

# Fe-Pt 系合金薄膜を用いた熱アシスト磁気記録媒体の設計



23 年度

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 物理工学専攻

杉田 寛佳

## 目次

第1章 序論.....	1
1-1 はじめに.....	1
1-2 磁気記録.....	1
1-2-1 記録方式.....	1
1-2-2 記録・再生.....	2
1-2 トリレンマ.....	3
1-3 熱アシスト磁気記録.....	5
1-4 本研究の目的と概要.....	6
第2章 シミュレーション方法.....	7
2-1 はじめに.....	7
2-2 分子場近似.....	7
2-3 ニュートン法.....	8
2-4 熱揺らぎ指標.....	9
第3章 計算条件.....	12
3-1 はじめに.....	12
3-1 4 Tbps, granular, thermal gradient.....	12
3-2-2 記録領域周辺.....	12
3-2-2 ヘッド磁界の分布.....	14
3-3 計算モデル.....	14
3-4 熱揺らぎ指標 $K_\beta$ .....	15
3-4-1 330K.....	15
3-4-2 $T_w$ .....	15
3-4-3 $T_{rec}$ .....	16
3-4-4 $T_{adj}$ .....	16
3-5 計算アルゴリズム.....	18
第4章 シミュレーション結果.....	19
4-1 はじめに.....	19
4-2 Model-1 (バルク $Fe_{0.5}Pt_{0.5}$ $M_s 1000 \text{emu/cm}^3$ , $K_u 70 \times 10^6 \text{erg/cm}^3$ , $T_c 770 \text{K}$ ).....	19
4-2-1 計算結果.....	19
4-2-2 膜厚依存性(Model-1).....	21
4-2-3 物理的関係性.....	22
4-2-4 記録温度依存性(Model-1).....	24
4-3 Model-2 ( $Fe_{0.5}Pt_{0.5}$ $M_s 1125 \text{emu/cc}$ , $K_u 70 \times 10^6 \text{erg/cc}$ , $T_c 770 \text{K}$ ).....	25
4-3-1 計算結果(Model-2).....	25
4-3-2 膜厚依存性(Model-2).....	26

4-3-3	記録温度依存性(Model-2).....	27
4-4	Model-3 ( $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$ $M_s$ 1000emu/cm <sup>3</sup> , $K_u$ $46 \times 10^6$ erg/cm <sup>3</sup> , $T_c$ 770K).....	28
4-4-1	計算結果(Model-3).....	28
4-4-2	膜厚依存性(Model-3).....	29
4-4-3	記録温度依存性(Model-3).....	30
4-5	Model-4 (薄膜 $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$ $M_s$ 1125emu/cc, $K_u$ $46 \times 10^6$ erg/cc, $T_c$ 770K).....	31
4-5-1	計算結果(Model-4).....	31
4-5-2	膜厚依存性(Model-4).....	32
4-5-3	記録温度依存性(Model-4).....	33
第5章 総括.....		35
謝辞.....		37
参考文献.....		38

## 第1章 序論

### 1-1 はじめに

近年、動画や画像や音楽などの大容量のデータ通信が一般的になってきている。また、2011年7月にデジタル放送の移行が行われた。このようなことにより一人一人が扱う情報量が増え続けている。また、今後高度情報化によりのハードディスクドライブ (Hard Disk Drive, HDD) の省エネが課題とされている。このようなことにより、今後も記録容量の向上が求められている。HDDは、記録密度が1990年代に10年で約100倍という急激な技術革新がなされてきた。HDDは、超常磁性限界により、記録密度の成長が低下している。超常磁性限界とは、磁性微粒子の微小化により、記録された情報の熱的安定性が失われてしまい、磁化の方向がランダムに反転してしまうことであり、記録密度に限界をもたらしている。この課題を解決するための次世代の高密度記録方式の有力な候補として熱アシスト磁気記録 (Thermally Assisted Magnetic Recording, TAMR) 方式などが研究されている。

### 1-2 磁気記録

#### 1-2-1 記録方式

磁気記録は記録面の磁化の向きを0,1の2進法に変換して記録再生される。

図1-1に示すような従来の面内磁気記録方式では、磁化の向きを面内方向に並行に配置し、記録・再生が行われる。この方式では、記録密度を高めるため、磁性微粒子の体積を小さくしたときビット間の反発力が相対的に大きくなり、熱揺らぎ問題により磁化が反転しやすくなり情報を安定して保持できなくなる。そこで提案されたのが図1-2に示すように面に垂直に磁化を配置する垂直磁気記録方式である。この方式では、ビット間で互いの漏れ磁界が強め合う力が働くため、面内磁気記録方式に比べて記録情報の熱的安定性が高くなる。



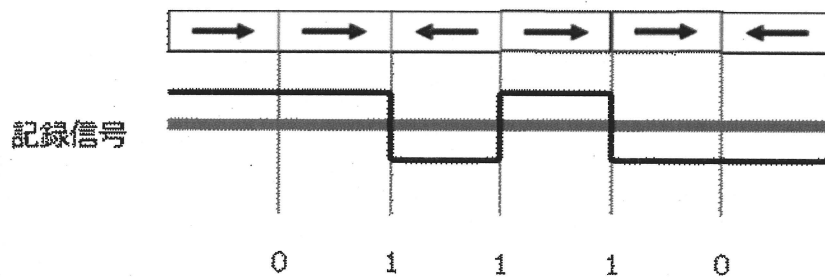


図1-1 面内記録方式

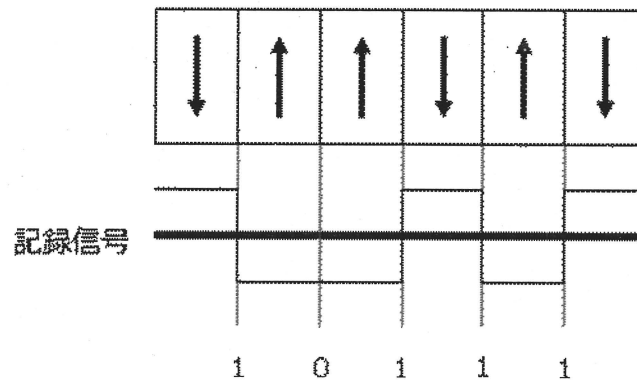


図1-2 垂直記録方式

### 1-2-2 記録・再生

磁気記録では磁気ヘッドで記録・再生が行われる。記録は単磁極ヘッドでされる。単磁極ヘッドは主磁極を細くし、軟磁性裏打ち層を設けることで大きな磁界で記録することができる。ヘッド磁界を印加したとき、軟磁性裏打ち層では磁荷の分布に変化が生じて、分極が起こり、軟磁性裏打ち層内で磁極が発生する。これにより、ヘッド磁界が大きくなる。

再生は巨大磁気抵抗効果をGMR (Giant Magneto Resistance : 巨大磁気抵抗) ヘッドやTMR (Tunneling Magneto Resistance : トンネル磁気抵抗) ヘッドが用いられる。GMRヘッドは記録磁化による漏れ磁界によってGMR素子の電気抵抗に変化が生じる。端子間に電流を供給することによって、GMR素子の抵抗変化を電圧変化の出力として得ることで記録

情報を読み取る。TMRヘッドは記録による漏れ磁界によってTMR素子のトンネル磁気抵抗が変化によって記録を読み取る。

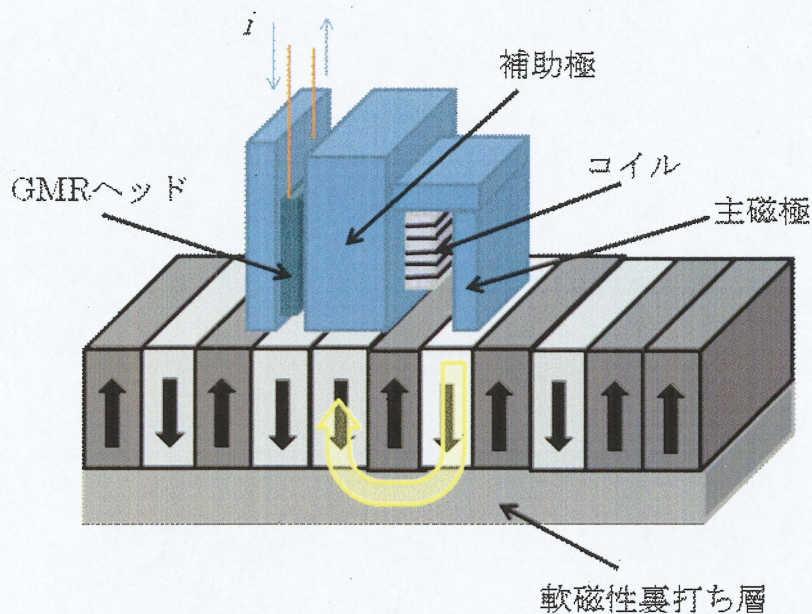


図1-3 単磁極ヘッド

### 1-3 トリレンマ

磁気記録は図1-4のような不連続媒体で構成される。図1-4のように記録媒体のそれぞれの磁性微粒子は単磁区構造となっており、複数の磁性微粒子を使って1bitを記録している。記録密度向上のため、磁性微粒子の微細化が必要になる。ここで磁性微粒子体積が減少することにより、記録情報の熱的安定性が失われることが問題となっている。

不連続体では、記録密度を高めるためには、記録領域の境界の凸凹を減らす必要がある。そのため、図1-4(b)のように磁性微粒子の体積を小さくしなければならない。

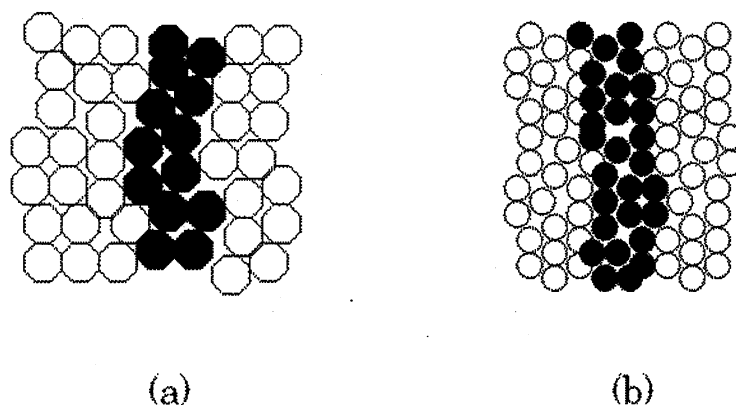


図1-4 不連続体

そこで、磁気記録で記録密度を高めるためには以下のことが問題となる。

1. 記録密度を上げるために磁性微粒子の体積 $V$ を小さくしなければならない
2. 記録媒体は熱擾乱によって十分な熱的安定性がなければ記録を保持できなくなってしまう。熱的安定性の目安として熱揺らぎ指標は以下の式で表され、ある程度大きくしなければならない

$$K_B = \frac{K_u V}{k_B T}$$

ここで $K_u$ は磁性微粒子の異方性エネルギー定数、 $k_B$ はボルツマン定数、 $T$ は絶対温度である。

3. ヘッド磁界はヘッドの軟磁性材料の飽和磁化  $M_s$  に依存するので、ヘッド磁界強度には限界があり、情報を書き込むために磁性微粒子の保磁力  $H_c$  はヘッド磁界より小さくならない。 $H_c$ は、

$$H_c \propto \frac{K_u}{M_s}$$

であり、ここで $M_s$ は磁性微粒子の飽和磁化である。

記録密度を高くするには磁性微粒子の体積 $V$ を小さくしなければならない。体積を小さくすると $K_u$ が小さくなり、熱的安定性が悪くなってしまふ。十分な熱的安定性を得るために $K_u$ を大きくすると $H_c$ が大きくなってしまひ記録できなくなってしまう。このように磁気記録では、記録密度を高くすると磁性微粒子の体積、熱的安定性、磁性微粒子の保磁力の3つの条件を同時に満たせなる問題を磁気記録のトリレンマという。

