MR ヘッド非線形歪みが PRML チャンネルに及ぼす影響

正会員 山 腰 隆 道[†], 島 野 嘉 治[†], 正会員 矢 田 博 昭[†]The Effect of Non-Linear MR Read-Back Distortion
on a PRML ChannelTakamichi Yamakoshi[†], Yoshiharu Shimano[†] and Hiroaki Yada[†]

Abstract Although the combination of a highly sensitive MR read head and a PRML channel is promising for high areal density recording, non-linear distortion in the MR read-back process is a critical issue for the channel in which linearity is known to be essential. First, we theoretically analyzed the characteristics of SHD (Second Harmonic Distortion) as a gauge of non-linearity. Next, the effect of non-linearity on error rates was studied by computer simulation and examined by experiments. Results show that SHD of less than -25 dB is required for the channel to be free from non-linear distortion.

1. ま え が き

ディジタル磁気記録において、狭トラック化による S/N の低下を救済するためには、高感度の MR ヘッドの使用が有利である。一方、高線密度領域で有効な信号処理方式として PRML (Partial Response Maximum Likelihood) の導入が進められており、線密度の改善が図られている。しかし、両者を組合せて高面密度記録を狙う場合、MR ヘッドに特有の非線形歪み成分がチャンネルのエラーレートを悪化させる場合がある。これは PRML 方式が、線形な記録再生チャンネルを前提としているためである。Fuchigami らは、従来のピーク検出チャンネルにおける MR 非線形歪

みの影響を報告¹⁾しているが、本論文では、PRML チャンネルにおける MR 非線形歪みの影響について、シミュレーションおよび実験により検討を行った。

以下では、まず MR ヘッドの非線形歪みの評価方法を検討し、SHD (Second Harmonic Distortion: 2 次高調波歪み率) による評価について、その性質と測定条件等を明らかにする。次に、非線形歪みがエラーレートに及ぼす影響をシミュレーションを用いて検討した結果について述べる。最後に、得られた結果を実験により検証する。

2. MR ヘッド非線形歪みの測定手法

図 1 に代表的な MR ヘッドの動作曲線の実測例を

キーワード：ディジタル磁気記録, MR ヘッド, PRML, 非線形歪み, SHD

1993 年 8 月 20 日, 画像情報記録研究会で発表

1994 年 3 月 31 日受付, 1994 年 7 月 1 日再受付

[†] ソニー株式会社 総合研究所磁気技術研究部

(〒141 東京都品川区北品川 6-7-35, TEL 03-5448-6751)

[†] Applied Magnetism Research Department, Corporate Research Laboratories, Sony Corporation (6-7-35 Kitashinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141, Japan)

図1 MRヘッ드의動作曲線
A sample of magnetoresistive curve.

示す。直流バイアス磁界 H_B で設定される動作点を中心にして、信号磁界 $H_s(t)$ が再生電圧 $v_{MR}(t)$ に変換される。動作点近傍を図中の破線(1)のように簡単な2次関数

$$\Delta r/r = (k_1 H^2 + k_0) \quad (1)$$

で近例すると、再生電圧への伝達関数は

$$v_{MR}(t) = i_{MR} r (k_1 (H_B + H_s(t))^2 + k_0) \quad (2)$$

与えられる。ここで i_{MR} はMRセンス電流、 k_1 、 k_0 は定数である。

本論文でいう非線形歪みは、MRヘッ드의動作曲線形状に起因し、再生波上では正負波形の非対称として現れる非線形性のことを指している。

MRヘッド非線形歪みの測定は、一定の繰り返し周期 T_0 (角周波数 ω_0) でメディア上に記録された磁化反転を再生して行うものとする。2値飽和記録された孤立磁化反転は、一般に逆正接関数で表現できる階段状の磁化遷移領域を持つ。そこから発生する磁界の主に垂直成分が、空間分解能を向上させる目的で設けられているシールドコアにより整形されて、MR膜へと導かれる。解析を簡単にするために、MR膜に流入する信号磁界の形状 $x(t)$ がローレンツ関数で近似できるものとする

$$x(t) = H_0 \frac{1}{1 + (t/a)^2} \quad (3)$$

これをフーリエ変換して

$$X(\omega) = H_0 a \pi e^{-a|\omega|} \quad (4)$$

を得る。ただし H_0 は信号磁界振幅、 $2a = PW_{50}$ (半値幅) である。信号磁界が孤立波形の線形重ね合わせで表すことができるとすると、フーリエ級数表現による $H_s(t)$ は

$$H_s(t) = H_0 \frac{\omega_0}{\pi} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X((2k+1)\omega_0) e^{j(2k+1)\omega_0 t} \quad (5)$$

図2 2次高調波歪みSHDおよび上下非対称性Rの規格化測定周波数依存性

SHD and asymmetry as a function of the normalized frequency for measurements.

