

Title	't Hooft anomaly, global inconsistency, and some of their applications(Abstract_要旨)
Author(s)	Kikuchi, Yuta
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2018-03-26
URL	https://doi.org/10.14989/doctor.k20902
Right	許諾条件により本文は2019-03-25に公開
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	菊池 勇太
論文題目	't Hooft anomaly, global inconsistency, and some of their applications		
(論文内容の要旨)			
大域的対称性をゲージ対称性へ昇格させることを「ゲージ化」といい、ゲージ化の障害となる量子効果を「 't Hooft(トホーフト-)アノマリー」という。また、離散対称性と高次微分形式対称性を含む大域的対称性をゲージ化するとき系の基本的性質が理論に含まれるパラメータの変化に伴い不連続的に変化し得ることを「大域的非整合」があるという。さらに、これらの性質が紫外(UV)領域の理論とくりこみ群でつながる低エネルギーの赤外(IR)領域の理論で一致することは「UV/IR(アノマリー)一致条件」と呼ばれる。			
本論文の第2章ではトホーフト-アノマリーと大域的非整合の一般的な導入がされ、場の量子論の一般的な状況下における大域的非整合に対する「UV/IR一致条件」が提示・提案されている。さらにトポロジカル項を持ついくつかの量子力学系で大域的非整合のUV/IR一致条件を解析し、申請者らの提案した一致条件の妥当性を確認している。またその解析はトホーフト-アノマリーと大域的非整合両概念の初等的だが全般的な紹介となることも意図されている。そのまとめは第3章で与えられている。			
第4章は一般化された大域的対称性のレビュー的解説に充てられ、最近導入された高次微分形式で表される大域的対称性など説明されている。第5章はトポロジカル項を持つ「純粋ヤン・ミルズ理論」の真空構造についてのレビュー解説である。ここで「純粋」の意味はクォークなどの物質場を含まないという意味である。一方、量子アノマリーに基づく解析を強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)に適用するにはダイナミカルクォークが中心対称性を破ることによる困難が存在する。本論文では第6章において、QCDのフレーバー対称性がゲージ化された理論としてダイナミカル”クォーク”が存在するにもかかわらず中心対称性を保持した系になっているクォーク場が双基本表現になるゲージ理論を採用し、トホーフト-アノマリーと大域的非整合を用いた解析によりこの理論の非摂動的な真空構造を明らかにしている。			
第7章では以上の解析をもとにQCDの真空構造、および有限温度および有限化学ポテンシャルにおけるねじれ境界条件を有する零質量QCDの相構造が明らかにされている。真空ではトホーフト-アノマリーが出現するが、有限温度でのその存在は虚時間方向のコンパクト化のために全く自明ではない。しかし申請者は、虚時間方向にフレーバーねじれ境界条件を有するQCD、いわゆる零質量Z(N)-QCDでは、トホーフト-アノマリーの存在により、任意の温度Tおよび化学ポテンシャルにおいて対称性が回復した相が厳密に除外されることを示し、実際のQCDの低温領域にも同様の制限がかかることを明らかにしている。この厳密な結果は、QCDの非摂動的側面を明らかにする際の重要な情報を与えるとともに、多くの有効模型を用いた有限温度および化学ポテンシャルの相構造の解析に強力な制限を課することが強調されている。			

(論文審査の結果の要旨)

量子理論における大域的対称性をゲージ対称性への昇格させる際の障害として現れるトホフト-アノマリーは、低エネルギー領域の赤外(IR)領域の物理的内容を解明するための強力な手がかりを与えることが知られている。高エネルギー紫外(UV)領域と赤外領域でのアノマリー項一致の条件(「UV/IRアノマリー一致条件」)により、大域的対称性が紫外理論においてトホフト-アノマリーを持つならば、くり込み群を介して到達する赤外理論は同じトホフト-アノマリー項を再現しなければならない。たとえば、赤外理論において対称性が完全に回復した位相幾何学的秩序のない状態ではエネルギーギャップは存在し得ないと言える。このようにトホフト-アノマリー項はUV/IRアノマリー一致条件と組み合わせることで、低エネルギー有効理論に強い制約を課す。近年、これまでの連続対称性に加え、離散対称性や高次微分形式対称性などのより広範な対称性に付随したトホフト-アノマリーをも含める理論へと展開されつつあり、UV/IRアノマリー一致条件と合わせることで場の理論の新たな非摂動的手法として大きく発展していくことが期待される。

菊池勇太氏の本学位論文では、「強い相互作用」の基礎理論である量子色力学(QCD)の赤外構造の非摂動的な一般的な性質を明らかにすることを目標に、UV/IR(アノマリー)一致条件を用いてトホフト-アノマリーと大域的非整合の帰結が詳細且つ体系的に議論されている。まず、大域的対称性をゲージ化する際に現れる新たな障害として2017年にその存在が認識された「大域的非整合」に対して、その「UV/IR一致条件」の一般的な状況下での定式化が初めて行われた。本論文はさらに、トホフト-アノマリーと大域的非整合の明快な一般的定式化も与えるとともに提案されたUV/IR一致条件の定式化の妥当性を興味深い量子力学モデルの詳細な解析を実行することにより確認している。このことは、本論文はこの新しい分野の確固とした基礎を与える重要な貢献となっていることを意味する。また、そこでの詳細な計算はこの新しい課題の広範で明快な解析となっており、本課題の今後の発展に大いに資すると期待できる。

QCDへの応用への直接の関連研究として本申請論文では、「ダイナミカル”クォーク”が存在し、且つ中心対称性を保持した系になっている双基本ゲージ理論のトホフト-アノマリーを用いた真空構造の解析が行われている。これはフレーバー対称性をゲージ化した理論の真空構造をトホフト-アノマリーと大域的非整合を用いた初めての厳密な解析であり、この分野のブレークスルー的な貢献となっている。そもそもクォークを含むヤン・ミルズ理論であるQCDのトホフト-アノマリーの理論を適用することはダイナミカルクォークが存在することによる中心対称性の喪失により禁止的に困難であると考えられていた。ところが、この菊池氏らの研究がきっかけとなってその後QCDそのもののトホフト-アノマリー発見に導くいくつかの研究が生まれることになったのである。

本論文ではさらに、QCD類似の理論の有限温度および有限化学ポテンシャルにおける厳密な相構造も解明している。すなわち、上記の基本ゲージ理論のトホフト-アノマリー解析を基礎にして、ねじれ境界条件を有するいわゆる零質量 $Z(N)$ -QCDでは任意の温度および化学ポテンシャルにおいて対称性が回復した相が厳密に除外されることが初めて明らかにされた。QCDあるいは $Z(N)$ -QCDの有限密度領域では、符号問題により格子QCDによる数値シミュレーションが未だ不可能であること、また、そのために有効モデルによる解析がもっぱら行われているという現状を鑑みるに、ここで導かれた厳密な結果のインパクトは大きく、QCDの相構造の解明研究における重要な貢献であると言える。

このように本論文は、場の理論の強力な非摂動的手段として今後大きい発展が期

待される新しい手法についての基礎的且つ独創的な研究となっているだけでなく、「強い相互作用」の基礎理論であるQCDの真空および有限温度/有限化学ポテンシャルでの相構造解明に向けての厳密で重要な成果を含んでいる。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30年1月12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