

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 素粒子原子核研究所
受理番号 Proposal No.	大型 13/14-04	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 25-26 年度においては、シミュレーションによる格子データ生成が進み、 $1/a=2.4$  GeV,  $3.6$  GeV のランがほぼ完了、 $4.6$  GeV の生成もあと 3 ヶ月程度で完了する見込みである。トポロジー荷電の計算によりモンテカルロの自己相関をチェックし、少なくとも  $2.4$ ,  $3.6$  GeV 格子においては統計的に独立なサンプルが得られていることを確認した。初期的な物理量計算として、クォークポテンシャルとウィルソン流による格子間隔の決定、軽いハドロンの質量計算、くりこみ定数の計算を進めると同時に、重いクォークのための新しいフェルミオン定式化のテストを行った。

(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 carry out the simulations at three fine lattice spacings. In the term of 2013-2014, we almost completed the generation of the data for the lattices of  $1/a=2.4$  GeV and  $3.6$  GeV, and expect to finish the finest lattice  $4.8$  GeV in three months. We confirmed that the statistically independent samples are obtained by checking the topological charge at least on the  $2.4$  and  $3.6$  GeV lattices. As the first physics calculations, we performed the determination of the lattice spacing from the quark potential and the Wilson flow, calculation of the light hadron spectrum and the renormalization constants. In addition, we are testing a new fermion formulation for heavy quarks.

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読つきの 学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)
	17	1	6	0

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表 Presentations at scientific meetings concerning the program

1. J. Noaki, S. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, "Fine lattice simulations with the Ginsparg-Wilson fermions", talk at Lattice 2014.
2. H. Fukaya, S. Aoki, G. Cossu, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, "Topology density correlator on dynamical domain-wall ensembles with nearly frozen topological charge", talk at Lattice 2014.
3. M. Tomii, G. Cossu, S. Hashimoto, J. Noaki, "Non-perturbative renormalization of bilinear operators with Mobius domain-wall fermions in the coordinate space", talk at Lattice 2014.
4. Y.G. Cho, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, A. Juttner, M. Marinkovic, J. Tsang, "Scaling study of an improved fermion action on quenched lattices", talk at Lattice 2014.
5. G. Cossu, S. Hashimoto, H. Fukaya, A. Tomiya, T. Kaneko, J. Noaki, "Axial U(1) symmetry at finite temperature with Mobius domain-wall fermions", talk at Lattice 2014.
6. A. Tomiya, H. Fukaya, G. Cossu, S. Hashimoto, J. Noaki, "Effects of near-zero Dirac eigenmodes on axial U(1) symmetry at finite temperature", talk at Lattice 2014.
7. T. Iritani, S. Hashimoto, G. Cossu, "Partial restoration of chiral symmetry inside hadrons", talk at Lattice 2014.
8. 入谷匠、「格子量子色力学によるカラー・フラックス・チューブ中のカイラル凝縮の解析」、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月東海大学。
9. 深谷英則、「Overlap/domain-wall reweighting」、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月東海大学。
10. 富谷昭夫、「カイラルフェルミオンを用いた数値計算による高温 QCD における U(1)アノマリーの解析」、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月東海大学。
11. 富井正明、「座標空間における非摂動くりこみ」、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月佐賀大学。
12. 野秋淳一、「ギンスパーグ・ウィルソンフェルミオンによる系統的 QCD シミュレーション」、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月佐賀大学。
13. 金児隆志、「2 ループカイラル摂動論に基づいた中間子形状因子の解析」、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月佐賀大学。
14. 趙栄貴、「重いクォーク系のシミュレーションに向けた格子作用の改良」、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月佐賀大学。
15. 橋本省二、「高精細格子 QCD におけるトポロジー相関関数」、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月佐賀大学。
16. 富谷昭夫、「一般化ドメインウォールフェルミオンによる高温 QCD における U(1)アノマリーの解析」、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月佐賀大学。
17. 入谷匠、「格子量子色力学を用いたカラー電場中のカイラル対称性の部分的回復の解析」、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月佐賀大学。

査読つきの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (\*) 不足する場合には追加願います。

Refereed Journal Articles (name of journal, volume, page, year)

1	著者名 Author	H. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki
	タイトル title	Computation of the electromagnetic pion form factor from lattice QCD in the epsilon regime
	雑誌名 name of journal	Phys. Rev. D90 (2014) 034506.
	URL	<a href="http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.90.034506">http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.90.034506</a>
2	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
3	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	

プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (\*) 不足する場合には追加願います。

International Conference Proceedings (name of journal, volume, page, year)

1.	著者名 Author	T. Iritani, G. Cossu, S. Hashimoto
	タイトル title	Analysis of topological structure of the QCD vacuum with overlap-Dirac operator eigenmode
	雑誌名等 name of journal	PoS LATTICE2013 (2014) 376.
	URL	
2.	著者名	H. Fukaya et al. [JLQCD collaboration]
	タイトル	Overlap/Domain-wall reweighting
	雑誌名等	PoS LATTICE2013 (2014) 127.
	URL	
3.	著者名	T. Kaneko et al. [JLQCD collaboration]
	タイトル	Large-scale simulations with chiral symmetry
	雑誌名等	PoS LATTICE2013 (2014) 125.
	URL	
4.	著者名	Y.G. Cho, S. Hashimoto, J. Noaki, A. Juttner, M. Marinkovic
	タイトル	O(a <sup>2</sup> )-improved actions for heavy quarks and scaling studies on quenched lattices
	雑誌名等	PoS LATTICE2013 (2014) 255.
	URL	
5.	著者名	J. Noaki et al. [JLQCD collaboration]
	タイトル	Fine lattice simulations with chirally symmetric fermions
	雑誌名等	PoS LATTICE2013 (2014) 263.
	URL	
6.	著者名	S. Hashimoto et al. [JLQCD collaboration]
	タイトル	Residual mass in five-dimensional fermion formulations
	雑誌名等	PoS LATTICE2013 (2014) 431.
	URL	
その他（学位論文、紀要、投稿中の論文を含む）（著者、タイトル、論文種別、URL を記載） Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)		
1. Author, title, sort of article, URL: 2. Author, title, sort of article, URL:		
特記（本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など）（過去に遡っても構いません。） Special Notes (newspaper article, literary works, awards, etc.)		
1. 2.		

# 「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 25-26 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

平成 26 年 12 月 1 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 연구를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

- 金見 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) 筑波大学大学院 数理物質科学研究科 D2
- 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 D2
- 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)

## 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 年から本格運用が始まった KEK の新スーパーコンピュータシステムを用いて、連続極限に近い格子シミュレーションを実行している。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。大規模シミュレーションを実行する一方で、計算コードの最適化に引き続き取り組んでいる。シミュレーションによる格子配位データ生成はほぼ完了し、本格的な物理量計算に移行しつつある。

## 3 平成 25-26 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 25-26 年度の進捗状況と成果について報告する。

- 本グループがこれまでに進めてきた厳密なカイラル対称性をもつ格子 QCD シミュレーションによる経験をもとに、カイラル対称性を非常によい精度で保ちつつシミュレーションを大幅に高速化できる手法の開発を行った上で、実際の HMC シミュレーションによる本格的なテストを実施した。その結果、ドメインウォール・フェルミオンを修正してカイラル対称性の破れを小さくする定式化 (Mobius domain-wall fermion) を用いることで、カイラル対称性の破れを 0.5 MeV 以下に抑えながら、従来のオーバーラップ・フェルミオンよりも 20 倍程度高速なシミュレーションを実現できることがわかった。大規模シミュレーションにおいてもカイラル対称性の破れの大きさを常にモニターし、問題ないことを確認しながら進めている。

