

令和 4 年 6 月 4 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03819

研究課題名（和文）グラジエントフローによるクォーク・ハドロン物質の熱力学特性

研究課題名（英文）Thermodynamic Properties of Quark-Gluon-Plasma by the Gradient Flow

研究代表者

金谷 和至（Kanaya, Kazuyuki）

筑波大学・数理物質系（特命教授）・特命教授

研究者番号：80214443

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）：138億年前のビッグバン直後に、クォークが自由に飛び回るクォーク・グルオン・プラズマ相から、クォークがハドロン中に閉じ込められているハドロン相への相転移があったと考えられている。このQCD相転移の解明は宇宙史を理解する上で極めて重要である。我々は、グラジエントフローに基づくSFtX法(small flow-time expansion method)を使い、QCD相転移温度近傍におけるクォーク物質の熱力学的性質を、ウィルソン型クォークを用いた格子2+1フレーバーQCDで研究した。また、関連する手法開発やクォークが重いQCDの有限温度相転移における潜熱や臨界点等の研究を推進した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

QCD相転移は、我々の宇宙が経験した、素粒子レベルでの最後の相転移である。この相転移により、我々の知る通常物質（陽子や中性子など）が生成された。従って、その解明は、重い元素の創生や生命の発生につながる、宇宙史の物質進化の初期状態を理解する上で極めて重要である。QCD相転移をQCDの第一原理から再現する唯一の研究方法が格子QCDの大型シミュレーションである。SFtX法は、格子QCD研究に大きなブレイクスルーをもたらす可能性があり、我々の先駆研究には、大きな意義があると考えている。

研究成果の概要（英文）：Just after the Big Bang 13.8 million years ago, our Universe is expected to have experienced a phase transition from the quark-gluon-plasma state in which quarks are liberated to the ordinary hadron phase in which quarks are confined in hadrons. Understanding this QCD phase transition is important in clarifying the history of the Universe. We studied thermodynamic properties of the quark matter around the QCD phase transition temperature by lattice simulation of 2+1 flavor QCD with Wilson-type quarks, adopting the SFtX method (small flow-time expansion method) based on the gradient flow. We also pushed forward development of related technics and studies of the latent heat, critical point, etc. at the finite-temperature transition of QCD with heavy quarks.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：素粒子物理学 クォーク・グルオン・プラズマ 有限温度 熱力学的性質 シミュレーション 宇宙史
グラジエントフロー SFtX法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

クォークは、通常は陽子や中性子などのハドロンの中に閉じ込められており、単独で取り出すことができないが、1兆度以上の超高温では、ハドロンから溶け出してクォーク・グルオン・プラズマ状態に相転移すると考えられている。この QCD 相転移により、我々の知っているハドロン宇宙の初期状態が与えられる。従って、QCD 相転移の詳細や相転移点近傍におけるクォーク物質の熱力学的性質の理解は、宇宙の現在の姿を理解する上で極めて重要である。また、QCD 相転移や高温・高密度クォーク物質の状態方程式は中性子星の内部構造の予言でも重要であり、重力波やパルサーの周期変化から測定された中性子星の大きな質量を理解する上で本質的である。QGP を地上で生成させるために、米国の RHIC や欧州の LHC を用いた実験が進められているが、基礎理論である QCD 第一原理からの理論的予言が不可欠である。

QCD 相転移もクォーク・ハドロン物質の熱力学も本質的に非摂動論の問題であり、格子場の理論に基づく QCD の数値シミュレーションが、現在最も信頼性の高い研究方法である。格子正則化では、時空の連続的並進対称性やカイラル対称性などが陽に壊されてしまう。これらは、適切な格子作用で適切なくりこみを行うことで、連続極限で回復するが、対称性に関わる物理量の評価には、複雑で非自明なくりこみ操作や、対称性が壊れていることに由来する多数の演算子との非物理的な混合の解消が数値的に要求される。複雑な操作と様々な量の高精度評価が要求され、実用に至らない場合も多い。また、有限温度・有限密度 QCD のシミュレーション研究の多くは、計算量が少ないスタガード型格子クォークを用いて行われているが、連続極限での QCD の再現が証明されていないという本質的問題を孕んでいる。Wilson 型格子クォークは理論的基礎が確立しており連続極限の正しさが保証されている反面、カイラル対称性を陽に壊しているため、カイラル凝集や位相感受率など、カイラル対称性に関わる物理量に関して複雑なくりこみ操作や非物理的な混合の解消が要求され、全体として大きな計算資源が要求されるという困難がある。

