

電磁誘導を利用した塗装上からの溶接部の検知に関する研究

日大生産工（院） ○成瀬 譲
日大生産工 星川 洋、小山 潔

1. はじめに

石油備蓄タンクやガスホルダーなどの構造物では、その安全性を確保するために溶接部を非破壊試験法による保守検査が行われている。従来の手法では塗装を剥がしてから検査を行うため時間を要するという問題がある。近年、塗装を剥がすことなく塗装上から検査を行える手法が望まれている。その検査のためには、塗装上からセンサにより溶接部の位置と方向を検知して追従する技術が必要となる¹⁾。

渦流探傷試験で用いられている渦電流プローブは、電磁誘導を利用して非接触で試験導体の欠陥を検出する。この渦電流プローブを溶接部検知のセンサとして用いれば、母材部と溶接部での電磁気特性の相違や溶接部の余盛りによる形状の変化により誘導される渦電流が変化してプローブに起電力が発生するので、塗装上から溶接部を検知できる可能性がある。しかし、従来の差動上置渦電流プローブ²⁾(以下、差動プローブ)では、溶接部の位置は検出できるが方向を検出できず、塗装が厚くなると信号が大きく減衰してしまうという問題がある。

そこで、塗装の厚さに影響されることなく溶接部の位置と方向の検知を可能とすることを目的として、回転一様渦電流プローブ³⁾(以下、RUECP)の適用を提案する。今回、余盛りのある溶接試験体と余盛りの研磨された溶接試験体に RUECP を用いて溶接部の検知について検討を行った。その結果、溶接部の余盛りの有無に関わらず溶接部の位置と方向を検知でき、塗装の厚さによる信号の減少が小さいことを確認した。

2. 回転一様渦電流プローブによる溶接部の検知

2-1 RUECP の構造と原理

RUECP の構造は図 1 に示すように、2 つの矩形縦置きコイルを十字に組み合わせた励磁コイルとその中心下に配置した円形検出コイルから構成される。RUECP の 2 つの励磁コイルに互いに 90°

位相の異なる交流電流を流すことにより回転磁界が発生する。この回転磁界により、試験導体には図 2 に示すような励磁電流に同期して方向が回転する一様な渦電流(以下、回転渦電流)が誘導される。そして、図 3 に示すように一様な渦電流上に置かれた円形検出コイルの各巻線部分では、それと平行な渦電流成分により起電力が発生する。発生した起電力は円形検出コイルの巻線方向に関して互いに逆向きとなり、互いに打ち消し合う。回転渦電流が一様な場合には、検出コイルの起電力は平衡を保つので発生しない。この特性により RUECP と試験導体とが軸対称を保つ限りにおいて、塗装厚さの変化や追従に伴う装置の上下振動によって RUECP と試験体との距離が変化しても、原理的に雑音は発生しない。

