

研究責任者名 Name	金谷 和至 KANAYA, Kazuyuki	所属機関 Affiliation	筑波大学 数理物質系 Faculty of Pure and Applied Sciences, Univ. of Tsukuba
受理番号 Proposal No.	大型 13/14-21	研究課題名 Program title	有限温度・有限密度 QCD の非摂動論的研究 Non-perturbative study of hot and dense QCD

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要

Abstract

(和文)

重イオン衝突実験からクォーク・グルオン・プラズマ生成のシグナルを抽出するためには、低密度領域での QCD 相転移に関する理論からのインプットが必要である。我々は、非摂動論的に改良されたWilson・クォーク作用を用いた格子 QCD の数値シミュレーションにより、高温低密度領域での QCD の相構造や相転移温度、熱力学量の温度・密度依存性などに関する定量的研究を進めている。本課題では、ストレンジクォークの真空偏極まで取り入れた、物理点直上での $N_f=2+1$ QCD の状態方程式計算を固定格子間隔に基づいて進めている。さらに偏移境界条件を取り入れた新しい状態方程式の計算方法を検討し、クエンチ近似におけるテスト計算を行った。また、状態方程式の計算に必要なベータ関数の評価方法として、複数点再重み付け法による方法を考案し、試験的研究を行った。ヒストグラム法による有限密度相構造の研究も継続し、複素位相を除いたシミュレーションで複素位相の補正を入れる計算により、高密度で 1 次相転移に変わる兆候を確認した。

(英文)

In order to extract an evidence for formation of the quark-gluon-plasma by heavy ion collision experiments, theoretical understanding of the nature of QCD transition at low but finite densities is indispensable. We are pushing forward a series of projects to study the phase structure and thermodynamic properties of QCD on the lattice using improved Wilson quarks. In this project, we are investigating the equation of state (EOS) in finite-temperature $N_f=2+1$ QCD at the physical point adopting the fixed scale approach. In order to overcome the limitation of our approach, we tested a method based on the shifted boundary conditions in quenched QCD. We also made a test study of the beta function, which is necessary in the calculation of the equation of state, adopting a multi-point reweighting method. We have also continued the study of finite-density phase structure of QCD based on the histogram method: By performing a phase-quenched simulation of finite-density QCD and taking into account the corrections by the phase factor, we confirmed the signal suggesting a first order phase transition at high densities.

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読つきの 学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)
	10	2	1	0

