

# 二輪車のメンテナンスの高精度化に関する補助事業 研究報告書

平成 24 年 3 月 31 日

愛媛大学大学院

中畑 和之

**概要:** フレキシブルアレイプローブを用いて、曲率や凹凸を有する自転車フレームの超音波探傷を行うための基礎的研究を行った。フレキシブルアレイプローブは可撓性を有しており、一般的な自転車のフレーム径の大きさ程度ならば設置可能である。ここでは、超音波シミュレータを援用してアレイ素子のディレイを計算し、このディレイパターンを電子スキャン装置に入力することで、凹凸面に設置したフレキシブルアレイプローブから超音波集束ビームを放射することに成功した。この集束ビームによるセクタスキャン法を用いて、アルミニウム供試体内部の横穴（人工欠陥）が良好に再構成できた。

**Keywords:** フレキシブルアレイプローブ、可撓性探触子、超音波、きずの映像化、超音波シミュレータ、ディレイパターン

# 1. 序論

構造物部材に発生する欠陥を早期に発見することは、構造物の維持や管理において重要である。表面に発生する欠陥に対しては目視検査などが行われているが、外側から見ることでできない内部欠陥を評価するには非破壊試験が採用されている<sup>[1]</sup>。構造物の健全度を高精度予測するためには定量的な非破壊試験が必要となる。

構造物部材内部に発生するき裂や空洞などの欠陥を検出する方法として、超音波探傷試験がある。超音波探傷試験は、対象物の表面に設置した探触子から超音波を送信し、欠陥等の存在により散乱した超音波を受信することで、内部の欠陥情報を推定するものである。近年、医療分野で普及したフェーズドアレイ探触子が工業分野の非破壊検査においても導入されつつある<sup>[2]</sup>。フェーズドアレイ探触子は、独立に駆動できる複数の小さな素子で構成されており、各素子に適当な時間遅延(ディレイ)を与えて印加することで、超音波の送信角度(ステアリング)や集束点(フォーカシング)が制御できる<sup>[3]</sup>。

一般的にフェーズドアレイ探触子は、直線(リニア)状、あるいは平面(マトリクス)状に素子が配列されており、供試体との接触面は平らであるものが多い。検査対象とする部位の測定面が曲率等を有する場合、予めその形状にフィットするようにカスタマイズされたアレイ探触子を適用するが、通常のアレイ探触子は、基本的に平らな面にしか設置できない。しかし、近年、フレキシブルアレイプローブと呼ばれる接触部が柔軟に曲がる探触子が市販され始めた。このアレイ探触子は、コンポジットタイプ(圧電セラミクスと樹脂の複合材料)の素子を薄く配置したものであり、ウレタン系のゴムで被覆している。かなりの可撓性を有するため、曲率が大きくても供試体に接触が可能である。そこで、本研究ではこの探触子(以下、フレキシブルアレイ探触子と呼ぶ)を、金属内部の欠陥の映像化に適用するための基礎的な研究を行うことを目的とする。

フェーズドアレイ探傷の方法の中で、セクタスキャンと呼ばれるものがある。アレイ探触子自体は固定し、設定した角度範囲の電子スキャン走査(ここではステアリング)を繰り返すことで欠陥像を出力する。実際には、一定の角度ピッチで超音波を送受信し、1つの送信角度についてBスコープを描くので、結果的にセクトリアル・イメージ(扇状画像)となる。本研究では、フレキシブルアレイ探触子を用いてセクタスキャンによる映像化を行う。セクタスキャンのためには各素子のディレイを適切に設定する必要がある。そこで、ここでは、動弾性有限積分法(EFIT)を用いて予め各送信方向のディレイを推定しておき、このディレイを電子スキャン装置に入力することで、フレキシブルアレイ探触子によるセクタスキャンを実行する。

