

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01903

研究課題名（和文）有限温度QCDにおける物理量の決定へ向けて

研究課題名（英文）Toward the determination of physical quantities in finite temperature QCD

研究代表者

鈴木 博（Suzuki, Hiroshi）

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：90250977

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)の有限温度における物理量を格子ゲージ理論を用いて第一原理から計算する。この計算は、素粒子の極限状態における性質というアカデミックな興味のみならず、初期宇宙の進化、重イオン衝突のダイナミクス、またアキシオンダークマターの残存量などの研究への基礎的データを理論の側から与える。従来の計算法では、格子間隔を変化させた場合の格子パラメータの変化（いわゆるベータ関数）の決定に莫大な計算量が必要であった。我々はグラディエント・フローを用いた物理量の構成（SFtX法）を用いることで、この困難を回避した。当初計画した数値計算はほぼ終了し最終的な解析が残されている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)の有限温度における物理量を格子ゲージ理論を用いて第一原理から計算する。この計算は、素粒子の極限状態における性質というアカデミックな興味のみならず、初期宇宙の進化、重イオン衝突のダイナミクス、またアキシオンダークマターの残存量などの研究への基礎的データを理論の側から与える。当研究の目的の一つには、従来の計算法が必要とした莫大な計算量の低減に、我々の開発したグラディエント・フローを用いた物理量の構成（SFtX法）が有効であることを実証することにもあった。最終的な解析結果にはもうしばらく時間が掛かるが、現状では有望な結果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We calculate the quantities in finite temperature Quantum Chromodynamics (QCD), which is the fundamental theory of strong interactions, using lattice gauge theory from first principles. This calculation answers not only academic question on the properties of particles in extreme states but also provides fundamental data from a theoretical perspective for studying the early universe evolution, dynamics of heavy-ion collisions, and the abundance of axion dark matter. In conventional methods, a tremendous amount of computational resources is required to determine the variation of lattice parameters under the change of the lattice spacing (the so-called beta function). We circumvent this difficulty by employing the gradient flow to construct the physical quantities (SFtX method). The initial numerical calculations are almost completed, and only the final analyses remain.

研究分野：素粒子論

キーワード：格子ゲージ理論 量子色力学 グラディエント・フロー 有限温度QCD

1. 研究開始当初の背景

自然界の究極構成要素である素粒子は、現在到達可能なエネルギー領域まで、いわゆる「標準模型」により極めてよく記述される。この意味で、我々は素粒子を支配する法則を既に知っているが、このことが現象の理解を直には意味しない。特に、強い相互作用の基礎理論である量子色力学 (QCD) では、低エネルギーで相互作用が極めて強くなり、解析的な計算が不可能となる。この強い相互作用が引き起こす複雑で多彩な物理現象を理解することは、物理学の重要課題の一つである。この研究を第一原理から可能にする方法が格子ゲージ理論であり、この定式化に基づく大規模数値シミュレーションにより、強い相互作用のダイナミクスの解明は大きく進んだ。

こうした状況のもと残されている問題の一つとして、QCD の有限温度での各種物理量、具体的には、熱力学量 (状態方程式) カイラル凝縮、トポロジカル感受率、粘性係数などの計算が挙げられる。この計算は、素粒子の極限状態での物性の理解というアカデミックな興味に留まらず、初期宇宙の進化、中性子星の内部構造、重イオン衝突のダイナミクス、またアキシオンダークマターの残存量などを解明する上での基礎的なデータを理論の側から与える。注目すべきなのは、格子ゲージ理論におけるこれまでの理論的理解とアルゴリズムの進歩により、十分な計算機資源があればこの計算は遂行可能という点である。ところが、歴史的また財政的な理由から、我が国ではこの計算が十分な形で行われていないのが現状なのである。

