



平成 23年 5 月 27 日

科学技術振興機構（JST）  
Tel : 03-5214-8404（広報ポータル部）

東京大学 大学院理学系研究科  
Tel : 03-5841-7585（理学系広報室）

東北大学原子分子材料科学高等研究機構  
Tel : 022-217-5922（WPI事務室）

## 電圧で磁気を制御できる新しいトランジスターの開発に成功 —室温での電気的な磁性のスイッチングに道—

JST 課題解決型基礎研究の一環として、東京大学 大学院理学系研究科の福村 知昭 准教授らは、ありふれた光触媒材料である透明な酸化チタンを用いて室温において電圧で磁気を制御することに成功しました。

磁石の性質が電圧制御できることは、これまでガリウムマンガンヒ素などの磁性半導体などで報告されていましたが、 $-100^{\circ}\text{C}$ 以下の低温でしか動作しませんでした。福村准教授らは今回、酸化チタンに微量のコバルトを加えて、磁石の性質を持つ透明な磁性半導体を作り、わずか数ボルトの電圧で磁石の性質をオン・オフする新しいトランジスターの作製に成功しました。材料としてコバルト添加酸化チタンを用いるとともに、電圧を有効に加えるために有機電解質が形成する電気二重層を用いる工夫をしたことによって、世界で初めて低電圧による室温動作につなげました。

今回の成果は今後、窓ガラスなどにも搭載可能な室温で動作する透明な磁気メモリデバイスなどへの応用に発展するものと期待されます。

本研究は、東京大学 大学院工学系研究科附属 量子相エレクトロニクス研究センターの川崎 雅司 教授（兼 東北大学原子分子材料科学高等研究機構 連携教授）、東北大学原子分子材料科学高等研究機構、同大学金属材料研究所、東京大学 大学院工学系研究科、財団法人 ファインセラミックスセンターと共同で行われました。

本研究成果は、2011年5月27日（米国東部時間）発行の米国科学雑誌「Science」に掲載されます。

本成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。

戦略的創造研究推進事業 個人型研究（さきがけ）

研究領域：「革新的次世代デバイスを目指す材料とデバイス」  
（研究総括：佐藤 勝昭 東京農工大学 名誉教授）

研究課題名：「ワイドギャップ強磁性半導体デバイス」

研究者：福村 知昭（東京大学 大学院理学研究科 准教授）

研究期間：平成20年10月～平成23年3月

この研究領域は、CMOSに代表される既存のシリコンデバイスを超える革新的な次世代デバイスを創成することを目標として、環境やエネルギー消費に配慮しつつ高速・大容量かつ高度な情報処理・情報蓄積・情報伝達を可能とする新しい材料の開拓やプロセスの開発を図る挑戦的な研究を対象とするものです。

## <研究の背景と経緯>

現在の情報技術を支える半導体エレクトロニクスでは、半導体の中を流れる電子が主な役割を担います。電流は半導体の中にあるたくさんの電子の流れです。外から電界をかけると電子の数が増減して、電流の流れやすさも変化します。このような現象は、電子がマイナスの電荷を持つという性質に起因するものです。一方で、電子は電荷以外にスピンという属性を持っています。スピンは、非常に微量の(量子力学的な)磁気モーメントです。ハードディスクから棒磁石に至るまで強磁性<sup>注1)</sup>材料では、大量の電子のスピンの向きが一方向に揃っているため、磁力の源の磁場を発生します。このように、電子には電荷とスピンという異なる物理的属性があり、エレクトロニクスや磁気工学で電荷とスピンを使い分けてきました。ところが、1つの電子に電荷もスピンもあるので、工夫次第で両方を一緒に活用することもできます。例えば、磁場をかけてスピンの向きを揃えると電気抵抗が小さくなるという巨大磁気抵抗効果現象があり、現在ではハードディスクの磁気ビットを読み取る磁気センサーに利用されています。2007年に磁気抵抗効果を発見したフランスとドイツの研究者にノーベル物理学賞が授与されたことは記憶に新しく、そのような磁気抵抗効果現象は主に金属の強磁性体で見いだされています。金属の場合、材料の中のスピンや電子の数は一定で、スピンの向きが状況に応じて変わることになります。従って、どのような条件でも強磁性を保っているのです。

