

機関番号：12608

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007 ～ 2010

課題番号：19740122

研究課題名（和文） ゲージ理論の量子効果とブレーンダイナミクス

研究課題名（英文） Quantum corrections in gauge theories and brane dynamics

研究代表者

今村 洋介（ IMAMURA YOSUKE ）

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：80323492

研究成果の概要（和文）：

ブレーンタイリングと呼ばれる、4次元ゲージ理論のブレーンを用いた構成法を拡張し、アノマリー相殺をブレーン上のフラックスの保存を用いて説明した。

BLGモデルと呼ばれる3次元チャーンサイモン理論を用いてD2ブレーンおよびM5ブレーンを記述する方法を提案した。

3次元ゲージ理論、特にN=4超対称チャーンサイモン理論のブレーンを用いた構成と

AdS/CFTを通して関係する曲がった背景上のM理論の対応を詳細にしらべた。

異常次元を持つ演算子を含む3次元ゲージ理論における超共形インデックスの一般公式を与えた。

研究成果の概要（英文）：

I extended the brane tilings, a prescription to construct a large class of four-dimensional gauge theories, and clarify the relation between gauge anomaly cancellation in gauge theories and the flux conservation on corresponding brane systems.

I proposed descriptions of D2 and M5-branes in terms of BLG model.

I investigated in detail the relation between N=4 supersymmetric Chern-Simons theories and M-theory in the dual geometries.

I derived a general formula for the superconformal index for 3-dimensional N=2 supersymmetric gauge theories which contain operators with large anomalous dimensions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	600,000	0	600,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	2,100,000	450,000	2,550,000

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：素粒子物理

1. 研究開始当初の背景

素粒子論において、電子、クォーク等の粒子間の相互作用はゲージ理論によって記述されるため、ゲージ理論のダイナミクスを解明することは素粒子論のあらゆる分野において重要である。特に、結合定数が大きく摂動論を用いることができないような相互作用は、素粒子が束縛状態をなし、原子核等を構成する際に本質的な役割を果たす。従来はこのような系の解析にはコンピュータを用いた数値計算などに頼る必要があったが、近年、弦理論における双対性、特にブレーン上のゲージ理論とそのブレーンによって曲げられた重力理論の古典解の間の双対性 (AdS/CFT 対応) を用いることが、そのような強結合ゲージ理論の解析にきわめて有用であることが明らかとなった。

この双対性はまず Maldacena によって大きな超対称性 (具体的には 16 個の超対称性) を持つ理論に対して提案された。このような理論においてはその大きな対称性のために、量子補正がほとんど相殺してしまい、多くの物理量を容易に計算することができる。このことを利用して、双対性のさまざまなチェックが行われてきた。その後超対称性の個数が小さな場合への拡張が行われた。特に、4 次元の $N=1$ 超対称性を持つ理論 (4 つの超対称性を持つ) への拡張は、現象論的な応用においても重要であり、精力的な研究がなされていた。そのような理論においては対称性の縛りがそれほど強くないために、さまざまな理論を構成することができる。また、量子補正も大きく、たとえば場の異常次元がオーダー 1 になることが一般的である。このような強結合の理論においては、場の理論において摂動論的なアプローチを行うことが不可能であり、AdS/CFT の手法が非常に重要な役割を果たすと期待される。

AdS/CFT を場の理論の解析に適用するためには、与えられたゲージ理論に対して、対応する弦理論を定めなければならない。より具体的には、弦理論が定義される背景時空の構造を決定することが必要となる。近年、このような対応関係を確立するための強力な手法として、Hanany らによって提案されたのがブレーンタイリングである。これはゲージ理論の構造をあるルールに従って図示し、その図から対応する弦理論の背景時空の構造を読み取るための数学的手続きとして与えられた。このブレーンタイリングの手続きは、その名の通り双対性の背景にあるブレーンの構造そのものに由来しているであろうことは当初から期待されていたが、この研究の開始時点では、ブレーン構造とその物理的性質についてはあまりよく理解されてい

なかった。

ブレーンタイリングが提案されてまもなく、3 次元のゲージ理論と M 理論に対する双対性の関係を与えるブレーンクリスタルなども提案されていた。これについては、当時 3 次元の超共形場理論に対する研究がほとんど進んでおらず、ブレーンを通じた理解は得られていなかった。たとえば、M 理論における M2 ブレーンを何枚か重ねるとその上で 3 次元の超共形場理論が実現されるであろうということが対称性の解析からは期待されていたが、本研究開始時点ではそのラグランジアンさえ知られていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、摂動論的な手法によっては解析が困難なゲージ理論の量子論的效果に対して、弦理論において現れる、ゲージ理論と重力理論あるいはブレーンの理論の間の双対性を用いてアプローチすること、特に、ゲージ理論側において起こるさまざまな現象がブレーンを用いてどのように表現されるかを明らかにし、広いクラスのゲージ理論に対して適用可能な解析手法を開発することである。

