

特集 磁気エレクトロニクスの最近の進歩

光磁気磁界変調記録に関する検討

渋谷 義一*・小野寺 隆**・高山 勝**・
松本 光功***・森迫 昭光****

Technical Study of Magnetic Field Modulation Recording for Magneto-Optical Media

Giichi SHIBUYA, Takashi ONODERA, Suguru TAKAYAMA,
Mitsunori MATSUMOTO, and Akimitsu MORISAKO

Magnetic field modulation recording, MFMR, for magneto-optical media is very useful to the overwrite process. However, it needs an additionally new type of magnetic recording heads besides the present optical ones. There has still remained some problems to be improved: magnetic sensitivity of the recording media, the driving circuit for the magnetic head and so on. We have designed some magnetic heads for MFMR and evaluated some necessary parameters with them.

As a result, we have achieved to record high quality signals with 8 Ampere turns of recording current by MFMR.

1. ま え が き

光磁気記録における磁界変調記録方式は、すでに実用化されている光磁気記録媒体と同等の膜構造のままでオーバーライトが可能であるため、新しいオーディオメディアシステムとしての実用化に近い¹⁾。しかし、本方式では従来の光学ヘッド以外に、新たに記録用の磁気ヘッド^{2),3),4)}が必要となる他、媒体の記録感度の向上⁴⁾、さらに変調された電気信号を記録するための駆動回路の検討^{5),9)}など、残された課題も多い。特に、従来まで使用されてきたオーディオシステムと同等以上の性能、信頼性、経済性を保つためには、それぞれの部品がバランスのとれた最適の設計値となっていることが必要となる。そこで、我々は本システムの実用化に向けて、安定した磁界変調記録を達成するための必要条件について検討を行った。本稿では、磁界変調記録用磁気ヘッドの設計と試作、駆動回路の検討、さらに試作ヘッドと媒体を用いて磁界変調記録特性の評価を行ったので、以下に報告する。

2. 光磁気記録用磁気ヘッド

光磁気記録に用いる磁気ヘッドは、以下の様に従来の磁気ヘッドとは若干異なった性能

* 大学院博士後期課程 システム開発工学専攻 (TDK株 開発研究所)

** TDK株 開発研究所 *** 情報工学科 教授 **** 情報工学科 助教授

が要求される²⁾。

- ① 記録専用であり，再生の機能は不要である。
- ② 記録磁界は，垂直成分のみを必要とする。
- ③ 記録媒体とのスペーシングが0.1~0.3mm とかなり大きく，変動しやすい。
したがって，ヘッドから遠い位置において安定した磁界強度を保つ必要がある。
- ④ 電力消費や発熱の低減のため，できる限り少ない記録電流で強い磁界を得る必要がある。
- ⑤ 比較的高い周波数で使用するうえ，記録電流は矩形波となるため，十分な周波数特性が要求される（コンパクトディスク（CD）の最密記録周波数は720KHz）。
- ⑥ C/N の高い信号を記録するためには，高速の電流の立ち上がりが要求される（通常は200ns 以下）。このため，ヘッドのインダクタンスを最適値に設計する必要がある。
これらの条件を満たすことのできる磁気ヘッドについて検討し，試作を行った。

2.1 磁場解析シミュレーション

ヘッドの周囲に発生する磁界強度分布について検討するために，有限要素法を用いた磁場解析シミュレーションを行った。計算には，CRC 社製電磁場解析ソフト“MAGNA FIM”を用いた。回転 pot 型のコアに巻線を施したヘッドに電流を流した時に，主磁極の中心部分に得られる磁界強度の垂直方向成分は，Fig. 1 に示す分布をもつ。本研究では，主として Fig. 1 に示す回転体コアモデルに対するシミュレーション結果をもとにヘッドの試作・評価を行い，検討を進めた。

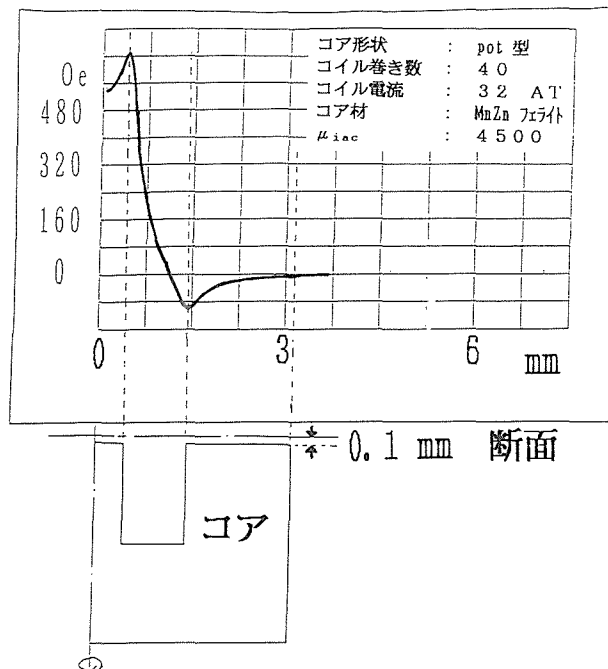


Fig. 1 Generated magnetic field strength with a pot type head simulated by the finite element method.

