

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：32706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25282106

研究課題名(和文)非接触・非線形音響効果による損傷評価法の創出

研究課題名(英文)Invention of Damage Evaluation Method with Non-contacting Nonlinear acoustics

研究代表者

大谷 俊博(OHTANI, Toshihiro)

湘南工科大学・工学部・教授

研究者番号：60454154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電磁超音波共鳴法を用いてASME Gr. 91およびGr. 122鋼の溶接継手部のクリープ損傷中の2つの非線形音響特性：共鳴周波数の移動と混合した周波数の応答と微細組織変化の関係を明らかにした。クリープはGr. 91鋼では873K, 90MPa, Gr. 122では873K, 100MPaの条件で行った。2つの非線形超音波量は、Gr. 91鋼ではクリープ開始から寿命の約20%、Gr. 122鋼では50%まで減少し、Gr. 91鋼では寿命の30%過ぎ、Gr. 122鋼では80%過ぎから破断まで急増した。これらは細粒HAZ部の転位組織の変化とクリープボイドの発生・成長に起因することが分かった。

研究成果の概要(英文)：We investigated the relationship between microstructural changes and the evolutions of two nonlinear acoustic characterizations: resonant frequency shift and three-wave mixing, with electromagnetic acoustic resonance throughout the creep life in the welded joints of ASME Gr.91 (9Cr-1Mo-VNb) and Gr.122 (11Cr-0.4Mo-2W-CuVNb) heat resistant steels and the correlation between two nonlinear acoustic characterizations. Creep tests with thick-welded joint specimens were carried out at 873 K, and 90 MPa in Gr.91 and 100 MPa in Gr.122 and interrupted at several time steps. Two nonlinear acoustic parameters and ultrasonic attenuation decreased from the start to 20% in Gr.91 and 50% in Gr.122 of creep lives. After slightly increased, they rapidly increased from 30% in Gr.91 and 80% in Gr.122 of creep lives to rupture. We interpreted these phenomena in terms of dislocation recovery, recrystallization, and restructuring related to the initiation and growth of creep void.

研究分野：材料強度、非破壊材料評価

キーワード：クリープ 非線形超音波 タイプ4損傷 非接触計測 損傷評価

1. 研究開始当初の背景

近年の地球温暖化防止対策による二酸化炭素量排出規制のため、高温機器は、より高効率化が計られ、高温高压の過酷な運転が強いられる傾向にあり、これらの構成材料の損傷・劣化の懸念はますます増えてきている。蒸気温度が約 600 の超々臨界圧発電プラント(USC)では、主要構造材料に高 Cr フェライト系耐熱鋼が用いられている。その溶接では、施工時の熱履歴により、溶接熱影響部(Heat affected zone: HAZ)に母材よりクリープ強度の低い細粒組織が形成される。細粒 HAZ での損傷(Type-IV 損傷)により、溶接部の寿命は母材より著しく低下する。その Type-IV 損傷は、内部から進行するため、従来からのレプリカ法や非破壊検査手法が適用できないという問題がある。さらに3月11日東日本大震災以降の電力不足により、休止していた老朽化した火力発電所の再稼働が起きている。このような状況下において、高温機器設備の安全性と信頼性を保つためには、構成材料の健全性・余寿命を評価する技術が必要不可欠である。材料内部の組織変化が検出可能で、非破壊的に現場で広範囲の計測が容易な検査手法が強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、クリープ損傷中の高 Cr フェライト系耐熱材料の HAZ 部での非線形超音波特性の変化を調べることを目的とした。電磁超音波共鳴法(Electromagnetic acoustic resonance: EMAR)を用いて2つの非線形音響特性：共鳴周波数の振幅依存性の変化と3波相互作用による振幅を調べる。EMARは、非接触で超音波を送受信できる電磁超音波探触子(Electromagnetic acoustic transducer: EMAT)と共鳴法を組み合わせた方法である。使用した EMAT は板厚方向に横波を発生する体積波型 EMAT である。クリープ進行に伴う2つの非線形超音波量と材料の組織変化の検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 供試材

