

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：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246119

研究課題名(和文) 高時間分解能サブハーモニック超音波映像法の開発と鋼管オンライン検査への適用

研究課題名(英文) Development of high temporal resolution subharmonic phased array and application to online testing of steel pipes

研究代表者

山中 一司 (YAMANAKA, Kazushi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00292227

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,800,000円

研究成果の概要(和文)：閉じたき裂は超音波を透過させ、見逃す可能性がある。溶接鋼管は、重要機器の構造部材に広く採用されているが、閉口き裂の見逃しによる事故の影響は甚大である。

そこで、広い領域に大振幅超音波を入射し、閉口き裂を開口させて検出する分調波フェーズドアレイ(SPACE)による閉口き裂の計測を実現し、シミュレーションで再現した。また水と鋼管界面での超音波の屈折による収差補正方法とSAWを集束するSAW SPACEを開発して標準閉口き裂で検証し、時間分解能を向上するため基本波の振幅差分(FAD)法を開発した。これらを鋼管のオンライン検査装置に導入して、実機に近い条件における適用性を実証した。

研究成果の概要(英文)：Since closed cracks are transparent to ultrasound, measurement error in ultrasonic testing is a difficult problem. Since welded steel pipes are widely used in structural components of important facilities, effects of accidents caused by overlook of closed cracks is serious. Therefore, we realized measurement of closed cracks by the subharmonic phased array for crack evaluation (SPACE) in a wide area. By correcting the aberration caused by refraction at water/ steel interface, it enabled large amplitude incident waves to the cracks. Also, we developed surface acoustic wave (SAW) SPACE and fundamental amplitude difference (FAD) method to enhance the temporal resolution, and verified them with standard closed cracks. Then, we implemented those methods in the online testing equipment and verified their performance in real testing condition for production line of pipes.

研究分野：超音波

キーワード：分調波 フェーズドアレイ 閉口き裂 応用腐食割れ

1. 研究開始当初の背景

圧縮残留応力や酸化膜生成により閉じたき裂は超音波を透過させるため、線形超音波における計測誤差が懸念されている。この解決法である非線形超音波では大振幅超音波を入射し閉じたき裂を開口させて発生する非線形成分を検出する。代表者らが開発した分調波フェーズドアレイ(subharmonic phased array for crack evaluation: SPACE)は、初めて閉口き裂の深さ測定を実現したが、広い領域における検査効率は十分ではなかった。また、表面近傍の欠陥検出や時間分解能に課題があった。

溶接鋼管は、高疲労強度と優れた成形性、良好な耐水素脆性をあわせ持ち、従来の中実鋼棒に比べ大幅な軽量化を達成できるため、重要機器の構造部材に広く採用され、その性能向上に寄与している。しかし溶接中に導入される閉口き裂を超音波探傷で検出できず、見逃しによる事故が起きると人的・社会的影響は甚大である。

2. 研究の目的

閉口き裂の広い領域における検査を実現し、電縫管の欠陥のオンライン計測を可能にする技術を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

広い領域に焦点を走査して大振幅超音波を入射し、閉口き裂を開口させて分調波を発生させる分調波フェーズドアレイ(SPACE)による閉口き裂の計測を実現し、シミュレーションで再現する。また水と鋼管界面での超音波の屈折による収差補正方法とSAWを集束するSAW SPACEを開発して標準閉口き裂で検証し、時間分解能を向上するため基本波の振幅差分法を開発する。これらを鋼管のオンライン検査装置に導入して、実機に近い条件における適用性を実証する。

4. 研究成果

(1) 共焦点 SPACE の原理

共焦点 SPACE の原理図を図 1 に示す。従来の単一アレイ SPACE と同様に、送受信に同一のアレイ探触子を用い、後述の集束遅延則に従ってアレイ探触子を励振することで大振幅集束超音波を単一の送信焦点に送信する。この散乱波をアレイ探触子で受信後、デジタルフィルタを通して基本波成分と分調波成分に分離する。これを遅延則に従ってシフト加算することで、単焦点基本波(fundamental array: FA)像と単焦点分調波(subharmonic array: SA)像を形成する。この手順を角度 θ および距離 r の異なる複数の送信焦点に対して繰り返し、各送信焦点の単焦点像を得る。そして、各単焦点 FA 像および

