

# 鑄造ステンレス鋼の超音波探傷において結晶組織が 超音波の入射角と欠陥検出感度に与える影響

## Influence of Crystal Structure on Ultrasonic Incident Angle and Defect Detection Sensitivity for Ultrasonic Inspection of Cast Stainless Steel

黒住 保夫 (Yasuo Kurozumi) \*

**要約** PWRの1次冷却材主配管等に用いられている鑄造ステンレス鋼中では、超音波が結晶組織の影響を強く受けることが知られている。本研究では、鑄造ステンレス鋼中の超音波伝播の挙動を明らかにし、新しい探触子の設計に資するため、鑄造ステンレス鋼への超音波入射角を変化させることにより、材料中におけるその屈折角ならびに欠陥検出感度を調べた。その結果、(1)鑄造ステンレス鋼中の超音波屈折角は、柱状晶と45°をなす方向に最大11.8°シフトすることと、(2)内面開口欠陥の検出感度は入射角が小さいほど大きいことが明らかになった。しかしながら、実際の溶接部での超音波探傷では、入射角を小さくすると欠陥検出感度は増加するが、欠陥以外反射源からの疑似信号が大きくなり、かえって欠陥を識別しにくくなることがわかった。

**キーワード** 超音波探傷, 鑄造ステンレス鋼, 1次冷却材管, 遠心鑄造管, 結晶構造, 入射角

**Abstract** It is well known that ultrasonic waves are strongly influenced by macro structure in cast stainless steel, which is used for the primary pipe or other components in pressurized water reactors (PWRs). In this work, ultrasonic refracted angles and defect detection sensitivities were investigated by changing incident angles in cast stainless steel in order to clarify the transmission of ultrasonic in cast stainless steel and to contribute to the transducer design. As a result, it has become clear that a refracted angle in cast stainless steel shifts to the direction of 45 degrees from the direction of dendritic structures in the maximum 11.8 degrees and that the sensitivity of an inner surface breaking crack increases if the incident angle is smaller. However, in the case of the field ultrasonic inspection of welds, it is clear that if the incident angle is small, the discrimination of the defect becomes difficult, since the false signal becomes large as well as the detection signal sensitivity.

**Keywords** ultrasonic inspection, cast stainless steel, reactor coolant pipe, centrifugally cast pipe, crystal structure, incident angle

## 1. はじめに

鑄造ステンレス鋼は、優れた耐食性、溶接性を有することから、加圧水型軽水炉 (pressurized water reactor, PWR) の1次冷却材主配管やポンプケーシングに使用されている。直管の配管材の場合、本材料は遠心鑄造により製造される。遠心鑄造製の鑄造ステンレス鋼においては、その冷却過程において板厚方向に非常に大きな柱状晶が成長することが知られている。図1に、本研究で使用した遠心鑄造ステンレス鋼試験片の断面マクロ組織の写真を示す。板厚方向に大きく結晶粒が成長している様子が観察される。

この巨大な結晶粒とその異方性が、内部を通過す

る超音波の著しい散乱を発生させるとともに、超音波ビームの方向をシフトさせるため、欠陥信号のSN比の低下による欠陥識別性の低下、欠陥位置誤認等を発生させるため、本材料に対する超音波探傷検査を困難にしている。このような鑄造ステンレス鋼特有の超音波に対する性質に関する研究が幅広く行われている。<sup>(1-19)</sup>

鑄造ステンレス鋼中の超音波の散乱減衰を補償する手段として、材料中に超音波を集束できる2振動子探触子あるいは集束探触子が適している。<sup>(20-24)</sup> 筆者は両探触子の長所を組み合わせた大口徑集束2振動子探触子を開発し、専用の自動走査機構を用いた自動超音波探傷により、鑄造ステンレス鋼溶接部に適用した結果、非常に優れた欠陥検出性能を実証し

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

た。<sup>(25)</sup>ただ探触子の感度が高すぎるために欠陥以外の材料の組織変化，材料内面形状の微小な凹凸等により，欠陥と同様の高い反射エコーを欠陥とみなしてしまう誤コールが発生することがあった．さらに検出した欠陥は，精度よく寸法同定（サイジング）する必要がある．このため本研究では，鋳造ステンレス鋼中の超音波の基本的伝播特性を再度確認し，新しい探触子設計の参考データを得ることとした．

鋳造ステンレス鋼中に入射する超音波は，結晶構造の異方性により伝播特性を変化させる．特に遠心鋳造材においては，柱状晶の成長方向と超音波の入射方向との角度により影響を受ける．この影響は超音波のモードにより異なり，縦波においては，柱状晶の成長方向との角度が $45^\circ$ の方向で最も音速が速くなり，柱状晶とある角度をなして入射する超音波は， $45^\circ$ の方向にシフトすることが知られている．<sup>(3-6,19)</sup>本研究では，入射角を自由に变化させることのできる2振動子探触子を用いて縦波超音波入射角と屈折角の関係を鍛造ステンレス鋼材および鋳造ステンレス鋼材について測定した．さらにステンレス鋳鋼への超音波入射角と欠陥検出性の関係を調べた．

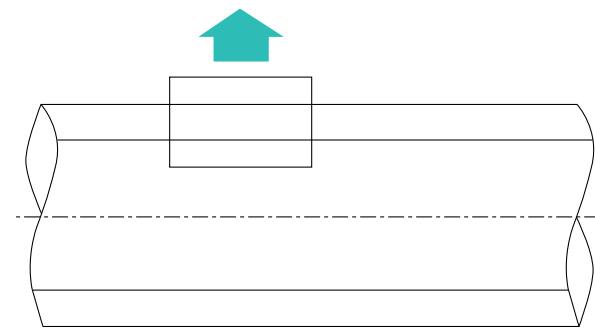
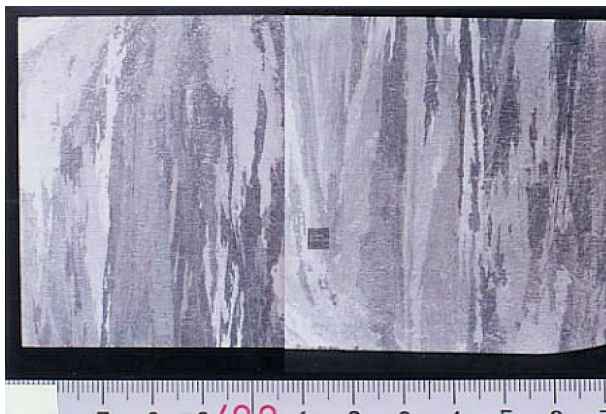
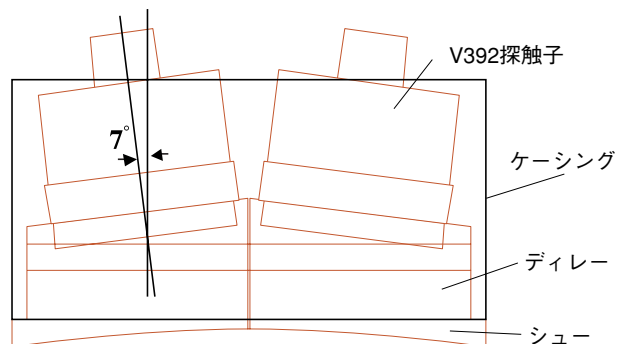


