



特集記事・3

21世紀 鉄はここまで使える

磁気特性への挑戦

Challenge to Strong Fe Magnets

宮島英紀

Hideki Miyajima

慶応義塾大学 理工学部 教授

1 情報化社会における磁性材料

情報化社会といわれる今日では、大量の文字情報や音声・画像情報が世界中を休む間もなく交錯しているが、これを支えているものは、情報を高速で処理するコンピュータ技術と莫大な情報を記憶・再生する情報記憶技術である。

情報技術の表の主役は、言うまでもなく半導体集積技術である。高密度に集積された高性能演算素子があって初めて情報化社会が実現できたといってよい。一方、磁気的素子や磁気部品も、地味ながら裏の主役として情報技術を支えている。実際、磁気テープ、フロッピーディスクをはじめ、光磁気ディスク、ハードディスクは、大きな記憶容量と中高速のアクセス時間を持ち、コンピュータの外部記憶装置の主流となっている。また、これらが高性能でありながら入手しやすい価格であることも幅広い需要を生む要因になった。

磁気記録の記録密度は飛躍的に伸びてきた。1993年以前は1年間に1.3倍ずつ密度が増えてきたが、磁気抵抗効果を使った磁気ヘッドが開発された1993年以降は1.6倍/年の割合に加速された。さらに、巨大磁気抵抗効果 (GMR) 素子が市場に出回りはじめた2000年頃からは2倍/年となり、今日では20Gbit/inch²クラスの面記録密度をもった磁気ディスクが商品化されている。

このような情報化社会で強磁性体・Feはどのような役目を果たしているのか、また、将来どのような役割を務めるのか、そのためには何が必要か、などについて考えてみたい。結論を先に述べれば、Fe合金が将来にわたって磁性材料として活躍する必要不可欠な要件は、「Fe合金の磁化を大きくすること」である。

2 Feの磁性

簡単に磁気現象を復習しておこう。 μ_0 を真空の透磁率 ($=4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$)、磁場を H [A/m]、磁化を M [Wb/m²=T] とすると、磁束密度 B [T] は次のように表される。

$$B = \mu_0 H + M \equiv (\mu_0 + \chi) H \equiv \mu H \cdots \cdots (1)$$

式中の χ を磁化率、 $\mu \equiv \mu_0 + \chi$ を透磁率という。磁化率は、外部磁場を印加したとき、その磁場が磁性体によって何倍増強されるか^{*1}、透磁率は外部磁束が磁性体によって何倍増強されるかを表す特性量である。透磁率は、構造敏感量であり、材料の形、熱処理や含有不純物など諸々の原因によって大幅に変わる。

磁化は磁場の印加の仕方によって変わり、磁気ヒステリシスを示す。磁場 (H) と磁化 (M)、磁場 (H) と磁束密度 (B) の間の関係を模式的に書いたものを図1に示す。これらを磁気ヒステリシス環線とかヒステリシスループと呼ぶ。環線が囲む面積は着磁された強磁性体がつもつ磁気的エネルギーである。また、 $H=0$ のときの磁化 M を残留磁化 M_r 、 $H=0$ のときの磁束密度 B を残留磁束密度 B_r 、 $M=0$ あるいは $B=0$ になるときの磁場を各々 $M H_c$ 、 $B H_c$ と書き、これらを保磁力^{*2}という。慣例として、 H_c が 10^2A/m ($\sim 10 \text{Oe}$) 以下のものを高透磁率磁性体、 10^4A/m ($\sim 100 \text{Oe}$) 以上のものを高保磁力磁性体と呼び分けている^{*3}。

Feの磁気特性を表1にまとめておく。表からわかるようにFeは、高いキュリー温度と大きな磁化をもつ。一つ一つの特性ではFeを越えるものも少なくないが、総合的に評価

*1 もし、SIに準じて書けば、 $B = \mu_0 (H + M) \equiv \mu_0 (1 + \chi) H \equiv \mu H$ となり、透磁率は $\mu \equiv \mu_0 (1 + \chi)$ になる。

