

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21686069

研究課題名(和文) 大型構造物の閉じたき裂映像化のための低周波加振型非線形超音波映像法の創出

研究課題名(英文) Development of nonlinear ultrasonic imaging method with low frequency vibration for closed cracks in large structures

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

研究成果の概要(和文)：高度経済成長期に建造された高速道路・橋梁などの大型構造物は経年劣化が蓄積されており、社会の安全と安心のためには、それらを非破壊で評価する必要がある。本研究の目的は、大型構造物の閉じたき裂を高分解能で映像化するため、低周波加振とパルス超音波フェーズドアレイを組み合わせた“低周波加振型非線形超音波映像法”を創出することである。本研究では、[1]装置開発、[2]閉じたき裂試験片の作製、[3]実証試験の3項目を遂行した。その結果、アルミニウム合金A7075のCT試験片に導入した閉じた疲労き裂において、パルス超音波による高分解能映像化に加えて、閉じたき裂映像化の選択性を最大で24倍改善できることを実証した。また、無負荷では約10mm過小評価してしまったき裂深さを、本手法により約1mmの精度で計測できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：The aging damage has been accumulating in the large structures built during high economic growth period. To maintain safety and reliability of society, the means of evaluating them is necessary. The objective of this study is to develop the nonlinear ultrasonic imaging method with low-frequency vibration and phased array using pulse waves in order to visualize closed cracks in large structures with high resolution. In this study, we performed [1] development of the apparatus, [2] formation of closed-crack specimen, and [3] its verification test. As a result, we succeeded in imaging closed crack, formed in aluminum-alloy specimen, with high spatial resolution. Furthermore, we found that the selectivity for closed cracks in ultrasonic images was enhanced by 24 times. In addition, although the crack depth was underestimated by approximately 10 mm, we succeeded in measuring the crack depth with an accuracy of less than 1 mm using the developed method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2010年度	11,000,000	3,300,000	14,300,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	18,400,000	5,520,000	23,920,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：非破壊評価、非線形超音波、閉じたき裂、フェーズドアレイ、低周波加振

1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期に建造された大型インフ

ラ設備は設計寿命を迎え、経年劣化が蓄積されている。大型構造物におけるき裂の計測誤差は、社会の安全と安心を確保する上で大きな問題である。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。

応募者は、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、大振幅の短いパースト波（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な超音波映像法 SPACE（Subharmonic Phased Array for Crack Evaluation）を開発した。閉じた疲労き裂に SPACE を適用することで、様々な応力状態のき裂を映像化し、その計測誤差は約 1mm を実現した [Y. Ohara(応募者), T. Mihara, R. Sasaki, T. Ogata, S. Yamamoto, Y. Kishimoto, K. Yamanaka, Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 011902]。

SPACE のキーテクノロジーの 1 つである大振幅超音波発生用 LiNbO₃ 送信探触子は MHz 帯域のものであり、大型構造物検査のために数百～数十 kHz に低周波化することは困難であった。また、周波数が低いほど超音波映像の分解能が低下するが、これを防ぐことは原理上不可能だった。一方で、効率よく広範囲の閉じたき裂を検出するため、大変位を効率よく発生できる低周波加振（周波数：数 Hz～数百 kHz）と分解能のよい MHz 超音波を利用する非線形超音波法の研究は行われてきたが（V. V. Kazakov, A. Sutin, P. A. Johnson, Appl. Phys. Lett. 81 (2002) 646 など）、き裂深さ計測できる実用的な高分解能映像法は実現されていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、従来不可能だった閉じたき裂の広範囲・高分解能映像化を達成するため、容易に大振幅を出力可能な低周波加振器を励振源として、それによる閉じたき裂の開閉振動を、高映像分解能のパルス超音波フェーズドアレイでモニタリング・映像処理を行う“低周波加振型非線形超音波映像法”を開発し、大型構造物を 1mm の分解能で検査できる閉じたき裂の映像法を創出する。

3. 研究の方法

広範囲に大変位を励振できる低周波加振を行うことで、効率よくき裂面を開閉振動させ、その変化を高分解能パルス超音波フェーズドアレイでモニタリングする。例えば、無負荷もしくは低周波加振による圧縮応力がき裂に作用すると、き裂開口部のみが映像化される。一方で、低周波加振によりき裂に引張応力が作用すると、き裂は開口し、映像上で現れる。これらの映像で、時間依存で変化する部位は閉口部であり、時間的に不変な部位は開口部となる。それゆえ、時変部と時不変部を映像処理で抽出することで、き裂の開口部と閉口部を超音波パルスの分解能で映像化できる。