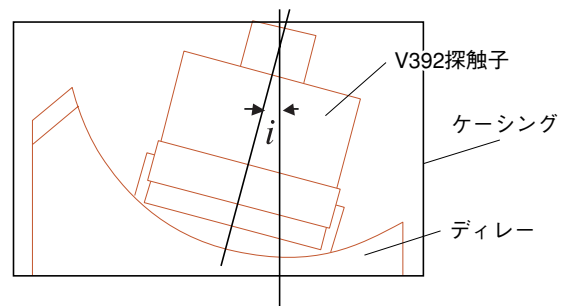
図1 鋳造ステンレス鋼断面マクロ組織

## 2. 実験装置

鋳造ステンレス鋼の結晶方向あるいは欠陥の方向と入射する超音波との関係を調べるため，超音波の入射角を種々变化させる必要がある．このため，入射角可変型探触子を製作した．図2～4に，探触子の形状図ならびに写真を示す．形状図には探触子の前方から見た正面図と横から見た側面図を示す．形状として，鋳造ステンレス鋼の超音波探傷に適した2振動子探触子の設計条件をベースとした．側面図に示すように下部のディレー材の上面を円形に加工した．なお，ディレー材には，音響インピーダンスが水に近いポリスチレン系樹脂を使用した．この上を探触子が自由に回転し，入射角 $i$ を变化させることができる．正面図に示すように，2振動子探触子は2個の振動子が横に並んでおり，探傷する深さによりある角度(屋根角)をなしている．本探触子の場合，屋根角は $7^\circ$ に設定されている．この $7^\circ$ は，厚さ70mmの鋳造ステンレス鋼の底面付近に超音波を収束させることのできる角度であり，筆者が開発した大口径集束2振動子探触子<sup>(25)</sup>とほぼ等しい大きさである．



(正面図)



(側面図)

図2 角度可変2振動子探触子形状図

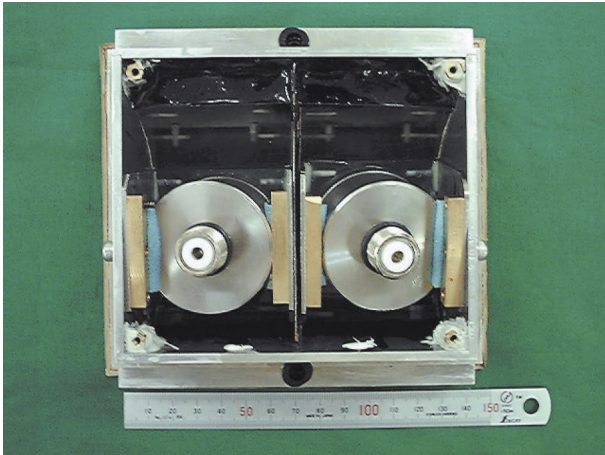


図3 角度可変2振動子探触子（表側）

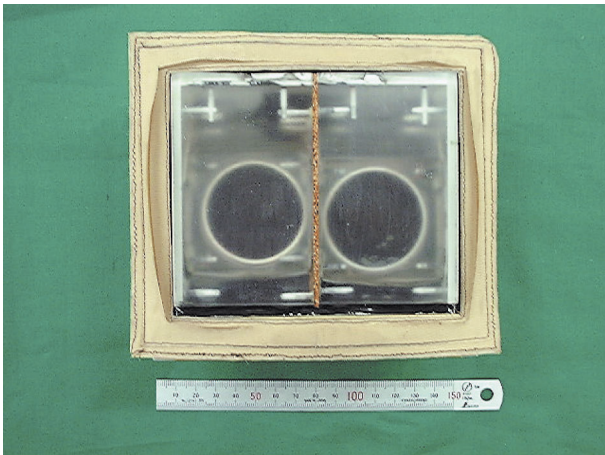


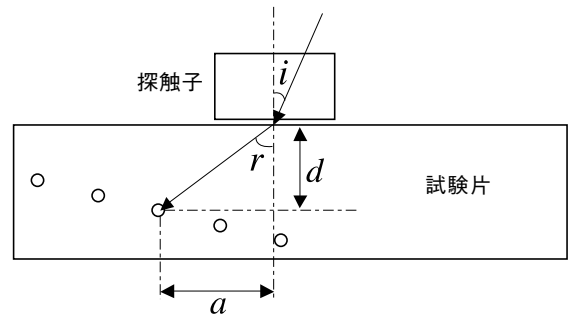
図4 角度可変2振動子探触子（裏側）

側面から見た入射角 $i$ は、ピヴォット構造により $0^\circ$ から $25^\circ$ まで、変化させることができる。超音波を縦波モードで鋼中に入射させる場合、この入射角範囲で $0^\circ$ から $90^\circ$ まで、ほぼすべての範囲の屈折角を得ることができる。ピヴォット構造を有するディレー材に、2個の水浸用垂直探触子を搭載している。探触子は周波数1MHz、広帯域型で、鋳造ステンレス鋼のような粗粒材に適したパナメトリックス製V392を使用した。表1に、この探触子の仕様を示す。

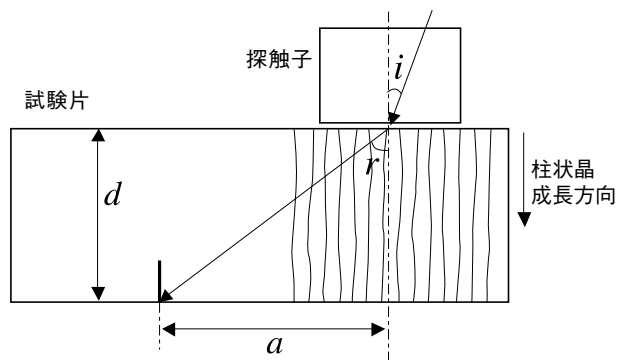
表1 探触子仕様

探触子名	パナメトリックスV392
型式	水浸用垂直探触子
周波数	1MHz
振動子径	38mm(1.5inch)
-6dBバンド幅	64.6%(広帯域)

試験片には、厚さ90mmのSUS304鍛造試験片および厚さ70mmの遠心鋳造製CF-8M鋳造ステンレス鋼の校正試験片を用いた。図5にそれぞれの試験片形状を、図6、7に、探傷データ取得状況を示す。SUS304鍛造試験片は縦200mm、横300mm、高さ88mmで、深さ37, 47, 57, 67, 77mmの位置に直径10mm $\phi$ の横穴が空けられている。本試験片は、鋳造ステンレス鋼と比べ結晶異方性がほとんどなく、超音波伝播特性上等方性均質材とみなすことができる。鋳造ステンレス鋼試験片は縦145mm、横200mm、高さ70mmで、深さ $1/4t$ ,  $2/4t$ ,  $3/4t$  ( $t$ は板厚)の位置に直径4.8mmの横穴と底面に5% $t$ と2% $t$ の深さのEDM (Electronic Discharge Machining: 放電加工)スリットがある。本研究においては、これらEDMスリットを用いた。



(a)SUS鍛造鋼試験片



(b)鋳造ステンレス鋼試験片

図5 試験片形状

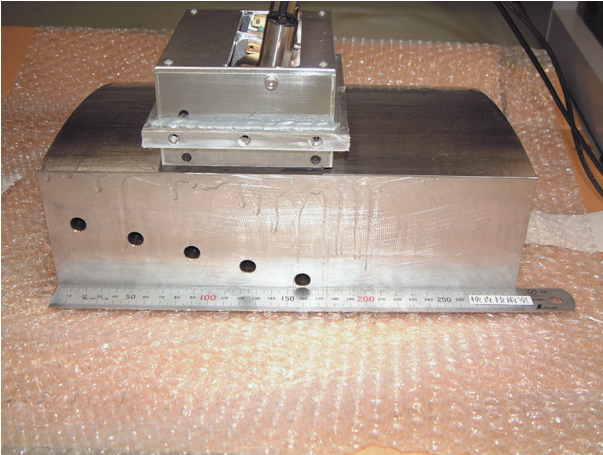


図6 探傷データ取得状況 (SUS鍛造鋼試験片)

