

平成21年3月31日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18740126

研究課題名（和文） ゲージ理論と弦理論の双対性に関する研究

研究課題名（英文） On the gauge/string correspondence and its application

研究代表者

酒井忠勝（SAKAI TADAKATSU）

茨城大学・理学部・准教授

研究者番号：50375359

研究成果の概要：

2004年の共同研究において提案されたモデルに基づき、ハドロン物理に関して理論的な研究を行った。メゾンとバリオンに関して様々な計算を行った結果、実験とも非常によく一致することが確かめられた。これにより、我々のモデルが定量的にハドロン物理の現象を正しく記述するモデルとみなすことができる。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
18年度	600,000	0	600,000
19年度	500,000	0	500,000
20年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,600,000	150,000	1,750,000

研究分野：素粒子論

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：ゲージ理論、弦理論

## 1. 研究開始当初の背景

理論物理学における最も重要な課題の一つは、非可換ゲージ理論における強結合の物理現象をいかに理解するかである。特に、量子色力学（QCD）はハドロンに関する非常に多様な現象を支配するゲージ理論と考えられており、それを理論的に証明することは理論物理学者にとっての長年の夢の一つである。しかしながら、強結合領域の物理を解析するのに摂動論はもはや有効な手段ではありえない。90年代の後半までの時点で研究者が

持ち合わせていた非摂動論的手法は、格子ゲージ理論による数値的な解析法である。これ自身非常に強力な枠組みであり、実際ハドロンに関して様々な特筆すべき結果が得られている。しかしながら、数値計算に頼らず解析的な手法によりハドロン物理を解析することも、非常に有用な課題である。このような流れの中、90年の後半に提案されたゲージ理論と弦理論の双対性のアイデアが、ゲージ理論の強結合現象を理解するのに非常に強力な枠組みとして役立つことが示唆さ

れた。実際、この双対性を用いると、ゲージ理論の強結合現象の解析が、ある種の古典重力理論を解く問題に帰着してしまう。後者は非常に解析が可能であるため、ゲージ理論の新たな解析手法としてゲージ理論/弦理論対応が脚光を浴びることとなった。しかしながら、90年代後半から2000年の初めにかけては、この双対性をハドロン物理に直接適用することはできなかった。その理由は、(1)ゲージ理論のなかでもある特殊なクラスの理論(共形場理論)に対してのみ双対性が考えられていたこと、(2)ハドロンの物理を記述する上で決定的に重要であるクォークの自由度を、双対性に取り入れることが困難であったためである。(1)に関しては比較的早い段階で一つの有効な解がWittenにより提案された。そのおかげで、QCDに登場する場のうち、ゲージ場(グルーオンのこと)はうまく記述することが可能となった。したがって、当時残された課題は(2)であり、その中で特に困難であった点は、クォークに対して作用するカイラル対称性をいかに双対性において実現するかにあった。この点を説明するため、まずカイラル対称性がなぜそんなにも重要なのか簡単に触れたい。クォークのうち、特にアップ(u)とダウン(d)の2つのクォークは非常に軽い粒子であるため、QCDの作用にはカイラル対称性とと呼ばれる近似的な対称性が存在する。QCDの低エネルギー領域ではカイラル対称性の自発的破れが起こり、その結果現れる南部・ゴールドストーン粒子を $\pi$ 中間子とみなすのが50年代に提唱された南部のアイデアであった。実際これにより、 $\pi$ 中間子がなぜこんなにも軽いのか(約100MeV程度で核子10分の1程度)、さらには $\pi$ 中間子の低エネルギー領域での散乱振幅の値などが、見事に説明された。このようにハドロンの低エネルギー領域の物理を特徴付けるのがQCDにおけるカイラル対称性と其の自発的な破れであると考えられている。しかしながら、QCDを第1原理としてカイラル対称性の自発的破れを証明するのは非常に困難である。その理由は、QCDには漸近的自由性と呼ばれる、低エネルギーになればなるほど理論の結合定数が強くなる傾向があるため、低エネルギーにおいて起こると考えられているカイラル対称性の自発的破れは本質的に強結合現象であるためである。QCDのカイラル対称性をゲージ理論/弦理論対応において正しく実現し、その自発的な破れを重力理論を用いることによりうまく説明できないかがまさに(2)の目標であった。しかしながら困難であった点は、そもそ

も弦理論側でカイラル対称性を実現するのは容易ではないことである。弦理論としての理論的整合性を保ちつつ、カイラル対称性を実現するようなモデルを構築することが、(2)の理解に向けて残された課題であった。これを解決したのが、私自身の2004年の共同研究の成果であった。実際このモデルは、弦理論から構築されたモデルの中で、QCDにおけるカイラル対称性を明白に実現する世界で最初のモデルとなった。それにより、弦理論の手法を用いることでハドロン物理を解析できる可能性が開けた。

