

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 3 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21246105

研究課題名(和文) 共焦点サブハーモニック超音波フェーズドアレイによる応力腐食割れの高分解能映像法

研究課題名(英文) High resolution imaging of stress corrosion cracking by a confocal subharmonic ultrasonic phased array

研究代表者

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

研究成果の概要(和文):原子力等の発電施設、化学プラント等では経年劣化が蓄積されており、特に応力腐食割れは、漏洩事故をもたらす危険な欠陥であるため高精度に非破壊で評価する必要がある。代表者らは閉じたき裂を映像化できる分調波映像法(SPACE; subharmonic phased array for crack evaluation)を開発したが方位分解能に課題があった。本研究では、送信も集束することで空間分解能が高く、限られた探傷面でも適用可能な共焦点 SPACE を開発した。高温高圧水環境下でステンレス鋼溶接熱影響部に導入した応力腐食割れ SCC は、基本波像では多数の粗大結晶粒での線形散乱により映像化されなかったが、分調波像では少数の明瞭な輝点として映像化され、周波数解析により分調波の発生を確認した。さらに減衰を導入した 2 重節点モデルを創出し、これを 2 次元シミュレーションで解析する方法を確立した。これにより閉じた SCC の高選択性映像化に SPACE が有効であることを実証した。

研究成果の概要(英文): To ensure the safety and reliability of structures such as nuclear power plants, it is necessary to detect closed crack by nonlinear ultrasound. Though the novel imaging method, subharmonic phased array for crack evaluation (SPACE) is a practical solution, the lateral resolution was not high enough. In this research, we developed confocal SPACE with a single array transducer which can transmit a large amplitude focused wave and detect scattered wave using a single array sensor. We then succeeded to image an SCC in a heat affected zone (HAZ) of type 304 stainless steel specimen, formed in high temperature pressurized water, and succeeded in visualizing the closed crack tip in subharmonic image with high selectivity, irrespective of strong linear scattering at grain boundary. We also succeeded in 2D simulation of these waves. This result will significantly contribute to improve the safety and reliability of nuclear power plants.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	16,600,000	4,980,000	21,580,000
2010 年度	11,600,000	3,480,000	15,080,000
2011 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
年度			
年度			
総計	34,300,000	10,290,000	44,590,000

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、応力腐食割れ

1. 研究開始当初の背景

原子炉など重要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は、超音波を反射・散乱するので、1mm以下の誤差で高精度に計測できるが、実際は計測誤差が1mmより大きい場合がある。2002年には原子炉用ステンレス鋼の応力腐食割れ (SCC; stress corrosion cracks) において、5mm以上の計測誤差があることが判明して深刻な懸念を呼んだ。この原因の一つとして、残留応力や酸化物の影響でき裂が強く閉じている (閉口き裂) ことが指摘されている。

研究代表者らは、疲労き裂の明瞭な分調波を観測し、これが高い時間分解能を持つことを見出し、大振幅超音波の発生に有用なLiNbO3探触子と、き裂評価のための分調波超音波フェーズドアレイ (Subharmonic Phased Array for Crack Evaluation; 略称は頭文字のSPACE) を開発した。従来法では5mm以上あった閉口き裂での誤差を1mm以下にできる可能性を示し [Y. Ohara, T. Mihara, R. Sasaki, T. Ogata, S. Yamamoto, Y. Kishimoto, K. Yamanaka, Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 011902] 学界で高く評価され読売など新聞各社でも報道された。

しかしSCCや材料加工によるき裂は3次元的構造を持ち、従来の送信に単一のLiNbO3探触子を用いるSPACEでは、送信波を集束できず方位分解能が低いという問題があった。

2. 研究の目的

本研究では、微小電気機械システム (Micro electromechanical systems; MEMS) を活用して、大振幅入射波を送信できるアレイを開発し、クロックと同期したバースト送信機能を持つフェーズドアレイの回路で送信波に遅延則を適用して集束し、本研究では空間分解能が高く、限られた探傷面でも適用可能な共焦点SPACEを開発する。また、これを適用して、SCCにおける複雑な枝分かれき裂の生成と進展など、材料工学分野における困難な問題の解決に資する新しい知見を得る。

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

単一アレイSPACEの原理と構造をFig. 1に示す。き裂の開口に必要な大変位を達成するには、耐圧性に優れたLN23-32のアレイ (31) が望まれるが、その作製は容易ではない。そこで本研究では、市販のPZTアレイ (周波数5MHz, 素子幅0.4mm, 素子間ピッチ0.5mm, 素子の奥行き幅10mm) を送信に用いる。次に、同一アレイで受信した波形からデジタルフィルタで各成分を分離し、受波フォーカシング (0.1mmステップ) を行い、基本波 (fundamental array: FA) 像と分調波 (subharmonic array: SA) 像を形成する。これにより、FA像では線形散乱源であるき裂開口部、SA像では非線形散乱源であるき裂閉口部を選択的に映像化できる。上述の原理を定式化する。送信超音波を集束させるための遅延則は、

$$t_{r,n}(\mathbf{r}_f) = \frac{|\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_f|}{V} \quad (1)$$

