

令和 5 年 5 月 19 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01896

研究課題名（和文）高階スピン重力とゲージ/重力対応による超弦理論の研究

研究課題名（英文）Superstring theory from higher spin gravity and AdS/CFT correspondence

研究代表者

疋田 泰章（Hikida, Yasuaki）

京都大学・基礎物理学研究所・特定准教授

研究者番号：80567462

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：超弦理論の高エネルギー極限で現れる高階スピン対称性を利用することで、超弦理論・量子重力の研究を行った。特に、量子重力をより定義されている共形場理論で解析可能にするゲージ重力対応を利用した。本研究課題では、共形場理論の新解析手法を開発した。その手法を応用することで、弦理論の高エネルギー極限を利用したゲージ重力対応の導出や、膨張宇宙における高階スピン重力を用いたゲージ重力対応の提案・検証・応用を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙がどのように始まったかは、世界の根源とも言える問いである。まだ単純化したモデルの段階ではあるが、私たちの研究結果により定量的に取り組めるようになった。より現実的な宇宙への拡張が今後の課題である。また、共形場理論やゲージ重力対応は応用範囲が非常に広く、私たちの研究結果はこれらの基礎的な性質の理解にも役立つと考えている。

研究成果の概要（英文）：We examine superstring theory and quantum gravity by making use of higher spin symmetry appearing at the high energy limit of superstring theory. In particular, we use gauge/gravity correspondence, which enables us to analyze quantum gravity in terms of well-formulated conformal field theory. In this research project, we developed new methods to deal with conformal field theory. Applying the method, we derived gauge/gravity correspondence involving the high energy limit of strings. Furthermore, we proposed, verified, and applied the gauge/gravity correspondence using higher spin gravity in expanding universe.

研究分野：素粒子理論・超弦理論

キーワード：超弦理論 ゲージ重力対応 高階スピン重力 共形場理論 膨張宇宙

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

宇宙初期やブラックホール内部では重力の量子効果が強く効いてくる。量子重力理論の有力候補として超弦理論があるが、解析が難解で物理的意味のある情報を取り出すのが難しい。超弦理論には高階スピン粒子が数多く存在するが、非常に重く観測にはかからない。ただし、高エネルギー極限では、これらの粒子の質量が有効的にゼロになると同時に、高階スピングージ対称性が現れると考えられている(図1参照)。この高階スピン対称性を利用することで、超弦理論を解析しようという試みは昔から行われていた。さらに、超弦理論はゲージ重力対応という新たな概念を生み、量子重力をより定義されている場の量子論(共形場理論)で記述できるようになってきた(図2参照)。特にここ10年ほど、高階スピングージ理論(高階スピン重力)を利用したゲージ重力対応の理解が進んできた。私たちは、一連の研究において、拡張した高階スピングージ理論を利用したゲージ重力対応を提唱してきた。ところが、高階スピン理論と超弦理論との関係性は定性的なものであり、定量的な解析を行うには不十分であった。そこで、これらの関係性を定量的なものとするべく、高階スピン重力を利用した超弦理論・量子重力の新解析手法を構築しようと考えた。

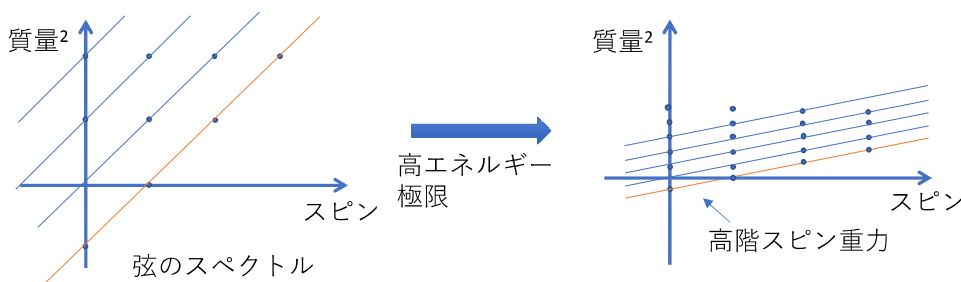


図1 (左図)典型的な弦スペクトル (右図)高エネルギー極限では高階スピン粒子の有効質量がゼロとなり高階スピングージ対称性の出現が期待される

2. 研究の目的

高階スピン重力やゲージ重力対応の理解を深めることで、高階スピン対称性を利用した超弦理論・量子重力の新解析手法を開発するのが当初の目的であった。これらの解析手法を利用することで、宇宙初期やブラックホール内部の理解ができると考えた。その目的のため、次のような研究課題を立てた。本研究は、応用範囲の広い共形場理論やゲージ重力対応の基礎的研究も兼ねている(図3参照)。

