

# 縦波斜角モード変換法による SUS304 隅肉溶接部のルート部き裂の探傷技術

芝田 三郎 \*

*Saburo Sibata*

梶ヶ谷 一郎 \*\*

*Ichiro kajigaya*

鋼構造物の運用中に発生する欠陥はその外表面に発生するものが多く、これらは、目視試験、磁粉探傷試験、あるいは浸透探傷試験が主に用いられているが、管外面に円筒形金具が隅肉溶接された構造においては、き裂の発生が溶接部下となるためクリーピング波法や表面SH波法が適用されてきた。しかし、き裂が傾いた場合、エコー高さが低下しこれまでの検出法では検出困難となることが懸念されてきた。本解説では、縦波斜角探触子から発生した縦波を管内表面で横波にモード変換させて検出性を検討した結果、傾きの影響が従来手法と比べ小さく検出性がよいことを確認できたので報告する。

キーワード：超音波探傷試験、縦波探触子、クリーピング波、モード変換法、表面SH波

## 1. はじめに

超音波探傷試験は、内部きずの最も優れた探傷手法の一つとして、広く用いられており、また JIS Z 3060「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」などの多くの探傷規格も整備されている。しかしながら、構造物に用いられている溶接部の形状も千差万別であり、探傷規格に基づいた探傷方法でのきずの検出が困難になる場合もある。従って、これらの特殊部位に発生するきずに対しては、予めモックアップ試験を行って、探傷方法を確認して

おくことが強く望まれる。

オーステナイト系ステンレス鋼の隅肉溶接部のルート部に発生するき裂を検出するための超音波探傷試験方法を確立するために、モックアップ試験を行った。この結果、縦波斜角探触子を用いたモード変換法が、他の方法よりもきずの傾きの影響が少なく、最も検出性の高い手法であることが確認でき、この結果に基づいて、実機において調査した結果、検出性に優れた手法であることを確認できた。

\* 検査事業部 技術部 NDE技術グループ

\*\* 検査事業部 技師長 博士（工学）

## 2. 試験部形状と探傷手法

図1に、対象とした溶接部形状ときずの形状及び探傷方法の例を示している。きずは、隅肉溶接部のルート部から母材部側に発生したき裂である。これらのきずの探傷方法としては、横波斜角探触子による一回反射法、表面SH波法やクリーピング波法が考えられる。

横波斜角探触子による一回反射法は、裏面で超音波を一度反射させ、裏面からの反射波をきずに入射させて探傷する方法であり、最も一般によく用いられている方法である。しかし、平板の表面に設けたスリットの場合と異なり、隅肉溶接ルート部に生じるき裂では、コーナー反射（き裂の側面と試験体表面で2回反射することで得られる反射波）が生じにくく、き裂からのエコー高さは、き裂の傾きに著しく依存する。また、隅肉溶接部のルート部や止端部などから発生する妨害エコーとの識別が難しくなると考えられる。従って、本探傷

方法では、比較的大きく、単純な形状のき裂の検出を対象として適用すべきであると考えられる。

SH波は、横波の一種である。通常の斜角探傷に用いられる横波は、粒子が上下方向に振動しながら伝搬するSV波が用いられている。これに対して、SH波は、水平方向に粒子が振動しながら伝搬する横波である。表面を伝搬する表面波として用いると、SV波と比べて、表面粗さなどによる影響を著しく低減でき、また平面などにSH波が入射しても、モード変換が起こらず、モード変換によるエコー高さの低下がないなどの特長を持っている。特に隅肉溶接部では、SV波を用いると、溶接止端部で超音波が散乱して妨害エコーが強くなるが、SH波ではこの影響を低減できることが期待される。

但し、隅肉溶接部のルート部に発生するき裂の探傷の場合、き裂の存在しない健全な溶接部であっても、ルートギャップ部からの妨害エコーが発生する。この妨害エコーの伝搬距離は、き裂から