である。ここで、 \mathbf{r}_f は送信焦点の位置ベクトル、 \mathbf{r}_n はアレイの n 番目の素子の位置ベクトル、 V は試験片の音速である。集束させた場合の分解能は

$$\Delta r \approx \lambda \frac{d_f}{D} \quad (2)$$

ここで d 、 λ は波長、 d_f は焦点までの距離、 D はアレイの開口幅である。(2)式より、 D が大きいほど、分解能が高い。しかし、 Δr が小さいほど、一度の送信での見逃しのリスクは高くなる。一方で、 d_f もしくは $|\mathbf{r}_f|$ が無限大の場合は平面波の送信に等しい。この場合、集束効果は得られないが、一度に広い範囲に超音波を送信できる。

任意の位置ベクトル \mathbf{r} の映像強度は

$$I_{F,S}(\mathbf{r}) = \sqrt{\int_{t_c}^{t_c+\tau} u_{F,S}(\mathbf{r}, t) dt} \quad (3)$$

と表される。ここで、 t_c は楔を用いた場合の伝搬時間やトリガー遅延などの補正項、 τ は入射波のサイクル数に依存して決める時間幅、

$$u_F(\mathbf{r}, t) = \sum_{n=1}^N u_{F,n}(t - t_n(\mathbf{r})) \quad (4)$$

$$u_S(\mathbf{r}, t) = \sum_{n=1}^N u_{S,n}(t - t_n(\mathbf{r})) \quad (5)$$

$$t_n(\mathbf{r}) = (|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}| + |\mathbf{r} - \mathbf{r}_n|) / V \quad (6)$$

である。ここで、 N はアレイの総素子数、 $u_F(\mathbf{r}, t)$ はバンドパスフィルタで周波数 f 付近の成分だけを抽出された波形、 $u_S(\mathbf{r}, t)$ はバンドパスフィルタで周波数 $f/2$ 付近の成分だ

けを抽出された波形, $t_n(\mathbf{r})$ はアレイ中心の位置ベクトル \mathbf{r}_s から \mathbf{r} を経由して \mathbf{r}_n への伝搬時間である。

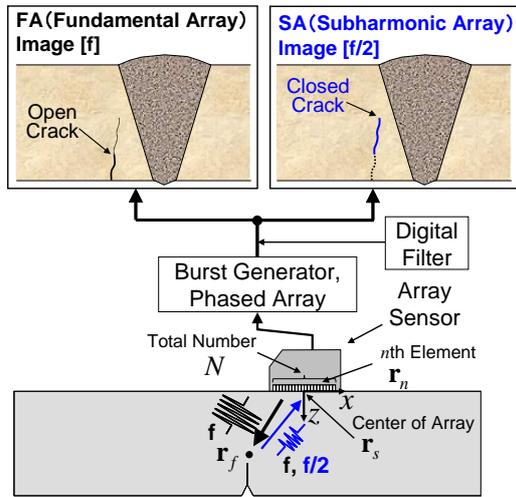


Fig. 1 単一のアレイを用いる共焦点 SPACE の原理と装置の構造

共焦点 SPACE を溶接金属の SCC に適用した。これは異方が強く減衰も大きいため、Fig. 2 に示すように、超音波が溶金を伝搬しない配置で、アレイの首振りにより適切な配置を選択した。単一アレイ SPACE で映像化した結果を Fig. 3 に示す。ここで、入射条件には、周波数 7 MHz、入力電圧 150 V、サイクル数 3 を選択した。

SPACE による映像化結果を Fig. 3 に示す。FA 像では多数の線形散乱により SCC は映像化されなかった。これは、粗大結晶粒界での線形散乱によると考えられる。一方で、SA 像では少数の明瞭な輝点 (点 A, C) として SCC が映像化された。これらの箇所は、高温高压水での酸化膜生成²⁾により SCC が閉じていたことを示唆している。

分調波の発生を確認するため、Fig. 3 の点 A におけるシフト加算波形とその周波数解析結果を Fig. 4 に示す。点 A の映像生成に使用された時間、つまり、点 A からの散乱波の伝搬時間は、式(6)に点 A の座標と音速を代入することで算出できる。その時間付近 8.5 ~ 9 μs において、波形歪みが観察された。その領域の矩形窓で得られたパワースペクトルで分調波 (3.5 MHz) の明瞭なピークが確認された。なお、基本波 (7 MHz) のピークが分離されて観察されたが、これは多数の結晶粒からの散乱波の干渉によると考えられる。同様にウェーブレット変換結果からも分調波の発生が確認された。

