

# Numerical Analysis of a Write Head for High-Density Perpendicular Magnetic Recording

K. Fudano<sup>\*,\*\*</sup>, Y. Suzuki<sup>\*,\*\*\*</sup>, and Y. Nakamura<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

<sup>\*\*</sup>NEC Software Tohoku, Ltd., 1-10-23 Ichiban-cho, Aoba-ku, Sendai 980-0811, Japan

<sup>\*\*\*</sup>Central Research Lab., Hitachi, Ltd., 1-280 Higashi-Koigakubo, Kokubunji, Tokyo 185-8501, Japan

A strong and sharp write-head magnetic field distribution is necessary in order to achieve higher density in perpendicular magnetic recording. The magnetic field of a head-medium model was calculated by using a finite element method (FEM) simulator. In studying the head-medium interaction, an FEM simulator was combined with a magnetizing reversal model to realize self-consistent calculation. The magnetic circuit formed by a single-pole head and the soft-magnetic underlayer of a double-layered medium produces an efficiently strong magnetic field. By taking account of the head-medium interaction, a stronger and sharper head field distribution was produced.

**Key words:** perpendicular magnetic recording, FEM simulation, cusp coil, head-medium interaction, self-consistent calculation, single pole tip, soft-magnetic underlayer, curling mode

## 垂直磁気記録の高密度化のための記録ヘッド構造の数値解析

杉野 欽也<sup>\*,\*\*</sup>・鈴木 良夫<sup>\*,\*\*\*</sup>・中村 慶久<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>東北大学 電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

<sup>\*\*</sup>NEC ソフトウェア東北 (株), 仙台市青葉区一番町 1-10-23 (〒980-0811)

<sup>\*\*\*</sup>(株) 日立製作所 中央研究所, 国分寺市東恋ヶ窪 1-280 (〒185-8501)

### 1. はじめに

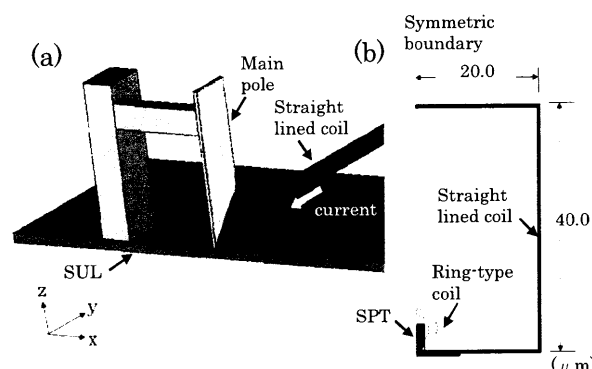
垂直磁気記録の高密度化のためには、結晶粒が微細化されかつ高い磁気異方性を持つ記録媒体と、それに対応した強く急峻な勾配の記録磁界を発生する記録ヘッドが必要である。そのためには、ヘッド・媒体を全て含んだ記録過程モデルを構築し、ヘッド設計および媒体設計のための指針を示すことが有効である。我々は、垂直磁気記録用単磁極ヘッド(SPT ヘッド)をモデル化し、三次元有限要素法を用いてシミュレーションを行うことにより、記録磁界を高めるために必要な要因についての検討を行っている<sup>1), 2)</sup>。また、ヘッド・メディア間の相互作用を取り入れたセルフコンシステント計算<sup>3)</sup>を用いることにより、定量的に精度の高い記録過程を再現できることが知られている<sup>4)</sup>。

本論文では、特に主磁極・リターンヨークの磁路構造と記録磁界分布との関係について、解析を行った。すなわち、ヘッドの磁路構造や、主磁極に対するコイルの設置位置を種々に変化したモデルについて解析を行い、高記録磁界の発生要因の検討を行った。また今回使用したモデルをもとに、実用的なヘッドの1つとして提案されているカスプコイル励磁型単磁極ヘッド<sup>5)</sup>の磁界分布を調べることで、ヘッド磁路が高記録磁界の発生に与える影響を確認した。さらに記録層の磁化の計算により、ヘッド・媒体相互作用<sup>3)</sup>を考慮したときの、記録層が在ることの記録磁界に対する影響についても検討を行った。

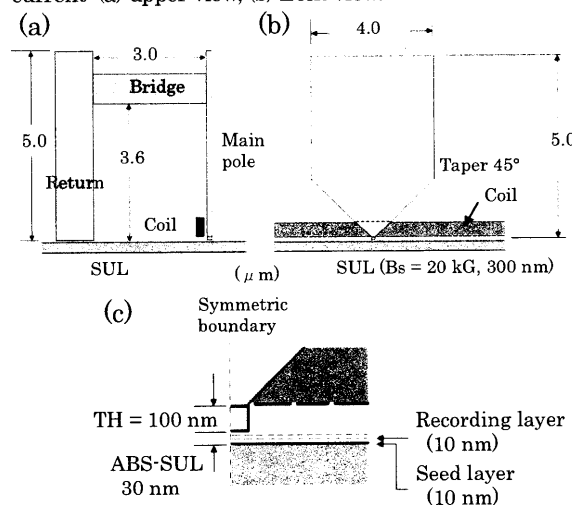
### 2. 計算方法

#### 2.1 記録ヘッドの有限要素解析

小さな印加電流で効率よく記録磁界を発生させるためには、電気回路の特定の部分でヘッド材料が磁気飽和することを避け、ヘッド磁極先端に磁束が到達するような構造としなければならない。



**Fig. 1** Calculation model in the case of a straight line current: (a) upper view, (b) front view.



**Fig. 2** (a) Side view, (b) front view, and (c) enlarged view of a single-pole-tip write head and the soft underlayer of the medium.

