氏　　　名	中　山　法　子（なか やま のり こ）
学位(専攻分野)	博士　（人間・環境学）
学位記番号	人　博　第　274　号
学位授与の日付	平　成 17 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	N=2 Supersymmetric Sigma Models and Supergravity Solutions （N=2超対称シグマモデルと超重力解）
論文調査委員	（主　査） 教授　青山秀明　　教授　宮本嘉久　　教授　際本泰士

論　文　内　容　の　要　旨

弦理論は，重力まで含めた自然界の基本的な相互作用を統一的に記述する理論として現時点で最も有力な候補と言われている。特に，ボゾンとフェルミオンの間の対称性である超対称性を取り入れた超弦理論には，全ての基本的構成要素とそれらの相互作用を統一する究極理論を与えるものとして大きな期待が寄せられている。

弦は1次元的な広がりを持ち，閉じた弦と端を持つ開いた弦を考えることが可能である。それが時空の中を運動するときに描く軌跡（世界面）を考えると，この上の2次元の場の理論は共形場理論と呼ばれる。端を持つ開弦は様々な形（境界条件）で時空に広がった物体に繋がることができる。そのような物体はD ブレインと呼ばれていて，その背景となる時空と，その中に存在するD ブレイン自体の性質を調べることが重要課題となっている。これをうけて本論文では，超弦理論の背景時空となりうる超重力解の構成方法や，その背景上でのN=2 超対称シグマモデルのD ブレインの幾何的描像，U(1)双対性などが扱われている。

第1部では，N=2 超対称シグマモデルのDブレインの幾何的な描像の解析が行なわれている。通常，これには共形場理論が用いられる。この方法による解析は厳密ではあるが，代数的な議論が中心となるため，D ブレインが背景時空であるターゲット空間内でどのような形をとっているのかが非常にわかりにくい。そのため，本論文では，超対称性に注目して，開弦の世界面の境界条件を直接的に解析し，ブレインがどのような幾何的描像となるかを論じた。D ブレインが BPS object と呼ばれる超対称性を部分的に保つ状態であることに注目すると，開弦の境界上でN=2 超対称性の半分が破れN=1になっているはずである。この超対称性を半分破る方法によって，A タイプ，B タイプの2種類の境界条件を考えることが可能である。まず，2次元ターゲット空間を持つ場合を考えると，共形不変な超弦理論を与える背景としては，以前より良く知られる2次元ブラックホールが導出される。このモデルは SL(2；R)/U(1) gauged Wess-Zumino-Witten（WZW）モデルと等価であり，背景時空は trumpet や cigar と呼ばれる形をとる。この背景上での開弦の境界条件を解析することにより，A タイプからは1次元ブレイン，B タイプからは0次元，2次元ブレインが得られ，時空の中での幾何的描像を与えることができた。ここで得られた結果は，先述の WZW モデルにおける SL(2；R) conjugacy classes の解析から知られているものと矛盾しない。更に，この背景空間を，共形不変な弦理論を与えるという条件の下で 2n 次元のターゲット空間に一般化した。この場合についてもブレインの描像の考察を行い，A タイプとしては n 次元ブレイン，B タイプとしては0次元，2n 次元ブレインが得られることを示した。ここまでの議論は非線形シグマモデルに基づいた古典的な議論であった。しかし，低エネルギー極限で2次元ブラックホールや 2n 次元の一般化した空間を実現するような線形シグマモデルを考えることにより，量子論の立場からの議論も可能であり，古典論での結果と同様の結果が導出された。

第2部では，超弦理論のための新しい非コンパクトな超重力背景の構成方法を与えた。初めに，任意のコセット空間上の複素線束を仮定し，共形不変な理論を与えるための条件，つまり背景場の方程式の解としてケーラー背景を導出した。この背景は，計量の他に線形なディラトン場を伴っている。一般に Liouville 理論など線形ディラトン場を持つ理論は豊かな構

造を持つことから，定数ではなく，自明でないディラトンを持つ系を導出することは意義深いことと考えられる。この新しく求められた背景の具体例は容易に見出すことが可能であり，第1部で与えた2次元ブラックホールの拡張で得られる2n次元ターゲット空間や，従来より知られるCalabi-Yau多様体がこれに含まれていた。また，ここで求められた背景はその構成方法上，必然的にU(1)対称性を持っていた。したがって，その背景上でのN=2 超対称シグマモデルを考え，それに対しU(1) 双対変換を施すことにより，更に新たな超重力背景を求めることが可能であった。ここで言う双対変換とは，Legendre 変換により，chiral superfield をtwisted chiral superfieldに置きかえることに他ならない。双対変換は共形不変性を保ち，双対な背景もまた矛盾しない超弦理論を与えるが，中心電荷は元の背景から変化せず，共形場理論としては完全に等価であった。しかしながら，この双対な背景は計量の他に自明ではない式で表されるディラトン場と反対称テンソル場を伴った非ケーラー多様体であり，全く別のN=2 超対称シグマモデルとなっていた。この結果，従来より拡張された類の背景場が見出され，今後のこの分野の発展に寄与することが期待される。

