

## 論文内容の要旨

論文題目 Superstrings on NSNS PP-Waves and Their CFT  
Duals

(NSNS PP-Wave 背景上の超弦理論とその双対な  
共形場理論)

氏名 正田 泰章

超弦理論は知られている量子重力を含む理論のうち、唯一の自己矛盾のない理論であり近年注目を集めている。最近の発展において、特に双対性と D ブレーンが大きな役割を果たしてきた。双対性とは一見違ったように見える理論が、見方を変えると実は同じ理論に帰着できるという性質で、この双対性を使うことで扱いにくい理論を比較的扱いやすい理論に帰着させることができる。D ブレーンとは、超重力理論の解のうちブラックホールの高次元版であるブラックブレーン解として実現されるものである。また、D ブレーン上の有効理論は超対称性ゲージ理論で記述できることが知られている。この事実を用いると、重力理論とゲージ理論の間に、ある双対性が存在していると推測することができる。

この双対性は現在 AdS/CFT 対応と呼ばれているものであり、そのうち最も研究されているものが  $AdS_5/CFT_4$  対応である。非常に多い枚数（ここでは  $N$  枚とする）の D3 ブレーン ( $Dp$  ブレーンとは時間方向に 1 次元、空間方向に  $p$  次元広がっている物体) のホライズン近傍に注目すると、その解の幾何は  $AdS_5 \times S^5$  となる。一方、D ブレーン上の低エネルギー有効理論を調べると 4 次元の  $SU(N)$  超対称性 Yang-Milles 理論となっている。そこで、4 次元の超対称性 Yang-Milles 理論と  $AdS_5 \times S^5$  上の超重力理論が双対であると推測される。超重力理論としての近似のよい領域は、ゲージ理論側で強結合領域になっているため、強結合領域のゲージ理論に対する知見が得られるのではないかと期待され非常に多くの研究がなされている。

超重力理論は超弦理論の低エネルギー近似として得られるため、超重力理論を超弦理論まで持ち上げようとするのは自然である。ところが、 $AdS_5 \times S^5$  上の超弦理論は RR-flux というある種

の磁場がかかっているため、量子化することが困難である。ところが最近 Berenstein-Maldacena-Nastase によってこの方向に対する進展がなされた。Penrose 極限と呼ばれるある極限をとると、 $AdS_5 \times S^5$  の背景は超対称性を最大限に保つ pp-wave 背景となり、その背景上での超弦理論は光錐ゲージで量子化することができる。Penrose 極限は超対称性ゲージ理論側では、非常に大きな R 電荷を持つような BPS 状態に近い状態に注目することに対応しており、彼らは実際に超弦理論の弦理論特有な状態に対応する超対称性ゲージ理論の演算子を構成した。

AdS/CFT 対応のその他のよく研究されている例として  $AdS_3/CFT_2$  対応がある。この対応は D1/D5 系の二つの見方の対応になっている。D1/D5 系とは  $Q_5$  個の D5 ブレーンを  $M^4$  ( $M^4$  は  $T^4$  あるいは  $K3$  とする) に巻き付け、残った 2 次元方向に平行に  $Q_1$  個の D1 ブレーンを埋め込んだものであり、ブラックホールへの応用として注目を集めた系である。そのため、 $AdS_3/CFT_2$  対応はブラックホール物理への応用という観点で興味深い例となっている。超重力理論の解としての D1/D5 系はホライズン近傍に注目すると、 $AdS_3 \times S^3$  となっている。一方、低エネルギー有効理論は target 空間が

$$Sym^{Q_1 Q_5}(M^4) = (M^4)^{Q_1 Q_5} / S_{Q_1 Q_5}$$

であるような  $N = (4, 4)$  超対称性非線形シグマ模型で記述されると言われている。ここで  $S_M$  は  $M$  個の座標の入れ替えを表している。また、この理論には共形対称性が存在するため、超対称共形場理論となっている。したがって、 $AdS_3 \times S^3$  上の超重力理論あるいは超弦理論と  $Sym^{Q_1 Q_5}(M^4)$  を target 空間とする超対称共形場理論と双対であると推測できる。

