



新しいメカニズムによる負の磁気抵抗効果の発見

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

国立大学法人 京都大学

公立大学法人 首都大学東京

概要

1. 国立研究開発法人物質・材料研究機構（以下NIMS）の量子物性グループと、アメリカ強磁場研究所（フロリダ）、オランダ強磁場研究所、首都大学東京、京都大学の研究グループは、非磁性で良導電性のパラジウム-コバルト酸化物において、導電性が磁場により変化する磁気抵抗効果^[1]を測定したところ、磁場とともに抵抗が減少し導電性が大きく増加する現象（負の磁気抵抗効果^[2]）を観測しました。非磁性で、かつ豊富な伝導電子により導電性が高い物質において、負の磁気抵抗効果が観測されるのは初めてです。
2. 磁気抵抗効果は、磁性を利用したハードディスクなど様々な場面で応用されており、大きな磁気抵抗効果を示す新物質の探索を含めて精力的に研究が行われています。また、負の磁気抵抗効果は磁性材料や不純物半導体などで観測されています。一方、非磁性で導電性が良い物質（伝導電子が豊富にある金属類）では、磁場をかけると物質内の伝導電子が衝突しあって抵抗が増加する「正の磁気抵抗効果」が見られますが、このような物質群で大きな負の磁気抵抗効果が観測されたことがありませんでした。
3. 今回研究チームは、パラジウム-コバルト酸化物という非磁性の導電性物質で、負の磁気抵抗効果を観測しました。この物質は層状構造を有しており、パラジウムから構成される2次元平面が極めて良い金属的導電性を担います。また、この物質は磁気的な性質を持たないことから、負の磁気抵抗効果を示さないありふれた導電体の一つとしてこれまで認識されていました。ところが、パラジウム伝導面に垂直方向に磁場をかけると、磁場方向の導電性が著しく増加する（抵抗が減少する）負の磁気抵抗効果が観測されました。磁場中の電子状態の解析から、その発現メカニズムも明らかにしました。
4. さらにパラジウム-コバルト酸化物のみならず、姉妹物質である白金-コバルト酸化物や、他の層状導電性酸化物であるストロンチウム-ルテニウム酸化物においても同様に負の磁気抵抗効果が観測されました。今回の一連の実験結果は、非磁性で導電性が良い物質において、負の磁気抵抗効果が普遍的な現象であることを示しています。これらの結果は、基礎学術研究の観点から非常に興味深い現象であるだけでなく、今後同じ機構で発現する磁気抵抗効果を示す物質の探索や、デバイス・センサーの開発といった応用面にも新たな指針を与えるものと期待されます。
5. 本研究の一部は、科学研究費補助金新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」の支援を受けておこなわれました。
6. 本研究成果に関する原著論文は、英国科学誌 Nature Communications のオンライン版に3月29日（火）19時（日本時間）に掲載されました。

研究の背景

物質の導電性が磁場により変化する磁気抵抗効果を応用した技術は、現代社会に不可欠です。その一例として、記憶媒体としてのハードディスクが挙げられます。これは、磁性多層膜で発現する、巨大磁気抵抗効果を利用したものです。巨大な磁気抵抗効果を示す物質を探索・応用していくことは今後の情報化社会を支える上で非常に重要であり、盛んに研究がおこなわれています。

豊富な伝導電子を内在する通常金属において磁気抵抗効果は、運動する伝導電子の軌道が磁場から受ける力により強制的に変化されることにより生じます。そのため、物質内で電子が衝突する確率が増加し、結果として磁場下では電子が動きにくくなり、電気抵抗が増加する「正の磁気抵抗効果」が見られるのが一般的です。反対に、磁場により伝導電子がさらに動きやすくなる「負の磁気抵抗効果」については、これまで理論的示唆はありましたが、実際に伝導電子が多く含まれる通常金属においてこのような現象が観測されたことはありませんでした。

研究内容と成果

今回 NIMS を中心とする研究グループは、パラジウム-コバルト酸化物 (PdCoO_2) に着目して研究をおこなってきました。この酸化物は、図 1a に示すように、パラジウムのみから構成される層とコバルト-酸素から構成される層が互いに並んだ積層構造をしています。そして、パラジウムの層 (図 1b) はもともと導電性が極めて良く、酸化物の中でも有数の導電性を有することがわかっていました。今回、 PdCoO_2 の単結晶 (図 1c) を作製し、電気抵抗を測定するための端子を付け、磁場下での層間の電気抵抗を測定しました。

