回転磁束型磁気センサーによる磁気探傷

Non-Destructive Testing with Magnetic Sensor Using Rotational Magnetic Flux

榎園正人・長田尚一郎*

大分大学工学部, 大分市旦野原 700 (☎870-11)

*宮崎大学工学部, 宮崎市学園木花台西 1-1 (☎889-21)

M. Enokizono and S. Nagata*

Faculty of Engineering, Oita Univ., 700, Dannohara, Oita 870-11

*Faculty of Engineering, Miyazaki Univ., 1-1 Gakuen Kihanadai Nishi, Miyazaki 889-21

This paper presents a new non-destructive testing (NDT) method using rotational magnetic flux. In conventional eddy current NDT, the magnetic sensor has been driven by dc or alternative current. Therefore, the generated magnetic field in the magnetic material is arranged in one direction. However, in order to estimate shape or position of an unknown defect, a two-dimensional alternating magnetic flux density vector is necessary. The NDT system using rotational magnetic flux is proposed. In this system, the magnitude and phase value are obtained as the signals of defect.

Key words: non-destructive testing, magnetic sensor, rotational magnetic flux, Lissajous's figure.

1. ま え が き

構造物中の亀裂や腐食などの金属欠陥を探知することは事故防止のみならず、部品交換による寿命の延長という観点からも非常に重要である。

これらの欠陥は従来、目視による検査によって検出されてきたが、近年、原子炉内構造物の安全性の保持や寿命の推定などの点から、より確実で定量的な欠陥探知法が求められており、各種の非破壊検査法 (NDT) が提案されている。電界や磁界を用いる検査法については解析的手法を用いた検討¹⁾や、逆問題として実験から得られた場の情報から欠陥形状を推定する研究が進められている²⁾。

印加磁界による金属内部の誘導電流を用いる渦電流法は励磁コイルとピックアップコイルからなる簡単な構造で、金属内部や裏面など不可視の欠陥を探知できるなど利点が多く、各方面での使用が期待されている。反面、探査する方向によっては欠陥情報が得られないことがあり、また、探査可能範囲も比較的小さく、広い範囲での欠陥探知や欠陥の形状推定には向かない。

Fig. 1 Eddy current non-destructive testing.

これらの問題は印加磁界の方向が直流ないしは交番磁界のため1次的であり、加えてセンサーの走査方向に依存することに起因していると考えられる。非破壊検査の対象が金属平板のような2次的物体である場合、金属欠陥も2次的な形状、位置、方向性を備えている。2次的な欠陥を1次的な磁界で走査するならば、欠陥情報の欠落は免れないであろう。

筆者らは回転磁界を用いることにより、磁界の方向を2次的に変化させることのできる新しい探傷方式を提案する。本方式は金属試料内部に回転磁界を印加し、磁束あるいは誘導によって生じる渦電流から欠陥を走査する方法である。

本論文では、本磁気センサーの基本となる従来の磁気探傷法について検討を行い問題点を明らかにした上で、回転磁束型磁気センサーの実験を行ったので報告する。

2. 従来の磁気探傷法

渦電流法で用いられる磁気センサーは基本的に励磁コ

Fig. 2 Construction of magnetic sensor and principle of NDT.

イルと数個のピックアップコイルで成り立っている (Fig. 1)。金属導体中に電流を誘導させ、金属欠陥の妨害による電流通路の変動を反抗磁界によって知ることができる。これらの方法では非検査体の磁性、非磁性にかかわらず導体であれば欠陥探傷が可能であるが、磁性体の場合には磁束通路の変動により信号が発生する傾向が強くなる。

金属導体中に電流を発生させる方法としては直流磁界を印加し、運動による速度起電力を誘導させる方法と、交流磁界による渦電流を利用する方法とがある。両者とも励磁磁界に対して誘導電流による反抗磁界は一般に小さく、反抗磁界に含まれる欠陥の情報は微小である。励磁コイルに対して対称な位置にピックアップコイルを二つ用意し、差動により励磁磁界をキャンセルすれば、欠

Fig. 3 Interlinkage flux at each pickup coil.

陥信号が抽出できる。一方のピックアップコイルで欠陥を検知するとすれば、片方は欠陥に無関係の位置にある必要があり、ピックアップコイルの配置により必ず欠陥を検査する方向が決まる。

Fig. 2(a) に従来型の磁気センサーを示す。馬蹄型ヨークに励磁巻線を施し、ヨーク脚部にそれぞれピックアップコイルを施す。励磁電流には交流を用いる。これを被検査試料に近傍させる。欠陥が試料中に存在しない場合、両脚のピックアップコイルを鎖交する磁束は等しくなる。

Fig. 4 Flux distribution around the defect.