*2 中国語では頑磁力という。こちらの方が H_c のイメージに合うかもしれない。

*3 以前は、高透磁率材料をソフト磁性体、高保磁力磁性体をハード磁性体と呼んでいたが、何がソフトであり、何がハードなのか不明確なので、ハード・ソフトという用語を使うことを避けるようになってきた。

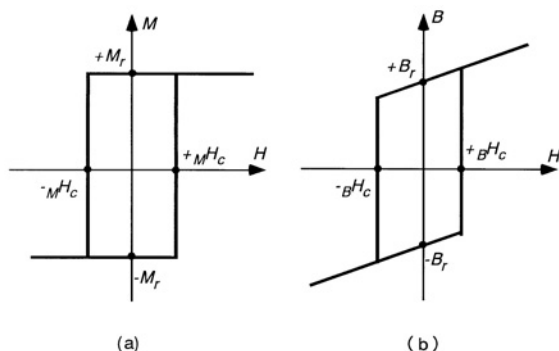


図1 理想的な磁気ヒステリシス環線（ヒステリシス曲線）
 (a) M-H曲線： M_r =残留磁化（図の場合は飽和磁化に一致）、 H_c =保磁力 (b) B-H曲線： B_r =残留磁束密度、 H_c =保磁力

すればFeはもっとも優れたフェロ磁性体である。

なぜ、最も優れているのだろうか？

- (1) Feは、他の遷移金属に比べ、多くの元素と合金・化合物をつくりやすい。つまり、他の元素と融合させることによって、Feの磁性を変えることができる。
- (2) Feは↑スピンバンドと↓スピンバンドの両方に空隙をもつフェロ磁性体（弱いフェロ磁性）である。このため合金をつくって生じた過剰（あるいは不足）電子は、↑または↓スピンバンドに入るので磁化の増減を調整しやすい。たとえば、磁化を小さくしたいときはAl、Siなどの非磁性元素、大きくしたいときはCo、V、Ti、Pt、Rh、Pdなどの金属元素、磁歪を小さくしたいときはNi、大きくしたいときはTb、Dy、Ho希土類金属を添加する。これは磁気特性改善のための常套的な方法である。
- (3) 結晶磁気異方性の大きさが約 10^4 J/m^3 と適度な大きさであること。このため高透磁率材（ソフト磁性体）としても高保磁力材料（ハード材料）としても使われている。
- (4) いわゆる冶金学的な特性（融点、展性、延性…）が優れているので、試料の形状やサイズを変えやすい。このため形状を変えて磁気異方性の大きさを人為的に制御することが可能である。

「神は、Siによって人類に知性を、Feによって人類に力を与えた」とよく言われる。FeとSiから電気鉄板を、FeとCoから高保磁力材料（パーメンジュール）を、FeとNiから高透磁率材料（パーマロイ）を与えた。大変おもしろいことにSiの質量数28の2倍が、ちょうどFeの質量数56になる。FeとSiは宇宙の開闢、ビッグバン以来の兄弟だった。

以上のことを踏まえて磁気材料について考えてみる。

表1 Feの磁気特性

磁気量	物理量	数値	単位
飽和磁化[100] $T=4.2 \text{ K}$ 密度 $\rho=7.93 \text{ g/cm}^3$	質量磁化 σ_g	222.671	Gcm ³ /g
	体積磁化 M_s	1766	G
	体積磁化 $4\pi M_s$	22189	G
飽和磁化[100] $T=286.41 \text{ K}$ 密度 $\rho=7.87 \text{ g/cm}^3$	質量磁化 σ_g	218.210	Gcm ³ /g
	体積磁化 M_s	1717	G
	体積磁化 $4\pi M_s$	21580	G
磁気モーメント	強磁性状態 m_s	2.2	m_B
	常磁性状態 m_p	3.13	m_B
	軌道磁気モーメント	0.0918	m_B
磁化率	強磁場磁化率 (4K)	2.66×10^{-4}	emu/mol
キュリー温度	αFe 強磁性キュリー-温度	1043	K
	αFe 常磁性キュリー-温度	1093	K
	δFe 常磁性キュリー-温度	1093	K
圧力依存性	磁気モーメント ($\Delta M_i / M_i$) / Δp (300K)	-2.78×10^{-4}	1/kbar
	キュリー-温度 $\Delta \theta_i / \Delta p$	0 ± 0.03	K/kbar
磁気異方性	K_1 ($T=4.2 \text{ K}$)	$4.70\text{-}5.64 \times 10^5$	erg/cm ³
	K_1 ($T=273 \text{ K}$)	$4.50\text{-}4.81 \times 10^5$	erg/cm ³
g 因子	g	2.05 - 2.09	