本研究は、5つの節から成る。第2節では、フェーズドアレイ探傷を行うための装置構成と、フレキシブルアレイ探触子の構成および特徴について述べる。第3節では凹凸や曲率を有する供試体に対してディレイを設定するために、数値解析法を用いて推定を行う。ここでは、2次元イメージベース有限積分法を用いて、設定した集束点から超音波を逆伝搬させ、各素子で到達した時間差からディレイを求めた。第4節では、アルミニウム供試体に作成した人工欠陥に対して、第3章で求めたディレイを用いてセクタスキャンを行う。第5節は結論である。

## 2. フェーズドアレイ探傷法

本節では、欠陥の画像化に用いた各種計測装置と実験手法について説明する。はじめに、実験で使用したフレキシブルアレイ探触子の基本特性と周波数特性について説明する。次に、超音波電子スキャン装置について述べる。最後に、セクタスキャンの原理について説明する。

### 2.1 フレキシブルアレイ探触子

本実験で使用したフレキシブルアレイ探触子は、ジャパンプローブ製の可撓性の探触子である。この探触子は、通常のリニアアレイ探触子と大きく異なり、図1の上図に示すように、素子部分がコンポジットタイプで薄く作られている。直径40mmの円管にフレキシブルアレイ探触子を接触したときの写真を図1の下図に示す。

この探触子の素子数は32、素子サイズは0.8mm × 10mm、素子ピッチは0.9mmである。フレキシブルアレイ探触子の構成を図2に示す。この探触子の1素子から超音波を送信したときの、底面からの反射波のエコーと、そのフーリエスペクトルを図3に示す。フーリエスペクトルのピーク周波数から探触子の中心周波数が3.39MHzであることがわかる。

また、フレキシブルアレイ探触子の耐久性試験によれば、20000回の曲げ試験に耐えるような堅牢性を有している<sup>[4]</sup>。実験ではフレキシブルアレイ探触子と供試体の接触溶媒としてグリセリンペースト(ソニコート)を使用して計測を行った。

### 2.2 超音波電子スキャン装置

本実験で使用した超音波電子スキャン装置は、図4に示すような日立エンジニアリングアンドサービス製のES3100である。この装置は、パソコンで制御することができ、素子へ与える印加電圧の大きさやディレイを自由に設定できる。また、アレイ素子を24素子まで同時駆動できる。この電子スキャン装置では、パルス幅を50~320nsの範囲で設定することが可能である。通常、パルス幅は探触子の公称中心周波数に相当する周期の半分に設定することが望ましい。実験では公称中心周波数3.0MHzのフレキシブルアレイ探触子を用いたので、パルス幅は160nsに設定した。

### 2.3 セクタスキャン

超音波アレイ探触子は、素子の駆動時間を制御することによって、超音波ビームを任意の方向に送信(ステアリング)したり、任意の位置に集束(フォーカシング)したりできる。この二つを組み合わせ、ビームを扇状(セクタ)にスキャンし、画像化するのがセクタスキャンである(図5)。開始角度、終了角度、角度ステップを設定することで任意の範囲を検査対象とすることができ、浅部より深部の方が測定視野が広い<sup>[5]</sup>。各送信角度からの受信波形を深さ方向にプロットすることで、欠陥像が色によって濃淡をつけて表示される。超音波電子スキャン装置は高速な制御が可能であるため、セクタスキャンはリアルタイムで実行可能である。従って、探触子の動きに合わせて断面画像を継続的に表示させることができる。

