

210 受動型電気ポテンシャル CT 法によるき裂同定および欠陥モニタリング

Crack identification and damage monitoring by passive electric potential CT method

正 塩澤 大輝(神大工), 正 久保 司郎(阪大工)・正 阪上 隆英(阪大工)

Daiki SHIOZAWA, Kobe University, Kobe

Shiro KUBO, Osaka Univ., Osaka

Takahide SAKAGAMI, Osaka Univ., Osaka

Key Words : Non-destructive testing method, Passive electric potential CT method, Inverse problem, Crack identification, Piezoelectric material

1. 緒言

供用中の機械構造物を保守管理するために、検査のための外的負荷を必要とせず、構造物供用中に自然発生的に出力される信号のみを用いて欠陥・損傷検出を行う受動的すなわちパッシブな非破壊検査手法の開発に期待が高まっている。著者らは、パッシブな非破壊検査手法のひとつとして、受動型電気ポテンシャル CT 法を提案している。本手法では、圧電効果を有する PVDF ピエゾフィルムを検査対象表面に貼り付ける。ピエゾフィルム上には負荷を受ける物体のひずみ分布情報を転写した電気ポテンシャル分布が現れる。もし機械・構造物内に損傷が存在すれば、ひずみ分布にはその損傷の影響が現れる。この損傷の影響は電気ポテンシャル分布にも現れるため、電気ポテンシャル分布に逆問題解析処理を施すことにより、損傷の位置、形状および寸法を推定できる。

本報告では、受動型電気ポテンシャル CT 法によるき裂測定に関する基礎的検討として、均質材内の三次元表面き裂同定の有効性について実験的に検討した結果を示す。さらに、同法を積層複合材に適用し、複合材内はく離欠陥の同定の有効性について実験的に検討した結果を示す。

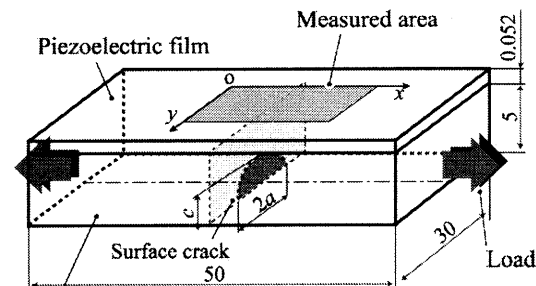
2. 三次元き裂の同定

2.1 三次元き裂に対する電気ポテンシャル分布

表面き裂の位置および寸法の変化がピエゾフィルム上の電気ポテンシャル分布に与える影響について、有限要素解析プログラムを用いて数値解析的に検討を行った結果を示す。

解析対象を Fig. 1 に示す。Fig. 1 に示したように板材長手方向に x 軸を、幅方向に y 軸を設定した。ピエゾフィルム上の測定領域 $20 \times 20(\text{mm})$ の範囲に $1(\text{mm})$ 間隔の格子点を設け、各点の電気ポテンシャル値を得た。欠陥の位置および寸法に関するパラメータとしては、き裂表面半長 a 、き裂深さ c 、 x 方向のき裂中心の位置 x_c 、 y 方向のき裂中心の位置 y_c を用いた。

き裂パラメータが電気ポテンシャルに与える影響について調べる



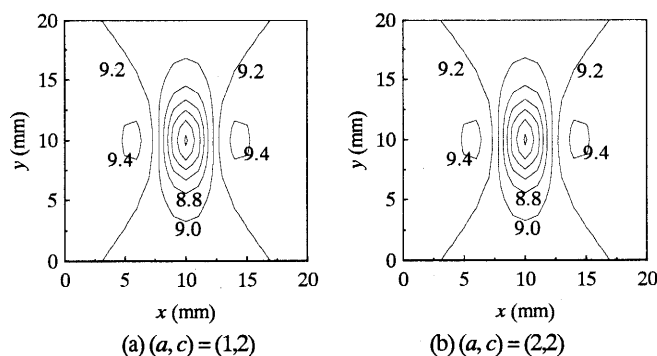
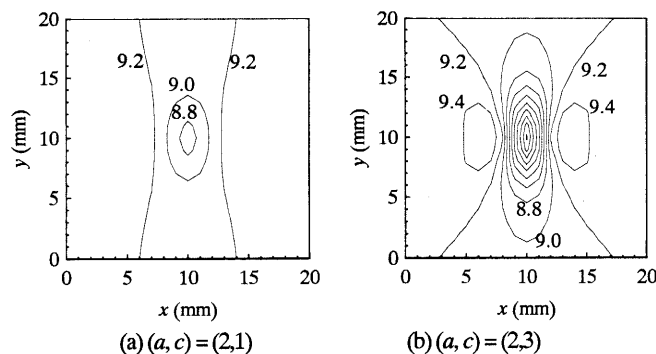
Elastic substrate material (Al2024)

