The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	大型構造物検査のためガイド波技術
Author(s)	林, 高弘
Citation	日本AEM学会誌. 2012, 20(4), p. 639-644
Version Type	AM
URL	https://hdl.handle.net/11094/84560
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

大型構造物検査のためのガイド波技術

Guided wave technique for inspecting large structures

林　高弘[*1]

Takahiro HAYASHI

Guided wave inspection has been expected as a promising non-destructive evaluation technique for large structures due to its prominent characteristic of long range propagation. This reviewed paper first presented characteristics of guided wave propagation, and then introduced author's studies on guided wave calculation and experiments for pipe and rail inspection. A semi-analytical finite element method realized large calculation of guided wave propagation even with a PC. Based on the calculation results, two defect imaging techniques for a pipe and an inspection technique for bottom edges of rails were developed.

Keywords: ultrasonic, guided waves, semi-analytical finite element method, defect imaging, rail inspection

１ 緒言

プラント内の配管や圧力容器，航空機のボディや鉄道レールなど検査を必要とする大型構造物は無数に存在している．これらに対する最も簡単な検査方法は目視検査であるが，内部にある損傷状態を検出するためには，一般にX線や超音波が用いられる。このうち超音波は人体への影響がほとんど無く，現場に導入しやすい手段である。

現在，超音波を用いた大型構造物の非破壊評価には，パルスエコー法や透過法などが利用されている[1]。パルスエコー法は，パルス状の波形を超音波探触子から材料内へ入射し，傷などから返ってくる波形を同一の超音波探触子で検出するという手法である。また，透過法は，被検査対象の材料を挟むようにして超音波探触子を設置し，一方の探触子より入射した超音波を対向する探触子により受信する手法である。いずれも，古くから材料評価に利用され，高い信頼性と計測精度を持つ手法であるが，一度の計測で評価できる材料内の領域は超音波が通過する非常に狭い領域のみとなっている。

そのため，大型構造物に適用する場合には，経験的に損傷が現れやすいとされる箇所のみを検査するか，全体を膨大な時間とコストをかけて検査するかのいずれかとなっている。

ガイド波と呼ばれる超音波モードを用いた非破壊評価技術は，このような大型構造物を効果的に検査できる手法として近年注目されている[2]。

本報では，ガイド波という超音波モードの特徴について述べた後，著者らが行ってきたガイド波伝搬の数値計算およびガイド波検査に関する実験的研究を紹介する。

２ ガイド波の特徴的性質

ガイド波とは，薄板やパイプ，鉄道レール中を長手方向に伝搬する超音波モードの総称であり，近年，JIS Z 2300（非破壊検査用語）においても「「細長い材料中を長手方向に伝搬する超音波」として定義付けられた[3]。ガイド波は，断面内の縦波や横波の複雑な相互作用によって一種の共振状態が形成された結果，得られる伝搬形態である。そのため，その伝搬挙動は非常に複雑であり，周波数や断面形状に大きく影響を受ける。すなわち，周波数や材料の幾何形状とは無関係の縦波・横波といったバルク波とは全く異なる特徴的な伝搬形態を示す。

以下，そのガイド波に現れる特徴的な性質である速度分散性と多モードの重畳について述べる[4, 5]。

2.1 速度分散性

図１は速度分散性を良く示すガイド波（ラム波 S0 モード）の伝搬の様子である。パルス状の波形が伝搬するにつれて広がっていくことが分かる。平板中に欠陥など減衰する要因がないにもかかわらず，波形が広がり振幅が減少するので，判断を誤る要因となっている。これは，入射された S0 モードが周波数によって

連絡先： 林　高弘，〒606-8501 京都市左京区吉田本町，
京都大学　大学院工学研究科　航空宇宙工学専攻，
e-mail: hayashi@kuaero.kyoto-u.ac.jp
[*1] 京都大学

