

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：73905

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560119

研究課題名(和文)非線形超音波法による金属材料の劣化・損傷の非破壊画像化と識別

研究課題名(英文)Imaging and identification of anomalies in metal by nonlinear ultrasonics

研究代表者

川嶋 紘一郎(Kawashima, Koichiro)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：50023239

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：従来超音波探傷法により、巨視き裂発生前の材料劣化、非金属介在物を含む微小異質部、塑性変形域などを非破壊的評価することは極めて困難である。本研究では、大振幅正弦波パースト波により上記不健全部を振動させたときに励起される、正弦波からの波形のゆがみを高調波振幅として抽出しその振幅を用いて不健全部を可視化する高調波画像化により、上記不健全部を非破壊的に検出し識別することも試みた。厚さ方向の共振周波数を持つパースト波を入射し、その高調波振幅を可視化することにより、疲労き裂先端部塑性域、引張負荷の増大に伴う塑性域の拡大を可視化できた。平面図と断面図より隙間を持つ欠陥と隙間のない異常部を識別できる。

研究成果の概要(英文)：This project aims to visualize nondestructively material degradation, small nonmetallic inclusions, weak diffusion bond and local plastic region. To visualize these anomalies, we have applied an immersion harmonic imaging technique in which large amplitude sinusoidal burst wave forces the anomalies to vibrate and thus excited higher harmonics are extracted by a pertinent analogue high-pass filter. By mapping the higher harmonic amplitude of interest, we can image the anomalies. Plastically deformed region is imaged by a local resonance harmonic method, in which sinusoidal burst wave of a through-thickness resonant frequency of a flat plate forces dislocation loops to vibrate and higher harmonic amplitude thus generated are imaged. Thermal fatigue cracks of tens nanometer gap in a glass plate is imaged by through-transmission local resonance method. By comparing C- and B-scan images, we identify anomalies with narrow gaps from those without gap.

研究分野：工学，機械工学，材料力学・機械材料

キーワード：非線形超音波 超音波試験 非破壊検査 非破壊材料評価 高調波 画像化 劣化・損傷 局部塑性域

1. 研究開始当初の背景

高経年化構造物・プラントの増大に伴い、金属材料内部に製造当初から存在する非金属介在物、供用時の荷重あるいは環境によって発生する材料劣化、マイクロポイド、マイクロクラック、局部塑性変形などの不健全部を非破壊的に検出する技術が求められている。しかし、従来の音響インピーダンス差を利用する超音波探傷法ではmm以下の微小な不健全部の非破壊的検出・可視化はほとんど不可能である。

研究代表者は1998年以降、大振幅正弦波バースト波入射により上記不健全部を揺り動かしたときに発生する正弦波からの波形のゆがみをアナログハイパスフィルタを用いて高調波振幅として抽出し、その振幅を用いて不健全部を可視化する水浸高調波を開発し、閉口き裂、溶接凝固界面などを可視化してきた。

2. 研究の目的

本研究では、上記の水浸高調波法を用いて、金属中の1mm以下の非金属介在物、塑性域(可動転位密度)、偏析、固相接合界面の不健全部などを可視化し、不健全部の種類を非破壊的に識別する手法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 波形ゆがみの発生モデル

結晶性金属の応力ひずみ関係は、原子間引力と斥力のポテンシャルが異なるため、本来は図1に示すように非線形である。固体中の波の伝搬速度は(ヤング率/密度)^{1/2}に比例するので、ヤング率の大きい圧縮側の速度が引張側より速い(図2)ため、純正弦波を入射しても、伝搬後にゆがみが発生する。

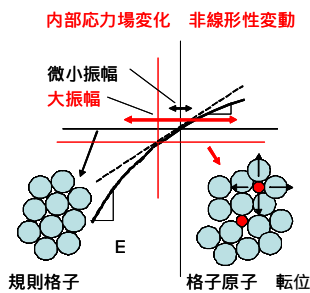


図1 非線形応力ひずみ曲線

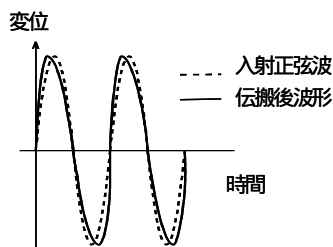


図2 正弦波からの波形のゆがみ

一方、閉口き裂面、金属内の非金属介在物界面は、圧縮応力下では母材に近い剛性を持つが引張応力下では表面凝着力による極めて弱い剛性しか持たない。このため、図3破線で示す正弦波を入射しても、透過波は引張側頂部が欠落した、顕著なゆがみを示す。

