電磁誘導を利用した塗装上からの溶接線の検知

正員 小山 潔* 正員 星川 洋*
非会員 成瀬 譲**

Detecting Weld Line of Steel Material through Anticorrosion Paint
by an Electromagnetic Induction Probe

Kiyoshi Koyama*, Member, Hiroshi Hoshikawa*, Member, Yuzuru Naruse**, Non-member

The authors have developed a new method for detecting position and direction in weld zone of steel structures such as oil-storage tanks and bridges without removing their anticorrosion paint. The method uses a special eddy current probe and detects the position and direction by utilizing the difference of electromagnetic characteristics between the base material and the heat affected zone. The probe comprises two large tangential exciting coils wound orthogonally each other and a small pancake detecting coil. The exciting coils induce uniform eddy current rotating its direction synchronizing to the alternating exciting current. The signal amplitude from the probe provides information on its position in the weld zone and the signal phase indicates the direction of the probe. Thus the probe generates the weld signal to effectively follow the weld line in steel structures. The experimental results have shown that the proposed method is promising because the probe provides clear weld signal with little noise and the change of the probe lift-off from the material causes little variation in the signal.

キーワード：溶接線検知，電磁誘導，渦電流，回転一様渦電流プローブ

Keywords : weld line detection, electromagnetic induction, eddy current, rotating uniform eddy current probe

1. はじめに

石油備蓄タンクやガスホルダー，橋梁などの構造物では，その安全性を確保するためにそれらの溶接部を超音波や電磁気などを利用した非破壊試験法による保守検査が行われている。従来の非破壊試験法による保守検査においては，防錆などのための塗装を剥してから検査を行い，検査終了後に再度塗装を行うために検査に時間を要するという問題がある。近年，塗装を剥さずに塗装の上から検査を行える手法が望まれている。構造物の溶接部を塗装の上から検査するためには，溶接部の位置を知る必要があり，検査装置はセンサにより溶接線の位置と方向を検知し，溶接線を追従する技術が必要となる。光学センサを利用した溶接線の検知では，防錆などのための塗装がされている場合や溶接部の余盛が研磨されている場合には，溶接線の検知が困難であるという問題がある^{(1)~(5)}。

溶接線を塗装の上から検知する方法に，電磁誘導により

非接触で導体内に渦電流を誘導するプローブ（以下，渦電流プローブ）を用いる方法がある。交流電流を流した渦電流プローブは，電磁誘導により導体内に渦電流を誘導する。導体内に誘導された渦電流は，導体の導電率や透磁率などの電磁気特性の変化や形状の変化などによって流れが変化する。この渦電流の変化は，渦電流プローブの起電力の変化として検出される。溶接部の電磁気特性は，母材部の電磁気特性とは異なる。また，溶接部に余盛がある場合には，母材部とは形状が異なる。したがって，溶接部に塗装がされていても，溶接部と母材部との電磁気特性や形状の差異によって渦電流の流れが変化するから，渦電流プローブによって塗装の上から非接触に溶接線の検知が可能である。

しかし，従来のパンケーキ状の円形コイルの渦電流プローブ⁽⁶⁾では，塗装の厚さ変化すなわち，プローブと導体との相対距離が変わると誘導される渦電流それ自身が変化するので，検出される信号が変化する。また，溶接部の電磁気特性や形状の部分的な変化に対して渦電流が変化するので，検出される信号が変化する。このため，溶接線の位置と方向の検知が困難である。このような影響を受けない工夫として円形コイルを2個並置して差動検出とした渦電流プローブ⁽⁶⁾とする方法があるが，プローブと導体との相対距

* 日本大学生産工学部電気電子工学科
〒275-8575 習志野市泉町 1-2-1
College of Industrial Technology, Nihon University
1-2-1, Izumicho, Narashino 275-8575

** 日本大学大学院生産工学研究科
〒275-8575 習志野市泉町 1-2-1
Nihon University Graduate
1-2-1, Izumicho, Narashino 275-85

離の変化による影響や溶接部の電磁気特性や形状の部分的な変化の影響を受けずに、溶接線の位置は検知できるものの、溶接線の方法は検知することができない。検査装置が溶接線を追従するためには、プローブからの信号によって溶接線の位置と方向を検知し、その信号に基づいて検査装置の走行を制御する必要がある。

