

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400244

研究課題名(和文) 確率分布関数に着目した高温高密度格子QCDの臨界点の探索

研究課題名(英文) Search for the critical point of lattice QCD at high temperature and density focusing on probability distribution functions

研究代表者

江尻 信司 (Ejiri, Shinji)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：10401176

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)：数値シミュレーションにより、高温高密度での量子色力学(QCD)の相構造を研究した。温度と化学ポテンシャルだけではなくクォーク質量も変数として加え、確率分布関数を計算して相転移の性質を調べた。まず、クォークが重い領域で相構造を調べ、一次相転移とクロスオーバーの領域を分ける臨界面を具体的に決定し、我々の方法の有用性を示した。また、一次相転移における二相間の圧力差や潜熱をクォーク質量が無限大のときに計算した。さらに、最近注目されているグラディエントフロー法を用いた熱力学量の計算も試行した。

研究成果の概要(英文)：We studied quantum chromodynamics (QCD) at high temperature and density by numerical simulations. Treating the quark masses as parameters of the system as well as the temperature and chemical potential, we investigated the nature of phase transitions by calculating probability distribution functions.

We investigated the critical surface which separates the first order transition and crossover regions in the heavy quark region, and demonstrated the usefulness of our method. The pressure gap and the latent heat between the two phases at the first phase transition were calculated when the quark mass is infinite. Furthermore, we tried calculation of thermodynamic quantities using the gradient flow method which has recently attracted attention.

研究分野：物理学

キーワード：素粒子論 計算物理

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙誕生直後の温度が非常に高いとき、クォーク・グルーオン・プラズマ状態からハドロン状態に変わる「強い相互作用」の相転移があったと考えられている。その相転移を実験室で実現するために、現在、欧州原子核研究機構のLHCやブルックヘブン国立研究所のRHICで大規模な重イオン衝突実験が行われている。それを支援するために、超高温での「強い相互作用」の理論的な研究が非常に重要となっている。「強い相互作用」の基礎理論は量子色力学(QCD)であることが確立してきて、その最も有力な研究方法はスーパーコンピュータによる大規模数値シミュレーションである。しかし、密度の効果をとり入れ、高密度状態を研究しようとすると、その数値的な解析が困難になることが知られている。その解決策を探ることが急務となっている。

### 2. 研究の目的

ハドロン相からクォーク・グルーオン相に変化するQCDの有限温度相転移は、低密度で熱力学的特異性を持たないクロスオーバーであったものが、ある臨界密度で一次相転移に変わることが予想されている。その相転移の次数が変わる臨界点を見つけることが、現在、理論・実験どちらからも注目されている。

本研究の目的は、格子QCDの数値シミュレーションを行うことにより、その臨界点をQCDの第一原理計算で求めることである。有限密度QCDの計算には、「符号問題」という深刻な問題があることが知られているが、本研究では、その問題を回避する工夫をし、さらに、クォーク質量も調節できる変数として扱い、物理量の確率分布関数の密度依存性を調べることによって、一次相転移に変化する臨界点を探索する。

### 3. 研究の方法

温度、化学ポテンシャル、クォーク質量、フレーバー数(クォークの種類の数)の関数として、QCDの相転移の次数がどう変化するかを、数値シミュレーションによって調べる。計算が簡単なパラメータから調査をはじめ、現実のクォーク質量で、相転移がクロスオーバーから一次相転移に変わる臨界密度の決定を目指す。

有限密度でのQCDは、直接モンテカルロ・シミュレーションができないため、再重み付け法をベースに、確率分布関数を計算することによって相転移を議論する。化学ポテンシャルが大きくなると符号問題が起こるので、化学ポテンシャルの効果を、温度やクォーク質量の変化になるべく吸収させるようにする。一次相転移があれば、同時に2つの状態が等確率で現れるため、その確率分布関数の形を調べることによって、一次相転移であるかどうかを判定することができる。

再重み付け法でシミュレーションパラメ

ータを変化させながら、その確率分布関数がどう変化するかを調べ、パラメータ空間が拡張されたQCDの相転移の性質を調べる。

### 4. 研究成果

(1) 確率分布関数に着目した方法により、まず、すべてのクォークが重い領域での相構造を調べ、一次相転移とクロスオーバーの領域を分ける臨界点を決定した。すべてのクォーク質量が無限大の場合は一次相転移で、ある質量からクロスオーバーになることが分かっていた。質量の逆数をゼロから増加させながら、QCD相転移のオーダーパラメータである、ポリヤコフループなどの関数とした確率分布関数を相転移温度直上でプロットした。質量が大きいつきにピークが複数あった分布関数が徐々に1つに変化した。これは一次相転移からクロスオーバーになったことを意味している。さらに、有限密度での相転移の性質が変わるパラメータ空間内の臨界面を求めた(論文)。

