垂直磁気記録の進展

—画像記録への応用—

正会員 中村 慶久[†]

垂直磁気記録には1ビットの情報を数千 nm² のきわめて微小な面積内に記録できる能力があり、ハイビジョンやデジタル VTR など、次代の高画質で大容量な画像情報記録装置を実現するものとして期待されている。本文では、垂直磁化方式による超高密度記録の可能性と、その実現を目指す最近の研究開発動向を画像記録を中心に概観する。

1. ま え が き

今日私たちは、オーディオやビデオテープレコードをはじめ、フロッピーディスクやハードディスクなどの磁気記録装置の便利さをごく当り前のように享受している。これは磁気記録技術が過去 30 年間に約 1000 倍も面記録密度を高めてきたおかげである。それでもなお、もっと高音質、高画質で長時間記録、あるいはもっと多量の画像情報をコンパクトに記録したいとする高密度化の要求には際限がない。

筆者らが次世代の高密度記録法として垂直磁気記録方式を提案してから 10 年余りの歳月が過ぎた¹⁾。一時は試作機も発表され、膜面に垂直方向に磁化し易い媒体を用いると極めて高い記録密度が実現できることが実証された²⁾。しかし、磁気記録技術は媒体やヘッドさえ取り替えればすぐにでも桁違いの高密度記録が実現できるものではない。メタル粉末塗布テープが今日のように安心して使えるようになるまでに、初めて試作されてからほぼ 30 年³⁾、また、いま正に実用期に入ろうとしているメタル蒸着テープも、最初の原理的な提案からほぼ 30 年たっている⁴⁾。

垂直磁気記録も、新しい金属薄膜媒体や磁気ヘッドを用いるための技術的未成熟さが浮き彫りにされ、とくに信頼性のうえで多くの問題点が指摘された。この

たび初めて垂直磁気記録国際会議 (PMRC '89) が東京で開催されたが、ここでは周辺の基本技術、とくに金属媒体の信頼性に関わる媒体基板やベースフィルム、あるいは保護・潤滑層の研究が一段と進展したことが報告され、垂直磁化方式が将来の超高密度化へつながる道であることがあらためて確認された。すでに垂直磁化方式の原理を応用した Ba フェライト塗布媒体を用いる 3.5 インチ径 4 MByte のフロッピーディスクドライブが発売されており、また、最近発売されたハイバンド 8 ミリビデオテープレコード用磁気テープにも、垂直磁化方式の原理が導入されている⁵⁾。

垂直磁気記録の概要については、すでに以前本誌でも紹介している²⁾。以下、本文では、その後明らかにされた垂直磁化方式による超高密度記録の可能性と、それを目指して進められている研究開発動向について、画像記録を中心に概観する。

2. 超高密度磁気記録の可能性

磁気記録における長手磁化方式と垂直磁化方式の優劣を、現在のそれぞれの技術的水準でそのまま比較して性急に論ずるのは危険である。垂直磁化方式の本質的な特徴をまず理解し、今よりも格段に大容量あるいは高品質な画像記録ができる超高密度磁気記録装置の実現を目指して技術を育てて行くことが重要である。

2.1 リングヘッドによる高密度記録

最近、筆者らは磁気記録の過程を計算機でシミュレーションする手法を開発した⁶⁾。これは塗布媒体、合金膜媒体を問わず、記録媒体の磁性層を構成する微粒子あるいは微結晶粒の磁化反転機構をモデル化し、こ

[†] 東北大学 電気通信研究所

"The Development of Perpendicular Magnetic Recording — Application to Video and Image Recording —" by Yoshihisa Nakamura (Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai)

図1 長手磁化方式による孤立磁化転移(1ビット)の記録過程(a)、再生過程(b)の計算機シミュレーション、および再生波形(c)の一例

これらの磁化挙動を確率統計的に計算する手法と、磁気ヘッドなどの磁束効率の計算などによく用いられる有限要素法とを組合せたものである。記録媒体や磁気ヘッドの磁気特性ばかりでなく、厚さ、ギャップ長、スペーシングなどの幾何学的寸法や記録レベルなどの記録再生条件を設定すると、磁気ヘッドの移動に伴う記録再生時の磁性層内の磁化状態や磁力線分布の変化がディスプレイ上にアニメーション風に描かれ、かつ再生電圧波形が定量的に求められる。

