

超音波探傷を利用した配管の外面腐食検査

高橋芳朗*・岡林裕司**・下郡貴久**

*材料開発部・**新日本非破壊検査株式会社

Inspection for Surfaces Corrosion Piping by Ultra Sonic Testing

Yoshiroh TAKAHASHI*, Yuji OKABAYASHI** and Takahisa SHIMOGORI**

*Material Development Division and **Shin Nippon Non Destructive Inspection Co.,Ltd.

要旨

化学工場などのプラント内に設置されているSGP配管50Aで問題になっている外面腐食の検査方法として、可変角探触子を使用した反射法、板波探触子を使用した透過法および斜角探触子を使用した透過法の適用について模擬欠陥を用いた検討を行った。その結果、可変角探触子を使用した反射法による検査では、超音波の最適入射角度を 39° 、腐食部と探触子間との距離を125mm以下かつ腐食深さを2.0mm以上とした条件で、腐食部からの反射エコーを十分に検知することができた。板波探触子を使用した透過法による検査では、探触子間の距離が100mmの時にのみ超音波の減衰を確認することができた。斜角探触子を使用した透過法による検査では、探触子の角度 45° および 60° 、探触子間の距離100mm、探触子の周波数5MHzの時に超音波の減衰が明確であることが分かった。また、腐食深さと超音波の減衰量との関係にある一定の関係があることから、SGP配管50Aの外面腐食検査方法として、斜角探触子を使用した透過法による検査が最も適していることが分かった。

1. 緒言

化学工場などのプラント内に設置されているSGP配管50A（板厚 $t=3.8\text{mm}$ ）は、その多くが架台上に設置されており、配管と架台との接触部に雨水などが浸入することで発生する外面腐食が問題となっている。腐食部の非破壊検査方法として、垂直探触子を使用した残肉厚測定やディプスゲージを使用した腐食深さ測定などがある。しかし、配管と架台との接触部では、垂直探触子やディプスゲージを直接当てることができず、配管をクレーンで吊り上げて腐食部のスケールを除去してから検査を行わなければならない。また、限られた時間内で全て検査し、危険な箇所が発見された場合は配管の取替えも行わなければならない。よって、検査を請負う側に相当の労働負担がかかることと、検査を依頼する側にも相当の費用負担がかかることとなる。そこで、工期短縮、労働力削減、検査費用節約などを目的として、配管を吊り上げずに検査を行うことのできる新しい方法の確立が求められている。

超音波を用いた検査方法の中で垂直探触子を使用した残肉厚測定以外に考えられる方法として、薄板中に伝搬する板波を利用した反射法がある。反射法とは、試験体内部に超音波パルスを送信し、試験体内部または

底面からの反射エコーを検知することで欠陥部（腐食部など）の位置や大きさなどを調べる方法である。板波は薄板の両表面を対称および斜対称に振動させながら伝搬する波¹⁾であるため、欠陥部（腐食部など）からの反射エコーを得ることができる。この反射エコーから欠陥部（腐食部など）の位置や大きさなどを推定することができる。また別の方法として、透過法により超音波の減衰量から探傷する方法がある。透過法とは、探触子を超音波パルスの送信部と受信部との2つに分け、欠陥部（腐食部など）が中心となるように配置し、超音波の減衰量から残肉厚を推定するものである。

本研究では、外面腐食を想定して模擬欠陥を施したSGP配管50Aを用いて、上述した可変角探触子を使用した反射法、板波探触子を使用した透過法および斜角探触子を使用した透過法の外面腐食検査への適用について、探触子屈折角、周波数、探触子間距離などの条件から検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置

本研究では、以下の探傷器、探触子および接触媒質を用いて試験を行った。

探傷器：クラウトクレーマー(株)製探傷器USD-15型
 探触子：(株)技研製作所製可変角探触子
 (2Z10x20VA型)
 新日本非破壊検査(株)製板波探触子
 (P204型)
 クラウトクレーマー(株)製斜角探触子
 (2Z8x9A45型, 5Z10x10A45型)
 三菱電機(株)製斜角探触子
 (2Z10x10A45型, 5Z10x10A45型,
 2Z10x10A60型, 5Z10x10A60型)
 接触媒質：グリセリン