3 磁気記録材料としての特性

3.1 どの位小さいか¹⁾

記録の最小単位をビット bit といい、0か1の値をとる。通常1平方インチの面積に含まれるビット数を記録面密度という^{*4}。記録面密度が大きければ大量の情報を記録できる上、情報を検出して、拾い上げるまでの時間（アクセス時間）を短縮できる。

この50年間で1ビットの大きさはどの位変わったのだろうか。1956年にIBMからハードディスク305RAMACが発売された（RAMACはRandom Access Method of Accounting Controlの頭文字に由来）。これは直径24インチのアルミニウムディスク50枚に磁性体を塗布したもので、記憶容量は5MBであった。アクセス時間は0.6～1.5秒というから、信じられないほどのんびりとした性能である。このハードディスクで1ビットあたりの面積を単純に計算すると

$$\frac{3.14 \times (25.4 \times 12 \text{ mm})^2 \times 50}{5 \times 10^6 \times 8 \text{ bit}} = 0.36 \frac{\text{mm}^2}{\text{bit}} \dots\dots\dots (2)$$

となる。一方、現在の記録密度は大体10Gbit/inch²であるから、1ビットの大きさは

$$\frac{25.4^2}{10 \times 10^9} = 6.5 \times 10^{-8} \frac{\text{mm}^2}{\text{bit}} \dots\dots\dots (3)$$

である。RAMACに比べると5,600万分の1にすぎない^{*5}。

強磁性体の体積が小さくなると、記録領域内は単磁区状態になり、領域内の全スピンのあたまも一つのスピンのようになった

*4 別に平方インチである必要はない。SIに直せば、bit/inch² = $10^6/6.45 \text{ bit/m}^2 = 0.155 \text{ Mbit/m}^2$ となる。

*5 すなわち、大雑把に言えばRAMACの1ビットは0.6mm四方を必要としたものが、今では80nm四方で間に合うことになる。もっと感覚的に言えば、50年前は1ビットの書き込みに東京ドームほどの面積が必要であったものが、今では1円玉2枚分の面積で間に合うことになる。

かのように振る舞う。この状態で温度が高くなったり、体積がさらに減少すると、スピンは熱揺らぎのために特定方向に配向することができなくなる。この状態を「超常磁性superparamagnetism」という。強磁性が超常磁性に移り変わる体積や温度が磁気記録密度の理論的限界を与える²⁾。

温度 T -体積 V の関係を定性的に示すと図2のようになるだろう。ある温度 T_0 で記録密度を上げるために体積を V_1 から小さくしていくと、強磁性-超常磁性遷移領域 (曲線 AB) を切る。このときの体積を V_2 とすると V_2 以下の体積ではスピン配向 (記録) を安定に保持できない。また、より低温 T_1 で使用した場合は曲線 CD を切る点 V_3 でトンネル効果により磁化反転が起こり、これが限界点になる。トンネル効果については後述する。

