

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01892

研究課題名（和文）強い相互作用の第一原理計算による軽ハドロン形状因子の総理解

研究課題名（英文）Unified understanding of light hadron form factors using the first principle calculation of strong interaction

研究代表者

山崎 剛 (Yamazaki, Takeshi)

筑波大学・数理解物質系・准教授

研究者番号：00511437

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：現実世界と同じクォーク質量かつ一辺が10fmを超える巨大体積を用いた世界初となる大規模格子QCDによる軽いハドロンの形状因子精密計算を実施し、パイ中間子とK中間子の電気的な伝わりに対応する荷電半径の実験値を再現した。また、素粒子標準模型を超える物理探索に関する物理量精密計算も実行し、クォーク混合行列要素 $|V_{us}|$ に対して現在の最高精度に近い結果を得た。さらに様々な核子形状因子精密計算を実行し、その計算に含まれる系統誤差について調査を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題で遂行した、現実世界と同じクォーク質量かつ一辺が10fmを超える巨大体積を用いた大規模格子QCDによる精密計算によって、軽い中間子の内部構造に密接に関係する物理量の実験値の再現に成功し、理論的に理解が難しい強い相互作用について、定量的理解を深めた。この成果は強い相互作用の非摂動的総理解として重要であるだけでなく、現在の素粒子物理分野で喫緊の課題である素粒子標準模型を超える物理現象の探索研究に対しても重要である。本課題では、この成果を基にして、素粒子標準模型を超える物理探索に関係した研究も実施した。

研究成果の概要（英文）：We performed the large-scale lattice QCD simulation at the physical quark masses on the volume, where the physical spatial extent is more than 10 fm. Through the simulation, we obtained precise results of the form factor for light hadrons. The charge radius, which corresponds to the electric size of hadron, is determined from the form factors for pion and kaon. Those results agree with the experimental ones. Furthermore, the one of the quark mixing matrix elements, $|V_{us}|$, is precisely determined. This quantity is related to search for physics beyond the standard model. The uncertainty of our result is similar in size to the most accurate value of $|V_{us}|$. Moreover, various nucleon form factors are computed, and systematic uncertainties in the form factor calculations are investigated.

研究分野：素粒子理論

キーワード：素粒子理論

1. 研究開始当初の背景

我々の世界の物質は、クォーク・グルーオンを含む素粒子により構成されている。クォーク・グルーオンをハドロン(中間子や核子などの総称)に束縛するのが強い相互作用である。この相互作用は、クォーク・グルーオン→中間子・核子→原子核といった、大きくエネルギースケールの異なる階層構造を持つことが特徴である。これらの強い相互作用に対する理解は実験的事実に依っており、理論的に完全に理解されているとは言い難い。強い相互作用の理論的理解を阻む大きな原因は、強い相互作用にはクォーク間の距離が大きくなると結合定数が大きくなる、閉じ込めの性質があることである。この性質のため、ハドロンに対する強い相互作用の理論計算には、様々な計算で有効であった摂動論的計算が行えない。そのため非摂動論的計算方法が必要になる。

強い相互作用の非摂動論的計算が行える、現在最も有力な方法が計算機を用いた格子 QCD 計算である。近年、現実の低エネルギー素粒子物理に近いアップ・ダウン・ストレンジクォークの真空偏極効果を取り入れた格子 QCD 計算が世界的に行われており、特にハドロン質量や崩壊定数に対して多くの成果が挙げられている。ハドロンの内部構造に係る形状因子の格子 QCD 計算はそれらに比べ複雑であるため、精密計算の段階には入っていなかった。この原因は、格子 QCD 計算の 3 つの主要な系統誤差、①現実より大きなパイ中間子質量、②有限体積効果、③有限格子間隔効果が取り除かれていないためであると考えられていた。

