

平成21年 1月30日現在

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2006～2008

課題番号：18686012

研究課題名（和文） 非接触非線形超音波法の曲面スキヤニングによる損傷画像化

研究課題名（英文） Defect imaging using scanning over curved surfaces of non-contact non-linear ultrasonic technique

研究代表者

林 高弘 (Hayashi Takahiro)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30324479

研究成果の概要：

非接触曲面スキヤニングによる超音波検出方法としてレーザードップラー振動計をロボットアームに取り付けて円管周りを走査する手法を確立し、これまで実験的に得られていなかったガイド波伝搬の可視化を行うことに成功した。また、疲労亀裂を有する試験片に対し、低周波非線形超音波法を試みた。低周波超音波のみの励振では、亀裂開閉口を起こすエネルギーが小さいことから、試験片の局部冷却を行い基本波、高調波の検出をモニターした。その結果、亀裂開閉口に対応する振幅の変化が得られることが明らかになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2007年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	17,900,000	5,370,000	23,270,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 機械工学 機械材料・材料力学

キーワード： 機械材料・材料力学，超音波，非破壊評価，非接触，非線形

1. 研究開始当初の背景

原子力発電所圧力バウンダリー機器に対して、「発電用原子力設備規格 維持規格（日本機械学会）」に基づく損傷許容の検査体制が2003年度より開始された。しかし、用いられている超音波損傷評価法（端部エコー法、TOFD法、フェイズドアレイ法などの線形超音波法では、検出困難な性状の亀裂も存在することが明らかになっていた。特に亀裂先端部の閉じているがせん断剛性を有しない領域は、強度低下を引き起こすにもかかわらず線形超音波では計測できない領域として

問題となっていた。

そこで、亀裂部でのMHzオーダーの超音波のゆがみを利用した非線形超音波法が注目されており、すでに入射周波数の2倍、3倍の高調波を利用する方法や入射周波数の1/2周波数の分調波を利用する方法が提案されている。

2. 研究の目的

本研究では、同様に亀裂部における超音波の非線形効果を利用するが、1MHz以下の低周

波領域を用いることにより、水などの超音波伝達媒質を利用しない完全非接触による構造物の剛性強度分布画像を得ることを最終的な目標としている。

低周波超音波を利用するため、市販のレーザードップラー振動計により超音波振動を容易に非接触で検出することができ、さらにそのレーザードップラー振動計をロボットアームに取り付けることによって平面だけでなく、配管のようなあらゆる曲面に対しても超音波振動の面計測を行うことができる。これを利用して、例えば原子力発電所の再循環系配管やシュラウドなどの対象物における閉じた亀裂部の損傷画像化を目指している。

3. 研究の方法

(1) ロボットアームとレーザードップラー振動計を用いたガイド波伝搬の可視化

レーザードップラー振動計などの物体をロボットアームで保持して位置および姿勢を制御する場合、その先端の座標位置(X, Y, Z)と姿勢を決定するロールピッチヨー角(A, B, C)をロボットアームに指示することで、任意の位置および姿勢を実現することができる。

ここでは、図1のようにレーザードップラー振動計から発信されるレーザー光の焦点位置をロボット座標系の(X, Y, Z)とし、レーザー光の照射する向きを示すベクトルをE3とする。このとき、座標(X, Y, Z)はそのままロボットアーム側に座標値を入力すれば、容易にレーザー光の焦点位置が所望の点(X, Y, Z)に到達する。次に、ロールピッチヨー角(A, B, C)を決定するためには姿勢を示すベクトルE1, E2, E3を決定しておく必要がある。

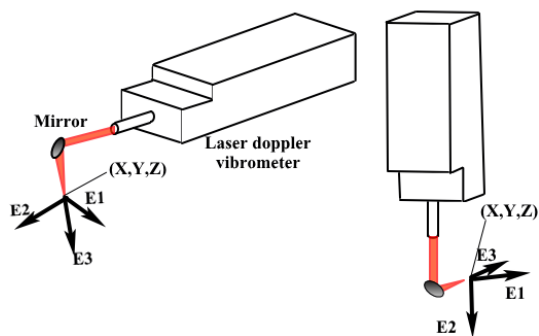


図1 レーザードップラー振動計の制御

図2に示すような人工欠陥の入ったアルミニウム配管を用いて、入射ねじりモードおよび欠陥からの反射波の可視化を行った。実験で用いた配管上の発信受信位置および欠陥位置の関係は図2の通りである。用いた試

