1. 超高密度記録技術の将来

正会員 中 村 慶 久[†]

1. ま え が き

「もし VTR がなかったら…」, 「もし磁気ディスク装置がなかったら…」ということを考えてことがあるだろうか. 「もし空気がなかったら…」とはめったに考えないように, 当たり前のようにこれらを使っている. 「もっと小型にならないだろうか」, 「もっとたくさんデータが入らないだろうか」などと考える方が多いに違いない.

画像情報工学を中心テーマにする本学会会員にとって, 画像情報蓄積技術の進展は重大な関心事である. ハイビジョン画質の小型家庭用 VTR やデジタル VTR の動向はもとより, マルチメディアを思い通りに実現するにも, 画像蓄積メディアの能力が成否を支配する. 情報を高速大量に処理するコンピュータ技術や, 情報を空間的に多量に高速伝送する通信技術の性能が上がるほど, 多量の情報を高速で蓄わえてパッケージングし, 時間や空間を越えて広く伝送し分配する情報ストレージ技術の進展がますます望まれる.

本文では, 将来の超高密度大容量ストレージ技術の候補として上げられている各種記録方式の原理と高密度化の可能性を簡単に紹介し, 記録技術の超高密度化によってもたらされるインパクトについて論ずることを命じられている. 磁気記録の高密度化が研究テーマである筆者にとって, 他の記録技術は耳学問程度の知識であり, また超高密度化の可能性を何をもって論ずるのか, 原理的な可能性で良いのか, 技術的な可能性も予測するのか, なかなか難しい. およそ 100 年の歴史をもつ磁気記録も, 原理的な高密度化の可能性では, STM などプローブ顕微鏡技術を応用するナノメモリーやフォトケミカルホールバーニングによる波長多重光メモリーなどと遜色ない.

以下では, 磁気記録にひいき目になることをあらかじめお許し頂いて, 比較的論じられることの少ない磁気記録の超高密度化の原理的な可能性を, その他と比較しながら述べ, 記録技術の将来を身勝手に展望してみたい.

2. 高密度記録技術の期待と現状

1 枚のカラー静止画像をデジタル信号でデータ圧縮なしでコンポーネント記録するのに約 1 MB (メガバイト), 動画を 1 時間記録するのに約 1 TB (テラバイト) 必要である. ハイビジョン画質ではさらにこの約 5 倍が必要になる. 一方, 計算機の性能が半導体技術の進歩とともに向上し, 西暦 2000 年には, パーソナルコンピュータですら 100 MIPS (Million Instructions Per Second) 以上になり, 100 MB 以上のメインメモリーと, 数 GB の記録容量をもつ HDD (ハード磁気ディスクドライブ) が必要といわれている¹⁾²⁾.

これに対し, VCR (ビデオカセット磁気テープ記録装置) では 1 ビットを数 μm^2 内に記録できるまでになり³⁾, 計算上は 8 mm ビデオカセット 60 分用 1 巻にアンフォーマットで 10 GB (ギガバイト) 程度は記録できるまでになった. それでもカラー動画像をデジタルで 1 時間記録するには, 格段の高密度化と, かなりのデータ圧縮が必要である.

一方, HDD の高密度化技術が急速に進み, ビット面積は $1\mu\text{m}^2$ を切る勢いで微細化している. VHS カセットよりやや小さく, 幾分厚い, 3.5 インチ (9 cm) 径 HDD に, 最近, 5 GB も記録できるものが現れた⁴⁾. 厚さ 41 mm の中に 8~10 枚のディスクを重ねて収納し, その微小隙間を小さな磁気ヘッドが忙しく動いて, データを書込み読出している. まさに 3 次元立体メモリーである. ビット面積がこの半分の $0.5\mu\text{m}^2/\text{bit}$ 程度のものも試作され⁵⁾⁶⁾, これより 1 桁高い $0.06\mu\text{m}^2/\text{bit}$ 程度のものの研究開発が⁷⁾, とくに米国で, 今世紀内に目途をつける勢いで進められている. これが完成すると, 現在の 10 倍の 100 GB 以上

[†] 東北大学 電気通信研究所

“The Future of Ultra-High Density Recording” by Yoshihisa Nakamura (Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai)

