

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17679

研究課題名（和文）超弦理論の非摂動的定式化についての研究

研究課題名（英文）Nonperturbative Formulation of Superstring Theory

研究代表者

伊敷 吾郎 (Ishiki, Goro)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：50710761

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、量子重力理論の候補として期待されている弦理論の完全な定式化（非摂動的定式化）の候補として、ゲージ/重力対応と行列模型という二つのアプローチを研究した。研究の結果、ゲージ/重力対応に関しては、ゲージ理論を用いた弦理論のブラックホールの記述についての新しい知見が得られた。また行列模型の研究では、行列模型を使った弦理論の物体（M5ブレーン）の記述法が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重力も含んだ全ての相互作用を記述できる素粒子の理論を確立することは素粒子理論分野の最も大きな目標の一つですが、超弦理論はそのような理論の候補として期待されています。本研究では超弦理論の完全な（非摂動的）定式化の方法を探り、ゲージ/重力対応や行列模型を使って、これまで考えられていなかった超弦理論の様々な側面が記述できることを示しました。この結果は、これらが確かに超弦理論の定式化を与えている事の強い証拠を与えています。

研究成果の概要（英文）：In this research, we study the gauge/gravity correspondence and the matrix model, both of which are conjectured to give a nonperturbative formulation of superstring theory. We found a new relation between blackholes in the string theory and the corresponding gauge theory. We also found a new formulation of some objects in the string theory (M5-branes) in terms of the matrix model.

研究分野：素粒子理論

キーワード：弦理論 行列模型 ゲージ/重力対応

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子の間に働く四つの相互作用(重力・電磁気力・弱い力・強い力)を統一的に記述する理論を構築することは、素粒子物理学の最も大きな目標の一つである。特に重力の量子論的記述はまだ完成しておらず、従来の枠組み(場の理論)において重力を記述しようとするとう散が取り除けない(繰り込み不可能である)という問題が生じる。この困難を回避し、重力を量子論的に記述する試みとして、超弦理論が提案された。この理論では、背景時空が平坦な場合には、その時空の周りの重力場の揺らぎを量子的に取り扱うことが可能である。しかし、超弦理論の一般的な背景時空における定式化や、非摂動的な定式化はまだ得られていない。

そのような超弦理論の定式化の候補として、行列模型が知られている。この模型は行列幾何という新たな幾何の枠組みに基づいた超弦理論の定式化を与えていると期待されている。しかしながら、重力理論において一般的に用いられるリーマン幾何と、行列模型に現れる行列幾何の関係はいくつかの特別な場合を除いて理解されておらず、これが行列模型を重力の理論として理解する上で一番の障害であった。行列模型が本当に重力の量子論となっているかを検証するためには、既存の幾何学の言葉であるリーマン幾何学と、行列幾何学との関係をまず明らかにする必要がある。

ところで、超弦理論の非摂動的定式化のもう一つのアプローチとしてゲージ/重力対応と呼ばれる対応関係に基づくものがある。ゲージ/重力対応とは、重力の理論である超弦理論が、一見重力を含まないゲージ理論によって等価に記述されるという予想である。この予想が本当であれば、例えば格子理論を用いて非摂動的に定義されるゲージ理論によって、超弦理論の非摂動的定式化を与えることができる。そのためこの対応関係を証明することは、超弦理論分野における最も重要な課題の一つであると言える。この対応を示すためにはゲージ理論の強結合領域を解析する必要があり、数値計算などの非摂動的な解析方法が必要となる。

## 2. 研究の目的

本研究は上記の超弦理論の二つの定式化法の有効性を検証することである。具体的な研究目的は以下のとおりである。

### (1) 行列模型における幾何学と微分幾何学の関係の理解

これまでの先行研究により、行列模型の離散的構造から、弦や膜等を表す連続的な多様体を定義できることが分かっている。行列模型においてどのような行列を与えたときに、対応する多様体がどのような構造(複素構造・リーマン構造等)を持つのかという、行列の配位と多様体とのさらなる詳細な関係を理解する。また行列から得られる多様体の性質を分類する。

### (2) 行列模型における超弦理論の物体(弦や膜等)の記述の理解

上記(1)によって得られる幾何学の関係を使って、行列模型で実現される行列の配位(古典解等)と、超弦理論やM理論における弦や膜といった物体の間関係を理解する。特にM理論にはM5ブレーンと呼ばれる、その記述がまだ明らかでない物体が存在し、このような物体に対する行列の配位を行列模型において同定する。

