高角型比・高規格化保磁力 CoCr 基垂直磁気記録媒体の材料設計

Guideline for Selecting Materials to be used in CoCr-Based Perpendicular Media with High Squareness and Normalized Coercivity

齊藤 伸・星 文和・板垣憲和・高橋 研*

東北大学大学院工学研究科電子工学専攻, 仙台市青葉区荒巻字青葉 05 (〒980–8579)

*東北大学未来科学技術共同研究センター, 仙台市青葉区荒巻字青葉 04 (〒980–8579)

S. Saito, F. Hoshi, N. Itagaki, and M. Takahashi*

Department of Electronics Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Aoba-yama 05, Sendai 980–8579

*New Industry Creation Hatchery Center, Tohoku University, Aoba-yama 04, Sendai 980–8579

A guideline for selecting materials to be used in CoCr-based perpendicular media with high squareness and normalized coercivity was investigated by taking the effects of thermal agitation and intergranular exchange coupling into consideration. The main results are as follows: (1) The current media have a low maximum value of H_c/H_k^{grain} of 0.35, which is considered to be due to the effects of thermal agitation for $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}} / kT < 150$, and intergranular exchange coupling for $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}} / kT > 200$. (2) Media with low $4\pi M_s / H_k^{\text{grain}}$ and large α tend to show a low positive H_n / H_k^{grain} . (3) Media with large $4\pi M_s / H_k^{\text{grain}}$ and large α tend to show a low effective nucleation field H_n^{eff} . On the other hand, some media that have low α , with a value of about 1, show positive H_n^{eff} . The behavior of H_n^{eff} is considered to be caused by thermal agitation. (4) To realize a medium with $S = 1$ and α as low as possible, the selection of a material with $4\pi M_s / H_k^{\text{grain}} = 0.2\text{--}0.3$ (for $\alpha = 1.6$) is promising. This medium is expected to show values of $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}} / kT$ of 150–200, and of H_c / H_k^{grain} of 0.22–0.28. To realize a medium with high H_c / H_k^{grain} , $4\pi M_s / H_k^{\text{grain}} = 0.6\text{--}0.7$ (for $\alpha = 1.3$) is promising. This medium is expected to show values of $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}} / kT$ of 150, and of H_c / H_k^{grain} of 0.35.

Key words: CoCr-based perpendicular magnetic recording media, thermal agitation, exchange coupling, normalized coercivity, loop squareness, nucleation field

1. はじめに

CoCr 系垂直磁気記録媒体は、記録密度 100 Gbit/in² を越える HD を実現するポテンシャルを有すると目されており¹⁾, 実用上重要な 30 nm 以下の膜厚領域において磁気特性を向上させることが課題である。これまでの研究では、磁気特性を劣化させる要因として、軟磁気的な初期層の存在^{2)–3)}, 単磁区微粒子型の磁化反転機構からの逸脱^{4)–5)}, 熱擾乱による磁化反転^{6)–7)}, 結晶粒間の磁気的交換結合の存在^{8)–9)} 等が指摘されており、実験で得られる媒体の磁気特性の低下について上記の要因を分離して議論することは容易でない。筆者らは、まず材料とプロセスの改善により初期層を低減させることが肝要と考え、種々の CoCrPt(B, Ta) 磁性層材料について検討を行ってきた結果、材料組成によっては媒体の初期層厚を低減できること¹⁰⁾,

Co₆₀Cr₄₀/C 中間層を用いたエビタキシャル成長媒体により初期層を完全に排除できること^{11)–12)} を見出してきた。しかしながら初期層を排除した媒体を用いてもなお、低膜厚媒体の規格化保磁力 H_c / H_k^{grain} (H_c : 容易軸方向 (媒体面法線方向) 保磁力, H_k^{grain} : 結晶粒の異方性磁界) や角型比 S は、理想的な単磁区微粒子集合組織からなる垂直磁化膜が示すと考えられる値「1」から大きく低下しており、個々の媒体の磁気特性の低下要因は明確でない。本論文では、初期層の形成を極力抑制した CoCrPt(B, Ta) 媒体の諸磁気特性を、熱擾乱現象と粒間の交換結合の影響を特に考慮して整理することにより、現状プロセスにおいて高角型比ならびに高規格化保磁力媒体を得る CoCr 系材料選定指針を考察する。

