ミクロ磁界の高速変化を可視化する ——ストロボ電子ビームトモグラフィ——

品 田 博 之 ((株)日立製作所 中央研究所第4部)

1. はじめに

近年のコンピュータシステムは、データ量の増大やデータベースの大規模化に伴って、磁気ディスク、磁気テープなどの外部記憶装置に求められる容量が急速に増大している。これに伴い、高密度、高速度の磁気ディスク装置が強く要請されており、数年後には、記録密度は数十メガビット/cm²、記録周波数も数十MHzになると予想されている。一方、VTRにおいてもハイビジョン対応の小型デジタルVTRの実用化を目指し、記録密度の向上が急がれている。

これら磁気記録装置の高密度化、高速度化に対応するためには、その主要部品である磁気ヘッドが微小空間にいかにか効率良く、高速に磁界を発生できるかが重要な課題である。現在実用化している磁気ディスク用のヘッドでも、既に磁極の幅(トラック幅)が10μm前後、磁極のギャップ長は0.5μm以下となっている。このような微小な磁極から発生する磁界によって磁気ディスクやテープに情報を書き込んでいる。

図1は磁気ディスクと磁気ヘッドの関係を模式的に示したものである。この磁気ヘッドは、LSIと同様な薄膜形成プロセスを用いて製作されている(このようなプロセスで作られた磁気ヘッドを薄膜ヘッドと呼んでいる)。高密度化、高速度化のためにはヘッドを更に微小化し、しかも高周波(数十MHz以上)動作可能なものにする必要がある。そのためには高周波動作状態でヘッドが発生する漏えい磁界を高分解能で計測することが不可欠である。そこで、電子ビームとコンピュータ断層映像法およびストロボ法を用いて、微小空間磁界分布の高速変化を観察できるストロボ電子ビームトモグラフィ法⁽¹⁾⁽²⁾が開発されている。

磁気ヘッドはスライダと呼ばれる数ミリ角の保持材の端部に埋め込まれている。コイルに高周波の電流を流し、磁気ヘッド先端から発生する漏えい磁界により磁気ディスク上にデータが記録される。

図1 磁気ディスク装置に使われている
磁気ヘッドの概念図

本稿では、微小空間の磁界分布を計測する従来技術を簡単に紹介した後、最近開発されたストロボ電子ビームトモグラフィ法と、その計測例について述べる。

2. ミクロ磁界を計測する従来技術

微細領域の磁界を測定することを目的として、これまで様々な方法が工夫されてきた。例えば、微小な磁気センサを測定空間で移動させ、磁界の強度分布を求めるものが報告されている^{(3)~(5)}。いずれも半導体プロセスを用いて微小なセンサを作成しているが、分解能は数ミクロンオーダーが限界である。従って、ミクロンオーダーの磁気ヘッドの磁界分布を分解能良く測定するのは困難である。

Dynamic Micro-Magnetic Field Measurement —Stroboscopic Electron Beam Tomography—

By Hiroyuki Shinada (Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.)

キーワード: 磁気ヘッド, 磁界分布, 電子ビーム, ストロボ法, 高周波磁界, 磁気ディスク

高分解能の測定が期待できるものとして電子顕微鏡を用いる方法がある。電子ビームを磁界中に通過させ、その後方に配置した参照物（メッシュやナイフエッジ）の像のゆがみを観察したり、位置検出器でビームの偏向量を測定し、磁界を推定するものなどである⁽⁶⁾⁽⁷⁾。この手法では電子ビーム軌道上の磁界の積分量が測定される。従って、電子ビームの軌道に沿った磁界が一定とみなせる場合にのみ有効である。電子顕微鏡による方法では高感度かつ高分解能な方法として電子ビームホログラフィが注目されている⁽⁸⁾。これは、磁界中を通過することによる電子ビームの位相変化をホログラフィ像として得る方法で、薄膜磁性試料からの非常に微細（ナノメートルオーダー）かつ微弱（磁束量子 h/e オーダー）な磁力線の様子が観察できる。

しかし、磁気ヘッドが発生する磁界は三次元的に分布し、電子ビームの軌道上に於て磁界が一定ではない。従って、上記の方法では真の磁界分布を測定することは不可能である。そこで、断層映像（トモグラフィ）法を応用した手法が提案されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。更に近年では、高周波の磁界分布も測定可能なストロボ電子ビームトモグラフィ法が開発されている⁽¹⁾⁽²⁾。

