

フィールド検査に適した Mobile EDDy の紹介と POD 解析

戸部 訓子^{*1} 高橋 秀治^{*2} 藤原 貢^{*3}
Tobe Satoko *Takahashi Hideharu* *Fujiwara Mitsugu*
 吉川 和夫^{*4} 田北 雅彦^{*5} 細谷 昌厚^{*6}
Yoshikawa Kazuo *Takita Masahiro* *Hosoya Masaatsu*

鉄鋼構造物の表面に発生するき裂は重大事故の原因になる可能性があるため、保守検査として、従来から一般的に磁粉探傷試験または浸透探傷試験が適用されている。これらの手法は、検査時に腐食防止の目的で施工されている塗装を剥離する必要があり、コストの低減・作業の省力化が課題となっている。

IIC では、検査のコストダウンに着目し、塗膜を剥離せず表面きずの検査が可能な非破壊検査技術の研究開発に取り組んできた。その結果、現場でも容易に使用することができる携帯型渦流探傷装置「Mobile EDDy」を開発した。本稿では、Mobile EDDy の紹介および本装置を使用した溶接部のきず検出性能を POD 解析手法を用いて定量的に明らかにしたので、その結果を報告する。

キーワード：渦流探傷装置、一様渦電流プローブ、POD 解析、POD 曲線、定量評価

1. 緒言

現在、我が国において社会インフラの安全・安心の確保が非常に大きな社会問題となっている。非破壊試験は安全・安心を確保するための重要な技術であり、その高い信頼性だけでなく、試験技術者の負担を軽減し、試験コストや作業の手間を少なくすることも重要なポイントとなっている。

鉄鋼構造物に発生する表面きずの検査には、一般的に磁粉探傷試験または浸透探傷試験を実施されている。しかしながら、通常の鉄鋼構造物は酸

化や腐食等を防止する目的で、表面にペンキなどの塗装が施工されているため、従来の検査手法では、試験前に塗膜を剥離する必要があり、塗膜剥離にかかる作業コストおよび検査時間の低減が課題となっている。また、磁粉探傷試験や浸透探傷試験は他の非破壊試験手法に比べて、試験技術者の経験や熟練に頼るところが大きく、試験技術者の負担も他の手法に比べて大きいという課題もある。

そこで、塗膜を剥離せずに高感度な表面検査が可能であり、フィールドでも容易に使用するこ

*1：検査事業部 技術部 NDE グループ 非破壊検査技術者 レベル 2 (UT, PT, ET)

*2：検査事業部 技術部 NDE グループ 非破壊検査技術者 レベル 2 (MT, UT, PT)

*3：検査事業部 技術部 部長 非破壊検査技術者 レベル 3 (UT, PT, ET)

*4：計測事業部 材料試験部 課長

*5：検査事業部 横浜検査部 課長 非破壊検査技術者 レベル 3 (RT, UT, MT, PT) CIW 検査管理技術者 放射線取扱主任者 第 1 種

*6：技師長

とができる小型・軽量の渦流探傷装置「Mobile EDDy」を開発した。また本装置を用いて溶接熱影響部（HAZ 部）のクラックに対する基本検出性能を、POD（Probability Of Detection）解析によって定量的に明らかにしたので、以下にその概要を報告する⁽¹⁾。

2. 携帯型渦流探傷装置「Mobile EDDy」の開発

渦流探傷試験での渦電流密度は、探傷表面からプローブが離れるとその密度は減衰する。

そのため、塗膜厚さが厚くなるにしたがって、鉄鋼構造物表面からプローブが離れることになり、クラックの検出性が低下する。本課題に対して、励磁エネルギーを高くすることができる一様渦流方式を用いることとした。一様渦流方式は、渦電流を発生させる励磁コイルを試験体表面に平行に設置することにより試験体表面に平行で一様な電流を誘導する方法である。本方式を用いた一様渦電流プローブにより励磁エネルギーを高くすることで、溶接部のきず検出性を高くすることができる⁽²⁾⁽³⁾。当社では、橋梁などの一般産業用鉄鋼構造物の塗膜上からの検査を対象として、一様渦電流プローブを用いた小型、軽量で操作も容易な渦流探傷装置「Mobile EDDy⁽⁴⁾」（**図 1** 参照）を開発した。以下に Mobile EDDy の基本仕様を示す。

- (a) 電源：バッテリーおよび AC100V（バッテリー駆動時間：連続 4 時間以上）
- (b) 装置寸法：W270×H190×D30
- (c) 装置重量：1.5kg（本体：1.0kg、バッテリー：0.5kg）
- (d) 試験周波数設定：1kHz～1MHz
- (e) 感度設定：10～60dB（0.1dB ピッチ）
- (f) 位相設定：0～359°（0.1° ピッチ）
- (g) データ保存：装置内部および USB メモリーへの保存

