

(別紙1)

論文の内容の要旨

氏名	近藤 綾		
論文題目	(外国語の場合は、日本語で訳文を()を付して記入すること。) 4次元超対称非線形シグマ模型の定式化におけるアノマリーと有効ポテンシャルの解析		
審査委員	区分	職名	氏名
	委員長		
	委員		
	委員		
	委員		
	委員		
	委員		
内容の要旨			
<p>超対称性とはボゾンとフェルミオンを統一的に扱った時空対称性を一般化した概念であり、素粒子の統一理論において重要な役割を果たしている。大統一理論や量子重力理論のエネルギースケールに比べ、実験的に確立している標準模型のエネルギースケールは非常に小さく、超対称性はこの階層性問題に対称性の観点からの解決を与えると考えられている。その一方で、自然界で観測される素粒子にはこのような対称性は見出されていない。これは超対称性が自発的に破れているためだと考えられているが、どのような機構によって破れが実現しているのかについて完全には理解されていないのが現状である。本論文では、超対称性の破れについて明らかにするという動機の下、4次元超対称非線形シグマ模型についての再考を行い、その定式化におけるアノマリーの存在と有効作用への効果、アノマリーを考慮した定式化の応用について論じている。</p> <p>第1章から第3章では、研究の背景にはじまり、超対称性と非線形シグマ模型に関する現在までの研究の概要について、第4章から第7章では、4次元超対称非線形シグマ模型に関する研究と新たに得られた研究結果について述べている。また、第4章から第7章で用いたファイマン積分の計算方法についての詳細を付録Aにまとめている。</p> <p>第1章では、素粒子論における自然さの問題と超対称性の導入、超対称性の破れについて歴史的に概観することによって本研究の背景を説明している。超対称性の破れを実現する単純で直接的な模型を構築することによって拓かれる可能性についても触れている。研究背景を踏まえて、4次元超対称非線形シグマ模型、超対称南部・Jona-Lasinio 模型について再考することで、超対称性理論のダイナミクスを明らかにするという本研究の目的を述べている。</p>			

第2章では、超対称性の表現、カイラル超場、ベクトル超場について簡潔に説明し、超対称性をもつゲージ不変作用、超対称性を自発的に破る模型の例について述べている。第3章では、ボゾン型の非線形シグマ模型と、その超対称性模型への拡張について説明し、以下の章で扱う模型とその解析を理解する上での準備が行われる。

第4章では、超対称非線形シグマ模型の一種である超対称 CP^{N-1} 模型の定式化について再考している。超対称 CP^{N-1} 模型は隠れた局所対称性をもつ線形模型として定式化できることが知られていたが、この局所対称性にはアノマリーが存在し、従来の定式化に修正が必要であることを指摘している。分配関数におけるカイラル超場の積分測度をゲージ変換した際に現れるヤコビアンについて考察し、有効ポテンシャルに Wess-Zumino 項を加える必要があることを述べ、カットオフ理論として三角ダイアグラムの運動量積分を評価して Wess-Zumino 項の厳密な表式を導出している。この Wess-Zumino 項の影響によって模型の対称性が従来の結果よりも小さくなることを明らかにしている。

さらに、 $1/N$ 展開を用いて有効ポテンシャルを評価し、この模型の真空について考察している。結果として、弱結合領域では局所対称性が自発的に破れているが、超対称性は破れないことを明らかにしている。一方で、強結合領域では停留性条件をみたす安定な真空が存在しないことが示され、アノマリーを考慮した解析の結果であることが強調される。

また、スペクトル関数を評価し、ベクトル超多重項をなす粒子が不安定だが力学的に生成され、結合定数が大きくなるにつれゼロ質量に近づくことを述べている。臨界結合定数において局所対称性が回復する傾向にあることを示唆すると指摘している。

第5章では、F 項拘束条件を付加した $SO(N)/SO(N-2) \times U(1)$ 模型について述べている。この模型の隠れた局所対称性にもアノマリーが存在し、Wess-Zumino 項を加える必要があることを述べている。 $1/N$ 展開を用いて有効ポテンシャルの解析を行い、 CP^{N-1} 模型の場合と同様の結果を得ている。同じく強結合領域で停留性条件をみたす真空が存在しないことを明らかにしている。

第6章では、隠れた局所対称性のアノマリーを考慮した量子化法を、超対称南部・Jona-Lasinio 模型へ応用することについて述べている。模型を書き換える際に導入された補助ベクトル超場に関連した局所対称性がアノマリーを持つこと、このことが従来の解析では見落とされていたことを指摘している。しかし、アノマリーによって従来の結果は定性的な変更を受けず、先行研究で指摘されていた負計量をもつ粒子の出現問題が解決されないことを述べている。

最後に第7章では、超対称非線形シグマ模型に関して得られた新たな研究成果について議論している。エルミート対称空間をターゲット空間とする全ての模型で隠れた局所対称性にはアノマリーがあり、有効ポテンシャルに Wess-Zumino 項を加える必要があることを述べている。また、 CP^{N-1} 模型における $U(N-1)$ を隠れた対称性とする定式化が、強結合領域での振る舞いを記述する可能性があることについて述べている。二つの定式化の間には、サイバーグ双対性と似た関係があることが知られており、 $U(N-1)$ 対称性に対する Wess-Zumino 項を加えた作用の解析によって、超対称非線形シグマ模型における双対性の存在について明らかにできることを指摘している。

(別紙2)

