

物理的クォーク質量における 2+1+1 フレーバー格子 QCD を用いた 標準模型を超えた物理の探索

Search for physics beyond the standard model from 2+1+1 Flavor Lattice QCD with the Physical Quark Masses

石川 健一

広島大学大学院先進理工系科学研究科

1. 研究目的

我々は QCD 物理量の精密計算を目指し、2016 年度から大体積かつ現実的クォーク質量での master-field シミュレーションと呼ばれる超大規模シミュレーションを行っている。master-field シミュレーションの特性を活用した計算として、陽子の形状因子やカビボ-小林-益川行列要素の精密計算がある。これらは標準模型を超えた物理を探索する上で重要な物理量である。長さ L の格子上での運動量の解像度は $\Delta p \propto 1/L$ となることから、master-field シミュレーションの超大体積 ($V = L^4 > (10\text{fm})^4$) 格子上では、形状因子の運動量移行 $q^2 = 0$ 近辺の解像度が高くなり、かつ、統計誤差も小さくなり、高精度での計算が可能となる。本研究の目的は 2+1 フレーバー master-field シミュレーションの結果を踏まえ、2+1+1 フレーバー master-field シミュレーションにより、標準模型を超えた物理を探索する上で必要な強い相互作用に関する物理量である K 中間子の崩壊形状因子や陽子崩壊行列要素を高精度で求めることである。

2. 研究成果の内容

2024 年度までに、2+1+1 フレーバー master-field シミュレーション用の格子 QCD ゲージ配位を格子間隔 (0.085 fm, 0.065 fm) で生成完了し、これらのゲージ配位を用いて、カビボ-小林-益川行列要素 $|V_{us}|$ の決定に関する物理量である K 中間子のセミレプトニック崩壊 ($K \rightarrow \pi \ell \nu$) 形状因子の計算を行った。2025 年度は最小の格子間隔 0.045 fm の計算を行い、その中間結果を様々な国際会議や国内研究会で報告した。図 1 に我々の $|V_{us}|$ の 2+1+1 フレーバー最新結果(赤丸印)とこれまでの結果(青丸印、紫丸印)、および他グループの結果を示す。我々の 2+1+1 フレーバーの最新結果は中間結果ではあるが、異なる格子間隔 3 点を使い連続極限を取っており、

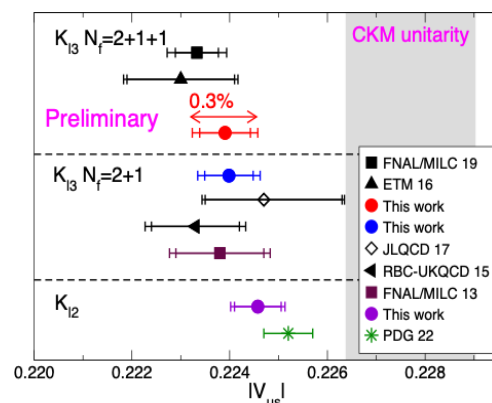


図 1 $|V_{us}|$ の結果。赤丸印と青丸印は我々の結果。その他の印は他グループの結果。紫丸印と緑米印は K 中間子レプトニック崩壊から決められた結果。内側の誤差は統計誤差、外側の誤差は統計誤差と系統誤差を合わせた総合誤差。灰色は標準模型からの予言値。

我々の 2+1 フレーバーの中間結果(青丸印)と同程度の結果となった。この不定性 0.3% 程度の結果は、他グループの結果と比較しても、世界最高レベルの高精度のものとなっている。この研究成果の一部を日本物理学会誌(学術論文[1])で紹介した。

さらに 2025 年度は、2+1 フレーバー master-field シミュレーションの最終結果をまとめるための研究を進め、基礎物理量に関する精密計算を実施した。その一部の成果として、ストレンジクォークとアップ・ダウンクォークの質量比の結果を図 2 に示す。

我々の結果(黒丸印)は全ての格子間隔で 1% を切る精度で求めることができ、それらを用いて得られた連続極限の値(青四角印)は、既存格子 QCD 計算の結果を取りまとめている FLAG2024 の値(赤米印)と比較しても遜色のないものとなっている。

また、2+1+1 フレーバーの 256^4 格子サイズでの基礎物理量計算のため GPU コードを開発した。このコードを用いて、Miyabi-G の 64 ノードでの計算を実施した。

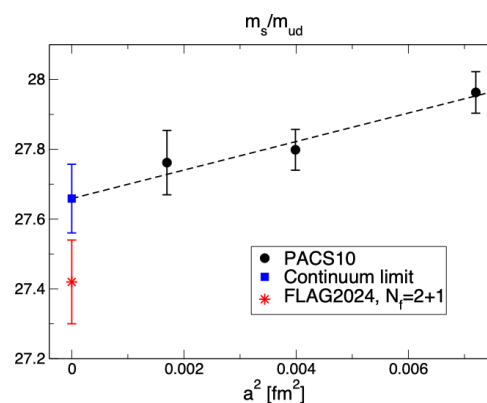


図 2 2+1 フレーバーシミュレーションから得られた、ストレンジクォークとアップ・ダウンクォークの質量比の結果。横軸は格子間隔二乗。赤印は FLAG2024 の値。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

Pegasus は 2+1+1 フレーバー 格子サイズ 168^4 のゲージ配位、Miyabi-G は格子サイズ 256^4 のゲージ配位を用いた様々なハドロン質量計算に用いた。各計算機システムにおいて、GPU を搭載した複数ノードを利用することにより速やかに計算を実行することができた。特に、世界最大の格子サイズ 256^4 ゲージ配位を用いた規模の計算を複数実行できる計算環境は国内に「富岳」以外には Miyabi-G のみである。

4. 今後の展望

これまでに生成したゲージ配位および、今後生成する 2+1+1 フレーバー master-field ゲージ配位を用いて、標準模型を超えた物理の探索に必要な形状因子などの計算を行う。これらの物理量の精密決定には連続極限が必要である。そのためのより小さい格子間隔の 2+1+1 フレーバー master-field シミュレーションをおこなう。master-field シミュレーションを用いて精密に求めた物理量を通じて標準模型を超えた物理の探索に貢献する。

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] 山崎剛, “物理点超大規模格子 QCD による標準理論を超える新物理探索”, 「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] 浮田尚哉, “超大規模格子 QCD による PACS10 および PACS10c 配位について”, 「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.
- [3] 山崎剛, “K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子計算”, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学, 広島, 9/16-19, 2025.
- [4] 浮田尚哉, “K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子計算”, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学, 広島, 9/16-19, 2025.
- [5] Takeshi Yamazaki, “Kaon semileptonic form factors at the physical quark masses on large volumes in 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.
- [6] [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.
- [7] [招待講演] 山崎剛, “「富岳」と AI で挑む素粒子の謎”, 第 5 回 シンポジウム「富岳百景」, オンライン, 12/25, 2025.
- [8] [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.
- [9] 山崎剛, “Kaon semileptonic decay form factors at the physical quark mass on large volumes in 2+1+1 flavor lattice QCD”, 「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.
- [10] 浮田尚哉, “大規模格子 QCD 計算による PACS10、PACS10c 配位生成”, 「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.
- [11] [招待講演] 石川健一, “格子ゲージ理論やラージ N ゲージ理論を通じた素粒子標準模型の探求”, 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.

(3) その他

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	○	72000		
Miyabi-G	○	180000	+21200	
Miyabi-C	○	27000	-26500	
※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				