(2) また、実際のクォーク2種類は非常に軽いため、クォークが重い領域の一次相転移がなくなる臨界面は現実世界とあまり関係ない。再重み付け法を用いた、クォークが軽い領域での臨界点の探索を行うために、動的クォークを含むFull QCDで、クォーク質量の違うシミュレーション数点を組み合わせる多点再重み付け法の実用化を行った。それにより、クォーク質量の連続関数として物理量を計算することができるようになった。さらに、将来的には、有限密度での化学ポテンシャルの効果を、再重み付けによるクォーク質量の変更に吸収させるといったことも可能になると考えている(論文)。

(3) 質量だけでなく、クォークの種類の数(フレーバー数)も調節できる変数として扱った。現実世界は非常に軽いクォーク2種類と中間的な質量のクォーク1種類、それ以外は重いという系であるが、それを少し変更して、軽いクォーク2種類と少し重いクォークが多数ある系を考えた。その重いクォークの種類が多くなるほど、有限密度では化学ポテンシャルが大きくなるほど、一次相転移の領域が広がることが分かった。一般にクォークが軽いほどシミュレーションのコストがかかるため、臨界点となるクォーク質量が大きくなっているような系では、有限密度の場合も含めて、比較的容易に一次相転移に変わる臨界点の場所が調べられる。その臨界点の計算がしやすい系から出発して、重いクォークのフレーバー数を減らし、現実世界に近付けるというアプローチがあることを提案した(論文)。

(4) 相転移が一次相転移になる点を定めることだけでなく、格子ゲージ理論の枠内で、一次相転移点があるとき、相転移点近

傍での熱力学量の解析方法を確立することも重要である。一次相転移の特徴は、相転移の前後で潜熱を放出・吸収することである。その潜熱を動的クォークのないクエンチQCDで計算した。潜熱の計算には、熱力学量の計算によく使われる積分法と呼ばれる方法は不適切で、微分法と呼ばれる方法が必要になる。その微分法は、格子間隔を空間・時間で非等方にして変化させ、分配関数を温度や体積で微分して熱力学量を計算する方法である。今までは非常に粗い格子でしか潜熱の計算がされていなかったが、本研究では微分法により潜熱の連続極限の値まで計算した。さらに、一次相転移では共存する2相間の圧力のバランスが取れていることが重要であるが、高温相、低温相間の圧力差も計算し、圧力差がなくバランスが取れていることを確認した(論文 )。

(5) また、最近注目されているグラディエント・フローという方法を用いた熱力学量の計算も行った。グラディエント・フロー法は、ある種の拡散方程式を解いて力学変数であるゲージ場と物質場を粗視化する方法で、正則化のために空間を離散化した格子間隔と粗視化のスケールの両方をコントロールして計算をすることができる。その方法を用いて、エネルギー運動量テンソルなど、格子上で、これまで評価が困難であった様々な物理量を定義する方法が提案され、QCD物質の状態方程式などの研究に応用できることが分かってきた。2+1フレーバーQCD(アップ、ダウン、ストレンジクォークの動的効果を考慮した系)でエネルギー密度や圧力などの熱力学量の計算をするために、グラディエント・フロー法を試行し、その方法が有効であることを示した。すでに確立している積分法、微分法の弱点を補い、QCD相転移の研究が劇的に進展することを期待している(論文 )。

(6) その他、ウィルソン・フェルミオンを用いたQCDの熱力学の研究を行い、いくつかの成果が得られている。ゼロ密度2+1フレーバーQCDのシミュレーションを行い、標準的な積分法により、状態方程式の計算を行った(論文 )。さらに、低密度領域において、フレーバー数2のQCD相転移の臨界点付近でオーダーパラメータのスケールング測を調べた。相転移が0(4)スピン模型と同じユニバーサリティー・クラスにあるということ仮定して、高温相と低温相を分ける相転移線の低密度領域での密度依存性を決定した(論文 )。

(7) また、化学ポテンシャルや温度を複素数にすることにより、QCDの臨界現象を解析する方法についても、具体的なモデルを解析することにより議論した(論文 )。さらに、重イオン衝突実験における粒子数や電荷

のイベントごとの揺らぎについて、高次のキムラントの測定が重要であることも議論した(論文 )。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計19件)

"Energy-momentum tensor correlation function in  $N_f=2+1$  full QCD at finite temperature", Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, and Takash Umeda, EPJ Web of Conferences 175, 07013 (2018) (8 pages), LATTICE 2017, arXiv:1711.02262, 査読有  
DOI: 10.1051/epjconf/201817507013

"Equation of state in (2+1)-flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow", Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi and Takash Umeda (WHOT-QCD Collaboration), EPJ Web of Conferences 175, 07023 (2018) (8 pages), LATTICE 2017, arXiv:1710.10015, 査読有  
DOI: 10.1051/epjconf/201817507023

