

## 研究論文

## テラビット記録用パターンド磁気記録メディアの設計

本多直樹,<sup>1</sup>大内一弘<sup>1,2</sup>

Design of Patterned Magnetic Recording Media for Tera-Bit Recording

Naoki HONDA<sup>1</sup> and Kazuhiro OUCHI<sup>1,2</sup>

Specifications of patterned magnetic recording media for tera-bit recording were designed as an extension of perpendicular magnetic recording. Effective thermal stability of the magnetic dots with perpendicular anisotropy was estimated using the magnetic field where magnetization reversal begins in the magnetic dot array by the applied perpendicular field. The estimated magnetic properties of the media with an areal density of 1 Tbit/in<sup>2</sup> were expected to be realized with known hard magnetic materials such as Co-Pt and FePt alloys. Effects of the size and shape of dots and the spacing between dots on the magnetic reversal properties were investigated using a micromagnetic simulation. It was found that the spacing between dots would impose strong restriction on the achievable recording density. Recording simulation on a designed patterned medium indicated possibility of realization of 1 Tbit/in<sup>2</sup> recording.

**Key Words** : patterned magnetic recording media, tera-bit recording, perpendicular magnetic recording, thermal stability, micromagnetic simulation, magnetostatic interaction, recording simulation

## 1. 緒言

垂直磁気記録方式はその発明[1]から30年近くの歳月を経て、次世代高密度ハードディスク装置として複数の企業から本格的な実用化が始まった。2004年5月に仙台で開催された第7回垂直磁気記録国際会議 (PMRC 2004) では、垂直磁気記録による面記録密度170 Gbit/in<sup>2</sup> のデモンストレーションの報告もなされ[2]、最近では270 Gbit/in<sup>2</sup> 以上の報告もされるようになった[3]。このように、ハードディスク装置は垂直磁気記録の導入により、今後は面記録密度 1 Tbit/in<sup>2</sup> の実現に向けた開発が進むと期待される。しかし、記録密度 1 Tbit/in<sup>2</sup> の達成には、垂直磁気記録方式でも現行システムの延長では困難と予想され、新しい方式の付加が必要と考えられる。磁気記録での新規方式として、熱補助記録[4]やプローブ記録[5]、パターンドメディア方式が提案されている。これらの中で、パターンドメディア方式は現行の磁気記録システムに最も近く、垂直磁気記録の自然な発展形の最適方式の一つと成りうる。記録メディアとしてのパターンドメディアの提案は古く、1989年には中谷らにより特許が出願されている[6]。その後、1994年に S. Chou らにより面記録密度65 Gbit/in<sup>2</sup> の磁性ドットアレーが作製され[7]大きな注目を浴びるに至った。しかし、これらはリソグラフィー

技術の高精細性によって記録密度を高めることが本質であったため、その後の磁気記録技術の急速な進歩により達成記録密度という点では大きな優位性は見られなくなってしまった。しかし、面内記録メディアでの高密度化に伴う熱磁気緩和現象が問題にされ始め、S. H. Charap らにより記録密度の限界が数10 Gbit/in<sup>2</sup> 程度との予測もされ始めた[8]。このため、パターンドメディア方式が熱磁気緩和現象を乗り越える方式として R. L. White らにより再提案された[9]が、これはあくまでも面内磁気記録の延長として考えられていた。一方、同時期に、垂直磁気記録方式では記録メディアの飽和磁化と膜厚を相対的に大きくできるため、熱磁気緩和現象の点でも有利であることが指摘され[10]、その後、正にこの意味で従来方式を置き換えて実用化に至った。文献[9]以降に始まった、熱磁気緩和現象を意識したパターンドメディアの検討[11, 12]も初期は面内記録方式も同列に考えられていた。ここではパターンドメディア方式を、高密度化に伴う熱磁気緩和現象の抑制手法として垂直磁気記録方式の発展形と位置付け、次世代の高密度磁気記録方式として検討した。面記録密度 1 Tbit/in<sup>2</sup> を実現するためのパターンドメディアの設計と磁気特性を主にシミュレーション解析を用いて検討した。

## 2. 熱磁気安定性条件

連続膜型垂直磁気記録メディアの熱磁気安定性設計に従い[13]、パターンドメディアの熱磁気設計を行った。パターンドメディアでは、ビット単位となる各磁性ドットの中で最も磁化反転し易いものが熱磁気安定性条件を満たしている必要がある。Figure 1 に磁性ドットアレーの垂直方向 M-H ループを模式的に示す。個々の磁性ドットは、一軸異方性を持つ微細ドットであるので Stoner-Wohlfarth 型の矩形ループを持つ。しかし、

平成18年7月27日受付;平成18年10月25日受理

1 秋田県産業技術総合研究センター 高度技術研究所

〒010-1623 秋田市新屋町字砂奴寄 4-21

2 秋田県立大学システム科学技術学部

〒010-0055 由利本荘市土谷字海老ノ口84-4

1 Research Institute of Advanced Technology, Akita Prefectural R &amp; D Center

E-mail: n.honda@rdc.pref.akita.jp

2 Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University

ドットアレーでは磁性ドットの磁気異方性の分散とドット間の静磁気相互作用により磁化反転磁界が分散を持つため、集合体としてのループは傾きを持つ。このため、ループの傾きが大きくなるほど抗磁力  $H_c$  に比べ反転開始磁界  $H_n$  は小さくなり、また、飽和磁界  $H_s$  は大きな値となる。ここでは垂直磁気異方性を持つ磁性ドットの熱磁気安定性条件として、磁性ドットアレーの磁化反転開始磁界  $H_n$  を最も磁化反転し易い磁性ドットの実効的な磁気異方性磁界  $H_k^{\text{eff}}$  と見做し、飽和磁化  $M_s$  および体積  $V$  により磁化反転エネルギー  $E_m$  を、

$$E_m = (1/2)H_k^{\text{eff}} \cdot M_s \cdot V \sim (1/2) \cdot H_n \cdot M_s \cdot V \quad (1)$$

