

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03446

研究課題名（和文）ゼロ磁場の強磁性量子臨界点の実現に対する微視的・系統的検証

研究課題名（英文）Microscopic and systematic investigations for realization of ferromagnetic quantum critical point at zero field

研究代表者

小手川 恒 (Kotegawa, Hisashi)

神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号：30372684

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：磁場印加なしには強磁性量子臨界点是实现しないと思われてきたが、CeRh6Ge4に対して核四重極共鳴（NQR）測定を行った結果、圧力下の量子臨界点近傍でも2次相転移的な振舞いを示し、微視的にも強磁性量子臨界点の実現を指示する結果が得られた。また、CeZnにおいては圧力により強磁性量子臨界点が誘起される直前で反強磁性的な相が突如として現れることを明らかにし、物質によって多様な振舞いが現れることを明らかとした。また、NbMnPという磁性体の磁気構造を明らかにした。反強磁性を主体としながら異常ホール効果という強磁性的応答を示すことを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強磁性量子臨界点はゼロ磁場では実現しないとされており、固体物理の中で一種の普遍的性質の一つと考えるのが通説であった。しかし、本研究を通して物質によっては強磁性量子臨界点を持ち得ることが明らかになりつつあり、物質の多様性を強く印象付ける成果を得ていることが学術的な意義である。また、本研究を通して異常ホール効果などの強磁性的応答を示す反強磁性的物質も見つかっている。本系は将来的に反強磁性体を用いたメモリは熱電変換材料への応用に結びつく可能性がある。

研究成果の概要（英文）：It has been considered that ferromagnetic quantum critical point (QCP) cannot be realized without an external magnetic field, but NQR measurement for CeRh6Ge4 revealed that a second-order phase transition is maintained even under pressure near the QCP. For CeZn, our measurements show that a new phase like antiferromagnetic phase suddenly appears near the QCP. This impresses the instability of the ferromagnetic QCP and show the variety of the behavior near the ferromagnetic QCP.

We also revealed a magnetic structure of NbMnP. It showed an anomalous Hall effect, which is a ferromagnetic response, even in the antiferromagnetic structure.

研究分野：固体物理

キーワード：強磁性体 量子臨界点 量子相転移 異常ホール効果 反強磁性

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子臨界点は絶対零度における 2 次相転移点であり、非従来型超伝導の出現など興味深い現象が起こる舞台として広く研究されている。一般に圧力などのパラメータで相転移点を下降させることが出来れば、量子臨界点を誘起させることが出来る。しかし、秩序相が強磁性である場合、量子臨界点に至る過程で転移が 1 次相転移に切り替わり量子臨界点を持たない事が通説とされていた。2019 年、CeRh₆Ge₄ において圧力下で強磁性量子臨界点が現れることが示唆された。空間反転対称性の欠如による影響も指摘され、強磁性量子臨界現象に多様な振舞が生じ得る可能性が見出された。

2. 研究の目的

本研究は強磁性量子臨界現象の多様性を追求することを目的として行われた。まず着目する物質は空間反転対称性が欠如した CeRh₆Ge₄ であり、NQR による微視的測定から量子臨界点の確認を行った。また、空間反転対称性の欠如はスピン - 軌道結合を通してフェルミ面の縮退を解き強磁性量子臨界点を生じさせると指摘されているため、スピン - 軌道結合の大きな *f* 電子系は主な研究対象とした。

3. 研究の方法

本研究の課題は以下のように 2 つに大別された。

(1) ⁷³Ge-NQR 測定を用いた CeRh₆Ge₄ のゼロ磁場強磁性量子臨界点の微視的検証

微視的手法である ⁷³Ge-NQR 測定を圧力下で行い、CeRh₆Ge₄ において本当にゼロ磁場下の強磁性量子臨界点を実現しているのかを検証した。

(2) 強磁性量子臨界点候補物質の純良単結晶作製・圧力下相図作成を通じた系統的評価

空間反転対称性の有無に注目した上で、多様な磁性体に対して純良単結晶の作製、圧力下電気抵抗測定を通して強磁性消失過程の系統的評価を行った。

4. 研究成果

(1) ⁷³Ge-NQR 測定を用いた CeRh₆Ge₄ のゼロ磁場強磁性量子臨界点の微視的検証

CeRh₆Ge₄ は約 2.5 K にキュリー点を持つ強磁性体であり、圧力印加と共に強磁性転移が 2 次転移的に消失するため、CeRh₆Ge₄ には三重臨界点を避けるための要素が備わっていると考えられ注目を浴びている。ただし、強磁性体 UCoGe もバルク測定では圧力下で 2 次相転移的に強磁性転移が消失するが NQR で微視的に観測すると明確な 1 次相転移であることが分かっており、この判別には微視的測定が不可欠である。⁷³Ge-NQR を行った結果、内部磁場の発達から確かに CeRh₆Ge₄ の強磁性転移は微視的に見ても 2 次相転移であることが分かった。さらにその特徴は 0.4 GPa の圧力下でも失われていなかった。このことから CeRh₆Ge₄ は微視的に見ても強磁性量子臨界点を示す初の物質と位置付けられる可能性が高いと言える。

