

# 新しい高密度記録技術 —— ECC 媒体 ——

竹野入 俊司 (たけのいり しゅんじ)

李 図強 (り ときょう)

久保木 孔之 (くぼき よしゆき)

## 1 まえがき

富士電機で、垂直磁気記録媒体が量産されてからすでに2年以上が経過し、生産される媒体の多くの部分を垂直媒体が占めるようになってきた。長手記録方式では100 Gbits/in<sup>2</sup>を超える程度で停滞していた面記録密度も、垂直記録方式に移行してからは順調に進展し、現在では250 Gbits/in<sup>2</sup>レベルのHDDが量産されている。一方、研究レベルではすでに500 Gbits/in<sup>2</sup>を超えるデモンストレーションが報告されており、量産・研究レベルともに面記録密度は年率約40%のスピードで急速に増加している。今後もHDDの記録密度がこのままのペースを維持して伸長すると仮定すれば、2009年には量産レベルで500 Gbits/in<sup>2</sup>、研究レベルでは1 Tbits/in<sup>2</sup>に達することになる。現在の垂直媒体の改善のみでこのような高い記録密度を実現することは極めて困難であり、なんらかのブレークスルーが必要になる。

面記録密度を増加させるためには、トラック幅を狭く、ビット長を短くする必要がある。トラック幅を狭くするためには記録ヘッドの磁極幅を狭くしていくことになるが、それによって記録磁界は減少する。磁極先端に用いる軟磁性材料の飽和磁束密度( $B_s$ )を高くすれば記録磁界は増加するが、現在用いられている材料の $B_s$ はすでに理論限界近くに達しており、それも望めない。つまり、記録密度の増加に伴い、記録ヘッドは“書けなく”なることが予想される。一方、ビット長を短くするためには媒体における記録層の磁化反転単位を小さくする必要があるが、磁化反転単位を小さくすると熱安定性が低下してしまう。すなわち保存した記録が消えてしまうリスクが大きくなる。そこで、磁化反転単位が小さくても熱安定性を確保するために、記録層に用いる磁性材料の異方性を高くすればよい。異方性が高くなると、媒体に記録する際に必要な磁界、すなわち反転磁界がより高くなってしまふ。前述したように、今後、ヘッドの記録磁界が増加することは期待できないので、媒体の反転磁界を増加させると“書けなく”になってしまう。このように、“高密度化”、“記録容易性”、“熱安定性”の

三つを同時に成り立たせることは困難であり、これを指して、“垂直媒体のトリレンマ”と呼ばれている。冒頭でブレークスルーが必要といった理由は、従来の延長線上ではこのトリレンマを解決することが難しいと考えるからである。

トリレンマを解決して高密度化を実現するためのアイデアには、熱アシスト記録、パターンメディアなど幾つかの候補が挙げられているが、その一つとして、ECC (Exchange-coupled Composite) 媒体が提案されている。<sup>(1),(2)</sup> シミュレーションでは、ECC媒体を用いることで1 Tbits/in<sup>2</sup>レベルまで実現可能との結果も報告されており、<sup>(3)</sup> 次世代の技術として期待されている。また、熱アシスト記録ではヘッドに熱源を搭載する必要があり、パターンメディアでは各ビットを微細加工技術などにより物理的に分離する必要があるのに対し、ECC媒体は媒体やヘッドに大きな変更を加えずに実現できることから、コストや製造技術の面でも大きなメリットがある。

