

$^{57}\text{Fe}$ -NMR による M 型 Ca フェライトの研究

高尾健太、宇治克俊、和氣剛、田畑吉計、中村裕之  
(京大院工)

$^{57}\text{Fe}$  NMR study of M-type calcium ferrites

K. Takao, K. Uji, T. Waki, Y. Tabata, H. Nakamura  
(Kyoto Univ.)

## 【背景】

M 型フェライトは鉄原子が磁性を担う鉄系酸化物磁石であり、安価な磁石材として広範囲の用途に使われている。M 型フェライトは異なる 5 つの Fe サイトを有する複雑な構造を持ち、微視的磁性の情報を得ることは容易ではない。これまで M 型フェライトの微視的磁性評価には  $^{57}\text{Fe}$ -メスバウア分光がよく用いられてきた [1]。メスバウア分光は測定が簡便な手法である。しかし、原理的なことが理由で分解能に限界があり、四重極効果によるスペクトルの分裂もあるため、構造が複雑な M 型フェライトではデータの解釈に曖昧さを残す欠点がある。一方で、NMR は分解能が高く、 $^{57}\text{Fe}$ -NMR では四重極効果もないため内部磁場の大きさを直接的に観測できるメリットがある。しかし、M 型フェライトは内部磁場が広く分布しているため、広い周波数領域の測定が必要であり、実験には多大な労力を要する。そのため NMR は微視的な評価手法として積極的には利用されてこなかった。我々は周波数自動掃引 NMR 装置を用いて測定労力を軽減し、M 型フェライトの系統的な測定を行っている。

本研究では Ca を含む M 型フェライトに  $^{57}\text{Fe}$ -NMR 実験を適用した。Ca を含むフェライトは M 型フェライトの中でも高い磁気特性を有しており、近年製品化されている [2]。一方、その母物質である Ca フェライトの基礎物性は不明な点が多く、特に微視的な磁性は全く知られていない。本研究では La 置換 Ca フェライトの  $^{57}\text{Fe}$ -NMR 測定を行い、微視的な磁性を評価する。

## 【実験方法】

La 置換の Ca フェライト ( $\text{Ca}_{0.75}\text{La}_{0.5}\text{Fe}_{11.75}\text{O}_{19}$ ) の粉末試料  $^{57}\text{Fe}$ -NMR 測定を行った。試料は固相反応法により作製した多結晶試料と、CaO 自己フラックス法により作製した単結晶試料を砕いたものを用意した。それぞれの測定結果および他の M 型フェライトの  $^{57}\text{Fe}$ -NMR 測定結果を比較し、Ca フェライトの 5 つの Fe サイトの内部磁場の強さや La 置換による電子状態の変化を評価する。

## 【結果・考察】

図 1 は La 置換 Ca フェライト多結晶試料の NMR 測定の結果である。測定は 4 K、ゼロ磁場下で行い、Fe サイト由来のスペクトルの詳細な形状が判明した。非置換 Sr フェライトの NMR 測定結果 [3] と比較すると  $12k$ 、 $2a$  サイトはほぼ同じ周波数に観測されたが、 $4f_1$ 、 $4f_2$  サイトは低い周波数で観測された。また、69 MHz 付近に強度が小さく幅広いスペクトルが観測された。このスペクトルは Sr フェライトには存在しないものであり、その起源に興味を持たれる。Sr フェライトで、60 MHz 付近に観測される  $2b$  サイトの信号の周波数が上昇した可能性や、Ca-La サイトの不均化に伴う新たな局所環境の Fe サイトの出現などが考えられるが、現在のところ不明である。今後の系統的实验が待たれる。

