

渦電流試験器性能評価の自動化

Automation of Procedures for Evaluation of Eddy Current Instruments

守安 奎裕, 中村 亮, 小坂 大吾, 柿下 和彦, 橋本 光男

Keisuke Moriyasu, Ryo Nakamura, Daigo Kosaka, Kazuhiko Kakishita,
and Mitsuo Hashimoto

In order to compare or calibrate instruments, a standard is needed. JIS Z 2316-2 as a standard defines 18 characteristics of instruments and measurement methods for the eddy current testing. We made a process document and an automatic measurement system for calibrating eddy current instruments, and tested the effectiveness of this system through experiment. This paper explains the standard and automation of the measurements of the standard. First, the characteristics and measurement methods used in the standard are discussed. Users of this standard need to select proper characteristics in many characteristics for each purpose in accordance to goals. We tried to explain how to select proper characteristics. Second, the results measured by the system are discussed. We measured characteristics of a lock-in amplifier, in comparison with that of other settings of the amplifier using the system. The results rightly show characteristics. It is hoped that the automation will help in measuring characteristics and compare of the eddy current instruments.

Keyword: Eddy current testing, Automatic measurement, Evaluation of instruments, JIS Z 2316-2

1. はじめに

計測器が健全であることを確認するため、また複数の計測器を比較するためには物差しが必要である。渦電流試験に使われる装置(以下、渦電流試験器)においては、特性と検証方法を定義した規格として 2014 年以前は JIS Z 2315 が用いられていた。その後、2014 年に JIS Z 2316-2^{1,2)}が制定された。これは ISO 15548-1³⁾を元に制定された規格である。本規格は渦電流試験器を論理的な機能ブロックとして定義することで各特性を渦電流試験器の入力と出力から測定することができる。これによりメーカーだけではなくユーザが本規格を用いて渦電流試験器の相互比較をすることや校正をすることができる。これまでの規格と比較して多くの測定項目が定義されている。よってアプリケーションに応じて適切な項目を選択することと、測定を省力化することがこの規格の利用者に求められる。

我々は熱交換器の伝熱細管の検査に利用する渦電流試験器のための定期点検の手順書を作成した。この手順書では JIS Z 2316-2(以下、規格)で定義されている特性を用いた。また、その測定時間を短くするために測定の自動化を試みた。本稿は渦電流試験器の特性評価を自動化する手法について提案する。最初に規格で定義されている渦電流試験器の特性とその測定のために広く使われてい

る周波数ビート法について説明する。次に目的に応じて選択すべき規格の項目について明らかにする。最後に、これをロックインアンプに適用した結果を示しロックインアンプの設定と特性の評価結果を比較することで、本手法の有用性を明らかにする。

2. 渦電流試験器の特性と測定方法

2.1. 特性

電気伝導体に時間的変化を持った磁場を加えるとその表面に渦電流が発生する。この渦電流は電気伝導体の不連続部の影響を受ける。これを利用した電気伝導体の非破壊的な検査を渦電流試験と呼び、航空機、自動車、プラント等の様々な対象に対して適用されている。渦電流試験に用いられる装置はプローブ、渦電流試験器、その他の装置で構成される。これらの装置はその性能、特性を担保するために定期的な試験を実施する必要がある。本稿では渦電流試験器の性能評価を目的としているので、渦電流試験器の仕組みとその特性について述べる。

規格ではその渦電流試験器を図 1 のような機能ブロックで定義している。これは論理的なブロックであり、渦電流試験器の内部がこのように物理的に分かれていることを保証するものではない。渦電流試験器は内部の発振器の交流信号をプローブに印加する。次に増幅部でプロ

ープのわずかなインピーダンス変化または起電力を増幅する。これを検波部に入力し発振器の周波数成分だけを取り出す。渦電流試験器は小さな信号を高い SN 比で測定することが求められている。これを実現するために連続波を用いる汎用の渦電流試験器では一般に図 2 に示す同期検波が用いられている。信号処理部では得られた信号を処理する。以上の説明の通り、渦電流試験器の実体はロックインアンプそのものである。渦電流試験器は使用周波数や設定等において渦電流試験に最適化されたロックインアンプであると言える。規格ではここで説明した機能ブロックごとに特性と測定方法を規定しており、周波数ビート法を用いることでこれらの渦電流試験器の内部にアクセスすることなく、これらの測定が可能である。

