

令和元年6月12日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05041

研究課題名(和文)有限温度・有限密度クォーク物質の物性と相構造

研究課題名(英文) Nature and phase structure of quark matter at finite temperature and density

研究代表者

金谷 和至 (Kanaya, Kazuyuki)

筑波大学・数理解物質系・教授

研究者番号：80214443

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：グラジエントフローに基づく鈴木法を応用して、クォーク物質の熱力学的諸性質を、ウィルソン型クォークを用いた格子QCDシミュレーションにより計算した。第1段階として、u,dクォークが現実より重い場合に、エネルギー運動量テンソルやカイラル凝集、位相感受率などを評価し、従来の方法による状態方程式を再現すること、カイラル感受率が他の物理量から示唆される相転移温度でピークを示すこと、位相感受率の信頼できる評価が可能であることを示した。次にu,dクォークが現実のクォーク質量の場合を研究し、スタガード型クォークによる先行研究に近い相転移温度を示唆する中間結果を得た。また、粘性係数などの研究も推進した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

格子QCDによるクォーク物質の研究は、現実のクォーク質量ではこれまでスタガード型クォークを用いた研究しか行われていないが、理論が非局所になる、連続極限の存在が保証されていないなどの未解決の原理的な問題が残る。ウィルソン型クォークにはこうした問題が無いが、カイラル対称性の陽な破れに起因して、カイラル凝集などの物理量の評価に複雑なくりこみが要求される。この研究により、グラジエントフロー法でこれらの問題が回避できることを示した。ウィルソン型クォークの結果をスタガード型クォークの結果と比較することにより、格子による系統誤差をより精密に議論することができるようになる。

研究成果の概要(英文)：We investigate thermodynamic properties of quark matter by a systematic study of finite temperature QCD with (2+1) flavors of improved Wilson quarks applying the Suzuki method based on the gradient flow. As the first step, we studied the case of heavy u and d quarks on a fine lattice. We found that the energy-momentum tensor is consistent with our previous evaluation of the equation of state adopting a conventional method, and that the chiral condensate and the chiral susceptibility show a clear signal of chiral restoration at pseudocritical temperature suggested by previous observations. We also find that the results of the gluonic definition for the topological susceptibility are consistent with those of the fermionic definition already on finite lattices. Extending the study to QCD with physical u and d quarks, we got preliminary results suggesting the transition temperature consistent with previous studies with staggered-type quarks. We also studied viscosities etc.

研究分野：素粒子物理学(理論)

キーワード：素粒子論 量子色力学 格子場の理論 計算物理学 クォーク・グルオン・プラズマ 有限温度・密度  
相転移 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

クォークは通常、陽子、中性子などのハドロンに閉じこめられているが、約1兆度以上の超高温では溶け出して、クォーク・グルオン・プラズマ(QGP)状態と呼ばれる、人類がかつて経験したことのない物質の相に転移すると考えられている。QGPの性質の精密な理解は、初期宇宙の物質進化や物質創成メカニズムの解明への重要なステップである。その実験的検証に向けて大規模実験が精力的に進められているが、終状態に数千個以上の粒子を含む複雑な重イオン衝突実験データからQGP生成の明確な証拠とその熱力学特性を引き出すためには、格子QCDによるQCD第一原理からの理論計算が不可欠である。特に、QCDの相構造において、1次相転移の端の臨界点がどこにあるかは、重イオン衝突実験の結果を分析する上で基本的な情報である。しかし、相図の全体構造も細部も未だに確定しておらず、格子QCDの結果に関して不定要素が残されていた。

有限温度・有限密度の格子QCD研究は、現実に近いクォーク質量では、計算が楽なスタaggered型格子クォークを用いた研究しか行われていない。しかし、スタaggered型クォークには、理論の対称性がQCDと違っている、理論が非局所になる、連続極限の存在が保証されていないなどの未解決の原理的な困難がある。有限温度・有限密度の解析では、ユニバーサリティーやスケールリングが重要であり、スタaggered型格子クォークのこれらの欠点は深刻な問題を孕んでいる。ウィルソン型クォークにはこうした原理的問題が無いが、ウィルソン型クォーク作用による有限格子上でのカイラル対称性の陽な破れに起因して、カイラル凝集などの物理量の評価に複雑なくりこみが要求され、これまでほとんど実用的ではなかった。

