

## 論文審査の結果の要旨

氏名 松本 宗久

低次元量子スピン系において、スピン間相互作用により長距離秩序が生じることが多くあるが、結晶構造やスピンの大きさによっては長距離秩序が生じずに、スピン液体状態と呼ばれる状態が実現することがある。この場合、スピン波などの低エネルギー励起は存在せず、基底状態からの励起には有限のエネルギーギャップを持つことが知られている。このような状態はスピンギャップ状態と呼ばれている。スピンギャップ状態は、初め  $S = 1$  の 1 次元鎖について Haldane によって予想されたが、その後スピンギャップの存在は厳密に解けるモデルや数値計算によって確かめられた。また  $S = 1/2$  の系でも、格子形が梯子型であればスピンギャップを持つことがわかっている。これらの状態は、valence bond solid (VBS) または、ダイマー状態というもので理解される。つまり、すべてのスピンが隣接のスピンと対をつくり、その 2 つのスピンが一重項を形成した状態が基底状態となっていると考えられる。この場合、明らかに長距離秩序は存在せず、励起スペクトルにギャップがある。

本研究では、このようなスピンギャップ状態がいくつかの格子上で実現するかどうかについて、連続時間ループアルゴリズムによる量子モンテカルロ法という数値計算、および解析的な解釈によって詳しく調べたものである。その結果、いくつかの量子相転移を見出し、1 次元系と擬 1 次元系との関係を明らかにした。

本論文の第一章は序、第二章では正方格子状に結合した 1 次元スピン鎖について研究の結果が述べられている。モデルとしては、2 種類の交換相互作用の大きさを持つボンドが交互に現れる 1 次元鎖が、2 次的に結合しているものを考えた。まず数値計算によって、このモデルでの基底状態の相図を明らかにし、量子相転移での臨界指数を有限サイズスケールリングによって求めた。その結果、量子相転移の universality class が 3 次元古典ハイゼンベルグモデルのものと一致することを結論した。またスピンギャップを持つ相が 1 つにつながっているということを議論した。次の第三章では、スピン梯子系に対する結果および、その解析がなされている。相関長の発散する点、および「ひねり演算子秩序変数」を数値的に調べることにより、基底状態での臨界点が得られ、相図を決定した。さらに物理的描像を明らかにするために、対角線上のスピンを合成して作られるスピンを考え、その合成スピンのなす 1 次元有効モデルを導入した。この新しい観点によると、

導入された1次元鎖におけるVBS描像を考えることができ、数値的に得られた相図が自然に理解できることを示した。また、スピン梯子の横の本数を増やして行った場合に、どのように2次元系に移行して行くかについて考察を加えた。第四章では不純物効果について調べ、不純物によって誘起される長距離秩序の発現という現象を得た。第五章はまとめと将来の課題に当てられている。

以上のように、本論文は1次元および擬1次元のスピン系に関して系統的に調べることによって、いくつかの興味深い知見を与えている。とくに、新しい観点からのスピンギャップ描像を得たこと、および梯子型1次元系から2次元系への移行について興味深い可能性を指摘したことが高く評価される。本論文の内容の一部は、英文雑誌に掲載済である。また本研究は高山一教授、安田千寿氏、藤堂眞治氏、中村正明氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって数値計算を行い、理論を構築したものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断された。以上をもって審査員一同は、本論文が博士(理学)の学位を授与するにふさわしいものであると認定した。