

大型素子アレイプローブを用いたフェーズドアレイ UT リニアスキャンの分解能向上

Accuracy improvement of the linear scanning phased array UT with
a large element array probe

株式会社 東芝	山本 撰	Setsu YAMAMOTO	Non-Member
株式会社 東芝	菅原 あずさ	Azusa SUGAWARA	Non-Member
株式会社 東芝	千星 淳	Jun SEMBOSHI	Non-Member
株式会社 東芝	落合 誠	Makoto OCHIAI	Non-Member
株式会社 東芝	土橋 健太郎	Kentaro TSUCHIHASHI	Non-Member
株式会社 東芝	山本 智	Satoshi YAMAMOTO	Non-Member

Abstract (Times New Roman 10pt) should be about 150 words.

Recently, an application target of the phased array ultrasonic testing (PAUT) has been extended. For the inspection of CASS, low frequency (less than 1 MHz) array probe is required. Low frequency array probe are usually constructed by large pitch element. In the case of linear scanning, the low frequency array probe could not obtain enough number of sound beams which construct a precise B-Scope image owing to non-dense array pitch. In order to overcome this problem, we have developed virtual element separation method. The method can define a virtual focus points and sound beams which located in between sequential actual sound beams. Using this method, high density sound beams would be obtained in a B-Scope. In this paper, principles and performance verification using FEM waveform would be represented.

Keywords: Ultrasonic testing, Phased array, Linear scanning, Low frequency array probe

1. 緒言

今般の超音波探傷試験 (Ultrasonic testing: UT) では、サイズや探傷屈折角度が固定されている単眼プローブに変わり、探傷位置や探傷屈折角、フォーカス深さなどを電子走査により可変なフェーズドアレイ超音波探傷 (Phased Array Ultrasonic Testing: PAUT) 技術が適用されるケースが増えてきている[1,2]。特に、高度な安全性が求められる原子力発電プラントでは、シュラウド溶接線や制御棒駆動機構 (CRD: Control Rod Drive) ハウジング/スタブチューブ溶接部等にいち早く適用されてきた[3]。しかしながら PAUT であっても、溶接部やオーステナイト系ステンレス鋼といった粒界や溶金境界のノイズで欠陥が検出困難な対象へは一部を除いて十分な適用が成されてこなかった。特にオーステナイト系ステンレス鋼は ASME

においても UT 適用対象に含めていく動きがあり、それらに適用可能な UT 技術の確立が急がれている。

著者らはそれらを解決するため、Full matrix capture (FMC) をベースに複数探傷屈折角のリニアスキャン結果からノイズと欠陥エコーを識別する技術を開発してきた[4,5]。粒界ノイズと欠陥でエコー強度の探傷屈折角依存性が異なることに着目し、傾向を解析することでノイズと欠陥の識別に一定の目処を得た。その一方、規格によっては厚板の鋼に対しては 1 MHz 以下の低周波アレイプローブの適用を推奨する場合がある。低周波アレイプローブは十分な出力を得るために一つ一つの素子幅 (素子ピッチ) が大きく設定されている場合が多く、数 MHz 帯のアレイプローブを使った場合に比べてリニアスキャンの B-Scope を形成する A-Scope の密度が大きく低下する。そのため、低周波プローブを用いると上述したリニアスキャンベースの探傷法では欠陥検出性やサイジング精度が大きく低下してしまう。

そこで著者らは、B-Scope において通常は素子ピッチと

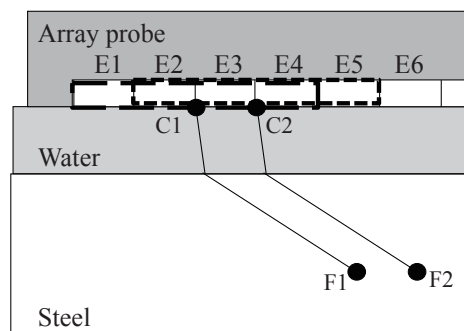
連絡先: 山本撰、〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町 8、
(株) 東芝 電力・社会システム技術開発センター
E-mail: setsu.yamamoto@toshiba.co.jp

同じ幅でシーケンシャルに形成される焦点の間に仮想的な焦点を設け、その仮想座標にフォーカスするよう遅延時間を計算する、仮想素子分割技術を開発した。その仮想焦点を複数設け、それぞれで得られた遅延時間を用いて A-Scope を合成することで、通常のリニアスキャンで得られる音線よりも細かいピッチで A-Scope の描画が可能となる。本稿では、原理の解説および FEM で得た波形を用いた性能検証結果を述べる。

