

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：34428

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360055

研究課題名(和文)マトリックス状プローブ柔軟 piezo・スマート層による能動受動型欠陥モニタ逆解析手法

研究課題名(英文)Passive/Active Defect Monitoring Inverse Analysis Method Using Flexible Piezoelectric Smart Layer with Probe Matrix

研究代表者

久保 司郎 (KUBO, SHIRO)

摂南大学・理工学部・教授

研究者番号：20107139

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円、(間接経費) 4,350,000円

研究成果の概要(和文)：構造物の健全性を確保するため、piezofilm上に多数のプローブを配置したスマート層を用いて欠陥をモニタする能動受動型欠陥モニタ手法を提案した。piezofilm上に受動的に表れる電気ポテンシャル分布を用いる受動型電気ポテンシャルCT法により、非貫通3次元き裂が同定できた。複数のpiezofilmを利用することの効果을明らかにした。多数のプローブ間で能動的に音響発振と受信を行う能動型パルスエコー法を適用し、エコーの伝播時間から欠陥を同定した。複数のプローブから時間差をおいてエコーを発振させ、それらが干渉する時間差からき裂端の位置が推定できた。能動型受動型両手法の併用により、き裂同定の確度が高められた。

研究成果の概要(英文)：For assuring integrity of structures, the passive/active defect monitoring inverse analysis method was proposed using flexible piezoelectric smart layer with probe matrix. By the passive electric potential CT (computed tomography) method, which used electric potential appearing passively on piezoelectric film, a part-through three-dimensional crack was identified successfully. The advantage of the use of several piezoelectric films was demonstrated. In the active pulse-echo method, echo emitted actively at a probe was received at several probes. From the time-of-flight of the echo for several combinations of emitting and receiving probes, the crack was identified. When echo interference was observed for echo emitted at two probes, crack identification was made successfully from the difference of emitting time of the echo. The effect of the simultaneous use of the passive and the active methods was identified.

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：非破壊評価 破壊力学 欠陥同定 電気ポテンシャル法 piezofilm スマートマテリアル パルスエコー法

## 1. 研究開始当初の背景

### ( 1 ) 経年プラント・機器の増大によるモニタリングの重要性の増大

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、非破壊評価の重要性が増している。一般に非破壊検査は、機器を停止して定期的に行われる。機器を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、機器停止による損傷が生じない点で、定期検査に勝る大きな利点をもつ。

### ( 2 ) 受動型・能動型手法の併用によるモニタリングの向上

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手法が適している。一方、き裂や欠陥が検出されたときには、その部分に集中して能動的に検査を行う必要がある。これら受動型能動型両手法の情報を総合・融合することにより、検出の確実性を高め、欠陥寸法の推定精度が向上できると考えられる。

### ( 3 ) 申請者らによる受動型・能動型モニタリング手法の実績と本研究の見通し

非破壊検査やモニタは、出力より入力を推定する逆問題の一つである。申請者らは、直接通電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し、欠陥同定を行った。さらに、力学的負荷を受ける物体の表面に piezofilm に貼付し、通電せずに電気ポテンシャル分布を得ることができる、受動型電気ポテンシャル CT 法を提案した。また、同じ piezofilm に電気的パルスを与え、能動的に音響加振する新たな能動型パルスエコー法を提案した。

これまでの研究成果のもと、マトリクス状に配置されたプローブ(探触子)より構成されるスマート層を用いることにより、受動型と能動型の利点を相補的にもち、3次元欠陥・き裂を高精度かつ確実に検出・計測する新たなモニタリング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、逆問題解析に基礎をおくき裂の同定法として申請者らが開発した、piezofilm を用いた受動型電気ポテンシャル CT 法と能動型パルスエコー法を組み合わせ、マトリクス状に配置した多点のプローブを有するスマート層を用いて、マトリクス状プローブ柔軟 piezo・スマート層による能動受動型 3次元欠陥モニタ逆解析手法を構築することにある。

具体的には、piezofilm 上にマトリクス状プローブを配置したスマート層を製作し、これを、き裂や欠陥を有する物体に貼付する。物体が力学的負荷を受けるとき、電流負荷がなくても piezo 効果により物体表

