

配管壁貫通部の腐食診断技術

Corrosion Inspection Technique for Piping Covered with Wall

大谷 靖弘 OOTANI Yasuhiro JFE エンジニアリング 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員

要旨

配管壁貫通部は遮蔽されているため、容易に健全性を確認することができない。そこで、壁貫通部手前から超音波を送受信することにより、貫通部の腐食状況を診断する技術の開発を目指した。壁貫通部の計測では計測距離が長くなるため、本技術では通常の超音波探傷法に比して長距離計測が可能なガイド波を用いた検査方法を採用した。しかし、パイプ全体を振動させる既存のガイド波を用いた検査方法は検出能力が低いため、本技術では周方向において部分的にガイド波を発振し、順次周方向に走査する方法を開発したことで高い検査性能を実現した。

Abstract:

A corrosion inspection technique for buried parts of piping such as penetration parts through a concrete wall was developed. The technique transmits and receives ultrasonic wave from accessible position such as in front of piping covered with a wall. Because a part covered with a wall has a long measurement distance, it is difficult to apply a conventional ultrasonic testing method. This technique adopted a guided wave having long-distance propagation characteristics. However, detection ability is poor in case of the existing guided wave inspection. The proposed technique improved inspection performance by generating a guided wave partially and scanning sequentially in the circumferential direction of the pipe.

1. はじめに

既設配管の維持管理において、壁貫通部のように他の構造物によって遮蔽されている箇所は、容易に健全性を確認する手段がなく、課題となっている。本技術はこのような箇所をアクセス可能な位置から計測を行い、腐食状態を診断することを目的に開発したものである。

図1に本技術が適用対象として想定した橋梁添架配管の

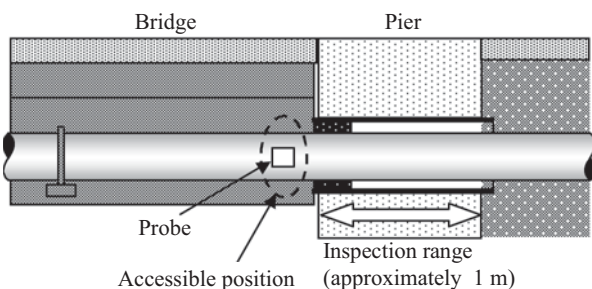


図1 適用対象例

Fig.1 Example applying corrosion inspection technique

橋台貫通部を示す。貫通部手前のアクセス可能な位置に機器を設置し、およそ1m遠方までの範囲の腐食状態を計測することが必要となる。

2. 計測方法の開発

前記の適用形態を考慮すると、遮蔽された1m遠方の状態を片側から調べることが求められる。また、稼働状態での適用を想定しているため、管内からの計測も選択肢から外れる。以上のことから、1m遠方まで伝播する可能性を有し、一方向からの計測が可能な超音波探傷法を選択した。

2.1 超音波の種類

固体中における超音波の種類を表1に示す。通常の超音波探傷で用いられる超音波は媒質の形状を考慮しない縦波、横波である。さらに横波はその変位方向に応じてSV波、SH波に分類される。これら横波の種類を図2に示す。

一方、表1の2段目以降に示した波は、総じてガイド波と呼ばれ、物理的な境界面の作用により、その境界に沿って伝搬する波動のことである。ガイド波は伝搬モードが無数に存在し、各々が速度分散するため、取り扱いが難しいものの、エネルギーの散逸が少なく遠方まで伝搬可能なこ

表 1 超音波の種類
Table 1 Varieties of ultrasonic

	Longitudinal wave	Shear wave	
		SV wave	SH wave
Plate	Lamb wave	SH guided wave	
Pipe	Longitudinal mode Flexural mode	Torsional mode	

