電子顕微鏡による薄膜磁気ヘッドの磁区構造変化と記録後ノイズの相関

Correlation between Noise-after-Write and Magnetic Domain in Thin-Film Heads by Electron Microscopy

小林和雄

(株)富士通研究所, 神奈川県厚木市森の里若宮 10-1 (〒243-01)

K. Kobayashi

Fujitsu Laboratories Ltd., 10-1 Morinosato-Wakamiya, Atsugi 243-01

Noise-after-write has been reported in thin-film heads, although the sources have not yet been identified. To discover these noise sources, I observed the magnetic domain structure conversions after writing with an electron microscope. The magnetic domain observation consisted of lock-in image processing for back-scattered electron contrast (Type II), using a JEOL 2000FX II 200 kV electron microscope. Thin-film heads were excited with a 10 mA_{p-p}, 100 kHz drive current. The magnetic domains in the upper yokes of the heads were observed after 60 mA_{p-p} write operations. The head that had the highest noise probability of 5.2×10^{-2} exhibited radial walls centered at the backgap closure because of stress. Its magnetic domain configuration after writing was severely converted. The head with the lowest noise probability of 1.6×10^{-4} exhibited a normal closure domain configuration, with very little conversion. These results indicate that noise-after-write is generated mainly near the backgap closure.

Key words: noise-after-write, thin-film head, magnetic domain, scanning electron microscope, back-scattered electron, lock-in amplifier

1. はじめに

薄膜ヘッドにおいて、記録電流を流した直後 (μ s のオーダー) に、記録後ノイズと呼ばれる突発的なパルス状ノイズの発生することが知られている^{1)~4)}。記録後ノイズの原因としては、コイルに電流を流すことによりヘッドの温度が上昇し、磁歪定数が零でないヘッドヨークが記録後に冷却されることにより機械的な応力が変化し、それによってヘッドヨークの磁壁の不連続な移動が誘起されるためであると考えられている¹⁾。しかし磁壁の不連続な移動はディレイタイムで数 μ s~100 μ s、磁壁の移動時間としては数十 ns~数百 ns のオーダーで突発的に起こるために、磁壁移動の直接的観察はこれまで行われておらず、その発生場所がどこであるかについては今だ

未解決の問題となっている。

Carnegie Mellon 大学の Liu らは、ストロボカー効果顕微鏡を用いて薄膜ヘッドの磁区観察を行い、磁極先端付近に現れる縦割れの 180° 磁壁は、記録再生出力変動の原因であるが記録後ノイズの原因ではなく、記録後ノイズの原因はバックギャップクロージャー (以下 BGC と略す) の近くに表れるスパイクライク磁区であろうとしている^{5), 6)}。スパイクライク磁区は磁極ヨークの中心線上で、かつ BGC の近くに現れ、静的状態では発生せず、MHz オーダの周波数で駆動された場合に、駆動サイクルのたびに現れる。しかしこのように周期的に発生する磁区が本当に記録後ノイズの原因であるかは、いささか疑問の余地があるものと思われる。

そこで、これまでに開発した、走査型透過電子顕微鏡を用い、磁性膜からの反射電子 (Type II) を S/N 良く観察可能なロックイン手法^{7), 8)}を構築し、薄膜ヘッドの磁区構造と記録後ノイズの関係を明らかにすることを目的として、磁区構造観察を行った。特に、記録した後の磁区構造変化に注目し実験を行った。

2. 実験方法

磁区構造の観察には、JEOL 2000FX II 走査型透過電子顕微鏡を用いた。これに磁場遮蔽用ポールピース (BMP20) を取り付け、この内側の試料直上の位置に、一対の反射電子検出器 (PN フォトダイオード) を軸に対称の位置に取り付けた。実験の構成を Fig. 1 に示す。薄膜ヘッドはシグナルジェネレータにより 100 kHz で駆動し、薄膜ヘッドからの反射電子を検出器で受け、両検出器の和信号をロックインアンプを通して同期検出する。電子ビームの走査と画像の取り込みは Link eXL-II で行った。