の記録容量を3.5インチ径HDDで実現できる。機構系や信号処理系などの周辺技術の進展も考慮すると、さらにその数倍の可能性もある。

これに対し、高密度大容量記録技術として期待されている光ディスク装置では、きわめて高い信頼性と確実性、量産性を備えたCD-ROMが、比較的安価で手軽に扱えることもあって、データディストリビューションとして着実に普及が進んでいる。しかし、書き換え型として期待されている光磁気ディスクは、光源の短波長化、超解像技術、オーバーライト方式など、高密度高速化が熱心に進められているにもかかわらず、ハード磁気ディスクの急迫もあって苦戦している。実用機では1ビット当たりの占有面積がようやく $1\mu\text{m}^2$ の壁を破った程度であり⁸⁾、普及化もまだ期待したほどではない。磁気記録では、メディアやヘッド、またモータやアクチュエータも、磁性材料や磁気工学そのものの進展で性能改善が図れるが、光磁気記録は高密度化の首ねっこを光ダイオードの短波長化で押さえられているのが苦しい。原理的には熱記録であり、熱分布の制御の難しさも高性能化を難しくしている。

一方、半導体フラッシュメモリー技術が急速に伸び、フロッピーやハード磁気ディスクの置き換えを狙う意気込みである。コストと書き換え回数が課題といわれていたが、これらの改善を図ったNAND型EEPROMも開発された⁹⁾。量産されている4Mb(メガビット)フラッシュEEPROMのセルサイズは、 $0.7\mu\text{m}$ ルールで約 $4\mu\text{m}^2$ であるが、1995年には64~128Mbチップが量産でき、名刺大のカードに10個乗せて80~160MBのメモリーカードが実現できると予測している⁹⁾。さらに、2000年には1Gb(ギガビット)のチップを10個乗せた8GBカードの可能性も期待している。その間に磁気メモリーと高速性の半導体メモリーをどう共存させて使いこなし、情報ストレージシステム全体としての性能や使い勝手を向上させていくかが、今後の重要な研究テーマである。

3. 各種の超高密度記録法

3.1 光化学ホールバーニングメモリー

光化学ホールバーニングは、構造が不規則な非晶質媒質材料(これをホストと呼ぶ)に、光吸収波長が微妙に異なる色素など(これをゲストと呼ぶ)を分散させたものが記録メディアである¹⁰⁾。この不均一光吸収帯をもつ記録メディアに、この波長帯域内の波長のレーザー光を照射すると、その光吸収率が減少することを利用している。光吸収率の減少する波長幅が極めて狭いため、これをホールと呼ぶ。

図1 光化学ホールバーニング波長多重メモリーの原理¹¹⁾

不均一光吸収帯全体の波長幅は数10nmで、ホールの波長幅はその1000分の1程度であるため、例えば、数 μm の太さの光ビームを照射し、光ビームの波長を狭い範囲で変化させると、光照射した面積内に各ホールの波長で1000多重記録できる(図1)¹¹⁾。これは1ビットを1000分の数 μm^2 に書込み、 $100\text{Gb}/\text{cm}^2$ で超高密度記録できることである。

読出しは光波長を走査して行うが、弱い光でも長時間照射するとホールが形成されるので、記録情報の読出しが難しくなることもある。すでに有機系の材料を用いて記録再生の原理が確認されているが、これを装置化し、実際のデータを記録再生して実用化試験を行うまでには、まだかなりの時間が必要に思える。

3.2 STM技術応用メモリー

STM(走査型トンネル顕微鏡)は、マイクロプローブと試料表面間のトンネル電流を利用して試料表面の形状を観測するもので、走査型プローブ顕微鏡(SPM)とも呼ばれている。同様の手法を用い、プローブ先端の原子と試料表面原子との間の斥力や引力を利用して、表面の凹凸を計測するのがAFM(原子間力顕微鏡)、磁性体プローブを用いて試料の磁化状態の観察を行うのがMFM(磁気力顕微鏡)である。これらの手法を応用した記録方式には、①磁性体マイクロプローブで磁性薄膜上にデータを高密度で書込み、MFMを利用して読出す方法と¹²⁾、②トンネル電流を流している状態でプローブを記録メディアに近づけてプローブに電圧を加え、電界蒸発により試料表面原子を取り除くか¹³⁾、逆にプローブ先端の原子をメディア側に移動させるなどして、原子オーダーでドットを形成して書込み、同じプローブで原子間力の変化で凹凸情報を検出する方法¹³⁾、などがある。

