

解 説

飽和磁化および磁気異方性測定による材料評価

Evaluation of Material Properties by Saturation Magnetization and Magnetic Anisotropy Measurements

渡辺 義見^{*1}

Yoshimi WATANABE

In this article, evaluation of material properties by saturation magnetization and magnetic anisotropy measurements will be described. The influence of the difference in the solubility of Fe atoms between the α -Fe/Cu and γ -Fe/Cu systems in Cu-Fe alloys is studied by the saturation magnetization measurement. Magnetic analysis of magnetic gradients in non-uniformly deformed 304 stainless steel is carried out. In addition, evaluation of fiber orientation in short-fiber reinforced composites can be carried out by magnetic anisotropy measurement. In order to study the wear of bag-filter by ash dust, sintered magnetite (Fe_3O_4) compact were used for counter material for sliding wear test. It can be concluded that magnetic measurements are one of the useful methods for evaluation of material properties.

Keywords: saturation magnetization, magnetic anisotropy, Cu-Fe alloy, composite, orientation, bag-filter.

1 緒言

材料の性質は材料の成分と材料組織によって決まり、材料組織は材料の成分と製造プロセスによって決まる[1]。材料強度の通常の評価法として、引張試験・圧縮試験、硬さ試験、疲労試験、クリープ試験、衝撃試験および摩耗試験などがある[1]。また、代表的な材料組織の評価法として、光学あるいは電子顕微鏡観察や x 線あるいは電子線回折があげられる。これに対し、強磁性体相を含む材料の場合、磁気測定を行うことにより種々の材料評価を行うことが可能となる。例えば、常磁性体の母相中に既知の飽和磁化を有する強磁性の第二相粒子が析出している材料においては、その材料の磁化測定により強磁性体粒子の体積分率が評価できる。常磁性から強磁性への変態率を評価するのにも利用できる。これらの例として、Cu 母相中の析出 Fe 粒子が bcc 構造を有する強磁性 Fe 粒子(α -Fe)であるか fcc 構造を有する常磁性 Fe 粒子(γ -Fe)であるかの評価[2, 3]や、常磁性相から強磁性相へと磁気転移を伴うオーステナイト系ステンレス鋼のマルテンサイト変態の研究[4, 5]が行える。強磁性体の全磁気モーメントが示量変数であることを利用すれば、非磁性体に混入した強磁性体物質の量を飽和磁化測定により評価することが可能である。この原理を利用したバグフィルタの摩耗量

に関する研究がある[6]。

ところで、強磁性体の自発磁化が、その磁性体の特定方向に向きたがる傾向を磁気異方性という。発生原因に基づき、磁気異方性は形状磁気異方性や結晶磁気異方性などに分類される[7]。第二相粒子が強磁性体の場合、その形状や配向度あるいは結晶方位などの評価が可能となる。

本稿では、まず飽和磁化測定による材料評価について概説した後、磁気異方性について簡単に説明し、Cu-Fe 合金中の α -Fe 粒子に起因する磁気異方性および磁気異方性測定による繊維強化複合材料中の繊維配向度の非破壊評価について述べる。加えて、磁性を利用したバグフィルタの摩耗量評価についても紹介する。

2 飽和磁化測定による材料評価

2.1 Cu 母相中の析出 Fe 粒子

過飽和に Fe 原子が Cu 母相に固溶した Cu-Fe 合金を時効すると、準安定相である fcc 構造の γ -Fe 球状粒子が析出する[8]。引張あるいは圧縮の外力により塑性変形を加えると、この Cu 母相中の析出 γ -Fe 粒子は bcc 構造の α -Fe 粒子へと応力誘起マルテンサイト変態する[9]。マルテンサイト変態した α -Fe 粒子は層状の内部双晶構造を持ち、母相に対して Kurdjumov-Sachs (K-S) の格子関係をほぼ満たす[10]。また、変態後、転位を消す焼鈍を行うと、球状の α -Fe 粒子は回転楕円体状へと形状変化することが知られている[11]。