図1は、空隙長 $0.3 \mu\text{m}$ のリングヘッドで、記録層塗布厚 $0.5 \mu\text{m}$ の長手配向金属粉末媒体に孤立磁化反転を記録し(a)、再生する過程(b)の計算機シミュレーションの一例である。ヘッドの代表的な位置での磁力線分布(細線)や残留磁化分布(矢印)を示している。(c)は再生波形である⁶⁾。磁気記録では磁化転移領域が情報を担っているが、長手磁化方式でもここは

垂直磁化されていることに注意する必要がある。再生時にはこれが磁気ヘッドと鎖交する磁束の源になる。

高密度(短波長)記録時には、垂直磁化領域が近接して次第に円弧状磁化モードに変わるが、ビット間隔(半波長)が媒体磁性層の厚み以下になると回転磁化モードを形成する⁷⁾。これは、①リングヘッド空隙近傍の円弧状磁力線分布、②媒体内の磁化転移領域間の磁性層表面に生じる長手成分減磁界、③媒体磁性層の長手方向に磁化され易い性質、などが原因で静磁エネルギー的に安定な磁化状態をとる結果であり、記録減磁損失の原因になっている。

このため、リングヘッドで高密度記録を行うには、きわめて短いビット間隔でも円弧状磁化モードが保持され、回転磁化モードが形成されないことが必要である。現在は、磁性層の薄膜化と高保磁力化、あるいは低記録レベルによる表層記録などでこれを実現してい

るが、薄膜化しなくても高密度で高い再生電圧を得るには、媒体磁性層に積極的に強い垂直磁気異方性を与え、垂直磁化を保つことが望ましい。すなわちリングヘッドによる準垂直磁気記録 (Quasi-perpendicular Magnetic Recording) である。最近発売されたハイバンド 8 mm VTR 用金属蒸着テープでは結晶粒が磁性層表面で垂直に立っており⁵⁾⁸⁾、磁性層表面ほど垂直磁気異方性が強くなっていると予測される。これはすでに準垂直記録を実現している。

2.2 高密度記録の条件

垂直磁気異方性が強いほど磁性層は垂直磁界成分だけに感じ、リングヘッドを用いても高密度では垂直磁化が反平行で隣接する⁹⁾。垂直磁化の磁化反転領域では垂直成分減磁界がほとんど影響しないので、垂直磁化の転移幅は媒体磁化曲線の抗磁力付近の傾きとヘッドの垂直磁界分布の急峻さだけで決まる。したがって高密度記録を実現するには、

- (1) 回転磁化モードをつくらないように媒体磁性層に強い垂直磁気異方性を持たせる。
- (2) 媒体磁化曲線の抗磁力付近の傾きを急峻に、すなわち磁性層を構成する微粒子 (微結晶粒) の抗磁力分布を狭める。
- (3) ヘッド磁界の垂直成分の分布を急峻にする。

などが満たされることである。記録媒体が、Co-Cr 合金膜のように強い垂直磁気異方性と鋭い抗磁力分布を持つ場合には、媒体磁性層の微粒子 (微結晶粒) の大きさとその充填度および磁気ヘッドの垂直磁界の急峻さで究極的な記録限界が決まる。

単磁極各ヘッドの記録動作時の磁界分布を比較すると⁹⁾、リングヘッドでは、垂直磁界成分が長手成分に比べて小さく、起磁力を増すほど分布も広がるが、単

磁極ヘッドでは、記録層内部ほど垂直成分が主で、分布も起磁力にほとんど依存しない。これらのヘッド磁界は媒体との磁氣的な相互作用の影響を強く受け、性能を支配する。単磁極ヘッドでは主磁極と媒体の軟磁性下地層および Co-Cr 記録層との間隔を狭くし、さらにこれらの飽和磁化の大きさを同程度にすると、ヘッド・媒体間の磁氣的相互作用が強まって単位起磁力当りの磁界強度が増し、分布のきわめて急峻な垂直磁界成分だけを生じる。これに対しリングヘッドでは、媒体と対向するヘッドコアが広いために、ヘッドと媒体の磁氣的結合が強まるほど磁界分布が広まり、垂直磁界の急峻さが失われる⁹⁾。

