

[先端的大規模計算利用サービス利用成果]

熱アシスト磁気記録の記録磁化過程シミュレーション

— Recording simulation of heat assisted magnetic recording —

水野 友人¹, Simon Greaves², 村岡 裕明²¹ TDK 株式会社 浅間テクノ工場² 東北大学 電気通信研究所

本稿では、熱アシスト磁気記録における記録磁化過程について、東北大学サイバーサイエンスセンターのSX-9を用いて得られたシミュレーション結果の報告を行う。

1. はじめに

ハードディスク装置 (HDD) は、情報化社会における情報記憶の中心技術であり、その産業規模は年間数億台の生産に達している。記憶容量の需要を背景に、垂直磁気記録の実用化を始めとする技術革新による記録面密度の向上が続いている。現在の記録密度は ~ 500 ギガビット/ inch^2 程度であるが、これをテラビット/ inch^2 級にまで大幅に高める記録・再生ヘッドの開発が強く求められている。しかし、1ビットを記憶するためのディスク上の領域 (以下ビットサイズ) は数十 nm 以下の極めて微細なサイズであり、実験用デバイスの試作も容易ではなく、年々計算機シミュレーションによる研究開発への要求が高まっている。本研究では、磁気ヘッド磁界に対する磁気ディスク媒体の磁化スピンの反転挙動を LLG 方程式によりモデル化し、熱アシスト磁気記録における記録磁化過程の解析を行った。計算には東北大学電気通信研究所 村岡研究室で開発されたシミュレーションプログラムを用いた。

2. 熱アシスト磁気記録

HDD の記録密度を増加するためにはビットサイズを減少させる必要があり、具体的には 12nm 以下、単位長さあたりの磁束反転数 (Flux Changes per inch = FCI) 2000kFCI 以上に相当するビットサイズの実現が今後の記録密度増加に対して不可欠となっている。一方、ビットサイズを小さくすると磁気記録層膜厚との積である 1 ビットの体積が減少し、熱安定性が損なわれる。これを回避するために、磁気記録媒体の磁気異方性 (K_u) を増加し、媒体保磁力 (H_c) を増加させる必要があるが、記録素子の微細化に伴う記録磁界の減少により、記録困難となる。媒体磁気異方性を高めつつ、記録磁界を増加させずに容易に記録する方法の 1 つとして、熱アシスト記録が検討されている [1, 2]。これは、記録したいビットの H_c を加熱により減少させ、低い記録磁界で安定に記録を行う一方、記録後の冷却過程で磁気異方性が回復増大し、記録された磁化情報の熱安定性を保つことができる記録方法であり、今後の HDD の記録密度増大に有望な技術として考えられている (図 1)。

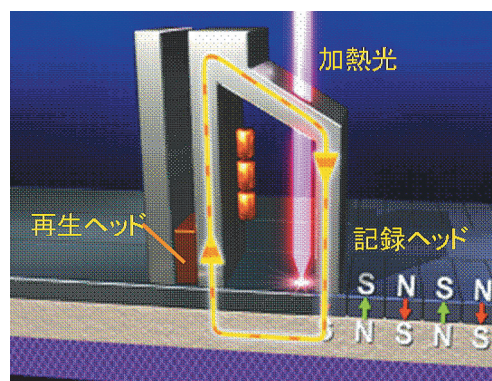


図 1. 熱アシスト磁気記録のイメージ図。磁気記録ヘッドは磁気信号読み取り再生ヘッドと、記録ヘッドから構成される。熱アシスト磁気記録では、加熱光を導入することで記録を行う。

3. 計算手法

本節では、熱アシスト記録の物理現象を再現するために用いた計算手法について述べる。3.1では磁気記録媒体の磁化の動力学方程式について説明し、3.2では加熱で発生する媒体上の温度分布を得るための熱伝導方程式について説明する。最後に3.3において、近接場光の媒体吸収量の評価に用いた式について説明する。