2.2 実験試料の作製

Fig.1に模擬欠陥を施した試験体の形状を示す。本研究で使用する試験体は、実際に現場で外面腐食が問題となっているSGP配管50A(板厚 $t=3.8\text{mm}$)とする。それぞれの試験体には深さ0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5mmの腐食による減肉を想定した模擬欠陥を機械加工により施しており、腐食と貫通した孔食を区別するために $\phi 1.0, 5.0\text{mm}$ の穴を別途機械加工により施している。ただし、試験体の長さは800mmとする。

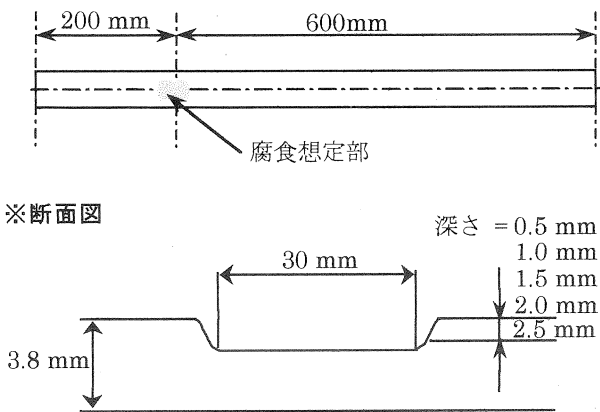


Fig.1 試験体形状

2.3 実験方法

2.3.1 可変角探触子を使用した反射法による検査

超音波の伝搬様式の1つである板波は、縦波や横波がジグザグに反射され、相互に重畳されて生じる。また、板波の伝搬様式には板の両表面を対称に振動させながら伝搬する対称モード(sモード)と板の両表面を斜対称に振動させながら伝搬する斜対称モード(aモード)の2つがあり、縦波や横波のように各材料中に一定の音速を持っておらずモードにより音速が著しく異なることが知られている。よって、板波の音速は、(試験体の

板厚) \times (探触子の周波数)および超音波の入射角度に依存する²⁾。そこで、実探傷に板波を適用する場合は、試験体への超音波の入射角度および試験体の板厚、探触子の周波数などの条件を十分に検討する必要がある。よって、今回の実験では可変角探触子の周波数は2MHz、試験片の板厚は $t=3.8\text{mm}$ の固定値であるため、超音波の入射角度を変化させて最適値を測定した。

具体的には、試験体端部を反射源として、入射角度と反射エコー高さとの関係を調べた。(株)技研製作所製可変角探触子(2Z10x20VA型)を試験体端部から150~500mmの位置に順に配置し、探触子のくさび中における超音波の入射角度を $1^\circ \sim 64^\circ$ (最高値)まで 1° ピッチで変化させ、試験体端部からの反射エコーが明確に得られた時の入射角度を測定した。次に、上記によって求められた入射角度で $\phi 1.0, 5.0\text{mm}$ のドリル穴を探傷し、最も傷の識別性が良かった角度を最適入射角度とした。また、上記最適入射角度を用いて、腐食による減肉を想定した模擬欠陥と探触子間との距離を変えた超音波探傷試験を実施した。Fig.2に探触子配置図を示す。また、本実験では腐食部の中心を原点に配管の径方向をX軸、配管の軸方向をY軸として、Y軸のみを変化させて測定を行った。

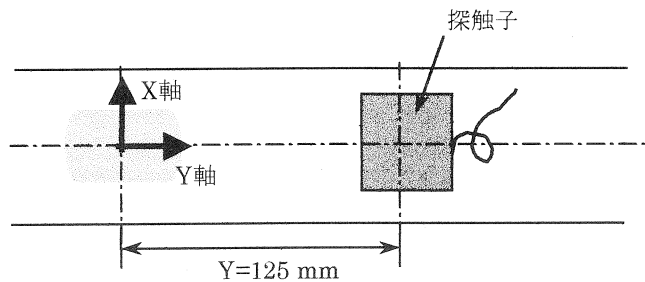


Fig.2 探触子配置図(反射法)