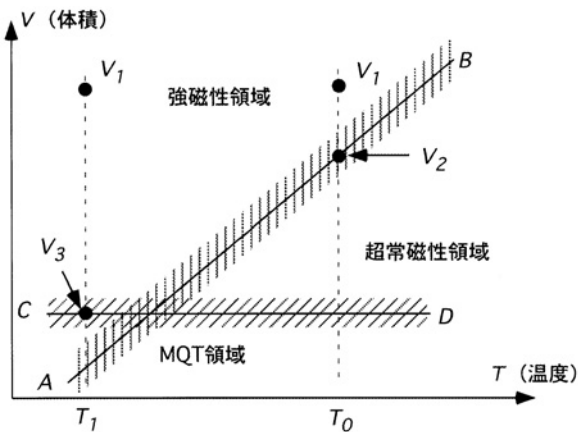


図2 温度 (T) と記録体積 (V) の磁気マップ
 曲線 AB : 強磁性と超常磁性の境界線、
 曲線 CD : 巨視的トンネル効果による遷移線

3.2 記録の原理

(1) 記録の保持

書き込んだビット情報は、残留磁化 M_r の状態として記録される。たとえば、 $+M_r$ あるいは $-M_r$ を、それぞれ1または0に対応させる。この状態が安定して保持されるためには、磁気エネルギーが熱エネルギーよりも大きければよい。すなわち、磁性体の飽和磁化を M_s 、保磁力を H_c 、1ビットを記録するのに必要な体積を V 、温度を T 、ボルツマン定数を k とすると、非常に乱暴であるが次の不等式を満たせば良い^{*6}。

$$M_s H_c V > kT + M_s H_D V \dots \dots \dots (4)$$

ここで H_D は着磁を打ち消す方向に働く逆磁場 (外来ノイズ、反磁場、浮遊磁場など) である。

この不等式が成立させるためには、次のようにすればよい。

(2) 体積 V を増大

1ビットあたりの体積を大きくする。しかし、これでは時代の流れに逆行してしまう。

(3) 低温で使用 (温度 T を室温以下にする)

究極的には極低温で磁気記録装置を使用することになるかもしれないが、液体窒素や液体ヘリウムを使ったハードディスクなど売れるはずがない。

(4) 飽和磁化 M_s を増大

室温の飽和磁化を増やすには、2つの方法があり、絶対零度の飽和磁化 (絶対飽和磁化) を大きくするか、強磁性体のキュリー温度を高くして室温での磁化を大きくすればよい。

(5) 保磁力 H_c を増大

結晶磁気異方性定数を K とすると、理論的な保磁力は次式で与えられる^{*7}。

$$H_c = \frac{2K}{M_s} \dots \dots \dots (5)$$

一般に $K \propto M^n$ ($n > 1$) であるから、結局 H_c を大きくするためには、飽和磁化を増やせばよい。

結晶磁気異方性以外にも、磁歪や形状に依存する磁気異方性がある。形状磁気異方性は、 N を反磁場係数とすると、 $K = -NM^2$ と与えられるので、異方性の値は飽和磁化で決まる。また、係数 N は0~1の値を持つから、形状を変えて適当な値を選べば異方性定数の大きさを0~ M^2 の間で調整できる。

磁気記録材料でもっとも要求されるのは品質の良い磁気異方性である。たとえば、最近の記録材料の主流である Fe Pt、CoCrPt や CoSm の磁気異方性エネルギーは $5 \sim 10 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ と非常に大きく、永久磁石としてみても恥ずかしくない異方性を持っている。

(6) 逆磁場 H_D を減少

式 (4) からわかるように H_c 程度の H_D が印加されれば磁化は反転したり、反転しないまでも記録保持が不安定になる。 H_D を低減するためには反磁場を減らす配置を設計すること、および、磁場ノイズを低減することである。

(7) 結局何が大切か

記録密度を向上させるための必要条件は、磁性体の磁化を増大させることである。磁化が増大したからといって、即、磁気記録材料へ応用されるものでは必ずしもないが、磁化が

*6 電磁気学によれば $MH/2$ は単位体積あたりの磁気エネルギーである。この MH は図1に示した理想的 M - H ヒステリシスループで囲まれる第2象限 (あるいは第4象限) の面積に相当する。また、このループが角型であれば“切れ味”のいい記録・再生ができる。

*7 実際の保磁力は、この値の0.1~0.3倍程度にすぎない。このように実際の値と理論的に予測値が大幅に異なることを「ブラウンのパラドックス」という。今日でも解決されていない磁性問題の一つである。

