

熱アシスト磁気記録における媒体特性および情報安定性



平成 23 年度

三重大学 大学院工学研究科 物理工学専攻
北山 達哉

目次

1.	序論	1
1.1	序	1
1.2	磁気記録	1
1.2.1	データと磁化	1
1.2.2	グラニューラー媒体	4
1.2.3	熱アシスト磁気記録	6
1.2.4	ビットパターンド媒体	7
1.3	本研究の目的	8
2.	媒体特性	9
2.1	序	9
2.2	本研究の特徴	9
2.3	計算方法	9
2.3.1	分子場近似	9
2.3.2	磁気異方性エネルギー	11
2.4	計算条件	12
2.4.1	媒体条件	12
2.4.2	2 Tbps	13
2.4.3	4 Tbps	15
2.4.4	6 Tbps	16
2.4.5	熱的安定性	17
2.5	計算アルゴリズム	20
2.6	計算結果	21
2.6.1	2 Tbps	21
2.6.2	4 Tbps	23
2.6.3	6 Tbps	24
2.6.4	まとめ	24
3.	情報安定性	26

3.1	序	26
3.2	ビットエラーレート	26
3.3	誤り訂正符号	27
3.4	ボックス=ミュラー法	27
3.5	計算方法および計算条件	28
3.5.1	媒体条件	28
3.5.2	磁性微粒子 1 個あたりのエラー確率	29
3.5.3	ビットエラーレートの計算方法	30
3.5.4	計算誤差の許容	33
3.6	計算結果	34
3.6.1	1 ビットあたりの粒子数依存	34
3.6.2	熱揺らぎ指標依存	35
3.6.3	粒子サイズの標準偏差依存	35
3.6.4	ビットパターンと媒体の情報安定性	36
3.6.5	まとめ	38
4.	総括	40
	謝辞	42
	参考文献	43
	論文目録	44

1. 序論

1.1 序

IT 社会の発展は目覚ましく、最近ではスマートフォン（高機能携帯電話）やクラウドコンピューティングサービスの普及などにより人々は大量の情報を簡単に扱うことができるようになった。我々の生活は便利になっているが、それに伴いデジタル情報量もますます増加している。現在、人類が有するデジタル情報は 10^{21} Byte 以上にもなる¹⁾。この莫大な情報を扱うためデータセンタが世界中に数多く建設されている。

2006 年、アメリカのデータセンタで消費された電力量は 610 億 kWh であった。これはアメリカの全消費電力の 1.5 % にも及ぶ²⁾。このように、データセンタは大量の電力を消費しており、近年問題となっている。また、データセンタのサーバには記録容量あたりのコストの低さからハードディスクドライブ (Hard Disk Drive, HDD) が用いられている。

HDD の大容量化、すなわち HDD に用いられている記録媒体の高密度化は、同容量のサーバにおいて HDD の台数削減を実現する。つまり、磁気記録における記録密度の向上は消費電力を大きく低下させ、エネルギーや資源の節約にもなる。

HDD は 50 年余りの歴史を持ち、その記録密度は様々な限界説をブレイクスルー技術の導入により打開し 1 億倍にまで向上させてきたが、その結果、熱揺らぎ問題という本質的な問題に直面することとなった³⁾。これを解決するため熱アシスト磁気記録やビットパターンド媒体などが提案され、研究が続けられている。

1.2 磁気記録

1.2.1 データと磁化

磁気記録では、図 1-1 のように 1 ビットの領域における磁化の方向のパターンによって 0, 1 の 2 進数のデータを保存している。

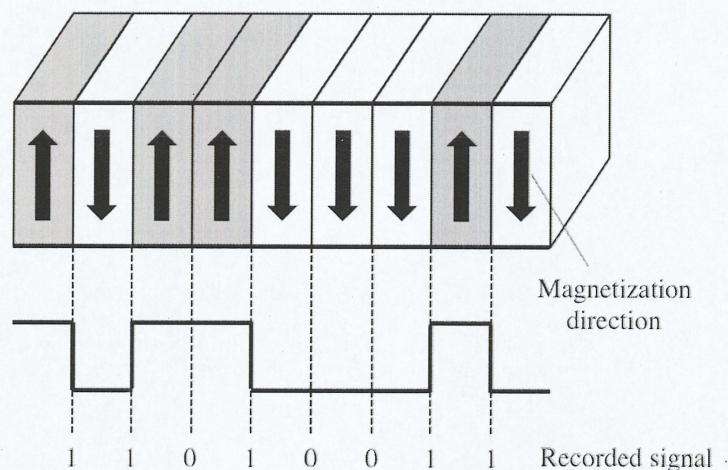


図 1-1 記録信号と磁化方向

情報の記録には図 1-2 のような単磁極型の磁気ヘッドが用いられている。この磁気ヘッドは主磁極、補助極、コイルで構成されており、補助極に比べ主磁極を小さくすることで、補助極よりも高い磁束密度で主磁極から磁界を発生させる。また、軟磁性裏打ち層 (Soft Under Layer, SUL) を記録層の下に設けることで、より強い磁界を発生させることができる。再生には GMR ヘッドや TMR ヘッドを用いており、これらは媒体表面から漏れる磁界の向きにより電気抵抗が変化する現象 (磁気抵抗効果) を利用して 0, 1 のデータを読み取っている。

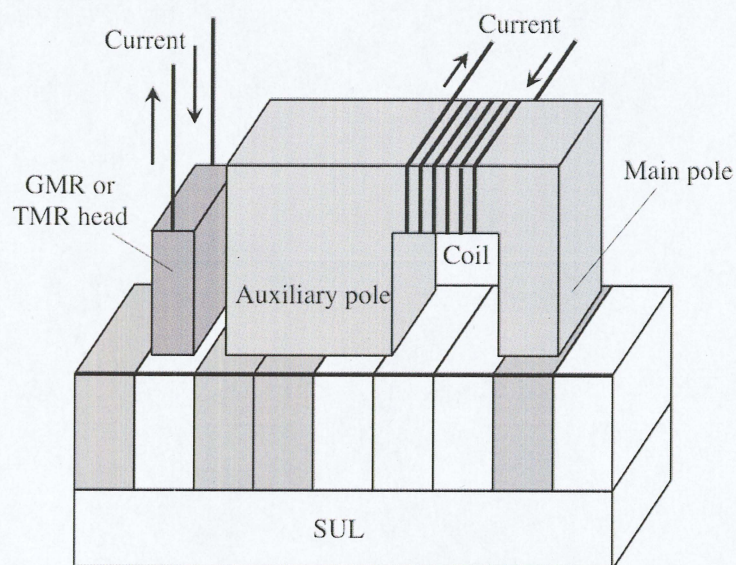
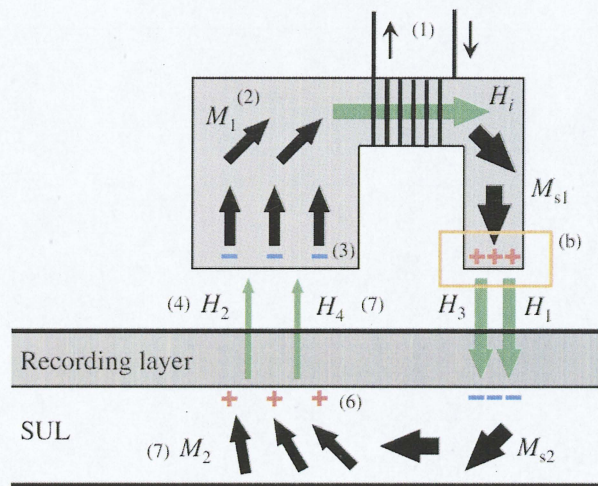
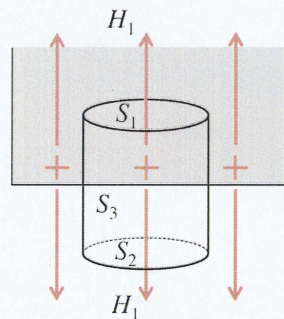


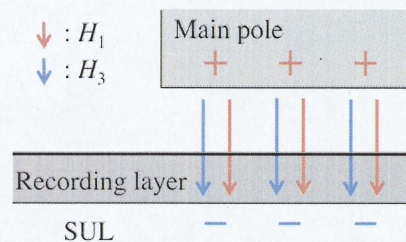
図 1-2 単磁極ヘッド



(a)



(b)



(c)

図 1-3 ヘッド磁界発生のプロセス

図 1-3 は単磁極ヘッドによる記録磁界を発生させるプロセスの概略図である。図 1-3 (a) のように、まず、コイルに電流を流すことで磁界 H_i を発生させる (1)。するとヘッドの軟磁性材料の磁化 M_{s1} 、 M_1 が整列する (2)。ここで、主磁極側の磁化が飽和している場合でも、補助極側は断面積が大きいため飽和しない。ヘッドの磁化が整列することにより、主磁極と補助極の表面に磁極が現れる (3)。すると、それぞれの磁極から磁界 H_1 、 H_2 が発生する (4)。 H_1 、 H_2 により、SUL の磁化 M_{s2} 、 M_2 が整列する (5)。 M_{s2} 、 M_2 が整列することで SUL 表面にも磁極が現れる (6)。この磁極が磁界 H_3 、 H_4 を発生させる (7)。このように、主磁極側では、ヘッドの軟磁性材料が発生させる磁界 H_1 と、SUL が発生させる磁界 H_3 の和として強いヘッド磁界を発生させることができる。主磁極側と補助極側に現れるそれぞれの磁極の数

は等しいので、断面積を大きくする分だけ補助極側に発生する磁界 H_2 , H_4 を弱くすることができ、記録された情報への影響を小さくすることができる。図 1-3 (b) は主磁極の表面付近を表したものである。図のような全表面積が S の円筒を考えると、ガウスの法則は

$$\int_S H_{1\perp} ds = 4\pi m \quad (1-1)$$

となる。ここで $H_{1\perp}$ は H_1 の曲面に対して垂直な成分、 ds は微小面積、 m は円筒内の全磁極である。主磁極表面は円筒の面積に対して十分に大きい、無限平面であると仮定すると、対称性から、 S_1 と S_2 およびそれらを貫く $H_{1\perp}$ は等しく、 H_1 は主磁極表面に対する垂直成分しかないので、

$$\begin{aligned} \int_S H_1 ds &= \int_{S_1} H_1 ds + \int_{S_2} H_1 ds + \int_{S_3} H_1 ds \\ &= 2 \int_{S_1} H_1 ds + 0 \\ &= 2H_1 S_1 \end{aligned}$$

となり、 $4\pi m = 4\pi M_{s1} S_1$ なので

$$H_1 = 2\pi M_{s1} \quad (1-2)$$

が得られる。同様に

$$H_3 = 2\pi M_{s2} \quad (1-3)$$

も得られ、記録層を貫く磁界は図 1-3 (c) に示すように H_1 と、 H_3 の和

$$H_1 + H_3 = 2\pi (M_{s1} + M_{s2}) \quad (1-4)$$

となる。このように、ヘッド磁界の大きさはヘッドの軟磁性材料および SUL の磁化 M_{s1} , M_{s2} に依存する。つまり、ヘッド磁界は上限をもつ。

1.2.2 グラニューラー媒体

HDD の記録媒体にはグラニューラー媒体が用いられており、強磁性である磁性微粒子が図 1-4 のように並んで非磁性体に囲まれた不連続媒体で構成されている。磁性微粒子は単磁区構造で、微粒子間では相互作用は働かないようにしてある。1 ビット分の情報は複数の磁性微粒子が担っている。図の磁性微粒子の色と矢印は磁化の方向を示している。

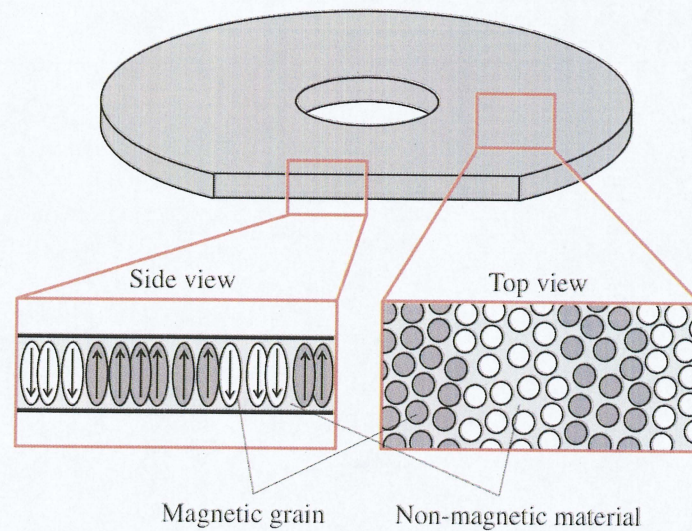


図 1-4 グラニューラー媒体

高密度化のためには磁性微粒子を小さくしなければならない。これは、グラニューラー媒体であるので、図 1-5 のように 1 ビットの領域を小さくするとともに領域境界の凹凸も小さくしなければならないためである。

