

研究責任者名 Name	三角 樹弘 MISUMI Tatsuhiro	所属機関 Affiliation	秋田大学 Akita University
受理番号 Proposal No.	大型 14/15-12	研究課題名 Program title	中心対称性を保った $N_f=1+1+1$ SU(3) ゲージ理論での有限温度相転移の解析 (Finite-temperature phase transition of $N_f=1+1+1$ SU(3) gauge theory with center symmetry)

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) 本課題は、有限温度QCDにおけるカイラル転移とZ3中心対称性転移の関係の解明という長年にわたる問題の解決を目指すものである。具体的には、中心対称性が厳密なZ3-QCDの有限温度格子数値計算を行い、それにより上記問題を理解しようという試みである。Z3-QCDとは、3つの基本表現クォークに異なる境界条件を課すことでZ3中心対称性を保った3フレーバーSU(3)ゲージ理論である。我々はこの理論の格子シミュレーションを行い、中心対称性の厳密な秩序変数であるPolyakovループの温度依存性を解析した。その結果、ヒステリシスという1次相転移の特徴を持つ相転移を発見した。また、その際にcrossover転移であるカイラル転移が、中心対称性転移温度付近で同様のヒステリシスを持つことを示した。さらに、この理論の特徴として高温相においてフレーバー対称性の破れが顕わになることも発見した。この研究は中心対称性とカイラル対称性の関係の理解を新たな観点を導入し、今後この分野の研究に重要な示唆を与えることになると思われる。

(英文) Via finite-temperature lattice simulation of the Z3-center-symmetric QCD-like theory, called Z3-QCD, we attempt to understand the long-standing question on the relation between chiral and center transitions in finite-temperature QCD. Z3-QCD realizes 3-flavor SU(3) gauge theory with exact Z3-center symmetry by imposing different twisted boundary conditions by $2\pi/3$ on the 3 flavors. We perform lattice simulations for the theory with emphasis on temperature dependence on the VEV of Polyakov-loop (an order parameter of center symmetry). We find out the phase transition associated with spontaneous center symmetry breaking, with the sign of the first-order transition, or the hysteresis depending on the thermalization process. We also show the crossover transition of chiral symmetry has the hysteresis in the same temperature range as the center phase transition. Furthermore, we find that the flavor symmetry breaking gets manifest in the high-temperature phase in this specific model. This simulation has initiated a new approach to understanding the relation of chiral and center transitions, which could influence on future works on the subject.

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	2	0	(*)1	0

平成 26-27 年度 sc zzzqcd(14/15-12) 実施報告書

- 中心対称性を保った $N_f = 1 + 1 + 1$ SU(3) ゲージ理論での有限温度相転移の解析 -

1 研究組織

研究責任者

三角 樹弘 (みすみたつひろ) 秋田大学 理工学部 専任講師

共同研究者

入谷 匠 (いりたにたくみ) ストローニーブルック大学 (ニューヨーク州立大学) 研究員

伊藤 悦子 (いとうえつこ) 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所 特任助教

2 当該期間の実施報告の詳細

2.1 研究背景

「閉じ込め」と「カイラル対称性の自発的破れ」は、量子非摂動効果が顕著に現れた強い相互作用の本質的特性である。一方、有限温度 QCD ではこのような性質が消失する相、つまり閉じ込めが消滅しカイラル対称性が回復する高温相が存在すると考えられている。このような転移現象においては、閉じ込めに深く関係する「 Z_3 中心対称性」とその秩序変数である「ポリャコフループ」、そしてカイラル特性に関係する「カイラル対称性」とその秩序変数である「カイラル凝縮」がそれぞれ重要な概念となる。一般に、 Z_3 対称性の破れに関する転移温度とカイラル転移温度は独立であるが、格子 QCD シミュレーションのクエンチ近似ではほぼ同温度でそれぞれの転移が起きることが知られている [1]。ところが現実の QCD (3 クォーク + SU(3) ゲージ理論) では、それぞれの相転移に付随する対称性である Z_3 中心対称性とカイラル対称性が、前者はダイナミカルなクォークの存在により、後者はクォーク質量により破れている。したがってここで言う転移温度とは、ポリャコフループとカイラル凝縮を近似的な秩序変数と見た場合のクロスオーバー転移温度であり、本質的に 2 つの転移に関係があるとは言い切れない。実際 $N_f = 2 + 1$ ダイナミカル格子 QCD 計算によると、転移温度がほぼ同じと主張するグループ [2] と相違があると主張するグループがあり [3]、一致した見解は得られていない。「2 つの転移に相関があるか」

