

マトリクスアレイセンサを用いた 音響異方性媒質の超音波検査技術の開発

Development of Ultrasonic Inspection Techniques
using a Matrix Array Transducer for Acoustical Anisotropic Media

(株)日立製作所 河野 尚幸 Naoyuki KONO Member

We have been developing ultrasonic testing techniques for acoustical anisotropic media. In this study, we have applied the phased array method using a matrix array transducer to directionally-solidified austenitic steels, i.e. homogeneous anisotropic media, as a first step. Behavior of ultrasonic wave propagation in anisotropic media was analyzed by means of point-source modeling and ray tracing. Insonification angle was optimized in consideration of beam divergence effect based on results of the point source modelling; delay laws and image distortion were calculated by propagation time of group velocity vectors using the ray tracing. We confirmed improvement of sizing accuracy by experiments for artificial notched in directionally-solidified austenitic steels.

Keywords: phased array, matrix array, anisotropy, austenite, ray tracing, sizing

1. 背景

ステンレス鋼やニッケル基合金などのオーステナイト系材料は、その耐熱性や耐食性から、発電所における主要な機器に広く使用されている。しかしながら、オーステナイト系材料の溶接部や鋳造材は、炭素鋼などと比較して、音響異方性が強いために、超音波の伝搬挙動がより複雑となることが知られている。そのため、超音波検査において、SN比の低下やビームの曲がりといった現象が生じる可能性がある。

オーステナイト系材料の凝固組織は、立方晶系の結晶粒から構成される多結晶構造をしており、溶接後の冷却等による結晶成長方向は、 $\langle 100 \rangle$ 方向に揃い、その直交方向はランダムに分布する。このため、凝固組織は局所的には、一方向凝固組織とみなせるため、横等方性として近似的に扱うことが可能となる。

オーステナイト系材料の溶接部における超音波伝搬挙動に関しては、1970年代以降、音速や減衰の角度依存性など、多くの研究が報告されている[1-5]。音速の角度依存性は理論と実験がよく一致している。

一方、減衰への寄与は、結晶粒などによる散乱減衰と、幾何学的に広がる拡散減衰の2種類が主要因である。減衰の角度依存性を測定した実験では、結晶成長方向 $\langle 100 \rangle$ に対して約 45° 方向で減衰が少なくなる報告がなされている[6]。しかしながら、散乱減衰の理論では結晶成長方向と平行な $\langle 100 \rangle$ 方向で減衰率が小さくなるとされており、この傾向を説明できない。これに対して、Seldisらが超音波の受信波形の位相補正を行うことで散乱減衰の理論と一致する報告をしている[7-9]。これに対し、著者らは、均質異方性媒質を対象に、半無限平面上の点音源の積分モデルにより伝搬挙動を定式化し、異方性による拡散減衰の効果が、結晶成長方向 $\langle 100 \rangle$ に対して約 45° 方向に伝搬する場合に小さくなることを確認した[10]。

本研究では、異方性媒質の超音波検査技術の開発として、均質異方性材である一方向凝固材を対象にマトリクスアレイセンサを用いたフェーズドアレイ法を適用した。異方性媒質の伝搬挙動を考慮し、超音波検査に用いる屈折角の選定、遅延時間、表示補正を行い、サイジング精度の改善を試みた。

連絡先: 河野 尚幸

〒319-1221 茨城県日立市大甕町 7-2-1 (株)日立製作所
研究開発グループ エネルギーイノベーションセンタ
原子力システム研究部

E-mail: naoyuki.kono.jm@hitachi.com

2. 異方性媒質中の超音波伝搬

2.1 理論

半無限平面における等方媒質中の弾性波の遠方場は、

点音源からの広がりを表わす球面波、角度依存性を持つ指向性、偏波方向ベクトルの積を、音源領域 S_T にわたって積分することで、式(1)のように表わされる。これは、Rayleigh-Sommerfeld 積分モデルとして知られている[11]。

$$\mathbf{u}^{\text{iso}} = \frac{e^{-i\omega t}}{2\pi} \int_{S_T} \frac{1}{c_L} \cdot \frac{P_0 K_L(\theta) \mathbf{p}_L}{\rho c_L} \cdot \frac{\exp(ik_L D)}{D} dS_y \quad (1)$$

$$+ \frac{e^{-i\omega t}}{2\pi} \int_{S_T} \frac{1}{c_T} \cdot \frac{P_0 K_T(\theta) \mathbf{p}_T}{\rho c_T} \cdot \frac{\exp(ik_T D)}{D} dS_y$$