供試材は、板厚 25mm の Gr. 91 鋼(9Cr-1Mo-VNb 鋼)と板厚 30mm の Gr.122 鋼(11Cr-0.4Mo-2W-CuVNb 鋼)の板材である。供試材を母材とした H 開先の溶接継手をガスタングステンアーク溶接により作成した。溶接後熱処理(Post weld heat treatment: PWHT)は、Gr.91 鋼では、750 , 75 min, Gr.122 鋼では 745 , 60min で行った。大型平板溶接継手試験片を製作し、Gr.91 鋼では 600 , 100MPa で、Gr.122 鋼では 600 , 90MPa の条件で、所定の時間までクリープ試験を行い、中断材を作製し、図1に示すような溶接継手試験片から板厚が約 3.5mm 程度になるように切り出し、室温にて HAZ 近傍で板厚方向の超音波特性の測定を行った。溶接継手の全積層が観察できる面の積層方向を幅(Width)、溶接線方

向を厚さ(Thickness)とした。破断時間 t_r は Gr.91 鋼では 8,853.4h, Gr.122 鋼では 16,340h だった。Gr.91 鋼では破断時間の約 0.1($t=1,000h$), 0.2($t=2,000h$), 0.5($t=4,425h$), 0.7($t=6,000h$), 0.8($t=7,040h$), 0.9 ($t=7,970h$)で、Gr.122 鋼では約 0.46 ($t=7,540h$), 0.82 ($t=13,400 h$), 0.92($t=15,080h$), 0.96($t=15,710h$), 0.98($t=16,080 h$)で中断した。

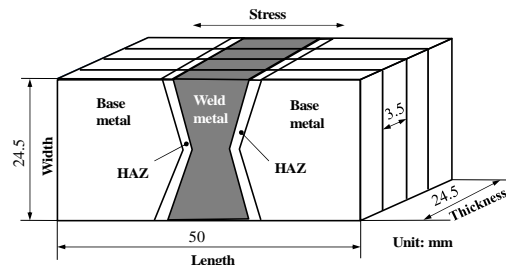


図1 溶接継手試験片形状

(2) 非線形超音波特性の計測

使用した体積波横波 EMAT は、トラック状に巻いた平面コイルと一対の永久磁石からなり、磁わい効果を利用して、試料表面に垂直に伝播する横波を送受信する(図2参照)。ここで用いた横波 EMAT の送受信の有効面積は $10 \times 10 \text{ mm}^2$ である。本実験では HAZ 近傍だけの超音波特性を計測するため、銅箔で非測定領域を覆い計測領域(幅方向 10 mm, 応力と平行方向 2 mm の領域)を狭めた。

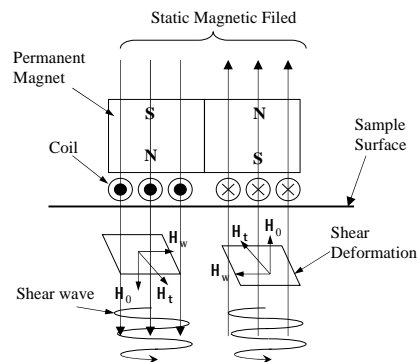


図2 横波用 EMAT の構造と送受信原理

EMAR を用いた共鳴周波数の振幅依存性の変化と3波相互作用による振幅計測を以下に述べる。共鳴周波数の振幅依存性の計測には、NRUS法(Nonlinear Resonant Ultrasound Spectroscopy)により、比較的低振幅で試料を加振しながら、ひずみ振幅の周波数依存性を調べる。相対的な周波数の移動量を観察することで、材料内部の微細組織の変化の計測が可能になる。NRUS法においては、加振力の変化に伴う試料の共鳴周波数の移動を計測することである。加振力の増加につれて、弾性非線形性が、共鳴周波数の移動を引き起こしている。本研究では、NRUS法にEMAR法を適用し、測定する際の駆動電圧を10%から