となり、偶数次高調波が含まれないことがわかる。

SHDは再生信号の基本波成分(角周波数 ω_0)と、ヘッ드의非線形応答により生じる2次高調波成分(同 $2\omega_0$)との振幅比で定義される。これは(5)式を(2)式に代入することにより求められる

$$SHD = \frac{a\omega_0 e^{-a\omega_0}}{2} \left(1 + \frac{2e^{-2a\omega_0}}{1 - e^{-4a\omega_0}} \right) \frac{H_0}{H_B} \quad (6)$$

となる。(6)式によると、SHDはバイアス磁界 H_B に反比例して小さくなることになるが、これはMRセンサ動作曲線を2次関数近似したためであり、実際は極端にバイアスをかけると飽和のため歪みが増大する。

MRヘッド非線形歪みの評価法としては、再生波形の上下非対称性(Assymmetry)を測定する手法²⁾も従来から利用されている。再生波形の正の波高値を α 、負の波高値を β とすると、上下非対称性 R のひとつの定義は

$$R = \frac{\alpha - \beta}{\alpha + \beta} \quad (7)$$

与えられる。 α と β は(2)式と(5)式から計算できるので、結局

$$R = \frac{a\omega_0 e^{-a\omega_0}}{2} \left(1 + \frac{2e^{-2a\omega_0}}{1 - e^{-4a\omega_0}} \right) \frac{H_0}{H_B} \quad (8)$$

となる。(6)式および(8)式から明らかなように、SHD、上下非対称性共に、 $a\omega_0 = \pi PW_{50}/T_0$ の関数である。したがって、その測定値は半値幅 PW_{50} と測定する際の磁化反転の周期 T_0 とに依存したものとなる。図2にその様子を示す。これは、図1の破線(2)に示すような、より実際の動作曲線に近いローレンツ型の近似曲線を用いて数値解析的に求めても、ほぼ同様の結果となる。

MR非線形歪みの正当な評価を行うためには、観測

量がヘッド自身の f 特や測定周波数に依存しない測定指標を用いることが必要となる．観測値が測定周波数に大きく依存する上下非対称性に対し，SHD は測定周波数 $(1/T_0)$ が $PW_{50}/T_0 \leq 0.2$ を満たす領域ではほぼ一定の値として観測できるため，より正しい評価結果を得ることができる．以下，本論文では MR 非線形歪みの評価値として SHD を使用する．

3. シミュレーションによる影響評価

3.1 記録再生チャンネル

MR 非線形歪みが PRML チャンネルに及ぼす影響を見積もるために，計算機シミュレーションによるエラーレート解析を行った．使用した記録再生チャンネルのモデルを図 3 に示す．チャンネルはクラス 4 パーシャルレスポンス $[PR(1, 0, -1)]$ を想定している．この図を用いてシミュレーションの手順を簡単に説明する．

まず，周期 511 ビットの M 系列擬似ランダムデータを生成し，記録データ a_k とする．記録データ長は約 10 M サンプルとした．これを $1/(1+D^2)$ でプリコードし，記録電流 b_k を作成する．ここで D は 1 ビット遅延演算子である．孤立磁化反転の再生磁界として，(3) 式で示した振幅 H_0 のローレンツ波形を用い，線形重ね合わせにより信号磁界波形を合成する．この合成波形に白色ガウスノイズを加算してヘッド入力の信号磁界 $H_s(t)$ とする．ノイズ加算点をこの位置に置いたのは，メディアノイズが支配的な状況を想定したためである．

次に，MR 動作曲線によって $H_s(t)$ を非線形写像し，ヘッド出力の再生電圧波形を生成する．このときの写像関数は，図 1 中の破線 (2) に示すような，実際の動作曲線により近いローレンツ型の

$$\Delta r/r = \left(k_0 + \frac{k_2}{H^2 + k_3} \right) \quad (k_0, k_2, k_3 \text{ は定数}) \quad (9)$$

