

# 「応用磁気における計測の実際 I」 微小磁化を測定する一高感度試料共振型磁力計一

Measurement of Micro-magnetization: A Highly Sensitive Resonating Sample Magnetometer (RSM)

増田 宏 東英工業(株)磁性部

H. Masuda, Magnetic Dept., Toei Industry Co., Ltd.

**Key words:** resonating sample magnetometer (RSM), micro-magnetization, phase-sensitive detection, flat spring, mechanical resonance, ac field gradient, Elinvar alloy, Young's modulus

### 1. はじめに

近年,磁気記録媒体の分野では高密度化を実現するため に薄膜化が進み,媒体および磁気センサなどの磁気デバイ スの厚みはナノメートルスケールに到達している.また, 半導体分野での微細化技術を利用して,同様なスケールに 微細加工した微小磁性体の研究も各所で行われている.こ のような状況の下で,磁性材料の測定・評価技術はさらに 高感度化が必要であり,精度の高い磁力計が求められてい る.

従来、磁性材料の測定には広範囲な温度測定にも対応し ている振動試料型磁力計(VSM)<sup>1)</sup>が広く一般的に使用さ れているが、測定感度が10<sup>-5</sup> emu 程度のため薄膜、微細 化された材料に対しては感度不足を感じる.一方、超伝導 量子干渉素子(SQUID)を用いた磁力計は約10<sup>-8</sup> emu の 高感度測定が可能であるが、常時液体へリウムを必要とす るうえ、測定時間が非常に長いことから手軽に測定結果を 得ることはできない.また、SQUIDと同等な感度を有し、 液体へリウムが不要な交番力磁力計(AGFM)<sup>2)~4)</sup>は、試料 に交番磁界を重畳させ試料の磁化をピェゾ素子で高感度に 検出するという優れた磁力計であるが、交番力周波数が高 いことによる渦電流の発生や、ピェゾ素子が温度変化に敏 感であるため室温以外では測定感度が大幅に低下してしま い、磁化の温度変化を高感度に測定することが難しいとい う問題もある.

試料共振型磁力計 (Resonating Sample Magnetometer, RSM)<sup>5), 6)</sup>は、上記の不便さを改善した短時間で高感 度な磁化測定が可能な磁力計である。RSMは、直流磁界 で磁化した磁性体試料に弱い交流磁界勾配を印加して振動 させ、その振動を磁気回路中に設置されたピックアップコ イルに伝達し、発生した誘導起電力をロックインアンプで 測定することにより磁化を検出する。その際、RSMの特 徴である検出コイルを保持する板バネの機械的共振を利用 して振幅増幅を行い測定の高感度化を図っている.

## 2. 試料共振型磁力計 (RSM)

従来,直流磁界中に設置された磁性体試料の磁化を測定 する方法として,加振器などに連結された振動棒を介して 試料を振動させ,印加磁界中に設置されたピックアップコ イルを用いて,試料から発生する交流磁界を検出する電磁 誘導法がある.この方式は微弱な信号を検出する方法とし て有効な手段で,磁化測定器として一般化している振動試 料型磁力計(VSM)などに用いられている.

一方、試料を振動させるには機械的に行う以外に、直流 磁界内に設置されたコイルを用いて交流磁界勾配を作用さ せ、交流磁気力を印加する方法もある。 VSM と同様な場 所に設置したコイルの配置と形状で、検出コイルとしてで はなく磁界勾配発生コイルとして利用すればよい. この場 合、もちろんコイルに電流を流すため線材などの変更が必 要である。また、VSM で試料を振動させる加振器として 使用していたムービングコイルの機構部は,高感度な振幅 検出回路として利用できる、この場合、コイルに電流を流 す必要はなく、永久磁石と鉄製ヨークで構成された磁気回 路の空隙に設置されたピックアップコイルとして利用す る. そのため, 狭い空間に細い電線を多数巻く必要がある. 信号検出部が直流印加磁界の外に設置されるため S/N 比 の向上が期待できる. このように VSM で採用されている 試料駆動部と磁化検出部の配置はそのままにして、各機能 を逆転したような方式を採用した磁力計が RSM である. さらに、ピックアップコイルは板バネに固定されているた め、板バネを共振させて使用することにより電気的な増幅 とは別に機械的な振幅増幅を行えるメリットがある. この ような環境を整えることにより、VSM と同様に直流磁界 中の微小な交流磁界信号を分離検出する位相同期検波方式 も採用でき、高感度な磁化測定が可能となる.