連絡先： 渡辺 義見，〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町，名古屋工業大学大学院工学研究科機能工学専攻，
e-mail: yoshimi@nitech.ac.jp

^{*1}名古屋工業大学

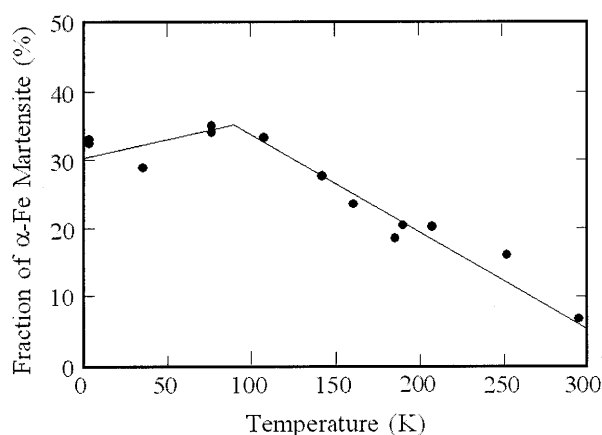


Fig. 1 Volume fraction of transformed Fe particles in Cu-Fe alloy plotted against the transformation temperature [12].

γ -Fe 粒子を約 70 K 以下に冷却すると、磁気的に無秩序な常磁性から磁気的に秩序な反強磁性へ磁気転移が生じる。この時、配列のエントロピーが減少するため、 γ 相の自由エネルギーの温度依存性はネール点以下では小さくなる。そのため、マルテンサイト変態量の温度依存性はネール点を境にして変化する[12]。平均粒子径 90 nm の γ -Fe 粒子を析出させた Cu-Fe 合金に 5 % の引張りずみを与えた場合の Fe 粒子のマルテンサイト変態量を Fig. 1 に示す。約 90 K において変態量は最大値を示し、それ以下の温度では温度が低いほど変態量は減少している。このマルテンサイト変態量は変態に伴う自由エネルギー差の相対量を反映しているため、90 K における変態量の遷移温度の存在は、 γ -Fe の磁気転移がこの温度付近にあり、この温度以下では温度低下に伴い γ 相と α 相との自由エネルギー差が小さくなることを意味する。

緒言でも述べたが、 γ -Fe 粒子は常磁性であるのに対し、マルテンサイト変態により生じた α -Fe 粒子は強磁性を示す。したがって、飽和磁化測定を行うことによりマルテンサイト変態量が見積もれる。特に、長時間時効を行い、粗大化した Fe 粒子の場合、薄膜の電子顕微鏡観察試料作製に伴い変態が発生する可能性があるため、この手法は有効である[2]。電子顕微鏡観察を行うと、粒子径別の変態量が算出できる。これに対し、飽和磁化測定では、非破壊で一度に試料全体の変態量が評価できる特徴を有する。

さらに、飽和磁化測定により、Cu 母相中の Fe 原子の固溶度を知ることができる[3]。長時間の時効により γ -Fe 粒子を析出させ、低温変形することにより全ての

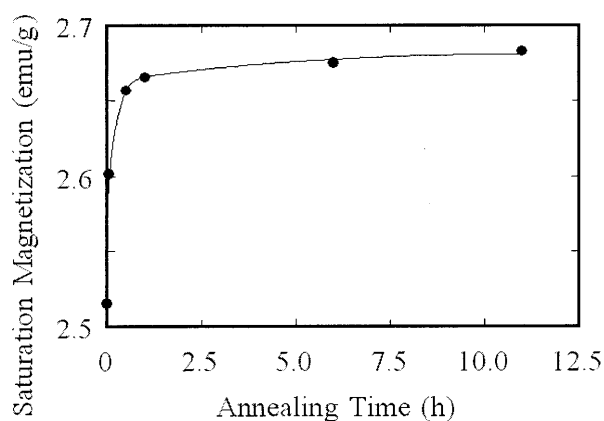


Fig. 2 Variations of saturation magnetization in Cu-1.60 mass% Fe alloy against the annealing time [3].

