

# 高次元場の理論の広がり



林 博貴

東海大学理学部  
h.hayashi@tokai.ac.jp



八木 太

西南交通大学数学学院 (中国)  
futoshi\_yagi@swjtu.edu.cn

我々は通常、空間3次元と時間1次元からなる4次元時空に住んでいると考えている。しかし、素粒子をより根源的な理論から統一的に扱おうとする試みの中で、我々の住む世界が実は極小サイズの余剰次元を含む5次元以上の時空である可能性が指摘されている。実際、素粒子理論を記述する枠組みである場の理論は、高次元時空についても古くから盛んに研究されている。

ところが、高次元の場の理論は、典型的には高エネルギーにおいて相互作用が強くなるために量子補正の理解が困難であり、未だにわからないことも多い。例えば、あるラグランジアンによって指定された高次元場の理論が、すべてのエネルギースケールで予言能力を持つような問題のない理論かどうか自体がすでに非自明である。

**超対称性**を持つ場の理論においては、摂動計算による量子補正の形が厳しく制限されるため、この問題に関してある程度信頼できる議論が可能になる。1996年頃のSeibergらによる研究では、有効結合定数の計算に基づき、各々の5次元超対称ゲージ理論について、前述の意味での問題のない理論であるかどうかの分類が行われた。

高次元場の理論の研究においては、**超弦理論**を用いたアプローチもまた、長年にわたり重要な役割を果たしてきた。例えば、**Dブレーン**を用いて、超対称ゲージ理論を構成する手法がある。特に、**5ブレーンウェブ**と呼ばれるものを用いることにより、多くの5次元超対称ゲージ理論が構成され、その分類や性質が議論されてきた。

場の理論的手法と超弦理論的手法は超対称ゲージ理論の研究において相補的な役割

を果たすため、ともに必要不可欠な存在である。ところが、両者には5次元超対称ゲージ理論の分類に関して一部食い違いがあり、それは長い間謎のままであった。

近年、場の理論的手法と超弦理論的手法の双方のさらなる発展に伴い、この謎を解決する形で分類の理解が進んでいる。まず、場の理論的手法においては、クーロンの**真空**を正しく同定する方法が提唱され、その結果、問題のない理論が新たに存在する可能性があることが指摘された。また、超弦理論的手法では、5ブレーンウェブに関する理解の発展などに伴い、様々な5次元超対称ゲージ理論が、実際に超弦理論を用いて新たに実現できるようになってきた。その結果、当時の食い違いが解消されるとともに、初期の分類では問題があるとされていた多くの5次元超対称ゲージ理論が実は問題のない理論であることが明らかになってきた。また、それと深く関連する形で、6次元場の理論の分類の研究も進んでいる。

5次元超対称ゲージ理論の研究においては、その分類だけでなく、様々な量子的性質が研究されている。例えば、5ブレーンウェブを用いた構成を応用することにより、超対称性の一部を保つ状態の数上げや、空間の一方が周期的になっている場合の有効結合定数の計算、ゲージ結合定数が発散するときのヒッグスの真空の解析などが行われている。その結果、摂動論では捉えきれなかった効果が定量的な形で明らかにされつつある。

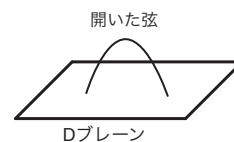
高次元場の理論は、古くからの研究テーマでありながら今なお新しい進展が続いており、今後のさらなる発展が期待される。

## 用語解説

**超対称性：**  
ボソンとフェルミオンを入れ換えるような対称性。

**超弦理論：**  
粒子の起源が振動する弦であると考えられる理論。超対称性を持つ理論であり、一般相対性理論と量子力学を統一的に記述できると期待されている。また、この世界が10次元時空であることを予言する。

**Dブレーン：**  
超弦理論に存在する膜。開いた弦の端点は必ずDブレーン上に存在する。Dブレーンに端点を持つ弦が、ゲージ理論に現れる粒子を記述する。



**5ブレーンウェブ：**  
Dブレーンの拡張。空間5次元と時間1次元に広がった6次元の膜が、蜘蛛の巣状に組み合わさってできたもの。5次元超対称ゲージ理論の構成に使われる。

**真空：**  
場の理論における真空とは、エネルギーが最低になる状態のことである。超対称ゲージ理論においては、しばしばそのような状態が連続的に無限に存在する。それらの状態は、どのような種類の場が0でない真空期待値を持つかによって分類される。例として、クーロンの真空やヒッグスの真空などがある。