

機関番号：11301

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360133

研究課題名 (和文)

界面誘起非補償反強磁性スピンの解明・制御による高性能交換磁気異方性材料の開発

研究課題名 (英文)

Development of High Performance Exchange Bias Materials by Analyzing and Controlling Interfacial Induced Uncompensated Antiferromagnetic Spins

研究代表者

角田 匡清 (TSUNODA MASAKIYO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80250702

研究成果の概要 (和文)：

$\text{Mn}_{74}\text{Ir}_{26}/\text{Co}_{100-x}\text{Fe}_x$ 積層膜の交換磁気異方性の大きさと界面誘起非補償反強磁性スピンとの相関を見出した。交換磁気異方性の大きさは $x = 25$ at.% で最大となり、非補償反強磁性スピンを表す Mn の X 線磁気円二色性 (XMCD) は負号ならびに大きさが組成 x に対して系統的に変化した。両者の間には直線的相関があり、両者を結びつける隠されたパラメータは界面における交換結合であり、それが強磁性層組成に対して変化するものと考えられた。上記知見に基づき、大きな Mn-XMCD を誘導する強磁性層を形成すべく極薄の Co-Fe 層を $\text{L}_{12}\text{-Mn}_3\text{Ir}/\text{Co}_{65}\text{Fe}_{35}$ 積層膜の界面に挿入することで $1.2\text{erg}/\text{cm}^2$ を超える大きな交換磁気異方性材料の開発に成功した。

研究成果の概要 (英文)：

A correlation between uncompensated (UC) antiferromagnetic (AF) spins and exchange bias (E.B.) strength was investigated for $\text{Mn}_{74}\text{Ir}_{26}/\text{Co}_{100-x}\text{Fe}_x$ bilayers. The E.B. strength had a maximum at $x = 25$ at.%, and the x-ray magnetic circular dichroism of Mn, representing the UC-AF spins, changed systematically in sign and magnitude with respect to x . A linear correlation was found between the E.B. strength and the root mean square magnitude of the UC-Mn spins. The hidden parameter connecting these two quantities might be exchange coupling energy at the hetero-interface, which varies as a function of the ferromagnetic layer composition. Based on the above findings, we succeeded to induce large ($> 1.2 \text{ erg}/\text{cm}^2$) E.B. strength on $\text{L}_{12}\text{-Mn}_3\text{Ir}/\text{Co}_{65}\text{Fe}_{35}$ bilayers with inserting an ultra-thin Co-Fe layer which induces large Mn-XMCD.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2009 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2010 年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：物性実験、磁性、磁気記録、X線、分光

1. 研究開始当初の背景

強磁性／反強磁性積層膜（以下交換結合膜）で観測される交換磁気異方性は、通常印

加磁界方向に追従する強磁性体のスピンの一方に固着される現象であり、スピンバルブ膜の磁化相対角の人工制御性を生み出す

ため、磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) や超高密度ハードディスク (HDD) 用ヘッド等に既に実用化されている。一方で、およそ半世紀前の現象の発見以来、交換磁気異方性の物理の理解と特性開発が多く研究者によって行なわれてきたものの、現在に至るまで、本事象の統一的解釈と特性導出のための材料設計指針を欠いているのが世界的に見た研究の実状であった。交換磁気異方性の特性の内、応用上最も重要なスピン固着力 (一方向異方性定数: J_K) に関してすら、その定量的理解ならびに理論上限値が明らかとなっていない。特に、素子サイズの微細化 ($< 1 \mu\text{m}$) が進む MRAM や HDD ヘッドでは、大きなスピン固着力の導出が、デバイス特性向上の不可欠の要素となっており (K. Nishioka, IEEE Trans Mag **41**(2005)2950)、本事象の微視的発現機構の解明は、応用上も急務の課題となっていた。そもそも、交換磁気異方性によって強磁性スピンが一方向に引き易くなるということは、交換結合膜スピン系が磁場に対する反転対称性を失っている、すなわち、実用磁場 ($< 1 \text{T}$) 印加の範囲で完全に反転しないスピン成分の存在を意味している。非補償反強磁性スピンは、このような交換結合膜における非反転スピンの候補と考えられ、精密磁化測定 (K. Takano, PRL **79**(1997) 1130) や中性子散乱 (A. Hoffmann, PRB **66**(2002) 220406) ならびに光電子全収量 XMCD (W. J. Antel Jr., PRL **83**(1999)1439) の手法によって、積層膜中での存在が確認された。中でも、H. Ohldag のグループは、光電子全収量 XMCD で計測した非補償反強磁性スピンの元素選択性磁化 (ESMH) 測定から、非補償反強磁性スピンの一部が強磁性スピンの磁化反転に追随せずに固着しており、それが交換磁気異方性の微視的起源であると報告していた (PRL **91**(2003) 017203)。