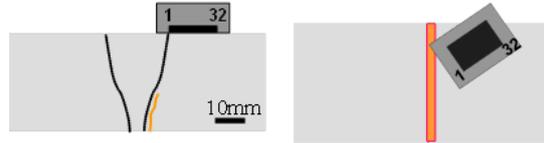
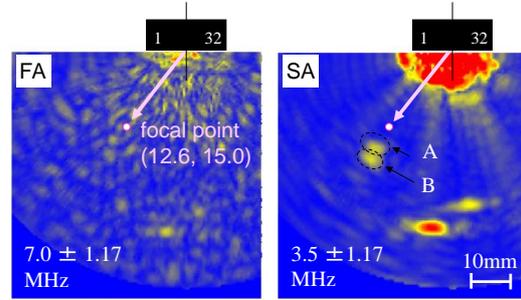


Fig. 2 溶接部の側面図と上面図およびアレイセンサの配置 (感度向上のため斜め入射配置を採用)



(a) 基本波像 FA (b) 分調波像 SA

Fig. 3 共焦点 SPACE による応力腐食割れ SCC の映像

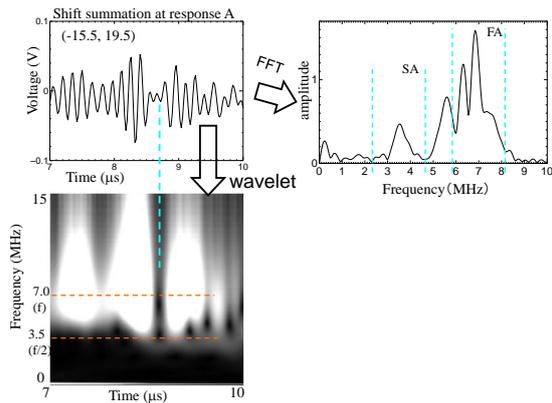


Fig. 4 FA 像で強度の強かった点 B におけるシフト加算波形とその周波数解析結果

比較のため、FA 像で強度の強かった点 B の波形とその周波数解析結果では、点 B の映像生成に使用された時間 5.5 ~ 6 μs において、波形歪みは観察されずパワースペクトルで基本波 (7 MHz) の明瞭なピークのみ観察された。ウェーブレット変換結果でも、同様であった。そこで点 B の応答は粗大結晶粒での線形散乱によると考えられる。これは、組織観察でも確認された。このことから分調波が閉じたき裂で発生したことが分かる。

理論面では、分調波の発生原因を解析するため、Fig. 5 のようなき裂面の粒子速度を計算する 2 重節点に減衰を導入した減衰 2 重節点 (damped double node; DDN) モデルを創出

した。これを、時間領域有限差分法を適用することで、閉口き裂の分調波発生²の2次元挙動の再現に初めて成功した。この成果により映像化アルゴリズムの有効性検証も可能になり、時間分解能を向上させる次の研究課題の基盤構築にも有用であった。

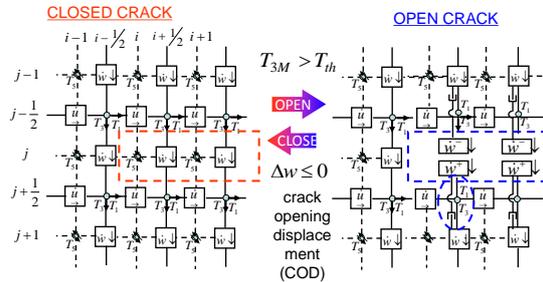


Fig. 5 減衰2重節点(DDN)を用いた閉口き裂の超音波散乱2次元解析モデル

以上の研究により、共焦点SPACEが閉じたSCCの高選択性映像化にSPACEが有効であることが実証された。

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 17 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²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 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.
- ⑰ 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 20 件)

- ① 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)
- ② 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)
- ③ 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)
- ④ 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)

- ⑤ 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)
- ⑥ K. Yamanaka, T. Tsuji and Y. Ohara, Theory of nonlinear ultrasound using oscillator model and damped double node, Meeting for Ultrasonic Nondestructive Evaluation, CEA, Sacre, France (2011. 9. 3)
- ⑦ 山中一司、非線形超音波のシミュレーション法、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)
- ⑧ K. Yamanaka, Y. Ohara, M. Oguma, Y. Shintaku, Two-Dimensional Analyses of Subharmonic Generation at Closed Cracks, 38th Annual Review of Progress in QNDE, University of Vermont, Burlington, America (2011. 7. 19)
- ⑨ 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)
- ⑩ 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)
- ⑪ 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)
- ⑫ 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)
- ⑬ 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)
- ⑭ 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. (2010.8.23)
- ⑮ 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)
- ⑯ 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)
- ⑰ 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)
- ⑱ 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)
- ⑲ 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 (2009.9.10)
- ⑳ 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)

〔産業財産権〕
○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔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

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

(2) 研究分担者

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
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