

記録密度 Gbit/in²クラスの塗布型磁気媒体 - NANOCUBIC 技術 -

斉藤 真二*, 野口 仁*, 遠藤 靖*,
江尻 清美*, 萬代 俊博**, 杉崎 力*

Particulate Magnetic Media with Gbit/in²-Class Recording Density - NANOCUBIC Technology -

Shinji SAITO*, Hitoshi NOGUCHI*, Yasushi ENDO*,
Kiyomi EJIRI*, Toshihiro MANDAI**, and Tsutomu SUGIZAKI*

Abstract

Particulate magnetic media capable of Gbit/in²-class recording densities have been developed owing to the following technologies;

- 1) Coating technology for magnetic layers with uniform thickness of several tens of nanometer (NANO COATING).
- 2) Preparation technology for extremely fine magnetic particles with several tens of nanometer (NANO PARTICLE), and
- 3) Finely dispersing technology for uniformly close-packed magnetic layers (NANO DISPERSION)

These technologies, integrally named NANOCUBIC, achieved a ten-fold increase of recording density, realizing 3GB capacity for 3.5 inch diameter flexible disk media and 1TB capacity for half inch width tape media.

1. はじめに

磁気記録は音声、画像、デジタルデータなどさまざまな情報の記録再生に広範囲に使われてきた。近年では、コンピューターの高性能化やブロードバンドネットワークで代表される通信技術の発達にともない、大量のデータが記録されるようになってきている。また、不慮の事件や災害などでデータを失い、多大な経済的損失が発生した例もあるために、データを複数の場所に分散して保管するニーズも高まっている。これら大量のデータを記録、保管する装置は磁気記録システムが主流を占めている。これは、磁気記録が光記録などの他の記録方法と比べて高密度化と大容量化のポテンシャルがあり、かつ高速での記録再生に適しているためである。

磁気記録システムには、ハードディスクドライブ(HDD)のように記録媒体とドライブが一体になった固定型と、磁気テープ装置、フロッピーディスク装置のような可換型がある。HDDは、記録密度が高く記録再生

が速いが、信頼性とビットコストの点で課題がある。一方、可換型はドライブと切り離してデータを保存できるので、データ損失のリスクが少ない。磁気テープはアクセス速度が遅いが、低ビットコストで大容量の記録ができることがメリットである。これらの特徴からHDDと可換型媒体は相互補完の形で組み合わせて用いられることが多い。

磁気記録媒体には大きく分けて、磁性体を結合剤中に分散した液を支持体上に塗布した塗布型媒体と、真空中での蒸着やスパッタリングで金属薄膜を形成した薄膜型媒体がある。塗布型媒体は、真空プロセスを用いないので大量生産に向いていること、磁性体が高分子で保護されているので保存安定性に優れていることが利点である。したがって、大容量と高い信頼性が要求される放送用ビデオテープやコンピューター用メモリーテープに用いられており、今後の大容量、高速化に対応した高密度化の要求が高まっている。

本誌投稿論文(受理2002年10月16日)

*富士写真フイルム(株)記録メディア研究開発センター
〒250-0001 神奈川県小田原市扇町2-12-1

* Research & Development Center
Recording Media Products Division
Fuji Photo Film Co., Ltd.
Ohgi-cho, Odawara, Kanagawa 250-0001, Japan

**富士写真フイルム(株)生産技術部
〒250-0001 神奈川県小田原市扇町2-12-1

** Production Engineering & Development Division
Fuji Photo Film Co., Ltd.
Ohgi-cho, Odawara, Kanagawa 250-0001, Japan

2. 高密度化の動向と課題

磁気記録システムの面積記録密度の変遷を Fig. 1 に示した。HDD はクローズドシステムであり、媒体、ヘッド、信号処理を最適化することができるので、最も高密度化が進んでいる。1990 年代初頭から記録密度の向上が加速したのは、この時期に磁気抵抗型 (MR) ヘッドと高効率信号処理方式 PRML (Partial Response Maximum Likelihood) が導入されたことが大きな要因になっている。

