

記者会見 開催のお知らせ
チタン酸化物表面のナノ磁石化に成功
～レアメタルを使わない磁気メモリで低コスト化へ～

1. 会見日時： 2016年5月20日（金）15:00 ～ 16:00

2. 会見場所： 東京大学本郷キャンパス理学部1号館3階338

3. 出席者：

辛 埴 （しん しぎ）（東京大学物性研究所

附属極限コヒーレント光科学研究センター 教授）

谷内 敏之（たにうち としゆき）（東京大学物性研究所

附属極限コヒーレント光科学研究センター 特任研究員）

鈴木 博之（すずき ひろゆき）（東京大学物性研究所 特任研究員）

4. 発表のポイント

- ◆磁性を持たないと考えられてきたチタン酸化物 SrTiO_3 において、真空中での加熱処理により結晶表面が強磁性になることを発見した。
- ◆クランク係数（注1）が高く安価な材料で、垂直磁化を示し 600°C の高温下でも磁性が保持されることから、レアメタルを使わない磁気デバイス材料の実現が期待される。
- ◆世界最高空間分解能の超高感度レーザー光電子顕微鏡の開発に成功したことが本発見につながった。

5. 発表概要：

東京大学物性研究所の辛埴教授、谷内敏之特任研究員らとパリ南大学のアンドレス・サンデル・シロ准教授らの共同研究グループは、チタン酸化物の表面に強磁性の層が熱処理により生成されることを初めて発見しました。

地球上に多く存在する元素で構成されたチタン酸ストロンチウム（ SrTiO_3 ）は、触媒で良く知られている二酸化チタン（ TiO_2 ）と並ぶ代表的なチタン酸化物です。一般に、チタン酸化物のように磁性を担う価電子が全く存在しない、またはわずかにしか存在しない物質は磁石のような強磁性は示しません。しかし今回、真空中での短時間の加熱処理がチタン酸ストロンチウムの結晶の表面を室温強磁性層に変えることを、東京大学物性研究所が開発した超高感度レーザー光電子顕微鏡を用いた実験により発見しました。

また、発見された強磁性の状態が磁気デバイスやスピントロニクス（注2）の大容量化・微細化にとって重要となる高い垂直磁気異方性（磁化が表面に対し垂直に向く性質）を有していることもレーザー光電子顕微鏡を使って明らかになりました。さらに 600°C という極めて高い温度でもこの強磁性が維持され、垂直磁気異方性も保持されることが分かりました。今日のハードディスクなどでは、垂直磁化を実現するには白金等のレアメタル系磁性体を利用することが一般的ですが、そもそも磁性すら持たないと考えられてきたチタン酸化物が同様の性質を示

すという今回の発見は、安価な高密度磁気デバイスの実現が期待されると同時に、磁性の基礎研究にも多大な影響を与えるものと期待されます。

なお、本研究は科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(CREST)「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」研究領域の一環として行われました。

6. 発表内容：

データストレージ技術には、ICT技術の発展に伴って、記録密度の向上だけでなく低コスト化・高速化が要求されています。コンピュータのハードディスク(HDD)など、磁気記録はこれまでのデータストレージ技術の中心であり、今後も磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM、注3)等の次世代技術の実用化により更なる発展が期待されています。今日のHDDでは、大容量化のための高記録密度を実現するために垂直磁化材料を用いる必要があります、これには白金などのレアメタル材料が使用されています。今回、東京大学物性研究所の辛埴教授、谷内敏之特任研究者らは、パリ南大学のアンドレス・サンタンデル・シロ准教授らとの共同研究で、ごくありふれたチタン酸化物であるチタン酸ストロンチウム(SrTiO_3)の結晶表面が強磁性を持っており、なおかつ強い垂直磁化を示すことを発見しました。

