

# D 直流電位差法をもちいた接合体の余寿命予測におけるCAEと機械学習の活用事例

機械や構造物に発生する疲労き裂検出の一手法として、直流電位差法がある。き裂発生による抵抗値の変化を4端子法で測定する手軽さから、直流電位差法は多くの適用事例<sup>1)</sup>が報告されている。しかしながら、三次元的に発生する疲労き裂形状に対しては、電位変化と亀裂形状との相関が複雑であることから、評価されたものは少ない。

一方、近年では試験データをもちいた機械学習による予測が注目されており、生産設備の保全や出荷検査への適用が進められている。しかし、き裂形状は多種多様であるため、大量の試験結果を準備する必要があり、また限られたデータ数による回帰を行うと十分な精度が得られないことが課題として明らかになりつつある。

そこで本稿では、直流電位差法を模擬した静電場解析のパラメータスタディを行って、き裂形状-電位差データベースを作成し、機械学習させることで非線形のき裂形状予測モデルの構築を試みた。疲労試験中の電位測定結果を、構築したき裂形状予測モデルに与えることで予測き裂形状を求め、実際のき裂形状と比較した事例<sup>2)</sup>を紹介する。



技術本部 計算科学センター 野口 暁  
技術本部 機械プロセスソリューション事業部 構造技術部 草野 岳彦

## D-1 直流電位差法によるき裂検出

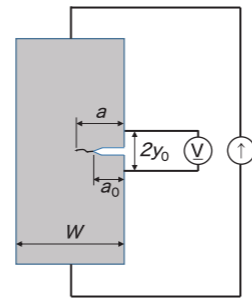
直流電位差法は第1図に示すように、き裂検出対象となる材料に一定間隔で4本の端子を接触させ、外側の端子間に一定電流を供給し、内側の端子間の電位差を測定する方法である。電位差は端子間にあるき裂の大きさなどに依存して変化する。

第1図の試験体形状において、板厚方向に貫通して進展するき裂を挟んだプローブ2点間の電位変化は下式に示すJohnsonの式<sup>3)</sup>をもちいることによって計算できることが知られている。

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\cosh^{-1} \left[ \frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right) / \cosh\left(\frac{\pi a}{2W}\right)}{\cosh\left(\frac{\pi y_0}{2W}\right) / \cosh\left(\frac{\pi a_0}{2W}\right)} \right]}{\cosh^{-1} \left[ \frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right) / \cosh\left(\frac{\pi a}{2W}\right)}{\cosh\left(\frac{\pi y_0}{2W}\right) / \cosh\left(\frac{\pi a_0}{2W}\right)} \right]}$$

ここで、Vはプローブ位置におけるき裂長さaにおけるときの電圧、V<sub>0</sub>、a<sub>0</sub>はその初期値、yはプローブ間隔の1/2、Wは試験体幅を表す。

第1図 直流電位差法のイメージ図



しかし、一般的な溶接構造物に対してプローブ2点間の電位差を求めようとする場合、有限要素法をもちいた静電場解析をもちいるのが一般的な手法となる。次章では、まず、平板疲労試験体を対象に有限要素法をもちいたときの電位差の精度を検討し、その上で、より一般的な構造物に近いT字溶接構造物を対象を広げて、機械学習をもちいたT字溶接構造物のき裂形状-電位差データベースを作成した事例を示す。

## D-2 有限要素法をもちいたき裂形状 — 電位差データベース作成

### 2.1 平板疲労試験体をもちいた2点間プローブ電位の精度検証

はじめに、第2図に示す片側にノッチが入った疲労試験用試験体に機械加工で模擬き裂を入れた場合について、有限要素法をもちいた静電場解析と測定における2点間プローブ電位の比較検

