Effect of Transition Curvature on Signal Quality for Narrow Track Recording

M. Shiimoto, H. Katada, Y. Urakami, M. Hashimoto, M. Sugiyama, T. Ichihara, and K. Nakamoto

Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., 2880 Kozu, Odawara, Kanagawa 256-8510, Japan

We investigated the effect of transition curvature on track edge noise through experiments and calculations. We measured and calculated two types of recording heads that had similar magnetic write widths, but different transition curvatures. In both the measurements and calculations, the track edge noise increased more at high linear density with the head with larger transition curvature, due to its wider erase band, which was considered to be noise source at the track edge. We also clarified that reducing the transition curvature was effective to increase signal-to-noise ratio (SNR), especially at high linear density, and that reducing the track edge fluctuation was effective to increase SNR, especially at low linear density. Therefore, reducing both the transition curvature and track edge fluctuation is necessary to reduce track edge noise and consequently achieve high areal density.

Key words: magnetic recording, recording head, medium noise, transition curvature, track edge noise

狭トラック記録再生における転移湾曲の信号品質へ与える影響

椎本正人・片田裕之・浦上洋輔・橋本光弘・杉山幹人・市原貴幸・中本一広

日立製作所中央研究所, 神奈川県小田原市国府津 2880 番地 (〒256-8510)

1. はじめに

ハードディスクドライブの高記録密度化のためには、線記録密度およびトラック密度の向上が必要である。線記録密度の向上には、ビット境界における磁化転移ラインの揺らぎに起因する転移性ジッタノイズ¹⁾の低減が必要であり、記録ヘッドの磁界勾配の向上、媒体の粒径や磁気クラスターの微細化やヘッド・軟磁性裏打ち層間距離の低減などが有効である²⁾。トラック密度の向上には、記録および再生ヘッドの狭小化と、それに伴うヘッド特性の低下を抑制することが必要である。しかし、最近の検討により、記録ヘッドの磁界勾配が一定でも記録トラック幅が狭小化すると、トラックエッジノイズの影響が増加し、トラック中心においても SNR(Signal-to-Noise Ratio) が劣化することが明らかになっている³⁾。したがって、高トラック密度化の実現には、トラックエッジノイズの低減が必須であり、その要因と物理を明らかにすることが重要である。

トラックエッジノイズの要因の一つとして、トラック境界線の揺らぎに起因するトラック端部の揺らぎノイズが知られている^{4,5)}。このトラック端部揺らぎを低減するためには、媒体の磁気クラスターサイズの低減⁶⁾や記録ヘッドのクロストラック方向の磁界勾配の向上が有効である³⁾ことが確かめられている。一方で、トラック端部の磁化状態に着目すると、記録転移線の湾曲^{7,8)}もトラックエッジノイズに影響を与えていると考えられる。そこで、転移湾曲がトラックエッジノイズに与える影響を明らかにすることを目的として、記録磁界の湾曲量が異なるヘッドを用いてトラックエッジノイズを検討した結果を報告する。また、転移湾曲とトラック端部揺らぎが SNR に及ぼす影響がどのように異なるかについても報告する。

2. 実験及び計算方法

2.1 実測及び計算に用いたヘッド磁界分布計算方法

実測及び計算に用いた記録ヘッドの磁界分布を有限要素

Fig. 1 Typical calculated head field contour. Field width, field gradient, and field curvature were defined as shown in this figure.

法(FEM)により計算した。有効ヘッド磁界 H_{eff} は $H_{\text{eff}} = |H|(\cos \varphi^{1/n} + \sin \varphi^{1/n})^n$ の式を用いて計算した。ここで、 φ は媒体に垂直な面とヘッド磁界のなす角度である。係数 n は実測に用いた媒体の記録時の残留保磁力の角度依存性と一致するように 1 とした。この条件における残留保磁力の角度依存性は、理想的な角度依存性を持つ Stoner-Wohlfarth model ($n=1.5$) よりも小さく、例えば φ が 45 度のときの残留保磁力は $n=1.5$ の 1.4 倍になる。Fig. 1 に記録ヘッドの有効磁界分布の例を示す。Fig. 1 の磁界幅は媒体の反転磁界である 7 kOe における等磁界線のクロストラック方向への幅と定義した。また、磁界幅は実測の磁気トラック幅(MWW)とほぼ一致することを確認している。転移湾曲はトレーリング側から等磁界線 (7 kOe) までの変異量と定義した。本研究では記録磁界の湾曲の大きさ(c)とクロストラック磁界勾配は、それぞれ磁界幅の 80%