を使用した．

こうして得られた再生波形をイコライザで等化し，ビタビ復号器に入力して最尤復号する．イコライザには 7 tap のトランスバーサルフィルタを使用し，そのタップ係数値は符号間干渉とランダムノイズを合わせた理想等化点からの誤差が最小となるように LMS (Least Mean Square) アルゴリズムにより，それぞれの場合について最適化を行っている．規格化線密度 2.0 のときのタップ係数ベクトル h_{PR4} の一例を示すと， $h_{PR4} = [0.0914, -0.2560, -0.0832, 1.000, -0.1002, -0.2478, 0.1061]$ となる．ビタビ復号器出力の復号データ $\hat{a}_k$ をビット毎に記録データ a_k と照合し，BER(Bit Error Rate)を算出する．

このような記録再生モデルを使用することにより，MR の非線形写像およびイコライザの伝達特性に起因するノイズの相関も考慮され，十分に現実的な条件のもとでの検討が可能になると考えられる．

3.2 エラーレートの SHD 依存性

エラーレートの SHD 依存性を調べるためには，合成する再生波形の SHD を変化させてやる必要がある．MR 動作曲線が与えられているので，SHD はバイアス磁界 H_B と信号磁界振幅 H_0 の関数となる．図

図 4 SHD のバイアス磁界依存性
SHD as a function of the magnetic bias field.

図 3 記録再生チャンネルのシミュレーションモデル
Configuration of the channel simulation model.

図5 S/N を変えたときのBERのSHD依存性
Bit error rate(BER) as a function of the SHD at various signal-to-noise ratios.

4に、SHDのバイアス磁界依存性を示す。SHDは、繰り返し周期 $PW_{50}/T_0=0.125$ の再生信号を合成し、それをFFTして求めたものである。以後のシミュレーションでは、基本的にバイアス磁界 H_B をおよそ5~12 Oeの間で振ってやることによって、合成する再生波形のSHDを変化させている。

磁気記録チャンネルのBERは、一般に線密度と S/N により決定される。ヘッドの非線形歪みによるBER劣化を議論するためには、これらの条件を同一にして比較する必要がある。

まず、信号磁界の振幅を $H_0=5$ Oeに固定とし、信号磁界 $H_s(t)$ を合成する際のノイズ振幅を定めてチャンネルの S/N を決定する。 S/N は

$$S/N = \frac{\text{孤立波形振幅の0-p値}(H_0)}{\text{ノイズrms値}} \quad (10)$$

と定義した。合成を行う際の規格化密度(Normalized Linear Density)は、 b をビット長として $NLD = PW_{50}/b = 2.0$ である。この信号磁界を(9)式で非線形写像する際に、動作点を定めるバイアス磁界 H_0 の値を変化させてやると、異なるSHDを与える動作点におけるBERの値がプロットできる。結果を図5に示す。

予期されたように、SHDが大きくなるとBERも劣化する。特に $SHD > -20$ dBの領域での劣化が著しい。これは信号の S/N によらず、ほぼ同一の傾向を示す。実用的なBER(10^{-6} 以下)が得られる条件のもとにおいて、BER劣化を2倍以内に抑えるためには、SHDを -25 dB以下に抑圧しなければならないことが明らかとなった。

次に、 $S/N=20.0$ dB一定とし、信号磁界振幅をパラメータとして計算した結果を図6に示す。信号磁界振幅を変えることにより、同一SHDを与える動作曲

図6 信号磁界振幅 H_0 を変えたときのBERのSHD依存性
BER as a function of the SHD at various signal field intensity

線上の動作点(バイアス磁界 H_B の値)が変化していることになるが、得られるBERはほぼ単一の曲線上にプロットされる。これは、観測されるSHDが同一であれば、最終的なBERはMR動作曲線の形状によらずにほぼ定まることを示しており、本論文で提案しているSHDによるMR非線形歪みの評価が妥当なものであることが確認できる。

4. 実験による検証

4.1 実験系の概要

シミュレーションで得られた結果を検証するため、実電磁変換系を用いて実験を行った。使用したヘッドメディアの諸元を表1に示す。メディアは、ガラス基板上にCoPt膜をスパッタしたハードディスク媒体を使用した。ヘッドは2ギャップのMR/インダクティブヘッドで、再生側は電流バイアス方式の縦型シールドタイプMRヘッド³⁾を用いている。このヘッドは

表1 電磁変換系の諸元
Specifications of the MR head and the media.