2. 実験方法

CoCrPt(B, Ta) 媒体は超高真空プロセス下で DC マグネトロンスパッタリング法を用いて結晶化ガラス基板上に作製した。作製時の基板温度は、放射加熱ヒータを用い室温から 350℃ の範囲で変化させ、磁性層膜厚 d_{mag} は 5 nm から 200 nm まで変化させた。Ar ガス圧は 4 mTorr とした。媒体の組成は合金ターゲットを用いて制御し、ターゲット組成により CoCrPt 媒体については CoCr_{16–24}Pt_{8–20}, B 添加媒体については CoCr_{16–24}Pt_{8–20}B_{2–8}, Ta 添加媒体については CoCr_{16–24}Pt_{8–20}Ta_{2–5} の範囲で様々に変化させた。主たる媒体の層構成は、保護層側から順に、C(7nm) / 磁性層 / Ta(25nm) / 基板とした。磁性層をエビタキシャル成長させるために用いた媒体の中間層/下地層の層構成は、Co₆₀Cr₄₀(20nm) / C(1nm) / Ti(25nm) もしくは Ru(3nm) / Ti(25nm) とした。

媒体の構造は、in-plane XRD 法 (Cu-K α) により解析した。媒体の磁化曲線は極 Kerr 装置 (stepped field; 7s/each field) により測定し、飽和磁化 M_s は VSM (swept field; 100 Oe/s) により評価した。尚、反転開始磁界 H_n を求める場合には、磁化曲線上での接線が必要となるため、VSM による磁化曲線を利用した。結晶粒の結晶磁気異方性 K_u^{grain} は、トルク磁力計で評価される媒体全体の垂直磁気異方性を元に $K_u^{\text{exp}} \times d_{\text{mag}}$ vs. d_{mag} プロット^{13)–14)} の傾きから算出した。結晶粒の異方性磁界 H_k^{grain} は、
$$H_k^{\text{grain}} = 2 K_u^{\text{grain}} / M_s, \quad (1)$$

により導出した。

媒体の活性化体積 V_{act} は、残留保磁力の保持時間依存性

$$H_f = -\{dH_f(t)/dt\}, \quad (2)$$

から揺動磁界 H_f を求め、下記の式により導出した¹⁵⁾。

$$V_{\text{act}} = k_B T / M_s H_f. \quad (3)$$

3. 実験結果および考察

3.1 インコヒーレントな磁化反転機構の影響

Fig. 1 に(A) $\text{Co}_{72}\text{Cr}_{16}\text{Pt}_8\text{B}_4$ 媒体および (B) $\text{Co}_{64}\text{Cr}_{24}\text{Pt}_8\text{B}_4$ 媒体の活性化体積の磁性層膜厚依存性を示す。TEM による断面構造観察および結晶磁気異方性の解析の結果、これらの媒体には初期層部分の 2–3 nm を除いて、膜厚方向に均一なコラム状結晶粒が形成されていることを確認した^{10), 16)}。図中には参考のために、媒体中のコラム状結晶粒が円柱状であることを仮定して求めた結晶粒体積 V_{phys} も示してある。算出に用いた面内結晶粒径 GD は(100)面からの in-plane X 線回折線の半値幅を基に Sherrer の式により導出した。いずれの組成の媒体も V_{phys} は d_{mag} の増加にともないほぼ直線状に増加しているが V_{act} は $d_{\text{mag}} = 30 - 50 \text{ nm}$ を境界として折れ線状に傾きが低下していることがわかる。このような膜厚の厚い領域で V_{act} の増加率が変化する現象は、パルス磁界による V_{act} の評価結果と同様であり、厚膜媒体では結晶粒内の局所的磁気モーメントが一斉には磁化反転できなくなっていることを示唆している^{17)–18)}。

以下の解析では、膜厚は 30 nm でかつ初期層厚 3 nm 以下の媒体のみ解析の対象とし、諸磁気特性に及ぼすインコヒーレントな磁化反転と初期層の影響を極力排除した。

3.2 規格化保磁力にみられる熱擾乱と交換結合の影響

以降の解析に用いた媒体は、基板温度依存性の結果垂直保磁力が最大を示す温度条件で作製している。まず、規格化保磁力

Fig. 1 Activation volume for medium A, $\text{Co}_{72}\text{Cr}_{16}\text{Pt}_8\text{B}_4$ (solid line), and for medium B, $\text{Co}_{64}\text{Cr}_{24}\text{Pt}_8\text{B}_4$ (broken line), as a function of the thickness d_{mag} of film deposited on a Ta underlayer. In the figure, the thickness dependence of the physical volume of a columnar grain with grain diameter GD is also shown.

