

令和元年6月20日現在

機関番号：38005

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17711

研究課題名(和文) 超弦理論における標準模型の導出 ブレーンの構造と素粒子の対称性

研究課題名(英文) Derivation of Standard Model in String Theory --- Structure of Branes and Symmetry of Particles ---

研究代表者

船井 正太郎(柴) (Funai (Shiba), Shotaro)

沖縄科学技術大学院大学・物理生物学ユニット・研究員

研究者番号：40724993

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：超弦理論は素粒子の相互作用をすべて記述できる、究極の理論だと考えられている。しかし、高次元時空で記述されるため、我々が認識できる4次元時空との関係を明らかにする必要がある。私は、超弦理論のブレーンと呼ばれる重要な物体に注目し、ブレーンが4次元時空をどのように創れるか、そして素粒子の相互作用をどのように創れるかを、詳しく議論した。先行研究では、例えば、前者は明らかだが後者は不明確(またはその逆)であった。本研究において、私は両者の議論を直接的に繋ぐ方法を提案し、超弦理論から素粒子の性質を導出する新しいアプローチを確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超弦理論は、自然界を形作る素粒子の相互作用をすべて記述できる、優れた理論だと考えられている。ところが、10次元以上の高次元時空で表現される理論であるため、私たちが認識している4次元時空と、どのように関係しているかを理解することが重要である。そうすれば、私たちはより深い世界観を手にできる可能性がある。私は本研究を通して、超弦理論(特にM理論)に登場するブレーンと呼ばれる物体と、素粒子の相互作用が宇宙の初めに持っていた性質(例外群)が、どのように関係し得るかを表現することに成功した。これによって、高次元時空の中でどのように4次元時空が創られたかについて、より理解を深めることができた。

研究成果の概要(英文)：String theory is known as a unified theory that can describe all the interactions among the elementary particles. However, this theory is defined in high dimensional spacetime, then we need to clarify its relation to four dimensions that we can recognize. I especially focus on the branes (important objects in string theory), and discuss in detail how they can make four dimensional spacetime and a property of the interactions among the particles. In the previous researches, for example, the former is trivial but the latter is not clear (or vice versa). In this research, I proposed a way to connect both discussions directly, and established a new approach to derive the property of particles from string theory.

研究分野：超弦理論

キーワード：超弦理論 ブレーン 対称性 M理論 F理論 標準模型 繰り込み群 機械学習

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

自然界は、素粒子が4種類の相互作用をすることで形作られていると考えられている。すなわち、重力、電磁気力、弱い力、強い力の4種類である。重力は一般相対性理論、その他は量子場理論（標準模型）で記述できることがわかっている。

これら一般相対性理論と標準模型を融合し、4種類すべての相互作用を記述し得る理論として注目されているのが、超弦理論である。

ただ、超弦理論は10次元以上の高次元時空で定義されており、我々が認識している4次元時空との関係が明らかにならなければ、自然界を記述する理論としては認められない。ところが、その関係については研究者によって様々に見解が分かれるところであった。

1995年ころから、超弦理論の非摂動的な側面（特に弦が強く相互作用する場合）が明らかになってきたことで、そうした側面がもつ豊かな数学的構造が知られるようになった。そこで、そうした性質を活かして、超弦理論と4次元世界との関係を繋ぐ（標準模型を導出する）研究が2010年ころから再び注目を集めるようになってきた。

超弦理論を非摂動的に記述する方法として、M理論とF理論がよく知られている。そして、M理論から標準模型、F理論から標準模型を導出するような研究も既にいくつかなされていたが、各々に長所と短所があり、いずれのアプローチも決定打に欠けていた。

### 2. 研究の目的

前節のような状況において、私はM理論とF理論、双方のアプローチの長所と短所を整理し、それぞれの長所を活かすような新しいアプローチを見つけたいと考えようになった。

M理論の長所は、単純さである。超弦理論には一般に、様々な時空の次元に広がった物体であるブレーンというものが何種類も登場し、特にダイナミクスを考える際には重要な役割を果たす。ところが、M理論にはブレーンが2種類しかなく、理論の全体像が掴みやすいのである。また、ブレーンを使って簡単に4次元時空を作れる点も長所と言えるだろう。短所は、標準模型を導出する上で重要と考えられている、例外群をブレーンで作ることが難しい点である。