筆者らは、確実に溶接線の位置と方向を検知するための電磁誘導プローブを提案する。筆者らが開発した大きさが一様で方向が回転する渦電流（以下、回転渦電流）を誘導するプローブ⁽⁷⁾⁽⁸⁾（以下、回転一様渦電流プローブ）を溶接線の検知に適用する。回転一様渦電流プローブによれば、塗装の厚さ変化による影響や溶接部の電磁気特性や形状の部分的な変化による影響を小さく、溶接線の中央部位置で零値を示し溶接線の中央部位置に対して右側と左側で符号の異なる差動信号が得られる。また、溶接線の方法に応じた位相の異なる信号が得られることとなる^{(9)~(11)}。実験の結果、回転一様渦電流プローブを用いれば、従来の渦電流プローブに比べて確実に溶接線を検知でき、回転一様渦電流プローブの信号の振幅と極性から溶接線の位置を、信号の位相角から溶接線の方法を検知できることを確認した。これらの実験結果から、検査装置が溶接線の中央部位置より移動した場合や溶接線に対する向きが変化した場合には、回転一様渦電流プローブの信号が変化するので、信号変化に応じて検査装置の制御を行って溶接線を追従可能と考える。

2. 回転一様渦電流プローブによる溶接線の検知

〈2・1〉 プローブの構造 回転一様渦電流プローブは、図 1 に示す様に矩形に巻いた縦置きのコイルを十字に組合せた 2 つの励磁コイルとその中心下に配置したパンケーキ状の円形の検出コイルから構成される。2 つの励磁コイルに互いに 90 度位相の異なる交流電流を流すと回転磁界が発生し、図 2 に示すように導体内には励磁電流に同期した回転渦電流が誘導される。

励磁コイルと導体の間に配置した巻数 N の検出コイルの起電力 V は、次式で与えられる⁽¹²⁾。

$$V = -N \frac{\partial}{\partial t} [\iint_S B \cdot n dS] = -N \frac{\partial}{\partial t} [\oint A \cdot dl] \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 t は時間、 S は検出コイルの面積、 B は磁束密度、 n は微小面積 dS に対する単位法線ベクトル、 A は磁気ベクトルポテンシャル、 dl は検出コイルの巻線に沿った単位接線ベクトルを表す。

電流密度 J によって発生する磁気ベクトルポテンシャル A は、クーロンゲージ $\nabla \cdot A = 0$ を課して次式で与えられる⁽¹²⁾。

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \iiint \frac{J}{r} dVc \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 r は電流密度 J からの磁気ベクトルポテンシャル A の位置までの距離、 Vc は電流源の体積を表す。(2)式より磁気ベクトルポテンシャルは、励磁コイル近傍の電流が一様であるとき、電流の向きと同じ方向のベクトルである。

図 1 回転一様渦電流プローブの構造
Fig. 1. Rotating uniform eddy current probe.

図 2 試験体に誘導される回転渦電流と
検出コイル起電力

Fig. 2. Rotating uniform eddy current and detecting coil emf.

以上の関係より、検出コイルは、巻線と平行な電流成分を検出することとなる。従って、図 2 に示す様に一様な渦電流中に置かれた円形の検出コイルの起電力は、検出コイルの中心を通る軸に対して対称なコイル巻線部同士では巻線方向に関して逆向きとなり、互いに打ち消し合う。すなわち、図 2 に示す様に系に対称性がある場合には(2)式より磁気ベクトルポテンシャルは相殺し合って、その積分値は零となる。この結果、(1)式より一様な渦電流の場合には検出コイルに起電力は発生しない。

〈2・2〉 溶接線の位置と方向の検知 回転一様渦電流プローブによる溶接線の検知を考える。励磁電流に同期して方向が回転する回転渦電流を図 3(a)に示す様に溶接線に垂直な成分と図 3(b)に示す様に平行な成分に分けて考える。溶接線に垂直な成分の場合には、円形の検出コイルの中心を通り溶接線に垂直な軸に関して左右で渦電流が対称であり、溶接線に対するプローブの位置に関わらず原理的に検出コイルの起電力は発生しない。一方、溶接線に平行な成分の場合には、円形の検出コイルの中心を通り溶接線に平行な軸に関して左右で渦電流の大きさが異なるので起電力が発生し、溶接線に対するプローブの位置に応じた正負の極性の異なる信号を示す。プローブが溶接線の中央部に位置すると、円形の検出コイルの中心を通り溶接線に平行な

(a) Eddy current perpendicular to the weld line

(b) Eddy current parallel to the weld line

図3 回転一様渦電流プローブによる溶接線の検知原理

Fig. 3. Principle of detecting weld line by rotating uniform eddy current probe.