向上のための材料条件について検討する。Fig. 2 に種々の組成の CoCrPt 系媒体の $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}} / kT$ に対する H_c / H_k^{grain} をプロットした。○印は CoCrPtB 媒体、▲は CoCrPtTa 媒体、■は CoCrPt 媒体を示している。評価した媒体の特性を概観すると、図中灰色にて示した通り上に凸なる帯状の領域を形成するように分布しており、 CoCrPtB 媒体や CoCrPtTa 媒体は低 $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}} / kT$ 値を、 CoCrPt 媒体は高 $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}} / kT$ 値を有する傾向が認められる。

具体的に材料および層構成を変化させた場合媒体の特性が如何に変化するか、本プロット上で例を挙げて示す。まず磁性層組成を高 Pt 濃度化した媒体の評価結果を示す。Fig. 3 上段には、Pt 濃度 x を 8 at.% から 16 at.% へと変化させた $\text{CoCr}_{20}\text{Pt}_x\text{B}_4$ 媒体 (○), $\text{CoCr}_{20}\text{Pt}_x$ 媒体 (△), $\text{CoCr}_{16}\text{Pt}_x$ 媒体 (□) すなわち、Co と置換させながら Pt 濃度を变化させた組成系列の媒体の H_c / H_k^{grain} を $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}} / kT$ に対して示す。いずれの組成系の媒体でも Pt 濃度を増加させると、 H_c / H_k^{grain} 値が著しく低下していることがわかる。Fig. 3 中段には、Cr 濃度 y を 16 at.% から 20 at.% あるいは 24 at.% へと変化させた $\text{CoCr}_y\text{Pt}_8\text{B}_4$ 媒体 (●), CoCr_yPt_8 媒体 (▲), $\text{CoCr}_y\text{Pt}_{16}$ 媒体 (■) すなわち、Co と置換させながら Cr 濃度を变化させた組成系列の媒体の H_c / H_k^{grain} を $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}} / kT$ に対して示す。いずれの媒体においても Cr 濃度の低減は $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}} / kT$ 値の増加をもたらすことがわかる。また $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}} / kT$ 値が 120 程度以下の媒体については、Cr 濃度の低減は H_c / H_k^{grain} の向上に有効であることがわかる。Fig. 3 下段には種々の組成の記録層に対し、中間層として $\text{Co}_{60}\text{Cr}_{40}(20\text{nm})/\text{C}(1\text{nm})$ 、もしくは $\text{Ru}(3\text{nm})$ を設けた媒体と設けなかった媒体の $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}} / kT$ に対する H_c / H_k^{grain} の変化を示す。記号 ◎ ▽ ◇ ● は記録層の組成がそれぞれ $\text{Co}_{64}\text{Cr}_{24}\text{Pt}_8\text{B}_4$ 、 $\text{Co}_{69}\text{Cr}_{19}\text{Pt}_8\text{B}_4$ 、 $\text{Co}_{64}\text{Cr}_{20}\text{Pt}_{16}$ 、 $\text{Co}_{76}\text{Cr}_{16}\text{Pt}_8$ である媒体を指し、矢印の始点側が中間層を用いていない媒体、終

Fig. 2 Normalized coercivity H_c / H_k^{grain} plotted against $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}} / kT$ for 30-nm-thick CoCrPt (■), CoCrPtB (○), and CoCrPtTa (▲) media with various compositions. In the figure, equivalent curves of the loop gradient at coercivity α are also shown.

Fig. 3 Change in normalized coercivity H_c/H_k^{grain} plotted against $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ for 30-nm-thick media (gray circles). The dependence of H_c/H_k^{grain} on (upper) Pt content, (middle) Cr content, and (lower) the intermediate layer, respectively, is shown. In the lower figure, $\odot$, ∇ , $\diamond$, and $\bullet$ correspond to media with compositions of $\text{Co}_{64}\text{Cr}_{24}\text{Pt}_8\text{B}_4$, $\text{Co}_{69}\text{Cr}_{19}\text{Pt}_8\text{B}_4$, $\text{Co}_{64}\text{Cr}_{20}\text{Pt}_{16}$, and $\text{Co}_{76}\text{Cr}_{16}\text{Pt}_8$, respectively.

