

研究責任者名 Name	橋本 省二 Shoji Hashimoto	所属機関 Affiliation	高エネルギー加速器研究機構 KEK
受理番号 Proposal No.	大型 14/15-10	研究課題名 Program title	格子ゲージ理論の大規模シミュレーションとその素粒子現象論への応用

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要

Abstract

(和文)

素粒子フレーバー物理で必要になる種々の物理量の精密計算を目標として、カイラル対称性を保つ格子フェルミオンを用いた格子量子色力学の大規模シミュレーションの計画を進めている。高精細格子でのシミュレーションを複数の格子間隔で実行し、連続極限をとる。平成 26-27 年度においては、格子間隔 3 点でのデータ生成を完了し、本格的な物理量計算に移行した。軽い中間子と D 中間子の崩壊定数、短距離相関関数を用いたくりこみ定数の計算、チャーモニウム相関関数を用いたチャームクォーク質量の決定、D 中間子セミレプトニック崩壊形状因子の計算、ゲージ場のトポロジー荷電相関を用いた  $\eta'$  中間子質量の計算、固有値フィルタリング法を用いたディラック演算子スペクトルの計算など、多様な研究を推進している。

(英文)

Our project aims at precise calculation of various physical quantities relevant to quark flavor physics. We perform large-scale simulations of lattice Quantum Chromodynamics (LQCD) using lattice fermion formulation that preserves chiral symmetry. To approach the continuum limit, we have generated gauge ensembles at three fine lattice spacings. The project has then moved to the phase to calculate physical quantities. The first physics applications include the calculation of light and D meson decay constants, determination of renormalization constants from short-distance current correlators, charm quark mass determination from charmonium correlator, calculation of D meson semileptonic decay form factor,  $\eta'$  meson mass from the topological charge density correlator, calculation of Dirac operator spectrum using the eigenvalue filtering technique.

研究成果を公開しているホームページアドレス

事務局にて使用	論文 査読有	論文 査読無	講義・発表	招待講演	その他
	1	1	0	0	0

# 「格子ゲージ理論の大規模シミュレーションとその素粒子現象論への応用」平成 26-27 年度研究報告書

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 橋本省二

2015 年 12 月 22 日

## 1 研究組織

scqcd グループは KEK、大阪大、京大、筑波大を主体とするグループで、格子 QCD の大規模シミュレーションによる素粒子物理学の非摂動的な研究を推進している。対外的には JLQCD collaboration の名前で研究発表を行っている。一部の研究については UKQCD collaboration (Edinburgh, Southampton) と共同研究を行っている。

- 研究責任者

- 橋本省二 (はしもと しょうじ)

- 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 教授

- 研究従事者

- 金児 隆志 (かねこ たかし)

- 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 研究機関講師

- 松古 栄夫 (まつふる ひでお)

- 高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター 助教

- 野秋 淳一 (のあき じゅんいち)

- 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 特任助教

- Guido Cossu

- 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 研究員

- 大野木 哲也 (おおのぎ てつや)

- 大阪大学 理学研究科 教授

- 深谷 英則 (ふかや ひでのり)

- 大阪大学 理学研究科 助教

- 青木 慎也 (あおき しんや)

- 京都大学 基礎物理学研究所 教授

- 谷口 祐介 (たにぐち ゆうすけ)

筑波大学 物理学系 助教

- 趙 栄貴 (ちょう よんぎ) 東京工業大学 研究員
- 富井 正明 (とみい まさあき) 総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科 大学院生
- 中山勝政 (なかやま かつまさ) 名古屋大学 理学研究科 大学院生 / KEK 特別共同利用研究員
- 山中 長閑 (やまなか のどか) 理化学研究所 仁科加速器科学センター 研究員
- 大木 洋 (おおき ひろし)  
名古屋大学 素粒子宇宙起源研究機構 (KMI) 研究員
- Xu Feng  
Columbia University, Postdoctoral fellow

- UKQCD collaboration

- Peter Boyle (University of Edinburgh)
- Jonathan Flynn (University of Southampton)
- Andreas Juttner (University of Southampton)
- Christopher Sachrajda (University of Southampton)
- Justus Tobias Tsang (University of Southampton)

