

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686081

研究課題名(和文) 局所冷却との融合による閉じたき裂の3次元非線形超音波映像法の創出

研究課題名(英文) Three-dimensional nonlinear ultrasonic imaging method of closed cracks by local cooling

研究代表者

小原 良和 (Ohara, Yoshikazu)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90520875

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,000,000円

研究成果の概要(和文)：閉じたき裂の高精度計測法として、局所冷却との融合による閉じたき裂の非線形超音波映像法を開発した。まず、局所冷却に加えて、広域加熱も組み合わせることで、閉じたき裂の開口性能を大幅に向上させることに成功した。また、測定システムでは、アレイ探触子やフェーズドアレイ装置を設計・試作した。そして、アルミニウム合金やステンレス鋼の閉じたき裂に対して、その有効性を実証した。さらに、1次元の伝熱・熱応力解析により、閉口応力の推定法を提案し、その有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：As a method of accurately measuring closed cracks, nonlinear ultrasonic imaging method was developed by combining the phased array and local cooling. First, we succeeded in significantly enhancing the closed-crack opening ability by global preheating and local cooling (GPLC). As the measurement system, we designed and made transducer and phased array apparatus. By applying it to closed cracks in aluminum alloy and stainless steel specimens, which are widely used in infrastructure, we demonstrated that GPLC is very useful in measuring closed cracks. Furthermore, by formulating one-dimensional heat-transfer and thermal stress analyses, we proposed a crack closure stress estimation method and demonstrated it in closed crack specimens.

研究分野：非破壊評価

キーワード：非破壊検査 非線形超音波 閉じたき裂 局所冷却 フェーズドアレイ 熱応力

1. 研究開始当初の背景

経年劣化が蓄積された発電プラント・高速道路・橋梁などの構造物は、大地震や津波など自然災害により大きなダメージを受けており、安全・安心な社会の実現にはそれらの高精度な非破壊評価法の確立が必須である。き裂が空隙を伴う場合（開いたき裂）は、超音波を反射・散乱するので高精度に計測できるが、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、見逃しや計測誤差が発生する。この問題を解決するため、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（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。

これまで、閉じたき裂に大振幅超音波（周波数 f ）を照射することで発生するサブハーモニック波（周波数 $f/2$ ）が高い時間分解能を持つことを見出し、大振幅の短いバースト波（周波数は MHz 帯域）で効率的にサブハーモニック波を発生できる LiNbO₃（ニオブ酸リチウム）送信探触子の開発とフィルタ処理を採用したフェーズドアレイ映像化アルゴリズムの構築により、閉じたき裂の深さ計測が可能で超音波映像法 SPACE（Subharmonic Phased Array for Crack Evaluation）を開発した。そして、閉じた疲労き裂や応力腐食割れに適用することで、様々な応力状態のき裂や枝分かれき裂を映像化し、その計測誤差は約 1mm を実現した。さらに、閉じたき裂の荷重依存性を利用する方法を提案し、閉じたき裂の高分解能映像化を達成するとともに、選択性を最大で 24 倍向上させることに成功した。

上記研究では、閉じたき裂映像化の分解能・選択性は飛躍的に向上したが、荷重荷方法に低周波加振器を用いていたため、適用対象の形状に応じた共振モード選定を厳密に行う必要があった。その研究過程で応募者は、荷重荷方法として、-55 度まで急速冷却可能なスプレーを試料表面に噴射し、表面・裏面の温度差からき裂に引張熱応力を作用させることで閉じたき裂を一時的に開かせる方法が適用できることを見出した。さらに、超音波フェーズドアレイと非線形超音波に関する学術・技術基盤の蓄積により、3 次元非線形超音波映像法の基盤技術を確立する準備も整った。

2. 研究の目的

本研究では上記の研究を融合させることで、世界に先駆けて「局所冷却との融合による閉じたき裂の 3 次元非線形超音波映像法」の基盤技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本手法の概念図を図 1 に示す。ここでは、線形フェーズドアレイ（PA）を用いて、点線で囲まれた領域の、先端が閉じたき裂と溶接欠陥や底面などの線形散乱源を映像化する