図 2 は、(a)のリングヘッドでは媒体との磁氣的な相互作用を弱め、逆に(b)の単磁極ヘッドでは強めて、高密度記録できる条件で磁界分布を比較したものである。それぞれの媒体の記録層は同じ程度に薄く、かつ前者の場合は記録層の飽和磁化を弱く、後者は強くしている。単磁極ヘッドでは、Co-Cr 記録層と Ni-Fe 軟磁性層とからなる 2 層媒体と組合せ、かつ、できるだけ両者の磁氣的結合が強まるように各々のパラメータを選ぶと、垂直成分だけのきわめて急峻で理想的な磁界分布に近づけられる。

2.3 垂直磁気記録の可能性

図 3 は、垂直磁気記録の計算機シミュレーションによって、(a)孤立磁化転移 (低密度) と、(b)約 22480 b/mm の高密度でデジタル信号を書込んだ場合の Co-Cr 層内の残留磁化分布を求めたものである。厚さ $0.1 \mu\text{m}$ の Co-Cr 層を約 11 nm の大きさのメッシュに分け、それぞれのメッシュ点が最大確率でとりうる残留磁化の平均値を計算した結果である¹⁰⁾。メッシュの大きさは、厚さ $0.1 \mu\text{m}$ の Co-Cr 層を構成する

図 2 リングヘッド(a)と単磁極ヘッド(b)の磁界分布の比較

微結晶粒の大きさ約 10 nm にほぼ等しい．図 3 (b) の結果は，垂直磁化方式によれば高密度ほど磁化転移幅が狭くなり，ビット間隔が微結晶粒数個分に相当するきわめて高密度まで，磁性層全体を垂直磁化モードで記録できることを理論的に証明している．

一方，図 4 は，単磁極ヘッドを用いて図 3 と同様な媒体条件で実測した記録密度特性である¹⁰⁾¹¹⁾．リングヘッドのギャップ損失に相当する現象で，ビット間隔が主磁極の実効厚さのほぼ偶数分の 1 に相当する記録密度で再生電圧が落ち込んでいるが²⁾，主磁極厚の数分の 1 以下である極めて狭いビット間隔 50 nm 以下，すなわち，媒体 1 mm 当たりに 20000 ビット以上の超高密度で，信号を記録し再生できることを示している．これは，単磁極ヘッドの垂直磁界分布がきわめて急峻で，Co-Cr 膜の微結晶粒数個分に相当する，きわめて高い記録および再生分解能を持っていることを実証している．単磁極ヘッドはトラック方向の磁界分布も長手方向と同様に急峻であるから，垂直磁気記録にはナノメータオーダーの記録分解能，すなわち，1 ビットの情報を一辺数 10 nm の領域内に記録できる能力がある．

図 3 垂直磁気記録後の Co-Cr 層内の残留磁化分布

図 4 垂直磁気記録の記録密度特性の一例

3. 超高密度記録への課題と開発動向

図 5 は，これまでの磁気記録の面記録密度の変遷をプロットしたものである．過去 30 年間にハード磁気ディスク装置で約 10,000 倍，VTR で約 500 倍，面密度が増大したが，原理的境界によって線記録密度の向上がそろそろ飽和に達し，トラック密度の向上で面密度を高めている．この図に，上述した垂直磁化方式の可能性を記すと星印 になる．垂直磁化方式によれば，線密度でさらに 10 倍以上，トラック密度で 100 倍以上，したがって面密度で 1000 倍以上の増大が図れる．これは約 4×10^8 b/mm² の面記録密度，単純計算で 1 cm² に約 5 GByte もの情報が記録できることに相当する．

現在の磁気記録技術でも面記録密度を 1 桁改善させるのに 10 年かかっている．高密度記録を実現するには，磁気ヘッドや記録媒体の改良ばかりでなく同時に周辺技術の整備も不可欠である．新しい Co-Cr 合金膜媒体や単磁極型ヘッドを用いる垂直磁化方式で現在の長手磁化方式と同様な信頼度を得るには，技術を熟成させる年月が必要である．当面は，1 ビットを 1 μm 平方内に記録された情報を確実に読取る基本技術を確立することが目標であり¹²⁾，このため，① 1 μm^2 以下の微小領域内に記録された 1 ビットの情報を確実に読取れる能力をもつ磁気ヘッドと，② 磁気ヘッドを媒体に接触させて走行させても損傷させずに高信頼性を確保できる技術，の開発が進められている．