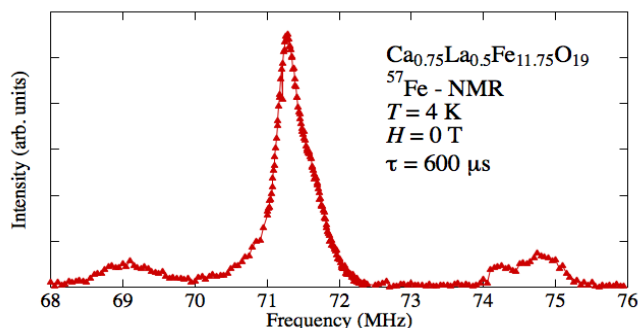


図 1. 多結晶 Ca フェライトの  $^{57}\text{Fe}$ -NMR 測定

## 参考文献

- 1) G. Wiesinger et al., Phys. Stat. Sol. a **189** (2002) 499.
- 2) Y. Kobayashi et al., J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy **55** (2008) 7-541.
- 3) M. Küpferling et al., Phys. Rev. B **73** (2006) 144408.

La-Co 置換系 M 型 Sr フェライトの  $^{57}\text{Fe}$  核 NMR酒井宏典, 服部泰佑, 徳永陽, 神戸振作, 下田愛子\*, 和氣剛\*, 田畑吉計\*, 中村裕之\*  
(原子力機構,\* 京大) $^{57}\text{Fe}$  NMR study in La-Co substituted M-type Sr FerriteH. Sakai, T. Hattori, Y. Tokunaga, S. Kambe, A. Shimoda, T. Waki, Y. Tabata, and H. Nakamura  
(JAEA,\* Kyoto Univ.)

## 1 はじめに

M 型フェライト  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  は、六方晶系マグネトプランバイト型 (M 型) 結晶構造を有し、Sr の一部を La で、Fe の一部を Co で同時に置換すると磁気異方性が大きく向上し、飽和磁化も大きくなることを見いだされ、磁気応用上、有用な材料となった。しかしながら、この共置換系において、磁気異方性が向上する理由についてはよく分かっていない。M 型フェライトには、5 つの結晶学的に異なる Fe サイトが存在し、Co が Fe のどのサイトと置換しているのか、価数はどうなっているのか、中性子散乱<sup>1)</sup>、Mössbauer 効果<sup>2-4)</sup>、核磁気共鳴 (NMR)<sup>5)</sup> などの微視的磁気プローブ毎に、見解が異なっているのが現状である。本研究では、 $^{57}\text{Fe}$  核 NMR 及び  $^{59}\text{Co}$  核 NMR を行い、他の微視的実験結果や第 1 原理計算結果などを相補的に考慮しながら、整合性のある解を目指している。本講演では、主に  $^{57}\text{Fe}$  核 NMR の実験結果について発表する。

## 2 結果および考察

$\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  及び、La-Co 共置換系  $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  の粉末試料、フラックス法で育成された単結晶を用いて、ゼロ磁場 NMR 実験を行った。 $^{57}\text{Fe}$  核は、自然存在比 2.2% で核スピン  $I = 1/2$  をもち、強磁性体中の各 Fe サイトにおける内部磁場に呼応して、外部磁場ゼロで NMR を行うことが出来る。核磁気回転比が  $\gamma_n = 1.4 \text{ MHz/T}$  と低いと、NMR 敏感核ではないが、強磁性体では巨視的磁気モーメントが高周波に対して大きく応答し NMR 強度が増強する効果があり、実験可能となる。特に、この NMR 信号増強効果は、典型的に磁区内で約  $10^4$  倍、磁壁内で約  $10^{10}$  倍と見積もられており、粉末 NMR スペクトルでは、磁区・磁壁からの NMR 信号を区別することが必要となる。

