

論文内容要旨 (和文)

令和元年度入学 大学院博士後期課程

地球共生圏科学専攻 物理学分野

氏名 川口 正記

印

論文題目

一般次元におけるドメインウォールネットワーク厳密解の構成及びトポロジカルソリトン上へのゲージ場の局在機構の解明

本論文では標準模型を超える模型の一つであるブレーンワールド模型を扱う。ブレーンワールド模型とは時空を5次元以上の高次元に拡張し、我々の世界である4次元時空を高次元中の4次元膜(3-ブレーン)と捉える物理模型である。従来のブレーンワールド模型は多くの不自然な仮定に基づいて理論が構成されているという問題があるが、トポロジカルソリトンを用いてブレーンワールド模型をダイナミカルに構成することでその問題の大部分が解決する。しかしながらこれまで解決されていない問題も残されていて、その中でも最大の未解決問題は、標準模型に不可欠な素粒子間の相互作用をつかさどる0質量ゲージボゾンのトポロジカルソリトン上への局在機構の解明である。そこで本論文では、トポロジカルソリトン上へのゲージ場の局在の解明、及び高次元ドメインウォールネットワーク厳密解の構成を行う。本論文は全8章からなる。1~4章は主に先行研究のレビューであり、5~7章が新しい結果を含み、第8章が結論である。

第1章では、導入として研究の背景と目的を説明する。

第2章では、まず初めに標準模型の課題を詳しく説明し、その問題を解決するために提案された高次元模型、ブレーンワールド模型などの先行研究をレビューする。その後に、従来の多くのブレーンワールド模型に共通する不自然な仮定に関して問題点を明らかにする。その次に、トポロジカルソリトンを利用することでそれらの不自然な仮定を回避しつつ、ブレーンワールドがダイナミカルに実現できるというアイデアを説明する。最後に、本論文で重要な役割をする自発的対称性の破れを説明する。

第3章では場の理論におけるトポロジカルソリトンの基本事項をまとめて紹介する。トポロジカルソリトンとは自発的対称性の破れからダイナミカルに生成されるトポロジカルな励起状態である。初めにドメインウォールを紹介し、次にボーテックスを紹介する。その後に、トポロジーの観点からボーテックスの分類と安定性を説明する。最後に、平面的なドメインウォールジャンクション厳密解の構成に関する先行研究をレビューする。

第4章ではトポロジカルソリトン上への場の局在機構をレビューする。トポロジカルソリトンを3-ブレーンと同定するためには、トポロジカルソリトン上に標準模型の粒子が局在しなければならない。初めにドメインウォール上へのフェルミオンの局在をレビューする (Jackiw-Rebbi, Phys. Rev. D 13, 1976)。次に0質量ゲージ場のトポロジカルソリトン上への局在が困難である理由を説明し、4次元のトイ模型ではあるがゲージ場のドメインウォール上への局在を実現したDvali-Shifman (DS) 機構をレビューする (Dvali-Shifman, Phys. Lett. B 396, 1997)。続いて6次元においてボーテックス上でブレーンワールドを構成する方法をレビューする (Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali, Phys. Lett. B429, 1998)。その後、DS機構の問題点、すなわち、高次元時空において真空が閉じ込め相になるかどうかに起因する問題点を指摘する。最後に、この問題を解決するために太田・坂井が5次元模型で提案したゲージ結合定数をスカラー場に依存する関数へ一般化する局在機構 (太田・坂井, Prog. Theor. Phys. 124, 2010)、及び新井・衛藤・Blaschke・坂井による一般の次元への拡張 (新井・衛藤・Blaschke・坂井, PTEP 2018. 6, 2018) や、ゲージ結合定数が電荷を持つスカラー場に依存する場合への拡張 (新井・衛藤・Blaschke・坂井, PTEP 2018. 8, 2018) とその

問題点をレビューする。

第5章ではトポロジカルソリトン上でブレーンワールドを実現するために、ゲージ場のトポロジカルソリトン上への局在機構を解明する。太田・坂井や新井・衛藤・Blaschke・坂井による先行研究はゲージ固定やゲージ場の高次元成分の解析が不十分であった。このためトポロジカルソリトン上の有効理論を導くための解析が一部不完全であり、理論模型の有効性を実験で検証する段階に至っていなかった。この問題を解決するために、5次元にこだわらず一般的な時空次元においてゲージ結合定数が場の関数に一般化された模型においてトポロジカルソリトン上への0質量ゲージ場の局在機構を解明する。特にゲージ場の高次元成分の理論解析を大幅に改良し、トポロジカルソリトン上の有効理論を導出するため的一般的かつ系統的な手法を確立する。その後、ゲージ結合定数が電荷を持つスカラー場に依存する場合への拡張も行い、自発的対称性の破れに伴うヒッグス機構とトポロジカルソリトン上へのゲージ場の局在の関係を調べ、この場合に対してもトポロジカルソリトン上の有効理論を導出するための理論的な枠組みを整備する。さらに具体例として6次元におけるトポロジカルソリトンを考え、トポロジカルソリトン上にゲージ場の0質量モードが局在することを示す。