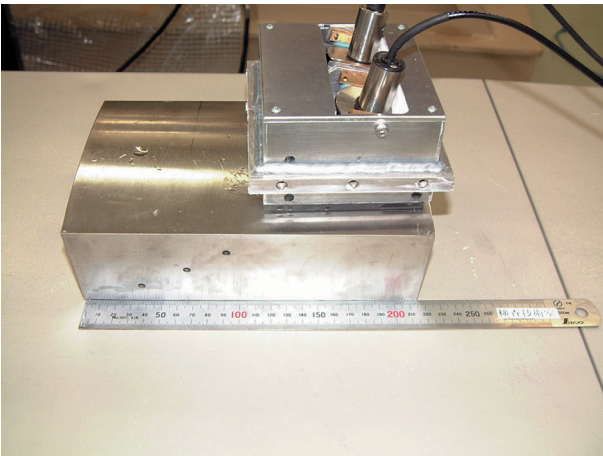


図7 探傷データ取得状況 (鋳造ステンレス鋼試験片)

### 3. 鋳造ステンレス鋼の柱状晶成長方向と超音波入射角

鋼中に入射する超音波の屈折角は、スネルの法則により入射前に通過する媒体中の音速と入射後に通過する媒体中の音速によって決まり、式(1)のように表すことができる。

$$\frac{V_i}{\sin i} = \frac{V_r}{\sin r} \quad \dots (1)$$

$i, r, V_i, V_r$  は、それぞれ入射角、屈折角、入射前の音速、入射後の音速を表す。

材料がSUS304鍛造試験片のように等方性均質材とみなせる場合、試験片中の屈折角は、上式に基づき決まるはずである。SUS304鍛造試験片の横穴を用いて入射角と屈折角の関係を測定した。測定方法は図5(a)に示すとおりである。試験片表面から横穴中心までの深さ $d$ 、探触子の超音波入射点から横穴中心までの水平方向距離 $a$ とすると、屈折角 $r$ は式(2)

$$\tan r = \frac{a}{d} \quad \dots (2)$$

により求まる。 $a$ は、横穴からの反射エコーが最大値を示すときに測定した。入射角 $12.5^\circ$ および $15^\circ$ のときのA-scopeを図8に示す。

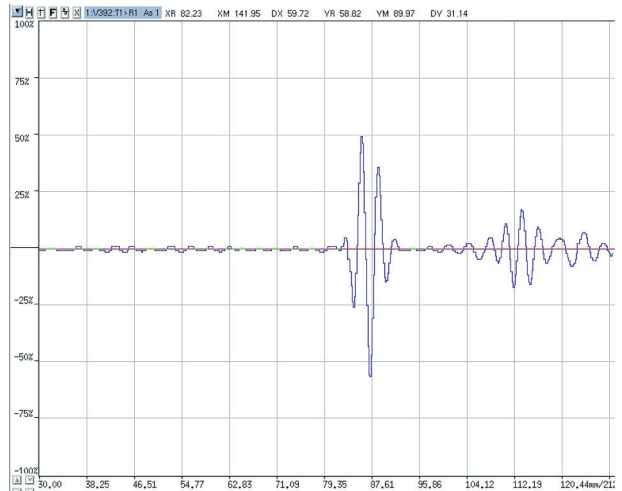
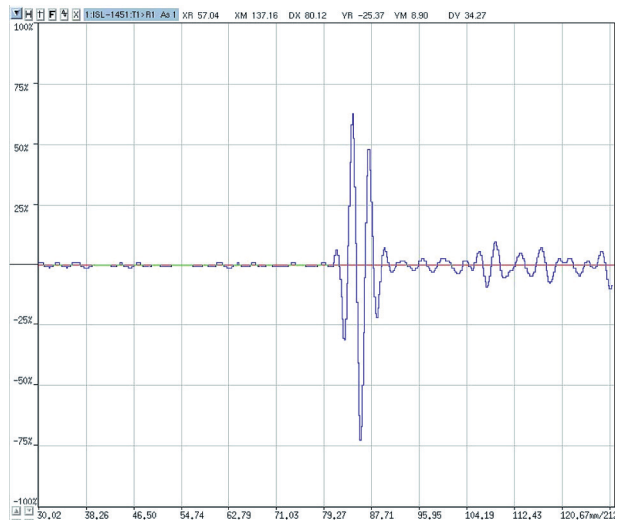
(a) 入射角 $12.5^\circ$ 、67mm横穴 (35dB)(b) 入射角 $15^\circ$ 、67mm横穴 (37dB)

図8 SUS鍛造材のAスコープ

鋳造ステンレス鋼の試験片についても、同様の方法で屈折角 $r$ を測定した。鋳造ステンレス鋼による測定方法は、図5(b)に示すとおりである。図5(b)に示すように、鋳造ステンレス鋼試験片においては、柱状晶が表面にはほぼ垂直に成長しているため、試験片上に設置した探触子から鋼中に伝播する超音波の屈折角 $r$ が、試験片中の柱状晶と超音波伝播方向のなす角度とみなすことができる。鋳造ステンレス鋼試験片の場合は、5%tスリットを用いた。この場合、

深さ $d$ はちょうど板厚に相当し、 $d = 70\text{mm}$ である。表2に、SUS304鍛造試験片と鍛造ステンレス鋼試験片の屈折角 $r$ の測定結果を示し、図9に入射角と屈折角の関係を示す。また、図中の曲線は、ポリスチレン樹脂中の縦波音速を $2350\text{m/s}$ 、鋼中の縦波音速を $5920\text{m/s}$ としたときの屈折角 $r$ の計算値であり、式(1)から導いた式(3)から求めた。

$$r = \arcsin\left(\frac{5920}{2350} \sin i\right) \dots (3)$$

表2 SUS鍛造材試験片と鍛造ステンレス鋼試験片の入射角と屈折角測定値

入射角(°)	SUS 屈折角(°)	CS 屈折角(°)
7.5	18.2	28.4
10.0	24.5	34.0
12.5	32.1	38.7
15.0	38.8	43.0
17.5	49.6	47.3
20.0	52.1	48.8

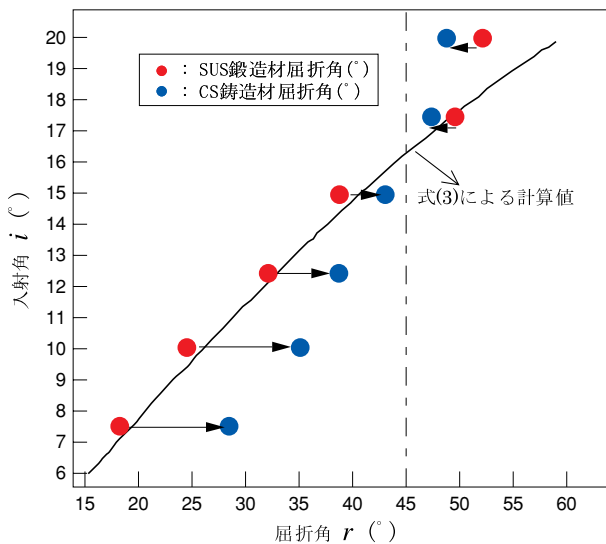


図9 鍛造ステンレス鋼の結晶方向に対する入射角と屈折角の関係

図からわかるように、SUS304鍛造試験片中の屈折角 $r$ は、ほぼ計算値に近い値となっており、樹脂中および試験片中の音速の設定値が実際の音速とほぼ一致していたことがわかる。一方、鍛造ステンレス鋼試験片中の屈折角 $r$ は、鍛造試験片中の屈折角 $r$ と比べ $45^\circ$ より小さい屈折角 $r$ は増加し、 $45^\circ$ より大きい屈

