

渦流探傷及び電磁誘導式電位差法による亀裂の推定

星川 洋、小山 潔（電気電子工学科）

1. はじめに

ヘルスマニタリングのための非破壊検査技術の確立を目的として、大型構造物などの溶接部表面及び表層部の検査に、電磁誘導を利用した非破壊検査技術である渦流探傷試験を適用するための新しい渦流探傷プローブの開発研究を行った、その研究経過を報告する。

溶接部表面及び表層部の検査には、従来から非破壊検査技術である浸透探傷試験や磁粉探傷試験が適用されている¹⁾。これらの試験法は、防錆などの保護材がある場合には、保護材を剥がしてから探傷を行うため検査に長時間を要するという問題がある。表面及び表層部の試験法に渦流探傷試験があり、非接触で高速度に探傷を行える特徴を有する。したがって、溶接部表面及び表層部の検査に渦流探傷試験を適用できれば、防錆などの保護材を剥がすことなく、従来の試験法に比べて短時間に検査が行える。

しかし、溶接部の検査に従来の上置コイルを用いて渦流探傷試験を行うと、溶接部の電磁気特性の変化や溶接部の余盛りによる試験体と試験コイルの距離（これをリフトオフという）の変化などによって大きな雑音（これを溶接部雑音とする）が発生する。このため、従来の上置コイルを用いた渦流探傷試験では、溶接部の検査が困難である。渦流探傷試験によって溶接部の検査を行うためには、溶接部雑音の小さな渦流探傷プローブが必要である。溶接部雑音の小さな渦流探傷プローブとして、上置コイルを2つ並べた差動上置プローブやクロスポイントプローブ^{2,3)}などがある。

今回新たに開発した一様渦電流プローブは、矩形に巻かれた縦置き励磁コイルとその内部に配置された矩形で縦置きの2つの検出コイルから構成される。2つの検出コイルの配置は、溶接部における検出すべききずの方向に応じて異なり、一様渦電流プローブの差動特性により、溶接部雑音の小さな探傷結果が得られることとなる。また、一様渦電流プローブは、差動上置コイルやクロスポイントプローブに比べて、リフトオフが大きくなってもきず信号振幅の減衰が小さく、きず深さに対するきず信号振幅の比例性が良い^{4,5)}。このような特性を有する一様渦電流プローブを用いて防錆などの保護材の上から溶接部の渦流探傷試験を行った場合、溶接部雑音が小さく、リフトオフが大きくてもきず信号振幅の減衰の小さな探傷結果が得られること、きず深さの変化に対して比例性良くきず信号振幅が変化することが期待できる。

開発した一様渦電流プローブと差動上置プローブ及び、クロスポイントプローブとを対比しながら溶接部の渦流探傷試験を行った。実験の結果、従来困難と考えられていた溶接部の渦流探傷試験を、一様渦電流プローブを用いれば、溶接部雑音が小さく、溶接部におけるきずの検出の可能性を確認した。また、一様渦電流プローブは、差動上置プローブやクロスポイントプローブと同等以上のSN比で溶接部におけるきずを検出できることを確認した。さらに、一様渦電流プローブは、他のプローブに比べリフトオフが大きくなってもきず信号振幅の減衰が小さいこと及び、きず信号振幅がきず深さに対して比例性が良いという利点があることを確認した⁶⁾。

2. 溶接部探傷のための一様渦電流プローブ

一様渦電流プローブは、矩形に巻かれたタンジェンシャルの励磁コイルによって図1に示すように試験体に一様な渦電流を誘導する。図1(a)に示すように、一様な渦電流に対して平行なきずについては、渦電流の変化が小さいので検出が困難である。きずを感度高く検出するためには、図1(b)に示すように、きずに対して一様な渦電流を直交方向に誘導する。したがって、一様渦電流プローブによって溶接部の探傷を行う場合には、検出すべききずの方向に応じて一様な渦電流を誘導する方向を変えなければならない。

開発した一様渦電流プローブは、矩形に巻かれた縦置き励磁コイルとその内部に配置され、矩形に巻かれた縦置きの2つの検出コイルから構成される。試験体に誘導される一様な渦電流中に置かれた2つの検出コイルを差動接続すれば、2つの検出コイルの起電力は互いに打ち消し合い起電力は発生しない。また、リフトオフが変化しても2つの検出コイルのリフトオフが同じである限り、リフトオフの変化による雑音は発生しない。