2.3.2 板波探触子を使用した透過法による検査

新日本非破壊検査(株)製板波探触子(P204型)を使用して、送信部と受信部との間隔を100mmおよび200mmと変化させた時の超音波の減衰量を測定した。ただし、超音波の減衰量は各配管から得られる無欠陥部の透過エコー高さおよび腐食部の透過エコー高さを測定し、その透過エコー高さの差より算出している。また、ドリル穴との比較により、腐食形態の識別が可能か確認を行った。

Fig.3に探触子配置図を示す。ただし、探触子は腐食部を中心として配管の軸方向に配置している。

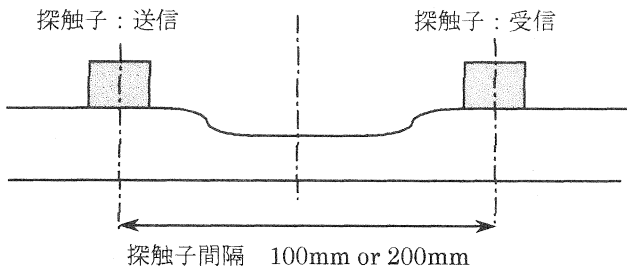


Fig.3 探触子配置図(透過法)

2.3.3 斜角探触子を使用した透過法による検査

超音波の減衰量から腐食部の形状、深さなどを推定するため、クラウトクレーマー(株)製斜角探触子(2Z8x9A45型, 5Z10x10A45型)および三菱電機(株)製斜角探触子(2Z10x10A45型, 5Z10x10A45型, 2Z10x10A60型, 5Z10x10A60型)を使用して、Table 1に示すように探触子の屈折角、周波数、探触子間距離の組み合わせを変えた最適条件の検討を行った。ただし、探触子はFig.3に示すように、腐食部を中心として配管の軸方向に配置している。

Table 1 探傷条件

屈折角(°)	周波数(MHz)	探触子間隔(mm)
45	2	100
		200
	5	100
		200
60	2	100
		200
	5	100
		200

3. 実験結果及び考察

3.1 可変角探触子を使用した反射法による検査

可変角探触子を用いた超音波の最適入射角度を測定した結果、試験体端部からの明確な反射エコーは探触子のくさび中における超音波の入射角度が20°, 39°, 53°, 60°の時に得られることが分かった。また、これらの入射角度でφ1, 5mmのドリル穴を探傷した結果、入射角度が39°の時に最も高い反射エコーが得られた。よって、腐食による減肉を想定した模擬欠陥の検出における超音波の最適入射角度は39°であることが分か

った。

また、予備実験として、各入射角度における超音波(板波)の音速を求めた。Table 2にその結果を示す。音速の測定は探傷器の音速測定機能を利用し、試験体端部を反射源として探傷器の音速を調整し、試験体端部からの反射エコーが実際の位置に現れるように調節した。

Table 2 各入射角度での音速測定値

入射角度(°)	音速(m/s)
20	3886
39	2422
53	2741
60	2742

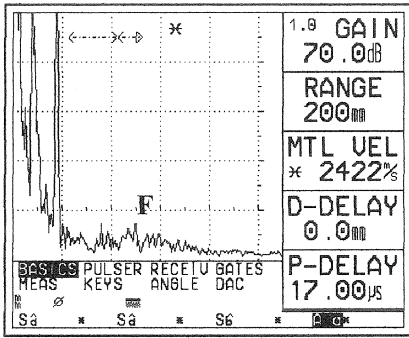
次に、超音波の最適入射角度を39°とし、腐食による減肉を想定した模擬欠陥を探傷した時の探傷波形をFig.4に示す。この結果より、腐食深さが2.0, 2.5mmの時、模擬欠陥から得られる反射エコーがFの位置に現れることが分かった。しかし、腐食深さが1.5mmになると模擬欠陥からの反射エコーは確認できず、腐食深さが0.5, 1.0mmの時にも同様の結果が得られた。よって、腐食深さが2.0mm以上あれば、模擬欠陥と探触子間との距離が125mm離れていても検出が可能であることが分かった。また、腐食深さ2.5mmの時の反射エコーが腐食深さ2.0mmの時の反射エコーに比べて低く現れているが、これは探傷する配管の裏面の状況や板厚の微妙な変化によるものと考えられる。