Table 1. Magnetic write width (MWW), transition curvature (c/MWW) of head field distribution, and effective transition curvature (c_{eff}/MWW) for Head A, B, C, and D.

	MWW at 235 kfc	c/MWW (FEM-cal.)	c_{eff}/MWW (fitting.)
Head A (Meas.)	88 nm	0.13	0.48
Head B (Meas.)	83 nm	0.11	0.37
Head C (Cal.)	72 nm	0.12	0.44
Head D (Cal.)	70 nm	0.09	0.28

の位置における等磁界線のダウントラック方向の位相の変位量およびクロストラック方向の磁界勾配と定義した。

2.2 評価方法および評価ヘッド

本検討では、磁気トラック幅(MWW) がほぼ等しく転移湾曲 (c) が異なる 2 種類の記録ヘッド (Head A, B) のトラックエッジノイズとイレーズバンド幅 (EBW) を評価した⁹⁾。Table 1 に Head A と B の 235 kfc における MWW, 記録磁化の実効的な規格化転移湾曲(c_{eff}/MWW), および磁界計算から求めた規格化転移湾曲 (c/MWW) を示す。 c_{eff} は, X. Che 等により提案されている MWW の線記録密度依存性から算出する方法¹⁰⁾を用いた。本検討では磁化転移形状を楕円関数で表現し、楕円の長径が MWW であり、半短径が実効的な転移湾曲(c_{eff})である仮定とした。また、磁化転移幅はクロストラック方向に一定であるとした。このように磁化転移形状を仮定することにより、MWW の線記録密度依存性を計算することができ、これと実測による MWW の線記録密度依存性を比較することによって c_{eff} が求められる。 c_{eff}/MWW は磁界の規格化転移湾曲より 3 倍程度大きい、定性的には磁界の規格化転移湾曲と相関がある。つまり、ヘッド磁界の転移湾曲が大きいヘッドを用いて記録すると、記録磁化の転移湾曲も大きくなることが確かめられる。なお、実効的な記録磁化の転移湾曲が磁界の転移湾曲より大きい理由は、現実には磁化転移幅がトラック端部において増大している影響が本手法では考慮されていないためである。

再生ヘッドは磁気再生幅 (MRW) が 31 nm と MWW に対して十分に狭いものを用いた。また、記録ヘッドの構造による差だけを議論できるように、異なる記録ヘッドで記録した信号を常に同一の再生ヘッドで再生した。媒体はキャップ媒体¹¹⁾を用いた。ヘッドと媒体の記録層間の距離は 10 nm である。

2.3 記録再生計算方法

Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を用いたマイクロマグネティック計算¹²⁾を行い、転移湾曲の異なるヘッド (Head C, D) のトラックエッジノイズおよび SNR を検討した。

Fig. 2 Measured medium noise profile for Heads A and B at 134 and 940 kfc.

Fig. 3 Dependence of measured peak noise at track edge and erase band width on linear density for Head A and B.

3. 実験・計算結果および考察

3.1 実測による転移湾曲がトラックエッジノイズに与える影響の検討

Fig. 2 に転移湾曲が異なるヘッドの線記録密度が 134 kfc および 940 kfc におけるオフトラックノイズプロファイルの実測値を示す。トラック端部におけるノイズのピーク値に着目すると、134 kfc では Head A と B ではほぼ等しいのに対し、940 kfc では転移湾曲が大きい Head A の方が Head B よりも大きいことが分かる。Fig. 3 に、このトラック端部におけるノイズのピーク値と EBW の線記録密度依存性を示す。低線記録密度におけるノイズのピーク値は Head A と B ではほぼ等しいが、線記録密度が増加すると転移湾曲が大きい Head A の方が大きくなる。EBW の線記

Fig. 4 Relationship between peak noise at track edge and erase band width for Head A and B.