3.1 高分解能高感度磁気ヘッド

記録分解能がきわめて高い垂直磁気記録媒体の能力を最終的に引き出すのは磁気ヘッドである．単磁極ヘ

図 5 長手磁化方式の記録密度の変遷と垂直磁気記録の可能性

ッドは同じオーダーで高分解能記録できるが、現在の回路系を満足させる実用的な SN 比での再生能力には実績がない。すでに技術的に安定し実績のあるリングヘッドを用いて装置の開発を検討しているところが多いが、リングヘッドは垂直磁界成分が小さく、分布が媒体と対向する面にわたって広がり易いため、垂直磁気異方性をもつ媒体への記録能力に原理的な問題がある。

例えば、磁界分布がヘッド起磁力や組合せる媒体の磁気特性などに依存して変わり易いため、記録特性の最適範囲が狭く¹³⁾¹⁴⁾、また高記録密度を実現するために空隙長を狭くすると、消去特性やオーバーライト特性が著しく劣化する。さらに、媒体が強く垂直磁化されるほど孤立ビットに対する再生波形がダイパルス状になり、波形等化回路が必要になる¹⁵⁾。

最近、垂直磁化層の裏面に抗磁力の幾分大きめの軟磁性層を薄く付着させた準 2 層媒体が、リングヘッド記録の再生出力を増大させ、オーバーライト特性を改善したり、ダイパルス性を弱めるうえにも効果のあることが報告されている¹³⁾¹⁶⁾。これはリングヘッドの弱点を媒体で補っている。また、記録信号の波形を工夫してダイパルス性をなくす提案もある¹⁷⁾。

これに対して、単磁極ヘッドの性能を実用レベルに引き上げる努力も続けられている。筆者らが初めて垂直磁気記録の実験を行ったのは、媒体を挟んで主磁極が補助磁極と対向する補助磁極励磁型であった。現在では、補助磁極を主磁極と一体化して片側からアクセスする主磁極励磁型に変わっている²⁾。図 6 は、有限

要素法で計算した各種構造の単磁極ヘッドの再生磁束効率に対して試作されたヘッドの規格化出力をプロットしたものである¹⁸⁾。記録再生条件によってヘッド・媒体間の磁氣的相互作用の程度が違うのでデータにばらつきはあるものの、おおむねよく対応している。主磁極励磁型ヘッドの補助磁極コアの構造改良や主磁極膜の改善によって、単位トラック幅、巻線数、相対速度当りの規格化出力は数倍からほぼ 1 桁近くまで向上し¹⁹⁾²⁰⁾、数 μm の狭トラックヘッドで高画質のビデオ信号を記録再生する実験も行われている²¹⁾。

単磁極型ヘッドの再生能力を決めているのは、補助コアの構造およびコイル位置および主磁極膜の磁気特性である。図 6 に示したように、磁束効率の点からは薄膜で集積化してコアの微小化を図り、主磁極先端近くにコイルを巻くことが望ましい。とくにハード磁気ディスク装置への応用では、薄膜集積ヘッド化が検討されている²²⁾。しかし、最終的には主磁極の素材となる軟磁性薄膜の特性がヘッドの性能を決める。垂直磁化方式では、主磁極膜の透磁率だけではなく、飽和磁束密度の高いことも要求される。ヘッド・媒体間に強い磁氣的相互作用を誘起してヘッド磁界分布を急峻にし、本来の良好な記録特性を得るためにも、媒体全磁性層を強く磁化する必要がある。最近では、Fe 系の高透磁率膜が着目されている²³⁾。

一方、単磁極ヘッドの記録再生分解能を高めるには、主磁極膜の薄膜化と狭トラック化が不可欠である。主磁極膜が微小化されると、その微視的な挙動、例えば磁壁や磁区の動きが、再生電圧の不安定性やノイズの原因になる²⁴⁾。主磁極膜は、理想的には単磁区微結晶粒で構成されているかのように磁氣的に均質で、かつ軟磁気特性の優れていることが望ましい。Fe 系の膜は、結晶粒を微細化しかつ多層構造にすると比較的良好な磁気特性が得られるが²³⁾²⁵⁾、これを主磁極にすると安定で良好な記録特性が得られる¹⁹⁾²³⁾。

主磁極膜を挟み、媒体と接触して走行する基板材料の選択もきわめて重要である。基板材にはセラミックが用いられるが、その緻密さや熱膨張係数などは主磁極膜の良好な軟磁気特性、およびそれに基づく良好な高記録再生感度を引き出すばかりでなく、主磁極の薄膜化を可能にして再生分解能を向上させる。さらに硬度や潤滑性、靱性などは、ヘッドと媒体間の接触走行性を良好にして耐久性、信頼性を向上させる²⁶⁾。

