

# 超音波探傷試験における簡便な傷サイジング手法の提案

## Proposal of Concise Crack Sizing Approach in Ultrasonics

|         |       |                   |            |
|---------|-------|-------------------|------------|
| 電力中央研究所 | 福富 広幸 | Hiroyuki FUKUTOMI | Member     |
| 電力中央研究所 | 林 山   | Shan LIN          | Non-Member |
| 電力中央研究所 | 緒方 隆志 | Takashi OGATA     | Non-Member |

**Abstract** This paper describes a new crack tip diffraction approach using a set of angle beam and direct contact transducers. In this approach, a crack height is calculated from a time difference from two echoes of a tip-diffracted longitudinal wave, which arise after an incident wave from the angle beam transducer impinges the crack. The two echoes are detected by the direct contact transducer which lies on the opposite surface of and over the crack. One echo is related to the wave traveling directly from the tip, and the other is the wave after back wall reflection. The new approach has been demonstrated by applying to height measurements of crack-like slits which are machined in welded specimens made from austenitic stainless steel.

**Keywords:** Nondestructive Inspection, Ultrasonics, Tip Echoes, Crack Sizing, Stainless Steel Weldments

E-mail: fukutomi@criepi.denken.or.jp

## 1. 緒言

沸騰水型軽水炉プラントの再循環系配管における溶接部には、応力腐食割れ (Stress Corrosion Crack, SCC) が発生した事例が報告されている[1]. 一方、既設火力発電設備の老朽化は進む傾向にあり、欧米では、経年火力発電プラントの高温蒸気配管において、熱影響部におけるクリープボイドの発生・連結によるき裂の発生に起因した噴破事故を経験している[2,3]. 上記の厚肉配管溶接部に対する非破壊検査には、超音波探傷試験が実施されており、近年、高精度な傷高さ測定および傷の早期発見が要求されるようになり、現在、フェーズドアレイ法やTOFD (Time of Flight Diffraction) 法などの適用研究が進められている[4,5].

再循環系配管に用いられているオーステナイト系ステンレス鋼の溶接金属は、炭素鋼やクロム合金鋼の溶接金属と異なり、非均質・弾性異方性を有するため、超音波の直進性や減衰などで検討すべき課題が多い[6-9]. このため、簡便で傷高さの測定精度が高いTOFD法を適用することができず、フェーズドアレイ探触子を用いた端部エコー法が有望視されている。しかしながら、溶接金属からのエコーと区別して微弱な端部エコーを識別しなければならない傷高さ測定は、難易度が高く、検査員の技量に負うところが大きい[10].

本研究では、TOFD法の適用が困難な厚肉のステ

ンレス鋼溶接部の探傷を想定して、従来の端部エコー法より簡便な傷高さ測定法を提案し、厚さ40mmのステンレス鋼製の溶接試験体に導入したスリットの高さ測定を行い、提案手法の妥当性を確認することを目的とする。

## 2. 端部エコーを用いた傷高さ測定法

### 2.1 従来の端部エコーを用いた手法

端部エコー法は、これまで、一般的によく用いられてきた手法である。この手法の代表例として、斜角探触子を用いた場合をFig.1に示す。ここでは超音波ビームの中心軸が傷の上端部やコーナーと一致したときに、それぞれに対応するエコーの高さ

