

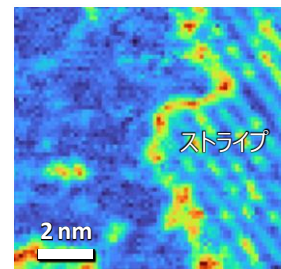
ありふれた金属でつくる「原子のレール」！ －電子デバイスの微細化は新次元へ－

【研究成果のポイント】

- ◆ ありふれた金属である鉄とマンガンの組み合わせで、原子が規則正しく並んだ縞模様（原子のレール）が自然に出来上がる現象（自己組織化）を世界で初めて確認。
- ◆ この現象が、異なる磁性を持つ物体（強磁性体と反強磁性体^{※1}）が接する面で引き起こされる「磁氣的なせめぎ合い」によって生まれることを、実験と理論計算の両面から解明。
- ◆ 作製した縞模様は室温でも安定しており、表面の欠陥にも強いことから、将来、機能性分子を並べる精密な鋳型や次世代デバイスの極微細配線など、ナノテクノロジーを原子レベルで加速させる新たな基盤技術となることが期待。

【概要説明】

高知工科大学の稲見 栄一教授、千葉大学大学院のピーター・クリューガー教授、同大学院修了の林 宏樹氏、同大学院の山田 豊和准教授らの研究グループは、鉄（強磁性体）の表面上で、マンガン（反強磁性体）原子が自ら整列し、原子レベルで極めて均一な 1 次元の縞模様を形成することを世界で初めて発見しました。この現象は、鉄とマンガンが持つ磁石としての性質の違いから生じるエネルギー的な「せめぎ合い（磁気フラストレーション^{※2}）」により、マン



電子の状態分布

ガン原子が上下にわずかに変位することで、安定した縞模様を形づくることによると突き止めました。

本成果は、物質の根源的な性質を活かして原子構造を自在に制御する新たな道を拓くものです。これにより、原子数個の幅しかもたない究極的に微細な電子回路や、処理速度が速く消費電力の低いデバイスなど、従来の技術では作製が困難だった新機能材料の開発が大きく加速すると期待されます。

本研究成果は、国際的な科学雑誌「Small」（Wiley 社）に、2025 年 9 月 4 日付のオンライン速報版（Early View）として掲載されました。

【研究の背景】

スマートフォンやコンピュータに代表される電子デバイスの驚異的な性能向上は、回路を限りなく小さくする「微細化」によって支えられてきました。ナノテクノロジーが切り開いたこの流れは、今や原子や分子を一つひとつのレベルで物質を制御する、新たな次元へと突入しています。しかし、原子を一つずつ正確に並べることは極めて困難です。これまでは、希少かつ高価なレアメタルなどの特殊な材料や複雑なプロセスが必要でした。このため、ありふれた材料を用い、原子たちが自らの力で望みの構造を形づくる「自己組織化」技術の確立が、この分野のブレークスルーの鍵とされています。

【発見の経緯】

このような課題の解決に向けて、本研究グループでは、原子一つひとつが持つ磁石の性質「原子磁石(スピン)」に着目し、鉄(Fe)とマンガン(Mn)という身近な金属を用いた研究を行ってきました。この二つはありふれた金属でありながら、原子磁石としては正反対の性質を示します。鉄は、強磁性体^{*1}と呼ばれる磁石で、構成する全ての原子磁石が一斉に同じ方向を向く性質を持ちます。一方、マンガンは、反強磁性体^{*1}と呼ばれ、隣り合う原子磁石が互いに逆を向く性質を持ちます。この正反対の磁石の性質がぶつかり合う究極の「せめぎ合い」を、特別な材料を使わずありふれた金属だけで引き起こし、新しい構造を創り出せないかと考え、今回の実験に着手しました。

