

本論文は、“Quantum Monte Carlo Study of Superfluidity and Supersolidity in Bosonic Lattice Systems”（量子モンテカルロ法を用いた格子ボーズ系における超流動及び超固体の研究）と題し、6章からなる。第1章は、イントロダクションであり、研究の背景および本論文の主目的について述べている。第2章では、2-1節から2-4節において、本研究で用いた経路積分表示に基づく量子モンテカルロ法のレビューを行った上で、最後に2-5節において、長距離相互作用のある系を効率的に計算するために、directed-loop algorithm と呼ばれる従来のアルゴリズムに対して独自の改良を行っている。この改良により、改良前のアルゴリズムではオーダー N^2 (N はシステムサイズ)の計算コストがかかっていたところを、オーダー N に軽減することに成功している。第3章では、大越氏が過去に行った二成分ボーズ・ハバードモデルにおける対向超流動の研究のレビューを行っている。対向超流動は一種の対超流動相で、本研究で用いた計算手法では対形成を特徴づける対相関関数を求めることが困難であった。この困難に対し、本研究では、2種類の超流動に対応する対のワームを導入するというシンプルな改良によってこれを計算できる方法を提案し、実際にその計算を行った。さらに、この改良によって、対向超流動において起きる著しく遅い緩和の問題を克服していることも示している。第4章では、最近接相互作用項を含めた拡張ボーズ・ハバードモデルに対するオリジナルな研究成果をまとめている。このモデルは、超固体が現れるミニマル・モデルの一つであり、1/2-filling の checkerboard 固体に余剰粒子やホールをドーピングすることにより出現することが先行研究によってわかっていた。本研究では、立方格子及び正方格子上のモデルに対し、広いパラメータ領域で基底状態相図の解明を行った結果、ドーピングなしでも超固体が現れる領域が存在することを先行研究よりもより広いパラメータ領域で明らかにしている。また、正方格子上のモデルに対してはこれまででいられていなかった、ホール・ドーピングによって現れる超固体相の存在も示している。さらに、超固体相において、time-of-flight 法を用いた実験で観測できる運動量分布に、超流動と固体秩序に起因した2タイプのピークが現れるという特徴をもつことも明らかにしている。第5章では、双極子相互作用項を含めた拡張ボーズ・ハバードモデルに対するオリジナルな研究成果をまとめている。本研究では、正方格子上のモデルを扱い、相互作用にカットオフを設けずに、長距離相互作用を正確に取り扱った数値計算を行っている。本モデルの先行研究では、双極子モーメントが格子面内と垂直方向に偏極した場合に、最近接相互作用だけでは現れないハードコア・ボゾンの超固体相が現れることが知られていた。これに対して本研究では、まずドメイン壁形成に対する超固体相の安定性に関する摂動論的な議論を行い、長距離相互作用によって超固体が安定化するメカニズムを明らかにしている。さらに、双極子モーメントを面内に偏極させたケースでの基底状態相図を数値計算によって解明し、ストライプ固体相の存在、超固体相の不在、そして粒子数密度に多段プラトーが出現する領域の存在を明らかにした。最後に、双極子モーメントが面内と垂直に偏極し、さらにソフトコアの自由度を考慮したケースでの基底状態相図を新たに得た。その結果、入れ子構造の固体秩序やその超固体といった新しい量子相を見つけている。さらに、この入れ子構造の固体秩序が有限温度における逐次転移を通して現れることも明らかにしている。第6章では、本論文のまとめを行っている。

なお、本論文でのオリジナルの結果を含む第2、4、5章の研究は、川島直輝氏、鈴木隆史氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析および検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できるものと認める。