Fig. 1 は, RSM 主要部の模式図である. 試料は, 信号検 出部と連結された振動伝達棒の先端のアクリル製試料ホル ダーに装着され, 直流磁界発生用電磁石の中心に設置され る. 振動棒の他端を検出コイルおよび板バネに固定する. 試料は常に交流磁界勾配中にあるので, 空間的に一様な直



**Fig. 1** Schematic view of a resonating sample magnetometer.

流磁界によって誘起された磁気モーメント $m_x$ に比例した 交流磁気力 $F_z$ を受ける.この交流磁気力 $F_z$ は、振動伝達 棒を介して板バネおよびピックアップコイルを振動させ る.ここで、交流磁気力の周波数を板バネの機械的共振周 波数に同期させることにより、振幅は機械的に増幅するた め、この振幅を振動伝達棒に連結したピックアップコイル を用いて電磁誘導法により磁化信号として測定する.試料 の振幅は磁気モーメントの大きさに比例するため、振幅を 検出することにより磁化を測定できる.

## 3. 試料共振型磁力計 (RSM) の測定原理

磁界勾配コイルは, Fig. 2 のように何種類かの配置が考 えられる. 今, 勾配磁界 $h_x$ , 磁気モーメント $m_x$ , 磁気力Fが静的にバランスされた状況を考える. (a)のコイルはa-a'方向, (b)のコイルはa-a'方向, b-b'方向, (c)のコイルは a方向, b方向に勾配磁界を発生するように電流を流して 励磁する. このとき, 直流磁界の中心にある試料付近には 磁界勾配が発生し, 試料は直流磁界によって誘起された磁 気モーメントに比例した磁気力を受ける. ただし, 磁界勾



Fig. 2 Arrangement of the gradient coil.

配コイルにより発生した磁界は, 試料が設置された磁界中 心では零である.

Fig. 2(a) は、直流磁界方向、磁界勾配方向、および試料 が受ける力の方向(振動棒の方向)がすべて同一のx軸方 向としたコイル配置であり、式で表すと以下のようにな る.

$F_x = m_x \partial h_x / \partial x \tag{2}$	1)
---	----

また, Fig. 2(b), (c) のコイル配置は, 直流磁界方向を x 軸 方向としたとき, 磁界勾配方向と試料の受ける力の方向 (振動棒の方向)が z 軸方向となるコイル配置で, 次式で表 すことができる.

 $F_z = m_x \partial h_x / \partial z$  (2) (a) の配置は、二つのコイルを接近させることにより磁界 勾配を上げ、磁気力を大きくすることにより高感度化でき る長所がある.しかし、低温用クライオスタットあるいは 高温用オーブンを使用して温度測定を行う場合は、コイル 中心を通してこれら温度可変ユニットを設置する必要があ り空間的な配置に困難が伴う.(b),(c)の配置は、コイル間 に温度可変ユニットを設置することが可能で、温度測定を 行う場合は有利であるが、コイル間距離が離れるため磁界 勾配が弱くなり高感度化には不利となる.また,(c)のコイ ル配置は、振動棒の方向(試料の受ける力の方向)と同一 となるため使用できない. いずれの配置でも, 力Fは  $dh_x/$ dx あるいは  $dh_x/dz$  が一定であれば磁気モーメント  $m_x$  に 比例する.