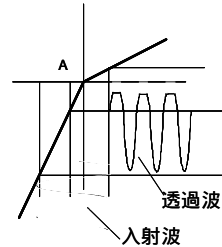


図3 閉口き裂における波形のゆがみ

これらの正弦波からの波形のゆがみはFFTを用いて高調波振幅として定量化でき

(2) 水浸高調波画像化装置

固体の不健全部で励起される高調波振幅は入射波振幅の1%以下であるので、大振幅バースト波送信器と受信波形のA/D変換前に所望の高調波成分を抽出するアナログハイパスフィルタパス(HPF)が不可欠である。バースト波送信機にはRITEC RPR-4000を、HPFには遮断周波数3-40MHz範囲で10段階切替式と、60, 80, 100, 120 MHzの個別フィルタを用いた。装置構成を図4に示す。内部不健全部の可視化には、数サイクルの短いバースト波を入射する反射高調波法と、平板試料の厚さ方向共振周波数を持つ数十サイクルのバーストを入射する局部共振高調波法を対象に応じて選択する。後者では共振により定在波振幅が増大するので、塑性変形のごくわずかしき物性変化のない劣化の可視化が可能である。

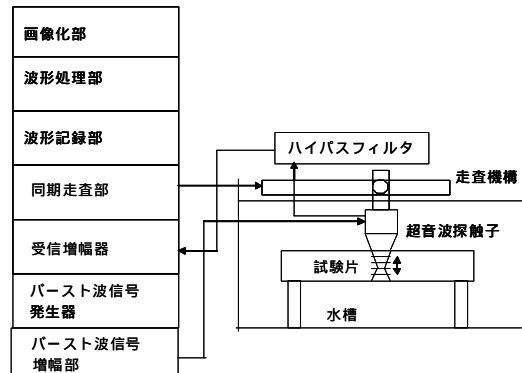


図4 水浸高調波画像化装置

4. 研究成果

(1) 金属中の非金属介在物の可視化

疲労き裂の発生源には多くの場合非金属介在物が存在するので、その非破壊検査・評価が求められる。図5には、JAEAが開発した酸化物分散強化9Crフェライト鋼燃料被覆管の非金属介在物の高調波像(a)、光学顕微鏡・SEM像(b)を示す。(a)は不健全部の管周

方向展開図である．赤横線に沿って切断した管断面光学顕微鏡(OM)像を図(b)外側に，内部にOMで検出された介在物のSEM像を示す．図(a)の高調波指示位置に $15 \times 4 \mu\text{m}$ のチタン酸化物を確認できた．ただし，この材料は特殊な工程で製造された超高純度鋼である．

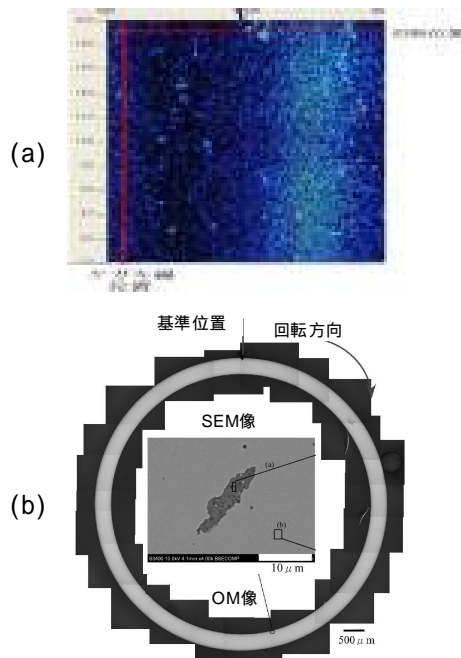


図5 燃料被覆管の介在物像

(2) 疲労き裂先端局部塑性域可視化

構造用延性金属材料の劣化は塑性変形を伴う．局部共振高調波法を用いて厚さ 4mm の SM400 鋼板に進展させた疲労き裂先端の塑性域の高調波像と表面写真を図 6(a)と(b)に示す．図(a)の白横線内の疲労による割れ面の輝度が高く，その下にハの字状に広がる塑性域，さらに上白線から左右下方に伸びるリューダース線も高調波を用いて可視化できる．これらは板厚方向の共振周波数を持つ長いバースト波を送信し，その高調波を抽出するときだけに可視化できる．