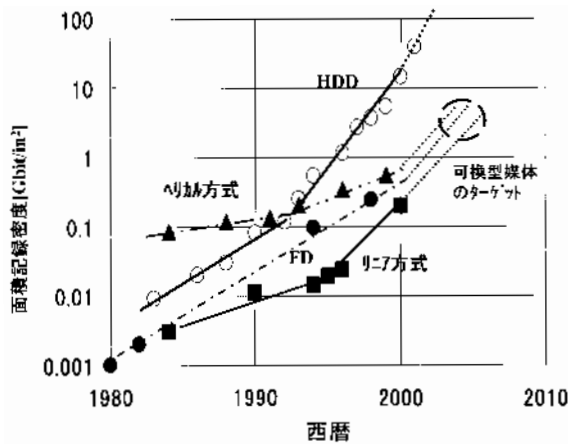


Fig. 1 Areal recording density progress.

VTR などヘリカルスキャン記録方式、コンピューターテープに使われているリニア記録方式などのシステムでは、可換性のために記録密度の向上が緩やかであったが、MR ヘッドや PRML の導入により、近年になって HDD と同様に高密度化の加速が始まっており、可換型媒体でも 2005 年には 3 ~ 5Gbit/in² に達すると予測される。この記録密度は現在実用化されている可換型媒体の約 10 倍であり、記録される最小ビット長は 100nm、トラック幅は 1.2 μm 程度となる。

高密度化は線記録密度とトラック密度の向上による。Fig. 2 に媒体設計要素をまとめた。高密度化の基本となるのは、磁化単位を小さく、かつ均一にすることであり、このために塗布型媒体においては、磁性層の薄層化、磁性体の微細化、磁性層の均一化・平滑化が特に重要な課題になっている。

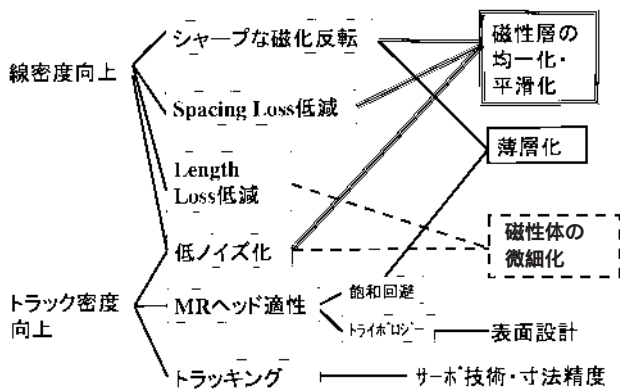


Fig. 2 Design strategy for high density recording media.

磁性層を薄くすることで磁化反転がシャープになり、波形干渉が減少するので¹⁾、磁化反転を短い間隔で行うことが可能になる。PRML の方式によるが、長さ 100nm のビットを記録するには 100nm 以下の厚みの磁性層が必要である。また、磁性層を薄くすることでオーバーライト特性も向上する。前述のように、再生ヘッドとして MR ヘッドを使用するが、MR ヘッドの飽和現象を避けるための磁化量の最適化²⁾にも磁性層を薄くすることが有効である。

ビット長とトラック幅が小さくなると、ビットあたりの磁性体数が減少して SN 比は低下する。単純に磁性層を薄くすると、さらに磁性体数が減少するので、粒子を微細化し高充填して粒子数を増やさなければならない。また、磁性体の長さ起因する出力損失³⁾が大きくなるので、磁化容易軸方向の粒子長をビット長に対して充分短くすることも必要である。

磁性体は凝集で磁氣的に結合すると、見掛け上大きな磁性体として振る舞う。その結果、磁性体の分布状態が不均一になり、ノイズが増加するのみならず、凝集粒子に基づく表面の凹凸がスペーシングロスの原因ともなる。磁性体をいかに磁氣的に孤立させるかは、塗布型媒体の高密度化に必須な技術である。

その他、ヘッド磨耗や静電破壊の防止など、ヘッド・媒体インターフェイスの問題⁴⁾、狭トラックに追従するためのサーボ技術や媒体の寸度安定性などが塗布型、薄膜型媒体共通の課題である。

3. 高密度化のための媒体技術

前述のように、塗布型媒体の記録密度向上のため、磁性層厚み、磁性体サイズ、分散状態をそれぞれ数十 nm オーダーに制御する技術 (NANOCUBIC 技術) を検討した。各論を述べてゆく。

