On cognate integrable structure for three-point functions in AdS5/CFT4 correspondence

その他のタイトル	AdS5/CFT4対応における3点関数の可解構造について
学位授与年月日	2017-03-23
URL	http://doi.org/10.15083/00075547

別紙２

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名　西村　拓也

序

本論文では，超弦理論において発見・提案された AdS/CFT 対応(双対性)の基礎づけの問題が論じられている。特に，弦の相互作用を記述する３点相関関数を CFT サイド(すなわち４次元 $\mathcal{N}$=4 U(N)超対称ヤン-ミルズ理論)から可解性に基づいて構成・計算するための新しい手法が提案され，弱結合領域・半古典的極限における３点相関関数のより一般的な解が導出されている。この際，半古典的極限における可解性と解析的構造の果たす役割がよく解明され，同型の可解性・解析的構造が，AdS サイド(すなわち AdS_5 x S^5 時空上の古典的 type-IIB 超弦理論，強結合領域に対応)においても矛盾なく３点相関関数を決定することが指摘されている。この知見に基づいて，少なくとも半古典的極限における３点相関関数の性質には双対性の両サイドを同型の可解性・解析性が貫いていることが主張されている。

本論文は３部９章からなる。第１部１章から５章では，導入に引き続き，AdS/CFT 対応の基礎概念，２点相関関数(演算子異常次元スペクトル)の決定とそれに関わる CFT サイド，AdS サイドの可解性，　CFT の可解性に基づく３点相関関数の構成と決定，について先行研究の主要な結果が概説されている。第２部６章から８章では本論文の主要な結果が詳述されている。第３部９章では，本博士論文の結論が述べられ，今後の研究の課題および展望について言及されている。

本文

超弦理論は，重力相互作用の量子論を矛盾なく与え，　素粒子とその相互作用を重力も含めてゲージ原理の下に統一的に記述することのできる大統一理論の候

補とみなされている。この理論において，Maldacena によって発見・提案された AdS/CFT 対応は，狭義には，$AdS_5 \times S^5$ 時空(５次元 Anti de Sitter 空間と５次元球面の直積の構造をもつ時空間)上の(古典的)type-IIB 超弦理論と４次元 $\mathcal{N}$=4 U(N)超対称ヤン-ミルズ理論(の large N 極限)との間に成立する双対性である。この双対性は，バルクと境界，強結合領域と弱結合領域とが対応する点に特徴があり，特にバルクの重力理論と境界の４次元共形場理論の間に等価性が成立することから，矛盾のない量子重力理論が持つとされるホログラフィック原理を体現している。この AdS/CFT 対応を検証し，その成立根拠を明らかにすることは超弦理論の研究における最も重要な課題の一つとなっている。

AdS/CFT 対応の CFT サイドを与える共形場理論(Conformal Field Theory (CFT))では，一般に，共形対称性の制約と演算子積展開(Operator Product Expansion (OPE))の成立により，２点相関関数のスケーリング則を与える演算子異常次元のスペクトル$\{\Delta_i\}$と，３点関数を与える構造定数 $\{C_{ijk}\}$とによって，理論の構造が完全に規定される。この異常次元スペクトル$\{\Delta_i\}$および構造定数$\{C_{ijk}\}$は，AdS サイドにおいては，弦の状態スペクトルおよび３体散乱振幅にそれぞれ対応するから，AdS/CFT 対応の検証には，これらの物理量の評価と比較が必要になる。

AdS_5/CFT_4 対応における CFT，４次元 $\mathcal{N}$=4 U(N)超対称ヤン-ミルズ理論について注目されるべき点は，large N 極限において可解構造(可解量子スピン鎖との対応)が存在することである。この発見を契機として，可解性に基づいて，AdS/CFT 両サイドの対応する物理量(異常次元スペクトル$\{\Delta_i\}$および構造定数$\{C_{ijk}\}$ vs. 弦の状態スペクトルおよび３体散乱振幅)の理論的計算が進められ，その結果を用いて，AdS_5/CFT_4 対応の直接的な検証が行われてきた。