メディア	保磁力 H_c	1800 Oe (143 kA/m)
	磁性層厚 δ	36 nm
	残留磁化密度膜厚積 $M_r \delta$	22.5 mA
	角形比 S	0.79
ヘッド	記録Gap長	0.35 μm
	記録トラック幅	4.0 μm
	再生Gap長	0.25 μm
	再生トラック幅	4.5 μm
	Flying Height	0.065 μm
	線速度	6.03 m/s
	半値幅 PW_{50}	100 ns (0.603 μm)

図 7 S/N と SHD のバイアス電流依存性
Bias current dependency of S/N and SHD.

低浮上量のナノスライダに搭載され、ディスク上を $0.065\ \mu\text{m}$ のスペーシングで浮上走行する。

記録再生系は、サンプルサーボフォーマットに基づく外部クロック型 PRML 方式(XPRML)⁴⁾を採用し、クラス 4 パーシャルレスポンスにビタビ復号を組合せている。チャンネルの等化は、帯域制限を行うアナログのローパスフィルタと、最大 8 タップのディジタル FIR フィルタにより行っている。ビタビ復号したデータを、ビット毎にリアルタイムで記録データと照合し、BER を測定した。

4.2 MR ヘッドのバイアス特性

MR ヘッドのバイアス導体に流す電流値を変えたときのヘッド出力の S/N と SHD の変化を図 7 に示す。

S/N は、孤立波形の振幅 0-p と、5 MHz の連続磁化反転を再生したときのノイズ振幅 rms(観測帯域 10 MHz)との比をとったものである。薄膜金属媒体に 2 値飽和記録を行う場合、磁化遷移ノイズ成分が主となるため、ノイズの測定は最悪値が得られるように高い周波数の矩形波を記録して行っている。SHD は 1.875 MHz の連続磁化反転を再生したときの基本波と 2 次高調波との振幅比をスペクトラムアナライザで測定した。このときの測定周波数は、2 章で明らかにした測定条件 $PW_{50}/T_0 \leq 0.2$ を満たすように設定している。

バイアス電流が変わると、動作点の移動に応じて SHD が変化するが、同時に再生出力も変化するので、得られる S/N も変動する。このヘッドの場合、S/N 最良点と SHD 最良点のバイアス電流値は一致しない。

図 8 BER のバイアス電流依存性
Bias current dependency of BER.

図 9 ビタビデコード入力アイパターン
Eye diagram of XPRML channel.

い。

前節のシミュレーションで示した通り、BER は S/N と SHD に依存していると考えられるが、現実のヘッドでは両者を独立して設定することができないので、SHD による影響分のみを分離して測定することは難しい。今回の実験系では、S/N が同一となる MR 動作点間での比較のみが可能である。

4.3 エラーレート測定

M 系列のランダムデータを録再し、MR ヘッドのバイアス電流を変化させて BER を測定した。結果を図 8 に示す。このときの線記録密度は 2507 b/mm (63.7 kFCI)、規格化線密度は NLD=1.5、データ転送レートは 15.12 Mb/s である。MR ヘッドのセンス電流は、最良 SHD の得られる 10 mA に固定とした。XPRML は外部同期型であるため、プリコーディング以外のチャンネル符号は使用していない。また、規格化線密度が NLD=1.5 と低めであるので、記録時の非線形ビットシフト⁵⁾の補償は行っていない。

バイアス電流 15 mA のときのビタビ復号器入力のディジタルデータ列をもとに再構成したアイパターンを図 9 に示す。このときの SHD は約 -25 dB であるが、やや上がつぶれて下に伸びたアイとなっている。

表 2 同一 S/N 条件での BER 比較
Comparison of BER at the same signal-to-noise ratio.

