

透明半導体磁石における磁気電気伝導の室温制御に成功

- 透明なスピントロニクスデバイスの室温動作の可能性 -

2004年3月22日(月)報道解禁

東北大学金属材料研究所の福村知昭助手と川崎雅司教授のグループは、3年前に同グループらの共同研究チームが発見した透明な強磁性体であるコバルト原子を添加した酸化チタン(Ti, CoO_2)の性質を詳しく調べた結果、メモリーや磁気ヘッドに利用できる高性能強磁性体としての性格と電子濃度の変化で大きく(電気的な)性質を変える半導体としての性格を併せ持つ材料であることを突きとめた。このような物質は「強磁性半導体」と呼ばれ、電子の電荷と自転(スピン)の両方の性質を利用した次世代スピントロニクスデバイスを可能にすると期待されている。しかし、既存の強磁性半導体で最も精力的に研究されているマンガン原子を添加したガリウム砒素(Ga, MnAs)のキュリー温度は絶対温度160K(零下93℃)であり、実用デバイスへの応用には致命的な欠点があった。今回の確認によると、室温以上で十分な強磁性半導体の性質を保持しており、キュリー温度は高温すぎるために測定が不可能であった(130℃以上)。さらに、 Ti, CoO_2 は可視光領域で透明であり、目に見えない磁性体メモリーとして集積化が可能になるだけでなく、すでに同グループが開発に成功している透明トランジスタなどと組み合わせたスピントロニクス回路の開発に期待がかかる。この研究成果は、東京工業大学応用セラミクス研究所の鯉沼秀臣教授、東京大学理学系研究科の長谷川哲也教授、物質・材料研究機構の知京豊裕ディレクターとの共同研究の成果であり、文部科学省科学研究費補助金「学術創成研究」と物質材料研究機構「コンビナトリアル材料プロジェクト」の支援を受けて行われた。英国科学誌「ネイチャー・マテリアル」にて、印刷版での掲載に先立ち3月21日付けで同誌のホームページ上に公開される。

< 研究背景 >

強磁性を示す材料は数多いが、そのほとんどが電気を通さないか、または金属のように電気が非常に良く流れるものがほとんどで、半導

体のように電子の数や流れを制御できるような材料はあまりない。一方で、現在の半導体エレクトロニクスでは、半導体中の電子の数や流れを制御してトランジスタや発光ダイオードなどのデバイス動作を実現している。その電子は元来自転運動を行っており、電子スピンと呼ばれる微小な磁石として振る舞い、その回転の方向に応じて上向きと下向きの2種類のスピン状態をとりうる。そして、2種類のスピンの数に不均衡があると物質は強磁性体(磁石)として振る舞う。東北大学電気通信研究所の大野英男教授らはマンガン原子を添加したガリウムヒ素を用いて、スピン状態の不釣り合いな状態(スピン偏極)を半導体中に作りつけ、その強磁性の性質を半導体エレクトロニクスの技術を用いて制御することに成功している。この技術は、電子のスピン利用した新しい半導体エレクトロニクス(半導体スピントロニクス)として大きな注目を浴びているが、絶対温度約160度(-113℃)以上で強磁性の性質が消失してしまうため、室温で強磁性を示す半導体の実現が望まれていた。

以前、川崎教授らの共同研究チームは、[コンビナトリアル探索\(注1\)](#)により、コバルト原子を添加した二酸化チタンが室温以上で強磁性を示すことを発見していたが、スピントロニクスデバイスに利用できる材料であるかどうかは不明であった(Science 291, 854(2001))。強磁性半導体として重要な材料であることを実証するには、数や流れを制御できる電子のスピン状態に不均衡が生じていることを証明する必要がある。川崎教授らが注目したのは、[異常ホール効果\(注2\)](#)である。磁性を持たない通常の半導体に電子を流し磁場をかけると、電子は磁場から進行方向に対して横向きの力を受ける(ホール効果)。この現象は磁気センサーとして実用化されており広く利用されている。半導体が強磁性になるとスピン状態に不均衡が生じるため、磁場をかけなくても同様の横向きの力が発生し、その向きが強磁性のスピンの向きで左右の方向に制御できる(図1)。すなわち、電子スピンの情報が電子の流れの方向を決めるというスピントロニクスの基本原理を最も直接的に観測する手段である。