第6章、第7章では一般次元におけるドメインウォールネットワーク厳密解の構成を行う。これまでのブレーンワールド模型に応用してきたトポロジカルソリトンは、複数の平行なドメインウォールやボーテックスといった比較的単純なものだけであった。一般に複数のトポロジカルソリトンはもっと複雑な配位を取り得るが、そのような一般的な配位は5次元以上の時空ではこれまでよく調べられていない。そこでより現実的なブレーンワールド模型を構成することを視野に入れ、高次元時空におけるドメインウォールネットワーク解を構成する。

特に第6章では、D+1次元時空の模型が離散的なD+1次対称群を持つ場合においてD次元的な单一のドメインウォールジャンクションを持つ解析解（厳密解）を構成する。まず初めに非平面的なドメインウォールネットワークが解として含まれると期待できるBogomol'nyi-Prasad-Sommerfield (BPS) 方程式を導出する。得られた方程式の解を構成するために、ある種のスカラーポテンシャルを導入する。これによりBPS方程式が大幅に単純化され、D+1次元時空におけるD次元的なドメインウォールジャンクションの厳密解を構成する。さらに得られた厳密解のトポロジカルな性質を明らかにするため、一般次元のトポロジカルチャージを定義する。ドメインウォールジャンクション解はD次元空間からD次元内部空間（D次元正単体）への写像として理解され、トポロジカルチャージはその写像のトポロジカルな指標を与えていていることを明らかにする。最後にD次元のドメインウォールジャンクション厳密解を可視化するため、D次元正単体を2次元平面に射影したものがコクセター図形となることを見る。

第7章では、6章で考えた模型の場の数を増やし、かつU(1)ゲージ相互作用の強結合極限を取ることで有質量非線形シグマ模型を考え、そこでBPS方程式に含まれる全ての解析解を構成する。つまり全てのモジュライパラメータを特定し、各モジュライパラメータがどのような解に対応しているかを明らかにする。これらの解は一般に複数のドメインウォールジャンクションを含みかつそれらが非平面的に複雑に絡み合ったネットワーク構造を有する。このような複雑なドメインウォールネットワークの厳密解を与えたのはこの仕事が初めてである。最後に具体例として3次元ドメインウォールネットワーク厳密解の性質を詳しく調べる。特にドメインウォールに囲まれた真空泡とそれに対する内部空間の幾何学的構造を比較し、それらが幾何学的双対の関係にあることを示す。

最後に、第8章では第5、6、7章の結果をまとめ本論文の結論とする。

論文内容要旨（英文）

令和元年度入学 大学院博士後期課程

地球共生圈科学専攻 物理学分野

氏名 川口 正記



論文題目 Construction of exact solutions of domain wall networks and localization mechanism of gauge fields on topological solitons in generic dimensions

Brane-world models incorporating topological solitons in higher dimensional spacetime are studied in this thesis. I clarified several long-standing problems common to both the standard braneworld scenarios and the extended braneworld scenarios. Especially, I resolved the problem on localization mechanism of massless/massive gauge fields on various topological solitons in generic higher dimensions.

In section 1, I explained previous developments and unsolved issues on the brane-world scenarios. In section 2, I reviewed models in higher dimensions and spontaneous symmetry breaking. In section 3, I gave a review on topological solitons: domain walls, vortices, and planar domain wall junctions. In section 4, I explained previously known localization mechanisms of fields on topological solitons. Firstly, I described the Jackiw-Rebbi mechanism for fermions. Next, I illustrated a difficulty in localizing massless gauge fields, and reviewed the Dvali-Shifman mechanism (Dvali-Shifman, Phys. Lett. B 396, 1997), Ohta-Sakai (OS) mechanism (Ohta-Sakai, Prog. Theor. Phys. 124, 2010) and its extensions by Arai-Eto-

Blaschke-Sakai (AEBS) (Arai-Eto-Blaschke-Sakai, PTEP 2018. 6, 2018; Arai-Eto-Blaschke-Sakai, PTEP 2018. 8, 2018).

