

令和 4 年 4 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18766

研究課題名（和文）経路積分の効率化に基づいた場の量子論からの重力ダイナミクスの創発

研究課題名（英文）Gravity Dynamics via Path-integral Optimizations of Quantum Field Theories

研究代表者

高柳 匡（Tadashi, Takayanagi）

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：10432353

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：研究代表者らによって2017年に提案された「経路積分の効率化」は、量子臨界点の物理法則を記述する理論である共形場理論に対して、その量子状態がどれだけ複雑かわらわす「量子計算複雑性」と呼ばれる重要な量子情報量を計算する強力な手法を与える。その効率化の過程で、反ドジッター宇宙が現れ、共形場理論と反ドジッター宇宙における重力理論の対応関係である「ゲージ重力対応」との関連が予想されていた。本研究における研究成果のハイライトは、この謎の解明である。具体的には、反ドジッター宇宙のHartle-Hawking波動関数を最大にすることが、共形場理論の経路積分の効率化に相当することが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ゲージ重力対応は、重力の相互作用が存在しない物質の理論（量子多体系）が、1次元高い宇宙の重力理論と等価になることを主張する大変謎に満ちた対応関係である。非常に多くの具体的な検証がなされており、正しいことは疑う余地がなく、最近の理論物理学における新展開の原動力となっている。本研究で得られた成果は平たく言うと、「量子臨界物質に対する効率の良い計算法を探すプロセスは、実は重力理論において出現確率がもっとも大きな宇宙を探すことに相当している」という新しい理解である。いわば、あるクラスの量子物質を解析する際に、重力理論が高速な量子計算機の役割を果たしているように見える。

研究成果の概要（英文）：The path-integral optimization, proposed by the Principal Investigator in 2017, provides a powerful method to calculate an important quantum information quantity called quantum computational complexity, which expresses how complex a given quantum state is for a conformal field theory, a theory that describes the physical laws at quantum critical points. In the process of the optimization, an anti de-Sitter universe emerges, which has been expected to be related to the Gauge-Gravity correspondence, the correspondence between conformal field theories and gravity theories in the anti-de Sitter universe. The highlight of our research outcome is that we unraveled this mystery. Specifically, it was found that maximizing the Hartle-Hawking wave function in the anti de-Sitter universe corresponds to the path integral optimization in conformal field theories.

研究分野：素粒子論

キーワード：超弦理論 量子エンタングルメント ゲージ重力対応

## 1. 研究開始当初の背景

2017年に研究代表者らが提案した「経路積分の効率化」は、場の量子論における量子状態をユークリッド経路積分で表した時に、それを離散化して数値計算を行う際の計算効率を最大にする手法を与える(原論文はINSPIREデータベースによると2022年4月現在230回以上引用されている)。場の量子論が共形場理論である場合には、スケール不変性を利用して、離散化の格子間隔を変形できる。特に2次元共形場理論の場合は、離散化は全てスケール変換で実現でき、リュービル作用を最小化することで、経路積分の効率化が実行される。この時に、リュービル作用が量子計算複雑性(量子状態がどれだけ複雑なのか表す量)を表すと解釈されるが、これを最小化することで、反ドジッター宇宙の時間一定面の計量が得られる。一方、超弦理論の中心課題であるゲージ重力対応は、反ドジッター宇宙における重力理論が、その境界に置かれた共形場理論と等価になると主張する。ゲージ重力対応はこれまで非常に多くの具体的な検証を受けてきており、疑う余地がない対応関係であるが、未だにその基礎原理は解明されていない。しかし、上記のように経路積分の効率化から反ドジッター宇宙が得られるというメカニズムに、ゲージ重力対応の謎を解く鍵があると予想される。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、この経路積分の効率化とゲージ重力対応の関係を解明することを大きな動機として、以下の3つに分かれる：

- (1) ゲージ重力対応において、共形場理論における経路積分の効率化が、重力理論においてどのような操作に対応するのか明らかにする。
- (2) 経路積分の効率化を用いた共形場理論における物理量の新しい計算法の開発
- (3) ゲージ重力対応の量子情報理論的な側面に関して、経路積分表示を用いた新しいアプローチの開発