渦電流試験器の検波部について説明する。検波部の入力信号 $v(t)$ は、渦電流試験器に接続されたプローブの出力を増幅部で増幅した信号である。 $v(t)$ を以下のように定義する。

$$v(t) = A \sin(2\pi ft + \theta) \quad (1)$$

ここで t は時間、 A は振幅、 f は渦電流試験器の内部の発振器の周波数、 θ は渦電流試験器内部の発振器との位相差である。増幅部を通過した $v(t)$ は検波部において $v(t)$ に発振器の周波数 f と同じ周波数の正弦波 $\sin 2\pi ft$ を掛ける。これを $x(t)$ とする。同様に $\cos 2\pi ft$ を掛けた結果を $y(t)$ とする。 $x(t)$ と $y(t)$ は次の式のように表せる。

$$x(t) = v(t) \sin 2\pi ft = -\frac{A \cos(2 \cdot 2\pi ft + \theta)}{2} + \frac{A \cos \theta}{2} \quad (2)$$

$$y(t) = v(t) \cos 2\pi ft = \frac{A \sin(2 \cdot 2\pi ft + \theta)}{2} + \frac{A \sin \theta}{2} \quad (3)$$

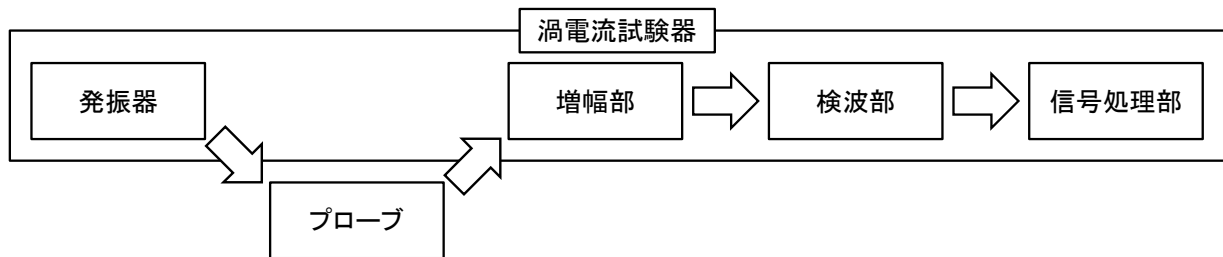


図 1 渦電流試験器の機能ブロック

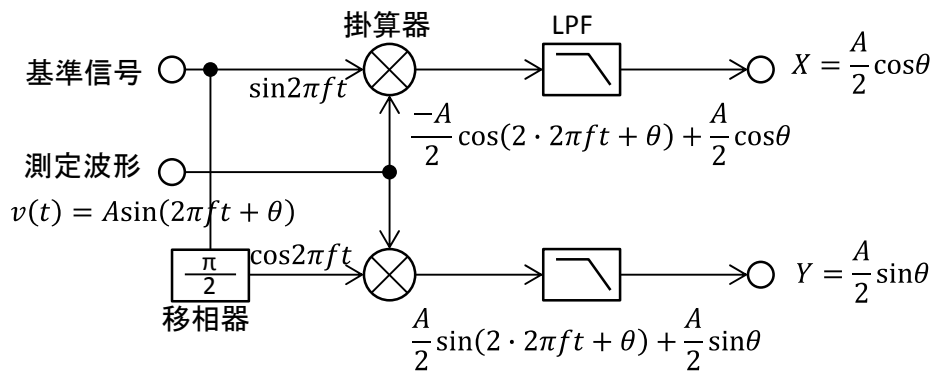


図 2 同期検波

次に $x(t)$ と $y(t)$ を十分低いカットオフ周波数 f_c を持つローパスフィルタに通す。一般に、 $f_c \ll f$ である。式 (2),(3) の第 1 項は t を含むため交流である一方、第 2 項は t を含まないため直流である。よってローパスフィルタ後の式(2),(3)はそれぞれ次式に示す X, Y のようになる。