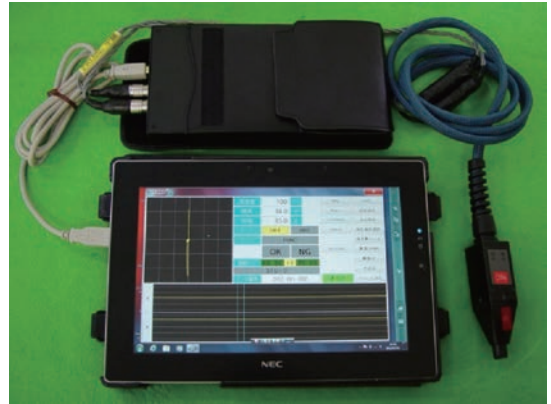


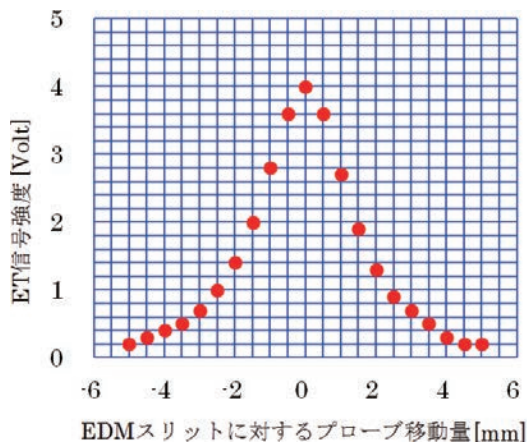
図 1 Mobile EDDy の外観写真および検出画面

また、機械加工した SM490A 平板上に放電加工（EDM）で加工した 5.0L × 2.5D × 0.3W のスリットを用いて本装置のプローブ特性を調査した。

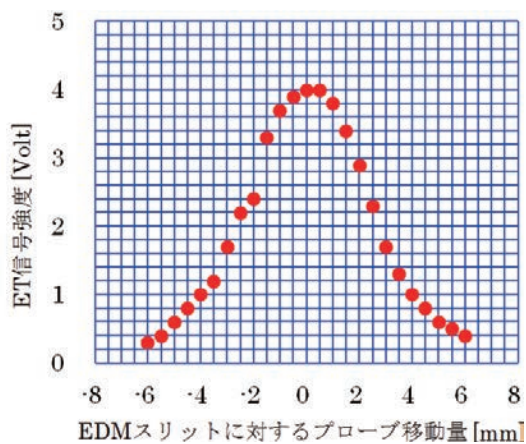
渦流探傷試験の試験条件は以下の通りである。

- (a) プローブ：一様渦電流プローブ
- (b) フィルター：LPF 100Hz
- (c) 試験周波数：100kHz
- (d) 走査速度：22m/s
- (e) 探傷感度：EDM スリットで設定

図 2 (a) はスリット長手方向にプローブを走査した場合の信号強度（Peak-to-Peak の電圧）を示す。また、**図 2 (b)** はスリット長手方向に 90° 方向にプローブを走査した場合の信号強度を示す。いずれもほぼ左右対称に変化しており、プローブは適切に製作されていると言える。



(a) EDM スリットに平行に走査 (0.5mm ピッチで移動)



(b) EDM スリットに直交に走査 (0.5mm ピッチで移動)

図2 プローブ移動に伴う ET 信号強度の変化

3. POD 解析

POD とは Probability Of Detection の略であるが、本報告では欠陥検出確率と呼ぶことにする。検査装置の基本性能として安定して検出できる最少の欠陥寸法を認識することは、高い信頼性の試験を行うための第一歩である。本報告では MIL-HDBK-1823 の POD 解析手順に従い、POD Transfer Function 手法⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いて Mobile EDDy の装置の欠陥検出能力を定量的に把握することとした。

MIL-HDBK-1823 は POD 解析手順を記述した米国防総省発行のガイドラインである。1999 年に初めて発行され、その後、2009 年に大幅に改訂されており、解析ソフトウェアは公開されている。解析手順には a-hat vs. a 法と Hit/Miss 法がある。a-hat vs. a 法では解析に必要なデータ数は 40 個以上、Hit/Miss 法では 60 個以上が推奨されている。a-hat は特定の試験装置で得られる計測データに相当する。また、Hit/Miss では特定の欠陥が検出できた (Hit) か、できなかった (Miss) を区別するだけの試験の場合に適用する。本報告の渦流探傷試験結果は信号電圧として取得できるので a-hat vs. a 法を適用することにした。本方法では計

