

研究責任者名 Name	三角 樹弘 Tatsuhiro MISUMI	所属機関 Affiliation	慶応義塾大学 Keio University
受理番号 Proposal No	大型 13/14-15	研究課題名 Program title	中止対称性を破った $N_f=1+1+1$ 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)

本研究は、有限温度 QCD におけるカイラル転移と  $Z_3$  中心対称性転移の関係という長年にわたる未解決問題を、中心対称性が厳密な  $Z_3$ -QCD の有限温度格子数値計算を行うことで理解しようという試みである。 $Z_3$ -QCD においては、3 つの基本表現フレーバーに異なる境界条件を課すことで  $Z_3$  中心対称な 3 フレーバー SU(3)ゲージ理論を実現している。我々はこのような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結果、1 次相転移と思しき相転移を発見した。ここでの数値計算は physical point より重いクォーク質量で行われたが、その際に crossover 転移であるカイラル転移が、中心対称性の転移の影響を受けて比較的速く転移する傾向も見られた。これにより、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から進めることに成功し、今後この分野の研究に重要な示唆を与えることとなった。

(英文)

Based on finite-temperature lattice simulation of the  $Z_3$ -center-symmetric QCD-like theory, called  $Z_3$ -QCD, we attempt to understand the long-standing question on the relation between chiral and center transitions in finite-temperature QCD.  $Z_3$ -QCD realizes 3-flavor SU(3) gauge theory with exact  $Z_3$ -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), then we find out the first-order phase transition associated with spontaneous center symmetry breaking. Furthermore, we show the crossover transition of chiral symmetry is accelerated by the center phase transition in a relatively heavy quark regime. Through this simulation, we have opened 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

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)
	3	0	0	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. 三角樹弘, "中心対称性を保つ Z3-QCD 有限温度相転移とカイラル特性", 日本物理学会 2014 総会, 東海大学平塚キャンパス 2014 年 3 月 28 日
2. 入谷 匠, "中心対称性を保つ  $N_f = 3$  QCD の有限温度相転移の解析", 日本物理学会 2014 年秋季大会, 佐賀大学本庄キャンパス, 2014 年 9 月 18 日-21 日
3. 入谷 匠, "厳密な中心対称性を保つ  $N_f = 3$  QCD の有限温度相転移の解析", 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 日-5 日

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	著者名 Author	
	タイトル title	
	雑誌名 name of journal	
	URL	
2	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
3	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	

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.	著者名 Author	
	タイトル title	
	雑誌名等 name of journal	
	URL	
2.	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
3.	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	

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. )

- 1.
- 2.

# 平成 25-26 年度 sc zzzqcd( 13/14-15 ) 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) 慶応義塾大学 日吉物理学教室 (経済学部) 助教

共同研究者

入谷 匠 (いらたにたくみ) 京都大学基礎物理学研究所博士研究員

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

量子色力学 (QCD) における「カラー閉じ込め」と「カイラル対称性の自発的破れ」は、量子非摂動現象の代表例であり、また強い相互作用の本質的特性でもある。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。

この問題を調べるには、理想的な状況としてカイラル対称性と  $Z_3$  中心対称性が厳密な QCD 型理論を考え、その理論を格子数値計算により解析出来れば良い。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 と呼ぶこととする。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次相転移で起きることを発見した。さらに、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。その結果、通常の  $N_f = 3$  QCD に比べて、カイラルクロスオーバー転移が中心相転移温度付近で加速していることを示唆する結果を得た。これは、カイラル転移が中心転移に影響されてその転移温度にもその効果が現れる可能性を示している。

## 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) 今回のシミュレーションでは、Wilson fermion を使用するため物理量を一定にするためには各  $\beta$  毎の hopping parameter  $\kappa$  の調整が必要となる。まずゼロ温度で各  $\beta$  毎に複数の  $\kappa$  で配位生成を行う、格子サイズとしては、 $(L/a)^4 = 16^4$  を用いた。擬スカラー・ベクトル中間子質量 ( $m_{\text{PS}}, m_{\text{V}}$ ) を測定し、 $m_{\text{PS}}/m_{\text{V}}$  一定となる line of constant physics を探索した。