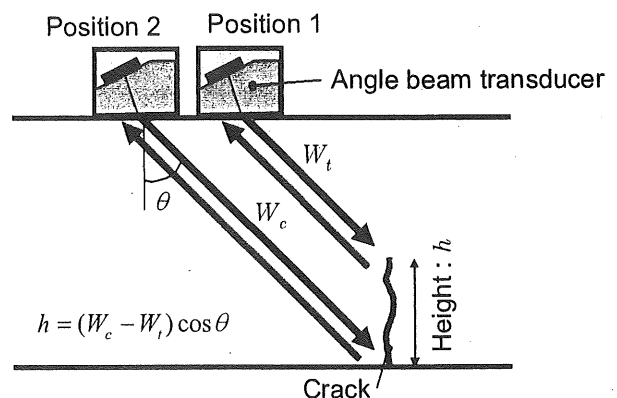


Fig.1 General crack tip diffraction method

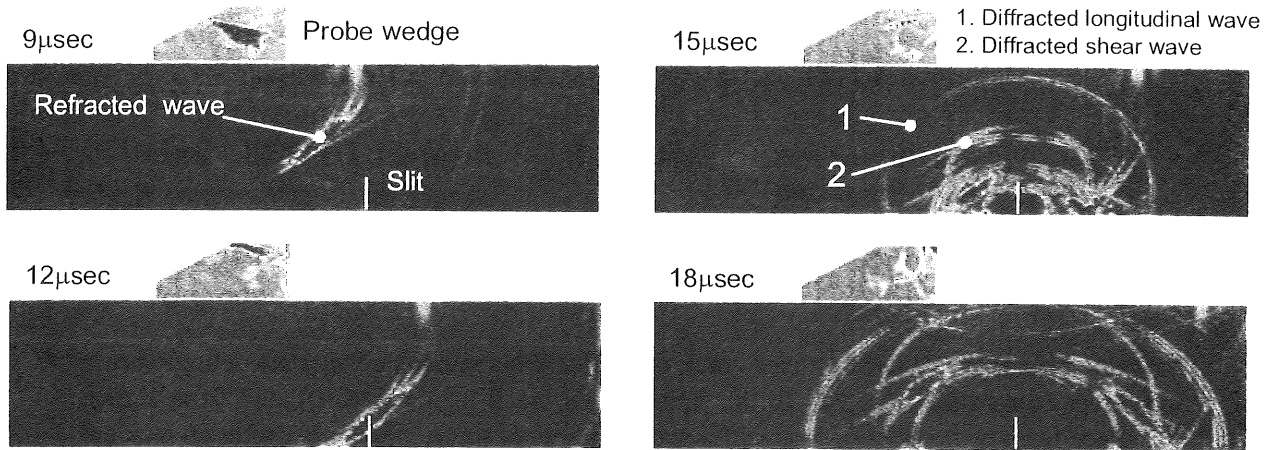


Fig.2 Behavior of ultrasonic wave propagation

が最大となる。これらのエコーは端部エコーおよびコーナーエコーと呼ばれる。以下、上端部を単に端部と記す。端部エコーおよびコーナーエコーが得られた時のビーム路程  $W_t$  および  $W_c$  を求め、幾何学的な関係から次式により傷高さ  $h$  を求めることができる。

$$h = (W_c - W_t) \cos \theta \quad (1)$$

ただし、 $\theta$  は屈折角である。横波  $45^\circ$  斜角探触子により入射された超音波ビームの中心軸上に傷端部がある場合 (Fig.1 の Position 1) の超音波の波面を超音波伝搬有限要素シミュレーションにより予測した一例 [4] を Fig.2 に示す。この図から横波がスリットに達した後、スリット端部から縦波および横波回折波が円弧状に広がり、探触子に戻る回折波が端部エコーとして受信される。また、Fig.3 に示すように傷先端から見て逆向きに伝搬する回折波を受信するように探触子を配置し、傷の高さを測定するのが TOFD 法である。TOFD 法では、試験体の厚さとビーム路程から、次式により傷高さ  $h$  を求めることができる。

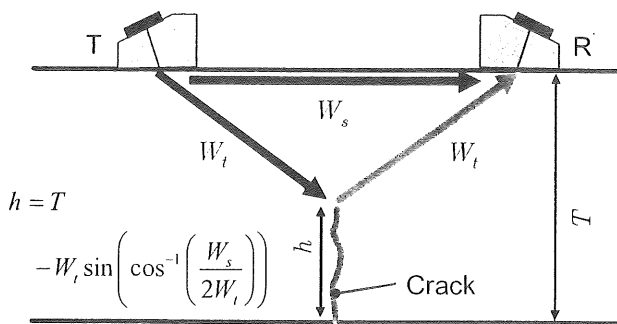


Fig.3 Time of Flight Diffraction method

$$h = T - W_t \sin \left( \cos^{-1} \left( \frac{W_s}{2W_t} \right) \right) \quad (2)$$