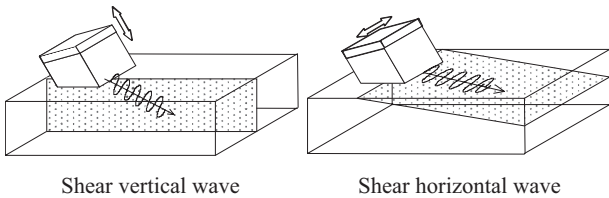


図 2 横波の種類
Fig.2 Shear wave modes

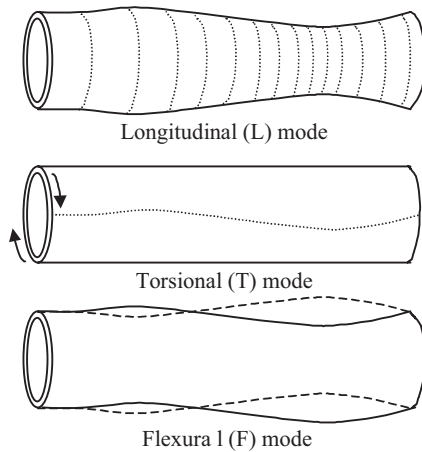


図 3 パイプを伝搬するガイド波の種類
Fig.3 Guided wave modes propagated in pipe

とから、配管などの高効率な評価手法として期待されている¹⁾。パイプを伝搬するガイド波は図3に示すように、管軸に対して対称に変位する Longitudinal モード (Lモード)、円周方向にねじれて変位する Torsional モード (Tモード)、非対称に変位する Flexural モード (Fモード) の3種類に大別できる。さらに、板厚、円周方向にパラメータを設定した高次モードに分類される。これらのモードは周波数に応じて伝搬速度が変化する分散性を示し、同一周波数で複数のモードが同時に存在する²⁾。このため、受信した信号は複雑であり、その解釈には理論に基づいた解析や計測に使用するモードの選択が必要となる。

2.2 計測方法の検討

通常の超音波では、1 m の距離を計測することは困難であり、仮に計測できたとしても、鋼材内部で多数の反射を繰り返す必要があるため、得られる受信信号は複雑になる。そこで、本技術では、長距離計測が可能なガイド波を計測

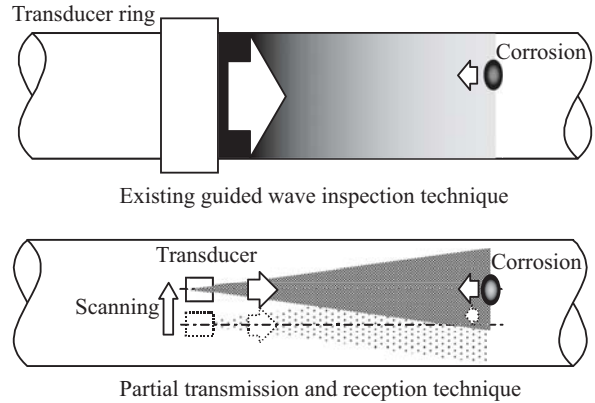


図 4 部分送受信法
Fig.4 Partial transmission and reception technique

に用いることとした。

ガイド波を用いた腐食検査システムは長距離計測が可能な一次診断技術として国内外で数種類開発され、運用されている。これら既存のシステムは、小さな腐食に対する検出性能、腐食程度の評価能力が低い。要因の一つとして、パイプを媒質としたガイド波では、腐食を周方向断面積の変化として捉えることが考えられる。深い腐食でも断面積が小さいと検出が難しくなり、同一断面に複数の腐食がある場合は合算した断面積変化の評価となって、分離して評価することはできない。また、ガイド波の発生要件や距離伝搬性を確保するために試験周波数が低いことも要因として考えられる。

前述の課題、要因の中で、周方向断面積変化で検出、評価を行うこと、すなわち、腐食の周方向情報が得られず、合算した値で診断している点に着目した。既存のガイド波腐食検査システムは、パイプ全周に多数の探触子を配置、同期して超音波を発生することにより、周方向において均一なガイド波を送受信するが、周方向情報を得ることができない。

そこで、本技術では、ガイド波を周方向において部分的に送受信し、周方向計測位置を走査することによって、腐食の周方向情報を得る方法を立案した。図4に示すように、従来型のシステムではパイプ全体にガイド波を伝搬させるのに対し、本案は部分的にガイド波を発生させ、順次周方向走査する。計測位置に応じた検出信号の推移を監視することにより、腐食の周方向情報を得ることができる。また、腐食が周方向に複数存在しても分離して評価することができる。

2.3 計測に用いるガイド波の検討

ここでは、計測に用いるガイド波の種類について述べる。パイプを伝搬するガイド波は、図3に示すように、3種類に分類される。このうちTモードは複数ある伝搬モードの種類や特性が比較的シンプルであること、周波数による速

