



| | |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Title | 長距離伝播するガイド波による損傷画像化 |
| Author(s) | 林, 高弘; 長尾, 将弘; 村瀬, 守正 |
| Citation | 日本機械学会論文集 A編. 2006, 72(724), p. 1941-1948 |
| Version Type | AM |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/84557 |
| rights | |
| Note | |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

長距離伝播するガイド波による損傷画像化*

林 高 弘 *1, 長 尾 将 弘 *2, 村瀬 守 正 *3

Defect imaging with guided waves propagating in a long range.

Takahiro HAYASHI*4, Masahiro NAGAO and Morimasa MURASE

*4Nagoya Institute of Technology, Faculty of Engineering
Gokiso Showa Nagoya, 466-8555 Japan

Pipe inspection with guided waves is highly expected as an efficient screening technique that enables us to inspect a few dozen meters of a pipe. Although inspection equipments widely introduced in a practical inspection site adopt easy-to-use axisymmetric modes, authors have developed defect imaging technique using non-axisymmetric modes as well. In our previous paper, defect images were shown in short range of only 1.2 meters away from transducers. In this study, therefore, effects of long propagation to defect images are discussed. Long range imaging was experimentally done using source signals and their multiple reflections between both edges of a 4-meter-long pipe, instead of reflected waves from defects. In the experimental investigation, large degradation of images was shown in far field. A computer simulation of guided wave propagation reveals that a major reason of the degradation is the difference between dispersion curves for an actual pipe and theoretical ones. To reduce the degradation, images were obtained by neglecting higher modes with larger differences in phase velocity. As a result, images were obtained in correct location up to about 20 meters.

Key Words: Ultrasonic nondestructive inspection, Guided waves, Imaging,
Long range inspection

1. 緒 言

配管表面より数十 kHz～200kHz 程度の低周波数の超音波を入射すると、配管の長手方向に超音波が伝播する。この長手方向に伝播する超音波モードはガイド波と呼ばれ、適切に入射されれば、数十メートルから 100 メートル程度の長距離を伝播する。現在、この長距離伝播するガイド波の特性を生かした配管の長距離スクリーニング技術が開発されている。既存のガイド波を用いた配管検査技術は、検査装置からガイド波を発信し、損傷や溶接線などからの反射波を受信し、反射波の受信時刻とガイド波の音速から損傷や溶接線などの反射源の位置を特定している。速度分散が無く、円周方向に同位相で伝播する軸対称モードを用い

るが、その軸対称モードからは、円周方向の位置や損傷の広がり具合といった円周方向情報は得られない。そのため、損傷が 1 個なのかそれとも円周方向にいくつか存在しているのか、ドリル穴のような局所的なガイド波の反射源なのか、溶接部のような広がった反射源なのかといったことが分からぬという問題がある。

そこで著者らは、軸対称モードとともに非軸対称モードも利用することで、損傷や溶接線などの反射源の画像化を行うことの出来る手法を開発した⁽¹⁾。円周方向に並べた多数のセンサーで波形を収録し、ソフトウェア内で波形を処理することにより反射源の画像が得られるというものである。図 1 は直径 110mm、厚さ 3.5mm のアルミニウムパイプにあけた直径 10mm の貫通ドリル穴 2 個からの反射波を用いて画像化したものである⁽¹⁾。受信センサーからの距離 1.2m, 0° と 90° の位置に黒い点があり、これはドリル穴の位置に一致している。このようにガイド波を用いて損傷が像になって得られるようになり、少なくとも、損傷の長

*原稿受付 2006年 月 日。

*1正員、名古屋工業大学 大学院工学研究科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)。

*2名古屋工業大学 大学院工学研究科

*3 (有)超音波材料診断研究所

hayashi@nitech.ac.jp

手方向位置と円周方向位置は同定できることが分かったが、その損傷が貫通穴なのか腐食状欠陥なのかなどの性状を特定したり、長距離伝播で用いるためには、依然として明らかにすべき課題が多い。

本研究では、図1のような近距離では可能となった画像化技術を、実用レベルの数m～20m程度の遠距離で用いる際の影響について、4mのパイプの両端面での多重反射波を用いた実験とガイド波伝播のコンピュータシミュレーションにより検討する。

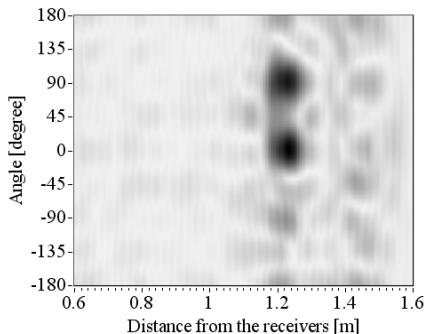


Fig.1 One example of a defect image.

