ミアンダコイルを用いた渦電流探傷プローブの配管溶接部への適用

Eddy-Current Testing Probe Using Meander Coil Applied to Weld Point of Pipe

水野 覚・山田 外史・岩原 正吉

金沢大学工学部, 金沢市小立野 2-40-20 (〒920-8667)

S. Mizuno, S. Yamada, M. Iwahara

Faculty of Engineering, Kanazawa University, 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa-shi 920-8667

This paper presents an eddy-current testing probe (for pipes including weld points) using a meander coil. Simulations clarified distributions of the eddy current by the meander coil and revealed that a probe can generate an effective eddy current for flow detection. Experiments demonstrated that the probe can detect an outer notch with 50 % depth and 10 mm length, which is located near the weld point. Enhancement of detectivity by inserting magnetic material in the detector coil was examined.

Key words: nondestructive testing, eddy current testing, meander coil, figure-of-eight coil, weld point, outer defect

1. はじめに

渦電流探傷法(Eddy Current Testing: ECT)は, 原子力発電所の熱交換器伝熱細管をはじめとする金属構造物の探傷に用いられている。しかし, 溶接接合部の欠陥検査を行う際, 様々な問題がある。溶接接合部は母材に比べて導電率及び透磁率が不均一であることに加え, ビードと呼ばれる盛り上がりの存在により, プローブと対象物との相対高さが異なり雑音を生じる¹⁾。このような溶接部を含む配管の検査を行うとき, 配管の内側にプローブを挿入して感度良く裏側欠陥を検出することが望まれている。

本研究では, 非磁性の原子力用配管等を対象とするミアンダコイルを用いた渦電流探傷プローブを提案し, 溶接部近傍における欠陥検出特性について検討を行ってきた²⁾。本稿では裏側欠陥の検出感度向上のために励磁周波数の選定, 及び検出コイルにおける磁性体の挿入の検討を行った。

2. ミアンダコイルを用いた渦電流探傷プローブ

2.1 ミアンダコイルを用いた渦電流探傷法

Fig. 1 にミアンダコイル及びその励磁によって誘起される渦電流の概念図を示す。ミアンダコイルを高周波により励磁すると, その近傍に置かれた導体中にミアンダコイルの線方向に沿って渦電流が流れる。一般に渦電流探傷では渦電流に対して垂直な傷は高感度で検出できるが, 渦電流に対して平行な傷は検出が困難である³⁾。本研究では溶接接合部において生じやすい周方向傷の探傷を目的とするため, ミアンダコイルを管軸方向に設置し, 軸方向に渦電流を誘導する。管に傷があると渦電流が乱れ, そこでの磁束の乱れを検出し探傷を行う。Fig. 2 に検出コイルとして用いる 8 の字コイルを示す。8 の字コイルはコイルの巻き方が逆になっているために, 2つのコイルを貫く磁束が均一な場合2つのコイルで

差動性を示し, 起電力は生じないが, 磁束に不均一があると起電力を生じる。

2.2 探傷プローブ

Fig. 3 に探傷プローブの概要を示す。上で述べたように管の軸方向にミアンダコイルを設置し, その 1 ピッチ間に 8 の字コイルを固定する。プローブは管の内側から挿入し, 軸方向及び周方向に走査でき全方向の探傷が可能である。本研究で対象とするオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 製配管 ($\sigma = 1.38 \times 10^6$ S/m) を Fig. 4 に示す。管中心部にはアーク溶接 (TIG 溶接) を行っており, 母材に比べ溶接部の導電率は低い。溶接部近傍の周方向に幅 0.5 mm,

Fig. 1 Configuration of probe.

Fig. 2 Configuration of figure-of-eight coil.

Fig. 3 Configuration of probe.

Fig. 4 Tube used in experiments.

Fig. 5 Experimental setup of probe.

長さ 10 mm の欠陥が施されている。探傷実験による比較のため OD 33 % (管厚に対し深さ 33 % である裏側欠陥), OD 50 %, OD 66 %, 100 % のモデルを用意した。Fig. 5 に実際に作製したプローブを示す。プローブの外径は管の内径に合わせ 53 mm とした。溶接部におけるビード部の盛り上がり (高さ約 0.8 mm) は管の内部にも存在し、これに対応するためコイルを固定するプローブの支持台は、弾力のある材質を用いている。ミアンダコイルの軸方向長さは 100 mm, ピッチを 6 mm として $\Phi 0.3$ mm の銅線を巻いた。検出コイルには直径 2 mm の左右のコイルに $\Phi 0.08$ mm の銅線を 20 ターン巻いた 8 の字コイルを用いた。

