

# 論文内容要旨（和文）

氏名 齋藤 悌二郎



論文題目 経路積分によるアーベリアンゲージ場及び Yang-Mills 場の  
量子論的ゲージ自由度

素粒子の基本作用は、全てゲージ理論で記述できる。ゲージ理論ではゲージ対称性があるために、量子化するためにはゲージ固定が必要となる。従って、ゲージ場の量子論では、理論はゲージ固定で決められるのでゲージ自由度は存在しない。例えば、標準的な形式である正準的に量子化されたゲージ理論では、量子レベルでのゲージ変換は考えられない。

横山はローレンツ共変なゲージ固定の範囲内で、量子論的なゲージ変換（ $q$  数ゲージ変換）を実現するゲージオン形式を提唱した。ゲージオン形式では、 $q$  数ゲージ変換のために、いわゆるゲージオン場と呼ばれる、対の補助的な場が導入される。 $q$  数ゲージ変換によって、ゲージ固定パラメータを異なる値に移すことができる。即ち、ゲージオン形式は、標準形式で任意のゲージ固定パラメータを持つ理論を一つの理論で纏められ、量子論的ゲージ理論の統一的な取り扱いを表している。

アーベリアンゲージ場のゲージオン形式には、Type I と Type II の2種類の理論が知られている。Type I の理論では  $q$  数ゲージ変換によって、ゲージ固定パラメータを任意にシフトできるが、その符号は変えられない。Type II の理論では  $q$  数ゲージ変換によって、符号を含めてゲージ固定パラメータを変えられる。更に拡張された Type I の理論というものがある。この理論は Type I と Type II の両方の特徴を兼ね備えている。強調すべきは、これらの理論はいずれも標準形式の理論と等価であるということである。任意のゲージ固定パラメータの標準形式の状態空間が、ゲージオン形式の部分空間になっている。

Yang-Mills 場に対するゲージオン形式は、横山、竹田、門田によって与えられている。この理論は任意にシフトできるゲージ固定パラメータ  $\alpha$  をもつが、 $\alpha = 0$  以外では標準形式と等価でない。唯一、 $\alpha = 0$  のとき Landau ゲージの標準形式の理論に一致するのみである。それ以外のゲージでは、標準形式の理論と異なった理論である。

迫田は Yang-Mills 場に対して、原田-筒井の方法を用いることで、Landau ゲージ ( $\alpha = 0$ ) と  $\alpha = a$  ゲージの標準形式の理論を同時に含む理論を導いた。 $q$  数ゲージ変換で  $\alpha = 0$  と  $\alpha = a$  を結ぶことができる。しかしゲージオン形式と違って、これ以外の  $\alpha$  の値にシフトできない。この点で、迫田の理論は必ずしも満足のいく理論とは言えない。

本博士論文は迫田理論に対して再度、原田-筒井の方法でゲージ自由度を拡張することにより、自由にシフトできるゲージ固定パラメータの可能性を調べた。最初のステップとして、アーベリアンゲージ場を考察した。標準形式の Landau ゲージの Lagrangian に対して、原田-筒井のゲージリカバリー法を2回適用し、ゲージ自由度の拡張を行った。1回目のゲージ自由度の拡張では、当然のことながら迫田理論の Lagrangian のアーベリアン極限が得られた。この Lagrangian はゲージオン形式の Type I の理論と等価である。2回目のゲージ自由度の拡張では、ゲージオン形式の拡張された Type I 理論と等価な理論が得られた。拡張された Type I の理論は、Type I と Type II の両方の特徴を兼ね備えた理論である。以上のことから、アーベリアンゲージ場に関しては、ゲージオン形式の理論は標準形式のゲージ自由度の拡張として説明できることが分かった。また3回以上のゲージ自由度の拡張についても調べた。

次のステップとして、ゲージ自由度の拡張を Yang-Mills 場に対しても実行した。Yang-Mills 場の迫田理論の Lagrangian から出発し、これに原田-筒井のゲージリカバリー法をもう一度適用する。これにより、BRST 対称な Lagrangian を導出することができた。得られた Lagrangian は、ゲージ固定パラメータ  $\alpha$  が 0 (Landau ゲージ)、 $a_1$ ,  $a_2$  にゲージ固定された 3 つの標準形式の理論を含んでいることが分かった。我々の理論には 3 つの BRST 電荷が存在し、これらを用いることで、Landau ゲージ、 $a_1$  ゲージ、 $a_2$  ゲージの状態ベクトル空間を抽出することができる。この理論に含まれる  $q$  数ゲージ変換を用いると、これらの 3 つのゲージを結ぶことが出来るが、それ以外のゲージ固定パラメータの値には変換できない。ゲージオン形式のように  $q$  数ゲージ変換で、自由にゲージ固定パラメータを変えられるような理論を見出すのが今後の課題である。

