

令和元年6月6日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05042

研究課題名(和文)量子色力学の新しい定式化に基づくクォーク閉じ込めの研究

研究課題名(英文)Quark confinement based on the novel reformulation of quantum chromodynamics

研究代表者

近藤 慶一 (Kondo, Kei-Ichi)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：60183042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：クォーク閉じ込めの双対超電導描像に促されて、ヤン・ミルズ理論の新しい再定式化とウィルソンループ演算子に対する非可換ストークスの定理を用いて行われた我々の研究を中心として、最近の研究の成果を総合報告としてPhysics Reportsに出版した。さらに、ゼロ質量のゲージボソンが質量を獲得する機構のひとつであるヒッグス機構を、ゲージ対称性の自発的破れに頼らないで、明白にゲージ不変に記述することが可能であることを示した。ゲージ不変な質量項を導入した純粋ヤン・ミルズ理論には、磁気モノポール配位が存在することを、相補的なゲージ・スカラー模型の場の方程式の解から純粋ゲージ場の配位を得る方法を用いて示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質を構成する原子のなかで、電子を除く原子核を構成する陽子や中性子は、クォークと呼ばれる素粒子が強い相互作用を担うグルーオンと呼ばれる素粒子によって結び付けられて存在していると考えられている。しかし、クォークやグルーオンは、陽子や中性子を含むメソン、バリオンなどのハドロンやグルーボールなどと呼称される。それらを基本的構成要素とする束縛状態としてのみ観測され、単体としては取り出されていない。これを「クォークの閉じ込め」と呼ぶ。この機構を解明することは、素粒子物理学のみならず、我々がどのようにしてこの宇宙に存在しているのかという根源的な疑問に答えるために重要であり、我々の研究は一つの解答を与える。

研究成果の概要(英文)：We have published a review on the recent developments on quark confinement in Physics Reports which is based on the new reformulation of the Yang-Mills theory and the non-Abelian Stokes theorem for the Wilson loop operator guided by the dual superconductor picture for quark confinement. Moreover, we have shown that it is possible to describe the Higgs mechanism which is one of the mechanisms for massless gauge bosons to acquire their mass in a manifestly gauge-invariant way without relying on the spontaneous breaking of gauge symmetry. We have also shown that there exist configurations of magnetic monopoles in the pure Yang-Mills theory with the gauge-invariant mass term based on the method in which gauge configurations can be obtained from solutions of the field equations in the complementary gauge-scalar model.

研究分野：素粒子論

キーワード：クォーク閉じ込め グルーオン閉じ込め ヒッグス機構 磁気モノポール 双対超伝導 非閉じ込め相転移 質量ギャップ 非可換ストークス定理

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

強い相互作用を担う素粒子であるクォークやグルーオンは、メソン、バリオンなどのハドロンやグルーボールとして観測され、単体としては取り出されていない。これを「クォーク閉じ込め」と呼ぶ。クォーク閉じ込めの判定基準としては、Wilson ループの面積則が良く知られている。申請者らは、クォーク閉じ込め機構を双対超伝導描像に基づいて明らかにするために、可換射影のような特定のゲージ固定を用いずに、ゲージ不変な Wilson ループ演算子に対する非可換 Stokes の定理を  $SU(N)$  に拡張することで、ゲージ不変な磁気モノポールを Wilson ループ演算子から直接的に定義することに成功した。これにより磁気モノポールが閉じ込めに果たす役割を直接検証することができる。一方で、ヤン・ミルズ理論を新しい場の変数を用いて書換える再定式化を、経路積分量子化に基づく連続理論で完成させた。さらに、それを格子上に移植し、数値シミュレーションを実行することも可能にした。これらの道具を用いて、ヤン・ミルズ理論が元々持っていたゲージ対称性を壊すことなく、特定のゲージに依らずに、クォーク閉じ込めに支配的に寄与する場の自由度(制限場と呼ぶ)を分離・抽出することを可能にした。その結果、 $SU(2)$  ゲージ群の場合には、最大可換ゲージでのみ得られていた双対超伝導描像を特徴付けるアーベリアン・ドミナンスや磁気モノポール・ドミナンスに、ゲージ固定に起因する作為的な結果ではないのかという疑義を払拭し、ゲージ不変な物理的意味づけを与えることに成功した。さらに、 $SU(3)$  ゲージ群の基本表現に属すクォークの閉じ込めには、従来のアーベリアン射影で得られる可換磁気モノポールではなく、非可換磁気モノポールが支配的に寄与する非可換双対超伝導を発見した。我々は既に、絶対零度では、静的ポテンシャルの弦定数を再現する、制限場ドミナンスと非可換磁気モノポールドミナンスを示した。その成果は、研究分担者(柴田)、研究協力者(加藤)と総説論文にまとめた。

