交流電位差法による表面き裂検出の
実験および有限要素法による検討*片山 靖彦^{*1}, 坂根 政男^{*2}, 大南 正瑛^{*2}Surface Crack Detection by A. C. Potential Drop Method;
Experiment and FEM Considerations

Yasuhiko KATAYAMA, Masao SAKANE and Masateru OHNAMI

This paper describes surface crack detection by the alternating current potential drop (ACPD) method. A. C. potentials were measured for SUS304 and SS400 cracked specimens from 50 Hz to 5 kHz. The variation of potential with crack depth using sinusoidal a. c. for SUS304 did not depend on the frequency, but it did for SS400. The potential ratio measured using sinusoidal a. c. precisely agreed with that using rectangular a. c. in which a. c. potentials at many frequencies could be obtained by one measurement utilizing fast Fourier transformation. The increase in potential with increasing crack depth in experiments agreed with that calculated by the finite element method taking account of the skin effect.

Key Words: Finite Element Method (FEM), Surface Crack, Nondestructive Inspection, Alternating Current Potential Drop (ACPD), Sinusoidal A. C., Rectangular A. C., Skin Effect, Electromagnetic Field

1. 緒 言

機械構造部材の破壊はき裂の発生・伝ばによるものが多い。例えば、高サイクル疲労破壊は主としてき裂の発生・伝ばに起因しており、低サイクル疲労や高温クリープ疲労の破壊もき裂によるものが多い。したがって、き裂発生および伝ばの挙動を高精度に計測する手法を確立することは材料の損傷評価や寿命延伸の点から重要である。今日、き裂の計測法として最もよく使用されている手法は、顕微鏡による表面観察であるが、この手法は信頼性が高いものの、人手と時間がかかるという欠点を有している。

き裂の発生・伝ばによる試料断面積の減少を、電気抵抗の変化としてとらえようとする手法に電位差法がある。電位差法には直流法と交流法があるが、電位差とき裂長さの較正関係が解析的に求めやすいこと、測定原理および装置が比較的簡単であるという理由から、き裂の計測には直流電位差法がこれまで主に用いられてきた^{(1)~(3)}。一方、交流電位差法は測定結果が温度変化による熱起電力などに影響を受けにくく、周波数の高い交流電流は導電体の表面近くを流れるという表皮効果を有効に利用できるという利点を有している。しかし、これまでの研究によれば、誘導電流によるノイ

ズ処理等に技術的課題があり、き裂計測はそれほど広範に用いられてこなかった^{(4)~(7)}。

本研究では、交流電流の表皮効果を積極的に利用し、材料の表面に発生・伝ばするき裂深さを、精度良くかつ効率的に計測する手法の開発を目的とした。非磁性体材料のSUS304と強磁性体材料のSS400模擬き裂材を用いて、正弦波交流電流による電位差計測を行った。併せて、周波数応答の定常動電磁場有限要素法(FEM)解析を行い、実験結果と比較し、電位差計測システムの妥当性を検討した。さらに、種々の周波数成分から構成される矩形波交流を用いた電位差計測を行い、正弦波交流の結果と比較し、精度比較や計測時間の短縮について検討した。

2. 交流電位差法を用いた表面き裂計測法

本研究で用いた試験片の形状・寸法をFig.1に示す。試験片は、非磁性体のSUS304ステンレス鋼および強磁性体のSS400軟鋼の10mm×10mmの正方形断面を有する角柱であり、ワイヤー放電加工機を用いて、中央に深さの異なる幅0.5mmの模擬き裂を設けたものである。拡大投影器によって計測した模擬き裂の深さをTable 1に示す。平滑試験片および中央に模擬き裂を有する試験片の表面をエメリー紙で2000番まで研磨した後、Fig.2に示す電位差計測システムを用いて電位差を計測した。計測システムは4端子法を用いており、関

* 原稿受付 1996年1月24日。

*¹ 学生員、立命館大学大学院 (〒525 77 草津市野路町1916)。*² 正員、立命館大学理工学部。

Fig.1 Shape and dimensions of the specimen tested in millimeter.