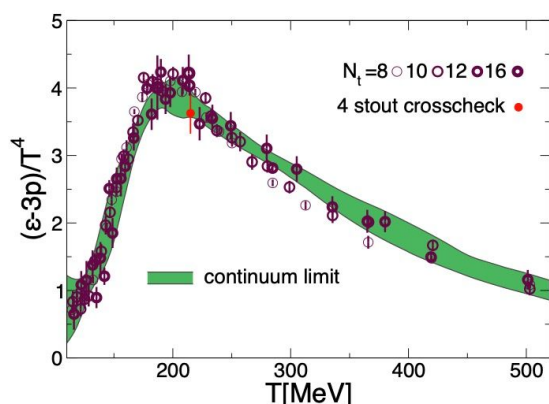


図 1: スタッガードフェルミオンを用いた、物理点でのトレースアノマリー。横軸は温度。

図 1 をご覧頂きたい。これらは、有限温度 QCD でのトレースアノマリーと呼ばれる熱力学量を格子ゲージ理論により計算したもので、2014 年までにそれぞれヨーロッパとアメリカのグループにより発表されたものである (引用文献 と)。これらは、軽いクォークであるアップ・ダウン・ストレンジを取り入れ、ただしアップとダウンの質量差は無視する 2+1 フレーバー

QCD と呼ばれる近似内のものだが、現実とほぼ同じアップ・ダウン・ストレンジクォークの質量 (これを物理点と呼ぶ) 格子の間隔を 0 にする連続極限を取っている、という点で理想的であり、このため有限温度 QCD の熱力学量の計算はすでに完了したと広くとらえられている。しかしながら、これらの計算では数値計算のコストおよび歴史的な理由から、クォークをスタッガードフェルミオンという定式化で定義している。実は、クォークのスタッガードフェルミオンの理論的正当性はたびたび疑問視されてきたのである。

一方我が国では、2006 年頃より、金谷・初田らを中心とした WHOT-QCD Collaboration が、有限温度 QCD の物理点での計算に向けたプロジェクトを開始している。ここでは、スタッガードフェルミオンの理論的正当性が不明確であることを念頭に、理論的基礎の明確なウィルソンフェルミオンを用いている。ただし、ウィルソンフェルミオンには、スタッガードフェルミオンに比べより多くの計算量を必要とするという難しさがある。図 2 は、2012 年段階での WHOT-QCD Collaboration の結果 (引用文献) で、2+1 フレーバー QCD の熱力学量に対する世界初のものであるが、計算量の制約から、ストレンジクォークは、ほぼ物理点の質量であるが、アップ・ダウンクォークが物理点よりやや重いパイ中間子の質量で約 490 MeV (現実の世界では約 140 MeV、これらはアップ・ダウンクォークの質量にほぼ比例する) 格子間隔は 0.07 fm と固定で連続極限は取られていない、という計算であり、これらの点で不満足であった。

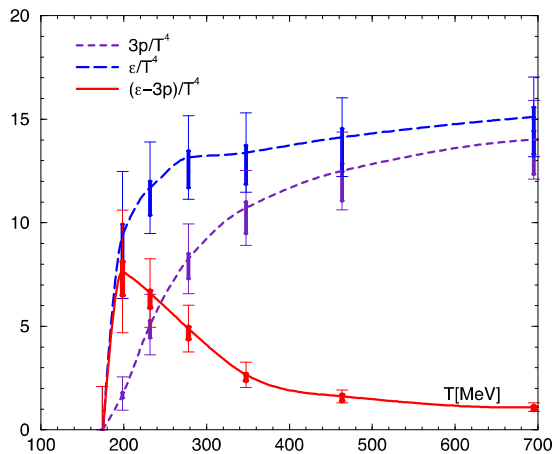


図 2：ウィルソフェルミオンを用いた、積分法によるトレースアノマリー他の熱力学量

そこで WHOT-QCD Collaboration では、2010 年頃より物理点における有限温度ゲージ場の配位生成を進めた。(格子ゲージ理論では、経路積分の重みに比例して分布するゲージ場の配位を数値的に生成し、物理量をそれらにわたる平均値として計算する。)物理点の軽いクォークでの計算には、条件数の大きな巨大線形連立方程式を解く必要があり、これが多大の計算資源を要する。また、通常、有限温度 QCD での熱力学量の計算には、積分法という方法が用いられるが、この方法では、物理量を保って格子間隔を変化させた時の格子ゲージ理論パラメータの微分(ベータ関数と呼ばれる)を計算する必要がある。このためには、多数の格子ゲージ理論パラメータに対する数値シミュレーションが必要で、この理由から WHOT-QCD Collaboration での物理点クォーク質量での研究は、2012 年以降足踏み状態であった。

こうした状況のもと、2013 年に、鈴木によりグラディエント、フローにより格子ゲージ理論でのエネルギー運動量テンソルを定義する全く新しい方法(SFtX 法)が提案され、有限温度 QCD での熱力学量を計算するこれまでと全く異なったアプローチが誕生した(文献)。このアプローチはクォークを含まない SU(3)ゲージ理論での熱力学量の計算に早速応用され、その有効性が検証された(文献)。

