

Mag-noise Impact on SNR of Magnetoresistive Heads

M. Shiimoto, H. Katada, K. Nakamoto, H. Hoshiya, M. Hatatani, and A. Namba *

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

* Product engineering research Laboratory, Hitachi Ltd., 292 Yoshida-cho, Totsuka-ku, Yokohama, Kanagawa 244-0817, Japan

We analyzed the mag-noise of fabricated CIP-GMR and TMR heads to clarify the properties of mag-noise and what influence it had on the head signal-to-noise ratio (SNR). We clarified that the measured mag-noise of CIP-GMR heads is quantitatively consistent with the calculated mag-noise. We found that when the MR ratio is small, the head-amp SNR increases as the MR ratio increases. The head-amp SNR saturates at a certain value of "mag-noise SNR" as the MR ratio increases. When the read head becomes small, the mag-noise SNR decreases. This is due to a large thermal fluctuation of the magnetization "mag-noise" in heads with a small volume. The mag-noise needs to be reduced to achieve high head-amp SNR. The volume of the free layer must be maintained at the highest possible level to reduce mag-noise.

Key words: mag-noise, magnetoresistive head, magnetic recording, TMR

再生ヘッドにおけるマグノイズの SNR への影響

椎本正人・片田裕之・中本一広・星屋裕之・幡谷昌彦・難波明博*

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)

*日立製作所生産技術研究所, 神奈川県横浜市戸塚区吉田町 292 番地 (〒244-0817)

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、再生ヘッドの S/N の向上が必要である。このために、高い MR 比が得られる TMR(Tunnel Magnetoresistive)ヘッドや CPP-GMR (Current-Perpendicular-to-the-Plane Giant-Magnetoresistive)ヘッドの開発を初めとして、再生素子の高感度化が進められている。一方、高い S/N を実現するためには、ヘッドノイズの低減も不可欠である。ヘッドノイズは、従来からジョンソンノイズとショットノイズ¹⁾が知られている。これらのノイズは抵抗に大きく依存するので、再生素子の低抵抗化がノイズ低減の有効な手段である。

ところが近年、マグノイズ²⁾が注目されている。マグノイズとは、スピンパルスを構成する磁化の熱揺らぎに起因するノイズであり、理論的に再生出力に比例することが報告されている³⁾。さらに、マグノイズは再生素子の微小化とともに顕在化することが指摘されている。なぜなら、磁性層の体積が減少すると、強磁性磁化が熱的に揺らぎ易くなるからである。このため、記録密度の向上に伴い再生素子が微小化すると、マグノイズは増大し、ヘッド S/N の観点から問題となることが懸念される。

再生ヘッドのマグノイズが定量的に理論と一致するかを明らかにし、マグノイズがヘッド S/N に及ぼす影響を定量的に評価することは、マグノイズの本質を明らかにするという点と次世代再生ヘッド設計の両面において非常に重要である。そこで、再生ヘッドのマグノイズが理論と定量的に一致するかどうかを明らかにし、マグノイズが再生ヘッドの S/N へどのような影響を与えるのかを明らかにするために、CIP-GMR(Current-in-the-Plane-GMR)ヘッドと TMR ヘッドのマグノイズと出力を測定し、理論計算と比較した結果について報告する。

2. 実験

本研究には CIP-GMR ヘッドと TMR ヘッドを用いた。CIP-GMR ヘッドの幾何学トラック幅(T_w)は 75 nm、トラック幅と素子高さ(SH)の比(SH/T_w)は 1、素子抵抗は 70 Ω であり、MR 比は 4%である。TMR ヘッドの幾何学トラック幅は 75 nm、 SH/T_w は 2、素子抵抗は 200 Ω であり、MR 比は 25%から 50%に変化させたヘッドを用いた。トラックの両端には、自由層を単磁区化するために、磁区制御膜を設けている。

