

**磁気デバイス反強磁性／強磁性交換結合膜における
交換結合バイアスの軟 X 線共鳴磁気反射率による起源解明
Soft X-ray resonant magnetic reflectivity study on the origin
of the exchange bias for the ferromagnet/antiferromagnet coupled film
used in the magnetic devices**

淡路直樹^a, 土井修一^a, 野村健二^a, 野間賢二^b, 広野等子^c, 木村洋昭^c
Naoki Awaji^a, Shuichi Doi^a, Kenji Nomura^a, Kenji Noma^b, Toko Hirono^c, Hiroaki Kimura^c

^a(株)富士通研究所, ^b富士通(株), ^c(財)高輝度光科学研究センター

^a Fujitsu Laboratories Ltd., ^b Fujitsu Ltd., ^c JASRI

IrMn/CoFe 交換結合膜のスピンの深さ分布を元素選択的に評価するために、軟 X 線共鳴磁気反射率測定を行った。Co *L*3 及び Mn *L*3 吸収端ピークで測定した結果、Co 及び Mn スピンの深さ分布を決定することができた。IrMn 層中には広く非補償 Mn スピンが存在し、IrMn/CoFe 界面近傍では Mn スピンは Co スピンと反平行に結合する成分、IrMn 膜中では Co スピンと平行に配列する成分が存在していることが分かった。IrMn/CoFe 界面近傍には、外部磁場によりスピンの向きが反転しない pinned Mn スピンが存在することを見出した。

キーワード： 交換結合膜、X 線磁気円二色性、共鳴磁気反射率

背景と研究目的：

磁気ヘッドのスピナルブ膜やMRAM (Magnetoresistive Random Access Memory) 素子には、反強磁性/強磁性薄膜からなる交換結合膜が磁気情報の読み出し等に用いられている。近年の磁気記録密度の増大により、微小領域の磁気情報を安定に読み出すことが課題になっている。最近、反強磁性材料として開発されたIrMn₃合金膜は、他の反強磁性材料に比べてIrMn/CoFeとしたときの交換バイアスが大きく、バイアス発生時の最小膜厚も薄いことなどから、ハードディスクドライブの読み取りヘッドやMRAM用のTMR膜に広く用いられはじめている。一方、交換結合バイアスの発現機構に関しては、これまでに平行スピンモデルによる多くの研究が行われているが、Triple-qスピン構造が提案されているIrMnの磁化深さ分布については、未だ十分に解明されていない。[2,3]

X線共鳴磁気反射率は、磁性元素の吸収端における磁気散乱効果を利用することにより、試料中のスピンの深さ分布を、元素選択的に評価することのできる有力な方法である[4]。軟X線MCD実験ビームラインであるBL25SUでは、CoやMnなどの3d遷移金属の*L*吸収端の測定が可能である。我々は、IrMn/CoFe交換結合膜において、Co及びMnスピンの深さ分布、特にIrMn/CoFeの界面における磁気構造を調べることにより、磁気情報読み出しの安定化などのデバイス性能の向上に加え、

交換結合の起源考察および巨大Jkの発現機構の考察が可能になると考えた。

実験：

軟X線共鳴磁気反射率測定を行うために、(1)MgO基板/Ru(30Å)/IrMn(60Å)/CoFe(80Å)/Ru(30 Å)、(2) MgO基板/Ru(30Å)/IrMn(35Å)/CoFe(40Å)/Ru(30 Å)という、膜厚の異なる2種類の試料をスパッタ製膜により準備した。Ruは下地層及びキャップ層である。試料面内にバイアスを付加するために、試料の製膜後に15kOeの磁場中で270°C4時間の条件で熱処理を行った。VSMによる磁化測定の結果、今回準備した試料の交換バイアスは試料1で $H_E=400$ Oe、試料2で $H_E=50$ Oeであった。試料2の H_E が小さいのは、IrMn層の膜厚が薄く、交換バイアスが消失する臨界膜厚(20 Å)に近いためである。軟X線共鳴磁気反射率測定において、2軸ゴニオメータを内蔵するエリプソ装置[5]内に、光の進行方向と試料の着磁方向が平行になるように試料を設置した。ネオマックス製の永久磁石により800Oeの外部磁場を試料の着磁方向と平行及び反平行に印加した。±1ヘリシティの円偏光について、マイクロチャンネルプレート(MCP)検出器を用いてゴニオメータの $\theta/2\theta$ 走査により $2\theta=0\sim 140^\circ$ の広い角度範囲で反射率を測定した。測定のエネルギーは622eV(非共鳴条件)、640eV(Mn L3吸収端)、及び780eV(Co L3吸収端)で行った。