学位論文の審査及び学力確認の結果の要旨

平成 29 年 2 月 6 日

理工学研究科長 殿

論文博士論文審査委員会

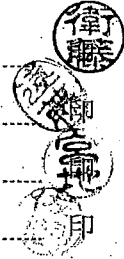
主査 衛藤 稔

副査 遠藤 龍介

副査 宮地 義之

副査 佐野 隆志

副査



学位論文の審査及び学力確認の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	齋藤 悌二郎		
論文題目	経路積分によるアーベリアンゲージ場及び Yang-Mills 場の量子論的ゲージ自由度		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	平成 29 年 1 月 25 日～ 平成 29 年 2 月 3 日
論文公聴会	平成 29 年 2 月 3 日	場 所	理学部 32 番教室
学力確認結果	合格	学力確認年月日	平成 29 年 2 月 3 日
学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)			
<p>素粒子間に働く基本的な力はゲージ場によって伝えられる。一般に、ゲージ場の量子論を扱うにはゲージ固定という操作が必要である。この操作に付随して、二つの問題が生ずる。(1)ゲージ固定操作により理論に非物理的自由度が現れ、これを物理的自由度と分離する必要がある。(2)ゲージ固定操作には任意性があり、それに応じて(物理的には同等なはずの)無数の量子論が存在し得る。(1)の問題は九後-小嶋の BRST 対称性を使うことで解決されている。(2)に関しては横山のゲージオン形式などによる、異なるゲージ固定にもとづく量子論を統一的に扱おうとする試みがある。</p> <p>本論文は、アーベリアンゲージ場と非可換ゲージ場 (Yang-Mills 場) の量子論における、ゲージ固定の任意性の問題を理論的に扱ったものである。論文は 9 章からなり、その構成と内容は以下の通りである。</p> <p>第 1 章では研究の背景と研究目的が適確に述べられており、第 2 章から第 4 章までがゲージ場の量子論についての概観である。第 2 章はゲージ場の導入とその基本的な性質の紹介、第 3 章はゲージ固定と経路積分によるゲージ場の量子化、第 4 章がゲージ固定によって現れる非物理的自由度を分離するために用いられる九後-小嶋の方法を要領よくまとめたものである。第 5 章と第 6 章は、本論文のテーマであるゲージ固定の任意性の問題についての既存研究の紹介である。第 5 章は横山のゲージオン形式の簡潔な説明、第 6 章は Yang-Mills 場に対する迫田理論の詳細な解説であり、特に、迫田が必ずしも重視していなかったゲージリカバリ法の有用性に焦点をあてている。この方法をさらに発展・応用したのが本研究であり、第 7 章と 8 章でその理論展開を行っている。第 7 章では、ゲージリカバリ法を進展させることでアーベリアンゲージ場に対する量子論的ゲージ自由度を導入し、拡張されたゲージオン形式と等価な理論が導出されることを明解に示している。(この成果は査読付き国際雑誌に発表済みである。)第 8 章では、7 章で行った方法を Yang-Mills 場に適用することで、迫田理論を越えた量子論的ゲージ自由度を持つ理論を導くことに成功している。第 9 章ではまとめと今後の展望を述べており、本研究で用いた方法の有用性を強調している。</p> <p>ゲージリカバリ法の有用性に着目し、迫田理論から更に一步進めた自由度の拡張には、その着想と方法に新規性・独自性が見られる。ゲージ場の量子論に付随する問題の理論的背景や研究目的の記述は適切であり、導入から結論に至るまでの構成およびその論理的な展開も適正に述べられている。これらのことから学位論文としての審査基準を十分に満たしているものと認め、合格と判定した。</p> <p>なお、本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きの必要はない。</p>			
学力確認の結果の要旨			
<p>学力については主に、公聴会における口頭発表とその後の質疑応答をもって判定した。その結果、ゲージ場の量子論に関する基本的な知識、および、本研究の背景と意義等についてよく理解していることが認められた。また、英語による論文を多数発表していることから、英語の能力も十分であると確認できた。以上より、申請者はこの分野の博士としての学力を備えているものと認め、合格と判定した。</p>			