論文審査の結果の要旨

氏名 澁佐　雄一郎

いわゆる超弦理論は、重力を含めた相互作用の統一理論へ向けてほとんど唯一の手掛かりとみなされ、様々な観点から研究されてきた。特にここ5年ほどのあいだに、超弦理論の捉え方自体に関してそれまでとは質的に異なった新しい段階に達しつつあると思わせるような数々の新知見が得られている。なかでももっとも目覚ましい発見として、摂動論的に可能な10次元時空における5種類の理論が、次元が一つ上がった11次元時空におけるある理論の存在を想定することにより実は一つの理論の異なった実現として理解できることが判明したことである。ここで想定された11次元理論のことを通称 M 理論と呼んでいる。現在の最先端における研究課題の一つは、このM理論の具体化にあり、活発に研究がなされている。

M理論において、弦の役割を果たす物理的自由度は摂動的弦理論における太さがゼロの1次元のひも＝弦の代わりに、一つ次元が上がった厚さのない2次元の面、メンブレーンであると考えられている。従って、M理論を構築する上で鍵になる手掛かりの一つは、メンブレーンの量子論の定式化にある。メンブレーンの量子論の定式化自体に関してはすでに10年以上前から試みられているが、極めて困難な問題であることが分かっている。一方、M理論が満たすべき性質として、その低エネルギー (= 長距離) 極限での有効理論が11次元超重力理論に帰着すべきことが挙げられる。メンブレーンの古典論の研究からは、11次元時空での明白な超対称性を実現するためには、弦の場合と同じように、メンブレーンが時空での軌跡のなす3次元超曲面上の場の理論として、κ 対称性と呼ばれるある局所対称性が必要であることが知られている。さらに、メンブレーンを11次元の曲がった時空におくと、背景場は、ちょうど超重力理論から導かれる場の方程式を満たすときにこの κ 対称性が存在できることが知られている。すなわち、メンブレーンの力学を構成するには、すでに古典論を構築する段階で、超重力理論との整合性が重要な役割を果たすことが判明している。このことから、11次元時空での超対称性を明白にした形式で、11次元超重力理論の背景場のもとでのメンブレーンの古典作用を具体的に書き下すことは、メンブレーンのM理論としての定式化のために解決されなければならない重要な課題の一つである。本博士論文では、こうした立場から超重力背景場中のメンブレーンの古典論に関して、以下の2点に絞って研究を行った。

1. 超重力背景場のもとでのメンブレーン作用を書き下すために必要な超場 (super fields) を超重力場の成分を用いて表すこと。

2. 背景場のうち、定数の3階反対称なテンソル場だけを取り入れたときの、作用の構築とその対称性を定式化すること。

最初の点に関しては、これまでに知られている超座標に関する展開による表式を拡張することにより、超座標の2次までの近似でこれまで求められていなかった項についても陽な

表式を得ることにより精密な結果を導いた。これが本論文の主要な新知見である。また、第2の点に関しては、メンブレーンを一般の次元の p ブレーンに拡張したうえで、定数の $p+1$ 形式に対応する反対称テンソル場を背景場としてもつ場合の正準形式を調べ、 p=1 のときに知られている弦理論と非可換場の理論との関係を一般の次元に拡張しその応用を目指した興味深い議論が与えられている。

次に各章の概要を述べる。序論である第1章では非自明な背景場のもとでのメンブレーン理論の研究に関してこれまで得られている主な成果と問題点を簡潔に整理し、本論文への動機づけがまとめられている。第2章は、第3章以降への準備として、 11 次元超重力理論の成分表示と超座標表示がレビューされ、さらに超座標表示を用いて一般の超対称背景場中のメンブレーンの作用原理の要点を説明している。第3章において、本論文の主要結果の導出に進む。まず、メンブレーンの作用に現れる一般的な超場を超重力理論の成分により具体的に表すために用いられるゲージ完成化 (gauge completion) の手続きの詳細を論じている。ゲージ完成化とは、超座標の最低次を初期条件として与えて、高次の項を超対称変換と整合的になるように決定する方法である。これは概念的にはごく自然な方法ではあるが、実際の実行には、超重力理論のいくつかの異なった対称性の混合およびその非線形性のため、極めてこみいった手続きになり、これまでは超座標に関して2次までの一部の項が求められているにすぎない。本論文提出者はまず既知の結果を要約した後、その拡張のためにはこの手続きにおいてこれまで用いられてきた仮定をはずしたより一般的な解法が必要なことを示す。続いて、超座標の2次までの一般解が導出される。第4章では、時空自体は平坦であるが、メンブレーンに特有な高階反対称テンソル場の存在のもとでの作用原理に話題を転じる。ここでは、その幾何学的構造を明確にするため、一般の p- ブレーンの議論が展開されている。その場合の対称性として重要な p 次元における体積を不変に保つ局所座標変換 (Volume preserving diffeomorphism) の母関数の代数を表す p 次元ポアッソン括弧構造が $p-2$ 形式の渦度テンソルにより表せることが論じられる。一方、反対称テンソル場が定数であるときには、 $p-1$ ブレーンの境界をなす $p-2$ ブレーンのディラック括弧には非可換構造が現れる。これらの準備の後、 $p-2$ ブレーンが p ブレーンに埋め込まれているとして、後者の体積保存局所座標変換に対応する $p-2$ 渦度形式を、非可換構造をもった $p-2$ ブレーンのディラック括弧から導くという立場をとり、 p ブレーンの力学に現れる代数構造を定式化することを試みている。

前半部分は、メンブレーンの超重力外場中での性質を調べるために重要な背景場中のメンブレーンの作用の具体形を定めるため、既知の結果を拡張して超座標の2次までの一般形を定めるという複雑な計算を実行して新しい結果を得た。また、後半部分では、 p が2の場合に Matrix theory として知られているアプローチを高次元の場合に拡張する可能性を示唆する意義のある議論が展開されている。

なお本論文の第4章は松尾泰氏との共同研究に基づいているが、論文提出者が主体的に考察と計算を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断した。

よって、審査委員会は全員一致で本論文が博士（理学）の学位を授与するのにふさわしいものであると判定した。