### 2. 研究の目的

この研究の目的は、ウィルソン型格子クォークを用いたQCDにおいて、相構造や状態方程式の効率の良い計算手法を開発し、それにより、現実のクォーク質量に近い点で、有限密度クォーク物質の熱力学特性を解明することである。原理的問題が無いウィルソン型クォークの結果をスタaggered型クォークの結果と比較することにより、格子による系統誤差をより精密に議論することができるようになる。

### 3. 研究の方法

格子上では連続な並進対称性が陽に壊されているため、エネルギー運動量テンソルを並進対称性に伴う保存カレントとして定義できない。これに起因して、格子QCDによるエネルギー運動量テンソルの評価には、5種類の演算子の非自明な繰り込みと混合を非摂動的に求めなければならないという理論的・数値的な困難が存在している。本研究は、この非摂動的なくりこみの問題に関して、グラジエントフロー(勾配流)を用いて根本的な解決を図る。Lüscherらにより提案されたグラジエントフローは格子上の物理量計算に様々な革新をもたらしているが、特に、共同研究者である鈴木博らにより、これまで格子での計算や定義に大きな困難が伴っていた様々な物理量の非摂動的評価に新しい方法が提案された。

この方法は、ウィルソン型クォーク作用によるカイラル対称性の陽な破れに起因する困難にも有効であると考えられ、カイラル凝集や位相感受率など、これまでウィルソン型クォークでは実用上計算困難であった様々な物理量の評価にも新たな可能性を開いている。我々は鈴木らの方法を世界で初めて動的クォークを含むQCDシミュレーションに系統的に適用して、クォーク物質の熱力学特性を研究した。また、並行して、計算資源量の要求が高いウィルソン型クォークのシミュレーションを遂行するために、様々な計算手法開発も進めた。

格子作用としては、改良ウィルソン型クォーク作用とくりこみ群による改良を行った岩崎ゲージ作用の組み合わせを用い、クォークの $O(a)$ 改良係数は、非摂動的に評価した値を用いた。

### 4. 研究成果

#### (1) Gradient flowを用いた有限温度(2+1)-flavor QCDの研究(1):クォークが重い場合

動的クォークを含むQCDシミュレーションでの最初のグラジエントフロー計算として、sクォーク質量は現実の値に近いがu,dクォークは現実より重い( $m_\pi/m_\rho \sim 0.63$ )場合に、エネルギー運動量テンソルなどの評価を実行した。我々が先行研究で開発した固定格子間隔法を用いて、格子間隔が $a \sim 0.07\text{fm}$ の1点で、 $T \sim 174\text{--}697\text{MeV}$ の温度を研究した。固定格子間隔法により、既存のゼロ温度高精度配位を流用して計算時間を削減した研究が可能となる。この研究では、CP-PACS/JLQCD Collaborationが生成したゼロ温度配位のうち、u,dクォークが最も軽く、格子間隔が最も小さい格子のものを使用した。

図1に状態方程式(エネルギー密度 $\epsilon$ と圧力 $p$ )の結果を示す。赤丸が、グラジエントフロー法で計算したエネルギー運動量テンソルの対角成分から評価した結果で、黒三角は、同じ配位上で通常の $T$ 積分法を用いて状態方程式を評価した結果である。グラジエントフロー法により、従来の方で要求されていた非摂動的なベータ関数の情報を使うことなく、状態方程式を直接評価することが可能である。 $T < 300\text{ MeV}$ (温度軸方向の格子サイズ $N_t > 8$ )で従来の方による結果がよく再現されている。これは、グラジエントフロー法の有用性を示すと同時に、ここで研究した格子が連続極限に十分近いことを示唆している。他方、 $T > 300\text{ MeV}$ でのずれは、 $O((aT)^2 = N_t^{-2})$ の $a$ に依らない格子化誤差が $N_t < 8$ で無視できなくなるからと理解できる。

