

反射型電子線断層撮像・再構成法による局所高周波漏れ磁界分布の3次元計測に関する研究

松田 基一
長岡技術科学大学工学部
電気系 教授

1. はじめに

近年、高密度化の進む磁気記録において、ミクロンオーダーのギャップ幅をもつ超小型磁気ヘッドの開発が盛んに行なわれているが、これら磁気ヘッドの特性評価のためにはギャップ極近傍の漏れ磁界分布に関する詳細な情報が不可欠であり、その計測・評価手法の開発が重要な課題となっている。

本研究では、サブ μm オーダーのギャップ幅を持つ磁気ヘッドのギャップ極近傍における漏れ磁界分布の高精度3次元計測を目指して、新たに、2次元アレイ状に走査しながら電子線を磁気ヘッド面に入射し、反射してきた電子線の偏向量から断層撮影法的手法によりヘッド全域にわたる磁界分布を3次的に再構成する電子線トモグラフィ手法を提案し、その再構成精度をコンピュータ・シミュレーションにより検証し、さらに、市販の走査型電子顕微鏡装置をベースに新たに試作した磁界計測装置を用いて実際に磁界分布の計測実験を行い、本計測手法の有効性を実験的に明らかにした。なお、以下では、この手法を反射型電子線トモグラフィと呼ぶことにする。

2. 再構成原理

2.1 偏向量の計測

図1に反射型電子線トモグラフィによる磁界分布再構成の原理図を示す。図に示すように、鏡面加工、または金属膜などでコーティングされた磁気ヘッド表面に対して垂直に電子ビームを入射し、磁気ヘッド表面で鏡面反射されて戻ってきた電子線の出射位置を磁気ヘッド表面の上方に設置された位置検出素子により測定する。この測定を磁界が存在しない場合、すなわち、磁気ヘッドの励磁電流がゼロの場合、および磁界が存在する場合について行い、これら電子線の出射位置の差から磁界による偏向量ベクトルを求める。同様の測定を2次元アレイ状に電子線の入射位置を走査しながら繰り返し、このようにして得られた全偏向量データから断層撮像的再構成手法を用いて対象磁界分布を3次的に再構成する。

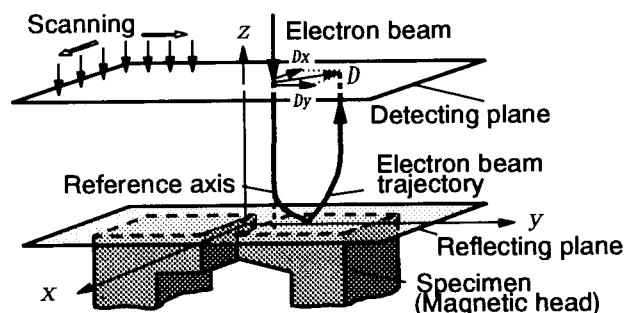


図1. 反射型電子線トモグラフィによる磁界再構成の原理

2. 2 初期値の設定

断層撮像手法に基づいて磁界分布を再構成する場合、一般に、反復補正回数の低減ならびに解の妥当性を保証するためには、初期値としてできるだけ真値に近い値を用いることが望ましいとされている。ここでは、初期値を以下のようにして決定した。

磁界の大きさは、図2に示すように、磁気ヘッド表面から遠ざかるとともに指数関数的、すなわち、 e^{-az} で減少して行くと仮定し、電子の運動方程式を近似的に解くと、偏向量ベクトルDのXおよびY成分 $D_x(x, y)$ 、 $D_y(x, y)$ を用いて磁気ヘッド表面における磁界のX成分 $B_x(x, y, 0)$ およびY成分 $B_y(x, y, 0)$ は、式(1)、式(2)で与えられる。

$$B_x^{(0)}(x, y, 0) = \frac{a^2 m v z_0}{2 e \{1 - (1 + aL) \exp(-aL)\}} D_y(x, y) \quad (1)$$

$$B_y^{(0)}(x, y, 0) = -\frac{a^2 m v z_0}{2 e \{1 - (1 + aL) \exp(-aL)\}} D_x(x, y) \quad (2)$$