本研究においては再生出力測定とヘッドノイズ測定を行った。再生出力はヘッドの素子高さ方向に媒体磁場相当の一樣磁場を印加することで測定した。また、MR 比を求めるために最大印加磁場 8 kOe のトランスファーカーブを測定した。ヘッドノイズ測定は最大周波数 10 GHz までの高周波帯域の測定を行った。ヘッドノイズスペクトラムはスペクトラムアナライザーを用いて測定した。CIP-GMR ヘッドにおいては、以下の方法でマグノイズ(N_{mag})成分を求めた。マグノイズは出力に比例するので、電流を流していないときは存在しない。マグノイズは、電流を流しているときのノイズ(MI_s)、電流を流していないときのノイズ(N_0 mA))と通電による素子温度の上昇によるジョンソンノイズの増加分($\Delta N_{Johnson}$)の差分と定義し、

$$N_{mag} = \sqrt{N(I_s)^2 - N(0mA)^2 - \Delta N_{Johnson}^2} \quad (1)$$

として計算した。ここで I_s はセンス電流である。TMR ヘッドの場合は、 $\Delta N_{Johnson}$ を ΔN_{shot} で置き換えて計算した。ここで、 ΔN_{shot} は通電による電圧と素子温度の増加によるショットノイズの増加分である。

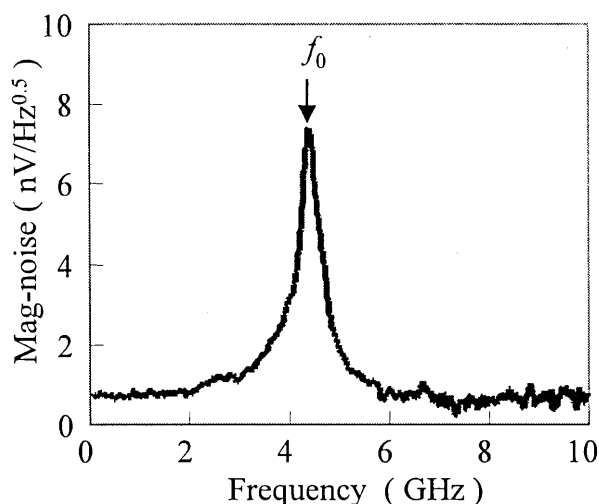


Fig. 1 Mag-noise spectrum of CIP-GMR head. f_0 represents resonance frequency.

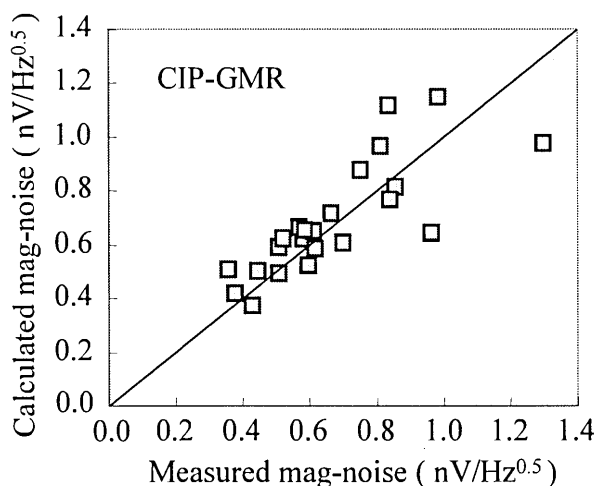


Fig. 2 Calculated vs. measured mag-noise.

3. 実験結果および考察

3.1 マグノイズスペクトラム

前節の方法で求めた CIP-GMR ヘッドのマグノイズスペクトラムを Fig.1 に示す。再生ヘッドの帯域は約 1 GHz 以下であるので、マグノイズの実測値はこの帯域の値を用いた。スペクトラムは大きなピークを示すが、このピークの位置(f_0)から自由層のスティフネス磁界(H_{stiff})を以下の式より、求めることができる⁴⁾。

$$f_0 = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{M_s H_{stiff}} \quad (2)$$