このアプローチは、クォークを含む QCD での計算に特に有効である。(そのための理論的定式化は文献でなされた。)つまり、この方法では、エネルギー運動量テンソルの表式が先験的に分かるため、熱力学量に対応したエネルギー運動量テンソルの対角成分の期待値を計算すればよい。つまり、上記のベータ関数を計算する必要がないのである。さらに、グラディエントフロー法により、カイラル感受率やトポジカル感受率など、これまでウィルソフェルミオンでは計算が困難であった量の評価の可能性も拓かれた。このグラディエントフロー法を実際に有限温度 QCD に適用したのが、文献であり、そこでの結果の一部を図 3 に示した。ただし、ここでは上記の WHOT-QCD Collaboration のゲージ場配位を用いており、アップ・ダウンクォークの質量は物理点よりやや重く、格子間隔も 0.07 fm のみで連続極限は取られていない、とまだ不満足なものである。

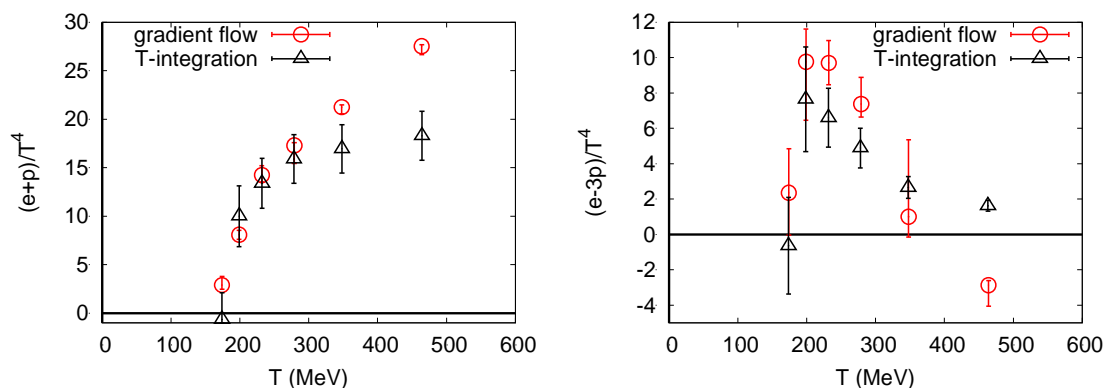


図 3：グラディエントフロー法による有限温度 QCD の熱力学量(左がエントロピー密度、右がトレースアノマリー)

2. 研究の目的

上でも述べたように、この研究の目的は、強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)の有限温度における各種物理量を、格子ゲージ理論により第一原理から数値計算することにある。この計算は、素粒子の極限状態における物性的性質というアカデミックな興味のみならず、初期宇宙の進化、宇宙の元素合成に重要な中性子星の内部構造の解明、重イオン衝突のダイナミクス、またアキシオンダークマターの残存量などを解明する上での基礎的なデータを理論の側から与

える。上で強調したように、我々の最終目標は、ウィルソンフェルミオンという理論的基礎が明確な格子ゲージ理論の定式化を用い、有限温度 QCD での物理量を、物理点クォーク質量に対して、連続極限を取って計算することである。本研究の独自性は、グラディエントフロー法という新しい理論的定式化を用いることで必要計算量を軽減し、この目標への到達を現実的なものとするところにある。これが達成された暁には、この問題における諸外国に対する大きな遅れを取り戻し、有限温度 QCD での物理量をより理論的に満足のいく形で決定できると考えた。