3. ストロボ電子ビームトモグラフィ

この手法は、空間の各点の磁界強度を三次元で測定でき、しかも 10~50 MHz の高周波磁界分布を測定することが可能である⁽¹⁾⁽²⁾。この手法について説明する。

3.1 測定原理

測定原理を図 2 に示す。細く絞った電子ビームをヘッド表面近傍の測定したい平面上に走査させる。電子ビームは磁界によるローレンツ力により偏向を受ける。この偏向量を位置検出器により測定する。この測定値のみでは電子ビーム軌道上の磁界の積分情報しか得られない。そこで、磁気ヘッドを数度づつ 0° から 180° まで回転して、偏向量測定を繰返す。これらのデータを用い、X 線 CT に用いられている手法と類似の断層像再構成計算を行う。X 線 CT では、X 線が透過した人体の断層像が得られるのと同様に、この方法では電子ビームが透過した部分の磁界の分布像が得られる（図 3）。

高周波動作中の磁気ヘッド磁界の測定は、ストロボ法により可能になる。ストロボ法では、図 4 に示すように磁気ヘッドの高周波駆動電流と同期し、駆動電流の特定の位相で繰返し発生するパルス電子ビームを用いる。このようなパルス電子ビームによって測定された結果は、パルスが発生した瞬間の磁界強度を反映し

図 2 ストロボ電子ビームトモグラフィの原理図

図 3 X 線 CT と電子ビームトモグラフィの比較

電子ビームが照射される位相のタイミングの情報のみが測定される。ただし繰返し現象に限定される。

図 4 ストロボ法の原理（高周波駆動電流とパルス電子ビームのタイミング）

ている。これは、高速で回転している物体をその回転と同期したストロボライトで照らし、静止しているかのように観察する方法と同じ原理である。パルス電子ビームとヘッド駆動電流のタイミングを遅延回路により調整することで、任意のタイミングにおける磁界分布を測定することが可能である。

この手法の空間分解能は、測定に用いる電子ビームの径、試料回転精度、トモグラフィ再構成のメッシュ分割数などの要因により決定される。本装置では試料

と電子ビームの位置決めを工夫することで最高 $0.1\ \mu\text{m}$ の分解能が得られている。また、時間分解能は電子ビームのパルス幅と電子ビームが磁界中を通過する速度によって決まる。現在は、前者によって決まっており、パルス幅 $100\ \text{ps}$ まで実現している。後者は、電子ビームのエネルギーが $3\ \text{keV}$ のとき数 ps となる。従って、電子ビームの短パルス化と高エネルギー化により時間分解能を ps 以下にすることも将来可能になるであろう。磁界に対する感度は、電子ビームの偏向量がどこまで感度良く測定できるかで決まる。本装置では $10\ \mu\text{m}$ の領域に存在する $2\ \text{mT}$ の磁界まで検出できる。磁気ヘッドの磁界は $100\ \text{mT}$ 程度であるため、測定感度は十分である。

3.2 トモグラフィ再構成法

電子ビームの磁界による偏向量測定から磁界分布を再構成するトモグラフィ演算について説明する。X線CTなどで用いられているトモグラフィ手法はスカラー量を対象としているので、ベクトル量である磁界分布の再構成にそのまま用いることはできない。これについてはいくつかの方法が報告されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。例えば試料の回転角 θ によって重み付けした量を用いて再構成する方法がある⁽¹⁾。この手法の詳細は省略するが、X方向磁界は $d_z \cos \theta$ 、Y方向磁界は $d_z \sin \theta$ から通常のトモグラフィ演算を用いて求めることができる。このアルゴリズムの妥当性を確かめるため、シミュレーションで求めた薄膜磁気ヘッドの磁界分布から電子ビームの偏向量を計算し、それをこのアルゴリズムで再構成した。その結果、両者はほとんど一致し、誤差は5%以下であった。

4. 薄膜磁気ヘッドの測定結果

4.1 三次元磁界分布

ここでは、磁気ディスクで主流になりつつある薄膜磁気ヘッドの磁界分布を測定した例について紹介する。このヘッドの形状を図5(a)に示す。トラック幅は $17\ \mu\text{m}$ 、ギャップ長は $0.4\ \mu\text{m}$ 、磁極形状は矩形で、上部磁極が下部磁極よりも $2\ \mu\text{m}$ 程度短くなっている。測定はヘッド表面から $0.5\ \mu\text{m}$ 離れたところで行い、 $10\ \text{MHz}$ の矩形波電流で駆動した。パルス電子ビームは矩形波の電流値が最大になっている位相に合せている。測定結果を図5(b)に示す。 H_x 、 H_y 磁界分布再構成結果から、 x - y 平面上の磁界をベクトル表示したものである。斜線の部分は磁極である。この結果から、上部磁極側の広い範囲に磁界が存在し、下部磁極側は急激に磁界が減少している様子がわかる。

