

論文審査の結果の要旨

氏名 立川 裕二

超弦理論は、重力を含む統一理論の最有力候補として精力的に研究されてきたが、1997年 Maldacena によってゲージ場の理論との新しい深い対応が示唆され、新たな発展段階に入った。これは「AdS/CFT 対応」と呼ばれ、曲がった反ドジッター (Anti de Sitter) 空間をその一部として含む 10 次元時空中の重力 (弦) 理論がより低い次元の超共形不変理論 (CFT=conformal field theory) と等価であることを主張する。その典型的な例は、 $U(N)$ をゲージ群とする 4 次元の $\mathcal{N} = 4$ 超対称ヤン・ミルズゲージ理論が、 N が大きなある極限で 5 次元反ドジッター空間 AdS_5 と 5 次元球 S^5 の直積からなる 10 次元時空中の閉じた超弦の理論の情報をすべて内包しているというものである。AdS/CFT 対応では、重力 (弦) 理論側の弱結合領域とゲージ理論側の強結合領域 (あるいはその逆) が対応しているため、弦理論の非摂動的性質をゲージ理論側から考察したり、またゲージ理論の強結合相を弱い重力場を用いて理解するという画期的な可能性を内包している。

この驚くべき対応を検証しようとする多くの研究のほとんどは、技術的理由から Maldacena の例のような超対称電荷の数が最大 (32 個) の場合についてであり、超対称性が低いより現実に近い場合の考察は、ごく最近になって初めて信頼のできる解析が可能になってきた。こうした流れのなかで、本論文では、超電荷が 8 個の場合を考察し、最新の発展を取り入れつつ、興味深い新たな結果を得ている。以下その概要、評価を述べる。

本論文は 9 章からなる。第 1 章から第 4 章までは背景となる AdS/CFT のレビューであり、第 5 章以下のオリジナルな研究に必要な概念とそれに関するこれまでの知見が明解に説明されている。超対称電荷が 8 個の場合、ゲージ側は $\mathcal{N} = 1$ の超共形ゲージ理論になり、重力側は 5 次元のゲージ化された $N = 2$ 超重重力理論を含む 10 次元理論になる。その重要な例は、4 次元の拡がりを持つ D3 ブレーンと呼ばれるソリトンの物体が円錐構造を持った 6 次元のカラビ・ヤウ多様体の頂点にあたる特異点に置かれている状況で実現され、これらの配位はそのまわりに $AdS_5 \times SE_5$ という時空を生み出す。ここで SE_5 は 5 次元佐々木・アインシュタイン空間である。このとき、D3 ブレーン上には quiver ゲージ理論と呼ばれる 4 次元の超共形ゲージ理論が現れる。SE 空間の例はわずかしかなかったが、ごく最近無限個の新たな例が構成され、それに対応する quiver ゲージ理論

についても理解が進んだ。一般に、 $\mathcal{N} = 1$ の超共形ゲージ理論には、 c と a と書かれる二種類の「中心電荷」と呼ばれる超共形理論を特徴づける重要な量が現れるが、特に a を求める問題については、最近ゲージ理論に現れる三角アノマリーの性質を利用して、 a -関数と呼ばれる量を最大化することで決定されることが示された。

論文提出者は、第5章において、この a -最大化の方法の重力理論側での対応物について考察した。まず、ゲージ理論の三角アノマリーに付随する係数が、5次元のゲージ化された超重力理論に現れる Chern-Simons 項の係数と対応することを示し、さらに、この結果を利用して、 a -最大化が超重力側の超ポテンシャル P の最小化条件 (P -最小化) と対応するという非常に自然かつ興味深い事実を発見した。

第6章及び第7章は第8章の仕事への準備であり、佐々木・アインシュタイン空間の数学的性質及び対応する quiver ゲージ理論の説明に充てられている。特に、SE 空間の体積 V を求める方法及びゲージ理論側の中心電荷 a を求める方法が詳しく述べられている。

これらの考察をもとに、第8章では、中心電荷 a と SE 空間の体積 V を無限個の quiver-SE 空間のペアに対して独立に計算し、それらがこれまでに考察された少数の例と同様互いに逆数の関係にあることを示した。まず $AdS_5 \times SE_5$ の10次元超重力理論から次元縮小で得られる5次元の超重力理論の Chern-Simons 項を計算し、そこから P -最小化によって V を得る。一方ゲージ理論側においてアノマリーの係数を算出し、 a -最大化法により a を計算している。この結果は、quiver ゲージ理論が実際に $AdS_5 \times SE_5$ に対応したゲージ理論であることを強く示唆しており、非常に重要な結果である。最終第9章では結論及び今後の展望が述べられている。

以上述べてきたように、本論文はゲージ理論側の三角アノマリーの重力理論側における対応物を明らかにしたのみならず、それを用いて無限個の新たな例について AdS/CFT が成り立っている強い証拠を提出したものであり、超弦理論及びゲージ理論の発展に大きな寄与をするものと言える。高度な数学的理論の深くて確かな理解、およびゲージ理論及び超重力理論・弦理論の深い物理的理解をもとに、最新の研究成果をいち早く取り入れて行われた世界的レベルの研究であり、早期提出にふさわしい高いレベルの博士論文であると認められる。なお、本論文の第8章は、S.Benvenuti 及び L.A.Pando Zayas 氏との共同研究に基づくが、論文提出者が主体となって立案解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。よって審査員一同博士(理学)の学位を授与できると認める。