2. ガイド波損傷画像化技術の概要

画像化技術については、文献(1)に詳しく書かれており、ここではこの文献中の実験結果を用いて、概要を述べる。まず、図2のように軸対称ねじりモード($T(0,1)$ モード)を発信するセンサーと局所的な円周方向振動を検出する受信センサーからなる検査装置を配管に設置する。文献(1)では軸対称ねじりモードを励起するのに磁わい型センサーを、局所的な円周方向振動を検出するのに電磁超音波探触子(EMAT)を用いた。長さ4m、直径110mm、厚さ3.5mmのアルミニウム配管に対して、端面から0.5mの位置に人工損傷として2個の直径10mmの貫通穴が 0° と 90° に位置にあり、その人工損傷からそれぞれ、1.0m、1.2mの位置に軸対称ねじりモード発信用の磁わい型センサーと受信用EMATがある。このとき、円周方向に45°づつ異なる角度で8箇所受信し、それらの波形を処理したときの結果を次に示す。

これら8つの受信波形を適切な重みを与えることで、円周方向に振動分布の異なるモードごとに分離される⁹。ガイド波の位相速度、群速度といった音速はこのモードごとに異なっており、また周波数によっても変化する。これを周波数×位相速度(または群速度)のグラフにしたものは一般に分散曲線と呼ばれ、解析的にもしくは固有値計算により求めることが可能である。抽出分離波形を、この理論分散曲線データを用いて計

算することにより任意時刻の空間波形を求めることができる。

人工損傷からの反射波形から抽出されたモードごとの波形に、理論分散曲線データを用いて計算された318μsにおける各モードの空間波形を図3に示す。この時刻は、磁わい型センサーから発信された入射 $T(0,1)$ モードがちょうど人工損傷に到達する時刻(発信センサーから人工損傷までの距離1.0m / $T(0,1)$ モードの音速3120m/s)である。横軸は受信EMATからの距離、縦軸は円周方向の角度であり、濃淡が振幅強度を示している。図中のnはn次の族に対するモードであることを示し、それぞれ $T(n,1)$ モードの波動伝播を表示していることに相当する⁹。n=0は円周方向に一様な分布を持つ軸対称なモードであるので、直線の縞となり、n=1は $\sin\theta$ の分布を持つので、円周方向に節が2つの分布になっている。次数が増えるにつれ、節と腹の個数が増え、 $\sin n\theta$ の複雑な分布となる⁹。実際の画像化の信号処理では、 $\sin n\theta$ の分布ではなく、 $\pm\theta$ 方向の回転を考慮した $\exp(in\theta)$ の分布として取り扱っているが¹⁰、ここでは簡単のため、回転方向の正負については議論していない。図3のn=1,2,3,4の図は、 $+\theta$ 方向回転のモードの分布と $-\theta$ 方向回転のモードの分布の和として表し、 $\sin n\theta$ の分布としている。

このようにして得られた各モードの推定空間波形を足し合わせることによって、図3の右下図に示すような空間波形が得られる。この空間波形はその時刻における推定反射波形であり、損傷に入射波が到達する瞬間に損傷部分で大きな強度を示す。このような空間波形は、図4に示すように時間ステップごとに得られ、損傷からの反射波が各時刻でどのように伝播しているかを表すことができている。これらの空間波形に対して、入射波の到達位置は分かっている。入射波がちょうど損傷位置に到達した瞬間に反射波の振幅強度が大きくなることから、その領域の振幅強度値を足し合わせることにより、1枚の損傷画像が得られる。図1は、図4に示される各時刻の空間波形を入射波位置において足し合わせたものである。

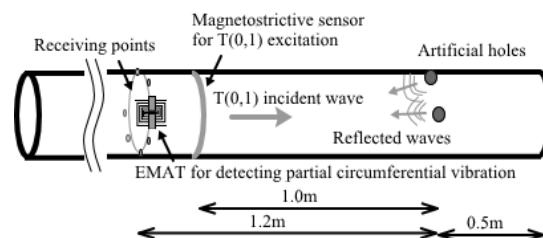


Fig.2 Locations of incident and receiving transducers and defects on a test pipe for a defect image in Fig.1.

