

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2023

課題番号：17K05414

研究課題名（和文）非摂動的場の理論による量子論的幾何学の研究

研究課題名（英文）Quantum geometry via non-perturbative quantum field theory

研究代表者

寺嶋 靖治 (Terashima, Seiji)

京都大学・基礎物理学研究所・助教

研究者番号：20435621

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：一般相対性理論と量子論の統合に向け、古典的な幾何学の枠組みを超える新たな「幾何」を模索し、ゲージ/重力対応を用いて、量子重力理論をゲージ場の理論としてみならず可能性を研究した。特に、量子重力の局所演算子をゲージ場の理論の演算子として具体的に導出した。また、これを用いて量子情報理論的側面を探求した。更に、ゲージ/重力対応における量子重力の再構成を詳細に検証し、その中で有限のニュートン定数による量子重力効果の重要性を明らかにした。これらの成果は、量子重力における時空と幾何の理解に大きな一歩を踏み出したものである。しかし、より深い理解を得るには、今後も継続した研究が不可欠である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子重力の理解は、我々の世界に対する認識、特に空間や時間の概念を根本的に異なったものに変える、非常に興味深い問題である。特に、ゲージ/重力対応と呼ばれる、量子重力と重力を含まない場の理論が互いに等価であるとする予想が重要となる。この研究は、ゲージ/重力対応を通じて、量子重力を非摂動的なゲージ場の理論として捉え、その背後にある時空の本質を探求した。特に、演算子形式での解析を通じて、量子重力における量子状態の具体的な理解を追求した。そして、有限のニュートン定数による非摂動的な量子重力効果の重要性を明らかにした。これらの成果は、量子重力における時空や幾何を理解する上で重要な一歩である。

研究成果の概要（英文）：We explored a new "geometry" beyond the framework of classical geometry in pursuit of integrating general relativity and quantum theory. Utilizing the gauge/gravity duality, we investigated the possibility of regarding the quantum gravity theory as a gauge field theory. Specifically, we derived the local operators of quantum gravity as operators of gauge field theory. Additionally, we used this to explore the quantum information-theoretic aspects. Furthermore, we extensively verified the reconstruction of quantum gravity in the gauge/gravity duality, revealing the significance of finite Newton's constant in quantum gravity effects. These achievements represent a significant step forward in understanding spacetime and geometry in quantum gravity. However, continuous research is essential for deeper comprehension.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 場の理論 量子重力

1. 研究開始当初の背景

古典的な重力理論である一般相対性理論では、時空そのものが物質によって変化する。そのため、時空を変化させることができる幾何学が必要とされ、リーマン幾何学が重要な役割を果たす。しかしながら、重力も他の力と同様に量子論で記述されることが強く予想されるため、ブラックホールや宇宙初期のような非常に強い重力場では、量子論的な効果を考慮する必要がある。ところが、量子重力は理論的にすら解明されていない状況である。ここで、物理量が本質的に揺らぐ量子論と、時空が物理量である一般相対性理論を組み合わせると、時空は通常の幾何学的な描像を失ってしまう。例えば、リーマン幾何学の基本的な概念であるトポロジーや多様体も近似的にしか意味を持たない。しかし、量子重力の背後にリーマン幾何学に変わる一般化された「幾何」が存在すると考えるのは自然であろう。この新しい「幾何」を基盤とした量子重力理論は、我々の世界に対する認識を根本的に変える興味深い理論であると考えられる。量子重力の理解は、我々の世界に対する認識、特に空間や時間の概念を根本的に異なったものに変える非常に興味深い問題であり、自然科学における最重要課題の一つである。

2. 研究の目的

以上のような背景から、この研究の大きな目標は「リーマン幾何学に代わる、量子化された重力理論における「幾何」は何か？」という問いに答えることであった。この問いの解明に挑戦するためには、量子重力を記述すると考えられる理論が必要となる。その最も有力な候補が、強く結合した自由度の非常に大きい非可換ゲージ理論である。この理論は、重力を含まない通常の量子の理論であるが、次元が一つ大きい量子重力理論と等価であると予想されている。このゲージ/重力対応（または、ホログラフィック双対）と呼ばれる予想において、古典的な重力理論である一般相対論とその背後にあるリーマン幾何学で記述される時空は、場の理論の中に創発的に現れると考えられる。そこで、このような古典的な幾何学がどのように場の理論の中で現れるか、そして、その古典的な幾何学のどのような一般化が場の理論の中で可能かを調べることで、量子重力の背後にある幾何学を調べることになる。この対応は、反ドジッター空間 (AdS 空間) 上の重力理論と共形場理論 (CFT) の等価性が最もよく理解されており、AdS/CFT 対応として知られている。そのため、この研究では、非摂動的な手法を用いた非可換ゲージ理論、特に共形場理論の解析を行い、量子重力理論における量子論的幾何学を理解することを目指した。