K.-I.Kondo, S.Kato, A.Shibata, T.Shinohara, Quark confinement: dual superconductor picture based on a non-Abelian Stokes theorem and reformulations of Yang-Mills theory (226頁) Physics Reports 579, 1-226 (2015).e-Print: arXiv:1409.1599 [hep-th]

### 2. 研究の目的

我々は、クォーク閉じ込めを第一原理から理解するために、双対超伝導描像の視点から支配的自由度をゲージ共変に抽出する新しい定式化を開発したが、 $SU(3)$  カラー群の基本表現に属すクォークの閉じ込めは、 $SU(2)$  と異なり、ゲージ不変に定義された非可換磁気モノポールに起因する非可換双対超伝導であると提唱し、その理論的裏付け、数値的検証を行ってきた。本研究では、それをさらに発展させ、有限温度にも拡張し、閉じ込め/非閉じ込め相転移のメカニズムを解明するとともに質量ギャップの原理的理解も目指す。特に、残された最も重要な問題であるクォークの表現依存性、モノポール凝縮による磁気的対称性の自発的破れを解明する。

### 3. 研究の方法

- (1) Polyakov ループ, Wilson ループに対する非可換ストークス定理の高次元表現, 有限温度への拡張: Casimir スケーリングや N-ality の問題を議論するために,  $SU(N)$  Wilson ループ演算子に対する非可換 Stokes の定理を, 既に得られている基本表現から, 任意の表現に拡張する [ $SU(2)$  では既に完了済]。これにより, 演算子レベルでの表現依存性が, 期待値レベルでの表現依存性にどう反映するかを調べ, Casimir スケーリングの物理的起源, 理論的整合性, 数値計算結果の再現性などを吟味して, クォークポテンシャルの表現依存性の多面的理解に繋げる。
- (2) 有限温度を扱うために Polyakov ループ演算子に対しても非可換 Stokes の定理を拡張し, 絶対零度と有限温度との相違を認識することは重要である。この際に, センター群, ワイル群などの離散的部分群の果たす役割に特に注意を払うことが重要である。有限温度閉じ込め/非閉じ込め相転移はセンター群の自発的破れに伴って起こると考えられているからである。 $SU(2)$  と  $SU(3)$  で相転移の次数が異なると考えられる要因を特定したい。
- (3) 有限温度での閉じ込めと非閉じ込め相転移: 有限温度では, クォーク・反クォーク対 (Wilson ループ) は Polyakov ループ対で置き換えれば, 絶対零度と類似の方法で, ゲージ不変な場の強さを定義できることがわかる。有限温度での Polyakov ループ期待値  $\langle P[A] \rangle$  における制限場ドミナンス  $\langle P[A] \rangle = \langle P[V] \rangle$  が見られるか。制限 Polyakov ループ期待値  $\langle P[V] \rangle$  で相転移が特定できるか,  $\langle P[A] \rangle$  による結果と一致するかを調べる。有限温度でのカラーフラックスチューブの形成とそれに伴う磁気カレントの誘導が起こるか, その温度変化はどうなるか。特に, 相転移温度以上で, カラー電場フラックスチューブの広がり喪失, 及びそれに伴う磁気カレントの消滅が起こるか。この相転移において非可換磁気モノポールが支配的役割を果たすか。これらの結果の表現依存性も重要な課題である。
- (4) 制限されたヤン・ミルズ理論のラージ  $N$  展開と質量ギャップ:  $SU(N)$  ヤン・ミルズ理論の再定式化における minimal オプションでは, 制限場に限定したヤン・ミルズ理論は Large  $N$  展開が元々のヤン・ミルズ理論より容易なこと [が予備的考察から判明している] から, 摂動論に依らない解析的な取り扱いが可能である。これを用いて次元の転化によるスケールの生成を示し, それを基礎として質量ギャップの存在に関して考察する。また, 有質量ヤン・ミルズ理論に基づく低エネルギー有効理論の導出を試みる。これに基づきカイラル