一方、磁性体試料を設置した振動棒を固定している板バ ネの機械的共振について Fig. 2(b) のコイル配置を例に考 察する. 試料に交流磁気力  $f(t) = F_z \cos \omega t$  を加えた場合, 板バネの運動方程式は以下の式となる<sup>6)</sup>.

$$m\ddot{z} + 2m\,\lambda\dot{z} + kz = f(t) = F_z \cos\omega t \tag{3}$$

ここで m は試料と振動棒の質量, λ は減衰定数である. 定 常強制振動の場合、この方程式の解は次式で与えられる.

$$z(t) = \frac{F_z}{m} \cdot \frac{\cos(\omega t - \alpha)}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\lambda^2 \omega^2}}$$
$$\equiv \frac{F_z}{k} \cos(\omega t - \alpha) \cdot Q(\omega)$$
(4)

$$\tan \alpha = \frac{2\lambda\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \tag{5}$$

ここで、 $\omega_0^2 = k/m$  である.

(4) 式より、板バネの振幅は力 F<sub>2</sub>に比例するので、磁気 モーメント $m_x$ にも比例する. また,  $Q(\omega)$ は静的な板バネ の伸びの増幅率を表すもので、次式で与えられる.

$$Q(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{4\lambda^2 \omega^2}{\omega_0^4}}} \approx \frac{\omega_0}{2\lambda}$$
(6)

上式より、板バネの固有振動数ω。と同じ周波数に磁界勾 配コイルの励磁周波数を合わせることにより、板バネの振 幅は増幅されることがわかる.  $\omega = \omega_0 \sigma c \delta$ ,板バネのz 方向の変位 z(t) は (4) 式より,

$$z(t) = \frac{m_x}{2\lambda m\omega_0} \frac{\partial h_x}{\partial z} \cos(\omega_0 t - \alpha)$$
(7)

となる. このとき、板バネの中心に取り付けられたピック アップコイルは、磁化検出用磁気回路の空隙に設置されて いるため電磁誘導により以下の式で表される誘導起電力 V(t)を発生する.

$$V(t) \propto \frac{\partial z(t)}{\partial t} = \frac{m_x}{2\lambda m} \frac{\partial h_x}{\partial z} \cos(\omega_0 t - \beta)$$
(8)

よって,誘導起電力 V(t)を測定することにより磁気モーメ ント $m_x$ を測定できる.

一方、板バネの横振動(厚さ方向)に対する曲げ変形は 梁理論によって以下の式で与えられる<sup>7)</sup>.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right) = - \frac{\rho A}{g} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$$
(9)

ここに EI は曲げ剛性で, E はヤング率, I は断面二次モー メントである. 板バネの長さを l, 幅を w, 厚みを d とする と $I = wd^3/12$ であり、 $\rho$ は密度、A(=wd)は断面積であ

る. また、gは重力加速度である. ただし、この式は曲げ モーメントによるたわみのみを考え、せん断力によるたわ みを無視し、回転の慣性力を考えていない、境界条件とし て板バネの両端でたわみおよび曲げモーメントが零として (9) 式を解くと、両端支持の板バネの最低共振周波数 fo は 以下の式で与えられる.

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{gEI}{\rho A}} \tag{10}$$

さらに、 質量 We の両端支持の板バネに質量 Ws の振動棒 を連結した場合,板バネの複合共振周波数 f。は次式のよう になる<sup>8)</sup>.

