

強度分布を有する Fe/MgO 多層膜の磁気回折像における解析法の開発 Development of analysis method for magnetic diffraction image obtained from Fe/MgO multilayers

深澤太地¹, 阿久津和音¹, 鈴木宏輔^{1,*}, 櫻井浩¹, 平野馨一², 伊藤正久¹

¹群馬大学大学院理工学府, 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1

²KEK 物質構造科学研究所, 〒305-0801 つくば市大穂 1-1

Taichi FUKASAWA¹, Kazune AKUTSU¹, Kosuke SUZUKI^{1,*},

Hiroshi SAKURAI¹, Keiichi Hirano and Masahisa ITO¹

¹ Graduate School of Sci. and Tech. Gunma Univ., 1-5-1 Tenjincho, Kiryu, Gunma 376-8515, Japan

²High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

1 はじめに

X線磁気回折法(X-ray magnetic diffraction: XMD)は、入射 X 線と試料の磁化方向とのなす角を選択することにより、強磁性体の磁気形状因子を実験的にスピン成分と軌道成分に分離して測定できる。磁気形状因子は、フーリエ変換により磁気モーメントを与える。これまで我々のグループでは、強磁性体単結晶を対象とした XMD 実験を行ってきた[1-9]。

近年、本実験手法の適用範囲の拡大を目指し、強磁性層を有する磁気多層膜の XMD 実験の開発を行っている[10-12]。2016G666 課題にて、Fe/MgO 多層膜からの磁気効果 R が Fe 単結晶と同程度の精度で測定できることを示した[13]。しかし、磁気効果 R から Fe の磁気形状因子を導出にあたり、回折像の広がりやを考慮した偏光因子の補正が必要であることがわかった。そこで、本研究では、偏光因子の補正方法を新たに開発し、Fe/MgO 多層膜における Fe(200) の磁気形状因子の導出を試みた。

2 実験

試料は、群馬大学の高周波スパッタ装置を用いて、以下の二種類の多層膜を作製した。

(i) [Fe(5nm)/MgO(1nm)]₂₀₀ (熱処理あり)

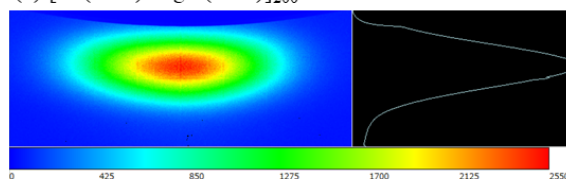
(ii) [Fe(5nm)/MgO(1nm)]₂₀₀ (熱処理なし)

両試料とも MgO 基板上に成膜した。試料の構造と磁気特性は、XRD と VSM にてそれぞれ確認した。

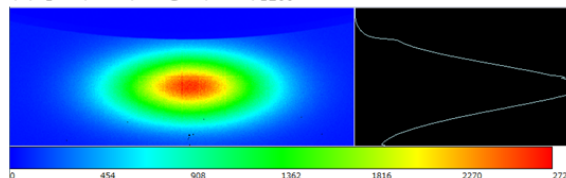
XMD 実験は、PF-BL3C にて行なった。電子軌道面からわずかに上方または下方に放射される楕円偏光 X 線を、Si(111)二結晶モノクロメータにより単色化し試料に照射した。入射 X 線の波長は、試料(i)が 1.992 Å (6.223 keV)、試料(ii)が 2.023 Å (6.128 keV)とした。試料のブラッグ角を 45 度に固定し、多層膜の Fe-bcc 構造に由来する 200 回折 X 線を二次元多素子検出器 PILATUS で計測した。試料には電磁石により 0.85T の磁場を印加し、磁場反転に伴う回折強度

の差から磁気効果 R を求めた。本測定では、入射 X 線と磁場とのなす角を 45 度に固定し、多層膜面内に磁場を印加した。この 45 度配置では、スピン磁気形状因子(μ_s)と軌道磁気形状因子(μ_l)の和($\mu_s+2\mu_l$)が得られる。

(a) [Fe(5nm)/MgO(1nm)]₂₀₀ (熱処理あり)



(b) [Fe(5nm)/MgO(1nm)]₂₀₀ (熱処理なし)



(c) Fe 単結晶

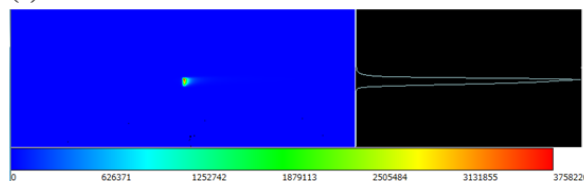


図 1. (a) [Fe(5nm)/MgO(1nm)]₂₀₀ (熱処理あり) から得られた Fe(200) 回折像、(b) [Fe(5nm)/MgO(1nm)]₂₀₀ (熱処理なし) から得られた Fe(200) 回折像、(c) Fe 単結晶から得られた Fe(200) 回折スポット