Fig. 5 Calculated field gradient at track edge vs. c/MWW .

録密度依存性もノイズピークの線記録密度依存性と同様に、線記録密度が低いときには転移湾曲の大きさに依らず等しいが、線記録密度が増加すると転移湾曲が大きい Head A の方が大きくなる。Fig. 4 に Head A と B のトラック端部におけるノイズのピーク値と EBW の関係を示す。トラック端部のノイズのピーク値は EBW と非常に強い相関があり、イレースバンドがトラックエッジノイズと密接に関係していることを示唆している。

3.2 数値計算による転移湾曲がトラックエッジノイズに与える影響の検討

転移湾曲がイレースバンドやトラックエッジノイズにどのような影響を与えているのかを詳細に解析するために、数値計算を行った。初めに、転移湾曲によって高線記録密度における EBW が異なる原因について解析する。Fig. 5 に規格化転移湾曲とトラック端部における磁界勾配の関係を有限要素法により求めた結果を示す。ここで、規格化転移湾曲はヘッド構造を変化させることによって変化させている。転移湾曲が大きいヘッドはトラック端部における磁界勾配の劣化が激しいことが分かる。この結果は、一般的に

Fig. 6 Schematic images of recording pattern with different transition curvatures at high linear density.

Fig. 7 Calculated normalized magnetic noise profiles for Heads C and D with different transition curvatures by using (a) wide-width read head and (b) narrow-width read head.

磁界勾配が低いほど磁化転移幅は増大するので、転移湾曲が大きいヘッドではトラック端部における転移幅の広がりが大きいことを意味している。このような転移湾曲が異なる磁化状態の模式図を Fig. 6 に示す。トラック端部における転移幅が広く、また線記録密度が高いほど、トラック端部におけるビット間の干渉が増大するので、信号が消失した所謂イレースバンド領域は増大すると考えられる。したがって、特に高線記録密度において転移湾曲の大きいヘッドの EBW が大きい原因は、トラック端部の磁界勾配の劣化に起因するトラック端部のビット干渉の増大によると考

Fig. 8 Relationship between SNR at 235 and 940 kfc i and normalized transition curvature.

えられる。また、イレーズバンド領域は波形の干渉により擬似的に線記録密度が高くなった状態であるとする、非常に高いノイズを持っていると考えることができる¹³⁾。このようなトラック端部における磁化状態とトラックエッジノイズの関係を明らかにするために、オフトラックノイズプロファイルを計算した。Fig. 7に、MWWがほぼ等しく転移湾曲が異なるHead CとDの940 kfc iにおけるオフトラックノイズプロファイルの計算結果を示す。再生ヘッドは、MRWが50 nmの比較的広いものと、15 nmの非常に狭いものの2種類を用いた。まずMRWが50 nmのときの結果を比較すると、転移湾曲が大きいヘッドの方がトラック端部のノイズのピーク値が大きく、実測と似た振舞いが確認できる。次に、MRWが15 nmのときのノイズプロファイルを比較する。トラック端部におけるノイズのピーク値は転移湾曲に依らずほぼ等しいが、転移湾曲が大きいHead Cの方がトラック端部のノイズがトラックの中央に近づいていることが分かる。これは、Fig. 6に示したように、転移湾曲が大きいヘッドの方が、ノイズ源であるEBW¹²⁾が広いことに対応している。したがって、転移湾曲の増大に伴うトラックエッジノイズ増大は、ノイズ源であるイレーズバンド領域の増大で説明できる。

3.3 転移湾曲およびトラック端部揺らぎがSNRに与える影響の検討

転移湾曲及びトラック端部の揺らぎがSNRに与える影響がどのように異なるのかを数値計算により検討した。Fig. 8に、235 kfc i および 940 kfc i におけるSNRと転移湾曲の関係を示し、Fig. 9にクロストラック方向の磁界勾配とSNRの関係を示す。クロストラック方向の磁界勾配は高いほど、トラック端部の揺らぎに起因するトラックエッジノイズが低減する。全ての条件において、235 kfc i における

Fig. 9 Relationship between SNR at 235 and 940 kfc i and cross-track field gradient.