3.1 マイクロマグネティクス

磁気記録媒体を構成する磁性微粒子の磁化挙動について、時間発展 t に関する磁化の動力学方程式(Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式)に基づいた、マイクロマグネティクスモデルの計算を行う(式1)。

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma \left(\vec{M} \left(\vec{H} - \frac{\alpha}{\gamma \cdot M_s} \cdot \frac{d\vec{M}}{dt} \right) \right) \quad (\text{式. 1})$$

\vec{M} は磁性微粒子の磁化ベクトル(M_s は飽和磁化)、 γ はジャイロ磁気定数、 \vec{H} は印加磁界ベクトル、 α は磁化ベクトルの磁界方向の緩和を表現するための無次元の摩擦係数であり、Gilbert のダンピング定数と呼ばれる。磁性微粒子は図2に示す Voronoi 多面体で表現し、各 Voronoi 粒子について式.1を計算する。

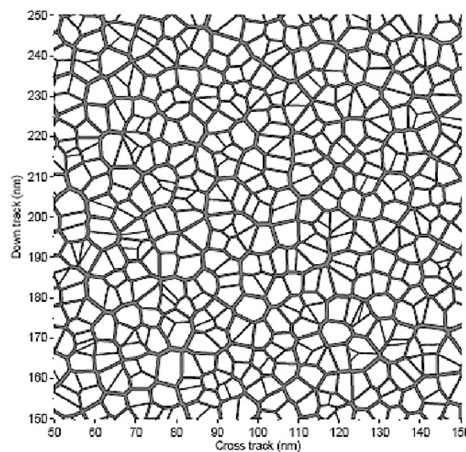


図.2 Voronoi 多面体による磁性微粒子の表現

3.2 熱伝導解析

熱アシスト磁気記録においては、磁性微粒子を加熱し、 H_c を減少させた状態にヘッド磁界を印加して記録を行う。このため磁性微粒子の熱源による温度上昇を計算する必要があり、本研究では熱拡散方程式を用いて、熱源による媒体加熱をシミュレーションした。隣り合う i 番目と j 番目の磁性微粒子について、 i 番目の磁性微粒子の温度の時間発展 t についての方程式を計算した(式2)。

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{k}{CV} \frac{A(T_j - T_i)}{L} \quad (\text{式. 2})$$

i 番目の磁性微粒子について、 T_i は温度、 k は熱伝導率、 C は比熱、 V は体積である。 A と L は、 i 番目と j 番目の粒子との接触面積と中心間距離である。

3.3 熱源

媒体の加熱に用いるナノメートルオーダーの熱源として、近接場光を仮定した計算を行った。近接場光によって、通常の光ディスク光学系では不可能な回折限界以下の微小な光スポットが得られるため、高密度記録が期待できる[3]。近接場光による加熱エネルギーは、媒体による電磁場吸収により発生し、本研究では式.3によるエネルギー吸収量Qを、単位体積当たりの熱源として仮定した。

$$Q = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_i \omega E^2 \quad (\text{式. 3})$$

ϵ_0 は真空の誘電率、 ϵ_i は複素誘電率であり、屈折率と吸収係数をnとkとすると $2nk$ に等しい。 ω は電磁場の振動数、 E^2 は電界強度である。

4 熱アシスト記録シミュレーション

4.1 磁気記録媒体モデル

磁気記録媒体モデルとして、図.3に示す4層から成る構成（ガラス基板/下地/中間層/磁気記録層）を検討した。磁気記録層については、10nmと20nmの場合について記録状態の比較を行った。磁性粒子の大きさは平均値で5nmとした。磁気記録層の磁気特性は表.1に示す値を仮定している。温度TにおけるKuとMsは、絶対零度におけるKuとMsを仮定して、式.4と式.5により求めた。ここでは $\chi=1$, $n=5$ を用いている(図.4)。

$$K_u(T) = \frac{\cosh(\chi) - \cosh(\chi(T/T_c))}{\cosh(\chi) - \cosh(\chi(T/T_c))} K_u(0) \quad (\text{式. 4})$$