あるいは「一方の転移がもう一方の転移を誘発するか」という問題は、有限温度 QCD の枠を越えて強い相互作用の本質に関係しており、長年に亘り議論されてきた。

この問題を調べる一つの方法は、カイラル対称性と Z_3 中心対称性が厳密な QCD 型理論を理想的な状況として考え、その理論を格子数値計算により解析するというものである。カイラル対称性を持つ QCD はすなわちゼロ質量 QCD であり原理的には実現可能である。一方、 Z_3 中心対称性はクォークの存在そのものにより破れてしまっているため、素朴にはそれを保つ QCD 型理論を構成するのは困難であるが、3つのクォークの境界条件を適切にずらすことで Z_3 中心対称性を保つ格子作用を構成することが可能である。このような理論を以下では Z_3 QCD と呼ぶ。本研究ではこの Z_3 QCD の格子シミュレーションを通して、新しい視点から閉じ込め転移とカイラル転移の性質を追求した。

2.2 研究概略

本研究では、縮退した3つの基本表現クォークに $2\pi/3$ ずつシフトした境界条件 (Z_3 -twisted 境界条件) を課すことで厳密に中心対称性を保つように構成した QCD 型理論、 Z_3 -QCD の有限温度格子シミュレーションを行った。これは「動的な基本表現クォークを含む Z_3 対称な3フレーバー QCD」という現実の QCD に近い中心対称理論であり、カイラル転移と Z_3 転移の関係を調べるには格好のモデルであった。これまでこのセットアップは、[5] 等において有効モデルを用いた解析は行われていたが、未だにダイナミカルな格子シミュレーションを用いた研究は為されていなかった。

具体的には、1つのフレーバーについて虚時間方向に反周期境界条件 (有限温度系) を課し、残りの2フレーバーにはそこから位相が $2\pi/3$ と $4\pi/3$ ずれた境界条件を課した 3-flavor 理論を格子上で構成した。そしてこのような理論に基づく有限温度ゼロ質量 Z_3 対称 SU(3) ゲージ理論 ($N_f = 1 + 1 + 1$) の格子シミュレーションを実行し、ポリャコフループ期待値の温度依存性と感受率の解析により相転移温度と相転移次数を決定した。その結果、 Z_3 中心対称相転移が1次相転移の特徴であるヒステリシスを伴って起きることを発見した。また、カイラル凝縮の温度依存性を、特に中心相転移温度付近での振舞に注目して調べた結果、通常の $N_f = 3$ QCD と同程度の温度で起きるカイラルクロスオーバー転移が中心相転移温度と同様のヒステリシスを持つことがわかった。これは、カイラル転移が中心転移に影響されており、ゼロ質量極限では転移次数も1次になる可能性を示している。さらに、このモデルに特徴的な事情として、フレーバー対称性の破れが高温相で顕著になることをフレーバー毎のカイラル凝縮を計算することで示した。