$$f_{\rm s} = f_0 \sqrt{\frac{W_{\rm e}}{W_{\rm e} + 4.2W_{\rm s}}} \tag{11}$$

(8) 式は、 $\omega_0^2 = k/m$ より

 $V(t) \propto \omega_0^2 \cos(\omega_0 t - \beta)$ 

(12)と表されるので、RSM にとって振動棒およびピックアッ プコイルの質量増加は板バネの共振周波数 fsの低下を招

き, f<sub>s</sub>は (12) 式の ω<sub>0</sub> に相当するので誘導起電力 V(t) を減 少させる.そのため振動棒および検出コイルの軽量化が必 要である.また、foが変化することは板バネの振幅変化を 引き起こし、磁化信号のドリフトの原因となるため極力避 けなければならない、共振周波数を変化させる要因として 考慮しなければならない物理量は、(10)式よりヤング率E である、このため検出部に設置されている板バネの材質 に、室温付近におけるヤング率の温度変化がほとんどない 非磁性エリンバー合金<sup>9,10)</sup>を使用して装置の安定化を 図った.

#### 4. 試料共振型磁力計 (RSM) の構成

Fig.3 に測定システムの基本構成を示す. 測定システム は、信号検出部,振動伝達部,直流磁界発生部,交流磁界 勾配発生部、磁化信号増幅部、磁界計測部、およびデータ 処理部から構成されている.

信号検出部には、永久磁石と鉄製ヨークを使用した磁気 回路とその空隙部に設置されたピックアップコイル、ピッ クアップコイルを固定し機械的振幅増幅を行う板バネ,そ して除振機構部が組み込まれている. VSM と異なり, 信 号検出部は試料励磁用の直流磁界外にあるため、磁界の変 動や励磁電源によるリップルなどの影響を受けにくい、そ のため、測定時間の短縮や S/N 比の向上に結びつく. 一 方、信号検出部は機械的振動や音響的振動などの外的振動 に影響されやすいため、特に高感度測定を行う場合は周囲 の振動ノイズに注意する必要がある.外的振動源には、床 から伝わる外部機械的振動、空気を伝わる音響的振動、お よび電磁石に固定されている交流磁界勾配コイルに働く ローレンツ力による内部機械的振動がある. これらの振動 源を遮断するため,外部機械的振動に対しては空気バネ式 除振器を使用して床から分離し、内部的機械振動に対して

日本応用磁気学会誌 Vol. 26, No. 5, 2002



Fig. 3 System block diagram of a resonating sample magnetometer.

はゲル状の防振材と金属板との組合せによる除振機構によ り電磁石から隔離した.また,音響的振動に対しては,検 出部をステンレス製のベルジャーにより覆い,試料および 振動伝達棒をガラス管で覆って空気による直接の振動を抑 えた.

振動伝達部は、一端がピックアップコイルおよび板バネ に固定された振動伝達棒と試料ホルダーから構成されてい る.そのため、振動伝達部の重量増加は板バネの固有振動 数の低下を招き感度を下げる.これを避けるため、振動伝 達棒と試料ホルダーは、軽くて丈夫な磁化率の小さい材料 を選ぶ必要がある.また、低温測定を行う場合も同じ試料 ホルダーを使用するため、温度変化にも強くなくてはなら ない.以上の点を考慮して、振動伝達棒には直径2mm¢ のカーボングラファイトを用い、試料ホルダーにはアクリ ル樹脂を使用した.

直流磁界発生部はワイス型電磁石, 励磁用電源から構成 されている. 電磁石は 45 mm の磁極間隔に最大発生磁界 15 kOe 以上を発生する. 励磁用電源は ±50 A のバイ ポーラ型定電流電源を使用し, パソコンより D/A ボード を使用して制御される.

交流磁界勾配発生部は, 試料を温度可変するため Fig. 2 (b) のコイル配置を採用した. また, 高感度測定するため Fig. 2(a) の配置も試みた.

磁化信号増幅部は、増幅率 100 倍の低ノイズ前置増幅器 を経て、ロックインアンプに入力され磁界勾配コイルに流 す電流波形を参照信号として位相同期検波され磁化を測定 する. 磁界計測部は、GaAs ホール素子を使用したガウスメー タで磁界が計測される.

磁化および磁界信号は,パソコンにより読み取られデー タ処理や解析が行われる.