2. 研究の目的

本研究は、グラジエント・フロー(勾配流)に基づく SFtX 法 (small flow-time expansion method) [1,2] を応用して、クォーク・ハドロン物質の相構造と熱力学的特性を、格子 QCD シミュレーションにより解明することを目的としている。SFtX 法はくりこまれた物理量を格子で直接評価する一般的で強力な方法であり、上記の困難を克服して格子 QCD にブレイク・スルーをもたらす可能性がある。SFtX 法は、最初に、格子化で並進対称性が陽に壊されるためにこれまで格子計算の扱いが難しかったエネルギー運動量テンソルの評価に応用され、クエンチ近似 QCD でその有効性が確認された。我々は、SFtX 法がどんな物理量にも使うことができ、カイラル対称性の破れにも有効であることに着目し、動的な Wilson 型クォークを使った 2+1 フレーバー QCD の研究を推進する。並行して、SFtX 法の基本的性質の研究やそのさらなる改良方法の開発も促進する。さらに、クォークが重い領域における QCD の相構造や臨界点も、SFtX 法と再重み付け法などを応用して研究する。

3. 研究の方法

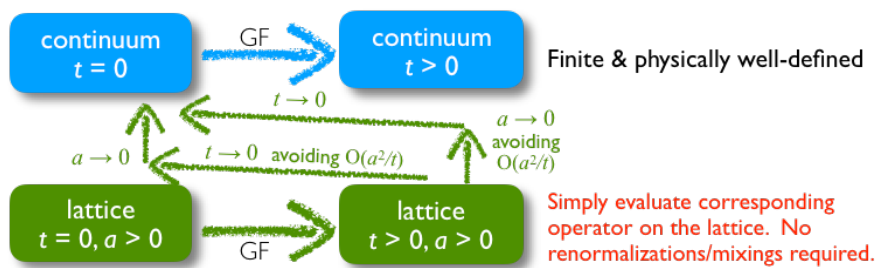


図 1: SFtX 法による物理量評価[1, 2]。格子のフローさせた物理量 (右下) を連続極限 ($a \rightarrow 0$) とフロー時間ゼロ極限 ($t \rightarrow 0$) に 2 重外挿して物理量 (左上) を得る。

連続理論の物理量を非摂動論的に評価しようとする、通常は、その物理量を格子上で評価して連続極限に外挿する。しかし、上に述べたように、くりこみや混合の除去のためにしばしば重い計算となる。他方、連続時空の場の理論において、場の量にグラジエント・フローと呼ばれる変形 (場の量をフロー時間 $t=0$ から $t>0$ までフロー方程式に従って発展させる) を行うと、フローさせた場の量で構成する演算子は紫外発散も同一点特異性も無い有限量となることが証明されている。SFtX 法 [2, 3] では、フローさせた演算子の有限性を利用して、対応する演算子を格子上で直接評価し、連続極限とフロー時間ゼロ極限に 2 重外挿することで、くりこまれた物理量を評価する (図 1)。有限量の評価なので、対応する演算子を格子で構成するだけで、基本的にくりこみ操作や混合の除去などが不要である。

動的クォークを含む QCD への SFtX 法の最初の応用として、我々はまず、u, d クォークが現実よ

りやや重い 2+1 フレーバー QCD を、格子間隔が $a \approx 0.07 \text{ fm}$ で研究した[2, 3]。状態方程式が従来の方法により評価した状態方程式を良く再現することを示し、また、カイラル感受率がクロスオーバー温度でピークを示すことを Wilson 型クォークとして初めて示した[2]。さらに、位相感受率を、グルオンを用いた定義式と、それを連続理論のカイラル関係式を用いてクォークを用いて表し直した評価式の両方で計算し、有限の格子間隔でも両者が極めてよく一致することを示した。通常の方法でスタガード型クォークを用いた先行研究では、この程度の格子間隔では両者は 2桁も違っており、SFtX 法が極めて有用であることをあらわしている[3]。

4. 研究成果

SFtX 法におけるくりこみスケールと高次項の効果の研究 [4]

上記の、u, d クォークが現実よりやや重い場合の 2+1 フレーバーQCD の研究[2, 3]を発展させ、物理点（現実のクォーク質量）での 2+1 フレーバーQCD の研究や格子間隔依存性の研究を開始した。その過程で、格子が粗い場合などには SFtX 法をさらに改良する必要があることが判明したので、マッチング係数のくりこみスケール依存性などの SFtX 法の特性をさらに研究し、くりこみスケールを適切に選ぶことで SFtX 法を大きく改善できることを示した[4]。