ただし、 $T$  は試験体の厚さ、 $W_s$  は表面波のビーム路程である。

Fig.1 の例に戻り、コーナーエコーが受信され始めた位置から探触子を移動量  $x$  ずつスリットに近づけていった場合の受信波形に対するシミュレーション結果を Fig.4 に示す。探触子をスリットに近づけると、まずコーナーエコーが最大になり、さらに近づけると端部エコーが大きくなる。端部エコーおよびコーナーエコーが最大となる時のエコー立ち上がり時間を  $t_t$  および  $t_c$  とすると、ビーム路程は

$$W_i = \frac{C t_i}{2}, \quad i = t, c \quad (3)$$

となる。ただし、 $C$  は音速であり、上記の例では横

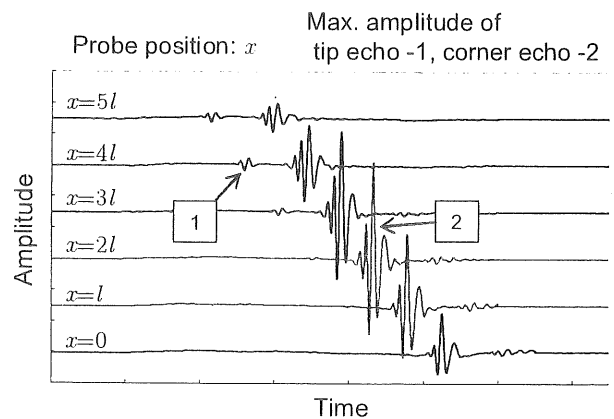


Fig. 4 Predicted tip and corner echoes from slit

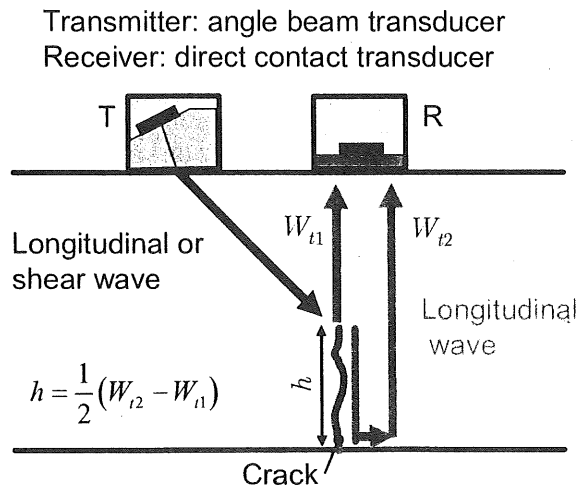


Fig.5 Proposed crack tip diffraction method

波音速となる。

一般に端部エコーは、コーナーエコーよりかなり小さい。ステンレス鋼溶接部のSCCを探傷する場合、回折波は基材での結晶粒界散乱により減衰し、溶接部の溶け込み境界での反射に起因するエコーと端部エコーは同程度の強度になる場合がある。また、分岐したSCCの複数の先端や屈曲部から端部エコーが得られる。このような状況で、SCCの真の先端からの端部エコーを見出し、それに応じた $t$ から精度よくビーム路程 $W_t$ を求めるためには、相当の経験と技量が検査員に要求される[10]。

## 2.2 提案手法

スリット先端からの縦波および横波回折波はFig.2から従来の端部エコー法やTOFD法で利用するもの以外にも、スリットの上方に強いエネルギーを有して伝搬していることが判る。この成分に着目し、傷直上に垂直探触子を配置することにより、最も短いビーム路程で回折波を受信できることとなる。このため、回折波の拡散減衰や材料の金属組織による散乱減衰が少なく、傷先端から直接伝搬する縦波回折波と、傷面に沿って伝搬する縦波表面波による強いエコーを受信できることが期待できる。Fig.5に示すように傷直上に縦波垂直探触子を配置することで直接受信される縦波回折波 $L_1$ と傷面に沿って伝搬する縦波表面波 $L_2$ のそれぞれのビーム路程 $W_{t1}$ および $W_{t2}$ の差の半分が傷高さとなる。よって、 $L_1$ および $L_2$ の伝搬時間 $t_{t1}$ および $t_{t2}$ から $h$ によらず次式により傷高さ $h$ を求めることができる。