対称性の自発的破れ/回復転移の原理的理解も目指す。

#### 4. 研究成果

- (1) 双対超電導描像に基づくクォーク閉じ込めに関して、新しい再定式化と非可換ストークスの定理を用いて行われた我々のこれまでの研究を中心として、最近の研究の成果を総合報告として Physics Reports に出版した。
- (2) Wilson ループ期待値の表現依存性、つまり、クォークポテンシャルの表現依存性を調べるために、Wilson ループ演算子に対する非可換 Stokes の定理を、既に得られている基本表現から、 $SU(N)$ の任意の表現に拡張した。
- (3) Wilson ループ演算子に対する例外群  $G(2)$ をゲージ群に持つヤン・ミルズ場のゲージ共変な分解を与えた。これは  $SU(N)$ ヤン・ミルズ場に対して Cho-Duan-Ge-Faddeev-Niemi によって提案された場のゲージ共変な分解法の拡張を与える。その応用として、 $G(2)$ の任意表現に属す Wilson ループ演算子に対する非可換ストークスの定理の新しい表示を導いた。これを用いてゲージ不変な磁気モノポールを定義することに成功した。その磁気モノポールの磁荷は Dirac の量子化条件に類似の量子化条件を満たすことを示した。
- (4) ゼロ質量のゲージボソンが質量を獲得する機構のひとつであるヒッグス機構を、ゲージ対称性の自発的破れに頼らないで、明白にゲージ不変に記述することが可能であることを、Higgs 場がゲージ群  $SU(2)$ の随伴表現に従う場合にあらわに示した。この方法の特徴的な点は以下の通りである。(i) ゲージ対称性は自発的に破れずに維持されているので、南部・Goldstone 粒子が生成され、その後で吸収されるというステップを導入する必要はない。(ii) ゲージ固定条件に依存して変わるスカラー場の真空期待値を導入する必要がない。(iii) 閉じ込め-ヒッグス相補性やクォーク閉じ込め機構を新たな視点から議論することが可能である。(iv) この対応を用いて、クォーク閉じ込めに効く非自明なトポロジカル配位を求めることが可能になる。実際、相補的なゲージ-スカラー理論の運動方程式を解くことによって、スカラー場のないヤン・ミルズ理論の磁気モノポールあるいはダイオン配位をゲージ非依存に求めることが可能になった。
- (5) 明白にローレンツ共変なゲージ固定でのヤン・ミルズ理論に質量項を加えた理論においてグルーオンとゴーストから成る 2 体の束縛状態を調べるために、経路積分量子化の枠組みで複合演算子に対する Cornwall-Jackiw-Tomboulis の有効作用を用いてグルーオンとゴーストの同時束縛状態に対する Bethe-Salpeter 方程式を系統的に導出した。次に、梯子近似で方程式を解いて、束縛状態に相当する Bethe-Salpeter 振幅の数値解を求めた。ゴーストが如何にグルーオン 2 体束縛状態に影響するかを調べた。また、この解が負のベータ関数で見られる漸近自由性とコンシステントであることを示した。
- (6) 2 重に巻いたループに対する Wilson ループ演算子の真空期待値の振る舞いを調べることは、正しい閉じ込め機構が何であるかを判定する一つの手段となることがゲージ群が  $SU(2)$ の場合に示されていた。これを拡張し多重巻きのループを  $SU(N)$ ヤン・ミルズ理論で考えることで様々な閉じ込め機構を分類、精査できることを例示し物理的意味を与えた。