Fig. 1 Analysis model for surface

ため、 $(a, c)=(1,2)$, $(2,2)$ および $(a, c)=(2,1)$, $(2,3)$ のき裂形状に対し、それぞれ x 方向に $2940(\text{N})$ の荷重を与えた場合のピエゾフィルム上の電気ポテンシャル分布を FEM により解析した。ただし、表面き裂の中心位置は $x=y=10.0(\text{mm})$ である。 a および c の影響を調べた結果を、それぞれ Fig. 2 および 3 に示す。図中の数値は等ポテンシャル線のポテンシャル値を示している。Fig. 2 よりき裂中心位置にあたる $(x, y)=(10, 10)$ においてポテンシャル分布が最小値をとっていることがわかる。さらにき裂から離れるにつれてポテンシャル値は同心円状に増加し、 $9.2(\text{V})$ をすぎると等ポテンシャル線は $x=10.0(\text{mm})$ と $y=10.0(\text{mm})$ を対称軸とする放物線状の分布に変化している。また、き裂半長 a が大きくなるほど、き裂存在位置のポテンシャル値が小さくなる。Fig. 3 より、 c が大きくなるほど、き裂が存在する位置でのポテンシャル値が小さくなり、また、等ポテンシャル線が同心円状から放物線状の分布に変化する位置がき裂に近くなっていることが分かる。このように、電気ポテンシャル分布がき裂形状に応じて、特徴的な変化を示すことから、電気ポテンシャル分布から逆解析的にき裂形状を推定できるものと考えられる。

2.2 ポテンシャル分布の測定

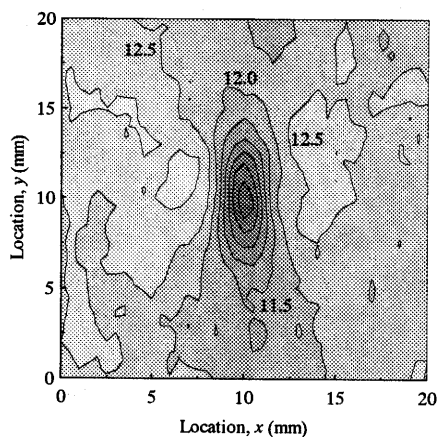
表面き裂を有する試験片のき裂背面、すなわちき裂開口側の反対表面にピエゾフィルムを貼り付け、試験片に荷重が加えられた場合に、ピエゾフィルム上に発生する電気ポテンシャル分布を測定した。試験

Fig. 2 Effect of crack length a on potential distributionFig. 3 Effect of crack depth c on potential distribution

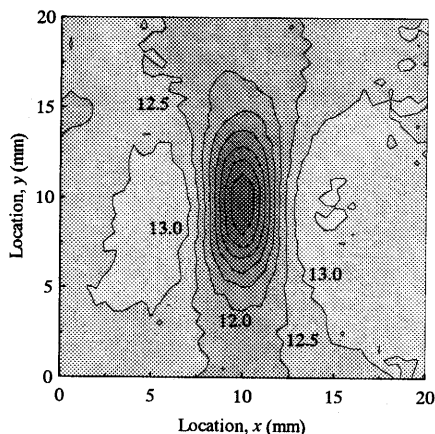
片には放電加工により, Fig. 1 に示したように x 軸に垂直な半円き裂があるものとした。き裂パラメータの組合せが, $(a, c, x_c, y_c) = (2, 3, 10, 10)$ および $(a, c, x_c, y_c) = (3, 2, 10, 10)$ となる 2 種類の形状の表面き裂について測定を行った。