2. 原理

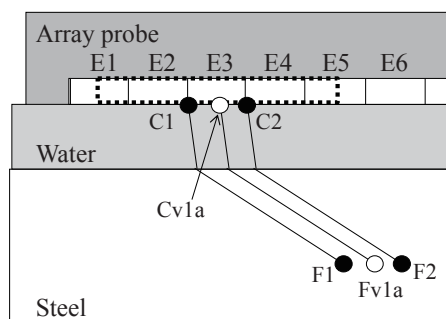
仮想素子分割アルゴリズムについて、概念図を Fig.1 に示す。4 素子を同時駆動させる水浸法でのリニアスキャンを想定する。ここで素子の番号は左から順に E1、E2…とし、素子を同時駆動させて音線を形成する組合せをシーケンス (S) と呼称する。E1～E4 を駆動させる場合を S1、E2～E5 を駆動させる場合を S2 とする。またそれぞれの実シーケンスにおける同時駆動素子群の中心座標を C、焦点座標を F とする。Fig.1(a) に示されているのは、通常のリニアスキャン B-Scope で見られるような S1 の次に S2 の音線が形成される例である。図中の素子への囲みは実シーケンスごとの同時駆動素子の範囲であり、音線は素子中心からのメインビームのみを記載している。仮想素子分割は Fig.1(b) に示すように S1 と S2 の間 (ここでは中間点) に仮想シーケンス Sv12a を設けるものである。仮想シーケンス Sv1a の音線は Fig.1(b) に仮想的な同時駆動領域を示すように、Cv1a を中心座標として仮想焦点 Fv1a へ集束するような音線を E1～E5 の素子を駆動させて形成される。しかし、仮想シーケンスにおいてこのまま 5 素子分の波形を合成しては SN 比や強度の観点から実シーケンス S1、S2 と不整合が生じる。そこで同時駆動領域の両端にあたる E1 および E5 を用いて送受信した波形には重みづけ指数を乗じることで、不整合を低減させた。

上述した仮想素子分割アルゴリズムを用い、例えばシーケンス間に 3 つの仮想シーケンスを設けることで、Fig.2 に示すような B-Scope の概念図が得られる。Fig.2(a) は通常の音線のみで構成された B-Scope、Fig.2(b) は仮想シーケンスを加えた B-Scope である。ここで実線は実シーケンスの音線 (実音線)、破線が仮想シーケンスの音線 (仮想音線) で、Fig.2(b) は実シーケンス間に 3 つの仮想シーケンスを設けてある。これにより、通常はアレイプローブのピッチに依存した密度でしか得られない A-Scope の音線数が仮想的に 4 倍に増加可能となる。



S1 S2

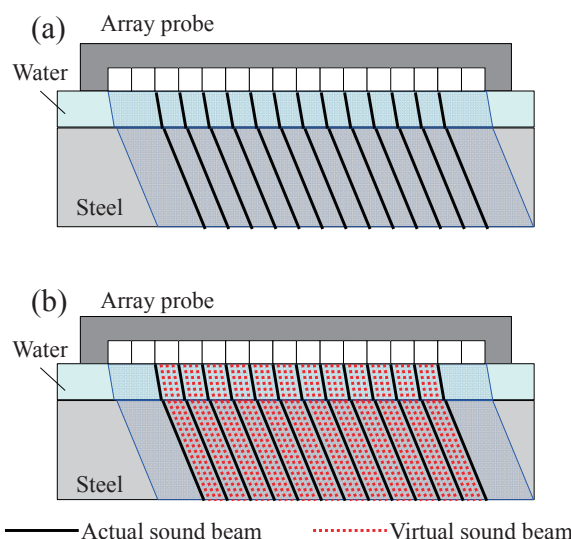
(a) Conventional liner scanning



Sv1a

(b) Virtual element separation method

Fig.1 Schematic diagram of virtual element separation method



(a) Conventional and (b) Virtual element separation method

Fig.2 Schematic diagram of B-Scope image

3. 性能検証

3.1 数値解析モデル

開発したアルゴリズムを、FEM 数値解析を用いて得られた波形で検証した。数値解析には、ComWAVE（伊藤忠テクノソリューションズ製）を用いた。解析モデルを Fig.3 に示す。本解析では、50 mm の板厚をもつオーステナイト系ステンレス鋼を測定対象とした 20 mm ギャップの水浸法を想定した。測定対象には 25 mm 深さに ϕ 3.2 mm の横穴（Side drilled hole: SDH）を導入した。超音波を送受信するアレイプローブは小型素子アレイとして 0.8 mm ピッチ 64ch のものと、大型素子アレイとして素子幅が 4 倍かつ開口幅が同等となる 3.2 mm ピッチ 16ch のもの 2 パターンを定義した。周波数は 0.5 MHz で共通とした。また、モデル側面からの反射波を回避するためモデル両端を吸収帯とし、厚さは 12 mm とした。超音波の送受信は、通常の PAUT のように遅延時間等を設けず、ソフト上で任意の条件で B-Scope 化が可能となるように、1 素子ごとの送受信波形を全てサンプリングする FMC と同じ形式で行った。