Fig. 1 に、温度 4 K で測定した  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  の粉末試料、単結晶におけるゼロ磁場  $^{57}\text{Fe}$  核 NMR スペクトルを示した。磁区内の信号に関しては、磁化容易軸が  $c$  軸であるために NMR 励起用高周波 ( $rf$ ) が  $c$  軸垂直であるときに最も NMR 信号が観測され、完全に  $rf$  が  $c$  軸平行であれば NMR 信号は消える。一方、磁壁では、磁化方向が隣接する磁区間で回転しているため、たとえ  $rf \parallel c$  とセットしていても、磁壁増強 NMR 信号が観測されることが予想される。実際、Fig. 1 に示したように、単結晶 NMR スペクトルに明瞭な  $rf$  方向依存性が観測され、磁区・磁壁信号の分離に成功した。NMR スペクトルの横緩和時間測定、外部磁場依存性などからも、この分離が妥当であることを確認した。このように単結晶試料を用いることで、各 Fe サイトにおける内部磁場を微視的に決定することが可能である。当日は、共置換系における  $^{57}\text{Fe}$  核 NMR の結果についても報告し、Mössbauer 効果の実験等との比較についても検討したい。

## References

- 1) Y. Kobayashi, E. Oda, T. Nishiuchi and T. Nakagawa, *J. Cer. Soc. Jpn.* **119**, 285 (2011).
- 2) G. Wiesinger, M. Müller, R. Grössinger, M. Pieper, A. Morel, F. Kools, P. Tenaud and J. M. Le Breton and J. Kreisel, *physica status solidi (a)* **189**, 499 (2002).
- 3) A. Morel, J. M. Le Breton, J. Kreisel, G. Wiesinger, F. Kools and P. Tenaud, *J. Magn. Mater.* **242-245**, 1405 (2002).
- 4) J. M. Le Breton, J. Teillet, G. Wiesinger, A. Morel, F. Kools and P. Tenaud, *IEEE Transactions on Magnetics* **38**, 2952 (2002).
- 5) M.W. Pieper, F. Kools and A. Morel, *Phys. Rev. B* **65**, 184402 (2002).

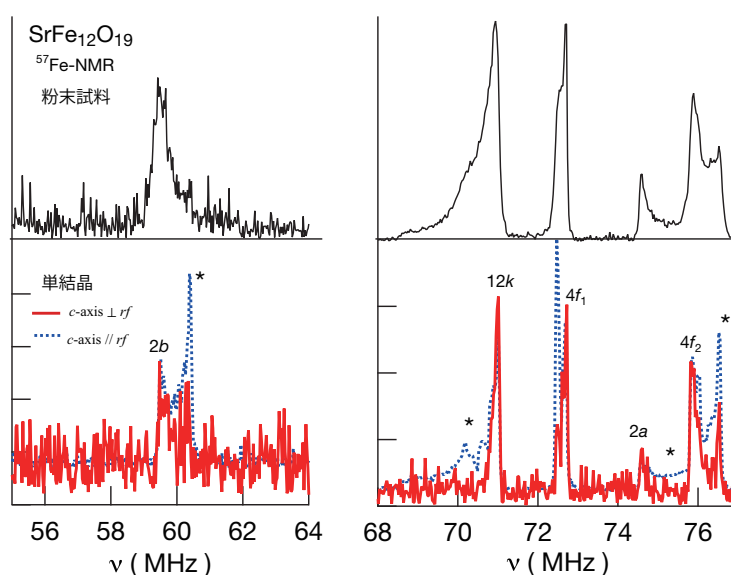


Fig. 1 温度 4 K で測定した  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  の粉末試料、単結晶におけるゼロ磁場  $^{57}\text{Fe}$  核 NMR スペクトル。単結晶のスペクトルは、高周波 ( $rf$ ) 方向を磁化容易軸である  $c$  軸平行に配置したもの、と、垂直に配置したものを示している。

# 単結晶 M 型 Sr フェライトの強磁場下 $^{57}\text{Fe}$ メスバウアー分光

永澤延元, 池田修悟, 下田愛子\*, 和氣剛\*, 田畑吉計\*, 中村裕之\*, 小林寿夫  
(兵庫県立大, \*京都大)

Single-crystalline M-type Sr hexaferrite with external magnetic fields  
studied by  $^{57}\text{Fe}$  Mössbauer spectroscopy

N. Nagasawa, S. Ikeda, A. Shimoda\*, T. Waki\*, Y. Tabata\*, H. Nakamura\*, and H. Kobayashi  
(Univ. of Hyogo, \*Kyoto Univ.)

