

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540290

研究課題名(和文) グルーオン散乱振幅の可積分構造

研究課題名(英文) Integrability structure in gluon scattering amplitudes

研究代表者

伊藤 克司 (Ito, Katsushi)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：60221769

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：ゲージ重力対応に基づき、N=4超対称ゲージ理論におけるグルーオン散乱振幅と反ド・ジッター時空中の極小曲面の面積の対応を研究した。n点グルーオン散乱振幅について、摂動論から予想されている、Bern-Dixon-Smirnov公式からのずれであるremainder関数の強結合領域における解析的構造を、可積分模型、特に2次元共形場理論の可積分摂動により解析した。さらにそれに関係する超対称ゲージ理論の可積分構造を調べ、その可解性の成立する原理を追求した。その結果AdS3およびAdS4時空中におけるグルーオン散乱に対応するremainder関数の支配的補正項を厳密に決定することができた。

研究成果の概要(英文)：Based on the gauge-gravity correspondence, we studied the relation between gluon scattering amplitudes in N=4 supersymmetric gauge theory and minimal surfaces in anti-de Sitter spacetime. Using the integrable model and especially the integrable perturbation of two-dimensional conformal field theory, we investigated the analytic structure of the remainder function at strong coupling, which shows the deviation from the Bern-Dixon-Smirnov's formula predicted from the perturbative calculations. We also studied the integrable structure of the related supersymmetric gauge theories, and tried to find the basic principles on which such integrable structure rely. In particular we were able to determine exactly the leading correction terms in the remainder functions of the gluon scattering amplitudes corresponding to AdS3 and AdS4 spacetimes.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：超対称性 ゲージ重力対応 グルーオン散乱 極小曲面

1. 研究開始当初の背景

超弦理論は、重力を含む素粒子の基本的相互作用を統一する究極理論の最有力候補である。しかし弦理論は、弦の相互作用の結合定数の弱結合展開でのみ well-defined な理論であり、強結合領域を含んだ包括的な理論的な枠組みはまだ確立していない。近年、ラージN展開、インスタントン、双対性等のゲージ理論において有効性を発揮してきたアプローチを用いた超弦理論の強結合領域における特有なダイナミクスの研究が進展し、またそれによりゲージ理論の強結合領域における新しい研究方法が開発されている。

最近超対称ゲージ理論と超弦理論の間の対応関係(ゲージ・重力対応)の発見により、研究の大きな進展が見られる。特に AdS/CFT 対応と呼ばれる、N=4 超対称 Yang-Mills 理論と AdS 空間上の超弦理論の双対性により、弦理論あるいはゲージ理論の強結合領域における性質が、他方の理論の弱結合の解析で説明される。この対応の証明はまだされていないが、様々な状況証拠により成立すると考えられている。この対応はゲージ不変な観測量の異常次元について精密に検証されているが、最近カラー自由度をもつグルーオン散乱振幅が、超弦理論側に対応物をもつことがわかってきた。場の理論における最も基本的な物理量である散乱振幅を AdS/CFT 対応で理解することは、ゲージ理論の強結合領域におけるダイナミクスを理解する上で重要な問題である。

2. 研究の目的

N=4超対称ゲージ理論におけるMaximally Helicity Violating (MHV)グルーオン散乱振幅は、超弦理論における、グルーオンの外線運動量に対応する光的境界を持つWilson ループで囲まれる極小曲面の面積で計算されるということが Alday-Maldacenaにより発見された。この極小曲面は4点振幅の場合、ゲージ理論側における摂動的計算から期待される factorization や colinear 極限等の性質から導かれるBern-Dixon-Smirnovの仮説公式の強結合における表式と一致し、世界中の素粒子論研究者を驚かせた。このグルーオン振幅・Wilson ループ対応は、その後弱結合領域の摂動計算においても成立することが n 点1ループの場合に成立することが確かめられ、振幅がグルーオンの外線運動量に関する共形変換に対する不変性 (dual共形不変性) が成り立つことが証明された。しかし Bern 達及び Drummond 達により 6 点 2 ループの場合の計算が数値的に実行され、グルーオン振幅と Wilson ラインの期待値の一致は確認されたが、新たにBDS 公式とのずれが発見された。このずれはその後 2 ループレベルで解析的にも示された。n(≥ 6)点グルーオン振幅のBDS公式からのずれはremainder関数と呼ばれる。このremainder関数の形はdual 共