$$X = \frac{A \cos \theta}{2} \quad (4)$$

$$Y = \frac{A \sin \theta}{2} \quad (5)$$

式(4),(5)から次式に示すように $v(t)$ の A と θ を得ることができる。

$$A = 2\sqrt{X^2 + Y^2} \quad (6)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{Y}{X} \quad (7)$$

なお、渦電流試験器を含むロックインアンプでは、検波部の出力は信号処理部で 2 倍されて出力される。ロックインアンプの出力から振幅 A を得るのに、毎回 2 を掛けなくてもよいようにするためである。

検波部の後にある信号処理部は X, Y に対してゲインや位相の操作を行う。渦電流試験器の出力は、検波部から信号処理部を通して出力される。よって、渦電流試験器の周波数特性は検波部と信号処理部の周波数特性を掛けたものになる。一般に信号処理部の周波数特性は検波部の周波数特性以下である。規格ではこの特性を「6.4.5 信号処理段の周波数応答域」で定義している。このほかにも規格では複数の特性を定義している。規格で定義されている特性を表 1 にまとめる。規格では 18 の特性とその測定方法が定義されている。規格の「6.2」は渦電

表 1 渦電流試験器の特性と測定方法

特性	測定方法
6.2.1 励磁周波数	周波数ビート法
6.2.2 高調波ひずみ	ひずみ率計, スペクトルアナライザ又はハイパスフィルタ
6.2.3 信号源インピーダンス	電圧測定器, 抵抗器
6.2.4 最大出力電圧	オシロスコープ又は適切な電圧測定器
6.2.5 最大出力電流	電流プローブが接続したオシロスコープ, 電流測定器又は抵抗器と電圧計
6.3.1 最大許容入力電圧	周波数ビート法
6.3.2 入力インピーダンス	ネットワークアナライザ, インピーダンスメータ. 又は, 附属書 C 規定の方法
6.4.3 ブリッジバランス	周波数ビート法
6.4.4 高調波減衰特性	周波数ビート法
6.4.5 信号処理段の周波数応答域	周波数ビート法
6.4.6 信号処理段の帯域幅	6.4.5 の結果から求める。
6.4.7 位相直線性	周波数ビート法
6.4.8 出力成分の直交性	周波数ビート法
6.4.9 利得設定精度	周波数ビート法
6.4.10 位相設定精度	周波数ビート法
6.4.11 クロストーク特性	周波数ビート法(結線の変更あり)
6.4.12 同相信号除去	周波数ビート法(結線の変更あり)
6.4.13 最大ノイズ	周波数ビート法

流試験器内部の発振器, 「6.3」は主に増幅部, 「6.4」は主に検波部及び信号処理部に関する特性と測定方法を定義している。

次に, 伝熱細管の検査に利用する渦電流試験器に求められる特性について考察する。この検査は熱交換器内部に多数存在する伝熱細管の肉厚を評価し減肉, きずの程度を測定する検査である。「6.2.1 励磁周波数」は渦電流試験器内部の発振器の励磁周波数を校正する。「6.2.2 高調波ひずみ」は励磁波形の周波数成分を確認する。

「6.2.4 最大出力電圧」は内部の発振器が出力できる電圧を測定する。内部の発振器が正常であることは渦電流試験器が正しく動作するためには必要であるので, これらの特性はすべてのアプリケーションにおいて測定されるべきであると考えられる。

「6.4.3 ブリッジバランス」は主にプローブを構成するコイルのバランスに対して, どれだけ補正できるかを表す特性である。「6.4.4 高調波減衰」から「6.4.13 最大ノイズ」までは渦電流試験器の増幅部から信号処理部の総合特性を定義している。どれも重要であるが, 「6.4.5 信号処理段の周波数応答域」の特性が想定するアプリケーションに与える影響について考察する。この検査では検査効率を向上させるため細管に内装されたプローブを

