

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630340

研究課題名(和文) コンクリート構造物の閉じたき裂評価のための低周波非線形超音波映像法の創出

研究課題名(英文) Low-Frequency Nonlinear Ultrasonic Imaging Method for Crack Evaluation in Concrete Structures

研究代表者

小原 良和 (OHARA, Yoshikazu)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：90520875

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：高度経済成長期に建設されたインフラの経年劣化が社会問題となっているが、その安全性保障のための非破壊検査法の開発が喫緊の課題である。しかし、インフラの大半を占めるコンクリートは金属より遥かに不均質で高減衰のため、MHzの周波数帯域を用いる通常の超音波法では計測できない。本研究では、コンクリート構造物の閉じたき裂の低周波非線形超音波映像法の創出を目的として、その基盤技術を開発した。送信に接触探触子を用いて、受信にレーザ振動計走査を用いた基礎実験でその有効性を実証した。さらに、高効率な送受信圧電探触子の試作、ユーザフレンドリーな映像化プログラムの試作も行った。

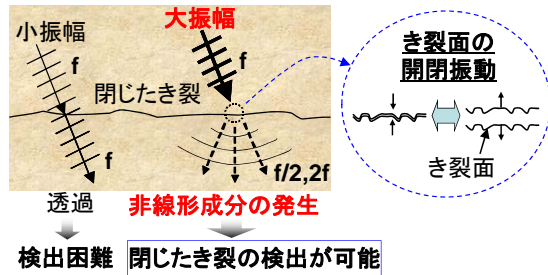
研究成果の概要(英文)：Aging infrastructure has been inspected to ensure the safety and reliability, where most infrastructure has been made of concrete. However, it is difficult to inspect such concrete structures by ultrasonics with MHz because it is generally highly attenuative and heterogeneous. In this study, we developed the fundamental techniques to realize low-frequency nonlinear ultrasonic imaging method for the inspection of aging concrete structures. First, we constructed an imaging system that uses contact-type transmitter with a wedge and the laser scanning receiving array. It was demonstrated in the metal and concrete specimens. Furthermore, we fabricated a high-output low-frequency transducers and made a user-friendly imaging program.

研究分野：非破壊検査

キーワード：非破壊検査 非線形超音波 コンクリート き裂 フェーズドアレイ 欠陥検出

1. 研究開始当初の背景

福島原発事故や笹子トンネル崩落事故等が頻発する中、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、き裂が残留応力や界面酸化の影響で閉じている場合、超音波は透過してしまうため、見逃しや過小評価が発生する。この問題解決のため、大振幅超音波（周波数  $f$ ）を入射し、き裂面の開閉振動で発生する高調波（周波数  $2f$ ）やサブハーモニック波（周波数  $f/2$ ）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）。



検出困難 閉じたき裂の検出が可能

図1 閉じたき裂評価のための非線形超音波法

これまで、我々は閉じたき裂の映像法（subharmonic phased array for crack evaluation: SPACE）を開発し、金属試験片でその有効性を実証してきた。しかし、インフラの大半を占めるコンクリートは金属より遥かに不均質で高減衰のため、超音波の伝搬・散乱挙動が極めて複雑であり、これまでの MHz 帯域の SPACE では検査できない。