音速が大きく変化するために起こる現象で，速度分散性もしくは単に分散性と呼ばれる。Fig.1 中の下図は分散曲線と呼ばれるグラフであり，この平板に対する速度の周波数依存性を示す。この例では，丸印の周波数位置の S0 モードを励振させている。この曲線丸印の部分は右肩下がりとなっており，周波数が大きくなるに従って音速が小さくなることが分かる。これにより，パルス状の波形のうち高周波成分は遅く伝搬するが，低周波成分は早く伝搬するので，パルス波形が広がっていく。

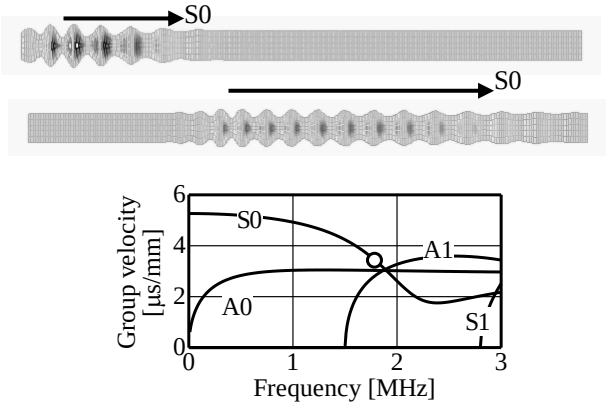


Fig.1 Wave propagation in a plate showing dispersion and group velocity dispersion curves for the plate

2.2 多モードの重畳

Fig.2 はラム波 A0 モードと S0 モードが重畳して伝搬する様子を示している。バルク波に速度の異なる縦波と横波の 2 つのモードが存在するように，ガイド波には無数のモードが存在しており，必要に応じて A0, S0 などの名称が付けられている。

これらのモードが重畳して伝搬した場合に，ある距離離れた地点で計測すると，これらの音速が異なっているため，複数の波束が検出される（Fig.2）。この例のように健全な材料であっても，内部の損傷により多重反射が起こったような複数の波形が得られるため，計測波形の判断を誤る要因となる。

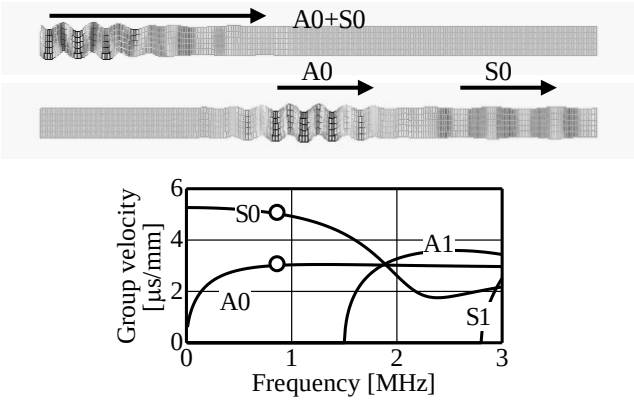


Fig.2 Wave propagation in a plate showing multi-mode nature and group velocity dispersion curves for the plate

３ 半解析的有限要素法によるガイド波の数値計算

このように，分散性のある多数のモードが同時に伝搬しうるガイド波に対し，数値計算を用いた解析が非常に有効である。

一般に，超音波伝搬のような動弾性問題の解法には，差分法，有限要素法，境界要素法などが利用されている。しかし，ガイド波のように大領域を取り扱う必要がある場合に，これらの方法を用いると膨大な計算時間とメモリを要するという問題があった。

そこで，著者らは，Fig.3 のように断面のみを要素分割し，長手方向の分布は直交関数で表記するという半解析的有限要素法をガイド波伝搬の数値計算に導入した。これにより，計算時間の大幅な短縮および必要メモリの削減に成功し，ガイド波伝搬の数値計算がパソコンで行えるようになった[4]-[8]。