本論文において，論文提出者は，AdS_5/CFT_4 対応(双対性)の基礎づけの問題を論じている。特に，弦の相互作用を記述する３点相関関数を，CFT サイド(すなわち４次元 $\mathcal{N}$=4 U(N)超対称ヤン-ミルズ理論)から可解性に基づいて構成・計算するための新しい手法を提案し，それによって，弱結合領域・半古典的極限における３点相関関数のより一般的な解の導出に成功している。この際，半古典的極限における可解性と解析的構造の果たす役割をよく解明して，同型の可解

性・解析的構造によって，AdS サイド(すなわち $AdS_5 \times S^5$ 時空上の古典的type-IIB 超弦理論，強結合領域に対応)においても矛盾なく３点相関関数が決定されることを指摘している。これらの知見に基づいて，少なくとも半古典的極限における３点相関関数の性質には，双対性の両サイドを同型の可解・解析性が貫いていることを主張している。

はじめに，６章では，４次元 $\mathcal{N}$=4 U(N)超対称ヤン-ミルズ理論のボゾン演算子の, su(2)セクターと呼ばれる部分クラスに対する３点相関関数の構成法として，``double spin chain” formalism と``skew-symmetric singlet paring”によるWick 縮約が導入される。この構成法によって su(2)セクターの演算子の一般的な組み合わせ(より一般的な弦三体状態に対応)の３点相関関数を構成することが可能となる。さらに，この構成法によって，３点相関関数が monodoromy 関係式を満たすことが示される。この monodoromy 関係式は，以下，CFT/AdS 両サイドにおける可解性にもとづく３点相関関数の計算に決定的な役割を果たす。

７章においては，上記の構成法が，４次元 $\mathcal{N}$=4 U(N)超対称ヤン-ミルズ理論のもつ超共形対称性 psu(2,2|4)の作用するボゾン演算子の完全なクラスにまで拡張できることが示され，この方法の有用性が示される。

８章では，半古典的極限において，３点相関関数の構造定数が Landau-Lifshitz 模型の可解性と monodoromy 関係式に基づいて決定される。はじめに，構造定数の半古典的極限を，量子スピン鎖コヒーレント状態による経路積分表示の鞍点近似として定式化することにより， Landau-Lifshitz 模型(古典的に可解な1+1 次元場の理論)との関係が明示される。特に, 構造定数の対数 $\log C_{ijk}$ が， 可解模型の作用変数 S・角度変数 ϕ のペアを関係付ける母関数 F ($\partial F/\partial S = \phi$)として解釈できることが指摘され，さらに，角度変数 ϕ の，monodoromy 行列の固有関数のなす行列式 wronskian を用いたシンプルな評価式が導かれる。以下，wronskian の解析性の決定，Riemann-Hilbert 問題の求解といった可解模型に関わる手法を屈指して，角度変数と作用変数が再構成されて，構造定数の解析的表式が導出される。得られた弱結合領域・半古典的極限における３点相関関数は, 先行研究の結果と矛盾せず, それを含むより一般的な結果となっている。

８章の後半では，さらに，この弱結合領域・半古典的極限における解法が，AdS サイド・強結合領域にも適用され，特に，on-shell 状態ベクトルの直交性が考慮されて，３点相関関数が正しく導出されることが示される。特に，Frolov-Tseytlin 極限において弱結合領域と一致すること，先行研究における矛盾が解消されることが指摘されている。

本論文の主要部(第 6, 7, 8 章)は風間洋一氏(総合文化研究科 名誉教授，立教大学大学院理学研究科 客員教授)と小松尚太氏(Perimeter Institute for Theoretical Physics(カナダ) PD）との共同研究にもとづくが，特に，8 章の内容，すなわち半古典的極限における３点相関関数の導出部分は論文提出者が主体となって解析を行ったものと認められ，論文提出者の寄与は十分であると判断する。その解析では，幾つかの新しく重要な物理的考察が加えられ，多くの非自明な技術的ステップが踏まれて結果に至っており，論文提出者の問題に対する深い理解と洞察，優れた計算実行力が示されていると判断する。本論文で示された結果は，当該研究分野において重要な成果であり，今後の研究の発展に寄与するところが大きいと認められる。

したがって，本審査委員会は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する。