

平成 22 年 5 月 26 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004～2009

課題番号：16081206

研究課題名（和文）超弦理論のコンパクト化に基づく標準模型へのアプローチ

研究課題名（英文）Approach to Standard Model based on Superstring Compactifications

研究代表者

江口 徹 (EGUCHI TOHRU)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：20151970

研究成果の概要（和文）：素粒子統一模型の構築に対し重要な役割を果たす超弦理論の様々なカラビヤウ空間へのコンパクト化やフラックス背景上のブレーンに対し系統的な研究を行った。主に世界面上の共形場理論や超対称ゲージ理論に基づく解析を通し、超弦理論の数理的構造やフラックスが与える低エネルギー有効理論への非摂動的効果等に関し、様々な興味深い知見を得た。

研究成果の概要（英文）：We have made systematic studies on the superstring compactifications on various Calabi-Yau manifolds and the branes on flux backgrounds, which plays important roles in construction of the unified model of elementary particles. We have gained various significant insights about the mathematical structure of string theory and non-perturbative aspects of low-energy effective theories caused by the flux, mainly through our approaches by conformal field theories on string worldsheet, and also analysis of supersymmetric gauge theories.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	1,900,000	0	1,900,000
2005年度	3,500,000	0	3,500,000
2006年度	2,900,000	0	2,900,000
2007年度	2,900,000	0	2,900,000
2008年度	2,500,000	0	2,500,000
2009年度	2,700,000	0	2,700,000
総計	16,400,000	0	16,400,000

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）、超弦理論、超対称性、ゲージ理論、D-ブレーン、共形場理論

## 1. 研究開始当初の背景

超弦理論のコンパクト化に基づく素粒子の統一模型を構築する上で、カラビヤウ空間に基づくフラックス真空の重要性が強く認識されるに至っており、同時にフラックス背

景上のブレーンの動力学の研究の重要性が認識されていた。性質のよいフラックス真空はモジュライ空間において特異カラビヤウ空間の近傍に集中的に存在することが知られており、特異カラビヤウ空間における弦理

論の挙動の解析が重要であると考えられた。

## 2. 研究の目的

超弦理論、M理論の4次元へのコンパクト化及びブレーンの動力学の研究が主要な目的である。世界面上の共形場理論の手法に基づく(特異)カラビヤウ空間上の超弦理論や、フラックス背景上のブレーンの動力学の詳細な解析を通し、超弦理論のコンパクト化による素粒子統一模型の構築について重要な知見を得ることを目指す。

## 3. 研究の方法

研究の方法としては、主に江口と菅原が超弦理論の世界面上の共形場理論に基づく超弦理論のコンパクト化の研究を担当した。また、伊藤が超対称ゲージ理論の解析を通して、フラックス背景上のブレーンの動力学の研究を担当し、本計画研究において互いに補完的な役割を果たした。江口は更に本計画研究と関連の深いフラックス真空のモジュライ空間上の分布の解析や、近年注目されているゲージ理論と2次元の共形場理論の新しい双対性に関して行列模型を用いた研究を行った。

## 4. 研究成果

(1) 超弦理論において素粒子模型として有望な超対称フラックス真空は、モジュライ空間上において特異カラビ・ヤウ空間の近傍に多く分布することが知られており、更に世界面上の共形場理論の観点からも特異カラビ・ヤウ空間上の超弦理論は重要性を持つ。江口と菅原は  $N=2$  超対称リュービル理論を用いた非コンパクトカラビ・ヤウ多様体上の超弦理論に関する系統的な研究を行った。D-ブレーン・スペクトラム、及び開弦のウィッテン指数についての詳細な解析を行い、物理的および幾何的解釈に対する考察を行った。更に江口は  $N=4$  の超共形代数の指標に関し、mock theta 関数の手法を用いて組織的な解析を行った。この方法を用いる事により高い次元のハイパーケーラー多様体やカラビヤウ多様体の楕円種数の詳細な解析が可能となり、楕円種数に含まれる無限個の有質量表現の展開係数を決定した。