3.1 超薄層精密塗布技術 (NANO COATING)

塗布型媒体では塗布欠陥が発生しやすいため、蒸着媒体、スパッタ媒体に比べて磁性層を薄くすることが困難であると言われてきた。これに対して、非磁性層上に磁性層を同時重層塗布 (上下層塗布液が湿潤状態で二層を塗布) し、実質的に厚く塗布することでサブミクロンの磁性層を実現したのが ATOMM 技術である^{5)・7)}。

これまで、サブミクロンの磁性層厚では磁性層の表面近傍を使って記録してきたが、磁性層厚みが数十 nm になると、磁性層全体を使いたいいわゆる飽和記録状態になる。このとき、厚み方向には数個の磁性体しか存在しない。これら粒子数や充填密度の変動が再生信号振幅の変動 (変調ノイズ) になるので、塗布精度の向上が重要な技術になる。具体的には、磁性層の厚み変動抑制、非磁性層と磁性層の界面の均一化、上下層に含まれる粒子混合抑制が必要になってくる。

磁性層厚みは、塗布液の送液精度やウェブハンドリングの精度向上により厚み誤差 5% 以内に制御した。界面の乱れと塗布液の混合は、塗布液のレオロジカルな物性

と塗布ヘッドから突出する塗布液のせん断力の最適化によって低減させた。Fig. 3 に従来の ATOMM 媒体と NANOCUBIC 媒体の塗布層の断面写真 (TEM 像) を示した。非磁性下層には針状ヘマタイト粒子, 磁性上層にはバリウムフェライト磁性体を塗布してある。従来媒体は磁性層厚 250nm で上下層の界面揺らぎが 40nm であるのに対して, 超薄層精密塗布技術により磁性層厚 50nm の均一塗布が可能になり, 界面揺らぎは数 nm に低減している。

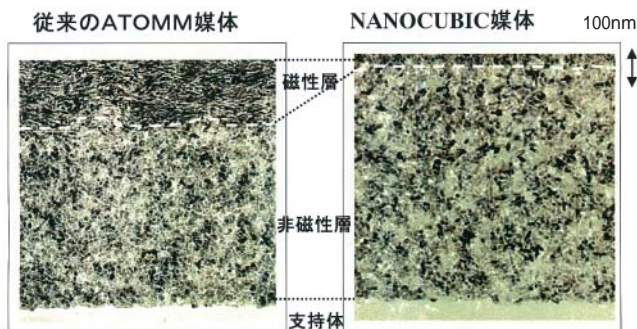


Fig. 3 Cross sectional electron micrographs of NANOCOATINGS.

Fig. 4 に磁性層厚と孤立反転信号の再生波形の半値幅である PW_{50} との関係を示した。磁性層を薄くすることで波形がシャープになり, より高密度の記録が可能になる。

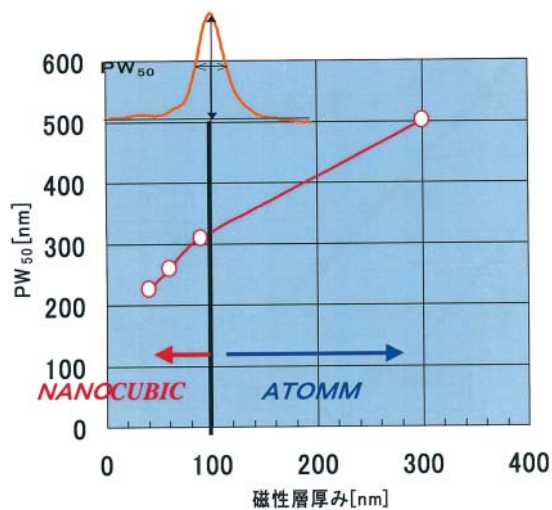


Fig. 4 Magnetic layer thickness versus PW_{50} .

