

ガイド波による配管減肉検査システム

A Pipe Inspection System Using Ultrasonic Guided Wave

日立 GE ニュークリア・エナジー(株)	小平 小治郎	Kojirou KODAIRA	Member
(株)日立製作所	永島 良昭	Yoshiaki NAGASHIMA	Non-member
(株)日立製作所	三木 将裕	Masahiro MIKI	Non-member
(株)日立製作所	遠藤 正男	Masao ENDOU	Non-member

A pipe inspection system using ultrasonic guided wave with inter-digital transducer was developed. In this system, for uni-directional transmission, a pair of transducer is set axially on the pipe with a separation of one-quarter of the wavelength, and a one-quarter period delayed anti-phased waveforms are applied to the pair. By this method, the amplitude of the synthetic traveling wave in the minus direction can be completely decreased to zero in theory. For 50A pipe specimen, artificial discontinuities that were 1% of the cross section area of the pipe could be detected clearly. In order to detect circumferential position of discontinuity for large diameter pipe, partially installed guided wave sensor is now under developing.

Keywords: Ultrasonic inspection, Guided wave, Pipe

1. 緒言

火力・原子力発電プラント、石油精製・化学プラントでは、高経年化プラントが増加している。それに伴い、プラントに多数存在する配管の劣化状態、特に減肉の状態を効率良く把握する技術の必要性が高まりつつある。しかしながら、非破壊で配管の減肉を検出する試験方法として一般的に知られている放射線透過試験、超音波試験、渦電流試験では、一度に検査できる範囲が狭く、時間的・金銭的成本が無視できない。また、高所に設置された配管に対しては足場の設置・解体が必要であり、放射線透過試験以外では、測定箇所毎に保温材の撤去・復旧が必要となる。

この問題を解決する技術の一つとして、管体のガイド波を用いた長距離検査方法が提案されており、一部は実用ベースにある[1]。超音波厚さ計が、局所領域の減肉深さを高精度に測定する技術であるのに対して、ガイド波検査は、数十メートルの距離を伝搬する特徴を活かして広範囲の減肉をスクリーニングする技術である。

本稿では、低周波数に適した構造の櫛型探触子を用いたガイド波の送受信方法と、その方法を搭載した検査システムの概要、および試験体を用いた測定例を紹介する。また、大口徑の配管に対して、部分的に配置する新たなタイプのセンサを使って、減肉の周方向位置を特定する技術を開発中であるので、その概要を紹介する。

連絡先:小平小治郎、〒317-0073 茨城県日立市幸町3-1-1、日立 GE ニュークリア・エナジー(株)、電話:0294-55-5950、e-mail: kojiro.kodaira.vf@hitachi.com

2. ガイド波の送受信原理

ガイド波を用いた配管検査の概要を Fig. 1 に示す。配管にリング状のセンサを設置し、配管に沿って軸方向に伝搬するガイド波を発生させる。減肉位置で反射したガイド波の反射信号の検出時間と振幅から、減肉の位置と大きさ(配管断面積に対する比率)を測定する。

配管の軸に沿った一方向にガイド波を励起するために、軸方向に離散的に一对の送信源を配列した櫛型センサを用いる。配管の軸方向に4分の1波長離れた二箇所の位置に、4分の1周期の時間遅延を与えた同相もしくは逆相の信号を送信して、後方へ進行するガイド波を能動的に抑制する原理を用いる。この原理による正方向(右方向)への合成波動の進行波 $A^+(x, t)$ と、負方向(左方向)への合成波動の進行波 $A^-(x, t)$ は、波動の重ねあわせとして、各々式(1)と式(2)で与えられる。

$$A^+(x, t) = A_1 e^{j(\omega t - kx)} + A_2 e^{j\left(\omega\left(t - \frac{T}{4}\right) - k\left(x - \frac{\lambda}{4}\right)\right)} \quad (1)$$

$$A^-(x, t) = A_1 e^{j(\omega t + kx)} + A_2 e^{j\left(\omega\left(t - \frac{T}{4}\right) + k\left(x - \frac{\lambda}{4}\right)\right)} \quad (2)$$

