

令和 5 年 10 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03605

研究課題名（和文）格子QCDで探る核子の構造

研究課題名（英文）Nucleon structure from lattice QCD

研究代表者

佐々木 勝一（Sasaki, Shoichi）

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：60332590

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、3種類の動的クォークの自由度（アップ、ダウン、ストレンジ）を物理的クォーク質量上で厳密に取り扱った、物理点における格子QCD計算により、核子構造の情報を持つ核子形状因子に対して統計精度数%レベルの第一原理計算を実施した。核子形状因子に対する精密な理論評価は、核子の内部構造の総合理解の入り口であり、実験分野で議論されている様々な未解決問題の全容解明の手がかりを与えることが期待されている。本研究では、特に、物理点のみの格子QCD計算により、核子構造の情報の一つである、核子軸性電荷の実験値を量子色力学が2%以下の精度で再現できることを世界に先駆けて示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、格子QCD計算は、強い相互作用の第一原理計算により、陽子や中性子（2つ合わせて核子）の質量を誤差1%レベルで実験値を再現できている精密理論計算として知られているが、核子の構造に関して、同様の精密計算を達成できると、実験分野で議論されている「陽子半径パズル」に代表される核子構造におけるいくつかの未解決問題に対して、その全容解明に貢献できる。本研究では、核子構造の情報の一つである、核子軸性電荷に対して誤差2%以下の精度の精密理論計算を達成させ、今後、陽子半径を含む核子構造に関係する基本的な物理量に対して、誤差数%レベルの精密理論計算が実現可能なことを示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, realistic lattice QCD calculations, where three dynamical quark degrees of freedom (up, down, and strange) are treated rigorously with physical quark masses, have been performed for nucleon form factors, which should include information of the nucleon structure, with the statistical errors at a few % level. Accurate theoretical evaluation of the nucleon form factors is a gateway to a comprehensive understanding of the internal structure of nucleons and is expected to provide clues to the full clarification of various unsolved problems discussed in the experimental field. Using lattice QCD simulations only at the physical point, we have succeeded in reproducing the experimental values of the nucleon axial charge, which is one of the most important pieces of information on the nucleon structure, with an error of less than 2%, ahead of other studies in the world.

研究分野：ハドロン理論

キーワード：ハドロン 量子色力学 格子ゲージ理論 核子構造

1. 研究開始当初の背景

核子の内部構造に関する研究は、1960年のSLACにおける形状因子の測定に始まり、強い力の第一原理、「クォーク・グルーオン力学」として量子色力学(QCD)の発見に至るマイルストーンであるが、未だ核子スピンの起源の全容解明には至っていない。さらに、最近では、陽子の大きさを示す陽子電荷半径が、電子-陽子弾性散乱の実験で見積もられたものと、 μ 粒子が電子の代わりに水素原子核に束縛したミュオニック水素原子の軌道半径を利用して評価したものと間に4%ほどの有意な差異があるなど、前述のスピン問題を含めて、物資の構成要素の一つである核子の構造に関して未だ人智が及んでいない状況になる。核子の内部構造を反映しているのは、その構成要素であるクォークとグルーオンの力学「QCD」なのは当然である故、格子QCD計算によって、それらの問題が解明されるものと期待されている。

2. 研究の目的

本研究課題では、核子の内部構造に関する諸問題に焦点を合わせ、強い相互作用の第一原理計算である格QCD数値計算に基づく研究を行う。既に生成されている、物理点の2+1 フレーバー格子QCDゲージ配位(PACS10配位)を利用して、核子の大きさを含む核子の内部構造に関する物理量の精密計算を行う。

3. 研究の方法

本研究では3種類の動的クォークの自由度(アップ、ダウン、ストレンジネス)を物理的クォーク質量上で厳密に取り扱った、物理点における格子を用いた第一原理計算によって、核子の構造の情報をもつ核子形状因子に対して、誤差数%レベルの精密計算を実施する。そこで、PACS Collaborationにより「物理点(中間子が135 MeVを再現)」かつ「超巨大体積(物理空間が1辺10 fm以上の4次元超立法体)」で生成されたゲージ配位(PACS10配位)を利用し、これまで2パターンの格子間隔(0.085 fmと0.063 fm)での格子QCD計算を行ってきた。