#### 1-4 熱アシスト磁気記録

体積の減少によつてもたらされる熱ゆらぎ問題を解決する技術として熱アシスト磁気記録 (Thermally Assisted Magnetic Recording: TAMR) 方式が提案されている。熱ゆらぎ問題を解決することにより、記録密度の向上が可能となる。

熱ゆらぎ問題に対しては記録媒体に  $K_u$  の大きい材料を用いれば十分な熱的安定性を確保することができるが、保磁力  $H_c$  が  $K_u$  に比例して大きくなってしまひ、ヘッド磁界には上限があるので記録できなくなる。TAMR 方式は、記録時に媒体の微小な領域をレーザーによつて加熱することで  $H_c$  を低くして記録する方式であり、高い  $K_u$  の材料でも  $H_c$  を下げることで記録することができる。このため、室温での  $H_c$  を高く設定することができるので  $K_u$  の高い材料を用いることができる。よつて、情報の熱的安定性を失わずに磁性微粒子の微細化が可能となる。

TAMR には Thermal Gradient(TG), Field Gradient(FG)と Dual Gradient(DG)がある。TG は、広い範囲に磁界を印加して記録領域のみにレーザーによつて加熱をして記録をする。FG は、広い範囲を加熱して記録領域のみ局所的に磁界を印加して記録をする。DG は、記録領域のみ加熱をして磁界を印加することで記録する。

TAMRでは記録時に媒体を加熱することによつて記録直後の冷却過程にある記録情報の熱揺らぎが加速してしまふ問題がある。また、記録後も加熱源が記録ビットを通過するたびに隣接トラックの記録情報がわずかに熱揺らぎの影響をうける。 $10^5$  回の書き換えを想定したとき、この熱揺らぎは無視できないものとなり、記録情報が劣化する。必要な熱的安定性を確保するため、磁性微粒子の体積 $V$ を小さくすることができなくなる。そこで、ヒートシンク層を設けることや加熱スポットを小さくすることなどによつて記録後の媒体の冷却時間を短くすることなどによつて、熱揺らぎの加速による情報の劣化を少なくすることが求められる。

## 1-5 本研究の目的と概要

次世代の磁気記録の高密度化方式の有力な候補として、熱アシスト磁気記録(TAMR)がある。TAMR は記録時に媒体を加熱して保磁力を下げたて記録する方式であるが、TAMR 媒体の設計には膜厚、磁化、磁気異方性、キュリー温度などの材料特性が複雑に関係してくる。従来、材料特性の一つが変化したときに TAMR 成立条件がどのように変化するかはわかっていたが、現実の材料では特性のいくつかが同時に変化する。

本研究では、実際の材料として Fe-Pt 系合金を想定し、その特性を変えたときに TAMR 成立条件がどのように変化するかをシミュレーションで検討した。Fe-Pt-Cu の Cu による単純希釈分子場近似シミュレーションは報告されている薄膜の Fe-Ni-Pt の実験結果をかなり再現できるので、計算の容易な Fe-Pt-Cu で検討をする。

第1章では、磁気記録の方式や記録再生の原理、さらにトリレンマ、TAMR について簡潔に述べた。

第2章では、シミュレーションの方法、また熱揺らぎ指標について述べる。

第3章では、シミュレーションの計算条件について述べる。

第4章では、実際の材料として Fe-Pt 系合金を想定し、Fe-Pt のバルクの磁気特性に一致させて Fe-Pt-Cu の Cu 単純希釈分子場近似シミュレーションをした結果について述べる。また、Fe-Pt の薄膜の磁気特性に一致させてシミュレーションした結果についても述べる。

第5章では、本研究の総括をする。

## 2章 シミュレーション方法

### 2-1 はじめに

本研究では、TAMR 媒体として、フェロ磁性体の Fe-Pt 系合金を想定し、一元系の強磁性体の分子場近似を用いてシミュレーションする。本章では、その導出方法、熱揺らぎ指標について記述する。

### 2-2 分子場近似

強磁性体は磁性原子一つ一つの磁気モーメントがある一定の方向に整列されて、大きな磁気モーメントを持つ物質である。強磁性体内部での磁気モーメント間には複雑に交換相互作用が働いており、各々の磁性微粒子を考え、磁気特性を計算することは難しい。そこで、磁気特性の計算に分子場近似を用いる。分子場近似とは、ある一つの磁気モーメントに働く交換相互作用を平均的磁場として近似することである。

フェロ磁性体 ( $\text{TM}_x \text{M}_{1-x}$ )<sub>2</sub>M<sub>2</sub> の分子場近似を以下に示す。TAMR 媒体では、熱的安定性を考慮すると TM、M1 は高い磁気異方性をもつ Fe-Pt や Co-Pt が適する。ここで TM は 3d 遷移金属の磁性体、M1 は Pt などである。M2 は単純希釈元素として加えられた非磁性体である。

ある温度  $T$  におけるスピン角運動量  $S$  の熱平均  $\langle S \rangle$ 、分子磁界  $H$  は、

$$\langle S \rangle = SB_S(g\mu_B SH/k_B T)$$
$$H = \frac{2J_{11}z_{11}\langle S \rangle}{g\mu_B}$$

となる。ここで、 $g$  は TM 原子の  $g$  係数、 $\mu_B$  はボーア磁子、 $H$  は分子磁界、 $J_{11}$  は TM 原子の交換積分である。

$B_S(x)$  は Brillouin 関数と呼ばれ、

$$B_S(x) = \frac{2S+1}{2S} \coth\left(\frac{2S+1}{2S}x\right) - \frac{1}{2S} \coth\left(\frac{x}{2S}\right)$$

と表される。単位体積当たりの原子数  $N$  は、

$$N = \frac{1}{[x(1-z)V_{TM} + (1-x)(1-z)V_{M1} + zV_{M2}]}$$

で与えられる。ここで、 $V_{TM}$ 、 $V_{M1}$ 、 $V_{M2}$ はそれぞれの原子一個あたりの体積である。

ある一つのTM原子の最近接TM原子数 $z$ は、

$$z_{11} = 8x(1-z)$$

となる。温度 $T$ におけるTMの磁化 $M_s(T)$ は、

$$M_s(T) = N\mu_B |x(1-z)g(S)|$$

で与えられる。4式において、 $x \ll 1$ のとき、

$$B_s(x) \sim \frac{(S+1)x}{3S}$$

と近似され、

$$A_{11} = J_{11}z_{11}S(S+1)$$

とすると、キュリー温度 $T_c$ は、 $t_c = 3K_B T_c$ としたとき、

$$\begin{vmatrix} 2A_{11} & 0 \\ 0 & -t_c \end{vmatrix} = 0$$

より求められる。これを解くと、

$$T_c = \frac{2A_{11}}{3k_B} = \frac{2J_{11}z_{11}S(S+1)}{3k_B}$$

となる。また、TM一原子当たりのTM原子とのpair orderingによる異方性は、

$$\kappa_{11} = D_2 \langle S \rangle z_{11} \langle S \rangle$$

となる。 $D_2$ はTM-TMのpair orderingによる異方性定数である。よって、 $K_u$ は、

$$K_u = Nx^2z(1-z)D_2 \langle S \rangle^2$$

となる。フェロ磁性体分子場近似によって温度 $T$ における $M_s(T)$ 、 $K_u(T)$ を導出する。TAMR媒体を一斉回転モデルの垂直磁化膜と仮定することで、保磁力 $H_c$ は $H_c = H_k$ と考えられるので、

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

となる。

### 2-3 ニュートン法

ニュートン法とは非線形方程式の数値解を求める手段の一つである、本研究では分子場近似をニュートン法を利用して解く。

$$f(x)=0$$



の解を $x$ とする。ここで $x$ のある初期近似値 $x_0$ をとり、 $x_0$ より近い近似値 $x_1$ を

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

によって求められる。繰り返しこの近似計算をすることによって、 $x$ により近い近似値 $x_1$ を得ることができる。つまり、初期近似値をとり、

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}$$

の計算を繰り返すことによって近似値を求めることができる。これをニュートン法という。

## 2-4 熱揺らぎ指標

磁性体における熱的安定性を表すものとして熱揺らぎ指標を用いる。熱揺らぎはモーメントを容易軸方向に向かせようとする磁氣的エネルギーと熱的エネルギーの比で与えられる。以下で熱揺らぎ指標を導出する。

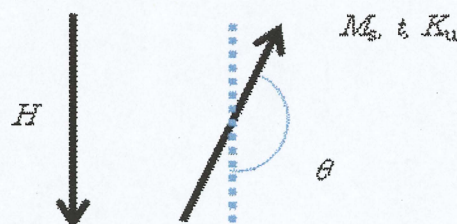


図2-1 単層膜のエネルギー障壁

図において最初に磁化方向が $\theta = \pi$ であると仮定し、磁界 $H$ を印加して $\theta = 0$ に磁化を反転させることを考える。 $\theta = 0, \pi$ でエネルギー極小であり、ここでのエネルギーを $E_0$ とする。また、 $0 < \theta < \pi$ にエネルギー極大が存在し、そのエネルギーを $E_1$ とする。そのとき、エネルギー障壁 $E_1 - E_0 \equiv \Delta E$ となる。

単位体積当たりの $E$ は、

$$E = -M_s t H \cos \theta + K_u t \sin^2 \theta$$

となる。ここでは膜厚である。エネルギー極値は、



$$\frac{\Delta E}{\Delta \theta} = M_s t H \sin \theta + 2K_u t \sin \theta \cos \theta = \sin \theta (M_s t H + 2K_u t \cos \theta) = 0$$

よりエネルギー極小は、

$$\sin \theta = 0, \quad \therefore \theta = 0, \pi$$

また、エネルギー極大は、

$$M_s t H + 2K_u t \cos \theta = 0, \quad \therefore \cos \theta = -\frac{M_s H}{2K_u}$$

で与えられる。

ここで  $E_0$  は  $\theta = \pi$  となるので、

$$E_0 = M_s t H$$

また、 $E_1$  は、

$$\begin{aligned} E_1 &= -M_s t H \cos \theta + K_u t \sin^2 \theta = -M_s t H \cos \theta + K_u t (1 - \cos^2 \theta) \\ &= -M_s t H \left( -\frac{M_s H}{2K_u} \right) + K_u t \left( 1 - \left( -\frac{M_s H}{2K_u} \right)^2 \right) = \frac{M_s^2 H^2}{2K_u} + K_u t - \frac{M_s^2 t H^2}{4K_u} \\ &= \frac{M_s^2 t H^2}{4K_u} + K_u t \end{aligned}$$

となる。よって、エネルギー障壁  $\Delta E$  は、

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_1 - E_0 = \frac{M_s^2 t H^2}{4K_u} + K_u t - M_s t H \\ &= K_u t \left( \frac{M_s^2 t H^2}{4K_u} + 1 - \frac{M_s H}{K_u} \right) = K_u t \left( 1 - 2 \frac{M_s H}{2K_u} + \left( -\frac{M_s H}{2K_u} \right)^2 \right) \\ &= K_u t \left( 1 - \frac{H}{\frac{2K_u}{M_s}} \right)^2 \end{aligned}$$