として磁性ドットの実効磁化反転エネルギーを見積もった。この  $E_m$  の熱擾乱エネルギー  $k_B T$  に対する比  $E_m/k_B T$  が60以上であれば30年以上の熱磁気安定性条件が満たされることになる。即ち、Sharrock の熱磁気緩和の式[14]に従えば、約30年間で  $10^7$  個の磁化反転、即ち経時によるエラーレートが  $10^7$  となると見積もられる条件である。なお、熱磁気安定性の議論では Figure 1 の M-H ループは無限小時間でのいわゆるゼロ時間特性と仮定する。また、磁化反転開始磁界  $H_n$  を熱磁気緩和を決定する実効磁気異方性磁界  $H_k^{\text{eff}}$  と直接見做せるのは  $H_n$  の  $H_c$  からの減少が磁化反転磁界の分散による場合だけである。しかし、静磁気相互作用による減磁界  $H_d$  による減少の場合には Sharrock の式に従えば、 $H_k^{\text{eff}} = H_c - H_d$  ではなく  $H_k^{\text{eff}} = H_c \cdot (1 - H_d/H_c)^2$  として  $H_k^{\text{eff}}$  を見積もる必要があるが、後述するようにパターンドメディア用磁性ドットの場合は  $H_d$  は  $H_c$  の10%程度以下なので誤差は最大でも-10%以下である。また、磁化反転が磁化の向きが揃った一斉磁化回転型でない場合も  $H_k^{\text{eff}}$  の見積り誤差の原因となるが、この場合も最も極端な非一斉磁化反転となる Victora らにより提唱された ECC 媒体[15]のようなハード・ソフト複合膜でも、ソフト層の異方性がハード層の異方性の1/2以上では誤差は+10%以下と見積もられる。した

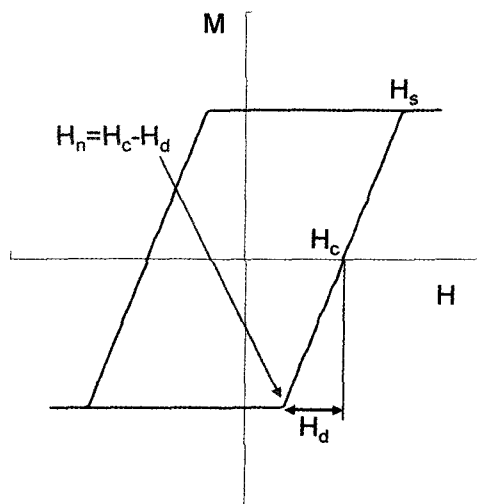


Figure 1 磁性ドットアレーの垂直方向 M-H ループと磁化反転開始磁界  $H_n$  と飽和磁界  $H_s$  の定義。  $H_d$  はドットの異方性分散とドット間の静磁気相互作用による見かけの減磁界を示す。

がって、式(1)による磁化反転エネルギーの見積もりは±10%以内の誤差であるといえる。これより、ドット寸法が  $7 \text{ nm} \times 7 \text{ nm}$ 、膜厚  $t$  が  $11 \text{ nm}$ 、 $M_s = 600 \text{ emu/cm}^3$  とした時、 $H_n = 15 \text{ kOe}$  が一つの解となる[16]。しかしこの場合、記録に必要な飽和磁界  $H_s$  は  $21 \text{ kOe}$  以上と見積もられ、狭トラックヘッドでの記録が困難となる。さらに、室温+50°Cとなる場合を想定すると、室温での熱擾乱エネルギー比は70以上とする必要があり、必要な  $H_n$  が大きくなって記録条件はより厳しくなる。

### 3. 必要記録磁界の低減

飽和磁界  $H_s$  を低減するため、グラニューラメディアと同様に、飽和磁化  $M_s$  による低減を検討した[13]。即ち、式(1)より飽和磁化  $M_s$  を高めることで、その分必要な  $H_n$  を低減でき、飽和磁界  $H_s$  の低減が期待できる。さらに、印加磁界の傾きによる飽和磁界の低減についても同時に検討した。ここでは各磁性ドットが一斉磁化回転する簡易なシミュレーションモデルを用いた。  $64 \times 64$  個の磁性ドットを2次元に  $25 \text{ nm}$  ピッチで配置し、垂直方向印加磁界に対する残留磁化曲線を求めた。残留磁化特性は、初期値を飽和負磁化とし、  $300 \text{ Oe}$  ステップで印加磁界をゼロから増加させ、各ステップで印加磁界をゼロとしたときの残留磁化を求め、印加磁界 vs 残留磁化の曲線として得た。 Figure 2 に残留磁化反転開始磁界  $H_{nr}$  と残留飽和磁界  $H_{sr}$ 、残留抗磁力 (スイッチング磁界)  $H_{cr}$  の定義を示す。シミュレーションは市販の Euxine Technology 社 ARM (Advanced Recording Model) を使い、計算領域境界の磁荷を除去したエネルギー平衡法により行った[17]。 Figure 3 に、ドット寸法を  $7 \text{ nm} \times 7 \text{ nm}$ 、膜厚  $t$  を  $9.9\text{--}11 \text{ nm}$  (必要な  $H_n$  を整数値で見積もったため、  $1 \text{ nm}$  ほどの範囲で図中に示したように  $M_s$  により膜厚  $t$  を若干調整してある) とし、飽和磁化を  $600$  から  $1200 \text{ emu/cm}^3$  まで増加した時の、異方性方向 (垂直方向,  $90^\circ$ ) 磁界印加での、熱磁気安定性条件  $E_m/k_B T > 60$  に必要な残留磁