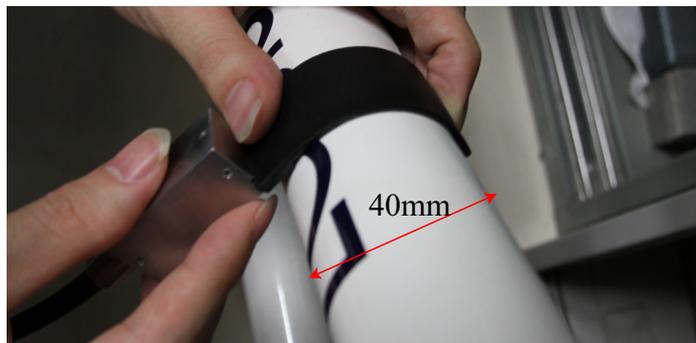
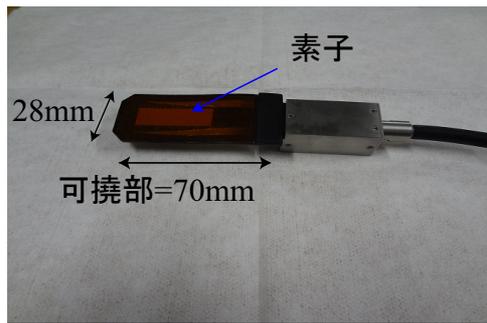


図1 フレキシブルアレイ探触子

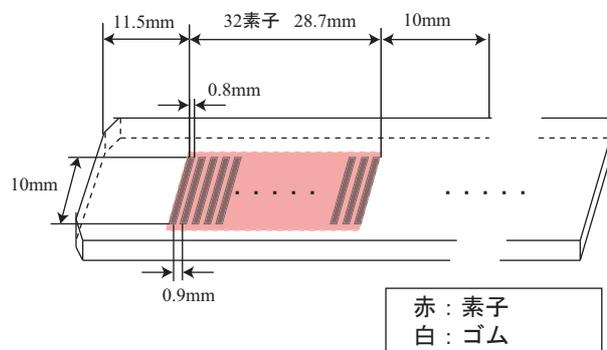
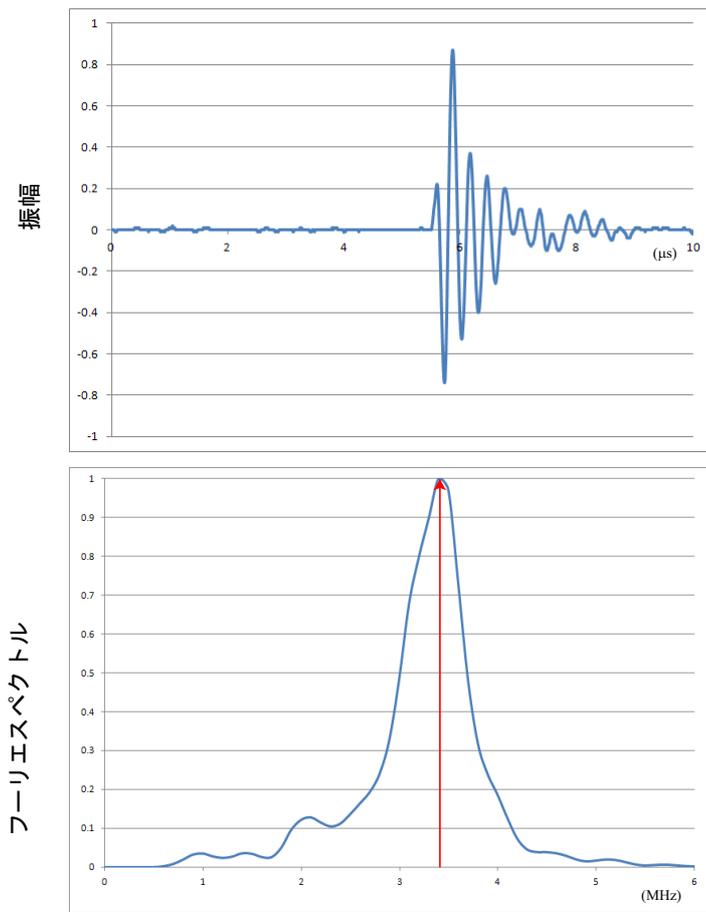


図2 フレキシブルアレイ探触子の構成



中心周波数=3.39(MHz)