増えないことには身動きがとれない。Feは磁化を増大させる可能性を持った大事な元素である。

4 どこまで小さくできるか

3.2節の不等式(4)を満足させる最終的な状況はどのようなものであろうか。理学的な立場から考えてみる。

式(4)からわかるように、 V が極めて小さくても温度 T と逆磁場 H_D をゼロにできれば不等式の条件を満たすはずであり、長らくこのように考えられてきた。しかし、微小領域の磁性研究が進み、記録密度は量子力学的なトンネル現象によって上限が決まってしまうことがわかってきた。おもしろい現象なので簡単に説明しておく。

図3に示すように、スピンの向きが $\downarrow$ を向いた領域と $\uparrow$ を向いた領域があり、前者の方がエネルギー的に低い状態にあるとする。また、2つの領域はエネルギー障壁 ΔE で隔てられており、 $\uparrow$ 状態から $\downarrow$ 状態へ移り変わることはできないが、逆向きの磁場 H_D や高い温度 T が与えられ、 $M_s H_D > \Delta E$ あるいは $kT > \Delta E$ となると、障壁を乗り越えることができる。特に、温度によって乗り越える場合を熱活性型という。

しかし、量子力学的には、 $\uparrow$ 状態にあるスピン集団がトンネル効果によって障壁を通り抜けて $\downarrow$ 状態へ変わりうる。このようなトンネル効果を巨視的トンネル効果MQT (Macroscopic Quantum Tunnel Effect) という。

トンネル遷移確率は室温ではほとんど無視できるが、温度

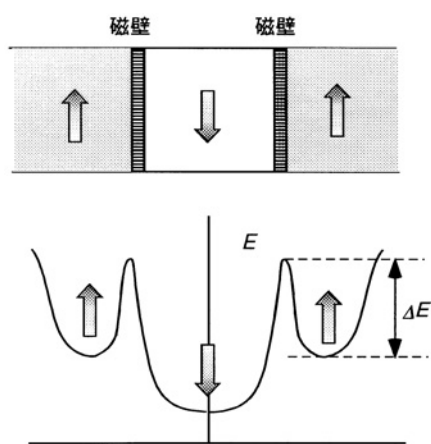


図3 巨視的量子トンネル効果
スピニアップ $\uparrow$ 状態とスピンドアウン $\downarrow$ 状態はエネルギー障壁(磁壁)で隔てられているが、トンネル効果により $\uparrow$ 状態が $\downarrow$ 状態へ遷移する。

に依存しないので、低温になって熱活性型遷移が減少してくるとMQT遷移が顔を出してくる。そうすると、外から磁場を加えなくても遷移が起こってしまう。すなわち、熱活性型遷移とMQT遷移が等しくなるところで、臨界体積 V_c が記録密度の上限を与え、臨界温度 T_c が使用できる下限温度を与える。

実際の磁性体について、その臨界温度や臨界半径を量子力学的に計算することは大変難しいが、最近IBMのHeldとGrinsteinはNéel-Brownモデルに立脚して理論的な計算を行った³⁾。それによると、現在10Gbit/inch²クラス材料として開発が進んでいるCo系合金では $T_c = 0.1\text{K}$ で1.9Tbit/inch²が記録面密度の上限になる。また、100Gbit/inch²クラス材料であるFe-Pt系($M_s = 1,140\text{emu/cm}^3$, $K = 10^8\text{erg/cm}^3$)では $T_c = 1.3\text{K}$ で43Tbit/inch²程度が上限になるという^{*8}。したがって、今日のように記録密度が倍々ゲームで進展していったら、あと十数年で理論的な限界に達してしまう。

5 情報化社会でのFe

5.1 Feの役割

(1) 力としてのFe

Feの磁束密度 B が大きいことを活かし、薄くて軽く見栄えのする電磁シールド材、小型で変換効率の高いトランス、温度特性に優れ駆動力の大きい電磁モータなど一層重要になるだろう。たとえば、信頼性に優れ、アクセス時間の短いハードディスクが可能になったのは、磁気記録技術自体の進歩もさることながら、駆動モータの小型化と高速回転を実現させた高性能永久磁石の開発によるところが大きい。なお、永久磁石での性能がアップするにつれ、磁束をガイドするヨーク材の磁束密度が限界に達しつつあり、高磁束密度磁気材料の開発が待たれている^{*9}。

