

令和元年5月14日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2018

課題番号：26400251

研究課題名（和文） 偏移境界条件を利用した有限温度格子QCDの研究

研究課題名（英文） Study of finite-temperature lattice QCD with shifted boundary conditions

研究代表者

梅田 貴士（Umeda, Takashi）

広島大学・教育学研究科・准教授

研究者番号：40451679

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究者が提唱した固定格子間隔アプローチによって、世界で初めてウィルソンクォークを用いたQCD状態方程式の格子QCD計算が可能になった。本研究課題では、偏移境界条件（Shifted boundary conditions）の手法を取り入れることによって、固定格子間隔アプローチの弱点である温度分解能の劇的な改善を達成することができた。さらにグラディエントフローの手法を採用することによって世界で初めてウィルソンクォークを用いた物理点における状態方程式の計算を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

格子QCDシミュレーションにおける状態方程式の計算はまだスタaggerドクォーク作用によって行われたものがほとんどである。しかしスタaggerドクォーク作用は連続極限が保証されていないので理論的に問題のないウィルソンクォーク系作用を用いた計算が期待されている。

また、新しいグラディエントフローによる計算はウィルソンクォーク系作用で問題となっていたカイラル対称性の陽な破れによる影響を最小限に抑えることが可能になる。このグラディエントフローの手法の有効性を世界に示したことは学術的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：The fixed scale approach proposed by the principal researcher enabled lattice QCD calculations of the QCD equation of state using the Wilson quark for the first time in the world. In this research project, by adopting the technique of Shifted boundary conditions, we were able to achieve a dramatic improvement in temperature resolution, which is a weakness of the fixed scale approach. Furthermore, by adopting the gradient flow method, we calculate the equation of state at physical points using Wilson quarks for the first time in the world.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：格子QCD クォークグルーオンプラズマ 状態方程式

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

QCD の有限温度相転移は現在の宇宙が経験した最後の相転移であり、その相転移の性質は初期宇宙の進化を探る上でも重要な手がかりとなる。この相転移の高温相で現れる物質状態はクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP) と呼ばれ、重イオン衝突実験により生成が可能である。RHIC 実験では QGP 状態が完全流体の性質を示すなど、当初の予想に反して、強い相互作用性を示す実験結果が多く発表された。その後の LHC 実験で、この QGP の性質のさらなる解明が進められている。重イオン衝突実験における QGP 状態の理論研究は、主に流体モデルなどを用いて行われているが、モデルの構築には QCD の第一原理計算から求まる物理量が必要になる。現在のところ、これらの物理量の計算を非摂動的、定量的に行える方法は格子 QCD による数値シミュレーションだけである。実際、格子 QCD は QCD 相図の決定、相転移温度、状態方程式の計算などで数多くの研究を発表し、流体モデルを含む現象論的な QGP 研究に重要な役割を果たしている。

これまでに行われた有限温度・密度での格子 QCD の計算はほとんどが KS クォークという格子クォーク作用を採用している。しかしながら現実世界に対応する (アップ、ダウン、ストレンジクォークの真空偏極が重要になる、いわゆる 2+1 フレーバーの) QCD 計算に対しては、KS クォークは作用の局所性が連続極限においても保証されていないなど、理論的な正当性に問題が残されている。(KS クォークは定式化の特性により、フレーバー数が 4 の倍数でのみ正当性が保証されている。) ウィルソンクォークの様に、フレーバー数によらず正しい連続極限が保証されている定式化を用いた計算結果が、格子 QCD の分野に限らず、重イオン衝突実験に係わる広い分野の研究者達から熱望されている。