Fe 粒子を α -Fe へと変態させる。この状態で飽和磁化の測定を行えば、 γ -Fe/Cu における Cu 母相中の Fe 原子の固溶度が求められる。これに対し、この合金をさらに時効温度と同じ温度で転位を消す焼鈍を行えば α -Fe/Cu 平衡状態に達するので、 α -Fe/Cu における Cu 母相中の Fe 原子の固溶度の情報が得られる。Fig. 2 に焼鈍に伴う飽和磁化変化を示すが、図の様に焼鈍によって飽和磁化が増加している[3]。これは、固溶度の変化に伴い、固溶していた Fe 原子が α -Fe 粒子に取り込まれたためであり、このことから、 α -Fe/Cu 系に比べて、 γ -Fe/Cu 系における Fe の固溶度が高いことがわかる[3]。

2.2 オーステナイト系ステンレス鋼

ステンレス鋼の基本は Cr に代表されるフェライト生成元素と Ni に代表されるオーステナイト生成元素のバランスによるものであり、Cr を 18 %含む実用の SUS304 ステンレス鋼には 0.08 %の C と 2 %程度の Mn が含まれているので、Ni 添加量は 8 %でオーステナイト単相となる[1]。合金元素の含有量が多くなるほど高価になるので、オーステナイト系ステンレス鋼では SUS304 が最も安価であり使用量が圧倒的に多い。

このオーステナイト系ステンレス鋼も変形を加えるとマルテンサイト変態し、これに伴い、常磁性から強磁性への磁気転移も生じる。この現象を利用すれば、Fig. 3 に示す様に位置ごとに磁性が変化する磁気的傾斜機能材料が製造できる[4, 13]。即ち、材料に不均一変形をオーステナイト系ステンレス鋼に加えることにより、位置ごとに発生するマルテンサイト変態量を制御し、磁性を変化させるというものである。発生した

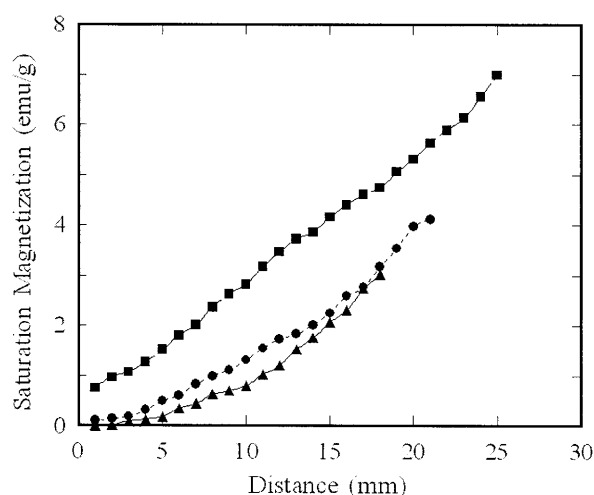


Fig. 3 The saturation magnetization gradients in non-uniformly deformed 304 stainless steel samples [4].

マルテンサイト相は加熱によりオーステナイト相へと逆変態するので、不均一加熱によっても磁氣的傾斜機能材料が製造できる[14]。

3 磁気異方性測定による繊維強化複合材料の繊維配向度評価

3.1 磁気異方性測定

ひずみが入っておらず、また、特別な熱処理を施していない強磁性体では、磁性体の内部エネルギーは結晶の対称性を反映する。このような磁気異方性を結晶磁気異方性という[7]。Fe や Ni のように立方晶系に属する結晶における単位体積あたりの内部エネルギー E_a は、立方体の x , y , z 軸に関する自発磁化の方向余弦を (a_1, a_2, a_3) とすると

$$E_a = K_1(a_1^2 a_2^2 + a_2^2 a_3^2 + a_3^2 a_1^2) + K_2 a_1^2 a_2^2 a_3^2 \quad (1)$$

となる。ここで、 K_1 および K_2 は立方異方性定数と呼ばれ、20°CにおけるFeの場合、それぞれ $4.72 \times 10^4/\text{m}^3$ および $-0.075 \times 10^4/\text{J/m}^3$ である[7]。