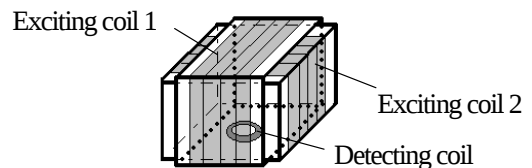


図 1 回転一様渦電流プローブの構造

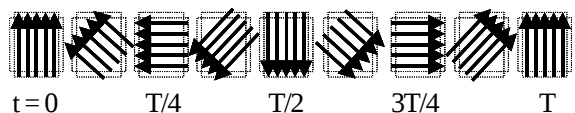


図 2 誘導される回転渦電流

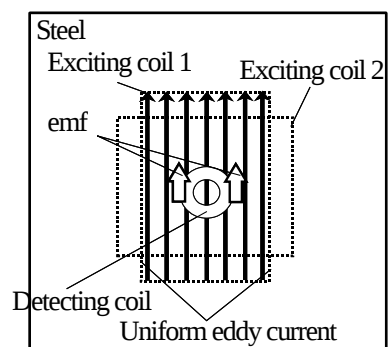


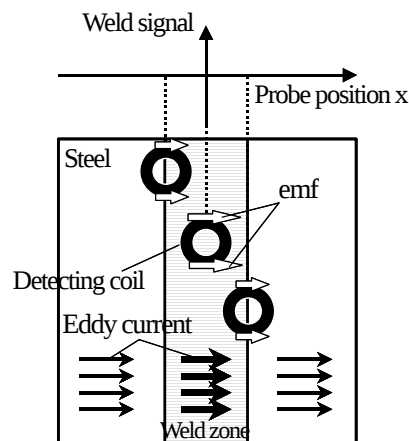
図 3 円形検出コイルの起電力

2-2 位置検知の原理

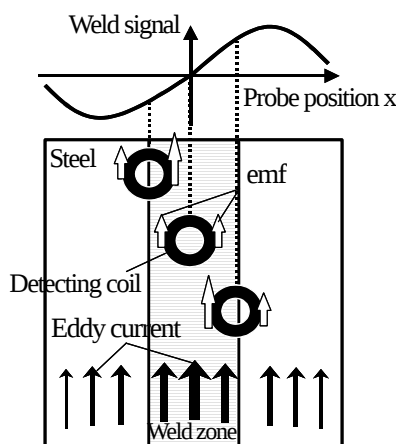
回転渦電流は溶接部に平行な成分(以下、平行成分)と垂直な成分(以下、垂直成分)の合成であり、ここで2つの成分に分けて考える。図4(a)のように垂直成分では渦電流が検出コイルの中心軸で対称となるため、検出コイルの起電力は巻線方向(図では、時計回り方向とする)を正、逆方向を負とすると正負の平衡を保つので、信号は発生しない。垂直成分では RUECP の位置に関わりなく常に信号は発生しない。図(b)のように平行成分では母材部と溶接部での電磁気特性の相違により渦電流が変化している。RUECP が溶接部中央から左側(x 負方向)に外れると、検出コイルの起電力は負が正に対して優勢となり平衡が崩れて負極性の信号が発生する。逆に、右側(x 正方向)に外れると起電力は正が負に対して優勢となり平衡が崩れて正極性の信号が発生する。RUECP が溶接部中央に位置した場合には渦電流が検出コイルの中心軸で対称となるため起電力の平衡が保たれ、信号は発生しない。したがって、回転渦電流はこの2つの成分の合成であり、RUECP による検知信号は平行成分により発生している。その信号は溶接部中央に対し左右の位置で極性の異なる差動信号で得られ、その零値と極性により溶接部の位置を検知できる。

2-3 方向検知の原理

図5に RUECP の向きと、回転渦電流の方向の時間的変化とそれに伴う検知信号の変化を示す。図5(a)のように RUECP が溶接部と同方向の場合には、回転渦電流の方向は溶接方向から励磁電流に同期して角速度 ω 、周期 T で回転を始める。検知信号は回転渦電流の平行成分により発生しており、回転渦電流が溶接部と同方向のときに($t = 0$)に最大、垂直方向のとき($t = T/4$)に零となる正弦波である。図5(b)のように RUECP の向きが $-\theta$ 方向の場合には、回転渦電流の方向は $-\theta$ 方向から励磁電流に同期して角速度 ω 、周期 T で回転を始める。このため、回転渦電流は $t = -\theta/\omega$ のときに溶接部と同方向となるので、同図(a)の場合に比べて検知信号が最大となる時刻にプローブ方向のずれである $-\theta$ の分だけ時間のずれが生じる。この時間のずれにより検知信号の位相は θ だけ遅れる。したがって、RUECP は溶接部とプローブとの方向角を検知信号の位相角により検知することができる。

