非線形非破壊検査・評価—密着き裂・微細損傷の非線形超音波画像化—

川 嶋 紘一郎^{*1,*2}Nonlinear Nondestructive Testing and Evaluation:
Harmonic Imaging of Kissing Bonds and Micro DamageKoichiro KAWASHIMA^{*1,*2}^{*1}Department of Research, Nagoya Industrial Science Research Institute^{*2}Ultrasonic Materials Diagnosis Laboratory

(Received April 26, 2010, Accepted June 5, 2010)

Recent advances in harmonic imaging of industrial materials are reviewed. The conventional ultrasonic testing, which is based on acoustic impedance mismatch between contact materials, fails to detect kissing bonds, micro damage and micro defects within a bond layer of dissimilar materials. To the contrary, the nonlinear ultrasonic method, in particular higher harmonic method, makes use of higher harmonics excited at disordered structures mentioned above under incidence of large amplitude of tone-burst waves of a fixed frequency. This review is composed of three parts; key concept of nonlinear ultrasonics, instruments for higher harmonic imaging and harmonic images of kissing bonds, nonmetallic inclusions in metal, creep damage, microcracks in SiC/Ti composite, and weld boundaries. The higher harmonic imaging could be indispensable technique for quality assurance of bonded interfaces of dissimilar materials in near future.

1. はじめに

大多数の読者にとって「非線形非破壊検査・評価」という表現は初めて目にされることであろう。世界でも専門書に Nonlinear Nondestructive Evaluation という概念が明示されたのは文献 1 だけであり、本解説の表題もそれになった。

従来の非破壊検査・評価は、測定対象へ入力した信号とそれからの出力信号が正比例するという線形応答を仮定している。例えば固体の超音波検査では、対象がフックの法則に従う線形弾性体であるとみなすので、弾性係数や超音波伝搬速度は入射波振幅（入力電圧）に依存せず一定値を取ると考える。現実には、固体の原子間力は平衡位置からの変位の非線形関数である引力と斥力により支配されるので、応力ひずみ関係は厳密には非線形である。「非線形超音波非破壊検査・評価」とは、例えば大振幅超音波入射、外部加振などにより測定対象が持つ上記の非線形性を顕在化させることにより、従来の微小振幅超音波法で不可能或いは困難であった密着き裂や微細損傷などを検出する方法である。超音波以外に、電磁気非線形性²⁾、非線形渦電流法³⁾、誘電率非線形性⁴⁾を用いる計測法も開発されているが、筆者の専門外であるのでここでは触れない。

物理学分野では非線形波動現象は古くから研究されており、本解説に隣接する流体の非線形音響分野では専門書⁵⁾も出版されている。また超音波便覧⁶⁾には「超音波の非線形現象」と題する章において流体及び固体に関する音波と超音波の非線形理論と測定例が紹介されている。

歴史的に見ると、英語圏における固体の非線形超音波計測に関する最初の報告の一つが米国ブラウン大学の干潟昭氏⁷⁾

らにより行われた。また密着き裂面における波形ひずみの最初の数値解析がノースウエスタン大学に留学中の廣瀬壮一教授（東工大）ら⁸⁾によって行われた。さらに国内では元東工大佐藤拓宋教授がポンピング波を利用した医療診断及び材料評価研究⁹⁾を推進した。

一方、工業材料・製品の非破壊検査・評価分野における非線形現象の利用はまだ極めて限られている。しかし、この数年で急速に拡大する傾向にある¹⁰⁻¹⁶⁾。

従来超音波法は材料界面、例えば金属内のボイド、き裂面などにおける空気と金属の音響インピーダンス（密度×超音波伝搬速度）差により発生する界面反射波振幅を利用する。このため、理想的には同一材料の密着界面では反射波が発生しない。現実には微細な凹部に存在する空気による反射がいくらか生ずるが、開口き裂に比べれば極めて微弱である。反対に、例えば拡散接合のような異種材料接合界面では健全に接合されていても、界面両側材料の音響インピーダンス差により反射波が発生するため、界面に存在する微細欠陥を検出できない。