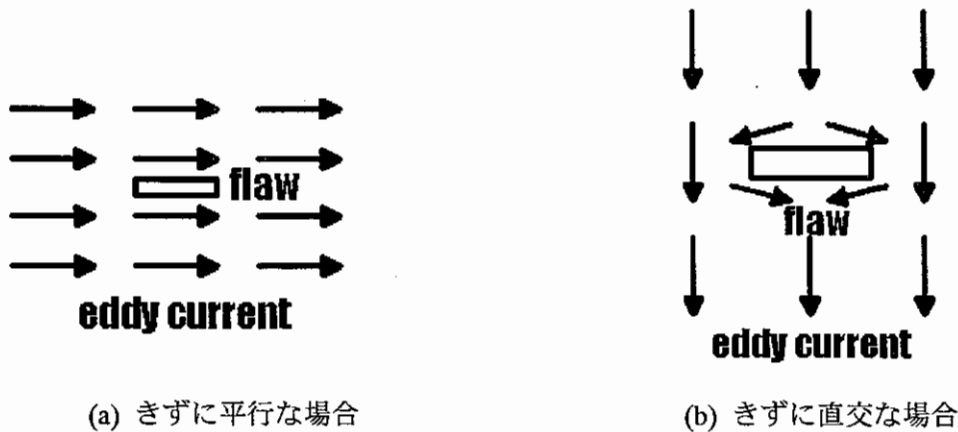
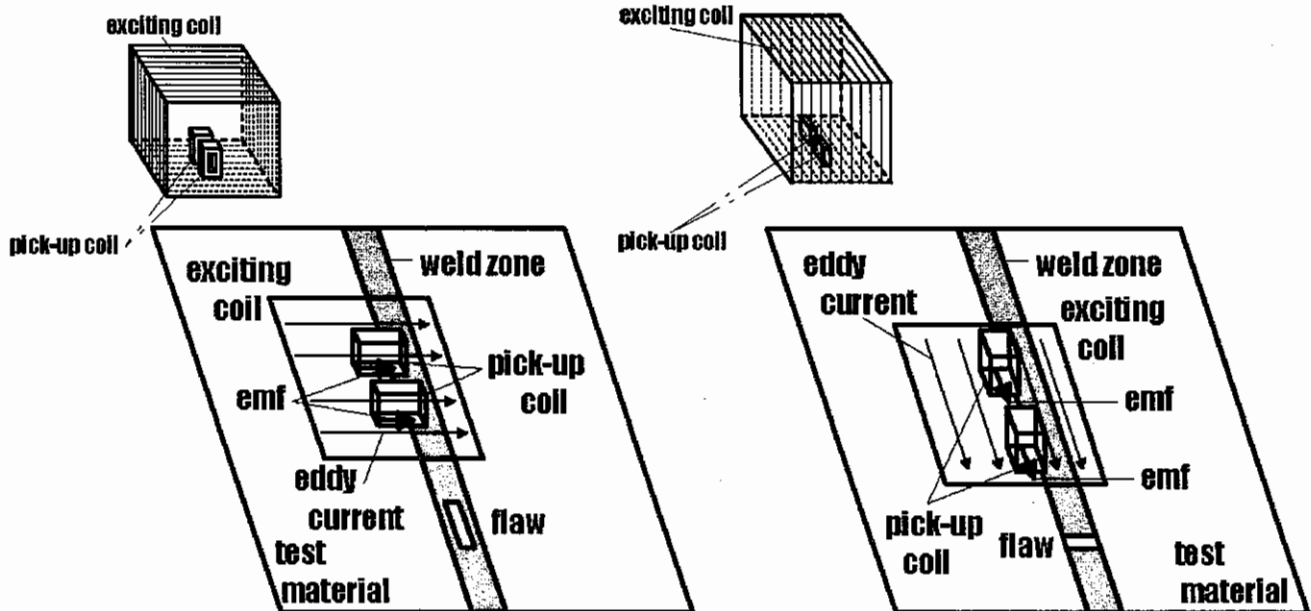