これに対して研究代表者らのグループでは、表面近傍のみの磁気情報が得られる光電子全収量法に比較して、試料全体の磁気情報が得られ、かつ印加磁場による光電子脱出阻害などのアーティファクトが少ない透過法 XMCD の手法を用いて、Mn-Ir/Co-Fe 交換結合膜の非補償反強磁性スピンの起源と、交換磁気異方性に及ぼす役割について検討してきた。その結果、非補償反強磁性スピンは、積層界面の交換相互作用によって生じ、積層界面における反強磁性層 1~2ML にのみ局在していることを、実験的に初めて明らかとし (M. Tsunoda, JAP**101**(2007) 09E510)、同じく積層界面の交換相互作用を起源とする交換磁気異方性との間の相関研究の可能性を拓いた。また、透過法 XMCD で計測した非補償反強磁性スピンの ESMH 測定からは、前述の Ohldag らの実験結果とは異なり、磁場反転に

伴う強磁性スピンの反転に際して、非補償反強磁性スピンは強磁性スピンに追随してすべて反転し、固着成分は存在しないことを見出した (M. Tsunoda, APL **89**(2006)172501)。これは、固着した非補償反強磁性スピンと強磁性スピンとの直接交換相互作用がスピン固着力 (J_K) を決めているとする従来の Ohldag らの説が成り立たないことを示すものであり、磁場反転に対する交換結合膜のスピン系の非対称性は反強磁性層内深部に存在することを意味している。

2. 研究の目的

交換結合膜において、反強磁性層材料を変化させることでスピン固着力 (J_K) が変化することは良く知られ、反強磁性層内部のスピン系の非対称性が変化することに相当している。しかしながら、反強磁性層材料を固定し、強磁性層材料を変化させた場合にもスピン固着力 (J_K) が変化することを、研究代表者らは実験により既に明らかとしている (M. Tsunoda, JMMM **239**(2002)182)。このことは、強磁性層材料の変化 \Rightarrow 積層界面の交換相互作用が変化 \Rightarrow 界面の非補償反強磁性スピンが変化 \Rightarrow 反強磁性層内部のスピン非対称性が変化 \Rightarrow J_K が変化、なる連鎖機構に拠ると推察され、非補償反強磁性スピンとスピン固着力 (J_K) の相関を詳細に調べることで、交換磁気異方性の微視的発現機構解明に繋がると考えるに至った。事実、本研究グループでは、Mn-Ir/Co-Fe 交換結合膜の J_K と非補償 Mn スピンの強磁性層組成依存性を調べた結果、両者の間に何らかの相関が存在することを既に見出している。

そこで本研究では、交換結合膜の積層界面における非補償反強磁性スピンが交換磁気異方性に及ぼす役割とその微視的機構を、XMCD による実験と理論計算の両面から検討し、交換結合膜中のスピン系の磁場反転に対する非対称性の検出を通じて、交換磁気異方性の発現機構を解明することを目的とした。

軟X線 MCD 分光は、実用的な交換結合膜に用いられる 3d 遷移金属元素の磁性研究に極めて有力なツールであるが、軟X線の大きな吸収係数ゆえの透過試料形成の困難さから、一般に光電子全収量法が用いられる。本研究グループでは、メンブレン基板上への安定した薄膜作成手法の確立ならびに SPring-8 の高輝度円偏光の利用によって、より定量性に富んだ透過法計測を可能とし前述の成果を上げてきた。これは当該分野において国内外を通じて大きな特色であり、本研究でも同手法を踏襲した。また、研究組織内で試料作製、XMCD 計測、理論計算のすべてを行い、きめ細かな実験と理論計算との相互フィードバックが可能なことも本研究の大きな特色であった。