$$M_s(T) = M_s(0) \left(\frac{K_u(T)}{K_u(0)} \right)^n \quad (\text{式. 5})$$

Recording layer (10, 20nm)
Inter layer (15nm)
Under layer (200nm)
Glass subst

Ms (emu/cc)	Ku (erg/cc)	Hk (kOe)	Tc (K)	D (nm)
1000	2.40E+07	48	660	5

図.3 磁気記録媒体モデル

表.1 磁気記録媒体の磁気特性

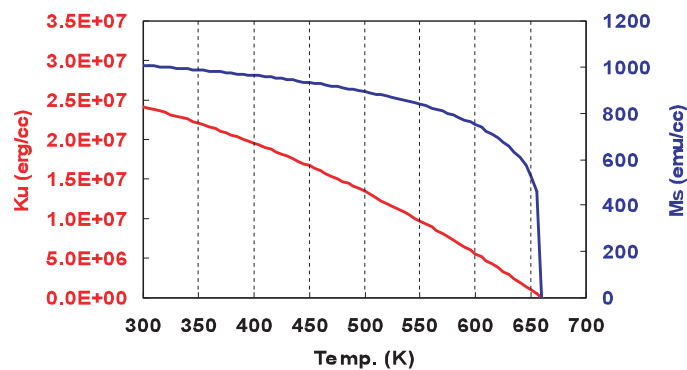


図.4 KuとMsの温度依存性

4.2 熱計算モデル

熱計算は、表. 2 に示す熱計算パラメータを仮定して計算を行った。また式. 3 による近接場光による発熱量の計算には、電界強度の FWHM が約 20nm×20nm 領域となる電界強度分布を仮定した (図. 5)。(ここではガラス基板への熱伝導は考慮しない。)

Layer	比熱 (J/cc K)	熱伝導率 (W/cm K)	反射率 n	吸収係数 k
Recording	3.8	0.12	3.11	3.72
Inter layer	3.1	0.01	1.68	0.00
Under layer	3.1	0.90	2.91	3.09
Glass	1.6	0.00	1.50	0.00

表. 2 磁気記録媒体の熱計算パラメータ

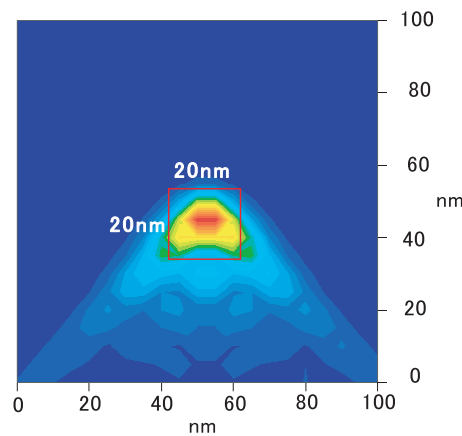


図. 5 電界強度分布

4.3 記録ヘッドによる磁界強度分布

市販の磁界計算プログラム JMAG [4] を用いて、記録ヘッド形状、磁気特性および記録電流値を仮定した、Stoner-Wohlfarth モデルにおけるダウントラック方向の有効ヘッド磁界分布を求めた (図. 6)。磁極端における最大有効磁界は 13500 (Oe) である。熱源として、磁極端から 35nm の位置に、図. 5 の電界強度分布のピーク位置を配置した。媒体は熱源による加熱を受けた後、磁界強度が増加する方向 (図. 6 の原点に近づく方向) に移動し、線速度 24m/sec を仮定した。