$$h = \frac{1}{2}(W_{t2} - W_{t1}) = \frac{C_L}{2}(t_{t2} - t_{t1}) \quad (4)$$

ただし、 $C_L$ は縦波音速である。縦波を用いる理由は、横波より速く探触子に到達することのほか、同じ周波数では横波より波長が長いため、金属組織による影響を受けにくいためである。上述の端部エコー法では、探触子を移動させて傷の端部とコーナーを見つけ、ビーム路程と屈折角の幾何学的な関係から傷高さを求める。これに対して、本稿で提案する手法では、斜角探触子を傷からの端部エコーが強くなる位置に配置し、傷上方に配置した垂直探触子で得られる2つの端部エコーの伝搬時間のみから傷高さを算出することができる。この測定と傷高さの算出は、送信用探触子の屈折角を事前に求めることが不要であり、一般的な超音波探傷器、縦波または横波斜角探触子、および縦波

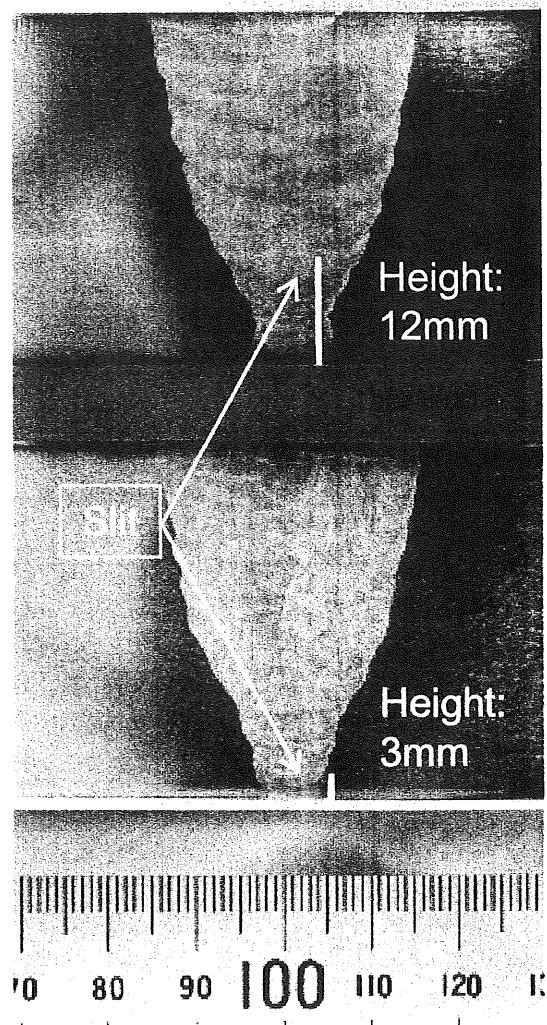


Fig.6 Cross section of welded test specimens with slits

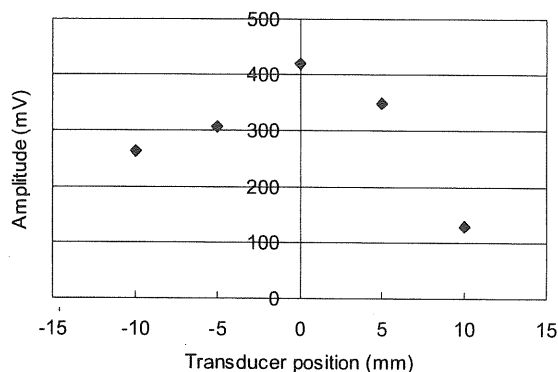


Fig.7 Tip echo intensities over slit

垂直探触子を用いることにより簡便に実施することが可能である。探傷領域を挟むように2つの探触子を対向して同時に配置するTOFD法が適用できない空間的制約がある場合においても、本提案法であれば、片側に送信用斜角探触子を、傷直上に受信用垂直探触子を配置することにより傷高さの測定が可能となる。また、1回目の端部エコーしか受信されない場合、斜角探傷ではコーナーエコーは容易に得られるため、送信に用いる探触子で得られたコーナーエコーから試験体の厚さを測定する、もしくは、受信用垂直探触子を利用して試験体の厚さを測定し、 $t_n$ から傷先端の位置を求めることによって傷の高さを測定することができる。

