昭和40年6月3日　第三種郵便物認可　平成16年7月10日発行（年6回1，3，5，7，9，11月の10日発行）富士時報　第77巻　第4号（通巻第827号）　ISSN 0367-3332

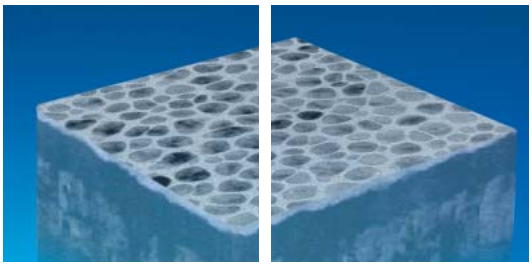
e-Front runners

富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

7
July 2004
Vol. 77 No. 4

特集1　磁気記録媒体
特集2　感光体



富士電機グループ

富士時報
FUJI ELECTRIC JOURNAL

7
July 2004
Vol. 77 No. 4

特集1 磁気記録媒体
特集2 感光体

目 次

特集1 磁気記録媒体

高密度磁気ストレージ技術の将来を思う 243（1）
村岡 裕明

磁気記録媒体の現状と展望 244（2）
今川 誠 ・ 小沢 賢治

アルミポリッシュ基板 249（7）
矢吹 和彦 ・ 増田 光男

長手アルミ基板媒体 252（10）
坂口 庄司 ・ 二村 和男 ・ 柏倉 良晴

ガラス基板媒体 260（18）
松尾 壮太 ・ 増田 克也 ・ 白井 信二

グラニュラー型垂直磁気記録媒体 265（23）
上住 洋之 ・ 川田 辰実 ・ 横澤 照久

400 Gbits/in²を目指す垂直磁気記録媒体技術 270（28）
河田 泰之 ・ 及川 忠昭

低浮上状態におけるヘッド試験評価技術 275（33）
佐藤 公紀 ・ 片野 智紀

特集2 感光体

電子写真という発明 281（39）
竹内 学

感光体の現状と展望 282（40）
成田 満 ・ 田中 辰雄

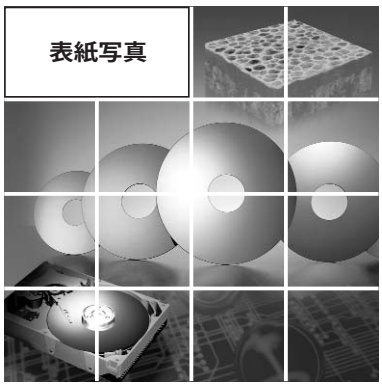
プリンタ用有機感光体 286（44）
寺崎 成史 ・ 池田 豊 ・ 小日向俊紀

ディジタル複写機用有機感光体 291（49）
篠崎 美調 ・ 宮本 貴仁

正帯電型有機感光体 295（53）
中村 洋一 ・ 面川 真一 ・ 竹嶋 基浩

1ドット潜像電位評価技術 299（57）
会沢 宏一 ・ 上野 芳弘 ・ 竹嶋 基浩

表紙写真



ディジタルデータを記録・再生・保存する大容量メモリとしてハードディスク装置（HDD）の適用がパソコンをはじめ，携帯情報機器，情報家電などへと拡大している。

富士電機はこれまで，HDDの基本的部品である磁気記録媒体の開発から製造・販売に多くの実績をあげてきた。特に研究・開発面では，進行するHDDの小型・大容量化に対応し独自の先行技術を結集して磁気記録媒体の飛躍的な高密度化の実現を推進している。

表紙写真では，HDDに内蔵されている磁気記録媒体の外観を紹介し，さらに，今後飛躍的な高密度磁気記録媒体として製品化が期待されている垂直磁気記録媒体の磁性層構造をイメージ的に示している。

高密度磁気ストレージ技術の将来を思う

村岡　裕明（むらおか　ひろあき）
東北大学電気通信研究所教授 工学博士

情報ストレージ技術は総じて順調に高密度化を進めているようである。今日の目標は 100 Gbits/inch^2 程度の面密度を巡る開発であろうか。筆者が学生の頃には 100 kBPI と言うと相当な“超”高密度記録であったから，文字通り隔世の観がある。100 Gbits/inch^2 と一口に言っても，これは 80 nm 四方のビットを磁気ディスク上に形成することに相当する。まさにナノテクノロジーである。さらに，数年後と目される 1 Tbits/inch^2 では 25 nm 四方のビットを形成しなければならない。果たして実現できるのであろうか。磁気記録は過去に何度も高密度化限界が指摘されたが，そのたびに乗り越えてきているから今回も大丈夫と言う主張をよく耳にする。しかし，現実に高密度磁気記録の研究に取り組んでいる当事者の一人としては，これは大変だというのが実感である。ビット長が十数 nm でトラック幅が数十 nm という，まさに“超”の付く高密度記録への挑戦である。

将来の方向が見えなくなってきたときほど，改めて原理原則に立ち戻ることが必要である。今，世界中で求められている垂直記録が高密度に適していることは原理からして正しいのである。しかし，垂直磁気記録は提案以来実用化に時間をかけてきた。筆者は，長手記録媒体の超薄膜化が工業的な意味で実現されたことが大きな要因だったと考えている。これほどの微弱な媒体再生磁束で十分な品質の電気信号が再生ヘッドから得られるとは当時は考えられなかったし，10 nm 程度の膜厚で欠陥のない記録媒体が量産できるとも信じられてはいなかった。しかし，いったんモノができれば tB_r 値が小さいから反磁界による垂直磁化とのクロスオーバーはずいぶん高密度になる。その意味で，高感度再生ヘッド技術と記録媒体の高度な成膜プロセス技術とがコンビで長手記録におけるスケーリング則に則った高密度化を促進し，垂直磁気記録を今日まで温存したということであろう。ただ，記録の原理は変わらないから，長手記録が限界に当たった現在，垂直磁気記録が求められるのは当を得ている。

垂直磁気記録技術においても，次々と高密度化への無理難題が出てこよう。これまでの歴史に学べば，もしそれが技術的なものであれば解決の可能性は高いが，原理的な限界を含んでいれば困難な事態を覚悟しないといけない。たとえば，熱緩和問題は解決可能であろうか。微粒子構造が記録媒体の基本であるならば，垂直磁気記録といえども際限のない微細化の要求と，熱安定性とヘッド磁界強度の両立が再び高密度化限界として立ちはだかる。知恵を絞らなければならない。今後も本質的な限界をもたらすものは何かを常に吟味しておく必要がある。

しかし，筆者は大概の高密度限界では磁気ストレージ技術が進歩を停滞させることはないと考えている。それは，最近ほど情報ストレージの大容量化のニーズが高まっていることはないと思われるからである。マルチメディアはディジタル家電の流れの中で日常生活に深く入り込み始めている。ディジタル地上波やハイビジョンの高細精度ディジタル映像を家庭でストレスなく楽しむには，テラバイト級のストレージでも物足りないものとなろう。携帯電話を通じた無線ネットワークはこれから大きく飛躍していくが，その応用の一つの中心はユビキタスでのマルチメディア用途である。ハンドヘルドの超小型数十ギガバイト級ストレージが個人用途のために幅広く要求される。

今後の情報ストレージ技術の発展は，これまでのコンピュータ用という閉じた世界の中とは違って，質的にも量的にも大きな変化を伴いながら拡大していくことであろう。しかもこのような用途に対して適切な高速性とコンパクトさを併せ持つストレージデバイスとして磁気ストレージ以外のものは当面は考えにくい。我々は，世の中のニーズに後押しされながら，磁気ストレージの高密度化・高機能化を続けていくものと思われる。

磁気記録媒体の現状と展望

今川　誠（いまかわ　まこと）　　小沢　賢治（おざわ　けんじ）

1　まえがき

パソコン（PC）が普及し始めてからすでに20年余りが経過しているが，ブロードバンドの広がりに伴ってPCの使われ方も大きく変化してきた。これまでオフィスなどの室内環境で使われていたデスクトップ型から，持ち運びのできる薄型・軽量ノート型，サブノート型が主流となってきた。最近では1.0インチサイズの超小型ハードディスク装置（HDD）が市販され，その用途も従来のディジタルデータの取扱いから，映像，音楽，ゲーム用ソフトウェアを取り扱う総合エンターテインメント機器へと変貌を遂げつつある。現在，HDD市場に占める情報家電向けHDDシェアはまだ8％程度であるが，今後，映像，音楽を扱う家電機器への搭載が大きく伸びると期待されており，これに携帯電話への搭載が加われば，2008年にはモバイルおよび情報家電用途向けHDDが全体市場の半分を占めるようになるとの見方もされている。

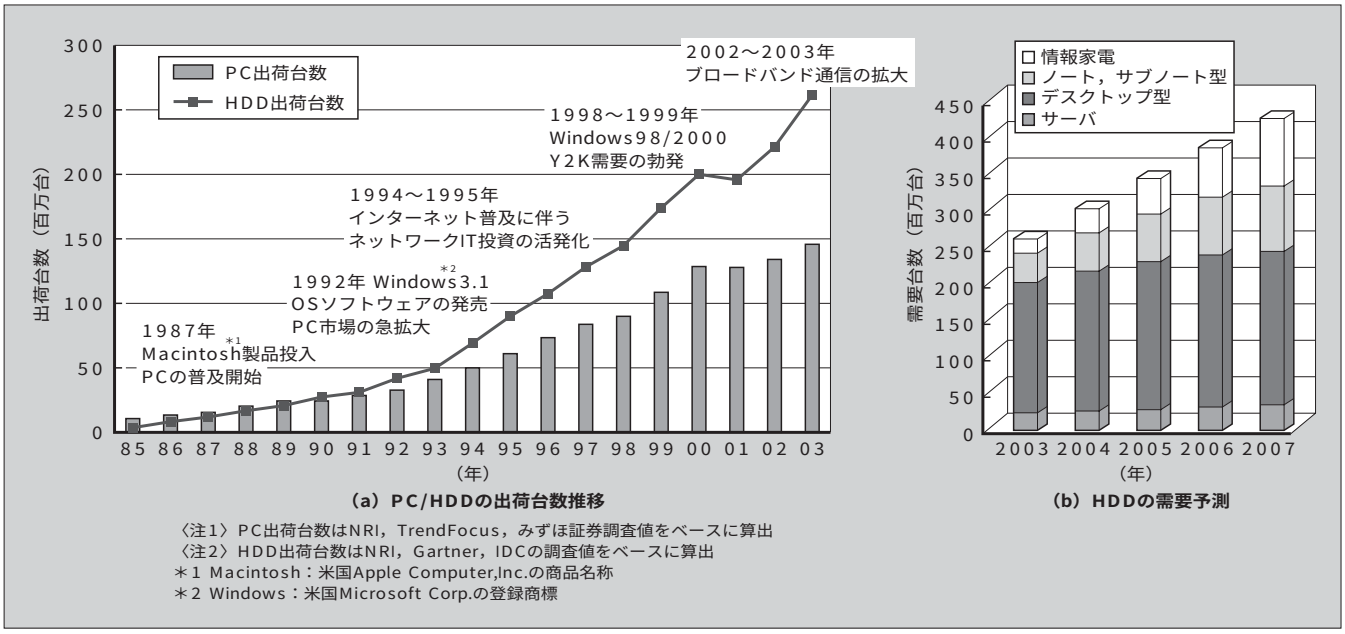
本稿では，今後も市場拡大すると期待されるPCおよびHDDの市場動向・技術動向について述べるとともに，富士電機の磁気記録媒体の技術開発状況と今後の展望について述べる。

2　PCとHDDの市場動向

図1(a)にPCが市販されてから最近までのPCおよびHDDの出荷推移を，**図1**(b)にHDDの需要予測を示す。社会状況の変化に伴って伸び率に変動があるが，ネットワーク社会およびブロードバンドの広がりとともに一貫して右肩上がりの成長を示している。このHDD市場の伸びを支えているのがノート型，サブノート型に分類されるモバイルPC市場であり，年率20～30％の伸びを示している。またサーバ機器およびデスクトップ型もモバイルPCほどではないが，堅調な需要に支えられて伸びている。

また，近年DVD（Digital Versatile Disk），ディジタル

図1　ワールドワイドPC/HDDの出荷推移とHDDの需要予測[(1),(2)]



（a）PC/HDDの出荷台数推移　　（b）HDDの需要予測

〈注1〉PC出荷台数はNRI，TrendFocus，みずほ証券調査値をベースに算出
〈注2〉HDD出荷台数はNRI，Gartner，IDCの調査値をベースに算出
＊1 Macintosh：米国Apple Computer,Inc.の商品名称
＊2 Windows：米国Microsoft Corp.の登録商標

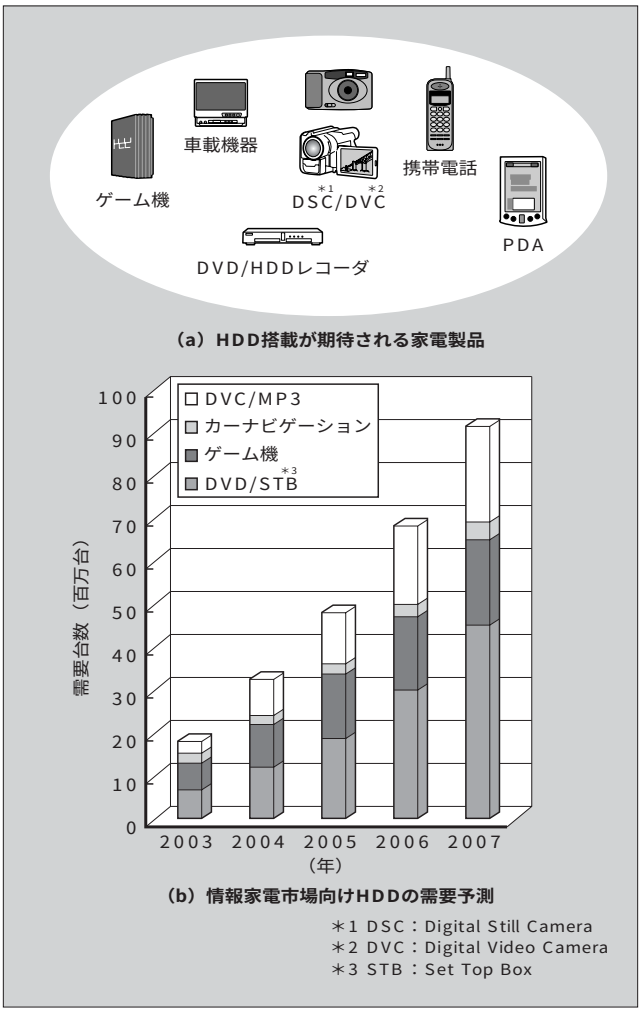
今川　誠

磁気記録媒体の次世代媒体開発に従事。現在，富士電機ストレージデバイス(株)製品開発部長。

小沢　賢治

ガラス基板媒体の研究開発に従事。現在，富士電機ストレージデバイス(株)製品開発部担当部長。

図２　情報家電市場向けの製品展開と需要予測[1]



ビデオカメラなどに代表される情報家電分野への適用が急速に伸びてきているが，HDD の搭載が期待される家電製品と今後の需要予測を**図２**に示す。2003 年の実績では 3.5 インチサイズの HDD が全体の 70 %近くを占めた。これまでゲーム機器市場向けが主用途であったが，2004 年夏に開催されるアテネオリンピックに向けて DVD/HDD ハイブリッド型プレーヤの新製品が続々と発表され，適用市場が拡大したことが特記される。2.5 インチサイズはカーナビゲーションへの搭載が，1.89 インチサイズ以下ではアップルコンピュータ社の iPod に代表されるミュージックプレーヤへの搭載が伸びている。今後，1.0 インチあるいは 0.85 インチといった超小型 HDD の製品系列の拡大が進むと，個人情報端末 PDA（Personal Digital Asistant）や携帯電話への搭載も視野に入ってくる。これまでこの分野のメモリは半導体メモリが主流であったが，HDD 高密度化技術の革新によって安価で大容量の HDD を供給することが可能となり，消費者にとって選択の幅を広げる魅力ある製品に育ってきている。特に携帯電話市場は，**図３**に示すとおり 2003 年実績ですでに 4 億台を超える市場規模があり，アジア，中国市場の拡大も考慮に入れると今後も大幅な需要拡大が見込まれる。これらの携帯機器に超小型 HDD が標準搭載されるようになれば，巨大な市場が新たに形成されると考える。

図３　携帯電話の需要予測（新規＋買換え）

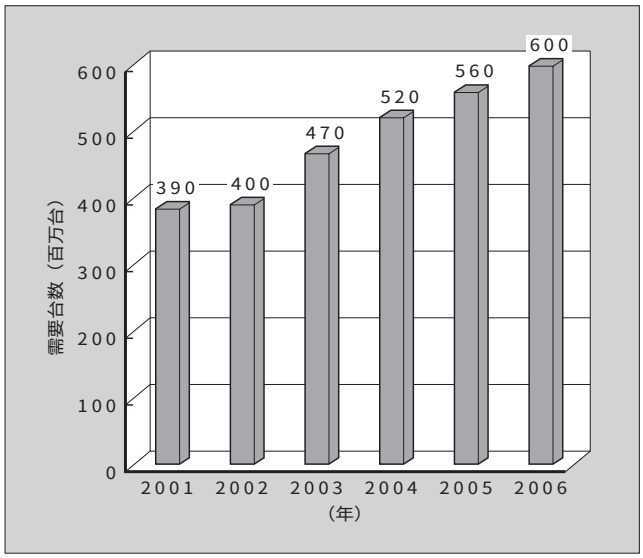
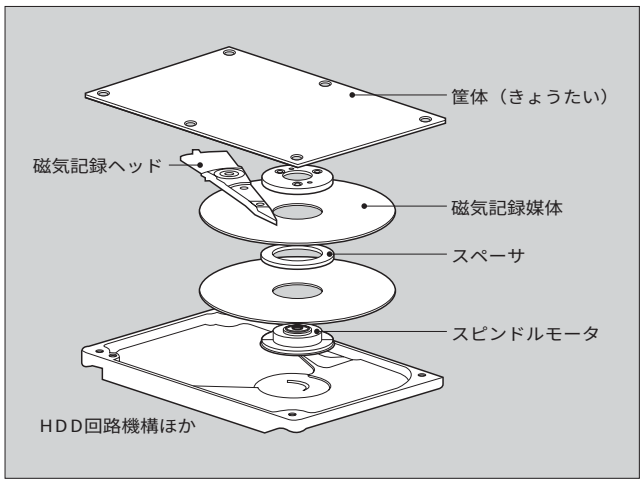


図４　HDD の主要構成部品



３　磁気記録媒体の技術動向

図４に HDD の主要構成部品を示す。HDD の大容量化技術は HDD の超精密メカニカルサーボ技術や回路設計を含めた信号処理技術のほかに，その構成部材である磁気記録ヘッド，磁気記録媒体，スピンドルモータなど，周辺機器の技術開発や量産技術の発展に負うところが大きい。最近まで年率 100 %の高密度記録を実現してきたのも，MR（Magnetoresistance），GMR（Giant Magnetoresistance）というヘッドの革新技術と磁気記録ビットサイズを微小化し，熱安定性と低ノイズを実現した媒体技術の組合せの結果であった。コンパクトで大容量を実現する高密度化技術の発展に伴い，音楽，映像，特に動画を取り扱う情報家電機器への搭載が加速されている。

一方で，**図５**に示すとおりこれまで年率 100 %で伸びてきた面記録密度は，長手磁気記録方式の限界点が近づくにつれ，最近では年率 40 ～ 50 %の伸びにとどまっている。

図５　面記録密度の伸び予測

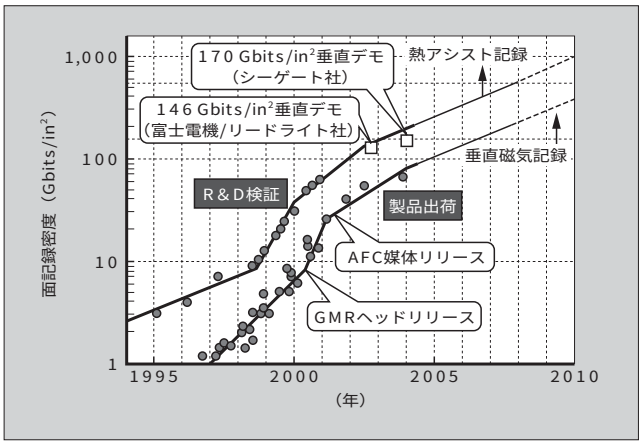
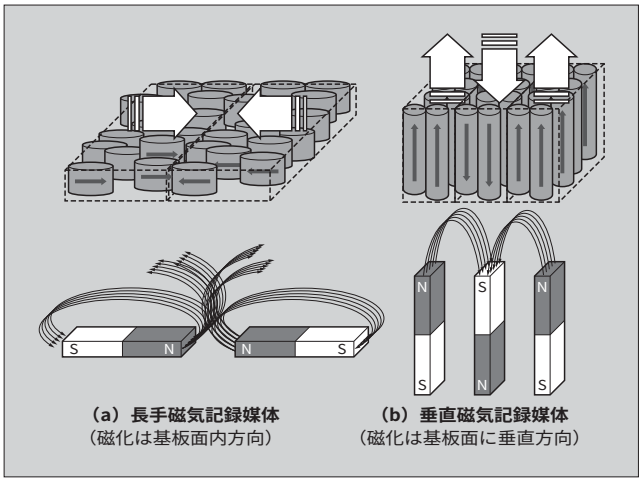


図６　長手・垂直磁気記録方式の比較



製品寿命もこれまでの半年から１年以内であったものが，2 年近くにまで伸びてきた。この面記録密度の伸びの停滞を打破する技術として，長手磁気記録方式に代わる垂直磁気記録方式の研究開発が活発化しており，各社とも実用化に向けて開発を進めている。

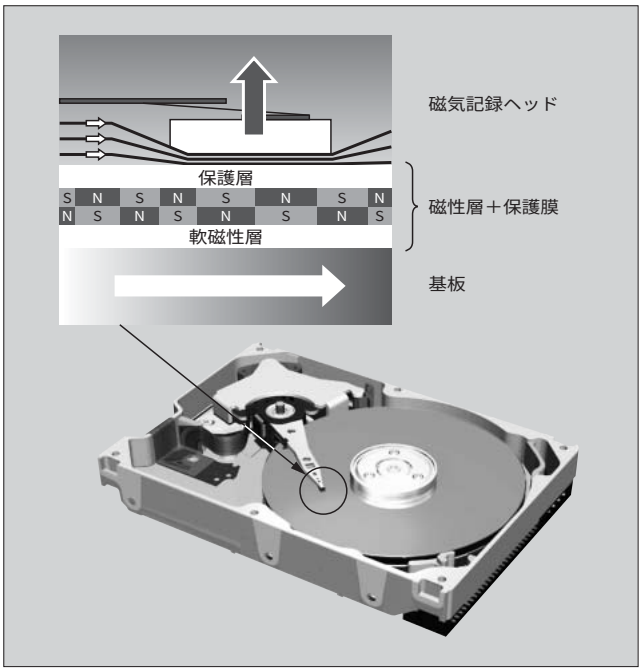
図６に従来の長手磁気記録方式と垂直磁気記録方式との比較を示す。長手磁気記録方式は，反磁界の影響で熱揺らぎ現象が大きくなり，記録ビットサイズの微小化に限界がある。これに対して垂直磁気記録方式は，垂直に磁化することで磁気記録ビットの微小化と熱安定性とを両立させることができ，長手磁気記録方式に比較してさらに高密度化することが可能となる。垂直磁気記録方式の実用化は 2006 年ごろと予測されているが，この方式の採用によって再び高密度化競争が激化することになる。

4　磁気記録媒体開発の現状

4.1　磁気記録媒体用基板技術

富士電機は，従来から磁気記録媒体用アルミ基板の開発，製造，販売を行ってきた。他社に先駆けて 80 G バイト製品を量産化したが，その支えとなったのが 80 G バイト仕様のアルミ基板技術である。基板側の技術的観点から一層の高密度化を図るためには，**図７**に示すようにヘッドが媒体面上を安定に浮上走行して記録再生することができるように微小うねりの低減と，表面欠陥の低減を図ることが必要であった。そのため基板加工に用いる研磨パッド，研磨砥粒および加工条件を最適に制御することで，欠陥の少ない，微小うねりが 0.1 nm 以下のアルミ基板を量産することに成功した。引き続き 3.5 インチサイズ１枚あたり 120 G バイト，160 G バイトの大容量磁気記録媒体の製品化を目指して，基板の特性向上に取り組んでいる。

図７　HDD でのヘッド浮上走行の模式図



磁気記録媒体用基板の分野では，モバイル用途に用いられるガラス基板媒体の需要が年々伸長し，その基材であるガラス基板が需要に追いつかない状況に至っている。基板加工に必要なポリッシュ加工設備能力が不足していることがその要因としてあげられる。富士電機はこれまでの豊富なアルミ基板加工技術と基板加工設備とを保有しており，今後ガラス基板加工分野に進出を果たすことで基板充足の体制を整える予定である。

4.2　長手磁性膜技術

磁性膜技術の中で特筆すべきは AFC（Anti-Ferromagnetic Coupling）構造媒体の実用化である。この技術は高密度化によって微小化された磁気記録ビットが使用環境の温度影響によって磁化反転を起こしてしまい，記録が消失するという，いわゆる「熱揺らぎ」を抑制するものである。**図８**に AFC 構造媒体の基本層構成を示す。富士電機では磁性層を２層構造とし，Ru 合金と組み合わせることで電磁変換特性と熱揺らぎ特性とのバランスを図っている。また，特性を極限まで発現するために，媒体構造全体を機能分離させて設計する考え方に基づき，下地層の多層膜化をはじめとしてスペーサ層，安定化層などの機能膜を積層する構造を採用している。80 G バイト製品では平均粒径が 7

nm レベルまで微細化されている。この多層積層構造スパッタ成膜技術では，数 nm 程度の薄膜の中で初期成長相の結晶配向をいかに制御し，均一に成膜するかが重要となる。

さきに長手磁気記録方式がそろそろ限界に近づいたと述べたが，これまで磁気記録の歴史はさまざまな限界を打破して発展してきた経緯がある。現在も MR/GMR に代わるヘッド技術として TMR（Tunneling Magnetoresistance）が提唱され実用化を迎えようとしている。TMR は MR/GMR に比較して感度が向上し，微小信号を検出する能力に優れるため，AFC 構造媒体を用いて磁気記録媒体磁性層の薄膜化，磁性粒子の微細化を図ることでさらに高密度化できる可能性がある。また，HDD の構成部材であるスピンドルモータ，アクチュエータ性能，回路ノイズなどの改善により，160 Gbits/in^2（3.5 インチサイズで 200 G バイト/枚）の面記録密度までは現行の長手磁気記録方式で実現できると考えている。

4.3　垂直磁性膜技術

160 Gbits/in^2 の面記録密度を超えるあたりから，垂直磁気記録方式が採用されると予測されている。垂直磁気記録方式が従来の長手磁性層構造と大きく異なるのは，ヘッドと対をなす軟磁性層を必要とする点である。通常の軟磁性層はその特性を発現させるために 200 nm 程度の膜厚を必要とする。通常のスパッタ法で成膜しようとすると，幾つものスパッタチャンバが必要となり，スパッタ装置の大型化とともにコスト的にも不利となる問題点を抱えていた。富士電機では基板事業で培っためっき技術を応用して，めっき手法による軟磁性層開発に取り組み，実用化のめどをつけた。この手法を採用することで，従来の長手磁気記録方式と同じスパッタ装置を用い，コストを抑制した垂直磁気記録媒体を提供することが可能となった。

富士電機の垂直磁気記録媒体は**図 9** の平面 TEM（透過電子顕微鏡）写真に示すとおり，グラニュラー構造を持つことを特長としている。磁性粒子を非磁性相で粒子状にパッキングすることで，磁性粒の分離性を高めるとともに磁性粒そのものの磁性を高く維持することで，微小サイズ記録でのノイズ低減と熱揺らぎ耐性を確保している。2006 年の製品化に向け，引き続き技術開発と性能検証に取り組んでいる。

4.4　ヘッドディスクインタフェース（HDI）技術

高記録密度を実現するためには，**図 10** に示すとおり磁気スペーシング（ヘッド素子と磁性層との距離）を小さくすること，磁気ヘッドが媒体上を低い浮上量で安定に浮上することが必要であり，媒体の表面技術ではカーボン保護膜と潤滑剤（ルブ）との組合せを最適化することが重要である。富士電機では機能分離の考え方を基に，CVD（Chemical Vaper Deposition）とスパッタのカーボン 2 層化技術を導入し，3 nm の薄膜で磁気スペーシングの低減と耐食性とを確保した。また，潤滑剤には PFPE（パーフルオロポリエーテル）混合潤滑剤を開発し，表面被覆率が高く，かつルブピックアップ（ヘッドへのルブ移着）の少ない信頼性の高い表面品質を実現した。今後ヘッドの浮上量はさらに低下し，媒体との接触を前提とした表面設計が重要となる。要求品質の高まりに応えるために，これまで以上に品質安定性に優れた超薄膜潤滑剤の開発および被覆率が高く均一に塗布する技術の開発に取り組んでいる。

一方で，従来用いてきた測定装置の分解能では欠陥検出が難しくなりつつある。**表 1** に媒体の記録容量の増加とともに，記録ビットが微細化していく様子を模式的に示す。記録ビットの微小化に伴い，許容される表面欠陥のサイズはどんどん小さくなり，表面品質を評価する測定技術の開発が不可欠となる。量産品の品質保証も含めて，どれだけ

図 8　AFC 構造媒体の基本層構成

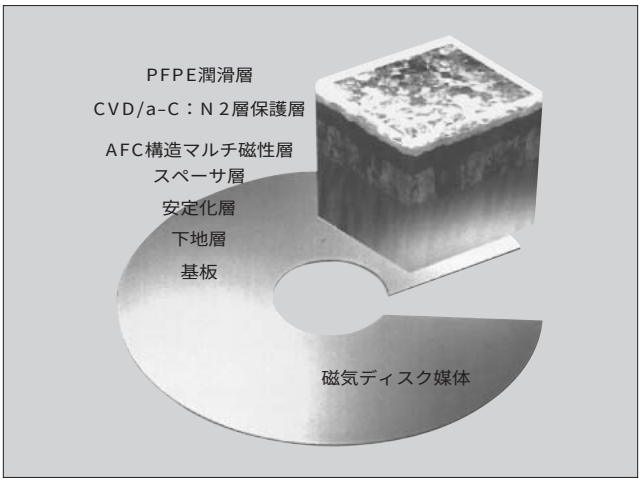


図 9　長手・垂直磁気記録媒体の結晶構造比較（平面 TEM 像）

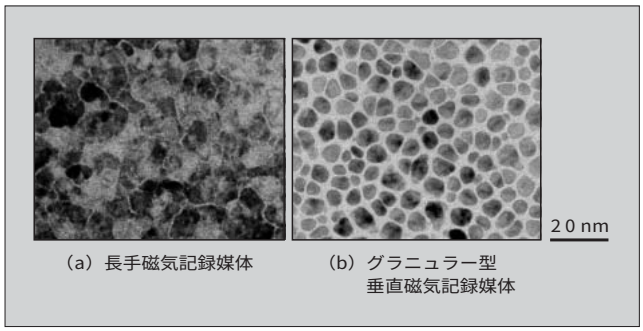


図 10　HDI 特性の開発課題

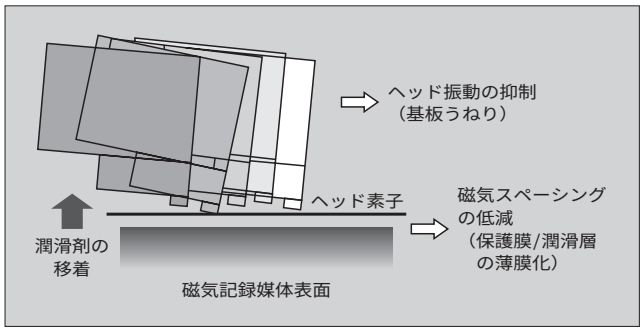
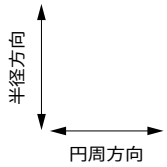


表１　磁気記録媒体の記録容量と記録ビットサイズの微小化

記録容量（3.5インチ換算）	80 Gバイト	120 Gバイト	160 Gバイト	240 Gバイト	320 Gバイト
面記録密度（Gbits/in^2）	63	94	140	200	250
磁気記録方式	長手	長手	長手	垂直	垂直
ヘッド浮上量（nm）	7.6	5	4	3.5	3
	0.037 µm	0.034 µm	0.032 µm	0.025 µm	0.023 µm

細かな欠陥を検出，排除する能力があるかが製品差別化の重要なポイントとなる。富士電機では基板，媒体の開発，製造技術にまつわる評価，測定技術に関して，最先端の評価技術の開発および評価装置開発に取り組んでいる。

5　あとがき

情報家電向け市場の拡大により，これまで以上に HDD 製品の需要は増加するとともに，HDD 製品の小型化に伴い高密度化技術への要求は一段と強まる傾向にある。使われ方の広がりに伴って一段と厳しくなる要求品質に応える技術の確立と低価格化の両立を目指して，今後も技術開発に取り組み特長ある製品を世に送り出していく所存である。

参考文献

(1)　IDC 社フォーキャスト資料．1998 ～ 2004.

(2)　TrendFocus 社年間レポート．1993 ～ 2004.

(3)　野村電子部品マンスリー．2002 ～ 2004.

(4)　日経エレクトロニクス「21 世紀を支えるディジタル記録技術最前線」．2001-7-30.

(5)　大月章弘．21 世紀の外部メモリを担う磁気記録媒体．富士時報．vol.76, no.7, 2003, p.415-420.

解　説　垂直磁気記録媒体関連用語

(1)　垂直磁気記録

垂直磁気記録方式は記録媒体を垂直（膜厚）方向に磁化することでデータを記録する方式で，記録密度が高くなるほど減磁が起きやすい面内記録方式とは逆に，密度が高いほど反磁界が減ってより安定な状態になり，熱揺らぎに対しても強いといわれている。

(2)　記録密度

トラック密度と線記録密度の積で求める。トラック密度は単位長さあたりのトラック本数であり，線記録密度は記録トラック上の単位長さ幅に記録できるビット数である。

(3)　熱揺らぎ

熱の影響で記録媒体の磁化方向が不安定になる現象である。記録密度を高めるほど顕著になる。

(4)　グラニュラー（granular）

意味は「粒状の」である。

(5)　磁気異方性定数（K_u）

磁性体の磁化方向が一定方向に向きやすくなる特性を磁気異方性という。異方性の強さを表す指標が磁気異方性定数である。

(6)　磁気クラスターサイズ（$D_{cluster}$）

記録媒体を交流消磁した後に観察される磁気的な固まりの直径と定義する。磁化が反転する最小の体積よりも 2.5 倍以上の大きさになるといわれている。

(7)　磁気力顕微鏡（MFM：Magnetic Force Microscope）

磁性探針を用いて磁場分布を観察することができる走査型プローブ顕微鏡。

アルミポリッシュ基板

矢吹　和彦（やぶき　かずひこ）　　**増田　光男**（ますだ　みつお）

1　まえがき

いろいろな外部記憶装置が開発，提案される中でハードディスク装置（HDD）は一貫してそのビットコストと高速性，容量の大きさから他の追随を許して来なかった。これは近年の年率 60 ～ 100 %という面記録密度の向上によるもので，今後も続くと考えられている。

また，最近はその高速性とランダムアクセス可能な特質を生かし，カーナビゲーションシステムやビデオデッキにHDD が搭載された製品をよく目にするようになってきており，このように AV（Audio-Visual）関連の市場も広がりつつある。

HDD に使われる磁気記録媒体用基板に関しては，過去いろいろな材質の検討が行われてきている。しかしながら一部モバイル系などで耐衝撃性の面からガラス基板が採用されているが，大多数のデスクトップ系やサーバ系に対しては高品質で安価なアルミ基板に代わる基材は出てきておらず，今後も特にデスクトップなどの設置型に関しては需要は堅調であると考えられる。

磁気記録媒体は，テクスチャによりある程度の規則的な粗さを付与した基板上にスパッタ膜が 6 層程度（約 30 nm）成膜されている。また，磁気記録媒体面上をヘッドが約 10 nm の高さで浮上走行し，漏れ磁場を利用して情報の読み書きを行っている。

この漏れ磁場を利用した記録と磁束の変化を検知する再生の方式は変わることなく，今後もこの方式が採用されると考えられる。要求される仕様の数値とその納期に関する議論はあるものの，基板に求められる要求品質は現状でも主要項目である超平滑性（うねり低減）に代表される表面特性について，より高度化が要求され続けることは当面変わらないであろう。

富士電機では，磁気記録媒体製造にかかわる各工程でさまざまな技術開発を行っているが，本稿ではアルミポリッシュ基板の平滑化技術に関する現状と次世代技術について概略を紹介する。

2　磁気記録媒体の構成

磁気記録媒体の基本的な層構成を**図 1** に示す。これを大まかに工程別に分けると，以下となり，富士電機ではグラインド基板を購入した後のめっき基板以降の工程を持ち，量産を行っている。

(1)　ブランク工程

アルミ合金を溶解・鋳造し，これを圧延する。これをドーナツ状の円板状に打ち抜き，応力開放のために加圧焼鈍を行う。

(2)　グラインド基板工程

内外端部を面切削し，チャンファー形状を付与する。さらに，機械加工による面切削で大まかな表面出しを行い，面研削により最終仕上げを行う。その後，応力解放のために加熱焼鈍を行う。

(3)　めっき基板工程

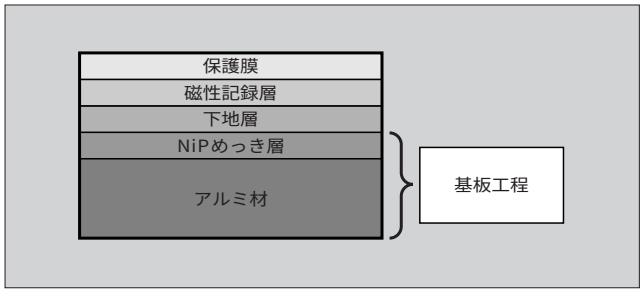
グラインド基板の表面を化学的に調整し，アモルファスのニッケルリン層を無電解めっきで十数 μm 程度成膜する。

(4)　ポリッシュ基板工程

めっき成膜の際に発生する応力解放のために加熱焼鈍を行い，次にポリッシュ機にて**図 2** に示す表面と，**図 3** に示す断面を持った発泡パッドを用いて遊離砥粒を分散させた研磨液（スラリー）により基板表面を精密研磨加工する。前述のように，世代進化に応じて粗さ・うねりに代表される表面特性の要求品質が高度化している。

(5)　磁気記録媒体工程

図 1　磁気記録媒体の基本構成



矢吹　和彦

磁気記録媒体用ガラス基板の研磨技術開発に従事。現在，富士電機ストレージデバイス(株)基板開発部課長。

増田　光男

磁気記録媒体用基板の開発に従事。現在，富士電機ストレージデバイス(株)基板開発部長。

図２　研磨パッドの表面写真

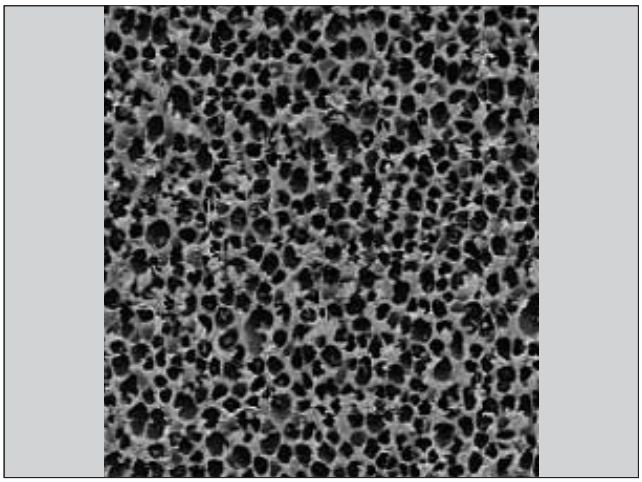
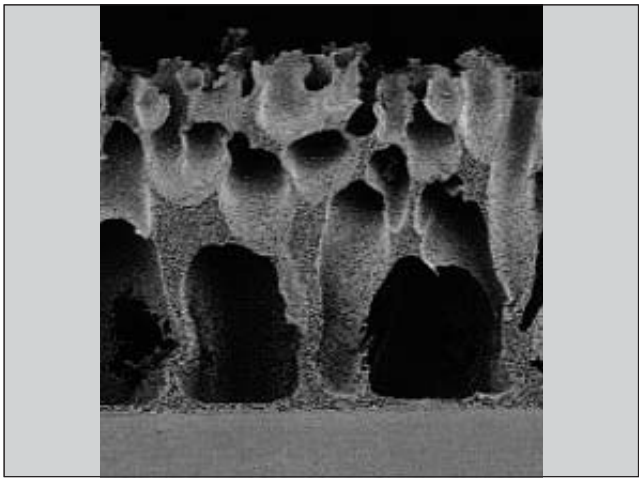


図３　研磨パッドの断面写真



表面に精緻（せいち）な形状を付与（テクスチャ加工）し，スパッタ法により何層かの下地層，記録層を成膜し，さらに保護層を形成する。

3　アルミポリッシュ基板加工技術

容量進化に伴い，アルミ基板に対し要求される表面清浄性と表面平滑性はますます厳しくなっている。ここではその２点における最近の開発状況の概略を紹介する。

(1)　表面清浄性

ニッケルリン層を付与されたアルミ基板の表面研磨（ポリッシュ）は現状２段研磨を行っている。その際，突発的に１段目の研磨砥粒が２段目で残り，表面特性を悪化させる不具合を発生させる場合がある。これを改善するために研磨剤の改善実験を種々行っている。実験の際に残渣（ざんさ）を検出しやすくするために２段目の研磨時間を極端に短くした特殊条件での表面観察をした実験の結果例を，**図４**に示す現状研磨剤を用いた場合と**図５**に示す実験研磨剤を用いた場合との比較で示す。写真中の細かな白点が砥粒残渣である。現状研磨剤では点々と散見されるが，実験品ではほとんど認められない。

図４　研磨剤実験による表面観察結果（現状品）

図５　研磨剤実験による表面観察結果（開発品）

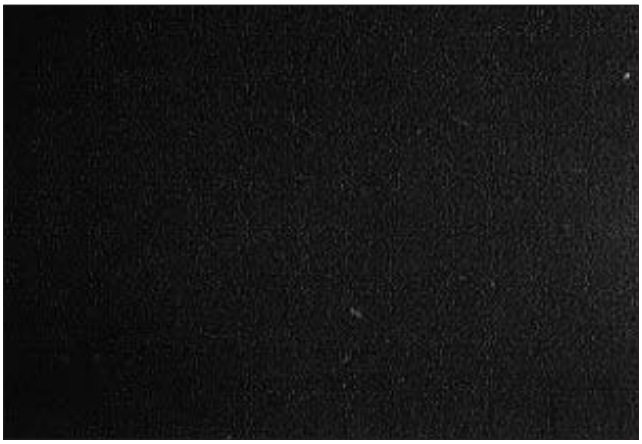
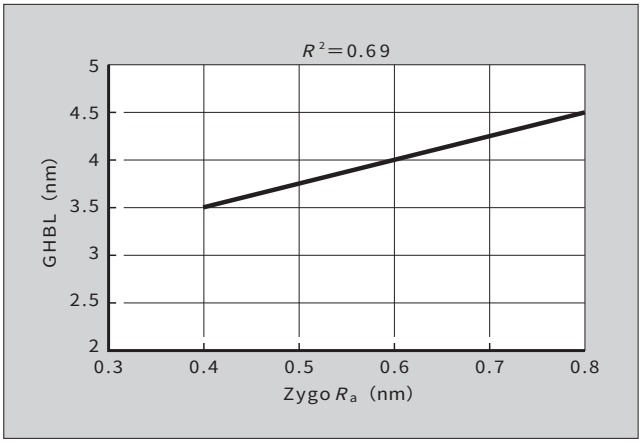


図６　GHBL と基板表面特性の関係



このように，研磨剤の開発により表面清浄性の改善およびスループットの改善が図れるめどがつきつつある。

(2)　表面特性

図６に，うねり対 GHBL（Glide Height Base Line）の評価例を示す。うねりの指標としては Zygo という表面性状測定器の平均粗さ R_a 値を用いている。GHBL とは，浮上しているヘッドの浮上高さを徐々に低下させ，媒体とヒットした高さをいう。世代進化によりヘッドの浮上量は低下するため，GHBL の要求値もより低い値が要求される。

