

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 17 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540252

研究課題名(和文)クォーク・グルーオンの同時閉じ込めとゲージ不変なカラー閉じ込め機構

研究課題名(英文) Simultaneous confinement of quarks and gluons and a gauge-invariant color confinement mechanism

研究代表者

近藤 慶一 (Kondo, Kei-Ichi)

千葉大学・理学(系)研究科(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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ヤンミルズ理論の新しい再定式化とウイilsonループ演算子に対する非可換ストークスの定理を併用して、双対超電導描像に基づくクォークとグルーオン閉じ込めに関する研究を遂行した。SU(3)の場合は、SU(2)と異なり、非可換磁気単極子が起源となって閉じ込めを引き起こすことを示した。これらの結果は、ゲージ非依存な形で得られる。一方で、先行研究の主張とは異なり、我々の結果は、ゲージ群がSU(2)かSU(3)かに拘わらず、双対超電導がI型であることを示す。この事実は、QCD真空が従来考えられていたII型の超電導体の電磁双対ではないことを示しており、今後、真空の安定性の問題と関連したより深い理解が必要である。

研究成果の概要(英文)：In order to study quark and gluon confinement based on the dual superconductor picture, we have developed both novel reformulations of the Yang-Mills theory and the non-Abelian Stokes theorem for the Wilson loop operator. We have confirmed that quark confinement in the SU(3) case is caused by NON-Abelian magnetic monopoles defined in a gauge-invariant way, in sharp contrast to the SU(2) case in which the magnetic monopole is Abelian type. These results are supported in a gauge-independent way. On the other hand, our numerical data show that the dual superconductivity is type I, irrespective of the gauge group, SU(3) or SU(2), against the preceding works. These results suggest that QCD vacuum is not equal to the electro-magnetic dual of the type II superconductor against the conventional wisdom. Therefore, we need deeper understanding on the stability of the vacuum related to confinement mechanism.

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 カラー閉じ込め 磁気単極子 双対超伝導 双対マイスナー効果 Savvidy真空 非閉じ込め相転移

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 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、陽子、中性子、中間子などのハドロンやグルーボールを構成するが、単体としては観測されてはいない。これを「クォーク閉じ込め」と呼ぶ。さらには、クォークやグルーオンはカラーと呼ばれる量子数を持つが、カラーが無色になる組み合わせの複合粒子しか観測されていない。これを「カラー閉じ込め」と呼ぶ。

(2) 申請者らは、クォーク閉じ込めの機構を明らかにするために、2005 年以降、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に取り組み、経路量子化に基づく連続理論の再定式化を完成させた。さらに、分担者と協力して、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。

一方、トポロジカルな配位である磁気モノポールがウィルソンループに果たす役割を明らかにするために、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拡張することにも成功した。

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を分離・抽出することが可能になった。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・ドミナンスが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、これらにゲージ不変な物理的意味づけを与えることに成功した。

(3) 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、従来考えられていた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こと、つまり、面積則での弦定数を再現する非可換双対超伝導を発見した。

(4) カラー閉じ込めに関しては、九後 - 小嶋(KO)と Gribov-Zwanziger(GZ)のシナリオは、シュウインガー-ダイソン方程式や汎関数くりこみ群、数値シミュレーション等の方法論の発達が契機となって、特にこの数年は活発な研究がヨーロッパやアメリカで続いている。KO/GZ はカラー閉じ込めを、グルーオン場とゴースト場から定義される或るグリーン関数の赤外(運動量ゼロ)極限での振舞いに帰するものである。グリーン関数はゲージ(固定条件)を指定しないと決まらないため、カラー閉じ込めはこれまでゲージ毎に調べられてきた。最もよく調べられている(ローレンス)ランダウゲージでは、赤外極限での伝播関数の振舞いに関して、二つの解が提唱されている：

・スケーリング解(グルーオン伝播関数：運動量ゼロ極限でゼロ、ゴースト伝播関数：自由場より特異的)

・デカップリング解(グルーオン伝播関数：運動量ゼロ極限で有限、ゴースト伝播関数：自由場と同様)

スケーリング解は KO/GZ を満たすが、デカップリング解はそうではない。しかし、2007 年以降、大きな格子での数値シミュレーションはデカップリング解を支持している。一方で、二つの解の違いは、ゲージ固定の不完全さ(Gribov コピー)に起因する作為的な帰結である可能性も指摘されている。このように、どちらが物理的に正しい解であるのか今も大論争中である。