4. 研究成果

本研究では、(1)装置開発、(2)閉じたき裂試験片の作製、(3)実証試験の 3 項目を遂行した。成果の概要を以下に示す。

本研究では、通常規格より大型の CT（compact tension）試験片に繰り返し荷重をかけることで閉じた疲労き裂を作製した。試験片材料にはアルミニウム合金 A7075 を用いた。試験片形状は、図 1 に示すように、破壊靱性試験のための規格である ASTM-E399（JIS G 0564）に従い、かつ、超音波探傷用にノッチから探傷面までの厚さが 40 mm となるように設計した。疲労試験では、応力拡大係数を一定に保つため、き裂深さを試験片表面から目視で測定し、それに合わせた単位厚さあたりの荷重を選択した。閉じたき裂の進展が報告された Buck らの論文 [J. D. Frandsen, R. V. Inman, and O. Buck, Int. J. Fracture 11 (1975) 345-348] を参考にして、 $K_{max} = 9.0$ 、 $K_{min} = 0.6 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ の条件で 86000 サイクル疲労試験を行った。その結果、図 2 に示すように、側面の目視観察で約 10mm の深さの閉じた疲労き裂を導入することに成功した。

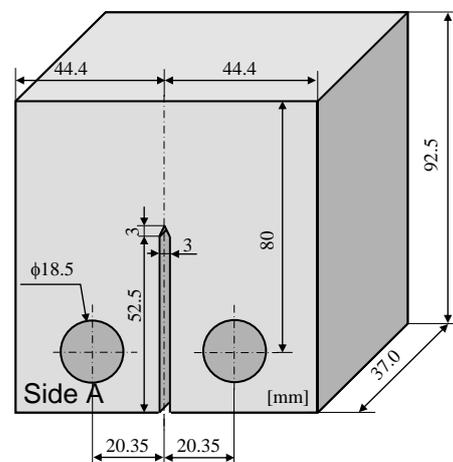


図 1 CT 試験片

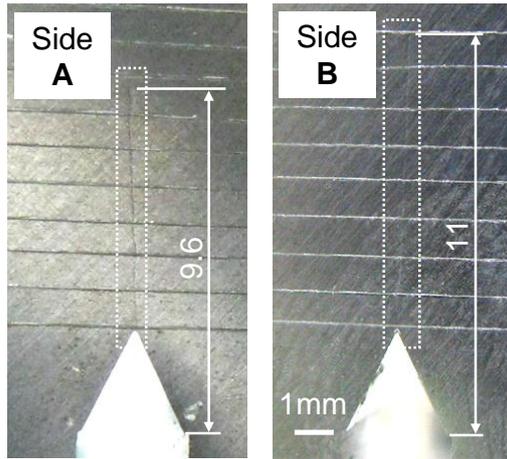


図2 作製した疲労き裂の光学観察写真

疲労試験機により $K=0\sim 7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、 0.1 Hz の荷重を負荷を模擬し、線形フェーズドアレイ PA を用いて CT 試験片に導入した疲労き裂を映像化し変化を記録した。図 3(a)、(b) に最小と最大の荷重下の映像を示す。(a) ではき裂端部が映像化されなかったが、(b) ではき裂端部まで映像化された。これは閉じたき裂端部が荷重により開口したためだと考えられる。これにより、パルス超音波フェーズドアレイと低周波加振を組み合わせた低周波加振型非線形超音波映像法により、閉じたき裂の高分解能で映像できることを実証した。また、これは無負荷では 10mm 過小評価してしまったき裂深さを、約 1mm の計測精度で映像化できたことも示している。

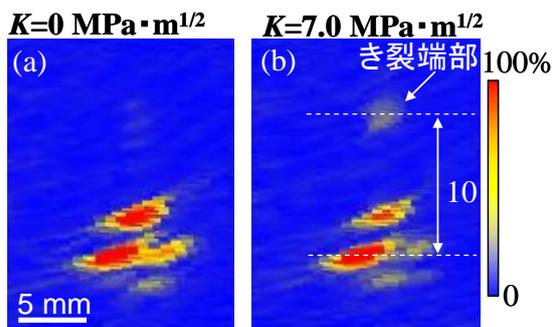


図3 異なる荷重におけるパルス超音波フェーズドアレイによる閉じたき裂の映像

さらに、き裂端部の応答強度を 0.25 s 間隔で抽出し、荷重による変化を調べた。その結果を図 4 に示す。 $K=2.4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 以上では応答強度がほぼ一定となった。これは $K=2.4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ でき裂が完全に開口したためと考えられる。これよりき裂の閉口応力は $K=2.4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に相当すると考えられる。

