

ガイド波多重反射エネルギー閉じ込め法による高感度欠陥検出法

Highly sensitive defect detection using Multireflecting Guided wave Energy Trapping (MGET) method.

徳島大学大学院先端技術科学教育部 小倉 圭二 Keiji OGURA Non-member
徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 西野 秀郎 Hideo NISHINO Member

The authors have previously been reported a novel method of an efficient transduction method for guided waves using the wave reflector just located near the sensor. The sensitivity of the method with the reflector has been 2.0-2.5 times larger than that without the reflector. This paper describes a much more efficient method for defect detection using guided waves with two reflectors. The novel method called Multireflecting Guided wave Energy Trapping (MGET) method is evolved from the above-described efficient method. When the guided waves are trapped between the two reflectors, n combinations of propagation paths having same path length are principally existed at the n times multireflections. Therefore the amplitudes of the defect signals are overlapped each other and are enhanced. Details of the principle and experimental verifications are shown. The sensitivity of the MGET method was evaluated about 10 times larger than that of the conventional guided wave method.

Keywords: Ultrasonic testing, Guided wave, Pipe inspection, Defect detection

1. 緒言

近年、配管の長手方向に長距離伝搬するガイド波[1][2]を用いた配管の検査技術が注目を集めている。しかし、配管の状態によっては欠陥検出が困難であり、現状の励起検出効率では不十分であることからガイド波の励起検出効率の向上が課題となっている。

筆者らは、ガイド波用センサーの近傍に反射体を設置することで励起・検出効率を向上させる方法[3]の研究を実施している。これまでに、反射体を適切な位置に設置することにより、欠陥反射の振幅値を概ね2倍強向上させることに成功している[4]。

本報告では、更に欠陥検出感度を向上させる手法として多重反射エネルギー閉じ込め(Multireflecting Guided wave Energy Trapping ; MGET)法を提案する。これは検査部位を限定する一方で、大きく欠陥検出感度を向上させる手法である。ここではMGET法の原理確認と理想的な条件下での欠陥漸増実験を行った結果、前記の反射体を用いた方法に比べ最大で5.6倍、従来法に比べて14倍程度の感度向上が得られたので報告する。また本手法は磁歪センサー、圧電センサーの2種類のセンサーを用いて検証を行った結果、いずれも概ね同様の結果が得られたが、本報告では、磁歪センサーで得られた結果を用いて説明をする。

連絡先:西野秀郎、〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1、徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部、電話:088-656-7357、e-mail:nishino@me.tokushima-u.ac.jp

2. 原理及び実験方法

2.1 MGET法の原理

MGET法は配管の任意の2ヶ所に反射体を設置し、その中にガイド波を励起・伝搬させる。それにより2カ所の反射体で挟まれた領域で、ガイド波の多重反射が発生する。領域内に欠陥が存在すると、多重反射に伴い以下に示す原理で、欠陥信号の振幅が増幅され検出される。以下詳細に示す。

Fig. 1に原理図を、また得られる波形をFig. 2に示す。Fig. 1とFig. 2に示す①～⑥の伝搬経路と波形は、送信センサーで励起されたガイド波が受信センサーで検出されるまでの主要な伝搬波を伝搬時間の短い順に番号を記載したものである。

MGET法において重要なのは、③と⑥の伝搬経路である。③は、減肉欠陥→左側反射体→右側反射体で検出されたガイド波と、右側反射体→左側反射体→減肉欠陥で検出されたガイド波である。これら2つの経路は、伝搬経路が異なるだけで、伝搬時間と距離が全く同じ信号となる。ここで反射体の反射率が100%で、ガイド波の伝搬減衰が無いとすれば、減肉欠陥での反射強度が2倍になって検出されることを意味する。⑥についても同様に、伝搬経路が異なるが、伝搬時間が同じ信号が3通り考えられ、減肉欠陥での反射強度が3倍になって検出される。さらに反射体の中で多重反射を繰り返せば、4倍、5倍と多重反射の回数に比例し

