

## 格子 QCD を用いた現実的クォーク質量近傍でのハドロン物理量測定

### Calculation of physical quantities of hadrons near physical quark masses from lattice QCD

山崎 剛

筑波大学数理物質系

#### 1. 研究目的

筑波大学を中心とした格子 QCD 研究グループ (PACS Collaboration) では、アップ、ダウン、ストレンジクォークを動的に扱う計算において、現実的なクォーク質量かつ、一辺が 10fm を超える巨大体積を用いて、格子 QCD に含まれる主要な系統誤差を全て除いた計算から物理量を精密に求めることを目的とした PACS10 プロジェクトを実行している。2022 年度には、このプロジェクトで当初目標としていた異なる格子間隔 3 点のゲージ配位「PACS10 配位」の生成が終了した。本課題の目標は、この PACS10 配位を用いた精密物理量計算の実施である。

本プロジェクトでは PACS10 配位を用いて、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD からハドロンの内部構造を解明すること、および、さらなる格子 QCD 計算の高度化に向けた計算方法の開発を目的とした。

#### 2. 研究成果の内容

これまでに、パイ中間子、荷電 K 中間子の内部構造に関する電磁氣的形状因子を、2 種類の格子間隔の PACS10 配位、(格子サイズ, 格子間隔)=(128<sup>4</sup>, 0.085 fm), (160<sup>4</sup>, 0.065 fm) を用いて計算した。これらの微分係数で定義される荷電半径の結果は、実験値と良く一致していた。特に、K 中間子荷電半径については、実験から得られた値よりも遥かに小さな統計誤差で求まっている。今後、この結果の系統誤差を見積もり、それが統計誤差と同程度以下であれば、格子 QCD 計算から K 中間子荷電半径についての高精度な予言を与えられると期待できる。

この系統誤差の要因の一つに、荷電半径を形状因子から求める際のフィット関数依存性がある。この系統誤差の排除を目指し、本課題では形状因子をフィットすることなく荷電半径を直接求める計算方法の開発研究を行った。この直接計算法はこれまでも提案されていたが、素朴な計算を行うと荷電半径に大きな有限体積効果が含まれてしまうという問題があった。この問題を改善する方法が 2020 年に提案された。本課題でこの方法を調査した結果、2020 年の方法では特定の場合、特に荷電半径が大きく、体積が小さい場合に系統誤差が大きくなることが明らかになった。この系統誤差

を改善する改良計算法を提案し、2026 年度始めにそれらの研究成果をまとめた論文を投稿した。

また、2023 年度から行っている、直接計算法を PACS10 配位に適用した荷電半径計算を継続した。現在までに得られた  $\pi$  中間子と荷電 K 中間子荷電半径の中間結果を図 1 に示す。上段の図には、2 つの格子間隔の PACS10 配位を用いた  $\pi$  中間子荷電半径の中間結果と、その連続極限結果を示す。各格子間隔の 2 つの結果(赤・青印)は、異なるベクトルカレントの定義を用いた計算によるものである。この違いは連続極限で消えるものであり、実際のデータもこの予想と一致する振る舞いが見えている。連続極限では、我々の結果(黒丸印)は実験値(灰色帯)と良く一致している。

一方、下段の図に示す荷電 K 中間子荷電半径の中間結果も、 $\pi$  中間子結果と同様の結果である。特筆すべき点は、実験値よりも遙かによい精度で結果が得られていることである。今後は、この計算を最も細かい格子間隔での PACS10 配位を用いて継続すると同時に、系統誤差を見積もり、最終結果を求める計画である。

それ以外にも、アップ、ダウンクォークの違いを取り入れる計算で重要となる、非連結ダイアグラムの計算方法の研究を行った。

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本プロジェクトで実施した大規模格子 QCD シミュレーションには、膨大な大型並列計算機資源が不可欠であり、学際共同プログラム利用で配分されたリソースにより研究を実施することが可能になった。