4. 研究成果

(1) HPCI 戦略プログラム分野5の下でスパコン京により物理点近傍(中間子質量が146 MeV)でかつ核子間相互作用が計算可能なほど大きな空間サイズ(一辺8.1 fmの4次元超立法体)で生成された格子点 96^4 のゲージ配位(HPCI配位)を用いて、核子形状因子に対する格子QCD計算を行い、核子構造に関係する基本的な5つの物理量(電荷半径 r_E 、磁気モーメント μ 、磁気半径 r_M 、軸性電荷 g_A 、軸性半径 r_A)に対して実験値を統計精度10-25%のレベルで再現することに成功した。

(2) HPCI配位を使って得られた結果の計算精度をさらに上げるために、PACS Collaborationの下、スパコンOakforest-PACSを用いて生成されたPACS10ゲージ配位を利用した格子QCD計算を行った。PACS10配位は、HPCI配位と同じ格子間隔(0.085 fm)で、さらなるパラメータの微調整により物理点直上(中間子質量が135 MeV)で、かつ空間サイズも25%増大(一辺10.8 fmの立方体)した格子点 128^4 上で生成されている。格子空間では取り得る運動量が空間サイズの逆数で量子化されるため、PACS10配位は、HPCI配位に比べてさらに空間サイズが大きくなったことで、より重点的に低運動量領域の核子形状因子の情報にアクセスできる利点がある。特に、電荷半径などの平均二乗半径は、核子形状因子のゼロ運動量における運動量変化から求まるため、PACS10配位の計算では核子の大きさに対してより高精度の計算が可能となった。そのため、以下の図1で示すように、核子構造に関係する基本的な5つの物理量に対して、統計精度2-7%の高精度に改善した結果を得ることができた。

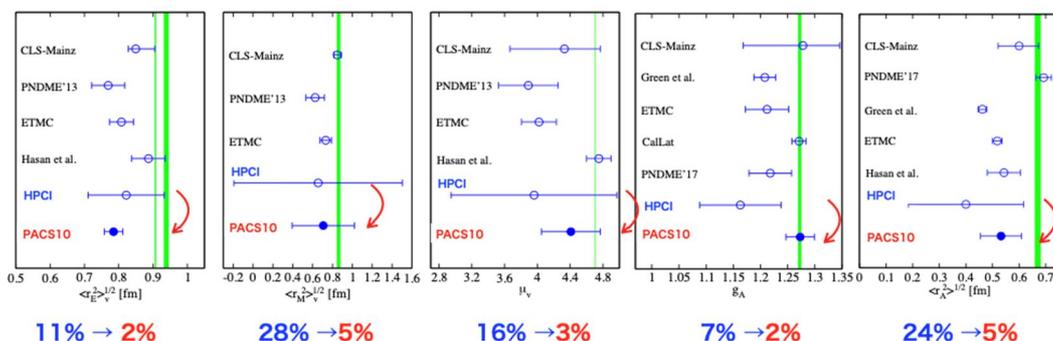


図1

図は左から、電荷半径 r_E 、磁気半径 r_M 、磁気モーメント μ 、軸性電荷 g_A 、軸性半径 r_A の順となっている。PACS10 のラベルの本研究の結果が HPCI のラベルの成果と比べて、精度が格段に改善されていることを示している（図の下の数字は、青字が HPCI の相対誤差、赤字が PACS10 の相対誤差の大きさを表す）。比較のため、別のグループの格子 QCD 計算による結果も合わせて載せてある。まず、今回の PACS10 の結果で特筆すべきは、軸性電荷 g_A 、磁気モーメント μ 、磁気半径 r_M に対しては、それぞれ相対誤差が 2%、3% 5% の精度の範囲で、それぞれ該当する実験値をきちんと再現することに成功している点である。しかし、電荷半径 r_E と軸性半径 r_A に関しては、他のグループの結果と同様に、それぞれの実験値よりも小さな値となっていることが、計算の高精度化によって明らかとなった。この実験値との食い違いは、まだきちんと評価できていない隠された系統誤差の存在を表している可能性が高い。実際、本計算では、格子間隔 0.085 fm における格子 QCD 計算のみの結果であり、有限格子間隔に伴う格子離散化誤差が未評価となっている。PACS10 配位は、複数のより細かい格子間隔でのゲージ配位生成が予定されているため、引き続き、それらの別の格子間隔の PACS10 配位を利用した格子 QCD 計算を実施して、残された格子離散化誤差を評価することが必要不可欠である。