ここで、 \mathbf{u} は変位ベクトル、 ω は超音波の角振動数、 c_L と c_T は等方性媒質中の縦波および横波音速、 ρ は密度、 P_0 は半無限平面上の音源領域に付与される一様圧力、 \mathbf{p} は偏波方向を表す単位ベクトルである。 $K_L(\theta)$ 及び $K_T(\theta)$ は指向性関数であり、(2)、(3)式で与えられる。

$$K_L(\theta) = (1 + R^{LL}(\theta)) (\mathbf{e} \cdot \mathbf{p}^L) + (\mathbf{e} \cdot \mathbf{p}^T) R^{LT}(\theta) \quad (2)$$

$$K_T(\theta) = (1 + R^{TT}(\theta)) (\mathbf{e} \cdot \mathbf{p}^T) + (\mathbf{e} \cdot \mathbf{p}^L) R^{TL}(\theta) \quad (3)$$

R は半無限平面に対する反射率であり、例えば、 $R^{LT}(\theta)$ は縦波 (L) が入射した場合の横波 (T) の θ 方向の反射率を表す。 \mathbf{e} は圧力 P_0 付与方向を表す単位ベクトルである。

異方性媒質に対しても等方性媒質と同様に、点音源モデルで定式化できる。半無限平面における異方媒質中の弾性波の遠方における変位 ($\mathbf{u}^{\text{aniso}}$) は、距離を分母に持つ点音源からの広がりを表わす振動関数と、指向性関数、偏波方向ベクトルの積を、音源領域にわたって積分することで表される[10]。特に、準縦波 (qL : quasi-longitudinal) の成分を取り出すと、式(4)のように表すことができる。

$$\mathbf{u}^{\text{aniso}} = \frac{e^{-i\omega t}}{2\pi} \int_{S_T} \frac{1}{|k_1^{qL} k_2^{qL}|^{1/2}} \cdot \frac{P_0 K_{qL}(\theta) \mathbf{p}_{qL}}{\rho V_3^{g(qL)}} \cdot \frac{\exp \left[i\omega (s_3^{p(qL)} x_3^{p(qL)}) + i \frac{\pi \sigma^{p(qL)}}{4} \right]}{x_3^{p(qL)}} dS \quad (4)$$

なお、式(4)において、遠方場における変位の観測点を、添字 1~3 を持つ局所座標系 $(0, 0, x_3^{p(qL)})$ で表記した。また、 \mathbf{s} はスローネスベクトル(向きは位相速度と等しく、大きさは位相速度の逆数)、 V^g は群速度、である。

$k_1^{qL} k_2^{qL}$ は準縦波に対するスローネスの主曲率の積、すなわち、3次元空間の方向に対するスローネス分布(ス

ローネス曲面) の Gauss 曲率である。また、 $\sigma^{p(qL)}$ は主曲率の符号の和、すなわち、 $\text{sgn } k_1^{qL} + \text{sgn } k_2^{qL}$ である。

準縦波に対する指向性関数 $K_{qL}(\theta)$ は、偏波方向の単位ベクトル \mathbf{p} 、半無限平面に対する反射率 R を用いて、式(5)のように書くことができる。

$$K_{qL}(\theta) = (1 + R^{qLqL}) (\mathbf{e} \cdot \mathbf{p}^{qL}) \quad (5)$$

$$+ (\mathbf{e} \cdot \mathbf{p}^{qT1}) R^{qLqT1} + (\mathbf{e} \cdot \mathbf{p}^{qT2}) R^{qLqT2}$$

等方性に対する式(1)の右辺第一項と、異方性に対する式(4)を比較すると、類似の構成であることが分かる。異方性媒質の場合に特有な相違点は、点音源からの広がりが群速度であること、また、幾何学的な拡散の影響として、距離の逆数に加えて、スローネス曲率の逆数の効果が含まれる点である。