2. 研究の目的

本研究では、これまで蓄積してきた学術・技術基盤に基づき、コンクリート構造物の閉じたき裂の低周波非線形超音波映像法（図2）を創出することを目的とする。

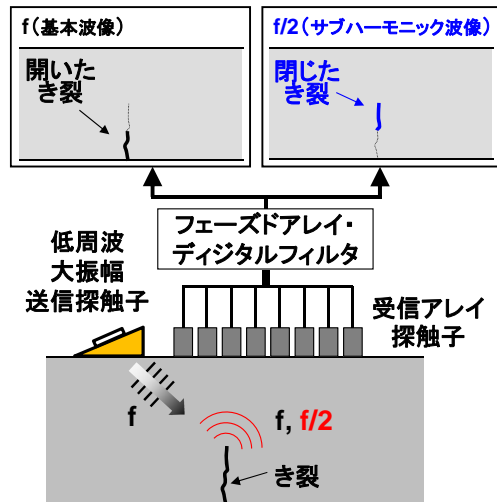


図2 コンクリートの低周波非線形超音波映像装置

3. 研究の方法

低周波超音波映像法の基礎実験として、送信に接触型探触子、受信にレーザ振動計走査を用いた映像法を構築し、映像化アルゴリズムの構築、基礎実験による検証を行う。さらに、より高感度を実現するため、高出力な送受信接触探触子の利用が望ましいことを考慮し、高効率な圧電素子（ソフト系 PZT）を用いた探触子の試作を行う。さらに、ユーザーフレンドリーな映像化プログラム（LabVIEW）と高速処理のための Fortran を融合した装置の試作も行う。

4. 研究成果

まず、低周波超音波映像法の基礎実験として、送信に楔を介した接触型探触子、受信に広帯域で非接触計測可能なレーザ振動計走査を検討した（図3）。

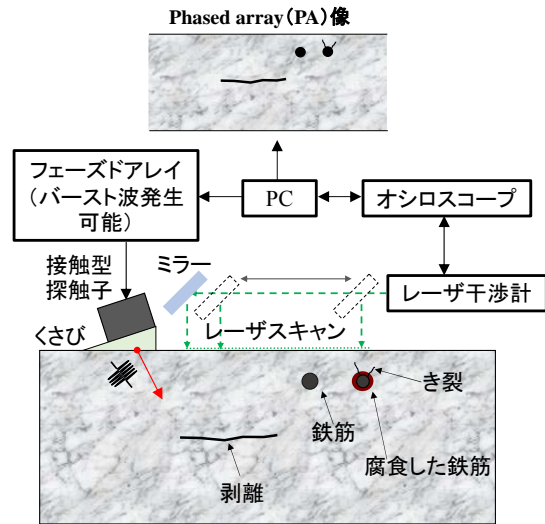


図3 レーザ走査を用いた低周波超音波映像法概念図

上記概念に基づく映像化アルゴリズムを定式化する。試験体と座標系を表す模式図を図4に示す。ここで、試験体の長手方向、奥行き、深さ方向をそれぞれ  $x, y, z$  軸と定義する。ただし、本研究では受信点を  $x$  方向に限定するため、奥行き方向  $y=0$  の断面を考えた2次元のモデルを用いる。受信開口の中心  $S_0$  を原点  $(0, 0)$  とする。くさび中の伝搬距離を  $L_w$ 、くさびと試験体の縦波音速をそれぞれ  $V_w$  と  $V_L$ 、受信点の総数を  $N$ 、受信点の番号を  $n$ 、受信点の座標を  $S_n(X_n, 0)$ 、超音波が振動子の中心からくさびを通り試料表面に到達する位置を  $S_i(X_i, 0)$  とする。強度算出任意座標を  $F(X, Z)$  とすると、送信側探触子から第  $n$  番目の受信点  $S_n(X_n, 0)$  に、 $F(X, Z)$  を経由して信号が到達するまでの伝搬時間  $t_n$  は

$$t_n = \frac{L_w}{V_w} + \frac{\sqrt{(X_i - X)^2 + Z^2}}{V_L} + \frac{\sqrt{(X_n - X)^2 + Z^2}}{V_L}$$