3. 研究の方法

これまで述べたように、有限温度 QCD での物理量を、物理点クォーク質量の場合に対して、連続極限を取って決定したい。このためには、いくつかの格子間隔に対してゲージ場の配位を生成し、物理量を計算、そして格子間隔ゼロへの外挿を行うことが必要である。ここで、格子間隔を変えても物理量(例えば中間子の質量)が変化しないよう格子ゲージ理論のパラメータを選ぶ必要があるが、このパラメータ探索自体が、多大の数値計算を必要とする。そこで我々は、PACS Collaboration の厚意を得て、0.08fm、0.06fm、0.04fm の格子間隔に対してパラメータ探索が既に完了している物理点でのゲージ場配位 (PACS10 配位 (文献)) を使わせて頂くことを想定した。ただしこれらはゼロ温度でのゲージ場配位であり、我々は、これらと同じ格子パラメータで、有限温度でのゲージ場配位を独自に生成しなくてはならない。そこで、本研究では、研究費として計上した計算機使用料により、北海道大学情報基盤センターのスーパーコンピュータ Grand Chariot の 52 ノードを占有使用することで、格子間隔 0.08fm、格子サイズ $32^3 \times 12$ 及び $48^3 \times 12$ (これらは温度 193MeV に相当) また、格子間隔 0.08fm、格子サイズ $32^3 \times 16$ (これは温度 145MeV に相当) のゲージ場配位の生成を行った。さらに、これらのゲージ場配位群と PACS10 での格子間隔 0.08fm ゼロ温度配位 (格子サイズは 64^4) また、以前 PACS-CS Collaboration によって得られた物理点クォーク質量でのゲージ場配位 (格子間隔 0.09fm) に対して熱力学量の測定を行った。

4. 研究成果

まず、物理的質量クォークに対する PACS-CS Collaboration の格子パラメータをもとにした格子間隔 0.09fm のゲージ場配位に関するものである。温度、122 MeV、137 MeV、146 MeV、219 MeV のものに対して、我々が開発した SFtX 法を用いて熱力学量の測定を行った。熱力学量のうち、エントロピー密度に関しては、まだ preliminary ではあるが、図 4 に示す通り、他グループの先行研究の結果とほぼ無矛盾な結果が得られた (この結果については論文で発表予定)。一方、もう一つの熱力学量であるトレースアノマリーに関しては、これまで文献 で現実より重いクォークの場合に我々が経験した通り、先行研究の結果より数倍大きな値が得られる。この不一致に関しては、我々が用いているゼロ温度配位の妥当性が疑われ、この点を明らかにするために HPCI で使用申請した富岳などの計算機資源を用いて、ゼロ温度とみなせるサイズ 32^4 の格子でのゲージ場配位を独自に生成した。これに関しては、これまでに 200 程度の配位を得たが、問題の物理量を見る限り未だ熱平衡に達していないように見え、この大きなトレースアノマリーの問題の理解は今後の課題である。

一方、PACS10 の格子パラメータをもとにした格子間隔が 0.09fm の配位で、温度が 145 MeV、193 MeV のものについても SFtX 法による測定を行った。少なくとも 193 MeV のものに関しては、エントロピー密度は既存の結果とほぼ無矛盾に見える結果が得られた (図 5)。一方、トレースアノマリーは依然数倍大きな値を与えている。このことから、大きなトレースアノマリーの問題は、格子化誤差の観点からも再検討する必要があるように思われる。この結果についても論文で発表予定である。また、連続極限に向けた研究までは達成できず、これも今後の課題として残った。

