

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03839

研究課題名（和文）トポロジカルソリトンで見る余剰次元とトポロジカル物質

研究課題名（英文）Extra dimensions and topological matters from topological solitons

研究代表者

衛藤 稔 (Eto, Minoru)

山形大学・理学部・教授

研究者番号：50595361

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,700,000円

研究成果の概要（和文）：余剰次元モデルではソリトン上に標準模型の全ての場を局在させる必要がある。フェルミオンの局在は広く知られているが、本研究ではヒッグス場やゲージ場などのボゾン場の0質量モードがソリトン上に局在することを明らかにした。またボゾンとフェルミオンの0モードの局在機構が類似していることを指摘し、ソリトン上にトポロジカルなエッジモードとしてボゾン・フェルミオンが現れることを明らかにした。更に5次元時空に限られていた先行研究を拡張し、一般次元について0質量ゲージ場の局在機構を明らかにした。また6次元の場合にnon-Abelian量子渦を用いてSU(5)GUTからダイナミカル標準模型ゲージ場を得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子標準模型は理論的に決定出来ない多くのパラメータを含み、またゲージ階層性問題など未解決問題を含んでいるため、より自然な理論を求め研究が続けられている。本研究はその一つである余剰次元に関するものであり、特に位相的ソリトンを3ブレーンとみなし、不自然な仮定なしにブレーンワールドを構成することを目指した。最大の成果は長年未解決であった0質量ゲージボゾンのソリトンへの局在機構の解明に成功したことである。またこのボゾンの局在モードと近年注目されてるトポロジカル物質のフェルミオンエッジモードの類似点を指摘し、物性系でのボゾンのトポロジカルモードの存在可能性を初めて指摘した。

研究成果の概要（英文）：In order to realize the standard model on topological solitons, we have to ensure localization of massless fields including chiral fermions, Higgs and gauge bosons. The localization mechanism for the fermions has been well known for long time, but that for bosons have not been well understood. In this study we clarified that the Higgs and gauge bosons generally also have massless modes localizing on the solitons. The bosonic localization mechanism works when a gauge coupling nontrivially depends on scalar fields that take nontrivial solitonic configurations. We pointed out nontrivial similarity exists between fermionic and bosonic mode equations, and figured out that both fermions and bosons are topological edge modes localized on the solitons. Furthermore, we extended the previous studies on localization of massless gauge fields which are limited to the five dimensions to generic higher dimensions. We also constructed the SU(5) GUT on non-Abelian vortices in six dimensions.

