

平成 30 年 5 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04139

研究課題名(和文)熱応力と表面波フェーズドアレイによる閉じた表面き裂の非線形超音波映像法の創出

研究課題名(英文)Development of nonlinear ultrasonic phased array imaging with surface acoustic wave and thermal stress

研究代表者

小原 良和 (Ohara, Yoshikazu)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90520875

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：構造物の表面は最も欠陥が発生しやすいため、表面き裂の高精度計測が信頼性保障の要である。しかし、発生初期の表面き裂は閉じていることが多く、超音波を透過してしまうため、従来法では検出できない。本研究では、これまで開発してきた閉じたき裂の映像法を飛躍的に発展させ、世界に先駆けて「熱応力と表面波フェーズドアレイの融合による閉じた表面き裂の非線形超音波映像法」を創出し、閉じた表面き裂の検出感度の向上と長さの高精度計測を実証した。

研究成果の概要(英文)：Accurate measurement of surface crack is very important to ensure the safety and reliability of strategic structures because surface is one of defects-prone areas. However, conventional ultrasonic method may cause underestimation or overlook, since some of them are closed. In this study, we proposed and developed a novel imaging method, nonlinear ultrasonic phased array imaging with surface acoustic wave and thermal stress. It was demonstrated that our proposed technique is very useful in improving the sensitivity of detection of closed surface cracks and in achieving high measurement accuracy of crack length.

研究分野：非破壊評価

キーワード：非破壊検査 閉じたき裂 フェーズドアレイ 表面波 熱応力

1. 研究開始当初の背景

経年劣化インフラの非破壊検査は、政府が「インフラ長寿命化基本計画」の中核に挙げるなど、最重要課題である。しかし、発生初期の表面き裂は残留応力や界面酸化の影響で閉じていることが多く、超音波は透過してしまうため、見逃しや計測誤差が発生する。これを解決するため、図1に示すように、通常より大振幅の超音波(周波数 f) を入射し、き裂面の開閉振動で発生する高調波 ($2f$) やサブハーモニック波 ($f/2$) を検出する非線形超音波法が幅広く研究されてきた。

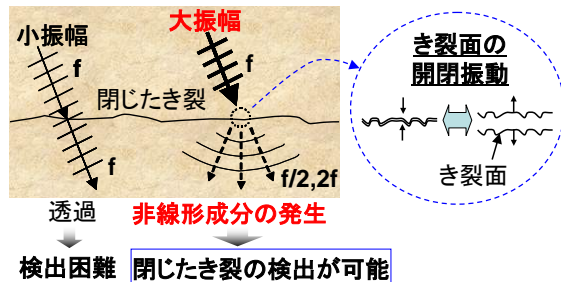


図1 閉じたき裂評価のための非線形超音波

これまで我々は閉じたき裂への大振幅超音波(周波数 f) の照射により発生するサブハーモニック波 ($f/2$) が高い時間分解能を持つことを見出し、閉じたき裂の深さ計測が可能な映像法 SPACE(subharmonic phased array for crack evaluation)を開発した。そして、10mm以上の深さの閉じたき裂で、約1mmの高い計測精度を実現した。さらに、閉じたき裂の荷重依存性を利用する映像法を提案し、実用的な荷重負荷方法として、広域加熱と局所冷却を組み合わせた熱応力負荷方法(global preheating and local cooling: GPLC)を創出することで、閉じたき裂の高分解能・高選択性映像化に成功した

しかし、発生初期の閉じた表面き裂の検出・長さ(深さと直交方向のサイズ)計測は困難だった。

2. 研究の目的

本研究では、これまで開発してきた閉じたき裂の映像法を飛躍的に発展させ、世界に先駆けて、熱応力と表面波フェーズドアレイの融合による閉じた表面き裂の非線形超音波映像法を創出し、閉じた表面き裂の検出感度の飛躍的向上と長さの高精度計測を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

表面波フェーズドアレイ(surface acoustic wave phased array: SAW PA)では、表面欠陥に高感度なレイリー波の臨界角を有する楔に、アレイ探触子を設置する。フェルマーの原理に基づく遅延則に従って、各素子を励振することで、楔内に縦波が入射され、楔・試験片界面でレイリー波に変換されて、任意の焦点にレイリー波を集束する。受信波形に対して、同様の遅延則を用いてシフト加算する