受信波形を眺めるだけでは、人工損傷が 2 つであるかはまったく分からず、長手方向位置が音速から推測できるだけであるが、画像化により 2 つの損傷が 0°, 90° の位置に存在していることがはっきり分かる。ただし得られた損傷画像は、空間波形から得ているものであるため、画像の長手方向長さは、発信波の波長と波数の積の分だけ広がり、円周方向長さは検出される円周方向伝播モードの次数に依存している。そのため、ここで用いた入射波（中心周波数 70kHz, 波長 44mm, 4 波）では、長手方向に $44 \times 4 = 176$ mm 程度の広がりが想定され、4 次の円周方向モードまで用いていることから、 $360/5 = 72^\circ$ 程度の円周方向の広がりが想定されており、人工損傷の寸法については正確に表すことできていないと考えられる。

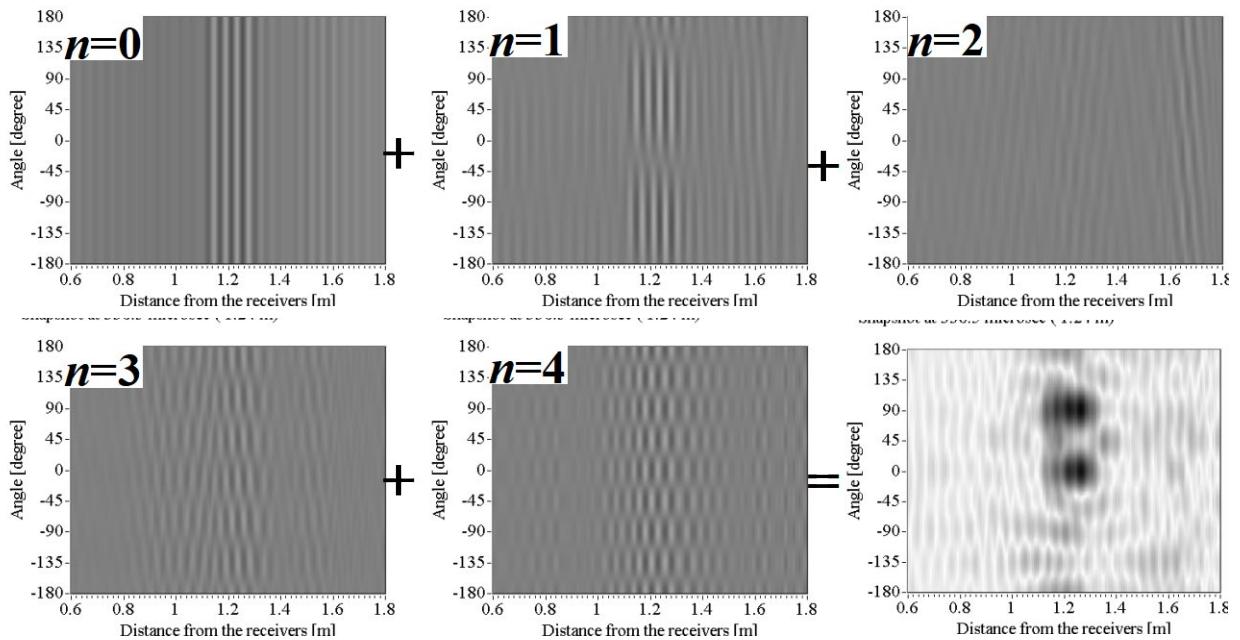
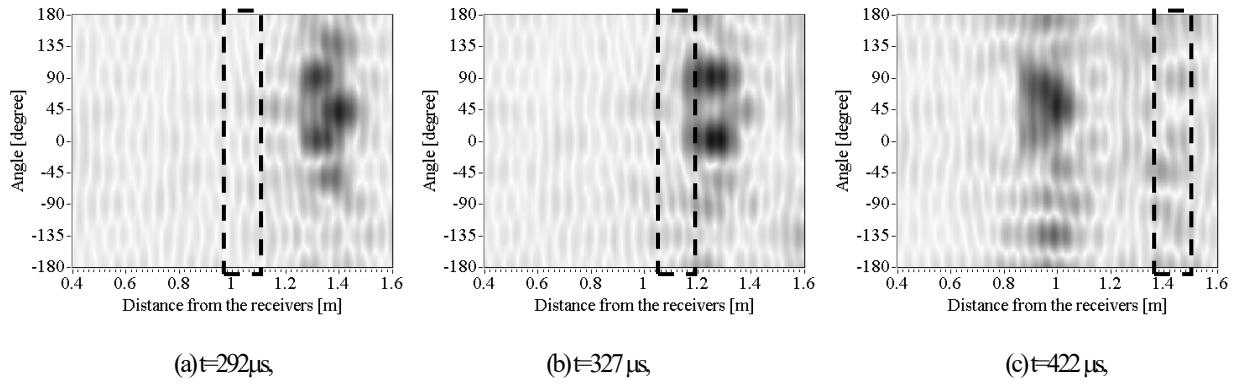


Fig.3 Spatial waveforms for each family and their summation at the moment when an incident wave arrives at the defects.