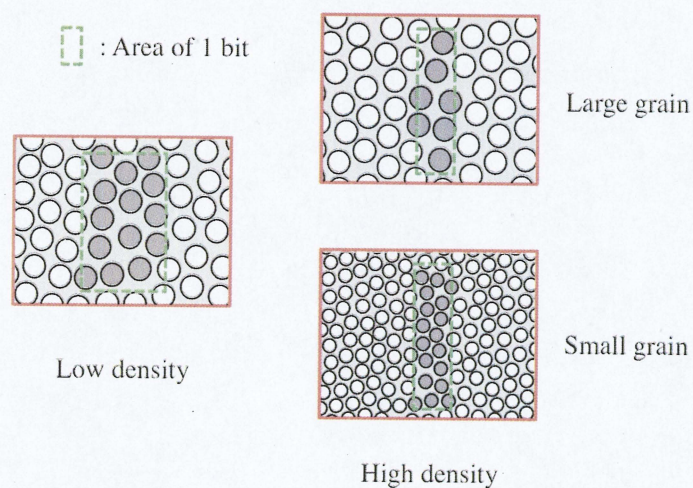


図 1-5 高密度化と粒子サイズ

記録された情報の安定性を示す熱揺らぎ指標は磁性微粒子の磁化の方向を保とうとする磁気的エネルギーと磁化の方向を乱そうとする熱的エネルギーの比

$$\frac{K_u V}{kT} \quad (1-5)$$

と表すことができる。ここで、 K_u は磁性微粒子の磁気異方性エネルギー、 V は磁性微粒子 1 個の体積、 k は Boltzmann 定数、 T は絶対温度である。この値が大きいほど記録されている情報は熱的に安定していると言える。記録密度向上のために V を小さくすると (1-5) 式は小さくなる。(1-5) 式が小さすぎると室温でも磁化の方向が安定せず、情報が失われてしまう熱揺らぎ問題が発生してしまう。また、 V の大きさを保つために膜厚を厚くしようとすると、媒体作製時に微粒子同士が接してしまいグラニュー媒体にならない。つまり、十分な大きさの熱的安定性を保つためには V を小さくすると同時に K_u を大きくしなければならない。しかし、1.2.1 項で説明したように情報を記録するため磁気ヘッドが発生させる磁界の大きさには上限があり、そのヘッド磁界は磁性微粒子の保磁力 $H_c(\propto K_u)$ よりも大きくなければ記録することができない。つまり、 K_u にも上限がある。このように、磁性微粒子を小さくする、十分な熱的安定性を保つ、保磁力を大きくしすぎない、という記録密度向上のための三要素を同時に成立させることが難しく、この磁気記録のトリレンマが記録密度向上のための重要な課題となっている⁴⁾。この問題を解決するために、熱アシスト磁気記録やビットパターン媒体が提案されている。

1.2.3 熱アシスト磁気記録

熱アシスト磁気記録 (Thermally Assisted Magnetic Recording, TAMR) では記録時に媒体をレーザー光により加熱しながらヘッド磁界を印加する。加熱された微小エリアでは図 1-6 のように保磁力 H_c が低下するので、室温ではヘッド磁界よりも大きな保磁力 H_c を持つ媒体でも容易に記録が可能となる。そのため、(1-5) 式において V を小さくしても $K_u(\propto H_c)$ を大きくすることができるので、記録密度向上に有効な記録方式であるといえる。

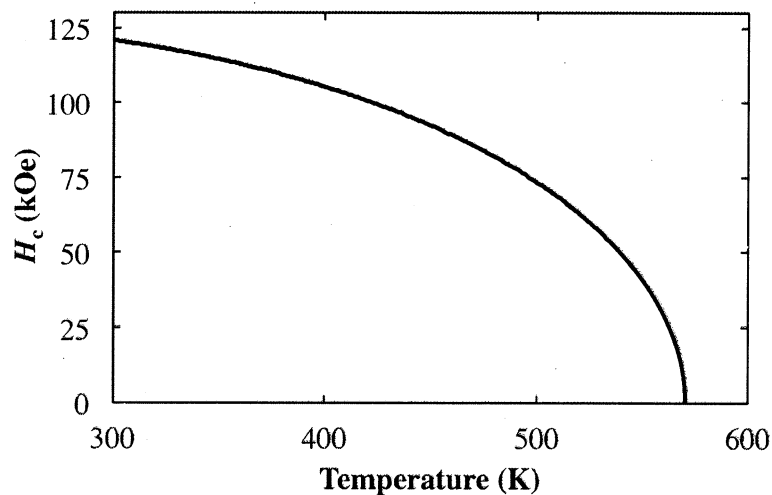


図 1-6 加熱と保磁力

しかし、TAMR では、一時的にはあるが媒体を加熱することにより記録領域周辺の磁性微粒子においても (1-5) 式の T が高くなり熱的安定性が低下してしまう問題が指摘されているが^{5,7)}、媒体に必要なとされる特性に関する研究は少ない。

また、TAMR では加熱により保磁力を下げて書き込みを行うため常温での磁気異方性エネルギー K_u の大きさに制限はないが、 K_u が大きいほど媒体の作製が難しくなる。そのため 1 ビット分の情報を記録する磁性微粒子の数を少なくすることで、1 ビット分の面積を小さくし、記録密度を向上させようとする傾向がある。

なお、TAMR の記録方式には、TG (Thermal Gradient)、FG (Field Gradient) および DG (Dual Gradient) があるが⁸⁾、本研究では TG を考える。

1.2.4 ビットパターンド媒体

グラニュー媒体では複数の磁性微粒子が 1 ビット分の情報を担っているが、ビットパターンド媒体 (Bit Patterned Media, BPM) では図 1-7 のように磁性材料を 1 ビット分の領域に規則正しく配列させる。1 ビットあたりの磁性微粒子数 n を少なくする傾向にある中で、グラニュー媒体では $n=4$ 程度まで減らすことができても、最少である $n=1$ にすることは期待できないが、BPM では 1 微粒子もしくは 1 パターン領域を 1 ビットとして記録するため、 $n=1$ にすることを可能にする。

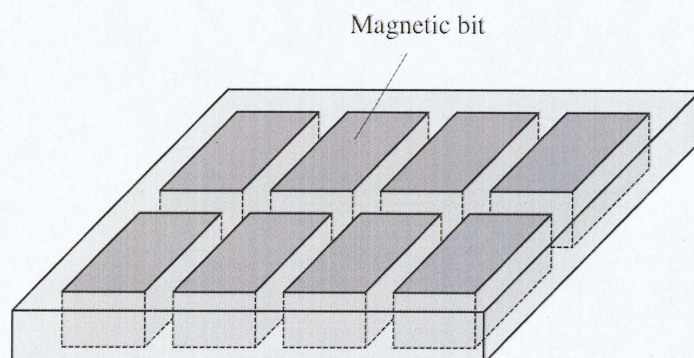


図 1-7 ビットパターンドメディア

1.3 本研究の目的

TAMR の記録方式に TG を想定するので、記録領域を加熱するとともに記録領域を含む広い範囲にヘッド磁界が印加されるとする。すると、書き込み完了となったビットの冷却過程および、記録領域の隣接トラックにもヘッド磁界の影響があることが考えられる。本研究では、これらの位置での情報の熱的安定性も考慮して、TAMR で必要となる媒体特性をシミュレーションにより明らかにする。

また、1 ビットあたりの磁性微粒子の数 n を少なくすることで記録密度を向上させようとする傾向があるが、従来は、磁気記録における情報の安定性は熱的安定性のみで議論されてきた。つまり、ある基準以上の熱揺らぎ指標があれば、記録された情報は十分に安定するとされてきた。しかし、 n を少なくすることが情報の安定性に影響を与えるかもしれない。そこで、本研究では 1 ビットあたりのエラーの確率 (ビットエラーレート) をシミュレーションすることで、1 ビットあたりの磁性微粒子数 n と情報の安定性の関係を明らかにする。なお、数値計算には C 言語を用い、独自のプログラムを作製しシミュレーションを行う。

第 2 章では TAMR において必要となる媒体特性を検討する。

第 3 章では 1 ビットあたりの磁性微粒子数と情報の安定性の関係を明らかにし、必要となる熱揺らぎ指標の変化なども検討する。

そして、第 4 章では全体のまとめを行う。

2. 媒体特性

2.1 序

本章では、TAMR 媒体としてフェロ磁性のグラニューラー媒体を想定し、まず分子場近似による磁気特性の温度変化の計算方法を示す。次に媒体モデルや熱的安定性などの計算条件について説明し、そして TAMR 媒体として必要となる媒体特性を検討し、膜厚および記録温度に対する依存性についても調査する。

2.2 本研究の特徴

媒体設計における数値計算では、飽和磁化 M_s 、や磁気異方性エネルギー K_u 、キュリー温度 T_c などのパラメータが複雑に関係し合っている。マイクロマグネティクスシミュレーションは磁化分布の主な解析方法であるが、従来これらパラメータの相互関係がわかりにくく、計算量も膨大であった。

そこで本研究では、まず 330 K、無磁界で 10 年間安定であるために必要な熱揺らぎ指標を 60 以上であるとする。それをもとに記録領域、その周辺での熱的安定性の条件を解析的に計算、それから数値計算を行う。この計算方法を用いることで、従来よりも計算量を少なくし、パラメータ間の関係をわかりやすくすることを試みる。

また、昨年までは 2 Tera bits per square inch (Tbps) と 4 Tbps の面記録密度でシミュレーションしていたが⁹⁾、本研究では、6 Tbps の面記録密度も想定したシミュレーションを行う。

2.3 計算方法¹⁰⁾

2.3.1 分子場近似¹¹⁾

フェロ磁性体中の原子の磁気モーメントは交換相互作用により、ある一定方向に平行に整列している。このように、相互作用により影響し合っている各原子の磁気特性を調べることは非常に困難である。そこで本研究では、磁性微粒子の磁気特性の温度変化を計算するために分子場近似を用いることとした。本研究では、磁性体中の 1 個の原子に注目し、その原子が周囲の

原子群から受ける交換相互作用をある平均的な磁場であると近似する．この磁場は分子場と呼ばれ，分子場が磁性体中の全原子に共通であるとする事で近似計算を行うことができる．

磁性微粒子の材料であるフェロ磁性体として， $(\text{TM}_x\text{M1}_{1-x})_{1-z}\text{M2}_z$ という組成の合金を想定する．TM は Fe や Co などの 3d 遷移金属 (Transition Metals, TM)，M1 は Pt などの非磁性金属であるとする．つまり TM-M1 には非常に大きな結晶磁気異方性を持つ FePt や CoPt を想定している．M2 には Cu や Cr などの非磁性金属を想定し，TM-M1 の磁気特性を単純希釈するものと仮定する．TM，M1，M2 の組成はそれぞれ $x(1-z)$ ， $(1-x)(1-z)$ ， z で，単位は at. % である．

温度 T における TM のスピン角運動量の熱平均を $\langle S \rangle$ とすると，

$$\langle S \rangle = SB_s \left(\frac{g\mu_B SH}{kT} \right), \quad (2-1)$$

$$H = \frac{2JZ(g-1)\langle S \rangle}{g\mu_B} \quad (2-2)$$

と近似できる．ここで， S は TM のスピン角運動量， $B_s(\alpha)$ は Brillouin 関数

$$B_s(\alpha) = \frac{2S+1}{2S} \coth\left(\frac{2S+1}{2S}\alpha\right) - \frac{1}{2S} \coth\left(\frac{\alpha}{2S}\right), \quad (2-3)$$

g は TM の g 係数， μ_B は Bohr 磁子 ($\mu_B = 9.274 \times 10^{-21}$ emu)， H は分子場， J は TM 原子間の交換積分， Z は TM 原子の最近接位置にある TM 原子の数であり，結晶構造を fcc であると仮定すると，

$$Z = 12x(1-z) \quad (2-4)$$

である．なお，Fe，Co の g 係数はそれぞれ 2.15，2.22 であるので，計算では $g=2$ とする．

温度 T における磁化 $M_s(T)$ は

$$M_s(T) = N\mu_B [x(1-z)g\langle S \rangle] \quad (2-5)$$

により求めることができる．ここで， N は単位体積あたりの全原子数

$$N = \frac{1}{x(1-z)V_{\text{TM}} + (1-x)(1-z)V_{\text{M1}} + zV_{\text{M2}}} \quad (2-6)$$

であり， V_{TM} ， V_{M1} ， V_{M2} はそれぞれ TM，M1，M2 の原子 1 個あたりの体積である．

原子 1 個あたりの体積はそれぞれの元素の原子量と密度から計算した．表 2-1 に TM，M1，M2 として想定した各元素の原子 1 個あたりの体積を示す．なお，TM 原子の体積には Co のものを，M1 原子の体積には Pt のものを，M2 原子の体積には Cr のものを用いて計算することとする．

表 2-1 原子量, 密度, 原子 1 個あたりの体積

	Atomic weight (g/mol)	Density (g/cm ³)	Volume of atom (10 ⁻²³ cm ³)
Cr	51.996	7.19	1.20
Fe	55.845	7.87	1.18
Co	58.933	8.90	1.10
Cu	63.546	8.94	1.18
Pt	195.08	21.5	1.51

$\alpha \ll 1$ のとき, (2-3) 式は $B_s \approx (S+1)\alpha/(3S)$ と近似できるので,

$$A = JZS(S+1) \quad (2-7)$$

とおくと, Curie 温度 T_c は,

$$\begin{vmatrix} 2A - 3kT_c & 0 \\ 0 & -3kT_c \end{vmatrix} = 0 \quad (2-8)$$

で求めることができる. すなわち,

$$T_c = \frac{2A}{3k} = \frac{JZS(S+1)}{k} \quad (2-9)$$

である.

