

高周波 NLTS におけるライトヘッド特性の影響

Effect of Write Head Properties on High-Frequency NLTS

田河育也、西田周治、上原裕二

富士通(株)ファイル研究部、〒243-0124 厚木市森の里若宮 10-1

I. Tagawa, S. Nishida, and Y. Uehara

File Memory Lab., Fujitsu Ltd., 10-1 Morinosato-Wakamiya, Atsugi 243-0124

(1998 年 10 月 15 日受理、1999 年 1 月 21 日採録)

Non-linear transition shift (NLTS) increases rapidly with an increase in the write frequency. We investigated the relation between the frequency characteristics of NLTS and the write head properties, and proposed a new mechanism whereby high-frequency NLTS depends on the field rise time, not on the spatial field gradient. It is shown that NLTS decreases with an increase in resistivity, a shortening of the yoke length, and an increase in the effective write current. It is also shown that a main factor in NLTS is the write time shift caused by the difference between the first bit and second bit rise times of the write field.

Key words: magnetic recording, NLTS, high-frequency, write head, field rise time.

1. はじめに

昨今の急速なコンピュータの処理能力の向上とこれに伴うハードディスク装置の記録容量の増大に伴い、情報の出し入れの高速化が求められている。ライトヘッドの高周波特性が悪いと、たとえ記録密度が一定であっても記録周波数の増大とともに非線型転移点シフト(NLTS)が急激に悪化する。

記録密度の増加にともなう NLTS の悪化は、媒体内反磁界の増大とヘッド磁界勾配との関係から比較的容易に理論的解析が可能であるが¹⁾²⁾、記録周波数と NLTS の関係についての理論的解析はなされていない。周波数に関連して記録電流の立ち上がり時間と NLTS の関係については報告されているが³⁾⁴⁾、これらの論文ではモデルから予想される NLTS よりも実測の方がはるかに大きかったり、最近の HDD 装置における値よりも一桁近く大きな値である数十 ns という立ち上がり時間でのモデルであったりするため、現状と対応づけることが出来ない。また、ヘッドの高周波特性はヘッド形状や材料ばかりでなく記録電流によっても変化する³⁾、さらに媒体特性によっても見かけの周波数特性が変化する。そこで、媒体磁化モデルを組み込んだ磁界解析シミュレーションによりライトヘッド特性と NLTS 周波数依存の関係について調査した。そして、周波数増大にともなう NLTS 悪化のメカニズムに関する新たなモデル

を考案し、NLTS 低減のための設計指針について検討した。

2. シミュレーション

2.1 モデル

渦電流を考慮した二次元の有限要素法を用いた。薄膜ヘッド上部磁極の絞り込み形状効果を考慮するため、飽和磁化 B_s 、透磁率 μ および抵抗率 ρ を先端部トラック幅に対するヨーク幅の拡大比率に従って増大させ、また、先端部におけるポール側面からの漏れリラクタンスも考慮した⁵⁾。また、残留磁化分布計算には、媒体を Curling モデル微粒子集合体と仮定した期待値計算モデルを用いた⁶⁾。これらのモデルにより、媒体内部の反磁界およびヘッド内部の渦電流も考慮にいれたセルフコンシステントな磁化状態が計算される⁷⁾⁸⁾。

NLTS のシミュレーションは五次高調波法の測定手順に従った。すなわち、参照パターンと測定パターンに対する媒体磁化分布を求め、MR ヘッドの相反定理⁹⁾を用いて再生出力を算出し、フーリエ級数展開により五次高調波出力の比を算出した。

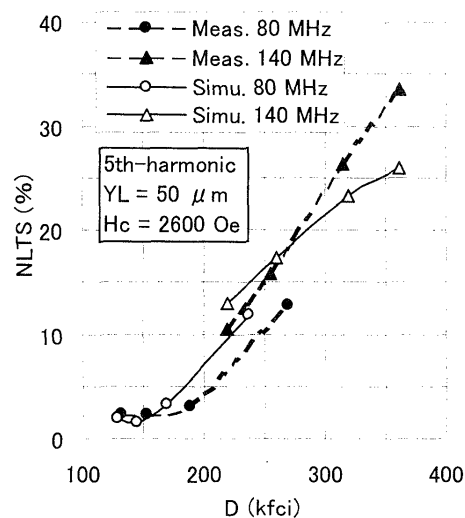


Fig. 1 NLTS vs. recording density characteristics calculated and measured for two different frequencies.

