

平成 30 年 5 月 10 日現在

機関番号：34428

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03897

研究課題名(和文) piezoelectric material using time-space active pulse-echo and passive electric potential methods for defect identification

研究課題名(英文) Defect Identification by Time-Space Active Pulse-Echo and Passive Electric Potential Methods Using Piezoelectric Material

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) 8,200,000円

研究成果の概要(和文)：検査物体の表面上に貼付した piezoelectric film 上の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法によりき裂を同定した。複数面上の piezoelectric film の使用が有効であった。ポテンシャルの計算値と計測値の間で評価した残差をき裂パラメータの関数で表現すること、および分布の特徴量抽出の使用により同定が迅速になった。また、piezoelectric film に電氣的パルスを加えて超音波を発生させ、き裂からの反射波をフィルムで受信する能動型パルスエコー法によるき裂同定を行った。得られた波形に時間反転法を適用することにより、き裂先端位置が推定できた。piezoelectric film を複数面に配置することにより推定の確度が上がった。

研究成果の概要(英文)：Crack identification by the passive electric potential (computed tomography) method was made using electric potential on piezoelectric film pasted on surface of a body to be inspected. Use of the piezoelectric film on several surfaces was effective. Function expansion of residual between calculated and observed potentials and use of characteristics of potential distribution worked well for rapid identification. Crack identification was made by the active pulse-echo method, in which supersonic wave was activated by applying electric pulse on the film and receiving signal reflected on the crack. By applying time reversal method location of crack tip was estimated. Use of piezoelectric film on several surfaces was effective.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：機械材料・材料力学 非破壊検査 破壊力学 欠陥同定 逆問題 逆解析 piezoelectric film

1. 研究開始当初の背景

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 に電氣的パルスを与え、能動的に音響加振する新たな能動型パルスエコー法 (能動型電気ポテンシャル CT 法) を提案した。この能動的パルスエコー法によれば、piezofilm 上に設置した多くのプローブから超音波を送信し、また反射波を受信することができ、また数個のプローブから時間差をもって超音波を発信させることにより、欠陥位置にあわせた超音波を送信することができた。いま、検査物体が有するいくつかの面に piezofilm を貼付すれば、従来の単一平面に piezofilm がある場合に比べ、超音波の送受信の自由度を飛躍的に向上させることができ、欠陥同定の確実性と精度を大きく高めることができるものと考えられる。

そこで、piezofilm を用いた時空間能動型パルスエコー/受動型電気ポテンシャル併用による欠陥同定手法の提案を行うこととした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、構造物の健全性評価のため、piezofilm を用いた時空間能動型パルスエコー・受動型電気ポテンシャル併用欠陥同定手法を確立することにある。すなわち、検査物体の表面に piezofilm を貼付し、piezofilm に受動的に表れる電気ポテンシャル分布より欠陥を同定する。また、piezofilm に設置したプローブに電氣的パルスを印加し、逆 piezofilm 効果により超音波を発生させる。piezofilm 効果を利用し、欠陥等の反射波を piezofilm 全面で受信し、欠陥を同定する。

3. 研究の方法

本研究では、piezofilm を用いた時空間能動型パルスエコー・受動型電気ポテンシャル併用欠陥同定手法を確立する。すなわち、検査物体の表面に piezofilm を貼付し、piezofilm に受動的に表れる電気ポテンシャル分布より欠陥を同定する。き裂同定のための逆解析手法としては電気ポテンシャルの計算値と計測値の間で残差を評価する残差最小化法を適用する。piezofilm を検査物体の複数の面に貼付することにより、自由度の高い情報を獲得する。あわせて、残差の関数表現や特徴量抽出による同定計算の高速化を図る。また、piezofilm に設置したプローブに電氣的パルスを印加し、逆 piezofilm 効果により超音波を発生させる。piezofilm

効果を利用し、欠陥等の反射波を piezofilm 全面で受信する。受信波に対して逆解析手法を適用することにより、き裂を同定する。piezofilm を貼付する面を複数にすることや、プローブの配置の選択による効果的な同定の方法を探る。