100% (156Vp-p~1560 V_{p-p})の間で測定し、共鳴周波数シフト Δf を振幅に依存しない共鳴周波数 f_0 で除した $\Delta f/f_0$ を NRUS 法における非線形超音波量として定義している。

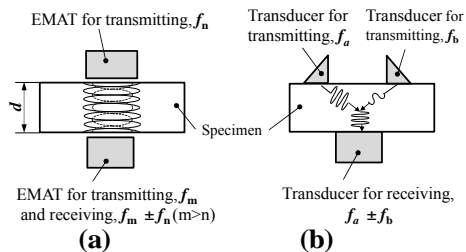


図 3 非線形 3 波相互作用の測定方法 (a)本研究の方法, (b)これまでの研究での方法。

非線形 3 波相互作用の測定においては、試料内に 2 つの探触子から異なる周波数を発生させる。この時 2 つの超音波の相互作用により第 3 の超音波が生じる。相互作用によって生じた超音波の振幅を非線形超音波量とする方法である。図 4(a)に今回の計測方法を示す。2 つの EMAT を厚さ方向に対向させ、双方から異なる n, m 次 ($n > m$) の共鳴周波数 f_n, f_m (n 次の共鳴周波数は次式で表される $f_n = nV/2d$, V :横波音速, d :板厚)の超音波を厚さ方向に送信し(それぞれの最大振幅 A_1, A_2)、一方でその和また差の成分 $f_n \pm f_m$ の振幅 A_3 を測定する。今回は差の成分のみ計測した。ここでは、2 つの送信の共鳴周波数のモード次数 n, m が素数または約数、倍数とならない様なモード次数 n, m を用い、各モードの倍数の成分による測定への影響を避けた。ここでの非線形超音波量を $A_3/(A_1A_2)$ と定義する。また図 4(b)に、これまでの研究で用いられた計測例も示す。3 つの圧電式探触子を用いて測定をしていた。今回の共鳴法を用いた 3 波相互作用法の計測方法は、探触子の数を減らすことに成功した。なお NRUS 法の計測では、1 つの EMAT で超音波を送受信した。計測にはスーパーヘテロダイン位相検出器を搭載した RITEC RAM5000-SNAP を使用した。非線形超音波量の計測と併せて、減衰係数(単位時間当たりの減衰)も計測した。

(3) 組織観察

組織観察は、溶融境界から荷重方向に約 1.5mm 離れた細粒 HAZ について、電子後方散乱解析 (EBSD)、走査型電子顕微鏡 (SEM) および透過電子顕微鏡 (TEM) をおこなった。

4. 研究成果

(1) クリープ中の非線形超音波特性

本研究では、5 次モード f_5 (2.1MHz 近傍) と 8 次モード f_8 (3.5MHz 近傍) を用いて、NRUS による $\Delta f/f_0$ 、3 波相互作用法ならびに超音波特性; 減衰係数 α 、相対音速、 $\Delta V/V_0$ ($\Delta V = V - V_0$, V :音速, V_0 :初期音速)の測定を行った。3 波相互作用法は、 f_8 と f_5 の共鳴周波数を用いて相

互作用させ、差分のモード次数 ($f_3 = f_8 - f_5$) を測定し、その時の振幅を用いて、 $A_3/(A_1A_2)$ の非線形超音波量を求めた (A_1 : f_8 の最大振幅, A_2 : f_5 の最大振幅, A_3 : 相互作用で発生した波 f_3 の最大振幅)。