折角 $r$ は減少している。その変動幅は、鍛造試験片中の屈折角 $24.5^\circ$ のとき最大となり $11.8^\circ$ に及んだ。この傾向は、文献データとも一致している。<sup>(5,6)</sup>

鍛造ステンレス鋼中の超音波が、試験片中の柱状晶と超音波伝播方向のなす角度 $45^\circ$ の方向に屈折角をシフトさせることは、以前より実験的にもシミュレーションによっても明らかにされていた。<sup>(3-6, 19)</sup>本研究においても、あらためてこれを裏付ける結果を得ることができた。これらのデータは今後の探触子設計ならびに実際の探傷データ分析の参考とすることができる。さらに探触子設計ならびに探傷データ分析を綿密なものにするためには、溶接部を模擬した試験片を用いたデータを取る必要がある。

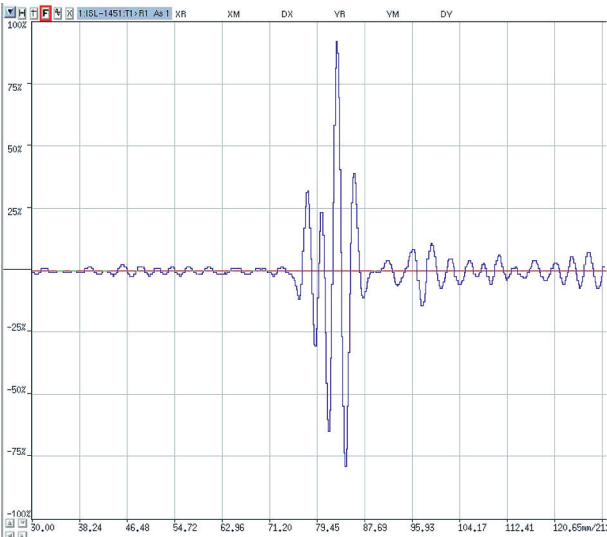
#### 4. 超音波入射角と欠陥検出性

超音波探傷においては、検査対象となる欠陥の性状により使用すべき探傷法が異なる。溶接部の溶け込み不良やブローホールなど機器の製造時に材料内部に発生する欠陥に対しては、垂直探傷法が有効である。一方、機器の使用期間中には、割れ等の材料表面に発生する開口欠陥が多い。このような欠陥に対しては、斜角探傷法が有効である。

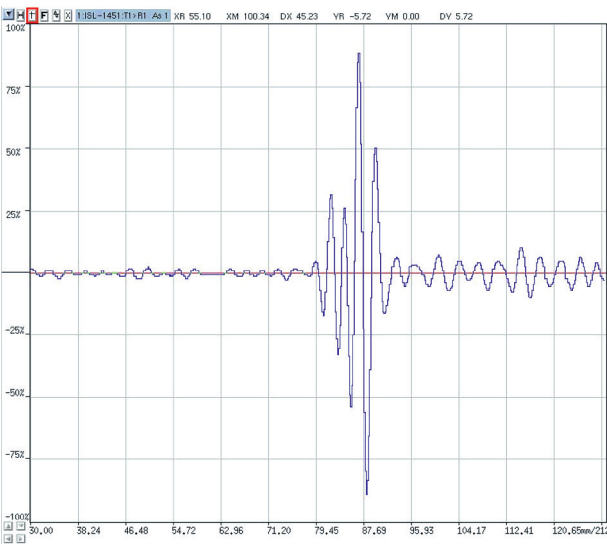
本研究では、鍛造ステンレス鋼中の割れ等の表面開口欠陥に対し有効な2振動子探触子を用いた斜角探傷法に関し、超音波入射角と欠陥エコー検出感度の関係について調べた。探触子は、前章と同様の入射角可変型探触子を用い、入射角を $7.5^\circ$ から $10^\circ$ 、 $12.5^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $17.5^\circ$ および $20^\circ$ に変化させた。また、開口欠陥として鍛造ステンレス鋼試験片中の $2\%t$ と $5\%t$ スリットを使用した。測定方法は、図5(b)に示すとおりである。なお、筆者が開発した大口徑集束2振動子探触子の入射角は、 $15^\circ$ である。

入射角 $7.5^\circ$ 、 $12.5^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $17.5^\circ$ および $20^\circ$ の場合の $5\%t$ スリットに関するA-scopeを図10に示す。各図の縦軸は反射エコー強度を表し、横軸は距離で表示した時間軸である。反射エコーの位置は、入射角が増加するのともなって、次第に増加している。これらのエコーは、入射角スリット下端のコーナーエコーである。これら反射エコーの立ち上がり位置は、前章の実験で得られた $28.4^\circ$ 、 $43.0^\circ$ 、 $48.8^\circ$ の屈折角から計算した超音波ビーム路程とほぼ一致している。各A-scopeから明らかなように、スリットからの反射エコーは、入射角が小さいほど大きい。また図10(c)の入射角が $12.5^\circ$ の場合、波形が2つのピークを示し

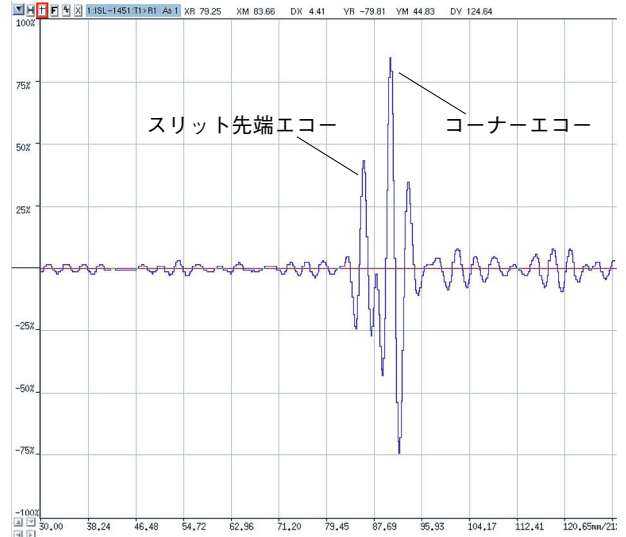
ている。これは、図中に示すようにスリット下端からのコーナーエコーとともに、スリット先端からのエコーを捕らえているものと推定される。