磁壁移動の直接的な観測は不可能なので、特に、記録電流を流した後の磁区構造の変化の度合いに注目して実験を行った。記録周波数は実際と異なる 100 kHz では

あるが、実際のヘッドの記録電流である $60 \text{ mA}_{\text{p-p}}$ の記録電流を $1 \sim 2 \text{ s}$ の間流すことを $3 \sim 4$ 回繰り返した。磁区観察は駆動電流 $10 \text{ mA}_{\text{p-p}}$ 、周波数 100 kHz で行った。磁区の測定は 256×256 画素で行い、1 画素の取り込みに要する時間 (Dwell time) は 5 ms とした。したがって 1 画面の測定時間は約 5 分である。

まず、実験には記録後ノイズの発生確率の異なる A, B, C 3 種類のヘッドを各々 2 個ずつ用意した。それらの記録後ノイズ発生確率を Table 1 に示す。ヘッドは、めっきプロセスを用いた NiFe 磁極ヘッドであり、磁極組成 $83.5 \text{ wt\%Ni}$ 、磁極厚は約 $3 \mu\text{m}$ 、磁極先端のコア幅は約 $8 \mu\text{m}$ 、捲線数は 32 ターンである。比較的高い分解能が得られる、ヘッド保護膜のない状態で観察した。

次に、散乱により少し分解能が落ちるものの、本観測手法は保護膜厚が $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 存在しても磁区観察が可能なので、実際に使われている状態であるアルミナ保護膜が被覆されたヘッドで、かつ磁極組成が異なり、記録

後ノイズの発生確率も異なるヘッドの磁区観察を行った。保護膜が付いた状態でも、磁極先端付近の詳細な磁区を除いて十分な分解能を持っている。それらヘッド D ~ G の記録後ノイズ発生確率およびヘッド磁極組成を Table 2 に示す。ただしこのヘッドの捲線数は 42 ターンである。記録後ノイズの発生確率の測定方法を Fig. 2 に示す。記録周波数 9 MHz 、記録電流 $60 \text{ mA}_{\text{p-p}}$ で 0.5 ms の間記録を行い、その直後の過渡現象時間を考慮して $20 \mu\text{s}$ の休止時間を設けた後 1.2 ms の間再生を行う。この間にヘッド再生出力の 10% 以上のノイズ (ここでは $40 \mu\text{V}_{\text{p-p}}$) が発生した場合は発生個数としてカウントする。これを繰り返して 6250 回行い、発生確率を求める。

3. 実験結果および考察

3.1 保護膜のないヘッドの測定結果

記録後ノイズの発生確率の高いヘッド C-1 (ノイズ発生確率 5.2×10^{-2}) の磁区構造変化を Fig. 3 に示す。電子線の加速電圧は 100 kV で測定している。Fig. 3(a) は記録後ノイズを計測した後の磁区構造であり、本手法に

Fig. 1 Schematic diagram.

Fig. 2 Method of noise-after-write measurement.

Table 1 Probabilities of noise-after-write (N-A-W) in heads without a protective layer

Head	Probability of N-A-W
A-1	1.6×10^{-4}
A-2	3.2×10^{-4}
B-1	2.7×10^{-3}
B-2	2.2×10^{-3}
C-1	5.2×10^{-2}
C-2	1.5×10^{-1}

Table 2 Probabilities of noise-after-write (N-A-W) and compositions of NiFe pole of heads with a protective layer

Head	Probability of N-A-W	Composition of NiFe (wt. %Ni)
D	2.3×10^{-2}	83.5
E	1.7×10^{-2}	83.5
F	8.5×10^{-3}	82.5
G	4.5×10^{-4}	82.5

よる記録電流を流す前の磁区構造である。この計測法では磁壁は白と黒の一对の線になって現れるので、BGCを中心とした放射状の磁壁（円弧状の磁化を持った磁区）が多く発生していることが分かる。この原因としては、小柳ら⁹⁾により明らかにされたようにBGCを中心とした円弧状に引張応力が発生し、磁性膜の磁歪定数が負のため放射状の磁壁になると考えられる⁸⁾。Fig. 3(a)で磁区構造がより消磁状態に近く見えるのは、記録周波数の違いによるものと考えている。100 kHzの周波数では、駆動電流の増加につれて磁壁移動が激しい⁸⁾が、9 MHzの周波数では100 kHzほど磁壁が動いていないものと考えられる。

Fig. 3(b)は60 mA_{p-p}の記録電流を1~2sの間流すことを3~4回繰り返した後、磁区を観察した結果である。磁区構造が大きく変化しているのが見て取れる。Fig. 3(c)~(d)も同じ方法で記録電流を流した後観測した磁区構造の変化である。磁極先端まで縦割れの磁壁だ