(2) 江口は、フラックス真空の特異点付近の分布を調べ、フラックス真空は特異点付近に集中するため分布関数は発散するが、それを積分したものは有限にとどまること(特異点付近の真空の数は有限である)を示した。

更に特異  $K3$  ファイバーを持つカラビヤウ空間上のコンパクト化において、重力が decouple する極限について詳細に解析し、「弱重力予想」として知られる興味深いエネルギースケールが実際に現れることを示した。

(3) 江口はまた、Alday, Gaiotto, 立川によって提唱された4次元  $N=2$  共形不変ゲージ理論と2次元リュービル理論の関係について調べ、この関係を説明するため提唱された行列模型が  $N=2$  理論のサイバークワイクテン解を正しく再現する証拠を導いた。

(4) 伊藤は、フラックスのあるDブレーン系に対し、ブレーン上の超対称Yang-Mills理論の非摂動効果に関する一連の研究を行い、超対称時空上の「非反可換性」に関する興味深い知見を得た。更にインスタント有効作用へのR-R形式場の効果を弦理論の散乱振幅から計算し、 $N=2$ 理論における $\Omega$ 背景場を $N=4$ に拡張した背景場中のYang-Mills理論から得られたインスタント有効作用と同等になることを見いだした。また、AdS/CFT対応を用いて、強結合領域における $N=4$ 超対称Yang-Mills理論におけるグルーオン散乱振幅をAdS空間内の極小曲面を数値的に評価することにより計算し、ゲージ理論の摂動計算との詳細な比較を行った。

(5) 菅原は T-双対性やミラー双対性変換によるオービフォルド化を含むような非幾何学的背景上の弦理論を世界面上の共形場理論を用いて研究し、モジュラー不変性や境界状態による D ブレーンのスペクトルについて解析した。

## 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 39 件)

以下すべて査読有

① T. Eguchi and K. Maruyoshi, “Penner Type Matrix Model and Seiberg-Witten Theory,” JHEP 1002, 022 (2010).

② T. Eguchi and K. Hikami, “Superconformal Algebras and Mock Theta Functions,” J. Phys. A 42, 304010 (2009).

- ③ K. Ito, H. Nakajima and S. Sasaki ,  
 “Instanton Calculus in R-R 3-form  
 background and Deformed N =2 Super  
 Yang-Mills Theory”, JHEP 0812 (2008)  
 113.
- ④ S. Dobashi, K. Ito and K. Iwasaki,  
 “A Numerical Study of Gluon Scattering  
 Amplitudes in N=4 Super Yang-Mills  
 Theory at Strong Coupling”, JHEP0807  
 (2008) 088.
- ⑤ S. Kawai and Y. Sugawara,  
 “Mirrorfolds with K3 Fibrations,”  
 JHEP 0802, 065 (2008).
- ⑥ T. Eguchi and Y. Tachikawa,  
 “Rigid Limit in N=2 Supergravity and  
 Weak-Gravity Conjecture,” JHEP 0708,  
 068 (2007).
- ⑦ T. Eguchi, Y. Sugawara and A. Taormina,  
 “Liouville field, modular forms and  
 elliptic genera,” JHEP 0703, 119  
 (2007).
- ⑧ K. Ito and S. Sasaki,  
 “Non(anti)commutative N=2  
 Supersymmetric Gauge Theory from  
 Superstrings in Graviphoton  
 Background”, JHEP 0611 (2006) 004.
- ⑨ T. Eguchi and Y. Tachikawa,  
 “Distribution of flux vacua around  
 singular points in Calabi-Yau moduli  
 space,” JHEP 0601, 100 (2006).
- ⑩ T. Eguchi and Y. Sugawara,  
 “Conifold type singularities, N = 2  
 Liouville and SL(2, R)/U(1) theories,”  
 JHEP 0501, 027 (2005).
- ⑪ D. Ghoshal and T. Kawano,  
 “Towards p-adic string in constant  
 B-field,” Nucl. Phys. B 710, 577  
 (2005).

[学会発表] (計 58 件)

- ① T. Eguchi,  
 “Penner Type Matrix Model and  
 Seiberg-Witten Theory”, 国際会議  
 “Komaba2010 Recent Developments in  
 Strings and Fields”, 2010/2/13-14, 東  
 京大学.

