

平成22年5月10日現在

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19360052  
 研究課題名(和文) 逆解析とスマートレイヤを用いた能動型受動型電気ポテンシャルCT法による欠陥モニタ

研究課題名(英文) Defect Monitoring by the Active/Passive Electric Potential CT Method Using Inverse Analysis and Smart Layer

## 研究代表者

久保 司郎 (KUBO SHIRO)  
 大阪大学・工学研究科・教授  
 研究者番号：20107139

研究成果の概要(和文)： 機器・構造物の中のき裂・欠陥モニタ手法を構築するため、 piezo材料とプリント基板を組み合わせることによりスマートレイヤを構成した。このスマートレイヤを用いて、受動型電気ポテンシャルCT法ではpiezoフィルム上の電気ポテンシャル測定を行い、能動型電気ポテンシャルCT法では音響発信を行った。これらを組み合わせ、逆解析を援用することにより、き裂の大きさおよび位置を効率的に推定することができた。スマートレイヤ上の多数の電極に電圧を印加して超音波を送受信することにより、き裂の形状を推定することができた。

研究成果の概要(英文)： For monitoring defects and cracks in structures, a smart layer was constructed by combining piezoelectric film and a printed circuit. By using the smart layer the electric potential on the film was measured in the passive electric potential CT method and an acoustic wave was emitted in the active electric potential CT method. By combining these methods with an inverse method, the crack size and location were effectively estimated. Crack shapes were estimated from acoustic wave signals emitted and received from and to electrodes on the smart layer.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2008年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：逆問題，電気ポテンシャルCT法，非破壊検査，スマートマテリアル，き裂同定，破壊力学，複合材料，界面はく離

## 1. 研究開始当初の背景

経年プラントや機器が増加している中、そ

れらを安全に管理し使用するため、非破壊評価がますます重要となってきた。一般に非破

壊検査を行うためには機器を停止しなければならない。このため、機器の運転中に監視するモニタリングは、時々刻々の情報を把握できる点や、点検による停止がもたらす損傷をもたらさない点で、非破壊評価に勝る大きな利点をもつ。モニタリングには、外部負荷を行わず応答を得ることができる受動型の手法が適しており、さらに一旦き裂や欠陥が検出されたときに、その部分に集中して検査を行う能動型の手法と組み合わせるのが最適であると考えられる。

非破壊検査やモニタは逆問題のひとつであるとの認識のもと、申請者らは、直流電流を負荷したときに物体に生じるポテンシャル分布に逆問題解析を適用することにより物体内部に存在する2次元・3次元き裂や欠陥を同定する、電気ポテンシャルCT法を提案した。この手法は直流電流を負荷する、いわゆる能動(アクティブ)型手法である。申請者らは、使用下で力学的負荷を受ける物体の表面に piezofilm を用いることにより、物体に通電しなくとも電気ポテンシャル分布を受動的に得ることができる、受動型電気ポテンシャルCT法を提案した。さらに、piezofilm に通電することにより、能動的に加振する piezo acoustic による新たな能動型電気ポテンシャルCT法を提案した。

これまでの研究成果のもと、piezofilm とマトリックス状の電極より構成されるスマートレイヤを用い、計測の範囲のみならず piezo acoustic の発信・受信を空間的に広げるとともに、波形発生と計測を 1GHz 程度の超高速にし、波形の調整と詳細計測を可能にすれば、高精度の欠陥モニタ手法が構成できるものと考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、機器・構造物のモニタのため、逆問題解析に基礎をおく2次元・3次元き裂の同定法として申請者らが開発した、①受動型電気ポテンシャルCT法と②piezo acoustic による能動型電気ポテンシャルCT法を組み合わせ、受信と音響発信をマトリックス状の多点で行うことができるスマートレイヤを構成し、能動型・受動型電気ポテンシャルCT法による欠陥モニタ手法を確立することにある。

