

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：11501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800119

研究課題名(和文)位相的ソリトンを基軸とするエネルギー階層突破型研究の開拓

研究課題名(英文)Studies based on topological solitons for seeking breakthroughs to overcome large energy hierarchy in physics

研究代表者

衛藤 稔(Eto, Minoru)

山形大学・理学部・准教授

研究者番号：50595361

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文):本研究最大の成果は2つある。第一に標準模型の未解決問題を従来の理論と比較してより自然に解決することができる位相的ソリトンによるブレンワールド模型構築のための基礎理論の完成(特に非可換ゲージ場の局在化問題の解決)、第二に冷却原子気体の多成分ボーズ・アインシュタイン凝縮系における半整数量子渦のダイナミクスの理解と、それを量子色力学におけるカラーの閉じ込め問題の理解に応用することに成功したことである。本研究は素粒子・原子核・宇宙・物性の各分野をエネルギー階層性を超えた新しい視点で理解することを目的とするが、位相的ソリトンを利用して特に物性物理学と素粒子物理学の問題の解決に繋げることに成功した。

研究成果の概要(英文): There are two highlights in the results of this research project. The first is to succeed in completing a basic theory for dynamical brane-world scenario by topological solitons which is more natural than many previous brane-world models. Especially, we resolved a longstanding problem of localizing non-Abelian gauge fields on topological solitons. Secondly, we revealed dynamics of half quantized vortices in multi-component Bose-Einstein condensations of ultra-cold atomic gases, and applied it to the quantum chromodynamics (QCD) and got a new insight for a longstanding problem of QCD, namely color confinement. The main purpose of this research project is discovering new and universal methods which cover particle physics, nuclear physics, cosmology, and condensed matter physics. To this end, we focused on symmetry, spontaneous symmetry breaking, and topological solitons in all the studies. The results mentioned above really embody that purpose and open up a new research method in physics.

研究分野：素粒子理論物理学

キーワード：位相的ソリトン 対称性 対称性の自発的破れ ブレンワールド 冷却原子気体 多成分ボーズ・アインシュタイン凝縮 カラーの閉じ込め 標準模型を超える新しい物理

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 素粒子物理学に関わらず現代物理の様々な分野に共通することであるが、基礎理論を構築する際に最も重要なことはその系の対称性を見抜くことである。特に素粒子物理学においては対称性の理解は物質・相互作用・時空の起源・統一にダイレクトにつながるもので非常に重要である。対称性の理解の有効性は系が複雑な程高くなることが多く、より単純な自然法則の発見は、一見無関係に見える様々な異なる自然現象（例えば素粒子現象と物性現象）を全く新しい視点で統一的に理解することにつながる。このように対称性は自然現象の最も単純な理解に必要不可欠であるが、その一方で自然現象の複雑さは「対称性の自発的破れ」によって引き起こされることが多い。特に系のトポロジーが非自明であるとき、対称性の自発的破れの帰結として位相的ソリトンが自動的に生成され様々な重要な役割を果たす。トポロジーや対称性は系の詳細によらないため、位相的ソリトンは素粒子だけでなく原子核、宇宙、物性の各分野で同じように現れるが、これまでは個々の分野の中で限定的に位相的ソリトンに関する研究が行われて来ていた。

(2) 素粒子物理分野における研究当初の状況は以下のものであった。2012年にヒッグス粒子が観測され素粒子標準模型は一応の完成をみた。しかしながらゲージ階層性・物質の質量階層性・3世代の謎・ニュートリノの質量・暗黒物質など多くの未解決問題が残されたままであるのも事実である。これらは素粒子物理学における長年の問題であるが、ヒッグス粒子の存在が確かになり標準模型が完成した今、これらの問題を自然に解決する標準模型を超える新しい物理の発見・構築が素粒子物理学における喫緊の課題である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、「対称性・対称性の自発的破れ・位相的ソリトン」を主軸(特に位相的ソリトンに焦点を当てる)として、素粒子・原子核・宇宙・物性・数理物理の各分野を自然界のエネルギー階層性を越えた新しい視点から理解することである。また、従来切り離されて研究されてきた個々の分野を横断的かつ有機的なつながりを持った視点から捉え直すことにより、自然現象の背後に潜むより基本的な法則や新現象を発見することを目指す。またそのための新手法の開発や、境界領域を分野横断的に研究することで新分野を開拓することである。このように一見すると全く関係がなく典型的なエネルギースケールも全く違う素粒子・原子核・宇宙・物性の諸分野を統一的に理解することを可能にするのは、位相的ソリトンの存在が系のトポロジーと対称性(自発的破れ)という模型の詳細によらない単純でユニバーサルな現象だけにしか依らないためである。

