

## 解析および数値的手法による超弦の行列模型の研究

|       |   |
|-------|---|
| メタデータ | 言語: ja<br>出版者:<br>公開日: 2024-03-19<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: 土屋, 麻人<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="http://hdl.handle.net/10297/0002000336">http://hdl.handle.net/10297/0002000336</a>       |

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03614

研究課題名（和文）解析および数値的手法による超弦の行列模型の研究

研究課題名（英文）Studies of the matrix model for superstring theory by analytical and numerical methods

研究代表者

土屋 麻人 (Tsuchiya, Asato)

静岡大学・理学部・教授

研究者番号：20294150

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）：球面を微小変形して得られる回転楕円面について、コヒーレント状態法とBerezin-Toeplitz量子化の間に対応があることを見出した。また、ゲージ重力対応において、双対重力理論を持つ場の量子論とそれに摂動をかけて得られる理論を考え、これら2つの理論の基底状態の間の距離を測る量子情報計量を、バルクにおいて元の場の量子論に対応する時空へのバックリアクションで表す公式を発見した。IIB行列模型において赤外のカットオフとして質量項を導入し、フェルミオンの自由度を落として得られる模型の数値シミュレーションを実行したところ、1+1次元の膨張する時空が創発することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

回転楕円面についての結果は、一般的な多様体についてコヒーレント状態法とBerezin-Toeplitz量子化の間に対応を見出すための第一歩となる。ゲージ重力対応において量子情報計量について発見した公式は、摂動の種類に依らない普遍的なものである。ここからIIB行列模型における時空の創発を量子情報の観点から理解する研究が発展することが期待される。IIB行列模型に関する数値シミュレーションの結果から、IIB行列模型に赤外のカットオフとしてローレンツ対称な質量項を導入し、行列サイズを大きくする極限をとり、質量パラメータをゼロにする極限をとると、3+1次元の膨張する宇宙の創発が見られることが期待される。

研究成果の概要（英文）：We showed that there is a correspondence between the coherent state method and the Berezin-Toeplitz quantization for ellipsoid which is obtained by deforming sphere infinitesimally. In the context of the gauge/gravity correspondence, we considered a quantum field theory that has a dual gravitational theory and a theory that is obtained by perturbing the original theory, and found a formula that represents the quantum information metric that measures the distance between the ground state of those two theories in terms of the back reaction to the bulk geometry corresponding to the original field theory. We simulated numerically a model that is obtained by introducing a Lorentz-invariant mass term in the IIB matrix model and dropping the fermionic degrees of freedom of the model. It turned out that (1+1)-dimensional expanding space-time emerges in the model.

研究分野：素粒子論

キーワード：超弦理論 IIB行列模型 時空の創発 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

「我々の宇宙はなぜ  $3+1$  次元なのか」、「宇宙はどのように創成し、ホットビッグバンに至ったか」といった問いは、量子重力を含む統一理論によって答えられるべきである。超弦理論はそのような理論の最有力候補であるが、超弦理論は現在のところ摂動論でしか定義されておらず、摂動論的に(準)安定な真空は無数に存在し、また宇宙の始まりにおいて摂動論は無力である。したがって、これらの問いに答えるためには、超弦理論の非摂動論的定式化を構築し、その非摂動ダイナミクスを理解する必要がある、行列模型はそのような定式化を与えると期待されている。

### 2. 研究の目的

1996年に研究代表者と Ishibashi-Kawai-Kitazawa によって提唱された IIB 行列模型は超弦理論の非摂動論的定式化を与えると期待されている。この模型においては、時空はアприオリには存在せず、行列の自由度よりダイナミカルに創発する。このため、上記の問いに答えるために適したものであると考えられる。本研究課題では、この模型について以下の2つの研究を推進する。1つ目は、この模型における曲がった時空の記述の仕方を明らかにすることにより、超弦理論のさまざまな摂動論的に安定な真空がどのように実現されるかを明らかにし、背景時空に依らない超弦理論の非摂動論的定式化を完成させることを目指す。2つ目は、IIB 行列模型の数値シミュレーションを実行することにより、この模型から創発する時空の性質を明らかにする。これらの2つの研究を基に、上記の問いに答えるための知見を得る。