### 3. 実証実験

#### 3.1 試験体および実験方法

提案手法を検証するために、低炭素オーステナイト系ステンレス鋼製の溶接試験体に施工された傷を模擬したスリットの高さ測定を試みた。試験体の基材および溶接金属はSUS316Lである。溶接

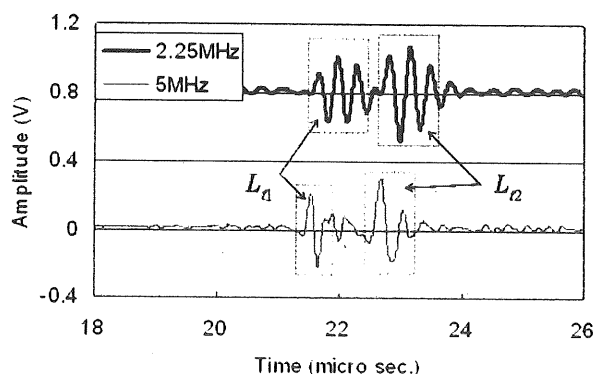


Fig.8 Two echoes of diffracted waves from slit

は層間温度が規定される原子力仕様にに基づき、初層はTIG溶接で、2層目以降はCO<sub>2</sub>溶接で行った。結晶粒径は、同じ面積の円形に換算すると、基材では約160 $\mu$ m、溶接部では約500 $\mu$ mであった。試験体の厚さは40mmであり、測定を容易にするために、溶接部の余盛と裏波を研削した。スリットはFig.6に示す溶接金属部とそこから十分に離れた部位にそれぞれ放電加工により導入した。スリットの高さは3, 6, 9, 12mmである。本試験体の縦波音速を測定した結果、基材で5,648m/s、溶接金属で5,383m/sであった。

実験にはパルサレシーバ (PANAMETRICS製 MODEL 5800) およびオシロスコープ (Tektronix製 TDS5034B) を用いた。超音波の送信には基材での減衰を抑制し、傷先端からの強い端部エコーを得るために、集束型の縦波斜角探触子 (屈折角45度、中心周波数3.5MHz、振動子径20mm) を用いた。受信には縦波垂直探触子 (中心周波数2.25および5MHz、振動子径25mm) を用いた。接触媒体にはグリセリンペーストを使用した。

#### 3.2 結果とその考察

##### (1) 測定条件の検討

本提案手法では傷の上方へ伝搬する回折波が重要である。上記のシミュレーション結果から、スリットの上方においても端部エコーが受信できることが予測される。そこで、縦波斜角探触子により溶接金属から十分離れた位置の高さ3mmのスリットの端部に超音波を入射し、スリット直上の近辺で小さな垂直探触子 (中心周波数が2.25MHz、振動子径3mm) を移動させ、端部エコーを受信した。受信したスリット端部から直接到達する回折波による端部エコーの最大値をFig.7に示す。この図の横軸の原点は探触子がスリット直上に位置した状態であり、入射点は-37mmである。従来の端部エコー法では-37mm、TOFD法では+37mm近辺での端部エコーを利用していることになる。同図からスリット直上近辺では従来の端部エコー法やTOFD法より強い端部エコーを受信できることが明らかになった。

次に、受信用の垂直探触子の中心周波数による影響を検討するため、溶接金属から十分離れた位置のスリットを測定した。測定結果の一例として、高さ3mmのスリットによる $L_1$ および $L_2$ を異なる中心周波数の垂直探触子で受信したエコーをFig.8に示す。以下の垂直探触子で得られるエコーは、送信に用いた斜角探触子で最大の端部エコーが得られる位置におけるエコーである。また、一般的には超