論文[4]では、マッチング係数におけるくりこみスケールと摂動高次項の効果の研究した。マッチング係数とは、フローさせた演算子と求めるくりこまれた物理量とを結びつける係数である。SFtX 法では、格子上で測った $t > 0$ の演算子にマッチング係数を掛けたものを組み合わせて、目的とする物理量をあらわし、その 2 重外挿を実行する。マッチング係数は、QCD などの漸近自由な理論では、 t が大きくなれば摂動計算することができる。SFtX 法ではさらに、摂動であらかじめわかっている t 依存性をマッチング係数に取り込むことで、 $t \rightarrow 0$ 外挿がより滑らかになるように改良している。実際、上記の u, d クォークが現実よりやや重い場合の研究（格子間隔 0.07 fm ）では、マッチング係数のおかげで、 $t \rightarrow 0$ 外挿を数値的に可能とする線形領域 “linear window” が実現した。他方、物理点での 2+1 フレーバーQCD の研究（格子間隔 0.09 fm ）や、u, d クォークが重い QCD で格子間隔を粗くした試験研究において、いくつかの物理量に関して linear window が十分明確でなくなるという現象を経験した。

図 1 に示したように、SFtX 法では、格子上で測った $t > 0$ でのフローさせた演算子の結果を、連続極限 ($a \rightarrow 0$) とフロー時間ゼロ極限 ($t \rightarrow 0$) に 2 重外挿する。ここで、 t が大きな領域と同時に $t/a^2 \sim 0$ 領域でも誤差が大きいので、それらを避けながら 2 重外挿する必要がある。従って、格子が粗い場合もしくは格子化誤差が大きい演算子の場合には、外挿に必要な線形領域が不明確になる可能性がある。これらに SFtX 法を応用するためには、改善が要求される。マッチング係数を摂動計算するときのくりこみスケール μ は、摂動展開が破綻しない限りどんな値を取っても良く、最終的な物理量は μ に依存しないはずである。しかし実際は、摂動展開を有限次で切っているため、摂動展開の質は μ をどう取るかで影響を受ける。通常 μ としては、フローによる平滑化のスケールである $\mu_d = 1/(8d)^{1/2}$ が採用されてきたが、 t が大きい赤外領域では摂動計算が破綻する。SFtX 法で $t \rightarrow 0$ 外挿を実行する上で、どこまで大きな t を利用できるかは、実用上重要である。論文[4]では最近提案された $\mu_0 = 1/(2er)^{1/2}$ (γ はオイラー数) を調べた。数値的には $\mu_0 \approx 1.5 \mu_d$ なので、 μ_0 は摂動領域をより大きな t まで拡大し、 t が大きな領域で線形シグナルを改善してくれる可能性がある。

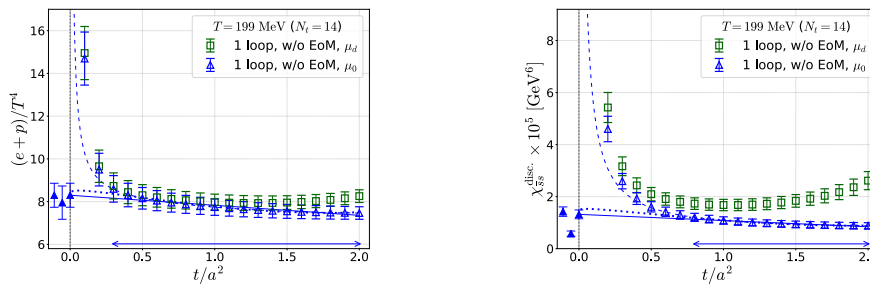


図 2：マッチング係数におけるくりこみスケールの効果。ud クォークが現実よりやや重い 2+1 フレーバーQCD におけるエントロピー密度（左図）と ud クォークのカイラル感受率（右図）。直線（点線、ダッシュ線）は、 μ_0 スケールを用いた $t \rightarrow 0$ 線形フィット（非線形外フィット、linear+log フィット）の結果。 $t \approx 0$ のシンボルは、右から線形、非線形、linear+log フィットによる各物理量の評価結果[4]。

図 2 にエントロピー密度（左図）と ud クォークのカイラル感受率（右図）の $t \rightarrow 0$ 外挿を示す。緑が μ_d 、青が μ_0 の結果である。 $t \rightarrow 0$ 極限はどちらもコンシステントだが、 μ_0 により線形シグナルが改善されていることがわかる。これを応用した物理点 2+1 フレーバーQCD の試験研究でも、 μ_0 スケールにより線形シグナルが劇的に改善され、SFtX 法の安定性と適用範囲が大きく改善されることを確認した。（論文[4]では、マッチング係数における 2 ループ項の効果や、2 ループ計算で使われた運動方程式の影響も研究したが、我々の研究している 2+1 フレーバーQCD では線形シグナルの改善には寄与しないことがわかった。）

