学 位 論 文 題 名

$N = 2$ Supersymmetric Model with Dirac-Kähler Fermions
from Generalized Gauge Theory in Two Dimensions

(2次元における一般化されたゲージ理論に基づく、ディラック・
ケーラーフェルミオンを含む $N = 2$ 超対称模型)

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

数年前、Kawamoto と Watabiki は通常は3次元で定義される Chern-Simons 理論を任意の次元に拡張する、一般化された Chern-Simons 理論を提唱した。任意次元への拡張の際に、可能な全ての階数の反対称テンソル場を含む一般化されたゲージ場が導入され、理論のゲージ対称性は従来のゲージ理論のものに比べて、非常に大きなものになっている。この理論は、既に、2次元、3次元及び4次元で古典的な解析がなされており、それぞれ位相的重力理論を記述することが示されている。また、近年、Chern-Simons 理論の持つ代数構造を反映した形で、量子化もなされている。

この一般化されたゲージ理論は、従来の理論の代数構造を尊重した形で定式化されているため、従来の理論で知られている代数関係は、そのままの形で一般化されている。

本論では、2次元において一般化されたゲージ理論を Witten type と呼ばれる位相的場の理論の観点から解析する。

位相的場の理論の解析は、BRST 量子化法に基づいた理論の定式化より、通常の場の理論の手法で系の位相不変量に関する情報を得るというものである。ここでは一般化された位相的 Yang-Mills 作用を古典的な作用と考え、BRST 代数を構成する。さらに、適当なゲージ固定条件を課すことにより作用を導出し、それが記述する物理的対象を考察することを目的とする。

BRST 対称性は、ボソン場とフェルミオン場を統一的に取扱うことのできるこの理論の枠組みの中では、一般化された微分演算子と一般化された曲率を導入することにより定式化される。さらに、降下方程式と呼ばれる一連の方程式を導くことにより、理論の BRST 不変な物理的観測量を帰納的に構成することができる。本論での解析は具体的には2次元でなされるが、この代数は任意の次元でも同様に定式化できる。

次に、ゲージ群を選んで具体的な模型を解析する。まず、インスタントン条件と呼ばれる Yang-Mills 理論の古典解を与える条件でゲージ固定を行なう。このゲージ固定条件により、位相的 Yang-Mills 理論は BRST 量子化の下で、物理的 Yang-Mills

理論、ゴースト場、さらにボソン場により記述される理論と等価になる。この際、スピンの整数値を持つフェルミオンのゴースト場の作用は、Dirac-Kähler フェルミオン場と呼ばれる反対称テンソル場により定式化されており、形式上、通常のスピノルの作用として再構成することができる。ここで重要なことは、この量子化された作用には、BRST 対称性の他に、さらにフェルミオンの対称性が存在することである。対称性の代数の解析により、これらのフェルミオンの対称性は、通常の $N = 2$ 超対称性とツイストと呼ばれる操作により関係付くことが分かる。ツイストとは、理論のエネルギー運動量テンソルを理論に含まれている自由度を用いて再定義することによりなされ、従って、場のスピンの変更されることになる。この操作により、Dirac-Kähler ゴースト場の整数スピンは分数スピンの読み変えることができ、その結果として、Dirac-Kähler 場を超対称性理論の物質場として解釈できるようになる。これは、ツイストの構造が Dirac-Kähler フェルミオンを通じて理解されたということである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 河 本 昇
副 査 教 授 石 川 健 三
副 査 教 授 藤 本 正 行
副 査 助 教 授 中 山 隆 一
副 査 助 教 授 鈴 木 久 男

学 位 論 文 題 名

$N = 2$ Supersymmetric Model with Dirac-Kähler Fermions from Generalized Gauge Theory in Two Dimensions

(2次元における一般化されたゲージ理論に基づく、ディラック・
ケーラーフェルミオンを含む $N = 2$ 超対称模型)

普通のゲージ理論は1フォームのゲージ場と0フォームのゲージパラメーターで記述されるが、これを一般化して全てのフォームを導入することにより、一般化されたゲージ理論が河本・綿引によって提唱された。この拡張により任意の次元にゲージ理論を拡張することが可能になり、特に3次元でのみ定義されていたチャーン・サイモンの理論が偶数次元を含む任意次元に拡張された。一般化されたゲージ理論は更に任意次元のヤング・ミルズ或いはトポロジカルなヤング・ミルズ理論に拡張されるがここではこれらの理論のうち、2次元で定義されるトポロジカルなヤング・ミルズ理論の量子化を行いその代数的構造を解析し、4次元のトポロジカルなヤング・ミルズ理論と構造が相似になる事を明らかにした。更にこれまで知られていない新たな代数的構造も明らかになった。その内容を更に述べると、2次元に於けるインスタントンの満たすべき方程式が発見され、それをゲージ固定条件として量子化すると $N = 2$ の超対象性の構造をを持つことが明らかになった。またこの量子化された理論にツイストと呼ばれる操作をするとゴーストが半整数のスピンを持った物質場としてのフェルミオンに変換する事が明らかになり、このフェルミオンは実は過去に知られている、ディラック・ケーラーフェルミオンであることが、始めて指摘された。その結果2次元の $N = 2$ のスーパーヤング・ミルズ理論の作用が新たに導かれた。また副産物として、一般化されたゲージ理論の特徴を利用したトポロジカルな不変量も明らかになり、4次元に於けるドナルドソン不変量と相似の関係に有ることが明らかになった。

結論として、本論文は全ての部分がオリジナルであるという意味で価値の高い論文であり、4次元で Witten によって定式化された理論の2次元版になっていることを明らかにし、2次元のインスタントンの満たすべき方程式及びツイストとディラック・ケーラーフェルミオンとの関係を明

らかにした。その意味で大変価値の高いオリジナルな内容であり、これ以後この仕事の色々な応用が期待され高く評価される。よって審査員一同、申請者が博士（理学）の学位を受けるに十分な資格があるものと認めた。