上述の試験片に, 平均応力 1470(N), 応力比 $R=0$, 周波数 2.0(Hz) の正弦波荷重を与えた。このとき得られるピエゾフィルム上の電圧を, 測定領域 20×20 (mm) の範囲にわたって非接触表面電位計で測定した。測定範囲内に 1.0(mm) 間隔の格子点を設け, 各点を順次走査計測した。ピエゾフィルム表面上では, 繰返し負荷に伴う試験片のひずみ変化に応じた電圧変化が計測される。計測された最大電圧と最小電圧の差を, 計測点の出力電気ポテンシャル値とした。

二つのき裂に対する測定結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 より, 解析結果と同様に実験により得られたポテンシャル分布では, 表面き裂の中心位置ある $x=y=10.0$ (mm) において電気ポテンシャル値が極小値をとっており, さらに, 表面き裂から離れるにつれて, ポテンシャル値は同心円状に増加していることがわかる。



(a) Crack 1 (a, c, x_c, y_c) = (2, 3, 10, 10)



(b) Crack 2 (a, c, x_c, y_c) = (3, 2, 10, 10)

Fig. 4 Measured electric potential distribution for surface crack

2.3 三次元き裂の同定結果

電気ポテンシャルの計測結果をもとに, 三次元表面き裂を逆問題的に同定した。逆問題解析手法として, 残差最小化法を適用した。残差最小化法では, き裂パラメータを適当に仮定した場合の計算値 $\phi^{(c)}$ と測定により求められたポテンシャル値 $\phi^{(m)}$ との間で次式の残差平方和 R_s を計算する。

$$R_s = \sum_{i=1}^M (\phi_i^{(c)} - \phi_i^{(m)})^2 \quad (1)$$

ここで M は総測定点数である。

この R_s を最小化するき裂パラメータの組合せを最も確からしいものとし, これを同定結果とする。ただし, i 番目の計測点の出力ポテンシャルとして, 実験結果 $\phi_i^{(m)}$, 解析結果 $\phi_i^{(c)}$ ともにき裂のない位置における電気ポテンシャル値で無次元化したものを用いた。具体的には次のような階層的き裂パラメータ推定法を適用した。

(1) き裂パラメータの粗い推定

(a) き裂位置の粗い推定: き裂背面に貼り付けられたピエゾフィルム上の電気ポテンシャル分布は, 表面き裂の中心位置はポテンシャル値が最小値をとる位置と一致する分布形状となる。そこで, 計測された分布において, ポテンシャル値の最小値近傍の位置に, 表面き裂の中心が存在すると考え, その位置を x 方向および y 方向の表面き裂の中心存在位置の粗い推定値 x_c, y_c とした。

(b) き裂寸法の粗い推定: き裂位置を前述の推定値に固定し, 未知パラメータ (a, c) をそれぞれ 3 通りに変えた合計 9 個の組合せについて残差平方和 R_s を計算し, これらの R_s をもとに, 最小 2 乗近似関数 $R_s(a, c)$ を定めた。この近似関数 $R_s(a, c)$ を最小にする a, c を粗い推定値とした。

(2) 修正 Powell 法によるき裂パラメータの推定

R_s を最小にするき裂パラメータの組合せを修正 Powell 法により求めた。ただし初期値には(1)で得られた粗い推定値 a, c, x_c および y_c を用いた。

得られたき裂パラメータ a, c, x_c, y_c の推定結果, 推定誤差として, 真値との差の相対値 $\Delta a/a, \Delta c/c, \Delta x_c/x_c$ および $\Delta y_c/y_c$ および残差平方和 R_s を Table 1 に示す。Table 1 より, 各き裂パラメータは 10% 以内の精度で推定できていることがわかる。また, 対象としたいずれのき裂においても, き裂の位置を表すパラメータ x_c, y_c は, き裂の寸法を表すパラメータ a, c よりも精度良く推定できている。