3. 研究の方法

(1)反強磁性層を $Mn_{75}Ir_{25}$ とした交換結合膜において、強磁性層材料を変化させた場合の界面誘起非補償反強磁性スピンの変化を、Spring-8 BL25SUにおいて透過法 XMCD 分光・軟 X 線光電子顕微分光の手法によって計測した。XMCD スペクトルと非補償反強磁性スピン磁区の詳細な解析、ならびに交換結合膜のスピンの構造シミュレーションから、非補償反強磁性スピンの原子レベルの微視的誘起機構の解明を図った。同知見から、積層界面における有効スピン結合力を見積もった。

(2)上記ステップで明確化した界面誘起非補償反強磁性スピンと交換結合膜に誘導されている交換磁気異方性との相関について検討を行った。磁場反転時のスピン構造シミュレーションとの対比検討を交え、交換磁気異方性の発現機構の解明を行った。

(3)発現機構に関して得られた知見に基づいて、大きなスピン固着力を有する交換結合膜実現のための界面スピン構造を設計し、その実現のための界面微細構造制御技術を開発した。

4. 研究成果

図 1 に $Mn_{74}Ir_{26}/Co_{100-x}Fe_x$ 積層膜の J_K ならびに飽和磁化 (M_s) の強磁性層組成 (x) 依存性を示す。図の上部には面内 X 線回折法で同定した強磁性層の結晶構造に関する知見を併記してある。 M_s がバルク合金同様にスレーターポリング曲線に従って $x = 60$ at.% を中心とするブロードなピークを示すのに対して、 J_K は $x = 25$ at.% で極大値を示す。このことは、 J_K の大きさが M_s によって支配されているとする過去の報告 (F.T.Parker, PRB 61(2000)R866, H.S.Jung, JAP 95(2004)6849) が正しくないことを意味しており、交換磁気異方性が積層界面における局所的な磁気モーメントの大きさと単純には相関しないことが判った。

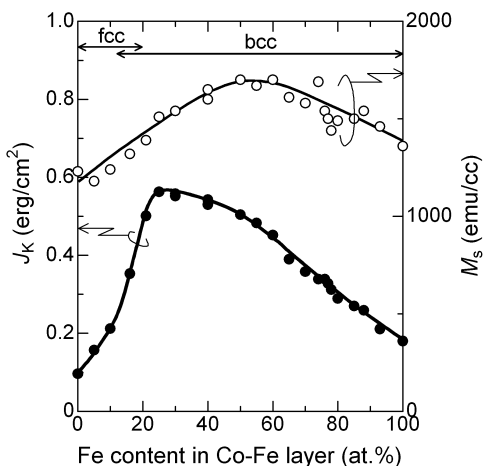


図 1. $Mn_{74}Ir_{26}/Co_{100-x}Fe_x$ 積層膜の J_K と M_s

図 2 には、同積層膜の Mn-L 吸収端近傍における X 線吸収スペクトル (XAS) ならびに XMCD スペクトルを示す。同図(a)は $x = 30$ at.% の試料の測定例であり、同図(b)に L_3 吸収端の XMCD スペクトルの強磁性層組成に対する系統的な変化を示している。 $x = 0$ at.% (純 Co 強磁性層) の場合には Mn-XMCD の符号は負であり、非補償 Mn スピンが強磁性層磁化の方向に平行であることが判る。一方で、 $x = 100$ at.% (純 Fe 強磁性層) の場合には非補償 Mn スピンの方向は強磁性層磁化の方向と反平行である。このことから、界面における非補償反強磁性スピンは、強磁性層の組成によって、その大きさならびに符号を変化させることが明らかとなった。 $0 < x < 100$ at.% の試料 (Co-Fe 合金強磁性層) においては、上記正負の Mn-XMCD 信号が重畳していると仮定して、光電子エネルギー ($h\nu$) = 640.2 eV にピークを有する隣接 Co 原子からの寄与と $h\nu = 639.95$ eV にピークを有する隣接 Fe 原子からの寄与を、図 2(c)に例示する方法でピークフィッティングを行い、分離評価を行った。測定データ (白抜小丸) に対してフィッティング結果 (太線) が良い一致を与えていることが判る。