研究代表者が所属する、筑波大学の格子 QCD 研究者が中心となる PACS Collaboration では、これら全ての系統誤差を取り除いた計算を行う「PACS10 計画」を実行しており、本課題実施前には、計画の初期段階であるゲージ配位生成計算を進めていた。この計画では、①、②の系統誤差を取り除くため、現実的クォーク質量かつ一辺 10fm の大体積を採用し、③のためには、三種類の異なる格子間隔でゲージ配位(以下 PACS10 配位)を生成し、最終的に三種類の格子間隔で得られる結果の連続極限を取ることで、全ての系統誤差を取り除いた結果を得る計画である。

2. 研究の目的

本課題では、格子 QCD 計算の主要な系統誤差を取り除いた精密計算を実施することで、軽ハドロン(軽い中間子であるパイ中間子と K 中間子、及び、最も軽いバリオンである核子)について、その形状に密接に係る形状因子を求め、それから得られる物理量、例えば荷電半径の精密決定を目指す。この精密計算で得られた結果が高精度で実験値を再現すれば、強い相互作用が創り出すハドロンの基本的性質の一つを定量的に理解できたことになる。さらに、本研究で扱う全ての軽ハドロンの内部構造に対する物理量が実験値を再現すれば、これまでによく理解されてきたハドロン質量を超えて、強い相互作用を統一的に理解できた一つの証左を得ることになる。このことは、未知の物理現象の予言や素粒子標準模型を超えた物理の探索へ研究を進める上で極めて重要である。

上記の最終目標を達成するため、本計画では上記 PACS10 配位を用いて、(1)パイ中間子と K 中間子に対する電磁的形状因子、(2)K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子、および(3)核子形状因子の精密計算を実施することを目的とした。

3. 研究の方法

強い相互作用の第一原理計算が可能である格子 QCD を用いて研究を行った。格子 QCD は大型並列計算機を用いたモンテカルロシミュレーションにより、結合定数の大きさに依らない QCD の非摂動論的計算を行うことができる。PACS10 配位は、大体積かつ現実的なクォーク質量でのパラメータを採用しているため、その計算には典型的な格子 QCD 計算よりも約 10 から 100 倍の計算機資源が必要となる。本計画で利用した大型計算機資源の大部分は、毎年度筑波大学計算科学研究センターで公募される学際共同利用プログラムと高度情報科学技術研究機構で公募される HPCI システム利用研究課題に応募し獲得した。2020 年度からは、国内フラッグシップ計算機である「富岳」も利用し研究を推進した。

PACS10 配位の特徴は、現実的クォーク質量かつ一辺が 10fm を超える物理体積を持つことである。現実的クォーク質量を採用していることにより、従来の格子 QCD 計算で大きな系統

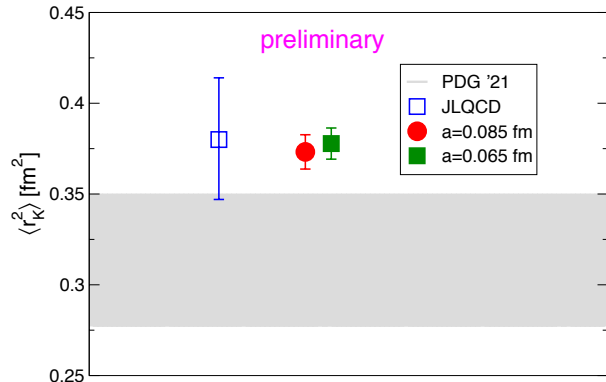
誤差の要因となっていた、重いクォーク質量での計算結果を用いた現実的クォーク質量への外挿を必要としない計算が可能となる。また、巨大体積での計算は、現実的クォーク質量で問題となる有限体積効果が無視できるレベルに抑えることができるだけでなく、形状因子計算に対しても非常に有効である。格子 QCD 計算では運動量は一辺の長さを単位に離散化されるため、巨大体積を用いることで形状因子解析で重要となる極小の運動量での計算を行うことができる。このような PACS10 配位の有用性を最大限に活用した軽ハドロン形状因子計算を実行した。

