

## 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24年5月24日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740138

研究課題名（和文） 格子量子色力学を用いたキャビボ・小林・益川行列要素の決定

研究課題名（英文） Determination of Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix elements by lattice quantum chromodynamics

研究代表者

滑川 裕介 (Namekawa Yusuke)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：00377946

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、格子量子色力学によるキャビボ・小林・益川行列要素の決定である。キャビボ・小林・益川行列要素は、素粒子標準理論の基本パラメータであり、行列要素の定量的決定は素粒子論的に意義深い。研究目的達成のため、DおよびD<sub>s</sub>中間子の純レプトン崩壊を用いた行列要素  $|V_{cd}|$ 、 $|V_{cs}|$  の高精度決定を試みた。最終的に  $|V_{cd}| = 0.205(6)(10)$ 、 $|V_{cs}| = 1.00(1)(4)$  を得た。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this work is determination of Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix elements by lattice quantum chromodynamics. The Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix elements are fundamental parameters of the standard theory of the elementary particle. It is important to determine the matrix elements quantitatively. We determined the matrix elements,  $|V_{cd}|$  and  $|V_{cs}|$ , using the pure leptonic decays of the D and D<sub>s</sub> mesons. Our final results are  $|V_{cd}| = 0.205(6)(10)$ ,  $|V_{cs}| = 1.00(1)(4)$ .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,200,000	360,000	1,560,000

研究分野：数物系科学

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：素粒子論

## 1. 研究開始当初の背景

キャビボ・小林・益川（CKM）行列要素は、素粒子標準理論の基本パラメータであり、その値の決定は素粒子論的に意義深い。また、標準理論を超える新たな理論に対しても入力パラメータとして必要とされるため、CKM行列要素値を正確に求めねばならない。しかし、全てのCKM行列要素を実験のみから精度良く決定する事はできない。行

列要素  $|V_{ud}|$  は核子の超許容ベータ崩壊実験により非常に高精度で得られる。一方、 $|V_{cd}|$  等は量子色力学（QCD）の非摂動効果のため、精度が悪い。特に、 $|V_{cd}|$ 、 $|V_{cs}|$  の誤差は5-10%と大きい。精度改善が望まれる。

$|V_{cd}|$ 、 $|V_{cs}|$  はD及びD<sub>s</sub>中間子の純レプトン崩壊から決定できる。ただし、

純レプトン崩壊の崩壊比からCKM行列要素を引き出すためには、D及びDs中間子崩壊定数が必要になる。何らかの理論計算を用いて崩壊定数を求めねばならない。

## 2. 研究の目的

本研究では、格子QCDに基づく数値シミュレーションにより、CKM行列要素を求める。まず、格子QCD計算によりD及びDs中間子崩壊定数を非摂動的に決定する。これら崩壊定数をD及びDs中間子の純レプトン崩壊幅と組み合わせ、 $|V_{cd}|$ 、 $|V_{cs}|$ を引き出す。

シミュレーションの際、相対論的重クォークの使用・繰り込み因子の非摂動的決定・物理点直上のシミュレーション実行等の工夫を凝らし、理論的不定性を最大限削減する。本計算による $|V_{cd}|$ 、 $|V_{cs}|$ 値の高精度決定を目指す。

## 3. 研究の方法

研究目的達成のため、D及びDs中間子崩壊定数を非摂動的に求めた。中間子崩壊定数は、擬スカラー状態に関する軸性カレント行列要素で定義される。格子QCDシミュレーションにより、上記行列要素を非摂動的に決定し、中間子崩壊定数を導いた。

シミュレーションは、以下のセットアップで実行した。シミュレーションに必要なゲージ配位は、私を含むPACS-CSグループにより生成済みである。本研究では、このゲージ配位を使用した。このゲージ配位にはほぼ現実的な動的クォーク効果が含まれるため、非常に現実に近いシミュレーションができた。また、格子サイズは3 fmである。重クォークを含むハドロンに対する有限体積効果は十分抑制される。

本研究では、高精度計算結果到達を目指し、種々の手法を適用した。まず、チャームクォークに対して相対論的重クォーク作用を用いて、重クォークに起因する離散化系統誤差を削減した。これまで、重いクォークを含む物理量を格子QCDで計算する際、非相対論的近似が多用されてきた。ただし、非相対論的近似に起因する不定性が大きく、高精度計算の妨げとなっていた。本研究には、この不定性が存在せず、高精度計算が可能になった。なお、相対論的重クォーク作用は、作用中のパラメータを決定する必要がある。このため、別途計算を行い、作用中のパラメータを非摂動的に求めた。