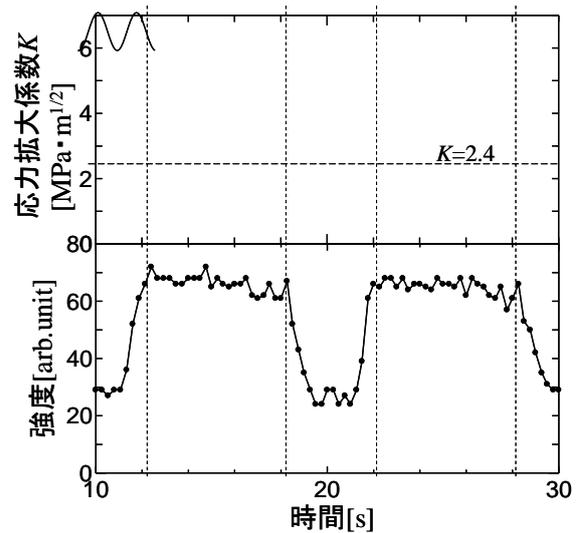


図4 荷重(上)とき裂端部の応答強度(下)の時間変化

また、図 3(b) から図 3(a) の差分を取った結果、図 5 に示すようにき裂が開口したことによるき裂端部の増加とき裂根元の減少を映像化できた。

次に、閉じたき裂の選択性向上を定量的に調べるため、その指標を次式で定義する。

$$S = I_c / I_l \quad (1)$$

ここで、 I_c は超音波映像におけるき裂強度、 I_l は線形散乱源の強度である。ここでは、 I_c としてき裂端部の強度、 I_l としてき裂開閉の影響を受けない強い線形散乱源であるノッチ左端を選択した。その結果、閉じたき裂の選択性 S は 24 倍向上した。これは、本手法が閉じたき裂を極めて高い選択性で映像化できることを示唆している。

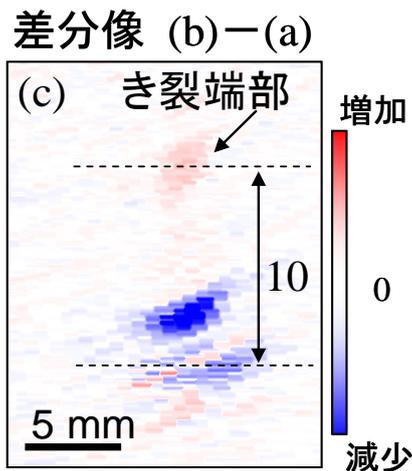


図5 荷重差分像

以上より、低周波加振型非線形超音波映像法の創出により、閉じたき裂を高分解能・高選択性・高精度で映像化できることを実証した。

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 18 件)