3.2 超微粒子磁性体 (NANO PARTICLE)

現在実用化されている最も小さな磁性体は, Fe を主体とした針状の合金磁性粉末 (メタル磁性体) で, 長さは約 100nm である。この大きさでは 100nm 以下のピットを記録することは困難である。磁性体は単磁区粒子なので, ピット長より大きな粒子は磁化反転が行われなためである。高密度化に適したピット長の約半分以下の粒子長の磁性体として, メタル磁性体の微粒子化と六方晶バリウムフェライト (BaFe) 磁性体を検討した。

磁性体の超微粒子化における課題は, 抗磁力 H_c の確保と磁化の熱的な安定性にある。 H_c は, 針状のメタル磁性体のように形状磁気異方性を有する材料で問題と

なる。Fig. 5 は磁性体の長軸長と H_c の関係を示している。メタル磁性体の場合, 短くなると針状比が低下し形状異方性が損なわれるので H_c が低下する。Co 合金化と粒度分布改善 (低 H_c 成分減少) により, 微粒子でも高い H_c を得ることが可能となった。結晶磁気異方性の BaFe 磁性体はさらに微粒子で高 H_c 化が可能である。Fig. 6 に磁性体の TEM 像を示した。超微粒子メタル磁性体は長さが 60nm で体積は従来比 1/4, BaFe 粒子は板径 30nm で体積は従来比 1/6 である。

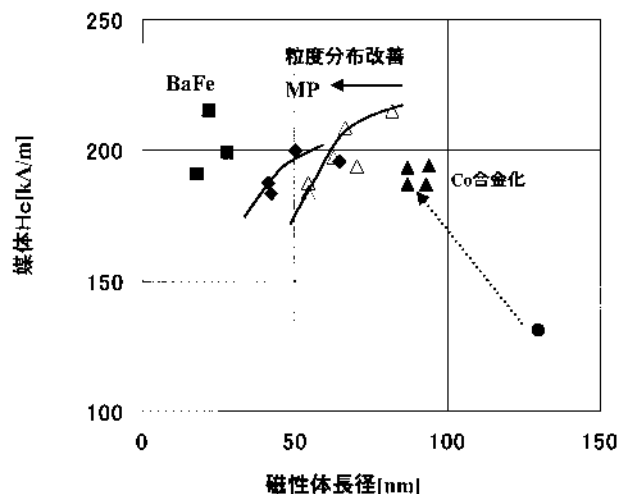


Fig. 5 Particle long-axis length versus coercivity.

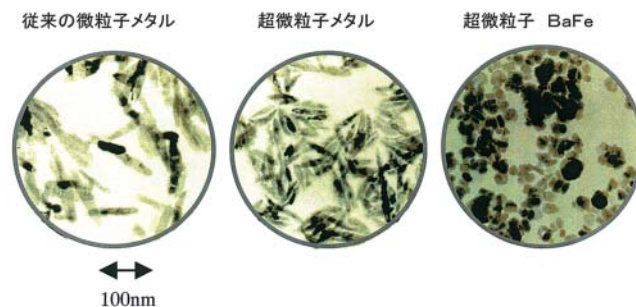


Fig. 6 TEM photos of NANO PARTICLES.

磁化の熱安定性は, 体積が小さくなるとスピンの熱揺らぎによって磁化が減衰する現象⁸⁾と, 熱酸化による磁化の減衰⁹⁾がある。熱揺らぎは磁性体の飽和磁化 s と異方性磁界 H_k が大きいほど安定である。メタル磁性体の場合, Co との合金化により大きな s が得られており, BaFe は H_k が大きいために 30nm の大きさでも安定である。熱酸化による減磁は, 金属であるメタル磁性体の課題で, 粒子表面に酸化膜を形成することで安定化してきた。しかし, 超微粒子になると酸化膜の比率が高くなるので s 低下をもたらす。

これに対しては, Co を添加し, かつ緻密で薄い酸化膜を形成することで, s を確保しながら¹⁰⁾ 酸化安定性を向上させた。初期のメタル磁性体に比べて 1/10 以下の体積でも酸化安定は数倍改善されている。BaFe は酸化物なので酸化による減磁がない。

3.3 精密分散技術(NANO DISPERSION)