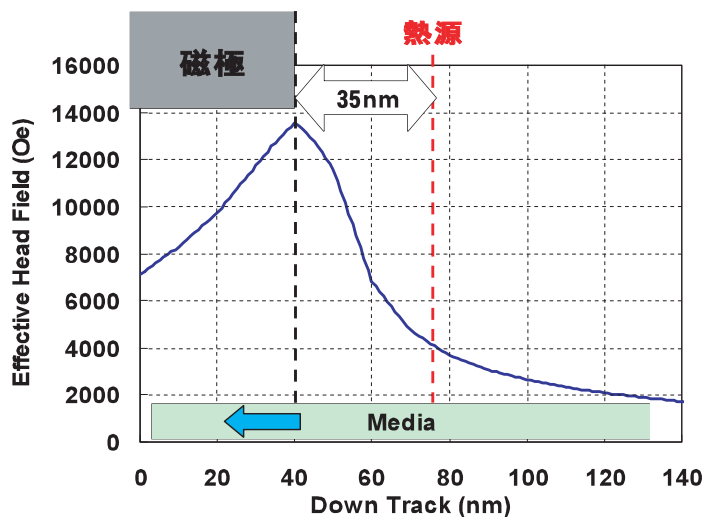


図. 6 ダウントラック方向の有効ヘッド磁界分布

4.4 磁化遷移点と有効磁界勾配

図. 7-1 と図. 7-2 に、磁気記録層膜厚 10nm と 20nm の場合について、ダウントラック方向の有効ヘッド磁界分布、温度分布および Hc 分布を示す。最高到達温度は 800K とした。磁化遷移点はヘッド磁界分布と Hc 分布との交点となり、磁気記録層膜厚 10nm と 20nm の場合、図中の 472nm と 462nm の位置に対応する。磁気記録層膜厚を 20nm にした場合に温度分布がダウントラック方向に広がり磁化遷移点に変化している。これは膜厚を 2 倍にした際、最高到達温度 800K を実現するために近接場光強度の増加が必要となった影響と考えられる。

