（別紙様式５）

論　文　内　容　要　旨

（NO.　1）

氏　　名	金子　智一	提出年	平成 30 年
学位論文の 題　　　目	拡張された内部空間を持つ弦の双対不変な重力理論		

論　文　目　次

論　文　内　容　要　旨

素粒子物理学において現在までに確認されている基本的な相互作用は電磁相互作用，弱い相互作用，強い相互作用，重力相互作用の 4 種類である．超弦理論は，これら 4 種類の相互作用を統一的に記述できる理論の候補として研究されている．超弦理論では基本単位を点粒子ではなく，1 次元的に広がった弦と考える．これに伴い，弦の異なる振動モードが重力子を含む様々な素粒子を再現することが知られている．

矛盾のない超弦理論として I 型，IIA 型，IIB 型，SO(32)ヘテロ型，$E_8\times E_8$ヘテロ型の 5 種類が知られている．これら 5 種類の超弦理論は完全に独立ではなく，双対性と呼ばれる対応関係によって互いに関係付けられている．

本研究では超弦理論において議論されている双対性の内，特に T 双対性に注目する．T 双対性は，特定の異なる標的空間を運動する弦の理論が互いに等価であることを示す双対性である．最も単純な例として，半径 R の円周(S^1)上を運動する弦と半径 1/R のS^1上を運動する弦が，運動量と巻きつき数を入れ替える対応関係によって等価であることが挙げられる．また，d 次元トーラス(T^d)上を運動する弦の場合 T 双対性は拡大され，変換は O(d,d)群を生成することがわかっている．以上の T 双対性は IIA 型と IIB 型，SO(32)ヘテロ型と$E_8\times E_8$ヘテロ型の超弦理論をそれぞれ対応づけることが知られている．

超弦理論では矛盾のない理論の条件として，標的空間が 10 次元時空であることが要請される．一方，観測されている時空の次元は 4 次元である．この隔たりを埋めるために 6 次元の余剰次元は，これまでの観測にかからない程度に十分に小さく丸められている（コンパクト化されている）と考えられている．超弦理論から得られる低エネルギー有効理論は，コンパクト化された余剰次元の大きさや形によって異なる．そのため，余剰次元がどのような空間にコンパクト化されているのかという問題は超弦理論の課題の１つとなっている．

コンパクト化された余剰次元の大きさや形を表すパラメータをモジュライと呼ぶ．コンパクト化の仕組みを理解するためには，モジュライを安定的に固定するメカニズムが必要となる．このモジュライを固定するコンパクト化の方法として知られているのがフラックスコンパクト化の方法である．フラックスコンパクト化では，拡張された電磁場（フラックス）を余剰次元方向に導入することで，モジュライに対応するスカラー場のポテンシャルを生成し，その真空期待値を力学的に安定化させることができる．

フラックスコンパクト化を議論するにあたって，どのような種類のフラックスが導入できるかが論点の１つとなる．例えば捻れた 6 次元トーラスへのコンパクト化を実現する Scherk-Schwarz (SS)コンパクト化の方法を考えると, H フラックスと f フラックスと呼ばれる幾何学的フラックスを導入できる．一方，フラックスが導入された空間に対して T 双対変換を施すと，通常の多様体へのコンパクト化では得られないフラックスが現れることが示唆されている．このようなフラックスは一般に局所的にのみ定義されるフラックスで，非幾何学的フラックスと呼ばれる．非幾何学的フラックスが導入された空間は，通常の多様体と同様，パッチごとにフラックスの局所的な表式が与えられるが，パッチが重なった領域における座標変換が通常の一般座標変換だけでなく T 双対変換によって定義される．このことから，非幾何学的フラックスが導入された空間は多様体(manifold)に対して T-fold と呼ばれる．

多様体で表される時空を記述する重力理論は一般座標変換不変性を持つ一般相対性理論である．この一般相対性理論の拡張であり, T-fold を記述する重力理論として研究されているのが Double Field Theory (DFT)である. DFT は一般座標変換不変性と T 双対変換不変性を持つ重力理論であり, T-fold を大域的に記述できることがわかっている．

DFT のゲージ代数は，通常の Lie 微分を T 双対変換を含むように拡張した一般化 Lie 微分によって生成される．一般化 Lie 微分は通常の Lie 微分の拡張であるが, Leibniz 則を満たさずゲージ代数が閉じない．このため, DFT のゲージ代数を記述するためには通常の Lie 代数ではなく，拡張された代数構造が必要であると考えられている．

本研究では，拡張された代数構造を記述できる超多様体法を用いて DFT の代数構造を明らかにした．超多様体法は BRST 量子化の拡張である BV 量子化の議論で導入された方法で, BRST 電荷に対応する Q 構造と Poisson 括弧積を定める P 構造の 2 つの構造を持つ超多様体(QP 多様体)によって定義される．BRST 電荷が冪零であることに対応して, Q 構造は古典的マスター方程式と呼ばれる整合性の条件が課される．この条件は QP 多様体上に定義される誘導括弧積が Leibniz 則を満たすための十分条件である．本研究では，一般化 Lie 微分が Leibniz 則を満たさないことに注意して, Q 構造が古典的マスター方程式を満たさない場合に拡張された pre-QP 多様体を用いて DFT の代数構造を特定した．特に，本研究では pre-QP 多様体上に DFT 基底を導入することで, O(D,D)共変性が明らかな形で DFT の代数構造を記述できることを発見した．また, DFT のフラックス(一般化フラックス)についても議論し，これと整合的

であるように DFT の一般化フラックスを pre-QP 多様体上で再定義した．更に，フラックスによって変形された pre-QP 多様体の整合性の条件として pre-Bianchi 恒等式を提唱し，先行研究で議論されていた一般化フラックスが満たすべき一般化 Bianchi 恒等式を導くことを確認した．また, DFT の SS コンパクト化に対応する一般化 Scherk-Schwarz (GSS)コンパクト化が, pre-QP 多様体上では正準変換として記述できることも示した.

