

空中超音波を用いたパイプ中でのガイド波の発生

Generation of Guided wave in pipe using Air-Coupled ultrasonic wave

○近藤 容明*, 西平 守正*, 今野 和彦*

○Masaaki Kondou*, Morimasa Nishihira*, Kazuhiko Imano*

*秋田大学 工学資源学部

*Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

キーワード：ガイド波(Guided wave), 空中超音波(Air-Coupled), 分散曲線(Dispersion curve),
ウェーブレット変換(Wavelet conversion), 欠陥検出(Defect inspection),

連絡先：〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学 工学資源学部 電気電子工学科
近藤容明, Tel : (018)889-2494, Fax : (018)837-0406, E-mail : imano@ipc.akita-u.ac.jp

1. はじめに

現在, コンビナートなどの経年劣化に伴い, プラントを構成している各種配管の腐食進展に伴う, 漏洩・爆発事故の発生が相次ぎ社会問題となっている. そのため配管設備の安全確保のためには, 事故が発生する以前に配管全体の腐食・減肉個所を把握し, 適切な時期に補修・交換する必要がある. よって膨大な数の配管を有するコンビナート全体を検査するためには高速かつ網羅的に検査できる検査技術が求められている.

しかし, これまでの検査技術では, 主に配管の肉厚方向に超音波を伝搬・検出する垂直探傷法が一般的である. だがこの検査技術では, 測定が point-to-point であるために, 1つの測定対象物を検査するには多くの時間・労力・コストを要してしまうため, 未だ検査精度及び検査能率の両方を満足する検査技術はない.

近年, 伝搬時の拡散損失が少なく長距離を伝

搬する特性を有するガイド波が, 非破壊検査の有望な技術として応用が期待されている¹⁻³⁾.

これまでガイド波の発生・検出する方法には, 複数の圧電素子をリング状に形成した探触子アレーを用いた方法や探触子と配管の間に固体くさびを介する方法がある. しかし, これら方法は接触法であるため, 測定毎に配管に取り外しをする必要がありまた, 接触法であるために測定試料に様々な制限があるといった問題があった. このような問題に対して非接触法, すなわち空中超音波を用いてガイド波の発生・検出ができれば, 上記に示した問題も一掃できる. しかしこれまで, 空中超音波を用いたガイド波の研究報告はない. この原因としては, 超音波探触子と空気間の 5 桁程度の音響特性インピーダンス不整合による送受波感度の低下, 空気中における周波数に依存する超音波の高減衰性などが問題となるためである. このため, 空中超音波を用いた計測は, 高分解能(高周波数)

を要求される分野では用いられておらず、数十 kHz～数百 kHz 程度の低周波帯域と限られた分野への応用にとどまっている。しかし、近年研究レベルではあるが近距離計測用の MHz 帯空中超音波探触子が開発された。よって MHz 帯空中超音波を用いてガイド波が発生できれば、より実用的な超音波探傷への応用が期待できる⁴⁾。

本研究では、これまでに行われていない MHz 帯空中超音波を用いたガイド波の発生について検討を行う。また、ガイド波を用いた非破壊検査の一応用例として、ドリル貫通穴の欠陥検出について検討を行う。

2. ガイド波伝搬特性

2.1 ガイド波の伝搬モード

ガイド波は、3次元の波動伝搬問題となるため、円柱座標 (r, θ, z) を用いると関与する実体波は、縦波1つ (k_z) と、横波が偏波方向により3つ $(k_{sr}, k_{s\theta}, k_{sz})$ となる。従って波動方程式は、円筒波の波数ベクトルを k_{cyl} とすると(1)式で示される。

$$\left. \begin{aligned} \phi &= A J_n(k_r r) \exp(ik_\theta \theta) \exp(ik_{cyl} z) \\ \psi_r &= [B_1 J_{n-1}(k_{sr} r) + B_2 J_{n+1}(k_{sr} r)] \exp(ik_\theta \theta) \exp(ik_{cyl} z) \\ \psi_\theta &= [B_1 J_{n-1}(k_{sr} r) - B_2 J_{n+1}(k_{sr} r)] \exp(ik_\theta \theta) \exp(ik_{cyl} z) \\ \psi_z &= B_3 J_n(k_{sz} r) \exp(ik_\theta \theta) \exp(ik_{cyl} z) \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、 A, B_1, B_2, B_3 は任意係数である。