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表 Presentations at scientific meetings concerning the program									
1. S. Ejiri, Quark mass dependence of the nature of QCD phase transition at high temperature and density by a histogram method(招待講演), Quark Confinement and the Hadron Spectrum XI, 2014/9/8-12, St. Petersburg, Russia 2. T. Umeda, Thermodynamics in the fixed scale approach with the shifted boundary conditions, The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) 2014/6/26 Columbia University, New York, USA 3. R. Iwami, Multipoint reweighting method and beta-functions for the calculation of QCD equation of state, The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) 2014/6/26 Columbia University, New York, USA 4. 梅田 貴士, 偏移境界条件を用いた有限温度格子 QCD の研究, 日本物理学会, 2014/3/28 東海大学, 神奈川 5. H. Saito, The critical surface of QCD in the heavy quark region (招待講演), SIGN 2014, International EMMI Workshop on the Sign Problem in QCD and beyond, 2014/2/18-21, GSI, Darmstadt, Germany 6. T. Umeda, QCD thermodynamics from shifted boundary conditions (招待講演), Lattice QCD at finite temperature and density, 2014/1/21, KEK, Ibaraki, Japan 7. S. Ejiri, Numerical simulations to understand QCD phase structure at high temperature and density (招待講演), Lattice QCD at finite temperature and density, 2014/1/20, KEK, Ibaraki, Japan 8. S. Ejiri, Nature of QCD phase transition at finite temperature and density, Long-term Workshop on New Frontiers in QCD 2013 (NFQCD2013), 2013/11/25-29 (2nd week), 京都大学基礎物理学研究所, 京都 9. S. Ejiri, QCD phase structure by a histogram method, Lattice Field Theory on multi-PFLOPS computers, German-Japanese Seminar 2013, 2013/11/6-8, Regensburg, Germany 10. H. Saito, QCD critical surface in the heavy quark region, Lattice Field Theory on multi-PFLOPS computers, German-Japanese Seminar 2013, 2013/11/6-8, Regensburg, Germany									
査読つきの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。 Refereed Journal Articles (name of journal, volume, page, year)									
1	<table border="1"> <tr> <td>著者名 Author</td> <td>H. Saito, S. Ejiri, S. Aoki, K. Kanaya, Y. Nakagawa, H. Ohno, K. Okuno and T. Umeda</td> </tr> <tr> <td>タイトル title</td> <td>Histograms in heavy-quark QCD at finite temperature and density</td> </tr> <tr> <td>雑誌名 name of journal</td> <td>Phys. Rev. D89, 034507 (2014) (23pages)</td> </tr> <tr> <td>URL</td> <td>http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.89.034507</td> </tr> </table>	著者名 Author	H. Saito, S. Ejiri, S. Aoki, K. Kanaya, Y. Nakagawa, H. Ohno, K. Okuno and T. Umeda	タイトル title	Histograms in heavy-quark QCD at finite temperature and density	雑誌名 name of journal	Phys. Rev. D89, 034507 (2014) (23pages)	URL	http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.89.034507
著者名 Author	H. Saito, S. Ejiri, S. Aoki, K. Kanaya, Y. Nakagawa, H. Ohno, K. Okuno and T. Umeda								
タイトル title	Histograms in heavy-quark QCD at finite temperature and density								
雑誌名 name of journal	Phys. Rev. D89, 034507 (2014) (23pages)								
URL	http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.89.034507								
2	<table border="1"> <tr> <td>著者名</td> <td>T. Umeda</td> </tr> <tr> <td>タイトル</td> <td>Fixed-scale approach to finite-temperature lattice QCD with shifted boundaries</td> </tr> <tr> <td>雑誌名等</td> <td>Phys. Rev. D 90, 054511 (2014) (6pages)</td> </tr> <tr> <td>URL</td> <td>http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.90.054511</td> </tr> </table>	著者名	T. Umeda	タイトル	Fixed-scale approach to finite-temperature lattice QCD with shifted boundaries	雑誌名等	Phys. Rev. D 90, 054511 (2014) (6pages)	URL	http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.90.054511
著者名	T. Umeda								
タイトル	Fixed-scale approach to finite-temperature lattice QCD with shifted boundaries								
雑誌名等	Phys. Rev. D 90, 054511 (2014) (6pages)								
URL	http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.90.054511								
プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。 International Conference Proceedings (name of journal, volume, page, year)									
1.	<table border="1"> <tr> <td>著者名 Author</td> <td>T. Umeda, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Maezawa, Y. Nakagawa, H. Ohno, H. Saito and S. Yoshida</td> </tr> <tr> <td>タイトル title</td> <td>Scaling properties of the chiral phase transition in the low density region of two-flavor QCD with improved Wilson fermions</td> </tr> <tr> <td>雑誌名等 name of journal</td> <td>PoS LATTICE2013 (2014) 450 (7pages)</td> </tr> <tr> <td>URL</td> <td>http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/450/LATTICE%202013_450.pdf</td> </tr> </table>	著者名 Author	T. Umeda, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Maezawa, Y. Nakagawa, H. Ohno, H. Saito and S. Yoshida	タイトル title	Scaling properties of the chiral phase transition in the low density region of two-flavor QCD with improved Wilson fermions	雑誌名等 name of journal	PoS LATTICE2013 (2014) 450 (7pages)	URL	http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/450/LATTICE%202013_450.pdf
著者名 Author	T. Umeda, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Maezawa, Y. Nakagawa, H. Ohno, H. Saito and S. Yoshida								
タイトル title	Scaling properties of the chiral phase transition in the low density region of two-flavor QCD with improved Wilson fermions								
雑誌名等 name of journal	PoS LATTICE2013 (2014) 450 (7pages)								
URL	http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/450/LATTICE%202013_450.pdf								
その他 (学位論文、紀要、投稿中の論文を含む) (著者、タイトル、論文種別、URL を記載) Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)									
特記 (本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など) (過去に遡っても構いません。) Special Notes (newspaper article, literary works, awards, etc.)									

