磁化モデルを組み込んだ有限要素法による 単磁極ヘッド・二層膜媒体間磁氣的相互作用の解析

Analysis of Head to Medium Magnetic Interaction in Perpendicular Magnetic Recording
by Finite Element Method Combined with Magnetization Model

田河育也・中村慶久

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980)

I. Tagawa and Y. Nakamura

Res. Inst. of Elec. Commun., Tohoku Univ., 1-1, Katahira 2-chome, Aoba-ku, Sendai 980

A new simulation program has been developed for the analysis of perpendicular magnetic recording. This is the finite element method program which adopts a magnetization curling mode and a statistical method to calculate vectorial magnetizations in a medium. Using this simulation analysis, we could explain quantitatively the effects of the magnetic interaction between a single-pole head and a double-layer medium which were predicted from the experimental results. Furthermore, we were able to analyze a vectorial recording and reproducing mechanism. This new program is a very powerful tool which can more precisely simulate the magnetic recording process.

1. はじめに

筆者らは、単磁極型ヘッドと Co-Cr/Ni-Fe 二層膜媒体を用いる垂直磁気記録方式の記録再生メカニズムの解析や、ヘッドと媒体を組み合わせたシステム全体の最適条件を見いだすことを目的として、定量性ある計算機シミュレーションの検討を集中的に進めている¹⁾。

既に、セルフ・コンシステント磁化を逐次近似法で求める方法で計算機シミュレーションを行い、

(a) 記録再生特性の Co-Cr 層の M_s および $H_{c\perp}$ 依存性や記録密度特性など、実測の傾向をほぼ再現する、

(b) 600 kFRPI 近い高密度記録再生を確認する、などの成果を得ている²⁾。しかし、この手法では、①媒体裏打ち軟磁性層の μ および B_s が無限大、②ヘッド磁界分布が Co-Cr 層内磁化分布によらず一定、と仮定しているため、ヘッドと媒体の磁気飽和および磁氣的相互作用の考慮が不十分である。

一方、最近、電磁界の新しい数値解析法として有限要素法が各所で用いられ、磁気ヘッドの飽和現象の解析に

大きな成果を挙げている。しかし、磁気記録解析においては極めて重要な、記録媒体の回転磁化機構³⁾までも考慮したシミュレーションはほとんど行われていない。

そこで筆者らは、これまでのシミュレーション解析において構築してきた媒体の磁化機構モデルを有限要素法に結合させ、新しいシミュレーションプログラムの開発を行った。

2. 媒体の磁化モデルを考慮した有限要素法

従来、有限要素法で記録過程の磁化を計算する場合には、しばしば Potter & Schmulian の方法⁴⁾が用いられている。この方法は、媒体の磁化容易 (X) 方向と磁化困難 (Y) 方向に測定される磁化曲線を用い、 M_x, M_y をそれぞれ、 H_x, H_y から別々に求めベクトル和を計算するのである。この方法では、例えば 45° 方向に非常に強い磁界をかけたとき、 M_x, M_y 共に M_s になるためにそのベクトル和である 45° 方向の磁化は M_s の約 1.4 倍になり不合理である。また当然、記録時のヘッド磁界の回転を伴う複雑な磁化過程の解析も不可能である。

このため筆者らは、磁界解析のための有限要素法において、記録媒体の磁化については従来のシミュレーションで用いている磁化機構モデルの導入を試み⁵⁾、Co-Cr 層にカーリング磁化反転モード⁶⁾を基本とする磁化機構モデル⁷⁾を適用した。磁化モデルでは、磁界ベクトル H を引数とするベクトル関数として磁化ベクトル M を求めるが、筆者らは、ベクトル・ポテンシャルの計算に便利のように、これを磁化電流に換算して電流要素に変換している⁸⁾。ヘッドの主磁極や媒体裏打ち層などの軟磁性体は、非線形性さえ考慮すればヒステリシスを無視しても大きな誤差は生じないので、 μ - B 曲線により非線形性を取り入れる⁹⁾。

Fig. 1 Distributions of dynamic permeabilities and magnetization vectors around main-pole tips for Co-Cr layers having low (a) and high (b) saturation magnetizations.