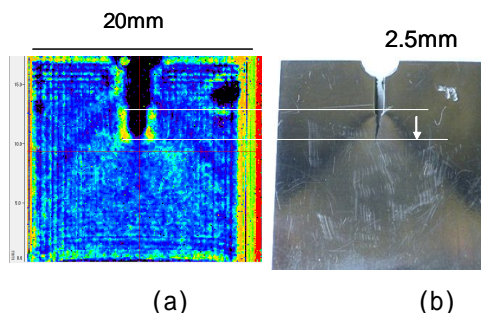


図6 鋼板の疲労き裂先端部の塑性域の高調波像(a)と外観写真(b)

(3) 引張負荷と除荷過程における塑性域の変化の可視化

2007 年新潟中越沖地震により柏崎原子力発電所配管は極低サイクル疲労損傷を受け

た．この種の損傷を非破壊的に評価する基礎として，水中設置小型引張試験機を用いて，局部共振高調波法により引張負荷と除荷過程における塑性域の変化の可視化を試みた．図7には厚さ 3mm の A5052 試験片の引張応力増大に伴う高調波像を示す．応力増加に伴い塑性域が増大するが，246MPa と 252MPa において最小断面の高調波振幅が低下する．これはくびれにより試験片が薄くなったことによる．そこで，共振周波数を 17.70MHz に高め，応力 252MPa からの除荷の各段階における高調波振幅の変化を図8に示す．除荷による応力低下に伴い，最小断面の高調波振幅も低下する．この理由は負荷応力が高いほど大振幅入射波により振動する可動転位が多いためである．曲げによる塑性変形については今後の研究が必要であるが，引張塑性変形度の高調波による非破壊評価が世界で始めて可能となった．

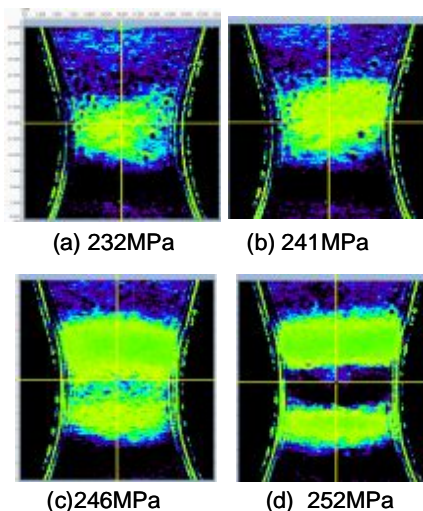


図7 応力増加による塑性域変化 (共振周波数 17.40MHz)

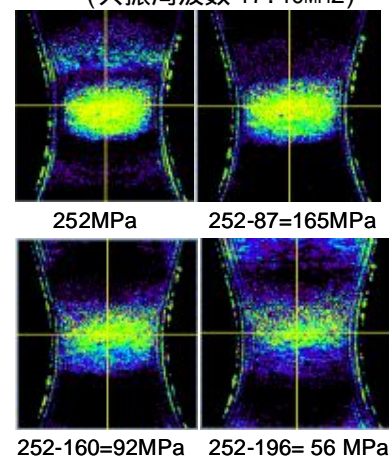


図8 除荷過程の高調波振幅の変化 (共振周波数 17.70MHz)