度分散が小さいこと、管体表面での面外変位が小さいため外面の影響を受けにくいことなどの点において優位である。

ガイド波のモードはさらに分類でき、モードパラメータ n, m を用いて T モードの場合は $T(n, m)$ と標記される。 n は円周方向のモードを示し、 m は板厚方向のモードを示す。本技術では局部的に発振することを目的とするので、 n は無視し、板厚方向の m に着目する。図 5 に示すように $m=1$ では一様な変位となるが、2 以上では複雑になっていくことが分かる。たとえば、 $m=2$ の場合、板厚の中央に変位の節がある。したがって、この部分に存在する反射源に対して感受性が低下することが予想される。よって、計測には $m=1$ 、すなわち $T(0, 1)$ モードが適している。なお、これらは SH ガイド波のモード (SH_0, SH_1, \dots) に相当する。

また、ガイド波は周波数によって速度が変化する分散性を有している。図 6 に 400A、板厚 7.9 mm における群速度分散曲線を示す。群速度は波束が管軸方向に伝搬する速度であり、検出位置の算出に用いる。図から分かるように、 $T(0, 1)$ モードは周波数によって群速度が変化しておらず、条件設定や受信データの分析が容易になる。

一方、図 6 の速度分散曲線から分かるように、選択する周波数によっては同時に複数のモードが発生する。これらのモードは群速度が異なるため、受信波形上では同一の反射源からの信号でも検出位置が異なる複数の信号が現れることになり、診断が難しくなる。そこで、計測で使用する $T(0, 1)$ モード以外のモードが発生しない周波数を選択することとした。速度分散曲線は、管径、板厚、材料音速に

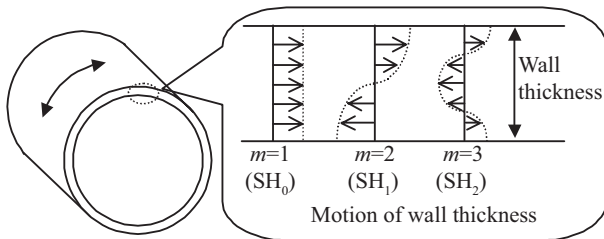


図 5 Tモードの変位分布
Fig.5 Motion of torsional mode

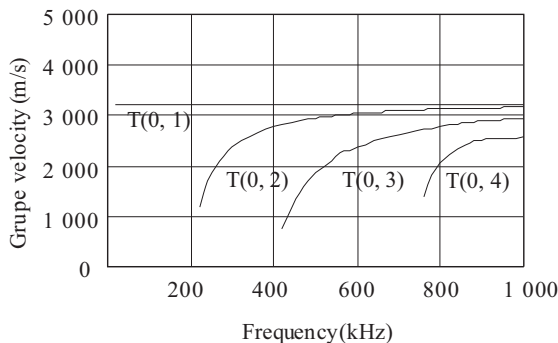


図 6 Tモード群速度分散曲線
Fig.6 Dispersion curve of T mode

よって、変化するため、適用対象別に速度分散曲線を考慮して、計測に使用する周波数を設定する必要がある。

2.4 計測方法の立案

前述までの検討の結果、採用した計測方法を以下に記す。

- (1) 計測に用いる超音波は、ガイド波 $T(0, 1)$ モードとする。
- (2) 管周方向において部分的にガイド波を送受信し、順次走査する。
- (3) 試験周波数は、分散曲線より $T(0, 1)$ モードのみが発生する値を選択する。

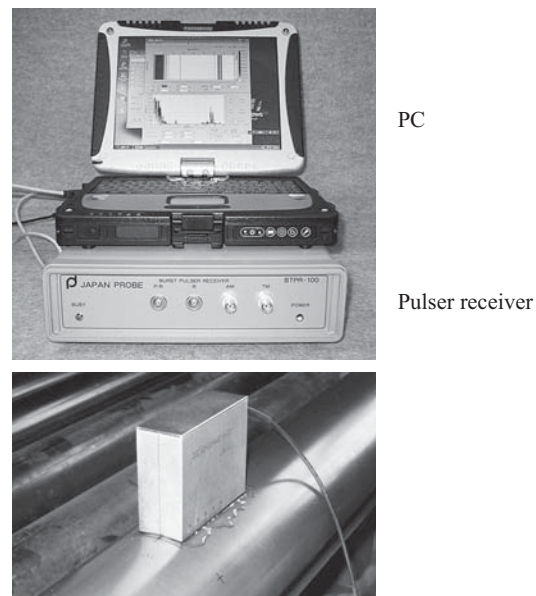
3. 装置開発

本技術では部分的にガイド波を発生させるため、一般的な超音波探傷器や従来のガイド波腐食検査システムと異なる装置を開発する必要があった。ここでは開発した装置について述べる。