## はじめに

M 型 Sr フェライトである  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  は、空間群 No. 194 の六方晶  $P6_3/mmc$  のフェリ磁性体であり、室温下で結晶学的に等価でない 5 つの Fe サイトが存在している。この  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  の  $\text{Sr}^{2+}$  を  $\text{La}^{3+}$  に、 $\text{Fe}^{3+}$  を  $\text{Co}^{2+}$  で少量置換することで室温での保持力が向上するため、様々な永久磁石材料に利用されている。しかしながら、Fe の電子状態や、Fe サイトに  $\text{Co}^{2+}$  を置換することで Fe が受ける影響については未だ解明されていない。今回は M 型 Sr フェライトの単結晶の強磁場下  $^{57}\text{Fe}$  メスバウアー分光測定を行い、Fe の電子状態と置換による影響を調べたので報告する。

## 実験方法

$^{57}\text{Fe}$  メスバウアー分光測定には  $c$  軸（磁化容易軸）方向が薄く、その厚さが  $50\ \mu\text{m}$  程度の板状の単結晶試料を十数枚貼りあわせて、直径  $8\ \text{mm}$  程度の大きさにした試料を用いた。また  $c$  軸に対して平行に  $\gamma$  線を入射し、 $c$  軸に対して垂直に外部磁場  $H_{\text{ex}}$  を印加した。

## 実験結果

Fig. 1 に、 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  に対して強磁場下  $^{57}\text{Fe}$  メスバウアー分光測定の結果を示す。 $H_{\text{ex}} = 0\ \text{kOe}$  のスペクトルにおいて、Evans が提案しているモデル<sup>1)</sup>を基準にフィッティングを行うと、得られたスペクトルとの良い一致を示した。また、 $H_{\text{ex}} \neq 0\ \text{kOe}$  のスペクトルについては、外部磁場を印加してもセンターシフトと四重極相互作用は変化しないという仮定のもと、良いフィッティング結果を得ることができた。これらのスペクトル解析から得られた超微細磁場  $H_{\text{hf}}$  から、 $H_{\text{ex}}$  の寄与を差し引くことで各 Fe サイトの内部磁場  $H_{\text{int}}$  を求めることができる。 $H_{\text{ex}} = 0\ \text{kOe}$  で得られたスペクトルでは、 $\Delta m = 0$  の遷移による吸収がほとんど観測されなかった。これは、各 Fe サイトの内部磁場  $H_{\text{int}}$  が磁化容易軸である  $c$  軸と実験誤差の範囲内で平行であることを示している。

$H_{\text{ex}}$  の増加と共に  $\Delta m = 0$  の遷移によるピークの相対強度が大きくなっていることから、磁場印加によって  $H_{\text{int}}$  が  $H_{\text{ex}}$  と平行になる様に回転していくことがわかった。そして、 $H_{\text{ex}} = 30\ \text{kOe}$  では  $H_{\text{int}}$  の向きと  $H_{\text{ex}}$  の向きが平行になっており、この結果は磁化測定で得られた結果と一致した。また、 $H_{\text{int}}$  が  $H_{\text{ex}}$  に依存しない Fe サイトと、 $H_{\text{ex}}$  の増加と共に  $H_{\text{int}}$  が減少する Fe サイトが存在することがわかった。La-Co 置換系フェライト  $\text{Sr}_{0.554}\text{La}_{0.456}\text{Fe}_{11.775}\text{Co}_{0.225}\text{O}_{19}$  についても同様の測定を行った結果、 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  では  $H_{\text{ex}}$  に依存しなかった  $2a$  サイトの  $H_{\text{int}}$  が、 $H_{\text{ex}}$  の増加と共に大きく上昇することがわかった。

## 参考文献

- 1) B. J. Evans, F. Grandean, A.P. Lilot, R. H. Vogel, and A. Gérard: *J. Magn. Magn. Mater.* **67** 123(1987).

