

氏名	彌永 亜矢
学位の種類	博士 (理学)
報告番号	甲第 558 号
学位授与年月日	2021 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	Extended Cuscuton Theory: Formulation and Dark Energy (拡張されたカスカートン理論: 理論の構築およびダークエネルギーモデルへの応用)
審査委員	(主査) 中山 優 (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) 村田 次郎 (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

第1章の序論では、研究テーマの背景と研究に至った動機が示されている。第2章では、本研究テーマの研究背景に当たる一般相対性理論と修正重力理論のレビューがなされている。特に、一般相対性理論を計量テンソルだけでは拡張することが難しいとするラヴロックの定理を引用し、スカラー自由度の導入を動機づけ、オストラグラドフスキー不安性を回避する一般のクラスのスカラー・テンソル理論の紹介を行っている。第3章では、本論文の主題となるカスケートン理論が、一般相対性理論と同じ伝搬自由度を保つスカラー・テンソル理論の一種として導入され、先行研究が紹介されている。第4章以降が本人のオリジナルな内容を含み、本論文の主題である。第4章では、拡張されたカスケートン理論という概念を定義し、その性質を満たすスカラー・テンソル理論のクラスを同定した。具体的には、まず、宇宙論的な一様等方時空での時間発展から伝搬自由度が一般相対性理論と同じとなる理論のクラスを見つけ、さらにハミルトニアン解析をすることで一般的な時空でも（カスケートンとなるスカラー場の勾配が時間的である限り）伝搬自由度が一般相対性理論と同じであり続けることを示した。第5章では、このようにして得られた拡張されたカスケートン理論の宇宙論的な応用を議論し、特に私達の宇宙の時間発展と矛盾しない理論が存在することを示した。拡張されたカスケートン理論では、一般相対性理論からの違いとして、「万有引力定数」の時間変化や物質の密度ゆらぎの変更が予言される。本研究では、パラメタをうまく選ぶことによって、現在の観測の制限と矛盾しないが、将来の観測で見つかるかもしれない新しい現象を示す重力理論の候補として拡張されたカスケートン理論が有望であるということを示している。第6章は、本論文のまとめであり今後の展望が議論されている。

### (2) 論文の内容の要旨

一般相対性理論は現在のところ量子力学が適用されない領域ではあらゆる観測・実験と矛盾していない古典重力理論として成功を収めている。一方、一般相対性理論と宇宙論的な観測の整合性を取るためには、未だ正体のよくわかって

いないダークエネルギー、ダークマターといった重力源が必要であり、拡張された重力理論（いわゆる修正重力理論）を考えることは一般相対性理論の限界を考える上で重要であると考えられる。

修正重力理論として最も簡単なものは、単一のスカラー場を重力の作用に加えることである。古典的な運動の安定性を考慮すると、運動方程式は2階の微分方程式で表されることが自然であり、そのような運動方程式を与える一般的な作用は GLPV 理論と呼ばれている。

GLPV 理論は一般相対性理論における伝搬自由度に単一のスカラー場の伝搬自由度が加わっているため、 $2 + 1$  自由度が期待されている。しかし、GLPV 理論の特別な場合は、2 自由度しか伝搬自由度を持たない、一般相対性理論の最小限な拡張になっていることがあり得る。その簡単な例がカスケートン理論として知られていた。本論文では、GLPV 理論の枠内で、2 自由度の伝搬自由度を持つ一般的な作用のクラスを構築し、「拡張されたカスケートン理論」と名付けた。

拡張されたカスケートン理論の構築のために、宇宙論的な一様等方時空での運動方程式を調べ、カスケートンとなるスカラー場が正の時間勾配を持つ場合に、理論の伝搬自由度が2になる条件を調べた。さらに、こうして得られた条件下では、一様等方とは限らない一般の背景時空でもスカラー場の勾配が時間的である限り理論の伝搬自由度が2であるということをハミルトニアン解析によって示した。

以上の理論的な解析に加えて、本論文では拡張されたカスケートン理論と私達の宇宙における観測的な制限との整合性を調べている。私達の宇宙の時間発展では、過去に物質優勢期があり、現在は加速膨張に転じていることがわかっている。また、私達の宇宙では万有引力定数はほとんど時間変化しておらず、重力波と光の速度はほぼ等しい。拡張されたカスケートン理論が含まれる GLPV 理論ではこれらの条件は自動的に満たされず、拡張されたカスケートン理論がこれらの制限を満たしつつ新しい予言ができるのか？は非自明な問題である。本論文では拡張されたカスケートン理論の中で、現在の宇宙論的な観測と矛盾せず、新しい現象、例えば万有引力定数の時間変化、が起こるモデルパラメタが存在することを示した。

## II. 審査結果の要旨

### (1) 論文の特徴

拡張されたカスケートン理論は修正重力理論の中でも、伝搬自由度が一般相対論と変わらないという点で特別な位置を占めている。本論文では、伝搬自

自由度が2に留まるスカラー・テンソル理論の一般的な構造を確立し、宇宙論的な観測データと矛盾しないモデルが存在することを示した。これは修正重力理論における一里塚であり、今後のより精密な実験・観測との比較検証が待たれる。

## (2) 論文の評価

一般相対性理論は現在のところ量子力学が適用されない領域ではあらゆる観測・実験と矛盾していない古典重力理論として成功を収めているが、その適用限界を理解するためにも、拡張された重力理論を精査することは重要である。最も単純な拡張はスカラー場を加えることであるが、その場合に理論に含まれる伝搬自由度は $2 + 1$ になることが期待される。しかし、特別な場合に2に留まることがあり得る。そのような可能性を網羅的に調べたのが本論文である。

本論文では、このような特殊なスカラー・テンソル理論を拡張されたカスケートン理論と呼び、その力学的な構造をハミルトニアン解析で調べ、さらに宇宙論的な観測との整合性を調べた。本論文によって、伝搬自由度が2に留まる（単一スカラー場による）修正重力理論の一般的な枠組みができ、さらに宇宙論的な観測と矛盾しないパラメタの存在も示された。これは、修正重力理論とその宇宙論への応用に関して新しい知見を人類に与えるものである。そのため、審査委員会としては学位論文として高い評価を与えた。

また、本研究は重力理論の解析力学、宇宙論に関する深い知識を必要とするものであり、論文提出者が博士号の学位に相応しい学問的力量を持つ事を示すものである。

論文提出者の研究結果は、既に国際学術雑誌に発表されている。

・ A. Iyonaga, K. Takahashi and T. Kobayashi, Extended Cuscuton: Formulation, JCAP 1812 (2018) 002.

・ A. Iyonaga, K. Takahashi and T. Kobayashi, Extended Cuscuton as Dark Energy, JCAP 07 (2020) 004.

これらの論文は共著論文であるが、博士論文提出者が主体的に研究を押し進めて得た結果であることは確認されている。

2020年1月7日、午前11:00から正午に本論文に関する公聴会が開かれた。申請者は論文の内容を明快に説明し、また質問に対する応答も満足すべきものであった。