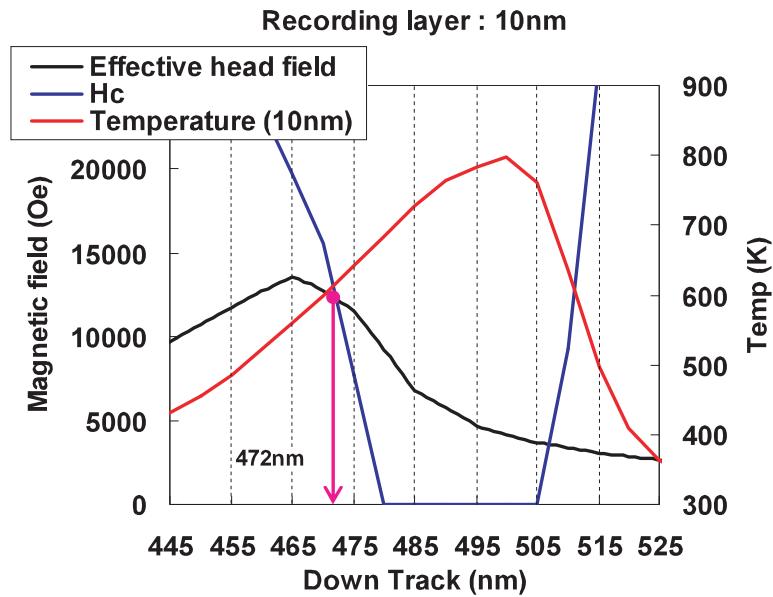


図. 7-1 磁気記録層膜厚 10nm の場合の有効ヘッド磁界、Hc および温度分布

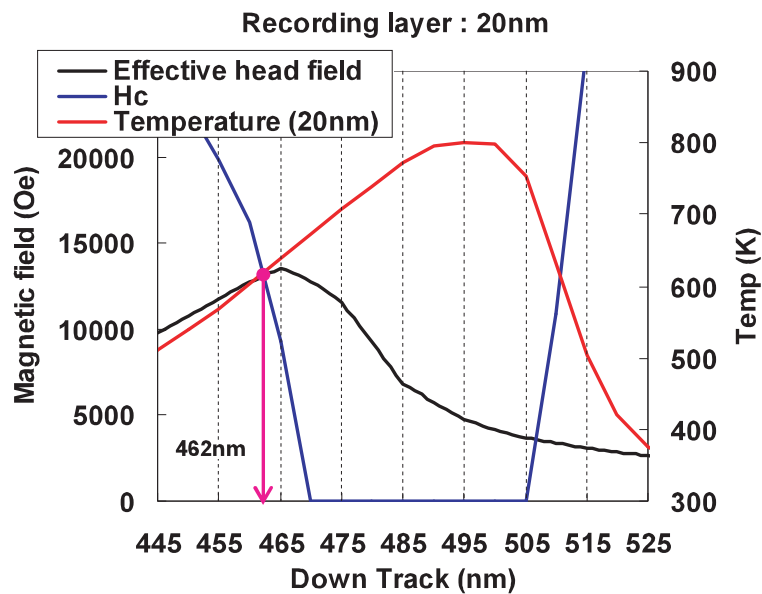


図. 7-2 磁気記録層膜厚 20nm の場合の有効ヘッド磁界、Hc および温度分布

記録品質の指標となる信号-ノイズ強度比(SNR)は、磁化遷移点における有効磁界勾配が高い値であるほど大きな値になると考えられる。有効磁界勾配は式. 6 で表現され[5]、磁気記録層膜厚が10nm と 20nm の場合について、磁気記録点での有効磁界勾配を比較した(表. 3)。また有効磁界勾配の計算には各温度での Hc の温度依存性が必要であり、各温度における磁化曲線の LLG シミュレーションから求めた動的 Hc (Dynamic-Hc) の温度依存性から算出した(図. 8)。

$$\frac{dH_{total}}{dx} = \frac{dH_{head}}{dx} - \frac{dH_c}{dT} \frac{dT}{dx} \quad (\text{式. 6})$$

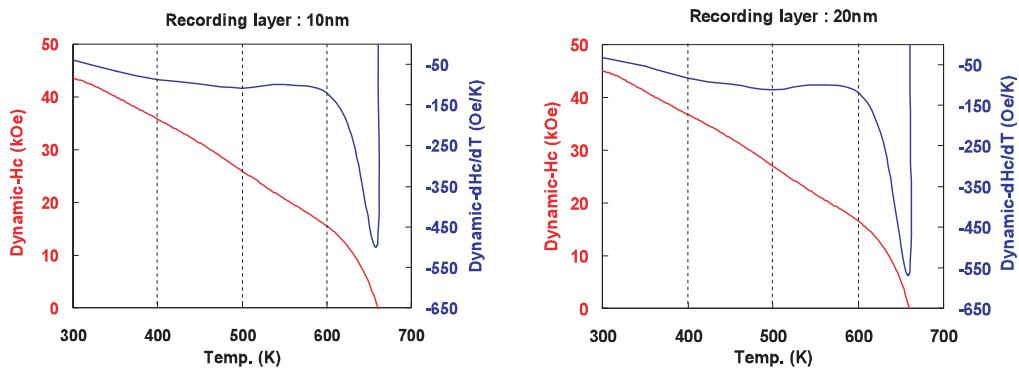


図. 8 Dynamic-Hc の温度依存性

式. 6 と図. 7-1, 7-2, および図. 8 の結果から推定した有効磁界勾配は、磁気記録層膜厚 10nm と 20nm について、各々681 (Oe/nm) と 1449 (Oe/nm) の値を得た。また 2000kFCI における磁気記録状態を計算し、磁気記録層膜厚 10nm と 20nm 各々の場合について 7. 8dB と 10. 6dB の SNR 値を得た(図. 9)。

磁気記録層膜厚 (nm)	磁化遷移点 (nm)	磁化遷移点の温度 (K)	ヘッド磁界 (Oe)	dH _{head} /dx (Oe/nm)	dH _c /dT (Oe/K)	dT/dx (K/nm)	dHeff/dx (Oe/nm)	SNR (dB)
10	472	595	12253	-240	-113	8.2	681	7.8
20	462	620	12797	163	-185	7.0	1449	10.6

