21世紀の外部メモリを担う磁気記録媒体

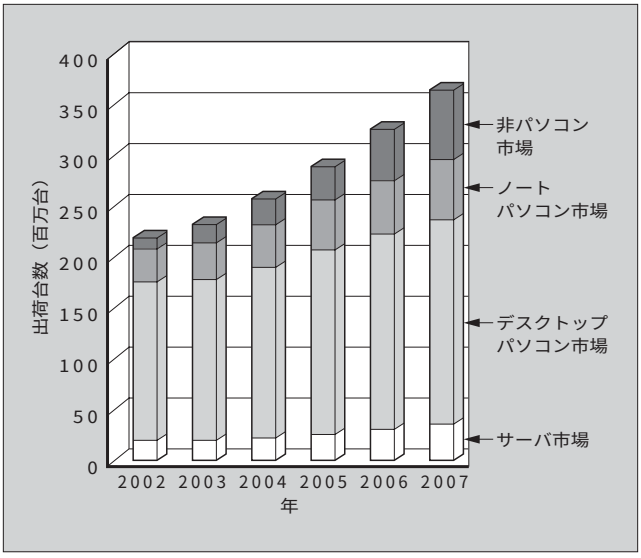
大月　章弘（おおつき　あきひろ）

1　まえがき

1956年に実用化された固定磁気ディスク装置（HDD）は，当初は，主に大型コンピュータ用の外部記憶装置（外部メモリ）として使われていた。しかしその後，高密度化・小型化・低価格化技術の進展に伴い，HDDの利便性や高速性や低ビット価格性が広く知れ渡るようになり，今や小型・大型を問わず，コンピュータ用外部メモリ市場の主要メモリの地位を占めるに至っている。最近になって，長年HDDに用いられてきた長手磁気記録方式に技術的な限界が見え始めたが，それを打破する垂直磁気記録方式[(1), (2)]の技術開発が進み，2005年以降は，垂直磁気記録を用いた大容量小型HDDが登場して，適用市場を一層拡大していくと予想されている。すなわち，21世紀のユビキタス社会において，HDDは，コンピュータ以外の車載や情報家電や携帯などの市場にも使われるようになり，既存のHDD市場を押し上げる成長を示すようになると予想されている（**図1**）。このHDDの中に収納されて使われ，100Gバイト（800 × 10^9 ビット）オーダーもの膨大な情報を記録する円板状の中枢機能素子が，磁気記録媒体（媒体）である。

富士電機は1985年に，それまで主流を占めていたγ-Fe_2O_3塗布型媒体を置き換える，スパッタ法コバルト（Co）合金系媒体の量産に世界に先駆けて成功し，以来，主要媒体メーカーの1社として，常に最先端の媒体を世界に供給し続けてきた。最近も，世界最高面記録密度のグラニュラー磁性層垂直媒体[(3), (4)]の開発に成功し，国内外の高い評価を受けるに至っている。次に，今後の主流となる垂直媒体の，富士電機における最新の開発状況を説明する。

図1　HDD需要予測

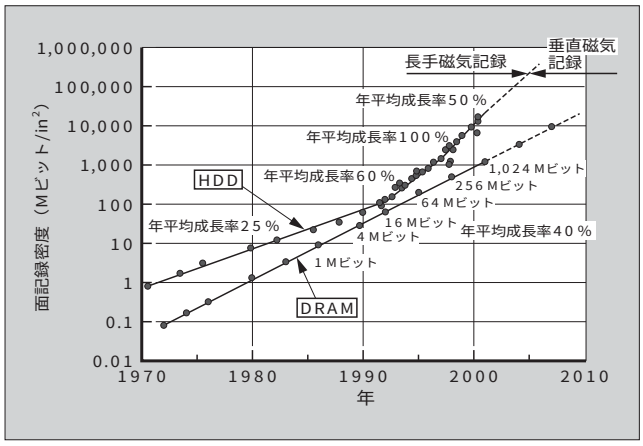


2　記録方式の変遷と富士電機の取組み

HDDの面記録密度は，1992年以降，半導体メモリ（DRAM：Dynamic Random Access Memoryなど）を上回る勢いで成長を遂げてきた（**図2**）。特に近年の面記録密度の成長は著しく，その結果，2005年には，今まで用いられてきた長手磁気記録方式では，「熱ゆらぎ」問題を引き起こすに至る面記録密度領域（～200Gビット/in^2）に，いよいよ差し掛かろうとしている。

