垂直磁化モードを用いた高密度磁気記録

東北大学 電気通信研究所 岩 崎 俊 一

記録媒体の面に垂直な磁気記録方式を提案した。垂直磁界を発生する磁気ヘッドと、Co-Cr 合金膜による垂直磁化膜を組合せることによって、記録密度の限界を著しく伸ばすことができた。記録密度特性が向上した理由は、リング型ヘッドによる長手磁化とは逆に、記録が高密度になるに従って媒体内の減磁界が零に近づいていくという原理による。

1. ま え が き

磁気記録は、記録媒体を部分的に磁化して信号の記録・再生を行うことを原理としている。したがって部分磁化の形態としては種々の磁化モードが利用できるはずであるが、1935 年のリング型磁気ヘッドの発明以後は、すべて媒体の長手（面内）磁化を用いる方式に統一されてきた。

これは当時の媒体、磁気ヘッド等の性能上、記録が長波長範囲に限られていたことに原因があると思われる。

しかし長手（面内）磁化モードは、原理的には、記録の高密度化とともに媒体内の減磁界が最大値 $4\pi M$ に漸近するという性質をもっており、最近の解析によると、この減磁界が高密度の記録に著しい悪影響を及ぼすことが明らかになってきている。

このため筆者らは、磁気記録に用いる磁化モードを変えることを考え、最近、磁性薄膜を用いた垂直型ヘッドと垂直磁化膜を組合せることによって、媒体面に垂直な磁気記録を実現できることを確かめた。

垂直磁化には、記録の高密度化とともに媒体内の減磁界が零に漸近するという性質があるので、いままでの高密度記録における問題点が大幅に改善できることが予想される。

本文では、まずこの研究の経過について述べ、ついで現在得られている垂直型記録の特性の概要を述べる。

2. 研究の経過

垂直型の磁気記録に関しては、古くは 1930 年代¹⁾、また比較的近年では 1958 年²⁾に磁気ヘッドが提案され

ているが、前に述べたような理由で実用には達せず、まったく捨て去られて今日に至っている。

したがって、現在はすべてリング型ヘッドを用いる方式であり、長手（面内）磁化が示す減磁作用に逆らって記録の高密度・大容量化を図るには、とくに記録媒体の薄膜化と高抗磁力化が必要である。しかしこの方法では、高密度時における信号の残留磁気モーメントが急激に減少して S/N が低下するとともに、記録媒体の作成も非常に難しくなることが予想される。

これに対して、われわれは、記録過程において媒体の内部に作用する磁界に着目して検討^{3)~5)}した結果、高密度記録時には残留磁化の減衰とともに磁化ベクトルの回転が生ずることを見だし、これに基づいて厚い媒体では、

① 短波長領域での再生出力の減衰は、記録媒体断面に磁化の閉ループ構造（これを回転磁化モードと名づけた）が生じ、外部からの再生に有効な磁束を減少させるのが主な原因である。

② 回転磁化モードは磁極をもたないので、そのままでは検出できないが、媒体の厚み方向成分をもつ直流磁界を加えると垂直磁化に変換でき、リング型ヘッドで再生可能となる。

ことを確かめた⁶⁾。

図 1 (a) は、①の回転磁化モードを示す磁気テープ ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) 断面の Bitter 図形⁵⁾⁹⁾である。高密度記録時には、記録レベルとともに減磁作用が増して、残留磁化ベクトルは (b) のモデルのように磁性層内（断面）で回転をはじめる⁶⁾⁹⁾。

(b) では、中心層付近の残留磁化は磁性層内で閉磁路を作り外部に磁力線を放射しないので、磁気ヘッドの再生電圧にはまったく寄与していない。したがって、このような回転磁化モードの発生が、高密度時の再生電圧を

"High Density Magnetic Recording Using Perpendicular Magnetization Mode" by Shun-ichi Iwasaki (Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai)

図 1 磁気テープ断面の Bitter 図形およびモデル図¹⁰⁾
(AC バイアス記録、テープ表面にマイラー膜を
接着して切断した¹⁰⁾)