ことで、その焦点からの応答を選択的に抽出する。これを複数の焦点に対して繰り返し、応答強度をマッピングすることで、映像(表面投影像)を得る。

表面欠陥が閉じている場合、その映像化感度向上やき裂以外の応答に対する選択性向上には、き裂の開閉挙動の利用が有効である。これまで縦波を用いたフェーズドアレイで機械荷重負荷や熱応力負荷 GPLC で閉じたき裂を一時的に開口し、負荷前後の PA 像の差分を取る LDPA により、き裂の選択性向上を実証してきた。本研究では、GPLC と LDPA を SAW PA にも適用する。その原理図を図2に示す。ここでは部分的に閉じたき裂とき裂以外の線形欠陥(溶接欠陥など)を映像化すると仮定する。広域加熱(global preheating: GP)の有無に寄らず、SAW PA ではこれらが全て映像化される(図2(a))。これに対して、き裂反開面側を局所冷却(local cooling: LC)すると、3点曲げと同様の原理で、探傷面側に引張熱応力が作用する。これにより、部分的に閉じたき裂は一時的に開き、SAW PA での映像でも応答強度は増加するが、その他の線形散乱源の応答は変化しない(図2(b))。それゆえ、GPLC 適用前後の映像の差分を取る、即ち LDPA を適用することで、線形散乱源の応答をキャンセルし、き裂の応答のみを選択的に抽出できる(図2(c))。

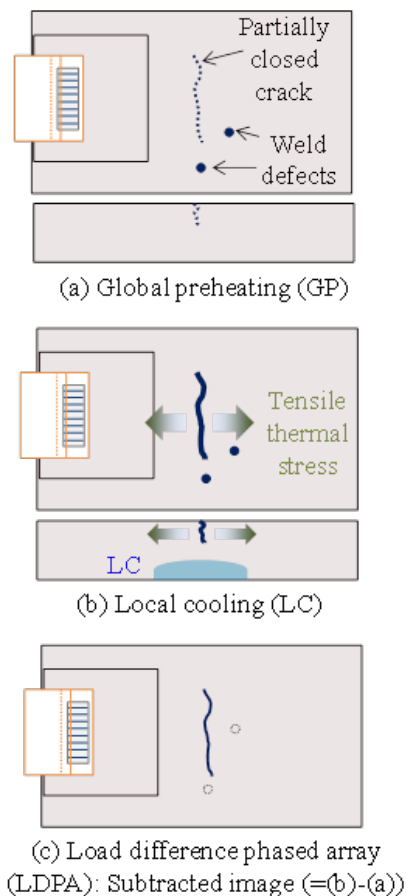


図2 SAW PA への GPLC と LDPA 適用によるき裂の高選択性映像化の原理図

4. 研究成果

アレイ探触子を用いて表面波を励起するには、レイリー波の臨界角を有する楔が必要である。予備実験では安価で加工性に富んだアクリルを用いたが、本研究では減衰、伝達効率、伝搬距離、材料の音速変化への対応度の高さの観点から検討した結果、高密度ポリスチレンが適していることが分かった。この知見に基づき、図3に示すように、SAW PA用の楔を作製した。

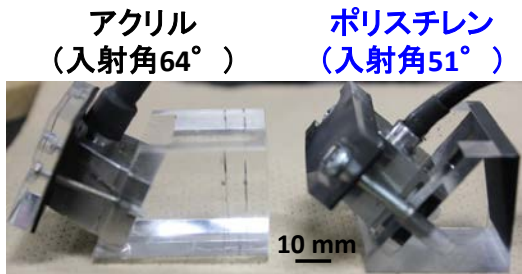


図3 試作した SAW PA 用楔

界面での屈折を考慮した映像化アルゴリズムの構築：表面波フェーズドアレイによる非線形超音波映像法では、くさびと試験片の2相界面の屈折を3次的に考慮する必要がある。そこで、これまで分調波フェーズドアレイ映像法の開発で蓄積してきた映像化アルゴリズムを3次元に拡張し、適切な入射点を設定し、フェルマーの原理の導入により遅延則を定式化した。さらに、Fortran のプログラムで実装し、高密度ポリスチレンで試作した楔を用いて、表面スリット欠陥でのその映像化性能の妥当性、および高分解性能を検証した。

これまで蓄積してきた技術基盤を進展させ、最適な冷却範囲の制御治具を作製した。特に、熱応力が最大になる配置について検討した結果、拘束が無い試験片に対しては、厚み方向の温度分布を利用した曲げ応力の利用が有効であることが分かった。また、実機構造物のような左右の拘束がある試験片に対しては、厚み方向全体の冷却による引張応力負荷が有効であることが分かった。

