

令和 5 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2022

課題番号：20K22350

研究課題名（和文）量子アノマリーに基づいたゲージ理論の相構造の解明

研究課題名（英文）Study of the phase structure of gauge theories based on quantum anomalies

研究代表者

谷崎 佑弥（Tanizaki, Yuya）

京都大学・基礎物理学研究所・助教

研究者番号：90782102

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究において強い相互作用の基礎理論である量子色力学を解析的に調べる新しい舞台を整え、その領域におけるカラーの閉じ込め現象やカイラル対称性の破れを具体的に示すことができる計算手法を確立した。我々の住む4次元時空においてこれらの現象は場の量子論の強結合の解析を必要とするが、適切なカラー磁束が貫くコンパクト化された時空においては半古典的な計算により系統的な近似で示すことができる。このような特殊なコンパクト化は近年発展してきている場の理論の一般化された対称性から着想を得たものである。この研究ではさらに場の理論の一般化された対称性として非可逆的対称性を高次元の場の理論で初めて構成することにも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

場の量子論は量子多体系を調べるための大きなフレームワークを与え、その強結合領域には未だ多くの謎が残されている。量子色力学もそのような場の理論の一つであり、素粒子標準理論において核力をつかさどる強い相互作用の基礎理論となっている。このような理論の振る舞いを調べる新しい手法を作り上げそれらを発展させていくことは、量子色力学の振る舞いを理解するうえで重要であるのみならず、量子多体系一般をより深く理解するために欠かすことはできない過程である。本研究で発展させた半古典的計算法や一般化された対称性は、上記の問題に対する新しいアプローチや視点を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：We built up a new setup for analytical investigation of quantum chromodynamics, the fundamental theory of strong interactions, and established analytical method that can concretely show color confinement phenomena and chiral symmetry breaking in this setup. In the 4-dimensional spacetime in which we live, these phenomena require a strongly coupled analysis of the quantum field theory, but in the compactified spacetime penetrated by an appropriate color magnetic flux, they can be shown in a systematic approximation by semiclassical calculations. This particular compactification is inspired by the generalized symmetries that have been developed in recent years. In this study, we have also succeeded in constructing the first example of noninvertible symmetries in higher-dimensional field theories.

研究分野：場の量子論

キーワード：量子ゲージ理論 アノマリー 一般化された対称性 半古典的計算法

## 1. 研究開始当初の背景

ゲージ理論は素粒子標準模型はもちろんのこと量子スピン系の低エネルギー有効理論としても広く現れる。しかしながら、一般にそのダイナミクスを決定することは容易ではなく、摂動論を超えて場の理論を調べていくことでその振る舞いを理解することは現代物理の重要な課題の一つである。

近年、場の理論における対称性の概念が一般化されたことで、多くの場の理論の現象から一部を綺麗に切り離してその問題に関して厳密な議論を進められるようになってきている。特に新しい対称性に伴う量子アノマリーの発見はこの方向の研究を大きく発展させ、ゲージ理論の真空構造に対する新しい理解の仕方を与えていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、ゲージ理論のダイナミクスに対して新たな計算手法を発展させ、ゲージ理論の持つ相構造を明らかにすることを目指している。特に、量子 Yang-Mills 理論の閉じ込め現象に焦点を当てている。量子 Yang-Mills 理論は素粒子・原子核物理学において重要な理論であり、強い力を記述するための基礎である。しかしながらこの理論のダイナミクスは非常に複雑であり、特に閉じ込め現象と呼ばれる現象はその核心となる物理現象である一方で解析的には未解明のままである。

閉じ込め現象の理解はハドロン物理学の重要な課題であり、本研究では従来のアプローチに加えて新たな計算手法を導入することで閉じ込め現象のメカニズムをより詳細に調査している。またトポロジーなどの数学的手法を活用し、理論の枠組みをより厳密に捉えることも目指している。