本稿では、ECC媒体の構成や特長について紹介するとともに、富士電機におけるSemi-ECC媒体の開発状況と今後の課題について述べる。

## 2 ECC 媒体について

### 2.1 ECC 媒体の原理と特長

ECC媒体について述べる前に、1 Tbits/in<sup>2</sup>レベルの媒体のスペックを満たそうとした時に媒体の反転磁界がどの程度になるのか、簡単に見積もってみる。Greavesらと同じ仮定を用い、磁化反転単位が6.5 nm程度の結晶粒径、磁性層膜厚13 nm、 $K_u V/kT$ が約60 ( $K_u$ : 磁気異方性定数、 $V$ : 活性化体積、 $k$ : ボルツマン定数、 $T$ : 温度)として $K_u$ を単純計算すると、 $K_u$ は約 $5 \times 10^6$  erg/cm<sup>3</sup>となる。ここで磁性結晶粒の飽和磁化( $M_s$ )を750 emu/cm<sup>3</sup>とすると、反転磁界を考慮した反転磁界は、 $H_0 \sim 17$  kOeと概算できる。これは、現在実用化されている媒体の反転磁界を大きく超えるものである。Greavesらの方法<sup>(3)</sup>で考慮されているヘッド磁界である12~13 kOeと比較しても非常



竹野入 俊司

固体電解質型燃料電池、磁気記録媒体の研究開発に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社ディスク媒体事業本部開発営業統括部媒体開発部課長。日本磁気学会会員。



李 図強

磁気記録媒体の設計、磁気記録媒体の研究開発に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社ディスク媒体事業本部開発営業統括部媒体開発部。博士(工学)。



久保木 孔之

X線回折・透過電子顕微鏡による評価技術開発・磁気記録媒体の研究開発に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社ディスク媒体事業本部開発営業統括部媒体開発部。日本磁気学会会員。

に高く、この仕様では到底記録できそうもない。このように、単純な構成では、1 Tbits/in<sup>2</sup> レベルのスペックを満たす媒体を作れないことが分かる。そこで、熱安定性を維持しながら反転磁界を下げる必要があるが、その実現が可能な ECC 媒体について次に説明する。

図1にECC媒体の概念図を示す。ECC媒体の記録層は、ソフト層、ハード層（ハード層とソフト層：279ページの「解説」参照）およびこれらの層間の交換結合エネルギーを制御する層の三層で構成される。通常の積層膜であれば、ソフト層とハード層を直接積層するところであるが、層間にさらに一層設けて交換結合エネルギーを適切に制御することで、熱安定性を低下させずに反転磁界を低減できる。

図2にシミュレーションによる反転磁界 ( $H_{sw}$ ) およびエネルギー障壁 ( $E_b/kT$ ) の層間結合エネルギー (Inter-layer coupling energy) 依存を示す。なお、本計算では稲葉らの方法と同様に、1 グレインを対象にそれぞれの磁性層のスピンを一つとした単純化した2-spin modelを用いた。図の横軸は、層間結合エネルギーが0に近付くほど結合が弱くなり、値が大きくなるほど結合が強くなることを表している。例えば、層間に結合エネルギーを制御する層を入れないダイレクトカップリングの場合は、図中右端近くのような特性になり、一方、層間の結合が完全に切れている場合には、層間結合エネルギー=0の特性になる。また、エネルギー障壁は、値が大きいほど熱安定性が高いことを表している。層間結合エネルギーを0から増加させて

図1 ECC媒体の概念図

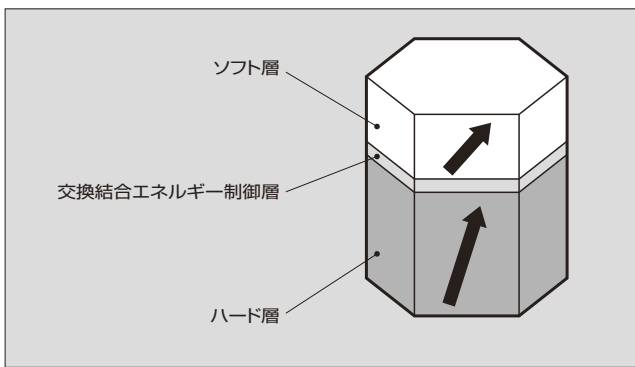
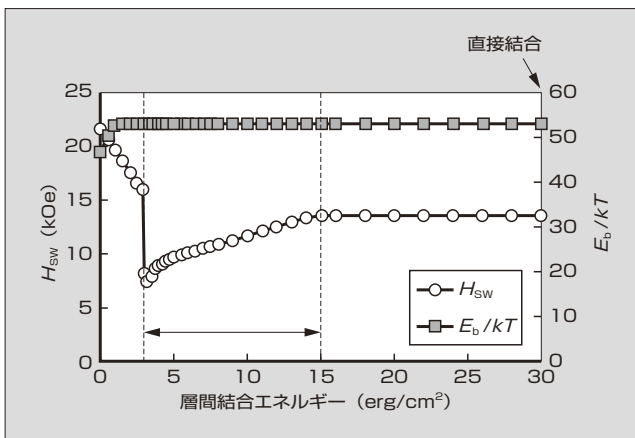