研究分野：素粒子理論

キーワード：対称性 対称性の自発的破れ トポロジカルソリトン ブレーンワールド ボゾンのエッジモード トポロジカル相

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

「対称性」は素粒子標準模型(以下 SM)を構築するための指導原理の一つであり、素粒子と力の統一を理解するために不可欠な概念である。また対称性は物理現象の詳細やエネルギースケールに依らない概念であるので、物性・宇宙・原子核においても同様に重要であり、其れ故、対称性を基軸とした物理現象の理解は、一見無関係に見える緒現象を結びつけ統一することにつながる。顕著な例は「対称性の自発的破れ」で、超伝導などの物質の相転移と素粒子の質量の起源が統一的に理解される。同様に普遍的な概念としてトポロジがある。素粒子分野でもトポロジは重要な概念であるが、研究当初、物性分野ではトポロジカル絶縁体に代表されるトポロジカル相という物質の新しい性質が注目されており、量子アノマリーやトポロジカル不変量など素粒子物理学においても重要な概念を用いて深く理解されるようになっていた。このように対称性・対称性の自発的破れ・トポロジという系の詳細やスケールに依らない普遍的な性質に着目し分野横断的な新しい視点を持つことで、未解決問題にアプローチすることが可能になり、新しい現象の発見、更には新分野の開拓を推進する機運が高まっていた。一方で素粒子分野においては対称性・対称性の自発的破れ・トポロジが SM の問題を解決する糸口になるとして長年研究が続いてきていた。SM はこれまでの実験・観測の結果を矛盾なく説明するが、ゲージ階層性や質量階層性などのナチュラルネスや、ニュートリノ質量、暗黒物質、相互作用や物質の未統一などの不満足点を抱えている。これらの問題を解決しかつ量子重力を含むトップダウン的な理論は超弦理論がその有力候補であるが、その真空は偽真空を含め無数に存在するため低エネルギーで標準模型が自然に選ばれることを説明することが難しい。これと反対の立場として、SM に最小限の変更を加えて新しい物理を探索するボトムアップ的なアプローチに余剰次元模型がある。余剰次元模型の利点は、空間の次元を増やすだけなので複雑なセットアップが必要ないというミニマル性と、それにも関わらず余剰次元方向の幾何学がゲージ階層性問題や物質の質量階層性を自然に説明することが出来るということである。しかし多くの先行研究では 1) 余剰次元をコンパクトな空間とし (余剰次元と 4 次元時空をあらかじめ区別している)、2) 厚み 0 の 4 次元膜(3 プレーン)を手で導入し、3) SM 粒子がプレーンへ局在する、という大きな仮定の基に議論が展開されていた。この点を解決する試みとして 3 プレーンをトポロジカル・ソリトンとしてダイナミカルに生成するというアイデアがあり、これにより a) コンパクトな空間を考える必要がなく、b) トポロジカル・ソリトンは系の詳細には寄らず対称性が自発的に破れる際にダイナミカルに生成され、c) SM の物質場(カイラルフェルミオン)はトポロジカルな理由で自動的にプレーンに局所化 (Jackiew-Rebbi 機構 [Phys. Rev. D13 (1976)] (以下 JR 機構)) される。これらは確かにソリトンを考える大きなアドバンテージであるが、一方で多くの先行研究に共通する最大の困難は相互作用を媒介するゲージ粒子のプレーン上への局在機構が未解明のままであることであった。プレーン上でゲージ対称性を保つためにはゲージ場の質量は 0 ではないが、ソリトン背景で安直にゲージ場の質量スペクトルを求めるとゲージ場の質量はプレーンの厚みの逆数程度になってしまう。一般に 0 質量粒子の出現には理由が必要で、たとえば対称性の自発的破れ又はカイラル対称性、超対称性などがあれば必然的に 0 質量粒子が存在する。ゲージ場の質量を 0 に保つ対称性はゲージ対称性そのものである。一般にトポロジカルソリトンは対称性の異なる相が接する境界に現れるので、プレーン上に 0 質量ゲージ場を局在させようと思えば、バルクはゲージ対称性が破れたヒッグス相で、ソリトン上はゲージ対称性が回復しているような状況を実現すれば良いはずである。このようなソリトンを構成することは容易いが、実際にそのようなソリトンを構成してみるとゲージ場の質量は 0 にはならないことが知られている。その理由はゲージ場にとってバルクは超伝導相であるため、ソリトン内部に電荷を置いた場合その電気力線はプレーン内部を無限に伸びることができず導体であるバルクに吸い込まれてしまうため、力が有限の距離しか到達できない、というものである。そこで Dvali-Shifman(以下 DS) [Phys. Lett. B396(1997)] は閉じ込め相中のソリトンを考えることで 0 質量ゲージ場がソリトン内に局在する新機構を提案した。これは物理的な本質を捉えたとても良い発想であるが、しかし余剰次元の数が大きくなるにつれ紫外発散が厳しくなるうえ、非摂動効果である閉じ込め現象が高次元時空で実現するかどうか明らかでないため、多くの先行研究では結局 DS 機構が起こることが仮定されてきた。そのような状況の中、DS のアイデアを準古典的に実現する模型として、Sakai-Ohta [Prog. Theor. Phys. 124(2010)] はゲージ場の運動項の係数、すなわちゲージ結合定数をスカラー場の汎関数に置き換えた 5 次元の模型を考え、ドメインウォール上に 0 質量ゲージ場が局在することを明らかにした。その後、本研究代表者を含むグループにより模型が改良され、SU(5)統一理論や SM をソリトン上に局在させる現実的な模型が構築され、5 次元時空中のドメインウォールを 3 プレーンとみるソリトン・ワールド模型についてはゲージ場の局在を含め SM を実現出来る模型の具体的な構成法が整備されつつあった。