4. 研究成果

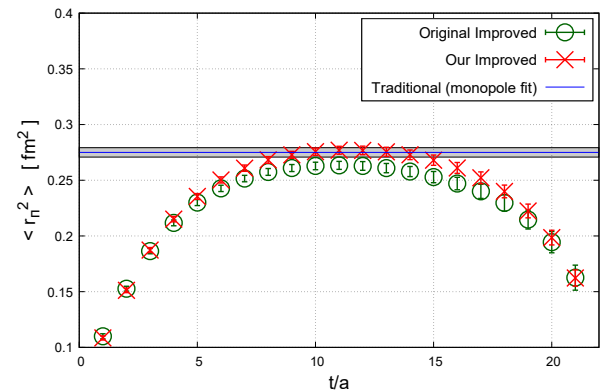
以下では、本計画で実行した(1)パイ中間子と K 中間子に対する電磁的形状因子、(2)K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子、(3)核子形状因子、について各々にまとめる。

(1) パイ中間子と K 中間子に対する電磁的形状因子

中間子の電磁気的形状因子の運動量移行に対する原点での傾きで定義される荷電半径は、中間子の電磁気的大きさを表す物理量であり、その内部構造を理解するために重要である。2つの格子間隔(0.085fm, 0.065fm)の PACS10 配位を用いて、パイ中間子と K 中間子の電磁気的形状因子計算を実行し、それらを理論的モデルを用いて運動量移行の関数としてフィットし荷電半径を求めた。中間結果ではあるが、得られた荷電半径はパイ中間子と K 中間子ともに統計的に高精度の結果となった。パイ中間子荷電半径は、2つの格子間隔で若干の差異が見られたが、実験値とよく一致する結果となった。一方、K 中間子の結果は、右図に示したように 2つの格子間隔(赤丸、緑四角)で一致しており、有限格子間隔による系統誤差が小さいと考えられる。さらに、他グループの格子 QCD 計算結果(青四角)や実験値(灰色帯)よりも、高精度の結果となっている。右図の我々の結果は系統誤差は含まれていないが、もし系統誤差が統計誤差程度であれば、実験値を超える精度で、格子 QCD 計算から K 中間子荷電半径に対する予言を与えることができる。今後、これらの荷電半径の系統誤差を見積もり、最終結果を確定させる予定である。



形状因子から荷電半径を求める際に、系統誤差の原因になるのが、形状因子を運動量移行の関数としてフィットする際のフィット関数依存性である。この系統誤差を排除するためには、形状因子の微分係数を直接格子 QCD 計算により求められれば良い。そのような方法は 1990 年代から提案されてはいたが、荷電半径に大きな有限体積効果が含まれてしまう問題があったため、特に中間子荷電半径では有効ではなかった。しかし、有限体積効果を十分抑えたパイ中間子荷電半径の直接計算方法が 2020 年に提案された。この方法を詳しく調べた結果、特定の条件下、荷電半径が大きい場合、もしくは体積が小さい場合に、無視できない系統誤差が得られる結果に含まれてしまうことがわかった。この特定の条件下でも、系統誤差を抑えた荷電半径直接計算を行う改良された方法を提案し、中間子形状因子に合わせた擬似データを用いた解析により、系統誤差が 2020 年の方法より抑えられていることを確認した。さらに、パイ中間子質量が 0.51GeV での実際の格子 QCD 計算によるパイ中間子荷電半径データをを用いた解析も実行した。右図



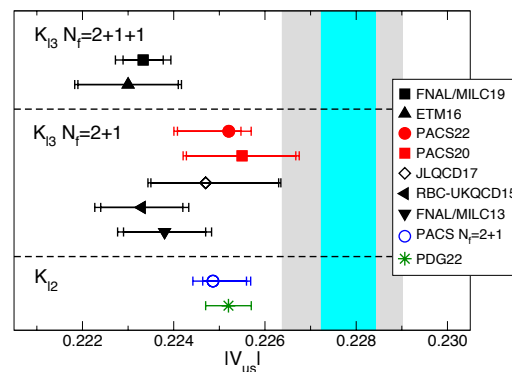
[PoS(LATTICE2022)122 より抜粋]に示したのは、我々の提案した方法を用いた結果(赤印)と 2020 年に提案された方法を用いた結果(緑丸)の比較である。これらのデータの t/a 依存

