

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03840

研究課題名(和文) ゲージ不変なヒッグス機構と物質場の存在する非可換ゲージ理論におけるカラー閉じ込め

研究課題名(英文) Gauge-invariant Higgs mechanism and color confinement for non-Abelian gauge theories in the presence of matter fields

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：代表者が提唱したBrout-Englert-Higgs機構のゲージに依存しない記述を通じて得られるゲージ不変なグルーオン場の質量項を付加したSU(2) Yang-Mills理論において、't Hooft-Polyakovの磁気単極子に対応する磁気単極子の解を発見した。また、Julia-Zee ダイオン解に対応する磁荷と電荷を併せ持つ新しいダイオン解を発見し、有限温度での非閉じ込め相転移との関連を示唆した。

また、数値シミュレーションによって、クォークと反クォークを結ぶゲージ不変なカラー電場の分布を求めることで、クォーク閉じ込めの双対超伝導がタイプIであることを示した。

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ばれ、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)：In the SU(2) Yang-Mills theory with the added gauge-invariant mass term of the gluon field obtained through a gauge-independent description of the Brout-Englert-Higgs mechanism proposed by us, we have found a solution for a magnetic monopole that corresponds to the 't Hooft-Polyakov magnetic monopole. We also discovered a new type of Dyon solution that has both magnetic and electric charges corresponding to the Julia-Zee Dyon solution, and suggested the relationship with the deconfined phase transition at finite temperature.

We also showed that the dual superconductor for quark confinement is type I by finding the distribution of the gauge-invariant color electric field connecting quarks and antiquarks measured by numerical simulation.

研究分野：素粒子論

キーワード：クォークの閉じ込め グルーオンの閉じ込め カラー閉じ込め 双対超伝導 場の量子論の非摂動的な方法 磁気単極子 複素特異点

1. 研究開始当初の背景

強い相互作用に従うクォークやグルーオンは現在まで単独で観測されたことはなく、ハドロンに閉じ込められていると考えられる。しかし、この事実の QCD に基づく第 1 原理的証明は未だに存在しない。しかし問題はそもそも閉じ込めの定義が必ずしも明確に与えられていないことである。クォークの閉じ込めに対しては、Wilson ループ期待値の面積則（絶対零度）や Polyakov ライン期待値の消失（有限温度）というゲージ不変な判定基準がよく知られている。しかし、これらは無限に重い静的クォークの閉じ込め（つまり、物質場が存在しない純粋な Yang-Mills 理論）に関してであり、軽いクォークや元々の質量がゼロのグルーオンの閉じ込め、より一般のカラーの閉じ込め等、物質場が存在する場合のゲージ不変な閉じ込め判定基準が知られていない。

Landau ゲージ固定した Yang-Mills 理論では、巨大格子を用いた数値シミュレーションを初め、Schwinger-Dyson 方程式、汎関数繰り込み群に基づいた数値的研究により、時空次元が 3 及び 4 で、デカップリング解が閉じ込めを記述するユークリッド領域での正しい解と認識されている。この解はエネルギー・運動量がゼロの極限で、グルーオン伝播関数は有質量ベクトル場の様に有限なゼロでない値に収束する。一方、ゴースト伝播関数は自由場の様に運動量の二乗の逆ベキで発散し、ゴースト dressing 関数は有限なゼロでない値をとる。Gribov-Zwanziger 理論の予言によるスケールリング解とは異なる。

この事実は Yang-Mills 理論の質量ギャップの存在と閉じ込めの密接な関連を示唆する。これらを理解するためには、デカップリング解をゲージ固定した Yang-Mills 理論から理論的に導出し、その物理的起源を明らかにすることと同時に、ユークリッド領域でのデカップリング解から出発して、それから導かれる物理的帰結を調べることである。その結果から、物質場が存在する場合のゲージ固定に依らないゲージ不変な閉じ込め判定基準を明確にすること、グルーオンの質量のゲージ不変な定義とグルーオンのゲージ不変な質量生成機構を与えることが重要である。

