棒状磁性体試料の抵抗率と透磁率の同時測定

正員 吉澤 伸 幸 (工 学 院 大 学)
 正員 中 根 央 (工 学 院 大 学)
 正員 根 岸 照 雄 (工 学 院 大 学)

Simultaneous measurement of resistivity and permeability of
 a rod-shaped magnetic sample

Nobuyuki Yoshizawa, Hiroshi Nakane and Teruo Negishi
 (Kogakuin University)

キ ー ワ ー ド : 抵 抗 率 測 定 , 透 磁 率 測 定 , 反 磁 界 係 数 , ソ レ ノ イ ド コ イ ル

SRPM法(Simultaneous Resistivity and Permeability Measuring method)では,ソレノイドコイル中に導体試料を挿入した場合と引き抜いた場合のインピーダンス変化分をベクトルの的に測定した値と,理論式(試料長さを無限長と仮定)に試料定数の推定値を代入して求めた値とを比較することによって,抵抗率と透磁率が同時に求められる⁽¹⁾⁽²⁾。

本稿では,出来るだけ短い試料で測定を可能とするため,理論式中の透磁率の項に反磁界係数の補正を行ってSRPM法により抵抗率と透磁率の周波数特性を求め,リング試料に対して巻線式⁽³⁾で測定した透磁率および直流4端子法により測定した抵抗率との比較を行った結果について報告する。

ソレノイドコイルの半径をa,長さをℓ,巻数をnとする。コイルと同軸上に半径bの無限長試料を配置したとき,配置しないときのコイルのインピーダンス変化分dZは反磁界係数を考慮して次式で表される⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

$$dZ(r) = dR(r) + j dX(r) \\ = j \pi \omega \mu_0 a^2 n^2 \int_0^{\omega \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \frac{\sin^2(\ell \zeta / 2)}{(\ell \zeta / 2)^2} D_1(r) Y_1^2(\xi a) d\zeta \\ + j 2 \omega \mu_0 a^2 n^2 \int_{\omega \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}^{\infty} \frac{\sin^2(\ell \zeta / 2)}{(\ell \zeta / 2)^2} D_2(r) K_1^2(\eta a) d\zeta \quad (1)$$

ただし,

$$D_1(r) = \frac{\mu_r \xi b J_0(\xi b) I_1(r) - r J_1(\xi b) I_0(r)}{\mu_r \xi b Y_0(\xi b) I_1(r) - r Y_1(\xi b) I_0(r)} \quad (2)$$

$$D_2(r) = \frac{\mu_r \eta b I_0(\eta b) I_1(r) - r I_1(\eta b) I_0(r)}{\mu_r \eta b K_0(\eta b) I_1(r) + r K_1(\eta b) I_0(r)} \quad (3)$$

$$\eta^2 = -\xi^2 = \zeta^2 - \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \quad (4)$$

および

$$\left\{ \frac{r}{b} \right\}^2 = \zeta^2 - \frac{\omega \mu_s \mu_0}{1 + N_d(\mu_s - 1)} \left\{ \omega \epsilon - j \frac{1}{\rho} \right\} \quad (5)$$

ここで,ωは角周波数,μ_sは比透磁率,μ₀は真空中の透磁率,N_dは棒状磁性体の反磁界係数を示す。また,J_nとY_nはn次のベッセル関数であり,I_nとK_nはn次の変形ベッセル関数である。(5)式を(1)式に代入し,μ_sおよびρを変数として実数部dRおよび虚数部dXの理論値を計算した。dRとdXを測定し,理論値と比較することによりμ_sおよびρを求めた。同一組成の鉄材料から,棒状およびリング試料を作り,従来の測定法によって測定を行い,SRPM法で求めた値との比較を行った。表1および表2はSRPM法および従来法である巻線式で用いたコイル(巻線)と試料の諸元を示す。

表1 SRPM法で用いたコイルと試料の諸元

Table 1. Specifications of the coil and the sample for the SRPM method

コイル	直径d=0.1mm,巻数N=200,長さℓ=22.6mm 半径a=5.42mm,内部磁界H=1.8A/m
鉄丸棒 試料	半径b=5mm,長さℓ _s =25~400mm