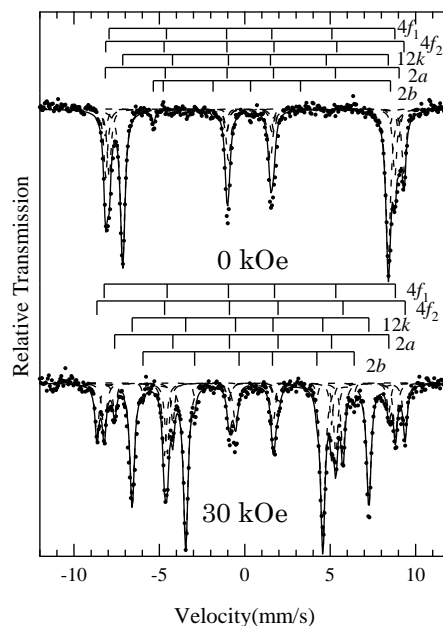


Fig. 1 Mössbauer spectra of the single crystalline samples  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  with external magnetic fields, at 150K.

# La 置換 M 型 Ca フェライトの単結晶合成と物性

宇治克俊、和氣剛、田畑吉計、中村裕之  
(京大)

Growth and characterization of La-substituted M-type calcium ferrite single crystals

K. Uji, T. waki, Y. Tabata, H. Nakamura  
(Kyoto Univ.)

## はじめに

マグネトプランバイト型 (M 型) フェライト ( $A\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ ,  $A = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}, \text{Pb}$ ) は、 $\text{Fe}^{3+}$  ( $3d^5$ ,  $S = 5/2$ ) が磁性を担うフェリ磁性体であり、これを母相とした永久磁石は、低価格・化学的に安定・元素戦略上有利などの理由から市場の大半を占めている。現在主流の製品は  $A = \text{Sr}$  の SrM フェライトで、Sr を La、Fe を Co で一部置換すると、磁気異方性が増大し、保磁力が向上することが知られている。近年、LaCo 置換 SrM フェライトに性能が勝るフェライト磁石として、LaCo 置換 CaM フェライトが開発された[1]。その母体となる非置換の  $\text{CaFe}_{12}\text{O}_{19}$  は安定相として存在せず、La をいくらか添加することによって初めて CaM フェライトが安定になることが知られているが[2]、La 置換 CaM フェライトの物質固有の性質に関する報告は少ない。本研究では、La 置換 CaM フェライトの単結晶試料を作製し、その物性を評価した。

## 実験方法

単結晶試料は CaO 自己フラックス法により合成した。 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{La}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  を原料として  $\text{Ca} : \text{La} : \text{Fe} = 2.9375 : 0.5 : 11.75$  となるように秤量し、メノウ乳鉢で 30 分混合後、白金るつぼ内で  $1400^\circ\text{C}$  から  $1200^\circ\text{C}$  まで  $2.5^\circ\text{C}/\text{h}$  で徐冷した。相同定を XRD、SEM-WDX により行い、磁化測定を MPMS、微視的磁性を  $^{57}\text{Fe}$  メスバウア分光法にて評価した。

## 実験結果・考察

図 1 はフラックス法により得られた薄板状の単結晶である。粉末 XRD を行った所、M 型フェライトに同定された。また、SEM-WDX による組成分析の結果、組成は  $\text{Ca}_{0.49}\text{La}_{0.48}\text{Fe}_{12.03}\text{O}_{19}$  と判明した。多結晶の CaM フェライトは Fe が M 型フェライトの組成式より少ないとき安定化するため、Ca の Fe サイトへの侵入が疑われているが[3, 4]、A イオンと Fe の比が 1 : 12 の試料が得られた。