我々は、Yang-Mills ゲージ場のゲージ共変な分解の方を用いてこれまでの研究活動で様々な成果をあげてきたが、この方法を導入する上で最も理解が難しい箇所は、単位長さをもつベクトル場で、ゲージ変換の下でゲージ群の随伴表現に従って変換する新しい場、カラー方向場 $n(x)$ の導入である。このカラー方向場が、スカラー場を含まない純粋 Yang-Mills 理論において、スカラー場の役割を果たすことで、ゲージ不変な磁気モノポールを定義できるようになる。この場を仲介することで、Yang-Mills 場 $A(x)$ は 2 つに分解される、 $A(x) = V(x) + X(x)$ 。この $V(x)$ に、カラー方向場で定義される磁気モノポール相当部分が含まれ、遠距離で支配的になることで、クォーク閉じ込めが双対超電導描像で理解される。これらの結果から、場 $X(x)$ は長距離では早く減衰する高エネルギーモード、場 $V(x)$ が長距離で支配的になる低エネルギーモードと同定された。この事実は格子上の数値シミュレーションで確立されたが、理論的には、様々な取り組みはあったものの完璧には理解されてはいなかった。特に、カラー方向場の物理的意味付けが問題であった。

2016 年以降に申請者が発見したゲージ対称性の自発的破れに頼らない BEH 機構の明白にゲージ不変な記述法は、これらの疑問に答えるものである。Yang-Mills 理論におけるカラー方向場 $n(x)$ は、同じゲージ群 G を持つ或るゲージ不変なゲージ・スカラー模型において、ゲージ群 $G = SU(2)$ がその部分群 $H = U(1)$ に自発的に破れる場合の、(単位長さに)規格化されたスカラー場 $\phi(x)$ に対応し、 $X(x)$ は BEH 機構で質量を獲得した有質量成分 $W(x)$ に、 $V(x)$ が残余ゲージ群 H ゲージ成分 $R(x)$ に対応する。ゲージ共変な場の分解の方法は、むしろ、ゲージ不変に BEH 機構を記述する手続きに通じていることが発見された。さらに、場の分解の方法が、従来見出されたもの以外にも、ゲージ群 G が様々な部分群 H に破れるパターンに対応した様々な分解の仕方があることが判明した。逆に、場の分解はゲージ対称性を破らずに行えることから、BEH 機構がゲージ対称性の自発的破れに頼らずに説明できることが理解できる。BEH 機構は、カラー方向場に物理的意味づけを与え、我々の Yang-Mills 理論の閉じ込めの研究を補完し、さらに大きく発展させる準備になっている。

2. 研究の目的

Brout-Englert-Higgs 機構を、ゲージ対称性の自発的破れに依らず、明白にゲージ不変に記述する方法が申請者によって最近発見された。この記述法は、格子ゲージ理論で証明された Fradkin-Shenker 連続性、つまり、純粋 Yang-Mills 理論の閉じ込め相とゲージ・スカラー模型の Higgs 相の等価性（相補性）を連続理論で実現する。この理論的枠組みにおいて、Yang-Mills 理論の閉じ込め相を記述する解として現在広く受け入れられているユークリッド領域でのデカップリング解を再現するような（ゲージ不変なグルーオン質量項を持つ）有質量 Yang-Mills 理論を構築する。この理論から導かれるグルーオンとゴーストのユークリッド伝播関数を複素運動量へ解析接続して、特異点（極、分岐切断）の構造を特定し、スペクトル関数等のミンコフスキー領域での物理量を求める。これらから静的な重いクォークに対する Wilson の閉じ込め判定基準を超えて、グルーオン、軽いクォーク、さらに、一般の物質場が存在する場合の閉じ込めとは何かを特定のゲージ固定に依らないで明らかにする。

