

負の一軸結晶磁気異方性を有する hcp-CoIr 単結晶薄膜における Co
軌道磁気モーメントと結晶磁気異方性定数との相関
Correlation between orbital magnetic moment and magnetocrystalline
anisotropy constant in hcp-CoIr single crystal thin films with negative
uniaxial magnetic anisotropy

小川 智之^a, 長谷川 大二^a, 中村 哲也^b, 角田 匡清^a

^aTomoyuki Ogawa, ^aDaiji Hasegawa, ^bTetuya Nakamura, ^aMasakiyo Tunoda

^a東北大学, ^b高輝度光科学研究センター

^aTohoku University, ^bJASRI

H.c.p. Co-Ir 合金が有する負の結晶磁気異方性の起源を明らかにするために、大型放射光施設 SPring-8 の BL25SU にて hcp[001]と[110]の XMCD 測定し、その結果に磁気光学総和則を適用することにより、Co の軌道磁気モーメント、 M_{Co}^{orb} の結晶方位依存性を評価した。その結果、負の結晶磁気異方性を有する h.c.p. Co-Ir における Co の軌道モーメントは結晶方位に関わらず符号は正であり、 $M_{Co}^{orb}[001] > M_{Co}^{orb}[110]$ であることが明らかとなった。結晶磁気異方性の起源がスピン軌道相互作用エネルギーの結晶方位による差であることを考慮すると、以上の結果は、h.c.p. Co-Ir における負の結晶磁気異方性の起源は Co のスピン軌道相互作用ではなく、Ir のスピン軌道相互作用であることを示唆している。

To clarify a origin of negative magnetocrystalline anisotropy in h.c.p. Co-Ir alloy, the crystallographic axis dependences of the orbital moment, M_{Co}^{orb} , of Co for Co-Ir single crystal films were investigated with X-ray magnetic-circular-dichroism, XMCD and the magneto-optic sum rules. As a result, it was found that both of the sign of $M_{Co}^{orb}[100]$ and $M_{Co}^{orb}[110]$ were positive and $M_{Co}^{orb}[001] > M_{Co}^{orb}[110]$. This suggests that the origin of the negative magnetocrystalline anisotropy in h.c.p. Co-Ir alloy was not the spin orbit interaction in Co but in Ir.

キーワード：負の結晶磁気異方性、六方晶 Co-Ir 合金、X 線磁気円二色性、元素別磁化測定、軌道磁気モーメント

背景と研究目的： 負の一軸結晶磁気異方性を有する材料は、磁化容易方向が c 面内にあり、a-c 面内における大きな磁気異方性エネルギー ($|K_u| \sim 10^6 \text{ erg/cm}^3$) にもかかわらず c 面内における磁気異方性エネルギーが小さい ($K_4 \sim 10^3 \text{ erg/cm}^3$) ため、c 面内の磁化ベクトルの運動に対しては軟磁気特性を発現する特異な性質を有する。このため同磁性材料は、インダクターの磁心、アンテナ基板、電磁波ノイズ吸収体等の高周波デバイス用磁性材料としての応用が期待されている他、超高密度垂直磁気記録媒体における軟磁性裏打ち層あるいは磁性記録層ならびに MRAM 等スピントルクデバイスにおける強磁性固定層など広い分野への応用が検討されている。

筆者らは高周波デバイス用磁性材料として負の K_u を有するナノ粒子に着目し、薄膜による材料探査・磁気物性値 (K_u および飽和磁化 M_s) 評価およびナノ粒子化に伴う磁気特性の変化を検討してきた。その結果、薄膜による材料探査では、負の一軸結晶磁気異方性を有する

hcp-Co₈₃Ir₁₇ 不規則合金薄膜において絶対値が比較的大きな負の異方性磁界 ($H_k = 2K_u/M_s = -12\text{kOe}$) を有することを見出した。また、負の K_u を有する材料は、10nm 程度のナノ粒子化に伴い c 面内のみに発現する 2 次元的な超常磁性現象という全く新しい物理現象の存在を実験的に実証し、非常に優れた高周波磁気特性を示すことを理論計算により見出した。高周波デバイス応用のためには、上限周波数向上の観点からはさらに大きな H_k の絶対値が求められており、現在、第 3 元素の添加による結晶磁気異方性 (K_u) および飽和磁化 (M_s) の制御を検討している。しかしながら、hcp-CoIr の結晶磁気異方性の起源は、理論・実験を通じてこれまでに明確化されておらず、第 3 元素種の選択指針が定まっていないのが現状である。

そこで、本研究では、Co-Ir 単結晶合金薄膜ならびに比較対象として、正の一軸磁気異方性を示す Co-Pt 単結晶合金薄膜について Co-L 吸収端の XMCD スペクトルを高精度で得、同スペクトルに磁気光学総和則を適用することにより、

hcp-Co 合金における Co のスピン・軌道モーメントの結晶方位依存性を分離評価し, CoIr の特異的な結晶磁気異方性の起源を明らかとすることを目的とする.

実験: 試料は, 単結晶 MgO(110) 基板上に成膜された(100)配向した h.c.p. $\text{Co}_{100-x}\text{Ir}_x$ ($x=2, 5, 17\text{at}\%$) 擬単結晶薄膜(80nm)を用いた. 比較対象として正の一軸異方性を有する h.c.p. $\text{Co}_{100-x}\text{Pt}_x$ も作製した.

Co の軌道モーメントは, BL25SU にて h.c.p.[001]および[110]に磁界を印加し, Co の L2, L3 吸収端における XAS ならびに XMCD スペクトルを全電子収量法で測定し, 得られたスペクトルに磁気光学総和則を適用しスピンモーメントから分離評価した.