点側が中間層を用いた媒体の特性を示している。いずれの組成の媒体でもエピタキシャル成長をさせることにより $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ 値は増加する。また $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ 値が 68 と低い $\text{CoCr}_{24}\text{Pt}_8\text{B}_4$ 媒体では、 H_c/H_k^{grain} 値に改善効果が認められる。

Fig. 2 中には磁性結晶粒間の交換結合の一指標として、各媒体の実験値を元にヒステリシスループの傾き α ($4\pi(dM/dH)_{H=H_c}$) の等値線を記入してみた。 H_c/H_k^{grain} vs. $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ プロット上での α の等値線の傾斜は $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT < 150$ の領域では急峻であるが $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ の増加とともに傾きが緩慢になる。したがって、 H_c/H_k^{grain} は $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT = 150$ 付近を境界として変化の傾向が異なる。すなわち、 $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT < 150$ ではいずれの α 値を有する媒体も $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ の減少とともに H_c/H_k^{grain} が低下している。一方 $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT > 150$ では H_c/H_k^{grain} は $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ よりもむしろ α に依存しており、 α の増加とともに H_c/H_k^{grain} が低下している。換言すれば、 H_c/H_k^{grain} は $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT < 150$ の媒体では熱擾乱の影響を、 $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT > 150$ の媒体では交換結合の影響を顕著に受ける結果、いずれの場合も低下すること、またこれらの現象の兼ね合いにより、150 から 200 程度の $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ 値を有する媒体が、0.35 程度の比較的高い H_c/H_k^{grain} 値を示し得ることがわかる。

Fig. 4 Left: plot of H_n/H_k^{grain} vs. $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$. Right: schematic view of an ideal CoCr-based perpendicular magnetic recording medium consisting of S-W-type grains. The perpendicular magnetic hysteresis loop of the corresponding medium is also shown.

3.3 規格化反転開始磁界にみられる熱擾乱と交換結合の影響

次に、角型比向上のための材料条件を検討するために、実験で得られる各媒体の反転開始磁界 H_n の傾向について整理する。Fig. 4 には評価に用いた H_n/H_k^{grain} vs. $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ プロットの説明図を示す。挿入図は理想的な単磁区微粒子集合組織を仮定した媒体とその磁化曲線の模式図である。理想的な単磁区微粒子集合組織媒体では、磁化反転がコヒーレント型であり磁化容易軸方向保磁力は H_k^{grain} と等しくなる。また H_n は、結晶粒が反磁界零雰囲気下にあることを考慮すると、

$$H_n/H_k^{\text{grain}} = -1 + 4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}, \quad (4)$$

と表される。実際の媒体では各結晶粒は H_k^{grain} 以下の逆磁界で磁化反転することが予想されるから

$$H_n/H_k^{\text{grain}} > -1 + 4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}, \quad (5)$$

である。一方、垂直磁化膜化の条件、ならびに角型比 1 の条件から、

$$4\pi M_s/H_k^{\text{grain}} < 1, \quad (6)$$

$$H_n/H_k^{\text{grain}} < 0, \quad (7)$$

である。(5)–(7) 式を満たす材料条件を Fig. 4 の H_n/H_k^{grain} vs. $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ プロット中に図示すると、灰色領域となることがわかる。

一方、磁化反転開始時に結晶粒が実際に感じる実効反転開始磁界を H_n^{eff} とすると、反磁界を考慮して、

$$H_n/H_k^{\text{grain}} = H_n^{\text{eff}}/H_k^{\text{grain}} + 4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}, \quad (8)$$

と書ける。このことは、実験にて得られる媒体の $H_n^{\text{eff}}/H_k^{\text{grain}}$ が H_n/H_k^{grain} vs. $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ プロット図中で作図的に得られることを意味している。すなわち、図中の実験点（一例として $\circ$ 印）で示される媒体の $H_n^{\text{eff}}/H_k^{\text{grain}}$ は、プロット点 $\circ$ を通り (4) 式で表される直線と平行な直線を補助線として引いた場合（図中点線）、縦軸切片となる。

Fig. 5 に種々の組成の CoCrPt 系媒体の $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ に対する H_n/H_k^{grain} をプロットした。 $\circ$ 印は CoCrPtB 媒体、 $\blacktriangle$ は

Fig. 5 Normalized nucleation field H_n/H_k^{grain} plotted against $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ for 30-nm-thick CoCrPt (■), CoCrPtB (○), and CoCrPtTa (▲) media with various compositions. In the figure, equivalence curves of the loop gradient at coercivity α are also shown. The supplementary graph shows the method for determining H_n .