一方、強磁性体の形状が球状でない場合、方向によって反磁界係数が変化し、反磁界による磁気エネルギーにも差が生じる。これに起因した磁気異方性を形状磁気異方性という。回転楕円体形状の磁性体の単位体積あたりの静磁エネルギー E_s は

$$E_s = \frac{1}{4\mu_0} I_s^2 (3N_z - 1) \cos^2 \theta \quad (2)$$

であらわされる。ここで、 μ_0 , I_s および θ は、それぞれ真空の透磁率、自発磁化の大きさおよび印加磁場方

向と磁性体の長手方向との角度である。また、 N_z は反磁界係数であり、回転楕円体形状の強磁性体のアスペクト比を k とすれば、

$$N_z = \frac{1}{k^2 - 1} \left[\frac{k}{\sqrt{k^2 - 1}} \ln(k + \sqrt{k^2 - 1}) - 1 \right] \quad (3)$$

となる[15]。

磁気異方性を測定するのに適した装置としてトルク磁力計がある[7]。円板状あるいは球状の強磁性体試料に強い外部磁場を印加し、磁場の向きを変化させて試料に作用するトルクを測定する。自発磁化の存在する面内において、 θ の増す方向に $\delta\theta$ だけ回転したとき、異方性エネルギーが $\delta E(\theta)$ だけ増加したとする。このとき自発磁化には θ の減少する方向に単位体積あたり $-L(\theta)$ の磁気トルクが働き、

$$-L(\theta)\delta\theta = \delta E(\theta) \quad (4)$$

の関係がある。結晶磁気異方性および形状磁気異方性による磁気トルク曲線は、それぞれ式(1)および式(2)を式(4)に代入することにより得られる。

3.2 Cu 母相中の析出Fe粒子のバリエーション評価

応力誘起によってマルテンサイト変態した α -Fe粒子において、発生するバリエーションは外力の向きや方向に依存することが知られている。前述のように、 α -Fe粒子は強磁性であるため、特定のバリエーションの発生は、試料の結晶磁気異方性として検知できる。また、変態後の焼鈍により粒子の形状は球状から楕円体状へと変化するが、これは形状磁気異方性発現の原因となる。したがって、磁気異方性測定により、マルテンサイトの発生バリエーションの同定が可能となる[16]。

変形を加えただけの試料のトルク曲線は複雑であるが、焼鈍に伴いトルク曲線はきれいなサイン曲線を示すようになり、また、同時に振幅は増加していた。得られたトルク曲線を、結晶磁気異方性と形状磁気異方性の両観点から理論的に解析してみる。結晶磁気異方性に起因する磁気トルクは式(1)を式(4)に代入することにより得られ、また、形状磁気異方性に起因する磁気トルクは式(2)を式(4)に代入することにより得られる。時効前の曲線は、 α -Fe粒子のアスペクト比がほぼ1であり、また、特定のバリエーション群が優先的に発生していたとすると再現できる。焼鈍による曲線の振幅の増大は、時効に伴いアスペクト比が大きくなるとすると再現できる。このように、磁気異方性測定を行

うことにより、結晶学的に等価なバリエーションのうち特定のバリエーションが優先的に発生すること、および α -Fe 粒子が球状から楕円体状へと形状変化することが検知できる。これらの結果は、電子顕微鏡観察による報告 [10, 11] と一致する。