以上の結果から、板波を利用した可変角探触子によるSGP配管50Aの外表面腐食検査は、探傷条件に制限はあるものの、十分に適用の可能性があると分かった。よって、今後は現場での実証試験により、実験データとの相関性を求めることが必要となる。

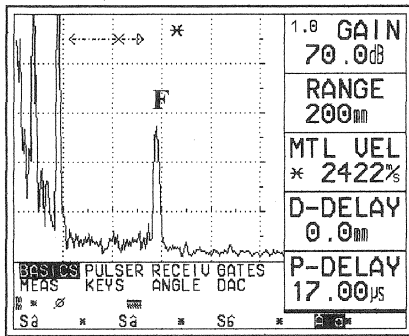
3.2 板波探触子を使用した透過法による検査

Fig. 5に探触子間距離100mm, 腐食深さ2.5mmの時の探傷波形を示す。(a)図は腐食部の探傷波形、(b)図は無欠陥部の探傷波形を示している。この結果より、腐食により超音波が減衰し、透過エコー高さが低くなっていることが分かった。また、波形右上に表示されている値が超音波の減衰量であり、(b)図の無欠陥部の透過エコー高さを基準に何dB低下したかを測定することができる。

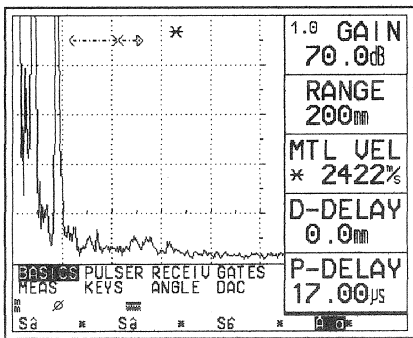
このような方法を用いて、探触子間距離を100mmおよび200mmと変化させた時の各腐食深さに対する超音



