

磁場で絶縁性を持つ磁石を金属に

～ 金属-絶縁体転移を利用した次世代メモリやセンサーへの応用に期待 ～

1. 発表者：

Tian Zhaoming (東京大学物性研究所 新物質科学研究部門 日本学術振興会外国人特別研究員)

小濱 芳允 (東京大学物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設 特任助教)

富田 崇弘 (東京大学物性研究所 新物質科学研究部門 特任研究員)

石川 洵 (東京大学大学院新領域創成科学研究科 博士課程3年)

金道 浩一 (東京大学物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設 教授)

中辻 知 (東京大学物性研究所 新物質科学研究部門 准教授)

2. 発表のポイント：

- ◆希土類元素と遷移金属元素のハイブリッド型磁性体(注1)を使えば、これまで不可能とされていた磁性絶縁体の金属-絶縁体転移が微小磁場でも制御可能であることを示した。
- ◆立方晶(注2)のこのハイブリッド型磁性体のおかげで、磁性絶縁体の金属-絶縁体転移の強い磁場角度依存性を持たせることが可能となった。
- ◆これらの指針は今後のメモリやセンサーの開発など、先端的技術の実用化に大きく貢献すると期待できる。

3. 発表概要：

通常物質は温度や磁場を変化させても、電気を通さない絶縁体から電気を通す金属へ、もしくは金属から絶縁体へと性質が大きく変化することはありません。しかしながら物質の中には、金属-絶縁体転移とよばれる相転移(注3)により、金属状態から絶縁体状態へと電気的な性質が変化するものがあります。この金属-絶縁体転移に伴う大きな抵抗変化は、メモリやセンサーの機能原理として利用できることから、金属-絶縁体転移を示す物質開発や、その物性研究が盛んに行われてきました。学術的な面からも、絶対零度で起こる量子相転移(注3)に伴う金属-絶縁体転移についての研究は、近年の金属-絶縁体転移の研究の中で一つのトピックスとして注目されています。しかしながら、絶縁体の絶縁性は通常、磁場に対して強靱で、このような量子相転移に伴う金属-絶縁体転移を外部磁場により制御することは、ほとんど不可能だと思われてきました。

今回、東京大学物性研究所(所長 瀧川仁)の Tian Zhaoming 日本学術振興会外国人特別研究員、小濱芳允特任助教、富田崇弘研究員、金道浩一教授、中辻知准教授らの研究グループは、希土類と遷移金属のハイブリッド型磁性体(注1)であるパイロクロア構造(図1)を持つ希土類酸化物 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ において、磁場で誘起される金属-絶縁体転移を観測することに成功しました。この金属-絶縁体転移は多くの特徴を持っており、例えば磁場を加える方向を変えることでも、この転移の出現を制御することができます。これはスピンの配列の磁気構造(注4)の変化に伴って金属-絶縁体転移が引き起こされることを示しています。この物質では理論的な研究から、主に磁性を担う希土類元素 Nd と電気伝導を担う遷移金属元素 Ir との間に相関を持つハイブリッド型磁性体を使うことが重要であることを明らかにしています。この新たなタイプの金属-絶縁体メカニズムの発見は、金属と絶縁体の研究におけるブレークスルーを引き起こす可能性を秘めていると同時に、電子間の相関を用いた物質科学研究の新しい方向性を提示しています。本研究の一部は、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業さきがけ(個

人型研究)の「新物質科学と元素戦略」研究領域(研究総括:細野 秀雄 東京工業大学 フロンティア研究センター/応用セラミックス研究所 教授)における研究課題「スピンのナノ立体構造制御による革新的電子機能物質の創製」(研究代表者:中辻 知)の一環として行われ、2015年11月30日の『Nature Physics』のオンライン版で公開されます。

4. 発表内容:

(背景)

次世代の科学技術の根底となる、超高密度メモリや磁気センサーなどの実現に向け、さまざまな新規化合物の探索がすすめられています。小さな磁場で物質の抵抗値を制御できる金属-絶縁体転移を示す化合物は、特に産業的な応用性が高いため、広く研究がすすめられている物質群です。

電気が流れない絶縁体状態では、物質は電気伝導を起こす電子の生成を阻害するエネルギーギャップ(注5)を持っています。金属-絶縁体転移を示す化合物においても、絶縁体状態ではこのエネルギーギャップを持ちます。このギャップが大きいと、抵抗値の高い良質な絶縁体状態を広い温度範囲で得ることができるため、大きなエネルギーギャップを示す化合物の探索が必須でした。しかしながら、大きなエネルギーギャップは磁場などの外部刺激に強く、磁場による制御は困難になるということが知られています。このため、実用上利用できる10テスラ(=10万ガウス)程度の外部磁場下では、金属-絶縁体転移を磁場制御することは非常に難しいと考えられていました。