## 2 概要

本研究の目標は、SuperKEKB/Belle II 実験に代表されるクォーク・フレーバー物理の実験・解析において必要となるハドロン行列要素を十分な精度で計算し、実験で得られるデータをもとに標準模型を超える物理の探索につなげることである。2012年に研究を開始し、最適な格子定式化や計算手法の開発から、連続極限に近い格子シミュレーションの実行、物理量の測定・解析までを総合的に行っている。カイラル外挿や演算子混合による不定性を抑えることができるよう、カイラル対称性をよい精度で保ちながらも高速なシミュレーションが可能になる Mobius domain-wall fermion を詳細なテストの上で採用した。チャームおよびボトムクォークでも系統誤差を制御できるよう、0.085 fm 以下の小さな格子間隔 3 点でのシミュレーションを行う。格子配位データ生成は完了し、本格的な物理量計算を開始した。

## 3 平成 26-27 年度の研究報告

本研究は、基本となる定式化の研究から計算コード開発、シミュレーション実行、種々の物理量計算手法の開発・実行、解析などからなる全体としては大規模なプロジェクトである。以下に、平成 26-27 年度の進捗状況と成果について報告する。

- 大規模シミュレーションにより、格子切断として 2.45 GeV, 3.61 GeV, 4.50 GeV をもつ格

子データを生成した。格子サイズ  $32^3 \times 64$ ,  $48^3 \times 96$ ,  $64^3 \times 128$  をもつ大規模格子で、物理的体積 2.5 fm 程度以上を確保する。アップおよびダウンクォーク質量は 500–230 MeV の質量をもつパイ中間子に相当する範囲をカバー、ストレンジクォークは物理的な値を挟むような 2 点をとるようパラメタを定めた。もっとも軽いパイ中間子質量 230 MeV では、 $32^3$  と  $48^3$  の 2 つの格子サイズを用意し、有限体積効果をチェックする。平成 26-27 年度においては、最後まで残った大体積かつ軽いクォーク質量およびもっとも格子間隔の小さい格子のデータ生成を完了した。合計で 15 個の統計アンサンブルについてそれぞれ 10,000 HMC トラジェクトリーを蓄積した。

- 軽いハドロンおよびチャームクォークを含む中間子質量の計算を行った。それぞれのアンサンブルから 200 配位を取り出して合計 400 回の測定を行った。階層的デフレーションの手法を用いて、計算コストを大幅に削減したため、当初の予定よりも 2 倍速く計算が進行した。 $\pi$ ,  $K$  中間子および  $D$  中間子の質量と崩壊定数の計算を行い、2% 程度の誤差で結果を得られることを確認した [1]。その後、さらに統計誤差を削減するため確率的測定的手法を組み合わせることで統計誤差を 1/3 程度にまで削減できることを確認した。この手法での再計算に、チャームを超えてボトムクォークへの外挿のための計算を組み合わせ、高統計計算を実行中である。
- Mobius domain-wall fermion における演算子のくりこみ定数を決定するために、座標空間くりこみ法の計算手法開発を進めた。これは、座標空間での演算子の短距離 2 点相関関数を計算して摂動計算にマッチさせるもので、よく使われている RI/MOM にもとづく方法と比較すると、ゲージ固定が不要である点、および摂動計算が 4 次まで知られている点が優れている。短距離での格子化の誤差を効率よく取り除く手法を開発し、くりこみ定数計算を完了した [2]。同時に演算子積展開の手法を格子計算を使って確認する新たな研究も進めている。
- 上記で得られたチャーモニウム 2 点関数のデータを使って、モーメント法によるチャームクォーク質量と強い相互作用の結合定数の決定を行った。知られていた手法の解析方法を改善してより信頼できる系統誤差の見積りを加えた。チャームクォーク質量について 1% の精度での決定が可能になった [3]。
- $D$  中間子のセミレプトニック崩壊形状因子の予備的計算を行った。限られた統計量でも既存の計算結果に比肩する結果が得られることを確認した [4]。今後、統計精度を改善する手法を組み合わせる再計算を行う計画である。
- ウィルソン流にもとづくトポロジー荷電の計算を応用し、トポロジー荷電の相関から  $\eta'$  中間子の質量を計算することに成功した [5]。ゲージ場のトポロジーが中間子スペクトルに反映される顕著な例となる。
- 確率的な固有値数計算の手法を用いて、ディラック演算子の固有値分布を計算する研究を行った。予備的計算により、低エネルギー固有値の蓄積によって自発的カイラル対称性の破れが起こる様子を大体積格子のシミュレーションで再現し、カイラル凝縮を計算できることを示した [6]。
- 今回採用した新しいドメインウォール・フェルミオン定式化を用いた有限温度 QCD シミュ

レーションのテスト的計算を行っている。カイラル対称性に非常に敏感な軸性  $U(1)$  対称性の回復を調べるのが主目的である。この量ではカイラル対称性の小さな破れが結果を大きく左右するため、フェルミオン定式化のよいベンチマークにもなっている。従来の格子計算の結果にはカイラル対称性の破れに伴う問題があることを、ディラック演算子の固有モード分解を用いて詳細に調べて明らかにした [7, 8]。