チタン酸ストロンチウムは触媒で良く知られている酸化チタン(TiO_2)と並ぶ代表的なチタン酸化物材料で、レアアースや磁性元素等を含まず、しかも極めて安価です。立方体状の単純な結晶構造(ペロブスカイト構造)を持ち、単結晶作製が比較的容易なことから、誘電体・磁性体・超電導等の薄膜・デバイス作製における基板材料として広く利用されてきました。チタン酸ストロンチウムを含めたチタン酸化物のチタンは Ti^{4+} イオン状態であり、磁性を担うための価電子(d 電子)を持たないため、この物質自体は強磁性を示しません。一方で、本来絶縁体であるチタン酸ストロンチウムの結晶表面に酸素原子がわずかに足りない環境をつくると、表面に微量の価電子が生成され、それが理想的な表面伝導を示す層(2次元電子ガス)を形成することが明らかにされていました。

本研究グループは、この価電子を持つ特殊な伝導性のある表面では、磁性が出現する可能性があることを考えました。このような物質全体から見ると非常に微量な表面のみの磁性を、物質の中の磁性不純物と区別し、精確に検出するためには、表面を高感度に測定でき、かつ不純物かどうかを見分けるためのマイクロ観察技術が必要となります。最近、極限コヒーレント光科学研究施設・辛研究室では、表面の磁性を極めて高い感度で測定できるレーザー光電子顕微鏡(レーザーPEEM)装置(注4)の開発に成功していました。レーザーPEEMは紫外レーザーを照射することで物質から電子(光電子)を取り出し、伝導状態・磁気状態を観察することが可能な新しい手法です(図1)。チタン酸ストロンチウム表面にある価電子のエネルギー準位が他の電子とは離れていて、一番高いエネルギーを持っているため、紫外レーザーで価電子だけを励起・放出させることができます(図2)。

このレーザーPEEMを用いて、表面の磁気状態をマッピングできる磁気イメージングを行ったところ、室温で磁石のように磁気モーメントが揃っている磁気ドメインが、ナノサイズで表面に均一に分布していることが分かりました(図3)。これは、加熱処理で生じた酸素欠損由来の価電子がわずかに存在し、強磁性を発現していると考えられます。表面のわずかな価電子が強磁性を形成するという今回の結果は、従来の磁性理論では説明が付かない現象であり、今後の磁性の基礎研究において大きな影響を与えるものと期待されます。さらに、この強磁性は垂直方向の磁化を持ち、 600°C 以上でも磁気特性は保持されることも確認されました(図4)。これまで磁性すら持たないと考えられてきたチタン酸化物が室温強磁性を持ち、かつレアメタ

ル系材料のように強い垂直磁化を持つという以上の結果は、磁気記録の分野に新たな技術を提供するものと期待されます。

7. 発表雑誌：

雑誌名：「**Nature Communications**」

論文タイトル：

“Imaging of room-temperature ferromagnetic nano-domains at the surface of a non-magnetic oxide”

(和題：「非磁性酸化物表面における室温強磁性ナノ構造の観察」)

著者：

Toshiyuki Taniuchi*, Yoshihito Motoyui, Kairi Morozumi, Tobias C. Rödel, Franck Fortuna, Andrés F. Santander-Syro*, and Shik Shin*

8. 問い合わせ先：

【研究に関する問い合わせ先】

東京大学物性研究所 附属極限コヒーレント光科学研究センター

特任研究員 谷内 敏之 (たにうち としゆき)

電話: 04-7136-3381, FAX: 04-7136-3383,

Email: taniuchi@issp.u-tokyo.ac.jp

研究室 HP: <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/spectroscopy/shin/>

東京大学物性研究所 附属極限コヒーレント光科学研究センター

教授 辛 埴 (しん しぎ)

電話: 04-7136-3380, FAX: 04-7136-3383,

Email: shin@issp.u-tokyo.ac.jp

研究室 HP: <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/spectroscopy/shin/>

【報道に関する問い合わせ先】

東京大学物性研究所総務係

主査 中村 正俊 (なかむら まさとし)

TEL: 04-7136-3590

9. 用語解説：

注1 クラーク係数

地球の地表付近に存在する元素の割合。

注2 スピントロニクス

磁性の最小単位である電子のスピンと、電子の電荷を利用したエレクトロニクスであり、ハードディスク等に利用されている技術。磁気ランダムアクセスメモリ等への次世代情報記録デバイス等への応用範囲の拡大が期待されている。