(a) $t=292 \mu s$, before incident wave arrives at the defects. (b) $t=327 \mu s$, the moment when incident wave arrives at the defects. (c) $t=422 \mu s$, after incident wave passed away from the defects.

Fig.4 Spatial waveforms at three different time steps.

Dashed squares show incident wave regions that are summed up and resulted in one defect image.

超音波減衰が全くないと仮定したガイド波理論においては、用いる周波数帯を上げれば、波長が小さくなると同時に円周方向に振動分布の複雑な高次のモードが伝播するため、長手方向および円周方向に対して分解能が向上する。たとえば前述の配管に対して、200kHz の周波数帯を用いた場合、T(0,1)モードの波長は 1.55mm、円周方向の伝播モード次数は $n=20$ 程度までとなる。すなわち、長手方向分解能が、波長（数 mm）オーダー程度、円周方向分解能が円周長さ（直径 110mm × π ）/20 = 20mm くらいの分解能となる。

実際には、周波数帯域が高くなるほど、超音波減衰により波形の SN 比は小さくなり、長距離伝播の測定が難しくなる。そのため、ガイド波による損傷画像化では、画像の分解能と長距離伝播特性はトレードオフ

の関係になっている。もともとガイド波による配管検査を行う動機が長距離を高速で検査することであるので、画像から損傷寸法が分かるほどの精度を求めて周波数をあげることは得策ではない。現在ガイド波検査に用いられる数十 kHz~200kHz 程度の周波数帯では、前述のとおりせいぜい長手方向で数 mm オーダー程度、円周方向で 20mm程度の分解能が最大であると予想されるので、損傷の長手方向および円周方向位置、広がりなどが分かる程度のぼやけた画像になる。そのため、その画像をもとに検査者自身が検査現場で蓄積した経験なども利用して長距離区間の損傷スクリーニングを行うという利用方法になる。

3. 長距離伝播をする励起源の画像化

ガイド波を長距離伝播させて利用する場合における損傷画像への影響を調べるために、4mのアルミニウム配管内での多重反射波を用いた実験を行った。用いた配管は直径 110mm、管厚 4.0mm のアルミニウム配管であり、その配管中を伝播する円周方向の振動 (SH 波) が支配的なモード (ねじりモード) の位相速度および群速度分散曲線を図5に示す。損傷からの反射波を模擬するためにEMATを配管の上に乗せて、80kHz、4波のSH波を与えた。振動が与えられるアクティブ領域はおよそ 10mm × 10mm 程度の領域であり、同程度の大きさの損傷状態からの反射波を模擬している。信号レベルは図1の損傷画像を取った場合の受信された反射波とほぼ同じレベルであり、EMATから発信された波形がおおよそ損傷からの反射波を再現しているといえる。受信には、局所的なSH波を検出できる磁わい型センサーを用いた。図6には配管と発信EMAT、受信の磁わい型センサーの位置関係を示す。これより受信点に到達する経路を考えると、伝播距離の短い順にAからDのように描ける。実際にはAからの経路に加えて、配管の端面間を何往復もする波形が受信されるので、得られる受信波形の経路は、 $1.4+8N$, $3.4+8N$, $4.6+8N$, $6.6+8N$ (m)となる (N は往復回数)。左端面から 1.6m にある受信位置において、円周方向の 8 つの異なる点で波形を受信し、発信源の画像化を行った。

このときのある 1 つの点で受信された波形を図7に、それらの波形を処理した結果得られる 0 から 16m までの励起源画像を図8に示す。矢印は図6の A から D に示された経路と一往復した経路を通る場合の励起源の位置である。また、図9には 8 つの波形の積算平均を示す。横軸として時刻にとともに、軸対称モードの音速と時刻の積として表される伝播距離も示した。この積算平均波形は軸対称モードの波形を表しており、

従来のガイド波における配管評価に用いられるモードである。図9の軸対称モードの速度は横波速度 (3120m/s、実測値)となることから、56mの遠距離間でもおおよそ $1.4+8N$, $3.4+8N$, $4.6+8N$, $6.6+8N$ (m) の位置に波形が得られていることが分かる。一方、図8の励起源像は、はじめの4点 1.4 , 3.4 , 4.6 , 6.6 m程度までは 0° の位置に像が得られ、正確な位置を示しているが、8m以上の長距離になると次第にるべき位置の像が薄れたり、あるべきでない位置に強い強度を示す像が得られている。ただし、波長 38.5mm 程度の低周波を入射波として用いているので、励起源位置が特定できたはじめの4点の場合でも、励起源の寸法は画像中に表されていない。