原点  $S_0$  からの信号が  $F(X, Z)$  で散乱し  $S_0$  に至る場合の伝搬時間  $t_0$  は、

$$t_0 = \frac{\sqrt{X^2 + Z^2}}{V_L} \times 2$$

よって、原点  $S_0$  から第  $n$  番目の受信点との伝搬時間差は

$$\Delta t_n = t_n - t_0$$

であり、上式から伝搬時間と受信点間の遅延則が得られる。第  $n$  番目の受信点の受信波形を  $u_n(X, Z, t)$  とすると、 $F(X, Z)$  に合わせて、 $N$  個の受信点における周波数フィルタ後の波形をシフト加算したときの波形  $U(X, Z, t)$  は

$$U(X, Z, t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n(X, Z, t_n - \Delta t_n)$$

と表せる。散乱の強度は  $U(X, Z, t)$  の自乗平均平方根 (Root Mean Square : RMS) 値として、

$$E(X, Z) = \left( \frac{1}{\Delta \tau} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta \tau} U^2(X, Z, t) dt \right)^{1/2}$$

で表す。  $\Delta \tau$  は信号強度抽出範囲である。得られた  $E(X, Z)$  を各焦点の座標にプロットすることで映像化を行う。

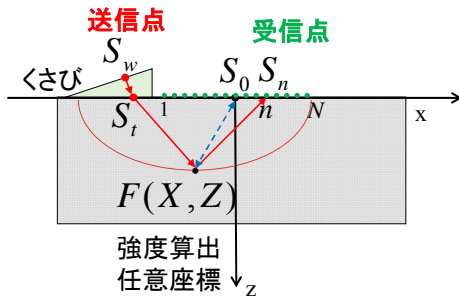


図4 映像化アルゴリズム

アルゴリズムの基本原理の確認のために、本手法をアルミニウム合金 A7075 の丸穴試験片に適用し、丸穴の映像化を行った。

試験片の模式図と測定条件を図5に示す。ここでは  $\phi 4$  mm の丸穴の上部に楔を介さずに垂直探触子 (中心周波数 5 MHz、 $\phi 9$  mm) を接触させ、その両側 27 mm の範囲でレーザスキャンを行った。入力電圧には、300 kHz、200 V、サイクル数 2 のバースト波を用いた。受信点は 0.5 mm ピッチの計 109 点とし、電気ノイズ低減のためデジタルオシロスコープ (Tektronix、TDS7104) の加算平均回数は 3000 回とした。映像化条件として、フィルタ範囲 1-20 MHz、A7075 の縦波音速を 6380 m/s、時間窓 4  $\mu$ s-50  $\mu$ s、映像化範囲 50 mm  $\times$  50 mm (0.5 mm ピッチ)、RMS 範囲を 1 周期  $\times$  サイクル数とした。

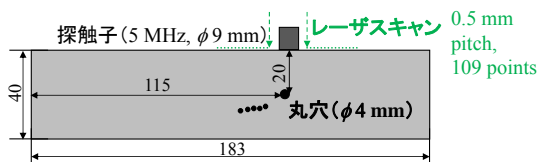
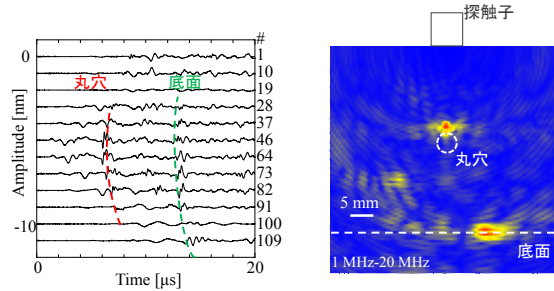


図5 丸穴試験片 (A7075)

受信波形と映像化結果を図6に示す。波形の右側の番号は受信点の番号を表す。受信波形から、丸穴応答と底面応答が観察された。また、映像化結果では、丸穴と底面が正しい位置に映像化された。以上より、本研究で用いる映像化アルゴリズムの妥当性を確認できた。