なお、磁界のZ成分 $B_z(x, y, 0)$ は、式(1)、式(2)および $\text{div} B = 0$ を用いて計算している。

$$B_z^{(0)}(x, y, 0) = \sum_{i=0}^{\infty} B_x^{(0)}(x, y, 0) \exp(-az_i) \Delta z + \sum_{i=0}^{\infty} B_y^{(0)}(x, y, 0) \exp(-az_i) \Delta z \quad (3)$$

このようにして求めた磁気ヘッド面上における初期磁界分布 $B^{(0)}(x, y, 0)$ を境界条件として、反射面から検出面間に広がる3次元磁界分布 $B^{(0)}(x, y, z)$ を境界要素法により求めている。

2. 3 磁界分布の反復補正

上記のようにして求めた初期磁界分布をもとに、以下に述べる反復推定手順に従い、3次元磁界分布を推定・再構成する。まず、初期磁界中を計測時の入射条件に合わせて入射した電子線について、磁界通過後の偏向量ベクトル $D_c(x, y)$ を、電子運動方程式を用いて、数値計算によって求める。次に、これらを実際に計測した偏向量ベクトル $D_m(x, y)$ と比較して磁界の補正量 $\delta B(x, y)$ を算出し、磁気ヘッド面、すなわち、反射面上の磁界を補正する。ここで、 $(q+1)$ 回目の補正後の磁界分布 $B^{(q+1)}(x, y, 0)$ は、 q 回目の補正後の磁界分布 $B^{(q)}(x, y, 0)$ を用いて次式のように表される。

$$B^{(q+1)}(x, y, 0) = B^{(q)}(x, y, 0) + \delta B^{(q)}(x, y) \quad (4)$$

なお、補正量 $\delta B(x, y)$ は次式を用いて算出する。

$$\delta B_x^{(q)}(x, y) = \left(\frac{D_{m_y}}{D_{c_y}} - 1 \right) B_x^{(q)}(x, y, 0) \quad (5)$$

$$\delta B_y^{(q)}(x, y) = \left(\frac{D_{m_x}}{D_{c_x}} - 1 \right) B_y^{(q)}(x, y, 0) \quad (6)$$

さらに、補正後の磁界分布について同様の処理を補正量が設定値以下になるまで繰り返し、3次元磁界分布を再構成する。図3に磁界再構成の手順をフローチャートにまとめておく。

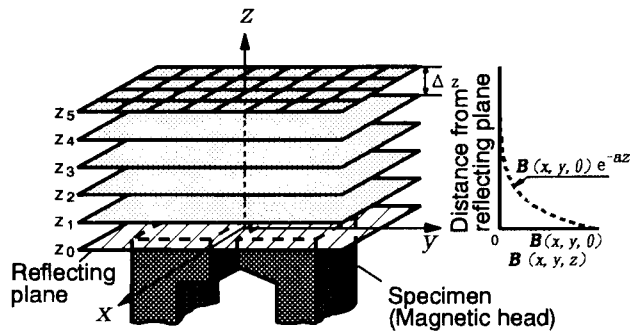


図2. 反射面からの磁界の変化

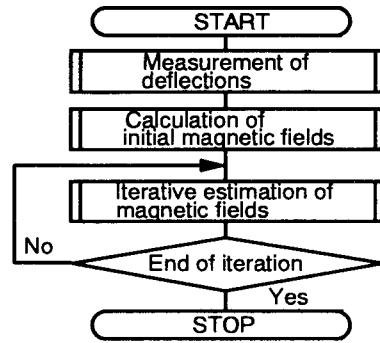


図3 再構成法の流れ図

3. 再構成アルゴリズムの評価

3. 1 解析モデル

磁界分布が解析的に求められる矩形ワンターンコイルをモデルに選び、コンピュータ・シミュレーションにより本再構成アルゴリズムの評価を行った。図4に、コンピュータ・シミュレーションに用いたモデル図を示す。図4の矩形ワンターンコイルの磁位関数は、式(7)で与えられ、従って、磁界の各成分は、式(8)から求められる。

