

超精密位置制御のための高速サーボ信号記録技術

茨城大学大学院理工学研究科(工学野)

小峰 啓史

1. はじめに

近年、第4次産業革命の到来により、我が国が得意として来た情報通信機器にも新たな変革が迫られている。第5世代移動通信システム利用開始やCOVID-19パンデミックによるデジタルコンテンツ利用拡大により、データ生成量は加速の一途を辿り、2020年に世界で生成されたデジタルデータは59 Zetta Byteにもものぼる。データの利活用は様々な情報通信技術に支えられ、データ蓄積技術も重要な構成要素の一つである。近年では、人工知能(AI)の利活用が加速しており、データセンターの設置拡大とともに、情報記憶装置の主力であるHDDの著しい需要増が見込まれている。今後のデータ生成量増加に見合う台数のHDD供給を担保し続けることは、高度情報化社会を支える上で必要不可欠である。しかし、HDD供給量増加(年率17%)とデータ生成量の増加(26%)は乖離の一途を辿っている。この状況が続けば、持続可能な情報通信産業の発展に大きなブレーキを掛けることに成りかねない。

HDDは磁気ヘッド、プラッタ、アクチュエータ、制御回路などで構成されるが、それぞれの製造工程は秒単位で行われる微細化技術、成膜技術に支えられ、一定の生産速度を維持している。一方、これら部材をアセンブリした後のHDDにおいて生産性を律速する最も深刻なボトルネックは、磁気ヘッドの位置情報であるサーボ信号の書き込みプロセスである(図1上)。現状のサーボ信号は、十分に制御されたクリーンルーム環境下で、現場で1台あたり2-3日もの膨大な時間をかけて記録される(サーボトラックライタ, STW)。現状のHDD出荷数減少は、ニーズの減少ではなく、生産性を高めるプロセスの難しさに起因している。

我々は、HDD製造技術の問題が顕在化する以前から、STWに代わる記録時間を大幅に短縮する技術として、パターンドマスター磁気転写技術を開発している。磁気転写法(図1左下)では、初めにプラッタをディスク面垂直方向に一様に磁化する(初期磁化過程)。次にあらかじめサーボ信号に対応する磁性体パターンを有するマスター媒体(原盤)をプラッタに密着さ

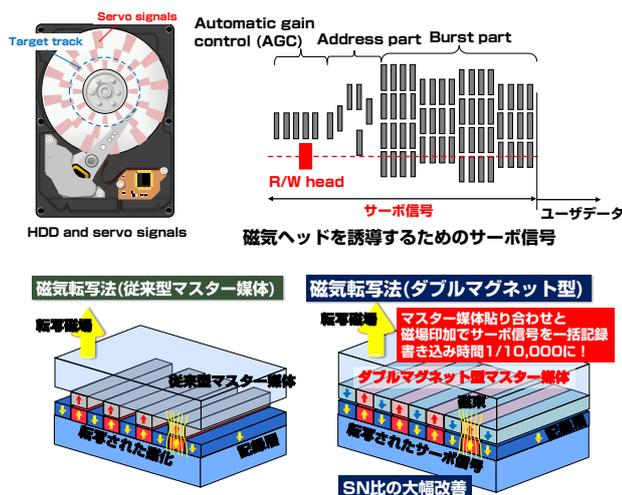


図1. (上図)HDDと磁気ヘッドを誘導するためのサーボ信号。(下図左)従来型磁気転写法。(下図右)新しく発明したダブルマグネット(DMM)型磁気転写

表 1 ダブルマグネット(DMM)型磁気転写による磁気信号(サーボ信号)記録の比較

| 比較項目 | 従来技術 STW (磁気ヘッド記録) | 磁気転写法 | |
|-----------------|---|-----------------------------------|-----------|
| | | 従来方式 | 本提案 (高SN) |
| サーボ信号 書き込み時間 | 72時間@2Tbit/inch ² 記録密度増加で時間増加 | 6秒 記録密度に依存しない | |
| サーボ 信号 品質 | Tbit/inch ² | | |
| | 0.3 | ◎ | ◎ |
| | 1.0 | ○ | ◎ |
| | > 2 | × | ◎ |
| 機器導入による コスト | 記録密度が増加するた びに一定の設備投資が必要 | 初期投資は必要だが、記録密度仕様変更 はマスター媒体作製のみ | |

