

氏名	富川 慶太郎 (とみかわ けいたろう)
学位の種類	博士 (理学)
報告番号	甲第606号
学位授与年月日	2023年3月31日
学位授与の要件	学位規則(昭和28年4月1日文部省令第9号) 第4条第1項該当
学位論文題目	Toward Tests of Modified Gravity with Cosmological and Astrophysical Gravitational Waves (宇宙論的、天体物理学的重力波を用いた修正重力理論の検 証に向けて)
審査委員	(主査) 初田 泰之 (立教大学大学院理学研究科准教授) 小林 努 (立教大学大学院理学研究科教授) 平山 孝人 (立教大学大学院理学研究科教授)

## I. 論文の内容の要旨

### (1) 論文の構成

本論文の第一章では、論文全体に対する導入として、研究背景や動機などが簡潔に述べられる。第二章では、本論文のテーマとなる修正重力理論についての基本事項がレビューされる。第三章では、一般相対論におけるブラックホールの摂動論がレビューされ、特にマスター方程式と呼ばれる基礎方程式や準固有振動モードの概念的説明が与えられる。第四章においては、修正重力理論で重要なクラスであるスカラー・テンソル理論におけるブラックホール解の構成について述べられる。第五章と第六章が申請者によるオリジナルな研究成果である。まず第五章ではスカラー・テンソル理論のブラックホール摂動論が展開される。特に奇パリティセクターの摂動が詳細に解析され、マスター方程式が一般的な形で導出される。そして準固有振動数の定量的な評価が与えられ、一般相対論との相違が示される。第六章では修正重力理論における非一様な宇宙での重力波の伝播についての解析がなされる。特に非一様性を摂動的に扱い、これまでの観測事実との比較・検討により、修正重力理論のパラメータに関する制限が与えられる。

### (2) 論文の内容要旨

本論文で申請者は、修正重力理論におけるブラックホール摂動論と宇宙論的摂動論の2つの異なる観点から理論の妥当性についての定量的な評価を行い、新しい知見を得た。

第五章では、シフト対称性を持つスカラー・テンソル理論のブラックホール摂動論を、特に奇パリティセクターに焦点を当てて詳細な解析を行った。一般相対論とは異なり、修正重力理論は多くの未知関数を含み、ラグランジアンが非常に複雑な形になるが、2次のオーダーまでのラグランジアンを顕に書き下し、地道な計算の末、摂動の基礎方程式(マスター方程式)を後の解析に便利な形で導出した。その結果を用いて、ブラックホールの準固有振動数を定量的に解析した。特に準固有振動数の計算では境界条件が重要であるが、今の場合には重力子と光子で地平面の位置が異なることに注意を払い、準固有振動数が修正重力理論のパラメータに依存して変化することを示した。

第六章では、4次元時空全体ではなく、3次元空間に対する共変性を持つ重力

理論の定式化を用いて、修正重力理論における非一様な宇宙での重力波の伝播に関する解析を行った。特に非一様な宇宙においても重力波が光子と同じ様に伝播するためには、修正重力理論中のいくつかの未知パラメータに対する強い制限が課されることを示した。

## II. 論文審査の結果の要旨

### (1) 論文の特徴

本論文は、一般相対論を含む広いクラスの重力理論について、いくつかの観点から、その妥当性を検討するものである。単なる理論的な計算だけに留まらず、現在の観測結果を踏まえた上で、修正重力理論の検証可能性を考察しており、重力理論だけでなく、宇宙論や重力波天文学にも跨る点が特徴的である。今後、重力波観測の精度が向上すれば、このような方向の研究がますます盛んになっていくことは容易に想像でき、本論文はその先駆け的な研究に位置付けられることが期待される。

### (2) 論文の評価

修正重力理論は一般相対論では説明することが難しい問題を解決する可能性を秘めており、世界中の多くの研究者が精力的に取り組んでいる。そのような競争の激しい分野において、本論文はいくつかの新しい成果を提示した。まずシフト対称性を持つスカラー・テンソル理論について、時間に依存するスカラー場を持つ球対称ブラックホールの摂動論を詳細に展開した。線形近似におけるインシュタイン方程式は、なお複雑な方程式であるが、適切なゲージ固定や変数変換を行うことで、解析が容易なマスター方程式を導出した。またこの設定において、これまであまり深く検討されてこなかった重力子と光子に対する地平面の位置が異なることに細心の注意を払い、準固有振動モードが持つべき境界条件を明らかにした。境界条件が変われば準固有振動数の値も変化してしまうため、これは重力波の観測結果から理論の妥当性を検討する上で極めて重要な問題である。また非一様な宇宙での重力波の伝播を調べるために、宇宙論的摂動論を用いて定量的な解析を行った。現在の観測結果では、重力波の伝播速度は光速とおよそ $10^{-15}$ のオーダーで一致するが、このような観測結果からの要請により、修正重力理論のいくつかのパラメータについて極めて強い制約が課されることを明確に指摘した。これは修正重力理論と観測結果を結びつける成果であり、高く評価される。富川氏はこれらの研究において主要な寄与を果たしており、学位論文として十分な水準であると認められる。