- ② K. Ito,  
 “(Discretized) Minimal Surface in AdS”,  
 国際会議 “Komaba 2010 Recent  
 Developments in Strings and Fields”,  
 2/14, 2010, 東京大学.
- ③ T. Eguchi,  
 “Decoupling Limit in String Theory and  
 the Mass Hierarchies”, IHES 50 周年記  
 念事業 6/17-20, 2008, パリ, フランス.
- ④ T. Eguchi,  
 “Superconformal Algebra and Mock Theta  
 Function”, DESY 研究会 “Applied sigma  
 model”, 11/10-11/14, 2008, DESY  
 Hamburg, Germany.
- ⑤ 伊藤克司,  
 「AdS/CFT 対応とグルーオン散乱振幅計算  
 の最近の進展について」  
 日本物理学会, 特別講演, 3/24, 2008, 近  
 畿大学, 東大阪市.
- ⑥ T. Eguchi,  
 “Geometric Engineering Limit and  
 Weak-Gravity Conjecture”,  
 大阪市大研究会 “International  
 Conference on Progress of String Theory  
 and Quantum Field Theory”, 12/7-12/9,  
 2007, 大阪市立大学.
- ⑦ K. Ito,  
 “Comments on gluon 6-point amplitudes  
 of N=4 SYM at strong coupling”,  
 Progress of String Theory and Quantum  
 Field Theory, 12/8, 2007, 大阪市立大  
 学.
- ⑧ T. Eguchi,  
 “Liouville Field, Modular Forms and  
 Elliptic Genera,” Exploration of New  
 Structures and Natural  
 Constructions in Mathematical  
 Physics, 3, 2007, U. Nagoya, Nagoya,  
 Japan.
- ⑨ Y. Sugawara,  
 “Recent Progress in Superstrings on  
 Non-compact Calabi-Yau Manifolds,”  
 “International Workshop on  
 Non-commutativity in Strings, Gravity  
 and Field Theory”, 11, 2006, Tokyo  
 Metropolitan Univ.

- ⑩ T.Eguchi,  
 "Distribution of string vacua in type IIB string theory", Strings2006, 6/19-6/24, 2006, Beijing, China.
- ⑪ T.Eguchi,  
 "String Landscape", Discoveries of Higgs and Supersymmetry to Pioneer Particle Physics in the 21st Century, 11/24-11/25, 2005, 東京大学.
- ⑫ T.Eguchi,  
 "Distribution of Vacua around Singular Points in Calabi-Yau Moduli Space," Cosmological Landscape, Strings, Gravity and Inflation, 9/20-9/24, 2005, KIAS, Korea.
- ⑬ Y.Sugawara,  
 "D-branes Falling into 2-dimensional Black-Hole and Closed String Radiation," International Conference PASCOS-05, 5/30-6/4, 2005, Hote Hyundai Gyeongju, Gyeongju, Korea.
- ⑭ T.Eguchi,  
 "Geometry of  $N = 2$  Liouville Theory," Ecole Normale Superieure, 3/2, 2005, Paris, France.
- ⑮ T.Eguchi,  
 "Modular Bootstrap of Boundary  $N = 2$  Liouville Theory," strings 2004, 6/27-7/2, 2004, College de France, Paris, France.

菅原 祐二 (SUGAWARA YUJI)  
 立命館大学・総合理工学院理工学部・准教授  
 研究者番号：70291333  
 (H18→H19：研究分担者，H20→H21：連携研究者)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

江口 徹 (EGUCHI TOHRU)  
 京都大学・基礎物理学研究所・教授  
 研究者番号：20151970

### (2) 研究分担者

川野 輝彦 (KAWANO TERUHIKO)  
 東京大学・大学院理学系研究科・助教  
 研究者番号：20292831  
 (H16→H17)

### (3) 連携研究者

伊藤 克司 (ITO KATSUSHI)  
 東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号：60221769  
 (H16→H19：研究分担者，H20→H21：連携研究者)