せて、適切な磁場（転写磁場）を印加することで、プラッタのサーボ信号を一括して記録する（転写過程）。特筆すべきは記録にかかる時間であり、上記の一連のプロセスをわずか数秒で行うことができ、STWと比較すると、その優位性は極めて明確である（表1）。従来方式の磁気転写法^{1,2,3)}は実用化の一手手前まで漕ぎ着けたものの、ベンチマークの結果、1Tbit/inch²を有する当時の次世代製品に対して製品が要求する信号品質(SN比)が3dBだけ及ばないという課題をクリアすることが出来なかった。

提案者は、最近、サーボ信号品質を劇的に改善する重要な新技術であるダブルマグネット型マスター媒体（以降、DMMと略す）を提案した^{4,5,6)}。提案するDMMでは、従来マスター媒体で不足していた記録磁場強度を2種類の磁性体パターンにより増強する（図1右下）。マスター媒体を構成する磁性体に高保磁力および低保磁力材料を用いることで、記録磁場を従来の2倍に増強出来、SN比改善を実現出来る。周期的なパターンに対するシミュレーションでは、HDDでは未到達の4Tb/inch²（ビット長10nm、トラック幅25nm）のサーボ信号記録までもが可能であり、エネルギーアシスト磁気記録(EAMR)で用いられる次世代高保磁力媒体にも十分な記録特性を有する^{4,5,6)}。しかし、実際のサーボ信号は、オートマティックゲインコントロール部、バースト部、アドレス部と様々なパターン形状を有しており、そのためのDMM設計方法は明らかではない。本研究はDMMパターン形成の設計方針を確立するため、開口部の大きなバースト部のパターン設計指針を調査した。

2. 解析方法

DMMの磁化状態及び記録層の磁化状態をマイクロマグネティックシミュレーションにより解析した。振幅バーストを想定したDMMの解析モデルを図2に示す。バースト部には、オントラックの振幅を調整するため、ダウントラック方向にパターンが周期的に配列している部分とパターンが配置されていない部分があり、さらに、オートマティックゲインコントロールと呼ばれる出力調整パターンが形成されているものとした。DMMでは、転写磁場により反転可能な軟磁性パターンと磁場により反転しない硬磁性パターンがあり得るため、どの部分にいずれの磁性パターンを配置するかを検討する必要がある。図2(a)と図3(b)のパターンを想定した。いずれのパターンも交換結合を分断するため、磁気分離層が形成されている。また、記録特性を比較するため、単一の磁性体を用いる従来マスター媒体を図2(c)のように想定した。

図 2(d)に示したように, 記録層の磁化状態を計算するため, DMM 及び従来マスター媒体の発生する記録磁場をマイクロマグネティックシミュレーションにより求めた. 記録層は, 硬磁性体と軟磁性体を積層した六角柱コラムナーを仮定した. 記録層と DMM の間の磁気的スペーシングは, 次世代記録層の保護膜, 潤滑層を考慮して 2nm とした. また, 記録層の保磁力を変えるため, 軟磁性層と硬磁性層の厚みを変化させて, 記録特性の違いを調べた. 記録層のヒステリシスループを図 3 に示す. 硬磁性層の厚みを厚くするとともに, 記録層の保磁力が増大し, 軟磁性層と硬磁性層の厚みをそれぞれ 5nm, 7nm としたとき, 保磁力 30kOe となり, 次世代記録媒体と同等の大きさになる. 磁気転写では, 図 2(d)に示すような転写磁場 H_p を加えることで, DMM の漏れ磁場と転写磁場の重畳が記録磁場となる. このとき, 転写磁場強度は保磁力と同等かそれ以下が適切であることがわかっており, 解析でも保磁力周辺の磁場強度を有する転写磁場を印加し, 記録層に転写された磁化状態を解析した.