低下させる大きい原因となっていることがわかる。

これが現在、高密度記録を阻んでいる記録減磁作用に対する解釈であり、したがって記録媒体を薄くすることの実際の効果は、この回転磁化モードの発生を妨げることにあつたといえる。

これに対して、筆者らは上述の回転磁化モードが半波長毎に方向が逆転していることに着目し、厚い媒体でも②のように、(b)の矢印の方向に直流磁界 H_{dc} を加えることによって回転磁化を垂直磁化に変換して再生できることを見いだした⁴⁾⁶⁾。

これは、高密度記録時には媒体面に垂直な磁化モードを利用できることを示唆する重要な事実であり⁶⁾、これに基づいてさらに効率の良い垂直磁化の実現方法を検討した結果、

③ 磁気テープをはさみ、磁性体の薄膜と厚膜を離して同一軸上に対向させ、これを厚膜側から励磁する磁気ヘッドによって、分布が鋭くかつ強い垂直磁界を発生することができる⁷⁾。

④ スパッタ法による Co-Cr 金属膜によって、比較的高い M_s をもち、かつ膜面に垂直な磁化容易軸をもつ薄膜を実現でき、これは垂直記録媒体としてきわめて有望である⁸⁾。

ことを見だし、2つを組合せることによって、いままでは不可能と考えられてきた垂直型記録が容易に実現できることを確かめた⁹⁾¹⁰⁾。

3. 垂直型記録の特徴

垂直磁化の性質は、最近磁気バブルを通じて広く理解されているが、これを磁気記録に応用したときの効果を

図 2 磁化モードの特徴

図 2 に要約して示す。

すなわち、長手磁化(a)に対して垂直磁化(b)の最大の利点は、記録波長 λ が短くなるに従い内部減磁界 H_d が零に近づき、さらに記録過程で作用する動的な減磁界³⁾も、垂直型ヘッド(後述)の影響によって減少することが予想されることである。

このため膜厚 δ が厚く、飽和磁化 M_s が大きい媒体を用い高密度の記録ができ、長手磁化のようにとくに抗磁力 H_c を極端に増す必要はない。ただし膜面に垂直な磁化容易軸をもつ媒体を実現することが重要な条件となる。

これらは従来の記録媒体とはまったく逆の性質である。

以上は原理上の比較であるが、リング型ヘッドを用いる(a)の方式では、実際には、図1のような回転磁化モードの発生を防ぐため磁気テープの表面層だけを磁化して用いなければならない。高密度記録時には、再生電圧の最大値は有効磁化層の厚みがほぼ記録波長 λ の1/4のときに生ずることが確かめられている⁵⁾⁹⁾。

このため、信号の残留磁気モーメントは(a)の状態よりさらに減少し、再生電圧が低下する。

また記録媒体の残留磁化において、垂直成分 M_y が長手成分 M_x を越す波長を決めるのは減磁作用である。

媒体の厚み δ について均一に、トラック幅無限大で長手磁化、垂直磁化の正弦波信号を仮定したときのそれぞれの減磁率は、近似的に次式で与えられる。

$$N_x = 4\pi \left\{ 1 - \frac{\lambda}{2\pi\delta} (1 - e^{-2\pi\delta/\lambda}) \right\} \quad (1)$$

$$N_y = 4\pi - N_x$$

したがって、 $\lambda/\delta \leq 4$ では $N_x > N_y$ となり、垂直記録の方が有利となることが予想できる。

一方、デジタル記録では、両者の差はさらに明らかである。すなわち、媒体に垂直磁化 M_r の弧立転移を仮定すると、媒体内の垂直磁界(減磁界)は、

$$H_y = 4M_r \left\{ \tan^{-1} \frac{x}{(y-\delta/2)} - \tan^{-1} \frac{x}{(y+\delta/2)} \right\} \quad (2)$$