Fig. 2(b) のようにヨーク右脚の付近にクラックなどの欠陥が存在する場合、右脚のピックアップコイルを鎖交しない漏れ磁束 ϕ_1 が発生し、鎖交磁束は ϕ_2 に減少する。一方左脚においては $\phi = \phi_1 + \phi_2$ の磁束が鎖交するため変動はほとんどない。そのため、図中の誘導電圧は v_1 減少、 v_2 一定となる。次に Fig. 2(c) のようにセンサー中心と欠陥中心がほぼ一致する場合には両脚とも鎖交磁束に差異が生じない。そのため v_1, v_2 とも一定となる。Fig. 3(d) のように欠陥が左脚付近に存在する場合、右脚と同様に漏れ磁束が生じるため v_1 一定、 v_2 減少となる。この原理を実験的に確認したものが Fig. 3 である。Fig. 3(a), (b) ではそれぞれ、ヨーク右脚部、左脚部の鎖交磁束密度、Fig. 3(c) は両者の差動磁束密度を示す。図中の横軸は欠陥とセンサー中心との距離で Fig. 2(b) (c) (d) の位置関係をそれぞれ b, c, d で示している。それぞれの鎖交磁束は欠陥が各脚部付近に存在しない限り変動していない。よってピックアップコイルの極性を逆にして接続すれば Fig. 3(c) に相当する誘導電圧が得られるので、欠陥の存在を知ることができる。

実験に用いたヨークの幅が 22 mm であり、欠陥信号が出力されている範囲とほぼ一致している。すなわちヨーク付近に欠陥がないと信号が得られず、欠陥探知可

Fig. 5 Rotational magnetic flux density vector arbitrary.

能範囲が小さいことが分かる。ヨーク断面積を大きくすれば範囲も広がるが、漏れ磁束が減少するため感度の低下に繋がり必ずしも得策ではない。

Fig. 4 に有限要素法による欠陥近傍の磁束分布の解析結果を示す。欠陥の長手方向に垂直に磁束が印加される場合、欠陥近傍に大きな磁束の乱れが見られる。一方、磁束の方向と欠陥の長手方向が一致した場合、磁束の乱れは小さい。同じ形状の欠陥でも磁束の方向によって不利と有利が存在することが分かる。

このような欠陥が磁気センサーヨーク付近にある場合、前者のような磁束に直交する形状の欠陥では漏れ磁束が大きくなるため大きな出力が得られるが、後者では小さな出力しか得られないと考えられる。しかしながら、ヨーク脚部で流入または流出する磁束の方向が欠陥に平行な状態から垂直方向に切り替えられるならば、同様に大きな出力が得られるであろう。すなわち、欠陥探知範囲が小さいという点も磁束方向が 1 次元的事であることに一原因があると考えられる。

また上記の理由により、従来の磁気センサーを用い

Fig. 6 Construction of magnetic sensor using rotational flux.

Fig. 7 Experimental equipments.

て、より高度な欠陥探知、例えば出力信号による欠陥の位置や形状を推定するには欠陥近傍を何度も探査する必要がある、このような用途には適しないと言える。

3. 回転磁束型磁気センサー

3.1 欠陥近傍の回転磁界の挙動

欠陥の方向に依存しない欠陥探傷を行うには磁束密度ベクトルを任意の方向に向けられるような磁界の印加方式が必要である。そこで回転磁束を印加する磁気探傷法を考察した。Fig. 5 に磁界を印加した場合の金属試料中の磁束密度ベクトル軌跡の解析結果を示す。無欠陥試料の場合は試料の広い範囲にわたって円形の磁束密度ベクトル軌跡が得られていることが分かる。一方、欠陥の存在するモデルでは、欠陥近傍でベクトル軌跡が大きく楕円に歪んでおり、欠陥の方向に依存せずに探知できることが分かる。また磁束密度ベクトルの方向の変化が局所的に位相の進みや遅れを生じていることが明らかである。このことから、回転磁界を利用すれば磁束密度のみならず、位相のずれが欠陥探知の手がかりになることが考えられる。

3.2 回転磁束型磁気センサーと測定システム

Fig. 6 に本研究で使用した磁気センサーの外観を示す。磁路長の異なる従来型の磁気センサーを2個直交配置させている。2個の馬蹄型鉄心にはそれぞれ励磁巻線と、両脚部には欠陥探知用の二つのBコイルを施す。励

Fig. 8 Lissajous's figure of B-coil signal.