3. 結果と考察

従来マスター媒体, n-DMM, p-DMM を用いた場合の記録磁場分布を図 4 にそれぞれ示す. 図 4(a),(c)を比べると, p-DMM では明らかに磁場強度の差が大きくなっており, 明瞭な転写特性が期待される. 一方, n-DMM の記録磁場を見ると, バーストマークのスペース部分に意図しない磁場分布の変動が見られる. これは, スペース部の大部分が軟磁性体で構成されており, 磁場強度が十分でない場合, 一様な磁化とならず, 磁区が形成されるためである. 磁区

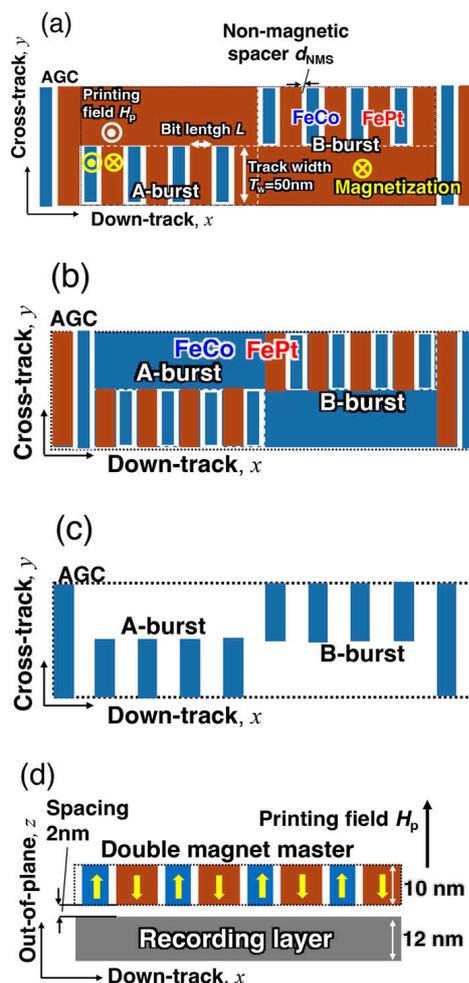


図 2. A/B バーストパターン用のダブルマグネットマスター(DMM)媒体の概略図. (a) ポジティブ DMM (p-DMM), (b) ネガティブ DMM (n-DMM), (c) 従来マスター媒体, (d) 計算モデルの断面図

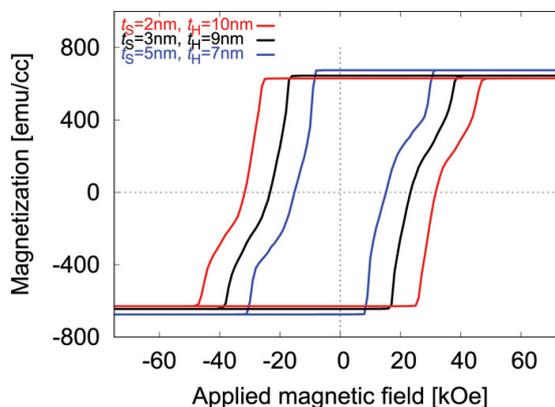


図 3. 様々な層厚を持つハード/ソフト積層記録層のヒステリシスループ

境界部である磁壁から、比較的大きな漏れ磁場が発生する。このような非一様な記録磁場分布は記録特性に影響を及ぼす。

転写された磁化分布を図 5 に示す。図 5(a)は理想的な転写状態、図 5(b)は従来マスター媒体により転写された状態、図 5(c)は n-DMM、図 5(d) p-DMM を用いた場合の転写された直状態を示している。いずれも、転写磁場 $H_p = 10$ kOe とした。記録磁場分布から予想される通り、従来マスター媒体および p-DMM を用いた場合には、バースト部で優れた転写特性を示している。一方、n-DMM では、記録磁場の分布が反映され、特にバーストスペース部分で信号劣化が見られた。また、いずれのマスター媒体においても、AGC 部の転写特性には改善が必要であることがわかる。

