

氏名	後藤 義典
学位(専攻分野)	博士 (人間・環境学)
学位記番号	人博第83号
学位授与の日付	平成12年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	人間・環境学研究科人間・環境学専攻
学位論文題目	Partial Breaking of Global Supersymmetry in Linear and Nonlinear Models (線形, 非線形模型における大局的超対称性の部分的破れ)

論文調査委員 (主査) 教授 植松恒夫 教授 松田 哲 教授 青山秀明

論文内容の要旨

近年の素粒子論における力の統一の試みにおいては、ボゾンとフェルミオンの変換に対する超対称性 (Supersymmetry) に広く興味を持たれている。この対称性が量子論に及ぼす効果により、ゲージ階層性等の様々な問題を解決すると考えられているからである。超対称性におけるボゾンとフェルミオンの変換の数すなわち超電荷数を N としたとき、 N が 2 以上のいわゆる拡張された超対称性に、最近関心が集まっている。特に、数年前の Seiberg と Witten による $N=2$ 超対称 Yang-Mills 理論の真空構造の厳密解をきっかけとして、 N が 2 以上の超対称理論が注目されている。一方、超対称性はわれわれの住む低エネルギーの現実の世界では、ボゾンとフェルミオンの縮退を解くため、破れていなければならない。本学位申請論文では、この超対称性の自発的な破れが考察されている。

従来、一般に超対称性が破れる場合、任意の N に対して破れた後では $N=0$ つまり、超対称性は完全になくなるということが、Witten 等によって代数的な議論から結論づけられていた。しかし数年前に、J. Hughes と J. Polchinski によって超対称性の部分的破れの可能性が指摘されて以来、この超対称性の部分的破れに対し、様々な側面から研究が進められてきた。本学位論文申請者は、この拡張された N が 2 以上の大局的超対称性の部分的破れにつき、非線形模型と線形模型の両面から研究を遂行した。

本論文の第 1 章では、大局的超対称性の部分的破れとその解析方法について、その研究の動機とこれまでの研究の発展の経緯が述べられている。

つづく第 2 章では、この研究での基本的な枠組である、自発的対称性のある系を記述するのに有効な手段としての非線形実現の方法を、まず Coleman-Wess-Zumino による内部対称性の自発的な破れの場合について述べ、次にこの方法を時空の対称性が自発的に破れる場合に拡張する。群 G で特徴づけられる対称性が、その部分群 H に自発的に破れるとき、剰余空間 G/H を考えると、この空間は質量ゼロの南部・ゴールドストーン場で記述され、群 G の元の作用のもとでの変換性および低エネルギーでの有効相互作用が導かれる。この枠組みを時空の対称性に拡張するには、代数が満たすべき reductivity の条件や、破れた生成子のすべてに南部・ゴールドストーン粒子の自由度が必ずしも対応するわけではないこと等に注意する必要があることが論じられる。

第 3 章では、線形模型と非線形模型の間の関係を超場 (superfield) に拘束条件を課すことによって導出する方法を、2 次元および 4 次元時空の場合に論じている。これは後述の超対称性の部分的破れを考察する上で有効な手法を与える。

第 4 章では、 $N=2$ の超対称性が $N=1$ の超対称性に部分的に破れる場合を考察し、2 つの方法でこれを解析している。最初に、非線形実現の理論的枠組みで、 NG フェルミオンを含む $N=1$ の超対称多重項を考察する。すなわち、Bagger と Galperin が論じたようにベクトル、カイラルおよびテンソル多重項の 3 つの可能性があることが示される。さらにこれらの間に、双対性 (duality) と呼ばれる関係が存在することが議論される。次に、線形理論でソリトン解が超対称性の部分的破れを引き起こす場合を、6 次元の $N=1$ アーベル超対称ゲージ理論を例にとって解析する。すなわち、この理論に存在する

Nielsen-Olesen 渦糸解が、ある方向の並進対称性を破るのに伴って、超対称性が部分的に破れることが示される。この解は超対称 3-ブレインであり、超対称性は 4 次元に換算して $N=2$ から $N=1$ に部分的に破れることがわかる。さらに、拡張された Fayet-Iliopoulos 項による $N=2$ 超対称アーベルゲージ理論の部分的破れの可能性と、拘束条件を超場に課す手法による解釈が与えられる。

第 5 章では、非線形実現の手法を用いて、 $N=2$ 超共形群が $N=1$ 超対称ポアンカレ群に破れる模型について考察した。このとき、対称性の破れに対応して現れるいくつかの南部-ゴールドストーン (NG) 粒子を、 $N=2$ 超共形代数の生成演算子に対する Jacobi の恒等式を用いて決定した。その結果、2 種類の $N=1$ 超対称 NG 多重項の存在を申請者は明らかにした。一つの多重項は、スケール変換の破れに対応する dilaton、カイラル回転の NG 粒子である axion および S 超電荷の破れで現れる dilatino から成る。またもう一つは、破れた 2 番目の Q 超電荷の NG フェルミオンを含む $N=1$ ベクトル多重項である。さらにこれらの NG 粒子の低エネルギー有効作用を求めた。

第 6 章では、線形理論において、古典解により超対称性を部分的に破る方法を応用し、10 次元の $N=1$ 超対称性、すなわち 4 次元でみた場合に $N=4$ 超対称性を有する理論が、4 次元 $N=2$ 超対称理論に破れる模型を見出し、これについての解析を行った。特に、この 10 次元の理論が $N=1$ 超対称 Yang-Mills 理論である場合に、そのインスタント解が超対称性を半分に壊し、その破れに伴って出現した (NG) 粒子の低エネルギー有効作用が、5-ブレインの動きで記述できることを示した。