となる。5式に  $H_k = 2K_u/M_s$  を代入すると、

$$\Delta E = K_u t \left( 1 - \frac{H}{H_k} \right)^2$$

となり、無磁界では、

$$\Delta E = K_u t$$

となる。 $\theta = \pi$  の方向に外部磁界  $H$  が印加されているとき、熱揺らぎ指標は以下の式で与えられる。

$$K_{\beta} = \frac{\Delta E S}{k_B T} = \frac{K_u t S}{k_B T} \left(1 - \frac{H}{H_c}\right)^2$$

$$= \frac{K_u t S}{k_B T} \left(1 - \frac{H}{H_c}\right)^2$$

ここで、 $S$ は磁性微粒子の面積である。

また、無磁界では、

$$K_{\beta} = \frac{K_u V}{k_B T}$$

となる。

$\theta = 0$ の方向に $H$ が印加されるときの $K_{\beta}$ を考える。このときのエネルギー障壁 $\Delta E'$ は、

$$\Delta E' = K_u t \left(1 + \frac{H}{H_k}\right)^2$$

となり、

$$K_{\beta} = \frac{K_u V}{k_B T} \left(1 + \frac{H}{H_c}\right)^2$$

となる。

### 第3章 計算条件

#### 3-1 はじめに

熱アシスト磁気記録の Thermal Gradient(TG)方式によって 4 Tbps のグラニューラー媒体に記録することを想定する。TAMR 成立条件として、無磁界 10 年間の熱的安定性  $K_{\beta 0}$ 、記録時の情報の熱的安定性  $K_{\beta w}$ 、記録直後の情報の熱的安定性  $K_{\beta \text{rec}}$  と隣接トラックでの情報の熱的安定性  $K_{\beta \text{adj}}$  について検討する。以下では、計算条件について示す。

#### 3-2 4 Tbps, granular, thermal gradient

##### 3-2-1 記録領域周辺

グラニューラー媒体の磁性微粒子の大きさを図 3-1(a)のように決める。線記録密度は 3200kFCI、トラック密度を 1440kTPI とする。1 bit 当たりの磁性微粒子数を約 5 個とする。グラニューラー媒体は不連続媒体で不規則に並んでいるが、図に示すように計算を簡単にするため規則的にならべる。ヘッド磁界の分布は図 3-1(b)に示す。主磁極の大きさをダウントラック方向で 600nm、クロストラック方向で 300nm とする。

本研究では、TAMR として TG を想定し計算をする。記録領域を含む広い範囲にヘッド磁界  $H_w$  を印加し、書き込みが完了したときの磁性微粒子の温度を  $T_w$  とする。書き込み過程が完了して冷却過程にある  $T_w$  の位置からトレーリング側に 1 bit ずれた磁性微粒子の温度を  $T_{\text{rec}}$  とする。その温度差を  $\Delta T = T_w - T_{\text{rec}}$  とする。 $T_{\text{rec}}$  の磁性微粒子には 1bit 前の情報が記録されており、 $T_w$  の記録時に  $T_{\text{rec}}$  の記録された情報は保持されなくてはならない。bit 間距離  $\Delta x$  は線記録密度 3200kFCI なので、 $\Delta x = 7.9\text{nm}$  となる。媒体の冷却速度  $\Delta T/\Delta x$  を  $\Delta T/\Delta x < 10 \text{ K/nm}$  とする。

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_w - T_{\text{rec}}}{7.9} < 10 \text{ K/nm}$$

となり、これを満たさなければならない。

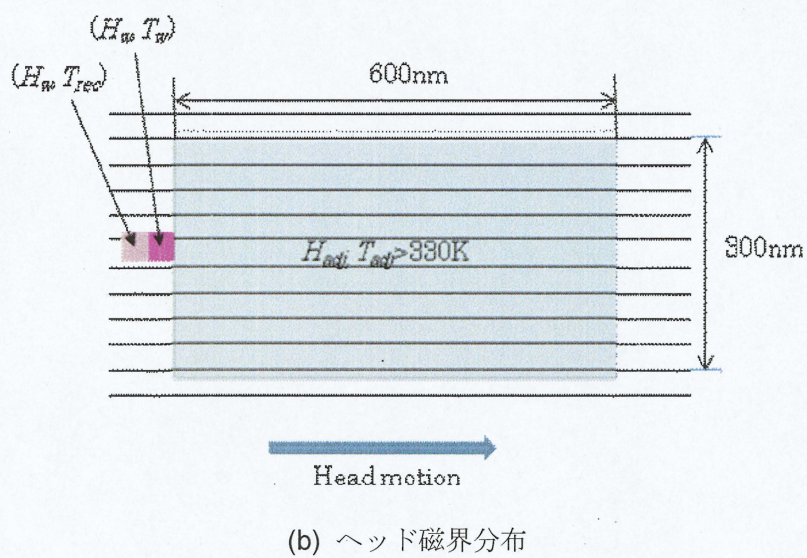
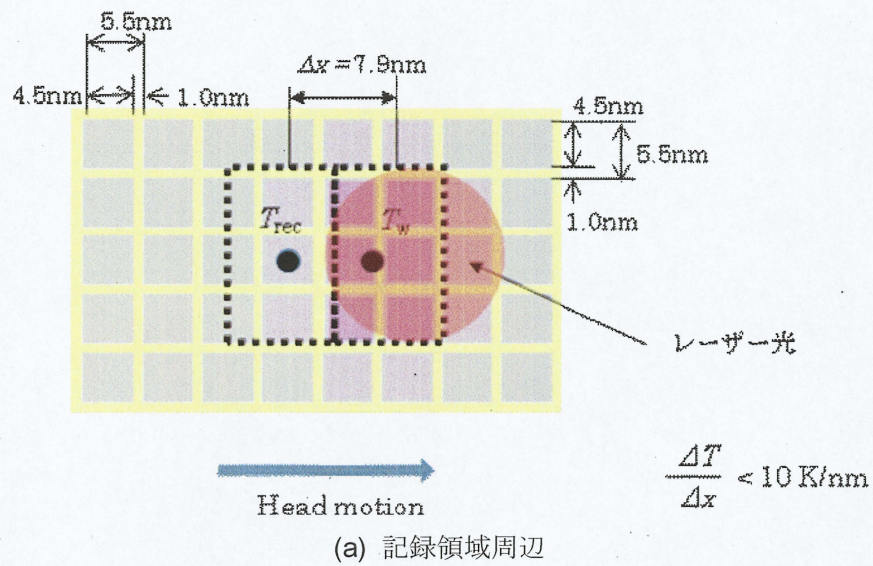


図 3-1 グラニューラー媒体 (4Tbpsi、TG)

### 3-2-2 ヘッド磁界の分布

図 3-1(b)にヘッド磁界の分布を示す。書き込み時の隣接トラックには  $600\text{nm} \times 300\text{nm}$  の範囲に  $H_{\text{adj}}$  が印加される。加熱は主磁極のトレーリング側で行われるので  $H_{\text{adj}} > H_w$  となる。書き込み時の隣接トラックの温度を  $T_{\text{adj}}$  とする。ハードディスクの動作時、内部は温度が上昇する。TAMR 媒体はキュリー温度が低く、温度によって磁気特性がかなり変化するので周囲温度の最大を  $330\text{K}$  とする。TAMR 媒体は  $T_{\text{adj}} > 330\text{K}$  を満たさなければならない。

### 3-3 計算モデル

表 3-1 に計算条件を示す。 $K_u$  と  $M_s$  は、表 3-1(b)に示すように  $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$  のバルクの磁気特性( $M_s$   $1000\text{emu/cc}$ ,  $K_u$   $70 \times 10^6\text{erg/cc}$ ,  $T_c$   $770\text{K}$ )に一致させたモデル、薄膜の磁気特性( $M_s$   $1125\text{emu/cc}$ ,  $K_u$   $46 \times 10^6\text{erg/cc}$ ,  $T_c$   $770\text{K}$ )に一致させたモデルで計算をする。膜厚  $t$  は  $4\text{nm}$ ,  $6\text{nm}$ ,  $8\text{nm}$ 、記録温度  $T_w$  は  $500\text{K}$ ,  $550\text{K}$ ,  $600\text{K}$  とする。冷却速度は  $dT/dx(\text{K/nm}) < 10$ , 隣接トラックにおける情報保持最高温度は  $T_{\text{adj}}(\text{K}) > 330$  とする。

表 3-1 計算モデル

(a)

$t(\text{nm})$	4, 6, 8
$T_w(\text{K})$	500, 550, 600
$K_u/\text{Wk}(300\text{K})$	> 60
$\Delta T/\Delta x(\text{K/nm})$	< 10
$T_{\text{adj}}(\text{K})$	> 330

(b)

	Model-1	Model-2	Model-3	Model-4
$M_s(\text{emu/cm}^3)$	1000	1000	1125	1125
$K_u(\text{erg/cm}^3)$	$70 \times 10^6$	$46 \times 10^6$	$70 \times 10^6$	$46 \times 10^6$

### 3-4 熱揺らぎ指標 $K_\beta$

記録媒体の熱的安定性の目安として熱揺らぎ指標  $K_\beta$  が用いられる。一般的に  $K_\beta$  は、

$$K_\beta = \frac{K_u V}{k_B T} \left( 1 \pm \frac{H}{H_c} \right)^2$$

で表される。 $T$  と  $H$  の関数である。ここで複合の+は  $H$  と  $M_s$  が平行、—は反平行の場合である。

#### 3-4-1 330K

周囲温度の最大 330K、無磁界で 10 年間 ( $\tau = 3.2 \times 10^8$ ) のデータ保持のため  $K_\beta$  が 60 以上必要であるとし、これを  $K_{\beta 0}(330K)$  とすると、

$$K_{\beta 0}(330K) = \frac{K_u V}{k_B T} > 60$$

となる。

$\tau$  は  $\exp(K_{\beta 0}(330K))$  に比例するので、

$$\tau \propto \exp(K_{\beta 0}(330K))$$

となる。

#### 3-4-2 $T_w$

温度  $T_w$  で磁界  $H_w$  が印加されている状態で、ある時間  $\tau'$ 、 $M_s$  の方向が安定であるとき記録が完了したとする。このときの  $K_\beta$  を  $K_{\beta w}(T_w)$  とする。媒体が bit 間距離  $_x$  を移動するのにかかる時間を  $\tau'$  とする。

$$\tau \propto \exp(K_{\beta w}(T_w))$$

となる。例えば線速度  $v=10$  m/s で考えると、このときの  $K_{\beta w}(T_w)$  は

$$\frac{\tau'}{\tau} = \frac{0.79 \times 10^{-9}}{3.2 \times 10^8} = \frac{\exp(K_{\beta 0}(T_w))}{\exp(K_{\beta 0}(330K))}$$

となり、これより、

$$K_{\beta w}(T_w) = \ln\left(\frac{\tau'}{\tau} \exp(K_{\beta 0}(330K))\right) = \ln\left(\frac{\tau'}{\tau}\right) + K_{\beta 0}(330K) = 19$$