- (7) グルーオン場から構成されるゲージ不変な質量次元 2 の複合演算子の真空期待値が非ゼロ、つまり真空凝縮が存在することを示すことは、クォーク閉じ込めに関する様々な現象を解明する上に極めて重要な課題であり以前からその遂行が望まれていた。今回は、共変ゲージ固定した  $SU(N)$ ヤン・ミルズ理論において摂動 1 ループの範囲で、この複合演算子のゲージ不変性に替わる BRST 不変性と複合演算子としての繰り込み可能性を示した。さらに質量次元 2 の真空凝縮が起こっていることを示した。
- (8) ゲージ場が質量を持つ機構である Brout-Englert-Higgs 機構のゲージ非依存な記述法を与えた。この記述法は、スカラー場の真空期待値を指定する必要がなく、従来のゲージ対称性の自発的破れに頼らないためゲージ対称性を破らない。これを用いると、ゲージ対称性を破らずに、ゲージ不変な質量項を持つヤン・ミルズ理論が、対応するゲージ・スカラー理論から、スカラー場の動径自由度が固定された場合に還元条件を課すことで構成できる。これは、格子ゲージ理論のゲージ不変な枠組みで以前得られたヒッグス領域と閉じ込め領域をつなぐ Fradkin-Shenker 連続性(相補性)の連続理論での実現と解釈できる。この相補的なゲージ・スカラー理論から出発してヤン・ミルズ理論での閉じ込めが理解できる。
- (9) ゲージ不変な質量項を導入した純粋ヤン・ミルズ理論には、磁気モノポール配位が存在することを、相補的なゲージ・スカラー模型の場の方程式の解から純粋ゲージ場の配位を得る最近の方法を用いて示した。このゲージ不変な質量項は、ゲージ対称性の自発的破れやスカラー場の真空期待値に頼らない Brout-Englert-Higgs 機構のゲージ非依存な記述法と場の変数変換から得られる。静的かつ球対称性を持つアンザッツの下で、動径自由度を固定した単一のスカラー場に結合した  $SU(2)$ ヤン・ミルズ理論の場の方程式を解くことで求めた。この解は有質量ヤン・ミルズ理論の最小の磁荷を持つ磁気モノポールに対応するゲージ場の配位と見なせる。得られた有質量ヤン・ミルズ理論の磁気モノポールを純粋ヤン・ミルズ理論の Wu-Yang 磁気モノポールや Georgi-Glashow のゲージ・スカラー模型の 't Hooft-Polyakov の磁気モノポールと比較した。
- (10) 有限温度における閉じ込め相において、有限温度の Polyakov ループ期待値  $\langle P[A] \rangle$  において制限場ドミナンス  $\langle P[A] \rangle = \langle P[V] \rangle$  が見られるか。制限 Polyakov ループ期待値  $\langle P[V] \rangle$  で

相転移が特定できるか，元の Polyakov ループ期待値  $\langle P[A] \rangle$  による結果と一致するかを調べた。これと共に，有限温度でのカラーフラックスチューブの形成とそれに伴う磁気カレントの誘導が起こるか，その温度変化はどうなるか。特に，相転移温度以上で，カラー電場フラックスチューブの広がりと喪失，及びそれに伴う磁気カレントの消滅が起こるかを格子上で数値シミュレーションを用いて調べた。

## 5 . 主な発表論文等（研究代表者，及び研究分担者は下線）

〔雑誌論文〕(計 18 件)