一方、F理論の長所は、ブレーンを用いて例外群が簡単に作れることである。短所は、ブレーンを用いて4次元時空を作ることがなかなか難しい点である。また、F理論の全体像がまだよく理解されていないことも短所として挙げられる。

従って、M理論においては例外群が自然に現れるような定式化を確立すること。また、F理論においては、ブレーンのダイナミクスについての理解を深め、4次元時空が自然に現れるような定式化を提案すること。さらに可能ならば、両者を繋ぐような（包含するような）アプローチを考案すること。以上を、本研究の目的として掲げた。

### 3. 研究の方法

(1) M理論からのアプローチで問題になるのは、例外群との関係が不明確な点であった。そこで私は、M理論を定式化する際に例外群を用いる方法として、E<sub>11</sub>群と呼ばれる無限次元のリー群を用いた定式化が提案されていたことに着目した（文献①）。

私はそのE<sub>11</sub>群の定式化に基づいて、M理論のブレーンやそのダイナミクスを記述することを目指した。そうすれば、ブレーンを用いて4次元時空が簡単に作れるというM理論の長所を保持しながら、例外群との関係がわかりにくいという短所を改善することができると考えた。それによって、超弦理論と標準模型を結びつける、より良いアプローチが提案できるはずだと考えた。

(2) F理論からのアプローチで問題になるのは、ブレーンを用いて4次元時空を作るのが難しい点であった。ただ、そもそもF理論は全体像があまり理解されておらず、ブレーンがもつ性質についてもよくわかっていなかった。

ブレーンのダイナミクスについて、あまり理論の詳細によらずに一般的に解析できる方法として、私はp-soup模型という独自の手法を提案していた（引用文献②）。これは、ブレーン同士が比較的強く相互作用し、ダイナミクスが複雑になる場合に、その熱力学的な性質を簡単に見積もる方法である。

私は、この独自の手法を用いて、F理論のブレーンがもつ性質を明らかにできると考えた。また、同じ手法を用いてM理論のブレーンを解析することは既に出来ていたもので、その結果とF理論のブレーンを比較することにより、両者の関係を明らかにできるとも考えた。こうした解析を通して、F理論のブレーンが4次元時空を作る場合について議論することが可能になり、やはり超弦理論と標準模型を自然に結びつけるアプローチが提案できると想定した。

### 4. 研究成果

(1) M理論からのアプローチに関しては、本研究の目的を十分に達成できたと考えている。

E<sub>11</sub>群を用いた定式化は、先行研究においてはnonlinear realizationと呼ばれる、かなり間接的な表現になっていた。そこで私は、共同研究者である菅原寛孝氏と共に、カレント代数の手法を導入することによって、より直接的にダイナミクスが見られるようにした。

その結果、M理論に登場する自由度、特にブレーンの自由度を、E<sub>11</sub>群の定式化と結びつ

けることができ、それによって M 理論のブレーンと例外群である E<sub>11</sub> 群との関係を明らかにすることができた (発表論文 3)。

引き続き、このカレント代数を用いた E<sub>11</sub> 群の定式化に基づいて、宇宙初期に 4 次元時空で起こった現象 (特にインフレーションと呼ばれる加速膨張) がどのように記述されるか、その際にブレーンのダイナミクスがどのように影響したのかについて、議論を深めているところである。

(2) F 理論からのアプローチに関しては、未だ研究途中ではあるが、本研究目的を達成するに向けて一定以上の進展があったと考えている。

まず私は一般的に (F 理論に限らず)、時間依存性を持つブレーンが複数集まった系のダイナミクスに注目した。そして、独自の手法である p-soup 模型を用いて、そうした系の熱力学的な性質を議論することにより、各々のブレーンが相互作用する様子を明らかにすることができた。こうした時間依存性を持つブレーンの系は、様々な様子で膨張・収縮する 4 次元時空を創ることができる (宇宙初期のインフレーションも含まれる)。そのような 4 次元時空を創るためには、高次元時空においてどのようにブレーンが振る舞えば良いのかについても、議論することができた (発表論文 4)。

F 理論のブレーンについては、ブレーンを超重力理論の解として捉えると、一部の (ディラトンの) 結合定数に虚数が現れることが知られており、物理的な描像を掴むのが難しいと考えられている。私は、そうした現象に今までとは異なる解釈を与えることで問題を回避し、やはり p-soup 模型を用いて、ブレーンの系の熱力学的な性質を議論することができた。今後も研究を続けて、近いうちに発表する予定である。

