HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study of Local Bulk Operator inside the Horizon of BTZ Black Hole [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	塩原, 堅司
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第14359号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81936
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kenji_Shiohara_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（理　学）　氏　名　　塩　原　堅　司

審査担当者	主査	准教授　中　山　隆　一
	副査	教　授　鈴　木　久　男
	副査	教　授　小　林　達　夫
	副査	講　師　末　廣　一　彦

学 位 論 文 題 名

Study of Local Bulk Operator inside the Horizon of BTZ Black Hole
（BTZ ブラックホールのホライズン内部における局所的なバルク演算子に関する研究）

博士学位論文審査等の結果について（報告）

近年、ブラックホール内部の量子論に関する研究が盛んに行われている。これらの研究については、ブラックホールの成長、蒸発に伴う非ユニタリー性の問題を解決することが主な動機になっている。しかし、時間変化をしないブラックホールの場合でもホライズン内部の量子論については未知の領域であり、ブラックホール物理の理解のためその解明が急務である。

時間変化しないいわゆる永遠(eternal)ブラックホールのペンローズ図は、角運動量を持たないブラックホールの場合、2 つの外部領域（I, III）と未来の内部領域(II)、過去の内部領域(IV)のそれぞれ 4 つの領域からなる。宇宙定数が負である反ドジッター（AdS）時空の場合、2 つの外部領域の無限遠には、それぞれに時間的境界面が存在し、それらの上にはコンフォーマル不変な場の理論（CFT）が存在している。ホログラフィー原理に基づく AdS/CFT 対応の理論では、これらの 2 つの境界上のコンフォーマル理論によって、ブラックホールの外部だけでなく内部も記述されると期待されている。しかしながら、ホライズン内部については具体的な量子化に基づく研究は未だなされていない。

本論文は、このような状況にあって、3 次元の Banados-Teitelboim-Zanelli(BTZ)ブラックホール時空のホライズン内部領域 II におけるスカラー場の基準モードを解析的手法を用いて具体的に求め、スカラー場の量子化を行い、ホライズン内部におけるスカラー場の演算子を境界上の演算子を用いて具体的に表現する研究を行ったものである。ホライズン内部は、外部とは時間の座標が異なり、さらに曲がった時空であって特異点も存在するため、解析的な研究が難しい。また、左右ホライズンに於いてスカラー場の外部領域 I、III での値との接続条件を課す必要がある。これらの解析を実際に実行した例は、これまでなかった。

この量子化のためには、ホライズン内部の規格化された基準モードを解析的に計算する必要がある。本研究では、3 次元反ドジッター時空から BTZ ブラックホール時空への座標変換を利用し、ブラックホール時空における基準モードの積分表示を外部と内部それぞれにおいて構成した。ホライズンに於いては、外部と内部との基準モードの間の特別な接続条件が Papadodimas-Raju によって提案されている。本研究では、BTZ ブラックホールの場合に、この接続条件を満たすことができることを確認し、この条件の解を具体的に求めた。この結果以下のことが示された。

まず、ホライズン内部のスカラー場の基準モードは外部との接続条件のみでは一意的には決まらないことが分かった。これまでホライズン内部の基準モードは接続条件により一意的に決まると考えられていた。一意的にならない原因は、ホライズン上で線形従属になる基準モードがあるため、ホライズン上でゼロになる項をモードに加える自由度があるからである。また、ホライズン内部では時間方向がキリングベクトルの方向でないため、正振動数状態を自然に定義できず、基準モード関数の空間が不定計量になる。本研究では、未来での正振動数基準モードに関する条件を付けることで、ホライズン内部の基準モードを決定した。これによって、ホライズン内部も、無限遠の境界 CFT と関係づけられることが示された。また、求まったスカラー場の演算子を用いて、ホライズン内部の点と外部の点の間のスカラー場のプロパゲーターを計算した。これまでの他の先行研究では、このプロパゲーターは外部２点間のプロパゲーターを解析接続することによって得られるとされてきたが、それとは異なる結果になることが示された。これは領域 II にはホライズンを経由して領域 I と III から粒子が入るためである。

ホライズン内部のスカラー基準モードに対する付加条件については、他の条件を考える余地および位相因子の不定性もあり、さらに研究が必要である。高次元のブラックホールや時間変化するブラックホーについても研究はこれからであるが、3 次元における本研究の結果は、ホライズン内部の量子論が従来の予想とは大きく異なることを示しており、この研究によって得られた知見は、高次元のより現実的なブラックホール内部の理解に資するところ大であると考える。

これを要するに、著者は、ブラックホール内部における量子論と AdS/CFT 対応についての新知見を得たものであり、これらの分野に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。