高速で動かす。この時, プローブの出力信号は細管に存在するきずの信号が励磁周波数で AM 変調された波形となる。つまり, きず信号の振幅変化の速度はプローブの移動速度に比例する。プローブを高速に動かした場合, 信号処理段の周波数応答域によってはきず信号の振幅 A が減衰することを意味する。したがって, プローブの移動速度に適した信号処理段の周波数応答域が存在する。よって, この特性は, 伝熱細管の探傷において重要な特性の一つであると言える。

ユーザが実施する定期点検での閾値は, アプリケーションに応じて決定する必要がある。例えば「6.2.1 励磁周波数」においては, ユーザが行う定期試験では 5.6 桁の精密さは必要ないと考える。なぜなら 10kHz と 10.001kHz とで発生する渦電流の違いを明確に測定することは一般的には困難であるからである。「6.4.5 信号処理段の周波数応答域」では, プローブを使用する際の伝熱細管での掃引速度から決定すればよい。このようにユーザの実施する定期点検では要求する特性と閾値をアプリケーションに応じて決定すればよく, すべての特性を測定する必要はなく, また測定器の許す限り渦電流試験器の性能を精密に測定する必要もない。そのような測定は渦電流試験器を比較するときに行うのが適切であると

考える。

2.2. 測定方法

規格では幾つかの特性を周波数ビート法で測定することを求めている。そこで周波数ビート法について説明する。渦電流試験器の入力信号は一般にはプローブの出力であるが、周波数ビート法では入力として発振器を用いる。渦電流試験器の入力を 50Ω の無誘導抵抗で終端し、校正された発振器を接続する。このとき、規格では渦電流試験器の増幅部のゲインは最も小さい値とし、フィルタの効果は最も小さくなるように設定することが求められている。渦電流試験器の入力に接続された発振器の信号を $v_{FG}(t)$ とし、以下のように定義する。

$$v_{FG}(t) = A \sin(2\pi f_{FG}t + \theta_d) \quad (8)$$

$$f_{FG} = f + f_d \quad (9)$$

ここで θ_d は外部と内部の発振器の位相差である。 f_d は校正された外部の発振器の周波数 f_{FG} と渦電流試験器内部の周波数 f の差である。この時、検波部の出力 x, y は式 (2)-(9) から以下のように表せる。

$$x(t) = k \frac{A \cos(2\pi f_d t + \theta_d)}{2} \quad (10)$$

$$y(t) = k \frac{A \sin(2\pi f_d t + \theta_d)}{2} \quad (11)$$

k は増幅部のゲインである。 $f_d = 0$ のとき、 x, y は直流となる。理想的には外部と内部の発振器の周波数を同じ値に設定した場合、 x, y は直流となる。しかし x, y が直流とまらない場合がある。規格の「6.2.1 励磁周波数」ではこのときの周波数の差を渦電流試験器の設定周波数で正規化した値を偏差割合と定義している。 f_c を信号処理段の周波数応答域の上限の周波数とすると $0 < f_d \ll f_c$ のとき、 x, y をリサージュ波形で表すと軌跡は円軌道を描く。その角速度は $2\pi f_d$ となる。 f_d を徐々に大きくすると、軌跡の半径は徐々に小さくなっていく。この時の半径の減衰傾向が「信号処理段の周波数応答域」を表す。この他に「6.2.1 励磁周波数」、「6.4.3 ブリッジバランス」、「6.4.7 位相直線性」、「6.4.9 利得設定精度」等、規格で定義される 12 項目の特性を周波数ビート法により測定することができる。一部の項目を除き結線を変更する必要がない。接続する発振器等の計測器を自動制御することで、短時間での測定が可能になることが予想される。

次に本稿で提案する周波数ビート法の自動化アルゴリズムについて述べる。式(10),(11)から渦電流試験器の出力の輝点は半径 r の円を描くと仮定する。この時の中心を x_0, y_0 とすると渦電流試験器の出力 x, y は次のように表せる。