我々はコイルとヘッド磁極との位置関係の効果を検討するために、トラック幅方向に無限に長い直線状のコイルを用いてシミュレーションを行った。

Fig.1 に、解析に用いたヘッドのモデルを示す。Fig.1(a)は俯瞰図、Fig.1(b)はヘッド進行方向からの図である。図のように、主磁極中心軸を通りヘッド厚さ方向に平行な平面を対称境界とし、ヘッド全体に対して半分の領域を解析対象としている。また、以下で「直線状コイル」と呼ぶものは、主磁極先端近くで直線的であり、磁極よりも十分離れたところを巻いて戻ってくる長方形の環状コイルをさす。ヘッド側面から見たときのコイルの位置条件を特定することができるようにするため、コイルをクロストラック方向に直線状に配置した。Fig.2において、(a)は、ヘッドの側面図、(b)は正面図（両対称領域を含む）、(c)は主磁極先端部分を拡大した正面図である。

主磁極形状は、記録密度  $300 \text{ Gb/in}^2$  を想定し、Table 1 に示すようなものとした。記録トラック幅は  $120 \text{ nm}$ 、厚さは  $120 \text{ nm}$  である。また、スロートハイトを  $100 \text{ nm}$  とし、 $45^\circ$  のテーパ部を設け、全体として幅  $4.0 \text{ } \mu\text{m}$ 、高さ  $5.0 \text{ } \mu\text{m}$  となる。またブリッジは、幅  $1.0 \text{ } \mu\text{m}$ 、厚さ  $3.0 \text{ } \mu\text{m}$ 、高さ  $0.8 \text{ } \mu\text{m}$  とし、主磁極先端から  $3.6 \text{ } \mu\text{m}$  の深さの位置に設置した。リターンヨークは、幅  $4.0 \text{ } \mu\text{m}$ 、厚さ  $1.0 \text{ } \mu\text{m}$ 、高さ  $5.0 \text{ } \mu\text{m}$  とした。ヘッドは、初透磁率を  $2000$ 、飽和磁束密度を  $24 \text{ kG}$  とし、B-H 曲線を  $\arctan$  関数で近似している。

記録媒体は、記録層（厚さ  $10 \text{ nm}$ ）、非磁性下地層（厚さ  $10 \text{ nm}$ ）、軟磁性裏打ち層（SUL）（厚さ  $300 \text{ nm}$ ）よりなる（Fig.2(c)）。主磁極先端と SUL 表面間の距離は、 $30 \text{ nm}$  とした。後述する 3.4 に記す検討以外では、記録層の磁化は考慮せずに計算した。SUL は初透磁率を  $2000$ 、飽和磁束密度を  $20 \text{ kG}$  とした。コイルは断面形状が  $200 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$  の矩形となるようにし、Fig.2(a)に示すように、深さ  $100 \text{ nm}$  にて、主磁極先端より  $100 \text{ nm}$  離して設置した。

三次元有限要素解析プログラムは、JMAG-Studio 8.2（株）日本総研ソリューションズの製品）<sup>6)</sup>を用いた。

## 2.2 ヘッド・媒体相互作用を考慮した計算の方法

3.4 では、前項で記述したヘッドモデルに加えて記録層の磁化を置いて計算を行った<sup>7)</sup>。記録層の磁化反転は、Curling モデル<sup>8),9)</sup>により非一斉磁化反転の効果を実効的に取り込んで、記録媒体のヒステリシスループを復元するものである。電磁界の有限要素法計算にこの記録層の磁化反転モデルを組み込みセルフコンシステントに解くことにより、ヘッド・媒体相互作用の影響を取り入れることが可能となった。

記録層の物性値を、Table 2 に示す。一軸異方性を有する粒子と仮定し、容易軸を膜面垂直方向とした。粒子間の交換相互作用はゼロとした。また、SUL 無しの記録層の垂直方向磁化曲線を Fig.3 に示す。Fig.4 は、ヘッド媒体相互作用の計算を行う際の主磁極先端と記録層のモデルである。ヘッドと記録層の磁気的スペーシングを  $5 \text{ nm}$  とし、記録層を  $10 \text{ nm}$ 、非磁性下地層を置かず、軟磁性裏打ち層 SUL は、初透磁率を  $2000$ 、飽和磁束密度を  $24 \text{ kG}$ 、厚さを  $300 \text{ nm}$  とした。