図2 反転磁界, エネルギーバリアの交換結合エネルギー依存



いくと、反転磁界はいったん低下し、極小値をとった後に再び増加し、最終的に飽和することが図2から分かる。

極小値となる反転磁界は、ダイレクトカップリング時の値と比較して半分程度まで低下して、またこの時エネルギー障壁には変化がないことから、エネルギー障壁を変えずに反転磁界を低下させられることが可能であることが分かる。つまり、熱安定性を維持したまま、記録しやすい媒体が実現されている。ECC媒体では、このような効果を得るために、図2の矢印で示した領域の層間結合エネルギーに制御することが重要となる。

2.2 Semi-ECC 媒体

ECC媒体のメリットを生かして高密度記録を達成するためには、次の2点が必要になる。

- (a) ハード層の  $K_u$  を高くすること (例えば、 $K_u$  を  $10^7$  erg/cm<sup>3</sup> 以上にする。)
  - (b) ソフト層膜厚を厚くすること (例えば、記録層の総膜厚の半分以上をソフト層にする。)
- これは次の理由による。

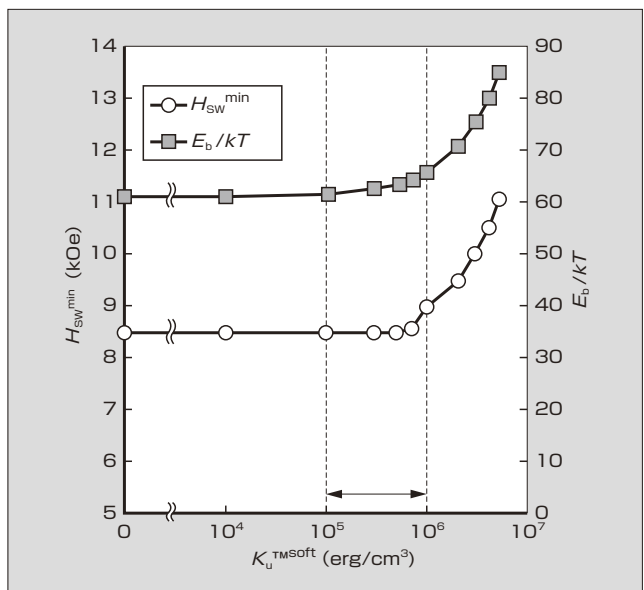
- (a) ハード層の  $K_u$  を高くすることで熱安定性は高まるが、反転磁界が増加する。
- (b) ソフト層を厚くすることで反転磁界を大きく低減することができる。

しかし、現実には、次の状況にある。

- (a) 要求を満たすような高  $K_u$  かつ低ノイズの実用的な磁性材料が見つからない。
  - (b) ソフト層膜厚を厚くすることは技術的に困難である。
- そこで、ECC媒体に移行する前段階として、ソフト層を用いない媒体構成を検討した。

図3に、シミュレーションから見積もった、最小反転磁界 ( $H_{sw}^{min}$ ) とエネルギー障壁 ( $E_b/kT$ ) のソフト層の  $K_u^{soft}$  依存性を示す。なお、最小反転磁界は、層間結合エネルギーを変化させた時に最小になる反転磁