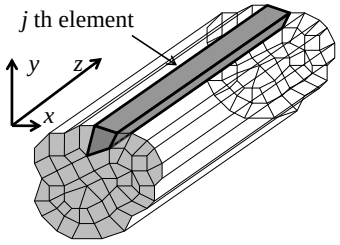


Fig.3 Subdivisions in a semi-analytical finite element method

半解析的有限要素法を用いたガイド波伝搬の数値計算では，材料定数および幾何形状が長手方向に一定であるという制約条件がある。そのため，材料定数や形状の変化する損傷部を有する平板やパイプに対するガイド波伝搬の数値計算を行うために，Fig.4 のようなハイブリッド法を利用した[8]。Fig.4 は，減肉部を有限要素法で，その他の健全部を半解析的有限要素法で表した例である。領域全体を有限要素法とするより大幅な計算時間の短縮となる上，任意の損傷形状を模擬することができる。Fig.4 下図は，ラム波 A0 モードが減肉部を通過する様子を示したものである。この結果を基に 4.2 で紹介する発振レーザ走査法による損傷画像化技術を開発した[8]。

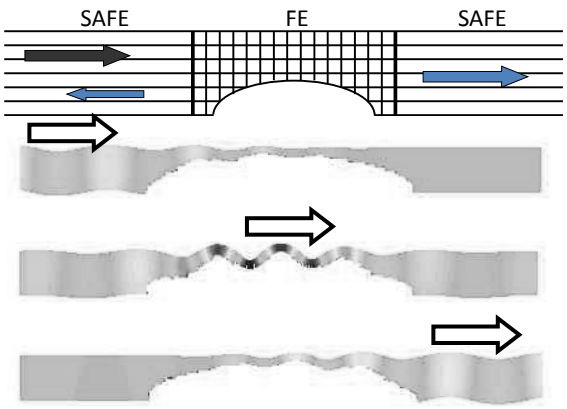
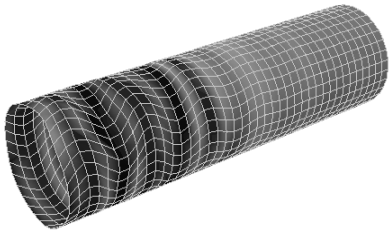
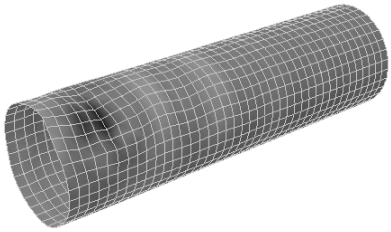


Fig.4 Propagation of A0 mode of Lamb wave in a plate with a thinning calculated by hybrid technique of a SAFE and a FE [8]

Fig.5 は損傷のあるパイプを伝搬するガイド波を示したものである。軸対称ねじりモード（T(0,1)モード）を右より入射し，左端近くにある損傷（へこみ部）に入射波が到達した瞬間における円周方向の振幅分布を示している。(a)はすべての波を表した結果であり，(b)は(a)より入射波成分を取り除いて損傷での散乱波のみを抽出した結果である。数値計算では，このような操作を容易に行うことができ，詳細なガイド波伝搬解析を行うことができる。さらに半解析的有限要素法では，ガイド波のモードごとの解析も可能である。



(a) incident wave (T(0,1) mode) and scattered waves



(b) only scattered waves

Fig.5 Snapshots of guided wave propagation around a defect in a pipe at the moment when incident T(0,1) mode hits at the defect

４ ガイド波検査に関する実験的研究

以上に示したガイド波伝搬の数値計算は，得られた実験結果を解析するだけでなく，新しい検査手法を開発する上で大きな役割を果たす。以下，数値計算結果に基づいて著者らが開発したガイド波検査手法を紹介する。

4.1 ガイド波パルスエコー波形処理による損傷画像化技術[9],[10]

ガイド波による配管検査は，一般に損傷からのパルス状の反射波を解析し，その損傷の長手方向位置を同定する。しかし，この手法では，損傷の円周方向位置や形状，サイズなどを知ることができない。そこで，計測された反射波から損傷画像を取得するという技術を考案した。この画像化手法は，Fig.5 の数値計算結果が開発のヒントとなっている。

Fig.5(b)では，損傷位置において大きな散乱波強度を有していることが示されている。すなわち，入射波が損傷にあたった瞬間の散乱波の強度分布を求めることにより損傷画像を得ることができる。