本研究代表者らはこれらの目的のために固定格子間隔アプローチを提唱した[1]。有限温度場の理論では、温度は虚時間方向の周期長の逆数で定義される。通常、有限温度格子 QCD では、虚時間方向の格子点の数 ( $Nt$ ) を固定して、格子間隔 ( $a$ ) を変えて温度 ( $T = 1/(Nt \cdot a)$ ) をコントロールする。一方、固定格子間隔アプローチでは逆に  $a$  を固定して  $Nt$  を変える。このアプローチでは各温度で格子間隔  $a$  が共通な為、従来の方法で必要な膨大なゼロ温度 (での準備) 計算を大幅に省略することが可能になる。このアプローチを採用することによって、比較的重いクォーク質量ながら世界で初めてウィルソンクォークによる 2+1 フレーバー QCD の状態方程式の計算を成功させた。近年ではウィルソンクォーク[2] だけでなく、twisted mass クォーク[3] や、ドメインウォールクォーク[5]、オーバーラップクォーク[6] など、連続極限が保証されているだけでなく、さらにカイラル対称性などが優れたクォーク定式化を用いた大規模プロジェクトが始まっている。これらのプロジェクトの多くで固定格子間隔アプローチが採用される[2,3] など、このアプローチの有用性は世界で認められつつある。一方で、このアプローチでは、温度の分解能が整数の逆数に制限されてしまう問題がある。そのため現在の計算では、状態方程式の温度分解能が低く、相転移温度は数十 MeV 程度の精度でしか求まらないという限界がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、この温度分解能の問題を改善するために偏移境界条件の手法[4] を取り入れる。偏移境界条件はエントロピー密度の新しい計算手法などの為に考案されたもので、場に対して虚時間方向の周期境界条件を課すとき、同時に空間方向への偏移 (Shift) を行う。この偏移を行うことによって同じ格子間隔、同じ格子サイズでも、偏移の大きさによって様々な温度を実現することが可能になる。有限温度場ではローレンツ不変性がソフトに破れているものの (無限体積では) 偏移境界条件は系の自由エネルギーに対して (格子誤差を除き) 温度を通してのみ影響することが確認されている[4]。固定格子間隔アプローチに、この偏移境界条件を組み合わせることによって、問題であった温度分解能の劇的な改善が期待できる。さらに偏移境界条件によるエントロピー密度計算[4] を用いると、新しいゼロ温度計算を行う必要なくベータ関数を計算する事が可能になる。

本研究課題の目的は、この偏移境界条件の手法を固定格子間隔アプローチに適用して、期待する高い温度分解能の計算を実証することである。クエンチ近似だけでなく、クォークの真空偏極を含んだ格子 QCD 計算においても同様の計算が行えることを確認し、最終的には物理点における 2+1 フレーバー QCD 計算に適用することを狙っている。この新しいアプローチが機能すれば状態方程式だけでなく、物理点での相転移温度や相転移次数の決定を行うことも可能になる。

### 3. 研究の方法

この研究課題では、固定格子間隔アプローチに偏移境界条件の手法を適用するという新しいアプローチに対して、様々な熱力学量がどのように計算されて、どれくらいの精度で求まるのか、新しい問題が生じないのか? ということを明らかにする。第一段階では、少ない計算コストで高精度の結果の検証が行えるクエンチ近似 (クォークの真空偏極を無視する近似) によって、新しいアプローチのテストを行う。第二段階では、クォーク真空偏極の効果を入れた計算を行う。ここでは最終的な目的である物理点 (現実のクォーク質量) での計算を踏まえ、クォーク質量以外の条件をそろえた 2+1 フレーバー QCD の計算を行う。PACS-CS グループによる物理点計算のパラメータ[7] と同じ格子結合定数 ( $\beta=1.9$ ) における、非摂動改良されたウィルソンクォークを採用して、パイ中間子が 400MeV 程度となるクォーク質量を狙う。物理点計算へ向けた、必要統