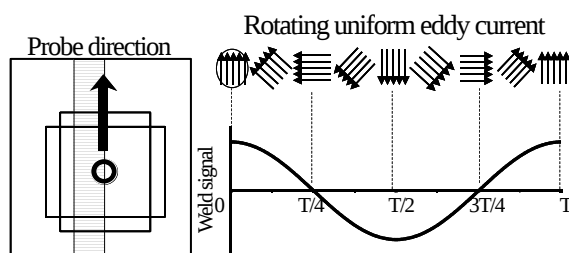


(a) 溶接部に垂直な渦電流成分

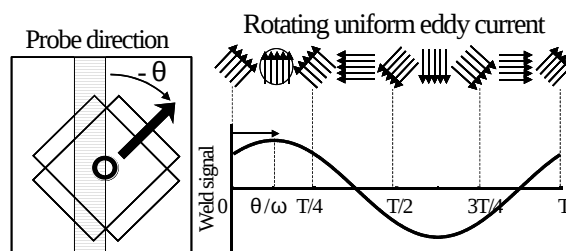


(b) 溶接部に平行な渦電流成分

図4 溶接部における渦電流と起電力



(a) RUECP と溶接部とが同じ向きの場合



(b) RUECP の向きが $-\theta$ 方向の場合

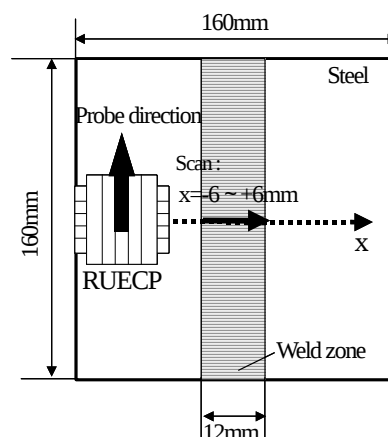
図5 RUECP の向きに対する検知信号の位相変化

3. 溶接部検知の実験

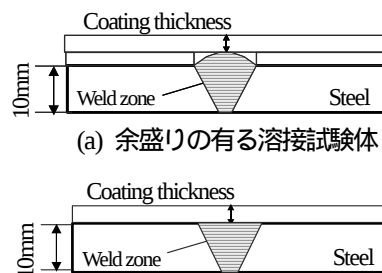
溶接部の検知について RUECP を用いて実験を行った。図 6 に実験の概要と用いた溶接試験体を示す。溶接試験体には、中央に幅約 12mm の溶接を施した一辺 160mm、厚さ 10mm、材質 SS400 の鋼平板を 2 つ用いた。一方の溶接試験体には余盛り高さが約 1mm 程度あり、もう一方は余盛りが研磨されている。RUECP の励磁コイルは、幅 30mm、長さ 40mm、高さ 30mm、検出コイルは外径 6mm、巻線断面積 $1 \times 1\text{mm}^2$ である。試験周波数は 50kHz、塗装の厚さは 1mm である。検出コイルの起電力は励磁電流に対して同相成分(In-phase component)と 90° 進相成分(Quadrature component)の複素信号¹⁾であり、RUECP の向きが溶接部と同方向のときに検知信号は同相成分のみが発生するよう位相調整を行い、このときの位相を 0° とした。試験体の中心を原点として溶接に対して垂直方向に x 軸をとり、 $x = \pm 6\text{mm}$ (溶接部の左端から右端まで)の範囲で RUECP を走査して信号を得た。

4. 実験結果

溶接部における RUECP の位置に対する検知信号の同相成分を図 7(a)に示す。図中の点線は余盛りの有る溶接試験体の、実線は余盛りの研磨された溶接試験体の結果である。余盛りの有る溶接試験体では、母材部と溶接部での電磁気特性の相違に加えて余盛りによる形状の変化も検出する。これに対し、余盛りの研磨された溶接試験体では、余盛りによる形状の変化が無くなり母材部と溶接部での電磁気特性の相違のみを検出する。このため、図のように余盛りの研磨された溶接試験体では余盛りが有る場合に比べて信号振幅が小さくなるが、どちらの場合にも RUECP が溶接部の中央($x=0\text{mm}$)に位置すると信号は零値となり、溶接部の中央より左側($-x$ 側)に位置したときには負極性、右側($+x$ 側)に位置したときには正極性となる。RUECP の検知信号は余盛りの有無に関わらず溶接部の位置に応じた差動信号で得られ、位置の検知が可能である。次に、同図(b)に RUECP の位置に対する検知信号の直線性を余盛りの有無で比較するため同図(a)の結果についてそれぞれ信号振幅を正規化したものを示す。検知信号の直線性は、余盛りの有る溶接試験体と研磨された試験体とで大きな違いは無くどちらの場合にも同じように位置の検知が可能である。