図3 垂直磁化による媒体内減磁界

で与えられ、図3の実線のように転移の中心では必ず零になることがわかる⁹⁾¹⁰⁾。

記録過程において、最も強い減磁はヘッド磁界 H_h が加わった瞬間、すなわち媒体内部に $(H_h + H_d, H_d; \text{減磁界})$ が作用したときに生ずるが³⁾、垂直磁化では H_y (減磁界) が上述の傾向を示すため転移の近傍での内部磁界の増加は少なく、したがって、長手磁化のように極端に転移幅を広げ、また peak shift (位相推移) を増すことはない。また転移が密集しても、ビットごとの磁極間の相互作用は減磁界 H_y を減らし磁化を強めるように働くだけである。

これらは垂直磁化が、長手磁化にくらべて本質的に高密度記録に適した磁化モードであることを表わしている。しかし垂直磁化は、当然長手成分磁界 H_x (図3点線) をも生ずるので、なるべく純粋な垂直磁界を生ずる磁気ヘッドと異方性分散が少ない垂直磁化膜を組合せ、長手方向への磁化回転を防ぐ必要があることが実験的に確かめられている。

4. 垂直記録用磁気ヘッドおよび記録媒体

4.1 磁気ヘッド

垂直記録用ヘッドは、媒体面に垂直に、強くかつ鋭い分布をもつ磁界を発生することが必要である。その構造としては種々のものが考えられるが¹¹⁾、図4に現在実験に用いている磁気ヘッドを示す。

これは短冊型の磁気薄膜 (パーマロイ膜、厚み $3 \sim 1 \mu\text{m}$) の主磁極が媒体に接触して記録することを特徴とするもので、媒体の裏側に主磁極にくらべて充分大きい補助磁極を置いて、前記の主磁極を補助磁極側から励磁する。

この構造によると、主磁極は先端から磁化するため補助磁極側に加える起磁力が少なくすみ、また主磁極を直接励磁するよりは、はるかに飽和の影響が少ないことが確かめられている¹²⁾。

図4 垂直型ヘッドの磁界分布 (モデル実験)

とくに重要な特徴は、両磁極の中心軸の精度が低くても、常に傾きのない単磁極型の垂直磁界を媒体に加えることができることである。図4に、同ヘッドの磁界分布に対するモデル実験を示す (主磁極を約5000倍に拡大)。

同図の曲線I (点線) は主磁極近傍 ($Y=0.05T_m$) の垂直磁界を示し、これは補助磁極からの磁界 (曲線II, 点線) と主磁極自身から発生する磁界の和である¹⁰⁾。したがって曲線IとIIの差をとれば、主磁極は実線のような磁界 (ほぼ単磁極型) を発生していることがわかる。モデルでは主磁極の透磁率 μ が低いいため曲線IIの成分が大きく分布は裾を引くが、実際の磁気ヘッドでは薄膜の μ が充分高いため、ほぼ実線に近い鋭い分布を示すことが予想される¹¹⁾。

これは、主磁極の膜厚 T_m に等しい空隙幅をもつリング型ヘッドの長手磁界の分布形状にほぼ一致することがわかる¹⁰⁾。

さらに興味がある点は、この構造では主磁極と媒体の磁化間の相互作用によって、媒体内により鋭い磁化分布を実現できることである。すなわち、媒体の垂直異方性 (あるいは垂直方向の最大透磁率) が大きいときには、ヘッド・媒体間の磁束はほぼ連続となって、減磁界としては媒体の裏面の面磁荷の影響が支配的となる。

この減磁界は、常に図4のヘッド磁界による磁化領域をせばめるように作用し¹²⁾、長手磁化のように磁化領域を広げる³⁾ ことはない。この傾向は、媒体の飽和磁化 M_s を増しても変化しないことが予想される。

このため、長手磁化にくらべて記録時の減磁作用が著しく改善されることが期待でき、これは実験でも確かめられている¹⁵⁾。

写真1に、研究室で試作した磁気ヘッドの一例を示す。同図において(A), (B) がそれぞれ主磁極および補助磁極を示し、他はこれを支えるための非磁性体の支持機

写真 1 垂直型ヘッドの外観 (A: 主磁極, B: 補助磁極および巻線)