と仮定する。まず、GP 後・LC 前の PA 像（図 1(a)）では、き裂開口部と底面、溶接欠陥が映像化されるが、閉じたき裂は映像化されない。そこで、-55 まで冷却可能なスプレーを試験片上面に噴射し急速に冷却すると、上面近傍が熱収縮する。これにより、3 点曲げと同様の原理でき裂に引張熱応力が作用する。ここで、作用する引張熱応力は、冷却面積固定の場合、試験片上面とき裂部の温度勾配に依存するため、GP 温度を変えることで、その大きさを制御できる。これにより、閉じたき裂端部は開口し、PA 像（図 1(b)）で映像化される。一方、その他の線形散乱源の応答は変化しない。それゆえ、荷重差分法（load difference phased array: LDPA）により、LC 前後の PA 像の差分像（図 1(c)）を取ることで、き裂以外の応答を除去し、閉じたき裂の応答変化のみを映像化できる。

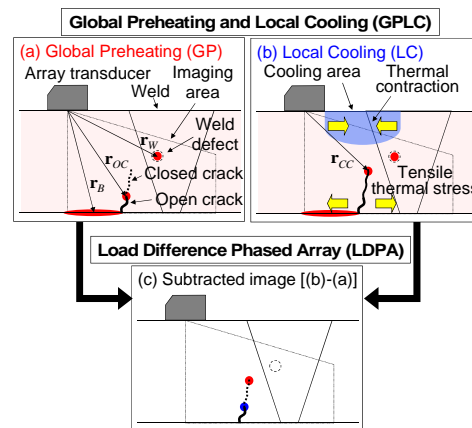


図 1 (a)および(b) 局所冷却前後の線形フェーズドアレイ像, (c) (b)-(a)で得られた差分像

4. 研究成果

本実験では、図 2 に示すように、アルミニウム合金 A7075 の CT (compact tension) 試験片の閉じた疲労き裂（疲労条件：最大応力拡大係数 = 9.0 MPa, 最小応力拡大係数 = 0.6 MPa, 疲労サイクル数 76,000）を用いた 16)。真のき裂深さを調べるため、油圧制御試験機でき裂に機械的に引張応力を負荷し、PA で映像化した。その結果、11.3 mm であることが分かった。

熱応力を用いた実験では、図 2 上図に示すアクリル製の蓋で限定された範囲を 10 s 間、2 つの冷却スプレー（HFC-125a）により左右から急速に局所冷却した。その過程を、PZT アレイ探触子（5 MHz, 32 素子）と時間分解能の高いパルス波を用いた PA で映像化した。入力電圧は 100 V, サンプリング周波数 50 MS/s, 送受フォーカシングは深さ方向 1 mm 刻み, 角度方向 1° 刻みで行った。

本研究では、き裂開口性能の比較のため、LC（従来法）と GPLC で各々計測を行った。LC では試験片温度が室温から局所冷却を行い、GPLC では GP 温度 50 を選択し、試験片底面からホットプレートで加熱した後、局所冷却を行った。

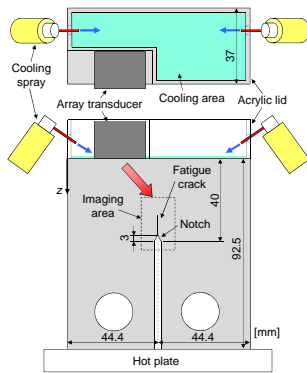


図2 実験条件

まず、LC で得られた PA 像のスナップショットを図4に示す。LC 前の PA 像(図3(a))では、き裂は映像化されなかった。これは、無負荷ではき裂が閉じていたことを示唆している。一方、LC 開始後の PA 像(図3(b)-(d))では、き裂が明瞭に映像化された。これは、LC によりき裂開口に有効な引張熱応力が作用したことを示唆している。しかし、最大き裂深さは、LC 開始後 =4 s の PA 像(図3(c))で 7.9 mm だった。これは、油圧制御試験機を用いた実験で確認された実際のき裂深さ 11.3 mm より浅いことから、き裂端部が依然として閉じていたと考えられる。以上より、LC のみでは、強く閉じたき裂を開かせるのに十分な引張熱応力を作用させることが困難であることが分かった。

