

# 微小試料の精密渦電流損測定

## Precision Measurements of Eddy Current Loss for Small Samples

山田興治<sup>1</sup>, 羅 姣蓮<sup>1</sup>, 韓 旭<sup>1</sup>, 草木一将<sup>1</sup>, 本多善太郎<sup>1</sup>, 匂坂充行<sup>2</sup>, 磯部仁博<sup>2</sup>

Koji Yamada, Jiaolian Luo, Xu Han, Kazuyuki Kusaki, Zentaro Honda,  
Mituyuki Sakizaka, Yoshihiro Isobe

<sup>1</sup> 埼玉大学 理工学研究科

Graduate school of Science and Engineering, Saitama University

<sup>2</sup> 原子燃料工業株式会社

Nuclear Fuel Industries, Ltd.

For non-destructive evaluation of eddy current losses in small samples as TEM samples are developed for iron-based material by the magnetic bridge with ac magnetic field transmission. We found the power laws of transmission on frequency, permeability, thickness and conductivity with a high accuracy of 0.1% error.

### 1 緒言

一般に交流電磁界に対して金属はその磁氣的性質（透磁率）、電氣的性質（電気伝導率）と周波数により渦電流損失が大きく依存することから、劣化評価を可能とする。金属である鉄基構造材料は一般に強磁性であるが、ステンレス鋼である SUS304 のように常磁性を示す鋼材もある。また本物質は印加応力によって発生した歪が原因で部分的に強磁性を示すことが知られている。この磁性的性質は磁性物理の表現を用いるとスピン相互作用定数  $J$  のスピン間隔距離の関数であって、結晶欠陥密度に大きく依存した量である。また一般的に構造材料として出荷されるときにはその強度が一樣になるように仕上げされていて磁氣的性質もほぼ一樣である。

本研究グループでは非破壊評価の手法として構造物体からの漏洩磁気を検出することにより非一樣な固体物性的性質、即ち位置に依存した格子欠陥密度変化～透磁率の空間変化を見出す手法を採ってきた<sup>1,2,3)</sup>。本報告においては空間的变化<sup>4,5,6)</sup>ではなく、原子力発電所など、構造物に対する放射線照射による材料劣化の特定箇所における一様な物性量変化を検出することを目的とした。また本手法では懸架試験片から透過電子顕微鏡用試料（TEM 試料）を切り出し、その渦電流損を検出する方法を採った。このための精密磁気ブリッジ装置を開発した。なお、本手法は構造物のリアルタイムな評価方法ではないが、常時監視可能な評価法である。

### 2 実験原理及び装置の開発

#### 2. 1 磁気ブリッジ

前章にも述べたように交流磁気回路に挿入することにより金属物質の磁氣的、電氣的性質を渦電流損失から評価することが可能である。Fig.1 に其の基礎概念図を示す。まず、磁気回路を通る磁束密度  $\Phi$  は起磁力  $V$ 、励磁電流  $I$  と巻数  $N$  の積から求められ次式によって与えられる。

$$V=NI \quad (1)$$

また磁気回路を構成する素子の磁気抵抗  $R$  は素子長  $L$ 、透磁率  $\mu$  及断面積  $S$  により決定されて式(2)のように与えられる。

$$R=\frac{L}{\mu S} \quad (2)$$

連続体の場合はそれぞれの積分表現で求められる。これらを用いて  $j$  個の素子が従続接続されている場合には磁気回路の総磁束  $\Phi$  は

$$\Phi = \frac{NI}{R_M} = \frac{NI}{\sum_j \frac{L_j}{\mu_j S_j}} \quad (3)$$

となる。

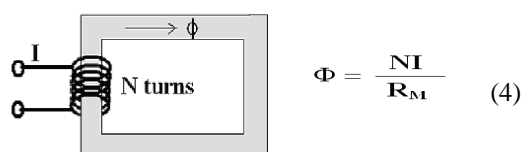


Fig.1 Magnetic Circuit

ここでこれらの素子を用いて磁気ブリッジを構成すると Fig.2 に示す磁気回路となる。ここで試料ホルダーの挿入部と、参照部（リファレンス、Ref）空隙（ギャップ）の磁気抵抗の差を検出コイルの出力差電圧  $V_{out}$  としていることである。このことから試料部に試料を挿入しない場合には  $V_{out} = 0$  となるようにポテンシオメーターを用いる。このとき周波数  $f$  によりポテンシオメーターの位置が異なる。

