

フェーズドアレイシステムによるステンレス鋼溶接部の非破壊評価

Non-Destructive Evaluation of Welding Part of Stainless Steels by Phased Array System

京都大学エネルギー科学研究科 立松 展大 Nobuhiro TATEMATSU Student
京都大学エネルギー科学研究科 松本 英治 Eiji MATSUMOTO Member

Recently, more accurate and convenient Non-Destructive Evaluation techniques are required for flaw inspection of structural materials. Phased array ultrasonic transducers are expected as such a NDE technique but there are many subjects to be solved. Furthermore, commercial phased array systems with conventional scanning and imaging techniques have not fulfilled their maximum potential. The purpose of this paper is to improve the phased array system to be applicable to the inhomogeneity evaluation of welding part of stainless steels.

Keywords: Phased Array Ultrasonic Transducers, Flaw Detection, NDE, Inhomogeneity, Welding Part

1. 緒言

原子炉構成要素では、溶接箇所におけるき裂形成に対する対策が重要となり、そのような溶接部位のき裂損傷の評価技術の向上が望まれている。そこで、経済的・合理的な溶接構造の健全性評価を実現するために、高温条件でかつ多様な配管材料が用いられている高経年化原子炉における溶接部位の劣化・損傷過程をより高精度にシミュレートしうる革新的な高精度ハイブリッド非破壊検査技術が必要となる。

上記の理由から、高精度な波形収集が可能なフェーズドアレイ超音波探触子を用いて、応力腐食割れ（以降、SCC）や溶接部の形状を発見・画像化する技術の開発を目的とする。

2. 超音波による材質分布測定の実理

構造材料内部の不均質性に関する近年の研究により、超音波の波形あるいはそのスペクトルを解析することによって、材料特性の微細な変化を定量的に検知できる可能性が示された。Matsumoto[1][2]は、均質な1次元弾性体についてひずみ波のスペクトル方程式を導き、材料の非線形性により発生する高周波倍音を測定することにより高次の弾性定数が測定できることを示した。その他、層状の不均質構造を持つ材料についての弾性波の反射・透過問題を解析

した文献には、村田・松本・柴田[3]、田辺・松本・柴田[4]、Pedersen, Tretaik, He[5]などがある。さらに、三浦・大好・原・岡崎[6]は、不均質部の音響インピーダンス分布による反射エネルギーの変動から、不均質性の特定化への手掛かりを得ることができることを示している。そして、泉屋・松本・柴田[7]は、入射波と反射波のスペクトル解析により、音響インピーダンスの分布を再現する方法を示した。

本論文では、文献[7]の方法を2次元的不均質の同定に拡張する。すなわち、組織が2次元、連続的に変化する材料について、フェーズドアレイ超音波探触子によって収集された複数の受信波形のスペクトル解析を行うことにより、材料定数の一つである音響インピーダンスの2次元分布を求めて、材料内部の不均質性を評価する理論的方法を提案し、実験によってその方法の有効性を検証する。次節で、参考文献[7]にしたがって、層状の不均質の場合に、垂直入射波の受信波形の解析によって音響インピーダンスの分布が場所の関数として求められることを示す。

2.1 1次元における材質分布

材質が異なる境界面で弾性波の反射と透過がおきる場合、反射係数 R は次式のように表される。

$$R = \frac{b_1}{a_1} = \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (1)$$

式中の $\rho_1 c_1$ 、 $\rho_2 c_2$ は入射側および透過側の材料の音響インピーダンスである。文献[7]によると、上

連絡先:立松展大, 〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町, 京都大学エネルギー科学研究科
電話: 075-753-3565
e-mail:tatema@modem.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

式を連続的に材質が変化する場合に拡張して、音響インピーダンスの分布を次式から求めることができる。

$$\frac{\rho c\{x(t)\}}{\rho c\{x(0)\}} = \exp\left[-4 \int_0^t h(2t) dt\right] \quad (2)$$

ここで、

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G(\omega)}{F(\omega)} \exp(i\omega t) d\omega \quad (3)$$