## 2. 研究の目的

このような状況において本研究では先行研究を引き継ぎ更に発展させるため、「対称性・対称性

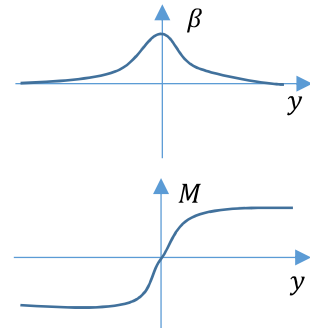
の自発的破れ」と「トポロジー」に加えて対称性が自発的破れる際に現れる「トポロジカル・ソリトン(位相欠陥)」に着目し、真空とは連続的に繋がらないトポロジカルに非自明な配位を包括する普遍的な理解を見出すことを目指した。具体的な問いは、素粒子物理学における素粒子標準模型の問題点を自然に解決する候補であるブレーン・ワールド模型を高次元(5次元に限らず一般次元)時空中にダイナミカルに生成される位相欠陥と捉えるソリトンブレーン・ワールド模型と物性物理学におけるトポロジカル物質の類似性・関連性を明らかにし、特にソリトンブレーン・ワールド模型の最大の困難であり長年の課題である0質量ゲージ場の局在機構の更なる解明と、それに対応するトポロジカル物質の新しい性質の発見を目標と設定した。

### 3. 研究の方法

本研究では高次元時空中のゲージ理論を考えた(ゲージ群は最も簡単なU(1)群からSMゲージ群としてU(1)xSU(2)xSU(3)、または大統一理論的なSU(5)など様々なものを考えたが、結果がなるべくゲージ群の詳細には依らないような一般的な理論の構築を目指した)。手法として独創的な点は、理論に(SMなどには存在しないエクストラな)スカラー場 $T(x^M)$ を導入している点である。そのスカラー場が系の対称性を自発的に破りその結果位相的ソリトンが構成され高次元空間中に3ブレーンがダイナミカルに生成される。このスカラー場はゲージ変換に対してはシングレットとする。普通、シングレット場はゲージ場と相互作用しないが、本研究においてはゲージ結合定数 $g$ を $T(x^M)$ の汎関数として $g = g(T(x^M))$ とすることで相互作用が生まれ、またゲージ結合定数は $T(x^M)$ がトポロジカルソリトン配位を取るとき、 $T(x^M)$ を通じて余剰次元座標に依存することになる。典型的なラグランジアンは $L = -(2g(T))^{-2} F^{MN} F_{MN}$ であり、ゲージ場と $T(x^M)$ はこのゲージ場の運動項を通じてのみ相互作用できる。 $T(x^M)$ が余剰次元座標に非自明に依存するとき、ゲージ場がどのような質量スペクトルを持つのかを調べるといった手法をとった。またゲージ場だけでなく、スカラー場や反対称テンソル場などのボゾン場についても同様の解析を行い、ボゾン場の局在性がどの程度一般的な現象なのかなどを調べた。更に一般的な結果を得るために、高次元時空といっても一番簡単な5次元だけでなく、より複雑になる6次元以上にも適用可能な解析手法を開発し、ボゾン場の局在性が何によって保証されているのかを明らかにすることを試みた。関連した研究として、6次元以上の時空に新しい3ブレーン的な構造を構成するために超対称ゲージ理論にヒントを得た高次元ゲージ理論を考え、Bogomol'nyi-Prasad-Sommerfield(BPS)型の安定解を探した。