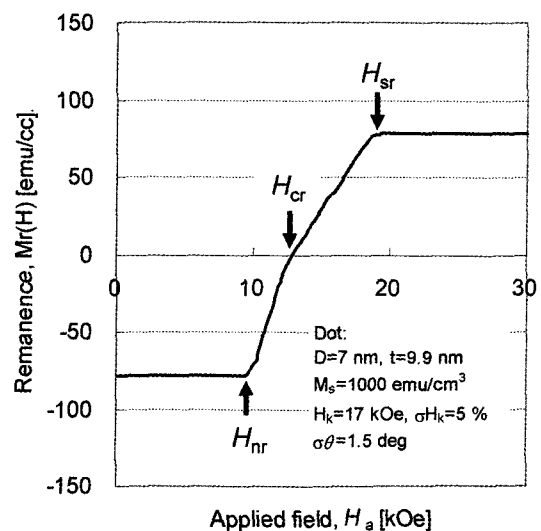


Figure 2 磁性ドットアレーの垂直方向残留磁化曲線のシミュレーション例と残留磁化反転開始磁界  $H_{nr}$ 、残留抗磁力 (スイッチング磁界)  $H_{cr}$ 、および残留飽和磁界  $H_{sr}$  の定義。

化反転開始磁界  $H_{nr}$  と残留飽和磁界  $H_{sr}$ 、残留抗磁力（スイッチング磁界） $H_{cr}$  の変化をシミュレーション解析した結果を示す。また、印加磁界方向を垂直方向から20度傾けて70度とした場合の残留磁化特性の変化も同図に示す。磁化反転を議論する場合は、印加磁界の影響のない残留磁化特性を用いた方が適しているため、以下では全て残留磁化特性を用いて検討した。ここでも時間依存性を考えないゼロ時間特性を仮定した。また、磁性ドットの下に5nmの空隙（非磁性中間層）を介して軟磁性裏打層を仮定したが、これは磁荷に対する鏡面として取り込んだ。Figure 3より、 $M_s=1000 \text{ emu/cm}^3$  とすることで、 $H_{nr}$  は10kOe程度まで低減でき、飽和磁界  $H_{sr}$  も18kOe程度に低減できると見積もられた。さらに、磁界を20度傾けることで飽

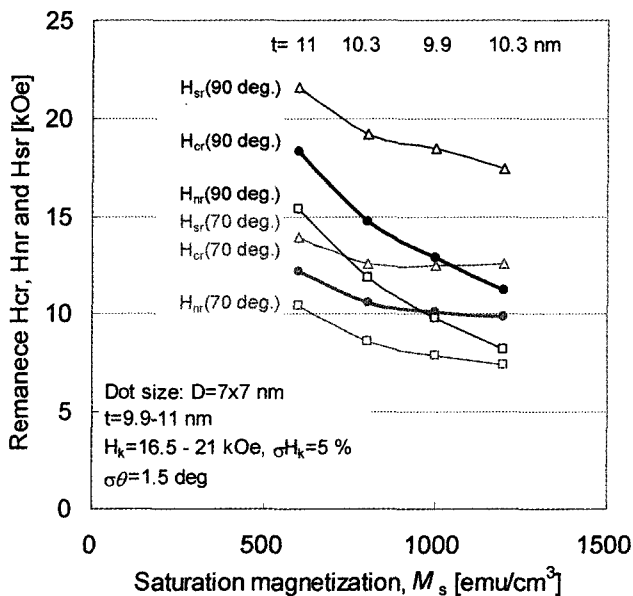


Figure 3 シミュレーション解析によるパターンドメディアの熱磁気安定性を保つための必要残留磁化特性 ( $H_{nr}$ ,  $H_{cr}$ ,  $H_{sr}$ ) の飽和磁化  $M_s$  依存性。印加磁界方向が垂直方向 ( $90^\circ$ ) と  $70^\circ$  の場合について示す。

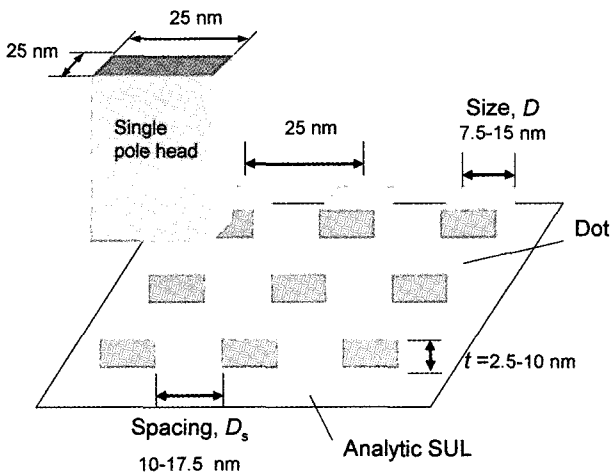


Figure 4 面記録密度  $1 \text{ Tbit/in}^2$  のパターンドメディアのドット寸法範囲。

和磁界  $H_{sr}$  を  $2/3$  程に低減できることが分かった。このような磁性ドットよりなる  $1 \text{ Tbit/in}^2$  パターンドメディアのモデル図を Figure 4 に示す。なお、ドット寸法を  $7.5 \text{ nm} \times 7.5 \text{ nm}$ 、膜厚を  $10 \text{ nm}$  として体積を増すことで室温での熱エネルギー比  $E_m/k_B T \sim 70$  とできる。また、ここで得られたパターンドメディアの磁気特性 ( $M_s$ ,  $H_k$ ) は FePt 規則合金 [18] や Co-Pt 基合金 [19] などの既存の磁性材料で容易に実現可能な値である。