図1 試験体に誘導される一様な渦電流

溶接線に対して平行なきず（これを縦きずとする）の検出を考える。縦きずを感度高く検出するためには、図2(a)に示すようにきずに対して直交方向に一様な渦電流を誘導し、2つの検出コイルを溶接線に対して直交方向に並べれば、差動検出のため溶接部による雑音は発生しない。プローブを溶接線に平行方向に走査すると、溶接部に縦きずがある場合には、一方の検出コイルがきずを走査するとききず信号が発生し、1回の走査で差動信号の8字パターンが得られる。一方、溶接線に対して直交なきず（これを横きずとする）の検出の場合には、感度高く検出するためには、図2(b)に示すようにきずに対して平行方向に一様な渦電流を誘導し、2つの検出コイルを溶接線に対して平行方向に1列に並べれば、差動検出のため溶接部雑音は発生しない。プローブを溶接線に平行方向に走査すると、溶接部に横きずがある場合には、一方の検出コイルがきずを走査するとき信号が発生し、走査することにより差動信号の8字パターンが得られる。縦きずと横きずの両方を検出する場合には、図2(a)と図2(b)の一様渦電流プローブを2つ組み合わせて走査探傷を行えばよい。



(a) 縦きずを検出する場合

(b) 横きずを検出する場合

図2 一様渦電流プローブによる溶接部の渦流探傷

3. 実験方法

試験体には、幅5mmのTIG突合せ2層盛り溶接をした $170 \times 120 \times 1.9 \text{mm}^3$ のステンレス板SUS304を用いた。溶接部は、約1mm程度の余盛りがある。溶接線上に長さ5mm、幅0.2mm、深さ75%、90%のスリットを溶接線に対して平行方向と直交方向に放電加工した。また、試験体の母材部には、長さ5mm、幅0.2mm、板厚に対して深さ100%、90%、75%、50%のスリットも放電加工した。

一様渦電流プローブの励磁コイルの寸法は、幅30mm、長さ40mm、高さ30mmであり、検出コイル

の寸法は、幅 1mm、長さ 4mm、高さ 7mm である。平行に並べられた 2 つの検出コイルの間隔は、2mm である。溶接部探傷の比較のために用いたクロスポイントプローブの励磁コイルと検出コイルの寸法は、幅 2mm、長さ 15mm、高さ 15mm である。クロスポイントプローブを溶接線に対して 45 度傾けて走査探傷した。また、差動上置プローブには、図 2 に示した一様渦電流プローブの縦置きを検出コイルを差動接続して用いた。差動上置プローブでは、縦きずに対しては 2 つのコイルを溶接線に対して直交に並べ、横きずに対しては 2 つのコイルを溶接線に対して平行に 1 列に並べて走査探傷した。試験周波数を 70kHz として、プローブを試験体表面上を走査して溶接部の渦流探傷試験を行った。

4. 実験結果

図 3 は、1 例として溶接部のきず深さ 90% の縦きずについてリフトオフ 0mm として 2 次元に走査して得られた探傷信号の 3 次元表示を示す。ここでは、複素信号平面上での探傷信号を確認した上で、例として信号振幅の振れが大きかった虚数成分を示す。図より、差動上置プローブやクロスポイントプローブでは、きず信号は得られるものの溶接部雑音が発生していることがわかる。これに対して、一様渦電流プローブでは、溶接部雑音が小さく、きず信号が明確に現れている。

プローブを溶接線に対して平行方向にきずの上を走査して得られるきず信号と、プローブをきずのない位置で溶接線に対して直交方向に走査して得られる溶接部雑音との比 (SN 比) を求めた。差動上置プローブでは 10.3 であり、クロスポイントプローブでは 5.0 であり、一様渦電流プローブでは 12.2 である。なお、従来の円形上置コイルの場合では、縦きずと横きずとも SN 比は 0.4 であった。これらのことから、従来の円形上置コイルでは溶接部雑音が大きく溶接部のきず検出が困難であるが、一様渦電流プローブは、差動上置プローブやクロスポイントプローブと同等以上に SN 比高く溶接部におけるきずを検出することができた。なお、横きずおよび深さ 75% のきずについても同様な実験結果が得られた。