## 3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、大きく分けて次の二つのアプローチを取ることにした。

1. 場の量子論の具体的なモデルに対してその真空構造や低エネルギー励起を計算し、対称性やアノマリーがどのように実現されるのかを調べることを重視した。具体的なモデルの理論的な計算から新たな選択則や対称性の発見が行われ、予想外の物理的な振る舞いが明らかになることがある。
2. 場の量子論そのものの性質に焦点を当て、場の理論における対称性やアノマリーの拡張を行った。既存の理論枠組みに新たな概念や規則を導入することでより包括的な理論が構築される可能性があり、新しいクラスの対称性はその観点から特に有力視されているものである。

これらのアプローチは相補的な性質を持っており、具体的なモデルの研究からは予想もしなかった選択則や物理現象が浮かび上がることがある。また、新たな対称性の発見を基にして、従来解析的な計算手法が適用できなかった強い相互作用を持つ場の理論のモデルに対して、具体的な計算手法が開発されることも期待できる。本研究では、実際に両方の側面から新たな結果が得られた。

#### 4. 研究成果

上の項目 1 について最も大きな発見についてまず述べる。

Yang-Mills 理論および量子色力学(QCD)に対して新しい半古典的計算が妥当な領域を見つけ、そのダイナミクスが 4 次元時空におけるカラー閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れと連続的につながることを発見した。

具体的には、4 次元時空のうち 2 方向をトーラスに丸め、その境界条件を  $t$  Hooft twist と呼ばれる高次対称性で捻られたものにした。通常の周期境界条件では小さなトーラスに丸めると center symmetry とよばれる対称性が自発的に破れるためカラーの閉じ込めを実現することができないが、本研究で用いた境界条件の場合はこの対称性を保つことが可能である。このこと自体は 80 年代から認識されており、large- $N$  gauge theory を調べるための twisted Eguchi-Kawai model などでも用いられてきたものである。

本研究ではこれをさらに推し進め、トーラスの半径が十分小さい領域においては中心渦 (center vortex) と呼ばれる半古典的な配意からなる希薄なガスとして Yang-Mills 理論を系統的に近似することが可能であることを示した。中心渦によって閉じ込め現象が引き起こされるということ自体は数値計算モデルとして長らく調べられてきたが、筆者らはそのアイデアを上手く昇華させて場の理論の解析的な計算として実現している、という点が先行研究と大きく異なり新しい点である。またそのダイナミクスに対する帰結を詳細に調べることで、このトーラスの半径が小さい領域と無限大の領域は量子相転移なしにつながることができることの強い示唆を得ることができた。

この計算手法はグルーオンのみからなる Yang-Mills 理論を超えてクォークが存在する QCD に対しても適用することができることも示すことができた。クォークがいる場合には  $t$  Hooft の捻られた境界条件を取ることができないため、そのままの形では上記の計算は応用することができないが、バリオン対称性に対するモノポールフラックスを導入するというアイデアによりこの問題を回避することに成功した。これにより、一般にはカイラル対称性の自発的破れを仮定した上でカイラル有効理論を決定するが、本研究では QCD のラグランジアンから出発して半古典的計算が適用できる領域に対して直接カイラル有効理論を導出することに成功した。その上で  $\eta'$  meson の質量に対する Witten-Veneziano 関係式などの非自明な関係式を半古典的計算により具体的に実現することがわかった。

この研究成果は、これまで解析できていなかった多くの 4 次元ゲージ理論のダイナミクスを調べるための新しい計算手法を提供するという点で特に重要であると考えている。本研究ではその第一歩として、その応用としてクォークが  $SU(N)$  ゲージ群の対称もしくは反対称表現に属する QCD に対してこの新しい計算手法を応用した。これらの理論は large  $N$  極限と呼ばれる領域で超対称 Yang-Mills 理論と摂動的な等価性を示すという orientifold equivalence が知られていたが、この等価性を非摂動的な等価性として確立するためには真空が荷電共役対称性を自発的に破らないということが重要である、ということが知られていた。今回新しく発見した半古典的な閉じ込めを応用することで、実際にこれらの理論の真空がカイラル対称性のみを自発的に破り荷電共役対称性は保たれる、ということを示したことで非摂動的な orientifold equivalence がもっともらしいという示唆を得ることができた。

