

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 17 日現在

機関番号：32652

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2012

課題番号：21540279

研究課題名（和文） ソリトンの非摂動効果と標準模型を超える統一理論

研究課題名（英文） Nonperturbative effects due to solitons  
and unified theories beyond the Standard Model

研究代表者

坂井 典佑 (SAKAI NORISUKE)

東京女子大学・現代教養学部・教授

研究者番号：80108448

研究成果の概要（和文）：ソリトン，特にポーテックスのモジュライ空間の理解は大きく進展した．非アーベルポーテックスの有効理論を具体的に得ることができたので，力学の考察に進むことができる．新たな手法として，位相的場の理論の方法を取り入れ，局所化の手続きでモジュライ空間の重要な側面であるモジュライ空間の体積をポーテックスに適用することに成功した．

研究成果の概要（英文）：We have made progress to understand moduli space of solitons, especially vortices. We obtained an effective theory of non-Abelian vortices, which allows us to examine dynamical aspects. We have also introduced a new method of localization procedure to obtain volume of moduli space of vortices.

### 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子(理論)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) CERNのLHC加速器が稼動を開始し始めて、標準模型を超える物理現象を発見することへの期待が高まっていた。この時期に、超対称模型や余剰次元模型など、標準模型を超える統一理論の有力な模型の予言を精査することが大きな課題であった。

(2) 超対称模型は摂動論的に模型を構成できる点で堅実な模型であるが、理解がもっとも不十分な点は、超対称性の破れである。この点を解決するためには、非摂動効果を理解することが不可欠である。現在までに知られている非摂動効果の機構では、場の方程式の古典解、すなわ

ちインスタントンを初めとするソリトンが中心的役割を果たしている。

- (3) 余剰次元模型は我々の 4 次元時間空間は高次元時空の中の部分空間、すなわちブレーンであると考え、この模型は重力まで説明できる可能性があるが、ブレーンの安定性、標準模型粒子のブレーンへの局在などの基本的な課題が十分理解されていない。ブレーンを構成するために、場の方程式の解としてソリトンを求める必要がある。その上で、有効理論が現実的な模型になっているかを検討しなければならない。
- (4) 超対称性、余剰次元模型に共通する課題であるソリトンの力学的な役割を理解するためには、ソリトン解の解空間の全体的構造を理解することが最初に重要になる。

## 2. 研究の目的

- (1) 標準模型を超える素粒子統一理論の構築のために、場の理論及び弦理論での非摂動効果を検討する。特に、非摂動効果に重要な役割を果たすソリトン解の解空間の全体的構造と、その力学を解明することが本研究の第一の目的である。
- (2) さらに、超対称模型と余剰次元模型を取り上げて、超対称性の破れや、ゲージ対称性の破れの理解を進めることが第二の目的である。
- (3) 非摂動効果の理解が進展した段階で、最終的にその機構を応用して、具体的な模型の提案に応用することが第三の目標である。

## 3. 研究の方法

- (1) 非アーベル的対称性を持つソリトン  
真空中に縮退がある場合には、一般にソリトン解が大域的対称性を持つようになり、しばしば内部空間中でのソリトンの向きを表すモジュライが生じて、それらが非アーベル的対称性を持った構造となる。この場合を詳しく研究することで、このようなソリトン上の有効理論と、その対称性を理解する。
- (2) ソリトン解の物理的内容の解析  
ヒッグス相では、我々の提案したモジュライ行列の方法が最も有効な解析手法となっている。ソリトン解のすべての情報がモジュ

ライ行列に含まれている。しかし、真空が縮退している場合や、いくつかの種類のソリトンが共存する複合ソリトン系の場合には、モジュライ行列のさまざまな形が物理的にどのような状況を与えているのかを、詳しく考察する必要がある。