ここで x は配管軸方向座標、 A_1 と A_2 は各々位置1と位置2に与える送信信号の振幅、 ω は角周波数、 t は時間、 k は波数、 $T(=2\pi/\omega)$ は周期、 $\lambda(=2\pi/k)$ はガイド波の波長、 j は虚数単位である。式(1)(2)において、 $A_1 = A_2$ とすれば、正方向への進行波の振幅は倍増し、負方向への進行波は相殺されることになる。

実際に検査に用いる送信信号は、一定時間持続するバースト波なので、位置1に与える送信信号に対して、位置2に同一の送信信号を4分の1周期遅延させて与

える方法と、Fig. 2 に示すように、位置 1 に与える送信信号に対して、位置 2 に極性が反対の信号を 4 分の 1 周期早く与える方法に分けることができる。前者の方法は、正方向への進行波を完全に二倍化することができるが、負方向への進行波を完全に打ち消すことはできない。一方で、後者の方法は、正方向への進行波を完全に二倍化することはできないが、負方向への進行波を理論的には完全に打ち消すことができる。

検査においては、減肉からの反射信号とそれ以外の信号（ノイズ）を区別するためには SN 比の向上が重要であるので、センサ後方への送信信号を低減してノイズを抑制できる後者に示す送信方式が有効である。なお、ガイド波の受信時においても、図示はしないが、送信時と逆の過程で単一方向からの信号のみを抽出する二通りの処理方法があるが、送信と同じ理由で後者の方法に相当する信号処理を施して受信信号とする。

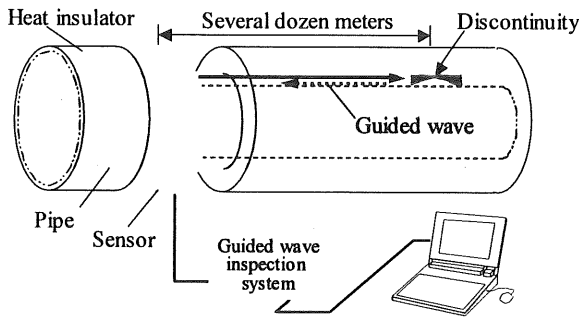


Fig. 1 Overview of pipe inspection using guided waves

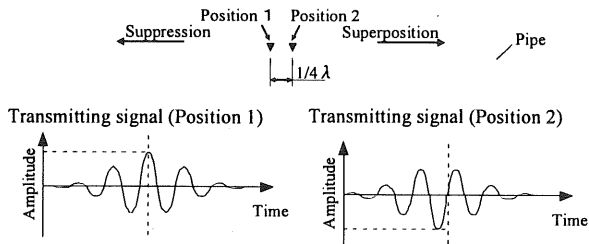


Fig. 2 Unidirectional transmission by inter-digital sensors

3. システム構成

ガイド波配管減肉検査システムとガイド波センサ（配管外径 50A、100A、300A、500A 用）の概観を Fig. 3 に示す。波形発生器、パワーアンプ、A/D変換器等を内蔵する装置本体とコンピュータで構成される。ガイド波センサは、50A 配管用では 16 個（8 個×2 列）の櫛型探触子を有する。各探触子は、すべり振動の超音波振動子を有し、水を包含する配管でもほとんど減衰がない非分散性のねじり振動 T(0, 1) モードのガイド波を送受信する。