となる。

$H_w$  と  $M_s$  はそれぞれ記録方向と一致するので平行となる。よって  $K_{\beta w}(T_w)$  は、

$$K_{\beta w}(T_w) = \frac{K_u V}{k_B T} \left(1 + \frac{H}{H_c}\right)^2 = 19$$

となる。

### 3-4-3 $T_{rec}$

記録が完了した位置 (温度  $T_w$ ) からトレーリング側に 1 bit ずれた位置 (温度  $T_{rec}$ ) には、1bit 前の情報が記録されている。温度  $T_{rec}$  の位置では磁界  $H_w$  がかかっている状態で、ある時間、 $M_s$  の方向が安定である必要がある。ある時間を  $\tau'$  とし、ここでは  $H_w$  とが反平行の場合を考える。この時の  $K_{\beta}$  を  $K_{\beta rec}(T_{rec})$  とすると、

$$K_{\beta rec}(T_{rec}) = \frac{K_u V}{k_B T} \left(1 - \frac{H}{H_c}\right)^2 > 19$$

となる。

### 3-4-4 $T_{adj}$

Thermal gradient 方式の場合、書き換えが行われる度に隣接トラックに  $H_{adj}$  が印加される。ダウントラック方向に 600nm の距離で  $H_{adj}$  が印加される。線速度  $v=10\text{m/s}$  とすると、一回の書き換えに対して  $\tau''=600/10=60\text{ns}$  の時間だけ複数のトラックに  $H_{adj}$  が印加される。このことを考慮して、 $10^5$  回の書き換えに対しても情報が保持されるとする。 $H_{adj}$  と  $M_s$  が反平行の場合も考えて、必要な  $K_{\beta}$  を  $K_{\beta adj}(T_{adj})$  とすると、

$$\frac{\tau'' 10^5}{\tau} = \frac{60 \times 10^{-9}}{3.2 \times 10^8} = \frac{\exp(K_{\beta 0}(T_{adj}))}{\exp(K_{\beta 0}(330K))}$$

$$K_{\beta adj}(T_{adj}) = \frac{K_u V}{k_B T} \left(1 - \frac{H}{H_c}\right)^2 > 35$$



となる。

なお、時間が 2 倍、1/2 倍となったとしても、 $\ln 2 = 0.69$  となるので  $K_\beta$  の値はほとんど変わらない。

以上の TAMR 成立条件を図 3-2 にまとめる。

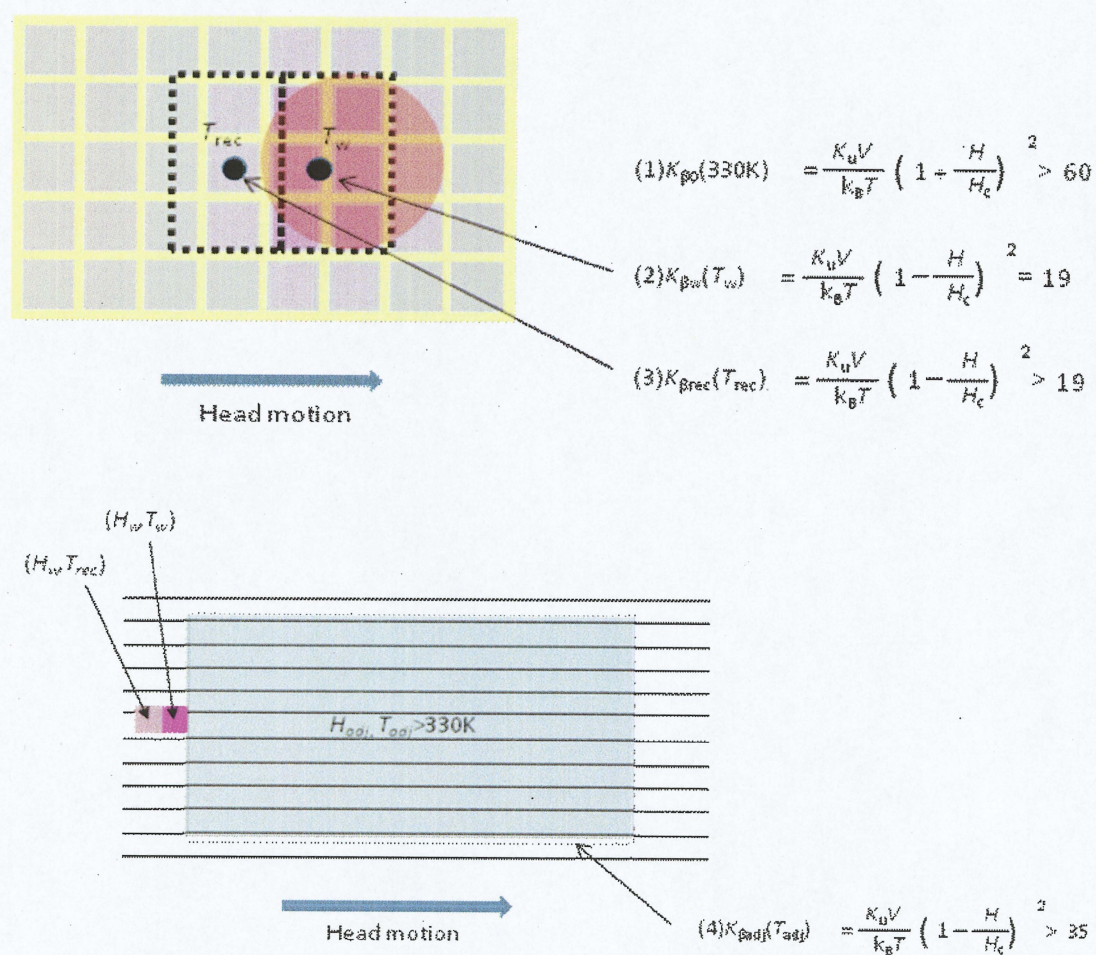


図3-2 TAMR成立条件



### 3-5 計算アルゴリズム

磁気特性の温度変化は第2章で示したフェロ磁性体の分子場近似、ニュートン法により、非磁性元素のM2の組成 $z$ 、TMのスピン量子数 $S$ 、TM原子間の交換積分 $J_{11}$ 、TM原子間のpair orderingによる異方性定数 $D$ を変化させて条件を満たす分子場近似パラメータを計算する。ただし、ここで分子場近似パラメータ $g$ 係数は2.0とする

はじめに設定した $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$ の磁気特性 $M_s$  (300K)、 $K_u$  (300K)、 $T_c$ に一致させる。 $M_s$  (300K)と $T_c$ を $J_{11}$ と $S$ を変化させて一致させて、次に $K_u$  (300K)を $D$ を変化させて一致させる。ここで、 $M_s$ は $J_{11}$ と $S$ の関数、 $K_u$ は $J_{11}$ と $D$ の関数、 $T_c$ は $J_{11}$ と $S$ の関数である。 $M_s$  (300K)によりヘッド磁界( $H_w$ ,  $H_{\text{adj}}$ )が決定する。 $K_{\beta w}(T_w)$ はヘッド磁界の関数であり、書き込み完了時の熱揺らぎ指標の条件 $K_{\beta w}(T_w)=19$ を満たす $z$ を決定する。 $z$ を変えたことにより、 $M_s$  (330K)が変化する。そして $M_s$  (330K)からヘッド磁界( $H_w$ ,  $H_{\text{adj}}$ )を決定し、 $K_{\beta w}(T_w)=19$ を満たす $z$ を決定する。同様の計算を繰り返し行なうことで、 $K_{\beta w}(T_w)=19$ の条件を満たすパラメータを決定する。

## 4 章 シミュレーション結果

### 4-1 はじめに

TAMR 材料として、Fe-Pt 系合金薄膜を想定し、その特性をかえたときに TAMR 成立条件がどのように変化するかを情報の熱的安定性を考慮してシミュレーションで検討した。

### 4-2 Model-1 (バルク $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$ $M_s 1000 \text{emu/cm}^3$ , $K_u 70 \times 10^6 \text{erg/cm}^3$ , $T_c 770 \text{K}$ )

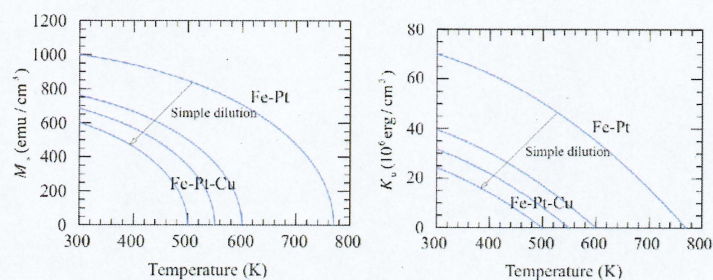
計算するモデルとして Cu を添加しないときの Fe-Pt-Cu の磁気特性をバルクの  $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$   $M_s(300\text{K})=1000 \text{emu/cm}^3$ ,  $K_u(300\text{K})=70 \times 10^6 \text{erg/cm}^3$ ,  $T_c=770\text{K}$  として設定し、これを Model-1 とする。そしてこの条件で Fe-Pt-Cu の Cu による単純希釈分子場近似シミュレーションを行なった。

#### 4-2-1 計算結果

図 4-1 に Model-1 の Fe-Pt-C の  $T_c=500\text{K}$ ,  $550\text{K}$ ,  $600\text{K}$ ,  $770\text{K}$  における  $M_s$ ,  $K_u$ ,  $H_k$  の温度特性を示す。

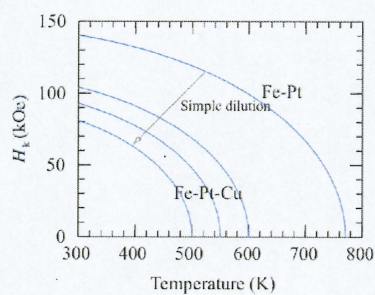
また、 $M_s$  と  $K_u$  の  $T_c$  依存性について図 4-2 に示す。 $T_c$  の低下に対して、

$M_s(T_c=770\text{K}) 1000 \text{emu/cm}^3$ ,  $K_u(T_c=770\text{K}) 70 \times 10^6 \text{erg/cm}^3$  からそれぞれリニアに低下している。Fe-Pt-Ni のデータは報告されている薄膜の Fe-Ni-Pt の実験データ<sup>(1)</sup>である。その薄膜  $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$  の磁気特性は  $M_s 1125 \text{emu/cm}^3$ ,  $K_u 46 \times 10^6 \text{erg/cm}^3$ ,  $T_c 770\text{K}$  となる。Model-1 でのバルクの  $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$  と報告されている薄膜の  $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$  の磁気特性が一致していないが、 $M_s$ ,  $K_u$  共にデータの傾きが非常に似ている。よって計算が簡単な Fe-Pt-Cu の Cu による単純分子場近似は報告されている薄膜の Fe-Ni-Pt の実験結果をかなり再現できるので、本研究では、計算が容易な Fe-Pt-Cu で検討する。バルク  $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$  の磁気特性と薄膜  $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$  の磁気特性が一致しない。Model-1 では、 $M_s$ ,  $K_u$  ともにバルクの値、Model-2 では、 $M_s$  は薄膜、 $K_u$  はバルクの値、Model-3 では、 $M_s$  はバルク、 $K_u$  は薄膜の値を用い、Model-4 では、 $M_s$ ,  $K_u$  ともに薄膜の値を用いた。