では磁束密度を大きくするためにどうすればいいか。式(1)からわかるように、やっぱり飽和磁化を大きくすることである。

(2) 知としてのFe

速度の点で半導体メモリを凌ぐといわれているMRAM (magnetic random access memory)、スピントランジスター、トンネル効果型磁気抵抗効果素子(TMR)^{*10}など最

*8 Tbit/inch²のTとはテラ=10¹²である。すなわち、10¹²bit/inch²。もし、FePt系で50Tbit/inch²が実現できたとする。世界中の人々(約100億人)から、一人あたり400字詰め原稿用紙一枚分の調書をとったものを1インチ四方の中に保管できる。

*9 これは電気に例えると理解しやすいだろう。大電流を流せる電源があっても電流を流す導線が細ければ、これで電流上限が決まってしまう、電源の性能は生かせない。強力な永久磁石があっても多数の磁束を発生させても、それをガイドする磁性体の磁束密度が低いと磁束は磁気回路外へ漏洩し、必要なところへ磁束を供給することができなくなる。

*10 このようにスピンとエレクトロニクスが関連した分野をスピントロニクス (spin electronics)、あるいはスピトロニクス (spitronics) というが、最近のナノ技術の進展に伴い、急速に研究が進んでいる。

近の素子開発の話題は事欠かないが、ここでは割愛する。いずれにせよ、Feがこのようなスピトロニクス素子材料として活用されるためには、前述のように磁化と磁気異方性を大きくできるかどうかのキーポイントになる^{*11}。

以下、磁化増大法^{*12}について2、3提案したい。

5.2 負の圧力の印加⁴⁾

表1で磁化とキュリー温度の圧力依存性からわかるように、キュリー温度は圧力を印加しても変わらないが、磁化の圧力係数 (dM_s/dp) はかなり大きな負の値を持つ。この仕組みは以下のように説明できる。符号が正の圧力下では物質は圧縮されるが、逆に負の圧力は物質を膨張させるように働き、原子と原子は引き離されるので格子定数は伸び、単位胞体積は増大する^{*13}。原子間距離 (R) が増加すると3dバンドの幅は R^{-5} に比例して急減するが、このためフェルミレベルでの状態密度は増大し、3d電子の収容数が増えるから、飽和磁化は増大する。このような効果を磁気体積効果magneto-volume effectという。

負の圧力を印加するためには、Feに第2の元素を加えて格子定数を大きくする。このような圧力を化学的圧力という。化学的圧力を加える元素は「黙ってFeの格子を押し広げる」ものが良く、Fe原子と仲良く結合してFeの電子状態を変えてしまうものは困る。そうすると、いわゆる置換型原子よりも、Feの格子間隙に入る侵入型元素の方が都合がいい。

Feに対する侵入型元素には、ボロンB ($1s^2 2s^2 2p^1$) 炭素C ($1s^2 2s^2 2p^2$)、窒素N ($1s^2 2s^2 2p^3$) などがある。金森(阪大)はFeに置換型元素(An, Al, Si, Ge, Sn, Sb)と侵入型元素(B, C, N)を添加したときの磁気モーメントの変化を計算し、置換型元素の場合には磁化が減少するが、侵入型の場合では、C、N原子のs電子とFeのd電子が混合するので磁化が増える可能性があることを指摘している⁵⁾。面白いことに、Fe原子とC、N原子が混成軌道をつくると、Fe原子は見かけ上Co原子のように振る舞う。これを鉄のコバルト化という。直截的に言えば、このFe-N系でFeとNが協力してCoの役目を果たし、あたかもFeとCoからなる合金のように振る舞うので、パーメンジュールFeCo合金のような特性が生じることになる。実際、N原子添加でコバルト化が生じているという報告もある⁶⁾。