#### 5. RSM 主要各部の性能

## 5.1 信号検出部

信号検出部を構成している磁気回路は,温度特性の良い Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> 永久磁石と鉄製ヨークが使用され,中央部にピッ クアップコイルを配置するための空隙がある.空隙部の構 造は,検出コイルの非常に小さな変動による誘導起電力を 効率良く発生させるため磁界勾配を大きくする必要があ る.このため効果的な磁極の形状を設計するため磁界解析 ソフトウェアでシミュレーションを行った.Fig.4 は磁気 回路の空隙部の磁界分布をホール素子で計測した結果であ り,シミュレーションの結果とほぼ一致した.実測値から 得られた空隙部の最大磁界は約 6,500 Oe で最大磁界勾配 は約 1,800 Oe/mm であった.

ピックアップコイルの位置は、コイルの変動による誘導 起電力の発生を最大限得るため、空隙部磁界分布の磁界勾 配が大きく直線性のある場所に配置した.コイルの巻き線 は、線径 30 µm のホルマル線を使用し、4,000 ターンの巻 数とした.

ピックアップコイルを保持している板バネは、磁気回路 の近くに配置されているため、漏洩磁界による力の影響を 受けないように非磁性材料を使用する必要がある.また、 板バネの温度変化は固有振動数を変化させるため、ヤング

日本応用磁気学会誌 Vol. 26, No. 5, 2002



**Fig. 4** Magnetic field distribution of the magnetic circuit air gap.



**Fig. 5** Resonant characteristics of a nonmagnetic elinvar flat spring.

率の温度係数が小さいエリンバー合金を使用した.板バネ の形状と固定方法については、両端支持構造となるように 50 mm 四方の板材の 2 カ所に T 型の溝を切り、側面で固 定する方法を採用した.Ni 線試料に 5 kOe の磁界を印加 して、磁化信号から得られた厚さ 0.4 mm の板バネの共振 特性と、(6) 式より減衰定数  $\lambda$ ,共振周波数  $\omega_0$  を設定して 増幅率の周波数依存性を計算して規格化した結果が Fig. 5 である.実測値と計算結果は非常に良い一致を示し、交 流磁界勾配コイルの励磁周波数を板バネの固有振動数に合 わせることにより、大きな機械的振幅増幅が行われること がわかった.このとき、フィッティングした板バネの減衰 定数  $\lambda$  は 0.38 であった.また、共振周波数  $f_r$ =206.25 Hz に対して、出力の半値幅は  $f_a$ =1.3 Hz で、Q 値 (quality factor) は 158 と大きな値を示し、大きな S/N 比を得られ ることがわかった.

#### 5.2 交流磁界勾配コイル

試料に交流磁気力を与える方法は, Fig. 2(b) に示される ような電磁石の磁極面に設置された磁界勾配コイルに, そ れぞれ逆向きの交流電流を流し交流磁界を発生させる. こ



**Fig. 6** Measured magnetic field distribution of the gradient coil.

のコイル配置の場合に発生する磁界分布の実測値を Fig. 6 に示す.式(2)の磁界勾配  $dh_x/dz$  は, Fig. 1 中の試料中 心とコイル中心とがなす角度 $\theta$ が45°よりも小さくなると 急激に小さくなるため、 $\theta=45$ °になるようにコイルの大き さを設計した<sup>11),12)</sup>. 電磁石の磁極間距離 45 mm に対し て,コイルの直径 30 mm,長さを7 mm とした. このコ イルに対して,0.5 A の直流電流を流した場合,試料付近 に発生する磁界勾配  $dh_x/dz$  は約 5.5 Oe/mm であった.

直流励磁磁界中に設置した交流磁界勾配コイルに電流を 流す際に,注意しなければならないことは,コイルに発生 するローレンツ力による振動である.このコイルの取り付 けが不十分であると電磁石全体を揺らし検出部まで伝わ る.励磁電流の周波数は検出電圧の周波数でもあるためそ の成分を極力抑える必要がある.