昨年度開発した界面での屈折を考慮した映像化アルゴリズムを有するユーザーフレンドリーなインタフェースの映像化プログラムを LabVIEW と高速計算の Fortran を組み合わせて構築した。これは映像化のみならず、詳細評価に効果的な元データの波形観察や周波数解析機能も有し、実験室での実証試験だけではなく、本技術の今後の普及に有効である。

実探傷では、き裂以外にも散乱源（粗大結晶粒、溶接欠陥など）が存在することが多く、き裂映像化の選択性向上に対するニーズが高い。そこで、本研究では熱処理後の閉じたき裂に対して、GPLC と LDPA を適用し、その有効性を実証した。

き裂長さ計測の実験のため、非貫通のき裂試験片を作製した。まず、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の凸形試験片（図4(a)）に、荷重 49 kN、周波数 10 Hz の条件で4点曲げ疲労試験を行った。100,000 サイクル繰り返すことで、凸部上部のノッチより、疲労き裂を土台部まで進展させた。その後、図4(b)に示すように、放電加工で中央の凸部のみ除去することで、非貫通の疲労き裂を有する試験片を作製した。さらに、き裂以外の線形応答として、き裂上部に丸穴（φ1.8 mm）を追加した。本研究では、き裂を閉口させるため、試験片を電気炉に入れ、熱処理（600℃、24 h）を行った。

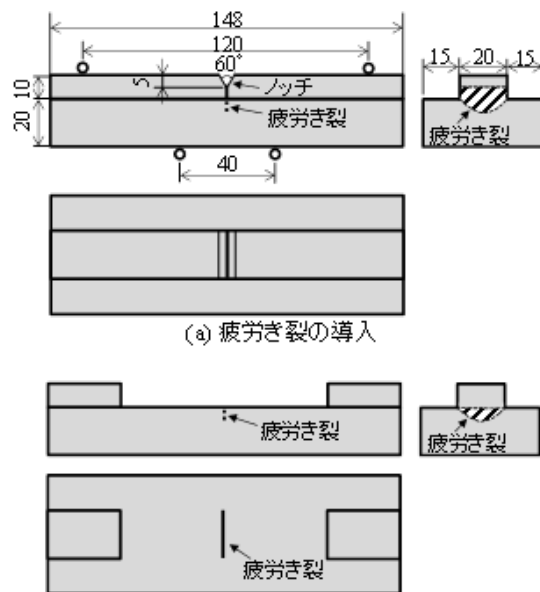


図4 非貫通疲労き裂試験片の作製

GPLC 適用前の映像（図5(a)）では、き裂の応答に加えて、線形応答である丸穴が明瞭に映像化された。これらの欠陥は前知識なしに識別することは容易では無い。次に、GPLC 適用後の映像（図5(b)）では、疲労き裂の応答がわずかに増加した。この変化強度の小ささは、残留応力で閉じた疲労き裂で観察された大きな変化とは異なる。これはき裂閉口メカニズムの違いによる可能性が高い。一方、き裂以外の応答（丸穴）は変化しなかった。そこで、これらの映像に対して、LDPA を適用した（図5(c)）。その結果、線形散乱源（丸穴、楔端）の応答は除去され、き裂の応答のみが抽出された。

さらに、き裂の選択性向上を定量的に評価するため、GPLC 適用前後および LDPA 像において、以下の式に基づき、き裂映像化における選択性を評価した。

$$S = I_{crack} / I_{linear} \quad (1)$$

ここで、 I_{crack} は映像化結果のき裂の応答強度（図5におけるき裂応答の白四角で囲まれた領域の強度の平均値）、 I_{linear} は線形散乱源（丸穴応答の白四角で囲まれた領域の強度の平均

値)を示す。その結果、GPLC 適用前後では各々、だったのに対し、LDPA 適用によりと約 28 dB 増加した。以上より、GPLC と LDPA の組み合わせが、SAW PA による閉じたき裂の高選択性映像化に有効であることが実証された。