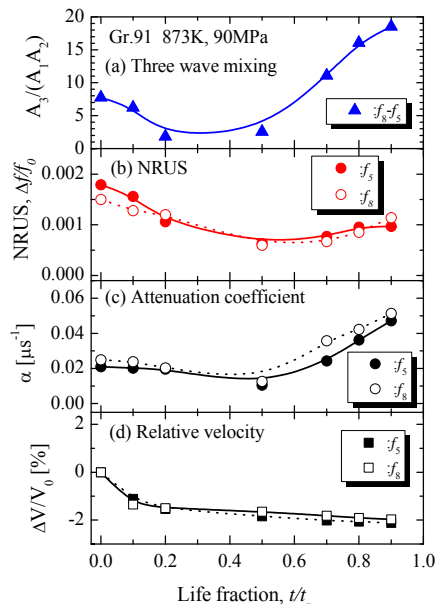


図 4 クリープ中の Gr.91 鋼の細粒 HAZ 近傍での超音波特性の変化; (a) 3 波相互作用法による非線形超音波量, (b)NRUS 法による非線形超音波量, (c) 減衰係数, (d)相対音速 (873K, 90MPa)。

図 4 に Gr.91 鋼の細粒 HAZ 近傍の測定結果を示す。横軸は寿命比 t/tr (t :クリープ途中止め時間, tr :破断時間)である。 $A_3/(A_1A_2)$ は、初期から $t/tr=0.2$ まで減少し、その後 $t/tr=0.3$ 付近から増加する傾向を示した。NRUS における非線形超音波量 $\Delta f/f_0$ は、初期から $t/tr=0.3$ まで減少しどちらのモード次数でも、わずかに増加する傾向を示した。 α は、 $A_3/(A_1A_2)$ と同様に初期から $t/tr=0.2$ まで減少し、その後増加する傾向を示した。 $\Delta V/V_0$ は、初期から $t/tr=0.2$ まで急激に減少後、その後は緩やかに減少する傾向を示した。この傾向は、どちらのモード次数でも見られ、その変化量は最大でも 2%程度であった。

図 5 に Gr.122 鋼の細粒 HAZ 近傍の測定結果を示す。 $A_3/(A_1A_2)$ は、初期からわずかに減少し、 $t/tr=0.5$ 付近から増加の傾向を示し、 $t/tr=0.96$ で最大値を示した。NRUS における非線形超音波量は、どちらのモード次数でも初期から減少した後、 $t/tr=0.82$ 付近まで一定となった後、 $t/tr=0.9$ 付近から再び増加する傾向を示した。減衰係数は、NRUS と同様に初期から減少し、 $t/tr=0.9$ 付近から増加する傾向を示した。 $\Delta V/V_0$ は、初期から増加の傾向を示し、その後 $t/tr=0.92$ 付近で減少する傾向を示した。この傾向は、どちらのモード次数でも見られ、その変化量は最大でも 2.5%程

度であり、変化がほとんどなかった。

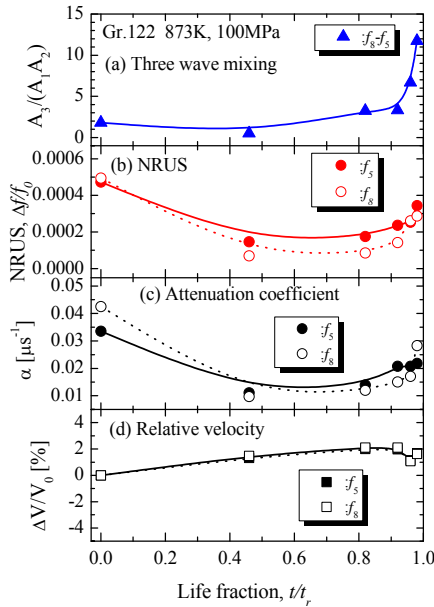


図5 クリープ中の Gr.122 鋼の細粒 HAZ 近傍での超音波特性的変化; (a) 3 波相互作用法による非線形超音波量, (b)NRUS 法による非線形超音波量, (c)減衰係数, (d) 相対音速 (873K, 100MPa).