【研究内容と成果】

実験では、原子レベルで平坦な鉄の表面の中でも、特定の結晶面(110 面^{*3})を舞台として選びました。この面がもつ特徴的な原子の並びによって、上に乗ったマンガン原子が下地の鉄原子と隣り合うマンガン原子の両方から強い磁気的な影響を受け、「せめぎ合い」を最大限に引き出す最適な舞台となるからです。この舞台の上に、マンガン原子を、わずか原子 1 個分の厚さで堆積させ、原子を直接観察できる特殊な顕微鏡「走査型トンネル顕微鏡(STM)^{*4}」で観察しました。

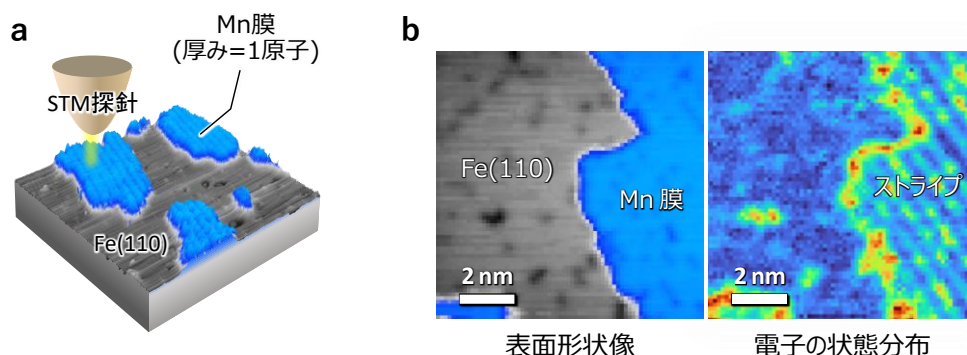


図 1 : 鉄表面上のマンガン薄膜における縞模様

a 実験の模式図。 **b** STM による観察像。下地である鉄の部分には縞模様はなく、その上に作製したマンガン膜の部分にだけ、鮮やかな電子の縞模様が形成されているのが確認できます。

その結果、原子レベルで平坦な鉄の表面にもかかわらず、その上にあるマンガン膜内では、電子の状態に由来する、幅わずか 0.72 ナノメートル（1 ナノは 10 億分の 1 メートル）の、極めて規則正しい縞模様が現れることを発見しました（図 1 参照）。

さらに、なぜこのような精密な構造が自発的にできるのかを解明するため、理論計算（第一原理計算）を行いました。その結果、下地にある鉄の「すべての原子が同じ方向を向きたがる」強磁性の性質と、その上に乗ったマンガンの「隣り合う原子が互いに逆方向を向きたがる」反強磁性の性質が、両者の触れ合う面で競合し、磁氣的な「せめぎ合い（磁気フラストレーション^{※2}）」が生じていることがわかりました。この不安定な状態を解消するため、マンガン原子がわずかに上下変位し（浮き上がり/沈み込み）、エネルギー的に安定な縞模様構造が形成されることを突き止めた（図 2 参照）。この原子レベルの微小な凹凸が、電子の状態を周期的に変調し、結果として、図 1b に示す STM 像のような縞模様が観察されたのです。縞模様は室温でも保持され、表面の欠陥にも影響を受けにくい高い安定性を持つことも確認されました。

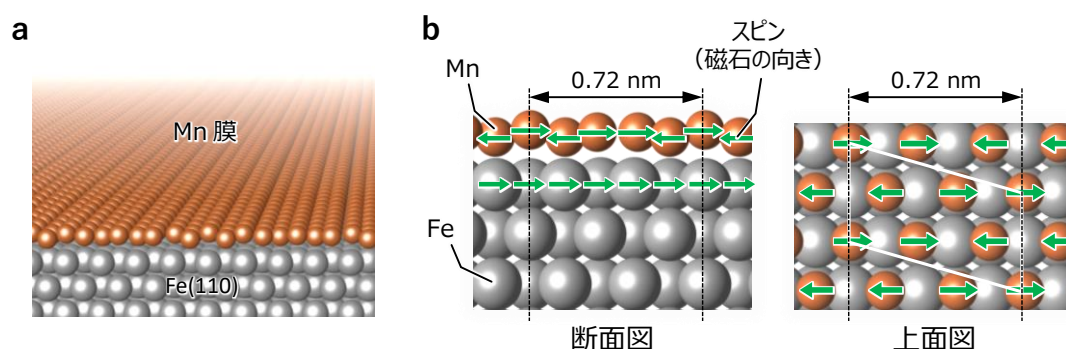


図 2：理論計算によって解明された縞模様の構造

a Mn 薄膜の構造モデル。 **b** 断面・上面図。Fe と Mn のスピン(磁石の向き)が競合し、Mn 原子がわずかに上下に変位する（原子レベルの凹凸）様子を示しています。