実施報告書

研究課題名 「有限温度・有限密度 QCD の非摂動論的研究」
(Non-perturbative study of hot and dense QCD)

筑波大学 数理物質系

金谷 和至

2014 年 12 月 1 日

1 研究組織 (研究実施開始時)

	氏名	所属 職名 / 研究分担
研究責任者	金谷和至 (かなやかずゆき)	筑波大学数理物質系 教授 研究の統括と解析
共同研究者	江尻信司 (えじりしんじ)	新潟大学大学院自然科学研究科 准教授 有限密度 QCD の研究
共同研究者	梅田貴士 (うめだたかし)	広島大学大学院教育学研究科 准教授 シミュレーションの実行とプログラム開発
共同研究者	中川義之 (なかがわよしゆき)	新潟大学大学院自然科学研究科 研究員 シミュレーションの実行とデータの解析
共同研究者	吉田信介 (よしだしんすけ)	理化学研究所仁科加速器研究センター 研究員 シミュレーションの実行とデータの解析
共同研究者	斎藤華 (さいとうはな)	DESY/Zeuthen 研究員 シミュレーションの実行とデータの解析
共同研究者	石見涼 (いわみりょう)	新潟大学大学院自然科学研究科 博士前期課程大学院生 シミュレーションの実行とデータの解析

2 研究課題の内容

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、これまで人類が経験したことのない物質に相転移すると考えられている。この相転移の解明は宇宙の初期進化や物質創成を理解する上で重要である。これまでにブルックヘブン国立研究所の RHIC において実験的検証に向けた高エネルギーハドロン衝突実験が行われ、また CERN の LHC では、約 $10T_c$ までの QGP の性質を定量的に調べることを目的とした、より高エネルギー領域での大規模実験もスタートした。終状態に数千個 数万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、QGP の物性に関する QCD 第一原理からの理論的予言が不可欠である。そのための現在唯一の研究方法が、格子 QCD に基づく数値シミュレーションである。実験データと格子 QCD の理論的解析により QGP の性質が精密に理解されると、初期宇宙におけるクォーク物質の進化を定量的に追うことが可能になり、物質創成のメカニズムも解明できると期待される。本研究では、有限温度・有限密度における QCD の性質を、クォークの対生成・対消滅効果を取り入れ

た格子 QCD の数値シミュレーションにより、非摂動的に研究する。さらに、RHIC や LHC ではクォーク数密度がゼロでないことの効果を見積もる必要がある。このプロジェクトでは、ウィルソン型クォークで有限温度・有限密度のクォーク物質の性質を研究する。改良ウィルソン型クォーク（クローバークォーク）と岩崎改良ゲージ作用を組み合わせた作用を、厳密なアルゴリズムを用いてシミュレーションする。s クォークまで正しく取り入れた物理クォーク質量での $N_f = 2 + 1$ QCD で相転移温度と相転移次数の決定、状態方程式や音速などの熱力学量の計算を行うことや、有限密度における符号問題の解決を目指している。

3 平成 25-26 年度の研究の概要

3.1 質量前処理を用いた物理点での有限温度配位生成

今年度も引き続き、物理点での状態方程式計算の準備を行っている。ウィルソン型クォークを用いたシミュレーションは、クォーク質量を物理点近傍まで下げると、格子間隔をかなり小さくしない限り、数値的不安定性を示す可能性がある。計算時間を抑えるために、通常は、格子間隔を小さくする代わりに、格子作用の改良を行っているが、smaering と呼ばれる高次の改良や質量前処理による改良が有効であるとの報告がなされている。この研究では特に質量前処理を用いた物理点での有限温度配位生成を行っている。高温相における配位生成では 1 段の前処理程度で十分なアクセプタンスと安定性が得られたものの、低温相では 3, 4 段の前処理と注意深いパラメータの設定が必要である。今年度はさらなるシミュレーションの高速化のためにコードのマルチスレッド化を行い、配位生成を行った。

