

研究責任者名 Name	佐々木 勝一 Sasaki, Shoichi	所属機関 Affiliation	東北大学 Tohoku University
受理番号 Proposal No.	大型 13/14-03 大型 13/14-03-2	研究課題名 Program title	格子 QCD に基づくハイペロン β 崩壊の研究 Hyperon beta decay from lattice QCD

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)

バリオン八重項（ハイペロン）の質量スペクトルにおいて、フレーバーSU(3)の破れは精密に観測されているが、バリオン八重項の弱い相互作用によるセミレプトニック崩壊であるハイペロン β 崩壊においては、実験的にフレーバーSU(3)の破れを観測することは非常に難しい。本研究課題は、現実的な 2+1 フレーバー格子 QCD 数値計算を用いて、ハイペロン β 崩壊、特に $\Xi^0 \rightarrow \Sigma^+$ 崩壊と $\Sigma^- \rightarrow n$ 崩壊を用いて、フレーバーSU(3)の破れを 2-3% 以下の誤差の範囲内でその破れの有無を観測することを目的としている。当該年度では細かい格子間隔 0.09 fm での Domain Wall Fermion (DWF) による 2+1 フレーバー格子 QCD 計算によりベクトル結合 $f_1(0)$ の数値解析を行い、これまでに得られていた粗い格子間隔 0.12 fm での計算結果との良いスケールリングが確認できた。現在、連続極限も考慮した最終的な解析を進めている。

(英文)

The spectrum of the octet baryons (hyperons) exhibits the definite SU(3) breaking effect, which was precisely measured in experiments. On the other hand, signature of the SU(3) breaking scarcely shows up in various semileptonic decays among hyperons (hyperon beta decays) because of poor experimental precision. The level of precision required for determining the SU(3) breaking effect on the vector couplings $f_1(0)$ should be less than a few % accuracy. It could be easily accomplished by the first principles calculation, namely lattice QCD simulation. We explore the SU(3) breaking effect in hyperon beta decays by using 2+1 flavor dynamical lattice simulations. In this FY 2013/2014, we determine vector couplings $f_1(0)$ of $\Xi^0 \rightarrow \Sigma^+$ and $\Sigma^- \rightarrow n$ beta decays using the RBC/UKQCD 2+1-flavor dynamical domain-wall fermion ensembles at the finer lattice spacing ($a=0.09$ fm). Our results show a good scaling behavior together with previous results obtained at the coarser lattice spacing ($a=0.12$ fm). We now finalize our analysis to take the continuum limit of the vector couplings $f_1(0)$.

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	査読付きの 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)
	0 件	0 件	0 件	0 件

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		
なし		
査読付きの学術論文(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	
	タイトル title	
	雑誌名 name of journal	
	URL	
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	
	タイトル title	
	雑誌名等 name of journal	
	URL	
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	
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.)		
特になし		
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.)		
特になし		

平成25-26年度大型シミュレーション実施報告書

高エネルギー加速器研究機構長 殿

東北大学大学 理学研究科
准教授 佐々木 勝一

受理番号: 大型-13/14-03 および 13/14-03-2

研究課題名: 格子QCDに基づくハイペロン β 崩壊の研究

研究組織:

研究責任者

佐々木勝一(ささきしょういち)

東北大学大学院 理学研究科 准教授

平成25-26年度の実施報告の詳細:

平成22年の9月まで運用されていたIBM BlueGene/Lの利用による大型シミュレーション研究として、本研究課題はスタートしている。これまでに、研究責任者によって、RBC+UKQCD collaborationsにより公開されている2+1フレーバー Domain Wall Fermion (DWF) QCD ゲージ配位 (格子サイズ、 $24^3 \times 64 \times 16$ 。格子間隔は比較的粗い0.12 fmで物理的空間サイズは一辺2.7 fmの箱である) [?] を使ったハイペロン β 崩壊の格子QCD数値計算が、平成22年度までの大型シミュレーション研究プロジェクトとして完了し、その数値計算の解析成果は平成24年9月に文献 [?] として発表している。