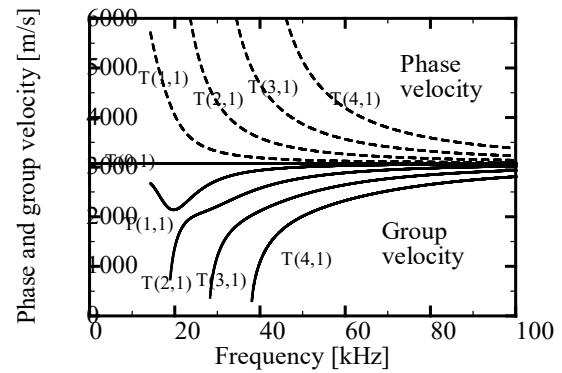


Fig.5 Phase and group velocity for a test pipe.

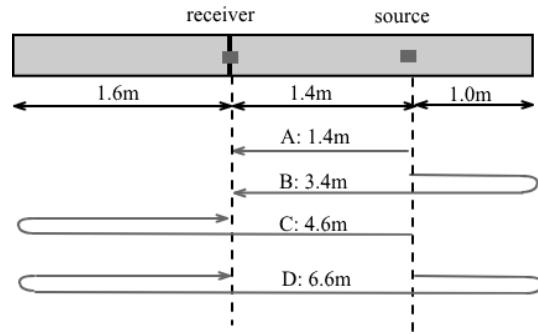


Fig.6 Sensor locations in a pipe and paths of guided wave propagation.

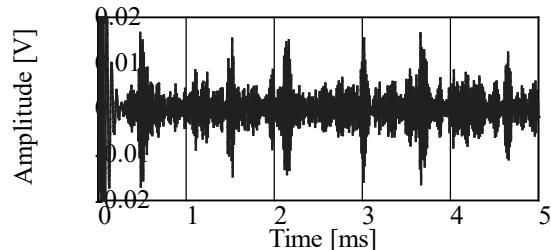


Fig.7 Received signals at the first point.

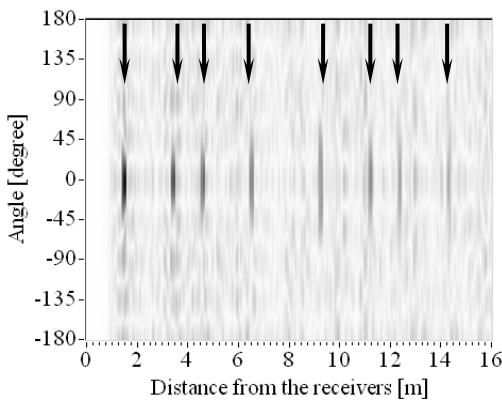


Fig.8 Image of source locations.

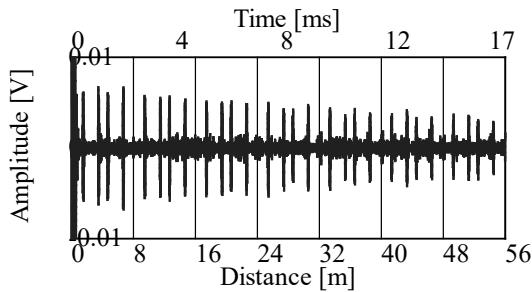
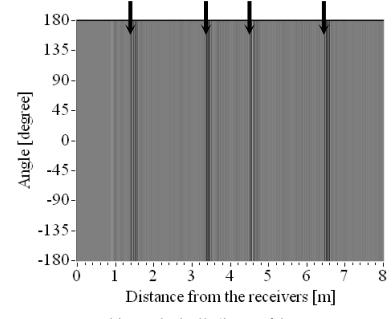


Fig.9 Waveform of axisymmetric $T(0,1)$ mode.