3. ヘッド・媒体間磁氣的相互作用

3.1 Co-Cr 層の動作時の透磁率

Fig. 1(a), (b) は、主磁極励磁型単磁極ヘッドと Co-Cr 層の M_s が 2 倍異なる 2 種類の Co-Cr/Ni-Fe 二層膜媒体を想定して、主磁極を励磁した場合の Co-Cr 層内ベクトル磁化分布、および動作透磁率分布を新しい計算機シミュレーションによって求めたものである。ヘッドコイルに加える電流密度は $35 \times 10^4 \text{ A}/\mu\text{m}^2$ で一定、また、Co-Cr 層の初期状態は交流消磁状態、軟磁性裏打ち層の B_s は 7 kGauss で、主磁極の B_s がそれぞれ 7 kGauss と 12 kGauss であると仮定している。

磁界が印加された状態、すなわち動作時の磁氣的結合の強弱は、Co-Cr 層の動作時の透磁率の大小としてとらえることができる。Fig. 2 は、Co-Cr 層が交流消磁状態から過飽和状態に至る過程での、動作透磁率の変化を示したものである。 $M_s = 400 \text{ emu/cc}$ ($B_s = 5 \text{ kGauss}$) の場合、最適磁化状態では $\mu = 5$ くらいにまでなるが、Fig. 1 (a) のように、Co-Cr 層が過飽和になると、主磁極真下での Co-Cr 層内透磁率が 2 以下と低く、磁氣的結合が弱くなる。一方、同図 (b) のように M_s が主磁極に匹敵するくらい高いと、励磁磁界が大きくても透磁率が高く、磁氣的結合が強いためにヘッド磁界が急峻になっている。

Fig. 2 Dynamic permeabilities of a Co-Cr layer for various magnetization intensities.

3.2 ヘッド磁界分布の変化

Fig. 3 は、ヘッド主磁極、Co-Cr 記録層、および軟磁性裏打ち層の飽和磁束密度 B_s の、それぞれの主な組合せについて、ヘッドコイルの電流密度に対する Co-Cr 層内磁束密度分布の強さと急峻さを示したものである。 B_y は磁束密度分布の最大値、 σ は磁束密度が最大値の半分になる位置での傾きである。図中、 σ は逆数をとっているのが小さいほどヘッド磁界が急峻である。

ヘッド磁界分布が変化するのヘッドと媒体の磁氣的結合の強さが変化するため、これから、

(a) 主磁極の B_s が高いほど強いヘッド磁界が生じ

Fig. 3 Strength " B_y " and sharpness " σ " of the head-field distribution versus recording current density for various combinations of the saturation flux density " B_s " of a main-pole, a Co-Cr layer and a soft magnetic back-layer.

る。

- (b) 励磁磁界が小さいとヘッド磁界の分布もなだらかで大きくなるほど急峻になる。
- (c) しかし、Co-Cr 層が過飽和になると分布が広がる。
- (d) 強い励磁磁界でも分布の急峻さが保たれる条件は、Co-Cr 層の B_s が軟磁性裏打ち層の B_s と同じくらい高いこと、かつ、これらの B_s が主磁極の B_s の 1/2 以上であることである。

など、従来から定性的に予想されていたことが定量的に明確に示されている。

Fig. 4 Recording (a) and reproducing (b) processes and reproduced waveform (c), in perpendicular magnetic recording for an isolated transition obtained by the finite element method combined with the medium magnetization model.

4. 記録再生特性

新しい有限要素法プログラムを用いて、垂直磁気記録の記録再生過程をシミュレーションした結果の一例を、Fig. 4 に示す。膜厚 $0.1 \mu\text{m}$, $M_s = 400 \text{ emu/cc}$, $H_{c\perp} = 700 \text{ Oe}$ の Co-Cr 膜を想定し、主磁極は、膜厚 $0.4 \mu\text{m}$, $B_s = 12 \text{ kGauss}$, $\mu_i = 4000$ で、媒体裏打ち層は、膜厚 $0.5 \mu\text{m}$, $B_s = 7 \text{ kGauss}$, $\mu_i = 1000$ に設定した。