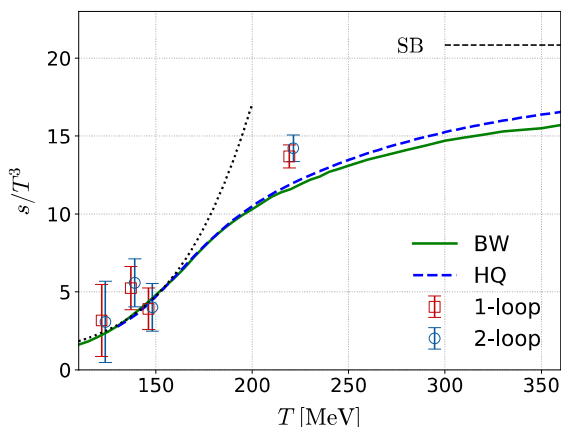


図 4 : PACS CS の格子パラメータに基づいたエントロピー密度の計算結果。格子間隔

0.09fm で、温度は、122 MeV、137 MeV、146 MeV、BW と HQ は文献①と②の結果。

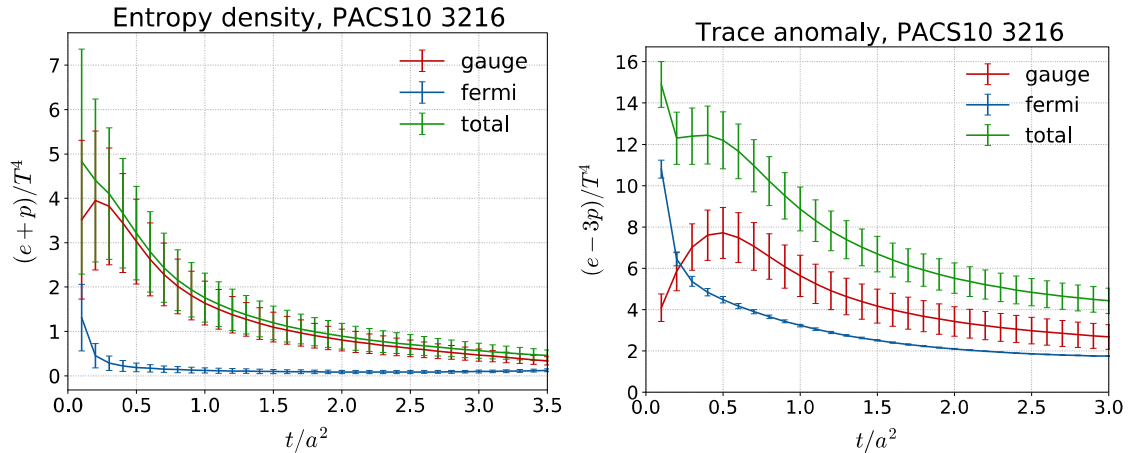


図 5：PACS10 の格子パラメータに基づいた SFtX 法による熱力学量の計算方法。左がエントロピー密度、右がトレースアノマリー。横軸はフロー時間で、値のゼロへの外挿が物理的結果を与える。

こうした当研究課題での主たる研究の他に、当科研費でサポートされた研究テーマとして、2ループの摂動係数を SFtX 法で用いた場合の QCD 熱力学量の測定（これは現実より重い質量のクォークに関するもの）、 S^4 コンパクト化された空間での adjoint QCD におけるリノマロンの解析、SFtX 法による 4 フェルミオン演算子の定義から K 中間子バグ定数を決定する研究、有限温度純 Yang-Mills 理論における潜熱の SFtX 法による測定（ここではエネルギー運動量テンソルの定義を用いる）、グラディエント・フローに示唆されたゲージ対称性を保つ厳密くりこみ群の定式化とその解析、SFtX 法におけるゼロフロー時間への外挿公式のくりこみ群による研究、グラディエント・フローに基づいたウィルソン流くりこみ群の解析、格子ゲージ理論における分数トポロジカル電荷の定式化とその一般化された対称性のアノマリーへの応用（この論文は PTEP の Editors' choice 論文に選出）、ホッピングパラメータ展開に基づいた重いクォーク領域の QCD のカイラル臨界点の決定、などの研究を行った。これらの研究成果については、発表論文の業績リストを御覧頂きたい。

< 引用文献 >

- S. Borsanyi, Z. Fodor, C. Hoelbling, S. D. Katz, S. Krieg and K. K. Szabo, Phys. Lett. B 730, 99 (2014).
- A. Bazavov et al. [HotQCD Collaboration], Phys. Rev. D 90, 094503 (2014).
- T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno, T. Umeda et al. [WHOT-QCD Collaboration], Phys. Rev. D 85, 094508 (2012).
- H. Suzuki, PTEP 2013, 083B03 (2013).
- M. Asakawa, T. Hatsuda, E. Itou, M. Kitazawa, H. Suzuki, Phys. Rev. D 90, 011501 (2014).
- H. Makino and H. Suzuki, PTEP 2014, 063B02 (2014).
- Y. Taniguchi, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, M. Kitazawa, H. Suzuki, T. Umeda and N. Wakabayashi, Phys. Rev. D 96, 014509 (2017).
- (PACS Collaboration) K. I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, E. Shintani, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie, Phys. Rev. D 100, 094502 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計26件（うち査読付論文 26件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 24件）