2.3.2 磁気異方性エネルギー

磁気異方性エネルギー K_u は飽和磁化 M_s の 2 乗に比例すると仮定する¹²⁾. 単位体積あたりの TM 原子は $Nx(1-z)$ 個なので, 温度 T における磁気異方性エネルギー $K_u(T)$ は

$$K_u(T) = Nx(1-z)DZ\langle S \rangle^2 \quad (2-10)$$

となる. ここで, D は異方性定数である. ここで, $M_s(T)$ および $K_u(T)$ の計算結果の一例を図 2-1 に示す.

また, 一斉回転モデルを想定するので, 保磁力 H_c と異方性磁界 H_k は等しいと仮定する. つまり, 温度 T における保磁力 $H_c(T)$ は

$$H_c(T) = H_k(T) = \frac{2K_u(T)}{M_s(T)} \quad (2-11)$$

とする.

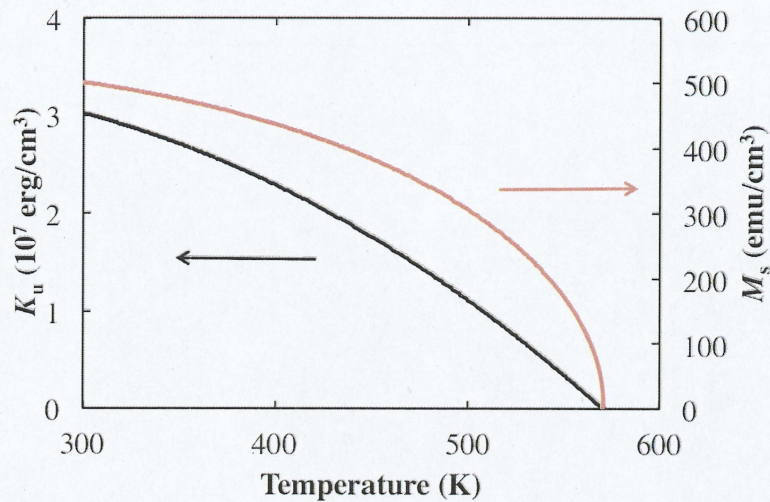


図 2-1 飽和磁化および異方性エネルギーの温度依存性

2.4 計算条件

2.4.1 媒体条件

TAMR によって 2 Tbps, 4 Tbps および 6 Tbps の面記録密度で、グラニューラー媒体に記録することを想定する。これらの記録密度が実現した場合の、HDD としてのおおよその記録容量 (2.5 インチおよび 3.5 インチ, プラッタ 1 枚, 片面記録) を表 2-2 にまとめる。現在では, プラッタの両面に書き込むタイプのものがほとんどで, デスクトップ PC 用のものでは, 通常 1 台の HDD にはプラッタが 2, 3 枚使用されており, 多いものでは 5 枚のものもあるということを見ると, かなり大きな記録容量となることが想像できる。

線記録密度の単位, トラック密度の単位をそれぞれ kilo Flux Changes per Inch (kFCI), kilo Tracks Per Inch (kTPI) として, 線記録密度, トラック密度およびそれらから求めたビット間距離 Δx , トラック幅を表 2-3 に示すように仮定する。 Δx はヘッド磁界の制御である程度短くできるが, 媒体の移動中ヘッドがトラック幅方向に揺らいでしまうためビット間距離 Δx に対してトラック幅を長くしてある。また, これらの線記録密度およびトラック密度によると, 面記録密度はそれぞれ 2.3, 4.6, 6.9 Tbps となるが, 想定しているそれぞれの面記録密度との差 0.3, 0.6, 0.9 Tbps 分の領域は誤り訂正符号等に使用されることを想定している。誤り訂正符号については第 3 章で説明する。

表 2-2 HDD としての記録容量

	Storage capacity (TByte)	
	2.5 inch	3.5 inch
2 Tbps	0.8	2.0
4 Tbps	1.6	4.0
6 Tbps	2.5	5.9

表 2-3 線記録密度, トラック密度, ビット間距離, トラック幅

	Linear recording density (kFCI)	Track recording density (kTPI)	Bit width Δx (nm)	Track width (nm)
2 Tbps	2600	870	9.8	29
4 Tbps	3200	1440	7.9	18
6 Tbps	3900	1760	6.5	14

2.4.2 2 Tbps

2 Tbps での計算条件を示す. 図 2-2 は記録領域周辺を表したものである. 図のように磁性微粒子の形を正四角柱であるとし, その大きさを 4.5 nm, 非磁性体の幅を 1.0 nm としたので, 面記録密度 2 Tbps より, 1 ビットあたりを約 10 個の磁性微粒子で記録することとなる. なお, グラニューラ媒体なので, 磁性微粒子は不規則に並んでいるが, 図では簡単のため規則的に並べてある. TG を仮定するので, 光は記録領域のみに照射されるが, ヘッド磁界 H_w は記録領域を含む広い範囲に印加されるとする. 書き込みが完了となるのは冷却過程で磁性微粒子の磁化の方向が初めて熱的に安定となったときで, そのときの温度を記録温度 T_w とし, $T_w = 500, 550, 600$ K とした場合を考え, 媒体特性の記録温度依存を検討する.

温度が T_w である粒子の位置を x_w とする. x_w からトレーリング側に 1 ビット分ずれた位置 x_{rec} には記録が完了したばかりの粒子が存在し, この粒子の温度を T_{xrec} とする. T_{xrec} と T_w の差を ΔT とし, 媒体の冷却速度を $\partial T / \partial x < 10$ K/nm とすると, $\Delta T / \Delta x < 10$ K/nm よりビット間距離 $\Delta x = 9.8$ nm なので, $\Delta T = T_w - T_{xrec} < 98$ K となり,

$$T_{xrec} > T_w - 98 \text{ K} \quad (2-12)$$

が得られる.

図 2-3 はヘッド磁界全体の分布を表している. 書き込み位置の隣接トラックにも

600 nm × 300 nm という広い範囲にヘッド磁界 H_{adj} が印加されると想定した．加熱（記録）は主磁極のトレーリング側の端で行われると仮定するので $H_{\text{adj}} > H_w$ である．ここで，HDD は動作時に室温より温度がかなり高くなることと，TAMR 媒体は Curie 温度が低いので，少しの温度変化で磁気特性が大きく変化することを考慮して，動作時の HDD の温度，周囲温度を考え，330 K とする．隣接トラックでの磁性微粒子の温度を T_{radj} とし，

$$T_{\text{radj}} = 330 \text{ K} \quad (2-13)$$

とする．

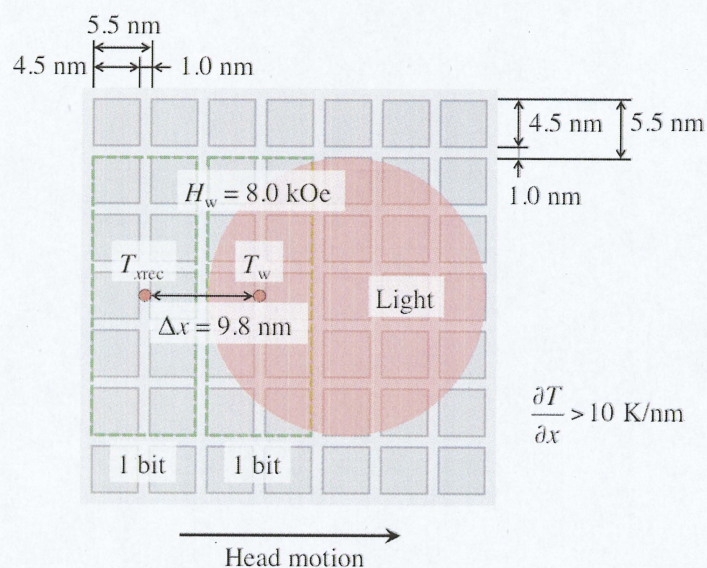


図 2-2 記録領域周辺 (2 Tbps)

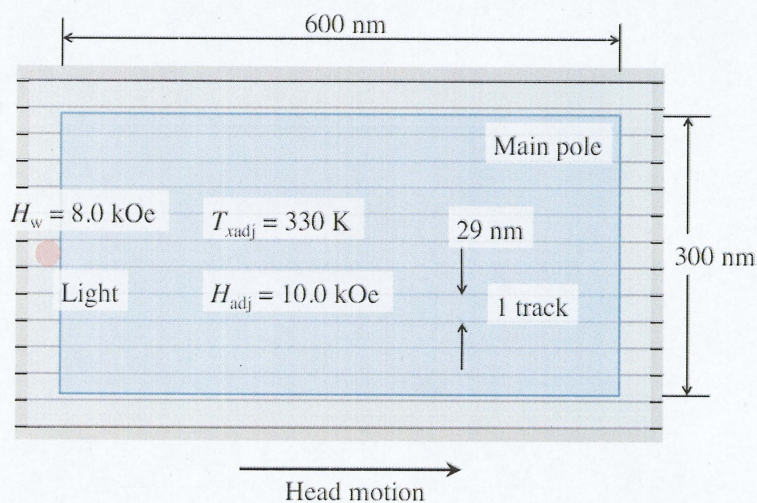


図 2-3 ヘッド磁界分布 (2 Tbps)

300 K での M_s は 500 emu/cm^3 のみを考え、媒体特性の磁化依存についての検討は省略する。このとき反磁界が $4\pi M_s = 6.3 \text{ kOe}$ なので、ヘッド磁界 H_w はそれよりも大きく $H_w = 8.0 \text{ kOe}$ とする。書き込み対象と隣接する磁性微粒子の反磁界の漏洩磁界がヘッド磁界よりも大きい場合、その漏洩磁界の書き込み対象の磁性微粒子の磁化に与える影響がヘッド磁界よりも強い可能性があるため、ヘッド磁界は磁性微粒子の反磁界よりも大きくなくてはならない。隣接トラックに印加されるヘッド磁界 H_{adj} は 10.0 kOe のみを考え、ヘッド磁界依存についての検討は省略する。膜厚 h は $4.5, 6.5, 8.5 \text{ nm}$ で計算し、媒体特性の膜厚依存を調査する。 h を厚くしすぎると隣接する磁性微粒子同士がきれいに分離されたグラニューラ媒体を作ることが難しくなるので、本研究では $h = 8.5 \text{ nm}$ をその上限とする。表 2-4 に 2 Tbps での媒体条件をまとめる。

表 2-4 2 Tbps での媒体条件 (* は各面記録密度で共通)

Grain size (nm)	4.5
* Width of non-magnetic material (nm)	1.0
* Writing temperature T_w (T)	500, 550, 600
* Cooling rate $\partial T / \partial x$ (K/nm)	< 10
T_{rec} (K)	$> T_w - 98$
* Ambient temperature (K)	330
* Magnetization $M_s(300 \text{ K})$ (emu/cm^3)	500
* Head field (kOe)	$H_w = 8.0$ $H_{adj} = 10.0$
Thickness h (nm)	4.5, 6.5, 8.5

2.4.3 4 Tbps

図 2-4 は 4 Tbps の場合での記録領域周辺を表したものである。 4 Tbps では磁性微粒子の大きさを 4.0 nm としたので、1 ビットの情報を約 6 個の磁性微粒子で記録することとなる。ビット間距離 $\Delta x = 7.9 \text{ nm}$ としたので、 $T_w - T_{rec} < 79 \text{ K}$ である。膜厚 h は $4.0, 6.0, 8.0 \text{ nm}$ で計算する。その他の計算条件は 2 Tbps と同様である。 4 Tbps での計算条件は表 2-5 にまとめる。

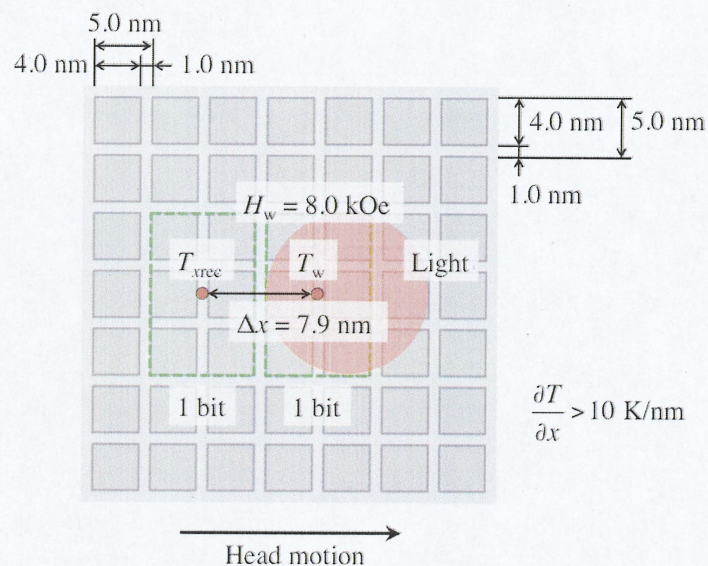


図 2-4 記録領域周辺 (4 Tbps)

表 2-5 4 Tbps での媒体条件

Grain size (nm)	4.0
T_{rec} (K)	$> T_w - 79$
Thickness h (nm)	4.0, 6.0, 8.0

2.4.4 6 Tbps

図 2-5 は 6 Tbps の場合での記録領域周辺を表したものである。6 Tbps では磁性微粒子の大きさを 3.5 nm としたので、1 ビットの情報を約 5 個の磁性微粒子で記録することとなる。 $\Delta x = 6.5$ nm としたので、 $T_w - T_{rec} < 65$ K となる。膜厚 h は 3.5, 5.5, 7.5 nm で計算する。その他の計算条件は 2 Tbps と同様である。6 Tbps での計算条件は表 2-6 にまとめる。

