

Title	Quantum Entanglement, Fidelity Susceptibility, and Scrambling from AdS/CFT correspondence(Abstract_要旨)
Author(s)	Miyaji, Masamichi
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2019-03-25
URL	https://doi.org/10.14989/doctor.k21567
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

(続紙 1)

京都大学	博士（理学）	氏名	宮地 真路
論文題目	Quantum Entanglement, Fidelity Susceptibility, and Scrambling from AdS/CFT correspondence		

(論文内容の要旨)

本博士論文には、量子情報理論の考え方を用いてAdS/CFT(反ドジッター時空/共形場理論)対応の理解を深める研究成果がまとめられており、宮地氏のこれまでに雑誌に出版された3本の論文に基づく。AdS/CFT対応は、「曲がった時空(反ドジッター時空)を記述する重力理論と、重力を含まないミクロな理論(量子多体系、特に共形場の理論)が等価である」という予想である。20年以上前に発見され、多くの検証がなされてきたにもかかわらず、何故そのような対応関係が成り立つかその基礎原理は未解決のままであり、超弦理論の分野では現在最も活発に研究が進んでいる分野である。ここ最近の多くの研究で、量子情報理論とAdS/CFT対応の原理が密接にかかわっていることが明らかになってきた。例えば、量子エンタングルメントやそのエントロピーの対応関係については非常に多くの結果が知られてきており、博士論文でも冒頭に触れられている。

本博士論文では、量子情報理論とAdS/CFT対応の深い関係について、大きく分けて二つの視点からの研究成果が書かれている。一つ目の視点は、情報計量(Fidelity Susceptibility)を場の理論に対して計算することであり、二つ目の視点は、量子情報理論で重要な量子操作を場の理論に導入することである。それぞれの詳細を以下で順に説明したい。

まず、情報計量を用いた解析では、情報計量を場の量子論に対して初めて導入した。具体的には、場の量子論の作用を演算子で変形し、その変形パラメーターに関する情報計量を定義する。具体的に経路積分で解析することで、この情報計量はその変形に用いた演算子の2点関数を積分することで求められることが明らかにされた。さらに共形場理論に対してはスケール性から2点関数の形が決まるこに着目して、普遍的な振る舞い(体積則)を見出した。熱場2重状態と呼ばれる非自明な時間発展する量子状態についても、具体的に情報計量を計算し、最終的に時間に比例するように情報計量が増加することが示された。

さらに、この情報計量が共形場理論のマージナル変形では、AdS/CFT対応を用いて、重力理論における時空の時間一定面の体積として計算できるという予想を提起した。ある時刻に急に結合定数が変化する系の重力理論における対応物はヤヌス解と呼ばれ、その解を薄い膜で近似することで、前述の予想を得ている。具体的に複数の例で計算を行い、この予想が少なくとも半定量的に正しいという検証結果を得ている。エンタングルメント・エントロピーが重力理論の時空の余次元2の曲面の極小面積に対応することが知られているが、情報計量は余次元1の極大体積に対応することが分かったことになり、エンタングルメント・エントロピーでは捉えることができない時空領域を情報計量でプローブすることができ興味深い。

この情報計量の興味深い応用として、スクランブリング現象を解析している。十分相互作用がある量子系において、空間の一点を励起するとその励起が四方に複雑に伝播し、背景に散逸する。この熱化現象をスクランブリングと呼ぶ。最近このスクランブリング現象は、量子カオスとの関係で多くの研究者に興味を持たれ、特に演算子の交換子が時間とともに指数関数的に増大することがスクランブリング現象に対応することが指摘してきた。宮地氏の博士論文では、この最近の知識を用いて、具体的に

共形場理論における空間の一点を励起した場合の時間発展を考え、その情報計量を見積もった。その結果、情報計量には演算子の交換子に比例する項があり、指數関数的に増大することを見出した。一方、AdS/CFT対応を用いた予想を用いた計算では、励起に相当する衝撃波が時空に伝播する背景での極大体積を計算することになる。その結果として、前述の共形場理論における情報計量の振る舞い、すなわち指數関数的な増大を再現できることを確認した。

二つ目の視点である量子操作を用いた解析では、共形場理論において、離れた2点間に相互作用を導入すると、どのように対応する重力理論の時空が変化するのか明らかにした。2点間の相互作用はダブルトレース演算子で共形場理論の変形を行うことに相当し、AdS/CFT対応では、反ドジッター時空中の場の境界条件を変えることに相当する。具体的な例で、その境界条件の変化が量子的に及ぼす背景の計量への変化を計算したところ、その2点間をバルク時空（反ドジッター時空を変形したもの）で往来する際にかかる時間が、相互作用がない場合と比べて、短くなることが示された。同時に、平均ヌルエネルギー条件も破れていることが分かった。平均ヌルエネルギー条件が破れるのは、最初に因果的につながっていない2点間に相互作用を導入したからであり、最近話題となっている進行可能なワームホールのAdS/CFTにおける実現と類似したメカニズムである。さらに、この相互作用を導入した際に、共形場理論のエンタングルメント・エントロピーが時間とともにどのように変化するかを具体的な計算で明らかにし、フォンノイマン・エントロピーでもレンニ・エントロピーでも類似する特徴的な振る舞いをすることを見出した。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本博士論文では、超弦理論において活発に研究が行われているAdS/CFT対応と量子情報理論の関わり合いに関して、二つの新しい視点を提起し、それぞれに関して興味深い結果を報告している。情報計量(Fidelity Susceptibility)という概念を初めて場の理論に導入し、それがAdS/CFT対応において時空の極大体積という基本的な幾何学量に対応していることを発見し、AdS/CFT対応のメカニズムにおいても本質的な役割を担うことが明らかになった。またこの情報計量は非平衡過程に対しても有用な量となることも見出した。これらの研究成果は、超弦理論の発展への重要な貢献といえる。従来のエンタングルメント・エントロピーを用いた計算とは全く異なる新しい解析法を提案していることは画期的である。今後の関連研究の発展も期待される。

また、量子操作を場の理論に導入し、そのAdS/CFT対応を考察すると重力理論の時空の因果性の性質を大きく変えることを見出した研究成果も大変興味深い。量子情報理論では様々な量子操作が行われるが、その中でも重要なクラスに関してAdS/CFT対応が明らかになったわけであり、今後の更なる研究でAdS/CFT対応の操作的な解釈の全貌が理解されてゆくと期待される。実際に、博士論文ではこの量子操作を行うと、エンタングルメント・エントロピーが特徴的な振る舞いを示すを見出している。このような研究の方向性は、AdS/CFT対応はなぜ成立するのかという現在でも未解決な根源的な問題の解決の鍵になると期待され、重要な研究といえる。

以上のように、宮地氏の博士論文では、AdS/CFT対応の基礎原理の理解を深めることにつながる、大きく分けて二つの重要な研究成果が述べられており、両者ともに今後のさらなる発展が期待される。また、本博士論文は3本の出版論文に基づいており、そのうち2本は、宮地氏の単著論文である。このことからも、上記の研究成果を得る際に宮地氏が極めて重要な役割を果たしたことがうかがわれる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降