Table 1 Estimated parameters of cracks

(a, c)	Parameter of crack			
		a	c	x_c, y_c
(2, 3)	Actual	2.0	3.0	10.0, 10.0
	Estimated	2.211	3.308	9.742, 9.903
	Error (%)	10.59	10.26	2.582, 0.9697
(3, 2)	Actual	3.0	2.0	10.0, 10.0
	Estimated	3.302	2.023	9.956, 10.20
	Error (%)	10.06	1.158	0.4429, 1.958

3. 複合材内はく離欠陥の同定

近年, 適用の拡大が進んでいる CFRP 等の積層複合材では, 低速度衝撃により容易に層間はく離が生じ, 強度が著しく低下することが知られている。そこで, 複合材内の欠陥をリアルタイムでモニタリングすることを目指し, 受動型電気ポテンシャル CT 法の適用を試みた。

3.1 はく離に対する電気ポテンシャル分布

複合材に貼り付けられたピエゾフィルム上に現れる電気ポテンシャル変化を有限要素解析プログラムを用いて検討した。解析対象としては, Fig. 5 に示すような繊維強化コンポジット積層体の表層に PVDF ピエゾフィルム層を形成した板材を想定した。解析対象の寸法として

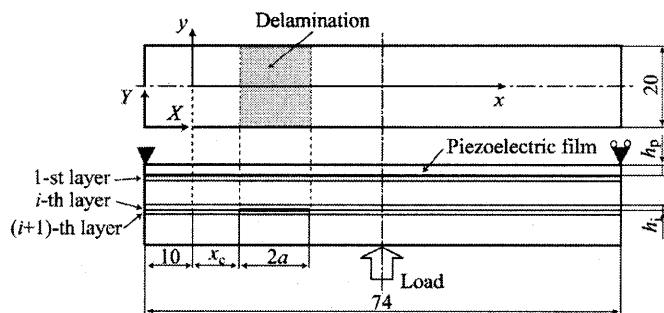


Fig. 5 Analysis model for composites

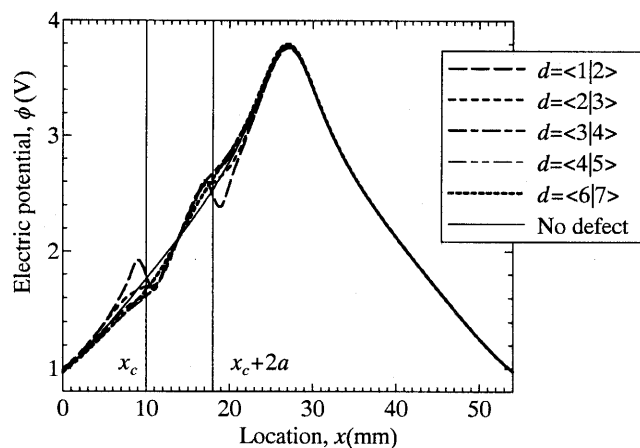
は、 Piezofilm の厚さを h_p 、 および 繊維強化コンポジットの 1 層の厚さを h_t とした。添字 i は、 Piezofilm 層を除いた、最上部から数えて i 番目の層であることを表している。解析対象の主座標系 (XY) と i 層目の繊維強化コンポジットの局所座標系がなす角度を θ_i とし、 i 層目と $(i+1)$ 層目の層間を $\langle i | (i+1) \rangle$ と表すことにする。

はく離欠陥として、層間に Y 方向に貫通するはく離を考えた。このとき、はく離の位置および寸法を表すパラメータとして、はく離半長 a 、 x 方向のはく離の左端位置 x_c 、 はく離の層間深さ d を用いた。

