

反強磁性/強磁性超薄膜ヘテロ構造の磁気結合状態を原子スケールで解明
— ヘテロ接合デバイスのさらなる性能向上へ —

1. 発表者：

- 宮町俊生（東京大学物性研究所ナノスケール物性研究部門 助教）
中島脩平（研究当時：東京大学物性研究所ナノスケール物性研究部門 博士課程学生/日本学術振興会特別研究員 DC2）
立津慶幸（研究当時：東京工業大学物質理工学院、現名桜大学 准教授）
高橋文雄（研究当時：東京大学物性研究所ナノスケール物性研究部門 博士課程学生/日本学術振興会特別研究員 DC2）
高木康多（研究当時：自然科学研究機構分子科学研究所 助教、現公益財団法人高輝度光科学研究センター 主幹研究員）
合田義弘（東京工業大学物質理工学院 准教授）
横山利彦（自然科学研究機構分子科学研究所 教授）
小森文夫（東京大学物性研究所ナノスケール物性研究部門 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆ 反強磁性/強磁性超薄膜ヘテロ構造の界面形成過程における磁気特性の逐次変化を原子スケールで明らかにした。
- ◆ 界面磁気結合状態を決定する原子構造と電子状態の役割を個別に分離して理解することに成功。
- ◆ 磁性超薄膜ヘテロ構造の界面磁気特性を飛躍的に向上させ、ヘテロ接合デバイスのさらなる低消費電力化や高密度化につながることを期待できる。

3. 発表概要：

東京大学物性研究所（所長 森初果）の宮町俊生助教、中島脩平博士課程学生、小森文夫教授らの研究グループは、東京工業大学合田義弘准教授、自然科学研究機構分子科学研究所横山利彦教授らのグループと共同で磁性超薄膜ヘテロ構造の界面磁気結合状態を原子スケールで明らかにすることに成功しました。

近年、ハードディスクに代表される磁気媒体のさらなる高密度化への期待から、情報の書き込みや、記録された情報の読み出しに用いられる磁気ヘッドの小型化・高性能化が求められています。磁気ヘッドは反強磁性/強磁性超薄膜ヘテロ構造（注1）から構成されており、性能向上のためにはより強固で安定な界面磁気結合状態を実現する必要があります。しかしながら、ヘテロ接合界面には原

子スケールでの構造や電子・磁気状態の空間的乱れがあるために、実験的に得られる磁気結合エネルギーは理想界面の場合と比較して2桁程度小さく、それを向上させることが長年の課題となっていました。

今回、本研究グループは走査トンネル顕微鏡 (STM, 注2) に軟 X 線磁気円二色性 (XMCD) 測定 (注3) を組み合わせた研究手法により、反強磁性 Mn/強磁性 Fe 超薄膜ヘテロ構造界面の原子構造と電子状態の原子スケールでの違いが磁気結合に及ぼす影響を明らかにすることに成功しました。本成果により、磁気センサー等、磁性超薄膜ヘテロ構造から構成される磁気デバイスの開発が飛躍的に進展することが期待されます。

本研究成果は 2018 年 11 月 23 日 (ドイツ時間) に Wiley 出版 (ドイツ) の国際科学誌「Advanced Functional Materials」のオンライン速報版で公開されました。

4. 発表内容：

①研究の背景

ハードディスクへの情報の書き込みや、記録された情報の読み出しには磁気センサー (磁気ヘッド) が用いられています。磁気記録のさらなる高密度化のためには磁気ヘッドの小型化・高性能化が求められており、磁気ヘッドを構成する反強磁性/強磁性超薄膜ヘテロ構造間の強固で安定な界面磁気結合状態をいかに実現するかが鍵になります。近年の薄膜形成技術の発展により、高精度に界面制御された反強磁性/強磁性超薄膜ヘテロ構造の作製が可能になりました。しかし、実験的に得られる磁気結合エネルギーは理想界面の場合と比較して、未だ2桁程度も小さいことが示されています。この原因として、ヘテロ接合界面における原子スケールでの構造や電子・磁気状態の空間的乱れが挙げられますが、高い空間分解能で接合界面の原子構造と磁気結合状態を直接観測できる実験手法の欠如からその詳細は殆どわかっていませんでした。そこで、本研究では走査トンネル顕微鏡 (STM) と軟 X 線磁気円二色性 (XMCD) 測定とを組み合わせた研究手法により、反強磁性 Mn/強磁性 Fe 超薄膜ヘテロ構造界面における原子配列と電子状態の原子スケールでの違いが磁気結合状態に及ぼす影響を明らかにすることを目指しました。