クエンチ近似 QCD の潜熱と SFtx 法における 2 重外挿の順序依存性の研究 [5]

SFtx 法における $a \rightarrow 0$ と $t \rightarrow 0$ の 2 重外挿 (図 1) では、格子化誤差が大きい $t/a^2 \sim 0$ 領域のデータを取り除いて外挿する必要がある。逆に、この $t/a^2 \sim 0$ 領域の格子化誤差が正しく取り除かれているならば、最終結果は外挿の順番によらず同じになると期待される。論文[5]では、SFtx 法を応用して、クエンチ近似 QCD (SU(3)ヤン=ミルズ理論) の有限温度 1 次相転移点における潜熱 $\Delta \epsilon$ と圧力ギャップ Δp を研究した。1 次相転移点では、共存する 2 相の動的平衡から $\Delta p = 0$ となるはずで、その数値的確認は結果の信頼性の良い指標とされてきた。クエンチ近似 QCD は計算が軽く、様々な格子間隔や空間体積で系統的に評価できる。3 つの格子間隔 ($N_t = 8, 12, 16$ に対応する $a = 1/(N_t T_c)$)、2 つの空間体積 ($N_s/N_t = 6, 8$ に対応する $V = (N_s a)^3 = (N_s/N_t)^3/T_c^3$) でシミュレーションを実行し、我々が開発した再重み付け法とヒストグラム法を組み合わせた手法を使って臨界点 $T = T_c$ に調整した上で、SFtx 法を応用して臨界点における $\Delta \epsilon$ と Δp を測定した。そのデータを使い、SFtx 法の様々な別手法による物理量評価が連続極限で一致することを示し、SFtx 法の正しさと実用性を確認した。

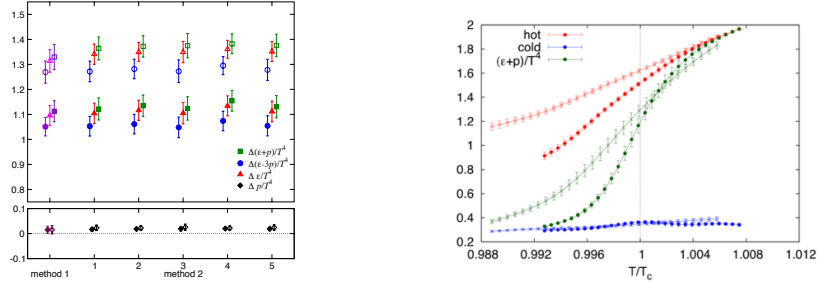


図 3: クエンチ近似 QCD の潜熱と圧力ギャップに関して 2 重外挿を行った結果。左図: $t \rightarrow 0$ を先に実行する "method 1" と $a \rightarrow 0$ が先の "method 2" の結果 (method 2 では $t \rightarrow 0$ 外挿の 5 種類のフィット・レンジも比較)。filled (open) symbols は $N_s/N_t = 8$ (6) の結果。右図: $N_t = 8$ におけるエントロピー密度 $\epsilon+p$ のヒステリシス。赤 (青) は高温 (低温) 相での平均で、緑は全体平均。thick (thin) symbols は $N_s/N_t = 8$ (6) の結果[5]。

図 3 左に、 μ_0 スケールを使った潜熱と Δp の結果を示す。この図から、(a) $a \rightarrow 0$ と $t \rightarrow 0$ の極限操作の順番を変えても結果が一致すること、および、(b) Δp がゼロとコンシステントであることが確認される。同時に、最終結果に空間体積依存性が確認される。図 3 右に示したように、有限体積効果は、主に高温相で大きく出ていることがわかった。

クォークが重い QCD の臨界点と臨界スケージングの研究 [6, 7]