3.3 短繊維強化複合材料中の繊維配向度の評価

短繊維強化複合材料あるいは板状粒子強化複合材料の強度物性は強化相の向き、すなわち配向度によって変化する[1]。したがって、短繊維強化複合材料中の繊維配向度の測定は、複合材料の力学物性を予測する上で不可欠な技術である。今までに数々の繊維配向度評価方法が提案されているが、最も広く用いられている 2 次元配向度評価方法は、ヘルマンの配向度と呼ばれているものである。このヘルマンの配向度 f_p は、

$$f_p = [2 \langle \cos^2 \phi \rangle - 1] \quad (5)$$

で定義される[1, 17]。ここで ϕ は配向角であり、ある繊維 i の繊維配向角 ϕ_i は、基準方向と繊維長手方向との角度として求められる。また、 $\langle \cos^2 \phi \rangle$ は三角法の平均である。すべての繊維が基準方向に配向した場合、ヘルマンの配向度 f_p の値は 1 に、すべての繊維が完全無秩序な場合には、ヘルマンの配向度 f_p の値は 0 となる。

通常、ヘルマンの配向度を決定するためには、繊維強化複合材料を配向面に沿って注意深く切り出し、この面を顕微鏡によって観察する必要がある。この手法では、数多くの繊維に関して各々の配向角を測定しなければならず、簡便、迅速かつ高精度に配向度を決定することは不可能であった。

ところで、繊維形状の磁性体の場合、形状磁気異方性が支配的となり、単位体積あたりの繊維形状物質の磁気トルク曲線 L_{fiber} は

$$L_{\text{fiber}} = \frac{1}{4\mu_0} I_s^2 (3N_z - 1) \sin 2\theta \quad (6)$$

となる。そこで、簡単のため磁気トルク曲線を

$$L_{\text{fiber}} = K_f \sin 2\theta \quad (7)$$

とあらわすことにする。ここで、 K_f は定数であり、繊維形状の場合、反磁界係数 N_z が 1/3 以下であるため負の値となる。また、 θ は印加磁場方向と繊維の長手方向との角度である。

次に複合材料中、配向角 ϕ_i を有する i 番目の繊維の

寄与による磁気トルク曲線を求めてみる。反時計回りに磁気トルクを測定し、繊維配向角が ϕ_i 、測定中の磁場印加方向と基準方向との角度を θ とすると、 i 番目の繊維の寄与による磁気トルク曲線 L_{ith} は

$$L_{\text{ith}} = K_f \sin 2(\theta + \phi_i) \quad (8)$$

となる。したがって、強磁性体繊維強化複合材料の磁気トルク曲線 L_{comp} は

$$L_{\text{comp}} = \frac{1}{N_{\text{total}}} \sum \{ n_{\phi} K_f \sin 2(\theta + \phi) \} \quad (9)$$

となる。ここで、 n_{ϕ} は配向角 ϕ_i を有する繊維の本数、 N_{total} は全繊維の本数である[17]。

強磁性体繊維強化複合材料の磁気トルク曲線をコンピュータシミュレーションによって求めたところ、 180° 周期のサイン曲線となっており、配向度が大きくなるに従い、振幅も大きくなっていることがわかった。したがって、配向度決定のためには磁気トルク曲線を 180° にわたって測定する必要はなく、最大振幅を示す $\theta = 45^\circ$ あるいは $\theta = 135^\circ$ における値を求めればよいことになる。

そこで、最大振幅を示す $\theta = 135^\circ$ における磁気トルクとヘルマンの配向度との関係を導いてみよう。 ϕ 度だけ基準方向からずれた繊維の場合、磁気トルク曲線 L_{ith} は

$$\begin{aligned} L_{\text{ith}} &= K_f \sin 2(\theta + \phi_i) \\ &= K_f (\sin 2\theta \cos 2\phi_i + \cos 2\theta \sin 2\phi_i) \end{aligned} \quad (10)$$

となる。ここで、 $\theta = 135^\circ$ を代入すると

$$\begin{aligned} L_{\text{ith}} (\text{at } \theta = 135^\circ) &= -K_f \cos 2\phi_i \\ &= -K_f (2 \cos^2 \phi_i - 1) \end{aligned} \quad (11)$$