(5) では、デカップリング解は、カラー閉じ込めを満足しないなら、クォーク閉じ込めも示さないのだろうか。最近、ランダウゲージのこれら二つの解はどちらもクォークとグルーオンの閉じ込めを満たすことが示された。ただし、ここで示されたクォーク閉じ込めはポリャコフループ期待値が非閉じ込め相転移温度以下でゼロになることを指し、温度ゼロのときは除外されている。

(6) このように、現状では、クォーク閉じ込めやグルーオン閉じ込めを、カラー閉じ込めの特殊ケースとしては議論できない状況であり、別個に議論しなくてはならない。言い方を変えると、クォーク閉じ込めやグルーオン閉じ込めがグリーン関数の赤外での振舞いと、どのように関係しているのかすら明らかになってはいない。これを解明することが、本申請のひとつの動機である。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、クォーク閉じ込めに対して我々が開拓してきた方法論を、クォーク閉じ込めのみならず、グルーオン閉じ込めにも適用し、クォークとグルーオンの閉じ込めが、グルーオン伝播関数(2点グリーン関数)を初めとするグリーン関数の赤外領域での振舞いとどのように関係しているかを明らかにし、現在紛糾しているカラー閉じ込めの完全理解に一步でも近づきたい。

(2) クォーク閉じ込めの判定基準としては、ウィルソンループの面積則が良く知られている。ウィルソン判定基準はあらわにゲージ不変であるが、カラー閉じ込めのゲージ不変な判定基準は残念ながら現在に至るも知られていない。閉じ込めの判定基準を特定することは、閉じ込めのメカニズムは何かという疑問に答えることであり、それを明らかにすることは物理的に極めて重要である。実際、ウィルソンの面積則はクォーク・反クォーク間の静的ポテンシャルが線形であることと等価であり、クォーク閉じ込めの双対超伝導描像やハドロン弦へと自然に導かれる。

(3) カラー閉じ込めのゲージ不変なメカニズムを明らかにするため、クォークとグルーオンの閉じ込めを同時に示し、かつ、その双対変換がギンツブルグ-ランダウ模型に一致するような低エネルギー有効模型をウィルソンくりこみ群のアイデアを適用して導出し、汎関数くりこみ群の方法を用いて、系統的に改良していく。

定性的のみならず定量的に赤外領域での QCD のグリーン関数、特にグルーオン伝播関数の振る舞いを調べることによって、クォーク閉じ込めとグルーオン閉じ込めがカラー閉じ込めにもたらす意味を明らかにする。

さらには、これらのアプローチを有限温度(密度)へと拡張し、非閉じ込めをもたらすメカニズムを解明する。

### 3. 研究の方法

カラー閉じ込めの機構が QCD グリーン関数の赤外領域での振舞いとどのように関係しているのかを解析的および数値的両側面からゲージに依らずに解明する。

具体的な計画方法は、

(1) 我々が開拓した QCD と等価な再定式化とウィルソンループ・ポリヤコフループに対する非可換ストークスの定理を併用して、クォーク閉じ込めとグルーオン閉じ込めを同時に示すような低エネルギー有効模型を元々のゲージ対称性を保持して導出する。

(2) グルーオンのグリーン関数の赤外での振舞いを決定し、クォークとグルーオンの閉じ込めが、従来のカラー閉じ込めとどう関係しているかを、特定のゲージ固定に依らずに明らかにする。

(3) これらの結果を、有限温度・密度での閉じ込め/非閉じ込め相転移に適用して、有限温度で非閉じ込めをもたらすメカニズムを理解することを目指す。

### 4. 研究成果

(1) グルーオン伝播関数の赤外領域での振る舞いからカラー閉じ込めを理解するためには、最近発見されたデカップリング解に対する理解を深める必要がある。

有質量スピン 1 の粒子を記述する非可換有質量ベクトル場を非摂動的に構成した。有質量スピン 1 の粒子として正しい独立自由度を持つ非可換有質量ベクトル場は、元の場から非線形だが局所的な変数変換を用いて、変形した BRST 変換の下で不変な形で得られることを示した。この結果を用いて、ベクトル場の質量項と質量次元 2 の真空凝縮で、ローレンツ不変かつカラーシングレットかつ変形した BRST 変換の下で不変であるものを見出すことに成功した。〔雑誌論文〕(7)

さらに、Higgs 場を含まずカラーゲージ対称性が自発的にも破れていない有質量ヤンミルズにおいて、物理的ユニタリー性が成立

するかを検討した。その結果、摂動的扱いを行う限り物理的ユニタリー性は成立しないこと従来とは異なる方法で示した。〔雑誌論文〕(6)

