

令和元年6月20日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05051

研究課題名（和文）超弦理論における時空の可積分構造とカオス

研究課題名（英文）Chaos and Integrable Structure of Space-Time in String Theory

研究代表者

吉田 健太郎（Yoshida, Kentaroh）

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：30544928

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：弦理論において、弦は様々な時空の上を運動することができる。よって、いろいろな弦の古典的な運動を考えることが可能であり、その運動は時空によっては可積分である場合もあれば、非可積分であってカオス的、あるいは乱流的な振る舞いを示すこともある。本研究課題では弦の古典的な運動に着目し、可積分性・非可積分性の観点から時空の構造について研究を行い、Yang-Baxter変形と呼ばれる系統的な手法について確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

弦の古典的な運動が可積分になる背景時空には反ドジッター(AdS)時空が含まれている。弦理論では、このAdS時空上の弦理論と共形場理論(CFT)の間の双対性が知られており、その研究において可積分性は重要な役割を果たす。本研究課題の成果であるYang-Baxter変形の手法により、この可積分性を保持したままAdS時空を変形することが可能になったため、可積分性に立脚した計算技術を用いて解析できる双対性の具体例を無数に構築できた。また、非可積分な時空においても、弦のカオス的な運動から示唆される、双対的なゲージ理論における物理についても理解を深めることができた。

研究成果の概要（英文）：In string theory, strings can move on various spacetime. Therefore, it is possible to consider the classical motion of various strings, and the motion may be integrable in some space-time, or it may be non-integrable and exhibit chaotic or turbulent behavior. In this research subject, we focused on the classical motion of strings, studied the structure of space-time from the viewpoint of integrability and non-integrability, and established a systematic method called Yang-Baxter deformation.

研究分野：素粒子論

キーワード：超弦理論 可積分性 カオス 乱流

## 1. 研究開始当初の背景

超弦理論における重要な研究課題の一つは、ゲージ・重力(弦)対応と呼ばれるゲージ理論と重力(弦)理論の双対性である。最も典型的な例は、Anti-de Sitter (AdS)空間上の超弦理論と共形場理論(CFT)の等価性であるAdS/CFT対応である。この場合には共形対称性という高い対称性が存在するため、種々の物理量が厳密に計算できる。しかし、このAdS/CFT対応においてさえも、その本質的な機構は未だ理解されておらず、その説明は基礎的な問題として残されていた。この状況は現在も未だ変わらない。

近年、欧州の研究グループの貢献により、AdS/CFT対応の背後にある可積分構造が発見された。可積分性は非常に強力な性質であり、大きな研究成果をもたらしている。そして、このAdS/CFT対応の可積分性を契機として、一般のゲージ・重力(弦)対応においても、新たな研究の方向性が切り開かれつつあった。また、その相補的な非可積分な場合に存在する、カオス的な運動をする弦の理解も注目されつつあった。

## 2. 研究の目的

本研究では、ゲージ・重力(弦)対応における可積分性とカオスの観点から、以下の2つを目的として研究を行い、更にその2つの研究の流れの統合を目指す。

### 目的1 可積分な双対性の系統的な構成と普遍的な数学的構造

超弦理論において、ゲージ・重力(弦)対応の具体例は無数に構成されている。その中でもAdS/CFT対応を含む可積分な例は特別なクラスであり、厳密な検証が可能である。この可積分な双対性を系統的に構成し、普遍的な数学的構造を見出すことで、双対性の本質的な機構を理解することを目指す。

### 目的2 カオス的な弦の古典解とゲージ理論における物理現象

可積分な双対性が存在する一方で、残りはすべて非可積分な双対性に分類される。この非可積分な双対性に対しては、厳密計算で対応関係を検証しきれないが、その反面、カオスのような魅力的な研究対象が存在する。非可積分な双対性においては、弦はカオス的な運動をする。このカオス性に着目し、カオス力学系に特有の物理量を足がかりにして、双対なゲージ理論における現象を解明し、新しい研究分野の創発を目指す。