従来のガイド波腐食検査システムは基本的にパイプ全周に探触子などを配置し、送受信する方式を用いているが、本技術では周方向において部分的にガイド波を送受信する必要がある。そこで、パイプを局部的に板とみなし、板材に SH ガイド波を送受信する要領で装置を構築した。写真 1 に開発した装置の外観を示す。

3.1 探触子

$T(0, 1)$ モードに相当する板材のガイド波は SH ガイド波の 0 次モード (SH_0) となる。この送受信に適した斜角探触子を設計した。また、周波数は板厚が数波長分以内にな



Transducer
写真 1 開発装置外観
Photo 1 Development devices

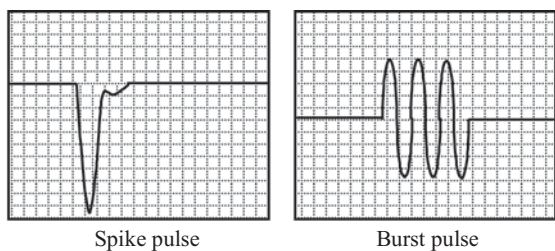


図7 送信波形
Fig. 7 Transmission waveform

るように設定する。高く設定した場合、エネルギーが表面近傍に集中し、ガイド波の態様をとらなくなってしまう。併せて、前述したように T(0, 1) モード以外のモードの発生を抑制できる周波数の値を選ぶこととした。

3.2 超音波送受信装置

ガイド波には前述のように速度分散性がある。このため、発振する超音波の周波数を狭帯域で制御する必要があることから、バーストパルスを採用した。図7に超音波送受信装置の送信波形を示す。一般的な超音波探傷器はスパイクパルスもしくはスクウェアパルスが用いられており、発振される超音波の周波数は振動子の固有周波数で決まる。一方、バーストパルスは、任意の周波数を設定したパルス電圧を振動子に負荷する方法で、振動子の固有周波数にパルス電圧の周波数を合わせることで高エネルギー発振と試験周波数の制御が可能となる。

また、本技術は評価を行う段階で複数データの処理などをPCで行う必要があるため、受信した波形情報をデジタル化し、PCで操作、記録できるシステムとした。

4. 腐食評価

4.1 感度較正

本技術の腐食評価では、腐食からの反射信号値を用いる。評価の信頼性を確保するには、腐食以外の要因による信号値変化を取り除く必要がある。ここでは、探触子の接地状態による信号値変化を補正する方法について述べる。

本技術は剪断方向 (SH 方向) の振動を鋼面へ伝えるため、接触媒質の粘性や探触子接触面の状態によって鋼材へのエネルギー伝達効率が変化、すなわち、信号値が変化する。特に接触媒質の粘性は気温によって変化し、信号値に影響を与えることから、評価時には大きな誤差要因となる。較正方法としては、計測用の探触子の手前に受信用の探触子を配し、得られた信号値を基準値として、計測データの補正を行う。これにより事前に試験体で決めた評価基準や他の計測位置のデータとの誤差の低減を図る。

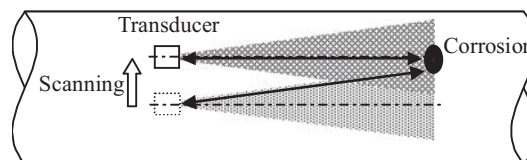


図8 円周方向位置と超音波の伝搬経路
Fig. 8 Circumference direction position and route of ultrasonic

4.2 腐食位置の検出

管軸方向の検出位置は超音波が往復する時間から算出でき、円周方向は探触子の計測位置から推定する。

図8に円周方向計測位置と超音波の伝搬経路を示す。超音波は伝搬距離が長くなるにつれて周方向に拡がっていくため、腐食を正面に捉えていなくても、信号は検出される。この場合、探触子位置が腐食から外れるほど、超音波の経路が長くなり、検出位置が遠くなる傾向が現れる。したがって、腐食の円周方向位置の推定では、計測位置が異なる複数のデータを比較しながら評価する必要がある。

4.3 腐食深さの推定

腐食深さは腐食から反射する信号の強さで評価する。腐食を想定した人工きずを用いて管径別に評価基準データを作成、この値を基に腐食深さを推定するしきい値を定めた。

人工きずの形状を図9に示す。基準データに用いた人工きずの形状は、あばた状に発生する実際の腐食を想定し、φ5 mm のすり鉢状とし、これを複数並べて配置した。この人工きずの深さを板厚の1/3、2/3とした2種類を用意し、計測位置を変化させてデータを収録、距離に応じた信号値の推移を記録した。