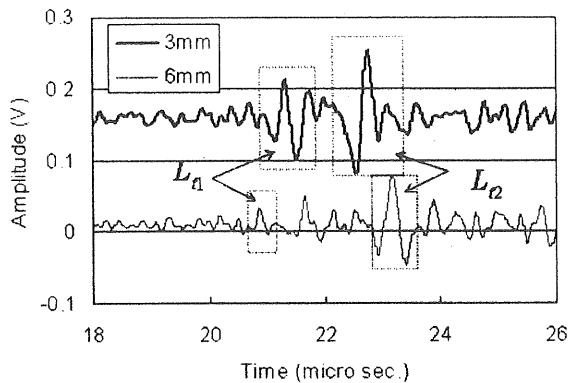


Fig.9 Sets of echoes from slits with different heights

音波探傷試験のエコーは全波されている場合が多いが、エコーの位相情報も端部エコーを特定するために有益である。このため、受信された波形は全波せずに表示している。送信用探触子と異なる周波数の受信用探触子を用いたにも関わらず、この図から  $L_1$  および  $L_2$  に対応した明瞭なエコーを観察することができた。なお、本試験体中を伝搬する超音波の中心周波数は2.72MHz程度あり、5MHzはそれより高く、2.25MHzはやや低いということになる。この図から  $L_2$  に対するエコーは  $L_1$  よりも周波数が低下しているが、両者の波形の相似性が高いことが判る。これより、この位相情報は、両者のエコーを他のエコーと区別するとき有効である。また、5MHzの受信用探触子の結果は、2.25MHzのもの比べて  $L_1$  および  $L_2$  を分離し易くなっている。一般に金属の結晶粒界散乱に起因する林状エコーを抑制するため、ステンレス鋼の場合には、低合金や炭素鋼の場合に比べて、低い中心周波数の探触子が用いられる。これに対して、本提案手法では、低い中心周波数の送信用探触子と、高い中心周波数の受信用探触子を用いることによって、傷の2つの端部エコーに対する分離性を向上させることが期待できる。

## (2) スリット高さ測定精度

ステンレス鋼溶接部を本提案法により探傷する場合、溶接金属を伝搬した回折波を受信しなければならない。超音波は上記溶接部のような粗大な結晶粒を有する金属を伝搬する過程で高調波成分が減衰し、中心周波数が低下する[5]。よって、受信に高い中心周波数の探触子を用いた場合、溶接部を伝搬

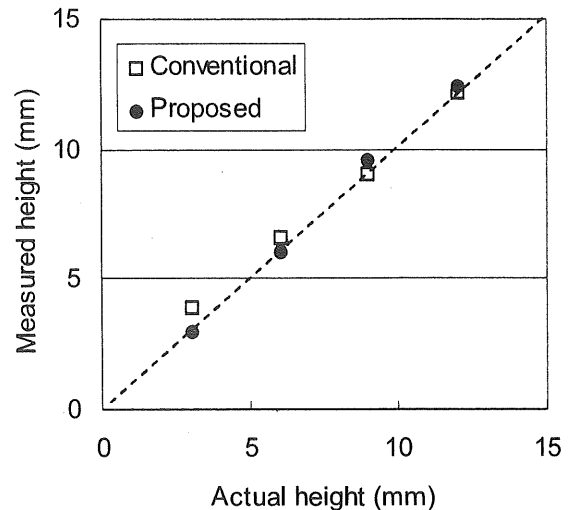


Fig.10 Comparison of actual and measured heights

してきた回折波の検出が困難となることが予想される。溶接金属近傍の高さ3mmおよび6mmのスリットによる回折波を5MHzの垂直探触子で受信したエコーをFig.9に示す。溶接金属を跨いだ測定により傷高さを測定することは困難な場合がある。しかしながら、2次クリーピング波を用いることにより、送信用探触子の位置から見て、傷が溶接金属の手前か奥かは容易に判別ができるため、以下の測定は溶接を跨がずに超音波をスリットに入射した。この図からスリットによる回折波が溶接金属を伝搬しているにも関わらず、高い中心周波数の探触子を用いても  $L_1$  および  $L_2$  の明瞭なエコーを観測することができる。また、スリットの高さに応じて、  $L_1$  および  $L_2$  の伝搬時間差が変化していることが判る。以上の結果より、低い中心周波数の送信用探触子と高い中心周波数の受信用探触子を用いることの妥当性を確認することができた。

