移動磁界型磁気探傷装置

Moving Magnetic Sensor for Non-Destructive Testing

榎園正人・槌田雄二・片井哲也

大分大学工学部電気電子工学科, 大分市旦野原 700 (〒870-11)

M. Enokizono, Y. Tsuchida, and T. Katai

Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Oita University, 700 Dannoharu, Oita 870-11

This paper describes a new non-destructive testing instrument that searches for defects on the steel surface opposite that into which H-coil and the exciting coil are built. Defects can be found with the H-coil by measuring changes in the eddy current. In this case, defects on the surface of the steel can be found according to the skin depth of the eddy current. Therefore, a moving magnetic field is effective for defects on the opposite surface of the steel, because much information is derived from the moving magnetic field in comparison with an alternative magnetic field. The shape and structure are also important to improve the sensibility of the testing instrument. In this paper, we present some results obtained with our new non-destructive testing instrument, and discuss the possibility of detecting defects in the opposite surface and subsurface region of the steel.

Key words: non-destructive testing, moving magnetic field, opposite surface defects, H-coil, defect depth, defect width

1. はじめに

金属構造物や発電所の熱交換器配管などに生じた欠陥の検出には、高速で精度の高い非破壊検査技術が要求されてきた。その検査技術の一つとして、渦電流探傷法 (ECT, Eddy Current Testing) がある^{1), 2)}。同手法により表面上の欠陥・傷を検知するには、高周波励磁を行うためのコイルを、被探傷物に近接させ、被探傷物における誘起電圧の変化を、サーチコイルにより測定する。このとき被探傷物に欠陥があると渦電流の流路が変化し、欠陥周辺の電磁場が乱される。この現象をサーチコイルで測定することにより、欠陥の深さおよび形状を同定することができる。ECT では、高周波励磁を行うほど、表皮効果により、渦電流が金属構造物の表面近傍を流れるため、配管などの内側の傷を測定するには、配管内部で測定装置を使わなければならない。小さな配管や複雑な構造物に適用するには容易ではない。

本論文では、ECT による金属構造物の裏側欠陥探傷を試みた。裏側欠陥を推定するには、渦電流が金属構造物の深部まで浸透するように励磁電流周波数を低くすればよい。しかし、周波数を低くすると、表皮効果により、渦電流分布が板厚方向に広がってしまうため、欠陥が存在するときと、しないときとの渦電流変化量が小さくなり、その結果、サーチコイルが検知する誘導起電力の変化量も小さくなるので、裏側欠陥を同定することが困難となる。このため、著者らは、サイン波励磁とコ

サイン波励磁を組み合わせることによって、被探傷物に移動磁場を印加し、裏側欠陥の同定を試みた。通常の交番磁場では、被探傷物中の磁場は、時間的に増減を繰り返すのみであるが、移動磁場を印加することによって、被探傷物中の磁場をベクトル量として変化させることができる。したがって、欠陥検出に対して、より感度の高い磁場を印加することとなる。本論文では、我々が新たに開発した移動磁界型磁気探傷装置の構成を示し、本装置による裏側欠陥の探傷結果について報告する。

2. 実験方法

Fig. 1(a), (b) に示すようにサイン波励磁を行うためのコイルとコサイン波励磁を行うためのコイルを、交互に配置することによって移動磁界を発生するための励磁コイルを構成する。励磁コイルには、 $\phi 0.5$ mm 銅線 100 ターンを一巻きとし、Fig. 1 に示すように、3 組で 1 相分を構成している。各相の各コイルは並列に接続されている。

測定システムを Fig. 2 に示す。D/A コンバータとバイポーラ型パワーアンプを介して励磁コイルに励磁電圧を供給し、被探傷物に移動磁界を印加する。H-コイル (以下、サーチコイルとする) からの電圧は、直流増幅器で増幅した後、S/H (Sample Hold) ユニツト、A/D コンバータによりコンピュータに取り込む。ここで、S/H ユニツトは、複数のサーチコイルで、複数成分の磁束変化を検出する際に、同一時刻の波形を得るために、サンプル波形をホールドするために用いる。取り込んだ

Fig. 1 Exciting coils (units in millimeters).