表. 3 磁気記録層膜厚による有効磁界勾配の比較

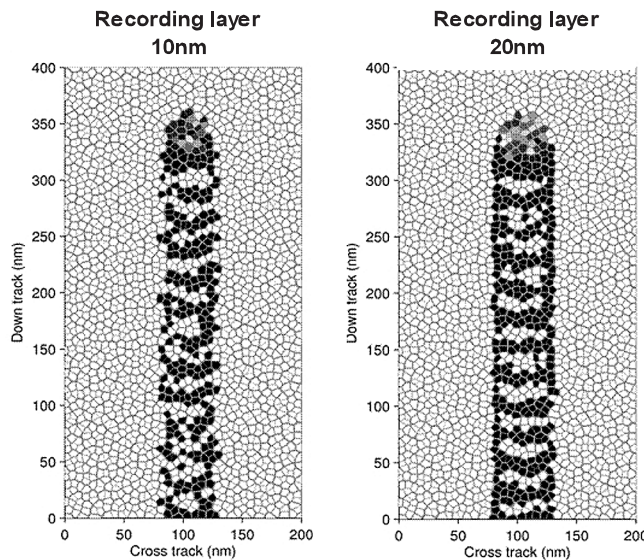


図. 9 磁気記録層による記録状態の比較

磁気記録層膜厚 20nm の場合が 10nm の場合よりも高い SNR を示すことは、有効磁界勾配の差で理解できる。しかし磁気記録膜厚 10nm の場合は、ヘッド磁界勾配絶対値より 2.8 倍も高い有効磁界勾配を示しており、有効磁界勾配の値だけでは磁気記録層膜厚 10nm の低い SNR を説明することは難しい。磁気記録膜厚 10nm の場合について、時間ステップにおける記録磁化過程の解析を行い考察した。

4.5 磁気記録膜厚 10nm の場合における記録磁化過程の解析

図. 10-1 は、磁気記録膜厚 10nm の場合について、赤でマークした磁性微粒子の記録磁化過程を示している。13.25(nsec) 付近で磁化がヘッド磁界方向(-1.0)に磁化反転した後、次のビット形成磁界に引きずられ、13.58(nsec) 付近で逆方向(+1.0)に再反転している。記録後に逆方向に再反転する粒子の存在はジッタの原因となり、記録信号の SNR が減少する。また、逆方向に再反転した時の磁界強度は約 6000(Oe)であり、温度は 575K であることがわかる(図. 10-2)。

