

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2008 ～ 2012

課題番号：20105002

研究課題名（和文） 量子色力学にもとづく真空構造とクォーク力学

研究課題名（英文） vacuum structure and quark dynamics based on quantum chromodynamics

研究代表者

大野木 哲也 ( ONOGI TETSUYA )

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：70211802

研究成果の概要（和文）：

量子色力学における真空構造とクォークのダイナミクスを解明するため、大規模数値計算にもとづく格子 QCD 理論計算を Wilson フェルミオンによるクォーク質量直上の「現実的計算」、Overlap フェルミオンによる厳密なカイラル対称性を保った計算手法を確立した。これを応用し、ハドロンスペクトル、ハドロン相互作用を含むハドロンダイナミクスの総研究と、カイラルダイナミクスの低エネルギー定数の決定を行った。

研究成果の概要（英文）：

In order to reveal the vacuum structure and quark dynamics from QCD, we established the lattice QCD calculation based on large scale numerical simulation in two approaches: one is the realistic QCD simulation at the physical point using Wilson fermion, the other is the QCD simulation with exact chiral symmetry using Overlap fermion. We achieved the study of hadron dynamics including the spectrum and hadron interactions, and determined the low energy constants of the chiral dynamics.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2009 年度	17,800,000	5,340,000	23,140,000
2010 年度	21,700,000	6,510,000	28,210,000
2011 年度	17,800,000	5,340,000	23,140,000
2012 年度	17,800,000	5,340,000	23,140,000
総計	81,700,000	24,510,000	106,210,000

研究分野：素粒子理論

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：格子 QCD, 計算機シミュレーション, フレーバー物理, ハドロン

## 1. 研究開始当初の背景

格子 QCD はクォーク・グルーオンの非摂動的ダイナミクスの探求を可能にする最も有力な手法としてその応用が期待されてきていた。しかし、実際の数値計算においてクォークの質量を現実の軽い値に近づけるにつれて計算時間が長大になるという問題のためハドロン相互作用やカイラルダイナミク

スなど軽いクォークとなっていたモンテカルロ法に対し、新しいアルゴリズムの進展があり計算時間の劇的な短縮が起こった。それをうけて Wilson フェルミオンを用いた応用計算を分担者を含む研究グループである PACS-CS collaboration が開始していた。また Overlap フェルミオンという厳密なカイラル対称性を保つフェルミオンに対して効率

のよい計算方法を研究代表者、分担者の所属する研究グループ JLQCD collaboration が提案し、その応用を開始していた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、格子計算を用いた第一原理計算によって QCD の真空構造とクォーク力学を解明すること、格子 QCD 計算にもとづいてハドロンの相互作用を第一原理から計算することで低エネルギー有効理論や核力を精密に決定し、原子核理論で記述される階層へつなぐ基礎的な理論情報を提供することである。最近の格子ゲージ理論の研究の進展により、我々は上記の目的を達成するために格子 QCD の理論と計算手法の研究を推し進め、真の意味での精密な第一原理計算の基本を確立することを目標とする。また、確立した方法を応用して、有効理論のパラメータの決定や、ハドロン相互作用の決定をめざす。同時に素粒子のフレーバー物理等、新しい物理を念頭においた研究への応用も行う。

## 3. 研究の方法

計算手法として、2つのアプローチにわけて進める。1つは研究分担者の所属する PACS-CS collaboration を中心に Wilson フェルミオンを用いた 2+1 フレーバー QCD のシミュレーションを用いるアプローチである。ここではアップ・ダウンクォーク質量を現実的な 2-3MeV という小さなクォーク質量の物理点直上で計算をおこなう。有限体積効果をおさえるため、空間の大きさ  $L=3\text{fm}-6\text{fm}$  に取る。これにより更に2体のハドロンの相互作用の研究も視野に入れる。計算時間を短縮するため Domain-Decomposition 法と呼ばれるアルゴリズムを採用する。これを用いてハドロンスペクトルの高精度決定と、ハドロン相互作用の決定を目指す。