図3に，長手磁気記録と垂直磁気記録の違いを示す。長手磁気記録は，媒体磁性層の面内方向に平行にビット情報

図2　面記録密度の進展



大月　章弘

電子写真用感光体および磁気記録媒体の開発に従事。現在，富士電機ストレージデバイス（株）先行開発統括部長。日本応用磁気学会会員。

を記録する方式である。この方式は，面記録密度が高まると，ビット情報を担う磁化ビット内にその磁化を打ち消す方向の反磁界が増大し，ビット情報が不安定になるという欠点を有している。より高密度化が進み１ビットの大きさが小さくなると，それを支える磁性合金結晶粒の磁気エネルギーが一層低下し，室温程度の熱エネルギーによってさえ次第にビット情報が消えていく，いわゆる「熱ゆらぎ」問題を引き起こすようになる。それに比べ垂直磁気記録は，１ビットを媒体磁性層の垂直方向に刻み込む方式なので，長手磁気記録に比べ，より高密度な記録に耐えられるという特徴を有している。そのため垂直磁気記録は，長手磁気記録の数倍の高面記録密度が可能（～１T ビット/in^2）であると考えられており[(5)]，これに熱アシスト記録やパターンド媒体などの将来技術を組み合わせると，数十 T ビット/in^2 もの超高面記録密度も夢ではないといわれている（**図４**）。

そのため，世界の主要な HDD メーカーは，ビジネス上（新市場の創成）も技術上（長手から垂直へ）も大きな転回点となる垂直磁気記録の開発に注力しており，どこがその先鞭（せんべん）をつけるか，熾烈（しれつ）な開発競争を繰り広げているのが現状である。

富士電機は，2005 年の転回点を契機に，外部メモリ市場で世界のトップの地位を占めることを目指し，1999 年から垂直媒体の開発に着手した。具体的には，長手媒体の熱ゆらぎ対策を狙った低温グラニュラー磁性層技術の研究と，垂直アモルファス Co 合金系磁性層の研究がそれである。2000 年には，それらの技術はグラニュラー磁性層垂直媒体として融合され，2001 年から一部の研究機関に研究サンプルを試供し始め，2002 年末には世界最高面記録密度である 150 G ビット/in^2 を実証し，2003 年 3 月には 200 G ビット/in^2 垂直媒体の実用化を見通せる状況に至っている。

3　垂直媒体の基本層構成と開発課題

垂直媒体の基本層構成を**図５**に，基本工程フローを**図６**に示す。垂直媒体は，アルミニウム（Al）基板ないしはガラス基板上に軟磁性層を設け，その上に垂直磁性層，次いで保護潤滑層を形成して作製されている。図では単純化されているが，実際の各層はそれぞれ多層化されており，より高度な層構成をより複雑な製造工程で作り上げて，実際の垂直媒体に仕上げている。その垂直媒体の技術上のポイントは，次のとおりである。