論文審査の結果の要旨

氏名	近藤 綾		
論文題目	(外国語の場合は、日本語で訳文を()を付して記入すること。) 4次元超対称非線形シグマ模型の定式化におけるアノマリーと有効ポテンシャルの解析		
審査委員	区分	職名	氏名
	委員長		
	委員		
	委員		
	委員		
	委員		
	委員		
要 旨			
<p>本論文は、超対称非線形シグマ模型の定式化についての再考を行い、そのダイナミクスを量子論的に解析した研究についてまとめている。</p> <p>4次元超対称非線形シグマ模型は、標準理論を越えた理論の低エネルギー有効理論としての位置づけを持ち、以前から盛んに研究されてきた。特に、エルミート対称空間をターゲット空間とする超対称非線形シグマ模型は、隠れた局所対称性をもつ線形化されたゲージ理論として定式化できるとされている。線形化されたゲージ理論から補助場を消去し、あるゲージ固定を選択することで非線形模型が得られるからである。ところが、本論文で指摘されているように、線形化されたゲージ理論には量子異常（アノマリー）が存在しており、ゲージ変換性を用いた線形模型から非線形模型への変形が許されないのである。本論文は、従来の研究で考慮されてこなかったアノマリーについての認識から出発し、超対称非線形シグマ模型の諸性質とダイナミクスについて明らかにしている。</p> <p>本論文では、まず超対称 CP^{N-1} 模型の分配関数の考察から始め、補助場の導入と Fadeev-Popov 行列式の挿入によって分配関数の書き直しが行われる。この過程ではアノマリーの影響は存在しない。さらに分配関数の積分変数を変数変換することで線形化されたゲージ理論に変形するが、この際、アノマリーの影響により分配関数の積分測度から Wess-Zumino 項が生じる。この考察の結果として、超対称 CP^{N-1} 模型が、従来考えられていたゲージ理論に Wess-Zumino 項を付け加えた模型に等価であることが本論文で初めて明らかにされたのである。</p>			

Wess-Zumino 項を付加する結果として斉次座標を用いた従来のゲージ理論には無かった特異性が現れるが、元々の CP^{N-1} 模型におけるターゲット空間には特異性がないこととの関係に論じ、超対称 CP^{N-1} 模型をターゲット空間のすべての領域で物理的に等価なゲージ理論に変形できることを明らかにしている。また、積分測度から導出した Wess-Zumino 項について、三角ダイアグラムの運動量積分を実行することで、運動量カットオフに対して厳密な表式として得ることに成功している。カットオフ理論においてループ運動量をずらす不定性を調節することでゲージ不変性を保つ計算を実現し、また運動量カットオフを含まない主要項が積分測度から生じた Wess-Zumino 項と一致する結果を得ており、新たに厳密な表式を導出した点が評価できる。

次に、超対称 CP^{N-1} 模型と厳密に等しいゲージ理論に対し、Wess-Zumino ゲージの下で $1/N$ 展開を適用し、その有効ポテンシャルの導出と停留点の評価を行っている。Wess-Zumino 項を加えてゲージ対称性を実現しなければゲージ固定という操作ができないことを踏まえれば、4次元超対称 CP^{N-1} 模型における有効ポテンシャルは本論文で初めて正確に導出されたと言える。このことから本研究の内容は高く評価されるべきものである。

有効ポテンシャルの解析の結果として、弱結合相に超対称性を保つ真空が存在することが明らかにされる一方、強結合相には停留性条件をみたす安定な真空が存在しないことが示される。これらの事実は、アノマリーの効果として Wess-Zumino 項を加えた超対称模型の特徴を捉えており、本論文によって初めて明らかにされた超対称 CP^{N-1} 模型の性質である。

弱結合相での二点頂点関数を計算し、スペクトル表示を用いてベクトル粒子の伝搬関数を導出することによって、不安定ではあるが有質量ベクトル粒子が力学的に生成し、強結合に行くほどその質量がゼロに近づくことを示している。強結合には質的に異なる相があることを示唆する興味深い結果である。

さらに超対称 CP^{N-1} 模型に F 項拘束条件を加えた模型について、同様の Wess-Zumino 項を加えて線形化したゲージ理論を構築している。再び $1/N$ 展開によって有効ポテンシャルを導出し、弱結合相でのみ安定な真空が存在することを明らかにしている。この模型のターゲット空間は $SO(N)/SO(N-2) \times U(1)$ というエルミート対称空間の一種となっている。本論文では $U(1)_D$ 対称性に対するアノマリーに着目することで、エルミート対称空間上の超対称非線形シグマ模型はすべて、線形化された理論に変形する際に Wess-Zumino 項を加えなければならないことを指摘する。この一般的な結果も本研究で初めて明らかになった事実である。

本論文では、これらの解析手法を超対称南部・Jona-Lasinio 模型に適用した研究も行っている。アノマリーの効果を取り入れても以前から知られていた負計量粒子の出現問題は解決されないが、安定な真空では D 項に加えて F 項が期待値をもつことが示される。また、関連した三角ダイアグラムの計算では、S. Weinberg による場の量子論の教科書における記述が修正されるべきことを指摘している。

以上のように、本研究は、隠れた局所対称性がアノマリーを有する場合の超対称非線形シグマ模型の定式化について明らかにした研究であり、超対称性理論に関連した重要な知見を得た研究として価値があると認められる。また、本研究の一部はすでに査読付き欧文学術誌に掲載されている。よって、本学位申請論文は、奈良女子大学博士（理学）の学位を授与されるに十分な内容を有していると判断した。