その一方で、半導体エレクトロニクス材料と同じ性質を持つもので、強磁性を示す材料があります。それは強磁性半導体と呼ばれる材料で、半導体に微量の磁性元素を添加したものです。磁性元素の添加により、電流に寄与しない磁性元素に局在した電子のスピンの向きが、電流に寄与する電子によって揃えられ強磁性が生じやすくなります。しかし、半導体はスピンの数が金属と比べて少なく、スピンとスピンの空間的に離れていて相互作用しないため、そのままでは強磁性が生じません。そこで、電流に寄与する電子の量を増やすことにより、その電子が局在スピンの間の相互作用を取り持ち、強磁性が生じるようになります。半導体にそのような電子を増やす方法はいろいろあり、現代のエレクトロニクスを支えるトランジスタはその代表例です。例えば、電界効果型トランジスタ<sup>注2)</sup>構造を利用して半導体に電圧を加えると、電子を容易に増やすことができます。その結果、電圧を加えて電子を増やすと強磁性が生じ、電圧を切ると電子が減って強磁性が消えるという、金属の強磁性にはできない現象を引き起こすことができるようになると考えられます。これはコイルに電流を流す電磁石とは異なる原理です。電磁石の場合は導線に電流を流すことで磁場が発生しますが、常にジュール熱(=エネルギー)を消費します。一方、電界で強磁性を引き起こす場合は、電界を加えても電流は流れないので基本的にジュール熱を消費しません。

このように強磁性半導体は、電圧を加えると強磁性のオン・オフを行うことができます。しかし、鉄などの強磁性金属やフェライトなどの磁性材料に比べて歴史が浅く、種類も限られています。ほとんどの強磁性半導体では、強磁性になるのは $-100^{\circ}\text{C}$ 以下の温度で、室温以上になる材料はごくまれということが、応用への可能性を阻む大きな要因でした。

## ＜研究の内容＞

本研究で用いた材料は、光触媒や透明導電体として知られる酸化チタン ( $\text{TiO}_2$ ) に少量のコバルト (Co) を添加した薄膜 (コバルト添加酸化チタン) で、図1のように見た目はほぼ透明です。この材料は、本研究グループの一部を含む研究チームがコンビナトリアル手法<sup>注3)</sup>を用いた効率的な材料探索技術を駆使して発見し、2001年に「Science」誌で報告しました。室温よりはるかに高い温度まで強磁性を示すことは分かっていましたが (図2)、電界効果で強磁性を制御できるかどうか不明でした。もし、室温で強磁性を制御できることを示せば、強磁性半導体を初めて室温で活用できることになり、応用への可能性もかなり高くなるはずです。

電界効果型トランジスタ構造で電圧を加えるのが通常の手法ですが、本研究では最近開発されたイオン液体という電解質を用いた電気二重層トランジスタ構造<sup>注4)</sup>を採用しました。パターン加工した薄膜試料に液体を垂らすだけというシンプルな構造 (図3) ながら、 $50 \times 10^6 \text{ V/cm}$  という非常に大きな電圧を容易に加えることができるからです。電氣的に強磁性の磁化の強さを測定することができるホール効果<sup>注5)</sup> という測定手法を用いて、試料に電圧を加えた効果を調べました。図4が、電圧の強度を変えるゲート電圧<sup>注6)</sup>の大きさを変えながら室温で測定した磁気ヒステリシス<sup>注7)</sup>です。ゲート電圧がゼロのときには磁気ヒステリシスはほとんどなく強磁性になっていない状態です。しかし、ゲート電圧を増やしていくと、電圧が大きくなって電子濃度が増えて、強磁性が引き起こされます。つまり、電圧を加えることにより、室温で強磁性を生じさせることに世界で初めて成功しました。

## ＜今後の展開＞

本研究は、非磁性の物質を電氣的に強磁性の物質に変化することができるという画期的な成果です。従って、強磁性体が用いられる磁気メモリに記録された情報に対して、電氣的にオン・オフスイッチングなどの操作が可能です。本研究で用いられた酸化チタンという材料は、透明で電気を流すことからディスプレイ技術として注目されている透明エレクトロニクスに有望な材料です。今後、窓ガラスなどにも搭載可能な透明な磁気メモリデバイスの実現が期待できます。