軸に関して左右で渦電流が対称となるので原理的に起電力は発生せず、信号は零値を示す。回転一様渦電流プローブは、渦電流が検出コイルの中心を通る軸に関して対称を保つ場合には、塗装の厚さ変化すなわち、プローブと導体との相対距離が変化しても検出コイルには起電力は発生しないので、塗装の厚さが変わっても溶接部の中央部位置で信号は零値を示す。したがって、信号が零値となるようにプローブの位置を制御すれば確実に溶接線の位置を検知できる。

溶接線の方角検知について考える。上記のことから、回転渦電流の向きが溶接線と平行なときに信号が最大となる。溶接線に対してプローブが平行な場合に図4(a)に示すように $t=0$ で回転渦電流の向きが溶接線と平行とすると、 $t=0$ で最大となる信号が発生する。一方、プローブが溶接線に対して図4(b)に示す様に θ 傾いた場合には、 $t=\theta/\omega$ で回転渦電流の向きが溶接線と平行となるので、信号は、図4(a)の場合のプローブの向きが溶接線と平行のときの信号より θ 位相が遅れることとなる。すなわち、信号の位相角より溶接線に対するプローブの方角、逆にプローブに対する溶

(a) When probe is parallel to the weld line

(b) When probe tilts θ degrees to the weld line

図4 プローブの傾きと信号位相

Fig. 4. Tilt of probe and signal phase.

接線の方角を検知できる。

以上のような特性を利用すれば信号の振幅と極性及び位相に基づいて溶接線の位置と方角を検知して、溶接線の追従制御が行える。

〈2・3〉 溶接線の追従 回転一様渦電流プローブは、溶接線の中央部位置で信号の零値を示し、溶接線に対するプローブの向き、あるいは溶接線の方角に対応して信号の位相が変化する。検査装置が溶接線の中央部位置より移動した場合や溶接線に対する向きが変化した、あるいは溶接線の方角が変化した場合には、回転一様渦電流プローブの信号が変化するので、信号変化に応じて検査装置の制御を行って溶接線を追従可能と考える。すなわち、溶接線の中央部位置より溶接線に対して垂直に移動した場合には、信号の振幅と極性により溶接線の中央部位置への移動を制御し、信号が零値を保つ様に検査装置を制御する。溶接線に対する向きが変化した、あるいは溶接線の方角が変化した場合には、信号の位相角が変化する所以、位相角に応じて検査装置の向きを修正し、その後信号が零値となるように溶接線の中央部位置へ移動制御すれば、検査装置は溶接線を追従可能である。

3. 実験方法

回転一様渦電流プローブを製作し溶接線の検知実験を行った。実験に用いた回転一様渦電流プローブの励磁コイルの寸法は、幅 30 mm、長さ 40 mm、高さ 30 mm であり、検出コイルの寸法は、外径 6 mm、コイル巻線断面積 $1 \times 1 \text{ mm}^2$

である。試験体には、中央に幅約 12 mm の 2 層盛り被覆アーク溶接のされた、一辺の大きさ 160 mm、厚さ 6 mm、材質 SS400 の鋼平板を用いた。溶接部の余盛りが約 1 mm 程度ある試験体と余盛りを研磨した試験体を用意した。溶接線と垂直な方向を x 軸とし、溶接線と平行な方向を y 軸とする。溶接部の電磁気特性や形状の部分的な違いによる影響を検討するために y 軸上でのプローブの位置を種々変えて実験を行った。プローブと導体との相対距離を 1.5 mm とし、周波数を 10 kHz とした。

4. 実験結果

〈4・1〉 余盛のある溶接試験体 図 5 には、溶接線に対するプローブの向きを平行に保ちながらプローブを溶接線に対して垂直方向に移動させたときの複素信号平面上での溶接線検知信号を示す。検出コイルの起電力は、励磁電流に対する同相成分 (In-phase component) と 90 度進相成分 (Quadrature component) の複素信号である。図中の○印は溶接部の中央位置を、□と△は溶接部と母材部との境界位置を示す。

(a) Probe position y=0mm

(b) Probe position y=-15mm

図 5 溶接信号の溶接線に沿った位置による差異

Fig. 5. Weld signal variation by probe position along weld line.