らけになっていることが分かる。

記録後ノイズの発生確率が中間の値であるヘッドB-1（ノイズ発生確率 2.7×10^{-3} ）およびB-2（ノイズ発生確率 2.2×10^{-3} ）の磁区構造変化をそれぞれFig. 4の(a)~(d)および(e)~(h)に示す。Fig. 4(a)と(e)は記録後ノイズを計測した後の磁区構造であり、Fig. 4(b)~(d)および(f)~(h)は前述したように、60 mA_{p-p}の記録電流を流した後磁区を観察した結果である。ヘッドB-1では磁極先端部分の磁区はほとんど変化せず、BGC付近の磁区のみが変化している。また、ヘッドB-2ではヘッドC-1と同じくBGCを中心とした放射状の磁壁を示しているが記録電流による磁区構造の変動が少ない。

記録後ノイズの発生確率の低いヘッドA-1（ノイズ発生確率 1.6×10^{-4} ）の磁区構造変化をFig. 5に示す。Fig. 5(a)は記録後ノイズを計測した後の磁区構造であり、Fig. 5(b)~(d)は前述と同様の記録電流を印加した後磁区を観察した結果である。この場合、磁区構造はほ

Fig. 3 Magnetic domain, head C-1. (a) before write; (b, c, d) after write (60 mA_{p-p}).

Fig. 4 Magnetic domain, head B-1 (a, b, c, d) and B-2 (e, f, g, h). (a, e) before write; (b, c, d, f, g, h) after write (60 mA_{p-p}).

とんど変化していないことが分かる。

A-2 および C-2 に関しては、磁区構造の変動の点ではそれぞれ A-1, C-1 の結果とほぼ同じ傾向であった。

以上の結果より、記録後ノイズと磁区構造変化は強い相関性のあることが分かる。特に BGC 付近の磁区構造変化の大きいヘッドが記録後ノイズの発生確率が高い。

3.2 保護膜のあるヘッドの測定結果

保護膜のあるヘッドの磁区の観察結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6(a) および Fig. 6(b) は記録後ノイズの発生確率の高いヘッド D およびヘッド E の磁区構造の観察結果であり、BGC を中心とした放射状の磁壁が多く発生していることが分かる。ここでは、NiFe 磁極がアルミナ保護膜の下にあるので、電子線の加速電圧 200 kV で測定している。また磁区観察時のヘッド駆動電流は 20 mA_{p-p} としている。

上部磁極の組成を磁歪定数がほぼ零である 82.5 wt% Ni 組成とし、記録後ノイズの発生確率を低くしたヘッド F, G の測定結果を Fig. 6(c) および Fig. 6(d) に示す。BGC を中心とした放射状の磁壁は見られず、比較きれいな還流磁区構造を示す。BGC を中心とした円弧状に引張応力が発生していても、磁歪定数がほぼ零のために磁気異方性が発生しないものと考えられる。Fig. 6(c) および Fig. 6(d) では、むしろ BGC 付近の磁壁は少し円弧状の傾向があり、若干磁歪定数が正気味になっている

ことが予想される。

Fig. 7 は記録後ノイズの発生確率の高いヘッド D を用いて、記録電流を印加した後の磁区構造変化を観察した結果である。磁極先端付近の磁壁はほとんど変化していないが、BGC 付近の放射状の磁壁が変動しているのが分かる。特に磁極中心線付近の縦割れ磁壁の変動が大きいように見える。

以上、保護膜がない時とある時の実験結果より、記録電流を印加した後のヨークの BGC の磁区構造の変動と記録後ノイズとは強い相関を示している。

Kasiraj らによると、磁極先端および段差部付近における磁区構造の変動、特にそこに発生する縦割れ磁壁は再生出力の変動（ウイグルと呼ばれている）の原因であるが、ヨークの BGC 付近の縦割れ磁壁は再生出力変動の原因ではないことが知られている^{10, 6)}。その理由としては、BGC 付近は磁極先端および段差部に比較して再生の場合磁束密度が低く、かつ縦割れ磁壁を通らずに他を迂回する磁路が存在するためであるとしている。また、神田らは静的磁区構造と記録後ノイズの関係を調べ、BGC 付近に縦割れ磁壁のないヘッドでも記録後ノイズは発生するが、縦割れ磁壁のあるヘッドでは記録後ノイズがより発生しやすいとしている¹¹⁾。

ここで観測したヨークの BGC 付近の磁区構造が記録

Fig. 5 Magnetic domain, head A-1. (a) before write; (b, c, d) after write (60 mA_{p-p}).

