



平成 27 年 9 月 18 日
国立大学法人東京大学
一般財団法人電力中央研究所

パラジウムの磁力を電圧で制御できることが明らかに ～非磁性体の物質を電氣的に磁石にする手法に道～

1. 発表者：

大日方 絢（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 修士課程学生）
日比野 有岐（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 修士課程学生）
早川 大智（研究当時：東京大学工学部物理工学科 学部学生）
小山 知弘（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 助教）
三輪 一元（電力中央研究所 材料科学研究所 特別契約研究員）
小野 新平（電力中央研究所 材料科学研究所 主任研究員）
千葉 大地（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 准教授）

2. 発表のポイント：

◆自然界に存在する状態では磁石の性質をもたない非磁性体の金属として知られるパラジウムに磁力をもたせた構造を作製しました。

◆パラジウムの同構造に正負の電圧を加えることで、その磁力の大きさをコントロールできることを示しました。

◆非磁性体の物質を電氣的に磁石化できることで、磁気デバイスで活用できる材料拡大の可能性に道を拓きました。

3. 発表概要：

今回、東京大学大学院工学系研究科の大日方 絢 大学院生、同研究科 物理工学専攻の千葉 大地 准教授、電力中央研究所・材料科学研究所の小野 新平 主任研究員らの研究チームは、自然界に存在する状態では非磁性体の金属として知られる「パラジウム（元素記号：Pd）」に磁力を持たせ、その磁力の大きさを電圧を加えることによって制御できることを明らかにしました。パラジウムの薄膜にコバルト（元素記号：Co）の薄膜を隣接させることでパラジウム自身に磁力をもたせた構造を作製し、その磁力の大きさを正負の電圧でコントロールできることを示しました。

一度作った材料の性質を、電氣的にチューニングできれば、必要なときに、必要な特性を簡便・自在に得られるようになるばかりでなく、磁気デバイスに使われる材料の幅がさらに広がります。磁性を帯びる物質である磁性体を扱う分野では、一方の電極が磁石の薄膜であるキャパシタ構造（コンデンサ）に電圧を加え、磁石の薄膜中に電荷（電子）を充放電することで、その磁力のチューニングやN極とS極の向きを反転させる試みが盛んにされてきました。従来の熱・磁界・電流 で磁力を制御する手法よりも圧倒的な低消費電力で磁石の特性を制御できる期待があるからです。

これまで、磁性体の物質に電圧を加えて磁力を消すことが可能であることは報告されてきましたが、非磁性体の物質に電圧を加えて磁石化したり、非磁性体の状態に戻したりすることには成功していませんでした。

今回の研究成果は、自然界では磁石として存在しない非磁性体の物質を、電氣的に磁石化できる可能性に道を拓くものです。

本成果は、2015年9月22日（英国時間）に、英国科学雑誌「サイエンティフィック・リポーツ（Scientific Reports）」のオンライン版に掲載されます。

なお、本研究は科研費基盤研究(S)の助成を受けて実施されました。

4. 発表内容：

[研究の背景]

近年、一方の電極が磁石の薄膜であるコンデンサの構造を用いて、電氣的に磁力や磁極の向きやすい方向などを制御する研究が盛んに行われています。キャパシタ構造に電圧を加えると、磁石の薄膜中の電荷が充放電されます。つまり、電子の濃度が変わります。これが磁石の特性変化の要因であると考えられています。これまで、本研究チームの一員により、磁石であるコバルトの磁力を、この方法によって消したり元に戻したりすることができることを明らかにしていました [D. Chiba *et al.*, *Nature Materials* **10**, 853 (2011).]。今回、本研究チームは、「自然界では磁石として存在しない金属に電圧を加えることによって、逆に磁力をもたせることもできるのではないだろうか」という仮説を立て、研究を進めてきました。

[研究内容]