測される信号電圧の値が a-hat であり、a-hat と実際の欠陥寸法 a の対数値とが線形の関係にある。また、特定の欠陥寸法における計測データのばらつきが正規分布に従っていると仮定している。閾値を設定後、POD 曲線の式は最尤法によってパラメータを求めている。POD 曲線から求めることができる欠陥限界値 $a_{90/95}$ は 95% 信頼水準で 90% の検出確率をもつ最小欠陥寸法になる。この値は指定した試験システムを用い、設定された試験条件で特定の試験技術者によって行われた試験の試験能力を定量的に示している。非破壊試験において検査能力を定量的に把握しておくことは検査の信頼性確保にとって極めて重要なポイントである。

POD Transfer Function (POD 変換関数) を用いた手順は、2005 年 2 月の米国 Model-Assisted POD Working Group において Pratt & Whitney の Kevin D. Smith 氏によって航空エンジン部品に対して提案された方法で、ラボ試験で自然に近い欠陥 (疑似欠陥) と EDM 人工欠陥との相関をとり、EDM 人工欠陥から自然に近い欠陥に変換することにより、間接的に複雑形状の実体部品における自然に近い欠陥の POD データを得る方法である。

4. 試験片の製作

本研究では、SM490A 材突合せ溶接部の HAZ 部に溶接方向に沿った疲労クラック（疑似欠陥）と放電加工による EDM 人工欠陥を用いて長さ方向に平行に探傷する場合の POD 曲線を取得し、欠陥検出限界値 $a_{0.95}$ を明確にすることとした。

疲労クラックは、HAZ 部に半円形状の EDM スリットを加工し、三点曲げ疲労試験にて EDM 人工欠陥の底からき裂が発生するようにした。図 3 には疲労試験を中断し、加熱暴露し、さらに疲労試験を行い、温度を下げて加熱暴露を計 5 回繰り返した疲労破面を示す。

同様に疲労き裂を発生させた試験片のき裂部のマイクロ写真を図 4 (a) に、き裂部の拡大写真を図

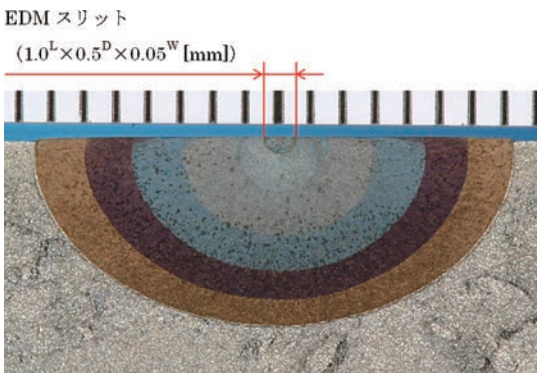
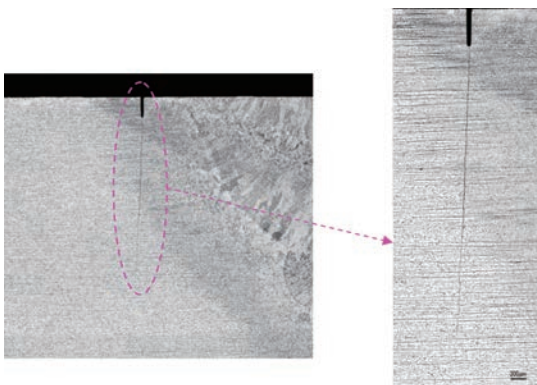


図 3 試験片の疲労破面ステップカラーリング模様



(a) ミクロ写真

(b) 拡大写真

図 4 疲労き裂の断面マイクロ写真

4 (b) に示す。き裂は EDM スリット底から深さ方向にほぼ直線的に進展していることがわかる。

図 3 の破面を観察し、疲労クラックの長さおよび深さを計測した結果を図 5 に示す。本結果より疲労クラックの深さと長さには相関性が確認でき、疲労クラックの L/D (クラック表面長さとの比) は、ほぼ 3.0 であった。そのため、EDM 人工欠陥の深さも $L/D=3$ となるように半楕円形状に加工した。