陽子や中性子などの原子核の中の極小世界の位相的ソリトン、超流動や超伝導体などの実験室スケールにおける位相的ソリトン、また宇宙ひもなどの宇宙スケールの位相的ソリトンなどを統一的に理解することによって、それらが関与する自然現象を統一的に理解することが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

本研究の対象は広範囲に渡るため、その研究スキームは大きく分けて2つに分かれる。

(1) 個々の分野(素粒子・原子核・物性・宇宙・数理物理)の中でそれぞれに問題を解決する。特に位相的ソリトンに焦点を当てて問題解決に当たり、その問題に固有の理解にとどまらず、後にそれをより広い視点から活用し他分野に 응용が出来るよう準備する。

(2) 個々の分野における個別の問題を解決したら、それぞれの共通点・類似点・相違点を抽出し整理する。そして、それを他分野における問題に適用可能かどうかを調べ、可能である場合は、これまでの未解決問題に対して全く新しいアプローチで解決するための糸口とする。

上記の研究を遂行するためのメソッドは以下の通り。

(1) 可能な限り解析的な手法を駆使して、厳密な結果を得る。例えば超対称性などの数学的に性質の良い理論における問題解決にあたっては解析的な手法が非常に役に立つことが予想される。特に模型のパラメータなどによらない予言能力の高い結果を導出することを心がける。

(2) 解析的な手法を展開するのが難しい系における問題(通常の問題はこのようなものが多い)に対しては必要に応じて数値シミュレーションを用いる。本研究では多成分場のダイナミクスを調べる必要があるため、グラディエントフロー(リラクゼーション法)により安定解を探したり、また必要に応じて数値計算のコードを開発して時間発展を調べる。

## 4. 研究成果

(1) 素粒子分野における研究成果

位相的ソリトンによるブレーンワールド模型:

### ①非可換ゲージ場の局在

位相的ソリトンを利用したブレーンワールドはBeyond Standard Model (BSM) の一つとして有望な候補であるが、その最大の難点は0質量のベクトル場、特に非可換ゲージ場を位相的ソリトンの上に局在させる一般的な機構がわかっていない点である。2010年にOhta-Sakaiは5次元理論においてゲージ場の運動項を一般化させることでこの問題を解決出来ることを示したが、一方で5番目のゲージ場成分 $A_5$ (4次元の視点ではアジョイントスカラー場)の0モードの解析に関して改善すべき点が残されていた。Ohta-Sakaiを含めた似たような多くの模型では、簡単のため $A_5 = 0$ ゲージが取られるが、一般にゼロモードに関しては

ゲージ変換に特別な注意が必要である。また  $A_y = 0$  ゲージは5次元の場合しか通用せず、自然には高次元に拡張することが出来ないという難点もある。そこで  $A_y = 0$  より一般的で性質の良いゲージ固定として  $R\xi$  ゲージの一般化を考案し、 $A_y$  に物理的なゼロモードが存在しないことを証明した。更に、 $D = 6, 7$  の場合においても同様に、ゲージ場から余分な0質量スカラー場が出てこないことを示した。この結果はモデルビルディングにおいては非常に重要で、位相的ソリトンによるブレーンワールドモデルを5次元以上の高次元へ拡張するための理論的な土台を完成させた。