(2) 今回の解析では  $m_{\text{PS}}/m_{\text{V}} = 0.70$  となる  $\kappa$  を採用し、 $16^3 \times 4$ 、 $20^3 \times 4$ 、 $24^3 \times 4$  でポリャコフループ期待値を計算する。これらの  $\beta$  依存性、特に感受率のピーク位置と高さを調べることで、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。

## 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)  $m_{\text{PS}}/m_{\text{V}} = 0.70$  に対応する hopping parameter  $\kappa$  の決定。
- (ii) 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。
- (iii) 格子サイズ  $16^3 \times 4$ 、 $20^3 \times 4$ 、 $24^3 \times 4$  でのポリャコフループの温度依存性解析により中心対称性相転移を発見、またヒステリシスと感受率ピークの体積依存性を調べることで相転移次数が1次であることを示唆。
- (iv) 格子サイズ  $16^3 \times 4$  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) が中心転移に引きずられる傾向のあることを示唆。

### (i) $m_{\text{PS}}/m_{\text{V}}$ 一定となる line of constant physics の決定

まずゼロ温度 (格子サイズ  $(L/a)^4 = 16^4$ ) で、異なる  $\beta$  毎の  $m_{\text{PS}}/m_{\text{V}}$  と一定なる  $\kappa$  を決定した。 $\beta$  については1.2から2.2まで10点程度を取り、各  $\beta$  において  $\kappa$  数点で擬スカラー・ベクトル中間子質量 ( $m_{\text{PS}}, m_{\text{V}}$ ) を計算した。そして  $m_{\text{PS}}/m_{\text{V}} = 0.70$  となる  $\kappa$  を推定した [図1]。この結果は通常の  $N_f = 3$  QCD と一致しており、メソンスペクトルが一致することと合わせて、 $Z_3$  境界条件がメソンセクターには影響しないことを確認した。

### (ii) ポリャコフループ $L$ の分布プロットから $Z_3$ 対称な真空を確認

$Z_3$  対称性を反映してポリャコフループ期待値が  $Z_3$  対称な真空を取ることを以下のように確認した： $Z_3$  QCD においては、[図2左] に示すように、低温相 ( $\beta = 1.2$ ) ではポリャコフループ期待値が原点付近に分布し、高温相 ( $\beta = 1.5, 1.6, 2.0$ ) では3つの  $Z_3$  真空が均等に存在し、そのうちのどれかが選ばれる (自発的  $Z_3$  対称性の破れ)。一方で、同じセッ

トアップ ( $\beta, \kappa$ , 格子サイズ) でも、理論自体が  $Z_3$  対称性を持たない通常の  $N_f = 3$  QCD においては、[図 2 右] に示すようにポリャコフループの分布は位相ゼロの実軸上真空しか選ばない。

(iii) ポリャコフループの温度依存性から  $Z_3$  対称性の 1 次転移を発見

[図 3] で示すように、低温側から高温側へ  $\beta$  が変化する中で、ポリャコフル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 3]、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が体積とともに増加する傾向を見ることが出来ている [図 4]。これは「1 次相転移においては感受率ピークが体積に比例する」という性質と無矛盾であり、相転移次数が 1 次であることを支持する結果となっている。

(iv)  $Z_3$  QCD のカイラル凝縮の温度依存性の特徴的振舞を確認

[図 5] が示すように、 $Z_3$  QCD のカイラル凝縮はヒステリシスに影響されることが判明した。これはカイラル転移が  $Z_3$  相転移に引きずられていることを示している。

## 2.5 まとめ

当該期間における研究成果の結果として、世界に先駆けて「動的基本表現クォークを含む QCD」での  $Z_3$  中心対称性を厳密に議論することに成功した。そして、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、新たな知見を得る事が出来た。