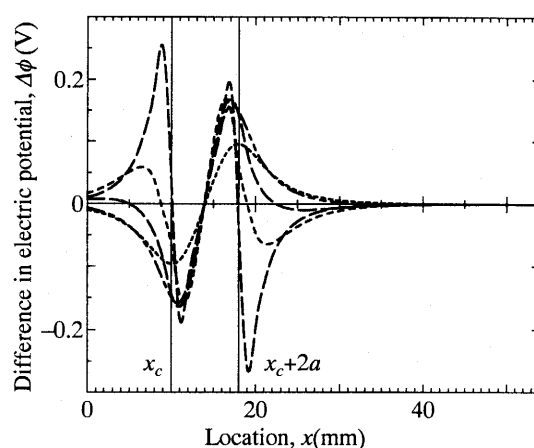
繊維強化コンポジットとしては、繊維が一方方向のみに配向された、一方方向強化コンポジットを用いることを想定した。一方方向強化コンポジットの材料定数を Table 2 に示す。この一方方向強化コンポジット 1 層の板厚 h_t を 0.75 (mm) とした。この一方方向強化コンポジットを用いて、 $[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$ で与えられる積層構成をもつ一方方向強化積層板を想定した。

前述の解析対象に三点曲げにより曲げ負荷を与えた。荷重としては Fig. 1 に示したように、 Piezofilm 層の裏面から z 方向に、板材 x 方向の中心線上において 49 (N) の一様な分布荷重を与えた。 Fig. 5 に示した Piezofilm 上の直角座標系 (xy) では、荷重点の x 方向の位置は 27 (mm) となる。

はく離の層間深さ d が電気ポテンシャル分布に及ぼす影響について検討を行った。はく離半長 a 、 およびはく離の左端位置 x_c を一定とし、層間深さ d を変化させて解析を行った。 x_c を 10 (mm) と固定し、 (a, d) を $(5, \langle 1|2 \rangle)$ 、 $(5, \langle 2|3 \rangle)$ 、 $(5, \langle 3|4 \rangle)$ 、 $(5, \langle 4|5 \rangle)$ および $(5, \langle 6|7 \rangle)$ とした場合に対して、電気ポテンシャル分布を計算した。計算結果を Fig. 6 に示す。また、はく離がない場合の計算結果を図中にあわせて示した。ポテンシャル分布を示した Fig. 6 (a) より、電気ポテンシャル分布は層間深さ d に応じて、それぞれ異なる様相を呈していることがわかる。



(a) Electric potential distribution



(b) Difference in electric potential

Fig. 6 Effect of defect depth d on electric potential distribution (a, x_c) = (5, 10)

Table 1 Properties of uni-directionally reinforced composite

E_x (GPa)	E_y (GPa)	E_z (GPa)
151	10.6	10.6
G_{yz} (GPa)	G_{zx} (GPa)	G_{xy} (GPa)
4.15	5.58	5.58
ν_{yz}	ν_{zx}	ν_{xy}
0.28	0.02	0.28

はく離深さ d がポテンシャル分布に与える影響を比較するため、はく離が存在する場合のポテンシャル値 ϕ とはく離が存在しない場合のポテンシャル値 ϕ_0 の差 $\Delta\phi (= \phi - \phi_0)$ を計算した。得られた $\Delta\phi$ 分布を Fig. 6 (b) に示す。 Fig. 6 (b) より、はく離深さ d に応じて $\Delta\phi$ 分布は異なる分布形を示すことがわかる。まず、 d が $\langle 1|2 \rangle$ 、 $\langle 2|3 \rangle$ となるはく離に対する $\Delta\phi$ 分布においては、 $\Delta\phi$ は極大、極小、極大、極小の順に四つの極値を示す。一方、 d が $\langle 3|4 \rangle$ 、 $\langle 4|5 \rangle$ および $\langle 6|7 \rangle$ となるはく離に対する $\Delta\phi$ 分布は、 x 軸正の方向に向かって極小、極大の順に二つの極値を示している。

3.2 電気ポテンシャル分布の測定

3.1.1 試験片および測定方法

複合材内のはく離を同定する実験を行った。試験片は、 Fig. 5 に示す直角座標系を基準として、一方方向炭素繊維強化プリプレグ (株式会社、 P3312G-19、 繊維含有率 : 56%) を $[(45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ)_s]$ で与えられる配向パターンで、 40 層積層したマルチアングルプライ CFRP である。試験片の寸法は、長さ $l = 250$ (mm)、幅 $w = 60$ (mm) である。また、プリプレグ層あたりの厚さ h_t は 0.19 (mm) であるため、試験片の厚さは、 $h = 7.6$ (mm) である。

