

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 14/15-23	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。これまでに生成した物理点直上での有限温度配位を用いて Polyakov loop 期待値や、状態方程式に必要な物理量の計算を行った。また、有限密度におけるオーバーラップ問題をクリアするための multi-point reweighting 法に関する研究を行った。

(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. We have already generated a moderate number of configurations at the physical point. In combination with the PACS-CS zero temperature configurations we investigated some basic observables to study the QCD equation of states. We also studied the multi-point reweighting technique to solve the overlap problem in the finite density QCD.

研究成果を公開しているホームページアドレス

事務局にて使用	論文 査読有	論文 査読無	講義・発表	招待講演	その他
	1	0	0	0	0

# 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

2015 年 12 月 22 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)	新潟大学理学部 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	吉田信介 <sup>1</sup> (よしだしんすけ)	理化学研究所/BNL 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 <sup>2</sup> (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 博士後期課程大学院生 シミュレーションの実行とデータの解析
共同研究者	高橋優 (たかはしゆう)	新潟大学大学院自然科学研究科 博士後期課程大学院生 シミュレーションの実行とデータの解析
共同研究者	宇治敦史 (うじあつし)	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
共同研究者	藤田陽 (ふじたみなみ)	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
共同研究者	白銀瑞樹 (しろがねみずき)	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

<sup>1</sup> 現在の所属：中国武漢、華中師範大学 研究員

<sup>2</sup> 現在の所属：筑波大学計算科学研究センター 研究員

## 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ハドロンから溶け出して、クォーク・グルオン・プラズマ (QGP) と呼ばれる、これまで人類が経験したことのない物質の状態に相転移する。QGP やその相転移の解明は、宇宙の初期進化や物質創成を理解する上で重要である。RHIC や LHC において、約  $10T_c$  までの QGP の性質を定量的に調べる大規模実験が進められているが、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して、有限温度・有限密度のクォーク物質の性質を研究する。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と、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 26-27 年度の研究の概要

#### 3.1 物理点での有限温度 QCD の研究

我々が開発したる固定格子間隔アプローチに基づき、PACS-CS が 2012 年に発表したウィルソンクォークを用いた物理点でのゼロ温度シミュレーションの結果を採用して、有限温度 QCD の研究を行った。PACS-CS の計算で用いられたのと同じパラメータを使って、 $T = 140\text{--}500$  MeV に相当する温度の配位生成をこれまでにやってきた。今期も引き続き有限温度における配位生成を行い、これまでに各温度において、およそ 2000 から 3000 MD-time step に相当する統計を貯めることができた。これらと、PACS-CS が公開している 4000 MD-time step に相当するゼロ温度での 80 配位（と各 reweighting factor）を用いて、Plaquette 期待値、Polyakov loop 期待値、さらに状態方程式の計算で必要となる QCD 作用の各 coupling parameter に関する微分量の期待値の計算をおこなった。これらの結果は Lattice 2015 においてポスター発表として報告を行った。論文 [1] はその Proceedings である。今後の課題としては、状態方程式を計算する為に必要な係数である  $\beta$  関数を求める必要がある。PACS-CS のゼロ温度配位と、reweighting factor を用いて、ハドロン質量の coupling parameter 依存性を計算して、 $\beta$  関数を見積もっていきたい。それと同時に、ここで生成した物理点での配位を用いて、従来の手法である微分法による計算方法によっても状態方程式の計算を行いたい。

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。（論文 [1]）

#### 3.2 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 (lines of constant physics) 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には、物理量をシミュレ