(研究内容と成果)

今回、本研究グループは、高純度なパイロクロア化合物 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の単結晶を育成し、この化合物における電気的特性を高磁場下かつ極低温で評価しました。この化合物は、わずかな化学的組成のずれによりその金属-絶縁体転移の振る舞いが異なってくるために、純良単結晶が必要となる研究です。合成した $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ はゼロ磁場下では27 Kという高温領域に金属-絶縁体転移を示しており、この転移で開くエネルギーギャップは45 meV(注6)程度とかなり大きいことが判っています。これは、これまで知られている単結晶試料として最良のものであることを示しています。今回の実験では、電流印加方向(結晶軸[001]方向)に対して磁場を加える方向を変えながら50テスラまでの強磁場を加え、 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の抵抗値の変化を測定しています(図2)。これにより、10テスラ程度の外部磁場を結晶軸の1つの[001]方向に加えた時にエネルギーギャップが抑制され、絶縁体から金属状態になることでおよそ600倍の大きな抵抗値の変化を検出することに成功しています。通常~10テスラの外部磁場で得られるエネルギー利得は~1 meV程度ですが、この50倍ほどの大きなエネルギーギャップを持つ $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ を小さな磁場で制御できていることとなります。本研究グループは理論的な考察から、この異常に磁場に敏感な性質は、 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ に含まれている希土類元素 Nd と遷移金属元素 Ir の電子相関から来ていることを突き止めました。 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ においては近藤カップリングと呼ばれる Nd と Ir 間の相関によりエネルギーギャップが開いていますが、この近藤カップリング機構によるエネルギーギャップは Nd の磁気的な構造に敏感であり(図1(b))、Nd の磁気構造を磁場により変化させることによりこの金属絶縁体転移を制御できることがわかりました。このため、 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ は立方晶でありながらも、磁場を加える方向に依存する、金属・絶縁体転移が観測されたと考えられます。

希土類元素と遷移金属元素のハイブリッド型磁性体を使えば、これまで不可能と思われてきた金属-絶縁体転移が比較的低磁場で敏感に起こることを示したということで、今後のメモリ等

の開発に新しい開発指針を示すと同時に、立方晶という構造的に等方的な物質においても、磁場報告に敏感なセンサーの開発等に新しい指針を与えると期待されます。また、金属-絶縁体転移は、次世代の科学技術の根幹となりえるメモリ技術などへの応用が考えられるだけでなく、背後にある多彩な物性物理のために多くの研究が集中している分野です。本研究の成果を基盤として、パイロクロア化合物におけるさらなる物性研究が進行し、従来化合物では成しえなかった電子相関を利用した金属-絶縁体転移の弱磁場応答の研究が加速的に進むことが期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名： 「Nature Physics」誌（オンライン版） 2015年11月30日

論文タイトル： Field-induced quantum metal-insulator transition in the pyrochlore iridate $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$

著者：Zhaoming Tian, Yoshimitsu Kohama, Takahiro Tomita, Hiroaki Ishizuka, Timothy H. Hsieh, Jun J. Ishikawa, Koichi Kindo, Leon Balents, and Satoru Nakatsuji*

6. 問い合わせ先：

東京大学物性研究所

特任研究員 鈴木博之

〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

TEL: 04-7136-3435

Email: Suzuki.hiroyuki@issp.u-tokyo.ac.jp

東京大学物性研究所

特任助教 小濱芳允

〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

TEL: 04-7136-5337

Email: yokohama@issp.u-tokyo.ac.jp

7. 用語解説：

注1) ハイブリッド型磁性体：ハイブリッド型磁性体とは、ここでは $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ のように一つの物質中に磁性を担う希土類元素と電気伝導を担う遷移金属元素が存在する磁性体を指す。他にも幾つかの種類の磁性物質により構成されるコンポジット材料（例：有機磁性体と無機磁性体のコンポジット）などもハイブリッド磁性体などと呼ばれるが、 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ は一つの物質中に希土類元素(Nd)と遷移金属元素(Ir)が存在するため、意味合いが異なる。他にも類似の言葉にハイブリッド磁石などがあるが、これは超伝導磁石と水冷型電磁石を組み合わせた磁場発生のための電磁石である。

注2) 立方晶：物質はさまざまな結晶構造を持つが、その結晶構造の対称性は、立方晶、正方晶、三方晶、六方晶、直方晶、単斜晶、三斜晶の7つに分類されることが知られている。立方晶はこのなかで最も高い対称性をもつ結晶系であり、通常このような物質はどの方向から磁場を加えてもその性質は変わらない。