磁性体は粒子同士が凝集して磁氣的に結合してしまうと、一次粒子を小さくしても実質的に大きな粒子としてふるまう。また、凝集塊が発生すると配向の乱れ、充填度のばらつき、表面粗さの増加によるノイズ増加を招く。塗布型媒体では、低ノイズ化のためにこの凝集を防止することが重要である。超微粒子磁性体を安定に均一分散するために、立体障害安定化理論¹¹⁾に基づいたポリマー吸着層の設計を行った。磁性体同士の凝集は分子間力や磁氣的引力が原因になるので、凝集力を十分に弱めるため塗布液中での吸着層の厚みを厚くした。Fig. 7に概念図を示した。

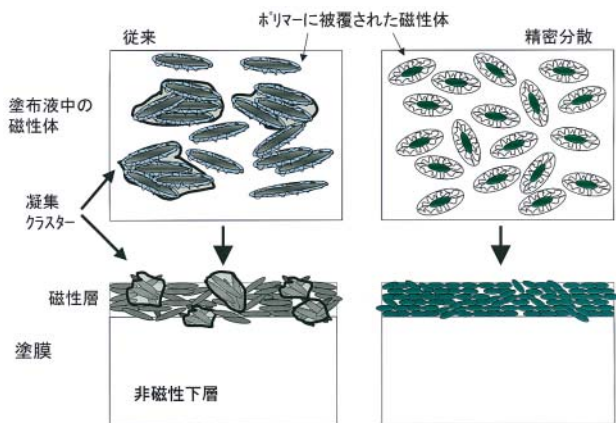


Fig. 7 Schematic images of NANO DISPERSION.

磁性体の分散には、粒子表面への吸着を促進するために親水性極性基を持つポリマーを使うことが知られている¹²⁾。微粒子になると表面積が増大し、吸着膜厚が減少するので、分散を安定化するにはポリマーの分子量を大きくし、使用量を増加させればよいが、この場合、粒子充填密度が低下する。この問題を解決するため、ポリマーの分子鎖が、塗布液中で十分に広がり、厚い吸着層が得られるように分子構造を設計した。吸着したポリマー層は、塗布液中では分子鎖を広げて磁性体同士の凝集を防止し、塗布後の乾燥とカレンダー処理によって収縮するので粒子充填密度は低下しない。

これらの精密分散技術を適用した NANOCUBIC 媒体は、Fig. 8に示すように従来の ATOMM 媒体に比べ磁性層表面が大幅に平滑化するため、スペーシングロスが低減し、高密度記録が可能になる。

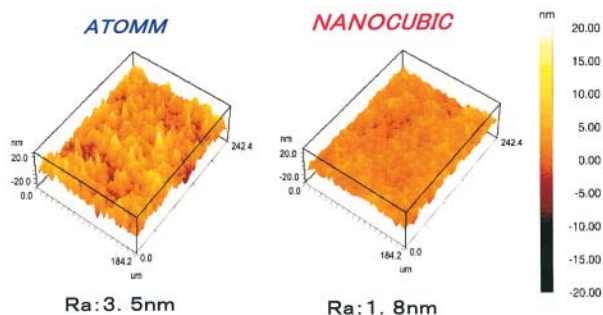


Fig. 8 Surface configuration of NANOCUBIC media.

4. 記録再生特性

以上の技術内容を盛り込んだ NANOCUBIC 媒体の記録再生特性を報告する。Table 1に媒体の諸元を示した。磁性層厚みは現在実用化されている ATOMM 媒体の 1/3 ~ 1/5、磁性体体積は 1/4 ~ 1/6 と小さい。Fig. 9は、MIG (Metal in Gap)ヘッドを搭載したドラムテスターで、ビット長 100nm (線記録密度 253kfc_i)の信号を記録したテープ媒体の磁化パターンを磁気力顕微鏡 (MFM)で観察したものである。色の濃淡が磁極の反転に対応しており、縞状模様が1ビットに相当する。従来の ATOMM 媒体ではビット間にまたがる磁化反転が多くみられ、SN比が劣るが、これは前述したように磁性層が厚く磁化反転が急峻でないこと、磁性体サイズが大きく凝集しているため大きな磁区を形成していることが原因である。これに対して、NANOCUBIC 媒体では磁化の不整が少なく、分解能が高くなっていることがわかる。

Table 1 NANOCUBIC Media Specifications.