Table 1 Crack depth of each specimen.

SUS304		SS400	
Specimen No.	Crack depth a, mm	Specimen No.	Crack depth a, mm
U1	0.000	F1	0.000
U2	0.254	F2	0.241
U3	0.482	F3	0.549
U4	0.978	F4	0.864
U5	1.488	F5	1.411
U6	1.974	F6	1.917
U7	2.994	F7	2.960

Fig.2 Block diagram of the experimental apparatus.

数発生器（菊水電子工業，459）により種々の周波数の交流波形を発生させ，それを交流アンプ（NF回路設計ブロック，4015）で交流電流1Aに増幅して，外側の2端子から試験片に通電した．電位差計測は内側2端子で検出された電位差をトランス（NF回路設計ブロック，LI-772M）によって1:100に増幅し，FFT解析器（小野測器，CF360）によって各周波数での電位差を計測した．さらに，FFT解析器からの信号をGP-IBインターフェイスを介してパーソナルコンピュータにデータを転送し，データ処理を行った．

交流電位差計測実験としては，Fig.1のAA'間に種々の周波数の正弦波および50Hzの矩形波の交流電流を通電し，BB'間の電位差を計測した．50Hzの矩形波を用いた理由は，同波が広い周波数帯域にわたって比較的

(a) Waveform

(b) Power spectrum

Fig.3 Waveform and power spectrum of 50Hz rectangular a.c.

均一なスペクトラムを有するためである．Fig.3(a)に50Hz矩形波のFFTアナライザに表示された原波形を，Fig.3(b)に同波形をスペクトラム解析した結果を示す．FFT解析器の最高周波数が100kHzであるため，Fig.3(a)での矩形波の電圧立ち上がりの部分がやや乱れているが，同図(b)に示すように50Hzの矩形波は，高周波数帯域までほぼ均一なスペクトラムで構成されていることがわかる．

3. 実験結果および考察

3.1 供試材の電磁気特性評価 定常動電磁場解析に必要な供試材の電気伝導度および比透磁率の計測を行った．前者の計測には低抵抗測定器（井上電機製作所，SLR-851）を用い，後者の測定にはLCZメータ（NF回路設計ブロック，2322）を用いて行った．

真空の自己インダクタンス L_0 は次式で求められる．

$$L_0 = \mu_0 n^2 l S \quad (1)$$

ここで， μ_0 は真空の透磁率（ $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]）であり， n ， l ， S はそれぞれ巻かれたコイルの単位長さ当たりの巻き数，長さ，断面積である．この L_0 とLCZメータから得られる材料の自己インダクタンス L を用いて，次式から供試材の比透磁率 μ_r を求めた．

$$L = \mu_r L_0 \quad (2)$$

電気伝導度 σ および比透磁率 μ_r の計測結果をそれぞれTable 2およびFig.4に示す．

Table 2 Electrical conductivity of the two materials.

	electrical conductivity σ [S/m]
SUS304	1.37×10^6
SS400	5.26×10^6

Fig.4 Variation of specific permeability with a.c. frequency.

Table 2からSS400の方がSUS304に比べて4倍近く電気伝導度大きいことがわかる。また、Fig.4からSUS304は非磁性体であるため、比透磁率は1であり周波数依存性はないが、SS400の比透磁率は顕著な周波数依存性があることがわかる。10Hzのときの μ_r は約60であるが、100kHzではほぼ1となる。後述するSS400の有限要素法解析には、各周波数での μ_r の値を用いた。

半無限体の場合の表皮厚さは次式で示される。ここで表皮厚さとは、電流値が表面のそれと比べて $1/e$ に減少する地点の表面からの距離である（ e は自然対数の底）。

$$\delta = \left(\frac{1}{2} \mu_r \mu_0 \sigma \omega \right)^{-1/2} = (\mu_r \mu_0 \pi \sigma f)^{-1/2} \quad (3)$$