## ② Geometric Higgs Mechanismの発見

よく知られているように超弦理論の  $D$ -braneの有効理論は超対称Yang-Mills理論であるがそこに現れるゲージ群のランクは  $D$ -braneの枚数と密接に関係している。本研究では5次元時空の場の理論に存在するドメインウォールについても全く同じことが言えることを示した。例えば  $N$  枚のドメインウォールが存在する理論において、その全てが重なった場合はドメインウォール上に  $SU(N)$  ゲージ場が局在し、 $N$  枚が  $N-M$  枚と  $M$  枚の組みに分裂した場合は  $SU(N) \rightarrow SU(N-M) \times SU(M) \times U(1)$  と部分群に対応するゲージ場だけが局在し、破れた生成しに対応するゲージ場は0でない有限の質量を持ち重くなることを示した。つまりゲージ対称性の自発的破れがドメインウォールの余剰次元方向のダイナミクスによって引き起こされる(Geometric Higgs Mechanism)ことを明らかにした。これまでも場の理論の位相的ソリトンと超弦理論の  $D$  ブレーンの間の類似性は色々と指摘されているが、多くの場合、1枚のドメインウォールと1枚の  $D$  ブレーンの類似性(例えばどちらも有効理論がBorn-Infeld作用で記述される)に関するものであり、複数枚の場合に関するものはこの結果が初である。

## ③ ブレーンワールドと大統一理論の融合

②で説明したGeometric Higgs Mechanismの重要な帰結として、ブレーンワールドが自動的に大統一理論に帰着する点にある。標準模型のゲージ対称性  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  をドメインウォール上に局在させるためには  $3+2=5$  枚のドメインウォールが必要になるが、一方で、ドメインウォールの位置はモジュライのため自由に動かせる。全てのドメインウォールが重なる極限では  $SU(5)$  ゲージ理論、すなわち  $SU(5)$  GUTが4次元有効理論に必然的に登場する。このように位相的ソリトンがブレーンワールドと大統一理論を自然に融合するという新しいフレームワークを提供するということを提案した。その背後にあるのは、高次元時空における対称性の自発的破れだけであり、余剰次元のトポロジカルな性質がすべてのことを自然に説明出来るという点でとても魅力的なモデルである。

## ④ ヒッグス場によるゲージ場の局在

位相的ソリトンによるブレーンワールドの構

成に関する最も興味深い結果の一つとして、ヒッグス場にこれまでにない第3の役割がある可能性を示した。標準模型におけるヒッグス場の役割は、ヒッグス場の凝縮によりウィークボソンに質量を与えることと物質場に質量を与えることの2つである。これまでの模型ではゲージ場を局在させるために、標準模型とは無関係のスカラー場  $\phi$  を導入していたが、 $\phi$  の代わりに標準模型ヒッグス場  $H$  を利用して標準模型をソリトンに局在させることに成功した。これによって、余分なスカラー場を導入する必要がなくなったことに加えて、電弱対称性を自発的に破ることと物質場に質量を与えるというこれまでの役割に加えて、ゲージ場を局在化させるという全く新しい役割をヒッグス場が担っている可能性を指摘した。また標準模型にないヒッグス場とゲージ場の新しい相互作用の影響として次の2点に着目した。1つ目は  $H \rightarrow \gamma\gamma$  の崩壊であり、LHCデータと矛盾がないようにする要請から5次元理論のパラメータに制限がつくこと。2点目は現在CERNではMoEDAL(Monopole and Exotics Detector At Lhc) 実験でモノポール探索が行われているが、この実験の根拠の一つは、最近 J. Ellis 等によって示された標準模型のモノポールの質量が約5.5 TeV未満であるということがある。しかしこの計算の前提として標準模型の有効理論にヒッグス場とゲージ場にある相互作用があることが仮定されているが、この相互作用の存在について特に根拠がなく導入されている。一方で、ヒッグス場を利用したゲージ場の局在機構においては従来仮定されてきた形の相互作用が4次元有効理論に自然に現れる。つまり今後MoEDALで磁気的モノポールが発見された場合、それは単に標準模型の一面を見ているのではなく、余剰次元の存在を示す証拠であるという新しい可能性を指摘した。

超対称ゲージ理論の1/4BPSソリトン：

## ① ヒッグス相中のモノポール・反モノポールのダイナミクス

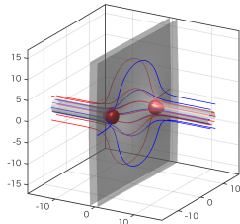
ヒッグス相の中に置かれた磁気的モノポールから出る磁束はマイスナー効果により1次元的なフラックスチューブ状に閉じ込められる。 $N=2$  超対称ゲージ理論においてこの状態はモノポールとボータックスの2種類の位相的ソリトンが共存する1/4BPS状態として安定に存在することが知られているが、モノポールと反モノポールが同時に存在する場合の動的な解については全く知られていなかった。本研究ではモノポールがボータックスのキルクと同定される近似の範囲で、モノポール・反モノポールのダイナミクスがsine-Gordon模型のキルク・反キルク解と同等であることを示し、安定なモノポール・反モノポール状態がnon-BPS状態として存在できることを示した。