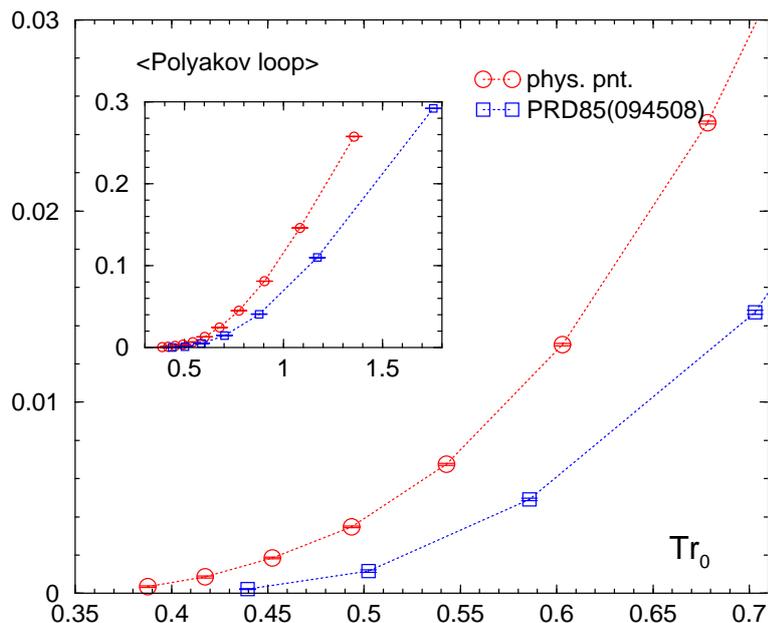


図 1: 物理点における有限温度 QCD の配位で計算した Polyakov loop 期待値の温度依存性。以前の計算による比較的重いクォーク質量での結果も示す。クォーク質量が軽くなると相転移温度が下がる事が分かる。(論文 [1])

シミュレーションパラメータの連続関数とし求める必要があるが、それ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「複数点再重み付け法 (multi-point reweighting method)」を提案した。再重み付け法には「オーバーラップ問題」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十分に生成されていないという問題である。一つのパラメータ点でシミュレーションを行い、再重み付け法を適用すると、生成された配位の分布の幅が狭いため、オーバーラップ問題が起こる。その解決法として、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。

その検証のために、我々は、 $N_f = 2$  QCD のシミュレーションを実行し、多次元パラメータ空間内の複数点再重み付け法によりオーバーラップ問題を回避し、ハドロン質量をそれらのパラメータの連続関数として計算した。これにより、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。図 2 (左) は、複数点再重み付け法で計算した擬スカラー中間子とベクトル中間子の質量比を  $\beta$  と  $\kappa$  の関数としてプロットしたものである。それに基づき、図 2 (右) の物理一定の線 (lines of constant physics) を求めた。(論文 [2])

### 3.3 ヒストグラム法による有限温度・密度多フレーバー QCD の相転移の研究

有限温度・密度 QCD の相構造を研究する有効な手法として、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「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おり、有限密度でその臨界面を探ることが本研究の目標である。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

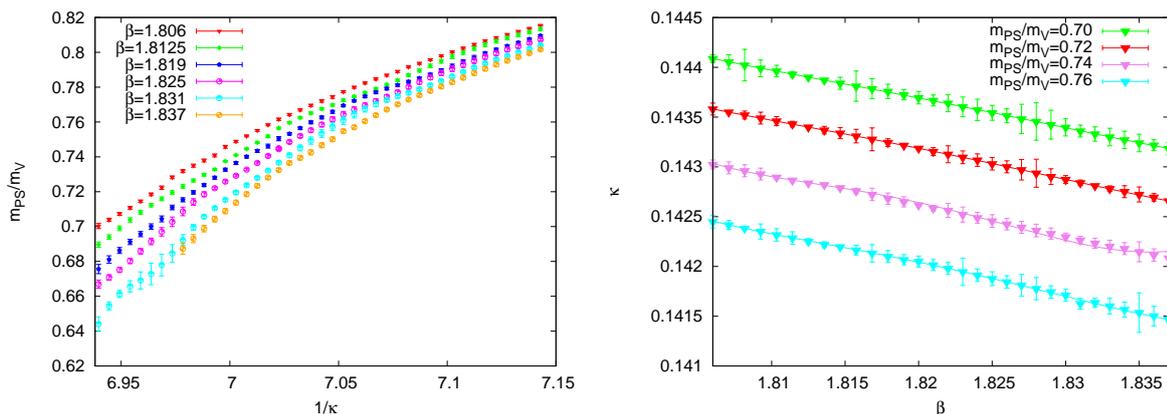


図 2: 左図: 多点再重み付け法を用いて  $\beta$  と  $\kappa$  の関数として計算した、擬スカラー中間子とベクトル中間子の質量比  $m_{PS}/m_V$ 。  $N_f = 2$  QCD での結果。右図: 左図の質量比から計算した物理一定の線 (lines of constant physics)。(論文 [2])

分かる。

有限密度 QCD ではシミュレーションの重みが複素数になり、研究が困難であるため、それに向けた足掛かりをつくる研究として、2 フレーバーの軽いクォークと  $N_f$  フレーバーの重いクォークがある多フレーバーの系を考える。  $N_f$  が大きくなると、一次相転移が現れる  $N_f$  フレーバーの臨界質量が重くなる。その性質を利用して、  $N_f$  が十分大きな場合に、クォークが重い場合に有効なホッピングパラメータ展開と再重み付け法を組み合わせる方法を用いて臨界質量を計算した。シミュレーション自体は改良されたウィルソンクォーク、2 フレーバーで行い、残りの重いクォークの動的効果は再重み付け法で取り入れた。