図3 最小反転磁界とエネルギー障壁の  $K_u^{soft}$  依存



界(図2)を表している。また、ここではハード層の $K_u$ をCoPtCr-SiO<sub>2</sub>グラニューラ磁性膜でも実現可能な値<sup>(4)(5)</sup>である、 $6 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ に設定している。図3から、ソフト層を $K_u$ が0程度の完全な軟磁性膜にしなくても、 $K_u^{\text{soft}} < 5 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$ 程度であれば、最小反転磁界、エネルギー障壁ともに変化がないことが分かる。また、最小反転磁界、エネルギー障壁ともに $K_u^{\text{soft}} > 1 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ で急激に増加する傾向が見られる。これらの結果から、ソフト層を $K_u^{\text{soft}}$ が $1 \times 10^6 \text{ (erg/cm}^3)$ 程度のセミ・ハード膜とすることで、反転磁界の大きな増加がなく、かつエネルギーバリアがわずかに増加したECC媒体を得られることが明らかとなった。富士電機では、これをSemi-ECC媒体と呼んでおり、現在その開発を進めている。3章で、実際に試作したSemi-ECC媒体の特性について述べる。なおこれ以降、磁性層間に設けて結合エネルギーを制御する層(図1)のことを結合層と呼ぶ。

③ Semi-ECC 媒体の特性

3.1 磁気特性

図4に、結合層膜厚を変化させたときのカー曲線の変化を、図5に、保磁力( $H_c$ )および飽和磁界( $H_s$ )の結合層膜厚依存を示す。ここでは、ハード層とセミハード層の $K_u$ をそれぞれ約 $5 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ の $K_u^{\text{hard}}$ と $1 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ の $K_u^{\text{semi-hard}}$ とし、磁性膜の組成や膜厚を一定にして結合層の膜厚のみを変化させている。なお図5では、図2と対応させるために、直接結合では結合層膜厚=0、横軸の左側に行くほど結合層膜厚は増加するようプロットしている。これを層間結合エネルギーで考えると、横軸の右側に行くほど増加することになり、図2と対応している。また、図4で①、②、③と番号をつけたカー曲線(カー曲線:279ページの「解説」参照)は、それぞれ図5の番号に対応している。これらの結果から、試作したSemi-ECC媒体のスイッチング磁界( $H_s$ と一致する程度)は、層間結合エネルギーが増加する、すなわち結合層膜厚

が減少すると、いったん減少して極小値をとった後再び増加するというシミュレーションから予想した挙動と同じ挙動を示していることが分かる。また、ダイレクトカップリングした場合(①)とスイッチング磁界の極小値近くに層間結合エネルギーを制御した場合(②)とでは、カー曲線の形状に大きな差はないが、 $H_c$ 、 $H_s$ が大きく増加している領域(③)では、カー曲線が二段になり、その傾斜も小さくなっていることが分かる(図4)。③では、段差にあたる領域でセミハード層の磁化が可逆的に反転していると考えられ、これが原因で反転磁界は十分に低下しない。図2において、層間結合エネルギーが低い、すなわち結合が弱い領域(層間結合エネルギー $< 3 \text{ erg/cm}^2$ )で反転磁界が増加するのは、③のような磁化反転挙動をとるためである。

以上の結果から、磁気特性上は、シミュレーションで予測されたようなSemi-ECC媒体を作製できることが明らかになった。そこで次に、電磁変換特性を評価し、書込み容易性などが実際に改善されているのかどうかを調べた。

3.2 電磁変換特性

ここでは3.1節と同様に、磁性層の組成および膜厚を一定として、結合層膜厚のみを変化させて試料を作製した。なお、スピンドロップの状態(図4、図5の③)になった場合、書込み特性が低下することは明白なので、今回はカー曲線上でスピンドロップが現れない領域に結合層膜厚を制御した。

図6に、試作したSemi-ECC媒体の磁気特性および電磁変換特性の結合層膜厚依存を示す(Reverse O/WとMF-SpiSnt:279ページの「解説」参照)。なお、ここでは横軸を右側に行くほど結合層膜厚が厚くなるようにしている。図6中の磁気特性から、ダイレクトカップリングから結合層膜厚を厚くしていくことで、 $H_c$ および $H_s$ が単調に減少していることが分かる。これは図5の①~②の領域に相当する。最大では、 $H_c$ が約2.6kOe(41%)、 $H_s$ が約3.6kOe(35%)低減できており、“書込みやすさ”に対