(2) 組織観察

図6および図7に Gr.91 と Gr.122 の未使用材とクリープ中断材の硬さ、ポイド面積率、局所方位差(KAM 値)粒界長さの変化を示す。横軸は寿命比である。ポイド面積率は HAZ 全体(粗粒 HAZ からインタークリティカル HAZ を含む領域; 縦 0.2mm x 横 0.2mm)で測定した値、硬さは試験片の下表面から板幅 1/3, 溶融境界から 1.5mm 離れた位置の値である。

Gr.91 鋼では、硬さは初期から $t/tr = 0.2$ まで急激に減少後、その後緩やかに減少した(図6(a))。一方、ポイドは $t/tr = 0.2$ 付近から発生し、破断に向けて増加する結果を示した(図6(a))。また、HAZ 部細粒域において、EBSD における測定結果より、KAM 値と硬さが相関関係にあることを示した。また、KAM 値と転位密度は比例関係にあることから、HAZ 部細粒域における KAM 値は、初期から $t/tr = 0.2$ まで低下後、その後あまり大きな変化を見せない結果が示されている(図6(b))。粒界の長さは、 $t/tr = 0.2$ まで減少後、その後緩やかに減少。(図6(b))。この減少は回復によるサブグレインの減少によると考えられる。

Gr.122 鋼では、硬さは $t/tr = 0.46$ までわずかに減少し、その後急激に低下していく(図7(a))。クリープポイドは $t/tr = 0.46$ から発生が見られるが、その発生は抑制され寿命末期 ($t/tr = 0.92$ 以降)に急成長していく(図7(a))。KAM 値は、 $t/tr = 0.5$ まではあまり変化が見られず、その後破断まで急激に低下していく(図8(b))。この変化は硬さと類似している。

また、ポイド面積率は小さく、き裂の成長が寿命末期に急激に進んでいることが分かる。粒界の長さは、 $t/tr = 0.46$ まで増加後、 $t/tr = 0.80$ 位まで減少後、ほぼ一定になっている(図7(b))。

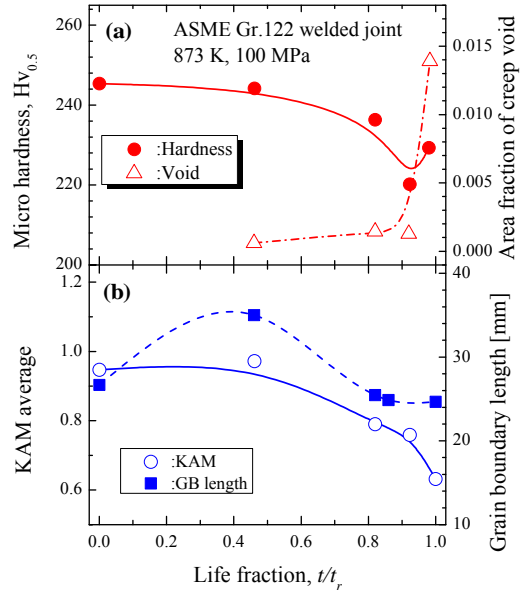


図6 クリープ中の Gr.91 鋼の細粒 HAZ 近傍での組織変化; (a) 硬さ, ポイド面積率, (b) KAM 値, 粒界長さ (873K, 90MPa).

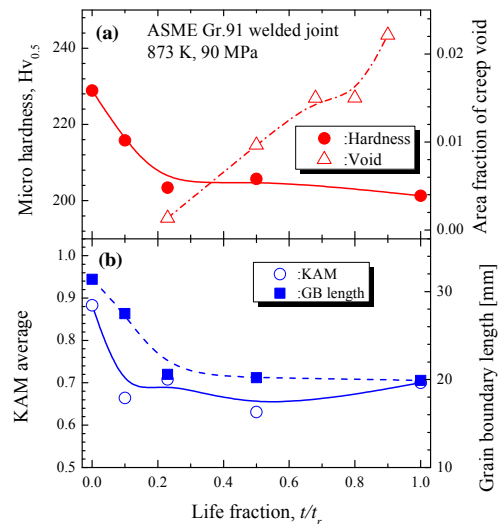


図7 クリープ中の Gr.122 鋼の細粒 HAZ 近傍での組織変化; (a) 硬さ, ポイド面積率, (b) KAM 値, 粒界長さ (873K, 100MPa)