$F(\omega)$ および $G(\omega)$ は、入射波と反射波のフーリエスペクトルである。

2.2 2次元的に伝ばする超音波の受信波形と音響インピーダンスの関係

前節で求めた層状材質の音響インピーダンスの分布を求める方法を、2次元的な分布に拡張する。後でフェーズドアレイシステムにこの方法をインプリメントするために、まず材料表面の一直線上の異なる点に送信および受信の探触子があると仮定する。Fig.1のように、送信探触子から出発した波が、試料中の点Pで反射して、受信探触子に到達すると仮定する。このとき、点Pの反射率は入射波と反射波の角度によらず一定とする。送信波形を $f(t)$ とすると、受信波形 $g(t)$ は次のように表される。

$$g(t) = R(x) \cdot f\{t - \tau(a, b)\} \quad (4)$$

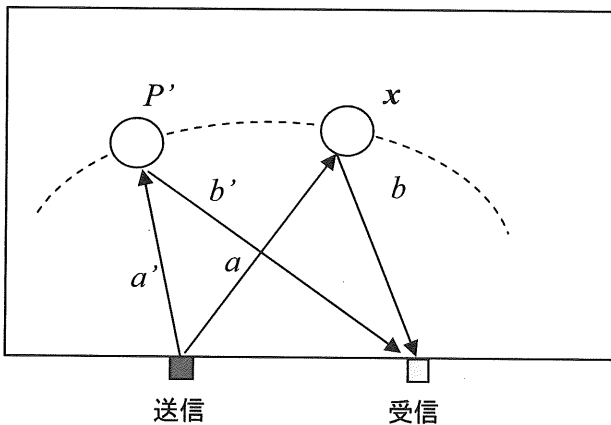


Fig.1 Locus of ultrasonic wave

ここで、 $\tau(a, b)$ は経路 $a+b$ に沿う波の伝ば時間である。まず、伝ば経路に沿って点 x 以外で、材質の不連続や傾斜による波の反射はないと仮定する。一方、同じ送信探触子と受信探触子の組から得られる受信

波形には、異なる位置で反射して帰還する波も含まれている。それらのうち、同じ位相だけ遅れる波形は

$$\tau(a, b) = \tau(a', b') \quad (5)$$

を満たす、全ての点 x' から反射して受信探触子に到達した可能性がある。いいかえれば、式(4)に含まれる反射係数 $R(x')$ は、式(5)を満たす点 x' に配分する必要がある。もし、媒質において波の速度が一様であれば、式(5)を満たす点の集合は送信および受信探触子の位置を焦点とする楕円の周上となる。実際にはすべての点が反射係数 $R(x')$ を持つのではないが、異なる送信、受信探触子の組から得られるデータも加味していくと、このような点は淘汰されて、実際の反射係数に近づいていくことが期待できる。

さらに、受信探触子で得られる波形は、探触子間の距離 l_0 以上の距離を伝ばして受信されたすべての波の重ね合わせで表現される。すなわち、次のように表される。

$$g(t) = \int_{l_0}^{\infty} R(x') \cdot f\{t - \tau(a', b')\} dl \quad (6)$$

ここで積分は、送信および受信探触子からの距離の和 $a'+b'$ が l_0 から l までの任意の経路に沿って行う。このような経路に沿って、前節の結果を利用して反射係数と音響インピーダンスの分布の関係を求めることができる。ただし、入射波と受信波のフーリエスペクトルを $F(\omega)$ と $G(\omega)$ とし、その比の逆フーリエ変換したものを $h(t)$ とすると、次の式を得ることができる。

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G(\omega)}{F(\omega)} \exp(i\omega t) d\omega dl = \int R(x') \cdot \delta\{t - \tau(a', b')\} \quad (7)$$

ここで、積分の下限は l_0 であったが、0としても0と l_0 の間の点からの情報は受信波形に含まれていない(波形の変位が0)であるのでさしつかえない。上式の右辺の積分を行うと、

$$h(t) = R(x'') \cdot c(t) \quad (8)$$

ここで、 $c(t)$ は積分経路に沿って送信探触子から時刻 t の位置の点における波の速度で、 x'' は送信および受信探触子との距離の和が $c(t)$ を0から t まで積分したものとなるような任意の点である。さらに、(8)を時間で積分すると、次式を得ることができる。

$$\int h(t) dt = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} R\{x''(t)\} dt \quad (9)$$

結局、上の経路に沿う任意の点の位置を $x(t)$ 、送信探触子の位置を $x(0)$ とし、(2)式の変わりに

$$\frac{\rho c\{x(t)\}}{\rho c\{x(0)\}} = \exp\left[-2 \int h(t) dt\right] \quad (10)$$