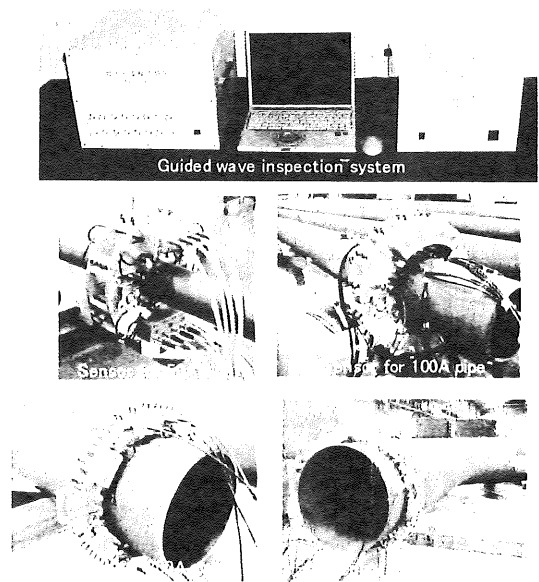
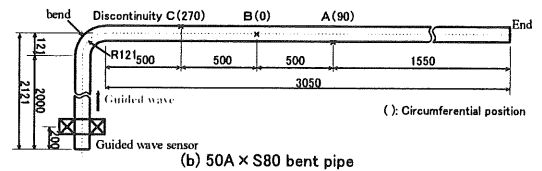
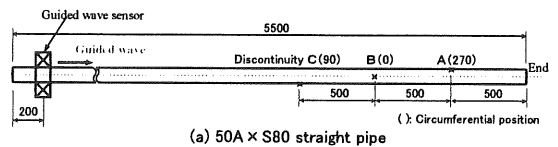


Fig. 3 Guided wave inspection system and sensors

4. 実験結果

試験に用いた配管は、炭素鋼管（STPG370）の 50A スケジュール 80（公称外径 60.5mm、公称肉厚 5.5mm）で、いずれも全長が 5.5m である。模擬減肉は、配管の断面積比が 1%の楕円形状であり、肉厚方向深さと軸方向長さの比を、1:8、1:16、1:32 の 3 種類とした。試験体の概要と減肉の形状を Fig. 4 に示す。配管内外面の減肉の検出性は殆ど変化がないため、外面から減肉を付与した。試験結果を Fig. 5 に示す。各試験体の模擬減肉 A、B、C ともに、明瞭に検出できている。



Items	A	B	C
W(Circumferential width)	9.9mm	12.3mm	14.0mm
L(Axial length)	11.5mm	18.4mm	32.4mm
T(Depth)	1.4mm	1.2mm	1.0mm
Aspect ratio (T:L)	1:8	1:16	1:32
Shape			

Fig. 4 Specimens

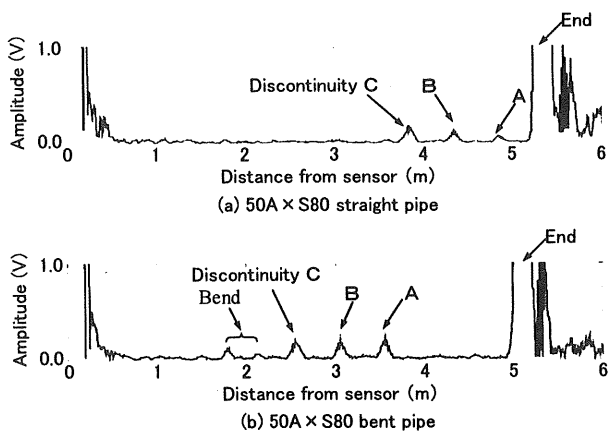


Fig. 5 Experimental results

5. 大口径配管での減肉位置の特定

Fig. 3 に示したガイド波センサは、配管の全周に探触子を配置する必要があるため、配管の口径が大きくなるに伴ってセンサのサイズが大きくなる問題がある。この課題を解決するために、主に大口径配管に対して、センサから比較的短距離の間を点検する目的で、Fig. 6 に示す部分設置型ガイド波センサを開発中である。使用する櫛型探触子は Fig. 3 と同じで、配管内に水を内包しても、殆ど減衰が生じない剪断振動モードを送受信する。