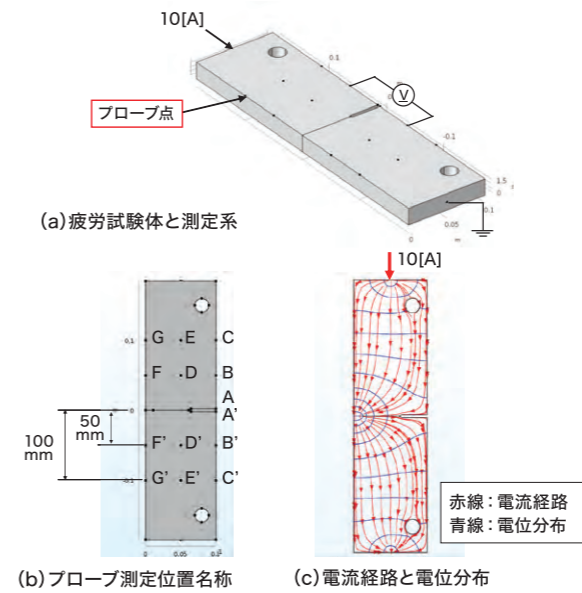
証を行った。解析にはCOMSOL Multiphysics™ ver.5.6を使用した。素材はS20Cであり電気伝導率は $5.92 \times 10^6$  [S/m]とした。入力電流は10[A]とした。試験体内部の電流経路と電位分布を第2図(c)に、ノッチ長さ(35[mm])とき裂長さの和を総き裂長さとして定義し、計測結果と解析結果を比較したものを第3図に示す。プローブ位置名称は第2図(b)に示す通りとする。プローブ各位置

における測定値は解析結果と良く一致している。この結果から、有限要素法をもちいたプローブ2点間の電位差変化からき裂寸法の評価が可能であることがわかる。ただし第2図(c)に示すように、直流では大半の電流が試験体の母材部に流れてしまい、欠陥による偏流効果は電位にごくわずしか現れていない。

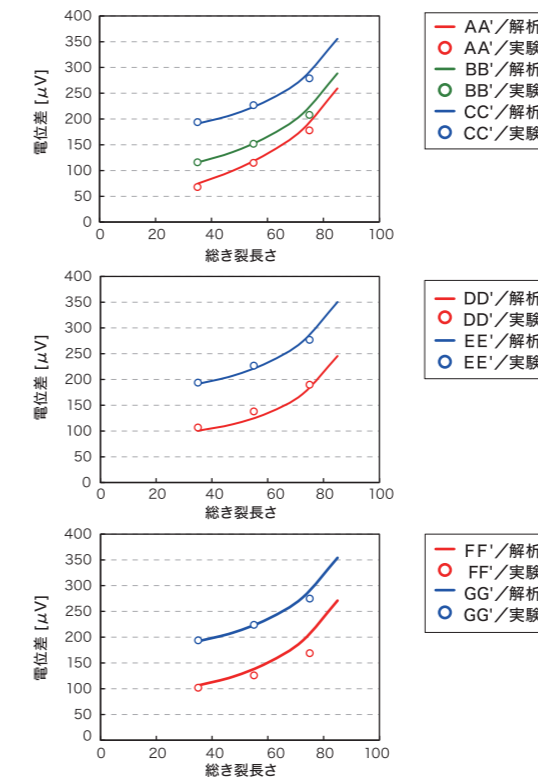
### 2.2 T字溶接構造物のき裂形状 — 電位差データベース作成

次に、より一般構造物に近いT字溶接構造物に対して直流電位差法を適用した例を取り上げる。

第2図 疲労試験体の静電場解析モデルと電流経路



第3図 解析と測定によるプローブ間電位差の比較

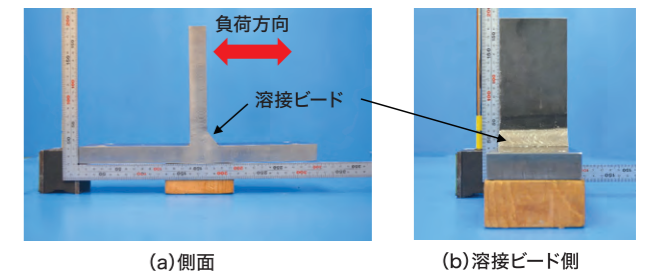


対象とする試験体は第4図に示すT字溶接試験体とした。材料はSS400であり、溶接は片側のみのみ行った。疲労試験時に負荷をかけるのは縦板の溶接部側で、溶接止端側にき裂が生じることを想定している。