4. 研究成果

4.1 受動型電気ポテンシャル CT 法によるき裂同定の結果

き裂を有する物体に力学的負荷が作用するとき、物体表面に貼付した piezofilm 上に生じる電気ポテンシャル分布からき裂を同定する受動型電気ポテンシャル CT 法に関する検討を行った。貫通き裂状欠陥を有する試験片の上面および下面に piezofilm を貼付したときの電気ポテンシャル分布を総合し、観測値と計算値の間で評価した残差を最小化する残差最小化法によりき裂の位置と形状を推定する数値シミュレーションを実施した。両面のポテンシャル分布を使うことにより、き裂同定の確実性が増すことがわかった。

また、残差をき裂パラメータのべき関数で表現し、それをもとに残差の最小値を与えるき裂パラメータを計算する操作を組み入れ、これを繰り返すことにより、き裂同定の迅速化を行った。

さらに、電気ポテンシャル分の特徴量の使用を行った。すなわち、ポテンシャル分布の最大値の大きさとその発生位置をもとに欠陥寸法と位置の第 1 段推定を行った。その結果を初期値として、残差を最小にするようなき裂パラメータの組合せを繰り返し計算で求めた。このような特徴量を用いた推定を行うことにより、解の収束が格段に速くなることがわかった。

4.2 能動型パルスエコー法によるき裂同定の結果

き裂を有する物体の表面に貼付した piezofilm に電氣的パルスを印加することによる超音波を発生させ、き裂からの反射波を同じく piezofilm で検出する能動型パルスエコーについて検討を行った。波動に関する支配方程式の随伴方程式が時間を反転させた波動方程式であることを利用して、プローブで受信した波を逆にプローブ上で発信し、時間を逆に進める時間反転法を提案した。

能動的パルスエコー法では、図 1 のように piezofilm 上の Probe 0 にパルス電圧を付加し超音波を発振させ超音波はき裂先端で反射する。この反射波を piezofilm 上の Probe 1 から 5 で受信する。

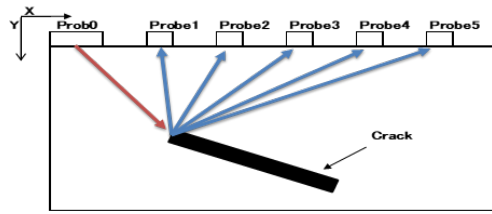


図1 能動型パルスエコー法による超音波の伝播

時間反転法では、図2のように時間を巻き戻しながら各プローブで受信波を発振する。波はき裂先端部に集まるものと予想される。

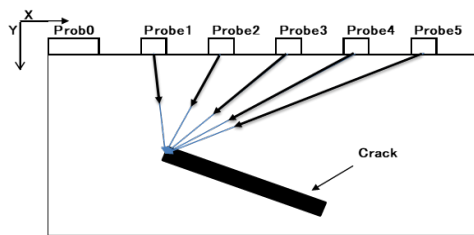


図2 時間反転法による超音波の逆伝播

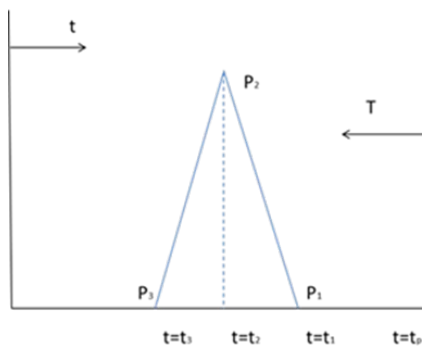
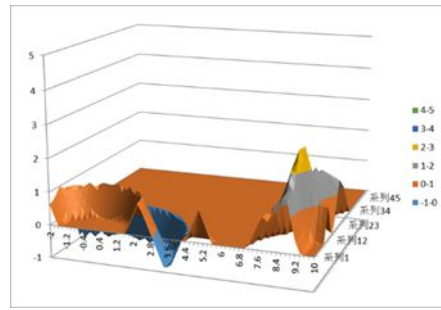


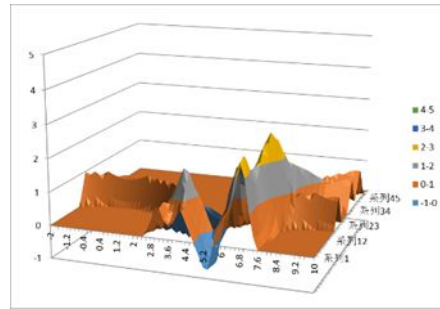
図3 模擬波形

そこで、 piezofilm上に設置されたプローブ各点で計測された反射波を計測する。この反射波を、時間を反転させて各プローブ上で発信するときの波の焦点化によりき裂を同定する。