(1)式と円筒の内外表面において応力がゼロとする境界条件より(2)式の Gazis の周波数方程式が得られる。

$$|c_{ij}| = 0 \quad (i, j=1, \dots, 6) \quad (2)$$

この(2)式の $|c_{ij}|$ がゼロになる条件を数値的に計算することでガイド波の位相速度の速度分散曲線(理論値)を算出することができる^{1,5)}。

ガイド波には Fig.1 に示すように、管軸に対

して対称に振動する Longitudinal モード(以下、L-mode と省記する)、非対称に変位する Flexural モード(以下、F-mode と省記する)、円周方向に捻れて変位する Torsional モード(以下、T-mode と省記する)の3種類に分類できる。これら L, F, T-mode はそれぞれ2つのモードパラメータ n と m を用いて、 $L(0, m)$, $F(n, m)$, $T(n, m)$ と記述される($n, m=1, 2, 3, \dots$, T-mode では $n=0, 1, 2, \dots$)。

モードパラメータ n による円周方向の変位を Fig.2, モードパラメータ m による板厚方向の変位を Fig.3 に示す。L-mode は、円周方向で変位が一樣なため $n=0$ となり、 $n>1$ になると F-mode となる。一方、板厚方向の変位を示すモードパラメータ m は奇数のとき、板厚の中に対して非対称に振動し、偶数のときは対称に振動する^{3,6,7)}。

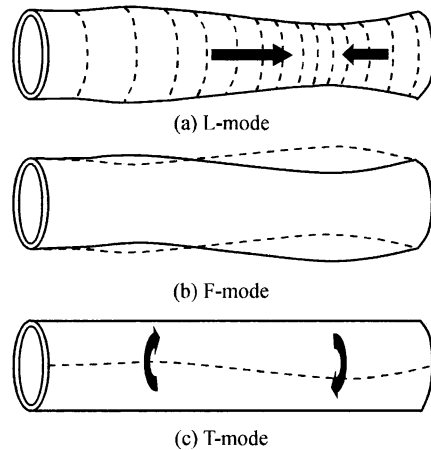


Fig.1 パイプ中での伝搬モード

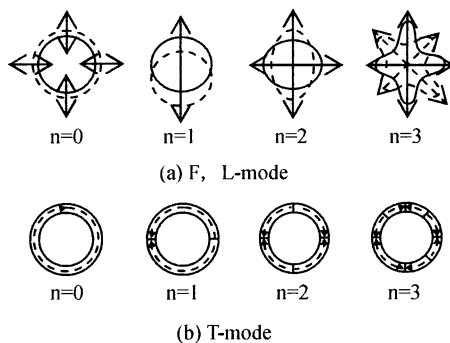


Fig.2 円周方向のモードパラメータ n による変位模式図

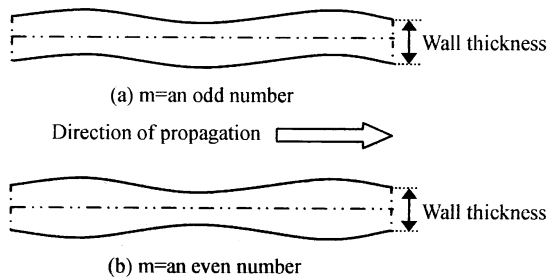


Fig.3 板厚方向のモードパラメータ m による変位模式図

2.2 速度分散曲線

本研究では、ガイド波の伝搬媒質としてアルミニウムパイプ($c_L=6260$ m/s, $c_T=3080$ m/s)を用いる。この速度分散曲線を Fig.4 に示す。