単焦点 SA 像から送信焦点近傍のみ抽出して 1 枚の映像に合成することで、合成 FA 像と合成 SA 像をそれぞれ形成する。また、 θ の異なる複数の単焦点像に対してビーム送信方向を表す白線を重ねた表示方法をレーダ表示と呼ぶ。静止画を複数並べたり、実際のレーダのように動画で連続的に表示したりすることで、入射角依存の散乱挙動を観察できる。

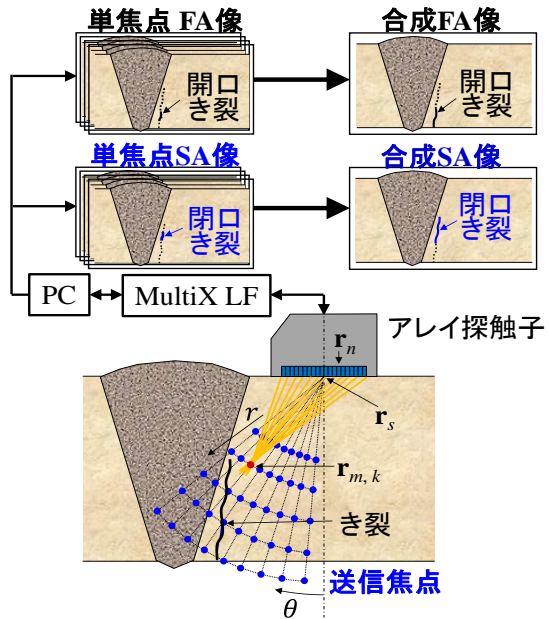


図 1 共焦点 SPACE の原理

(2) 実験結果

① 単焦点像

共焦点 SPACE を SUS304 の応力腐食割れ(SCC)に適用した。入射角 $\theta = 36^\circ \sim 42^\circ$ ($r = 27$ mm) の単焦点像のレーダ表示を図 2 に示す。

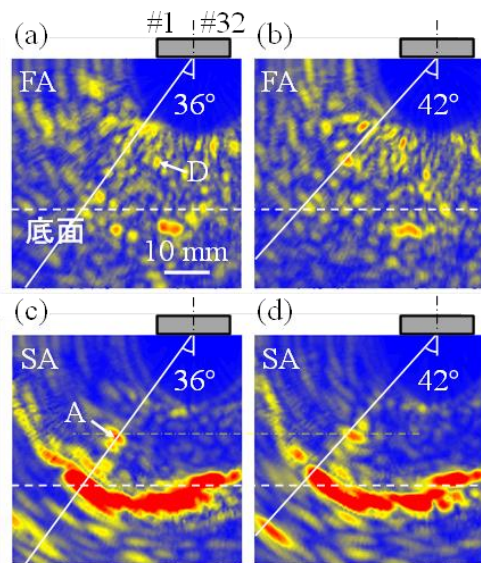


図 2 単焦点像のレーダ表示 ($\theta = 36^\circ, 42^\circ$)
 (a), (b) $\theta = 36^\circ, 42^\circ$ の単焦点 FA 像
 (c), (d) 表示 ($\theta = 36^\circ, 42^\circ$) の単焦点 SA 像

ここで、図中の白線はビーム送信方向を表す図2(a)の $\theta=36^\circ$ における単焦点FA像では、広範囲に渡って複数の輝点が映像化された。一方、図2(c)の単焦点SA像では、ビーム送信方向近傍でのみ輝点Aが映像化された。これとは別に、輝点Bが観察され、 $\theta=50^\circ$ から $\theta=56^\circ$ に変化させると深い位置に移動した。輝点Aのように θ を変化させても動かない応答はこれまでも観察されてきたが、輝点Bのように動く応答(moving crack response: MCR)は今回初めて観察された。