Fig. 6 Magnetic domains of heads that have different probabilities of noise-after-write. (a) head D; (b) head E; (c) head F; (d) head G.

のたびに変動することと記録後ノイズとが強い相関を示すことは次のように解釈される。ヘッドに記録電流を徐々に印加していくと、まず磁極先端の段差部に局所的磁気飽和が起こり、続いて起磁力 0.7 AT あたりで BGC 付近に局所的磁気飽和が発生する¹²⁾と考えられる。ここで使用したヘッドの起磁力は 0.96 AT であるので、磁極先端の段差部付近と BGC 付近との両方に局所的磁気飽和が起こっているものと考えられる。記録電流が取り除かれると磁気飽和が発生した場所の磁区構造は磁気異方性、ヘッド形状による減磁界、温度上昇などによって規制されながら各種の磁区構造を取る可能性が増大する。したがって、そのような場所は準安定な磁区構造を作る確率が増大し、準安定な磁区構造は緩和により安定な磁区構造に移行し、ノイズが発生するものと考えられる。磁壁の不可逆的動きは、小さな局所的な欠陥に磁壁がピンングされることによって起こる。欠陥としては、傷、表面粗さ、不純物、ボイド、局所応力などが考えられる。ここでの実験においては、記録電流を流した後の磁区構造は磁極先端段差付近では変わらないが、BGC 付近では大きく変化していた。このことは、磁極先端付近ではピンングサイトが少なく（ピンングサイトでトラップされるよりも形状などによる抑制が大きいと考えても良い）、磁気飽和後磁壁は同一の安定状態に戻るが、BGC 付近ではピンングサイトが多くあり、磁壁は同一の安定状態に戻らないことを意味する。また、記録後ノイズの少ないヘッドは、ピンングサイトが少なく磁気飽和後磁壁は同一の安定状態に戻るが、記録後ノイズの多いヘッドはピンングサイトが多く、磁壁は同一の安定状態に戻らないと考えられる。記録後に電流を切断するとヘッドヨークが冷却され、局所的応力の変化が起こり、ピンングされていた磁壁が開放され、次のピンングサイトにトラップされる現象が記録後ノイズであると考えられる。BGC 付近の縦割れ磁壁は再生出力変動には大きな影響を与えないが、最後に示す簡単な計算でも明らか

なように、BGC 付近での磁壁の突発的な変動は再生時に重畳するノイズとしては寄与が大きい。

ヨークの BGC 付近は段差のために応力が複雑に変化しており、磁壁のピンングサイトが多く存在するものと予想される。Liu らが主張するスパイクライク磁区^{51, 6)}でなくとも、記録後ノイズの原因になり得ると思う。ここで述べた、比較的低周波数で記録し磁区構造の変動を観察する手法は、一種の加速試験になっているものと考えられる。これまでヘッドの磁区構造を観察した例は多い^{13)~16)}が、ここで述べた方法は、ヘッドに現れる各種の不安定性の理解のための良い方法であると考えられる。

最後に、記録後ノイズの原因であると考えられている磁壁の突発的な移動量を簡単に見積もってみる。Fig. 8 に示すように BGC 付近の縦割れ磁壁が記録後ノイズの原因と仮定する。縦割れ磁壁全体が Δx だけ動いたとすると、その時の磁極中心線方向の磁化の変化は、磁化 M_s のコア幅方向からの角度を θ とすると、磁極の飽和磁束密度の変化量は $4\pi M_s$ の 2 倍となり、磁束 ϕ の変化量は、磁極の膜厚を p とすると

$$\phi = 8\pi M_s \sin \theta \Delta x p \quad (1)$$

で与えられる。ヘッドの捲線数を N 、再生出力を V とすると、磁束量 ϕ は、

$$\phi = -1/N \int_{-\infty}^{\infty} V dt \quad (2)$$

で与えられ、記録後ノイズの出力波形をピーク値 A 、半値幅 $2a$ のローレンツ波形と仮定すると、符号を無視して

$$\phi = (1/N)\pi A a \quad (3)$$

となる。(1)式と(3)式を等しいと置くと、磁壁の移動量は

$$\Delta x = (1/N)\pi A a / 8\pi M_s \sin \theta p \quad (4)$$

で与えられる。

NiFe 磁極ヘッドの場合、 $4\pi M_s = 10^4 \text{G}$ 、 $p = 3 \mu\text{m}$ 、 $N = 32$ 、 $\theta = 45^\circ$ と仮定し、すでに発表されたノイズ波形より

Fig. 7 Magnetic domain, head E. (a) before write; (b, c, d) after write (60 mA_{p-p}).