## 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).

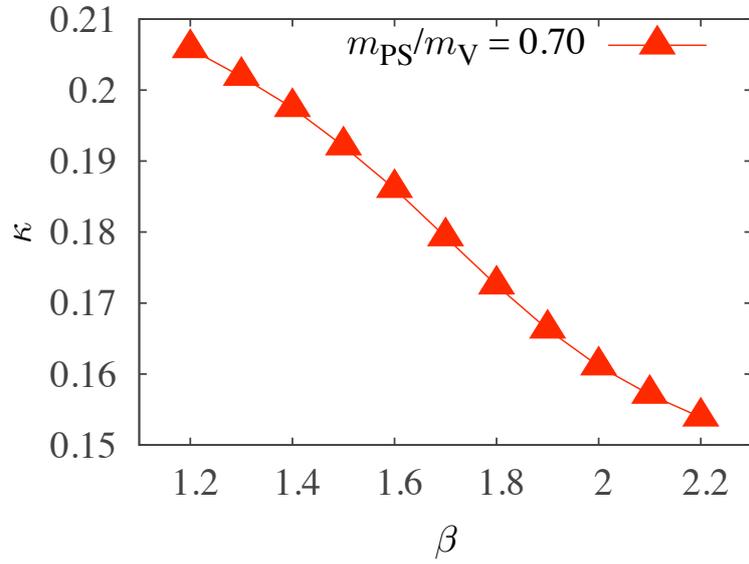


図 1:  $Z_3$  QCD における  $m_{\text{PS}}/m_{\text{V}} = 0.70$  に対応する line of constant physics。

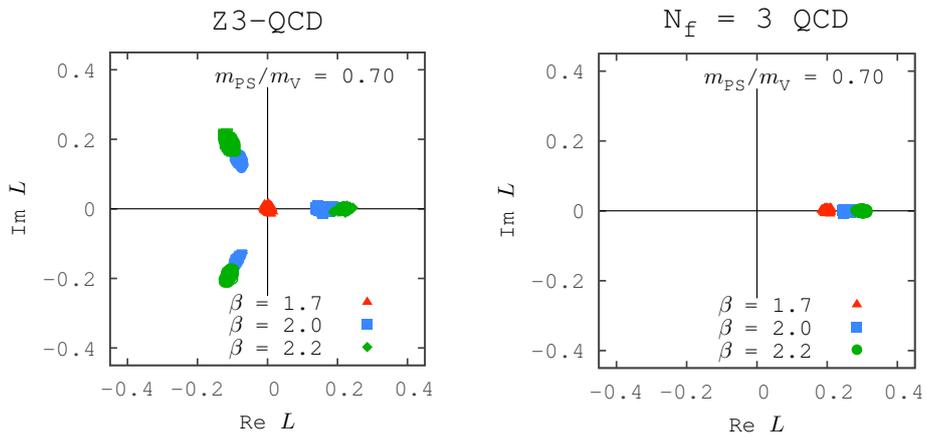


図 2:  $Z_3$  QCD(左) と  $N_f = 3$  QCD(右) におけるポリャコフloop  $L$  の配位毎 distribution plot。格子サイズは  $16^3 \times 4$ 、 $\beta = 1.7, 2.0, 2.2$  での計算結果。