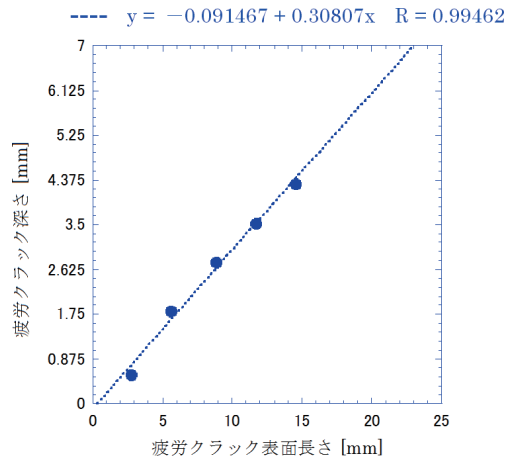


図 5 疲労破面から求めたクラック深さと長さの関係

5. 欠陥検出能力の定量的把握

まず、最初に POD 変換関数を求める試験を行った。EDM 人工欠陥および疲労クラックについての渦流探傷試験結果を図 6 に示す。

渦流信号強度は EDM 人工欠陥に比べて、疲労クラックのほうが全体として低下していることがわかる。EDM スリットおよび疲労クラックそれぞれに対する ECI 信号強度との関係式から、以下の POD 変換関数の (1) 式が得られる。 $D_{\text{Fatigue (Actual)}}$ は疲労クラックの計算された深さを、 $D_{\text{EDM (Actual)}}$ は EDM 人工欠陥深さの実測値を示す。この式が EDM スリット深さから疲労き裂深さへ変換する際の変換式となる。

$$D_{\text{Fatigue(Actual)}} = 1.52 \times (D_{\text{EDM(Actual)}})^{0.85} \quad (1)$$

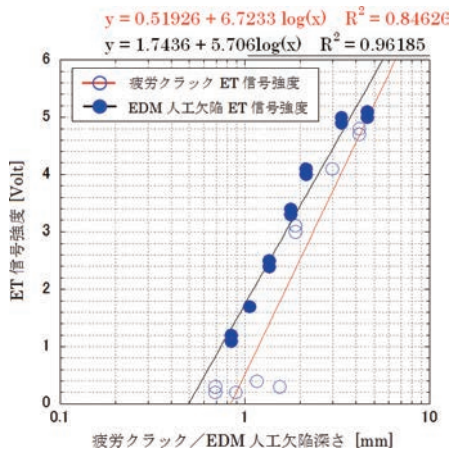


図6 疲労クラックおよびEDM人工欠陥からのET信号強度

次にPOD解析を行うためにL/D比が3の半楕円状EDM人工欠陥46個について渦流探傷試験を行い、データを取得し、POD解析を実施した。

EDM人工欠陥の \hat{a} -hat vs. a およびPOD曲線を図7、図9に、疲労クラックの \hat{a} -hat vs. a およびPOD曲線を図8、図10に示す。この曲線からEDM人工欠陥の欠陥検出限界値 $a_{90/95}$ は、深さは0.778mmであり、L/D = 3の半楕円形状から長さは2.33mmと算出することができる。同様に疲労クラックでの欠陥検出限界値 $a_{90/95}$ は、深さは1.23mmとなり、長さは3.69mmと算出することができ、疲労クラックとEDM人工欠陥の場合では、

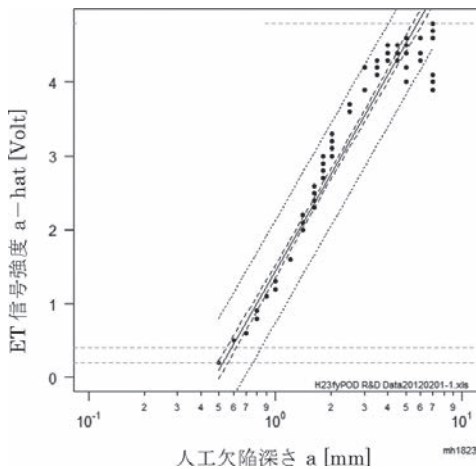


図7 渦流探傷試験の \hat{a} -hat vs. a (EDM人工欠陥深さ)

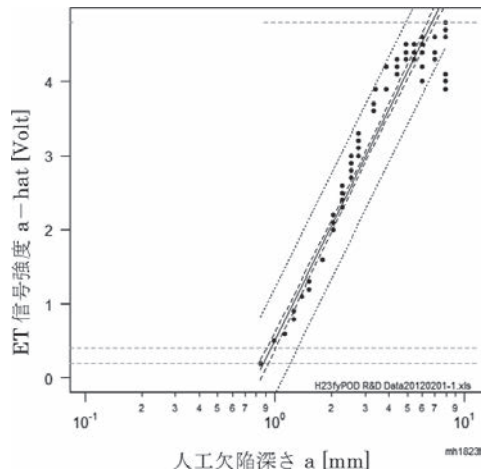


図8 渦流探傷試験の \hat{a} -hat vs. a (疲労クラック相当深さ)