## 3. 研究の方法

前述の学術的背景と目的に沿って、以下の2点に焦点を絞って研究を行う。

### (i) 可積分なゲージ・重力(弦)対応の系統的な構成

可積分な双対性には、可積分な超弦理論が付随する。一方、この可積分な弦理論を一つずつ構成して、個別に解析するのは効率的ではないし、そもそも、その構成自体が一般に難しい。そこで我々は、Yang-Baxter変形の手法を用いることで、可積分な超弦理論の系統的な構成法を開発した。この方法に従うと、古典Yang-Baxter方程式を満たす古典 $r$ 行列を指定する毎に、対応する弦の背景時空(重力解)が構成される。この対応関係は重力/Yang-Baxter対応と呼ばれる。具体例として、Lunin-Maldacena解やMaldacena-Russo解など既知の重力解のみならず、新しい

重力解に対応する古典 $r$ 行列も発見されている。このYang-Baxter変形の研究を押し進めることで、古典 $r$ 行列に対応する重力解のモジュライ空間を解明し、この手法の範囲内において可積分なゲージ・重力(弦) 対応を完全に分類する。

### (ii) 非可積分な双対性におけるカオス的な弦とそのゲージ理論との関係

非可積分なゲージ・重力(弦) 対応も多数存在する。例えば、 $AdS_5 \times T^{1,1}$  上の超弦理論は非可積分である。非可積分な双対性には、カオス的な運動をする弦の古典解が存在する。このカオスが発生する機構は、内部空間の変形によって二重振り子が形成され、カオス力学系が実現されることにある。一方、この弦のカオスに対応するゲージ理論における物理現象は理解されていない。カオス力学系に付随する物理量(Kolmogorov-Sinai(KS)エントロピーなど) やAdS空間の乱流不安定性を足掛かりにして、双対なゲージ理論における物理現象を解明する。

## 4 . 研究成果

上記の研究方法に従い、研究を進めた結果、Yang-Baxter 変形の手法の整備が進み、数多くの業績をあげることができた。非可換時空を特徴付ける量と古典  $r$ -行列の関係、通常の超重力理論を越えた「一般化された超重力理論」の発見に対する貢献、Double Field Theory への一般化された超重力理論の埋め込み、解の生成技術の構築、Yang-Baxter 変形された時空が T-fold と呼ばれる通常の様体の概念を超えた大域構造を持つこと、一般化された超重力理論の解を背景時空として持つ弦理論におけるワイル不変性 など、その研究成果は枚挙に暇がない。結果として、Yang-Baxter 変形の研究は円熟を向かえ、世界的にも幅広く受け入れられている標準的な手法として確立された。

一方、非可積分な背景時空におけるカオス的な弦の振る舞いについても、研究成果を挙げることができた。Berenstein-Maldacena-Nastase 行列模型と呼ばれる超弦理論を非摂動的に定義する模型におけるカオスについて、ポアンカレ切断、リヤプノフ指数を計算することによって、その存在を明らかにした。また、AdS 空間における D-ブレーンのカオス的な運動から、双対なゲージ理論におけるカイラル凝縮について考察した。この結果は高く評価されており、Physical Review Letters 誌に掲載された。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 25 件) すべて査読有。

- [1] Jose J. Fernandez-Melgarejo, Jun-ichi Sakamoto, Yuho Sakatani and Kentaroh Yoshida, “T-folds from Yang-Baxter deformations,” JHEP 1712 (2017) 108.
- [2] Thiago Araujo, Eoin O Colgain, Jun-ichi Sakamoto, Mohammad Mahdi Sheikh-Jabbari and Kentaroh Yoshida, “I in generalized supergravity,” Eur. Phys. J. C77 (2017) no.11, 739.
- [3] Jun-ichi Sakamoto, Yuho Sakatani and Kentaroh Yoshida, “Homogeneous Yang-Baxter deformations as generalized diffeomorphisms,” J. Phys. A50 (2017) no.41, 415401.
- [4] Thiago Araujo, Ilya Bakhmatov, Eoin O Colgain, Jun-ichi Sakamoto, Mohammad Mahdi Sheikh-Jabbari and Kentaroh Yoshida, “Conformal twists, Yang-Baxter sigma models & holographic noncommutativity,” J. Phys. A51 (2018) no.23, 235401.