(3) 非線形超音波特性と組織の関係

従来の超音波法では、ポイドがある程度密集し、き裂にならないと検出できないことから、寿命の末期でしか Type-IV 損傷を評価ができない。それゆえ、従来の超音波法では、余寿命予測を評価することが困難である。

非線形超音波量に影響する因子について考察する．非線形超音波量と減衰係数が同じ傾向を示したことから，非線形超音波量の変化は転位密度の変化とポイド発生に伴う組織変化によって引き起こされていると考えられ，硬さの変化からも裏付けることができる．固体が示す非線形音響現象の原因はさまざまであるが，下記のような 3 つの要因が知られている．i) 固体を構成する結晶格子が有する非対称性，ii) 転位の運動の非線形性，iii) 固体に内在する欠陥やき裂により生じる非線形性

ポイドやき裂は観察されていたことから，組織変化にともなう i), ii) に加え，iii) のき裂による非線形性も要因になる．

NRUS 法を用いた共鳴周波数の移動による非線形超音波量は減衰係数の変化と同じ傾向を示している(図 4 および図 5 参照)．これまでの我々の研究では，クリープ損傷中の減衰係数および音速の変化は，転位組織の変化に関係することを示した．その関係は，Granato と Lücke の弦モデルを用いて説明ができた．弦モデルでは，転位の振動を，粘弾性体中の弦の振動としてモデル化し，減衰係数 α ，相対音速 $\Delta V/V_0$ と転位密度 Λ ，平均転位長さ L との関係を示すように導いた．

$$\alpha = C_1 \Lambda L^4 f^2 \quad (1)$$

$$\Delta V/V_0 = -C_2 \Lambda L \quad (2)$$

ここで， C_1, C_2 は正の定数であり，剛性率，転位運動の比粘性係数，転位の有効線張力，バーガスベクトルに依存する．このモデルによると，減衰係数は転位密度 Λ ，転位の平均長さ L の 4 乗と振動数 f の 2 乗に比例する．音速は， Λ, L に比例して減少する．また超音波減衰は超音波により生じる応力とひずみのヒステリシスに起因し，その不可逆的な動的過程は，転位運動により引き起こされる．そしてヒステリシスループの面積が超音波 1 サイクル中に吸収されるエネルギーである．これが超音波減衰として観察される．この非線形なヒステリシスは，超音波により引き起こされるひずみ振幅 $\Delta \varepsilon$ に比例する(ただし，大きなひずみ振幅において)．そして共鳴周波数の移動量 Δf は， $\Delta \varepsilon$ に比例する．

$$\Delta f / f_0 \propto C_3 \Delta \varepsilon \quad (3)$$

ここで C_3 は，非線形ヒステリシスパラメータである．これら式(1)~(3)の関係からクリープ損傷中の NRUS 法を用いた共鳴周波数の移動による非線形音響量は，転位の振動による超音波減衰に起因していることが分かった．また，ポイド面積率が増加すると非線形音響量が増加している理由として，ポイド発生初期では，サブグレイン粒境界の分離により，音響インピーダンスの差がない同一材料の隙間ゼロの界面に作用する圧縮応力より入射

超音波により励起される変動応力が大きくなり波形のゆがみが生じ非線形音響量が増加したと考えられる．またクリープポイドの成長が進行すると，分離がサブグレイン粒境界を囲むようになり，微視き裂に成長し破断に至っている．ポイド周辺の転位組織の変化と微視き裂による非線形性の増加により非線形超音波量が増加したと考えられる．

