

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 9 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540340

研究課題名（和文）磁気量子臨界点近傍における磁気ゆらぎと輸送特性

研究課題名（英文）Magnetic fluctuations and transport properties in the vicinity of magnetic quantum critical point

研究代表者

仲間 隆男（NAKAMA TAKAO）

琉球大学・理学部・教授

研究者番号：80264472

研究成果の概要（和文）：本研究は、原子置換、強磁場および高圧力などの外部パラメーターにより、磁気秩序を消失する条件の近傍にある化合物について磁気ゆらぎが電気抵抗および熱電能等の輸送特性にどのように影響を与えるかを知るために、希土類と遷移金属の化合物の置換系について調べた。その結果、磁気秩序を消失する近傍では、輸送特性が大きく変化しフェルミレベル上の電子状態密度が大きく変化する振る舞いを示した。また、価数転移により磁気モーメントを消失する Eu の化合物 EuNi_2Ge_2 についても同様の測定を行い、価数転移と磁気秩序が競合しており、転移によりやはり電子状態密度が大きく変化していることがわかった。

研究成果の概要（英文）：In order to investigate the effect of magnetic fluctuations on transport properties of the rare earth compounds around magnetic critical point, the electrical resistivity and thermopower have been measured at 2 K to 300 K under pressures up to 3 GPa in magnetic fields up to 10 T. The anomalous behaviors of electrical resistivity and thermopower of the compound with the critical atomic concentration have been observed. And the measurement results indicate the large change of the temperature dependence, indicating the large modification of the electrical density of states at the Fermi level.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,450,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：磁性

1. 研究開始当初の背景

強磁性や反強磁性などの磁気秩序状態を取るようになるが、反強磁性と強磁性相関、反強磁性相関と外部磁場との競合、構造による磁気相関の競合等の「競合する 2 つの相互作用」が存在する場合、磁気的な秩序状態が抑制され、磁気量子臨界点が存在することに

なる。この磁気量子臨界点近傍では磁気的なゆらぎが大きく、金属状態で普遍的に成り立っていると考えられているフェルミ液体的な振る舞いからの逸脱が顕著に見られるようになる。すなわち、低温における電気抵抗 ρ の T^2 依存性および電子比熱係数 (C/T) 一定の振る舞いが低温まで観測されず、 $\rho \sim T$ およ

び $C/T \sim -\ln T$ の振る舞いが広い温度範囲で観測され、非フェルミ液体と呼ばれる特異な振る舞いを示す。また、この量子臨界点近傍で観測される超伝導は、異方的なギャップをもつ超伝導を示すことが報告されており、現在精力的に研究されている。この磁気量子臨界点近傍における常伝導状態における磁気ゆらぎが輸送特性に及ぼす効果についての系統的な研究はこれまであまり多くなかった。

2. 研究の目的

上述したように、この量子臨界点近傍では磁気的なゆらぎが大きく、通常のフェルミ液体から非フェルミ液体状態に変わり、電気抵抗および熱電能などの輸送特性が通常金属とは著しく異なる振る舞いを示す。この非フェルミ液体状態が基底状態として実際に存在するかどうかは物性研究上非常に興味深い課題の1つである。本研究では、これまであまり詳細に研究されてこなかった、磁気量子臨界点近傍の常伝導状態における磁気ゆらぎの発達が輸送特性、特に熱電効果(熱電能)に及ぼす効果およびそのメカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

希土類金属間化合物について置換、外部磁場および高圧力等の外部パラメーターをかせ磁気量子臨界点に近い状態を実現し、その時の熱電能および電気抵抗率を測定し、磁気量子臨界点近傍での電子状態および磁気ゆらぎが輸送係数にどのように影響するかを詳細に調べる。測定には、我々が開発した強磁場中、高圧力中およびそれらを併用する。反強磁性-強磁性、反強磁性-外部磁場、磁気秩序状態-高圧力、強磁性-反強磁性的な内部磁場(R-RCO₂系)等の相関を有する化合物について詳細に調べる。遷移金属化合物の多くは、幅のせまいdバンドがフェルミ準位近傍に高いピークを形成しているため、電気抵抗等の輸送特性はd電子状態に非常に敏感である。また、電気抵抗がフェルミ準位近傍の伝導電子の電子状態密度の大きさと伝導電子の散乱機構に敏感であるのに対し、熱電能はフェルミ準位近傍の電子状態密度の形状および電子散乱のエネルギー依存性に非常に敏感な物理量であるため、電気抵抗と熱電能を同時に測定することで、フェルミ準位近傍の電子の状態に対する多くの情報を得ることができる。