MWWは64 nmであり、MRWは40 nmである。Fig. 8から転移湾曲の低減は、比較的低記録密度である235 kfc iのときよりも、比較的高記録密度である940 kfc iのときに、SNRの向上に有効であることが分かる。これは、転移湾曲の低減による分解能向上効果に加え、特に高記録密度においてトラックエッジノイズが低減する効果によるものである。一方、クロストラック方向の磁界勾配の向上によるトラック端部揺らぎノイズの低減は、Fig. 9から高記録密度よりも特に低記録密度において有効であることがわかる。これは、トラック端部の揺らぎは線記録密度に依存しないためであると考えられる。低記録密度のときには転移性ジッタノイズは小さいので、媒体ノイズ全体に占めるトラック端部揺らぎによるノイズの割合が大きく、この低減によるSNRの向上効果が大きい。一方で、高線記録密度のときは転移性ジッタノイズが大きいので、媒体ノイズに占めるトラック端部揺らぎの割合が小さく、この低減によるSNR向上効果も小さくなる。

4 まとめ

転移湾曲およびトラック端部の揺らぎが信号品質に与える影響を明らかにするために、転移湾曲およびクロストラック方向への磁界勾配が異なるヘッドを実測と数値計算により評価した結果、①転移湾曲が大きいヘッドの方が特に線記録密度が高いときにトラックエッジノイズが大きいこと②これは転移湾曲が大きいヘッドの方がトラック端部におけるノイズ源であるイレーズバンド幅が大きく、トラック端部ノイズがトラック中心に近づくためであること③転移湾曲の低減は主に高線記録密度におけるSNRの向上に有効であり、トラック端部揺らぎの低減は主に低記録密度SNRの向上に有効であること、の結論を得た。これらの結論より、HDDの高記録密度化には、トラックエッジノイズ

低減の観点から、転移湾曲とトラック端部揺らぎの両方の低減が必要であることが明らかになった。

謝辞 日立製作所の中川健氏，伊藤直人氏，松原正人氏，西田靖孝氏，渡邊克朗氏，江藤久俊氏，高澤浩幸氏，日立グローバルストレージテクノロジーズの石井生氏，岡田行正氏，井手浩氏には本研究を行うにあたり多大のご協力を頂きました。ご協力頂いた方々に深く感謝致します。

References

- 1) K. Miura, H. Muraoka, Y. Sugita, and Y. Nakamura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **24**, 231 (2000).
- 2) K. Miura, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 1926 (2001).
- 3) Y. Urakami, N. Ito, H. Katada, M. Shiimoto, S. Das, M. Hashimoto, M. Sugiyama, and K. Nakamoto: *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 3656 (2009).
- 4) T. T. Lam, J. G. Zhu: *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 4245 (1994).
- 5) T. Korenari, S. Tsuboi, T. Okumura, H. Matsutera, and K. Tagami: *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 2509 (1997).
- 6) D. Sudo, M. Hashimoto, K. Miura, H. Muraoka, H. Aoi, and Y. Nakamura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **30**, 122 (2006).
- 7) M. Hashimoto, M. Salo, Y. Ikeda, A. Moser, R. Wood, and H. Muraoka: *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 3315 (2007).
- 8) Hazel A. Shute, John C. Mallinson, and David T. Wilton: *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 2025 (2007).
- 9) T. Kiya, K. Yamakawa, N. Honda, and K. Ouchi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **33**, 369 (2009).
- 10) X. Che, and N. Kim: *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 2300 (2006).
- 11) S. Das and H. Suzuki: *J. Appl. Phys.* **103**, 07F540 (2008).
- 12) M. Igarashi, M. Hara, A. Nakamura, and Y. Sugita: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 1897 (2003).
- 13) K. Miura, T. Ogawa, H. Aoi, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *J. Magn. Magn. Mater.*, **320**, 2908 (2008).

2009年10月20日受理，2009年12月1日再受理，2010年3月17日採録