もう1つは研究代表者、分担者の所属する JLQCD collaboration を中心に厳密なカイラル対称性をもつ Overlap フェルミオンを餅田 2+1 フレーバー QCD のシミュレーションを用いるアプローチである。ここではアップダウンクォークは現実の4倍以上の値をいくつかとり結果を物理点に向かって外挿する。厳密なカイラル対称性の利点を生かして、低エネルギー有効理論との詳細な比較が可能になる。これを通じて低エネルギー定数の決定を目指す。またカイラル対称性が重要となる、 $\pi$  中間子、 $K$  中間子に関する形状因子や遷移行列など素粒子物理で重要な物理量の決定も行うことができる。

4. 研究成果 JLQCD collaboration による厳密なカイラル対称性を持つ Overlap フェルミオンによる 3 フレーバーの full QCD シミュ

レーションでクォークスペクトル関数のカイラル摂動論との比較、低エネルギー定数の決定、 $\pi$  中間子形状因子の決定が主な成果である。これにより QCD 真空およびカイラルダイナミクスに関する現象を格子ゲージ理論から探究する手法が確立した。また真空偏極からの強い相互作用の結合定数の決定を行った。暗黒物質の直接探索に重要な核子のシグマ項の決定などの新たなテーマの開拓につながる研究も行った。

PACS-CS collaboration による 0(a)-改良された Wilson fermion による 3 フレーバーの full QCD においてサイズ 3fm 格子間隔 0.09fm のゲージ配位を用いて、物理的クォーク質量直上でのシミュレーションに成功した。バリオンも含む様々なハドロンの質量スペクトル、崩壊定数などの基礎的物理解定の決定を行った。共鳴状態を除く多くのハドロンに対し実験値の 5% の誤差範囲内で再現することに成功した。更に Reweighting 法とよばれる方法を用いてアップダウン質量の差、量子電磁気学の効果も取り入れた 1+1+1 フレーバーの QCD+QED のシミュレーションに成功した。これは金字塔ともいべき成果である。またヘリウム原子核や deuteron 原子核を量子色力学の第一原理から求める計算を行った。さらにシュレーディンガー汎関数法によるクォーク質量の非摂動的繰り込みの決定と強い相互作用の結合定数の高精度決定を行った。A02 班との連携につながる研究としてハドロンの相互作用の研究、特にロー中間子の崩壊の第一原理計算は特筆すべき研究である。

## 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 12 件)

- [1] T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa, "Helium Nuclei in Quenched Lattice QCD", Physical Review D81:111504, 2010. 査読あり
- [2] H. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada, "Determination of the chiral condensate from 2+1-flavor lattice QCD", Physical Review Letters 104:122002, 2010. 査読あり
- [3] S. Aoki, K. -I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie, "Physical Point Simulation in 2+1 Flavor Lattice QCD", Physical Review D81:074503, 2010. , 査読あり
- [4] J. Noaki, T. W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, H. Matsufuru, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada, "Non-perturbative renormalization of bilinear operators with dynamical overlap fermions", Physical Review D 81, 034502 (2010), 査読あり
- [5] S. Aoki, T. W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada, "Pion form factors from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry", Physical Review D 80, 034508 (2009), 査読あり
- [6] K. Takeda, T. Onogi et al. "Nucleon strange quark content from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry", Physical Review D83, 114506 (2011) 査読あり
- [7] M. Hayakawa, N. Yamada et al. "Running coupling constant of ten-flavor QCD with the Schrödinger functional method",

- Physical Review D83 074509 (2011), 査読あり
- [8] N. Ishizuka, Y. Kuramashi, et al "  $\rho$  meson decay in 2+1 flavor lattice QCD" , Physical Review D84 094595 (2011), 査読あり
- [9] T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa "Two nucleon bound states in quenched lattice QCD", Physical Review D84 054506 (2011) 査読あり
- [10] Y. Namekawa, Y. Kuramashi, et al "Charm quark system at the physical point of 2+1 flavor lattice QCD", Physical Review D84 074505 (2011), 査読あり
- [11] S. Aoki, T. - W. Chiu, G. Cossu, X. Feng, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. - H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. - I. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, K. Takeda, "Simulation of quantumchromodynamics on the lattice with exactly chiral lattice fermions", Progress of Theoretical and Experimental Physics, 01A106( 2012), 査読あり
- [12] H. Ohki, K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi "Nucleon strange quark content from  $N_f=2+1$  lattice QCD with exact chiral symmetry", Physical Review D87, 034509 (2013)
- [13] S. Aoki, N. Ishii, K. - I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, O. H. Nguyen, M. Okawa, K. Sasaki, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie, "Lattice quantumchromodynamics at the physical point and beyond", Progress of Theoretical and Experimental Physics, 01A102, ( 2012) 査読あり