が得られる。

3. 波形合成による材料内部の画像化

実験から得られた入射波形と受信波形を2章のようにスペクトル解析をし、試験片内部の音響インピーダンスの分布を求める。この 32×32 個のデータに、超音波の拡散性や、探触子の感度、指向性を考慮した合成法（改良 ALOK 法）で画像化を行う。

各探触子から出る超音波があらゆる方向に伝ばすると仮定し、またそれぞれの探触子もあらゆる方向からの波を受信できるとする。伝播距離、時間を考慮し、その時刻における値で可能性がある点を選び加算平均を行う。

そして、ある振動子から斜め方向に入射して欠陥や底面から反射してくる波も受信波形に含まれているが通常超音波の送受信特性には方向依存性がある。このような指向性も考慮にいれば、各反射点の音響インピーダンスがより正確になり、合成した分布がより明瞭になることが期待できる。これら指向性や放射性などのパラメータを変えることによって、より精度の高い画像を得ることができる。具体的な計算方法については、紙面の都合上省略する。

4. 実験方法

試験片は溶接部を有する SUS316 で、寸法が $20\text{mm} \times 166\text{mm} \times 12\text{mm}$ である。溶接部周辺で表面および内部で、音響インピーダンスがどのように変化しているかを調べてみた。

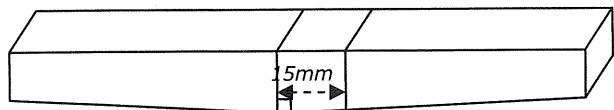


Fig.2 Sus316 specimen

マルチプレクサにより 32CH のフェーズドアレイ探触子の各 2 対の探触子に送受信信号を切り替えて、受信波形を収集した。16 ミリの遅延材をつけた

5MHz と 10MHz の探触子を用いて計測を行った。

5. 測定結果

5.1 表面の音響インピーダンス分布

まず、2 章の(1)式を用いて、表面の音響インピーダンスを計測する。このとき、 $\rho_1 c_1$ は遅延材の音響インピーダンスなので既知であり、反射係数を波形から求めることによって試験片表面の音響インピーダンスの値を求めることができる。Fig.3 は周波数が 5MHz の探触子を使い、縦軸が 1mm 刻み、横軸が 0.75mm 刻みである。

Fig.3 の(a)は溶接部に無関係な部分を計測して結果です。真ん中に表面の加工の痕跡と思われる音響インピーダンスの分布が見えました。

Fig.3 の(b)はまばらに出ている部分がありますが、中心部分に変化が見られ、溶接部と判断できるためこれは成功したとみなせる。

5.2 5MHz での内部の音響インピーダンス分布

次に、内部の音響インピーダンス分布を計測した。計測には周波数が 5MHz および 10MHz の探触子の 2 通りを行った。なお、Fig.4 以降の図は横軸が試験片の長さ方向、縦軸が深さ方向を表示している。

Fig.4 の(a)は溶接部を中心に計測した結果である。Fig.4 では下の部分に底面の像が現れている。溶接部では超音波の速度が遅くなるため底面の位置が少しずれて表示されている。色が少し薄くなっている部分が溶接部の断面形状を表している。この図の左上に見える部分が切欠きから伸びている SCC と考えられる。Fig.4 の(b)は斜めから見たもので、図の左部分にある欠陥部分の音響インピーダンスの変化がはっきりと見える。

次に、Fig.4 の左上にある欠陥部分の詳細な分布を調べてみると Fig.5 の(a)のようになった。Fig.4 では底面での音響インピーダンスの変化が激しいため、欠陥部分にあまり変化がないように見えるが、Fig.5 で詳細に調べてみると激しい変化が出ているのが分かる。Fig.5 の(b)は別角度から見たもので、欠陥近傍の音響インピーダンスの分布が明瞭となっている。

5.3 10MHz での内部の音響インピーダンス分布

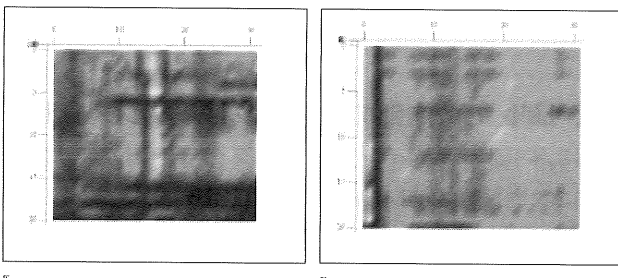
次に、周波数が 10MHz の探触子で計測を行った結

果を示す。

Fig.6 の(a)も溶接部を中心部にして計測したものである。Fig.6 のように、10MHz の探触子を使用した場合の方がより鮮明になることがわかる。右側の部分は波形処理の都合で実際にはない像が見えている。この部分を無視すると、5MHz の場合と同じような欠陥による音響インピーダンスの変化が見られる。

