

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 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：2012～2013

課題番号：24656429

研究課題名(和文) 閉じたき裂の映像法サブハーモニック超音波フェーズドアレイ 曲面对応への新展開

研究課題名(英文) Closed-crack imaging method, subharmonic phased array for crack evaluation (SPACE), for curved surfaces

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) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：非破壊評価において「曲面部材」と「閉じたき裂」が2大障壁である。そこで、本研究では、これまで独自に開発してきた閉じたき裂の映像法「サブハーモニック超音波フェーズドアレイ(subharmonic phased array for crack evaluation)」と、最新の「曲面形状に合わせて変形できるフレキシブルアレイ探触子」との融合により、SPACEの曲面对応への新展開をはかった。まず、曲率考慮の映像化アルゴリズムを構築した。そして、フレキシブルアレイ探触子を設計・試作を行った。さらに、レーザ干渉計走査による評価法を用いて、音場計測を行うことで、曲面对応型SPACEの基本性能を実証した。

研究成果の概要(英文)：In the field of nondestructive evaluation, "curved surface" and "closed crack" are two big problems that we need to resolve. Thus far we have developed an closed-crack imaging method, subharmonic phased array for crack evaluation (SPACE). In this study, we propose a new imaging method by combining SPACE and state-of-the-art array transducer, flexible array transducer, which can conform a curved surface. First we formulated an imaging algorithm under a consideration of curvature. We designed and fabricated the flexible array transducer. Furthermore, we measured the sound field due to the flexible array transducer by utilizing the scanning laser interferometer. Thus we demonstrated the fundamental performance of SPACE which can be applied to an arbitrary curved surface.

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：非破壊検査 非線形超音波 フェーズドアレイ 曲面 閉じたき裂

1. 研究開始当初の背景

大震災による福島第一原発事故以前にも、福井県の大飯3号機では、原子炉容器上蓋の制御棒駆動装置取り付け管台溶接部で SCC が貫通し、炉内のホウ酸が漏えいする事故があった。しかし、「溶接部が曲面であること」と「SCC が閉じていること」が原因で、その検査法は未だ存在しない。また、曲面部材の閉じたき裂検査ニーズは発電プラントのみならず、航空機、鋼管、丸棒素材の検査などでも極めて高く、曲面検査法の開発が急務である。

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た。そして、 LiNbO_3 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映像法 SPACE を開発し、閉じた疲労き裂や SCC でサブハーモニック波像により計測誤差 1mm を実現した [Y. Ohara(応募者), et al., APL, 90 (2007) 011902]。しかし、上記 SPACE では送受信に平面型探触子を用いていたため、曲面には適用できなかつた。一方で、近年、曲面形状に合わせて変形できるフレキシブルアレイ探触子の開発が進んできたことから、SPACE との融合により曲面对応型の閉じたき裂映像化装置が実現できると着想した。

2. 研究の目的

本研究では、応募者らが独自に開発してきた閉じたき裂の映像法「サブハーモニック超音波フェーズドアレイ SPACE (subharmonic phased array for crack evaluation)」と、最新の「曲面形状に合わせて変形できるフレキシブルアレイ探触子」との融合により、SPACE の曲面对応への新展開をはかることを目的とする。

3. 研究の方法

これまで構築してきた閉じたき裂の映像法を曲率考慮へと発展させるためには、下記2点が最重要課題となる。

[1] 曲率考慮の映像化アルゴリズムの構築

これまでの超音波フェーズドアレイでは基本的に平面を対象とするため、アレイ各素子の位置が平面上にはない場合、独自の映像化アルゴリズムの構築が必要となる。そこで、これまで蓄積してきた学術基盤に基づき、映像化アルゴリズムを構築する。

[2] フレキシブルアレイ探触子の設計・試作・実証

平面型アレイ探触子では一部しか接触できない曲面の検査を実現するためには、曲面形状に合わせて変形できるフレキシブルアレイ探触子が必要である。さらに、サブハーモ

ニック波を用いて閉じたき裂を映像化するには、分解能やグレーティングロブ抑制条件 [S. Wooh., et al., Ultrasonics, 36 (1998) 737] に加えて、閉じたき裂を開閉振動させるための大振幅超音波の入射が必要である。そこで、実機構造物を想定して曲率半径 10mm の凹形・凸形まで各素子が接触できるように、素子数・素子間距離・素子幅・厚さを考慮した最適設計を行う。さらに、これまで蓄積してきたレーザ干渉計走査による音場計測を行い、その基本性能を実証する。