(a) 受信波形 (b) 映像化結果  
図6 映像化アルゴリズムの確認

鉄筋コンクリート試験片を作製し、鉄筋の映像化を行う。まず、コンクリート成型のための木枠を作製した。用いたコンクリートミックスにはポルトランドセメント、混和剤、骨材があらかじめ配合されているものである。この組成は、セメント：砂：砂利=1：1：2である。骨材の大きさは  $\phi 3-4$  mm であった。このコンクリートミックス約 8 kg を金属製の容器に入れ、水 1.2 kg を少量ずつ混ぜ合わせた後、作製した木枠に流し込んだ。次に内部の気泡を抜くため、木製の棒で何度も押し固めた後、小手を用いて表面を均等にならした。最後に、 $\phi 12$  mm の鉄筋を木枠の開いている面から流し込んだコンクリートミックスに差し込み、固定した状態でコンクリートを養生させた。以上の手順で、図7に示す縦 200 mm、横 200 mm、奥行約 135 mm の直方体の試験片を作製した。

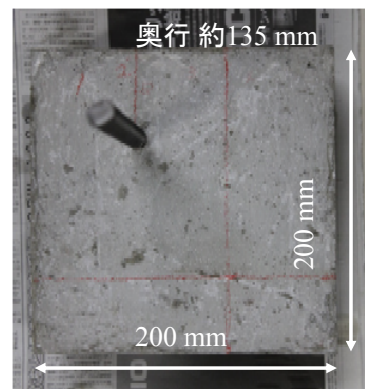


図7 鉄筋コンクリート試験片

試験片の模式図と測定条件を図8に示す。送信側には、中心周波数 500 kHz、 $\phi 45$  mm の探触子を用いた。本研究ではある程度の分解能で原理検証を行うため、コンクリート計

測にとっては比較的高周波の 500 kHz を選択した。また図に示すように、試験片の上面左端中央 (送信点を  $x=45\text{ mm}$ ,  $y=60\text{ mm}$  と仮定) に楔 (アクリル、底面 60mm、高さ 20mm、奥行 40mm、楔の入射角  $26.5^\circ$ ) を設置した。送信探触子は、周波数 300 kHz、入力電圧 200 V、サイクル数 2 のバースト波で励振された。レーザスキャンの範囲は、 $x=70\text{ mm}$ -120 mm (50 mm) で、0.5 mm ピッチの 101 点とし、電気ノイズ低減のためデジタルオシロスコプの加算平均回数は 3000 回とした。また、鉄筋の無い位置で同様の測定を行い、結果を比較した。映像化条件として、フィルタ範囲を 100 kHz-500 kHz を選択した。コンクリートの縦波音速は、複数点で測定を行い、その平均値として 3900 m/s を用いた。時間窓  $0\text{ }\mu\text{s}$ -200  $\mu\text{s}$ 、映像化範囲 250 mm $\times$ 250 mm (2.5 mm ピッチ)、RMS 範囲は 1 周期 $\times$ 0.3 $\times$ サイクル数を選択した (高分解能での映像化のため)。

受信波形を用いて得られた映像化結果を図 9 に示す。波形で分離が困難だった鉄筋は、映像では明瞭に映像化された (図 9)。しかし、映像の表面付近にアーティファクトが観察された。これは表面波に起因すると考えられる。このように、信号対雑音 (signal-to-noise: SN) 比はそれほど高くないが、鉄筋の有無による映像の違いは明らかだった。これにより、本手法がコンクリート内部の映像化に適用できることが確認できた。