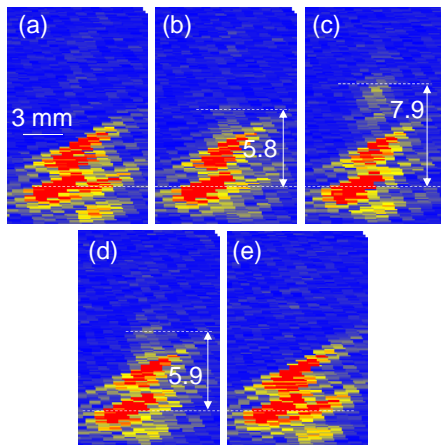


図3 局所冷却に伴う PA 像のスナップショット

次に、GPLC で得られた PA 像のスナップショットを図4に示す。GP 後・LC 前の PA 像(図4(a))では、き裂は映像化されなかった。これは、図3(a)と同様、き裂が閉じていたことを示唆している。一方、LC 開始後の PA 像(図4(b)-(d))では、き裂は明瞭に映像化された。また、最大き裂深さは、LC 開始後 =4 s の PA 像(図4(c))で 11.3 mm だった。これは、実際のき裂深さと一致することから、LC のみでは開かなかったき裂が、GPLC により端部まで開口したと考えられる。これより、GPLC が強く閉じたき裂の開口法として有効

であることが実証された。

その後、冷却時間増加に伴い、き裂は浅く映像化され、 $t=15$ s の PA 像(図4(e))では消失した。これは、試験片上面が冷却され続けることで、試験片内の温度分布が均一になり、引張熱応力が低下したためと考えられる。以上より、本試験片のき裂開口には、4 s 程度の短時間の冷却で十分であることが分かった。

次に、き裂の応答のみを抽出するため、GP 後・LC 前の PA 像(図4(a))と GPLC 適用後の PA 像(図4(c))に LDPA を適用した。その結果、差分像(図4(f))で、き裂の開閉に関係しない線形散乱源のノッチ左端を除去し、き裂の端部と根元の応答変化を抽出することに成功した。さらに、き裂端部と線形散乱源(ノッチ左端)の強度比(点線で囲まれた領域の平均値として算出)として選択性 22)を調べた結果、LDPA 法により 45.6 dB 向上したことが分かった。

以上より、GPLC と LDPA の組み合わせが、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。

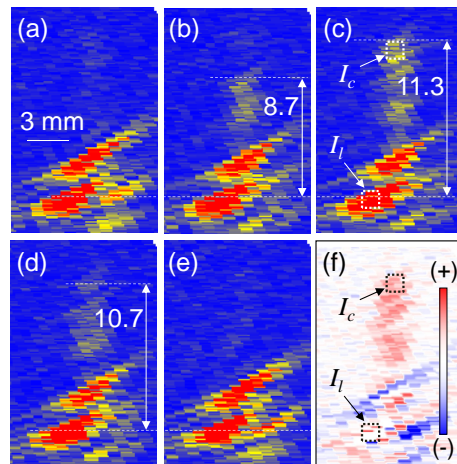


図4 広域加熱(50)・局所冷却に伴う PA 像のスナップショット

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)

K. Takahashi, K. Jinno, Y. Ohara, K. 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, Vol. 53, 2014, pp. 07KC20-1-7.

DOI: 10.7567/JJAP.53.07KC20

K. Takahashi, K. Ohmachi, K. Jinno, Y. Ohara, K. Yamanaka, Effect of Thermal Conductivity on Phased Array Imaging of Closed Crack by Global Preheating and Local Cooling, Proceedings of Symposium

on Ultrasonic Electronics, 査読有, Vol. 35, 2014, pp. 443-444.

A. Ouchi, A. Sugawara, Y. Ohara, K. Yamanaka, Subharmonic Phased Array for Crack Evaluation Using Refraction and/or Mode Conversion at an Interface, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 査読有, Vol. 35, 2014, pp. 259-260.

A. Sugawara, K. Jinno, Y. Ohara, K. Yamanaka, Closed-Crack Imaging and Scattering Behavior Analysis Using Confocal Subharmonic Phased Array, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 査読有, Vol. 35, 2014, pp. 11-12.

K. Jinno, A. Sugawara, Y. Ohara, K. Yamanaka, Analysis on Nonlinear Ultrasonic Images of Vertical Closed Cracks by Damped Double Node Model, Materials Transactions, 査読有, Vol. 55, No. 7, 2014, pp. 1017-1023.
DOI: 10.2320/matertrans.I-M2014812

Y. Ohara, K. Takahashi, K. Jinno, K. Yamanaka, High-Selectivity Ultrasonic Imaging of Closed Cracks Using Global Preheating and Local Cooling, Materials Transactions, 査読有, Vol. 55, No. 7, 2014, pp. 1003-1010.
DOI: 10.2320/matertrans.I-M2014810

小原良和, 閉じたき裂の高精度計測のための非線形超音波映像法の開発, 日本金属学会 マテリアル (新進気鋭) 査読無, Vol. 3, 2014, pp. 100-103.