単結晶の磁化曲線を図 2 に示す。非置換の  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  の磁化困難軸方向の磁化曲線は線形に増加するが、本系では  $H = 0.5 \text{ T}$  付近でメタ磁性転移的に磁化が急激に上昇した。格子の乱れなどにより局所的な磁気異方性が  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  とは異なる可能性がある。今後 MPMS によって詳細な磁化曲線及び試料依存性を測定し、当日報告する予定である。得られた単結晶を用いた  $^{57}\text{Fe}$  メスバウア分光の結果も当日報告する。

## 参考文献

- [1] Y. Kobayashi et al., J. Jpn. Soc. Powder Metallurgy **55**, 7-541 (2008)
- [2] N. Ichinose et al., J. Phys. Soc. Jpn. **18**, 1700 (1963).
- [3] F. K. Lotgering and M. A. H. Huyberts, Solid State Commun. **24**, 49(1980)
- [4] 宇治克俊ほか, 粉体粉末冶金協会講演概要集 平成 27 年度春季大会, 222 (2015)



図 1 得られた単結晶

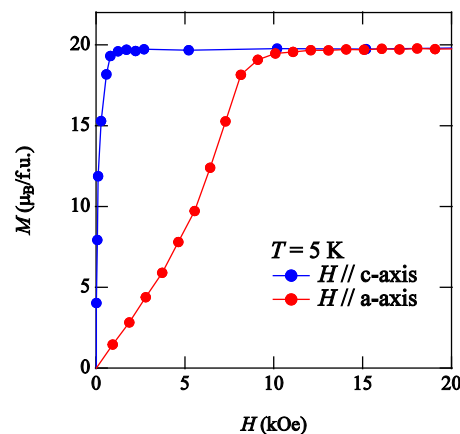


図 2 CaM フェライト単結晶の磁化曲線

# La,Co 置換 M 型 Sr フェライトの単結晶育成及び磁気異方性の評価

森下翔、谷奥泰明、植田浩明、道岡千城、吉村一良  
(京大院理)

Single crystal growth and characterization of magnetic anisotropy in La,Co-substituted M-type Sr ferrites

H. Morishita, Y. Tanioku, H. Ueda, C. Michioka, and K. Yoshimura

(Dept. of Chem., Grad. Sch. of Sci., Kyoto Univ.)

## 1. はじめに

$\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  は M 型フェライトに分類される六方晶の構造を持つ物質であり、磁気異方性が強く保磁力が高いため永久磁石材料として実用化されている。これまで磁石特性を高めるために様々な元素置換が行われてきたが、特に Sr を La に、Fe を Co に部分置換した  $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  は置換に伴い  $x < 0.4$  では飽和磁化が減少せずに保磁力が増加する<sup>1)</sup>。しかし、これまで行われてきた研究は焼結体に関するものであるが、磁気異方性を正確に評価するためには単結晶が必須である。本研究では、La 置換及び La,Co 置換体に対して、単結晶の磁気異方性を測定し、La 置換及び Co 置換それぞれの役割を解明することを目的とする。

## 2. 実験方法

La 置換  $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$  及び La,Co 置換  $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  の単結晶を、キヤノンマシーナリー製の赤外線加熱単結晶育成装置 SC-E15HD を用いて育成した。直径 5mm、長さ 120mm 程度の棒状の焼結体を作製し、Sr,La-rich なフラックスを用いて移動溶媒型浮遊帯域 (Traveling Solvent Floating Zone, TSFZ) 法にて 1mm/h の速度で成長させ、円柱状の単結晶を得た。