人工欠陥としては、 Fig. 5 に示したように、試験片の長さ方向の中央に半長が $a = 10$ (mm)、厚さは $52 (\mu\text{m})$ であるテフロンフィルムが 1 枚層間に挿入されている。 10 層目と 11 層目の層間に人工はく離が導入された試験片①、 20 層目と 21 層目の層間に人工はく離が導入されている試験片②、 および 30 層目と 31 層目の層間に人工はく離が導入されている試験片③を作製した。大ひずみ用ゲージセメントを用いて Piezofilm を試験片表面に貼り付けた。

前述の試験片に、電気油圧サーボ式疲労試験機により周波数 3.0 (Hz)、荷重比 0.33、平均荷重 980 (N) の正弦波変動荷重による曲げ負

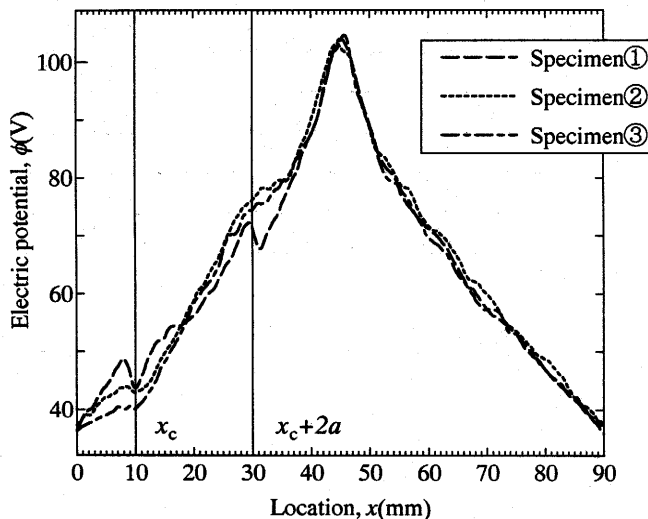


Fig. 7 Measured electric potential distribution for composites

荷を試験片に与えた。このとき各測定点において、ひずみ変動に応じて発生する電圧変動を表面電位計により計測した。

3.1.2 測定結果

試験片①、②および③に対する測定結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より、はく離が存在していない範囲である $45 \leq x \leq 90$ の範囲においてポテンシャルは単調減少しており、いずれの試験片の場合に対してもよく一致していることがわかる。一方、はく離が存在している範囲である $0 \leq x \leq 45$ においては、ポテンシャルは、解析結果と同様に、はく離深さによって異なる傾向を示していることがわかる。

さらに、はく離深さがポテンシャル分布に与える影響をより詳細に調べるために、実測値 $\phi^{(m)}$ と、健全材に対するポテンシャル $\phi^{(m)_0}$ との差 $\Delta\phi^{(m)} = \phi^{(m)} - \phi^{(m)_0}$ を計算した。健全材に対するポテンシャル分布を測定していないため、はく離の影響を受けていないと考えられる $45 \leq x \leq 90$ の範囲のポテンシャルから、最少二乗法によりこの範囲のポテンシャル分布の四次近似関数を求め、次に、対称性を用いてこの近似関数を $x=45$ に関して折り返すことにより、 $0 \leq x \leq 45$ の範囲のポテンシャル分布の四次近似関数を求めた。

測定により得られたポテンシャル分布には、ピエゾフィルムの貼り付けの不備、および負荷のばらつきによるものと考えられるノイズが現れている。そこで、ポテンシャルの分布傾向を比較するために $x=45(\text{mm})$ における測定値をもとに計測結果を基準化した。基準化ポテンシャルの差 $\Delta\hat{\phi}^{(m)} (= \hat{\phi}^{(m)} - \hat{\phi}_0^{(m)})$ を Fig. 8 に示す。ここで変数につけた記号 $(\hat{})$ は、基準化した値を表す。

