

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	春名 純一
論文題目	Gradient Flow Exact Renormalization Group for Scalar Field Theories (スカラー場の理論におけるグラディエントフロー厳密くりこみ群)		
(論文内容の要旨)			
<p>くりこみ群は現代物理学の基本的な解析手法である。高エネルギー側の理論と低エネルギー有効理論をつなぐ流れに注目することで系のダイナミカルな構造を調べることが可能となり、これまで、様々な量子場や多体系の相構造や臨界現象が摂動的側面および非摂動的側面の両方で明らかにされてきた。</p> <p>最近、グラディエントフロー方程式による粗視化を用いてウィルソン流の有効作用を定義する「グラディエントフロー厳密くりこみ群」が提案された。グラディエントフロー方程式は量子場の(時空の実時間とは無関係な)仮想時間についての拡散方程式の形をしているが、拡散方程式は「仮想時間が進むにつれて、場を各時空点周りで次々と平均していく粗視化のくり返し」と解釈できるため、グラディエントフロー方程式はくりこみ群方程式として解釈できるのではないか、という期待が以前からあった。「グラディエントフロー厳密くりこみ群」はこの可能性を精密に実現したものである。さらにこの枠組みでは、グラディエントフロー方程式を用いることにより、紫外切断の導入にも関わらず、ゲージ対称性や拘束条件といった、場の標的空間の大域的構造を保ちながらくりこみ群の流れが定義できる。この著しい特長により、グラディエントフロー厳密くりこみ群は、ゲージ対称性や非線形性を持つ物理系のダイナミクスを非摂動的に研究するための有望なアプローチと期待されるようになった。本博士論文はこの新しい枠組みのレビューとそれを用いたオリジナルな研究成果の2つからなる。</p> <p>第2章は厳密くりこみ群の体系的解説である。まず、与えられたエネルギースケールでの物理を記述するウィルソン有効作用を定義し、そのくりこみ群の流れの方程式(厳密くりこみ群方程式)を導出した。この固定点とそこから流れ出る「くりこまれた軌道」が低エネルギーの物理を支配するため、ミクロな物理の記述法が違ってても低エネルギーでの振る舞いは同一のくりこまれた軌道で普遍的に記述できる。本章ではこの「普遍性」についても議論し、さらに、固定点付近の流れを線形化することで臨界指数を導入した。また、以上の概念を、ガウス固定点とウィルソン・フィッシャー固定点を例にとって説明した。</p> <p>第3章はグラディエントフロー厳密くりこみ群の詳細な解説である。上でも述べたように、グラディエントフロー厳密くりこみ群はもともと、ゲージ理論に対するウィルソン有効作用をゲージ不変に定義するために提案された。この枠組みでは、拡散方程式による粗視化を利用してウィルソン有効作用が定義されるため、それを用いて系の局所的な対称性や非線形性を尊重したくりこみ群の流れを定義することが可能である。第3章では、まずグラディエントフロー厳密くりこみ群におけるウィルソン有効作用を導入し、この有効作用がゲージ対称性を明白に保っていることの証明を与えた。さらに、このくりこみ群の流れを記述するグラディエントフロー厳密くりこみ群方程式を導出した。また、グラディエントフロー厳密くりこみ群の最近の進展として、フェルミオン場を含む系の解析、量子電磁力学の摂動解析、一粒子既約有効作用のくりこみ群方程式などを紹介した。</p> <p>第4章がオリジナルな研究成果で、一般のスカラー場理論に対して、グラディエントフロー厳密くりこみ群の固定点構造とそれに付随するくりこまれた軌道を詳細に解</p>			

析した。具体的には、場の任意多項式で表される拡散方程式に基づいてより広いクラスのウィルソン有効作用を定義し、そのくりこみ群の流れの固定点とその周りの構造を調べた。とくに、このウィルソン有効作用が従うくりこみ群の流れの方程式が、既存の厳密くりこみ群ですでに知られているウィルソン-ポルチンスキー方程式と、同じ固定点と同じくりこまれた軌道を持つことを示し、2つの厳密くりこみ群が低エネルギーの振る舞いに対して整合的に同じ予言を与えることを示した。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本博士論文は「グラディエントフロー厳密くりこみ群」について研究したものである。「グラディエントフロー厳密くりこみ群」とは、仮想時間によるグラディエントフロー方程式を場の粗視化とみなすくりこみ群であるが、系の対称性を保った粗視化を行いやすいなど、厳密くりこみ群における従来のアプローチよりも優れた点がある。本博士論文はこの新しい枠組みのレビューとそれを用いたオリジナルな研究成果の2つからなる。

本博士論文前半のレビュー部分では、こうした動機の解説も含めて、オリジナルな研究につなげるためのアイデアや手法が必要十分な量で記述されている。後半のオリジナルな研究では、この手法を一般のスカラー場理論に適用し、非自明な固定点周りでの非線形 $O(N)$ シグマ模型と $O(N)$ ベクトル模型の詳細な比較を行っている。グラディエントフロー厳密くりこみ群を用いた両者の比較はこれまでなく、今回の博士論文の学術的価値は高いと言える。

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、令和5年1月20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