## 3. 結果および解析

Table 1 Parameters of the main pole.

| Main pole                     |         |
|-------------------------------|---------|
| Thickness                     | 120 nm  |
| Track width                   | 120 nm  |
| Throat height                 | 100 nm  |
| Length                        | 5000 nm |
| Saturation flux density       | 24 kG   |
| Initial magnetic permeability | 2000    |

Table 2 Parameters of a recording layer.

| Recording layer                 |            |
|---------------------------------|------------|
| Thickness                       | 10 nm      |
| Saturation magnetization        | 6.3 kG     |
| Coercivity                      | 5 kOe      |
| Mean Hk                         | 15 kOe     |
| Standard deviation of Hk        | 1.5 kOe    |
| Standard deviation of easy axes | 20 degrees |
| Intergranular exchange          | 0.0        |

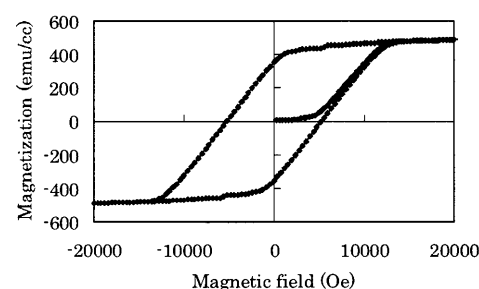


Fig. 3 M-H loop of the recording layer.

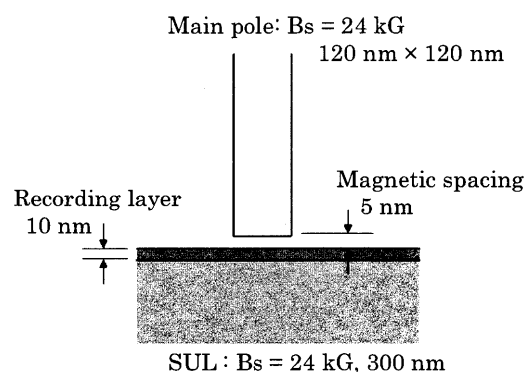


Fig. 4 Main pole and recording layer.

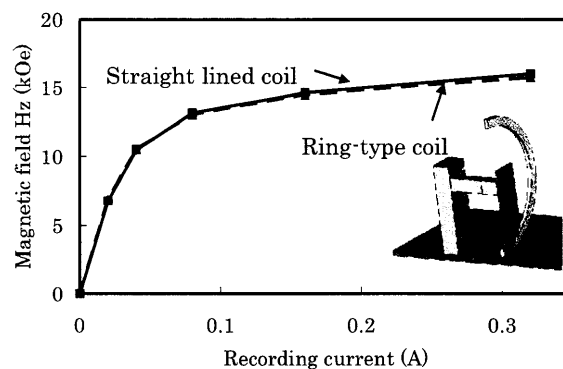


Fig. 5 Magnetic field dependence on the recording current in the case of a straight lined coil (solid line) and a ring-type coil (dotted line).

ヘッドの磁路構造およびコイルの形状と位置が記録磁界に及ぼす影響を調べた。まず、直線状コイルを用いることの妥当性を確かめるために、通常用いられている円弧型コイルを用いた場合との比較を行った。円弧型コイルは、断面形状が  $200\text{ nm} \times 500\text{ nm}$  の矩形となるようにし、内径を  $3.4\text{ }\mu\text{m}$  とした。Fig.5は、直線状コイルを用いたヘッドおよび円弧型コイルを用いたヘッドの、記録ヘッド磁界のコイル印加電流依存性である。ここでは磁界は、ヘッド表面より  $10\text{ nm}$  離れた記録層表面のトラック中心における磁界である。なお両者でのコイル位置は、主磁極先端に最も接近する場所で一致している。すなわち、トラック中心の断面が重なりあうようにした。Fig.5にて、両者の磁界がほぼ重なることから、直線状コイルを用いてコイル位置の依存性を検討することが妥当であることが確認された。

### 3.1 ヘッド内の磁路の影響

ヘッドの戻り磁路は、主磁極の先端を効率良く励磁するための磁気回路を、SULとともに構成する。戻り磁路の効果を確認するために、通常の構造のヘッドから、ブリッジ、およびリターンヨークを取り去ったものについて磁界解析を行った。

Fig.6は、記録層表面に相当する面で主磁極中心の直下でのヘッド磁界の垂直 ( $z$ ) 成分の記録電流依存性である。リターンヨークとブリッジがともにある場合は、比較的小さい電流で磁界強度が飽和に達している。これは後にも述べるとおり、戻り磁路とSULで構成される磁気回路の効果により磁路内部での局所的な磁気飽和が抑えられることと、テーパ構造による磁束の絞込みにより主磁極先端に効率良く磁束が集中していることによる。一方、ブリッジ無しの場合およびブリッジとリターンヨークともに無い場合は、磁気回路の効果が下がり、磁界強度が飽和に達するにはより大きな電流が必要となる。このように、ヘッドとSULによる閉磁路構造を形成することにより、小さな励磁電流でヘッド先端に強い磁界を効率良く発生させることができる。ただし戻り磁路の構造によっては、リターンヨークから記録層に数  $\text{kOe}$  程度の磁界が印加される場合があるので、この戻り磁界を低く抑えるような設計が必要となる。