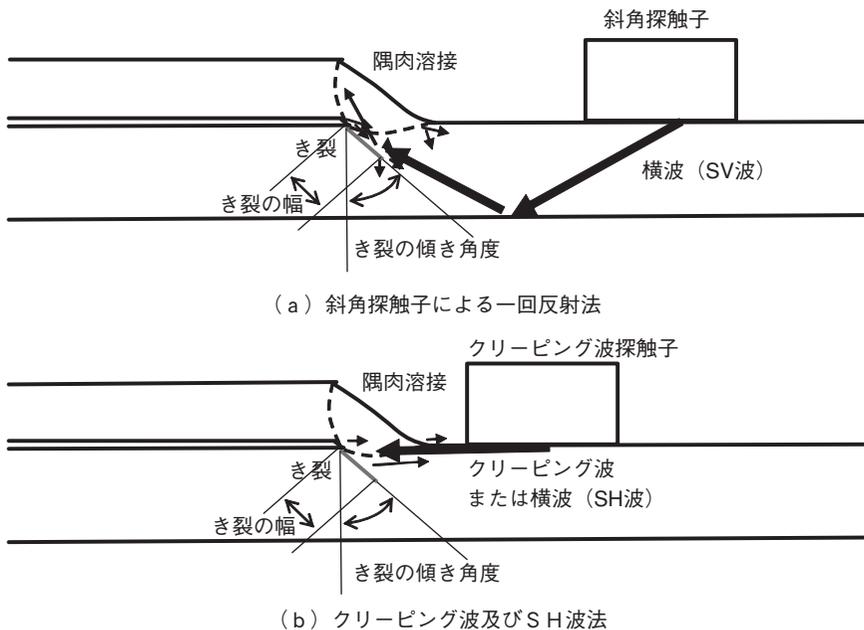


図1 試験対象部位と探傷方法の例

のエコーの伝搬距離とほぼ一致する。従って、きずの検出は、エコー高さの大小で判断する必要がある。

一方、通常の横波斜角探触子（SV波）は、試験体表面での縦波から横波へのモード変換を利用して、所定の方向に超音波を送信させている。従って、超音波を試験体に入射させるために探傷面に塗布する液体（接触媒質）を伝搬する超音波は縦波である。これに対してSH波を送信させるためには、直接横波を探触子より送信し、接触媒質に横波を伝搬させる必要がある。液体はせん断力を持たないために、横波を伝搬することはできない。このために、SH波探触子を用いる場合には、蜂蜜のようにきわめて粘性の高い物質を接触媒質として用いる必要がある。

この粘性の高い接触媒質を用いると、探触子の走査性を著しく悪くするとともに、エコー高さの安定性も悪くなる。経験によれば、探触子の押さえ方で6～12 dB程度のエコー高さのばらつきは容易に発生する。このことは、エコー高さのみを判断基準としてきずを評価する場合に、きわめて検出性を悪くし、小さなきずの見落としを容認せざるを得なくなる。

これに対して、クリーピング波探触子の場合には、通常の横波斜角探触子の場合と同様の液体の接触媒質を用いることが可能であり、安定してエコー高さを評価できる。しかし、きずを直射で探傷する場合には、SH波を用いる場合も同様に、ルート部で妨害エコーが発生することを考慮する必要がある。特にき裂の傾きによって、エコー高さがどの程度変化するかなどを予め確認しておく必要がある。

また、オーステナイト系ステンレス鋼の隅肉溶接では、きずを直射で検出するには、溶込み部の溶接部を超音波が伝搬する必要がある。溶接部では、柱状晶が最もクリーピング波の伝搬を阻害す

る方向に発達しており、きずの検出性に悪影響を及ぼすと考えられる。また、溶接熱影響部には、結晶粒が粗大化した領域もあり、超音波の伝搬に悪影響を及ぼすと考えられる。

著者らは、縦波斜角探触子を用いて、裏面でモード変換した波をき裂部に入射して探傷するモード変換法を検討した。縦波斜角探傷法では、探触子から縦波のほかに横波も同時に発生する。これらの波が裏面で反射するときモード変換が生じ、横波や縦波も同時に発生する。これらの多くの波がき裂部に入射して、通常複雑な探傷波形を生じ、評価を難しくして、敬遠されがちである。しかし、これらのモード変換した波で得られる探傷波形を解析し、評価することで、エコー高さに依存しない探傷方法を確立でき、微小なき裂の検出に寄与できると考えられた。