計量の見積り、必要温度領域の見積りなどの様々な情報収集が、適度な計算コストで行えることを想定している。新しいアプローチによる、クエンチ近似と上記設定における 2+1 フレーバー QCD において、(1) 状態方程式(EOS)、(2) 相転移温度と次数( $T_c$ )、(3) ベータ関数の計算を行う。状態方程式は具体的には、トレースアノマリー、圧力、エネルギー密度、エントロピー密度、音速を計算する。2+1 フレーバーQCD の配位生成や物理量計算では、HPCI 戦略プログラム分野 5 で開発されている格子 QCD 共通コード Bridge++ [8] を採用し、これをベースに偏移境界条件を組み込んでいく。これらのコード開発と高速化は、Bridge++プロジェクトで中心的役割を果たしている連携研究者の松古氏と協力して行っていく。これらのコードは Bridge++ プロジェクトとして開発が行われる。

#### <引用文献>

- [1] T. Umeda, et al. [WHOT-QCD Collab.], Phys. Rev. D 79, 051501(R) (2009).
- [2] S. Borsanyi, et al., JHEP 1208, 126, (2012).
- [3] F. Burger, [tmfT Collab.], Lattice 2013.
- [4] L. Giusti, et al., Phys. Rev. Lett. 106, 131601, (2011); JHEP 1301, 140, (2013).
- [5] M. Buchoff, et al. [LLNL/RBC Collab.], arXiv:1309.4149.
- [6] G. Cossu et al. [JLQCD Collab.], Phys. Rev. D 87, 114514, (2013).
- [7] S. Aoki, et al. (PACS-CS Collab.), Phys. Rev. D 81, 074503, (2010).
- [8] Bridge++プロジェクト, <http://bridge.kek.jp/Lattice-code/>.

#### 4. 研究成果

2014 年度は、これまでに確立した固定格子間隔アプローチに偏移境界条件を適用し、QCD 熱力学量を計算するという新しいアプローチの有効性を検証を進めた。最初に、少ない計算コストで高精度の結果の検証が行えるクエンチ近似計算を行った。クエンチ近似の高い精度の計算において、従来の手法により求められた状態方程式の結果と良い精度での一致が確認できた。さらに偏移境界条件なしの場合に比べて格子化誤差を小さくなる傾向が確認できた。これらの成果は論文にまとめて学術雑誌に掲載された。

2015 年度は、偏移境界条件を入れない場合の物理点計算における準備を重点的に行った。物理点における計算は本研究の最終的な目標である。物理点、計算を行うには膨大な計算コストが必要になるために、質量前処理を行ったハイブリッドモンテカルロ法の計算が必要で、さらに入念なパラメータのチューニングが必要になる。これらのチューニングをして生成した配位の上で状態方程式をはじめとする様々な熱力学量の温度依存性を計算した。ウィルソンクォークを用いた物理点直上の結果は世界初であり、これらの結果について国際会議で発表を行った。

2016 年度は、新しくグラディエントフローの手法を用いた状態方程式計算に取り組んだ。これまでは従来型の温度積分法による状態方程式の計算を採用する予定だったが、この方法では生成した配位上での物理量測定のために、ベータ関数を求める必要がある。本研究課題では偏移境界条件を利用した新しいベータ関数を求める手法を開発する予定だったが、グラディエントフローの手法によりベータ関数を必要としない状態方程式の直接計算を行うことが可能になった。この年はこのグラディエントフローの手法により状態方程式などの熱力学量が計算できることを検証した。さらにこの新しい方法ではウィルソンクォークでは計算が困難であったカイラル凝縮の揺らぎを調べることが可能になった。これらの研究成果により、国際会議での発表や、研究論文を発表した。

2017 年度は、引き続き、グラディエントフローの手法を用いた状態方程式計算に取り組んだ。この年はこれまでに生成した物理点におけるウィルソンクォークを用いた QCD 配位の元で状態方程式の計算を行ったが、グラディエントフローの手法を用いても統計精度がまだ不十分であることと、計算した温度領域が予想していたよりも高く、相転移の低温側のデータが取れていないことが分かった。また、フロータイム依存性に関する解析で格子間に関する依存性の寄与が問題になることも明らかとなった。これらの研究成果により、国際会議での発表や、研究論文を発表した。