2.2 単結晶試験体での検証

単結晶試験体を用いて、異方性媒質中の超音波伝搬特性を計算と実験により検討する。単結晶材として、Ni 基 600 合金 (立方晶系) を用いた。試験体は铸造により作成し、試験体表面に垂直な結晶軸方向が $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ となるように、1辺 20mm の立方体を切り出した。

単結晶試験体を水槽内に設置し、実験体系 (図 1) に示すように、試験体下面から小型センサ (周波数 5MHz、センサ直径 6.3mm) で非集束ビームを送信し、試験体上面で点集束センサ (周波数 5MHz、センサ直径 12.7mm、焦点距離 12.7mm) で受信した。

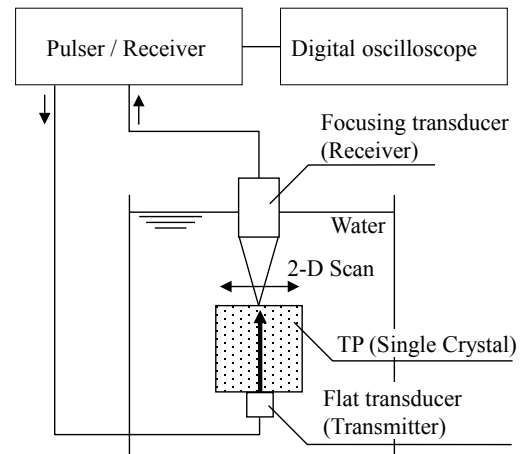


Fig.1 Experiment setup of single crystal

試験中の伝搬方向を〈100〉、〈110〉、〈111〉と変化させ、受信波の振幅を計測した。実験と計算の比較結果を図2に示す。横軸は試験体表面の距離、縦軸は受信振幅であり、〈111〉の受信波形の振幅ピーク値を基準に規格化した。なお、計算には、表1の密度及び弾性定数を用いた。

図2において、実験と計算がよく一致することから、点音源モデルは異方性媒質においても妥当であることが確認できた。

単結晶を用いた実験では、結晶粒の境界による散乱減衰は生じないが、受信波の振幅は、結晶方位に対する角度依存性を示した。すなわち、この角度依存性は拡散減衰によるものであり、(4)式の伝搬モデルにおけるスローネス曲率の影響によるものと考えられる。従来、位相速度の速い方向に対して、超音波ビームが集束する効果があることは定性的には知られており、今回の計算では、この効果を定量化することができた。

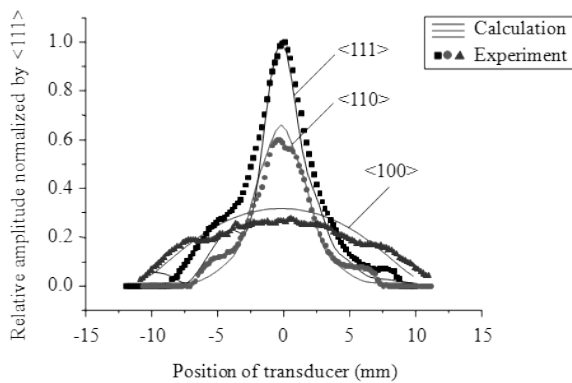


Fig.2 Angular dependence of divergence effect for cubic single crystal (alloy 600)

Table 1. Stiffness tensor for alloy 600

Density (kg/m ³)	C ₁₁ (GPa)	C ₁₂ (GPa)	C ₄₄ (GPa)
8.36 × 10 ³	2.37 × 10 ²	1.50 × 10 ²	1.22 × 10 ²

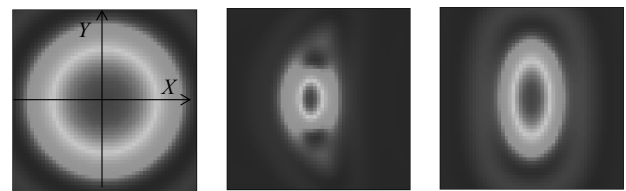
次に、一方向凝固材の伝搬特性を把握するため、横等方性を仮定して、点音源モデルにより超音波の伝搬特性を計算した。ここで、横等方性とは、結晶成長方向〈100〉には結晶方位が揃っており、その直交方向には結晶方位がランダムに分布していることを仮定したモデルである。対象材料は600合金で、計算では、(4)式および表1の定数を用いた。なお、この計算には、単結晶の場合と同様に、散乱減衰の効果は含まれない。