2.3 ミアンダコイルによる渦電流の特性

本研究ではミアンダコイルを軸方向に長くすることで、経路の長い渦電流を溶接部に垂直に誘導し、溶接部での導電率の不均一による影響を軽減することを考案した²⁾。さらに、渦電流探傷法において一般的である一様渦電流を誘導する手法⁴⁾に比べ、ミアンダコイルによる渦電流が有効であることを示すため数値解析を行った。一様渦電流は欠陥に対して渦電流の方向が均一であるため、欠陥の中心部での信号が得られにくい。解析には Ansoft 社製電磁界解析ソフト Maxwell 3D を用いた。解析に用いたモデルを Fig. 6 に示す。渦電流の分布を確認することが目的であるため、オーステナイト系ステンレスの平板に貫通傷を施した簡単なモデルとした。平板から 0.5 mm 離れた位置に平行導線を配置する。平行導線において一様渦電流を表現するため同一の方向に電流を流した場合、及びミアンダコイルによる渦電流を表現するため逆向きの電流を流した場合に解析を行った。電流の周波数は 50 kHz とした。Fig. 7 (a) に同一方向の電流による渦電流ベクトルの分布を示す。同様に Fig. 7 (b) にミアンダコイルによる渦電流ベクトルの分布を

Fig. 6 Model used for calculation.

(a) Eddy currents using parallel current excitation.

(b) Eddy currents using meander coil.

Fig. 7 Distribution of eddy currents.

示す。同一方向に渦電流を誘導した場合には傷を大きく避けて流れ、傷の中心付近で渦電流が流れないため、傷の端部でしか検出信号が得られない。ミアンダコイルの場合には傷の中心に沿って渦電流が回り込む様に流れていることがわかる。これはミアンダコイルによる渦電流が傷の長さ及び位置を明確にするために有効であることを示している。しかし、ミアンダコイルのピッチ幅に比べ極端に小さな傷に対しては検出信号が小さくなる。探傷実験の際にはこのような小さな傷に対しても垂直に渦電流を誘導できるように走査間隔を狭くすることが必要となる。

3. 探傷実験

3.1 軸方向の検出電圧特性

Fig. 5 に示したプローブを用いて探傷実験を行った。プローブを軸方向に 0.5 mm 間隔で走査し、検出コイルから

Fig. 8 Characteristics of detector coil signals.

ロックインアンプを通して出力電圧を得る。計測は溶接部を中心とする軸方向 45 mm の範囲で行った。対象とした SUS304 製配管には OD 50% の欠陥が溶接部近傍に施されている。溶接部及び欠陥を含む溶接部における検出電圧特性を Fig. 8 に示す。ミアンダコイルによる渦電流分布と 8 の字コイルの特性から欠陥と溶接部の前後で山と谷が連続するような波形となっている。これより溶接部での導電率の変化により欠陥部と同様の渦電流分布となることがわかる。また、欠陥部では信号 V_p が大きくなるため、欠陥の有無を確認できる。雑音 V_n の要因としてはプローブと管との相対高さの変動による影響が考えられ約 10 μV 程度である。本研究では、欠陥の検出感度を評価するために SN 比を次式のように定義する。

$$\text{Ratio} : R_{pn} = 20 \log (V_p / V_n)$$

3.2 励磁周波数の選定

裏側欠陥を感度良く検出するためには、渦電流を管の裏側付近のより深い位置に誘導することが必要であると考えられる。本研究で実験対象とする SUS304 製配管は厚さ 3 mm であるので、管の裏側付近に渦電流を誘導するには表皮厚さが 3 mm となる周波数 25 kHz が適当であると考えられる。しかし、裏側欠陥の深さによって最適な励磁周波数は異なると考えられるため、溶接部のない OD 66 %, 50 %, 33 % の欠陥モデルに対して、励磁周波数の選定実験を行った。周波数を可変する際、励磁コイルに流れる電流は一定の値で 2.0 A とした。Fig. 9 に励磁周波数と SN 比の関係を示す。欠陥の深さによって最適な励磁周波数が異なることがわかる。探傷実験ではより浅い傷に対して最大の SN 比を得ることのできる励磁周波数に選定するのが適当である。今回の実験より OD 33 % の欠陥に対して SN 比が最大となる励磁周波数 45 kHz が最適であると考えられる。

次に励磁周波数 45 kHz として異なる深さのモデルに対して欠陥信号 V_p を測定した。対象としたモデルは溶接部のある場合と無い場合とでそれぞれ OD 100 %, 66 %, 50 %, 33 % である。Fig. 10 に結果を示す。溶接部のある場合と無い場合とで類似した傾向を示していることがわかる。2 つの場合共に欠陥の深さに対応して V_p が増加しており、探傷実験の際にこの V_p から欠陥の深さを推定できる可能性があると思われる。また、2 つの場合を比較するとほぼ

Fig. 9 S/N ratio versus excitation frequency.

Fig. 10 Signal amplitude versus depth of outer defect.