また、いずれの場合でも、磁界強度の飽和後も磁界が増加し続ける。これは、コイルによる直接磁界の寄与が比較的大きいためである。コイルのみを置いた場合の磁界も Fig.6 に示すが、磁界強度の飽和後に磁界が線形に増加し続ける傾きは、コイルのみの場合の傾きとほぼ等しい。

### 3.2 記録ヘッド磁界のコイル位置依存性

次に、主磁極に対するコイルの位置を変えたときの磁界への影響を検討した。このために、Fig.7のようにコイルを1から5までの位置に設置した場合につき磁界計算した<sup>2)</sup>。また、ヘッドの戻り磁路がある場合と無い場合との比較も行った。

ここで用いたヘッドは、主磁極は前述のものに対して深さ方向に  $1.0\text{ }\mu\text{m}$  伸ばし、また主磁極の最上部から  $1.0\text{ }\mu\text{m}$  の幅でブリッジを介してリターンヨークに接続している。ブリッジは、幅  $4.0\text{ }\mu\text{m}$ 、厚さ  $3.0\text{ }\mu\text{m}$ 、高さ  $1.0\text{ }\mu\text{m}$  とし、主磁極先端から  $5.0\text{ }\mu\text{m}$  の深さの位置に設置した。リターンヨークは、幅  $8.0\text{ }\mu\text{m}$ 、厚さ  $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 、高さ  $10.0\text{ }\mu\text{m}$  とした。

まず、励磁コイルの位置の違いによる、主磁極内の磁束密度分

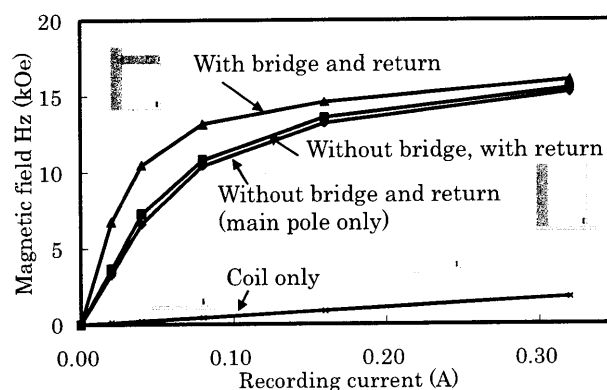


Fig. 6 Magnetic field dependence on the recording current with or without the return yoke and bridge of the head.

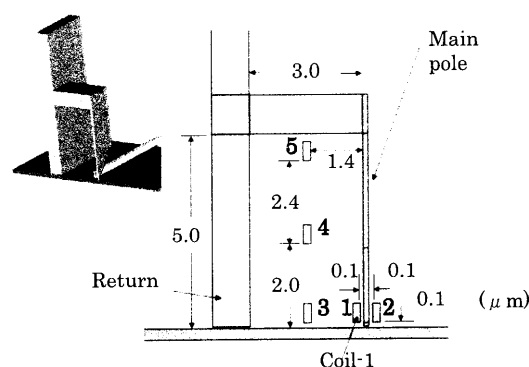


Fig. 7 Positions of the coils (1 to 5, bold numbers) in the head.

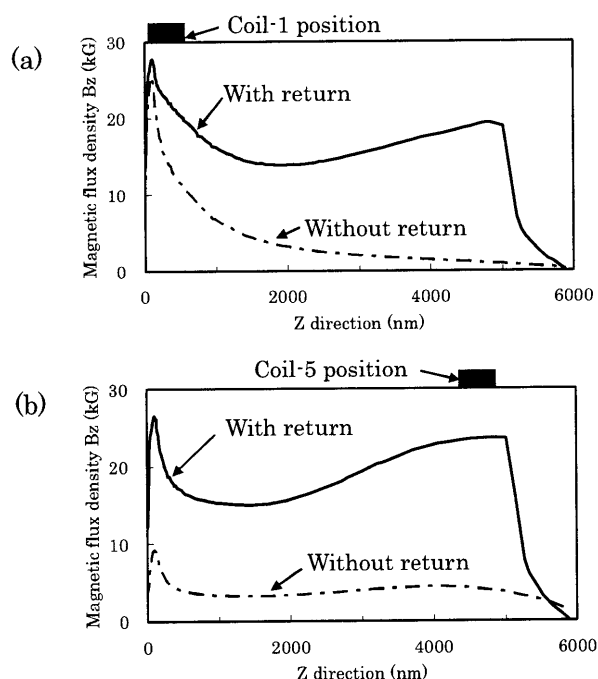


Fig. 8 Magnetic flux density in a main pole in the case of (a) coil-1 and (b) coil-5, with a return yoke (solid line) and without a return yoke (dotted line).

