



## 世界で初めての透明強磁性体の開発に成功

### — 新しい磁気光学効果の発見 —

公益財団法人電磁材料研究所(理事長：荒井賢一)の小林伸聖主席研究員、国立大学法人東北大学(総長：里見進)学際科学フロンティア研究所の増本博教授、同金属材料研究所の高橋三郎助教および国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(理事長：児玉敏雄)先端基礎研究センターの前川禎通センター長の研究グループは、全く新しい発想による透明強磁性体の開発に世界で初めて成功しました。開発した材料は、ナノグラニューラー材料<sup>1, 2)</sup>と呼ばれる、ナノメートルサイズの磁性金属粒子を誘電相中に分散させた金属と絶縁体(誘電体)の2相からなる薄膜材料であり、室温で大きな光透過率<sup>3)</sup>と強磁性を示し、かつ、透明度が磁場で制御可能な新しい磁気-光学効果<sup>4)</sup>を示すことを見いだしました。

透明な磁性体の開発は、磁性材料研究において重要なテーマの一つです。室温で透明な強磁性体を実現すれば、磁気・電子および光学デバイスのみならず、様々な産業分野に多くの革新的な技術発展をもたらすことが期待できます。これまでに、磁性半導体や磁性酸化物において透明な磁性体の検討がされてきましたが、室温では磁化が小さく、また十分な透明性が得られないなど、透明な強磁性体は実現されていませんでした。我々は、ナノメートル(1/1000000 ミリメートル)の微細複合構造を持つナノグラニューラー磁性体の研究開発を進め、可視光領域において高い光透過性を持ち、かつ強磁性併せ持つ薄膜材料の開発に成功しました。この材料は、粒径が数ナノメートルの鉄-コバルト合金微粒子(グラニュール)が、フッ化アルミニウム<sup>5)</sup>の媒質(マトリックス)中に分散した構造を有します。この構造により、鉄-コバルト合金による強磁性とフッ化アルミニウムによる光透過性の両方の特性を同時に発揮することができます。さらに、この材料の光透過率は磁場の大きさを変化させることによって制御することも見出しました。これは、過去に報告の無い新しい磁気-光学効果であり、鉄-コバルト合金の強磁性グラニュール間の量子力学的トンネル効果によるスピン依存電荷振動<sup>6)</sup>に基づく『トンネル磁気誘電効果』によって説明されます。

この新しい材料は、世界で初めて実現した室温で透明な強磁性体であって、かつ、透明度が磁場により自己調整できる機能を持ちます。今後の開発の進展によって、例えば、速度、燃料計や地図を自動車や航空機のフロントガラス上に直接表示するデバイスなど、次世代透明磁気デバイスや電子機器の実現が可能となります。

なお、本研究成果は、英国科学誌「Scientific Reports (サイエンティフィック レポート)」(9月28日付)に掲載されます。

## 補足説明

### 【背景と経緯】

可視光に対して透過性を持つ強磁性体は、新しいデバイスの創出において非常に有望です。これまでもいくつかの透明な磁性体が提案されています(例えば、磁性元素をドーピングした磁性半導体、マグネタイト  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  やヘマタイト  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  などの酸化鉄)。しかしながら、磁性半導体の場合、磁気転移温度が低い室温での磁化は非常に小さく、また、酸化鉄では、強い磁化を持っているマグネタイトの場合は光透過性に劣り、高い光透過性を示すヘマタイトの場合は磁化が小さく、室温において実用に適う大きな磁化と高い光透過性の両方を兼ね備えた材料は未だ実現されていません。

ナノグラニューラ材料は、ナノメートルサイズの微細な金属の粒子(グラニューラ)が絶縁体セラミックス中に均一に分散した特徴的な構造を有します(図1)。物性が異なる2つの相がナノ状態で混在するため、金属と絶縁体の含有比率の違いによって物性が大きく変化します。金属が多い組成では金属特有の物性が、絶縁体が多い組成では誘電特性や光透過特性が期待されます。さらに、中間領域では両相の機能が複合した多機能性が期待できます。また、このナノグラニューラ薄膜は工業的に用いられるスパッタ法で容易に作製でき、再現性や耐熱性にも優れているので、実用性の高い材料であると言えます。

### 【研究の内容】

ナノスケールの強磁性金属を透明な絶縁相中に分散させたナノグラニューラ膜を作製することで、室温で実用に適う大きな磁化と可視光領域を含む光透過性を同時に発揮する材料を見出すことに成功しました。さらに、光透過性は磁場により制御が可能であることも発見しました。

今回の研究では、鉄(Fe)-コバルト(Co)合金およびフッ化アルミニウム( $\text{AlF}_3$ )をターゲットとしたスパッタ法によりナノグラニューラ膜を作製しました。Fe-Co合金は最大の磁化を有する強磁性金属であり、 $\text{AlF}_3$ は安定で優れた光透過性を有する誘電体なので、膜中では両者が完全に分離して存在します。この全く物性の異なる物質をナノスケールで混在させることにより、ナノ量子効果による新しい機能を生成させることを期待しました。その結果、磁化の大きさが  $18 \text{ kA/m}$  ( $0.025 \text{ T}$ ) で可視光領域を含む  $400\sim 2000 \text{ nm}$  の波長領域において透明な強磁性体(図2a)の作製に成功しました。さらに、磁界中で光透過率を計測した結果、常温で約  $0.04\%$  (現在は約  $0.1\%$  が得られている) という透過率の変化を示しました(図2b)。この特性の発現機構は、量子効果(トンネル磁気誘電効果)に基づく新しい磁気-光学効果であることを本研究の理論的解析によって明らかにしました。