3. 研究の方法

ゼロ質量のゲージボソンが質量を獲得する最もよく知られた機構として Brout-Englert-Higgs (BEH) 機構がある。通常、BEH 機構は連続的な「ゲージ対称性 G の自発的破れ」に伴って生じるゼロ質量の南部・Goldstone 粒子が、元々はゼロ質量であったゲージボソンに吸収され、南部・Goldstone 粒子は現れなくなると同時に、ゲージボソンは有質量になると説明される。ゲージ対称性の自発的破れは、Higgs スカラー場 ϕ が非自明な真空期待値 $\langle 0|\phi|0\rangle = 0$ を持つときに起こると主張される。しかし、「ゲージ対称性の自発的破れ」は、かなり誤解を招く用語である。ゲージ対称性を常に保った格子ゲージ理論の定式化では、「局所的な連続対称性は決して自発的に破れない」という [Elitzur の定理] が証明できる。実際、ゲージ不変でない Higgs 場の真空期待値 $\langle 0|\phi|0\rangle$ はゲージ固定をしない限りゼロである。明らかに、この意味でゲージ対称性の自発的破れが起こるか否かはゲージに依存した概念であり、ゲージボソンのゲージ不変な質量生成機構を与えない。因みに、ゲージ固定後に残る大域的な連続対称性の自発的な破れに基づいた議論は可能であるが、様々な病的な帰結をもたらすことが知られている。このような従来の記述法は、不適切ではないとしても、ゲージ固定毎の相当に慎重な取り扱いを要する。

これらの困難を避けるには、ゲージ対称性の自発的破れに頼らない BEH 機構の明白にゲージ不変な記述法を与えることである。申請者は、2016 年に Higgs 場がゲージ群 G の随伴表現に従う場合に、2018 年に Higgs 場がゲージ群 G の基本表現に従う場合に、このような記述法を与えることに成功した。前者は、ゲージ群 G が部分群 H に破れる場合に対応し、具体的には、 $G = \text{SU}(2)$ $H = \text{U}(1)$ で示された。後者は、ゲージ群 G が全て破れる場合に対応し、 $G = \text{U}(1)$ の場合も含まれる。

この記述法は、物質場が存在する場合のゲージ不変な閉じ込め判定基準、閉じ込め機構を新たな視点から議論することを可能にする。その理由は以下の通りである。1970 年代末に、ゲージ・スカラー理論において、閉じ込め相と Higgs 相は解析的に接続された一つの相の部分的領域であり、その間には熱力学的相転移は存在しないことが格子ゲージ理論の枠内で証明された。この閉じ込め相とヒッグス相の等価性は Fradkin-Shenker 連続性あるいは閉じ込め-ヒッグス相補性と呼ばれる。通常、閉じ込めはゲージ不変な物理現象でありゲージ対称性が破れていない相で実現していると考えられ、ゲージ対称性が自発的に破れて BEH 機構が起こる Higgs 相とは繋がりがなかった。

申請者が連続理論で定式化したゲージ対称性の自発的破れを必要としない BEH 機構の明白にゲージ不変な記述法は、連続理論の枠内での Fradkin-Shenker 連続性を実現すると考えられ、BEH 機構の起こっているゲージ・スカラー理論の Higgs 相と純粋な Yang-Mills 理論の閉じ込め相を一つの理論的枠内で同時に議論することを可能にする。これによって、物質場が存在する場合のゲージ不変な閉じ込め判定基準を考察する土台ができた。