布の比較を行った。Fig.8(a)と Fig.8(b)は、コイルを主磁極先端に近づけた場合（位置1）と、遠ざけた場合（位置5）について、戻り磁路が無い場合と有る場合の主磁極内部の磁束密度分布である。コイル印加電流は、0.08 Aとしている。Fig.8の横軸は記録層表面からの距離であり、主磁極の中心軸における磁束密度の垂直成分  $B_z$  をプロットした。戻り磁路の無い場合には、主磁極は、コイルと同じ深さ位置を中心として磁化される。そのためコイル位置1の場合のように主磁極先端に近くにコイルを設置した場合ほど、主磁極先端の磁束密度が大きくなる。戻り磁路の有る場合はFig.8のとおり、戻り磁路側から流れ込む磁束により主磁極内の磁束密度が全体的に増大し、またコイル位置が異なっても主磁極内の磁束密度分布に大きな違いが無く、主磁極先端の磁束密度も大きい。いずれの場合でも主磁極先端部分では、磁束密度が主磁極の飽和磁化  $4\pi Ms$  である 24 kG を超えるが、これはテーパにより磁束が絞られることによる。

次に、励磁するコイルの位置の違いによる、ヘッド磁界の強さの比較を行った。Fig.9は、それぞれの位置に設置したコイルについての、コイル印加電流が 0.08 A のときの(a)記録層表面における主磁極中心での磁界の値、および(b)磁界勾配の最大値を示している。Fig.9はコイル位置を主磁極先端から測ったものを横軸として、磁界および磁界勾配の値をプロットしたものである。戻り磁路の無い場合は、主磁極先端に近づけてコイルを設置したものほど、強い磁界が得られる。一方、戻り磁路が有る場合は、コイルにより励磁される部分がどの位置にあっても、強く急峻な磁界が得られ、またコイル位置による磁界の違いは小さい。前述のとおり、戻り磁路と SUL が作る磁気回路の効果とテーパの絞込み効果により、主磁極先端の磁束密度が大きくなっているためである。

さらに、ヘッド磁界の広がり具合を確かめるために、主磁極先端に近い位置にコイルを置いた場合と、先端から離れた位置にコイルを置いた場合とで、磁界分布の比較を行った。Fig.10は、(a)ダウントラック方向、および(b)クロストラック方向の規格化されたヘッド磁界分布であり、記録電流は 0.32 A とし、戻り磁路が有るときのコイル位置1とコイル位置4の場合について示している。磁界分布は、両者の場合ともに、クロストラック方向およびダウントラックのトレーリングエッジ側の裾の広がり大きいが、主磁極先端に近いコイル位置1の場合の方が、裾引きがより顕著である。この場合、隣接トラック信号を消去してしまうことが無いように注意しなければならない。

また、戻り磁路が有り、コイルをヘッド磁路のループの外に設置した場合（コイル位置2）についても解析を行った。コイル位置2の場合、主磁極からの距離は、コイル位置1と同じであるにもかかわらず、ヘッド磁界は 3.0 kOe（印加電流 0.08 A）と、コイル位置1の場合の 13.3 kOe に比べて非常に小さい。これは次に示すとおり、戻り磁路も含んだ磁気回路全体とコイルの位置関係によるものである。Fig.11は、印加電流が 0.08 A のときのヘッド周りの磁束密度ベクトル図であり、(a)がコイル位置1の場合を、(b)がコイル位置2の場合である。主磁極先端での極性を一致させるために、コイル位置1とコイル位置2に印加する電流の向きは逆向きとなるように設定している。Fig.11(a)のように、コイル位置1の場合では、コイルにより反時計回りの磁界が発生し、ヘッ

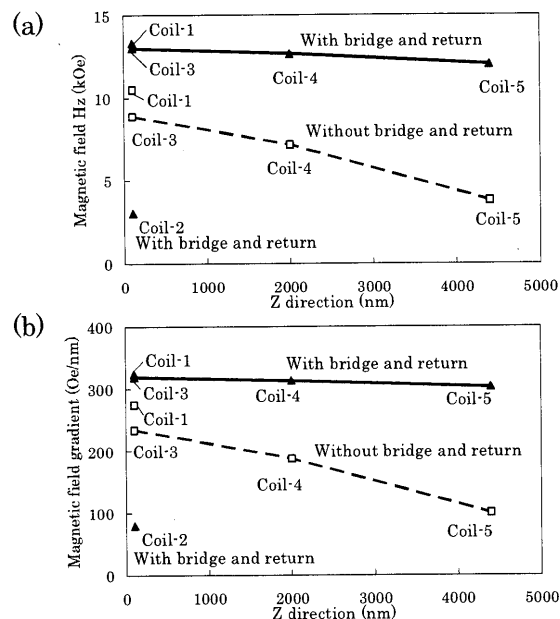


Fig. 9 (a) Magnetic field and (b) field gradients for a coil current of 0.08 A, with a return yoke (filled triangle) and without a return yoke (white rectangle).