構である。

この型の磁気ヘッドは、補助磁極を含む磁気回路の効率、あるいは記録媒体をはさむ必要があることなどの面でやや不便であるが、強くかつ鋭い垂直磁界を確実に発生できるという点で原理的に優れたものと考えられる。

また主磁極の摩耗が磁界分布に影響しないこと、あるいは補助磁極を充分離して配置できることなど、実用上の利点ももっている。

4.2 記録媒体

垂直磁化膜に関しては、最近磁気バブル材料として多くの物質が報告されている。記録媒体としては、磁気特性 (M_s , H_c)、膜作成の容易さ、付着強度などで、バブル材料とは異なった条件が必要である。すなわち、図 2 で述べた原理に従い、なるべく高い M_s と、これを保持する H_c (特に低密度側で必要) を示すこと、さらに大量に作成する場合の容易さなど考慮し、われわれは RF スパッタ法により Co-Cr 垂直膜を作成した⁸⁾¹³⁾。

Co は大きい結晶異方性エネルギーをもち、垂直磁化膜となる可能性があるが、比較的薄い膜厚でこれを実現するには、一般的に、異方性磁界 H_k に関し、

$$H_k \geq 4\pi M_s, \text{ or } K_u \geq 2\pi M_s^2 \quad (3)$$

の条件が必要である (K_u : 結晶異方性定数)。

図 5 Co-Cr スパッタ膜の M-H ループ (実線: 垂直, 点線: 面内)

このためには、 c 軸が膜厚方向に配向した状態で Cr を添加し、 M_s を低下させることが有効である⁸⁾。

図 5 に、試作した膜の面内 ($\parallel$), 垂直 ($\perp$) 方向の M-H ループの測定結果を示す¹³⁾ (ベース材料は耐熱性のある polyimide フィルムを使用)。

同図は膜の Cr 組成比を (A) 16 at. %, (B) 18 at. %, (C) 20 at. % としたときの M-H ループで、直径 5 mm のディスク状試料 (厚み $0.8 \mu\text{m}$) で測定している¹³⁾。

この結果から、Co-Cr スパッタ膜は明らかに垂直面内に磁化容易軸をもつことがわかる。

なお垂直面内の M-H ループ (実線) は試料の減磁界の補正をしていないので、これを補正すればほぼ理想的な角形ヒステリシス特性を示すことがわかる。したがって垂直磁化では、高密度の信号に対して減磁がきわめて少ない記録を実現できることが予想される。

Co-Cr 膜には現在なお多くの研究すべき点があるが¹⁴⁾、とくに RF スパッタ法による薄膜は、付着強度が大きくかつ M_s が高い範囲まで著しい垂直異方性を示すという点で、記録媒体として非常に優れた性質を示すことが明らかになってきている。

5. 垂直型記録特性

次に、垂直型ヘッドと垂直磁化膜を組合せて記録を行ったときの動作特性を要約して述べる⁹⁾¹⁰⁾¹⁵⁾。

図 6 は、Co-Cr 膜の膜厚をパラメーターとして、デジタル信号における再生電圧対記録密度特性を測定した結果である。なお同図には、比較のためリング型ヘッドによって現用の $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ テープを定電流記録 (低密度信号の飽和電流の約 35% の電流値: 高密度側で最高出力を与える) したときの特性を示した。

前述の垂直型ヘッドは再生にも用いることができるが、短波長信号を再生するため主磁極の膜厚 (リング型

図 6 デジタル信号の記録密度特性 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ テープにリング型ヘッドで記録, 再生)

ヘッドの空隙に相当する)を薄くすると再生感度が著しく低下するので、図6では、垂直型ヘッドによって飽和型の記録を行い、狭い空隙をもつリング型ヘッド($G_p = 0.8 \mu\text{m}$)を用いて信号を再生している。