4. 研究成果

高圧力中で精度良く熱電能測定を行うため静水圧性の高い二層式ピストンシリンダー型の高圧力発生装置を設計・作製を行った。また、希土類金属間化合物のNd_{1-x}Tb_xCo₂、

Y_{1-x}Tb_xCo₂、HoCo₂系およびEuCo₂P₂、EuNi₂Ge₂について、原子置換および圧力がこれらの物性にどのような影響を与えるかを調べた結果、以下のことが分かった。

1. Nd_{1-x}Tb_xCo₂では、Co副格子に働く分子場と4fモーメントの向きがNdでは平行、Tbでは反平行を向く。この局在磁気モーメントと分子場の相対的な向きが異なる希土類金属の置換により、輸送特性がどのように変化するかを調べた。その結果、全4f磁気モーメントが零になる組成領域で、低温における熱電能の符号が逆転することがわかった。これは、伝導電子のスピンの向きに依存する散乱が関係していると考えられる。
2. 軽希土類金属Ndを非磁性のYで置換した系Y_{1-x}Nd_xCo₂について、電気抵抗率および熱電能の測定を行った。その結果、低温における電気抵抗率が磁気転移点消失濃度近傍で大きくなりピークとなることがわかった。この振る舞いは、重希土類金属HRとの化合物Y_{1-x}HR_xCo₂のYの置換効果と同様であり、軽希土類化合物においても、Co副格子の磁気状態に電子散乱が大きく依存していることがわかった。熱電能の結果についても、ほぼ同様な知見が得られた。しかしながら、磁場に対する低温での輸送特性の変化は重希土類の場合と異なる振る舞いをしていることがわかった。
3. HoCo₂のCo副格子を非磁性のAlで置換した系Ho(Co_{1-x}Al_x)₂について、磁場および圧力中で電気抵抗率、熱電能の測定を行った。CoのAl置換により、磁気転移点が大きく上昇し、また低温の電気抵抗率の急激な上昇が確認できた。圧力を加えると磁気転移点は低温側にシフトする。また、 $x=0.15, 2.0$ の化合物は磁気転移点以下で電気抵抗が上昇する特異な振る舞いがみられた。
4. EuCo₂P₂は、圧力により局在4f磁気モーメントの反強磁性配列から遍歴3d磁気モーメントの反強磁性へと変化することが報告されている。圧力中で電気抵抗率と熱電能を同時に測定した。電気抵抗率と熱電能ともに、相転移にともない大きく変化しフェルミ準位近傍の電子状態が大きく変化していることを示した。
5. EuNi₂Ge₂およびGeのSi置換系を作成し、熱電能Sおよび電気抵抗率の測定を行った。その結果、ある圧力で磁気転移点以下で価数転移が観測され、低温ではEuが3価の非磁性状態になることが分かった。これは、磁気秩序と価数転移が競合状態にあることを示している。また、EuNi₂Ge₂は鋭い価数転移を示し、低温でのSは特徴的な振る舞いを示す。また、置換系に

ついても、Si 置換による化学圧力により価数転移することがわかった。しかしながら、置換系の価数転移における S の変化と EuNi_2Ge_2 の圧力中の変化には大きな違いがあることが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① K. Uchima, C. Zukeran, A. Nakamura, N. Arakaki, S. Komesu, M. Takeda, Y. Takaesu, M. Hedo, T. Nakama, K. Yagasaki and A. T. Burkov: “Resistivity and thermopower of $\text{Ho}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$ -Effects of Pressure and Magnetic Field-”, J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. A, 80 (2011). (査読有)
- ② T. Nakama, Y. Takaesu, T. Naka, A. Matsushita, Y. Yamada and K. Yagasaki: “Electrical resistivity and thermopower of the Heusler compound $\text{Fe}_{1.98}\text{V}_{1.02}\text{Al}$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. A, 80 (2011). (査読有)
- ③ H. Niki, H. Okuda, K. Higa, M. Oshiro, N. Fukuyoshi, R. Mahoe, M. Yogi, T. Nakama, K. Yagasaki, S. Ebisu and S. Nagata: “NMR studies of metal-insulator transition in the spinel-type $\text{Cu}(\text{Ir}_{1-x}\text{V}_x)_2\text{S}_4$ ”, J. Phys.: Conf. Ser., 273 012139 (2011). (査読有)
- ④ K. Uchima, Y. Takaesu, S. Yonamine, M. Takeda, M. Hedo, T. Nakama, K. Yagasaki, Y. Uwatoko and A. T. Burkov: “Pressure effect on transport and magnetic properties of $\text{Nd}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Co}_2$ ”, J. Phys.: Conf. Ser., 273 012130 (2011). (査読有)
- ⑤ Y. Takaesu, T. Nakama, A. Kinjyo, S. Yonamine, M. Hedo, K. Yagasaki, K. Uchima, Y. Uwatoko and A. T. Burkov: “ Effects of pressure and magnetic field on transport properties of $\text{Y}_{1-x}\text{R}_x\text{Co}_2$ alloys (R=Gd, Tb, Dy, Ho and Er) ”, J. Phys.: Conf. Ser., 215 012039 (2010). (査読有)
- ⑥ T. Nakama, T. Yoshida, A. Ohno, D. Nakamura, M. Hedo, K. Yagasaki, K. Uchima, T. Fujiwara and T. Shigeoka: Effect of pressure on thermopower and resistivity of EuCo_2P_2 ,