2.2 試作ヘッドのインピーダンス, Q 特性

本研究の試作に用いたコア材は、すべて比較的高い周波数において低損失を達成できる Mn-Zn フェライト焼結体である。数種類の形状を有する Mn-Zn フェライト材に巻線を施し、その特性のコア形状依存性について評価・検討を行った。

コイルの銅損、鉄損の周波数特性を議論するには、 Q 値 ($=X_L/R$, X_L : コイルリアクタンス) を用いるのが有効である⁹⁾。この数値が大きい程コイルの損失が少ない。 Q 値のコイル巻数を変化させた場合の周波数特性は、Fig. 2 に示す様に、コイル巻数に伴い Q のピーク値とその周波数がシフトする。この傾向は、コア形状に依存する。すなわち、それぞれのコアについて最も高い Q 値の得られる最適巻数 (インダクタンス L) と周波数 f が存在することが想像できる。これらの L と f の最適値を求めるため、試作した全サンプルについて等 Q 図⁹⁾を作成すると、Fig. 3 の様になる。

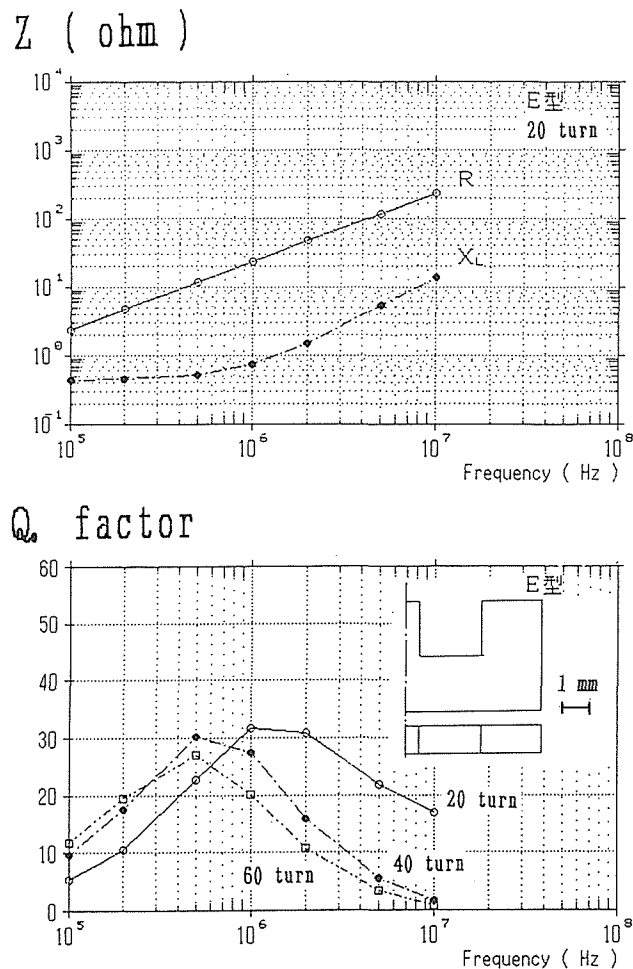


Fig. 2 Frequency response of the impedance Z and quality factor Q with a magnetic head.

E型コア材を用いたヘッドの等 Q 図を例にとると、このコイルの最適インダクタンス L はほぼ $2\sim 5\ \mu\text{H}$ (L は巻数により変化する)、最適周波数は $1\sim 3\ \text{MHz}$ であることが読み取れる。

2.3 試作ヘッドの発生磁界強度

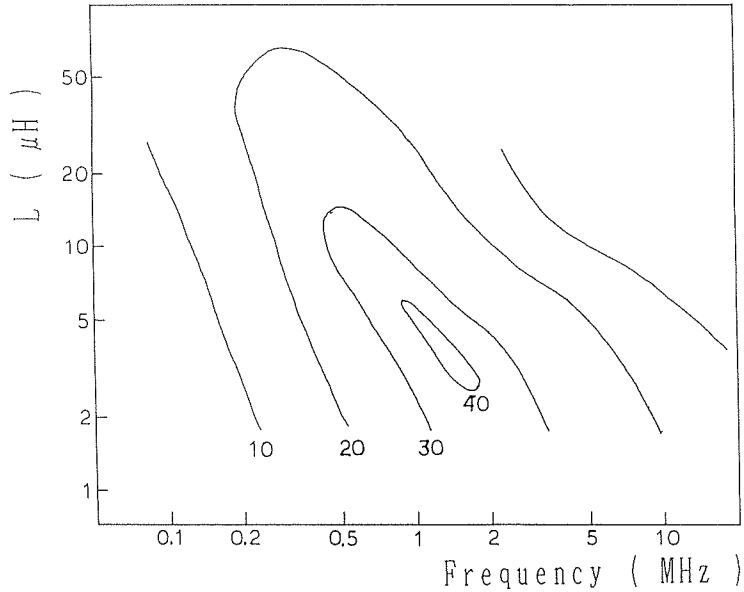


Fig. 3 Contour of the quality factor Q with a figure-E type head.