#### 6. RSM による磁化測定

磁化の校正には、直径 90  $\mu$ m,長さ 450  $\mu$ m の Ni線 (飽和磁気モーメント:  $\sigma_s$ =1.38×10<sup>-3</sup> emu)を使用した. なお、Ni線の磁化は、校正された VSM を用いて同定し た. 測定は試料ホルダーに Ni線を取り付け、直流磁界を 印加して最大磁界に到達後ファンクションジェネレータの 周波数を変化させ、ロックインアンプの出力 (X=A cos  $\phi$ ) が最大となる周波数を探す. この出力最大となった周波数 が板バネの固有振動数であり測定周波数となる. Ni 線の 磁気ヒステリシス曲線の測定結果を Fig. 7 に示す. 出力 の磁化変化率は 4.62×10<sup>-4</sup> emu/mV となった. このと きの測定条件は、共振周波数  $f_r$  が 206.25 Hz,磁界勾配コ イルに流す電流  $I_r$  を 800 mA,磁界掃引時間を 0.5 min/ kOe,時定数 T const. を 100 ms に設定した.

次に Ni 線の出力特性より,共振周波数近傍における S/ N 比を評価するために, FFT スペクトルアナライザーを 用いて周波数分析を行った. Fig. 8(a) は,飽和磁気モーメ



Fig. 7 Magnetization curve of Ni wire.



**Fig. 8** Frequency spectra of the magnetization signal measured with an FFT analyzer. (a) Ni wire  $(\sigma_s = 1.38 \times 10^{-3} \text{ emu})$  at H = 5 kOe; (b) no sample at H = 0 kOe

ントが  $1.38 \times 10^{-3}$  emu の Ni 線試料に 5 kOe の直流磁 界を印加した場合のスペクトルで, Fig. 8(b) は,磁界およ び磁気モーメントがゼロの場合のスペクトルである. 横軸 は周波数,縦軸は電圧利得を表し,入力電圧を  $V_{in}$ ,出力電 圧を  $V_{out}$ とすると Gain = 20 log<sub>10</sub>( $V_{out}/V_{in}$ ) [dB] と表さ れる. 測定共振周波数  $f_r$ =206. 25 Hz における Ni 線試料 の電圧利得は -2.94 dB で,磁気モーメントがゼロの場合



**Fig. 9** Magnetization curve of  $SmCo_5$  in a permanent magnet.



Fig. 10 Magnetization curve of a photographic film.

は -78.19 dB であった.  $V_{in}$ を一定と仮定して電圧利得 の比から試料の有無による出力電圧の比が求められる. Ni 線試料を基準にして,試料がない場合の磁気モーメントを 計算すると約  $2.4 \times 10^{-7}$  emu となる. この値は,磁化測定 におけるノイズレベルであり, RSM の最高感度に相当す る.

Fig. 9 の磁気ヒステリシス曲線は、着磁前の SmCo<sub>5</sub> 焼 結磁石を粉砕し、一辺が 100  $\mu$ m 程度の多結晶粒子を取り 出し、少量の接着剤中で配向固化させて測定した結果であ る. 微細な粒子を高感度で磁化測定すると、バルク状態で は観察されない逆磁区の発生による磁壁の移動がダイナ ミックに測定される. 各磁区による磁化反転磁界の違いが 明瞭に測定されている. さらに微細な試料を測定すると、 正負の印加磁界で磁気ヒステリシス曲線の非対称性が顕著 になった.

Fig. 10 は写真フィルムのデータ記録部に使用されてい

日本応用磁気学会誌 Vol. 26, No. 5, 2002

る記録媒体の磁気ヒステリシス曲線の測定結果である. 0.4×0.7 mm の大きさのフィルムを1枚測定した結果で ある. 磁気ヒステリシス曲線上のノイズレベルは約 3× 10<sup>-7</sup> emu 程度であり, FFT スペクトルアナライザーを用 いた結果と同程度であった.