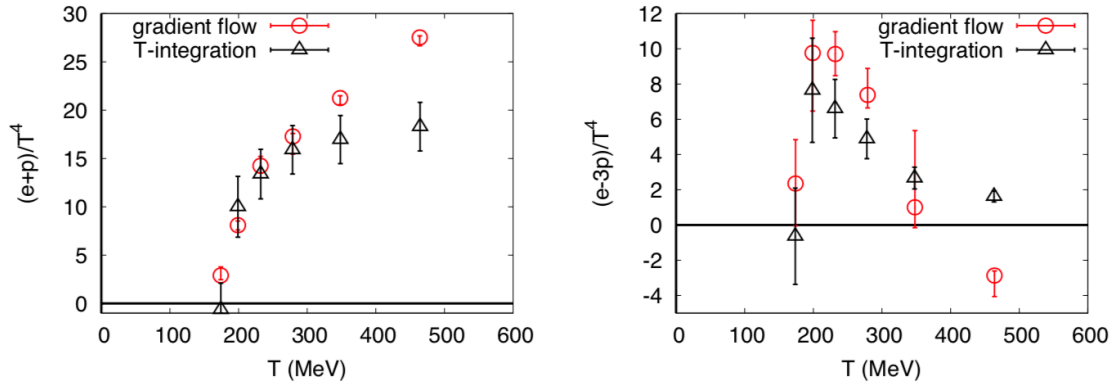


図1 グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の状態方程式の研究。クォークが重い場合の結果。左図：エントロピー密度  $\varepsilon + p$ 。右図：トレース・アノマリ  $\varepsilon - 3p$ 。横軸は温度。(論文⑥)

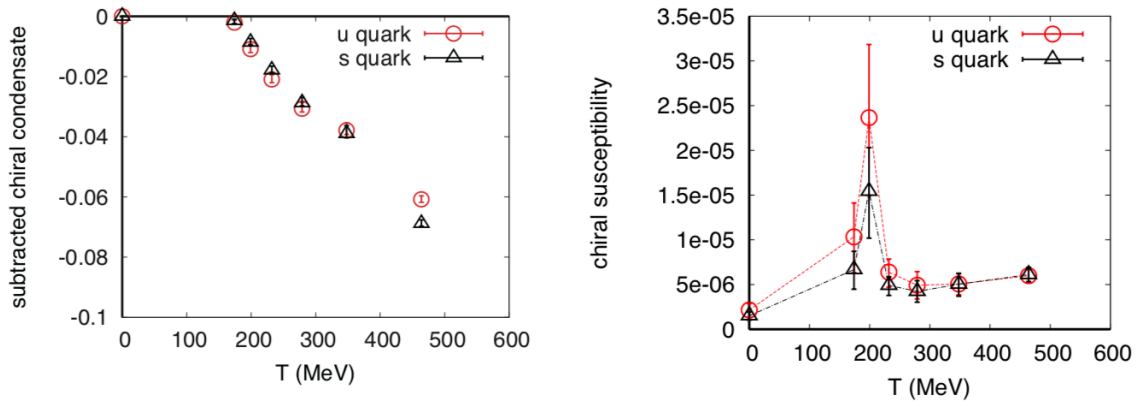


図2 グラジエントフロー法による (2+1)-flavor QCD の熱力学。クォークが重い場合。左図：カイラル凝集。右図：カイラル感受率の非連結部分。赤丸は u,d クォーク、黒三角は s クォークのカイラル凝集/感受率。(論文⑥)

図2の左図に、カイラル凝集の結果を示す。ウィルソン型クォークはカイラル対称性を陽に破るために、格子では通常複雑なくりこみが要求されるが、グラジエントフロー法により、正しくくりこまれたカイラル凝集を直接評価できる。ポリアコフープや状態方程式の温度依存性から示唆される相転移温度  $T_{pc} \sim 190$  MeV で急激な変化が見て取れる。右図にカイラル感受率の非連結部分を示す。ウィルソン型クォークでは従来の方法では評価が困難な物理量だが、グラジエントフロー法で有意な精度で計算することができた。その結果は、期待どおり  $T_{pc} \sim 190$  MeV で明確なピークを示している。また、s クォークよりも、軽い u, d クォークのカイラル感受率の方がより強い特異性をしめしており、これも理論的期待と一致する。格子上でカイラル対称性を陽に壊してしまうウィルソン型クォークでこれらが示されたのは初めてである。(論文⑥)

カイラル感受率の連結部分の計算には、クォーク二体演算子の相関関数の評価が要求される。スタガード型クォークなどを使った先行研究では、カイラル感受率の連結部分は相転移に敏感では無さそうであることが報告されている。グラジエントフローを使って連結部分を評価した結果、ウィルソン型クォークでも同様の振る舞いが示唆されることを見た(論文②)。