②研究の内容

本研究では、超高真空環境下で銅単結晶 Cu(001)基板上の強磁性 Fe 超薄膜に反強磁性 Mn 超薄膜を積層することにより Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造を作製しました (図 1 左：模式図)。XMCD 測定は分子科学研究所の放射光施設 UVSOR のビームライン BL4B で行いました。XMCD 測定では、Fe イオンの吸収が起こる

エネルギーをもつ軟 X 線を Mn/Fe 超薄膜へテロ構造に照射し、埋もれた Fe 超薄膜の磁化曲線を測定しました (図 1 右)。結果、反強磁性 Mn 超薄膜の積層数増大に伴い、Fe 超薄膜の容易磁化方向が面直方向から面内方向に変化するスピンの再配列転移 (注 4) を起こすことがわかりました。さらに詳細に見ていくと、(1) Mn 膜厚が 1 原子層までは面直磁化・面内磁化ともに弱まる、(2) 1~3 原子層で面直磁化が徐々に減少して、面内磁化が相対的に強まる、という 2 段階のスピンの再配列転移であることがわかりました。観測されたスピンの再配列転移の起源を明らかにするため、Mn/Fe へテロ構造界面の形成過程における STM 原子分解能構造観察を行いました。そして、Mn 積層数の増大に伴い、界面構造が FeMn 不規則合金から FeMn 規則合金へと変化することを突き止めました (図 2)。さらに、STM による分光測定や第一原理計算 (注 5) の結果も併せて、最初のスピンの再配列転移は FeMn 不規則合金形成によるヘテロ接合界面近傍の格子定数の変化と表面粗さの増大に、次のスピンの再配列転移は FeMn 規則合金と強磁性 Fe 超薄膜間の電子混成に由来することを明らかにしました。

③今後の展開

本研究によって Mn/Fe 超薄膜へテロ構造に観測された磁気特性の変化 (スピンの再配列転移) が、ヘテロ接合界面における原子構造と電子状態の原子スケールでの動的変化によって引き起こされていることが明らかになりました。さらに、界面磁気結合状態を決定する様々な要因の役割を個別に分離して評価可能なことを示すことができ、磁性超薄膜へテロ構造の磁気特性を評価する上で STM と XMCD を相補的に組み合わせた本研究手法の重要性が示されました。本成果により、磁性超薄膜へテロ構造から構成されるヘテロ接合デバイスの性能を飛躍的に向上させるための基礎的な知見を得ることができると期待できます。

本研究は日本学術振興会の科学研究費 [若手研究 (A) : 課題番号 16H05963 (研究代表者 : 宮町俊生)、基盤研究 (B) : 課題番号 26287061 (研究代表者 : 小森文夫)]、民間財団 [放送文化基金、島津科学技術振興財団、池谷科学技術振興財団 (研究代表者 : 宮町俊生)] などの助成を受けて行われました。

5. 発表雑誌：

雑誌名：Advanced Functional Materials（2018年11月23日オンライン公開）

論文タイトル：Dynamic Interface Formation in Magnetic Thin Film Heterostructures

著者：Shuhei Nakashima, Toshio Miyamachi*, Yasutomi Tatetsu, Yukio Takahashi, Yasumasa Takagi, Yoshihiro Gohda, Toshihiko Yokoyama, Fumio Komori

(*：責任著者)

6. 問い合わせ先：

【研究に関すること】

東京大学物性研究所ナノスケール物性研究部門

助教 宮町俊生

教授 小森文夫

TEL: 04-7136-3311

E-mail: toshio.miyamachi@issp.u-tokyo.ac.jp

komori@issp.u-tokyo.ac.jp

【報道に関すること】

東京大学物性研究所 広報室

TEL: 04-7136-3207

E-mail: press@issp.u-tokyo.ac.jp

7. 用語解説：

(注1) 反強磁性/強磁性超薄膜ヘテロ構造

組成元素が異なる反強磁性超薄膜を強磁性超薄膜に接合して形成される構造のこと。また、強磁性（反強磁性）は隣り合う原子間のスピンの向きが平行（反平行）に揃う磁性体の性質のことである。

(注2) 走査トンネル顕微鏡 (STM)