実験結果: 図 1 に Co-Ir および Co-Pt 薄膜における Co の [001]ならびに [110] 軌道モーメント, $M_{\text{Co}}^{\text{orb}}[001]$, $M_{\text{Co}}^{\text{orb}}[110]$, の Ir および Pt 組成に対する変化を示す. Co-Ir, Co-Pt ともに, 結晶方位および組成に関わらず $M_{\text{Co}}^{\text{orb}}$ の符号は正であり, $M_{\text{Co}}^{\text{orb}}[001] > M_{\text{Co}}^{\text{orb}}[110]$ となった. このことは, 結晶磁気異方性エネルギーの起源が [110] と [001] のスピン軌道相互作用エネルギー ($E_{\text{SL}} = -\lambda \mathbf{S} \cdot \mathbf{L}$, \mathbf{S} : スピン角運動量, \mathbf{L} : 軌道角運動量) の差であることを考慮すると $\lambda > 0$ であり, また,

$$E_{\text{Co-SL}}[110] - E_{\text{Co-SL}}[001] = \lambda \mathbf{S} \cdot (\mathbf{L}[001] - \mathbf{L}[110]) > 0$$

であることを示している.

そこで, 図 2 に, Ir および Pt 濃度に対し $L[001] - L[110]$ に対応する

$$M_{\text{Co}}^{\text{orb}}[001] - M_{\text{Co}}^{\text{orb}}[110]$$

を示す. 参考のため, K_u も示す. Co-Pt の場合, Pt 組成の増加と共に $M_{\text{Co}}^{\text{orb}}[001] - M_{\text{Co}}^{\text{orb}}[110]$ も増大し, K_u の符号および変化とよく対応しており, Co-Pt において Co の軌道モーメントが K_u 増大の一因になっていることがわかる. しかしながら, Co-Ir の場合, Ir 組成の増大と共に $M_{\text{Co}}^{\text{orb}}[001] - M_{\text{Co}}^{\text{orb}}[110]$ は減少するが, その符号は正のままである. このことは, Co-Ir における負の K_u が Co の軌道モーメントでは説明できないことを示唆している. 実際に課題番号 2007A2042 にて, BL39XU を使用し Co-Ir における Ir 軌道モーメントの評価を行った結果, 負の K_u の起源が Ir の軌道モーメントに有ること示唆したデータが得られている.

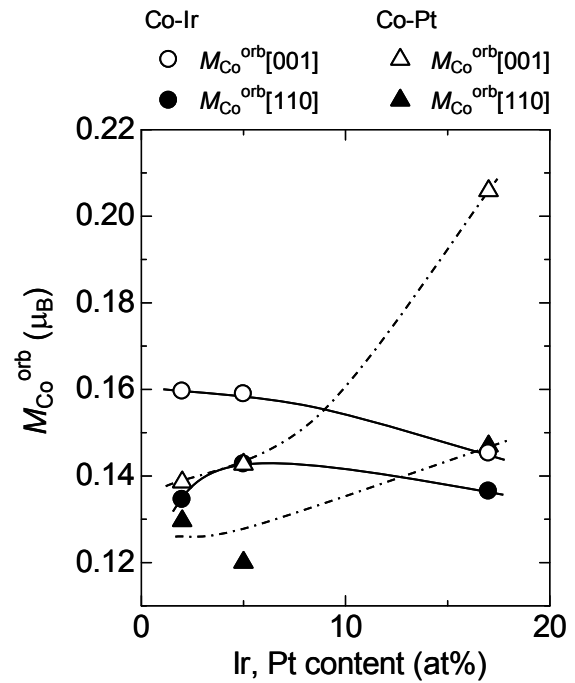


図 1 Co-Ir および Co-Pt 薄膜における Co の [001] ならびに [110] 軌道モーメント, $M_{\text{Co}}^{\text{orb}}[001]$, $M_{\text{Co}}^{\text{orb}}[110]$, の Ir および Pt 組成依存性

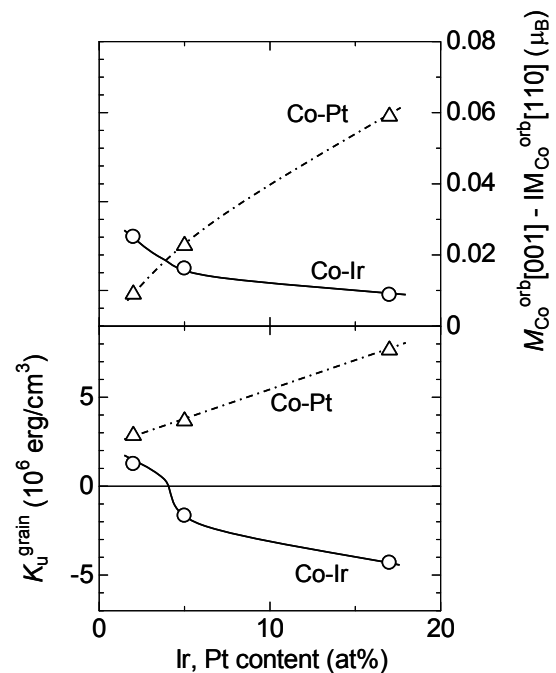


図 2 Co-Ir および Co-Pt 薄膜における Co の軌道モーメントの結晶方位による差 $M_{\text{Co}}^{\text{orb}}[001] - M_{\text{Co}}^{\text{orb}}[110]$ ならびに結晶磁気異方性, K_u , の Ir・Pt 組成依存性