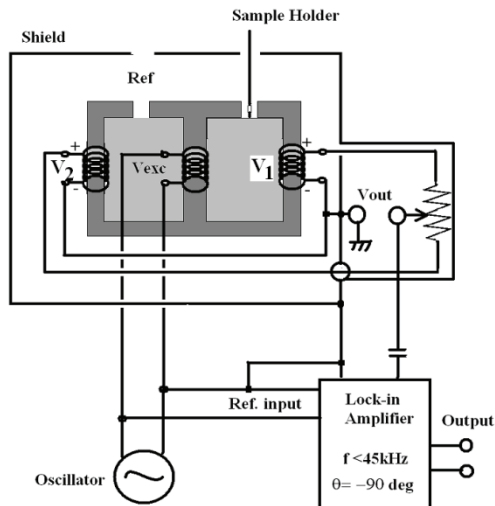


Fig.2 Block diagram of the magnetic bridge

ここで磁気回路の中央部には励磁用の磁気ヨークが設けてあり標準試料挿入部と参照試料または空隙からの変移を測定することになる。ここで試料挿入部に強磁性試料を挿入すると磁気回路抵抗が減少し、磁気回路磁束が増大する。また渦電流が大きい試料の場合には磁束が減少する。

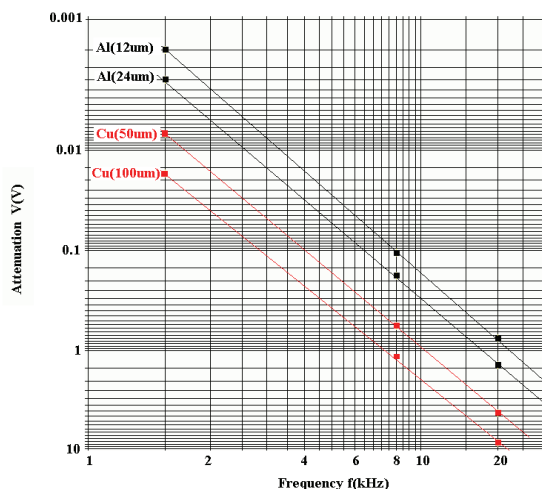


Fig.3 Experimental results of EM-Wave transmission

この磁気ブリッジの基本性能を知るために銅、アルミニウム薄膜についての渦電流を調べた結果を Fig.3 に示す。明らかに渦電流の発生により、銅（厚み:100 $\mu$ m,50 $\mu$ m）、Al（24 $\mu$ m,12 $\mu$ m）薄膜の実験では磁気回路の試料側磁束が減少している。ついでメットグラス（強磁性薄膜、厚み:20 $\mu$ m）については Fig.4 に示すように透磁率が増大したことにより試料挿入側回路の磁束増大が見られる。なお、20kHz 以上で減少傾向が見られるのは渦電流による損失増大が優勢になるからである。

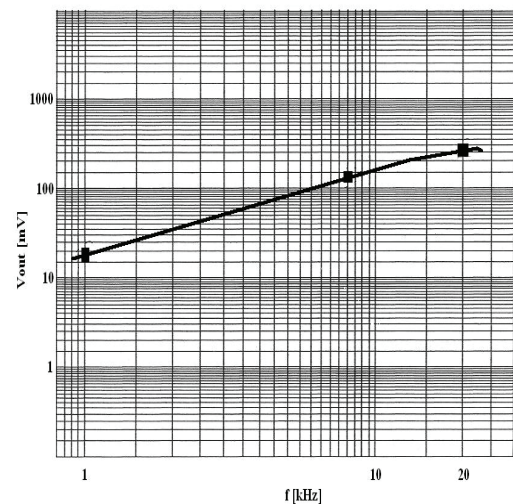


Fig.4 Transmission increase by ferromagnetic amorphous ribbon in the gap

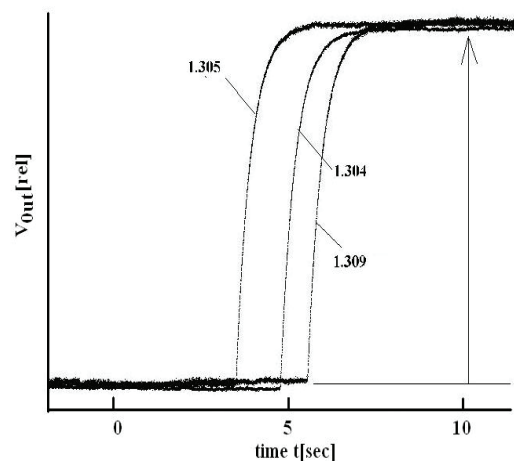


Fig.5 Transient response of the magnetic bridge during metal sample removal from the gap