形不変性からは決まらず、グルーオン運動量の共形不変な関数である複比の関数で表される。このremainder 関数を強結合極限で計算することで 摂動的 n 点グルーオン振幅との対応が評価できる。このグルーオン多点振幅に対する極小曲面の構成は難しく、その具体的形は現在のところ数値計算 によるしかない。ところが 2009 年 Alday-Maldacenaは AdS₅ の部分空間である AdS₃ 空間における極小曲面の方程式が、変更された Sinh-Gordon 方程式になることを示した。さらにその方程式を Z₂ 対称性を持つ Hitchin 方程式に書き直すことにより、極小曲面の問題をスペクトラルパラメータの 入った Hitchin 方程式に附随する平坦切断の線型方程式を解く問題に帰着させた。この線形問題の解 の漸近形の示す Stokes 問題を解くことにより、極小曲面の面積が評価できることを示した。この問題はその後 Alday-Gaiotto-Maldacena[AGM]および Alday-Maldacena-Sever-Vieira[AMSV]により考察され、線形問題 の解の Wronskian が可積分模型における T-系の関数方程式をみたし、Stokes 問題における漸近解の接続公式である Stokes 係数が Y-関数となることがわかった。この Y-関数から導かれる熱力学的ベータ仮説 (TBA) 積分方程式の自由エネルギーにより極小曲面の面積が表されることが明らかになった。我々の研究グループ (初田-伊藤-酒井-佐藤) はAGMの結果をもとに、AdS₃ 空間の 2n 点振幅に相当する極小曲面の TBA 方程式を AMSV と同時かつ独立に導出し、対応する可積分模型が一般化されたパラフェルミオン模型SU(n-2)₂/U(1)ⁿ⁻³であることを始めて明らかにした。さらに我々は AdS₅ 空間中の 6 点振幅の remainder 関数を Z₄ パラフェルミオン模型の可積分摂動で解析的に評価することに成功した。

本研究の目的は上記で得られた部分的な成果を進展させて、一般の n 点グルーオン振幅の remainder 関数の解析的構造を、可積分模型特に 2 次元の共形場理論(CFT) の可積分摂動と関係づけることにより明らかにしていく ことにある。さらに AdS₅ 空間の極小曲面に関係する Y-系の関数方程式は、通常の可積分系に附随する Y-系と性質が異なり、6 点振幅の場合を除き対応する可積分系が知られていない。これは新しい可積分模型の存在を示唆しており、この可積分模型を明らかにして、強結合極限における一般のグルーオン散乱振幅の解析的構造を明らかにする。またこの 4 次元ゲージ理論における極小曲面と 2 次元の可積分系が対応する一般的な原理は自明なものではない。この対応の原理的な理由をより 4 次元ゲージ理論の 2 次元次元縮小で得られる一般的な Hitchin 方程式系と可積分系の対応としてとらえその原理、構造を明らかにしたい。またこの対応をグルーオン以外の散乱振幅に拡張するために超対称

性化を行い, $N=4$ 理論の振幅全体の構造を明らかにする.