(2) 双対超伝導描像に基づいてクォーク閉じ込めを理解するために、SU(2)ヤンミルズ理論では可換マグネティックモノポールを起源とする双対超伝導描像が信じられているが、SU(3)ヤンミルズ理論においては、非可換マグネティックモノポールが起源となって閉じ込めを引き起こす機構として非可換双対超伝導描像を提唱した。その数値的証拠として、線形ポテンシャルの弦定数を、制限場だけで再現すること、さらにその中で非可換マグネティックモノポールからの寄与が支配的であることを示した。さらに、クォーク・反クォーク対をつなぐカラー電場のフラックスの分布を測定することで双対マイスナー効果の存在を確立した。カラー電場フラックスの周りにはモノポールカレントが誘導されることを示した。SU(3)ヤンミルズ理論の真空は I 型双対超伝導であることを示した。これらの振舞いは制限場のみを用いて再現されることも示した。これは、トイモデルである SU(2)ヤンミルズ理論では、閉じ込めにおいて支配的なのは可換モノポールであるという従来の可換射影による結果とは異なり、双対超伝導は I 型と II 型の境界とも異なる重要な結果である。〔雑誌論文〕(5)

(3) クォーク閉じ込めを示す真空の代表例として知られる、空間的に一様なカラー磁場の凝縮を持つ Savvidy 真空がタキオンモードの存在のために不安定であると Nielsen と Olesen によって指摘されて久しい。これは 1-ループの結論であるが、我々は、汎関数繰り込み群を用いれば、Savvidy 真空の Nielsen-Olesen 不安定性は消滅することを示した。これは、複素数に値を持つ有効平均作用に対する Wetterich 型汎関数繰り込み群方程式に対しては、虚数部分を持たない安定解が、新規な固定点を表現する解として、任意の赤外切断パラメータの値に対して実現するという発見から従う。これは、十分小さい赤外切断に対しても、安定性を維持するために固定点に留まることを可能にする物理的機構が存在を示唆するが、その例として、質量次元 2 で BRST 不変な真空凝縮に起因するグルーオンの動力学的質量生成(グルーポールと同一視可能)を議論した。〔雑誌論文〕(4)

(4) SU(2)ヤンミルズ理論において、基本表現のウィルソンループから計算されたクォークの静的ポテンシャルから取り出された弦定数に対して、アーベリアン部分(制限場)および磁気単極子の寄与が支配的であることをゲージ非依存な形で示した。クォーク

と反クォークをつなぐ方向にのみ、色場のフラックスが形成され、そこでは、色磁場の成分は無く、色電場の成分のみが現れること、および、そのフラックスの周りに磁気モノポールからなる円状のカレントが誘導されることを観察し、双対マイスナー効果を確立した。また、双対マイスナー効果においても制限場が支配的寄与を与えることを確認した。双対超電導の型も、これらの結果を双対ギンツブルク＝ランダウ模型とフィットして決定した。従来の主張とは異なり、我々の結果は、双対超電導がI型であることを示している。それはSU(3)と同様の結果である。この事実は、QCD真空が従来考えられていたようなII型の超電導体の電磁双対であるとは言えないことを示しており、今後、真空の安定性の問題と関連したより深い理解が必要である。このようにしてクォーク閉じ込めの双対超電導描像がゲージ非依存な形で支持されることを示した。〔雑誌論文〕(3)

(5) 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。〔雑誌論文〕(2)

(6) 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。〔雑誌論文〕(1)

(7) 我々は、これらの方法論を有限温度の場合に適用し、ポリャコフループの期待値とポリャコフループ対相関関数を測定し、カラー場のフラックスを測定し、有限温度の閉じ込め・非閉じ込め相転移を理解できることを検証した。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や喪失、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。

新しい再定式化では、SU(3)では可能な二つの再定式化(maximal, minimal)が存在するが、両者で Wilson ループ演算子にいかなる相違が生じ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、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計8件)

(1) 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, Phys. Rept.579, pp.1--226 (2015).

査読有 DOI: 10.1016/j.physrep.2015.03.002

(2) 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,

Phys. Rev. D92, 125038 (2015) [10 pages].

査読有

DOI:

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.92.125038>

(3) S. Kato, K.-I. Kondo, and A. Shibata, Gauge-independent "Abelian" and magnetic-monopole dominance, and the dual Meissner effect in lattice SU(2) Yang-Mills theory,

Phys. Rev. D91, 034506 (2015) [14 pages].