(4) 摩擦圧接界面の不健全部

鋼とアルミニウム合金丸棒 (25) アルミニウム合金丸棒の摩擦圧接結合界面の高調波像を図9に示す．No. 13の高調波振幅の大

きい部分(赤色)の断面図(下図)では1回目の界面反射波の下側に2回目の反射波が現われる。これは接合面に隙間が存在するためである。

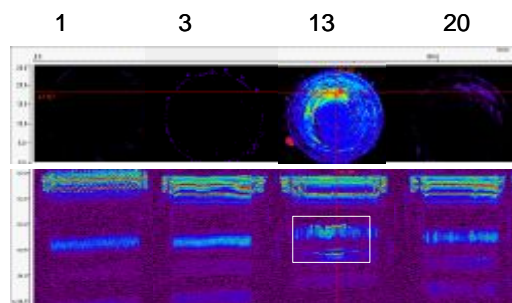


図9 摩擦圧接面の高調波像

(5) ナノメートルオーダーの隙間を持つガラスの熱疲労き裂の可視化

貼り合せウエハーの不完全接合部を模擬するため、ガラス板の端面から熱疲労き裂を成長させた試験片を用いて、隙間幅数十ナノメートルの閉口き裂の可視化を試みた。図10のSEM像が示すように、き裂幅は約30nmである。き裂面が厚さのほぼ中央となるように加工した試験片(15x8x100mm)について、図11に示す透過局部共振高調波法(入射共振周波数5.49MHz)を用いて閉口き裂面を可視化した結果を図12に示す。下図の斜め目視像でV形に表示される幅の

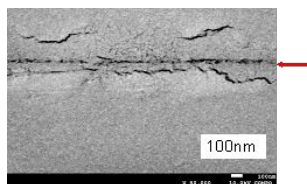


図10 ガラス熱疲労き裂の側面SEM像

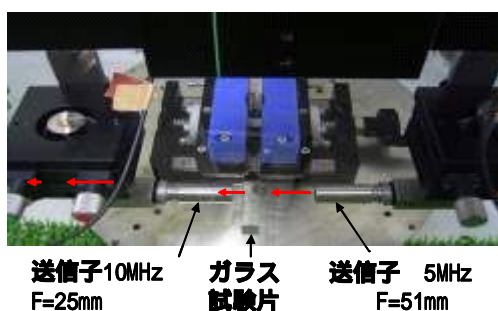


図11 透過局部共振高調波法測定形態

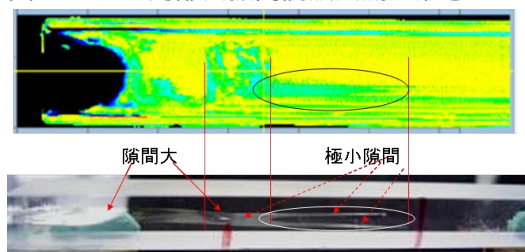


図12 閉口き裂の高調波像(上)と斜め目視像(下)

やや大きいき裂部が、上手の高調波像の楕円内に明瞭に表示される。片側だけしか表示されないのは、疲労き裂面が超音波入射面に完全に平行でないためである。また板幅中央部はき裂面に垂直に作用する圧縮応力が高いため、図3に示すような波形のゆがみが生じないためである。

(6) 要約

局部塑性変形域は共振周波数を入射する局部共振高調波法だけで検出・可視化できる。材料が高純度であれば10μm台の非金属介在物を可視化できる。異種材料固相接合界面の未接合部は超音波平面図と断断面図を用いて、接合部と区別できる。

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2件)

K.Kawashima, T.Aida, H.Yasui,

Higher-harmonic imaging of the plastic zone in front of a fatigue crack tip, 査読有, Jpn. J. Appl. Phys., 53-7, 07KC04-1-3, 2014

K.Kawashima, R.Imanishi, T.Aida and Y.Zhou,

Enhanced higher harmonic imaging of heterogeneities and local plastic deformation in steel plates, 査読有, Journal of Physics: Conference Series 520 (2014) 012021LU2013

[学会発表](計2件)

川嶋紘一郎, 安井一, 水浸高調波法による繰返負荷過程における塑性域変化の可視化, 日本機械学会2015年次大会, 2015.9.14, 北海道大学

M. Hertl, K. Kawashima, K. Sekino, H. Yasui and T. Aida, Nonlinear ultrasound imaging of thermal fatigue cracks of several tens nm gap in glass plate, ISNA2015, 2015.6.30, リヨン大学, フランス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川嶋紘一郎 (KAWASHIMA Koichiro)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号: 50023239