面に受動的に表れる電気ポテンシャル分布を計測する。さらに、逆 piezo 効果を利用してスマート層上のマトリクス状プローブに電気的パルスを印加することにより能動的に超音波を発振させ、欠陥から反射する波をマトリクス状プローブで検出する。これらの応答に逆解析を適用することにより、3次元き裂や欠陥を同定する。

## 3. 研究の方法

### ( 1 ) 受動型電気ポテンシャル CT 法によるき裂同定の方法

従来の電気ポテンシャル CT 法は、通電したときに物体の表面に生じる電気ポテンシャル分布を用いてき裂を同定する、いわゆる能動型(アクティブ)検査法である。圧電効果を持つ piezofilm を物体表面に貼り付ければ、物体に力が加わったときの物体のひずみ分布に応じた piezofilm 上の電気ポテンシャル分布を、外部から通電することなく、受動的に得ることができる。き裂があるときのひずみ分布はき裂の影響を受け、piezofilm 上の電気ポテンシャル分布はき裂の位置と寸法を反映したものとなる。したがって piezofilm 上の電気ポテンシャル分布をもとにき裂を逆問題的に同定することができる。このような受動型電気ポテンシャル CT 法により、3次元き裂の同定を行う。

### ( 2 ) 能動型パルスエコー法によるき裂同定の方法

図1のように、piezofilm とフレキシブルプリント基板(FPC)からなるスマートレイヤを構成すると、電極を多数設置することが可能となり、電気ポテンシャル分布を計測することができる。この多数の電極に電気的パルスを印加すると逆 piezo 効果により超音波を発振することができ、欠陥等からの反射波を多数の電極で受信することができる。このときの伝播時間等から、き裂の位置や形状に関する情報を逆問題的に推定することを考える。そこで、このような原理に基づいた能動型パルスエコー法により、き裂の同定を行う。

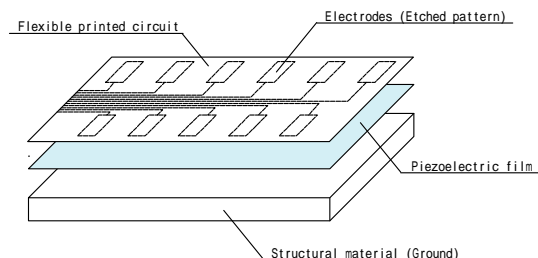


図1 piezofilm とフレキシブルプリント基板(FPC)からなるスマートレイヤ

#### 4. 研究成果

##### (1) 受動型電気ポテンシャル CT 法によるき裂同定の結果

受動型電気ポテンシャル CT 法を、長方形の非貫通 3 次元き裂を有する試験片、および先端に丸みの非貫通 3 次元き裂を有する試験片に適用した。試験片上面に貼付した piezofilm 上に表れる電気ポテンシャル分布からき裂の位置および形状の同定を行った。同定結果の一例を図 2 に示す。

図 2 のように、観測誤差が存在する条件下においても、き裂位置と形状が推定できていることがわかった。

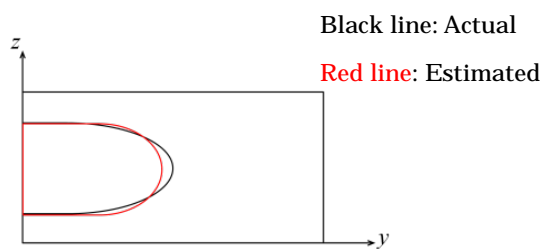


図 2 受動型電気ポテンシャル CT 法による非貫通 3 次元き裂の同定結果

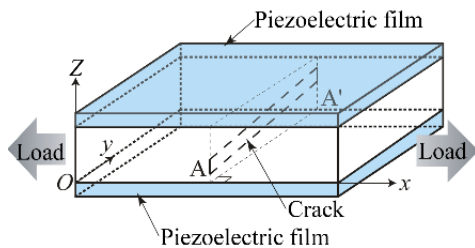


図 3 上下面に piezofilm を貼付したき裂試験片

試験片の複数の表面に貼付された複数の piezofilm の上の電気ポテンシャル分布を用いたき裂の同定について検討を行った。図 3 のように、上下面に piezofilm を貼付した場合に得られる電気ポテンシャル分布を用いて、斜めき裂の同定を行った。