## ② BPSブージャム状態の数値解の構成

$N=2$  超対称ゲージ理論にはボータックスとドメインウォールの複合配位として安定な1/

4BPS状態が存在することが知られている。ドメインウォールとボーテックス スtringの交点にはブージャムと呼ばれる磁氣的モノポールの半分のトポロジカルチャージをもつ特徴的なソリトンが現れることが知られている。これらの解の主に定性的な性質はモジュライ行列法によってすでに詳しく調べられている一方で、実際の解を構成する上では最終的にマスター方程式という偏微分方程式を数値的に解く必要がある。本研究では、この偏微分方程式を数値的に解くための適切な初期条件を与える一般論を導き出し、その上で実際にグラディエント フローの方法を用いて様々な解を構成した。

またマスター方程式を解く際にあるスカラー関数を導入するが、その関数の物理的意味は3+1次元的にはドメインウォールの「高さ」を意味し、一方でドメインウォール上の2+1次元の意味においてはブージャムから流れ込む磁束の広がりを表す磁氣的なポテンシャルに対応していることを明らかにし、ドメインウォールの形と有効理論の物理の関係を明らかにした。



位相的ソリトンの有効理論に対する高次微分補正項の導出：

#### ① ノンアーベリアンボーテックスの有効理論

近年、超対称ゲージ理論や高密度QCDなど様々な分野でノンアーベリアン ボーテックスが盛んに研究されている。その一番の特徴はオリエンテーションモジュライと呼ばれる内部自由度の存在であり、この内部自由度が励起した状態は元のソリトンが電荷が帯びたことを意味する。本研究ではこの電荷を帯びたソリトンの質量公式を利用して、オリエンテーションモジュライの有効理論に対する高次微分を含む補正項を求める簡単な方法を提案した。高次微分補正項の導出は一般に非常に複雑な計算が必要であり、BPSのような特別な場合においてさえ4次までしか解析的に求められていない。本研究では電荷を帯びたソリトン解を数値的に構成し、その質量を測定し、その結果を用いてBPSに限らずnon-BPSソリトンに対しても適用可能で、かつ高次微分を無限次まで含む有効理論を導出導出する方法を提案した。

#### ② ドメインウォールの有効理論

①で展開された手法をドメインウォールに適用することにより、CP1非線形シグマ模型のドメインウォールとしてこれまで知られていなかったJ-kink解を発見した。またこの有効理論が南部・後藤作用の一般化として表されることを示し、2+1次元の特徴である双対性を利用することでこれがD-braneの有効理論であるBorn-Infeld作用そのものであることを示し、CP1シグマ模型のQ-kinkやJ-kink解が背景磁場や背景電場中に置かれたD-brane

と同定できることを明らかにした。この結果を更に一般の非線形シグマ模型に対しても一般化することに成功し、その場合有効理論が南部後藤作用の関数として表すことができることを示した。この方法は高次の微分項を含む有効理論を求める非常に強力な方法であるだけでなく、ソリトン場を伝播する内部自由度の速度に一般に制限があることを意味している。この制限がどのような物理的意味を持つのか興味深く今後の進展が待たれる。

その他の話題：

#### セミローカルインスタントン

$N_c > N_f$  であるような  $U(N_c)$  超対称QCD理論のヒッグス相において、分数トポロジカル電荷をもつような新しいインスタントン解を発見した。

#### (2) 原子核分野における研究成果

##### スカーミオンとCP(N)ランプの関係：

スカーミオンは中間子に対応するボソン場の有効理論であるカイラル有効作用における位相的ソリトンであり、原子核をソリトンとして取り扱うという点で非常に際立っている。最近、 $U(N)$ カイラル ラグランジアンに非可換モジュライを持つドメインウォール解が発見されたが、本研究ではこのドメインウォール上の低エネルギー有効理論を求め、それがCP(N)非線形シグマ模型であることを明らかにした。さらにこの低エネルギー有効理論においてBPSランプ解を構成し、それが元の理論の立場ではスカーミオンであることを示した。本研究の出発点であるカイラル ラグランジアンにはスカーム項が含まれていないが、ドメインウォール上に閉じ込めることでスカーム項なしで安定なスカーミオンが構成できる可能性を示した。