・原著論文（査読有）

- (1) K.-I. Kondo, Gauge-independent Brout-Englert-Higgs mechanism and Yang-Mills theory with a gauge-invariant gluon mass term, The European Physical Journal C, 78, 577 [24 pages] (2018). DOI: [10.1140/epjc/s10052-018-6051-2](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-6051-2)
- (2) S. Nishino, R. Matsudo, M. Warschinke, and K.-I. Kondo, Magnetic monopoles in pure SU(2) Yang-Mills theory with a gauge-invariant mass, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2018, 103B04 [22 pages] (2018). DOI: [10.1093/ptep/pty105](https://doi.org/10.1093/ptep/pty105)
- (3) M. Warschinke, R. Matsudo, S. Nishino, T. Shinohara and K.-I. Kondo, Composite operator and condensate in the SU(N) Yang-Mills theory with U(N-1) stability group, Physical Review D 97, 34029 (2018). DOI: [10.1103/PhysRevD.98.059901](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.059901), [10.1103/PhysRevD.97.034029](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.034029)
- (4) H. Fukamachi, K.-I. Kondo, S. Nishino and T. Shinohara, Gluon bound state and asymptotic freedom derived from the Bethe-Salpeter equation, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2017, 053B05 (2017). DOI: [10.1093/ptep/ptx059](https://doi.org/10.1093/ptep/ptx059)
- (5) R. Matsudo and K.-I. Kondo, Double-winding Wilson loops in the SU(N) Yang-Mills theory, Physical Review D 96, 105011 (2017). DOI: [10.1103/PhysRevD.96.105011](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.105011)
- (6) R. Matsudo and K.-I. Kondo, Gauge-covariant decomposition and magnetic monopole for G(2) Yang-Mills field, Physical Review D 94, 45004 (2016). DOI: [10.1103/PhysRevD.94.045004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.94.045004)
- (7) K.-I. Kondo, Gauge-invariant description of Higgs phenomenon and quark confinement, Physics Letters B, 762, 219–224 (2016). DOI: [10.1016/j.physletb.2016.09.026](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.09.026)
- (8) R. Matsudo and K.-I. Kondo, Non-Abelian Stokes theorem for the Wilson loop operator in an arbitrary representation and its implication to quark confinement, Physical Review D 92, 125038 (2015). DOI: [10.1103/PhysRevD.92.125038](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.125038)
- (9) K.-I. Kondo, S. Kato, A. Shibata and T. Shinohara, Quark confinement: Dual superconductor picture based on a non-Abelian Stokes theorem and reformulations of Yang-Mills theory, Physics Reports 579, 1-226 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2015.03.002>
- ・国際会議録（査読無）
- (10) K.-I. Kondo, Y. Suda, M. Ohuchi, Y. Hayashi and R. Matsudo, Mass-deformed Yang-Mills theory in the covariant gauge and its gauge-invariant extension, Proceedings of Science, Confinement2018 (2019).
- (11) A. Shibata, R. Matsudo, S. Kato and K.-I. Kondo, Confinement of quarks in higher representations in view of dual superconductivity, Proceedings of Science, PoS(LATTICE2018) 254 (2019).
- (12) R. Matsudo, A. Shibata, S. Kato and K.-I. Kondo, Correct way to extract dominant part of the Wilson loop in higher representations, Proceedings of Science, PoS(Confinement2018) 052 (2019)
- (13) A. Shibata, K.-I. Kondo, S. Nishino, T. Sasago and S. Kato, Type of dual superconductivity for SU(2) and SU(3) Yang-Mills theories, Proceedings of Science, PoS(Confinement2018) 269 (2019).
- (14) A. Shibata, S. Kato and K.-I. Kondo, Confinement/deconfinement phase transition in SU(3) Yang-Mills theory and non-Abelian dual Meissner effect, Proceedings of Science, PoS(Confinement2018) 061 (2019).
- (15) M. Warschinke, R. Matsudo, S. Nishino, T. Shinohara, and K.-I. Kondo, Composite operator and condensate in SU(N) Yang-Mills theory with U(N-1) stability group, Proceedings of Science, Confinement2018 (2019).
- (16) R. Matsudo, K.-I. Kondo and A. Shibata, Double-winding Wilson loops in SU(N) Yang-Mills theory; A criterion for testing the confinement models, EPJ Web Conf. 175, 12002 (2018).
- (17) A. Shibata, S. Kato, K.-I. Kondo and R. Matsudo, Lattice study of area law for double-winding Wilson loops, EPJ Web Conf. 175, 12010 (2018).
- (18) K.-I. Kondo, Gauge-independent Higgs mechanism and the implications for quark confinement, EPJ Web Conf. 137, 3009 (2017).