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 \quad (12)$$

ここで知りたいのは、 x_0, y_0 と r である。最小二乗法を用いると以下の式が得られる。

$$f(x_0, y_0, \alpha) = \sum_{i=1}^n \{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r^2\}^2 = 0$$

$$\Leftrightarrow \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 - 2x_i x_0 - 2y_i y_0 + \alpha)^2 = 0 \quad (13)$$

$$\alpha = x_0^2 + y_0^2 - r^2 \quad (14)$$

n はサンプリング数、 x_i, y_i は測定された渦電流試験器の出力である。式(13)を x_0, y_0, α について偏微分すると以下のようになる。

$$\frac{\partial f}{\partial x_0} = (-2 \sum x_i^2) x_0 + (-2 \sum x_i y_i) y_0 + (\sum x_i) \alpha + \sum (x_i^3 + x_i y_i^2) = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y_0} = (-2 \sum x_i y_i) x_0 + (-2 \sum y_i^2) y_0 + (\sum y_i) \alpha + \sum (x_i^2 y_i + y_i^3) = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} = (-2 \sum x_i) x_0 + (-2 \sum y_i) y_0 + (\sum 1) \alpha + \sum (x_i^2 + y_i^2) = 0 \quad (17)$$

式(14)-(17)の連立方程式を解くことで、 x_0, y_0 と r を推定することができる。

次に、 f_d を求める方法を考える。 x, y が x_0, y_0 を中心とする円を描くと仮定すると、 f_d は時間 t と x, y の角度 θ から以下の式で得られる。

$$\theta(t) = \tan^{-1} \frac{y(t) - y_0}{x(t) - x_0} + \theta_d = 2\pi f_d t + \theta_d$$

$$\Rightarrow f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \theta(t) \quad (18)$$

この方法は渦電流試験器の出力の輝点が円を描くと仮定している。つまり渦電流試験器の x と y のゲインが同一であることを前提としている。そのゲインが異なる、または故障している渦電流試験器では正しい値が得られない。一般式を楕円とするなど対象とする渦電流試験器に適したアルゴリズムを用いるか、周波数ビート法の測定においては渦電流試験器の出力を確認し、「6.2.1 励磁周波数」の測定において輝点の角速度が十分小さくなっていくことを確認する必要がある。

3. 測定結果

周波数ビート法では様々な特性を測定することができるが、ここではその一部の測定方法及び結果について説明する。被検査対象としてロックインアンプ(NF LI5640)を用いた。なぜなら一般的な渦電流試験器の周波数応答域はそのパラメータを自由に変えることができない。使用したロックインアンプは、検波器のローパスフィルタのカットオフ周波数を時定数として設定でき、その減衰特性も設定できる。そこで、ロックインアンプの設定を変えた時の値を比較することで、周波数ビート法がその特性を測定できていることを確認する。使用した測定回