性がない領域の値が荷電半径に対応する。我々の結果は 2020 年の方法による結果よりも統計誤差を超えて大きく得られており、同じ体積で形状因子から計算した結果(紫帯)とも一致している。この一致や、擬似データを用いた解析、大きな体積での計算結果から判断し、我々の方法と 2020 年の方法で得られた結果の差は、2020 年の方法に含まれる有限体積効果による系統誤差であると結論した。今後、この方法を PACS10 配位を用いた計算に適用する、より現実的なデータでの解析を計画している。

(2) K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子

クォークの世代間混合を表す行列であるキャビボ-小林-益川(CKM)クォーク混合行列の行列要素のうち、アップクォークとストレンジクォークの混合の度合いを表すのが $|V_{us}|$ である。CKM 行列は標準模型枠内ではユニタリー性を持つので、複数の CKM 行列要素を合わせた解析により、ユニタリー性の確認を行うことで標準模型を超える物理現象の存在を検証することができる。2018 年に $|V_{ud}|$ の再評価が行われ、 $|V_{ud}|$ の値が大きく動いたことで、ユニタリー性から見積もられる $|V_{us}|$ の値も誤差を超えて動いた(下図の水色帯)。それにより、K 中間子セミレプトニック崩壊により決定された最高精度の $|V_{us}|$ (黒四角)とのズレは 5σ 程度に広がった。このズレが確実に存在することが確かめられれば、標準模型を超えた物理が存在することになる。その検証のためにも、K 中間子セミレプトニック崩壊による決定に重要である K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子の精密決定が望まれている。

本計画では、PACS10 配位を用いて K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子の精密計算を行った。 $|V_{us}|$ の決定には、ゼロ運動量移行での形状因子が必要である。この値の高精度決定には、ゼロ運動量移行付近での形状因子高精度計算が必須であり、巨大体積を持つ PACS10 配位を用いることで、そのような計算が可能となる。右図には、格子間隔 0.085fm の PACS10 配位を用いて計算された K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子から得られた $|V_{us}|$ の結果(赤四角)と、2 つの格子間隔 (0.085fm, 0.065fm) の計算結果から見積もられた連続極限での結果(赤丸)を示している。我々の結果は、それ以前のお他グループによる結果(黒色印)よりも若干大きいのが、異なる $|V_{us}|$ の決定方法である K 中間子レプトニック崩壊(青丸、緑星印)とは一致する結果となった。我々の連続極限での結果(赤丸)は、格子間隔 0.085fm のみの結果(赤四角)よりも誤差は小さく、他グループの結果と同程度の精度と言える。今後、3 つ目の格子間隔の PACS10 配位を用いた計算を実行し、さらなる高精度の結果を求める予定である。



(3) 核子形状因子

核子(陽子と中性子の総称)は、パイ中間子や K 中間子より複雑な構造を持っており、その構造を調べるためには様々な形状因子の計算が必要である。これらの形状因子計算にも PACS10 配位は有用であり、これまでに(0.085fm, 0.065fm)の格子間隔での PACS10 配位を用いた計算を実行した。格子間隔 0.085fm を用いた計算では、電氣的形状因子の傾きから荷電半径を求めた結果、精密に測定されている実験値より 15%程度小さな値が得られた。この原因は有限格子間隔による系統誤差なのかを判定するために、格子間隔 0.065fm の計算を実行し、実験値を再現するまでには至らないまでも、格子間隔 0.085fm より大きな荷電半径が得られた。この傾向がさらに小さな格子間隔でも見られ、連続極限で実験値を再現するかを確かめることが今後の課題であり、3 番目の格子間隔の PACS10 配位を用いた計算を今後進めていく。

電氣的形状因子以外にも、磁氣的形状因子、ニュートリノ散乱に密接に関係する軸性ベクトル形状因子、さらに標準模型を超える物理探索に関係する核子スカラー電荷やテンソル電荷などの計算も実行し、高精度の計算結果が得られている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 15件）