2.2 実測との比較

Fig. 1 はシミュレーションにより求めた NLTS の記録密度および周波数依存性を同様の条件における実測結果と比較したものである。Hc=2600 Oe、tBr=70 μm 、mmf=0.4 AT、ギャップ長 $g=0.3\text{ }\mu\text{m}$ 、スロートハイト $Th=4\text{ }\mu\text{m}$ 、およびスペーシング $d=50\text{nm}$ とした。300 kFCI 以上の記録密度ではシミュレーションの NLTS 値の方がやや大きい、それ以外の領域では 5% 以内程度の差に納まっている。実測値におけるヘッドや媒体による変動も決して小さくないことも考え合わせると、本シミュレーションを NLTS 解析に用いたときの信頼性は満足できるものである。

3. NLTS の周波数特性

3.1 抵抗率およびヨーク長による変化

既に報告したように⁵⁾、ライトヘッドの高周波磁界は磁極の抵抗率とヨーク長によって大きく変化する。そこで、ヘッド上下磁極の抵抗率 ρ 、あるいはヨーク長 Yl を変化させて NLTS の周波数依存性を求めた。ここでは、膜厚 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ で $B_s=1.5\text{ T}$ の高 B_s 層と膜厚 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ で $B_s=1.0\text{ T}$ の膜が積層された複合膜上部磁極を想定した。後述する図中における記号 up2、up1、および low は、それぞれ、上部磁極低 B_s 層（主磁性層）、上部磁極インナー側の高 B_s 層、および、下部磁極を示す。

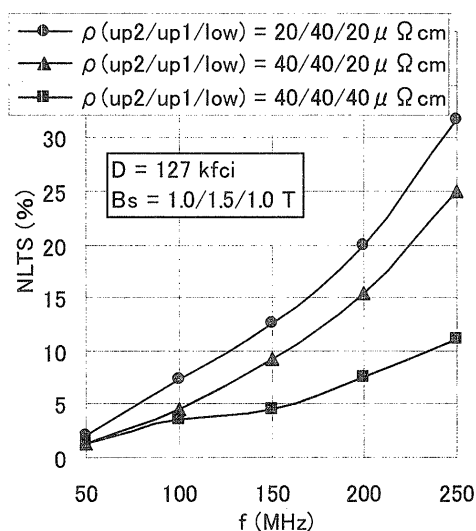


Fig. 2 NLTS vs. frequency characteristics calculated for various combinations of resistivity for upper-1 (high- B_s layer), upper-2 (low- B_s layer), and lower poles.

Fig.2 は上部磁極低 B_s 層、上部磁極高 B_s 層、および、下部磁極の抵抗率 ρ の組み合わせ ρ (up2/up1/low) を、20/40/20 $\mu\Omega\text{cm}$ 、40/40/20 $\mu\Omega\text{cm}$ 、および、40/40/40 $\mu\Omega\text{cm}$ と変化させて NLTS 周波数依存性を求めたものである。抵抗率の増大により高

周波 NLTS が向上し、特に下部磁極の抵抗率も 40 $\mu\Omega\text{cm}$ とした場合には、高 B_s 層以外が 20 $\mu\Omega\text{cm}$ の場合の半分程度にまで NLTS を低減できることがわかる。

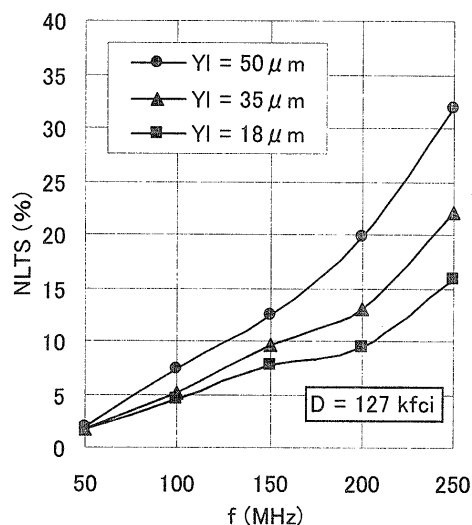


Fig. 3 NLTS vs. frequency characteristics calculated for various yoke lengths.