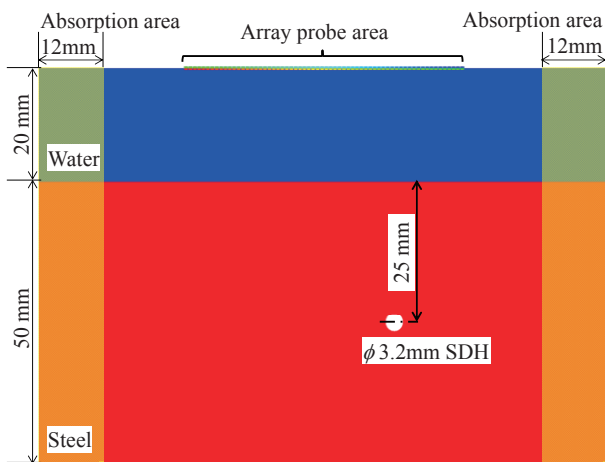
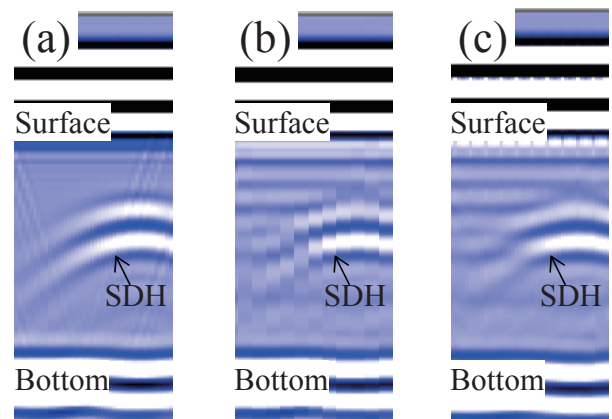


Fig.3 FEM model of performance verification

3.2 性能検証

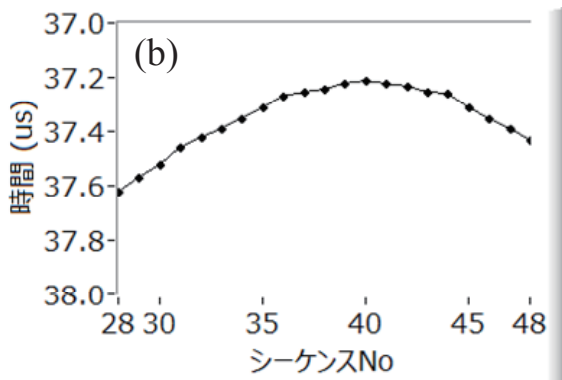
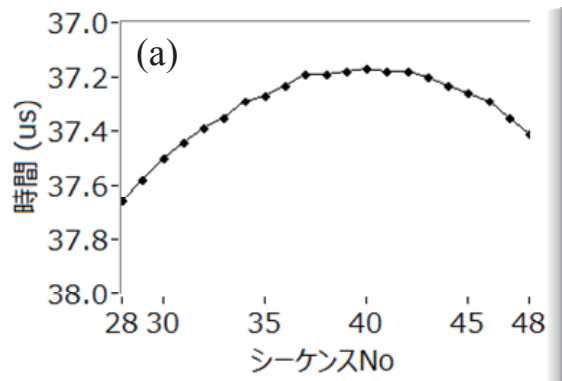
ここで得られた数値解析波形を用いて B-Scope を再構築した結果を Fig.4 に示す。全ての B-Scope はフォーカス深さを SDH に合わせた垂直探傷とした。Fig.4(a)は小型素子アレイで得られた B-Scope であり、0.8mm ピッチ素子を 16ch 同時駆動させて電子走査したものである。B-Scope は 0.8mm ピッチ 49 本の実音線のみで構成されている。Fig.4(b)は、仮想素子分割を適用していない大型素子アレイの結果であり、3.2mm ピッチ素子を 4ch 同時駆動させた。仮想シーケンスは Fig.2 と同様に実シーケンス間に 3 本を設けた。これにより B-Scope は 0.8mm ピッチ、13 本の実音線と 36 本の仮想音線、合計 49 本の音線で構成されている。いずれの結果においても、表面エコーと底面エコーの間に SDH からのエコーが明瞭に観察された。大型素子アレイで得られた B-Scope には、SDH の左上部に当たる部分に並行線のようなノイズが観察された。これは大型化したアレイ素子内で発生した多重反射が重畳したものであり、仮想素子分割によって発生するグレーティングローブのようなノイズとは異なる。仮想素子 B-Scope 上の SDH に着目すると、Fig.4(a)ではエコーが滑らかなローカスカーブを形成しているが、Fig.4(b)では、音線数が少ないため階段状にエコー位置が変遷している。一方で、Fig.4(c)では Fig.4(a)と同様に滑らかなローカスカーブが得られた。定量的な方位分解能を議論すると、音線密度の高い Fig.4(a)、(c)では分解能 0.8 mm で欠陥位置が評価できるのに対し、Fig.4(b)では 3.2mm 分解能での評価となる。Fig.5 に SDH エコーのピーク時間位置プロットを示す。Fig.5(a)は小型素子アレイ、(b)は仮想素子分割を行った大型素子アレイの結果である。両者とも 40 番目の音線を頂点とした同様の結果が得られた。これにより、仮想素子分割を用いることで大型素子のアレイプローブを用いても高精度なリアスキャン B-Scope が得られる可能性が示唆された。

