

京都大学	博士 (理学)	氏名	小路田 俊子
論文題目	弦の場の理論における位相的構造と反転対称性		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は弦理論のoff-shellかつ非摂動的定式化の一つである弦の場の理論の背後に隠された位相的構造を研究したものである。弦理論は空間に一次的に広がった弦を自由度とする理論であり、種々の素粒子は弦の各振動モードとして説明される。特に重力子も振動モードとして現れるため、物質と力と時空の全てを統一的に扱える無矛盾な量子論として注目されている。時空の幾何は重力を表すが、弦理論に基づいたミクロの幾何学は点を基本的要素とはしないのかもしれない。</p> <p>しかし弦理論には基本原理、あるいは基礎方程式が未だ無い。固定された時空の中を飛ぶon-shellの弦の散乱振幅の摂動的計算法が与えられているだけで、非摂動的解析は不十分であり、また、無矛盾な弦理論が無数に存在してどれが真の真空か決定できない。そこで弦の生成/消滅を行う「弦の場」というものを導入して弦の無限多体系を扱い、非摂動的定式化を目指したのが「弦の場の理論」である。弦の場の理論はYang-Mills理論のゲージ対称性(あるいは一般座標不変性)を含む巨大な弦的ゲージ対称性を持つ理論である。弦の場の理論は構成上の困難を今なお抱えているものの、ボソニックな開弦の場の理論であるCubic String Field Theory(CSFT)においては、非摂動的現象である不安定Dブレーンの消滅を記述できるなど、弦理論の非摂動的定式化として着実に成果を見せつつある。</p> <p>本論文は、このCSFTが3次元のコンパクトな多様体上の位相的ゲージ理論であるChern-Simons(CS)理論と、作用やゲージ変換の数学的構造が似ていることに注目することで、CSFTの位相的構造を探っている。CS理論にはwinding数と呼ばれる整数に量子化された位相不変量が存在する。Winding数は多様体から群への写像が、多様体を一度覆う間に群の空間を何度覆うかを数えている量である。またwinding数は全微分の積分形、そして表面積分に書き直すことができる。多様体はコンパクトゆえこの表式は一見ゼロであるが、ゲージ場が多様体上に特異性を持つ場合には、多様体を一枚の座標系で覆えず表面項が出現しnon-zeroの整数値を獲得する。CSFT側でもwinding数と同じように作用の有限ゲージ変換で現れる量Nを定義し、Nが整数に量子化されるか、量子化されるとしたらどのような構造がそれを保証しているのかについて調べている。CSFTには多様体、群、表面項、といったwinding数において重要な役割を演じる概念が存在しないため対応は非自明である。</p> <p>本論文では、まずNをwinding数と同じように全微分の積分形に対応する形に書き直す事に成功している。この表式も単純には代数的にゼロとなる量であるが、解が特異性を持つ場合にはNがその特異性を拾い正しい値が得られる。さらにKBC代数と呼ばれるある種の代数を満たすK, B, cという三つの量で構成されたクラスの解についてNの構造を調べた所、Nは解の詳細に依らず解の持つ$K=0$と$K=\infty$における特異性にのみ依存することが分かった。また古典解に対するNは整数になることも確かめられている。更にKBCで構成された任意の相関関数が$K=0$と$K=\infty$の入れ替えに対して不変である(inversion symmetry)という証明にも成功している。以上の事実からNは、KBC“多様体”上の原点と無限遠の特異性を拾う量であり、KBC“多様体”は原点と無限遠が等価な球面のような構造をしていることが分かってきた。Inversion symmetryの考察を重力結合エネルギーに適用することで、これまでに考えられていなかった、inversion symmetryが明白な重力結合の発見も行っている。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

弦理論は素粒子標準模型と重力を統一する理論として期待されているが、未だその基本原理が確立しているとは言い難い。本論文で扱っている弦の場の理論は、局所場の理論を弦理論へ自然に拡張した理論であり、Yang-Mills場や重力場を含み、さらに高階の足を持つ無限個の場が含まれた理論となっている。その作用はYang-Mills理論あるいはEinstein理論のゲージ対称性を一般化した、無限個の場に対するゲージ対称性を持つ理論となっている。弦の場の理論は摂動論的振幅に関しては従来の結果を再現するなどいくつかのテストにパスしてきたが、もっとも特筆すべき成果は、そのタキオン凝縮解の発見である。ボソニックな開弦理論にはタキオンモードが含まれており、その真空、すなわち開弦の端点で定義されるDブレーンは不安定である。この不安定Dブレーンは非摂動論的效果により崩壊し、より安定な真空に落ち着くと予想されていたが、開弦の場の理論はタキオン凝縮解の発見によってその記述に成功したのである。しかしその一方で開弦の場の理論自体もその無限個の自由度のために解析が非常に困難であり、現段階では弦の場の理論の威力を十分に発揮しているとは言い難い。このため、弦の場の理論における見通しの良いイメージを持つことが望まれている。

本研究は、開弦の場の理論の一つである Cubic String Field Theory (CSFT) の持つ位相的構造を明らかにしようという基礎的問題に取り組んだものである。Winding数という位相不変量を持つ3次元の位相的ゲージ理論であるChern-Simons (CS) 理論と、CSFTとの数学的構造の類似性に着目し、CSFTにおいてwinding数に対応する量(以下 N と書く)が位相的性質を持つかどうかを調べている。またその位相的性質を保証する背後にある構造の探求も行っている。CSFTとCS理論の類似性は良く知られた事実であるが、この類似性を本論文のような観点で追及する研究はこれまで無かった。本論文では、 N が全微分の積分形に対応する形に書き直せることの証明や、古典解の特異性が効いて整数値を獲得するなど、winding数と同じいくつかの性質を持つという結果を得ており、 N がCSFTにおけるwinding数らしきものである可能性が見えてきている。また、タキオン凝縮解を含み近年研究が盛んに行われている、 KBc 代数という代数構造を持つ三つの量 K, B, c (K はある種の世界面のハミルトニアン、 c と B はゴーストと反ゴースト)で表される解のクラスについて N を調べており、解の持つ $K=0$ と $K=\infty$ における特異性が N の種になっていることを突き止めている。更に K, B, c で構成された任意の相関関数が $K=0$ と $K=\infty$ の入れ替えに対して対称である (inversion symmetry) という驚くべき定理も証明している。この強力な定理によって N もまたinversion symmetryを持つ。得られた結果をまとめると、 N が原点と無限遠が等価なまるで球面のような構造をした KBc “多様体” 上のwinding数であるというイメージがおぼろげながら見えてきており、CSFTの位相的構造の理解に確かな進展を与えている。

また N という量は、純ゲージ型の多重ブレーン解に対してブレーンの枚数を与えており、 N の位相的構造を探ることと多重ブレーン解の探索は密接に関係し合っている。古典解の探求が活発に研究されているが、本研究のように複数の解を系統立てて説明し、背後の構造について議論している研究は無い。 N の考察で得られたinversion symmetryを重力結合として信じられてきた量に対して解析し、これまで知られていなかった新たな重力結合の発見も行っている。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成27年1月13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。

要旨公表可能日： 年 月 日以降