ここで、 δ : 表皮厚さ[m]、 ω : 角周波数[rad/sec.]、 f : 周波数[Hz]である。

Fig.5に(3)式から計算した半無限体の表皮厚さと、今回用いた断面10mm×10mmの角柱のFEM解析（後述）により求めた表皮厚さとの比較を示す。

半無限体の場合には、同一周波数ではSS400の表皮厚さはSUS304のそれに比べて約1桁小さいことがわかる。また、両者の差は周波数が高くなるほど小さくなる傾向にある。一方、SUS304の10mm×10mmの角柱の表皮厚さは約5kHzまで5mmとなっており¹¹⁾、試料に均一に電流が流れていることがわかる。5kHzを超えると表皮厚さは周波数が高くなるにしたがって直線的に小さくなっていく。また、SS400の10mm×10mmの角柱の表皮厚さは約300Hz付近まで5mmで試料に均一

¹¹⁾ 試料断面全体にほぼ均一な電流が流れていたため、ここでは便宜的に表皮厚さを試験片の厚さの1/2の5mmとした。

Fig.5 Relationship between a.c. frequency and skin depth.

Fig.6 Variation of potential with crack depth using sinusoidal a.c.

に電流が流れているが、それ以上の周波数になると表皮厚さは下に凸な2次関数的に減少していくのがわかる。また、約100kHzでSUS304およびSS400の表皮厚さはほぼ等しくなっている。半無限体と今回用いた試験片とでは、表皮厚さの周波数依存性がかなり異なることがわかる。

3.2 正弦波交流での電位差測定結果 正弦波交流電流を用いた模擬き裂進展に伴う電位差の変化をFig.6に示す。Fig.6(a)のSUS304では、用いた3種類の周波数ともに等しい電流1Aを通電したにもかかわらず、検出された電位差の絶対値は周波数が高いほど大きくなる。すなわち、表皮効果によって周波数が高くなるほど電流は表面近くを流れ、電流の流れる実効断面積が減少し、電位差が上昇したことがわかる。しかし、0.0mm～3.0mmのき裂進展に伴う電位差上昇量 ΔE は50Hzで0.036mV、1kHzで0.032mV、5kHzで0.040mV

Fig.7 Relationship between potential ratio and crack depth using sinusoidal a.c.

であり、SUS304ではき裂深さの増加に伴う電位差の上昇量に周波数の影響は殆どないことがわかる。

Fig.6(b)のSS400では、SUS304と同様に検出電位差の絶対値は周波数が高いほど大きくなっている。しかし、0.0mm～3.0mmのき裂進展に伴う電位差の上昇量 ΔE は50Hzで0.012mV、1kHzで0.061mV、5kHzで0.149mVであり、周波数が高いほど大きいことがわかる。すなわち、単位き裂深さ当たりの電位差上昇量は周波数が高いほど大きくなっており、SS400でのき裂検出には高周波交流電流が有利であるといえる。また、これらのことは強磁性体の方が非磁性体よりもより大きな表皮効果が存在していることを示している。

き裂を有する場合の電位差をき裂のない場合の電位差で無次元化した電位差比と、き裂深さとの関係をFig.7に示す。Fig.7(a)のSUS304では、すべてのき裂深さに対して50Hzの交流電流を通電したものが最も電位差比が大きくなり、周波数が高くなるにつれて電位差比の上昇は小さくなる傾向がある。Fig.6(a)に示したように、 ΔE がすべての周波数でほぼ等しいため、電位差の絶対値が小さい低周波交流電流の方が電位差比の上昇が大きくなっている。Fig.7(b)のSS400では、3種類の周波数ともにき裂の進展に伴う電位差比の上昇量はほぼ等しい。これはFig.6(b)に示したように、周波数が高くなるほど電位差の絶対値および ΔE が大きくなるためである。

以上のことから、非磁性体および強磁性体の両者ともに、交流電位差法によるき裂検出は有効であること

Fig.8 Potential ratio at various frequencies for rectangular a.c.