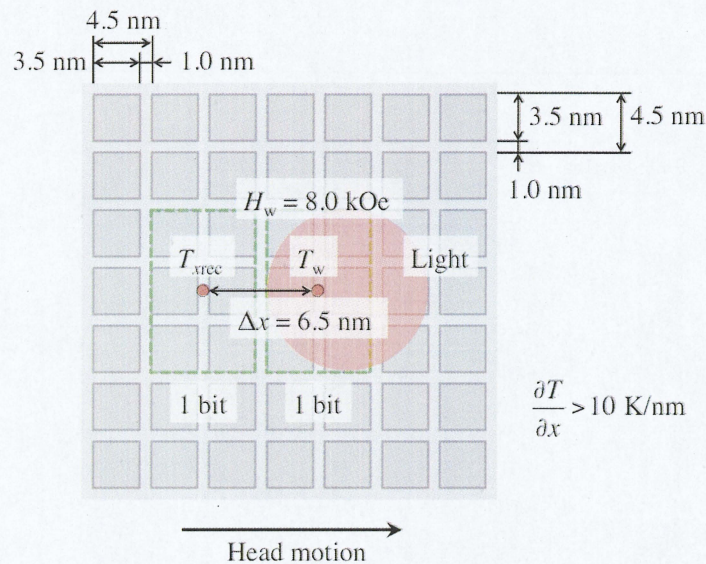


図 2-5 記録領域周辺 (6 Tbps)

表 2-6 6 Tbps での媒体条件

Grain size (nm)	3.5
T_{xrec} (K)	$> T_w - 65$
Thickness h (nm)	3.5, 5.5, 7.5

2.4.5 熱的安定性

まず, 2 Tbps の場合での熱的安定性の計算条件について説明する. 熱揺らぎ指標は一般に,

$$K_{\beta}(T, H) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 \pm \frac{H}{H_c} \right)^2 \quad (2-14)$$

と表される. つまり温度 T と磁界 H の関数である. 複合は, 磁性体の磁化 M_s の方向と H の方向が平行の場合 $+$ となり, 反平行の場合は $-$ となる. (1-5) 式は無磁界 ($H=0$) のときの熱揺らぎ指標である.

まず, 周囲温度 330 K, 無磁界で 10 年間 ($\tau=3.2 \times 10^8$ s) 記録された情報が安定であるために必要となる熱揺らぎ指標を

$$K_{\beta 0}(330 \text{ K}) = \frac{K_u V}{kT} > 60 \quad (2-15)$$

とする。このとき、 τ と $K_{\beta 0}(330 \text{ K})$ は

$$\tau \propto \exp\{K_{\beta 0}(330 \text{ K})\} \quad (2-16)$$

という関係をもつ。

x_w にある微粒子が x_{rec} まで移動するのにかかる時間を τ' とする。媒体の移動速度を線速度 $v=10 \text{ m/s}$ とすると、 $\tau'=\Delta x/v=9.8/10=0.98 \text{ ns}$ となる。温度が T_w 、 H_w が印加されている状態で磁化 M_s の方向が τ' の間安定となったとき、記録が完了したとする。このときの K_{β} を $K_{\beta w}(T_w)$ とすると、

$$\tau' \propto \exp\{K_{\beta w}(T_w)\} \quad (2-17)$$

である。(2-14) 式と (2-15) 式から、

$$\frac{\tau'}{\tau} = \frac{\exp\{K_{\beta w}(T_w)\}}{\exp\{K_{\beta 0}(330 \text{ K})\}}$$

$$\therefore K_{\beta w}(T_w) = K_{\beta 0}(330 \text{ K}) + \ln\left(\frac{\tau'}{\tau}\right) = 60 + \ln\left(\frac{0.98 \times 10^{-9}}{3.2 \times 10^8}\right) = 20$$

となる。ここで、不等号でないのは、冷却過程において T_w で初めて M_s の方向が τ' の間安定となったとき記録が完了するとしたからである。なお、 T_w では常に M_s と H_w の方向が平行なので、

$$K_{\beta w}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H_w}{H_c}\right)^2 = 20 \quad (2-18)$$

が得られる。図 2-6 に記録過程での熱揺らぎ指標の時間変化についての概略図を示す。

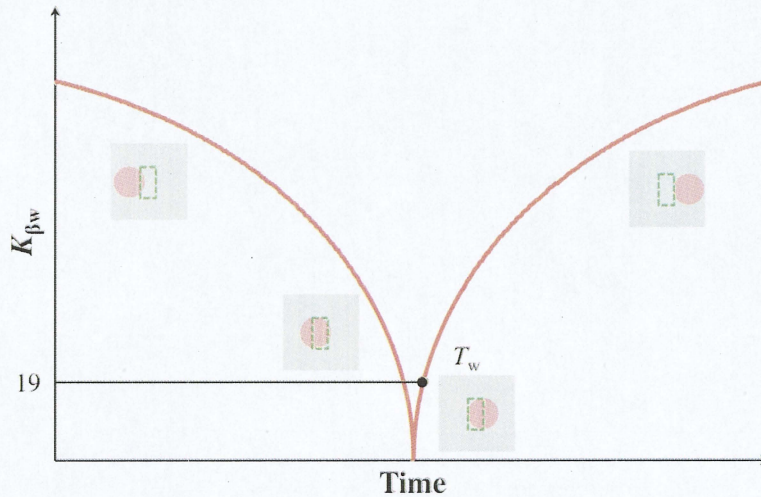


図 2-6 記録過程での熱揺らぎ指標の時間変化

記録が完了となり、 x_{rec} にある磁性微粒子について、この粒子の磁化 M_s が安定となる最大の温度を T_{rec} とする。つまり、この粒子は冷却過程で温度が T_{rec} となったときに初めて M_s の方向が熱的に安定となるとする。この粒子には記録されたばかりの情報があるが、ここでも情報が失われないために、媒体がビット間距離 Δx を移動する間 (時間 τ')、 M_s の方向が安定である必要がある。また、 x_{rec} では M_s と H_w の方向が反平行である場合がある。反平行の場合では平行の場合よりも磁化 M_s の方向は安定しにくい。つまり、反平行のときに情報が保持される条件を満たせば平行のときにも必ず情報が保持されるので、反平行の場合を考えて、

$$K_{\beta\text{rec}}(T_{\text{rec}}) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 - \frac{H_w}{H_c}\right)^2 = 20 \quad (2-19)$$

とする。 T_{rec} は x_{rec} の位置で M_s の方向が安定となる最大の温度であり、 x_{rec} での微粒子の温度 T_{rec} よりも高くなくてはならないので、 $T_{\text{rec}} > T_{\text{rec}}$ と (2-12) 式より、少なくとも

$$T_{\text{rec}} > T_w - 98 \text{ K} \quad (2-20)$$

を満たさなくてはならないとする。

書き込み位置の隣接トラックの温度を $T_{\text{adj}} = 330 \text{ K}$ としたが、ここでも M_s の方向が安定となる最大の温度を T_{rec} とし、必要となる熱的安定性の条件を考える。隣接トラックでは $600 \text{ nm} \times 300 \text{ nm}$ という広い範囲にヘッド磁界 H_{adj} が印加されることを想定する。ダウントラック方向に H_{adj} が 600 nm の距離で印加されるということは、隣接トラックの磁性微粒子は $600/\nu = 60 \text{ ns}$ の時間 H_{adj} の影響を受け続けるということになる。また、 H_{adj} が印加される範囲をクロストラック方向に 300 nm 、トラック密度を 870 kTPI としたのでトラック幅は約 29 nm で、 H_{adj} は少なくとも 9 トラック (6 Tbps では 19 トラック) には必ず印加されることとなる。1 度の書き込みでこれだけ広範囲に磁界が印加されるということを考慮し、10 万回 (10^5 回) の書き込みに対しても記録された情報が安定しなければならないとして、 $\tau'' = 60 \times 10^5 \text{ ns}$ とすると、

$$\frac{\tau''}{\tau} = \frac{\exp\{K_{\beta\text{adj}}(T_{\text{adj}})\}}{\exp\{K_{\beta 0}(330 \text{ K})\}} \quad (2-21)$$

$$\therefore K_{\beta\text{adj}}(T_{\text{adj}}) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 - \frac{H_{\text{adj}}}{H_c}\right)^2 = 60 + \ln\left(\frac{\tau''}{\tau}\right) = 35$$

となる。 T_{adj} は T_{rec} よりも高くなければならないので、

$$T_{\text{adj}} > 330 \text{ K} \quad (2-22)$$

を満たさなければならない。

なお、10 年間や 0.98 ns などの時間を 2 倍や 1/2 倍、または 3 倍や 1/3 倍にしても、 $\ln(2) = 0.69$ 、 $\ln(3) = 1.10$ なので K_{β} の条件にはほとんど影響はないと考える。

4 Tbps、6 Tbps の場合での熱的安定性の条件についても同様に決定した。各面記録密度で

の熱的安定性の条件を表 2-7 にまとめる.

表 2-7 熱的安定性の条件

	2 Tbps	4 Tbps	6 Tbps
$K_{\beta 0}(330\text{ K})=\frac{K_u V}{kT}$	> 60		
$K_{\beta w}(T_w)=\frac{K_u V}{kT}\left(1+\frac{H_w}{H_c}\right)^2$	20	19	
$K_{\beta \text{rec}}(T_{\text{rec}})=\frac{K_u V}{kT}\left(1-\frac{H_w}{H_c}\right)^2$	20	19	
$K_{\beta \text{adj}}(T_{\text{adj}})=\frac{K_u V}{kT}\left(1-\frac{H_{\text{adj}}}{H_c}\right)^2$	35		
$T_{\text{rec}}(\text{K})$	$>T_w-98$	$>T_w-79$	$>T_w-65$
$T_{\text{adj}}(\text{K})$	> 330		

2.5 計算アルゴリズム

ここでは計算の一例として, 面記録密度 2 Tbps, 膜厚 $h = 6.0 \text{ nm}$, 記録温度 $T_w = 500 \text{ K}$ としたときの計算アルゴリズムについて説明する. 本シミュレーションでは, 表 2-8 に示すように分子場近似パラメータの一部を設定した.

表 2-8 分子場近似パラメータ

Atomic percent z	0.2
Volume of atom (10^{-23} cm^3)	$V_{\text{TM}} = 1.10$
	$V_{\text{M1}} = 1.51$
	$V_{\text{M2}} = 1.20$
g factor	2
Angular momentum S	0.6

2.3.1 項で説明したように媒体の磁気特性の温度変化を計算するためには, これらの他に TM の組成 x , 交換積分 J , 異方性定数 D の値が必要となる. そこで, 以下のような流れで計算

をする。

$M_s(300\text{ K}) = 500\text{ emu/cm}^3$ としたので, (2-5) 式は未知数 x と J の方程式とみなすことができる. 次に, (2-9) 式では, T_c は x と J を変数に持つ関数である. ここで, ある値を T_c に代入すると, こちらも x と J の方程式となる. つまり, T_c にある値を代入することで, これらの方程式を解くことができる. こうして得た x と J の値を (2-10) 式に代入すると, K_u は D の関数となる. $T_w = 500\text{ K}$ としたので, この K_u を (2-18) 式に代入すると, D の値が得られる. このように, 1 つの T_c の値を決定することで 1 組の x , J , D の値を得ることができる. これらの値を使って磁気特性の温度変化を計算すると $K_{\beta 0}(330\text{ K})$ や T_{rec} , T_{adj} の値を得ることができるので, (2-15), (2-20), (2-22) 式で示した条件を満たすように T_c の値を決定すればよい. 図 2-7 に計算の流れを示す. 他の計算条件でも同様に計算する.

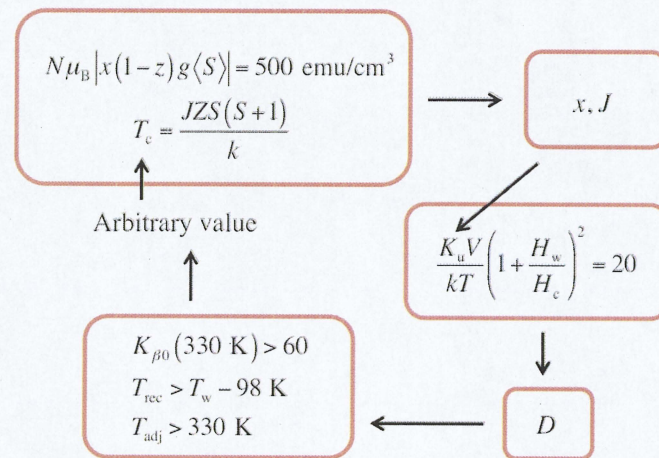


図 2-7 媒体特性の計算の流れ

2.6 計算結果

2.6.1 2 Tbps

2 Tbps での計算結果を表 2-9 にまとめる. 表の $\partial T / \partial x$ は $(T_w - T_{\text{rec}}) / \Delta x$ であり, 4 Tbps と 6 Tbps の結果でも同様であるとする. (2-15), (2-20), (2-22) 式で示した条件をすべて満たすように T_c の値を決定するとき, 必ずどれかの条件が律速 (ボトルネック) となる. 表からわかるように, すべての媒体条件で, (2-15) 式が律速となった.