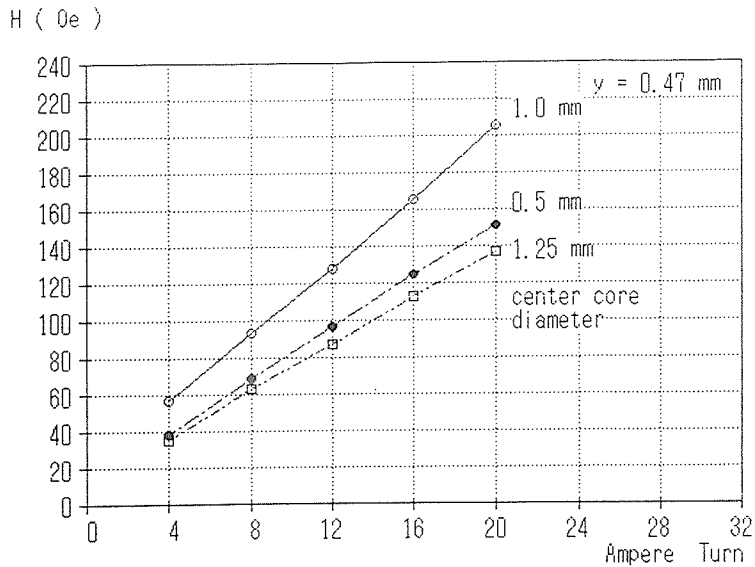


Fig. 4 Generated magnetic field strength with different size of the center cores measured with the Hall magnetometer.

前述の様に、記録ヘッドはできる限り少ない記録電流で強い磁界を得る必要があるため、単位起磁力に対する発生磁界強度に関する評価を行った。試作した各ヘッドのコイルに DC 電流を流した時の発生磁界を、ホール素子を用いて測定した。ホール素子に被覆があるため、コア端面とホール素子の距離は 0.47mm で、固定とした。コアから一定距離だけ離れた点の単位起磁力に対する発生磁界強度はほぼコア形状と線材のみで決まり、巻数には殆ど依存しないことが確かめられた。そこで、いくつかの形状をもつコア材を用いたヘッドの起磁力に対する発生磁界強度の推移の様子を Fig. 4 に示す。20AT までの起磁力においては発生磁界強度はほぼ直線に乗り、飽和しないことが確認された。

2.4 試作ヘッドの性能評価

ヘッドを高い周波数で駆動する場合には、そのインダクタンス L が重要なパラメータとなる。特に光磁気記録用ヘッドにおいては、前述の様に高速の記録電流の立上りが必要とするため、インダクタンスはできる限り小さくすることが望ましい。しかし、通常このことは、少ない記録電流において強い磁界を得るという記録ヘッド本来の目的とは相反することが多い。そのため、実際の設計においては、必要な事柄を全て考慮しバランスのとれた条件を見いだす必要がある。また、インダクタンスは実測が比較的容易であるため、その結果からコアのもつ実効比透磁率などの性能を類推することがしばしば行われる。そこで、本研究においても、各種の形状を有するコア材において、その性能評価をインダクタンスの測定値を用いて試みた。

コアがトロイダル状で、漏れ磁束がないと仮定した場合、コイルの巻数を n 、コア断面積を S [m²]、コアの平均磁路長を l [m] としたときのインダクタンス L は、次式で表される⁷⁾。

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 S n^2}{l} \quad [\text{H}] \quad (1)$$

ここで、 μ_r : コアの比透磁率、 μ_0 : 真空の透磁率 ($=4\pi \times 10^{-7}$ H/m) を示す。

すなわち、閉磁路の場合には、 L は巻線 n の 2 乗に比例し、主磁極 (コア巻線部分) の断面積に比例する。しかし、今回の様な pot 型の系では磁路が開いているため、コアに反磁界が存在し、コア内の磁束密度はこの分だけ減少する。この減少分は、見かけ上この分だけ透磁率が小さくなったとみなすことができる。反磁界による減少分を考慮した場合の比透磁率を、実効比透磁率として μ_e で表すことにする。また、巻線にはその巻き方の不均一性や容量性リアクタンス等から生ずるロスが発生し、 L は n^α ($\alpha=1\sim 2$) に比例する形となる。これらのことを考慮すると、ヘッドのインダクタンス L に関する理論式は、以下の様書き換えることができる。