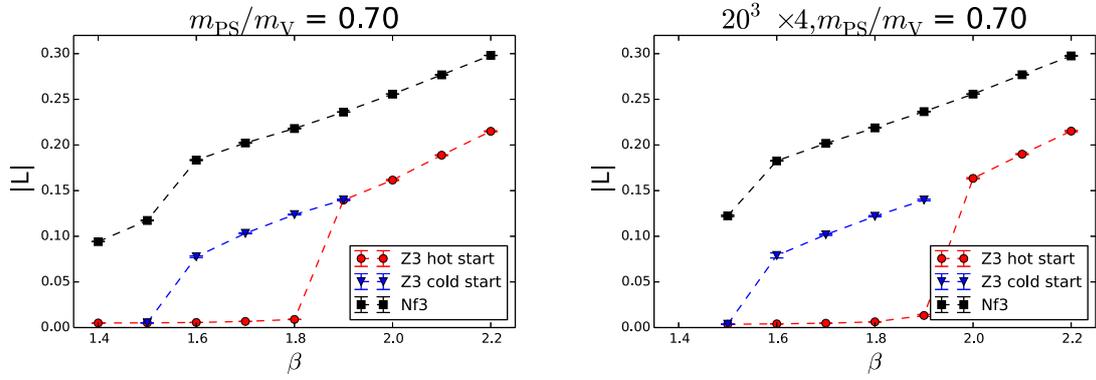


図 3:  $Z_3$  QCD と通常の  $N_f = 3$  QCD におけるポリャコフループ期待値  $\langle L \rangle$  の  $\beta$  依存性。格子サイズは  $16^3 \times 4$  (左図)、 $20^3 \times 4$  (右図) での計算結果。  $Z_3$  QCD では 0 から急激に増加し、さらに Hot-cold start によって転移点に違いが見られる。

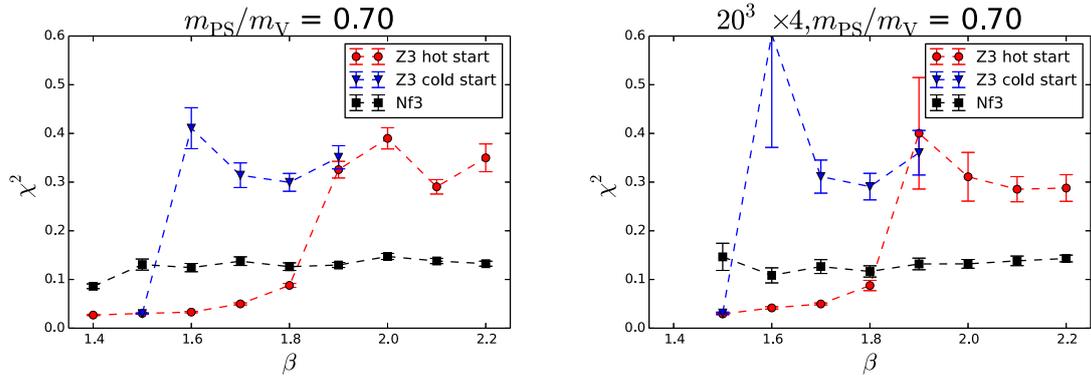


図 4:  $Z_3$  QCD と通常の  $N_f = 3$  QCD におけるポリャコフループ期待値感受率の温度依存性。格子サイズは  $16^3 \times 4$  (左図)、 $20^3 \times 4$  (右図) での計算結果。  $Z_3$  QCD では特徴的なピークが見られ、さらにそのピークの値が体積の増加とともに大きくなる傾向が見られる。

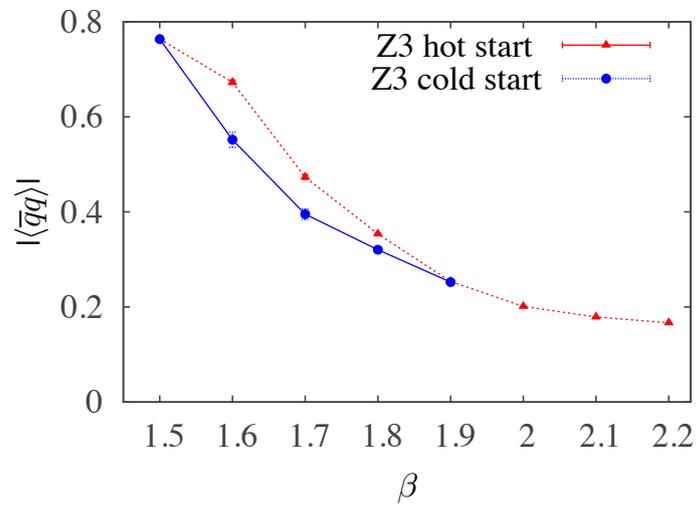


図 5:  $Z_3$  QCD におけるカイラル凝縮  $\langle \bar{q}q \rangle$  の  $\beta$  依存性。格子サイズは  $16^3 \times 4$ 、 $\beta = 1.5-2.2$  での計算結果。