J. Phys.: Conf. Ser., 200 032050 (2010). (査読有)

- ⑦ K. Uchima, S. Yonamine, A. Kinjyo, Y. Takaesu, M. Hedo, T. Nakama, K. Yagasaki and A. T. Burkov: Electrical resistivity and thermopower of $\text{Nd}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Co}_2$ compounds, J. Phys.: Conf. Ser., 200 032077 (2010). (査読有)

[学会発表] (計 27 件)

- ① 平川先太郎, 渡部晋太郎, 照屋淳志, 新垣望, 仲村愛, 瑞慶覧長潤, 米須将太, 竹田政貴, 辺土正人, 仲間隆男, 矢ヶ崎克馬, 高江洲義尚, 内間清晴, 松林和幸, 上床美也: EuTX_3 (T=遷移金属, X=Ge, Si) の圧力下輸送特性, 日本物理学会第67回年次大会 (2012. 3. 24), 関西学院大学.
- ② 竹田政貴, 渡部晋太郎, 照屋淳志, 平川先太郎, 新垣望, 仲村愛, 瑞慶覧長潤, 米須将太, 辺土正人, 矢ヶ崎克馬, 仲間隆男, 高江洲義尚, 内間清晴, A. T. Burkov: ラーベス相化合物 $\text{Y}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Co}_2$ の T_c の圧力依存, 日本物理学会第67回年次大会 (2012. 3. 24), 関西学院大学.
- ③ 仲村愛, 竹田政貴, 新垣望, 米須将太, 瑞慶覧長潤, 仲村大, 平川先太郎, 渡部晋太郎, 照屋淳志, 辺土正人, 仲間隆男, 矢ヶ崎克馬, 高江洲義尚, 内間清晴, 松林和幸, 上床美也: $\text{EuNi}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ の圧力下輸送特性, 日本物理学会第67回年次大会 (2012. 3. 24), 関西学院大学.
- ④ 照屋淳志, 平川先太郎, 渡部晋太郎, 瑞慶覧長潤, 新垣望, 米須将太, 仲村愛, 竹田政貴, 高江洲義尚, 内間清晴, 辺土正人, 矢ヶ崎克馬, 仲間隆男, A. T. Burkov: ラーベス相化合物 $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Co}_2$ の磁場中における輸送特性, 日本物理学会第67回年次大会 (2012. 3. 24), 関西学院大学.
- ⑤ 渡部晋太郎, 平川先太郎, 照屋淳志, 瑞慶覧長潤, 米須将太, 新垣望, 仲村愛, 竹田政

貴, 辺土正人, 仲間隆男, 内間清晴, 松林和幸, 上床美也: 大きなカゴ状構造を持つ CeRuGe₃の輸送特性, 日本物理学会第67回年次大会 (2012. 3. 24), 関西学院大学.

⑥ 渡部晋太郎, 平川先太郎, 照屋淳志, 竹田政貴, 内間清晴, 辺土正人, 仲間隆男, 松林和幸, 上床美也: 大きなカゴ状構造を持つ CeRuGe₃の高圧下輸送特性, 第52回高圧討論会 (2011. 11. 9), 沖縄キリスト教学院.