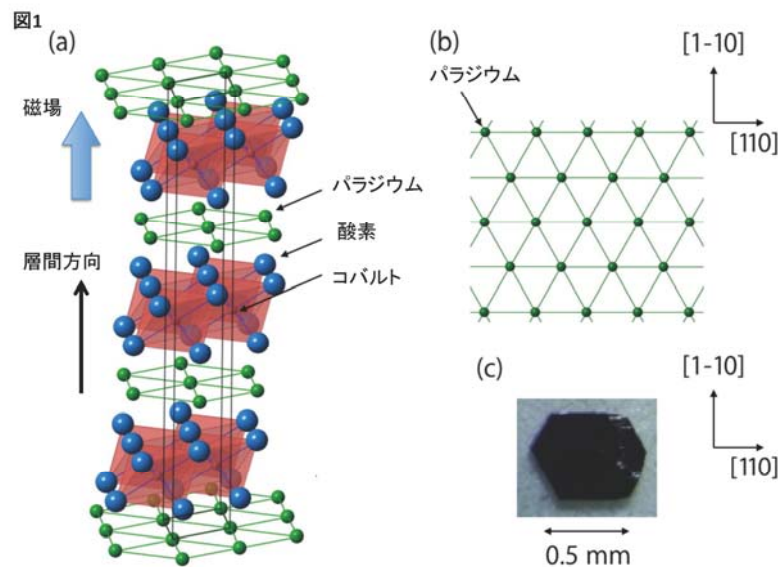


図 1: (a) パラジウム-コバルト酸化物の結晶構造。パラジウムからなる層と、コバルト-酸素の層が交互に積層した構造を有する。パラジウム層が良い導電性を担う。(b) パラジウム層を上から見た図。パラジウム同士の 2 次元ネットワークを有する。(c) 作製したパラジウム-コバルト酸化物の結晶。これに端子を付けて磁場中の電気抵抗測定をおこなった。

磁場をパラジウム面間方向にかけたときの電気抵抗の振る舞いを図 2 に示します。縦軸は、磁場がない時の電気抵抗に対しどれだけ電気抵抗が変化しているのかを示しています。すなわち、プラス方向へは磁場により抵抗が増加、マイナス方向へは抵抗が減少していることを示しています。磁場をかけていくと、電気抵抗の変化は単調にマイナスになっていきました。30 テスラ^[3]までで 70% もの減少が見られました。通常非磁性金属においては、正の磁気抵抗、すなわち磁場による電気抵抗の変化はプラスになっていきます。今回われわれが測定した負の磁気抵抗効果は、通常予想される結果とは反対であり、これは磁場により導電性が増大していくことを示しています。しかも、70% もの抵抗の減少というも大きな変化です。

このような負の磁気抵抗効果は、ハードディスクの基本となる磁性多層膜で見られます。これは、磁性

膜内にある磁石が、電気伝導を担う伝導電子と相互作用することで引き起こされます。また、不純物の入った半導体でも負の磁気抵抗効果は見られます。ところが、今回研究をおこなったパラジウム-コバルト酸化物は、非磁性物質であること、さらに極めて純度が高いことから、上の2つのメカニズムとは異なったメカニズムにより、負の磁気抵抗が観測されたと考えられます。

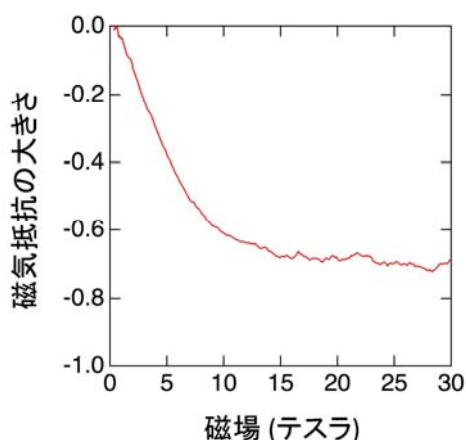


図2: パラジウム-コバルト酸化物の磁気抵抗効果。横軸は磁場の大きさ、縦軸はゼロ磁場からの抵抗の変化を示している。今回、30テスラまでの磁場により、この非磁性の酸化物が70%もの抵抗の減少、すなわち、負の磁気抵抗効果が見出された。

今回の結果の説明として、磁場により金属性が増したというモデルが考えられています(図3)。もともと磁場がなくても導電性がよい、すなわち、伝導電子が散乱される機会が極めて少ないというのが、今回の着目点です。その状態に磁場が加わると、磁場の影響を受け電子の軌道が再編成されます。その状態では、電子同士が邪魔されずにさらに動きやすくなる状況が生じる、というものです。通常ですと、再編成される前に電子が散乱されてしまうため、このような状況は生じにくいと考えられます。ところが、パラジウム-コバルト酸化物はその物質の純度が極めて高いため、磁場により金属状態が増大する現象が見られたと考えられます。このような機構に基づく金属性の増大は、理論的示唆はあったものの、これまで実験では見られていませんでした。今回の新しい機構に基づく負の磁気抵抗効果は、パラジウム-コバルト酸化物だけではなく、この姉妹物質である白金-コバルト酸化物や、これらとは異なる結晶構造を有するストロンチウム-ルテニウム酸化物においても見出されました。このことから、この負の磁気抵抗効果は、普遍的な現象であることが明らかになりました。