①は、基本的には磁気記録であり、記録限界はプロープの生じる磁界分布と磁気メディアの記録分解能で決まる。これに対し②は、原理的に原子オーダーでの記録が期待されるが、原子サイズで無欠陥の記録メディアを作製することが難しいため、実用できるドットサイズは10 nm程度と見積もられており、1 Tb/cm²を期待している¹³⁾。この可能性はすでに実験で確認されているが(図2)、記録できるメディアの面積や記録速度、記録環境などで、実用化にはまだ遠い。

3.3 スピニックスデータストレージ

強磁性体を微細化していくと、単磁区構造の微粒子になる。これは、粒子を構成する原子の中の磁気を担う特定の電子のスピンの向きが粒子全体で一方向に揃った、強磁性体の最小単位である。スピンの向きを正と負の2方向しかとれないようにすると、その向きで0と1の2値信号がストアできる。これは、平行スピン群の向きでデータをストアすることであり、スピニックスメモリーといえる。これを連続的に並べてデータ列を書込めば、スピニックスデータストレージである。

磁性粒子のサイズが小さくなり過ぎると、熱擾乱の影響で、いわゆる超常磁性的に振る舞う¹⁴⁾。単磁区強磁性微粒子として振る舞える最小のサイズは10 nm程度である。したがって、スピニックスデータストレージの最小ビットサイズは100 nm²程度といえ、1 Tb/cm²の高密度化の可能性がある。これは、ホールバーニングやSTM技術に応用する超高分解能記録方式に期待されているものと同程度の値である。

図2 STM技術応用ナノメタメモリーの原理¹³⁾

4. 磁気記録からスピニックスストレージへ

4.1 究極の長手磁化方式

スピニックスデータストレージの一例として、柱状あるいは針状単磁区強磁性微粒子を長手方向に連続的に並べてデータ列を書込むことを考える。これを、長さ L が同じで、厚さ T と幅 W が直径と同じ細長い磁石で模式的に描くと(図3)、 L をビット間隔に、データ1のとき磁石の向きを逆転させ、0のときは逆転させないとして、各磁石の境界に情報を担わせた形でデータ列が書込める。書込まれたデータは、磁化反転した磁石の境界に生じる磁界の有無で検出できる。

これは、現在の長手磁化方式による磁気記録の延長線上にあるスピニックスストレージのひとつである。メディアが、長さ L 、直径 R の柱状粒子を横にして連続的に並べた構造であると、原理的な最小ビット面積は L と R の積で決まる。 L を50 nm、 R を5 nmとすると、これは250 nm²になり、0.4 Tb/cm²の可能性がある。

現在われわれは、個々の磁性微粒子に直接アクセスして、磁化方向を変えてデータを書込み、外部磁界を検出してデータを読み出す手段をもっていない。そのため、多数の磁性微粒子の平均的な磁化変化で情報を書込み、各粒子からの磁界の総和を磁気ヘッドで検出して、情報を再現している。

高密度化を実現している最新のハード磁気ディスクの記録層は、タンタルや白金などを添加し、スパッタ法で数10 nm程度の厚さに被着させた、コバルトクロム系薄膜である。直径数10 nmほどの微細磁性粒子を、その磁化容易方向をヘッドメディアの相対走行

図3 スピニックスストレージの原理

方向に揃えて、数粒子層で並べた構造になっている¹⁵⁾。これに線密度約 4000 FRPM (Flux Reversal Per Millimeter: 磁束反転数/mm), ビット間隔で約 250 nm, トラック幅 $2\mu\text{m}$ で書込めば⁵⁾⁶⁾, 1 ビットは 5000 個ほどの粒子に書込まれている。ビット面積 $0.06\mu\text{m}^2$ 程度の次世代磁気ディスクでは、これが数 100 個の磁性粒に書込まれることになる⁷⁾。

ところで、データ 1 が書込まれているところ、すなわち磁化が互いに逆極性で突き合っている磁性粒子の境界では、磁性粒子間に磁化の向きを互いに長手方向から傾けようとする反発力が働く。この影響を避けて、できるだけ短い間隔で磁性粒子の磁化の向きを変えるには、粒子長 L をできるだけ短く、かつ L に比べ直径 R も細くするか、強い一軸磁気異方性を与え、さらに磁化容易方向を揃えて単粒子層で並べる必要がある (図 4)。これは磁性層を薄くすることで、検出すべき外部磁界強度を弱め、データの読出しを難しくする。