次に項目 2 について最も大きな発見について述べる。

近年、場の量子論の対称性はその概念の段階から非常に一般化されてきている。特に 2020 年

この段階では 2 次元場の理論において非可逆的対称性の数理的な一般論が確立してきており、これらの新しい対称性が高次元場の理論においても存在するのか、またその有用性はどのようなものか、ということに興味を持たれ始めていた。その中で、本研究では高次元連続場の理論において非可逆的対称性を持つ最初の例を構築し、そこから従う選択測について物理的な帰結を調べることに成功した。

この発見も具体的な場の理論のモデルの解析に端を発している。3 次元コンパクト  $U(1)$  ゲージ理論が解析的に計算できる閉じ込め現象を示すことがよく知られているが、本研究では筆者らはその荷電共役対称性もゲージ対称性の一部であるような理論について閉じ込め力の係数 (string tension) の計算をした。その解析の中で string tension の N-ality rule という規則が破れていることを発見し、その起源として新しい対称性の概念が背後に隠れているのではないかという予想を立てた。

その予想は正しく、実際に新しくトポロジカルな演算子を構成し Wilson loop 演算子との交換関係の計算をすることで、string tension の持つ奇妙な選択測の起源が非可逆的対称性の存在によるものであるということを示した。この構成は筆者らが semi-Abelian ゲージ理論と呼ぶ場の理論に対して一般に適用でき、また 2 次元の Yang-Mills 理論の閉じ込め現象も同じ非可逆的対称性を持っていることがわかった。これらの成果は上でも述べたように、高次元場の理論における非可逆的対称性を明確に認識した初めての例であるという点で重要な成果であると考えられる。

また、その後の他のグループによる研究の発展として高次元の非可逆的対称性が一部系統的に構成できるようになってきたため、そのアイデアを応用して Cardy-Rabinovici モデルという多くの非自明な閉じ込め相を持つモデルに対して非可逆的対称性を構築した。特に筆者らはこのモデルで非可逆的対称性が重力アノマリーを持つことを示し、アノマリーつり合い条件を適用しながらこれらの多くの閉じ込め相が示すべき低エネルギー有効理論の決定を行うことができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Kobayashi Ryohei, Lee Yasunori, Shiozaki Ken, Tanizaki Yuya	4. 巻 4
2. 論文標題 Topological terms of (2+1)d flag-manifold sigma models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2021)075	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 Mendel Nguyen, Yuya Tanizaki, Mithat Unsal	4. 巻 104
2. 論文標題 Non-invertible 1-form symmetry and Casimir scaling in 2d Yang-Mills theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 65003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.065003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Itsuki Takahashi, Yuya Tanizaki	4. 巻 104
2. 論文標題 Sigma-model analysis of SU(3) antiferromagnetic spins on the triangular lattice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 235152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.235152	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Masazumi Honda, Etsuko Itou, Yuta Kikuchi, Yuya Tanizaki	4. 巻 2022
2. 論文標題 Negative string tension of higher-charge Schwinger model via digital quantum simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 033B01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac007	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 該当する

1. 著者名 Yuya Tanizaki, Mithat Unsal	4. 巻 2022
2. 論文標題 Center vortex and confinement in Yang-Mills theory and QCD with anomaly-preserving compactifications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 04A108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac042	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 該当する

1. 著者名 Kenji Fukushima, Takuya Shimazaki, Yuya Tanizaki	4. 巻 8
2. 論文標題 Exploring the $\Lambda$ -vacuum structure in the functional renormalization group approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2022)040	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 Nguyen Mendel, Tanizaki Yuya, Unsal Mithat	4. 巻 3
2. 論文標題 Semi-Abelian gauge theories, non-invertible symmetries, and string tensions beyond N-ality	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2021)238	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 該当する