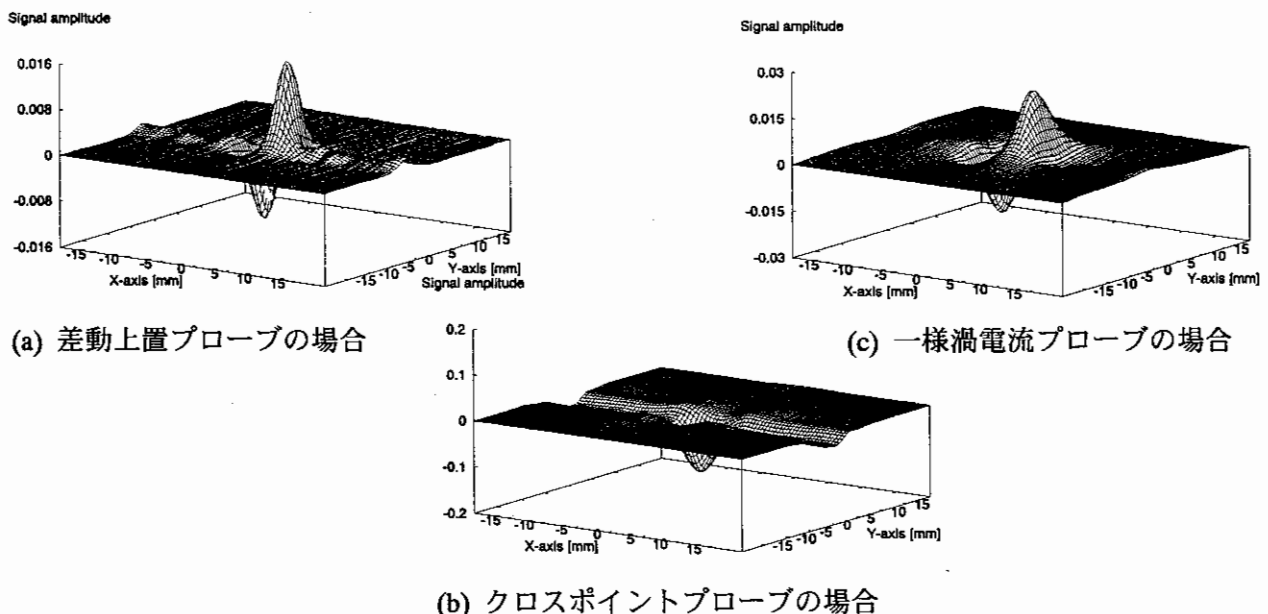


図 3 溶接部上の縦きずを走査したときの探傷信号の 3 次元表示

保護材の上から渦流探傷試験を行うことを想定して、リフトオフを種々変えて溶接部の探傷試験を行った。実験では、リフトオフを 0~3mm まで変えて溶接部の探傷試験を行った。図 4 は、溶接部のきず深さ 90% の縦きずについて、リフトオフに対するきず信号振幅の変化を示す。図では、リフトオフ 0mm のきず信号で正規化表示した。一様渦電流プローブは、差動上置プローブやクロスポイントプローブに比べて、リフトオフが大きくなってもきず信号振幅の減衰が小さいことがわかる。横きずについても、きず信号振幅の減衰が小さいことを確認している。このことから、保護材の上から溶接部の渦流探傷試験を行うとき、保護材が厚い場合でも、一様渦電流プローブは、他のプローブに比べてきず信号振幅が減衰しないので、より精度よく溶接部の探傷が行える。

また、きず深さが変化した場合の探傷信号の変化について検討を行った。図 5 は、リフトオフ 0mm における、きず深さに対するきず信号振幅の変化を示す。図では、きず深さ 100% の信号で正規化表示した。一様渦電流プローブは、他のプローブに比べ、きず深さに対するきず信号振幅の比例性が良いこ