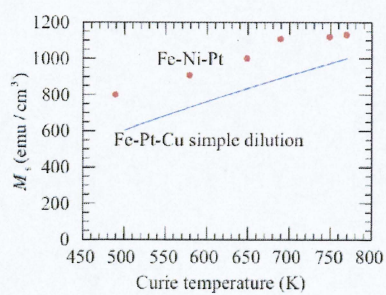
(a)  $M_s - T$

(b)  $K_u - T$

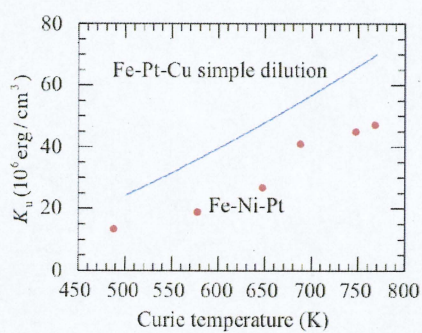


(c)  $H_k - T$

図 4-1  $M_s$ 、 $K_u$ 、 $H_k$  の温度特性



(a)  $M_s - T_c$



(b)  $K_u - T_c$

図 4-2  $M_s$ 、 $K_u$  の  $T_c$  依存性



#### 4-2-2 膜厚依存性(Model-1)

膜厚  $t=4\text{nm}$ ,  $6\text{nm}$ ,  $8\text{nm}$  としたときの TAMR の媒体特性の膜厚依存性をまとめたものを表 4-1 に示す。ここで、記録温度  $T_w$  を  $500\text{K}$  とし  $K_{\beta w}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H}{H_c}\right)^2 = 19$  と設定する。

表 4-1 膜厚依存性(Model-1)

Specifications of TAMR	4 Tbps, granular, TG		
$H_w$ (kOe)	11.4	10.7	10.4
$H_{adj}$ (kOe)	14.2	13.4	13.0
$t$ (nm)	4	6	8
$M_s$ (300 K) (emu / cm <sup>3</sup> )	710	672	652
$T_w$ (K)	500	500	500
$K_u V / kT$ (330 K) > 60	56	74	93
$\partial T / \partial x$ (K / nm) < 10	7.8	6.3	5.4
$T_{adj}$ (K) > 330	352	384	405
$K_u V / kT$ (300 K)	67	89	112
$K_u$ (300 K) (10 <sup>6</sup> erg / cm <sup>3</sup> )	34.1	30.4	28.6
$T_c$ (K)	566	542	530
$T_{rec}$ (K)	438	450	457
$H_c$ (300 K) = $H_k$ (300 K) (kOe)	96	91	88
$H_c(T_{rec})$ (kOe)	73.5	62.1	55.2
$H_c(T_w)$ (kOe)	54.8	43.2	36.3
$\partial H_c / \partial T$ (Oe / K)	300.4	377.6	441.9
$\partial H_c / \partial x$ (Oe / nm)	2343	2390	2405

ここで、熱揺らぎ指標  $K_u V / k_B T > 60$ 、冷却速度  $\partial T / \partial x$  (K/nm) < 10、隣接トラックにおける情報保持最高温度  $T_{adj} > 330$  (K) が TAMR 成立条件である。 $4\text{nm}$  における  $K_u V / k_B T$  は 56 なので条件を満たしていないが、その他のそれぞれの膜厚  $t$  での成立条件の値はすべて満たしている。また、 $t$  を  $4\text{nm}$  から  $8\text{nm}$  に厚くすることによってそれぞれの成立条件は  $K_u V / k_B T$  が 56 から 93 に増加し、 $\partial T / \partial x$  が  $7.8\text{K/nm}$  から  $5.4\text{K/nm}$  に小さくなり、 $T_{adj}$  が  $352\text{K}$  から  $405\text{K}$  に高くなり、条件を満たしやすくなっている。また、ヘッド磁界 ( $H_w$  (kOe)、 $H_{adj}$  (kOe))



は (11.4, 14.2) から (10.4, 13.0) に減少し、 $M_s$ 、 $K_u$ 、 $T_c$  もそれぞれ減少している。

どの膜厚でもほぼすべての TAMR 成立条件を満たしている。また、 $t$  を厚くすることはすべての条件が改善され、必要なヘッド磁界が低下しているので、Model-1 の TAMR 媒体設計においては有効だと考えられる。膜厚を厚くすると非磁性体できれいに分離されたグラニュー媒体を作製することが難しくなるという別の問題もある。

#### 4-2-3 物理的関係性

ここでのそれぞれのパラメータの変化の物理的な関係性について以下で説明する。パラメータ間の関係性を知ることには熱揺らぎ指標 ( $K_{\beta 0}$ ,  $K_{\beta w}$ ,  $K_{\beta \text{rec}}$ ,  $K_{\beta \text{adj}}$ ) の温度特性を考えることが非常に効果的である。以下でそれぞれのパラメータの物理的関係性について述べる。

$t$  を厚くすることによって  $K_u$ 、 $T_c$  それぞれ減少している。 $K_{\beta w}$  の温度特性を図 4-3 に示す。 $t$  が 4nm から 8nm と 2 倍にしたとき、 $V$  もそれに比例して増加する。また、

$$K_{\beta \text{rec}}(T_{\text{rec}}) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 - \frac{H}{H_c}\right)^2 > 19 \left(1 - \frac{H}{H_c}\right)^2 \text{ の項の変化は、} t \text{ が 2 倍に変化することに対}$$

して  $\left(1 - \frac{H}{H_c}\right)^2$  は 1.46 から 1.65 と約 1.1 倍となり、わずかな変化だけする。

よって  $t$  が増加したとき、 $V$  が増加し、 $K_{\beta w}(T_w)=19$  と固定したことによって  $K_u$  が減少する。また、図 4-2(b) に示したように、 $K_u$  が減少すると  $T_c$  が低下する。よって、 $t$  を厚くすると  $K_u$  が減少し、 $T_c$  が低下する。また、 $K_{\beta w}(T_w)=19$  固定しているので  $T_c$  が下がると  $K_{\beta w}$  の温度勾配が大きくなる。

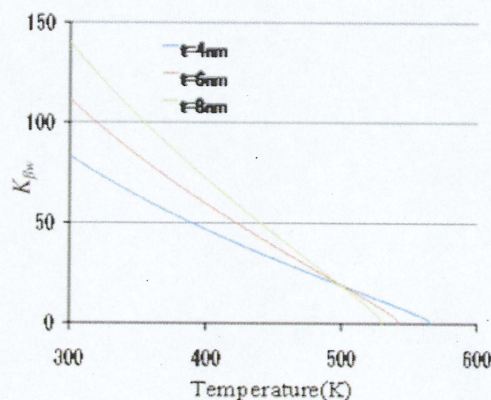


図 4-3  $K_{\beta w}$  の温度特性



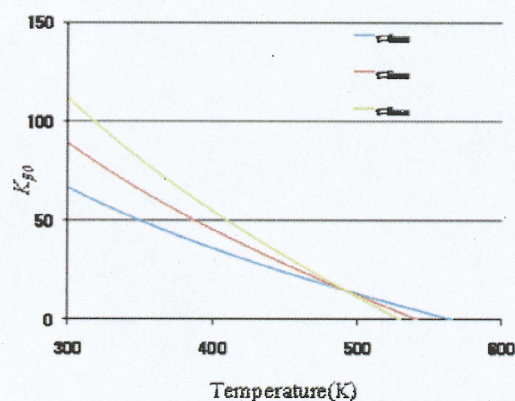


図 4-4  $K_{\beta 0}$  の温度特性

$t$  を厚くすることで  $K_{\beta 0}(330\text{K})$  が増加しているが、この関係性について、図 4-4 に示した  $K_{\beta 0}$  の温度特性によってわかる。膜厚  $t$  が厚くなることで  $T_c$  は低下する。 $T_c$  の低下によって  $K_{\beta 0}$  の温度勾配が大きくなり、330K での  $K_{\beta 0}$  の増加につながる。

$t$  を厚くすると必要な冷却速度  $\partial T / \partial x$  が小さくなる。これは  $t$  を厚くすることによって  $T_c$  が低下する。この関係性について図 4-5 に示した  $K_{\beta \text{rec}}$  の温度特性によってわかる。 $t$  が厚くすることで  $T_c$  が低下する。 $T_c$  が低くなることで  $K_{\beta \text{rec}}$  の温度勾配が大きくなり、傾きが大きくなったことで  $K_{\beta \text{rec}}$  を満たす  $T_{\text{rec}}$  が高くなる。 $T_w=500\text{K}$  としているので、 $T_{\text{rec}}$  の上昇によって  $\partial T / \partial x$  は  $7.8\text{K/nm}$  から  $5.4\text{K/nm}$  に小さくなる。

$t$  を厚くすることで、 $K_{\beta \text{adj}}$  が増加する。この関係性は図 4-6 に示した  $K_{\beta \text{adj}}$  の温度特性によってわかる。 $t$  を厚くすることによって  $T_c$  は低下する。 $T_c$  が低下することにより  $K_{\beta \text{adj}}$  の温度勾配が大きくなり、 $K_{\beta \text{adj}}=35$  を満たす  $T_{\text{adj}}$  が高くなる。

$t$  を厚くすると  $M_s$  は減少し、ヘッド磁界 ( $H_w$ ,  $H_{\text{adj}}$ ) は増加する。 $t$  を厚くしたことによって  $T_c$  が低下し、図 4-2(a) からわかるように  $T_c$  が低下することで  $M_s$  が減少する。よって、必要なヘッド磁界は  $M_s$  に依存するので減少する。

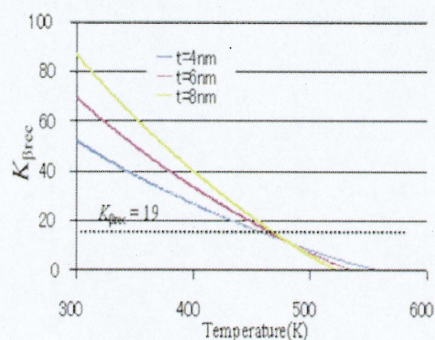


図 4-5  $K_{\beta \text{rec}}$  の温度特性



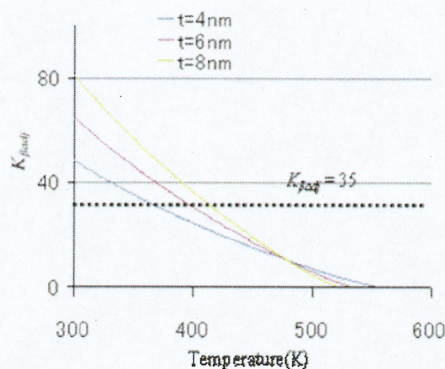


図 4-6  $K_{\beta \text{ adj}}$  の温度特性

#### 4-2-4 記録温度依存性(Model-1)

記録温度  $T_w = 500\text{K}$ 、 $550\text{K}$ 、 $600\text{K}$  としたときの TAMR の媒体特性の記録温度依存性をまとめたものを表 4-2 に示す。ここで、膜厚  $t=6\text{nm}$  とし、 $K_{\beta w}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H}{H_c}\right)^2 = 19$  と設定する。

表 4-2 記録温度依存性(Model-1)