3.2 偏移境界条件を用いた状態方程式の計算方法の開発

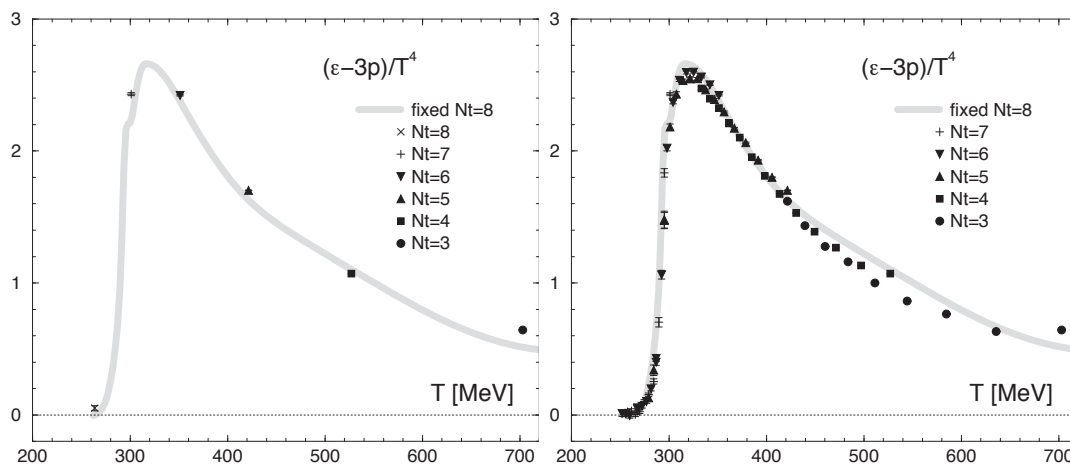


図 1: (左図) 固定格子間隔でのトレースアノマリーの結果、計算をした N_t の数だけ点がある。従来の結果 (固定 N_t) とは良い一致を示している。(右図) 偏移境界条件を組み合わせた結果。左図の結果に比べて劇的に計算できる点が増えている。従来の結果とも良い一致を示している。

QCD の状態方程式計算において、非常に大きな計算量を要求するものの、フレーバー数などに関して基盤の確立したウィルソンクォークを用いた計算を行うために、我々のグループでは固定格子間隔アプローチを開発した。このアプローチには温度分解能の問題があり、それを改善するために偏移境界条件の手法を利用した。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るとき、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。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を行うことが可能になった。図に (クォークの真空偏 極を無視する) クエンチ近似での結果 (トレースアノマリー) を示す。(状態方程式は全てトレースア ノマリーから導出される)。従来の固定格子間隔アプローチでは左図に示される温度分解能しか計算 することができないが、新しいアプローチ (右図) では劇的に温度分解能を改善することができた。

3.3 複数点再重みづけ法とベータ関数計算方法の開発

状態方程式の計算を行うためには、物理一定の線上でのパラメータの格子間隔微分、つまり、ベータ関数が必要である。その微分を得るための連続関数として物理量を計算する方法として、いくつ かのシミュレーション・データを組み合わせる「複数点再重みづけ法」を提案した。再重みづけ法に は「オーバーラップ問題」という問題があることが知られている。それはパラメータを大きく変化さ せると、モンテカルロ法で生成した時に重要だった配位と補正後に重要となる配位が異なり、補正後 に重要な配位が生成されていないという問題である。パラメータ一点でシミュレーションを行い、再 重みづけ法を適用すると、生成された配位の分布の幅が狭いために、オーバーラップ問題が起きるの で、解決法として、パラメータ数点のシミュレーションを行い生成される配位の分布を広げ、それら の配位を組み合わせることによってこの問題を回避することを考えた。ベータとホッピングパラメータを同時に変化させる複数点再重みづけ法を開発し、実際にハドロンの質量をそれらのパラメータの 連続関数として計算した。それによって、ベータ関数の計算に関して、この方法が有効であることを 示した。

3.4 ヒストグラム法による有限密度 QCD の相転移の研究

状態を適当な物理量でラベルして、その状態がどれだけの確率で発生するかを表す関数「確率分布 関数」に着目して、有限温度・密度 QCD の相転移の性質が、クォークの質量や化学ポテンシャルの 関数としてどのように変化するかを議論した。一次相転移であれば、同時に 2 つの状態が等確率で現 れるため、一次相転移の判定できる。質量のパラメータ空間内の現実の質量点付近に一次相転移領域 の境界となる臨界面があることが予想されていて、有限密度でその臨界面を探ることが最終的な目標 である。各密度で現実の質量点とその臨界面に対して一次相転移側にあるかどうかを特定することに よって、現実世界の QCD 相転移の性質が分かる。有限密度でのシミュレーションの重みは複素数に なるため、本研究ではその複素位相を除いて配位生成を行い (phase-quenched simulation)、あとで複 素位相部分の補正を行った。その補正のとき、符号問題が現れるが、位相平均をキュムラント展開し、 その収束性を確認しながら、最初の項で近似することによってその問題を回避した。まだ格子点の数が 少ない計算であるが、確率分布関数の形を調べることにより、低密度でクロスオーバーであった相 転移が、高密度で一次相転移に変わる兆候を見つかることができている。今後、その相転移の変化を 系統的に調べることにより、高密度 QCD の相構造の詳細な研究に進んでいきたいと考えている。