ここで、 M_s は自由層の飽和磁化である。 H_{stiff} とは、自由層の実効的な異方性磁界であり、磁区制御磁界や形状異方性磁界などを含む。

3.2 マグノイズの実測値と理論値の比較

マグノイズの実測値が理論から予測される値と一致するかを検

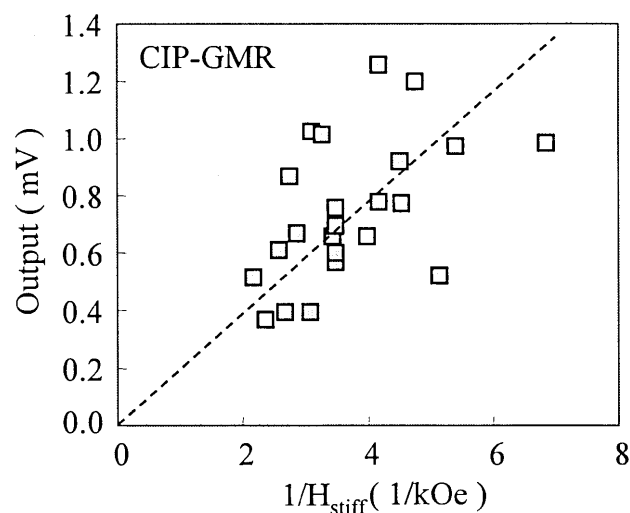


Fig. 3 Dependence of output on $1/H_{stiff}$. Break line shows fitting curve.

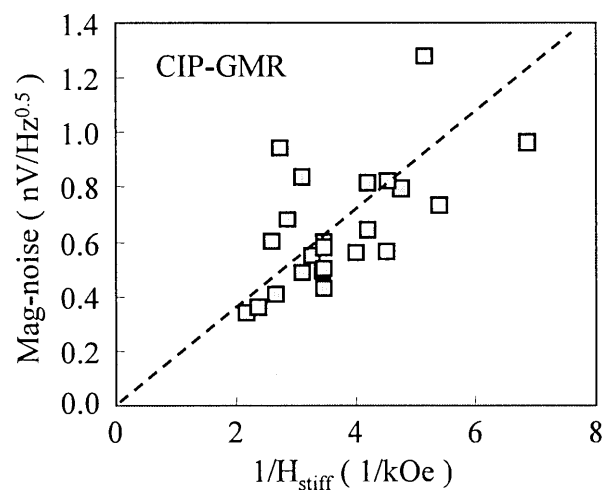


Fig. 4 Dependence of mag-noise on $1/H_{stiff}$. The broken line shows fitting.

討した。約 1 GHz 以下の低周波帯域のマグノイズは理論的に次式から計算できることが報告されている⁴⁾。

$$N_{mag} = \frac{I_s \Delta R \cos \theta}{H_{stiff}} \sqrt{\frac{\alpha k_B T}{\mu_0 M_s V \gamma}} \quad (3)$$

ここで、 ΔR は再生素子の最大抵抗変化量、 $\cos \theta$ は自由層磁化と磁区制御磁界のなす角度、 k_B は Boltzmann 定数、 $\gamma (=2.78 \times 10^5 \text{ m/As})$ はジャイロ磁気定数、 T は素子温度、 α は Gilbert damping 定数、 μ_0 は真空の透磁率であり、 V は自由層の体積である。 ΔR はトランスファーカーブを測定することにより求めた。 H_{stiff} は、測定したマグノイズスペクトラムの f_0 と M_s を用いて式(2)から算出した。上記のパラメータの中では $\cos \theta$ と α だけが未知である。自由層磁化には磁区制御膜を設けることにより十分に強い磁区制御磁界を印加しているので、自由層磁化と磁区制御磁界はほぼ平行と考え、 $\cos \theta$ は 1 と仮定した。また、 α は約 0.015 と報告されている⁵⁾のでこの値を用いた。Fig.2 に磁区制御磁界

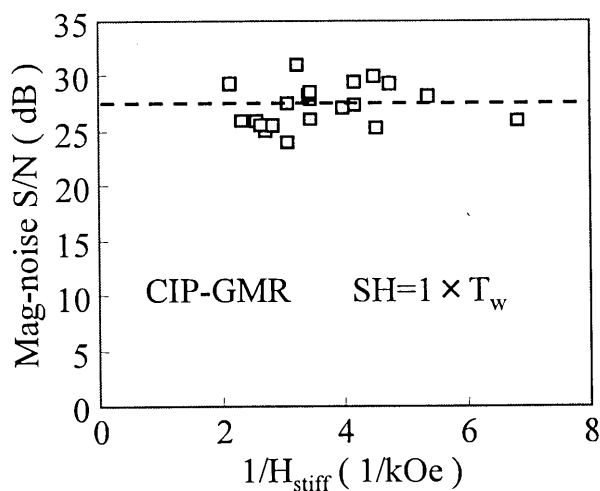


Fig. 5 Mag-noise S/N vs. $1/H_{stiff}$. The broken line shows fitting.