データはコンピュータにより波形処理を行う。この際、測定結果に測定装置系のノイズが見られるため、8周期分のデータを取り込み、同期平均を行ってノイズを低減した。Fig. 2 に示すように、サーチコイルと励磁コイルは、移動板（アクリル板）を介して自動座標測定装置に取り付けてあり、コンピュータ制御により、精密に位置を決定している。また、Fig. 3 に示すように、サーチコイルは、励磁コイルとともに移動板に取り付けられており、同時に非探傷物上に移動する。移動した各点において、被探傷物に移動磁界を印加し、渦電流の変化を測定する。

被探傷物としては、Fig. 3 に示すように、200 mm×100 mm×5 mm 鋼板（軟鉄，SS41）の中央部に人工的に裏側欠陥を作成したものを用いた。裏側欠陥の幅が、0.4 mm, 0.6 mm, 1.0 mm ものに対して、それぞれ、欠陥深さが 4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm の鋼板、無欠陥の鋼板および、溶接を施した鋼板の 14 種類の鋼板について測定を行った。

測定点は、Fig. 4 に示すように、欠陥があるが鋼板の中央部から左右 10 mm の範囲で、1 mm ごととした。各測定点に励磁コイルの x - y 平面での中心点（サーチコイルの中心点も同一点）を一致させて測定を行った。

サーチコイルの形状・寸法については、Fig. 5(a)~(d) に示す 4 種類で検討を行った。Fig. 5 に示すように、各サーチコイルを Type-1~4 コイルとする。サーチコイルは 0.4 mm 厚アクリル平板に、Type-1, 2 は $\phi 0.14$ mm 銅線を、Type-3, 4 は $\phi 0.04$ ウレメット線を巻いて作成した。サーチコイル厚のため、各コイルを用いたときのリフトオフ（励磁コイルと被探傷物との間隔）は、それぞれ、3.0 mm, 2.5 mm, 2.0 mm, 2.0 mm となる。Type-1, 3 のコイルには x 方向の磁束変化を測定する H_x -coil, y 方向の磁束変化を測定する H_y -coil が取り付けられているが、今回の被探傷物では、裏側欠陥が y 方向に一樣であり、 y 方向の磁束変化が微小であるので、Type-2, 4 では、 x 方向の磁束変化を測定する H_x -coil のみとし、Type-1, 3 においても、 x 方向磁束変化のみを測定した。各サーチコイルの有効エリターンは、標準コイルを用いて測定を行い、それぞれ、0.015664, 0.004958, 0.00196, 0.0011975 Turn $\cdot$ m² である。Type-1~3 のサーチコイルについては、前述したように、励磁コイルの下部中心点に取り付け、Type-4 については、同一 x - y 平面上、中央点からずれた位置（Fig. 3 において、 x 方向に 62.5 mm 平行移動した位置）に取り付けた。

測定条件としては、0.4 A, 10 Hz の励磁電流を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 サーチコイルについての検討

Fig. 5 に示した各サーチコイルを用いた測定結果を、それぞれ Fig. 6(a)~(d) に示す。裏側欠陥幅については、0.4 mm, 0.6 mm, 1.0 mm にて測定を行ったが、これらの範囲では、測定結果には、ほとんど影響しないので、以後、探傷が最も困難である欠陥幅 0.4 mm における結果のみ報告する。

Type-1 コイルでは、裏側欠陥がある鋼板と、無欠陥の鋼板との区別が可能であるが、欠陥がある場合においても、全体として起伏が緩やかであり、欠陥の位置までを決定するに至っていない。

Fig. 2 Measurement system.

Fig. 3 Arrangement of exciting coils, the search coil, and the steel plate (units in millimeters).

Fig. 4 Measurement points (units in millimeters).

Fig. 5 Searching coils (units in millimeters).

Type-2 コイルでは、裏側欠陥がある中央部で若干の起伏があり、裏側欠陥が起伏の頂点付近にあることが推定できる。

さらに、Type-3 のコイルでは、裏側欠陥が存在する中央部で起伏が激しく、欠陥の存在とその位置を同定することが可能である。Type-3 に比べて、Type-1, 2 における結果の起伏が緩やかであるのは、Type-1, 2 コイルでは、欠陥幅に対して、コイル自身の大きさが大きいために、サーチコイルが欠陥付近の広

Fig. 6 Effects of searching coils.

範囲における磁束を拾ってしまい、裏側欠陥の存在による磁束の変化が、他の磁束によって鈍化されてしまうためであると考えられる。

しかしながら、さらに寸法の小さい Type-4 コイルでは、Fig. 6(d) に示すように欠陥の存在および位置は推定できない。これは本コイルが小さいために有効なエアーターンが小さくなり、欠陥により磁束変化がノイズに埋もれてしまう結果であると考えられる。

以上の検討より、本被探傷物では、Type-3 コイルを用いて、測定を行うこととした。以上は表皮深さに影響されるために、被探傷物の板厚が異なれば、再検討する必要がある。

