



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Ground state properties of the Kondo lattice model with electron-phonon interaction [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	富永, 隼人
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第15223号
Issue Date	2022-12-26
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/88172">https://hdl.handle.net/2115/88172</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Hayato_Tominaga_abstract.pdf, 論文内容の要旨



# 学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(理学) 氏名 富永隼人

## 学位論文題名

Ground state properties of the Kondo lattice model with electron-phonon interaction  
(電子格子相互作用をもつ近藤格子模型における基底状態の性質)

電子同士が強く相互作用する電子系は、強相関電子系と呼ばれる。強相関電子系では様々な物理現象が現れる。強相関電子系の中でも  $f$  電子間に働く強い斥力により、伝導電子の有効質量が自由電子の質量の数倍以上も重くなる系は重い電子系と呼ばれる。重い電子系では超伝導や強磁性、反強磁性などの秩序が現れることが知られている。近藤格子模型は重い電子系を記述する模型の一つであり、局在スピンの伝導電子との間の交換相互作用をもつ。特に half-filled における近藤格子模型は近藤絶縁体を記述する模型とみなすことができる。近藤格子模型は幅広い応用範囲をもつため、活発に研究されている。

電子とフォノンの相互作用は、様々な物理現象を引き起こす。電子とフォノンが相互作用すると電子は対になる性質がある。その結果、超伝導秩序や電荷密度波秩序を示すようになる。そのため、電子フォノン結合系は実験、理論ともに活発に研究されてきた。J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer らが提唱した BCS 理論では電子フォノン相互作用により、2つの伝導電子が Cooper 対を作ることが理論の出発点となる。莫大な数のクーパー対が凝縮することにより超伝導秩序が現れる。この機構により、Meissner 効果などの超伝導体をもつ様々な性質が説明できる。

本論文では、電子フォノン相互作用をもつ half-filled における近藤格子模型の基底状態の磁気特性を厳密に調べる。より正確には、この模型の基底状態が唯一であることを証明し、基底状態の total spin の正確な値を決定する。これらのことを証明するために、Lieb によって導入されたスピン鏡映正值性の手法を拡張する。Lieb は Hubbard 模型と呼ばれる固体中の電子を記述するための単純化された模型において、鏡映正值性の概念を電子のスピン空間に適用し、Hubbard 模型の基底状態が唯一であることと、磁気的性質を明らかにした。Yanagisawa と Shimoi らはスピン鏡映正值性の手法を初めて近藤-Hubbard 模型へと応用した。一方で、Freericks と Lieb はこの手法を電子フォノン結合系へと拡張した。Miyao はスピン鏡映正值性をさらに一般化し、電子フォノン結合系を含むより多様な系へと応用した。本論文では、Miyao のアイデアを拡張することによりスピン鏡映正值性の手法を電子フォノン相互作用をもつ近藤格子模型へと適用する。

本論文ではまず初めに、作用素不等式を定義するために Hilbert space に Hilbert cone を導入する。Hilbert cone により Hilbert space に順序関係が誘導される。この順序関係から、Hilbert 空間上の有界線形作用素に対して順序構造が入る。スピン鏡映正值性はこの順序の意味で非負であることに対応する。Faris はこの順序構造を使い、Perron-Frobenius の定理を無限次元 Hilbert 空間へ拡張した。この定理を適用することで、電子フォノン相互作用を持つ近藤格子模型の基底状態が唯一であることを証明できる。さらに、基底状態の一意性から基底状態は反強磁性の秩序を持つことも分かる。この定理を適切に適用するためには、hole-particle 変換や Lang-Firsov 変換により模型の Hamiltonian を変換する必要がある。この変換された Hamiltonian が生成する熱半群が Perron-Frobenius-Faris の定理の条件をみたすことを証明する。この証明では、作用素不等式において近藤格子模型がもつ交換相互作用が Coulomb 相互作用と同様の効果を導くことを利用する。

基底状態の total spin を決定するために、交換相互作用項の係数を  $J$  として交換相互作用が強磁性的 ( $J < 0$ ) または反強磁性的 ( $J > 0$ ) のそれぞれの場合で調べる。証明の方針は、まず Hubbard 模型における Lieb の結果から、電子フォノン相互作用を持たない通常の近藤格子模型における基底状態の total spin を決定する。通常の近藤格子模型の total spin に関する結果とスピン作用素が Lang-Firsov 変換について不変であることを使うと、電子フォノン相互作用をもつ近藤格子模型における基底状態の total spin を決定することができる。