以上で議論した T 双対性は平坦な空間であるT^dにコンパクト化された弦の双対性である．一方，曲がった空間上の T 双対性として非アーベル型 T 双対性(NATD)が注目されている．曲がった空間の Killing ベクトルは非アーベル型の交換関係を満たすため，曲がった標的空間上のシグマモデルの対応関係は非アーベル型 T 双対性と呼ばれる. NATD に関して標的空間を平坦時空にとれば, Killing ベクトルは自明な交換関係を満たし, NATD は通常の T 双対性に帰着する．このため, NATD は T 双対性の拡張として研究されている.

NATD は T 双対性の拡張であるため, DFT の類推として NATD 不変な重力理論が考えられる．しかし，これまでに議論されてきた DFT は平坦な背景時空上で議論されているため，曲がった空間上の T 双対性である NATD をそのまま適用することはできない. DFT を曲がった背景時空上の理論に拡張する取り組みは DFTwzw として[1]などによって進められている. DFTwzw は 2D 次元の群多様体を標的空間とする DFT であり, NATD 不変な重力理論であることが示唆されている.

本研究では pre-QP 多様体を背景時空に関して共変な形に拡張することで，一般の背景時空に対して適用できる共変形式の pre-QP 多様体を構成した．更に，共変形式の pre-QP 多様体上に DFT 基底を導入することで，一般の曲がった背景時空上の DFT の代数構造を pre-QP 多様体の立場から提案した．この際, GSS コンパクト化された DFT が二重化された捻れたトーラス上の DFT として捉えられることと, pre-QP 多様体上の DFT の GSS 変形が Q 構造の変形のみによって記述できることから，一般に pre-QP 多様体上の DFT の背景時空の変形は Q 構造の変形によって記述できるという仮説を立てて議論を進めた．この仮説に基づいて DFT の Q 構造を背景時空に関して共変な形に変形し，曲がった背景時空上の DFT の代数構造を提案した．また，変形された Q 構造を元に一般化 Lie 微分や一般化フラックス, pre-Bianchi 恒等式などを導出した．得られた全ての結果は背景時空に関して共変な形で書かれており，また，背景時空を平坦に選べば通常の DFT に帰着することが確かめられた．最後に本研究で提案した，曲がった背景時空上の DFT の適用例として DFTwzw を議論し，代数構造および一般化フラックスが群多様体上で適切に再現されていることを確認した.

なお，本研究の内容は[2]にまとめて報告した.

[1] R. Blumenhagen, F. Hassler, and D. Lust, JHEP 02 (2015) 001, arXiv:1410.6374 [hep-th].

[2] U. Carow-Watamura, N. Ikeda, T. Kaneko,and S. Watamura, arXiv:1812.03464 [hep-th].

別　紙

論文審査の結果の要旨

本学位論文は，弦理論の有効理論のT双対性共変な拡張について，彼の行った研究の成果をまとめたものである．弦理論は様々な双対性を持つことが弦理論の大きな特徴である．中でもT双対性は弦から見ると伝搬する２つの通常の幾何学的意味では異なる時空が区別できないことを意味している．このことは，弦理論のコンパクト化を考えるときにT双対性の理解が不可欠であることを意味する．さらに，フラックスと呼ばれる背景時空の自由度がT双対性を考慮すると所謂幾何学的フラックスと非幾何学的フラックスを含むような新しいコンパクト化との双対性を示唆する．このような問題を研究するためにDouble Field Theory(DFT,二重場理論) が提唱されている．本論文ではこのDFTの基本的なフラックス，一般化Lie微分と呼ばれる演算子によって生成されるゲージ対称性の代数，さらに得られた理論の整合性の条件を表すビアンキ恒等式を双対性変換を含むO(D,D)共変な形で構成する方法を提唱している．また，手法として開発した次数付超シンプレクティック空間を用い，一般化された場やフラックスを超空間上での正準変換として導出する方法をまとめている．特に，本論文の最後の章では，DFTを背景時空に依存しない共変な形で書く理論を提唱しており，すでに知られている群空間上でのDFTの成果を含むようなDFTの共変化になっていることを示している．この結果は，最近分かってきた一般化超重力理論の解析にも適用できることが考えられ，提唱された理論の応用が期待される．

プレゼンテーションに関しては予備審査の段階においても質問に的確に答え，本審査においても，論文の内容と結論を簡潔に述べることが出来ていた．

本学位論文は現在投稿中の論文に基づいている．また，その他に技術的に関連した１編の論文がある．

以上，本論文は博士としての十分な内容であり，金子氏が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって，金子智一氏提出の博士論文は，博士（理学）の学位論文として合格と認める。