となるので、種々の配向角を有する短繊維が分布した複合材料の $\theta = 135^\circ$ における磁気トルクの値

$L_{\text{comp}} (\text{at } \theta = 135^\circ)$ は

$$\begin{aligned} L_{\text{comp}} (\text{at } \theta = 135^\circ) &= \frac{-1}{N_{\text{total}}} \sum \{ n_{\phi} K_f (2 \cos^2 \phi - 1) \} \\ &= -K_f \left\{ \left(\frac{2 \sum n_{\phi} \cos^2 \phi}{N_{\text{total}}} \right) - \left(\frac{\sum n_{\phi}}{N_{\text{total}}} \right) \right\} \\ &= -K_f [\langle 2 \cos^2 \phi \rangle - 1] = -K_f f_p \end{aligned} \quad (12)$$

で表すことができる。このように、最大振幅を示す $\theta =$

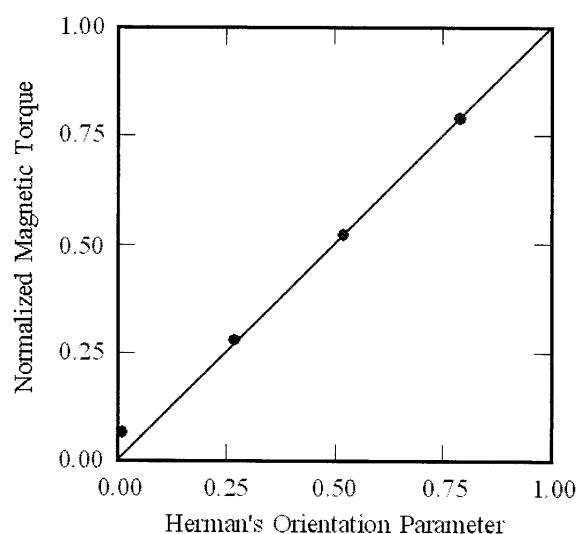


Fig. 4 Comparison of the normalized torque value and Hermans' orientation parameter [18].

135°における磁気トルクの値を定数- K_f によって除すれば、直接ヘルマンの配向度が求められることとなる[17]。実際に、種々の配向度を有する鉄短繊維強化複合材料を製造し、磁気トルク測定に供したところ、Fig. 4 に示す様にヘルマンの配向度と規格化した磁気トルクの値とは一対一対応しており、上記の考え方が正しいことが確認されている[18]。

4 バグフィルタの摩耗量の評価

近年、クリーンな地球環境作りが叫ばれている中で、ゴミ焼却施設では諸装置の性能向上の他、運転上の安全を確保する設計が重要な役割を占めている。ゴミ焼却炉から出た粉塵を含む有害ガス、ダイオキシンおよび重金属などを高効率にて除去できる優れた方法として、バグフィルタが広く用いられている。しかしながら、バグフィルタには粉塵摩耗による寿命があり、その寿命がゴミ焼却炉操業に大きな影響を与えている。交換時期を誤ると、煙突から汚染空気が排出してしまうという災害が発生する。そこで、粉塵摩耗によるバグフィルタの寿命予測が不可欠である。

現在、目的に応じて種々の摩耗試験法が提案されている。摩耗量の評価法としては、摩耗試験前後の質量変化、体積変化および摩耗痕の大きさなどが採られる[1]。しかし、これら既存の摩耗量評価法は粉塵によるバグフィルタの摩耗量を評価する手法としては不適切である。これは、粉塵摩耗に伴いバグフィルタ内に粉塵が混入し、これにより質量や体積増加が伴ってしま

うためである。また、摩耗痕の大きさにより評価する方法も、バグフィルタが変形容易材料であるために適切ではない。最近現場では、バグフィルタに付着した粉塵を洗濯によって除去し、磨耗量を質量変化により求めているが、正確な摩耗量が測定できるとはいえないのが現状である。問題点は、バグフィルタに付着している粉塵量の正確な見積もりである。