以上をまとめると次のようになった．

EMAR 法を用いて高 Cr フェライト系耐熱鋼 ASME Gr. 122 鋼および Gr.91 鋼の溶接継手部のクリープ損傷中の 2 つ非線形超音波量と微細組織の変化との関係を調べた．以下の事が明らかになった．

- 1) 細粒 HAZ 部の共鳴周波数の移動と 3 波相互作用法による 2 つの非線形音響量は，Gr.122 鋼では，クリープ寿命の約 50% まで減少し，その後微増し，寿命の 80% 過ぎから急増した．Gr.91 鋼では，クリープ寿命の約 20% まで減少し，その後クリープ寿命の約 30% 過ぎから急増した．これは細粒 HAZ 部の転位の運動と再構築とによる組織変化に起因する．Gr.122 鋼の寿命 50% 以降，Gr.91 鋼の寿命 30% 以降の変化はクリープポイドの発生・成長と同じであった．それは SEM や TEM 観察による結果から裏付けられる．減衰係数の変化も 2 つの非線形音響量と同じであった．
- 2) 細粒 HAZ 部の 3 波相互作用法による非線形音響量の変化は，共鳴周波数の移動による非線形音響量よりも組織変化に敏感であった．
- 3) EMAR 法を用いた非線形超音波法は，細粒 HAZ での Type-IV 損傷の捕らえることができる可能性を持っている．

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 6 件)

T. Ohtani, T. Honma, Y. Ishii, M. Tabuchi, H. Hongo, and M. Hirao, Nonlinear ultrasonic Change in High Chromium Ferritic heat resisting steel welded joint during creep, Studies in Applied Electromagnetic and Mechanics (XII), (IOS press), 査読有, (2016), in press.

T. Ohtani, T. Honma, Y. Ishii, M. Tabuchi, H. Hongo, and M. Hirao, Change of Nonlinear Acoustics in ASME Grade 122 Steel Welded Joint during Creep, 42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Editors, AIP Conf. Proc. 1706, 査読有, (2016), 130006-1-7.

大谷俊博, 非線形超音波の非破壊検査への応用, 日本機械学会誌, 査読無, Vol.119, No.1167, (2016), pp.94-95.

大谷俊博, クリープ損傷中の高クロムフ

エライト系耐熱鋼溶接継手部の非線形超音波特性の変化, 超音波テクノ, 査読無, Vol.28, No.2, (2016), pp.10-15.

大谷俊博, 本間 匠, 石井優, 田淵正明, 本郷宏通, 平尾雅彦, Gr. 122 鋼溶接継手のクリープ損傷中の非線形音響特性と微細組織の変化, 材料, 査読有, Vol.64, No.2, (2015), pp.80-87.

T.Ohtani, Y. Kusanagi, Y. Ishii, M. Tabuchi, H. Hongo, and M. Hirao, Evolution of Nonlinear Acoustics during Creep in Welded Joint for High Cr Ferritic Heat Resisting Steels, 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 査読無, (2014), pp.1444-1447.

[学会発表](計 12 件)

大谷俊博, 本間匠, 石川皓嵩, 石井優, 田淵正明, 本郷宏通, 平尾雅彦, 非線形超音波法による改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手部のクリープ損傷評価, 日本材料学会・第 65 期学術講演会講演論文集, No.706, 2016 年 5 月 28 日, 富山大学 (富山県).

大谷俊博, 本間匠, 石井優, 田淵正明, 本郷宏通, 平尾雅彦, クリープ損傷中の高 Cr フェライト系耐熱鋼溶接継手部の非線形超音波特性の変化, 第 53 回高温強度シンポジウム前刷集, pp.126-130. 2015 年 12 月 10 日, 和倉温泉観光会館 (石川県).

T. Honma, Y. Ishii, T. Ohtani, M. Tabuchi, M. Hongo and M. Hirao, Creep-induced Nonlinear Ultrasonic Changes in ASME Gr. 91 Heat Resistant Steel Welded Joint, Proceeding of the 36th Symposium on Ultrasonic Electronics, 2015 年 11 月 6 日, エポカル, つくば (茨城県).