図3 金属底面からの反射エコーとフーリエスペクトル



図4 超音波電子スキャン装置と計測風景

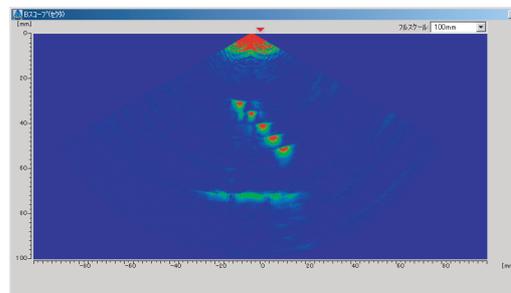
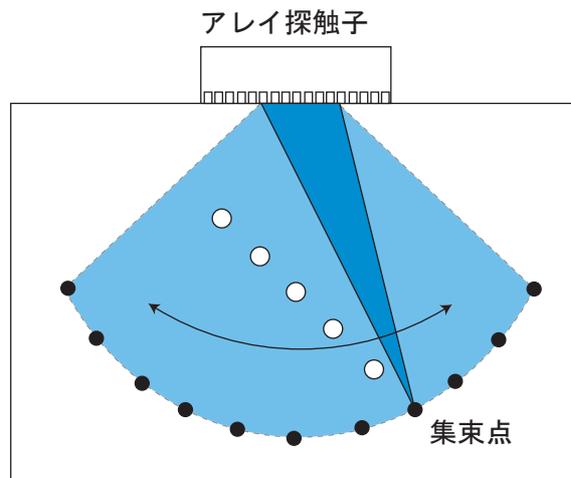


図5 セクタスキャンと画像化結果

### 3. イメージベース動弾性有限積分法

前述のように，曲率を有する形状に接触したフレキシブルアレイ探触子のディレイを数値解析で求める．本研究では，その数値解法としてイメージベース動弾性有限積分法 (EFIT) を用いる．ここでは，固体中の超音波ビームを集束させたい点について，その点を波源とする波動伝搬解析を行う．超音波は固体表面に向かって伝搬するので，固体表面のアレイ探触子の設置位置において到達時間を計測することによって，各素子のディレイを算出する．

イメージベース EFIT を採用する理由は，計算が非常に高速かつ高精度であること，イメージベース処理を導入しているので試験体の数値モデルが容易に作成できることである．以下にイメージベース EFIT の概要について述べる．

#### 3.1 支配方程式

ここでは弾性波動の伝搬を支配する方程式を述べる．ここでは， $x_1 - x_2$  平面を伝搬する 2 次元面内波動場とする．以下の式では，インデックスを用いて表現し，総和規約を適用する．いま，固体の粒子速度を  $v_i(\mathbf{x}, t)$ ，応力を  $\tau_{ij}(\mathbf{x}, t)$  とする．このとき，運動方程式と構成式は次式で表される．

$$\rho(\mathbf{x})\dot{v}_i = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (1)$$

$$\dot{\tau}_{ij} = \lambda(\mathbf{x}) \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu(\mathbf{x}) \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

ここで， $\rho(\mathbf{x})$  は弾性体の密度， $f_i(\mathbf{x}, t)$  は弾性体に作用する物体力であり， $(\dot{\quad})$  は時間  $t$  に関する偏微分 ( $\partial/\partial t$ ) を表す．また， $\lambda(\mathbf{x})$  と  $\mu(\mathbf{x})$  は Lamé 定数であり，弾性体中の縦波音速  $c_L$  および横波音速  $c_T$  の間に次の関係がある．

$$c_L = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}} \quad , \quad c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3)$$

式 (1) と (2) を微小領域  $V$  で積分し，ガウスの発散定理を適用すると次式のようなになる．

$$\int_V \rho \dot{v}_i dV = \int_S \tau_{ij} n_j dS \quad (4)$$

$$\int_V \dot{\tau}_{ij} dV = \int_S \lambda v_k n_k \delta_{ij} + \mu (v_i n_j + v_j n_i) dS \quad (5)$$

