大型 117「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」研究成果報告書

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 17 年 5 月 30 日

1　研究組織

scqcd グループは KEK、筑波大、京大基研、広島大を主体とするグループで、「大型シミュレーション研究」の開始当初から、格子 QCD の大規模シミュレーションを通じて、素粒子物理学の非摂動的研究を行ってきた。対外的には JLQCD collaboration の名前で研究発表を行っている。

- 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 助教授
- 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 助手
  - 山田 憲和 (やまだ のりかず)
    高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 助手
  - 筒井 直人 (つつい なおと)
    日本学術振興会 特別研究員 (高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所所属)
  - 青木 慎也 (あおき しんや)
    筑波大学 物理学系 教授
  - 宇川 彰 (うかわ あきら)
    筑波大学 計算科学研究センター長、教授
  - 金谷 和至 (かなや かずゆき)
    筑波大学 物理学系 教授

– 石塚 成人 (いしづか なるひと)
筑波大学 計算科学研究センター 助教授
– 吉江 友照 (よしえ ともてる)
筑波大学 計算科学研究センター 助教授
– 蔵増 嘉伸 (くらまし よしのぶ)
筑波大学 計算科学研究センター 講師
– 福来 正孝 (ふくぎた まさたか)
東京大学 宇宙線研究所 教授
– 大野木 哲也 (おおのぎ てつや)
京都大学 基礎物理学研究所 助教授
– 大川 正典 (おおかわ まさのり)
広島大学大学院 理学研究科 教授
– 石川 健一 (いしかわ けんいち)
広島大学大学院 理学研究科 講師

2 研究課題の内容

自然界の強い相互作用は量子色力学 (QCD) で記述されるが、低エネルギーでの QCD はその非摂動的な性質のために、解析的な手法では定量的な予言を与えるのが多くの場合に非常に困難である。格子上に定義された QCD(以下では格子 QCD) は、QCD の非摂動的性質を数値シミュレーションを使って定量的に計算する手法を与えており、計算機の急速な進歩にともなって物理量の現実的な計算が可能になりつつある。特に、動的クォークの効果を無視したクエンチ近似の範囲内では、大規模な数値計算が行われ種々のハドロンの質量や行列要素の値が高い精度で求められている。現在の格子 QCD における最大の課題は、クェンチ近似によらない (動的クォークの効果を取り入れた) 数値シミュレーションで種々の物理量を精度よく計算し、真の意味での第一原理計算による予言を与えることである。

特に素粒子物理学の現象論との関係で重要なのは、B 中間子と K 中間子の崩壊におけるハドロンの行列要素の計算である。KEK は B ファクトリー実験によって B の物理における世界の中心の一つになっているが、B の物理において CP の破れの測定と同様に重要なことは、小林益川行列要素を精密に決定して標準理論の検証を行うことである。現在のところ、いくつかの小林益川行列要素の決定精度はハドロン行列要素の不定性で制限されており、この点で格子 QCD シミュレーションの役割は本質的である。同様に、K 中間子崩壊の研究や陽子崩壊を通じた大統一模型の研究においてもハドロンの不定性が理論の予言可能性を制限しており、格子 QCD の進歩が素粒子物理学全体の中でも重要な位置をしめている。

本研究課題の目的は、これらの重要なハドロン行列要素をクェンチ近似によらない格子 QCD のシミュレーションで計算すること、またそのための基本的な手法を開発することである。

これまでに、$N_f = 2$ の大規模シミュレーションを実施し、基本となるハドロンスペクトル等の計算については結果を発表ずみである [1]。以下では、平成 16 年度に実施した研究について報告する。

1. B 中間子混合の研究
   B 中間子混合の大きさを決めるのに必要な崩壊定数 f_B と B パラメタ B_B の計算は、すでに完了し、結果を Physical Review Letters 誌に発表した [2]。

   さらに精度のよい計算のために Grinstein 比と呼ばれる二重比 $(f_{B_s}/f_B)/(f_{D_s}/f_D)$ の計算を実施し、予備的な結果が得られている [3]。比を取る前の崩壊定数は、統計誤差やカイラル外挿による誤差、さらには連続理論へのマッチングのための有限くりこみによる誤差のために 15% 程度の誤差が残っているが、二重比では安全に見積もっても誤差は 1% 以下にできることがわかった。現在、詳細な解析を進めているところである。