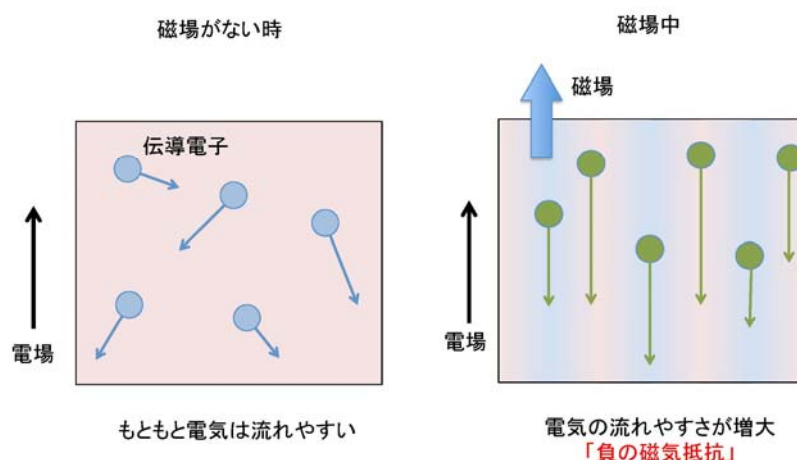


図3: 今回見出した負の磁気抵抗効果のモデル図。磁場の無い左図では、伝導電子は電場の逆方向以外にも動け

る。ところが、磁場のかかった右図の状態になると電子の軌道が再編成され、電場方向に対しより動きやすくなる。このような状態は、物質の純度が極めて良い場合にのみ見られる。今回のパラジウム-コバルト酸化物では、パラジウム伝導面に対し垂直方向に磁場をかけた。

今後の展開

今回見出された新しい機構の負の磁気抵抗効果は、一つの物質のみで現れる特殊な現象ではなく、普遍的な現象であることがわかりました。このことは、基礎学術研究において非常に興味有る現象です。また、物質開発の面でも、2次元構造を有する導電性の良い非磁性物質のさらなる開発など、磁気抵抗効果を利用するデバイス・センサーの開発に新たな指針を与えられます。新たな非磁性物質の開発によって、より低い磁場で負の磁気抵抗効果を発現できる可能性を秘めています。さらに、モデルでは、物質の構造が2次元的存在である必要はありません。そのことから、同じメカニズムで発現する大きな負の磁気抵抗を示す物質の開発など、さらなる物質開発への波及が期待できます。

掲載論文

題目：“Inter-planer coupling dependent magnetoresistivity in high-purity layered metals”

日本語訳題名：「高純度な層状導電性物質における面間カップリングに依存した磁気抵抗」

著者：N. Kikugawa, P. Goswami, A. Kiswandhi, E. S. Choi, D. Graf, R.E. Baumbach, J. S. Brooks, K. Sugii, Y. Iida, M. Nishio, S. Uji, T. Terashima, P. M. C. Rourke, N. E. Hussey, H. Takatsu, S. Yonezawa, Y. Maeno, and L. Balicas

雑誌：Nature Communications 第7巻 (2016年) (DOI: 10.1038/NCOMMS10903)

掲載日時：2016年3月29日19時（日本時間）

用語解説

[1] 磁気抵抗効果

磁場により、物質の持つ電気抵抗が変化する現象。物質のもつ磁氣的性質が伝導を担う電子との相互作用により大きな磁気抵抗効果を示す。実際、磁性多層膜を利用した巨大な応答を示す磁気抵抗効果は、ハードディスクに応用されている。また、磁気抵抗効果は伝導電子自体が磁場から受ける力により電子の軌道が曲げられることによって生じる。一般的に後者は非磁性物質において見られるが、その効果は小さい。また伝導電子を多く持つ金属では、磁場により抵抗が増加する「正の磁気抵抗効果」を示す。

[2] 負の磁気抵抗効果

磁場により、物質の電気抵抗が減少していく効果。すなわち、物質内の導電性が高くなる。この効果は、磁性多層膜など、物質の磁性と伝導電子との相互作用により生じることがわかっている。また、不純物のある半導体でも見られる。今回見出した負の磁気抵抗効果はこれらのメカニズムでは説明できない、新たな機構に基づく現象である。

[3] テスラ

磁束密度の単位として用いられるが、磁場の大きさを表すにも用いられる。例えば、地磁気の大きさはおよそ0.00005 テスラに相当する。今回用いた30 テスラという磁場は、それから見るととてつもなく大きな値であるが、このような大きな磁場下での測定をおこなうことで、今回の新しい負の磁気抵抗効果を見いだすことができた。