## 7. おわりに

試料に作用する交流磁気力,板バネの機械的共振,コイ ルに発生する電磁誘導、そして位相同期検波方式を効果的 に利用した試料共振型磁力計(RSM)を使用することによ り短時間(約 20分/ループ)で非常に高感度(約 3×10<sup>-7</sup> emu) な微小磁化の測定を行うことが可能となった. 高感 度化を図るうえで注意しなければならない点は、磁化信号 の安定性と除振対策である.製作当初,磁化信号の温度ド リフトに悩まされたが、板バネに非磁性エリンバー合金を 使用することによりこの問題はかなり解消された. また, RSM で検出する振幅は非常に小さいため、特に高感度測 定に際しては空気を伝播する音響学的振動や磁界勾配コイ ルによる内部機械的振動が影響した. この問題に対して は、ゲル材とステンレス材との積層構造の除振器を採用す ることにより対処できた. 温度可変測定に関しては紙面の 都合で割愛させていただいたが、現在のところ 4.2 K から 室温までの測定はクライオスタットを使用して、室温と同 程度の感度で測定を行っている. 今後も板バネの形状に関 する考察を加えてさらに安定した高感度磁力計を製作する 予定である.

謝辞開発当初より多方面にわたるご指導、ご鞭撻、および装置のネーミングをいただきました慶應義塾大学物理学科の宮島英紀教授、磁界勾配コイル、磁気回路の設計など、RSMの原理について基礎からご指導いただきました東北大学材料物性学科の大谷義近助教授に御礼申し上げ

ます. また, RSM の感度アップに並々ならぬご助言, 討 論, 実験をしていただきました慶應義塾大学物理学科宮島 研究室の学生に感謝いたします.

## 参考文献

- 1) 川西健次,近角聰信,櫻井良文:磁気工学ハンドブック, p. 86 (朝倉書店, 1998).
- 2) P. J. Flanders: J. Appl. Phys., 63, 3940 (1988).
- 3) P. J. Flanders: Rev. Sci. Instrum., 61, 839 (1990).
- K. O'Grady, V. G. Lewis, and D. P. E. Dickson: J. Appl. Phys., 73, 5608 (1993).
- 5) 能崎幸雄, 宮島英紀, 大谷義近, 増田 宏, 本橋一成, 真砂 卓史, K. Runge: 日本応用磁気学会誌, 20, 297 (1996).
- 6) 宮島英紀:日本応用磁気学会誌, 20,887 (1996).
- 7) 井町 勇: 機械振動学, p. 91 (朝倉書店, 1970).
- F. S. Tse, I. E. Morse, and R. T. Himble, Mechanical Vibrations, 2nd Ed., p. 190 (Allyn and Bacon, Boston, 1978).
- 9) 深道和明, 斉藤英夫: 日本金属学会会報, 15, 553 (1976).
- 10) 深道和明:金属, 4,28 (1983).
- 11) J. Mallinson: IEEE Trans. Magn., 27, 4398 (1991).
- 12) J. Mallinson: J. Appl. Phys., 37, 2514 (1966).
- 13) S. Kainuma: 日本応用磁気学会誌, 19, 61 (1995).
- 14) 渡辺克郎,後藤公美:日本応用磁気学会学術講演概要集, 13,317 (1989).
- 15) 渡辺克郎,後藤公美:日本応用磁気学会学術講演概要集,
  15,97 (1991).

(2002年2月13日受理)



増田 宏 ますだ ひろし
 昭 50 東京理科大学理学部応用物理学科
 卒業 昭 51 東京工業株式会社磁社報入

卒業, 昭51 東英工業株式会社磁性部入 社,現在に至る. 専門 磁気測定器の開発,製造