3. 研究の方法

$N=4$ 超対称 Yang-Mills 理論における MHV(Maximally Helicity Violated) グルーオン散乱振幅の構造は, tree レベル振幅とその他のループ効果を含む部分に分けられる. ループ効果の和は BDS 公式で表され, それからの非自明なずれを表すのが remainder 関数である. remainder 関数は外線運動量の複比の関数である. AdS/CFT 対応を用いるとこのグルーオン散乱振幅はグルーオンの運動量に比例した線分からなる多角形(Wilson ライン)を境界とする AdS 空間内の弦の張る極小曲面の面積 A であり, それは

$$A=A_{\text{div}}+A_{\text{BDS-like}}+A_{\text{period}}+A_{\text{free}}$$

の形に分解される. A_{div} はグルーオンの赤外発散の正則化項, $A_{\text{BDS-like}}$ は, Hitchin 方程式に付随する線形問題 $(d+A) = 0$ の Stokes セクターの寄与を正 n 角形で分割したときの各 Stokes セクターの寄与, A_{period} は実際の n 多角形と正 n 角形の寄与の差, A_{free} は Hitchin 方程式系の接続問題に関連した Y -系から導かれる熱力学的ベテ仮説(TBA)方程式の自由エネルギーである. これから remainder 関数 R_n が求められる. R_n において赤外発散項は相殺し, 運動量の複比の有限な関数となる. この remainder 関数を単純な設定から出発して評価を行う.

まず AdS_3 空間内の $2n$ 点振幅の場合, A_{free} は $n-2$ 個の Y -関数 $Y_s(\cdot)$ ($s=1, \dots, n-2$) の積分方程式(TBA 方程式)で表され, さらに $Y_s(\cdot)$ は Y -系と呼ばれる関数関係式をみだす. TBA 方程式はパラメータ m_s (質量), μ_s (共鳴パラメータ)で特徴づけられる. Y 関数はグルーオンの運動量の複比で表され, $m_s \rightarrow 0$ の極限では境界が正 $2n$ 角形解に対応し, $m_s \rightarrow \infty$ では境界はグルーオンの運動量が平行になる colinear 極限に相当する.

これまでの可積分系の研究では A_{free} の厳密な式は知られておらず, Y -系が 2 次元共形場理論(CFT)の可解摂動と同一視される場合に解析的な展開式が知られていた. 初田, 伊藤, 酒井, 佐藤は AdS_5 空間内の 6 点振幅の場合に Z_4 パラフェルミオンモデルの質量摂動により A_{free} の CFT 点の周りの解析的表式を得ることに成功した. そこでまず初めにこの結果を AdS_3 空間内の $2n$ 点振幅に拡張する. この Y -系は一般化パラフェルミオン $\text{SU}(n-2)_2/U(1)^{n-3}$ の可積分変形である Homogeneous Sine-Gordon モデルとして知られている. その具体的な自由エネルギーの展開式はある特別な場合にのみミニマルモデルの共形摂動論と同じになることがわかり, 具体的に自由エネルギーを求めるとができる. その情報より, HSG モデルのグルーオン散乱振幅の remainder 関数を計算する.

グルーオン運動量の複比を与える Y -関数の解析的な展開に関して, 最近境界のある CFT の境界状態に付随するエントロピー関数である g -関数と T -関数の関係が示唆されており, その境界状態を boundary CFT の摂動論による評価から Y -関数の解析解を求める. 以上の解析解を数値計算による結果と比較してその妥当性を検証する.

次に同様な考察が可能である AdS_4 時空内の極小曲面に対応する n 点振幅に対して同様な考察を行う. この場合対応する可積分模型は $\text{SU}(n-4)_4/U(1)^{n-5}$ HSG 模型となり, その特別な摂動が, W ミニマルモデルの共形摂動論として具体的に計算できることがわかる. これから HSG 模型の自由エネルギー, T -関数, Y -関数の解析的展開を求め, remainder 関数を評価する.