$$L = \frac{\mu_e \mu_0 S n^\alpha}{l} \quad [\text{H}] \quad (2)$$

上式における α はコイル巻線部分に関する性能を示し、2 に近づく程理想的な巻線であると言える。また、実効比透磁率 μ_e は、主にコアの形状や材質に依存するものであり、この値は大きい程 (コア材の真の比透磁率 μ_r に近い程) 反磁界の影響が少なく、コイルの起磁力を有効に使っていることを示す。以上を考慮して、今回の試作に使用した各コア材について、それらのインダクタンスの実測値から α と μ_e の値を求め、ヘッドの品質に

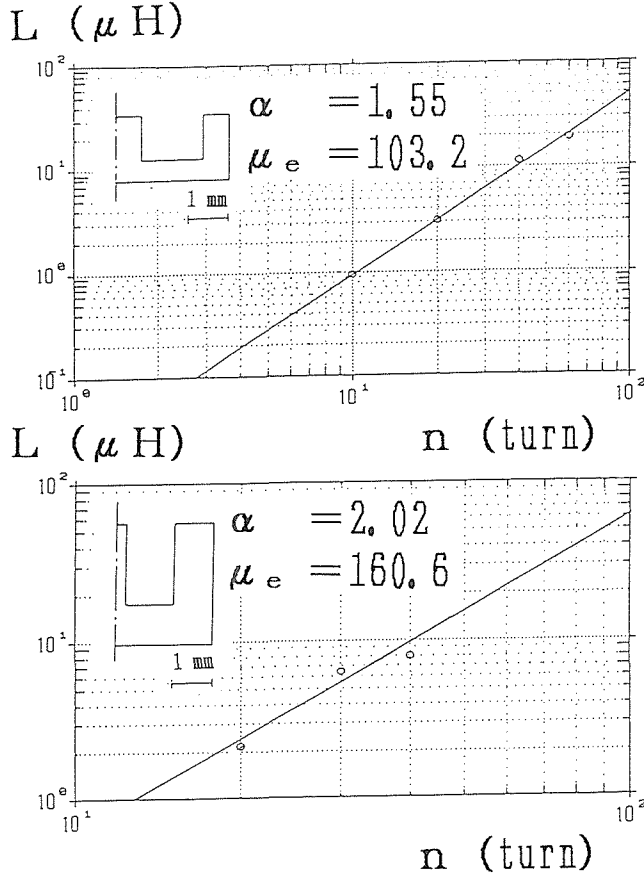


Fig. 5 Evaluations of parameters α and μ_e by inductance L and winding turns n .

関する評価・検討を行った。その結果の一例を、Fig. 5 に示す。データ数は少ないが、主磁極径の細い pot 型 F のコア材のものが、 α 、 μ_e とも大きな値を示した。

2.5 発生磁界強度の距離依存性

点磁荷から距離 y だけ離れた点の磁界 H は、距離 y の 2 乗に反比例して急激に減少する。しかし、磁荷が点でなく、半径 R の円の中に均一に分布している場合には、その円軸方向の距離 y における磁界は、磁荷密度を σ とすると、次式で表される様に、磁界の減少は緩やかになる⁸⁾。

$$H = \frac{-\sigma}{2\mu_0} \left(\frac{y}{\sqrt{y^2 + R^2}} - 1 \right) \quad [\text{A/m}] \quad (3)$$

すなわち、発生磁界強度 H は、主磁極の断面積と、コア端面からの距離に依存する。主磁極断面積を変化させた場合の、発生磁界強度の y 軸方向成分とコア端面からの距離の関係性を求めた結果を、Fig. 6 に示す。磁界強度は主磁極中心部の y 方向成分の値で、起磁力は 16 AT とし、磁荷密度 σ は R^2 に反比例するものとした。pot 型コアの主磁極端面

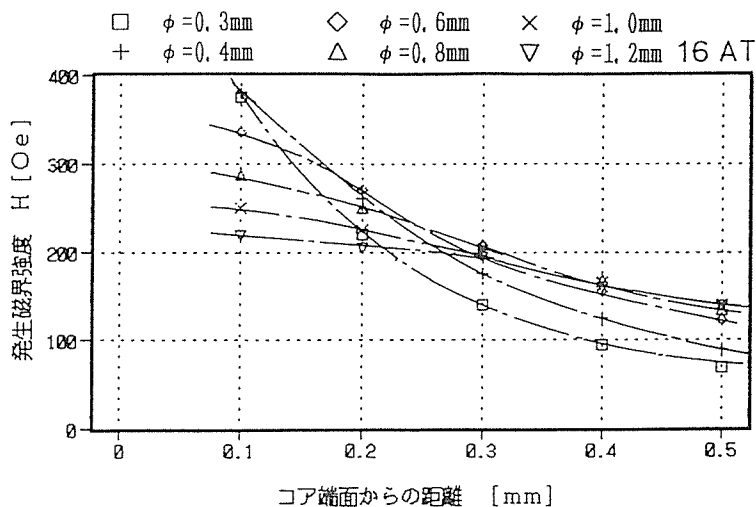


Fig. 6 Simulated relationship between generated magnetic field strength and spacing between a core and the media surface.