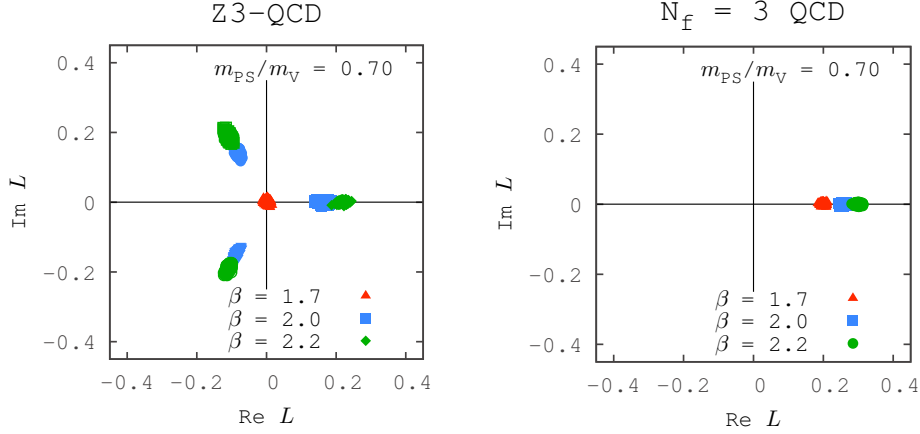


図 1: Z_3 QCD(左) と $N_f = 3$ QCD(右) におけるポリャコフループ L の配位毎 distribution plot。格子サイズは $16^3 \times 4$ 、 $\beta = 1.7, 2.0, 2.2$ での計算結果。

2.3 計算方法の概略

本研究では $N_f = 1 + 1 + 1$ に Z_3 境界条件を課した $SU(3)$ ゲージ配位生成を行う。格子作用としては Iwasaki gauge action と Wilson fermion action 用い、RHMC アルゴリズムを用いる。以下概略を述べる。

(1) これまでのシミュレーションで、Wilson fermion において物理量を一定にするパラメータセットである (β, κ) を求めていた。具体的には $(L/a)^4 = 16^4$ つまりゼロ温度で、各 β 毎に複数の κ で配位生成を行い、擬スカラー・ベクトル中間子質量を測定することで、 $m_{PS}/m_V = 0.70$ となる line of constant physics を求めた [図 1]。これまで既にポリャコフループ L の分布プロットから Z_3 対称な真空の確認した [図 1]。

β	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20
κ	0.2019	0.1975	0.1921	0.1861	0.1793	0.1725	0.1663	0.1611	0.1571	0.1539

表 1: シミュレーションパラメータ (β, κ) の組。

(2) 今回の解析では $m_{PS}/m_V = 0.70$ となる κ を採用し、 $16^3 \times 4$ 、 $20^3 \times 4$ でポリャコフループ期待値を計算した。これらの β 依存性、ヒステリシスを調べることで、それぞれの転移温度と相転移次数を決定した。

(3) カイラル転移 (クロスオーバー転移) について、通常の $N_f = 3$ QCD と Z_3 -QCD を比較することで、カイラル転移がどのように中心相転移に影響を受けるのかを定性的に調べた。

(4) 各フレーバー毎のカイラル凝縮の計算から、高温領域においては中心対称性の破れに伴って、フレーバー対称性がどのように影響を受けるかを調べた。

2.4 具体的な研究成果

当該期間に行ったシミュレーション研究の成果としては以下の3点が上げられる。

(i) 格子サイズ $16^3 \times 4$ 、 $20^3 \times 4$ でのポリャコフープの温度依存性解析により中心対称性相転移を発見、またヒステリシスを調べることで相転移次数が1次であることを確認。

(ii) 格子サイズ $16^3 \times 4$ 、 $20^3 \times 4$ でのカイラル凝縮の温度依存性から、カイラル転移(クロスオーバー)の際にも、ヒステリシスが現れることを発見。

(iii) 格子サイズ $16^3 \times 4$ 、 $20^3 \times 4$ での各フレーバー毎のカイラル凝縮の計算から、高温領域においては中心対称性の破れに伴って、フレーバー対称性の破れが顕著になることを発見。

(i) ポリャコフープの温度依存性から Z_3 対称性の1次転移を発見

[図2] が示すように、低温側から高温側へ β が変化する中で、ポリャコフープ期待値がゼロから急激に大きくなる。通常の $N_f = 3$ QCD と比較すると明らかな変化であり、 Z_3 対称性の自発的破れに関する相転移があることを確認出来た。また Hot start, cold start の比較により、ヒステリシスが確認されており [図2]、この転移が1次転移であることも示した。また、感受率のピークの値からある程度正確に転移温度を知ることが出来ている [図3]。

(ii) Z_3 QCD のカイラル凝縮の温度依存性にヒステリシスを発見

[図4] が示すように、 Z_3 QCD のカイラル凝縮は中心転移と同じ温度領域でヒステリシスを持つことが判明した。転移温度は大まかに普通の3フレーバー QCD と比較して同程度であるが、ヒステリシスは Z_3 QCD にしか存在した。これは、 Z_3 相転移が1次であるときには、カイラル転移もそれに付随してヒステリシスを持ち、カイラル極限においては1次転移になる可能性を示している。