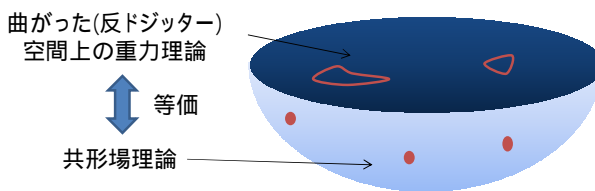


図2 ゲージ重力対応の概念図

(1) 高階スピン重力の量子効果の理解

ゲージ重力対応を応用し、対応する共形場理論を用いて、高階スピン重力の量子効果の解析を行う。共形場理論における高階スピン対称性を、対応する重力理論において量子効果も含んだ形で理解する。

共形場理論	ゲージ重力対応
<ul style="list-style-type: none"> <li>弦の世界面の理論</li> <li>ゲージ重力対応</li> <li>物性系の臨界現象</li> <li>4次元超対称ゲージ理論との関係(AGT関係)</li> <li>数理論理</li> <li>...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>超弦理論や量子重力</li> <li>共形場理論</li> <li>QCDの強結合領域</li> <li>物性系の強相関物理</li> <li>量子情報</li> <li>...</li> </ul>

図3 共形場理論やゲージ重力対応は様々な分野へ応用できる

(2) 高階スピン重力と超弦理論の関係性の明示化

共形場理論で高階スピン対称性を破る様な変形を行い、対応する高階スピン重力理論でどのように質量が生成し、超弦理論とどのように関係するか定性的に調べる。また、一般のゲージ重力対応のように、D プレーンの二つの見方による導出も試みる。

(3) 超弦理論の高エネルギー極限を利用したゲージ重力対応の導出

私たちの開発してきた、共形場理論をより基本的な理論に帰着させる方法を発展させる。その手法を応用して超弦理論の高エネルギー極限を解析する。超弦理論の相関関数が対応する共形場理論ともの一致を示す。

### 3. 研究の方法

本研究課題の目的を達成するためには、共形場理論の基礎的な理解が必要である。解析を進めるうちに、共形場理論の新解析手法に大きな進展が見られた。そのため、研究目的はそのまま具体的な研究課題を少し変更し、共形場理論の新解析手法がうまく適応できるよう工夫した。具体的には、次の様に研究を遂行した。

#### (1) 拡張高階スピン重力によるゲージ重力対応の理解

超弦理論と関係付けるには、高階スピン重力を行列に値を持つように拡張すればよい。拡張した高階スピン重力を用いたゲージ重力対応で、対応する共形場理論の対称性を高階スピン重力の量子効果も含んだ形で理解した。

#### (2) 共形場理論の新解析手法の開発

共形場理論を基本的な理論に帰着させる解析手法を、より広い場合に適応できるよう拡張した。その手法により、数多くの共形場理論間の双対性を導出した。

#### (3) ゲージ重力対応の導出

NSNS-flux のみの 3 次元反ドジッター背景上の弦理論を含むゲージ重力対応の証明を行った。その際、弦理論の高エネルギー極限の最近の理解を応用した。

#### (4) ゲージ重力対応の膨張宇宙への応用

高階スピン重力を利用したゲージ重力対応を、宇宙初期に応用できる様に拡張した。そのゲージ重力対応を応用し、共形場理論側から宇宙初期における重力の性質を導いた。

### 4. 研究成果

上記で分類した研究成果について、より詳細に説明する。

#### (1) 拡張高階スピン重力によるゲージ重力対応の理解

弦理論には高階スピン状態が膨大な数存在している（図 1 参照）。単純な高階スピン重力には、一つのスピンの対し一つの場合しか存在せず、弦理論を記述するには自由度が全く足りない。高階スピン重力で弦の膨大な高階スピン状態を記述するには、行列に値を取るよう拡張すれば良い。以前の研究で、行列拡張された 3 次元高階スピン重力を用いたゲージ重力対応を提唱した。証拠の一つとして、対称性の一致も示した。ところが、高階スピン重力で古典的な極限でしか解析していなかった。本研究では、この対称性に関する解析を、高階スピン重力で量子効果も含んだ領域へと拡張した。高階スピン代数の表現を求め、高階スピン重力の解における量子効果を解析した。

#### (2) 共形場理論の新解析手法の開発

3 次元高階スピン重力に高階スピングージ対称性があることと関係し、対応する 2 次元共形場理論には  $W$  代数と呼ばれる高階スピン代数の対称性がある。基本的な  $W$  代数は、一つのスピンの一つのカレントがあり、比較よく理解されている。ところが、より一般的な  $W$  代数の性質はあまりよく理解されていない。そのような  $W$  代数を対称性としてもつ共形場理論に対しても、基本的な理論へと帰着させる解析手法を適応できるように拡張した。近年、一般の  $W$  代数に関して、複数の自由場表示が存在することが示された。私たちは、自分たちに都合のよい自由場表示を採用することで、複雑な共形場理論をより基本的な理論へ帰着できるようにした。