て減肉欠陥での反射強度が大きくなる。

以上が、反射率を 100 %とした理想的な場合の MGET 法の原理である。ここに反射体での反射回数を n 、反射率を R 、減肉欠陥での反射率と透過率を r 、 t とし、伝搬減衰は比較的小さいのでこれを無視すると、減肉欠陥での反射波強度 I は、以下の式で表せる。

$$I = \left(\frac{n}{2} + 1\right)r(tR)^n \quad (1)$$

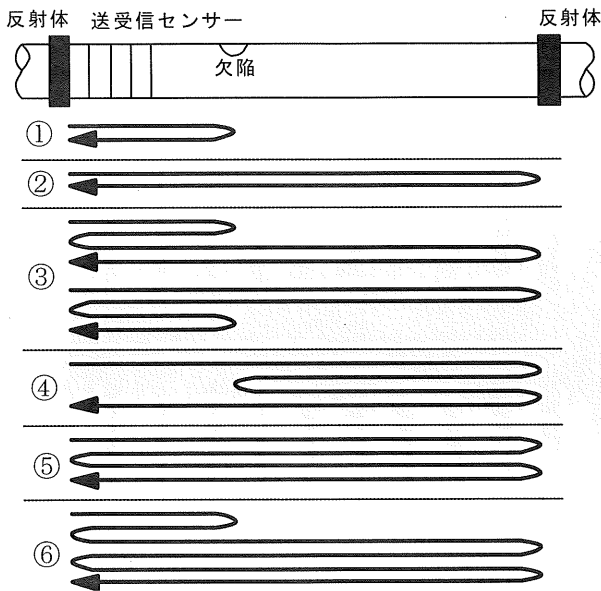


Fig. 1 Propagation paths of reflection at the reflectors and a defect.

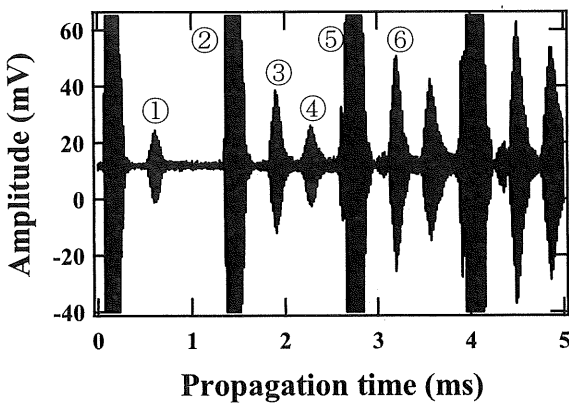


Fig. 2 Time-domain signal

2.2 検証実験方法

Fig. 3 に実験の配置図を示す。今回は原理確認を行うため、より理想的な状態として、反射率がほぼ 100 %である管端に送受信センサーを設置し、実験を行った。実験には外径 60 mm、肉厚 2 mm、長さ 2 m のアルミニウムパイプを用いた。なお、アルミニウム T(0,1)の音速は実測値で 3120 m/s であり、送信するガイド波は 6 波の sin 波の前後 2 波に窓関数(ガウス窓の立ち上がり部と立ち下がり部)を掛けたものを使用し、周波数は 50 kHz(波長 $\lambda=62$ mm)とした。また、人工欠陥はセンサー側の管端から 710 mm の位置にパイプに減肉深さ 0.05 mm ずつ円筒状に漸増させ計測した。

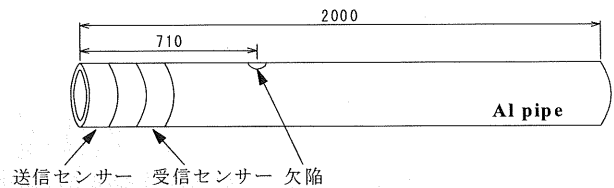


Fig. 3 Schematic illustration of the Al pipe, sensors and a defect.

3. 実験結果

Fig. 4 と Fig. 5 に欠陥深さ 1.50 mm(断面欠損率 5.17 %)の受信波形とその拡大図を示す。Fig. 4 において、伝搬時間の増加と共に両方の管端での多重反射信号が減衰することが確認できる。一方で、Fig. 5 よりその間の欠陥の信号が伝搬時間とともに増大している様子が確認できる。Fig. 5 中の①～③に示した各波束の振幅値は、Peak-to-peak で 25.4 mV, 50.5 mV, 76.3 mV であり、往復回数の増大と共に 2 倍、3 倍と増幅していることが分かる。そして、10 ms 付近で最大振幅値を取り、それ以降は減衰することが確認できる。今回は理想的な状態として、反射率が 100 %に近い管端反射を利用し、検証実験を行ったため、このような高感度の欠陥検出が可能となった。しかし、現状で反射体の反射率は 70 %程度であり、多重反射による検出波の減衰が大きくなることは容易に想像できる。従って、出来るだけ 100 %に近い反射体を実現することは、今後の最も重要な開発課題の一つである。