4. 研究成果

[1] 曲率考慮の映像化アルゴリズムの構築

ここでは、SPACE の開発で蓄積してきた超音波フェーズドアレイの技術基盤を集約して、曲面形状を考慮した映像化アルゴリズムを構築した。以下にその定式化を示す。

丸棒のような一定の曲率を持つ円の外面に適用する場合を考える (図 1)。パイプや丸棒の中心を原点とした座標系を用いると $\mathbf{r}_n = (x_n, z_n)$ は、

$$x_n = R \sin \theta_n \quad (1)$$

$$z_n = R(1 - \cos \theta_n) \quad (2)$$

と表される。ここで、 R は検査面の曲率半径、 θ_n はアレイ探触子の中心と n 番目の素子間を円の弧としたときの中心角である。さらに θ_n は、

$$\theta_n = \{n - (N + 1)/2\} L_{EP} / R \quad (3)$$

と表される。

送信超音波を集束させるための遅延則は、

$$t_{T,n}(\mathbf{r}) = |\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_f| / V \quad (4)$$

と定式化できる。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。

任意の位置ベクトル \mathbf{r} の映像強度は、

$$I_{F,S}(\mathbf{r}) = \left[\int_{t_c}^{t_c + \tau} |u_{F,S}(\mathbf{r}, t)|^2 dt \right]^{1/2} \quad (5)$$

と表される。ここで、 t_c はくさびを用いた場合の伝搬時間やトリガー遅延などの補正項

$$\tau = n_c / f \quad (6)$$

$$u_F(\mathbf{r}, t) = \sum_{n=1}^N u_{F,n}(t - t_n(\mathbf{r})) \quad (7)$$

$$u_S(\mathbf{r}, t) = \sum_{n=1}^N u_{S,n}(t - t_n(\mathbf{r})) \quad (8)$$

$$t_n(\mathbf{r}) = (|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}| + |\mathbf{r} - \mathbf{r}_n|) / V \quad (9)$$

である。ここで、 f および n_c はそれぞれ入射波の周波数およびサイクル数である。また、 $u_F(\mathbf{r}, t)$ 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、 $t_n(\mathbf{r})$ はアレイ探触子の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。

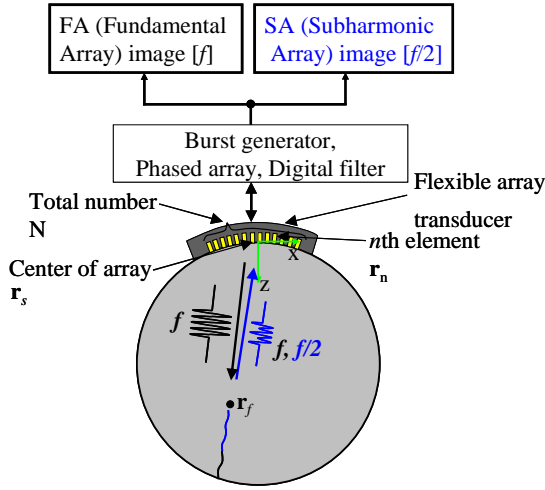


図1 曲面对応型 SPACE

[2] フレキシブルアレイ探触子の設計・試作・実証

曲面形状に合わせて変形できるフレキシブルアレイ探触子の設計を行った。分解能やグレーティングロブ抑制条件を考慮した。

ここでは、アレイセンサの設計パラメータに依存した音場特性について検討するため、リニアアレイセンサの各素子から円筒波が発生すると仮定し、その理論解析を行った。円筒座標系における波動方程式は次式のように表される。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (10)$$

ここで、圧力 p は円柱軸（線音源）から考えられた時間 t および半径 r の関数である。上式の一般解は、第一種および第二種ハンケル関数により表される。ここで、縦波のみを取り扱えば、その解は次式のように表される。

$$p(r, t) = AH_0^{(2)}(kr) \exp[j\omega t] \quad (11)$$

ここで、 k は波数、 ω は角周波数、 $H_0^{(2)}$ は第二種ハンケル関数、 j は虚数単位、 A は任意定数である。 $kr \rightarrow \infty$ と仮定すると、第二種ハンケル関数は次式で近似できる。

$$H_0^{(2)} \approx \left(\frac{2}{\pi kr} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[-j \left(kr - \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (12)$$