#### 4. 磁性ドットアレーの磁気特性解析

##### 4.1. 要素分割解析モデル

磁性ドットのドット寸法や形状、ドット間スペーシング等による磁気特性の変化をマイクロマグネティックシミュレーションにより調べた。ここでは、ドット形状によるドット内での磁化分布の影響も考慮するため、各ドットを Figure 5 に示すような一辺  $5 \text{ nm}$  の立方体要素に分割し、各要素間に交換ステイフネス  $A$  が約  $1 \times 10^6 \text{ erg/cm}$  の交換結合 [20] を導入したシミュレーションモデルを用いた。ドット寸法  $D$  は  $10\text{-}160 \text{ nm}$ 、膜厚  $t$  は  $10$  および  $20 \text{ nm}$  の場合について調べた。各要素には  $\sigma H_k = 15\%$  の結晶異方性磁界  $H_k$  分散と垂直方向から  $\sigma\theta = 2^\circ$  の角度分散を入れた。本モデルでは、非一斉磁化回転モードが考慮されるが、計算は静的なエネルギー平衡法を用いた。このため温度や時間の効果は入っていない。また、軟磁性裏打膜 (SUL) は、磁性ドットとの間に  $5 \text{ nm}$  の非磁性中間層を仮定し、磁荷に対する解析的な鏡面として取り込んだ。

##### 4.2. ドット寸法と異方性磁界

ドット間のスペーシング  $D_s$  を  $30 \text{ nm}$  一定とし、 $320 \text{ nm} \times 320 \text{ nm}$  の正方領域に要素分割した  $2 \times 2$  個以上 ( $160 \text{ nm}$  のドットについては  $1$  個) のドットを配置したときの、ドットアレーの残留磁化抗磁力  $H_{cr}$  の正方ドット寸法依存性を Figure 6 に示す。同図にはドット膜厚が  $20 \text{ nm}$  と  $10 \text{ nm}$  の場合、および膜厚  $20 \text{ nm}$  で一斉磁化回転モデルで解析した場合の 3 種類について示す。ここでは飽和磁化  $M_s$  は  $900 \text{ emu/cm}^3$  とした。結晶異方性磁界  $H_k$  は  $12 \text{ kOe}$  であるが、ドット形状が扁平な場合には  $H_k$  に比べて  $H_{cr}$  が非常に小さい。これは扁平ドットでは形状異方性が結晶異方性を減少させているためである。ドット寸法が膜厚と等しくなると  $H_{cr}$  は  $H_k$  とほぼ等しくなり、それ以下では逆に  $H_{cr} > H_k$  となる。これは垂直方向の形状異方性の寄与が負から正に変化するためである。また、ドット寸法が大きな場合には、Figure 7 に示すように残留磁化状態で複磁区構造を

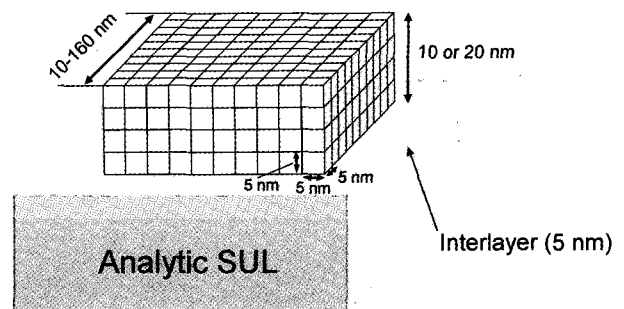


Figure 5 磁気特性のシミュレーション解析に用いた磁性ドットのモデル図。

示したが、100 nm 以下のドットでは単磁区構造であった。Figure 6 に見られるように、ドット寸法が小さくなると  $H_{cr}$  は増加するが、寸法対膜厚比  $D/t < 3/2$  では一斉磁化回転モデルと同じ抗磁力となった。即ち、磁化反転が一斉磁化回転モードに近くなると考えられる。膜厚10 nm で、ドット寸法が120 nm の場合でも、印加磁界角度が  $60^\circ$  より大きい場合（垂直方向より  $30^\circ$  以内）には、単磁区構造のまま磁化反転をし、 $H_{sw} = H_{cr}$  は  $45^\circ$  で最小値となる S-W 型の印加磁界角度依存性を示した。これは磁化反転モードが各ドット内での核形成に支配されていると解釈できる [21]。また、得られた残留抗磁力  $H_{cr}$  は垂直異方性磁界  $H_k$  よりも、ほぼ形状異方性磁界分小さくなっている。このため、パターンドメディアでは磁性ドットの形状によっても熱磁気安定性に必要な結晶磁気異方性の大きさが異なる。

#### 4. 3. ドット形状とスペーシング

加工によるドットの形状変化の影響を調べるため、ドットの側面形状を変えた場合の残留磁化抗磁力の変化を調べた。

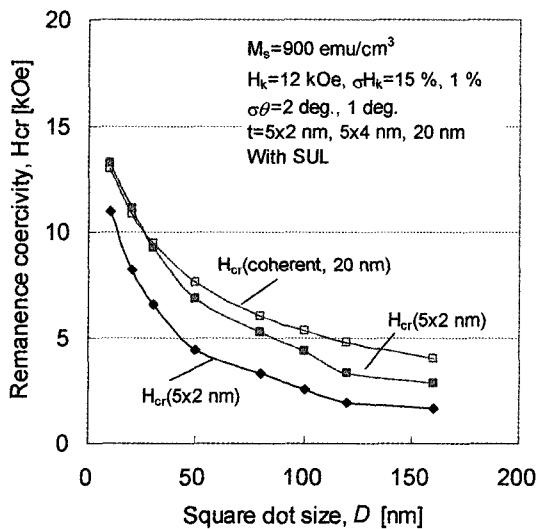


Figure 6 シミュレーション解析による磁性ドットアレーの残留抗磁力  $H_{cr}$  のドット寸法  $D$  依存性。ドット膜厚が10 nm と20 nm の場合、および、膜厚20 nm で一斉磁化回転の場合について示す。