### 3. クリーピング波による探傷方法の検討

#### 3.1 クリーピング波による直射での検出法

外径50.8 mm、板厚8 mmのSUS304配管外表面の周方向に、表面に垂直方向の傾きを持たない各種深さのスリットを作成し、クリーピング波による距離振幅特性を求めた。用いた探触子は、周波数10 MHzで振動子寸法10×5 mmの二振動子型クリーピング探触子である。結果を図2に示してい

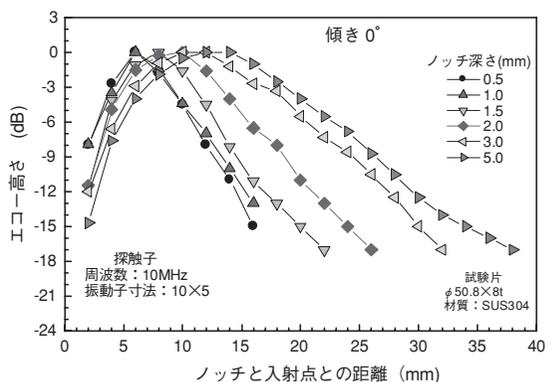


図2 クリーピング波の距離振幅特性

るが、探触子がノッチ部から遠ざかると急激にエコー高さは低下するのがわかる。このことより、探触子の接近限界距離（超音波が試験体に入射する入射点と、探触子先端までの距離）を考慮すれば、できるだけ探触子をすみ肉溶接部の止端部に接近させた探傷が望ましいといえる。

検出性におよぼすき裂の傾きの影響を検討するために、種々の傾きのノッチを持つ、一連の基礎試験体を作製した。この試験体は、母材（SUS304鋼板）からくり抜いて隅肉溶接部の形状を模擬したもので、隅肉溶接は行われていない。試験体の形状及び外観を図3に示す。なお、作製したスリットの断面における長さ（スリット幅という）は3mmとした。

作製した基礎試験体を用いて、傾きのあるスリットの検出性を検討した。用いた探触子は周波数10MHzで振動子寸法10×5mmの二振動子型クリーニング探触子である。試験の結果を図4に示しているが、傾きによって、エコー高さは1/4 (-12dB)まで低下するのがわかる。

一方、健全部においても、同一伝搬距離においてルート部からの妨害エコーが発生する。この妨害エコーのレベルは、ルートギャップの大きさに依存すると考えられる。傾きによる4倍のエコー高さの変化は、かなり大きなきずも見落としが起りうる可能性のあることを示唆していると考えられた。

