

2層3次元磁気記録方式における記録層磁化容易軸分散が記録状態に与える影響の計算機検討

Computational Analysis of Easy-Axis Dispersion Effects on Recording State in Dual-Layer 3D Magnetic Recording

○山田優太¹, 大家幸太², 吉川大貴³, 塚本新³

Yuta Yamada¹, Kouta Daike², Hiroki Yoshikawa³, Arata Tsukamoto³

Abstract: Although a three-dimensional magnetic recording method has been proposed for increasing information capacity, controlling the easy axis of magnetization direction in the recording layers remains challenging. Therefore, we conducted a computational study to evaluate the performance requirements for 3D magnetic recording media, focusing on the allowable range of recording states. This evaluation was based on a quantitative analysis of the dispersion in the easy-axis direction of magnetization. Our results revealed a dependence between the K_u value of the upper layer and the required easy-axis directional ratio. This finding provides an important guideline for the fabrication of 3D magnetic recording media.

1. 背景

情報量増加に伴いデータセンター等で使用される HDD にはテラビット級の記録密度向上が求められており^[1], 現行の磁気記録媒体では, 高い磁気異方性定数 $K_u = 7.0 \times 10^6$ [J/m³] を持つ $L1_0$ -FePt が用いられている. 更なる高密度化のために磁性微粒子の微細化が求められているが, 微細化限界によりこれ以上の微細化による高密度化は困難である. そこで, 記録層を2層に拡張する3次元磁気記録方式が提案されている^[2]. 記録層/非磁性層/記録層という構造を採用し上下の記録層に書き込みを行えるようにする事で, 磁化ベクトルが上下層共に上向き, 下向きに加えて反平行状態の3状態を扱えるようにする事で, 10Tbit/in² 級の記録密度達成が期待される. しかし, 非磁性層の材質や表面形状が記録層の配向制御に影響を与えるため, 結晶配向の分散が記録性能に及ぼす影響を理解する事が3次元磁気記録媒体作製において重要となるが, 結晶配向性に起因する磁化容易軸方向の自由な制御を実実験で行うことは困難である. そこで本研究では磁化容易軸分散の定量的な評価を行い, 記録媒体に求められる性能, 特に記録状態の許容範囲を評価するため, 磁化の歳差運動を示す LLG 方程式に基づいたマイクロマグネティクス計算を行う mumax3 を用いて計算機解析を行った.

2. 計算機実験モデル, シミュレーションモデル及び計算条件

Fig. 1 に計算機実験モデル, Fig. 2 に記録媒体の 1bit を想定したシミュレーションモデルを示す. 誘導基板上に成膜が行える事を考慮し下層の磁性パラメータは $L1_0$ -FePt の 0[K] における特性^[3] を想定し, 飽和磁化 $M_s = 1140 \times 10^3$ [A/m], 磁気異方性定数 $K_u = 7.0 \times 10^6$ [J/m³], ダンピング定数 $\alpha = 0.1$, 交換スティフネス定数 $A = 1.13 \times 10^{-11}$ [J/m], 磁化容易軸 $\langle 001 \rangle$ 方向とした. 非磁性層は媒体定数として $M_s, K_u, A = 0$ とし, 層間相互作用を無視するよう設定した. 計算条件として初期磁化は上下層共に上向き, 外部印加磁場を z 軸平行方向に設定し, シミュレーション内で自然対称性の破れを再現するため x 軸方向に 0.01° 傾けた.

3. 上層モデル詳細設定

配向誘導基板を用いずに非磁性層上へ $L1_0$ -FePt を成膜する過程では, 結晶配向の分散と規則化度の低下が生じると考えられるため, 磁化容易軸に分散を持ち, 下層に比べて K_u が低下した磁性パラメータを設定した. 理想的な $L1_0$ -FePt の結晶配向性は $\langle 001 \rangle$ 方向が現れる事と非磁性層の導入により格子不整合が生じ, 上層の結晶配向性を乱し $\langle 111 \rangle$ 方向に傾斜してしまう事が予想されるため, 本モデルでは記録媒体に求められる z 軸方向への磁化容易軸の配向を仮定し, 磁化容易軸が $\langle 001 \rangle$ と $\langle 111 \rangle$ のみ存在とした. 異なる結晶構造の存在による物性パラメータのパラつきを