### 3. 研究の方法

1つ目の研究については、与えられた行列から幾何を得る方法であるコヒーレント状態法と与えられた幾何から対応する行列配位を得る方法である Berezin-Toeplitz 量子化の間の関係を研究する。球面など対称性が高い空間については対応が見つかることが知られていたが、一般の多様体においては対応があるかどうかはわかっていなかった。また、ゲージ重力対応におけるバルク時空の創発の機構を明らかにすることを目指した研究を行い、そこから行列模型における曲がった時空の記述の仕方についての知見を得る。2つ目の研究については、「京」や「富岳」をはじめとするスーパーコンピュータを用いた並列計算による大規模シミュレーションを推進する。IIB 行列模型のシミュレーションには符号問題が存在するが、これを複素ランジュバン法によって克服する。

### 4. 研究成果

1つ目の研究については、一般の多様体についてコヒーレント状態法と Berezin-Toeplitz 量子化の間の関係を明らかにするための第一歩として、球面を微小変形して得られる回転楕円面についてそれらの間に対応があることを見出した。この結果を基に、現在は一般の多様体に対する対応について研究を進めている。また、ゲージ重力対応において、双対重力理論を持つ場の量子論とそれに摂動をかけて得られる理論を考え、これら2つの理論の基底状態の間の距離を測る量子情報計量を、バルクにおいて元の場の量子論に対応する時空へのバックリアクションで表す公式を発見した。この公式は摂動の種類に依らない普遍的なもので、バルク時空の創発機構の解明に大きな進展を与えると期待される。さらにここでの研究が、研究代表者とその共同研究者によるパブリック幾何における標的空間エンタングルメントエントロピーの研究と、相互作用がある理論に対する cMERA の構築に向けた波動汎関数に対する厳密くりこみ群方程式の導出の研究につながった。これらの研究で得た知見を基に、今後 IIB 行列模型においても時空の創発を量子情報の観点から理解する研究が発展することが期待される。

2つ目の研究については、これまでの IIB 行列模型の数値シミュレーションにおいては、符号問題を避けるための近似が用いられていたが、これが原因で創発している時空が特異的になっていることが判明した。ここでは、この近似は用いなくて、複素ランジュバン法により符号問題を克服する。まずは、複素ランジュバン法は常に適用可能ではないが、IIB 行列模型については適用可能な方法であることを示した。そのうえで、赤外のカットオフを入れないと、IIB 行列模型はそのユークリッド型模型と等価になっていることを見出した。ユークリッド型模型では3次元時空が創発することが知られている。ここで、以下に述べる古典解の解析を動機として、赤外のカットオフとしてローレンツ対称な質量項を導入した。また、まずは簡単のため、フェルミオンの自由度を落として得られるボゾニック模型を考えた。そして、この模型のシミュレーションを実行したところ、 $1+1$ 次元の特異性のない膨張する時空が創発することがわかった。この結果とフェルミオンの自由度がもたらすパフィアの性質を考慮すると、元の模型で行列のサイズを大きくする極限をとり、質量パラメータをゼロにする極限をとることにより、 $3+1$ 次元の膨張宇宙の創発が見られることが期待される。関連して、宇宙の始まりから十分時間が経過した後には、古典解が支配的になることが期待されるが、ローレンツ対称な質量項を導入した IIB 行列模型の古典運動方程式を数値的に解き、確かに膨張する  $3+1$ 次元宇宙を表し、余剰次元の構造から  $3+1$ 次元においてフェルミオンゼロモードを与える解があることがわかった。余剰次元の

構造からフェルミオンのゼロモードが得られることを示した研究は以前にもあったが、そこでは余剰次元を表す行列配位は手で与えられていたのに対し、ここでは古典運動方程式の解として得られたことに意義がある。

これら 2 つの研究で得られた知見を基に、今後は IIB 行列模型を超弦理論の非摂動論的定式化として完成させ、同時に IIB 行列模型の大規模数値シミュレーションを推進することにより 3+1 次元の膨張宇宙がこの模型から創発することを確立したい。さらに、フェルミオンゼロモードの研究で得た知見を基に、標準模型を行列模型から導出することが長期的な目標である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 14件）