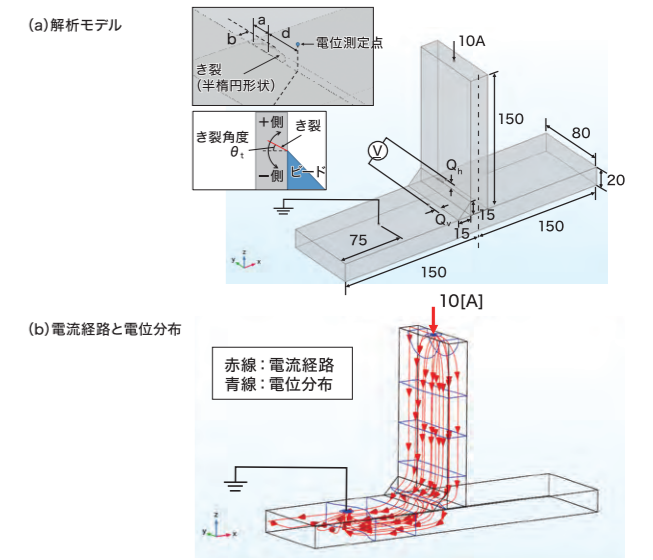
T字溶接構造物のような一般溶接構造物では発生する疲労き裂は2.1節の疲労試験体のように二次元的なき裂にはならず、三次元的なき裂となる。そのため、直流電位差法と予測式をもちいて三次元なき裂の形状や寸法を知ることは難しい。また、実際のT字溶接構造物を多数作成しさまざまな条件でのき裂形状を取得し、機械学習をもちいたき裂形状推定は現実的でない。そこで、2.1節と同様に静電場解析をもちい、大量のき裂形状-電位差データベースを作成することで機械学習に必要なデータを準備した。

き裂形状-電位差データベースを作成するために、T字溶接試験体にき裂が存在する解析モデルを作成、三次元静電場解析を実施した。T字溶接試験体については、第5図(a)に示すような溶接部を三角断面、き裂は半楕円形状と仮定<sup>4)</sup>した。解析に使用したパラメータ値を第1表に示す。解析にはCOMSOL Multiphysics™ ver.5.6を使用した。この解析で得られたき裂形状-電位差のデータ数は3375である。第5図(b)に電流経路と電位分布を示す。2.1節で述べたように電流が試験体全体に流れてしまうため、欠陥による偏流効果は電位にごくわずしか現れない。そこで電位差については、き裂ありの電位差をき裂なしの電位差で割ることで無次元化した。

第4図 T字溶接試験体



第5図 き裂を模擬したT字溶接試験体の解析モデルと電流経路





## D-3 き裂形状予測のための機械学習モデル構築と精度検証

### 3.1 き裂形状予測のための機械学習モデリング

2.2節で作成したき裂形状 — 電位差データをもちいて、き裂形状予測モデルを機械学習の手法をもちいて構築する。

機械学習のモデルには、第6図に示すように「予測精度」と「中身のわかりやすさ」の基準において各モデルに長所と短所がある。本件では、実用的な予測精度とモデルのわかりやすさという2点から、ランダムフォレスト法をもちいることとした。

2.2節で作成したき裂形状—無次元化電位データを教師データ：テストデータを7:3に分割し、教師データにランダムフォレストを適用してき裂予測モデルを作成した。そのき裂予測モデルに対してテストデータをもちいた予測結果を第7図に示す。R<sup>2</sup>（決定係数）は0.982とプロットが対角線付近に多く存在し、十分予測精度のあるき裂予測モデルが得られたと考えられる。