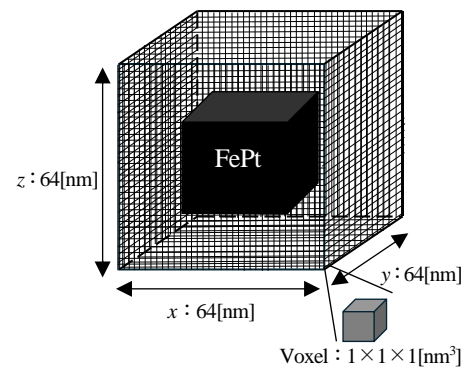


Fig. 1 Experimental Model

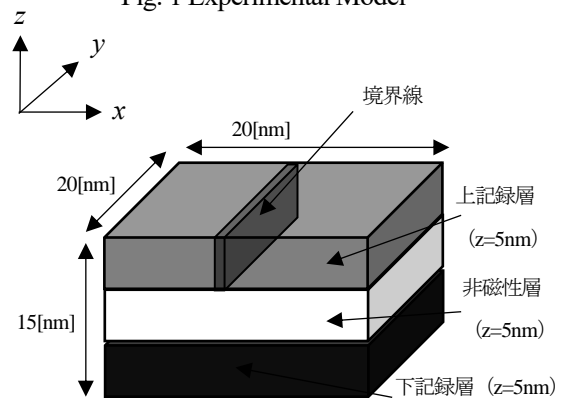


Fig. 2 Simulation Model

1: 日大理工・学部・電子 2: 日大理工・院(前)・電子 3: 日大理工・教員・電子

抑えて比較検討を行うため、磁化容易軸<001>と<111>の割合をシミュレーションモデルに対しyz平面を境界線としx軸方向に変化させた。また規則化度の低下を考慮するために $K_u = 3.5, 5.0 \times 10^6 [J/m^3]$ の2種類を想定した。Fig. 3に上層の<001>と<111>の容易軸を持つ領域の境界部分を示す。磁化容易軸<001>と<111>を設定した部分の境界線において明確な磁化ベクトルの区別は無く連続的な遷移が確認できた。

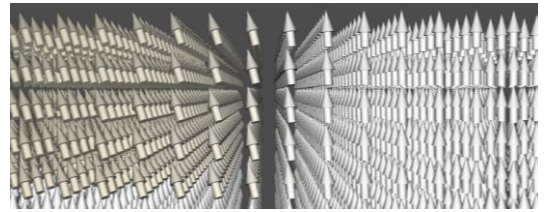


Fig. 3 Boundaries within the simulation

4. 磁化容易軸割合変化

上層の磁化容易軸<001> : <111>の割合変化時の異なる上層の K_u で行った計算結果を Fig. 4, Fig. 5 に示す。外部印加磁場遷移は $+12 \sim -x \sim +x \sim -12 \sim +x \sim -x \sim +12 [T]$ とし, $x = \text{Fig. 4 : 6, Fig. 5 : 8.5}$ とした。全ての条件において2段階での磁化反転が起き、3状態となる事を確認する事が出来た。初めに Fig. 4 での結果を示す。上層の磁化容易軸が完全<001>方向成分から完全<111>方向成分を持つよう変化していくと、ヒステリシスの角型比の低下が確認された。本研究では角型比は残留磁化 M_r を飽和磁化 M_s で割った値で定義した。実際の記録媒体に求められている角型比の値は 0.8~0.9 である^[4]事から、記録層に磁化容易軸<001>方向と<111>方向成分のみ存在すると仮定すると、<001>方向成分が 25%以上、75%未満になった時に記録媒体に求められている角型比が得られる事が明らかとなった。よって、磁化容易軸<111>の割合を 50~75%確保する事が Fig. 4 における条件での3次元磁気記録媒体において求められている範囲である事が明らかとなった。また、Fig. 4 に比べて K_u を上げた Fig. 5 の条件では<001>方向成分が 50%未満の時に記録媒体に求められている角型比が得られ、磁化容易軸<111>の割合を 75%以上確保する事が Fig. 5 における条件での3次元磁気記録媒体において求められている範囲である事が明らかになった。