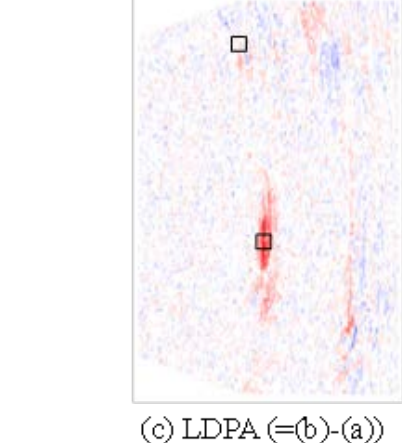
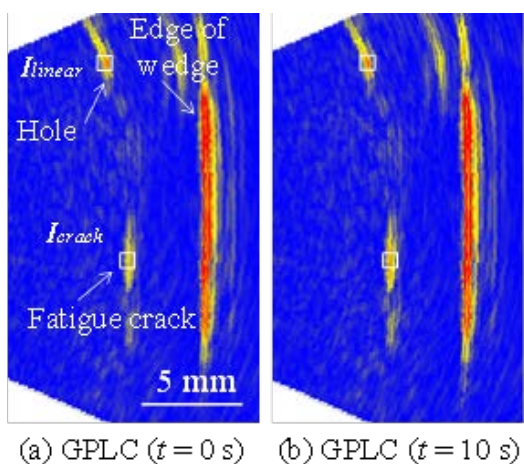


図 5 熱処理後の疲労き裂に対する GPLC と LDPA の適用結果

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

- ① Yoshikazu Ohara, Koji Takahashi, Ino Yoshihiro, Kazushi Yamanaka, Toshihiro Tsuji, Tsuyoshi Mihara, High-selectivity imaging of closed cracks in a coarse-grained stainless steel by nonlinear ultrasonic phased array, NDT & E International, 査読有, 91, 2017, 139-147.
DOI:10.1036/j.ndteint.2017.07.007
- ② Yoshikazu Ohara, Taro Oshiumi, Hiromichi Nakajima, Kazushi Yamanaka, Xiaoyang Wu, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Toshihiro Tsuji, Tsuyoshi Mihara, Ultrasonic phased array with surface acoustic wave for imaging cracks, AIP Advances, 査読有, 7, 2017, 065214

DOI:10.1063/1.4989725

- ③ 高橋恒二、大町弘毅、小原良和、山中一司、広域加熱・局所冷却を用いた閉じたき裂のフェーズドアレイ映像化における飽和時間の推定、非破壊検査、査読有、65(10)、2016、513-520
- ④ 小原良和、小特集-音響に関する施設と装置- 非破壊検査のための超音波フェーズドアレイ映像装置、日本音響学会誌、査読無、73(7)、2016、426-427
- ⑤ Azusa Sugawara, Kentaro Jinno, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Closed-crack imaging and scattering behavior analysis using confocal subharmonic phased array, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 54, 2015, 07HC08-1-8
DOI:10.7567/JJAP.54.07HC08
- ⑥ Akihiro Ouchi, Azusa Sugawara, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Subharmonic phased array for crack evaluation using surface acoustic wave, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 54, 2015, 07HC05-1-6
DOI:10.7567/JJAP.54.07HC05
- ⑦ Yoshikazu Ohara, Koji Takahashi, Yoshihiro Ino, Kazushi Yamanaka, Nonlinear Ultrasonic Phased Array Imaging of Closed Cracks Using Global Preheating and Local Cooling, AIP Conference Proceedings, 査読無, 1985, 2015, 080002-1-4
- ⑧ Yoshikazu Ohara, Koji Takahashi, Yoshihiro Ino, Kazushi Yamanaka, Imaging of Closed Cracks in Coarse-Grained Materials by Nonlinear Ultrasonic Phased Array, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 査読無, 36, 2015, 2P2-7-1-2
- ⑨ 小原良和、閉じたき裂の非線形超音波映像法、日本機械学会誌、査読無、119、2016、92-93
- ⑩ 小原良和、低周波と高周波を組泡汗た閉じたき裂の非線形超音波計測、日本音響学会誌、査読有、71(12)、2015、682-688

[学会発表] (計 46 件)

- ① Yoshikazu Ohara, Toshihiro Tsuji, Tsuyoshi Mihara, Nonlinear Ultrasonic Phased Array for Imaging Closed Cracks, ElyT Workshop 2018, 2018
- ② 小原良和、非線形超音波フェーズドアレイ映像法を用いた閉じたき裂の非破壊評価、(公社)日本鑄造工学会 東北支部 第 96 回鑄造技術部会、2018
- ③ Yoshikazu Ohara, Nonlinear Ultrasonic Phased Array for Closed Crack Imaging,