がわかる。 ΔE でき裂進展を評価した場合には、非磁性体では周波数の依存性はないが、強磁性体では周波数が高いほど分解能が増加することがわかる。しかし、初期電位差で基準化した電位差比を用いた場合には、非磁性体では低周波が高感度となり、強磁性体では周波数依存のない結果となった。

3.3 矩形波交流での電位差計測結果 矩形波交流電流を用いた場合の周波数と電位差比の関係をFig.8に示す。Fig.8(a)のSUS304では、き裂深さが0.254mmのとき、どの周波数帯域においても電位差比は1.005～1.010程度と殆ど変化はない。しかし、それ以上の深さのき裂に対しては、すべての周波数で電位差比は上昇し、とくに2kHz以下の周波数帯域の電位差の上昇が顕著になる。Fig.8(b)のSS400では、深さが0.864mmまでの比較的浅いき裂では、1kHz以下の低周波数帯域よりも1kHz以上の周波数帯域の方が電位差比が大きくなっている。しかし、さらにき裂が深くなると低周波数帯域での電位差比が大きくなっている。

矩形波交流電流を用いた場合のき裂深さと電位差比の関係をFig.9(a)、(b)に示す。これらの図は、種々の周波数成分から低周波数成分の代表として62Hzを、中

Fig.9 Relationship between potential ratio and crack depth using rectangular a.c.

周波数成分の代表として1060Hzを、高周波数成分の代表として4950Hzを抜き出して整理した結果である。

Fig.9(a)のSUS304では、き裂の進展に伴う電位差比の上昇が62Hzの場合に最も大きく、周波数が高くなるにしたがって小さくなる傾向がある。SUS304の矩形波交流を用いたき裂検出においても、正弦波と同様に、低周波数帯域の方が高周波数帯域よりも感度がよいことがわかる。Fig.9(b)のSS400では、SUS304に比べて高周波交流電流での検出感度が高くなり、き裂の進展に伴う電位差比の上昇は3種類の周波数ともにほぼ等しくなっている。

Fig.9の矩形波を用いた実験結果は、Fig.7に示した正弦波を用いた場合と良好に一致していることから、矩形波をフーリエ解析する手法を用いることによって、大幅な計測時間の短縮が計れることがわかる。

4. 有限要素法を用いた動電磁場解析

交流電位差法によるき裂計測実験の妥当性を検討するため、周波数応答の定常動電磁場FEM解析を行った。

一般に磁性体の磁化特性は、磁束密度 B 、磁化 M 、磁界の強さ H に依存し、 M と H の関係を表す磁化曲線や B - H 曲線はヒステリシス現象を起こすことが多い。しかし、本解析では時間的に変動する磁界や渦電流を簡便に解析するため、扱う磁化特性を線形とし、残留磁気や永久磁化については考慮していない。すなわち磁化特性は、

$$M = \chi H, \quad B = \mu_0(1 + \chi)H = \mu H \quad (4)$$

Fig.10 FEM mesh used for a.c. potential analysis.

であると仮定した。ここで、 χ : 磁化率、 μ : 透磁率 [H/m]である。解析に必要な材料定数である電気伝導度 σ はTable 2、比透磁率 μ_r はFig.4に示した値を用いた。また、本解析では電磁界を解くためにベクトルおよびスカラーポテンシャル法を用いてマクスウェルの方程式を扱い、時間が正弦波状変化をする場合の解析を行った⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

本解析に用いた要素分割図の一例をFig.10に示す。

Fig.11 Current density analyzed by FEM for SS400.