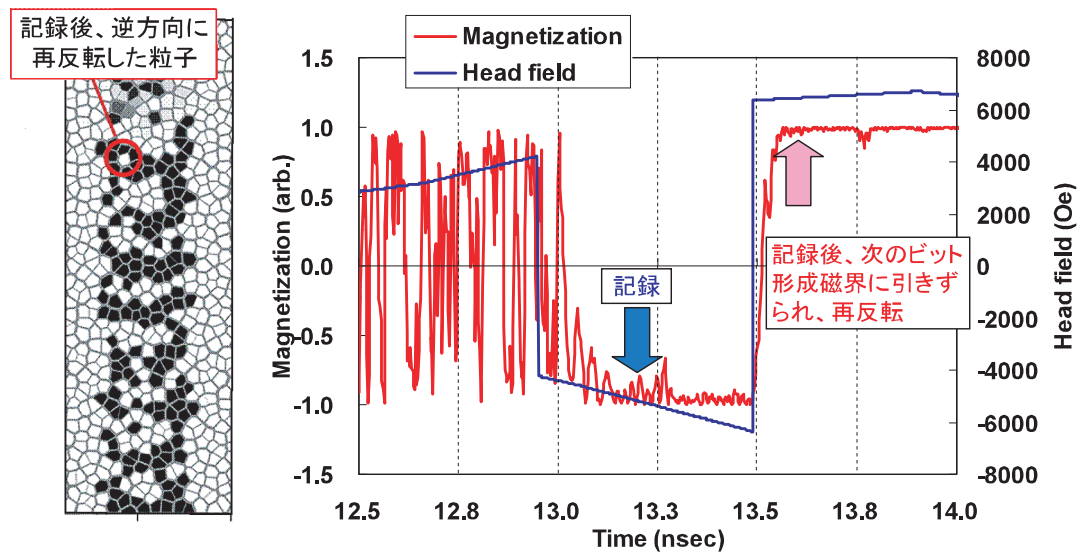


図. 10-1 逆方向に再反転した粒子の磁化方向とヘッド磁界の変化

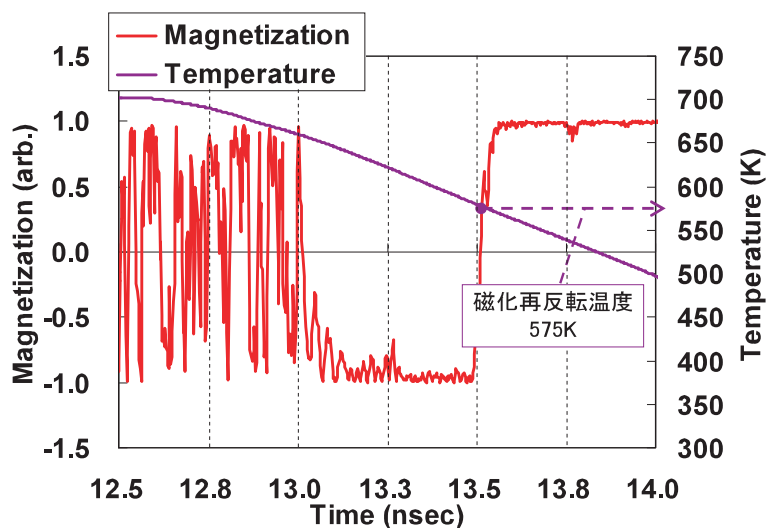


図. 10-2 逆方向に再反転した粒子の磁化方向と温度の変化

磁気記録層膜厚の差を比較するため、磁気記録層膜厚 10nm と 20nm について逆方向に再反転した時と同じ環境条件（温度 577K, 磁界 6000 Oe）を与え、記録状態の比較を行った。比較を容易にするため、計算機上で理想的な磁化パターンをプログラムした後に、577 (K) と 6000 (Oe) の温度と磁界を与えた (図. 11)。磁界方向は黒のパターンに対して逆方向 (白のパターン方向) とした。