性能確認に用いた試験体の一例を Fig. 7 に示す。口径 500A、厚さ 9.5mm の配管で、内面にポリエチレンライニングを施工しており、配管の断面積に対する比率で 3% の減肉 b を 180° の位置に、5% の減肉 c を 270° の位置に付与してある。

部分設置型センサを左端から 1500mm の位置で 0° から 300° まで 60° ピッチで設置し、周方向 6 箇所測定した結果を Fig. 8 に示す。減肉 b、減肉 c の正面に部分設置型ガイド波センサを配置したときに、反射波の振幅が概して大きくなる。近距離においては、減肉の周方向位置を特定できる可能性があると言える。

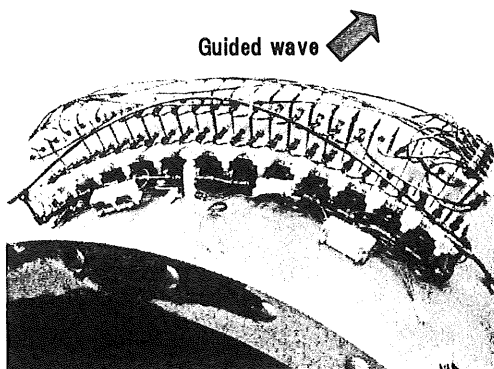


Fig. 6 Partially installed guided wave sensor

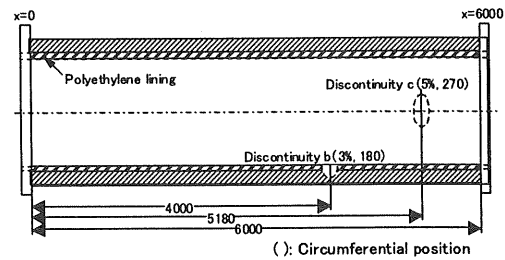


Fig. 7 Specimen (500A pipe)

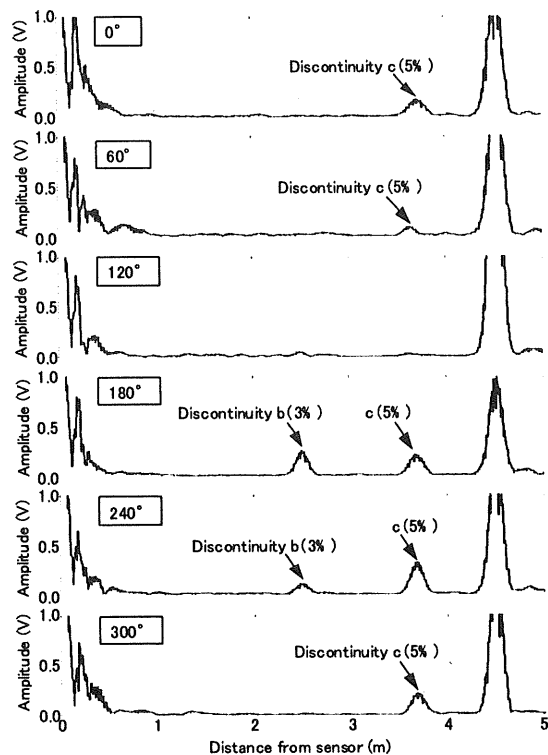


Fig. 8 Experimental results (500A pipe)

6. 結言

配管全体の減肉を一括して検査できるガイド波検査システムを開発した。結論は、以下の通りである。

- (1) 配管の全周に探触子を配置するリング型ガイド波センサにより、配管断面積比率の 1% の減肉を検出できる。
- (2) 配管周囲の一部に設置する部分設置型ガイド波センサを開発中である。近距離において、配管の周方向の減肉位置を特定できる可能性がある。

参考文献

- [1] P. J. Mudge, "Field application of the Teletest long-range ultrasonic testing technique", Insight, Vol.43, No.2, 2001, pp.74-77