Fig. 8 より、はく離深さによって、 $\Delta\hat{\phi}^{(m)}$ は異なる傾向を示していることがわかる。すなわち、試験片①に対する $\Delta\hat{\phi}^{(m)}$ 分布では、はく離縁である $x=10$ および $x=30$ において、はく離縁をはさんで極大値、極小値が現れている。また、試験片①および②に対する $\Delta\hat{\phi}^{(m)}$ 分布では、はく離縁である $x=10$ 付近において極小値が現れ、また、はく離縁である $x=30$ 付近においては極大値が現れている。これらのように計測結果は、はく離深さによって異なる $\Delta\hat{\phi}^{(m)}$ 分布傾向を示し、3.1 節で示した解析結果と同様の傾向を示している。これらの測定結果より、はく離縁および深さの影響がポテンシャルの分布形状に反映されていることが確認された。

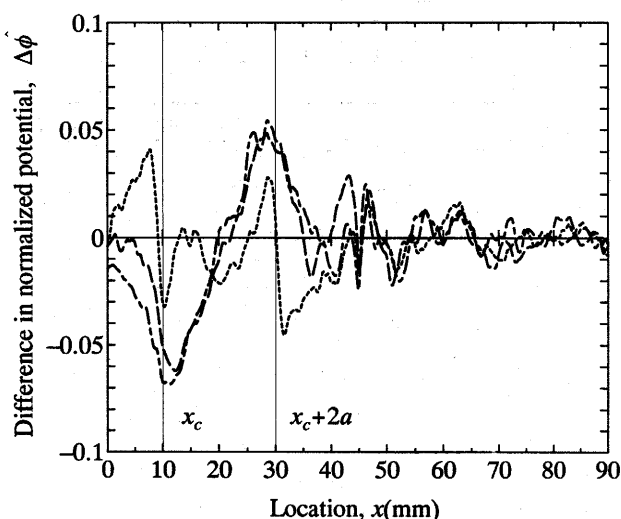


Fig. 8 Normalized difference in measured electric potential composites

3.3 はく離の同定

計測結果をもとに、逆問題的是はく離の同定を行った。逆解析手法としては、三次元表面き裂の場合と同様の階層化パラメータ推定法を適用した。

はく離の同定結果を Table 3 に示す。はく離縁の位置については、試験片①、②および③のいずれの場合においても最大で 20% 程度の誤差で推定が行われていることがわかる。はく離深さについては、試験片①の場合では、正確に推定が行われている。試験片②、③の場合では、はく離深さは中立軸より深いものと正しく推定されているが、試験片②についてははく離の層間位置の正確な推定は困難なものとなっている。

Table 3 Detailed estimate of delamination parameters

Specimen	Defect parameters				R_s
		x_c	x_c+2a	d	
①	Actual	10	30	$\langle 10 11 \rangle$	2.78×10^{-2}
	Estimated	8.3	30.7	$\langle 8 9 \rangle$	
②	Actual	10.0	30.0	$\langle 20 21 \rangle$	1.47×10^{-2}
	Estimated	12.3	29.7	$\langle 30 31 \rangle$	
③	Actual	10.0	30.0	$\langle 30 31 \rangle$	1.43×10^{-2}
	Estimated	11.6	29.8	$\langle 25 26 \rangle$	

4 結言

受動型電気ポテンシャル CT 法によるき裂の同定および欠陥モニタリングの基礎的検討として、アルミニウム合金平板内の三次元表面き裂および複合材内のはく離欠陥の同定に関する実験的検討を行った。その結果、三次元表面き裂については、き裂の位置、および寸法の推定が可能であることを確認した。さらに、はく離欠陥については、その結果、はく離縁の位置については 10~20% 程度の誤差で推定が可能であることがわかった。また、はく離深さについては、はく離がピエゾフィルムを貼り付けた測定面に対して浅い位置か、深い位置に存在するかについての判別が可能であり、はく離が浅い位置に存在する場合は精度良く層間位置の推定が行われることがわかった。