2018 年度も引き続き、グラディエントフローの手法を用いた状態方程式計算に取り組んだ。ここでもこれまでに生成した物理点におけるウィルソンクォークを用いた QCD 配位の元で状態方程式の計算を行った。物理点における相転移温度が当初想定していたよりも低いことが判明したために、今年度はより低温度の配位を生成し、カイラル凝縮の揺らぎの測定により低温相にあることを確認した。これらの低温相と昨年度までの研究で生成した高温相の配位を用いて様々な熱力学量の計算を行い、国際会議などでの発表を行った。

また、重いクォーク質量における格子間隔依存性を調べるために従来の計算を行った格子間隔より粗い格子間隔における配位生成を行い、状態方程式などの熱力学量の計算を行った。重いクォーク質量においても粗い格子間隔における格子化誤差の影響が大きく、細かい格子間隔での計算の必要性が明らかとなった。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① Y. Taniguchi, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, M. Kitazawa, H. Suzuki, T. Umeda, N.

- Wakabayashi, Exploring  $N_f = 2+1$  QCD thermodynamics from the gradient flow, Physical Review D96, 査読有り, Vol.1, 2017, pp.014509-1--014509-28  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.014509>
- ② K. Kanaya, S. Ejiri, R. Iwami, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda, Equation of state in  $(2+1)$ -flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow, EPJ Web of Conferences, 査読有り, 175, 2018, pp.07023-1--07023-8  
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201817507023>
- ③ Y. Taniguchi, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, A. Suzuki, H. Suzuki, T. Umeda, Energy-momentum tensor correlation function in  $N_f = 2 + 1$  full QCD at finite temperature, EPJ Web of Conferences, 査読有り, 2018, pp.175-1--175-7  
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201817507013>
- ④ Y. Taniguchi, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, H. Suzuki, T. Umeda, R. Iwami and N. Wakabayashi, Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow, Proceedings of Science, 査読有り, LATTICE2016, 2017, pp.064-1--064-7
- ⑤ S. Ejiri, R. Iwami, M. Shirogane, N. Wakabayashi, K. Kanaya, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi and T. Umeda, Determination of latent heat at the finite temperature phase transition of SU(3) gauge theory, Proceedings of Science, 査読有り, LATTICE2016, 2017, pp.058-1--058-7
- ⑥ K. Kanaya, S. Ejiri, R. Iwami, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda and N. Wakabayashi, Equation of state in  $(2+1)$ -flavor QCD with gradient flow, Proceedings of Science, 査読有り, LATTICE2016, 2017, pp.063-1--063-7
- ⑦ T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, H. Ohno, A. Uji, N. Wakabayashi and S. Yoshida,  $O(4)$  scaling analysis in two-flavor QCD at finite temperature and density with improved Wilson quarks, Proceedings of Science, 査読有り, LATTICE2016, 2017, pp.376-1--376-7
- ⑧ Y. Taniguchi, K. Kanaya, H. Suzuki, and T. Umeda, Topological susceptibility in finite temperature  $(2+1)$ -flavor QCD using gradient flow, Physical Review D95, 査読有り, 2017, pp.054502-1--054502-8  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.054502>
- ⑨ T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami and K. Kanaya, Towards the QCD equation of state at the physical point using Wilson fermion, Proceedings of Science, 査読有り, LATTICE2015, 2016, pp.209-1--209-7
- ⑩ R. Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, D. Yamamoto, T. Umeda, Multipoint reweighting method and its applications to lattice QCD, Physical Review D, 査読有り, 2015, Vol.92, no.9, pp.094507-1--094507-11  
[doi:10.1103/PhysRevD.92.094507](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.094507)
- ⑪ R. Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, T. Umeda, D. Yamamoto, Multipoint reweighting method and beta functions for the calculation of QCD equation of state, Proceedings of Science, 査読有り, 2015, LATTICE2014, pp.222-1--222-7
- ⑫ T. Umeda, Fixed-scale approach to finite-temperature lattice QCD with shifted boundaries, Phys. Rev. D90, 査読有り, 054511, 2014, pp.1-6,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.90.054511>.