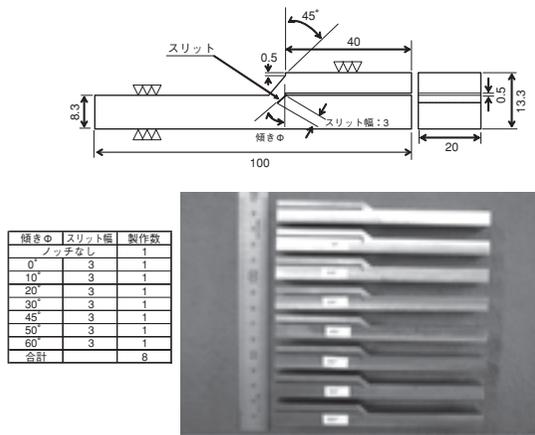


図3 基礎試験に用いた母材切抜き試験体（SUS304）の形状と外観

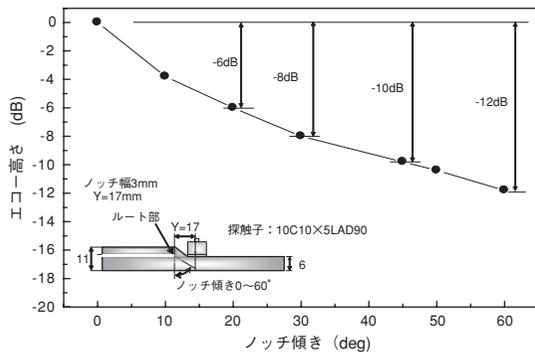


図4 クリーピング波直射法でのノッチ検出性及びすき傾き角の影響

### 3.2 縦波斜角探触子によるモード変換法

縦波斜角探触子を用いたモード変換法の概念を図5に示している。縦波斜角探傷では、縦波の他に横波も同時に送信される。これらの波が、裏面で反射するときに、スネルの法則に従ってモード変換し、横波や縦波が新たに発生し、き裂部に入射して複雑な探傷波形を生じる。通常の縦波斜角探傷では、これらの複雑な経路で得られるエコーは妨害エコーと考えられ、縦波の直射の範囲のみが評価に用いられる。モード変換法は、むしろこれらの複雑な経路によって得られるエコーを評価し、き裂のある場合と健全な場合との探傷波形の違いより、積極的にこれら妨害エコーを活用する方法である。

本探傷に用いるために、以下の仕様の縦波斜角探触子を試作して用いた。試作したモード変換用探触子の外観を図6に示す。縦波屈折角を73度としたのは、探触子の接近限界距離を考慮したものである。なお、本探触子では、同時にクリーピング波も発生していることも確認された。なお、探触子は、配管用に曲率のシューを持たせたものと、平板用の平面のシューを用いたものを試作している。

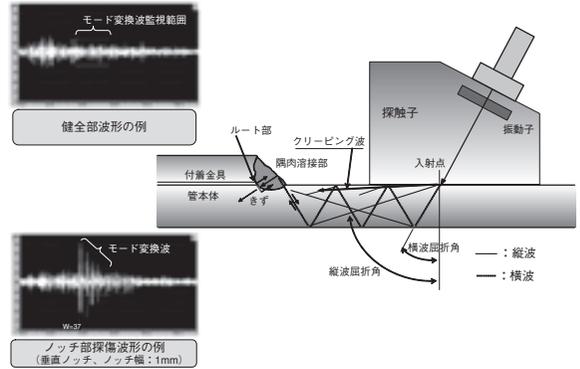


図5 縦波斜角探触子によるモード変換法の概念

周波数：10 MHz

屈折角：縦波73度、(モード変換波がき裂の面に当たるように設定した)

振動子寸法：10×5 mm (二振動子型)

ビームの交軸範囲：5～20 mm (交軸点のエコー高さの1/2以上が得られる範囲)

図3に示した母材を切り抜いて、種々の傾きを持つスリット幅3 mm き裂を作製した基礎試験体を用いて試験した。健全部における探傷波形と比

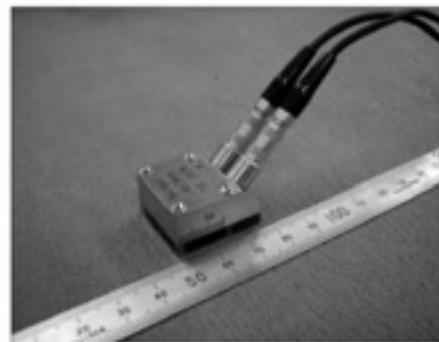
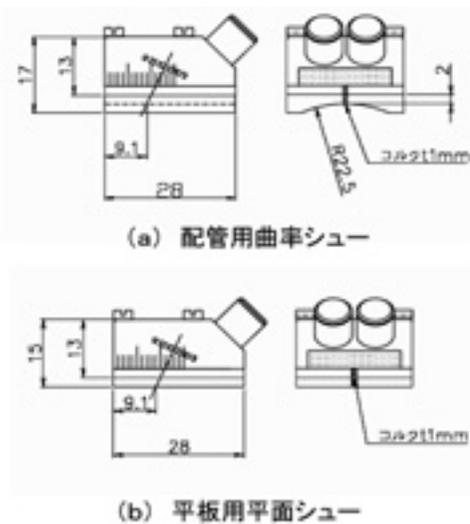