小原良和, 高橋恒二, 神納健太郎, 山中一司, 広域加熱・局所冷却を用いた閉じたき裂の高選択性映像法とその解析, 非破壊検査, 査読有, Vol. 62, No. 12, 2013, pp. 600-605.

K. Takahashi, K. Jinno, Y. Ohara, K. Yamanaka, Evaluation of Crack Closure Stress by Damped Double Nodes Analyses of Images Obtained by Global Preheating and Local Cooling, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 査読有, Vol. 34, 2013, pp. 91-92.

K. Jinno, A. Sugawara, K. Takahashi, Y. Ohara, K. Yamanaka, Quantitative Analysis of Nonlinear Ultrasonic Response at Closed Cracks by the Damped Double Node Model, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 査読有, Vol. 34, 2013, pp. 371-372.

Y. Ohara, K. Takahashi, S. Murai, K. Yamanaka, High-Selectivity Imaging of Closed Cracks Using Elastic Waves with Thermal Stress Induced by Global Preheating and Local Cooling, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 103, 2013, pp. 031917-1-5.

DOI: 10.1063/1.4816160

M. Ikeuchi, K. Jinno, Y. Ohara, K. Yamanaka, Improvement of Closed Crack Selectivity in Nonlinear Ultrasonic Imaging Using Fundamental Wave Amplitude Difference, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 52, 2013, pp. 07HC08-1-5.
DOI: 10.7567/JJAP.52.07HC08

小原良和, 池内雅子, 山中一司, 振幅差分を用いた分調波映像法による閉口き裂の選択性向上, 検査技術, 査読有, Vol. 18, No. 3, 2013, pp. 1-5.

Y. Ohara, S. Murai, K. Takahashi, K. Yamanaka, Nonlinear Ultrasonic Imaging of Closed Cracks by Load Difference Phased Array with Global Pre-Heating and Local Cooling, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 査読有, Vol. 33, 2012, pp. 299-300.

M. Ikeuchi, K. Jinno, Y. Ohara, K. Yamanaka, Improvement of Selectivity of Closed Cracks in Nonlinear Ultrasonic Imaging by Using Amplitude Difference of Fundamental Wave, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 査読有, Vol. 33, 2012, pp. 327-328.

K. Jinno, M. Ikeuchi, A. Ouchi, Y. Ohara, K. Yamanaka, Analysis on Nonlinear Ultrasonic Images of Vertical Closed Cracks by Damped Double Node Model, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 査読有, Vol. 33, 2012, pp. 179-180.

Y. Ohara, M. Ikeuchi, K. Jinno, A. Ouchi, S. Horinouchi, K. Yamanaka, Enhancement of the Selectivity of Closed Cracks in Nonlinear Ultrasonic Imaging Using Amplitude Difference Phased Array, Proceedings of SICE Annual Conference 2012, 査読無, 2012, pp. 1177-1180.

S. Horinouchi, M. Ikeuchi, Y. Shintaku, Y. Ohara, K. Yamanaka, Evaluation of Closed Stress Corrosion Cracks in Ni-Based Alloy Weld Metal Using Subharmonic Phased Array, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 51, 2012, pp. 07GB15-1-5.
DOI: 10.1143/JJAP.51.07GB15

Y. Ohara, Y. Shintaku, S. Horinouchi, M. Ikeuchi, K. Yamanaka, Enhancement of Selectivity in Nonlinear Ultrasonic Imaging of Closed Cracks Using Amplitude Difference Phased Array, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 51, 2012, pp. 07GB18-1-6.

〔学会発表〕(計 51 件)

高橋恒二, 猪慶弘, 小原良和, 山中一司, 広域加熱・局所冷却による閉じたき裂の超音波フェーズドアレイ映像化の定量

解析、第62回応用物理学会春季講演会、神奈川県、東海大学 湘南キャンパス(2015年3月11日)

高橋恒二、猪慶弘、小原良和、山中一司、広域加熱・局所冷却による閉じたき裂の超音波フェーズドアレイ映像化の定量解析、圧電材料・デバイスシンポジウム2015、宮城県、東北大学(2015年2月19日)

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、愛知県、名古屋工業大学(2015年1月21日)