今回の研究は、コバルト原子を添加した二酸化チタンの磁気電気伝導を測定し、室温で異常ホール効果を捉えることに成功したものである。これまで低温でしか実現しなかった強磁性半導体によるスピントロニクスデバイスの動作が室温においても可能になったことを意味している。しかもこの材料は、安価であり環境にも優しい材料であることから今後の産業化に好ましい条件を揃えている。また、二酸化チタンは透明な物質であるため、目に見えないスピントロニクスが可能になり、より広範な応用分野が期待できる。

< 研究成果の内容 >

[レーザー-MBE法\(注3\)](#)を用いてコバルト原子を添加した二酸化チタンの単結晶薄膜をサファイア基板上に形成した。試料に電流を流しながら

ら、電流の向きと垂直に磁場をかけて横向きに発生する電圧を測定した。試料にコバルト原子を添加しない場合は、発生する電圧は磁場の強さに比例するが(図2下)、コバルト原子を添加したときにはゼロ磁場付近で急激な電圧の増大(異常ホール効果)が観測された(図2)。したがって、二酸化チタンという半導体を流れている電子のスピンの向きにもともと不均衡が生じていたことを証明している。また、様々な電子の濃度を变化させた試料で異常ホール効果の大きさを調べたところ、4桁の電子濃度の変化で、約7桁にもわたる異常ホール効果の系統的な変化が観測できた(図3)。半導体ではトランジスタなどで電子の濃度を大きく変化させることが容易にできるため、電圧で磁石の強さを变化するなどスピントロニクスデバイスの原理検証ができたと言える。異常ホール効果のメカニズムについては、現象論的には理解されているが、量子論に基づいた微視的な電子の振る舞いについては十分な説明が、未だに成されていない。この一つの原因が、電子濃度を広い範囲で变化させた場合の異常ホール効果の振る舞いが、実験的には全く明らかにされていなかったからである。今回初めて得られた異常ホール効果の系統的な変化を示す基礎データは、今後の理論的な取り組みに重要な突破口を与える可能性がある。

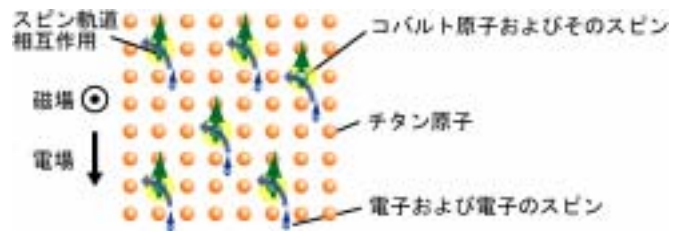


図1 異常ホール効果の模式図

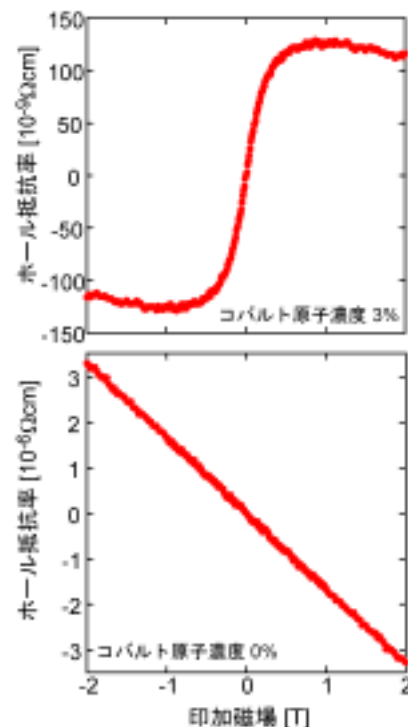


図2 室温の異常ホール効果
(ホール電圧はホール抵抗率に比例する)