図6 試作した縦波斜角探触子の概要

較して、探傷結果を図7に示している。探触子をき裂の長さ方向に直交する方向の前後走査を行い、エコー高さをカラー区分で示して、探触子位置とビーム路程の関係を表している（Bスコープ）。最もビーム路程の短い位置に、クリーピング波による直射でのきずのエコー（図中C）が得られているのがわかる。また、3.1項のクリーピング波の距離特性で検討したように、この直射でのクリーピング波による画像は、探触子が溶接部にごく近い範囲でしか得られておらず、クリーピング波の減衰が大きいことを示している。

ノッチのある基礎試験体の探傷画像は、健全部のものに比べ複雑で多くの指示が得られている。これらの画像の中で、M1、M2、M3のモード変換によって得られた特徴ある指示が得られているのがわかる。なお、健全部の探傷画像においても、ルート部でのモード変換によると考えられる指示模様が得られており、ノッチのある試験体のM2指示部と位置的に重畳している。しかし、ノッチの試験体のM2指示のエコー高さのピーク位置は、探触子がよりノッチに近い位置にあり、クリーピ

ング波直射による指示の位置に対応していることより、健全部のルート部の指示と判別可能である。

なお、溶接部を施さない母材を切り抜いた本試験体では、クリーピング波の直射でもきずの評価は可能であることを示しているが、実際の探傷部位にはオーステナイト系の隅肉溶接があり、溶込み部や溶接熱影響部をクリーピング波が伝搬することで、きずの検出はより困難になると考えられた。

#### 4. モックアップ試験と実機適用結果

検討した縦波斜角探触子を用いたモード変換法の有効性を確認するために、モックアップ試験を行った。図8に試験に用いた試験体の形状及び外観を示している。外径45 mm φのオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304）配管に、内径46 mm φの配管を隅肉溶接で取付け、ルート部に各種サイズで種々の傾きのノッチを配置した。

縦波斜角探触子によるモード変換法ときずの検出性を比較するために、クリーピング波の直射によるきずの検出性を検討した。得られた結果を、図9に示している。横軸にノッチの傾きを示し、

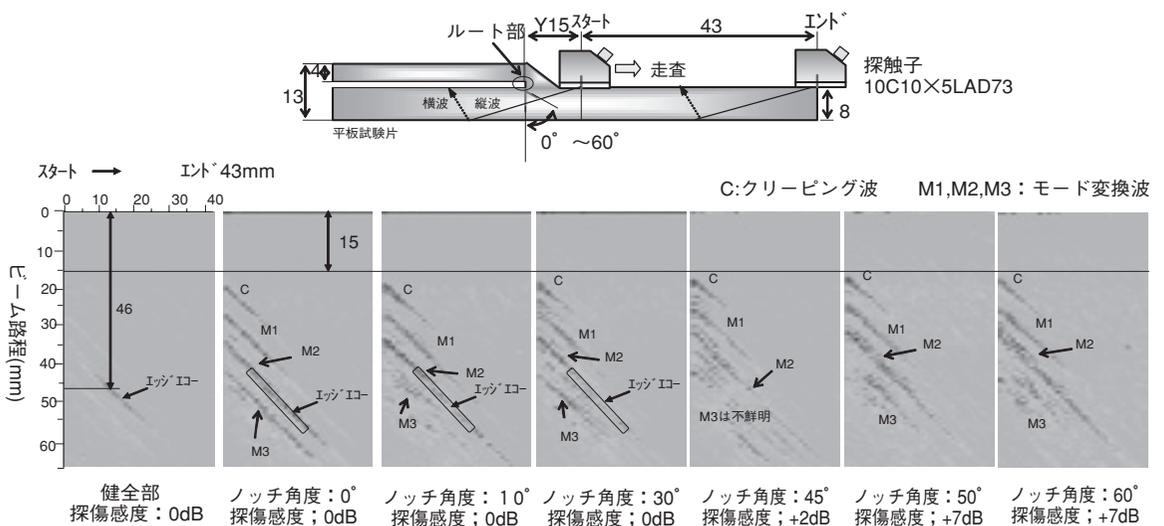
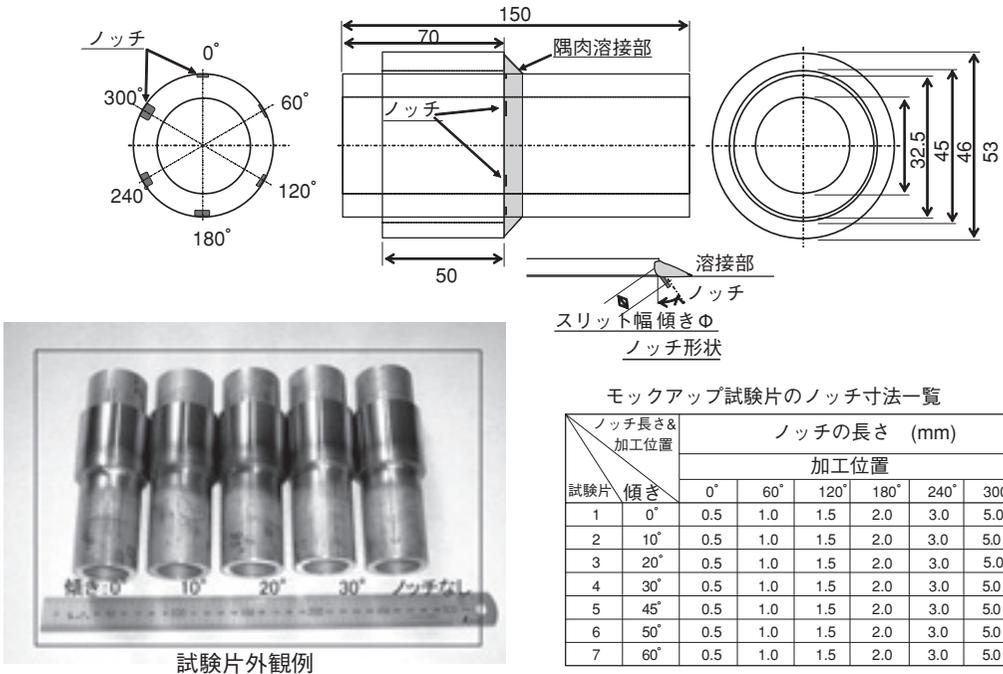