New results are given in sections 5, 6 and 7. In section 5, I studied localization mechanism of gauge fields in order to construct a realistic brane-world model. I improved the previous studies (OS and ABES) and in particular clarified the unresolved problems related to the gauge fixing and treatment of higher-dimensional components of the would-be localized gauge field. Thus, I provided complete and self-contained formulas about localization of massless/massive gauge fields via a field dependent gauge kinetic term. In sections 6 and 7, I obtained all the exact solutions of domain wall junctions and their networks in higher dimensional spacetime. In section 6, I considered a model in D+1 dimensional spacetime with the symmetric group of degree D+1. I derived Bogomol'nyi-Prasad-Sommerfield equations, and obtained the analytic solutions of the D dimensional nonplanar domain wall junction. In addition, I found new topological charges. In section 7, I extended the model studied in section 6 to a massive nonlinear sigma model. I constructed all the exact solutions of the domain wall networks in D+1 dimensional spacetime. I identified all the moduli parameters and clarified properties of the solutions. This result is the first to give exact solutions of nonplanar domain wall networks. In section 8, I closed the thesis by summarizing the new results shown in sections 5, 6 and 7.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和4年 2月 7日

理 工 学 研 究 科 長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 衛藤 稔 印
副査 新井 真人 印
副査 奥間 智弘 印
副査 印
副査 印

学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	専攻・分野名 地球共生圈科学専攻・物理学分野 氏名 川口 正記		
論文題目	一般次元におけるドメインウォールネットワーク厳密解の構成及びトポロジカルソリトン上へのゲージ場の局在機構の解明		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	令和4年1月19日～令和4年2月4日
論文公聴会	令和4年 2月 4日	場所	Zoom (オンライン)
最終試験結果	合格	最終試験年月日	令和4年 2月 4日

学位論文の審査結果の要旨 (1,000字程度)

本学位論文では標準模型を超える物理模型として特に時空次元が5次元以上である余剰次元模型に焦点を絞り、トポロジカルソリトンによるブレーンワールド模型に関して次の2つの問題に取り組み独自の結果を得ている。第1のテーマはソリトンによるブレーンワールドの最大の課題であるゲージ場の局在機構の解明、第2のテーマはブレーンワールド模型における3ブレーンの多様性を明らかにすべく、高次元時空中の最も一般的なトポロジカルソリトンの解析解(厳密解)を構成することである。この2テーマは密接に関連していて共に新規性が認められる。

第1章では研究の背景と目的が明確に述べられている。第2・3・4章では余剰次元模型・トポロジカルソリトン・ソリトン上への場の局在機構について先行研究の結果と問題点が明確に説明されている。第5章は第1のテーマに関する研究内容と結果が詳細に述べられている。主な結果は、 R_g ゲージ固定法の一般化によるソリトン背景での高次元ゲージ場の質量スペクトルを特定する理論的枠組みを完成させたこと、模型の詳細によらず4次元のゲージ場のみが厳密に0質量で局在することの証明を与えたこと、ヒッグス機構とゲージ場の局在機構が両立することを示したこと、の3点である。いずれも数学的手法を巧みに駆使した独自の手法による成果であり、ゲージ場の局在に関する長年の未解決問題を解決した点を特に高く評価した。第6・7章は第2のテーマに関する研究である。第6章では任意次元において新しいBogomol'nyi-Prasad-Sommerfield方程式の導出に成功し、一般次元におけるドメインウォールジャンクションの解析解の構成法が示され、更に新しいトポロジカル不变量による解析解の位相的性質を明らかにした。第7章では第6章を更に発展させ、任意の次元においてドメインウォールジャンクションのネットワーク構造を有する全ての解析解の構成法を確立している。これらの結果は長いトポロジカルソリトンの研究の歴史の中で全く新しい発見であり、その独自性・新規性を非常に高く評価した。第8章では本学位論文の結論が明確に述べられている。

上記のように、本論文では専門的知識を基に研究背景・目的が簡潔に述べられていて、テーマ・手法・研究結果に十分な新規性と独自性が認められ、その学術的価値を高く評価した。記述は論理的であり構成は適切かつ体裁も整っている。以上のことから本論文は学位論文の審査基準を十分に満たしていると判断し、審査委員全員一致で合格と判定した。

本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。

最終試験の結果の要旨

最終試験は学位論文の内容について口頭発表を約1時間30分行い、その後、学位論文の内容および当該分野に関連する内容について口頭試問を約40分間行なった。口頭発表では研究の背景・動機、研究結果の独自性・新規性・物理的意義・考察が明確に発表された。また、口頭試問においても多角的な質問に対して論理的かつ明瞭に答えることができた。以上から、博士の学位を授与するのに十分な専門知識と研究遂行能力を有していることが確認できたため、審査員全員一致で合格と判定した。