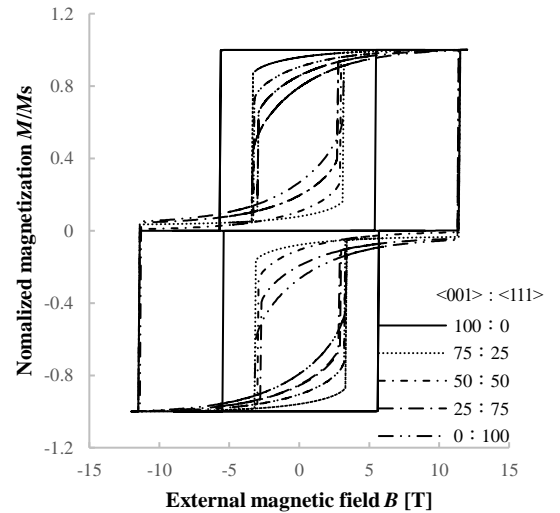


Fig. 4 Hysteresis loop when the easy-axis ratio of magnetization changes at $K_u = 3.5 \times 10^6 [J/m^3]$ in the upper layer

これより、3次元磁気記録方式において上層 K_u の値と必要となる磁化容易軸方向<001>と<111>の割合に依存性がある事が明らかとなった。

5. まとめ

本研究では、3次元磁気記録媒体の作製過程における非磁性層の上に記録層を作製した際の結晶配向の分散に起因する磁化容易軸方向の分散に対する記録媒体に求められる性能の許容範囲を評価するために計算機解析を行った。上層の K_u が $3.5 \times 10^6 [J/m^3]$ の時は磁化容易軸方向<111>を 50~70%, K_u が $5.0 \times 10^6 [J/m^3]$ の時は磁化容易軸<111>方向を 75%以上確保する事が3次元磁気記録媒体に求められている磁化容易軸方向の範囲であり、上層 K_u の値と必要な磁化容易軸方向の割合に依存性がある事が明らかとなった。

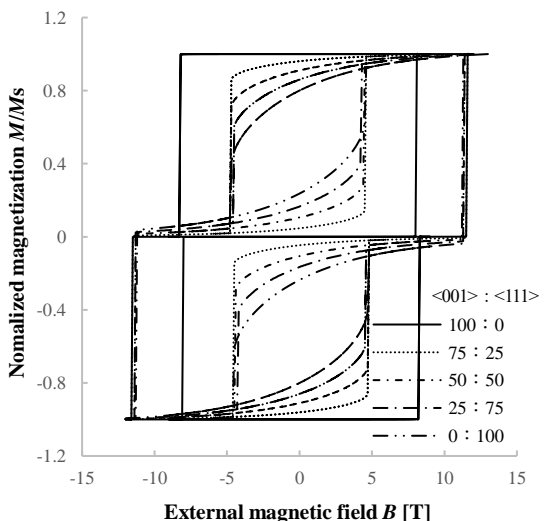


Fig. 5 Hysteresis loop when the easy-axis ratio of magnetization changes at $K_u = 5.0 \times 10^6 [J/m^3]$ in the upper layer

6. 参考文献

[1] Bharat Bhushan, Current status and outlook of magnetic data storage devices. *Microsystem Technologies*. 29, 2023, p.1529-1546
 [2] P. Tozman, S. Isogami, I. Suzuki, A. Bolyachki, H. Sepehri-Amin . . . Dual-layer FePt-C granular media for multi-level heat-assisted magnetic recording . *Acta Materialia* 271, 2024, 119869.
 [3] T. Klemmer, D. Hoydick, H. Okumura, B. Zhang, W. A. Soffa. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1995, vol. 33, p. 1793-1805
 [4] Piramanayagam, S. N. (2007). Perpendicular recording media for hard disk drives. *Journal of Applied Physics*, 102(1), 011301.