有限要素法による MIG ヘッドの非線形磁界解析

Nonlinear Magnetic Field Analysis of an MIG Head by FEM

張 林佳・松本光功・森迫昭光・榮岩哲二*・武井重人・小穴和行
信州大学工学部, *信州大学地域共同研究センター, 長野市若里 500 (〒380)

L. Zhang, M. Matsumoto, A. Morisako, T. Haeiwa,* S. Takei, and K. Oana

Faculty of Engineering and *Cooperative Research Center, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano 380

Finite element magnetic field analysis is one of the best tools for designing magnetic recording heads and arriving at a better understanding of the various phenomena associated with them. This paper describes the modeling of a metal-in-gap (MIG) magnetic recording head using the 2-D finite element method, and various analyses carried out on the basis of this modeling. It was confirmed that an MIG head, owing to the effect of its metallic layer, generates a much steeper magnetic field gradient than a ferrite head and alleviates the saturating characteristics of the magnetic field in relation to the magnetomotive force. The optimized thickness of the metallic layer deposited on one side of the gap is $0.4\text{--}1.0\text{ }\mu\text{m}$ for a frequency lower than 10 MHz.

Key words: finite element method, metal-in-gap head, ferrite head, magnetomotive force, gap length, eddy current, magnetic field gradient

1. はじめに

高密度磁気記録実現のため、磁気記録媒体は高保磁力化の一途をたどり、これに相応して磁気ヘッドコア材料の高飽和磁束密度化が求められてきた。高飽和磁束密度材料の開発・研究が行われる一方で、フェライトヘッドのギャップ近傍に高飽和磁束密度の金属層を付着させた Metal-In-Gap (MIG) ヘッドが開発・実用化されるに至った。MIG ヘッドは、フェライトの周波数特性の良さと金属層を付けることによって大きな記録磁界が得られるという長所をもつ。一方、高周波域における金属層の渦電流損¹⁾による透磁率の減少やフェライトと金属層の境界面に疑似ギャップを発生するなどの短所も併せもつ。その設計にあたって、数値解析によるシミュレーションはたいへん有効である。

有限要素法を用いる MIG ヘッドの設計に関しては、飯塚・金井らによる詳細な報告があり、金属層の飽和磁束密度および厚さの効果を調べている^{2), 3)}。本来は、磁気ヘッドの数値解析は 3 次元で行うべきであるが、その要素分割は、より困難になり、計算時間も増加する。また、2 次元と 3 次元の非線形解析で得られる磁界分布の差が小さいという結果も報告されており⁴⁾、本報告のような 2 次元解析も基本的には重要であると考えている。

本報告では、MIG ヘッドの最適設計を目的に、特に金属層がコア両面ならびに片面に付着されている場合の MIG ヘッドの

特性の差異を検討するため、材料の非線形特性を考慮して、Newton-Raphson 法を用いた二次元有限要素法のプログラムを作成し、MIG ヘッドから発生する記録磁界の分布ならびに磁界勾配を求めた。さらに、高周波域で渦電流がどのように記録磁界に影響するかについて解析した。

2. 解析方法

2.1 計算方法

二次元時間依存場の解析に限定した方程式⁵⁾

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_y \frac{\partial A}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_x \frac{\partial A}{\partial y}\right) = -J_0 + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (1)$$

を基本方程式とする。ここで、 A は磁気ベクトルポテンシャルの z 方向成分、 J_0 は記録電流密度ベクトルの z 方向成分、 ϕ は記録電位、 ν_x, ν_y はそれぞれ材料の磁気抵抗率の x 方向成分、 y 方向成分、 σ は導電率である。

まず、変分法を用いて未知パラメータ A に関する全体節点方程式を作り、各節点の線形解を得る。次に、材料の非線形特性を考慮し、Newton-Raphson 法を使って各節点の収束した非線形解を求める。さらに差分近似法を利用して時間における渦電流の影響を計算して、各時刻における各節点のベクトルポテンシャル A を求める。この A から各要素内の磁束密度および磁界強度を計算した。

2.2 解析条件

今回の解析で設定したモデルヘッドの形状を Fig. 1 に示す。構成材料として、コアを MnZn フェライト、金属層を Fe-Al-Si と想定した。図の左右のコアを、それぞれ I-core, C-core と呼ぶ。I-core の内側のみに金属層がついているヘッドを I-single MIG (I-MIG) ヘッドと呼ぶことにする。また、C-core の内側のみに金属層がついているヘッドを C-single MIG (C-MIG) ヘッド、両者の内側に金属層がついているヘッドを Both-sided MIG (B-MIG) ヘッドと呼ぶことにする。ヘッドを三角形のメッシュに分割し、要素の総数および総節点数をそれぞれ約 28800 および 14000 とした。境界条件として、計算領域の周辺上の磁気ベクトルポテンシャルを零の固定境界と仮定した。

MIG ヘッドを構成しているフェライトおよび金属強磁性層の磁気特性は等方性とし、

$$M = \frac{\mu_0(\bar{\mu}_i - 1)M_s H}{\bar{\mu}_i \mu_0 H + M_s} \quad (2)$$

Fig. 1 Model of an MIG head.