3. 研究の方法

この目的のために本研究では、ゲージ理論と量子重力の間の量子論としての対応を、経路積分ではなく、演算子形式で具体的に調べた。つまり、ゲージ理論の演算子や状態と量子重力の演算子や状態との間の具体的な対応関係を調べた。特に、ラーゼン N 極限で創発される古典時空を背景としたときに与えられる局所的な場や重力子に対する演算子や量子状態がどのようにゲージ理論で記述されるかを調べた。これにより、量子重力における時空とその上の局所演算子等が、ゲージ理論からどのように復元されるのかの理解が進むはずである。ここで、ゲージ/重力対応では（経路積分で定義された）分配関数を主に考察するため、このような演算子や状態を具体的に調べる研究は非常に独自性があると考えられる。

4. 研究成果

研究の主な成果として、以下が挙げられる：

(1) 強結合のラーゼン N ゲージ理論で構成される共形対称性をもつ量子場の理論では自然になりたつと考えられる性質を仮定することで、ラーゼン N、かつ、低エネルギー近似では、ゲージ理論が重力理論と等価な事を具体的に示した。その際に、量子重力理論における局所演算子を量子場の理論の局所演算子の線形結合として明示的に与える非常に重要な式を得た。(主要な発表論文 1, 2)。これは量子重力を量子場の理論から復元する式ともいえる。この式から、従来の研究で仮定されていたゲージ/重力対応の性質の一部が実際には満たされていないことも示される。具体的には、CFT 側から演算子形式で AdS/CFT 対応を調査することで、量子重力理論における局所状態を CFT での局所状態の線形結合として明示的に関連付ける式を導出した(主要な発表論文 3)。これにより、特に、量子誤り訂正符号が AdS/CFT 対応が持つとされていた性質が動径方向局所性に関するパラドックスを解消する機構として仮定されていたが、実際には、このパラドックス自体が存在しないことが示された。これらの結果は、本研究で得られた研究成果が AdS/CFT 対応を理解し量子重力の性質を調べるうえで、非常に重要であることを示唆している。このように、ゲージ理論の状態から量子重力の状態がどのように復元されるかを理解できたこ

とは重要である。この解析は量子重力の幾何学の理解の基礎になりえる結果ではあるが、真空の周りの準古典重力の近似の範囲である。これを、さらに様々な方向に発展させることが重要である。特に、具体的な対応関係を用いて、量子重力の量子情報理論的な側面を演算子形式で場の理論側から直接解析することは今後の研究の一つの大きな目標となる。

(2) 演算子形式を用いたゲージ/重力対応の解析、特に、量子重力を量子場の理論から復元する式は以前から HKLL 公式として知られるものがあった。しかし、この公式は積分で書かれており、一意ではなく曖昧さを含む。そのため、この公式は具体的な対応を調べるといよりは、むしろ復元する式が存在することを保証したりするような抽象的な目的で使われている。私の開発した公式は、量子重力とゲージ理論の量子状態の間の具体的な対応に基づいたものであり、このように具体的な対応を使った研究は実質的には未開の領域といえる。ここで、経路積分を用いた解析は非常に多くの先行研究があるため、この二つを相互に参照しつつ研究を進めた。特に、量子重力の量子情報理論的な側面は、量子重力の理解において本質的に重要になる可能性があり、近年非常に注目されている。ここで、量子情報理論は、本来、状態や演算子を扱う理論である。一方で、ゲージ/重力対応においては、Entanglement entropy に関する Ryu-Takayanagi 公式に代表されるように、現在まで、経路積分を用いた解析が行われてきた。これが可能なのは、Replica trick と呼ばれる手法を用いることで、状態に対して定義される Entanglement entropy を経路積分で計算することができるためである。しかし、状態や演算子を直接扱うことは、量子重力の量子情報理論的な側面の理解において本質的に重要なことは明らかである。実際、経路積分では Entanglement entropy に代表される、状態から決まる特別な量以外は解析を行うことが非常に難しい。つまり、上述のような研究は量子重力の量子情報理論的な側面の理解するうえで、現在までの研究と相補的、かつ、不可欠な研究であると考えられる。このため、寺嶋と杉下氏は、AdS-Rindler でのバルク再構成を詳しく調べた(主要な発表論文 4)。特に共形場理論のユニタリー性等の基本的な性質を考察することで、一般に部分領域の双対性とエンタングルメントウェッジ再構成が成立しないことを示した。これは、ホログラフィック誤り訂正の議論も否定する。これらのホログラフィック理論において現在まで強く正しさが信じられている性質が、無限小の周りの展開でなく正しく有限のニュートン定数で考えると量子重力効果で破れていることは、量子重力の理解においても本質的に重要である。また、寺嶋は杉下氏とともに AdS/CFT 対応において CFT から量子重力理論を再構成する具体的な方法を調べた(主要な発表論文 5)。CFT 側で空間の一部のみを切り取った理論を考えたときに、量子重力理論側でも、対応する部分領域をとれば理論を再構成できることが予想されている。この時、量子重力の非摂動的な効果のために、CFT 作用素としては元のものと異なることを示し、これをブラックホール相補性の類似として部分領域相補性と呼んだ。