$$\Omega(x, y, z) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left\{ -\tan^{-1} \frac{\left(x + \frac{a}{2}\right) \left(z + \frac{a}{2}\right)}{y \sqrt{\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + \left(z + \frac{a}{2}\right)^2}} + \tan^{-1} \frac{\left(x + \frac{a}{2}\right) \left(z - \frac{a}{2}\right)}{y \sqrt{\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + \left(z - \frac{a}{2}\right)^2}} \right. \\ \left. + \tan^{-1} \frac{\left(x - \frac{a}{2}\right) \left(z + \frac{a}{2}\right)}{y \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + \left(z + \frac{a}{2}\right)^2}} - \tan^{-1} \frac{\left(x - \frac{a}{2}\right) \left(z - \frac{a}{2}\right)}{y \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + \left(z - \frac{a}{2}\right)^2}} \right\} \quad (7)$$

$$\begin{cases} B_x = -\frac{\partial}{\partial x} \Omega(x, y, z) \\ B_y = -\frac{\partial}{\partial y} \Omega(x, y, z) \\ B_z = -\frac{\partial}{\partial z} \Omega(x, y, z) \end{cases} \quad (8)$$

今回のシミュレーションでは、1辺100 μmの矩形ワンターンコイルに1 Aの電流を流した場合について考えた。以下では、一例として電子ビーム偏向量ベクトルの検出面と反射面間距離（作動距離）を10 μmとした場合について述べる。表1に、磁界分布の再構成シミュレーションに用いた諸パラメータ値をまとめて示す。

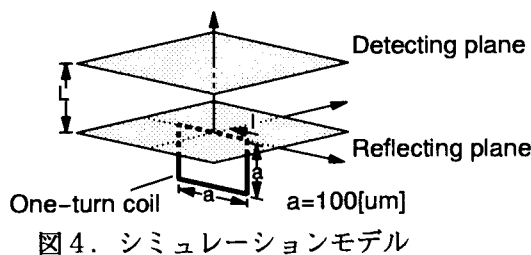


図4. シミュレーションモデル

表1 シミュレーションの諸条件

Side width of coil	100μm
Excitation current	1A
Accelerating voltage	15kV
Work distance	10μm
Deflection data size	41×41
Measuring interval	4μm
Measuring area	160μm×160μm

3. 2 シミュレーション結果

シミュレーションは、次の手順で行なった。まず、2. 1で述べた電子ビームの偏向量ベクトル計測に代えて、ここでは、式(8)から求められる理論磁界を用いて、実際の計測時の入射条件に合わせて偏向量ベクトルを数値計算によって算出した。次に、これらの偏向量ベクトルから、逆に、2. 3で述べた再構成アルゴリズムによって元の磁界分布の再構成を試みた。

図5に、式(8)から求めた理論磁界分布と本再構成手法による磁界再構成の結果を示す。図5から、両者の磁界各成分の形状が、よく一致していることがわかる。

図6に両磁界分布の差を、また、これを再構成誤差として式(9)、(10)を用いて定量評価した結果を表2に示す。

$$E_a = \frac{\sum_{x,y} |B_r(x,y) - B_t(x,y)|}{\sum_{x,y} |B_t(x,y)|} \times 100 [\%] \quad (9)$$

$$E_v = \sqrt{\frac{\sum_{x,y} \{B_r(x,y) - B_t(x,y)\}^2}{\sum_{x,y} \{B_t(x,y) - \overline{B_t}\}^2}} \times 100 [\%] \quad (10)$$

ここで、式(9)は正規化絶対平均誤差、また式(10)は正規化誤差分散である。表2から、いずれの評価法によっても再構成誤差は、20%程度であることがわかる。なお、作動距離を長くすると再構成誤差が増加し、例えば、作動距離1cmの場合には、再構成誤差が50%程度となる。