具体的には、piezofilm 上にマトリックス状の電極を有するスマートレイヤを作製し、物体が力学的負荷を受けるときに piezo 効果により電流負荷を与えることなく構造要素に受動的に表れる電気ポテンシャル分布を計測する。このポテンシャル分布に逆問題解析を適用し、欠陥をモニタリングする。さらに、逆 piezo 効果を利用してスマートレイヤに空間的・時間的に調整した電圧を印加することにより能動的に超音波を発振させ、

き裂や欠陥から反射する波をスマートレイヤで検出し、検出反射波に逆解析を適用することにより、き裂や欠陥を同定する。

## 3. 研究の方法

貫通き裂を有する試験片に、図1に示す機能層を貼り付け、パルス反射法により、き裂パラメータの推定を行う。また、試験片に荷重を加えたときに、piezofilm 上に現れる電気ポテンシャル分布を測定した。

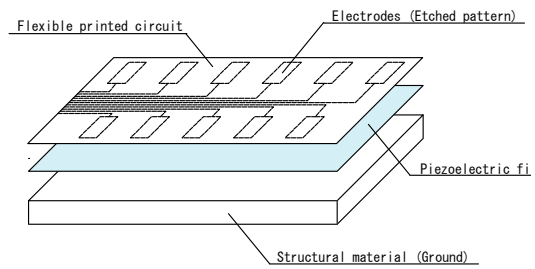


図1 ピエゾフィルムとプリント基板により構成されたスマート層

貫通垂直き裂を有する試験片を図2に示す。き裂を表すパラメータは、き裂半長  $a$ 、き裂深さ  $h$  およびき裂位置  $x_c$  である。

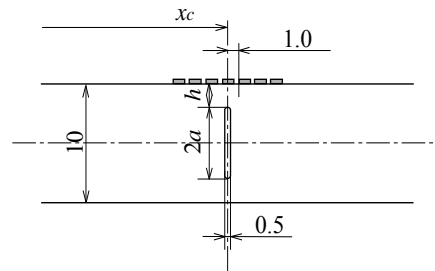


図2 貫通き裂のパラメータ

機能層による超音波探傷を行い、き裂深さ  $h$  およびき裂位置  $x_c$  を以下の方法で推定する。図2のように、 $x = 20.0(\text{mm})$ の電極中心位置とき裂中心位置との距離を  $c$  で表す。斜角探傷法により、超音波が  $x = 18.5(\text{mm})$ の電極からき裂部で反射し、 $x = 20.0(\text{mm})$ の電極へ伝搬する経路を  $L_1$ 、 $x = 21.5(\text{mm})$ の電極からき

裂部で反射し,  $x = 20.0(\text{mm})$ の電極へ入力される伝搬経路を  $L_2$ ,  $x = 18.5(\text{mm})$ の電極からき裂部で反射し,  $x = 21.5(\text{mm})$ の電極へ入力される伝搬経路を  $L_3$ とする. 超音波の伝達時間より  $L_1$ ,  $L_2$  および  $L_3$  を求め, これらの結果を用いて, き裂パラメータ  $h$  および  $x_c$  を推定した.

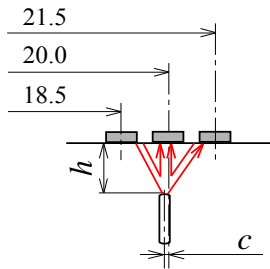


図3 音波の伝搬経路

試験片に荷重を与え, ひずみを生じさせる. ひずみによってピエゾフィルム表面の電極部に現れる電気ポテンシャル分布を求め, 無次元化すると図4に示す結果が得られた. き裂の前後で電気ポテンシャルの極致が表れていることがわかる.