(a) 腐食深さ : 2.5mm Y=125 mm

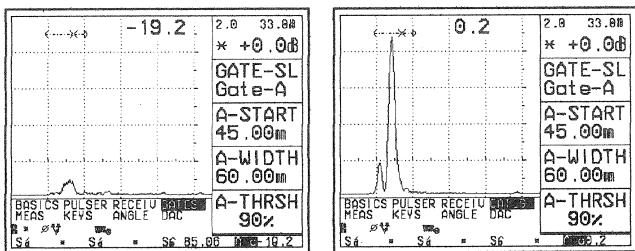


(b) 腐食深さ : 2.0mm Y= 125mm



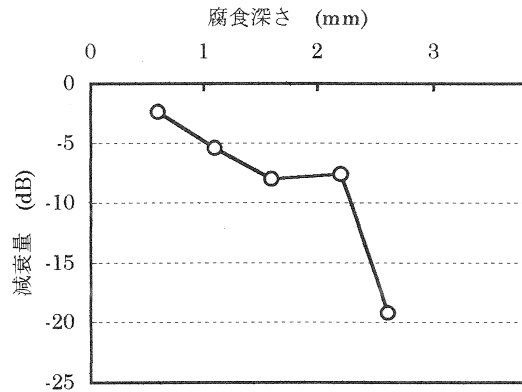
(c) 腐食深さ : 1.5mm Y= 125mm

Fig.4 模擬欠陥から得られる反射エコー

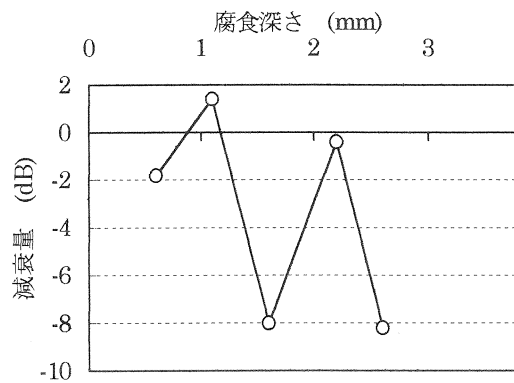


(a) 腐食部の透過エコー (b) 無欠陥部の透過エコー

Fig.5 板波探触子を使用した探傷波形例 (腐食深さ : 2.5mm, 探触子間距離 : 100mm)



(a) 探触子間距離 : 100mm



(b) 探触子間距離 : 200mm

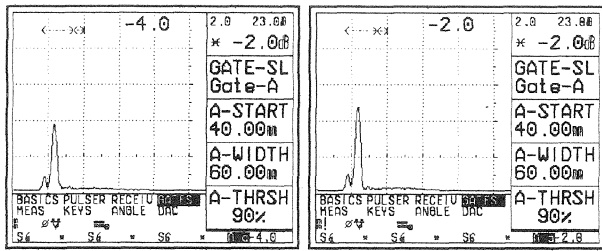
Fig.6 腐食深さと超音波減衰量との関係

波の減衰量を算出した。Fig.6にその結果を示す。

上記の結果より、探触子間距離が200mmの時よりも100mmの時の方が腐食による超音波の減衰が明確であり、ある一定の傾向を持つことが分かった。このことは、超音波が試験体中を透過する過程で干渉され減衰することに関係しており、その量も探触子間距離が大きくなると増加し、腐食による超音波の減衰との相互作用により検出が困難になるものと考えられる。

また、Fig.7にφ5mmのドリル穴を探触子間距離100mmで探傷した時の結果を示す。この結果より、腐食部は無欠陥部に比べ約2dBの透過エコー高さの低下が認められた。しかし、波形形状から腐食による減肉とドリル穴を見分けることは困難であった。

よって、板波探触子を使用した透過法によるSGP配管50Aの外面腐食検査は、探触子間距離を100mmとした時に腐食による超音波の減衰量にある一定の関係が得られたため、現場で実証試験を繰り返すことで十分に適用の可能性があるものと期待される。



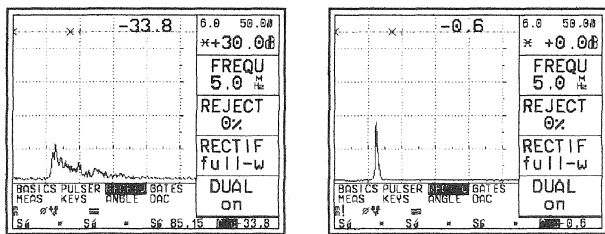
(a) ϕ 5mmドリル穴部の透過エコー (b) 無欠陥部の透過エコー

Fig.7 板波探触子を使用した ϕ 5mmドリル穴の探傷波形 (探触子間距離: 100mm)

3.3 斜角探触子を使用した透過法による検査

探触子の屈折角, 周波数, 探触子間距離の組み合わせを変えた最適条件の検討を予備実験で行ったところ, 屈折角が 45° および 60° , 周波数が5MHz, 探触子間距離が100mmの時に腐食による超音波の減衰が明確に現れることが分かった. よって, この条件をもとに各腐食部の探傷試験を実施した.

Fig.8に屈折角 60° , 周波数5MHz, 探触子間距離100mmの条件で, 腐食深さ2.5mmの模擬欠陥を探傷した時の結果を示す. この結果より, 腐食部の透過エコー高さは無欠陥部の透過エコー高さとはあまり差がないことが分かった. しかし, 腐食部の透過エコー高さは探傷感度を30dB上げているので, 実際には無欠陥部と33.2dBの透過エコー高さの差があることに注意を要する.