注3) 相転移、量子相転移：水と氷の間の相転移のように、物質における一般的な相転移は温度変化により引き起こされる。一方、磁場や圧力など温度以外のパラメータ変化による絶対零度での相転移は、量子相転移と呼ばれる。

注4) 磁気構造：磁性体はスピンと呼ばれる磁場に応答する成分をもつ。このスピンの構造は特に“磁気構造”と呼ばれる。例えば、全てのスピンの同じ方向に向いた磁性体は強磁性体であり、隣り合うスピンの逆方向に向いた磁性体は反強磁性体に分類される。 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の結晶構造は図1(b)に示したようなパイロクロア型結晶構造をとり、その磁気構造はその頂点を共有する正四面体の頂点にスピンが存在する反強磁性構造をとる。その磁気構造は外部磁場により変化する。

注5) エネルギーギャップ：通常の金属にはエネルギーギャップは存在せず、絶対零度まで伝導電子が存在する。このとき、電気抵抗は温度を減少させると共に下がり、これは典型的な金属的ふるまいとして知られる。一方絶縁体にはエネルギーギャップが存在し、この場合は、物質内に熱励起された伝導電子しか存在しない。このとき、温度を下げることにより伝導電子の数が少なくなり、これは抵抗値の増大を引き起こす。この温度を下げることによる抵抗値の上昇は、典型的な絶縁体の振る舞いとして知られる。

注6) eV: 電子ボルト(electron volt)の略であり、エネルギーの単位である。1 eV は 1.60×10^{-19} ジュールもしくは 3.83×10^{-20} カロリーである。