3 結果および考察

図1に試料(i)と(ii)から得られた Fe(200)の回折像と比較のため、Fe 単結晶の(200)回折を示す。Fe 単結晶の回折像はスポット状であるのに対し、Fe/MgO 多層膜では、楕円状の回折像となる。これは局所的な構造の不連続性に関連すると考えられる。回折像の中心から縦方向と横方向にそれぞれ40ピクセル分の回折 X 線強度を積算することで得られた軌道面上、および下の磁気効果 R_U と R_D は、それぞれ以下の通りであり、Fe 単結晶の R_U と R_D と概ね一致する。

- (i): $R_U = 3.358 \pm 0.364, R_D = -3.484 \pm 0.424$
- (ii): $R_U = 3.509 \pm 0.355, R_D = -3.855 \pm 0.359$
- Fe 単結晶: $R_U = 4.100 \pm 0.048, R_D = -3.876 \pm 0.049$

測定された磁気効果から磁気形状因子を算出するにあたり、磁気散乱理論[14-16]より回折像の広がり方を考慮した以下の(1)式を用いた。

$$R = \gamma [f'_{PS}\mu_S + 2f'_{PL}\mu_L] / \sqrt{2} F_S \quad (1)$$

ここで、 γ はエネルギー項、 f'_{PS} と f'_{PL} は、それぞれスピン成分と軌道成分にかかる偏光因子である。 μ_S と μ_L は、それぞれスピン磁気形状因子と軌道磁気形状因子である。 F_S はFeの構造因子である。本研究では μ_S と μ_L にかかる偏光因子が異なるため、(1)式は、さらに(2)式のように書き下すことができる。

$$\frac{\sqrt{2}R_i F_S}{\gamma f'_{PSi}} = 2 \frac{f'_{PLi}}{f'_{PSi}} \mu_L + \mu_S \quad (2)$$

添字の i は、検出器の i 番目の素子を表す。解析では、図2のように PILATUS の素子ごとに R を求め、

素子ごとに偏光因子を補正した後、X 線強度による重みをつけた最小二乗法により、 μ_S と μ_L のそれぞれを求めた。その結果、試料(i)で $\mu_S = 1.122, \mu_L = 0.018$ 、試料(ii)で $\mu_S = 1.347, \mu_L = 0.010$ であった。この値は、バンド理論計算から得られる Fe(200)の $\mu_S = 0.7782, \mu_L = 0.0473$ と概ね近い値が得られた。

4 まとめ

本研究において、Fe/MgO 多層膜に XMD 実験を適用し、Fe(200)回折像を測定した。Fe(200)回折像から得られる磁気効果は、Fe(200)単結晶から得られる磁気効果と概ね一致することを確認した。また、回折像の広がり方を考慮することで、磁気形状因子からスピン成分と軌道成分を分離できる可能性を示した。

参考文献

- [1] M. Ito *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **64**, 2333-2337 (1995).
- [2] M. Ito *et al.*, J. Phys. Chem. Solids, **65**, 1993-1997 (2004).
- [3] M. Ito *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B **238**, 237-241 (2005).
- [4] K. Suzuki *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **48**, 056506 (2009).
- [5] M. Ito *et al.*, Key Eng. Mater., **459**, 3-6 (2011).
- [6] K. Suzuki *et al.*, Key Eng. Mater., **459**, 7-10 (2011).
- [7] M. Ito *et al.*, Key Eng. Mater., **497**, 3-7 (2012).
- [8] M. Ito *et al.*, Key Eng. Mater., **643**, 39-43 (2015).
- [9] H. Shimoyama *et al.*, Key Eng. Mater., **698**, 3-7 (2016).
- [10] 大沢冬樹子, 平成 27 年度群馬大学修士論文
- [11] 加藤康平, 平成 28 年度群馬大学修士論文
- [12] 高嶋雅仁, 平成 28 年度群馬大学修士論文
- [13] T. Fukasawa *et al.*, PF Act. Rep. 2016 #34 (2017).
- [14] M. Blume, J. Appl. Phys., **57**, 3615 (1985).
- [15] S. W. Lovesey, J. Phys. C: Solid State Phys., **20**, 5625-5639 (1987).
- [16] M. Blume *et al.*, Phys. Rev. B **37**, 1779 (1988).

* kosuzuki@gunma-u.ac.jp

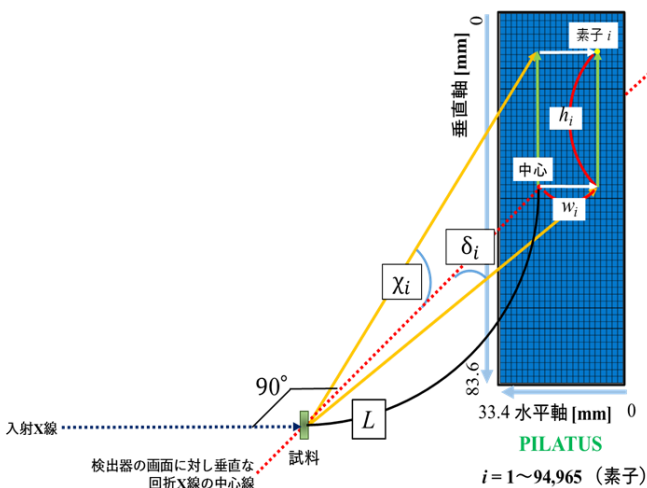


図 2. PILATUS の各素子の位置を考慮したシミュレーションモデル