K. Takahashi, K. Ohmachi, K. Jinno, Y. Ohara, K. Yamanaka, Effect of Thermal Conductivity on Phased Array Imaging of Closed Crack by Global Preheating and Local Cooling, The 35th Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2014), Meiji University, Tokyo, Japan. (2014年12月5日)

Y. Ohara, K. Takahashi, K. Jinno, K. Yamanaka, Estimation of Crack Closure Stress from Ultrasonic Phased Array Images during Global Preheating and Local Cooling (GPLC), 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), Prague, Czech Republic. (2014年10月6日)

K. Takahashi, K. Ohmachi, K. Jinno, Y. Ohara, K. Yamanaka, High-Selectivity Imaging of Closed Fatigue Crack with Coarse Grain by Load Difference Phased Array with Global Preheating and Local Cooling, 41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), Boise Centre, Boise, Idaho, America. (2014年7月24日)

Y. Ohara, A. Sugawara, K. Jinno, K. Yamanaka, Development of Confocal Subharmonic Phased Array for Crack Evaluation for Closed Crack Imaging and Analyses of Nonlinear Scattering Behaviors, 41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), Boise Centre, Boise, Idaho, America. (2014年7月22日)

Y. Ohara, A. Sugawara, K. Jinno, K. Yamanaka, Development of Confocal Subharmonic Phased Array for Crack Evaluation (SPACE) for Closed Crack Imaging and Analyses of Nonlinear Scattering Behaviors, The 19th International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials (XIX ICNEM), Frejus, France. (2014年6月26日)

小原良和、非線形超音波の基礎と応用～閉じたき裂の映像法の開発～、日本材料学会 高温強度部門委員会 第2期第10回 損傷評価 WG、宮城県、東北大学

(招待講演)(2014年3月7日)

高橋恒二、大町弘毅、神納健太郎、小原良和、山中一司、広域加熱・局所冷却を用いた閉口き裂の超音波映像と熱応力解析による閉口応力の推定、圧電材料・デバイスシンポジウム2014、宮城県、東北大学(2014年1月30日)

K. Takahashi, K. Jinno, Y. Ohara, K. Yamanaka, Evaluation of Crack Closure Stress by Damped Double Nodes Analyses of Images Obtained by Global Preheating and Local Cooling, The 34th Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2013), Doshisha University, Kyoto, Japan. (2013年11月20日)

小原良和、非線形超音波を用いた構造物の欠陥と経年損傷の評価、日本非破壊検査協会 シンポジウム 社会インフラのメンテナンスを支える非破壊検査技術、東京都、きゅりあん小ホール(依頼講演)(2013年9月30日)

小原良和、山中一司、サブハーモニック超音波フェーズドアレイを用いた閉じたき裂の計測精度向上、日本金属学会2013年秋季大会、石川県 金沢大学(受賞講演)(2013年9月18日)

Y. Ohara, K. Takahashi, K. Yamanaka, Ultrasonic Imaging of Closed Crack with Thermal Stress Induced by Global Preheating and Local Cooling, 40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), Hilton Baltimore, Baltimore, Maryland, America. (2013年7月24日)

K. Takahashi, Y. Ohara, K. Yamanaka, Ultrasonic Imaging of Tightly Closed Cracks by Linear Phased Array with Global Preheating and Local Cooling and the Estimation of Crack Closure Stress, 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM symposium, Prague Congress Centre, Prague, Czech Republic. (2013年7月22日)

小原良和、高橋恒二、神納健太郎、山中一司、広域加熱・局所冷却を用いた閉じたき裂の高選択性超音波映像法とき裂閉口応力推定法の検討、非線形音響研究会、長野県(財)加藤科学振興会 軽井沢研修所(2013年7月13日)

Y. Ohara, K. Takahashi, K. Yamanaka, Nonlinear Ultrasonic Imaging of Closed Cracks Using Thermal Stress Induced by Global Preheating and Local Cooling, 3rd International Symposium on Laser Ultrasonics and Advanced Sensing, The Yokohama Red Brick Warehouse, Yokohama, Japan. (2013年6月28日)

Y. Ohara, M. Ikeuchi, K. Jinno, K. Yamanaka, Selectivity Improvement of Closed Cracks in Nonlinear Ultrasonic Images by Using Fundamental Wave, 3rd