<参考図>

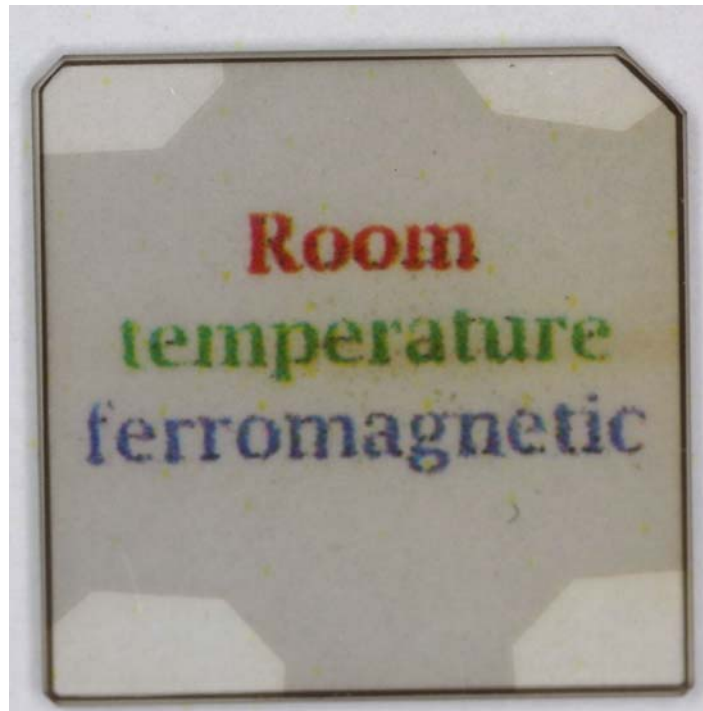


図1 コバルト添加酸化チタン薄膜試料

透明な10ミリ角で0.5mm厚のセラミックス基板上に薄膜が積層されています。

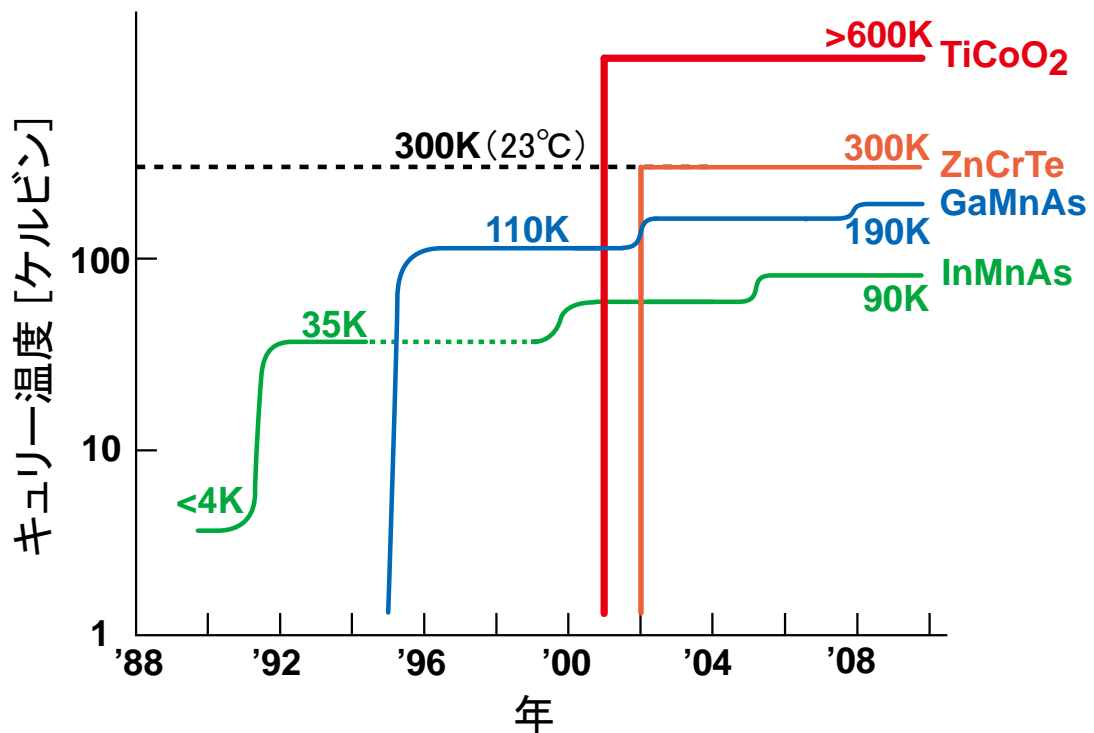


図2 さまざまな強磁性半導体の強磁性転移温度（キュリー温度）の推移

ほとんどの強磁性半導体はキュリー温度が室温に達しないため、室温で強磁性を示すことはできません。コバルト添加酸化チタン（ $TiCoO_2$ ）は最高で $300^{\circ}C$ 以上のキュリー温度を示します。