磁巻線には90度の位相差の2相交流を印加する。交流定電圧電源を用いると磁路長が異なるためインダクタンスの差により、磁界の位相差が正確に90度にならない。印加電流を調整して磁界の位相を制御するための外部制御回路が必要である。Fig. 7 に本実験に用いた計測システムを示す。位相角を制御するため、励磁巻線に供給する2相交流の現波形はコンピュータにより計算し、D/A変換し、電力増幅器を介して各巻線に供給される。各脚部からの4個のBコイルからの出力はA/D変換器を介してコンピュータに入力され、数値積分などの処理が行われる。

励磁に関しては、磁気ヒステリシス、磁気飽和、残留磁気などの材質の非線形特性が小さい領域で励磁している。よって、非線形特性の振幅、位相に対する影響については小さいと考えられる。また、近年の研究で回転磁界下の磁気特性は交番磁界下のそれと大きく異なっていることが明らかになっている³⁾。交番磁界下での非線形特性で回転磁界下の特性を代用できないため、回転磁界による磁気探傷では非線形特性を積極的に用いることは適切ではない。

材料中の残留磁気と欠陥の区別は、残留磁気をどのように設定するかの問題が残っており、現状では区別できない。この問題については数値解析等を用いて検討を進める必要がある。

励磁周波数については本実験においては60 Hzを用いた。原理的に被検査体全体に磁束が侵入することが望ましい。文献1においては表皮効果により、磁束が試料内部に侵入しないため、試料表面の欠陥が探知しにくいことが明らかとなっている。周波数の選択基準としては表皮厚さ $\sigma = \sqrt{2/\mu\omega}$ に対して、試料厚みが同程度が、または表皮厚さが試料厚さより大きくなるように周波数を選択する必要がある。試料が軟鋼のような磁性体の場合、例えば比透磁率1000、導電率 10^6 では励磁周波数60 Hzで表皮厚さは約2 mmになる。試料の材質、厚さによって励磁周波数を小さくする必要がある。

Fig. 9 Distribution of measured axis ratio and direction angle of major axis.

3.3 リサージュ波形による欠陥探知

位相情報を用いて欠陥の位置や形状を推定するには、何らかの位相関係を含んだ評価法が必要になってくる。本研究では Fig. 8 に示すようにそれぞれの B コイルを鎖交する差動磁束密度を X 方向 ΔB_x と Y 方向 ΔB_y でリサージュ波形を作り、その軸比 A (=長軸/短軸) と、長軸のなす角 θ をパラメータとすることにした。

4. 実験結果と検討

実験には、600 mm 四方、3.5 mm 厚の軟鋼を用い、欠陥のモデルとして軟鋼板の中央部に直径 10 mm の丸穴を施した。欠陥の中心を座標中央とし、センサー中心からの距離をパラメータとして各々の位置で ΔB_x と ΔB_y のリサージュ図形を求め、軸比と長軸の角を求めた。

Fig. 9 に Y 方向の座標を固定し, X 方向に走査した場合の軸比と位相角の関係を示す。対称のため, x, y 方向の操作は正座標のみで行っている。Fig. 9(a) では, $Y=0$ の際の信号が得られている。

$X=40$ mm 付近で軸比が跳躍していることがわかる。これは従来形の磁気センサーと同様に欠陥がヨークに接触しているためである。極めて大きな値の ΔB_x が出力されていることが予想されるが, もし ΔB_y が小さければ長軸の角は 0 度あるいは 180 度であるはずである。しかるに長軸の方向は 125 度程度である。これは ΔB_x と同程度の出力が ΔB_y を生じており, ΔB_x と ΔB_y の位相差がほぼ零であることを示す。これにより, 回転磁界型磁気センサーは x 方向, y 方向に影響を及ぼしあって欠陥を感知することができる。Fig. 9(b) $y=10$ mm でも同様な傾向が見られる。

Fig. 9(c) では興味深い結果が得られている。軸比の小さなピークが 30 mm で見られる点である。この点は x 方向ヨークと y 方向ヨークを結んだ線上の midpoint に当たる点であり, 欠陥はどちらのヨークにも接触しない。しかるにこの点で欠陥信号が得られたことは, 従来の磁気センサーに比べて欠陥探知範囲が拡大したことを示しており, 本方式の優位性を示すものである。

Fig. 9(d) では $x=0$ の点で y 方向センサーがピーク値をとっている。

Fig. 9(e), (f) では長軸の位相角の階段関数的な変動がなくなっている。すなわち, Fig. 9(a) から (d) までの位相角の急激な変化は欠陥が付近にある場合に起こるものである。

5. 結 論

本論文では従来の磁気探傷に用いられる磁気センサーに回転磁束を印加することにより, 以下の点を明らかにした。

- 1) リサージュ波形により振幅と位相角により, 欠陥探傷を行う手法を明らかにした。
- 2) 従来の交番磁界センサーと比較して, 欠陥探知範囲が拡大した。
- 3) 位相情報を用いることにより, 欠陥位相推定のための手掛かりが得られた。

文 献

- 1) M. Enokizono and S. Nagata: *IEEE Trans. Magn.*, **26**, 877 (1990).
- 2) 岩村, 高木, 宮: 電気学会研究会資料, SA-88-36, RM-88-58, p. 79 (1988).
- 3) 榎園, 鈴木, J. D. Sievert: 日本応用磁気学会誌, **14**, 455 (1990).

1990 年 12 月 4 日受理, 1991 年 2 月 28 日採録