よって、Eq.(3-3) を Eq.(3-2) に代入することにより、圧力 p は次式のように表される。

$$p(r, t) = \left(\frac{p_0}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \exp[j(\omega t - kr)] \quad (13)$$

ここで、 p_0 は波数 k の関数である。このような線音源からの調和振動を支配する方程式に基づいて、リニアフェーズドアレイの音場解析を行う。

リニアフェーズドアレイについて取り扱うために、まず、無限小の幅の線音源がアレイセンサの幅方向に断続的に並べられた場合の音場と、ある面積を持つ単一素子の音場を導出し、それらを組み合わせることで、素

子ごとに面積を持つリニアアレイの音場導出を行う。

無限小の幅の線音源がアレイセンサの幅方向に断続的に並べられた場合、媒質中の点 (r, θ) から i 番目の線音源までの距離 R_i は、次式のように表される。

$$R_i = \sqrt{r^2 + [(i-1)d]^2 - 2r(i-1)d \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right)} \quad (14)$$

ここで、 d は隣り合う線音源間の距離（エレメントピッチ）、 N は線音源の数を表す。ここで、 y 軸に対して時計回りの角度を正と取ると、角度 θ は負である。距離 r がエレメントピッチ d より遥かに大きい、すなわち $rd \gg 1$ と仮定すると、 R_i は次式のように近似できる。

$$R_i \approx r - (i-1)d \sin \theta \quad (15)$$

隣接する線音源間の時間遅れを $\Delta\tau$ とすると、位置 (r, θ) 、時間 t における i 番目の線音源の音場への寄与は、 t を $[t - (i-1)\Delta\tau]$ 、 r を R_i と置き換えることにより、次式のように表される。

$$p_i(r, \theta, t) = \left(\frac{p_0}{R_i} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \{ j[\omega(t - (i-1)\Delta\tau) - kR_i] \} \quad (16)$$

従って、リニアフェーズドアレイの音場は次式のように表される。

$$\begin{aligned} p(r, \theta, t) &= \sum_{i=1}^N p_i(r, \theta, t) \\ &= \left(\frac{p_0}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\sin \left(\frac{ka \sin \theta}{2} \right) \sin \left(\frac{\omega\Delta\tau - kd \sin \theta}{2} N \right)}{\frac{k \sin \theta}{2} \sin \left(\frac{\omega\Delta\tau - kd \sin \theta}{2} \right)} \\ &\quad \exp \left(-\frac{jka \sin \theta}{2} \right) \exp \left[-j \left(\frac{\omega\Delta\tau - kd \sin \theta}{2} (N-1) \right) \right] \\ &\quad \exp[j(\omega t - kr)] \end{aligned} \quad (17)$$

ビームの指向性は、焦点 (r, θ_s) の場合、次式のように表される。

$$H(\theta) = \left| \frac{p(r, \theta, t)}{p(r, \theta_s, t)} \right| \quad (18)$$

リニアフェーズドアレイの指向性 $H(\theta)$ は、式(24)に式(23)を代入することで、次式のように表される。

$$H(\theta) = \left| \frac{\frac{\pi a \sin \theta_s}{\lambda} \sin \left(\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \right) \sin \left(\frac{\pi d (\sin \theta - \sin \theta_s)}{\lambda} N \right)}{\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \sin \left(\frac{\pi a \sin \theta_s}{\lambda} \right) N \sin \left(\frac{\pi d (\sin \theta - \sin \theta_s)}{\lambda} \right)} \right| \quad (19)$$

図2に、 $\theta_s = 30^\circ$ 、 $\lambda = 1.24 \text{mm}$ (周波数 5MHz、音速 6230m/s)、 $d = 1.0 \text{mm}$ 、 $a = 0.8 \text{mm}$ の条件で計算したビーム指向性の例を示す。メインローブは正確に $\theta = 30^\circ$ に現れ、隣接して多数のサイドローブが現れた。方位分解能はメインローブの幅に依存して決まる。さらに注目すべきは、 $\theta = -48^\circ$ に現れたメインローブ

