

氏 名	たなか ひろかず 田 中 宏 和
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2165 号
学位授与の日付	平成 12 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	AdS ₃ /CFT ₂ と U-duality を用いた CFT ₂ のくりこみ群的解析

論文調査委員	(主 査) 教 授 二 宮 正 夫	教 授 九 後 太 一	教 授 川 合 光
--------	----------------------	-------------	-----------

論 文 内 容 の 要 旨

近年, AdS/CFT 対応と呼ばれる, $(d+1)$ 次元の反ドジッター時空 (AdS) を背景場とした超弦理論と AdS の境界上に住む d 次元の共形場理論との等価性が Maldacena により提唱され, 盛んに研究が行われている。AdS/CFT 対応は, 重力を含む超弦理論と重力を含まない場の理論との双対性であり, このように全く異なる原理の二つの理論が等価であると主張する驚くべき対応関係である。一般に曲がった時空上での超弦理論は定義することが難しいので, 超弦理論をその低エネルギー近似である超重力理論で扱うことが許されるパラメータ領域で議論することが多い。このとき対応する共形場理論での結合定数は非常に大きな値をとる。つまり, 強結合領域における共形場理論の振る舞いを AdS 上の超重力理論から理解できることになる。本論文でもこの立場をとり, 超重力の近似がよい領域において, 対応する強結合領域の共形場理論を理解する。

超弦理論, もしくは超重力理論側で非摂動的対称性として持つと期待されている U-duality を, AdS/CFT を用いて対応する共形場理論に作用する試みについて議論した。超重力理論において U-duality はある一つの古典解を他の異なる古典解に写すことができる。元の古典解と U-duality で写された古典解がどちらも AdS/CFT が適用できるものであれば, 共形場理論側で付異なる二つの CFT 間の写像を意味していることになる。この CFT 間の写像は共形場理論側では明らかなものではなく, AdS/CFT 対応と U-duality を用いて初めて構成できるものである。

本論文で具体的に用いた古典解は, Q_5 枚の D5-brane と Q_1 本の D1-brane の結合系に Q_K の Kaluza-Klein (KK) 運動量を加えた系 (D1-D5-KK 系) である。この系は超弦理論からブラックホールのエントロピーを理解するのに重要な役割を果たした古典解である。それにもかかわらずこの D1-D5-KK 系に双対な共形場理論は KK 運動量を持たない系 (D1-D5 系) に双対な共形場理論に比べて理解が進んでいないので, 超重力の側から D1-D5-KK 系に双対な共形場理論の情報を得ることは, ブラックホールのミクロな記述という観点からも重要である。

本論文では, 5 次元 U-duality group $E_{6(6)}$ の部分群で, 電荷 (Q_1, Q_5, Q_K) を入れ替えはするが, D1-D5-KK 系を壊さない部分群を求め, それが $F_{4(4)}$ の lift されたワイル群であることを示した。この部分群を D1-D5-KK 系が破らずに持っている U-duality の部分群という意味で residual U-duality と呼ぶことにする。residual U-duality により写される古典解のすべては D1-D5-KK 系なので, AdS/CFT を用いて共形場理論に対応付けすることができる。このようにして AdS/CFT と residual U-duality を組み合わせることで異なる共形場理論間の写像を構成することができる。

さらに residual U-duality を用いて, 小さな共形次元を持つ演算子がどのような多重項に分類されるかを見出すことができた。超重力理論における KK タワーの最も低い部分にある 42 個のスカラー場が 28 個の massless の多重項と, 14 個の massive の多重項に分類されることから, 対応する共形場理論には 28 個の marginal および 14 個の irrelevant な演算子があることが分かる。また residual U-duality を用いることで共形固定点から少しだけ離れたくりこみ群の流れにも条件を課すことができ, それから 28 個の marginal operator のうち, 16 個が exactly marginal の候補であることが結論付けられた。

AdS/CFT と U-duality を組み合わせることで、D1-D5-KK 系に双対な共形場理論の新しい情報を引き出すことができたわけだが、この結果を純粋に共形場理論の立場で導けるかどうかは興味深い問題である。

