# 論文の内容の要旨

## Analytic solutions in open superstring field theory
## （開いた超弦の場の理論における解析解）

野海 俊文

**■重力理論としての弦理論**　重力は我々にもっとも身近な相互作用であるが，物理学者にとっては最も不思議で魅力的な研究対象であると言える．とりわけミクロなスケールでの振る舞いについては現象論的にも理論的にも未知な領域が多く残されおり大変興味深い．長年に渡る理論的な研究の積み重ねにより，重力には熱力学との類似性やホログラフィーと呼ばれる低次元の異なる理論との双対性の存在が示唆されており，これらの現象の背後には未だ知られていない重力のミクロな記述が存在すると広く信じられている．弦理論はそのような重力のミクロな記述の有力な候補の一つであり，先の現象についても一定の理解を与えることに成功しているが，その際，弦理論の最も基本的な双対性の一つである開弦-閉弦双対性が重要な役割を果たしてきた．

**■開弦-閉弦双対性**　弦理論にはゲージ粒子などを記述する開弦と重力子などを記述する閉弦の２つの自由度が存在する．世界面を用いた弦理論の定式化を用いると，閉弦の伝搬は開弦のループダイアグラムと解釈可能であることが自然と示され，これら２つの見方の等価性は開弦-閉弦双対性と呼ばれている．このことは，開弦のダイナミクスから重力子を含む閉弦が自然と現れる可能性を示唆しており大変興味深い．このように重力が他の自由度から副次的に現れる現象は，重力理論一般に期待されており，開弦-閉弦双対性が弦理論において重要であるのみならず，重力の基本的な側面を捉えたものとしても大変重要であると考えることができる．以上をふまえ，『開弦の自由度のみを用いてどのクラスの物理が記述可能であるか（※）』という問題意識のもと，本論文では開弦の場の理論についての議論を行う．

**■弦の場の理論**　弦の場の理論は弦理論の非摂動論的側面の理解を目指した場の理論的定式化であり，その基本的な自由度『弦の場』は弦のスペクトラムに現れる無限個の状態に対応した無限個の場の自由度を含んでいる．特に，開弦の場の理論は開弦の自由度からなる開弦の場で構成されており，閉弦の自由度は露には含んでいない．そのため，開弦の場の理論は先の問題を議論するのに適した枠組みであると言える．実際，開弦の場の理論は『タキオン凝縮』と呼ばれる現象の理解に大きく貢献してきた．

**■開弦の場の理論におけるタキオン凝縮**　ボソン弦のスペクトラムには不安定モードであるタキオンが含まれるが，開弦に含まれるタキオンは開弦が端を持つ Dirichlet ブレーン（Dブレーン）の不安定性と関係しており，特に，Dブレーンが消失して開弦の物理的自由度が存在しない『タキオン真空』が存在することが Sen により予想された．Sen の予想を受けて開弦の場の理論において『タキオン真空を記述するタキオン真空解』構成の試みが 1990 年代後半から盛んに行われてきたが，2005 年に Schnabl はタキオン真空解を解析的に構成することに成功した [1]．Schnabl の成功を受けて，近年開弦の場の理論における解析的取り扱いが大きく進展しており，本論文の内容もこの流れを受けている．

**■第一部（１章，２章）：開弦の場の理論における解析的手法**　Schnabl の構成は後に，$KBc$ 代数と呼ばれる代数関係式によって特徴づけられ，この代数的取り扱いの進展により様々な解析解が開弦の場の理論において構成されてきた．本論文の第一部では，開いたボソン弦の場の理論の導入を行った後に，$KBc$ 代数に特徴づけられる近年大きく進展した弦の場の理論における解析的手法についてレビューを行い，タキオン真空解について $KBc$ 代数を用いて議論する．

**■第二部前半（３章）：境界状態による解への制限**　先の問題意識（※）に基づき『開弦の場の理論にどのクラスの古典解が含まれるか』を系統的に議論したいという動機のもと，第二部では開いたボソン弦の場の理論における解析解の構成に関する２つのアプローチを議論する．