とは異なるピークである。これはグレーティングローブと呼ばれ、隣接する素子間の意図しない干渉の結果現れるものである。グレーティングローブは、フェーズドアレイで電子スキャンを行う際にアーチファクトを生成してしまう可能性があるため、避けなければならない。そこで、メインローブの幅とグレーティングローブの抑制条件について考える。

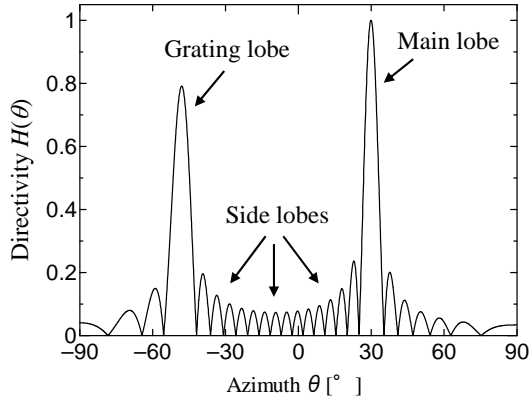


図 2 メインローブ、サイドローブ、グレーティングローブを示すためのビームの指向性の例。

まず、メインローブの幅について検討を行う。 $H_2(\theta)$ は振幅値にのみ影響を与え、その幅を決定するのは $H_1(\theta)$ である。メインローブの幅は、左右に隣接するゼロ点間の角度で決定される。ここで、指向性で振幅が 0 となるのは、 $H_1(\theta)$ の分子が 0 のとき、すなわち次式を満足するときである。

$$\frac{\pi d(\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda} N = m\pi \quad (20)$$

上式を変形することにより、指向性で振幅が 0 となる角度 θ は次式で表される。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\sin \theta_s - \frac{m\lambda}{Nd}\right) \quad (21)$$

メインローブに隣接する方位分解能の値が 0 となる角度は、式(31)の $m=-1$ および 1 のときであるため、メインローブの幅 $\Delta \theta_m$ は次式で表される。

$$\Delta \theta_m = \sin^{-1}\left(\sin \theta_s + \frac{\lambda}{Nd}\right) - \sin^{-1}\left(\sin \theta_s - \frac{\lambda}{Nd}\right) \quad (22)$$

この式より、次の条件を満足するとき、 $\Delta \theta_m$ は最小になることが分かる。

- ①波長 λ を短くする。(周波数を高くする)
- ②開口 Nd を大きくする。(素子数 N を増やす。エレメントピッチ d を大きくする。)

しかし、無条件にこれらのパラメータを改善すると、グレーティングローブが発生してしまう。グレーティングローブが発生する角度は、メインローブを除いて、 $H_1(\theta)=1$ となる次式の関係式を満足する場合である。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\sin \theta_s - \frac{n\lambda}{d}\right) \quad (23)$$

ここで、 $n=0$ のときの θ がメインローブであり、 $n=1$ のときの角度 θ_{g1} に 1 つ目のグレーティングローブが現れる。

$$\theta_{g1} = \sin^{-1}\left(\sin \theta_s - \frac{\lambda}{d}\right) \quad (24)$$

グレーティングローブを完全に回避するためには、グレーティングローブに隣接するゼロ点の角度が -90° より小さくなればよい。よって、メインローブとグレーティングローブの間のサイドローブの数は $N-2$ であることから、式(30)に $m=N-1$ および $\theta=\pi/2$ を代入することにより、グレーティングローブを回避する限界のエレメントピッチ d_{max} はスキャン範囲の限界角度 $(\theta_s)_{max}$ の関数として次式のように表される。

$$d_{max} = \frac{\lambda}{1 + \sin(\theta_s)_{max}} \frac{N-1}{N} \quad (36)$$

よって、この d_{max} を下回るようにアレイセンサを設計することでグレーティングローブを回避した上で、式(32)に示されるメインローブの幅 $\Delta \theta_m$ が最小になるように設計すれば良い。

本研究では、以上の理論に基づき、図 3 に示すような、中心周波数 5 MHz、 $d=0.5\text{mm}$ 、 $a=0.4\text{mm}$ と設計した。