位置を示す。初期設定においてプローブが溶接線と平行の場合に励磁電流に対する 90 度進相成分が無いように位相調整を行った。図 6 には溶接線に対する垂直方向である x 軸上でのプローブの位置に対する溶接線検知信号を表す。溶接線の幅は 12 mm であるのでプローブの位置 $x=\pm 6$ mm は溶接部と母材部の境界を示し、 $x=0$ mm は溶接部の中央部を示す。溶接部の中央部位置で信号の零値を示し、プローブの位置に応じて信号の振幅と極性が異なる。溶接線に対する平行方向である y 軸上でのプローブの位置が異なっても溶接線の中央部位置での信号の零値はほとんど変化しない。

図 7 には、塗装の厚さ変化を模擬してプローブと導体との相対距離が変化した場合における、x 軸上でのプローブの位置に対する溶接線検知信号を示す。相対距離が大きくなると信号の振幅は小さくなるものの溶接線の中央部位置での信号の零値はほとんど変化しない。

以上の結果は、回転一様渦電流プローブでは、溶接部の電磁気特性や形状の部分的な変化、塗装の厚さ変化などに

(a) Probe position y=0mm

(b) Probe position y=-15mm

図 6 溶接線上におけるプローブ位置に対する溶接線信号

Fig. 6. In-phase component weld signal for probe position on weld zone.

図7 溶接部とプローブ間の空隙による影響
Fig. 7. Influence by the probe lift-off from the material.

図8 溶接線に対するプローブの傾きと信号位相
Fig. 8. Weld signal phase and probe tilt to the weld line.

よる影響が小さく、溶接線信号の零値を観測することで溶接線の位置を確実に検知できることを示す。従って、検査装置が溶接線の中央部位置より溶接線に対して垂直に移動した場合には、信号の振幅と極性に基づいて検査装置を制御して溶接線を追従すれば良いことがわかる。

図8には、溶接線に対するプローブの向きが異なる場合の複素信号平面上での溶接線信号を示す。励磁電流に同期した回転渦電流であるので、溶接線に対するプローブの向きに応じて信号の位相角が変化する。このことは、回転一様渦電流プローブの信号の位相角から、溶接線の方向、あるいは溶接線に対するプローブの向きを検知できることを示す。従って、溶接線に対する検査装置の向きが変化した、あるいは溶接線の方向が変化した場合には、位相角に応じて検査装置の向きを修正し、その後溶接線検知信号が零値となるように制御すれば、検査装置は溶接線を追従可能である。

〈4・2〉 余盛のない溶接試験体 溶接部の余盛が研磨

図9 溶接線上におけるプローブ位置に対する溶接線信号 (余盛のない溶接試験体)
Fig. 9. In-phase component weld signal for probe position on weld zone (without reinforcement).

図10 溶接線に対するプローブの傾きと信号位相 (余盛のない溶接試験体)
Fig. 10. Weld signal phase and probe tilt to the weld line (without reinforcement).

された試験体についても同様な実験を行った。図9には、溶接線に対する垂直方向であるx軸上でのプローブの位置に対する溶接線検知信号を表す。比較のために余盛のある溶接試験体の検知信号も併記した。図10には、溶接線に対するプローブの向きが異なる場合の複素信号平面上での溶接線検知信号を示す。溶接部の余盛による形状変化がないため、検知信号の振幅が小さくなるが、溶接部の余盛が研磨されていても、母材部と溶接部の電磁気特性の違いによる溶接線信号が発生する。その結果、回転一様渦電流プローブを用いれば、信号の零値と極性より溶接線の位置を、信号の位相角より溶接線の方向、あるいはプローブの向きを検知できることが確認できる。

5. おわりに

回転一様渦電流プローブを用いた溶接線の位置と方向の検知に関する検討を行った。実験の結果、以下の知見を得た。

- (1) 励磁電流に同期した回転渦電流を誘導する回転一

様渦電流プローブを用いれば、他の渦電流プローブに比べ確実に溶接線の位置と方向を検知できることを確認した。

(2) 回転様渦電流プローブは、溶接線の中央部位置で信号の零値を示し、溶接線に対するプローブの位置に応じて信号の振幅と極性が変化する。このことより、信号の零値を保つように検査装置を制御すれば溶接線の位置を確実に検知できることを確認した。