図７　Zygo による基板表面プロファイル例

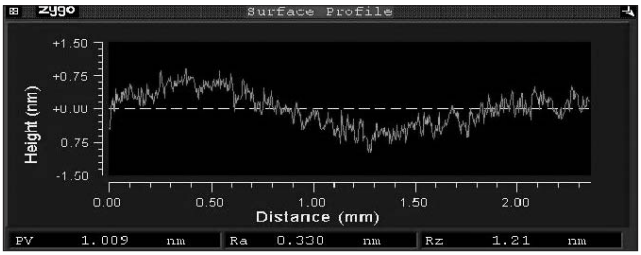
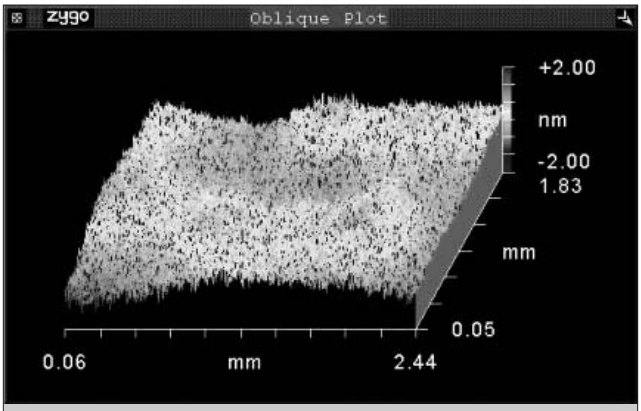


図８　Zygo による表面三次元プロファイル（現行品）

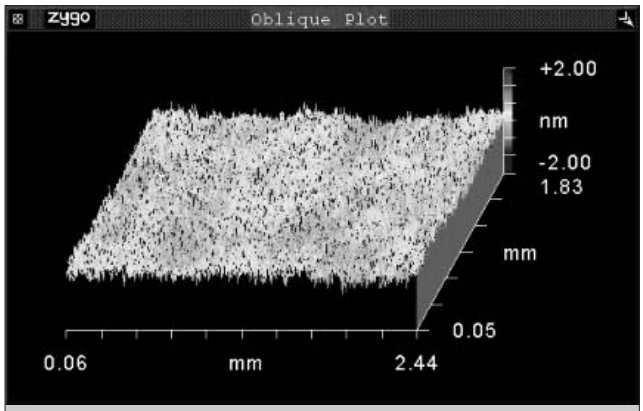


Zygo R_a＝0.294 nm

図７にアルミ基板表面の Zygo によるプロファイル例を示す。粗さ，うねり成分としてさまざまな周波数帯の成分が重畳していることが分かるが，この表面形状には研磨加工に使用されるパッドとスラリーの諸特性が大きく影響している。

このうち，パッドに関しては部材メーカーと共同開発を行い，主要特性である開口径・硬度・ポア形状の最適化と

図９　Zygo による表面三次元プロファイル（開発品）



Zygo R_a＝0.194 nm

パッドの表面調整技術（バフ）を高度化することで，表面特性が大きく改善された。Zygo による基板表面の三次元プロファイルの例を**図８**（現行品）と**図９**（開発品）に示す。

アルミ基板の表面特性は世代進化ごとに要求特性が厳しくなっているため，パッド・スラリーの開発に代表される表面研磨技術のさらなる高度化に取り組んでいる。

4　あとがき

磁気記録媒体のアルミ基板の製造技術の開発状況について概略を紹介した。HDD が民生用に大きく展開されつつある現状では，安価なアルミ基板に対する需要の伸張が十分に期待される。そのため，世代進化に対応した表面特性を達成する技術開発に努めていく所存である。

長手アルミ基板媒体

坂口　庄司（さかぐち　しょうじ）　二村　和男（にむら　かずお）　柏倉　良晴（かしわくら　よしはる）

1　まえがき

記録容量の増加，用途の拡大に伴い，磁気記録媒体の記録方式，使用される基板種，サイズは多様化している。現在，富士電機で生産している主な磁気記録媒体は，記録ビットの磁化が基板面内円周方向（長手方向）を向き，アルミ合金に NiP めっきを施したアルミ基板を用いた，長手アルミ基板媒体である。この磁気記録媒体は，パソコンやサーバを中心に使用されている。電子情報の高容量化が進む中，長手アルミ基板媒体についても，高記録密度化の開発が進んでいる。2001 年に 30 Gbits/in^2 であった記録密度は，2002 年には 60 Gbits/in^2 を超え，2004 年中には 90 Gbits/in^2 を超える製品が市場にリリースされようとしている。

このような高記録密度化を実現すべく，富士電機では基板表面加工技術，磁性技術，ヘッドディスクインタフェース技術を中核とした要素技術開発を行っている。本稿では，これまでの技術開発の状況を紹介するとともに，100 Gbits/in^2 を超える高記録密度を実現するための技術動向について述べる。

2　基板表面加工技術・洗浄技術

2.1　テクスチャ加工の目的

磁気記録媒体は，非磁性の基板上に複数の金属，非金属薄膜を形成することによって作られる。基板表面の性質は，磁気記録媒体の特性に大きな影響を与えることが知られている。

現在，主流の長手記録方式用基板はアルミ母材に NiP めっきを施した後に鏡面加工し，その表面にはテクスチャと呼ばれる円周方向の超微細な凹凸が形成されている。

このテクスチャ加工の目的は，大きく分けると次の二つが挙げられる。

(1)　磁気記録媒体と磁気ヘッドとの浮上安定性の確保

(2)　基板円周方向に磁化方向の配向

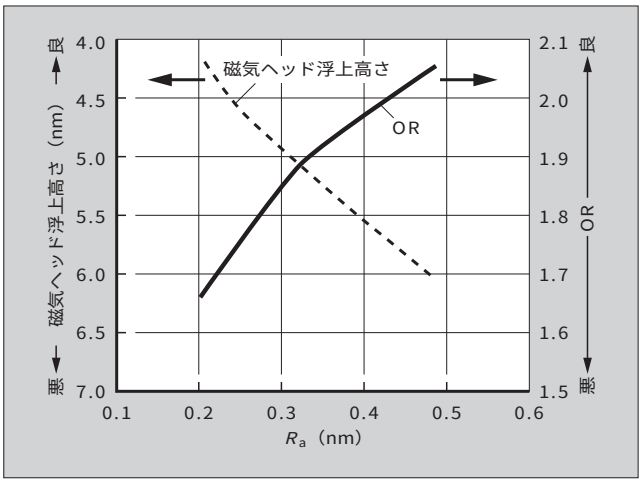
前者に関しては，テクスチャ加工により基板円周方向に緻密（ちみつ）な凹凸を形成させることで，磁気ヘッドの浮上安定性を確保すると同時に，実効的な接触面積を低減することで磁気ヘッドとの吸着を防止させることを狙っている。

また，後者に関しては磁性層技術（媒体としての電気特性）にも大きくかかわるものであり，特に長手記録方式の磁気記録媒体では，磁化の方位（磁石がそろいやすい方向）が基板円周方向に配向していることが好ましく，このテクスチャの存在は，薄膜結晶中にテクスチャに沿った膜応力を発生させるため，磁化の方位が基板円周方向に配向する。この配向の度合いは，テクスチャの形状により大きく左右されるため，磁気記録媒体にとって，テクスチャ加工は製品品質に大きくかかわる存在である。

2.2　テクスチャ表面と各特性との関係

テクスチャ加工における指標の一つに R_a（中心線平均粗さ）がある。この R_a については，前記目的の二つの特性と密接な関係があり，それぞれ相反する傾向となる。**図1**にその関係を示す。基板表面の R_a が低いと，磁気ヘッドの浮上性は良好となるが，逆に磁気配向比（OR：基板円周方向と半径方向の磁化比率）が悪化し，磁気記録媒体

図1　磁気ヘッド浮上高さ，OR と R_a の関係



坂口　庄司

磁気記録媒体の次世代基板加工技術開発に従事。現在，富士電機ストレージデバイス(株)製品開発部課長補佐。

二村　和男

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)製品開発部課長補佐。

柏倉　良晴

磁気記録媒体の次世代磁性記録層成膜技術開発に従事。現在，富士電機ストレージデバイス(株)製品開発部課長。

としての SNR（Signal/Noise Ratio，出力信号とノイズの比）が悪化する。したがって，磁気ヘッドの浮上性を確保しつつ，OR を向上させるための技術開発が必要であり，富士電機では，テクスチャ加工時の表面凹凸形状制御を行っている。

その一例として，テクスチャ時の表面先端曲率半径と OR の関係を**図 2** に示す。同一の R_a であっても，先端曲率半径が小さいと OR が向上しており，媒体特性の向上が図られる。先端曲率半径とは，テクスチャ加工における凸部の形状を示し，その先端がより鋭角である方が望ましい。この形状は，一般的には線密度で表現できるが，OR をより向上させるためには，線密度を向上しつつもテクスチャ時の山の一つ一つにおける先端曲率半径をより小さくすることが必要となる。

この山の先端曲率半径は，加工布，スラリー（加工液と砥粒の混合液），加工条件により決定される。

制御パラメータとしては，大きくは以下の 5 項目ある。

(1)　スラリーに含まれる加工液の加工性
(2)　スラリーに含まれる砥粒（ダイヤモンド）形状
(3)　テクスチャ加工時の基板回転数
(4)　テクスチャ加工時の加工圧力
(5)　加工布の繊維材料と繊維径

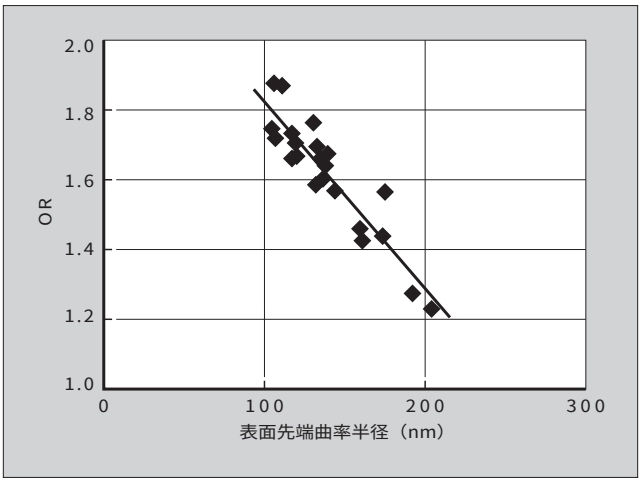
これらのパラメータを適切に組み合わせることで，磁気ヘッドの浮上性と，OR の両特性を満足し得る表面形状の作製が可能となる。

現在，富士電機で量産している主流製品の 80 G バイト製品（60 Gbits/in^2）の R_a は約 0.3 nm であり，テクスチャ加工時の凹凸先端曲率半径は約 100 nm としている。

2.3　洗浄品質

さきに述べた OR は，テクスチャ加工後の基板洗浄品質にも大きく左右されることが分かっており，後の磁性膜成膜工程に投入する前段階で，より成膜応力が発生しやすく，磁気が配向しやすい状態にしておく必要がある。すなわち，テクスチャ加工に用いられる加工液を確実に除去し，より残渣（ざんさ）の少ないクリーンな表面状態にすることが重要となる。

図 2　OR と表面先端曲率半径の関係



現在，富士電機では，磁性膜成膜前段階でのディスク 1 枚あたりの表面残渣量を ng の単位でモニタし，媒体性能の維持を行っている。

2.4　残渣低減方法

磁性膜成膜前段階での基板表面残渣を低減するための方法としては，大きく分けて以下の 3 項目が挙げられる。

(1)　洗浄性のよいテクスチャ用加工液の使用
(2)　洗浄性がよくリンス性の高い洗剤
(3)　乾燥時の乾燥むらの低減

(1)に関しては，テクスチャの加工性能を低下させることなく洗浄性能を向上させることが必要である。(2)に関しては，加工液に対しての浸透性（固形物の除去），乳化・分散性（油分の除去），さらには，NiP 表面への吸着性も考慮した洗剤を用いる必要がある。

また，内側に穴のあいている磁気記録媒体においては，(3)項の乾燥むらを低減させることが最も難しく，立上げ当初から工夫している項目である。

現在の量産機種においては，前述したように，表面残渣を少なくすることで，乾燥むらが発生しないように制御しているが，より清浄な基板表面を確保するため，温純水引上げ乾燥方式を高度化し適用している。基板を加温した超純水水槽に浸漬し，低速で基板を引き上げることで，基板上の残渣成分を超純水中へ拡散し，清浄な品質を得ると同時に水槽上部に，水に比べて揮発性の高い窒素ガスや IPA（Isopropyl Alcohol）蒸気などの気体を基板に吹き付ける方式により，乾燥しみの発生しない基板を作製することを可能としている。

2.5　次世代対応テクスチャ加工技術・洗浄技術

次世代の 120 G バイト/枚以上の記録容量を有する磁気記録媒体においては，従来以上に磁気ヘッドとの浮上スペースが小さくなると予想されており（5 nm 以下），テクスチャ加工時の加工うねり，および洗浄品質のさらなる高度化が必要となるため，従来技術の延長線ではなく，新たな方式も取り入れた技術開発が必要となる。

図 3，**図 4** に現行 80 G バイト製品で使用されているテクスチャ加工品と最新テクスチャ加工品における表面形状〔AFM（原子間力顕微鏡）像〕と磁気ヘッド浮上特性比較（グライドアバランシェ）を示す。従来以上に R_a を低下（0.2 nm）させつつ，先端曲率半径を小さくすることで，OR を維持しつつも磁気ヘッド浮上特性を向上させたテクスチャ技術を見いだしつつあり，次世代製品への展開を開始している。

次世代テクスチャでは，主に新しいタイプのスラリーとダイヤモンド砥粒を用いることにより，従来テクスチャ以上に緻密で低 R_a 化を達成させた表面形状を得ることができており，今後は，面内での形状分布を安定させつつもスクラッチなどの異常部の少ない加工条件を見いだすことが必要となる。

また，その他の課題もまだ多く存在しているため，さらに開発スピードを向上させる必要がある。

洗浄技術においても，記録ビットサイズの微細化に伴い，従来以上に付着物の極少化と，付着物質の特定が必要となり，新たな分析技術を含めた洗浄方式を早急に開発する必要がある。

また，磁気ヘッドの低浮上化に伴い，基板自体の品質により，テクスチャ加工条件・あるいは洗浄工程が大きく変わる可能性もあり，基板品質も視野に入れた技術開発も並行して実施する必要がある。

図3　基板表面形状（AFM）

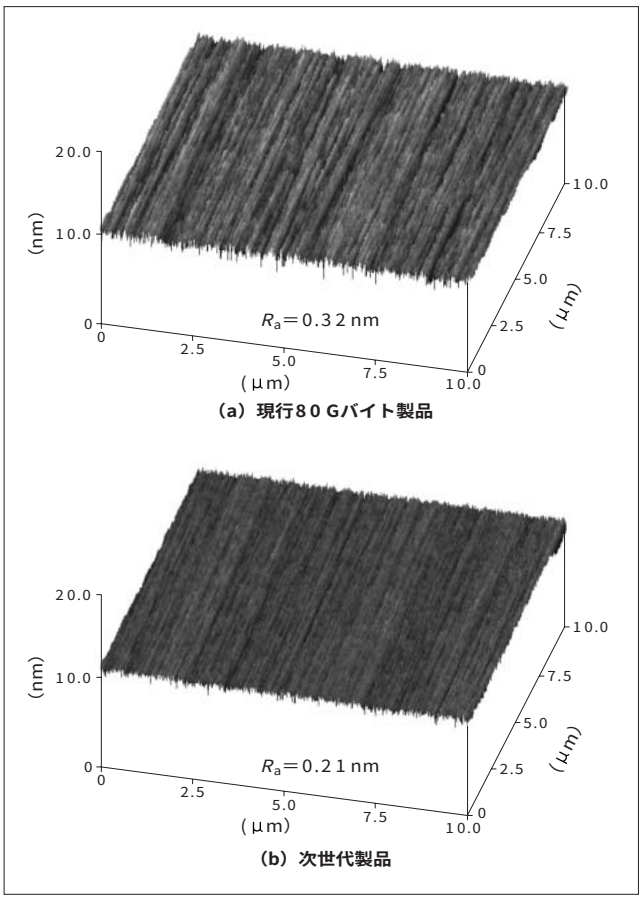
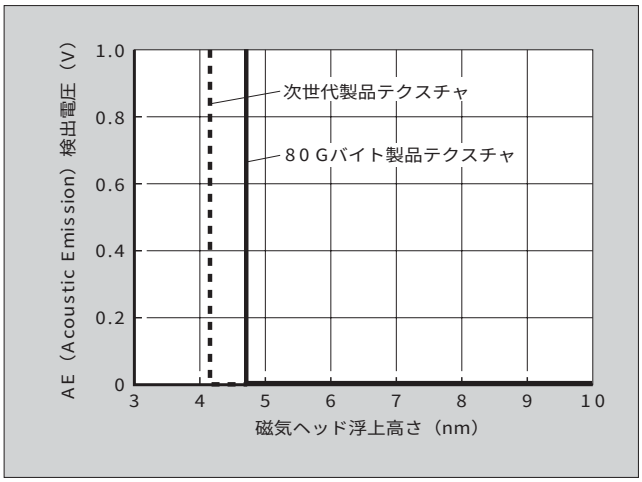


図4　磁気ヘッド浮上特性（グライドアバランシェテスト）



3　磁性技術

3.1　磁気記録媒体の基本層構成

磁気記録を行う磁気記録媒体では，最適な磁気特性を得るためのさまざまな磁性技術が取り入れられている。

図5に，長手アルミ基板媒体の層構成の一例を示す。NiPめっきを施したアルミ基板上に，複数の金属薄膜が設けられ，その上に磁気記録媒体と磁気ヘッドとのしゅう動から磁気記録媒体を保護するためのカーボン保護膜が設けられている。カーボン保護膜上にはさらに液体状の潤滑膜が塗布され，磁気記録媒体になる。基板表面には前述のテクスチャ加工が施されている。

複数の金属薄膜は，膜厚が0.8 nm程度から厚くても15 nm程度ときわめて薄く設計されている。これらは互いに結晶的な連続性を持つようエピタキシャル成長するように成膜され，それぞれに役割を持っている。Cr，Cr合金からなる下地層は，その上に形成される磁性記録層の結晶方位を基板面内に配向させるために設けられる。かつてはCrまたはCr合金の単層膜が採用されていたが，現在ではより高い結晶配向性を得るために複数のCr，Cr合金膜の積層構造を採ることが一般的である。中間層は，Co合金薄膜からなる。下地層と磁性記録層の結晶的な連続性を高め，磁性記録層の結晶欠陥を低減するために用いられる。磁性記録層は，実際に磁気信号が書き込まれる膜である。一般にはCoにCrおよび目的・機能に応じてPt，Ta，Bなどが添加されたCo合金からなる。**図6**に磁性記録層の平面TEM（透過電子顕微鏡）像を示す。磁性記録層は，複数のCo合金粒子の集合体である。その平均粒径はおよそ7 nmであり，記録密度の増加に伴い年々微細化されて

図5　磁気記録媒体の層構成例

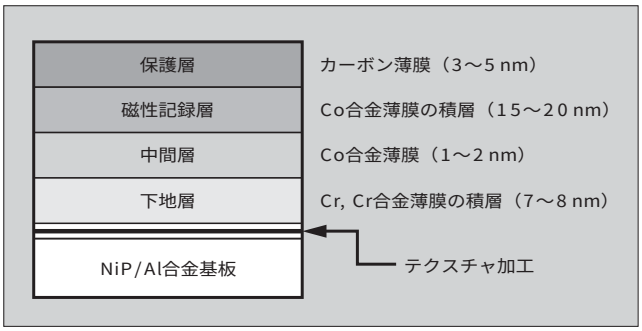
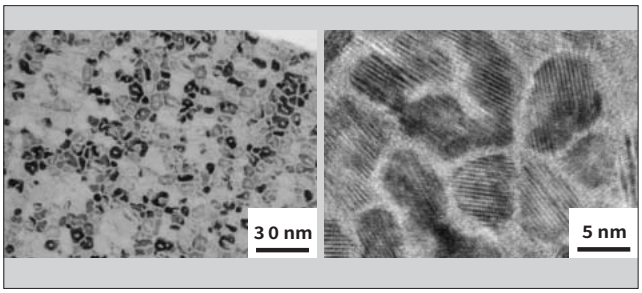


図6　磁気記録媒体の平面TEM像



いる。現在主流の記録密度である 60 Gbits/in^2 の場合，1 記録ビットの長さはおよそ 35 ～ 38 nm であり，Co 結晶粒およそ 5 ～ 6 個分に相当する。100 Gbits/in^2 を超えると 1 記録ビットの長さは 30 nm 前後にまで縮小されるため，Co 結晶粒径も 6 nm 前後に微細化する必要がある。一方で Co 結晶粒径が小さくなると，熱揺らぎの問題が顕著となる。熱揺らぎとは，周囲の熱の影響で磁気記録信号が減衰し消滅してしまう現象である。一般に小さい磁石が磁化をなくしやすいように，小さい Co 結晶粒ほど一度書き込まれた磁化を失いやすい。Co 結晶粒径は記録密度と熱揺らぎの関係を見きわめて設計する必要がある。

3.2　AFC 媒体の層構成

熱揺らぎ問題を抑制するため，富士電機では 2003 年から 60 Gbits/in^2 以上の磁気記録媒体に AFC 媒体を採用している。AFC 媒体とは，反強磁性結合（Anti-Ferromagnetic Coupling）を利用して熱揺らぎを緩和する磁気記録媒体である。その層構成を**図 7** に示す。**図 5** の中間層部分が，安定化層と非磁性のスペーシング層に置き換わった構造を採っている。スペーシング層の膜厚，安定化層の磁気特性をある範囲に制御すると，安定化層の磁化方向が磁性記録層の磁化の反対を向く。このことにより，媒体ノイズの元となる磁気信号の増加を起こさずに磁性層全体（磁性記録層＋安定化層）の膜厚を厚くすることが可能となり，熱揺らぎに対する耐久性が向上する。開発当初は信号の書込みが難しくなる現象も見られたが，各層の組成や膜厚構成を磁気ヘッドに合わせて最適化することにより，現在では十分な書込み性能を示している。

3.3　記録密度の改善

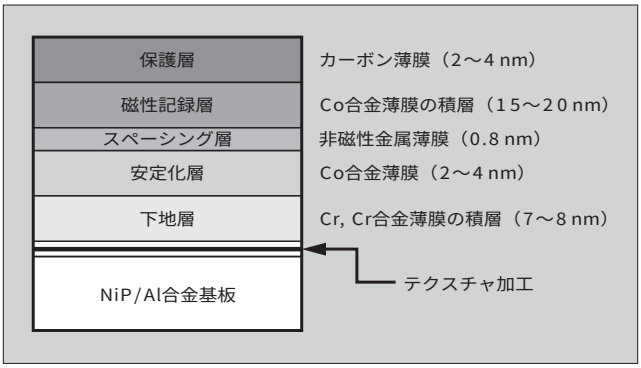
磁気記録媒体の記録密度を高めるための磁性技術開発は，記録密度の大小にかかわらずその方向性はほとんど変わっていない。すなわち，

(1)　Co 結晶粒径を微細にする。
(2)　Co 結晶粒間の磁気的な相互作用を弱める。
(3)　結晶配向性を制御する。
(4)　記録信号の熱的安定性を高める。

が重要となる。

開発の方向性は変わらないが，記録密度の向上に伴い要求されるレベルは高まっている。その要求を満足するために，合金設計，層構成設計，プロセス設計の最適化が継続的に行われている。

図 7　AFC 構造媒体の層構成例



3.4　合金設計

磁気記録媒体の金属薄膜には，機能に応じた多数の合金が用いられている。

下地層については，結晶配向性が良好な純 Cr や，Cr に結晶格子間隔を調整し Co 磁性薄膜との結晶整合性を高めるための V，Mo，W，Ti などを添加した Cr 合金，さらに結晶粒径を微細化させるための B などが添加された Cr 合金などが使用されている。最近の 60 Gbits/in^2 を超える磁気記録媒体では，これらの合金薄膜 2 ～ 3 層を積層構造とし，複数の機能を併せ持つように設計されることが一般化している。

磁性記録層には，従来から用いられている CoCrPt 系合金をベースに，結晶微細化，偏析構造の促進を目的とした B，結晶構造制御を目的とした Ta や Cu などが適宜添加されている。磁性層組成の設計では，添加元素の種類とともに，添加する量が重要となる。Co 粒子の微細化や粒子間の磁気的相互作用低減に効果のある Cr や B の添加量を増やすことは，媒体ノイズの低減に有効である。しかし Co 粒子の磁性が弱まるため，記録信号の熱安定性が損なわれる。反対に Cr，Bの添加量を少なく抑えると，熱安定性は高められるが，媒体ノイズが抑えられない。最近では，Cr と B の組成バランスを変えた 2 種類以上の磁性記録層を積層することで低ノイズと熱安定性のバランスを保つことが行われている。

3.5　層構成設計

これまで述べたとおり，磁気記録媒体ではそれぞれ独自の機能を持つ金属薄膜を適宜積層成膜することにより，記録密度の向上を行ってきた。層構成の設計をするうえでは，それぞれの膜厚や膜厚の比率に留意する必要がある。従来から下地 Cr・Cr 合金膜の膜厚が増えるとその上に形成される磁性記録層の Co 粒径が増大することが知られている。この現象は，下地層と磁性記録層の中間にある安定化層についても該当する。**図 8** に，磁性記録層の Co 粒径と安定化層膜厚との関係を示す。通常 3 nm 前後に設計される安定化層膜厚を 5 nm にするだけで，その上に積層される磁性記録層の Co 粒径は 8 %以上増加している。結晶粒径の増加は媒体ノイズの増加を招き，**図 9** に示すように SNR（大きいほど記録密度を高められる）低下の一因になっている。この例のように，磁気記録媒体の層設計においては，薄膜層それぞれの厚さをいかにして薄く保つかということが基本的な考え方になっている。

また，最近の磁気記録層は 2 種類以上の磁性薄膜の積層構造として設計されることが一般化されているが，その膜厚比率の設計が重要になっている。**図 10**，**図 11** に，二つの磁性層を積層したときの磁気特性および R/W（Read/Write）特性と上側磁性層の膜厚比率との関係を示す。一

図８　Co 粒径の安定化層膜厚依存性

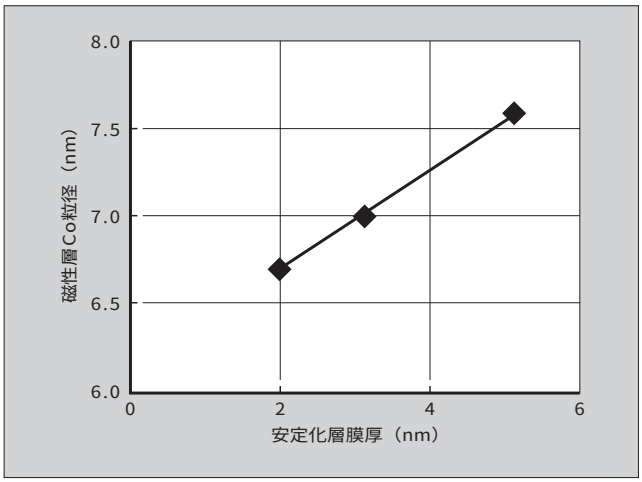


図９　SNR の安定化層膜厚依存性

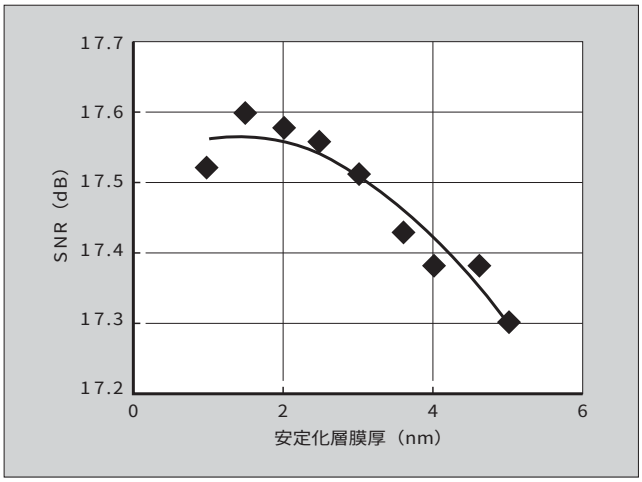


図10　磁気特性の上磁性層膜厚比率依存性

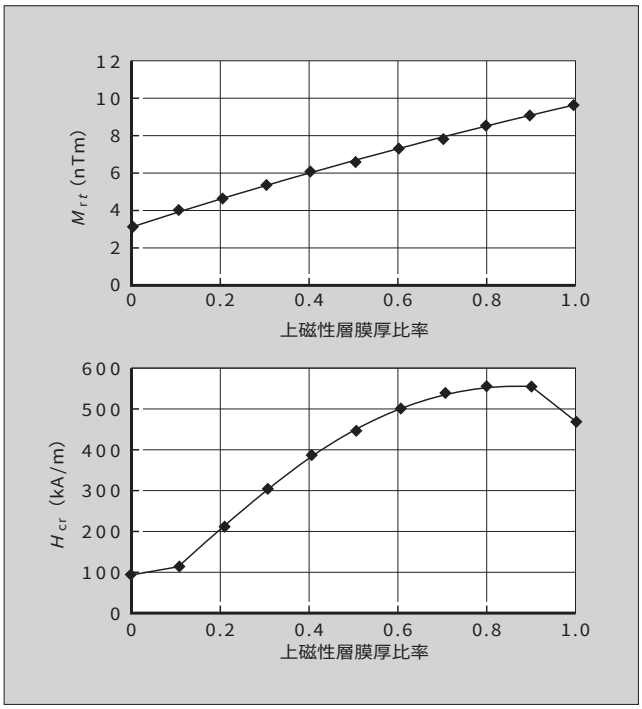
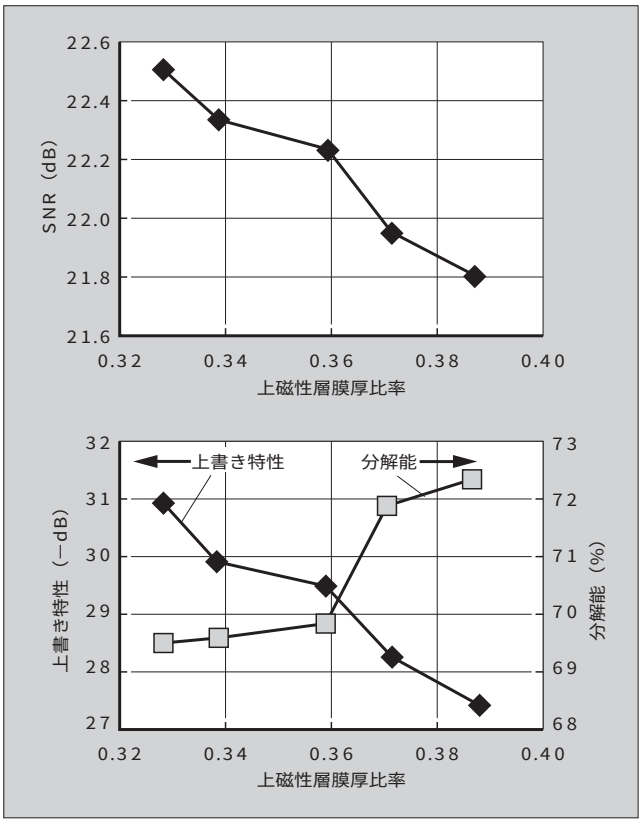


図11　R/W 特性の上磁性層膜厚比率依存性

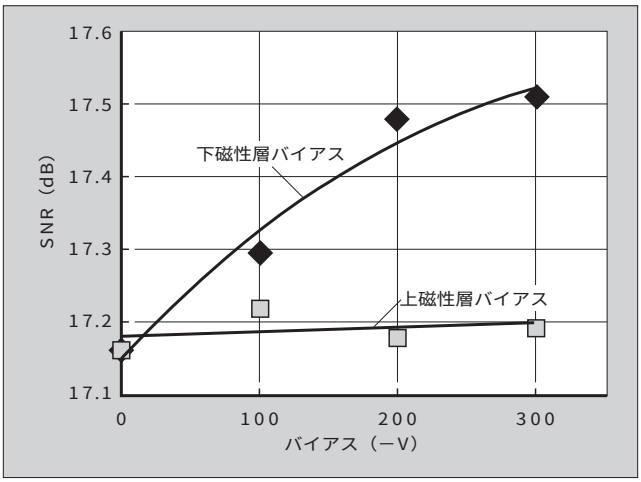


般に上磁性層は下磁性層よりも高保磁力に設計されることが多いが，両磁性層の積層比率によっては，上磁性層単層時よりも大きな保磁力が得られる。保磁力は，磁性記録層の磁気信号を消去するのに必要な外部磁場の大きさで，熱安定性と記録密度の目安になる。また R/W 特性も磁性層膜厚比率に大きく依存する。最適な膜厚の比率は磁性層組成の組合せや，信号の書込み・読出しを行う磁気ヘッドの能力にもよる。しかし最適な R/W 特性が得られる磁性層膜厚比率は狭い範囲であり，膜厚比率をこの狭い範囲に制御する成膜技術が必要である。富士電機では成膜設備・プロセス，膜厚管理方法の最適化を行うことにより高度な膜厚制御を可能とし，磁性層比率変動のない磁気記録媒体の安定生産を可能としている。また TEM 解析技術の高度化や，高輝度放射光解析（SPring-8 利用）の導入により 1 nm 以下の薄膜の結晶構造解析を可能にするなど[(3)]薄膜解析技術を強化し，層構成設計の指針としている。

3.6　成膜プロセス

磁気記録媒体の磁気特性，R/W 特性は，基板温度，成膜圧力，成膜速度，基板バイアスといった成膜プロセスにも依存する。その一例として，**図12**に磁性層成膜時に基板バイアス印加を行うことによる SNR 特性変化を示す。ここで用いられている磁性記録層は二つの磁性層の積層で構成されているが，下磁性層（基板に近い方）への基板バイアス印加により SNR 特性が向上しているのに対して，上磁性層（基板から遠い方）への基板バイアス印加では SNR 特性の改善は見られていない。基板バイアス印加には，

図12　SNRのバイアス依存性



スパッタ粒子のエネルギーを高め，より欠陥の少ない緻密な膜を形成させる効果がある。また，結晶の格子間隔を変える効果や，基板温度を高める効果も併せ持つ。これらの効果が相互に干渉し合うことにより，基板バイアス印加の効果が現れる膜，現れない膜，あるいは悪影響が現れる膜に分かれると考えられる。

成膜プロセスによる媒体特性変化のもう一つの例として，成膜前加熱によるORと基板表面うねりの変化の様子を**図13**に示す。2章で述べたように，基板円周方向と半径方向の磁化比率であるORは，磁気記録媒体のR/W特性に大きな影響を与える。OR発生のメカニズムには諸説あるが，その一つとして薄膜内の応力に起因して導出されると考えられている。成膜工程では基板を真空装置内に挿入してから成膜前に200～250 ℃程度に加熱する工程が含まれる。この成膜前加熱は薄膜への応力を発生させたり薄膜の結晶方位を変えたりする効果を持つ。その結果，ORも基板加熱の温度により変化すると考えられている。**図13**からも分かるように，基板加熱温度には最適な範囲が存在する。また，過剰な基板加熱は，基板表面の形状を変化させてしまう。このことによりせっかく得られた最適なテクスチャ形状が乱れてしまう。また基板表面の粗さが増加するため，磁気ヘッドの浮上特性にも影響を与え，結果として良好なR/W特性が得られなくなってしまう。加熱温度の最適化もまた，基板バイアスの最適化同様，記録密度向上のために重要なプロセスとなる。

成膜プロセスの最適解は層構成や合金組成によって異なる。富士電機では世代とともに変わりゆく層設計，合金設計に応じて成膜プロセスの最適化を行い，媒体特性を最大限に引き出すことを可能としている。

3.7　次世代対応磁性技術

表1に，2002年末に量産化された初期の60 Gbits/in^{2}クラスの磁気記録媒体と，2004年2月に量産化された磁気記録媒体のR/W特性比較を示す。2004年の磁気記録媒体にはAFC構造が採用されており，下地層の多層化，磁性層組成の見直しなどが行われている。さらにその層構成，

図13　成膜前加熱によるOR，基板表面うねり変化

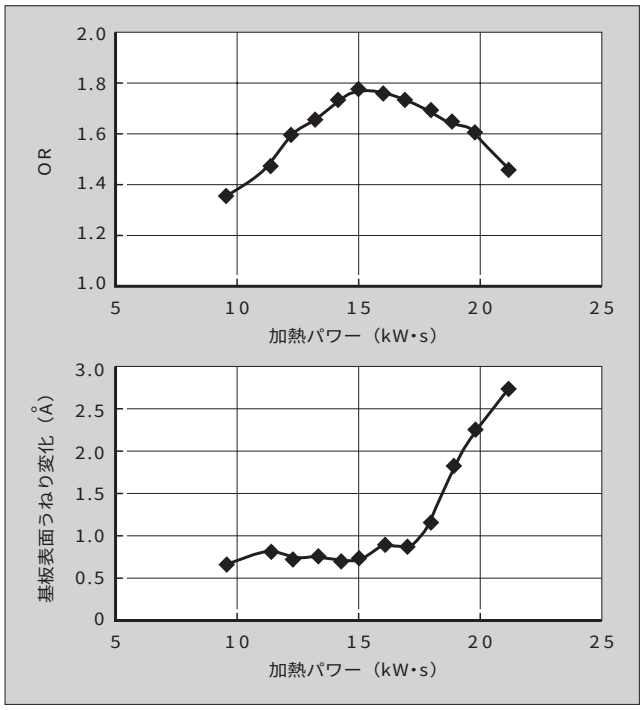


表1　新旧磁気記録媒体の特性比較

	2002年末	2004年2月
SNR	15.98 dB	17.15 dB
上書き特性	−28.7 dB	−30.4 dB
分解能	59.1 %	63.1 %
出力減衰率	−0.35 %	−0.26 %

組成に合わせたバイアス，加熱プロセスの最適化が行われている。その結果，2004年の磁気記録媒体は2002年当時の磁気記録媒体より優れたR/W特性を示している。熱安定性の目安となる出力減衰率もAFC化と磁性層組成の見直しにより改善されており（絶対値がより小さい），高記録密度化に有効であることが分かる。現在ではさらなる磁性層組成の見直しを行い，より優れた特性を有する磁気記録媒体が開発されている。90 Gbits/in^{2}への適用を目指し最終調整を行っている段階である。

今後100 Gbits/in^{2}を超える記録密度を実現するためには，さらなる特性改善が必要となる。磁性技術としての大きなポイントは前述のとおり，熱安定性を維持しながら結晶粒径の微細化を図ることである。現在，富士電機では，下地層，磁性記録層組成の見直しによる結晶粒径の微細化，AFC構造，磁性層組成の見直しによる熱安定性の確保を検討している。成膜プロセスにおいては，磁気記録媒体面内の磁気特性の分布をより均一にする成膜方法を検討し，総合的な媒体特性の向上を目指している。また，成膜中の真空雰囲気をより清浄に保つことにより金属薄膜内の結晶格子欠陥を低減し，媒体特性を改善することも検討している。

4　ヘッドディスクインタフェース

4.1　保護膜

磁気ディスク装置の記録密度向上のために，書込み信号を微小化しさらに有効な読み書き信号強度を得ようとするために，**図14**に示す磁気ヘッドから磁気記録媒体の磁性層までの間隔（磁気スペーシング）を低減することが効果的である。その一例として，**図15**にカーボン保護膜の厚さとR/W特性との関係を示す。カーボン保護膜を薄くすると，磁気スペーシングはより狭まることになる。このことによって，SNRをはじめとする諸R/W特性値が改善される様子が分かる。磁気スペーシングを減らすためには，磁気ヘッドの浮上量を低くすることと，保護膜の膜厚を薄くすることが必要である。これを実現するためには，年々低下する磁気ヘッドの浮上量に対応したグライド特性表面を前述の基板加工技術によって作り上げるとともに，薄くても十分な耐食性・耐久性を持つ保護膜・潤滑膜が要求される。

富士電機ではホロカソード型CVD（Chemical Vapor Deposition）方式による保護膜を適用して，スパッタカーボン膜では達成できない薄膜での耐食性と耐久性を確保している。保護膜中の水素量および窒素量は膜密度などの膜質を変えて摩耗特性に影響するとともに，表面電位や後述する潤滑膜と相互作用して磁気ヘッドの浮上性に影響することが分かっている。保護膜表面の窒素量を変えたディスクにグライドヘッドを浮上させたときの浮上ノイズを**図16**に示す。窒素添加により浮上ノイズの減少が確認された。このようなヘッドの浮上性や耐摩耗・耐食性を考慮した膜中の水素量および窒素量の最適化とディスク面内の均一化を行うことで，2.5 nm厚での信頼性に見通しを得ている。さらに2 nm以下の厚さでも耐久性と耐食性を満足する保護膜として，sp^3結合性炭素に富む緻密なta-C（tetrahedral amorphous Carbon）に着目してFCA（Filtered Cathodic Arc）法で成膜した保護膜の検討評価を行っている。

図14　磁気ヘッドと磁気記録媒体の断面構造

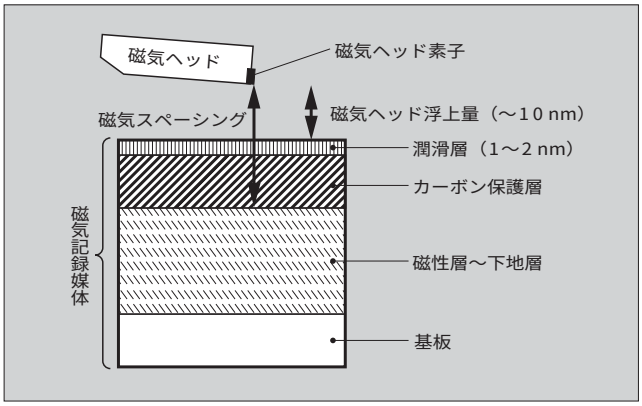
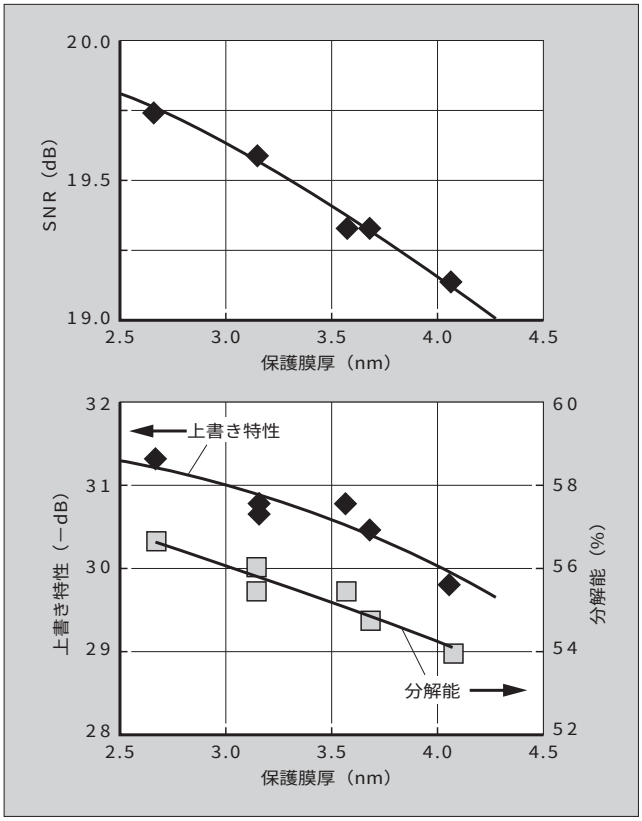


図15　R/W特性と保護膜厚の関係



4.2　潤滑膜

現在，磁気ディスクの摩擦摩耗信頼性は，保護膜とその上に1～2 nmの厚さに塗布されたフッ素系の潤滑膜PFPE（Perfluoropolyether）との相乗機能で確保されている。高記録密度化に伴う保護膜の薄膜化とヘッド浮上間げきの減少のために，潤滑膜についても薄膜での機能性に着目した材料検討がなされている。