- 前プロジェクトの計算データを用いて、 $K$  中間子セミレプトニック崩壊形状因子の解析を進めた。カイラル有効理論を 2 ループまで取り入れた初めての解析で、カイラル展開の性質を詳細に明らかにした [9]。
- 前プロジェクトの計算データを用いて、核子の軸性荷電、テンソル荷電の計算を行った。これはクォーク非連結ダイヤグラムを含む難しい計算で、カイラル対称性を保つ初めての計算となった [10]。

## 4 成果報告

上記の大規模プロジェクトは 2012 年に開始して現在にいたるまで順調に進んでおり、物理量計算の成果が出始めている。2015 年の格子場の理論国際会議 (The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory, July 14-18, 2015 in Kobe, Japan) では、研究グループとして以下の 10 件の研究発表を行った [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]。また、2015 年 3 月および 9 月の日本物理学会において関連する研究発表を計 11 件行った [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]。

その他の論文およびプロシーディングス等については別途成果報告システムで報告した。

## 参考文献

- [1] B. Fahy, G. Cossu, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, "Decay constants and spectroscopy of mesons in lattice QCD using domain-wall fermions", at the 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2015), Kobe, Japan, July 2015.
- [2] M. Tomii, G. Cossu, B. Fahy, H. Fukaya, S. Hashimoto, "Analysis of short distance current correlators using OPE", at the 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2015), Kobe, Japan, July 2015.
- [3] K. Nakayama, B. Fahy, S. Hashimoto, "Charmonium current-current correlators with Mobius domain-wall fermion", at the 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2015), Kobe, Japan, July 2015.
- [4] T. Suzuki, Y.-G. Cho, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, "D meson semileptonic decays from lattice QCD with chiral fermions", at the 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2015), Kobe, Japan, July 2015.
- [5] G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, "Extracting the eta-prime meson mass

- from gluonic correlators in lattice QCD”, at the 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2015), Kobe, Japan, July 2015.
- [6] G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, ”Stochastic calculation of the QCD Dirac operator spectrum with Mobius domain-wall fermion”, at the 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2015), Kobe, Japan, July 2015.
- [7] G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, ”On the axial U(1) symmetry at finite temperature”, at the 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2015), Kobe, Japan, July 2015.
- [8] A. Tomiya, G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, J. Noaki, T. Kaneko, ”Study of the U(1)A symmetry restoration in two-flavor QCD at finite temperature with reweighed overlap fermions”, at the 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2015), Kobe, Japan, July 2015.
- [9] S. Aoki, G. Cossu, X. Feng, H. Fukaya, T. Kaneko, ”Chiral behavior of light meson form factors in 2+1 flavor QCD with exact chiral symmetry”, at the 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2015), Kobe, Japan, July 2015.
- [10] N. Yamanaka, H. Ohki, S. Hashimoto, T. Kaneko, ”Nucleon axial and tensor charges with dynamical overlap quarks”, at the 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2015), Kobe, Japan, July 2015.
- [11] 深谷英則, ” $\eta'$  meson mass from gluonic correlators after a short Wilson flow”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月。
- [12] 橋本省二, ”高精細 2+1 フレーバー QCD シミュレーションによるパイ、K、D 中間子の崩壊定数の計算”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月。
- [13] 金児隆志, ”厳密なカイラル対称性をもつ格子 QCD による K 中間子セミレプトニック崩壊の研究”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月。
- [14] 富谷昭夫, G. Cossu, 深谷英則, 橋本省二, 野秋淳一, ”カイラルフェルミオンを用いた有限温度 QCD における U(1) アノマリーの解析”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月。
- [15] 富井正明, ”クォーク双線形演算子の 2 点相関関数に関する近距離における振る舞い”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月。
- [16] 金児隆志, ”(企画講演) 格子 QCD で迫るフレーバー物理”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月。
- [17] 鈴木貴志, ”格子 QCD 数値計算による D メソン崩壊過程における形状因子の決定”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月。
- [18] 中山勝政, 橋本省二, ”チャーモニウム相関関数の格子計算によるチャームクォーク質量の決定”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月。
- [19] 山中長閑, ”オーバーラップフェルミオンを用いた核子の軸性荷電およびテンソル電荷の計算”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月。

- [20] 富井正明, ”クォーク双線形演算子の近距離相関関数における非摂動効果”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月。
- [21] 橋本省二, ”固有値フィルタリング法による QCD ディラックスペクトルの計算”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月。