3.2 接触走行への挑戦

磁気記録された情報の再生性能を決めるもうひとつの重要な因子は、磁気ヘッドと記録媒体間のスペーシングである。この煩わしさを逃れるため、一方で光ビ

図 6 各種単磁極ヘッドの再生磁束効率の計算予測と実測の規格化再生電圧

ームを用いる記録方式が開発された。しかし数 10 nm オーダーの微小領域内に 1 ビットの情報が記録できる磁気記録技術の将来性を追求するため、接触走行技術への限らない挑戦を怠るわけにはいかない。

単磁極ヘッドと 2 層媒体とを組合せた垂直磁気記録では、スペーシングが小さくなるにしたがって、主磁極先端部の面積が広いほど媒体との磁氣的相互作用が強まり、再生出力が急速に増大する²⁷⁾。しかし原理的には、ビット面積が微細化するほど主磁極先端もこれに合わせて薄膜化、狭トラック化しなければならないので、狭スペーシングへの要求は垂直磁気記録でも例外ではない。ヘッドの接触走行は媒体磁性層面を損傷する恐れがあり、垂直磁気記録への信頼性を著しく失わせる。このため、ここ数年、接触走行させても媒体を損傷させないための保護層や潤滑層あるいはヘッド支持機構の研究や、金属媒体損傷のメカニズムの解明などに多くの努力が注がれている。

とくに保護層に関しては大きな進展があり、Co-Cr 合金膜を付着させたフレキシブル磁気ディスクで、現在用いられている塗布型ディスクと同等以上の 1000 万パス以上の接触走行耐久性が各方面で実現されている²⁸⁾²⁹⁾。保護層には、カーボンや SiO₂ などの非磁性層を数 10 nm の厚さで被着させるか、Fe-Co や Co-Cr などの垂直磁化層のごく表面を酸化させる方法がとられている³⁰⁾³¹⁾。先頃の国際会議 PMRC '89 でも、これらの方法で耐久性を高めたフレキシブル磁気ディスクの記録再生実験がいくつか公開された。プラスチックフィルム表面をイオンビーム処理し、Co-Cr 層表面を酸化処理して、付着強度や接触走行耐久性、記録特性を大幅に改善した Co-Cr 蒸着テープも試作され、ビデオ信号や PCM 音声信号が高品質で記録再生できることも報告されている³²⁾。

一方、Co-Cr 合金膜を記録層とするフレキシブル磁気ディスクの接触走行耐久性を損なう原因も詳細に調べられている。その一因として、合金膜生成時に生ずる膜面上の微小突起が磁気ヘッドの表面を傷つけ、さらにこの傷が媒体を損傷して急激に破壊することが明らかにされた³³⁾。この微小突起は、成膜前の高分子フィルム表面処理の不完全さや、成膜時にフィルム内部から吹き出すガスやオリゴマーなどが核となって、磁性膜が局部的に異常析出するものである。これらの生じない表面平滑で清浄なベース用高分子フィルムが実現されれば、充分な表面処理だけでこの問題が解決される。

一方、高分子フィルムと金属膜間のヤング率や熱膨張係数の差が大きいと、スパッタ法などによる成膜後

に金属膜表面に、ごく微小な面荒れが生ずる³⁴⁾。これが大きいとヘッドを傷つけ、媒体損傷の原因にもなる。高分子フィルムのこれらの値を金属膜のそれらに近づけるか、ベースフィルムを表面性の良好なガラス基板のような硬いものに変えるとこれは軽減され、ヘッドと媒体両方の耐久性も向上する。

4. 画像記録への応用

筆者らが垂直磁化方式によるビデオ信号の記録再生実験を初めて行ってから、この方式による画像記録の可能性を示す種々の実験結果が報告され、飛躍的な高記録密度性が確かめられた¹²⁾。このため、ディジタル VTR やハイビジョン VTR、大容量画像ファイルやパーソナルイメージファイルなどに用いることが期待され、そのための要素技術の開発に力が注がれ、着実に成果を挙げてきている。