ここで， $\mathbf{n}$  は領域  $V$  に対して外向きの法線ベクトルである．また，本研究では式 (4) において物体力  $f$  はゼロとしている．

#### 3.2 EFIT の離散化

式 (4) を微小領域  $V$  で積分すると，

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho(\mathbf{x}) v_1 dV = \int_S (\tau_{11} n_1 + \tau_{12} n_2) dS \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho(\mathbf{x}) v_2 dV = \int_S (\tau_{12} n_1 + \tau_{22} n_2) dS \quad (7)$$

となる．また，式(5)を微小領域  $V$  で積分すると，

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \tau_{11} dV = \int_S \{[\lambda(\mathbf{x}) + 2\mu(\mathbf{x})]v_1 n_1 + \lambda(\mathbf{x})v_2 n_2\} dS \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \frac{\tau_{12}}{\mu(\mathbf{x})} dV = \int_S (v_1 n_2 + v_2 n_1) dS \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \tau_{22} dV = \int_S \{\lambda(\mathbf{x})v_1 n_1 + [\lambda(\mathbf{x}) + 2\mu(\mathbf{x})]v_2 n_2\} dS \quad (10)$$

となる．ここで，式(6)~(10)にはガウスの発散定理を適用しており， $n_i$  ( $i = 1, 2$ ) は領域  $V$  の外向きの法線ベクトルである．いま，図6に示すように，粒子速度  $v_1, v_2$  と垂直応力  $\tau_{11}, \tau_{22}$ ，せん断応力  $\tau_{12}$  の積分セルを配置する．ここでは， $v_1$  と  $\tau_{12}$  の離散化について具体的に説明し， $v_2, \tau_{11}, \tau_{22}$  の離散化はその離散式を載せるに留めておく．なお，EFIT の定式化をする際の約束事として，以下のように定める．ここで積分領域  $V$  は一辺が  $\Delta x$  の正方形であるとする．以下，積分セルと呼ぶ．各積分セル内で，上辺に配置される物理量を上付き文字 ( $U$ )，下辺の物理量を ( $D$ ) で表す．また，右辺に配置される物理量を ( $R$ )，左辺の物理量を ( $L$ ) とおく．材料定数  $\rho, \lambda, \mu$  は  $\tau_{ii}$  (No sum for  $i$ ) の積分セルで与えるものとする．

まず， $v_1$  の離散化について考える．図7のように， $v_1$  の積分セルは赤色で示すセルである． $v_1$  は赤色セル内で値が一定であるものと仮定しているので，式(6)は，

$$\bar{\rho}_1 \dot{v}_1 (\Delta x)^2 = \left[ \tau_{11}^{(R)} - \tau_{11}^{(L)} \right] \Delta x + \left[ \tau_{12}^{(U)} - \tau_{12}^{(D)} \right] \Delta x \quad (11)$$

となる．式(11)の両辺を  $(\Delta x)^2$  で割ると，

$$\bar{\rho}_1 \dot{v}_1 = \frac{1}{\Delta x} \left[ \tau_{11}^{(R)} - \tau_{11}^{(L)} + \tau_{12}^{(U)} - \tau_{12}^{(D)} \right] \quad (12)$$

となる．さらに，式(12)の両辺を  $\bar{\rho}_1$  で割ると， $\dot{v}_1$  を求める式が得られる．

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{\bar{\rho}_1} \left\{ \frac{1}{\Delta x} \left[ \tau_{11}^{(R)} - \tau_{11}^{(L)} + \tau_{12}^{(U)} - \tau_{12}^{(D)} \right] \right\} \quad (13)$$

均質材料を扱う場合，式(13)中の  $\bar{\rho}_1$  の値は  $v_1$  の積分セル内で一定となる．しかしながら，非均質材料や異種界面を持つ解析領域を扱う場合， $\rho$  は  $\tau_{11}$  の積分セルで定義されるため， $\bar{\rho}_1$  の値を求める必要がある． $v_1$  は赤色セル内で一定と仮定しているので，式(12)の左辺は，次式のように考えることができる．

$$\bar{\rho}_1 \dot{v}_1 = \frac{1}{2} \left[ \rho^{(R)} \dot{v}_1 + \rho^{(L)} \dot{v}_1 \right] \quad (14)$$