### 4. 今後の展望

パイ中間子、K 中間子荷電半径については、形状因子のフィットを行わない計算結果の系統誤差の見積りと、形状因子をフィットする従来の計算方法で得られる結果と

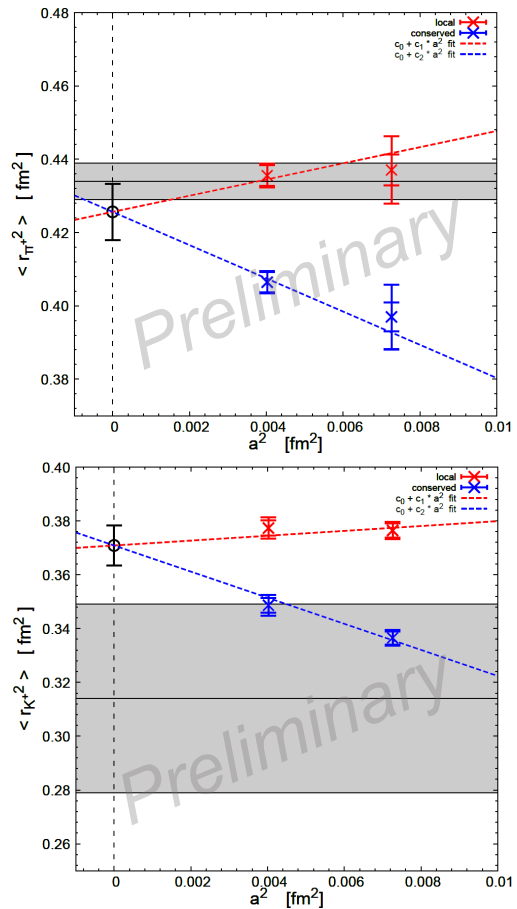


図 1 パイ中間子(上)と荷電 K 中間子(下)の荷電半径連続極限結果。赤印と青印の違いは計算方法の違い。横軸は格子間隔 2 乗。灰色帯は実験値。

の比較を行い、そこまでの成果を論文としてまとめる。それ以外にも、形状因子のフィットを行わない計算方法について、これまでの方法よりも系統誤差を抑制する研究についても実施する。

## 5. 成果発表

### (1) 学術論文

石川健一, 浮田尚哉, 藏増嘉伸, 山崎剛, “2+1 および 2+1+1 フレーバー格子 QCD におけるマスターフィールドシミュレーションと新物理探索”, 日本物理学会誌, 第 80 巻第 10 号, 2025 年 10 月, 579-583 ページ

### (2) 学会発表

- [1] 佐藤航平, “Meson charge radii with large-volume configurations”, 「富岳」成果創出加速プログラム 超大規模格子 QCD による新物理探索と次世代計算に向けた AI 技術開発 総括研究会, ビジョンセンター田町, 東京, 9/9-11, 2025.
- [2] 佐藤航平, “PACS10/L128・L160 配位を用いた中間子荷電半径の連続外挿”, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学, 広島, 9/16-19, 2025.
- [3] Kohei Sato, “Towards continuum limit of Meson Charge Radii using large volume configuration at physical point in  $N_f=2+1$  lattice QCD”, 16th European Research Conference on Electromagnetic Interactions with Nucleons and Nuclei, Coral Beach Resort, キプロス, 10/28-11/1, 2025.
- [4] [招待講演] Takeshi Yamazaki, “Hadron form factor from lattice QCD on large volumes at the physical quark mass”, The 2025 Asian Nuclear Physics Association, Academia Sinica, 台湾, 11/27-29, 2025.
- [5] [パネルディスカッション] 山崎剛, “「富岳」の最前線と未来予想図 – 研究者と語る 1 時間 –”, 第 5 回 シンポジウム「富岳百景」, オンライン, 12/25, 2025.
- [6] 佐藤航平, “Exploring Meson Charge Radii Near the Continuum Limit with Large-Volume, Physical-Point  $N_f=2+1$  Lattice QCD Configurations”, 「富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム 2025, 御茶ノ水ソラシティカンファレンスセンター, 東京, 1/13-15, 2026.
- [7] 佐藤航平, “大体積格子 QCD による連続極限近傍における中間子電荷半径の探求”, 第 5 回「富岳」成果創出加速プログラム研究交流会, 富士ソフトアキバプラザ, 東京, 3/3, 2026.
- [8] 佐藤航平, “大体積格子 QCD による連続極限近傍における中間子電荷半径の探求”, 計算物理春の学校 2026, 沖縄県市町村自治会館, 沖縄, 3/9-13, 2026.
- [9] 西岡理花, “格子 QCD におけるフェルミオン伝搬関数の新しい計算方法の研究

究”, 計算物理春の学校 2026, 沖縄県市町村自治会館, 沖縄, 3/9-13, 2026.

[10] 佐藤航平, “PACS10/L128・L160 配位と複数のカレントを用いた中間子荷電半径の連続外挿”, 日本物理学会春季大会, オンライン, 3/23-26, 2026.

(3) その他

西岡理花, 計算物理春の学校 2026 優秀ポスター賞受賞

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus	○	80000		
Miyabi-G	○	200000	+22800	
Miyabi-C	○	30000	-28500	
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				