### (3) ソリトンと D ブレーンの関係

場の理論ではソリトンが、また弦理論では D ブレーンが、非摂動効果の中心的役割を担っている。今まで場の理論のソリトンと D ブレーンとの類似点はある程度知られていたが、D ブレーンの特徴であるブレーンが互いに離れたとき生じる「幾何学的ヒッグス機構」はソリトンでは見つかっていなかった。この機構がソリトンにも生じ得るかどうかを詳しく吟味する。

### (4) 現象論的模型への応用

余剰次元模型では、標準模型の粒子はブレーン上に局在すると仮定するが、ゲージ粒子だけは、ブレーン上への局在を場の理論で実現することが困難であった。もっとも簡単なブレーンの例として、ドメイン・ウォールを取り上げ、その上に非アーベルゲージ理論を局在させる機構を考える。さらにその機構に基づいて、現実的な模型を目指す。

## 4. 研究成果

### (1) 非アーベル対称性を持つソリトン

ヒッグス相で真空が縮退した場合を考え、非アーベル対称性を持つソリトン解を構成した。特に、超対称性電荷を 8 個持つゲージ理論で、超対称性を部分的に保存するソリトン解を取り上げた。このようなソリトンを BPS ソリトンと呼ぶ。真空中に縮退がある場合には、ソリトンが非アーベル対称性を持つために、ソリトン上の低エネルギー有効理論にも非アーベル的対称性が現れる。ドメイン・ウォールの系で詳しい解析を行い、弦理論における D ブレーンとの対比を行った。「幾何学的ヒッグス機構」を場の理論のソリトンにおいて初めて実現することができた。

### (2) 複合ソリトン

ポータックスとドメイン・ウォールが共存するような場合には、磁気単極子も許される。このような複合ソリトン系の有効理論を構築し、何が有効理論の力学変数として可能になるかを明らかにした。また、得られた有効理論を用いて、ソリトンの散乱などの力学的考察を行い、一般にどのような力学系が生じるかを明らかにした。

### (3) 双曲面上のポータックス

双曲面上のアーベル型ポータックスは，厳密解を得ることができる可積分系であることが知られている．新しい次元簡約の手法を工夫することによって，双曲面上の非アーベル・ポータックス解を得ることに成功した．これは平坦面上の非アーベル・ポータックスと双曲面上のアーベル型ポータックスを拡張したものになっており，可積分系であると考えられる．

(4) 非アーベル・ポータックスの力学

ゆっくりと運動するポータックスの間に働く力は，モジュライ空間の計量を求めることで決定できる．これをモジュライ近似と呼ぶ．非アーベル・ポータックスが十分に離れた場合に，低エネルギー有効理論を具体的に決定した．これを用いて，モジュライ近似での非アーベル・ポータックスの散乱を考察した．

(5) 非アーベルゲージ場の局在

ゲージ結合がスカラー場に依存する模型を構成して，ドメイン・ウォール上に非アーベルゲージ理論を局在させる機構を提案した．この機構は次元に依らずに適用可能である．5次元ゲージ理論に適用することで，我々の4次元時空を説明できる模型を作ることができた．具体的には超対称理論でドメイン・ウォール解を構成し，その機構が働いていることを示した．さらにゲージ群の非自明な表現に属する物質場を導入することにも成功し，物質場とゲージ場が相互作用する有効理論を具体的に求めた．

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 11 件)

