

高性能フェライト磁石の開発と次世代電磁波吸収材への展開

(東大院理) ○生井飛鳥

Development of High-Performance Ferrite Magnets and the Advancement to Next-Generation Electromagnetic Wave Absorbers (*Graduate School of Science, The University of Tokyo*)

○Asuka Namai

Ferrite magnets are metal oxides that contain iron as a constituent element, and are the most widely used magnetic material due to their chemical stability and cost. Due to their low magnetic anisotropies, the coercive field (H_c) of magnetic ferrites is generally low. If the magnetic anisotropy of ferrite magnets can be improved, the applications is considered be greatly expanded, and thus, the development of ferrite magnets with large magnetic anisotropy is one of the important issues. Epsilon iron oxide ($\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$) is a ferrite magnet that has attracted attention since it exhibits the highest H_c value among metal oxides at room temperature. Herein, I will present our research on the development of high coercivity magnetic materials based on $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ by chemical synthesis, observation of high frequency millimeter wave absorption, design and development of thin millimeter wave absorbers.

Keywords : Nanomagnet; Natural resonance; Millimeter wave; High coercive field; Epsilon iron oxide

フェライト磁石は、鉄を構成元素に含む金属酸化物であり、化学的な安定性やコストなどの観点から最も広く用いられている磁性体である。フェライト磁石の磁気異方性は一般的に低く、保磁力はあまり大きくないが、磁気異方性が向上できれば用途が大きく広がることから、磁気異方性の大きなフェライト磁石の開発は物性化学分野において重要な課題の一つとなっている。イプシロン酸化鉄 ($\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$)は、単なる酸化鉄にもかかわらず室温において金属酸化物として最大の保磁力を示すことから、大きな注目を集めているフェライト磁石である。我々は $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ をベースとした、化学的合成手法を駆使した高保磁力磁性材料の開発、高周波ミリ波吸収の観測、薄型ミリ波吸収体の設計と開発を行った。

1. 高保磁力磁性材料の開発

ナノサイズ効果により安定相として得られる $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ が 20 kOe という大きな保磁力を示すことに着目し、新しい高保磁力磁性材料の開発を行い、鉄イオンの一部を他の金属イオンで置換することにより、保磁力を自在に制御することができることを見出した。例えば、 $\epsilon\text{-Al}_{0.40}\text{Fe}_{1.60}\text{O}_3$ では保磁力は 10 kOe まで減少する一方、 $\epsilon\text{-Rh}_{0.14}\text{Fe}_{1.86}\text{O}_3$ では保磁力は 27 kOe まで増大し、更に結晶方位を揃えることにより、35 kOe という極めて大きな保磁力を示すことを見出した。この保磁力はフェライト磁石の中で最大の値であり、希土類磁石にも匹敵する値である。この大きな磁気異方性により、10 nm を切る領域まで微小化が可能であり、史上最小のハードフェライト磁石として、次世代塗布型磁気メモリ材料への展開が期待されている。

2. 高周波ミリ波吸収の観測

磁気モーメントと電磁波の相関によって生じる自然共鳴現象 ($k = 0$ のマグノンによる共鳴現象) では、共鳴周波数が磁気異方性に比例することに着目し、合成した $\epsilon\text{-}$

Fe₂O₃ および金属置換型イプシロン酸化鉄 ϵ -M_xFe_{2-x}O₃ (M = Al, In, Rh 等)の磁気光学効果の研究を行った。テラヘルツ時間領域分光法により電磁波吸収特性を調べた結果、これらの材料がミリ波 (30~300 GHz) と呼ばれる高周波領域に共鳴吸収を示すことが明らかとなった。 ϵ -Fe₂O₃ は 182 GHz に吸収を示し、この共鳴周波数は球状ナノ粒子でもロッド状ナノ粒子でも同じであり、 ϵ -Fe₂O₃ の大きな磁気異方性が形状磁気異方性によるものではなく、結晶磁気異方性によるものであることを明らかにした。また、 ϵ -M_xFe_{2-x}O₃ (M = Al, In, Rh 等)では、保磁力の増減に伴って共鳴吸収ピークが変化し、Al や In 置換では低周波シフトし、Rh 置換では高周波側シフトすることを観測した。Rh 置換体は 222 GHz (ϵ -Rh_{0.19}Fe_{1.81}O₃) の自然共鳴周波数を示すなど、初めて 100 GHz を超える高周波化を達成した。また、着磁により磁気モーメントの方向が揃った ϵ -Fe₂O₃ および ϵ -M_xFe_{2-x}O₃ 試料を作製し、テラヘルツ時間領域分光法によりミリ波領域での偏光特性を測定することで、自然共鳴周波数近傍において偏光面が大きく回転し、直線偏光が円偏光に変換されることを見出した。このミリ波磁気回転効果は通常のパラデー効果とは異なり、電磁波による直接的な磁気双極子遷移に起因している。

3. 薄型ミリ波吸収体の設計と開発

ミリ波吸収特性の高性能化を目指し、位相整合による電磁波吸収制御とミリ波高誘電材料の開発に関する研究に取り組み、電磁波吸収特性の理論計算により、電磁波吸収体において生じる反射波の干渉を利用した薄型ミリ波吸収体の設計を行った。自然共鳴周波数近傍における誘電率と透磁率についてスピンの運動方程式を記述するランダウーリフシッツの式を用いて解析し、得られた誘電率と透磁率を用いて電磁波吸収量を計算した。その結果、位相整合による薄型化が可能であることを見出し、さらに、高誘電材料の添加等によって約 200 μ m の厚みで -20 dB (99%吸収)を超える高いミリ波吸収性能を達成した。現在利用が拡大しているミリ波レーダーといったミリ波デバイスにおけるノイズ抑制材料としての応用展開が期待されている。

この場を借りて大越慎一教授 (東大)、研究室構成員の皆様、共同研究者の皆様に厚く感謝申し上げます。

1) (a) A. Namai, S. Sakurai, M. Nakajima, T. Suemoto, K. Matsumoto, M. Goto, S. Sasaki, S. Ohkoshi *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 1170. (b) A. Namai, M. Yoshikiyo, K. Yamada, S. Sakurai, T. Goto, T. Yoshida, T. Miyazaki, M. Nakajima, T. Suemoto, H. Tokoro, and S. Ohkoshi, *Nature Communications*, **2012**, *3*, 1035. (c) A. Namai, M. Yoshikiyo, S. Umeda, T. Yoshida, T. Miyazaki, M. Nakajima, K. Yamaguchi, T. Suemoto, and S. Ohkoshi, *J. Mater. Chem. C*, **2013**, *1*, 5200. (d) S. Ohkoshi, A. Namai, K. Imoto, M. Yoshikiyo, W. Tarora, K. Nakagawa, M. Komine, Y. Miyamoto, T. Nasu, S. Oka, H. Tokoro, *Scientific Reports*, **2015**, *5*, 14414. (e) S. Ohkoshi, A. Namai, M. Yoshikiyo, K. Imoto, K. Tamazaki, K. Matsuno, O. Inoue, T. Ide, K. Masada, M. Goto, T. Goto, T. Yoshida, T. Miyazaki, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, *55*, 11403. (f) A. Namai and S. Ohkoshi, *Chem. Eur. J.* **2018**, *24*, 11880. (g) A. Namai, K. Ogata, M. Yoshikiyo, S. Ohkoshi, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2020**, *93*, 20. (h) R. Kinugawa, K. Imoto, Y. Futakawa, S. Shimizu, M. Yoshikiyo, A. Namai, and S. Ohkoshi, *Adv. Eng. Mater.* **2021**, *23*, 2001473.