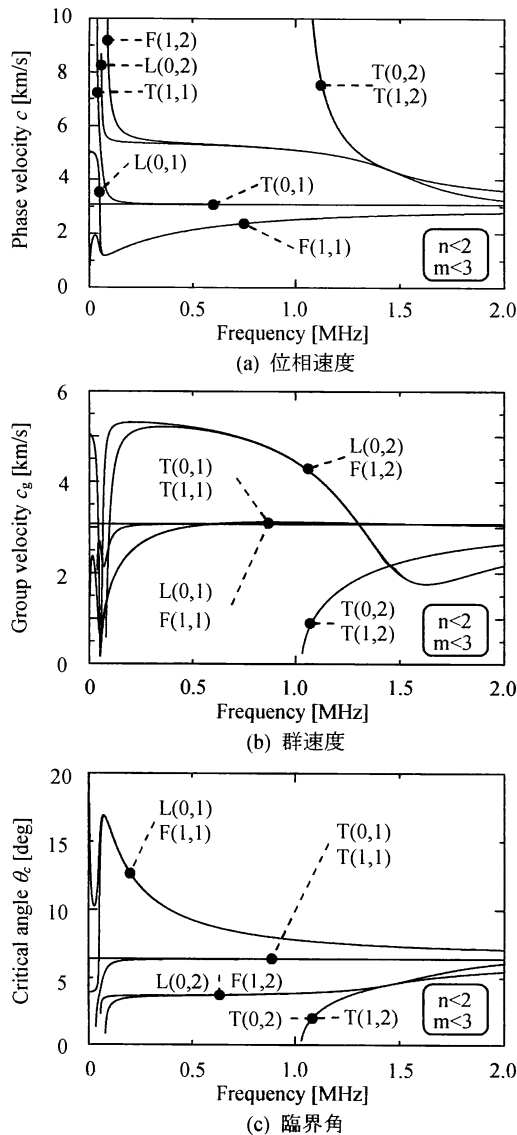


Fig.4 速度分散曲線

3. ガイド波の発生・検出

3.1 測定システム

本研究では、 $L(0,1)$ と $F(1,1)$ のガイド波を最も効率良く発生・検出するために、入射角及び受波角を Fig.4 に示す臨界角 $\theta=7.5^\circ$ に設定した。Fig.5 にガイド波を発生・受波するための測定システムを示す。発振器より周波数 1.2 MHz、電圧 $0.632 V_{p-p}$ 、サインバースト波 10 波を発振させ、増幅器及び整合器を介して送波用超音波探触子に印加する。そしてパイプ中を伝搬し、空气中にわずかに漏洩されるガイド波を受波用超音波探触子により受波する。そして増幅器を介し受波波形をオシロスコープに表示させ、同時に波形データをパソコンに取り込む。また伝搬距離は 100 mm と設定した。

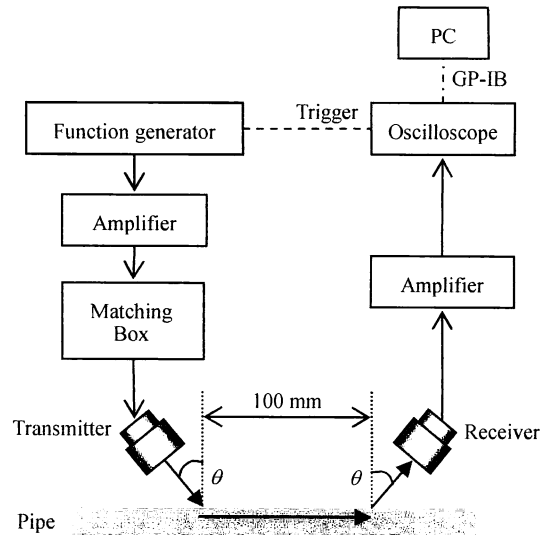


Fig.5 測定システム

3.2 測定結果

臨界角を 7.5° に設定した場合の受波波形を Fig.6 に示す。この結果、伝搬時間及び伝搬距離よりガイド波と考えられる波形を確認された。また臨界角 7.5° において、入射角を固定し受波角を臨界角付近で変化させた時のガイド波の振幅値の比較も行った。その結果を Fig.7 に示す。その結果、もっとも臨界角付近で振幅値が最大となった。

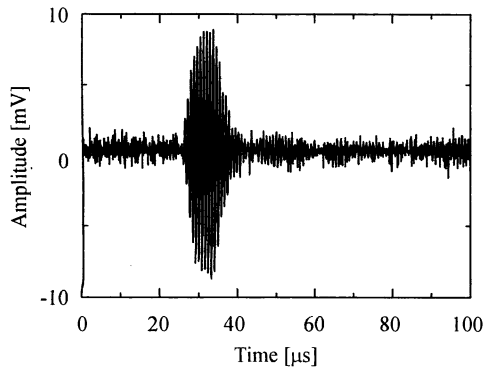


Fig.6 $\theta=7.5^\circ$ における受波波形

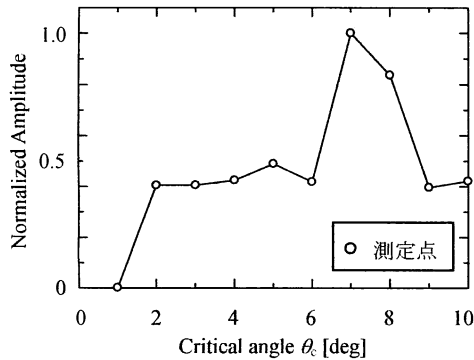


Fig.7 角度特性

3.3 伝搬モード判別

Fig.4 に示すように、ガイド波は同時に多数の伝搬モードが存在する。そのため臨界角や受波波形そのものから、ガイド波の伝搬モードを判別するのは困難である。そこで本研究では、群速度の速度分散曲線及びウェーブレット変換を用いて伝搬モード判別を行った。

伝搬モード判別結果を Fig.8 に示す。その結果、臨界角 $\theta=7.5^\circ$ では L(0,1)と F(1,1)の発生が考えられたが、その伝搬モードの速度分散曲線と重なっていることが確認できる。また T(0,1)と T(1,1)とも重なっているが、この2つの伝搬モードの臨界角は 6.4° である。Fig.7 の結果と T-mode の伝搬形態を考えると、この受波波形は L(0,1)と F(1,1)であると推定される。また L(0,1)に比べ F(1,1)の励振効率が大きいといった研究報告がある⁸⁾。それらを考えると、本研究で得られた受波波形は F(1,1)であると推定される。