5.3 Fe-C、N系の磁性

(1) Fe-C系

炭化鉄として良く知られている Fe_3C ($\theta=483K$, $m=1.78m_B$)、立方晶 Fe_2C ($\theta=653K$, $m=1.72m_B$) や斜方晶 Fe_2C ($\theta=520K$, $m=1.75m_B$) は磁氣的に平凡であるが、Cが最大10at%程度まで含む炭素鋼の磁性は隠れた宝箱のような感じがする^{*14}。実際、Cの添加により磁気モーメントや内部磁場が増加することが確認されている⁷⁾。なお、Fe-N系と同様に $Fe_{16}C_2$ が存在するという報告がある⁸⁾。もし $Fe_{16}C_2$ が存在すれば、その磁性や熱的安定性はどうか、興味が尽きない。

(2) Fe-N系

フェロ磁性を示す窒化鉄には Fe_2N と Fe_4N がある。この系のホットな話題は $Fe_{16}N_2$ のフェロ磁性である。高橋(東北大)はFeを低真空度中で蒸着したところ、薄膜中に体心正方晶(bct) $Fe_{16}N_2$ が析出し、非常に大きな磁化($2,200\text{emu/cm}^3$)を有することを発見した⁹⁾。Fe原子あたりの磁気モーメントを算出すると体心立方晶(bcc) Feの $2.2m_B$ の1.3倍ほど大きい $2.9m_B$ になる。その後、この結果を確認するための追試が世界各所で試みられたが、磁化が増大するというグループと変わらないとするグループに二分され、今なお決着はついていない。

高磁束密度材料として使うためにはバルク状 $Fe_{16}N_2$ が必要であるが、 $Fe_{16}N_2$ の熱的安定性が関連するので実現は大変難しい。しかし、磁気記録材料として使用するならば微量ですむので見込みがありそうだ。この夢の磁性体の性質は我々日本人の手で是非とも究明したいものである。

5.4 Feマルテンサイトの磁性

鉄鋼中のマルテンサイトの磁性も興味深い、これもまた本格的な磁性研究がなされていない。西山先生の有名な「マルテンサイト変態」(基本編)の初め(同書p14)にFe-N、Fe-Cの正方晶マルテンサイトの格子定数の図がある。それを見るとC、N量とともにa軸の長さはわずかに減少し、c軸の長さは大きく増加する。その結果、単位胞体積は増大する。結晶構造は約2at%以下ではbcc、それ以上ではc軸方向に一軸的に伸びたbctになる。

この結果から2つのキーワードが生まれる。単位胞体積が増えることから前述の磁気体積効果が生じるだろう。また、一軸的に歪むのでd電子波動関数の縮退がとけて磁化が変化するだろう(増減はわからないが)。これを正方晶効果

* 11 古いCMであるが、Feの世界では「大きいことはいいことだ」。大きいものは小さくできるが、小さいものは大きくできない。

* 12 養毛剤の広告程度の軽い気持ちで読み流して欲しい。

* 13 真空中にすればいいのではないかと、思う方がいるかもしれないが、真空は高々1気圧の負の圧力であるから、磁化にはほとんど影響しない。

* 14 理学系の物性物理の立場からみれば、あまりに泥臭い研究に思えて手を出さなかったのではないかと。

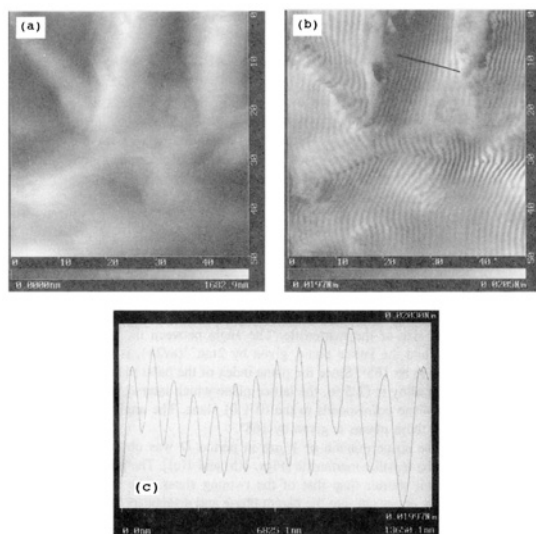


図4 $\text{Fe}_{0.69}\text{Ni}_{0.31}$ におけるマルテンサイト
(a) 原子間力顕微鏡により観察したレンズ型マルテンサイト（白い部分）。
(b) 磁気力顕微鏡で観察したマルテンサイトの磁区パターン。
(a) と (b) は同一場所を観察している。
(c) マルテンサイトに見られるストライプ磁区の振動パターン。
(b) の中央上の黒い直線上を走査したもの。