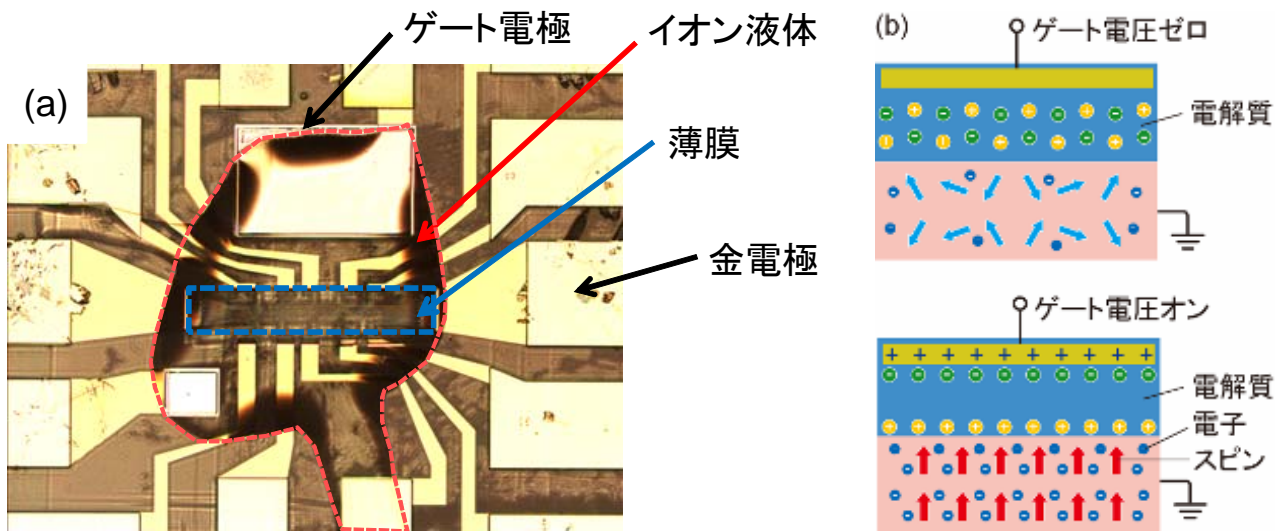


図3 電気二重層トランジスタ構造

- a : 本研究で用いた電気二重層トランジスタ構造の試料の写真。加工した薄膜に電気測定をするための金電極が蒸着されています。水滴のように見えるものがイオン液体と呼ばれる液体の有機電解質で、コバルト添加酸化チタン薄膜とゲート電圧印加用電極に接しています。
- b : 電気二重層トランジスタの動作原理の模式図。ゲート電圧がない状態ではコバルト添加酸化チタンの中の電子の数は少なく、スピンの方向がランダムな方向を向いている非磁性の状態です。ゲート電圧を印加すると、イオン液体の中でプラスの電荷を持つ陽イオンが多数配列し、それに引かれてマイナスの電荷を持つ伝導キャリアがコバルト添加酸化チタンの中に誘起され、空間的に離れたコバルトのスピンの間の相互作用を媒介して、強磁性が生じます。

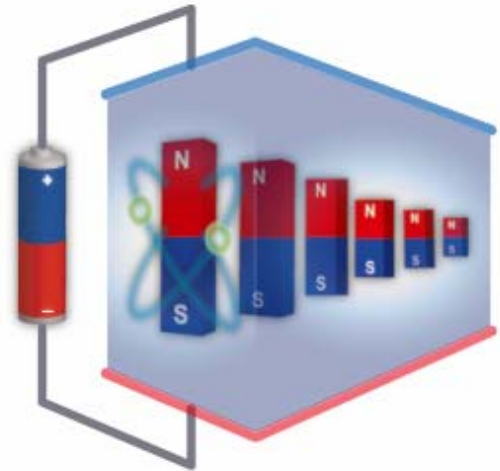
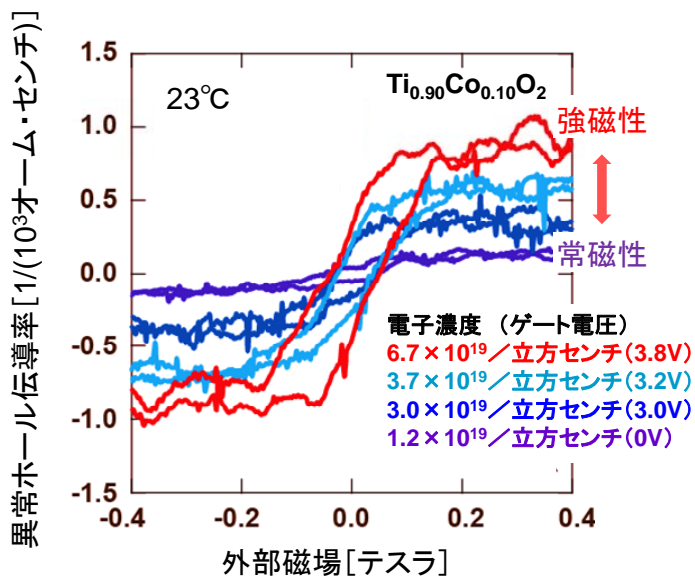