3.2 裏側欠陥の推定

Type-3 コイルを用いた場合の結果を Fig. 7, Fig. 8(a)~(c) に示す。

無欠陥鋼板と溶接した鋼板の場合の測定結果を Fig. 7 に示す。溶接した鋼板と無欠陥鋼板では明らかにセンサーコイルによる出力が異なることがわかる。

Fig. 8(a)~(c) は、欠陥幅 0.4 mm、欠陥深さが 1, 2, 3, 4 mm の裏側欠陥を有する鋼板について、励磁周波数を 10 Hz, 20 Hz, 40 Hz で測定した場合の結果である。10 Hz 時では、欠陥深さ 4 mm, 3 mm の裏側欠陥については同定可能であるが、2 mm の欠陥は、同定が困難であり、欠陥深さ 2 mm において無欠陥鋼板とほとんど区別がつかなくなっている。20 Hz, 40 Hz と周波数を上げていくと、欠陥深さが深いものでは、欠陥がある位置での出力の起伏が激しくなり、欠陥の位置はわかりやすくなるが、周波数が大きくなるにつれて、表皮深さが浅くなり、渦電流が鋼板表面に集中してくるので、同定可能な裏側欠陥の深さが浅くなり、両周波数で欠陥 4 mm, 3 mm 深さしか同定できない。

3.3 サーチコイルの高性能化

まず、Fig. 9 に示すように、内部に磁性線 (Fe-6.26%Si, $\phi 69 \mu\text{m}$) を入れたサーチコイルを作成した。これは、サーチコイル内部の磁束密度を大きくすることで、裏側欠陥に対する磁束変化の感度をよくするためである。本サーチコイルを Type-5 コイルとする。Fig. 9 に示すように、磁性線は x 方向にのみ施し

Fig. 7 Magnetic field strength picked up by a type-3 coil.

(a) Exciting frequency: 10 Hz

(b) Exciting frequency: 20 Hz

(c) Exciting frequency: 40 Hz

Fig. 8 Effects of frequencies by a type-3 coil.

た。前節でも言及したように、本被探傷物では、 x 方向以外の磁束変化が微小であるからである。なお、Fig. 9 では、中央左側のみコイルがあるが、実際は全体に巻いてある。本サーチコイルによる測定結果を Fig. 10(a), (b) に示す。Fig. 10(a), (b) は、それぞれ励磁周波数が 10 Hz, 20 Hz の場合である。前項の測定では、10 Hz 時には欠陥深さ 2 mm の同定は困難であったが、本サーチコイルを用いた測定では、2 mm 欠陥でも明確に起伏が得られることがわかる。20 Hz 時においても、欠陥深さ 4 mm, 3 mm での感度は最も良いことがわかる。

次に、Fig. 11 に示すサーチコイルを用いた。本サーチコイルを Type-6 とする。Type-5 のサーチコイルと同一の磁性線を内部に施し、裏側欠陥による磁束の変化を、広範囲で測定でき

Fig. 9 Type-5 coil Fe-6.26%Si wires (units in millimeters).

(a) Exciting frequency: 10 Hz

(b) Exciting frequency: 20 Hz

Fig. 10 Effects of frequencies by a type-5 coil.

るように、コイルの巻き線を欠陥に対して斜め 45 度にした。測定結果を Fig. 12(a), (b) に示す。それぞれ、励磁周波数が 10 Hz, 20 Hz の場合の測定結果である。Type-1～5 のサーチコイルによる測定結果のいずれと比較しても、欠陥深さ 2 mm まで、容易に同定することができる。しかしながら、本コイルを用いても、欠陥深さ 1 mm の同定は不可能であった。

4. まとめ

200 mm×100 mm×5 mm 鋼板 (軟鉄, SS41) に対して、裏側に施した深さ、1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm の欠陥の同定を、新しく開発した移動磁界型磁気探傷装置を用いて行った。サーチコイルの改良を行うことによって、欠陥深さ 4 mm, 3 mm, 2 mm の裏側欠陥まで同定することが可能となった。さら

Fig. 11 Type-6 coils with Fe-6.26%Si wires (units in millimeters).

(a) Exciting frequency: 10 Hz

(b) Exciting frequency: 20 Hz

Fig. 12 Effects of frequencies by a type-6 coil.

に、より信頼性の高い非破壊検査装置とするためには、サーチコイルおよび励磁コイルの改良が望まれる。

文 献

- 1) K. Hakuta *et al.*: Proc. ESAEM 6, Advanced Computational and Design Techniques in Applied Electromagnetic Systems, ed. by S. Y. Hahn, Seoul, 1994, p. 157 (Elsevier, Amsterdam, 1995).
- 2) S. Nagata and M. Enokizono: Proc. ESAEM 6, Advanced Computational and Design Techniques in Applied Electromagnetic Systems, ed. by S. Y. Hahn, Seoul, 1994, p. 141 (Elsevier, Amsterdam, 1995).

1996 年 10 月 16 日受理, 1997 年 1 月 16 日採録