クォークが重い極限の QCD は有限温度相転移が 1 次だが、クォーク質量を無限大から下げていくと連続的なクロスオーバーに変化する。両者の境界である臨界点の研究は、クォーク質量が軽い領域における臨界点研究の雛形として興味を持たれている。我々は、クォークが重い場合の 2+1 フレーバー QCD の臨界点を研究した。重いクォークの効果ホッピング・パラメータ展開で取り入れ、再重み付け法とヒストグラム法を組み合わせる 2 フレーバー QCD の臨界点を決定した。重クォーク展開の低次ではフレーバー数依存性がわかっているため、2+1 フレーバー QCD の臨界線もこれから導くことができる。 $N_t = 4, 6$ でホッピング・パラメータ展開の最低次の結果とその次の次数まで取り入れた結果を比較した結果、格子間隔依存性がまだ大きく、また、連続極限に近づくにつれて重クォーク展開の収束性が悪くなることがわかった。さらに、ここで調べた格子の空間体積では、有意な空間体積依存性があることがわかった[6]。

そこで、空間体積依存性を調べるために、 $N_t = 4$ 格子の場合に大きな空間体積までの系統的シミュレーションを行った。図 5 に、ポリアコフ・ループの Binder cumulant を示す。臨界スケージングが実現していれば、Binder cumulant は臨界点で系の空間体積によらず一定値になり、様々な体積の結果が 1 点で交差する。図 4 より、 $LT \geq 9$ で臨界スケージングが実現していることがわかる。この臨界スケージングにより、熱力学極限における臨界点を高精度で測定することが可能になる[7]。

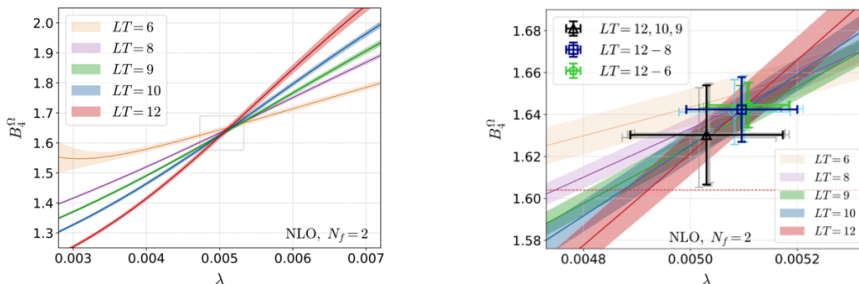


図 4: クォークが重い QCD の Binder cumulant. λ はクォーク質量を制御するパラメータで、 λ が大きいほどクォークは軽くなる。 $LT = N_s/N_t$ は格子のアスペクト比で、 LT が大きいほど格子の空間サイズが大きい。左図は右図の交点近傍の拡大図 [7]。

ホッピング・パラメータ展開の収束性の研究 [8]

臨界点におけるホッピング・パラメータ展開の有効性を確認するために、臨界点近傍における高次項の効果と展開の収束性を研究した。まず、収束性が最も悪い場合に、展開項を 100 次項まで準解析的に計算し、ホッピング・パラメータに関する収束半径を、ダランベールとコーシー・アダマールの 2 種類の方法で評価した。図 5 より、次数無限大極限で収束半径が $\kappa = 1/8$ (クォーク質量ゼロ) であることを示した。また、展開を有限次で止めた場合の誤差評価を行い、NL0 までを用いた前記の結果が $N_t = 4$ では十分信頼できるが、 $N_t \geq 6$ ではより高次項まで取り入れる必要があることがわかった。これを受けて、ホッピング・パラメータ展開の十分な高次までの効果を取り入れたシミュレーションを実現する手法を開発した。これにより、フル QCD シミュレーションよりも遥かに低コストでクォークが重い QCD のシミュレーションが可能になった。

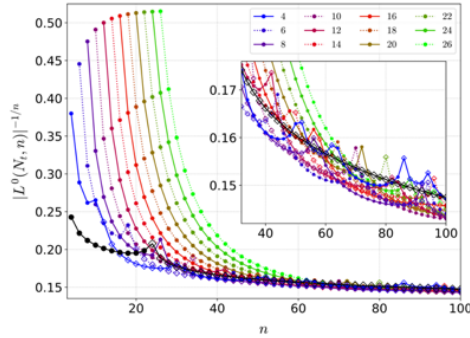


図 5: クォークが重い QCD におけるホッピング・パラメータ展開の収束性: 全てのリンク変数を 1 と置いた収束が最も悪い場合に、コーシー・アダマールの収束半径 (縦軸) を展開次数 n の関数として示したもの。黒はウィルソン型、色付きは様々なポリアコフ型ループ項の結果 [8]。

物理点 2+1 フレーバー QCD の研究 [9]