本研究チームは、非磁性金属としてパラジウムに注目しました。これは、パラジウムが非磁性体の中でも磁石に近い性質を持っていることが知られているためです。また、本研究チームは、パラジウムがもつ特徴の一つである強磁性近接効果を利用しました。これは、コバルトなどの強磁性金属とパラジウムを隣接させることで、パラジウムが磁力をもつ効果です。そこで、このようにしてパラジウムにあらかじめ磁力を持たせた試料を用いて、パラジウムの磁力を電圧で制御できるかを調べました。

具体的には、7原子層程度（1.7 ナノメートル）のパラジウム超薄膜を、平坦なシリコン基板上にあらかじめ製膜した1原子層程度（もしくはそれ以下）のコバルト超薄膜上に製膜し、パラジウムに磁力を持たせました。また、電圧を加えてパラジウム中の電子の濃度を大きく制御するため、イオン液体（注1）を用いた電気二重層キャパシタ（注2）を作製しました（構造の模式図は図1参照）。このようにして作製したキャパシタ構造に±2Vの電圧を加え、試料全体の磁力の大きさを測定しました。一般に、キャパシタ構造に電圧を加えると、電極金属がもつ自らの遮蔽効果のために、電極表面の1原子層程度にのみ電荷が蓄積することが知られています。したがって本研究チームが用いたキャパシタ構造では、電圧で最表面のパラジウムのみの電荷が変化することになります。

その結果、磁力の大きさが電圧によって変化することが明確に観測されました（図2）。具体的には、電圧による磁力の強さの変化量は低い温度ほど大きく、正の電圧の印加を加えてパラジウム表面の電子濃度を増加させたとき(+2V)のほうが、電子濃度が減少したとき(-2V)に比べて磁力が強くなっていることがわかりました。今回得られた結果は、パラジウムの磁力の大きさを、正負の電圧によってコントロールできることを意味しています。

[社会的意義・今後の予定]

本研究では、電圧を加えていない段階でパラジウムは磁力を備えており、磁石の状態であるということができます。しかし、本研究によって、パラジウムのようなもともとは磁石として存在しない非磁性金属においても、電圧でその磁気的性質がコントロールできることがわかりました。つまり、非磁性金属を電氣的に磁石にできる可能性を見出したといえます。元々、磁性を帯びていない材料に電圧を加えて磁石にしたり、また元に戻したりすることが容易に可能になれば、現在では磁気工学の分野で用いられていない物質も活用できることになるため、磁気デバイスに使われる材料の幅がさらに広がると期待されます。今後研究チームは、今回得られた知見をもとに、非磁性体物質の電氣的手法による磁石化への道を切り拓いていく予定です。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Scientific Reports」（オンライン版 9月22日掲載）

論文タイトル：Electric-field control of magnetic moment in Pd

著者：大日方絢、日比野有岐、早川大智、小山知弘、三輪一元、小野新平、千葉大地*

DOI 番号：doi:10.1038/srep140303

アブストラクト URL：<http://www.nature.com/articles/srep140303>

6. **注意事項**：日本時間 9月22日（火）午前8時（英国時間：22日（火）午前0時）以前の公表は禁じられています。

7. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻
准教授 千葉大地

研究室電話番号 03-5841-1165 or 1166

メールアドレス dchiba@ap.t.u-tokyo.ac.jp

8. 用語解説：

注1 イオン液体：室温で液体状態の陽イオンと陰イオンから構成される有機塩。

注2 電氣二重層キャパシタ：金属電極/イオン液体/金属電極から構成されるキャパシタ構造に電圧を加えると、イオン液体中の陽（陰）イオンが陰（陽）極の界面に引きつけられます。電極の表面には電荷が引きつけられ、同電荷層とイオンの層が対になった電氣二重層が形成されます。一般に電氣二重層キャパシタは、固体の誘電体絶縁膜を用いたキャパシタより容量が大きいことが知られています。

9. 添付資料 :