図３　長手磁気記録と垂直磁気記録の模式図

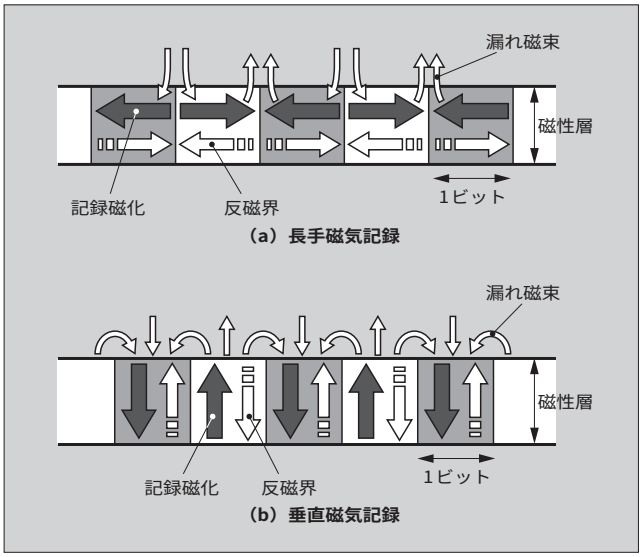
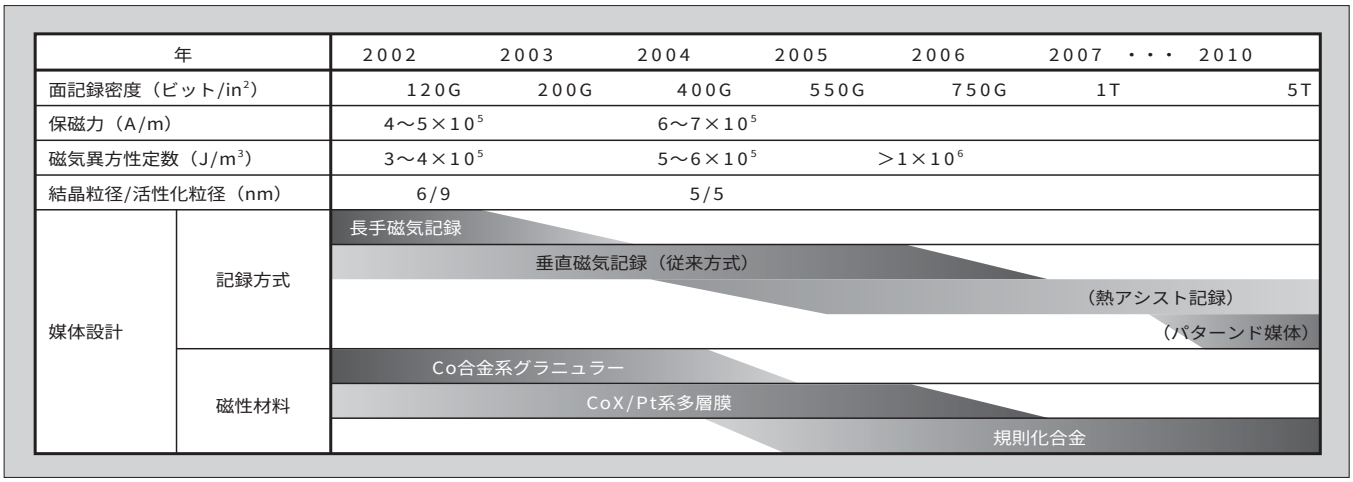


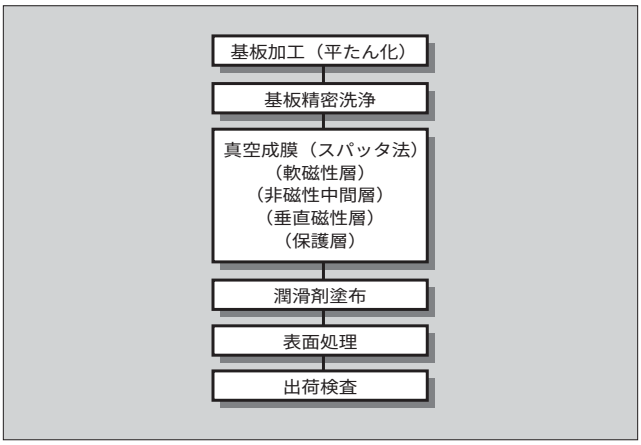
図５　垂直媒体の基本層構成

図４　垂直磁気記録の開発ロードマップ



年		2002	2003	2004	2005	2006	2007 ・・・ 2010
面記録密度（ビット/in^2）		120G	200G	400G	550G	750G	1T　5T
保磁力（A/m）		4～5×10^5		6～7×10^5			
磁気異方性定数（J/m^3）		3～4×10^5		5～6×10^5		＞1×10^6	
結晶粒径/活性化粒径（nm）		6/9		5/5			
媒体設計	記録方式	長手磁気記録					
		垂直磁気記録（従来方式）					
		（熱アシスト記録）					
		（パターンド媒体）					
	磁性材料	Co合金系グラニュラー					
		CoX/Pt系多層膜					
		規則化合金					

図６　垂直媒体の基本工程フロー



(1)　基板加工および基板洗浄技術（最低浮上量 3.7 nm を保証するための表面粗さ 0.1 nm の超鏡面加工技術と，0.01 nm オーダーの表面清浄化技術の開発）