【今後の展開】

今回発見された自己組織的な縞模様は、原子レベルの精密な「鋳型」や「レール」として機能する可能性を秘めています。例えば、縞模様の溝に沿って特定の機能を持つ分子を配列させれば、電気を流す「分子ワイヤー」や、新しいセンサー素子などを自在に作製できる道が拓けます。

また、この構造は異なる性質の磁石（強磁性体と反強磁性体^{※1}）が接することで生まれる性質を基盤としているため、電子の電氣的性質と磁氣的性質（スピン）の両方を活かす次世代技術「スピントロニクス^{※5}」への応用も期待されます。今回の発見は、物質の根源的な性質に基づくナノ構造設計という新しい材料開発の指針を示し、将来のナノデバイス開発に大きく貢献します。

【用語解説】

※1 強磁性体・反強磁性体

物質を構成する原子は、一つ一つが磁石（スピン）の性質を持つ。鉄に代表される「強磁性体」は、全ての原子磁石が同じ方向を向いて互いに強め合い、全体として強力な磁石となる物質。一方、マンガンなどにみられる「反強磁性体」は、隣り合う原子磁石が互いに逆方向を向いて打ち消し合うため、全体としては磁石の性質を示さない。

※2 磁気フラストレーション

物質内で原子が持つ磁石の性質（スピン）が、互いに打ち消し合ったり反発し合ったりして、最も安定な配置に落ち着くことができず、エネルギー的に不安定な「せめぎ合い」の状態にあること。

※3 110 面

「ミラー指数」という記法で表される結晶面の一つ。結晶構造における特定の面方位を表す。

※4 走査型トンネル顕微鏡（STM）

先端を原子レベルで鋭くした針を試料表面に近づけ、流れる微弱な電流（トンネル電流）を測定することで、表面の凹凸を原子スケールで観察できる顕微鏡。

※5 スピントロニクス

従来の電子が持つ「電荷」の性質だけでなく、磁石の性質の源である「スピン」も積極的に利用して、より高性能・低消費電力な電子デバイスを実現しようとする研究分野。

【研究資金】

本研究は、以下の支援によって行われました。

- ・ 日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業
(課題番号：17K19023, 19H05789, 20H02697, 21H01812, 23H02033)
- ・ 公益財団法人村田学術振興財団
- ・ 公益財団法人将来科学技術振興財団
- ・ 公益財団法人東京電力記念財団
- ・ 公益財団法人カシオ科学振興財団
- ・ 公益財団法人小笠原敏晶記念財団

【論文情報】

タイトル : Emergence of Robust 1D Atomic and Electronic Textures in Mn Ultrathin Films via Antiferromagnet-Ferromagnet Interfaces (和訳 : 反強磁性体—強磁性体界面を介したマンガン極薄膜における頑健な 1 次元原子・電子構造の出現)

著 者 : Eiichi Inami, Peter Krüger, Hiroki Hayashi, and Toyo Kazu Yamada

掲載誌 : Small

公開日 : 2025 年 9 月 4 日 (オンライン速報版)

D O I:10.1002/sml.202504791

【研究に関するお問い合わせ先】

高知工科大学 システム工学群 教授 稲見 栄一

TEL. 0887-57-2307

E-mail : inami.eiichi@kochi-tech.ac.jp

【広報に関するお問い合わせ先】

高知工科大学 広報課

TEL. 0887-53-1080

E-mail : kouhou@ml.kochi-tech.ac.jp