8. 添付資料：

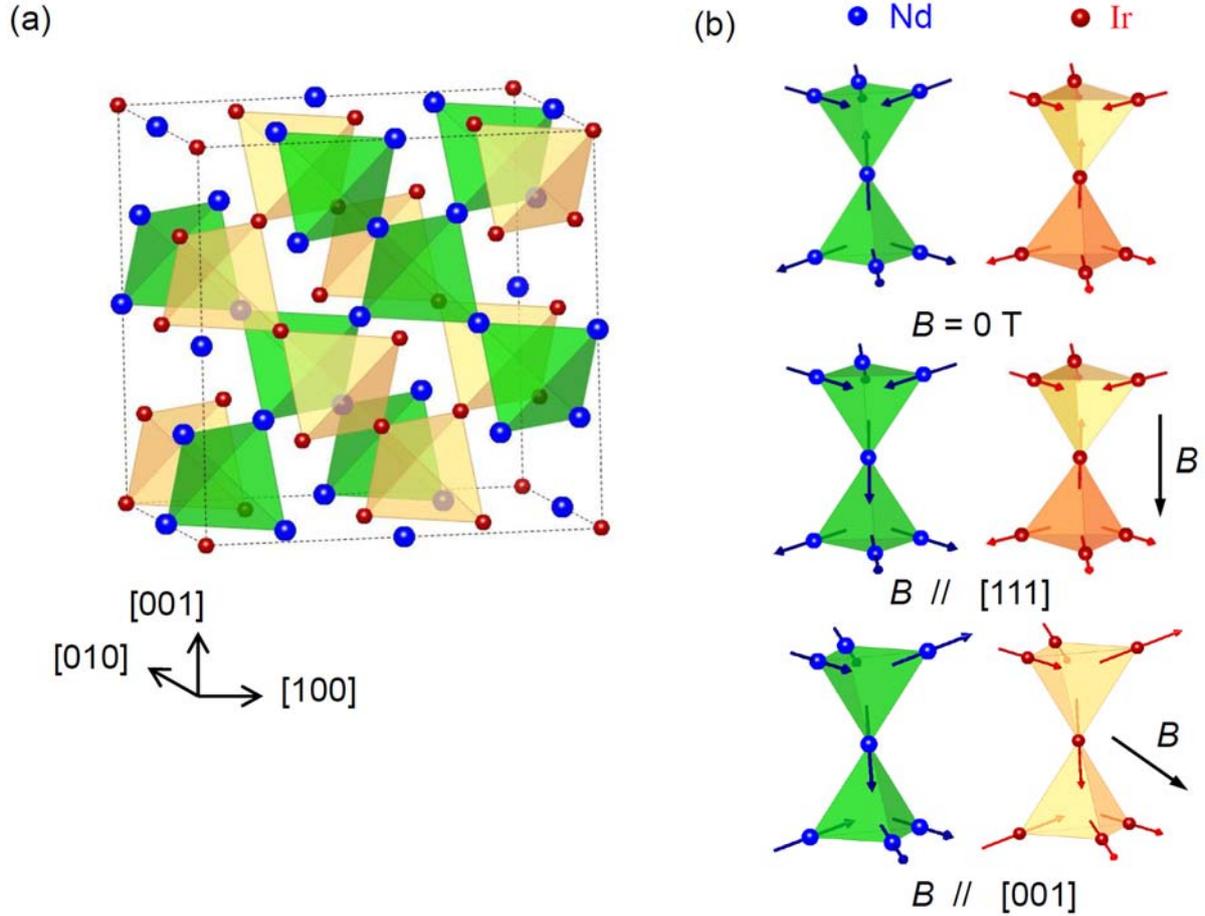


図 1: $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の結晶および磁気構造 (a) 希土類元素 Nd(ネオジウム：青)および遷移金属元素 Ir(イリジウム：赤)がそれぞれ四面体を形成し、パイロクロア格子と呼ばれる結晶構造を構成する。(b) $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ における磁場下での Nd スピン(青)と Ir スピン(赤)の磁気構造。上図：ゼロ磁場下でとりうる磁気構造、中図：磁場を $[111]$ 方向に加えたときの磁気構造、下図：磁場を $[001]$ 方向に加えたときの磁気構造。正四面体の内部(外部)に向く Nd スピンの数が、上図で 4 (もしくは 0)、中図で 3 (もしくは 1)、下図で 2 (もしくは 2) である。一方、正四面体の内部 (外部) に向く Ir スピンの数は上図で 4 (もしくは 0)、中図で 4 (もしくは 0)、下図で 2 と磁場を加える方向により、変化していることが判る。このとき、 $B = 0 \text{ T}$ では Ir はマルチドメイン構造を取り(上図)、 $B // [111]$ ではシングルドメイン構造を取っている(中図)。

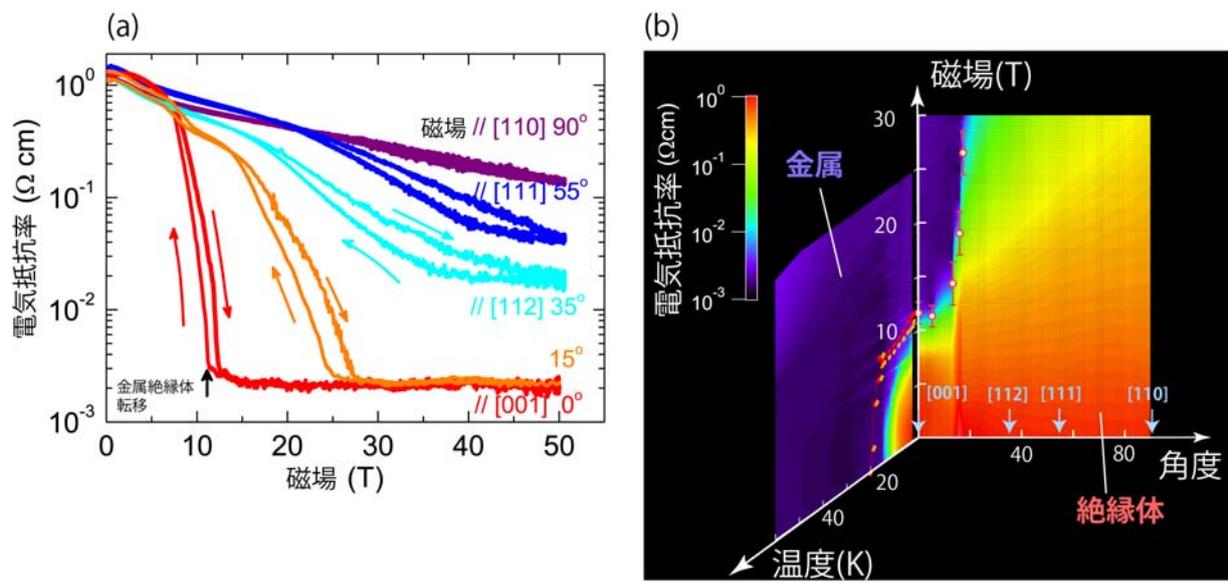


図 2: $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の磁気抵抗 (a) 2 K における磁気抵抗の角度依存性 (b) $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ における磁気抵抗の温度 (K) と磁場 (T) と角度 (θ) 依存性の 3 次元プロット。青の領域が低抵抗であり、赤の領域が高抵抗。結晶軸 $[001]$ 方向に磁場を加えた時のみ、抵抗が小さくなることが判る。