1. 著者名 Kanaya Kazuyuki, Ashikawa Ryo, Ejiri Shinji, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Hiroshi, Wakabayashi Naoki	4. 巻 -
2. 論文標題 Phase structure and critical point in heavy-quark QCD at finite temperature	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PoS LATTICE2022	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.430.0177	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 Kanamori Issaku, Aoyama Tatsumi, Kanaya Kazuyuki, Matsufuru Hideo, Namekawa Yusuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Bridge++ 2.0: Benchmark results on supercomputer Fugaku	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PoS LATTICE2022	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.430.0284	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 Abe Motokazu, Morikawa Okuto, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2023
2. 論文標題 Fractional topological charge in lattice Abelian gauge theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad009	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 Sonoda Hidenori, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2022
2. 論文標題 One-particle irreducible Wilson action in the gradient flow exact renormalization group formalism	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac047	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 Suenaga Daiki, Kitazawa Masakiyo	4. 巻 107
2. 論文標題 Effective model for pure Yang-Mills theory on $T^2 \times R^2$ with Polyakov loops	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.074502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Pihan Gregoire, Bluhm Marcus, Kitazawa Masakiyo, Sami Taklit, Nahrgang Marlene	4. 巻 107
2. 論文標題 Critical net-baryon fluctuations in an expanding system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.107.014908	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 Kitazawa Masakiyo, Esumi Shinichi, Nonaka Toshihiro	4. 巻 1030
2. 論文標題 Ratio of baryon and electric-charge cumulants at second order with acceptance corrections	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 122591 ~ 122591
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2022.122591	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Suenaga Daiki, Kitazawa Masakiyo	4. 巻 274
2. 論文標題 Roles of Polyakov loops in Yang-Mills theory on $T^2 \times R^2$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 02014 ~ 02014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202227402014	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 Ejiri Shinji	4. 巻 106
2. 論文標題 Canonical partition function and center symmetry breaking in finite density lattice gauge theories	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.114505	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 Miyakawa Yuki, Sonoda Hidenori, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Manifestly gauge invariant exact renormalization group for quantum electrodynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac003	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 Miyakawa Yuki, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Gradient flow exact renormalization group: Inclusion of fermion fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab100	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 Suzuki Hiroshi, Takaura Hiromasa	4. 巻 2021
2. 論文標題 $t = 0$ extrapolation function in SFtX method for the energy-momentum tensor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab068	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 Akahoshi Yutaro, Aoki Sinya, Aoyama Tatsumi, Kanamori Issaku, Kanaya Kazuyuki, Matsufuru Hideo, Namekawa Yusuke, Nemura Hidekatsu, Taniguchi Yusuke	4. 巻 2207
2. 論文標題 General purpose lattice QCD code set Bridge++ 2.0 for high performance computing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012053 ~ 012053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2207/1/012053	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 Wakabayashi Naoki, Ejiri Shinji, Kanaya Kazuyuki, Kitazawa Masakiyo	4. 巻 2022
2. 論文標題 Scope and convergence of the hopping parameter expansion in finite-temperature quantum chromodynamics with heavy quarks around the critical point	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac019	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 Kiyohara Atsushi, Kitazawa Masakiyo, Ejiri Shinji, Kanaya Kazuyuki	4. 巻 104
2. 論文標題 Finite-size scaling around the critical point in the heavy quark region of QCD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.114509	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 Sonoda Hidenori, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Gradient flow exact renormalization group	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab006	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 WHOT-QCD Collaboration, Shirogane Mizuki, Ejiri Shinji, Iwami Ryo, Kanaya Kazuyuki, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Hiroshi, Taniguchi Yusuke, Umeda Takashi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Latent heat and pressure gap at the first-order deconfining phase transition of SU(3) Yang-Mills theory using the small flow-time expansion method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa184	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 Suzuki Asobu, Taniguchi Yusuke, Suzuki Hiroshi, Kanaya Kazuyuki	4. 巻 102
2. 論文標題 Four quark operators for kaon bag parameter with gradient flow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.034508	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 Ashie Masahiro, Morikawa Okuto, Suzuki Hiroshi, Takaura Hiromasa	4. 巻 2020
2. 論文標題 More on the infrared renormalon in SU(N) QCD(adj.) on $\mathbb{R}^3 \times S^1$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa096	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 Taniguchi Yusuke, Ejiri Shinji, Kanaya Kazuyuki, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Hiroshi, Umeda Takashi, WHOT-QCD Collaboration	4. 巻 102
2. 論文標題 Nf=2+1 QCD thermodynamics with gradient flow using two-loop matching coefficients	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.014510	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 -