これとは全く独立に、有質量 Yang-Mills 理論が閉じ込め相でのデカップリング解を極めて良く再現することが数年前から示されている。有質量 Yang-Mills 理論とは、通常の Yang-Mills 理論に、Lorentz 共変な Landau ゲージ固定項と付随する Faddeev-Popov ゴースト項を補い、さらに、ゲージ場のナイーブな質量項を加えたモデルであり、Yang-Mills のゲージ結合定数 g と質量 M の二つのパラメータを持つ。例えば、1-ループ計算によって得られたグルーオンとゴーストのユークリッド伝播関数が、格子シミュレーションで求められたデータに一致するように二つのパラメータを決めると、Polyakov ループ期待値の計算から有限温度での閉じ込め・非閉じ込め相転移の温度と次数が、 $G = \text{SU}(2); \text{SU}(3)$ で正しく再現され、2-ループ計算ではさらに良い定量的一致が示されている。我々の独自性は、有質量 Yang-Mills モデルはゲージ不変性を一見欠いているが、実はゲージ不変な拡張を持ち、或るゲージ不変なゲージ・スカラーモデルに等しくなる、言い換えると、或るゲージ不変なゲージ・スカラーモデルを Landau ゲージ固定して BRST 量子化することで、ゲージ不変な質量項を持つ有質量 Yang-Mills 理論がゲージ不変な BEH 機構を通じて導出され、デカップリング解を再現しうることを既に示したことにある。

4. 研究成果

(1) [Nishino, Kondo, Shibata, Sasago, and Kato, 2019] クォーク閉じ込めの双対超伝導のタイプを調べた。この目的のために、 $U(1)$ ゲージ-スカラー模型の場の方程式を、従来のように長距離領域に制限することなく全空間領域で解いて単一の静的渦糸解を得た。次に、その渦糸の磁場分布を格子上の $SU(2)$ Yang-Mills 理論の数値シミュレーションによって測定された、クォークと反クォークを結ぶゲージ不変なカラー電場にフィットさせた。その結果、Ginzburg-Landau パラメータの適合値の精度が向上し、閉じ込めの双対超伝導がタイプ I であるという先行研究によって得られた主張を再確認した。

さらに、マクスウェル応力テンソルを計算して、フラックス チューブの周りの力の分布を得た。この結果は、タイプ I の双対超伝導と一致して、カラーフラックス チューブ間に引力が作用することを示唆する。

(2) [Nishino and Kondo, 2020] 前の論文では、純粋な $SU(2)$ Yang-Mills 理論にグルーオン場のゲージ不変な質量項を付加した理論における磁気単極子の解の存在を示した。この論文では、以前の磁気単極子の構造を拡張して、磁荷および電荷の両方を併せ持つ新規なダイオン解を得た。これは静的および球対称のアンザッツの下で、「相補的」 $SU(2)$ ゲージ-スカラー模型、つまり、動径自由度が除去された随伴スカラー場を $SU(2)$ Yang-Mills 理論に結合させた模型で場の方程式を解くことにより得られた。

この新規ダイオン解は質量項を持つ Yang-Mills 理論における、最小の磁荷を備えたダイオンのゲージ場配位と同一視できる。また、このようにして得られた質量項を持つ Yang-Mills 理論のダイオン解を Georgi-Glashow のゲージ-Higgs スカラー模型の Julia-Zee ダイオン解と純粋 Yang-Mills 理論における Wu-Yang 磁気単極子解と比較した。最後に、こうして見いだされた新規ダイオン解を非自明ホロノミーを持つ $S^1 \times R^3$ 空間上のダイオン配位と比較し、Yang-Mills 理論における有限温度での非閉じ込め相転移を理解するのに、有限温度での Kraan-van Baal-Lee-Lu カロロンを構成するダイオンの代わりに、それをを用いることを提案した。

(3) [Matsudo, Shibata, Kato and Kondo, 2019] クォーク閉じ込めの有力な機構である双対超伝導描像において、真空が第 1 種の双対超伝導体であることを、格子上の $SU(2)$ Yang-Mills 理論のシミュレーションで測定されたゲージ不変なカラー電場に、長距離のみでなく全空間領域で場の方程式を数値的に解いて得られた渦糸解をフィットさせることで示した。クォークがゲージ群の基本表現に属す場合には、閉じ込めに支配的な成分を抽出する方法が確立されていたが、高次元表現に属す場合は信頼に値する議論がなかった。高次元表現の場合にもゲージ群の数学的構造だけに基づいて補正する方法を提案し、数値シミュレーションによってそのエビデンスを与えた。