最後に AdS_5 時空内の n 点振幅に関係する Y -系に関係する可積分系について考察する. この可積分系は, 化学ポテンシャルを 0 にする極限では HSG 模型 $\text{SU}(n-4)_4/U(1)^{n-5}$ となる. しかし化学ポテンシャルがある場合は, その TBA 方程式と AdS_5 の Y -系から導かれた TBA 方程式の間には食い違い(積分方程式の核の違い)があることが知られている. その remainder 関数の解析的な評価は, 背後にある CFT の摂動論なしには困難であるので, 我々はまず AdS_5 の Y -系を導くような積分核をもつ新しい可積分模型の構築を考え, その CFT 極限として TBA 方程式を解析することを考える.

またこの事実はある種の Hitchin 方程式系と Y -系に基づく可積分系の新しい対応関係を示唆していると考えられる. 関連研究として常微分方程式と TBA の関係を見出した Dorey-Tateo の研究がある. その研究ではまだ現象論にすぎない対応関係であったが, 本研究において Hitchin 方程式系という新しい数学的対称を通じてより原理的な両者の対応を見出し, それをグルーオン散乱振幅の可解性の成立を保証するより深い物理的理由を調べる.

またこの可解性を超対称ゲージ理論の枠組み内で考察することは AdS/CFT 対応の完全な証明に向けた重要なステップである. 超対称ゲージ理論の背後にある可積分性の機構を明らかにすることにより, この対応が成立する原理を明確にしていく. 特にその中で可積分性を有する興味深い理論はオメガ背景場中の超対称ゲージ理論や M 理論の低エネルギー有効理論である. それらの可積分性に現れる普遍性を解明していく.

この研究を研究分担者との緊密な議論のもと系統的に進めていく. これらのテーマのいくつかは独立して進められるテーマであり, 進展する部分があれば集中的に研究を行う.

4. 研究成果

ゲージ重力対応に基づき、 $N=4$ 超対称ゲージ理論におけるグルーオン散乱振幅と反ド・ジッター時空中の極小曲面の面積の対応を研究した。 n 点グルーオン散乱振幅について、摂動論から予想されている、Bern-Dixon-Smirnov 公式からのずれである remainder 関数の強結合領域における解析的構造を、可積分模型、特に 2 次元共形場理論の可積分摂動により解析した。さらにそれに関係する超対称ゲージ理論の可積分構造を調べ、その可解性の成立する原理を追求した。その結果、以下の研究成果を得た。

(1) AdS_3 反ド・ジッター時空中における $2n$ 個の光的線分からなる Wilson ループの期待値は、平面内に運動量を制限されたグルーオンの散乱振幅と双対であり、 AdS/CFT 対応を用いると Wilson ループを境界とする AdS_3 内の極小曲面の面積になる。この運動量の配位が単純な場合に対応する自由エネルギーが 2 次元の Homogeneous Sine-Gordon (HSG) 模型 $SU(n-2)_2/U(1)^{n-3}$ の熱力学的ベテ仮説 (TBA) 方程式となることが初田-伊藤-酒井-佐藤の研究で分かっている。

また remainder 関数に現れるグルーオン運動量の複比は可積分模型の Y -関数または T -関数で表され、 Y -系あるいは T -系と呼ばれる関数関係式で統御されることが知られている。本研究で伊藤、酒井、佐藤は、HSG 模型の T -関数、 Y -関数の解析的展開が、境界のある共形場理論の境界にあるエントロピーを測る物理量である g -関数の比により定まり、その振幅の remainder 関数が解析的に評価できることを示した。その結果は $n=8, 10$ の場合には数値計算の結果を再現することが分かった。さらに 2 ループの摂動論に基づいた結果を我々の remainder 関数と比較し、両者が類似のべき展開の構造をもつことを発見した。

[Hatsuda-Ito-Sakai-Satoh, JHEP 1104 (2011) 100] その後伊藤、佐藤はその結果を拡張し、 $2n$ 点振幅の remainder 関数を HSG 模型の T -関数で評価する一般式を提案した。この結果と 2-loop の結果を比較したところ約 90% の一致をみた。これは摂動論側と強結合側の結果がそれほど違わないということを示し、 AdS/CFT 対応の新しい定量的検証になっている。[Hatsuda-Ito-Satoh, JHEP 11 (2012) 024] この結果について佐藤は多くの国際会議での招待講演を行った。

