

1. 研究課題名：電荷揺らぎに由来する強相関量子相の研究
2. 研究期間：平成 18 年度～平成 22 年度
3. 研究代表者：後藤 輝孝（新潟大学・自然科学系・教授）

4. 研究代表者からの報告

(1) 研究課題の目的及び意義

金属中に埋め込まれた磁性イオンの局在スピンは伝導電子と結合し、磁気モーメントが完全に遮蔽された近藤 1 重項が現れる。近藤淳による電気抵抗極小の記念碑的な研究から 40 年が経過し、局在スピンと伝導電子との強結合による近藤効果は、重い電子、異方的超伝導など強相関電子系の物理として著しい発展を遂げて来た。他方、磁気モーメントをもたず電荷揺らぎをもつ局在電子やイオンと伝導電子とが強く結合することで生ずる近藤効果では電荷揺らぎが主役を演じ、スピンの主役を担う近藤効果では見られない強相関量子相の出現が期待される。本研究では、局在 4f 電子の非クラマース 2 重項、カゴ状化合物でのオフセンター振動、シリコン結晶中での原子空孔などの電荷揺らぎと伝導電子・価電子との結合に由来する強相関量子相の研究を推進する。これらの局在 4f 電子、オフセンター振動、原子空孔の電荷揺らぎは明確な対称性を備えており、超音波歪みと結合する特徴を持っている。本研究では、電荷揺らぎを直接観測することができる超音波計測を駆使することで、電荷揺らぎに由来する強相関量子相の研究を推進する。本研究は四極子近藤効果、電子—格子相互作用、原子空孔の電荷状態などの物性物理の基本問題の解明を目指す。特に、超音波による原子空孔の直接観測は、半導体物理の半世紀にわたる難問解決であり、半導体産業技術に繋がると期待されている。

(2) 研究の進展状況及び成果の概要

本研究では、電荷揺らぎに由来する強相関量子相の研究を目的とし、超音波計測法を駆使して研究を推進する。具体的には次の 3 つの研究課題を設定した。

・希土類 Pr 化合物の非クラマース 2 重項：非クラマース 2 重項を基底に持つ PrInAg₂ および PrMg₃ の (C11-C12)/2 がソフト化を示し、0.08K～0.15K で極小をとることを見だし、四極子近藤状態が現れていると考えられ、磁場依存性などの詳しい研究を開始している。PrPb₃ は TQ = 0.4K で四極子秩序を示し、超音波実験によって従来考えられている以上に複雑な磁気相図が明らかとなり、より詳しい研究が進んでいる。・カゴ状化合物のオフセンター振動：カゴ状化合物 Ce₃Pd₂₀Ge₆、La₃Pd₂₀Ge₆ および充填スクッテルライト Pr₀s₄Sb₁₂ の超音波分散を示し、カゴ中の希土類イオンがオフセンターラットリングをしている。Pr₀s₄Sb₁₂ ではオフセンター振動の電荷揺らぎが重い電子とその超伝導の出現に役割を果たしていると考えられる。本研究では Pr₃Pd₂₀Ge₆ および Nd₃Pd₂₀Ge₆ での超音波分散実験を進め、ラットリング運動でラットリングが 4fn 電子軌道に依存して変化していることが分かり、電子—格子相互作用がラットリングに大きな影響を与えていることを示した。・シリコン結晶の原子空孔：無添加 FZ シリコンの弾性定数が低温でソフト化すること、ボロン添加 FZ シリコンの低温ソフト化は磁場を印可すると消失することを見だした。無添加シリコンでは 4 個の電子が捕獲された電荷状態 V₀ が、ボロン添加シリコンでは 3 個の電子を捕獲した V⁺が実現し、空孔軌道の電気四極子が超音波歪みと結合し、低温で弾性定数のソフト化を引き起こす。この成果は、半導体デバイス技術である CZ シリコン結晶の原子空孔定量評価法に繋がると期待されている。

5. 審査部会における所見

A (現行のまま推進すればよい)

本研究は、独自の超音波計測技術を駆使して、強相関電子系における電荷揺らぎを直接観測し、電荷揺らぎに由来する強相関量子相の研究を推進することにある。研究目的である「Pr 化合物における四極子近藤効果の解明」、「カゴ状化合物における多チャンネル近藤効果の解明」、及び「シリコン結晶中の原子空孔の定量評価」に関する研究は、研究グループ間の良好な協力体制のなか、いずれも順調に進行し、多数の成果が上げられてきている。特に、シリコン結晶中での原子空孔の定量評価に関する研究の成果は、国際的に注目を集めており、半導体業界に大きな影響を与えるものである。特許化を含めた今後の展開を期待する。本研究により購入された装置の立ち上げは順調に進みつつあり、超音波実験の測定システム高度化による今後の研究の進展を期待する。