令和 8 (2026) 年 11 月 17 日

茨城大学
立教大学
東北大学
東京理科大学
国立研究開発法人産業技術総合研究所
理化学研究所
北海道大学
横浜国立大学

【プレスリリース】

溶液を塗って作れる「分子の磁石」を開発

― 溶液プロセスで作れる傾角反強磁性結晶性薄膜の創製 ―

茨城大学基礎自然科学野の横森創助教（研究当時：東京大学物性研究所・立教大学理学部）は、東北大学多元物質科学研究所の出倉駿准教授（研究当時：東京大学物性研究所）、東京理科大学研究推進機構総合研究院の森初果教授（研究当時：東京大学物性研究所）、東京大学大学院新領域創成科学研究科の今城周作准教授（研究当時：東京大学物性研究所）、産業技術総合研究所の東野寿樹主任研究員らとともに、有機溶媒に溶かして塗布することで結晶性薄膜を形成できる金属錯体結晶 Au(4OEt) を開発しました。

分子性磁性体は、分子の形や並び方を設計することで磁気的な性質を生み出せる材料です。しかし、磁気秩序を示す分子結晶には有機溶媒に溶けにくいものが多く、溶液を使って結晶性薄膜を作ることが困難であるという課題がありました。本研究では、分子の構造を工夫することで、一種類の分子だけからなる結晶において、2 次元的な分子配列と低温での磁気秩序、さらに溶液からの薄膜形成の３つを同時に成立させることに成功しました。開発した Au(4OEt) は、約 8 K（約−265℃）以下の低温で「傾角反強磁性」と呼ばれる、弱い磁石のような性質を伴う磁気秩序を示します。さらに、溶液から作製した結晶性薄膜でも、この磁気秩序に特徴的な磁気応答が確認されました。加えて、この薄膜を用いたトランジスタでは、電子と正孔の両方を電気伝導に利用できる「アンバイポーラ（両極性）」動作も実証しました。本成果は、磁気秩序を持つ分子性材料を溶液から結晶性薄膜に加工できることを示したものであり、今後、磁性と電気伝導を組み合わせた分子エレクトロニクス・スピントロニクス材料の開発への展開が期待されます。

この成果は、2026 年 11 月 13 日付で国際学術誌「Angewandte Chemie International Edition」に掲載されました。

■背景

物質の「磁石としての性質」は、電子が持つ「スピン」という性質と深く関わっています。スピンは小さな磁石にたとえられ、その向き（＝矢印の方向）が物質の中でどのように並ぶかによって、さまざまな磁気的性質が現れます（図 1）。一般的な磁石である「強磁性体」ではスピンが同じ方向にそろうのに対し、隣り合うスピンが反対向きに並び互いの磁化を打ち消し合う「反強磁性体」という性質のものがあります。反強磁性体の中には、スピンが完全には反平行にならず、わずかに傾くことで弱い磁化を生じる「傾角反強磁性」を示すものもあります。こうした反強磁性体は、電子の電荷だけでなくスピンも利用する「スピントロニクス」の研究で注目されています。