本提案手法における高さ測定の精度を評価するため、上記の送信用探触子を用い、従来の端部エコー法によりスリット高さを測定した。従来の端部エコー法と本提案手法により溶接金属部のスリットの高さを測定した結果を比較してFig.10に示す。スリット高さの測定の際に、従来の端部エコー法では基材の縦波音速を用いた。これに対して本提案手法では受信する回折波は主に溶接金属を伝搬することから溶接金属の縦波音速を用いた。従来の端部エコー法の平均自乗誤差は0.56mmであったのに対し、本提案手法の平均自乗誤差は0.34mmであった。よって、本提案手法による結果

は、従来の端部エコー法と同様にスリットの高さを高精度に測定できることが明らかになった。

本研究では、ステンレス鋼の溶接部を対象としたが、同材料より超音波の減衰が少ない一般的な構造材料である炭素鋼やクロム合金鋼などにも十分に適用可能と考える。

#### 4. 結言

本研究では、超音波探傷試験において新たな傷高さ測定法を提案し、厚さ40mmのステンレス鋼製の溶接試験体に導入したスリットの高さ測定を行い、提案手法の妥当性を確認した。主な結果は以下の通りである。

- (1) 斜角探触子により傷先端へ超音波を入射することにより発生し、傷の上方へ伝搬する縦波回折波と、傷面に沿って伝搬する縦波表面波に着目した。傷直上に垂直探触子を配置することによって観測されるこれらの回折波の伝搬時間差から、入射した超音波の屈折角によらず、簡便に傷高さを測定する手法を提案した。
- (2) 2つの強い端部エコーを得るため、送信に集束型縦波探触子を用いることにより、識別するのに十分な強度で傷を模擬したスリットの先端からの両端部エコーを観測することができた。一方、受信に送信用探触子より高い中心周波数の垂直探触子を用いることにより、両端部エコーの分離性を向上させることができたことが明らかになった。
- (3) 炭素鋼やクロム系合金鋼に比べて超音波の減衰が大きいステンレス鋼の溶接部に導入したスリットの高さ測定に提案手法を適用した。その結果、従来の端部エコー法と同様に高精度で高さを測定できることから、提案手法の有効性を確認することができた。

高精度な傷高さ測定で十分な精度を確保することが困難な配管エルボなどの複雑な部位や狭隘部などにおいても、本手法を活用することによる測定精度の改善が十分期待できる。

#### 謝辞

石川島検査計測(株) 笹原利彦部長には、ステンレス鋼溶接部におけるSCCに対する端部エコー法による高さ測定について御指導いただいた。ここに感謝の意を表す。

#### 参考文献

- [1] 原子力安全・保安院, 原子力設備の健全性評価などに関する小委員会資料 (2003.3)
- [2] F.V. Ellis and R. Viswanathan, Proc. ASME PVP Conference, PVP-Vol.380, Fitness-for Service Evaluations in Petroleum and Fossil Power Plants, ASME, pp.59-76 (1998)
- [3] J.F. Henry, G. Zhou and C.T. Ward, Proceedings of Conference on Advances in Life Assessment and Optimization of Fossil Power Plants, (EPRI/DOE), (2002.3)
- [4] 福富, 林, 緒方, 電力中央研究所報告, Q04016, (2005), (印刷中)
- [5] 林, 福富, 緒方, 電力中央研究所報告, Q04015, (2005), (印刷中)
- [6] 岸上守孝, 石川島播磨技報, 20巻6号, pp.400-405(1980)
- [7] 米山弘志, 溶接技術, 10号, pp.65-69(1994)
- [8] J.A.Ogilvy, Ultrasonics, Vol.24, No.11, pp.337-347(1986)
- [9] J.A.Ogilvy, NDT International, Vol.18, No.2, pp.67-77(1985)
- [10] 米山弘志, 杉林卓也, 山口篤憲, 非破壊検