図4 コバルト添加酸化チタンの磁気ヒステリシス

- 左：異なるゲート電圧におけるコバルト添加酸化チタンのホール効果で測定した磁気ヒステリシス。測定温度は室温です。ゲート電圧が大きくなると、コバルト添加酸化チタンの中の電子の数が増え、磁気ヒステリシスが大きくなるのが分かります。磁気ヒステリシスの増加は磁化の増大、すなわち、強磁性が増強していることを示しています。
- 右：ゲート電圧を大きくすると磁化が大きくなる現象を模式的に表した図です。棒磁石は磁化を、緑球は電界で誘起された電子を示しています。

## <用語解説>

### 注1) 強磁性

外部から磁場をかけなくても、材料中のスピンの全てが一方向に揃っている状態。永久磁石や磁気メモリ用材料として応用されている。強磁性が生じる起源は材料によってさまざまであるが、本研究では材料中の電子の数を増やすことによって強磁性が生じている。

### 注2) 電界効果型トランジスター

一般に、ゲート電極／薄い絶縁体／半導体という積層構造を持つ。ゲート電極と半導体の間に電圧をかけると、間に絶縁体があるので電流は流れず、大きな電界がかかる。例えば、ゲート電極側に正の電圧をかけると半導体側にはマイナスの電荷が蓄積するが、その結果、半導体の電気伝導が大きくなる。このようなトランジスターは、半導体の電気伝導を制御するトランジスターとして広く用いられている。

### 注3) コンビナトリアル手法

試料を1個ずつ合成して物性を評価するという従来の実験手法ではなく、多種類の試料を同時に合成して、それらの試料の物性をまとめて評価する手法。材料探索速度を著しく向上させることができる。

### 注4) 電気二重層トランジスター構造

電気化学の用語で、電解質と電極の界面にできるイオンの集まった領域を指す。液体電解質をゲート電極と薄膜試料で挟んで薄膜試料に負電圧をかけると、電解質の中の陽イオンは薄膜試料の方へ移動し、電極の直上に密集した状態になる。一方、薄膜試料の中では陽イオンの量に対応した数のマイナスの電荷（すなわち電子）が集まる。この陽イオンの層を電気二重層と呼び、大きな電荷量が蓄積される。この手法は、電気二重層キャパシタやスーパーキャパシタと呼ばれるコンデンサーとして用いられている。

### 注5) ホール効果

試料に電流を流すと、電流と同じ向きに電圧が生じる（オームの法則）。一方、試料に電流を流して電流の向きと垂直に磁場をかけると、電流および磁場と垂直な方向に電圧が生じる。この現象をホール効果と言ひ、半導体の電気特性や試料の磁化の大きさを調べる手法として欠かせないものである。今回のように強磁性体に電流を流すと、異常ホール効果と呼ばれる現象が生じるが、強磁性体試料の磁化の強さに比例する電圧がホール効果として現れるためである。

### 注6) ゲート電圧

試料とゲート電極の間に印加する電圧のこと（図3（b）参照）。ゲート電圧の印加により、試料に電界が加わり、半導体試料では電子の数が電界の符号に応じて増減する。

### 注7) 磁気ヒステリシス

強磁性体試料に外部から磁場をかけ、その大きさを変えながら試料の磁化を測定すると、十分強い磁場では磁化が一定の値になり磁場がゼロの時でも有限の磁化を示します。この磁化と磁場の関係を図示すると、ループを持った曲線（磁気ヒステリシス）になります。磁気ヒステリシスは、磁石の磁力の強弱といった強磁性体の性質を表しています。

<論文名>

“Electrically Induced Ferromagnetism at Room Temperature in Cobalt-doped Titanium Dioxide”

(室温で電氣的に誘起したコバルト添加した酸化チタンの強磁性)

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

福村 知昭 (フクムラ トモテル)

東京大学 大学院理学系研究科 化学専攻 准教授

〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

Tel : 03-5841-7595 Fax : 03-5841-4603

E-mail : fukumura@chem.s.u-tokyo.ac.jp

<JSTの事業に関すること>

原口 亮治 (ハラグチ リョウジ)

科学技術振興機構 イノベーション推進本部 研究推進部

〒102-0075 東京都千代田区三番町5番地 三番町ビル

Tel : 03-3512-3525 Fax : 03-3222-2067

E-mail : presto@jst.go.jp