これに対し非線形超音波（高調波）法は、大振幅バースト波（繰返数が有限の一定周波数を持つ正弦波）を測定対象に入射し、密着き裂あるいは微細損傷により励起される正弦波形状からの波形ひずみを周波数域における高調波（入射周波数の整数倍周波数を持つ波）或いは分調波（入射周波数の分数周波数を持つ波）として検出する。送信と受信周波数帯域が異なるので、適切なハイパス、ローパス、或いはバンドパスフィルタを用いることにより、入射波振幅の0.1%台の振幅を持つ高調波或いは分調波を容易に検出できる。このように、非線形超音波法は音響インピーダンス差を用いないので、密着き裂や異種材料接合界面の不健全部を検出できる。

非破壊検査あるいは評価の客観性を高めるため、また微細損傷の検出のため測定結果の画像化が不可欠である。1973年に走査型超音波顕微鏡¹⁷⁾が開発され、80年代には縦波あ

^{*1} 名古屋産業科学研究所（〒464-0819 名古屋市千種区四谷通 1-13 ノア四谷ビル 2F）

^{*2} 超音波材料診断研究所（〒466-0062 名古屋市昭和区狭間町 4 名古屋工業会館 3F）

るいは横波を用いて工業材料内部欠陥を可視化する超音波走査画像化装置が開発されて現在も広く使用されている。一方、工業材料の非破壊検査より遅れて開発された人体用超音波診断装置では、X線画像との競合のため、1970年台にフェイズドアレイ素子を用いた人体組織画像化技術が開発され、さらに高空間分解能を得るためハーモニックイメージング（高調波画像化）が実用化されている。工業材料を対象とした高調波画像化がいくつかの研究機関で試みられてきた¹⁸⁻²¹⁾が、まだ高調波非破壊検査・評価装置としては市販されていない。以下では、著者らが進めてきた非線形超音波による非破壊材料評価・検査のための高調波画像化に限定して、その基礎と密着き裂・異種材料接合部検査などへの適用例を紹介する。

2. 非線形超音波法の基礎

前節で述べたように非線形超音波法は、材料自体或いは材料内不完全部が持つ非線形特性を適切な方法により顕在化させる非破壊評価・検査法である。Fig. 1に示すように非線形応力ひずみ曲線を持つ材料では、引張側より圧縮側の局所ヤング率が大きい。固体内縦波速度は（ヤング率/密度）^{1/2}に比例するので、引張相より圧縮側の縦波速度が大きい。このため正弦パースト波を入射しても、Fig. 2に示すように伝搬後には波形がひずみ、周波数域では入射周波数以外の高調波が現れる（Fig. 3）。圧縮率の非線形性が顕著な気体・液体に比べて、原子間結合力が強い固体材料では超音波非線形性は格段に弱い。固体の微弱な非線形性を顕在化させるために、Fig. 4に示すように、外部応力負荷（音弾性法）、大振幅パースト波入射（高調波法、分調波法）、外部加振（ポンピング波法）などが用いられる。ポンピング波を用いるサイドバンド法は複雑形状部品中の欠陥有無の検出に部分

Fig. 1 Nonlinear stress-strain curve.

Fig. 2 Waveform distortion.

的に利用されている

1990年以降、固体中の密着界面に大振幅パースト波を入射したとき、界面の繰返打撃あるいは微小繰返すべりによって非線形弾性連続体より桁違いに大きな高調波・分調波が発生することが見出され、Contact Acoustic Nonlinearity: (CAN)¹⁰⁾と名づけられた。繰返打撃（Clapping）モードにおける単純化した密着界面の応力ひずみ応答例をFig. 5に示す。このモデルは、入射波振幅が密着界面の隙間より大きい場合に成り立つ。圧縮波により界面が接触した後圧縮波が部分的に透過する。これに対し、引張相の波は界面を透過できず反射される。このため界面凝着力を無視すればFig. 5の②と③に示すような折れ線状の応答となり、Fig. 1に比べ

Fig. 3 Higher harmonics.

Fig. 4 Scope of nonlinear ultrasonics.

Fig. 5 Stress-strain response at kissing bond. Clapping mode.

Table 1 Comparison of nonlinear ultrasonic method with conventional ultrasonic method.