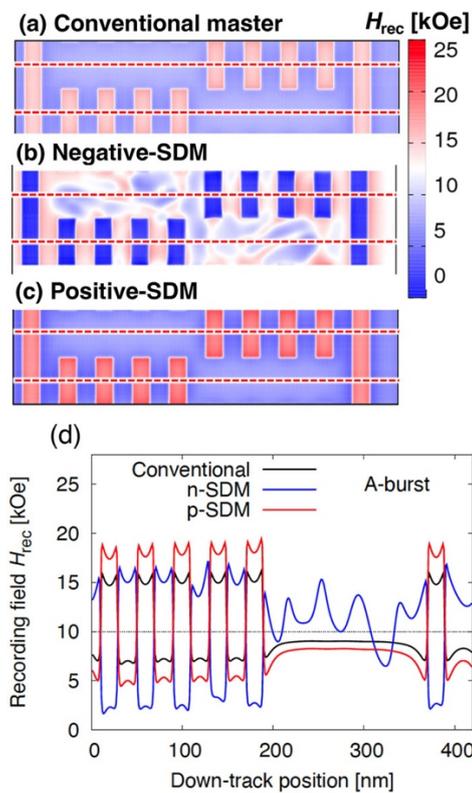


図 4. AGC および A/B バーストパターンの記録磁場分布. (a)従来マスター媒体, (b) n-DMM, (c) p-DMM. (d) A バースト中央に沿った各マスター媒体の記録磁場分布. 転写磁場 $H_p = 10$ kOe

転写特性のさらなる改善のため、バースト部及び AGC 部の記録磁場強度の差に着目した。AGC 部とバースト部の切り替わりの位置における磁場の最大値、最小値を比較した分布を図 6 に示す。図 6(a)より、AGC 部とバースト部で記録磁場の差は同程度であるものの、最大値、最小値に違いあることがわかる。この相違は最適な転写状態が得られる最適転写磁場強度の違い

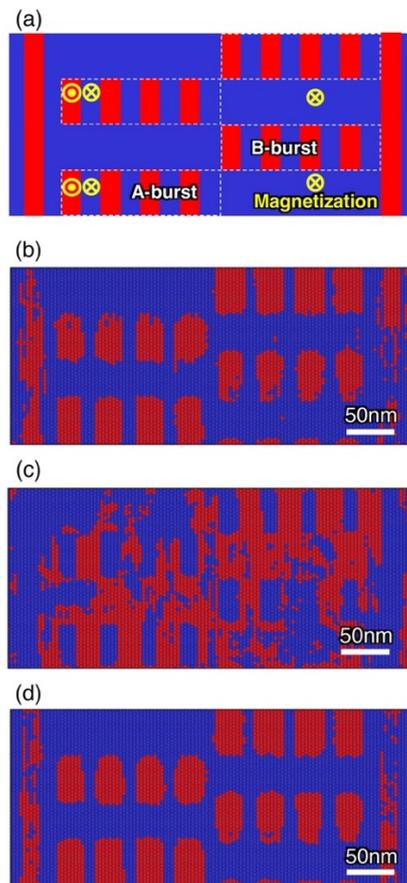


図 5. 転写された磁化分布: (a) 理想的な状態, (b) 従来マスター媒体, (c) n-DMM, (d) p-DMM. 転写磁場 $H_p = 10$ kOe

につながるため、同じ転写磁場で双方を最適にすることが出来ないことを意味する。この相違を埋めるため、磁性膜パターンの幅に着目し、AGC部とバースト部でダウントラック方向の幅を変えて、記録磁場を計算した。その結果を図6(b)に示す。磁性膜パターンの分離を促す磁気分離層の厚み、及び、ダウントラック方向のパターン幅を変えることで、最大磁場と最小磁場の強度さを縮めることが出来ることがわかり、これがDMMの設計指針となる。

このように最適化したパターン幅を有するDMMで転写した磁化分布を図7に示す。記録層の保磁力を変えて、それぞれの最適転写磁場を印加した。いずれにおいても、DMM設計指針に沿って作製したp-DMMは転写状態を改善し、十分に大きな保磁力30kOeを有する次世代記録媒体にも適用可能であることがわかる。

