

別紙4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 New formulation of wormhole

(ワームホールの新しい定式化)

氏 名 富川 祥宗

## 論 文 内 容 の 要 旨

wormhole は一般相対論でしばしば考察される非自明な時空である。仮にそれが存在したとすると超光速、又は高速（亜光速）で時空を移動できると考えられている。しかしその存在のためにはいくつかの問題がある。例えば wormhole は throat と呼ばれる構造を持っているが、その維持にエネルギー密度が負になっているような非物理的なエキゾチック物質が必要であると言われている。一方で初期特異点を持つ場合に例外が存在することも指摘されている。

これまで wormhole や throat に対して複数の定義が提案されてきたが、throat の概念が準局所的なものであるため、広いクラスの wormhole 的な時空に適用できる定義はなかった。主論文では、これまでに提案されてきた throat などの定義の長所のみを抽出する形で、光的測地線束を用いて wormhole の新しい定式化の提案を行う。また、余剰次元を持つ時空モデルにおいてエキゾチック物質を導入することなく、特異点も持たない wormhole が実現できることを最近構成された解の時空構造を調べることで示す。

第1章では導入として、wormhole 研究の歴史、問題点など、本研究で扱うテーマの背景を述べる。

第2章では、本研究に必要な一般相対論と wormhole の基礎事項を簡単にまとめる。一般相対論に関しては、Einstein 方程式と測地線束について触れた後にエキゾチック物質を特徴付けるためにエネルギー条件の導入を行う。また、wormhole を定義する際に black hole が存在しないことを要請する。そこでその典型例である Schwarzschild black hole の時空構造に触れる。そして宇宙論的な wormhole の基礎として、一様等方宇宙についても触れる。wormhole に関しては、空間のくびれに対応する throat の特徴付けに対する代表的な三つの提案 (Morris-Thorne, Hochberg-Visser, 前田-原田-Carr) を紹介する。しかし、throat はそれぞれ空間的、あるいは null 超曲面上の極小曲面として定義されることに注意する。さらに、代表例として Morris-Thorne wormhole と宇宙論的 wormhole の紹介を行う。

第3、4章は出版論文に基づいたオリジナルな部分である。第3章では、wormhole の新しい定式化を与える。これまでの研究では空間的、あるいは null 超曲面上の2次元面の面積の極小曲面として throat が定義されていたが、我々は2次元面から外向きと内向きに出る未来向きの null 測地線の束に注目し、その expansion rate (断面積の増加率)  $\theta_{\pm}$  の差から定義される量  $k = \theta_{+} - \theta_{-}$  を第二基本形式のトレースの代用として、throat 上で  $k = 0$  となることを要請した。そして wormhole を throat は持つが event horizon は存在しない時空として定義する。さらに traversable wormhole を throat の時系列の接ベクトルが timelike であることで特徴付ける。我々の定式化を用いると、静的な wormhole 時空の構成にエキゾチック物質の導入が不可欠であることを容易に示すことができる。次に、いくつかの球対称時空で我々の新しい定式化の有用性を確認した。このとき、初期特異点を持つ時空でも新しい定式化が適用できることも確認した。

第4章ではエキゾチックな物質の導入も特異点もない余剰次元を持つある非自明な時空の構造を解析し、それが wormhole になっていることを示す。最近、高次元宇宙モデルの一つである5次元の Dvali-Gabadadze-Porrati (DGP) ブレーンワールドモデルの非自明な真空解が構成された。ブレーンワールドでは我々の住む4次元時空が5次元時空内の薄い膜であるブレーンとして記述される。我々はこの新しい解のブレーン上の時空の大域構造を解析することで、traversable wormhole になっていることを示した。この時空は初期特異点もなく、真空解のためエキゾチック物質も存在しないという一見するとこれまでの理解を覆す性質を持つ。そこで4次元ブレーン上ではブレーン上の4次元の Einstein テンソルから定義される effective stress-energy がエキゾチック物質のような性質を持つことを示し、矛盾がないことを確認した。

第5章では全体のまとめと今後の課題を述べる。