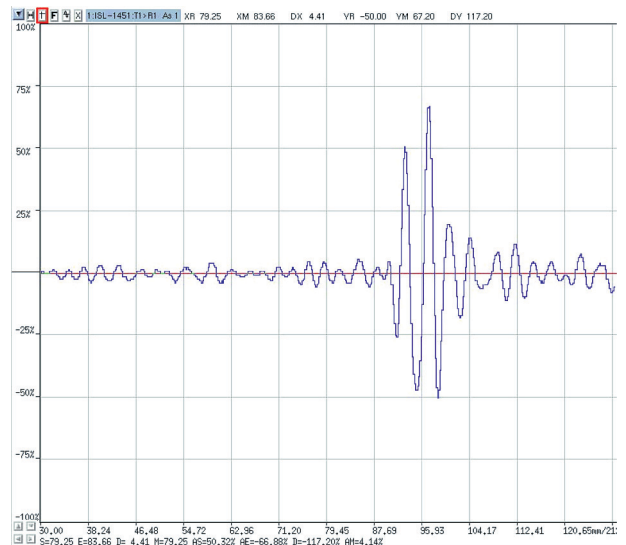
(a) 7.5CS 5 %-47dB



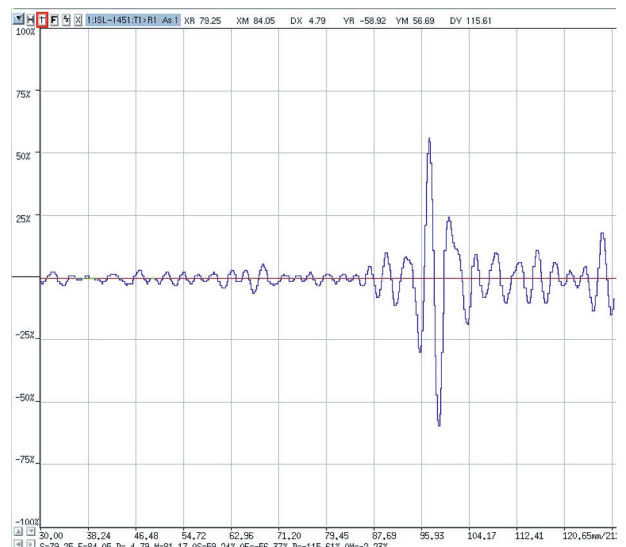
(b) 10CS 5 %-49dB



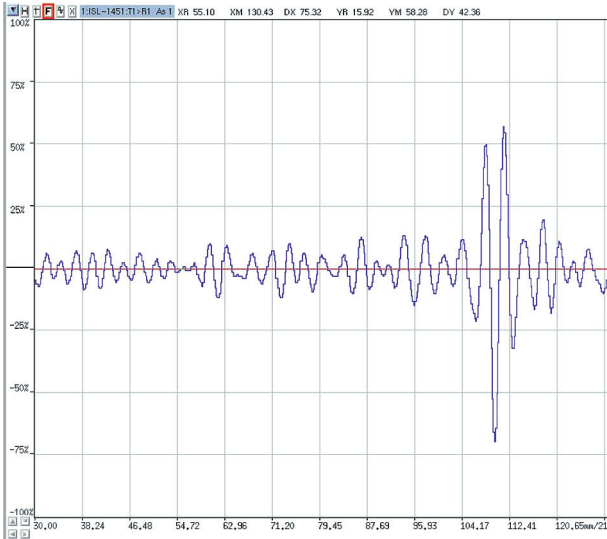
(c) 12.5CS 5 %-49dB



(d) 15CS 5 %-54dB



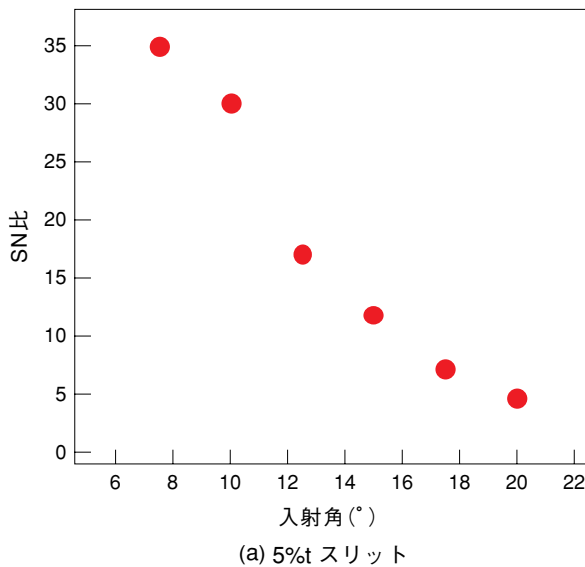
(e) 17.5CS 5 %-54dB



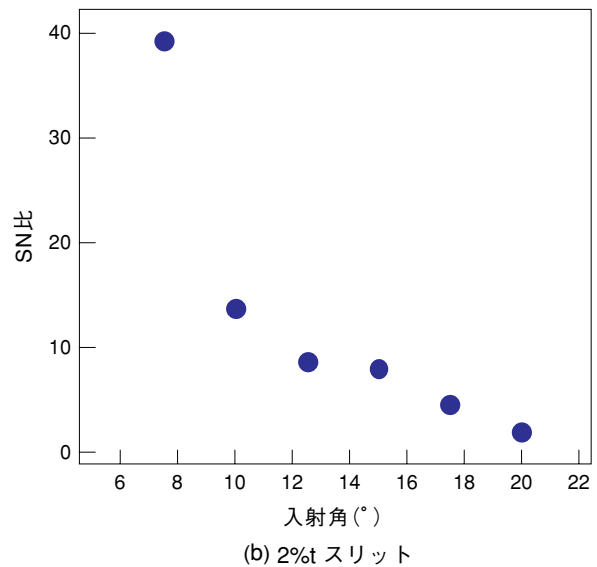
(f) 20CS 5 %-58dB

図10 鋳造ステンレス鋼試験片 5 %tスリットのAスコープ

5 %t, 2 %tスリットからの反射エコーのSN比を図11に示す. 各グラフには, 大口径集束2振動子探触子の場合のSN比データも合わせてプロットした. 5%tスリット反射エコーのSN比は, 入射角が20°の4.6から入射角が7.5°まで小さくなるにしたがって次第に増加し, 入射角7.5°で34.9に達する. 2 %tスリット反射エコーのSN比も同様の傾向を示し, 入射角が20°の1.9から入射角が7.5°まで小さくなるにしたがって次第に増加し, 入射角7.5°で39.2に達する. また, 入射角7.5°の場合, 5 %tスリットよりも2 %tスリット反射エコーのSN比のほうが高かった.