ところで、磁性材料の磁化が示量変数であることを利用すれば、バグフィルタ中に混入した粉塵量の評価が可能である[6, 19]。一般的に、 $I_s(\text{emu/g})$ の飽和磁化を有する磁性体粒子粉塵がバグフィルタに混入した場合、その磁性体粒子粉塵が混入したバグフィルタの巨視的磁化の値 $M_m(\text{emu})$ を測定すれば、バグフィルタに混入している磁性体粒子粉塵の質量 $M(g)$ は、

$$M(g) = M_m(\text{emu}) \div I_s(\text{emu/g}) \quad (13)$$

により算出できる。したがって、バグフィルタの初期質量を $M_0(g)$ 、粉塵摩耗を受け磁性体粒子粉塵を含んだバグフィルタの質量を $M_w(g)$ 、磁性体粒子粉塵の飽和磁化を $I_s(\text{emu/g})$ 、磁性体粒子粉塵を含んだバグフィルタの巨視的磁化の値を $M_m(\text{emu})$ とした場合、粉塵摩耗によるバグフィルタの有効な質量損失 $\Delta M(g)$ は

$$\Delta M(g) = M_0(g) - \{M_w(g) - [M_m(\text{emu}) \div I_s(\text{emu/g})]\} \quad (14)$$

により評価が可能である。

強磁性体であるマグネタイト(Fe_3O_4)焼結体を相手材として、市販のバグフィルタを摺動摩耗に供した。

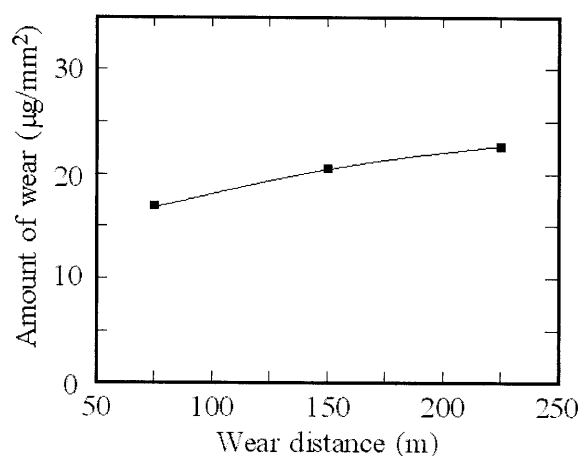


Fig. 5 The net amount of wear of bag-filter with a change of the wear distance.

摩耗後のバグフィルタの巨視的磁化および質量を測定し、式(14)を用いて摩耗量を算出した。その結果を Fig. 5 に示す。摺動距離が長いほど、摩耗量が増加している。このように、磁性体粒子を利用することにより、正確な摩耗量の評価が行える。なお、強磁性体を用いたバグフィルタ摩耗量評価および光ファイバセンサーによるバグフィルタの寿命予知システムを併用することにより、摩耗評価をより精密かつ統一的に行うことが可能となる[19]。

4 結言

材料組織を飽和磁化測定および磁気異方性により評価を行った我々の研究を紹介した。本文で示した様に、磁気測定は巨視的非破壊試験であり、材料組織分野の研究方法としても非常に有用である。磁場を印加することにより材料組織を制御することも可能であり、この研究も盛んに行われていることを付け加えておく。

謝辞

本研究は著者が大学院生時代に行った研究を始めに、助手として鹿児島大学および北海道大学、助教授として信州大学、在外研究員としてカルフォルニア大学バークレー校・ローレンスバークレー国立研究所および現所属である名古屋工業大学での仕事である。指導して頂いた先生方や諸先輩、同僚や学生諸君に感謝する。この研究の一部は文部科学省の＜イノベーションシステム整備事業＞地域イノベーション戦略支援プログラムグローバル型（第Ⅱ期）【東海地域】の援助を受けた。ここに謝意を表する。

(2011 年 5 月 24 日受付)