磁気ヘッドの低浮上化は，潤滑膜に与えるヘッドスライダ下の空気振動の影響を強め，また突発的な表面接触の機会の増加をもたらし，それらによって潤滑膜の部分的な凹凸（モーグル）やヘッドスライダへの移着を発生させることがある。その結果，磁気ヘッドの浮上安定を阻害して読み書き信号の出力変動を生じさせる。潤滑膜材料と保護膜との結合性に着目して調査した例を**図17**，**図18**に示す。結合性の強い潤滑膜は，ヘッドを設計浮上量からさらに低浮上させても潤滑膜の凹凸化は発生しにくい。また，塗布後

図16　保護膜窒素化処理による浮上特性変化

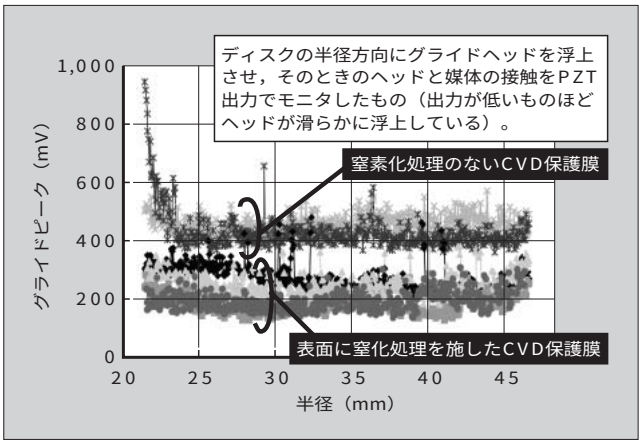


図17　潤滑膜の凹凸化

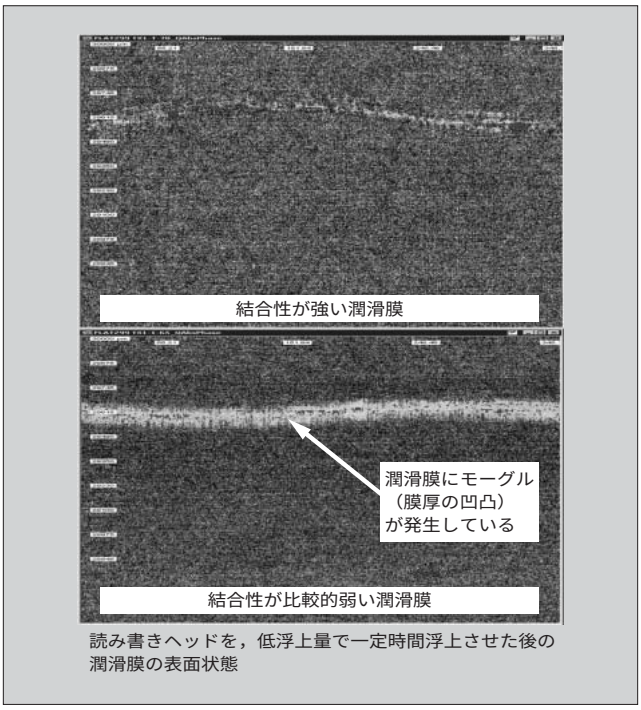
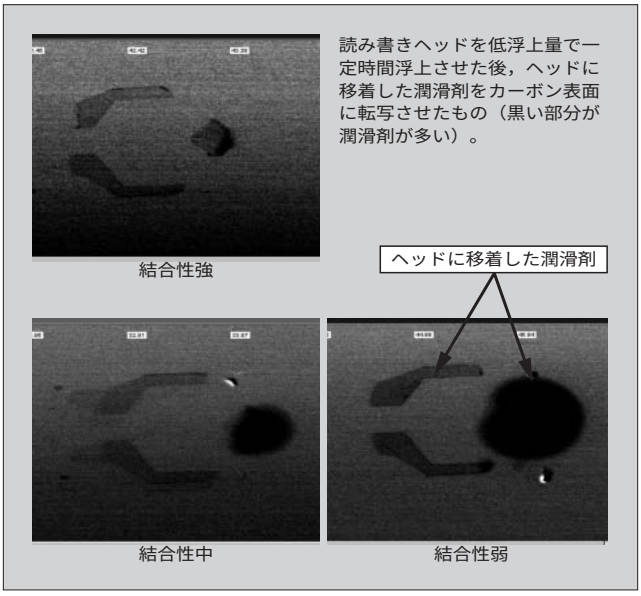


図18　潤滑膜―保護膜の結合性とヘッドへの移着量



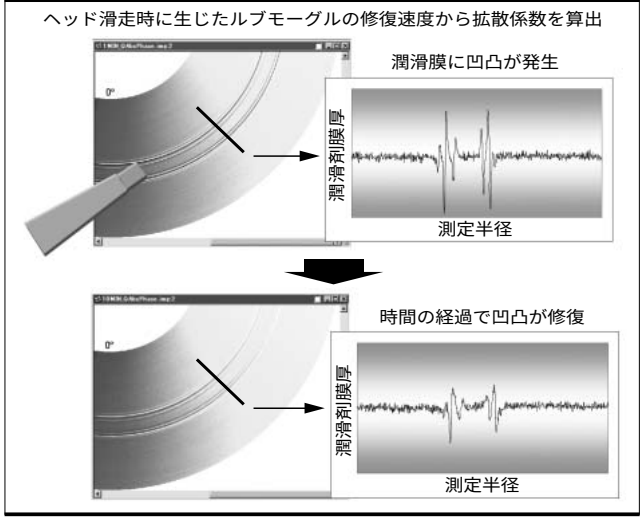
の表面処理を施すことによって，スライダ面に移着する潤滑膜の低減を図ることができる。

一方，潤滑膜に要求される摩擦摩耗の低減には，保護膜表面をいかに覆い続けるかということが重要である。高速回転時や温湿度ストレス環境でも潤滑膜が散逸せず，CSS（Contact Start Stop）時のヘッドとディスクの接触による潤滑膜の損失を抑えることと，損失した部分を修復する適度な拡散性が必要である。富士電機では，潤滑膜の拡散性を短時間に評価する手法を確立するとともに，各種末端基が異なるPFPE潤滑膜を評価し（**表2**）[(2), (3)]，ドライブデザインの特徴に対して潤滑膜の最適化を進めている。

また，独自な潤滑材料の精製技術を開発し潤滑膜の高品質化と高機能化を目指している。

表2　潤滑膜材料の拡散係数

潤滑膜材料	潤滑膜の拡散係数（$\mu m^2/s$）
潤滑剤A	0.53
潤滑剤B	1.19
潤滑剤C	0.02



5　あとがき

長手アルミ基板媒体は，ガラス基板媒体に比べると耐衝撃特性が劣ることから，その用途が限定される。そのため大幅な需要増は見込めないものの，現在の市場規模を維持しつつ推移することが予想されている。また，長手記録の原理的な記録密度の限界が議論されて久しいが，量産レベルで100 Gbits/in^{2}を超えることは時間の問題であり，200 Gbits/in^{2}を目指した開発が続けられている。生産コスト面ではまだまだ他の媒体に対する優位性を保ち続けており，またここで培われた要素技術はガラス基板媒体や次世代記録方式として実用化目前の垂直磁気記録媒体にも応用されている。長手アルミ基板媒体の技術開発はますます重要度を増しているといえる。富士電機においても長手アルミ基板媒体の限界に挑戦すべく技術開発を継続し，情報社会を支えていく所存である。

参考文献

(1)　大沢通夫．HDD用磁気記録媒体の結晶学的評価と磁気特性．第51回応用物理学関係連合講演会（2004年春季）講演予稿集．p.50.

(2)　中澤眞一，川久保洋一．磁気ディスク上の潤滑剤の移動/修復特性及びヘッド磨耗特性に対する影響．日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集．東京，2004-5, p.157-158.

(3)　熊崎博文．磁気記録媒体上の潤滑層流動特性評価方法．日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集．東京，2004-5, p.159-160.

ガラス基板媒体

松尾　壮太（まつお　そうた）　増田　克也（ますだ　かつや）　白井　信二（しらい　しんじ）

1　まえがき

ハードディスク装置（HDD）市場は，従来のパソコン（PC）主体から本格的なノンPC用途が広がりつつある。2003年は年間出荷台数2億3,000万台に到達し，2007年には4億台まで伸びることが予想されている。その中で，アルミ基板媒体とガラス基板媒体のすみ分けが進み，アルミ基板媒体は主にデスクトップPC，サーバ向け，ガラス基板媒体はノートPC，ノンPC向けとなっている。特に伸びが期待されるのは，ガラス基板媒体の領域であり，2007年度には，およそ半数がガラス基板媒体を用いたHDDとなることが予想される（**図1**）。

富士電機も現状のアルミ基板媒体に加え，ガラス基板媒体の生産拡大を行っていく計画である。

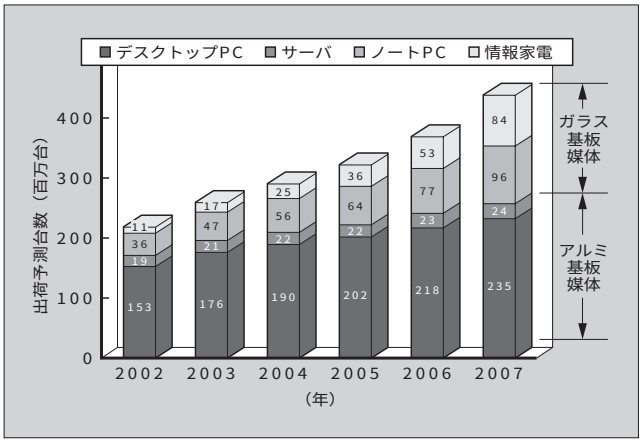
ガラス基板媒体は，その特徴である，

(1)　TMR（Track Miss Registration：磁気ヘッドの位置ずれ）が小さい。

(2)　耐衝撃性が高い。

を生かし，ノートPC用として2.5インチサイズのHDDが主に搭載されている。さらに小径モバイル用HDDが搭載される携帯電話，USBストレージ，MP3プレーヤなども今後急速に増加することが予想される。

図1　HDD市場予測（セグメント別）[1]



携帯電話に代表されるモバイル用途のHDDは，ノートPC対応と比較しさらに過酷な条件での品質安定性が必要である。現在，市場で要求されている項目としては，

(1)　耐環境特性（−20～＋70 ℃）

(2)　耐衝撃性1,000 G

(3)　HDDの厚みをできるだけ薄く（メモリカードなみの3.3 mm厚）

という三つが挙げられる。

富士電機では，2.5インチ用ガラス基板媒体からスタートし，さらに小径のガラス基板媒体につなげるべく技術開発を行っている。

本稿では，富士電機のガラス基板媒体の技術開発について紹介する。

2　ガラス基板媒体に要求される品質

現在，開発量産が進められているガラス基板媒体の要求品質とそれを達成するための必要条件を**表1**に示す。

これらを達成するため最も重要な技術開発事項は，電磁変換特性の開発とヘッドディスクインタフェース（HDI）

表1　ガラス基板媒体の要求品質

HDD要求品質		40Gバイト機種
回転数		5,400 r/min
1インチあたりのビット数		660kビット（サイズ0.038μm）
1インチあたりのトラック数		100kトラック（サイズ0.254μm）
記録密度		66 Gbits/in^2
ヘッド限界浮上		4 nm
熱緩和		＜1.20％Decay
エラーレート		＜−7乗
LULテスト	55℃/5％RH	30万回
	5℃/15％RH	30万回
コロージョンテスト		60℃/80％RH/21日間
耐環境テスト		5～55℃，5～80％RH 5日間
耐衝撃性		700G（非動作時）

松尾　壮太

磁気記録媒体の製品設計およびガラス基板媒体の製品化推進に従事。現在，富士電機ストレージデバイス(株)製品開発部課長。

増田　克也

ガラス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)製品開発部。

白井　信二

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)製品開発部。

技術の開発である。富士電機は，ガラス基板媒体を異方性媒体とすることで上記要求品質を満たす技術開発を達成している。

3　ガラス異方性媒体

従来，ガラス基板媒体は，表面にテクスチャ処理を行わずに作製する方法が主流であり，これらは等方性媒体といわれている。

一方，アルミ基板媒体は，アルミ合金の上に NiP がめっきされ，テクスチャが施されている。磁気記録層をテクスチャ方向に配向させており，その結果，円周方向の $M_r t$（残留磁化）が高く，同じ磁性層膜厚でも高い出力が得られることがメリットとなっている。

このために，アルミ基板媒体は，ガラス基板媒体に比べ媒体雑音が小さく，SNR（Signal/Noise Ratio）特性が良いものとなっている。

SNR 特性は HDD のエラーレートに直接影響することから，アルミ基板媒体と同様にガラス基板媒体を異方性媒体にできれば，記録密度の向上に対して効果的である。

3.1　ガラスダイレクトテクスチャ技術開発

当初，ガラス基板媒体はガラス基板上に NiP の成膜を行い，テクスチャが施されたアルミ基板媒体の構成と同一のプロセスが各社で開発されていた。アルミ基板媒体と同じく NiP を成膜後テクスチャを行うことは，異方性媒体としての特性は満足できるが，**図 2** に示すように，従来のアルミ基板媒体のプロセスに比較し，洗浄と NiP 成膜を行う工程を追加する必要があり，コストが上がる欠点がある。

アルミ基板媒体と同じプロセスでガラス基板媒体を作製するためにはガラス基板に直接テクスチャを行うことが必要である。しかし，ガラス基板にテクスチャを行い成膜を行っても単純には異方性媒体とならない。

そこで富士電機では，ガラス基板に対するテクスチャ技術の開発とシード層の最適化を行い，問題を解決した。

3.1.1　テクスチャ技術の開発

ガラス基板にテクスチャを行う際，本来，テクスチャとして必要な要求品質と異方性を向上させるために必要な項目の両立が必要となる。

その要求品質は，

(1)　表面粗さの低減
(2)　均一性向上（スクラッチ，リッジ）
(3)　テクスチャライン密度の最適化
(4)　テクスチャ先端半径の最適化

となる。

(1)は，磁気ヘッドの浮上特性に影響する。表面粗さを低減し，ヘッドと媒体間のスペースを確保する。

(2)は，信号欠陥やヘッド素子の損傷の低減に寄与する。表面に深いスクラッチがあれば，その部分のスペースが広がることで出力が低下する。リッジ（帯状に高い突起）があれば，ヘッドが接触あるいは接触しなくても急激な浮上姿勢の変化により出力異常を起こす。

(3)，(4)は，$M_r t$–OR（残留磁気膜厚積の配向比）の向上に寄与する。アルミ基板媒体は NiP 層にテクスチャを行うことで NiP の熱膨張によるひずみが大きく，磁性層が配向しやすい。ガラス基板に直接テクスチャを行う場合，表面硬度が高く熱膨張による形状的ひずみが小さいため，異方性を確保するには，テクスチャを緻密（ちみつ）に行い，単位長さに対するテクスチャ本数である線密度を高くすることが必要である。同時に線密度が高い場合，先端半径も小さくなる。この効果により**図 3** に示すような高い $M_r t$–OR が達成できるようになる。

上記の項目を満足するため，ガラス基板媒体専用の研磨剤と研磨テープまた加工条件を最適化することで，現在，**図 4** に示すとおり，要求品質を満足する表面形状を達成している。さらに，ガラス基板の材質が違うものでも同等の形状を作製できるようになっている。

3.1.2　シード層の開発

テクスチャによる異方性媒体の効果について述べてきたが，テクスチャだけでは，要求品質を満足する $M_r t$–OR を確保することはできない。シード層との組合せが重要である。

富士電機では，アルミ基板媒体が，NiP のアモルファス膜を用いていることが $M_r t$–OR に関連していることに注目し，シード層のアモルファス化を検討してきた。

図 2　プロセス比較

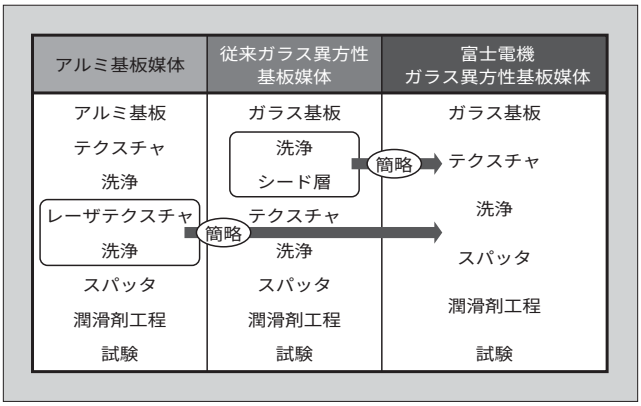
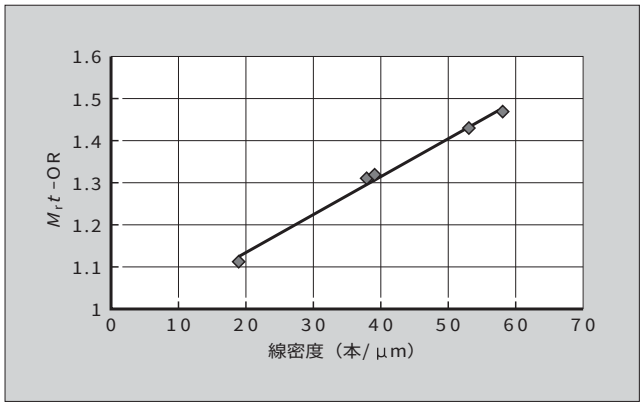


図 3　線密度と $M_r t$–OR の関係



重要なファクタは，

(1)　シード層の材質

(2)　シード層の膜厚比率

(3)　反応ガスの制御

となる。

(1)では，ガラス基板表面との密着性が高く，テクスチャに配向しやすい材質を選ぶことが重要である。また下地層が面内でテクスチャに沿って（200）配向に誘導されるものを選ぶ必要がある。

(2)では，シード層の膜厚を最適化することで高い配向が得られる条件を設定する。

(3)では，アモルファス化を誘導するガス種と導入量の最適化が必要となる。

(1)，(2)，(3)の組合せを最適化することで，**図5**に示す高い $M_r t$–OR を達成することが可能となった。今後，記録密度の上昇に従って，テクスチャで形成する粗さは小さくなり配向しずらくなる中，シード層の最適化を進めトータルでの高 $M_r t$–OR の達成を図る必要がある。

3.2　AFC 構造磁性層

ガラス基板媒体は前述のシード層の上にアルミ基板媒体と同様の下地層，安定化層，Ru 層，磁性層で構成される AFC（Anti–Ferromagnetic Coupling）構造（**図6**）を有する。特にガラス基板媒体は，HDD の要求品質から磁性層が薄く，分解能，ノイズが小さいものが必要となる。しかし，磁性層が薄くなると外部高温環境により減磁が生じ出力が低下する（熱緩和）可能性が高くなる。これらを解決するためには，熱緩和特性に関する式 $K_u V/k_B T$ を大きくすることが重要になる。K_u は結晶磁気異方性定数，V は磁性層の活性化体積に対応する。k_B はボルツマン定数，T は絶対温度である。同じ磁性層を用いた場合，K_u は一定であるので，V を大きくすることが必要である。V を大きくすると磁性層が厚くなりノイズが大きくなる。AFC 構造では，磁性層の一部が安定化層に用いた磁性層の磁化の強さに対応した磁気的な相互作用により，磁性層と安定化層を加えたものが磁性層の V となり，熱緩和特性を向上させる。

富士電機では，安定化層に低ノイズかつ磁気的な相互作用の最適な多元組成磁性層を用いることで，**図7**に示すとおり従来に比較し熱安定性が高い特性を確保した。さらに磁性層を2層化することにより，低ノイズ特性，書込み特性の両立を達成した（**図7**参照）。これらは，前述の $M_r t$–OR とも関連して，$M_r t$ を大きくしても磁性層の膜厚を従来ガラス基板媒体に比べ薄くできることを意味する。

図4　ガラス基板媒体の表面形状（AFM）

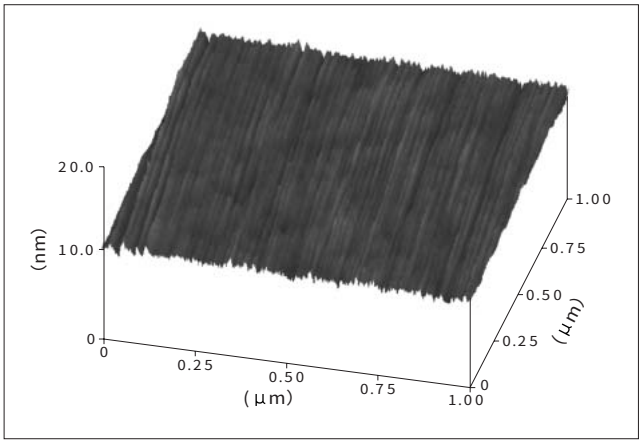


図5　シード層成膜の重要因子と $M_r t$–OR の関係

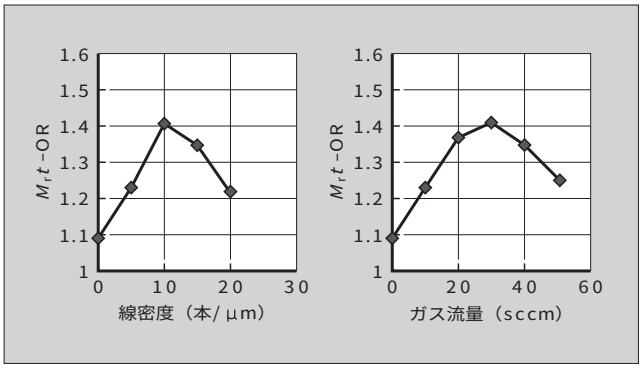


図6　AFC 構造磁性膜

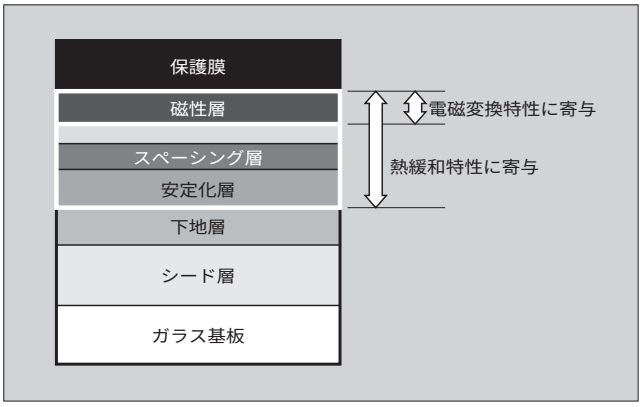
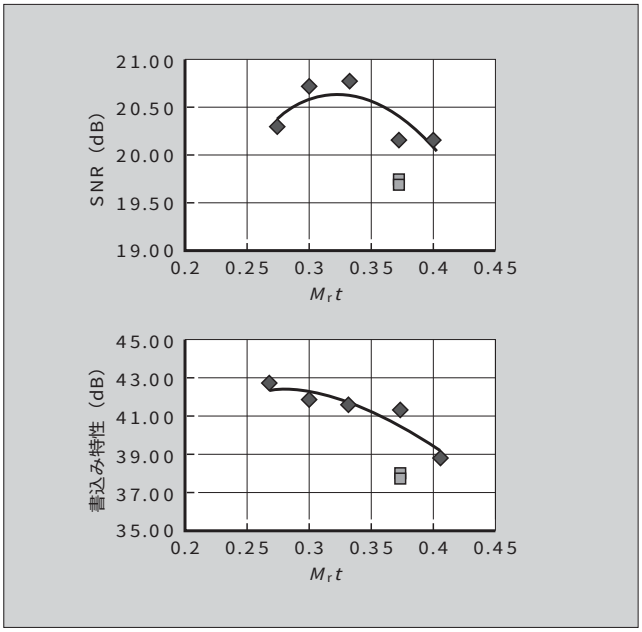


図7　富士電機製ガラス基板媒体の書込み特性と SNR 特性



現在，富士電機が作製し，顧客に展開しているガラス基板媒体は，出力が高くアルミ基板媒体に匹敵する電磁変換特性が得られている。

4　ガラス基板媒体の HDI 技術

4.1　ガラス基板媒体の HDI 方式

ガラス基板媒体，アルミ基板媒体双方に対して同じ記録密度においては，ほぼ同等の浮上品質が求めらているが，根本的に異なる点は，HDD の HDI 方式である。

ガラス基板媒体は，**図8**に示す LUL（Load Unload）方式を用いており，アルミ基板媒体に比較し，ヘッドが表面に接触しないことが大きな違いとなっている。アルミ基板媒体は，CSS（Contact Start Stop）方式を用い，電源オンオフ時に表面接触を起こす。その際ヘッドと媒体表面で摩擦を生じる。一方でヘッド側に付着した液体潤滑剤（ルブ）が媒体側に戻る現象が起こる。逆にガラス基板媒体は常にヘッド側にルブが付着し続ける。付着したルブは限界を超えるとヘッドの浮上特性を不安定にさせ，場合によると浮上が確保できずに媒体表面に衝突する。

したがって，ガラス基板媒体とアルミ基板媒体に要求される HDI 品質は異なる。ガラス基板媒体に必要な HDI 品質は次のとおりである。

(1)　ヘッドにルブが付着しないこと。

(2)　ヘッドが表面に衝突してもきずがつかないこと。

(1)は，保護膜とルブの付着力が関係する。また，付着せず自由に動くフリー層を適した膜厚に制御することが重要になる。付着力を高めてフリー層を少なくし，ヘッドにルブが付着しないようにする一方で，フリー層の流動性を制御して，ルブ膜厚が LUL 動作時に変動しない特性にすることが必要である。

富士電機では，上記品質を達成するため保護膜の膜質，潤滑剤の分子量，極性制御，添加剤の最適化を行い，これらの技術で特許（USP6730403，富士整理No.99P01607）を取得している。

4.2　保護膜技術

保護膜に求められる要求品質は，次のとおりである。

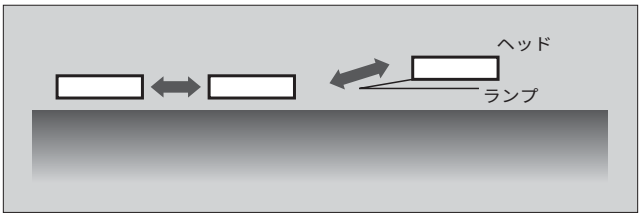
(1)　LUL に対する耐久性

(2)　ガス吸着特性対策

(3)　ガラス基板および磁性層からのコロージョン対策

(1)は，潤滑剤との密着性とも関連しており，具体的説明は，**4.3**節で行う。

図8　LUL 方式



(2)は，表面に腐食性ガスを付着させない不活性面にすることが必要であり，表面を窒化することで達成される。

(3)は，緻密な保護膜を用いる必要がある。

上記の要求品質を満足するため，富士電機では 2 層保護膜を用いている。**図9**および**図10**に示すとおり，第 1 層に CVD（Chemical Vapor Deposition）膜を用いてコロージョンを抑制し，第 2 層に a-C：N 膜を用いてガス吸着抑制を行っている。

4.3　潤滑剤技術

ルブのヘッド付着を抑制するため保護膜との結合性の高い潤滑剤を使用し，流動性を制御するため分子量の分布制御と極性制御を行っている。評価に加速評価を行い過酷な条件でもルブ膜厚の変化が発生しにくいものに制御している。**図11**に示すようにヘッドが安定浮上しない環境を故意に設定し，10 万回 LUL 動作を行ってもルブ膜厚が安定す

図9　Co コロージョン特性

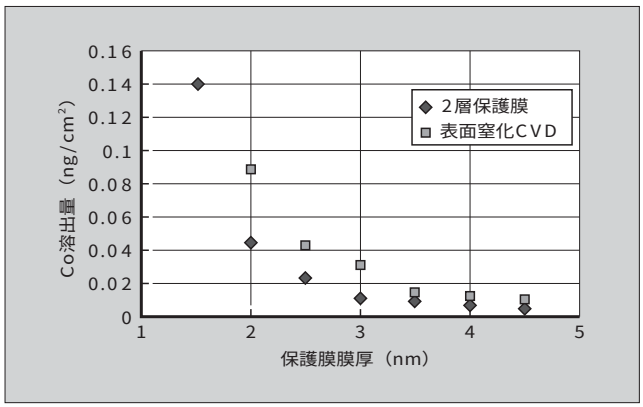


図10　保護膜によるガス吸着性

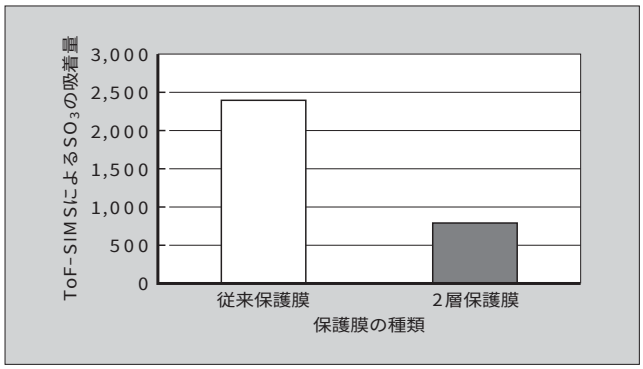
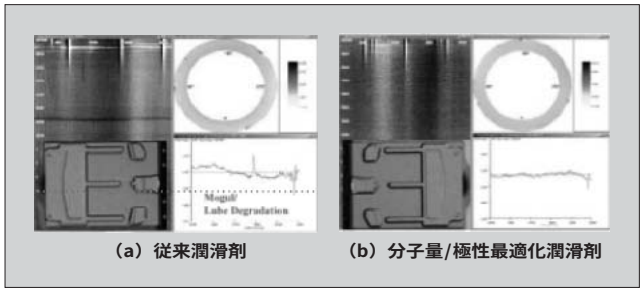
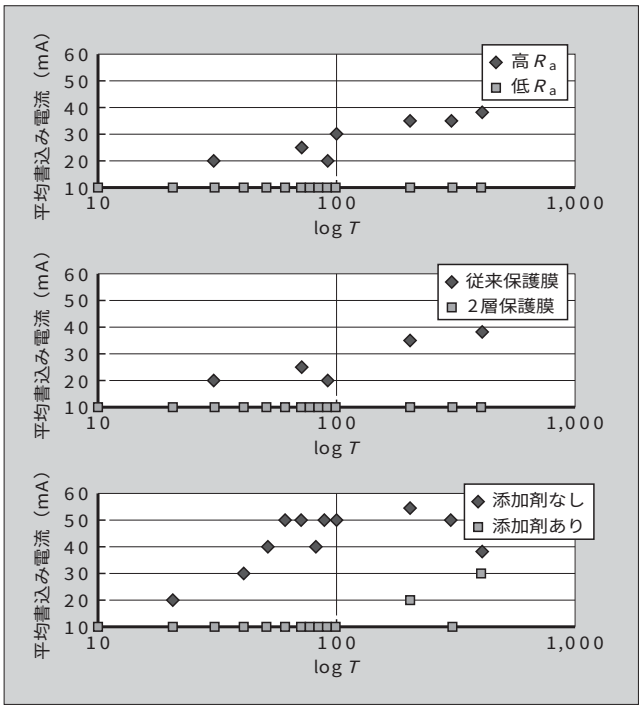


図11　高速 LUL テスト（1 サイクル： 0.12 秒）



（a）従来潤滑剤　　（b）分子量/極性最適化潤滑剤

図12　ヘッドダメージテスト



る HDI 特性を確保している。また，今後ヘッドの浮上が低くなる中，表面にヘッドが接触する可能性が高くなる。表面に接触した場合でもきずが生じない表面耐久性とヘッドがきずつかない衝撃緩和性の両立が必要となる。富士電機では前述した低 R_a（平均粗さ）化，2 層保護膜化，新ルブ添加剤により解決している。さらに**図12**は，ヘッドにきずがつきやすいか否かを確認する試験結果を示す。添加剤ありは，ヘッドにきずがつきにくく，また低 R_a，2 層保護膜も同様にきずがつきにくい特性を示している。

富士電機では，次世代の低浮上領域での HDI 品質を達成するため，潤滑剤の最適分子量や極性制御技術を開発している。

5　あとがき

富士電機では，アルミ基板媒体プロセスの採用によってシナジー効果が得られるガラス基板媒体でコスト低減を達成し，前述の技術開発の成果を生かした 60 Gbits/in^2 製品の量産を開始する。これまでのアルミ基板媒体に加えガラス基板媒体を製品ラインアップに加えることで，今後拡大するノン PC HDD に対してビジネス機会を獲得していく。特に，今後立ち上がる携帯電話に代表されるノン PC HDD は，使用環境も厳しく，またコスト要求も厳しいものとなっている。これまでの技術開発に加え，さらなる環境特性の向上とスループットの飛躍的な向上などによるコスト削減を進め，この分野でシェア No.1 となるべく開発に取り組んでいく所存である。

参考文献

(1)　2004 年 IDC 市場予測．2004.
(2)　増田克也ほか．ガラス磁気ディスク媒体の開発．富士時報．vol.75, no.3, 2002, p.165-168.

グラニュラー型垂直磁気記録媒体

上住　洋之（うわずみ　ひろゆき）　川田　辰実（かわた　たつみ）　横澤　照久（よこさわ　てるひさ）

1　まえがき

1956年に実用化されたハードディスク装置（HDD）は，近年，その記録密度を年率60～100％の割合で急速に増加させてきており，今後も年率30～60％の割合で増加し続けると予測されている。このような著しい成長の結果，これまで用いられてきた長手磁気記録方式が，低ノイズ特性と「熱揺らぎ」特性とのトレードオフ問題のため，いよいよその記録密度の限界に近づこうとしている。「熱揺らぎ」とは，記録された磁化が常温の熱エネルギーにより反転してしまうことで信号を安定に保持できなくなる現象であり，長手磁気記録方式では記録密度が上昇するほど「熱揺らぎ」が大きくなってしまう。

垂直磁気記録方式は1975年にIwasakiら[(1)]により提案された記録方式であり，長手磁気記録方式と正反対の特徴，すなわち記録密度の増大に伴い「熱揺らぎ」に強くなるという特性を有している。原理的に高密度記録に適した記録方式であることから，その実用化に向け，磁気記録媒体や記録再生ヘッドに関する数多くの研究がなされてきた。

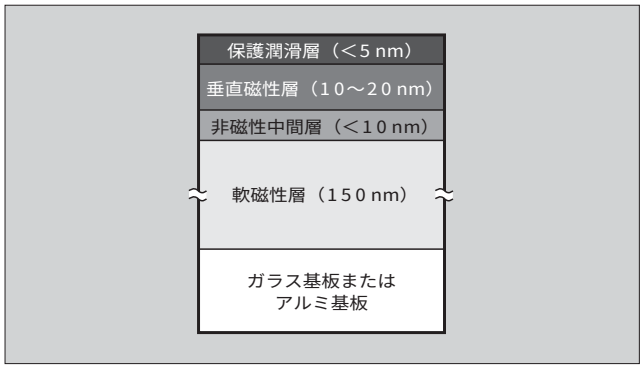
富士電機では，1999年に垂直磁気記録媒体の開発を開始し，大きな課題とされてきた，低ノイズ特性，高熱安定性，書込み特性を並立させた磁気記録層，ならびに厚膜のため生産性向上が必須であった軟磁性裏打ち層の実用化に注力して検討を行ってきた。現在までに，これらの実用課題にめどをつけることができ，引き続き2005年末あるいは2006年初めからと予想される量産化に向けた検討を行っている。

本稿では，グラニュラー構造を有する垂直磁気記録層と，生産性に優れた無電解めっき軟磁性裏打ち層をはじめとした，富士電機での垂直磁気記録媒体の開発状況について述べる。

2　垂直磁気記録媒体の基本構成と開発課題

垂直磁気記録媒体の基本層構成を**図1**に示す。垂直磁気記録媒体は，アルミ基板また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，実際の垂直磁気記録媒体に仕上げている。その垂直磁気記録媒体の実用化における技術上の最大のポイントは，次の2点である。

図1　垂直磁気記録媒体の基本層構成



(1)　磁区制御を含めた軟磁性層技術

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ず，かつ生産性の高い軟磁性層の開発

(2)　グラニュラー磁性層技術

低ノイズ，高熱安定，かつ書込み容易な磁性層の開発

3　軟磁性裏打ち層の開発

垂直磁気記録媒体の実用化に際しては，垂直磁気記録媒体特有の層構成である，軟磁性裏打ち層の開発が必須である。

軟磁性裏打ち層は，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ものである[(2)]。そのため，高い飽和磁束密度を持つ軟磁性材料を，数百nmという厚膜で形成する必要があり，従来のスパッタリング法で成膜することは生産性ならびに製造コストの観点から非常に困難であると考えられてきた。さらに，スパイクノイズと呼ばれる，軟磁性層に

上住　洋之

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在，富士電機ストレージデバイス(株)技術開発部課長補佐。博士(情報科学)。日本応用磁気学会会員，IEEE会員。

川田　辰実

機械技術，磁気記録媒体用基板の研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)機器技術研究所。精密工学会会員，日本ロボット学会会員。

横澤　照久

磁気記録媒体の研究開発，設計に従事。現在，富士電機ストレージデバイス(株)技術開発部課長。日本物理学会会員。

発生する磁壁に起因する大きなノイズが大きな問題とされ，その抑制も必須であるとされていた。

富士電機では，スパッタリング法で形成する軟磁性裏打ち層について，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挿入し，かつスパイクノイズの抑制のために必要な磁場中冷却処理を，スパッタ装置内で生産性に影響させずに行うプロセス技術をすでに開発済みである。[(3), (4)]

しかしながら，この方式を用いた場合でも，100 nm 以上の膜厚の軟磁性層と磁区制御を行う多層薄膜をスパッタリング法により成膜する必要があり，長手磁気記録媒体と同等の生産性を実現するためには，さらなる技術的なブレークスルーが必要であった。

富士電機は，磁気記録媒体だけではなく，媒体用の非磁性ニッケルリン（NiP）めっき付きアルミ基板も生産しており，高度な無電解めっき層の形成技術やめっき層表面の超平滑化研磨技術を有している。そこで，厚膜が必要とされる軟磁性裏打ち層についても，生産性の高い無電解めっき法による形成技術，ならびにその表面の超平滑化技術の開発を行い，実用化のめどをつけることに成功した。

軟磁性めっき層は，リン（P）の添加量を，従来，アルミ基板に施してきた非磁性 NiP めっき層より少なくすることで軟磁性化させている。このめっき層は従来の非磁性 NiP 層より硬度が高く，薄層化が可能である。さらに，開発した無電解めっきプロセスならびに研磨プロセスは，従来のアルミ基板を作製する場合とほぼ同じ生産プロセスであることから，安価で高性能な軟磁性裏打ち層付き基板が作製できた。

図 2 に，開発した軟磁性 NiP めっき裏打ち層の表面を原子間力顕微鏡（AFM）により観察した像を示す。表面粗さ（R_a）は約 0.1 nm と，現在の製品に用いられている非磁性 NiP めっき層表面の R_a である約 0.3 nm より小さく，今後の高密度化に伴う磁気ヘッドの浮上量の低下にも十分対応できるレベルが確保できている。

図 3(a)は，開発した軟磁性 NiP めっき裏打ち層から発生するノイズを磁気ヘッドにより読み取り，マッピング化したものである。比較のため，従来のスパッタリング法により作製した膜厚 200 nm の Co 系アモルファス軟磁性裏打ち膜から発生するノイズを**図 3**(b)に示す。図中の色の濃さがノイズの大きさに対応している。いずれの場合も特別な磁区制御は行っていない。

スパッタリング法により作製した軟磁性裏打ち層からは，大きなノイズが発生している箇所が多数存在する。これらは，軟磁性層に発生した磁壁を原因とするスパイクノイズである。一方，開発した軟磁性 NiP めっき裏打ち層では，特別な磁区制御を行っていないにもかかわらず，スパイクノイズが発生しないことが分かる。

図 4 には，軟磁性 NiP めっき裏打ち層を付与したアルミ基板を用いて作製した垂直磁気記録媒体の，線記録密度 370 kFCI（FCI：Flux Change/Inch）における対信号雑音比（SNR）のめっき層膜厚依存性を示す。図中の点線は，スパッタリング法により形成した膜厚 200 nm の Co 合金アモルファス軟磁性裏打ち層上に同様にして作製した垂直磁気記録媒体の SNR 値である。

軟磁性 NiP めっき裏打ち層上の垂直磁気記録媒体の SNR 値は，スパッタ軟磁性裏打ち層上の媒体の SNR 値とほぼ同等である。さらに媒体の書込み特性などを比較しても，今回開発した軟磁性 NiP めっき裏打ち層を使用した媒体は，従来のスパッタ軟磁性裏打ち層を使用した媒体と同等の電磁変換特性が実現できることが確認できた。

富士電機では，従来は困難といわれていたガラス基板上への軟磁性めっき裏打ち層の成膜技術の開発も行っており，新しいガラス基板前処理技術を開発することで，十分な密着性と生産性を両立できることが明らかになりつつある。

この軟磁性めっき裏打ち層付きアルミ基板およびガラス

図２　軟磁性 NiP 裏打ち層表面の AFM 像

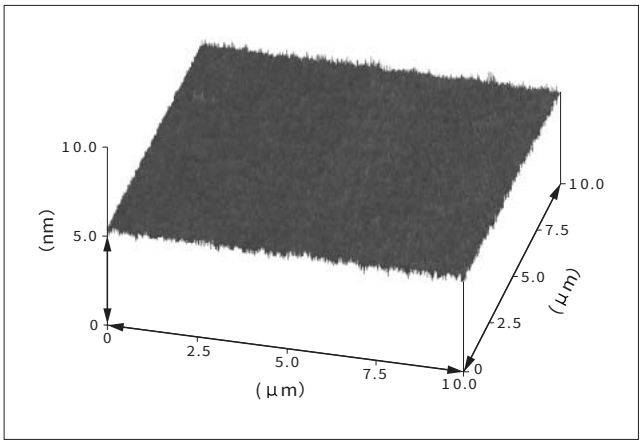


図３　軟磁性 NiP 裏打ち層のスパイクノイズ観察

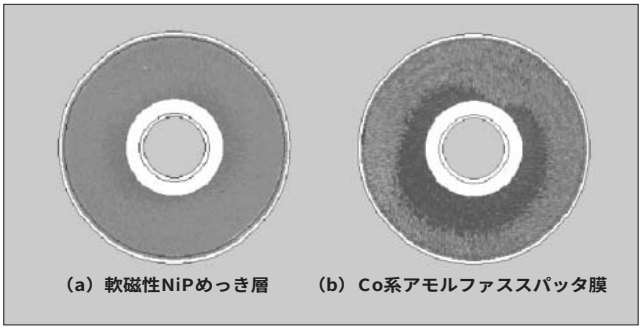
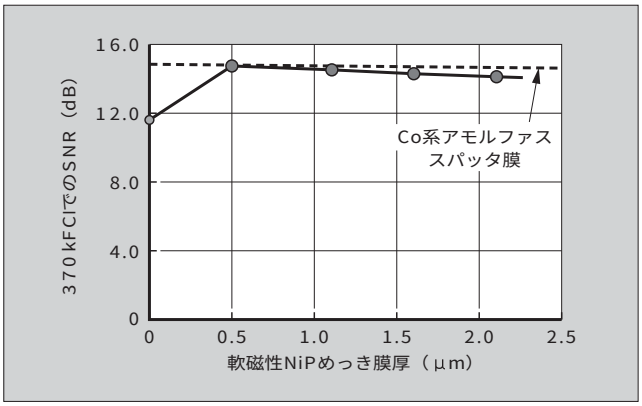


図４　SNR の軟磁性 NiP めっき膜厚依存性



基板を使うと，厚膜の軟磁性裏打ち層をスパッタリング法により形成する必要がなくなるため，従来の長手磁気記録媒体用のスパッタ装置で垂直磁気記録媒体を生産できるという非常に大きなメリットがあり，これによって垂直磁気記録媒体の実用化に大きく近づいたと考えている。

4　グラニュラー磁性層技術

4.1　従来媒体の問題点と課題

図5(a)に長手磁気記録方式，同図(b)に垂直磁気記録方式のそれぞれの模式図を示す。媒体面内方向に平行にビット情報を記録磁化する長手磁気記録媒体の場合，記録密度が高まると，ビット情報を担う記録磁化内に磁化を打ち消す方向の反磁界が増大して，ビット情報が不安定になってくる。高密度化が進み，ビット情報の大きさが小さくなると，それを担う磁性合金結晶粒の磁気エネルギーも低下するので，室温程度の熱エネルギーによっても次第にビット情報が消える，いわゆる「熱揺らぎ」問題を引き起こすようになる。現在 60 ～ 100 Gbits/in^2 に達しつつある長手磁気記録方式は，160 ～ 200 Gbits/in^2 で実用限界に達すると考えられている。