- [5] Hideki Kyono, Suguru Okumura and [Kentaro Yoshida](#), “Comments on 2D dilaton gravity system with a hyperbolic dilaton potential,” Nucl. Phys. B923 (2017) 126.
- [6] Jun-ichi Sakamoto, Yuho Sakatani and [Kentaro Yoshida](#), “Weyl invariance for generalized supergravity backgrounds from the doubled formalism,” PTEP 2017 (2017) no.5, 053B07.
- [7] Thiago Araujo, Ilya Bakhmatov, Eoin O Colgain, Jun-ichi Sakamoto, Mohammad Mahdi Sheikh-Jabbari and [Kentaro Yoshida](#), “Yang-Baxter sigma-models, conformal twists and noncommutative Yang-Mills theory,” Phys. Rev. D95 (2017) no.10, 105006.
- [8] Hideki Kyono, Suguru Okumura and [Kentaro Yoshida](#), “Deformations of the Almheiri-Polchinski model,” JHEP 1703 (2017) 173.
- [9] Jun-ichi Sakamoto and [Kentaro Yoshida](#), “Yang-Baxter deformations of  $W_{2,4} \times T^{1,1}$  and the associated T-dual models,” Nucl. Phys. B921 (2017) 805.
- [10] Yuho Sakatani, Shozo Uehara and [Kentaro Yoshida](#), “Generalized gravity from modified DFT,” JHEP 1704 (2017) 123.
- [11] Takaaki Ishii, Keiju Murata and [Kentaro Yoshida](#), “The fate of chaotic strings in a confining geometry,” Phys. Rev. D95 (2017) 066019.
- [12] Yuhma Asano, Hideki Kyono and [Kentaro Yoshida](#), “Melnikov’s method in String Theory,” JHEP 1609 (2016) 103.
- [13] Domenico Orlando, Susanne Reffert, Jun-ichi Sakamoto and [Kentaro Yoshida](#), “Generalized type IIB supergravity equations and non-Abelian classical r-matrices,” J. Phys. A49 (2016) no.44, 445403 [arXiv:1607.00795 [hep-th]].
- [14] Koji Hashimoto, Keiju Murata and [Kentaro Yoshida](#), “Chaos in chiral condensates in gauge theories,” Phys. Rev. Lett. 117 (2016) 231602.
- [15] Hideki Kyono and [Kentaro Yoshida](#), “Supercoset construction of Yang-Baxter deformed  $AdS_5 \times S^5$  backgrounds,” Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 083B03.
- [16] Takashi Kameyama and [Kentaro Yoshida](#), “Generalized quark-antiquark potentials from  $q$ -deformed  $AdS_5 \times S^5$  background,” PTEP 2016 (2016) no.6, 063B01.
- [17] Hideki Kyono, Jun-ichi Sakamoto and [Kentaro Yoshida](#), “Lax pairs for deformed Minkowski spacetimes,” JHEP 1601 (2016) 143.
- [18] Hideki Kyono and [Kentaro Yoshida](#), “Yang-Baxter invariance of the Nappi-Witten model,” Nucl. Phys. B905 (2016) 242-250.
- [19] Andrzej Borowiec, Hideki Kyono, Jerzy Lukierski, Jun-ichi Sakamoto and [Kentaro Yoshida](#), “Yang-Baxter sigma models and Lax pairs arising from kappa-Poincare r-matrices,” JHEP 1604 (2016) 079.
- [20] Takashi Kameyama, Hideki Kyono, Jun-ichi Sakamoto and [Kentaro Yoshida](#), “Lax pairs on Yang-Baxter deformed backgrounds,” JHEP 1511 (2015) 043.
- [21] Yuhma Asano, Daisuke Kawai, Hideki Kyono and [Kentaro Yoshida](#), “Chaotic strings in a near Penrose limit of  $AdS_5 \times T^{1,1}$ ,” JHEP 1508 (2015) 060.
- [22] Takuya Matsumoto, Domenico Orlando, Susanne Reffert, Jun-ichi Sakamoto and [Kentaro Yoshida](#), “Yang-Baxter deformations of Minkowski spacetime,” JHEP 1510 (2015) 185.
- [23] Yuhma Asano, Daisuke Kawai and [Kentaro Yoshida](#), “Chaos in the BMN matrix

model,” JHEP 1506 (2015) 191.

[24] Takuya Matsumoto and Kentaroh Yoshida, “Schrodinger geometries arising from Yang-Baxter deformations,” JHEP 1504 (2015) 180.