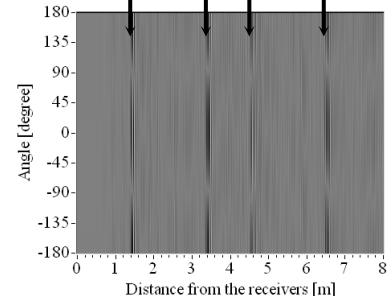
4. 画像劣化についての考察

励起源の画像（図8）では10m程度になるとあるべき位置の像が薄れ、ないはずの位置に像が出てくるというように画像の劣化が起こる。しかし、図9のように分散性がなく波形が崩れない軸対称モードは50m伝播後も大きく受信できていることから、50m程度でも十分励起源からのガイド波信号が得られていると言える。つまり信号は得られるが、処理が不適切で画像劣化が起こってしまうということである。著者らは多数の受信センサーを用いる場合、センサー間の感度差が画像を大きく劣化させることについて、文献(1)の中で述べている。その中で、あるセンサーの受信波形に位相が反転する程度の誤差を与えた場合に特に大きな画像劣化が得られた。しかし、今回の場合、近距離の励起源画像は得られていることから、伝播距離によらず影響のあるセンサー固有の誤差であるということは考えにくい。

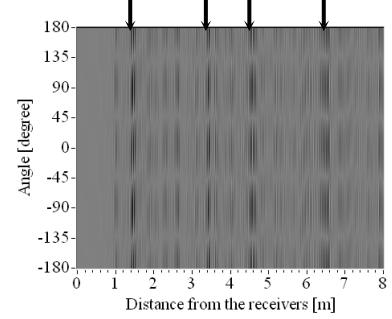
誤差要因を調べるために、図8の励起源画像を得る前の各モードの空間波形を図10に示す。 $n=0$ の抽出波形から得た軸対称モードの画像が(a), $n=1$ の非軸対称モードの画像が(b), 以下順に(c) $n=2$, (d) $n=3$, (e) $n=4$ の画像である。図3同様に濃淡は空間波形の強弱を表している。 $n=0$ 次モードの画像(a)は、8つの測定波形を足し合わせた図8の軸対称モードの波形をそのまま円周



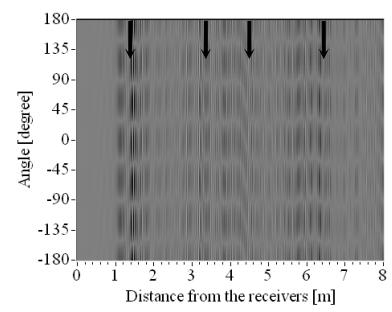
(a) $n=0$ ($T(0,1)$ mode)



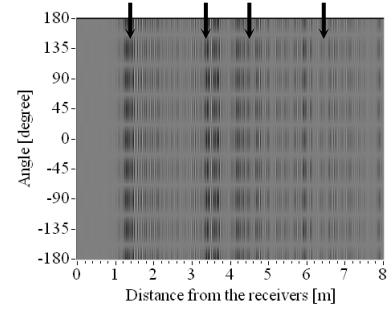
(b) $n=1$ ($T(1,1)$ mode)



(c) $n=2$ ($T(2,1)$ mode)



(d) $n=3$ ($T(3,1)$ mode)



(e) $n=4$ ($T(4,1)$ mode)

Fig.10 Image of source locations for each mode.

方向に一様な分布関数をかけて表示したものとなっている。 (a), (b)の $T(0,1)$, $T(1,1)$ モードでは4つ濃淡の帯がほぼ全て励起源位置に一致しているが、 (c), (d), (e)では次第にずれが見られるようになり、特に(d), (e)の5m以上の遠距離位置では矢印で示された真の励起源位置に明瞭な波形の帯が見られない。この高次モードでの励起源画像のズレは、これらの画像を足し合わせた場合に、画像の劣化となって現れると考えられる。

励起源の画像は、あらかじめ配管形状や材料特性より計算された分散曲線を用いて導出されている。このことより、このような各モードのズレは、この理論分散曲線と実際の配管中を伝播するガイド波の分散曲線が異なっていたことが原因と考えられる。図1中では、 0° と 90° の損傷位置以外にも薄い像が得られているが、これも分散曲線のズレによる画像劣化が一因である。

この理論分散曲線のズレによる画像の劣化度合いを検証するため、我々が開発した PipeWave^④によりガイド波伝播のコンピュータシミュレーションを行った。 0° の位置から発信された中心周波数 80kHz の波形を 10m 離れた円周方向 8 点で受信した。その時の波形と PipeWave 内の計算で用いられる理論分散曲線データを画像化に用いると、分散曲線誤差がない理想的な励起源画像が 10m, 0° の位置に得られる。図1-1はこのときの励起源画像である。次に分散曲線データに誤差を与えるために、ここでは配管の直径の誤差を考える。市販の配管は、同じ公称値の直径や管厚の配管であってもメーカーや用途によって、直径や管厚にばらつきがある。実際、実験に用いた試験配管も、公称値は直径 110mm, 管厚 3mm であったが、直径は 110~111mm 程度でばらつきがあり、管厚は 3.5mm~4mm 程度となっていた。そこで、ここでは直径が 1mm 大きく 111mm のアルミニウム配管に対する分散曲線を求め、それを基に画像化を行った。図1-2がその時の励起源画像である。図1-1の画像に比べ大きく円周方向に画像が伸び、励起源画像が劣化している様子が分かる。図1-3にこの配管の分散曲線を示す。実線が直径 110mm として計算した分散曲線であり、破線が直径 111mm として得た分散曲線である。中心周波数近辺の $T(1,1)$, $T(2,1)$ モードの位相速度を拡大して示した。高次のモードになるにつれて、これらの位相速度差が大きくなることが分かる。