はじめに３章では我々の研究 [2] に基づき，$KBc$ 代数で記述可能な古典解について境界状態の視点から議論する．ある正則条件のもと，文献 [3] による構成法を用いて $KBc$ 代数に属す一般の弦の場の配位に対して境界状態を構成する．得られた境界状態に弦の場の運動方程式と関係したある種の無矛盾性条件を要求することで，このクラスにはタキオン真空，摂動真空，負のエネルギーを持つ ghost D-brane の境界状態を再現する古典解しか存在し得ないことを示す．さらに，我々の結果からその存在が示唆される ghost brane 解の具体形を提案する．また，近年盛んに議論されている $KBc$ 代数における多重ブレーン解の構成可能性についても議論する．

**■第二部後半（４章）：boundary condition changing operator を用いた解の構成**　開弦の場の理論の古典解は開弦の背景場として無矛盾なDブレーン系を記述するが，世界面を用いた定式化においてそれらは世界面上の場の理論における境界条件（開弦の両端における境界条件に対応）で分類される．したがって，開弦の場の理論の古典解を系統的に構成する方法として，世界面上の場の理論の境界条件を変える演算子 boundary condition changing (bcc) operator を用いる方法が考えられる．４章では，文献 [4] におけるあるクラスの bcc operator を用いた解（KOS 解）

の構成と，我々の行った KOS 解の解析 [5] について議論する．

**■第三部（５章，６章，７章）：開いた超弦の場の理論における古典解**　開いた超弦の場の理論についてはいくつかの定式化が提案されているが，現状では確固たる定式化が得られているとは言えない．しかし，ボソンを記述する NS セクターの開弦の場の理論については２つの有望な定式化（modified cubic 型，Berkovits 型）が存在する．興味深いことに，開いた超弦の場の理論における近年の解析解構成の状況は，先の２つの定式化の間で記述可能な解が異なる可能性を示唆している．この問題は，開いた超弦の場の理論の定式化における重要な問題であると考え，第三部では開いた超弦の場の理論における解析解構成について議論する．

５章で２つの定式化を導入した後，６章では両定式化において解が存在する例として，文献 [5] で我々が構成した解析解について議論する．文献 [5] において我々は KOS 解の構成を拡張し，開いた超弦の場の理論の解析解を bcc operator を用いて構成した．我々の構成法は，modified cubic 型における古典解から Berkovits 型の古典解を形式的に構成する一般的な処方箋に基づいている．はじめに modified cubic 型において bcc operator を用いた解析解を構成した後，我々の処方箋の一般論を述べる．次に，構成した modified cubic 型の解に処方箋を適用することで Berkovits 型の解を構成する．また，得られた解の物理的な性質についても議論する．

文献 [6] において，modified cubic 型のタキオン真空解構成されているが，Berkovits 型においては現在までにタキオン真空解は構成されていない．７章では，２つの定式化の間で解の構成状況が異なる例として，開いた超弦の場の理論におけるタキオン真空解について議論する．はじめに modified cubic 型のタキオン真空解についてレビューした後，我々の一般的な処方箋の立場から Berkovits 型におけるタキオン真空解の構成可能性について議論する．

**■まとめと展望**　本論文の第二部において行う開弦の場の理論の古典解に関する系統的議論は，今後開弦の場の理論で構成可能な解を議論していく上での重要なアプローチであると考えられる．また，第三部で議論する modified cubic 型と Berkovits 型の開いた超弦の場の理論において記述可能な古典解の間の関係性については，開いた超弦の場の理論の定式化を目指す上での重要な判断材料となるであろう．このような意味で，本論文で行う議論は開弦の場の理論の今後の進展における重要な出発点となることが期待される．

## 参考文献


[1] M. Schnabl, Adv. Theor. Math. Phys. **10**, 433 (2006).
[2] T. Masuda, T. Noumi and D. Takahashi, JHEP **1210**, 113 (2012).
[3] M. Kiermaier, Y. Okawa and B. Zwiebach, arXiv:0810.1737 [hep-th].
[4] M. Kiermaier, Y. Okawa and P. Soler, JHEP **1103**, 122 (2011).
[5] T. Noumi and Y. Okawa, JHEP **1112**, 034 (2011).
[6] T. Erler, JHEP **0801**, 013 (2008).