②合成像

単焦点像から形成した合成像を図3に示す。図3(a)の合成FA像では、単焦点FA像と同様に粗大結晶粒での線形散乱が映像化された。一方、図3(b)の合成SA像では、輝点A、B、Cが全て映像化された。これは、 θ を変化させることで広い角度範囲で開口条件が成立したためである。

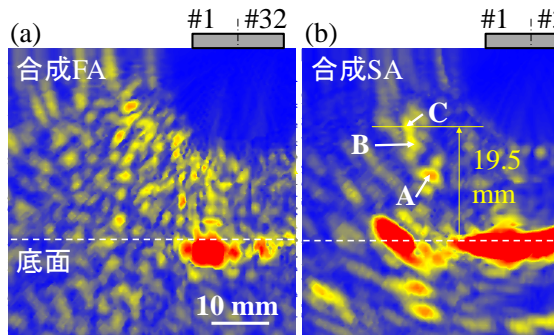


図3 合成像: (a) 合成FA像、(b) 合成SA像

以上より、合成像が閉口き裂の広範囲映像化に有効であることを実証した。

(3) シミュレーション結果

$\theta=50^\circ$ におけるx方向変位のスナップショットを図4(c)および(d)に示す。集束した波がき裂に入射するとCOP (crack opening point)が開口し、き裂面に沿って下方に連続的に開口した。この挙動はき裂に作用する引張応力がき裂の閉口応力を下回る閉口点 (crack closure point: CCP)まで続いた。

$\theta=50^\circ$ と 56° におけるシミュレーションにおける受信波形を用いて形成したSA像を図4(a)および図4(b)にそれぞれ示す。COPとCCPがそれぞれ映像化され、実験と同様に $\theta=50^\circ$ から $\theta=56^\circ$ に変化することで応答の中心が一点鎖線から二点鎖線へ移動した。また、各角度のスナップショットでも、 $\theta=56^\circ$ (図4(d))では $\theta=50^\circ$ (図4(c))より、COPとCCPは上方に移動した。これは θ 変化に伴い、き裂での入射波の応力分布が変化したことによると考えられる。以上より、MCRはCOPの変化によることが示唆された。

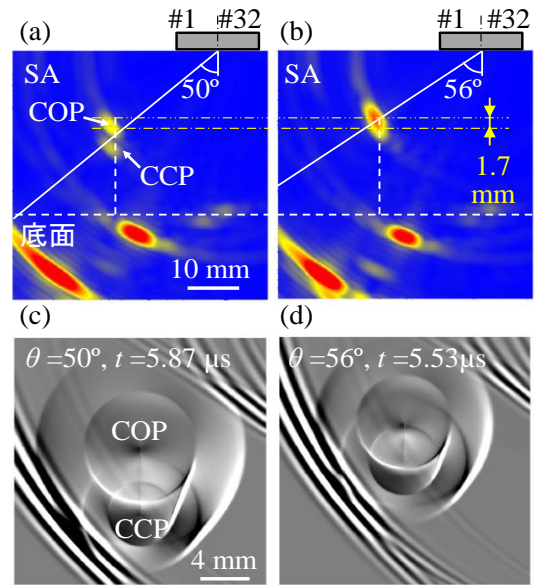


図4 SA像とスナップショット

(a), (b) $\theta=50^\circ$ 、 56° の単焦点SA像
(c), (d) $\theta=50^\circ$ 、 56° のx方向変位のスナップショット