上記の一連の研究と並行して、これらの研究で開発された改良技術を取り入れて、物理点 2+1 フレーバー QCD の有限温度シミュレーションを推進している。その最初のステップとして、PACS-CS Collaboration のゼロ温度物理点配位に相当する格子間隔 $a = 0.08995(40)$ fm の場合に集中して、有限温度配位生成を進めた。SFtX 法により、物理量の観測に関しては計算時間の大きな削減ができたが、物理点や格子間隔が細かい格子の配位生成には、通常どおり膨大な計算が要求され、様々な計算機資源を動員して大規模シミュレーションを系統的に遂行した。約 120–300 MeV の温度範囲でエネルギー運動量テンソルやカイラル感受率の測定を進め、相転移温度が 150 MeV 以下であることを示唆する中間結果を得た [9]。この相転移温度は、スタガード型クォークの結果より低い可能性があるが、相転移温度の精密な評価は重要である。ただし、相転移温度近傍の統計量が十分で無かったため、低温領域の統計を増強するシミュレーションを推進した。現在その解析を進めている。

SFtX 法によるカイラル物理量の研究 [10]

SFtX 法により、通常の方法では格子化に伴う対称性の破れのために評価が難しい物理量も直接非摂動的に評価できる可能性が拓かれた。有限温度の物理量だけでなく、ゼロ温度物理量にも、格子による非摂動的評価が望まれる物理量は多く存在する。

SFtX 法のゼロ温度物理量への応用として、B 中間子バググパラメータ B_K を SFtX 法で計算することを計画している。我々は、SFtX 法をクォーク 4 点関数の評価に拡張して、 B_K などの評価に必要なマッチング係数を摂動計算した [10]。

<引用文献>

- [1] H. Suzuki, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 083B03 (2013) [Erratum: 2015, 079201 (2015)]; H. Makino and H. Suzuki, *ibid.* 2014, 063B02 (2014) [Erratum: 2015, 079202 (2015)]; T. Endo, et al., *ibid.* 2015, 053B03 (2015); K. Hieda and H. Suzuki, Mod. Phys. Lett. A 31, 1650214 (2016).
- [2] Y. Taniguchi, et al., Phys. Rev. D 96, 014509 (2017), [Erratum: 99, 059904 (2019)]
- [3] Y. Taniguchi, et al., Phys. Rev. D 95, 054502 (2017).
- [4] Y. Taniguchi, et al., Phys. Rev. D 102, 014510, pp. 1–25 (2020) [Erratum: 102, 059903 (2020)].
- [5] M. Shirogane, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, 013B08, pp. 1–26 (2021)
- [6] S. Ejiri, et al., Phys. Rev. D 101, 054505, pp. 1–17 (2020).
- [7] A. Kiyohara, et al., Phys. Rev. D 104, 1144509, pp. 1–17 (2021).
- [8] N. Wakabayashi, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 033B05, pp. 1–27 (2022).
- [9] K. Kanaya, et al., PoS (LATTICE 2019) 088, pp. 1–7 (2020); 鈴木 博, ‘SFtX 法による $N_f = 2+1$ フレーバー QCD の熱力学量’, 日本物理学会 第 77 回年次大会 (3. 15–19, 2022)
- [10] A. Suzuki, et al., Phys. Rev. D 102, 034508, pp. 1–13 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 14件）

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 1-26
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 1-13
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 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 1-25
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 Taniguchi Yusuke, Baba Atsushi, Suzuki Asobu, Ejiri Shinji, Kanaya Kazuyuki, Kitazawa Masakiyo, Shimojo Takanori, Suzuki Hiroshi, Umeda Takashi	4. 巻 166
2. 論文標題 Study of energy-momentum tensor correlation function in N _f =2+1 full QCD for QGP viscosities	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PoS (LATTICE 2018)	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) 10.22323/1.334.0166	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, Shimojo Takanori, Suzuki Asobu, Suzuki Hiroshi, Taniguchi Yusuke, Umeda Takashi	4. 巻 173
2. 論文標題 Measuring of chiral susceptibility using gradient flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PoS (LATTICE 2018)	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) 10.22323/1.334.0173	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 Shirogane Mizuki, Ejiri Shinji, Iwami Ryo, Kanaya Kazuyuki, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Hiroshi, Taniguchi Yusuke, Umeda Takashi	4. 巻 164
2. 論文標題 Equation of state near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory using gradient flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PoS (LATTICE 2018)	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) 10.22323/1.334.0164	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 88
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 2019年
3. 雑誌名 PoS (LATTICE 2019)	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) 10.22323/1.363.0088	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 Ejiri Shinji, Itagaki Shota, Iwami Ryo, Kanaya Kazuyuki, Kitazawa Masakiyo, Kiyohara Atsushi, Shirogane Mizuki, Taniguchi Yusuke, Umeda Takashi, WHOT-QCD Collaboration	4. 巻 71
2. 論文標題 Determination of the endpoint of the first order deconfinement phase transition in the heavy quark region of QCD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PoS (LATTICE 2019)	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) 10.22323/1.363.0071	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 191
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 PoS (LATTICE 2019)	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) 10.22323/1.363.0191	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 Ejiri Shinji, Itagaki Shota, Iwami Ryo, Kanaya Kazuyuki, Kitazawa Masakiyo, Kiyohara Atsushi, Shirogane Mizuki, Umeda Takashi, WHOT-QCD Collaboration	4. 巻 101
2. 論文標題 End point of the first-order phase transition of QCD in the heavy quark region by reweighting from quenched QCD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.054505	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 1-17
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 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 1-27
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 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 Kanaya Kazuyuki, Shirogane Mizuki, Ejiri Shinji, Iwami Ryo, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Hiroshi, Taniguchi Yusuke, Umeda Takashi	4. 巻 64
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 2022年
3. 雑誌名 PoS (LATTICE 2021)	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) 10.22323/1.396.0064	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 4件 / うち国際学会 14件)