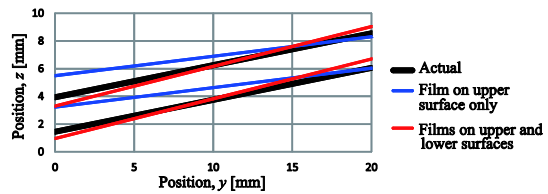


図 4 上下面に貼付した piezofilm の上の電気ポテンシャル分布からき裂を同定した結果

き裂の同定結果を図 4 に示す。図 4 のように、き裂の一部が試験片の上面近くのみならず下面近くに存在する場合には、複数の piezofilm 上の電気ポテンシャル分布を用いることにより、単数の piezofilm を用いた場合に比べて良好な推定結果が得られることがわかった。

##### (2) 能動型パルスエコー法によるき裂同定の結果

能動型パルスエコー法を用いて、3 次元き裂の同定を行った。このため、図 5 のようにマトリックス状のプローブを有するスマートレイヤを作成した。送信プローブと受信プローブとの多くの組合せに対するエコーの伝播時間から、き裂に接する多くの包絡線を描き、それらをもとに欠陥形状を再構成する、多重包絡線法を適用した。

実験に用いた 3 次元き裂を有する試験片の例を、図 6 に示す。図 6 の試験片の上面においてマトリックス状に配置された各プローブに電気的パルスを印加し、反射エコーの有無により、き裂形状を粗く推定するモノプローブ法を適用した。その結果を、図 7 に示す。図 7 より、モノプローブ法により、き裂の大まかな形状の推定が可能であることがわかる。

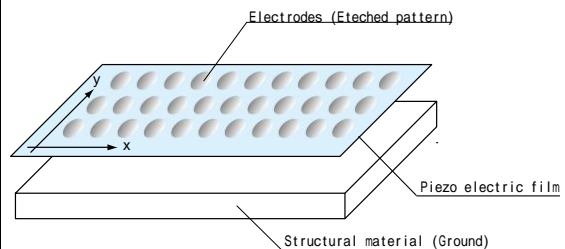


図 5 マトリックス状のプローブをもつスマートレイヤ

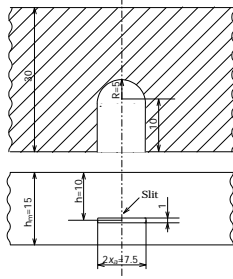


図6 3次元き裂を有する試験片

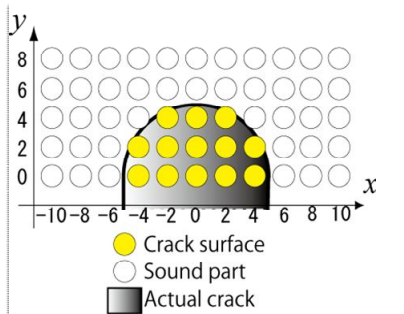


図7 マトリックス状に配置されたプローブを用いたモノプローブ法による3次元き裂形状の推定結果

また、送信プローブと受信プローブとの多くの組合せに対して多重包絡線法を適用して、き裂形状を再構成した。その結果を図8に示す。多重包絡線法により実き裂に接するような包絡線法が得られており、多重包絡線法によりき裂の位置および形状が推定できていることがわかる。

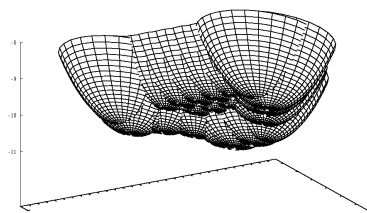


図8 マトリックス状に配置されたプローブ間の多重包絡線法による3次元き裂の再構成結果

複数のプローブから時間差をおいてパルスを発振する能動型パルスエコー法の適用性についても検討を行った。パルス発振の時間差を調整することにより、複数のプローブから発信された超音波が干渉をはじめることがわかった。干渉が生じる時間差を求める方法として、重ね合わせたエコーの立ち上がり時間付近のエコーの振幅が最大になるときから求める手法と、重ね合わせたエコーの