一方，垂直磁気記録は，媒体の面内に対して垂直方向にビット情報を記録するので，長手磁気記録方式のような反磁界による「熱揺らぎ」は起こりにくい。記録磁化内の反磁界は，記録密度を増加させると磁化を安定化させる傾向になるため，原理的に高記録密度に向く方式であるといえる。

長手・垂直を問わず，一般に磁気記録媒体の低ノイズ化のためには，媒体を構成する結晶粒をできるだけ微細化，かつ均一化し，それぞれの結晶粒を磁気的に分離することが必要である。低ノイズ化のために結晶粒径をさらに微細化した場合，結晶粒の体積の低下に伴って結晶粒の磁気エネルギーが低下し，熱安定性の劣化をもたらす。そのため，高い結晶磁気異方性エネルギー（K_u）を持つ材料を適用することが重要となる。

長手磁気記録媒体では，加熱した下地層上に CoCrPt 系合金をスパッタリング法により形成することで，Co と固溶しづらい Cr を粒界に偏析させ，結晶粒の微細化と粒の磁気的な分離を達成するとともに，結晶粒内は K_u の高い CoPt 合金が主体となり，熱安定性を維持している。

一方，垂直磁気記録媒体で同様に CoCrPt 系合金を用いて加熱成膜を行うと，長手磁気記録媒体と比べて相対的に Cr が粒界に偏析しづらく，かつ結晶粒径が増大する傾向にあった。さらに Cr が粒界に偏析しづらいため，Cr が残存する結晶粒内の K_u は予想以上に低下し，低ノイズ特性と高熱安定性を両立させることが困難であった。これは，垂直磁気記録媒体では磁化容易軸である六方最密充てん（hcp）構造の c 軸を膜面垂直方向に配向させるため，エネルギー的に最も安定で薄膜形成時に結晶粒が粗大化しやすいと考えられる hcp（002）面を優先配向させているためと推察された[5]。このため，低ノイズで熱安定性が高い垂直磁気記録媒体用の磁性層の新規開発が必要であった。

4.2　グラニュラー磁性層の高密度化

富士電機では，垂直磁気記録媒体の開発に先だって検討していた低温成膜可能なグラニュラー型長手磁気記録媒体の開発[6]における経験を生かし，微細な結晶粒径と粒間の磁気的な相互作用の低下，ならびに高い垂直配向性を両立させたグラニュラー型垂直磁気記録媒体用磁性層を開発した[7],[8]。

開発したグラニュラー磁性層は，結晶粒を分離する材料として SiO_2 などの酸化物を添加した CoCrPt–SiO_2 である。その磁性層の模式図を**図6**に示す。非金属である SiO_2 を添加しているため，成膜時に基板加熱を行わなくても結晶粒界には SiO_2 が析出しやすく，室温で結晶粒同士の分離が進み，かつ結晶粒の K_u を高く維持できるという利点がある。

一方，基板加熱を行わないため，グラニュラー磁性層の結晶成長のコントロールが困難であった。そのため，磁性層の下に設ける中間層の状態制御が重要であった。具体的には，ルテニウム（Ru）中間層の非加熱成膜条件を制御することで，Ru 自身の結晶性や結晶粒径のばらつきを改善し，グラニュラー磁性層の結晶性と結晶粒径の均一性を向上させるという方法を採っている。さまざまな検討の結果[9],[10]，Ru 中間層の結晶粒 1 個の上に磁性結晶粒 1 個が成長するように，Ru 中間層の結晶粒径を制御すること，ある

図5　長手磁気記録方式および垂直磁気記録方式の模式図

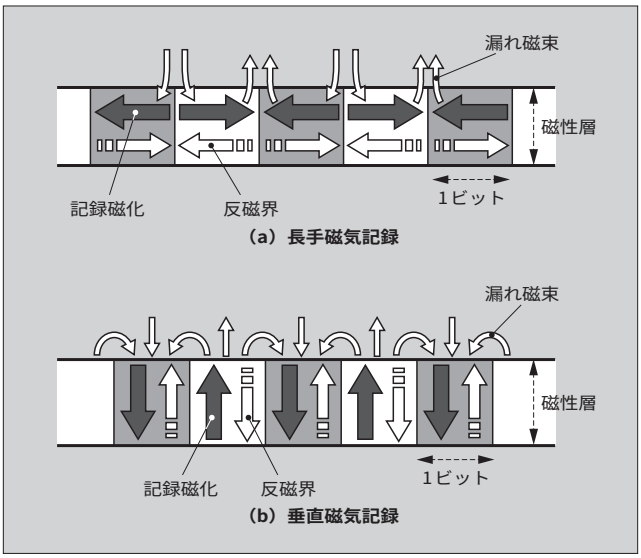
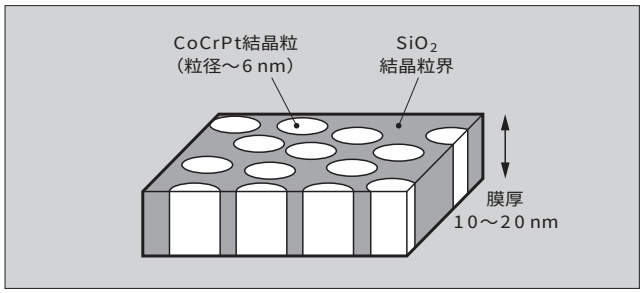


図6　グラニュラー磁性層の模式図



いはRu中間層の表面状態を制御することによって磁性層の初期成長層を制御することなどが重要であることが明らかとなった。このような知見を基に，非常に高度で精密な成膜条件の制御を行うことで，所望の微細構造の制御を達成している。

富士電機は，東北大学電気通信研究所が中心となって推進している，「超小型大容量ハードディスクの開発」プロジェクト（文部科学省科学技術試験研究RR2002，IT21プロジェクト）の共同研究会社として，グラニュラー磁性層のさらなる高密度化についての研究を行っている。

この共同研究において，Ru中間層上に成膜したCoCrPt合金磁性層が，9×10^6 erg/cm^{3}以上という非常に高いK_uを有していること，このCo合金磁性層にSiO_2を添加してグラニュラー構造とした場合にも，磁性結晶粒内のK_uは高く維持されることがすでに確認されている[11]。このことは，現状のグラニュラー磁性層の結晶粒径をさらに低減した場合でも，高い熱安定性を維持する垂直磁気記録媒体が実現可能であることを示唆している。このような検討結果から，現行のグラニュラー磁性層の組成を最適化して高K_u化させつつ，Ru中間層の微細構造を適切に制御して磁性層結晶粒の均一化，微細化および磁気的な分離を進めることで，200 Gbits/in^{2}以上の高い面記録密度の垂直磁気記録媒体を実現することは十分可能であると考えている。

4.3　書込み特性の向上

上述のように，低ノイズ化のための磁性層結晶粒径の微細化と結晶粒の磁気的な分離を進め，かつ熱安定性を維持するために結晶粒の高K_u化を進めた場合，磁性層の保磁力（H_c）が増大して書込み特性が劣化することが懸念される。一方，高密度化に伴い，トラック密度を増加させるためには磁気ヘッドの書込み素子のトラック幅を狭くする必要があり，このような狭トラック化は，磁気ヘッドが発生する磁界を減少させる。これらのことから，媒体の書込み特性を向上させることが今後ますます重要になると考えられる。

開発したグラニュラー磁性層においても，熱安定性を確保しつつ低ノイズ化を進める微細構造および磁性層組成の制御を進めた結果，高H_c化により狭トラックヘッドでの書込みが不十分になり，そのために記録再生特性が劣化するという問題が生じた。

図7に，種々の条件で作製したグラニュラー磁性層媒体の，線記録密度370 kFCIにおけるSNRを，媒体の書込み能力を示す，オーバーライト特性が飽和する書込み電流値でまとめた図を示す。SNRが高い媒体ほど，書込み能力が劣化する傾向が見て取れる。

このような媒体の書込み能力とSNR特性のトレードオフを両立させるために，グラニュラー磁性層の組成ならびに成膜プロセスの改善を試みた。すなわち，磁性層の結晶粒径や粒界構造などを変化させず，低ノイズ特性を維持したまま書込み特性を向上させるためには，Ru中間層の制御された微細構造や表面状態を変化させるのではなく，グラニュラー磁性層の組成や成膜プロセスを改善することが重要であった。

表1に，書込み能力を改善した媒体（A）と従来媒体（B）のオーバーライト特性ならびにSNRを，トラック幅の異なるヘッドでそれぞれ評価した結果を示す。ここで，媒体AのH_cは5.3 kOe，媒体BのH_cは6.6 kOeである。トラック幅が0.3 μmと広く，発生磁界が大きな磁気ヘッドで測定した場合，オーバーライト特性はいずれの媒体でも40 dB程度と十分な値が得られ，SNRもほぼ同等であった。一方，トラック幅が0.2 μmと狭い高密度対応の磁気ヘッドで測定した場合には，媒体Bではオーバーライト特性が30 dB以下と非常に悪く，SNRも低いのに対して，媒体Aはオーバーライト特性が36 dBと比較的良好であり，かつSNRも媒体Bに比べて1.5 dB程度も高く大幅に改善している。このように，磁性層の微細構造を変化させずに書込み能力を向上させることによって，トラック幅の狭いヘッドでも十分なオーバーライト特性が得られ，高いSNRを示す媒体を実現することができた。

開発した垂直磁気記録媒体の高密度化のポテンシャルを，スピンスタンドテスタで測定した結果を**表2**に示す。スピンスタンドテスタに，HDDのような高精度な位置決めサーボは期待できないので，オントラックモード（同一トラック上）で測定している。具体的には，線記録密度を変えながらバイトエラーレート（BER）を測定し，BER＝

図7　SNRと書込み特性の関係

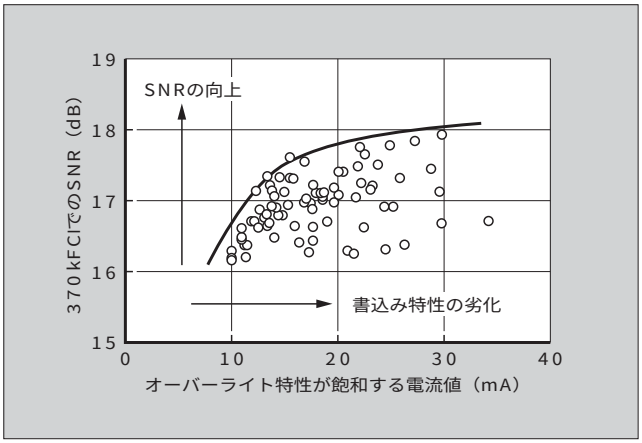


表1　書込み特性改善媒体の電磁変換特性

	オーバーライト特性（dB）370 kFCIに50 kFCIを上書き	SNR（dB）370 kFCI
改善媒体A＋広トラック幅ヘッド	39.2	15.05
従来媒体B＋広トラック幅ヘッド	40.0	14.75
改善媒体A＋狭トラック幅ヘッド	36.4	21.25
従来媒体B＋狭トラック幅ヘッド	29.9	19.68

表２　達成記録密度

測定年月	線記録密度kBPI（BER＝10^{-5}）	Gbits/in^2（BAR＝1：5）
2002年5月	727	106
2002年9月	793	126
2003年7月	867	150
2004年2月	900	162

10^{-5} のときの線記録密度を求め，線記録密度とトラック記録密度のアスペクト比を 1：5 と置いて比率掛けをして面記録密度を算出している。ここでの垂直磁気記録媒体のカーボン保護層の膜厚は，3.5 ～ 4.5 nm と設計仕様の 2.5 nm に比べて厚く，その分空げき損失が大きい状態での測定結果であるが，最新の評価結果では，達成可能な面記録密度は 162 Gbits/in^2 に達している。

5　あとがき

21 世紀のユビキタス社会を快適に実現するためには，中程度に大容量な情報クラスタを，タイムリーに処理できる安価なキャッシュメモリの存在が不可欠である。その「大容量・高速・低価格」のバランスが一番優れているのは HDD である。手の平に乗るような大きさの大容量垂直記録方式 HDD が実用化されれば，HDD メモリの適用市場は無限に広がると考える。

富士電機における垂直磁気記録媒体の開発は，東北大学の電気通信研究所の中村教授や村岡教授，同研究所 21 世紀情報通信研究開発センターの青井教授や島津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賜物である。ここに深く謝意を表する次第である。

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

(3)　渡辺貞幸ほか．二層膜垂直磁気記録媒体における反強磁性膜による軟磁性裏打ち層のスパイクノイズ低減．電子情報通信学会技術研究報告．MR2002-90, 2002, p.9-15.

(4)　上住洋之ほか．垂直磁気記録用磁性層技術．富士時報．vol.75, no.3, 2002, p.169-172.

(5)　上住洋之ほか．CoCrPt-（Ta, B）垂直記録媒体の初期成長層の低減と磁気特性．日本応用磁気学会誌．vol.26, 2002, p.205-209.

(6)　鄭用一ほか．AV 用磁気ディスク媒体．富士時報．vol.72, no.11, 1999, p.594-599.

(7)　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.

(8)　Uwazumi, H. et al. CoPtCr-SiO_2 Granular Media for High Density Perpendicular Recording. IEEE Trans. Magn. vol.39, no.4, 2003, p.1914-1918.

(9)　竹野入俊司ほか．CoPtCr-SiO_2 グラニュラー垂直媒体の微細構造と電磁変換特性．電子情報通信学会技術研究報告．MR2002-6, 2002, p.31.

(10)　渡辺貞幸ほか．CoPtCr-SiO_2 垂直磁気記録媒体の微細構造と諸特性．電子情報通信学会技術研究報告．MR2002-76, 2003, p.13.

(11)　及川忠昭ほか．CoPtCr-SiO_2 を用いた垂直磁気記録媒体の磁気特性と記録再生特性．日本応用磁気学会誌．vol.27, 2003, p.196.

400 Gbits/in^2 を目指す垂直磁気記録媒体技術

河田　泰之（かわだ　やすゆき）　　及川　忠昭（おいかわ　ただあき）

1　まえがき

ハードディスク装置（HDD）の記録密度は年率 30 ～ 60 %の割合で増加しており，**表1**に示すように 2005 年には 120 Gbits/in^2 に達する予定である。今後もこの増加傾向は継続していくと考えられ，この結果，現在製品化されている面内磁気記録方式は熱揺らぎ問題による限界（～ 200 Gbits/in^2）に近づいてきている。これに対し，垂直磁気記録方式は記録密度が増大しても記録ビットの安定性が確保されるため熱安定性が高く，今後の高密度記録技術として有利であり，各所で研究開発が進められている。

富士電機は 2002 年にグラニュラー薄膜を用いた垂直磁気記録媒体（248 ページの「解説」参照）で世界最高レベル（146 Gbits/in^2）の記録密度を達成した。[(1), (2)] グラニュラー薄膜は CoPtCr 合金に SiO_2 を添加したものであり，従来の CoCrPt 系材料では困難であった微細な（7 nm）磁性結晶粒子を分離性よく孤立させることが可能である。最近では垂直磁気記録媒体として代表的な記録層材料の一つになっており，世界中で広く研究開発が行われている。しかしながら，今後 400 Gbits/in^2 という高記録密度を目指すには，さらなるブレークスルーが必要である。

本稿では 400 Gbits/in^2 を目指す垂直磁気記録媒体技術として，①高磁気異方性エネルギー（K_u）を有する CoPtCr–SiO_2 垂直磁気記録媒体技術，②異方性エネルギーの高次項である K_{u2} を利用した垂直磁気記録媒体技術，③ SiO_2 を添加した Co/Pt 人工格子多層膜[(4)]による垂直磁気記録媒体技術を紹介する。①と②は東北大学電気通信研究所 21 世紀情報通信研究開発センターが主導する，2002 年度科学技術試験研究（RR2002）「超小型大容量ハードディスクの開発」プロジェクト（IT21 プロジェクト）に参画し，共同研究を行っている。

表1　磁気記録媒体の技術ロードマップ

年	2004	2005	2006	2007	2008
記録密度（Gbits/in^2）	80	120	200	300	500
媒体材料	CoCrPt系面内媒体				
			CoPtCr–SiO_2垂直媒体		
				Co/X多層膜垂直媒体	

2　CoPtCr–SiO_2 グラニュラー垂直磁気記録媒体

2.1　高 K_u を有する CoPtCr–SiO_2 垂直磁気記録媒体

垂直磁気記録媒体において，さらなる高記録密度化を図るには，熱安定性の確保と低ノイズ化の両立，および記録分解能の向上が必要不可欠である。媒体ノイズを下げるには，磁気クラスターサイズを小さくすることが重要であり，そのためには記録層の膜厚を薄くすることが有効である。[(5)] 一方，記録分解能を向上するには，保磁力（H_c）近傍での磁化曲線の傾き（**α**）を大きくすることが有効である。**α**の値は磁気クラスターサイズ（$D_{cluster}$）と記録層膜厚 δ の比 $D_{cluster}/\delta$ に比例することが報告されている。[(6)] 低ノイズを保ちながら，記録分解能を向上する，つまり**α**を大きくするには，$D_{cluster}/\delta$ の値を大きくし，記録層の膜厚を薄くすることが重要である。しかし，記録層を薄くすることは，磁化反転粒子の体積が小さくなることを意味し，その結果，熱安定性の低下が予想される。よって，記録層を薄くしつつ熱安定性を保つには，高い K_u の材料を記録層として用いる必要がある。そこで，すでに富士電機で開発している CoPtCr–SiO_2 グラニュラー垂直磁気記録媒体において，記録層組成の比率を変え，高 K_u の導出を図った。

図1は下地層として Ru を用いた CoPtCr 垂直膜において，Cr および Pt 組成に対する K_u の変化を示したものである。Cr を 10 at %含む CoPtCr 垂直膜において，K_u が 9×10^6 erg/cm^3 という非常に大きな値を示しており，熱安定性に対して非常に高いポテンシャルを有していることが明らかである。

図2は Cr を 10 at %含む CoPtCr 垂直膜に対して，SiO_2 を添加した際の K_u の変化を示したものである。SiO_2 を添加すると膜全体としての K_u は徐々に低下するが，SiO_2 の体積を除いて求めた結晶粒正味の垂直磁気異方性 K_u^g の低下は少ない。高 K_u を有する材料として FePt などの規則

河田　泰之

ガスセンサ，磁気記録媒体の研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)デバイス技術研究所。日本応用磁気学会会員。

及川　忠昭

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)デバイス技術研究所。日本応用磁気学会会員。

合金や，Co/Pt といった人工格子膜などが検討されているが，比較的容易に作製できる CoPtCr–SiO_2 グラニュラー膜においても高 K_u を導出でき，高記録密度化に優れた特性を得られる。

図3は CoPtCr 垂直膜に SiO_2 を 11.2 at %，14.4 at %添加した CoPtCr–SiO_2 垂直磁気記録媒体の記録層膜厚に対する K_u の変化を示したものである。SiO_2 を 11.2 at %添加した媒体では，記録層膜厚が 4 nm において，膜平均の K_u は 5.7×10^6 erg/cm³ となっており，SiO_2 の体積を除いて求めた磁性粒の垂直磁気異方性 K_u^g も 7.7×10^6 erg/cm³ という大きな値を維持している。また，SiO_2 添加量にかかわらず，記録層膜厚に対する K_u の大きな変化が見られず，膜の構造変化が小さいこと示している。

図4は熱安定性の指標である K_uV/k_BT（V：活性化体積，k_B：ボルツマン定数，T：絶対温度）の記録層膜厚に対する変化を示したものである。記録層組成は $\{(Co_{90}Cr_{10})_{80}Pt_{20}\}_{88.8}$–$(SiO_2)_{11.2}$ に固定した。一般にこの K_uV/k_BT が 60 以上あれば熱的に安定であるとされ，CoPtCr–SiO_2 垂直磁気記録媒体では，記録層膜厚が 8 nm にて 70 と高い値が得られる。従来の CoCrPt 系材料がその熱安定性を維持するためには，記録層膜厚が 20 ～ 30 nm 程度必要であることを考えると，CoPtCr–SiO_2 垂直膜が記録層の薄膜化に対して，格段に熱安定性に優れた材料であることは明らかである。このように CoPtCr–SiO_2 垂直磁気記録媒体は記録層の組成と膜厚の最適化により，さらなる高記録密度化が狙えると考えられる。

2.2　高記録密度化における課題

面記録密度を高めていくと，1 ビットのデータを記録する範囲（記録ビット）の面積が小さくなり，それに伴って記録ビットの体積も減少する。すると，磁界の保磁力が弱まり，磁性体そのものの持つ熱エネルギーの影響で磁界が

図1　CoPtCr 垂直膜における Cr および Pt 組成と K_u

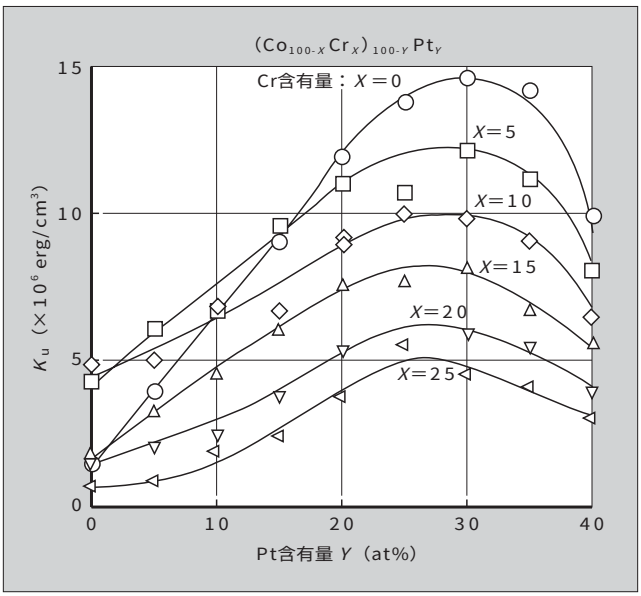


図2　CoPtCr 垂直膜での SiO_2 添加量と K_u

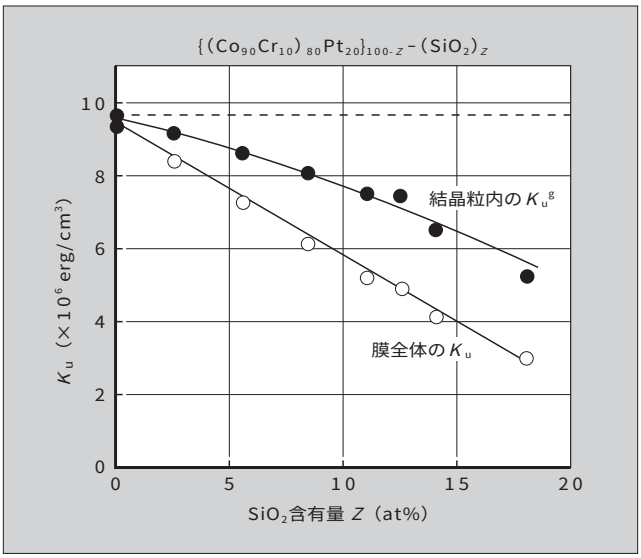


図3　SiO_2 を 11.2 at %，14.4 at %添加した CoPtCr–SiO_2 垂直磁気記録媒体の記録層膜厚と K_u

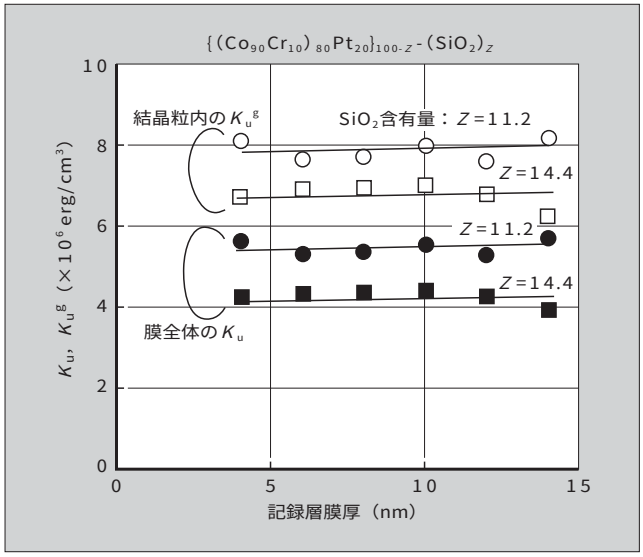
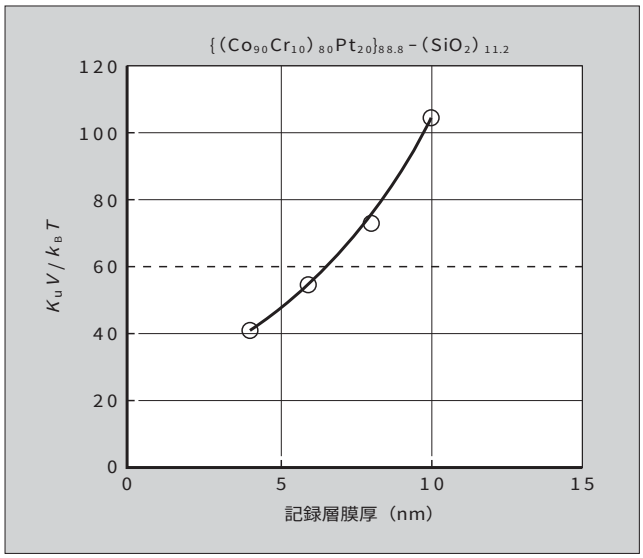


図4　K_uV/k_BT と記録層膜厚



消滅してしまう。これを熱揺らぎという。この熱揺らぎを回避するためには，高い磁気異方性を有する媒体（高保磁力媒体）が必要であるが，従来の磁気ヘッドの発生磁界では，これらの高磁気異方性媒体へのデータ書込みが困難になるという問題がある。したがって，今後の垂直磁気記録媒体開発においては，熱安定性を維持しながら，いかにして書き込みやすい媒体を開発するかが非常に重要な課題である。そこで，IT21 プロジェクトと富士電機では，これらの課題を解決し，実際に 400 Gbits/in^2 を目指した垂直磁気記録媒体として，従来考慮されていなかった磁気異方性エネルギーの高次の項と呼ばれる K_{u2} を利用した垂直磁気記録媒体の共同研究を行っている。

この高次の項 K_{u2} を用いた垂直磁気記録の考え方は以下のようなものである。磁気異方性定数（K_u）は，$K_u = K_{u1} + K_{u2}$ で表される。記録媒体に外部磁界を印加したときに磁化反転を起こす磁界 H_k（スイッチング磁界）は，K_{u2} には依存せず K_{u1} のみに比例する（$H_k=2K_{u1}/M_s$）（M_s：飽和磁化）。K_{u1} を高めるためには，記録ヘッドの書込み能力も高める必要があるが，現状，記録ヘッドの書込み能力は，物理的な限界に達しており，これ以上 K_{u1} を高めることは難しい。一方，熱安定性を示す指標である K_uV/k_BT の磁気的なエネルギーには，K_{u1} と K_{u2} の両方が寄与する。つまり，K_{u2} の大きさを適切に制御することで，H_k を上げずに，熱安定性を増すことが可能となる。[7]

2.3　400 Gbits/in^2 に向けた垂直磁気記録媒体の開発

IT21 プロジェクトでは，2005 年度末の 400 Gbits/in^2 実現を目指し，垂直磁気記録媒体の構造や物性の設計値を示している。その設計値を**表 2** に示す。低ノイズ化と熱安定性の両立とともに，磁気ヘッドでの書き込みやすさも確保するために，K_{u1} と K_{u2} の項を組み込んでいる。K_{u2} を制御することで 400 Gbits/in^2 の達成が可能である。現在，IT21 プロジェクトでは，CoPtCr（−SiO_2）グラニュラー膜の構造制御技術や，組成に対する物性値，磁気特性の変化など，これまで蓄積してきた知見を生かして，K_{u2} の出現メカニズムと，その制御技術の確立を目標に開発を行っている。現在検討を行っている CoPtCr 垂直膜において，下地層条件が異なる 2 種類の垂直磁気記録媒体（媒体 A，媒体 B）の K_{u1} および K_{u2} の値を**表 3** に示す。これらから，下地層条件，つまり記録層の膜構造を適切に制御することで，K_{u2} が導出できることが明らかとなり，その K_{u2} の絶対値は，400 Gbits/in^2 を達成するのに十分な値である。しかし，現状では，K_{u2} の出現機構のメカニズムが明確になっておらず，このような出現機構と制御技術の解明が急務である。また，これらの材料を用いて，媒体ノイズの低減を考慮し，実際に垂直磁気記録媒体として利用するには，成膜プロセスの最適化が必要不可欠である。

以上のように，400 Gbits/in^2 垂直磁気記録媒体の開発には，幾つかの課題が残っているが，K_{u2} を利用した垂直磁気記録媒体の開発により，400 Gbits/in^2 の記録密度の達成が十分に現実味を帯びてきている。

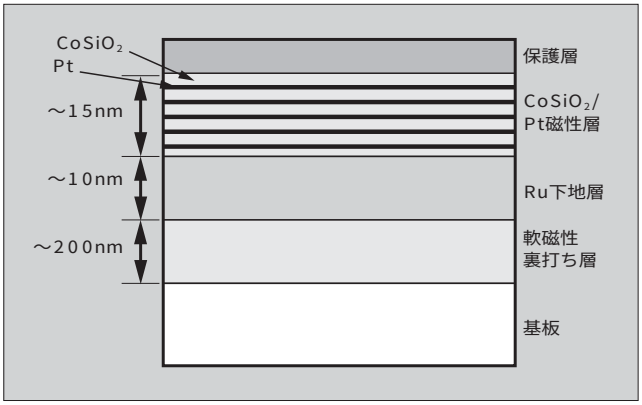
表 2　400 Gbits/in^2 の設計値

記録密度	400 Gbits/in^2
線記録密度	1,429 kBPI
トラック密度	280 kTPI
ビット・アスペクト比	5.1：1
最小磁化反転単位の直径	8.4 nm
記録層膜厚	18.6 nm
活性化体積	800〜1,000 nm^3
飽和磁束密度	0.63 T
磁気異方性定数 K_{u1}	4.3×10^6 erg/cm^3
磁気異方性定数 K_{u2}	0.9×10^6〜1.5×10^6 erg/cm^3
媒体飽和磁界（記録時）	1,270 kA/m（16 kOe）

表 3　K_{u2}（実験値）と 400 Gbits/in^2 達成に必要な理論値

記録層組成	$(Co_{90}Cr_{10})_{75}Pt_{25}$		要求値（理論値）
下地層条件	媒体A	媒体B	
K_{u1}（$\times10^6$ erg/cm^3）	6.69	11.8	4.3
K_{u2}（$\times10^6$ erg/cm^3）	1.51	0.06	0.9〜1.5
$K_u=K_{u1}+K_{u2}$（$\times10^6$ erg/cm^3）	8.20	11.9	5.2〜5.8
K_{u2}/K_{u1}	0.23	〜0	0.2〜0.35

図 5　$CoSiO_2$/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体の模式図



3　$CoSiO_2$/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体

3.1　$CoSiO_2$/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体の磁気特性

400 Gbits/in^2 を目指す垂直磁気記録技術として，富士電機は人工的に超薄膜を積層した人工格子（多層膜）を用いた垂直磁気記録膜の開発も行っている。**図 5** に富士電機の多層膜垂直磁気記録媒体の模式図を示す。記録層は SiO_2 添加 Co/Pt 多層膜を用い，下地層に Ru を用いている。この Co/Pt 多層膜は原子レベルでの設計・薄膜制御が行われており，優れた磁気特性と高い熱安定性を兼ね備えた垂直磁気記録薄膜である。

Co/Pt や Co/Pd などの多層膜を用いた垂直磁気記録媒体は一般に，高い保磁力（H_c），高い角形比（S），高い結晶磁気異方性定数（K_u）が得られ，熱安定性がきわめて

高い媒体となるが，粒子間の磁気的な交換相互作用が強いことから，媒体ノイズも大きいものとなりやすい。そこで富士電機では，先行開発した CoPtCr-SiO_2 垂直磁気記録媒体技術を用い，Co に SiO_2 を添加した $CoSiO_2$/Pt 多層膜を検討している。SiO_2 を添加することで磁性粒子の粒界に非磁性の SiO_2 を偏析させ，磁性結晶粒子間の磁気的な交換相互作用と媒体ノイズの低減を狙っている。$CoSiO_2$/Pt 多層膜では 1Å オーダーでの薄膜制御を行っており，Pt 層が 1 原子に満たないような膜厚の場合に，高 H_c・高 K_u が得られる。[8]

図 6 に軟磁性裏打ち層がない場合の $CoSiO_2$/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体（$CoSiO_2$/Pt ＝ 0.29 nm/0.12 nm）の磁化曲線を示す。H_c は 6.2 kOe，S は 1.0，飽和磁化（M_s）は 540 emu/cm³，反転磁区生成磁界（H_n）は 2.5 kOe，磁化曲線の H_c 近傍での傾き（**α**）は 1.6，K_u は 6.2×10^6 erg/cm³ の磁気特性が得られ，高 H_c，高 H_n，高 K_u，低 **α** を有する垂直磁気記録媒体が実現されている。**α** は粒子間の磁気的な交換相互作用と相関があり，この **α** の値が小さいほど，粒子間の磁気的な交換相互作用が小さく，その結果，媒体ノイズが低減する。よって，低 **α** であることが媒体設計において必要となる。**α** ＝ 1.6 は十分小さな値であり，この媒体が高 H_c と低 **α** を有していることから，磁性結晶粒子の分離性に優れることが示唆される。また，H_n ＝ 2.5 kOe 得られており，外的要因によるビットの磁化反転が起こりにくく，熱的にも安定性が高いと推定できる。このように $CoSiO_2$/Pt 多層膜媒体は多層膜としての特徴（高 H_c，高 S，高 H_n，高 K_u）と SiO_2 添加により低 **α** を同時に実現でき，高記録密度を狙う媒体として優れた磁気特性を有している。

3.2　$CoSiO_2$/Pt（SiO_2）多層膜垂直磁気記録媒体の微細構造と磁気クラスターサイズ

記録密度の向上には磁性層の微細構造制御が重要で，結晶粒の微細化・均一化と偏析の促進がポイントとなる。

図 7 に Ru 下地層 10 nm 上に形成した多層膜垂直磁気記録媒体の平面透過電子顕微鏡（TEM）像を示す。Co に SiO_2 を添加することにより粒界に SiO_2 が偏析し，磁性粒子の分離性に優れていることが分かる。Co/Pt 多層膜の平均粒子径は 7.8 nm であるが，$CoSiO_2$/Pt 多層膜では 6.7 nm であり，さらに Pt 層にも SiO_2 添加した $CoSiO_2$/Pt SiO_2 多層膜は 5.6 nm と非常に微細化されている。平均粒界幅も Co/Pt 多層膜の場合の 1.2 nm に比べ，$CoSiO_2$/Pt 多層膜では 1.6 nm，$CoSiO_2$/PtSiO_2 多層膜は 1.8 nm と SiO_2 添加により増大している。このように Co/Pt 多層膜への SiO_2 添加により酸化物が粒界偏析し，粒子の分離性に優れた構造の記録層が得られ，高記録密度を目指す磁気記録媒体として望ましい膜構造となる。

次に磁気力顕微鏡（MFM）を用いて，Co/Pt 多層膜，$CoSiO_2$/Pt 多層膜と $CoSiO_2$/PtSiO_2 多層膜の $D_{cluster}$ を見積もった。磁気クラスターは磁化反転単位であり，粒子間の磁気的な交換相互作用が強い場合や静磁気的な相互作用がある場合，幾つかの粒子が一つの反転単位として振る舞うことが知られている。したがって，高記録密度媒体を目指す場合，磁化反転単位の小さいことが重要で，$D_{cluster}$ を小さくすることが望ましい。[9] SiO_2 添加のない Co/Pt 膜の場合，$D_{cluster}$ は約 49 nm であるが，$CoSiO_2$/Pt 多層膜では約 37 nm，$CoSiO_2$/PtSiO_2 多層膜では約 28 nm まで減少されることが確認できた。このように Co/Pt 多層膜への SiO_2 の添加は $D_{cluster}$ の低減にも効果がある。

3.3　$CoSiO_2$/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体の記録再生特性

Co/Pt 多層膜への SiO_2 添加により，粒子径の減少，粒界幅の増大，$D_{cluster}$ の減少が確認できた。これらの結果から記録再生特性の向上が期待される。

図 8 に記録再生特性として SiO_2 添加のない Co/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体と Co 層および Pt 層に SiO_2 添加した

図 6　$CoSiO_2$/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体の磁化曲線

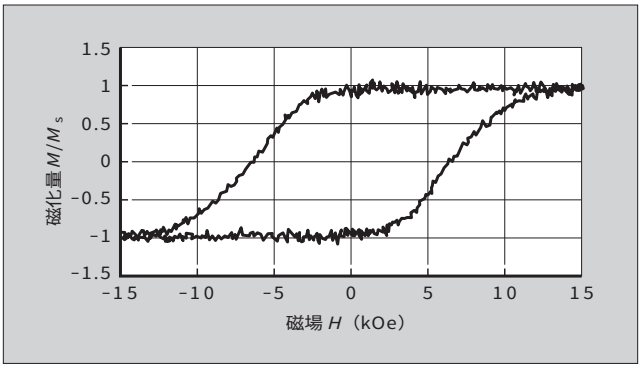


図 7　多層膜垂直磁気記録媒体の平面 TEM 像

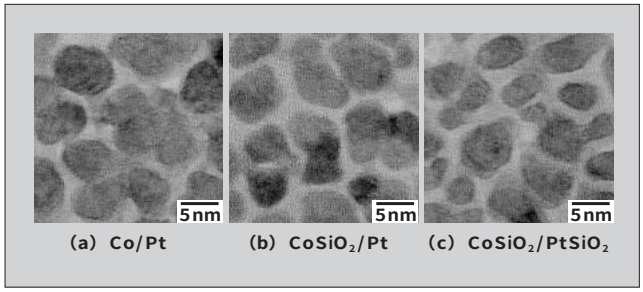


図 8　多層膜垂直磁気記録媒体の電磁変換特性

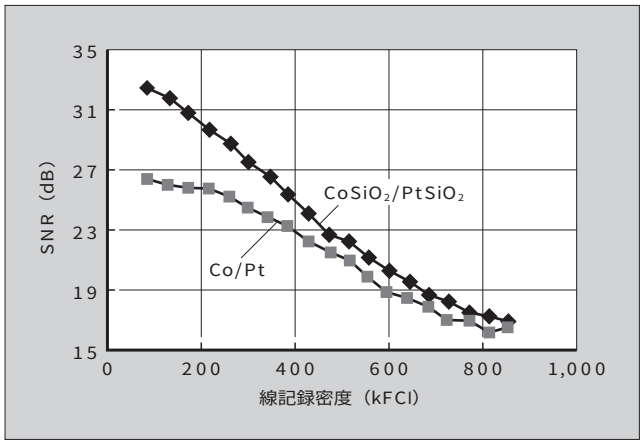
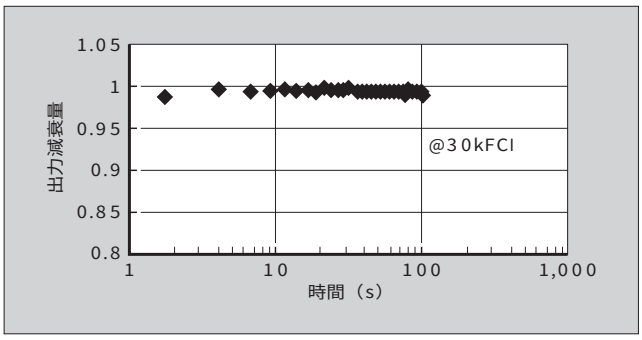


図9　SiO_2 を添加した Co/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体の信号の劣化割合



$CoSiO_2/PtSiO_2$ 多層膜垂直磁気記録媒体の信号対雑音比（SNR）を示す。$CoSiO_2/PtSiO_2$ 多層膜垂直磁気記録媒体は Co/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体に比べ，85 kFCI（FCI：Flux Change/Inch）の低線記録密度で約＋6dB，470 kFCI の高線記録密度で約＋1.5 dB の SNR の向上が達成された。これは媒体ノイズの低減によるところが大きく，SiO_2 の添加は，記録再生特性の向上に有効であることが分かる。

図9 に SiO_2 を添加した Co/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体の信号の劣化割合を示す。信号の時間劣化はほとんどなく（0.007 %以下），この媒体は熱揺らぎにきわめて強いことが確認できる。これは多層膜の特徴である H_n が大きいことに起因するものである。

3.4　400 Gbits/in² に向けての多層膜垂直磁気記録媒体

Ru 下地を用いた SiO_2 添加 Co/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体は高記録密度を狙う媒体として優れた磁気特性・微細構造・記録再生特性を示す。SiO_2 の添加により媒体ノイズは大幅に低減できた。膜の微細構造も膜厚 11 nm で粒径 6 nm 以下を達成した。実際に 400 Gbits/in² を達成するにはまだ高いハードルがあり，さらなる媒体ノイズの低減による SNR の向上が必要不可欠である。今後は前半に述べた K_{u2} の積極的利用により，さらなる書込み能力と熱安定性の向上を進めていく検討を進め，400 Gbits/in² の達成に向けての開発を行っていく。

4　あとがき

富士電機では 400 Gbits/in² の記録密度達成を実現させるため，東北大学電気通信研究所と共同の IT21 プロジェクトにおいて高磁気異方性エネルギーを有する $CoPtCr-SiO_2$ 垂直磁気記録媒体技術，異方性エネルギーの高次の項 K_{u2} を利用した垂直磁気記録媒体技術，SiO_2 を添加した Co/Pt 人工格子多層膜を用いた垂直磁気記録媒体技術の研究開発を行っている。現在，世界最高レベルにある富士電機の $CoPtCr-SiO_2$ 垂直磁気記録媒体を他社に先駆けて市場に供給し，あわせて将来技術となる 400 Gbits/in² 垂直磁気記録媒体技術を確立し，来るべきユビキタス社会に貢献したいと考えている。

富士電機における垂直磁気記録媒体の開発は，東北大学の電気通信研究所の中村教授や村岡教授，同研究所 21 世紀情報通信研究開発センターの青井教授や島津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賜物である。ここに深く謝意を表する次第である。

参考文献

(1) Oikawa, T. et al. Microstructure and Magnetic Properties of $CoPtCr-SiO_2$ Perpendicular Recording Media. IEEE Trans. Magn. vol.38, 2002, p.1976.

(2) 竹野入俊司ほか．$CoPtCr-SiO_2$ グラニュラー垂直媒体の微細構造と電磁変換特性．信学技報．MR2002-6, 2002, p.31.

(3) 及川忠昭ほか．$CoPtCr-SiO_2$ を用いた垂直磁気記録媒体の磁気特性と記録再生特性．日本応用磁気学会誌．vol.27, 2003, p.196.

(4) Kawada, Y. et al. Magnetic Properties, Microstructure and Read-Write Performance of $CoSiO_2$-Pt Granular Multilayer Perpendicular Recording Media. IEEE Trans. Magn.（in Press）.

(5) Shimatsu, T. et al. Magnetic cluster size and activation volume in perpendicular recording media. J. Appl. Phys. vol.93, 2003, p.7732-7734.

(6) Kitakami, O. et al. On magnetization reversal of Co-Cr films with perpendicular anisotropy. Jpn. J. Appl. Phys. vol.40, 2001, p.4019-4022.

(7) Kitakami, O. et al. Energy barrier enhanced by higher order magnetic anisotropy terms. Jpn. J. Appl. Phys. vol.42, L455, 2003.

(8) Kawada, Y. et al. Co/Pt Multilayers Perpendicular Magnetic Recording Media with Thin Pt Layer and High Perpendicular Anisotropy. IEEE Trans. Magn. vol.38, 2002, p.2045.

(9) Takenoiri, S. et al. Magnetic Properties, Magnetic Cluster Size and Read-write Performance of $CoPtCr-SiO_2$ Perpendicular Recording Media. IEEE Trans. Magn. vol.39, 2003, p.2279.