論文審査の結果の要旨

弦理論は，重力・強・弱・電磁の4つの相互作用を統一的に記述する理論であると広く考えられている。その弦理論の理解を深める上で，量子重力理論の解明は必須であるが，これには曲がった時空上や非自明な背景場が存在する場合の量子論を扱うことが有効な手法であると期待されている．特にこのような理論に必然的に存在するディラトン場は弦の結合定数そのものであるため，ディラトン背景場が定数でない場合は弦の結合定数が時空上で変化する模型として非常に興味深い。また，そのような模型と，非臨界的弦や2次元量子重力理論（Liouville理論)，2次元ブラックホールとの関係も精力的に研究されている。

一方で1995年以降，弦理論のソリトンとしてブレインが活発に研究されている。弦は1次元的な広がりを持ち，端を持つ開いた弦において，その端が壁などに繫がっていると，弦上の進行波が壁により反射される。この弦の反射・境界条件から弦の端として存在している物体の性質が理解・解析できる。特に超弦理論では，弦のパートナーとしてフェルミオンが存在するので，その境界条件から，弦の端として可能な壁（物体）の種類などが制限される。開弦の端が繫がる物体はブレインと呼ばれ，開いた超弦の境界条件から可能なブレインの分類が可能となる。このブレインは，弦の非摂動効果，および強結合領域の物理を解明するために重要な役割を担うと期待されている。従来は平坦な時空上でのブレインが解析されてきたが，重力理論と，その強結合領域の物理との関連から，曲がった時空でのブレインの解明が待たれている状況にある。つまり，曲がった時空でのブレインはどういう背景場のときに存在できるのか，どんな形状をしているのか，ブレイン上での動力学はどのように記述されるのかが重要なテーマとなっている。

本論文の目的は「超弦理論の背景時空となりうる新たな超重力解の構成」と「曲がった時空上でのブレインの解明」にある。まず，前者の目的のために，ディラトン背景場が空間的に変化する新たな解を超重力理論において構成した。また，後者の理解に向けて，2次元ブラックホール上に存在できるブレインの形状を非線形シグマモデルの立場から解析し，可能なブレインの分類を行なった。また，2次元ブラックホールを含む，より一般の模型についての解析も同時に行なった。さらに，ゲージ化された線形シグマモデルの立場から，ブレインの境界上での可能な相互作用項を決定した。このためにまず，N=2 超対称シグマモデルのブレインの幾何的な描像の解析を行なった．ここでは，開弦の境界上でN=2 超対称性の半分が保たれるもの（BPS ブレイン）の分類を行ない，開弦の境界条件を直接的に解析し，ブレインがどのような幾何的形状となるかを解析した。このモデルの背景時空はtrumpetやcigarと呼ばれる形をとるが，それを非自明なディラトン背景場を持つ2n次元時空に一般化した場合して，各種のブレーンを得た。さらに，ゲージ化した線形シグマモデルを用いて，量子論的な解析も行なった．

次に，非自明なディラトン場を持つ新たな超重力解の構成を行なった。N=2超対称性が存在するモデルを構成するために，任意のコセット空間上の複素線束にディラトンが結合した系を考え，背景場の方程式を解くことによって解を構成した。ここで求められた背景はU(1) isometryを持ち，U(1) 双対変換を施すことにより，2 階反対称場（NS B-field）のfluxがある新たな超重力解を求めることが可能となった．この変換によって構成された背景は共形場理）論（CFT）としては元の背景に等価なものであるが，シグマモデルとしては新しく，非ケーラーな多様体となっていた。非ケーラーな背景は近年脚

光を浴びているものの，容易に構成できるものではなく，本論文でそれが具体的に構成されたことは高く評価できる。

素粒子理論の研究での一つの重要な目標は，統一理論の構成である。そのような理論は一般の曲がった背景上のモデルも含有していなければならない。したがって，曲がった背景を持つモデルを可能な限り多く構成し，それらの性質を調べることは，統一理論を構成するために必須であると考えられる。そのような研究の一つの方向としては，新しいモデルつまり背景場を構成していくことが考えられる。また，導出された個々のモデルについてブレインなどの性質を解析することも重要である。本論文では，新たな背景場を導き，その解析を行なうことで，この分野の研究を前進させた。したがって，本論文の意義は大きいといえる。

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17年１月21日，論文内容とそれに関連した事項について諮問を行った結果，合格と認めた。