Fig.6 にその検証実験に用いたパイプと送受信センサ位置を示す。長さ 4m，直径約 110mm のアルミニウムパイプに 2 個の貫通穴（直径約 10mm）を開け，その損傷画像を取得した。磁わい型センサを用いて軸対称ねじりモードを入射し，EMAT により円周方向 8 箇所で反射波を検出した。

この反射波は，多数のガイド波モードが重なって形成されており，それぞれのモードは固有の音速特性（分散曲線）を有している。そのため，複数の波形を文献[9]で示したモード抽出手法により，一旦モードごとの波形に分離した後，モードごとの音速データ（分散曲線）に基づいて処理し，損傷からの反射波を空間波形に再構成した[10]。

Fig.7 の黒点線枠内(a)-(c)には，その再構成されたパイプ中のガイド波空間波形を展開図にして示す。これらは，図中左上に書かれた時間において配管中を伝搬する波形のスナップショットを意味している。これらの空間波形はモード抽出[9]と空間波形の再構成処理[10]により，時間ステップごとに取得される。それらを連続表示すると Fig.5(b)のような損傷からの反射波の動画を得ることができる。Fig.7(a)-(c)はその多数の時間ステップに対する空間波形のうち，代表的な 3 つの時刻について表示したものである。(a)は入射波が 2

個の貫通穴に到達する前の時刻における空間波形，(b)は入射波がちょうど貫通穴に到達した時刻における空間波形，(c)は入射波が貫通穴を通過した後の時刻における空間波形であり，それぞれ Fig.7(a)-(c)内の白点線枠に入射波の到達位置を示した。この入射波到達位置は，入射波となる軸対象ねじりモードの速度と時刻より推測されたものである。

(a)の時刻では，入射波が貫通穴に到達していないため，実際には反射波が無いが，見かけ上貫通穴より右に反射波強度の大きな領域があり，左へ移動している。(b)では，入射波が貫通穴で反射する瞬間であるため，ちょうど貫通穴の位置で反射波強度の大きな分布が得られた。(c)は，その貫通穴からの反射波が左へ移動している様子が見られた。

これらのうち(b)の反射波強度分布は損傷位置にのみ強度の大きな分布が得られ，損傷画像に相当する。しかし，実際には，損傷の位置は不明であるため損傷に入射波が当たった瞬間の時刻を決定し，(b)のような 1 個の画像を取り出すことはできない。そこで，(b)の画像において入射波位置と貫通穴の位置が一致することに着目し，入射波の支配領域における反射強度データを足し合わせる処理を行い，1 枚の損傷画像を得た。Fig.7(a)-(c)中の白点枠は，その時刻において入射波（軸対称ねじりモード）が伝搬している領域であり，既知の入射波音速から推定できる。(d)は，(a)-(c)のような各時刻における反射波強度分布の 2 次元データ列のうち，白点枠内の反射波強度データのみを抽出し，2 次元配列に足し合わせていくことにより得られた結果であり，1 枚の損傷画像として得ることができた。

これは，ちょうど 0°と 90°の位置に作成した貫通穴の画像を表している。ただし，本手法は反射波強度に基づいて画像を取得するため，損傷サイズや深さなどの正確な情報を得ることは難しいと考えられる。