非線形超音波 (高調波) 法	項 目	従来超音波法
弱結合部の繰返打撃・すべりにより発生する高調波振幅	検出対象	音響インピーダンスの差による反射波振幅
異なる帯域	送受信周波数帯域	同一帯域
10ナノメートル台	入射波振幅	数ナノメートル台
バースト波（一定周波数）	入射波	短パルス波（広帯域）
100～10000	入射波エネルギー（比率）	1
30 MPa/10 MHz のとき	最大励起応力（鋼対象）	0.3 MPa/1 MHz のとき
有	動的相互作用	ほとんど無し
入射波振幅程度の隙間、引張と圧縮で異なる剛性を持つ界面、材料強度	適用対象	開口き裂、異質界面、材料特性

て極めて著しい非線形性を呈する。次節で述べる大振幅バースト波送信機と市販の超音波探触子を用いたとき、金属中に励起できるバースト波振幅は数十ナノメートル程度である。高調波発生を可能とするそのような隙間を持つ界面の面積率が小さくても、Fig. 5 の②と③に示す顕著な非線形性のために、適切な測定形態を用いることにより高調波を検出できる。

上記応答は接触界面に作用する圧縮応力が0に近い場合に成り立つ。超音波入射により励起される応力振幅を超える大きな圧縮応力が接触面に作用していると、その拘束により繰返打撃や摩擦すべりが抑止されるので、高調波が発生しない。また、開口き裂では界面が接触しないので、入射面及び反射面の凹凸に起因する高調波以外は発生しない。次節最後に述べるように、ハイパスあるいはバンドパスフィルタを用いない場合には、開口き裂やボイドも画像化できる。

Table 1 に高調波超音波計測と従来パルス反射計測の比較を示す。従来パルス反射法で使用するスパイク波に比べて、大振幅バースト波により探触子に供給されるエネルギーは2～3桁大きい。この超音波エネルギーにより材料内密着界面あるいは損傷部を揺り動かし、高調波を発生させることができる。

後方散乱波高調波法においては検査対象部分を揺り動かすためのアクチュエータとして、またそこで発生した高調波を受信する超音波センサーとして同一探触子を用いる。ポンピング波（低周波加振）法では、超音波探触子以外の加振源を用いて検査対象部分を揺り動かす。

高調波とは逆に、入射周波数の分数である周波数を持つ分調波を利用する方法²²⁾も研究されている。分調波法は、共振現象を利用するので特定の測定形態でしか分調波が励起されない、入射周波数より低周波数の超音波を利用するので高調波法より空間分解能が低下するという問題点を持つので、

Fig. 6 Immersion harmonic imaging system.

微細欠陥・損傷検出には不向きである。

3. 高調波検出・画像化装置

筆者が使用している水浸高調波画像化システムの構成をFig. 6 に示す。

最も重要な構成機器は大振幅バースト波発生器（RITEC RPR-4000）である。前述のように、高調波計測においては単一周波数成分だけを含む大振幅正弦バースト波を送信する。固体密着界面で励起される高調波振幅は基本波（入射波）振幅の0.1～1%程度であるので、入射波に含まれる高調波成分は0.1%以下であることが望ましい。

次に、通常の超音波測定と異なり、ハイパスあるいはバンドパスフィルタが不可欠である。垂直分解能8～12ビットでA/D変換したデータに対して、デジタルハイパスあるいはバンドパスフィルタを適用しても、基本波振幅の0.1%台の高調波を有効に検出できないので、A/D変換前にアナログハイパスあるいはバンドパスフィルタを用いる。連続体の高調波計測では主に2次高調波だけを測定対象としてきたので、所望の周波数帯域を持つバンドパスフィルタを使用するのが一般的である。一方、密着界面ではFig. 5に示すような顕著な非線形性が存在するので、2次以上の高次高調波も励起される。従って、バンドパスフィルタに替えて、ハイパスフィルタを使用することで高次高調波をも検出できる。入射周波数に対応して異なる遮断周波数を持ついくつかのハイパスフィルタを用意するのが望ましい。-40 dBでは弱い高調波を抽出できないことがあるので、-60 dB程度の減衰とするのが良い。

適切なフィルタを使用すれば、市販の探触子を用いた高調波計測が可能である。通常の広帯域探触子の-6 dBあるいは-12 dB帯域は中心周波数程度であるが、基本波成分を除去するハイパスフィルタを用いれば、例えば中心周波数10 MHzの探触子を用いて5次高調波（50 MHz）を検出することができる。

上記構成要素以外は従来の超音波画像化装置をそのまま利用できる。ただし、超音波画像化装置とバースト波発生器が別個のクロックにより駆動されるときにはジッタリングが発

Fig. 7 Harmonic image of closed crack in a glass plate.