(3) 回転様渦電流プローブは、溶接部の電磁気特性や形状の部分的な違いやプローブと導体との相対距離の変化に対しても、溶接部の中央部位置での信号の零値はほとんど変化しないことを確認した。このことは、塗装の厚さ変化などに対しても確実に溶接線の位置を検知できることを示す。

(4) 回転様渦電流プローブは、励磁電流に同期した回転渦電流を誘導するので、溶接線に対するプローブの向きに応じて信号の位相角が変化する。このことより、溶接線に対する検査装置の向きが変化した場合には、信号の位相角から検査装置の向きを制御できることを示す。

(5) 構造物などの溶接線の検知について検討を行ったが、自動溶接機における溶接を行う部位の開先部の検知にも適用が可能である。

今回は溶接線の幅やプローブ寸法を一定で実験を行ったが、今後溶接線の幅に対する回転様渦電流プローブの励磁コイルや検出コイルの寸法の検討や励磁電流の周波数の検討さらに、十字状の溶接部の検知などについて検討を行う予定である。

(平成 16 年 2 月 17 日受付, 平成 16 年 5 月 6 日再受付)

文 献

- (1) 中村寿夫:「球形ガスホルダー脚栓隅肉溶接部自動検査ロボット」, センサ技術, Vol.10, No.2, pp.77-80 (1990)
- (2) 齋藤・石井・菅:「自走式パイプ溶接ロボットにおける溶接線追従制御性の向上」, 機会学会第 1 回機会材料・材料加工技術講演論文集, pp.242-245 (1993)
- (3) 川口圭史・吉田乙雄・車谷健太・菊田 隆:「鉄管内走行ロボットの開発」, ロボット学誌, Vol.14, No.1, pp.137-143 (1996)
- (4) 川口圭史・吉田乙雄・巖 敬三・菊田 隆:「鉄管内走行ロボットのセンサと演習方向走行」, ロボット学誌, Vol.15, No.8, pp.68-75 (1997)

- (5) 曾木忠幸・川口圭史・早川秀樹・森崎弘康・甲斐章義・大河清之:「球形ホルダー走行ロボットの開発」, ロボット学会学術講演会講演概要集, pp.123-124 (1999)
- (6) 日本非破壊検査協会編:新非破壊検査便覧, pp.396-397, 日刊工業新聞 (1992)
- (7) 星川 洋・小山 潔:「回転渦電流を利用した渦流探傷プローブ」, AEM 学誌, Vol.3, No.3, pp.36-42 (1995)
- (8) H.Hoshikawa and K.Koyama: "A New Eddy Current Probe Using Uniform Rotating Eddy Current", *Materials Evaluation*, Vol.56, No.1, pp.85-89 (1998)
- (9) K.Koyama and H.Hoshikawa: "Weld Line Detection by Rotating Uniform Eddy Current Probe", 6th FENDT (2002)
- (10) 星川 洋・小山 潔・成瀬 譲:「電磁誘導を利用した溶接線の塗装上からの検知法」, 第 47 回日本学術会議材料研究連合会講演論文集, pp.235-236 (2003)
- (11) 成瀬 譲・星川 洋・小山 潔:「回転様渦電流プローブによる溶接線の検知について」, JSNDI 秋季大会講演概要集, pp.91-92 (2003)
- (12) 例えば, 熊谷信昭:電磁理論, コロナ社 (1991)

小 山 潔

(正員) 1963 年 3 月 24 日生。1986 年 3 月日本大学卒業。1988 年 3 月日本大学大学院博士前期課程修了。1991 年 1 月より日本大学生産工学部に勤務。2001 年 4 月同助教授。現在は電磁気の応用計測に関する研究に従事。博士 (工学)。

星 川 洋

(正員) 1942 年 7 月 21 日生。1965 年 3 月山形大学卒業。1967 年 3 月山形大学大学院修士課程修了。1967 年 4 月より日本大学生産工学部に勤務。1989 年 4 月同教授。現在は主として渦流探傷に関する研究に従事。工学博士

成 瀬 譲

(非会員) 1980 年 1 月 18 日生。2003 年 3 月日本大学生産工学部電気工学科卒業。現在, 同大学大学院生産工学研究科博士前期課程在学中。電磁気を利用した非破壊計測に関する研究に従事。