Specifications of TAMR	4 Tbps, granular, TG		
$H_w$ (kOe)	10.7	12.0	13.2
$H_{\text{adj}}$ (kOe)	13.4	15.0	16.4
$t$ (nm)	6	6	6
$M_s$ (300 K) ( $\text{emu} / \text{cm}^3$ )	672	748	822
$T_w$ (K)	500	550	600
$K_u V / kT$ (330 K) $> 60$	74	95	117
$\partial T / \partial x$ (K / nm) $< 10$	6.3	6.8	7.2
$T_{\text{adj}}$ (K) $> 330$	384	428	472
$K_u V / kT$ (300 K)	89	112	136
$K_u$ (300 K) ( $10^6 \text{ erg} / \text{cm}^3$ )	30.4	38.1	46.3
$T_c$ (K)	542	591	640
$T_{\text{rec}}$ (K)	450	496	543
$H_c$ (300 K) = $H_k$ (300 K) (kOe)	91	102	113
$H_c(T_{\text{rec}})$ (kOe)	62.5	66.2	70.0
$H_c(T_w)$ (kOe)	43.2	44.9	46.5
$\partial H_c / \partial T$ (Oe / K)	377.6	395.4	413.2
$\partial H_c / \partial x$ (Oe / nm)	2390	2703	2981



どの  $T_w$  でも  $K_u V / k_B T > 60$ ,  $\partial T / \partial x (\text{K/nm}) < 10$ ,  $T_{\text{adj}} > 330 (\text{K})$  のすべての TAMR 成立条件を満たしている。 $T_w$  を 500K から 600K に高くすると、 $K_u V / k_B T$  は 74 から 117 に増加し、 $T_{\text{adj}}$  は 384K から 472K に上がり、 $\partial T / \partial x$  は 6.3K/nm から 7.2K/nm に大きくなる。 $K_u V / k_B T$  と  $T_{\text{adj}}$  は条件を満たしやすくなるが、 $\partial T / \partial x$  は悪化する。ヘッド磁界は (10.7、13.4) から (13.2、16.4) に増加し、また  $M_s$ 、 $T_c$ 、 $K_u$  はそれぞれ増加する。

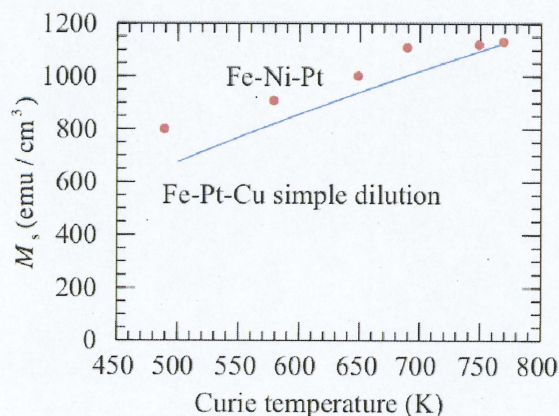
$T_w$  を上げることは Model-1 での TAMR 媒体設計において、 $K_{\beta 0}$ 、 $T_{\text{adj}}$  が改善されるが、 $\partial T / \partial x$  を速く、また必要なヘッド磁界が増加してしまう問題があることがわかる。TAMR の実現に対して記録温度を上げることは、有効とはいえない。

#### 4-3 Model-2 ( $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$ $M_s$ 1125emu/cc, $K_u$ $70 \times 10^6 \text{erg/cc}$ , $T_c$ 770K)

計算するモデルとして Cu を添加しないときの Fe-Pt-Cu の磁気特性を薄膜  $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$  の  $M_s$  のみ一致させて  $M_s(300\text{K}) = 1125 \text{emu/cm}^3$ 、 $K_u(300\text{K}) = 70 \times 10^6 \text{erg/cm}^3$ 、 $T_c = 770\text{K}$  とし設定をした。これを Model-2 とする。そしてこの条件で Fe-Pt-Cu の Cu による単純希釈分子場近似シミュレーションを行なった。

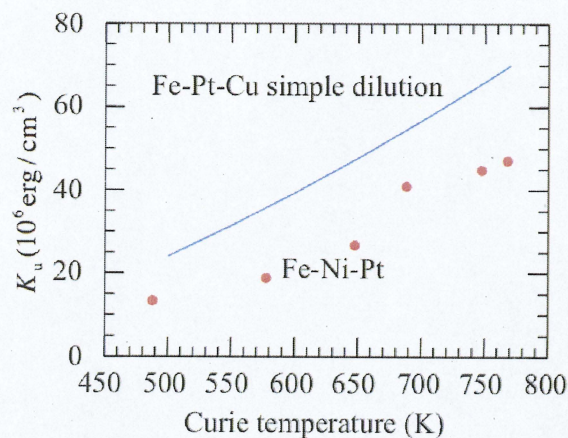
##### 4-3-1 計算結果(Model-2)

$M_s$  と  $K_u$  の  $T_c$  依存性について図 4-4 に示す。770K において薄膜  $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$  の  $M_s = 1125 \text{emu/cm}^3$  と計算結果が一致しており、また  $T_c$  の低下に対してリニアに減少している。 $M_s$  の  $T_c$  依存性において、計算結果は報告されているデータをかなり再現できている。また、 $K_u$  の  $T_c$  依存性は Model-1 と同様の結果を得た。



(a)  $M_s$ - $T_c$





(b)  $K_u$ - $T_c$

図 4-7  $M_s$  と  $K_u$  の  $T_c$  依存性

#### 4-3-2 膜厚依存性(Model-2)

膜厚  $t = 4\text{nm}$ ,  $6\text{nm}$ ,  $8\text{nm}$  としたときの TAMR の媒体特性の膜厚依存性をまとめたものを表 4-3 に示す。ここで、記録温度  $T_w$  を  $500\text{K}$  とし、 $K_{\beta_w}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H}{H_c}\right)^2 = 19$  と設定する。

$4\text{nm}$  における  $K_u V/k_B T$  は  $54$  なので条件を満たしていないが、その他のそれぞれの  $t$  の成立条件  $K_u V/k_B T > 60$ 、 $\partial T/\partial x (\text{K/nm}) < 10$ 、 $T_{\text{adj}} > 330\text{K}$  はすべて満たしている。また、 $t$  を  $4\text{nm}$  から  $8\text{nm}$  に厚くすることによってそれぞれの成立条件は  $K_u V/k_B T$  が  $54$  から  $90$  に増加し、 $\partial T/\partial x$  が  $9.9\text{K/nm}$  から  $7.0\text{K/nm}$  に小さくなり、 $T_{\text{adj}}$  が  $345\text{K}$  から  $388\text{K}$  に上がっており、条件を満たしやすくなっている。また、ヘッド磁界( $H_w(\text{kOe})$ ,  $H_{\text{adj}}(\text{kOe})$ )は  $(12.6, 15.7)$  から  $(11.6, 14.5)$  に減少し、 $M_s$ 、 $K_u$ 、 $T_c$  はそれぞれ減少している。

Model-2 はほぼすべての条件を満たしている。Model-2 は Model-1 に比べ、わずかに TAMR 条件が満たしにくくなるが、どちらのモデルでもほぼ変わらない。



表 4-3 膜厚依存性(Mode-2)

Specifications of TAMR	4 Tbps, granular, TG		
$H_w$ (kOe)	12.6	11.9	11.6
$H_{adj}$ (kOe)	15.7	14.9	14.5
$t$ (nm)	4	6	8
$M_s$ (300 K) (emu / cm <sup>3</sup> )	787	745	724
$T_w$ (K)	500	500	500
$K_u V / kT$ (330 K) > 60	54	72	90
$\partial T / \partial x$ (K / nm) < 10	9.9	8.0	7.0
$T_{adj}$ (K) > 330	345	366	388
$K_u V / kT$ (300 K)	65	87	109
$K_u$ (300 K) (10 <sup>6</sup> erg / cm <sup>3</sup> )	33.1	29.6	27.9
$T_c$ (K)	560	537	526
$T_{rec}$ (K)	422	437	445
$H_c$ (300 K) = $H_k$ (300 K) (kOe)	84	79	77
$H_c$ ( $T_{rec}$ ) (kOe)	66.7	56.8	51.0
$H_c$ ( $T_w$ ) (kOe)	46.3	36.0	29.9
$\partial H_c / \partial T$ (Oe / K)	261.7	329.0	383.9
$\partial H_c / \partial x$ (Oe / nm)	2584	2624	2672

## 4-3-3 記録温度依存性(Model-2)

記録温度  $T_w = 500\text{K}$ 、 $550\text{K}$ 、 $600\text{K}$  としたときの TAMR の媒体特性の記録温度依存性をまとめたものを表 4-4 に示す。ここで、膜厚  $t=6\text{nm}$  とし、 $K_{\beta w}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H}{H_c}\right)^2 = 19$  と設定する。

どの  $T_w$  においても  $K_u V / k_B T > 60$ 、 $\partial T / \partial x (\text{K/nm}) < 10$ 、 $T_{adj} > 330(\text{K})$  のすべての TAMR 成立条件を満たしている。 $T_w$  を  $500\text{K}$  から  $600\text{K}$  に高くすると、 $K_u V / k_B T$  は 72 から 132 に増加し、 $T_{adj}$  は  $366\text{K}$  から  $451\text{K}$  に上がり、 $\partial T / \partial x$  は  $8.0\text{K/nm}$  から  $9.2\text{K/nm}$  に大きくなる。 $K_u V / k_B T$  と  $T_{adj}$  は条件を満たしやすくなるが、 $\partial T / \partial x$  は悪化する。ヘッド磁界は (11.9、14.9) から (14.6、18.3) に増加する。また  $M_s$ 、 $T_c$ 、 $K_u$  はそれぞれ増加する。

Model-1 と比べ、Model-3 は全体的に TAMR 条件を満たしにくくなっている。また  $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$  の  $M_s$  を増加させたため、必要なヘッド磁界が大きくなった。



表 4-4 記録温度依存性(Mode-2)

Specifications of TAMR	4 Tbps, granular, TG		
$H_w$ (kOe)	11.9	13.3	14.6
$H_{adj}$ (kOe)	14.9	16.6	18.3
$t$ (nm)	6	6	6
$M_s$ (300 K) (emu / cm <sup>3</sup> )	745	831	914
$T_w$ (K)	500	550	600
$K_u V / kT$ (330 K) > 60	72	92	132
$\partial T / \partial x$ (K / nm) < 10	8.0	8.6	9.2
$T_{adj}$ (K) > 330	366	408	451
$K_u V / kT$ (300 K)	87	109	133
$K_u$ (300 K) (10 <sup>6</sup> erg / cm <sup>3</sup> )	29.6	37.2	45.3
$T_c$ (K)	537	586	635
$T_{oc}$ (K)	437	482	527
$H_c$ (300 K) = $H_k$ (300 K) (kOe)	79	89	99
$H_c(T_{oc})$ (kOe)	56.8	60.6	64.5
$H_c(T_w)$ (kOe)	36.0	37.2	38.3
$\partial H_c / \partial T$ (Oe / K)	329.0	344.8	358.9
$\partial H_c / \partial x$ (Oe / nm)	2624	2968	3317

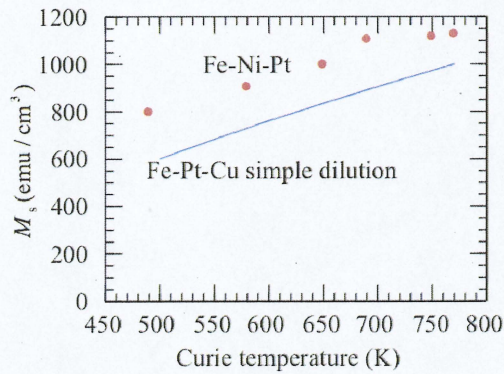
#### 4-4 Model-3 (Fe<sub>0.5</sub>Pt<sub>0.5</sub> $M_s$ 1000emu/cm<sup>3</sup>, $K_u$ 46×10<sup>6</sup>erg/cm<sup>3</sup>, $T_c$ 770K)