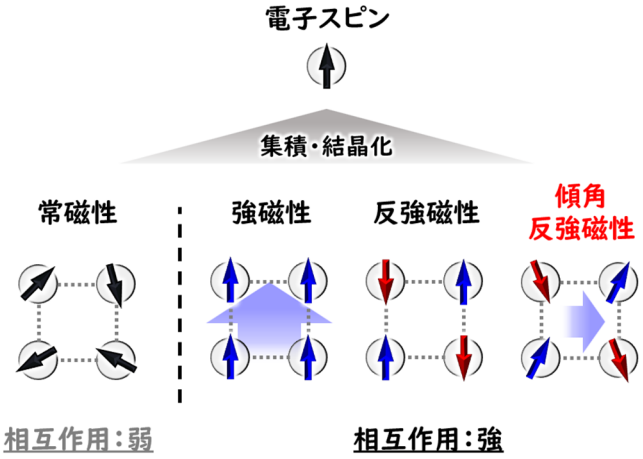


図 1. 固体中での電子スピンの並び方と磁性の種類
（太青矢印は正味の磁化方向を示す）

このような磁気的性質を示す材料は、金属や無機化合物だけではありません。分子が集まった結晶でも、電子スピンが規則正しく並ぶことで磁気秩序が形成されることがあります。このような「分子性磁性体」は、分子を構成する元素や置換基を変えることで、結晶中の分子配列や電子の状態、磁気的性質を化学的に制御できることが特徴です。一方、分子性材料を電子デバイスに応用するためには、基板上に薄膜を形成する技術が重要です。例えば、分子性材料を用いた電子デバイスの研究が進んでいる有機半導体の分野では、材料を溶媒に溶かして基板に塗布する「溶液プロセス」による薄膜形成が広く研究されています。しかし、磁気秩序を示す単一成分の分子性導体・磁性体には有機溶媒に溶けにくいものが多く、同様の方法で薄膜を作製することは困難でした。さらに、磁気秩序は結晶中の分子の並び方と密接に関係するため、磁気秩序を支える結晶構造を維持しながら、溶液プロセスによって薄膜を形成することが重要な課題となっていました。

■研究手法・成果

1. 分子を少し変えることで、結晶の並び方と溶解性を設計

私たちは、金（Au）原子と硫黄（S）を含む有機分子からなる「金ジチオレン錯体」に着目しました。この金属錯体は、対になっていない電子を持つ「中性ラジカル」として存在することができ、その電子のスピンを利用して磁気的な性質を生み出せる可能性があります。これまでの研究では、メトキシ基と呼ばれる置換基を持つ金錯体結晶 **Au(4OMe)**が、中性ラジカルからなる結晶を形成することを明らかにしていました（図 2 右上）。しかし、**Au(4OMe)**は有機溶媒に溶けに

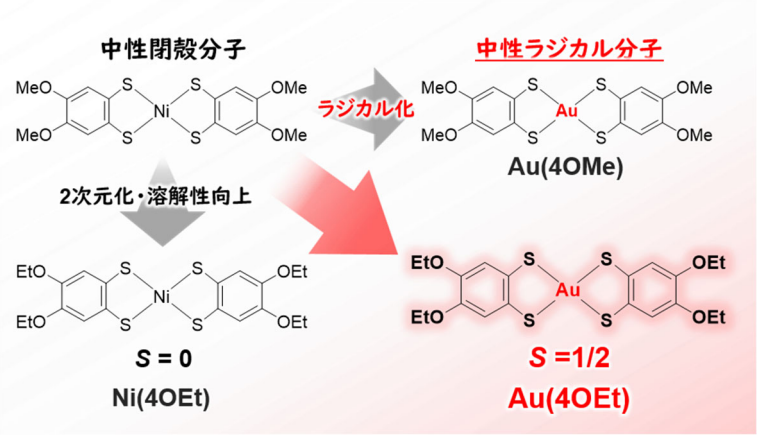


図 2. Au(4OEt)の類縁体と分子・物質設計指針

くく、結晶中の分子が一次元的に並ぶため、冷却するとスピンが対を作り、非磁性状態になるという特徴がありました。一方、エトキシ基を持つニッケル錯体結晶 **Ni(4OEt)**では、有機溶媒への溶解性と 2 次元的な分子配列が両立することがわかっていました（図 2 左下）。そこで本研究では、これらの先行研究を手がかりに、金ジチオレン錯体に 4 つのエトキシ基を導入した **Au(4OEt)**分子を新たに合成しました（図 2 右下）。得られた **Au(4OEt)**は、一種類の中性ラジカル分子だけからなる結晶を形成するとともに、予想どおり有機溶媒への溶解性を示しました。これにより、溶液から結晶を育成できるだけでなく、従来の分子性導体・磁性体と比較して、一度に多くの結晶試料を合成できるようになりました。