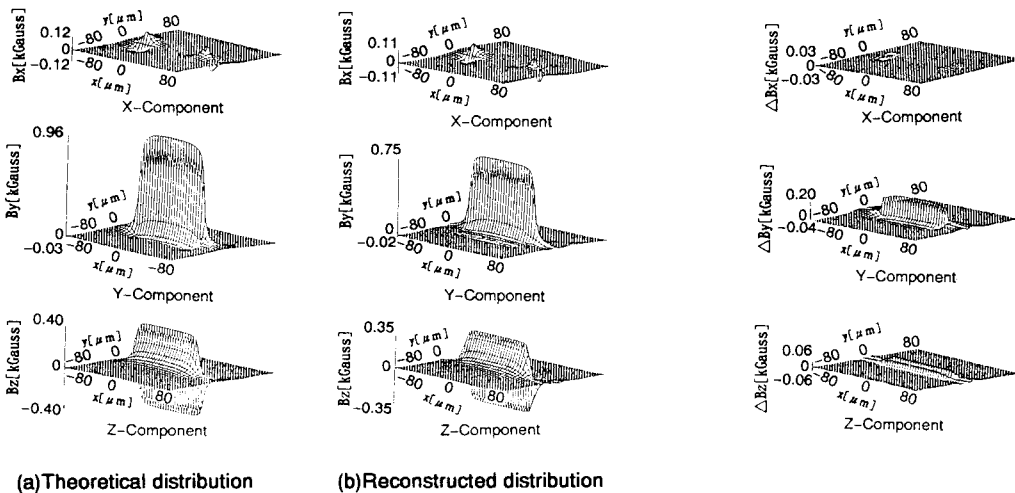


図5. 理論磁界分布と再構成磁界分布

図6. 絶対誤差分布

表2 誤差評価結果

	Bx	By	Bz
Ea[%]	16.1	28.8	15.6
Ev[%]	17.5	22.3	15.0

4. 計測装置

図7および図8に、今回試作した計測装置の外観図およびその概略図を示す。計測装置は、市販の走査型電子顕微鏡（日立製：S-800型）をベースとし、反射電子ビームの位置検出装置（2次元PSD）、試料微動装置、電子ビーム位置コントローラおよび計測システム全体を制御するパーソナルコンピュータ（NEC PC9801AP）から成っている。対物レンズから試料反射面までの距離は22mm、試料反射面からPSD（入射面）までの距離（作動距離）は12mmである。

試料表面に対する電子線の位置決めは、磁気ヘッド（試料）のギャップ近傍の2次電子像を基に行った。磁気ヘッド面は電子線の光軸に対して45°傾けた状態で設置している。電子線の入射位置の制御は、対物レンズの偏向コイルに適切なバイアスを与えるための電子線コントローラ装置を用いており、最小走査分解能は0.25 μ m、また最大走査範囲は4096 \times 4096である。なお、試料表面で反射された電子線は、反射面に対して平行に設置された電子線位置検出装置（2次元PSD）で検出している。

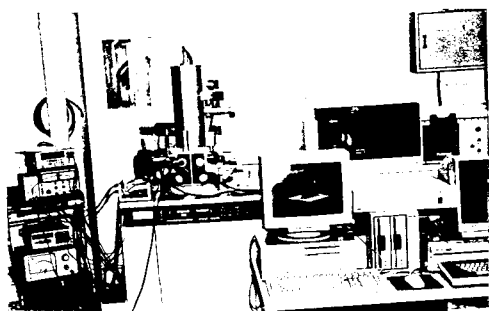


図7. 磁界分布計測装置の外観図

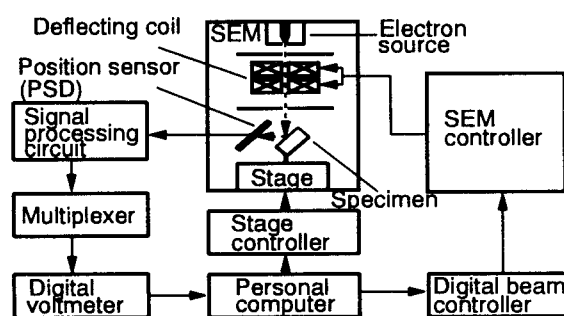


図8. 磁界分布計測装置の概略図

5. 磁気ヘッド磁界分布計測実験

今回の実験では、計測試料として、ギャップ幅が100 μ m、トラック幅が3mmのダブルギャップオーディオ用磁気ヘッドを用いた。磁気ヘッドの概略図を図9に示す。さらに、試料表面には、試料表面における電子線の鏡面反射を保証するため、また、測定中のチャージアップを回避するために、厚さ100nmの金の蒸着膜で被った厚さ150 μ mのガラス板を試料表面に密着させ反射面としている。

電子線の加速電圧は15kV、磁気ヘッドの励磁電流は25mA、また、試料表面に対する電子線の入射角度は45°である。試料表面の領域（4mm \times 4mm）に対して電子線入射総点数は21 \times 21、したがって入射電子線の入射間隔は200 μ mである。表3に主なパラメータをまとめて示す。