(4) 表面波SPACEの開発と鋼管への適用

表面近傍の欠陥の検査のため、表面でのモード変換を補正して、弾性表面波(SAW)を集束できるSAW SPACEを開発した。その概念図を図5に示す。

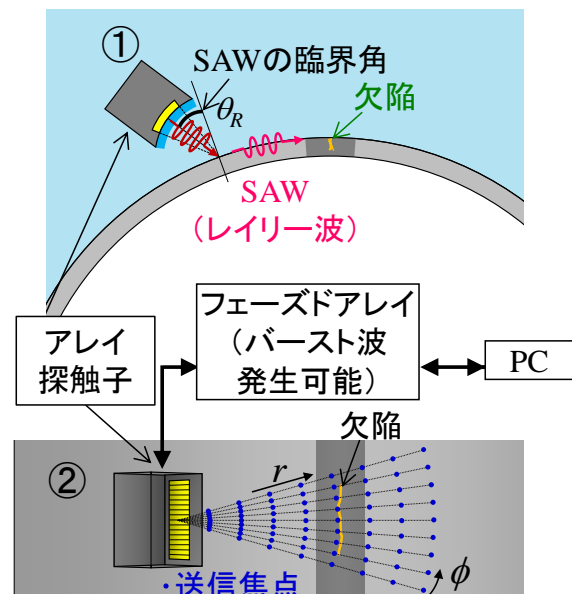
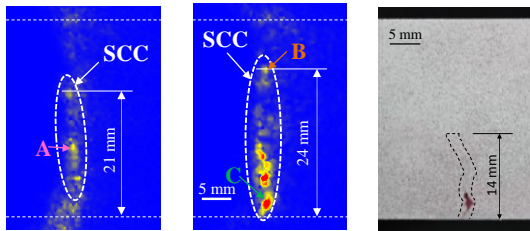


図5 SAW SPACEの原理と鋼管への適用法

水浸SAW SPACEでは超音波がSAWの臨界角で試験片に入射するように、アレイと試験片を配置する。そして、界面での屈折を考慮した遅延則により、角度および距離の異なる

る複数の焦点に SAW を集束させる。このとき、き裂開口部では基本波の線形散乱が起き、閉口部では分調波の非線形散乱が起こる。これを同一のアレイ探触子で受信し、得られた受信波形をデジタルフィルタで各成分に分離後、シフト加算することで FA 像と SA 像を形成する。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が選択的に映像化される。

SAW SPACE を 4.2 節と同じ SCC 試験片に適用した。図 6(c)の浸透探傷像で 14mm と観察された SCC の長さは、(a)の FA 像では 21mm あり、表面下に隠れた SCC を SAW により検出できた。また(b)の SA 像では 24mm も進展していることが分かった。以上の結果、SAW SPACE により、表面近傍の閉口き裂の過小評価を大幅に低減できることが実証された。



(a)FA 像 (b)SA 像 (c)浸透探傷像
図 6 表面波 SPACE の適用例

(5)基本波の振幅差分法

時間分解能の高い短いバースト波を用いると、底面などの線形散乱源が、入射波のスペクトルの広がりによりゴーストとして SA 像に現れ、閉口き裂の識別が困難な場合がある。この問題を解決するため、非線形散乱源の入射波振幅依存性を用いた差分法が提案されたが、線形散乱源は完全には消去されなかった。そこで本研究では、閉口き裂で発生する基本波のしきい値現象に着目し、閉口き裂の選択性を向上する新手法として、基本波の振幅差分 (fundamental wave amplitude difference; FAD) を開発した。

図 7 で、閉口き裂 C の FA 像の強度は、基本波のしきい値現象により、入射波振幅に対して非線形応答を示す。一方、き裂前方の底面 F は線形応答を示す。しかし、き裂後方の底面 R は非線形応答を示す。これは、小振幅では入射波が完全透過するが、大振幅では閉口き裂の開閉振動により、入射波が部分的にしか透過しないためである。そこで、大振幅の応答から振幅比 a を乗じた小振幅の応答の差分を取り、正のみを表示することで、底面 F、R の応答を除去し、閉口き裂 C の応答のみを抽出する。