図6は磁界分布を H_x 、 H_y 、 H_z の三方向の成分に分

図5 測定した薄膜磁気ヘッドの構造と磁界分布測定結果

図6 磁界分布測定結果の三次元表示と等高線表示 (ヘッド表面から $0.5\ \mu\text{m}$)

解し、鳥かん図と等高線で表示したものである。(a)(b)(c)はそれぞれ H_x 、 H_y 、 H_z の鳥かん図、(d)(e)(f)がそれぞれ H_x 、 H_y 、 H_z の等高線図である。また(g)は同一縮尺で磁極の形状を表わしている。 H_x の等高線図6(d)から、上部磁極側の磁界こう配が下部磁極側に比べ非常に緩やかになっていること、下部磁極側には逆方向の磁界が存在することなどがわかる。また H_y の分布から、 H_y は磁極の端部に集中している様

図 7 高周波における磁気ヘッドの磁界強度分布の変化

子がわかる。

4.2 高周波磁界の過渡特性

本測定手法では、パルス電子ビームの位相を任意に設定できるので、位相を変えて測定を繰返せば高周波で駆動されているヘッドの磁界が発生する様子を詳細に観察することができる。この例を図 7 に示す。測定したヘッドは図 5(a) と同じ薄膜磁気ヘッドである。磁気ヘッドは図 7 に示した 20 MHz の繰返し波形で駆動されている。パルス電子ビームのタイミングを 5 箇所の位相にそれぞれ固定して測定を行った。ここに示したのは x 方向の磁界分布の鳥瞰図表示である。磁界強度が電流に応じて変化している様子が測定されている。これによると、磁界分布は、同一形状を保ったまま強度のみが電流に対応して変化するのではないということがわかる。例えば、(a) と (b) の分布の裾野部分の形状が異なっている。このような計測結果をもとに、現在、磁気ヘッドの高周波特性の解析が進められつつある。

5. ま と め

従来、高周波動作中の磁気ヘッド磁界分布は、実測のみならずシミュレーションでも予測困難であった。これを実測できるようにしたストロボ電子ビームトモグラフィ法は、既に高密度磁気記録用磁気ヘッドの開発が有効利用されており、この測定手法はますます重要性を増してくるものと思われる。今後は、高周波磁界が測定できるという特長を生かし、磁気ヘッドのみ

ならず、一般の磁性体の高周波現象を解明するツールとしても威力を発揮できるものと期待される。

(平成 3 年 12 月 26 日受付)

文 献

- (1) 品田・大友, 他: 第 13 回応用磁気学会学術講演概要集 p. 86, p. 87
- (2) H. Shinada, S. Fukuhara, H. Todokoro, et al.: *IEEE Trans. Magnetics*, 28, 2, (印刷中) (1992)
- (3) R. F. Hoyt, D. E. Heim, J. S. Best, C. T. Horng, & D. E. Horne: *J. Appl. Phys.*, 55, 2241 (1981)
- (4) J. P. J. Groenland & J. H. J. Fluitman: *J. Sci. Instrum.*, 14, 503 (1981)
- (5) Y. Martin & H. K. Wickramasinghe: *J. Appl. Phys.*, 61, 4723 (1987)
- (6) R. F. M. Thornley & J. D. Hutchison: *Appl. Phys. Lett.*, 13, 8, 249 (1968)
- (7) J. B. Elsbrock, N. Nothen, L. J. Balk, & E. Kubalek: *J. Appl. Phys.*, 61, 4185 (1987)
- (8) K. Yoshida, A. Tonomura, et al.: *IEEE Trans. Mag.*, MAG-19, 5, 1600 (1983)
- (9) J. B. Elsbrock, W. Schroeder, & E. Kubalek: *ibid.*, MAG-21, 1593 (1985)
- (10) 松田・青柳・近藤・和田・武笠: 信学技報, MR89-10 (平 1)

品 田 博 之

昭和 40 年 7 月 15 日生。60 年慶應義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年(株)日立製作所入所。現在同社中央研究所において電子ビーム

応用の研究に従事。応用物理学会, 応用磁気学会会員。