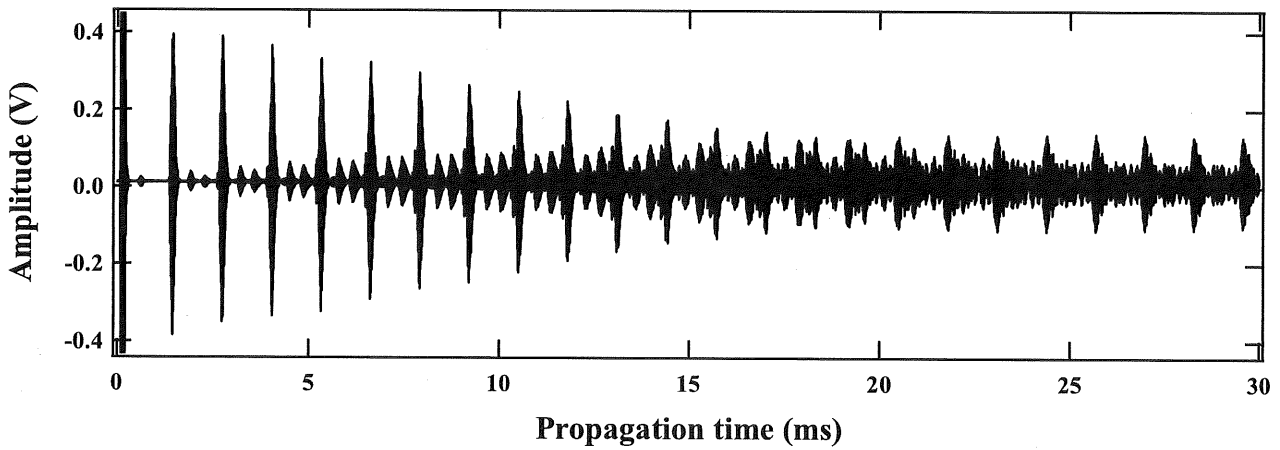


Fig. 4 Time-domain signal with a defect

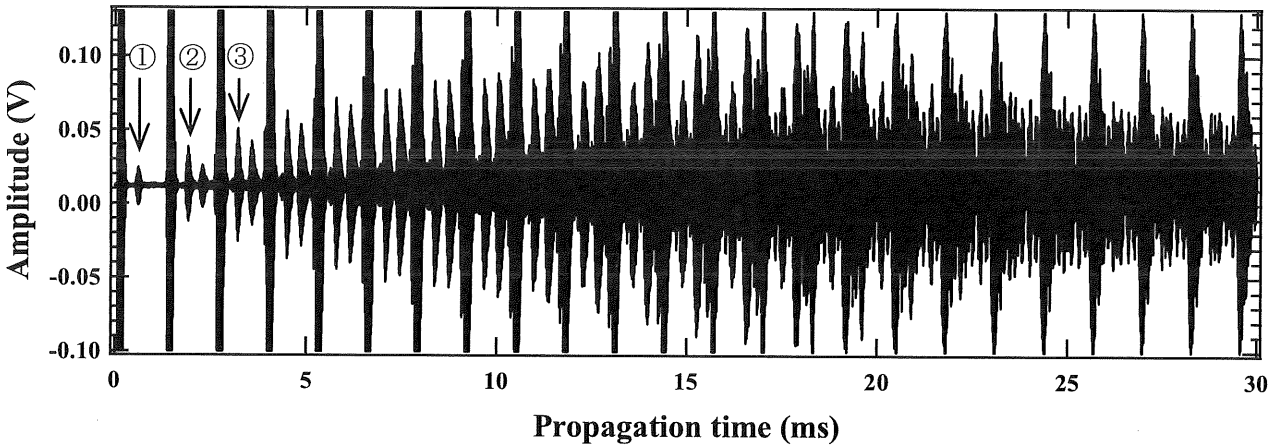


Fig. 5 Time-domain signal with a defect

Fig. 6 に断面欠損率を変化させたときの欠陥反射の振幅値を示す。図中の○、△、□はそれぞれ反射体での反射回数 0 回(Fig. 5 の①の波束の振幅)、4 回、8 回の際の振幅値を示す。これらの欠陥反射の振幅値は反射体での反射回数 0 回の反射波を受信したものに比べ、それぞれ概ね 3 倍、5 倍の向上が得られた。欠陥検出限界は、多重反射回数が増えると小さくなる傾向が確認できる。これは通常の見査に比べ早期段階での欠陥の発見が見込めることを示唆している。