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 (オンライン開催, 3.15-19, 2022)
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 (オンライン開催, 3.15-19, 2022)
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 (オンライン開催, 3.15-19, 2022)
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 (KEK, Tsukuba, Japan (online), Dec. 22, 2021) (招待講演) (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'' (YITP, Kyoto, Japan (online), Oct. 25-29, 2021)
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'' (YITP, Kyoto, Japan (online), Oct. 25-29, 2021)
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 (CCS, Tsukuba, Japan (online), 10.8, 2021) (国際学会)
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 (オンライン開催, 9.14-17, 2021)
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 (オンライン開催, 9.14-17, 2021)
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 (オンライン開催, 9.14-17, 2021)
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) (Univ. of Tsukuba (online), Sep. 6-11, 2021) (招待講演) (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) (KEK, Tsukuba, Japan (online), 8.30-9.1, 2021)
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) (オンライン開催 Zoom/Gather@MIT, USA, July 26-30, 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021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) (オンライン開催 Zoom/Gather@MIT, USA, July 26-30, 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021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 (東工大, 東京都 (online), 5.18, 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷口 裕介, 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 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 第12回拠点シンポジウム (THE GRAND HALL, 東京都, 品川区 (online), 7.09, 2020)
4. 発表年 2020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12回拠点シンポジウム (THE GRAND HALL, 東京都, 品川区 (online), 7.09, 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 $N_f=2+1$ QCD
3. 学会等名 熱場の量子論とその応用2020 (TFQT 2020) (KEK, Tsukuba, Japan (online), 8.24-26, 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬場 惇
2. 発表標題 SFtX法を用いたカイラル感受率の測定
3. 学会等名 熱場の量子論とその応用2020 (TFQT 2020) (KEK, Tsukuba, Japan (online), 8.24-26, 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) (KEK, Tsukuba, Japan (online), 8.24-26, 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬場 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介
2. 発表標題 SFtX法を用いたカイラル感受率の測定
3. 学会等名 日本物理学会 (筑波大学, 茨城県, つくば市 (online), 9.14-16, 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金谷 和至, 梅田 貴士, 江尻 信司, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介
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 日本物理学会 (筑波大学, 茨城県, つくば市 (online), 9.14-16, 2020)
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 (筑波大学, 茨城県, つくば市 (online), 9.14-16, 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 博, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 谷口 裕介, 馬場 惇
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 (筑波大学, 茨城県, つくば市 (online), 9.14-16, 2020)
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, Japan (online), 10.06, 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020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, TIFR, Bengaluru, India (online), 10.5-9, 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷口 裕介, 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 (THE GRAND HALL, 東京都, 品川区 (online), 10.30, 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 博, 金谷 和至, 谷口 裕介, 江尻 信司, 梅田 貴士, 北澤 正清, 馬場 惇
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 (THE GRAND HALL, 東京都, 品川区 (online), 10.30, 2020)
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 (大阪大学吹田キャンパス, 大阪府, 茨木市 (online), 3.10, 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 馬場 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北澤 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介
2. 発表標題 SfTX法を用いたWilson fermionの下でのカイラル感受率の測定
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (オンライン開催, 3.12-15, 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江尻 信司, 白銀 瑞樹, 石見 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士
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 (オンライン開催, 3.12-15, 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinji Ejiri, Atsushi Kiyohara, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Mizuki Shirogane, Ryo Iwami, Shota Itagaki, Takashi Umeda, Yusuke Taniguchi
2. 発表標題 Determination of the endpoint of the first order deconfinement phase transition in the heavy quark region of QCD