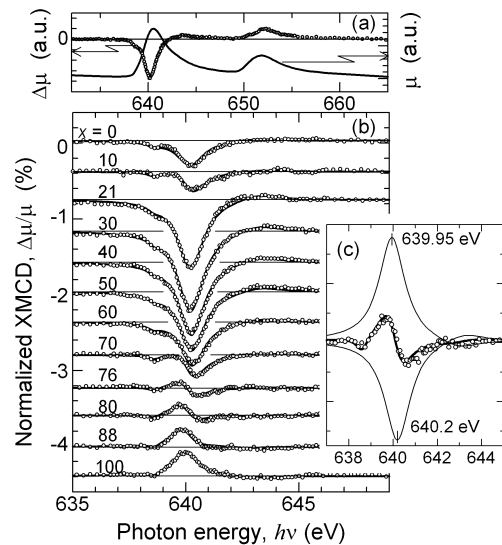


図 2. $Mn_{74}Ir_{26}/Co_{100-x}Fe_x$ 積層膜の Mn-MCD

図 3 には、図 2 のフィッティングから求めた Mn-XMCD における隣接 Co 原子からの寄与 ($Mn_{640.2eV}$) ならびに隣接 Fe 原子からの寄与 ($Mn_{639.95eV}$) の強磁性層組成依存性を示す。図 1 の結果と対比するため、図 3 では Mn-XMCD への両者の寄与の大きさ (縦軸) に負号を附して、非補償 Mn スピンが強磁性磁気モーメントと平行な場合に正の値となるようにしている。強磁性層の Fe 濃度 (x) の増大に伴って $Mn_{639.95eV}$ は単調に増大する傾向を示すが、 $Mn_{640.2eV}$ は $x = 25$ at.% の前後で異なる変化傾向を示し、結果として同組成

で極大値を示している。同図上部に示した強磁性層の結晶構造に関する知見を併せて考えると、体心立方 (bcc) 構造を有する Co が大きな Mn-MCD を導出していることが理解される。

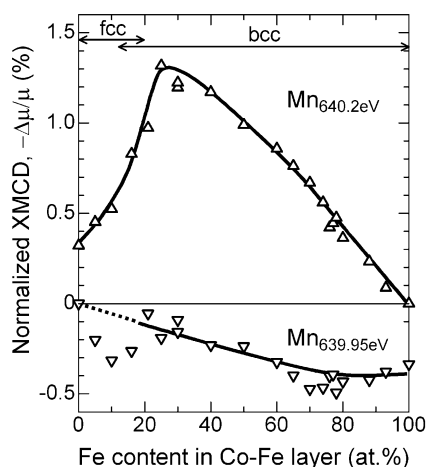


図3. Mn-XMCD の隣接 Co (Fe) 原子からの寄与 $Mn_{640.2eV}$ ($Mn_{639.95eV}$) の強磁性層組成依存性

図4には、非補償 Mn スピンの大きさと J_K との相関を示す。横軸には、非補償 Mn スピンの大きさとして Mn-XMCD の隣接 Co 原子からの寄与 ($Mn_{640.2eV}$) ならびに隣接 Fe 原子からの寄与 ($Mn_{639.95eV}$) の二乗和平均 ($\langle \Delta\mu/\mu \rangle_{rms}$) を採り、強磁性層結晶構造が bcc である範囲の試料について相関をプロットしている。両者の間には比例関係が存在することがわかる。すなわち、大きな非補償反強磁性スピンの誘導されている積層界面ほど、大きな交換磁気異方性を導出できることが明らかとなった。挿入図は強磁性スピン (ブロック矢印) と反強磁性スピン (太線矢印) の界面における配列のモデルであり、Co (白抜) ならびに Fe (ハッチ) 原子に隣接する Mn スピンがそれぞれ強磁性スピンに対して平行