立ち上がり時間が遅延時間を増加させても変化しなくなる時から求める手法を提案し、これらを計測結果に適用した。

斜めき裂の先端位置をエコーの立ち上がり時間から、き裂先端位置を推定した結果の例を図9に示す。またエコーの立ち上がり時間から推定する方法とエコーの振幅から推定する方法の比較を表1に示す。

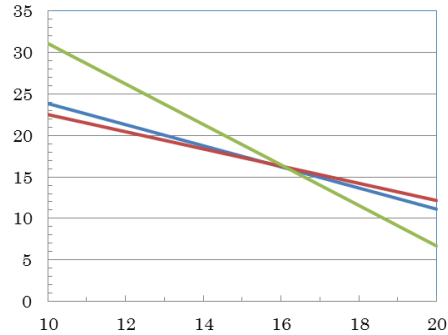


図9 複数の発信プローブを用いたエコーの立ち上がり時間から推定されたき裂先端位置

表1 複数のプローブからのパルスを用いた能動型パルスエコー法によるき裂先端位置の推定結果

	Right crack tip location ( $x_R, z_R$ )
Actual crack	(16.0, 16.24)
Estimated by amplitude	(16.2, 14.7)
Estimated by rise time	(16.2, 16.2)

表1のように、エコーの立ち上がり時間に注目し遅延時間を求めた方が、振幅を用いる場合よりも、高い精度でき裂端の位置を推定することが可能であることがわかる。

これらの結果より、複数のプローブを用いた能動型パルスエコー法により、き裂の同定が可能であることがわかる。

受動型の電気ポテンシャルCT法は、貼付した piezofilm からき裂や欠陥までの距離が短い場合に適している。これに対して、能動型のパルスエコー法は、piezofilm に近接しているき裂や欠陥の同定には不向きであるが、距離が遠い欠陥やき裂に対しても有効である。受動型電気ポテンシャルCT法と能動型パルスエコー法を組み合わせることにより、欠陥やき裂を効果的に同定することができる。

### (3) まとめ

piezofilm 上にマトリックス状のプローブを配置したスマートレイヤを作成し、これを用いてき裂や欠陥を同定する手法として、受動型電気ポテンシャルCT法と能動

型パルスエコー法を提案した。

これらの手法の有効性を調べた結果，多点のプロブを有する受動型電気ポテンシャルCT法と能動型パルスエコー法により，き裂の同定が可能であることが明らかとなった。受動型電気ポテンシャルCT法と能動型パルスエコー法の併用により，欠陥やき裂を効果的に同定できることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12 件)

西山 諒, 久保司郎, 井岡誠司, 「複数の Piezofilm を用いた受動型電気ポテンシャルCT法による欠陥同定」, 日本機械学会 第 19 回計算力学講演会講演論文集, 査読無, 講演#904, (2013), pp.1-3.

大東宜志, 久保司郎, 井岡誠司, 「スマートレイヤを用いた多点パルスエコー法による欠陥同定」, 日本機械学会 第 19 回計算力学講演会講演論文集, 査読無, 講演#902, (2013), pp.1-3.

Shiro Kubo, Takahide Sakagami and Seiji Ioka, “Passive electric potential CT method using piezoelectric film for identification of defects”, Journal: Inverse Problems in Science and Engineering, 査読有, Vol. 21, No. 6, (2013), pp. 917-928.

中村こころ, 久保司郎, 阪上隆英, 「受動型電気ポテンシャルCT法を用いた非貫通三次元き裂の同定」, 日本機械学会関西支部第 87 定時総会講演会講演論文集, 査読無, No.124-1, (2012), p. 8 - 23.

Takashi Oohigashi, Yuuki Wataka and Shiro Kubo, “Identification of a Vertical Crack by the Active Pulse-Echo Method Using Smart Layer”, Proc. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012), 査読有, (2012), Paper No. 4197, pp. 1-10.

Shiro Kubo, Kokoro Nakamura and Takahide Sakagami, “The Passive Electric Potential Computed Tomography Method for Identification of a Part-Through Three-Dimensional Crack”, Proc. CST2012: The 11th International Conference on Computational Structures Technology, 査読有, (2012), Paper No. 88, pp. 1-10.