(2) CeZn における強磁性量子臨界点の回避

CeZn の圧力下で出現する強磁性相の量子臨界点付近の詳細な相図を明らかにした。CeZn は常圧では反強磁性を示すが、約 1 GPa で構造相転移を示し、磁気状態が強磁性へと変化する。こ

のことは古くから知られていたが、本研究では更なる加圧により磁気秩序状態が消失する過程を新たに調べた。図1に示すように、約1 GPaで12 K程度であったキュリー温度は加圧により減少し、約3 GPa程度で強磁性量子臨界点に到達するが、その直前で反強磁性と思われる別の相へ変化することが分かった。この相転移は3 K以下で起こるため、量子効果が寄与していることを伺わせ、強磁性量子臨界点の不安定性を裏付ける良い例になるとと思われる。

(3) 他の磁性体の圧力効果

本課題では強磁性量子臨界点近傍の多様な振舞いを調査するために、フェリ磁性体 $Ce_5Ru_3Ga_2$ 、強磁性体 $UTeAs$ の圧力下実験を行った。 $Ce_5Ru_3Ga_2$ に関しては圧力下において約0.4 GPaで磁気転移が消失することと共に、この構造相転移も抑制され、複雑な温度-圧力相図を示すことが明らかになった。 $UTeAs$ は超伝導体 UTe_2 の類似物質として研究されているが、正方晶構造を取り、約60 Kにおいて強磁性転移を示す。加圧実験を行った結果、転移温度の減少は緩やかであり、約4 GPaにおいて50 K程度まで減少することが分かり、量子臨界点の誘起にはさらなる圧力が必要であることが明らかになった。

(4) 反強磁性の物質における異常ホール効果の発見

強磁性転移を示す新規物質を探索することを目的に新しい磁性体の開発を行った。その結果、 $NbMnP$ 、 $NbMnGe$ の単結晶作製に成功し、それらが弱強磁性(主体としては反強磁性)を示すことを明らかにした。 $NbMnP$ に関しては中性子散乱を通して明らかになった磁気構造(図2)から反強磁性由来の異常ホール効果の発現が予想され、実際に図3に示すように実際に大きな異常ホール効果が発現することを明らかにした。つまり、反強磁性でありながら、強磁性的な性質を示す物質を発見した。