(4) [Kondo, Watanabe, Hayashi, Matsudo and Suda, 2020] Landau ゲージにおける Yang-Mills 理論の閉じ込めを示すデカップリング解を理解するために、Yang-Mills 理論のローレンツ共変ゲージ固定項とそれに伴う Faddeev-Popov ゴースト項、さらに、グルーオン質量項を追加するだけで定義される有質量 Yang-Mills 模型を考える。まず、有質量 Yang-Mills 模型は、固定モジュラスを持つゲージ群の基本表現に属するスカラー場を持つゲージスカラー模型と同一視されるゲージ不変に拡張された理論のゲージ固定版として得られる。この同等性は、代表者によって最近提案された Brout-Englert-Higgs 機構のゲージに依存しない記述を通じて得られる。それから、数値シミュレーションによって格子上で得られた Euclid 領域での Landau ゲージでのグルーオンとゴーストの伝播関数を、1 ループ量子補正を考慮することで有質量 Yang-Mills 模型で再現する。さらに、ユークリッド領域でのグルーオン伝播関数から計算されるシュウィンガー関数はパラメータを物理点に選んだときに鏡映正值性の破れを示すことを数値的に示した。

さらに、Euclid 領域から Minkowski 領域に向かって、複素運動量平面上で、グルーオン伝播関数の解析接続を実行した。鏡映正值性が、有質量ヤン・ミルズ模型においてどのようなパラメーターを選ぼうと複素共役な極のペアが存在することと、グルーオンのスペクトル関数が負になることから破れることを 1 ループオーダーで解析的証明を与えた。伝播関数の複素構造は、グルーオン伝播関数がなぜ Euclid 領域では、Gribov-Stingl 形によって良く記述できるのかを説明することを可能にする。

これらの結果を、相補的なゲージスカラーモデルにおける単一の閉じ込め相での閉じ込め様領域とヒッグス様領域の間の Fradkin-Shenker 連続性の観点から理解することを試みた。

(5) [Hayashi and Kondo, 2019] 伝播関数を複素運動量平面上で Euclid 領域から Minkowski 領域に解析接続することを考え、その漸近的振る舞いを仮定することで、伝播関数の持つ複素極の個数とスペクトル関数の符号の間に成り立つ一般的関係を導いた。この関係を、質量項を持つ Yang-Mills 理論において 1 ループの量子補正を取り入れた模型に適用すると、グルーオン伝播関数の極が複素共役な対で存在することがわかる。この事実とグルーオン伝播関数のスペクトル関数が常に負であることを用いると、グルーオン伝播関数において鏡映正值性が破れていることが解析的に証明できる。これはグルーオンの閉じ込めに対応していると考えられる。また、格子上のシミュレーションから示唆されているように Euclid 領域での伝播関数が Gribov-Stingl 型であることも導かれる。

(6) [Hayashi and Kondo, 2020] 伝搬関数における複素極の存在は閉じ込めのシグナルであるという期待から、グルーオン質量項を持つ有効模型を用いて、Landau ゲージ QCD と QCD 類似理論でのグルーオン、クォーク、およびゴースト伝搬関数の複素解析的構造を調べた。特に、この模型で、ゲージ群が $SU(3)$ のとき漸近自由性を保つクォークフレーバー数の範囲で、ゲージ結合定数、グルーオン質量、クォーク質量といったパラメーターを変えて、複素極の数を調査した。その結果、2 フレーバー QCD において、グルーオンとクォークの伝搬関数には 1 対の複素共役な極があるが、グルーオン伝搬関数の複素極の数は、クォークのフレーバー数と質量に応じて 0 から 4 の間で変化することを示した。一般的な特徴として、ゼロでないクォーク質量を持つときのグルーオンのスペクトル関数は赤外極限で負であることが判明した。一方、クォークとゴーストの伝搬関数は、近似の範囲内ではフレーバー数に影響されないことが判明した。これらの結果は、閉じ込めメカニズムがクォークのフレーバー数と質量に依存する可能性を示唆している。