〔学会発表〕(計 42 件)

- (1) 近藤 慶一, BEH 機構のゲージ不変な記述法から得られるゲージ不変な質量項を持つヤン・ミルズ理論と閉じ込め, 日本物理学会 第 74 回年次大会, 九州大学, 3 月 14-17 日 2019 年.
- (2) 松戸 竜太郎, QCD 弦のモデルとしてのセンターボルテックス解, 日本物理学会 第 74 回年次大会, 九州大学, 3 月 14-17 日 2019 年.
- (3) 柴田 章博, クォーク閉じ込めの双対超伝導描像と閉じ込め・非閉じ込め相転移, 日本物理学会 第 74 回年次大会, 九州大学, 3 月 14-17 日 2019 年
- (4) Ryutaro Matsudo, How to extract the dominant “Abelian” part of the Wilson loop in higher representations, Probing the Phase Structure of Strongly Interacting Matter: Theory and Experiment [国際学会], GSI, Germany, 25-29 March 2019.
- (5) Akihiro Shibata, Confinement of quarks in view of dual superconductivity, 10th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, 筑波大学, 2018.10.15-16
- (6) Kei-Ichi Kondo, Mass-deformed Yang-Mills theory in the covariant gauge and its gauge-invariant extension, XIIIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum [国際学会], Maynooth, Ireland, 31 July-6 August 2018.
- (7) Akihiro Shibata, Confinement/deconfinement phase transition in SU(3) Yang-Mills theory and non-Abelian dual Meissner effect, XIIIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum [国際学会], Maynooth, Ireland, 31 July-6 August 2018.
- (8) Ryutaro Matsudo, Correct way to extract dominant part of the Wilson loop in higher representations, XIIIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum [国際学会], Maynooth, Ireland, 31 July-6 August 2018.
- (9) Matthias Warschinke, Composite operator and condensate in SU(N) Yang-Mills theory with U(N-1) stability group, XIIIth Quark Confinement and the Hadron [国際学会], Maynooth, Ireland, 31 July-6 August 2018.
- (10) Akihiro Shibata, Confinement of quarks in higher representations in view of dual superconductivity, Lattice2018 [国際学会], Michigan, USA, 22-28 July 2018
- (11) Kei-Ichi Kondo, Understanding quark confinement through the gauge-independent Brout-Englert-Higgs mechanism, New Frontier in QCD, [国際学会](招待講演), Kyoto Univ., May 28 - June 29 2018.
- (12) Akihiro Shibata, Confinement/deconfinement phase transition in SU(3) Yang-Mills theory and Non-Abelian dual Meissner effect, New Frontier in QCD [国際学会](招待講演), Kyoto Univ., May 28 - June 29 2018.