文献 [?] の研究では達成できなかった、連続極限 (格子間隔を零の極限) とカイラル極限 (アップクォークとダウンクォーク質量を零にする極限) に関連する系統誤差を評価することによってより計算の精度を高めることを主題として、平成23-24年度よりIBM BlueGene/Qの利用によるKEK大型シミュレーション研究を再開した。本研究課題は、すでにRBC+UKQCD collaborationsによって無償公開されている、以前用いた格子間隔より細かい格子間隔0.09 fmにおける、2+1フレーバー DWF QCD ゲージ配位 (格子サイズ、 $32^3 \times 64 \times 16$) [?] を利用した格子QCD計算に着手することによって、前述の点に関する計算精度の向上を目指している。格子空間サイズは文献 [?] の研究と同様、空間方向に対して一辺2.7 fmの格子サイズを用いた数値計算となり、前研究 [?] と同様、有限体積効果が充分無視できる格子サイズでの新たな2+1フレーバー格子QCD数値計算による研究が引き続き行なえる。すでに、筑波大学計算科学研究センター学際共同利用プログラム (T2K-Tsukuba) や理化学研究所RICC (RIKEN Integrated Cluster of Clusters) の一般利用などを通じてその研究の一部は進んでいるが、本研究の完遂には演算性能の高い、IBM BlueGene/Qの利用が不可欠となっている。

コードの開発・運用状況

前年度までに、先行研究 [?] において作成した BlueGene/L 用の計算プログラムコード¹の BlueGene/Q 上への移植が完了し、BlueGene/Q 上で走らせるための最適化も行なった。プログラムの並列化において、ノード間通信に関しては USQCD [?] が公開している QMP ライブラリ (Lattice QCD Message Passing) [?] を使い、同一のノード内の並列化には OpenMP を用いたハイブリッド並列化を併用した。また BlueGene/Q の性能を最大限に活かすためエディンバラ大学の Boyle 氏による BAGEL アセンブラ・ライブラリシステム [?] の実装を行なった。計算プログラムコードの BlueGene/Q 上での実行性能が著しく落ちている部分を特定し、別のプラットフォーム (筑波大学 T2K および PACS-IX や理研 RICC など) 上でその部分を計算することによりプログラムの実行性能が、推奨されている理論性能の約 5%以上 (10.00 GFLOPS/ノード) という基準を充分クリアすることが可能となった。表 1 では実際、最適化した計算プログラムコードを使って、比較的規模の小さい格子サイズ $16^3 \times 32 \times 16$ (格子間隔は $a = 0.12$ fm) の DWF の 2+1 フレーバー QCD ゲージ配位 [?] を利用してテスト計算を行った結果をまとめたものである。BAGEL の実装が本質的に計算プログラムコードの最適化作業のうち最も重要であることを示したものである。

表 1: BAGEL 実装の有無の違いによる計算時間 (実測) と実効性能

格子サイズ	クォークの質量	ノード	BAGEL	ノード間通信	1 ジョブの時間	GFLOPS/ノード
$16^3 \times 32 \times 16$	$m_{ud} = 0.03$	32	無	MPI	170 mins	2.38
$16^3 \times 32 \times 16$	$m_{ud} = 0.03$	32	有	MPI	16 mins	14.59

研究の背景

格子 QCD 数値解析によるハイペロン β 崩壊の研究は歴史が浅く、現時点で現実的なフレーバー SU(3) の破れを厳密に取り入れた 2+1 フレーバーの動的格子 QCD 計算に関しては、他の競合する格子 QCD グループが予備的な研究結果を国際会議などで口頭公表している [?, ?] 段階であるのに対し、研究責任者は格子間隔 0.12 fm (その逆数が 1.73 GeV 程度) のゲージ配位上での $\Sigma \rightarrow n$ と $\Xi \rightarrow \Sigma$ の 2 つのチャンネルに対する数値解析をすでに完了させ、世界に先駆けて 2+1 フレーバーの動的格子 QCD 計算による最新結果を査読付きの学術論文 [?] として発表している。