(iii) カイラル凝縮から高温相におけるフレーバー対称性破れの顕在化を確認

[図5] が示すように、各フレーバー毎のカイラル凝縮を比較することで、低温相では縮退していたものが、高温相では分離することが示された。これは境界条件によって元々破れているフレーバー対称性の破れが、低温では顕在化せず、高温相に至って Z_3 対称性の破れに伴って顕在化することを意味している。フレーバー対称性の破れはこのモデルにおけるねじれた境界条件の帰結であり、普通の3フレーバー QCD には見られない特性である。一方、この結果は低温相から相転移点にかけては3フレーバー QCD と非常に似た性質を持つことも示している。

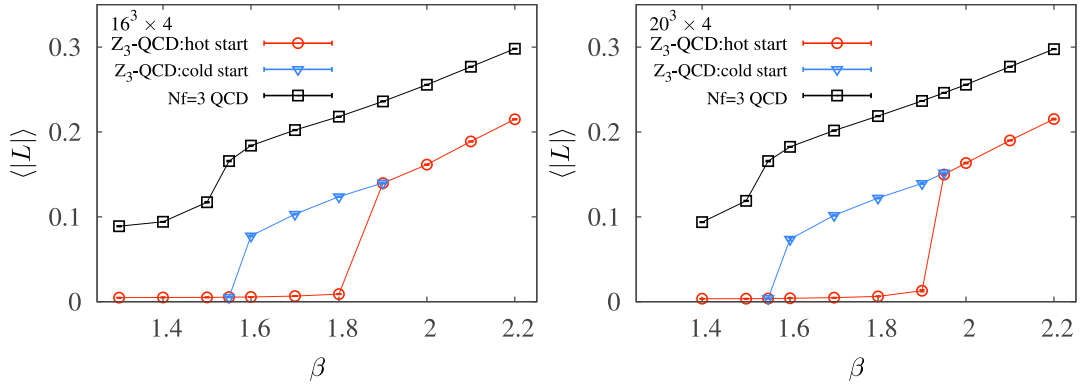


図 2: Z_3 QCD と通常の $N_f = 3$ QCD におけるポリャコフループ期待値 $\langle L \rangle$ の β 依存性。格子サイズは $16^3 \times 4$ (左図)、 $20^3 \times 4$ (右図) での計算結果。 Z_3 QCD では 0 から急激に増加し、さらに Hot-cold start によって転移点に違いが見られる。

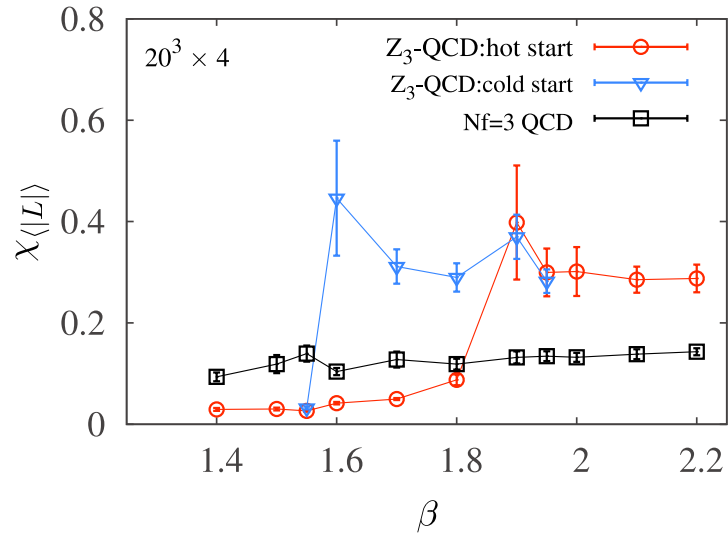


図 3: Z_3 QCD と通常の $N_f = 3$ QCD におけるポリャコフループ期待値感受率の温度依存性。格子サイズは $20^3 \times 4$ での計算結果。 Z_3 QCD では特徴的なピークが見られる。