計算は、結晶成長方向〈100〉に対して0、45、90°の3ケースについて周波数5MHzの準縦波(qL)の超音波の音場を計算した。計算結果を図3および図4に示す。

図3は、振幅の2次元マップである。なお、図3のXY軸は図1に示した試験体上面の座標に相当する。また、図4は結晶成長方向に対する角度に対する振幅のX軸上での依存性を示しており、〈100〉に対して45°になる場合の振幅のピーク値を基準に規格化した。

計算結果から、結晶成長方向〈100〉に対して45°となる場合、拡散減衰の影響が小さい結果が得られた。一般に、散乱減衰は、散乱体となる結晶粒の寸法と波長の比に依存することが知られており、結晶粒径のおよそ6倍以上の波長を持つ超音波を用いた場合には、散乱減衰の影響を低くすることができる。したがって、散乱減衰の影響の少ない周波数を選択すると、45°方向に透過する超音波で高い振幅が得られることが予想される。

これは、従来の研究において報告されている実験結果の傾向と一致している。したがって、溶接部などの凝固組織に対して、結晶成長方向〈100〉に対して45°方向の透過性が良好であるのは、散乱減衰ではなく、幾何学的な拡散減衰による効果が大いといと推定される。



(a) 0 degree (b) 45 degree (c) 90 degree

Fig.3 Acoustical field map for directionally-solidified alloy 600

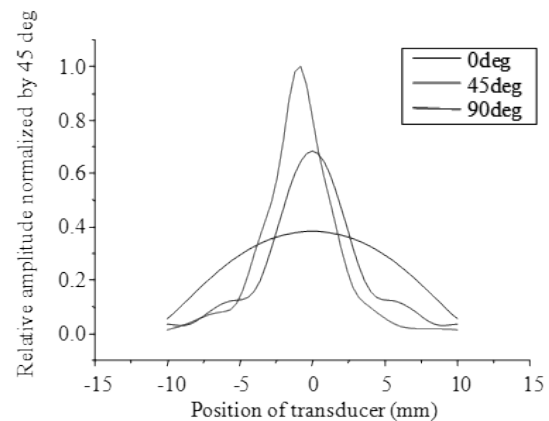


Fig.4 Angular dependence of divergence effect for directionally-solidified alloy 600

3. フェーズドアレイによる試験

3.1 アレイセンサ及び実験体系

異方性媒質の超音波検査技術開発の最初のステップとして、図 4 に示すような均質異方性媒質である一方向凝固材を対象にフェーズドアレイ法による超音波検査技術の適用を試みた。

結晶粒の寸法（短径方向）はおよそ 0.1~0.5mm であるので、散乱減衰を抑制するため結晶粒寸法の 6 倍以上の波長 3mm を得るため、周波数 2MHz（準縦波）を用いた。また、屈折角を結晶成長方向 $\langle 100 \rangle$ に対して、ビームの中心がおよそ 45° となるようにマトリクスアレイセンサの設置位置を決定した。

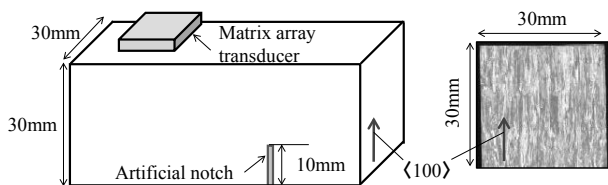


Fig.4 Test piece of directionally-solidified alloy 600

フェーズドアレイ法を用いて異方性媒質を超音波検査する場合のフローチャートを図 5 に示す。最初に、異方性媒質を構成する多結晶合金の結晶方位分布をモデル化する。今回は均質異方性のため、試験体全域が一樣な横等方性媒質と設定した。