バイアス電流	10 mA	20 mA
S/N	25.8 dB	25.6 dB
SHD	-16.6 dB	-33.2 dB
BER	1.6×10^{-6}	3.5×10^{-7}

図 8 に示すように、最終的に得られる BER は、 S/N 最良点(バイアス 15 mA)と SHD 最良点(バイアス 20 mA)の中間付近で最良となる。ここでバイアス電流 10 mA と 20 mA の 2 点に注目すると、両者の S/N はほぼ等しいので、2 点の BER の差は主に SHD の違いにより生じると考えられる。表 2 に、この 2 点の BER の値を示す。SHD が -33.2 dB から -16.6 dB へ変化すると、BER は 3.5×10^{-7} から 1.6×10^{-6} へと劣化する。これは図 5 のシミュレーション結果における $BER=10^{-6}$ 付近の劣化量とほぼ一致しており、本報告におけるシミュレーションが妥当なものであることが確認できる。

実験では規格化線密度が $NLD=1.5$ と低いにもかかわらず、同一 S/N 、SHD 条件のもとでの BER は、シミュレーションで得られる値よりも悪い値となる。現実の記録再生系では、再生クロックジッタや等化誤差などの要因により、データ識別点での実効的な S/N が、純粋な電磁変換系における測定値よりもさらに低下するので注意が必要である。

5. む す び

MR ヘッドの非線形歪みが、PRML チャンネルに及ぼす影響について検討した。

MR 非線形歪みの評価方法を検討したところ、非線形歪みは 2 次高調波歪み率 SHD を用いることにより有効に評価でき、その際の測定周波数 ($1/T_0$) は、 $PW_{50}/T_0 \leq 0.2$ を満たすように設定すべきであることを示した。

また、MR 非線形歪みが最終的な BER に及ぼす影響をシミュレーションと実験により検討し、シミュレーション結果が実測と比べて妥当なものであることを確認した。シミュレーションの結果により、BER=

10^{-6} 程度が得られる条件下で MR 非線形歪みによるエラーレート劣化を防ぐためには、SHD を -25 dB 以下に抑圧する必要があることを明らかにした。

MR ヘッドのサンプルを供給していただいた電子デバイス事業本部・開発部の関係各位と、MR ヘッド動作曲線の実測値を提供していただいた総研・磁気技術研究部の寺田氏に感謝いたします。

〔参 考 文 献〕

- 1) S. Fuchigami, K. Matsui, H. Sakata, and R. Sasaki: "Characteristic of Peak Shift in MR Read Head", IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan, **3**, 7, pp. 560-561 (1988)
- 2) T. D. Howell, D. P. McCown, T. A. Diola, Y. Tang, K. R. Hense and R. L. Gee: "Error Rate Performance of Experimental Gigabit per Square inch Recording Components", IEEE Trans. Magn., **MAG-26**, 5, pp. 2298-2302 (Sep. 1990)
- 3) H. Suyama, K. Tsunewaki, M. Fukuyama, N. Saito, T. Yamada and H. Karamon: "Thin Film MR Head for High Density Rigid Disk Drive", IEEE Trans. Magn., **MAG-24**, 6, pp. 2612-2614 (Nov. 1988)
- 4) H. Yada, T. Yamakoshi, N. Yamamoto, M. Erkocevic and N. Hayashi: "External Clocking PRML Magnetic Recording Channel for Discrete Track Media", IEICE Trans. Fundamentals, **E76-A**, 7, pp. 1164-1166 (July 1993)
- 5) Y. Lin and R. Wood: "An Estimation Technique for Accurately Modelling the Magnetic Recording Channel Including Nonlinearities", IEEE Trans. Magn., **MAG-25**, 5, pp. 4084-4086 (Sep. 1989)

やまおし たかみち
山腰 隆道 平成 2 年、信州大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年、ソニー(株)に入社。以来、同社総合研究所においてデジタル磁気記録チャンネルの信号処理に関する研究に従事。正会員。

しまの よしお
島野 嘉治 平成 2 年、慶応義塾大学理工学部電気工学科卒業。平成 4 年、同大学院修士課程修了。同年、ソニー(株)に入社。磁気ディスク装置の信号処理に関する研究に従事。

やだ ひろあき
矢田 博昭 昭和 56 年、京都大学工学部電子工学科卒業。同年、ソニー(株)に入社。同社技術研究所などを経て、63 年、南カリフォルニア大学大学院電気工学修士課程修了。現在、同社総合研究所磁気技術研究部課長。磁気記録系信号処理の研究に従事。正会員。