験配管は、直径 110mm、管厚 3.5mm、全長 4mのアルミニウムパイプであり、端面から 0.5mの位置に Fig.2 に示す 45° 方向にヤスリ傷をつけた。ヤスリ傷は、直径約 10mm の円筒状の金ヤスリを用いて、最大深さ約 1mmになるように作成した。軸対称ねじりモードである T(0, 1)モードの入射には、磁わい型センサーを用い、70kHz、4波の正弦波状の信号を入射波として使用した。入射位置から 500mm から 700mm 離れた位置までの領域 I と、710mm から 910mm 離れた領域 II (欠陥周り) の 2つの領域に、再帰反射マークを貼り付け、レーザードップラー振動計で、再帰反射マーク上の多点において振動を検出した。磁わい型センサーの長手方向位置と人工欠陥の円周方向位置をそれぞれ基準として $z=0\text{mm}$ 、 $\theta=0^\circ$ とした場合、振動を検出する走査領域は長手方向に 2.5mm 間隔で $z=500\text{mm}\sim 700\text{mm}$ の領域と $z=710\text{mm}\sim 910\text{mm}$ の領域、円周方向に 1° 間隔で $-25^\circ\sim 25^\circ$ の領域とし、I, II いずれの領域でも 81 点 \times 51 点で波形収録を行った。レーザーの入射角度は、図2中に示されているように円周方向接線から 60° 、円筒表面の法線から 30° の方向から入射した。このとき再帰反射マークにより入射方向にそのままレーザー光は戻る性質があるため、レーザー入射方向の振動を検出することができる。

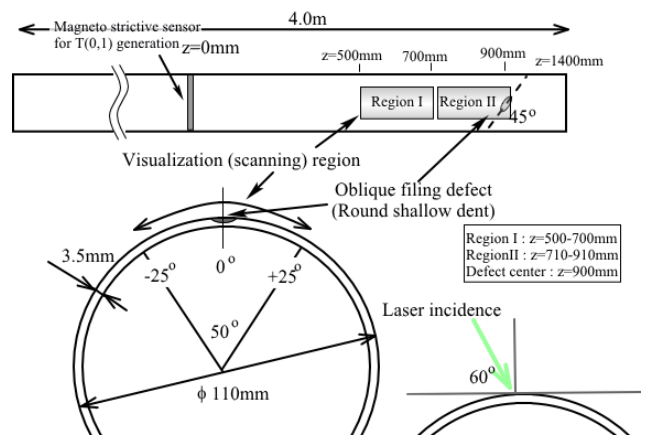


図2 ガイド波の多点計測実験

(2) 低周波超音波の非線形効果を利用した閉じた亀裂の非破壊評価

超音波振動によって発生する応力は、角周波数・と変位 u の積に比例している。一般に PZT などを用いて超音波を発生させる場合、低周波ほど大きな振幅を発生させることができるものの、振幅と周波数の積を考慮すると数十 MHz を用いた場合の 1/10 にも満たない応力しか発生させることができないことが測定結果から判明した。

そこで、低周波振動のみを用いて亀裂開閉

口させることは困難であると考え、本研究では、亀裂開口に不足する応力を補うため、材料を局部的に温度変化させ、熱応力を与えるという手法を用いた。

図3に示すように、中央に疲労亀裂を入れたアルミニウム試験片(縦 55mm, 横 96mm, 厚さ 10mm)に対してB~G点で冷却スプレアの吹き付けたときに、亀裂のすぐ後ろのH点における受信波形をモニターした。試験片右端から入射した超音波は 40kHz のバースト波であり、波形の受信にはレーザードップラー振動計を用いた。

