

10 倍の異方性磁気抵抗効果の発見 高磁場の電子軌道秩序相にて実現

1. 発表者

志村 恭通（研究当時：東京大学 物性研究所 日本学術振興会 特別研究員、現在：広島大学
先端物質科学研究科 量子物質科学専攻 助教）

松本 洋介（研究当時：東京大学 物性研究所 助教、現在：ドイツ マックスプランク研究所
研究員）

辻本 真規（研究当時：東京大学 大学院新領域創成科学研究科 博士後期課程大学院生）

酒井 明人（東京大学 物性研究所 助教）

榊原 俊郎（東京大学 物性研究所 教授）

荒木 幸治（研究当時：東京大学 物性研究所 特任研究員、現在：防衛大学校 応用物理学科
助教）

中辻 知（東京大学 大学院理学系研究科物理学専攻・物性研究所 教授）

2. 発表のポイント

- ◆ 高磁場で現れる軌道秩序相において、従来の反強磁性体に比べて一桁大きな異方性磁気抵抗効果を発見した。
- ◆ 巨大な異方性磁気抵抗効果は軌道秩序による電子状態の変化に由来することを明らかにした。
- ◆ 軌道自由度を用いた科学技術（オービトロニクス）の基礎学理の構築に貢献することが期待される。

3. 発表概要

東京大学物性研究所の志村 恭通 特任研究員（研究当時、現 広島大学 先端物質科学研究科 助教）、中辻 知 教授らの研究グループは米国国立高磁場研究所（National High Magnetic Field Laboratory）のグループと協力して、プラセオジウム化合物（ $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ ）が、11 テスラを超える高磁場中で、従来の反強磁性体で知られている値より一桁以上大きな異方性磁気抵抗効果（注1）を示すことを発見しました。異方性磁気抵抗効果はこれまで物質の磁化や結晶の歪み、不均一性によって起きると考えられてきましたが、本研究ではミクロな電子軌道秩序（注2）により電子状態が変化することに由来していることがわかりました。本成果は *Physical Review Letters* オンライン版（米国時間6月25日）に掲載される予定です。

4. 発表内容

（1）研究の背景

物質を構成する 10^{23} 個もの原子は「原子核」とその周りを飛び回って雲のように形を作っ

ている「電子」により構成されています。電子の性質のうち、この雲のような軌跡を「電子軌道」と呼び、自転の自由度を「スピン」と呼び、物質の性質を決めるのに非常に重要な役割を果たしていることが知られています。

これまで、電子のもつスピンに関する基礎研究やそれを応用したデバイス開発はさまざまになされてきました。例えば、2007年にノーベル賞を受賞した巨大磁気抵抗効果は、ハードディスクの読み込みに利用されています。このようなスピンを利用した技術はスピントロニクスと呼ばれ、研究の一大分野となっています。

電子軌道は通常ある形状を保ったまま固まっていますが、鉄やマンガンなどの遷移金属元素を含む化合物などでは、電子軌道が動くことがあります。実際、鉄系高温超伝導（注3）やマンガン酸化物の超巨大磁気抵抗効果（注4）では電子軌道の変化が起源になっていると考えられています。しかし、鉄やマンガンなどの遷移金属元素では電子軌道とスピンを分離して研究を行うことができず、起源の解明が難しいという問題があります。

その一方で、近年、希土類元素プラセオジウム Pr を含む立方晶の金属間化合物で、スピン自由度を持たずに、電子軌道の自由度のみを持つ物質に注目が集まっています。その中でも $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ は電子軌道が金属中の伝導を担う電子と強く結びついていることが知られており、例えば、軌道揺らぎによる超伝導が観測されています。このように $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ は電子軌道による伝導現象を理解するうえで絶好の舞台です。

（2）研究内容と成果

$\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ は約 0.65 ケルビン（マイナス 272.5°C）以下で Pr の電子軌道が整列する軌道秩序を示します。さらにこの軌道秩序状態に 11 テスラ以上の強磁場をある特定の結晶軸方向（[100]方向）に印加すると、異なる秩序相が現れ、これは軌道秩序の整列状態が変化していると考えられています。本研究ではこの高磁場の秩序相を調べるため、米国国立高磁場研究所の最大で 31 テスラ印可可能な水冷式マグネット（注5）を用いて磁場中の電気抵抗率（磁気抵抗効果）の測定を行いました。