- ① 山中一司、小原良和、小熊みゆき、新宅洋平、減衰 2 重節点を用いた閉口き裂における分調波発生の 2 次元解析、非破壊検査、査読有、61 巻 3 号、2012、pp.113-121.
- ② 小原良和、堀之内聡、新宅洋平、柴崎亮、山口雄一、田上稔、山中一司、単一アレイのサブハーモニック超音波フェーズドアレイ SPACE の開発とステンレス鋼溶接部の閉じた応力腐食割れの高選択性映像化、非破壊検査、査読有、60 巻 11 号、2011、pp.658-664.
- ③ S. Horinouchi, M. Ikeuchi, Y. Shintaku, Y. Ohara, K. Yamanaka, Evaluation of Closed Stress Corrosion Cracks in Nickel Based Alloy Weld Metal Using Subharmonic Phased Array, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 査読有, Vol. 32, 2011, pp.75-76.
- ④ Y. Ohara, Y. Shintaku, S. Horinouchi, M. Ikeuchi, K. Yamanaka, Analyses on Nonlinear Ultrasonic Imaging of Closed Cracks by Damped Double Node Model, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 査読有, Vol. 32, 2011, pp.31-32.
- ⑤ 小原良和、橋本真琴、堀之内聡、新宅洋平、山中一司、非線形超音波映像法による閉じた疲労き裂の進展モニタリング、電子情報通信学会論文誌、査読有、J94-A(11)、2011、pp.800-808.
- ⑥ Y. Shintaku, Y. Ohara, K. Yamanaka, Evaluation of Acoustic Anisotropy to Image Defects in Weld Metal by Ultrasonic Phased Array, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.50, 2011, pp.096601-1-7.
- ⑦ Y. Ohara, S. Horinouchi, M. Hashimoto, Y. Shintaku, K. Yamanaka, Nonlinear Ultrasonic Imaging Method for Closed Cracks Using Subtraction of Responses at Different External Loads, 査読有, Ultrasonics, Vol.51, 2011, pp.661-666.
- ⑧ K. Yamanaka, Y. Ohara, M. Oguma, Y. Shintaku, Two-Dimensional Analyses of Subharmonic Generation at Closed Cracks in Nonlinear Ultrasound, Applied Physics Express, 査読有, Vol.4, 2011, pp.076601-1-3.
- ⑨ Y. Shintaku, Y. Ohara, K. Yamanaka, Evaluation of Acoustic Anisotropy to Image Defects in Weld Metal by Ultrasonic Phased Array, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 査読有, Vol.31, 2010, pp.67-68.
- ⑩ M. Hashimoto, S. Horinouchi, Y. Shintaku, Y. Ohara, K. Yamanaka, Measurement of Closed Fatigue Cracks with Nonlinear Ultrasonic Imaging Method Using Subtraction of Responses at Different Loads, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 査読有, Vol.31, 2010, pp.61-62.
- ⑪ Y. Ohara, Y. Shintaku, S. Horinouchi, M. Hashimoto, Y. Yamaguchi, M. Tagami, K. Yamanaka, Ultrasonic Imaging of Stress Corrosion Crack Formed in High Temperature Pressurized Water Using Subharmonic Phased Array, POMA (Proceedings of Meetings on Acoustics), 査読無, Vol. 10, 2010, pp.045007-1-8.
- ⑫ 新宅洋平、小原良和、山中一司、超音波フェーズドアレイによる溶接金属中の欠陥映像化のための音響異方性の解析、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、US2010-67、2010、pp.105-110.
- ⑬ Y. Shintaku, Y. Ohara, M. Hashimoto, S. Horinouchi, K. Yamanaka, Evaluation of Stress Corrosion Cracks in Metals by Linear and Nonlinear Ultrasound, Proceedings of 20th International Congress on Acoustics 2010, 査読無, 2010, pp.473-1-4.
- ⑭ Y. Ohara, Y. Shintaku, M. Hashimoto, S. Horinouchi, K. Yamanaka, Fundamental Study on Nonlinear Ultrasonic Imaging Method for Closed Cracks Using Subtraction of Responses at Different External Loads, Proceedings of 20th International Congress on Acoustics 2010, 査読無, 2010, pp.254-1-5.
- ⑮ 小原良和、新宅洋平、橋本真琴、堀之内聡、山中一司、サブハーモニック超音波フェーズドアレイ SPACE を用いた閉じたき裂の映像化、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、US2010(2)、2010、pp.5-10.
- ⑯ 小原良和、サブハーモニック超音波フェーズドアレイ SPACE を用いた閉じたき裂の高精度計測、超音波 TECHNO、3-4、査読無、2010、pp.72-77.
- ⑰ Y. Ohara, H. Endo, M. Hashimoto, K. Yamanaka, Monitoring Growth of Closed Fatigue Crack Using Subharmonic Phased Array, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 査読有, Vol.29, 2010, pp.903-909.
- ⑱ Y. Shintaku, Y. Ohara, H. Endo, M. Hashimoto, K. Yamanaka, Observation of Closed Crack Distribution by Steering Intense Ultrasound and with Shoe to House

Transmitter and Receiver, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 査読有, 30, 2009, pp.251-252.