(2-15) 式が律速となっているので、各膜厚で $K_u V / kT(330 \text{ K}) = 60$ となっており、膜厚 h を厚くすると磁性微粒子の体積 V が大きく、その分、磁気異方性エネルギー $K_u(300 \text{ K})$ が小さくなっている。記録温度 T_w を変化させると、 $K_u(300 \text{ K})$ はほとんど変化しないが T_c が大きく変化する。

表 2-10 は 2002 年に発表された $\text{Fe}_{55-x}\text{Ni}_x\text{Pt}_{45}\text{Li}_0$ 薄膜の室温での K_u と M_s の実験的な値である¹²⁾。この表からわかるように T_c が低くなると $K_u(300 \text{ K})$ も低くなる。

表 2-9 において T_w が同じ (500 K) でも、膜厚が厚くなると必要となる $K_u(300 \text{ K})$ が $3.2 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ から $1.7 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ に低くなる。 T_c はあまり下がっていないので、これは媒体作製が容易にことであるが、 h を厚くすることで媒体に求められる冷却速度 $\partial T / \partial x$ が速くなっていることや h を厚くしすぎるとグラニュー媒体にならないなどの問題もあるので、単純に h を厚くすることが媒体作製に有利であるという判断はできない。

記録温度 T_w を高くすると、 T_c も高くなるが $K_u(300 \text{ K})$ はあまり変化していない。これも媒体作製を容易にするが、レーザ光の出力にも限界があるので、キュリー温度 T_c が高すぎると記録できなくなってしまう。

表 2-9 計算結果 (2 Tbps)

2 Tbps									
H_w (kOe)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
H_{adj} (kOe)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
h (nm)	4.5	4.5	4.5	6.5	6.5	6.5	8.5	8.5	8.5
M_s (300 K) (emu/cm ³)	500	500	500	500	500	500	500	500	500
K_u (300 K) (10^7 erg/cm^3)	3.2	3.1	3.1	2.2	2.2	2.1	1.7	1.7	1.6
H_c (300 K) = H_k (300 K) (kOe)	127	124	123	88	86	85	68	66	65
T_c (K)	578	658	744	568	645	726	560	633	710
$K_u V / kT$ (300 K)	70	68	67	70	68	68	70	69	68
$K_u V / kT$ (330 K) > 60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
T_w (K)	500	550	600	500	550	600	500	550	600
T_{rec} (K) > $T_w - 98$	467	507	546	454	490	525	442	474	505
$\partial T / \partial x$ (K/nm) < 10.0	3.4	4.4	5.5	4.7	6.1	7.7	5.9	7.8	9.7
H_c (T_w) (kOe)	79.7	83.0	86.4	52.9	55.1	57.4	38.6	40.3	42.1
H_c (T_{rec}) (kOe)	92.8	95.3	98.0	66.0	67.5	69.2	51.8	52.8	54.0
$\partial H_c / \partial T$ (Oe/K)	396.6	285.1	215.0	286.8	206.8	156.8	228.0	164.9	125.4
$\partial H_c / \partial x$ (Oe/nm)	1333	1260	1188	1341	1270	1201	1348	1279	1212
T_{adj} (K) > 330	393	408	422	378	389	400	363	371	378

表 2-10 異方性エネルギーと飽和磁化の実験的値

Fe _{55-x} Ni _x Pt ₄₅		
x (at.% Ni)	K_u (10^7 erg/cm ³)	T_c (K)
0	4.6	770*
5	4.4	750*
10	4.0	690
15	2.6	650
20	1.8	580
30	1.3	490

* : were obtained by extrapolation

2.6.2 4 Tbps

4 Tbps での計算結果を表 2-12 にまとめる. 4 Tbps でもすべての媒体条件で (2-15) 式が律速となった. 膜厚 h を厚くすることで必要となる $K_u(300\text{ K})$ が小さくなることや, T_w の調節が T_c の条件の設定に有効であることは 2 Tbps の場合と変わらないが, 各膜厚での $K_u(300\text{ K})$ が 2 Tbps の場合よりも大きくなっており, その分媒体作製が困難になっていることがわかる.

表 2-11 計算結果 (4 Tbps)

4 Tbps									
H_w (kOe)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
H_{adj} (kOe)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
h (nm)	4.0	4.0	4.0	6.0	6.0	6.0	8.0	8.0	8.0
M_s (300 K) (emu/cm ³)	500	500	500	500	500	500	500	500	500
K_u (300 K) (10^7 erg/cm ³)	4.5	4.4	4.4	3.0	3.0	2.9	2.3	2.2	2.2
H_c (300 K) = H_k (300 K) (kOe)	181	177	174	121	118	117	91	89	88
T_c (K)	578	659	743	570	648	729	563	638	716
$K_u V/kT$ (300 K)	70	68	67	70	68	67	70	69	68
$K_u V/kT$ (330 K) > 60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
T_w (K)	500	550	600	500	550	600	500	550	600
T_{rec} (K) > $T_w - 79$	477	520	563	467	507	546	457	494	530
$\partial T/\partial x$ (K/nm) < 10.0	2.9	3.8	4.7	4.2	5.5	6.8	5.4	7.1	8.8
H_c (T_w) (kOe)	113.7	118.3	123.0	73.3	76.3	79.4	53.1	55.3	57.6
H_c (T_{rec}) (kOe)	127.0	130.8	134.9	86.6	88.9	91.4	66.4	68.0	69.7
$\partial H_c/\partial T$ (Oe/K)	585.1	422.3	320.1	404.0	292.4	222.4	312.9	227.0	173.2
$\partial H_c/\partial x$ (Oe/nm)	1673	1588	1504	1681	1598	1517	1689	1607	1528
T_{adj} (K) > 330	402	420	436	390	405	418	378	390	400

2.6.3 6 Tbps

6 Tbps での計算結果を表 2-13 にまとめる. こちらもすべての媒体条件で (2-15) 式が律速となり, 膜厚 h を厚くすることで必要となる $K_u(300\text{ K})$ が小さくなることと, T_w の調節が T_c の条件設定に有効であることは他の面記録密度の場合と変わらない. 各膜厚での $K_u(300\text{ K})$ が他の面記録密度の場合よりもさらに大きくなっており, 膜厚 $h=3.5\text{ nm}$ の場合では, $K_u(300\text{ K})$ は $6.0 \times 10^7\text{ erg/cm}^3$ を超えており, 表 2-10 を見てもわかるようにこのような媒体を作製することとはかなり困難である.

表 2-12 計算結果 (6 Tbps)

6 Tbps									
H_w (kOe)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
H_{adj} (kOe)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
h (nm)	3.5	3.5	3.5	5.5	5.5	5.5	7.5	7.5	7.5
M_s (300 K) (emu/cm ³)	500	500	500	500	500	500	500	500	500
K_u (300 K) (10^7 erg/cm^3)	6.7	6.6	6.5	4.3	4.2	4.1	3.2	3.1	3.0
H_c (300 K) = H_k (300 K) (kOe)	269	263	260	172	168	166	126	123	122
T_c (K)	584	666	754	577	657	742	571	649	731
$K_u V/kT$ (300 K)	70	68	67	70	68	67	70	68	67
$K_u V/kT$ (330 K) > 60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
T_w (K)	500	550	600	500	550	600	500	550	600
T_{rec} (K) > $T_w - 65$	485	530	575	476	519	561	468	509	548
$\partial T/\partial x$ (K/nm) < 10.0	2.4	3.1	3.9	3.6	4.8	6.0	4.9	6.4	8.0
H_c (T_w) (kOe)	173.5	180.3	187.5	107.7	112.0	116.5	76.9	80.0	83.3
H_c (T_{rec}) (kOe)	186.7	192.8	199.3	120.9	124.5	128.4	90.2	92.7	95.3
$\partial H_c/\partial T$ (Oe/K)	851.7	613.6	463.7	557.9	402.9	305.4	420.3	304.1	231.2
$\partial H_c/\partial x$ (Oe/nm)	2026	1921	1817	2035	1931	1830	2042	1941	1842
T_{adj} (K) > 330	410	430	448	400	418	434	391	406	420

2.6.4 まとめ

各面記録密度での媒体特性のシミュレーションでは, すべての媒体条件において律速が (2-15) 式となった. (2-15) 式が律速であるということは, $K_u V/kT(330\text{ K})=60$ であることを意味し, 膜厚 h を厚くすると磁性微粒子の体積 V が大きくなり, その分磁気異方性エネルギー $K_u(300\text{ K})$ が小さくなる. $K_u(300\text{ K})$ の大きな媒体は作製が難しくなるので, この点では h を厚くすることは媒体作製が容易になることを意味するが, h を厚くすることで冷却速度 $\partial T/\partial x$ が速くなってしまふことや h を厚くしすぎるとグラニューラー媒体とならないなどの問題もある. 記録温度 T_w を変化させると, $K_u(300\text{ K})$ はあまり変化しないがキュリー温度 T_c が大きく変化した. 実際の媒体は T_c が高くなると $K_u(300\text{ K})$ が大きくなるので, この結果が

ら、 T_w を変化させることで $K_u(300\text{ K})$ などの媒体の磁気特性に合わせて T_c の条件を設定できることがわかった。ただし、レーザ光の出力にも限界があることを考慮しなければならない。面記録密度を高くすると $K_u(300\text{ K})$ が大きくなる。膜厚の厚い媒体を作製できなければ 4 Tbpsi や 6 Tbpsi の実現は難しい。

3. 情報安定性

3.1 序

従来、磁気記録媒体に保存された情報の安定性は、熱的安定性のみで議論されてきた。つまり、ある程度の熱揺らぎ指標が確保されていれば、一定期間情報は失われなかったとしてきた。第2章の内容もその議論の1つである。

第2章では $K_{\beta 0}(330\text{ K}) > 60$ や $T_{\text{adj}} > 330\text{ K}$ など、熱的安定性の条件が満たされていれば、一定期間記録されたすべての磁性微粒子の磁化は安定し、エラーはないとしてきた。しかし、現実の磁気記録媒体において、例えば、10年間、無磁界で十分な熱的安定性を保つための条件 $K_{\beta 0}(330\text{ K}) > 60$ が満たされていたとしても、エラーの確率が0となるものではなく、10年間のうちに記録された微粒子の磁化の方向はごく低い確率で反転してしまうことがある。また、TAMRを記録方式として用いても、磁気異方性エネルギー K_u の大きな材料は作製が難しいという理由から、1ビットあたりの情報を記録する磁性微粒子の数 n を少なくして記録密度を向上させようとする傾向があるが、その影響もこれまで考えられていなかった。

そこで本章では、磁気記録においてエラーが情報の安定性に与える影響を考慮し、さらに、磁性微粒子の大きさが偏差 σ を持ち、正規分布していると仮定し、より本質的な情報安定性の指標であるビットエラーレートという概念を導入することで、熱揺らぎ指標だけでなく、1ビットあたりの磁性微粒子の数 n や磁性微粒子サイズの標準偏差 σ が情報の安定性に与える影響を調査する。

まず、ビットエラーレートについて説明し、次に計算方法および媒体の条件を示す。計算誤差の許容などについても議論する。そして計算結果としてビットエラーレートの n 、熱揺らぎ指標、 σ 依存を調査する。

3.2 ビットエラーレート

ビットエラーレート (bit Error Rate, bER) とは、データ再生のときに生じるエラーの確率で、1ビットあたりのエラー率を意味する。ここで、bit の頭文字を小文字としているのは、bit と Byte との混同を避けるためである。bER の計算方法については3.5項で詳しく説明するが、bER は1ビットあたりの粒子数 n 、熱揺らぎ指標 σ 、粒子サイズの標準偏差 σ の関数であると考えられるので、より本質的な情報安定性の指標であることがわかる。本研究では情報の

保存期間を 10 年間とする． bER は 1 ビットあたりのエラー確率なので，例えば， $bER = 10^{-9}$ というのは， 10 年の間に 10^9 ビットのうち 1 ビットがエラーを起こすことを意味する．

3.3 誤り訂正符号

誤り訂正符号 (Error Correcting Cord, ECC) とは，再生時のデータを記録時のデータと比較して誤りがないか検出し，さらに誤りがあった場合には訂正を行うために記録時のデータに付加される冗長なデータである．

ECC の原理を簡単に説明する．図 3-1 のように記録時のデータを行列すると， ECC はその行，列それぞれの和を並べたものである．これを記録時，元のデータとともに記録しておく．そして，再生されるデータでも記録時と同様に ECC を生成する．この ECC を記録時のものと比較し，誤りがなければそのまま再生，誤りがあった場合は， ECC をもとに，行と列から誤りのある箇所を特定し， 0 から 1，または 1 から 0 に修正し，再生する．

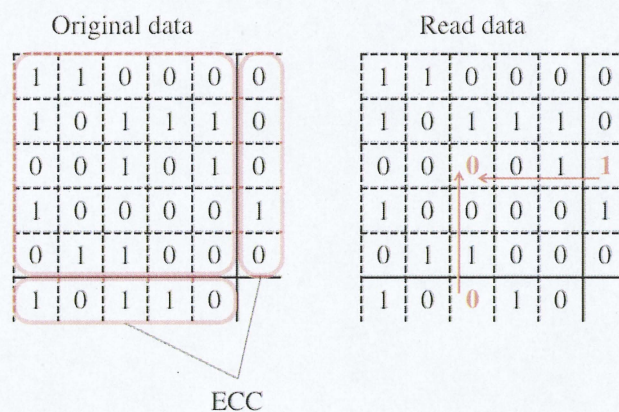


図 3-1 ECC の原理

3.4 ボックス=ミュラー法

情報安定性のシミュレーションでは，磁性微粒子のサイズが正規分布していると仮定するので，計算機によって正規乱数を発生させるプロセスが必要になる．本研究では，正規乱数を発