なお、同図は解析の対称性から試験片の1/4を示している。交流電流による表皮効果の解析の場合、空気層の電磁界変化も解析する必要があるため、Fig.10(a)に示したように、試験片のまわりの空気層（試験片の外側の部分）も要素分割した。本解析に使用した要素は8節点のアイソパラメトリック要素であり、Fig.10の要素分割の例では要素数6175、節点数7144である。境界条件はとしてFig.10(b)の①～⑤の面については対称境界とし、ベクトルポテンシャルAの面内成分を0で拘束し、そのうち①の面についてはスカラーポテンシャル ϕ も0で拘束した。また、⑥の面は、は自然境界とし、ベクトルポテンシャルAの拘束はしなかった。電流の入力については、Fig.10(c)の試験片拡大図中の矢印の点から行った。

有限要素法による動電磁場解析から得られたSS400の電流密度の分布をFig.11に示す。(a)と(b)は、き裂のない場合の電流密度で、(c)と(d)は、き裂深さが3.0mmの場合の電流密度である。図中の太い矢印は電流入力点である。Fig.11(a)の50Hzのとき、電流は試験片の全体をほぼ均一に流れているが、Fig.11(b)の5kHzのときは、試験片表面近くで内部よりかなり多くの電流が流れており、大きな表皮効果を有している

ことがわかる。また、試験片内部では、表面とは逆向きに電流が流れている部分もある。き裂深さが3.0mmのFig.11(c)の50Hzでは、き裂面で電流が流れず実効断面積が減少し、き裂付近で電流が乱され電位差が増大することがわかる。Fig.11(d)の5kHzでは、き裂付近でより大きく電流が乱され、うず電流の発生によってき裂近くでは、電流入力点側に向かって流れている部分もある。

それに対して、紙面の関係で図示は略すが、SUS304では50Hz、5kHzともに表皮効果は小さく試験片の全体をほぼ均一に電流が流れていた。また、き裂深さ3.0mmの場合でもき裂付近での電流の乱され方などに周波数による違いは殆どみられず、そのため電位差の上昇量に周波数依存性がなかったものと思われる。

FEM解析結果より得られた電位差をき裂深さで整理した結果をFig.12に示す。Fig.12(a)のSUS304では、0.0mm～3.0mmのき裂進展に伴う電位差上昇量 ΔE は50Hzで0.026mV、1kHzで0.032mV、5kHzで0.031mVであり、周波数の影響は殆どないことがわかる。また、実験結果ではこれらの値は0.036mV、0.032mV、0.040mVとなっており、ほぼ解析結果と実験結果の ΔE は一致している。Fig.12(b)のSS400では、

0.0mm～3.0mmのき裂進展に伴う電位差上昇量 ΔE は50Hzで0.008mV、1kHzで0.086mV、5kHzで0.490mVであり、周波数が高いほど大きいことがわかる。この結果は傾向的には実験結果と一致している。しかし、実験によって検出されたき裂深さ0.0mmの電位差 E_0 と、FEM解析によって求めたき裂深さ0.0mmの電位差 E_0 とはそれぞれ絶対値が異なっている。

0.0mm～3.0mmのき裂進展に伴う電位差上昇量 ΔE と実験結果と初期電位差 E_0 のFEMによる解析結果との比較をTable 3に示す。同表からSUS304の場合には ΔE は解析結果と実験結果とはほぼ一致しているが、 E_0 については少し差がある。SS400については、解析結果が、 ΔE 、 E_0 ともにき裂の浅い範囲では実験結果よりも小さめの、き裂が深くなると大きめの評価をしている。解析結果と実験結果に差が生じた原因として、FEM解析では端子部分まで解析することは困難であったため、端子をなくして解析したことによる計測端子の接触面積、接触抵抗、端子自体の電気抵抗、端子まわりに発生する磁場などの影響の違いが考えられる。

Fig.12 Variation of potential with crack depth in FEM analysis.

Table 3 Comparison of potential increase and initial potential between experiment and FEM analysis.

	ΔE (mV)				E_0 (mV)			
	SUS304		SS400		SUS304		SS400	
	sin wave	FEM	sin wave	FEM	sin wave	FEM	sin wave	FEM
50Hz	0.036	0.026	0.012	0.008	0.065	0.048	0.026	0.014
1kHz	0.032	0.032	0.061	0.086	0.091	0.142	0.144	0.288
5kHz	0.040	0.031	0.149	0.490	0.271	0.149	0.439	1.473

Fig.13 Comparison of potential ratio between experiment and FEM analysis for SUS304.