- シミュレーション・コードの開発、アルゴリズムの最適化については、継続的に研究を行っている。このプロジェクトのために新規の C++コードセット Iroiro++を開発して用いている。Blue Gene/Q 向けの最適化では、IBM が提供する QCD 向けライブラリをシミュレーションの各部で利用すると同時に、スレッド並列化の最適化を行っている。HMC シミュレーションで必要となるほとんどのパーツについてこの作業を完了しており、全体での浮動小数点演算実行効率を 10% 程度にまで高めた。さらに、フェルミオン行列の逆を計算する部分では、エジンバラ大学の Peter Boyle 氏が開発した BG/Q 向けに最適化されたコード全体を呼び出すような変更を加えている。ここでは KEK(日本 IBM) 独自の通信ライブラリとの接続で作業を要した。途中の計算を単精度で行いつつ最終的には倍精度を保証する混合精度計算も合わせて導入し、全体では 15% 程度の性能を得ている。
- 大規模シミュレーションは、格子切断として 2.4 GeV, 3.6 GeV, 4.6 GeV をもつ格子データを生成している。格子サイズは  $32^3 \times 64$ ,  $48^3 \times 96$ ,  $64^3 \times 128$  をもつ大規模格子で、物理的体積として 2.5 fm 程度以上を確保する。アップおよびダウクォーク質量は 400–220 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ている。もっとも軽いパイ中間子質量 220 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できるようにしている。平成 25-26 年度もシミュレーションを継続し、2.4, 3.6 GeV 格子のデータ生成はほぼ完了し、大体積かつ軽いクォーク質量の 1 点を残すのみ、4.6 GeV 格子についても順調に進行しており、全体として平成 26 年末あるいは 27 年はじめには当初予定した 10,000 HMC トラジェクトリーのデータ生成を完了できる見込みである。
- 格子間隔を決定するため、クォーク間ポテンシャルをから得られる  $r_0$  スケール、およびウィルソン流の計算から得られる  $t_0$ ,  $w_0$  スケールの計算を行った。それらのクォーク質量依存性は既存の他グループの計算と無矛盾である [1]。
- ウィルソン流にもとづくトポロジー荷電の計算を行った。さらにトポロジー荷電密度の相関関数を詳細に解析することで、大域的トポロジーによらずにトポロジー感受率の計算が可能であることを示した [2]。
- 通常の軽いハドロン質量の計算を行った。前年度の予備的な計算では統計精度が十分でなかったため、ゲージ普遍的な smearing の手法を新たに導入し、source 点だけでなく sink 点でも smearing を行えるよう修正した上で全体の再計算を行っている。この結果、基底状態の信号はより安定しており、初期的解析を行って  $\pi$ ,  $K$  中間子、核子と  $\Omega$  粒子の質量を計算し、インプットのクォーク質量は当初の想定通りであることを確認した。チャームクォークを含むハドロンの質量、崩壊定数も含め計算が進行中で、最初のデータの解析は平成 26 年中に完了できる見通しである [1]。
- 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、くりこみ定数計算の目処が立った [3]。

- 重いクォークのために用いるフェルミオン作用の研究を継続して行った。エネルギー運動量分散関係を非常に精度よく保ち、かつ格子化による誤差を  $O(a^2)$  まで取り除いた格子作用を開発し、その非摂動的なテストを行った。Southampton グループが生成したクエンチ近似の格子データを用いて、チャーモニウムのエネルギー運動量分散関係、質量スペクトルなどで、格子間隔依存性が小さいことを確認した [4]。
- 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明らかにした。本研究ではこれまでのところ、軸性  $U(1)$  対称性の回復を示唆する結果が得られている [5, 6]。
- 前プロジェクトの計算データを用いて、ハドロン中のカイラル凝縮の変化に関する研究を行った。ウィルソン・ループで近似した核子中では、カイラル凝縮が 30% 程度減ることを明らかにした。この手法を用いて有限密度中でのカイラル凝縮についても近似的な結果を得ることができる [7]。

## 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いるが、最終的な物理計算の成果発表にはさらに時間を要する見込みである。進行状況は毎年行われている格子場の理論国際会議で発表している。2014 年には、6 月にニューヨークで行われた。(The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory, June 28-28, 2014 at Columbia University, New York.) 研究グループとして以下の 7 件の研究発表を行った。また、別紙の通り、日本物理学会においても計 10 件の研究発表を行った。

## 参考文献

- [1] J. Noaki, S. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, “Fine lattice simulations with the Ginsparg-Wilson fermions”
- [2] H. Fukaya, S. Aoki, G. Cossu, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, “Topology density correlator on dynamical domain-wall ensembles with nearly frozen topological charge”
- [3] M. Tomii, G. Cossu, S. Hashimoto, J. Noaki, “Non-perturbative renormalization of bilinear operators with Mobius domain-wall fermions in the coordinate space”

- [4] Y.G. Cho, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, A. Juttner, M. Marinkovic, J. Tsang, “Scaling study of an improved fermion action on quenched lattices”
- [5] G. Cossu, S. Hashimoto, H. Fukaya, A. Tomiya, T. Kaneko, J. Noaki, “Axial U(1) symmetry at finite temperature with Mobius domain-wall fermions”
- [6] A. Tomiya, H. Fukaya, G. Cossu, S. Hashimoto, J. Noaki, “ Effects of near-zero Dirac eigenmodes on axial U(1) symmetry at finite temperature”
- [7] T. Iritani, S. Hashimoto, G. Cossu, “Partial restoration of chiral symmetry inside hadrons”