〔学会発表〕(計 61 件)

- (1) 小原良和、山中一司、閉じたき裂の高選択性映像化のための非線形超音波映像法、非破壊検査協会 非線形超音波研究会、福岡県、福岡工業大学。(2012.3.30)
- (2) Y. Ohara, Accurate Measurement of Closed Crack Depths Using Subharmonic Phased Array, European GDR-Workshop on Nonlinearities in Acoustics, Lab JAD, University of Nice, Nice, France. (2012.3.20) (Invited)
- (3) 小原良和、堀之内聡、村井智、神納健太郎、大内彬寛、池内雅子、新宅洋平、山中一司、荷重差分法を用いた閉じたき裂の高選択性映像化と実機適用のための基礎的検討、圧電材料・デバイスシンポジウム 2012、宮城県、東北大学青葉記念会館。(2012.1.30)
- (4) Y. Ohara, K. Yamanaka, Advanced Ultrasonic Measurement for Safe and Secure Society, GCOE International Conference (International Symposium of Materials Integration), Tohoku University, Miyagi, Japan. (2011.12.2)
- (5) K. Yamanaka, Y. Ohara, Advanced Ultrasonic Measurement for Safety and Security, International Forum on Mechanoluminescence and Novel Structural Health Diagnosis 2011, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan. (2011.11.11) (Invited)
- (6) 小原良和、新宅洋平、堀之内聡、池内雅子、山中一司、減衰 2 重節点モデルを用いた閉口き裂の非線形超音波映像の解析、USE2011 (第 32 回 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム)、京都府、京都大学。(2011.11.8)
- (7) Y. Ohara, Accurate Measurement of Closed Crack Depths Using Subharmonic Phased Array, Fall Conference of the Korea Society of Nondestructive Testing (KSNT), Ramada Praza Jeju Hotel, Jeju Island, Korea. (2011.10.27) (Invited)
- (8) Y. Ohara, Accurate Measurement of Closed Crack Depths Using Subharmonic Phased Array, International Workshop, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Dajeon, Korea. (2011.10.26) (Invited)
- (9) Y. Ohara, Y. Shintaku, K. Yamanaka, Imaging and Analysis of Closed Stress Corrosion Cracks Using Subharmonic Phased Array, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 (ATEM'11), Kobe International Conference Center, Hyogo, Japan.(2011.9.20)
- (10) Y. Ohara, S. Horinouchi, Y. Shintaku, K. Yamanaka, Accelerated Formation of Closed Stress Corrosion Cracks in Ni-Based Alloy Weld Metal and Its evaluation by Subharmonic Phased Array, International Congress on Ultrasonics (ICU), University of Gdansk, Gdansk, Poland. (2011.9.7)
- (11) 小原良和、非線形超音波計測-サブハーモニック(分調)波を用いた映像法 SPACE による閉じた応力腐食割れの映像化、平成 23 年度第 1 回非線形超音波の基礎と応用に関する研究会、徳島県、徳島大学 (2011.8.10)
- (12) Y. Ohara, S. Horinouchi, Y. Shintaku, K. Yamanaka, Two-Step Formation of Closed Stress Corrosion Cracks in Ni-Based Alloy Weld Metal and Its Evaluation by Subharmonic Phased Array, 38th Annual Review of Progress in QNDE, University of Vermont, Burlington, America (2011.7.20)
- (13) 小原良和、新宅洋平、堀之内聡、山中一司、サブハーモニック超音波フェーズドアレイ SPACE による Ni 基合金溶接金属中の閉じたき裂の映像化と解析、日本機械学会 第 16 回動力・エネルギー技術シンポジウム、大阪府、関西大学 (2011.6.23)
- (14) Y. Ohara, S. Horinouchi, Y. Shintaku, K. Yamanaka, Development of Subharmonic Phased Array with a Single Array and 2D Simulation Method for Evaluation of Closed Stress Corrosion Cracks, XVI International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials (XVI ICNEM), Prague, Czech Republic. (2011.6.9)
- (15) 小原良和、新宅洋平、堀之内聡、柴崎亮、山口雄一、田上稔、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じたき裂の映像化と時間領域差分法による解析、日本非破壊検査協会 平成 23 年度春季大会、東京都、アルカディア市ヶ谷(2011.5.25)
- (16) M. Hashimoto, S. Horinouchi, Y. Shintaku, Y. Ohara, K. Yamanaka, Measurement of Closed Fatigue Cracks with Nonlinear Ultrasonic Imaging Method Using Subtraction of Responses at Different Loads, The 31st Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2010), Tokyo, Meiji University. (2010.12.6)
- (17) 小原良和、Ultrasonic Measurement of Closed Stress Corrosion Crack Depth Using Subharmonic Phased Array、2010 年秋季