一定の差を保ちながら増加している。これより溶接部を含む欠陥の信号から溶接部の信号を差し引くことによって、溶接部の無い場合と同様の信号が得られることが期待できる。

3.3 二次元探傷実験結果

励磁周波数の選定実験において最適であると考えられる 45 kHz の場合に二次元的に探傷実験を行った。実験対象は溶接部の近傍に OD 50 % の欠陥(長さ 15 mm, 幅 0.5 mm)が施されている。プローブを軸方向 0.5 mm 間隔、周方向 5 度間隔で走査し、得られた出力電圧の二次元表示を Fig. 11(a) に示す。軸方向 22 mm 付近の周方向に一樣に溶接部の信号が確認できる。TIG 溶接による溶接部の凹凸が周方向で不均一であるため、信号幅に約 70~80 μV の変化がある。溶接部の信号に埋もれ明確ではないが周方向 90 度付近に欠陥の信号が確認できる。8 の字コイルの特性から溶接部及び欠陥の前後で電圧の高い部分と低い部分が連続して表れている。次に Fig. 11(b) に溶接部の信号を周方向全体に引いた結果を示す。溶接部の影響は減じられ欠陥の信号が明確になっている。欠陥信号は実験対象と同じく約 15 mm の長さで現れ、前後に電圧の高い部分と低い部分がありその中心に欠陥があることを示している。また、欠陥の端部だけでなく中心部においても信号が得られることがわかる。実際に溶接部の無い OD 50 % 欠陥モデルでの探傷実験と比較するとほぼ同程度の SN 比が得られており、溶接部の信号を引くことが有効であることがわかった。

(a) Raw signal image.

(b) Image after signal processing.

Fig. 11 Output voltage distribution of weld points.

4 磁性体挿入の検討

4.1 検出コイルにおける磁性体の挿入

本研究では検出感度を評価するための定量的な値として SN 比を定義している。ここで SN 比を向上させるために検出コイルに透磁率の高い磁性体の挿入を検討する。磁性体を挿入することによりコイル内の磁束量は増加するが、無欠陥部分では 8 の字コイルが差動性を示し信号は大きくなり、欠陥部分の信号 V_p のみが大きくなると期待できる。探傷実験における励磁周波数は 45kHz と高周波であるため、挿入する磁性体としてフェライトを用いた。また反磁界の影響を減じるため U 字型のフェライトを作製した。

しかし、フェライトを挿入することによってミランダコイルによる磁束密度分布が乱れることが懸念される。ここで数値計算によってフェライト挿入時のステンレス管表面の磁束密度分布を明らかにすることを試みる。ミランダコイルにより励磁されたステンレスから 0.5 mm 離れた位置にフェライトを配置したものをモデルとして解析を行った。結果を Fig. 13 に示す。ミランダコイルによる磁束密度分布が乱れておらず、フェライトを挿入していない場合と同じ傾向の欠陥検出特性が得られることを示している。

4.2 磁性体挿入時の欠陥検出特性

フェライトを挿入した検出コイルを用いて探傷実験を行った。OD 50 % の欠陥モデルに対し軸方向において得られた欠陥検出特性を Fig. 14 に示す。欠陥部分での信号 V_p が大きくなっていることがわかる。ここで雑音 V_n も大きくなることが問題となるが、SN 比として比較するとフェラ

Fig. 12 Configuration of detector coil including ferrite.

Fig. 13 Calculated distribution of magnetic flux density.

Fig. 14 Comparison of detector coil signals.

Fig. 15 Signal amplitude versus turns of coil.

イトを挿入していない場合には 18.7 dB であり、挿入時には 22.4 dB に向上しフェライトの挿入が有効であることがわかる。次に Fig. 15 に検出コイルの巻き数と欠陥信号 V_p の関係を示す。フェライト挿入時には約 2 倍程度の欠陥信号が得られていることがわかる。また、巻き数を増やすことによる V_p の増加はあまり効果は得られず、雑音もほぼ同比で増加するため SN 比の向上にはやはりフェライトの挿入

が効果的であるとわかった。

5. まとめ

ミアンダコイルを用いた渦電流探傷プローブを用いてその特性について検討した結果、以下の結論を得た。

(1)OD 66 %, 50 %, 33 %の SUS304 製欠陥モデル(外径 60 mm, 厚さ 3 mm)に対し励磁周波数の選定実験を行い、本研究で作製したプローブにおいてそれぞれの欠陥を感度良く欠陥検出するためには励磁周波数約 45 kHz が適当であるとわかった。

(2)探傷実験において溶接部の信号を周方向に全体に引くことによって欠陥の信号だけを確認することができた。また、OD 50 %以上の欠陥の場合には溶接部の無い場合とほぼ同程度の SN 比を得られることがわかった。

(3)8 の字コイルに磁性体を挿入することによって欠陥信号 V_p が大きくなり、SN 比の向上のために有効であるとわかった。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基礎研究 (B) (2) 14350218)の交付を得て行った。

文 献

- 1) 小山潔, 谷村紀之, 星川洋: 第 11 回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム(日本 AEM 学会, 東京, 1999), 横浜, 1999, p. 598.
- 2) 前田哲彦, 水野寛, 山田外史, 岩原正吉: 日本応用磁気学会誌, 25, 1067, (2001).
- 3) 宮腰貴久, 谷口哲樹, 山田外史, 岩原正吉: 日本応用磁気学会誌, 24, 855, (2000).
- 4) 橋本光男: 日本 AEM 学会誌, 9, No. 1, 66, (2001).

2002 年 10 月 7 日受理, 2003 年 1 月 17 日採録