### 3.2 T字溶接構造体の疲労試験と電位測定

前節で得た機械学習モデルの予測の妥当性を検討するために、第8図に示す疲労試験および電位測定を実施した。試験は当社尼崎事業所の試験機をもちいて実施した。縦板の接合部から100[mm]位置に最大荷重19.5[kN]で繰り返し荷重を与えた。電位測定点は試験体幅中央の溶接止端から3[mm]離れた位置とし、入力電流は10[A]とした。電位測定は、6万回ごとに試験機を止めて実施した。

第9図に繰り返し回数と測定電位から得られた無次元化電位の関係を示す。約39万回でき裂が発生し、その後繰り返し回数の増加とともに無次元化電位が上昇している。繰り返し回数60.1万回

でカラーチェックを実施し、狙い通りに縦板の溶接止端部にき裂が発生していることを確認した。繰り返し回数68.6万回後に試験体を破断させて観察したときの破断面写真を第10図に示す。破断面の半楕円状のピーチマークの寸法を測定し、き裂形状a、bを得た。破断面の角度は、Ch1側で約-7[°]、Ch5側で約-17[°]であった。

### 3.3 き裂予測モデルの精度検証

3.1節で作成したき裂予測モデルに3.2節の測定結果から得られた無次元化電位をもちいてき裂形状の逆解析を行い、実測のき裂形状と比較した結果を第11図に示す。

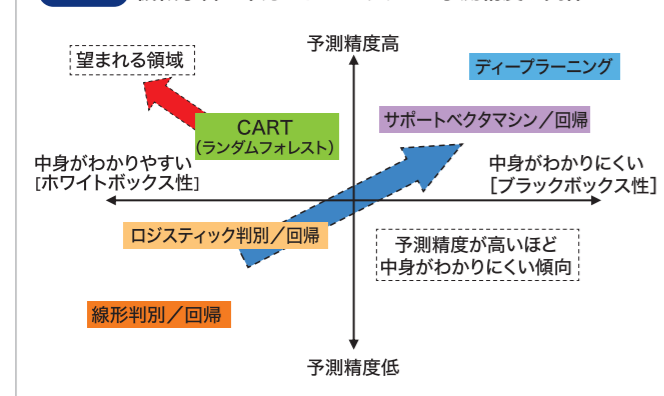
き裂形状の予測には、解析の電位測定位置と同じ試験体幅方向中央の電位を使用し、繰り返し回数0の時の電位を基準電位として測定電位を無次元化した。縦軸にはき裂に関する各パラメータを、横軸には疲労試験の繰り返し数を取った。実測のき裂寸法は図中の青色で、逆解析によるき裂予測形状は赤色で示す。き裂形状を比較すると、予測したき裂形状は、き裂の奥行きが実測より大きく推定している。一方で、表面き裂長さ、電位測定点からのずれおよびき裂角度については、ばらつきはあるもののおおよそ推定できている。

このように、静電場解析をもちいたデータ作成と機械学習を組み合わせることで、試験中の電位計測からき裂発生タイミングの検知やカラーチェック等のき裂長さの計測作業の短縮ができ、疲労き裂進展の様子をより詳細に把握することが可能になった。現段階では推定結果のばらつきが大きいので、モデル面、測定面ともに改良を進め、精度向上に努める。