査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.91.034506

(4) K.-I. Kondo, Stability of chromomagnetic condensation and mass generation for confinement in SU(2) Yang-Mills theory,

Phys. Rev. D89, 105013 (2014) [20 pages].

査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.89.105013

(5) A. Shibata, K.-I. Kondo, S. Kato and T. Shinohara, Non-Abelian dual superconductivity in SU(3) Yang-Mills theory: dual Meissner effect and type of the vacuum,

Phys. Rev. D87, 054011 (2013) [9 pages].

査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.87.054011

(6) K.-I. Kondo, Kenta Suzuki, Hitoshi Fukamachi, Shogo Nishino, Toru Shinohara, Physical unitarity for a massive Yang-Mills theory without the Higgs field:

(1) A perturbative treatment,

Phys. Rev. D87, 025017 (2013) (17 pages).

査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.87.025017

(7) K.-I. Kondo, A nonperturbative construction of massive Yang-Mills fields without Higgs fields,

Phys. Rev. D87, 025008 (2013) (11 pages).

査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.87.025008

(8) N. Fukui, K.-I. Kondo, A. Shibata, and T. Shinohara, Magnetic monopole loops generated from two-instanton solutions: Jackiw-Nohl-Rebbi versus 't Hooft instanton, Phys. Rev. D86, 065020 (2012) (4 pages). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.86.065020

〔学会発表〕(計 28 件)

(1) 柴田 章博, 閉じ込め・非閉じ込めの有限温度相転移と磁気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気的モノポール -, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学(宮城県・仙台市), 2016.03.19--03.22

(2) 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, 京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市), 2015.08.31--09.02

(3) K.-I. Kondo, Magnetic monopole and quark confinement, Workshop: Gauge Field Topology: From Lattice Simulations and Solvable Models to Experiment, (招待講演)(国際学会), State University of New York at Stony Brook, USA, 2015.08.17--08.21

(4) K.-I. Kondo, Confinement/deconfinement transition temperature from the Polyakov loop potential and gauge-invariant gluon mass, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015) (国際学会), 神戸国際会議場(兵庫県・神戸市), 2015.07.14--07.18

(5) A. 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), 神戸国際会議場(兵庫県・神戸市), 2015.07.14--07.18

(6) K.-I. Kondo, A systematic derivation of the Bethe-Salpeter equation for the gluon-gluon amplitude in gluodynamics and the numerical solutions, Bound state in QCD and beyond, Schlosshotel Rheinfels, St. Goar, Germany, 2015.03.24--03.27, <http://www.tpi.uni-jena.de/qcdbs/index>.

(7) 柴田 章博, クォーク閉じ込め・非閉じ込めの有限温度相転移と双対マイスナー効果, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学(東京都・新宿区), 2015.03.21--03.24

(8) 加藤 清考, Gauge-independent "Abelian" and magnetic-monopole dominance, and the dual Meissner effect in lattice SU(2) Yang-Mills theory, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学(東京都・新宿区), 2015.03.21--03.24

(9) K.-I. Kondo, Magnetic monopole versus vortex as gauge-invariant topological objects for quark confinement, (招待講演)(国際学会) Sakata Memorial KMI Workshop on "Origin of Mass and Strong Coupling Gauge Theories" (SCGT15), 2015, Nagoya, Japan (愛知県・名古屋市), 2015.03.03--03.06

(10) A. Shibata, Confinement/deconfinement phase transition in SU(3) Yang-Mills theory in view of dual superconductivity, (招待講演)(国際学会) Sakata Memorial KMI Workshop on "Origin of Mass and Strong Coupling Gauge Theories" (SCGT15), 2015, Nagoya, Japan (愛知県・名古屋市), 2015.03.03--03.06

(11) K.-I. Kondo, Reformulations of the Yang-Mills theory toward quark confinement and mass gap, XIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum (QCHSXI), St Petersburg, Russia, 2014.09.08--09.12

(12) A. Shibata, Discriminating between two reformulations of SU(3) Yang-Mills theory on a lattice, XIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum (QCHSXI), St Petersburg, Russia, 2014.09.08--09.12

(13) 柴田 章博, クォーク閉じ込め・非閉じ込め有限温度相転移と磁気的モノポールの役割, 「熱場の量子論とその応用」, 理研, (埼玉県・和光市), 2014.09.03--09.05

(14) A. Shibata, Magnetic monopole and confinement/deconfinement phase transition in SU(3) Yang-Mills theory, The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014), Columbia University, New York, USA, 2014.06.23--06.28