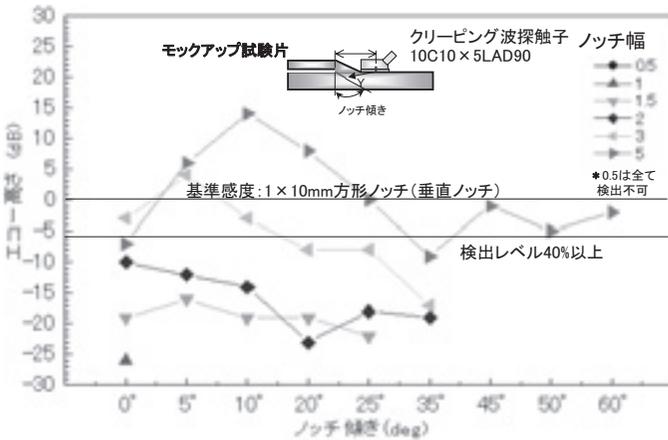
図7 切り抜き基礎試験体の縦波斜角探触子によるモード変換法試験結果



モックアップ試験片のノッチ寸法一覧

試験片	ノッチ長さ&加工位置 傾き	ノッチの長さ (mm)					
		加工位置					
		0°	60°	120°	180°	240°	300°
1	0°	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
2	10°	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
3	20°	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
4	30°	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
5	45°	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
6	50°	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
7	60°	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0

図8 モックアップ試験体の形状と外観



縦軸にエコー高さを示し、ノッチ幅はそれぞれ異なる記号で表している。なお、配管 (SUS304) の外表面に、深さ (スリット幅) 1 mm で、長さ 10 mm の方形スリットを作製し、これのエコー高さを基準感度としてエコー高さを測定した。

0.5 ~ 2 mm のノッチ幅のものは、いずれの傾き角度においても検出できず、3 mm 幅のノッチは、わずかに垂直 ~ 10° の傾きのもののみ検出されている。このように、傾き角度が大きくなると検出できないのがわかる。