Fig. 2 M-H curves of the materials used for calculation.

で記述した⁶⁾。ここで、 M は磁化、 M_s は飽和磁化、 μ_0 は真空の透磁率、 $\bar{\mu}_i$ は材料の初比透磁率、そして H は磁界強度である。金属層の磁気特性パラメータを $M_s = 1.0$ (Wb/m²)、 $\bar{\mu}_i = 2000$ 、フェライトコアを $M_s = 0.5$ (Wb/m²)、 $\bar{\mu}_i = 500$ と仮定すると、Fig. 2 の磁化曲線が算出される。

また高周波起磁力に対する解析においては、記録周波数を 10 MHz とし、金属層の比抵抗を 100×10^{-8} (Ωm)、フェライトの比抵抗を 10^5 (Ωm) と仮定した。

3. 解析結果

3.1 記録電流特性

ヘッド励磁電流が直流の場合の解析結果を述べる。金属層厚 $0.4 \mu\text{m}$ 、ギャップ長 $0.4 \mu\text{m}$ として、ヘッド表面から $0.05 \mu\text{m}$ 離れた位置での長手方向最大磁界の起磁力依存性を Fig. 3 に示す。参考のため、フェライトヘッド（すなわち金属層のない場合）についても示す。起磁力が約 0.3 AT 以下の時、MIG

Fig. 3 Maximum recording field strength (H_x) of the MIG head as a function of the magnetomotive force.

Fig. 4 Maximum field gradient (dH_x/dx) of the MIG head as a function of the magnetomotive force.

ヘッドの最大磁界はフェライトヘッドとほぼ同値である。これから金属層のもつ高い透磁率は発生磁界にあまり反映されることがわかる。起磁力が約 0.3 AT 以上になると、MIG ヘッドの発生磁界はフェライトヘッドを上回り、金属層の効果が明確に現れる。1.0 AT 以上では、いずれのヘッドについても最大磁界が飽和する傾向が見られる。

長手方向最大磁界勾配 (dH_x/dx) の起磁力依存性を Fig. 4 に示す。フェライトヘッドの磁界勾配は起磁力約 0.3 AT 以上で飽和する。MIG ヘッドの最大磁界勾配の変化は Fig. 3 に示した最大磁界の変化と同様な傾向を示すが、フェライトヘッドの磁界勾配の飽和が低起磁力で始まり、金属層付加による効果は磁界勾配で顕著に現れる。特に起磁力が 1.0 AT 以上になると、MIG ヘッドの最大磁界勾配はフェライトヘッドより約 50% 増加することがわかる。

3.2 ギャップ長の効果

金属層厚 $0.4 \mu\text{m}$ 、起磁力 1.0 AT とし、ヘッド表面から 0.05

Fig. 5 Maximum recording field strength (H_x) of the MIG head as a function of the gap length.

Fig. 6 Maximum field gradient (dH_x/dx) of the MIG head as a function of the gap length.

μm 離れた位置での長手方向最大磁界 (H_x) のギャップ長依存性を Fig. 5 に示す。参考のため、フェライトヘッドの場合についても示す。ギャップが存在しない (gap length = $0.0 \mu\text{m}$) 時、記録磁界は最低値になる。ギャップ長の増加とともに、最大磁界は急激に増加するが、ギャップ長が約 $1.4 \mu\text{m}$ 以上では、最大磁界はギャップ長の増加に対して緩やかに減少する。また、フェライトヘッドと比較して、MIG ヘッドはギャップ長に関わらず大きな磁界を発生する。ギャップ長が約 $1.4 \mu\text{m}$ の時、B-MIG ヘッドの最大磁界はフェライトヘッドより約 20% 増加する。また I-MIG ヘッドよりも、B-MIG ヘッドの方が大きな磁界を発生しているが、ギャップ長が約 $1.0 \mu\text{m}$ 以上になると、その差は減少することがわかる。

長手方向最大磁界勾配 (dH_x/dx) のギャップ長依存性を Fig. 6 に示す。フェライトヘッドの磁界勾配はギャップ長が約 $0.3 \mu\text{m}$ 以上で飽和することがわかる。MIG ヘッドの最大磁界勾配と最大磁界の変化は傾向としては同様であるが、MIG ヘッド

(a) Longitudinal component

(b) Vertical component

Fig. 7 Field distributions of a Both-sided MIG head with various gap lengths.