同図から、Co-Cr膜を用いた垂直記録によって、膜厚にかかわらず35 kBPI(キロビット/インチ)の記録密度(D_{50} 値)を達成していることがわかる。

とくに重要な点は、 $1 \mu\text{m}$ あるいはそれ以下の短い波長範囲で、再生ヘッドの空隙損失に基づく再生電圧の谷と2番目の山が測定できることであり、リング型ヘッドによる長手記録ではこのような例はない。

図の点線は、再生電圧の谷の記録波長を実効空隙($G_{pe} = 1.05 \mu\text{m}$)として、再生ヘッドの空隙損失を補償したときの出力増加の予想値である(ヘッド・媒体間のスペースによる分離損失を補償すれば、この値はさらに増加する)。

したがって、より狭い空隙をもつ再生ヘッドを用いれば、図6の記録密度特性はさらに高密度側に伸ばすことができる。

以上の結果を要約すると、垂直記録では、

㊸ 高密度範囲で再生電圧が著しく増加し、再生過程での損失(ヘッドの空隙および分離損失)を補償すると、媒体の残留磁化は高密度範囲でもほとんど減磁していない。

㊹ 飽和型記録でも、媒体の膜厚にかかわらず高密度の記録ができる。膜厚を増すことによって、全波長範囲の再生電圧が増加する。

ことがわかる。

これらの傾向は図2(b)で述べた垂直磁化の基本的特徴と一致するもので、前述の垂直型ヘッドとCo-Cr膜の組合せによって、ほぼ理想的な垂直記録を実現していることがわかる。

なお図6の記録密度特性を定量的に解析するには、媒体の異方性分散¹⁴⁾あるいは低密度側で増加する減磁作用の影響などを考慮する必要がある。

㊸に関連して、記録密度をどこまで伸ばすことができ

写真2 Co-Crスパッタ膜表面のBitter図形(1 μm /1目盛)

るかという点は興味ある問題であろう。

写真2に100 kBPI(記録波長 $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$)の記録に対するCo-Cr膜表面のBitter図形を示した。

この記録密度(4,000ビット/mm)では現在リング型ヘッドによる再生は難しく、またBitter法でも直接観測は難しいので、記録したCo-Cr膜面に垂直な直流磁界を加え⁴⁾、Bitter図形上で50 kBPIの密度に変換して観測している。同図から、100 kBPIの密度の原信号がきわめて均一に記録できていることがわかる。なお、現在磁気ディスク装置の実用密度は最高6.3 kBPIである。

原理的には、垂直記録の密度(記録過程)の限界は、長手磁化のような減磁作用による制限(静磁エネルギーの条件)から解放され、記録媒体の結晶粒の細かさによる制限が支配的となる密度にまで達することが予想される。

前述のCo-Cr膜の平均粒径は200 Å(0.1 μm 厚)~600 Å(0.5 μm 厚)であり、これが記録の限界のひとつの目安を与えるものと思われるが、現在は図6に示すように、再生ヘッドによる限界はるかに低密度側にある。

また㊹の結果は、高密度記録時における信号のS/Nを増す点で重要であろう。

すなわち長手磁化では、2章で述べた回転磁化モードの発生により、最大出力を生ずる有効磁化層は記録波長 λ とともに減少するが、垂直磁化では㊸から常に膜の全厚を磁化できると考えてよい。また図2の原理からみて、その残留磁束密度は記録が高密度になるに従って長手磁化では抗磁力、また図5のCo-Cr膜による垂直磁化では飽和磁束密度の値に漸近するので、これらを考慮すると、たとえば波長1 μm 付近では、現用の高密度テープに比較して50~80倍の残留磁気モーメントを実現できることが予想される。

より短波長範囲ではさらに差が増加する。

これは、磁気記録のS/Nを向上するうえできわめて有効なものと考えられる。

写真3に、垂直型記録による(a)低密度(200 BPI)および(b)高密度(30 kBPI)の信号の再生波形を示した。(a)では、1ビット当り正、負2個のパルスを生じているが、これは再生にリング型ヘッドを用いたことによる影響⁷⁾である。