次に、D及びDs中間子崩壊定数の繰り込み因子を非摂動的に決定した。通常、繰り込

み因子は1ループ摂動論値がよく用いられる。しかし、繰り込み因子から生じる有限格子間隔系統誤差が大きく、問題となる。本研究では、非摂動論繰り込みにより、系統誤差削減に成功した。

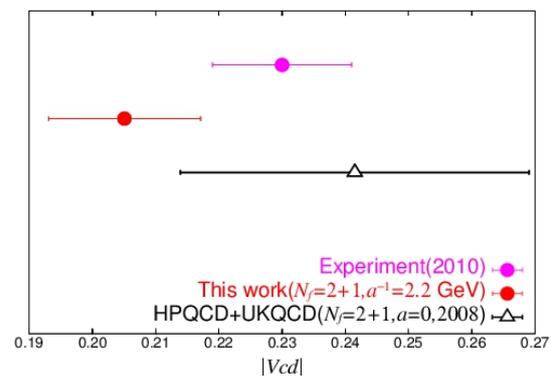
更に、本計算を物理点直上で行う事により、クォーク質量外挿に伴う系統誤差を消滅させた。これまでの格子計算において、クォーク質量外挿に伴う系統誤差は最大の理論的不定性であった。本研究では、多大な計算時間が必要とされたが、シミュレーションアルゴリズムの改善及びスーパーコンピュータ活用により、物理点直上計算を可能にした。クォーク質量外挿に伴う系統誤差を完全に消去できた。

こうして得られた高精度D及びDs中間子崩壊定数を純レプトン崩壊幅と組み合わせ、 $|V_{cd}|$ 、 $|V_{cs}|$ を決定した。

## 4. 研究成果

本研究により、 $|V_{cd}| = 0.205(6)(10)$ を得た。最初の括弧内数値が統計誤差、二番目の数値が系統誤差である。

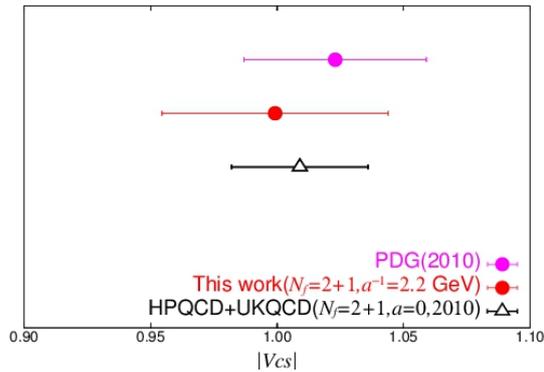
下図は、本研究で得られた結果(赤)と実験値(マゼンタ)及び他グループによる格子QCD計算結果(黒)との比較である。本計算結果は、他の結果と $2\sigma$ の範囲で無矛盾である。ただし、理論計算の精度は大きく改善された。本計算は、実験誤差とほぼ等しい精度を達成した。



同様に、 $|V_{cs}|$ に対して、 $|V_{cs}| = 1.00(1)(4)$ を得た。これまで $|V_{cs}|$ に関しては、理論的不定性が最大誤差であったが、本研究では大幅に改善できた。本研究で用いた大規模シミュレーションにより、統計誤差は系統誤差を下回るに至った。より高精度のCKM行列要素値を得るためには、系統誤差削減が必須である。系統誤差は、大

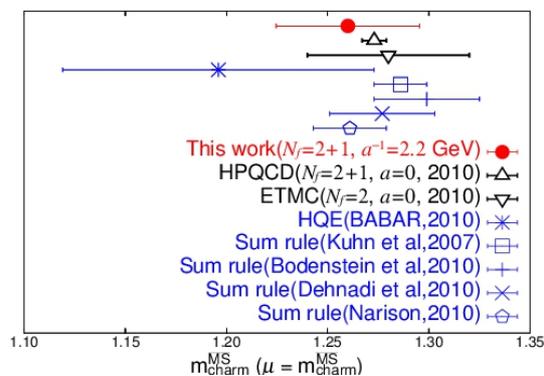
部分が純レプトン崩壊幅の実験誤差に占められている。純レプトン崩壊幅実験値の精度向上が待たれる。