(7) [Hayashi and Kondo, 2021] Landau ゲージでの Yang-Mills 理論にグルーオン質量項を加えた有効模型を用いて、非ゼロクォーク化学ポテンシャルでのグルーオン伝播関数の複素解析を長波長極限で実行した。この模型は、1 ループレベルの量子補正を取り込んだ Curci-Ferrari モデルの Landau ゲージの極限で得られる。主にグルーオン伝播関数の閉じ込めと関連し得る複素極を調査した。モデルパラメータの典型的な値の周りで、グルーオン伝播関数は、化学ポテンシャルの値に応じて、1 対あるいは 2 対の複素共役極を持つことを示した。化学ポテンシャルが、おおよそ、模型の有効クォーク質量と有効グルーオン質量の間にあるときには、ゼロ化学ポテンシャルの場合の複素極に加えて、新しい複素極の対が実軸の近くに表われることが判明した。これらの極について考えられる解釈について議論した。さらに、松原伝播関数の、無限遠でゼロに向かう、実軸上の有限個数の複素極と特異点を除いて正則である関数のクラスへの解析接続の一意性を証明した。

(8) [Hayashi and Kondo, 2021] Yang-Mills 理論の精密な大規模シミュレーション結果をよく再現する Yang-Mills 理論に質量項を加えた現象論的模型を用いて得られた具体的成果の上に立って、一般に Euclid 空間で定義されたグルーオン伝播関数が複素特異性を持つ場合に、解析接続によって得られた Minkowski 時空上で相対論的場の量子論が、Wightman 関数の緩増加性、計量の正值性、Poincare 対称性、局所性といった諸性質を維持できるか否かを公理的場の量子論の枠組みを用いることで、模型に全く依らずに明らかにした。これまでは漠然と「複素特異性は局所性を壊す」とされてきたが、我々は、「複素特異性は緩増加性と正值性条件を破るが、局所性と Poincare 対称性と整合する」ことを示した。さらに Lorentz 共変ゲージにゲージ固定されたゲージ理論のような、不定計量の量子論では、そのような複素特異性が実現しうることを指摘した。これらの結果は複素特異性が存在する場合の相対論的場の量子論の整合性に関する従来の懸念を払拭し、その正当性に対する明快な解を与えるものである。

(9) [Kato, Shibata and Kondo, 2020] $SU(N)$ 格子 Yang-Mills ゲージ理論における二重巻き Wilson ループを、強結合展開と数値シミュレーションの両方を用いて研究した。最初に、「共面の」二重巻き Wilson ループ期待値の面積則がカラー数 N にどのように依存するかを調べた。その結果、共面二重巻き Wilson ループ期待値は、 $N=2$ では「面積差」則を再現したが、 $N=3$ の場合は新しいタイプの「最大面積則」に従うこと、また、 $N \geq 4$ の場合は「面積和」則に従うことを見いだした。次に、2 つの構成ループが横方向に互いにずれている「シフトされた」二重巻き Wilson ループを調べた。横方向の距離を変えてその期待値を評価すると、長距離の振る舞いはカラー数 N に依存しないが、短距離の振る舞いは N に強く依存することを見いだした。