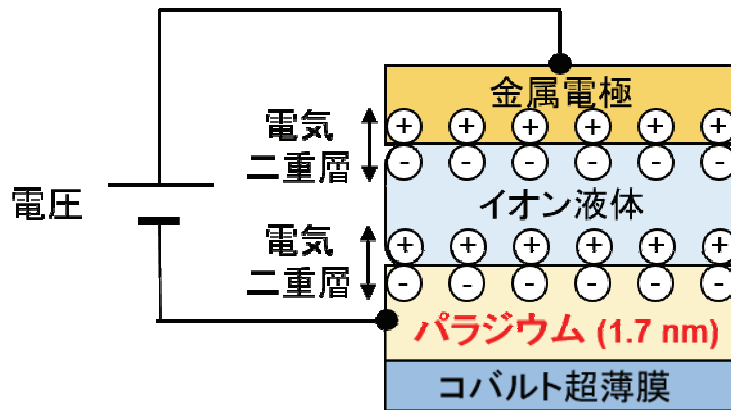


図1: 実験に用いた素子の模式図

今回の実験では、パラジウム表面の電子の濃度を、図のような素子に電圧を加えることによって制御している。磁石であるコバルトの超薄膜を下地とすることで、パラジウム薄膜にあらかじめ磁力をもたせている。図の素子に電圧を加えると、陰極であるパラジウム表面にイオン液体の陽イオンが、陽極である上部金属電極表面に陰イオンが引き寄せられる。このイオンの移動により、上下の金属においても異なる符号の電荷の蓄積が起こる。その結果、イオンと電極の表面に蓄積された電荷とで電気二重層を形成する。

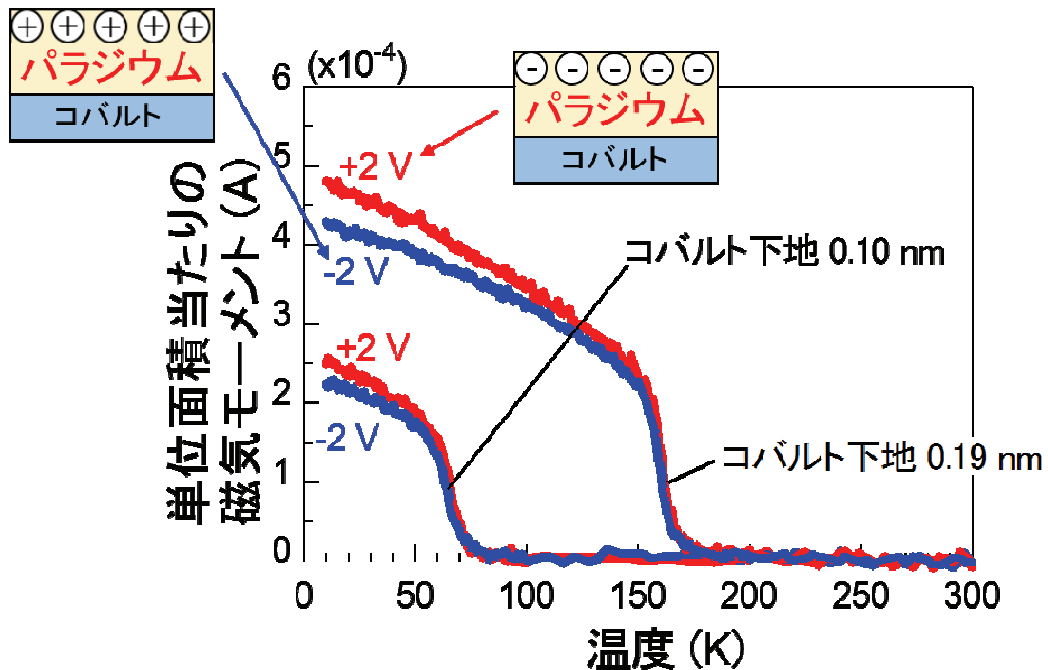


図2: 正負の電圧を加えた際の、試料の単位面積当たりの磁気モーメントの温度依存性

単位面積当たりの磁気モーメントは、磁力の大きさを表す。正の電圧を加え、パラジウム表面の電子濃度を増加させたとき (+2 V) は、電子濃度を減少させたとき (-2 V) よりも磁力が強くなっていることがわかる。磁力の大きさの差は低い温度ほど顕著であった。この傾向は、下地のコバルトの厚さに依らなかった。