(2)　磁区制御も含めた軟磁性層技術（垂直磁気ヘッドの性能を精度よく引き出し，電磁ノイズ環境の影響を受けない軟磁性層の開発）

(3)　グラニュラー磁性層技術（200 G ビット/in^2 対応低ノイズ磁性層の開発）

(4)　保護潤滑層技術（6 ～ 7 nm 浮上量ヘッドでの連続シーク使用を保証する保護潤滑層の開発）

(5)　耐久性などの HDD プロセス適合性技術（コンピュータ環境のみならず，車載や家庭などのより厳しい環境で使用しても問題を起こさない高信頼性技術の開発）

4　具体的な技術開発状況

4.1　基板技術

垂直媒体用の基板が具備しなければならない品質は，媒体表面上を 6 ～ 7 nm の超低浮上量で走行する垂直磁気ヘッドに，機械的にも電気信号的にも損傷を与えない高度な表面平滑性と表面清浄度である。

当面の開発目標である面記録密度 200 G ビット/in^2 を達成するためには，磁気ヘッドの浮上量保証値は，シミュレーション上は 3.7 nm に設計する必要があった。それを実現するためには，基板の表面粗さを 0.1 nm の超鏡面に仕上げる必要があり，当時入手し得る Al 基板もガラス基板も到底それを達成するものではなかった。幸いなことに富士電機は，媒体用の Al 基板で世界のトップシェアの地位を占めており，基板の鏡面加工技術と製造ノウハウに関して豊富な技術蓄積を有していた。その基板加工部門との連携のもとに，それぞれの基板に関して研磨液も含めた新たな加工技術開発を行い，所定の表面粗さを達成することに成功した。**図７**に Al 基板の，**図８**にガラス基板の，加工表面の原子間力顕微鏡（AFM）像を示す。いずれも高度に緻密（ちみつ）で均一な表面状態に調整されていることが分かる。**図９**に示すように，垂直媒体は表面粗さが小さいほど，高密度記録再生特性の指針である SN 比特性が改善されることが判明しており，富士電機の垂直媒体の良好なエラーレート特性は，このような基板があってはじめて達成されたものである。

また，垂直媒体用の基板は，超微小な記録ビットの信号品質を保証するために，0.01 nm オーダーの基板表面清浄度が求められていた。この清浄度は媒体のエラーレート特性を大きく左右するものである。その高度な基板表面清浄度を達成するために，従来の長手媒体で使用されていた超精密溶剤洗浄工程の後に，新たに特殊なドライ洗浄技術を導入し，高度な表面清浄度を達成することに成功した。**図**