(3) 格子間隔 0.085 fm の格子点 128^4 の PACS10 配位を利用した格子 QCD 計算において中性子崩壊を特徴付ける核子軸性電荷 g_A に対して統計精度 1-2% での評価が可能となった。中性子崩壊は、クォークの素過程レベルではベクトル型 (V) と軸性ベクトル型 (A) の差、V-A 型の結合によって引き起されるが、通常の崩壊では現れない、標準模型を超えた新物理の探求に有効とされる、「非 V-A 型」の中性子崩壊としてスカラー (S) 型とテンソル (T) 型の崩壊に着目して研究を行なった。非 V-A 型の崩壊過程は V-A 型のようなアイソスピン対称性やカイラル対称性に相当する対称性がないため、強い相互作用の量子補正の影響を強く受ける可能性がある。その量子補正の強さを表すのが、核子スカラー電荷 g_S や核子テンソル電荷 g_T という核子構造を反映した物理量で、それ自体実験で直接測定することが困難な物理量である。この核子スカラー電荷 g_S や核子テンソル電荷 g_T に対しても数% の統計精度で評価することに成功した。以下の図 2 は、これまで得られている他のグループの格子 QCD 計算との比較である。左から核子スカラー電荷 g_S 、核子テンソル電荷 g_T で、それぞれの図中の赤いマークが PACS10 配位による結果である。他のグループに比べ高精度で評価できていることがわかる。今後、超冷中性子を利用した中性子崩壊の超精密測定がいくつかの研究施設で計画されており、本研究で理論的に評価したアイソベクターの核子スカラー電荷 g_S 、核子テンソル電荷 g_T の値、特に 2% 以下の精度に達した g_T の結果は、新しい実験結果から標準理論を超えた新物理を探るための一助になると期待できる。

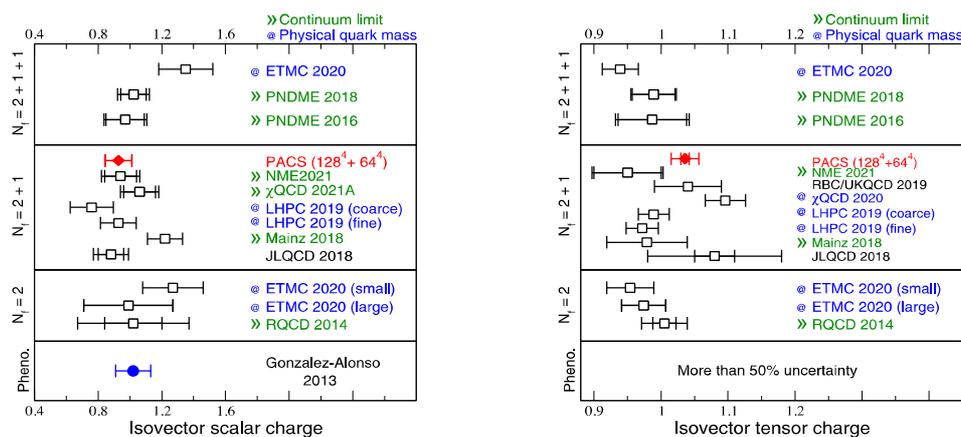


図 2

(4) 核子の内部構造の理解には、核子をクォーク・グルーオンの量子多体系として扱うために必要な構造関数やそのモーメントに関する研究は欠くことができない。この構造関数に関係する物理量、特に、核子中のクォーク運動量割合及びヘリシティ割合という物理量についても、格子間隔 0.085 fm の格子点 128^4 の PACS10 配位を利用した格子 QCD 計算において評価を行なった。それらの物理量を評価するには、格子上でクォーク運動量割合及びヘリシティ割合に相当する核子行列要素を計算するだけでなく、場の量子論の手続きに沿って、計算に用いたカレント演算子の繰り込み因子を非摂動的に格子 QCD で別途評価する必要がある。そこで、Regularization-independent (RI) スキームによる非摂動的繰り込みの手法を採用し、物理点直上での格子 QCD 計算として初めてアイソベクター型のクォーク運動量割合及びヘリシティ割合を評価した。得られた結果とこれまでに得られている他のグループの物理点近傍の格子 QCD 計算による理論計算の結果 (上段) 及び、実験から現象論的に求められた値 (下段) を比較したものが次の図 3 (左側がクォーク運動量割合、右側がヘリ