### 4. 研究成果

本研究の第1の成果として論文[Massless bosons on domain walls: Jackiw-Rebbi-like mechanism for bosonic fields]では0質量ゲージ場の局在機構の数学的物理的な構造を明らかにするために、5次元時空中のドメインウォールを考え、ゲージ場だけでなくスカラー場や2-formゲージ場(Kalb-Ramon場)などを含めたより一般的なボゾン場のドメインウォールへの局在のメカニズムを明らかにした。スカラー場に対しては $L = \beta(T)^2 \partial^M \Phi \partial_M \Phi$ を、ゲージ場については $L = -\beta(T)^2 F^{MN} F_{MN}$ を、2-formゲージ場については $L = \beta(T)^2 H^{MNL} H_{MNL}$ というラグランジアンを考え、 $T$ がドメインウォール的な配位をとった場合にそれぞれ $\Phi$ 、 $A_M$ 、 $B_{MN}$ の質量スペクトルを求め、 $y$ を5次元方向の空間座標とすると、いずれに対しても、 $\beta(T(y))$ がどのような関数であっても $\beta(T(y))$ が $y$ について2乗可積分でありさえすれば、0質量でドメインウォールに局在する物理的モードが存在することを明らかにした。これはフェルミオンに関してよく知られている、質量項 $M(T(y))$ がキンク的で $y \rightarrow \pm\infty$ でその符号を変えればその関数の詳細には依存せず0質量の局在モードが存在するというJR機構のボゾン版であると捉えることができる。フェルミオンの局在はトポロジカルな性質だけで決まっているが、ボゾンについてもかなり一般的に0モードが存在する条件を明らかにすることが出来た。右上の図に示す通りボゾンについては「 $\beta$ が $y \rightarrow \pm\infty$ で十分早く0に行く」という条件であり、フェルミオンについては「 $M$ が0を通過する」という条件である。

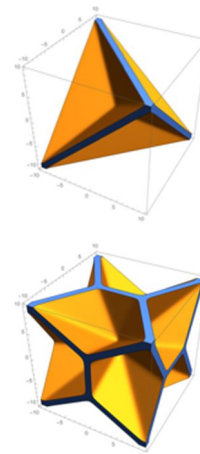


第2の成果として論文「Localization of gauge bosons and the Higgs mechanism on topological solitons in higher dimensions」では、トポロジカルソリトンへの0質量ゲージ場の局在について、先行研究では5次元のみが考えられていたが、それを6次元以上の場合、およびゲージ場をソリトンに局在させる役割を果たすエクストラなスカラー場 $T(x^M)$ がゲージ変換のシングレットでなくゲージ場とミニマル結合するような場合について、質量スペクトルを特定する一般的な解析方法を構築した。このような場合に共通する問題であるが、特にゲージ固定条件については $T(x^M)$ が定数である場合と取り扱いが大きく異なるので十分に注意が必要であり、また3+1次元成分 $A^\mu$ ( $\mu = 0, 1, 2, 3$ )と余剰次元成分 $A^a$ ( $a = 4, 5, \dots$ )をうまく切り分け、物理的モードと非物理的モードを区別する必要がある。本研究ではこの質量スペクトルの導出についてRξゲージ的なゲージ固定条件を置くことで模型の詳細に依らない一般的な解析手法を確立した。また先行研究では5次元の場合のみが考えられていたが、これを6次元以上に拡張した場合の解析手法も確立した(5次元の場合と6次元以上ではゲージ場の余剰次元成分の取り扱い



が本質的に違うため 5 次元の単純な拡張と捉えることが出来ない。6 次元以上は 6 次元の場合と本質的に同じである。)。エクストラなスカラー場  $T(x^M)$  がゲージ場に対して通常の電荷を持つ場合は、この場は 0 質量のゲージ場をソリトン上に局在させる役割と、通常のヒッグス機構により 0 質量ゲージ場を有質量にする役割を同時果たすことになる。このような場を考えれば、例えば SM 模型をソリトン上に構成することを考える場合に、電弱ゲージ場を 0 質量で局在させるためにスカラー場を必要とし、同時に電弱対称性を自発的に破り W/Z ボゾンに質量を与えるためにまた別のスカラー場 (ヒッグス場) を導入するというような複雑な模型を考える代わりに、ヒッグス場自身がゲージ場を局在させかつそのゲージ場に質量を与えるというスカラー場が 1 種類だけで模型を構成することを可能とするというんで重要である。