2. K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子の計算
   小林益川行列要素 $|V_{us}|$ は、K 中間子のセミレプトニック崩壊 $K \to \pi l \nu$ (K_{l3} 崩壊と呼ばれる) を通じて決定することができ、SU(3) カイラル対称性のおかげで理論的な不定性も 1%程度まで抑えられると考えられている。しかしながら、より注意深く見ると、SU(3) の破れを評価する理論計算はモデルに頼っており、不定性の大きさは過小評価されている可能性がある。この形状因子の精密計算を進めて、予備的な結果を国際ワークショップにおいて発表した [4]。ここでは、軽いハドロンの SU(3) 対称性を最大限に使う二重比によって格子計算の誤差を削減し、意味のある 1% 程度の精度の計算ができるようになった。さらに統計量を 2 倍に増やす計算を実行し、その解析が進行中である。

3. $N_F = 2{+}1$ シミュレーション
   CP-PACS と JLQCD collaboration の共同プロジェクトとして、ストレンジクォークの動的ループ効果も取り入れた $N_F = 2{+}1$ のシミュレーションを進めている。

   格子化による誤差を取り除くために、格子間隔 a として 0.14, 0.1 および 0.07 fm の３点のシミュレーションを実行中である [5]。計算資源としては、KEK の SR8000 と筑波大の CP-PACS に加えて、地球シミュレータの研究プロジェクトにも応募し、与えられた計算時間を最大限に活用している。これまでのところ、$a = 0.1$ fm でのシミュレーションは完了し、0.07 fm のシミュレーションを進めている。主なシミュレーションの主要部分は地球シミュレータと KEK SR8000 で実行し、得られたゲージ配位の下での物理量の計算では KEK の SR8000 を全面的に活用している。

3 平成 17 年度の研究発表

平成 17 年度に JLQCD グループが発表した論文と国際会議での発表は以下の通りである。

- クェンチ近似での陽子崩壊行列要素の連続極限 : Physical Review D 誌に掲載 [6]。

- $N_f = 3$ QCD での $O(a)$ 改良係数 $c_{\rm SW}$ の非摂動的決定：Physical Review D 誌に掲載 [7]。
- $O(a)$ 改良したウィルソンフェルミオンを用いた $N_F = 2{+}1$ シミュレーション：国際シンポジウム Lattice 2004 にて発表 [5]。
- $N_f = 3$ の Wilson 型フェルミオンシミュレーションにおけるバルク相転移の発見：Physical Review D 誌に投稿中 [8]。
- π および K 中間子の形状因子の計算：国際ワークショップ The 2nd International Lattice Field Theory Network Workshop "From Actions to Experiment" において発表 [4]。

参考文献

[1] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Light hadron spectroscopy with two flavors of O(a)-improved dynamical quarks," Phys. Rev. D **68**, 054502 (2003) [arXiv:hep-lat/0212039].

[2] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "$B^0 - \bar{B}^0$ mixing in unquenched lattice QCD," Phys. Rev. Lett. **91**, 212001 (2003) [arXiv:hep-ph/0307039].

[3] T. Onogi *et al.* [JLQCD Collaboration], "Heavy-light decay constants for B and D mesons in $N_f = 2$ unquenched QCD in Fermilab formalism," Nucl. Phys. Proc. Suppl. **129**, 373 (2004).

[4] S. Hashimoto for the JLQCD collaboration, "Pion and kaon form factors from unquenched lattice QCD," at the 2nd International Lattice Field Theory Network Workshop "From Actions to Experiment," e-Science Institute, University of Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom, 7-10 March 2005.

[5] T. Ishikawa *et al.* [CP-PACS Collaboration], "Light hadron spectrum in 2+1 flavor full QCD by CP-PACS and JLQCD collaborations," Presented at 22nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2004), Batavia, Illinois, 21-26 Jun 2004; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **140**, 225 (2005) [arXiv:hep-lat/0409124].

[6] N. Tsutsui *et al.* [CP-PACS and JLQCD Collaborations], "Lattice QCD calculation of the proton decay matrix element in the continuum limit," Phys. Rev. D **70**, 111501 (2004) [arXiv:hep-lat/0402026].

[7] N. Yamada *et al.* [JLQCD Collaboration], "Non-perturbative O(a)-improvement of Wilson quark action in three-flavor QCD with plaquette gauge action," Phys. Rev. D **71**, 054505 (2005) [arXiv:hep-lat/0406028].

[8] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Bulk first-order phase transition in three-flavor lattice QCD with O(a)-improved Wilson fermion action at zero temperature," arXiv:hep-lat/0409016.