## 3. 研究の方法

本研究における研究手法は、主に以下の3つに分かれる。

- (1) 共形場理論とその経路積分の効率化
- (2) ゲージ重力理論を通じた重力理論の解析
- (3) 量子情報理論の手法

## 4. 研究成果

- (1) 経路積分の効率化とゲージ重力対応の関係

研究代表者らは、共形場理論の経路積分の効率化がゲージ重力対応でどのように実現されるか明らかにした。これまで共形場理論のワイル変換を用いて経路積分の効率化が定式化されてきた。効率化を実行すると自然に反ドジッター空間が導出されることから、ゲージ重力対応の基礎原理と深く関わることを示唆されてきた。本研究では、反ドジッター空間の量子重力理論の量子状態を与える「Hartle・Hawkingの波動関数」を考え、それが最大の値をとることが、実は、ゲージ重力対応を通じ、共形場理論の経路積分の効率化と等価になることを見出した。重力理論における物理量はHartle・Hawkingの波動関数の二乗のウェイトを掛けて積分して求められることから、経路積分の効率化は、重力側の計算において支配的な寄与を取り出すことに対応することになる。このことから、重力理論は、共形場理論というクラスの複雑な量子系の解析において、高速な量子計算機のような役割を果たしていると言える。さらに、研究代表者らは、このゲージ重力対応の経路積分の効率化における解釈が、有限温度や実時間などより一般の状況にも拡張されることを見出した。

- (2) ゲージ重力対応における時空の量子回路としての解釈

ゲージ重力対応では、特に共形場理論から反ドジッター時空の重力理論が創発すると考えられ

ており、これまでに非常に多くの証拠が見つかってきているが、完全な説明は未だ得られていない。そこで、何故一次元高い時空が共形場理論から現れるのか理解する必要があるが、本研究では、重力理論の時空の余次元 1 の曲面は、共形場理論を離散化した場合の経路積分の量子回路と解釈できるという新しい予想を提案した。これを仮定すると、余次元 2 の曲面が量子状態に対応するという曲面/状態対応が自然に得られる。またテンソルネットワークによるゲージ重力対応の解釈とも整合性がよい。さらには、経路積分の効率化で現れる複雑性（経路積分の複雑性と呼ぶ）が自然に重力作用の最小化と同一視でき、結果として、サスキンドらの提唱しているホログラフィック複雑性を基底状態について導出することに成功した。特に空間的な曲面に対する量子回路を考えると、経路積分の効率化に現れる離散化されたユークリッド経路積分と解釈される。研究代表者による 2018 年の上記成果を報告した論文は既に 70 回以上引用されている。

### (3) エンタングルメント純粋化の経路積分の効率化を用いた計算法

本研究では、2 次元共形場理論における経路積分の効率化を利用して、エンタングルメント純粋化と呼ばれる量をいくつかのセットアップで計算することに成功した。エンタングルメント純粋化は、研究代表者らによって 2017 年にゲージ重力理論における計算法が提案された。ゲージ重力対応の新しい側面を探求する良い道具として注目を浴びたが、具体的に共形場理論の計算が重力理論からの予想と一致するのか、これまで定量的な検証はなされてこなかった。その大きな理由は、エンタングルメント純粋化では、様々な純粋化に対して最小値を取る必要があり、通常の場合の理論の枠組みでどのように最小値を計算すればよいかわからなかったからである。しかし、経路積分の効率化そのものが最小値を選び出す手法とみなせることが分かった。そこで、本研究では経路積分の効率化の手法をうまく利用することで、両者はいくつかの具体例で一致することを確かめた。本論文は Physical Review Letter 誌に掲載され、これまでに 50 回以上引用されている。

### (4) ウェッジ・ホログラフイーの提案

通常のゲージ重力対応やその一般化であるホログラフイーでは、余次元が 1、つまり重力理論は、それよりも 1 次元低い空間における場の量子論と等価になる。しかし、本研究では、反ドジッター宇宙をウェッジ状の領域に制限した重力理論を考えると、二次元低い共形場理論と等価になることを見出した。エンタングルメント・エントロピー、自由エネルギー、相関関数の振る舞いを調べて、この新しい対応関係がうまく機能することを確認した。これはゲージ重力対応の新しい展開を生み出すとともに、経路積分の効率化の新しい解釈ができることを示唆する。この研究成果は、Physical Review D 誌に出版され、Editor's selection に選ばれた。