腐食からの反射信号値は深さに限らず、その形状によっても変化する。本技術は局部的にガイド波を発生させることによって、腐食深さが反射信号変化の主要因となることを目的としたものである。実際の腐食形状は不定形であり、超音波としては長い距離を伝搬させる本技術では、腐食の詳細な形状を検知することも困難である。そこで腐食に近い形状を評価基準に用いることとした。

なお、ガイド波の挙動は管径、板厚によって異なるため、

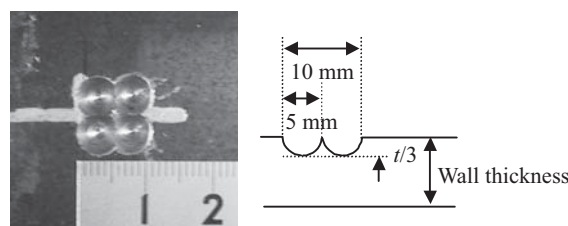


図9 人工きず
Fig. 9 Artificial flaw

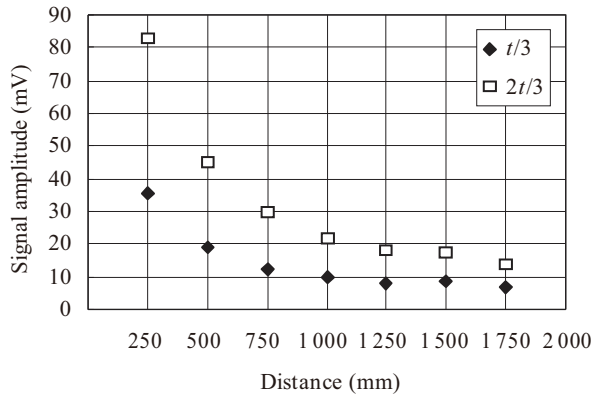


図 10 距離と信号値の関係

Fig. 10 Relationship between distance and signal amplitude

各管径別に評価基準を作成した。図 10 に配管用炭素鋼管 (SGP300A) を用いて記録した距離と人工きずからの反射信号値の推移を示す。

4.4 評価ソフト

検出位置の推移を一元的に確認するための画像化機能、波形および評価基準表示機能などを有したソフトウェアを開発した。表示画面を図 11 に示す。

画像は縦軸に周方向計測位置、横軸に管軸方向位置、信号値をコントラストで表示したものである。図に示したデータはφ5mmを4個並べた人工きず(10×10mm、深さ2t/3)を計測したものである。前述したように腐食と正対する位置で最も近い距離で検出し、周方向位置が外れるにつれて遠方で検出する傾向が確認できる。

評価基準は図 11 に示すように、しきい値を計測波形上に表示する。検出した信号がこのしきい値に対してどの高さに相当するかによって、腐食深さを推定する。

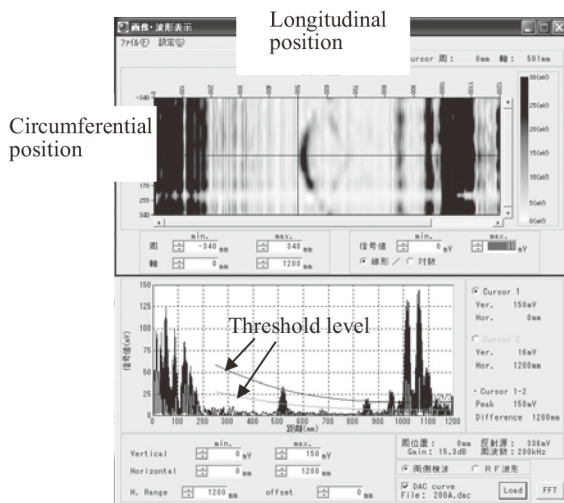


図 11 評価ソフト表示例

Fig. 11 Example of evaluation software

5. 試験体による実験

本実験では、超音波の伝搬方向である管軸方向において、複数の腐食が存在する場合を想定した。実験で用いた試験体を図 12 に示す。配管用炭素鋼管(SGP200A、板厚 5.8 mm) に人工きずを同一軸線上に 2ヶ所施した。なお、人工きずは評価基準の作成に用いたものと同様にすり鉢状とし、各々の深さを板厚の 1/3、2/3 とした。

人工きずに正対する位置で計測した波形を図 13、試験体を一周計測して画像化した結果を図 14 に示す。超音波の伝搬経路上に人工きず 1 が存在するにもかかわらず、人工きず 2 を検出することができた。加えて、各々の人工きず