カイラル凝集と同様に、位相電荷や位相感受率も格子化誤差やカイラル対称性の破れに敏感である。図3の左図に、グルオン場(ゲージ場)で定義した位相電荷の分布を示す。位相電荷は連続極限では整数だが、有限な格子では短距離の格子効果によって連続的な値を持つ。しかし、十分なクーリングを行なって短距離ゆらぎを消せば、整数に収束すると期待される。グラジエントフローも短距離ゆらぎを消す変換なので、クーリングとして使うことができる。図3の左図で、位相電荷がグラジエントフローにより期待どおり整数値に収束することが確認される。こうして十分にフローさせた位相電荷の分布から、位相感受率を評価する(グルオン場による評価)。他方、この位相感受率を、カイラル変換を使ってクォーク場を使った表式に書き換えることもできる。従来の方法では、クォーク場による位相感受率の評価には複雑で大きなくりこみが要求されるが、スタガード型クォークを使った先行研究では、グルオン場による評価結果と大きく異なった値を導くことが報告されており、物理的な評価としての信頼性が低かった。図3の右図に、クォーク場を使った位相感受率の標識をグラジエントフロー法で計算した結果(黒三角)と、グラジエントフローをクーリングとして使って計算したグルオン場による位相感受率の結果(赤丸)を比較した。これらの全く異なる評価方法の結果が完全に一致していることが見て取れる。有限な格子上でこうした一致が得られたのは初めてである。また、その温度依存性は、希薄インスタントンガス近似による予言と矛盾しないことが示された。(論文⑦)

これらの結果は、 $a \sim 0.07$  fm の格子間隔 1 点で得られたものである。様々な物理量で、全く異

なる評価方法の結果が良く一致していることにより、この格子が連続極限に近いことが強く示唆されるが、格子間隔依存性が小さいことは直接確認しておく必要がある。そのために、このクォークが重い場合で格子間隔を変えた研究も進めている。統計がまだ十分ではないが、状態方程式について格子間隔依存性が小さいことを示唆する中間結果を得た（学会発表②）。

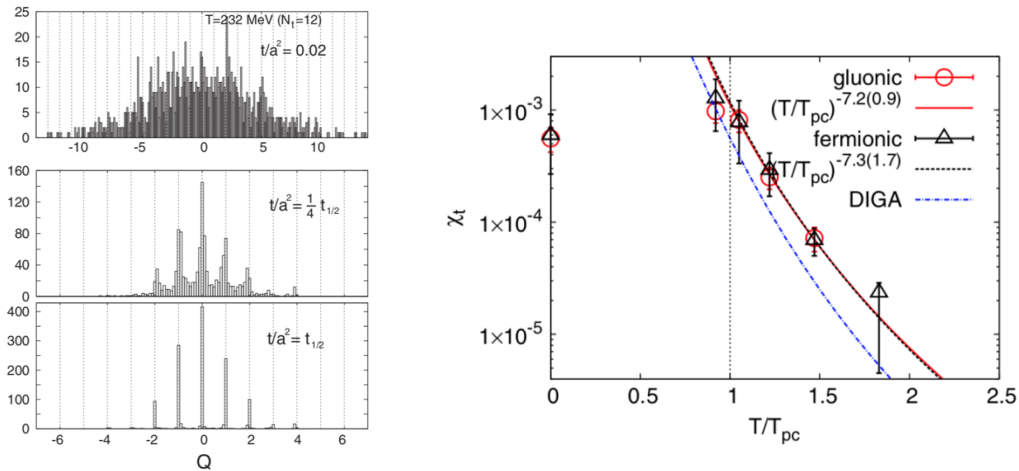


図3 グラジエントフロー法による(2+1)-flavor QCDの熱力学。クォークが重い場合。左図：位相電荷。右図：位相感受率。赤丸はグルオン場を用いた定義による評価の結果で、黒三角はクォークを用いた定義による評価の結果。（論文⑦）

## (2) Gradient flow を用いた輸送係数の研究

グラジエントフロー法でエネルギー運動量テンソルそのものが計算できるようになったことにより、その非対角要素や二点相関関数も直接評価可能となった。そこから、輸送係数など、クォーク物質の様々な熱力学特性を引き出す試みを進めている。最初の試みとして、クォークが重い場合を研究した。エントロピー密度をエネルギー運動量テンソルの異なる成分の二点関数から線形応答関係式を用いて評価し、一点関数から求めた前述の結果（論文⑥）と、フロー時間がゼロの極限で矛盾しないことを示した（論文④）。さらに、エネルギー運動量テンソルの二点関数から剪断粘性率を評価し、重イオン衝突実験の示唆する  $\eta/s \sim 0.12$  や AdS/CFT 対応理論の予言である  $\eta/s = 1/4\pi$  に近い結果を得た。ただし、二点関数では格子化誤差が一点関数より大きくなる傾向があり、系統誤差の精密な評価に向けて更なる研究が必要である。（論文①）