1. 著者名 Ishikawa Kosuke, Okuto Morikawa, Shibata Kazuya, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2020
2. 論文標題 Vacuum energy of the supersymmetric $\mathbb{C}P^{N-1}$ model on $\mathbb{R} \times S^1$ in the $1/N$ expansion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa066	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 Baba Atsushi, Ejiri Shinji, Kanaya Kazuyuki, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Asobu, Suzuki Hiroshi, Taniguchi Yusuke, Umeda Takashi	4. 巻 363
2. 論文標題 Calculation of PCAC mass with Wilson fermion using gradient flow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.363.0191	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 Kanaya Kazuyuki, Baba Atsushi, Suzuki Asobu, Ejiri Shinji, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Hiroshi, Taniguchi Yusuke, Umeda Takashi	4. 巻 363
2. 論文標題 Study of 2+1 flavor finite-temperature QCD using improved Wilson quarks at the physical point with the gradient flow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.363.0088	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 Kosuke, Morikawa Okuto, Shibata Kazuya, Suzuki Hiroshi, Takaura Hiromasa	4. 巻 2020
2. 論文標題 Renormalon structure in compactified spacetime	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz147	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 Ashie Masahiro, Morikawa Okuto, Suzuki Hiroshi, Takaura Hiromasa, Takeuchi Kengo	4. 巻 2020
2. 論文標題 Infrared renormalon in $SU(N)$ QCD(adj.) on $\mathbb{R}^3 \times S^1$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz157	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 Kosuke, Morikawa Okuto, Nakayama Akira, Shibata Kazuya, Suzuki Hiroshi, Takaura Hiromasa	4. 巻 2020
2. 論文標題 Infrared renormalon in the supersymmetric C^{N-1} model on $\mathbb{R} \times S^1$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa002	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47件 (うち招待講演 21件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 Gradient flow exact renormalization group
3. 学会等名 The Gradient Flow in QCD and other Strongly Coupled Field Theories (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北沢正清
2. 発表標題 ホッピングパラメタ展開の高次項と収束性
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江尻信司
2. 発表標題 重クォーク領域における臨界点決定のためのホッピングパラメタ展開の収束性
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 SFtX法による $N_f=2+1$ フレーバーQCDの熱力学量
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masakiyo Kitazawa
2. 発表標題 Flux-tube structure via energy-momentum tensor
3. 学会等名 The Intricate Dynamics Of QCD In Vacuum And Extreme Environments (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuyuki Kanaya
2. 発表標題 Phase structure and critical point in heavy-quark QCD at finite temperature
3. 学会等名 The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuyuki Kanaya
2. 発表標題 Critical point in heavy-quark QCD at finite temperature
3. 学会等名 Tsukuba Global Science Week (TGSW2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuyuki Kanaya
2. 発表標題 Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the gradient flow
3. 学会等名 The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences at the University of Tsukuba (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江尻信司,
2. 発表標題 有限温度格子QCDの重クォーク領域での一次相転移の終点の化学ポテンシャル依存性
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 有限温度量子色力学のダイナミクス
3. 学会等名 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN)第13回拠点シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 Gradient flow exact renormalization group: A perturbative analysis
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 有限温度量子色力学における物理量の第一原理計算
3. 学会等名 第8回「京」を中核とするHPCI システム利用研究課題成果報告会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 SFtX法による $N_f=2+1$ フレーバーQCDの熱力学量
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会（2022年）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuyuki Kanaya
2. 発表標題 Latent heat and pressure gap at the first-order deconfining phase transition of SU(3) Yang-Mills theory using the small flow-time expansion method
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 Kazuyuki Kanaya
2. 発表標題 Four quark operators for kaon bag parameter with gradient flow
3. 学会等名 熱場の量子論とその応用2021 (TFQT 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金谷和至
2. 発表標題 Four quark operators for kaon bag parameter with gradient flow
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuyuki Kanaya
2. 発表標題 Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the gradient-flow
3. 学会等名 CCS 13th international symposium 2021 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金谷和至
2. 発表標題 勾配流法を用いた $N_f=2+1$ QCDのエネルギー運動量テンソルの研究
3. 学会等名 第8回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題成果報告会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinji Ejiri