生させる方法として、ボックス=ミュラー法を採用する。ここでは、その概要について説明する。

区間 (0,1) で一様分布する、互いに相関のない 2 つの乱数を X , Y とする。このとき、

$$Z_1 = \sqrt{-2\ln X} \cos 2\pi Y, Z_2 = \sqrt{-2\ln X} \sin 2\pi Y \quad (3-1)$$

は、平均 0, 標準偏差 1 の互いに相関のない 2 つの正規乱数となる。そして、

$$d_1 = \sigma Z_1 + d_m, d_2 = \sigma Z_2 + d_m \quad (3-2)$$

は、平均 d_m , 標準偏差 σ の互いに相関のない 2 つの正規乱数でとなる。なお、乱数は `stdlib.h` でプロトタイプ宣言されている `rand()` を実行することで得る。

図 3-2 はボックス=ミュラー法を用いて乱数を $1E+8$ 発生させたときのその分布である。曲線は正規分布の理論値であるが、図のように正規乱数が得られることがわかる。

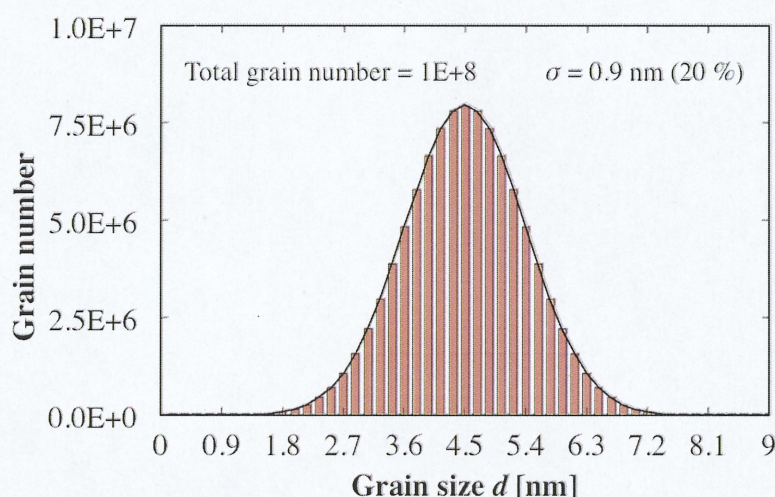


図 3-2 粒子サイズ分布のヒストグラム

3.5 計算方法および計算条件

3.5.1 媒体条件

1 ビットあたりの粒子数 n が 10 から 4 に減少した (記録密度が約 2 倍となった) 場合のシミュレーションに加え、BPM を意味する $n=1$ についての情報安定性についても検討する。 $n=1$ は特に BPM を意味する。磁性微粒子は実際には楕円体であるが、ここでは、簡単のため図 3-3 のように円柱であるとする。磁性微粒子のサイズ d は正規分布しているとする。粒子サイズ d の平均 d_m は 4.5 nm とする。なお、膜厚 h や 1 ビットあたりの粒子数 n は偏

差を持たず, d に依らず一定であるとする.

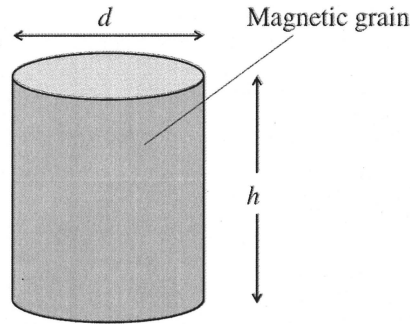


図 3-3 計算上での磁性微粒子の形状

3.5.2 磁性微粒子 1 個あたりのエラー確率

1 ビットあたりのエラー確率である bER を計算するために, 磁性微粒子 1 個あたりのエラー確率 P を考える. 保存期間を 10 年間 ($t=3.2 \times 10^8$ s) としたので, P は

$$P = f_0 t \exp\left(-\frac{K_u V}{kT}\right) \quad (3-3)$$

と定義する⁴⁾. ここで, f_0 は単位時間あたりに磁化がその方向を反転させようと振動する試行回数で, $f_0 = 10^{11}$ とする^{13), 14)}. $K_u V / kT$ は第 2 章でも説明したように熱揺らぎ指標である.

$V = \pi d^2 h / 4$ であり, h に偏差はないとしたので, (3-3) 式は

$$\begin{aligned} P &= f_0 t \exp\left(-\frac{K_u \pi d^2 h}{4 kT}\right) \\ P &= f_0 t \exp\left(-\frac{K_u \pi d_m^2 h d^2}{4 d_m^2 kT}\right) \\ P &= f_0 t \exp\left(-\frac{K_u V_m d^2}{kT d_m^2}\right) \\ P &= f_0 t \exp\left(-K_{\beta m} \frac{d^2}{d_m^2}\right) \end{aligned} \quad (3-4)$$

とすることができる。ここで、 V_m は平均サイズの粒子の体積で $V_m = \pi d_m^2 h / 4$ 、 $K_{\beta m}$ は d_m である粒子の熱揺らぎ指標である。こうすることで、 $K_{\beta m}$ を決定すれば任意の d に対する P を求めることができる。 $K_{\beta m} = 80$ とすると、図 3-4 のように P を d の関数として扱うことができる。(3-4) 式では、 d が小さくなっていくと右辺が 1 より大きくなることもある(破線)が、これは、複数回磁化の方向が反転していることを示し、エラーの確率としては 1 であるので、このとき $P=1$ とする(実線)。図 3-4 では粒子サイズ d が標準偏差 $\sigma = 0.9 \text{ nm}$ (20 %) で正規分布している場合の確率密度関数も併せて示してあるが、このとき、 $P=1$ となる磁性微粒子が 10.5 % と、かなり多く存在することがわかる。

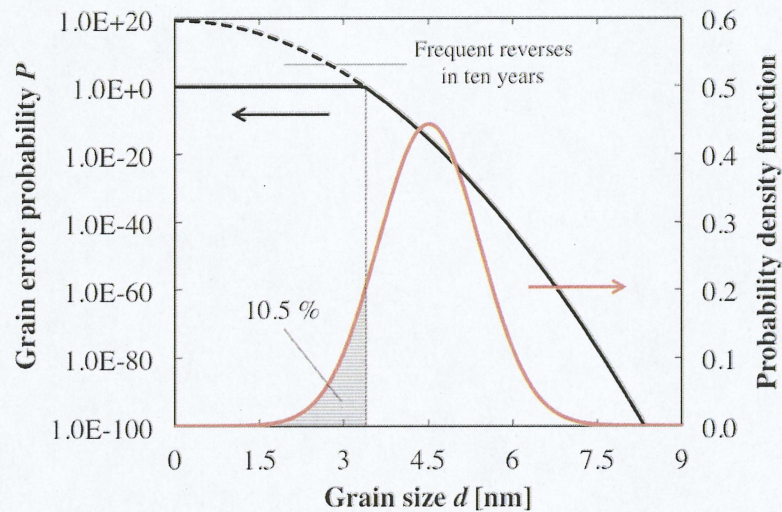


図 3-4 粒子サイズとエラー確率

3.5.3 ビットエラーレートの計算方法

まず、 $n=1$ (BPM) の場合を考える。 $n=1$ では 1 ビットに磁性微粒子 (パターン領域) が 1 個しかないので、10 年間のうちにその粒子がエラーを起こす確率がそのまま bER となる。したがって、 $n=1$ のとき、

$$\text{bER} = P \quad (3-5)$$

である。

$n=1$ 以外では、図 3-5 のように、1 ビット中の全微粒子の半分がエラーを起こした場合でも、エラーを起こした微粒子のディスク表面の面積が小さければ書き込まれた情報は正しく再生されるが、エラーを起こした微粒子の面積が大きければ書き込まれた情報は誤って再生され

てしまう．そこで， $n=1$ 以外の場合，ber は，1 ビット中で 10 年間のうちにエラーを起こす微粒子の面積 S_e が全微粒子の面積 S_t の半分以上となる場合の確率の合計とする．つまり， $S_e > S_t/2$ となる場合の確率の和である．

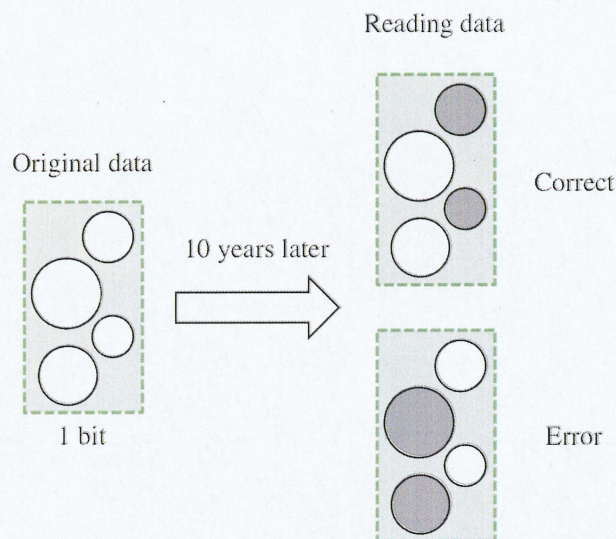


図 3-5 エラーを起こした粒子の面積とエラーの関係

$n=4$ の場合を考える． $n=4$ では 1 ビットあたりに 4 個磁性微粒子があるので，それぞれの粒子サイズ d を d_1, d_2, d_3, d_4 ， P を P_1, P_2, P_3, P_4 とする．このとき $S_t = d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2$ である．10 年間で，4 個のうち 1 個の微粒子がエラーを起こす場合の確率は

$$P_1(1-P_2)(1-P_3)(1-P_4), \quad (3-6)$$

$$P_2(1-P_1)(1-P_3)(1-P_4), \quad (3-7)$$

$$P_3(1-P_1)(1-P_2)(1-P_4), \quad (3-8)$$

$$P_4(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3), \quad (3-9)$$

2 個の微粒子がエラーを起こす確率は

$$P_1P_2(1-P_3)(1-P_4), \quad (3-10)$$

$$P_1P_3(1-P_2)(1-P_4), \quad (3-11)$$

$$P_1P_4(1-P_2)(1-P_3), \quad (3-12)$$

$$P_2P_3(1-P_1)(1-P_4), \quad (3-13)$$

$$P_2P_4(1-P_1)(1-P_3), \quad (3-14)$$

$$P_3P_4(1-P_1)(1-P_2), \quad (3-15)$$

3 個の微粒子がエラーを起こす確率は

$$P_1P_2P_3(1-P_4), \quad (3-16)$$

$$P_1P_2P_4(1-P_3), \quad (3-17)$$

$$P_1P_3P_4(1-P_2), \quad (3-18)$$

$$P_2P_3P_4(1-P_1), \quad (3-19)$$

4 個の微粒子すべてがエラーを起こす確率は

$$P_1P_2P_3P_4 \quad (3-20)$$

である。(3-20) 式では $S_e = d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2 = S_i$ なので確実に $S_e > S_i/2$ となる。つまり、bER は (3-20) 式と、(3-6) から (3-19) 式の中で $S_e > S_i/2$ となるものを合計したものである。1 ビットの計算結果の例を表 3-1 に示す。表の * は $S_e > S_i/2$ となる場合であることを示している。 $n=4$ の場合と同様なので、 $n=10$ の場合の bER の計算方法は省略する。

表 3-1 1 ビットの bER の計算結果

1 bit grain-number : $n = 4$			
	d_1 (nm)		3.61
	d_2 (nm)		3.40
	d_3 (nm)		5.00
	d_4 (nm)		3.52
	S_i (nm ²)		61.97
	P_1		1.48E-03
	P_2		4.26E-01
	P_3		4.59E-24
	P_4		1.69E-02
(1)	no grain-error bit	$(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)(1-P_4)$	5.64E-01
(2)	1 grain-error bit	(2-1) $P_1(1-P_2)(1-P_3)(1-P_4)$	8.38E-04
		(2-2) $P_2(1-P_1)(1-P_3)(1-P_4)$	4.18E-01
		(2-3) $P_3(1-P_1)(1-P_2)(1-P_4)$	2.59E-24
		(2-4) $P_4(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)$	9.70E-03
(3)	2 grain-error bit	(3-1) $P_1P_2(1-P_3)(1-P_4)$	6.22E-04
		(3-2) $P_1P_3(1-P_2)(1-P_4)$	3.85E-27 *
		(3-3) $P_1P_4(1-P_2)(1-P_3)$	1.44E-05
		(3-4) $P_2P_3(1-P_1)(1-P_4)$	1.92E-24 *
		(3-5) $P_2P_4(1-P_1)(1-P_3)$	7.19E-03
		(3-6) $P_3P_4(1-P_1)(1-P_2)$	4.46E-26 *
(4)	3 grain-error bit	(4-1) $P_1P_2P_3(1-P_4)$	2.86E-27 *
		(4-2) $P_1P_2P_4(1-P_3)$	1.07E-05 *
		(4-3) $P_1P_3P_4(1-P_2)$	6.63E-29 *
		(4-4) $P_2P_3P_4(1-P_1)$	3.30E-26 *
(5)	4 grain-error bit	$P_1P_2P_3P_4$	4.91E-29 *
		(1)+(2)+(3)+(4)+(5)	1.00E+00
	bER	(3-2)+(3-4)+(3-6)+(4-1)+(4-2)+(4-3)+(4-4)+(5)	1.07E-05