"Exploring  $N_f=2+1$  QCD thermodynamics from the gradient flow", Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi (WHOT-QCD Collaboration), Physical Review D96 (2017) 014509 (28 pages), arXiv:1609.01417, 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevD.96.014509

"Determination of latent heat at the finite temperature phase transition of SU(3) gauge theory", Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Mizuki Shirogane, Naoki Wakabayashi, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Proceedings of Science (LATTICE 2016) 058 (2016) (7 pages), Lattice 2016, arXiv:1701.08570, 査読有  
DOI: 10.22323/1.256.0058

"Equation of state in (2+1)-flavor QCD with gradient flow", Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi, Proceedings of Science (LATTICE 2016) 063 (2016) (7 pages), Lattice 2016, arXiv:1610.09518,

査読有

DOI: 10.22323/1.256.0063

"Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow", Yusuke Taniguchi, [Shinji Ejiri](#), Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Ryo Iwami, Naoki Wakabayashi, Proceedings of Science (LATTICE 2016) 064 (2016) (7 pages), Lattice 2016, arXiv:1611.02413, 査読有  
DOI: 10.22323/1.256.0064

"O(4) scaling analysis in two-flavor QCD at finite temperature and density with improved Wilson quarks", T. Umeda, [S. Ejiri](#), R. Iwami, K. Kanaya, H. Ohno, A. Uji, N. Wakabayashi, S. Yoshida, Proceedings of Science (LATTICE 2016) 376 (2016) (7 pages), Lattice 2016, arXiv:1612.09449, 査読有  
DOI: 10.22323/1.256.0376

"Latent heat at the first order phase transition point of the SU(3) gauge theory", Mizuki Shirogane, [Shinji Ejiri](#), Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa (WHOT-QCD Collaboration), Physical Review D 94 (2016) 014506 (14 pages), arXiv:1605.02997, 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevD.94.014506

"Critical point search from an extended parameter space of lattice QCD at finite temperature and density", [Shinji Ejiri](#), Ryo Iwami, Norikazu Yamada, Nuclear Physics A 956, 826-829 (2016), Proceedings of Quark Matter 2015, arXiv:1601.04577, 査読有  
DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2016.01.030

"Exploring the nature of chiral phase transition in two-flavor QCD using extra heavy quarks", [Shinji Ejiri](#), Ryo Iwami, Norikazu Yamada, Physical Review D 93 (2016) 054506 (16 pages), arXiv:1511.06126, 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevD.93.054506

"Importance of third moments of fluctuations of conserved charges in relativistic heavy-ion collisions", Masayuki Asakawa, [Shinji Ejiri](#), Masakiyo Kitazawa, European Physical Journal A 52 (2016) 252 (2 pages), Exploring strongly interacting matter at high densities - NICA White Paper, 査読有  
DOI: 10.1140/epja/i2016-16252-5

"Many flavor approach to study the

critical point in finite density QCD", Ryo Iwami, [Shinji Ejiri](#), Norikazu Yamada, Proceedings of Science (LATTICE 2015) 146 (2015) (7 pages), Lattice 2015, arXiv:1512.08317, 査読有  
DOI: 10.22323/1.251.0146

"Many flavor approach to study the nature of chiral phase transition of two-flavor QCD", Norikazu Yamada, [Shinji Ejiri](#), Ryo Iwami, Proceedings of Science (LATTICE 2015) 147 (2015) (7 pages), Lattice 2015, arXiv:1602.04595, 査読有  
DOI: 10.22323/1.251.0147

"Analytic continuation of finite density QCD with heavy quarks in the strong coupling region", [Shinji Ejiri](#), Hiroshi Yoneyama, Proceedings of Science (LATTICE 2015) 150 (2015) (7 pages), Lattice 2015, arXiv:1511.04811, 査読有  
DOI: 10.22323/1.251.0150

"Towards the QCD equation of state at the physical point using Wilson fermion", T. Umeda, [S. Ejiri](#), R. Iwami, K. Kanaya (WHOT-QCD Collaboration), Proceedings of Science (LATTICE 2015) 209 (2015) (7 pages), Lattice 2015, arXiv:1511.04649, 査読有  
DOI: 10.22323/1.251.0209

"Multipoint reweighting method and its applications to lattice QCD", R. Iwami, [S. Ejiri](#), K. Kanaya, Y. Nakagawa, D. Yamamoto, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Physical Review D 92 (2015) 094507 (11 pages), arXiv:1508.01747, 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.094507

"First order transition regions in the quark masses and chemical potential parameter space of QCD", [Shinji Ejiri](#), Norikazu Yamada and Hiroshi Yoneyama, Proceedings of Science (CPD 2014) 014 (2014) (10 pages), Proceedings of Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement 2014, arXiv:1504.02283, 査読有  
DOI: 10.22323/1.217.0014