磁化測定は QUANTUM DESIGN 社の MPMS を用いて、 $T=5\text{K}\sim 300\text{K}$ 、 $H=0\sim 5\text{MA/m}$  の範囲で行った。このとき、反磁場の影響を極力減らすために、単結晶試料をおよそ  $0.5\text{mm}\times 0.5\text{mm}\times 2\text{mm}$  の直方体状に整形し、長辺を磁場方向と平行にして測定した。

## 3. 結果

$\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  においては、TSFZ 法によって単結晶を合成可能である<sup>2)</sup>が、今回 La 置換及び La,Co 置換  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  においても TSFZ 法が有効であることが明らかとなった。図 1 は育成した結晶の一例であり、右側の複数ドメイン領域を除く直径 4mm、長さ 70mm 程度が単ドメインの単結晶となっている。

得られた試料を粉砕し、粉末 X 線回折測定を行ったところ、広い組成範囲において M 型フェライトが得られることが判明した (図 2)。磁化測定の結果、La 置換により、低温の異方性磁界が  $x \leq 0.3$  までは減少するが、 $x \geq 0.4$  では逆に増加する。同時に、 $x \geq 0.4$  では磁化曲線がある磁場で急に立ち上がる振る舞いを見せ、このことは異方性磁界の増加と関係していると考えられる。また、La,Co 置換体においては、異方性磁界は増加し、組成によっては 2 MA/m を超える試料も得られた。

## 参考文献

- 1) K. Iida, Y. Minachi, K. Masuzawa, M. Kawakami, H. Nishio and H. Taguchi, J. Magn. Soc. Jpn. **23**, 1093 (1999).
- 2) H. Morishita, A. Amano, H. Ueda, C. Michioka and K. Yoshimura, Proc. of the 11th Inter. Conf. on Ferrites, S64 (2013).

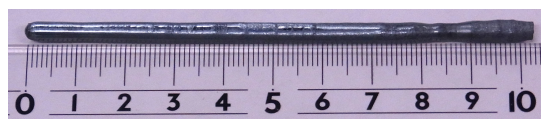


Fig.1 A single crystal of  $\text{Sr}_{0.6}\text{La}_{0.4}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$  grown using TSFZ method.

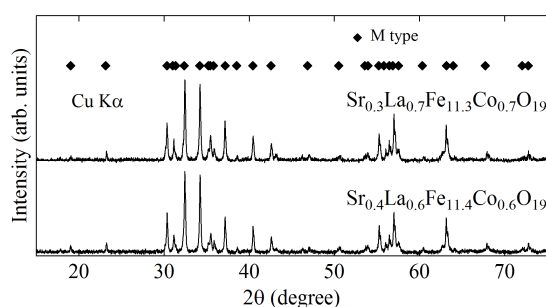


Fig.2 Powder X-ray diffraction patterns of  $\text{Sr}_{0.3}\text{La}_{0.7}\text{Fe}_{11.3}\text{Co}_{0.7}\text{O}_{19}$  and  $\text{Sr}_{0.4}\text{La}_{0.6}\text{Fe}_{11.4}\text{Co}_{0.6}\text{O}_{19}$ .

# FeCo 下地層を用いた Co フェライト薄膜の配向制御

原 佑輔 劉 小晰  
(信州大学)

Tailoring perpendicular magnetic anisotropy in Co-ferrite thin films by FeCo underlayer

Yusuke Hara, Xiaoxi Liu  
(Shinshu University)

## はじめに

これまでは単結晶基板を用い、(001)面上に Co フェライトを成膜し垂直磁気異方性を示す<sup>1)2)</sup>方法が用いられている。しかし我々是非晶質基板上に Co フェライトを形成し基板特性に依存せずに、垂直磁気異方性を示す試料の作成を試みた。また初期層に FeCo を成膜することによるヘテロエピタキシャル成長を試みた。FeCo を成膜する理由として Fig. 1 と Fig. 2 で示すように FeCo(200)面と  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  の misfit ratio 2.1% と非常に小さくテロエピタキシャル成長が期待できる。