本間匠, 横山瑞穂, 石井優, 大谷俊博, 田淵正明, 本郷宏通, 平尾雅彦, ASME Gr. 91 鋼溶接継手部のクリープ損傷中の非線形超音波特性の変化, 2015 年度年次大会講演論文集, 日本機械学会, J0420201, 2015 年 9 月 14 日, 北海道大学 (北海道).

T. Ohtani, T. Honma, Y. Ishii, M. Tabuchi, H. Hongo, and M. Hirao, Nonlinear ultrasonic changes in High Cr Ferritic Heat resisting steel welded Joint during creep, 20th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, 2015 年 9 月 22 日, 東北大学 (宮城県).

T. Ohtani, T. Honma, Y. Ishii, M. Tabuchi, H. Hongo, and M. Hirao, Creep-induced Nonlinear Ultrasonic Changes in High Cr Ferritic Heat Resisting Steel Welded Joint, 42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Conference, E-Abstracts.p.82, 2015 年 7 月 29 日, Hyatt Regency Minneapolis, Minneapolis, Minnesota, USA.

大谷俊博, 本間匠, 石井優, 田淵正明, 本郷宏通, 平尾雅彦, 非線形超音波法による高 Cr フェライト系耐熱鋼溶接継手部のクリープ損傷評価, 日本材料学会・第 64 期学

術講演会講演論文集, 2015 年 5 月 23 日, 山形大学 (山形県).

本間匠, 石井優, 大谷俊博, 田淵正明, 本郷宏通, 平尾雅彦, (2015-1), ASME Gr. 122 鋼溶接継手部のクリープ損傷中の非線形超音波の変化, 第 22 回超音波による非破壊評価シンポジウム論文集, 日本非破壊検査協会, 超音波部門, pp.31-34, 2015 年 1 月 28 日, 日本非破壊検査協会 (東京都).
T. Honma, Y. Ishii, T. Ohtani, M. Tabuchi, M. Hongo and M. Hirao, Creep-induced Nonlinear Ultrasonic Change in ASME Gr. 122 Heat Resistant Steel Welded Joint, Proceeding of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.35, pp.61-62, 2014 年 12 月 3 日, 明治大学 (東京都).

T. Ohtani, Y. Kusanagi, Y. Ishii, M. Tabuchi, M. Hongo and M. Hirao, Evolution of Nonlinear Acoustics during Creep in Welded Joint for High Cr Ferritic Heat Resisting Steels, 2014 IEEE International Ultrasonic Symposium, 2014 年 9 月 6 日, Hilton Chicago, Chicago, Illinois, USA.

大谷俊博, 草薙祐紀, 石井優, 田淵正明, 本郷宏通, 平尾雅彦, 高 Cr 鋼溶接継手部のクリープ損傷中の非線形超音波の変化, 2014 年度年次大会講演論文集, 日本機械学会, J0420106, 2014 年 9 月 8 日, 東京電機大学 (東京都).

大谷俊博, 草薙祐紀, 石井優, 田淵正明, 本郷宏通, 平尾雅彦, 高 Cr 鋼溶接継手部のクリープ損傷中の非線形超音波の変化, 日本材料学会・第 63 期学術講演会講演論文集 No.110, 2014 年 5 月 17 日, 福岡大学 (福岡県).

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大谷 俊博 (OHTANI, Toshihiro)

湘南工大学・工学部 教授

研究者番号: 60454154

(2) 研究分担者

田淵 正明 (TABUCHI, Masaaki)

国立研究開発法人 物質・材料開発機構,
高温材料グループ, グループリーダー

研究者番号: 60354239

(3) 研究分担者

平尾 雅彦 (HIRAO, Masahiko)

大阪大学・基礎工学研究科, 教授

研究者番号: 80112027