Fig.14 Comparison of potential ratio between experiment and FEM analysis for SS400.

また、SS400ではSUS304の場合以上に実験結果と解析結果の違いがみられたのは、解析プログラムが磁化特性であるB-H曲線を線形近似しているが、実際にはSS400では非線形ヒステリシスを有するため、強磁性体で解析結果と実験結果との差が大きくなった要因の一つであると考えられる。これらのことから、実験結果と解析結果の絶対値での比較は困難であると判断し、電位差比で両者の比較を試みた。

SUS304での実験結果と解析結果の電位差比を比較したものをFig.13に示す。1kHzでき裂深さが3.0mm付近で両者は若干異なった結果となっているがそれ以外では良好に一致している。SS400での実験結果と解析結果の電位差比を比較したものをFig.14に示す。SUS304同様、1kHz、き裂深さが3.0mm付近で若干異なった結果となっているが、その他では実験結果と解析結果は良好に一致しているといえる。したがって、両材料ともに初期電位差でき裂進展に伴う電位差を基準化したものを用いれば、十分信頼できるものであるといえる。

5. 結 言

(1) 1Aの正弦波交流電流を用いた電位差計測の結果、非磁性体のSUS304、強磁性体のSS400ともに表皮効果によって電流の流れる実効断面積が減少し、周波数が高いほど電位差が大きくなることがわかった。

(2) SUS304ではき裂の進展に伴う正弦波交流を用いた電位差の上昇量は、50Hz、1kHz、5kHzの周波数すべてにおいてほぼ等しく、周波数の影響は少ないことがわかった。また、周波数が低くなるほどき裂の進展に伴う電位差比の上昇が大きくなり、低周波交流電流がき裂の検出に有利であることがわかった。

(3) SS400では、き裂進展に伴う正弦波交流を用いた電位差の上昇量は周波数が高いほど大きくなった。き裂進展に伴う電位差比の上昇量には周波数の依存性は少なかった。このことから、強磁性体の交流電位差法を用いたき裂検出には高周波交流を用いた方が有効であるといえる。

(4) 矩形波交流電流を用いた電位差計測でも正弦波での結果と良好に一致し、き裂検出を矩形波で行うことによって計測時間を大幅に短縮できることがわかった。

(5) 有限要素法による定常動電磁場解析の結果、き裂進展に伴う電位差の上昇量は、SUS304では周波数の影響は殆どなく、SS400では周波数が高いほど同上昇量が大きくなることがわかった。また、初期電位差で基準化した電位差比の解析結果は実験結果と良好に一致した。

最後に、卒業研究として本実験に協力された当時立命館大学理工学部学生、森川泰暢君に感謝します。

参 考 文 献

- (1) M.Sakane, M.Ohnam, Trans.ASME, JEMT, 110, (1988), 247.
- (2) 日本鉄鋼協会高温強度研究委員会切欠き効果試験分科会報告、直流電気ポテンシャル法による切欠き材の高温低サイクル疲労き裂発生寿命検出試験法（日本鉄鋼協会推奨案）、(1989).
- (3) 多田直哉、坂之上悦典、北村隆行、大谷隆一、日本機械学会論文集、56, (1990), 259.
- (4) Dover, W.D., et al, A.C.Field Measurement : Theory and Practice, EMAS, (1980), 222.
- (5) Verpoest, L., et al, An A.C.P.D. Method for Detection and Measurement of Surface Microcracks During Fatigue Testing of Wires, EMAS, (1982), 295.
- (6) 矢川元基、福田俊彦、機械の研究、35, (1983), 1237 ; 35, (1983), 1324 ; 36, (1984), 27.
- (7) Y.Isono, M.Sakane, M.Ohnam, K.Fujiyama, Trans.ASME, JEMT, 116, (1994), 488.
- (8) 山本行雄監修、三次元電磁界・電磁波解析技術(1991)、トリケップス
- (9) 日本総合研究所、JMAG-Series USER'S MANUAL, (1994)