Figure 8 に一辺が50 nm のドットを640 nm × 640 nm の正方領域にドット間スペーシングが50 nm で  $6 \times 6$  個配置してシミュレーション解析した結果を示す。挿図に示すような、ピラミッド状の端面形状の変化に対して残留磁化抗磁力  $H_{cr}$  は大きく変化した。高さが20 nm の場合は、ドットの側面傾斜が小さくなると抗磁力  $H_{cr}$  は低下したが、これは垂直方向の形状異方性が小さくなるためとして解釈できる。ドット高さが10 nm の場合は反磁界係数が大きいため、端面形状の影響が小さい。同図に見られる10 nm ドットでの端面形状による  $H_{cr}$  の若干の増加は誤差範囲と考えられる。

Figure 9 にドット間スペーシングの変化による残留磁化特性、 $H_{cr}$ ,  $H_{sw}$ ,  $H_{cr}$  の変化を、膜厚  $t$  が20 nm と10 nm の一辺が50 nm の正方ドットおよび高さ20 nm のピラミッド形状について示す。640 nm × 640 nm の正方領域に、ドット間スペーシングにより異なるが、 $5 \times 5$  個以上のドットを配置して計算した。図ではドットアレーの残留磁化特性のそれぞれをスペーシングが80 nm の値で規格化して示す。いずれの形状でもドット間スペーシングが膜厚程度以下となると  $H_{cr}$  の低下が若干見られるが、規格化した場合にはほぼ同じスペーシング依存性を示す。

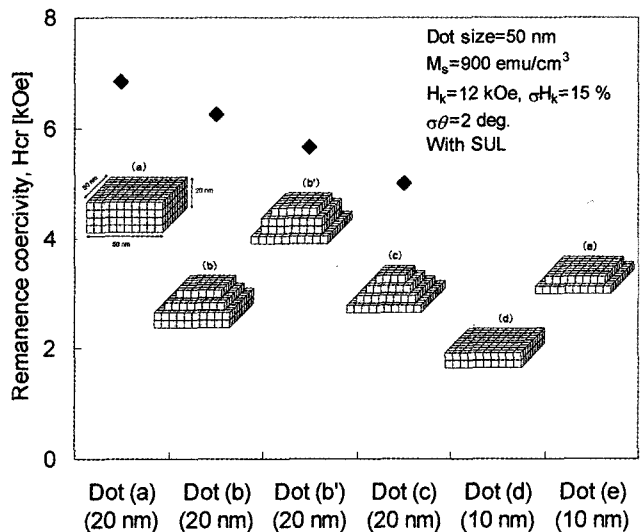


Figure 8 残留抗磁力  $H_{cr}$  の磁性ドット形状、膜厚による違い。

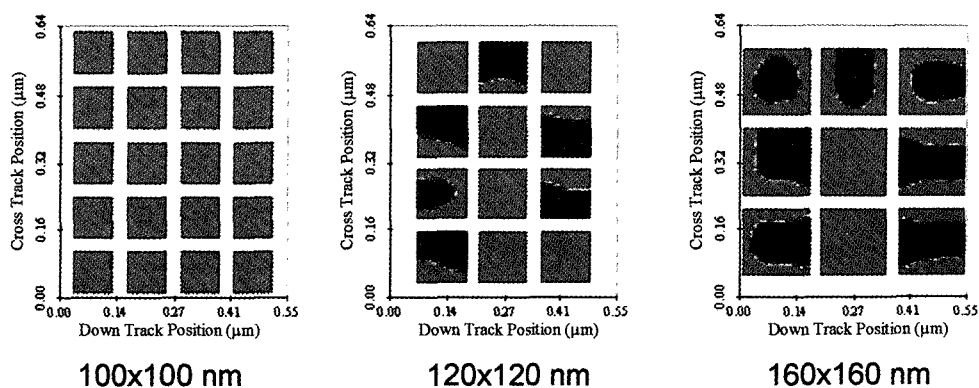


Figure 7 残留磁区構造のドット寸法による違い。

しかし、磁化反転開始磁界  $H_{nr}$  ではスペーシングの低下による減少が、また、飽和磁界  $H_{sr}$  では増加が顕著となる。これは、ドット間の静磁気相互作用によるものであるが、ドット間のスペーシングが小さくなると熱減磁し易く、かつ記録し難くなることを示しており、記録メディアとしては好ましくない特性変化である。ドット間のスペーシングの低減は、縦横方向とも減少する場合にはおよそ膜厚程度まで、また、一方向（例えばトラック長手方向）では膜厚の1/2程度までが一つの限界といえる。これはパターンドメディアの高密度化に大きな制約条件となる可能性がある。なお、Figure 9 に示すように、端面が傾斜したピラミッド形状ドットでは、形状異方性による抗磁力の低下が若干大きい代わりに、ドット間スペーシングの影響は相対的に小さくなるのがわかった。これは、加工により角が丸くなった磁性ドットでは、丸みを帯びている分ドット間の見かけの距離が大きくなりドット間の静磁気相互作用が減少するためと考えられる。ピラミッド状あるいは半球状の磁性ドットでは直方ドットに比べ、必要な結晶磁気異方性は少し大きくなるが、若干高密度な配置が可能になるといえる。