低浮上状態におけるヘッド試験評価技術

佐藤　公紀（さとう　きみのり）　　片野　智紀（かたの　とものり）

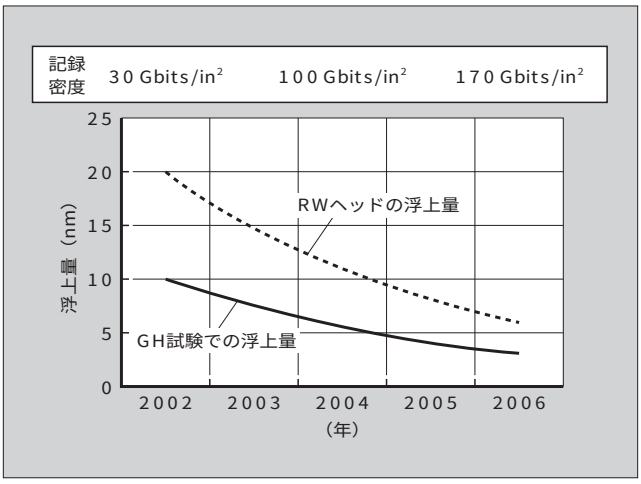
1　まえがき

ハードディスク装置（HDD）の記録密度は，年率30～60％で増加しており，2004年中には100 Gbits/in^{2}に達する見通しである。記録密度を増加するには，磁気ヘッドと磁気ディスクとの距離を近づけ，書込み・読込み分解能を上げることが必要である。

図1に，記録密度と，ヘッドの浮上量（磁気ヘッドー磁気ディスク間スペーシング）のロードマップを示す。実線は後述するGH（Glide Height）試験での浮上量，破線はHDDに内蔵されているRW（Read Write）ヘッドの浮上量を表す。記録密度100 Gbits/in^{2}に対応するには，RWヘッドの浮上量を10 nm以下に保つ必要がある。磁気ディスク表面上に高さ数nmの突起があっても，走行している磁気ヘッドに衝突し，磁気ヘッドや磁気ディスクにダメージを与える可能性があるので，突起欠陥に対する厳密な管理が重要である。

富士電機では，製造した全ディスクに対して突起の検出試験（GH試験）を実施し，磁気ディスクの良品判定を行っている。これはGHヘッド〔突起高さ検出専用の試験ヘッド。PZT（ピエゾ素子）センサを搭載したスライダと，スライダを支えるジンバルばねから構成される〕を8 nm以下の高さで浮上させ，突起衝突時に発生するPZT出力から，突起欠陥の有無を調べるものである（**図2**）。従来は浮上量が10 nmを超えていたため，スライダが安定に浮上し，突起欠陥を高い精度で検出可能だったが，現在はコンタクト状態に近い低浮上状態にあるため，スライダと磁気ディスクの接触頻度が増し，GHヘッドの浮上安定性確保が難しくなってきている。擬似コンタクト状態におけるGHヘッドの挙動を把握し，試験の安定性を保つべく開発を進めている。

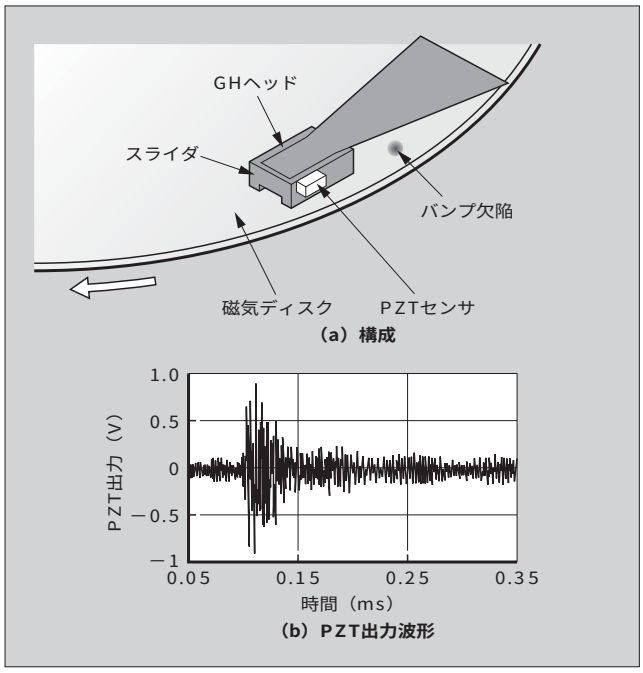
図1　ヘッド浮上量のロードマップ



2　ヘッド挙動解析

擬似コンタクト状態における，GHヘッドの挙動について評価解析を行った。

図2　GH試験システム



佐藤　公紀

磁気ディスク媒体の開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)デバイス技術研究所グループマネージャー。計測自動制御学会会員，日本機械学会会員。

片野　智紀

記録媒体の開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)デバイス技術研究所主任研究員。日本トライボロジー学会会員。

2.1　解析方法

図3に実験解析方法を示す。GHヘッドを磁気ディスク上で走行させ，スライダが磁気ディスクと接触しやすい環境下（低いディスク回転数など）で，PZT出力により接触振動を検知し，同時にLDV（レーザドップラー振動計）によりスライダ流出端の振動を計測する。実験には3.5インチアルミディスクおよび30％サイズのGHヘッドを用いている。

2.2　解析結果

図4はスライダと磁気ディスクが接触したときのPZT出力のスペクトラムである。500～600 kHz，1,200 kHz付近にピークが見られるが，これらはスライダ構造自身のねじりモード，曲げモードの固有振動ピークに対応していると考えられる。スライダが磁気ディスクと接触状態にあるため，種々の振動モードを励起している。

図5は**図4**の低周波領域を拡大したものである。スライダと磁気ディスクとの接触状態を反映し，100 kHz以下のピークが確認できる。**図6**はLDVにより計測したスライダ振動と，このときのPZT出力とを同時計測した後，時間スケールを合わせて表したものである。

図3　GHヘッド接触状態解析方法

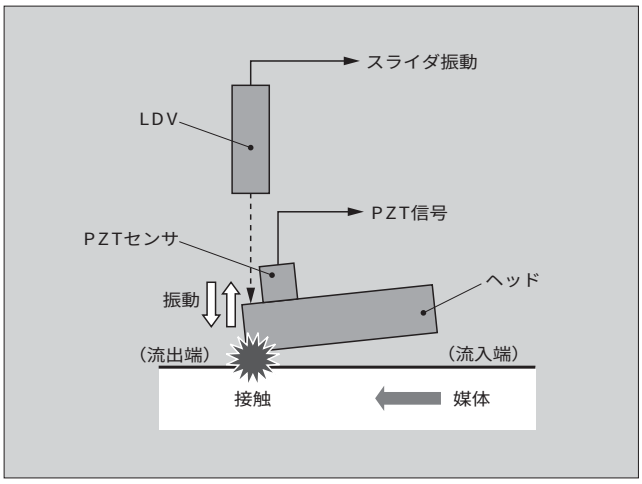
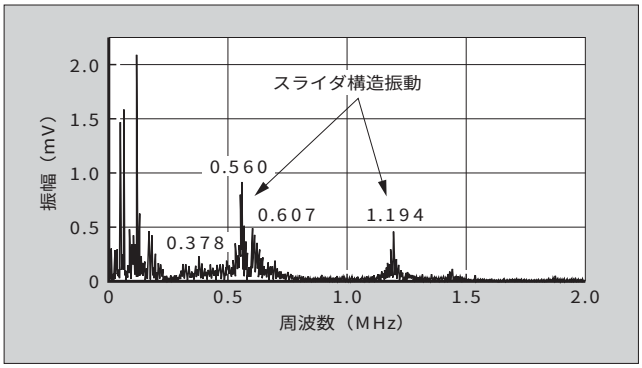


図4　ヘッド接触時のPZT出力スペクトラム



なお，同図で縦軸のスライダ振動は負側が磁気ディスク面に近づく方向である。スライダの振動振幅は60～80 nm程度であり10 nm以下のヘッド浮上量に比べ非常に大きい。PZT出力と対比させると，スライダが磁気ディスク面に近づいた極小点でPZT出力が励起されその後減衰

図5　ヘッド接触時のPZT出力スペクトラム（低周波領域）

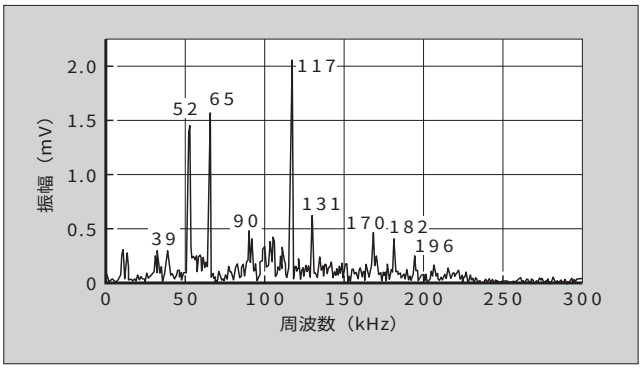


図6　ヘッド接触時のスライダ振動とPZT出力信号

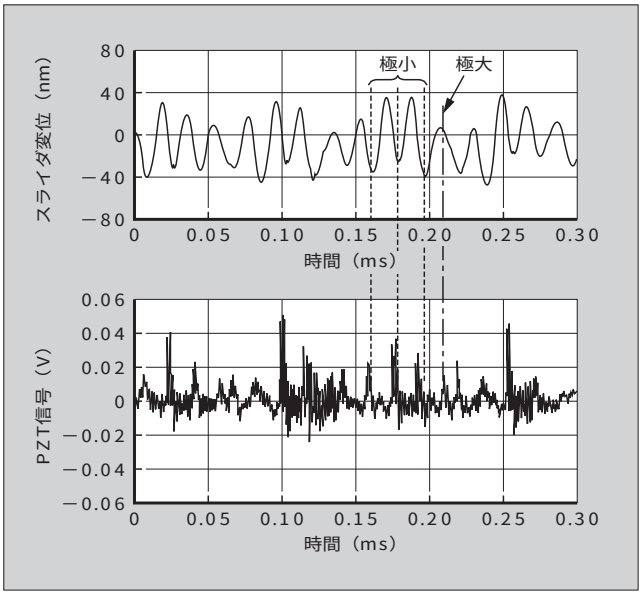
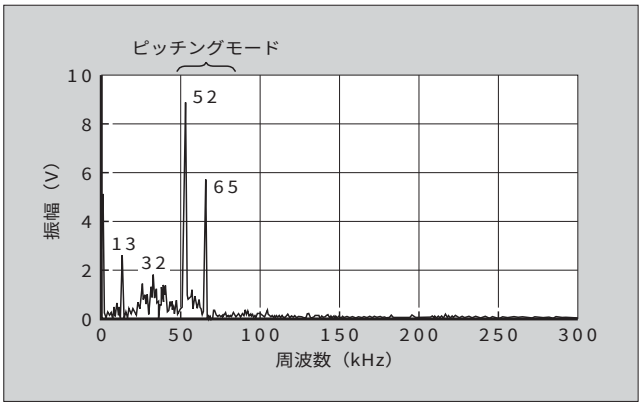


図7　接触時のスライダ振動スペクトラム



し，再び極小点でPZT出力が励起される，ということを繰り返している。

図7はスライダ振動のスペクトラムであり，50～60 kHz付近に**図5**と一致するピークが見られる。シミュレーションの結果，このピークはスライダ空気軸受のピッチングモード（前後傾き回転モード）に相当することが分かった。すなわち，スライダはピッチング方向の空気ばねに起因して接触ー跳躍を繰り返す自励振動状態にあり，先のような過大な振動振幅になったと考えられる。**図6**では，スライダ振動が極大，すなわちスライダ流出端が磁気ディスクから最も離れたところでもPZT出力が励起されている。つまり，ピッチングの振動振幅が過大になり流入端および流出端が交互に磁気ディスクに当たっていると推測される。

3　ヘッド種類と走行安定性

磁気ディスクの品質を向上させるには，前述の振動が継続する接触状態を回避し，GHヘッドを安定的に走行させる試験条件について検討する必要がある。本章ではヘッド種類とヘッド走行安定性の関係について，振動減衰性，ヘッド浮上姿勢の観点から解析を行いその影響について考察した結果を述べる。

3.1　振動減衰性

ヘッドの空気軸受振動における振動減衰性を，カリフォルニア大学バークレー校のコンピュータメカニカルラボラトリー（CML）が開発したヘッド浮上シミュレータCML Air（ver. 6.5.1）を用いて解析を行った。解析ではスライダがバンプを乗り越えた状態を設定し，このときの応答振動から減衰性を求めた。解析を行った3種類のヘッドの特性を**表1**に示す。ヘッドA，BとヘッドCとではスライダサイズが異なり，ヘッドAとヘッドBとでは空気軸受レール面の幅が異なる。実験によりその浮上安定性（振動接触発生頻度）を確認したところそれぞれ差異が認められた。

機械的振動における減衰は一般的に指数関数的であるため，シミュレーションで得られた応答振動から時定数τを算出し振動減衰性の指標とした。解析結果から算出したヘッドの時定数を**図8**に示す。同図では固有振動モードとの対応を取るため，横軸に固有振動数，縦軸に時定数を取っている。同図からヘッドA，B（50％ヘッド）はヘッドC（30％ヘッド）よりも高い固有振動数および高い減衰性を持っており，スライダサイズによりヘッドの走行安定的が異なることが分かる。例えば，ピッチングモードについてはヘッドCの時定数τはヘッドA，Bの1/5程度となっている。すなわち突起により励振されても速やかに収束し，振動が継続するような接触状態になりにくいと考えられ，**表1**に示した振動接触発生頻度の傾向と一致する。一方，レール幅が異なるヘッドA，Bではその減衰性に差が見られなかった。

表1　解析を行ったヘッド種類とその特性

ヘッド	サイズ	空気軸受面レール幅	試験周速	振動接触発生頻度	ヘッド姿勢角（μrad）	
					ピッチ	ロール
A	50％	10 mil	5.5 m/s	15％	92	1.4
B	50％	9 mil	7.5 m/s	5％	100	1.7
C	30％	6.5 mil	10.0 m/s	2％	253	−0.3

3.2　浮上姿勢

表1にヘッドの浮上姿勢角をシミュレーションにより求めた結果を示す。ピッチ角度で見ると，ヘッドCはヘッドA，Bよりも2倍以上大きいが，ヘッドA−B間でもレール幅の違いによりピッチ角に差異が生じている。**図9**はフライングハイトテスタによりヘッドのピッチ角を，その周速度を変えながら実測した結果（平均値）である。**表1**のシミュレーション結果と比較するとヘッド間の傾向は

図8　空気軸受固有振動モードと時定数

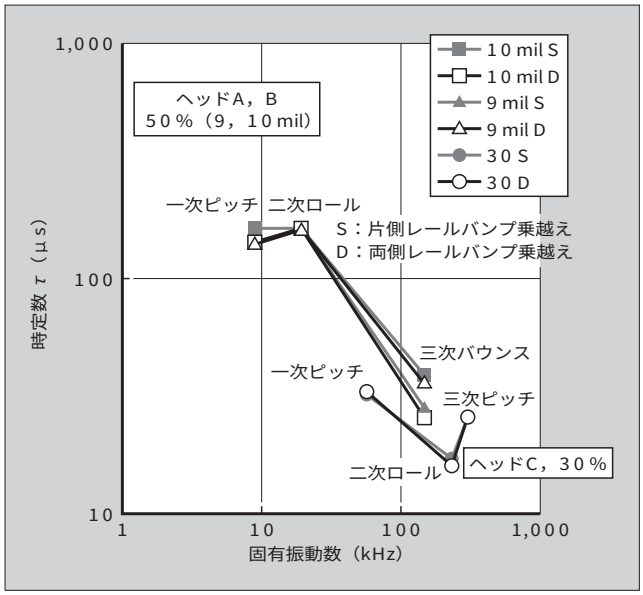


図9　周速とヘッド姿勢角

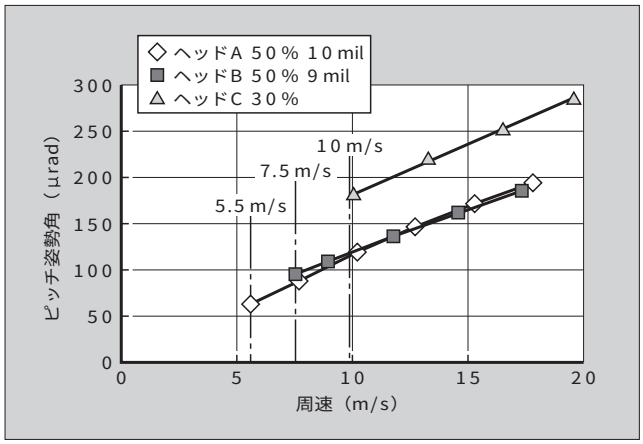


表２　同定パラメータ

パラメータ	値
k_1	2.0×10^{-11}
ζ_1	0.2
ω_{n1}	337,000
k_2	1.0×10^{-13}
ζ_2	0.01
ω_{n2}	2,180,000
k_3	5.0×10^{-15}
ζ_3	0.005
ω_{n3}	4,878,000
k_4	3.0×10^{-15}
ζ_4	0.008
ω_{n4}	7,900,000
k_5	2.0×10^{-15}
ζ_5	0.02
ω_{n5}	10,700,000

よく一致している。**図９**ではヘッドＡとヘッドＢとではその周速度に対するピッチ角はほぼ等しいといえ，ヘッドＡ－Ｂ間のピッチ角が異なるのは試験周速の違いが表れたものと考えられる。

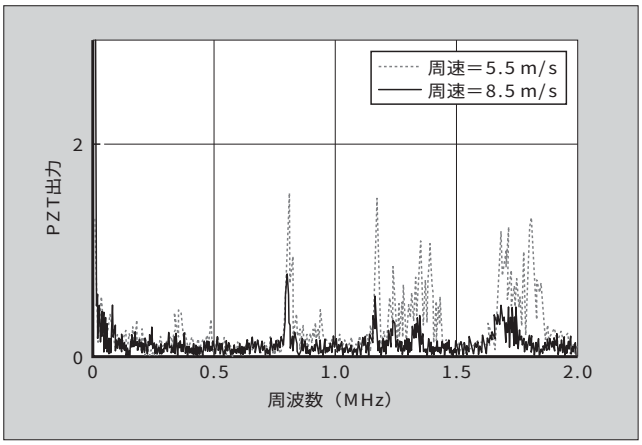
以上の結果を**表１**に示す振動接触発生頻度と対比させると，ピッチ角が大きいほど発生頻度が小さく，走行安定性が高くなっている。この理由としては，次の二つが想定される。一つは，浮上量すなわち流出端と磁気ディスクとのスペーシングが一定の場合，ピッチ角が大きいほど，スライダの重心が高く，スライダへの潤滑剤移着の影響が少ないというものである。もう一つは，スライダ流出端が磁気ディスクに接触する際に，摩擦が発生し，これがスライダ回転中心に対して偶力となり，その結果ピッチング振動が誘発される，というものである。[(1)] スライダのピッチ角が大きいほど磁気ディスクとの接触面積が小さくなり，発生する摩擦が小さくなるため，ピッチング振動が抑制されるものと考えられる。

4　新しいGH試験方法の検討

4.1　従来のGH試験の問題点

GHヘッドの浮上量が10 nm以上であれば，潤滑膜や磁気ディスクの表面うねりによるスライダ振動の影響を受けず，PZTセンサ出力から突起の検出を高い精度で行うことができる。しかし浮上量が8 nmを下回ると，潤滑膜の一部がスライダに接触し始め，また磁気ディスク表面の微細なうねりにより，スライダの姿勢や挙動が乱されるため，機械振動の発生や，PZTのエレキノイズ影響が大きくなる。これにより，突起との衝突現象でないにもかかわらず，衝突と同等の振幅を観測してしまい，誤った検出を引き起こす可能性がある。**図10**は同一ヘッドを使い，２種類の周速で浮上させた場合の，PZT出力の周波数応答である。

図10　浮上量とヘッド高周波共振



周速が低い（つまり浮上量が小さい）場合には，700 kHz以上の高周波成分が顕在化していることが分かる。

4.2　新しいGH試験の考察

GHヘッドを伝達関数 H のシステムとして考える。ブロックの入力は衝撃力 F，出力はPZT出力 Y である。従来のGH試験は，PZT出力 Y をもとに行ってきたが，Y にはGHヘッドの動特性項 H が含まれているため，GHヘッドの固有振動による影響や，個体差による影響を大きく受ける。新しく提案する方式は，GHヘッドの個体差の影響を受けない衝撃力 F で，評価するものである。衝撃力 F は，

$$F = H^{-1}\cdot Y \quad \cdots\cdots(1)$$

である。ここでGHヘッドの伝達関数 H は，以下の仮定のもと，式(2)のように与えられる。[(2), (3)]

(1)　衝撃力は，理想インパルス入力 $I\delta(t)$ とする。

(2)　GHヘッドは N 次元の質量スプリングダンパ系とする。

(3)　PZT出力はヘッドの加速度を表すものとする。

$$H(\omega) = A_I(\omega)/I \quad \cdots\cdots(2)$$

$$A_I(\omega) = \sum_{j=1}^{N}\left[(I\omega_{nj}^3/k_j)(\omega_{nj}^2-\omega^2-2i\zeta_j\omega_{nj}\omega)/\{(\omega_{nj}^2-\omega^2)^2+(2\zeta_j\omega_{nj}\omega)^2\}\right] \quad \cdots\cdots(3)$$

ここで，$A_I(\omega)$ は，ヘッドにインパルス入力 $I\delta(t)$ が加わったときの加速度をフーリエ変換したもの，N は質量スプリングダンパ系の次数である。

4.3　パラメータの同定

式(3)の振動のパラメータ k_j，ω_{nj}，ζ_j（$j=1\cdot\cdot\cdot N$）は，以下の実験により求めることができる。

表面に，GHヘッドの固有周期より十分短い（1/5以下）幅の突起を生成した，バンプディスクを用意する。例えばGHヘッドの周速を6 m/s，同定したいGHヘッドの固有周波数を800 kHzとすると，突起幅は1.5 μm以下が必要である。前記バンプディスク上にGHヘッドを浮上させ，突起にヒットしたときのPZT波形を記録し，これをフーリエ変換して，$A_I(\omega)$ の実験データ $A_I(\omega)^*$ を得る。

図11　ヘッド動特性の同定

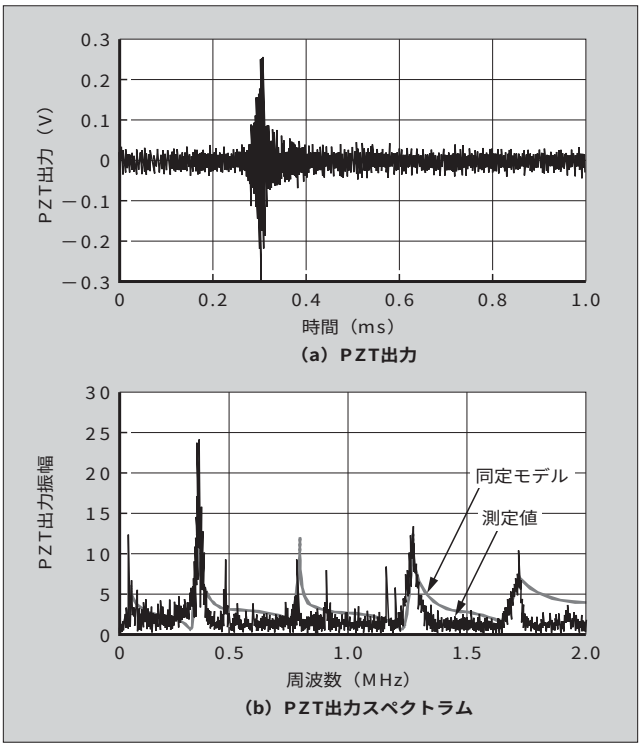
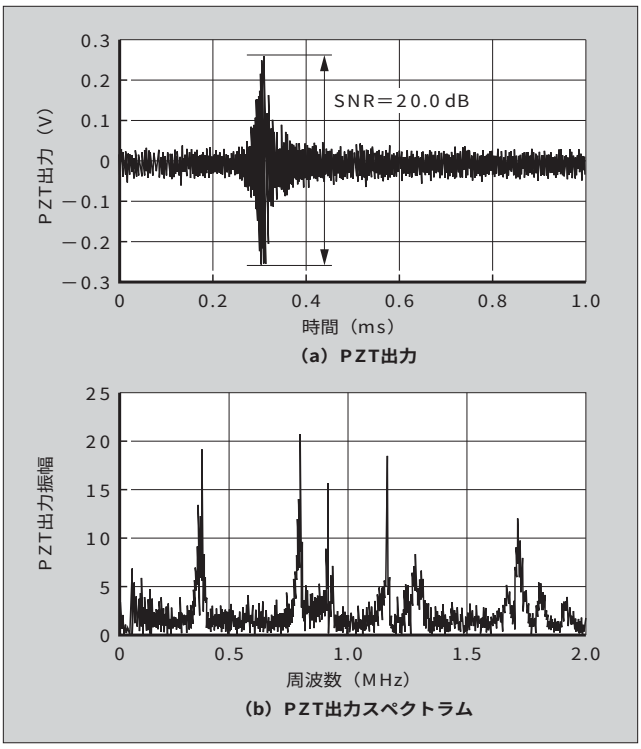


図12　バンプ衝突時の PZT 出力



k_j, ω_{nj}, ζ_j は A_I（ω）と A_I（ω）* の二乗差が最小になるように決める。

図11はサイズ 50 %－10 mil レール幅の GH ヘッドに対して，本手法を適用し，パラメータを求めた例である。GH ヘッドの自由度は 5 とし，おのおのの共振パラメータを**表2**のように決めた。共振周波数は，複数のヘッドにおいて共通して共振点となる周波数を採用した。

ここで，試験対象となる磁気ディスク上において，突起から衝撃入力 $f(t)$ を受けたときの GH ヘッド加速度を $a(t)$ とし，単位インパルス応答関数を $h(t)$ とすると，

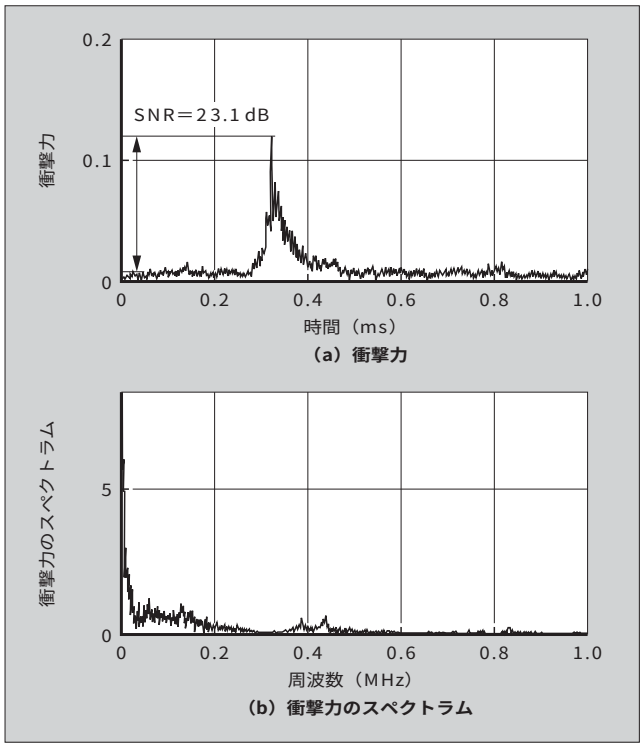
$$a(t) = \int_0^t h(t-\tau)\cdot f(\tau)\,d\tau \quad \cdots\cdots (4)$$

式(4)をフーリエ変換すると，

$$A(\omega) = H(\omega)\cdot F(\omega) \quad \cdots\cdots (5)$$

である。ここで，周波数伝達関数 $H(\omega)$ は式(2)で与えられるので，突起にヒットしたときの PZT センサ出力波形のフーリエ変換 $A_I(\omega)$ に周波数伝達関数 $H(\omega)$ の逆関数 $H(\omega)^{-1}$ を掛けることで，任意の衝撃入力 $F(\omega)$ を知ることができる。

図13　バンプ衝突時の衝撃力



4.4　実　験

7 nm の突起に衝突させた場合について，衝撃力を求め，PZT 出力の SNR（Signal/Noise Ratio）と衝撃力の SNR を比較した。ここでは，PZT 出力，衝撃力とも，加算平均によるフィルタリングを実施している。

図12，**図13**は 7 nm の突起に衝突させた場合の PZT 出力と，そのときの衝撃力である。衝撃力の SNR ＝ 23.1 dB であり，PZT 出力の SNR ＝ 20.0 dB よりも優れている。これは衝撃力のスペクトラムが低周波帯域に集中しているため，フィルタリングの帯域を適切に設定すれば，信号成分に影響与えることなく高周波ノイズをカットできるためと推測される。

5　あとがき

現在，磁気ディスクの量産工程では，製造した全ディスクに対して，GH ヘッドを 8 nm 以下で浮上させ，突起の検出試験を実施し，磁気ディスクの良品判定を行っている。スライダと磁気ディスクとが擬似コンタクト状態にあるため，スライダは外乱の影響を受けて，振動しやすく，突起の検出精度を確保することが難しくなってきている。

GH 出力と LDV 出力を同時に測定することにより，浮上量が 8 nm 以下でのスライダ挙動を調べた結果，スライダはピッチング動作により磁気ディスク表面と接触しながら走行していることを明らかにした。また，ピッチ角や振動減衰性の異なる GH ヘッドを使って，浮上安定性を比較した結果，ピッチ角の大きいヘッド，減衰係数の高いヘッドが，より安定に浮上できることを明らかにした。

さらにスライダ振動の影響を受けにくい試験方法として，突起衝突時に発生する衝撃力から，突起欠陥の有無を調べる新しい試験方法を開発した。本試験方法は PZT 出力の大きさから求める従来試験方法に比べ，SNR を 3 dB 以上改善できる。今後は，上記知見や技術を量産試験工程へ展開し，試験の安定化，検出感度の向上を進めていく予定である。

参考文献

(1)　Yamane, M. et al. 2-DOF Analysis of Friction-Induced Slider Vibrations in a Near-Contact Regime. The 2003 JSME-ⅡP/ASME-ISPS Joint Conference.

(2)　Sato, K. ; Kikuchi, H. Specification of the bump on the hard disk surface by deviation of impulse force. 9 th Joint MMM / Intermag. GP-8, 2004, p.396.

(3)　機械工学便覧．A3 編「力学・機械力学」．日本機械学会編．1986.

電子写真という発明

竹内　　学（たけうち　まなぶ）
茨城大学工学部教授 理学博士

複写機，レーザプリンタが立脚する電子写真は 1938 年にアメリカのカールソン（C. F. Carlson）により発明された。これは発明としていくつかの教訓を含んでいる。

その 1 は，この発明のきっかけである。カールソンは，1930 年にカリフォルニア工科大学物理学科を卒業し，P. R. マロニー社の特許部に就職した。彼の仕事の中心は特許申請のための書類，図面の作成であった。当時のことで，文書はタイプライタ（カーボンコピー）により，図面は写真により，必要部数を作成した。これらの仕事に日夜没頭する中で，彼は速くて，正確で，乾式の複写技術の必要性を痛感した。「必要は発明の母」といわれるが，まさにカールソンはそれを実践した。

その 2 は，カールソンの発明への取り組みである。乾式の複写技術の必要性を痛感した彼は，参考になる先人たちの試みを求めて多くの文献を調査した。その中で彼は Selenyi の静電記録に注目し，それを利用することにした。カールソンは光電導を利用して，原稿の像を静電気により作成し、それに粉末を付着させて画像を形成しようと考えた。1938 年 10 月，彼は実験に成功した。彼は先人の発明に学んだのである。

その 3 は電子写真の原理である。電子写真のカールソンプロセスはつぎの 6 ステップからなる。①帯電：暗所で感光体全面に帯電を施す。②像露光：原稿に光を照射し，反射光をレンズ系を通して感光体上に結像させる。感光体は半導体でできており，光が照射された部分は電気を流すようになる（光電導）ため帯電電荷が流れ去るが，光が照射されなかった部分の電荷はそのまま残り，原稿に対応した静電気の像（静電潜像）が感光体上に形成される。③現像：着色した微粒子（トナー，粒径：5 ～ 10 μm）を静電潜像と逆極性に帯電させ，静電潜像のところだけに静電気力により付着させる。④転写：感光体上のトナー像を電界の力により普通紙上に写し取る。⑤定着：普通紙上に静電気力で付着しているトナーに熱を加えて，トナーの主成分であるプラスチックを溶融させ，紙の繊維の間にしみ込ませて固着させる。⑥クリーニング：感光体上の残留トナーをブレードによりかき取って，感光体を最初の状態に戻す。一見複雑なステップの連続のように見えるが，実はこれら個々のステップは，大学の電気電子系，物理系の学科の学生であれば 4 年間で学ぶ事項ばかりである。具体的には，①帯電は，現在ではおもにコロナ帯電が用いられているが，細い金属線に数千ボルトの電圧を印加するとコロナ放電が発生し，近くの物体が帯電することは，「高電圧工学」で学習する。②像露光に関しては，半導体に光を照射すると電気を流すようになる「光電導」という現象を，「半導体工学」で学習する。③現像に関して，正，負に帯電した物体間には引力が作用することは，クーロンの法則として「電磁気学」の教科書の最初に出ているし，高等学校の「物理」でも習う。④転写は，帯電した物体には電界からの力が作用することを利用しているが，これは「電磁気学」における「電界」の定義そのものである。⑤定着の，プラスチックに熱を加えると溶けること，⑥クリーニングの，物体表面を何かでこすれば付着しているほこりが取れること，はいずれも大学入学前から知っている。すなわちカールソンの発明は，すでによく知られている事項ばかりであっても，それらを巧妙に組み合わせると大発明につながる可能性があることの典型である。

4 番目の教訓は目的と手段の関係である。写真フィルムの会社に勤める友人から以前に聞いた話であるが，フィルムはハロゲン化銀を使用しているため，フィルム会社の利益は世界の銀の相場に左右されるとのことである。そのため，フィルムの性能を低下させずに銀の使用量を減らす研究，銀以外の元素を用いて銀塩写真と同等の画像を得る研究が熱心に行なわれてきた。今日ではフィルム 1 本あたりの銀の使用量は以前より大幅に減少しているが，銀以外の元素を使用する（湿式）写真技術は実用化されていない。ところが，意外なところから銀を使用しない写真技術が出現した。デジタル写真である。インクジェット技術のほうが先行しているが，レーザプリンタ（電子写真）も銀塩写真の画質に近づいている。まったく別の手法により高精細な画像を形成するという目的を達成した一例である。

以上，何処までカールソンが意図したのか定かではないが，電子写真は実によくできた発明だと感心する。

感光体の現状と展望

成田　　満（なりた　みつる）　　田中　辰雄（たなか　たつお）

1　まえがき

最近，情報技術の高度化に伴ってパソコンおよびその周辺機器の高機能化により，われわれの情報活動は一昔前に比較して圧倒的に多くなっている。身近な例を挙げれば，ディジタルカメラ，スキャナ，プリンタ，ディジタル複写機など，画像入出力装置の普及が急速に進んでおり，それらのカラー画像をインターネットを介して配信することが日常化してきている。

こうした状況の中で，情報・画像を表示・記録するプリンタ，複写機の役割はますます重要性を増しており，期待される性能レベルも高くなってきている。

本稿では，これらプリンタ，複写機の市場動向とその中で電子写真方式のプリンタ，複写機の動向を解説し，これに対応した富士電機の感光体の概要について述べる。

2　プリンタ，複写機の市場動向

われわれは文字や画像の伝達手段として表示によるソフトコピー（ディスプレイ情報）と，印刷によるハードコピー（印刷情報）という方法を用いてきた。

ソフトコピーは液晶または有機 EL（Electroluminescence）ディスプレイに代表されるように技術の進歩が目覚ましく，今後ますます普及していくと考えられる。しかし，ハードコピーの媒体として紙の消費量は堅実な成長を続けており，その理由は種々考えられるが，表示，書込み，保存，伝達など多くの機能を併せ持ち，かつ軽量で利便性の高い媒体であることが大きな要因であると考えられる。

一方，最近は紙とディスプレイに次ぐ第三の媒体として電子ペーパー（ディジタルペーパー）など新規技術も進んでいる[1]。中長期的にはこれらの電子媒体が紙媒体に対し相対的には増加していくと考えられるが，両媒体の相乗効果により扱われる情報量そのものが増大し続け，その結果，両媒体とも増え続けると予測されている[2]。

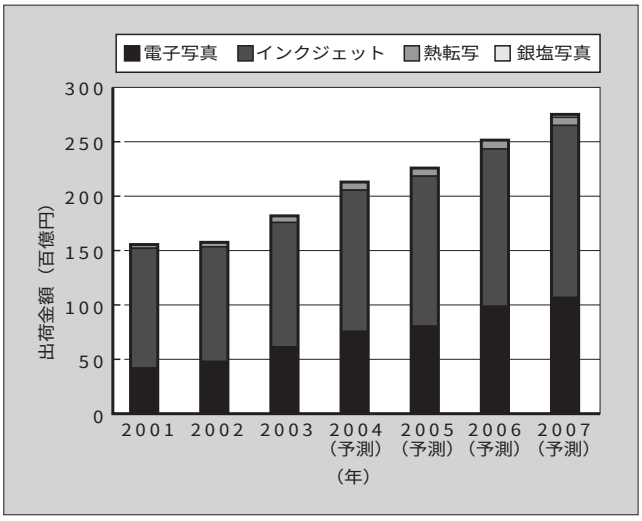
コンピュータなどからのハードコピー出力分野においては，パーソナルユース分野で強いインクジェット方式と，オフィスユース分野で強い電子写真方式に大まかに分類できる。インクジェット方式は装置価格が安く，カラー対応，専用紙で特徴を発揮する。一方，電子写真方式はランニングコストが安く，スピード，普通紙での画質に特徴を持つ。

図1は，カラーハードコピー機器の市場予測を示したものである。電子写真方式のカラープリンタ，カラー複写機は 2003 年から急激に増加し，ここ数年は 15 %から 19 %の伸びを示しており，今後も大きく成長すると予測されている[3]。インクジェット，電子写真の両方式は，今後も競合するものの，それぞれの特徴を生かし，ともに伸長を続けていくと考えられる。

3　電子写真の動向

電子写真方式のプリンタ，複写機の出荷台数はここ数年は飽和傾向にあり，数%の伸びにとどまっている。しかし，前述の環境変化に対応して技術の進展と機種構成の変化が進むとともに，新しい市場が開けつつある。

図1　ワールドワイドのカラーハード機器出荷金額推移[3]



成田　　満

電子写真用感光体の開発・設計に従事。現在，富士電機画像デバイス(株)第二開発部長。日本画像学会会員。

田中　辰雄

電子写真用感光体の開発および営業に従事。現在，富士電機デバイステクノロジー(株)情報デバイス事業本部画像デバイス事業部長。

3.1　プリンタ

電子写真方式によるプリンタのカラー化は，2002年ごろから増加している。**図2**，**図3**にはそれぞれモノクロプリンタとカラープリンタの出荷台数の動向を示す。2002年度はモノクロプリンタで出荷台数が約1,040万台であるのに対し，カラープリンタの出荷台数は約94万台にとどまっている。しかし，ここ数年，カラープリンタの出荷台数は年率30％程度の成長を見せており，今後急激に市場が拡大すると予測されている。

図3から分かるように，現在，カラープリンタは画像出力スピードが6枚/分以下の低速機が主流であるが，2004年度からは7枚/分以上のプリンタが主流になると予測されている。この場合，低速分野は，1本の感光ドラムで順に4色を印刷する方式（4サイクル方式）を採用するのに対し，中高速機では，4本の感光ドラムを直列に配しておのおの1本の感光ドラムが1色ずつ印刷する方式（タンデム方式）が主流になると考えられる。

図2　ワールドワイドの電子写真方式モノクロプリンタ速度別出荷台数推移[3]

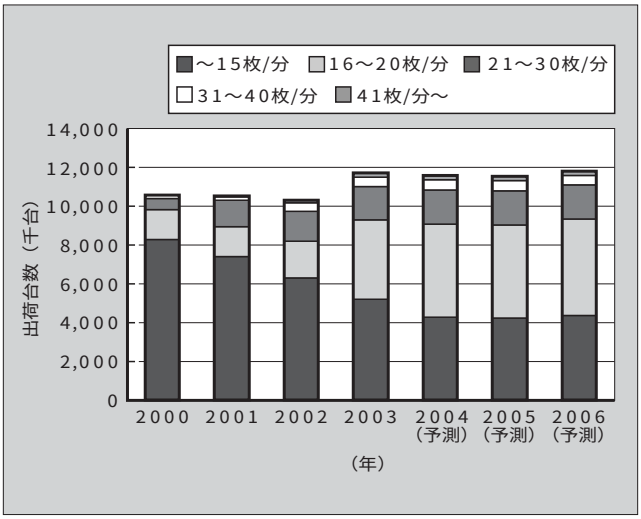
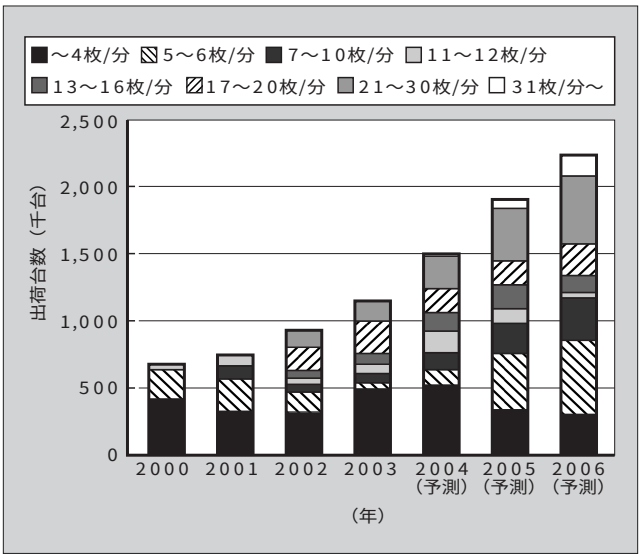


図3　ワールドワイドにおけるカラーレーザプリンタ速度別市場推移[3]



カラープリンタ用感光体に求められる特性としては，画質，特に解像度の向上と，色再現性に必要な安定した光減衰特性が挙げられる。また，上記のプロセスのうち特にタンデム方式では，4色の色ずれを抑制するためには感光体素管に高い寸法精度が要求される。

プリンタ分野におけるもう一つの動きは軽印刷分野への進展である。情報のネットワーク化によりオンデマンドプリンタが普及しつつあり，新聞，雑誌，カタログなどの小ロット印刷やオンサイトでの印刷に使用されている。電子写真方式の高速性および利便性を生かした新しい分野であるといえる。

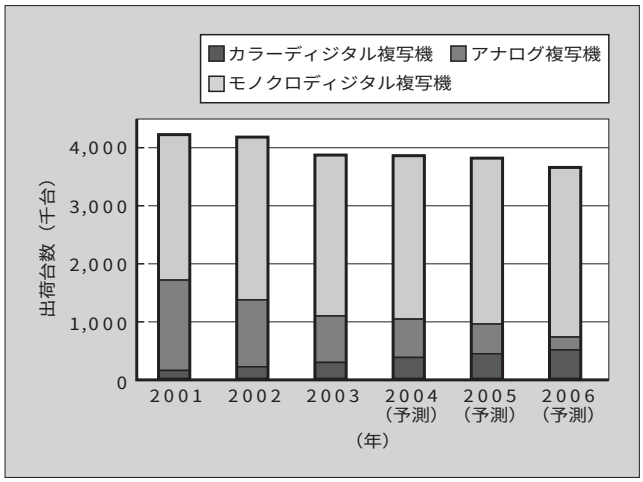
この分野で用いられる感光体には，印刷スピードに対応した高感度・高速応答性，長寿命である耐刷性，およびオフセット印刷に迫る高解像度が要求される。この分野に最適な感光体としては膜が削れても解像度が低下しない正帯電型単層感光体が報告されている。また一部では，従来の乾式トナーでなく液体トナーを用いた高解像度プリンタも発表されており，これに対応した感光体も開発しつつある。

3.2　複写機

複写機分野においてもディジタル化が進んでいる。**図4**に複写機の出荷台数推移を示す。全体の出荷数では少し減少しているが，その中でカラーディジタル複写機およびモノクロディジタル複写機は急成長している。特にモノクロディジタル複写機は2000年ごろからアナログ複写機に取って代わって主役の機種になっている。複写機，プリンタ，ファクシミリといった複合多機能機が伸長していると考えられる。**図5**にこのディジタル複写機のスピード別出荷台数推移を示す。画像出力が16～30枚/分と41～60枚/分の中高速機が堅調な伸びを示している。

ディジタル複写機用感光体に求められる特性としては，高速応答性，耐刷性とともにグラフィック画像のための中間調を再現するための階調性など，プリンタプロセスに適合した光減衰特性の実現が求められる。

図4　ワールドワイドにおける複写機出荷台数推移[3]