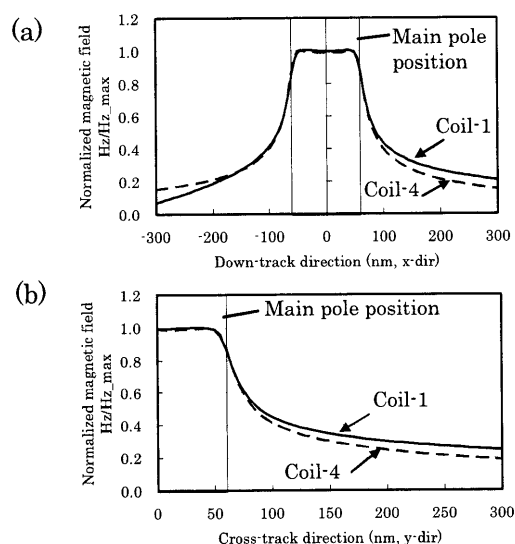


Fig. 10 Normalized magnetic field of the recording head in (a) the down-track direction, and (b) the cross-track direction in the case of coil-1 (solid line) and coil-4 (dotted line).

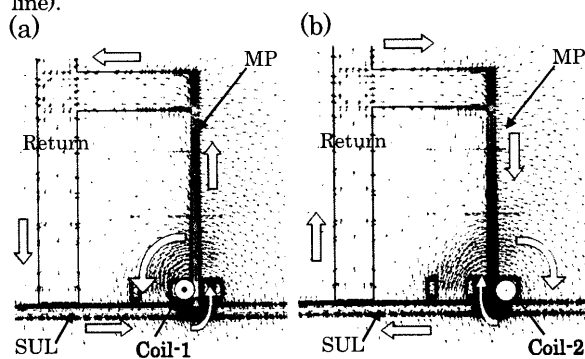


Fig. 11 Magnetic field vector around the head with the current of (a) coil-1 and (b) coil-2.

ド磁路に対して反時計回りにそのまま作用する。したがって、ヘッド磁路内では、主磁極先端では上向き、リターンヨークでは下向きの磁束の流れとなる。これらにより磁路内には一方向の磁束の流れが発生し、さらにテーパの絞込み効果により、主磁極先端において磁束密度が大きくなる。これに対し、コイル位置2の場合では、Fig.11(b)に示されるように、主磁極先端は上向きに励磁される。またリターンヨークも、コイル磁界により上向きに励磁される。ブリッジに接続した主磁極の上部ではリターンヨークからの磁束により下向きの流れとなり、主磁極先端とで反対向きの磁束の流れとなる。Fig.12は、コイル位置2の場合で印加電流が0.08 Aのときの、主磁極中心軸での垂直方向磁束密度分布である。主磁極内の磁束密度が、主磁極の先端とブリッジ接続側とで符号が反転している。このように、主磁極内で磁束が反転し打ち消されるために、励磁効率が悪くなる。ヘッドが戻り磁路の構造を持つ場合、コイルが磁路のループを貫くかどうかにより、励磁効率は大きく異なることがわかる。

### 3.3 カスプ型ヘッドの検討

カスプ型コイル<sup>5)</sup>を用いた単磁極ヘッドでは、主磁極の両側にリターンヨークがある Double Yoke 構造の磁極と、主磁極を挟んだ2つのコイルが用いられる。これらのコイルには、互いに逆向きの電流が印加される。これまで述べてきた検討結果を、カスプ型構造ヘッドの特性の解析に活用することを試みた。Fig.13(a)は、片側リターンヨークのもの(Single Yoke)、Fig.13(b)は、両側リターンヨークのもの(Double Yoke)のヘッド側面図である。これらのヘッド磁界の印加電流依存性をFig.14に示す。グラフの横軸は、コイルひとつあたりの電流をあらわし、Single Yoke の場合のコイル1のみまたはコイル2のみの電流を、およびコイル1とコイル2の両方に逆向きに電流を印加したもの、Double Yoke の場合のコイル1のみの電流を、およびコイル1とコイル2の両方に逆向きに電流を印加したものの磁界依存性である。

まず Single Yoke の場合で、コイル1とコイル2の両方に電流を印加した場合は、コイル1のみ電流を印加した場合と比べて磁界の値はやや大きくなり、また磁界強度が飽和した後の増大も著しくなる。また、コイル2のみの場合は、前述のとおり磁極内で磁束の流れが反転することにより、磁界は弱く線形に増大するという結果が得られた。これらのことから、コイルの設置位置とともにヘッドが作る磁路との位置関係も、記録磁界に大きな影響を与えていることがわかる。

次に、Single Yoke から Double Yoke に変えた場合では、コイル1のみの場合は、飽和磁界が大きく下がる。これは、磁路を付け加えたことにより、リターンヨークから主磁極に向かう磁束が、主磁極側と付け加えたブリッジ・リターンヨーク側とに分流してしまうためである。また、コイル1+コイル2の2個のコイルがある場合は、磁界依存性は Single Yoke でも Double Yoke でも変わらず、磁路を付け加えた影響はほとんど見られない。Fig.15は、Double Yoke の場合とリターンヨークが無い場合とでコイル1とコイル