## 5. 記録シミュレーション

ドット周期を25 nm として1 Tbit/in<sup>2</sup> の面記録密度となる正方ドットパターンについて、単磁極型ヘッドによる記録をシミュレーションにより検討した。ヘッド磁界は先端が25 nm 角の磁極面となる Karlqvist 型の磁界（磁極先端面に磁荷が均一に分布）を用いた。用いた記録磁界の垂直成分  $H_y$  の分布を Figure 10 に示す。磁界勾配  $dH_y/dx$  が現実的な300~400 Oe/nm となるように、ヘッド/SUL 間スペーシングを25 nm と大き目に設定した。このため記録磁界  $H_y$  の半値幅は42.5 nm と広がり大きなヘッド磁界となった。

磁性ドットは寸法が7.5~17.5 nm の正方柱ドットとし、寸法によって体積が大きく変わらないように膜厚を設定し、かつ、体積に反比例して磁化反転開始磁界  $H_m$  を調節して熱減磁に対する磁気エネルギーが一定となるようにした。検討したドットの寸法と磁気特性を Table 1 に示す。同表に示すように、各ドットを一辺が2.5 nm の立方体要素で分割し、記録のシミュレーションを行った。この場合も各要素には  $A \sim 1 \times 10^6$  erg/cm の交換結合と15%の異方性磁界  $H_k$  分散、2°の角度分散を仮定した。

各25個のドットよりなる3本のトラックの中央トラックへ1 Tbit/in<sup>2</sup> の記録を行った時の記録パターンの一例を Figure 11 に示す。同図では Table 1 の M-1メディアの場合について示す。この磁性ドットアレーの飽和磁界  $H_s$  は18 kOe であるが、記録ヘッドの垂直磁界成分の最大値は13 kOe ほどである。記録磁界の傾きにより、小さな記録磁界で磁化反転が可能であることを示している。ただし、記録磁界の傾きは記録ヘッドの構造に大きく依存する。また、できるだけ大きな磁界勾配であることが望ましいので、現実的には飽和磁界近くの記録磁界が必要となる。同図では中央トラックのドット磁化が順番に反転しており、シミュレーション上は1 Tbit/in<sup>2</sup> の記録が実現可能であることを示している。パターンドメディアでは記録時のヘッド磁界とパターン周期との同期が必要である。そこで、記録時のヘッド磁界の反転位置をドット位置に対してトラック長手方向へシフトさせたときの記録磁化のエラーレート（25ビット記録に対するエラービット数の比）を調べた。結果を Figure 12 に示す。なお、記録点は記録磁界強度とメディアの磁気特性によりずれるので、横軸の反転位置は相対値としての意味しか持