5. 低次モードのみを用いた遠距離での画像化補正

これらのズレを補正した高精度な分散曲線を導出することにより、図1-1のような理想的な励起源画像に近い画像が得られると考えられる。しかし、実験的に

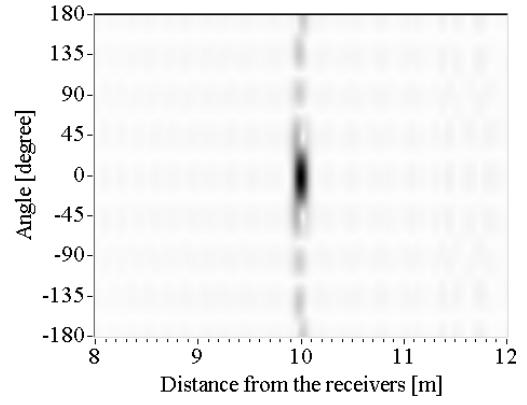


Fig11 Ideal image of an excitation region using simulation data with Pipe Wave.

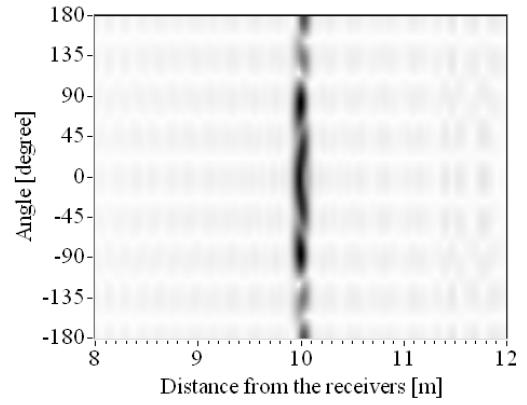


Fig12 Image of an excitation region when dispersion curve data has small differences. Dispersion curves for a pipe with 111mm diameter that is one-millimeter bigger than original one are used for imaging.

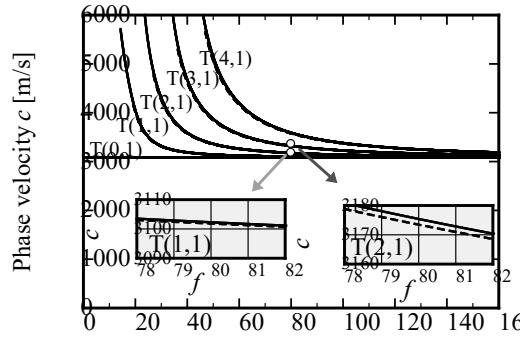


Fig13 Torsional mode dispersion curves for an aluminum pipe with 110mm and 111mm diameters.

分散曲線を求めた過去の研究^⑤から、ここで見られるような数m/s 程度の分散曲線内の誤差は非常に小さく、その範囲内に入るような高精度な分散曲線の導出

は非常に難しいといえる。さらに、計算される理論分散曲線と実際の配管の配管中のガイド波分散曲線とのずれは、直径や管厚以外に、配管が引抜成形される際の異方性によるものも非常に大きく、数 m/s 程度の位相速度のずれを補正するために異方性等の物性値を正確に計測するのは現実的ではない。

そこで、位相速度のずれの大きい高次のモードは無視し、比較的ずれの小さい低次モード $T(0,1)$ と $T(1,1)$ のみを用いて、同様の励起源の画像化を行うことにより、この画像劣化の補正を行った。図 14、図 15 にその時の励起源画像を示す。図 14 は 0 から 16m の範囲、図 15 は 16 から 32m の範囲であり、図 7 同様、矢印の位置の 0° 部分が励起源となっている。

図 7 の励起源画像に比べ、図 14 の画像は 14m 程度の遠距離でも劣化が小さくはつきり励起源位置が 0° 付近であることが特定できる。また、さらに遠距離の図 15 でも 20m 程度まではおおむね励起源の位置が像となって現れている。さらに遠距離の 20m から 32m では、 $T(0,1)$ および $T(1,1)$ モードの理論分散曲線のずれが顕著に現れ、画像が劣化したり、それら 2 つが分離したりする様子が分かる。