(3) 研究期間全体を通じて実施した研究の成果についてまとめる。量子重力における時空や幾何を理解するのが本研究計画の大きな目的であった。ゲージ/重力対応を用いて量子重力を非摂動的なゲージ場の理論とみなすことで、ゲージ場の理論の解析から量子重力の背後にある時空の理解を深める、特に、演算子形式でゲージ/重力対応を解析することにより、量子重力における量子状態の具体的な理解を目指した。量子情報理論は演算子形式で通常は記述されることから、この研究により新しい知見が得られた。ゲージ場の理論から重力理論を再構成するバルク再構成を詳しく調べることで、有限のニュートン定数であることによる非摂動的な量子重力効果が量子重力理論において、本質的に重要であることが理解された。これは、量子重力における時空や幾何を理解において本質的に重要な成果である。しかし、残念ながら本研究計画は非常に野心的なものであることもあり、そのゴールまではまだ遠いと言わざるを得ず、今後の継続した研究が必要である。

主要な発表論文：

1. AdS/CFT Correspondence in Operator Formalism
Seiji Terashima, JHEP 1802 (2018) 019
2. Classical Limit of Large N Gauge Theories with Conformal Symmetry
Seiji Terashima, JHEP 2002 (2020) 021
3. Bulk Locality in AdS/CFT Correspondence
Seiji Terashima, Phys.Rev.D 104 (2021) 8, 086014
4. Simple Bulk Reconstruction in AdS/CFT Correspondence
Seiji Terashima, PTEP 2023 (2023) 5, 053B02
5. Rindler Bulk Reconstruction and Subregion Duality in AdS/CFT
Sotaro Sugishita and Seiji Terashima, JHEP 11 (2022) 041

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 3件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Suzuki Yu-ki, Terashima Seiji	4. 巻 2022
2. 論文標題 On the dynamics in the AdS/BCFT correspondence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP09(2022)103	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 Sugishita Sotaro, Terashima Seiji	4. 巻 2022
2. 論文標題 Rindler bulk reconstruction and subregion duality in AdS/CFT	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP11(2022)041	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 Terashima Seiji	4. 巻 104
2. 論文標題 Bulk locality in the AdS/CFT correspondence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.104.086014	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 Nagano Lento, Terashima Seiji	4. 巻 2021
2. 論文標題 A note on commutation relation in conformal field theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP09(2021)187	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 Manabe Masahide、Terashima Seiji、Terashima Yuji	4. 巻 2021
2. 論文標題 The colored Jones polynomials as vortex partition functions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2021)197	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 Terashima Seiji	4. 巻 2020
2. 論文標題 Classical Limit of Large N Gauge Theories with Conformal Symmetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2020)021	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 Terashima Seiji	4. 巻 2018
2. 論文標題 Geometry from matrices via D-branes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2018)008	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 Honda Masazumi、Nosaka Tomoki、Shimizu Kazuma、Terashima Seiji	4. 巻 2019
2. 論文標題 Supersymmetry breaking in a large N gauge theory with gravity dual	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2019)159	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 Shimizu Kazuma, Terashima Seiji	4. 巻 2018
2. 論文標題 Supersymmetry breaking phase in three dimensional large N gauge theories	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2018)064	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 Terashima Seiji	4. 巻 2018
2. 論文標題 AdS/CFT correspondence in operator formalism	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2018)019	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 Asano Yuhma, Ishiki Goro, Shimasaki Shinji, Terashima Seiji	4. 巻 2018
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 -
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

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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