(2) (1) の結果を拡張し、伊藤、佐藤はグルーオンの運動量が平面からはずれた場合に相当する AdS_4 反ド・ジッター空間中の極小曲面に対応する remainder 関数をレベル 4 の HSG 模型 $SU(n-4)^4/U(1)^{n-5}$ の可積分摂動と熱力学的ベテ仮説方程式の方法で評価を行うことに成功した。特に HSG の可積分摂動と高階スピン W 代数を対称性にもつ minimal 模型の共形摂動の関係性を明らかにし、6 点および 7 点振幅に対応する remainder 関数の解析

的展開を行った。その支配的な補正項を計算し、6 点振幅の場合の摂動的な 2 ループ公式との比較を行い両者が AdS_3 の場合と同様に近い値をもつことを見いだした。

[Hatsuda-Ito-Satoh, JHEP 2 (2013) 067]

(3) 伊藤と佐藤は、(2) の結果を拡張し、グルーオンの運動量が一般の配位である、4 次元空間に含まれる場合の強結合散乱振幅を AdS_5 反ド・ジッター時空中の極小局面から解析した。これは、ODE/IM 対応と呼ばれる常微分方程式の漸近解の接続問題 (Stokes 現象) と可積分模型に現れる関数関係式の対応の研究から現れた、量子ロンスキアンと呼ばれる新方法を用いた新しい評価である。

[Hatsuda-Ito-Satoh-Suzuki, 論文準備中]

これに関連して、伊藤は、これまで現象論的にしか見られなかった ODE/IM 対応における ODE の構成をアフィンリー代数に基づく戸田方程式の観点から初めて系統的に分類することに成功した。[Ito-Locke, ODE/IM correspondence and modified affine Toda equations 投稿中] これは今後ゲージ重力対応の可積分性の理解に新しい方向性をもたらすと期待される。

(4) オメガ背景場における超対称ゲージ理論は可積分構造をもち、その真空構造が量子スピノ系等の可積分模型と対応していることが知られている。しかしその対応が成立する原理はまだ不明である。伊藤は、 $N=4$ 超対称ゲージ理論のオメガ背景場における変形を考え、その理論が保つ超対称性を分類した。その結果、 $N=4$ 位相的ゲージ理論の保つ対称性がオフェルでも保たれることを示した。またオメガ背景場における変形モノポール解を求めた。

(5) 酒井はゲージ理論・弦理論の強結合領域における物理を可積分性を利用して定量的に解析する研究の一環として、 M 理論における可積分性及び 6 次元の E 弦理論における可積分性の研究を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 17 件)

1. Takenori Ishii and Kazuhiro Sakai Thermodynamic limit of the Nekrasov-type formula for E-string theory, Journal of High Energy Physics, 02, 2014, 087-0~17, 査読有

DOI: 10.1007/JHEP02(2014)087

2. Yuji Satoh, AdS 空間中の極小曲面とグルーオン散乱振幅, RIMS Kokyuroku (数理解析研究所講究録) 1880 (2014) 42 - 71 査読有 URL:

<http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/>

kokyuroku/contents/pdf/1880-05.pdf

3. Kazuhiro Sakai and Seiji Terashima Integrability of BPS equations in ABJM theory, Journal of High Energy Physics, 11,2013,002-0~20, 査読有

DOI: 10.1007/JHEP11(2013)002

4. K.Ito, H.Nakajima and S. Sasaki Twisted N=4 Super Yang-Mills Theory in Omega-background

Journal of High Energy Physics, 査読有, 10 卷 (2013) 080 号, pp 1-23

DOI: 10.1007/JHEP10(2013)080

5.Yasuyuki Hatsuda, Katsushi Ito, Yuji Satoh,

Null-polygonal minimal surface in AdS4 from perturbative W minimal models, Journal of High Energy Physics, 査読有, 02 卷, 2013 年, 067 号,pp 1-39,