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Tsuchiya Asato, Yamashiro Kazushi   | 4. 巻<br>824          |
| 2. 論文標題<br>A geometrical representation of the quantum information metric in the gauge/gravity correspondence                               | 5. 発行年<br>2022年      |
| 3. 雑誌名<br>Physics Letters B   | 6. 最初と最後の頁<br>136830 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.physletb.2021.136830  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-            |
| 1. 著者名<br>Hatakeyama Kohta, Matsumoto Akira, Nishimura Jun, Tsuchiya Asato, Yosprakob Atis  | 4. 巻<br>2020, 4      |
| 2. 論文標題<br>The emergence of expanding space-time and intersecting D-branes from classical solutions in the Lorentzian type IIB matrix model | 5. 発行年<br>2020年      |
| 3. 雑誌名<br>Progress of Theoretical and Experimental Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>043B10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/ptep/ptaa042  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-            |
| 1. 著者名<br>Tsuchiya Asato, Yamashiro Kazushi   | 4. 巻<br>2020, 06     |
| 2. 論文標題<br>Information geometry encoded in bulk geometry  | 5. 発行年<br>2020年      |
| 3. 雑誌名<br>Journal of High Energy Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>107    |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/JHEP06(2020)107   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-            |
| 1. 著者名<br>Tsuchiya Asato  | 4. 巻<br>376          |
| 2. 論文標題<br>How information geometry is encoded in bulk geometry   | 5. 発行年<br>2020年      |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of Science  | 6. 最初と最後の頁<br>179    |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.22323/1.376.0179   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-            |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Matsumoto Masami, Tanaka Gota, Tsuchiya Asato         | 4. 巻<br>2021, 2      |
| 2. 論文標題<br>The renormalization group and the diffusion equation | 5. 発行年<br>2020年      |
| 3. 雑誌名<br>Progress of Theoretical and Experimental Physics      | 6. 最初と最後の頁<br>023B02 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/ptep/ptaa175                | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)                          | 国際共著<br>-            |

|  |                  |
|--|------------------|
| 1. 著者名<br>Nishimura Jun, Tsuchiya Asato  | 4. 巻<br>2019     |
| 2. 論文標題<br>Complex Langevin analysis of the space-time structure in the Lorentzian type IIB matrix model | 5. 発行年<br>2019年  |
| 3. 雑誌名<br>Journal of High Energy Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>77 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/JHEP06(2019)077  | 査読の有無<br>有       |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-        |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Aoki Toshihiro, Hirasawa Mitsuaki, Ito Yuta, Nishimura Jun, Tsuchiya Asato                   | 4. 巻<br>2019         |
| 2. 論文標題<br>On the structure of the emergent 3D expanding space in the Lorentzian type IIB matrix model | 5. 発行年<br>2019年      |
| 3. 雑誌名<br>Progress of Theoretical and Experimental Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>093B03 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/ptep/ptz092  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-            |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Matsuura Kaho, Tsuchiya Asato                    | 4. 巻<br>2020         |
| 2. 論文標題<br>Matrix geometry for ellipsoids                  | 5. 発行年<br>2020年      |
| 3. 雑誌名<br>Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁<br>033B05 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/ptep/ptz171            | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)                     | 国際共著<br>-            |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>Hatakeyama Kohta, Tsuchiya Asato, Yamashiro Kazushi | 4. 巻<br>2018       |
| 2. 論文標題<br>Renormalization on the fuzzy sphere                | 5. 発行年<br>2018年    |
| 3. 雑誌名<br>Progress of Theoretical and Experimental Physics    | 6. 最初と最後の頁<br>1~15 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/ptep/pty064               | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)                        | 国際共著<br>-          |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Hatakeyama Kohta, Tsuchiya Asato  | 4. 巻<br>782           |
| 2. 論文標題<br>Equivalence of large- N gauge theories on a group manifold and its coset space | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>Physics Letters B   | 6. 最初と最後の頁<br>503~509 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.physletb.2018.05.065                                | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-             |