研究の背景でも述べたように、研究開始時点では 4 次元の超対称ゲージ理論に対して対応する弦理論背景を得る方法 (ブレーンタイリング) が提案されたばかりであり、本研究ではその手法を用いて構成された、互いに双対なゲージ理論と弦理論の間の関係をより深く理解すること、そしてそれを用いて 4 次元の強結合なゲージ理論のダイナミクスを解明すること、いまだ証明されていない AdS/CFT の正当性を示す新たな証拠を得ることなどを目的とした。

その後、3 次元ゲージ理論と M 理論の間の双対性が新たに提案されたことに伴い、同様の手法を用いて 3 次元の強結合ゲージ理論に対しての理解を深めることも新たな目的となった。これは、さまざまな次元において定義されるゲージ理論は互いに関係しており、一つの次元にとらわれることなく、さまざまなゲージ理論を調べてその類似性や違いを調べることで、新たな知見が得られるであろうと期待されるからである。

3. 研究の方法

本研究の最初の段階では、さまざまな 4 次元超対称ゲージ理論をブレーンを用いて構成するために、ブレーンタイリングを用いた。特に、ブレーンタイリングを単なる数学的な手続きではなく、物理的なブレーンを表す図形であるとみなすことにより、ゲージ理論が

有する性質がどのようにブレーンの立場で説明されるかということに注目した。

本研究の後半では、弦理論の分野において本研究開始時にはほとんど注目されていなかった3次元超対称ゲージ理論に関する重要な発見（大きな超対称性を持つチャーンサイモン理論の発見とそのM理論的構成）がなされたことに伴い、私自身も3次元超対称チャーンサイモン理論におけるゲージ・重力対応の研究を開始した。

M理論においてはM2ブレーンとM5ブレーンと呼ばれる二種類のブレーンが存在するが、これらのブレーン上のゲージ理論のラグランジアンがどのように与えられるか、ということはブレーンとゲージ理論の関係を考える上でもっとも基本的な問題であり、私はM2ブレーンとM5ブレーンの両方について研究を行った。特にM2ブレーンに対しては、4次元ゲージ理論の場合に用いられたブレーンタイリングに類似したブレーンクリスタルと呼ばれる手法について、M理論におけるM2ブレーンとしての物理的意味に注目し、それをIIA型弦理論のD2ブレーンの系に落とすことで、どのようにゲージ理論がブレーン上の理論として実現されるかを研究した。

また、本研究の最終段階においては、ゲージ理論のより詳細な情報を調べるために、インデックスと呼ばれる量を計算し、それをAdS/CFTの予言と適合するかを調べた。ブレーンタイリング等の手法を用いるとAdS/CFTの例を無数に構成することができるが、その多くにおいては真空構造だけしか調べられておらず、励起状態についての情報はあまり得られていなかった。インデックスを用いれば、BPS状態と呼ばれる一部の状態についてのみという制限はあるが、励起状態に対する情報も得ることができる。

4. 研究成果

4次元のゲージ理論に対して、ブレーンタイリングを用いた構成法を拡張した。4次元の $N=1$ 超対称ゲージ理論は一般にカイラルであり、ゲージ群や物質場の表現を任意にとると一般にはゲージアノマリーが表れてしまう。そのような理論は矛盾を含み、現実には存在してはならない。ブレーンタイリングを用いた構成では一般にカイラルな理論が現れるが、もしブレーンタイリングが単なる数学的な手続きではなく物理的なブレーンを表しているのであれば、ブレーンタイリングを用いて構成したゲージ理論のゲージアノマリーは必ず相殺しているはずである。私はOプレーンやD7ブレーンを導入することで拡張したブレーンタイリングに対して、ゲージ群や物質場がどのように現れるかと

いったことについて、Oプレーンのチャージによる性質の違いなどに基づいて一般的なルールを与えると同時に、ゲージ理論側のアノマリー相殺をブレーン上の場のフラックスの保存を用いて理解できることを明らかにした（発表論文[11]）。このことは、現象論に応用できる超対称理論をブレーンを用いて構成する際に重要である。

3次元の超対象チャーンサイモン理論のうち、 $N=8$ という大きな対称性をもつ理論はBLGモデルと呼ばれ、M2ブレーンを与えるものとしてもともと提案された。しかし当初からBLGモデルとM2ブレーンの対応は完全ではなく、よく理解されていなかった。私は直接M2ブレーンを考えるのではなく、IIA型超弦理論における対応物であるD2ブレーンに注目し、それをBLGモデルによって記述する方法を研究した。そしてD2ブレーンの作用を直接BLGモデルから導出した。（発表論文[10]）また、BLGモデルによってM5ブレーンの作用も構成できることを示した（発表論文[9]）。