表2 巻線式で用いたコイルと試料の諸元

Table 2. Specifications of the coil and the sample for the winding method

巻線	直径d=0.1mm,巻数N=30,内部磁界H=1.2A/m
リング 試料	外径r ₁ =10mm,内径r ₂ =5.8mm,厚さt=3.5mm

図1および図2中の●は反磁界係数の補正(N_d=0.002)を行った場合を示し,○は反磁界補正なし(N_d=0)の場合

のSRPM法による測定結果を示す。図1は透磁率および抵抗率の試料長 l_s とコイル長 l の比(l_s/l)に対する依存性を示し、図2は透磁率および抵抗率の周波数特性($l_s/l=11.1$)を示す。図中のBH, Z, LCRは表2の試料を用いてBHアナライザ、インピーダンスアナライザおよびLCRメータなどを用いて巻線式で透磁率を求めた結果を示す。また、図中の破線は棒状試料を用いて直流4端子法で抵抗率を測定した値を示す。

図1 l_s/l に対する μ_s および ρ の依存性

Fig.1. Dependence of μ_s and ρ to the ratio l_s/l

図2 μ_s および ρ の周波数依存性

Fig.2. Frequency dependence of μ_s and ρ

反磁界係数の補正を行った場合、 $l_s/l > 11.1$ の範囲では、SRPM法による透磁率の測定結果とBHアナライザによる測定結果との差は5.0%以内であった。一方抵抗率は、 $l_s/l > 8.85$ の範囲では、SRPM法による測定結果と直流4端子法による測定結果との差は5.0%以内であった。

反磁界係数の補正を行った場合の透磁率の周波数特性は、100Hz～1 kHzの範囲においてSRPM法による透磁率の測定結果とBHアナライザによる測定値との差は5.0%以内であった。また、反磁界係数による補正を行わなかった場合の値は巻線式によるいずれの測定値よりも大きな値を示した。抵抗率測定に関して、は周波数250Hz以上で反磁界係数による補

正を行った場合、直流4端子法による値とSRPM法で求めた値との差は5.0%以内であった。

以上の結果から、反磁界係数による補正を行った場合、250 Hz～1 kHzの周波数領域において、 $l_s/l > 11.1$ の範囲で従来の個別測定法による透磁率および抵抗率の測定値との差は5.0%以内であり、この条件下でのSRPM法の有効性を確認した。SRPM法では非接触で磁気および電気特性を同時に測定することが出来るため、今後棒状試料に限らず任意形状試料に適用出来るようにすれば超伝導材料や、GMR素子などの測定にも有用であろうと考えている。

謝 辞

本研究において、透磁率測定の際に御助力をいただきました千葉大学工学部電気電子工学科榊陽先生、早乙女英夫先生、ならびに千葉大学工学部電気電子工学科大学院生河合武志氏に感謝致します。

(平成9年5月22日受付, 平成9年7月22日再受付)

文 献

- (1) 中根・石川・蓮池 : 「ソレノイドコイルを用いた抵抗率・透磁率同時検出センサ」, 電学論 p.135 (平3-2)
- (2) Y. Nonaka et al : "The Study of SRPM Method for a Short-Length Rod-Shaped Sample" IEEE Trans. Insut. Meas., Vol. 41, pp. 1010 -1013, December, 1992
- (3) JIS規格 : 「鉄ニッケル磁性合金および条」 JIS 2531 (昭62)
- (4) 山田・脇若 : 「磁気回路の反磁界係数」, 電学論, P. 107 (昭48-5)
- (5) 山田直平 : 「電気磁気学」, 電気学会, P. 228 (昭54)

吉澤伸幸

中根 央

根岸照雄

(正員) 昭和22年1月31日生まれ。

昭和45年3月工学院大学工学専攻科電気工学科修了。現在、育英工業高等専門学校助教授、平成8年4月工学院大学工学研究科修士課程電気工学専攻に入学現在に至る。

(正員) 昭和19年9月19日生まれ。

昭和42年3月工学院大学工学部電気工学科卒業。昭和44年東京理科大学工学部勤務。平成6年工学院大学工学部教授、高周波計測および生体計測に関する研究に従事、現在に至る。工学博士、IEEE、応用物理学会会員。昭和58年オーム技術賞受賞。

(正員) 昭和6年7月6日生まれ。

昭和41年3月工学院大学大学院修士課程修了、昭和61年工学院大学教授。応用計測に関する研究に従事、現在に至る。工学博士。計測制御学会、日本磁気応用学会会員。