CoCrPtTa 媒体, ■ は CoCrPt 媒体を示している。挿入図には媒体の H_n の決定例を示す。 H_n は M_s の 95 % の磁化値を示すヒステリシスループ上の点での接線と M_s との交点の磁界と定義した。評価した媒体は、 $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ 値にして 0.29–0.69 の広範囲にわたって分布しているが、いずれの媒体も $S=1$ とはならなかった。

材料組成ならびに層構成を変化させた場合の媒体の諸磁気特性の変化を本プロット上で概観する。 Fig. 6 上段には、 Pt 濃度 x を 8 at.% から 16 at.% へと変化させた CoCr₂₀Pt_xB₄ 媒体 (○), CoCr₂₀Pt_x 媒体 (△), CoCr₁₆Pt_x 媒体 (□) の $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ に対する H_n/H_k^{grain} の変化を示す。 Pt 濃度を増加させると総じて $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ 値は低下し、 H_n/H_k^{grain} 値が低下していることがわかる。

Fig. 6 中段には、 Cr 濃度 y を 16 at.% から 20 at.% あるいは 24 at.% へと変化させた CoCr_yPt₈B₄ 媒体 (●), CoCr_yPt₈ 媒体 (▲), CoCr_yPt₁₆ 媒体 (■) の $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ に対する H_n/H_k^{grain} の変化を示す。 Cr 濃度を減少させた場合、 $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ 値は増加するが、 H_n/H_k^{grain} 値は Pt 濃度依存性の場合とは逆に低下することがわかる。

Fig. 6 下段には種々の組成の記録層に対し、中間層として Co₆₀Cr₄₀(20nm)/C(1nm), もしくは Ru(3nm) を設けて記録層をエピタキシャル成長させた媒体の $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ に対する H_n/H_k^{grain} 値を中間層を設けなかった媒体のそれと比較して示す。記号ならびに矢印の意味は Fig. 2 の場合と同様である。いずれの組成の媒体でも、記録層のエピタキシャル成長如何に関わらず $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ 値はそれ程変化しない。ただし H_n/H_k^{grain} 値が高い B 添加媒体では、中間層の導入により H_n/H_k^{grain} 値が低下して角型比 1 の条件領域に近づくことがわかる。

Fig. 6 Change in the normalized nucleation field H_n/H_k^{grain} plotted against $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ for 30-nm-thick media (gray circles). The dependence of H_n/H_k^{grain} on (upper) Pt content, (middle) Cr content, and (lower) the intermediate layer, respectively, is shown. In the lower figure, ◎, ▽, ◇, and ● correspond to media with compositions of Co₆₄Cr₂₄Pt₈B₄, Co₆₀Cr₁₉Pt₈B₄, Co₆₄Cr₂₀Pt₁₆, and Co₇₆Cr₁₆Pt₈, respectively.

Fig. 2 の場合と同様に、磁性結晶粒間の交換結合について検討するため、Fig. 5 中に各媒体の実験値を元にヒステリシスループの傾き $\alpha(4\pi(dM/dH)_{H=H_c})$ の等値線を記入した。 α の等値線は $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ の減少とともに H_n/H_k^{grain} が緩やかに減少する方向へ伸びている。また、 α の値が増加する程、等値線が $S=1$ の領域に近づく傾向が認められる。このことは、現状のプロセス・材料系で作製した CoCrPt 系媒体において $S=1$ を実現するためには、磁性結晶粒間の交換結合を残存させなければならないことを示唆している。