また(b)の再生波形でS/Nが良いのは、前記のように残留磁気モーメントが増したことによる効果と考えられる。

その他、垂直記録には、高密度時のpeak shiftがきわめて少ないこと、あるいはACバイアス記録時には記録波長によって最適バイアス電流値がほとんど変わらず、

(a)

(b)

写真 3 垂直型記録の再生電圧波形
(a) 記録密度 200 BPI, (b) 記録密度 30 kBPI

また短波長でも飽和記録ができるなど、いままでの長手記録の問題点を一挙に解決するような性質があることが確かめられている。

これらはすべて、垂直記録では記録の高密度化とともに減磁界が零に近づくという図2の原理から生じていることが予想できる。

6. む す び

本文では、垂直記録の研究の現状について要約して述べた。これまでの基礎実験によると、この方式が高密度の記録に対して本質的に優れた特性をもっていることがわかる。

とくに本方式によって、現在の長手（面内）記録では避けることができなかった減磁作用による記録分解能の制限が除かれたことは、将来の磁気記録の高性能化に対してきわめて明るい見通しを与えるものと思われる。

なお、この実験で重要なことは、より純粋な垂直磁界と垂直磁化膜の組合せが、高密度の記録に対して長手記録にはない効果を生じていることである。今後、磁気ヘ

ッド、記録媒体などの開発を進める場合には、常にこの原則に従う必要がある。

また垂直磁化が、原理的にデジタル信号の記録に適していると考えられることから、記録方式の検討も積極的に進める必要がある。

本研究に対しては、日本学術振興会 茅誠司会長のご鞭撻と、文部省科学研究補助金および放送文化基金の援助を受けた。

またこの着想を具体化するに当っては、東北大学電気通信研究所 中村助教授、大内助手、竹村、渡辺 両技官の協力を得た。心から謝意を表する次第である。

(昭和53年2月22日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 永井：磁気記録の研究の思い出，日本応用磁気学会誌，1, 2 (1977)
- 2) A. S. Hoagland: High-resolution magnetic recording structures, IBM Jour. (Apr., 1958) 91-104
- 3) S. Iwasaki and T. Suzuki: Dynamical interpretation of magnetic recording process, IEEE Trans., **MAG-4**, 3 (1968) 269-276
- 4) 岩崎，竹村：短波長記録における回転磁化モードとその変換について，信学会磁気記録研資，MR 74-21 (1974)
- 5) 岩崎，平田：粉末図形法による磁気テープ記録状態の観察，信学会技報，76, 55, MR 76-7 (1976)
- 6) S. Iwasaki and K. Takemura: An analysis for the circular mode of magnetization in short wavelength recording, IEEE Trans., **MAG-11**, 5 (1975) 1173-1175
- 7) 岩崎，中村，渡辺：単磁極形磁気ヘッドの記録特性，信学会技報，76, 123, MR 76-16 (1976)
- 8) 岩崎，山崎：垂直磁気異方性をもつ Co-Cr スパッタ膜について，第7回応用磁気学術講演会，4pA-7 (1975)
- 9) 岩崎：垂直磁化による磁気記録，固体物理，12, 2(1977) 39-45
岩崎：磁気記録の将来に関する一考察，日本応用磁気学会誌，1, 2 (1977)
- 10) S. Iwasaki and Y. Nakamura: An analysis for the magnetization mode for high density magnetic recording, IEEE Trans., **MAG-13**, 5 (1977) 1272-1277
- 11) 岩崎，中村，山森：垂直記録用磁気ヘッドの磁界分布，信学会技報，77, 184, MR 77-25 (1977)
- 12) 岩崎，鈴木：高密度磁気記録における垂直記録機構の解析，昭 51 年信学総合大会，183 (1976)
- 13) 大内，岩崎：Co-Cr 垂直磁化膜の結晶配向，電気関係学会東北支部連大，1B 15 (1977)
- 14) 岩崎，大内：Co-Cr 垂直磁化膜の結晶構造，第1回日本応用磁気学会学術講演会，1pB-1 (1977)
- 15) 岩崎，中村：垂直形磁気記録機構の考察，第1回日本応用磁気学会学術講演会，1pA-11 (1977)