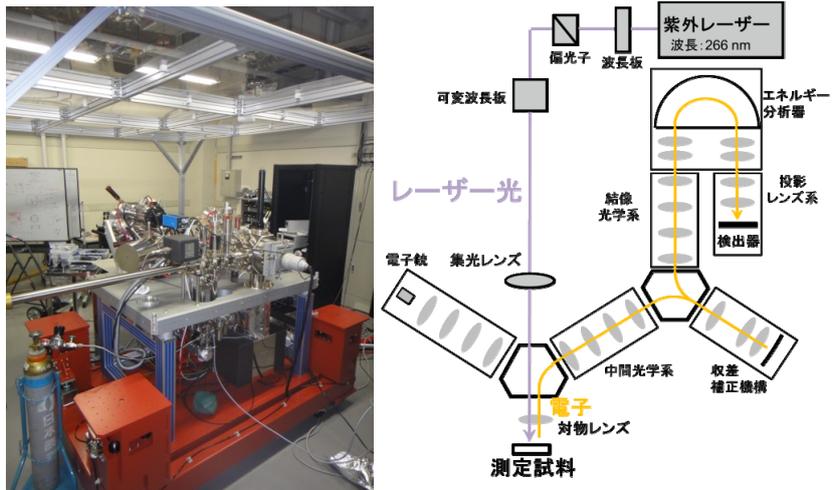
注3 磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM)

新しい磁気記録方式のひとつ。フラッシュメモリよりも高速化が可能で、かつ DRAM やキャッシュ等よりも待機電力を大幅に少ないという特長がある。

注4 光電子顕微鏡 (PEEM)

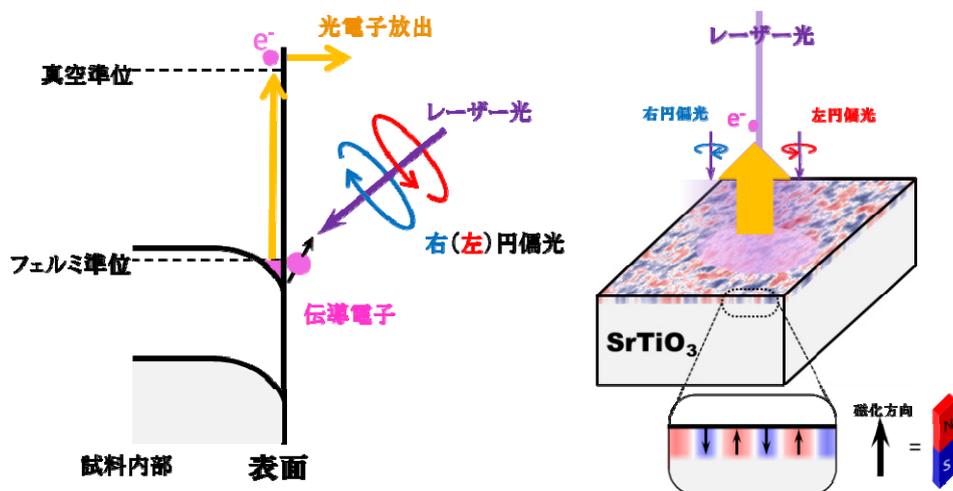
紫外レーザーやX線等を照射することによって、測定試料から電子（光電子）が放出される（光電効果）。光電子顕微鏡は光電子の空間分布を観察することが可能な顕微鏡であり、試料表面の化学状態や磁気状態の不均一性をコントラストとして観察することが可能。磁気状態の観察には光の偏光性を利用することが必要となる。