計算するモデルとして Cu を添加しないときの Fe-Pt-Cu の磁気特性を薄膜 Fe<sub>0.5</sub>Pt<sub>0.5</sub> の  $K_u$  のみ一致させて  $M_s(300K)=1000\text{emu/cm}^3$ 、 $K_u(300K)=46 \times 10^6 \text{erg/cm}^3$ 、 $T_c=770\text{K}$  として設定し、これを Model-3 とする。そしてこの条件で Fe-Pt-Cu の Cu による単純希釈分子場近似シミュレーションを行なった。

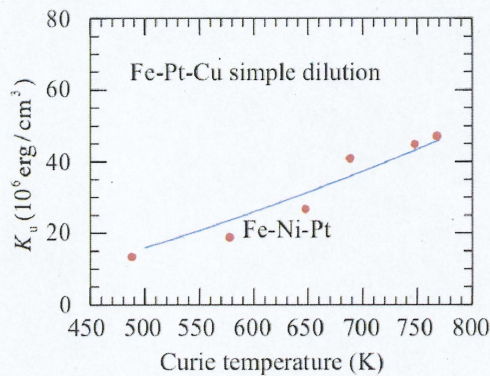
##### 4-4-1 計算結果(Model-3)

$M_s$  と  $K_u$  の  $T_c$  依存性の計算結果を図 4-8 に示す。770K において薄膜 Fe<sub>0.5</sub>Pt<sub>0.5</sub> の  $K_u=46 \times 10^6 \text{erg/cm}^3$  と計算結果が一致しており、また  $T_c$  の低下に対してリニアに減少している。 $M_s$  の  $T_c$  依存性において、計算結果は報告されているデータをかなり再現できている。また、 $M_s$  の  $T_c$  依存性は Model-2 と同様の結果を得た。





(a)  $M_s$ - $T_c$



(b)  $M_s$  -  $T_c$

図 4-8  $M_s$ ,  $K_u$  の  $T_c$  依存性

#### 4-4-2 膜厚依存性(Model-3)

膜厚  $t = 4\text{nm}$ ,  $6\text{nm}$ ,  $8\text{nm}$  としたときの TAMR の媒体特性の膜厚依存性をまとめたものを表 4-4 に示す。ここで、記録温度  $T_w$  を  $500\text{K}$  とし、 $K_{\beta w}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H}{H_c}\right)^2 = 19$  と設定する。

$K_u V/k_B T$  は  $4\text{nm}$ ,  $6\text{nm}$  において成立条件を満たしていない。 $\partial T/\partial x$  はどの膜厚においても成立条件を満たしていない。 $T_{\text{adj}}$  は  $4\text{nm}$ ,  $6\text{nm}$  において条件を満たしていない。また、 $t$  を  $4\text{nm}$  から  $8\text{nm}$  に厚くすることによってそれぞれの成立条件は  $K_u V/k_B T$  が  $41$  から  $64$  に増加し、 $\partial T/\partial x$  が  $14.6\text{K/nm}$  から  $10.3\text{K/nm}$  に小さくなり、 $T_{\text{adj}}$  が  $268\text{K}$  から  $338\text{K}$  に上がっており、それぞれの条件を満たしやすくなる。また、 $(H_w(\text{kOe}), H_{\text{adj}}(\text{kOe}))$  は  $(11.9, 14.9)$  から  $(10.7, 13.3)$  に減少し、 $M_s$ ,  $K_u$ ,  $T_c$  はそれぞれ減少している。



Model-3 は条件を満たしているのは、8nm における  $K_u V/kT$  と  $T_{adj}$  だけである。Model-1 に比べ、Model-3 は TAMR 条件を満たすことが少なくなり、このモデルでは TAMR 実現に有効ではないと考えられる。

表 4-4 膜厚依存性(Model-3)

Specifications of TAMR	4 Tbps, granular, TG		
$H_w$ (kOe)	11.9	11.1	10.7
$H_{adj}$ (kOe)	14.9	13.9	13.3
$t$ (nm)	4	6	8
$M_s$ (300 K) (emu / cm <sup>3</sup> )	744	693	666
$T_w$ (K)	500	500	500
$K_u V / kT$ (330 K) > 60	41	52	64
$\partial T / \partial x$ (K / nm) < 10	14.6	11.9	10.3
$T_{adj}$ (K) > 330	268	310	338
$K_u V / kT$ (300 K)	48	62	77
$K_u$ (300 K) (10 <sup>6</sup> erg / cm <sup>3</sup> )	24.7	21.3	19.7
$T_c$ (K)	588	555	538
$T_{rec}$ (K)	385	406	419
$H_c$ (300 K) = $H_k$ (300 K) (kOe)	66	61	59
$H_c(T_{rec})$ (kOe)	59.1	50.7	45.5
$H_c(T_w)$ (kOe)	41.9	32.7	27.2
$\partial H_c / \partial T$ (Oe / K)	150.4	191.6	226.2
$\partial H_c / \partial x$ (Oe / nm)	2190	2280	2319

#### 4-4-3 記録温度依存性(Model-3)

記録温度  $T_w = 500K$ 、 $550K$ 、 $600K$  としたときの TAMR の媒体特性の記録温度依存性をまとめたものを表 4-5 に示す。ここで、膜厚  $t=6nm$  とし、 $K_{pw}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H}{H_c}\right)^2 = 19$  と設定する。

$T_w$  が  $500K$  での  $K_u V/k_B T$  と  $T_{adj}$ 、すべての  $T_w$  での  $\partial T / \partial x$  は成立条件を満たしていない。 $T_w$  を  $500K$  から  $600K$  に高くすると、 $K_u V/k_B T$  は 52 から 81 に増加し、 $T_{adj}$  は  $310K$  から  $387K$  に上がり、 $\partial T / \partial x$  は  $11.9K/nm$  から  $13.5K/nm$  に大きくなる。 $K_u V/k_B T$  と  $T_{adj}$  は条件を満たしやすくなるが、 $\partial T / \partial x$  は悪化する。ヘッド磁界は (11.1, 13.9) から (13.4, 16.8) に増加する。また  $M_s$ 、 $T_c$ 、 $K_u$  はそれぞれ増加する。



膜厚依存性と同様に Model-1 と比べ、Model-3 では TAMR 条件を満たすことが少なくなる。

表 4-5 記録温度依存性(Model-3)

Specifications of TAMR	4 Tbps, granular, TG		
$H_w$ (kOe)	11.1	12.3	13.4
$H_{adj}$ (kOe)	13.9	15.4	16.8
$t$ (nm)	6	6	6
$M_s$ (300 K) (emu / cm <sup>3</sup> )	693	768	839
$T_w$ (K)	500	550	600
$K_u V / kT$ (300 K) > 60	52	66	81
$\partial T / \partial x$ (K / nm) < 10	11.9	12.7	13.5
$T_{adj}$ (K) > 330	310	348	387
$K_u V / kT$ (300 K)	62	77	93
$K_u$ (300 K) (10 <sup>6</sup> erg / cm <sup>3</sup> )	21.3	26.4	31.8
$T_c$ (K)	555	603	652
$T_{rec}$ (K)	406	450	493
$H_c$ (300 K) = $H_k$ (300 K) (kOe)	61	69	76
$H_c(T_{rec})$ (kOe)	50.7	54.0	57.4
$H_c(T_w)$ (kOe)	32.7	33.8	34.9
$\partial H_c / \partial T$ (Oe / K)	191.6	201.8	210.5
$\partial H_c / \partial x$ (Oe / nm)	2280	2555	2851

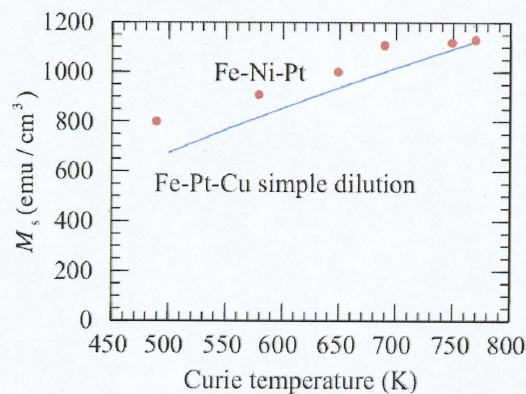
#### 4-5 Model-4 (薄膜 Fe<sub>0.5</sub>Pt<sub>0.5</sub> $M_s$ 1125emu/cc, $K_u$ 46×10<sup>6</sup>erg/cc, $T_c$ 770K)

計算するモデルとして Cu を添加しないときの Fe-Pt-Cu の磁気特性を薄膜 Fe<sub>0.5</sub>Pt<sub>0.5</sub> の  $M_s$ 、 $K_u$  一致させて  $M_s(300K)=1125\text{emu/cm}^3$ 、 $K_u(300K)=46\times 10^6\text{erg/cm}^3$ 、 $T_c=770\text{K}$  として設定し、これを Model-4 とする。そしてこの条件で Fe-Pt-Cu の Cu による単純希釈分子場近似シミュレーションを行なった。

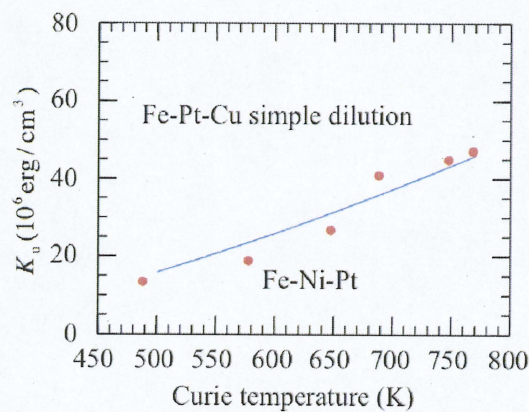
##### 4-5-1 計算結果(Model-4)

$M_s$  と  $K_u$  の  $T_c$  依存性について図 4-9 に示す。770K において薄膜 Fe<sub>0.5</sub>Pt<sub>0.5</sub> の  $M_s=1125\text{emu/cm}^3$ 、 $K_u(300K)=46\times 10^6\text{erg/cm}^3$  と計算結果が一致しており、また  $T_c$  の低下に対してリニアに減少している。 $M_s$ 、 $K_u$  の  $T_c$  依存性において、計算結果は報告されているデータをかなり再現できている。





(a)  $M_s - T_c$



(b)  $K_u - T_c$

図 4-9  $M_s$ 、 $K_u$  の  $T_c$  依存性

32

#### 4-5-2 膜厚依存性(Model-4)

膜厚  $t = 4\text{nm}$ ,  $6\text{nm}$ ,  $8\text{nm}$  としたときの TAMR の媒体特性の膜厚依存性をまとめたものを表 4-6 に示す。ここで、記録温度  $T_w$  を  $500\text{K}$  とし、 $K_{\beta_w}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H}{H_c}\right)^2 = 19$  と設定する。

$K_u V/k_B T$  は  $8\text{nm}$  では  $61$  なので条件を満たしているが、その他の膜厚では、満たしていない。 $\partial T/\partial x (\text{K/nm}) < 10$ 、 $T_{\text{adj}} > 330(\text{K})$  はどの膜厚でも条件を満たしていない。また、 $t$  を  $4\text{nm}$  から  $8\text{nm}$  に厚くすることによってそれぞれの条件は  $K_u V/k_B T$  が  $39$  から  $61$  に増加し、 $\partial T/\partial x$  が  $18.2\text{K/nm}$  から  $12.9\text{K/nm}$  に小さくなり、 $T_{\text{adj}}$  が  $236\text{K}$  から  $310\text{K}$  に上がっており、条件を満たしやすくなっている。また、ヘッド磁界( $H_w(\text{kOe})$ ,  $H_{\text{adj}}(\text{kOe})$ )は  $(13.1, 16.3)$  から  $(11.8, 14.7)$  に減少し、 $M_s$ 、 $K_u$ 、 $T_c$  はそれぞれ減少している。