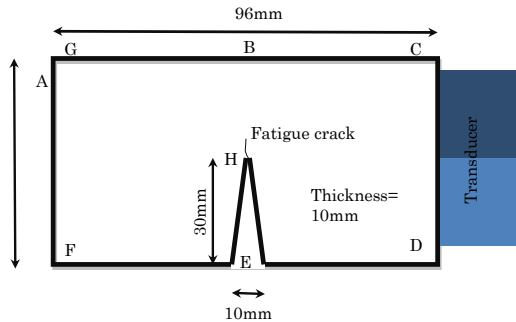


図3 冷却スプレー噴霧による亀裂開閉時の超音波モニター試験

4. 研究成果

(1) ロボットアームとレーザードップラー振動計を用いたガイド波伝搬の可視化

図4には、 $z=700\text{mm}$, $\theta=0^\circ$ における受信波形を示す。最初の大な波形が入射の $T(0,1)$ モードである。 $T(0,1)$ モードの振動成分は、ほとんどが円周方向振動であるため、レーザ光を配管表面に垂直入射した場合には、このモードは検出できなかったが、再帰反射マークを用いレーザ光を斜め入射したことで、このモードが測定できるようになった。次に現れているのが欠陥からのエコーであり、この位置では比較的明瞭にエコー波形が見られたが、場所によってはノイズに埋もれてほとんど分からないところも多く存在した。650・s以降に見られるのが、図2における配管の右端面 $z=1400\text{mm}$ で反射したエコーである。

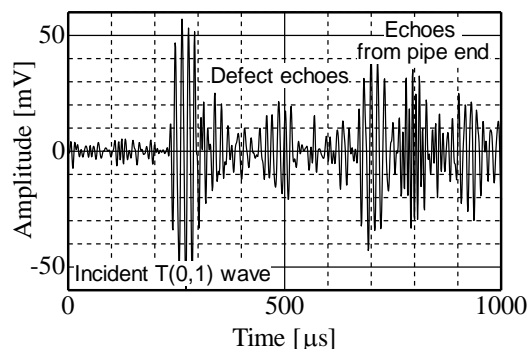
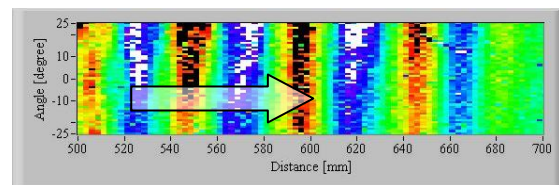
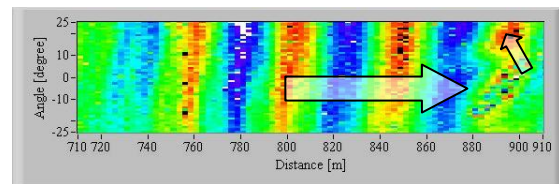


図4 ある点における受信波形の例

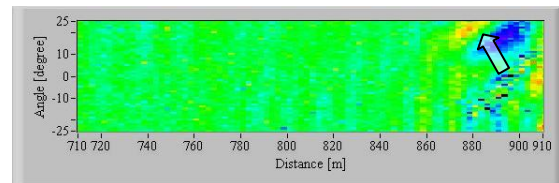
図5は、各時刻における波動伝搬の様子を各点の計測波形の振幅値を基に可視化したものである。横軸が長手方向位置、縦軸が円周方向位置を示しており、縦横比は、走査領域を展開して平面にした場合の長さに対応させている。測定信号値 50mV 以上が黒、-50mV 以下が白となっている。Fig. 4(a) (b)は、領域 I, II に入射波が通過する 230・s, 310・s における可視化画像であり、いずれも円周方向に位相の変化が無い軸対称モードが伝搬する様子が見取れる。(b)中の破線の楕円領域は人工欠陥の領域であり、反射マークをつけていないため振動は検出されていない。(c)は軸対称モードが欠陥位置を通過した直後の領域 II における画像であり、欠陥位置から斜め 45° の矢印方向に伝搬する波動が見られた。



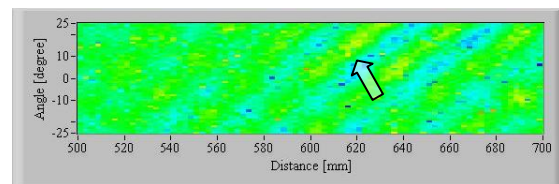
(a) 230・s, Region I



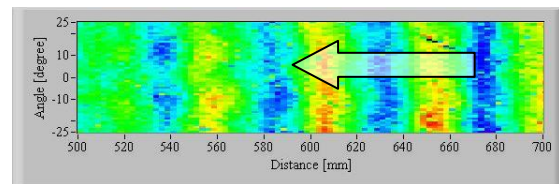
(b) 310・s, Region II



(c) 360・s, Region II



(d) 530・s, Region I



(e) 730・s, Region I

図5 斜め傷周りのガイド波伝搬の可視化結果

次に左向きに進行する欠陥からの反射波が見られた時刻(d) $530 \cdot s$ における可視化画像を示す。欠陥の傾きとほぼ等しい 45° に傾いたモードの伝搬が見られた。このことを平板中を伝搬するラム波に置き換えて考えると、伝播時刻より、これらは欠陥からの反射波が1周分回ったのちに可視化領域 I へ届いた A0 モードであるといえる。