従って， $\bar{\rho}_1$  は，

$$\bar{\rho}_1 = \frac{1}{2} \left( \rho^{(R)} + \rho^{(L)} \right) \quad (15)$$

となる．

$v_2$  の離散化も同じように行くと，

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{\bar{\rho}_2} \left\{ \frac{1}{\Delta x} \left[ \tau_{12}^{(R)} - \tau_{12}^{(L)} + \tau_{22}^{(U)} - \tau_{22}^{(D)} \right] \right\} \quad (16)$$

となり，式(16)中の  $\bar{\rho}_2$  は次式で計算できる．

$$\bar{\rho}_2 = \frac{1}{2} \left( \rho^{(U)} + \rho^{(D)} \right) \quad (17)$$

つづいて， $\tau_{12}$  の離散化を考える．図8のように， $\tau_{12}$  の積分セルは黒色で示すセルである． $\tau_{12}$  は黒色セル内で値が一定であると仮定しているから，式(9)は，

$$\frac{\dot{\tau}_{12}}{\bar{\mu}} (\Delta x)^2 = \left\{ \left[ v_2^{(R)} - v_2^{(L)} \right] \Delta x \left[ +v_1^{(U)} - v_1^{(D)} \right] \Delta x \right\} \quad (18)$$

となる．式 (18) の両辺を  $(\Delta x)^2$  で割ると，

$$\frac{\dot{\tau}_{12}}{\bar{\mu}} = \frac{1}{\Delta x} \left[ v_2^{(R)} - v_2^{(L)} + v_1^{(U)} - v_1^{(D)} \right] \quad (19)$$

となる．さきほどと同様に，非均質材料や異種界面を扱うために  $\bar{\mu}$  の導出を考える． $\tau_{12}$  は黒色セル内で一定と仮定しているので，式 (19) の左辺は次式のように考えることができる．

$$\frac{\dot{\tau}_{12}}{\bar{\mu}} = \frac{1}{4} \left[ \frac{\dot{\tau}_{12}}{\mu^{(U,R)}} + \frac{\dot{\tau}_{12}}{\mu^{(D,R)}} + \frac{\dot{\tau}_{12}}{\mu^{(U,L)}} + \frac{\dot{\tau}_{12}}{\mu^{(D,L)}} \right] \quad (20)$$

ここで，上付き文字  $(U, R)$ ， $(D, R)$ ， $(U, L)$ ， $(D, L)$  は  $\tau_{12}$  の積分セルからみて，右上，右下，左上，左下を表す．式 (20) の両辺を  $\dot{\tau}_{12}$  で除すと， $\bar{\mu}$  は次のようになる．

$$\bar{\mu} = \frac{4}{\left[ \frac{1}{\mu^{(U,R)}} + \frac{1}{\mu^{(D,R)}} + \frac{1}{\mu^{(U,L)}} + \frac{1}{\mu^{(D,L)}} \right]} \quad (21)$$

同様に  $\tau_{11}$ ， $\tau_{22}$  の離散化を行うと，

$$\dot{\tau}_{11} = \frac{1}{\Delta x} \left\{ (\lambda + 2\mu) \left[ v_1^{(R)} - v_1^{(L)} \right] + \lambda \left[ v_2^{(U)} - v_2^{(D)} \right] \right\} \quad (22)$$

$$\dot{\tau}_{22} = \frac{1}{\Delta x} \left\{ \lambda \left[ v_1^{(R)} - v_1^{(L)} \right] + (\lambda + 2\mu) \left[ v_2^{(U)} - v_2^{(D)} \right] \right\} \quad (23)$$