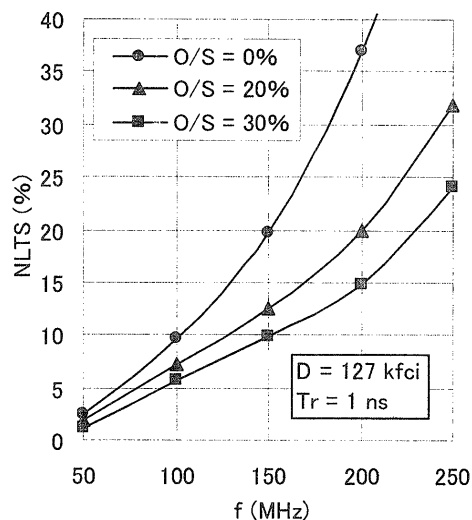


Fig. 4 NLTS vs. frequency characteristics calculated for various overshoots of the write current.

一方、Fig.3 はヨーク長（ギャップデプスからバックギャップまでの長さ）を $Yl=50, 35, 18\text{ }\mu\text{m}$ と短くしていったときの結果である。抵抗率は高 B_s 層以外の全て 20 $\mu\Omega\text{cm}$ と設定した。ヨーク長依存に関する以前の報告と同様に¹⁰⁾、本シミュレーションでも NLTS はヨーク長に強く依存し、これが小さいほど NLTS も改善する。これは、ヨーク長短縮化により渦電流密度そのものが低減するわけではないが、ヘッドの磁束経路全体の渦電流損失がヨーク長に比例するためと考えることができる。

3.2 記録電流による変化

ライトヘッドの高周波磁界はヘッドのパラメータだけでなくコイルを流れる電流によっても大きな影響を受ける。これまでの論文では³⁾、ヘッドのインダクタンス分によりコイルを流れる電流の立ち上がり時間が大きく変化することなどが述べられている。ヘッドインダクタンス低減も高周波化には重要な項目であるが、本論文ではヘッドインダクタンスの影響も含めてコイルに流れる電流が決まったとき、その電流波形が NLTS へどのような影響を及ぼすかを検討した。

Fig. 4 は、ライト電流のオーバーシュート量 O/S を 0%、20%、および、30% と変化させて NLTS の周波数特性を求めたものである。オーバーシュートの増大に伴って NLTS は大きく改善し、O/S=30% の NLTS は O/S=0% の場合の半分以下となっている。このことから、オーバーシュートが収束するまでの時間(リングング時間)が最短ビット時間を越えない限り、オーバーシュートは大きいほど望ましいといえる。リングング時間がビット時間より長くなると、オーバーシュートが収束しないうちに電流の極性が反転するためビット間隔が変化してしまい、NLTS が悪化する。オーバーシュートの増大による NLTS の改善は、実効的な記録電流の増大の効果と考えることができる。すなわち、起磁力の増加(コイル巻数の増加)により高周波磁界強度が増加することに起因する⁵⁾⁶⁾。

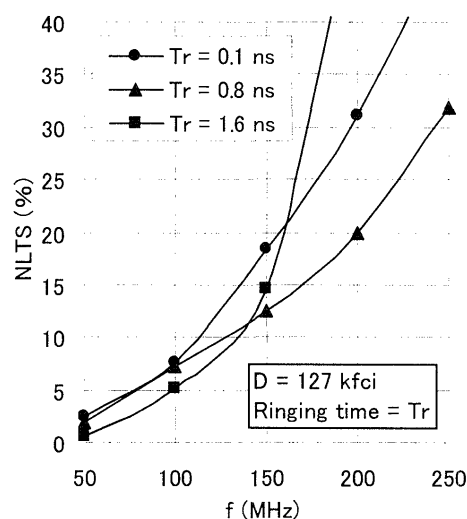


Fig. 5 NLTS vs. frequency characteristics calculated for various rise times of the write current, where the ringing time was set to be equal to the rise time.