これを実証するため、閉口疲労き裂試験片 (SUS316L) を単一アレイ SPACE で映像化した (図 8)。小振幅 (14.5 nm) の FA 像を $a = 3$ 倍増幅した像(a)、大振幅 (43.3 nm) の FA

像(b)では C 以外に F と R も観察され、C の選択性は低かった。しかし、FAD による差分像(c) (=b)-(a) では、F、R が消去され、選択性は 34 dB 向上した。

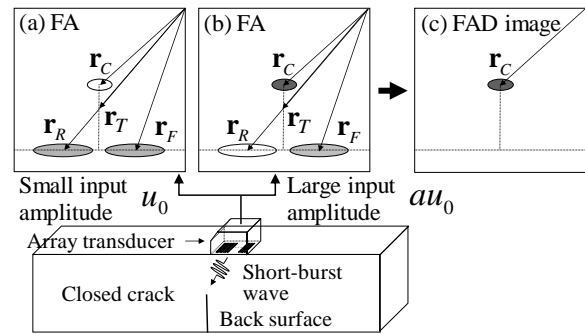


図 7 FAD の原理 ; (a)小振幅 FA 像(b)大振幅 FA 像

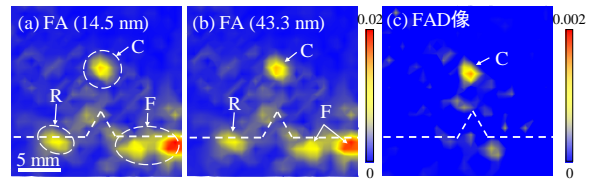


図 8 FAD 法適用結果 ; (a) 小振幅の FA 像、(b) 大振幅の FA 像、(c) FAD 像

最後に SAW SPACE とバルク波の共焦点 SPACE を、溶接鋼管に適用した。この精度を標準閉口き裂で検証した後、図 5①のように鋼管のオンライン検査が可能な装置に導入して、実機に近い水中で、モータ駆動した模擬の閉口き裂試験片を測定した。

(6) 研究成果のまとめ

閉口き裂の広範囲の計測のため、共焦点 SPACE を開発して、SCC 試験体に適用した。その結果、単焦点 SA 像や合成 FA 像では過小評価を引き起こす可能性のある深い SCC が、合成 SA 像で明瞭に映像化された。そして、各送信焦点の映像のレーダ表示から、入射角と共に動く応答 (MCR) が観察された。さらに、DDN モデルを用いた FDTD 法により、MCR が再現され、COP の変化による可能性が示唆された。また、基本波の振幅差分法を開発して、時間分解能を向上できる目処を得た。

最後に、開発した方法を製造ラインに適用できることを実証した。以上により、高分解能 SPACE の開発と鋼管オンライン検査への適用に関する本研究の目的を達成できた。

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 20 件)

