

京都大学	博 士（理 学）	氏名	土居 孝寛
論文題目	Lattice QCD study for the relation between confinement and chiral symmetry breaking		
(論文内容の要旨)			
<p>核子や中間子などのハドロンを記述する強い相互作用の基礎理論は、量子色力学（QCD）という非可換ゲージ理論であり、これは高エネルギー領域での漸近的自由性を示す反面、低エネルギー領域ではクォークとグルーオンの非常に強結合な系となり、真空の構造自身を非自明に変質させ、多様な非摂動的現象が起こる。これら非摂動的性質のQCDからの解明は理論物理学に残された主要な研究課題である。</p> <p>特に、“クォークの閉じ込め”と“カイラル対称性の自発的破れ”は、QCDが示す極めて顕著で重要な非摂動的現象であるが、この両者は、有限温度の格子QCD計算での2つの相転移温度の一致などから、密接な相関が予想されてきた。</p> <p>申請論文では、基礎理論であるQCDから、この2つの重要な非摂動的現象である“クォークの閉じ込め”と“カイラル対称性の自発的破れ”の対応関係を、関連する幾つかの物理量に着目して、まず数学的に導出し、次いでスーパーコンピュータを援用した格子QCD計算により詳細に研究した。なお、申請論文は申請者らが行った3編の関連する原著査読論文の研究に基づいている。</p> <p>申請論文の最初の研究では、クォークの閉じ込めと直接的に関わる“ポリヤコフ・ループ”（クォーク単体のエネルギーと関連）と、カイラル対称性の自発的破れに深くかわる“ディラック・モード”との対応関係に対し、QCDに基づいて、まず数学的・解析的に行い、世界で初めて両者の関係式を導出した。従来の研究では、この2つの非摂動現象には密接な対応関係が予想されてきたが、申請論文は、クォーク閉じ込め現象とカイラル対称性の破れを与える“低固有値のディラック・モード”との独立性を数学的に示し、次いで、格子QCDの大規模数値シミュレーション計算を用いても両者の独立性を定量的に示した。</p> <p>申請論文の2つ目の研究では、超高エネルギー重イオン衝突実験でのクォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）生成などとも関連し、有限温度でのQCD相転移に関する良い指標として近年注目されている“ポリヤコフ・ループの揺らぎ”と“ディラック・モード”との対応についても、解析的な関係式を導出し、格子QCD計算により、定量的に両者の独立性を示した。</p> <p>申請論文の3つ目の研究では、クォーク間の閉じ込め力といった物理的に分かり易い量に着目し、QCDにおける“ウィルソン・ループ”と“ディラック・モード”との対応についての解析的な関係式を導出し、クォークを閉じ込める力が、カイラル対称性の自発的破れを与える低固有値のディラック・モードの寄与は除いても全く変化しないことを定量的に示した。</p> <p>以上の諸研究で導出した関係式は数学的には正しいが、フェルミオンを格子上に定式化する際にダブラーという非物理的モードが現れるので、申請論文の最後の研究として、ダブラーを含まない“オーバーラップ・フェルミオン”を用いた研究も行い、クォークの閉じ込めとカイラル対称性の破れとの独立性という同様の結論を得た。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

素粒子の標準理論を構成する量子色力学 (QCD) に基づく強い相互作用の解明は、その低エネルギー領域での強結合的性質に起因して、現代物理学においてさえ、解析が極めて困難な研究課題である。申請論文が扱う“クォークの閉じ込め”と“カイラル対称性の自発的破れ”は、この強結合領域のQCDが示す代表的な非摂動的性質であり、両者の対応関係を研究することは、その重要性にもかかわらず、世界的にも稀であり、野心的な研究と言える。

特に“クォークの閉じ込め”という他に類例を見ない現象は、理論物理学の未解決な最重要課題の1つであり、その数学的解明は、クレイ数学研究所から「ミレニアム問題」として100万ドルの懸賞金が掛けられてもいる超難問である。“カイラル対称性の自発的破れ”もまた、南部陽一郎博士らによる発見以来、現代物理学の重要な研究対象であるが、実は、QCDから直接示すのは困難であり、解析的には満足な形で導出できていない。

申請論文では、単独でも解析が困難な2つの非摂動的性質の間の対応関係という極めて難しい研究課題に対して、第一原理であるQCDから取り組み、手法としては“場の量子論に基づく数学的な解析方法”と“大規模数値シミュレーション計算による定量的解析”の両面から研究を行った。

申請論文では、クォークの閉じ込めと直接的に関わる“ポリヤコフ・ループ”とその揺らぎに対して、カイラル対称性の自発的破れに深くかかわる“ディラック・モード”との対応関係を、数学的に考察し、世界で初めて両者の関係式を導出した。ここでのブレイクスルーは、QCDを時空の正方格子で正則化する際に、虚時間方向の格子数を奇数に取ることであり、これによってフォーマリズムが非常に単純化されるという発見であり、これは世界で初めての独創的な視点である。更に大規模数値シミュレーション計算を用いても定量的に計算し、その結果は、QCDにおけるクォークの閉じ込めとカイラル対称性の破れの独立性を示すものであった。

申請論文ではまた、“ウィルソン・ループ”に対しても“ディラック・モード”の観点からの解析を行い、クォークの閉じ込め力が、カイラル対称性の自発的破れに本質的なモードとは独立であることを定量的に示し、また、格子理論に現れる非物理的なダブラーを含まない理論形式での研究も行っている。

これらの研究は、クォークの閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れには密接な相関があるのではないかという、従来の単純な理論的予想を覆す新たな知見であり、当該分野におけるインパクトは極めて大きい。

このように申請論文は、基礎理論であるQCDのクォーク・グルーオンの自由度から、QCDの重要な非摂動的性質の間の関係を明らかにする斬新な研究であり、複数の独創的な新しい研究業績を含み、その寄与は大きい。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成29年1月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日：                      年                      月                      日以降