"Multipoint reweighting method and beta functions for the calculation of QCD equation of state", R. Iwami, [S. Ejiri](#), K. Kanaya, Y. Nakagawa, T. Umeda, D. Yamamoto (WHOT-QCD Collaboration), Proceedings of Science (LATTICE 2014) 222 (2014) (7 pages), Lattice 2014, arXiv:1501.06331, 査読有  
DOI: 10.22323/1.214.0222

"Complex singularities around the QCD critical point at finite densities", Shinji Ejiri, Yasuhiko Shinno, Hiroshi Yoneyama, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2014, 083B02 (2014) (19 pages), arXiv:1404.6004, 査読有  
DOI: 10.1093/ptep/ptu108

〔学会発表〕(計 15 件)

Shinji Ejiri, "Finite Density Lattice QCD", Reimei Workshop "Hadronic Resonances and Dense Nuclear Matter", 2017 年 12 月 11-13 日, いばらき量子ビーム研究センター、茨城県東海村

江尻信司, 「格子ゲージ理論による有限密度 QCD の臨界点探索」, 研究会「J-PARC エネルギー領域重イオン衝突のダイナミクス」, 2017 年 9 月 11 日, 高エネルギー加速器研究機構、東海キャンパス、茨城県東海村

Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Yusuke Taniguchi, Hiroshi Suzuki, Mizuki Shirogane, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi, "Thermodynamics near the first order phase transition of SU(3) gauge theory using gradient flow", Lattice 2017, International Symposium on Lattice Field Theory, 2017 年 6 月 19-24 日, Granada, スペイン

Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Yusuke Taniguchi, Hiroshi Suzuki, Mizuki Shirogane, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi, "Determination of latent heat at the finite temperature phase transition of SU(3) gauge theory", Lattice 2016, International Symposium on Lattice Field Theory, 2016 年 7 月 24-30 日, University of Southampton, Southampton, UK

Shinji Ejiri, "Phase structure of QCD at high temperature and high density by numerical simulations of lattice QCD", NIC-XIV School (School for Nuclei in the Cosmos XIV), 2016 年 6 月 13-17 日, 新潟大学, 新潟市

Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Norikazu Yamada, Hiroshi Yoneyama, "Critical point search from an extended parameter space of lattice QCD at finite temperature and density", Quark Matter 2015, International Conference on Ultra Relativistic Nucleus Nucleus Collisions,

2015 年 9 月 27 日-10 月 3 日, 神戸ファッションマート, 神戸市

Shinji Ejiri, "Phase structure in an extended parameter space of lattice QCD at finite temperature and density", International workshop on QCD in extreme conditions, 2015 年 9 月 21-23 日, 華中師範大学(Central China Normal University), 武漢, 中国

江尻信司, 「再重みづけ法による高温高密度格子 QCD」, 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 年 9 月 5 日, 筑波大学計算科学研究センター、つくば市

Shinji Ejiri, "First order transitions in finite temperature and density QCD with two and many flavors", Long-term workshop on "Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2015" (HHIQCD2015), 2015 年 3 月 16-20 日 (5nd week), 京都大学基礎物理学研究所、京都市

Shinji Ejiri, "Quark mass dependence of the nature of QCD phase transition", CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015), 2015 年 3 月 12-13 日, 筑波大学計算科学研究センター、つくば市

Shinji Ejiri, "First order transition regions in the quark masses and chemical potential parameter space of many-flavor QCD", Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD 2014), 2014 年 11 月 17-21 日, Bielefeld University, Bielefeld, ドイツ

Shinji Ejiri, Quark mass dependence of the nature of QCD phase transition at high temperature and density by a histogram method", Quark Confinement and the Hadron Spectrum XI, 2014 年 9 月 8-12 日, St. Petersburg, ロシア

江尻信司, 「多フレーバー格子ゲージ理論からの高温高密度 QCD 相転移の研究」, 理研シンポジウム・iTHES 研究会「熱場の量子論とその応用」, 2014 年 9 月 3-5 日, 理化学研究所、和光市

江尻信司, 「高温高密度格子 QCD の最近の進展」, 基研研究会「素粒子物理学の進展 2014」, 2014 年 7 月 28-8 月 1 日, 京都大学基礎物理学研究所、京都市

Shinji Ejiri, Norikazu Yamada, "Quark mass dependence of finite temperature

phase transitions in QCD with many flavors of Wilson fermions", Lattice 2014, International Symposium on Lattice Field Theory, 2014 年 6 月 23-28 日, Columbia University, New York, USA

〔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〕

ホームページ等

<http://muse.sc.niigata-u.ac.jp/~ejiri/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

江尻 信司 (EJIRI SHINJI)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：10401176

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者