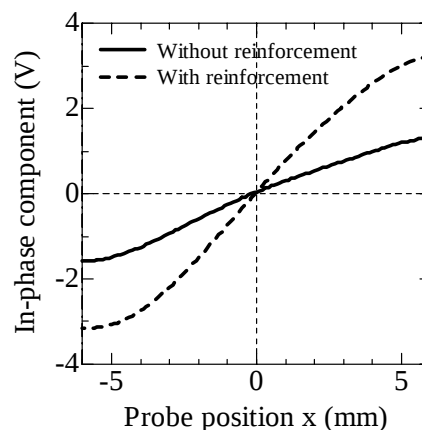


(a) 余盛りの有る溶接試験体

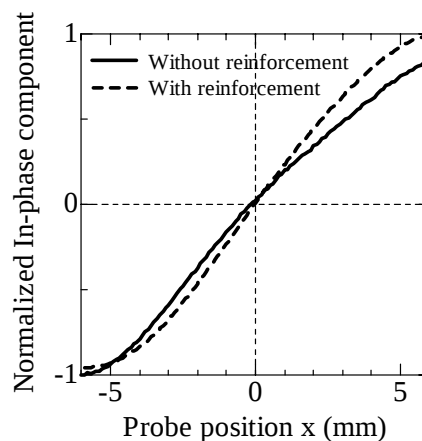


(b) 余盛りの研磨された溶接試験体

図 6 実験の概要と用いた溶接試験体



(a) 検知信号の同相成分



(b) 検知信号の直線性

図 7 RUECP の位置に対する検知信号

図8は溶接部に対して RUECP の向きを $\pm 45^\circ$ と変えて得た検知信号のパターンである。図は RUECP を溶接部の左端から右端まで走査した際に得られる複素信号平面上の検知信号の軌跡を示しており、□はプローブ位置が溶接部の左端、○は中央、△は右端にあることを示している。同図(a)に余盛りのある溶接試験体、同図(b)に余盛りの研磨された溶接試験体の結果を示す。RUECP では図のように余盛り有無の溶接試験体のどちらにおいてもプローブの向きが $+45^\circ$ 、 -45° と変わるとそれに対応して信号位相が 45° 進み、遅れる。したがって、RUECP は余盛りの有無に関わらず信号の位相により溶接部とプローブの方向検知が可能である。一方、従来の差動プローブでは、向きが変わっても信号位相に変化がなく方向の検知ができない。

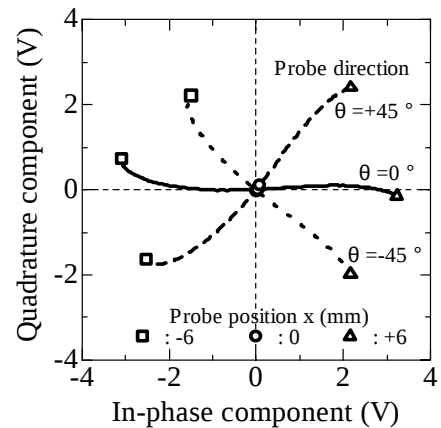
図9に塗装の厚さを 1mm から 3mm まで 0.5mm ずつ変えて検知信号の減衰を調べた結果を示す。図は RUECP が溶接端部に位置したときの信号振幅をそれぞれ正規化したものである。比較のために従来の差動プローブの結果についても同図に示した。図中の○は差動プローブ、□は RUECP を、点線は余盛りのある溶接試験体、実線は余盛りの研磨された溶接試験体の結果を示す。差動プローブでは、余盛り有無の溶接試験体のどちらにおいても塗装が厚くなるのに伴い信号が大きく減衰してしまう。これに対して RUECP では、どちらの溶接試験体においても従来の差動プローブに比べて塗装の厚さによる信号の減衰が小さい。

5. おわりに

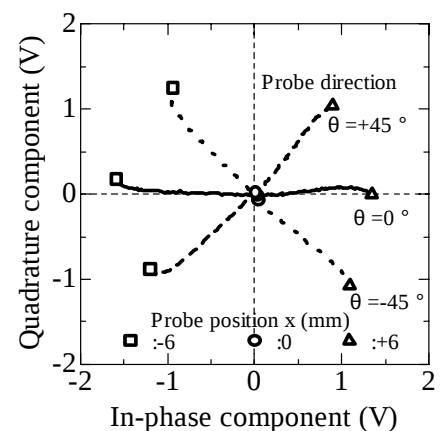
回転一様渦電流プローブを余盛りの研磨された溶接部の検知に用いると余盛りのある場合に比べて信号振幅が小さくなるが、どちらの場合にも差動信号と位相角により溶接部の位置と方向を検知できることを確認した。また、塗装の厚さによる信号の減衰が小さいので塗装上からの溶接部の検知が可能である。

参考文献

- 1) 小山潔, 星川洋, 成瀬謙, 「電磁誘導を利用した塗装上からの検知」電気学会論文誌 A, Vol124, No.9, pp.797-802 (2004)
- 2) 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)



(a) 余盛りの有る溶接試験体



(b) 余盛りの研磨された溶接試験体

図8 RUECP の向きに対する信号位相

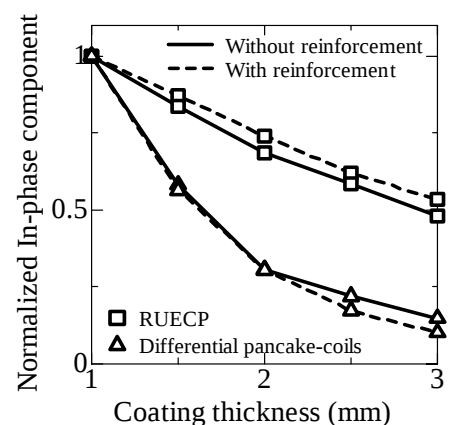


図9 塗装の厚さによる信号の減衰

- 3) 星川洋, 小山潔, 「回転一様渦電流プローブを利用した渦流探傷プローブ」日本 AEM 学会誌, Vol3, No.3, pp.36-42 (1995)