生するので、両者を同期させるユニットを必要とする．In-sight FlexScan 画像化システムでは RITEC パースト波送信器 RPR-4000 と同期した画像化ができる．以下の高調波画像はこのシステムで構成した．

水浸高調波画像化では、水中伝搬に伴って発生する高調波も必然的に発生する．ただし Fig. 6 に示すように水中伝搬距離が一定である測定形態では、水中伝搬により励起される高調波振幅は測定位置に依存せず一定値をとる．したがって、得られた高調波振幅の変動は材料内部あるいは超音波入射面凹凸だけに起因する．後者の影響は表面粗さが水中高調波波長と同程度であるときだけ現れる．

当然のことであるが、ハイパスあるいはバンドパスフィルタを用いなければ、通常の超音波画像が得られる．

なお、接触型焦点探触子を用いた接触法による高調波画像化も可能であるが、カプラント（音響結合剤）の状態を走査中一定に保つ工夫が必要である．

4. 密着き裂・微細損傷の高調波画像

従来超音波法で検出・画像化が困難な密着き裂・微細損傷の高調波画像を以下に示す．

4.1 密着き裂

ガラス板（厚さ15 mm）に平均隙間幅が数十ナノメートルである密着き裂を導入し（Fig. 7(a)）、そのき裂部を高調波により画像化した結果²³⁾を Fig. 7(b)に示す．バルク材料中の欠陥としては最も狭い間隔を持つき裂である．図(a)に示すようにき裂面端部を除いて可視光も透過する程度の平滑密着き裂面が形成されている．き裂面に対し周波数4 MHz、屈折角約45度の横波を入射し（図(c)）、密着き裂面からの後方散乱波振幅を画像化した．図の水平方向が板厚方向に対応し上下方向がき裂長さ方向に対応する．温度変動を与え熱応力によりき裂を成長させたので、き裂面間隔は場所により異なる．図において、灰色部分がき裂部、白色部は健

Fig. 8 Harmonic image of kissing bond. (a)conventional UT, (b)harmonic image.

全部である．密着き裂部がまだら模様に表示されるのは、隙間幅が入射波振幅以下であって微小相対変位が励起される部分だけで高調波が発生することによるためと考えられる．ちなみに、従来超音波法では密着き裂面を全く画像化できない．

金属素材の成形過程において生じた密着界面の通常超音波画像を Fig. 8(a)に、同一領域の高調波画像を Fig. 8(b)に示す．通常超音波画像でも注意してみれば多少コントラスト（受信振幅）が見られるが、この差では密着界面を確実に検出することは不可能である．これに対し、入射周波数2.5 MHzの高調波画像では四角枠で示すように極めて明瞭に密着界面が表示される．

繰返引張負荷によって半円切欠きを持つ厚さ0.5 mmの薄鋼板（Fig. 9(a)）に生じたごく初期の疲労き裂の高調波画像²⁴⁾を図(b)に示す．入射周波数は20 MHzである．円弧部

(a)

(b)

時間 (μs)

(c)

Fig. 9 Harmonic images of microcracks. (a) image. (b) waveform.

に複数のき裂が観察できる。き裂長さは0.1~0.2 mm程度である。**Fig. 9(c)**に示すように、き裂部では、表面反射波に遅れて到着するき裂面からの高調波散乱波が観察される。

4.2 微細損傷

上記の密着き裂より微細な損傷の高調波画像化例を以下に示す。

火力発電所で約20万時間使用された蒸気集合管の円周方向溶接 HAZ 部のクリープ損傷部材より切り出した試験体に対する入射周波数 8 MHz、横波斜角入射高調波画像²⁵⁾を**Fig. 10**に示す。図は円管試験体の軸方向断面における損傷分布を表す。高輝度領域では、切断顕微鏡観察によりクリープボイド及びそれらが合体したマイクロクラックが形成されていることが確認された。

直径140 μm の SiC 長繊維で強化した Ti 合金複合材を引張破断させた後、破断部から離れた位置に発生した損傷の高調波画像²¹⁾を**Fig. 11**に示す。図(a)が平面図、図(b)が縦断面図であり、図(c)に受信波形を示す。破断部から約5 mm離れた位置(白枠内)に明瞭な欠陥部が表示される。受信波形の上側が表面散乱波、その下が欠陥部からの散乱波である。極めて高い SN 比で欠陥部を検出できる。