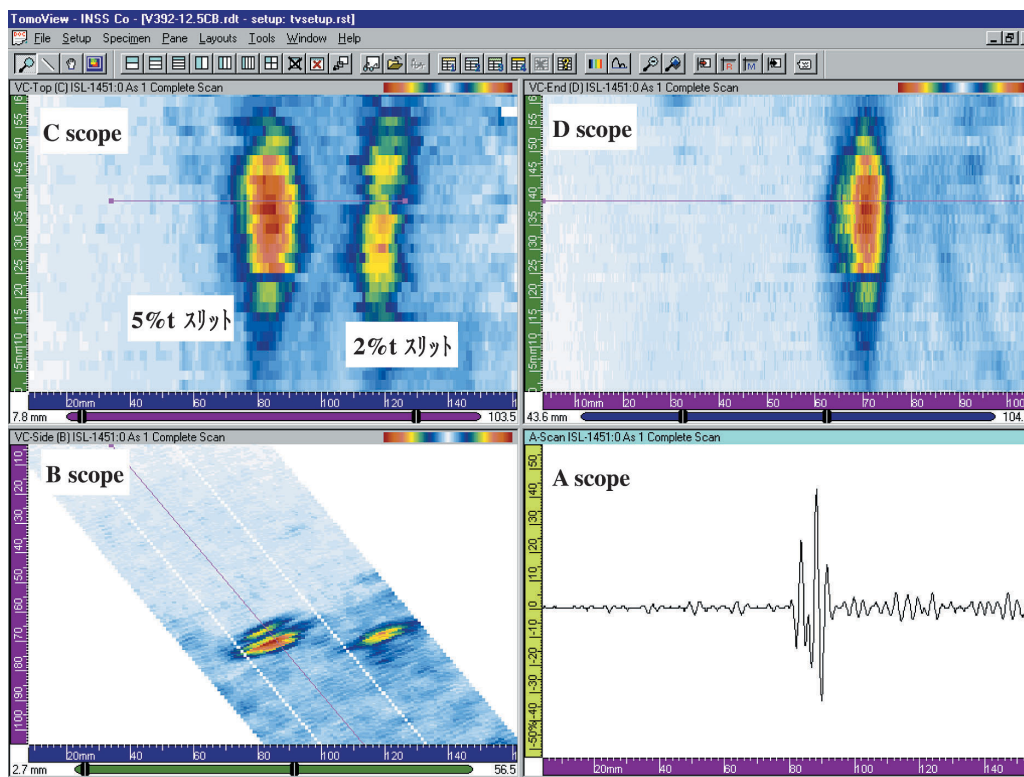
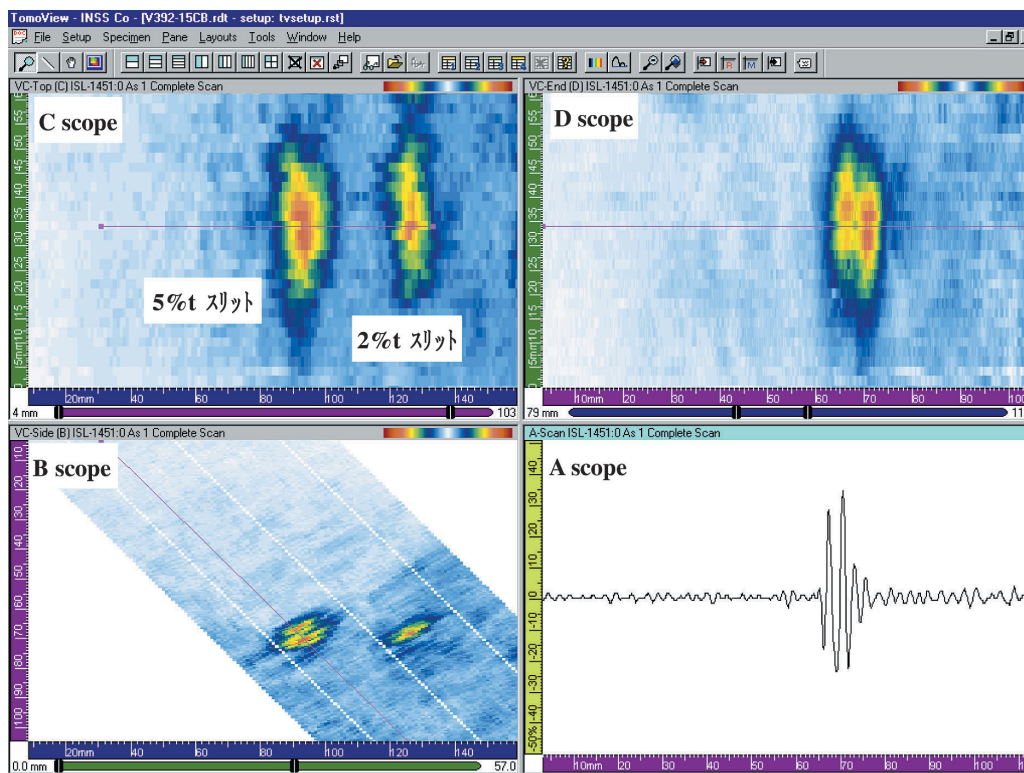
(a) 5%t スリット