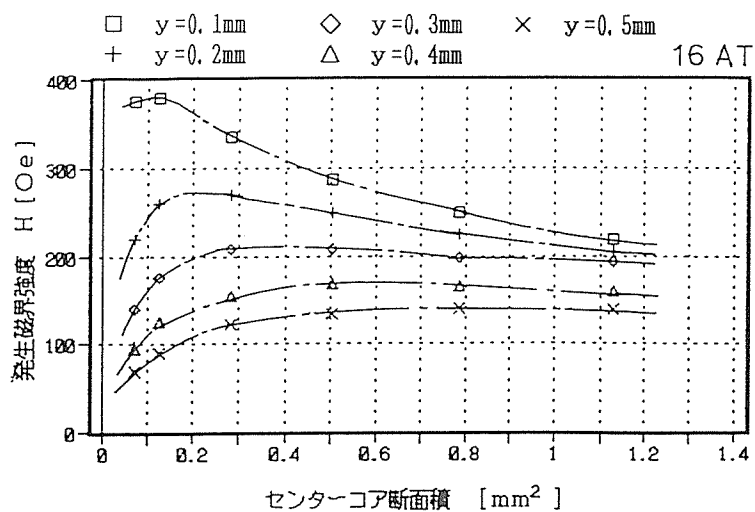


Fig. 7 Simulated relationship between generated magnetic field strength and the cross section of the center core.

の磁荷は面内で均一分布とはならず、Fig. 1 に示す様にエッジ部分に集中してしまうため、磁界強度の距離に対する減衰は(3)式に比べるとかなり緩やかになることがわかった。このように、コア端面近傍において強い磁界を得るためには、主磁極断面積は小さい方が望ましいが、その場合には、コア端面からの距離に対する磁界強度の減衰が激しくなることがわかる。したがって、主磁極断面積の最適化を行うためには、磁気ヘッドメディア間の距離をまず定める必要がある。

2.6 発生磁界強度の主磁極断面積依存性

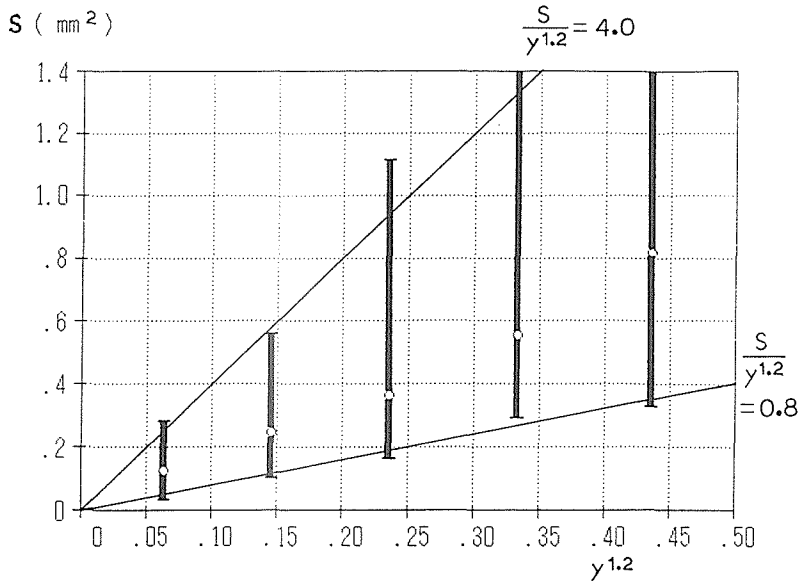


Fig. 8 Relationship between the parameter $y^{1.2}$ and the cross section of the center core S .