4.2 垂直磁化方式

これに対し、磁石を垂直に立て、データ 0 のときは磁石 (磁化) の向きをそのまま平行に、1 のとき反平行に逆転させて並べると、反平行に並んだ磁性粒子間には吸引力が働くので、粒子間相互作用磁界、いわゆる減磁界の影響から解放される。厚さ T あるいは粒径 R をビット間隔とする超高密度で、きわめて安定にデータ列が書込め、書込まれたデータは、反平行磁石の境界で磁界の極性が反転しているのを検出すれば、この有無で読出せる。これは垂直磁化方式による究極のスピニックスストレージである¹⁶⁾。

もし細長い柱状微細磁性粒子を整然と縦に並べた記録メディアができれば (図 5), 粒径 R がビット間隔になるので、最小ビット面積は粒径 R の自乗で決まる。例えば、 L が 50 nm, R が 5 nm の場合は、1 ビ

図 4 長手磁化用スピニックスストレージメディアの構造

ットを 25nm^2 内に、すなわち $4\text{Tb}/\text{cm}^2$ の超高密度記録でデータが書込めることになる。

コバルトクロム垂直磁化膜は、このような膜構造をしており¹⁷⁾, これを記録層とする磁気メディアには、単磁極ヘッドの軟磁性主磁極膜の幅をトラック幅として、20,000 FRPM 以上 (ビット間隔 50 nm 以下) の超高線密度で書込めることが、すでに筆者らにより実験やシミュレータで確かめられている (図 6)¹⁸⁾。

一方、最近、主磁極の厚さをトラック幅とする超狭トラック記録の実験を行い、厚さ 50 nm ほどのコバルトクロム垂直磁化膜に、300 nm 程度のトラック幅で、線密度 4000 FRPM のデジタル信号を鮮明に記録できることも確かめられている¹⁹⁾。ビット面積は $0.075\mu\text{m}^2$ 程度であり、単粒子層メディアの柱状粒子の直径を 5 nm とすると、これは 3000 個ほどの垂直

図 5 垂直磁化用スピニックスストレージメディアの構造

図 6 垂直磁化方式による超高密度記録特性

配向した磁性粒子に1ビットを書いている状態である。

もし線密度 20,000 FRPM がトラック幅 300 nm で書ければ、ビット面積は $0.015\mu\text{m}^2$ 程度になり、ビット当たりの粒子数は 600 個程度に下がる。また、原理的にトラック幅方向にもヘッド走行方向と同じ記録分解能があるので、20,000 FRPM のビット間隔と同じ 50 nm のトラック幅で記録できれば、 2500nm^2 以下の面積、すなわち 100 個以下の粒子数に1ビットが書込め、 40Gb/cm^2 の超高密度記録が期待できる。

5. 超高密度記録への期待と課題

5.1 超高密度記録の夢

現在の最先端の VTR や HDD でも、記録密度はまだ 100Mb/cm^2 に満たないレベルである。スピニックスストレージで期待される 1Tb/cm^2 に対して 10,000 倍、垂直磁化方式の実験や磁気記録シミュレータから予測される 40Gb/cm^2 に比べても 400 倍以上の差がある。現在は記録容量が 5 GB である 3.5 インチ (9 cm) 径 HDD も、将来は少なくとも 2 TB、究極的には 50 TB の可能性がある。カラー動画像を、コンポーネント信号でデータ圧縮なしで数時間デジタル記録できる容量であり、ハイビジョン画質での記録も可能になる。

記録密度が高くなると、HDD はさらに小型になり、オンボード化され、膨大な情報量を適当な記録容量に分散して収納できるようになる。必要に応じて多数連結してディスクアレイにすれば、大容量性と高速転送性、高信頼性を一挙に実現できる²¹⁾。

すでに 1.3 inch (3 cm) 径 HDD が実用化され、小型 HDD を可換携帯型にするだけの耐振性も実現されつつある。数 GB から数 10 GB のデータをパッケージしたマッチ箱程度の大きさの小型 HDD をポケットに入れて、データの交換や分配、移動を行うことも可能になる。カラー画像も収納できるから、ビデオムービーも VCR から HDD に変わり、収録後、必要なら電話回線で自宅へ高速転送し、加工編集してカセット磁気テープに保存することもできる。ワープロやパソコン、デスクトップパブリッシングなどで、カラー画像を自由に扱うことも可能になる。