10. 添付資料：



(図1) 東京大学物性研究所で開発した超高感度・高分解能レーザー光電子顕微鏡

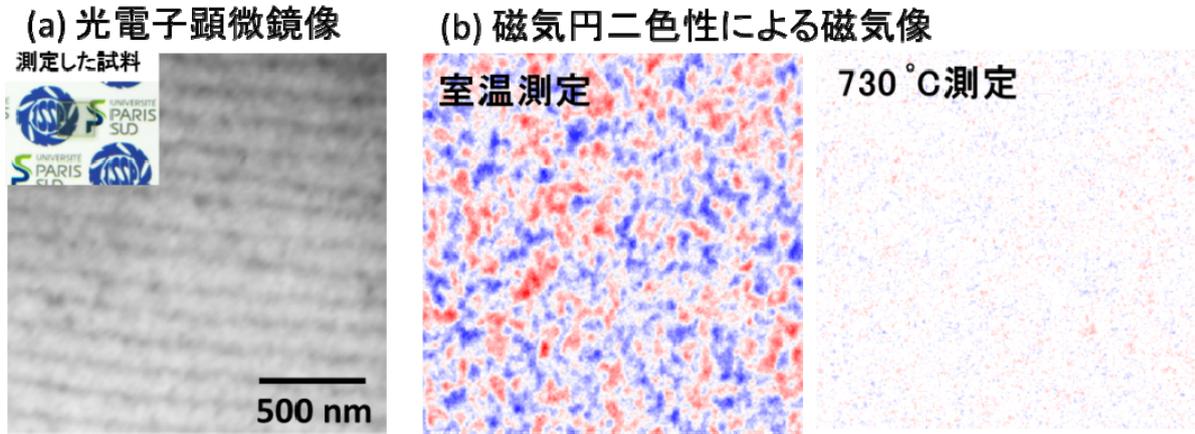
測定試料に紫外レーザーを照射することで試料表面から価電子を放出させる。放出した電子（光電子）は電子レンズを用いて拡大結像される。これにより価電子が持つ磁気状態などを可視化することが可能となる。本グループは解像度（空間分解能）を下げる要因のひとつであった電子レンズの収差を補正する機構を持ち、世界最高の空間分解能を達成した。



(図2) レーザー光電子顕微鏡による超高感度磁気イメージングの説明図

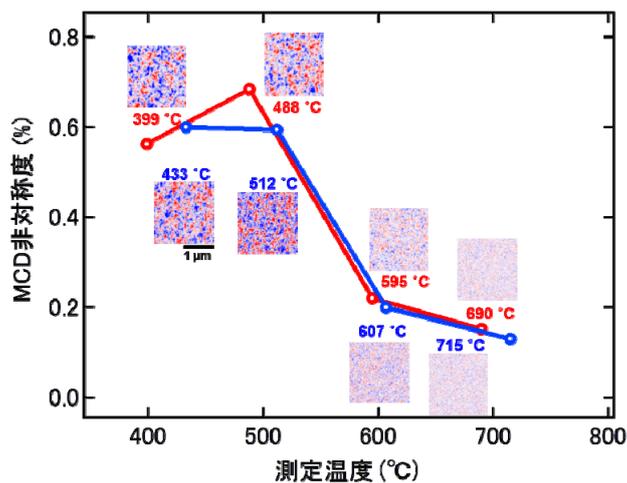
紫外レーザーでチタン酸ストロンチウム表面の価電子だけを励起・放出させる独自の手法を開

発。これによって表面の磁気状態を高感度に測定できるようになった。磁気イメージングにはレーザー光の偏光性を利用する。本研究グループが開発した光電子顕微鏡装置の解像度（空間分解能）は2.6nmであり、現在の世界最高性能である。



(図3) チタン酸ストロンチウム結晶表面における室温強磁性の発見

真空中での加熱処理後の表面状態を観察。(a) 通常測定モードの光電子像。原子レベルで平坦なため、結晶格子の階段構造（ステップ&テラス構造）だけが見られ、不純物等は観測されなかった。(b) 磁気測定モードでの光電子像。赤/青の色は面直磁化方向（上向き/下向き）を示している。室温測定にてナノ磁石（ナノドメイン）構造を形成していることが観察された。同時にレアメタル系材料のように垂直磁気異方性を持っていることも分かる。また高温（730°C）で測定すると磁化が消失することが分かった。



(図4) 観察された結晶表面の強磁性の温度変化

図の横軸は測定温度。縦軸はレーザーPEEM測定結果から得られた垂直磁化の大きさ。600°C以上でも垂直磁化成分が残っていることから、非常に強い垂直磁気異方性を持っていることが分かった。