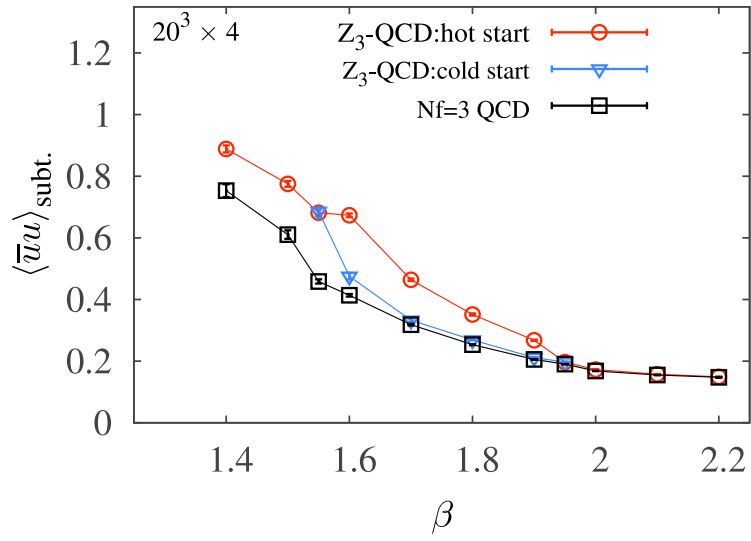


図 4: Z_3 QCD におけるカイラル凝縮 $\langle \bar{q}q \rangle$ の β 依存性。格子サイズは $20^3 \times 4$ 。

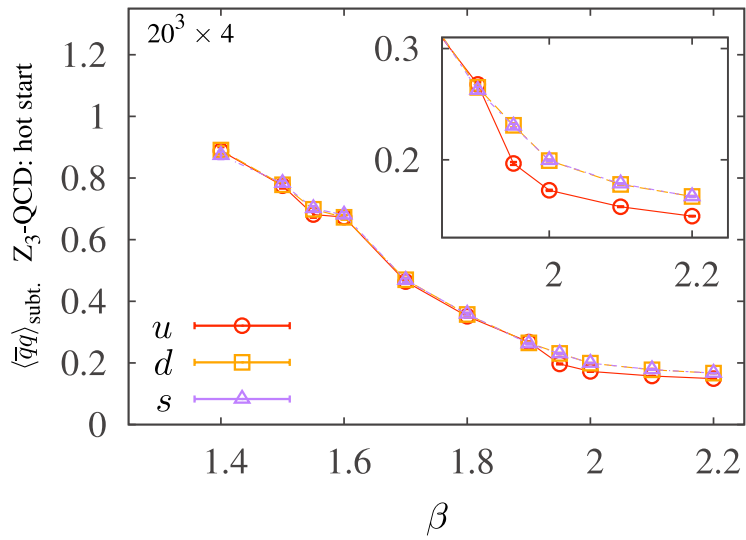


図 5: Z_3 QCD における各フレーバー毎のカイラル凝縮 $\langle \bar{q}q \rangle$ の β 依存性。格子サイズは $20^3 \times 4$ 。簡単のため hot start の結果のみを示している。

2.5 まとめ

当該期間においては、動的基本表現クォークを含む Z_3 中心対称な QCD 型理論において有限温度転移特に中心温度転移を厳密に議論することに成功した。中心対称性に関する 1 次相転移の発見と、それに伴うカイラルクロスオーバー転移におけるヒステリシスの存在を示したことは、閉じ込め転移とカイラル転移の関係の深さを示す上で重要な結果である。今後この方向性での研究が進められることで、一致した結論の出ていない現実の QCD での近似的 Z_3 破れ転移とカイラル転移の関係 [2, 3] について、新たな知見が得られる可能性がある。

参考文献

- [1] J. B. Kogut. et.al., Phys. Rev. Lett. **50**, 393 (1983).
- [2] A. Bazavov, [arXiv:1303.6294] and see its references.
- [3] Z. Fodor, S. D. Katz, [arXiv:0908.3341] and see its references.
- [4] F. Karsch, M. Lutgemeier, Nucl. Phys. B **550**, 449 (1999).
- [5] H. Kouno, T. Misumi, K. Kashiwa, T. Makiyama, T. Sasaki, M. Yahiro, Phys. Rev. D **88**, 016002 (2013).