⑦ 米須将太, 仲村愛, 新垣望, 瑞慶覧長潤, 竹田政貴, 高江洲義尚, 辺土正人, 仲間隆男, 内間清晴, 的場智広, 光田暁弘, 和田裕文: 鉄ヒ素系圧力誘起超伝導体の高圧下熱電能, 第52回高圧討論会 (2011. 11. 9), 沖縄キリスト教学院.

⑧ 照屋淳志, 平川先太郎, 渡部晋太郎, 竹田政貴, 高江洲義尚, 内間清晴, 辺土正人, 仲間隆男, 矢ヶ崎克馬, A. T. Burkov: Y_{1-x}Pr_xCo₂の圧力下における輸送特性, 第52回高圧討論会 (2011. 11. 9), 沖縄キリスト教学院.

⑨ 新垣望, 仲村愛, 米須将太, 瑞慶覧長潤, 平川先太郎, 竹田政貴, 高江洲義尚, 内間清晴, 辺土正人, 仲間隆男, 矢ヶ崎克馬, 松林和幸, 上床美也: EuNiGe₃の圧力中輸送特性, 第52回高圧討論会 (2011. 11. 9), 沖縄キリスト教学院.

⑩ 平川先太郎, 渡部晋太郎, 照屋淳志, 竹田政貴, 内間清晴, 辺土正人, 仲間隆男, 松林和幸, 上床美也: 圧力中におけるEuCoGe₃の輸送特性, 第52回高圧討論会 (2011. 11. 9), 沖縄キリスト教学院.

⑪ 仲村愛, 竹田政貴, 新垣望, 米須将太, 瑞慶覧長潤, 仲村大, 渡部晋太郎, 高江洲義尚, 内間清晴, 辺土正人, 仲間隆男, 矢ヶ崎克馬, 松林和幸, 上床美也: EuNi₂(Ge_{1-x}Si_x)₂の輸送特性に対する圧力効果, 第52回高圧討論会 (2011. 11. 9), 沖縄キリスト教学院.

⑫ 瑞慶覧長潤, 米須将太, 新垣望, 仲村愛,

竹田政貴, 照屋淳志, 高江洲義尚, 内間清晴, 辺土正人, 矢ヶ崎克馬, 仲間隆男, 松林和幸, 上床美也, A. T. Burkov: 希土類ラーベス相化合物Ho(Co_{1-x}Al_x)₂の圧力中の輸送特性, 第52回高圧討論会 (2011. 11. 9), 沖縄キリスト教学院.

⑬ 竹田政貴, 新垣望, 仲村愛, 瑞慶覧長潤, 米須将太, 高江洲義尚, 内間清晴, 辺土正人, 仲間隆男, 矢ヶ崎克馬, A. T. Burkov: Y_{1-x}Nd_xCo₂の圧力効果, 第52回高圧討論会 (2011. 11. 9), 沖縄キリスト教学院.

⑭ 米須将太, 仲村愛, 新垣望, 瑞慶覧長潤, 竹田政貴, 高江洲義尚, 辺土正人, 仲間隆男, 内間清晴, 的場智広, 光田暁弘, 和田裕文: EuFe₂As₂の高圧化の熱電能と電子状態, 日本物理学会2011年秋季大会 (2011. 9. 22), 山大学.

⑮ 仲村愛, 竹田政貴, 新垣望, 米須将太, 瑞慶覧長潤, 仲村大, 渡部晋太郎, 高江洲義尚, 内間清晴, 辺土正人, 仲間隆男, 矢ヶ崎克馬, 松林和幸, 上床美也: EuNi₂Ge₂の熱電能に対する圧力と置換の効果, 日本物理学会2011年秋季大会 (2011. 9. 21), 山大学.

⑯ 竹田政貴, 新垣望, 仲村愛, 瑞慶覧長潤, 米須将太, 高江洲義尚, 内間清晴, 辺土正人, 仲間隆男, 矢ヶ崎克馬, A. T. Burkov: Y_{1-x}Nd_xCo₂の熱電能, 日本物理学会2011年秋季大会 (2011. 9. 21), 山大学.

⑰ 瑞慶覧長潤, 米須将太, 新垣望, 仲村愛, 竹田政貴, 照屋淳志, 高江洲義尚, 内間清晴, 辺土正人, 矢ヶ崎克馬, 仲間隆男, 松林和幸, 上床美也, A. T. Burkov: Ho(Co_{1-x}Al_x)₂の圧力中の輸送特性, 日本物理学会2011年秋季大会 (2011. 9. 21), 山大学.