なお、対比きずとほぼ同形状のスリットも作製しているが、溶接部では、母材の対比きずと比べてかなりエコー高さが低いことがわかる。先に検討したごとく、隅肉溶接部では、溶込み部や熱影響部をクリーピング波が伝搬してきずを検出する必要があります。

あることや、溶接によるひずみの影響によってエコー高さが低下したと考えられる。また、溶接により、スリットの一部が溶融している場合もあることが確認されている。

縦波斜角探触子を用いたモード変換法の結果を

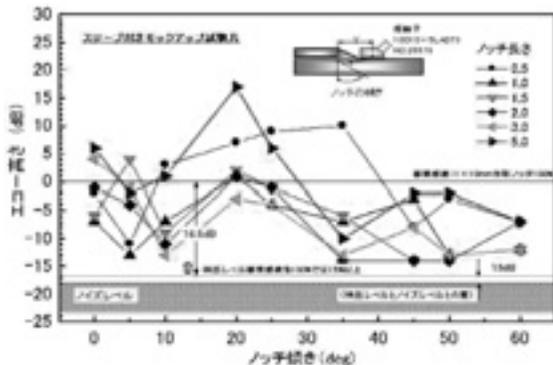


図10 モックアップ試験体によるクリーピング探触子のモード変換法探傷結果

図10に示す。モード変換法で得られる特徴ある指示波形M1、M2、M3において、最も検出性に優れた指示はM2であった。M2の指示の最大エコー高さを図10にまとめている。0.5 mm幅のスリットを初めとして、小さなきずをも検出できているのがわかる。なお、ここでの対比きずにも、クリーピング波探傷の場合と同じ、配管外表面に設けた、深さ(スリット幅)1 mmで長さ10 mmのスリットを用いている。このエコー高さの15%のエコーレベルを検出感度とすることで、ほぼ全てのノッチを検出できるといえる。

検討結果に基づき、現地のSUS304J1HTB 隅肉溶接箇所に対して、探傷方法の適正を確認するための調査を行った。この結果、縦波斜角探触子によるモード変換法によって、数箇所に指示が確認された。指示箇所を抜管して調査したところ、いずれの箇所にも微細なき裂が確認され、探傷方法の適正が確認された。なお、き裂の傾きは24度～57度の広い範囲に分散しており、種々の傾きのき

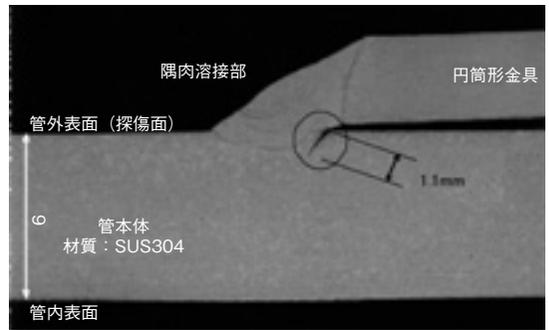


図11 実機探傷でのき裂指示部の抜管試験結果

裂が存在することがわかった。代表的なき裂の断面写真を図11に示す。

## 5. まとめ

オーステナイト系ステンレス鋼配管に円筒形金具が隅肉溶接されている部位のルート部に発生するき裂の検出方法の検討を行った。き裂の検出性は、き裂の傾きに大きく依存し、通常行われているクリーピング波による直射法では、3 mmのスリット幅のき裂も傷の傾きによっては検出できない場合のあることがわかった。これに対して、縦波斜角探触子を前後走査させ、探傷画像を求め、モード変換によって得られるエコー指示を評価するモード変換法を検討した。探触子を試作し、モックアップ試験を行ったところ、大幅に検出性を改善できた。得られた結果を実機に適用し、数箇所にき裂の指示を得た。これらを抜管し調査したところ、種々の傾きの微細なき裂が存在していることが知られ、本探傷方法の有効性を確認した。



検査事業部  
技術部 NDE技術グループ  
芝田 三郎

TEL. 045-759-2163  
FAX. 045-759-2146



検査事業部  
技師長 博士(工学)  
梶ヶ谷 一郎

TEL. 03-3778-7913  
FAX. 03-3778-7951