上記の様に、発生磁界強度は主磁極の断面積に大きく依存するため、Fig. 6 を y 軸方向の距離をパラメータとして書き換えたものを Fig. 7 に示す。 y 軸方向の距離がどの場合においても、発生磁界強度はある断面積の点 S_{\max} で極大値を示すことがわかる。すなわち、この曲線から、それぞれの距離における最適の主磁極断面積を求めることができる。主磁極断面積が小さすぎると距離に対する磁界の減衰が大きくなり、また大きすぎると発生磁界強度が小さくなるので、いずれも効率良く垂直磁界を得ることができない。 Fig. 7 の極大値を求めると、 S_{\max} は y の 1.2 乗にほぼ比例する傾向が見られた。

S_{\max} 及び、発生磁界強度が最大値の 90% 以上となる S の範囲を $y^{1.2}$ に対してプロットした結果を、 Fig. 8 に示す。これにより、主磁極断面積 S とヘッドメディア間距離 y を以下の式を満足する様に設定すれば、発生磁界が効率良く得られると言える。

$$0.8 \leq \frac{S}{y^{1.2}} \leq 4.0 \quad (4)$$

ヘッドを非接触で用いる場合には、ディスクの機械的変形により y は変動する。プラスチック基板を用いたディスクの基準面からの変動量は、直径 3.5 インチサイズのもので通常 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 以内の範囲に収められる。また、ヘッドクラッシュを防ぐために 0.1 mm の安全間隔を加えると、 y の最大値は 0.3 mm となり、主磁極の半径 R の最適値は以下の様に求まる。

$$0.245 \leq R \leq 0.548 \text{ [mm]} \quad (5)$$

以上の様に、ヘッドメディア間の距離を定めれば、最適の主磁極径を決めることができる。

3. 記録信号の周波数特性解析

3.1 記録波形の調波解析

光磁気記録信号は矩形波であるため、高調波成分を多く含む。このため、記録回路の設計においては、基本周波数の n 倍 (n は奇数) の周波数まで特性を保証する必要があるとする。この n を求めるために、立上がり時間が無限に短い理想的な矩形波と、立上がり時間を100nsとした矩形波についてフーリエ変換を行い、各高調波の振幅強度を算出した。結果を Fig. 9 に示す。なお、基本周波数を720kHz (周期 $T=1390$ ns) とした。理想的な矩形波の高調波振幅は $4/\pi n$ となるが、立上がり時間遅れのある矩形波はこれに比較して各高調波成分の振幅は小さくなるのがわかった。

この結果より、入力信号に理想的な矩形信号が加わった場合に、 $T_r=100$ ns、高調波の振幅20%以下を達成するためには、次数 n は7以上が必要であることが確認された。したがって、信号の最密記録周波数を720kHz とすると、記録ヘッド及び駆動回路は約5MHzまで保証しなければならないことがわかる。なお、遮断周波数を f_0 とした理想フィルタを仮定した場合、その応答波形の立上がり時間との関係は、 $f_0=1/(2T_r)$ で表される¹¹⁾。ここで出力波形の T_r を100ns とすると $f_0=5$ MHz となり、前述の計算結果と一致した。

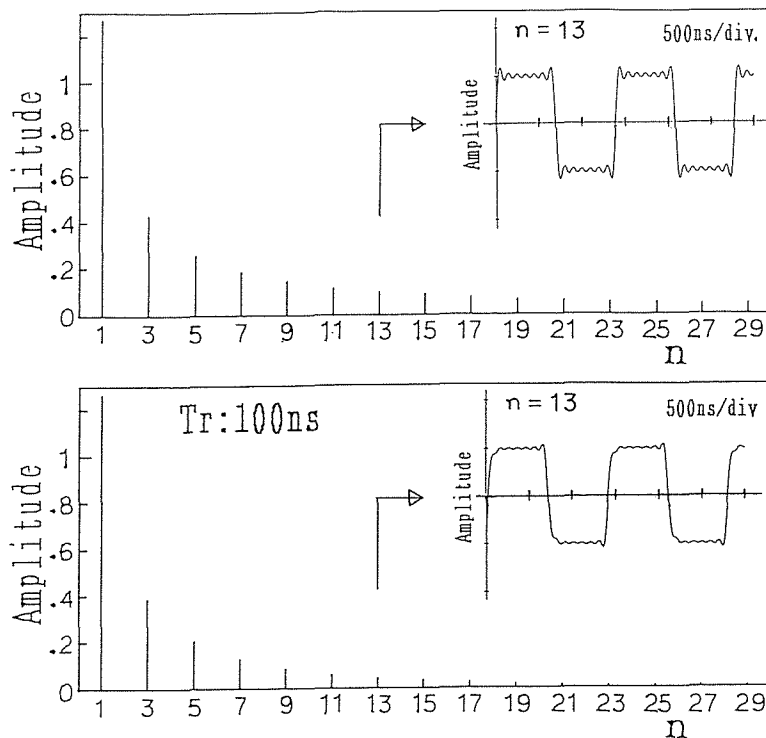


Fig. 9 Calculated spectrum analysis comparison between normal square wave and square wave with delay time 100ns.