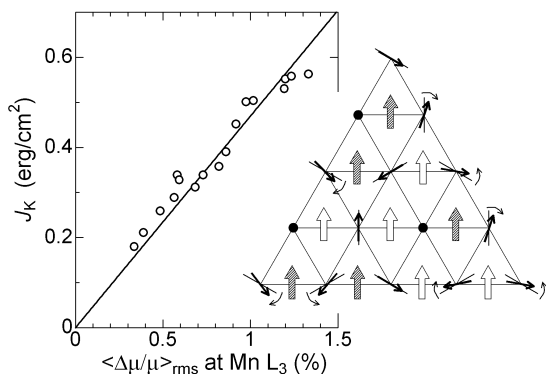


図4. J_K と非補償 Mn スピンの大きさの相関
挿入図は界面のスピンの配列の模式図

ならびに反平行を向こうとする結果非補償反強磁性スピンの誘導されることを示している。

図3ならびに図4の結果から、bcc 構造を有する Co を Mn-Ir 層に隣接させることで大きな非補償 Mn スピンならびにそれに伴う大きな交換磁気異方性が導出できることが予想される。Co 薄膜は通常、面心立方 (fcc) もしくは六方稠密 (hcp) 構造をとるため、bcc 構造の Co 薄膜を単体で実現するのは困難である。そこで、強磁性層には bcc 構造が安定な組成の CoFe 合金を用い、Mn-Ir 層との界面に Co リッチの CoFe 合金を極薄の膜厚で挿入することで、bcc 構造の Co ないし Co リッチ CoFe 層の合成を試みた。図5には、 γ - $Mn_{74}Ir_{26}/Co_{100-x}Fe_x(0.5nm)/Co_{50}Fe_{50}$ 積層膜 (丸印) ならびに $L1_2$ - $Mn_3Ir/Co_{100-x}Fe_x(0.5nm)/Co_{65}Fe_{35}$ 積層膜 (三角印) の J_K の挿入 CoFe 層組成依存性を示す。白抜きのプロットは、極薄挿入層を持たない積層膜の J_K の強磁性 (CoFe) 層組成依存性である。極薄挿入層を持たない積層膜の場合には、界面の CoFe 層の組成が $x = 25$ at.% 以下の領域で、 J_K が著しく低下しているのに対して、Co リッチ極薄層を挿入した試料では $x = 25$ at.% 以上の領域での J_K の組成依存性の傾向を引き継ぎ、 x の低下に対して単調に J_K が増大することが確認できた。結果として、 $L1_2$ - $Mn_3Ir/Co(0.5nm)/Co_{65}Fe_{35}$ 積層膜の場合に 1.2 erg/cm^2 に至る大きな J_K を誘導することに成功した。これは、従来の単層強磁性層を用いた交換結合膜に対して 20% の性能向上が実現できたことを意味しており、現時点までに世界最高の性能である。

本研究の今後の展開としては、HDD ヘッド素子や MRAM 記憶セルに用いられているスピバルブ型 TMR 素子へ、本開発材料を組み込んだ場合の実証研究を通して、実デバイスへの応用を目指す。