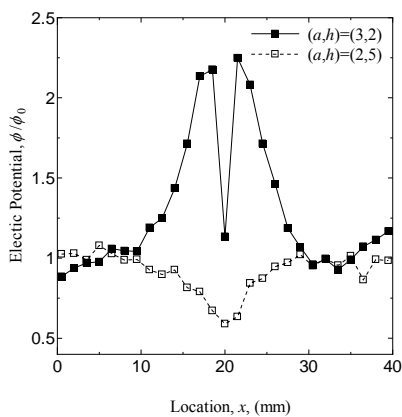


図4 ピエゾフィルム上の電気ポテンシャル分布の計測結果

受動型電気ポテンシャル CT 法では, 電気ポテンシャル分布を用いて, 二次元貫通き裂を逆問題的に同定する. 逆問題解析手法とし

ては, 残差最小化法を適用する. き裂パラメータを適当に仮定した場合の解析値  $\phi^{(c)}$  と計測値  $\phi^{(m)}$  との間で, 次式に示す残差平方和  $R_s$  を計算した.

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

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み合わせを同定結果とする.

受動型/能動型電気ポテンシャル CT 法では, き裂深さ  $h$  およびき裂位置  $x_c$  の値を補助的に用いて, き裂を同定する. 能動型パルス反射法によりき裂深さ  $h$  およびき裂位置  $x_c$  を推定し. き裂半長  $a$  の推定には受動型電気ポテンシャル CT 法を適用する手法を, 受動型 ( $a$ )/能動型 ( $h, x_c$ ) 電気ポテンシャル CT 法と呼ぶことにする. また, 能動型パルス反射法により裂深さ  $h$  を推定し. き裂半長  $a$  およびき裂位置  $x_c$  の推定には受動型電気ポテンシャル CT 法を適用する手法を, 受動型 ( $a, x_c$ )/能動型 ( $h$ ) 電気ポテンシャル CT 法と呼ぶことにする.

以下に, 各き裂同定手法について説明する.

#### (a) 受動型電気ポテンシャル CT 法

き裂が存在する場所での電気ポテンシャル分布は, 極小値をとることが数値解析より分かる. き裂パラメータ ( $a, h$ ) が (3,2) および (2,5) のどちらの場合も, 計測値は  $x = 20.0(\text{mm})$  で極小値をとる. したがってき裂位置  $x_c$  を  $x_c = 20.0(\text{mm})$  と粗く推定する. 次に  $x_c = 20.0(\text{mm})$  と固定し, 未知パラメータ ( $a, h$ ) をそれぞれ 3 通りに変えた計 9 個の組み合わ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  $R_s(a, h)$  を定める. この近似関数  $R_s(a, h)$  を最小にする  $a, h$  を粗い推定値とする.

$R_s$  を最小にするき裂パラメータの組み合わせを,  $a, h$  および  $x_c$  の 3 変数による修正パウエル法を用いて求める. ただし, 探索の初期値には, 粗い推定値を用いる

#### (b) 受動型 ( $a$ )/能動型 ( $h, x_c$ ) 電気ポテンシャル CT 法

能動型電気ポテンシャル CT 法により求めたき裂深さ  $h$  およびき裂位置  $x_c$  を推定値として用いる.

$R_s$  を最小にするき裂パラメータの組み合わせを,  $a$  のみの 1 変数による修正パウエル法を用いて求める. ただし, 探索の初期値は,

$a=1.0(\text{mm})$ とする。

(c) 受動型( $a, x_c$ ) / (h) 能動型電気ポテンシャルCT法

き裂深さ  $h$  を式(1)で求めた推定値に固定し、未知パラメータ ( $a, x_c$ ) をそれぞれ3通りに変えた計9個の組み合わ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乗近似により2次近似関数  $R_s(a, x_c)$  を定める。この近似関数  $R_s(a, x_c)$  を最小にする  $a, x_c$  を粗い推定値とする。

$R_s$  を最小にするき裂パラメータの組み合わせを、 $a$  および  $x_c$  の2変数による修正パウエル法を用いて求める。ただし、探索の初期値には、粗い推定値を用いる。

き裂パラメータ  $a, h, x_c$  の推定値と推定誤差  $\Delta a/a, \Delta h/h$ , および  $\Delta x_c/x_c$  の例を表1に示す。き裂パラメータ ( $a, h$ ) が (3, 2) および (2, 5) のどちらの場合においても、受動型 ( $a, x_c$ ) / 能動型 ( $h$ ) 電気ポテンシャルCT法を用いてき裂パラメータを同定した場合には、き裂深さ  $h$  およびき裂位置  $x_c$  を精度良く推定できることが分かる。