Fig. 8 Magnetic domain that has a longitudinal wall in the direction of flux conduction near the back-gap closure.

$2a = 100 \text{ ns}$ と仮定し（我々の測定結果は $50 \text{ ns} \sim 200 \text{ ns}^{11}$ 、Klassen らは $50 \sim 300 \text{ ns}^3$ 、宮本らは $80 \sim 160 \text{ ns}^{17}$ ）、さらに $A = 40 \mu\text{V}$ （記録後ノイズの最小計測出力）と仮定すると、磁壁の移動量 Δx は約 $460 \text{ \AA}$ となる。この 10 倍のノイズ出力としても磁壁の移動量は約 $0.5 \mu\text{m}$ にすぎない。したがって、Liu らが主張するスパイクライク磁区のような $10 \mu\text{m}$ ほどの大きさの磁区が原因とは考えにくい。また、このように少ない磁壁移動の直接的な観察は非常にむずかしく、ここでの観察のように今のところ間接的なものにならざるを得ない。

4. ま と め

走査型透過電子顕微鏡を用いて、反射電子をロックイン手法により計測する方法を構築し、薄膜ヘッドの磁区構造と記録後ノイズの関係を明らかにすることを目的として、記録後ノイズの発生確率の異なる各種ヘッドの磁区構造の観察を行った。記録した後の磁区構造変化に注目し実験を行った結果、記録後ノイズの発生確率の高いヘッドは記録後の磁区構造変化が大きく、記録後ノイズ

と磁区構造変化は強い相関のあることが分かった。また、応力が複雑に変化しているバックギャップクロージャー付近の磁壁の変動が激しく、記録後ノイズの原因はバックギャップクロージャー付近の磁壁の記録後の突発的な移動によると予想できた。

文 献

- 1) K. B. Klassen and J. C. L. van Peppen: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-25**, 3212 (1989).
- 2) K. B. Klassen and J. C. L. van Peppen: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-25**, 3209 (1989).
- 3) K. B. Klassen and J. C. L. van Peppen: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-26**, 1697 (1990).
- 4) K. B. Klassen and J. C. L. van Peppen: *J. Appl. Phys.*, **68**, 5417 (1991).
- 5) F. H. Liu, M. D. Schultz and M. H. Kryder: *J. Appl. Phys.*, **69**, 5415 (1991).
- 6) F. H. Liu, P. Ryan, X. Shi and M. H. Kryder: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-28**, 2100 (1992).
- 7) R. P. Ferrier, S. McVitie and W. A. P. Nicholson: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-26**, 1337 (1990).
- 8) 小林和雄: 日本応用磁気学会誌, **17**, 117 (1993).
- 9) 小柳広明, 荒井礼子, 光岡勝也, 福井 宏, 成重真治, 杉田 恒: 日本応用磁気学会誌, **13**, 103 (1989).
- 10) P. Kasiraj and R. D. Holmes: *J. Appl. Phys.*, **69**, 5423 (1991).
- 11) 神田英一, 金井 均, 金峰理明: 第 14 回日本応用磁気学会講演集, p. 163 (1990).
- 12) K. B. Klassen and J. C. L. van Peppen: presented in TMRC at MN, 1993, to be published in *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-29** (1994).
- 13) P. Kasiraj, R. M. Shelby, J. S. Best and D. E. Horne: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-22**, 837 (1986).
- 14) M. H. Kryder, P. V. Koeppel and F. H. Liu: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-26**, 2995 (1990).
- 15) R. E. Jones, Jr., R. D. Holmes and P. Kasiraj: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-25**, 3203 (1989).
- 16) P. V. Koeppel, M. E. Re and M. H. Kryder: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-22**, 71 (1992).
- 17) 宮本詔文, 福井 宏, 大津孝佳, 唐鎌義彬: 日本応用磁気学会誌, **16**, 91 (1992).

1993 年 10 月 13 日受理, 1994 年 1 月 28 日採録