3.5.4 計算誤差の許容

bER の計算では乱数を使用するので、計算結果には誤差が生じる。計算ビット数 (計算回数) が多ければ多いほど、計算の精度が高くなるが、計算に要する時間も長くなる。ここでは、計算ビット数の決め方について説明する。

図 3-6 は $K_{\beta m} = 80$ 、 $\sigma = 0.9 \text{ nm (20\%)}$ としたときのそれぞれの n での bER の計算結果を示している。それぞれの計算ビット数で 10 回分の計算結果をプロットしている。

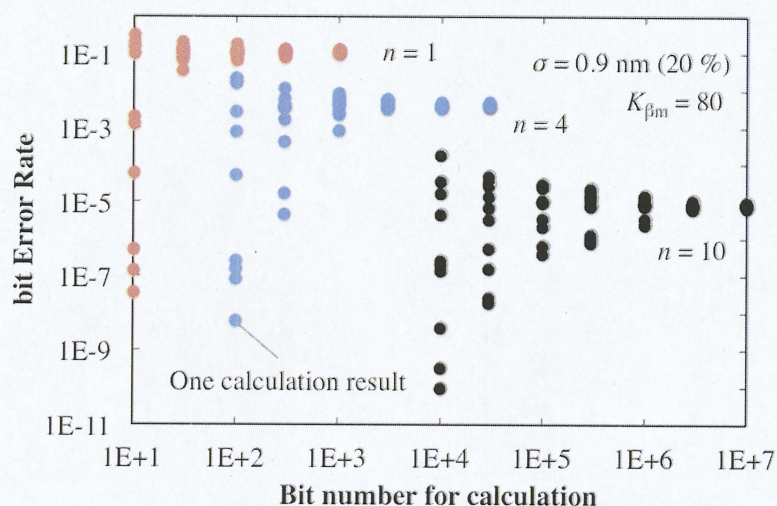


図 3-6 bER の計算結果

$n=10$ の場合、bER は約 1×10^{-5} であるが、計算ビット数を 1.0×10^4 とすると計算結果にかなりばらつきがでる。このとき、10 年間のうちにエラーを起こすビット数の期待値となる bER と計算ビット数の積は 0.1 であり、かなり低い。計算ビット数が 1.0×10^7 では計算結果が十分に収束しているが、bER と計算ビット数の積は 100 であり、10 年間のうちにエラーを起こすビット数の期待値が 100 個となる。 $n=4$ の場合では、計算結果が十分に収束する計算ビット数は 3.0×10^4 であり、このとき、10 年間のうちにエラーを起こすビット数の期待値は 120 個である。このように、10 年間のうちにエラーを起こすビット数の期待値が 100 個以上であれば、すなわち、 $100 / \text{bER}$ 以上の計算ビット数であれば bER の計算結果は十分な精度で得られるとする。

計算機で正規乱数を発生させ粒子サイズ d を与え P を決定し、bER を計算する、という流れで計算する。

3.6 計算結果

3.6.1 1 ビットあたりの粒子数依存

図 3-6 からわかるように $K_{\beta m} = 80$, $\sigma = 0.9 \text{ nm}(20\%)$ としたとき, n が 10 から 4 に減少すると bER が 2 桁悪くなり, 4 から 1 (BPM) になるとさらに 2 桁悪化する. これは, 面積を考慮して bER を計算しているため, $n=10$ では 7 個から 10 個の粒子がエラーを起こす確率にほぼ起因するが, $n=4$ では 3 個から 4 個の粒子がエラーを起こす確率にほぼ起因するからであると考えられる. 10 年間のうちに 7 個から 10 個もの粒子がエラーを起こす確率は非常に低い, 3 個や 4 個程度の粒子がエラーを起こす確率はそれほど低くない.

この結果は, 1 ビットあたりの粒子数 n を少なくすることが情報の安定性に影響を与えるかもしれない, という本研究の仮説が正しいことを証明し, 情報の安定性を検討する上で bER という要素が重要であるということを示している.

1 ビットあたりの粒子数 n を少なくすることで bER が悪化することがわかった. bER の改善方法として, $K_{\beta m}$ の増加, σ の低下, ECC の強化が考えられる. 以下でそれらを検討する.

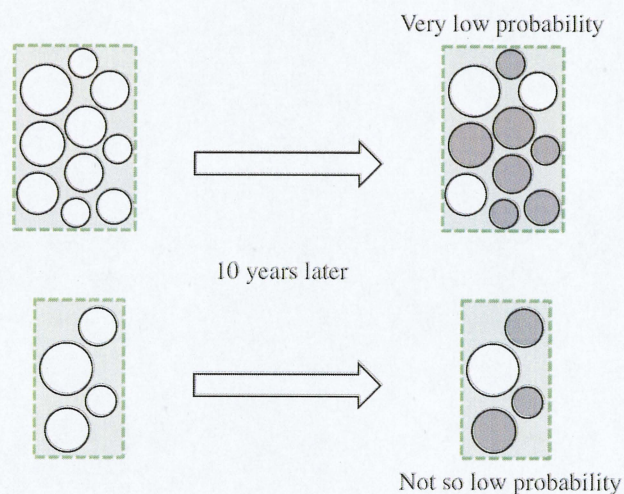


図 3-7 エラーを起こす粒子の数とエラー確率

3.6.2 熱揺らぎ指標依存

熱揺らぎ指標 $K_{\beta m}$ の大きな媒体を使えば、(3-4) 式から、磁性微粒子 1 個あたりのエラー確率 P を低くすることができる。 P が低くなれば bER も低くなる。

図 3-8 に $n=4$ および BPM で、熱揺らぎ指標 $K_{\beta m}$ を変化させたときの bER の計算結果を示す。なお、それぞれの $K_{\beta m}$ で 10 回分の計算結果をプロットしている。

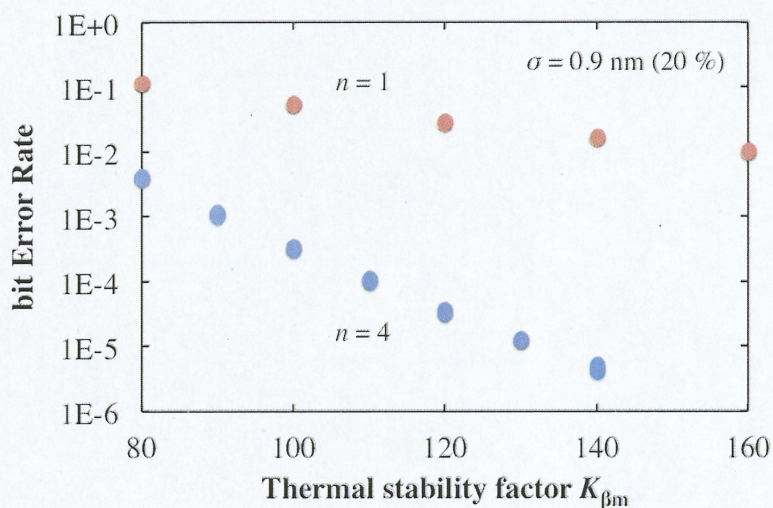


図 3-8 熱揺らぎ指標依存

$K_{\beta m}$ の増加により、 $n=4$ では bER の改善が見られるが、 $n=10$ で $K_{\beta m}=80$, $\sigma=0.9 \text{ nm}(20 \%)$ としたときの $\text{bER} = 1\text{E}-5$ を得るためには $K_{\beta m}$ を 130 まで上昇させなければならない。 $K_{\beta m}$ の増加のためには膜厚を厚くすることや磁気異方性エネルギー K_u の増加が必要となるが、グラニュー媒体ではあまり膜厚を厚くできないことや、 K_u の大きな媒体は作製が難しくなることが問題となる。例として、 $d=4.5 \text{ nm}$, $h=6.0 \text{ nm}$, $K_u=7.0 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ として $K_{\beta}(300 \text{ K})$ を計算すると、 $K_{\beta}(300 \text{ K})=161$ となるので $K_{\beta m}=130$ は実現が難しいかもしれない。BPM の場合、 $K_{\beta m}$ の増加による bER の改善はあまり有効ではなく、 $K_{\beta m}=160$ まですべて増加させても bER は $1\text{E}-2$ 程度にしか下がらない。

3.6.3 粒子サイズの標準偏差依存

媒体作製時に粒子サイズの標準偏差 σ を小さくすることができれば、小さな磁性微粒子が少

ない媒体となる． $P=1$ となる粒子が少なくなれば P の平均が低くなり bER も低くなる．

図 3-9 に $n=4$ および BPM で粒子サイズの標準偏差 σ を変化させたときの bER の計算結果を示す．なお，それぞれの σ で 10 回分の計算結果をプロットしている．

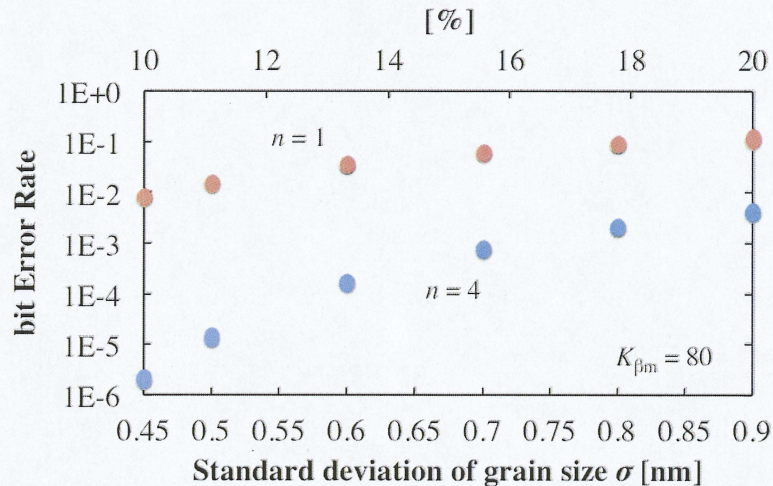


図 3-9 粒子サイズの標準偏差依存

$n=4$ では σ の低下により bER の改善が見られる．しかし bER を $1E-5$ 程度まで下げるには σ を 0.5 nm (11 %) にしなければならない．BPM の場合では， $\sigma = 0.45 \text{ nm}$ (10 %) まで低下させても bER は $8E-3$ 程度にしかならず， σ の低下は bER の改善にあまり効果はない．

3.6.4 ビットパターンド媒体の情報安定性

BPM では， $K_{\beta m}$ の増加や σ の低下が bER の改善に有効でないことがわかった．そこで， $K_{\beta m}$ を増加させ，かつ σ を低下させた場合，bER にどのような影響を与えるかを検討する．

図 3-10 にその計算結果を示す．

$K_{\beta m}$ が大きいとき ($K_{\beta m} = 100, 120$)， σ の低下により bER に改善が見られ， $K_{\beta m} = 100$ の場合 $\sigma = 0.47 \text{ nm}$ (10 %) で， $K_{\beta m} = 120$ の場合 $\sigma = 0.56 \text{ nm}$ (12 %) で $bER = 1E-3$ まで下がる．

図 3-11 のように $K_{\beta m}$ が小さいとき ($K_{\beta m} = 60$)， σ が 0.9 nm (20 %) と大きいときでも 0.45 nm (10 %) と小さいときでも $P=1$ となるサイズの粒子が多く存在する．一方， $P=1$ となる d は (3-4) 式より，

$$d = d_m \sqrt{\frac{\ln(f_0 t)}{K_{\beta m}}} \quad (3-21)$$

となり $\sqrt{1/K_{\beta m}}$ に比例するので、図 3-12 のように $K_{\beta m}$ が大きいとき ($K_{\beta m}=120$)、 σ が 0.9 nm (20 %) のときは $P=1$ となるサイズの粒子は少なくないが、0.45 nm (10 %) と小さいときは $P=1$ となるサイズの粒子がほとんど存在しなくなる。このため、 $K_{\beta m}$ が大きいときは σ の低下により bER の改善に効果があったと考えられる。

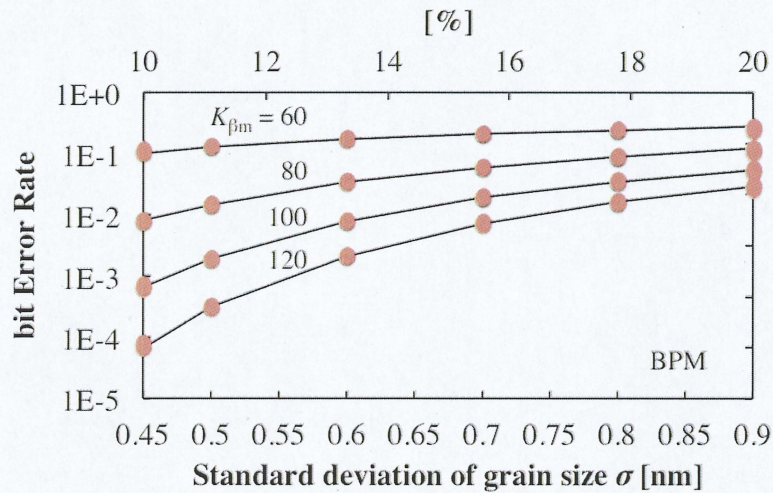


図 3-10 熱揺らぎ指標をパラメータとしたときの粒子サイズの標準偏差依存性 (BPM)