DOI: 10.1007/JHEP02(2013)067

6. Yuji Satoh, Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability, International Journal of Modern Physics: Conference Series Vol. 21 (2013) 1-21, 査読有

DOI: 10.1142/S2010194513009379

7. Kazuhiro Sakai, Counting BPS states in E-string theory

International Journal of Modern Physics: Conference Series, vol. 21 (2013) 116-125 査読有

DOI: 10.1142/S201019451300946X

8. Katsushi Ito, Hiroaki Nakajima, Shin Sasaki,

Torsion and Supersymmetry in Omega-background, Journal of High Energy Physics, 査読有,11 (2012) 132, 1-21

DOI: 10.1007/JHEP11(2012)132

9. Katsushi Ito, Hiroaki Nakajima, Shin Sasaki

N=4 instanton calculus in Omega and R-R backgrounds, Nuclear Physics B, 査読有 860 (2012) 240-244

DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2012.03.001

10. Katsushi Ito, Satoshi Kamoshita, Shin Sasaki

Deformed BPS Monopole in Omega-background Physics Letteres B710 (2012) 240-244, 査読有

DOI: 10.1016/j.physletb.2012.02.082

11 Yuji Satoh,

On supersymmetric interfaces for string theory, Journal of High Energy Physics, 1203 (2012) 072, 査読有

DOI: 10.1007/JHEP(2012)072

12 Yasuyuki Hatsuda, Katsushi Ito, Yuji Satoh, T-functions and multi-gluon scattering amplitudes, Journal of High Energy Physics, 査読有, 02, 2012, 003

DOI: 10.1007/JHEP02(2012)003,1-37

13. Kazuhiro Sakai, Seiberg-Witten prepotential for E-string theory and random partitions, Journal of High Energy Physics, 査読有, 6, 2012, 27, 1-15

DOI: 10.1007/JHEP06(2012)027

14. Kazuhiro Sakai, Seiberg-Witten prepotential for E-string theory and global symmetries, Journal of High Energy Physics, 9, 2012, 77, 1-22 査読有

DOI: 10.1007/JHEP09(2012)077

15. Yuji Satoh, Gauge/string duality and thermodynamic Bethe ansatz equations,

RIMS Kokyuroku Bessatsu, B28 (2011) 171- 192, 査読有

URL:http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kenkyubu/bessatsu/open/pdf/B28/B28-10.pdf

16. Katsushi Ito, Satoshi Kamoshita, Shin Sasaki, BPS Monopole Equation in Omega-background, Journal of High Energy Physics, 査読有 04 (2011) 023, 1-14

DOI: 10.1007/JHEP04(2011)023

17. Yasuyuki Hatsuda, Katsushi Ito, Kazuhiro Sakai, Yuji Satoh, g-functions and gluon scattering amplitudes at strong coupling, Journal of High Energy Physics, 査読有, 04, 2011,100,

DOI: 10.1007/JHEP04(2011)100

[学会発表](計 31 件)

1. Katsushi Ito, Omega-background and deformed BPS equations, KIPMU-FMSP Workshop "Supersymmetry in Physics and Mathematics", Kavli-IPMU, Kashiwa March 10-20,2014, 招待講演

2. Katsushi Ito, ODE/IM correspondence and modified affine Toda equations I, Japn-RFBR workshop on "Progress in the synthesis of integrabilities arising from gauge-string duality", KKR びわこ,大津 March 4-7, 2014

3. Yuji Satoh, ``Remainder function of N=4 SYM and massless TBA'', Workshop on "Progress in the synthesis of integrabilities arising from gauge-string duality"JSPS/RFBR collaboration (国際会議), KKR hotel Biwako, Ootsu; Ritsumeikan Univ., Kusatsu, March 4 -- 7, 2014