## 実験方法

対向ターゲット式スパッタ法を用い、ガラス基板上に薄膜を成膜した。真空到達圧力を  $4.0 \times 10^{-4}$  Pa 以下、スパッタガスは Ar、スパッタガス圧は 0.4 Pa。成膜後に電気炉内で熱処理を施すことにより、結晶成長をさせた。振動試料型磁力計 (VSM) にて磁気特性評価、X 線回折装置 (XRD) にて結晶構造解析を行った。

## 実験結果

Fig. 3 (a) では Co フェライト 単層の XRD 画像を示す。(311)面が回折線の最強ピークになっており、粉末回折法の結果からランダム配向となっていることが分かる。また Fig. 4 は Co フェライト単層の VSM 結果を示しており、この結果からも等方的な性質であることがわかる。これに比べて Fig. 3 (b) では初期層に FeCo 9nm を成膜しその後 Co フェライト 60nm を成膜した XRD 画像で、(400)面が回折線の最強ピークとなっており、優先的な(001)面配向した試料の作成に成功した。また Fig. 5 では Fig. 3 (b) での成膜条件の後 1000°C で熱処理をした結果を示しており、垂直方向に 8 kOe の保磁力を有する試料の作成に成功した。

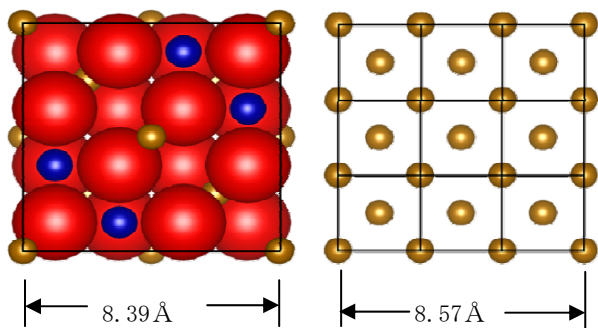


Fig.1 Ideal  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$

Fig.2 Ideal FeCo

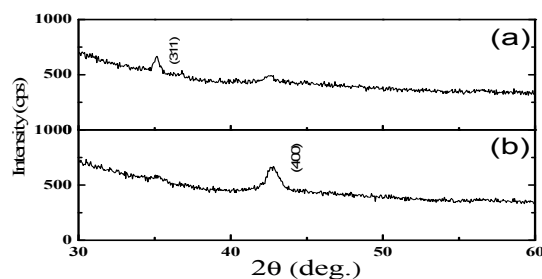


Fig.3(a)  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  single layer

Fig.3(b) FeCo(9nm) /  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ (60nm)

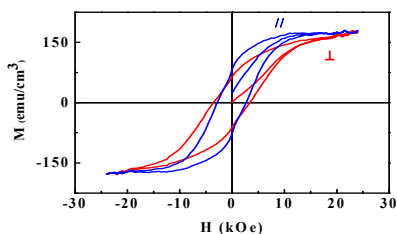


Fig.4 M-H loops of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  thin film

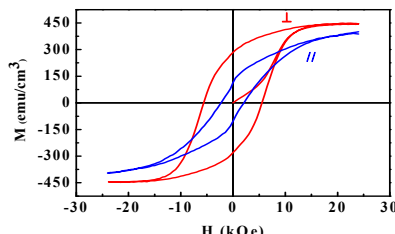


Fig.5 M-H loops of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{FeCo}$  thin film

## 参考文献

- 1) Tomohiko Niizeki et al., Extraordinarily large perpendicular magnetic anisotropy in epitaxially-strained cobalt-ferrite  $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4(001)$  ( $x = 0.75, 1.0$ ) thin films, 103, 162407 (2013)
- 2) H. Zheng et al., Multiferroic  $\text{BaTiO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$  Nanostructures, VOL303 661 (2004)