3.3　感光体

上述の電子写真方式のプリンタ，複写機に用いられる感光体には有機感光体（OPC：Organic Photoconductor），セレン感光体，アモルファスシリコン感光体などがある。**図6**はこれら感光体の生産本数推移を示したものである。[4] 年率5～8％と堅調な伸びを示している。また，生産地としては現状では日本が多くの生産をしているが，今後はアジア・パシフィックおよび中国での生産が多くなると予測されている。これら感光体が用いられる電子写真方式の装置は今後カラープリンタ，オンデマンドプリンタ，ディジタル複写機の普及が特に期待され，新しい市場が形成される可能性があり，さらなる成長が期待される。

今後の新しい展開に対応するために感光体に求められる特性をまとめると以下のようになる。

(1)　カラープリンタ（高解像度，色再現性，素管精度）

図5　ワールドワイドにおけるモノクロディジタル PPC 速度別市場推移[3]

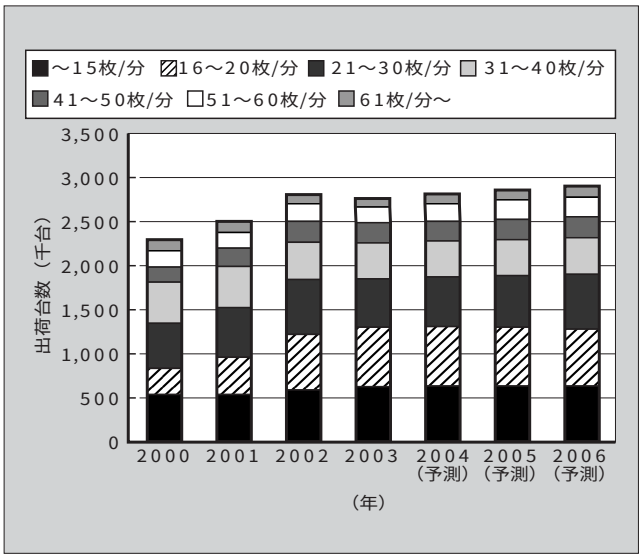
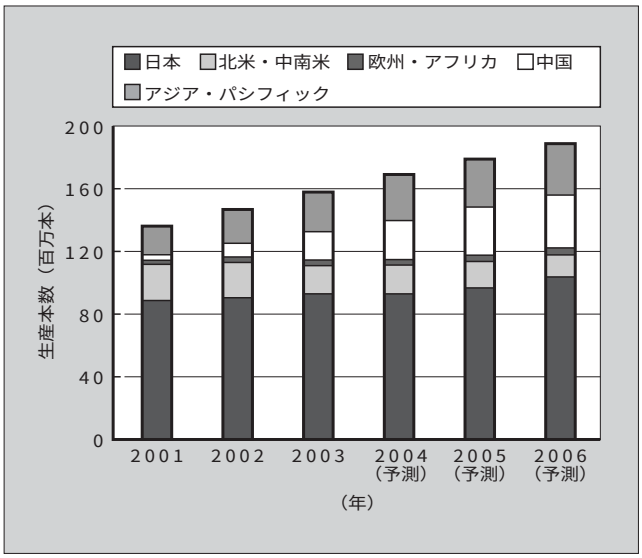


図6　ワールドワイドにおける感光体生産本数推移[4]



(2)　オンデマンドプリンタ（高感度，高速応答性，耐刷性）

(3)　ディジタル複写機（高速応答性，耐刷性，階調性）

4　富士電機の製品概要

富士電機は，1973年にセレン感光体を，1988年に有機感光体（OPC）をそれぞれ製品化し，販売を開始した。電子写真技術は進歩の速い情報産業の一角にあり，その動きに迅速，柔軟に対応するため，1999年に富士電機画像デバイス(株)を設立し，プリンタ，複写機の中核部品である感光体とその周辺装置の開発，生産から販売までを世界規模で事業展開している。生産拠点としては国内（松本地区）のほか，米国にU.S. Fuji Electric，中国（深圳地区）に富士電機深圳有限公司の3拠点を持ち，全世界の需要に効率的に対応している。また，富士電機深圳有限公司では現像スリーブ，トナーカートリッジをはじめ，各種周辺製品の生産拠点となっている。多くのプリンタメーカー，複写機メーカーが中国を含むアジア地区で，装置の組立を行っている現在，中国での感光体およびその周辺部材生産は大きな利便性を提供できるものと考えている。

4.1　OPC

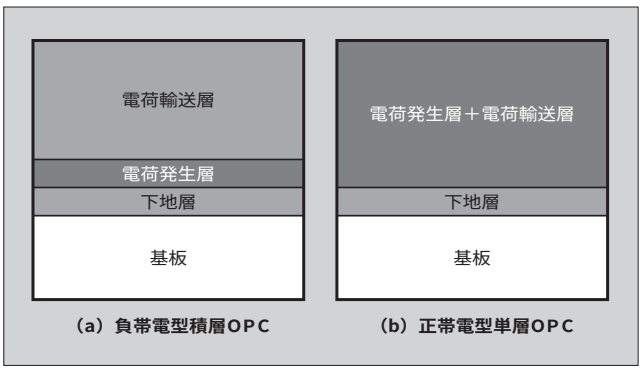
富士電機は，多様化するお客様の個々のご要望にお応えできる態勢を整えており，鮮明な画像を得るために，プリンタや複写機の光源の波長に適合するよう，各種感光体を製品系列化している。

表1に4タイプのOPC製品系列を示す。また，**図7**にOPCの層構成を示す。

表1　OPCの製品系列

種　類	特　徴		用　途
	帯電極性	層構成	
タイプ8	負帯電	積層型	カラー・モノクロプリンタ，ファクシミリ，多機能機
タイプ9	負帯電	積層型	アナログ複写機
タイプ10	負帯電	積層型	カラー・モノクロディジタル複写機，多機能機
タイプ11	正帯電	単層型	カラー・モノクロプリンタ，ファクシミリ，多機能機，軽印刷機

図7　OPCの層構成



(1)　プリンタ用 OPC

プリンタ用 OPC（タイプ 8）は低速機から高速機に至るまで幅広い電位応答性や感度範囲に対応可能な製品をそろえている。特に有機材料（電荷発生材料，電荷輸送材料など）については，コンピュータによる分子設計した材料も含め豊富な材料設計技術，材料を塗布液化する分散技術，そして OPC に仕上げるコーティング技術の開発を日夜続けており，カラープリンタで要求さている高解像度，カラー画像再現性など顧客の要望に幅広く応えることが可能である。

また，ドラムの寸法精度についても素管加工技術の高度化や歯車の高精度設計により優れた回転安定性を保持している。

(2)　複写機用 OPC

アナログ複写機用としてタイプ 9，ディジタル複写機用としてタイプ 10 の 2 系列に感光体を製品化している。複写機用として特に要求される高速応答性，高耐刷性，階調性を満足する製品をそろえるとともに新材料の開発，設計によりさらなる特性の改善を進めている。特にディジタル複写機用は長寿命，電位安定性が強く要求されるため，OPC バインダ材料の分子設計技術や電位安定各種添加剤技術により高性能な感光体を製品化している。

(3)　正帯電型単層 OPC

マイナス帯電方式に適合した OPC の製品系列の拡大と並行して，富士電機では高画質化が容易に実現できる可能性が高く，また，環境面でのオゾン発生量を低減可能な正帯電方式感光体の開発に取り組んできた。この感光体の実現には，高い移動度を持つ電子輸送材料の開発が不可欠であったが，独自の材料合成に成功し，1999 年その製品化を実現した。

よく知られているように，正帯電型 OPC はコロナ放電による帯電プロセスを用いてもオゾン発生が少なく，また光吸収と電荷発生が感光体表面で起きるため，高解像度化が可能という特徴を有している[(5), (6)]。さらに積層型に比べて応答性，環境特性が高く，かつ塗布工程が単純で生産性も高い。これらの特徴を生かして，モノクロプリンタおよびカラープリンタ，オンデマンドプリンタへの展開を進めるとともに，高感度化改良を進め，高速機へ適用範囲を広げつつある。

4.2　セレン感光体

セレン感光体の製品系列を**表 2** に示す。セレン-テルル（-ひ素）〔Se-Te（-As）〕系，セレン-ひ素（Se-As）系の 2 タイプを製品化している。富士電機は，セレン系材料技術，セレン精製技術，真空蒸着技術など，その豊富な経験を生かして当該製品分野を常にリードしてきており，顧客の要求に応え続けている。

表 2　セレン感光体の系列拡大

種　類	材　料	用　途
タイプ4	Se-Te（-As）系合金	中低速複写機，レーザプリンタ
タイプ5	Se-As系合金	高速複写機，レーザプリンタ

4.3　周辺製品

長年培った電子写真プロセス技術を基に，感光体を中心に帯電部，現像部，クリーニング部を一体としたプロセスユニットの開発設計から生産までを行っている。特に現像部に用いられる現像スリーブは感光体用素管加工技術の高度化により微細な表面加工技術と薄膜コーティング技術高度化により，モノクロプリンタ，カラープリンタ両者に採用されている。

5　あとがき

インターネットの発達により電子写真技術はディジタル，カラーの普及が飛躍的に拡大しつつある。感光体に期待される性能はより鮮明な画質と高い耐久性など，ますます高くなってきている。富士電機はこうした市場要求に応えるべく，材料設計，製品開発，生産技術の高度化へ挑戦し顧客にとって魅力ある製品を目標としている。今後も技術力の強化を図り，顧客のニーズに対応した高性能で信頼性の高い製品を提供していく所存である。

参考文献

(1)　面谷信．第 55 回日本画像学会技術講習会．2003, p.261-269.
(2)　川上春雄ほか．感光体の現状と展望．富士時報．vol.75, no.3, 2002, p.178-181.
(3)　インターウォッチ．2004 年版全プリンタ/全 PPC 市場分析レポート．2004.
(4)　インターウォッチ．2004 年版電子写真消耗品生産動向レポート．2004.
(5)　Aizawa, K. et al. A Study of 1-dot Latent Image Potential. IS&Ts NIP17 Internationnal Conference on Digital Printing Technologies. 2001, p.572.
(6)　上野芳弘，会沢宏一．電子写真におけるシミュレーション・計測技術．日本画像学会 2003 年度シンポジウム．2003, p.40-46.

プリンタ用有機感光体

寺崎　成史（てらさき　せいし）　池田　豊（いけだ　ゆたか）　小日向 俊紀（おびなた　としき）

1　まえがき

インターネットの普及やモバイルツールの発展に伴い，OA 機器を取り巻くオフィス環境は大きく変化してきている。これに対応して，装置メーカーはハードウェア単体を売るのではなく，顧客に必要な環境やソフトウェアをシステム化して提供する方向に変化してきている。言い換えると，オフィスワークフローをいかに効率的にするかを競う時代となってきている。

上記システムの出力機器としてのプリンタの市場動向は，本特集号の別稿「感光体の現状と展望」（282 ～ 285 ページ）に記されているとおり，モノクロプリンタが高速機分野へ移行し全体の物量は微減傾向である一方，本体価格やランニングコストの低下によりようやく普及し始めたカラープリンタが大きく伸長することが予測されている。

このような市場動向に伴い，プリンタの主要部品である感光体に要求される機能・品質は年々高度なものとなっている。富士電機ではこれらの要望に応えるために，各種ニーズに適した負帯電型有機感光体（OPC：Organic Photoconductor）および正帯電型 OPC を開発・製造している。

本稿では，ファクシミリ，プロッタ，複合機（MFP：Multifunction Peripheral）を含む負帯電型 OPC 製品の概要とその特長について紹介する。

2　製品の概要

負帯電型 OPC の層構成は**図 1** に示すように，アルミニウム製の導電性基体上に正電荷のブロッキングおよび露光光の干渉防止を目的とした，樹脂層からなる下引き層（UCL：Under Coat Layer）の上に，電荷発生層（CGL：Charge Generation Layer）および電荷輸送層（CTL：Charge Transport Layer）を順次積層した機能分離型構造をなす。

CGL は電荷発生材料（CGM：Charge Generation Material）と樹脂バインダとから構成され，レーザや LED（Light Emitting Diode）などの露光光により電荷発生機能を有する。また，CTL は電荷輸送材料（CTM：Charge Transport Material）と樹脂バインダとで構成され，CGL で発生した電荷を CTL 表面まで輸送する機能を有する。

富士電機ではさまざまな露光光量に対応できるよう，CGM の特性に対応して低感度・中感度・高感度の 3 タイプの製品系列を有している。5 種の CGL 材料および膜厚制御を行うことにより，**表 1** に示すとおり－100 V 到達露光感度で 0.20 ～ 1.50 μJ/cm² という広範囲の感度調整が可能である。

図 2 に低感度・中感度・高感度タイプおのおのの代表的な分光感度特性を示す。いずれのタイプも 600 nm から 800 nm までの波長領域でほぼ一様な感度を有しており，一般的なレーザや LED 光源に適合する特性を有している。

図 1　負帯電型 OPC の層構成

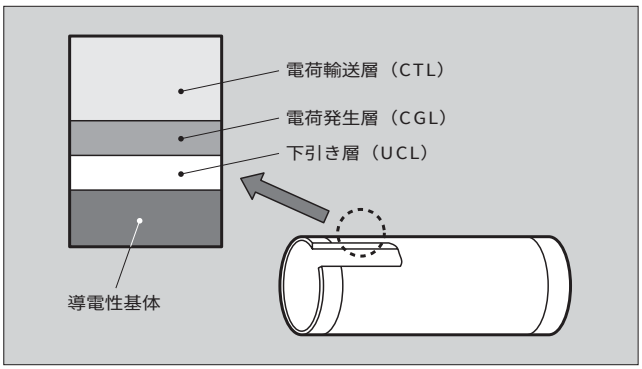


表 1　製品の概要

呼　称	区　分	感　度（－100 V到達露光量）
8A（低感度タイプ）	8A-02	0.80～1.50 μJ/cm²
	8A-15	0.70～1.20 μJ/cm²
8B（中感度タイプ）	8B-16	0.50～0.80 μJ/cm²
	8B-10	0.40～0.60 μJ/cm²
8C（高感度タイプ）	8C-03	0.20～0.40 μJ/cm²

〈注〉感度は－600 Vから－100 Vに減衰するのに必要な露光量を示す。

寺崎　成史

有機感光体の開発・設計に従事。現在，富士電機画像デバイス(株)第一開発部課長。日本化学会会員。

池田　豊

有機感光体および現像スリーブの開発・設計に従事。現在，富士電機画像デバイス(株)第一開発部。日本画像学会会員。

小日向 俊紀

有機感光体の開発・設計に従事。現在，富士電機画像デバイス(株)第一開発部。

これらの CGL と，**図 3** に示す各種 CTM とを組み合わせることにより，20 枚/分以下の低速機から 40 枚/分以上の高速機までさまざまなプロセスに適合する OPC の供給を可能としている。

形状については，**図 4** に示すとおり外径 24 mm から 262 mm まで，長さ 236 mm から 980 mm まで対応可能であり，A4 ページプリンタから A0 プロッタまで幅広く製品展開を行っている。

図２　分光感度特性

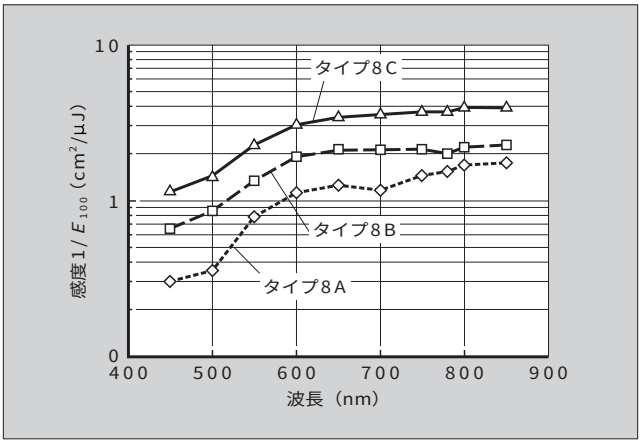


図３　電荷輸送材料の移動度とイオン化ポテンシャル

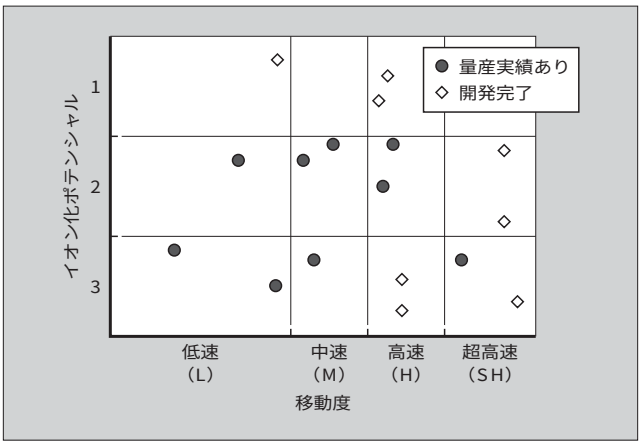
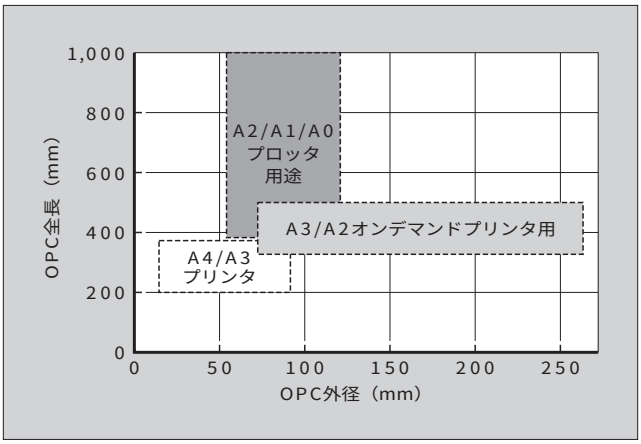


図４　OPC 量産可能形状



3　製品の特長

電子写真方式のプリンタやファクシミリ用の OPC は小型化，カラー化，高速化，メンテナンスフリー化という四つの要求特性に適合する性能を有することが必要である。具体的には**図 5** に示すような技術課題に分類される。以下，それぞれの項目について製品の特長を記載する。

3.1　高速応答性

直径 24 mm の OPC で A4 縦 30 枚/分以上の高速機に適合させるためには，プロセス配置にもよるが露光ー現像間時間が 60 ms 以下の領域まで一様な光応答性が必要となる。これに対応して，富士電機では 2×10^{-5} cm²/V·s という高速対応の CTM を実用化している。さらに，将来的な高速化対応として 6×10^{-5} cm²/V·s という高移動度を有する材料開発も完了している。

図 6 に代表的な CGL と CTL との組合せにおける明部電位の露光ー現像間時間依存性を示す。CTM のキャリヤ移動度中速品（M）では露光ー現像間時間が 80 ms まで，高速品（H）では露光ー現像間時間が 60 ms までほぼ一様となっており，前記プロセスに十分対応可能な特性を有している。さらに，量産実績はまだないものの超高速品（SH）を使用した場合には露光ー現像間時間が 40 ms まで実用可

図５　OPC 要求特性と技術課題

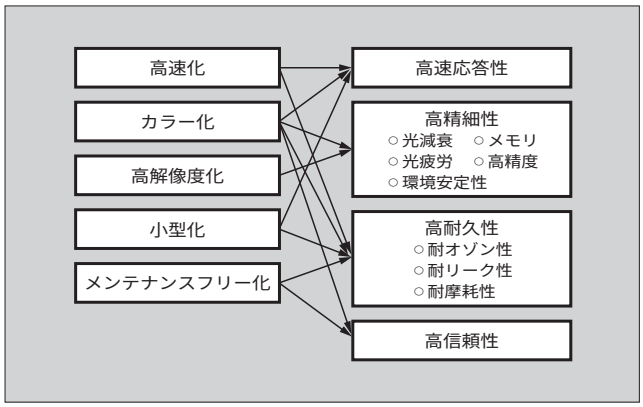
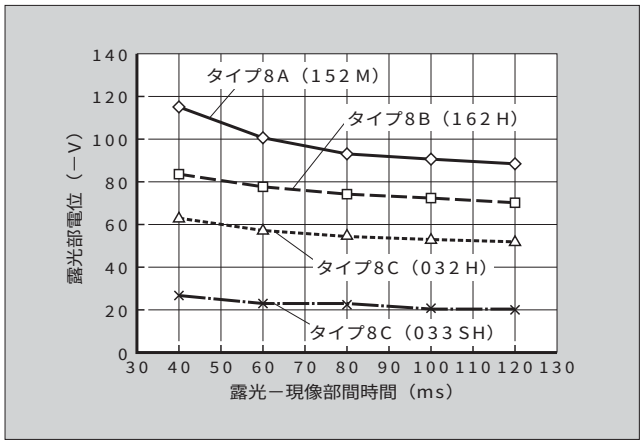


図６　光応答性



能な特性を有している。

3.2　高精細性

(1)　光減衰特性

コピー機能を有するMFPでは，ディジタル普通紙複写機（PPC）用OPCと同様，ハーフトーンの濃度階調再現性が要求される。また，プリンタにおいてもカラーあるいは1,200 dpi（ドット/インチ）以上への高解像度モノクロプリンタについては，トナーの微細化やレーザビーム発光の細かな制御が行われるなど周辺プロセスの高度化が進んでおり，従来以上にグラフィック画質向上が望まれている。富士電機では，各種マシンプロセスに最適な光減衰特性を有するOPCの開発・製品化を行っている。

図7に富士電機製OPCのタイプ別光減衰特性の一例を示す。本特性はCGLからCTLへの電荷注入性に大きく依存するため，CGLとCTLとの組合せにより調整することが可能である。

図8に光減衰特性を変更したOPCの印字例を示す。600 dpi 1ドット再現性，同じく1ドットライン白抜き細線再現性を向上させることが可能となっている。

(2)　ハーフトーン電位均一性

負帯電OPCは反転現像方式にて使用されるため，転写部にて帯電部と逆極性の正電荷がドラムに印加されることになる。この正電荷が励起すると，次帯電工程にて表面の負電荷を打ち消してしまい，部分的に電位差が発生しハーフトーン画像上に濃淡差となって現れることがある（転写メモリ）。

別の現象で，UCL/CGL/CTL各層の接合状態の差により連続露光した部分の残留電位が上昇し，非露光部との電位差が発生し同様にハーフトーン画像上に濃淡差となって現れることがある（サイクルアップ）。

プリンタの高画質化が進むにつれ，OPC表面の微小な電位差が印字濃淡差として画像に再現されやすくなってきており，上記外的因子に対して影響を受け難いOPCが望まれている。富士電機ではUCL/CGL/CTL各機能層に使用される材料の新規開発および最適化を図ることにより電位差の低減を図っている。

(3)　光疲労抑制

プリンタは複写機と異なり，OPCを含めた消耗部品をユニット化してユーザーが交換するシステムが一般的である。これらの交換のタイミングあるいは紙詰まりの際にOPCが室内灯や太陽光にさらされる可能性があるため，このような光暴露の影響が少ないOPCが求められている。

富士電機ではCGLおよびCTLを適切に組み合わせることにより，**図9**に示すような蛍光灯などの室内光にさら

図7　光減衰特性

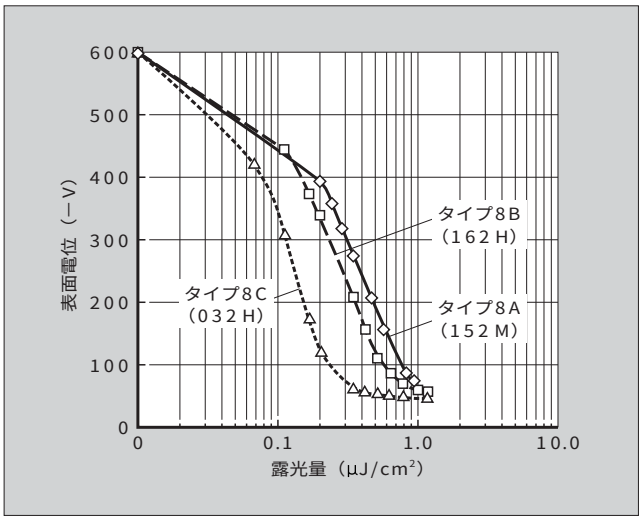


図8　OPCの印字例

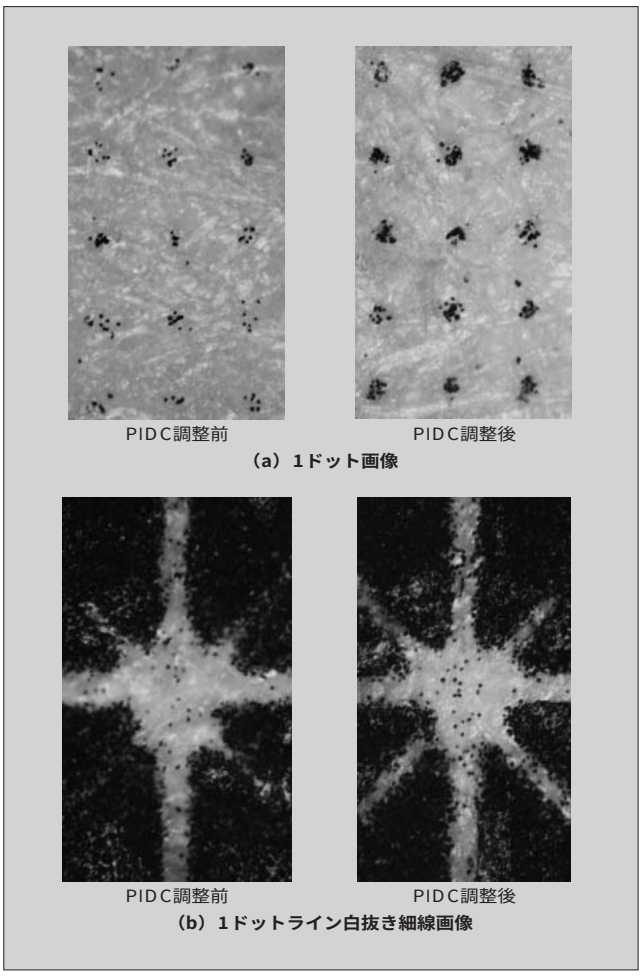
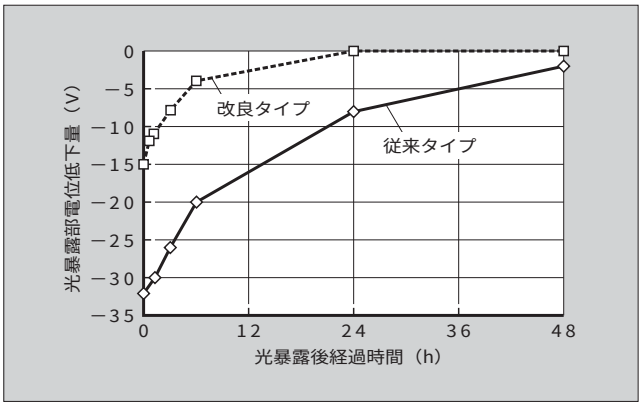


図9　強光疲労特性



されても画質への影響が少ない OPC を実用化している。

(4)　高寸法精度

カラープリンタには 1 本の OPC と転写ドラムあるいは転写ベルトを用い，転写体に 4 色を重ね合わせる 4 サイクル方式と，4 本の OPC を用い用紙に直接 4 色を重ね合わせるタンデム方式のカラー電子写真プロセス（290 ページの「解説」参照）がある。いずれの方式も，色ずれ防止のためモノクロプリンタと比較して高い寸法精度が要求される。富士電機では，4 サイクル，タンデムいずれの方式にも適用可能な振れ精度 50 μm 以下，真直度 20 μm 以下の OPC 用素管および樹脂フランジの供給体制を備えている。

(5)　環境安定性

初期画質を維持するためには，環境の変化や耐刷による特性変化の少ない OPC が望ましい。

直径 24 mm の OPC を搭載する市販の接触帯電方式のレーザプリンタにて，常温常湿環境（N/N），低温低湿環境（L/L），高温高湿環境（H/H）にてそれぞれ A4 縦送り 1 万枚の耐刷を行い，2,000 枚ごとに電位測定したデータを**図10**に示す。他社陽極酸化皮膜（ALM：アルマイト）製 OPC と比較していずれの環境においても大きな電位変化は認められず良好な特性を有している。

3.3　高耐久性

(1)　酸性ガス耐性

ページプリンタやパーソナル分野の MFP は帯電方式として，ローラやブラシなどの接触帯電方式が主流となっている。スコロトロン方式による帯電と比較するとオゾン発生量は大幅に低減されているが，クリーニングレスプロセスなど膜摩耗のほとんどないプロセスに使用される場合においては，摩耗による最表面の更新が期待できないことから，接触帯電プロセスであっても耐ガス性能が必要とされる。また，大型のプリンタやプロッタではまだスコロトロン方式による帯電が一般的であり，やはりオゾンなどの酸性ガスに対する耐性が求められている。

OPC にはさまざまな酸化防止剤が用いられているが，通常，添加量を多くすると酸性ガス耐性は向上する一方，残留電位の上昇など電気特性に悪影響を及ぼす。富士電機では劣化の少ない CTM，酸化防止剤，樹脂バインダなど各種材料技術を駆使して酸性ガス耐性を確保している。OPC の一部を 10 ppm のオゾン雰囲気に 2 時間さらし，その後 1 時間暗中に放置した後の明部電位波形を**図11**に示す。従来タイプはオゾン暴露により 12 V 程度電位上昇する一方，改良タイプは 1 V 程度の上昇にとどまっていることが分かる。

(2)　耐リーク性

中低速分野のプリンタ，MFP は接触帯電方式が主流となっており，非接触帯電方式であるスコロトロン帯電と比較して耐リーク性が強く求められている。富士電機では，1995 年に干渉抑制機能を兼ね備えた第三世代の UCL を市場投入以来，耐リーク性および環境特性向上を目指し開発を進めてきている。**図12**に耐リーク性および環境特性の開

図 10　環境耐刷時電位安定性

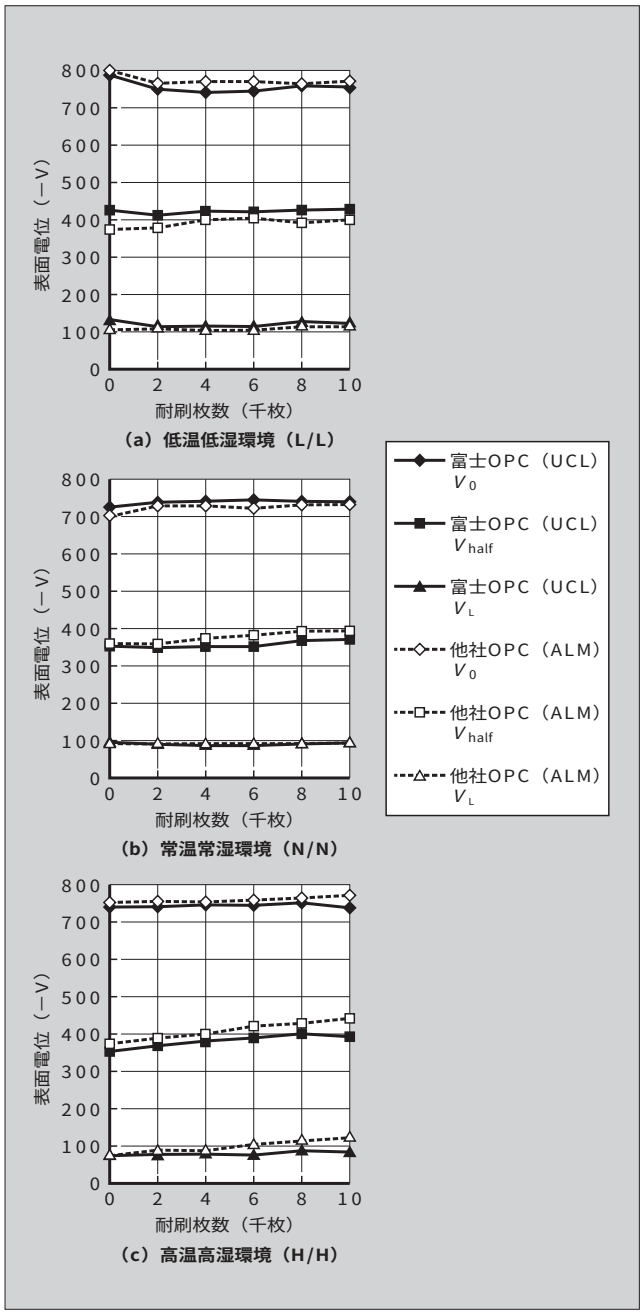


図 11　オゾン暴露部明部電位波形

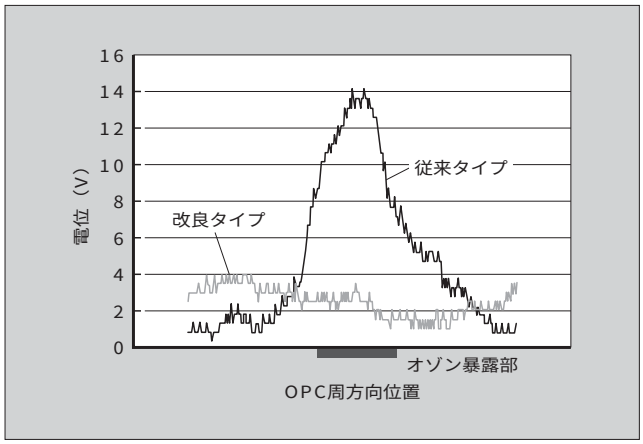
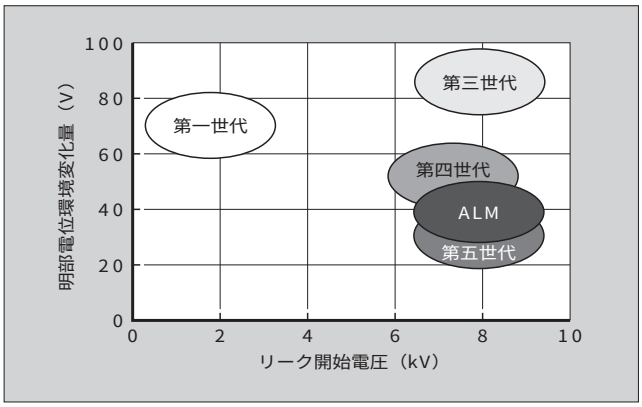


図12　UCL開発動向



発動向を示す。現在開発中の第五世代UCLについては，陽極酸化皮膜（ALM）と同等の耐リーク性を有し，かつ環境安定性に優れた性能を有している。

(3)　耐摩耗性，感光体表面物性

OPCの寿命は現像系や紙，クリーニングブレードなどの接触部材による摩耗，印字障害となるようなきず，トナーや紙粉などのOPC表面への付着（フィルミング）などによって決まる。OPCに対しては当接部材やプロセス設計と適合させるべく低摩耗，高硬度，低フィルミングなどの性能が求められる。

富士電機では耐摩耗性に優れた樹脂および潤滑性を有する樹脂の独自開発を行っており，プロセスに併せて適切な配合を行うことにより，各種プロセスに最適なOPCを提供している。

3.4　高信頼性

OPCは，さまざまな環境下で安定した特性を維持することが望まれている。また，外的なストレスに対してできるだけ劣化の少ない，高い信頼性を有することが望まれている。

富士電機では，材料開発段階から独自の検査項目を設定して開発を進めており，さらに製品ごとに長期保管特性を含めた信頼性評価を実施している。

4　あとがき

電子写真方式のプリンタは今後ますます高速化・多機能化・高品質化が進んでいき，感光体に要求される性能もより高度化していくものと考えられる。富士電機は今後も市場ニーズにマッチしたOPCの開発・製品化を推進していく。また，OPCで培った高い加工技術と表面加工技術を生かしたカラー用の非磁性1成分現像方式に好適な現像スリーブやカートリッジなど，周辺部材まで含めた一貫した開発製造を推進し，環境にも配慮した特長ある製品を提供していく所存である。

参考文献

(1)　寺崎成史ほか．プリンタ用有機感光体．富士時報．vol.75, no.3, 2002, p.182−185.

解　説　カラー電子写真プロセス

電子写真方式のカラープリンタ・複写機はシアン（青），マゼンタ（赤），イエローおよびブラックの4色のトナーを媒体に順次あるいは同時に転写するプロセスにより達成される。この色重ねの方法については，1本の感光体を用いて4回繰り返し色重ねをする4サイクル方式と各色専用の感光体を並列させるタンデム方式がある。さらに，中間転写体を用い，いったん色重ねをした後用紙に転写するものと，用紙に直接色重ねを行うものがある。

4サイクル方式はカラー画像を得るために4回の現象プロセスを経る必要があることから，高速化という観点ではタンデム方式と比較して不利であるが，タンデム方式よりプロセスが簡素化できることから，装置の大きさやコストにおいて有利な面があり，用途に応じて選択されている。

いずれの方式も，4色のトナーを重ね合わせることから，数十μm以下に色ずれを抑える必要があり，モノクロプリンタと比較して高い寸法精度が必要とされている。

ディジタル複写機用有機感光体

篠崎　美調（しのざき　みちょう）　　**宮本　貴仁**（みやもと　たかひと）

1　まえがき

近年のディジタル化の波に乗って，複写機市場においてもディジタル式製品が伸長している。ディジタル化に伴う複写機の技術的動向として，従来のアナログ式に対し，より一層の高速度化，高画質化，動作安定化，低価格化，さらにはカラー化が指向されている。これに対応するため，感光体は感度特性，耐刷性，環境安定性，信頼性などの改善がなされている。

富士電機は，複写機用の有機感光体（OPC：Organic Photoconductor）としてアナログ式にはタイプ9系を，ディジタル式にはタイプ10系を適用している。本稿では，ディジタル複写機用タイプ10系OPCの概要を紹介する。

2　製品の概要

OPCを使用した複写機は，その複写スピードで低速機（～20枚/分），中速機（20～50枚/分），高速機（50枚/分～）に大別できる。富士電機はこれらのディジタル複写機に対応可能なOPCを3タイプ（10A，10B，10C）に分けて開発している。これらの代表的な特性を**表1**に示す。適用感度帯は各タイプで異なり，顧客の要求に応じ，自由に選択することができる。

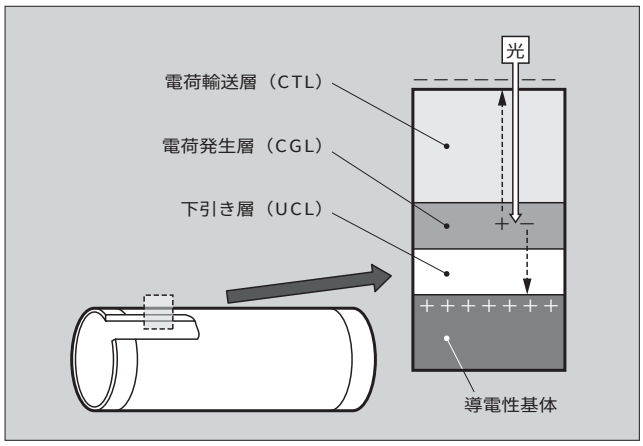
OPCの概略構造・動作原理を**図1**に示す。アルミニウムなどの円筒状導電性基体に下引き層（UCL：Under Coat Layer）を塗布し，次に電荷発生層（CGL：Charge Generation Layer）を塗布し，最表面に電荷輸送層（CTL：Charge Transport Layer）を塗布した機能分離型積層OPCである。

ディジタル複写機用OPCにはプリンタ用OPC（タイプ8系）に使用している材料を共用することが可能であり，タイプ8系で培ってきた技術をベースにしてタイプ10系に応用している。

表1　代表的な特性

タイプ	適用感度帯半減衰露光量（μJ/cm²）	半減衰露光量（μJ/cm²）	暗中帯電保持率〔5秒後〕（%）	残留電位（－V）	印字速度適用領域（枚/分）
10A（低感度）	0.20～0.60	0.37	97.5	52	～40
10B（中感度）	0.12～0.24	0.17	95.8	21	20～60
10C（高感度）	0.06～0.14	0.07	96.1	6	40～

図1　ディジタル複写機用OPCの層構成と動作原理



3　製品の特長

アナログ式からディジタル式への移行に伴い，複写機の高速度化，高画質化，高信頼性化が進んでいる。その中でOPCに求められる特性も多種多様に分岐し，かつ高度化しており，おのおのの要求特性に応えるための材料開発が進められている。

富士電機の複写機用OPCは，低・中速機から高速機に至るまで搭載可能であり，次のような特長を備えている。

(1)　高感度

(2)　高応答性

篠崎　美調

複写機・プリンタ用有機感光体の開発・設計に従事。現在，富士電機画像デバイス(株)第二開発部課長。

宮本　貴仁

有機感光体の開発・設計に従事。現在，富士電機画像デバイス(株)第二開発部。

(3)　高耐刷性
(4)　高環境安定性
(5)　高信頼性

3.1　高感度

ディジタル複写機は露光光源としてレーザやLED（Light Emitting Diode）を使用しているため，OPCとして600～800 nmの波長域で感度を有することが要求される。富士電機はこの波長領域で良好な感度特性を示すフタロシアニン顔料を採用している。**図2**に低感度タイプ10A，中感度タイプ10B，そして高感度タイプ10Cの分光感度を示す。

図3には，光減衰特性を示す。高感度タイプ10Cはタイプ10A，10Bと比較して，それぞれ50 %，30 %程度高感度になっている。また，各タイプとも残留電位近傍での立上り，裾（すそ）切れがよく，ディジタル複写機のプロセス設計上有利である。

3.2　高応答性

ディジタル複写機は，SOHO（Small Office Home Office）・パーソナル用途の低速機からオフィス・業務用途の高速機まで幅広くラインアップされている。その中で，特にオンデマンド印刷市場やPOP（Point of Purchase）広告分野などをターゲットにした100枚機を超す超高速機においては，OPCに対しより高い応答性が求められている。

応答性を向上させるためには材料の移動度，各材料間のイオン化ポテンシャルの整合，そして純度がポイントとなる。そこで，高応答性を実現するために，高移動度電荷輸送材料（CTM：Charge Transport Material）の研究に取り組み，移動度7×10^{-5} V·s/cm^{2}と従来品の10倍以上の性能を持つ高移動度CTMの開発を行った。**図4**に露光後電位の露光ー現像間時間依存性を，**図5**に複写機搭載時の現像特性を示す。高移動度CTMを適用した高応答性品は，露光ー現像間時間が0.05秒まで安定している。これは，OPCの外径30 mmでは45枚/分以上，外径100 mmでは105枚/分以上の高速プロセスにも十分対応するものである。また画像濃度（黒濃度）も従来品と比較して，再現性が高くなっている。

3.3　高耐刷性

ディジタル複写機用OPCは，複写機の使用頻度や，メ

図2　分光感度特性

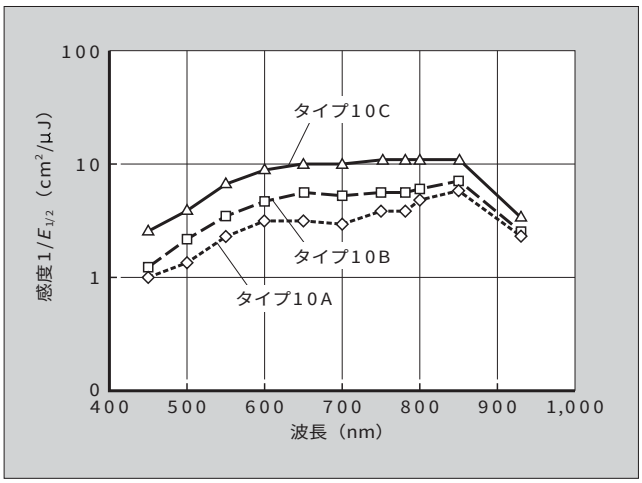


図3　光減衰特性

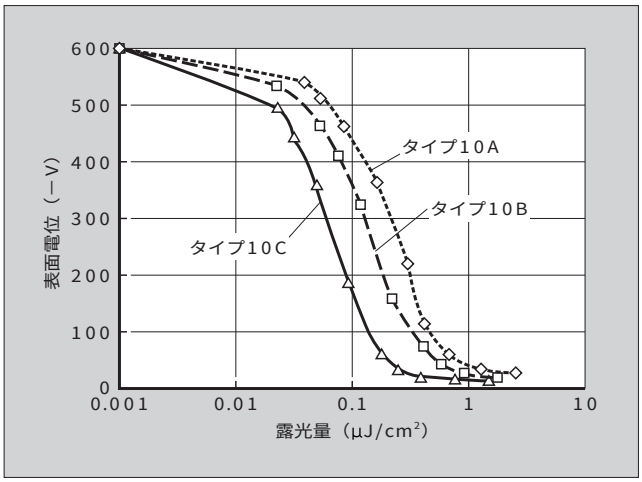


図4　露光ー現像間時間依存性（露光後電位）

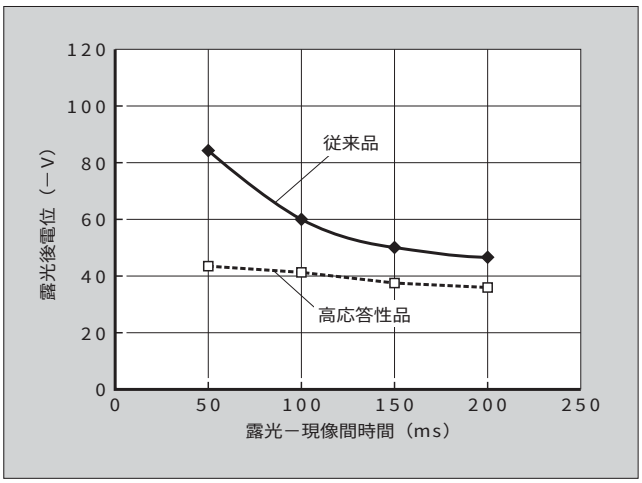
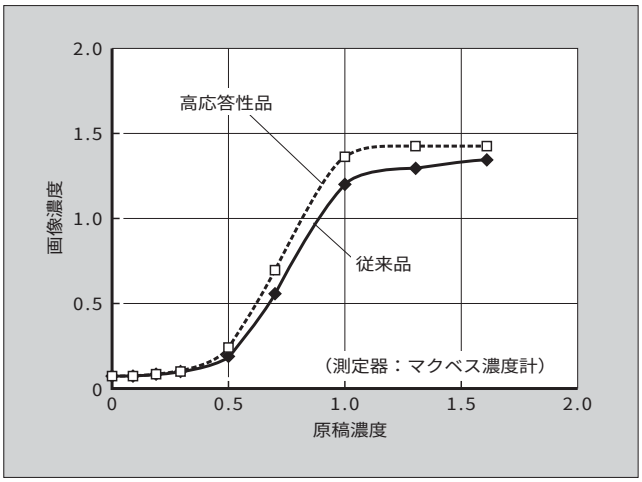