#### (3) 宇宙分野における研究成果

##### セミローカル宇宙ひもの分極による安定化：

ワインバーグ・サラム理論はトポロジカルに自明なので安定な位相的ソリトンが存在しない。しかしながら、ワインバーグ角が0の極限であるアーベリアン・ヒッグス模型はトポロジカルに自明であるにも関わらず、安定な宇宙ひもが存在できるパラメータ領域があり、セミローカル宇宙ひもと呼ばれている。このセミローカル宇宙ひもはII型模型においては不安定であることが知られているが、本研究において、ヒッグス場のポテンシャルを変更すると、セミローカル宇宙ひもが2つの分数量子をもつ宇宙ひもに分極し、お互いの引力相互作用のために、もともと不安定であったセミローカル宇宙ひもが安定化されることを示した。この分極によるソリトンの安定化は、ボーテックスに限らず様々なソリトンに対しても同様に働く機構であり、ソリトン一般に適用可能な新しい安定化の機構を提案した。

#### (4) 物性分野における研究成果

##### 2成分ボーズ・アインシュタイン凝縮系の分

### 数量子渦のダイナミクスの説明：

多成分ボーズ・アインシュタイン凝縮系には一般に分数量子化された量子渦が存在する。1成分系の渦のダイナミクスはよく知られているが、一方で多成分系の渦のダイナミクスはほとんどわかっていない。そこで冷却原子気体によるボーズ・アインシュタイン凝縮系をよく近似するGross-Pitaevskii方程式を数値的に解くことで、複数の分数量子渦の運動についてシミュレートし、1成分の場合と全く異なる運動が起こることを明らかにした。またこの運動を理解するために点渦近似を利用し、数値計算の結果を再現することを試みたが、点渦近似の計算は運動の極初期段階しか正しく記述できないことが明らかとなった。この理由は今の所明らかでなく、今後のさらなる研究が必要である。

### 分数量子渦によるQCD閉じ込め機構のシミュレーション：

2成分ボーズ・アインシュタイン凝縮系にRabi相互作用を導入すると、その系の分数量子渦の間にドメインウォールが発生し、ちょうどQCDにおけるクォークの閉じ込めに似た状況が発生する。2成分系では2種類の分数量子渦が存在するため、同種の渦と反渦からなるメソンの渦分子と、異種の渦同士からなるバリオンの渦分子が構成され、QCDとの対応がさらに鮮明になる。このメソンの・バリオンの渦分子の閉じ込めについて、分子を通常の安定なものと比較して十分長くした状態を始状態にして、その後の時間変化をGross-Pitaevskii方程式を数値的に解いて明らかにした。渦分子は回転または平行移動するが、長すぎる分子はドメインウォールの途中で渦と反渦を対生成して細かいバリオンのまたはメソンの渦分子を多量に発生して分裂することがわかった。これはハドロン加速器などで発生するジェットの起源と同等であり、構成子である分数量子渦を単体で取り出すことができないことを数値計算で明らかにした。2+1次元では渦と素粒子を入れ替える双対性が存在するが、これを踏まえると、冷却原子気体における量子渦の閉じ込めはQCDのカラーの閉じ込めをシミュレートするのに適当な物性系であることを明らかにした。

### (5) 数理物理分野における研究成果

#### 1+1次元ソリトンの新しいダイナミクス：

sin-Gordon型と二重井戸型の両方の性質を持つ1+1次元スカラー理論においてソリトンのダイナミクスの詳細を数値計算により解析した。このモデルには真空と偽真空が複数存在し、ソリトンの初期速度などに応じて非常に豊富なソリトンの散乱が見て取れた。単純に反発するものや、引力を感じながら散乱するもの、ソリトンの対生成の繰り返しなど興味深い現象を発見した。