(a) 腐食部の透過エコー (b) 無欠陥部の透過エコー

Fig.8 斜角探触子を使用した探傷波形例 (探触子屈折角: 60° , 探触子周波数: 5MHz, 腐食深さ: 2.5mm, 探触子間距離: 100mm)

Fig.9に屈折角 60° , 周波数5MHz, 探触子間距離100mmの条件で, 各腐食深さに対する超音波の減衰量を算出した結果を示す. また, Fig.10に屈折角 45° , 周波数5MHz, 探触子間距離100mmの条件で, 各腐食深さに対する超音波の減衰量を算出した結果を示す. これらの結果より, 腐食深さに関係なく腐食による超音波の減衰が明確に得られ, 腐食深さと超音波の減衰量との間にある一定の関係が成り立つことが分かった.

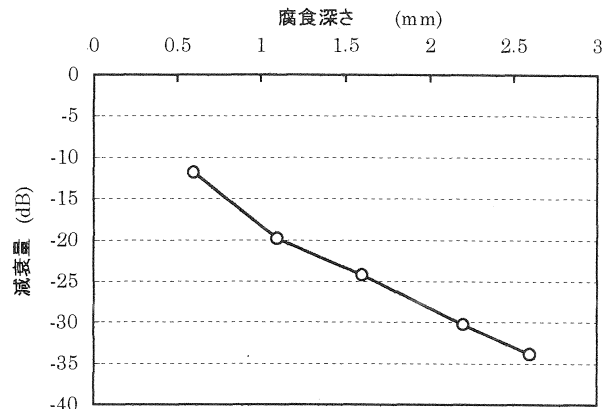


Fig.9 腐食深さと超音波減衰量との関係 (屈折角: 60° , 周波数: 5MHz, 探触子間距離: 100mm)

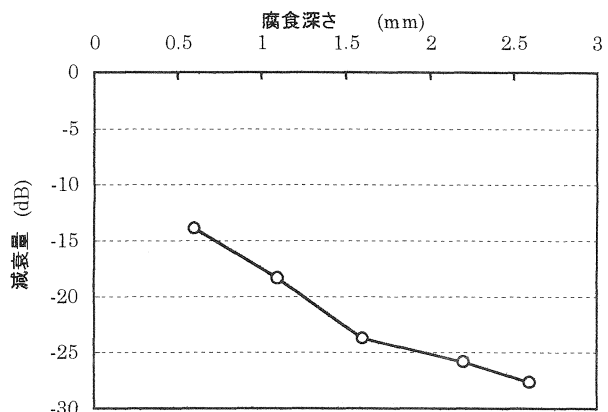


Fig.10 腐食深さと超音波減衰量との関係 (屈折角: 45° , 周波数: 5MHz, 探触子間距離: 100mm)

また, これらの結果と比較するため, Fig.11に屈折角 60° , 周波数2MHz, 探触子間距離200mmの条件で, 各腐食深さに対する超音波の減衰量を算出した結果を示す. この結果より, 腐食深さに関係なく腐食による超音波の減衰は明確に得られたものの, 腐食深さと超音波の減衰量との間にある一定の関係を見出すことはできなかった. よって, 斜角探触子を使用した透過法による検査は板波探触子を使用した場合と同様に, 探触子間距離が200mmの時よりも100mmの時の方が腐食による超音波の減衰傾向を明確に得ることができる. さらに, 周波数が高くなると減衰係数が大きくなる³⁾ことに起因して, 周波数は2MHzより5MHzの方が腐食による超音波の減衰が明確であることが分かった.