Fig. 7 に欠陥深さ 1.50 mm 時の反射体での反射回数に対する欠陥反射の振幅値を示す。この振幅値は反射

体での反射回数 0 回での欠陥反射の振幅値を 1 とし正規化している。■で示したものが実験値である。図中の実線は式(1)より求めた理論値であり、実験結果より求めた $r=0.032$, $t=0.985$, $R=0.985$ を用いた。この結果、反射体での反射回数 0 回での反射波を受信したものに比べ、最大で 5.6 倍の感度向上を見込めることを示した。また、実験値と理論値は概ね一致しているが、反射体での反射回数 15 回目以降では実験値と理論値に差異が見られた。これは、センサー一部での反射、透過による干渉の影響を考慮していないため、理論値に比べ、振幅が小さくなっていると考えられる。

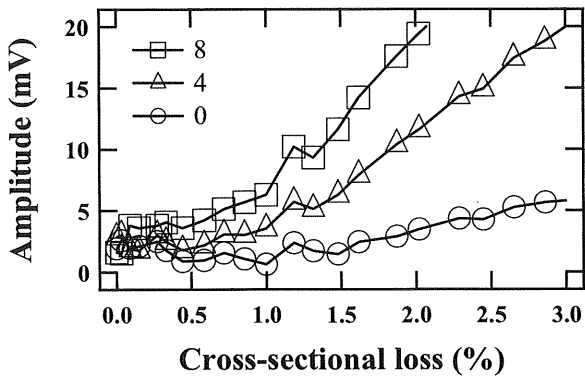


Fig. 6 Signal amplitude due to the defect as a function of the cross-sectional loss. The circles, triangles and squares indicate the results that the number of reflection at reflector is zero, four and eight, respectively.

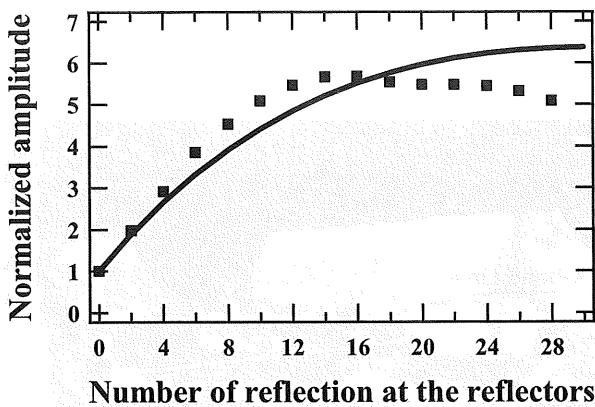


Fig. 7 Normalized amplitude due to the defect as a function of the number of reflection at the reflectors. Line and dots indicate theory and experiments, respectively.

4. 結言

本報告以前までに、反射体を設置することにより、欠陥反射を直接受信した際に振幅値を概ね2倍強向上させることに成功している。今回、より欠陥検出感度を向上させる手法として、多重反射エネルギー閉じ込め法(MGET法)を提案し、その原理確認と欠陥検出実験を行った結果、反射体を用いた方法に比べ最大で5.6倍、従来法に比べて14倍程度の感度向上が見込めることを示せた。本方法は、通常のガイド波法に比べて、検査範囲を制限するが、検出感度を1桁以上上昇させることが可能である。微小欠陥の早期発見が可能になると期待している。

謝辞

本研究は、経済産業省原子力・安全保安院の平成20年度高経年化対策強化基盤整備事業の一部として実施された。

参考文献

- [1] 非破壊検査誌 特集ガイド波による探傷, 52, 12, (2003)
- [2] 非破壊検査誌 特集ガイド波による探傷 II, 54, 11,(2005)
- [3] 近藤,吉田,西野, JSNDI 第14回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集,p115
- [4] 小倉,近藤,吉田,西野, JJSME 2008年次大会講演論文集(1)p337