

# 論文審査の結果の要旨

氏名 三宅 章雅

本論文は、全5章からなり、第1章は量子情報についての導入(introduction)と研究動機の提示、第2章はエンタングルメントに関する導入と要約、第3章は本研究論文の核となるアイデアである双対性と超行列式の量子情報への導入と数理的な分類の定式化、第4章が第3章の定式化を用いた量子多体エンタングルメントの例解および解析、そして第5章が結論という構成である。

エンタングルメントは、量子系に内在する非局所的な性質を示す相関である。量子論に基づいた新しいタイプの情報である「量子情報」を用いることで、従来の古典力学に従う情報(古典情報)を用いた情報処理では不適當や不可能なタスクを実行しようとする「量子情報処理」が近年活発に研究されるようになったが、量子情報処理を可能とする本質的な量子系の性質がエンタングルメントであると考えられている。多体エンタングルメントの性質を明らかにすることは、自然の基本法則たる量子論の新たな理解という点からも、量子情報処理の更なる可能性を探るためにも、非常に重要である。これまでに得られているエンタングルメントに関する研究成果は、2体エンタングルメントが中心であり、多体系におけるエンタングルメントの性質の理解は、取り扱うヒルベルト空間の次元の大きさに由来する自由度の指数的増加効果により、単純に2体系での研究成果を一般化することが不可能であり、従来の方法論を超えたブレイクスルーが必要とされていた。

本論文では、エンタングルメントを特徴づける鍵となる不変量として超行列式を導入している。超行列式は、現代数学においても発展途上の重要な話題の一つでもあり、最近の数学的成果も本論文に取り入れられている。超行列式は、3つの量子ビット(量子2準位系)からなる系のエンタングルメント共有性を議論する際に発見法的に見つけられていた3-tangleの一般化とも考えることができるが、本論文では、共有性の議論に限らず、多体エンタングルメントの指標としてさまざまな型の超行列式が母関数のよう

な中心的役割を果たすことを示し、エンタングルメントの系統的分類の一般論を構成した点が独創的である。

第3章では、エンタングルメントを局所的変換と古典情報通信の下で平均として増やすことのできない相関ととらえ、この視点から、量子純粋状態からなる2つの多体エンタングル状態に関して、どちらの状態からどちらの状態へ推移可能かという観点からのクラス分類を行った。多体に対するクラス分類を行うために、積に分離可能な状態の集合と縮退したエンタングル状態の集合の間にある双対性に注目し、それぞれのクラスにおける超行列式に関連した特異集合を解析した。そして、状態の推移性に関する上下関係を見出すことで非常に一般的なクラス分類を得ることができた。更に、超行列式の大きさは一般的な多体間エンタングルメントにおける共有性を定量化する議論で重要な働きをすることを示した。

第4章では、第3章の定式化で得られた双対性と超行列式を用いた量子多体エンタングルメントの分類を、さまざまな多体系に関して例解して示した。ここで取り上げられた具体例には、2つの量子ビットと1つの量子多準位系からなる系や、4つの量子ビット系等これまでに解析されたことのない系が含まれており、多体エンタングルメントに関する新たな知見がもたらされた。更に、得られた分類を基にしてエンタングルメントスワッピング等の具体的な量子プロトコルにおける多体エンタングルメント構造の寄与を考察した。

以上のように、本論文は、双対性と超行列式という量子情報の分野では知られていなかった全く新しい方法論を用いることによって、これまで3体の場合など発見法的かつ部分的にしか知られていなかった多体エンタングルメントの構造と性質に関して、非常に見通しの良い一般論を与えており、この分野の発展に強く寄与する結果を得た。また、この結果は、国際的にも高い評価を得ている。

なお、本論文の第 3 章の主要部分および第4章の前半部分は和達三樹教授、4 章の後半部分は Frank Verstraete 博士との共同研究であるが、問題提起から問題解決の核となるアイデアにいたるまで論文提出者が主体となって研究を遂行したものであり、論文提出者の寄与が中心的であったと判断する。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。