(10) [Ikeda and Kondo, 2021] 格子ゲージ理論における二重巻き Wilson ループは、クォークの閉じ込め機構を解明する目的で導入されたが、 $SU(N)$ ゲージ理論での二重巻き Wilson ループ期待値はカラー数 N に依存する面積則に従うことが知られていた。我々は、中心ゲージ群 $Z(N)$ を有する格子ゲージ理論における二重巻き Wilson ループが $SU(N)$ ゲージ理論の二重巻き Wilson ループ期待値の従う面積則を再現することを示した。これは、格子 $Z(N)$ ゲージ理論における閉じ込めが格子 $SU(N)$ ゲージ理論での閉じ込めを導くことを意味し、閉じ込め機構に関する 1 つの示唆を与える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Ikeda Ryu, Kondo Kei-Ichi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Center group dominance in quark confinement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab114	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Yui, Kondo Kei-Ichi	4. 巻 104
2. 論文標題 Reconstructing propagators of confined particles in the presence of complex singularities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.074024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Yui, Kondo Kei-Ichi	4. 巻 103
2. 論文標題 Reconstructing confined particles with complex singularities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.L111504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Yui, Kondo Kei-Ichi	4. 巻 103
2. 論文標題 Effects of a quark chemical potential on the analytic structure of the gluon propagator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.094006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Akihiro Shibata, Seikou Kato, and Kei-Ichi Kondo	4. 巻 85
2. 論文標題 Magnetic monopole dominance for the Wilson loops in higher representations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PoS(LATTICE2021)085	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2112.01045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Yui, Kondo Kei-Ichi	4. 巻 101
2. 論文標題 Complex poles and spectral functions of Landau gauge QCD and QCD-like theories	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.074044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nishino Shogo, Kondo Kei-Ichi	4. 巻 80
2. 論文標題 Dyon in the SU(2) Yang-Mills theory with a gauge-invariant gluon mass toward quark confinement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-020-8003-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kato Seikou, Shibata Akihiro, Kondo Kei-Ichi	4. 巻 102
2. 論文標題 Double-winding Wilson loops in SU(N) lattice Yang-Mills gauge theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.094521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Yui, Kondo Kei-Ichi	4. 巻 103
2. 論文標題 Effects of a quark chemical potential on the analytic structure of the gluon propagator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.094006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K.-I. Kondo, M. Watanabe, Y. Hayashi, R. Matsudo, and Y. Suda	4. 巻 80
2. 論文標題 Reflection positivity and complex analysis of the Yang-Mills theory from a viewpoint of gluon confinement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Eur. Phys. J. C	6. 最初と最後の頁 84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-020-7632-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y. Hayashi and K.-I. Kondo	4. 巻 99
2. 論文標題 Complex poles and spectral function of Yang-Mills theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 74001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.074001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Nishino, K.-I. Kondo, A. Shibata, T. Sasago, and S Kato	4. 巻 79
2. 論文標題 Type of dual superconductivity for the SU(2) Yang-Mills theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Eur. Phys. J. C	6. 最初と最後の頁 744
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-019-7280-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R. Matsudo, A. Shibata, S. Kato and K.-I. Kondo	4. 巻 100
2. 論文標題 How to extract the dominant part of the Wilson loop average in higher representations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 14505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.014505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計26件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Kei-Ichi Kondo
2. 発表標題 Confinement, mass gap and gauge symmetry in the Yang-Mills theory -- restoration of the residual local gauge symmetry --
3. 学会等名 XXXIII International Workshop on High Energy Physics ``Hard Problems of Hadron Physics: Non-Perturbative QCD & Related Quests'' (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akihiro Shibata