- 第 71 回応用物理学会学術講演会、長崎県、長崎大学（応用物理学会論文奨励賞受賞記念講演）(2010.9.14)
- (18) 小原良和、堀之内聡、橋本真琴、新宅洋平、山中一司、「荷重差分を用いた非線形超音波映像法による閉じたき裂の選択性向上」2010 年秋季 第 71 回応用物理学会学術講演会、長崎県、長崎大学 (2010.9.14)
- (19) Y. Ohara, Y. Shintaku, M. Hashimoto, S. Horinouchi, K. Yamanaka, Fundamental Study on Nonlinear Ultrasonic Imaging Method for Closed Cracks Using Subtraction Responses at Different External Loads, The 20th International Congress on Acoustics, Sydney Convention Center, Sydney, Australia. (2010.8.26)
- (20) 小原良和、山中一司、閉じたき裂評価のための非線形超音波と SCC への適用、日本非破壊検査協会 非線形超音波の基礎と応用に関する研究会・模擬 SCC 探傷研究委員会、(財)電力中央研究所 狛江地区 (2010.8.5)
- (21) 小原良和、堀之内聡、新宅洋平、橋本真琴、山中一司、荷重依存性を用いた閉じたき裂の非線形超音波映像法の検討、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 (2010.7.28)
- (22) Y. Ohara, S. Horinouchi, Y. Shintaku, M. Hashimoto, K. Yamanaka, Phased-Array Imaging Using Subtraction of Nonlinear Ultrasonic Responses at Different External Loads, 37th Annual Review of Progress in QNDE, Marriot San Diego Mission Valley, San Diego, California, America. (2010.7.21)
- (23) Y. Ohara, Y. Shintaku, S. Horinouchi, M. Hashimoto, Y. Yamaguchi, M. Tagami, K. Yamanaka, Ultrasonic Imaging of Stress Corrosion Crack Formed in High Temperature Pressurized Water Using Subharmonic Phased Array for Crack Evaluation (SPACE), XV International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials (15th ICNEM), Otrant, Italy. (2010.7.9)
- (24) 小原良和、新宅洋平、倉前隆一、遠藤宏明、山中一司、Ni 基合金溶接金属中の応力腐食割れの超音波非破壊評価、日本機械学会 第 15 回動力・エネルギー技術シンポジウム-動力エネルギーシステム部門 20 周年、次の 20 年への新展開-、東京都、早稲田大学 (2010.6.22)
- (25) 堀之内聡、橋本真琴、新宅洋平、小原良和、山中一司、荷重差分を用いた閉じたき裂の非線形超音波映像法の基礎的検討、日本非破壊検査協会 平成 22 年度春季大会、東京都、TFT（東京ファッションタウン）ホール(2010.5.26)
- (26) 小原良和、新宅洋平、橋本真琴、堀之内聡、山中一司、サブハーモニック超音波フェーズドアレイ SPACE を用いた閉じたき裂の映像化、電子情報通信学会研究会 超音波研究会、東京都、電気通信大学 (2010.4.22)
- (27) 小原良和、山中一司、ステンレス鋼の応力腐食割れの超音波計測、第 10 回核破砕中性子源材料技術の研究会、茨城県、いばらき量子ビーム研究センター (2009.12.15)
- (28) 小原良和、サブハーモニック超音波フェーズドアレイ SPACE を用いた閉じたき裂の高精度計測、新素材の非破壊評価特別研究委員会ミニシンポジウム、東京都、(社)日本非破壊検査協会（特別講演）(2009.11.27)
- (29) M. Hashimoto, Y. Ohara, H. Endo, Y. Shintaku, K. Yamanaka, Nonlinear Ultrasonic Imaging of Closed Cracks Using Subtraction of Responses at Different Loads, The 30th Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2009), Kyoto, Doshisya University. (2009.11.18)
- (30) Y. Ohara, H. Endo, M. Hashimoto, Y. Shintaku, K. Yamanaka, Monitoring of Fatigue Damage Using Subharmonic Phased Array for Crack Evaluation (SPACE), IEEE International Ultrasonics Symposium, Roma, Italy. (2009.9.21)
- (31) 小原良和、橋本真琴、遠藤宏明、新宅洋平、山中一司、閉じたき裂の超音波映像の荷重依存性に関する基礎的検討、2009 年秋季 第 70 回応用物理学会学術講演会、富山県、富山大学 (2009.9.8)
- (32) Y. Ohara, H. Endo, M. Hashimoto, Y. Shintaku, K. Yamanaka, Monitoring Growth of Closed Fatigue Crack Using Subharmonic Phased Array, 36th Annual Review of Progress in QNDE, University of Rhode Island (URI), Kingston, Rhode Island, America. (2009.7.30)

〔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