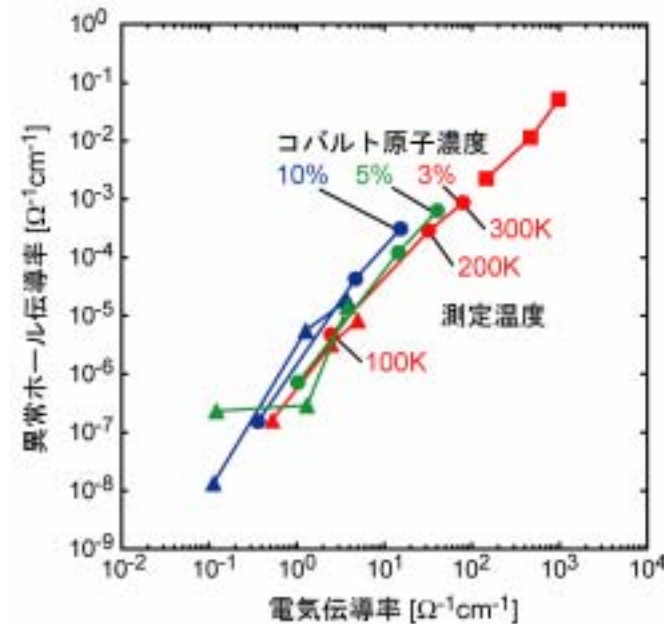


図3 異常ホール効果の電気伝導度依存性

< 今後の展開 >

今回の研究成果により、コバルト原子を添加した二酸化チタンが、室温動作の半導体スピントロニクス素子を可能にする画期的な新材料であることが実証できた。今後、ハードディスクの高密度化に対応できる高感度磁気センサーの開発や高密度磁気メモリーなどの開発に向

け、スピントネル接合の開発研究が加速するだろう。半導体のトランジスタや発光ダイオードを組み合わせた新しいスピントロニクスデバイスへの研究の進展が望まれ、また、二酸化チタンの透明性を利用した、従来の常識を覆す新しい応用分野が期待できる。

この研究テーマを実施した研究プロジェクトと研究期間は以下の通りである。

プロジェクト： 文部科学省学術創成研究「透明酸化物の平行エピタキシーとデバイス実証」(研究代表:川崎 雅司 東北大学 教授)

研究期間： 平成14年度～平成18年度

プロジェクト： 物質材料研究機構先導プロジェクト「コンビナトリアル材料科学技術」(研究代表:鯉沼 秀臣 東京工業大学教授)

研究期間： 平成11年度～平成17年度

<用語解説>

注1 コンビナトリアル探索

類似の構造や組成を持つ化合物群を網羅的に一括合成し、新機能物質を高効率で発見する手法。もともとは新薬を発見するために、溶液化学反応に組み合わせ理論を活用して類似構造の分子を一括に合成するため開発された手法であり、現在では1名の研究員が1日に10万～100万種類の新薬候補分子を合成している。東北大学の川崎雅司教授と東京工業大学の鯉沼秀臣教授は、この手法に注目し無機固体材料探索や電子デバイスの最適化に展開した。薄膜を合成するときに、様々なマスクパターンを通して基板上に原子を供給する操作をコンピュータ制御で繰り返すことにより、1枚の基板上に100～1万種類の組成や構造の異なった薄膜試料やデバイスを集積化できる。

注2 異常ホール効果

試料に電場と磁場を互いに垂直方向に印加したとき、両者ともに垂直な向きに電圧が発生し、これをホール効果とよぶ。強磁性体の場合には、その効果に加えて、試料の磁化に比例した電圧が発生する。すなわち、磁場をかけなくてもホール効果と類似の電圧が発生するので、これを異常ホール効果と呼んでいる。

注3 レーザー-MBE 法

セラミックス材料の高品質な単結晶薄膜を作製する手法。通常、セラミックス材料は蒸発しにくいいため、薄膜の合成が困難であったが、強烈な紫外レーザーパルスセラミックス材料に集光して照射すると表面が瞬間的に加熱され簡単に蒸発できる。こうして蒸発した原子を基板上に導き薄膜を合成する。他成分の元素から構成されるセラミックスでも組成のずれがほとんど無く、高エネルギー状態の原子を用いるため高品質な単結晶薄膜の合成が可能となる。

本件問い合わせ先:

川崎 雅司(かわさき まさし)

東北大学金属材料研究所 教授

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2 - 1 - 1

TEL:022-215-2085 FAX:022-215-2086

E-mail: kawasaki@imr.tohoku.ac.jp
