Fahy, H. Fukaya, S. Hashimoto

学会等名 University of Southampton UK.

年月日 2016 年 07 月 24 日~ 2016 年 07 月 30 日

〔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://kabuto.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~hfukaya/study.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

深谷 英則 ( FUKAYA, Hidenori )  
大阪大学・理学研究科・助教  
研究者番号 70435676

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号

##### (4) 研究協力者

( )