同一の試料（Al 薄膜）を何枚も挿入し、測定精度の試行結果を Fig.5 に示す。ここで横軸は試料挿入前後の変化を示す。この同一試料の測定結果から 0.2%程度の確度が得られたことがわかる。尚、直流抵抗の精密測定装置も合わせて開発した。

### 3 実験解析と検討

一般に交流磁界の金属に対する透過は浸透長（スキンドプス＝表皮厚さ） $\delta(f, \mu, \sigma)$ は周波数  $f$ 、透磁率  $\mu$ 、ならびに電気伝導率  $\sigma$  により次式によって与えられる。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu \sigma}} \quad (5)$$

またこの表皮厚さを用いると試料表面から  $x$  の位置における電界は次式で与えられる。

$$E = E_0 \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) \quad (6)$$

式(5)の交流電界（磁界）強度により位置  $x$  に渦電流が発生し、透過電磁界が減衰することになる。Fig.3, Fig.4 に示す Cu, Al 薄膜の実験結果からは次に示す透過強度の  $f$ ,  $\sigma$  依存性が実験式として求められた。

$$V = V_0 \omega (1 - e^{-\frac{d \sigma \omega}{6.65 \cdot 8 \cdot 20 \pi}}) \quad (7)$$

明らかに表皮厚さの2乗に比例して減衰していることが判明した。この実験式を Fig.3 に挿入すると同じ両対数プロットに対して直線となり、また実験と同じ傾きを与える。

尚、単位は 厚み  $d(\text{mm})$ 、 $\sigma(1/\text{Ohm} \cdot \text{m})$  及び  $\omega = 2\pi f(\text{kHz})$  である。さらに、式(7)は透磁率依存性が省略されているが実際は Fig.4 に示すように明らかに式(7)に表現された物理機構と異なる電磁波透過を示している。即ち磁気回路として以下のような考慮が必要である。磁気誘導による起電力の式、即ち式(3)の  $R_M$  の磁束の各パラメータ依存性から以下の式(8)を用いる。

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (8)$$

$$\delta\Phi = \frac{d\Phi}{d\mu} \delta\mu + \frac{d\Phi}{d\sigma} \delta\sigma + \frac{d\Phi}{d(d)} \delta d + \frac{d\Phi}{d\omega} \delta\omega$$

により与えられる。これらの式を用いると、挿入試料の透磁率変化により磁気回路の磁束  $\Phi$  式の右辺第一項から得られる。従って明らかに特定素子（試料）の透磁率増大により試料の磁気抵抗が減少し磁束が増大する。これが Fig.4 に示すアモルファス薄膜にみる正の信号である。但し、本試

料はアモルファスであることから電気伝導率が小さく、渦電流損失による磁束減少よりも磁気回路素子として磁気抵抗減少の効果が優勢であることに他ならない。また本試料では 20kHz 以上の高周波側では明らかに減少を示す。これは渦電流の周波数依存性の方が透磁率増大より優勢になることを示す。今、試料の磁気抵抗を  $R_s$  とすると式(3)から出力電圧の試料の透磁率に関する変分が得られる。

$$\delta V = -\frac{d(\delta\Phi)}{dt} = i\omega\delta\Phi, \quad (9)$$

$$= -i\omega\delta\left(\frac{NI}{R_0 + R_s}\right),$$

$$= -i\omega\left\{\frac{NI}{(R_0 + R_s)^2} \frac{dR_s}{d\mu} \delta\mu\right\}. \quad (10)$$

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{R_s}{R_0 + R_s} \frac{\delta\mu}{\mu} \quad (11)$$

となる。ここで  $R_0$  は試料以外の直列磁気抵抗を表す。従って、渦電流損失が小さい試料では透磁率の変化に対して磁気回路素子として磁気抵抗減少による磁束、出力電圧の増加が得られる。このように磁気回路ではその出力の周波数応答は複雑ではあるが細心の検討を行うことによって材料劣化の評価が可能である。

さて絶対値を精密に測定するにはまだ問題がある。即ち磁気ブリッジ回路に挿入するにあたっては試料温度が装置によって変化することである。実際 Fig.6 および Fig.7 に示すように試料の抵抗率は常温の範囲内でも 2% から 3% 変化する。

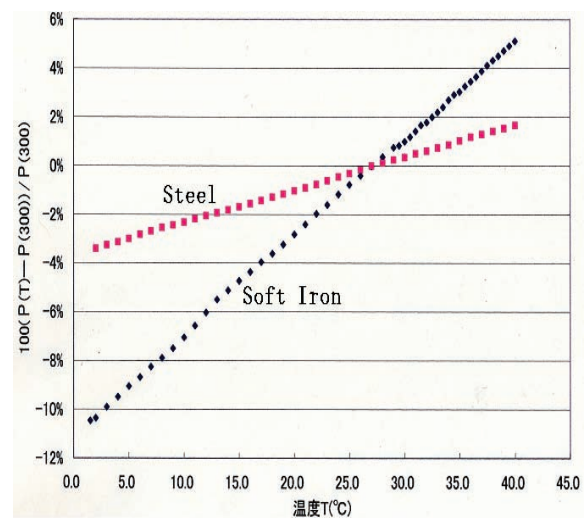


Fig.6 The temperature dependence of typical Iron-based material

Fig.6, Fig.7 に示す試料は汎用ハサミなどに用いられている鋼材と市販の1 mm厚さ鉄板であり、その温度依存性を計測した。ここで抵抗率の値を室温26度を基準として表示した。測定に当たっては純水の中に試料を浸して測定した。室温の寒暖計による温度を試料温度と同定した場合には3℃の差があった。さらに液体窒素温度(77 K)に至る温度における抵抗値の測定結果をFig.7に示す。

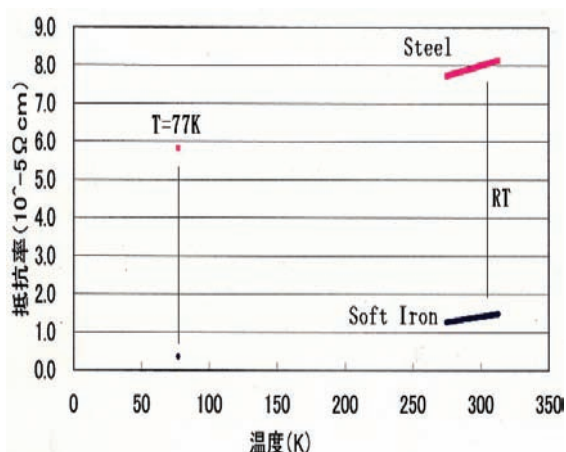


Fig.7 Temperature dependence of resistivities of steel and soft iron, respectively

実用的な観点からはこのような広範囲の温度領域での測定は必要ではないが1%以下の精度で議論をする場合には考慮する必要がある。さらに本方法は精密計測が可能であることから物体の亀裂進展の前に検出することが可能である。即ち、一般の鉄骨構造の適当な2点間の直流抵抗や渦電流損の時間変化、或いは経年変化などを常時計測と磁氣的測定<sup>7,8)</sup>とを併用することにより、構造体の一部にリベットの脱落やクラックの発生を捉えることが可能である。

尚、本稿では3mm径TEM試料の精密直流測定装置の開発については触れなかったが技術的な事として省略した。

#### 4. 結論

本稿に示した方法は試験片を切り出し、磁気回路に挿入することが必要であったが、構造物の一部にこのような磁気回路を組み込むことによる所定の部位の非破壊評価が可能である。従って本稿で提案する一般鉄骨材料などにも適用可能である。

#### 参考文献

- 1) Jiles D.C.: Review of magnetic methods for NDE, *NDT. Int.* 21-5(1988), 311-319
- 2) Yamada K. et. al.: Nondestructive cross evaluation of iron-based materials by optical and magnetic diagnosis tools, *Proc. Int. Workshop on Advanced Mechanics, Nagasaki, Japan*, (1997), 114-119
- 3) Yamada K., Liu B., Shinagawa A., Honda Z. and Isobe Y.: High sensitivity evaluation of iron-based steel materials by electromagnetic techniques, *J. JSEM*, 3-4 (2003), 258-265
- 4) Suprapedi and Toyooka S.: Time division observation of plastic deformation process using laser speckle Interferometry, *Opt. Rev.* 4(1997), 284-287
- 5) Yamada K., Yamaguchi K., Toyooka S. and Isobe Y.: Magnetic and optical nondestructive evaluations for iron-based materials, *Nondestructive Characterization of Material X*, ed. By Green et.al. Elsevier, (2001), 333-340
- 6) Yamada K. et. al.: Nondestructive cross evaluations of iron-based material by magnetic sensors and by laser speckle interferometry, *J. Mag. Magn. Mater.* 104(1991), 114-119
- 7) Liu B. and Yamada K.: New type fluxgate sensor with high spatial resolution, *Sensor and Actuator*, to be submitted
- 8) Shoji S.: Nondestructive Inspections of iron-based materials by magnetic methods *Doctor Thesis*, Saitama Univ., March (1999). (in Japanese).