その結果、図 1(a)に示すような磁場-温度相図が得られました。そして高磁場相に入る 11 テスラの磁場で磁気抵抗比にして 100 %もの大きな飛びを示すことがわかりました。さらに、この高磁場相内の電子状態の異方性を評価するため、磁場方向と電流方向が垂直な場合と平行な場合をそれぞれ測定し、その差から異方性磁気抵抗比を求めました。その結果、高磁場相内で 30 %もの大きな値に達することがわかり（図 1 (b)）、軌道自由度を持つ Pr の成分のみを抜き出しても 20 %の値が得られました。これは従来の反強磁性体の異方性抵抗比と比べて、一桁大きな値です。

さらに、同研究グループは極低温かつ高磁場下での磁歪や磁化、そして磁場方位依存性や試料依存性を丁寧に調べることで、この異方性磁気抵抗が磁性や巨視的な結晶歪や結晶の不均一性に起因するものとは異なり、Pr のもつ非磁性の電子軌道秩序を起源とすることを明らかにしました。すなわち、この大きな異方性磁気抵抗効果は異方的な形状を持つ電子軌道が電気伝導を担う電子と結びつくことで起こる現象であると考えられます（図 2）。

(3) 今後の展望

本研究で見出された巨大な異方性磁気抵抗効果は電子が持つ電荷やスピンの加えて、電子軌道の自由度が遠い将来、電子工学の表舞台に上がるためのきっかけとなる可能性を秘めています。そして $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ に関しても、今後、さまざまな微視的な情報を得る実験や電子構造を明らかにするための理論計算などから、ゼロ磁場の秩序相および高磁場相の秩序状態の解明が期待されます。

本研究は文部科学省 科学研究費補助金 新学術領域（研究領域提案型）「J-Physics：多極子伝導系の物理」課題番号 15H05882（研究代表：播磨尚朝）における研究計画班「A01: 局在多極子と伝導電子の相関効果」課題番号 15H05883（研究代表者：中辻知）の一環として行われました。

5. 発表雑誌

雑誌名：*Physical Review Letters*（オンライン版米国時間 6月25日掲載予定）

論文タイトル：“Giant Anisotropic Magnetoresistance due to Purely Orbital Rearrangement in the Quadrupolar Heavy-Fermion Superconductor $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ ”

著者：Yasuyuki Shimura, Qiu Zhang, Bin Zeng, Daniel Rhodes, Rico Schonemann, Masaki Tsujimoto, Yosuke Matsumoto, Akito Sakai, Toshiro Sakakibara, Koji Araki, Wenkai Zheng, Qiong Zhou, Luis Balicas, and Satoru Nakatsuji

DOI：10.1103/PhysRevLett.122.256601

6. 問い合わせ先

【研究内容に関すること】

広島大学 先端物質科学研究科 量子物質科学専攻
助教 志村 恭通（しむら やすゆき）

TEL：082-424-7029

E-mail：simu@hiroshima-u.ac.jp

東京大学物性研究所 量子物質研究グループ
教授 中辻 知（なかつじ さとる）

TEL：04-7136-3240

E-mail：satoru@issp.u-tokyo.ac.jp

【報道に関すること】

東京大学物性研究所 広報室

TEL：04-7136-3207

E-mail：press@issp.u-tokyo.ac.jp

7. 用語解説

(注1) 異方性磁気抵抗効果

電流方向と磁場方向を変えることによって現れる電気抵抗の変化。

今回は磁場方向と電流方向が垂直の場合と平行の場合の磁気抵抗をそれぞれ測定し、その差をそれらの平均値で割ったものを異方性磁気抵抗比として定義している。

(注2) 秩序、軌道秩序、反強磁性秩序

物性物理学において、物質を構成する原子や電子がもつ自由度（スピン、電荷、軌道など）がある規則に従い整列すること。多くの場合、温度を下げることや磁場を印加することによって起こる。例えば、軌道が整列したものを軌道秩序、スピンの隣同士別の向きを向いて交互に整列したものを反強磁性秩序などと呼ぶ。