この結果であり、3.2mm ピッチ素子を 4ch 同時駆動させた。B-Scope は 3.2mm ピッチ、13 本の実音線のみで構成されている。Fig.4(c)は、仮想素子分割を適用した大型素子アレイで得られた B-Scope であり、3.2mm ピッチ素子を 4ch 同時駆動させた。仮想シーケンスは Fig.2 と同様に実シーケンス間に 3 本を設けた。これにより B-Scope は 0.8mm ピッチ、13 本の実音線と 36 本の仮想音線、合計 49 本の音線で構成されている。いずれの結果においても、表面エコーと底面エコーの間に SDH からのエコーが明瞭に観察された。大型素子アレイで得られた B-Scope には、SDH の左上部に当たる部分に並行線のようなノイズが観察された。これは大型化したアレイ素子内で発生した多重反射が重畳したものであり、仮想素子分割によって発生するグレーティングローブのようなノイズとは異なる。仮想素子 B-Scope 上の SDH に着目すると、Fig.4(a)ではエコーが滑らかなローカスカーブを形成しているが、Fig.4(b)では、音線数が少ないため階段状にエコー位置が変遷している。一方で、Fig.4(c)では Fig.4(a)と同様に滑らかなローカスカーブが得られた。定量的な方位分解能を議論すると、音線密度の高い Fig.4(a)、(c)では分解能 0.8 mm で欠陥位置が評価できるのに対し、Fig.4(b)では 3.2mm 分解能での評価となる。Fig.5 に SDH エコーのピーク時間位置プロットを示す。Fig.5(a)は小型素子アレイ、(b)は仮想素子分割を行った大型素子アレイの結果である。両者とも 40 番目の音線を頂点とした同様の結果が得られた。これにより、仮想素子分割を用いることで大型素子のアレイプローブを用いても高精度なリアスキャン B-Scope が得られる可能性が示唆された。



(a) Small element array, (b) Large element array without virtual element separation method and (c) Large element array with virtual element separation method

Fig.4 B-Scope images



(a) Small element array (b) Large element array

Fig.5 Echo peak plot

4. 結言

本論文では、低周波化のために素子幅が大型化されたアレイプローブのリニアスキャン高精度化への検討について述べた。B-Scopeにおいて通常は素子ピッチと同じ幅でシーケンシャルに形成される実焦点の間に仮想的に焦点を設け、その仮想座標にフォーカスするように計算した遅延時間を用いて A-Scope を合成する仮想素子分割技術を開発した。FEM で得られた波形を用いて B-Scope を描画したところ、大型素子アレイであっても仮想素子分

割を用いることで音線密度の高い小型素子アレイと同等の精度が得られることが示唆された。今後は、本技術を実試験等に適用し、有効性を検証していく。

参考文献

- [1] 森忠夫、柏谷英夫、内田邦治、古村一朗、長井敏：電子走査形超音波探傷技術および装置、日本機械学会誌、87(793)、1984、pp.1341-1346
- [2] I. Komura, S. Nagai, H. Kashiwaya, T. Mori and M. Arai ; Improve Ultrasonic Testing by Phased Array Technique and its Application, Nuclear Engineering and Design, 87, 1985, pp.185-191
- [3] I. Komura, S. Nagai and J. Takabayashi ; Water gap phased array UT technique for inspection of CRD Housing/Stub tube weldment, Proc. of 14th Int. Conf. on NDE in Nuclear Industry, 1996, pp.305-310
- [4] S. Yamamoto J. Semboshi, A. Sugawara, M. Ochiai, K. Tsuchihashi, H Adachi and K. Higuma; Phased array ultrasonic inspection technique for cast austenitic stainless steel parts of nuclear power plant, Proceedings of ICONE 24, 2016, ICONE24-60256
- [5] 山本撰、千星淳、菅原あずさ、土橋健太郎、安達弘幸、日隈幸治：ポスト処理フェーズドアレイ UT による鋳鋼内欠陥のサイジング精度向上、日本保全学会第十三回学術講演会要旨集、2016、pp.253-258