### (3) ゲージ/重力対応の数値的検証

これまでの先行研究でゲージ/重力対応の数値的研究が行われてきたが、本研究ではさらに広いパラメータ領域において、ゲージ/重力対応の数値検証を行う。特に、超弦理論側の解析結果と直接検証できる低温領域において、ゲージ理論の物理量を計算し超弦理論と比較

を行う。比較対象としては、内部エネルギー等の熱力学量、及び、場の相関関数を考える。  
また、(1),(2)の研究によって得られた超弦理論の幾何を与える物理量をゲージ理論にも導入し数値的に計算することで、超弦理論の幾何が内包されているかを検証する。

### 3 . 研究の方法

上記の(1),(2),(3)について、以下のように研究を行った。

(1): 私は以前の研究において行列模型における行列の配位を、幾何学的に解釈する新しい方法を提唱している。この方法は量子力学のコヒーレント状態に着想を得たもので、これを用いると行列の配位という離散的な情報から、弦や膜の連続的な幾何の情報を構成できることが分かっている。本研究ではこの方法を用いて、行列の配位と、弦や膜の持つ幾何構造（リーマン構造やシンプレクティック構造、複素構造等）の間の関係を調べた。

(2): 本研究では、行列模型に局所化と呼ばれる方法を適用して解析を行った。局所化とは理論をより簡単な有限次元の積分に帰着させる方法である。この方法で得られた有限次元の積分を評価することで、行列模型の持つ幾何学的構造を調べた。

(3): ゲージ/重力対応の文脈で比較的良好に調べられている BFSS 模型と呼ばれるゲージ理論を考えた。この模型の大規模な数値計算を行うことで、対応が成り立つ極限における物理量の値を数値的に計算した。特に、弦理論のブラックホールに対応すると考えられているゲージ理論の束縛状態の内部エネルギーを計算し、対応するブラックホールのもものと比較することで、対応の成否を検証する。

### 4 . 研究成果

本研究では(1),(2),(3)のそれぞれの研究について、以下の結果を得た。

(1): 与えられた行列の配位から、対応する幾何におけるリーマン構造、シンプレクティック構造、複素構造、ポアソン構造といった様々な幾何構造を計算する手法を与えた。（例えば計量は行列の作用する空間における情報計量として計算できる。）この結果、与えられた行列の配位から、対応する多様体だけでなく、その上の幾何構造を構成できるようになった。またさらに、特別な交換関係を満たす行列の配位はケーラー構造を持つ多様体に対応することを示した。

一方、私が以前提唱した行列幾何の定式化の物理的・数学的意味も理解することができた。物理においてこの定式化は、弦理論のタキオン凝縮と呼ばれる現象において自然に現れる事が分かった。またこの定式化が数学における Berezin-Toeplitz 量子化と密接に関連することも分かっている。

(2): BMN 行列模型と呼ばれる模型は、M 理論と呼ばれる 11 次元の重力理論に対応すると予想されている。本研究では、この行列模型が M 理論における M5-brane という物体を記述していることを局所化の手法に基づき初めて証明した。この問題は、ゲージ/重力対応を提唱した Maldacena 氏が 15 年以上前に[J. Maldacena, M. M. Sheikh-Jabbari, M. Van Raamsdonk, JHEP 0301, 038 (2003)]において提唱している予想であり、本研究の結果はこの予想を解決している。

(3): 本研究で取り扱うブラックホールのエネルギーは、低温領域で  $7.41 T^{2.4}$  と振る舞うことが

弦理論からの計算結果として知られている。ここで  $T$  は温度である。本研究で、対応するゲージ理論の数値計算を行った結果、この 7.41 という比例定数をゲージ理論側から再現することに初めて成功した。また、 $T$  の冪である  $T^4$  も適当なフィット関数を仮定することで再現できることを示した。以上の結果はゲージ/重力対応が有限温度領域でも成立していることの強い証拠を与えている。本研究ではさらに、弦の結合定数の補正や、補正が入った場合の対応についても同様の検証を行い、対応と矛盾しない結果が得られている。