2. 発表標題 Magnetic monopole dominance for the Wilson loops in higher representations
3. 学会等名 The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akihiro Shibata
2. 発表標題 Lattice Study of confinement mechanism based on the dual superconductivity
3. 学会等名 13th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (CCS International Symposium 2021) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西野尚吾, 近藤慶一
2. 発表標題 ダイオン: 新奇な非自己双対解と従来の自己双対解 --閉じ込め・非閉じ込め相転移の理解へ向けて--
3. 学会等名 KEK理論センター研究会 「熱場の量子論とその応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西野尚吾, 近藤慶一
2. 発表標題 ダイオン: 新奇な非自己双対解と従来の自己双対解 --閉じ込め・非閉じ込め相転移の理解へ向けて--
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yui Hayashi, Kei-Ichi Kondo
2. 発表標題 Complex poles of QCD propagators and their interpretation
3. 学会等名 KEK Theory workshop 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yui Hayashi, Kei-Ichi Kondo
2. 発表標題 Complex poles of QCD propagators and their interpretation
3. 学会等名 The 15th Kavli Asian Winter School on Strings, Particles and Cosmology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林優依, 近藤慶一
2. 発表標題 Landauゲージのグルーオン伝播関数の解析的構造へのクォーク化学ポテンシャルの影響
3. 学会等名 KEK理論センター研究会 「熱場の量子論とその応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林優依, 近藤慶一
2. 発表標題 QCD伝播関数の複素極とその解釈
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林優依, 近藤慶一
2. 発表標題 グルーオン伝播関数の解析的構造へのクォーク化学ポテンシャルの影響
3. 学会等名 日本物理学会2021年年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Seikou Kato, Akihiro Shibata, Kei-Ichi Kondo
2. 発表標題 Double-winding Wilson loops towards flux tube interaction in SU(N) lattice gauge theory
3. 学会等名 Asia Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akihiro SHIBATA , Kei-Ichi Kondo, Ryutaro Matsudo, Shogo Nishino
2. 発表標題 The lattice Yang-Mills theory with a gauge-invariant gluon mass in view of the gauge-invariant BEH mechanism towards confinement
3. 学会等名 Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田 章博
2. 発表標題 双対超伝導描像に基づく高次元クォークの閉じ込め・非閉じ込め相転移
3. 学会等名 KEK理論センター研究会 「熱場の量子論とその応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松戸竜太郎, 柴田章博, 西野尚吾, 近藤慶一
2. 発表標題 場の分解の方法を用いて構成されるゲージ不変な質量項をヤン=ミルズ理論に加えた模型について
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田章博, 近藤慶一, 西野尚吾, 松戸竜太郎
2. 発表標題 ゲージ不変なBEH機構に基づくゲージ不変な質量項を有するSU(2)Yang-Mills理論におけるクォークの閉じ込め
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akihiro Shibata
2. 発表標題 Study of confinement mechanism based on the dual superconductivity
3. 学会等名 12th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (CCS International Symposium 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kei-Ichi Kondo
2. 発表標題 Complex poles, spectral function and reflection positivity violation of Yang-Mills theory
3. 学会等名 QCD on the light cone: from hadrons to heavy ions (Light Cone 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akihiro Shibata
2. 発表標題 Quark confinement in the Yang-Mills theory with a gauge-invariant gluon mass in view of the gauge-invariant BEH mechanism
3. 学会等名 37th international conference on lattice field theory (Lattice 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田章博
2. 発表標題 高次元表現クォークの閉じ込めと磁気モノポールの役割
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akihiro Shibata
2. 発表標題 Confinement/deconfinement phase transition for quarks in the higher representation in view of dual superconductivity
3. 学会等名 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shogo Nishino
2. 発表標題 Dyon in pure SU(2) Yang-Mills theory with a gauge-invariant mass toward confinement-deconfinement phase transition
3. 学会等名 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yui Hayashi
2. 発表標題 Complex poles and spectral function of the Landau gauge gluon propagator: effects of quark flavors
3. 学会等名 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田章博
2. 発表標題 ゲージ不変な質量項を持つ SU(2) Yang-Mills 理論とクォークの閉じ込め
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松戸竜太郎
2. 発表標題 場の分解の方法とヤン=ミルズ場のゲージ不変な質量項
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西野尚吾
2. 発表標題 ゲージ不変な質量項を持つSU(2) Yang-Mills理論におけるダイオン解と閉じ込め・非閉じ込め相転移
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林優依
2. 発表標題 カラー閉じ込めの観点からのQCD伝播関数の複素極とスペクトル関数
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	柴田 章博 (Shibata Akihiro) (30290852)	大学共同利用機関法人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 (82118)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------