シティ割合)である。この図の最上位に位置する本研究結果(赤い)に付いている誤差棒は統計誤差であり、外括弧は繰り込み因子の評価に伴う系統誤差を含めた総合的な誤差を表す。本研究結果は、クォーク運動量割合及びヘリシティ割合ともに、他のグループの格子QCD計算よりも実験データに基づく理論解析(Global FIT)結果に近い値となっている。特にヘリシティ割合に関しては、現状の理論解析(Global FIT)よりも精度の高い評価が可能となっている。

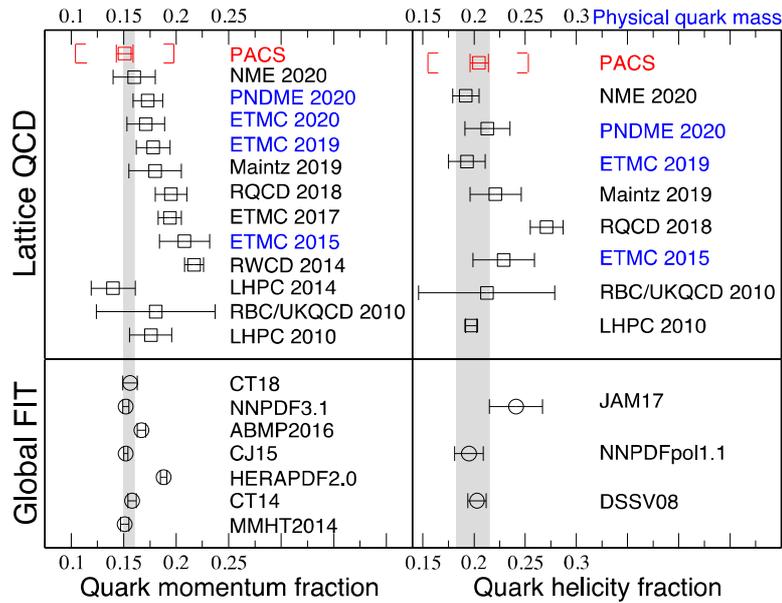


図 3

(5) PACS Collaboration の下、スパコン富岳を用いて 2 つ目の格子間隔 (0.063 fm) で生成された格子点 160^4 の PACS10 配位を利用した格子 QCD 計算を行った。格子点 128^4 の PACS10 配位を利用した格子 QCD 計算の時と同様に、核子三点関数から核子行列要素の情報を引き出す際に生じる系統誤差の評価を行った。核子三点関数はソースとシンクに核子演算子を置き、ソース・シンク間に、クォーク双線形なカレント演算子を挟むことで計算される。ソース・シンク間距離 (t_{sep}) が短い場合、核子行列要素の情報を核子三点関数から引き出す際に、核子の基底状態による行列要素の寄与だけでなく、核子の励起状態や、核子-中間子の二粒子連続状態などの寄与が無視できなくなる。そのため、 t_{sep} の依存性を調べることで、核子の基底状態以外からの寄与による系統誤差が見積ることが出来る。格子点 160^4 においても、3 つの $t_{\text{sep}}/a=13, 16, 19$ の計算を完了させ、 t_{sep} の依存性を精査した。