D1/D5 系には超弦理論の双対性で移りあう様々な系が存在するが、ここでは主に S 双対である F1/NS5 系、すなわち基本弦と NS5 ブレーンの系に注目する。この系のホライズン近傍は、NSNS-flux というある種の磁場のある場合の  $AdS_3 \times S^3 (\times M^4)$  上の超弦理論で記述されるが、この超弦理論は WZW 模型として知られる可解な模型に帰着することができる。そのため、超重力近似を越えて AdS/CFT 対応が調べられると期待され、盛んに研究されてきた。その中でも重要な研究の一つにスペクトラムの比較がある。ただし、超弦理論側の Kaluza-Klein モードと超対称共形場理論の BPS 状態の対応は調べられているが、超弦理論の弦理論特有な状態と BPS ではないような状態との対応は一般には難しい。

この博士論文では Penrose 極限を利用することで、 $AdS_3/CFT_2$  対応の場合にも弦理論特有な状態と BPS ではないような状態との対応がつけられることを示した。 $Sym^{Q_1 Q_5}(M^4)$  を target 空間とするような非線形シグマ模型は moduli パラメーターを持っており、F1/NS5 系に対応するような moduli の点では特異点を持つような理論になっているため、一般にスペクトラムを求めることは困難である。moduli 空間のなかでも orbifold 極限では一般論が知られており、スペクトラムを調べることができる。BPS 状態は moduli パラメーターの変形によらないため、BPS 状態だけは比較することができた。Penrose 極限では、R 電荷が非常に大きくて BPS 状態に近い状態に注

目しているため、moduli パラメーターの変形に対する依存性は小さく、orbifold 極限でのスペクトラムを使用できると期待できる。

1 章で論文の導入をし、2 章では  $AdS_3/CFT_2$  対応に対する Penrose 極限とはどのようなものかを調べた。 $AdS_3 \times S^3 (\times M^4)$  上の超弦理論の Penrose 極限は NSNS-flux のある場合の 6 次元の pp-wave 背景上の超弦理論となる。この場合、pp-wave 背景上の超弦理論は RR-flux の場合と異なり、光錐ゲージでも共変ゲージでも量子化できる。2.3 節で光錐ゲージで量子化し、物理的なスペクトラムに負ノルム状態の現れないことを示した。3 章では共変ゲージを用いて量子化した。この理論は 6 次元 Heisenberg 群を target とする WZW 模型（一般化された Nappi-Witten 模型）で記述できるため、カレント代数の技術を応用することができる。実際、Penrose 極限はカレント代数の縮約といった形でも表すことができる。この論文では自由場表示を用いて Hilbert 空間を構成した。超弦理論のスペクトラムとしては、共変ゲージで物理的な状態を生成する DDF 演算子を構成し、その DDF 演算子が生成する空間として Hilbert 空間を構成した。このスペクトラムは 2 章で求めた光錐ゲージでのスペクトラムと一致している。

4 章ではまず最初に、orbifold 極限における  $Sym^{Q_1 Q_5}(M^4)$  を target 空間とするシグマ模型の Hilbert 空間を調べた。次に大きな R 電荷を持った BPS 状態と Kaluta-Klein モードの比較をし、両者が対応していることを示した。その後、超弦理論側の DDF 演算子にあたる演算子を共形場理論側で構成することで、超弦理論側のスペクトラムを共形場理論側から再現できることを示した。ただし、共形場理論側の Hilbert 空間のほうが大きく、超弦理論側に多くの状態が足りないことが分かった。これらの状態は摂動的な記述では得られず、非摂動的な解析をすることで得られると期待している。

5 章では  $M^4 = T^4/Z_2$  の場合を調べた。これは特異点を解消すると  $K3$  となることを念頭においている。6 章では論文のまとめを述べた。この論文では実際に Penrose 極限を利用することで、 $AdS_3/CFT_2$  対応のスペクトラムの対応を、ある極限状態では弦理論特有な状態と BPS ではないような状態まで拡張できることを示した。将来の目標としては、極限を取らなくとも超弦理論のスペクトラムを共形場理論側から再現したい。そして、ブラックホール解など取り扱いの困難な系における超弦理論に対する理解に貢献したいと思っている。