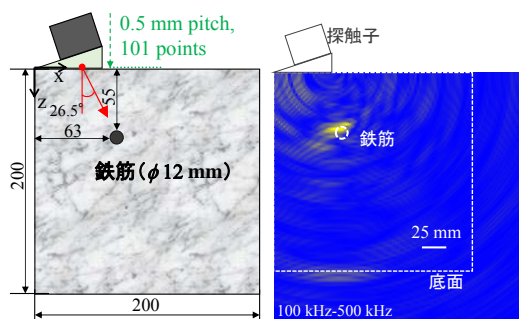


図 8 測定条件

図 9 映像化結果

剥離を模擬したコンクリート試験片を作製し、その映像化を行った。まず、試験片の作製を行った。寸法は縦 200 mm、横 200 mm、奥行き約 135 mm である。剥離は厚さ 2 mm の発泡スチロール (縦 80 mm $\times$ 横 80 mm) の薄板を養生前のコンクリートミックスに挟み込むことで導入した。一般的に発泡スチロールは密度が小さいため、音響インピーダンス  $Z = \rho V$  が小さく ( $\rho$  は密度、 $V$  は縦波音速)、空気の音響インピーダンスに近い。このことから、剥離 (空隙) を模擬することができる。



図 10 剥離を有するコンクリート試験片

送信探触子を 2ヶ所に設置し得られた映像化結果を図 11 に示す。送信 1、送信 2 のそれぞれで、剥離は送信点の真下近傍のみが映像化された。よって、2つの映像の合成像を形成した。その結果、図 11 に示すように、合成像では、剥離の全体が映像化された。このように、複数送信点で得られた映像の合成により、広範囲の映像化が可能であることがわかり、本研究がコンクリート内部の欠陥の映像化に対して有効であることが実証された。

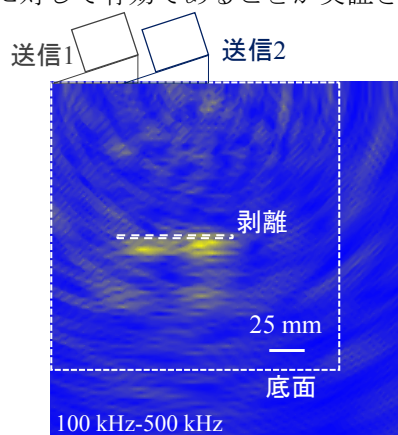


図 11 剥離の映像化結果

上記研究では、受信にレーザ振動計走査を利用したが、より高感度を実現するためには、高出力な送受信接触探触子の利用が望ましい。そこで、高効率な圧電素子 (ソフト系 PZT) を用いた探触子の試作を行った。さらに、ユーザーフレンドリーな映像化プログラム (LabVIEW) と高速処理のための Fortran を融合した装置の試作も行った。

## 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 19 件)

- ① 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年、513-520。
- ② 小原良和、Brian Anderson、T. J. Ulrich、Pierre-Yves Le Bas、Paul Johnson、Sylvain Hauptert、複数モード非線形共鳴超音波ス