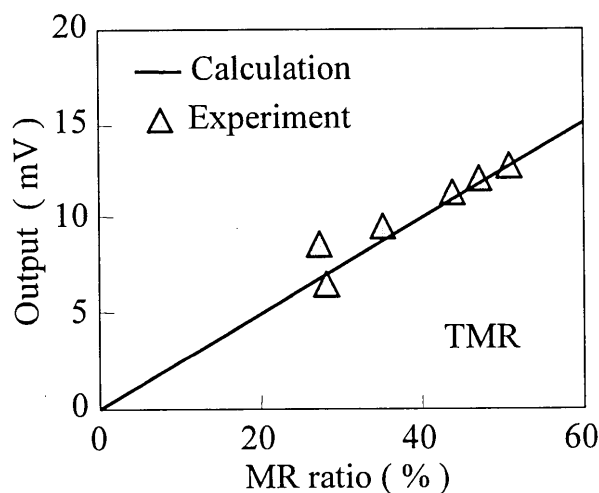


Fig. 6 Output of TMR heads vs. MR ratio. The triangles and solid line indicate experimental and calculated data.

の強さを変化させた複数の CIP-GMR ヘッドのマグノイズの実測値と計算値の関係を示す。Fig.2 からマグノイズの実測値と計算値は定量的に一致することが明らかとなった。

3.3 H_{stiff} と出力、マグノイズと S/N の関係

H_{stiff} と出力、マグノイズと S/N の関係を明らかにするために、磁区制御磁界を変化させた CIP-GMR ヘッドの出力とマグノイズの H_{stiff} 依存性を評価した。Fig.3 に再生出力と $1/H_{stiff}$ の関係を示す。センス電圧は 120 mV である。出力は $1/H_{stiff}$ に概ね比例することがわかる。これは $1/H_{stiff}$ が大きいほど磁区制御磁界は小さく、再生効率が增加するためである。Fig.4 にマグノイズと $1/H_{stiff}$ の関係を示す。マグノイズも出力と同様に $1/H_{stiff}$ に概ね比例する。これはマグノイズが再生出力に比例する性質を持つためである。次に、出力とマグノイズの比からマグノイズ S/N (S/N_{mag}) を、

$$S/N_{mag} = 20 \log(\text{Output} / 2N_{mag}) \quad (3)$$

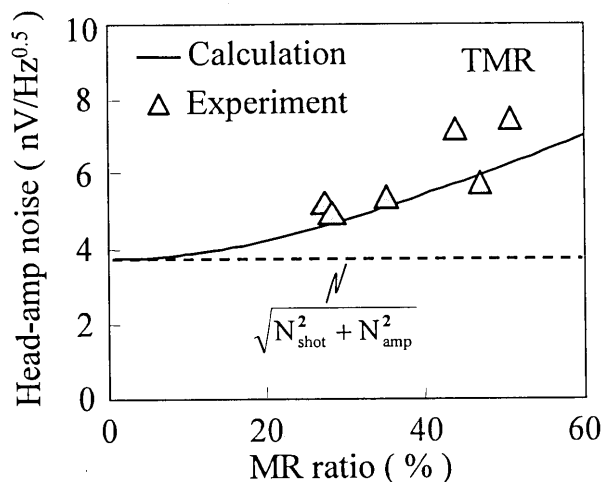


Fig. 7 Head-amp noise of TMR heads vs. MR ratio. The triangles and solid line indicate experimental and calculated data. The broken line indicates the calculation without mag-noise.

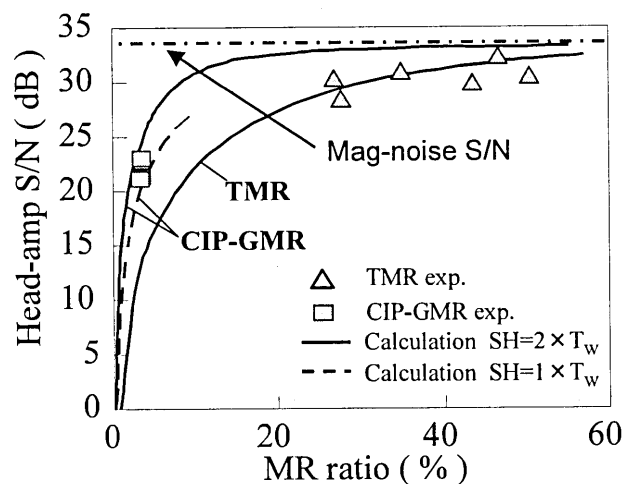


Fig. 8 Head-amp S/N vs. MR ratio. The triangles and squares indicate experimental data for TMR and CIP-GMR heads. The solid lines and broken line show calculated head-amp S/N with $SH/T_w=2$ and $SH/T_w=1$. The dashed line shows mag-noise S/N.

として定義する。このマグノイズ S/N と $1/H_{stiff}$ の関係を Fig.5 に示す。マグノイズ S/N は、 H_{stiff} に依らず一定であることがわかる。これは、出力とマグノイズはともに $1/H_{stiff}$ に比例するためである。

3.4 MR 比とマグノイズ、出力、S/N の関係

再生ヘッドの高出力化により、マグノイズがヘッドアンプ S/N にどのような影響を与えるのかについて明らかにすべく、MR 比が高い TMR ヘッドのヘッドアンプノイズ (N_{ha}) と出力の MR 比依存性を評価した。Fig.6 に実測と計算による再生出力と MR 比の関係を示す。再生出力はセンス電圧 130 mV の結果である。計算値の再生効率 (媒体磁場相当の一樣磁場印加による抵抗変化量/最大抵抗変化量) は 20% である。再生出力は MR 比に比例する。Fig.7 に実測と計算によるヘッドアンプノイズと MR 比の関係を示す。センス電圧は 130 mV である。ヘッドアンプノイズの計算

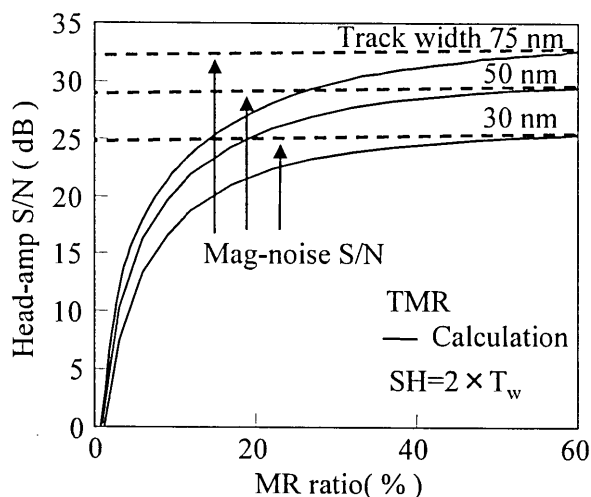


Fig. 9 Calculated head-amp S/N vs. MR ratio. Track widths are 75, 50, and 30 nm.

には以下の式を用いた.

$$N_{ha} = \sqrt{N_{mag}^2 + N_{shot}^2 + N_{amp}^2} \quad (4)$$

ここで N_{shot} はショットノイズであり, N_{amp} はアンプノイズである. N_{shot} の計算値 ¹⁾ は以下の式から計算した.

$$N_{shot} = \sqrt{2eVR \coth\left(\frac{eV}{2k_B T}\right)} \quad (5)$$

e は素電荷である. アンプノイズの計算値は $3 \text{ nV/Hz}^{0.5}$ とした. Fig.7 のように, ヘッドアンプノイズはあるオフセット(N_{shot} と N_{amp} の 2 乗和平方根)を持ち, MR 比とともに増加することがわかる. MR 比が増加すると, 式(4)の N_{shot} と N_{amp} は一定で, マグノイズだけが増加するためである. この振る舞いは実測と計算でよく一致している.

Fig.8 に実測及び計算における CIP-GMR ヘッドと TMR ヘッドのヘッドアンプ S/N の MR 比依存性を示す. CIP-GMR ヘッドの計算は SH/T_w が 1 と 2 の結果を示す. ノイズの積算帯域は 650 MHz とした. 計算と実測値はよく一致している. ヘッドアンプ S/N は MR 比の増加によりある値までは増加するが, それ以上は飽和する. これは, MR 比の増加に伴いマグノイズのヘッドアンプノイズに占める割合が増加し, MR 比が十分に大きくなると, ヘッドアンプ S/N は再生出力とマグノイズだけで決定されるためである. このときのヘッドアンプ S/N は, 式(3)から前述のマグノイズ S/N に等しいことがわかる. 素子サイズ (SH/T_w) が同じ TMR ヘッドと CIP-GMR ヘッドのマグノイズ S/N を較べるとほぼ同一値である. このマグノイズ S/N は, MR 比をパラメータとしたときのヘッドアンプ S/N の最大値であり, 非常に重要なパラメータであるといえる.

3.5 マグノイズ S/N とトラック幅の関係

今後再生素子が微小化すると, マグノイズ S/N がどのような影響を受けるかを検討する. Fig.9 にトラック幅が 75 nm , 50 nm , 30 nm のヘッドアンプノイズの MR 比依存性を示す. SH/T_w と素子の面積・抵抗積は一定とした. マグノイズ S/N はトラック幅が狭くなると急激に低下することがわかる. ここで, マグノイズ S/N は再生出力が $I_s \Delta R / H_{stiff}$ に比例することと式(3)から,

$$S/N_{mag} \propto \sqrt{(M_s V)/(T \alpha)} \quad (6)$$

として表すことができる. この式から, マグノイズ S/N は自由層体積の平方根に比例することがわかる. このため, 今後の高記録密度化とともに高いヘッドアンプ S/N を維持するためには, 自由層の体積を確保することが有効である. この方法としては, サイドシールド ⁶⁾ やディスクリートトラック ⁷⁾ などの, 幾何トラック幅を狭くすることなく磁気的なトラック幅を狭くできる技術が有効であると考えられる.

4 まとめ

マグノイズが再生ヘッドの S/N へ与える影響を明らかにするために, CIP-GMR ヘッドと TMR ヘッドのマグノイズと出力を評価した結果, ①マグノイズの実測値と理論値は定量的に一致すること, ②MR 比が増加するとヘッドアンプ S/N は増加するが, ある一定値 (マグノイズ S/N) 以上は増加しないこと, ③今後, 再生ヘッドの微小化に伴いマグノイズ S/N は低下すること, の結論を得た. これらの結論より, 今後高いヘッドアンプ S/N を維持するためには, マグノイズを低減する必要があることが明らかとなった. このためには自由層体積の確保が有効である.

謝辞 日立製作所中央研究所の田中秀明氏, 渡邊克郎氏, 星野勝美氏, 目黒賢一氏, 日立グローバルストレージテクノロジーズの N. Smith 氏, 岡田行正氏, 田辺英男氏, 片岡宏治氏, 堀あずさ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. 上記の方々を初めとするご協力頂いた全ての方に深く感謝致します.

References

- 1) E. R. Nowak, M. B. Weissman and S. S. Parkin: *Appl. Phys. Lett.*, **74** 600. (1999).
- 2) N. Smith and P. Arnett: *Appl. Phys. Lett.*, **78** 1448 (2001).
- 3) N. Smith: *J. Appl. Phys.*, **90** 5768 (2001).
- 4) K. B. Klaassen, X. Xing and J. C. L. Peppen: *IEEE Trans. Magn.*, **41**. 2307 (2005).
- 5) J. C. Jury, K. B. Klaassen, J. C. L. van Peppen and S. X. Wang: *IEEE Trans. Magn.*, **38**. 3545 (2002).
- 6) M. Hatatani, Y. Suzuki, H. Katada, N. Yoshida, T. Okada, K. Watanabe, and K. Nakamoto: *IEEE Trans. Magn.*, **41**. 4347 (2005).
- 7) A. Kaizu, Y. Soeno, M. Takai, K. Tagami and I. Sato: *IEEE Trans. Magn. conf.*, FB-06. (2006).

2006年10月17日受理, 2007年1月23日採録