図 3 (左) は、ゼロ密度でのクロスオーバーから一次相転移に変わる  $N_f$  フレーバーの臨界質量の結果である。横軸は 2 フレーバーの場合の  $m_{PS}/m_V$ 、縦軸は  $h = 2N_f(2\kappa_h)^{N_t}$  の臨界値である。ここで  $N_t$  は時間方向の格子数で、  $\kappa_h$  は重いクォークのホッピングパラメータである。臨界点より上が一次相転移で、下がクロスオーバーである。臨界点の軽いクォーク質量依存性は非常に小さく、この結果は  $ud$  クォークのカイラル極限に向かっても、一次相転移領域がクォークが重い領域に広がっていないことを意味し、2 フレーバー QCD のカイラル極限が二次相転移であることを示唆している。図 3 (右) は、  $\kappa_h^c N_f^{1/N_t}$  の臨界面を 2 フレーバーと  $N_f$  フレーバーの化学ポテンシャル ( $\mu_l$  と  $\mu_h$ ) の関数として描いたプレリミナリーな結果である。化学ポテンシャルが大きくなると  $\kappa_h$  の臨界値が指数関数的に減少することが分かる。また、化学ポテンシャルが大きくなると  $\kappa_h$  の臨界値が小さくなり、  $N_f$  が比較的小さくてもホッピングパラメータ展開による近似が妥当になることが分かる。ゼロ密度の投稿論文は論文 [3] で、有限密度の結果は Lattice 2015 で発表した (論文 [4])。そのような相転移の変化を系統的に調べるにより、今後も 2 + 1 フレーバー QCD の相転構造の解明に向けた研究を進めていきたいと考えている。(論文 [3,4])

## 論文リスト

- [1] “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 Lattice 2015, arXiv:1511.04649.
- [2] “Multipoint reweighting method and its applications to lattice QCD”, R. Iwami, S. Ejiri,

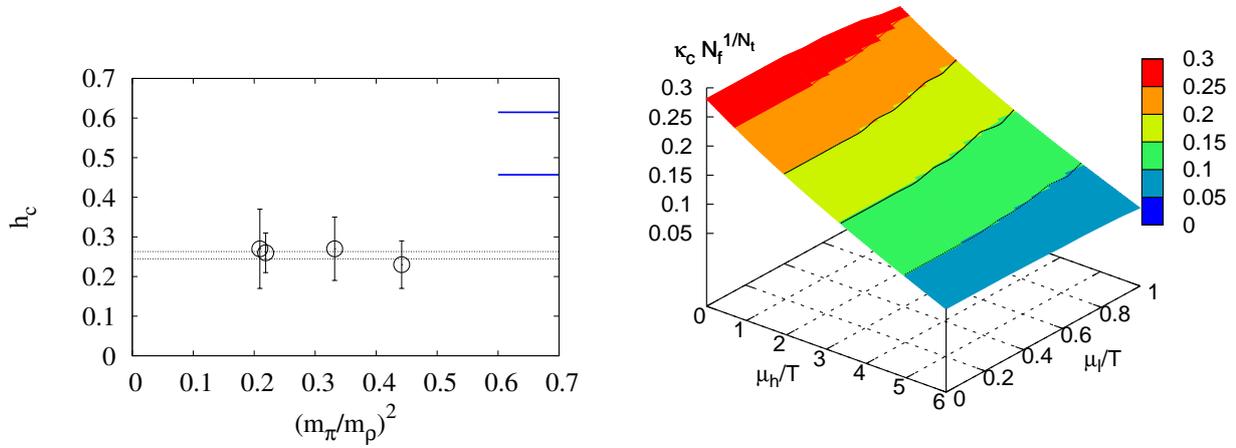


図 3: 左図：ゼロ密度でのクロスオーバーから 1 次相転移に変わる重いクォークの臨界質量。ここで、 $h = 2N_f(2\kappa_h)^{N_t}$ 。右図：化学ポテンシャル  $\mu_l$ 、 $\mu_h$  の関数として描いた  $\kappa_h N_f^{1/N_t}$  の臨界面。(論文 [3,4])

K. Kanaya, Y. Nakagawa, D. Yamamoto, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Physical Review D92 (2015) 094507 (11 pages), arXiv:1508.01747.

[3] “Exploring the nature of chiral phase transition in two-flavor QCD using extra heavy quarks”, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Norikazu Yamada, arXiv:1511.06126 (27 pages).

[4] “Many flavor approach to study the critical point in finite density QCD”, Ryo Iwami, Shinji Ejiri, Norikazu Yamada, Proceedings of Lattice 2015.