例えば、フレキシブル磁気ディスクを用いた高解像度のスチルビデオや大容量ディジタル画像ファイル装置などの実験が、実用化を目指して行われている。写真 1 は、筆者らが実験しているディジタル画像記録実験の一例である³⁵⁾。線密度約 3250 b/mm、トラック密度 10 tracks/mm で MFM 記録したもので、エラーレートは 2×10^{-6} 以下である。最大の課題は、前述したようにヘッドと媒体の耐久性を高め、高信頼性を確保することである。これについて近年飛躍的な成果を挙げていることをすでに述べた。可搬性の 3.5 インチ径磁気ディスクに 50 MByte 程度の記録容量をもたせて、フロッピーディスク的に気軽に利用できる高画質の画像情報記録装置が、近い将来実現可能な段階に來ている²⁶⁾³⁰⁾³⁵⁾³⁶⁾。

写真 1 フレキシブル媒体を用いた垂直磁気記録による画像記録実験の一例 (線記録密度 3250 FRPM, トラック密度 10 TPM)

一方、情報量の多い画像記録で垂直磁化方式の超高密度記録性を最も期待しているのが、体積記録密度のきわめて高い磁気テープ装置である。垂直磁化方式を利用した高密度記録用テープ、例えば、4 MByte 垂直フロッピーディスクと同様のバリウムフェライト磁性粉を塗布したテープ³⁷⁾、あるいはハイバンド 8 mm 用の垂直配向メタル磁性粉末塗布やメタル蒸着テープがすでに試作されたり、市販されている³⁸⁾⁵⁾。これらはやがてナノメタオーダーの超高密度記録用磁気テープを実現する技術へと発展していくと期待される。すでに Co-Cr 膜を記録層とする磁気テープが蒸着法で試作され、画像記録実験も行われている³²⁾。

5. む す び

磁気記録の原理、すなわち「磁化の極性反転に 1 ビットの情報を担わせる」という点に立ち帰り、さらに「現在の長手磁化方式でも磁化転移領域内は垂直磁化される」ことを考えると、高密度記録を実現するには垂直磁化方式が必然であることが容易に理解できる。この方式の記録限界はまだ無限に遠く、技術もまだほとんど未成熟である。やっといま原理的な可能性が広く認められ、要素技術に見通しを得て、いよいよこれから応用への展開が図れる段階に達したといえる。

垂直磁化方式を、いますぐに完成度の高い現在の長手磁化方式の技術レベル以上に到達させるのはなかなか難しいが、ヘッドと媒体などの要素技術の開発は着実に前進しているので、これからはこれらの完成度をより高めていくと同時に、垂直磁化方式の特徴を生かした高密度大容量画像記録システムの将来像を検討すべき時期に来ている。本格的な画像記録システムの開発はむしろこれからである。

終わりに、東北大学名誉教授、東北工業大学学長岩崎俊一先生の日頃のご指導に深謝する。

(1989 年 11 月 6 日受付)