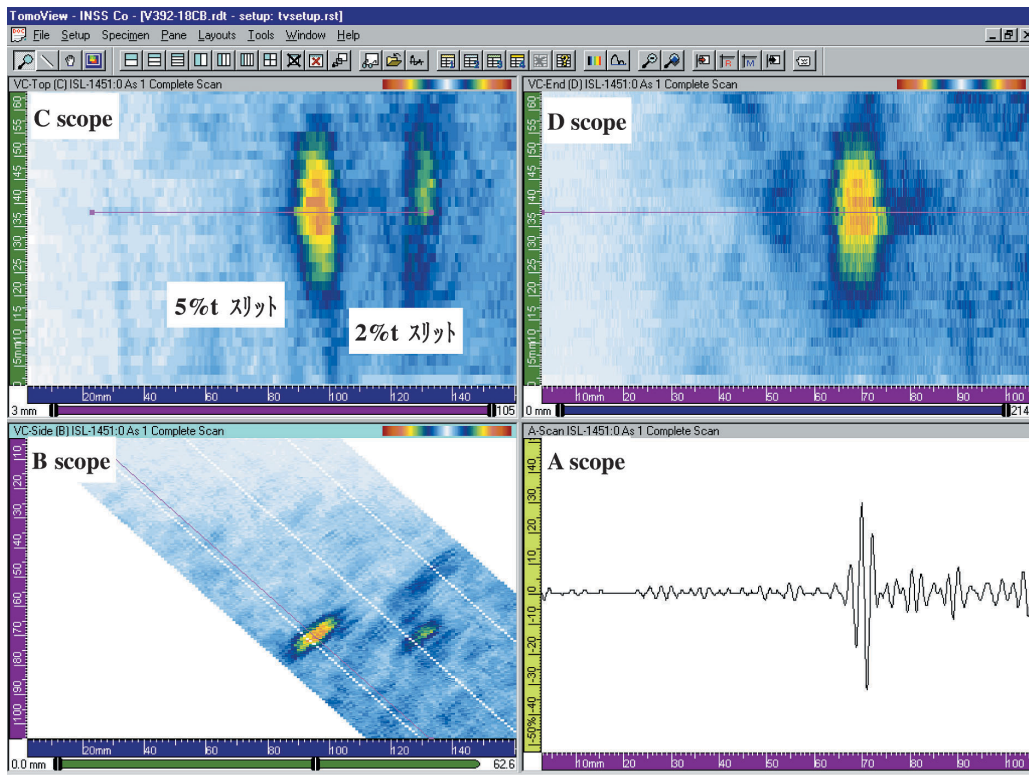
(b) 2%t スリット

図11 EDMスリット反射エコーのSN比

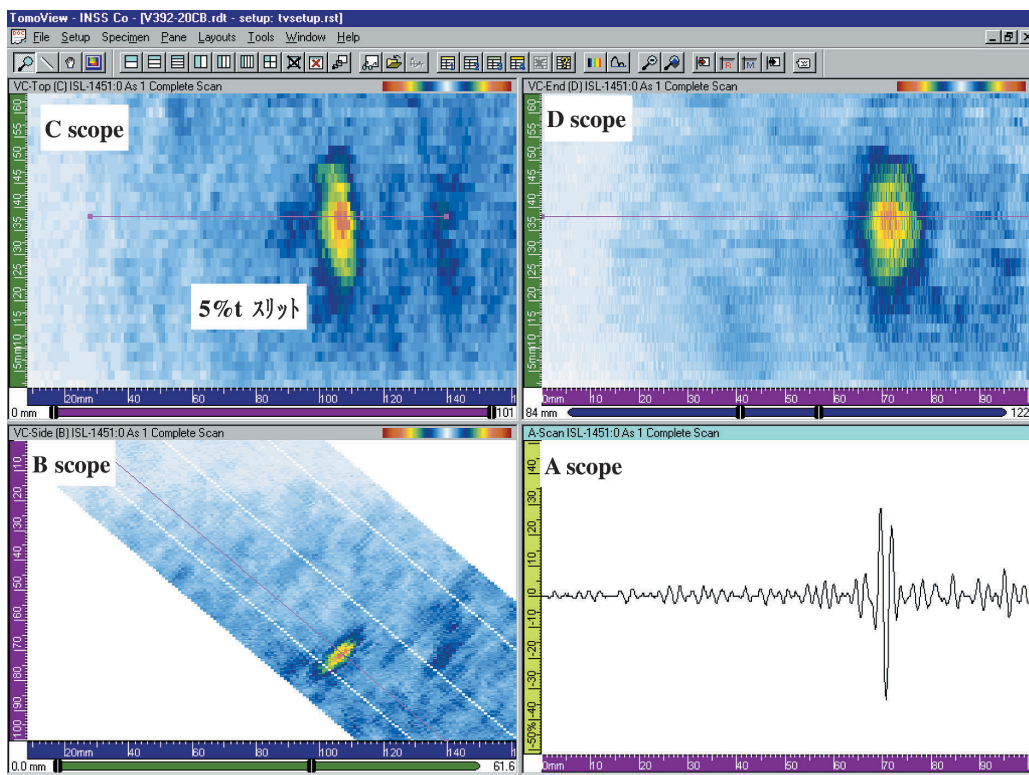
入射角が12.5°, 15°, 17.5°, 20°の場合における鋳造ステンレス鋼中の5%tスリットのA, B, C, D-scope画面を図12に示す. 本データは, 縦方向に2 mmピッチ, 横方向に1 mmピッチで走査したものである. C-scopeには, 5 %t, 2 %tスリットの双方が確認される. D-scope画面は, 5 %tスリットにゲートを調整したデータである. 欠陥エコーのSN比は, 入射角が大きくなるにつれて次第に減少している. 入射角が15°の場合には, D-scope画面で信号強度の高い部分が二重になっている. これは, 入射角が12.5°のA-scopeで観察されたのと同様, 欠陥先端の回折波を捕らえているためと思われる. 画面上から評価される欠陥深さは約5 mmで, 実際の欠陥深さ5 %t (=3.5mm) にほぼ近い値であるが, データ上は少し大きめとなっている. この誤差の原因は, 1 MHzという低周波数であることと, 振動子の口径が38mmと大きいことにともない超音波ビーム有効範囲が大きいことから, 本探触子の分解能がそれだけ低いことが原因と思われる. 一方C-scopeから見た欠陥長さは, 各データとも約30mmで, 実際のスリットの長さ30mmとほぼ一致している. 以上の結果より, 開口欠陥の検出感度のみに着目すれば, 超音波の入射角は鋳造ステンレス鋼中の入射角の小さいほうがよいことがわかった.

(a) 入射角  $12.5^\circ$ (b) 入射角  $15^\circ$





(c) 入射角 17.5°

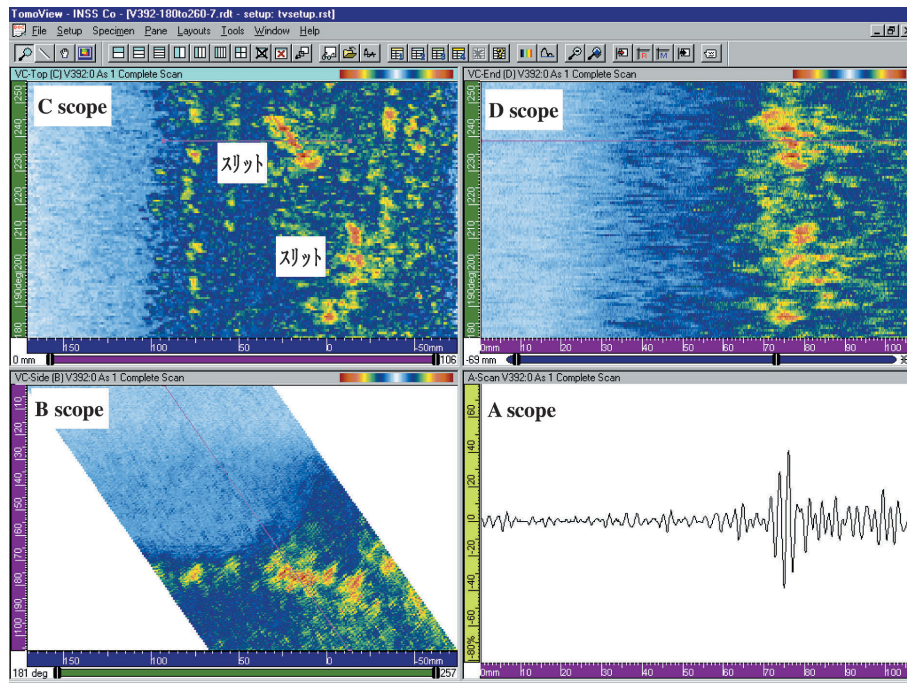


(d) 入射角 20°

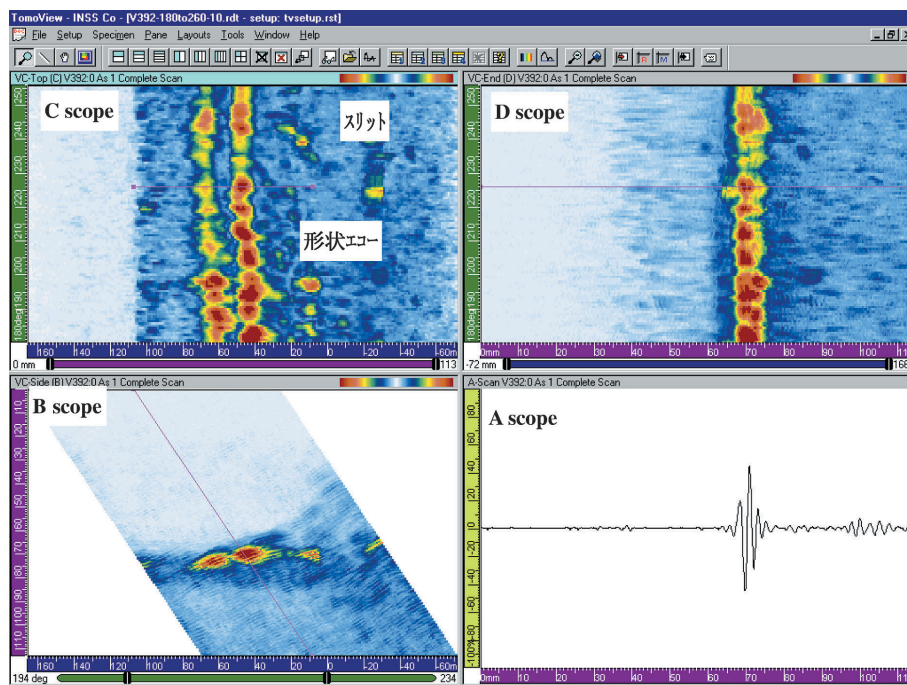
図12 EDMスリットのA, B, C, Dスコープ

次に、実際の1次冷却材管を模擬した試験体で入射角による欠陥検出性への影響を調べた。図13に、入射角15°と12.5°の場合のA, B, C, D-scope画面を示す。入射角15°（铸造ステンレス鋼中入射角43°）の場合、2箇所の欠陥が確認される。これらは、どちらもEDMスリットである。入射角12.5°（铸造ステンレス鋼中入射角38.7°）の場合、欠陥信号も確認されるが、欠陥よりもはるかに高いレベルの信号が観察さ

