渦電流による非磁性金属箔の厚さ測定

正員 田 中 章 雄 (宇部工専)
非会員 石 田 浩 一 (徳山工専)
正員 武 平 信 夫 (徳山工専)

Thickness Measurements of Non-Magnetic Conductors Using Eddy Current
Akio Tanaka, Member, (Ube Technical College), Koiti Ishida, Non-member, Nobuo Takehira, Member, (Tokuyama College of Technology)

キーワード：渦電流，金属箔，厚さ計

近年，厚さ数 μm から数 μm の金属箔への需要が高まっている。厚さ計には放射線厚さ計と，ロールなどで被圧延材を挟んで差動変圧器を用いて計測する方法がある。前者は非接触であるが，安全性や価格の面で問題がある。後者は安価で材質を選ばないが，接触法であるので材料に傷がつきやすい⁽¹⁾。本レターでは，非接触法であり，放射線の心配もなく，かつ安価に提供できる可能性がある渦電流を利用した厚さ計を提案している。

図1に測定回路の概略図を示す。励磁コイルに交流電流 I を供給すると，近傍に配置された導体板中に渦電流が発生し，差動接続された検出コイルへ起電力 E が誘起される。起電力 E は励磁電流と同相な成分 $E_R(E \cos \phi)$ と 90° 位相の異なる成分 $E_I(E \sin \phi)$ に分割できる。この E_R は導体板が十分薄い場合は，導体の厚さにほぼ比例することが確認できた。

誘導起電力 E_R は次式となる⁽²⁾。

$$E_R = -\frac{\omega \mu_0 N_0 N_1 I}{2a_0 a_1 \tau_0 \tau_1 (1 - \beta_0)(1 - \beta_1)} \times \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{S(a_0, \beta_0) S(a_1, \beta_1)}{\zeta^6} \times e^{-(z_0 + z_1)\zeta} (1 - e^{-\tau_0 \zeta})(1 - e^{-\tau_1 \zeta}) \times \{e^{-(\tau_0 + \tau_1 + 2\theta_0)\zeta} - 1\} \text{Im}(\lambda) d\psi d\zeta \dots (1)$$

ここに，

$$S(a, \beta) = \int_{\beta a \zeta}^{a \zeta} x J_1(x) dx \dots (2)$$

$$\lambda = \frac{\left(\frac{\gamma}{\zeta} - \frac{\mu}{\mu_0}\right) \left(\frac{\zeta}{\gamma} + \frac{\mu_0}{\mu}\right)}{\left(\frac{\gamma}{\zeta} + \frac{\mu}{\mu_0}\right) \left(\frac{\zeta}{\gamma} - \frac{\mu_0}{\mu}\right)} \times$$

$$\times \frac{\left(\frac{\gamma}{\zeta} + \frac{\mu}{\mu_0}\right) \left(\frac{\zeta}{\gamma} - \frac{\mu_0}{\mu}\right) e^{-27d}}{\left(\frac{\gamma}{\zeta} - \frac{\mu}{\mu_0}\right) \left(\frac{\zeta}{\gamma} + \frac{\mu_0}{\mu}\right) e^{-27d}} \dots (3)$$

$$\gamma = \sqrt{\zeta^2 - j\sigma\mu\nu\zeta \sin \phi + j\omega\sigma\mu} \dots (4)$$

ここで， $J_1(x)$ は〈第一種第一次〉ベッセル関数， ω ：励磁電流角周波数， μ_0 ：真空の透磁率， μ ：導体の透磁率， $\mu_r = \mu/\mu_0$ ， σ ：導

図1 測定回路

Fig. 1. Measuring circuit.

図2 厚さ特性

Fig. 2. Thickness characteristics.

図3 リフトオフの影響
Fig. 3. Influence of lift-off.

図4 速度の影響
Fig. 4. Influence of speed.

体の導電率, d : 導体の厚さ, v : 導体の速度, a_0 : 励磁コイルの外半径, β_0 : 励磁コイルの内半径と外半径の比, τ_0 : 励磁コイルの長さ, N_0 : 励磁コイルの巻数, a_1 : 検出コイルの外半径, β_1 : 検出コイルの外半径と内半径の比, τ_1 : 検出コイルの長さ, N_1 : 検出コイルの巻数, z_0 : 励磁コイル下面と導体表面のエアギャップ, z_1 : 検出コイル(+1)下面と導体表面のエアギャップ, g_0 : 励磁コイル面と検出コイル面のエアギャップ, ϕ, ξ : フーリエ変換に伴う変数

実験に用いた励磁, 検出両コイルの諸元は $a_0 = 25.0$ mm, $a_1 = 16.0$ mm, $\beta_0 = 0.8$, $\beta_1 = 0.5$, $\tau_0 = 9.0$ mm, $\tau_1 = 3.4$ mm, $N_0 = 71$, $N_1 = 164$, $g_0 = 3.8$ mm である。導体板は, 厚さ 10~50 μ m の非磁性のステンレス鋼板 (SUS 304) であり, 導電率は 1.389×10^6 S/m である。まず, 差動接続された検出コイルの平衡をとり, 次にステンレス鋼板に接近させた。0.5 A

の励磁電流を供給し, 励磁周波数は測定の容易さを考慮して 2 kHz とした。ロックインアンプを使用して励磁電流と同相な成分を同期検波し, 接続した電圧計により出力電圧を測定した。

結果を図2に示す。計算値と実測値はよく一致している。厚さに対する直線性は極めて良好である。

コイル系と導体板の距離(リフトオフ)により出力電圧がどのような影響を受けるかを認めたのが図3である。 z_1 の $\pm 10\%$ の変化に対して電圧も $\pm 10\%$ 程度変化する。リフトオフについては十分注意する必要がある。図4は導体板の速度が 0 m/s と 10 m/s のときの特性である。速度はそれほど影響しないことがわかる。

各方面で多量に使用されるようになった金属箔の厚さを簡易に測定する方法について述べた。本法は金属の導電率が既知であることが前提となるが, 片側から簡便に測定することが可能である。

(平成4年12月14日受付)

文 献

- (1) 北里敬輔: 「銅の薄板圧延技術の現状と今後の課題」, 塑性と加工, **32**, No. 363, 434 (平3)
- (2) 武平信夫・田中章雄・戸田圭一: 「うず電流を利用した速度計の解析」, 電学論 A, **97**, 457 (昭52-9)

田中章雄 (正員)

昭和50年山口大学大学院工学研究科修士課程修了。現在, 宇部工業高等専門学校助教授。

石田浩一 (非会員)

平成2年山口大学大学院理学研究科修士課程修了。現在, 徳山工業高等専門学校助手。

武平信夫 (正員)

昭和40年山口大学工学部電気工学科卒業。現在, 徳山工業高等専門学校教授。工学博士。