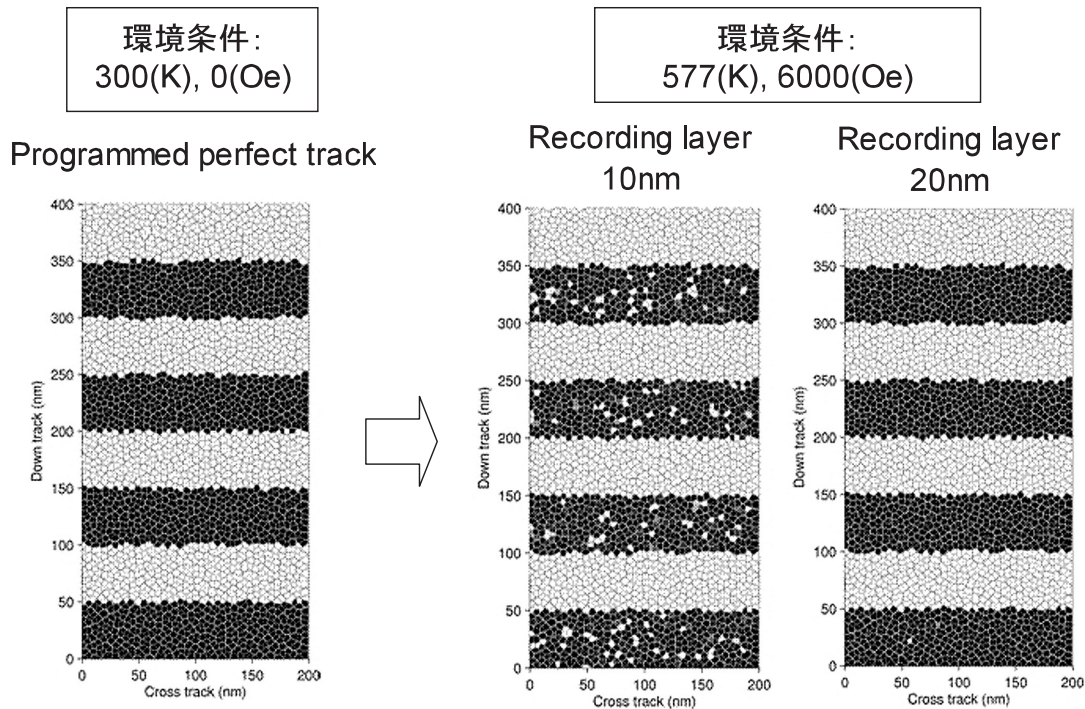


図. 11 環境条件 577 (K), 6000 (Oe) における、磁気記録層膜厚 10nm と 20nm の記録状態比較

図. 11 から、磁気記録膜厚 10nm は 20nm に比べて再反転粒子が多いことから、577 (K), 6000 (Oe) の環境条件では、記録後再反転しやすいことがわかる。熱アシスト磁気記録では、加熱により H_c を下げて記録する特徴があるが、加熱後の余熱のため再反転を引き起こす可能性があり、記録後も十分な熱安定性を確保する必要がある。図. 4 の K_u の温度依存性から 577 (K) の K_u を求めると、 7.5×10^6 (erg/cc) である。粒径 5nm について磁気記録層膜厚 10nm と 20nm の熱安定性指数 ($K_u V / k_B T$) を求めると、各々 18 と 37 と見積もられる。記録点付近での熱安定性指数の確保が重要であることを示唆している。

5 まとめと展望

熱アシスト磁気記録方式は今後の HDD の記録密度増大に有望な技術であり、本研究における LLG シミュレーションからも、2000kFCI の高線記録密度の可能性を示すことができた。一方で、ナノメートルオーダーの光による、微小磁性粒子の磁化反転制御に関連した物理現象 (媒体中の近接場光分布の詳細や、 T_c 付近の磁化挙動) を完全に反映しているとは言い難く、今後も第一原理計算による磁気記録過程の解析を進めることが必要である。

謝辞

本研究は、先端的大規模計算シミュレーションプログラム利用サービス 戦略分野利用推進において、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ (SX-9) を利用することで実現することができました。この場を借りて関係各位に感謝いたします。

参考文献

- [1] S. J. Greaves and H. Muraoka, "Effect of the temperature dependence of H_k in thermally assisted recording", J. Appl. Phys., Vol.101, 09H502(1-3), 2007.
- [2] S. J. Greaves, T. Mizuno and H. Muraoka, "Transition Formation in Heat-Assisted Magnetic Recording", J. Magn. Soc. Jpn., Vol.34, No.2, pp. 49-52, 2010.
- [3] T. Matsumoto, K. Nakamura, T. Nishida, H. Hieda, A. Kikitsu, K. Naito, and T. Koda, "Thermally assisted magnetic recording on a bit-patterned medium by using a near-field optical head with a beaked metallic plate", Appl. Phys. Lett., 93, 031108, 2008.
- [4] JMAG-Studio, Commercial software, JSOL, Ltd, <http://www.jmag-international.com>.
- [5] R. Rottmayer et al., "Heat Assisted Magnetic Recording", IEEE Transactions on magnetics, vol.42, no.10, 2006.