第 3 の研究成果は 2 つの論文「Exact solutions of domain wall junctions in arbitrary dimensions」と「Exhausting all exact solutions of BPS domain wall networks in arbitrary dimensions」にまとめた。これらの論文では 6 次元以上の時空に 3 プレーンの構造を構成するために  $d$  次元の ( $d > 2$ ) ドメインウォールジャンクションを構成する方法を明らかとした。これまで構成されていたドメインウォールジャンクションは基本的には 2 次元構造で、 $xy$  平面上に 3 枚のドメインウォールを考えそれが Y 字的に交わる点がジャンクションである。これを 6 次元時空で構成するとジャンクションの空間体積の次元は  $5-2=3$  となりジャンクションが 3 プレーン的な構造を出す。更に高次元から 3 次元を出すためには、例えば 7 次元時空だと空間次元は  $6-3=3$  とならなければならないので、3 次元的なジャンクションが必要となる。先行研究において  $d$  次元 ( $d > 2$ ) 的なドメインウォールジャンクションはほとんど考えられておらず、特に解析解については知られていなかった。そこで第 1 論文では  $N=2$  超対称ゲージ理論にヒントを得たボゾンのゲージ理論を考え、 $d$  次元 ( $d > 2$ ) 的なドメインウォールジャンクション解を構成した (右図上)。更に第 2 論文ではこれらの高次元的ドメインウォールジャンクションが単体でなく複雑に結合したネットワークを構成するような場合についても解析解や数値解を構成することに成功した。特に高次元になるにつれて新しいトポロジカル電荷が自然に定義され、高次元的なドメインウォールネットワークの性質についてトポロジカルな側面とまたそれらを具体的にどのように構成するのかという 2 点について完全に明らかにした。



第 4 の研究成果として論文「Standard model gauge fields localized on non-Abelian vortices in six dimensions」では、上記研究成果 2 で論じた一般論を 6 次元の場合に限定し、量子渦 (大局的) 上に  $SU(5)$  ゲージ場の 0 質量モードを局在させるというモデルを構成した。特に量子渦としては non-Abelian 型の量子渦を考えた。これらの渦は  $5 \times 5$  の複素行列場  $T(x^M)$  の 5 つの対角成分 (それぞれ複素スカラー場) がなす量子渦であり、それらが系のダイナミクスに従って余剰次元平面で 3 本-2 本に分かれると、 $SU(5)$  ゲージ群が SM ゲージ群  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  に自発的に破れ、さらにそれぞれの 0 質量モードが 3 本渦と 2 本渦上に分離して局在することを示した。大統一理論と余剰次元理論はそれぞれが標準模型の別々の拡張であるが、本研究ではその 2 つがトポロジカルソリトンを通じて統一される可能性を示すことに成功した。5 次元の場合には先行研究で同様の成果を得ていたが、本研究において 5 次元だけでなく一般次元において余剰次元模型と大統一理論が融合されることを示すことが出来た。

その他の成果：本研究の当初の目的にはなかったが、研究を進める中でトポロジカルソリトンの理解が大きく進みそれを受けて、SM の拡張である 2 ヒッグス 2 重項模型における量子渦や磁氣的モノポールに関する研究成果・他成分 Bose-Einstein 凝縮系における分数量子渦に関する研究成果・有限密度 QCD におけるカイラルソリトン格子に関する研究成果など、予想以上の成果を得ることが出来、大変有意義な研究を行うことが出来た。一方で、物質のトポロジカル相との関連はあまり深く追求することが出来なかった。研究成果 1 で発見したボゾンの 0 質量局在モードは物質の新しいエッジモードとして現れると期待しているが、それがどのような意味で物質のトポロジカル相と関係しているのかその理解が得られなかった。これは非常に興味深い問題であるので、今後も継続して研究していくつもりである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 15件）