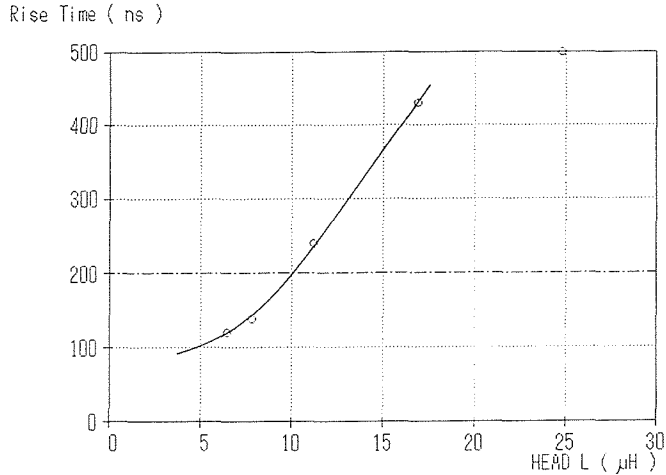


Fig. 10 Relationship between rise time and head inductance.

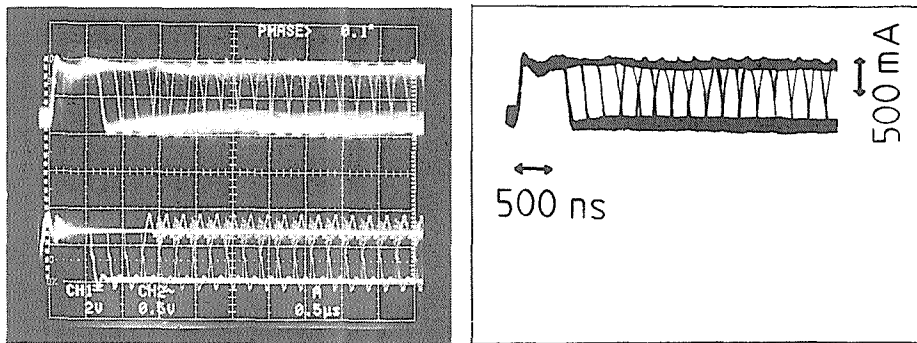


Fig. 11 Recording current wave of the magnetic recording head.
 top : recording current wave shape.
 bottom : input signal wave shape.

3.2 インダクタンスの検討

記録信号が矩形波の場合、ヘッドのインダクタンスが大きくなる程、磁界（電流）の立上がり速度に遅れを生ずる。ヘッドのインダクタンス L を変化させた場合の磁界の立上がり時間 T_r の変化について評価を行った結果を Fig. 10 に示す。安定した記録を行うために必要な T_r は通常200ns であるが、余裕を見て100ns とすると、 $L \approx 5\mu\text{H}$ 程度が望ましいことがわかる。ただし、光磁気記録回路には、通常の高周波増幅器を用いるもの他に、高速スイッチングによる極性の反転を利用した方式の回路も検討されており、良好な特性が得られている^{5),9),10)}。スイッチング方式の回路を用いて $L \approx 10\mu\text{H}$ のヘッドに電流を流した場合の電流波形を Fig. 11 に示す¹⁰⁾。

4. 記録特性評価

4.1 記録電流に対する発生磁界強度

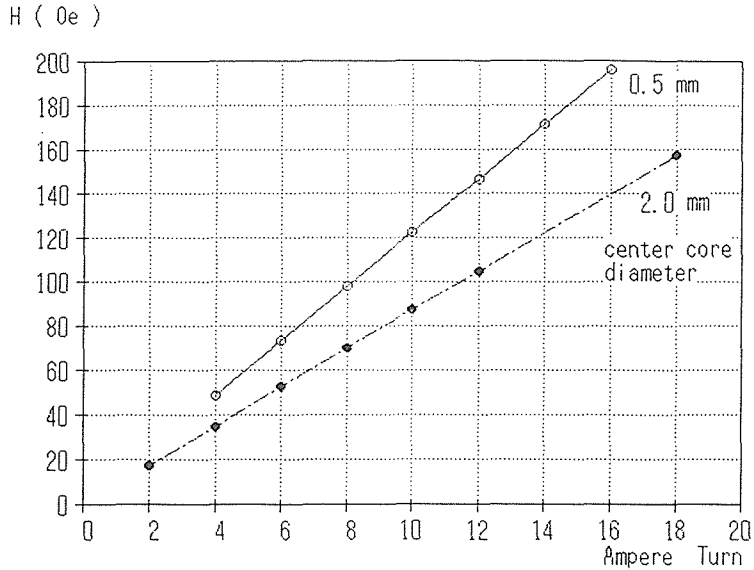


Fig. 12 Magnetic field strength and Ampere turn with the pot type head. ($y=0.2\text{mm}$)