図 3 設計・試作したフレキシブルアレイ探触子

非線形超音波の計測では、き裂面の大振幅超音波の閉じたき裂の非線形超音波計測では閉じたき裂のを開閉振動させるために十分な大振幅超音波入射性能が求められる。

フレキシブルアレイ探触子の各素子を、前述の送信アルゴリズムに従って励振し、図 4 の配置でレーザ干渉計で変位計測を行った結果、図 5、6 に示すように、き裂の開閉振動に必要といわれている 10nm を大きく上回る 60nm の変位の出力が確認できた。これにより、フレキシブルアレイを用いた曲面对応型 SPACE の基盤技術が確立できた。

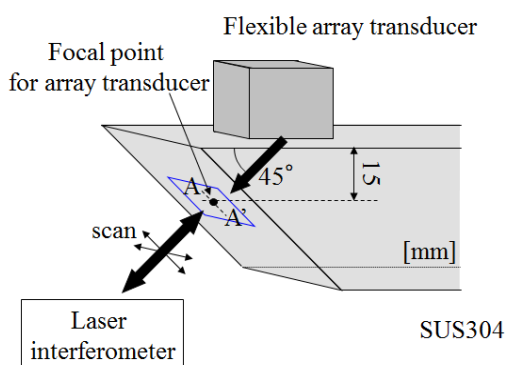


図4 変位計測配置

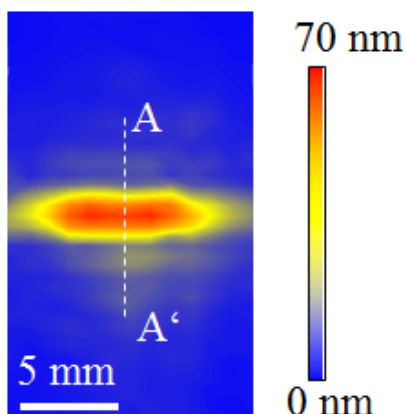


図5 変位の2次元分布

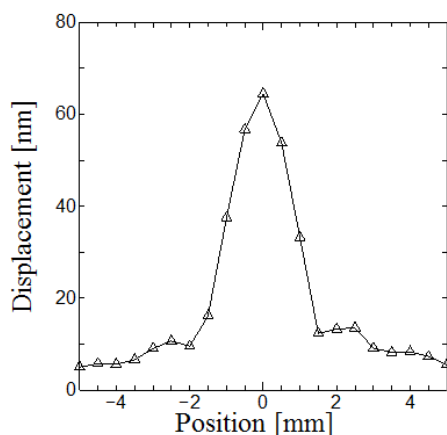


図6 図5のA-A'の分布

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 8 件)

- ① 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、日本金属学会会報、査読有、3 巻、2014、100-103
- ② Kentaro Jinno, Azusa Sugawara, Koji Takahashi, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Quantitative Analysis of Nonlinear Ultrasonic Response at

Closed Cracks by the Damped Double Node Model, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 34, 2013, pp. 371-372

- ③ Masako Ikeuchi, Kentaro Jinno, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Improvement of Closed Crack Selectivity in Nonlinear Ultrasonic Imaging Using Fundamental Wave Amplitude Difference, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 52, 2013, pp. 07HC08-1-5
DOI: 10.7567/JJAP.52.07HC08
- ④ Masako Ikeuchi, Kentaro Jinno, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Improvement of Selectivity of Closed Cracks in Nonlinear Ultrasonic Imaging by Using Amplitude Difference of Fundamental Wave, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 33, 2012, pp. 329-330
- ⑤ Kentaro Jinno, Masako Ikeuchi, Akihiro Ohuchi, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Analysis on Nonlinear Ultrasonic Images of Vertical Closed Cracks by Damped Double Node Model, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 33, 2012, pp. 179-180
- ⑥ Yoshikazu Ohara, Yohei Shintaku, Satoshi Horinouchi, Kazushi Yamanaka, Formation and Evaluation of Closed Stress Corrosion Cracks in Ni-Based Alloy Weld Metal for Nuclear Power Plants, AIP Conference Proceedings, Vol. 1474, 2012, pp. 183-186
- ⑦ Kazushi Yamanaka, Yohei Shintaku, Yoshikazu Ohara, Two Dimensional Model for Subharmonic Generation at Closed Cracks with Damped Double Nodes, AIP Conference Proceedings, Vol. 1474, 2012, pp. 179-182
- ⑧ Yoshikazu Ohara, Yohei Shintaku, Satoshi Horinouchi, Masako Ikeuchi, Kazushi Yamanaka, Enhancement of Selectivity in Nonlinear Ultrasonic Imaging of Closed Cracks Using Amplitude Difference Phased Array, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51, 2012, pp. 07GB18-1-6
DOI: 10.1143/JJAP.51.07GB18