また、この波動を長手方向に伝播するガイド波として捕らえると、円周方向の振動分布より、このモードは10次を超える高次モードであるといえる。群速度、波長などから考えるとこれらは $F(12, 1)$, $F(13, 1)$, $F(14, 1)$ といったモードである。これらは、現在広く利用されているガイド波検査装置では取り扱わない高次モードであるが、このように欠陥から大きく発生している可能性があり、今後のガイド波検査の高度化に利用できると考えられる。

(e) $730 \cdot s$ では、軸対称のモードが右から左へ伝搬した。これは、右端面に入射波が到達して可視化領域まで戻ってきた反射波であり、端面での反射であるため、モード変換せずに、そのまま軸対称ねじりモード $T(0, 1)$ が返ってきたものである。

(2) 低周波超音波の非線形効果を利用した閉じた亀裂の非破壊評価

図6は、スプレーの吹き付け位置を図3内の B~G に変化させたときに H 点において計測した超音波波形について、基本波、2次、3次高調波を抽出し振幅変化を示したものである。おおむね材料の上面を冷却したときに基本波が小さくなり、材料の下面を噴射したときに振幅が大きくなった。これは冷却による亀裂の開閉口が一因である。しかし、材料内の共振も大きいので、冷却により、共振状態が変化した結果である可能性も否定できない。

2次高調波および3次高調波の変化も同様に見られ、冷却によって亀裂部において超音波振動に非線形性を与える変化が起こっていることを示している。

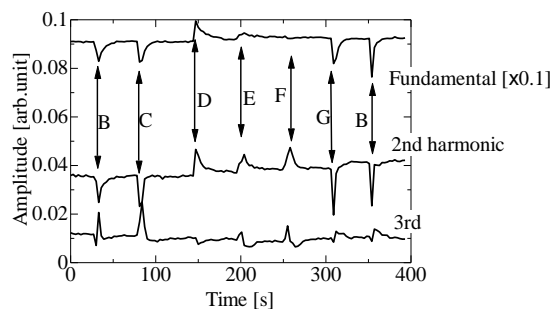


図6 試験片の冷却箇所を変えたときの受信波形の振幅変化

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計2件)

①林高弘, 小鹿雄介, 村瀬守正, レーザードップラー振動計の曲面スキャンによる配管中を伝搬するガイド波の可視化, 非破壊検査, 第57巻, 1号, (2008), pp.30-35

②Muhammad NOR SALIM, Takahiro HAYASHI, Morimasa MURASE, and Shoji KAMIYA, Visualization and Modal Analysis of Guided Waves from a Defect in a Pipe, Japanese Journal of Applied Physics, (2009) 印刷中

〔学会発表〕(計5件)

①Takahiro Hayashi, Koichiro Kawashima and Morimasa Murase, Nonlinear acoustic NDT of a crack under temperature change, International Congress on Ultrasonics, 2007年4月10日, オーストリア・ウィーン工科大学

②林高弘, 川嶋紘一郎, 琵琶志朗, 亀裂開閉口による高調波発生の可視化, 日本機械学会年次大会, 2007年9月10日, 大阪・関西大学

③林高弘, 川嶋紘一郎, 琵琶志朗, 温度変動による高調波振幅の変化を用いた金属材料の非破壊評価, 日本非破壊検査協会春季講演大会, 2007年5月23日, 札幌

④Muhammad NOR SALIM, Takahiro HAYASHI, Morimasa MURASE, and Shoji KAMIYA, Visualization and Modal Analysis of Guided Waves from a Defect in a Pipe, 超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム, 2008年11月11日

⑤Nor Salim Bin Muhammad, Takahiro Hayashi, Morimasa Murase, and Shoji Kamiya, Analysis of Guided Wave Propagation by Visualizing In-plane and Out-of-plane Modes, 35th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2008年7月24日, アメリカ・イリノイ大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 高弘 (HAYASHI TAKAHIRO)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 30324479

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし