記録媒体との相互作用を考慮した MR ヘッドの マイクロマグネティックシミュレーション

Micromagnetic Simulation of MR Head Considering Interaction with Recording Medium

櫻井雅樹・吉田和悦

工学院大学，東京都新宿区西新宿 1 - 24 - 2 (〒163-8677)

M. Sakurai, K. Yoshida

Kogakuin University., 1-24-2 Nishishinjuku, shinjuku-ku, Tokyo 163-8677, Japan

MR head and double-layered medium used for perpendicular magnetic recording interact strongly each other. In order to investigate the influences of the interaction on MR head read characteristics, we perform micromagnetic simulations considering the interaction between head and medium. The output of shielded MR head are larger than those of non-shielded MR head due to reducing the demagnetization field in the free layer. However, the interaction between shield and soft under layer causes decrease in the signal output and the widening of reproduced wave form, which might result in degradation of resolution.

Key words: perpendicular magnetic recording, soft under layer, magneto-static interaction, MR head

1. はじめに

現在のハードディスクには、長手記録方式が用いられているが、その方式では記録密度の増加に伴う記録媒体微粒子化を原因とする熱揺らぎの為、面記録密度は $100 \sim 200 \text{ Gb/in}^2$ が限界とされている。垂直磁気記録方式はその壁を超える技術として多くの研究および開発がなされている。

垂直磁気記録方式の記録媒体は記録層と軟磁性下地層から構成される二層媒体が用いられている。再生ヘッドにはMR(Magneto Resistive)ヘッドが用いられている。再生過程において、ヘッドと軟磁性下地層は強く相互作用するため、軟磁性下地層もヘッドの一部として機能する。そのためMRヘッドの再生特性を計算するには、ヘッド・媒体間の相互作用を考慮する必要がある。解析的には軟磁性下地層の透磁率を無限大とし、ヘッド・媒体間の相互作用を鏡像効果として取り入れ、相反定理により再生波形を求める方法が広く用いられている。しかし、現実の透磁率は有限であること、相互作用を鏡像効果のみで取り扱う妥当性などまだ検討すべき課題が残っている¹⁾。一方、数値計算を用いた手法では、有限要素法を用いて相互作用を取り込んだ計算もなされているが、2次元モデルであることやシールドや軟磁性下地層に生ずる磁区構造が考慮できないなどまだ十分とは言えない²⁾。

そこで本研究では、MRヘッドの再生過程におけるヘッドと媒体の相互作用を厳密に取り入れ、かつ磁化挙動をマイクロマグネティックモデルを用いて解くことを試みた。その結果、ヘッドと軟磁性下地層の相互作用が再生出力特性に大きな影響を与えることが明らかとなったので、以下に報告する。

2. 計算方法

2.1 MRヘッド・媒体モデル

ヘッド及び記録媒体(以下媒体)のモデルをFig.1に示す。自由層を見やすくするために、右側のシールドは破断面にしている。媒体上にヘッドを置き、 20 m/s の速さで右側に移動する。このときヘッド浮上高さを 10 nm とした。媒体は膜厚 100 nm の軟磁性下地層(SUL: Soft Under Layer)の上に厚さ 20 nm の記録層(RL: Recording Layer)を配置した。RLの磁化は、左半分は垂直上向き、右半分は垂直下向きとした。磁化遷移幅は零としてステップ状の孤立反転磁化とし、かつ永久磁石として取り扱うことにした。このように記録状態を単純化したのは結果の解析を容易にするためである。RLとSULの交換定数Aはそれぞれ $0.0, 1.0 \times 10^{-11} \text{ J/m}$ とした。RLとSUL間の交換定数は0である。SULの磁化容易軸は半径方向に向けた。

ヘッドは簡単のため自由層1枚とし、ピンニング層と中間層は省略した。自由層の膜厚は 5 nm 、高さ 160 nm 、トラック幅 200 nm とした。シールドは厚さ 200 nm 、高さ 300 nm 、幅 600 nm 、シールドギャップ長は 120 nm とした。縦バイアス磁界として、厚さ 20 nm 、高さ 160 nm 、飽和磁化 $M_s 0.5 \text{ T}$ の永久磁石を自由層の両端に設けた。記録に用いたヘッドと媒体の磁気特性をTable.1に示した。

ヘッド、媒体を1辺 20 nm の立方体セルに分割し、各セルの磁化挙動についてLandau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程式を用いて計算した。LLG方程式の解法にはHeun法を用い、タイムステップは $2.0 \times 10^{-12} \text{ s}$ とした。

Fig. 1 Calculation model of MR head and medium.

Table.1 Calculation condition

parameter	Head		Medium	
	Free Layer	Shield	RL* ¹	SUL* ²
Ms* ³ (T)	1.0	1.0	0.4	1.5
A* ⁴ (J/m)	1.0×10^{-11}	1.0×10^{-11}	0.0	1.0×10^{-11}
K* ⁵ (J/m ³)	3.0×10^3	3.0×10^3	2.0×10^5	3.0×10^3
Thickness (nm)	5		20	100

*¹ RL ; Recording Layer. *² SUL ; Soft Under Layer.

*³ Ms ; Saturation magnetization. *⁴ A ; Exchange constant.

*⁵ K ; Anisotropy constant.

Fig.2 Magnetostatic interaction calculation model between head and medium.

2.2 ヘッド-媒体間静磁的相互作用計算

ヘッドと媒体間の静磁的相互作用は、Fig.2 に示すように両者の間にいた仮想的な平面である仲介層を通して計算される。ヘッドから媒体への静磁界を計算するために、式(1)を用いて計算される磁荷を仲介層上に分布させた。媒体上の磁界はその磁荷から生じる磁界として得られる。同様に媒体からヘッドへの静磁界は仲介層における媒体からの磁界を磁荷に変換し、その磁荷がヘッド領域に作る磁界として計算した。この方法を用いるとヘッド・媒体間の静磁的相互作用の計算回数を減らすことが出来る。

$$(x,y) = 2\mu_0 H_{\text{Head}(\text{medium})}(x,y) \quad (1)$$

ここで、本論文における静磁的相互作用の計算について以下の定義をする。ヘッド・媒体間の相互作用を考慮するとした場合は、ヘッドから媒体に作られる静磁界(Fig.2 中 Head field, Head field from imaginary plane)及び、媒体からヘッドへ作られる静磁界(Medium field, Medium field from imaginary plane)の計算を両方とも実行する。ヘッド・媒体間の相互作用を考慮しないとした場合は、ヘッドから媒体へ作られる静磁界の計算は行わずに、媒体からヘッドに作られる静磁界の計算のみを行うものとする。

上記したように相互作用を考慮することにより、SUL には RL からの磁界だけでなく、ヘッドからの磁界も印加されるため磁化状態に変化が現れ、MRヘッドの再生特性に影響することが予想される。

Fig.3 Output signals with or without the interaction between free layer and medium. The shields of MR head are eliminated.

2.3 再生出力計算

MR の抵抗変化の大きさは、磁化の向きとトラック幅方向(y 軸)とのなす角度をとすると、 $\sin$ に比例する。再生出力計算では、LLG 計算から θ を求め、各セルの抵抗を求めた。その抵抗を自由層 y 方向に電流を流していることを想定し、自由層全体で合成抵抗を求め、それを出力とした。

3. 計算結果

3.1 シールド無しMRヘッドのヘッド・媒体間の相互作用

まずヘッドの自由層と SUL の相互作用が再生出力に与える影響を調べるため、シールドをはずし自由層だけの状態で計算をおこなった。この状態で、自由層と媒体の相互作用を考慮した場合と、考慮しなかった場合について計算を行った。

計算結果を Fig.3 に示す。相互作用を考慮したことにより、再生出力の増加が見られる。しかし、その割合は約 3%と極わずかで、自由層と SUL の相互作用は無視できるほど小さいことが分かった。なお右下に現れる幅広いピークは SUL に作られる磁化分布から生じるものである。これは再生信号の劣化をもたらす原因となることが予想されるが、本論文ではその詳細については触れない。

3.2 シールド付きMRヘッドのヘッド-媒体間相互作用

次にシールドを付け、シールドも含めた状態でヘッド・媒体間の相互作用について計算を行った。Fig. 4 にその結果を示す。

シールドが無い場合に比較し出力は増加し、再生波形も鋭くなる。再生出力がピークに達した時、シールドから自由層に印加される磁界を計算したところ、ABS 付近で約 1.4 kA/m の磁界が反磁界を弱める方向に印加されていた。これは鏡像効果によりシールドにできる自由層からの磁界と考えられる。しかし相互作用の有無による再生波形比較すると、図に示したように再生出力のピークは相互作用を考慮したことにより若干低下し、かつ再生波形の幅が広がっていることが分かる。再生波形の広がりは再生分解能の低下をもたらす原因となる。前節の結果からヘッド

Fig.4 Output signals with or without the interaction between free layer and medium. The shields are set on the both sides of free layer.

(a) With the interaction between head and medium.

(b) Without the interaction between head and medium.

Fig.5 Magnetization configurations of the shield and the SUL in y-z plane.

の自由層とSULの相互作用が極わずかだったことから、これらの結果を招いたのは、シールドとSULの相互作用が原因であると思われる。そこで、シールドとSULの磁化分状態布調べてみた。

3.3 シールド及びSULの磁化分布

磁化遷移から十分離れた位置におけるヘッドとSULを一体とした断面図y-z面(cross-track方向断面)の磁化分布をFig.5に示す。(a)はヘッド・媒体間の相互作用を考慮した場合、(b)は相互作用を考慮しない場合を表す。

ヘッドとSULの相互作用を考慮し無い場合(b)、シールドの磁化はシールド内で閉磁区構造を形成し、180°磁壁

(a) MR head is located at the left side of the transition

(b) MR head is located on the transition.

Fig.6 Mz component of distributions of the top surface of SUL.

と90°磁壁が現れる。これに対して、相互作用を考慮すると(a)、シールドとSULが一体となって閉磁区構造を形成し、シールド内の180°磁壁が消える。また、SUL内の膜厚方向の成分(z成分)も大きくなる。相互作用を考慮しない場合は、SULの磁化のz成分は小さい。

Fig. 6にRLと最隣接するSUL最上層のx-y面の磁化z成分の分布を示す。白枠で囲んだ領域がシールド位置に相当する。図中央はRLの磁化遷移中心である。シールド部で黒く表示されている部分は、Fig.5(a)の左側のSUL磁化z成分が上を向いている部分、白く表示されている部分は、Fig.5(a)の右側のSUL磁化z成分が下を向いている部分に対応している。ただし、図では白黒のコントラストを強調しており、明暗の指標は凡例に示したとおりである。数値は飽和磁化で規格化された磁化の大きさを表す。この図から、シールドの下に位置するSULの磁化のz成分が大きく変化していることが分かる。このz成分の変化はヘッド移動に追尾するように動いており、シールドとSULの相互作用が大きいことを示している。しかし、その変化は可逆的であり、ヘッドが離れていくと元の状態に戻ることが確認できた。(a)はヘッドが磁化遷移領域から離れた場所にある場合を示す。

このとき、シールドの下に位置するSUL磁化の上を向いている部分と下を向いている部分の割合は、ほぼ等しい。しかし、ヘッドが磁化遷移領域上にあるとき、磁化遷移領域の左側では、SUL磁化z成分が上を向いている部分が多く、右側ではSUL磁化z成分が下を向いている部分が多い。

このように、ヘッドの移動にともないSULの磁化分布状態は変化しており、3.2節で述べた再生波形がヘッドとSULの相互作用の有無で変化することと関係していると

考えられるので、次節において SUL が出力波形に及ぼす影響について検討することにする。

また、Fig.6 において相互作用の有無に関わらずシールドがない部分にも明暗のコントラストが見られる。これは SUL に磁区構造、磁壁が存在していたためである。これは Fig.3 に示したように、波形に非対称性をもたらす原因となるが、本論文ではその詳細については割愛した。

3.4 SUL からの出力成分

再生出力波形は、RL からの出力成分と SUL からの出力成分により形成される。ヘッドと SUL の相互作用を考慮した場合の全再生出力(Total)を RL からの寄与と SUL からの寄与に分離した結果を Fig.7(a)に示す。

RL からの出力波形に対して、SUL からの波形は幅が広がった状態になっており、全再生波形の幅を広げる原因となっていることが分かる。さらに RL からの出力ピーク位置と SUL からの出力のピーク位置がずれ、再生出力の低下の原因となっている。

次に相互作用を考慮しなかった場合についても、同様に全再生出力を RL と SUL からの成分に分解した。結果を Fig. 7(b) に示した。図中比較のために、相互作用を考慮した場合の SUL からの信号成分も示した。相互作用が存在しないと、SUL からの出力成分のピーク位置は RL からの出力成分とほぼ一致しており、全再生波形の幅の広がりはない。この場合の SUL からの出力は、純粋に RL に存在する磁化パターンからの転写成分によるものであり、前節で示したようなヘッドのシールドとの相互作用によって SUL に出来る磁化分布からの成分は含まない。このことから、シールドとの相互作用によって SUL に作られる磁化分布は再生波形を広げ、再生分解能を劣化させるとともに、再生出力をわずかではあるが、低下させる原因になることがわかった。

4. まとめ

MR ヘッドと軟磁性下地層の相互作用が再生特性に与える影響を調べるため、MR ヘッドと二層媒体の相互作用を考慮したマイクロマグネティックモデルを行い、以下の結果を得た。

- (1) MR ヘッド自由層と軟磁性下地層との相互作用は無視できるほど小さい。
- (2) MR ヘッドのシールドは再生出力の向上をもたらす。これは、自由層の反磁界がシールドにより低減するためである。
- (3) しかし、MR ヘッド自由層のシールドと軟磁性下地層の相互作用は、再生波形の幅を広げ、再生分解能を劣化させる原因となると考えられる。

(a) With the interaction between MR head and SUL.

(b) Without the interaction between MR head and SUL.

Fig.7 The output signal waveforms from RL and SUL.

5. 謝辞

本研究を遂行するにあたって、情報ストレージ研究機構 (SRC) の研究助成を頂きました。ここに深謝いたします。

References

- 1) Y. Suzuki, Y. Nishida: *IEEE Trans. Magn.*, 37, 1337 (2001).
- 2) H. Aizawa, S. Takanosu, K. Shinagawa, J. Hokkyo: *J. Magn. Soc. Jpa.*, 27, 257 (2003).

2004 年 10 月 4 日受理, 2005 年 1 月 14 日採録