(15) 柴田 章博, SU(3) Yang-Mills 理論におけるノンアーベリアン双対マイスナー効果の有限温度相転移, 日本物理学会, 東海大学(神奈川県・平塚市), 2014.03.27--03.30

(16) 近藤 慶一, QCD とモノポール --- 閉

じ込めの観点から ---」(招待講演), 研究集会「トポロジカル・ソリトンの数理と物理, 名古屋大学多元数理研究科(愛知県・名古屋市), 2014.01.05--01.06

(17) 柴田 章博, クォーク閉じ込め・非閉じ込め相転移と双対超伝導描像, 日本物理学会, 高知大学(高知県・高知市), 2013.09.20--09.23

(18) K.-I. Kondo, Stability of magnetic condensation and mass generation for confinement in SU(2) Yang-Mills theory, (招待講演)(国際学会) QCD-TNT-III--From quarks and gluons to hadronic matter: A bridge too far? (QCD-TNT-III), European Center for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas (ECT\*), Villazzano, Trento, Italy, 2013.09.02--09.06

(19) A. Shibata, Non-Abelian dual Meissner effect in SU(3) Yang-Mills theory and confinement/deconfinement phase transition at a finite temperature (招待講演)(国際学会) QCD-TNT-III--From quarks and gluons to hadronic matter: A bridge too far? (QCD-TNT-III), ECT\*, Villazzano, Trento, Italy, 2013.09.02--09.06

(20) 柴田 章博, クォーク閉じ込め・非閉じ込め相転移とノンアーベリアン双対超伝導描像, 基研研究会「熱場の量子論とその応用」, 京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市), 2013.08.26--08.28

(21) A. Shibata, Non-Abelian dual Meissner effect and confinement/deconfinement phase transition in SU(3) Yang-Mills theory, The 31st International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013), Johannes Gutenberg University, Mainz, Germany, 2013.07.29--08.03

(22) 柴田 章博, 格子 Yang-Mills 理論の新しい定式化と非可換双対超伝導描像, (招待講演) 日本物理学会, 広島大学(広島県・東広島市), 2013.03.26--03.28

(23) K.-I. Kondo, Non-Abelian dual superconductivity in SU(3) Yang-Mills theory due to non-Abelian magnetic monopoles, (招待講演)(国際学会) KMI/GCOE Workshop ``Strong Coupling Gauge Theories in the LHC Perspective (SCGT 12), Nagoya University(愛知県・名古屋市), 2012.12.04--12.07

(24) A. Shibata, Non-Abelian dual superconductivity in SU(3) Yang-Mills

theory due to non-Abelian magnetic monopoles, (招待講演)(国際学会) KMI/GCOE Workshop ``Strong Coupling Gauge Theories in the LHC Perspective (SCGT 12), Nagoya University(愛知県・名古屋市), 2012.12.04--12.07

(25) K.-I. Kondo, Physical unitarity of a massive Yang-Mills theory without the Higgs field from a viewpoint of confinement, Quark Confinement and the Hadron Spectrum X, TUM Campus Garching, Munich, Germany, 2012.10.08--10.12

(26) A. Shibata, non-Abelian dual superconductivity and Gluon propagators in the deep IR region and for SU(3) Yang-Mills Quark Confinement and the Hadron Spectrum X, TUM Campus Garching, Munich, Germany, 2012.10.08--10.12

(27) K.-I. Kondo, Quark confinement due to non-Abelian magnetic monopoles in SU(3) Yang-Mills theory, (招待講演)(国際学会) International Workshop on QCD Theory and Experiment, QCD@Work, Lecce, Italy, 2012.06.18--06.21

(28) A. Shibata, Gluon propagators in the deep IR region and non-Abelian dual superconductivity for SU(3) Yang-Mills theory, Lattice 2012, Cairns, Australia, 2012.06.04--06.29

〔図書〕(計1件)

(1) 近藤慶一著, 「ゲージ場の量子論入門【電子版】」~ 質量ギャップとクォーク閉じ込めの解決に向けて ~ 発行:サイエンス社 発行日: 2013-04-10 電子書籍 229頁 ISBN 978-4-7819-9902-9

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

近藤 慶一 (KONDO KEI-ICHI)  
千葉大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 6 0 1 8 3 0 4 2

### (2) 研究分担者

柴田 章博 (SHIBATA AKIHIRO)  
高エネルギー加速器研究機構・計算科学センター・研究機関講師  
研究者番号: 3 0 2 9 0 8 5 2

### (3) 連携研究者

加藤 清考 (KATO SEIKOU)  
小山高専・准教授  
研究者番号: 5 0 3 4 2 5 6 4