となる．

以上で，粒子速度  $v_i$  と応力  $\tau_{ij}$  の空間領域での離散化が完了した．一方で，時間領域の離散化は，次式のような中心差分近似を用いる．

$$\begin{aligned} \{v_i\}^z &= \{v_i\}^{z-1} + \Delta t \{\dot{v}_i\}^{z-\frac{1}{2}} \\ \{\tau_{ij}\}^{z+\frac{1}{2}} &= \{\tau_{ij}\}^{z-\frac{1}{2}} + \Delta t \{\dot{\tau}_{ij}\}^z \end{aligned} \quad (24)$$

ここで， $\Delta t$  は時間間隔であり，上付き文字  $z$  は整数次または半整数次の時間ステップを示している．

### 3.2.1 計算安定化条件

ここで，解析を安定して行うための条件について述べる．EFIT ではある時間ステップで数値誤差が生じると，時間ステップの更新とともに誤差が蓄積されていき，いずれ解が発散してしまう．数値的に安定した解析を実行するために，一般的な有限差分法 (FDM) と同様に時間間隔  $\Delta t$  は，以下のような CFL 条件<sup>[6]</sup>(Courant-Friedrichs-Lewy condition) を満たす必要がある．

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{2}c_{\max}} \quad (25)$$

ここで  $c_{\max}$  は構成される材料の音速のうち，最も速い(縦波)音速である．この条件をわずかでも満足しなければ解が計算途中で発散してしまう．次にセル長  $\Delta x$  であるが，境界要素法 (BEM) と同程度の精度を有するために，中畑ら<sup>[7]</sup> が次式を提案している．

$$\Delta x \leq \frac{1}{12} \lambda_{\min} = \frac{1}{12} \frac{c_{\min}}{f_{\max}} \quad (26)$$

ここで， $c_{\min}$  は材料の音速のうち，最も遅い(横波)音速であり， $f_{\max}$  は入射波の周波数スペクトル成分の最大周波数である．この条件を満足するように解析を行えば，精度のよい結果が得られる．

### 3.2.2 解析手順

以下に，解析の手順を説明する．

#### 解析手順

1. 式 (26) からセル長  $\Delta x$  を計算し，CFL 条件 (25) より時間間隔  $\Delta t$  を設定する．

2. 写真等のデジタル画像から，供試体の数値モデルを作成する．
3. 励起する波動の時刻歴波形を設定する．
4. EFIT の計算を実行する．まず，応力  $\tau_{ij}$  を計算し，次に粒子速度  $v_i$  を計算し，式 (24) で時間ステップの更新を行う．この過程をあらかじめ決めておいた総時間ステップ分繰り返す．
5. 固体中の応力の計算結果を出力する．

### 3.3 イメージベースモデリング

イメージベースモデリングとは，供試体の3次元表面像やCT写真等のデジタル画像から，EFITの数値モデルを作成する方法である．デジタル画像の1ボクセル(3次元の場合)や1ピクセル(2次元の場合)と，EFITの1セルの大きさを一致させることにより，解析領域の形状や介在物の分布状況を簡単に，かつ忠実にモデル化する方法である．ここでは，本研究で用いた供試体のイメージベースモデリングを図9に示す．まず，供試体を非接触3次元デジタルイザ(KONICA MINOLTA RANGE7)を用いて，表面形状を3次的に測定する．本研究で用いた供試体は奥行き方向に一定の断面であるから，この測定データの1断面を取り出して，黒色(アルミニウム)と緑色(空隙)に色分けする．

さて，RANGE7の基本原則<sup>[8,9]</sup>を述べる．図10に示すように，まず，半導体レーザーをコリメータ，円柱レンズによりストライプ状に変換し，ガルバノミラーで折り返して測定対象物に照射する．次に，測定対象物からの反射光を受光レンズによりイメージセンサ上に結像し，センサ上の像位置を求める．ガルバノミラーとイメージセンサの撮像を同期して駆動し，各投光角(時間)での受光出力変化から位置(角度)を求めることで測定対象物の形状を3次的にスキャンする．本研究では，この作業を測定会社に委託することで，3次元データを計測してもらった．3次元データはstlファイルで受け取り，本研究室のソフトウェアVoxelcon2011で加工することによって1断面を抽出した．