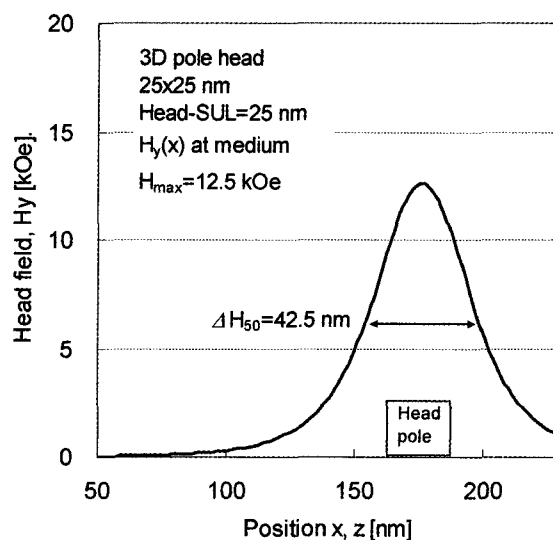


Figure 10 記録のシミュレーションに用いた Karlqvist 型単磁極ヘッドの磁界分布。

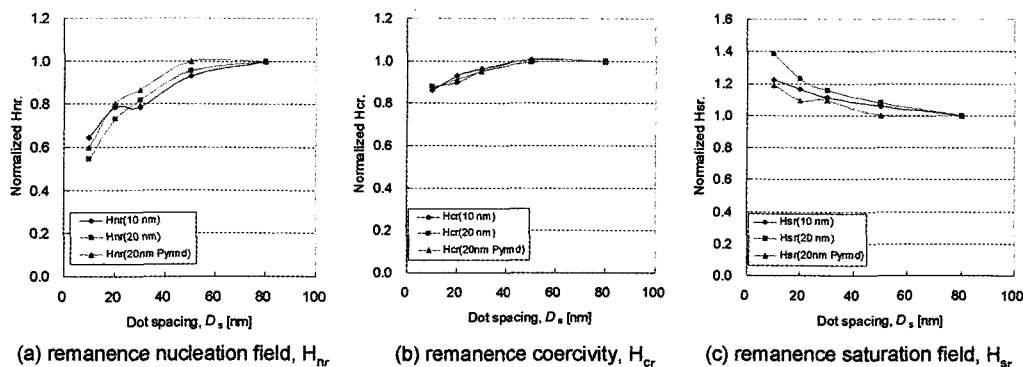
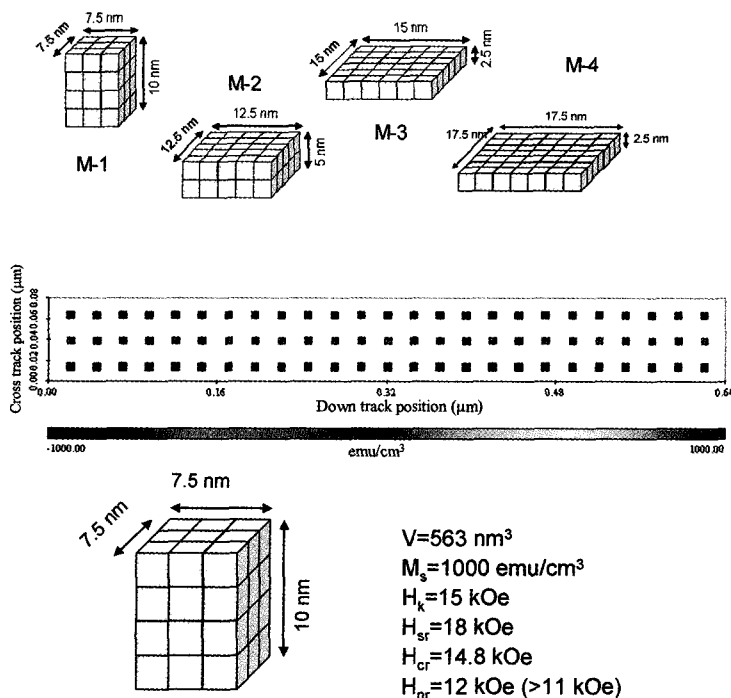
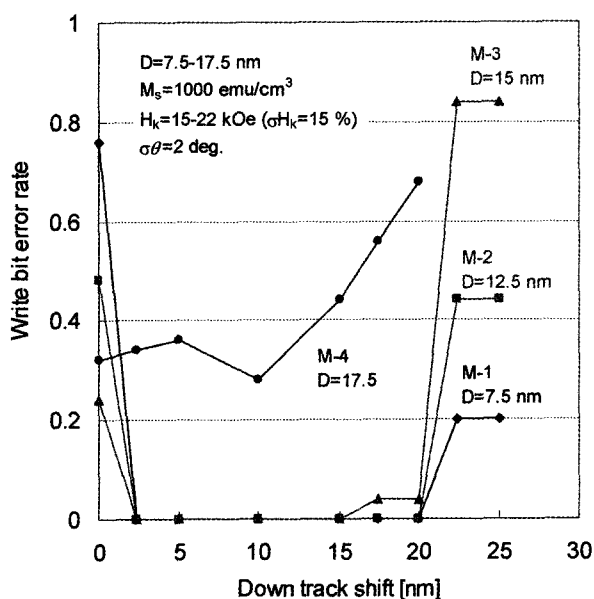


Figure 9 膜厚、形状が異なる磁性ドットの規格化残留磁化特性 ( $H_{nr}$ ,  $H_{cr}$ ,  $H_{sr}$ ) のドット間スペーシング依存性。ドット間スペーシング80 nm の各値で規格化した。

Table 1 記録のシミュレーションに用いたパターンドメディアのドット寸法と磁気特性。

Media	D [nm]	t [nm]	Volume [nm <sup>3</sup> ]	H <sub>k</sub> [kOe]	H <sub>nr</sub> [kOe]	H <sub>cr</sub> [kOe]	H <sub>sr</sub> [kOe]
M-1	7.5	10	563	15	12.0	14.8	18.0
M-2	12.5	5	781	15	8.4	9.9	12.0
M-3	15	2.5	563	22	11.4	13.2	15.0
M-4	17.5	2.5	766	19	8.4	9.9	11.7

Figure 11 シミュレーションによる1 Tbit/in<sup>2</sup>記録の残留磁化パターンの一例。ドット寸法D=7.5 nmのM-1メディアへの記録を示す。Figure 12 面密度1 Tbit/in<sup>2</sup>記録における記録エラー率の記録磁界反転位置のトラック長手方向シフト量依存性。ドット寸法が7.5-17.5 nmの正方形パターンドメディアについて示す。原点はシミュレーションでの記録磁界の反転設定のゼロ点を示すが、記録点がドットの磁気特性と記録磁界強度でずれるので横軸は相対的な意味しか持たない。

たない。ドット寸法が小さい場合には15 nmのウィンドウ幅（エラーがゼロとなる範囲）があるが、ドット周期の半分よりも大きな寸法になるとウィンドウ幅が小さくなる。ウィンドウ幅の最大値はドット周期に等しい25 nmなので、記録磁界の勾配とドットの磁化反転磁界分布により10 nmほど狭くなっていると考えられる。ドット寸法が17.5 nmの場合にはエラーゼロとなる反転位置は得られなかった。同図よりパターンドメディアでは十分な記録ウィンドウ幅を得るためには、ドット寸法をドット周期の半分程度以下とする必要があるといえる。このように、パターンドメディアでは記録面からも磁性ドット間のスペーシングに大きな制約があり、1 Tbit/in<sup>2</sup>の面記録密度ではドット寸法は12.5 nm程度以下とすべきと見積もられる。

## 6. まとめ

面記録密度1 Tbit/in<sup>2</sup>を実現するためのパターンド磁気記録メディアの設計を行った。磁化反転開始磁界H<sub>n</sub>と飽和磁化M<sub>s</sub>、およびドットの体積Vを用いて実効的な磁気エネルギーを見積り、熱磁気安定性条件を与えた。記録磁界を小さくするには、飽和磁化M<sub>s</sub>を大きくすること、傾斜した記録磁界を使うことが効果的である。得られた仕様の磁気特性は、Co-Pt合金やFePt等の既存の磁性材料で十分満足できることが分かった。磁化反転のマイクロマグネティックシミュレーションにより、寸法対膜厚比が3/2程度以下では一斉磁化回転と見做せるこ