その後、M2ブレーンについては、その上のゲージ理論としてABJMモデルと呼ばれる3次元チャーンサイモン理論が提案された。この理論は特定の背景上のM2ブレーンを記述するものであり、 $N=6$ の超対称性を持つ。私はこの理論の拡張を行った。まず、発表論文[7,8]においては $N=4$ の超対称性をもつ3次元チャーンサイモン理論のラグランジアンを構成し、AdS/CFTを通して対応するM理論の背景時空の構造を明らかにした。さらに発表論文[6]においては、ブレーンクリスタルを用いた $N=2$ 超対称チャーンサイモン理論の構成法について、部分的にはあるがブレーンを用いた解釈を提案し、物理的な正当化を行った。

さらに、 $N=4$ の超対称性を持つ3次元チャーンサイモン理論に対して、AdS/CFTによって関係する曲がった背景上のM理論との対応を詳細に解析した。 $N=4$ の理論の場合にも、双対なM理論の背景時空はABJM理論の場合と同様に7次元球のあるオービフォールドであるが、ABJMモデルにはなかった重要な特徴として、そのオービフォールドが非自明な2サイクルを持つ。このサイクルにはM2ブレーンが巻きつくことができ、その対応物がゲージ理論の側にも存在しているはずであるが、私はそのような内部空間の2サイクルに巻きついたM2ブレーンが、チャーンサイモン理論のモノポール演算子に対応することを始めて指摘した。（発表論文[4,5]）。さらにその対応関係について、インデックスを用いた詳しい解析を行い、イ

インデックスに寄与するようなBPSなもの(超対称性変換のうちのいくつかを作用させると0になるようなもの)については1対1の対応があることを示した(発表論文[2,3])。

3次元のゲージ理論において、超対称性が $N=2$ の場合にもやはりインデックスを調べることはAdS/CFTにおけるBPS状態の1対1対応を調べるために有用であるが、一般の $N=2$ 理論に対しては量子補正が大きく、BPS状態に対しても大きな異常次元が現れるため、インデックスの計算はそれまで成功していなかった。私はそのような強結合のゲージ理論においても局所化と呼ばれる方法を用いて超共形インデックスを与える一般公式を求めた(発表論文[1])。これにより、3次元ゲージ理論とM理論の間のAdS/CFT対応を調べる新たな手段が得られたことになり、今後3次元ゲージ理論とM理論の関係を調べていく上で大変有用である。また、M理論とは独立した、純粋に3次元場の理論の解析においても、たとえばミラー対称性のチェックなどにも私が求めた公式は重要な役割を果たすと期待される。

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 11 件)

[1] Y. Imamura, S. Yokoyama, ``Index for three dimensional superconformal field theories with general R-charge assignments,’’ JHEP 1104 (2011) 007, (査読有)

[2] Y. Imamura, S. Yokoyama, ``Twisted Sectors in Gravity Duals of $N=4$ Chern-Simons Theories,’’ JHEP 1011 (2010) 059, 2010; Erratum-ibid. 1104 (2011) 068, (査読有)

[3] Y. Imamura and S. Yokoyama, ``A Monopole Index for $N=4$ Chern-Simons Theories,’’ Nucl. Phys. B 827, 183 (2010), (査読有)

[4] Y. Imamura, ``Monopole operators in $N=4$ Chern-Simons theories and wrapped M2-branes,’’ Prog. of Theor. Phys. 121 (2009) 1173, (査読有)

[5] Y. Imamura, S. Yokoyama, `` $N=4$ Chern-Simons theories and wrapped M-branes in their gravity duals,’’ Prog. of Theor. Phys. 121 (2009) 915, (査読有)

[6] Y. Imamura, K. Kimura, ``Quiver Chern-Simons theories and crystals,’’ J. High Energy Phys. 0810 (2008) 114, (査読有)

[7] Y. Imamura, K. Kimura, `` $N=4$ Chern-Simons theories with auxiliary vector multiplets,’’ J. High Energy Phys. 10 (2008) 040, (査読有)

[8] Y. Imamura, K. Kimura, ``On the moduli space of elliptic Maxwell-Chern-Simons theories,’’ Prog. Theor. Phys. 120 (2008) 509, (査読有)

[9] P.-M. Ho, Y. Imamura, Y. Matsuo, S. Shiba, ``M5-brane in three-form flux and multiple M2-branes,’’ J. High Energy Phys. 08 (2008) 014, (査読有)

[10] P.-M. Ho, Y. Imamura, Y. Matsuo, ``M2 to D2 revisited,’’ J. High Energy Phys. 07 (2008) 003, (査読有)

[11] Y. Imamura, K. Kimura, M. Yamazaki, ``Anomalies and 0-plane charges in orientifolded brane tilings,’’ J. High Energy Phys. 03 (2008) 058, (査読有)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今村 洋介 (IMAMURA YOSUKE)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：80323492