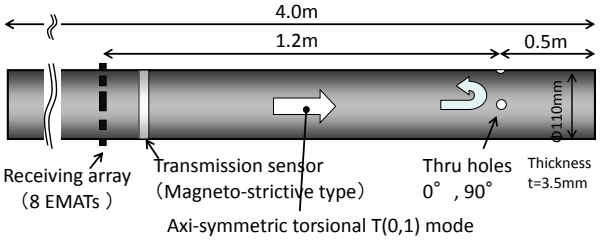


Fig.6 Locations of defects and sensors in the pipe tested

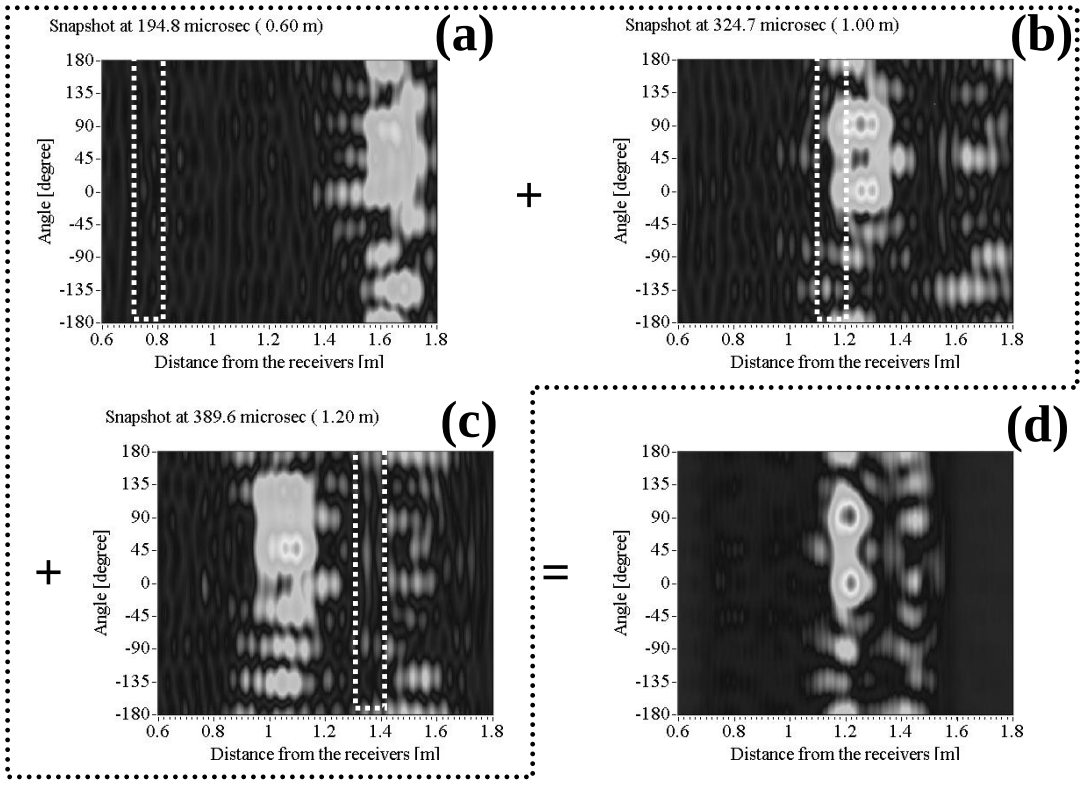


Fig.7 Reconstructed spatial waveforms at three different time steps and a defect image after tracing process

4.2 発振レーザ走査法による損傷画像化技術

ガイド波のパルスエコー法による画像化では，前出のような損傷サイズの不一致や画像の乱れなどの問題が見られた。また，反射波を利用した方法であるため，反射波が受信されにくい配管中の腐食状損傷のようななだらかな損傷状態に対しては，利用できないという大きな欠点があった。これらは，ガイド波のパルスエコー中に損傷情報を含んでいないという原理的な問題であり，センサ技術や信号処理技術が向上しても解決できない適用限界である。

そこで，レーザによるガイド波の励振と固定した超音波センサによる受信を組み合わせた発振レーザ走査法[8],[11]による損傷画像化を試みた。Fig.8 には，前節との比較のためパイプへの適用を考えたときの実験システムの概略図を示す。レーザ照射によってガイド波を励振し，離れた位置にある受信センサによって波形を取得する。そのため，この方法では，反射波を必要とせず，前出のパルスエコー法による画像化とは全く異なる特性があると考えられる。

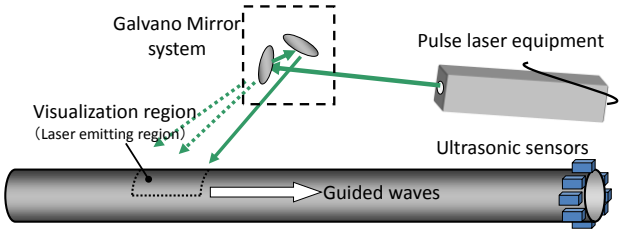


Fig.8 Schematic figure of defect imaging with a scanning laser source system

この手法は，Fig.4 に示した数値計算結果が基になっている。Fig.4 ではラム波 A0 モードが斜角探触子から入射されて，減肉部を通過する様子を示しているが，健全部では振幅が小さく，減肉部で振幅が大きくなることが示されている。ここで相反定理を導入すると，平板表面に垂直の振動を与えた場合，健全部では A0 モードの振幅が小さく，減肉部では A0 モードが大きく発生し伝搬すると言い換えることができる。つまりレーザ照射により垂直の振動を与えたとすると，離れた位置に設置した超音波センサでは，損傷部で振幅が大きく，健全部で振幅が小さい信号が得られる。