- ペクトロスコープを用いた閉じたき裂の位置特定、非破壊検査、査読有、64(12)、2015、571-578.
- ③小原良和、低周波と高周波を組み合わせ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年、682-688.
- ④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年、92-93.
- ⑤ 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年, 080002-1-4.
- 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年, 07HC05-1-6. DOI:10.7567/JJAP.54.07HC08
- ⑦ 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年, 07HC08-1-8. DOI:10.7567/JJAP.54.07HC05
- ⑧ Kentaro Jinno, Azusa Sugawara, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Analysis on Nonlinear Ultrasonic Images of Vertical Closed Cracks by Damped Double Node Model, Materials Transactions, 査読有, 55-7, 2014年, 1014-1023. DOI:10.2320/matertrans. I-M2014812
- ⑨ Koji Takahashi, Kentaro Jinno, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Evaluation of Crack Closure Stress by Analyses of Ultrasonic Phased Array Images during the Global Heating and Local Cooling, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 53, 2014年, 07KC20-1-7. DOI: 10.7567/JJAP.53.07KC20
- ⑩菅原あずさ、神納健太郎、小原良和、山中一司、閉口き裂の広範囲映像化のための共焦点サブハーモニック超音波フェーズドアレイの開発、超音波 TECHNO、査読無、27-2、2015年、50-55.
- [学会発表] (計 50 件)
- ①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 2016、2017年2月7日、東
- 北大学(宮城)
- ②辻俊宏、生駒諒太、小原良和、三原毅、カプラントフリー超音波計測のためのヘルツ接触探触子の開発、圧電材料・デバイスシンポジウム 2016、2017年2月7日、東北大学(宮城)
- ③辻俊宏、北原大太朗、田中康弘、小原良和、三原毅、ダイシングした圧電素子を用いる気相複合探触子の開発、圧電材料・デバイスシンポジウム 2016、2017年2月7日、東北大学(宮城)
- ④ 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年11月30日、ホノルル(アメリカ)
- ⑤小原良和、鴛海太郎、山中一司、Xiao 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、2016年10月7日、ハーネル仙台、宮城
- ⑥ 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 (APCFS2016), 2016年9月20日、富山国際会議場、富山
- ⑦小原良和、菅原あずさ、山中一司、三原毅、サブハーモニック超音波フェーズドアレイによる閉じたき裂のサイジング、日本保全学会第13回学術講演会、2016年7月26日、かながわ労働プラザ・ホテル横浜ガーデン、神奈川
- ⑧ Yoshikazu Ohara, Taro Oshiumi, Kazushi Yamanaka, Xiaoyang Wu, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Tsuyoshi Mihara, Phased Array with Surface Acoustic Wave (SAW PA) for Screening and Sizing of Surface Defects, The 43rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), 2016年7月20日、アトランタ、アメリカ
- ⑨ 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年7月14日、レイクタホ、アメリカ
- ⑩ Yoshikazu Ohara, Nonlinear Ultrasonic Phased Array Imaging Methods for Closed Cracks, Seminar at Hanyang University, 2016年1月27日、ソウル、韓国
- ⑪ Yoshikazu Ohara, Nonlinear Ultrasonic Phased Array Imaging Methods for Closed Cracks, Seminar at Seoul National University of Science & Technology, 2016年1月27日、ソウル、韓国

- ⑫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年11月26日、新潟第一ホテル、新潟
- ⑬ Yoshikazu Ohara, Koji Takahashi, Yoshihiro Ino, Kazushi Yamanaka, Tsuyoshi Mihara, Imaging of Closed Cracks in Coarse-Grained Materials by Nonlinear Ultrasonic Phased Array, The 35th Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2015), 2015年11月6日、つくば国際会議場、茨城
- ⑭小原良和、最近の非線形超音波法の研究動向、日本非破壊検査協会 平成27年度第2回材料の非線形現象を利用した非破壊評価研究会、2015年9月3日、東京工業大学、東京
- ⑮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年8月21日、電力中央研究所、神奈川
- ⑯ 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年7月30日、ミネアポリス、アメリカ
- ⑰ Yoshikazu Ohara, Akihiro Ouchi, Juri Saito, Kazushi Yamanaka, Crack Length Measurements by Subharmonic Phased Array for Crack Evaluation with Surface Acoustic Wave with Water Immersion, The 42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE)、2015年7月30日、ミネアポリス、アメリカ
- ⑱大内彬寛、齋藤樹里、小原良和、山中一司、界面での屈折・も<sup>o</sup>変換を用いたき裂評価のための分調波フェーズドアレイの開発、圧電材料・デバイスシンポジウム2015、2015年2月19日、東北大学、宮城
- ⑲菅原あずさ、神納健太郎、小原良和、山中一司、共焦点サブハーモニック超音波フェーズドアレイを用いた閉口き裂映像化と減衰二重節点モデルによる解析、圧電材料・デバイスシンポジウム2015、2015年2月19日、東北大学、宮城
- ⑳小原良和、非線形現象を利用した非破壊評価の展望と限界、平成26年度第2回材料の非線形現象を利用した非破壊評価研究会、2015年1月21日、名古屋工業大学、愛知

[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・助教  
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

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

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

### (3) 連携研究者

無し

### (4) 研究協力者

無し