32



**Model-4** はほぼすべての条件を満たしていない。**Model-1** と比べ、ヘッド磁界はわずかに大きくなるだけだが、**TAMR** 条件はかなり悪化している。薄膜  $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$  の磁気異方性の値であることは **TAMR** 媒体にとって不利に働く。

表 4-6 膜厚依存性(Mode-4)

Specifications of TAMR	4 Tbps, granular, TG		
$H_w$ (kOe)	13.1	12.2	11.8
$H_{adj}$ (kOe)	16.3	15.3	14.7
$t$ (nm)	4	6	8
$M_s$ (300 K) (emu / cm <sup>3</sup> )	817	763	735
$T_w$ (K)	500	500	500
$K_u V / kT$ (330 K) > 60	39	50	61
$\partial T / \partial x$ (K / nm) < 10	18.2	14.9	12.9
$T_{adj}$ (K) > 330	236	280	310
$K_u V / kT$ (300 K)	46	60	74
$K_u$ (300 K) (10 <sup>6</sup> erg / cm <sup>3</sup> )	23.5	20.4	18.9
$T_c$ (K)	578	547	532
$T_{rec}$ (K)	356	382	398
$H_o$ (300 K) = $H_k$ (300 K) (kOe)	58	53	51
$H_o(T_{rec})$ (kOe)	53.5	46.4	41.9
$H_c(T_w)$ (kOe)	34.7	26.7	21.9
$\partial H_c / \partial T$ (Oe / K)	130.6	166.4	196.4
$\partial H_c / \partial x$ (Oe / nm)	2380	2485	2536

#### 4-5-3 記録温度依存性(Mode-4)

記録温度  $T_w=500\text{K}$ 、 $550\text{K}$ 、 $600\text{K}$  としたときの **TAMR** の媒体特性の膜厚依存性をまとめたものを表 4-7 に示す。ここで、膜厚  $t=6\text{nm}$  とし、 $K_{\beta w}(T_w) = \frac{K_u V}{kT} \left(1 + \frac{H}{H_c}\right)^2 = 19$  と設定する。

$K_u V / k_B T$  は  $T_w = 550\text{K}$ 、 $600\text{K}$  において条件を満たす。 $\partial T / \partial x$  はどの  $T_w$  でも条件を満たさない。 $T_{adj}$  は  $600\text{K}$  のみ条件を満たす。 $T_w$  を  $500\text{K}$  から  $600\text{K}$  に高くすると、 $K_u V / k_B T$  は 50 から 78 に増加し、 $T_{adj}$  は  $280\text{K}$  から  $350\text{K}$  に上がり、 $\partial T / \partial x$  は  $14.9\text{K/nm}$  から  $17.1\text{K/nm}$  に大きくなる。 $K_u V / k_B T$  と  $T_{adj}$  は条件を満たしやすくなるが、 $\partial T / \partial x$  は悪化する。ヘッド磁界は (12.2、15.3) から (14.9、18.6) に増加し、また  $M_s$ 、 $T_c$ 、 $K_u$  はそれぞれ増加する。**TAMR** 媒体は薄膜なので実際の材料では、**Model-4** の磁気特性の条件であると考えられる。薄膜  $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$  の磁気特性(**Model-4**)では、**TAMR** 条件を満たすことが少なく、**Model-1** と比べ、必要なヘッド磁界が大きくなる。



表 4-7 記録温度依存性(Mode-4)

Specifications of TAMR	4 Tbps, granular, TG		
$H_w$ (kOe)	12.2	13.6	14.9
$H_{adj}$ (kOe)	15.3	17.0	18.6
$t$ (nm)	6	6	6
$M_s$ (300 K) (emu / cm <sup>3</sup> )	763	848	929
$T_w$ (K)	500	550	600
$K_u V / kT$ (300 K) > 60	50	63	78
$\partial T / \partial x$ (K / nm) < 10	14.9	16.1	17.1
$T_{adj}$ (K) > 330	280	314	350
$K_u V / kT$ (300 K)	60	74	90
$K_u$ (300 K) (10 <sup>6</sup> erg / cm <sup>3</sup> )	20.4	25.4	30.7
$T_c$ (K)	547	595	644
$T_{rec}$ (K)	382	423	465
$H_c$ (300 K) = $H_k$ (300 K) (kOe)	53	60	66
$H_c(T_{rec})$ (kOe)	46.4	49.6	52.8
$H_c(T_w)$ (kOe)	26.7	27.4	28.1
$\partial H_c / \partial T$ (Oe / K)	166.4	174.8	182.8
$\partial H_c / \partial x$ (Oe / nm)	2485	2809	3123

シミュレーション結果により、Fe-Pt 系合金薄膜において、 $M_s$  の値がバルクの値から多少高くなっているが、TAMR 成立条件にあまり関係しなかった。一方、薄膜  $K_u$  の値がバルクの値よりもかなり低下しているが、これにより TAMR 条件がほとんど成立しなくなった。したがって、薄膜における  $K_u$  の値をバルクの値に近づける成膜方法の開発が望まれる。

## 5章 総括

近年、動画や画像や音楽などの大容量のデータ通信が一般的になってきている。また、2011 年 7 月にデジタル放送の移行が行われた。このようなことにより一人一人が扱う情報量が増え続けている。また、今後高度情報化によりの HDD の省エネが問題とされている。このようなことにより、今後もさらなる記録容量の向上が求められている。しかし、高記録密度化に伴う磁性微粒子の微細化による磁気記録のトリレンマによって記録密度向上に歯止めがかかっている。そこで、その解決方法として TAMR が提案されている。TAMR は記録時に媒体の微小なエリアを加熱して記録するというものである。TAMR により室温での  $H_c$  を高く設定することができ、材料として  $K_u$  の大きいものを使うことが可能となり、媒体の磁性微粒子の微細化による熱的安定性の悪化を防ぐことができる。

TAMR 媒体の設計には膜厚、磁化、磁気異方性、キュリー温度などの材料特性が関係してくる。従来のマイクロマグネティクスシミュレーションでは、パラメータ間の物理的な関係がわかりにくかった。また、昨年の情報の熱的安定性を注目したモデル計算では、パラメータ間の物理的な関係はよくわかる。しかし、材料の特性の一つを変化させたとき、TAMR 成立条件がどのように変化するかはかわかっていなかったが、現実の材料では、特性のいくつかが同時に変化する。

本研究では、材料として Fe-Pt 系合金薄膜を想定し、その特性を変えたときに TAMR 成立条件がどのように変化するかを情報の熱的安定性を考慮してシミュレーションで検討した。Fe-Pt-Cu の Cu による単純希釈分子場近似シミュレーションは、報告されている薄膜の Fe-Ni-Pt の実験結果をかなり再現できるので、ここでは計算が容易な Fe-Pt-Cu で検討をする。

### 1) バルク $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$ $M_s 1000 \text{ emu/cm}^3$ , $K_u 70 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ , $T_c 770 \text{ K}$

まず、Cu を添加しないときの Fe-Pt-Cu の磁気特性をバルクの Fe-Pt に一致させてシミュレーションを行なった。すなわち、300 K における飽和磁化を  $M_s = 1000 \text{ emu/cm}^3$ 、磁気異方性を  $K_u = 7.0 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ 、キュリー温度を  $T_c = 770 \text{ K}$  とした。ここで、計算パラメータは膜厚と記録温度であり、TAMR 成立条件は熱揺らぎ指標、記録直後の媒体の冷却速度、隣接トラックにおける情報保持最高温度である。膜厚依存性に対する計算結果は、どの膜厚でもほぼすべての TAMR 成立条件を満足し、膜厚を厚くすると、さらに全ての条件で

TAMR が成立しやすくなること、また必要なヘッド磁界も低くすることができることがわかった。そして、なぜそのようになるかは、熱揺らぎ指標の温度特性によって説明することができた。一方、記録温度を高くすると、熱ゆらぎ指標と隣接トラックにおける情報保持最高温度が改善されるが、冷却速度を速く、またヘッド磁界も高くしなければならない弊害が現れることがわかった。

2) 薄膜  $\text{Fe}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$   $M_s$  1125 emu/cm<sup>3</sup>,  $K_u$   $46 \times 10^6$  erg/cm<sup>3</sup>,  $T_c$  770 K

次に、Cu を添加しない Fe-Pt-Cu の磁気特性を薄膜の Fe-Pt に一致させてもシミュレーションを行なった。すなわち、300 K における飽和磁化を  $M_s = 1125 \text{ emu/cm}^3$ 、磁気異方性を  $K_u = 4.6 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ 、キュリー温度を  $T_c = 770 \text{ K}$  とした。この場合の結果は、計算した膜厚と記録温度では TAMR 成立条件を満足することは少なかった。改善方法として膜厚を厚くすること、磁気異方性をバルクの Fe-Pt の値に近づけることが考えられる。グラニューラ媒体では膜厚を厚くすると、磁性微粒子同士の分離に問題が生じることがわかっているが、薄膜の Fe-Pt の磁気異方性の改善とともに、膜厚を厚くできる成膜方法の開発が望まれることがわかった。

今回の研究では、実際の Fe-Pt 系合金薄膜を想定して TAMR の成立条件をシミュレーションにより検討した。その結果、媒体の設計指針を得ることができた。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり終始懇切丁寧なる御指導を賜った三重大学工学部教授 工学博士 小林正先生に深く感謝いたします。

本研究ならびに本論文をまとめるにあたって、数々の御指導と御教示を頂いた、同学部准教授 工学博士 藤原裕司先生に深く感謝いたします。

最後になりますが、堀江匠をはじめ共に研究に励んだナノエレクトロニクス研究室の諸氏に深く感謝いたします。

## 参考文献

- (1) 澤田章弘：三重大学修士論文(2011)
- (2) 安田友則：三重大学修士論文(2009)
- (3) M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, and F. Petroff, *Phys. Rev.Lett.* **61**, 2472 (1988).
- (4) S.S.P.Parkin, *Phys, Rev. Lett* **66**, 2152 (1991)
- (5) IDEMA JAPAN(日本HDD協会)編集：最新ストレージ用語辞典 第2版, 日経BP社 (2008),p.248-253
- (6) 岡村博司, 服部正勝編集：ハード・ディスク装置の構造と応用, CQ出版社(2010), p.31-32
- (7) A. Kikitsu, T. Kai, T. Nagase, and J. Akiyama, *J. Appl. Phys.*, **97**, 10P701(2005)
- (8) 喜々津, 甲斐, 永瀬, 秋山,：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MR2005-52, p.5-9, February 2006
- (9) 喜々津, 甲斐, 永瀬, 秋山,：熱アシスト磁気記録用交換結合二層媒体, 信学技報 MR2004-64, p. 13-18, March 2005
- (10) 岡、小林：HDD 媒体の数値シミュレーション技術、富士時報 Vol.74 No.6 2001
- (11) IDEMA JAPAN(日本HDD 協会)編集：最新ストレージ用語辞典 第2 版, 日経BP 社 (2008),p.9
- (12) 小口武彦：磁性体の統計理論, 裳華房(1970),pp.33-37