Fig.9 は直径約 110mm，肉厚 3mm のパイプを半分に切った曲面の内側に T 字の人工傷を与えた試験体に対し，損傷領域の周囲にセンサを設置して画像化したときの結果である。センサは上下左右に 4 か所設置し，それぞれで得られた画像を平均化することでより鮮明な画像を得られるようにした。対象が曲面で T 字のような複雑な損傷形状であっても鮮明な損傷画像が得られていることが分かる。

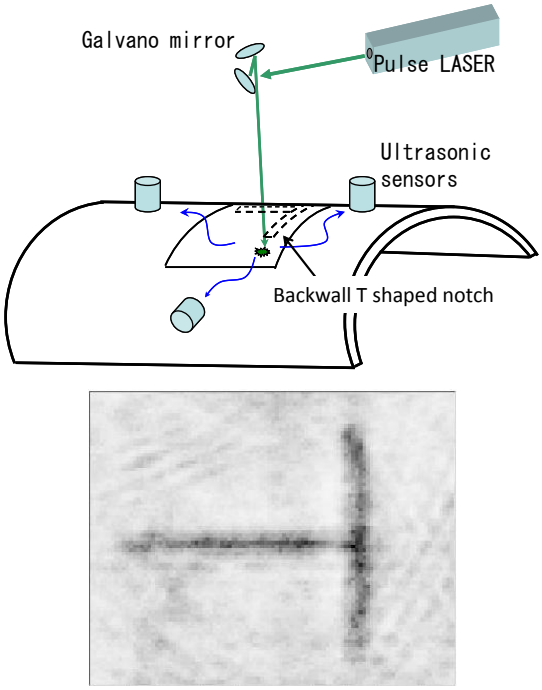


Fig.9 Imaging a T shaped defect in a half pipe by summarizing four images obtained at four sensors

4.3 鉄道レール底端部の非破壊評価技術

鉄道レールへのガイド波の適用も検討してきた[12]-[15]。鉄道レールのような複雑断面の棒状材料に対しては平板や配管の場合と異なり分散曲線を解析的に求めることができない。そこで，まず半解析的有限要素法を用いた数値計算技術によって理論的な研究を進めた。Fig.10 は著者らが開発した分散曲線導出ソフトウェア[12]によって求められた鉄道レールの群速度分散曲線である。一見すると，無数のモードがあり非破壊評価への適用が困難であるように感じられるが，ひとつひとつのモードの振動形態を解析すると，レールの頭部や腹部，底端部などが局所的に振動しているモードがたくさんあることが分かった[13]。著者らは底端部を振動するモードを用いて，レール底端部検査装置の開発を進めており，Fig.11 のように 10m 先の傷からのエコーも検出できる装置を開発することができた[14]。これは，踏切内のレール底端部の見えない箇所の遠隔検査として利用できるとして期待されている。