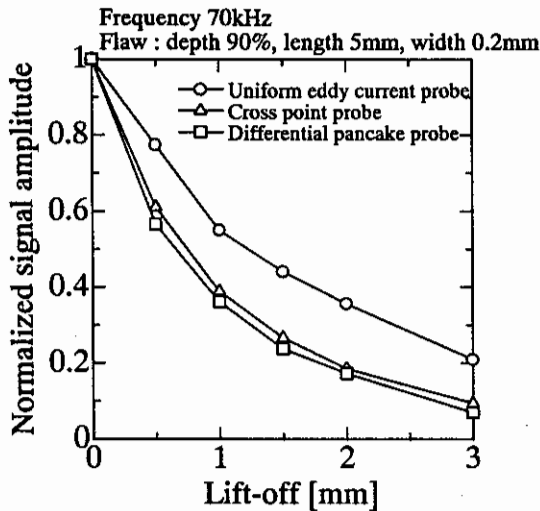


図4 リフトオフに対するきず信号振幅の変化

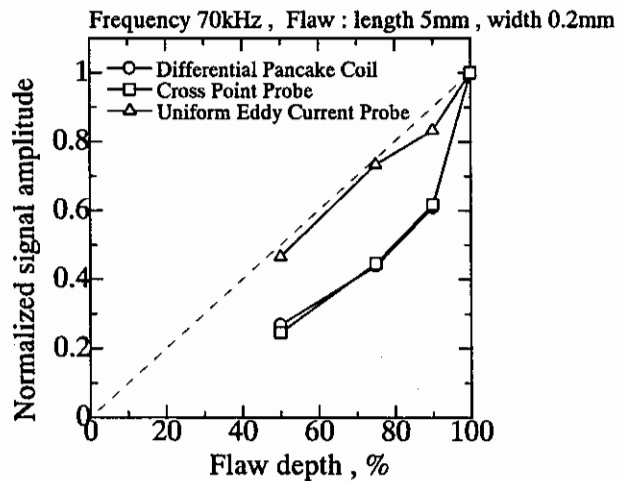


図5 きず深さに対するきず信号振幅の変化

とがわかる。このことから、一様渦電流プローブは、他のプローブに比べきず深さの評価をより精度良く行える。

5. おわりに

ヘルスマニタリングのための非破壊検査技術の確立の一環として、溶接部の渦流探傷試験を、一様渦電流プローブと差動上置プローブ及びクロスポイントプローブとを対比しながら試み、その結果以下の知見を得た。

- (1) 従来の上置コイルでは探傷が困難と考えられていた溶接部の渦流探傷試験に、溶接部における検出すべききずの方向に応じた適切な構造の一様渦電流プローブや差動上置プローブ、クロスポイントプローブを用いれば、溶接部雑音が小さく、渦流探傷試験によって溶接部の検査が行える可能性があることを確認した。
- (2) 一様渦電流プローブは、差動上置プローブやクロスポイントプローブと同等以上のSN比で溶接部におけるきずを検出できることを確認した。
- (3) 一様渦電流プローブは、差動上置プローブやクロスポイントプローブに比べ、リフトオフが大きくてもきず信号振幅の減衰が小さいことを確認した。このことより、防錆などの保護材の上から渦流探傷試験を行った場合、一様渦電流プローブでは、きず信号振幅が減衰しないので、より精度よく溶接部の探傷が行える。
- (4) 一様渦電流プローブは、差動上置プローブやクロスポイントプローブに比べ、きず深さに対するきず信号振幅の比例性が良いことを確認した。

今回は、試験体としてステンレス板について検討を行った。今後、種々の材料についても検討する予定である。

参考文献

- 1) 溶接構造物の検査、(社)日本溶接協会、pp116-161、(1994)
- 2) Gary L. Burkhardt, Jay L. Fisher, Jeffrey S. Stolte, Steven R. Kramer, and Kevin L. Cobble : NDE of Aging Aircraft Structure using Orthogonal-Axis Eddy Current Probes, Review progress of QNDE, 16, pp1021-1027 (1997)
- 3) D.Bouden, I.Lemahieu : Use of Blind Deconvolution to Restore Eddy Current Data from Non-destructive Testing of Defects in Welds, Review progress of QNDE, 18, pp743-750 (1998)
- 4) 星川洋、小山潔：標準浸透深さによって正規化表示した平板状導体内の渦電流分布、非破壊検査、48 (1)、pp21-28 (1999)
- 5) 小山潔、星川洋：渦流探傷試験における一様渦電流プローブの基礎的特性に関する研究、非破壊検査、49 (11)、pp775-781 (2000)
- 6) 小山潔、星川洋：渦流探傷による溶接部探傷のための一様渦電流プローブについて、JSNDI 平成 12 年度春季大会講演概要集、pp99-100 (2000)