- (1) Masato Arai, Filip Blaschke, Minoru Eto and Norisuke Sakai, Matter Fields and Non-Abelian Gauge Fields Localized on Walls, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2013, 013B05-1-37 (2013), 査読有, DOI:10.1093/ptep/pts052
- (2) Masato Arai, Filip Blaschke, Minoru Eto and Norisuke Sakai, Localization of matter fields and non-Abelian gauge fields on domain walls, Journal of Physics Conf. Ser. 411, 012001-1-11 (2013), 査読有, DOI:10.1088/1742-6596/411/1/012001
- (3) Akiko Miyake, Kazutoshi Ohta and Norisuke Sakai, Moduli space volume of vortex and localization, Journal of Physics Conf. Ser. 343, 012107-1-10 (2012), 査読有, DOI:10.1088/1742-6596/343/1/012107
- (4) Akiko Miyake, Kazutoshi Ohta and Norisuke Sakai, Higher Derivative Corrections to Non-Abelian Vortex Effective Theory, Progress of Theoretical Physics 128, 67-103 (2012), 査読有, DOI: 10.1143/PTP.128.67
- (5) Minoru Eto, Toshiaki Fujimori, Muneto Nitta, Keisuke Ohashi and Norisuke Sakai, Volume of Moduli Space of Vortex Equations and Localization, Progress of Theoretical Physics 126, 637-680 (2012), 査読有, DOI: 10.1143/PTP.126.637
- (6) Minoru Eto, Toshiaki Fujimori, Muneto Nitta, Keisuke Ohashi and Norisuke Sakai, Dynamics of Non-Abelian Vortices, Physical Review D84 125030-1-23 (2011), 査読有, DOI:10.1103/PhysRevD.84.125030
- (7) Kazutoshi Ohta and Norisuke Sakai, Non-Abelian Gauge Field Localized on Walls with Four-Dimensional World Volume, Progress of Theoretical Physics 124, 71-93 (2010), 査読有, DOI :10.1143/PTP.124.71
- (8) Toshiaki Fujimori, Giacomo Marmorini, Muneto Nitta, Keisuke Ohashi and Norisuke Sakai, The Moduli Space Metric for Well-Separated Non-Abelian Vortices, Physical Review D82 065005-1-17 (2010), 査読有, DOI:10.1103/PhysRevD.82.065005
- (9) Nicholas S. Manton and Norisuke Sakai, Maximally Non-Abelian Vortices from Self-dual Yang-Mills Fields, Physics Letters B 687, 395-399 (2010), 査読有, DOI:10.1016/j.physletb.2010.03.017
- (10) Minoru Eto, Toshiaki Fujimori, Takayuki Nagashima, Muneto Nitta, Keisuke Ohashi and Norisuke Sakai, Domain walls with non-Abelian orientational moduli, Journal of Physics: Conf. Ser. 222, 12006-1-10 (2010), 査読有,

DOI:10.1088/1742-6596/222/1/012006

- (11) Minoru Eto, Toshiaki Fujimori, Takayuki Nagashima, Muneto Nitta, Keisuke Ohashi and Norisuke Sakai, Multiple Layer Structure of Non-Abelian Vortex, Physics Letters B678, 254-258 (2009), 査読有, DOI:10.1016/j.physletb.2009.05.061

〔学会発表〕(計 4 件)

- (1) 坂井典佑, Moduli space volume of vortex and localization, 7th International Conference on Quantum Theory and Symmetries (QTS7), 2011 年 8 月 8 日, プラハ(チェコ)
- (2) 坂井典佑, Volume of Moduli Space of Vortex Equations and Localization, Continuous Advances in QCD 2011, 2011 年 5 月 12 日, ミネアポリス(アメリカ合衆国)
- (3) 坂井典佑, Maximally Non-Abelian Vortices from Self-dual Yang-Mills Fields, International Conference SUSY 2010, 2010 年 8 月 23 日, ボン(ドイツ)
- (4) 坂井典佑, Domain walls with non-Abelian orientational moduli, the First Mediterranean Conference on Classical and Quantum Gravity, 2009 年 9 月 14 日, コリンバリ(ギリシャ)

## 6 . 研究組織

- (1) 研究代表者  
坂井 典佑 (SAKAI NORISUKE)  
東京女子大学・現代教養学部・教授  
研究者番号 : 8 0 1 0 8 4 4 8
- (2) 研究分担者  
なし
- (3) 連携研究者  
太田和俊 (OHTA KAZUTOSHI)  
明治学院大学・法学部・准教授  
研究者番号 : 8 0 4 4 2 9 3 7