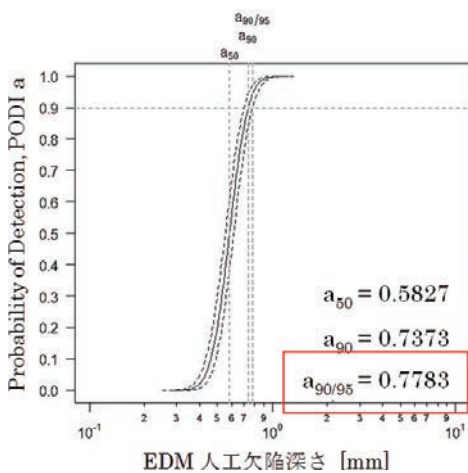


図9 EDM人工欠陥のPOD曲線

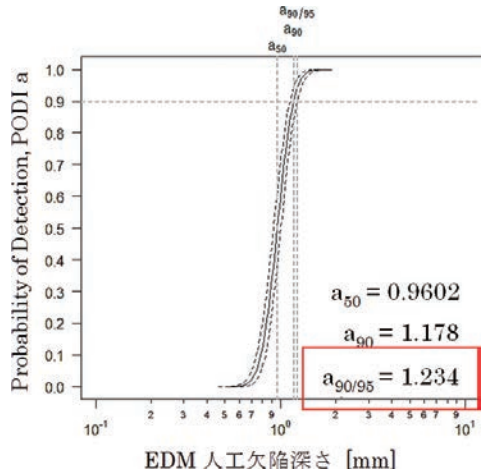


図10 疲労クラックのPOD曲線

約 1.6 倍の違いがある。この値は (1) 式の POD 変換関数から求められる値 1.52 にほぼ等しい結果となり、本手法の妥当性を確認することができた。

6. 結言

(1) 塗膜を剥離することなくバッテリー駆動による、き裂検査が可能な携帯型渦流探傷装置「Mobile EDDy」を開発した。

(2) 本装置での疲労クラックの欠陥検出限界値 $a_{90,95}$ は、深さ 1.23mm、長さは 3.69mm であることがわかった。

7. 今後の課題

フィールドにおける検査においては、探傷部位、表面粗度、溶接余盛形状、塗装等のさまざまな条件が異なることから、今後、フィールドにおいて実環境におけるデータを蓄積し、実検査における能力評価の定量化を目指す予定である。

参考文献

- (1) 戸部他：新携帯型渦流探傷装置の開発と検出性能の定量評価、日本非破壊検査協会、第 16 回表面探傷シンポジウム講演論文集、pp. 1-4、(2013-3)
- (2) 小山他：一様渦電流プローブを用いた溶接部の渦電流探傷試験の研究、非破壊検査、50 (5)、pp. 321-327、(2001)
- (3) 小山他：一度の走査で横きずと縦きずの検出を志向した一様渦電流プローブによる溶接部表面探傷に関する研究、非破壊検査、60 (5)、pp. 275-282、(2011)
- (4) 商標登録出願中：商願 2012-50368「Mobile EDDy」
- (5) MIL-HDBK-1823Rev.A : Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, DOD(USA), (2009)
- (6) http://www.cnde.iastate.edu-MAPOD-2005 February-POD Transfer Approach_Smith.pdf



検査事業部 技術部
NDE グループ 非破壊検査技術者 レベル 2 (UT、PT、ET)
戸部 訓子
TEL. 045-791-3523
FAX. 045-791-3547

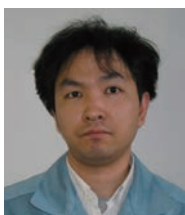


検査事業部 技術部
NDE グループ 非破壊検査技術者 レベル 2 (MT、UT、PT)
高橋 秀治
TEL. 045-791-3523
FAX. 045-791-3547

検査事業部 技術部 部長
非破壊検査技術者 レベル 3 (UT、PT、ET)
藤原 貢
TEL. 045-791-3523
FAX. 045-791-3547



計測事業部
材料試験部
課長
吉川 和夫
TEL. 045-791-3519
FAX. 045-791-3542



検査事業部 横浜検査部 課長
非破壊検査技術者 レベル 3 (RT、UT、MT、PT) CIW 検査管理技術者 放射線取扱主任者 第 1 種
田北 雅彦
TEL. 045-759-2280
FAX. 045-759-2146

技師長
細谷 昌厚
TEL. 045-791-3550
FAX. 045-791-3555