### (6) 研究成果の総括と今後の展望

本研究の主目的は「対称性・対称性の自発的

破れ・位相的ソリトン」を主軸として、素粒子・原子核・宇宙・物性・数理物理の各分野を統一的な視点から理解することである。4.研究成果に列挙したように、実際上記の5分野において位相的ソリトンに着目して研究を行うことができた。これらの各項目はそれぞれを独立に研究してきたわけではなく、それぞれの分野で問題提起や問題解決の各段階において、それぞれの研究に基づく経験や結果に大きく影響されあいながら進展してきた。特に目に見える形で異分野を融合することが出来たのは、冷却原子気体による2成分ボーズ・アインシュタイン凝縮系の分数量子渦の閉じ込めと、素粒子分野におけるQCDの長年の問題であるカラーの閉じ込め問題をリンクさせることに成功したことである。クォークを単体で取り出すことは非常に難しく、LHCのような巨大な装置をもってしてやっと核子の中身を覗くことができるが、それに比べて冷却原子気体の実験は規模が小さく容易に行える。必要な数値シミュレーションもまた大したコストが必要ない。現時点においてはQCDの閉じ込め問題の本質に迫るところまでは到達していないが、今後、物性実験で素粒子物理の核心に迫れる可能性が見えたことは非常に大きな成果である。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計16件)

- ① M. Arai, F. Blaschke, M. Eto and N. Sakai, “Localization of the Standard Model via Higgs mechanism and a finite electroweak monopole from non-compact five dimensions”, PTEP、査読有、出版中、2018
- ② M. Arai, F. Blaschke, M. Eto and N. Sakai, “Localized non-Abelian gauge fields in non-compact extra-dimensions”, PTEP、査読有、出版中、2018
- ③ M. Arai, F. Blaschke, M. Eto and N. Sakai, “Non-Abelian Gauge Field Localization on Walls and Geometric Higgs Mechanism”, PTEP、査読有、no.5, 053B01、2017、DOI:10.1093/ptep/ptx047
- ④ M. Arai, F. Blaschke, M. Eto and N. Sakai, “Grand Unified Brane World Scenario”, Phys. Rev., 査読有、D 96, no. 11, 115033、2017、DOI:10.1103/PhysRevD.96.115033
- ⑤ M. Eto and M. Nitta, “Confinement of half-quantized vortices in coherently coupled Bose-Einstein condensates: Simulating quark confinement in a QCD-like theory”, Phys. Rev., 査読有、A 97, no. 2, 023613、2018、DOI:10.1103/PhysRevA.97.023613
- ⑥ M. Arai, F. Blaschke and M. Eto, “BPS boojums in  $N = 2$  supersymmetric gauge theories II”, PTEP、査読有、no.3, 033B08、2017、DOI:10.1093/ptep/ptx007
- ⑦ M. Eto, M. Nitta and K. Sakurai, “Stabilizing semilocal strings by polarization”, JHEP、査読有、1610, 048、2016、DOI:10.1007/