図７　Al 基板表面の AFM 像

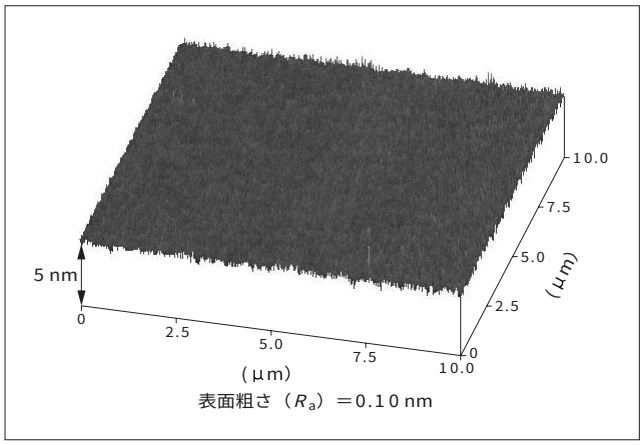


図８　ガラス基板表面の AFM 像

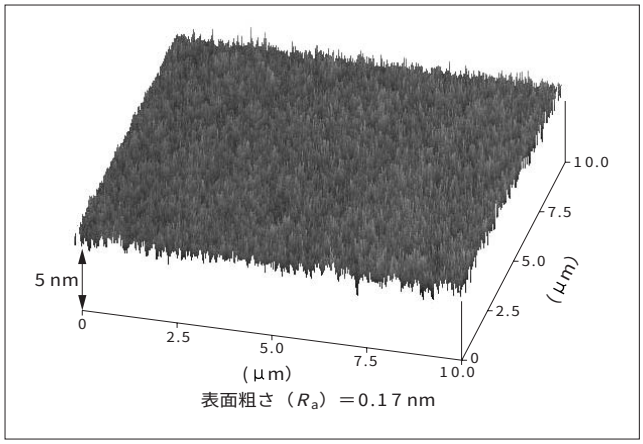
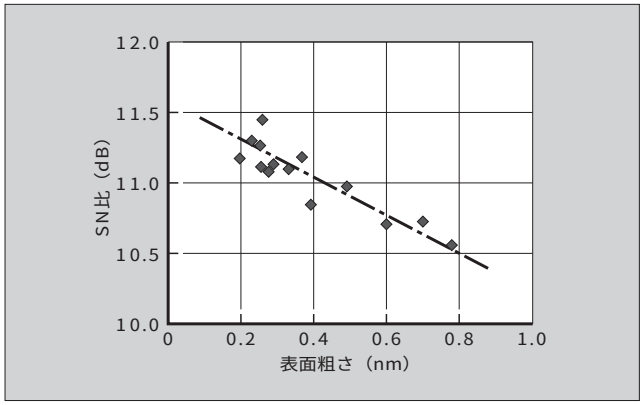


図９　基板表面粗さと SN 比特性の関係



10に見られるように，特殊なドライ洗浄を導入することにより，超微小な媒体欠陥に起因するノイズは大幅に減少している。

4.2　軟磁性層技術

軟磁性層は，垂直媒体に固有の補助層[6]である。この軟磁性層は，ビット情報を記録する際に垂直磁気ヘッドから発生する漏れ磁束を，媒体磁性層に効率よく引き込むための裏打ち層であり，したがって高い引込み能力（高い飽和磁束密度）と，それの均一性（磁区制御），および低ノイズ性（微結晶化，あるいはアモルファス化）に関する調和が求められていた。

飽和磁束密度を高めつつ低ノイズ化を進めるために，富士電機はアモルファス CoZrNb 軟磁性材料を採用し，かつその組成は，その後の成膜プロセスでの熱ストレスの影響や，市場で使われる際の経時安定性を考慮して，最も耐熱性が高くなる適切な組成に設計した。

また，この軟磁性層の厚さは，垂直媒体の層構成全体の中で最も厚く，スパッタ装置の生産能力，すなわち生産コストに対する大きな律則になっていた。高透磁率材料である軟磁性層材料は，使用寿命を長くして生産能力を上げるべく，真空放電させるスパッタターゲットの厚さを厚くすると，ターゲット中に磁束が封じ込められ，放電できなくなるという問題を抱えていた。富士電機は，独自の電極設計を行うことで，ターゲット寿命を 30 ～ 50 %延長することに成功した。また，アモルファス CoZrNb 軟磁性材料の成膜条件を適正化しつつ軟磁気特性を改善することで，当初 400 nm もの厚膜を必要としていた軟磁性層を，現在は 150 nm 程度に薄層化することに成功し，それらが相まって大幅な生産能力の向上を達成している。

さらに一層の生産能力の向上を狙って，現在次の技術開発を進めており，それぞれに関して実用化の見通しが得られつつある。

(1)　2.2 T 高飽和磁束密度軟磁性材料の開発（現行比 2 倍の飽和磁束密度）

(2)　超高速成膜が可能な軟磁性材料の開発（現行比 10 倍の成膜速度）

また，軟磁性層の磁区制御技術として，次の二つの技術を並行開発しており，それぞれに特徴のある二つの製品系列にまとめることを狙っている。

(1)　基板と軟磁性層の間に積極的に磁区制御を行うピン止め層を開発して導入（高い透磁率特性を示すので，高転送レート特性が必要なハイエンド市場向け垂直媒体に適する）