一方、Fig. 5 は、ライト電流の 10%–90% 立ち上がり時間 T_r をパラメータとしたときの結果である。ここではオーバーシュートを 20% とし、そのリングング時間を立ち上がり時間と同じになるように設定した。従って、電流立ち上がりが悪いほど 0.4 AT 以上の起磁力となっている時間が長くなり、それだけ多くの磁界エネルギーが供給さ

れることになる。これは実効的な記録電流の増大となるので NLTS を低下させる効果を与える。このことを反映して、立ち上がり時間が短いほど NLTS が小さいという結果にはなっていない。もしも、オーバーシュートが全く無かったとすると T_r が小さいほど NLTS も小さくなると思われるが、立ち上がり時間とリングング時間の和がビット時間を越えない範囲 $T_r + T_{\text{ringing}} \leq 1/2f$ においては、むしろ、立ち上がりの遅いほど NLTS は小さくなる。

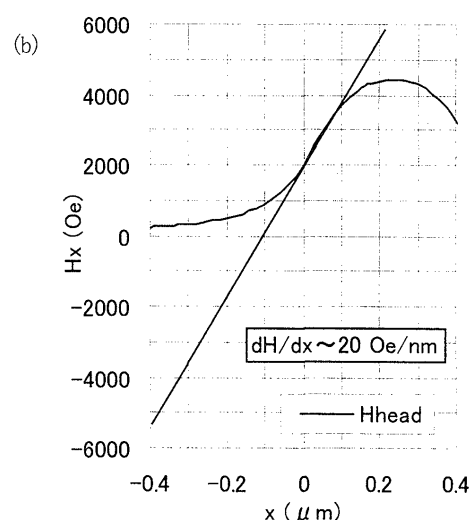
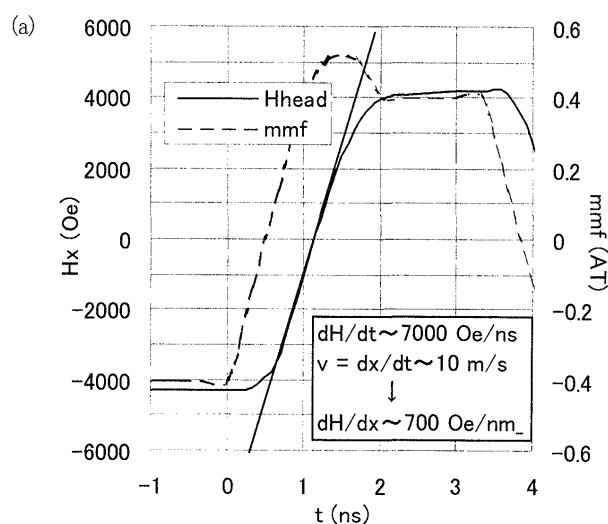


Fig. 6 Time-dimensional gradient (a) and spatial gradient of the head field (b).

4. NLTS 発生メカニズム

4.1 磁界立ち上がり時間と空間磁界勾配

上述のシミュレーションから、ライト磁界の時間的立ち上がり早いほど NLTS が小さくなることが明らかである。ところが、磁界変化の時間勾配を空間勾配の次元に変換した値は、通常の意味のヘッド磁界空間勾配よりも一桁以上大きい。すなわち、Fig. 6 に示すよ

うに、磁界変化の時間勾配は数千 Oe/ns のオーダーであるから、現状 HDD でのヘッド媒体相対速度である約 10 m/s で割ると空間勾配の次元に変換され、その値は数百 Oe/nm である。これに対して、いわゆるヘッド磁界分布の媒体 Hc 付近の勾配は数十 Oe/nm のオーダーである。従って、NLTS においてはヘッド磁界分布の空間勾配が支配的であり、磁界の時間的立上りが多少変化してもなんら影響を与えないことになる。ライト電流の立上り時間が数十 ns 以上であれば空間磁界勾配と同等の影響を与えるが⁴⁾、現状の装置では、高周波 NLTS が等価な空間勾配により発生すると考えたのでは説明ができない。

4.2 ライト時刻シフト

シミュレーションから得られたダイビット入力に対する磁界応答波形を詳しく調べると、Fig. 7 に示すように、第一ビットでの磁界立上り時間よりも、第二ビットの立ち下がり時間の方が少し短いことがわかる。これは、第一ビットでの反転後、媒体における磁界は飽和しているように見えるが、この時点ではヘッド磁性膜内部の渦電流はまだ消失しておらず、磁束は磁性膜表面に集中して流れている。この渦電流は、第二ビットでの磁界反転をアシストするように働くため、立ち下がり第一ビットでの立上りより早くなる。このように、ダイビットの立上りと立ち下がりに差がある場合、最大磁界強度の時間変化(磁界波形)から導かれるビット長 Tf は電流波形でのビット長 Tc よりも短くなり、NLTS が発生すると考えられる。ここでは、磁界強度が媒体の飽和磁界 Hs を越えたときに磁化反転が起こると仮定して図示した。