の有用性は最大磁界勾配において顕著に現れる。特にギャップ長が約 $1.4 \mu\text{m}$ のところで、MIG ヘッドはフェライトヘッドより磁界勾配が約 90% 増加している。

ギャップ長を変えた時の B-MIG ヘッドの磁界分布を Fig. 7 に示す。(a) は長手方向の、(b) は垂直方向の磁界成分である。(a) において、ギャップ端のわずかに外側から左右に向けて急に磁界が減少する。最大磁界勾配は図 (a) の左側に生じているが、そのギャップ長との相対位置はギャップ長によって変わっている。ギャップ長が小さい範囲 (spacing/gap-length > 0.1) では、 H_x が最大になるのはギャップ中心部分であるが、ギャップ長が大きくなるにつれて分布は鋭い双峰形状となり、ギャップ端に強い磁界が集中する。

3.3 金属層特性および高周波における渦電流の影響

ギャップ長 $1.0 \mu\text{m}$ 、起磁力 1.0 AT とし、ヘッド表面から $0.05 \mu\text{m}$ 離れた位置での長手方向最大磁界 (H_x) の金属層厚依

Fig. 8 Maximum recording field strength (H_x) of the MIG head as a function of the metal thickness.

Fig. 9 Maximum field gradient (dH_x/dx) of the MIG head as a function of metal thickness.

存性を Fig. 8 に示す。直流励磁の場合、金属層厚 $0.4 \mu\text{m}$ までは、金属層厚の増加に伴って MIG ヘッドの最大磁界が単調に増加する。金属層厚が $0.4 \mu\text{m}$ 以上で、フェライトヘッド（すなわち金属層のない場合）より B-MIG ヘッドは約 23% 以上大きな磁界を発生している。周波数 10 MHz の交流励磁の場合、金属層厚約 $0.4 \mu\text{m}$ 以下では渦電流の影響が少なく、フェライトヘッドと比較して、I-MIG ヘッドおよび B-MIG ヘッドはそれ

ぞれ約 15%, 10% 大きな磁界を発生する。金属層厚 $0.4 \mu\text{m}$ 以上では、金属層厚の増加とともに発生磁界が減少する。B-MIG ヘッドは I-MIG ヘッドより 2 倍の金属層がついていることになるので、渦電流の影響が顕著に現れている。

長手方向最大磁界勾配 (dH_x/dx) の金属層厚依存性を Fig. 9 に示す。厚さ $0.4 \mu\text{m}$ の金属層の効果は Fig. 8 より顕著に現れており、10 MHz の起磁力に対しても磁界勾配が約 80% も増加する。

4. まとめ

今回の解析による定量的な結果は用いた形状と特性パラメータによって異なるが、一般的にいえる結論は次のとおりである。

- (1) MIG ヘッドにおける金属層の存在は、発生磁界強度を高める以上に磁界勾配を大きくする効果が非常に大きい。
- (2) MIG ヘッドはフェライトヘッドと比較して、起磁力による発生磁界の飽和現象を緩和できる。
- (3) コア両面に金属層が存在する場合、片面のものに比べて高周波特性が劣化する。Fe-Al-Si 膜は、 $2 \mu\text{m}$ 以下の膜厚範囲で保磁力は膜厚とともにかなり急激に減少する⁷⁾ことを併せ考えると、両面・片面にかかわらず最適な金属層厚さは $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ の程度である。

本論文では励磁電流に正弦波を用いてそれぞれの解析を行ってきた。しかしながら一般にはデジタル信号のように、高周波を多く含む場合が多い。今後は、矩形波状の励磁電流に対する渦電流の影響についても検討する必要がある。

文 献

- 1) 井ノ上祐人, 岡田幸弘, 中田高義, 藤原耕二: 信学技報 (Technical Report of IEICE), MR94-58 (1994).
- 2) M. Iizuka, Y. Kanai, T. Abe, M. Sengoku, and K. Mukasa: *IEEE Trans. Magn.*, **24**, 2623 (1988).
- 3) 飯塚雅博, 金井 靖, 阿部武雄, 仙石正和, 武笠幸一: 信学技報 (Technical Report of IEICE), MR88-32 (1988).
- 4) Y. Kanai and K. Ogawa: *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 2948 (1994).
- 5) 中田高義, 高橋則雄: 電気工学の有限要素法, p. 19 (森北出版, 東京, 1982).
- 6) 篠原 聡, 松本光功, 栄岩哲二: 平成 2 年度電子情報通信学会信越支部大会講演論文集, p. 108 (1990).
- 7) 森迫昭光, 松本光功: アイオニクス, **21**(Suppl. 1), (No. 232), 13 (1995).

1995 年 10 月 16 日受理, 1996 年 1 月 12 日採録