続いて結晶粒が反転開始時に実効的に感じる磁界 H_n^{eff} について考察する。(8) 式にしたがい Fig. 4 に示した図式解法を適用して H_n^{eff} を評価すると、 $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ 値が大きく α 値の大きい媒体ほど低い $H_n^{\text{eff}}/H_k^{\text{grain}}$ 値を有し、逆に $\alpha=1$ 近傍の媒体の中には、 $H_n^{\text{eff}}/H_k^{\text{grain}}$ が 0 あるいは正の値を示すものも存在することがわかる。このことは、各結晶粒の磁化が自身の H_k^{grain} よりも相当小さい逆向き実効磁界、あるいは順方向実効磁界雰囲気下でも反転してしまっていることを意味しており、 H_n/H_k^{grain} vs. $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ プロット上の各媒体の特性分布は熱擾乱の影響を顕著に受けた結果であることが示唆される。

Fig. 7 Media conditions for high squareness with a value of 1, and for high normalized coercivity with a value of 0.35 in the black regions ① and ②, respectively, in an H_c/H_k^{grain} vs. $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ plot. In the figure, equi-value curves of the loop gradient at coercivity α and of $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ are also shown.

Fig. 8 Media conditions for high squareness with a value of 1, and for high normalized coercivity with a value of 0.35 in the black regions ① and ②, respectively, in an H_n/H_k^{grain} vs. $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ plot. In the figure, equi-value curves of the loop gradient at coercivity α and of $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ are also shown.

3.4 高角型比・高規格化保磁力を有する媒体の材料条件

最後に現状のプロセスにて CoCrPt 系媒体を作製する場合、高角型比、高規格化保磁力特性を導出する材料条件について検討する。Fig. 7 には H_c/H_k^{grain} vs. $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ プロット上に α と $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ の等値線を描いた図を、Fig. 8 には H_n/H_k^{grain} vs. $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ プロット上に α と $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ の等値線を描いた図をそれぞれ示す。両図を見比べると、角型比を完全に 1 とすることと、規格化保磁力を実験的に得られた最大の値である 0.35 とすることとは以下に説明するように両立せず、各々材料に課せられる条件が異なってくることに注意したい。すなわち、角型比 1 の達成を優先させ、磁性結晶粒間の交換結合を可能な

限り抑制する方針により材料探査をするならば、 $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}} = 0.2 - 0.3$ 程度の材料を用い、 α を 1.6 程度に抑えた媒体の作製が望まれる。この場合 $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ は 150 - 200 程度を示すものの、 H_c/H_k^{grain} は 0.22 - 0.28 程度の磁気特性に留まることが予想される (Fig. 7, Fig. 8 中 ①領域)。一方、規格化保磁力の増大を優先させ、熱擾乱耐性を維持しつつ磁性結晶粒間の交換結合を可能な限り抑制する方針により材料探査をするならば、 $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}} = 0.6 - 0.7$ 程度の材料を用い、 α を 1.3 程度に抑えた媒体において $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ は 150 程度、 H_c/H_k^{grain} は 0.35 程度の磁気特性を実現できると考えられる (Fig. 7, Fig. 8 中 ②領域)。ただしこの場合は、角型比が低下するため、特に低記録密度時の記録磁化の熱減磁耐性維持が困難になることが予想される¹⁸⁾。

以上のように、現行のプロセスで作製される CoCr 系垂直磁気記録媒体では、磁気記録媒体材料として必要である「熱擾乱耐性の維持」と「結晶粒の磁氣的孤立化」の両立が非常に難しいことがわかった。最近検討が進められている CoPtCrO¹⁹⁾ 媒体ならびに CoPtCr-SiO₂²⁰⁾ 媒体のように、磁性結晶粒の高 K_u^{grain} 化、磁氣的孤立化を実現する新規な材料およびプロセス開発が急務である。

4. まとめ

初期層の形成を極力抑制した CoCrPt(B, Ta) 媒体について、角型比ならびに規格化保磁力を向上させる CoCr 系材料設計方針について検討した。結晶粒間の交換結合ならびに熱擾乱の影響を考慮して、規格化保磁力 (H_c/H_k^{grain}) および規格化反転磁界 (H_n/H_k^{grain}) を解析した結果、以下のことが明らかになった。