【参 考 文 献】

- 1) S. Iwasaki, Y. Nakamura: "Analysis for the Magnetization Mode for High Density Magnetic Recording", IEEE Trans., **MAG-13**, 5, pp. 1272-1277 (Sep. 1977)
- 2) 中村: "垂直磁気記録技術", テレビ誌, **39**, 4, pp. 357-365 (Apr., 1985)
- 3) 例えば、永井, 岩崎, 守屋: "合金粉末磁気テープに関する報告", 昭和 34 年電気四学会連大, 734 (1959)
- 4) 例えば、永井, 岩崎, 守屋: "蒸着法による磁性薄膜の製造条件と諸特性", 昭和 35 年電気四学会連大, 448 (1960)
- 5) 佐藤, 近藤, 千葉, 関野, 海老根, 佐々木: "ハイバンド 8 ミリ用蒸着テープの開発", テレビ学技報, **13**, 31, pp. 19-24, VIR 89-4 (June 1989)
- 6) I. Tagawa, Y. Nakakura: "Computer Simulation of Magnetic Recording", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 29p-04, pp. 97-101 (Aug. 1989)
- 7) 大股, 田河, 中村, 岩崎: "長手磁気記録における回転磁化モードの形成過程—計算機シミュレーションによる解析—", 応用磁気誌, **12**, 2, pp. 114-146 (Apr. 1988)
- 8) H. Yoshida, K. Shinohara: "High-density Magnetic Recording Properties of Evaporated Co-Ni-O Thin Film", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 29p-11, pp. 139-144 (Aug. 1989)
- 9) Y. Nakakura: "Condition for Ultra-high Density Magnetic Recording", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 29a-04, pp. 33-42 (Aug. 1989)
- 10) Y. Nakakura, I. Tagawa: "Possibilities of Perpendicular Magnetic Recording", IEEE Trans., **MAG-24**, 6, pp. 2329-2334 (Nov. 1988)
- 11) S. Yamamoto, Y. Nakakura, S. Iwasaki: "Extremely High Bit Density Recording with Single-pole Perpendicular Head", IEEE Trans., **MAG-23**, 5, pp. 2070-2072 (Sep. 1987)
- 12) J. Hokkyo and F. Kugiyu: "Review on Perpendicular Magnetic Recording Development—Recording Physics and Systems—", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 29a-01, pp. 1-19 (Aug. 1989)
- 13) S. Iwasaki, K. Ouchi: "Co-Cr Composite Media Intended for Perpendicular Magnetic Recording by a Ring-type Head", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 29a-02, pp. 21-26 (Aug. 1989)
- 14) M. Suzuki, F. Kugiyu, K. Yoshida, O. Kitakami: "R/W Characteristics of Ring Head/Co-Cr Media with Soft Magnetic Under-layer", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 29a-03, pp. 27-32 (Aug. 1989)
- 15) B. J. Langland: "Phase Equalization for Perpendicular Recording", IEEE Trans., **MAG-18**, 6, pp. 1247-1249 (Nov. 1982)
- 16) S. Nasu, K. Matsumoto, A. Nakajima, M. Isurugi, K. Saiki: "Recording Characteristics of Partially Oxidized Fe-Co Media with an Fe-Co Under-layer", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 29p-01, pp. 79-84 (Aug. 1989)
- 17) N. Watanabe, Y. Ishizuka, E. Imaoka: "Perpendicular Recording in The Foot Print Mode", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 29p-10, pp. 133-138 (Aug. 1989)
- 18) 山本, 中村, 岩崎: "主磁極励磁形垂直磁気ヘッドの記録再生効率", 応用磁気誌, **13**, 2, pp. 113-116 (Apr. 1989)
- 19) 沼澤, 米田, 有賀, 堀内: "狭トラック単磁極ヘッドの記録再生特性", 信学技報, **88**, 122, MR 88-14, pp. 1-8 (June 1988)
- 20) N. Hayashi, S. Yoshimura, J. Numazawa: "Narrow Track Width Single-pole Head with Fe-Si-Al-N Thin Film", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 20p-32, pp. 545-549 (Aug. 1989)
- 21) 米田, 沼澤, 横山: "狭トラック単磁極ヘッドを用いた垂直磁気記録による録画実験", 信学技報, **85**, 120, MR 85-20, pp. 15-20 (June 1985)
- 22) Y. Koshimoto: "Review on perpendicular Magnetic Recording Development —Recording Heads—", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 30a-01, pp. 313-322 (Aug., 1989)
- 23) 例えば、Y. Nakamura, I. Watanabe, N. Tani: "Fe-Si/SiO₂ and Fe-Si-N/SiO₂ Multilayer Film for Single-pole Type Perpendicular Magnetic Recording Head", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 31p-09, pp. 729-724 (Aug. 1989)
- 24) 山川, 中村, 岩崎: "単磁極形垂直磁気ヘッドの再生感度の及ぼす主磁極磁区構造の影響", 応用磁気誌, **9**, 2, pp. 79-82 (Apr. 1985)
- 25) M. Takahashi, H. Shoji, T. Wakiyama: "Soft Magnetic