2+1 フレーバーの動的格子 QCD 計算の結果 [?] は、ハイペロン β 崩壊のベクトル結合²がフレーバー SU(3) 対称性を厳密に課した場合の値に比べて、つまりその比 $\tilde{f}_1(0) = f_1(0)/f_1(0)_{\text{SU}(3)}$ を考えた場合、1 より約 3% 程度減少することが確認できた。(図 1 左を参照) この結果は昔のクォーク模型を使った研究とは矛盾がないものの、模型の依存性のより少ない重いバリオンを含んだ拡張されたカイラル摂動論 [?] や Large N_c を用いた解析 [?] で予言されている $\tilde{f}_1(0) = f_1(0)/f_1(0)_{\text{SU}(3)} > 1$ とは、逆の傾向を示している。

論文 [?] の格子 QCD 計算の $\tilde{f}_1(0)_{\text{lattice}}$ の値に、CKM ユニタリティを仮定した場合に得られる $(V_{us})^{\text{unitarity}}$ を組み合わせた³、 $|V_{us}\tilde{f}_1(0)|^{\text{theory}}$ とハイペロン β 崩壊の実験で測られる、 $|V_{us}\tilde{f}_1(0)|^{\text{exp}}$ とを直接比較することが可能となる。 $\Xi \rightarrow \Sigma$ のチャンネルでは実験値の $|V_{us}\tilde{f}_1(0)|^{\text{exp}}$ が大きなエラーであるのも理由の一つではあるが、理論値と実験値はエラーの範囲内で等しくなっている。一方、 $\Sigma \rightarrow n$ では 2σ 程度ではあるが、両者が一致しないことが明らかとなった。(表 1 参照)

こうした状況を踏まえて、過去の模型による研究との整合性を精査することも含め、さらなる格子 QCD 計算による研究として、今までの研究において未だ評価できていない「格子間隔依存性による系統誤差」の評価が急務となっている。

¹計算プログラムコードはコロンビア大学、ブルックヘブン国立研究所の格子 QCD プロジェクトチームが公開している CPS++ [?] をベースとして作成した。

²これが弱崩壊の一つである semi-leptonic 崩壊に際しての強い相互作用による量子補正に相当する。この量子補正はフレーバー SU(3) 対称性が厳密な場合には、対称性による量子補正は働かず、ベクトル結合は単に SU(3) 対称性に伴うクレブシュ・ゴールドン係数となる。

³すでに K 中間子の semi-leptonic 崩壊においては格子 QCD の多大な貢献もあって V_{us} の精度があがり、CKM 行列の一行目に対するユニタリティ条件: $|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{uc}|^2 = 1$ が 0.1% レベルまで成立されていることが現在確認されている [?]

表 2: 4つの独立なハイペロン β 崩壊に対する実験値と半理論値の比較

$ V_{us}\tilde{f}_1(0) $	Experiment	Unitarity + Lattice
$\Sigma \rightarrow n$	0.2282(49)	0.2186(8) $_{V_{us}(24)}f_1$
$\Lambda \rightarrow p$	0.2221(33)	n/a
$\Xi \rightarrow \Lambda$	0.2367(97)	n/a
$\Xi \rightarrow \Sigma$	0.209(27)	0.2194(8) $_{V_{us}(15)}f_1$

当該年度研究の成果

当該年度に割り当てられたシステム B の CPU 時間を使って、格子間隔 0.09 fm (細かい) 上の数値計算 (詳細は表 3 を参照) の完了と同時に、これまで格子間隔 0.12 fm (粗い) 上での計算結果に対して 2 倍の統計量を増やすことに成功した。