結果および考察：

図1に、Co L3及びMn L3吸収端で測定した±1ヘリシティに対する試料1の共鳴磁気反射率の測定結果を示す。外部磁場は試料の着磁方向と平行に印加している。図1において、ほぼ6桁の強度範囲で良好なデータが取得できた。Co L3吸収端での測定結果はヘリシティによって反射率形状が明確に異なっており、吸収端での磁気散乱の存在を確認することができる。図2に、Co L3及びMn L3吸収端での試料1の反射率非対称度 $AR_B=(I^+_B-I^-_B)/(I^+_B+I^-_B)$ を示す。ここで、 I^+_B 及び I^-_B は±1ヘリシティに対するX線反射率であり、下付きの添字Bは外部磁場が着磁方向と平行のとき及び反平行のときを±1で示す。図2の構造はIrMn層中の非補償Mnスピンの起因する磁気散乱効果である。磁場の向きが反転したとき、非対称度の向きは反転し、外部磁場によりスピンの向きが反転することが分かる。

Co L3及びMn L3で得られた反射率非対称度を、界面ラフネスの項を考慮したDWBA[4,6,7]をベースにした計算プログラムにより解析を行った。試料中のスピンの深さ分布の解析の前に、まず非共鳴条件で得られたX線反射率の結果から、電荷散乱による試料中の膜厚、密度、表面・界面ラフネスなどの構造パラメータを決定した。次に吸収端での $(I^++I^-)/2$ を用いて磁気散乱を含まない電荷共鳴散乱強度から構造パラメータの最適化を行い、最後に磁気散乱を反映した反射率非対称度を用いてスピンの深さ分布を決定した。磁性層を3~4層に分割したモデルを用いて解析を行うことで、実験結果を良く再現することができた。図3に得られた試料1及び試料2のCoスピン及びMnスピンの深さ分布を示す。図1及び図2の実線は解析の結果得られた共鳴磁気反射率の計算値である。図3で得られた各スピンの分布形状から以下のことが分かった。(1)CoスピンはCoFe膜中にほぼ一様に分布している。(2)IrMn膜中および界面付近に非補償Mnスピンが存在する。(3)非補償Mnスピンのほとんどは、磁場により回転し、膜中の成分はCoスピンと平行に、界面成分は反平行に配列する。(4)試料1では、IrMn/CoFe界面近傍において、スピンの向きが回

転しない pinned Mn スピンがわずかに存在することが、磁場反転による強度差から分かった。試料2の pinned Mn スピンは測定精度以下であった。これは試料2の IrMn 膜厚が薄く H_E が小さいため、pinned Mn スピンが少ないためと考えられる。今回得られた(2)~(4)の結果から、Mn のスピン構造は複雑であり、これは IrMn 合金に特有の Triple-q スピン構造に起因している可能性がある。