表1 受動型 / 能動型電気ポテンシャルCT法によるき裂同定結果の例

		Crack parameters		
		$a$	$h$	$x_c$
Passive	Actual	3.00	2.00	20.00
	Estimated	3.53	1.45	19.85
	Error(%)	17.7	27.5	0.7
Passive( $a$ ) / Active( $h, x_c$ )	Estimated	2.96	2.12	18.24
	Error(%)	1.3	6.0	8.8
Passive( $a, x_c$ ) / Active( $h$ )	Estimated	3.23	2.12	20.00
	Error(%)	7.7	6.0	0.0

スマートレイヤの二つの電極を用いて超音波の送受信を行うと、エコーの立ち上がり時間から、送信電極から発振され、き裂で反射して受信電極へ到達する超音波の最短経路距離が得られる。最短経路を通った超音波の反射点は送受信電極上の2点を焦点とする楕円上に存在する。スマートレイヤ上の複数の電極で1電極および2電極による計測を行い、円および楕円を作成することでき裂の位

置、形状および寸法を推定することができる。超音波の多点送受信により推定されたき裂の形状の例を、図5に示す。超音波の多点送受信によりき裂の位置および形状が包絡船として描き出されることがわかる。

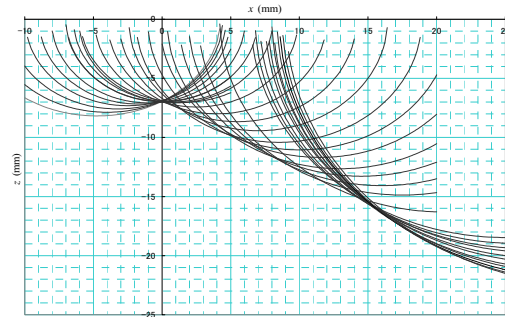


図4 多点間超音波送受信により同定されたき裂

4. 研究成果

機器・構造物のモニタのため、受動型電気ポテンシャルCT法と能動型電気ポテンシャルCT法を組み合わせ、受信と音響発信を行うことができるスマートレイヤを構成し、能動型・受動型電気ポテンシャルCT法によるき裂や欠陥をモニタする手法を構築した。得られた結果を以下に示す。

(1) ピエゾフィルム、電極とリード線端子をエッチングにより形成したフレキシブルプリント基板を、き裂を有する試験片の上に積層したスマートレイヤを製作した。このスマートレイヤをき裂を有する試験片に貼付し、受動型・能動型電気ポテンシャルCT法の適用性に関する検討を行った。すなわち、スマートレイヤを貼り付けた試験片に、力学的負荷がかかるときにスマートレイヤに受動的に表れる電気ポテンシャル分布を計測し、さらに、スマートレイヤに電圧を印加して能動的に超音波を発生させ、同時に反射波をスマートレイヤで検出した。これらの結果を総合することにより、き裂の大きさおよび位置を効率的に推定することが可能であることがわかった。受動型と能動型の組合せの方法の影響を調べた。

(2) スマートレイヤ上の多数の電極に電圧を印加して超音波を発生させ、その反射波をスマートレイヤ上の多数の電極で受信した。これらの結果を総合することにより、垂直き裂や斜めき裂の位置や形状を推定する