れる。これは、カウンターボア部からの形状エコーである。この形状エコーが欠陥の識別を困難にしている。これは、超音波の入射角が小さくなると開口欠陥からの反射エコーのSN比が大きくなるが、超音波ビームが下向きになることによって欠陥と同時に欠陥以外の内面の形状変化にも敏感に反応するようになることが原因と思われる。



(a) 入射角15°



(b) 入射角12.5°

図13 実機模擬試験体の自動超音波探傷結果

## 5. まとめ

角度可変型 2 振動子探触子を用いて入射角を変化させ、鋳造ステンレス鋼中の屈折角と鍛造ステンレス鋼中の屈折角を比較した。さらに、鋳造ステンレス鋼中屈折角と内面開口欠陥検出感度との関係について調べた。その結果、下記のことがわかった。

- (1) 鋳造ステンレス鋼中の超音波屈折角は、すべての角度が45°方向にシフトする傾向があることを確認し、設計屈折角と実際の屈折角の差を定量的に得ることができた。この差は、最大11.8°に達する。
- (2) 欠陥検出感度は、入射角が小さい方が高くなる傾向にあるが、1次冷却材管溶接部模擬試験体の探傷結果から、入射角が15°より小さいと形状エコーが相対的に高くなることがわかった。

設計屈折角と実際の屈折角の差に関しては、欠陥のサイジングに際し、考慮する必要がある。探触子の入射角は、欠陥エコーのSN比のみに着目すれば、小さいほど良いが、形状エコーレベルとの相対感度も増加する。このことから既に開発した探触子の入射角15°よりも大きい入射角の中で最適角度を選定することが、誤コール低減のために必要であることがわかる。

## 文献

- (1) Argonne National Lab, "Analytical ultrasonics for structural materials," Analytical Ultrasonics Conference, p.14 (1984).
- (2) T.N.Claytor, D.S.Kupperman, K.J.Reimann, "Visualization of Ultrasonic-Beam Distortion in Anisotropic Stainless Steel," *Journal de Physique Colloque*, **46** [C-10], p.795 (1985).
- (3) D.S.Kupperman, K.J.Reimann, "Ultrasonic NDE of Cast Stainless Steel," *NDT International*, **20** [3], p.145 (1987).
- (4) P.Jeong, "Application of Ultrasound Ray Tracing for Cast Stainless Steel Components and Austenitic Welds Examination in Nuclear PowerPlant," *Review of Progress Quantitative Nondestructive Evaluation*, **8**, p.1131 (1989).
- (5) P.Jeong, F.Amirato, "Ultrasonic Evaluation of Cast Stainless Steel Component," *Review of Progress Quantitative Nondestructive Evaluation*, **8**, p.2105 (1989).
- (6) P.Jeong, F.Amirato, *Ultrasonic Examination of Cast Stainless Steel*, EPRI NP-6299 Project 1570-2 Topical Report, (1989).
- (7) W.Lord, "Forward and inverse NDE problems," *Proc. the ISMM Int. Sympo. Computer Applications in Design, Simulation and Analysis*, p.113 (1989).
- (8) M.S.Good, E.R.Green, "Mapping of 1-MHz, 45° Longitudinal-Wave Fields in Centrifugally Cast Stainless Steel," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **8A**, p.889(1989).
- (9) J.L.Rose, K.Balasubramaniam, A.Tverdokhlebov, "Numerical integration Green's function model for ultrasonic field profiles in mildly anisotropic media," *Journal of Nondestructive Evaluation*, **8** [3], (1989).
- (10) P.D.Young, L.S.Lai, C.T.Eon, *Development of nondestructive testing technology for the pressure boundary*, KAERI/RR-856/89, p.106(1990).
- (11) R.B.Thompson, "Ultrasonic wave propagation in cast stainless steel," *Proc. from the tenth annual EPRI NDE information meeting*, 8.1, (1990).
- (12) M.S.Good, B.P.Hildebrand, C.M.Batson, "Phase Mapping of Ultrasonic Fields Passed Through Centrifugally Cast Stainless Steel," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **10B**, (1990).
- (13) A.Minachi, R.B.Thompson, "Ultrasonic Wave Propagation in Inhomogeneous, Anisotropic Cast Stainless Steel", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **10B**, (1990).
- (14) J.L.Rose, T.D.K.Ngok, A.Tverdokhlebov, K.Balasubramaniam, Y.Huang, "Ultrasonic interactions with CCSS (Centrifugally Cast Stainless Steel) and guidelines for CCSS inspection," *Proc. from the tenth annual EPRI NDE information meeting*, **10.1**, (1990).
- (15) A.Minachi, R.B.Thompson, "Ultrasonic Wave Propagation in Inhomogeneous, Anisotropic Cast Stainless Steel," *Review of Progress in*

- Quantitative Nondestructive Evaluation*, **10B**, (1991).
- (16) B.P.Hildebrand, M.S.Good, A.A.Diaz, E.R.Green, "Application of Critical Angle Imaging to the Characterization of Cast Stainless Steels," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **11A**, p.863 (1992).
- (17) M.S.Good, B.P.Hildebrand, C.M.Batson, "Phase Mapping of Ultrasonic Fields Passed Through Centrifugally Cast Stainless Steel," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **10B**, p.1982 (1990).
- (18) S.L.Lee, H.T.Lim, C.S.Park, B.C.Kim, "Ultrasonic testing simulation in austenitic stainless steel weld by ray tracing technique," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, **15**, p.310 (1995).
- (19) 西野俊一, 肥田善雄, 山本通雄, "オーステナイト系ステンレス鋼溶接部超音波探傷法の研究," *三菱重工技報*, **18** [4], p.23 (1997).
- (20) P.Dombret, P Caussin, P.Rorive, "Developing ultrasonics for PWR pump bowl in-service inspection," *Nuclear Engineering*, **35**, p.42 (1990).
- (21) P.Dombret, "Methodology for the ultrasonic testing of austenitic stainless steel," *Nuclear Engineering and Design*, **131**, p.279 (1991).
- (22) J.M.Bordier, M.Fink, A.L.Brun., F.C.Tenoudji, "The random phase transducer in ultrasonic nondestructive testing of coarse grain stainless steel: An original tool to characterize multiple scattering effect," *Proc. IEEE 1992 Ultrasonics Symposium*, **2**, p.877 (1992).
- (23) P.Lemaitre, T.D.Koblè, *Report on the evaluation of the inspection results of the cast-to-cast PISC III Assemblies no.41, 42 and weld B of Assembly 43*, PISC III Report no.34 European Commission, (1995).
- (24) P.Lemaitre, T.D.Koblè, *Report on the evaluation of the inspection results of the wrought-to-cast PISC III Assemblies 51 and weld A of Assembly 43*, PISC III Report no.35 European Commission, (1995).
- (25) Y.Kurozumi, "Development of an ultrasonic inspection technique for cast stainless steel," *Insight*, **44**, p.437 (2002).