1. 媒体特性を H_c/H_k^{grain} vs. $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$ グラフ上にプロットすると、その分布は $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT = 150$ 付近で 0.35 程度の H_c/H_k^{grain} 値の極大を有する上に凸なる帯状の領域を形成する。これは、 H_c/H_k^{grain} の低下の主要因が $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT < 150$ の媒体では熱擾乱、 $K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT > 150$ の媒体では粒間の交換結合の存在であることを示している。
2. 媒体特性を H_n/H_k^{grain} vs. $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ グラフ上にプロットすると、 $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ 値が小さく α 値が大きい媒体ほど角型比が 1 となる条件領域に近づく。
3. 結晶粒が反転磁界時に実際に感じる実効反転磁界を H_n^{eff} とすると、 $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}}$ 値が大きく α 値が大きい媒体ほど低い $H_n^{\text{eff}}/H_k^{\text{grain}}$ 値を有し、逆に $\alpha = 1$ 近傍の媒体の中には、 $H_n^{\text{eff}}/H_k^{\text{grain}}$ が 0 あるいは正の値を示すものも存在する。このことは H_n 付近で生じる磁化反転も熱擾乱の影響を受けるため、 $|H_n^{\text{eff}}|$ が H_k^{grain} よりも著しく低下することを示唆している。
4. 磁性結晶粒間の交換結合を可能な限り抑制して、角型比を 1 とするには、 $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}} = 0.2 - 0.3$ 程度の材料を用い、 α を 1.6 程度に抑えた媒体 ($K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}}/kT$: 150 - 200, H_c/H_k^{grain} : 0.22 - 0.28) の探査が望まれる。一方、交換結合を可能な限り抑制して、規格化保磁力を増大させるには $4\pi M_s/H_k^{\text{grain}} = 0.6 - 0.7$ 程度の材料を用い、 α を 1.3 程度に抑

えた媒体 ($K_u^{\text{grain}} V_{\text{act}} / kT$: 150, H_c / H_k^{grain} : 0.35) の探査が望まれる。

謝 辞 ガラスディスク基板を御提供頂いた(株)オハラ R&D センターの後藤直雪副参事に感謝いたします。

文 献

- 1) N. Honda and K. Ouchi: *J. Magn. Magn. Mat.*, **235**, 289 (2001).
- 2) E. R. Wuory and J. H. Judy: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-20**, 774 (1984).
- 3) K. Ouchi and S. Iwasaki, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-23**, 2443 (1987).
- 4) H. Danan and W. Andra, *J. Magn. Mater.*, **35**, 299 (1983).
- 5) Y. Nakamura and S. Iwasaki, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-23**, 153 (1987).
- 6) B. C. Webb, S. Schultz and S. B. Oseroff, *J. Appl. Phys.*, **63**, 2923 (1988).
- 7) A. Lyberatos, R. W. Chantrell, E. R. Sterringa and J. C. Lodder, *J. Appl. Phys.*, **70**, 4431 (1991).
- 8) J. G. Zhu and H. N. Bertram, *J. Appl. Phys.*, **66**, 1291 (1989).
- 9) A. Takeo, I. Tagawa and Y. Nakamura, *J. Magn., Soc. Jpn.*, **19**, 97 (1995).
- 10) S. Saito, F. Hoshi, and M. Takahashi: *J. Appl. Phys.*, **91**, 8028 (2002).
- 11) S. Saito, F. Hoshi, and M. Takahashi: *J. Magn., Soc. Jpn.*, **26**, 210 (2002).
- 12) S. Saito, F. Hoshi, and M. Takahashi: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 1985 (2002).
- 13) S. Saito, D. Hasegawa, D. D. Djayaprawira, and M. Takahashi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **25**, 583 (2001).
- 14) S. Saito, D. Hasegawa, D. D. Djayaprawira, and M. Takahashi: *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 811 (2001).
- 15) K. Yamanaka, T. Takayama, Y. Ogawa, A. Yano, and T. Okuwaki: *J. Magn. Magn. Mat.*, **145**, 255 (1995).
- 16) S. Saito, Y. Sato, F. Hoshi, and M. Takahashi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **26**, 215 (2001).
- 17) E. H. Frei, S. Strikman, and D. Treves: *Phys. Rev.*, **106**, 446 (1957).
- 18) T. Shimatsu, H. Uwazumi, H. Muraoka, Y. Nakamura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **26**, 109 (2002).
- 19) S. Oikawa, A. Takeo, T. Hikosaka, and Y. Tanaka: *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 2393 (2000).
- 20) T. Oikawa, M. Nakamura, H. Uwazumi, T. Shimatsu, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 1976 (2002).

2002 年 10 月 15 日受理, 2003 年 1 月 17 日採録