まず、予備実験として、電子線を走査しながら2次元格子状に反射面に入射し、反射後の電子線の位置検出特性を計測した。本計測装置の光学的配置に基づく幾何学的歪みが出力像に生じるが、これはアフィン変換を用いて補正することにより空間的歪みを0.3%以下に抑えることができ、偏向量ベクトル計測に及ぼす幾何学的歪みの影響はほとんど無視できることを確認した。

磁気ヘッド磁界分布の再構成結果を図10に示す。図10から、この磁気ヘッドの最大磁束密度は約150Gauss、そして磁気ヘッドのギャップ近傍からz軸方向、すなわち、磁気ヘッド表面に対して垂直方向に比較的急峻な磁界分布が形成されている様子が分かる。

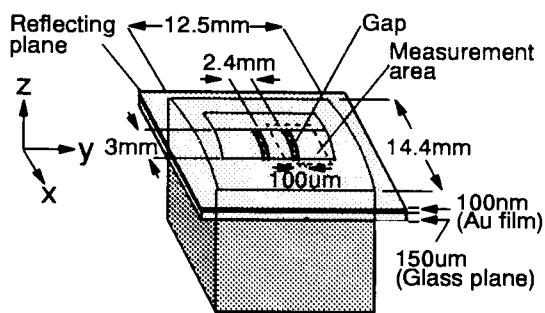


図9. オーディオ用消去ヘッド

表3. 実験条件

Excitation current	25mA
Accelerating voltage	15kV
Incident angle	45deg
Spacing	150um
Work distance	12mm
Number of the measuring points	21 × 21
Scanning interval	200um
Area of the reconstructing plane	4mm × 4mm

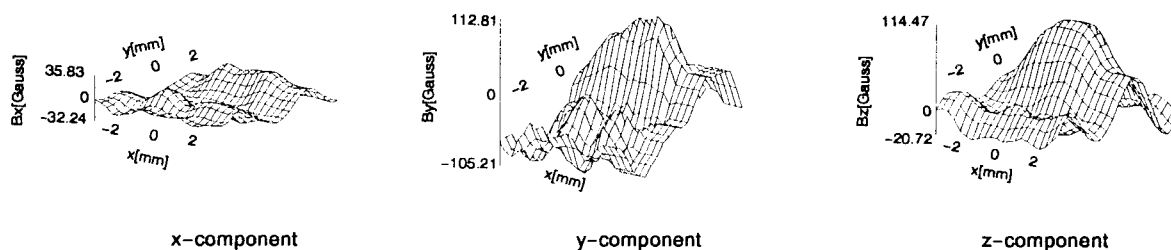


図10. 磁界分布再構成結果

6. まとめ

磁気ヘッド極近傍における漏れ磁界分布の3次元計測を目的とした反射型電子線トモグラフィ手法を提案し、実際に試作した計測装置を用いて市販の磁気ヘッドの3次元磁界分布の再構成を試みた。コンピュータ・シミュレーションによる磁界分布再構成精度の検討によれば、誤差は、50%とまだまだ大きいものの、従来困難であったギャップ極近傍の磁界分布の3次元計測にはじめて成功したことで、所期の研究目的をほぼ達成することができたと考えている[1][2]。試作装置の納期の遅れなどのため、高周波漏れ磁界分布の再構成実験を実施するまでには至らなかったが、今後の課題としたい。

現在、

- (1) 偏向量ベクトルの計測精度の向上
- (2) 3次元磁界分布の再構成アルゴリズムの改善
- (3) 高周波磁界分布の3次元再構成実験
- (4) 磁界分布のコンピュータによる数値解析結果と再構成結果との比較検討などを進めている。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、(財)高柳記念電子科学技術振興財団より多大のご援助を賜りました。ここに、理事長はじめ財団関係者の皆様方に謹んで御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 松田甚一, 大多和康彦, 野水重明: "反射電子線トモグラフィによる磁界再構成", 電子情報通信学会論文誌 C-II, Vol. J78-C-II, No.1, pp.46-53 (1995-01)
- [2] J.Matsuda, S.Nomizu, Y.Jun: "Reconstruction of magnetic fields by reflection tomography", INTERMAG'95, April 18-21, 1995