- ① 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, 53,2014,07KC20-1-7. DOI: 10.7567/JJAP.53.07KC20.
- ② 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, pp1017-1023. DOI: 10.2320/matertrans.I-M2014812.
- ③ Yoshikazu Ohara, Koji Takahashi, Kentaro Jinno, Kazushi Yamanaka, High-Selectivity Ultrasonic Imaging of Closed Cracks Using Global Preheating and Local Cooling, Materials Transactions, 査読有, 55-7,2014, pp1003-1010. DOI: 10.2320/matertrans.I-M2014810
- ④ Yoshikazu Ohara, Koji Takahashi, Satoru Murai, Kazushi 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,2013,103,(2013)031917-1-5 DOI:10.1063/1.4816160
- ⑤ 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,査読有,2013, 52,(2013)07HC08-1-5. DOI: 10.7567/JJAP.52.07HC08
- ⑥ Koji Takahashi, Kentaro Jinno, Yoshikazu Ohara, Kazushi 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 (2013),査読有, Vol.34,2013,pp91-92.
- ⑦ 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 (ISNA2012),査読有, 1474,2012,pp183-186.
- ⑧ Kazushi Yamanaka, Yohei Shintaku, Yoshikazu Ohara, Two Dimensional Model for Subharmonic Generation at Closed Cracks with Damped Double Nodes, AIP Conference Proceedings (ISNA2012),査読有, 1474,2012,179-182. DOI: 10.1063/1.4749326.
- ⑨ 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,査読有, 51,2012,07GB18-1-6. DOI : 10.1143/JJAP.51.07GB18
- [学会発表] (計 59 件)
- ① Azusa Sugawara, Kentaro Jinno, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Closed-Crack Imaging and Scattering Behavior Analysis Using Confocal Subharmonic Phased Array, The 35th Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2014), 2014 年 12 月 3 日,明治大学 (東京都)
- ② Yoshikazu Ohara, Koji Takahashi, Kentaro Jinno, Kazushi 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),2014 年 10 月 6 日, Prague Congress Centre (チェコ共和国)
- ③ Akihiro Ohuchi, Hiroshi Yorifuji, Kentaro Jinno, Azusa Sugawara, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Development of Subharmonic Phased Array Using Surface Acoustic Wave for Measurement of Closed Crack Length, 41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), 2014 年 7 月 20 日～25 日, Boise Center(アメリカ合衆国)
- ④ 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 34rd Symposium on Ultrasonic Electronics USE2013,2013 年 11 月 21 日, 同志社大学(京都府)
- ⑤ Yoshikazu Ohara, Hironori Yoshida, Kentaro Jinno, Akihiro Ohuchi, Kazushi Yamanaka, Precise Wall Thinning Measurement in Inaccessible Regions of Pipes Using Ultrasonic Multiple Reflection Method Using a

- Collimated Beam, 40th Annual Review of Progress in QNDE, 2013年7月23日、Hilton Baltimore(アメリカ合衆国)
- ⑥ Yoshikazu Ohara, Masako Ikeuchi, Kentaro Jinno, and Kazushi Yamanaka, Selectivity Improvement of Closed Cracks in Nonlinear Ultrasonic Images by Using Fundamental Wave, 3rd International Symposium on Laser Ultrasonics and Advanced Sensing, 2013年6月26日, 横浜赤レンガ倉庫(神奈川県)
- ⑦ 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, The 33rd Symposium on Ultrasonic Electronics USE2012, 2012年11月15日, 千葉大学, (千葉県)
- ⑧ Kazushi Yamanaka, Yoshikazu Ohara, Large Amplitude Ultrasonic Transducer for Crack Evaluation, SECURWARE2012, 2012年8月23日, H10 ROMA CITTA, (イタリア)
- ⑨ Kazushi Yamanaka, Kentaro Jinno, Yoshikazu 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 Quantitative Nondestructive Evaluation, 2012年7月18日, Hyatt Regency Denver Tech Center, (アメリカ合衆国)

[図書] (計7件)

- ① 菅原あずさ、神納健太郎、小原良和、山中一司、日本工業出版、超音波 TECHNO、2015、50-55
- ② 山中一司、依藤洋、菅原あずさ、大内彬寛、神納健太郎、小原良和、日本工業出版、超音波 TECHNO、2014、65-69
- ③ 小原良和、池内雅子、山中一司、日本工業出版、検査技術、2013、1-5
- ④ Kazushi Yamanaka, Toshihiro Tsuji, Springer, Acoustic Scanning Probe Microscopy, 2012, 155-186
- ⑤ Kazushi Yamanaka, Toshihiro Tsuji, Wiley, Characterization of MATERIALS vol.3, 2012, 2340-2350

[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：国立大学法人東北大学

種類：特許
番号：特願 2012-232404
出願年月日：2012年10月19日
国内外の別：国内

○取得状況 (計0件)

[その他]
ホームページ等
山中研究室ホームページ 研究成果
http://www.material.tohoku.ac.jp/~hyoka/datab ase_year_j.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

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