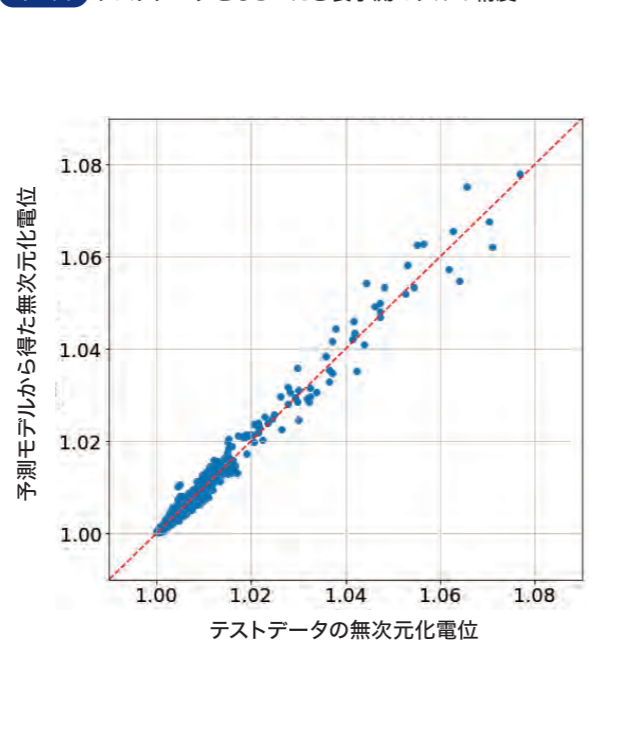
第1表 き裂および電位測定位置に関するパラメータ

パラメータ	値
表面き裂長さ a	2、4、6、8、10[mm]
き裂の奥行き b	2、4、6、8、10[mm]
電位測定点からのずれ d	0、2、4、6、8[mm]
き裂角度 $\theta_i$	0、+45、-45[°]
縦板の電位測定位置 $Q_v$	溶接止端から2、6、10[mm]
横板の電位測定位置 $Q_h$	溶接止端から2、6、10[mm]