(2)　磁区制御が不要な軟磁性材料の開発（低価格ニーズが高いローエンド市場向けの垂直媒体に適する）

4.3　グラニュラー磁性層技術

長手磁気記録にしろ垂直磁気記録にしろ，ビット情報が記録される磁性層の微細構造としては，次の状態が理想的であると考えられている。

(1)　望ましい結晶面だけが優先的に成長（長手の場合は c 軸が面内に，垂直の場合は c 軸が垂直に配向するように結晶成長）

(2)　成長した結晶粒と結晶粒の間が偏析構造により磁気的に断ち切られていること（磁気的な干渉による媒体ノイズが少ないこと）

(3)　磁気的に孤立している結晶粒の粒径が，熱ゆらぎを起こさない範囲で十分に小さく，かつそのばらつきが小さいこと

従来の長手媒体に用いられていた金属磁性材料は，かかる偏析構造を，基板を加熱してから磁性層を成膜して，金属磁性材料中のクロム（Cr）やボロン（B）などの非磁性材料を結晶粒界に熱拡散させることで，求める偏析構造を実現してきた。しかし，この加熱による偏析構造の促進は，加熱による結晶粒の成長をも引き起こし，結局のところ，上述の(3)項の条件との調和を図ることができなかった（**図11**）。

一方，低温成膜が特徴であるグラニュラー磁性層は，室温基板上で磁性結晶が成長する際に，磁性材料中の非磁性酸化物材料（SiO_2 など）を選択的に粒界に吐き出すことで，目的とする偏析構造を実現するシステムである。すなわち，富士電機が開発した垂直グラニュラー磁性層は，基板を加熱する必要がないので，長手媒体の金属磁性層より

図10　ドライ洗浄による基板清浄度の改善

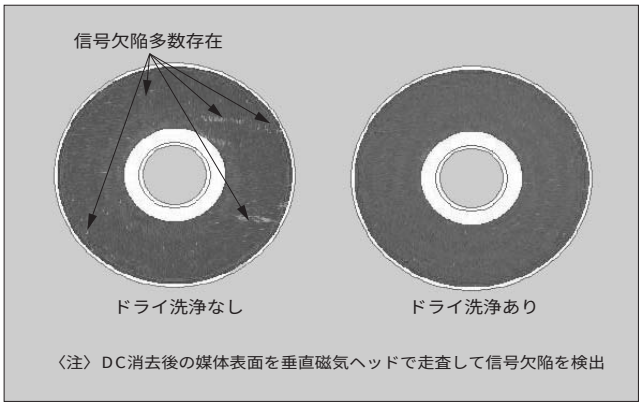
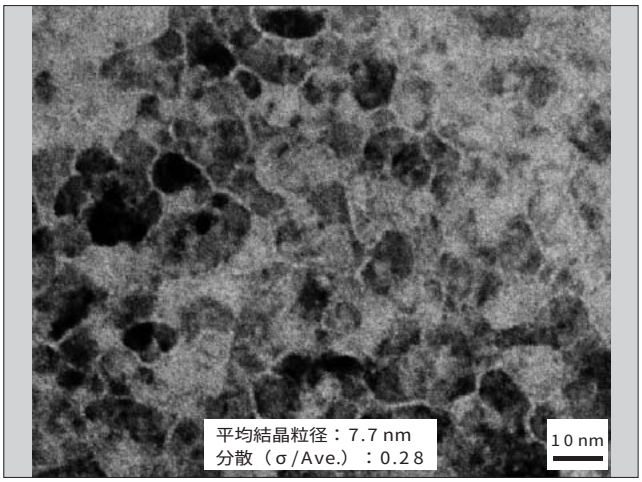


図11　CoCrPtB 長手媒体の透過電子顕微鏡像



も，結晶粒径の粗大化や結晶成長ばらつきが原理的に起きづらいという特徴を有するものである（**図12**）。

ただし，グラニュラー磁性層には，大きな技術的障壁があった。それは，主に磁性層の初期成長過程の問題である。金属磁性層と異なり，グラニュラー磁性層は熱エネルギーを駆動力として結晶成長や結晶粒界偏析を進めているわけではないので，成膜初期層から高い結晶性を有した磁性層を実現したり，最初の第一層から結晶粒と結晶粒の分離を進め良好な偏析構造を取らせることは，至難の業といってよかった。富士電機は，軟磁性層から磁性層に至る成膜プロセス技術に独自の改良を加えるとともに，並行して適切な磁性層組成設計を行うことで，これらの問題を解決し，画期的な面記録密度を達成することに成功している。