(3) 以上の研究を進める中で、標準模型において重要な役割を果たす繰り込み群 (系のエネルギーが変わると、素粒子の相互作用の強さが変化する現象) について、たびたび考察を深める機会を得た。そして、最近注目を集めている機械学習との関係を議論することができた。

具体的には、イジング模型のスピン配位を白黒画像として表したものを機械学習させることで、機械学習の特徴抽出と、繰り込み群の関係について議論を行った (発表論文 2)。また、熱力学的な視点を入れることで、その関係について詳しく議論することもできた (発表論文 1)。

さらに、サイズの小さなスピン配位を考えることで解析的な計算を行い、その解析結果と機械学習の結果を比較することで、繰り込み群との関係についてより具体的に理解を深めることもできている。今後もこの研究を続けていく予定である。

<引用文献>

- ① Peter C. West, “E(11) and M theory”, *Class. Quant. Grav.* **18** (2001) 4443-4460.
- ② Takeshi Morita, [Shotaro Shiba](#), Toby Wiseman, Benjamin Withers, “Warm p-soup and near extremal black holes”, *Class. Quant. Grav.* **31** (2014) 085001.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

1. [Shotaro Shiba Funai](#), Dimitrios Giataganas, “Thermodynamics and Feature Extraction by Machine Learning”, arXiv, 査読無, 1810.08179 [cond-mat.stat-mech], 2018,
2. Satoshi Iso, [Shotaro Shiba](#), Sumito Yokoo, “Scale-invariant Feature Extraction of Neural Network and Renormalization Group Flow”, *Phys. Rev.*, 査読有, E97, 2018, 053304  
DOI: 10.1103/PhysRevE.97.053304
3. [Shotaro Shiba](#), Hirotaka Sugawara, “M2- and M5-branes in E11 Current Algebra Formulation of M-theory”, *Int. J. Mod. Phys.*, 査読有, A33, 2018, no.07, 1850051  
DOI: 10.1142/S0217751X18500513
4. [Shotaro Shiba](#), “Microstates of black holes in expanding universe from interacting branes”, *JHEP*, 査読有, 05, 2017, 079  
DOI: 10.1007/JHEP05(2017)079

[学会発表] (計 11 件)

1. [船井 正太郎](#), “機械学習による特徴抽出と繰り込み群や熱力学との関係”, 日本物理学会年次大会 (シンポジウム講演) (招待講演), 2019 年.
2. [Shotaro Shiba Funai](#), “Renormalization, Thermodynamics, and Feature Extraction of Machine Learning”, Nagoya Workshop on Physics and Mathematics of Discrete Geometries

(名古屋大学) (招待講演) (国際学会), 2018 年.

3. 船井正太郎, 磯暁、横尾純斗, “平面図形の深層学習と複数の固定点をもつ繰り込み群との関係 II”, 日本物理学会秋季大会, 2018 年.

4. 船井正太郎, “機械学習と繰り込み群の関係”, Deep Learning and Physics 2018 (大阪大学) (招待講演), 2018 年.

5. Shotaro Shiba, “M-branes in E<sub>11</sub> current algebra formulation of M-theory”, Sugawara Symposium on Fundamental Problems in Theoretical Physics (招待講演) (国際学会), 2018 年.

6. 柴 正太郎, 磯暁、横尾純斗, “イジング模型を用いた機械学習と繰り込み群の関係 I”, 日本物理学会秋季大会, 2017 年.

7. 柴 正太郎, “M-brane dynamics from E<sub>11</sub> current algebra”, 日本物理学会年次大会, 2017 年.

8. Shotaro Shiba, “M-branes in E<sub>11</sub> current algebra”, Workshop on String and M-theory in Okinawa (国際学会), 2017 年.

9. Shotaro Shiba, “On microstates of blackholes from time-dependent brane systems”, KEK Theory Workshop 2016 (国際学会), 2016 年.

10. 柴 正太郎, “Analysis of time-dependent black brane systems as interacting branes”, 日本物理学会秋季大会, 2016 年.

11. Shotaro Shiba, “Thermodynamics of black branes as interacting branes”, East Asian Joint Workshop on Fields and Strings (招待講演) (国際学会), 2016 年.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※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、研究者個人に帰属されます。