### (5) 擬エントロピーと量子相転移

本研究では、擬エントロピーと呼ぶ、研究代表者らがゲージ重力対応に動機付けられて 2020 年に導入した新しい量子情報量を自由場理論の経路積分の離散化を利用して、数値的に解析し、その基本的な性質の数々を初めて明らかにした。この研究は本科研費で雇用した Mollabashi 氏との共同研究によるものである。まず、擬エントロピーを経路積分を用いて計算する手法を発展させ、自由場理論に関して擬エントロピーを計算する公式を見出した。そして、その公式を元に、スカラー場理論に関して擬エントロピーの数値計算を行い、基本的な性質を明らかにした。またイジング模型の常磁性相と強磁性相の擬エントロピーでは、エンタングルメント・エントロピーとの差が正になり、擬エントロピーを用いて量子相転移を検出できることを見出した。この研究成果は Physical Review Letter 誌に掲載された。またその後の Physical Review Research に出版した論文では、より一般の量子相転移に対しても同様に擬エントロピーがオーダーパラメーターとして機能することを見出し、ゲージ重力対応を用いた直観的な説明も与えた。

### (6) 境界のある共形場理論のゲージ重力対応と量子カオス性

本研究では、共形場理論に境界がある場合の性質をゲージ重力対応を用いて考察した。特に、境界から微小の経路積分で定義される境界状態の性質を詳しく調べた。その結果、異なる種類の境界状態の内積は、ゲージ重力対応が成立するようなカオス的な共形場理論では、指数関数的に小さくなることが経路積分表示を利用することで示された。これは、ETH (Eigenstate Thermalization Hypothesis) と呼ばれる量子カオス性の振る舞いの BCFT (境界のついた共形場理論) 版ともいべきものであり、我々の研究で初めて明らかになった。またこの成果は、最近話題となっているアイランド予想とも深い関係があることも分かった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計25件（うち査読付論文 25件/うち国際共著 10件/うちオープンアクセス 25件）