今後，グラニュラー磁性層で 200 G ビット/in^2 をはるかに超す高い面記録密度を達成するためには，なお解決すべき課題が残されている。それは，磁性層の磁気異方性エネルギーの主たる低下要因である，面心立方格子（fcc）構造の結晶粒の形成を抑止する技術の開発である。CoPt 系合金材料から成るグラニュラー磁性層の結晶粒は，六方最密充てん（hcp）構造をとる必要があるが，白金（Pt）の添加量が多くなると，磁性に寄与しない fcc 構造の結晶粒を形成しやすくなるという欠点を有している。しかし，ナノメートルオーダーの超薄膜の微細構造は，通常の手法では精度よく分析することができなかった。その対策として，富士電機は 1999 年から，大型放射光施設 SPring-8 を駆使したグラニュラー磁性層の微細構造分析に着手し，すでに磁性層中に fcc 構造を有する結晶粒が存在することを実証してきた（**図13**[7]）。富士電機は，かかる分析手法を用いつつ，薄膜形成プロセスの状態制御を精緻（せいち）に行うことで，fcc 構造結晶粒の形成を抑止し，さらに高性能なグラニュラー磁性層を実現しようと考えている。

4.4　保護潤滑層技術

垂直媒体の保護潤滑層の技術的課題は次のとおりである。

(1)　車載時や携帯時のような過酷な熱・振動・衝撃環境下で磁気ヘッドを超低浮上走行させても何ら問題を起こさないような高度な耐久性を確保する技術

(2)　グラニュラー磁性層は長手媒体の金属磁性層より比抵抗が高いので，それをカバーする静電気対策技術

これらの課題を解決するために，富士電機は，グラニュラー垂直磁性層に適合した，多層機能分離保護潤滑層を新たに開発した。その概念図を**図14**に示す。この層構成から成る富士電機の垂直媒体は，実験室での各種信頼性試験において，耐食性を含めて現行長手媒体と同等の性能を達成することが確認されている。

4.5　記録再生特性

これらの技術を総合した富士電機の垂直媒体は，国内外の研究機関や企業の研究所により，高い記録再生特性を示すことが確認されている。そのデータの一部を**表1**に整理した。それぞれが，その時点での世界最高面記録密度を達成したデータ例である。