1. 著者名 Minoru Eto, Kentaro Nishimura, Muneto Nitta	4. 巻 305
2. 論文標題 Phases of rotating baryonic matter: non-Abelian chiral soliton lattices, antiferro-isospin chains, and ferri/ferromagnetic magnetization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy 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/JHEP08(2022)305	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 Minoru Eto, Yu Hamada, Ryusuke Jinno, Muneto Nitta, Masatoshi Yamada	4. 巻 106
2. 論文標題 Abrikosov-Nielsen-Olesen strings from the Coleman-Weinberg potential	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 116002,1-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.116002	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 Minoru Eto, Muneto Nitta	4. 巻 77
2. 論文標題 Quantum nucleation of topological solitons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2022)077	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 Minoru Eto and Muneto Nitta	4. 巻 104
2. 論文標題 Chiral non-Abelian vortices and their confinement in three flavor dense QCD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 094052/1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.094052	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 Masato Arai and Filip Blaschke and Minoru Eto and Masaki Kawaguchi and Norisuke Sakai	4. 巻 2021
2. 論文標題 Standard model gauge fields localized on non-Abelian vortices in six dimensions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 123B07/1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab144	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 Gudnason, Sven Bjarke and Eto, Minoru	4. 巻 54
2. 論文標題 The moduli space of non-abelian vortices in Yang-Mills-Chern-Simons-Higgs theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	6. 最初と最後の頁 425402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ac254b	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 Minoru Eto and Yu Hamada and Muneto Nitta	4. 巻 2
2. 論文標題 Stable Z-strings with topological polarization in two Higgs doublet model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2022)099	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 Minoru Eto, Kazuki Ikeno, and Muneto Nitta	4. 巻 2
2. 論文標題 Collision dynamics and reactions of fractional vortex molecules in coherently coupled Bose-Einstein condensates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW RESEARCH	6. 最初と最後の頁 033373,1-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033373	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 Minoru Eto, Masaki Kawaguchi, Muneto Nitta, and Ryotaro Sasaki	4. 巻 102
2. 論文標題 Exact solutions of domain wall junctions in arbitrary dimensions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW D	6. 最初と最後の頁 065006,1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.065006	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 Minoru Eto, Yu Hamada, Masafumi Kurachi, Muneto Nitta	4. 巻 7,4
2. 論文標題 Dynamics of Nambu monopole in two Higgs doublet models. Cosmological Monopole Collider	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2020)004	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 Minoru Eto, Masaki Kawaguchi, Muneto Nitta, and Ryotaro Sasaki	4. 巻 101
2. 論文標題 Exhausting all exact solutions of BPS domain wall networks in arbitrary dimensions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW D	6. 最初と最後の頁 105020,1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.105020	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 Minoru Eto, Yu Hamada, and Muneto Nitta	4. 巻 102
2. 論文標題 Topological structure of a Nambu monopole in two-Higgs-doublet models: Fiber bundle, Dirac's quantization, and a dyon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW D	6. 最初と最後の頁 105018,1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.105018	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 Sven Bjarke Gudnason, Minoru Eto, Muneto Nitta	4. 巻 62
2. 論文標題 1/2-BPS vortex strings in $N = 2$ supersymmetric $U(1)^N$ gauge theories	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Physics	6. 最初と最後の頁 032304,1-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0039068	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 Minoru Eto, Adam Peterson, Fidel I. Schaposnik Massolo, Gianni Tallarita	4. 巻 3,156
2. 論文標題 Dynamics of global and local vortices with orientational moduli	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2021)156	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 Michikazu Kobayashi, Minoru Eto, Muneto Nitta	4. 巻 123, 075303