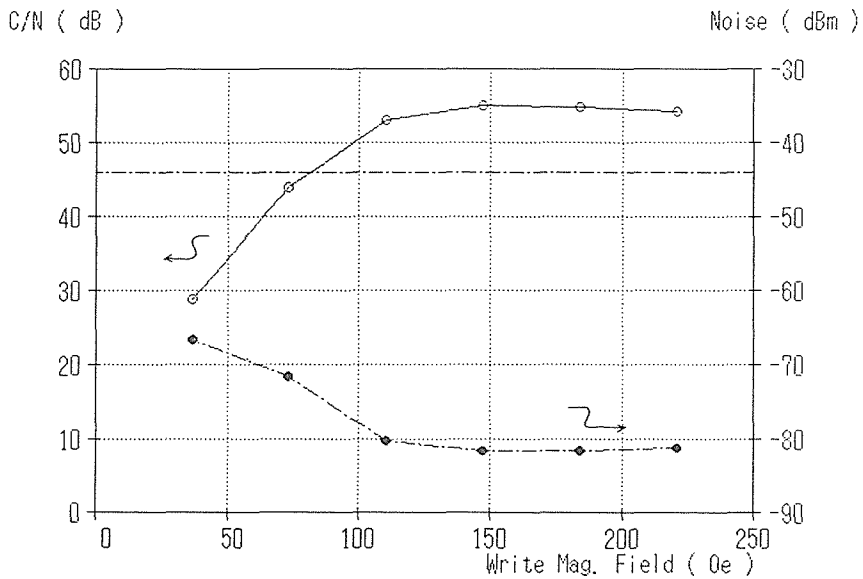


Fig. 13 Relationship between recording magnetic field and the carrier to noise ratio.

実際に記録を行う場合のヘッド-メディア間のスペーシングは、ディスクの機械的な精度を考慮して0.2mmが最適と判断された。そこで、この条件における試作ヘッドの発生磁界強度の測定を行った結果をFig. 12に示す。標準ディスクを用いて測定した数値は、

Fig. 6 に示した磁界強度の曲線と良く一致した。主磁極の直径0.5mm のヘッドを用い、スペーシングを0.2mm とすると、約 8AT の起磁力にて100Oe の磁界強度を得られることが確認された。

4.2 C/N 値評価結果

試作したヘッドを用いて C/N 値の記録評価を行った結果を Fig. 13 に示す。信号周波数は CD に用いられる最密周波数の720kHz とし、線速度は 1.2m/s とした。デジタル記録において必要となる C/N 値は通常46dB とされるが、100 Oe の記録磁界ではほぼ安定した信号の記録が可能であることがわかる。この条件において EFM 変調された信号の記録再生評価を行った結果、最短ビットのジッター値は約30ns で、十分に実用可能であると判断された¹⁰⁾。また、メディアの記録磁場感度を向上することにより、さらに低い記録電流で使用することも可能となる。

5. ま と め

以上の結果をまとめると、次のようになる。

- (1) 磁気ヘッドの最適主磁極径は、ヘッドーメディア間のスペーシングに依存する。スペーシングの最大値を0.3mm とした時の主磁極の半径 R の最適値は0.25~0.55mm となる。
- (2) 磁気ヘッドの最適使用周波数は、コアの形状に依存する。記録信号が矩形波である場合には、基本周波数の7倍程度までの周波数特性を確保する必要がある。
- (3) 磁気ヘッドのインダクタンスを $5\mu\text{H}$ 程度とすれば、約100ns の磁界反転の立上がりを得ることができる。
- (4) 試作ヘッドにてスペーシングの平均値を0.2mm とした場合、8AT の起磁力で約100 Oe の磁界を発生させることができた。これにより、C/N 値、ジッター値の点ではほぼ実用可能な特性を得られることが確認された。

おわりに、本研究を行うに当たり、多大なる御指導及び御協力を頂いた情報工学科 松本・森迫研究室、TDK(株)開発研究所を始めとする関連各部署の皆様方に心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉田忠雄, 日本応用磁気学会研究会資料 73-6 (1992)
- 2) 永木猛弘, 電子情報通信学会技報 MR87-52 (1987)
- 3) 菅谷, 草牟田 (他), 電子情報通信学会技報 MR90-46 (1990)
- 4) 鷺見, 山本 (他), SANYO TECHNICAL REVIEW VOL. 22 No. 3 OCT (1990)
- 5) 宮武, 日野 (他), テレビジョン学会技報 VIR90-14 (1990)
- 6) 山村英穂, 「トロイダル・コア活用百科」 P. 8-49 CQ出版社 (1983)
- 7) 松本光功 (他), 「磁気記録工学」 P. 18-34 共立出版 (1990)
- 8) 山本 勇, 西巻正郎, 「基礎電気磁気学」 P. 45-48 オーム社
- 9) F. Zucker, C. Büchler *et al*, 日本応用物理学会予稿 29p-G-2 (1990)
- 10) 渋谷義一 (他), 電子情報通信学会 信越支部大会講演論文集 162 (1991)
- 11) 松本光功 (他), 「制御工学」 P. 128-131 鼎書房 (1975)