図4 Semi-ECC 媒体のカー曲線

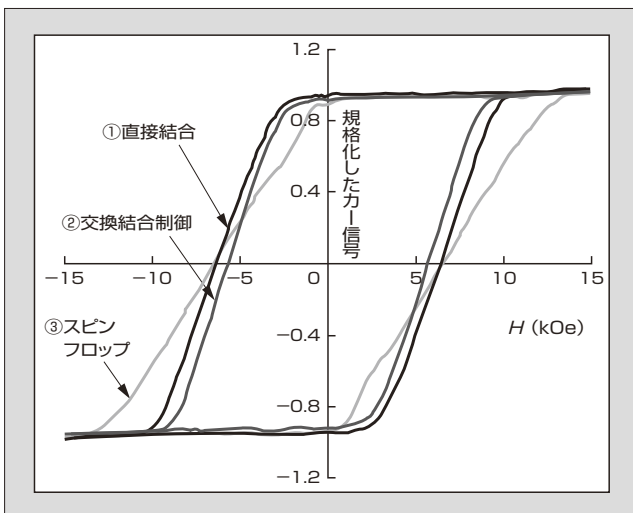


図5  $H_c$ 、 $H_s$ の結合層膜厚依存

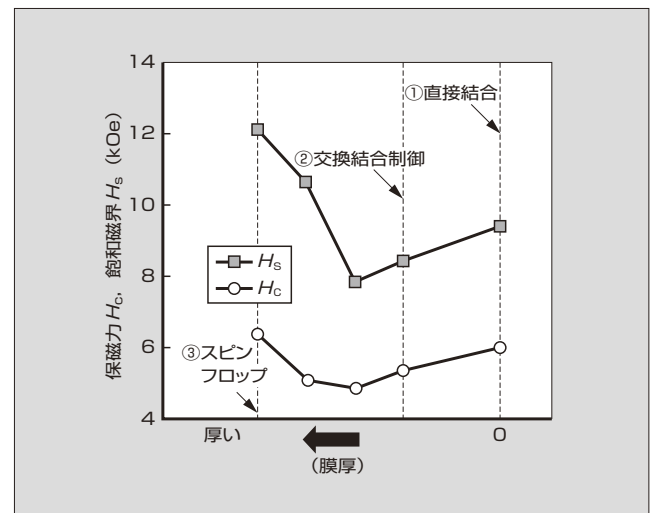
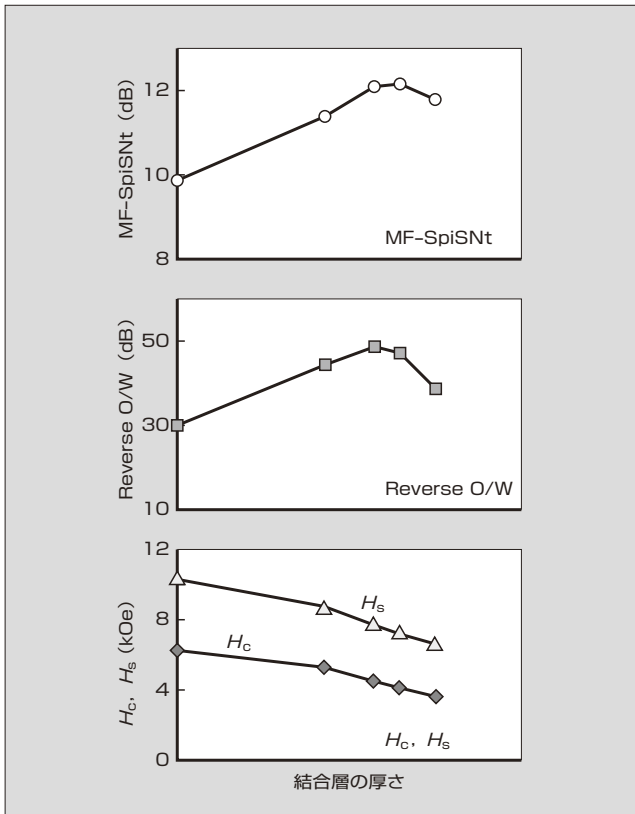