[学会発表] (計 32 件)

- ① 金谷和至, 石見涼, 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  $\text{Grad}$  ジェントフローによる格子  $2+1$  フレーバーQCD の熱力学研究, 日本物理学会 第 74 回年次大会(2019 年) 2019/3/15, 九州大学(福岡市)
- ② 谷口裕介, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 下条昂礼, 鈴木遊, 鈴木博, 馬場惇 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), 日本物理学会 第 74 回年次大会(2019 年) 2019/3/15 九州大学(福岡市)
- ③ 鈴木遊, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 下条昂礼, 白銀瑞樹, 鈴木博, 谷口裕介, 馬場惇  $\text{Grad}$  ジェントフローを用いた K 中間子の Bag パラメータの数値的研究, 日本物理学会 第 74 回年次大会(2019 年) 2019/3/15 九州大学(福岡市)
- ④ 馬場惇, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 下条昂礼, 白銀瑞樹, 鈴木遊, 鈴木博, 谷口裕介 Wilson fermion の下での  $\text{grad}$  ジェントフローを用いた PCAC 関係式の検証, 日本物理学会 第 74 回年次大会(2019 年) 2019/3/15 九州大学(福岡市)
- ⑤ 谷口裕介, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 下条昂礼, 鈴木遊, 鈴木博, 馬場惇 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, 日本物理学会 2018 年秋季大会 2018/9/16 信州大学
- ⑥ 鈴木博, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 下条昂礼, 白銀瑞樹, 鈴木遊, 谷口裕介, 馬場惇 Thermodynamic quantities in the  $N_f=2+1$  QCD; the case of

- somewhat heavy ud quarks, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018/9/16 信州大学
- ⑦ 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, 谷口裕介, Gradient flow を用いたカイラル感受率の測定, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018/9/16, 信州大学
  - ⑧ 板垣翔太, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 白銀瑞樹, 重いクォーク領域における格子 QCD の臨界質量の決定に関するホッピングパラメータ展開の収束性, 日本物理学会 2018 年秋季大会 2018/9/16 信州大学
  - ⑨ Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Asobu Suzuki, Atsushi Baba, Study of energy-momentum tensor correlation function in  $N_f=2+1$  full QCD for QGP viscosities, Lattice 2018, 2018/7/26, Michigan, USA
  - ⑩ S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda, Equation of state near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory using gradient flow, Lattice 2018, 2018/7/26, Michigan, USA
  - ⑪ Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Yusuke Taniguchi, Asobu Suzuki, Measuring of chiral susceptibility using gradient flow, Lattice 2018, 2018/7/26, Michigan, USA
  - ⑫ Y. Taniguchi, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, A. Suzuki, H. Suzuki, T. Umeda, Energy-momentum tensor correlation function in  $N_f=2+1$  full QCD at finite temperature, The 35th International Symposium on Lattice Field Theory, 2017/6/20, Granada (SPAIN)
  - ⑬ K. Kanaya, S. Ejiri, R. Iwami, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda, Equation of state in (2+1)-flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow, The 35th International Symposium on Lattice Field Theory, 2017/6/21, Granada (SPAIN)
  - ⑭ S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, Y. Taniguchi, R. Iwami, H. Suzuki, M. Shirogane, N. Wakabayashi, Thermodynamics near the first order phase transition of SU(3) gauge theory using gradient flow, The 35th International Symposium on Lattice Field Theory, 2017/6/20, Granada (SPAIN)
  - ⑮ Y. Taniguchi, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, A. Suzuki, H. Suzuki, T. Umeda, Energy-momentum tensor correlation function in  $N_f=2+1$  full QCD at finite temperature, The 15th International Workshop on QCD in eXtreme Conditions, 2017/6/28, Pisa (Italy)
  - ⑯ K. Kanaya, S. Ejiri, R. Iwami, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda, Thermodynamics of QCD at physical point with (2+1)-flavors of improved Wilson quarks using gradient flow The 15th International Workshop on QCD in eXtreme Conditions, 2017/6/28, Pisa (Italy)
  - ⑰ 金谷和至, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 北沢正清, 鈴木博, 谷口裕介, Gradient flow による (2+1)-flavor QCD 状態方程式 - 物理点での試験研究 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018/3/24, 東京理科大学 (野田市)
  - ⑱ 白銀瑞樹, 江尻信司, 石見涼, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 谷口祐介, 梅田貴士, 若林直輝, SU(3) 格子ゲージ理論の 1 次相転移近傍での熱力学量の詳細な解析, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018/3/24, 東京理科大学 (野田市)
  - ⑲ 谷口裕介, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 下条昂礼, 鈴木博, 馬場惇,  $N_f=2+1$  QCD における QGP 粘性係数の計算 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018/3/24, 東京理科大学 (野田市)
  - ⑳ 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, 谷口裕介, エネルギー運動量テンソル相関関数を用いた線形応答関係式のテスト, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018/3/24, 東京理科大学 (野田市)
  - 21 板垣翔太, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 白銀瑞樹, 再重み付け法を用いた SU(3) ゲージ理論の重いクォーク領域における臨界質量の決定, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018/3/24, 東京理科大学 (野田市)
  - 22 板垣翔太, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 白銀瑞樹, 谷口裕介, QCD の重いクォーク領域における臨界質量の格子間隔依存性 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017/9/12, 宇都宮大学 (宇都宮市)
  - 23 白銀瑞樹, 江尻信司, 石見涼, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 谷口祐介, 梅田貴士, 若林直輝, gradient flow 法を用いて見る一次相転移点近傍の熱力学量の性質, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017/9/12, 宇都宮大学 (宇都宮市)
  - 24 谷口裕介, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 若林直輝, Gradient flow で捉えるエネルギー運動量テンソル相関関数 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017/9/12, 宇都宮大学 (宇都宮市)
  - 25 T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, H. Ohno, A. Uji, N. Wakabayashi and S. Yoshida, 0(4) scaling analysis in two-flavor QCD at finite temperature and density