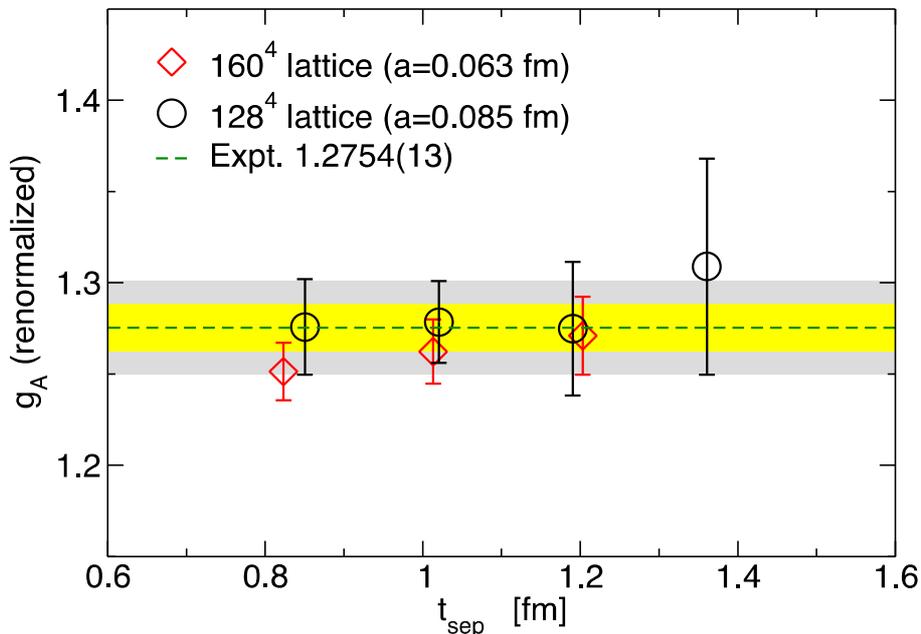


図 4

図 4 は、核子構造の計算精度の高さを測る指標である核子軸性電荷 g_A に対して、現時点までに得られている、2 つの格子間隔 0.085fm と 0.063fm による計算結果 (Schrödinger Functional 法による軸性カレントの繰り込み因子 Z_A を使って繰り込みを行った) の比較である。水平の点線は g_A の実験値で、2 つの帯は実験値からの 1%以下の誤差 (黄色帯) 2%以下 (灰色帯) の誤差の範囲をそれぞれ表す。赤色の \square のシンボルが格子点 160^4 の格子間隔 0.063fm で得られた結果、黒色の \square のシンボルが格子点 128^4 の格子間隔 0.085fm で得られた結果である。様々な核子構造の物理量の中で、格子 QCD 計算により最も高精度で評価可能な核子軸性電荷に対して、核子の基底状態以外からの寄与による系統誤差及び格子離散化誤差の二つの主要な系統誤差が、現状の計算において達成している統計誤差 1-2%以下に抑えられていることが確認できた。このことは、核子の大きさを含む、核子構造に関する基本的な 5 つの物理量全てに対して、誤差数%レベルの精密計算が今後実現可能なことを示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Ryutaro Tsuji, Natsuki Tsukamoto, Yasumichi Aoki, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani and Takeshi Yamazaki	4. 巻 106
2. 論文標題 Nucleon isovector couplings in $N_f = 2+1$ lattice QCD at the physical point	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 94505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.094505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Keita Sakai and Shoichi Sasaki	4. 巻 107
2. 論文標題 Glueball spectroscopy in lattice QCD using gradient flow	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 34510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.034510	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani and Takeshi Yamazaki	4. 巻 396
2. 論文標題 The lower moments of nucleon structure functions in lattice QCD with physical quark masses	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Science (Lattice 2021)	6. 最初と最後の頁 504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.396.0504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Keita Sakai and Shoichi Sasaki	4. 巻 396
2. 論文標題 An improvement of glueball mass calculations using gradient flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Science (Lattice 2021)	6. 最初と最後の頁 333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.396.0333	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani and Takeshi Yamazaki	4. 巻 274
2. 論文標題 Nucleon scalar and tensor couplings from lattice QCD at the physical points	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 6009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202227406009	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani and Takeshi Yamazaki	4. 巻 37
2. 論文標題 Nucleon Isovector Tensor Charge from Lattice QCD with Physical Light Quarks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 20202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.37.020202	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ishikawa Ken-Ichi, Kuramashi Yoshinobu, Sasaki Shoichi, Shintani Eigo, Yamazaki Takeshi, PACS Collaboration	4. 巻 104
2. 論文標題 Calculation of the derivative of nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD at $M_\pi \approx 138$ MeV on $a = 5.5$ fm volume	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 74514
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.074514	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 E. Shintani, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki and T. Yamazaki	4. 巻 102
2. 論文標題 Erratum: Nucleon form factors and root-mean-square radii on a $(10.8 \text{ fm})^4$ lattice at the physical point	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 19902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.019902	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 N. Tsukamoto and S. Sasaki	4. 巻 26
2. 論文標題 Nucleon isovector couplings from lattice QCD using 2+1 flavor domain wall fermions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 31011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.26.031011	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 N. Tsukamoto, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, E. Shintani, S. Sasaki and T. Yamazaki.	4. 巻 LATTICE2019
2. 論文標題 Nucleon isovector couplings from 2+1 flavor lattice QCD at the physical point	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of science (LATTICE2019)	6. 最初と最後の頁 132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ishikawa Ken-Ichi, Kuramashi Yoshinobu, Sasaki Shoichi, Tsukamoto Natsuki, Ukawa Akira, Yamazaki Takeshi, PACS Collaboration	4. 巻 98