下図は、本研究で得られた結果（赤）と他計算平均値（マゼンタ）及び他グループによる格子 QCD 計算結果（黒）である。本計算結果と一致している。なお、実験値は非常に誤差が大きいため、図中には表示していない。



また、C KM行列要素と同様な素粒子標準理論の基本パラメーターとして、クォーク質量が挙げられる。クォークはハドロン内部に閉じ込められているため、実験的にクォーク質量を測定できない。理論計算が必要不可欠である。本研究では、C KM行列要素計算時に、チャームクォーク質量も求めた。クォーク質量は軸性 Ward-Takahashi 恒等式から決定した。

下図は、本計算結果（赤）と他グループによる格子 QCD 計算結果（黒）及び非格子計算による結果（青）である。全ての結果は誤差の範囲で一致している。ただし、本計算結果は有限格子間隔に起因する系統誤差が大きい。この系統誤差削減は、今後の課題である。



## 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 5 件)

(1) PACS-CS Collaboration: S. Aoki, K. -I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie, “Rho meson decay in 2+1 flavor lattice QCD”, Phys. Rev. 査読有, D84 094505 (2011), DOI: 10.1103/PhysRevD.84.094505

(2) PACS-CS Collaboration: Y. Namekawa, S. Aoki, K. -I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, “Charm quark system at the physical point of 2+1 flavor lattice QCD”, Phys. Rev. 査読有, D84 074505 (2011), DOI: 10.1103/PhysRevD.84.074505

(3) Y. Namekawa, “Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD”, PoS 査読有, LAT2011 132 (2011), [http://pos.sissa.it/archive/conferences/139/132/Lattice%202011\\_132.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/139/132/Lattice%202011_132.pdf)

(4) PACS-CS Collaboration: S. Aoki, K. -I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, K. Kanaya, Y. Kuramashi, K. Murano, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, “Non-perturbative renormalization of quark mass in Nf=2+1 QCD with the Schroedinger functional scheme”, JHEP 査読有, 1008 101 (2010), DOI: 10.1007/JHEP08(2010)101

(5) PACS-CS Collaboration: S. Aoki, K. -I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie, “Calculation of rho meson decay width from the PACS-CS configurations”, PoS, 査読有, LAT2010 108 (2010), [http://pos.sissa.it/archive/conferences/105/108/Lattice%202010\\_108.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/105/108/Lattice%202010_108.pdf)

[学会発表] (計 10 件)

(1) Y. Namekawa, “Charm quark physics from lattice QCD”, KEK flavor factory workshop (KEK, Japan, Mar. 8-10, 2012)

(2) Y.Namekawa, “Charm quark physics from lattice QCD”, Elucidation of new hadrons with a variety of flavors (Osaka University, Japan, Feb.20-21, 2012)

(3) Y.Namekawa, “Charm quark physics from lattice QCD”, Expanding the horizon of theoretical particle physics through computational methods (KEK, Japan, Dec.19-21, 2011)

(4) 滑川裕介, “Charm quark physics from lattice QCD”, 素核宇宙融合による計算基礎物理学の進展 (合歓の郷、三重、2011年12月3-5日)

(5) Y.Namekawa, “Charm quark physics from lattice QCD”, Hadron structure and interactions (RCNP, Japan, Nov.25-26, 2011)

(6) 滑川裕介, “物理点における2+1フレーバー格子QCDシミュレーションによるチャームクォーク系の研究” 日本物理学会 (弘前大学、青森、2011年9月16-19日)

(7) Y.Namekawa, “Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD”, The XXIX International symposium on Lattice Field Theory (The Village at Squaw Valley, USA, Jul.11-16, 2011)

(8) 滑川裕介, “Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD”, 新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会 (理化学研究所・計算科学研究機構、神戸、2011年6月23-24日)

(9) Y.Namekawa, “Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD”, New hadron workshop 2010 (RIKEN Wako campus, Japan, Feb.28-Mar.1, 2011)

(10) Y.Namekawa, “Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD”, International conference “Lattice QCD confronts experiments” (Mishima, Japan, Nov.4-6, 2010)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

滑川 裕介 (Namekawa Yusuke)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：00377946