と、ドットの側面形状は抗磁力に影響を与えること、また、ドット間のスペーシングの減少は、磁化反転開始磁界  $H_0$  の低下と記録磁界の増大をまねくことが分かった。記録のシミュレーションより、1Tbit/in<sup>2</sup> 相当のドットアレーへの記録の可能性を得たが、ドット寸法はドット周期の半分程度以下とすべきことが分かった。このように設計されたパターンドメディアを用いることで1Tbit/in<sup>2</sup> の記録が実現できると期待される。

## 謝辞

日頃ご指導いただき、岩崎俊一東北工業大学学長に深謝いたします。また、討論いただいたAIT（秋田県産業技術総合研究センター高度技術研究所）研究員の皆様に感謝いたします。本研究の一部はJST秋田県地域結集型共同研究事業「次世代磁気記録技術と脳医療応用技術開発」および文部科学省科学技術振興調整費事業「ナノ界面制御による磁気記録材料の創製」の一環として行われた。

## 参考文献

- [1] S. Iwasaki and Y. Nakamura, "An analysis of the magnetization mode for high density magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 13, no. 5, pp. 1272-1277 (1977)
- [2] M. H. Kryder and R. Gustafson, "High-density perpendicular recording—advances, issues and extensibility," *J. Magn. Magn. Mat.*, vol. 287, pp. 449-458 (2005)
- [3] S. Mao, Y. Chen, F. Liu, X. Chen, B. Xu, P. Lu, M. Patwari, H. Xi, C. Chang, B. Miller, D. Menard, B. Pant, J. Loven, K. Duxstad, S. Li, Z. Zhang, A. Johnston, R. Lamberton, M. Gubbins, T. McLaughlin, J. Gadbois, J. Ding, B. Cross, S. Xue, and P. Ryan, "Commercial TMR Heads for Hard Disk Drives: Characterization and Extendibility at 300 Gbit/in<sup>2</sup>," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 2, pp. 97-102 (2006)
- [4] S. R. Cumpson, P. Hidding, and R. Coehoorn, "A Hybrid Recording Method Using Thermally Assisted Writing and Flux Sensitive Detection," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, pp. 2271-2275 (2000)
- [5] T. Ohkubo, J. Kishigami, K. Yanagisawa, R. Kaneko, "Reduced-area Magnetic Bit Recording and Detection Using Magnetic Force Microscopy Based on application of Bidirectional Magnetomotive Force," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, pp. 4086-4088 (1993)
- [6] I. Nakatani, T. Takahashi, M. Hijikata, T. Furubayashi, K. Ozawa and H. Hanaoka, Japan patent 1888363, publication JP03-022211A (1991)
- [7] S. Y. Chou, M. S. Wei, P. R. Krauss and P. B. Fischer, "Single-domain magnetic pillar array of 35 nm diameter and 65 Gbits/in<sup>2</sup> density for ultrahigh density quantum magnetic storage," *J. Appl. Phys.*, vol. 76, pp. 6673-6675 (1994)
- [8] S. H. Charap, Pu-Ling Lu, and Yanjun He, "Thermal Stability of Recorded Information at High Densities," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 1, pp. 978-983 (1997)
- [9] Robert L. White, Richard M. H. New, and R. Fabian W. Pease, "Patterned Media: A Viable Route to 50 Gbit/in<sup>2</sup> and Up for Magnetic Recording?," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 1, pp. 990-995 (1997)
- [10] S. Iwasaki, K. Ouchi, and N. Honda, "Gbit/in<sup>2</sup> Perpendicular Recording Using Double Layer Medium and MIG Head," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, no. 5, pp. 3795-3800 (1996)
- [11] B. D. Terris, L. Folks, D. Weller, J. E. E. Baglin, A. J. Kellock, H. Rothuizen and P. Vettiger, "Ion-beam patterning of magnetic films using stencil masks," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, pp. 403-405 (1999)
- [12] C. A. Ross, H. I. Smith, T. Savas, M. Schattensburg, M. Farhoud, M. Hwang, M. Walsh, M. C. Abraham and R. J. Ram, "Fabrication of patterned media for high density magnetic storage," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 17, pp. 3168-3176 (1999)
- [13] N. Honda, K. Ouchi, and S. Iwasaki, "Design Consideration of Ultrahigh-Density Perpendicular Magnetic Recording Media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, pp. 1615-1621 (2002)
- [14] M. P. Sharrock, "Time-dependent Magnetic Phenomena and Particle-size Effects in Recording Media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 26, pp. 193-197 (1990)
- [15] R. H. Victora and X. Shen, "Composite Media for Perpendicular Magnetic Recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 2, pp. 537-542 (2005)
- [16] 本多直樹, 「垂直磁気記録の将来」, 信学技報, MR2004-31, pp. 31-37 (2004)
- [17] J. R. Hoinville, "Micromagnetic modeling of soft magnetic underlayers for perpendicular recording," *J. Appl. Phys.*, vol. 91, pp. 8010-8012 (2002)
- [18] T. Suzuki, N. Honda and K. Ouchi, "Preparation and Magnetic Properties of Sputter-Deposited Fe-Pt Thin Films with Perpendicular Anisotropy," *J. Magn. Soc. Japan*, vol. 21-S2, pp. 177-180 (1997)
- [19] T. Shimatsu, H. Sato, T. Oikawa, Y. Inaba, O. Kitakami, S. Okamoto, H. Aoi, H. Muraoka and Y. Nakamura, "High Perpendicular Magnetic Anisotropy of CoPtCr/Ru Films for Granular-Type Perpendicular Media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, pp. 2483-2485 (2004)
- [20] 太田恵造, 「磁気工学の基礎 II」, 第6章, 共立出版(1977)
- [21] G. Hu, T. Thomson, C. T. Rettner, and B. D. Terris, "Rotation and Wall Propagation in Multidomain Co/Pd Islands," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, pp. 3589-3591 (2005)