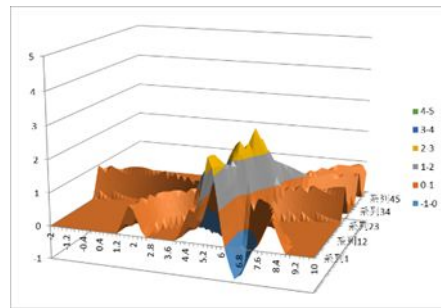
図3の模擬波形に対して各プローブ上の受信波を計算し、受信波に時間反転法を適用した。得られた結果の例を図4に示す。同図の(a),(b),(c)および(d)は、それぞれ反転時刻 $T=5.0\mu\text{s}$, $5.3\mu\text{s}$, $5.5\mu\text{s}$ および $5.7\mu\text{s}$ のときの波形である。図のように、時間反転法により波が収束していく様子が認められる。波の収束点の位置がき裂先端と一致することがわかった。



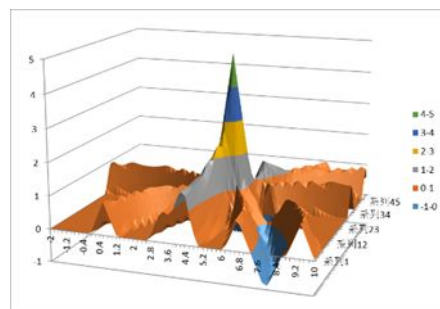
(a) $T=5.0\mu\text{s}$



(b) $T=5.3\mu\text{s}$

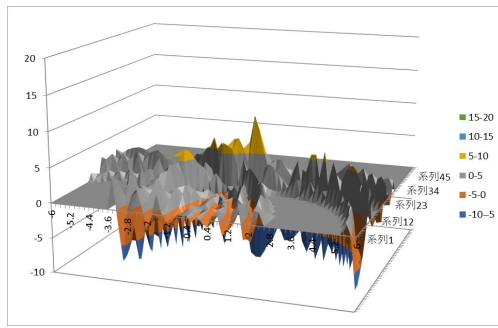


(c) $T=5.5\mu\text{s}$

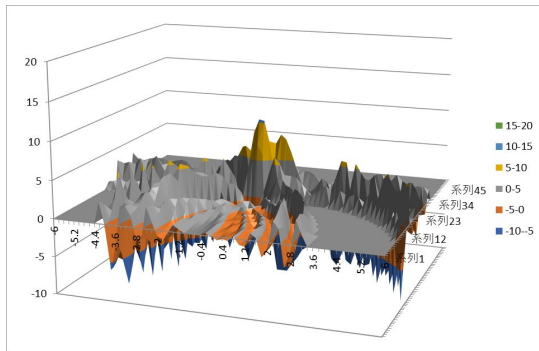


(d) $T=5.7\mu\text{s}$

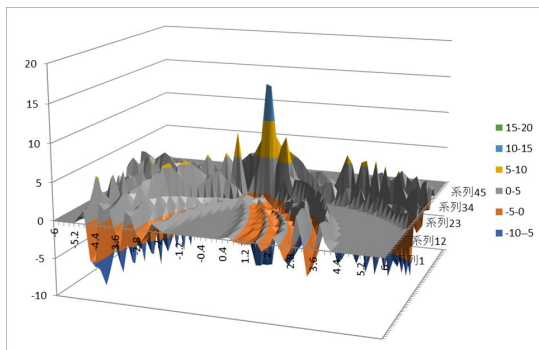
図4 時間反転法の適用結果の例



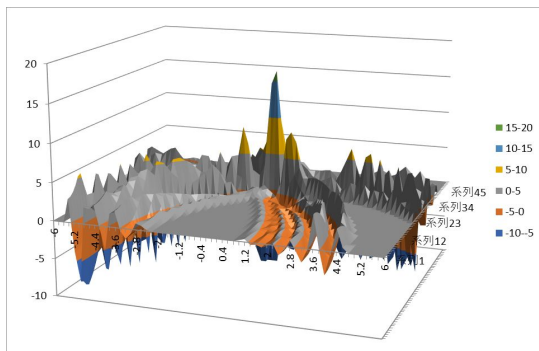
(a)



(b)