近年 Gaiotto らにより、新たな高階スピン代数やそれらの間の双対性が見出された（図 4 参照）。彼らは超弦理論における  $D$  プレーンを複雑に配位させることで  $W$  代数を実現し、超弦理論における双対性を応用して  $W$  代数間の双対性を導出した。私たちは、開発した新解析手法を応用することで、2 次元共形場理論の立場でこれらの双対性を導出した。 $W$  代数は戸田模型の対称性として実現できるが、あるコセット模型の対称性としても表せることが知られていた。私たちは、戸田模型とコセット模型の間の等価性が、相関関数の立場でも成り立つことを示した。高階スピン代数の基礎的な性質に関わる、長年未解決であった問題を解決した。

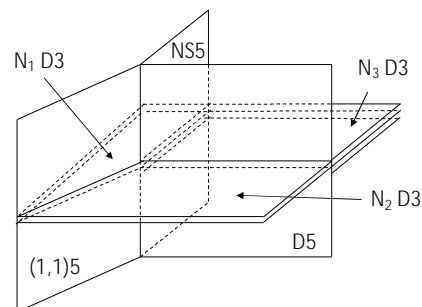


図 4 プレーンの交わった 2 次元面から多様な代数とその双対性が導ける

#### (3) ゲージ重力対応の導出

ゲージ重力対応が証明できれば、量子重力が理解できたと言っても過言ではない（図 2 参照）。ところが、Maldacena による提唱の後 25 年ほど経つが、一般的な証明はいまだになされていない。ゲージ重力対応が強弱対応であることが原因の一つである。共形場理論の弱結合領域は、弦

理論の高エネルギー極限に当たってしまう。ところが最近、弦理論の高エネルギー極限の理解が進んできた。そこで、共形場理論の摂動展開を、弦理論の高エネルギー極限からの摂動展開と対応させることで、ゲージ重力対応が証明できるのではないかと考えた。実際、NSNS-fluxのみを含む3次元反ドジッター時空中の弦理論は可解であり、この理論の高エネルギー極限の理解が最近発展した。これらの発展と、私たちの開発した弦理論の新開発手法を組み合わせることで、この高エネルギー極限における弦理論を用いたゲージ重力対応において、基本的な相関関数の一致を示した。この具体例に関しては、ほぼ証明できたと言って良い。また、解析の際用いた主張は基本的なものなので、より一般的なゲージ重力対応の証明にも応用できるはずである。

#### (4) ゲージ重力対応の膨張宇宙への応用

本研究課題のまとめとして、現実的なモデルへの応用も行った。宇宙は加速膨張の時期を経て始まったと言われている。その時期の宇宙は、正の宇宙項をもつアインシュタイン方程式の真空解であるドジッター時空中で近似できる。宇宙初期では重力の量子効果が強く効いてくると考えられるので、その効果を調べるにはゲージ重力対応が役に立つと考えられる。ところが、ゲージ重力対応は、負の宇宙項をもつアインシュタイン方程式の真空解である反ドジッター時空中のもとで開発されてきた。そのため、ドジッター時空中に関するゲージ重力対応はあまり理解されていない。私たちは、計算可能な具体例として、ドジッター時空中における3次元高階スピン重力を用いたゲージ重力対応を提唱した。証拠として、分配関数の比較や、知られている反ドジッター時空中の場合との関係性の明示化などを行った。

私たちの提唱により、ドジッター時空中における重力の定量的な解析が可能となった。まずは、宇宙初期における密度揺らぎの相関を、対応する共形場理論から計算した。ドジッター時空中の場の理論による一般論はすでになされており、その結果を再現した。また、私たちの宇宙は無から始まったと言われている。そのような時空は、複素計量を用いることで記述できる。ただ、どのような複素幾何の実現可能かは、長年の未解決問題であった。私たちは、ゲージ重力対応を利用し、実現可能な複素幾何を判定する手法を提唱した。さらに、私たちの提唱したゲージ重力対応を用いることで、3次元高階スピン重力における実現可能な複素幾何を共形場理論から具体的に判定した。