- with improved Wilson quarks, 34th annual International Symposium on Lattice Field Theory, 2016.07.26, University of Southampton, UK
- 26 K. Kanaya, S. Ejiri, R. Iwami, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda and N. Wakabayashi, Equation of state in (2+1)-flavor QCD with gradient flow, 34th annual International Symposium on Lattice Field Theory, 2016.07.27, University of Southampton, UK
  - 27 S. Ejiri, R. Iwami, M. Shirogane, N. Wakabayashi, K. Kanaya, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi and T. Umeda, Determination of latent heat at the finite temperature phase transition of SU(3) gauge theory, 34th annual International Symposium on Lattice Field Theory, 2016.07.29, University of Southampton, UK
  - 28 Y. Taniguchi, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, H. Suzuki, T. Umeda, R. Iwami and N. Wakabayashi, Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow 34th annual International Symposium on Lattice Field Theory, 2016.07.29, University of Southampton, UK
  - 29 T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, Towards the QCD equation of state at the physical point using Wilson fermion, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2015), 2015.7.15, Kobe International Conference Center (Kobe)
  - 30 E. Itou, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda, (2+1)-flavor QCD Thermodynamics from the Gradient Flow, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2015), 2015.7.17, Kobe International Conference Center (Kobe)
  - 31 梅田貴士, 固定格子間隔で行う有限温度格子 QCD 計算, 研究会「有限温度密度系の物理と格子 QCD シミュレーション」, 2015.9.5, 筑波大学(茨城)(招待講演)
  - 32 T. Umeda, Thermodynamics in the fixed scale approach with the shifted boundary conditions, The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory LATTICE2014, Columbia University, NY, USA, 2014.6.26.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 松古栄夫

ローマ字氏名 : Matsufuru, Hideo

※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、研究者個人に帰属されます。