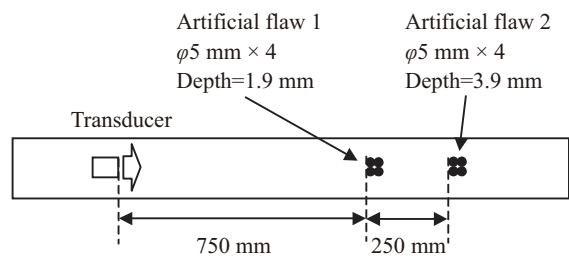


図 12 試験体

Fig. 12 Test piece

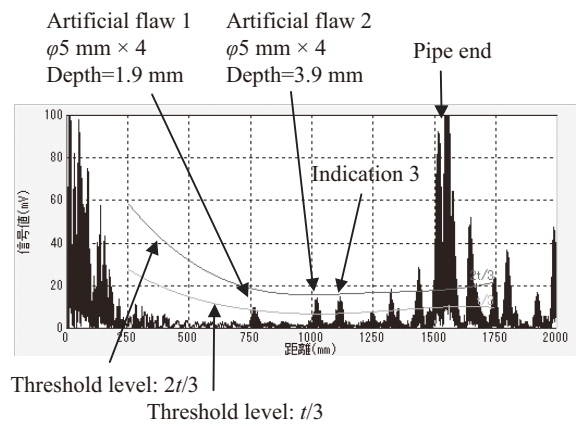


図 13 人工きず正面での波形

Fig. 13 Waveform at the front position of artificial flaw

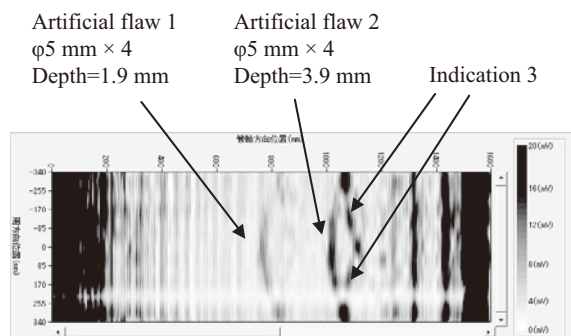


図 14 画像処理結果

Fig. 14 Image processing result

から得られた反射信号値も図 13 中に示すしきい値に対して妥当な値が得られた。このことから、手前に他の腐食が存在しても遠方側の腐食を検出できることが分かった。ただし、手前の腐食が大きい場合は、次第に影響を受けるようになると考えられる。

また、図 14 で得られた人工きずの画像が円弧状に現れるのは、前述したように超音波の拡がりによって、人工きず正面以外の位置でも反射信号が検出され、正面から外れるほど超音波の伝搬経路が長くなるためである。さらに、図 14 中に示す信号 3 は、人工きずまでの直進経路ではなく、超音波の拡がりによって斜めに伝搬した超音波がパイプを一周して、人工きずに到達することによって生じた信号である。この現象は管径が小さく、反射源までの距離が長いほど生じ易くなる。実用時には、この傾向を踏まえて評価を行う必要がある。

6. おわりに

壁貫通部を対象とした本技術は目標とした計測距離 (1 m)、検出性、腐食評価 (三段階評価) に関する性能を基本的に達成したと考える。本技術の特徴を以下に記す。

- (1) 配管壁貫通部の計測距離を確保するために、長距離計測が可能なガイド波を採用した。
- (2) ガイド波を周方向において部分的に送受信し、探触子を周方向走査することで高い検査性能を実現した。
- (3) 計測にはガイド波 T(0, 1) モードを使用し、このモード

を選択的に発生できる周波数を設定した。

- (4) 腐食からの反射信号値による評価方法を構築し、システム化した。

現在ガス導管を中心に現地適用を進めている。適用条件を以下に記す。

- (1) 適用管径：100A, 150A, 200A, 300A, 400A
- (2) 計測距離：1 m
- (3) 検出能力：板厚の 1/3 以上の減肉
- (4) 探触子設置箇所の防食被覆などを除去すること

溶接部との識別、防食被覆の影響など現地適用により実用上の課題が確認されている。現地の計測条件や腐食の形状は多種多様であり、信頼性を確保するには、データの蓄積が不可欠である。

参考文献

- 1) 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．2003, vol. 52, no. 12.
- 2) 林高広．配管検査のためのガイド波理論と将来技術．非破壊検査．2005, vol. 54, no. 11.



大谷 靖弘