3. 学会等名 The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019), Wuhan, China (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Taniguchi, Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda
2. 発表標題 Non-perturbative renormalization of Kaon B parameter using gradient flow
3. 学会等名 The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019), Wuhan, China (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuyuki Kanaya, Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda
2. 発表標題 Study of 2+1 flavor finite-temperature QCD using improved Wilson quarks at the physical point with the gradient flow
3. 学会等名 The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019), Wuhan, China (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kanaya, A. Baba, S. Ejiri, M. Kitazawa, A. Suzuki, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda
2. 発表標題 Thermodynamic properties of QGP at the physical point with the gradient flow method
3. 学会等名 The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019), Tokyo, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Baba, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, A. Suzuki, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda
2. 発表標題 Measuring chiral susceptibility using gradient flow
3. 学会等名 The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019), Tokyo, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Taniguchi, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, M. Shirogane, A. Suzuki, H. Suzuki, T. Umeda, A. Baba
2. 発表標題 QCD energy-momentum tensor using gradient flow
3. 学会等名 The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019), Tokyo, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷口 裕介, 馬場 惇, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 白銀 瑞樹, 鈴木 遊, 鈴木 博, 梅田 貴士
2. 発表標題 QGP粘性係数導出に向けた $N_f=2+1$ QCDエネルギー運動量テンソル相関関数の研究 (II)
3. 学会等名 基研研究会「熱場の量子論とその応用」(TFQT 2019), 京都大学基礎物理学研究所, 京都
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白銀 瑞樹, 江尻 信司, 石見 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士, 若林 直輝
2. 発表標題 高次補正項を取り入れたグラディエントフローによる一次相転移点近傍の熱力学量
3. 学会等名 基研研究会「熱場の量子論とその応用」(TFQT 2019), 京都大学基礎物理学研究所, 京都
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬場 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 鈴木 博, 鈴木 遊, 谷口 裕介
2. 発表標題 Wilson fermionの下でのGradient flowを用いたカイラル感受率の測定
3. 学会等名 基研研究会「熱場の量子論とその応用」(TFQT 2019), 京都大学基礎物理学研究所, 京都
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金谷 和至, 馬場 惇, 江尻 信司, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士
2. 発表標題 QGP at the physical point with the gradient flow
3. 学会等名 基研研究会「熱場の量子論とその応用」(TFQT 2019), 京都大学基礎物理学研究所, 京都
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金谷 和至, 梅田 貴士, 江尻 信司, 北沢 正清, 下条 昂礼, 白銀 瑞樹, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介, 馬場 惇
2. 発表標題 グラジエントフローによる格子2+1フレーバーQCDの熱力学研究 II
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会, 山形大学, 山形市, 山形県
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷口 裕介, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 馬場 惇
2. 発表標題 gradient flowを用いたK中間子Bパラメータの非摂動的な繰り込み
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会, 山形大学, 山形市, 山形県
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬場 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介
2. 発表標題 Wilson fermionの下でのGradient flowを用いたPCAC massの計算
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会, 山形大学, 山形市, 山形県
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kanaya, Y. Taniguchi, A. Baba, S. Ejiri, S. Itagaki, M. Kitazawa, T. Shimojo, A. Suzuki, H. Suzuki, T. Umeda
2. 発表標題 (2+1)-flavor QCD thermodynamics using the gradient flow
3. 学会等名 11th Symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, Tsukuba, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金谷 和至, 梅田 貴士, 江尻 信司, 北沢 正清, 下条 昂礼, 白銀 瑞樹, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介, 馬場 惇
2. 発表標題 グラジエントフローに基づくSFtX法による格子2+1フレーバーQCDの熱力学 -- 2-loop係数の効果
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会, 名古屋大学, 名古屋市, 愛知県
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬場 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介
2. 発表標題 Wilson fermionの下でのgradient flowを用いたカイラル感受率の測定
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会, 名古屋大学, 名古屋市, 愛知県
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
研究協力者	江尻 信司 (Ejiri Shinji)	新潟大学 (13101)	
研究協力者	北澤 正清 (Kitazawa Masakiyo)	大阪大学 (14401)	
研究協力者	鈴木 博 (Suzuki Hiroshi)	九州大学 (17102)	
研究協力者	谷口 裕介 (Taniguchi Yusuke)	筑波大学 (12102)	
研究協力者	梅田 貴士 (Umeda Takashi)	広島大学 (15401)	

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