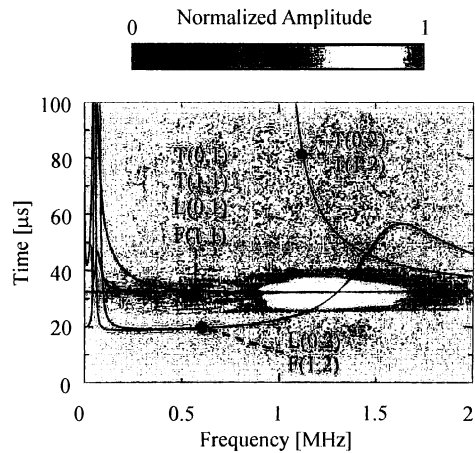


Fig.8 伝搬モード判別結果($\theta=7.5^\circ$)

4. 非破壊検査への応用

4.1 欠陥について

ガイド波を用いた非破壊検査の一応用例としてドリル貫通穴の欠陥検出について検討を行う。その試験片のレイアウト及び模擬欠陥の写真を Fig.9 に示す。

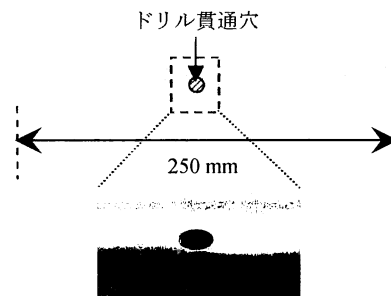


Fig.9 試験片のレイアウトと
模擬欠陥の写真

4.2 測定システム

Fig.5 における測定システムにおいて、欠陥の直径を 1.5 mm~5.0 mm まで変化させ、その時々ガイド波の振幅値の比較を行った。

4.3 測定結果

その測定結果を Fig.10 に示す。その結果、欠陥の直径のサイズが大きくなるほど、ガイド波の振幅値が小さくなることが確認された。よって基準波形(欠陥無し時)と波形を比較することで欠陥検出が行えると考えられる。

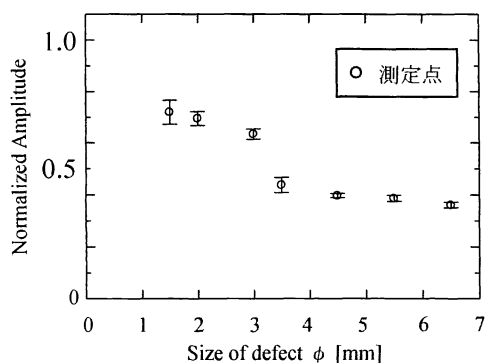


Fig.10 欠陥検出結果

5. おわりに

本研究では、MHz 帯空中超音波を用いたガイド波の発生・検出について検討を行った。その結果、MHz 帯空中超音波を用いてもガイド波を発生・検出できることが確認された。また、ガイド波を用いた欠陥検出についても検討を行った。その結果、欠陥のサイズによってガイド波の振幅値が変化することが確認された。

今後は、減肉欠陥および欠陥の位置特定についての検討を行う予定である。

6. 謝辞

伝搬モード解析に御援助頂いた、名古屋工業大学 林高弘先生に感謝します。

参考文献

- 1) 林高弘：配管検査のためのガイド波理論と将来技術, 非破壊検査, **54**,11,590/594(2005)
- 2) ガイドによる配管の信頼性評価委員会：配管等の検査の現状と課題, 非破壊検査, **54**,11,586/589(2005)
- 3) 西野秀郎：非破壊計測のためのガイド波の基礎と展望, 非破壊検査, **52**,12,654/661(2003)
- 4) Masaya Watanabe, Morimasa Nisihira, Kazuhiko Imano : Detection of Defects on Reverse Side of Metal Plate Using MHz-Range Air-Coupled Lamb Wave, JJAP, 45,5B,4565/4568,(2006)
- 5) D.C.Gazis : Three-dimensional investigation of the propagation of wave in hollow circular cylinder. I. Analytical foundation, JAcoust.Soc.Am, 31,5, 568/578(1959)
- 6) 西野秀郎：パイプを伝搬する超音波の速度分散曲線, 超音波 TECHNO, 7, 21/26 (2001)
- 7) 卯西裕之, 石川昌己, 大谷靖弘：ガイド波を用いた配管腐食検査技術, NKK 技法, **177**,38/42,(2002)
- 8) M.G.Silk and K.F.Bainton : The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to Lamb wave, Ultrasonics, 17,11/19(1979)