先端の尖った金属探針を、電圧を印加した導電性の試料表面に近づけ、流れるトンネル電流を検出して試料表面の凹凸情報を原子分解能で評価する装置。また、分光測定（電流-電圧特性計測）により試料表面の電子状態も局所的に観測可能である。

(注3) X線磁気円二色性 (XMCD)

磁化した試料に左円偏光と右円偏光を持つX線を照射したときのX線吸収スペクトルの差スペクトルのこと。XMCDスペクトルから試料の磁気特性（磁気モーメントや磁化曲線等）を元素選択的に評価可能である。

(注4) スピン再配列転移

磁性体のある一つの秩序状態（例：磁化容易軸）が、温度、外部磁場、圧力などの外場の変化によって別の秩序状態に移る現象。本研究では反強磁性 Mn 超薄膜の膜厚変化に伴い、スピン再配列転移が誘起されている。

(注5) 第一原理計算

量子力学の原理に基づいて、物質の電子状態等を非経験的に直接導く理論計算のこと。

8. 添付試料：

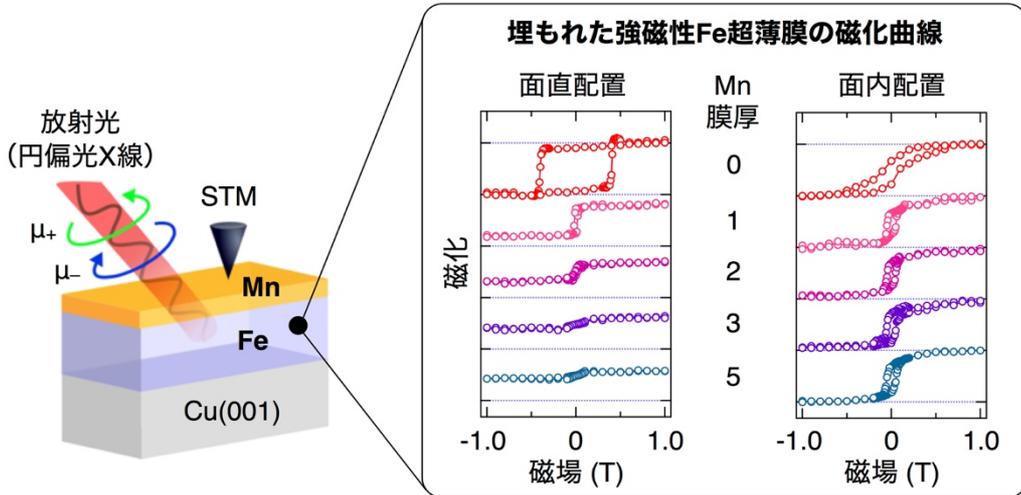


図1 左：Mn/Fe 超薄膜へテロ構造の模式図。右：XAS/XMCD 測定から得られた埋もれた Fe 超薄膜の磁化曲線。

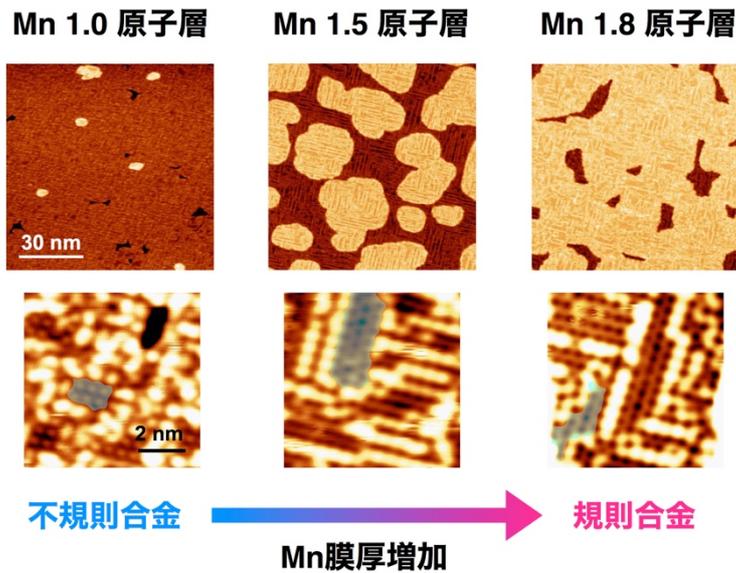


図2 Mn/Fe 超薄膜へテロ構造表面 STM 像の Mn 膜厚依存性。