- (13) Ryutaro Matsudo, Suitable operator to test the Abelian dominance for sources in higher representation, New Frontier in QCD [国際学会] (招待講演), May 28 - June 29 2018 年
- (14) Shogo Nishino, On the type of dual superconductor for SU(2) and SU(3) Yang-Mills theories, New Frontier in QCD [国際学会](招待講演), Kyoto Univ., May 28 - June 29 2018.
- (15) Matthias Warschinke, Composite operator and condensate in SU(N) Yang-Mills theory with U(N-1) stability group, New Frontier in QCD [国際学会](招待講演), Kyoto Univ., May 28-June 29 2018.
- (16) Kei-Ichi Kondo, Understanding quark confinement through a gauge-invariant Higgs mechanism WE-Heraeus Seminar - From Correlation Functions to QCD Phenomenology - [国際学会](招待講演), Germany, 3-6 April 2018.
- (17) 近藤 慶一, SU(2)及び SU(3) Yang-Mills 理論における双対超伝導のタイプについて, 日本物理学会 第 73 回年次大会, 東京理科大学 3 月 22 日 ~ 25 日 2018 年.
- (18) Matthias Warschinke, Composite operator and condensate in the SU(N) Yang-Mills theory with U(N-1) stability group, 日本物理学会 第 73 回年次大会, 東京理科大学 3 月 22 日 ~ 25 日 2018 年.
- (19) 柴田 章博, 高次元表現クォークの閉じ込め機構, 日本物理学会 第 73 回年次大会, 東京理科大学 3 月 22 日 ~ 25 日 2018.
- (20) 西野尚吾, Bethe-Salpeter 方程式を用いたグルーオンの束縛状態と漸近自由性の解析, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 9 月 21 日 ~ 25 日 2017 年.
- (21) 松戸 竜太郎, SU(N) ヤン = ミルズ理論における二重巻きウィルソン・ループ, 日本物理学会 2017 年秋季大会 岩手大学 9 月 21 日 ~ 25 日 2017 年.
- (22) 柴田 章博, 格子上の二重巻きウィルソン・ループの面積則, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 9 月 21 日 ~ 25 日 2017.
- (23) Kei-Ichi Kondo, On the mechanism for confinement and deconfinement transition at finite temperature, Functional Methods in Hadron and Nuclear Physics [国際学会](招待講演), ECT\*, Trento, Italy, 21-25 August 2017.
- (24) Akihiro Shibata, Lattice study of area law for double-winding Wilson loops, 35th International Symposium on Lattice Field Theory [国際学会], Granada, Spain, 18-24 Jun 2017.
- (25) Ryutaro Matsudo, Double-winding Wilson loops in SU(N) Yang-Mills theory; A criterion for testing the confinement models, 35th International Symposium on Lattice Field Theory [国際学会], Granada, Spain, 18-24 Jun 2017.
- (26) 近藤 慶一, 対称性の自発的破れに依らない Higgs 機構のゲージ不変な記述, 日本物理学会 第