論文審査の結果の要旨

申請者は、最近の超弦理論の発展において Maldacena によって見出された AdS/CFT 対応と呼ばれる新しい研究方法を用いて超弦及び場の理論の新しい性質の研究を行った。AdS/CFT 対応は $(d+1)$ 次元時空の反ドジッター空間 (AdS) において構成される超弦理論と AdS の d 次元境界空間における共形場の理論 (CFT) が等価であるという主張である。具体的には、超弦理論を低エネルギー領域で AdS 上の超重力理論で近似し、対応する共形場の理論の性質をこの超重力理論を用いて分析する。このとき共形場理論は摂動的に取り扱えない強結合領域のものが対応することになり、この方法によって初めて分析が可能となった。

本論文において超弦理論、もしくは超重力理論側で非摂動論的対称性として持つと期待されている U-duality を、AdS/CFT を用いて対応する共形場理論に作用する試みについて議論した。超重力理論において U-duality はある一つの古典解を他の異なる古典解に写すことができる。元の古典解と U-duality で写された古典解がどちらも AdS/CFT が適用できるものであれば、共形場理論側では異なる二つの CFT 間の写像を意味していることになる。この CFT 間の写像は共形場理論側では明らかなものでは全くなく、AdS/CFT 対応と U-duality を用いて初めて構成できるものである。

ここで具体的に用いた古典解は、 Q_5 枚の D5-brane と Q_1 本の D1-brane の結合系に Q_K の Kaluza-Klein (KK) 運動量を加えた系 (D1-D5-KK 系) である。この系は超弦理論からブラックホールのエントロピーを理解するのに重要な役割を果たした古典解である。それにもかかわらずこの D1-D5-KK 系に双対な共形場理論は KK 運動量を持たない系 (D1-D5 系) に双対な共形場理論に比べて理解が進んでいないので、超重力の側から D1-D5-KK 系に双対な共形場理論の情報を得るとは、ブラックホールのミクロな記述という観点からも重要である。

本論文では、5次元 U-duality group $E_{6(6)}$ の部分群で、電荷 (Q_1, Q_5, Q_K) を入れ替えはするが、D1-D5-KK 系を壊さない部分群を求め、それが $F_{4(4)}$ の lift されたワイル群であることを示した。この部分群を D1-D5-KK 系が破らずに持っている U-duality の部分群という意味で residual U-duality と呼ぶことにする。residual U-duality により写される古典解のすべては D1-D5-KK 系なので、AdS/CFT を用いて共形場理論に対応付けすることができる。このようにして AdS/CFT と residual U-duality を組み合わせることで異なる共形場理論間の写像を構成することができる。

さらに residual U-duality を用いて、小さな共形次元を持つ演算子がどのような多重項に分類されるかを見出すことができた。超重力理論における KK タワーの最も低い部分にある 42 個のスカラー場が 28 個の massless の多重項と、14 個の massive の多重項に分類されることから、対応する共形場理論には 28 個の marginal および 14 個の irrelevant な演算子があることが分かる。また residual U-duality を用いることで共形固定点から少しだけ離れたくりこみ群の流れにも条件を課すことができ、それから 28 個の marginal operator のうち、16 個が exactly marginal の候補であることが結論付けられた。

AdS/CFT と U-duality を組み合わせることで、D1-D5-KK 系に双対な共形場理論の新しい情報を引き出すことができたわけだが、この結果を純粋に共形場理論の立場で導けるかどうかは興味深い問題である。

以上の解析によって申請者は、D1-D5-KK 系の U 双対性に対応して、強結合領域における異なる共形場理論の間の変換を構成した。またこれらの共形場理論における低い次元の演算子を厳密に分類することが出来た。申請者のこのような研究はこれまで明らかでなかった強結合領域における共形場理論の性質の解明に重要な寄与をした。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。

平成 12 年 1 月 19 日、主論文及び参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。