2. 分子が 2 次元的に並び、スピン同士が相互作用する結晶を形成

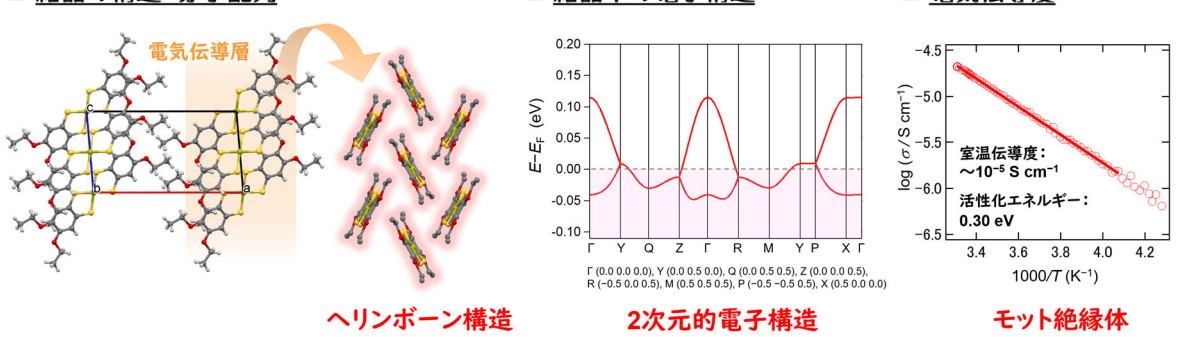


図 3. Au(4OEt)の結晶構造・分子配列、電子構造（バンド構造）および電気伝導特性

単結晶 X 線構造解析の結果、分子が互い違いに傾いて並ぶ「ヘリンボーン構造」が形成され、結晶中に 2 次元的な分子のネットワークが広がっていることが確認されました。さらに、電子状態の理論計算から、隣接する分子間で電子が移動するための相互作用も 2 次元的に広がり、特に分子の列と列の間で強く働くことが示されました。一方、結晶の電気伝導性を測定すると、温度を下げるにつれて電気が流れにくくなる半導体的な振る舞いが観測されました。この性質は、電子同士の反発によって電子が動きにくくなる「モット絶縁体」と呼ばれる状態に整合しています。この状態では電子が分子上に局在する傾向が強く、それぞれの電子が持つスピンの間に磁気的な相互作用が働きます。分子性磁性体では、単にスピンを持つ分子を集めるだけでは磁気秩序が形成されるとは限らず、分子同士の相互作用の強さや広がり方が重要です。**Au(4OEt)**では、こうした 2 次元的な分子配列と相互作用が、低温での磁気秩序の形成に重要な役割を果たしていると考えられます。

3. 約 8 K 以下で「磁石化」を確認

Au(4OEt)の磁気特性を調べるため、多結晶試料の磁化率・磁化測定に加え、固体核磁気共鳴（NMR）や単結晶試料の磁気トルク測定を行いました。磁化率測定では、温度を下げると 12 K 付近から磁気的な応答が大きく変化し、さらに約 8 K 以下では、磁場を強めるときと弱めるときで磁化の値が異なる「磁気ヒステリシス」が観測されました（図 4 左）。これは、物質に弱い磁化が残り、磁石のような性質が現れていることを示す特徴的な応答です。NMR 測定でも 11 K 付近に磁気的な変化が現れ、磁気トルク測定では、弱い磁場（0.1 T）下で 8.2 K 付近から明瞭な変化が観測されました。これらの結果から、弱い磁場の下では約 8 K（約−265 ℃）以下で、分子中の電子スピンが規則的に配列する長距離磁気秩序が形成されることが明らかになりました。さらに、磁化測定や磁気トルク測定の結果から、この磁気秩序は、電子のスピンが主として反対向きに並びながら、わずかに傾くことで弱い磁化を生じる「傾角反強磁性」であり、伝導面に対しておおよそ垂直方向（*a**軸方向）に自発磁化を示すことが明らかとなりました。この傾角反強磁性の発現には、重原子である金に由来する比較的強いスピン軌道相互作用や、結晶中の分子の並び方が関係していると考えられます。