参考文献

- [1] 渡辺義見, 三浦博己, 三浦誠司, 渡邊千尋, 図でよくわかる機械材料学, コロナ社, 2010.
- [2] Y. Watanabe, M. Kato and A. Sato, Growth kinetics and martensitic transformation of large Fe particles in a Cu-1.5mass%Fe alloy, *Journal of Materials Science*, Vol. 26, No. 16, pp. 4307-4312, 1991.
- [3] Y. Watanabe, J-i Murakami and H. Miura, Effect of annealing on saturation magnetization in deformed Cu-Fe alloys with transformed Fe particles, *Materials Science and Engineering A*, Vol. A338, Nos. 1-2, pp. 299-304, 2002.
- [4] Y. Watanabe, S. H. Kang, J. W. Chan and J. W. Morris, Jr., Fabrication of magnetically graded material by rolling of wedge-shaped 304 stainless steel, *Materials Transaction, JIM*, Vol. 40, No. 9, pp. 961-966, 1999.
- [5] Y. Watanabe, S. H. Kang, J. W. Chan, J. W. Morris, Jr. and J. Clarke, High-Tc superconducting quantum interference device microscope observation of heat affected zone in spot welded Fe-Cr-Ni system, *Applied Physics Letters*, Vol. 83, No. 9, pp. 1878-1880, 2003.
- [6] Y. Watanabe, H. Sato, Y. Hirai, I-S Kim, S. Hinata and J. Kim, Novel method to evaluate the net wear volume of bag-filter by ash dust, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 161, Nos. 2-3, pp. 775-780, 2009.
- [7] 近角聰信, 強磁性体の物理 (下) 磁気特性と応用, 裳華房, 1984.
- [8] F. Bitter and A. R. Kaufmann, Magnetic studies of solid solutions, *Physical Review*, Vol. 56, No. 10, pp. 1044-1051, 1939.
- [9] J. M. Denney, Precipitate kinetics and structure in a Cu-2.4%Fe alloy, *Acta Metallurgica*, Vol. 4, No. 6, pp. 586-592, 1956.
- [10] M. Kato, R. Monzen and T. Mori, A stress-induced martensitic transformation of spherical iron particles in a Cu-Fe alloy, *Acta Metallurgica*, Vol. 26, No. 4, pp. 605- 613, 1978.
- [11] R. Monzen, A. Sato and T. Mori, Structural changes of iron particles in a deformed and annealed Cu-Fe alloy single crystals, *Transaction. JIM*, Vol. 22, No. 1, pp. 65-73, 1981.
- [12] Y. Watanabe, Y. Takada, H. Miura, M. Kato and A. Sato, Temperature dependence of the amount of transformed Fe particles in a Cu-1.5-mass% Fe alloy, *Journal of Materials Science*, Vol. 28, No. 17, pp. 4578-4582, 1993.
- [13] Y. Watanabe, S. H. Kang, J. W. Chan, J. W. Morris, Jr., T. J. Shaw and J. Clarke, Observation of magnetic gradients in stainless steel with a high-Tc superconducting quantum interference device microscope, *Journal of Applied Physics*, Vol. 89, No. 3, pp. 1977-1982, 2001.
- [14] Y. Watanabe and I. Momose, Magnetically graded materials fabricated by inhomogeneous heat treatment of deformed stainless steel, *Ironmaking & Steelmaking*, Vol. 31, No. 3, pp. 265-268, 2004.
- [15] 近角聰信, 強磁性体の物理 (上) 物質の磁性, 裳華房, 1978.
- [16] T. Fujii, Y. Watanabe, T. Enami, A. Sato and M. Kato, Magnetic anisotropy caused by the formation of stress-induced martensite in small iron particles in a copper matrix, *ISIJ International*, Vol. 32, No. 9, pp. 1027-1033, 1992.
- [17] Y. Watanabe, Evaluation of fiber orientation in ferromagnetic short-fiber composites by magnetic anisotropy, *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, No. 8, pp. 915-923, 2002.
- [18] Y. Watanabe and T. Fujii, Experimental study on magnetic torque measurement to estimate fiber-orientation in Fe-fiber reinforced composites, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 42, No. 4A, pp. L391-L393, 2003.
- [19] 渡辺義見, 岸悟志, 佐藤尚, 壬生攻, 島川聡, 日向滋, 光ファイバーと磁性体粒子とを用いたバグフィルターの摩耗評価法, 繊維学会誌, Vol. 64, No. 3, pp. 79-84, 2008.