一方、励起源画像の円周方向長さは、図 14 の方が、図 7 に比べてはるかに長くなっている。実際の励起源領域と大きく異なることが分かる。これは、図 14 では円周方向に分布の異なるモードを、 $T(0,1)$ と $T(1,1)$ の低次の 2 つのみを用いたが、図 7 では $T(0,1)$, $T(1,1)$, $T(2,1)$, $T(3,1)$, $T(4,1)$ の 5 つを用いていることが原因であり、より円周方向の分布が複雑で高次のモードを用いる方が円周方向の励起源長さを正確に表すことが示されている。

6. 結 言

数mの近距離では確立されていたガイド波を用いた損傷画像化技術を実用レベルの数十m程度の配管に用いた場合の影響について、4m配管の両端面での多重反射を利用した励起源の画像化とガイド波伝播シミュレーションを用いて検証した。一般にガイド波検査で広く用いられている軸対称 $T(0,1)$ モードの波形では、明瞭な波形として得られる数十m程度距離も、高次モードも用いた画像化では劣化し、像が得られないことが分かった。これは、実際の配管中を伝播するガイド波の位相速度と、計算で得られる理論分散曲線にずれが一因であることが、ガイド波伝播シミュレーションにより証明された。そこで、この分散曲線のずれの小さい低次のモードのみを用いて画像化を行ったところ、円周方向には広がって像が得られるものの、20m程度の遠距離でも励起源の画像が得られることが分かった。

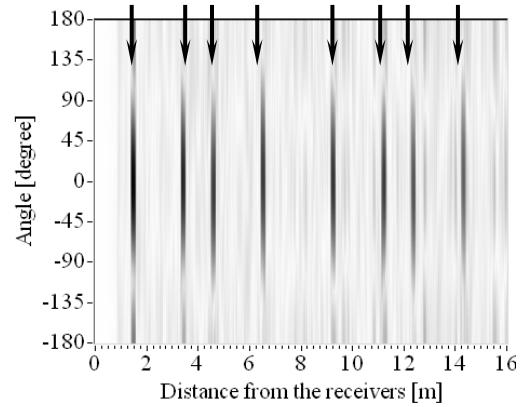


Fig 14 Image of excitation regions using lower modes, $T(0,1)$ and $T(1,1)$.

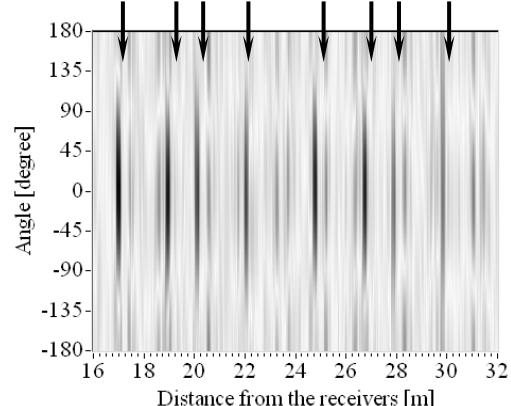


Fig 15 Image of excitation regions from 16m to 32m

実際の現場利用の際には、配管個々の直径や管厚、材質が正確には求められていないことがほとんどであるため、本手法が有効である。さらに、あらかじめ既知の距離にある EMAT 等の励起源の画像化を行い、画像が正確に得られるように分散曲線をわずかに補正した後に、損傷画像化を行うことで損傷の位置や性状を反映した画像が得られると考えている。

謝 辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、平成 15 年度産業技術研究助成事業により実施した。

参 考 文 献

- (1) Hayashi, T. and Murase, M., *Journal of the acoustical society of America*, Vol.117, No.4 (2005) pp.2134-2140
- (2) Hayashi, T. et. al, *Journal of the Japanese society of Non-destructive testing*, Vol.53, No.4 (2004) pp.223-229
- (3) Nishino, H, *Journal of the Japanese society of Non-destructive testing*, Vol.52, No.12 (2003) pp.654-661

- (4) Hayashi, T. et. al., *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* Vol.25 (2006) pp.173-180
- (5) Alleyne, D. and Cawley P., *Journal of the acoustical society of America*, Vol. 89, No.3 (1991) pp.1159-1168
- (6) Nishino, H. et. al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40 No.1 A (2001) pp.364-370
- (7) Hayashi, T. and Kawashima K., *JSME International Journal* (2003) pp.620-626