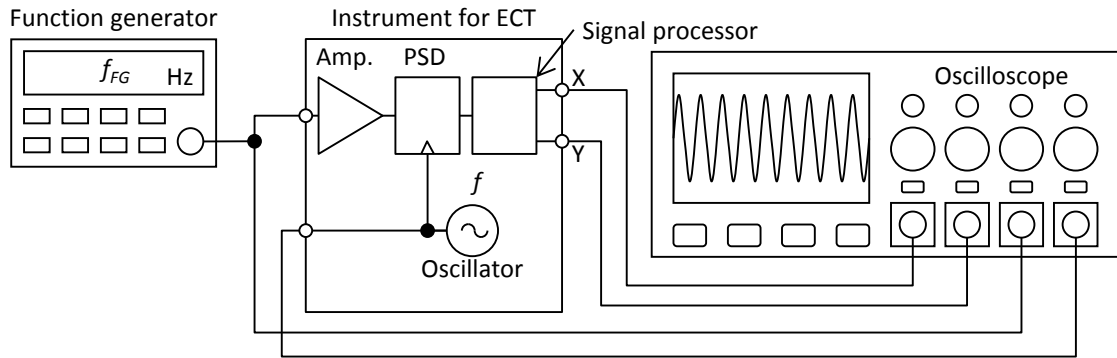


図 3 周波数ビート法の装置構成

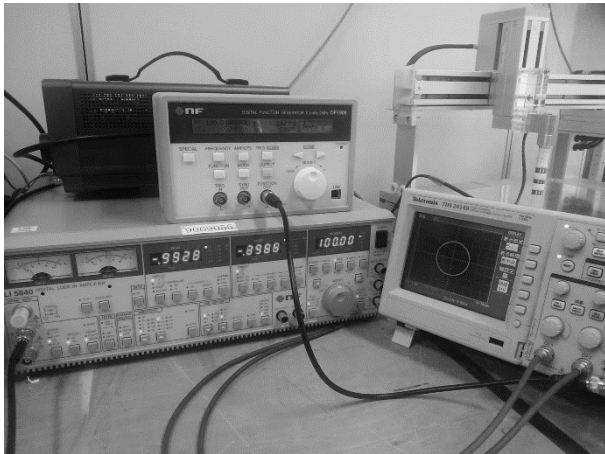


図 4 周波数ビート法の測定装置

路と装置を図 3, 4 に示す。校正されたファンクションジェネレータ(NF DF1906)を 50Ω の終端抵抗を内蔵したケーブルを使い渦電流試験器の入力に接続する。オシロスコープ(Tektronix TDS2014B)にファンクションジェネレータの出力、及び渦電流試験器の出力を接続する。このとき渦電流試験器のゲインは最小にすることが求められている。NF LI5640 の最小ゲインは 10 倍である。図 5 はファンクションジェネレータの振幅(0.5V)は変えずに周波数を変化させた時の渦電流試験器の出力をリサージュ波形で表したものである。このとき、ローパスフィルタ(LPF)の時定数は 10ms, 減衰傾度は 24 dB/oct とした。式(10), (11)で説明した通り渦電流試験器の出力の輝点が円を描いているのが確認できる。 $f_a = 1\text{Hz}$ の時、その円の半径は 5V であった。これは渦電流試験器の入りに渦電流試験器のゲインを掛けた値に等しく、正しく振幅を測定できていることを示している。「6.2.1 励磁周波数」ではこの円の角速度が十分小さくなる f_a を測定する。その結果を図 6 に示す。渦電流試験器として使用したロックインアンプでは 1kHz から 100kHz まで $f_a/f \times 100 = 0.000664\% \pm 0.000002\%$ であった。これは渦電流試験器の励磁周波数を 100kHz としたとき、0.66Hz 程度ずれていることを示している。ただし渦電流試験器の入りに接続したファンクションジェネレータの仕様における周波数精度は $\pm 25\text{ppm}$ である。これは設定周波数が 100kHz の

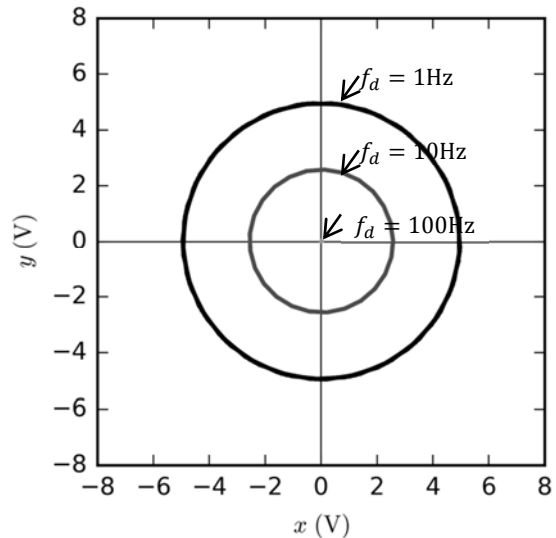


図 5 周波数ビート法における渦電流試験器の出力 (入力 0.5V, 時定数 10ms, 減衰特性 24dB/oct)

時、出力波形の周波数は $100\text{kHz} \pm 2.5\text{Hz}$ であることを示している。測定された f_a は我々の想定するアプリケーションにおいて合格ラインを超えている。「6.4.5 信号処理段の周波数応答域」では f_a を変化させた時の渦電流試験器の出力の変化を測定する。この測定は、検波部と信号処理部を合わせた渦電流試験器全体の減衰特性を比較することを目的とする。図 5 から渦電流試験器の出力を表す輝点が円運動をしており、入力信号の周波数が大きくなるにつれてその半径が小さくなっていることが確認できた。本測定の結果は横軸を入力信号の周波数、縦軸を出力信号の電圧(図 5 の半径)としてまとめられる。一般的な渦電流試験器は f_a とその出力の関係は一定である。本稿ではロックインアンプの減衰傾度を変更し、異なる特性の渦電流試験器を模擬した。検波周波数を 1kHz とし、入力波形の周波数を徐々に大きくした時の出力結果を図 7 に示す。横軸は f_a 、縦軸は $f_a = 0\text{Hz}$ の時の出力を基準に正規化した値である。使用した減衰傾度は 6, 12, 24dB/oct である図 8 に、12 dB/oct のデータ (図 7△) と 6 dB/oct (図 7○) のデータとの差、および 24 dB/oct のデータ (図 7□) と 6 dB/oct (図 7○) $\times 3$ のデータとの差をプロットしたものを示す。図には 6 dB/oct (図 7○) も同時に示してある。すべてのプロットが重なる事より、他の回路からの影響は小さく、12dB/oct の LPF の特性は 6dB/oct の LPF 特性の 2 段階、24dB/oct の LPF 特性は 4

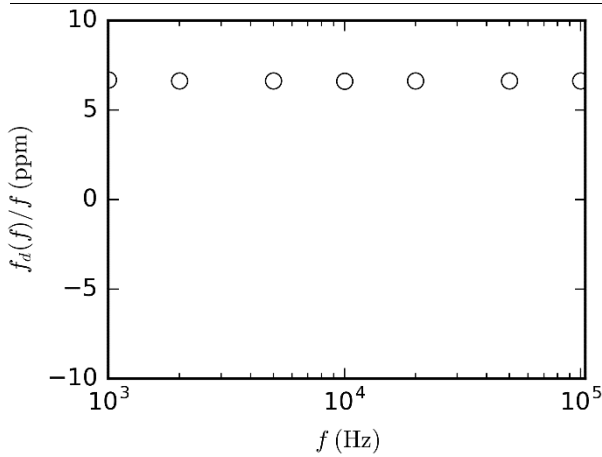


図6 「6.2.1 励磁周波数」の測定結果

段分の特性と一致している事がわかる。また、LPF のカットオフ周波数 15.9Hz (時定数 10ms) におけるゲインが -3dB となっていることから、本測定が異なる特性を持つ渦電流試験器を模擬したロックインアンプの周波数応答を比較することができることを示している。

4. まとめ

JIS Z 2316-2 で定義されている特性とその測定項目は多岐にわたり、本規格は渦電流試験器の詳細な特性を評価することができる。目的のために適切な項目を選択しその測定を省力化することがこの規格を活用するうえで必要とされる。本稿では規格で定義された特性の測定を試みた。また異なる特性を持つ渦電流試験器を模擬したロックインアンプに対して、本規格で定義された測定項目を適用し、渦電流試験器の特性を評価した。渦電流試験器の多くの測定項目について自動化できることを確認した。提案する手法を用いることで短時間での渦電流試験器の評価が可能になった。

JIS Z 2316 は JIS Z 2316-1 から 4 まで存在する。それぞれシステムやプローブなどについての特性とその測定方法が定義されている。今後、プローブの特性測定自動化システムについて検討を行う。

参考文献

- [1] JIS Z 2316-2:2014 非破壊試験—渦電流試験—第 2 部：渦電流試験器の特性及び検証 I, 日本工業規格, 2014.
- [2] 手塚 武夫, ISO 15548-1 に基づく渦電流試験装置の特性評価試験, 平成 23 年度第 1 回表面 3 部門合同研究会, 2011.
- [3] ISO 15548-1 Non-destructive testing -- Equipment for eddy current examination -- Part 1: Instrument characteristics and verification, ISO, 2008.

(原稿受付 2016/11/24, 受理 2017/03/31)

*守安 奎裕
職業能力開発総合大学校, 電気専攻, 〒187-0035 東京都小平

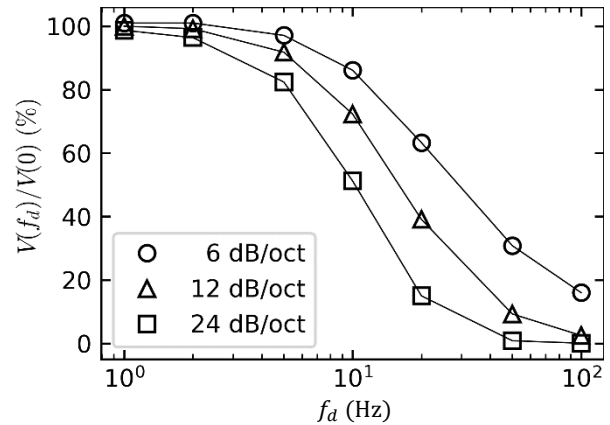


図7 「6.4.5 信号処理段の周波数応答」の測定結果 (時定数:10ms)

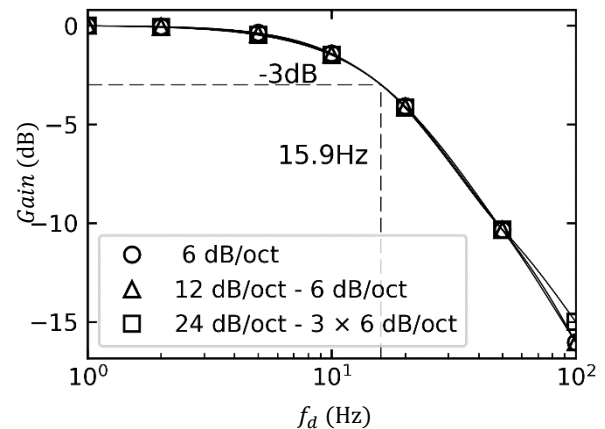


図8 ローパスフィルタの設定値の検証

市小川西町 2-32-1 email: b25051@uitech.ac.jp
Keisuke Moriyasu, Department of Electrical Engineering,
Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi,
Kodaira, Tokyo 187-0035.

*中村 亮
日本非破壊検査株式会社, 水島事業所, 〒712-8051 岡山県倉敷
市中岐 9-6-27 email: r_nakamura@jndi.com
Ryo Nakamura, Mizushima Office, Japan Non-Destructive
Inspection Inc., 9-6-27 Nakase, Kurashiki, Okayama 712-8051.

*小坂 大吾, 博士 (工学)
職業能力開発総合大学校, 能力開発院, 〒187-0035 東京都小
平市小川西町 2-32-1 email: kosaka@uitech.ac.jp
Daigo Kosaka, Faculty of Human Resources Development,
Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi,
Kodaira, Tokyo 187-0035.

*柿下 和彦, 工学博士
職業能力開発総合大学校, 能力開発院, 〒187-0035 東京都小
平市小川西町 2-32-1 email: kakishita@uitech.ac.jp
Kazuhiko Kakishita, Faculty of Human Resources Development,
Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi,
Kodaira, Tokyo 187-0035.

*橋本 光男, 工学博士
職業能力開発総合大学校, 能力開発院, 〒187-0035 東京都小
平市小川西町 2-32-1 email: hasimoto@uitech.ac.jp
Mitsuo Hashimoto, Faculty of Human Resources Development,
Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi,
Kodaira, Tokyo 187-0035.