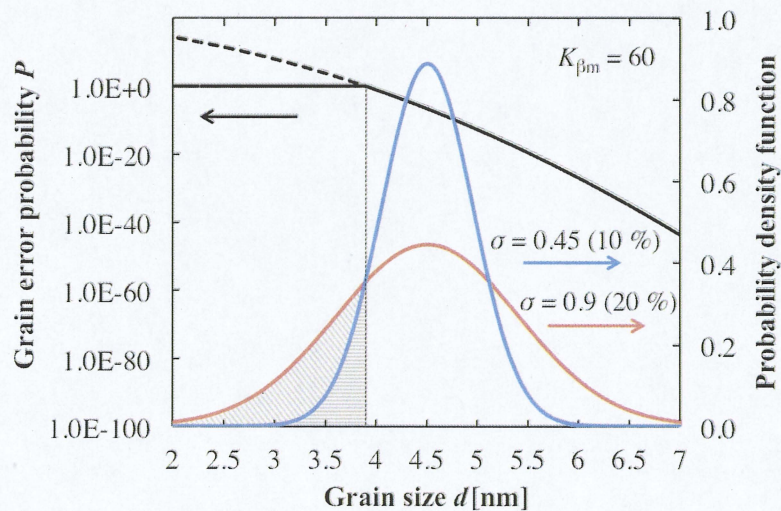


図 3-11 粒子サイズの標準偏差とエラー ($K_{\beta m}=60$)

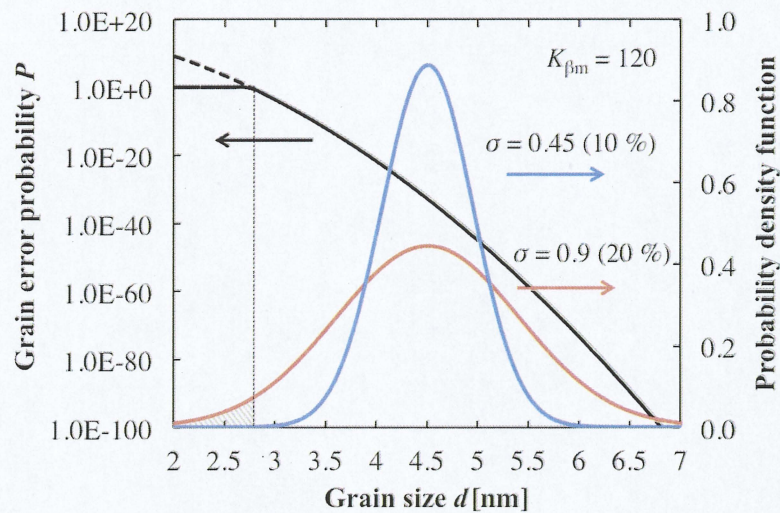


図 3-12 粒子サイズの標準偏差とエラー ($K_{\beta m} = 120$)

3.6.5 まとめ

表 3-2 に計算結果をまとめる．必要となる bER を $1E-5$ 以下とすると， $n=10$ では $K_{\beta m} = 80$ ， $\sigma = 0.9 \text{ nm}$ (20 %) が必要となることがわかった． $n=4$ に下げると $K_{\beta m} = 80$ ， $\sigma = 0.5 \text{ nm}$ (11 %) あるいは $K_{\beta m} = 130$ ， $\sigma = 0.9 \text{ nm}$ (20 %) が必要となることがわかった．しかし，これらは実現が難しいことが予想される．そこで，ECC の強化により，許容できる bER が $1E-3$ となった場合を考えると， $n=4$ では $K_{\beta m} = 80$ ， $\sigma = 0.73 \text{ nm}$ (16 %) あるいは $K_{\beta m} = 90$ ， $\sigma = 0.9 \text{ nm}$ (20 %) が必要となることがわかった．また，BPM では $K_{\beta m}$ だけの増加または σ だけの低下は bER の改善に有効ではなかったが， $K_{\beta m}$ が大きいときは， σ の低下が bER の改善に有効であることがわかった．bER = $1E-3$ を得るためには $K_{\beta m} = 100$ ， $\sigma = 0.47 \text{ nm}$ (10 %) や $K_{\beta m} = 120$ ， $\sigma = 0.56 \text{ nm}$ (12 %) が必要となることがわかった．BPM は 1 ビット分の情報を 1 つの粒子で記録するという性質から，グラニューラ媒体よりも大きな熱揺らぎ指標 $K_{\beta m}$ を持つことを期待されてきたが，この結果から，グラニューラ媒体よりも粒子サイズの標準偏差 σ をかなり小さくできなければ， $K_{\beta m}$ が大きくても情報安定性の低い媒体であることがわかった．

表 3-2 情報安定性の計算結果

bER	n	$K_{\beta m}$	σ (nm)	σ (%)
1E-5	10	80	0.9	20
	4	80	0.5	11
		130	0.9	20
1E-3	4	80	0.73	16
		90	0.9	20
	1	100	0.47	10
		120	0.56	12

4. 総括

HDD の記録密度向上は、その大容量化だけでなく、エネルギーや資源の節約にもなる。HDD の記録媒体にはグラニューラー媒体が用いられており、記録密度向上のためには、

- (1) 磁性微粒子を小さくする
- (2) 1 ビットあたりの磁性微粒の数を減少させる

という方法が考えられる。

(1) 磁性微粒子を小さくするためには、磁気記録のトリレンマを解消しなければならない。TAMR では記録時に媒体を加熱することで局所的に保磁力を下げて書き込みを行うため、磁気異方性エネルギー K_u の大きな材料を媒体に使うことができ、熱的安定性 ($K_u V / kT$) を保ちながら磁性微粒子を小さくすることができる。しかし、TG の TAMR では媒体を加熱し、広い範囲にヘッド磁界が印加するので、媒体設計においては、記録領域だけでなく、その周辺の情報安定性も考慮しなければならない。また、TAMR の媒体設計における数値計算では加熱することも考慮しなければならないので、 M_s や K_u に加えて T_c などのパラメータが複雑に関係し合っている。本研究では、記録領域とその周辺における熱的安定性の条件を解析的に計算し、それから数値計算を行うことで計算量を減らし、パラメータ間の相互関係をわかりやすくすることができた。TAMR 用の媒体として必要となる特性について、2 Tbps、4 Tbps、6 Tbps の面記録密度を想定して、膜厚と記録温度を変化させて検討した。

膜厚 h を厚くすると、その分必要となる K_u が小さくなるが、媒体に求められる冷却速度 $\partial T / \partial x$ が速くなってしまうことや、 h を厚くしすぎると非磁性体できれいに分離されたグラニューラー媒体とならないなどの問題もあり、 h を厚くすることが単純に媒体作製に有利になるかどうかの判断は難しい。

記録温度 T_w を高くすると K_u はあまり変化しないが、 T_c が高くなる。実際の媒体は T_c が高くなると K_u が大きくなるので、この結果は、 T_w を高くすることで媒体作製が有利になるということを示している。ただし、レーザー光の出力にも限界があるので、キュリー温度 T_c が高すぎると記録できなくなってしまうため、 T_w をあまり高くできない。

面記録密度を高くすると、 K_u が高くなる。4 Tbps や 6 Tbps の記録密度実現には膜厚の厚い媒体を作製しなければならない。

(2) 1 ビットあたりの粒子数 n を少なくする上で、グラニューラー媒体では磁性微粒子が不規則に配列しているので、最少である $n=1$ にすることはできない。そこで、1 ビット分の情報を 1 つの粒子で記録する媒体である BPM が提案されている。このように、 n を減らす方法については様々な検討がされてきたが、 n を減らすことが情報の安定性に与える影響に関する

研究は少ない。また、これまで情報の安定性は熱揺らぎ指標 K_β を用いて議論されることが多かったが、情報安定性の本質的な指標は bER である。本研究では、記録密度向上のために n を減少させることを考慮して、bER をシミュレーションすることで媒体の情報安定性を検討した。

n を 10 から 4 に減少させると bER は 2 桁悪くなり、4 から 1 (BPM) にするとさらに 2 桁悪化した。 $n=4$ の場合は K_β の増加または粒子サイズの標準偏差 σ の低下が bER の改善に有効であることがわかった。 K_β の増加のためには K_u を大きくすることや膜厚を厚くすることが必要となる。

BPM ではグラニューラー媒体よりも大きな K_β かつ小さな σ が必要となることがわかった。BPM は 1 ビット分の情報を 1 つの粒子で記録するという性質から、グラニューラー媒体よりも大きな熱揺らぎ指標 K_β を持つことを期待されてきた。しかし、今回の結果から、グラニューラー媒体よりも粒子サイズの標準偏差 σ をかなり小さくできなければ、 K_β が大きくても情報安定性の低い媒体であることがわかった。

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり，終始懇切丁寧な御指導，御鞭撻を賜った，三重大学工学部教授 工学博士 小林 正 先生に心から感謝致します。

本研究を遂行にあたり，種々の有益な御教示と御指導を頂いた三重大学工学部准教授 工学博士 藤原 裕司 先生に深く感謝致します。

日頃から種々の御協力を頂いた三重大学技術専門職員 前田 浩二 氏に深く感謝致します。

そして，杉田 寛佳 氏，堀江 匠 氏，布目 大策 氏，伊藤 雅哉 氏をはじめ，共に研究に励み御協力，御討論頂いたナノエレクトロニクス研究室の諸氏に深く感謝致します。

本研究の一部は情報ストレージ研究推進機構 (SRC) の助成のもとに遂行されました。ここに謝意を表わします。

参考文献

- 1) 村岡 裕明, "大容量情報ストレージと垂直磁気記録," 電子情報通信学会誌, Vol. 93, No. 9, pp. 816-818, 2010.
- 2) U.S. Environmental Protection Agency ENERGY STAR Program, "Report to congress on server and data center energy efficiency public law 109-431", p. 7, 2007.
- 3) 三浦 義正, "HDD の磁気記録とその将来," まぐね, vol. 2, no. 12, pp. 615-621, 2007.
- 4) 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, January 1997.
- 5) Akira Kikitsu, Tadashi Kai, Toshihiko Nagase, and Jun-ichi Akiyama, "A concept of exchange-coupled recording medium for heat-assisted magnetic recording," J. Appl. Phys., vol. 97, 10P701, 2005.
- 6) 喜々津 哲, 甲斐 正, 永瀬 俊彦, 秋山 純一, "熱アシスト磁気記録のための交換結合二層媒体," 信学技報, MR2004-64, 2005.
- 7) 喜々津 哲, 甲斐 正, 永瀬 俊彦, 秋山 純一, "熱アシスト磁気記録用交換結合二層媒体," 信学技報, MR2005-52, 2006.
- 8) 澤田 章弘, "熱アシスト磁気記録における熱的安定性を考慮した媒体特性の検討," 修士論文, 三重大学, 2011.
- 9) 林 秀晃, "RE-TM 膜における磁壁移動速度と交換結合に関するシミュレーション," 修士論文, 三重大学, pp. 6-9, 2009.
- 10) 小林 正, "希土類-鉄族非晶質合金薄膜およびその複合膜の磁性と磁気光学効果に関する研究," 博士論文, 名古屋大学, pp. 57-63, 1985.
- 11) J. -U. Thiele, K. R. Coffey, M. F. Toney, J. A. Hedstrom, and A. J. Kellock, "Temperature dependent magnetic properties of highly chemically ordered $\text{Fe}_{55-x}\text{Ne}_x\text{PtL}_{10}$ films," J. Appl. Phys., vol. 91, no. 10, May 2002.
- 12) Masukazu Igarashi and Yutaka Sugita, "Validity of values of thermal stability and recording medium obtained by using Sharrock's formula," IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 10, October 2006.
- 13) Masukazu Igarashi and Yutaka Sugita, "Study of attempt frequency in Sharrock's formula for perpendicular recording hard disk media," J. Magn. Magn. Mat., vol. 320, pp. 2988-2991, August 2008.

論文目録

- 1) 小林 正, 北山 達哉, 藤原 裕司, "熱アシスト磁気記録における記録プロセスの検討(Ⅱ)," 信学技報, MR2010-14, 2010.
- 2) 北山 達哉, 澤田 章弘, 小林 正, 藤原 裕司, "熱アシスト磁気記録における媒体特性の検討," 第 34 回 日本磁気学会学術講演概要集, 4aA-11, 2010.
- 3) Tadashi Kobayashi, Tatsuya Kitayama, and Yuji Fujiwara, "Media design analysis for thermally assisted magnetic recording," J. Magn. Soc. Jpn., vol. 35, pp. 175-179, 2011.
- 4) 堀江 匠, 北山 達哉, 杉田 寛佳, 小林 正, 藤原 裕司, "熱アシスト磁気記録における媒体特性の検討(Ⅱ)," 第 35 回 日本磁気学会学術講演概要集, 28pA-5, 2005.
- 5) Tatsuya Kitayama, Takumi Horie, Tadashi Kobayashi, Yuji Fujiwara, "Analysis of information stability in magnetic recording using granular media," IS² EMU 2011, pp. 449-451, 2011.
- 6) 小林 正, 北山 達哉, 藤原 裕司, "磁気記録における情報安定性," 信学技報(発表予定), 2012.