図 1: $\Sigma \rightarrow n$ に対する、ハイペロン β 崩壊のベクトル結合。

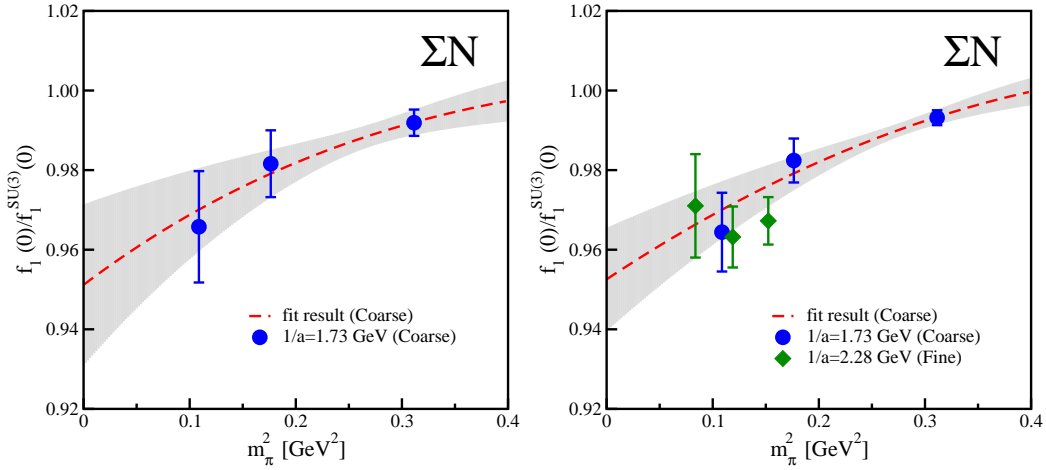


図 1 左は文献 [?] のみのデータの図である。図 1 右は、それに平成 25-26 年度中 BlueGene/Q の利用により 2 倍程度統計を追加した計算結果 (青い●) を図示している。点線のカーブはその格子間隔 0.12 fm (粗い) で計算された新しい結果に対して改めてカイル外挿をしたものであり、統計が増えたことにより、左図に比べ、より物理点でのベクトル結合の値の精度が僅かではあるが上がったことがわかる。

また、図 1 右においては、同年度中に得た、格子間隔 0.09 fm (細かい) 上での新しい計算結果 (緑の◆) も含めてあり、これまでの粗い格子間隔の計算結果 (青い●) と合わせて良いスケールリングが確認できる。このことは、格子間隔依存性が充分小さいことを示している。現在、連続極限も考慮した最終的な解析を進めているところではあるが、文献 [?] で指摘された、 $\Sigma \rightarrow n$ における理論値と実験値の 2σ 程度の不一致が有限格子間隔に伴う系統誤差によるものである可能性は低いものと考えられる。

現状では推論の域を出ていないが、理論値と実験値の不一致の由来を次のように考えることができる。実験値 $|V_{us}\tilde{f}_1(0)|^{\text{exp}}$ を評価する際に、これまでハイペロン β 崩壊における SU(3) 対称性の破れの効果 (ハイペロン間の質量差からおおよそ 10%程度と見積もれる) に伴う、第二種形状因子 g_2 の存在を無視した解析 (現状の実験ではゼロと統計誤差の範囲で無矛盾とされている) が行なわれている。これはハイペロンがスピン 1/2 を持つため、ハイペロン β 崩壊が同じ semi-leptonic 崩壊でも、K 中間子の semi-leptonic 崩壊場合と異なり、スピン偏極に伴う擬ベクトルチャンネルの形状因子の情報が必要となるが、このスピン偏極に伴う非対称度は擬ベクトル形状因子 g_1 を測定することで実験的に決める際に、SU(3) 対称性を仮定し、第二種形状因子 g_2 をゼロとして解析しているためである [?]