ことができた。

(3) 複合材料中に存在する複合はく離の同定に対する、受動型電気ポテンシャル CT 法の適用に関するシミュレーションを行った。複合材料中の複数はく離についても受動型電気ポテンシャル CT 法により欠陥の大きさと位置が推定できることがわかった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Shiro Kubo, Takahide Sakagami, Seiji Ioka, and K.atsunori Tsuboi, "Effect of Combination of Passive and Active Electric Potential CT Methods Using Piezoelectric Film on Crack Identification", Proc. of CST2010: The 10th International Conference on Computational Structures Technology, Valencia, Spain, 2010, (in press).
- ② Shiro Kubo, Takahide Sakagami, Seiji Ioka and T. Maeda, "Active and Passive Electric Potential CT Methods Using Piezoelectric Film and Inverse Analysis for Crack Identification", Proc. of the Joint 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, Sydney, Australia, 2010, (in press).
- ③ Shiro Kubo, Takahide Sakagami, Sayo Yamaguchi and Kensaku Nakatani, "An Application of the Passive Electric Potential CT Method for Identification of Plural Delaminations in a Composite Material", Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Fracture, Paper # T22.005, 2009, 1-8.
- ④ 久保司郎, 「材料の強度と破壊に関連する逆問題と逆解析」, 第 53 回材料強度と破壊総合シンポジウム論文集, 53 巻, 2009, 57-69.
- ⑤ Shiro Kubo, Takahide Sakagami, Toshio Suzuki, Takaharu Maeda and Kensaku Nakatani, "Use of the Piezoelectric Film for the Determination of Cracks and Defects -The Passive and Active Electric Potential CT Method", Journal of Physics, Conference Series, IOP, Vol. 135, 012057, 2008, 1-9.

[学会発表] (計 9 件)

- ① 綿加裕己, 鈴木俊男, 久保司郎, 阪上隆英, 「圧電フィルムを用いた超音波による欠陥検出・同定および構造ヘルスマニタリング手法」, 日本機械学会第 22 回計算力学講演会講演論文集, No.09-21, 2009, 127-128.
- ② 久保司郎, 阪上隆英, 前田孝治, 「ピエゾ

フィルムを用いた受動型/能動型ポテンシャル CT 法による欠陥同定」, 日本応用数理学会 2009 年度年会講演予稿集, 2009, 111-112.

- ③ 前田孝治, 鈴木俊男, 綿加裕己, 久保司郎, 阪上隆英, 「ピエゾフィルムを用いた受動型/能動型電気ポテンシャル CT 法による欠陥モニタリング」, 日本機械学会 M&M2009 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集, No.09-3, 2009, 761-762.
- ④ 鈴木俊男, 前田孝治, 綿加裕己, 久保司郎, 阪上隆英, 「圧電フィルムを用いた超音波による欠陥検出・同定および構造ヘルスマニタリング手法」, 日本機械学会 M&M2009 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集, No.09-3, 2009, 763-764.
- ⑤ 前田孝治, 久保司郎, 阪上隆英, 「ピエゾフィルムを用いた受動型/能動型ポテンシャル CT 法による欠陥モニタリング手法」, 日本機械学会関西支部 第 84 期定時総会講演会講演論文集, No.094-1, 2008, p.8-21.
- ⑥ 鈴木俊男, 久保司郎, 阪上隆英, 「圧電フィルムを用いた超音波による欠陥検出・同定および構造ヘルスマニタリング手法」, 日本機械学会関西支部第 84 期定時総会講演会講演論文集, No.094-1, 2008.3, p.8-20.
- ⑦ Shiro Kubo, "Identification of Cracks and Defects by the Passive/Active Electric Potential CT Method", 2008 Taiwan-Japan Joint Workshop on Inverse Problem, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, 2008.
- ⑧ 久保司郎, 古川功太, 阪上隆英, 「複合材料中の複合はく離欠陥の同定に対する受動型電気ポテンシャル CT 法の適用」, 日本非破壊検査協会 平成 19 年度秋季講演大会講演概要集, 2007, 47-50.
- ⑨ 古川功太, 久保司郎, 阪上隆英, 「受動型電気ポテンシャル CT 法による複合材料中の複合はく離の同定」, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, No.07-1, Vol. 6, 2007, 149-150.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

久保 司郎 (KUBO SHIRO)  
大阪大学・工学研究科・教授  
研究者番号：20107139

##### (2) 研究分担者

阪上 隆英 (SAKAGAMI TAKAHIDE)  
神戸大学・工学研究科・教授  
研究者番号：50192589

井岡 誠司 (IOKA SEIJI)  
大阪大学・工学研究科・助教  
研究者番号：50283726