## 2. 研究の目的

我々の2004年の共同研究において、すでにハドロン物理に関するいくつかの解析が行われている。例えば、カイラル対称性の自発的破れが、弦理論を用いることで非常に簡明に説明できることが示され、また、破れの結果登場する南部・ゴールドストーン粒子である $\pi$ 中間子の低エネルギーでの振る舞いが実験と一致することも確かめた。さらには、 $\pi$ 中間子だけでなく無限個の重い中間子を系統的に記述する枠組みを自然に与えることもわかった。私の研究の目的は、このモデルがハドロン物理の多様な現象を一体どの程度正しく記述しうるのかを徹底的に調べることであった。そのために、[1]において取り組んだことは、一番最初にモデルを提唱した論文においては扱うことの出来なかった、中間子に関する様々な散乱現象のより詳細な解析である。そこでの最も興味深い結果の一つは、我々のモデルにおいて系統的に取り扱うことが可能となった無限個の重い中間子の寄与を計算結果に反映させることが可能となったことである。さらに、[2]においてはバリオンの解析を行った。[1]に先立つ我々の最初の論文において、バリオンをある種のソリトンとして記述すつことを提案した。ソリトンとは有限なエネルギーをもつ古典解のことで、素粒子論において様々な場面で重要な役割を果たす。このアイデア自体は我々のオリジナルなものではなく、すでに60年代には知られていた。しかしながら、ソリトン解を実際に構成したそれまでの結果は、 $\pi$ 中間子などの軽い中間子の寄与しか考慮されておらず、重い中間子の寄与をいかに系統的に取り入れていくかは重要な課題であった。[2]はまさにこの問題に対して一つの満足すべき回答を与えた。

### 3. 研究の方法

2004年に我々が提唱したモデルに基づき、ハドロンに関する様々な定量的な解析を行った。そのためにまず重要であったことは、我々のモデルにおいて、メゾンとバリオンの状態をいかに記述するのか、その対応を定式化することであった。それに基づき、メゾンとバリオンに関する様々な物理量の計算が行われた。ここで強調すべき点は、そのような計算が数値計算に頼らず簡単な解析的な手法で行われたことであり、我々のモデルの利点であると言える。さらに我々のモデルの特徴は、弦理論に基づいて構築されていることである。そのおかげで、これまで弦理論において培われてきた解析手法をハドロン物理の解析に応用でき、実際様々な興味深い結果を得ることができた。

### 4. 研究成果

論文①においては、メゾンに関係する物理を取り上げた。我々のモデルの利点は、軽い中間子のみならず、重い中間子も含めた数多くの中間子を統一的に取り扱える枠組みになっていることである。それにより、様々な物理量の計算結果に重い中間子の効果を系統的に含めることが可能となった。この結果、これまでなされてきた理論的解析に比べ、実験値と非常によく一致する結果が得られることがわかった。

我々のモデルをハドロン物理に適用するためには、バリオンをいかに我々のモデルにおいて実現するか理解する必要がある。論文②ではこの問題を解決した。具体的には、バリオンをある種のソリトン解として記述することを示した。このアイデア自体は、昔から様々な形で主張されてきていたが、我々のモデルを用いると、重い中間子の効果を取り入れたバリオン解を構成することが可能である。この結果に基づきバリオンに関する定量的な解析を行ったところ、これまで取り扱いが困難であった励起したバリオン状態を非常に系統的に記述することが可能になっただけでなく、計算結果も実験と非常によく一致することが確かめられた。

以上の結果は、我々のモデルがハドロン物理を記述するモデルとして非常に有効であることを示唆している。

我々のモデルは、ハドロン物理をある種の5次元のゲージ理論で記述することを提案す

る。4次元のハドロン物理を5次元のゲージ理論によって記述するのは一見矛盾に聞こえるが、実はこの理由のために我々は無限個の重い中間子の寄与を系統的に取り入れることが可能となる。また、我々のモデルにおいては、ハドロン物理が5次元の古典的なゲージ理論を解くことで理解できるため、ハドロンの物理量を解析的な手法に計算することが可能となる。この結果に基づき①と②において詳細な解析を行った結果、我々のモデルは色々な点でこれまでのハドロン物理のモデルと比べて優れた点があることがわかった。つまり、上に述べた無限個の重い中間子を記述するのに5次元ゲージ理論を用いるという発想の転換ともいえる枠組みを与え、さらにそのおかげで実験結果との一致がよりよくなること、などである。さらにはこれまでハドロン物理において別々に提唱されてきた様々なアイデアが、我々のモデルにおいて統一的に理解できることも分かってきた。このように、90年代に提唱されたゲージ理論/弦理論対応をハドロン物理に適用することで、当初の予想をはるかに超えて多くの特筆すべき成果を上げることが出来た。その結果、単に弦理論のみならず、ハドロン物理を専門とする研究者との間との実りある交流が広がったことは、我々の仕事の意義を強く示唆するものである。弦理論は実験結果との比較がまったくできず役に立たないとの批判を受けてきたが、今やゲージ理論/弦理論対応を通じて、ハドロン物理を理解するための非常に有用な枠組みとなりうるということがわかったことは、非常に重要な発見であった。

### 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 2件)

① "Baryons from instantons in holographic QCD", Hiroyuki Hata, Tadakatsu Sakai, Shigeki Sugimoto, Shinichiro Yamato, Progress of Theoretical Physics Vol. 117 No. 6 (2007) pp. 1157-1180 査読有。:

② "More on a holographic dual of QCD". Tadakatsu Sakai, Shigeki Sugimoto, Prog.Theor.Phys.114:1083-1118,2005. 査読有。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井忠勝 (SAKAI TADAKATSU)

茨城大学・理学部・准教授

研究者番号： 50375359

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者