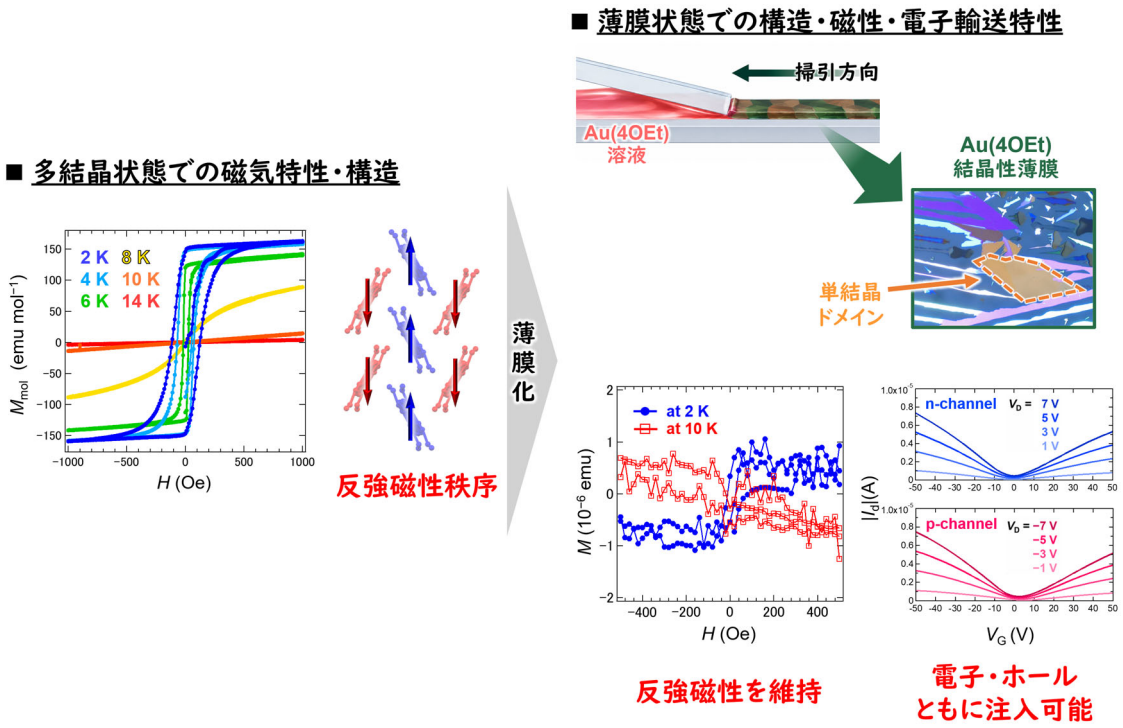


図 4. Au(4OEt)多結晶の磁気特性（磁化の磁場依存性）と想定されるスピン構造（左）
Au(4OEt)結晶性薄膜の作製法および磁気特性（磁化の磁場依存性）と電界効果トランジスタ特性（右）

4. 溶液を塗って作った結晶性薄膜でも「磁石化」を観測

Au(4OEt)を有機溶媒（*o*-ジクロロベンゼン）に溶かし、ブレードコート法によってシリコン基板上に塗り広げることで、結晶性薄膜を作製しました。薄膜の X 線回折測定では、単結晶の結晶構造と整合する回折ピークが観測され、薄膜中でも分子が規則正しく並んだ結晶構造が保たれていることが示されました。続いて、この薄膜の磁化測定を行ったところ、2 K（約−271 ℃）では、小さいながらも磁気ヒステリシスが観測されましたが、10 K では同様の応答は現れませんでした。この結果は、結晶試料で確認された傾角反強磁性に由来する磁気的な性質が、溶液から作製した結晶性薄膜でも維持されていることを示しています。さらに、この結晶性薄膜を用いて電界効果トランジスタ（FET）を作製したところ、負の電荷を持つ電子だけでなく、正の電荷を持つ「ホール（正孔）」によっても電流を流せる「アンバイポーラ（両極性）特性」が確認されました。本研究は、磁気秩序を持つ分子性材料を溶液から結晶性薄膜として作製し、薄膜化後もその磁気的な性質が維持されることを示した点で、分子性磁性材料のデバイス応用に向けた重要な成果です。

■今後の展望

本成果により、一種類の中性ラジカル分子からなる結晶について、低温での反強磁性秩序と溶液を用いた結晶性薄膜の作製を両立できることが示されました。磁気的な性質を示す分子性材料を、単結晶として調べる段階から、溶液プロセスで基板上に形成した薄膜として調べられる段階へ進めたことが、本研究の意義です。**Au(4OEt)**では、分子に取り付けた置換基が溶解性と結晶中の配列の両方に関わっています。今後、置換基の種類や結晶中での分子の並び方をさらに工夫することで、磁気秩序を維持した多様な結晶性薄膜の作製や、より高い温度で磁気秩序を示す材料の開発につながることが期待されます。また、結晶中の電子スピンの詳しい配列と対称性の関係を明らかにし、反強磁性状態に特有の電子状態や電子輸送現象を探索することも重要な課題です。さらに、今回確認したトランジスタ特性を利用して薄膜に電荷を注入することで、磁気秩序と電気伝導の関係や、磁気構造に由来する新たな電気的応答を調べる研究も考えられます。こうした取り組みは、分子の化学的な設計を生かした新しい磁性体薄膜や、磁気と電気の機能を結び付ける分子性スピントロニクス材料の開拓につながると期待されます。