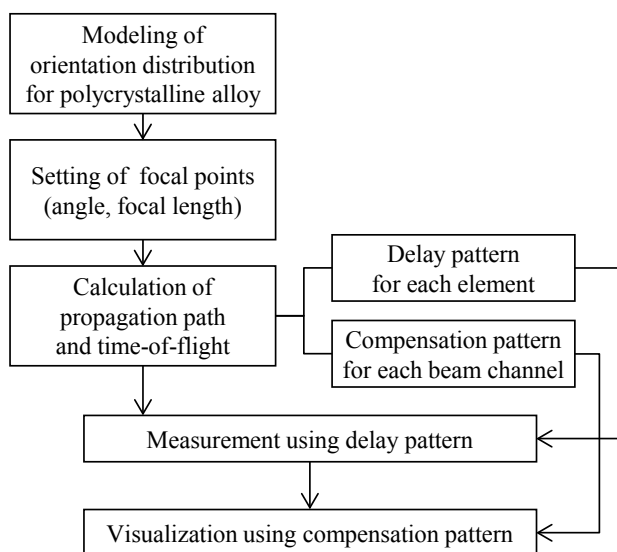


Fig.5 Raytracing for calculation of propagation path and time using group velocity vector

次に、検査対象の焦点（角度、焦点距離）を設定し、この焦点を仮想音源として伝搬解析を行い、焦点からアレイセンサまでの伝搬経路及び伝搬時間を計算する。各焦点位置からアレイセンサを構成する各素子への伝搬時間から計算される遅延パターンで検査を行う。また、各ビームチャンネル（例えば、屈折角ごと）に対する伝搬経路および伝搬時間を用いて、異方性媒質中の伝搬で生じる画像のゆがみを補正する。

本研究では、3次元レイトレース法により伝搬経路及び伝搬時間を計算した。計算例を図 6 に示す。計算では、位相速度が等角度ピッチになるように初期条件を与えた。図 6 の音線は、群速度の伝搬経路を表しており、異方性の影響で音線の分布に濃淡が形成されていることが分かる。例えば、異方性による拡散減衰が小さい現象は、音線の集中した分布として可視化されている。

レイトレース法で計算した遅延パターンの例を図 7 に示す。いずれも、センサ開口を 32mm（±16mm に分布）とし、-16mm の点を時間の基準とした。図 7(a) は等方性媒質を、図 7(b) は異方性（横等方性）を仮定した場合の結果である。例えば、等方性の 30° と異方性の 45° を比較すると、両者の遅延時間の曲線が類似していることから、等方性に対して 30° を想定したビームを入射すると、異方性媒質中では 45° に伝搬することを意味している。

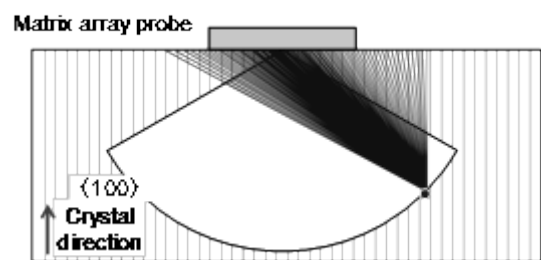


Fig.6 Raytracing for calculation of propagation path and time using group velocity vector

3.2 実験結果

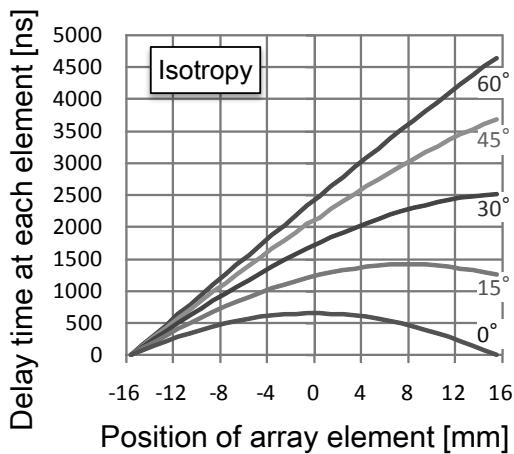
一方向凝固材に付与した深さ 10mm の人工欠陥（放電加工スリット）に対して、アレイセンサの中心が欠陥付与位置から 20mm、25mm の位置にアレイセンサを設置して試験を行った。探傷結果の画像例として、センサ中心を 25mm に設置した場合の結果を図 7 に示す。

図 7(a) は、遅延時間パターンを等方性媒質（位相速度）で計算し、表示も同様に等方性を想定とした場合である。図 7(b) は、異方性（群速度）で遅延時間計算を計算し、