画像も含む高速データ転送のためには、小型大容量 HDD と大容量半導体メモリーの組合せが必須である。大容量性を要するデータ交換や分配、移動、貯蔵には、依然として大容量な小型 VCR が有効である。半導体メモリーやその他の機能素子と組合せると、VCR でのトラッキングサーボも不要になり、カセッ

トも超小型にできるなど²⁰⁾、新しい大容量高機能磁気記録デバイスやシステムへの夢がさらに膨らむ。

5.2 超高密度化への課題

垂直磁化方式で粒子径サイズの超高密度記録を実現するには、分解能が粒子径以下である書込みヘッドと、単磁区微粒子の粒径と結晶性、配向性などを完璧にコントロールして作製された垂直配向単粒子層スピニックスメディア (図 5) が必要である。

単磁極ヘッドの先端は STM のマイクロプローブに相当する。軟磁性下地層をもった 2 層垂直磁化メディアと組合せると、エッジで急峻に減衰する極めて鋭い書込み磁界が得られる²²⁾。ヘッド材の吟味、加工精度の向上、ヘッドメディア間インタフェースの精密な制御などにより、一層の改善も期待できる。

これに対し、垂直配向スピニックスメディアの作製には、スパッタや蒸着などの真空製膜技術で、微粒子性合金磁性膜の配向性、結晶性、粒度分布などを如何にコントロールできるかが成否のカギを握る²³⁾。これは、メディアだけでなく、書込み・読出し両ヘッドに用いる軟磁性膜の特性改善にもつながる、極めて重要な研究課題である。磁性膜のような機能性薄膜がスパッタ法で比較的性能良く作製できるメカニズムは、意外にまだ解明されていない。

一方、高密度化とともにビットサイズが小さくなると、メディアから洩れる外部磁界強度が弱まり、分布範囲もメディア表面付近に限定される。最近、磁気抵抗効果を利用した MR ヘッドがようやく実用になり、巨大 MR 効果の研究も進展して、磁界感度の高い読出しヘッドの展望がひらけつつある。

ヘッドとメディアを安定に、かつ無傷で、接触状態で長時間高速走行させるためのトライボロジー技術の研究も進み、接触型磁気ヘッドの実用化の動きも見える。パーシャルレスポンスとビタビ復号を組合せた S/N に強い記録再生信号処理法やトラッキングサーボ技術など、超高線密度、超狭トラック記録に対応した周辺技術の新しい展開も始まり、技術的な面でもまだまだ大きな可能性が残されている。

6. む す び

データストレージは、どちらかというと受け身の技術である。しかし、高度情報化社会で果たす役割はますます必要不可欠なものになってきている。そのため、超高密度化が期待される各種の記録方式が提案され、磁気記録装置との置き換えを図って、熱心に研究開発が進められている。一方、古いと思われ勝ちな磁気記録装置は、極めて高いレベルの多数のハイテクノ

ロジーの集積であり、その膨大な底力によって、10年10倍の割合で着実に高密度化が進められてきた。最近では、このペースがもっと早まるとする見方さえある。

これからの各種記録方式の発展性を総合的に比較すると、本質的にも、また技術的にも、磁気によるデータストレージ技術、なかでも磁気ディスク装置が、超高密度化の展望が明確であり、依然としてその中心にあると予測される。足りない高速性や機能性などを他のメモリーデバイスや機能素子で補って、ストレージ技術の完成度をさらに高めていくであろう。

磁気記録は約100年の歴史をもち、限界説、置き換え説がしばしば議論されながらも、着実に進展してきた。しかもなお、スピニックスストレージとして見直すと、他の方式に劣らぬ超高密度化のポテンシャルがまだ相当ある。今まで培われてきた周辺技術の広がりや厚みが大きな財産となって、これからも確実に歩み続けるであろう。このことは、磁気記録が10年10倍で高密度化を達成してきた事実からも十分に期待できる。