Fig. 4(a) は、孤立転移を書き込む過程での磁力線分布と Co-Cr 層内のベクトル磁化分布の変化である。磁力線分布、すなわちヘッド磁界分布は Co-Cr 層の磁化状態によって微妙に変化するが、基本的には静的なヘッド磁界分布と同様であり、特に転移直後は静的な場合と同じく非常に急峻である。同図(b)は再生過程、同図(c)は、ヘッドコイルに鎖交する磁束を時間微分して得られた孤立再生波形である。また、Fig. 5 は、単磁極ヘッドの主磁極に巻かれたコイルの電流密度に対する再生電圧特性である。

Fig. 6 は、上述の計算機シミュレーションと同様な記録再生条件での、実測の、記録電流に対する再生出力特性と孤立再生波形である。主磁極は、膜厚が $0.3 \mu\text{m}$, $B_s = 12 \text{ kGauss}$ の Co-Zr-Nb 膜、媒体裏打ち層は、膜厚が $0.5 \mu\text{m}$, $B_s = 7 \text{ kGauss}$ の Cu-Mo-Ni-Fe 膜、Co-Cr 層は、膜厚 $0.1 \mu\text{m}$, $M_s = 370 \text{ emu/cc}$, $H_{c\perp} = 650 \text{ Oe}$ である。

上述のシミュレーション結果は、以下の3点、

Fig. 5 Reproduced voltage *versus* recording current density characteristics in perpendicular magnetic recording, obtained by the finite element method combined with the medium magnetization model.

Fig. 6 Reproduced voltage *versus* recording current characteristics (a) and a reproduced waveform (b), obtained by the experiments.

- (a) 再生波形の立ち上がりがなだらかで、 H_{c1} が 700 Oe 程度ではアンダースhootが見られない。
- (b) 記録電流に対する再生電圧特性の未飽和レベルでの立ち上がりが非常に急峻である。
- (c) 再生電圧は飽和後の記録電流を大きくしても低下しない。

などを含めて実験結果と極めてよく対応する。これらは従来の手法では実測と若干差のみられた点である⁵⁾。

この中、(a)、(b) は、有限要素法シミュレーションが、Co-Cr 層の磁化レベルの変化に伴うヘッド・媒体間磁

氣的結合状態の変化をきめ細かく考慮できることを示しており、また (c) は、ヘッドおよび媒体の磁気飽和を精度よく考慮できることを示している。

5. む す び

垂直磁気記録媒体に対する磁化機構モデルを有限要素法に組み込んだ、新しい磁気記録再生シミュレーションプログラムを開発した。これは、Co-Cr 層を構成する微結晶粒の磁化反転機構にカーリングモードを適用し、磁化容易軸と異方性磁界の分散を確率密度関数として、確率的に磁化ベクトルを求めるものである。

このシミュレーションプログラムは、従来のシミュレーションでは取り扱えなかったヘッドと媒体軟磁性層の磁気飽和や記録媒体の磁化の強さに依存する主磁極と媒体間の磁氣的相互作用、および従来の有限要素法では取り扱えなかった回転ベクトル磁化機構など、記録媒体の複雑な磁化過程が考慮できる。

この新しいシミュレーション解析により、Co-Cr 層の B_s が軟磁性裏打ち層の B_s と同じくらい高く、主磁極の B_s の 1/2 以上であるとき強い磁氣的結合状態が得られることなどが確かめられた。

文 献

- 1) 中村慶久, 大谷 毅, 岩崎俊一: 日本応用磁気学会誌, **10**(2), 109 (1989)
- 2) Y. Nakamura and I. Tagawa: Digest of INTERMAG, AF-01 (1988).
- 3) 中村慶久, 岩崎俊一: 電子情報通信学会技術報告, MR66, 5-6, (1966).
- 4) R. Potter and R. Schmulian: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-7**(4), 873 (1971).
- 5) 田河育也, 中村慶久: 電子情報通信学会技術報告, MR88-33 (1988).
- 6) S. Shtrikman and D. Treves: *J. Phys. Radium*, **20**, 186 (1959).
- 7) 中村慶久, 田河育也, 岩崎俊一: 日本応用磁気学会誌, **11**(2), 119 (1987).
- 8) 中田高義, 高橋則雄: “電気工学の有限要素法”, 森北出版.

1988 年 11 月 22 日受理, 1989 年 2 月 10 日採録