図6 磁気特性、電磁変換特性の結合層膜厚依存



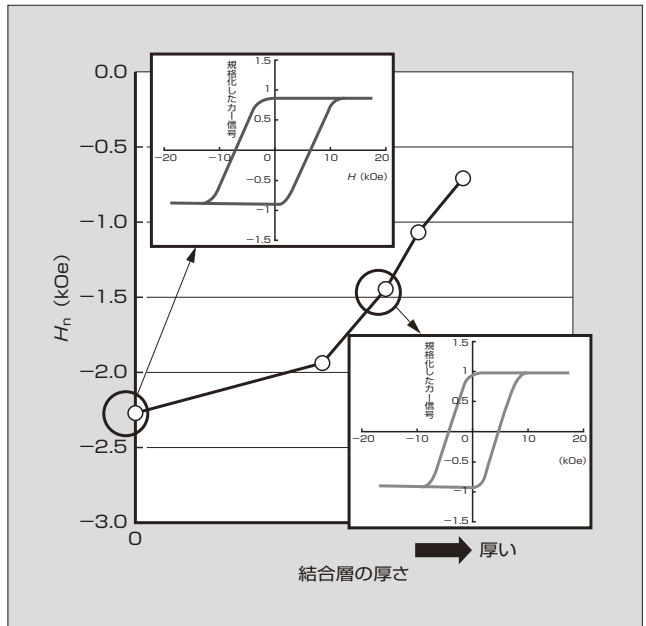
し高い効果が得られている。一方、 $H_c$  および  $H_s$  が結合層膜厚に依存して単調に減少しているのに対し、リバースオーバーライト (R-O/W: 高密度記録上に低密度で上書き) および MF-SNR (Middle Frequency Signal to Noise Ratio: 中周波信号対雑音比) は、結合層膜厚が増加するにつれていったん増加した後、極大値をとって低下する傾向があることが分かる。最大では、R-O/W が約 20 dB、MF-SNR は約 2.3 dB 改善しており、電磁変換特性上も高い効果が確認された。以上の結果から、磁気特性のみでなく電磁変換特性上も、Semi-ECC 構造にすることで特性が改善できることが明らかとなった。

なお、この領域の結合層膜厚での磁気特性と電磁変換特性の傾向の違いについては、原因を明らかにすることはできていないが、以下のように推測している。

- (a) 30 秒程度の測定時間によるカー曲線の測定では、カー曲線に明白な段差や  $H_s$  が増加する現象は見られない。これは、結合層を挟んだ二層が熱揺らぎの影響で次々に反転していることが原因であると考えられる。
- (b) しかし、ヘッドでの記録時のような数 ns オーダの非常に短い時間では、熱揺らぎの影響が小さいため、カー曲線測定時とは異なる磁化反転挙動になっている。つまり、ダイナミックにはスピンドロップになっている可能性がある。

最後に、今後、実用的な Semi-ECC 媒体を作る上での課題について述べる。

図7  $H_n$  の結合層膜厚依存



### 3.3 今後の課題

図7に、3.2節で電磁変換特性を示した Semi-ECC 媒体における、反転開始磁界 ( $H_n$ ) の結合層膜厚依存を示す。 $H_n$  はカー曲線の“肩”の部分にあたり、マイナス側に張り出しているほど熱揺らぎや浮揚磁場耐性が改善される。図7から、 $H_c$  や  $H_s$  の傾向と同様に (図6)、結合層膜厚が増加するにしたがって  $H_n$  の絶対値が低下していることが分かる。図6で R-O/W および MF-SNR が最大値になっている条件において、 $H_n$  は  $-1.5$  kOe 程度しかなく、熱揺らぎや浮揚磁場に対して十分な値とはいえない。 $H_n$  を確保するためにはハード層の  $K_u$  を高くすることが有効であるが、前にも述べたとおり、実用的かつ低ノイズな材料で  $K_u$  を高くすることは難しい。また、Semi-ECC 媒体に特有の課題である  $H_n$  以外にも、高密度化には幾つかの課題がある。今後の課題を列挙すると以下ようになる。