2. 発表標題 Particle density probability distribution function and center symmetry breaking in finite density lattice gauge theories
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 Shinji Ejiri
2. 発表標題 Phase structure of QCD in the heavy quark region
3. 学会等名 YITP workshop "QCD phase diagram and lattice QCD" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江尻信司
2. 発表標題 重クォーク領域における臨界点決定のためのホッピングパラメタ展開の収束性
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北沢正清
2. 発表標題 格子量子色力学に基づく初期宇宙の諸性質の精密数値解析
3. 学会等名 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN)第13回拠点シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masakiyo Kitazawa
2. 発表標題 Critical points in strongly-interacting media
3. 学会等名 Tsukuba Global Science Week (TGSW2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北沢正清
2. 発表標題 重クォーク領域の臨界点周辺における有限サイズスケーリングの精密測定
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masakiyo Kitazawa
2. 発表標題 Gravitational form factors from lattice QCD
3. 学会等名 GPDs and related topics at J-PARC (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masakiyo Kitazawa
2. 発表標題 Stress-energy-momentum tensor on the lattice
3. 学会等名 YITP workshop "QCD phase diagram and lattice QCD" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masakiyo Kitazawa
2. 発表標題 From lattice to observables
3. 学会等名 The 8th Asian Triangle Heavy-Ion Conference (ATHIC 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北沢正清
2. 発表標題 ホッピングパラメタ展開の高次項と収束性
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 有限温度量子色力学のダイナミクス
3. 学会等名 JHPCN第12回拠点シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 The vacuum angle is a marginal parameter
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 Small Flow time expansion (SFtX)法による2+1フレーバーQCDの熱力学
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 ウィルソンフェルミオンに基づいた有限温度量子色力学の研究
3. 学会等名 第7回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題成果報告会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 Gradient flow exact renormalization group
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Suzuki
2. 発表標題 Gradient flow and the Wilsonian renormalization group flow
3. 学会等名 The 10th International Conference on Exact Renormalization Group 2020 (ERG2020)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金谷和至
2. 発表標題 物理的なクォーク質量におけるエネルギー運動量テンソルの研究
3. 学会等名 JHPCN第12回拠点シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北澤正清
2. 発表標題 格子量子色力学に基づく初期宇宙の諸性質の精密解析
3. 学会等名 JHPCN第12回拠点シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kitazawa Masakiyo
2. 発表標題 Anisotropic pressure induced by finite-size effects at nonzero temperature in SU(3) YM theory
3. 学会等名 Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金谷和至
2. 発表標題 Improvement of the SFtX method based on the gradient flow in the study of finite temperature $N_f=2+1$ QCD
3. 学会等名 熱場の量子論とその応用2020 (TFQT 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江尻信司
2. 発表標題 有限密度格子ゲージ理論におけるセンター対称性による符号問題の回避法を用いた粒子密度確率分布関数
3. 学会等名 熱場の量子論とその応用2020 (TFQT 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金谷和至
2. 発表標題 Improvement of the SFtX method based on the gradient flow in the study of finite temperature Nf=2+1 QCD
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江尻信司
2. 発表標題 センター対称性による有限密度格子ゲージ理論における符号問題の回避
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuyuki Kanaya
2. 発表標題 Thermodynamic observables in (2+1)-flavor QCD applying the gradient-flow method
3. 学会等名 CCS 12th international symposium 2020 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, CCS, Tsukuba University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金谷和至
2. 発表標題 勾配流法を用いたクォーク・グルオン プラズマの物性的研究
3. 学会等名 第7回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題成果報告会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金谷和至
2. 発表標題 Gradient flowに基づくSfTX法による物理点QCDの熱力学特性の研究
3. 学会等名 大阪大学サイバーメディアセンター2020年度公募型利用制度成果報告会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江尻信司
2. 発表標題 Small flow-time expansion法によるSU(3)格子ゲージ理論の一次相転移点における潜熱と圧力差
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masakiyo Kitazawa
2. 発表標題 Energy-momentum tensor on the lattice
3. 学会等名 Extreme Nonequilibrium QCD, ICTS, India (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江尻信司
2. 発表標題 End point of first order phase transitions and sign problem in finite density lattice gauge theories
3. 学会等名 第3回クラスター階層領域研究会（招待講演）
4. 発表年 2020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
研究分担者	江尻 信司 (Ejiri Shinji) (10401176)	新潟大学・自然科学系・准教授 (13101)	
研究分担者	北澤 正清 (Kitazawa Masakiyo) (10452418)	京都大学・基礎物理学研究所・講師 (14301)	
研究分担者	梅田 貴士 (Umeda Takashi) (40451679)	広島大学・人間社会科学研究科(教)・准教授 (15401)	
研究分担者	金谷 和至 (Kanaya Kazuyoshi) (80214443)	筑波大学・数理物質系(特命教授)・特命教授 (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
---------	---------