1. 著者名 Akai Ibrahim, Kusuki Yuya, Shiba Noburo, Takayanagi Tadashi, Wei Zixia	4. 巻 126
2. 論文標題 Entanglement Entropy in a Holographic Moving Mirror and the Page Curve	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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/PhysRevLett.126.061604	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 Mollabashi Ali, Shiba Noburo, Takayanagi Tadashi, Tamaoka Kotaro, Wei Zixia	4. 巻 126
2. 論文標題 Pseudo-Entropy in Free Quantum Field Theories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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/PhysRevLett.126.081601	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 Boruch Jan, Caputa Pawel, Takayanagi Tadashi	4. 巻 103
2. 論文標題 Path integral optimization from Hartle-Hawking wave function	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.103.046017	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 Camargo Hugo A., Hackl Lucas, Heller Michal P., Jahn Alexander, Takayanagi Tadashi, Windt Bennet	4. 巻 3
2. 論文標題 Entanglement and complexity of purification in (1+1)-dimensional free conformal field theories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	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/PhysRevResearch.3.013248	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 Akal Ibrahim, Kusuki Yuya, Takayanagi Tadashi, Wei Zixia	4. 巻 102
2. 論文標題 Codimension-two holography for wedges	5. 発行年 2020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.102.126007	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 Nakata Yoshifumi, Takayanagi Tadashi, Taki Yusuke, Tamaoka Kotaro, Wei Zixia	4. 巻 103
2. 論文標題 New holographic generalization of entanglement entropy	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.103.026005	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 Kusuki Yuya, Suzuki Yuki, Takayanagi Tadashi, Umemoto Koji	4. 巻 2020
2. 論文標題 Looking at shadows of entanglement wedges	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental 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) 10.1093/ptep/ptaa152	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 Takayanagi Tadashi, Tamaoka Kotaro	4. 巻 2020
2. 論文標題 Gravity edges modes and Hayward term	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2020)167	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 Adolfo Del Campo, Tadashi Takayanagi	4. 巻 2020
2. 論文標題 Decoherence in Conformal Field Theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2020)170	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 Bhattacharyya Arpan, Takayanagi Tadashi, Umemoto Koji	4. 巻 2019
2. 論文標題 Universal local operator quenches and entanglement entropy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2019)107	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 Suzuki Yuki, Takayanagi Tadashi, Umemoto Koji	4. 巻 123
2. 論文標題 Entanglement Wedges from the Information Metric in Conformal Field Theories	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 221601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.221601	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 Caputa Pawel, Numasawa Tokiro, Shimaji Teppei, Takayanagi Tadashi, Wei Zixia	4. 巻 2019
2. 論文標題 Double local quenches in 2D CFTs and gravitational force	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2019)018	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 Bhattacharyya Arpan、Jahn Alexander、Takayanagi Tadashi、Umemoto Koji	4. 巻 122
2. 論文標題 Entanglement of Purification in Many Body Systems and Symmetry Breaking	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 201601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.201601	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 Takayanagi Tadashi、Ugajin Tomonori、Umemoto Koji	4. 巻 2018
2. 論文標題 Towards an entanglement measure for mixed states in CFTs based on relative entropy	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/JHEP10(2018)166	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 Pawel Caputa、Masamichi Miyaji、Tadashi Takayanagi、Koji Umemoto	4. 巻 122
2. 論文標題 Holographic Entanglement of Purification from Conformal Field Theories	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letter	6. 最初と最後の頁 111601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.111601	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 Takayanagi Tadashi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Holographic spacetimes as quantum circuits of path-integrations	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/JHEP12(2018)048	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 Shimaji Teppei, Takayanagi Tadashi, Wei Zixia	4. 巻 2019
2. 論文標題 Holographic quantum circuits from splitting/joining local quenches	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)165	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 Suzuki Kenta, Takayanagi Tadashi	4. 巻 2021
2. 論文標題 JT gravity limit of Liouville CFT and matrix model	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/JHEP11(2021)137	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 Nishioka Tatsuma, Takayanagi Tadashi, Taki Yusuke	4. 巻 2021
2. 論文標題 Topological pseudo entropy	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)015	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 Akal Ibrahim, Kusuki Yuya, Shiba Noburo, Takayanagi Tadashi, Wei Zixia	4. 巻 38
2. 論文標題 Holographic moving mirrors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 224001 ~ 224001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ac2c1b	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 Mollabashi Ali, Shiba Noburo, Takayanagi Tadashi, Tamaoka Kotaro, Wei Zixia	4. 巻 3
2. 論文標題 Aspects of pseudoentropy in field theories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	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/PhysRevResearch.3.033254	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 Hartnoll Sean, Sachdev Subir, Takayanagi Tadashi, Chen Xie, Silverstein Eva, Sonner Julian	4. 巻 3
2. 論文標題 Quantum connections	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Reviews Physics	6. 最初と最後の頁 391 ~ 393
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42254-021-00319-0	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 Boruch Jan, Caputa Pawel, Ge Dongsheng, Takayanagi Tadashi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Holographic path-integral optimization	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/JHEP07(2021)016	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 Miyaji Masamichi, Takayanagi Tadashi, Ugajin Tomonori	4. 巻 2021
2. 論文標題 Spectrum of end of the world branes in holographic BCFTs	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/JHEP06(2021)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

1. 著者名 Takayanagi Tadashi、Uetoko Takahiro	4. 巻 2021
2. 論文標題 Chern-Simons gravity dual of BCFT	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/JHEP04(2021)193	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 -

[学会発表] 計33件(うち招待講演 33件/うち国際学会 33件)