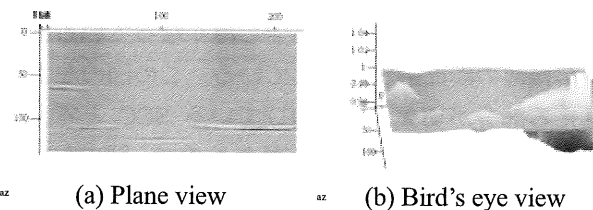
Fig.6 の(b)は別角度からみたものであり、欠陥部分の変化がより明瞭に見られる。

同様に欠陥部分の詳細な情報な分布を調べてみると Fig. 7 のようになった。全体的に波形のバラつきが大きくなり画像が波打っているが、欠陥は明瞭に見られる。これは、周波数が大きい 10MHz のほうが遅延材による減衰の影響を大きく受け、波形の収集精度が低下しているためと思われる。



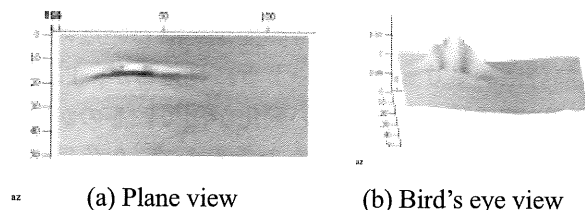
(a) Non-welding part (b) Welding part

Fig.3 Acoustic impedance of specimen surface



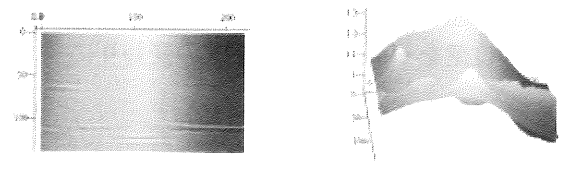
(a) Plane view (b) Bird's eye view

Fig.4 Internal acoustic impedance by 5MHz transducer



(a) Plane view (b) Bird's eye view

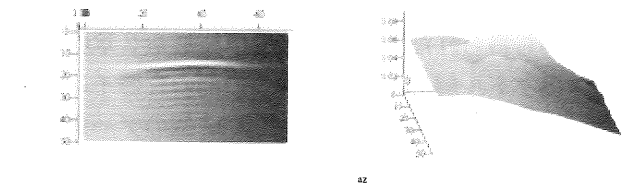
Fig.5 Close-up of notch edge by 5MHz transducer



(a) Plane view

(b) Bird's eye view

Fig.6 Internal acoustic impedance by 10MHz transducer



(a) Plane view

(b) Bird's eye view

Fig.7 Close-up of notch edge by 10MHz transducer

6. 結言

フェーズドアレイシステムによって、表面の音響インピーダンスの分布と断面の 2 次元的な音響インピーダンスの分布を求める方法を示した。

SUS316 曲げ疲労試験片では、き裂先端と溶接部の形状が明瞭に測定でき、切欠き部近傍の SCC の像が確認できた。欠陥の具体的な形状と音響インピーダンス分布との対応関係を調べることは今後の課題である。

参考文献

- [1] E.Matsumoto, *J. Acoust. Soc. Am.*, **81**-6, (1987), 1713.
- [2] E.Matsumoto, *J. Acoust. Soc. Am.*, **84**-1, (1988), 335.
- [3] 村田・松本・柴田, *機論*, **57**-534, A (1991), 404.
- [4] 田辺・松本・柴田, *機論*, **57**-544, A (1992), 3045.
- [5] P.C.Pedersen, O.J.Tretiak and Ping He, *J. Acoust. Soc. Am.*, **72**-2, (1982), 327.
- [6] 三浦・大好・原・岡崎, *機論*, **59**-561, A (1993), 54.
- [7] 泉屋亨, 松本英治, 柴田俊忍, 弾性波波形解析による傾斜機能材料内部の不均質の測定, *機械学会論文集*, 平成 7 年 1 1 月号, 61A, 591, 93-100 (1995) .