tetragonal elongation effectという。この2つの効果が重畳して磁化に反映するはずである。

鉄鋼の中からマルテンサイトを単独で取り出すことはできないから、マルテンサイトの磁化を正確に決めることはむずかしい。著者らは、Fe-Ni合金中のレンズ型マルテンサイト（正方晶）の形状を原子間力顕微鏡で観察し、同時に磁気力顕微鏡でマルテンサイト内の磁区観察を行った¹⁰⁾。その写真を図4に示す。写真に見られるストライプ磁区の周期長からマルテンサイト内部の磁化を見積もり、これが増大していることを明らかにした。

5.5 その他

Feは孤立した3価のイオンであれば $5m_B$ の磁気モーメントを持つが、固体に凝集することによって $3.13m_B$ （常磁性磁気モーメント）に減少する。さらに、強磁性状態に縮退すると $2.2m_B$ まで下がってしまう。すなわち、裸のFeの磁気モーメントのうち $2.8m_B$ を失っていることになる。これをどのようにして回復させるか。その回復手段の一つが体積効果や正方晶効果である。

一方、面心立方晶fccのFe原子には、 $2.8m_B$ という大きな磁気モーメントを持つ高スピン状態と $0.5 \sim 1.0m_B$ の小さなモーメントを持つ低スピン状態がある。低スピン状態のFeの格子定数を大きくしていくと、あるところで高スピン状態

へ転移する。したがって、格子定数の大きいfcc Feを作製すればbcc Feの1.27倍の磁気モーメントを持った高スピン状態が実現できるはずである。実際、松井（名大）らは、Cu、AuとFeからなる人工格子薄膜を作製して磁性を調べたところ、膜厚が減少すると磁化が増加すること、キュリー温度は650Kになり、室温でフェロ磁性を示すことがわかった¹¹⁾。今後の研究が楽しみである。

6 おわりに

21世紀においてもFeが金属グループの旗手として磁性研究を先導していくためには、その磁化を今以上に増大させることである。これは地味で根気仕事の研究だから人気が無いかもしれないが、情報化社会の中でエレクトロニクス素材と競合し、Feが最後まで生き延びるための必要条件である。

鉄をもっとも愛したお二人の先生、故高橋実先生（東北大名誉教授）と近角聡信先生（東大名誉教授）、のご指導の下で研究ができたことに感謝している。

引用文献

- 1) 宮島英紀：メゾスコピック系の磁性について，ふえらむ，5 (2000)，41.
- 2) D. J. Sellmyer, M. Yu, R. A. Thomas, Y. Liu and R. D. Kirby：Phys. Low-Dim. Struct., 1/2 (1998)，155.
- 3) G. A. Held and G. Grinstein：Appl. Phys. Lett., 79 (2001)，1501.
- 4) 志賀正幸：日本応用磁気学会会誌，15 (1991)，685.
- 5) J. Kanamori：Prog. Theoret. Phys. Suppl., 101 (1990) 1.
- 6) 楠見和久，宮島英紀，大谷義近：日本応用磁気学会会誌，18 (1994)，241.
- 7) T. Moriya, H. Ino, E. Fujita and Y. Maeda：J. Phys. Soc. Jpn. 24 (1968)，60.
- 8) 西山善次：マルテンサイト変態（応用編），丸善，(1974)，139.
- 9) T. K. Kim and M. Takahashi：J. Appl. Phys. Lett., 20 (1972)，492.
- 10) A. Hirohata and H. Miyajima：J. Appl. Phys., 81 (1997)，5665.
- 11) B. Sadeh, 山田保誠，近藤康寛，土井正晶，松井正顕：日本応用磁気学会会誌，23 (1999)，1349.

(2001年9月17日受付)