図5　現像特性



ンテナンス簡略化の観点から，プリンタ用 OPC に対して約 2 ～ 10 倍の高耐刷特性が要求されており，OPC の電気的特性と機械的特性の改善により実現している。

(1)　電気特性の改善

OPC は，帯電工程でコロナ放電によって発生するオゾンや，露光工程での光に繰り返し暴露されると，機能材料が化学的変質を起こす。これにより，帯電位低下あるいは残留電位上昇といった電気特性の劣化を引き起こし，白紙かぶり，濃度低下などの原因となる。帯電位低下および残留電位上昇を抑制するために，感光層中に発生する電気的欠陥を抑制する独自の電荷制御剤を開発し，各層間におけるイオン化ポテンシャルの整合性を確保することで，さまざまなマシンプロセスにおいても安定的に動作する OPC を提供している。

図 6，**図 7** に，高耐刷（OPC 保証寿命 46 万枚）が要求されるディジタル複写機で評価した際の表面電位の推移を示す。従来品と比較して電気特性改良品は，電位変動が少なく，すなわち画質変化が少ない動作安定性に優れた OPC を実現している。

(2)　機械特性の改善

OPC は，帯電ローラ，トナー，紙，転写ローラ，クリーニングブレードなどとの接触により，感光層の摩耗やきず，トナーや紙粉の異物付着などの物理的・機械的特性の劣化が生じる。これらはマシンプロセスによって発生の程度は異なるが，CTL 中の成分であるバインダの性能に大きく依存している。短期間でバインダの性能評価ができる耐刷試験機を導入し，加速評価を進め，バインダの性能を大きく向上させることに成功した。

CTL 中のバインダに高分子構造であり潤滑性にも優れた材料を採用し，膜硬度を向上させながらクリーニングブレードとの摩擦係数を低減することが可能となった。**図 8** に機械特性（ビッカース硬度，OPC の回転トルク，純水との接触角），**図 9** にディジタル複写機での感光層摩耗の改善例を示す。他の接触部材との摩擦を低減させることで，感光層の摩耗やきずを改善し，OPC の寿命を約 50 %向上させることができた。また，環境対策として，感光体寿命を向上させることで，OPC の廃棄量の削減にも取り組んでいる。

図 6　耐刷特性（帯電位）

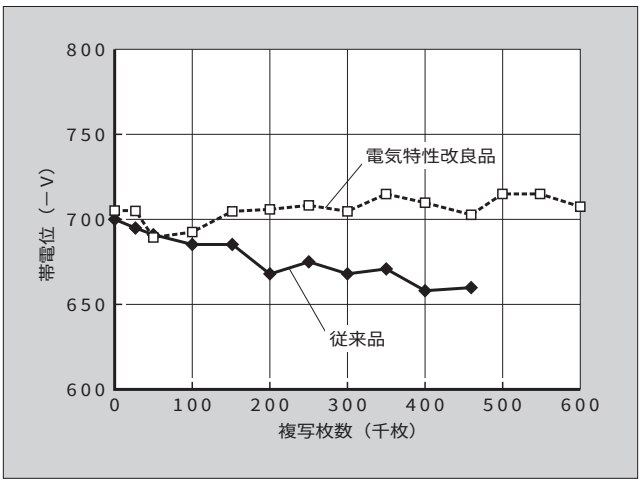


図 7　耐刷特性（露光後電位）

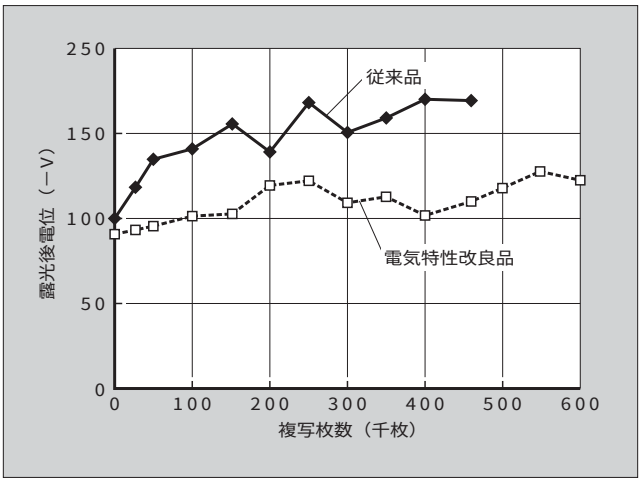


図 8　機械特性

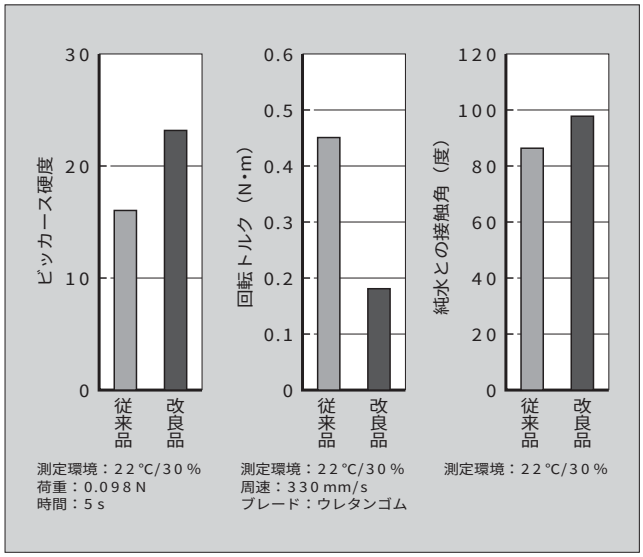


図 9　耐刷特性（摩耗量）

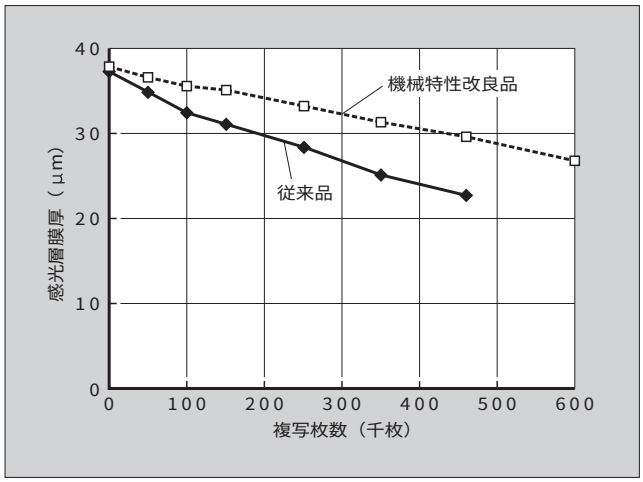


図10　環境電位特性

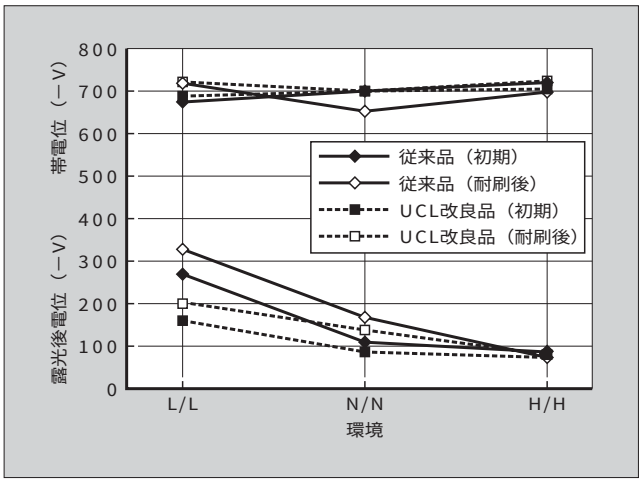


表2　信頼性試験

項　目	条　件
耐オゾン試験	100 ppm，2 h
強光疲労試験	1,000 lx，5 min
高温放置試験	45 ℃，1,000 h
高湿放置試験	40 ℃，90 %RH，1,000 h
低温放置試験	－20 ℃，1,000 h
温湿度サイクル試験（5サイクル）	20 ℃，1 h →常温常湿，0.5 h →45 ℃，1 h →常温常湿，0.5 h －20 ℃，1 h

3.4　高環境安定性

複写機のさまざまな環境での使用に対応するため，OPCの環境安定性が望まれている。

富士電機では，UCLのフィラーとバインダを最適化し，環境による体積抵抗率変動を抑制することで，常温常湿（N/N），低温低湿（L/L），高温高湿（H/H）環境下でOPCの安定性を確保している。**図10**に初期および60万枚耐刷後における電位測定データを示す。いずれの環境においても変動量は小さく，良好な特性を有している。

3.5　高信頼性

OPCの信頼性として**表2**に示す信頼性試験を行っている。耐オゾン試験は複写機中でのコロナ放電で発生するオゾン雰囲気を想定した試験であり，試験結果を**表3**に示す。オゾン濃度100 ppm，2時間暴露後においても諸特性にほとんど影響がない。また，強光疲労試験はメンテナンス時にOPCが光にさらされる場合を想定したもので，試験結果を**表4**に示す。照度1,000 lxの蛍光灯に5分間さらされても諸特性は安定している。

表3　耐オゾン特性（タイプ10C）

測定時	半減衰露光量 (μJ/cm²)	暗中帯電保持率〔5秒後〕(%)	残留電位 (－V)
暴露前	0.07	96.0	6
暴露直後	0.07	94.4	10
暴露24時間後	0.07	95.2	8

表4　強光疲労特性（タイプ10C）

測定時	帯電位（－V）
暴露前	610
暴露直後	585
暴露1時間後	590
暴露24時間後	607

4　あとがき

複写機市場においては，近年中に，ほとんどの設置マシンがアナログ式からディジタル式に置き換わると予測されている。ディジタル化により，1台でプリンタ機能，コピー機能，ファクシミリ機能を持ち合わせたマルチファンクション化が進み，低・中速機の分野ではプリンタと複写機の垣根はなくなりつつある。しかしながら高速機の分野では，プリンタの2～10倍の動作安定性が求められている。富士電機は，市場のニーズに合わせて，要求特性を的確に把握し，魅力あるOPCの開発を進めていく所存である。

参考文献

(1)　篠崎美調．ディジタル複写機用有機感光体．富士時報．vol.75, no.3, 2002, p.186–189.

正帯電型有機感光体

中村　洋一（なかむら　よういち）　面川　真一（おもかわ　しんいち）　竹嶋　基浩（たけしま　もとひろ）

1　まえがき

近年，プリンタ，複写機，ファクシミリなどの感光体応用機器は，ディジタル化・カラー化・ネットワーク化の進展に伴い，企業向け・個人向けともカラー・高解像度といった従来に比べて情報量が多い原稿・データの取扱いが増加している。

このような市場動向に伴い，感光体にはさらなる高感度高速化・高解像度化・高安定化とともに小型化・低価格化も要求されている。富士電機ではこれらの要求に応えるため，種々の特徴ある有機感光体（OPC：Organic Photoconductor）を製品化してきている。

本稿では，これらの要求に応える製品例として，富士電機独自の化学技術・感光体技術により製品化した正帯電型OPCの概要と特徴について紹介する。

2　正帯電型OPCとは

OPCは感光体表面の電位差を利用して画像を形成するが，原理的には電位は正極性・負極性いずれでも差し支えない。

画像形成電位が正極性であるOPCを正帯電型OPCと呼び，次のような特徴を持つ。

① 電荷発生機能と電荷輸送機能を一つの感光層に持たせる単層構造に設計できる。

② 単層構造により露光光吸収とそれに続く電荷発生がOPC表面近傍で起こるため，露光光や電荷の散乱・拡散が少なく，より高解像度にできる。

③ 単層構造によりOPCの製造工程を削減できるため，より低価格にできる。

④ 正帯電は負帯電に比べて帯電時のオゾン発生量が少なくオゾン対策負担が軽くなるため，OPC応用機器をより小型・低価格にできる。

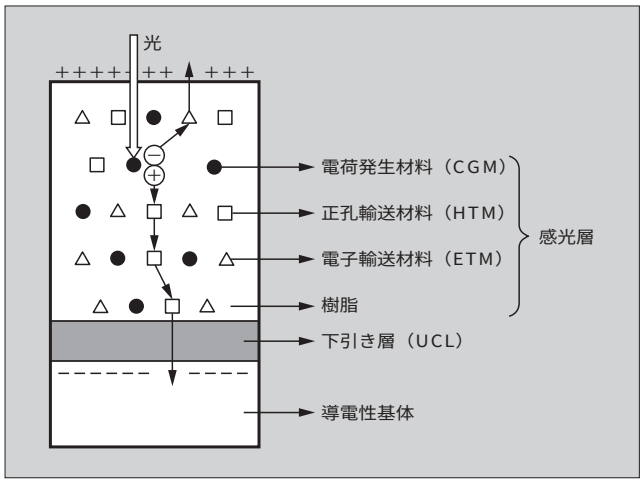
⑤ 帯電時のオゾン発生量が少なくOPCの劣化が少なくなるため，より高安定にできる。

一方で正帯電用の電荷輸送材料（CTM：Charge Transport Material）設計は，負帯電用に比べて要求特性が得られにくく難しい。富士電機では独自の計算化学技術・有機合成化学技術により正帯電用CTMを開発し，感光体技術と組み合わせて正帯電型OPCを製品化している。

図1に単層正帯電型OPCの層構成と動作原理を示す。アルミニウム管などの導電性基体上に，樹脂などからなる下引き層（UCL：Under Coat Layer）を設け，電荷発生材料（CGM：Charge Generation Material），CTMの一種である正孔輸送材料（HTM：Hole Transport Material），電子輸送材料（ETM：Electron Transport Material），樹脂などからなる単層感光層を形成した構造である。

感光層表面を正極性に帯電させたのち露光すると，CGMで正負両電荷が発生し，正電荷はHTM間を移動してUCLを通り基板に到達する。一方，負電荷はETM間を移動して感光層表面に到達する。これにより感光層表面正電荷が中和され周囲表面との電位差により静電潜像が形成される。この後トナーによる潜像の可視化とトナーの紙への転写・定着を経てプリントが完成する。

図1　単層正帯電型OPCの層構成と材料



中村　洋一

有機電子材料の開発および有機感光体の開発に従事。現在，富士電機画像デバイス(株)材料技術部課長。日本化学会会員。

面川　真一

有機機能材料の開発および有機感光体材料の開発に従事。現在，富士電機画像デバイス(株)材料技術部。

竹嶋　基浩

有機感光体材料の開発に従事。現在，富士電機画像デバイス(株)材料技術部。応用物理学会会員。

3　製品概要

表1に富士電機の単層正帯電型OPCの製品系列を示す。タイプ11Aから11Dまでの4系列により，低速（12枚/分以下）から高速（30枚/分以上）までのOPC応用機器に適用できる。特にタイプ11Dは近年の高感度高速化機器に適用できる。

また，寸法面でも，OPC外径24 mmの小型機種から262 mmの大型機種まで適用できる。

これらの単層正帯電型OPCは，OPC特性について次のような特徴を持つ。

① 高解像度・高階調度が得られる。
② 温湿度環境変動時にも安定している。
③ 光・オゾン暴露時にも安定している。
④ 連続使用時にも安定している。
⑤ OPCに接触する部材からの汚染によるクラックや画像欠陥にも強く安定している。

特にタイプ11Dは，以下と**表2**に示すように各機能材料の性能向上により，さらなるOPC特性の向上を図っている。

① UCL：機能材料の親水性や電気抵抗を最適化し，温湿度環境変動時の安定性を高めた。
② CGM：不純物の濃度を抑え，感度を高めた。
③ HTM，ETM：不純物の濃度を抑え解像度を高めた。
④ 樹脂：分子構造・分子量を最適化し，OPC特性を維持しつつ耐クラック性を高めた。

個々の機能材料の性能向上に加えて配合比の最適化も行い，感光層内の電荷移動を円滑にしてメモリなどの画像欠陥も抑えた。

このように正帯電型OPCは従来にも増して適用範囲を広げており，正帯電型OPCの適用により，特にカラープリンタ，高速プリンタ，オンデマンド印刷機などのさらなる性能向上が期待される。

表1　製品の概要

項目／タイプ	特　徴	推奨速度（枚/分）	耐刷寿命（A4間欠，外径30 mm換算）
11A	低速型	～12	2万枚
11B	中速型	10～18	3万枚
11C	中・高速型	12～24	14万枚
11D	高速・高耐刷型	≧30	20万枚（外径120 mmにてA4連続換算 100万枚まで使用可能）

表2　タイプ11Dの特徴と材料の関係

特　徴	材料系の特徴
高感度化	CGM→不純物減による量子効率向上
高速応答化	HTM→不純物減による移動度向上 ETM→不純物減による移動度向上
高強度化	樹脂→クリープ・クラック特性改善→表面硬度向上
高耐圧化	UCL→抵抗改良による耐リーク性向上

4　感光体特性

正帯電型OPC製品の代表的なOPC特性について述べる。

(1) 感度特性

図2，**図3**に分光感度特性と光減衰特性（PIDC：Photo Induced Discharge Characteristic）を示す。いずれの正帯電型OPCも分光感度特性は光波長600 nm以上でほぼ平坦（へいたん）であり，LD（Laser Diode），LED（Light Emitting Diode）などの光源を適用できる。また，半減衰露光量0.15～0.38 μJ/cm² の幅広い範囲の感度を取りそろえているので，低速機から高速機まで適用できる。

(2) 帯電特性

図4に帯電特性を示す。いずれの正帯電型OPCも0 Vから1,000 Vまで直線的に上昇し，高帯電位においてもリークが起きない。また，ローラやブラシなどによる接触帯電方式においても良好な帯電特性が得られる。

(3) 光応答性

図5に光応答性を示す。いずれの正帯電型OPCも露光

図2　分光感度特性

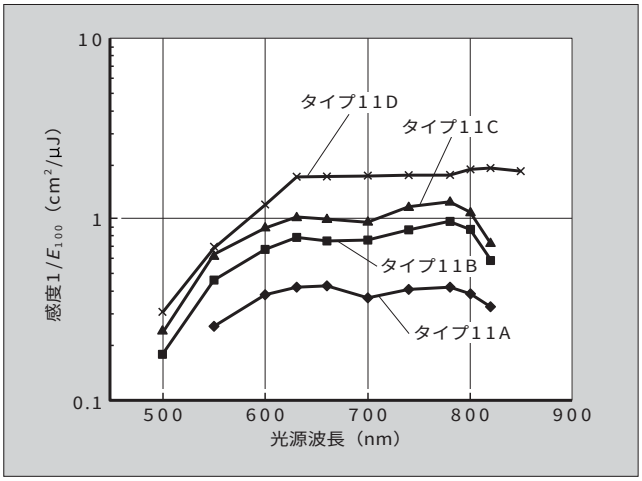


図3　光減衰特性（PIDC）

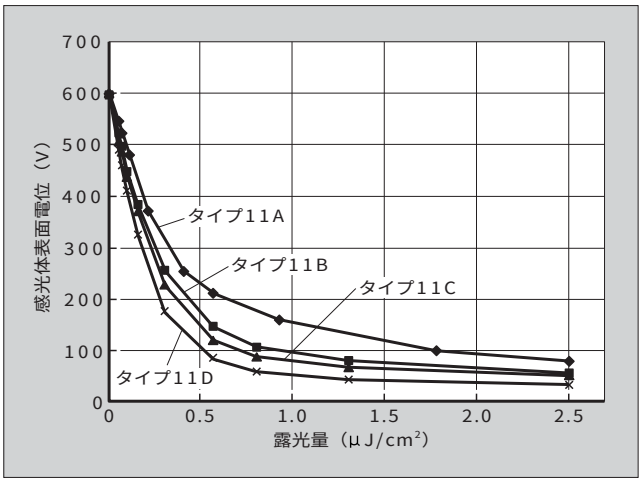


図４　帯電特性

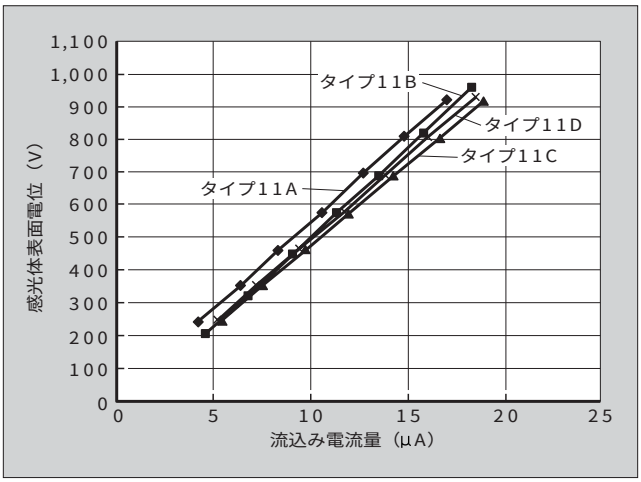


図５　光応答性

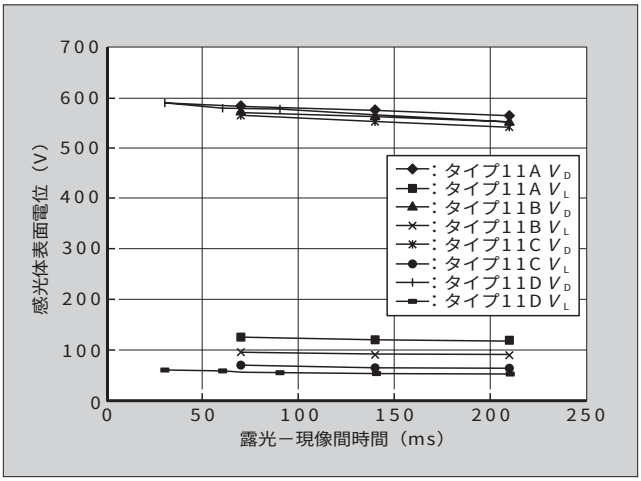


図６　明部電位（V_L）・暗部電位（V_D）の環境特性

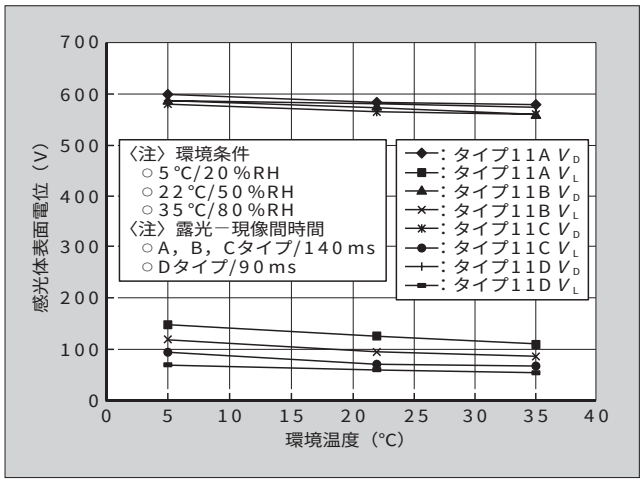
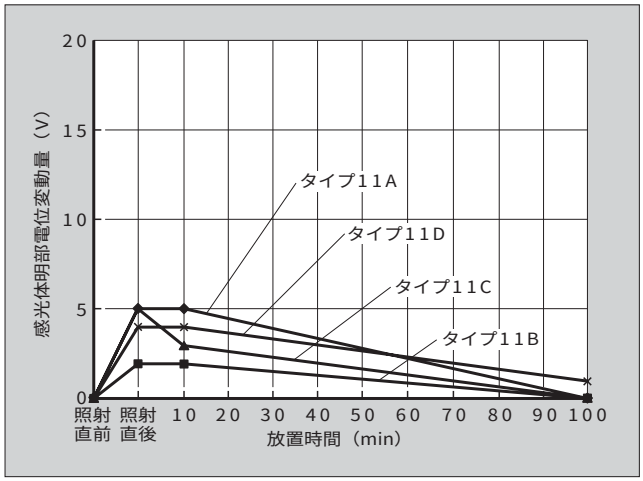


図７　強光疲労特性



後 75 ms まで明部電位は一定の値を示し，露光ー現像間時間 75 ms までの OPC 応用機器に適用できる。

特にタイプ 11D は露光後 30 ms においても明部電位上昇が少なく，より露光ー現像間時間の短い小型高速機に適用できる。

(4)　環境特性

図６に明部電位（V_L），および暗部電位（V_D）の環境特性を示す。いずれの正帯電型 OPC も 5 ℃ 20 % RH ～ 35 ℃ 80 % RH の温湿度範囲で暗部電位・明部電位ともに安定していて，環境変動が小さい。

(5)　強光疲労特性

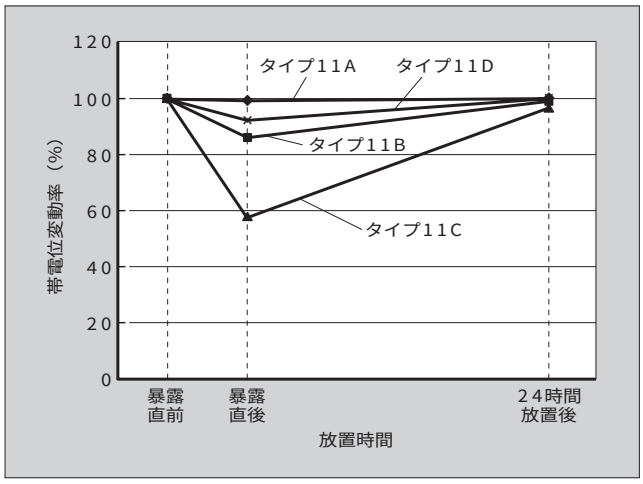
図７に強光疲労特性を示す。いずれの正帯電型 OPC も 1,000 lx 10 分の光照射による暗部電位の変化量は小さく，照射後の時間経過による回復も早い。

(6)　オゾン特性

図８にオゾン暴露後の帯電位変化率を示す。いずれの正帯電型 OPC も 5 ppm 30 分のオゾン暴露直後は一時的に帯電位が低下するが，24 時間の室温放置でいずれも初期の帯電位まで回復する。

特にタイプ 11A と 11D はオゾンに対する耐性が高く，暴露直後の帯電位低下も小さい。

図８　オゾン特性



(7)　耐刷性（タイプ 11D）

図９にタイプ 11D を 2 成分現像方式の OPC 応用機器に搭載して耐刷性評価をした場合の電位変動を示す。タイプ 11D は評価後も明部電位・暗部電位ともに安定でかつ画像欠陥も認められなかった。約 20 万枚の耐刷寿命を実現している。

図９　耐刷性（タイプ 11D）

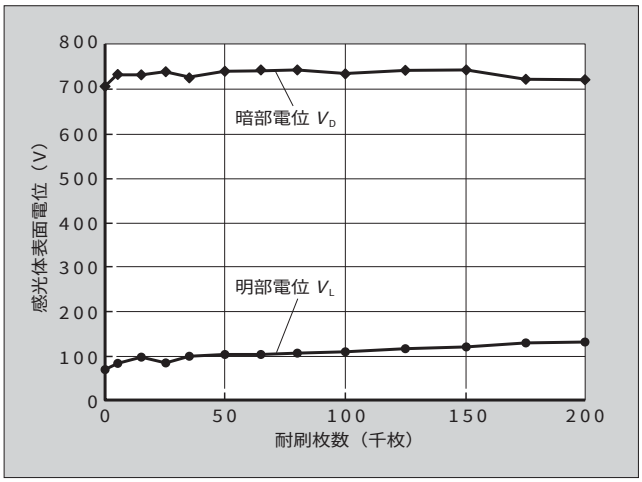


表３　信頼性試験による特性変化

試験項目	試験条件	試験前後特性変動値	
		暗部電位変動率	明部電位変動率
高　温　放　置	45℃下：1,000時間	＜±5％	＜±10％
高温高湿放置	35℃，90％RH下：1,000時間	＜±5％	＜±10％
ヒートサイクル（10サイクル）	－20℃下：1時間→常温常湿下：0.5時間→45℃下：1時間→－20℃下：1時間→常温常湿下：0.5時間	＜±5％	＜±10％
ローラ汚染試験	ローラ材質：NBR/ウレタン/シリコーン 50℃ 90％RH下：250時間	なし	なし
		感光層クラックなし，画像欠陥なし	

(8)　信頼性

表３に各種信頼性試験による特性変化を示す。いずれの試験項目においても暗部電位変動率 5 %以下，明部電位変動率 10 %以下と信頼性が高い。

特にローラ汚染試験については，NBR（アクリロニトリルブタジエンゴム），ウレタン，シリコーンなどからなるローラをそれぞれ感光体に圧接し，50 ℃ 90 % RH の環境下で 250 時間放置しても感光層クラック発生や感光体特性変化を起こさない。

5　あとがき

富士電機では正帯電型 OPC のたゆまない開発を進めてきたが，さらなる高感度・高速な製品系列実現のために，新規有機材料の開発による CGM，CTM の改良を進めている。

また，さらなる高解像度な製品系列実現のために，乾式現像方式に比べてトナー粒径が小さい液体現像方式に適用できる，液体現像方式正帯電型 OPC 材料の開発も進めている。セレン感光体・負帯電型 OPC での液体現像方式適用の実績を活用し，これら技術の蓄積と計算化学技術・有機合成化学技術によりいち早い実現を目指している。

富士電機ではこれらの化学技術・感光体技術などを活用発展させ，カラー・高解像度といった豊かな情報を安定して再現できる正帯電型有機感光体を通じて，より豊かなビジネス・社会に貢献していく所存である。

参考文献

(1)　面川真一ほか．正帯電有機感光体．富士時報．vol.75, no.3, 2002, p.190–193.

1 ドット潜像電位評価技術

会沢　宏一（あいざわ　こういち）　上野　芳弘（うえの　よしひろ）　竹嶋　基浩（たけしま　もとひろ）

1　まえがき

画像情報の出力用デバイスとしてはカラープリンタ，ディジタル複写機が主流であり，インクジェット方式のものと電子写真方式のものに二分されている。今後は，低速低価格領域では家庭用としてインクジェット方式が拡大し，高速領域では電子写真方式が伸長すると予想されている。このうち，電子写真方式への技術的要求の中では印字品質の向上に対するものが強くなっている。印字品質とは，解像度，階調性，濃度などを指すが，その中でも最近は解像度が重要視されている。現在，市販されている電子写真装置の解像度は600 dpi（ドット/インチ）から1,200 dpiあるいは2,400 dpiと多岐にわたっている。今後のカラー化やディジタル化への対応に向けて，さらに解像度を高めることが課題として挙げられる。

これまでにもプリンタ・複写機などの装置メーカー，感光体・トナー・光源などの部材メーカーが解像度向上に向けて，解像度を決定する要因の解析や，帯電・露光・現像・転写・定着という電子写真プロセス，ならびに感光体ドラムに用いられる感光体材料の改善を行ってきた。富士電機でも感光体上に画像情報を再現性よく電気潜像として形成できる高解像度感光体の開発を進めている。しかしながら，電子写真プロセスは複雑であり，印字の解像度の優劣を決定する要因を明確化することは現時点では難しいと考えられている。

また，解像度に大きな影響を与えると考えられる静電潜像の直接的な測定についても提案されているが[(1)]，感光体ドラム上の潜像測定については適切な手段が得られていなかった。

潜像形成に関するシミュレーションは，これまでに岡[(2)]，Watanabe[(3)]，Chen[(4)～(6)]らが試みているが，感光体上の潜像との直接的な対比は行われていなかった。

富士電機は解像度の優劣を決定する要因解析を目的に，MASPP（Micro-Area Surface Potential Probe：微小面積表面電位計）を用いた，1ドット潜像電位を測定する新しい評価装置を開発し，有機感光体（OPC：Organic Photoconductor）の材料，層構成などを変化させた場合に潜像がどのように追従するか検討を行ってきた[(7)～(10)]。

本稿ではMASPPによる潜像測定の原理を詳しく紹介し，特にMASPP信号の解釈と電子写真特性との関連について述べ，今後の電子写真技術の向上の一助としたい。

2　1ドット潜像電位測定装置

2.1　潜像電位測定装置の構成

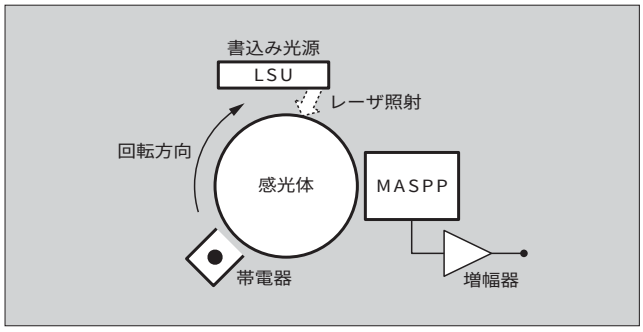
測定装置は，帯電器，ドラム駆動装置，書込み光源，MASPPから構成される（**図1**）。書込み光源は市販プリンタのレーザスキャニングユニット（LSU）を用いている。所望の電位 V_0 に帯電した感光体に対し，感光体の軸方向にLSUによる1ドット幅の線の書込みを行う。その後，MASPPの位置に，書込みを行った領域を移動させ，微小面積電位測定を行う。このとき，微小面積電位測定を感光体の周方向に数十μmの間隔で複数回測定を行うことにより潜像電位プロファイルを取得できる。

2.2　MASPPの仕組み

MASPPの動作原理[(11)]は，感光体の光減衰による表面電荷量の変化を，誘導電流として検出するものである。**図2**にMASPPの概念を示す。

感光体表面に対し平行に，およそ1 mmの間隔に配した透明電極を通して帯電された感光体表面に検知レーザを照

図1　1ドット潜像電位測定装置の構成



会沢　宏一

アモルファスシリコンおよび有機感光体の開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)物質・科学研究所主任研究員。応用物理学会会員，日本画像学会会員，米国画像学会会員。

上野　芳弘

有機感光体の開発に従事。現在，富士電機画像デバイス(株)材料技術部。

竹嶋　基浩

有機感光体用材料の開発に従事。現在，富士電機画像デバイス(株)材料技術部。応用物理学会会員。

射する。検知レーザを照射された感光体は光減衰し，感光体と透明電極で構成された電気容量において，感光体表面電荷の変化に相当した誘導電流が発生する。この誘導電流を増幅器で増幅したものが MASPP から出力される信号である。

図3には測定値と後述するパルス関数による計算値曲線を示す。

検知レーザ照射により，感光体の表面電荷がほとんど中和される条件においては，誘導電流の大きさは検知レーザ照射前の表面電位および感光体の光減衰特性に依存する。この関係から表面電位を逆算することで，検知レーザの照射面積内の表面電位を計測することができる。富士電機では，この検知レーザのビームサイズを直径約 10 μm と小径化することで，微小面積での表面電位の測定を可能とした。

2.3　潜像電位測定

MASPP によるある点の表面電位測定時間は，さまざまな検討の結果から 650 ms に設定している。この条件のもと，潜像を形成した負帯電積層型 OPC の表面を，30 μm ピッチでスキャンして得られた MASPP 信号を**図4**に示す。

スキャンは異なる 55 点の位置に対するものである。この信号から検知レーザ照射による電荷変化量を求めて表面電位に変換すると潜像電位プロファイルを得ることができる。

図2　MASPP の原理

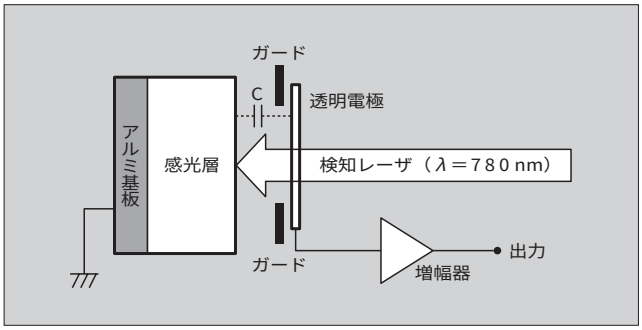


図3　MASPP 出力信号

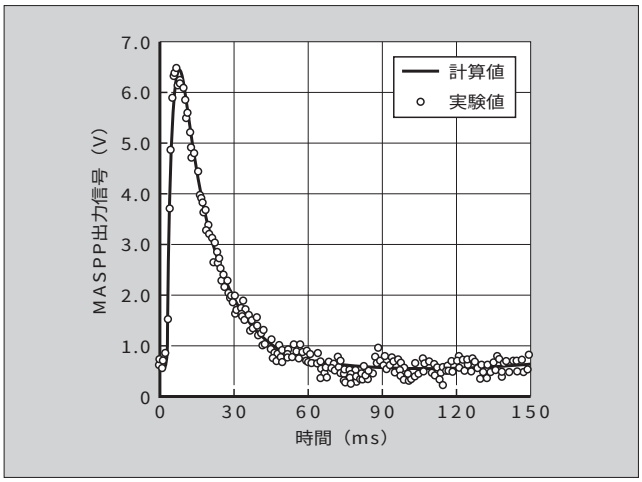


図4では，感光体上の 1 点目から 55 点目までには 35.75 秒の時間が必要となる。感光体には暗減衰があるため，この時間は可能な限り短縮する必要があるが，現状の測定システムでは，検知レーザ光照射による信号取得のために約 200 ms，ドラムの回転による位置の移動に約 100 ms，回転・停止による測定システムの振動が消失するまでに 100 ～ 300 ms の時間が必要であるため，これ以上の測定時間の短縮は現時点では難しい。

2.4　MASPP 出力信号の形状[9]

検知レーザ照射による MASPP 出力信号は検討の結果，式(1)のパルス関数により近似できることが分かった（**図3**）。感光体の層構成，電気特性，帯電極性などに依存せず，信号形状は式(1)により近似することができる。

$$S=S_{bg}+A\left\{1-\exp\left(-\frac{t-t_0}{k_1}\right)\right\}\exp\left(-\frac{t-t_0}{k_2}\right)\cdots\cdots\cdots(1)$$

ただし，式中 S は MASPP 出力信号，S_{bg} は信号のオフセット値，t は時間，A，t_0，k_1，k_2 は定数である。

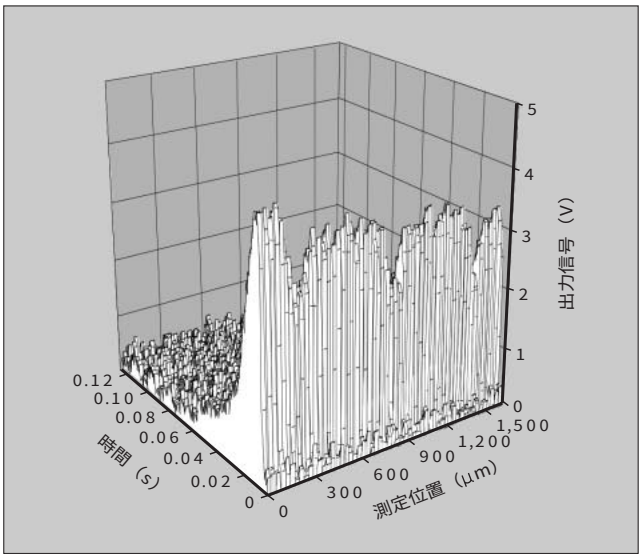
MASPP 信号に対し，式(1)によるカーブフィッティングを行うことにより，式中の各パラメータを決定できる。

感光体の諸電気特性と式(1)の各数値との関係について実験を行った結果を以下に述べる。これらの関係を明確にすることにより，潜像プロファイルを測定しなくても解像度を推定できることを期待してこのような解析を行っている。

2.5　電荷保持率と信号のオフセット値（S_{bg}）

負帯電積層型 OPC において，異なる暗電荷保持率 V_{k5}（5 秒後の電荷保持率）を有するサンプルを準備した。初期帯電電位を－500 V として測定を行い，得られた MASPP 信号に対し式(1)をカーブフィッティングして S_{bg} を求めた。**図5**に S_{bg} と感光体の暗電荷保持率との関係を示す。V_{k5} が小さくなる（暗減衰が大きくなる）と S_{bg} は増加する傾向を有している。これは，MASPP が感光体の時間あ

図4　MASPP による潜像測定例



たりの電荷変化量に比例した信号を出力する機構から理解できる。

2.6　信号の最大振幅と光感度

異なる光感度を有する負帯電 OPC サンプルを準備し，表面電位を－600 V として検知レーザ照射時の MASPP 信号を解析し，検知レーザ照射に伴う MASPP 信号の最大振幅を S_{max} とした。

S_{max} と光感度 E_{200}（表面電位を－600 V から－200 V に光減衰させるのに要する露光量）の間には，**図 6** に示すような関係があることが分かった。

これも S_{bg} の場合と同様に，MASPP の機構から理解される。光感度の優れた感光体は，光照射時の単位時間あたりの電荷変化量が大きいため S_{max} は大きな値を示すと考えられる。

2.7　信号ピーク時間と電荷移動度[9]

検知レーザが照射されてから，MASPP 信号の振幅が最大になるまでの時間（t_{peak}）と，電荷輸送層（CTL：Charge Transport Layer）の電荷移動度の関係を**図 7** に示す。CTL の電荷移動度が大きいものほど小さい t_{peak} を示す。これは t_{peak} と CTL 中を移動する電荷のトランジットタイムとの間に，またトランジットタイムと電荷移動度との間に関係があることを示す。なお，測定した OPC の膜厚，帯電電位は同一としている。

2.8　電荷変化量と表面電位

MASPP による測定では感光体の表面電荷量の単位時間あたりの変化量を検出している。このため，検知レーザ照射により生じる MASPP 信号を積分すると，電荷の総変化量に相当する値を求めることができる。これまでに示したように，MASPP の出力する信号は，暗減衰による成分と光減衰による成分を含んでいるため，積分時に暗減衰分を除く必要がある。**図 8** に，負帯電積層型 OPC を用いて，初期帯電電位 V_0 を変化させた場合の信号積分値（Σ）を示す。

測定する感光体ごとに，このような検量線を作成することで表面電位を求める。静電潜像プロファイルは，検知レーザ照射による電荷変化量を，検量線を用いて表面電位を算出することにより作成される。