最終の第 7 章では、本論文の内容の総括と今後の展望が述べられている。

論文審査の結果の要旨

最近の素粒子論においては、整数スピンのボーズ粒子 (ボゾン) と半整数スピンのフェルミ粒子 (フェルミオン) を結ぶ対称性である超対称性 (Supersymmetry) に大きな関心が寄せられている。その理由は、この対称性が、基本粒子間の相互作用の統一に重要な役割を演じるものと考えられているからである。実際、最近の弱・電磁力と強い力の大統一理論や、さらに重力まで含めた統一理論である超弦理論では、超対称性は欠くことのできない理論的構成要素となっている。その一方で、超対称性はわれわれの住む低エネルギーの世界では、ボゾンとフェルミオンの質量等の縮退が解けているため、真空がこの対称性を破るといいういゆる自発的対称性の破れを生じていなければならない。本学位論文申請者は、この超対称性の自発的な破れを解析する研究を行った。

一般に、時空点に依存しない引数で変換が行われる超対称性を、超重力理論での時空点による局所超対称性と区別して、大局的超対称性 (global supersymmetry) と呼ぶ。従来、大局的超対称性は超電荷数 N が 2 以上のとき、そのうちの一部分が破れて他は破れずに残るといふ部分的破れはないものと考えられてきた。しかし数年前に、J. Hughes と J. Polchinski によって超対称性の部分的破れの可能性が指摘されて以来、この超対称性の部分的破れに対し、様々な側面から研究が進められてきた。一方、最近の超対称ゲージ理論や超弦理論では N が 2 以上の超対称性を有する理論が広く考察されている。本学位論文申請者は、この拡張された N が 2 以上の大局的超対称性の部分的破れにつき、非線形模型と線形模型の両面から研究を遂行した。

申請者は、まず時空の対称性の破れに対する非線形実現の方法の定式化を総括し、準備段階として、 $N=2$ の超ポアンカレ群が $N=1$ の超ポアンカレ群に部分的に破れる場合を考察し、南部-ゴールドストーン (NG) フェルミオンを含む $N=1$ の超対称多重項を調べた。すなわち、ベクトル、カイラルおよびテンソル多重項の 3 つの可能性があることが示される。またこれらの間に、双対性 (duality) と呼ばれる関係が存在することが論じられる。申請者は、この非線形実現の手法を用いて、 $N=2$ 超共形群が $N=1$ 超対称ポアンカレ群に破れる模型について詳細な解析を遂行した。このとき、対称性の破れに対応して現れるいくつかの NG 粒子の自由度を $N=2$ 超共形代数の生成演算子に対する交換関係が満たす Jacobi 恒等式を用いて決定した。

その結果、2 種類の $N=1$ 超対称 NG 多重項の存在を申請者は明らかにした。一つの多重項は、スケール変換の破れに対応する dilaton、カイラル回転の NG 粒子である axion および S 超電荷の破れで現れる dilatino から成るいわゆるカイラル多重項である。またもう一つは、破れた 2 番目の Q 超電荷の NG フェルミオンを含む $N=1$ ベクトル多重項であることが判明した。さらにこれらの NG 粒子間の低エネルギーでの非線形有効相互作用の具体的な形を申請者は共変微分や超対称行列

式などを用いて求めた。破れる前には、スピンの $0, 1/2, 1$ の粒子を繋ぐ $N=2$ の多重項が、部分的破れによって2つの $N=1$ 多重項に分離することが本論文によって明らかにされた。また、破れた生成演算子とそれに伴って現れる NG 粒子を申請者は同定した。

次に、申請者は、線形理論でソリトン解が超対称性の部分的破れを引き起こす場合を、6次元の $N=1$ アーベル超対称ゲージ理論を例にとって解析する。すなわちこの理論に存在する Nielsen-Olesen 渦糸解が、ある方向の並進対称性を破るのに伴って、超対称性が部分的に破れることが示される。この解は超対称 3-ブレインであり、超対称性は4次元に換算して $N=2$ から $N=1$ に部分的に破れることがわかる。実際に、申請者は線形理論において、古典解により超対称性を部分的に破るこの方法を応用し、10次元の $N=1$ 超対称性、すなわち4次元でみた場合に $N=4$ 超対称性を有する理論が、4次元 $N=2$ 超対称理論に破れる模型を見出し、これについての解析を行った。特に、この10次元の理論が $N=1$ 超対称 Yang-Mills 理論である場合に、そのインスタントン解が超対称性を半分に壊し、その破れに伴って出現した NG 粒子の低エネルギー有効相互作用が、5-ブレインの動きで記述可能であることを本学位論文は示した。

以上のように、申請者は大局的超対称性の自発的破れにつき、非線形実現の方法および線形に実現された超対称ゲージ理論の古典解の両面から、超電荷数 N のうちのいくつかが部分的に破れる可能性を統一的に考察し、拡張された超対称性を備えた場の理論が有する性質に新たな知見を加えた。したがって、本研究は場の量子論に基づき自然界の基礎的構造を探究する本研究科人間・環境学専攻自然・人間共生基礎論講座の量子自然構造論での研究目的に合致したものとして高く評価できる。

よって本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成12年1月14日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。