- 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日~3 月 20 日, 大阪大学 (大阪府・豊中市)
- (27) 柴田 章博, 多重巻ウイルソンループについて, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日~3 月 20 日, 大阪大学 (大阪府・豊中市)
- (28) 西野 尚吾, 有質量 Yang-Mills 理論のゲージ不変な定式化とモノポール・ダイオン解, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日~3 月 20 日, 大阪大学 (大阪府・豊中市)
- (29) 柴田 章博, 閉じ込め・非閉じ込めの有限温度転移と磁氣的モノポールの果たす役割 - アーベリアン v.s. ノンアーベリアン 磁氣的モノポール -, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19 日~3 月 22 日, 東北学院大学 (宮城県・仙台市)
- (30) Kei-Ichi Kondo, Higgs mechanism without spontaneous symmetry breaking and quark confinement, 10th APCTP-BLTP/JINR-RCNP-RIKEN Joint Workshop on Nuclear and Hadronic physics [国際学会](招待講演), 2016 年 8 月 17 日~8 月 21 日, 理化学研究所 (埼玉県・和光市)
- (31) Kei-Ichi Kondo, Gauge-independent Higgs mechanism and the implications for quark confinement, 12th Conference on Quark Confinement and the Hadron Spectrum (Confinement XII) [国際学会], 2016 年 8 月 28 日~9 月 4 日, Thessaloniki (Greece)
- (32) Kei-Ichi Kondo, Connecting Non-Abelian magnetic monopole and vortex in Yang-Mills and Yang-Mills-Higgs theories, Second Geometric Models of Nuclear Matter Conference [国際学会], 2016 年 9 月 12 日~9 月 15 日, Canturbury (UK)
- (33) Akihiro Shibata, Quark confinement to be caused by Abelian or non-Abelian dual superconductivity in the SU(3) Yang-Mills theory, 34th International Symposium on Lattice Field Theory(lattice2016) [国際学会], 2016 年 7 月 24 日~7 月 30 日, Southampton (UK)
- (34) 松戸 竜太郎, クォーク閉じ込めに対するモノポールの役割 場の分解の複数の可能性, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 21 日~9 月 24 日, 宮崎大学 (宮城県・宮崎市)
- (35) Ryutaro Matsudo, Gauge-covariant decomposition and magnetic monopole for G(2) Yang-Mills field, 10th APCTP-BLTP/JINR-RCNP-RIKEN Joint Workshop on Nuclear and Hadronic physics [国際学会], 2016 年 8 月 17 日~8 月 21 日, 理化学研究所 (埼玉県・和光市)
- (36) 近藤 慶一, Higgs mechanism without spontaneous symmetry breaking and quark confinement, 熱場の量子論とその応用, 2016.8.22~8.24, 京都大学 (京都府・京都市)
- (37) K.-I. Kondo, Magnetic monopole and quark confinement, Workshop: Gauge Field Topology: From Lattice Simulations and Solvable Models to Experiment [国際学会](招待講演), 2015 年 8 月 17 日~8 月 21 日, State University of New York at Stony Brook, USA
- (38) Kei-Ichi Kondo, Confinement/deconfinement transition temperature from the Polyakov loop potential and gaugeinvariant gluon mass, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2015) [国際学会], 2015 年 7 月 14 日~7 月 18 日, 神戸国際会議場 (神戸市)
- (39) Akihiro Shibata, Confinement/deconfinement phase transition in the SU(3) Yang-Mills theory: center symmetry and Meissner effect, XQCD, 2016 1-3 August 2016, Plymouth Univ., UK. (poster)
- (40) Akihiro Shibata, Abelian monopole or non-Abelian monopole responsible for quark confinement, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015) [国際学会], 2015 年 7 月 14 日~7 月 18 日, 神戸国際会議場 (兵庫県・神戸市)
- (41) 近藤 慶一, 有限温度ヤンミルズ理論における閉じ込め/非閉じ込め転移の解析的導出と QCD におけるクォークフレーバーの影響, 熱場の量子論とその応用, 2015.8.31~9.2, 京都大学 (京都市)
- (42) 柴田 章博, SU(3)Yang-Mills 理論における閉じ込め・非閉じ込め相転移と双対超伝導描像--アーベリアン磁氣的モノポール対ノンアーベリアン磁氣的モノポール - (ポスター), 熱場の量子論とその応用, 2015.8.31~9.2, 京都大学 (京都市)

[図書](計 1 件)

- (1) Kei-Ichi Kondo, How Can We Understand Quark Confinement in Quantum Yang-Mills Theory?, pp.59-75, Memorial Volume for Yi-Shi Duan, Edited by: Mo-Lin Ge, Rong-Gen Cai, Yu-Xiao Liu, Chapter 3: (World Scientific, Singapore, 2018) ISBN: 978-981-3237-26-1, [https://doi.org/10.1142/9789813237278\\_0003](https://doi.org/10.1142/9789813237278_0003)

[その他]

- (1) 近藤 慶一, クォークの閉じ込め: なぜクォークは発見されないのか?, 日本物理学会誌 71, 290 (2016) [https://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/2016/05/71-05\\_70fushigi08.pdf](https://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/2016/05/71-05_70fushigi08.pdf)

## 6 . 研究組織

(1) 研究分担者 氏名: 柴田 章博 ローマ字氏名: SHIBATA AKIHIRO

所属研究機関名: 高エネルギー加速器研究機構 部局名: 計算科学センター

職名: 研究機関講師 研究者番号 (8 桁): 30290852

(2) 研究協力者 氏名: 加藤 清考 ローマ字氏名: KATO SEIKOU

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。