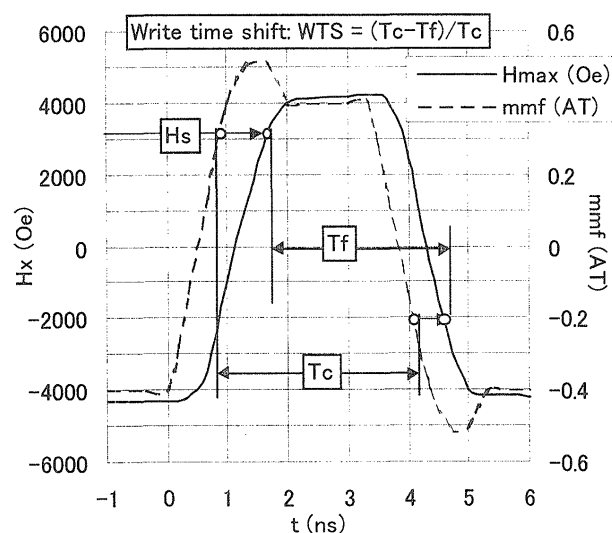


Fig. 7 Definition and mechanism of the write time shift.

5. まとめ

磁界波形と電流波形でのビット長の差を電流波形でのビット長

で割った値をライト時刻シフト $WTS = (T_c - T_f) / T_c$ と定義して、シミュレーション結果から WTS と NLTS の関係をプロットしたのが Fig. 8 である。両者の間には強い相関があることがわかる。

シミュレーションによりライトヘッド特性と NLTS 周波数依存の関係について調査するとともに、ヘッド磁界の時間的立上りの悪化に起因する NLTS のメカニズムについて検討した。その結果、NLTS は抵抗率の増大、ヨーク長の短縮化、および、実効的なライト電流の増大によって改善することがわかった。また、ダイビット記録時にはライト磁界の立上り時間が立ち下がり時間に比べて遅いため、ビット間隔がシュリンクしてしまうことが NLTS 悪化の原因であることを示した。

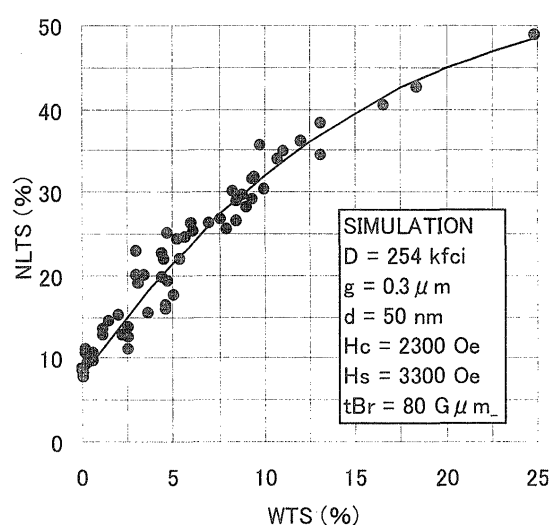


Fig. 8 Correlation between NLTS and write time shift (WTS).

文献

- 1) 例えば、H. N. Bertram: "Theory of Magnetic Recording", Cambridge University Press.
- 2) B. R. Baker: IEEE Trans. Magn., Vol.34, No.4, p.2356 (1998).
- 3) R. Wood, M. Williams, J. Hong: IEEE Trans. Magn., Vol.26, No.6, p.2954 (1990).
- 4) A. F. Torabi, M. L. Mallery, S. Marshall: IEEE Trans. Magn. Vol.30, No.6, p.3879 (1994).
- 5) 田河, 上原: 応磁学誌, Vol.22, No.4-1, p.199 (1998).
- 6) 田河, 上原: 応用磁気 103 研究会資料, 103-14, p.101 (1998).
- 7) Y. Nakamura, I. Tagawa: IEEE Trans. Magn., Vol.25, No.5, p.4159 (1989).
- 8) I. Tagawa, Y. Nakamura: J. Magn. Magn. Mat., Vol.134, p.382 (1994).
- 9) R. I. Potter: IEEE Trans. Magn., MAG-10, p.502 (1974).
- 10) M. Takagishi, K. Komaki, F. Hikami: IEEE Trans. Magn., Vol.33, No.5, p.2821 (1997).