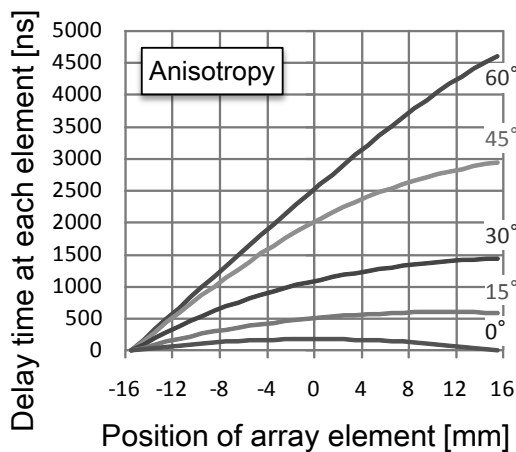
表示の歪みを、群速度を用いて補正を行った場合である。

等方性を想定した場合には、本来は縦方向に1直線上に表示されるべき放電加工スリットのコーナエコーと端部エコーが左右にずれて傾斜して表示されている。一方、異方性を考慮した遅延時間では、放電加工スリットはまっすぐに表示され、特に、端部エコーの分解能が改善されている。

等方性 (図 8(a)) と異方性 (図 8(b)) のそれぞれのケースについて、放電加工スリットのコーナ及び端部エコーの水平 (X 軸) および深さ方向 (Z 軸) のエコー表示位置を、図 9 にプロットして比較した。異方性を考慮することで、水平方向で最大 6mm 以上の誤差が 3mm 以内に、また、深さ方向では、欠陥高さのサイジング精度が 3mm から 0.5mm に改善することが確認できた。

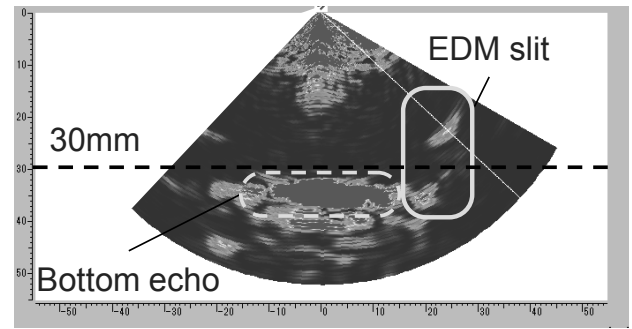


(a) Delay pattern for isotropic media

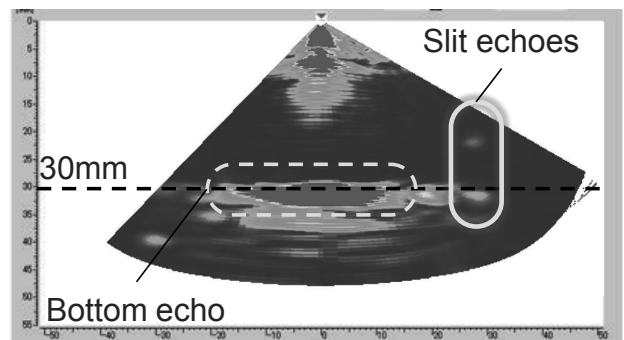


(b) Delay pattern for anisotropic media

Fig.7 Comparison of delay laws for angled focus beams



(a) Delay pattern: isotropy / phase velocity;
Visualization: isotropy / phase velocity)



(b) Delay pattern: anisotropy / group velocity;
Visualization: anisotropy / group velocity)

Fig.8 Compensation of sector scanning UT images

4. 結論

異方性媒質に対する超音波探傷技術の開発として、異方性媒質中の超音波伝搬挙動を考慮して、フェーズドアレイ法を適用し、サイジング精度の改善を試みた。異方性媒質に対するモデルにより、スローネス曲面の曲率の影響を考慮に入れると、幾何学的な拡散の影響が少ない方向に超音波で伝搬しやすいことを確認した。このことから、異方性媒質の検査には、散乱減衰を低減するための周波数の選定と、拡散減衰の影響を低減するための角度の選定が重要であり、後者の影響を定量化することができた。