- (a)  $H_n$  の確保
- (b) 低ノイズかつ高  $K_u$  の磁性材料探索、あるいはプロセス改善による高  $K_u$  材料の低ノイズ化
- (c) 磁性層結晶粒径または磁化反転単位の微細化

## 4 あとがき

Semi-ECC 媒体を試作し、反転磁界の低減効果、電磁変換特性の向上を確認した。しかし、実用化までには解決すべき課題があることも明らかになってきた。今後は、材料探索や製造プロセスの改善により、残された課題の解決を図る所存である。また富士電機では、Semi-ECC 構造のほかにも、 $K_u$  に傾斜をつけた積層構造<sup>(6)</sup>により、優れた電磁変換特性が得られることも確認している。この構造と Semi-ECC を組み合わせるなど、新たな層構成についても検討していきたい。

## 参考文献

- (1) Victoria, R. H. Shen, X. Composite media for perpendicular magnetic recording. IEEE. Trans. Magn., vol.41, no.2, 2005, p.537-542.
- (2) 稲葉祐樹ほか. Hard/Soft スタック垂直磁気記録媒体の基礎特性. 日本応用磁気学会誌. vol.29, no.3, 2005, p.239-242.
- (3) Greaves, S. et al. Simulations of magnetic recording for 1 Tb/in<sup>2</sup>. Digests of PMRC 2007, 2007, p.320.
- (4) Shimatsu, T. et al. Thickness reduction in CoPtCr-SiO<sub>2</sub> perpendicular recording media to improve media performance. IEEE. Trans. Magn., vol.40, no.4, 2004, p.2461-2463.
- (5) 竹野入俊司ほか. CoPtCr-SiO<sub>2</sub> 垂直磁気記録媒体の開発と課題, 日本応用磁気学会第 135 回研究会資料, 2004, p.9-16.
- (6) Hong, S. et al. Improvement of recording performances through optimization of exchange coupling in triple layered PMR media. Digests of PMRC 2007, 2007, p.126.

### 解説 ハード層とソフト層, カー曲線, Reverse O/W と MF-SpiSnt

#### ■ハード層とソフト層

ハード層には記録を安定化する役割があり, 保磁力 ( $H_c$ ) が高い永久磁石材料を用いる。一方, ソフト層には記録を容易にする役割があり,  $H_c$  が低く透磁率の比較的大きな材料を用いる。この両者の間の結合力を適切な値に調整することによってそれぞれの長所を併せ持つようにしたのが, ECC 媒体である。

#### ■カー曲線

直線偏光した光を磁化した材料の表面に当てると, 反射光の偏光面が回転する。これを磁気光学カー効果 (MOKE: Magneto-Optical Kerr Effect) と呼ぶ。回転角は磁化の大きさに比例するため, 外部磁場を印加しながら回転角を測定することで, 磁化曲線と似たループが得られる。これを, カー曲線と呼んでいる。

垂直媒体では, 軟磁性裏打ち層の影響で磁化曲線の測定が困難であること, 非破壊で測定可能なことなどから, 磁気特性の評価に MOKE を利用することが多い。

#### ■ Reverse O/W と MF-SpiSnt

(278 ページの図 6 縦軸の説明)

リバースオーバーライト (Reverse O/W) とは, 高密度の記録に低密度の記録を上書きしたときの, 記録信号と消し残りの信号強度の比である。リバースオーバーライトの値が高いほど, “記録しやすい” ことを意味している。

MF-SpiSnt とは, 最大記録周波数の 1/2 の周波数における, 信号-ノイズ比である。MF-SpiSnt の値が高いほど, 高密度でビットを記録できることを意味している。



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。