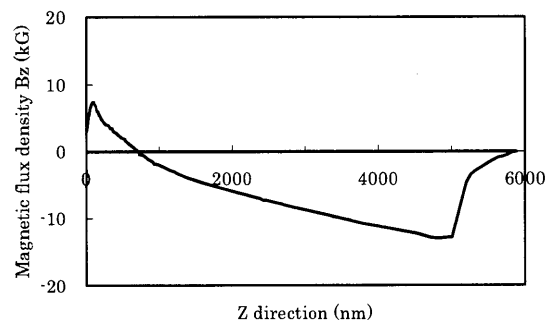


Fig. 12 Magnetic flux density in the main pole in the case of coil-2 with a return yoke.

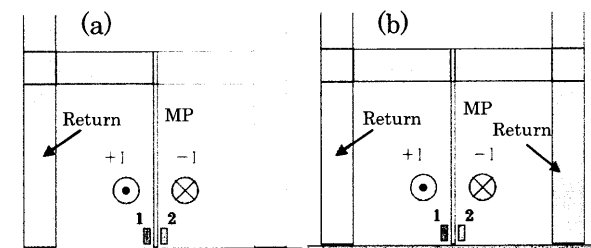


Fig. 13 Side view of (a) a single-yoke head, and (b) a double-yoke head.

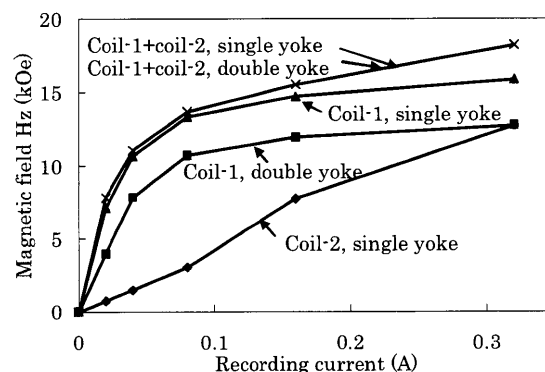


Fig. 14 Magnetic field dependence on the recording current in the case of a double yoke and a single yoke.

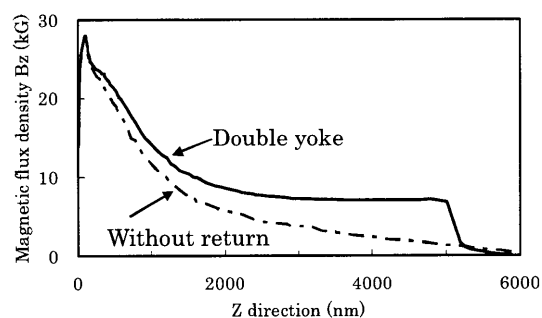


Fig. 15 Magnetic flux density in a main pole in the case of coil-1 and coil-2 of a double-yoke head (solid line) and without a return yoke head (dotted line).

2に互いに逆向きに0.08 Aの電流を印加した場合の、主磁極中心軸での垂直方向磁束密度分布である。なお、Single Yoke の場合の磁界分布は、Double Yoke のものとほぼ一致していた。Fig.8と比べると、リターンヨークを持つ場合でも、戻り磁路からの磁束の流れ込みはそれほど大きくないことがわかる。

このことは、リターンヨークから記録層への戻り磁界も小さいことを示す。コイルとヘッドの構造からみると、コイルの挟む内側では磁界の方向は一致し、また外側では磁界は逆極性となるため、コイル磁界が戻り磁路の磁束の流れに寄与する割合は小さい。また、戻り磁路の効果が得られなくても強いヘッド磁界が得られた要因は、2つのコイルが主磁極先端に巻かれていることによるものである。すなわち、主磁極を挟むようにコイルを設置した場合には、コイルを主磁極先端に近づけて設置することで強いヘッド磁界を得ることが出来る。

結果が示すように、カスプ型コイルを用いたヘッドに代表されるような、Double Yoke 構造で主磁極先端を両側から励磁する構造は、磁路の戻り磁界を抑え、かつ励磁効率を劣化させずに強い記録磁界を得ることができることを示している。