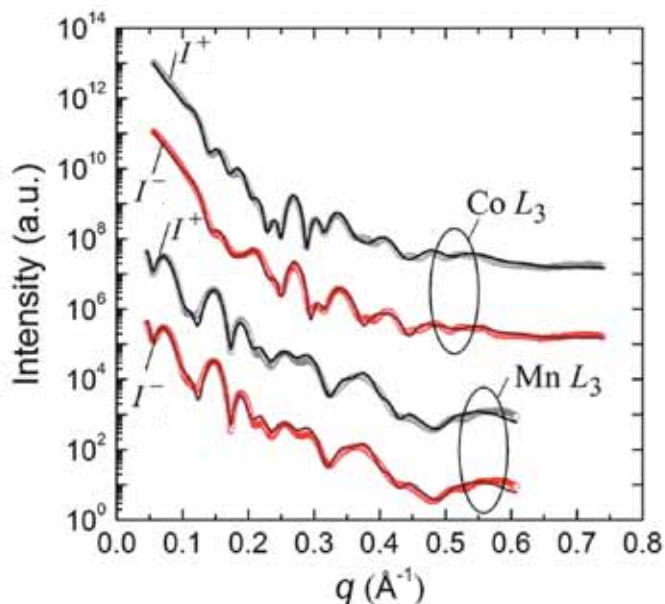


図1. 試料1のCo L_3 及びMn L_3 吸収端における共鳴磁気反射率

○は実験値、実線は解析より求めた計算値。

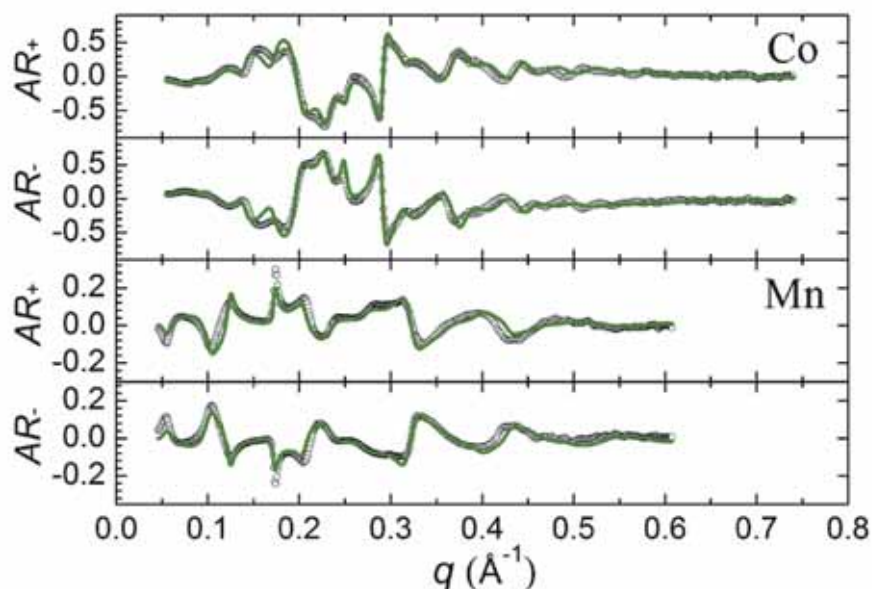


図2. 試料1のCo L_3 及びMn L_3 吸収端における共鳴磁気反射率シグナル

○は実験値、実線は解析より求めた計算値。

AR+は外部磁場が着磁方向と平行のとき、AR-は反平行のとき。

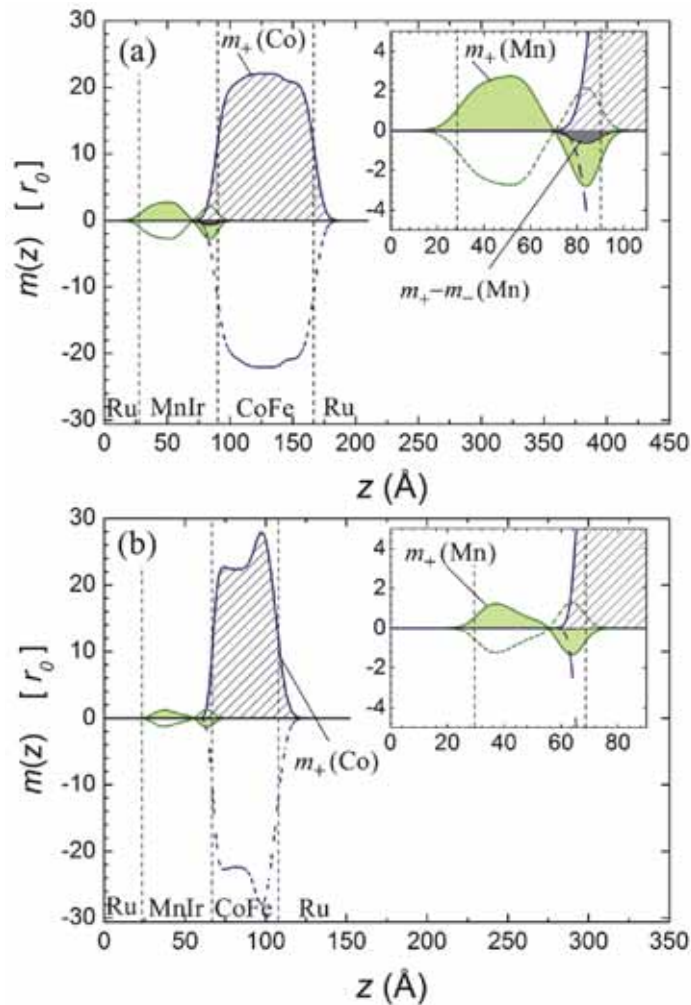


図3. 解析により得られたCoスピン及びMnスピンの深さ分布
 グラフの横軸は基板界面からの距離、縦軸は電子単位で表した磁気振幅。
 挿入図はIrMn/CoFe界面を拡大したもの。(a)は試料1、(b)は試料2。

参考文献：

- [1] S. Doi, N. Awaji, K. Nomura, T. Hirono, T. Nakamura and H. Kimura, Appl. Phys. Lt **94** (2009) 232509
- [2] D. Mauri, H. Siegmann, P. Bagus, E. Kay, J. Appl. Phys. **62** (1987) 3047.
- [3] C. Mitumata, A. Sakuma, F. Fukamichi, Phys. Rev. B **68** (2003) 014437.
- [4] N. Awaji, K. Noma, K. Nomura, S. Doi, T. Hirono, H. Kimura, and T. Nakamura, J. of Phys. Conf series **83** (2007) 012034.
- [5] Kimura H, Hirono T, Miyahara T, Yamamoto Y and Ishikawa T, AIP Conference Proceedings, **705** (2004) 537.
- [6] D. R. Lee, S. K. Sinha, D. Haskel, Y. Choi, C. Lang, S. A. Stepanov and G. Srager, Phys. Rev. B **68**, (2003) 224409.
- [7] S. A. Stepanov and S. K. Sinha, Phys. Rev. B **61**, (2000)15302.