(1994年1月5日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) R. H. Katz, G. A. Gibson, D. A. Patterson: "Disk System Architectures for High Performance Computing", Proc. IEEE, **77**, p. 1842 (1989)
- 2) M. H. Kryder: "Data Storage in 2000 — Trends in Data Storage Technologies—", IEEE Trans. Magn., **25**, p. 4358 (1989)
- 3) K. Kanota, H. Inoue, A. Uetake, K. Chiba, Y. Kubota: "A High Density Recording for Digital VCR", IEEE Trans. Consum. Electron., **36**, p. 546 (1990)
- 4) 日経 BP 社編: 日経エレクトロニクス, 595, p. 61 (1993)
- 5) 例えば, T. Yogi, C. Tsang, T. A. Nguyen, K. Ju, G. L. Goman, G. Castillo: "Longitudinal Media for 1Gb/in² Areal Density", IEEE Trans. Magn., **26**, p. 1689 (1990)
- 6) M. Futamoto, F. Kugiya, M. Suzuki, H. Takano, Y. Matsuda, N. Inaba, N. Miyamura, K. Akagi, T. Nakao, H. Sawaguchi, H. Fukuoka, T. Munemoto, T. Takagaki: "Investigation of 2Gb/in² Magnetic Recording at a Track Density of 17 kTPI", IEEE Trans. Magn., **27**, p. 5289 (1990)
- 7) E. S. Murdock, R. F. Simmons, R. Davidson: "Roadmap for 10Gbit/in² Media: Challenges", IEEE Trans. Magn., **28**, p. 3078 (1992)
- 8) 釘屋文雄, 前田武志, 井手浩, 戸田剛, 土永浩之, 桐野文良, 三田誠一, 重松和男: "2 GB 容量 5.25 インチ光磁気ディスク装置の記録再生系", 信学技報, **93**, MR 93-35, p. 9 (1993)
- 9) 榎岡富士雄: "躍進するフラッシュメモリ", 工業調査会 (1992)
- 10) 寺尾元康, 太田憲雄, 堀籠信吉, 尾島正啓: "光メモリの基礎", p. 104, コロナ社 (1990)
- 11) 村瀬至生: "光化学ホールバーニングメモリの可能性", 平5連大, E-4, p. 281 (1993)
- 12) 大久保俊文, 岸上順一, 柳沢佳一, 金子礼三: MFM (磁気力顕微鏡) を用いた高密度ポイント磁気記録, 信学論, **J75-C-II**, p. 600 (1992)
- 13) 保坂純男, 細木茂行, 小柳肇: "プローブ顕微鏡を用いた超高密度記録技術", 平5連大, E-5, p. 293 (1993)
- 14) 近角聡信: "強磁性体の物理(下)", p. 308, 裳華房 (1984)
- 15) 城石芳博, 吉田和悦, 二本正昭, 青井基: "面内薄膜磁気ディスクにおける高密度化", 応用磁気誌, **17**, p. 777 (1993)
- 16) S. Iwasaki, Y. Nakamura: "An Analysis for the Magnetization Mode for High Density Magnetic Recording", IEEE Trans. Magn., **MAG-13**, p. 1272 (1977)
- 17) 大内一弘, 岩崎俊一: "垂直磁気記録媒体", 第18回東北大通研シンポジウム論文集, p. 131 (1982)
- 18) Y. Nakamura: "Theoretical and Experimental Prospects of Perpendicular Magnetic Recording", J. Mag. Soc. Jpn., 15 Supple., S2, p. 497 (1991)
- 19) 村岡裕明, 中村慶久: "10 Gbits/in² 垂直磁気記録の基礎実験, 第17回応用磁気学術講演, 12 pF-9, p. 331 (1993)
- 20) 姫野卓治, 田中正人, 家徳隆史, 松本吉生, 田村正文, 韓敏哉, 佐々木利一, 伊藤条太: "Non-Traking 方式による高密度磁気テープ記録", 信学論, **J75-C-II**, p. 591 (1992)
- 21) 櫻井紀彦, 岸上順一: "小径ディスクを用いたディスクアレーのコスト最適システム", 信学論, **J75-C-II**, p. 672 (1992)
- 22) Y. Nakamura: "Conditions for Ultra-High Density Magnetic Recording", J. Mag. Soc. Jpn., 13 Supple., S1, p. 33 (1989)
- 23) 中村慶久: "超高密度磁気記録のための磁気メディアと記録限界", 応用磁気誌, **17**, p. 768 (1993)

なかむら よしき

中村 慶久 昭和43年、東北大学大学院博士課程修了。同年、同大学電気通信研究所助手、昭和46年、助教授、昭和62年、教授となり、現在に至る。高密度磁気記録とくに垂直磁化による超高密度記録、記録理論、メディアとヘッド、記録用磁性膜、マイクロ磁化機構などの研究に従事。工学博士。正会員。