また, Fig.12に屈折角 60° , 周波数5MHz, 探触子間距離100mmの条件で ϕ 5mmのドリル穴を探傷した時の結果を示す. この結果より, 腐食部は無欠陥部に比べて約3dBの透過エコー高さの低下が認められたが, 板波探触子を使用した場合と同様に, 波形形状から腐

食による減肉とドリル穴を見分けることは困難であった。

4. 結言

配管の外面腐食検査に各種超音波探傷技術の適用を試みた結果、以下のことが分かった。

- (1) 可変角探触子を使用した反射法によるSGP配管50Aへの超音波の最適入射角度は39°である。
- (2) 可変角探触子を使用した反射法によるSGP配管50Aの外面腐食検査は、腐食深さが2.0mm以上かつ腐食部と探触子間との距離が125mm以下の条件下で腐食部の検出が可能である。
- (3) 板波探触子を使用した透過法によるSGP配管50Aの外面腐食検査は、探触子間距離が100mmの時に明確に腐食部の検出が可能である。
- (4) 斜角探触子を使用した透過法によるSGP配管50Aの外面腐食検査は、屈折角45°および60°、周波数5MHz、探触子間距離100mmの条件下で腐食深さに関係なく腐食による超音波の減衰が明確に得られ、腐食深さと超音波の減衰量との間に一定の関係が成り立つことが分かった。
- (5) 斜角探触子を使用した透過法によるSGP配管50Aの外面腐食検査は、垂直探触子やディプスゲージなどを用いた従来の検査方法に変わる新しい検査方法として最も有力なものと期待される。よって、今後は現場での実証試験を行うことで、実験データとの相関性を求めることが必要である。
- (6) 腐食による超音波の減衰波形から腐食による減肉とドリル穴を見分けることは困難であった。

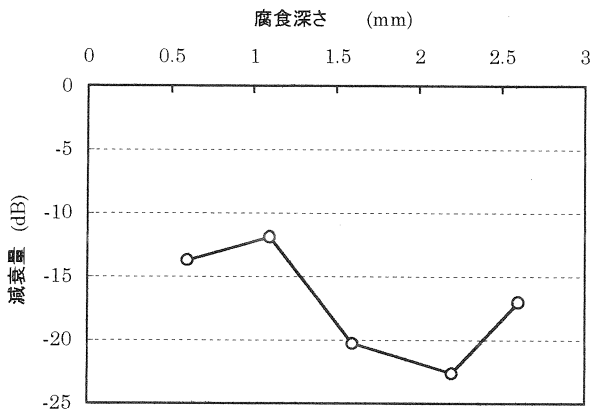
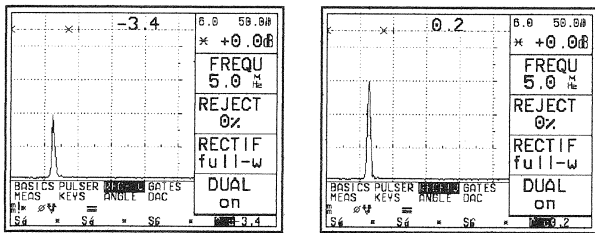


Fig.11 腐食深さと超音波減衰量との関係
(屈折角：60°、周波数：2MHz、探触子間距離：200mm)



(a)φ5mmドリル穴部の透過エコー (b)無欠陥部の透過エコー

Fig.12 板波探触子を使用したφ5mmドリル穴の探傷波形
(屈折角：60°、周波数：5MHz、探触子間距離：100mm)

以上の結果から、斜角探触子を使用した透過法によるSGP配管50Aの外面腐食検査は、屈折角45°および60°、周波数5MHz、探触子間距離100mmの条件下で腐食深さに関係なく腐食による超音波の減衰が明確に得られ、腐食深さと超音波の減衰量との間に一定の関係が成り立つことが分かった。また、この方法による検査は可変角探触子を使用した反射法による検査および板波探触子を使用した透過法による検査に比べて、より一層明確な腐食による超音波の減衰傾向を示していることから、垂直探触子やディプスゲージなどを用いた従来の検査方法に変わる新しい検査方法として最も有力なものと期待される。よって、今後は現場での実証試験を行うことで、実験データとの相関性を求めることが必要である。

参考文献

- 1) 藤森房雄：やさしい超音波の応用，P.14
- 2) 新日本非破壊検査株式会社技報 Vol.11，P.16
- 3) 超音波探傷試験Ⅱ(日本非破壊検査協会)，P.5