[25] Takuya Matsumoto and Kentaroh Yoshida, “Yang-Baxter sigma models based on the CYBE,” Nucl. Phys. B893 (2015) 287-304.

〔学会発表〕(計 15 件) 発表者はすべて吉田健太郎(研究代表者)であり、すべて招待講演。

国際会議、国際研究会における招待講演： 発表者はすべて吉田健太郎(研究代表者)

[1] “Introduction to Yang-Baxter deformations,” at the fourth China-Japan conference, Noncommutative geometry and K-theory at Rits, held at Ritsumeikan University, Kusatsu, Japan, March 26-28, 2018.

[2] “Recent progress on generalized supergravity and Yang-Baxter deformations,” at the NCTS Annual Meeting 2017: Particle Cosmology and Strings, held at National Center for Theoretical Sciences, Hsinchu, Taiwan, December 5-8, 2018.

[3] “Recent progress on generalized supergravity and Yang-Baxter deformations,” at the 2017 Kyoto-NTU High Energy Theory Workshop, held at National Taiwan University, Taipei, Taiwan, November 24-26, 2017.

[4] “Yang-Baxter deformations and generalized supergravity,” at the Ginzburg conference 2017, Lebedev Institute, Moscow, May 29-June 3, 2017.

[5] “Yang-Baxter deformations and generalized supergravity,” at the workshop on Geometry, Duality and Strings, held at Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP), Kyoto, Japan, March 9-10, 2017.

[6] “Yang-Baxter deformations and generalized supergravity,” at the workshop on String and M-theory in Okinawa, held at Okinawa Institute of Science and Technology (OIST), Okinawa, Japan, March 6-9, 2017.

[7] “Yang-Baxter deformations and generalized supergravity,” at the Kyoto-NTU workshop, held at National Taiwan University, Taipei, Taiwan, November 25-26, 2016.

[8] “Recent progress on Yang-Baxter deformations of the  $AdS_5 \times S^5$  superstring,” at New Trends in Field Theories, held at Banaras Hindu University, Varanasi, India, November 6-10, 2016.

[9] “Recent progress towards the gravity/CYBE correspondence,” at NCTS Summer Workshop on Strings and Quantum Field Theory, held at National Center for Theoretical Sciences (NCTS), Hsinchu, Taiwan, July 25-29, 2016.

[10] “Recent progress towards the gravity/CYBE correspondence,” at Noncommutative geometry, quantum symmetries and quantum gravity II, held at Wroclaw University, Wroclaw, Poland, July 4-7, 2016.

[11] “Recent Progress towards the gravity/CYBE correspondence,” at Generalized geometry & T-dualities, held at the Simons center for geometry and physics, Stony Brook University, New York, the United States, May 9-13, 2016.

[12] “Towards the gravity/CYBE correspondence,” at Quantum Spacetime’16, held at the Hyrny Conference and Recreation Centre, Zakopane, Poland, February 7-11, 2016.

- [13] “Towards the gravity/CYBE correspondence,” at Miami 2015, Fort Lauderdale, Florida, the United States, December 16-22, 2015.
- [14] “Towards the gravity/CYBE correspondence,” at Selected topics in Theoretical High Energy Physics, held at the Free University of Tbilisi, Tbilisi, Georgia, September 21-24, 2015.
- [15] “Yang-Baxter deformations of Minkowski spacetime,” at Mathematical Perspectives in String Theory, held at Kyoto University, Kyoto, Japan, August 6-7, 2015.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

招待レビュー記事

Daisuke Kawai, Yoshiki Sato and Kentaroh Yoshida,

“A holographic description of the Schwinger effect in a confining gauge theory,”

Int. J. Mod. Phys. A30 (2015) no.11, 1530026.

## 6 . 研究組織

### (1)連携研究者

連携研究者氏名：松本拓也

ローマ字氏名： Matsumoto Takuya

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：多元数理研究所

職名：助教(任期あり)

連携研究者氏名：橋本幸士

ローマ字氏名： Hashimoto Koji

所属研究機関名：大阪大学

部局名：理学研究科

職名：教授

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：亀山尚史

ローマ字氏名： Kameyama Takashi

研究協力者氏名：川井大輔

ローマ字氏名： Kawai Daisuke

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。