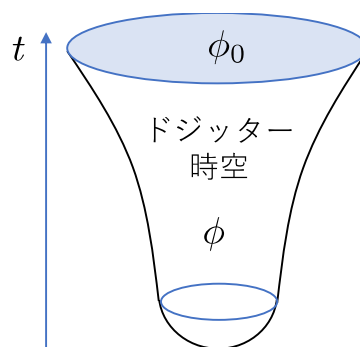


図 5 宇宙の波動関数

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Hikida Yasuaki, Nishioka Tatsuma, Takayanagi Tadashi, Taki Yusuke	4. 巻 2022
2. 論文標題 CFT duals of three-dimensional de Sitter gravity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2022)129	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Hikida Yasuaki, Nishioka Tatsuma, Takayanagi Tadashi, Taki Yusuke	4. 巻 129
2. 論文標題 Holography in de Sitter Space via Chern-Simons Gauge Theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 41601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.041601	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Chen Heng-Yu, Hikida Yasuaki	4. 巻 129
2. 論文標題 Three-Dimensional de Sitter Holography and Bulk Correlators at Late Time	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 61601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.061601	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する
1. 著者名 Chen Heng-Yu, Chen Shi, Hikida Yasuaki	4. 巻 2023
2. 論文標題 Late-time correlation functions in dS3/CFT2 correspondence	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2023)038	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Creutzig Thomas、Hikida Yasuaki、Stockal Devon	4. 巻 10
2. 論文標題 Correlator correspondences for subregular W-algebras and principal W-superalgebras	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2021)032	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Creutzig Thomas、Hikida Yasuaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Correlator correspondences for Gaiotto-Rapcak dualities and first order formulation of coset models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2021)144	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Creutzig Thomas、Hikida Yasuaki	4. 巻 977
2. 論文標題 FZZ-triality and large N=4 super Liouville theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 115734
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysb.2022.115734	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Creutzig Thomas、Genra Naoki、Hikida Yasuaki、Liu Tianshu	4. 巻 957
2. 論文標題 Correspondences among CFTs with different W-algebra symmetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 115104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysb.2020.115104	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Hikida Yasuaki、Liu Tianshu	4. 巻 9
2. 論文標題 Correlation functions of symmetric orbifold from AdS3 string theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2020)157	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Creutzig Thomas、Hikida Yasuaki	4. 巻 2
2. 論文標題 Higher rank FZZ-dualities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2021)140	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Thomas Creutzig and Yasuaki Hikida	4. 巻 100
2. 論文標題 Rectangular W algebras and superalgebras and their representations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 86008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.086008	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Thomas Creutzig, Yasuaki Hikida and Takahiro Uetoko	4. 巻 10
2. 論文標題 Rectangular W-algebras of types $so(M)so(M)so(M)$ and $sp(2M)sp(2M)sp(2M)$ and dual coset CFTs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2019)023	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

[学会発表] 計10件(うち招待講演 7件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Hikida Yasuaki
2. 発表標題 Three-dimensional de Sitter holography
3. 学会等名 mini-workshop "Higher Spin Gravity and its Applications" (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hikida Yasuaki
2. 発表標題 Late-time correlation functions in dS3/CFT2 correspondence
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Holography and its Applications (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hikida Yasuaki
2. 発表標題 Exploring 3d de Sitter gravity via holography
3. 学会等名 6th International Conference on Holography, String Theory and Spacetime in DaNang (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 疋田泰章
2. 発表標題 CFT realizations of Gaiotto-Rapcak dualities
3. 学会等名 KIAS-YITP Joint Workshop 2021 String Theory and Quantum Gravity (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 疋田泰章
2. 発表標題 3d de Sitter space/2d CFT correspondence
3. 学会等名 学術変革(A)第一回領域会議セミナー（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 疋田泰章, Liu Tianshu
2. 発表標題 テンションレス弦によるAdS/CFT対応の導出について
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shimada Hidehiko
2. 発表標題 Exact computation of operator product expansion for an interacting model with space/time anisotropic scaling symmetry
3. 学会等名 YITP Workshop Strings and Fields 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島田英彦
2. 発表標題 Bose-Einstein condensation and large-N colour confinement
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuaki Hikida
2. 発表標題 Matrix-valued higher spin holography
3. 学会等名 International conference on holography, string theory and discrete approaches in Danang (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuaki Hikida
2. 発表標題 Matrix-valued higher spin holography
3. 学会等名 APCTP-KHU Workshop "Higher Spin Gravity" (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 疋田 泰章	4. 発行年 2020年
2. 出版社 講談社	5. 総ページ数 208
3. 書名 共形場理論入門 基礎からホログラフィへの道	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>【Editor's suggestion】</p> <p>[1] CFT duals of three-dimensional de Sitter gravity, Y. Hikida, T. Nishioka, T. Takayanagi, Y. Taki, Phys. Rev. Lett. 129, 041601 (6頁), 2022</p> <p>【プレスリリース】</p> <p>[1] ホログラフィーによる宇宙の始まりの探索 新手法による初期宇宙の揺らぎの相関の計算 , 疋田泰章, Heng-Yu Chen, 京都大学, 2022年8月</p> <p>[2] 膨張宇宙を表すマイクロな模型の発見 3次元ドジッター宇宙のホログラフィー原理 , 瀧祐介, 疋田泰章, 西岡辰磨, 高柳匡, 京都大学, 大阪大学, 2022年7月</p>
--

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
その他の国・地域	国立台湾大学			
カナダ	アルバータ大学			