- Properties for Sputtered Fe Films in Ar+N₂ Plasma", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 30p-39, pp. 585-591 (Aug. 1989)
- 26) M. Ashikawa, S. Ogasawara, N. Sato, H. Funaki: "High Density Video Recording Experiments", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 29p-36, pp. 279-284 (Aug. 1989)
 - 27) Y. Nakamura, S. Yamamoto, S. Iwasaki: "The Effect of Magnetic Interaction Between Medium and Head on Perpendicular Magnetic Recording Characteristics", IEEE Trans., **MAG-22**, 5, pp. 376-378 (Sep. 1986)
 - 28) 例えば, K. Harth, H. Hibt, H. Mannsperger, H. P. Schilder, A. Werner: "Tribological Investigations of Metallic Layers on Flexible Substrates", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 29a-10, pp. 69-72 (Aug. 1989)
 - 29) 例えば, K. Tagami, H. Tamai, T. Arai, H. Hayashida: "Pass Wear Durability of CoCrTa Perpendicular Flexible Disks", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 29p-25, pp. 219-224 (Aug. 1989)
 - 30) M. Isurugi, S. Nasu, K. Matsumoto, A. Nakajima, K. Saiki: "Durability of a Partially Oxidized Fe-Co Perpendicular Magnetic Recording Medium with an Fe-Co Underlayer", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 29p-29, pp. 241-246 (Aug. 1989)
 - 31) K. Honda, R. Sugita, N. Echigo, Y. Sakamoto: "Surface Oxidization of CoCr Evaporated Films", IEEE Trans., **MAG-24**, 6, pp. 2664-2666 (Nov. 1988)
 - 32) R. Sugita, K. Tohma, K. Honda, Y. Kawawake, N. Echigo, T. Ishida: "Magnetic Properties and Recording Performance of Co-Cr Films Deposited Directly on Polymer Substrates", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 31a-05, pp. 645-650 (Aug. 1989)
 - 33) K. Ouchi: "Review on Perpendicular Magnetic Recording Development —Media—", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 31a-01, pp. 611-629 (Aug. 1989)
 - 34) M. Isurugi, Y. Nakamura, S. Iwasaki: "Origin of Microscopic Surface Roughness of Perpendicular Magnetic Recording", IEEE Trans., **MAG-24**, 6, pp. 2658-2660 (Nov. 1988)
 - 35) S. Yamamoto, H. Muraoka, Y. Nakamura, S. Iwasaki: "An Image File System Using Perpendicular Magnetic Recording", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 29p-35, pp. 273-278 (Aug. 1989)
 - 36) K. Kanazawa, J. Sato, J. Ezaki: "Recording Characteristics and Durability of Continuously Sputtered Double Layer Medium", Proc. of Perpendicular Magnetic Recording Conference, 29p-42, pp. 307-311 (Aug. 1989)
 - 37) 一色, 加藤, 小木, 大竹: "バリウムフェライト記録媒体のAV機器への応用", 東芝レビュー, **40**, 13, pp. 1123-1126 (Dec. 1985)
 - 38) 小島: "8ミリデッキにみるハイバンド技術", テレビ学技報, **13**, 38, pp. 7-10, VIR 89-6 (Aug. 1989)

なかむら よしひろ
中村 慶久 昭和43年、東北大学大学院工学研究科電気および通信工学専攻博士課程修了。同年、東北大学電気通信研究所助手、現在、同教授。垂直磁気記録、超高密度磁気記録に関する研究に従事、工学博士。正会員。

テレビジョン学会教科書シリーズ⑥

応用電子物性工学

佐藤勝昭・越田信義 共著

電子材料物性の研究は、エレクトロニクスを支える柱であり、その応用として、エレクトロニクス技術の進歩がもたらされてきた。

本書は、テレビジョン学会教科書シリーズの第6巻であり、単なる基礎知識の修得に留まらず、基礎と応用を関連させながら学ぶことを主眼に執筆されている。

全体は、以下の5章から構成されている。

- 第1章 身の回りの電子機器と電子材料
- 第2章 固体電子物性の基礎
- 第3章 光物性の基礎
- 第4章 電子材料とデバイス
- 第5章 電子・光デバイス

第1章では、テレビジョンシステムを例に電子材料と電子機器の関わり、前半の第2～3章では、固体電

子物性(固体物理)、光物性に関する基礎的事項が記述され、後半の第4～5章では、電子材料、デバイスなどの応用に関連した事項を扱っている。また、前半の各章には応用が、後半の各章には基礎的事例が随所に加味されていること、キーワード等がページ内の別コラムで簡潔に説明されていることなど、読み易い内容と構成になっている。さらに、各章の終わりには、演習問題が設けられるとともに、参考文献には、各分野での名著が挙げられるなど、教科書として十分な配慮がされている。

本書は、大学の学生向けに電子物性の講義用テキストとして書かれているが、光、画像を取り扱う材料やデバイスに関して多くのページがさかれていることも大きな特徴である。また、本書は、従来の型にはまった堅苦しい電子物性関連の教科書とは異なり読み易く、かつ、新しいスタイルで書かれた興味ある記述内容となっており、学生のみではなく技術者、特に放送技術者にとって最適の入門書と思われる。

紹介 大久保達也 (NHK)

テレビジョン学会編、コロナ社刊 (1989年11月20日発行)、定価 2,730円