フェーズドアレイ法を持つフレキシブルな遅延時間と画像化の特性を活かして、マトリクスアレイセンサを異方性媒質の検査に適用した。遅延時間および表示の補正には、3次元レイトレース法により、異方性媒質中を伝搬する群速度の経路及び伝搬時間を計算した。異方性を考慮した結果、異方性を考慮しない場合と比較して、サイジング精度を改善できていることが確認できた。

異方性媒質中の検査の高度化には、溶接組織のモデル化および異方性媒質中の伝搬解析技術が重要である。今後、より複雑な体系である非均質材への適用の検討を進める。

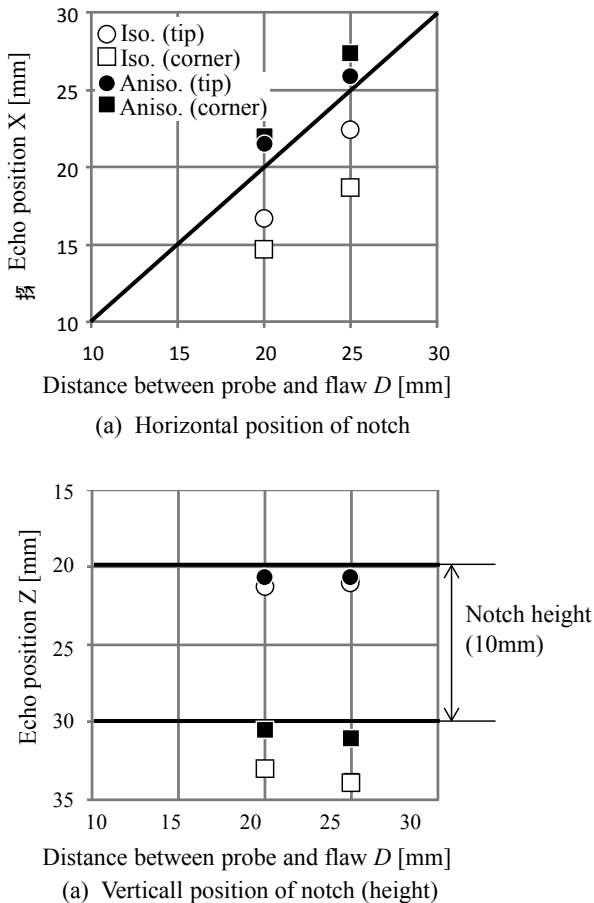


Fig.9 Results of underwater shape visualization

参考文献

[1] B. L. Baikie et al., Ultrasonic inspection of austenite welds, K. Br. Nucl. Energy Soc. 15(3), pp.257-261

[2] H. Yoneyama, S. Shibata, and M. Kishigami, Ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds, 9th World Conference on Nondestructive Testing, pp.1456-1464 (1979)

[3] J. R. Tomlison, A. R. Wagg, and M. J. Whittel, Ultrasonic inspection of austenitic welds, U. S. DOE Reports, IWGFR-35, pp.82-95 (1980)

[4] S. Hirsekom, Directional dependence of ultrasonic propagation in textured poly crystals, J. Acoust. Soc. Am. 72, pp.1269-1279 (1982)

[5] D. R. Atthey, The propagation of elastic waves through a textured granular material, Int. J. Engng. Sci. 23, pp.937-951 (1985)

[6] S. Ashmed and P. D. Panetta, Ultrasonic attenuation and backscattering in polycrystalline materials with nonspherical grains, Proceedings of NDE2002, (2002)

[7] T. Seldis and C. Pecorari, Scattering-induced attenuation of an ultrasonic beam in austenitic steel, J. Acoust. Soc. Am. 108, pp. 580-587 (2000)

[8] T. Seldis, Enhanced experimental approach to measure the absolute ultrasonic wave attenuation, Ultrasonics 50, pp. 9-12 (2010)

[9] T. Seldis, Measurement of the intrinsic attenuation of longitudinal waves in anisotropic material from uncorrected raw data, Ultrasonics. 53, pp. 1259-1263 (2013)

[10] N. Kono and S. Hirose, Semi-analytical modeling of acoustic beam divergence in homogeneous anisotropic half-spaces, Ultrasonics. 65, pp. 194-199 (2016)

[11] L. W. Schmerr, Jr, Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation, New York, Plenum Press (1998)