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Page Curve from Holographic Moving Mirror and End of the World brane
3. 学会等名 Online workshop on Quantum Gravity, Holography and Quantum Information (主催国:ドイツ)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Page Curve from Holographic Moving Mirror
3. 学会等名 HoloTube Webinar The Applied Holography Webinars Network (主催国:スペイン)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Quantum Entanglement and Holography
3. 学会等名 The 15th Kavli Asian Winter School on Strings, Particles and Cosmology (主催国:中国)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Path-integral Optimization and AdS/CFT
3. 学会等名 TENSOR NETWORKS: FROM SIMULATIONS TO HOLOGRAPHY III (オンライン、主催:カナダ Perimeter研究所)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Recent Progresses of AdS/BCFT
3. 学会等名 Quantum Aspects of Space-Time and Matter (オンライン、主催:ドイツ AEI研究所)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Recent Progresses in Path-integral Optimization
3. 学会等名 10th International Conference on Exact Renormalization Group 2020 (オンライン、主催:京都大学基礎物理学研究所)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 AdS/BCFT, Entanglement Wedges and Wedge Holography
3. 学会等名 Conference on The Dual Mysteries of Gauge Theories and Gravity (オンライン、主催:インド IIT Madras)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Emergence of Universe from Quantum Entanglement
3. 学会等名 Colloquium (Online), IIT Gandhinagar (主催国: インド) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Holographic Pseudo Entropy and Complexity
3. 学会等名 Online Workshop "Complexity from Quantum Information to Black Holes", (主催: オランダ Lorentz Center) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Holographic Pseudo Entropy
3. 学会等名 Online Conference "Frontiers of holographic duality", (主催: ロシア Steklov Mathematical Institute) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Entanglement Wedges from CFTs
3. 学会等名 Quantum Information in Quantum Gravity V, UC Davis, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Entanglement Wedges from Information Metric in Conformal Field Theories
3. 学会等名 KIAS-YITP 2019, KIAS ,Seoul, Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Entanglement Wedges from Information Metric in Conformal Field Theories
3. 学会等名 Entangle This: Chaos, Order and Qubits, UAM, IFT, Madrid, Spain (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Entanglement Wedges and AdS/CFT
3. 学会等名 Gravity, Information and Fundamental Symmetries, Max Planck Institute of Quantum Optics, Garching, Germany (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Looking at Shadows of Entanglement Wedges
3. 学会等名 Geometry from the Quantum, KITP, Santa Barbara, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Quantum Entanglement and Holography
3. 学会等名 Spring School on Superstring Theory and Related Topics, Trieste, Italy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Entanglement of Purification and Holography
3. 学会等名 Tensor Networks from Simulation to Holography II, Berlin, DESY Zeuthen, Germany (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Quantum Entanglement and Holographic Spacetime
3. 学会等名 Coloquium, AEI, Potsdam, Germany (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Recent Developments in AdS/CFT
3. 学会等名 The 4th KMI International Symposium, KMI, Nagoya (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Holographic Entanglement of Purification and CFT Dual
3. 学会等名 NCTS Annual Theory Meeting 2018: Particles, Cosmology and Strings, Hsinchu, Taiwan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Holographic Entanglement of Purification and CFT Dual
3. 学会等名 KEK Theory Workshop 2018, KEK (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Holographic Spacetimes as Quantum Circuits of Path-Integrations
3. 学会等名 East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2018, Seoul (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Holography and Quantum Entanglement
3. 学会等名 Lecture at YITP international workshop: Quantum Information Entropy in Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Emergence of Gravitational Spacetime from Quantum Information
3. 学会等名 The Physical Society of Japan 2022 Annual (77th) Meeting, Plenary Session Program(総合講演)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Extreme Universe of spacetime and matter from quantum information
3. 学会等名 Physics Frontiers with Quantum Science and Technology, U. of Tokyo (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 A new generalization of entanglement entropy
3. 学会等名 Colloquium, ICTS, India (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Holography in de Sitter Space via Chern-Simons Gauge Theory
3. 学会等名 RIKKYO MathPhys. 2022 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Holography in de Sitter Space via Chern-Simons Gauge Theory
3. 学会等名 Indian Strings Meeting 2021, IIT Roorkee, India (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Holography and Quantum Information
3. 学会等名 Plenary Talk at IRCHEP 1400, Iran (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Emergent Holographic Spacetimes from Quantum Information
3. 学会等名 Colloquium ,Dept. of Physics and Astronomy, Seoul National Univ. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 A New Generalization of Entanglement Entropy: Pseudo Entropy
3. 学会等名 Quantum Information in QFT and AdS/CFT-II, IIT Gandhinagar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 Page Curve from Holographic Moving Mirror and End of the World brane
3. 学会等名 Nordic remote HET seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tadashi Takayanagi
2. 発表標題 A New Generalization of Entanglement Entropy: Pseudo Entropy
3. 学会等名 Seminar, Jilin University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 高柳 匡	4. 発行年 2020年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 136
3. 書名 量子エンタングルメントから創発する宇宙	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都大学教育研究活動データベース  <a href="https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/j/dK5iC">https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/j/dK5iC</a>          個人のページ  <a href="http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~tadashi.takayanagi/">http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~tadashi.takayanagi/</a></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1件

国際研究集会 quantum information and string theory	開催年 2019年～2019年
---	--------------------

## 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			
ドイツ	Albert Einstein Institute, Potsdam	Free University Berlin	Max Planck Institute Munich	
ポーランド	Warsaw University			
デンマーク	Copenhagen University			
ドイツ	ベルリン自由大学			
スペイン	IKERBASQUE, Bilbao			
カナダ	マギル大学			
米国	ケンタッキー大学	UC Berkeley		
カナダ	ペリメーター研究所			