[14] T. Yamazaki, K. I. Ishikawa, Y. Kuramashi, A. Ukawa “Helium nuclei, deuteron and dineutron in 2+1 flavor lattice QCD”, Physical Review D86, 074514 (2012)

[15] S. Aoki, K. - I. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, ” 1+1+1 flavor QCD + QED simulation at the physical point” Physical Review D86 034507 (2012), 査読あり

[16] S. Takeda, Y. Kuramashi, A. Ukawa, On the phase of quark determinant in lattice QCD with finite chemical potential “, Physical Review D85, 096008 (2012) 査読あり

[学会発表] (計 5 件)

[1] 山田憲和 “Conformal window in many flavor QCD”, 国際シンポジウム ” From Quarks to Supernovae”, 2010 年 11 月 28 日, 静岡 岡県賀茂郡東伊豆町熱川ハイツ

[2] 大野木 哲也 “Lattice Problems for Particle Physics Phenomenology”, Lattice QCD confronts experiments - Japanese-German Seminar 2010, 2010 年 11 月 4 日、三島商工会議所会館(静岡県)

[3] 蔵増嘉伸, “Progress in Lattice QCD”, 35<sup>th</sup> International Conference on High Energy Physics ICHEP 2010, 2010 年 7 月 27 日, Palais des Congrès de Paris, France

[4] N. Yamada, “Exploring for Technicolor from QCD “ New Horizons for Lattice Computations with Chiral Fermions (招待

講演) 2012 年 05 月 16 日~2012 年 05 月 16 日  
Brookhaven National Laboratory (米国)

[5] Y. Kuramashi, ” 1+1+1 Flavor QCD+QED Simulation at the Physical Point”, New Horizons for Lattice Computations with Chiral Fermions (招待講演) 2012 年 05 月 16 日~2012 年 05 月 16 日  
Brookhaven National Laboratory (米国)

[その他]  
ホームページ等

量子色力学にもとづく真空構造とクォーク力学 [http:// suchix.kek.jp/ bridge/ A01/](http://suchix.kek.jp/bridge/A01/)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大野木 哲也 (ONOGI TETSUYA )  
大阪大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：70211802

### (2) 研究分担者

蔵増 嘉伸 (KURAMASHI YOSHINOBU )  
筑波大学・数理物質科学研究科(系)・准教授  
研究者番号：30280506

山田 憲和 (YAMADA NORIKAZU)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教  
研究者番号：30280506

### (3) 連携研究者

石塚 成人 (ISHIZUKA NARUHITO)  
筑波大学・数理物質科学研究科(系)・准教授  
研究者番号：70251030

早川 雅司 (HAYAKAWA MASASHI)  
名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授  
研究者番号：20270556

橋本 省二 (HASHIMOTO SHOJI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授  
研究者番号：90280510

谷口 裕介 (TANIGUCHI YUSUKE)  
筑波大学・数理物質科学研究科(系)・講師  
研究者番号：60322012

石井 理修 (ISHII NORIYOSHI)  
東京大学・理学(系)研究科(研究院)・研究員  
研究者番号：40360490

金児 隆志 (KANEKO TAKASHII)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教  
研究者番号：20342602

石川 健一 (ISHIKAWA KENICHI)  
広島大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授  
研究者番号：60334041

野秋 淳一 (NOAKI JUNICHI)  
大学共同利用機関法人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  
研究者番号：90392068

山崎 剛 (YAMAZAKI TAKESHI)  
名古屋大学・基礎理論研究センター・特任助教  
研究者番号：00511437

深谷 英則 (FUKAYA HIDENORI)  
大阪大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：70435676

古井 貞隆 (FURUI SADTAKA)  
帝京大学・理工学部・助教授  
研究者番号：30219092

青木保道 (AOKI YASUMICHI)  
名古屋大学・基礎理論研究センター・准教授  
研究者番号：20292500