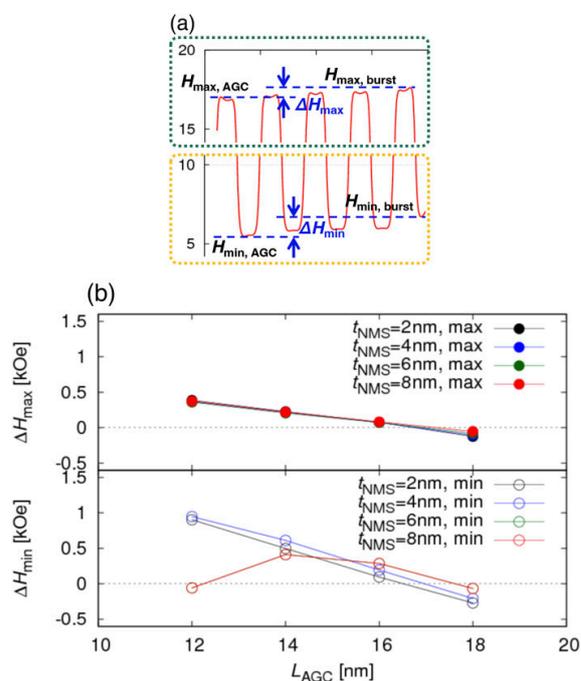


図 6. (a) 図 3 に示した記録磁場の拡大図。
(b) ビット長 L_{AGC} の関数としての記録磁場の差 ΔH_{\max} , ΔH_{\min}

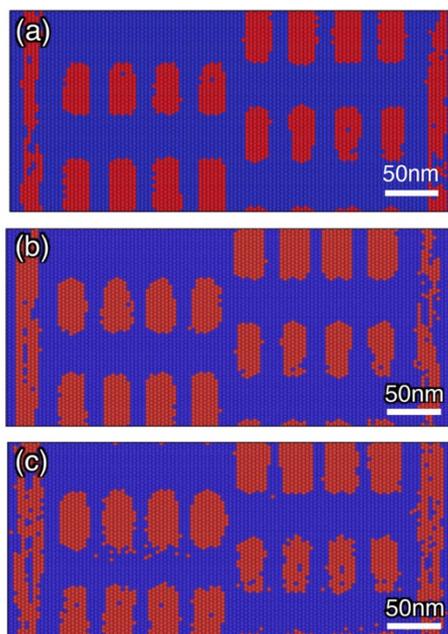


図 7. (a) 15 kOe、(b) 23 kOe、(c) 32 kOe の保磁力を持つ記録層に転写印刷された磁化分布。対応する転写磁場はそれぞれ転写磁場 $H_p = 8, 18, 28$ kOe

4. まとめ

本研究では、マイクロマグネティックシミュレーションにより、DMM媒体によるバースト信号のエネルギーアシスト磁気記録媒体への転写特性を調査した。DMM媒体は、軟磁性体の配列により正と負の磁気パターンの2種類の構成を考えた。P-DMMを利用することで、バースト信号を明瞭に印刷することが出来、明らかに従来マスター媒体よりも転写特性が優れている。一方、N-DMMを利用すると、軟磁性体の部分の磁化が不均一であるため、バースト信号の印刷が不十分である。最適な非磁性スペーサーの厚さと最適な印刷磁場により、高保磁力のEAMR媒体へ

の十分な記録磁化を得ることができる。したがって、P-DMM マスターによる磁気転写は、エネルギーアシスト磁気記録媒体に有望であることが明らかとなった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。また、ハードディスク業界の方々に多くのご議論を頂きました。ここに深謝致します。

参考文献

- 1) T. Komine, T. Murata, Y. Sakaguchi, and R. Sugita, "Feasibility of Perpendicular Magnetic Printing at 1 Tbit/inch²," IEEE Trans. Magn., **44**, 3416-3418 (2008).
- 2) N. Sheeda, M. Nakazawa, H. Konishi, T. Komine, and R. Sugita, "Perpendicular anisotropy master medium in magnetic printing for writing high-density servo signal," IEEE Trans. Magn. **45**(10), 3676-3678 (2009).
- 3) T. Murakoshi, T. Komine and R. Sugita, "Magnetization Distribution of Tb/in² Class Hard Disks Recorded with Bit Printing and Edge Printing", IEEE Trans. Magn. **47**(10), 3574 - 3577 (2011).
- 4) T. Komine, "Double magnet master media for magnetic printing onto energy-assisted magnetic recording media," IEEE Trans. Magn. **58**, 3200105 (2021).
- 5) T. Komine, "Master structure dependence of double magnet master on magnetic printing performance onto energy-assisted magnetic recording media," IEEE Trans. Magn. **58**(8), 3200905 (2022).
- 6) T. Komine, "Combinatorial dependence of magnetic printing characteristics in double magnet master media for energy-assisted magnetic recording," AIP Adv. **13**, 025310 (2023).
- 7) T. Komine, "Magnetic printing characteristics of burst signals by using double magnet master media", AIP Adv. **14**, 035138 (2024).