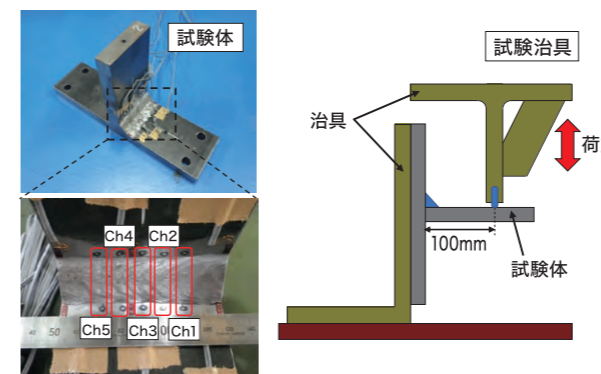
第6図 機械学習の中身のわかりやすさと予測精度の関係



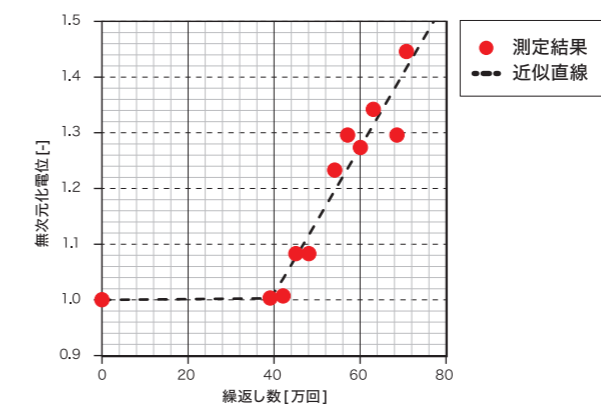
第7図 テストデータをもちいたき裂予測モデルの精度



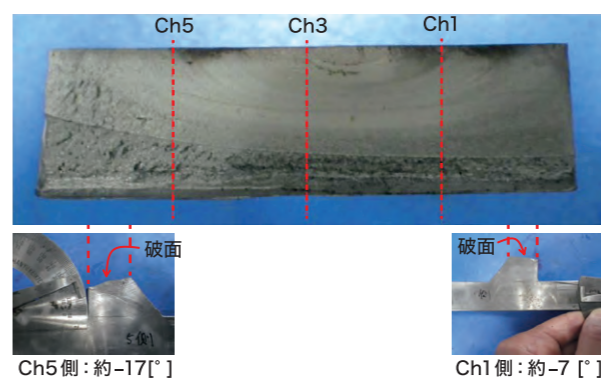
第8図 T字溶接試験体の疲労試験および電位測定



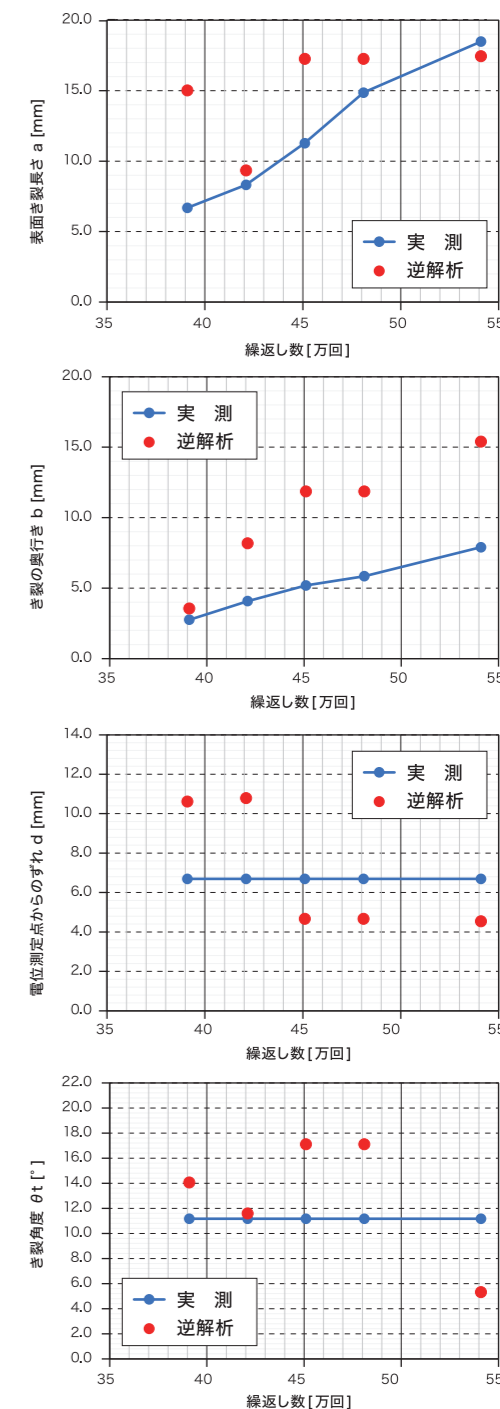
第9図 繰り返し回数と測定電位から得られた無次元化電位の関係



第10図 疲労試験後の試験体破面写真



第11図 き裂予測モデルの逆解析によるき裂形状と実測との比較



片側を隅肉溶接したT字溶接試験体を対象に、静電場解析と機械学習によるき裂形状予測モデルを作成し、疲労試験によるき裂形状と比較した事例を紹介した。電位を計ることによって、試験中では見ることのできないき裂形状を、非破壊でおおよそ知ることができた。今後同様な取り組みを行い、疲労試験のみならず、機械学習と試験を組み合わせた新たな試験評価技術を提供したいと考える。

参考文献 \*1) 多田直哉ほか：多点測定型直流電位差法による表面き裂の3次元的同定に関する実験的検討，日本機械学会論文集（A編），72巻，715号（2006），pp. 56-63.  
 \*2) 野口暁ほか：直流電位差法と機械学習を用いたき裂形状の予測，2020年度溶接学会秋季全国大会講演概要（2020），pp. 174-175.  
 \*3) Johnson, H. H., : Calibrating the Electric Potential Method for Studying Slow Crack Growth, Materials Research and Standards, Vol 5, No. 9, Sept. 1965, pp. 442-445.  
 \*4) 多田直哉ほか：直流電位差法による半円表面き裂形状・寸法測定のための電位解析，日本機械学会論文集（A編），56巻，522号（1990），pp. 69-74.