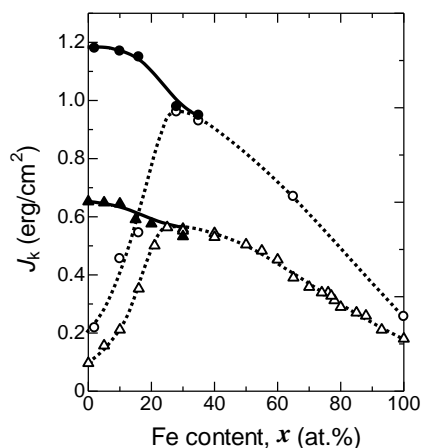


図5. 極薄 CoFe 挿入層を用いた交換結合膜の J_K の隣接強磁性層組成依存性

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

1. M. Tsunoda, H. Takahashi, T. Nakamura, C. Mitsumata, S. Isogami, and M. Takahashi, “Linear correlation between uncompensated antiferromagnetic spins and exchange bias in Mn-Ir/Co_{100-x}Fe_x bilayers”, Applied Physics Letters, **97**, 072501-1-072501-3 (2010), 査読有
2. 角田匡清, “高性能 Mn-Ir 基交換磁気異方性材料の開発”, まぐね, **5** (3), 115-126 (2010), 査読有
3. 高橋宏和、角田匡清、三俣千春、高橋研, “ γ -Mn-Ir/Fe-Co-Ni 積層膜の交換磁気異方性と強磁性層結晶構造との相関”, Journal of Magnetism Society of Japan, **34**(3), 285-288 (2010), 査読有
4. M. Takahashi, M. Tsunoda, and S. Saito, “Tailor-made nano-structured materials for perpendicular recording media and head -precise control of direct/indirect exchange coupling”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **321**, 539-544 (2009), 査読有
5. H. Takahashi, M. Tsunoda, K. Fukumoto, T. Nakamura, K. Arai, T. Kinoshita, and M. Takahashi, “Correlation between exchange bias field and domain size of ferromagnetic layer in Mn-Ir/Co-Fe bilayers”, Journal of Applied Physics, **105** (7), 07D720-1-07D720-3 (2009), 査読有
6. D. Y. Kim, S. S. Yoon, C. G. Kim, M. Tsunoda, and M. Takahashi, “Antiferromagnet Thickness Dependence of the Training Effect in Exchange-Coupled CoFe/MnIr Bilayers”, IEEE Transaction on Magnetism, **45**(10), 3865-3868 (2009), 査読有
7. M. Tsunoda, H. Takahashi, and M. Takahashi, “Systematic Study for Magnetization Dependence of Exchange Anisotropy Strength in Mn-Ir/FM (FM = Ni-Co, Co-Fe, Fe-Ni) Bilayer System”, IEEE Transaction on Magnetism, **45**(10), 3877-3880 (2009), 査読有
8. C. Mitsumata, A. Sakuma, K. Fukamichi, M. Tsunoda, and M. Takahashi, “Critical Thickness of Antiferromagnetic Layer in Exchange Biasing Bilayer System”, Journal of Physical Society of Japan, **77**,

044602-1-044602-6 (2008), 査読有

9. M. Tsunoda, T. Kato, Y. Ashizawa, Y. Suzuki, and M. Takahashi, “Compositional Dependence of Exchange Anisotropy in γ -Mn-Ir-Rh-Ru / Co₇₀Fe₃₀ Bilayers”, Journal of Magnetism Society of Japan, **32**, 445-446 (2008), 査読有
10. K. Komagaki, M. Tsunoda, H. Takahashi, K. Noma, H. Kanai, K. Kobayashi, Y. Uehara, and M. Takahashi, “Enhanced Exchange Anisotropy by Ultra-Thin Co_xFe_{100-x} (x > 80) Layer Insertion at the Interface of L1₂-Ordered Mn₃Ir/Co₆₅Fe₃₅ Bilayers”, IEEE Transaction on Magnetism, **44**(11), 2832-2834 (2008), 査読有

[学会発表] (計 17 件)

1. H. Takahashi, M. Tsunoda, and M. Takahashi, “Blocking temperature of γ -Mn-Ir/(Fe-Co, Co-Ni, Ni-Fe) exchange biased films with ultra-thin antiferromagnetic layer”, 55th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2010 年 11 月 17 日, 米国、アトランタ
2. H. Takahashi, M. Tsunoda, and M. Takahashi, “Exchange Anisotropy Strength of γ -Mn-Ir / (Fe-Co, Co-Ni, Ni-Fe) bilayers with ultra-thin antiferromagnetic layer”, 2nd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, 2010 年 7 月 13 日, 仙台
3. 高橋宏和、角田匡清、高橋研, “極薄反強磁性層を用いた γ -Mn-Ir / (Fe-Co, Co-Ni, Ni-Fe)積層膜の交換磁気異方性”, 日本磁気学会, 2010 年 9 月 7 日, つくば
4. 高橋宏和、角田匡清、三俣千春、高橋研, “ γ -Mn-Ir/Fe-Co-Ni 積層膜の交換磁気異方性と強磁性層結晶構造との相関”, 日本磁気学会, 2009 年 9 月 14 日, 長崎
5. 高橋宏和、角田匡清、中村哲也、児玉謙司、高橋研, “ γ -Mn-Ir/FM (FM=Fe-Co, Co-Ni, Ni-Fe) 積層膜の交換磁気異方性と界面非補償反強磁性スピンの関係”, 日本磁気学会, 2009 年 9 月 14 日, 長崎
6. 小田洋平、高橋宏和、土浦宏紀、角田匡清、高橋研、佐久間昭正, “反強磁性/強磁性接合界面の電子構造と磁気構造”, 日本磁気学会, 2009 年 9 月 14 日, 長崎
7. 三俣千春、角田匡清、高橋宏和、中村哲也、高橋研, “強磁性/反強磁性積層膜の交換