図12　グラニュラー垂直媒体の透過電子顕微鏡像

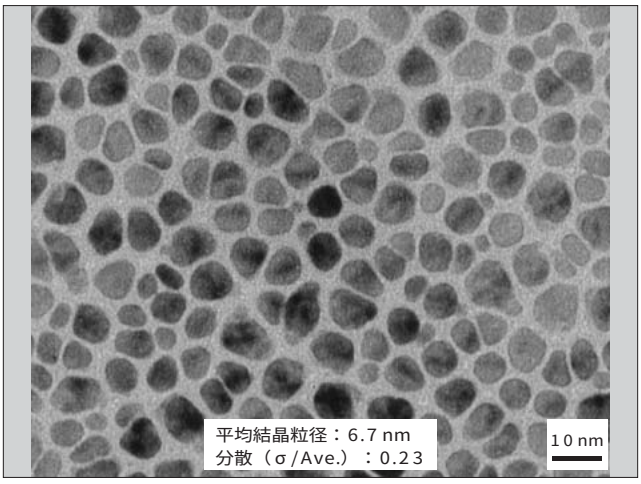


図13　SPring-8 によるグラニュラー磁性層構造分析

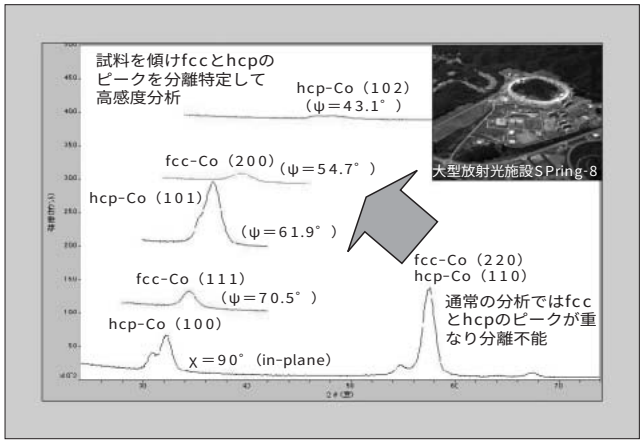


図14　保護潤滑層の概念図

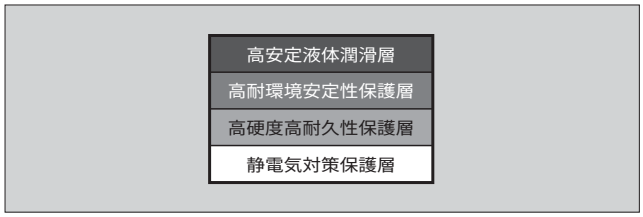


表1　達成面記録密度

達成年月	外部機関評価（Gビット/in^2）	線記録密度（kビット/in）
2001年11月	61	616
2002年 5月	105	727
2002年 9月	134	793
2002年11月	146	813
2003年 7月	──	867

5　あとがき

東北大学の岩崎俊一名誉教授が，垂直磁気記録の先駆的な研究を発表されて以来，はや25年以上の年月がたとうとしている。その間，何度も長手磁気記録の限界が喧伝（けんでん）されてきたが，その都度媒体や磁気ヘッドや回路や機構の技術革新で危機を乗り越えてきた。しかしその長手磁気記録も，媒体の熱ゆらぎ問題が障壁となって，いよいよ実用限界を迎えようとしている。その媒体がもたらした限界を媒体自身で打ち破るものとして垂直媒体の開発が進み，そのフロントランナーの地位を富士電機が占めるに至ったことは大きな幸いである。

しかしそれは，富士電機単独の研究開発の成果ではない。富士電機での垂直媒体の開発は，どちらかといえば他社より遅れて着手したといってよい。幸甚なことにその遅れは，さまざまなご支援を得ることにより，十分に埋め合わされてきた。東北大学の電気通信研究所の中村慶久所長や村岡裕明教授，同研究所21世紀情報通信研究開発センターの島津武仁助教授をはじめとした，国内外の研究機関の諸メンバーによる，一方ならぬご指導やご支援のたまものが，今日の富士電機の垂直媒体を作り上げたといってよい。ここに慎んで謝意を表したい。

富士電機は，記録方式が様変わりとなる2005年の転回点で業界をリードすべく，垂直媒体の事業化を計画しつつある。媒体のみならず基板ビジネスの可能性をも視野に入れた検討を行っており，垂直媒体は，富士電機の中期計画の柱の一つになっている。引き続いて400Gビット/in^{2}を目指した研究開発もスタートしており，富士電機はそれらの成果も含め，安全で快適なユビキタス社会を支える外部メモリ市場において，世界のトップメーカーの地位を獲得すべくこれからも努力していく所存である。

参考文献

(1) Iwasaki, S. et al. An Analysis for the Circular Mode of Magnetization in Short Wavelength Recording. IEEE Trans. Magn. vol.11, no.6, 1975, p.1137–1139.

(2) Takano, H. et al. A Practical Approach for Realizing High-Recording Density Hard Disk Drives. Abstracts of The 8th Joint MMM-Intermag Conference. CA–01, 2001, p.131.

(3) Oikawa, T. et al. Microstructure and Magnetic Properties of CoPtCr-SiO_2 Perpendicular Recording Media. IEEE Trans. Magn. vol.38, no.6, 2002, p.1976–1978.

(4) Uwazumi, H. et al. CoPtCr-SiO_2 Granular Media for High Density Perpendicular Recording. Digest of Joint [NA] PMRC 2003. 2003, p.47.

(5) Wood, R. The Feasibility of Magnetic Recording at 1 Terabit per Square Inch. IEEE Trans. Magn. vol.36, no.1, 2000, p.36–42.

(6) Iwasaki, S. et al. Perpendicular Magnetic Recording with Composite Anisotropy Film. IEEE Trans. Magn. vol.15, no.6, 1979, p.1456–1459.

(7) Ohsawa, M. et al. In-Plane Diffraction of Co-based Perpendicular Magnetic Recording Media. SPring–8 User Experiment Report. no.10, 2002B, 2003, in press.

e-Front runners

＊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。