2. 論文標題 Berezinskii-Kosterlitz-Thouless Transition of Two-Component Bose Mixtures with Intercomponent Josephson Coupling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1,6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.075303	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 Masato Arai, Filip Blaschke, Minoru Eto, Norisuke Sakai	4. 巻 100, 095014
2. 論文標題 Massless bosons on domain walls: Jackiw-Rebbi-like mechanism for bosonic fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1,17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.095014	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 Minoru Eto, Yu Hamada, Masafumi Kurachi, Muneto Nitta	4. 巻 802
2. 論文標題 Topological Nambu monopole in two Higgs doublet models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 1, 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135220	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 Minoru Eto, Masaki Kawaguchi	4. 巻 98
2. 論文標題 Localization of gauge bosons and the Higgs mechanism on topological solitons in higher dimensions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1, 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2019)098	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19件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 衛藤稔, 濱田佑, 神野隆介, 新田宗土, 山田雅俊
2. 発表標題 Coleman-Weinberg Abrikosov-Nielsen-Olesen strings
3. 学会等名 日本物理学会 2022秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 衛藤稔, 濱田佑, 新田宗土
2. 発表標題 Link soliton in model with B-L and Peccei-Quinn symmetries
3. 学会等名 日本物理学会 2023春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 衛藤稔, 濱田佑, 新田宗土
2. 発表標題 Hybrid solitons with monopoles, strings, and domain walls
3. 学会等名 日本物理学会 2023春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 衛藤稔, 西村健太郎, 新田宗土
2. 発表標題 非可換カイラルソリトン格子中の南部・ゴールドストーンモード
3. 学会等名 日本物理学会 2023春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 衛藤稔, 西村健太郎, 新田宗土
2. 発表標題 強磁場中の有限密度バリオン物質におけるドメイン壁スキルミオン相
3. 学会等名 日本物理学会 2023春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 衛藤稔, 西村健太郎, 新田宗土
2. 発表標題 SU(2) chiral soliton lattice from chiral vortical effect
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Minoru Eto
2. 発表標題 Radiolaria - Topological planktons?
3. 学会等名 International Conference on Discrete Geometric Analysis for Materials Design (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 衛藤稔, 川口正記, 新田宗土, 佐々木亮太郎
2. 発表標題 アーベリアンヒッグス模型におけるドメインウォールジャンクションの厳密解について
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 衛藤稔, 川口正記, 新田宗土, 佐々木亮太郎
2. 発表標題 Exhausting all exact solutions of BPS domain wall networks in arbitrary dimensions
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 衛藤稔, 濱田佑, 新田宗土
2. 発表標題 Dirac's quantization condition of Nambu monopole and electroweak dyon in two Higgs doublet models
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 衛藤稔, 新田宗土
2. 発表標題 Non-Abelian chiral soliton lattice
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 新井真人, Filip Blaschke, 衛藤稔, 川口正記, 坂井典佑
2. 発表標題 非アーベリアンポータックス上のブレンワールド
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 衛藤稔, 濱田佑, 新田宗土
2. 発表標題 電弱バリオン数生成とモノポール触媒効果
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 衛藤稔
2. 発表標題 多成分BEC系の量子渦分子の散乱と擬似QCDハドロンの散乱シミュレーション
3. 学会等名 KEK 素核宇・物性 連携研究会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Minoru Eto
2. 発表標題 Topological Z-strings and magnetic monopoles in two Higgs doublet models
3. 学会等名 Topological solitons, nonperturbative gauge dynamics and confinement 2 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minoru Eto
2. 発表標題 Gapless states on topological defects
3. 学会等名 Material Research Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minoru Eto
2. 発表標題 All exact solutions of BPS domain wall networks in CPN models
3. 学会等名 CPN model: recent developments and future directions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Minoru Eto
2. 発表標題 Magnetic monopoles
3. 学会等名 山形大学 理工学研究セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 衛藤 稔
2. 発表標題 ドメインウォール・ドメインウォール ジャンクションについて
3. 学会等名 トポロジカル表面状態、ソリトンとプレーン、指数定理
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
---------------------------	-----------------------	----

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			
中国	Henan University			
米国	Lawrence Berkeley National Laboratory			
フランス	Institut des Hautes Etudes Scientifiques			
チリ	Universidad Adolfo Ibanez			
中国	Henan University			
チェコ	Silesian University, Czech Republic	Prague, Technical University		