すでに、ゼロでない第二種形状因子 g_2 の存在はクエンチ近似の格子 QCD 計算 [?, ?] において報告されてい

る。そこで、これまでとは逆に CKM 行列のユニタリティを理論的に仮定し、第一原理計算によるベクトル結合 $f_1(0)$ の値を合わせることによって、 $|V_{us}\tilde{f}_1(0)|$ に理論的制限を与え、ハイペロン β 崩壊の崩壊確率 Γ から第二種形状因子 g_2 の大きさを見積もると $g_2(0) \approx 0.22$ と算出できる。この値がクエンチ近似の格子 QCD 計算 [?, ?] で観測されている第二種形状因子 g_2 の値と符号を含めて矛盾ないことが確認できた。

当該年度は順調に研究計画が進み、 $\Sigma \rightarrow n$ と $\Xi \rightarrow \Sigma$ の 2 つのハイペロン β 崩壊に対して、これまでのベクトルチャンネルに加え、擬ベクトルチャンネルについてもその計算の大半を終えることができた。そこで、上記の推論が正しいことを確かめるために、現在、それら擬ベクトルチャンネルの計算データから、2+1 フレーバーの動的格子 QCD 計算として第二種形状因子 g_2 を評価するための解析を行なっている。次年度以降は、残された $\Lambda \rightarrow p$ と $\Xi \rightarrow \Lambda$ の 2 つのチャンネルを含めた包括的な研究の推進を計画している。

参考文献

- [1] C. Allton *et al.*, Phys. Rev. D **76** (2007) 014504.
- [2] S. Sasaki, Phys. Rev. D **86**, 114502 (2012).
- [3] Y. Aoki *et al.*, Phys. Rev. D **83** (2011) 074508.
- [4] <http://qcdoc.phys.columbia.edu/cps.html>
- [5] <http://usqcd.jlab.org/usqcd-software/>
- [6] <http://usqcd.jlab.org/usqcd-docs/qmp/>
- [7] <http://www2.ph.ed.ac.uk/~paboyle/bagel/>
- [8] <https://qcdlattices.bnl.gov/>
- [9] H. W. Lin, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **187**, 200 (2009).
- [10] M. Gockeler *et al.* [QCDSF and UKQCD Collaborations], PoS **LATTICE2010**, 165 (2010).
- [11] L. S. Geng, J. Martin Camalich and M. J. Vicente Vacas, Phys. Rev. D **79**, 094022 (2009).
- [12] R. Flores-Mendieta, E. E. Jenkins and A. V. Manohar, Phys. Rev. D **58**, 094028 (1998).
- [13] E. Blucher and W. J. Marciano, “ V_{ud} , V_{us} , Cabibbo Angle, and CKM Unitarity,” in J. Beringer *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D **86**, 010001 (2012).
- [14] N. Cabibbo, E. C. Swallow and R. Winston, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **53**, 39 (2003).
- [15] S. Sasaki and T. Yamazaki, PoS LAT **2006**, 092 (2006), Phys. Rev. **D79** (2009) 074508.
- [16] D. Guadagnoli, V. Lubicz, M. Papinutto and S. Simula, Nucl.Phys. **B761** (2007) 63-91.

表 3: H25-26 年度に行なわれた格子 QCD 計算のまとめ

格子間隔 a	格子サイズ	クォーク質量	π 中間子質量	統計数 \times ソース数	備考
0.12 fm(粗い)	$24^3 \times 64 \times 16$	$m_{ud} = 0.005$	330 MeV	$240 \times 2^\dagger$	追加
		$m_{ud} = 0.01$	420 MeV	$120 \times 2^\dagger$	追加
0.09 fm(細かい)	$32^3 \times 64 \times 16$	$m_{ud} = 0.004$	290 MeV	120×4	新規
		$m_{ud} = 0.006$	345 MeV	100×4	新規
		$m_{ud} = 0.008$	390 MeV	100×4	新規

† 4 つの異なるソース位置 ($t_{\text{src}} = 0, 16, 32, 48$) のうち、すでに $t_{\text{src}} = 0, 32$ については文献 [?] で完了している。