Shiro Kubo, Yuki Wataka, Takashi Ohigashi, and Takahide Sakagami, “Identification of a Surface Crack by Active Pulse Echo Method Using Piezoelectric Film”, Proc. 15th Int. Conf. Experimental Mechanics, 査読有, (2012), Paper No. 2728, pp.1-5

Shiro Kubo, Takahide Sakagami and

Toshio Suzuki, “Multiple Electrodes Active Pulse Echo Method Using a Piezoelectric Film for Crack Identification”, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, JSME, 査読有, Vol. 6, No.6, (2012), pp.519-529.

中村こころ, 久保司郎, 阪上隆英, 「受動型電気ポテンシャルCT法を用いた非貫通三次元き裂形状の同定」, 日本材料学会高温強度・破壊力学合同シンポジウム - 第 49 回高温強度シンポジウム, 第 15 回破壊力学シンポジウム講演論文集, 査読無, (2011), pp.361-365.

綿加裕己, 大東宜志, 久保司郎, 「スマートレイヤを用いた多点パルスエコー法による 3 次元き裂同定」, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会講演論文集, 査読無, No.11-3, (2011), pp.1-2.

Shiro Kubo, Takahide Sakagami and Toshio Suzuki, “Multiple Electrodes Active Pulse Echo Method Using a Piezoelectric Film for Crack Identification”, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics (ATEM 11), 査読有, (2011), Paper # OS10F082 (OS10-1-4), pp.1-9.

Shiro Kubo, Takahide Sakagami, Seiji Ioka and Takaharu Maeda, “Multi-Electrodes Active and Passive Electric Potential CT Methods for Crack Identification Using a Smart Layer”, Strength, Fracture and Complexity, an International Journal, 査読有, Vol. 7, No.1, (2011), pp.43-51.

〔学会発表〕(計 6 件)

久保司郎, 「高温破壊力学と逆問題の研究黎明期の失敗とセレンディピテイ」(特別講演), 日本機械学会関西支部秋期技術フォーラム, 2013 年 10 月 16 日, 吹田・大阪大学コンベンションセンター。

久保司郎, 「高温破壊力学と逆問題解析の黎明期に身を置いて」(特別講演), 日本材料学会総会講演会, 2013 年 5 月 19 日, 東京・東京工業大学。

久保司郎, 「高温破壊力学, 非線形破壊力学から逆問題解析へ」(特別講演), 日本材料学会 第 143 回破壊力学部門委員会, 2013 年 2 月 28 日, 大阪・大阪大学中之島センター。

Shiro Kubo, “Crack Identification Using Electric Response -From Active Method to Passive Method, and Active Method Again-“ (キーノート講演), International Computational Mechanics Symposium 2012: JSME-CMD ICMS2012, 2012 年 10 月 11 日, Paper #: MS10-1-, Kobe, Kobe

University.

Shiro Kubo, Takahide Sakagami and Seiji Ioka, "Crack Identification from Electric Potential Response Using Inverse Analysis Methods"(招待講演), IUTAM 2012 Symposium "Fracture Phenomena in Nature and Technology", 2012年7月4日, Faculty of Engineering, Universita` di Brescia, Brescia, Italy.

久保司郎,「工学における逆問題とその数値解析例」(招待講演), 大中幸三郎先生退職記念研究集会「数値計算・数値解析と逆問題 -これまでとこれから-」, 2012年3月6日, 岡山・岡山理科大学

〔図書〕(計 2 件)

久保司郎,「逆問題」, 応用数理ハンドブック, (2013), 薩摩順吉・大石進一・杉原正顕 編, pp.566-569, 朝倉書店

Shiro Kubo, Takahide Sakagami and Seiji Ioka, "Crack Identification by the Passive and Active Methods with the Use of Piezoelectric Film and Inverse Analysis", Simulation and Modeling Related to Computational Science and Robotics Technology, Proc. of SiMCRT 2011, (2012), IOS Press, pp.79-84.

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

該当なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

久保 司郎 (KUBO SHIRO)  
摂南大学・理工学部・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)  
大阪電気通信大学・工学部・准教授  
研究者番号: 50283726