- JHEP10(2016)048
- ⑧ J. Ashcroft, M. Eto, M. Haberichter, M. Nitta and M. B. Paranjape, “Head butting sheep: Kink Collisions in the Presence of False Vacua”, J. Phys., 査読有、A 49, no. 36, 365203, 2016, DOI:10.1088/1751-8113/49/36/365203
- ⑨ M. Arai, F. Blaschke and M. Eto, “BPS boojums in  $N = 2$  supersymmetric gauge theories I”, PTEP, 査読有、no.3,033B07、2017, DOI:10.1093/ptep/ptx005
- ⑩ M. Eto and M. Nitta, “Semilocal Fractional Instantons”, JHEP, 査読有、1603, 067、2016, DOI:10.1007/JHEP03(2016)067
- ⑪ K. Kasamatsu, M. Eto and M. Nitta, “Short-range intervortex interaction and interacting dynamics of half-quantized vortices in two-component Bose-Einstein condensates”, Phys. Rev., 査読有、A 93, no. 1, 013615, 2016, DOI:10.1103/PhysRevA.93.013615
- ⑫ M. Eto and K. Hashimoto, “Speed limit in internal space of domain walls via all-order effective action of moduli motion”, Phys. Rev., 査読有、D 93, no. 6, 065058, 2016, DOI:10.1103/PhysRevD.93.065058
- ⑬ M. Eto, “J-kink domain walls and the DBI action”, JHEP, 査読有、1506, 160, 2015, DOI:10.1007/JHEP06(2015)160
- ⑭ M. Eto and M. Nitta, “Non-Abelian Sine-Gordon Solitons: Correspondence between  $SU(N)$  Skyrmions and  $CP(N-1)$  Lumps”, Phys. Rev., 査読有、D 91, no. 8, 085044、2015, DOI:10.1103/PhysRevD.91.085044
- ⑮ M. Eto and Y. Murakami, “Dyonic non-Abelian vortex strings in supersymmetric and non-supersymmetric theories — tensions and higher derivative corrections”, JHEP, 査読有、1503, 078, 2015, DOI:10.1007/JHEP03(2015)078
- ⑯ M. Arai, F. Blaschke, M. Eto and N. Sakai, “Dynamics of slender monopoles and anti-monopoles in non-Abelian super-conductor”, JHEP, 査読有、1409, 172, 2014, DOI:10.1007/JHEP09(2014)172
- [学会発表] (計20件)
- ① 衛藤稔、2ヒッグスダブルレット模型における非アーベリアン宇宙紐1：かいの構成と性質、日本物理学会第73回年次大会、2018
- ② M. Eto, “Geometric Higgs Mechanism and Soliton World Scenario”, Topological Solitons, Nonperturbative Gauge Dynamics and Confinement, Italy, 2017
- ③ M. Eto, GUT and Brane World on domain walls, Workshop on Solitons, Gauge Fields, and the integrability: Methods and Applications, 2017
- ④ M. Eto, Localization of gauge fields on topological defects, Miami 2017, 2017
- ⑤ 衛藤稔、2成分ボーズ凝縮体を用いた量子色力学のダイナミクスのシミュレーション、日本物理学会第72回年次大会、2017
- ⑥ M. Eto, Confinement of half-quantized vortices in coherently coupled Bose-Einstein condensates: Simulating quark confinement in QCD, Topological Science Workshop 2017, 2017
- ⑦ M. Eto, Topological solitons in dense QCD, Chiral matter 2016, 2016
- ⑧ 衛藤稔、Partons in semilocal vortex, 日本物理学会2016秋季大会、2016
- ⑨ M. Eto, On vortex dynamics in 2 component BECs, Mini Workshop on D-branes, solitons and Bose-Einstein condensation, 2016
- ⑩ M. Eto,  $1/4$  BPS boojums in  $N=2$  supersymmetric gauge theories, Mini Workshop on D-branes, solitons and Bose-Einstein condensation, 2016
- ⑪ M. Eto, Domain walls in nonlinear sigma models and Nambu-Goto/Dirac-Born-Infeld action, Mini Workshop on D-branes, solitons and Bose-Einstein condensation, 2016
- ⑫ M. Eto, Vortex dynamics in 2-component BECs, Topological Science Kick-off Symposium
- ⑬ 衛藤稔、J-kink domain wall and the DBI action, 日本物理学会 秋季大会、2015
- ⑭ 衛藤稔、non-Abelian sine-Gordon solitons: Correspondence between  $SU(N)$  Skyrmions and  $CP(N-1)$  lumps, 日本物理学会 秋季大会、2015
- ⑮ M. Eto, Walzing vortex molecules in two component BECs, Cold Atoms meet High energy physics, 2015
- ⑯ 衛藤稔、BPS solitons in non-BPS solitons, 日本物理学科第70回年次大会、2015
- ⑰ 衛藤稔、Dyonic non-Abelian vortices, これからの弦理論～橋本研closing研究会, 2015
- ⑱ 衛藤稔、Waltzing vortices and vortex lines in two component BECs, トポロジカルソリトン2015, 2015
- ⑲ 衛藤稔、素粒子物理における量子渦と多成分BECの渦輪、物理学会合同シンポジウム 量子渦の物理の最前線、2014
- ⑳ 衛藤稔、素粒子のノンアーベリアン量子渦と多成分BEC系のフラクショナル量子渦、スーパーマターが開く新量子現象、2014

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

衛藤 稔 (ETO, Minoru)  
山形大学・理学部・准教授

研究者番号：50595361