- 磁気異方性と界面非補償反強磁性スピンの相関～ハイゼンベルグモデルによる検討～”, 日本磁気学会, 2009年9月14日, 長崎
8. D. Y. Kim S. S. Yoon, C. G. Kim, M. Tsunoda, and M. Takahashi, “Antiferromagnetic Thickness Dependence of the Training Effect in Exchange-Coupled CoFe/MnIr Bilayers”, 2009 IEEE International Magnetic Conference, 2009年5月6日, 米国、サクラメント
 9. M. Tsunoda H. Takahashi and M. Takahashi, “Systematic Study for Magnetization Dependence of Exchange Anisotropy Strength in Mn-Ir/FM (FM=Ni-Fe, Co-Fe, Fe-Ni) Bilayer System”, 2009 IEEE International Magnetic Conference, 2009年5月6日, 米国、サクラメント
 10. M. Tsunoda, H. Takahashi, T. Nakamura, C. Mitsumata, and M. Takahashi, “Correlation between exchange anisotropy and interfacial uncompensated antiferromagnetic spins in Mn-Ir/Co_{100-x}Fe_x bilayers”, 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2008年11月12日, 米国、オースチン
 11. H. Takahashi, M. Tsunoda, K. Fukumoto, T. Nakamura, K. Arai, T. Kinoshita, and M. Takahashi, “Correlation between the exchange bias and ferromagnetic domain size in Mn-Ir/Co-Fe bilayers”, 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2008年11月12日, 米国、オースチン
 12. 角田匡清, 高橋宏和, 中村哲也, 三俣千春, 高橋研, “Mn-Ir/Co_{100-x}Fe_x 積層膜の交換磁気異方性と界面非補償反強磁性スピンの相関”, 日本磁気学会, 2008年9月13日, 多賀城
 13. 角田匡清, 高橋宏和, 中村哲也, 児玉謙司, 三俣千春, 高橋研, “ γ -Mn-Ir/Co-Fe 積層膜界面への極薄 Co-Fe 層挿入による交換磁気異方性の増強”, 日本磁気学会, 2008年9月13日, 多賀城
 14. 駒垣幸次郎, 角田匡清, 高橋宏和, 野間賢二, 金井均, 小林和雄, 上原裕二, 高橋研, “L₁₂-Mn₃Ir/Co₆₅Fe₃₅ 界面への極薄 Co_xFe_{100-x}(x>80)層挿入による交換磁気異方性の増大効果”, 日本磁気学会, 2008年9月13日, 多賀城
 15. 児玉謙司, 山岸隆一郎, 細糸信好, 高橋宏和, 磯上慎二, 角田匡清, 高橋研, “CoFe/MnIr 交換バイアス膜における Ir の磁気分極構造と磁化過程”, 日本磁気学会, 2008年9月13日, 多賀城
 16. 高橋宏和, 角田匡清, 福本恵紀, 新井邦明, 中村哲也, 木下豊彦, 高橋研, “Mn-Ir/Co-Fe 積層膜における交換結合磁界と強磁性層磁区サイズとの相関”, 日本磁気学会, 2008年9月13日, 多賀城
 17. 中村哲也, 角田匡清, 磯上慎二, 広野等子, 室隆桂之, 松下智裕, 高橋研, 木下豊彦, “MnIr/FeCo 交換結合膜のアニール過程における非補償 Mn スピン変化のその場観察”, 日本磁気学会, 2008年9月13日, 多賀城
- [その他]
ホームページ
http://www.ecei.tohoku.ac.jp/ecei_web/Laboratory/takahashi_j_index.html
6. 研究組織
 - (1) 研究代表者
角田 匡清 (TSUNODA MASAKIYO)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：80250702
 - (2) 研究分担者
中村 哲也 (NAKAMURA TETSUYA)
(財)高輝度光科学研究センター・利用研究推進部門 軟X線赤外チーム・チームリーダー 主幹研究員
研究者番号：70311355
 - (3) 連携研究者
なし
 - (4) 研究協力者
三俣 千春 (MISTUMATA CHIHARU)
東北大学・大学院工学研究科・客員教授
高橋 宏和 (TAKAHASHI HIROKAZU)
東北大学・大学院工学研究科・博士後期課程