|  |                   |
|--|-------------------|
| 1. 著者名<br>Hirasawa Mitsuaki, Anagnostopoulos Konstantinos, Azuma Takehiro, Hatakeyama Kohta, Nishimura Jun, Papadoudis Stratos, Tsuchiya Asato | 4. 巻<br>430       |
| 2. 論文標題<br>The emergence of expanding space-time in a novel large- $N$ limit of the Lorentzian type IIB matrix model                           | 5. 発行年<br>2023年   |
| 3. 雑誌名<br>Proceeding of Science  | 6. 最初と最後の頁<br>371 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.22323/1.430.0371  | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>該当する      |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>K. Hatakeyama, K. Anagnostopoulos, T. Azuma, M. Hirasawa, Y. Ito, J. Nishimura, S. Papadoudis and A. Tsuchiya | 4. 巻<br>2022       |
| 2. 論文標題<br>Complex Langevin studies of the emergent space-time in the type IIB matrix model                             | 5. 発行年<br>2022年    |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the East Asia Joint Symposium on Fields and Strings 2021                                       | 6. 最初と最後の頁<br>9-18 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1142/9789811261633¥_0002   | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>該当する       |

|  |                   |
|--|-------------------|
| 1. 著者名<br>Hatakeyama Kohta, Anagnostopoulos Konstantinos, Azuma Takehiro, Hirasawa Mitsuaki, Ito Yuta, Nishimura Jun, Papadoudis Stratos, Tsuchiya Asato | 4. 巻<br>396       |
| 2. 論文標題<br>Relationship between the Euclidean and Lorentzian versions of the type IIB matrix model   | 5. 発行年<br>2022年   |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of Science   | 6. 最初と最後の頁<br>341 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.22323/1.396.0341  | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>該当する      |

|  |                   |
|--|-------------------|
| 1. 著者名<br>Hirasawa Mitsuaki, Anagnostopoulos Konstantinos, Azuma Takehiro, Hatakeyama Kohta, Ito Yuta, Nishimura Jun, Papadoudis Stratos, Tsuchiya Asato | 4. 巻<br>396       |
| 2. 論文標題<br>A new phase in the Lorentzian type IIB matrix model and the emergence of continuous space-time  | 5. 発行年<br>2022年   |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of Science   | 6. 最初と最後の頁<br>428 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.22323/1.396.0428  | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>該当する      |

[学会発表] 計10件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 8件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>土屋麻人  |
| 2. 発表標題<br>Target space entanglement in the matrix model for bubbling geometry   |
| 3. 学会等名<br>Corfu Summer Institute 2021 "School and Workshops on Elementary Particle Physics and Gravity" (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>土屋麻人   |
| 2. 発表標題<br>How information geometry is encoded in bulk geometry                 |
| 3. 学会等名<br>Workshop on Quantum Geometry, Field Theory and Gravity (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |



|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>土屋麻人                               |
| 2. 発表標題<br>ゲージ重力対応における情報幾何とバルク幾何              |
| 3. 学会等名<br>離散的手法による場と時空の ダイナミクス研究会2019 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>土屋麻人  |
| 2. 発表標題<br>How information geometry is encoded in bulk geometry              |
| 3. 学会等名<br>East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>土屋麻人  |
| 2. 発表標題<br>Emergence of chiral zero modes in the Lorentzian type IIB matrix model              |
| 3. 学会等名<br>Workshop: Matrix Models for Noncommutative Geometry and String Theory (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>土屋麻人   |
| 2. 発表標題<br>Emergence of chiral zero modes in the Lorentzian type IIB matrix model |
| 3. 学会等名<br>East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2018 (招待講演) (国際学会)      |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>土屋麻人  |
| 2. 発表標題<br>Space-time Structure in the type IIB matrix model |
| 3. 学会等名<br>Space Time Matrices (招待講演) (国際学会)                 |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>土屋麻人  |
| 2. 発表標題<br>Emergence of chiral zero modes in the type IIB matrix model |
| 3. 学会等名<br>中部夏の学校2018  |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>土屋麻人   |
| 2. 発表標題<br>The emergence of expanding space-time in the type IIB matrix model |
| 3. 学会等名<br>East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2022 (招待講演) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>土屋麻人   |
| 2. 発表標題<br>Emergence of (3+1)-dimensional expanding space-time in the type IIB matrix model |
| 3. 学会等名<br>2022 NTU-Kyoto high energy physics workshop (招待講演) (国際学会)                        |
| 4. 発表年<br>2022年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

土屋素粒子論研究室  
<https://wpp.shizuoka.ac.jp/tsuchiya/>

6. 研究組織

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |  |  |  |
|---------|---------|--|--|--|
| ギリシャ    | アテネ工科大学 |  |  |  |