

論文内容の要旨

論文題目： Aspects of $\mathcal{N} = 4$ Chern-Simons Theories
and Their Gravity Duals

($\mathcal{N} = 4$ Chern-Simons 理論とその重力双対の諸相)

氏名：横山修一

我々は、超対称性が8個ある3次元 Chern-Simons 理論とそれと等価と考えられるM理論との関係について研究した。我々の研究の意義は、近年提唱された、M理論に存在するM2ブレーンという物体のなす相互作用が Chern-Simons 理論によって表される、という主張をある定めた設定の下で確認したことである。それと同時に、Chern-Simons 理論におけるバリオンやモノポールといった物体がM理論においてどのように表されるか提唱し、その主張を示すために様々な証拠を積み重ねたことである。具体的には、バリオンやモノポールといった物体は、M理論においてM5ブレーンやM2ブレーンといった物体で記述できることが分かった。

M理論は11次元の理論で、超弦理論の強結合極限で実現される。超弦理論には矛盾のない理論が5つ存在し、現実を表すものがどれかよく分からないという問題があったが、M理論はその5つを統一する可能性を秘めた理論である。

M理論ではメンブレン（もしくはM2ブレーン）と呼ばれる、2次元空間に広がった物体が基本的な物体であると考えられている。しかし、そのメンブレンが運動した世界体積上の場の理論では、超弦理論において弦の世界面のなす場の理論で可能であった、第一量子化や指導原理（量子論的対称性の要請）が確立していない。そのため、近年までメンブレンの量子論的な側面の研究に大きな進展はなかった。

しかし、近年メンブレンを複数考えた場合にそれらの間で生じる有効相互作用が Chern-Simons ゲージ理論で表される、という主張が具体的な

モデルと共に提唱された。このことにより、複数枚のメンブレンを表す有効場の理論に大きな進展があり、その量子論的な性質が有効場の理論を通じて明らかにされつつある。

この提案を確かめる方法として、AdS/CFT 双対性があり、現在活発に研究されている研究分野である。この考え方は、メンブレンの2通りの見方の等価性を主張する。すなわち、メンブレンはその世界体積上で3次元ゲージ理論を表すが、11次元空間では質量をもった広がった物体であり時空間を曲げる。この時空間の湾曲は11次元超重力理論によって記述される。メンブレンを経由した AdS/CFT 双対性は、このメンブレンをその上でゲージ理論を実現する物体であるという見方と11次元空間中で時空間を曲げる物体である、という見方が等価であることを主張する。したがって、メンブレンが超対称 Chern-Simons 理論によって記述されているのであれば、その理論はメンブレンの重力的な性質を再現するはずだからである。

我々は、このことを超対称性が8個ある超対称 Chern-Simons 理論を用いて様々な角度から正しいことを確認した (表1[1-3])。この理論の重力双対と考えられる理論は、 $AdS_4 \times X^7$ 上のM理論である。ここで、 X^7 は7次元球を離散群で割った空間で与えられる。

論文 [1] において、我々は内部空間 X^7 に巻きつく M ブレインとその Chern-Simons 理論側の対応物を調べた。得られた結果は、表2における (i) から (iii) の対応である。これを以下順に説明する。

(i) は twisted セクターに属するモノポール作用素と内部空間の2サイクルに巻きつく M2 ブレインとの対応である。この対応は、我々が初めて提唱した対応であり、過去の AdS_5/CFT_4 対応や、BLG モデル ($\mathcal{N} = 8$) や ABJM モデル ($\mathcal{N} = 6$) には現れない、 $\mathcal{N} \leq 4$ のモデルに特徴的な対応であることを我々は指摘した。

(ii) は、 $\mathcal{N} = 4$ Chern-Simons 理論における互いに Seiberg 双対であると考えられるクラスが、M理論側では内部空間の3次ホモロジーで分類されることを示した。我々は、 $\mathcal{N} = 4$ Chern-Simons 理論を type IIB 理論の D3-, NS5, (1,k)5 ブレインによって理論を設定し直すことで、互いに Seiberg 双対な理論のクラスを、5ブレインを連続的に動かすことで互いに移り合うものと捉え直した。このとき異なる種類の5ブレインが交差するときに D3 ブレインが生成される Hanany-Witten 効果を考慮に入れて D3 ブレイン電荷を分類した。ここで異なる5ブレインの間にある D3 ブレイン (分数 D3 ブレイン) は、M理論側では3サイクルに巻きつく M5 ブレインであることを指摘した。

(iii) では、バリオン作用素と 2 サイクルに巻きつく M 5 ブレーンとの対応である。我々はこの対応の根拠として、縮退度が一致することや、バリオンの共形次元と M 5 ブレーンの質量が一致することなどを示した。また、3次元のゲージ理論では U(1) 対称性がゲージ対称性として残ることを指摘し、このバリオン作用素がゲージ不変な作用素でないことを指摘した。さらに、ゲージ不変でない作用素が重力側に対応物をもつという事実について AdS₄/CFT₃ 対応において禁止されないことを議論した。

論文 [2] において、表 2 における (i) の対応に対する証拠をさらに積み上げるべく、我々は Chern-Simons 理論で超共形指数と、M 理論側で AdS₄ 多粒子指数を計算し一致するかどうか調べた。これらの指数は、理論の BPS スペクトルを特徴づけており、二つの理論が等価であれば一致すると期待されるものである。我々は、巻きついた M2 ブレーンの指数の寄与を試行錯誤で見つけてきて両方の指数を一致させることができることを示した。

論文 [3] において、我々は巻きついた M2 ブレーンの指数の寄与を実際に求めた。すなわち、特異点集合上を運動する 7 次元ベクトル多重項を表す作用を構成し、その Kaluza-Klein 解析を行うことによりそのスペクトルを求めた。このスペクトルから求めた指数は、論文 [2] において試行錯誤で見つけてきた M2 ブレーンの指数の寄与と完全に一致することを示した。

[1]	“N=4 Chern-Simons theories and wrapped M-branes in their gravity duals.” Collaboration with Yosuke Imamura Prog.Theor.Phys.121:915-940, (2009) e-Print Archive: 0812.1331 [hep-th]
[2]	“A Monopole Index for N=4 Chern-Simons Theories.” Collaboration with Yosuke Imamura Nucl.Phys.B827:183-216, (2010) e-Print Archive: 0908.0988 [hep-th]
[3]	“Twisted Sectors in Gravity Duals of N=4 Chern-Simons Theories.” Collaboration with Yosuke Imamura JHEP, Volume 2010, Issue 11, 1-19, e-Print Archive:1008.3180 [hep-th]

表 1: 発表論文。

	$\mathcal{N} = 4$ Chern-Simons 理論	\leftrightarrow	$AdS_4 \times X^7$ 上の M 理論
(i)	(Twisted) モノポール作用素	\leftrightarrow	2 サイクルに巻きついた M2 ブレーン
(ii)	ゲージ群のランク	\leftrightarrow	3 サイクルに巻きついた M5 ブレーン
(iii)	バリオン作用素	\leftrightarrow	5 サイクルに巻きついた M5 ブレーン
(iv)	超共形指数	=	AdS_4 多粒子指数

表 2: 研究結果。