また最近の研究では、超弦理論における不安定ブラックホールが、ゲージ理論における部分的閉じ込め ( $SU(N)$  のうち、 $SU(M)$ ,  $M < N$  が閉じ込めでその他が非閉じ込めとなるような状態) に対応していることを提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 9件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 M. Hanada, G. Ishiki, H. Watanabe	4. 巻 PoS(LATTICE2019)
2. 論文標題 Partial deconfinement in gauge theories	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ishiki Goro, Matsumoto Takaki	4. 巻 2020
2. 論文標題 Diffeomorphisms on the fuzzy sphere	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 013B04
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptz151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Asakawa, G. Ishiki, T. Matsumoto, S. Matsuura and H. Muraki	4. 巻 no. 6
2. 論文標題 Commutative Geometry for Non-commutative D-branes by Tachyon Condensation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 063B04
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/pty062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 G. Ishiki, T. Matsumoto and H. Muraki	4. 巻 98, no. 2
2. 論文標題 Information metric, Berry connection and Berezin-Toeplitz quantization for matrix geometry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 26002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.98.026002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Hanada, G. Ishiki and H. Watanabe	4. 巻 1903
2. 論文標題 Partial Deconfinement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2019)145	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuhma Asano, Goro Ishiki, Shinji Shimasaki, Seiji Terashima	4. 巻 D96
2. 論文標題 Spherical transverse M5-branes in matrix theory	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 126003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.126003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuhma Asano, Goro Ishiki, Shinji Shimasaki, Seiji Terashima	4. 巻 1802
2. 論文標題 Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2018)076	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuhma Asano, Goro Ishiki, Shinji Shimasaki	4. 巻 A32
2. 論文標題 Emergent Geometries from Strong Coupling Gauge Theories	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Internaitonal Journal of Modern Physics A	6. 最初と最後の頁 308-311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/9789813231467_0040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Evan Berkowitz, Enrico Rinaldi, Masanori Hanada, Goro Ishiki, Shinji Shimasaki, Pavlos Vranas.	4. 巻 D94 no.9
2. 論文標題 Precision lattice test of the gauge/gravity duality at large-N	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 94501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.094501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Goro Ishiki, Takaki Matsumoto, Hisayoshi Muraki.	4. 巻 1608
2. 論文標題 Kahler structure in the commutative limit of matrix geometry	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2016)042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masanori Hanada, Yoshifumi Hyakutake, Goro Ishiki, Jun Nishimura.	4. 巻 D94 no.8
2. 論文標題 Numerical tests of the gauge/gravity duality conjecture for D0-branes at finite temperature and finite N	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 86010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.086010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Goro Ishiki
2. 発表標題 Black holes and holography
3. 学会等名 CCS International Symposium 2019, "11th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences," (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Goro Ishiki
2. 発表標題 Partial Deconfinement
3. 学会等名 XQCD 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊敷吾郎
2. 発表標題 行列の幾何とBerezin-Toeplitz量子化
3. 学会等名 東京理科大学研究会「ポアソン幾何とその周辺」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Goro Ishiki
2. 発表標題 The gauge/gravity correspondence for the BFSS matrix model
3. 学会等名 International workshop "Quantum Gravity meets Lattice QFT (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Goro Ishiki
2. 発表標題 Diffeomorphisms for fuzzy spaces
3. 学会等名 International workshop "Matrix Models for Noncommutative Geometry and String Theory," (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Goro Ishiki
2. 発表標題 Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model
3. 学会等名 IPMU Focus Week on Quantum Gravity and Holography (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Goro Ishiki
2. 発表標題 Matrix geometry and string theory
3. 学会等名 Noncommutative Geometry and K-theory at Rits -The Fourth China-Japan Conference- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Goro Ishiki
2. 発表標題 Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model
3. 学会等名 Nonperturbative and Numerical Approaches to Quantum Gravity, String Theory and Holography, ICTS, Tata institute (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Goro Ishiki
2. 発表標題 Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model
3. 学会等名 APCTP workshop "Discrete Approaches to the Dynamics of Fields and Space-Time," (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Goro Ishiki
2. 発表標題 Spherical transverse fivebranes from the plane wave matrix model
3. 学会等名 Workshop on String and M-theory in Okinawa (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Goro Ishiki
2. 発表標題 Spherical transverse fivebranes from the plane wave matrix model
3. 学会等名 6th Bangkok workshop on high-energy theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Goro Ishiki
2. 発表標題 Matrix Geometry and Kahler Structure
3. 学会等名 NORDITA conference in Stockholm, "Aspects of Membrane Dynamics" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

筑波大学数理物質系素粒子理論 伊敷吾郎のHP  
<http://www-het.ph.tsukuba.ac.jp/~ishiki/index.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----