- International Congress on Ultrasonics (ICU2017), 2017
- ④ Yoshikazu Ohara, Hironichi Nakajima, Kazushi Yamanaka, Toshihiro Tsuji, Tsuyoshi Mihara, Nonlinear Ultrasonic Phased Array with Surface Acoustic Waves, The 44th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), 2017
- ⑤ Yoshikazu Ohara, Hironichi Nakajima, Kazushi Yamanaka, Toshihiro Tsuji, Tsuyoshi Mihara, Nonlinear Ultrasonic Phased Array Using Surface Acoustic Wave for Crack Evaluation, 22nd International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials (ICNEM 2017), 2017
- ⑥ 小原良和、三原毅、表面波を用いた超音波非破壊計測、日本材料学会 高温強度部門委員会、2017
- ⑦ 小原良和、中島弘達、鴛海太郎、山中一司、Xiaoyang Wu、内一哲哉、高木敏行、辻俊宏、三原毅、表面波フェーズドアレイを用いた表面き裂の計測、圧電材料・デバイスシンポジウム 2017、2017
- ⑧ Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Tsuyoshi Mihara, Nonlinear Ultrasonic Phased Array for Closed Crack Imaging, 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America (ASA) and Acoustical Society of Japan (ASJ), 2016
- ⑨ 小原良和、鴛海太郎、山中一司、Xiaoyang Wu、内一哲哉、高木敏行、三原毅、表面波フェーズドアレイを用いたき裂の映像化、日本非破壊検査協会 平成 28 年度 秋季講演大会、2016
- ⑩ Yoshikazu Ohara, Taro Oshiumi, Kazushi Yamanaka, Tsuyoshi Mihara, Surface-Defect Imaging Using Ultrasonic Phased Array with Surface Acoustic Wave, Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2016, 2016
- ⑪ Yoshikazu Ohara, Taro Oshiumi, Kazushi Yamanaka, Xiaoyang Wu, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Tsuyoshi Mihara, The 43rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), 2016
- ⑫ Yoshikazu Ohara, Taro Oshiumi, Kazushi Yamanaka, Tsuyoshi Mihara, Phased Array with Surface Acoustic Wave (SAW PA) for Imaging Surface Defects, 21st International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials (ICNEM 2016), 2016.
- ⑬ 小原良和、高橋恒二、猪慶弘、山中一司、

三原毅、広域加熱・局所冷却と超音波フェーズドアレイによる閉じたき裂映像化の選択性向上、圧電材料・デバイスシンポジウム 2016、2016

- ⑭ Yoshikazu Ohara, Nonlinear Ultrasonic Phased Array Imaging Methods for Closed Cracks, Seminar at Hanyang University, 2016
- ⑮ 小原良和、閉じたき裂の深さ計測のための非線形超音波映像法、火力原子力発電協会 東北支部主催 研究発表会、2015
- ⑯ Yoshikazu Ohara, Koji Takahashi, Yoshihiro Ino, Kazushi Yamanaka, Tsuyoshi Mihara, High-Selectivity Ultrasonic Phased Array Imaging of Closed Cracks in Coarse-Grained Materials Using Global Preheating and Local Cooling, The 35th Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2015), 2015
- ⑰ 小原良和、閉じたき裂の非線形超音波映像法の開発と最近の研究動向、電力中央研究所セミナー、2015
- ⑱ Yoshikazu Ohara, Koji Takahashi, Yoshihiro Ino, Kazushi Yamanaka, Nonlinear Ultrasonic Imaging of Closed Cracks in a Coarse Grained Stainless Steel by Global Preheating and Local Cooling, The 42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), 2015
- ⑲ Yoshikazu Ohara, Koji Takahashi Yoshihiro Ino, Kazushi Yamanaka, Closed-Crack Imaging by Nonlinear Ultrasonic Phased Array with Global Preheating and Local Cooling (GPLC), The 20th International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials (ICNEM), 2015
- ⑳ Yoshikazu Ohara, Koji Takahashi, Yoshihiro Ino, Kazushi Yamanaka, Nonlinear Ultrasonic Phased Array Imaging of Closed Crack Using Global Preheating and Local Cooling, 20th International Symposium on Nonlinear Acoustics (ISNA), 2015

[その他]

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~hyoka/lab.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小原 良和 (OHARA, Yoshikazu)
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：90520875

(2) 研究分担者

山中 一司 (YAMANAKA, Kazushi)

東北大学・未来科学技術共同研究センター・教授
研究者番号：00292227

三原 毅 (MIHARA, Tsuyoshi)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20174112

辻 俊宏 (TSUJI, Toshihiro)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：70374965

(3) 連携研究者
無し

(4) 研究協力者
無し