⑱ 新垣望, 竹田政貴, 仲村愛, 米須将太, 瑞慶覧長潤, 平川先太郎, 高江洲義尚, 内間清晴, 辺土正人, 仲間隆男, 矢ヶ崎克馬, 松林和幸, 上床美也: EuNiGe₃の磁性と熱電能, 日

本物理学会2011年秋季大会(2011. 9. 21), 山
大学.

①⑨内間清晴, 竹田政貴, 新垣望, 仲村愛, 瑞
慶覧長潤, 米須将太, 高江洲義尚, 辺土正人,
仲間隆男, 矢ヶ崎克馬: ラーベス相化合物
 $Y_{1-x}Nd_xCo_2$ の圧力中および磁場中の電気抵抗率,
日本物理学会第66回年次大会(2011. 3. 26), 新
潟大学.

②⑩瑞慶覧長潤, 内間清晴, 米須将太, 新垣望,
仲村愛, 竹田政貴, 高江洲義尚, 辺土正人,
矢ヶ崎克馬, 仲間隆男, 上床美也, A. T.

Burkov: 希土類ラーベス相化合物 $Ho(Co_{1-x}Al_x)_2$
の圧力および磁場中の輸送特性, 日本物理学
会第66回年次大会(2011. 3. 26), 新潟大学.

②⑪新垣望, 竹田正貴, 仲村愛, 米須将太, 瑞
慶覧長潤, 高江洲義尚, 内間清晴, 辺土正人,
矢ヶ崎克馬, 仲間隆男: 価数転移を示す立方晶
ラーベス相化合物 $Yb_{0.4}In_{0.6}Cu_2$ の熱電能, 日本
物理学会第66回年次大会(2011. 3. 26), 新潟大
学.

②⑫仲村愛, 竹田政貴, 新垣望, 米須将太, 瑞
慶覧長潤, 仲村大, 高江洲義尚, 内間清晴,
H. -G. Flesch, 辺土正人, 矢ヶ崎克馬, 仲間
隆男, 松林和幸, 上床美也: 圧力誘起価数転移
を示す $EuNi_2Ge_2$ の熱電能, 日本物理学会第66
回年次大会(2011. 3. 25), 新潟大学.

②⑬米須将太, 仲村愛, 新垣望, 瑞慶覧長潤,
竹田政貴, 辺土正人, 仲間隆男, 内間清晴,
的場智広, 光田暁弘, 和田裕文: 鉄ヒ素系超伝
導体の高圧下熱電能, 日本物理学会第66回年
次大会(2011. 3. 25), 新潟大学.

②⑭内間清晴, 瑞慶覧長潤, 仲村愛, 新垣望,
米須将太, 竹田政貴, 高江洲義尚, 辺土正人,
仲間隆男, 矢ヶ崎克馬: $Ho(Co_{1-x}Al_x)_2$ の電気抵
抗と熱電能, 日本物理学会2010年秋季大会
(2010. 9. 24), 大阪府立大学.

②⑮竹田政貴, 新垣望, 仲村愛, 瑞慶覧長潤,
米須将太, 高江洲義尚, 内間清晴, 辺土正人,

仲間隆男, 矢ヶ崎克馬: ラーベス相化合物 $Y_{1-x}Nd_xCo_2$ の輸送特性, 日本物理学会2010年秋季
大会(2010. 9. 24), 大阪府立大学.

②⑯與那嶺翔太, 金城敦, 高江洲義尚, 辺土正
人, 仲間隆男, 矢ヶ崎克馬, 内間清晴, 松林
和幸, 上床美也: $Nd_{1-x}Tb_xCo_2$ の磁性と熱電能,
日本物理学会第65回年次大会(2010. 3. 20), 岡
山大学.

②⑰金城敦, 与那嶺翔太, 高江洲義尚, 辺土正
人, 仲間隆男, 矢ヶ崎克馬, 内間清晴, 松林
和幸, 上床美也: ホイスラー型合金
 $Fe_2Mn_{1+y}Al_{1-y}$ の磁化と輸送特性, 日本物理学会
第65回年次大会(2010. 3. 20), 岡山大学.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仲間 隆男 (NAKAMA TAKAO)

琉球大学・理学部・教授

研究者番号：80264472

(2) 研究分担者

二木 治雄 (NIKI HARUO)

琉球大学・理学部・教授

研究者番号：80145549

(3) 連携研究者

辺土 正人 (HEDO MASATO)

琉球大学・理学部・准教授

研究者番号：00345232