通常超音波法では、SiC 繊維と Ti 合金の音響インピーダンス差が顕著なため、健全接合部でもまだら模様が生じ、界面の微細損傷は全く検出できない。

4.3 金属内非金属介在物

金属とボイド・開口き裂(空気)の音響インピーダンス差に比べて、金属と非金属介在物間のその差は少ないので、通常パルス波による非金属介在物の検出は容易でない。光学顕微鏡で観察する限り金属と非金属介在物の界面に隙間はない。しかし、非金属介在物は金属凝固時の圧縮応力により金属と密着しているだけである。両者の結晶構造が異なるので

ナノメートルあるいはそれ以下のレベルでは隙間を伴うと考えられる。極微細な隙間があれば大振幅パルス波入射により高調波が励起されるので、非線形超音波法により容易に非金属介在物を検出できると考えられる。

工具鋼中の非金属介在物の従来超音波画像と高調波画像と²⁶⁾を**Fig. 12(a)**と**(b)**に示す。従来超音波画像に比べて高調波画像では高コントラストで介在物が表示される。図(c)に示す波形の正規化スペクトル(図(d))から明らかなように、入射周波数 8 MHz の2次、3次及び4次高調波までが観察できる。

急冷された連続铸造鋼スラブ中の表面下約50 mmに存在する非金属介在物の検出例²⁷⁾を**Fig. 13**に示す。急冷部では直径1~2 mm、長さ50 mm程度の粗大柱状晶が成長し、その下部に非金属介在物が集積することがある。実スラブより切出した厚さ60 mmの鋼板に周波数1.6 MHzのパルス波を入射し、ハイドロフォンとバンドパスフィルタにより高調波成分を抽出し、その振幅を画像化した。受信波形及び振幅スペクトルの特徴を検討して、**Fig. 13**の多数の白点の内 A、B、及び C 点に介在物が存在すると判断した。鋼板から厚さ6 mmのサンプルを切り出し X 線透過試験を実施した結果、右図に示すように点 A と B に直径0.6 mm程度の介在物が確認された。なお、これ以外に別の1箇所でも X 線により介在物が検出されたので、高調波による検出率は50%であった。**Fig. 13**に多数の高振幅の点が表示された理由は、このときには-40 dBのバンドパスフィルタを用いたためであり、-60 dBのフィルタを用いれば高調波源の数は大幅に少なくなる。

厚さ3 mmの薄鋼板の中央面近傍における介在物の高調波画像を**Fig. 14**に示す。入射周波数は20 MHzであり、30 MHz ハイパスフィルタを用い2次以上の高調波を受信し

Fig. 10 Harmonic images of creep damage.

Fig. 11 Harmonic images of micro cracks in SiC/Ti alloy composite.

た．板中央面付近に数 mm 間隔で分散した介在物（高調波源）が観察される．ちなみにパルス波では画像強調をしてようやく確認できる程度である．

4.5 溶接界面の高調波画像化

これまでは材料内部に存在する密着き裂型欠陥に対する高調波画像を示した．以下では高調波を用いて全く隙間のない各種溶接界面を画像化できることを示す．

Fig. 12 Harmonic images of nonmetallic inclusions in steel. (a)conventional UT, (b)harmonic image, (c)spectrum.

Fig. 13 Harmonic images of nonmetallic inclusions continuously cast steel slab.

Fig. 14 Harmonic images of nonmetallic inclusions in thin steel plate.

Fig. 15にはアーク溶接部境界の高調波画像²³⁾を示す。入射周波数は20 MHzであり、30 MHz ハイパスフィルタにより2次以上の高調波を抽出した。切断・研磨した顕微鏡像と重ねて表示すると、両者がほぼ対応していることが分かる。

薄鋼板のスポット溶接ナゲット（溶融凝固）部の高調波画像²⁴⁾を Fig. 16に示す。図(a)が平面図を、図(b)が平面図に記入した位置の縦断面図である。ナゲットの周辺部ではナゲットが薄く、中央部で厚いことが断面図で明瞭に表示される。この方法を用いれば、ほとんど融け込みのないコロナボンド部を容易に検出できる。

最後の例として、電子ビーム溶接部の高調波画像を Fig. 17に示す。この図では、Fig. 15あるいは Fig. 16と異なり、

溶接部は散乱のない部分として表示される。両者の違いの原因は、アーク溶接及びスポット溶接部では溶融凝固した個々の結晶粒の原子配列の不規則性が著しいため、高調波が発生するが、入熱の少ない電子ビーム溶接では結晶粒径が超音波ビーム径より小さいため、個々の結晶粒方位の違いを識別できなく空間的に平均化されるためと考えられる。