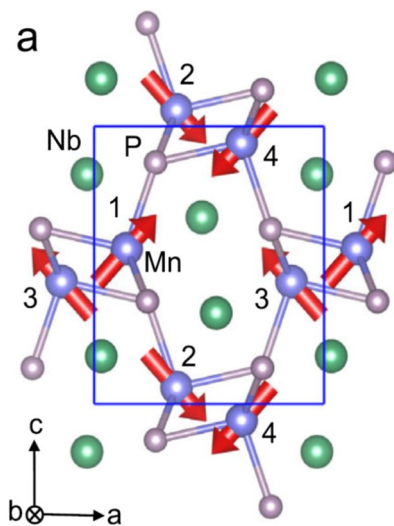


図3: $NbMnP$ の磁気構造。

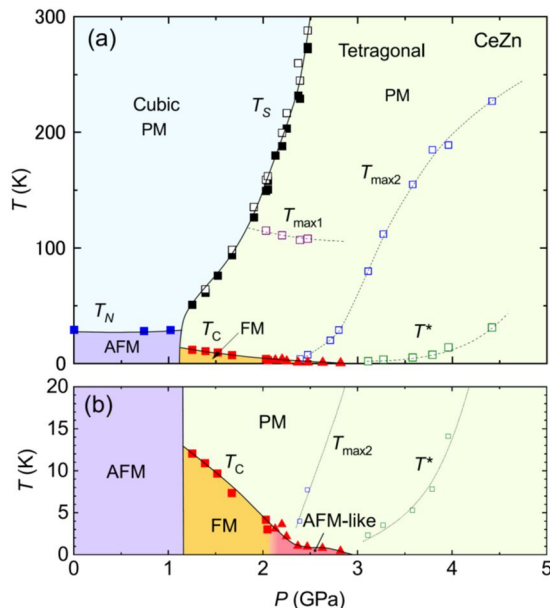


図1: $CeZn$ の圧力-温度相図。1 GPa程度で基底状態が強磁性となり、更なる加圧で反強磁性的な相を経て常磁性となる。

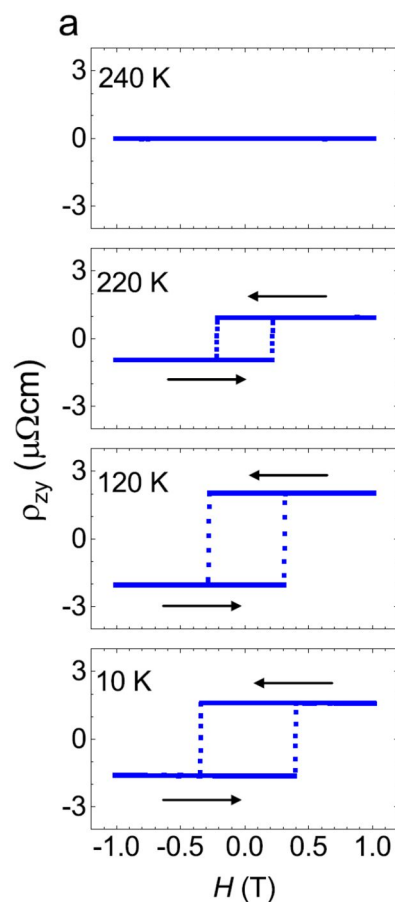


図3: $NbMnP$ の反強磁性由来の異常ホール効果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kotegawa Hisashi, Uga Toshiaki, Tou Hideki, Matsuoka Eiichi, Sugawara Hitoshi	4. 巻 106
2. 論文標題 Avoided ferromagnetic quantum critical point in CeZn	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L180405-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.106.L180405	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsuda Masaaki, Zhang Depei, Kuwata Yoshiki, Zhang Qiang, Sakurai Takahiro, Ohta Hitoshi, Sugawara Hitoshi, Takeda Keiki, Hayashi Junichi, Kotegawa Hisashi	4. 巻 104
2. 論文標題 Noncollinear spin structure with weak ferromagnetism in NbMnP	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174413-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.104.174413	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kotegawa Hisashi, Kuwata Yoshiki, Huyen Vu Thi Ngoc, Arai Yuki, Tou Hideki, Matsuda Masaaki, Takeda Keiki, Sugawara Hitoshi, Suzuki Michi-To	4. 巻 8
2. 論文標題 Large anomalous Hall effect and unusual domain switching in an orthorhombic antiferromagnetic material NbMnP	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 npj Quantum Materials	6. 最初と最後の頁 56-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41535-023-00587-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 石垣綾乃, 小手川恒, 藤秀樹, 谷田博司, 真砂全宏
2. 発表標題 CeCoSiの非磁性秩序相に対する核磁気共鳴法による研究
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石垣綾乃, 小手川恒, 藤秀樹, 谷田博司, 真砂全宏
2. 発表標題 CeCoSiの非磁性秩序相に対するNMR測定による研究
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 二斗蒔田亮太, 小手川恒, 土佐流司, 藤秀樹, 菅原仁
2. 発表標題 キラル構造を有するCe5Ru3Ga2の試料作製と圧力効果
3. 学会等名 第1回アシンメトリ量子研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土佐流司, 小手川恒, 菅原仁, 櫻井敬博, 太田仁, 藤秀樹
2. 発表標題 Ce5Ru3Ga2の試料作製と圧力効果
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 二斗蒔田亮太, 永瀬裕也, 小手川恒, 菅原仁, 藤秀樹
2. 発表標題 遍歴磁性体Ti3Cu4の圧力効果
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石垣綾乃, 小手川恒, 藤秀樹, 谷田博司
2. 発表標題 単結晶CeCoSiの温度 圧力 磁場相図の作製
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桑田祥希, 小手川恒, 松島恵, 藤秀樹, 兼吉潤, 松岡英一, 菅原仁
2. 発表標題 圧力誘起超伝導体CrAsに対する ⁷⁵ As-NMR
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永瀬裕也, 真砂全宏A, 小手川恒, 菅原仁, 松岡英一, 武田圭生, 藤秀樹
2. 発表標題 空間反転対称性の破れた超伝導体CaPtAsの試料作製, 及びNQR測定による研究
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石垣綾乃, 小手川恒, 藤秀樹, 谷田博司, 真砂全宏
2. 発表標題 CeCoSiの非磁性秩序相に対する核磁気共鳴法による研究
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小手川恒
2. 発表標題 Large anomalous Hall effect in antiferromagnetic materials NbMnP and TaMnP
3. 学会等名 The Conference of Condensed Matter Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小手川恒
2. 発表標題 Large Anomalous Hall Effect at Zero Magnetic Field in Noncollinear Antiferromagnetic Material NbMnP
3. 学会等名 Strongly Correlated Electrons Systems 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小手川恒
2. 発表標題 Large anomalous Hall effect in antiferromagnetic materials NaMnP and TaMnP
3. 学会等名 International Conference on Magnetism 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松岡 英一 (Matsuoka Eiichi) (20400228)	神戸大学・理学研究科・准教授 (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	Oak Ridge National Laboratory		