### 3.4 ヘッド・媒体相互作用の影響

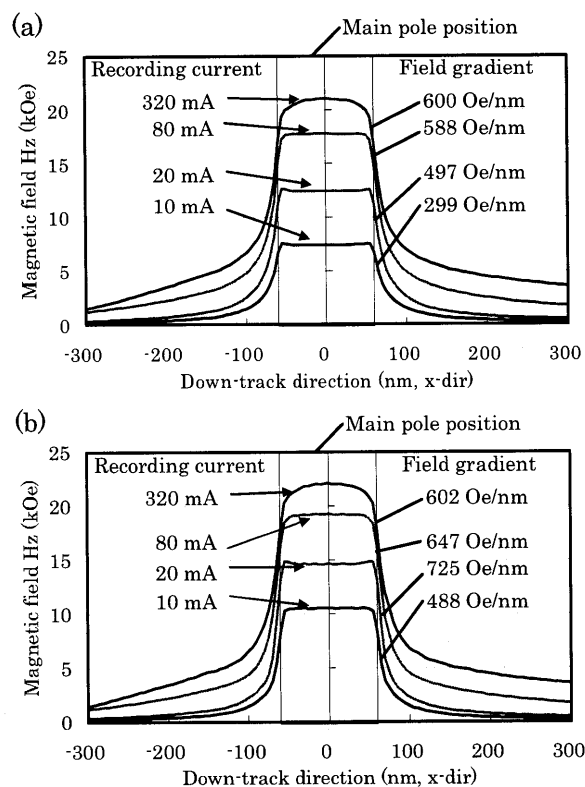
記録過程の正確な解析においては、ヘッド・媒体相互作用を考慮する必要がある。有限要素法による電磁界計算において、ヘッド・媒体系を扱う場合には経験的に、記録層の透磁率を2程度と想定して計算することもよく行われてきており、どのような透磁率値を用いるべきかの議論もなされている<sup>10)</sup>。しかし、このような透磁率換算は、ひとつの近似にすぎず、媒体の磁化によってヘッド磁界が修正されるようなヘッド媒体相互作用を考慮することができない。そこで、前述のモデルに加えて記録層の磁化を含んだモデルによる計算を行った。計算条件は、2.2 に示す。Fig.16 は、コイル印加電流を変えたときの、記録層表面でのヘッド磁界分布である。(a)が記録層を考慮しない場合、(b)が記録層を考慮して計算した場合の結果である。記録層を考慮した場合には、ヘッドと媒体の相互作用により、主磁極内の減磁界が弱められ、記録磁界が強まる。この効果は、磁界強度が未飽和である20 mA の場合では、約1.2 倍である。また、磁界分布もより急峻になり、最大磁界勾配が増加する。これも20 mA の場合で、約1.5 倍の効果となる。

記録層の磁化が作る磁界が主磁極先端の反磁界を弱めるように働くため、ヘッドの磁界強度は強まり、また磁界勾配も増大する。媒体の磁気特性を最適化することにより、さらに強い書き込み磁界や勾配を得ることを期待できる。

### 4. まとめ

垂直磁気記録の単磁極ヘッドと、軟磁性裏打ち層の系に関する電磁界計算により、強くかつ急峻な勾配の記録磁界を発生するための条件を検討した。ヘッドと記録媒体の軟磁性裏打ち層(SUL)が構成する磁気回路の効果により、小さな電流でも効率的に飽和するヘッド磁界が得られることを確認し、その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) ヘッド磁極内部の磁束密度が大きくなる領域は、コイルの設置位置により決定される。コイルを主磁極の先端に巻くことで、より強い磁界が得られる。
- (2) コイルの設置位置のみならず、リターンヨークの設置方法などヘッドの磁路構造が記録磁界に与える影響も大きい。理想的には、主磁極の先端に近い部分を励磁するこ



**Fig. 16** Magnetic field distribution around the recording head in the case of (a) not calculating the recording layer, and (b) calculating the recording layer.

とが望ましいが、ヘッドとSULによる閉磁路構造がコイルによる励磁作用を補完し、十分に強くかつ急峻な勾配の記録磁界を得ることが出来る。

(3) ヘッド・媒体相互作用を考慮した記録過程の計算を行った。媒体の記録層が存在することにより、ヘッド磁界が強く、磁界勾配が大きくなる効果がある。

**謝辞** 秋田県高度技術研究所の山川清志氏には本研究を行うにあたり多大のご助言を頂いた。ここに感謝する。本研究の一部は、SRCの支援を得て行った。謝意を表する。

### References

- 1) Y.Nakamura, *Magnetics Japan*, **1**, 489 (2006).
- 2) Y.Nakamura, *Magnetics Japan*, **2**, 41 (2007).
- 3) Y.Nakamura and S.Iwasaki, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-23**, 153 (1987).
- 4) Y.Nakamura and I.Tagawa, *IEEE Trans. Magn.*, **25**, 4159 (1989).
- 5) K.Ise, K.Yamakawa, K.Ouchi, H.Muraoka, Y.Sugita, and Y.Nakamura, *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 2520 (2000).
- 6) <http://www.jri.co.jp/pro-eng/jmag/jmg/> (As of March 30, 2007)
- 7) W.Xia, T.Yamada, H.Aoi, H.Muraoka, and Y.Nakamura, *J. Magn. Magn. Mat.*, **287**, 77 (2005).
- 8) E.H.Frei, S.Shtrikman and D.Treves, *Phys. Rev.*, **106**, 446 (1957).
- 9) A.Aharoni and S.Shtrikman, *Phys. Rev.*, **109**, 1522 (1958).
- 10) R.H.Victoria, J.Xue, and M.Patwari, *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 1886 (2002).

2007年3月31日受理, 2007年5月16日採録