2. 論文標題 Nucleon form factors on a large volume lattice near the physical point in 2+1 flavor QCD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 074510-1, 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.074510	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 E. Shintani, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki and T. Yamazaki	4. 巻 99
2. 論文標題 Nucleon form factors and root-mean-square radii on a (10.8 fm) ⁴ lattice at the physical point	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 014510-1, 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.014510	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計21件(うち招待講演 8件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki
2. 発表標題 The lower moments of nucleon structure functions in lattice QCD with physical quark masses
3. 学会等名 The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki
2. 発表標題 Nucleon isovector tensor charge from lattice QCD with physical light quarks
3. 学会等名 The 24th International Spin Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki
2. 発表標題 High-precision calculation of nucleon structure using HPC
3. 学会等名 The 4th R-CCS International Symposium The Supercomputer Fugaku: Simulation, Big data and AI supporting Society 5.0 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻竜太郎、青木保道、石川健一、藏増嘉伸、佐々木勝一、新谷栄吾、山崎剛
2. 発表標題 核子軸性電荷及びテンソル、スカラー荷の物理点格子QCD計算
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会(2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻竜太郎、青木保道、石川健一、藏増嘉伸、佐々木勝一、新谷栄吾、山崎剛
2. 発表標題 物理点格子QCDによる核子構造の計算
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki
2. 発表標題 Nucleon structure at physical point from 2+1 flavor Lattice QCD
3. 学会等名 Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻竜太郎、青木保道、石川健一、藏増嘉伸、佐々木勝一、新谷栄吾、山崎剛
2. 発表標題 物理点2+1フレーバー格子QCDによる核子構造研究
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki
2. 発表標題 Nucleon structure with 2+1 flavor lattice QCD at physical quark mass
3. 学会等名 International School for Strangeness Nuclear Physics(SNP school 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻竜太郎、青木保道、石川健一、藏増嘉伸、佐々木勝一、新谷栄吾、山崎剛
2. 発表標題 格子場の理論に基づく核子構造研究
3. 学会等名 研究会「日本のスピン物理学の展望」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻竜太郎、青木保道、石川健一、藏増嘉伸、佐々木勝一、新谷栄吾、山崎剛
2. 発表標題 核子内クォークの担う運動量及びヘリシティ割合の物理点格子QCD計算
3. 学会等名 日本物理学会春季大会(2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塚本夏基, 青木保道, 石川健一, 藏増嘉伸, 佐々木勝一, 新谷栄悟, 山崎剛
2. 発表標題 物理点2+1フレーバー格子QCDによる核子のアイソベクター結合の計算
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration
2. 発表標題 Nucleon form factors from PACS10 configuration
3. 学会等名 Lattice QCD workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration
2. 発表標題 Nucleon couplings in $N_f = 2+1$ lattice QCD
3. 学会等名 Workshop on Nucleon electric dipole moments and spin structure in 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shoichi Sasaki
2. 発表標題 Nucleon form factors from lattice QCD near the physical point
3. 学会等名 Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshinobu Kurahashi for PACS Collaboration
2. 発表標題 Nucleon form factors on a $(10.8 \text{ fm})^4$ lattice at the physical point in 2+1 flavor QCD
3. 学会等名 The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新谷栄悟, 藏増嘉伸, 石川健一, 佐々木勝一, 塚本夏基, 山崎剛 for PACS Collaboration
2. 発表標題 格子QCDを用いた核子形状因子及び電荷半径の計算
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 塚本夏基, 藏増嘉伸, 石川健一, 佐々木勝一, 山崎剛 for PACS Collaboration
2. 発表標題 ウィルソンフェルミオンを用いた物理点近傍での2+1フレーバーQCDによる核子形状因子の計算: 軸性ベクトル、擬スカラー形状因子再考
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎剛 for PACS Collaboration
2. 発表標題 PACS10 project in lattice QCD
3. 学会等名 10th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences" (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎剛 for PACS Collaboration
2. 発表標題 Lattice QCD studies on nucleon form factors
3. 学会等名 KEK研究会: 「QCDと核子構造の進展2019」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木勝一
2. 発表標題 Prospects on nucleon structure studies by PACS
3. 学会等名 KEK研究会: 「QCDと核子構造の進展2019」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木勝一
2. 発表標題 Nucleon form factors from lattice QCD at the physical point
3. 学会等名 ELPH 研究会「電子散乱による原子核研究」(招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山崎 剛 (Yamazaki Takeshi) (00511437)	筑波大学・数理物質科学研究科・准教授 (12102)	
研究協力者	蔵増 嘉伸 (Kuramashi Yoshinobu) (30280506)	筑波大学・数理物質科学研究科・教授 (12102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------