- International Symposium on Laser Ultrasonics and Advanced Sensing, The Yokohama Red Brick Warehouse, Yokohama, Japan. (2013年6月26日)
Y. Ohara, Nonlinear Ultrasonic NDT Research and Applications in Japan, Seminar at Laboratoire d'Imagerie Parametrique, UPMC(Universite Pierre et Marie Curie) Sorbonne University, Paris, France. (2013年6月17日)
Y. Ohara, K. Jinno, K. Takahashi, M. Ikeuchi, K. Yamanaka, Enhancement of Selectivity of Closed Cracks in Nonlinear Ultrasound, The 18th International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials (XVIII ICNEM), Ascona, Canton Ticino, Switzerland. (2013年6月14日)
- 21 高橋恒二、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超音波映像化と伝熱解析による熱応力の基礎的検討、日本非破壊検査協会平成25年度春季講演大会、東京都、アルカディア市ヶ谷。(2013年6月4日)
- 22 小原良和、高橋恒二、山中一司、広域加熱・局所冷却による熱応力を用いた閉じたき裂の高選択性映像化、第60回応用物理学会春季学術講演会、神奈川県、神奈川工科大学(2013年3月29日)
- 23 小原良和、池内雅子、神納健太郎、山中一司、基本波の振幅差分を用いた閉じたき裂の高選択性映像化、第60回応用物理学会春季学術講演会、神奈川県、神奈川工科大学(2013年3月29日)
- 24 小原良和、高橋恒二、山中一司、広域加熱・局所冷却を用いた荷重差分法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2013、宮城県、東北大学青葉山キャンパス(2013年1月29日)
- 25 Y. Ohara, Satoru Murai, Kohji Takahashi, K. Yamanaka, Nonlinear Ultrasonic Imaging of Closed Cracks by Load Difference Phased Array with Global Pre-Heating and Local Cooling, The 33rd Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2012), Chiba University, Chiba, Japan. (2012年11月15日)
- 26 小原良和、高橋恒二、村井智、山中一司、全体加熱・局所冷却を用いた荷重差分法による閉じた疲労き裂の高選択性映像化、日本非破壊検査協会平成24年度秋季大会、東京都、アルカディア市ヶ谷(2012年10月24日)
- 27 Y. Ohara, Satoru Murai, S. Horinouchi, K. Jin-nou, M. Ikeuchi, A. Ohuchi, K. Yamanaka, High-Selectivity Imaging of Closed Cracks by Load Difference Phased Array with Local Cooling, 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), International Congress Center, Dresden, Germany(2012年10月9日)
- 28 小原良和、神納健太郎、新宅洋平、堀之内聡、池内雅子、大内彬寛、山中一司、サブハーモニック超音波フェーズドアレイによる閉口き裂評価の高度化、日本機械学会M&M2012材料力学カンファレンス、愛媛県、愛媛大学(2012年9月24日)
- 29 Y. Ohara, M. Ikeuchi, K. Jinno, A. Ohuchi, S. Horinouchi, K. Yamanaka, Enhancement of the Selectivity of Closed Cracks in Nonlinear Ultrasonic Imaging Using Amplitude Difference Phased Array, SICE Annual Conference 2012, Akita University, Akita, Japan(2012年8月22日)
- 30 Y. Ohara, Satoru Murai, S. Horinouchi, K. Jin-nou, M. Ikeuchi, A. Ohuchi, K. Yamanaka, Load Difference Phased Array with Local Cooling for High-Selectivity Imaging of Closed Cracks, 39th Annual Review of Progress in QNDE, Hyatt Regency Denver Tech Center, Denver, Colorado, America. (2012年7月20日)
- 31 K. Yamanaka, K. Jinno, Y. Ohara, Analysis on Scattering of Large Amplitude Ultrasound at a Closed Crack by the Damped Double Node (DDN) Model, 39th Annual Review of Progress in QNDE, Hyatt Regency Denver Tech Center, Denver, Colorado, America. (2012年7月18日)
- 32 Y. Ohara, Satoru Murai, S. Horinouchi, K. Jinnou, M. Ikeuchi, A. Ohuchi, K. Yamanaka, High-Selectivity Imaging of Closed Cracks by Nonlinear Ultrasound, XVII International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials (XVII ICNEM), Cefalu, Sicily, Italy. (2012年7月5日)

〔産業財産権〕
 出願状況(計1件)

名称：構造物欠陥の非破壊検査方法および構造物欠陥の非破壊検査装置
 発明者：小原良和、山中一司
 権利者：同上
 種類：特許
 番号：特願2012-232404、特開2015-85161
 出願年月日：2012年10月19日
 国内外の別：国内

〔その他〕
 ホームページ等
<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