### 【本研究のインパクト】

これまで透明磁石の研究が世界において広く行われ、室温で強磁性と光透過性の両方を同時に発現する磁性体が求められてきました。しかし従来の材料では十分な特性が得られなかったために、透明な磁気デバイスは不可能でした。

本研究の成果は、世界で初めての透明強磁性体の作製に成功したことであり、さらに透過率を磁場の強さによりコントロールできることを新しいメカニズムにより発見したことにあります。今後特性の一層の向上によって、透明磁気デバイスが可能となり、さらに透明電極材料と組み合わせることによって、透明な電気磁気光学デバイスが可能になるものと期待されます。

本研究の実験は、公益財団法人電磁材料研究所の電磁気材料グループリーダーの小林伸聖主席研究員と同グループのスタッフによって行われたものであり、実験結果の解析は、小林伸聖主席研究員と国立大学法人東北大学増本博教授により行われました。また理論的解析は、同大学高橋三郎助教と国立研究開発法人日本原子力研究開発機構前川禎通センター長により行われました。

【参考図】

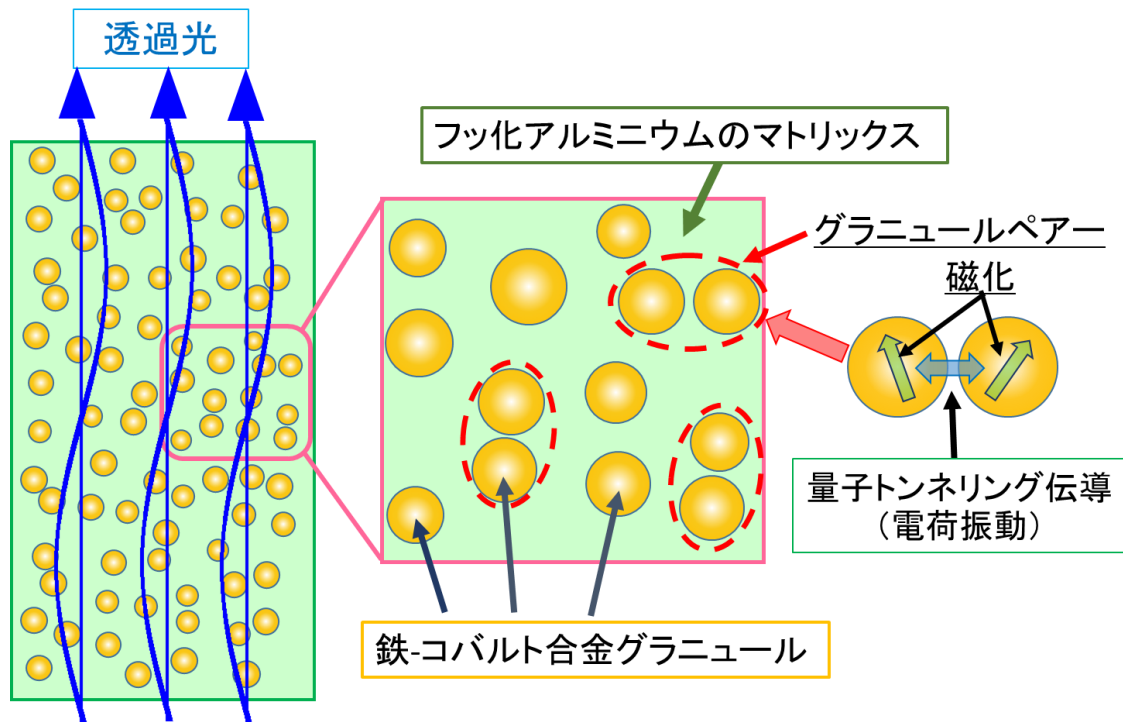


図1. ナノグラニューラー膜の構造、光透過および磁気光学応答のイメージ図です。右側には、2つのグラニューールペアのイメージを示します。交流電界における量子力学的トンネル効果によって電荷の振動(移動)が起こります。トンネリングは、グラニューールの磁化の相対的な向きに依存し、このスピン依存電荷振動によってトンネル磁気誘電効果が生じ、ナノグラニューラー膜の磁気-光学効果を誘導します。

(a)



(b)