[学会発表] (計 17 件)

- ① 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による広範囲の閉口き裂の深さ計測、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、神奈川 (2014. 3. 17-20)
- ② 大内彬寛、依藤洋、神納健太郎、菅原あずさ、小原良和、山中一司、表面波を用

- いた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長さ計測と散乱挙動の映像化、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、神奈川 (2014. 3. 17-20)
- ③ 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 (2014. 3. 7)
- ④ 神納健太郎、菅原あずさ、高橋恒二、小原良和、山中一司、閉口き裂の非線形超音波応答の減衰二重節点モデルによる定量解析、圧電材料・デバイスシンポジウム 2014、宮城 (2014. 1. 29-30)
- ⑤ 菅原あずさ、神納健太郎、依藤洋、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、日本非破壊検査協会 第 21 回超音波による非破壊評価シンポジウム、東京 (2014. 1. 20-21)
- ⑥ 大内彬寛、神納健太郎、菅原あずさ、高橋恒二、依藤洋、小原良和、山中一司、閉じたき裂の長さ計測のための表面波を用いたサブハーモニック超音波フェーズドアレイの開発、日本非破壊検査協会 第 21 回超音波による非破壊評価シンポジウム、東京 (2014. 1. 20-21)
- ⑦ 菅原あずさ、神納健太郎、小原良和、山中一司、広範囲の閉口き裂評価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、日本非破壊検査協会平成 25 年度秋季大会、広島 (2013. 11. 26-27)
- ⑧ Kentaro Jinno, Azusa Sugawara, Koji Takahashi, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Quantitative Analysis of Nonlinear Ultrasonic Response at Closed Cracks by the Damped Double Node Model, The 34th Symposium on Ultrasonic Electronics, 京都 (2013. 11. 20-22)
- ⑨ 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 (2013. 9. 30)
- ⑩ 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 (2013. 9. 17-19)
- ⑪ Kentaro Jinno, Masako Ikeuchi, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Analysis on Closed Crack in Nonlinear Ultrasonic Images Using Amplitude Difference by Damped Double Node Model, 40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, アメリカ ボルティモア (2013. 7. 21-26)
- ⑫ Yoshikazu Ohara, Masako Ikeuchi, Kentaro Jinno, Kazushi Yamanaka, Selectivity Improvement of Closed Cracks in Nonlinear Ultrasonic Images by Using Fundamental Wave, 3rd International Symposium on Laser Ultrasonics and Advanced Sensing, 神奈川 (2013. 6. 25-28)
- ⑬ Kentaro Jinno, Masako Ikeuchi, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Analysis on Nonlinear Ultrasonic Images of Vertical Closed Cracks by Damped Double Node Model, 3rd International Symposium on Laser Ultrasonics and Advanced Sensing, 神奈川 (2013. 6. 25-28)
- ⑭ Yoshikazu Ohara, Nonlinear Ultrasonic NDT Research and Applications in Japan, Seminar at Laboratoire d'Imagerie Parametrique, UPMC Sorbonne University, フランス パリ (2013. 6. 17)
- ⑮ Yoshikazu Ohara, Kentaro Jinno, Koji Takahashi, Masako Ikeuchi, Kazushi Yamanaka, Enhancement of Selectivity of Closed Cracks in Nonlinear Ultrasound, The 18th International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials, スイス アスコナ (2013. 6. 9-14)
- ⑯ 神納健太郎、池内雅子、小原良和、山中一司、振幅差分を用いた閉口き裂の非線形超音波映像の減衰二重節点モデルによる解析、日本非破壊検査協会平成 25 年度春季講演大会、東京 (2013. 6. 3-4)
- ⑰ 神納健太郎、池内雅子、小原良和、山中一司、減衰二重節点モデルを用いた閉じた縦き裂の非線形超音波映像の解析、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、神奈川 (2013. 3. 29)

[その他]

ホームページ等

http://www.material.tohoku.ac.jp/~hyoka/database_year_j.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・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：00292227

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