(注3) 超伝導、高温超伝導、鉄系高温超伝導体

電気抵抗率がある温度以下でゼロになる現象を超伝導と呼ぶ。絶対零度に近い極低温で起こる物質が多いが、比較的高温で起きるものもあり、高温超伝導と呼ばれている。高温超伝導を示す物質には、液体窒素の沸点である 77 K (-196°C) 以上で起こるものもある銅酸化物高温超伝導体や、鉄系高温超伝導体がある。

(注4) 磁気抵抗効果

磁場を印加することによって起こる電気抵抗率の変化。

(注5) 水冷式マグネット

電磁石（コイル）を用いて強い磁場を発生させようとするすると、導線の抵抗によるジュール発熱が問題になる。低温実験では超伝導線で電磁石を作ることによってこの問題を解消しているが、その最大磁場は 10 テスラ程度である。さらに強い磁場を定常的に発生させるには、超伝導を用いない大型電磁石に大電力（メガワット、一般家庭の 1 日の消費電力の数百～数千世帯分）、大量の水冷が必要である。なお最強の永久磁石であるネオジム磁石が発生させることが出来る磁場は 0.5 テスラ程度である。

8. 添付資料

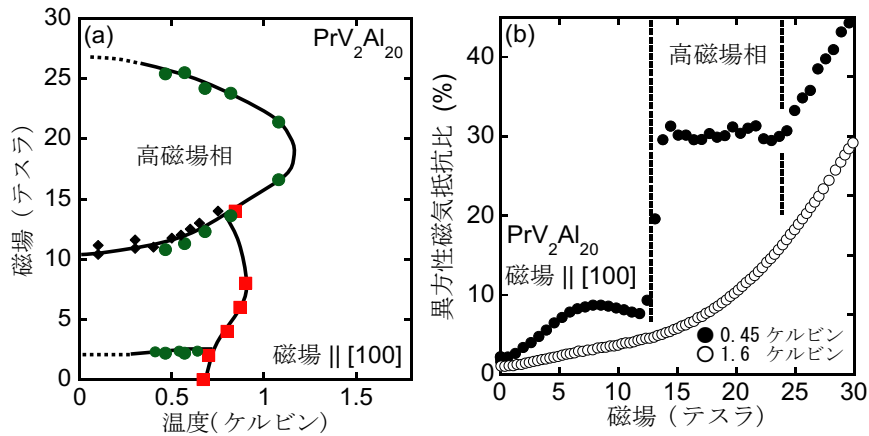


図1. $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の磁場-温度相図と異方性磁気抵抗比

(a) $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の磁場-温度相図、1.2 ケルビン以下の極低温かつ 11 テスラ以上の高磁場で高磁場相が現れる。(b) 高磁場相内 (0.45 ケルビン) と無秩序状態 (1.6 ケルビン) での異方性磁気抵抗比の磁場依存性

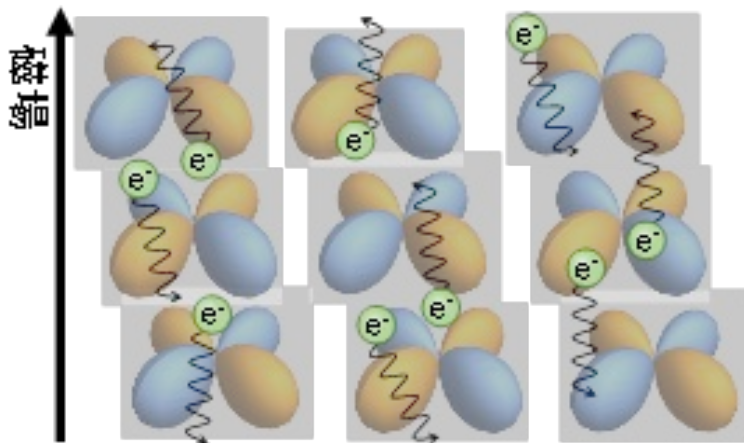


図2. 高磁場相で実現していると考えられる軌道秩序と電子状態の概念図

異方的な形状をもつ電子軌道の秩序を反映して、磁場を印加したある方向に対して、伝導を担う電子が動きやすくなり、電気が流れやすくなる。