1. 著者名 Honda Masazumi, Tanizaki Yuya	4. 巻 12
2. 論文標題 Topological aspects of 4D Abelian lattice gauge theories with the $\theta$ parameter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2020)154	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、Tanizaki Yuya	4. 巻 2022
2. 論文標題 Non-invertible self-duality defects of Cardy-Rabinovici model and mixed gravitational anomaly	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2022)036	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 Tanizaki Yuya、Unsal Mithat	4. 巻 2022
2. 論文標題 Semiclassics with 't Hooft flux background for QCD with 2-index quarks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2022)038	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 該当する

1. 著者名 Honda Masazumi、Itou Etsuko、Tanizaki Yuya	4. 巻 2022
2. 論文標題 DMRG study of the higher-charge Schwinger model and its 't Hooft anomaly	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2022)141	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 Tanizaki Yuya	4. 巻 -
2. 論文標題 Generalization of Global Symmetry and Its Applications to QCD-Related Physics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Handbook of Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 1~19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-15-8818-1_24-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 Yuya Tanizaki
2. 発表標題 Confinement and chiral symmetry breaking of 4d QCD-like theories with 2-torus compactification
3. 学会等名 Paths to Quantum Field Theory, Durham, UK (online), (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuya Tanizaki
2. 発表標題 Modified instanton sum in 4d gauge theories
3. 学会等名 Decomposition 2021, Virginia Tech (online), USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuya Tanizaki, Mendel Nguyen, Mithat Unsal
2. 発表標題 Non-invertible symmetry and string tensions beyond N-ality
3. 学会等名 A Virtual Tribute to Quark Confinement and the Hadron Spectrum 2021 (vConf2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷崎佑弥
2. 発表標題 QFTの非摂動的側面の紹介と一般化された対称性
3. 学会等名 関西地域セミナー2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Yuya Tanizaki, Mithat Unsal
2. 発表標題 Semiclassical vortex confinement picture of 4d Yang-Mills theory on $R^2 \times T^2$ and its relation to anomaly matching
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuya Tanizaki, Masazumi Honda, Etsuko Itou, Yuta Kikuchi
2. 発表標題 't Hooft anomaly of charge-q Schwinger model on the lattice in Hamiltonian formalism
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuya Tanizaki
2. 発表標題 Non-invertible symmetry and string tensions beyond N-ality
3. 学会等名 Topological Phases of Matter: From Low to High Energy, INT (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuya Tanizaki
2. 発表標題 Adiabatic continuity and symmetry-twisting from the viewpoint of anomaly
3. 学会等名 RIKKYO MathPhys 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuya Tanizaki
2. 発表標題 Anomaly and global inconsistency matching in QFTs
3. 学会等名 Theoretical studies of topological phases of matter, YITP (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuya Tanizaki
2. 発表標題 Generalized symmetries and anomaly matching
3. 学会等名 Probing the physics of high-density and low-temperature matter with ab initio calculations in 2-color QCD (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuya Tanizaki
2. 発表標題 Semiclassical description of confinement via center vortices and anomaly-preserving $T^2$ compactifications
3. 学会等名 Continuous Advances in QCD 2022, FTPI, University of Minnesota, MN, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuya Tanizaki
2. 発表標題 Semiclassical description of confinement via center vortices and anomaly-preserving $T^2$ compactifications
3. 学会等名 15th Quark Confinement and Hadron Spectrum, University of Stavanger, Norway (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuya Tanizaki
2. 発表標題 Symmetries in QFT and applications
3. 学会等名 KEK Theory Workshop 2022, KEK (online), Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuya Tanizaki
2. 発表標題 Nonperturbative Anomaly and Functional RG
3. 学会等名 Functional Renormalization Group at RIKEN 2023 - From condensed matter and particle physics to gravity -, RIKEN, Saitama, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuya Tanizaki
2. 発表標題 Noninvertible Solitonic Symmetry
3. 学会等名 Topological Phases of Matter: From Low to High Energy, Institute of Nuclear Theory (INT), University of Washington, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Yuya Tanizaki's Homepage  <a href="https://sites.google.com/view/yuyatanizaki/home?authuser=0">https://sites.google.com/view/yuyatanizaki/home?authuser=0</a></p>
--

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------