■論文情報

タイトル：A Solution-Processable Single-Component Molecular Antiferromagnet
著者：So Yokomori, Shun Dekura, Shusaku Imajo, Toshiki Higashino, Masatoshi Ito, Tomoko Fujino, Takuya Kobayashi, Shigeki Fujiyama, Nobuyuki Matsushita, Hatsumi Mori
雑誌：Angewandte Chemie International Edition
DOI：10.1002/anie.2142967

本研究の遂行にあたっては、理化学研究所の藤山茂樹専任研究員と北海道大学大学院工学研究院の小林拓矢准教授（研究当時：埼玉大学理学部）が固体 NMR の測定・解析に、横浜国立大学大学院工学研究院／先端科学高等研究院の藤野智子准教授（研究当時：東京大学物性研究所）、伊藤雅聡博士（研究当時：東京大学物性研究所の大学院生）、立教大学理学部の松下信之教授が試料合成にそれぞれ貢献しました。

■研究助成等の情報

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（JP18H05225、JP21K18597、JP22H00106、JP23K13715、JP25K08582、JP23K13722、JP25H00838、JP26K17820、JP25K24860、JP25K24862）、同研究拠点形成事業（JPJSCCA20240001）、文部科学省（MEXT）新学術領域研究「ハイドロジェノミクス」（JP18H05516）、公益財団法人天野工業技術研究所および公益財団法人池谷科学技術振興財団の研究助成による支援を受けて実施されました。

■用語説明

- **中性ラジカル分子：**他の電子と対を作っていない電子（不対電子）を持ち、分子全体としては電気的に中性である分子。不対電子が持つスピンは磁気的な性質の源となり、本研究の **Au(4OEt)**でも磁性・電気伝導性を担っている。
- **単一成分分子性導体・磁性体：**一種類の分子だけから構成された電気伝導性や磁気的な性質を持つ材料。複数種類の分子からなる材料と比べて、分子の構造と物性の関係を調べやすい特徴がある。
- **モット絶縁体：**本来は電子が移動できる電子状態を持っているにもかかわらず、電子同士の強い反発によって電子の移動が妨げられ、電気が流れにくくなった状態。一般的な絶縁体とは異なり、電子間の相互作用が絶縁性の主な原因となる。

- **スピン軌道相互作用：**電子が持つスピンと、原子や分子の中での電子の軌道運動が結び付く相互作用。スピンが向きやすい方向などの磁気的な性質に影響し、一般に金のような重い元素では強くなる傾向がある。
- **溶液プロセス・ブレードコート法：**溶液プロセスは、材料を溶媒に溶かし成膜する技術。ブレードコート法はその一種で、刃状の部品（ブレード、※本研究ではスライドガラス）をゆっくり動かして溶液を基板上に薄く広げ、溶媒を除去することで薄膜を形成する方法。
- **電界効果トランジスタ（FET）・アンバイポーラ（両極性）特性：**FET は、ゲート電極に加える電圧によって電流の大きさを制御する電子素子。身近な電子回路にも広く用いられる。アンバイポーラ特性は、電圧のかけ方に応じて、負の電荷を持つ電子と、正の電荷を持つ正孔（ホール）の両方を電流の担い手として利用できる性質。

本件に関するお問い合わせ先
＜研究内容について＞
茨城大学 学術研究院基礎自然科学野　助教　横森 創
TEL：029-228-8369
E-mail：so.yokomori.nb89@vc.ibaraki.ac.jp

＜報道関係のお問い合わせ＞
茨城大学　広報・アウトリーチ支援室
TEL：029-228-8008
E-mail：koho-prg@ml.ibaraki.ac.jp

立教大学　企画部広報課
TEL：03-3985-2202
E-mail：koho@rikkyo.ac.jp

東北大学多元物質科学研究所　広報情報室
TEL：022-217-5198
E-mail：press.tagen@grp.tohoku.ac.jp

東京理科大学 経営企画部 広報課
TEL：　03-5228-8107
E-mail：koho@admin.tus.ac.jp

国立研究開発法人産業技術総合研究所　ブランディング・広報部　報道室
E-mail：hodo-ml@aist.go.jp

理化学研究所　広報部　報道担当
TEL：050-3495-0247
E-mail：ex-press@ml.riken.jp

北海道大学　社会共創部広報課
TEL：011-706-2610
E-mail：jp-press@general.hokudai.ac.jp

横浜国立大学　総務企画部リレーション推進課
TEL：045-339-3027
E-mail：press@ynu.ac.jp