

## 論文審査の結果の要旨

氏名 中口 悠輝

$d$ 次元の重力を含まない或る場の理論と  $d + 1$ 次元の重力を含む別の理論とが或る種の等価性を示すことを、ホログラムからの類推に基づいて、ホログラフィーと呼ぶ。ホログラフィーが成立することを証明することは極めて難しい問題であるが、近年ホログラフィーが成り立つと予想される例が多数見出され、それを応用することで様々な場の理論の非自明な性質が重力側の幾何学的な性質に帰着されて理解できるようになってきた。その一例が、場の理論側における真空のエンタングルメントエントロピーを重力側の曲面の最小面積と同定した、所謂 Ryu-Takayanagi 公式である。これは、逆の見方をすれば、重力側の幾何学的情報を量子論側の物理量として理解することでもあり、強結合領域から外れていけば、量子重力の幾何学をどのように理解するのかとの長年の問いにも迫る可能性を秘めている。

このような背景のもとで論文提出者は、場の理論側の様々なエンタングルメントに関わる諸量と重力側の量との関係を一連の研究によって追求した。本論文では、第 1・2 章で背景説明と技術的準備を行った後、論文提出者の 4 本の独立した研究の成果が第 3 章から第 6 章にわたってまとめられている。

まず第 3 章では、有質量系の相互情報量を初めて直接求め、先行研究で仮定されていた質量の逆数による展開公式には現れ得ない、指数関数的振る舞いがあることを突き止めた。この結果、先行研究に対して指摘されていた加法性の問題点が、この新しい項によって解消されることを明らかにした。

次に第 4 章では、時間依存するエンタングルメントに対するホログラフィー的理解を与えた。そこから特徴的な振る舞いが何に由来するかという点に関して新しい解釈を与えた。また第 5 章では、繰り込まれた工

ンタングルメントエントロピーをシリンダーの場合に定義し、具体的な表式を求めた。

最後に第6章では、Rényi エントロピーやモデュラーエントロピー等が満たすいくつかの不等式に対してホログラフィー的証明を与えた。中でもエンタングルメント容量の正定値性を、重力側の作用の古典解まわりのヘッセ行列と結びつけることに初めて成功した。ただし、一般の場合にはこのヘッセ行列は正定値ではないことが以前から知られており、不等式が自明に成立するわけではない。ヘッセ行列と縮約をとるベクトルの性質をさらに調べる必要があり、残念ながらこの部分の証明は完結していない。しかし、問題をここまで追い詰めたことは重要な結果であり、高い評価に値する十分な成果と言える。

以上のように、エンタングルメントに関する諸量をホログラフィー的に理解するための数々の有用な研究成果を得ており、今後に大きな影響を与えることは間違いない。なお、それぞれの研究は、共同研究者との共著論文に基づいているが、論文提出者が主体的に研究を遂行し、その寄与が十分であると判断した。

以上により、本審査委員会は、申請者に対し博士（理学）の学位を授与できると認める。