項目	NANO CUBIC 媒体		ATOMM 媒体
	メタル	BaFe	
磁性層厚 δ [nm]	60	90	300
磁性粒子長 [nm]	60	30	100
Hc [kA/m]	192	207	190
Mr $\cdot\delta$ [mA]	14.6	10.0	71.7
表面粗さRa[nm]	2.3	1.8	3.5

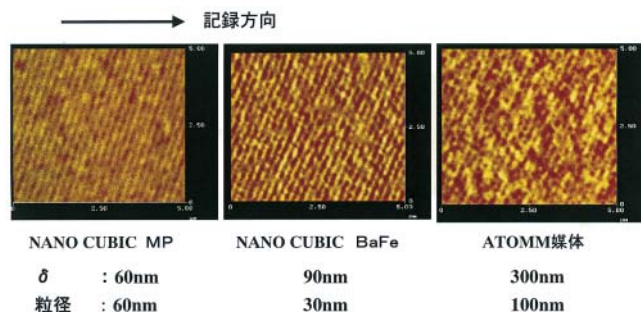


Fig. 9 MFM images of recorded signals with 0.1 μ m bit length.

メタル磁性体を使用した NANOCUBIC 媒体を MR ヘッドを用いて再生し、従来の6倍の記録密度が確認されたことが報告されている¹³⁾。さらに、1/2インチ幅のテープにして、従来 100GBであった記録容量を10倍の 1TBにできる可能性が確認されている¹⁴⁾。

Fig. 10に、BaFe磁性体を用いた NANOCUBIC 媒体を、3.5インチ径のディスクに加工し、スピンスタンドを用いて 3600rpmで回転させ、マージ型 MRヘッドを用いて記録再生したときの記録密度特性を示した。ヘッドのトラック幅は 1.9 μ mで、記録信号の線記録密度は 180kfc_i(面積記録密度 2.5Gbit/in²)である。再生出力が孤立反転の再生出力の 50%になる記録密度である D₅₀は、ATOMM 技術による従来の大容量フロッピーディスクの 120kfc_iに対し、NANOCUBIC 技術によるフロッピーディスクは 180kfc_iと高く、高密度記録が可能であることがわかる。

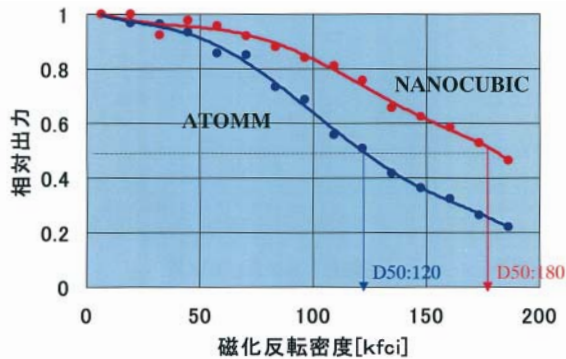


Fig. 10 Linear density responses of normalized reproduced output.

Fig.11には同様にして記録再生したときの変調スペクトルを示した。再生出力は、従来のATOMM媒体に対して+4dB,全帯域においてノイズが低く,CN比(搬送波出力とノイズの比)では約10dB向上している。約45dBのCNが得られており,適切なPRMLを組み合わせたことで3Gbit/in²程度の記録密度が可能と推定される。

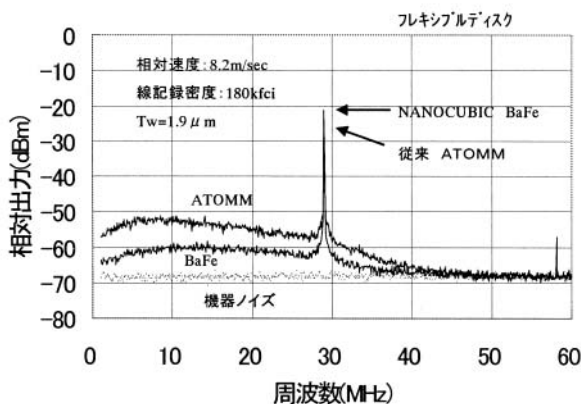


Fig. 11 Modulation noise spectra of NANOCUBIC media.