(c)



(d)

図5 実計測波形に対する時間反転法の適用結果の例

プローブの配置面と間隔を変えて、欠陥同定の確実性を調べた。その結果、プローブ間隔が狭い場合には、反射波の焦点化がしやすいが、間隔が広い場合には、き裂先端位置の同定の確実性が増すことがわかった。プローブ位置がき裂先端から離れているときには、プローブ間隔が狭いと、反射波の焦点化が顕著ではなくなることがわかった。ピエゾフィルムを貼付する面を、上面と側面の2面にした場合についても検討を行った。その結果、片面だけにプローブを配置するよりも上部と側面に配置した場合の方がき裂端部の位置を明確に同定できることが分かった。

さらに、受信波形にピーク値と受信時刻が推定結果に及ぼす影響を調べた。その結果、ピーク値に多少の誤差が入っても推定結果に及ぼす影響が小さいが、受信時刻に誤差が入ると推定結果に大きな影響が出ることがわかった。

実際に多数のプローブ上で計測された波形に対し、時間反転法を適用した。得られた波の例を、時間経過の順に図5(a), (b), (c)および(d)に示す。図のように波の収束が認められ、ピーク的位置がほぼき裂先端位置と一致することが確認できた。

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 9 件)

久保司郎, 「破壊力学」, 摂南大学融合科学研究所論文集, 査読有, 1 巻, 1 号, (2015), pp.91-98.

久保司郎, 山本哲平, 「コーティングを有する薄肉パイプ外面からの内部温度と熱応力の分布の逆解析」, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集, No.15-6, 講演 # 321, (2015), pp.1-3.

Shiro Kubo, Seiji Ioka and Ryo Nishiyama, “Defect Identification by the Passive Electric Potential CT Method Using Several Piezoelectric Films”, Proc. the 17th International Conference on Experimental Mechanics, 査読有, #426, (2016), pp.1-2.

Shiro Kubo, and Kotaro Murakami, “Time Reversal Method for Crack Identification by the Active Pulse Echo Method and the Effect of Probe Spacing”, Proc. of the 10th Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength, 査読有, (2016), pp. 201-202.

久保司郎, 「逆問題の考え方」, 摂南大学融合科学研究所論文集, 査読有, 2 巻, 1 号, (2016), pp.121-128.

Shiro Kubo, and Seigo Nakamura,

“Active Pulse Echo Method with Time Reversal Method for Identifying Crack”, The 9th Int. Conf. on Inverse Problems in Engineering, 査読有, (2017), Paper 23T, pp.1-8.

中村誠剛, 久保司郎, 「能動型パルスエコー法に対する時間反転法によるき裂同定: プローブ配置の影響」, 日本機械学会第30回計算力学講演会講演論文集, 査読無, No.17-4, #059, (2017), pp.1-3.

中村誠剛, 久保司郎, 「能動型パルスエコー法に対する時間反転法によるき裂同定: 実験的検証」, 日本機械学会M&M2017 材料力学カンファレンスCD-ROM 論文集, 査読無, No.17-5, 講演#OS0211, 2017.10, pp.157-161.

中村誠剛, 久保司郎, 「能動的パルスエコー法に対する時間反転法による欠陥同定: プローブ個数の影響」, 日本機械学会関西支部第93期定時総会講演会講演論文集, 査読無, No.184-1, #202, (2018), p. 49-51.

〔学会発表〕(計 4 件)

久保司郎, 「逆問題解析と非破壊評価への応用」(特別講演), 日本非破壊検査協会安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム論文集, 同シンポジウム論文集, 査読無, (2017), pp.vii-xii、函館・サン・リフレ函館.

久保司郎, 「 piezoelectric film を用いた受動型・能動型き裂同定・モニタリング手法」(特別講演), 2017年度 精密工学会 関西地方定期学術講演会, (2017), 寝屋川・摂南大学.

久保司郎, 「逆問題の考え方」(招待講演), 摂南大学融合科学研究所 研究発表会, (2017), 寝屋川・摂南大学.

Shiro Kubo, “Crack Identification Using Piezoelectric Film -From Passive Method to Active Method-” (招待講演), Taiwan-Japan Joint Workshop on Inverse Problems in Kanazawa 2017, (2017), Shiinoki Cultural Complex, Kansazawa, Japan.

〔図書〕(計 0 件)

〔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