4. Kazuhiro Sakai, Integrability of BPS equations in ABJM theory, Conference ``Integrability, Symmetry and Quantum Space-Time'' 2014 年 1 月 7 日, 京都大学基礎物理学研究所、京都府,招待講演

5. Katsushi Ito, Twisted N=4 super Yang-Mills theory in Omega background, Todai/Riken Joint workshop om super Yang-Mills, solvable systems and related subjects, University of Tokyo, October 23,24, 2103, 招待講演

6. 伊藤克司,Y-system and perturbed W

- minimal model, 日露共同ミニワークショップ(招待講演), 2013年03月23日~2013年03月25日, ヴィアーレ大阪, 大阪科学技術センター, 大阪市
7. Yuji Satoh, ``MHV amplitude around regular-polygonal limit'' (招待講演), Kavli IPMU Workshop on Gauge and String Theory, Kavli IPMU at University of Tokyo, Kashiwa, Japan, August 26 -- September 06, 2013.
 8. Yuji Satoh, ``On supersymmetric interfaces in string theory'', 基礎研究会「場の理論と弦理論」, 2012年7月23 -- 27日.
 9. 佐藤 勇二, ``On supersymmetric interfaces in string theory'', 日本物理学会 2012年秋季大会, 京都産業大、京都、2012年9月11日 -- 14日.
 10. Yuji Satoh, ``Gluon scattering amplitudes and two-dimensional integrable systems'', Yukawa International Seminar (YKIS) 2012 ``From Gravity to Strong coupling Physics'', YITP, Kyoto, Japan, October 15 -- 19, 2012 (invited talk).
 11. Yuji Satoh, ``Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability'', Light-Cone Physics: Hadronic and Particle Physics, University of Delhi, Delhi, India, December 10 -- 15, 2012 (invited talk).
 12. Yuji Satoh, ``Gluon scattering amplitudes and two-dimensional integrable systems'', 研究集会「場の数理とトポロジー」, 信州大学、松本、2013年2月6日 -- 8日 (invited talk).
 13. 佐藤 勇二, ``Analytic expansion of MHV amplitude at strong coupling'', 日露共同研究ミニワークショップ, ヴィアーレ大阪・大阪科学技術センター、大阪、2013年3月23日 -- 25日.
 14. 初田 泰之, 伊藤 克司, 佐藤 勇二, ``Null-polygonal minimal surfaces in AdS4 from perturbed W minimal models'', 日本物理学会第68回年次大会, 広島大学東広島キャンパス、東広島、2013年3月26日 -- 29日.
 15. Yuji Satoh, ``Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability'', International conference on Progress in Quantum Field Theory and String Theory, Osaka City University, Osaka, Japan, April 3 --7, 2012 (invited talk).
 16. Yuji Satoh, ``Gluon scattering amplitudes and two-dimensional integrable systems'', APCTP-CQeST-IEU Workshop on ``Quantum Integrability and its

Applications'', Seogwipo, Jeju Island, South Korea, July 7 -- 13, 2012 (invited talk).

17. Yuji Satoh, Thermodynamic Bethe ansatz and analytic expansions of gluon scattering amplitudes at strong coupling, 8th Bologna workshop on CFT and integrable models, 2011年9月15日, Bologna University (Bologna, Italy).
18. Yuji Satoh, g-functions and gluon scattering amplitudes at strong coupling, 35th Johns Hopkins workshop on AdS/CFT and its applications, 2011年6月24日, Eotvos University (Budapest, Hungary).

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 克司 (ITO, Katsushi)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 60221769

(2) 研究分担者

佐藤 勇二 (SATO, Yuji)
筑波大・数理物質科学研究科(系)・助教
研究者番号: 50312799

酒井 一博 (SAKAI, Kazuhiro)
立命館大学・理工学部・助教
研究者番号・10439242