1. 著者名 Tsuji Ryutaro, Aoki Yasumichi, Ishikawa Ken-Ichi, Kuramashi Yoshinobu, Sasaki Shoichi, Yamazaki Takeshi, Shintani Eigo, PACS Collaboration	4. 巻 LATTICE2021
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	6. 最初と最後の頁 1-9
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 Ishikawa Ken-ichi, Ishizuka Naruhito, Kuramashi Yoshinobu, Namekawa Yusuke, Taniguchi Yusuke, Ukita Naoya, Yamazaki Takeshi, Yoshie Tomoteru, PACS Collaboration	4. 巻 106
2. 論文標題 K ₁₃ form factors at the physical point: Toward the continuum limit	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.094501	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 Tsuji Ryutaro, Tsukamoto Natsuki, Aoki Yasumichi, Ishikawa Ken-Ichi, Kuramashi Yoshinobu, Sasaki Shoichi, Shintani Eigo, Yamazaki Takeshi, PACS Collaboration	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 1-25
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 Ishikawa Ken-Ichi, Kuramashi Yoshinobu, Sasaki Shoichi, Shintani Eigo, Yamazaki Takeshi, PACS Collaboration	4. 巻 104
2. 論文標題 alculation of derivative of nucleon form factors in N _f = 2+1 lattice QCD at M _π = 138 MeV on a (5.5 fm) ³ volume	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-20
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 Yamazaki Takeshi, Namekawa Yusuke	4. 巻 LATTICE2019
2. 論文標題 Two-pion scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function at the interaction boundary	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.363.0032	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 Kakazu Junpei, Ishikawa Ken-ichi, Ishizuka Naruhito, Kuramashi Yoshinobu, Nakamura Yoshifumi, Namekawa Yusuke, Taniguchi Yusuke, Ukita Naoya, Yamazaki Takeshi, Yoshi? Tomoteru, PACS Collaboration	4. 巻 101
2. 論文標題 K13 form factors at the physical point on a (10.9fm) ³ volume	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1~16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.094504	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 K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa., E. Shintani, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie for PACS Collaboration	4. 巻 100
2. 論文標題 Finite size effect on vector meson and baryon sectors in 2+1 flavor QCD 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 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.094502	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22件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yoshie for PACS Collaboration
2. 発表標題 Calculation of kaon semileptonic form factor with the PACS10 configuration
3. 学会等名 The 38th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2021) (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 for PACS Collaboration
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 (Lattice 2021) (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 for PACS Collaboration
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 for PACS Collaboration
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 R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki for PACS Collaboration
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 (国際学会)
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 for PACS Collaboration
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、新谷栄悟、山崎剛 for PACS Collaboration
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 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 Takeshi Yamazaki
2. 発表標題 Direct calculation of two-nucleon energy from lattice QCD
3. 学会等名 Frontiers in Lattice QCD and related topics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeshi Yamazaki and Yusuke Namekawa
2. 発表標題 Two-pion scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function at the interaction boundary
3. 学会等名 The 37th International Symposium on lattice field theory (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshie for PACS Collaboration
2. 発表標題 K13 form factors in $N_f = 2+1$ QCD at physical point on large volume
3. 学会等名 The 37th International Symposium on lattice field theory (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Natsuki Tsukamoto, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration
2. 発表標題 Nucleon isovector couplings from 2+1 flavor lattice QCD at the physical point
3. 学会等名 The 37th International Symposium on lattice field theory (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeshi Yamazaki
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
2. 発表標題 Nucleon couplings in $N_f=2+1$ lattice QCD
3. 学会等名 KEK 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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

【受賞】第9回成果報告会におけるHPCI利用研究課題優秀成果賞，山崎 剛(課題代表)，藏増 嘉伸，石川 健一，新谷 栄悟，他5名

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
研究分担者	佐々木 勝一 (Sasaki Shoichi) (60332590)	東北大学・理学研究科・准教授 (11301)	

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
---------	---------