現在では溶接部融込寸法が設計値を満足していることを切断・研磨・顕微鏡観察により確認している。高調波画像化法を用いれば部品・製品を破壊することなく、溶接部融込寸法の概略値を評価できるので、省資源・省エネルギー、コスト低減に寄与すると考えられる。

なお、固体における高調波発生はまだ未解明の部分が多い。密着界面での発生機構については琵琶により定量的検討が進められている²⁸⁾。

5. まとめと将来展望

非線形非破壊検査・評価法のうち、筆者の専門である非線形超音波、特に高調波を用いた密着き裂や異種材料接合界面の不健全部画像化について説明した。ページ数の制限のため、細部を割愛したので、興味のある方は拙著²⁹⁾を参照されたい。

上で紹介した高調波画像例以外に、摩擦圧接部、摩擦攪拌接合部の不健全部、樹脂/金属接着界面の不完全接合部の検

Fig. 15 Harmonic images of weld boundary.

Fig. 16 Harmonic images of spot weld.

Fig. 17 Harmonic images of electron beam weld.

出・画像化が可能となった。さらに、材料特性の非破壊評価として、2次高調波振幅による液相拡散接合部引張強さの予測³⁰⁾、溶射膜/基材界面の人工腐食層の有無も実験室では検出可能となった。さらに原子力発電所の圧力系配管において発生することのある粒界応力腐食割れの検出及び深さ測定においても、非線形超音波法が従来超音波法より高 S/N であること²⁴⁾が実証されている。

EV 車（電気/電池自動車）の普及に伴ない従来より高電圧・大電流の下で作動するパワー IC、及びそれ用の GaN あるいは SiC 基盤の生産が増大しよう。それらの品質保証のためにもナノメートル台の不完全接合部を検出できる非線形超音波非破壊検査法の重要性が増大するであろう。

本解説では、水浸高調波画像化例を紹介したが、低周波外部加振源で欠陥を含む部材を加振しながら超音波を送受する、あるいは加振周波数の高次高調波を受信することにより、加振点以外は非接触で欠陥の有無あるいは欠陥部を画像化することも一部可能になってきた。また、部品を低周波外部加振機で加振しながら赤外線カメラで局部温度変化を検出することにより、表面あるいは表面直下の密着き裂を検出することもできる。

上記のように、非線形超音波法を用いれば、従来超音波法で不可能あるいは極めて低 S/N でしか検出できなかった、密着き裂や異種材料接合界面に存在する不完全部を容易に検出・画像化できる。今後真空中あるいは各種雰囲気下で固相接合あるいは短時間液相拡散接合した異種材料接合界面の健全性評価に対して有効な非破壊検査・評価法になると考えら

れる。

なお、^(註)日本非破壊検査協会内に2006年度から非線形超音波に関する研究会が設置された。歴代主査(琵琶志朗(京都大学), 大谷俊博(湘南工科大学), 三原毅(富山大学)教授)の下で年3~4回の研究会が開催され、毎回製本された資料集が参加者に配布される。さらに、その成果の一部が同協会機関紙「非破壊検査」に特集号^{31,32)}として刊行されている。関心のある方は日本非破壊検査協会事務局に連絡されたい。世界的にも非線形超音波に関する研究会がこれだけ頻繁に開催されている国はなさそうである。

筆者の非線形超音波(高調波)研究に対して下記の機関からの研究費の交付を受けた。記して謝意を表す。文部科学省(科学研究費補助金), ^(註)原子力安全基盤機構(原子力安全基盤調査研究), 経済産業省原子力安全・保安院(高経年化対策強化基盤整備事業)。また下記の民間企業との共同研究, 委託研究及び委託測定により, 各種材料への非線形超音波法の適用範囲を検討し, 拡大することができた。^(株)IHI検査計測, イヅミ工業^(株), 新日本製鉄^(株), 大同特殊鋼^(株), 中央精機^(株), 東邦ガス^(株), 豊田合成^(株), 三菱重工業^(株)。疲労損傷試験片を提供戴いた福岡工業大学村山理一教授に, また非線形画像化装置製作において, RITEC社の大振幅バースト波発生装置と超音波画像化装置を同期させる装置・ソフトウェアを製作いただいたInsight社の宮・藤田・西方氏にも謝意を表す。