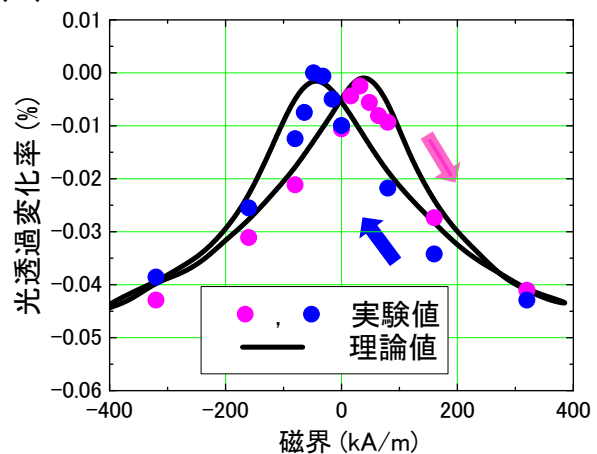


図2. (a) 660°Cに加熱したガラス基板(コーニング社製イーグル2000)上に作製した $\text{Fe}_9\text{Co}_5\text{Al}_{19}\text{F}_{67}$  ナノグラニューラー膜(1 $\mu\text{m}$ )の写真。膜は透明で、後ろの赤、青、黄色の文字をくっきりと見ることができます。(b)  $\text{Fe}_{13}\text{Co}_{10}\text{Al}_{22}\text{F}_{55}$  ナノグラニューラー膜の光透過率の変化(波長: 1500nm)。丸印は実験値で実線は理論値です。これは、スピン依存電荷振動による『トンネル磁気誘電効果』に基づく、従来に無い新しい磁気-光学効果です。

## 【用語解説】

### 1) ナノグラニューラー材料

「ナノ」とは、10 億分の 1 ( $10^{-9}$ ) を表す単位の接頭語であり、1 ナノメートル(nm)は 10 億分の 1 メートル。すなわち、「ナノグラニューラー材料」とは、母相（マトリックス）中にナノサイズの微小な粒子が分散した材料です。

2) 本研究で用いたナノグラニューラー材料は、磁性相の鉄 - コバルト合金粒子を、母相のアルミニウムフッ化物 ( $\text{AlF}_3$ ) 中に分散させた材料であり、この材料の基本特許は 2010 年に電磁材料研究所から出願されています（特願 2010-214360）。

### 3) 光透過率

光学および分光法において、特定の波長の入射光が試料を通過する割合であり、可視光での透過率が大きいと光に透けて見えます。

### 4) 磁気 - 光学効果

磁場をかけた物質の透過光や反射光の偏光状態が変化する現象です。材料の磁化に対応して、その材料の誘電率が変化的ること。従来の磁気-光学効果として透過光の偏光状態が変化する偏光面が回転するファラデー効果、反射光の偏光状態が変化する磁気光学カー効果が知られています。

### 5) フッ化アルミニウム

ナノグラニューラー材料に用いられるセラミックス絶縁体として、化学的・熱的に安定な窒化物、酸化物、およびフッ化物があります。フッ化アルミニウムは、バンドギャップが大きく光透過性が優れていることが特徴です。

### 6) スピン依存電荷振動

私たちが見出した多機能性の新しいメカニズム。グラニューラー間の電荷の移動が材料の磁化に対応して変化することによって発現します。

## 【論文名・著者名】

“Optically Transparent Ferromagnetic Nanogranular Films with Tunable Transmittance”

(透明で透過率の可変特性を有するナノグラニューラー強磁性膜)

Nobukiyo Kobayashi、 Hiroshi Masumoto、 Saburo Takahashi、 Sadamichi Maekawa

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

小林 伸聖 (コバヤシ ノブキヨ)

公益財団法人電磁材料研究所 研究開発事業部 電磁気材料グループ 主席研究員

〒982-0807 宮城県仙台市太白区八木山南 2-1-1 Tel : 022-245-8027

E-mail : n.kobayashi@denjiken.ne.jp

増本 博 (マスマト ヒロシ)

国立大学法人東北大学 学際科学フロンティア研究所 教授

〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3 Tel : 022-795-4405

E-mail : hiromasu@fris.tohoku.ac.jp

高橋 三郎 (タカハシ サブロウ)

国立大学法人東北大学 金属材料研究所 助教

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1 Tel : 022-215-2493

E-mail : takahasi@imr.tohoku.ac.jp

前川 禎通 (マエカワ サダミチ)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター センター長

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4 Tel : 029-282-5093

E-mail : maekawa.sadamichi@jaea.go.jp

<報道担当>

公益財団法人電磁材料研究所 事業支援部 部長 永洞 純一 (ナガホラ ジュンイチ)

〒982-0807 宮城県仙台市太白区八木山南 2-1-1

Tel : 022-245-8027、 Fax : 022-245-8031

E-mail : nagahora@denjiken.ne.jp

国立大学法人東北大学 学際科学フロンティア研究所 企画部 特任准教授 鈴木 一行 (スズキ カズユキ)

〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

Tel : 022-795-4353、 Fax : 022-795-7810

E-mail : suzukik@fris.tohoku.ac.jp

国立大学法人東北大学金属材料研究所 情報企画室広報班

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

Tel: 022-215-2144 Fax: 022-215-2482

E-mail: pro-adm@imr.tohoku.ac.jp

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 広報部報道課

〒100-8577 東京都千代田区内幸町 2-2-2

Tel : 03-3592-2346、 Fax : 03-5157-1950

E-mail : tokyo-houdouka@jaea.go.jp