2.9　1 ドット潜像電位測定装置で得られる潜像電位形状

本装置で得られる 1 ドット潜像電位として，**図 9** に負帯

図５　暗電荷保持率と信号のオフセット値

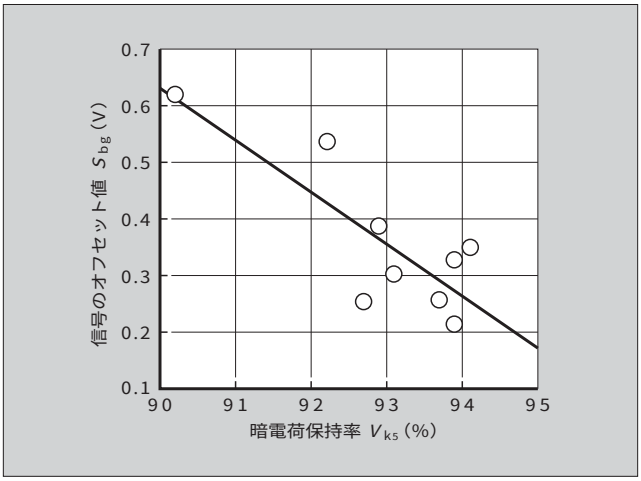


図７　電荷移動度と振幅最大時間

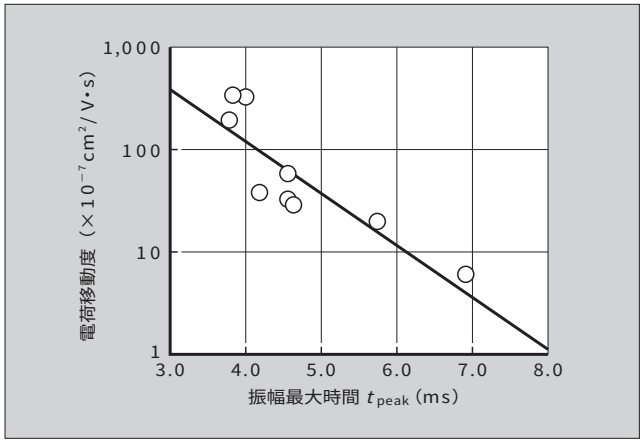


図６　信号の最大振幅と光感度

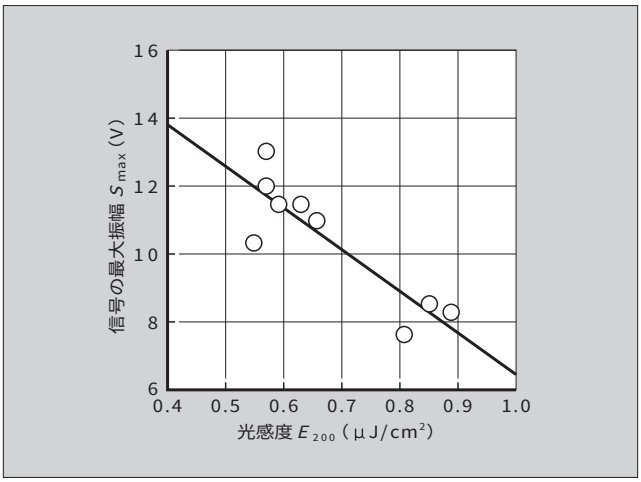


図８　信号積分値と初期帯電電位

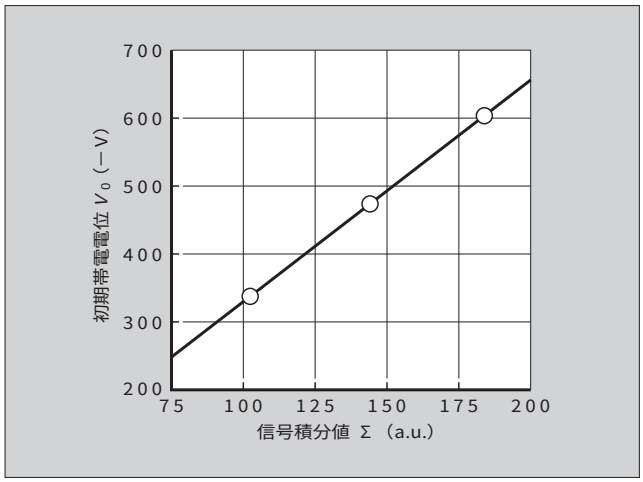


図 9　1 ドット潜像電位測定結果

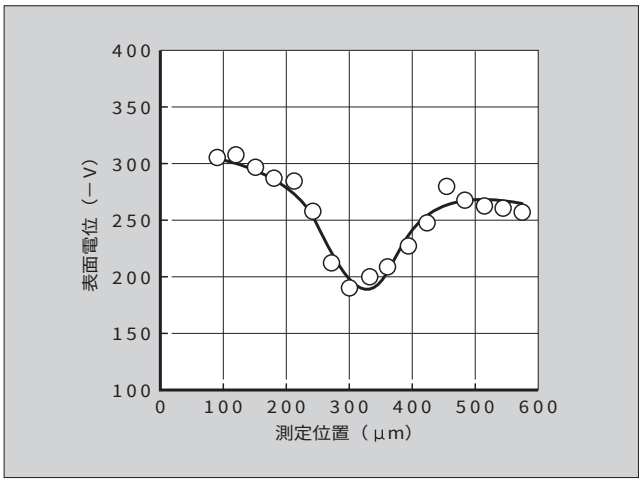
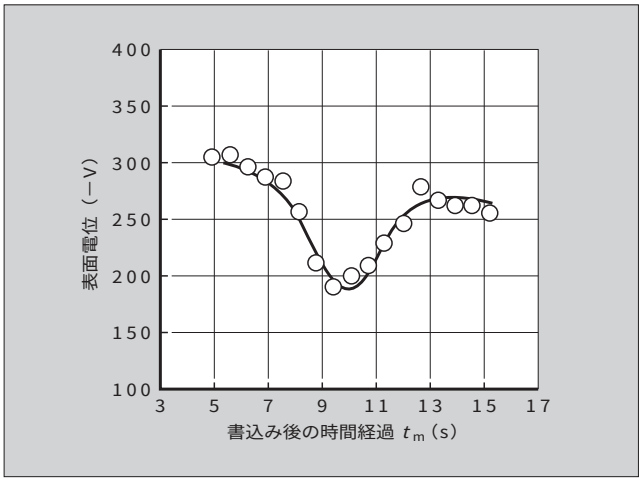


図 10　書込み後の時間経過と潜像電位



電積層型 OPC の場合の例を示す。

潜像電位形状を得るために，位置を変えながら MASPP による電位測定を 17 回繰り返している。さきに述べたように，MASPP の 1 回の測定には 650 ms 必要であるため，最初の測定点から最後の 17 番の測定点まで約 11 秒経過している。また，装置の制約から，書込みが行われてから MASPP 測定を開始するまでに 3 秒を必要とする。**図10**は，**図 9** の縦軸はそのままに，横軸を 1 ドット幅線の書込みを行ってから，MASPP による測定が行われるまでの時間（t_m）に直したものである。**図 9** および**図10**において，最初の測定点と最後の測定点では，表面電位は 50 V 程度の差が生じ，潜像プロファイルは全体的に右下がりの傾向を有している。本システムでは，各点を同時に測ることができないため，測定点ごとに書込みが行われてから経過している時間が異なる。本装置による潜像プロファイルは，この理由から右下がりの傾向を有する。

3　実験結果

3.1　測定条件

感光体ドラムを回転数約 5 r/min で回転させながら，ドラム表面を±500 ～±700 V 程度に均一帯電させる。その後，最大強度の e^{-2} におけるドット幅が約 80 μm の LSU を，記載のない場合は露光像面パワー 0.28 mW にて発光させ，1 ドットラインを書き込み，MASPP にて測定ステップ 30 μm で潜像電位を測定する。なお，本実験結果における潜像の幅は，**図11**に示すように感光体の表面電位の変化している幅を意味する。

図 11　潜像電位の幅と深さの定義

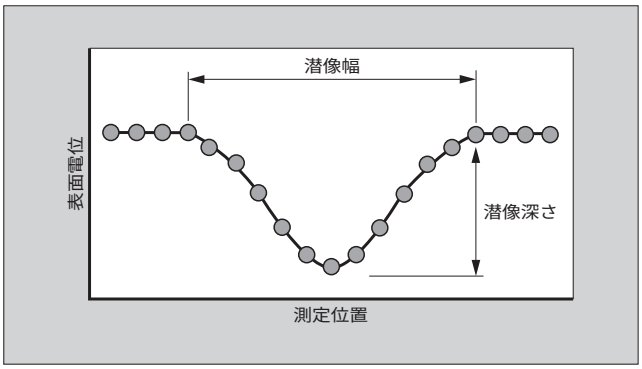
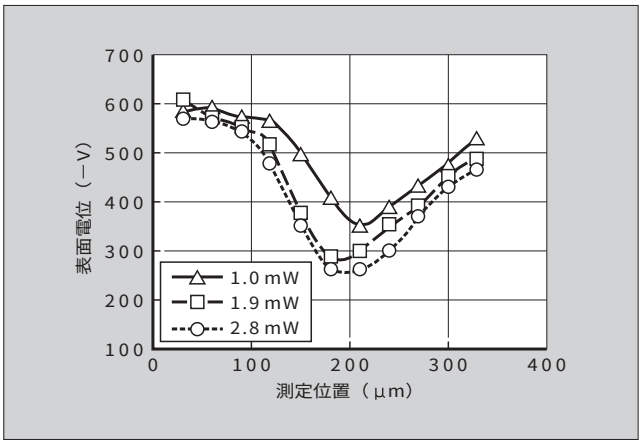


図 12　潜像の書込み光強度の依存性



3.2　潜像の露光強度依存性

1 ドットラインを形成する LSU の露光光強度を変化させた場合の，負帯電積層型 OPC の潜像形状の変化を**図12**に示す。露光強度の増加により潜像深さが深くなり，潜像幅が広がっている。露光強度増加により印字濃度が上昇し，ライン幅が広くなるという一般的に知られている結果と一致した傾向を示している。

本測定による潜像プロファイルが実際の電子写真プロセス上の静電潜像プロファイルに近いことを示唆する重要な結果である。

3.3　負帯電 OPC と正帯電 OPC の比較

負帯電積層型 OPC と正帯電単層型 OPC について潜像電位を測定した。潜像電位測定結果を**図13**および**図14**に示す。

各 OPC の層構成は以下のとおりである。

(1)　負帯電 OPC（積層型）：アルミ基板/電荷発生層

図 13　負帯電 OPC の潜像形の膜厚依存

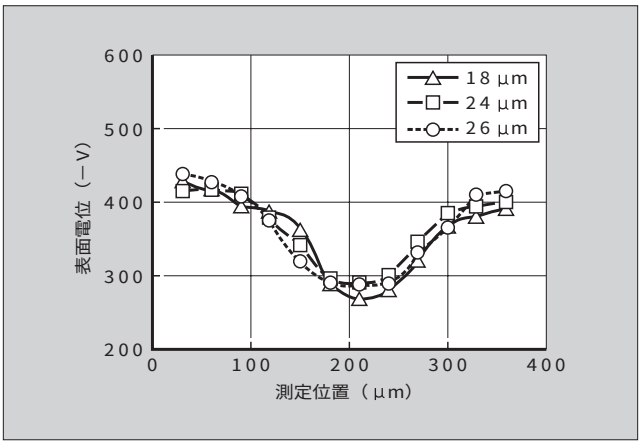


図 14　正帯電 OPC の潜像形状の膜厚依存

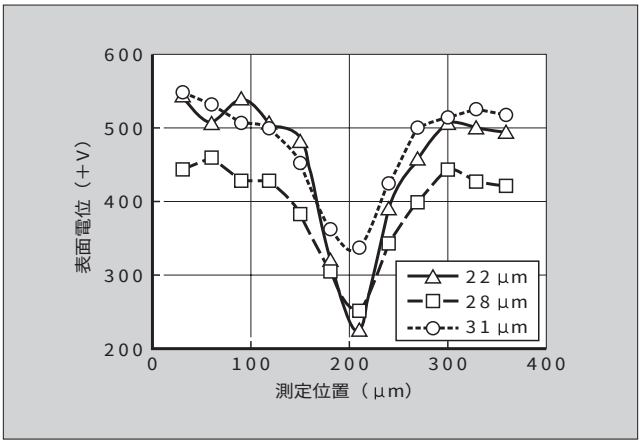


図 15　層構成による 1 ドット潜像の幅の違い

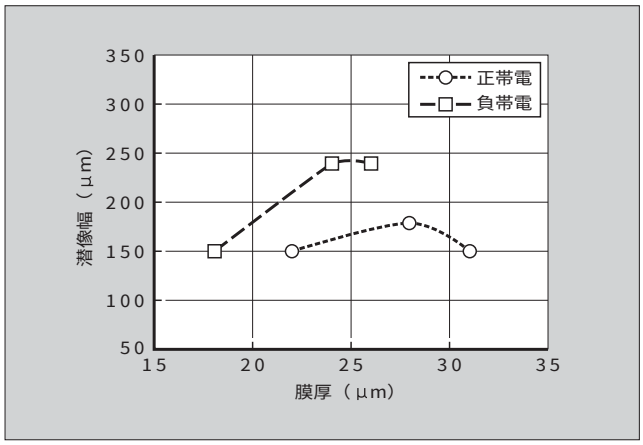
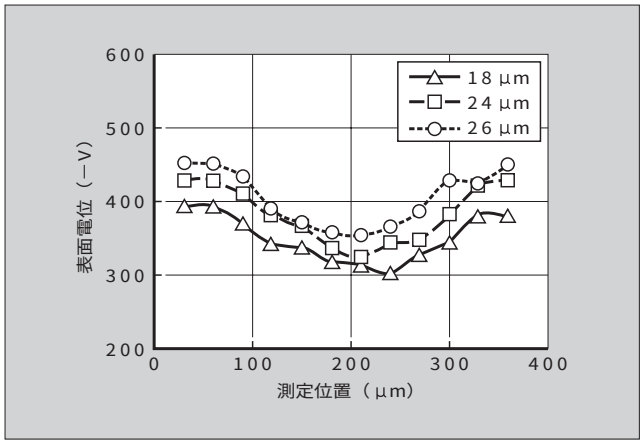


図 16　高移動度 CTL を使用した OPC の潜像



（CGL：Charge Generation Layer）/CTL

（CTL の移動度：1.0×10^{-6} cm²/V·s）

(2)　正帯電 OPC（単層型）：アルミ基板/感光層

負帯電 OPC では，膜厚 18 μm のときの潜像の幅は 150 μm であるが，膜厚 26 μm では幅が 240 μm に広がる。負帯電積層型 OPC では，基板側で電荷発生するため CTL 膜厚が厚くなると横方向への電荷の拡散が発生し，解像度が低下するという，従来の知見と合致する結果となっている。

一方，正帯電単層型 OPC では膜厚の依存性は小さく，膜厚 22 ～ 32 μm の範囲において潜像の幅は 150 ～ 180 μm と狭い。負帯電積層型 OPC と正帯電単層型 OPC の潜像の幅をまとめたものを**図 15** に示す。単層 OPC は表面で電荷発生するために高解像であるという考え方を支持する結果である。

3.4　潜像電位の移動度依存性

潜像形状と感光体の電気特性の関係を調べるために，負帯電積層型 OPC において移動度の異なる電荷輸送材料（CTM：Charge Transport Material）を CTL に用いた場合の 1 ドット潜像電位プロファイルを測定した。このとき，CTM は移動度のみに着目して選択し，CTM の分子構造はそれぞれ異なっている。CTL 中の CTM とバインダの質量比率はすべて 1：1 とした。

図 13 で使用した CTL の代わりに，より移動度の高い CTL を積層した OPC の潜像電位測定結果を**図 16** に示す。CTL の移動度は 1.5×10^{-5} cm²/V·s である。

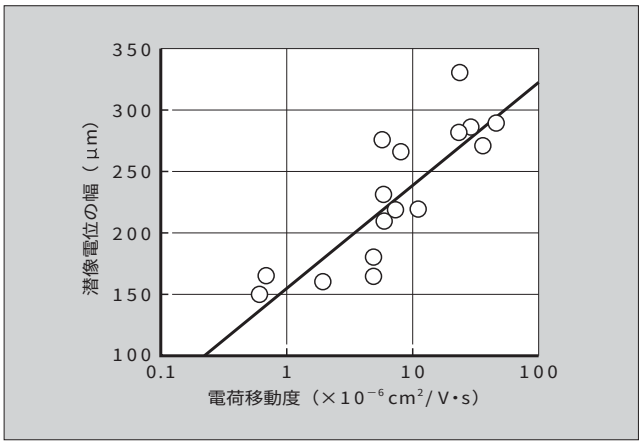
図 13 の OPC の場合，CTL 膜厚 18 μm では潜像の幅は 150 μm であったが，高移動度 CTL を積層した**図 16** の OPC の場合，CTL 膜厚 18 μm において潜像の幅は 270 μm となっている。高移動度 CTL を積層した場合，潜像の幅は広がる傾向を有する。また，潜像の深さについても，**図 13** では約 150 V に対し，**図 16** では約 100 V であり，移動度の高い CTL を積層した OPC の方が浅くなる。印字速度の高速化に対応した高移動度 CTL の適用が移動度を高めることで 1 ドット潜像の形状を，幅が広がり深さが浅くなるようにするという逆の結果を示している。

このように，負帯電積層型 OPC では膜厚の増加に伴う潜像の幅の広がりが観測されたが，負帯電積層型 OPC に関する潜像電位には，CTL 中を走行するキャリヤ移動度依存性が存在すると推測される。各種 CTM を用いて潜像電位の幅の移動度依存性を**図 17** に示す。

この実験結果から，CTL の高移動度化により潜像電位の幅が増加することが確認された。

高移動度 CTL を用いた OPC の 1 ドット潜像の幅は，低移動度 CTL の場合と比較して広くなると考えられる。

図17　負帯電 OPC の潜像の幅と CTL の電荷移動度の関係



これは低移動度 CTL の 1 ドット印字がシャープに印字されるというこれまでの経験と一致している。

岡ら[(2)]はシミュレーションにより，CTL 中の電荷拡散係数 D および移動度 μ の比 D/μ が，10 を超える場合において静電潜像の劣化が大きくなると述べている。潜像の劣化と CTL の電荷輸送特性は密接な関係を有している可能性は高いと考えられるが，今回の実験で得られた，潜像の幅と CTL の電荷移動度の関係は，このことを支持するものではないかと考えている。

4　あとがき

今回は富士電機独自の表面電位測定法を用いることで静電潜像の測定が可能となることと，幾つかの事例について報告した。また，MASPP 信号から得られる諸パラメータと感光体特性，静電潜像の関連性について示した。

今後は，測定時間の短縮や，検知レーザ微細化により，1 ドット潜像測定装置の高度化を図り，より詳細な潜像電位プロファイルを取得し，種々の潜像形成シミュレーション結果との対比を行い，OPC 設計における高解像度化技術の開発に役立てたいと考えている。

さらには，潜像形成用光源のフレキシブル化による最適な露光プロファイル（光量・発光波形など）の検討を行い，電子写真分野における高解像度化技術の発展に貢献していく所存である。

参考文献

(1)　Yarmchuk, E. J. ; Keefe, G. E. High-resolution surface charge measurements on an organic photoconductor. J. Appl. Phys. vol.66, 1989, p.5435–5439.

(2)　岡孝造，藤原将一郎．感光体の潜像劣化とディスオーダーパラメータ．日本画像学会誌，vol.38, no.4, 1999, p.296–301.

(3)　Watanabe, Y. et al. A Numerical Study of High Resolution Latent Image Generation by Laser Beam Exposure. IS & T's NIP16, 2000, p.822–826.

(4)　Chen, I. Optimization of photoreceptors for digital electrophotography. J. Imaging Sci. and Technol. vol.34, 1990, p.15–20.

(5)　Chen, I. Developability of interposed imagewise charge in color electrophotography. J. Imaging Sci. and Technol. vol.35, 1991, p.365–372.

(6)　Chen, I. Electrostatic image densities in digital hybrid halftone methods. J. Imaging Sci. and Technol. vol.39, 1995, p.302–305.

(7)　竹嶋基浩，会沢宏一．1DOT 潜像電位の検討．Japan Hardcopy 2001, 2001, p.281–284.

(8)　Aizawa, K. et al. A Study of 1-dot Latent Image Potential. IS&T's NIP17, 2001, p.572–575.

(9)　上野芳弘ほか．1DOT 潜像電位の検討(2)．Japan Hardcopy 2001 Fall, 2001, p.28–31.

(10)　会沢宏一ほか．感光体評価技術（1 ドット潜像電位評価技術）．富士時報．vol.75, no.3, 2002, p.194–197.

(11)　Lin, C. W. ; Nozaki, T. The measurement of Photoconductive Characteristics on Kicro-Area Surface of Photoconductor Drum. Proceedings of IS&T's 11th International Congress on Advances in Non Impact Printing Technologies. 1995, p.138–141.

もっと豊かな明日のために。

私たち富士電機グループは，グループ各社が「業界最強の専業」として，
それぞれの事業分野で，つねに最先端を走りつづけます。
同時に，集合体としての総合力を発揮し，お客様によりご満足いただける
ソリューション，サービス，商品を提供していきます。
豊かな暮らしと社会の実現を目指す富士電機グループに，どうぞご期待ください。

e-Front runners 富士電機グループ

主要営業品目

富士電機システムズ（株）

情報・通信・制御システム，水処理・計測システム，電力システム，放射線管理システム，FA・物流システム，環境システム，電動力応用システム，産業用電源，車両用電機品，クリーンルーム設備，レーザ機器，ビジョン機器，電力量計，変電システム，火力機器，水力機器，原子力機器，省エネルギーシステム，新エネルギーシステム，UPS，ミニ UPS

富士電機機器制御（株）

電磁開閉器，操作表示機器，制御リレー，タイマ，ガス関連機器，配線用遮断器，漏電遮断器，限流ヒューズ，高圧受配電機器，電力制御機器，電力監視機器，交流電力調整器，検出用スイッチ，プログラマブルコントローラ，プログラマブル操作表示器，ネットワーク機器，インダクションモータ，同期モータ，ギヤードモータ，ブレーキモータ，ファン，クーラントポンプ，ブロワ，汎用インバータ，サーボシステム，加熱用インバータ

富士電機デバイステクノロジー（株）

磁気記録媒体，パワートランジスタ，パワーモジュール，スマートパワーデバイス，整流ダイオード，モノリシック IC，ハイブリッド IC，半導体センサ，サージアブソーバ，感光体，画像周辺機器

富士電機リテイルシステムズ（株）

自動販売機，コインメカニズム，紙幣識別装置，貨幣処理システム，飲料ディスペンサ，自動給茶機，冷凍冷蔵ショーケース，カードシステム

富士時報	**第 77 巻 第 4 号**	平成 16 年 6 月 30 日 印刷 平成 16 年 7 月 10 日 発行 定価 735 円（本体 700 円・送料別）
編集兼発行人	原 嶋 孝 一	
発行所	富士電機ホールディングス株式会社 技術企画部	〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目 11 番 2 号 （ゲートシティ大崎イーストタワー）
編集室	富士電機情報サービス株式会社内 「富士時報」編集室	〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目 30 番 3 号 （新宿コヤマビル） 電話（03）5388 －7826 FAX（03）5388 －7988
印刷所	富士電機情報サービス株式会社	〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目 30 番 3 号 （新宿コヤマビル） 電話（03）5388 －8241
発売元	株式会社オーム社	〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目 1 番地 電話（03）3233 －0641 振替口座 東京 6－20018

© 2004 Fuji Electric Holdings Co., Ltd., Printed in Japan（禁無断転載）

富士時報論文抄録

磁気記録媒体の現状と展望

今川　誠　　小沢　賢治
富士時報　Vol.77 No.4 p.244-248（2004）

磁気記録媒体の高密度化技術の進展と，従来のディジタルデータを取り扱うパソコン（PC）用途から，映像，音楽を取り扱う情報家電への搭載が進むことで製品応用の幅が広がっている。本稿では，磁気記録媒体が搭載される PC およびハードディスク装置（HDD）の市場動向について述べるとともに，高密度化・小型化に大きく寄与する磁気記録媒体の開発状況について概説する。面記録密度は 2004 年には 100 Gbits/in^2 の大台に乗るといわれており，垂直磁気記録方式の本格的採用によって大容量化が進行し，応用製品がさらに広がると期待されている。

アルミポリッシュ基板

矢吹　和彦　　増田　光男
富士時報　Vol.77 No.4 p.249-251（2004）

容量進化に伴い，アルミ基板に対し要求される表面清浄性と表面平滑性はますます高度化している。ここではその 2 点における最近の開発状況の概略を紹介する。研磨剤の開発により，表面清浄性の改善およびスループットの改善が図れるめどがつきつつある。また，表面形状に関しては，パッドのサプライヤーと共同開発を行い，主要特性の最適化とパッドの製造技術の高度化により，表面特性が大きく改善され，ヘッド浮上性の改善に寄与した。

長手アルミ基板媒体

坂口　庄司　　二村　和男　　柏倉　良晴
富士時報　Vol.77 No.4 p.252-259（2004）

長手アルミ基板媒体は，主にパソコンやサーバに使用されている。その記録容量は，3.5 インチサイズ 1 枚あたり 80 G バイトを超えている。この高い記録容量は，媒体表面形状を nm 以下の精度で制御する基板表面微細加工技術，nm レベルで結晶構造を制御する磁気記録層形成技術，わずか 10 nm 程度の間隔で磁気記録媒体上を浮上する磁気ヘッドの浮上安定性を保証する媒体表面制御技術に支えられている。これらの技術革新の速度はきわめて速く，現在では 160 ～ 200 G バイト/枚を目指す技術開発が続けられている。

ガラス基板媒体

松尾　壮太　　増田　克也　　白井　信二
富士時報　Vol.77 No.4 p.260-264（2004）

ガラス基板媒体は，主にノート PC（パソコン），ノン PC に使用されている。その特徴である表面硬度と耐衝撃特性を生かし，今後市場の伸びが期待される小径モバイル用 HDD への搭載が予定される。富士電機では，異方性媒体化することで従来のガラス基板媒体と比較し高い SNR 特性を有することができた。それを達成するためガラス基板に直接テクスチャを行い，その上に独自のシード層を成膜する方法を開発した。また HDI 技術に，特許技術を採用し，他社にない特徴的な設計により顧客から高い評価を得ている。

グラニュラー型垂直磁気記録媒体

上住　洋之　　川田　辰実　　横澤　照久
富士時報　Vol.77 No.4 p.265-269（2004）

従来の長手磁気記録媒体を超える高密度化が期待される垂直磁気記録媒体の実用化には，低ノイズかつ高い熱安定性を有する磁性層と，垂直磁気記録媒体特有の厚膜軟磁性裏打ち層の開発が不可欠である。富士電機は，SiO_2 を添加した低温成膜グラニュラー磁性層と，低コスト化が可能な無電解めっきニッケルリン合金軟磁性裏打ち層の実用化にめどをつけ，120 ～ 160 Gbits/in^2 以上の高密度垂直磁気記録媒体の製品化に向けた開発を現在推進中である。本稿では，これらの開発成果を報告する。

400 Gbits/in^2 を目指す垂直磁気記録媒体技術

河田　泰之　　及川　忠昭
富士時報　Vol.77 No.4 p.270-274（2004）

垂直磁気記録媒体は次世代の高密度記録方式として期待されているが，さらなる高記録密度化の達成には，新たな磁性層構造や材料技術の開発が必要である。本稿では，富士電機が参画している，東北大学電気通信研究所を中心とする国家プロジェクト「IT21 プロジェクト」における CoPtCr-（SiO_2）系垂直磁気記録媒体の研究成果と Ru 下地上に SiO_2 を添加した Co/Pt 人工格子多層膜を積層した垂直磁気記録媒体の検討結果を挙げながら，富士電機の 400 Gbits/in^2 を目指した垂直磁気記録媒体技術を紹介する。

低浮上状態におけるヘッド試験評価技術

佐藤　公紀　　片野　智紀
富士時報　Vol.77 No.4 p.275-280（2004）

磁気ディスクの GH（Glide Height）試験において，GH ヘッドの浮上量は 10nm を下回っている。LDV と PZT センサの同時計測により，低浮上状態の GH ヘッドはピッチング動作しながらディスクと接触していることを明らかにした。浮上安定性の向上にはピッチ角の大きい GH ヘッド，振動減衰性の高い GH ヘッドが有効である。また，突起衝突時に生じる衝撃力から突起欠陥を検出する新しい GH 試験方式を開発し，3 dB の SNR 改善を確認した。低浮上状態であっても，従来の PZT センサから検出する方法に比べ，高い精度を期待できる。

感光体の現状と展望

成田　満　　田中　辰雄
富士時報　Vol.77 No.4 p.282-285（2004）

情報技術の高度化により画像入出力装置の普及が急速に進んでおり，特に電子写真方式の複写機およびプリンタ装置において，ディジタル化，カラー化が急激に進行している。本稿では感光体全般についてこれらの市場動向および技術動向の概要を述べるとともに，そのトレンドに対応した富士電機の感光体について概説する。モノクロプリンタは 16 ～ 20 枚/分，カラープリンタは 7 ～ 10 枚/分と 21 ～ 30 枚/分，そしてディジタル複写機は 16 ～ 30 枚/分が主流になると予測されている。

Abstracts (Fuji Electric Journal)

Aluminum Polish Substrate

Kazuhiko Yabuki Mitsuo Masuda

Fuji Electric Journal Vol.77 No.4 p.249–251 (2004)

As the capacity of magnetic recording media increases, aluminum substrates are being required to provide higher levels of surface cleanliness and smoothness. This paper summarizes recent developments concerning these two topics. The development of polishing agents offers promise for improving the surface cleanliness and throughput. Through collaborative development with pad suppliers, optimization of important characteristics, and advances in pad manufacturing technology, substrate surface characteristics have been improved dramatically, leading to improved head flying performance.

Present Status and Future Prospects for Magnetic Recording Media

Makoto Imakawa Kenji Ozawa

Fuji Electric Journal Vol.77 No.4 p.244–248 (2004)

Product applications for magnetic recording media are increasing due to technical advances that enable higher densities and a shift in applications from PCs that process conventional digital data to home information appliances that process video and music data. This paper describes market trends for PCs equipped with magnetic recording media and for hard disk drives (HDDs), and also summarizes the status of development of magnetic recording media, which is a significant factor in the trends toward higher densities and smaller sizes. Areal densities of 100 Gbits/in^2 are achived by 2004, and it is expected that the widespread use of perpendicular magnetic recording will lead to even larger capacities and a wider range of product applications.

Glass Substrate Magnetic Recording Media

Souta Matsuo Katsuya Masuda Shinji Shirai

Fuji Electric Journal Vol.77 No.4 p.260–264 (2004)

Glass substrate magnetic recording media is used chiefly in notebook computers and in non-PC applications. With its characteristics of a hard surface and good shock resistance, glass substrate magnetic recording media is expected to be used in small form factor HDDs for mobiles — a market for which future growth is promising. Fuji Electric has utilized anisotropic media to achieve a better signal-to-noise ratio (SNR) than conventional glass substrate recording media. In order to realize this media, the glass substrate is textured directly and a proprietary technique developed by Fuji Electric is used to deposit a seed layer on the glass substrate. Moreover, patented technology was utilized in the design of the head-disk interface (HDI), and this distinctive design, unavailable from other companies, is highly regarded by our customers.

Longitudinal Al Substrate Magnetic Recording Media

Shoji Sakaguchi Kazuo Nimura Yoshiharu Kashiwakura

Fuji Electric Journal Vol.77 No.4 p.252–259 (2004)

Longitudinal Al substrate magnetic recording media is used mainly in PCs and servers. The recording capacity of a single 3.5-inch disk exceeds 80 GB. This high recording capacity is supported by substrate surface fine processing technology for controlling the shape of a substrate surface with subnanometer precision, magnetic recording layer fabrication technology for controlling the growth of crystalline structures at the nanometer level, and media surface control technology for ensuring flying stability of the magnetic head that glides above the magnetic recording media at height of only approximately 10 nm. The rate of technical innovation is extremely brisk and present development efforts are aimed at achieving capacities of 160 to 200 GB/disk.

Perpendicular Magnetic Recording Media Technology and the Challenge to Achieve 400 Gbits/in^2

Yasuyuki Kawada Tadaaki Oikawa

Fuji Electric Journal Vol.77 No.4 p.270–274 (2004)

Perpendicular magnetic recording media holds promise as a next-generation high-density media, but in order to achieve even higher recording densities, the development of new magnetic recording layer structures and material technologies is necessary. This paper presents the results of research into CoPtCr–(SiO_2) perpendicular magnetic recording media from the Japanese government-sponsored "IT21 Project," based at Tohoku University's Research Institute of Electrical Communication and in which Fuji Electric is a participating member, and the results of a study of perpendicular magnetic recording media configured from a Co/Pt multilayer, to which SiO_2 has been added, laminated on an Ru underlayer, and also introduces Fuji Electric's perpendicular magnetic recording media technology that aims to realize a density of 400 Gbits/in^2.

Granular-type Perpendicular Magnetic Recording Media

Hiroyuki Uwazumi Tatsumi Kawata Teruhisa Yokosawa

Fuji Electric Journal Vol.77 No.4 p.265–269 (2004)

In order to realize the practical application of perpendicular magnetic recording media having higher density than conventional longitudinal magnetic recording media, it is necessary to develop a low-noise, thermally stable magnetic layer and a thick soft magnetic underlayer, which is characteristic of perpendicular magnetic recording media. Targeting the practical application of a low-temperature-deposited granular-type magnetic recording layer to which SiO_2 has been added and an electroless plated NiP soft magnetic underlayer, Fuji Electric is presently working to develop and commercialize perpendicular magnetic recording media having 120 to 160 Gbits/in^2 or higher densities. This paper reports the results of these development efforts.

Present Status and Future Prospects for Photoconductors

Mitsuru Narita Tatsuo Tanaka

Fuji Electric Journal Vol.77 No.4 p.282–285 (2004)

Advances in information technology have given rise to a rapid popularization of image input and output devices, and the trends toward digitization and colorization have progressed especially rapidly for electrophotographic copies and printers. This paper presents an overview of these market and technical trends for photoconductors, and also outlines Fuji Electric's photoconductors that support these trends. Page-per-minute (PPM) rates of 16 to 20 for monochrome printers, 7 to 10 and 21 to 30 for color printers, and 16 to 30 for digital copiers are predicted to become the mainstream.

Glide Height Test Technology at Low Flying Height

Kiminori Sato Tomonori Katano

Fuji Electric Journal Vol.77 No.4 p.275–280 (2004)

In a magnetic disk glide height (GH) test, the flying height of the GH head was less than 10 nm. From measurements taken simultaneously with a laser Doppler vibrometer (LDV) and a PZT sensor, it was learned that the low-flying GH head was pitching and making contact with the disk. GH head properties of a large pitch angle and vibrational damping are effective in improving flying stability. Additionally, a new GH test method has been developed for detecting bump defects based on the impact at the time of a collision with a bump, and a 3 dB improvement in the signal-to-noise ratio (SNR) was confirmed. Even in a low-flying state, this detection method is expected to be more accurate than detection based on a conventional PZT sensor.

プリンタ用有機感光体

寺崎　成史　　池田　豊　　小日向 俊紀
富士時報　Vol.77 No.4 p.286-290（2004）

オフィス環境の変化に伴い，プリンタはシステムの中の出力機器という位置づけに変わってきており，高速機やカラー機が大きく伸長すると期待されている。富士電機ではこれらの要望に応えるべく，各種ニーズに適した感光体を開発・製造している。本稿では，特に負帯電型プリンタ用有機感光体の概要とその特徴について紹介する。

ディジタル複写機用有機感光体

篠崎　美調　　宮本　貴仁
富士時報　Vol.77 No.4 p.291-294（2004）

複写機市場では，アナログ式に代わって，ディジタル式の発展期にある。ディジタル化により，低・中速機ではプリンタとファクシミリとの融合が進み，高速機ではポスト印刷機としてより一層の高速化・動作安定性（プリンタの 2 ～ 10 倍）が求められている。このため感光体にも感度特性・動作安定性などの改善が要求されている。富士電機は多様な市場要求に応えるため有機感光体の高性能化を図り，幅広い製品群をそろえている。本稿では動作安定性を中心に複写機用有機感光体を紹介する。

正帯電型有機感光体

中村　洋一　　面川　真一　　竹嶋　基浩
富士時報　Vol.77 No.4 p.295-298（2004）

近年，プリンタ・複写機・ファクシミリなどの感光体応用機器は，ディジタル化・カラー化などの進展に伴い，企業向け・個人向けともカラー・高解像度といった，従来と比べて情報量が多い原稿・データの取扱いが増加している。富士電機では豊かな情報を安定して再現できる感光体として，独自の化学技術による電荷輸送材料と感光体技術を適用した，高感度・高解像度かつ接触帯電方式にも好適な感光体を開発した。また，さらなる高解像度を目指して液体現像方式に適用できる感光体の開発も進めている。

1 ドット潜像電位評価技術

会沢　宏一　　上野　芳弘　　竹嶋　基浩
富士時報　Vol.77 No.4 p.299-304（2004）

電子写真方式の情報出力装置であるプリンタ，ディジタル複写機の高画質化に向けた研究が進められている。富士電機では独自の測定技術を開発し，潜像電位の測定を可能とした。潜像電位評価装置の原理，得られる情報の解釈および感光体特性との関連について述べる。また，感光体の構成と潜像プロファイルの対応，感光体特性を変えた場合の潜像プロファイルの変化についても紹介する。今後は，装置のさらなる高度化を図ることで，高画質化技術の発展に貢献する。

Organic Photoconductors for Digital Plain Paper Copiers

Micho Shinozaki Takahito Miyamoto

Fuji Electric Journal Vol.77 No.4 p.291–294 (2004)

Growth in the copier market has shifted from analog systems to digital systems. Digitization has brought about a merging of printer and facsimile functions for low and medium-speed devices, but for high-speed devices, such as post-printing machines, higher speed and operational stability (2 to 10 times that of printers) is required. Accordingly, enhanced sensitive characteristics, operational stability, and the like are required of photoconductors. In response to various market requirements, Fuji Electric is aiming to realize high performance organic photoconductors and has prepared a wide lineup of products. This paper introduces Fuji Electric's organic photoconductors for plain paper copiers and discusses their operational stability.

Organic Photoconductors for Printers

Seishi Terasaki Yutaka Ikeda Toshiki Obinata

Fuji Electric Journal Vol.77 No.4 p.286–290 (2004)

With changes in the office environment, printers have come to be positioned as system output devices, and the market for high-speed, color printers is predicted to grow dramatically. Accordingly, Fuji Electric is developing and manufacturing photoconductors suitable for various user needs. This paper presents an overview and describes the characteristics of organic photoconductors for negatively charged printers.

A Study of 1-dot Latent Image Potential

Kouichi Aizawa Yoshihiro Ueno Motohiro Takeshima

Fuji Electric Journal Vol.77 No.4 p.299–304 (2004)

Research into increasing the image quality of printers and digital copiers, which are electrophotographic image output devices, is proceeding. Fuji Electric has developed proprietary measurement technology that enables measurement of the latent image potential. This paper describes operating principles of latent image potential evaluation equipment, the interpretation of the acquired information and its relation to photoconductive characteristics. Moreover, the correspondence between the photoconductor configuration and latent image profile, and the change in latent image profile when photoconductor characteristics are changed are discussed. Fuji Electric will contribute to the development of picture quality enhancing technology in order to achieve even higher levels of performance in the future.

Positively Charged Organic Photoconductor

Yoichi Nakamura Shinichi Omokawa Motohiro Takeshima

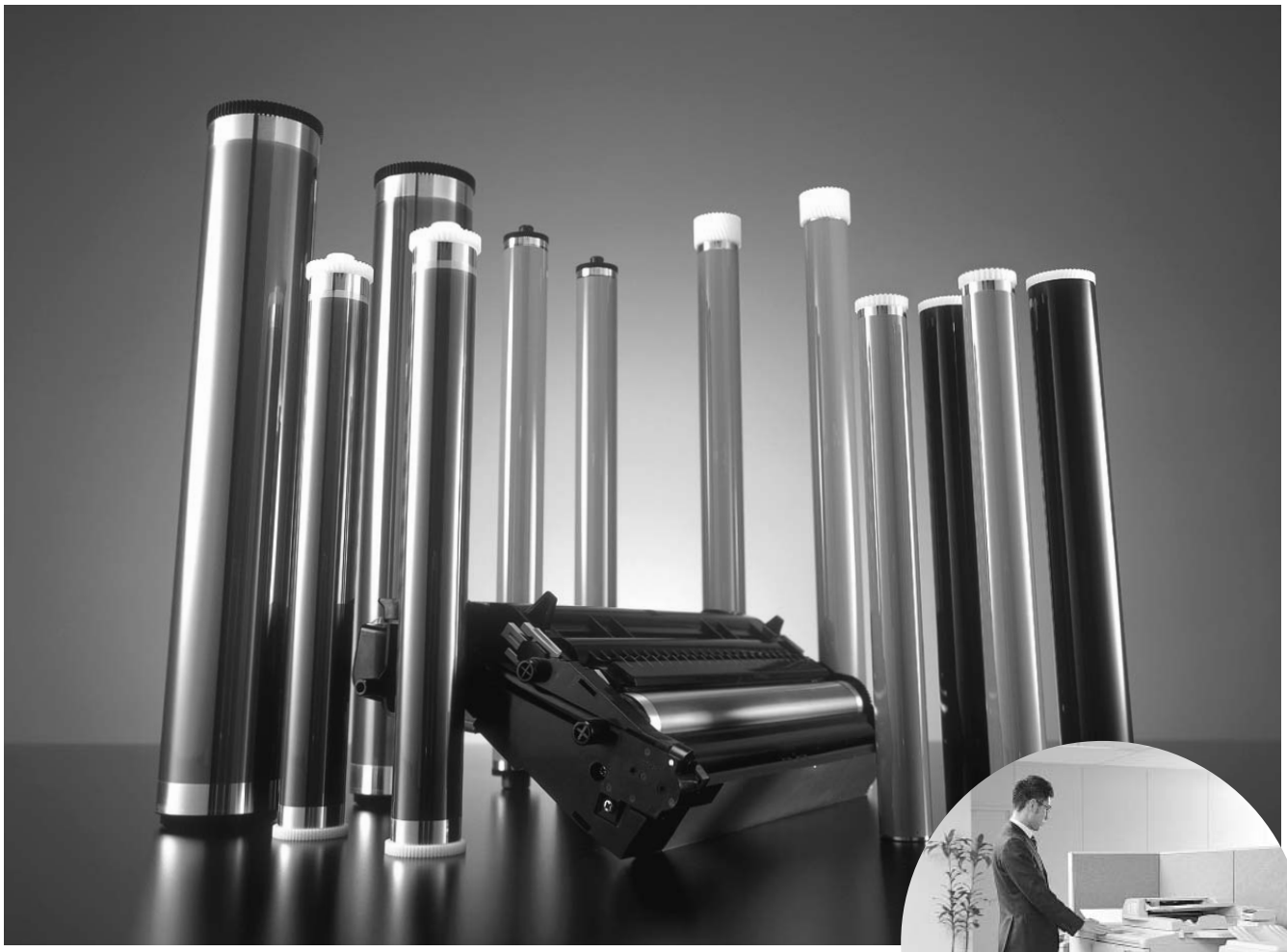
Fuji Electric Journal Vol.77 No.4 p.295–298 (2004)

Along with the technical advances in digitization and colorization of recent years, printers, copiers, facsimile machines and other devices that use photoconductors, in both business and personal uses, are increasingly called upon to process color and high-resolution original documents and data containing greater quantities of information than in the past. Using charge transport materials and photoconductor technology based on proprietary chemical technology, Fuji Electric has developed a photoconductor suitable even for high sensitivity, high resolution and contact charging methods, as a photoconductor capable of reproducing information-rich data stably. Moreover, aiming for even higher resolution, Fuji Electric is moving forward with development of a photoconductor suitable for liquid development.

e-Front runners

高画質化を担う,感光体。
豊富なラインアップと,
きめ細かなテクニカルサポートでお応えします。

IT化の進展により,複写機やファクシミリ,プリンタはさらなる高性能化が求められています。
これら情報機器の中で,画像形成という重要な働きを担っているのが,私たちの感光体です。
先進の材料技術と精密な製造技術を駆使し,高解像度,高速応答性,高耐刷性,
さらに環境や健康にも配慮した製品開発を推進。
光源の波長と分光感度が適合する豊富なラインアップを揃えるとともに,
個々のご要望に的確にお応えするために,きめ細かなテクニカルサポートを行い,
お客様の機器の性能を高めています。



▲感光体
ディジタル複合機やオンデマンド印刷対応のカラープリンタ用など,市場の要望に合わせた新製品をいち早く開発。オゾンの発生を少なくするなど,環境にも配慮しています。

富士電機の画像デバイス

お問合せ先：富士電機画像デバイス株式会社 電話(0263)28-5635

昭和40年6月3日　第三種郵便物認可　平成16年7月10日発行（年6回1，3，5，7，9，11月の10日発行）富士時報　第77巻　第4号（通巻第827号）

e-Front runners

本誌は再生紙を使用しています。

雑誌コード 07797-7　　定価 735円（本体 700円）