磁気記録は光記録に対し,より高速の書き込みができることが特長である。たとえば,外径が約90mmのディスク媒体の場合,回転速度3600rpm,磁束反転密度180kfciで10MB/s以上の転送速度が可能となる。これは,Zipなどの従来の高容量フロッピーディスクの4倍以上であり,また,開発が進められている青紫色レーザーを使用する光ディスク対しても2倍以上の高速書き込みを実現するもので,HDTVの録画に必要な転送速度も十分に満たしている。

一方,テープ媒体で相対速度10m/sで記録した場合は,1チャンネルあたりの転送速度は9MB/sになる。リニアトラックで8~16chで記録すると,転送速度は70~140MB/sとHDD同等以上になる。

5. 今後の展望

NANOCUBIC技術により,塗布型媒体の記録密度を飛躍的に向上させることができた。ビットコストが低い記録デバイスとしてHDDとともに今後も発展していく

と考えられる。高品位の映像記録の普及が進み,映像の資産価値が高まっている中,大容量で保存安定性に優れた塗布型媒体はますます重要な役割を担うと考えられる。塗布型媒体の高密度化はこれらのニーズに応えるだけでなく,省資源,省スペースにも有効である。たとえば,10倍の記録密度になれば,支持体に用いるポリエステルフィルムの使用面積や,テープカートリッジ・ディスクの保管体積を1/10にすることができる。

今後は,本報で解説した三つの高密度化の技術のレベルをさらに高めることを進めていく。具体的には,面積記録密度10Gbit/in²を目標として,20~30nmの磁性層厚みの実現,磁性体体積の半減,単粒子分散技術の開発である。

上記の高密度化は磁性層の性能向上のみでは達成し得ない。磁気ヘッドはAMRからGMRへとさらなる高感度化が進み,狭トラックを正確にトレースするための高精度サーボ技術が重要になってくる。今後は,記録媒体,記録再生装置,信号処理技術の歩調を合わせた開発の重要性がますます高まると考えられる。

参考文献

- 1)阿部直人,江尻清美,荒木宏明. 電子通信学会技術報告. MR92-83, 9-15 (1993).
- 2)真島恵吾,田口亮,武藤一利,上原年博,奥田治雄,近藤守央,新庄康彦,長谷川典夫. 映像情報学会誌. 23 (78), 21-27 (1999).
- 3)M.P.Sharrock. IEEE Trans. mag. 26, 193-197 (1990).
- 4)尾末匡,川名隆宏. 日経エレクトロニクス. 2001年6月4日号, No.797, 147-154 (2001).
- 5)H.Inaba; K.Ejiri; N.Abe; K.Masaki; H.Araki. IEEE. trans. mag. 29, 3607-3612 (1993).
- 6)斎藤真二,稲波博男,山崎信夫,野口仁,柏木朗. 日本応用磁気学会誌. 19, Supplement, No.S2, 1-5 (1995).
- 7)H.Inaba; K.Ejiri; K.Masaki; T.Kitahara. IEEE.trans. mag. 34 (4), 1666-1668 (1998).
- 8)M.P.Sharrock. IEEE trans. mag. 35 (6), No.6, 4414-4422 (1999).
- 9)Y.Okazaki; K.hara; T.Kawashima; A.Sato; T.Hirano. IEEE trans. mag. 28 (5), 2365-2367 (1992).
- 10)正木幸一,三浦俊彦. 粉体及び粉末冶金. 43, 961-965 (1996).
- 11)高橋彰. 色材. 67 (8), 496-504 (1994).
- 12)中前勝彦,中野秀作,谷川聡. 高分子論文集. 46 (6), 341-345 (1989).
- 13)K.Ejiri; T.Sugizaki; R.Taguchi; K.Majima; K.Muto; T.Uehara; H.Okuda. IEEE trans.mag. 37 (4), 1605-1608 (2001).
- 14)日本IBM社. www-6.ibm.com/jp/domino05/ewm/NewsDB.Nsf/2002/05152. (2002).

(本報告中にある“NANOCUBIC”は富士写真フイルム(株)の商標です。)