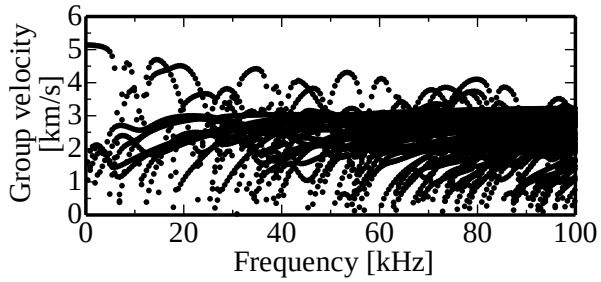


Fig.10 Group velocity dispersion curves for a rail of JIS 50kgN

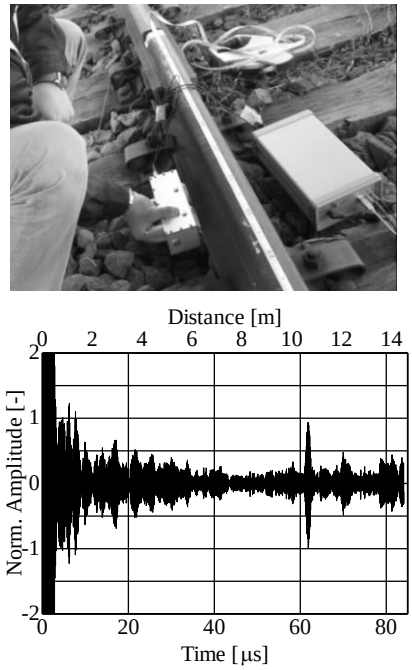


Fig.11　Rail inspection system and defect echo

５ 結言

本報では，平板，パイプ，レールなどの大型構造物検査に利用が期待されているガイド波の特徴的な性質について述べ，ガイド波数値計算およびガイド波検査装置開発に関する著者らの研究を紹介した。

ガイド波は断面形状により全く異なる伝搬形態を示すことから，ある対象物で利用できた装置をそのまま別の対象に利用できるというわけではなく，検査装置のカスタマイズが必要となる。その意味で，未だ活用できていない大型構造物は無数にあり，今後の発展が期待できる。

謝辞

本研究は，著者が所属した工業技術院資源環境技術総合研究所（現　産総研），名古屋工業大学，株式会社豊田中央研究所において様々な支援により行われた研究成果をまとめたものである。この場を借りて関係者の皆様に感謝申し上げる。

事務局記入―(20??年??月??日受付)

参考文献

[1] 日本非破壊検査協会編，超音波探傷試験 I-III，日本非破壊検査協会
[2] 特集 ガイド波による探傷，非破壊検査，Vol.52，No.12，2003
[3] 日本工業規格，JIS Z 2300 : 2009 非破壊試験用語，2009
[4] T. Hayashi and J. L. Rose, Guided wave simulation and visualization by a semi-analytical finite element method, Materials evaluation, Vol.61, No.1, pp.75-79, 2003
[5] T. Hayashi, W.-J. Song, J. L. Rose, Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example, Ultrasonics, Vol.41, No. 3, pp.175-183, 2003
[6] T. Hayashi, K. Kawashima, Z. Sun and J. L. Rose, Analysis of flexural mode focusing by a semi-analytical finite element method, J. Acoust. Soc. Am., Vol.113, No.3, pp.1241-1248, 2003
[7] 林高弘，半解析的有限要素法によるガイド波伝搬の数値計算，非破壊検査，Vol.60, No.4, pp.216-221, 2011
[8] T. Hayashi, M. Murase and M. Salim, Rapid thickness measurements using guided waves from a scanning laser source, J. Acoust. Soc. Am., Vol.126, No.3, pp.1101-1106, 2009
[9] T. Hayashi and M. Murase, Mode extraction technique for guided waves in a pipe, Nondestructive testing and evaluation, Vol.20, No.1, pp.63-75, 2005
[10] T. Hayashi and M. Murase, Defect imaging with guided waves in a pipe, J. Acoust. Soc. Am., Vol.117, No.4, pp.2134-2140, 2005
[11] T. Hayashi, M. Murase and T. Kitayama, Defect imaging technique using a anning laser source, Review of Progress in QNDE, Vol.30, pp.713-719, 2011
[12] http://guidedwave.web.nitech.ac.jp/
[13] T. Hayashi, C. Tamayama and M. Murase, Wave structure analysis of guided waves in a bar with an arbitrary cross-section, Ultrasonics, Vol.44, No.1, pp17-24, 2005
[14] T. Hayashi, K. Kataoka and M. Takikawa, Modal analysis of guided waves and its application to rail inspection, J. Solid Mech. and Mater. Eng., Vol.12, No.10, pp.1298-1306, 2008