〔文 献〕

- 1) R. A. Guyer and P. A. Johnson: “*Nonlinear Mesoscopic Elasticity*”, Weinheim, Wiley-VCH, 2009.
- 2) S. Takahashi, S. Kobayashi, H. Kikuchi and Y. Kamada: J. Appl. Phys. **100** (2006), 113908.
- 3) Ryouta OIKAWA, Tetsuya UCHIMOTO and Toshiyuki TAKAGI: Trans. JSME Ser. A (in Japanese), **75** (2009), 1777.
- 4) 例えば, 長康雄: 応用物理学会誌, **71** (2002), 62.
- 5) 鎌倉友男: 非線形音響学の基礎, (愛智出版, 1996).
- 6) 超音波便覧編集委員会, 超音波便覧, (丸善, 1999).
- 7) A. Hikata, B. Chick and C. Elbaum: Appl. Phys. Lett., **3** (1963) 195.
- 8) S. Hiorse and J. D. Achenbach: J. Acoust. Soc. Am., **93** (1993), 142.
- 9) 佐藤拓宋: 叩いて超音波で見る, 非線形効果を利用した計測, (コロナ社, 1995) .
- 10) I. Yu. Solodov: “1994 IEEE Ultrasonic Symp.”, (1994), 1279.
- 11) N. G. H. Meyendorf, P. B. Nagy and S. I. Rokhlin Eds., “*Non-destructive Materials Characterization with Applications to Aerospace Materials*” (Springer, Berlin, 2004) .
- 12) T. Kundu Edt., “*Ultrasonic Nondestructive Evaluation*” (CRC Press, 2004).
- 13) T. Kundu Edt., “*Advanced Ultrasonic Methods for Material and Structure Inspection*” (ISTE, 2007).
- 14) B. O. Enflo, C. M. Hedberg and L. Kari Eds., “*Nonlinear Acoustics-Fundamental and Applications*” (AIP, 2008).
- 15) 川嶋紘一郎: 線形及び非線形超音波を用いたき裂面及び微細損傷の画像化, 日本機械学会論文集A(研究展望), **72** (2006), 1812.
- 16) 川嶋紘一郎: 接触型非線形超音波を用いた工業材料の非破壊評価・検査—密着き裂と微細損傷の高調波画像化—, 非破壊検査, **56** (2007), 274.
- 17) 例えば, A. Briggs: “*Acoustic Microscopy*” (Oxford Sci. Pub, 1992).
- 18) R. Zheng, R. G. Maev and I. Yu. Solodov: Cand. J. Phys., **77** (1999), 927.
- 19) F. M. Severin, B. O’Neil and R. Maev: Rev. Progr. QNDE, AIP CP, **509**, (2000), 881.
- 20) C. Mattei and P. Marty: Rev. Progr. QNDE, AIP CP, **657** (2003) 989.
- 21) 川嶋紘一郎, 小原良和, 村瀬守正, 山田龍三, 松嶋正道, 植松充良, 藤田文雄, 宮武和, 非破壊検査, **54** (2005) 509.
- 22) Y. Yamanaka, T. Mihara and T. Tsuji, Jpn: J. Appl. Phys., **43** (2004), 3082.
- 23) K. Kawashima, K. Sekino and K. Ichigo: in B. O. Enflo, C. M. Hedberg and L. Kari Eds., Nonlinear Acoustics-Fundamental and Applications, AIP, (2008), 537.
- 24) 川嶋紘一郎: 検査技術, **15-6** (2010) 32.
- 25) 大谷俊博, 川嶋紘一郎, Michael Drew: 非破壊検査, **58** (2009) 397.
- 26) 川嶋紘一郎: 可視化情報学会誌, **26** (2006) 266.
- 27) K. Kawashima, T. Ito and Y. Nagata: Jpn. J. Appl. Phys. **49** (2010), 07HC11.
- 28) 琵琶志朗: 非破壊検査, **56** (2007) 297
- 29) 川嶋紘一郎: ものづくりのための超音波非破壊材料評価・検査, (養賢堂, 2009).
- 30) Y. Ohara, K. Kawashima, R. Yamada and H. Horio: Rev. Progr. QNDE, **23** (2004) 944.
- 31) 琵琶志朗: 非破壊検査, **56** (2007) 273.
- 32) 大谷俊博: 非破壊検査, **58** (2009) 379.