## (3) Gradient flow を用いた有限温度(2+1)-flavor QCDの研究(2)：物理的クォークの場合

グラジエントフロー法による状態方程式の評価は、従来の方法で必要であった、非摂動的ベータ関数の評価などが不要で、全体的計算コストを大きく抑えられる可能性がある。また、グラジエントフローのクーリング効果によって、誤差の大部分を占めるゲージ配位の揺らぎが押さえられ、従来の計算手法に比べて高精度の計算が可能になることが期待される。クォークが重い場合にグラジエントフロー法の高い有用性を示す前述の結果は、計算コストの高い物理点での研究で、グラジエントフロー法が大きな役割を担うことを示唆している。

改良ウィルソン型クォーク作用と岩崎ゲージ作用を用いて、クォーク質量を現実の値に合わせた物理点シミュレーションを開始した。クォークが重い場合は190MeV周辺が臨界温度であったが、クォークが軽いのでより低温側にシフトすると予想される。

格子場の理論国際会議で行った中間発表で、物理点でもグラジエントフロー法で状態方程式などを評価可能であることを確認した。また、u, dクォークがかなり軽くなったことと整合して、u, dクォークのカイラル凝集の方がsクォークより強い相転移の様相を示すことが示された。しかし、その時点における  $T > 157\text{MeV}$  のシミュレーションでは、相転移点の特定には至らなかった（論文⑤）。その後、より低温側の  $T \sim 122\text{MeV}$ ,  $137\text{MeV}$  を含むシミュレーションを進め、 $122 < T_{pc} < 146\text{MeV}$  に臨界温度を示唆する結果を得た（学会発表①）。

これらの研究と並行して、計算資源量の要求が高いウィルソン型クォークのシミュレーションを遂行するために、多重点ヒストグラム法（論文⑨）などの計算手法開発も進め、それらを使って、SU(3)ゲージ理論の有限温度1次相転移点近傍の状態方程式や潜熱の研究（論文③、⑧）などを行った。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計9件）

- ① Yusuke Taniguchi, Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, “Study of energy-momentum tensor correlation function in  $N_f = 2+1$  full QCD for QGP viscosities”, PoS (LATTICE 2018) (2019) ref.166, pp.1-6, URL: <https://pos.sissa.it/334/>（査読有）
- ② Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo,

Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi and Takashi Umeda, “Measuring of chiral susceptibility using gradient flow”, PoS (LATTICE 2018) (2019) ref.173, pp.1-6, URL: <https://pos.sissa.it/334/> (査読有)

- ③ Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, “Equation of state near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory using gradient flow”, PoS (LATTICE 2018) (2019) ref.164, pp.1-6, URL: <https://pos.sissa.it/334/> (査読有)
- ④ Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, “Energy-momentum tensor correlation function in  $N_f = 2+1$  full QCD at finite temperature”, EPJ Web of Conferences 175 (2018) ref.07013, pp.1-8, DOI:10.1051/epjconf/201817507013 (査読有)
- ⑤ Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi and Takashi Umeda, “Equation of state in (2+1)-flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow”, EPJ Web of Conferences 175 (2018) ref.07023, pp.1-8, DOI:10.1051/epjconf/201817507023 (査読有)
- ⑥ Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, and Naoki Wakabayashi (WHOT-QCD Collaboration), “Exploring  $N_f = 2+1$  QCD thermodynamics from gradient flow”, Phys. Rev. D 96, No.1 (2017) ref.014509, pp.1-28, DOI:10.1103/PhysRevD.96.014509 (査読有)
- ⑦ Yusuke Taniguchi, Kazuyuki Kanaya, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, “Topological susceptibility in finite temperature (2+1)-flavor QCD using gradient flow”, Phys. Rev. D 95, No.5 (2017) ref.054502, pp.1-8, DOI:10.1103/PhysRevD.95.054502 (査読有)
- ⑧ Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, “Latent heat at the first order phase transition point of SU(3) gauge theory”, Phys. Rev. D 94, No.1 (2016) ref.014506, pp.1-14, DOI:10.1103/PhysRevD.94.014506 (査読有)
- ⑨ R. Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, D. Yamamoto, and T. Umeda, “Multipoint reweighting method and its applications to lattice QCD”, Phys. Rev. D 92, No.9 (2015) ref.094507, pp.1-11, DOI:10.1103/PhysRevD.92.094507 (査読有)

[学会発表] (計 17 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, “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”, 日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学, 福岡市, 3.14-17, 2019)
- ② 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 (信州大学, 松本市, 9.14-17, 2018)
- ③ 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”, The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
- ④ 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”, The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
- ⑤ Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, “Equation of state near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory using gradient flow”, The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
- ⑥ Shinji Ejiri, Shota Itagaki, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Yusuke Taniguchi, Hiroshi Suzuki, Mizuki Shirogane, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi, “Thermodynamics near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory”, YITP long-term workshop on New Frontiers in QCD 2018 (NFQCD2018) (YITP, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 5.28-6.29, 2018)
- ⑦ TANIGUCHI, Yusuke; EJIRI, Shinji; KANAYA, Kazuyuki; KITAZAWA, Masakiyo; SUZUKI, Asobu; SUZUKI, Hiroshi; UMEDA, Takashi, “Energy-momentum tensor correlation function in  $N_f = 2+1$  full QCD at finite temperature”, The 15th International workshop on QCD in eXtreme conditions (XQCD 2017) (Univ. Pisa, Pisa, Italy, June 26-28, 2017)
- ⑧ KANAYA, Kazuyuki; EJIRI, Shinji; IWAMI, Ryo; KITAZAWA, Masakiyo; SUZUKI, Hiroshi; TANIGUCHI, Yusuke; UMEDA, Takashi, “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 (XQCD 2017) (Univ. Pisa, Pisa,



Italy, June 26-28, 2017)

- ⑨ KANAYA, Kazuyuki; EJIRI, Shinji; IWAMI, Ryo; KITAZAWA, Masakiyo; SUZUKI, Hiroshi; TANIGUCHI, Yusuke; UMEDA, Takashi, “Equation of state in (2+1)-flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow”, The XXXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Granada, Spain, June 18-24, 2017)
- ⑩ EJIRI, Shinji; KANAYA, Kazuyuki; KITAZAWA, Masakiyo; TANIGUCHI, Yusuke; IWAMI, Ryo; SUZUKI, Hiroshi; UMEDA, Takashi; SHIROGANE, Mizuki; WAKABAYASHI, Naoki, “Thermodynamics near the first order phase transition of SU(3) gauge theory using gradient flow”, The XXXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Granada, Spain, June 18-24, 2017)
- ⑪ TANIGUCHI, Yusuke; EJIRI, Shinji; KANAYA, Kazuyuki; KITAZAWA, Masakiyo; SUZUKI, Asobu; SUZUKI, Hiroshi; UMEDA, Takashi, “Energy-momentum tensor correlation function in  $N_f=2+1$  full QCD at finite temperature”, The XXXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Granada, Spain, June 18-24, 2017)
- ⑫ Yusuke Taniguchi, Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi, “Thermodynamics in (2+1)-flavor QCD by the gradient flow method”, Phase structure of lattice field theories, Japanese-German Seminar 2016 (Niigata Univ., Niigata, Japan, Sept. 26-28, 2016)
- ⑬ Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi, “Thermodynamics in (2+1)-flavor QCD with a gradient flow method”, Phase structure of lattice field theories, Japanese-German Seminar 2016 (Niigata Univ., Niigata, Japan, Sept. 26-28, 2016)
- ⑭ Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi, “QCD energy momentum tensor at finite temperature using gradient flow”, The 14th International workshop on QCD in eXtreme conditions (XQCD 2016) (Plymouth Univ., Plymouth, UK, Aug. 1-3, 2016)
- ⑮ Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi, “Topological susceptibility in finite-temperature (2+1)-flavor QCD with gradient flow”, The 14th International workshop on QCD in eXtreme conditions (XQCD 2016) (Plymouth Univ., Plymouth, UK, Aug. 1-3, 2016)
- ⑯ Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi, “Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow”, The XXXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016) (Univ. Southampton, UK, July 24-30, 2016)
- ⑰ Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi, “Equation of state in (2+1)-flavor QCD with gradient flow”, The XXXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016) (Univ. Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016)

## 6. 研究組織

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：江尻 信司

ローマ字氏名：(EJIRI, shinji)

研究協力者氏名：北澤 正清

ローマ字氏名：(KITAZAWA, masakiyo)

研究協力者氏名：鈴木 博

ローマ字氏名：(SUZUKI, hiroshi)

研究協力者氏名：谷口 裕介

ローマ字氏名：(TANIGUCHI, yusuke)

研究協力者氏名：梅田 貴士

ローマ字氏名：(UMEDA, takashi)

※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。