### 3.4 ディレイ計算

本節では，電子スキャン装置に入力するディレイを求めるための方法を説明する．ディレイ計算には，弾性波伝搬の時間に対する可逆性を利用して<sup>[10]</sup>，集束させたい位置を波源として波を逆伝搬させる．フレキシブルアレイ探触子位置における応力値から超音波の到達を調べ，ある閾値以上の応力値になったときに波動が到達したと判断する．この到着時刻から各素子におけるディレイを算出する．

図9に示すアルミニウム供試体( $c_L=6343\text{m/s}$ ， $c_T=3040\text{m/s}$ ， $\rho=2700\text{kg/m}^3$ )の数値モデルを例として説明する．入力波は，フレキシブルアレイ探触子の中心周波数である3.0MHz(最大周波数成分 $f_{max}=10\text{MHz}$ )のリッカー波を用いた．この時の最小波長 $\lambda_{min}$ はおよそ0.3mmの横波成分である．ここで，式(26)より $\Delta x=0.02\text{mm}$ とする．時間ステップは式(25)から $\Delta t=2.0\text{ns}$ とした．超音波が図12のフレキシブルアレイ探触子の素子点に到達するように5500ステップを計算した．以下にディレイ計算の手順を述べる．

#### ディレイ計算の手順

1. まず，図11に示すように複数の集束点を定め，その点を波源(ソースポイント)に設定する．

2. 図 12 のように探触子を設置する範囲を決定し，波源から超音波を逆伝搬させて，探触子の設置範囲において，等間隔 (0.2mm) で応力を出力する．このときの逆伝搬の様子を図 13 に示す．
3. 応力の出力結果から，ミーゼス応力を求め，閾値を超えた時刻を波の到達時間とし，この到達時間からディレイを計算する．
4. 等間隔で出力しているため，出力点と出力点の間については，補間法によってディレイを求める．
5. 探触子を設置する位置を決定し，数値モデルから各素子の位置を求め，対応するディレイを入力する．
6. もし，集束点の計算数が足りなくて，セクタスキャンの像の解像度が低い場合，集束点と集束点の間のデータを補間し，ディレイを求める．(19 点 91 点)

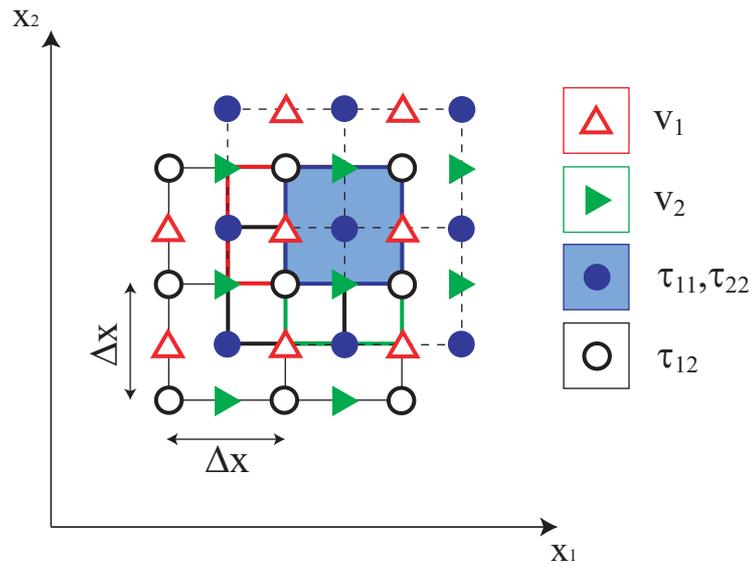


図 6 EFIT における  $v_i, \tau_{ij}$  の配置

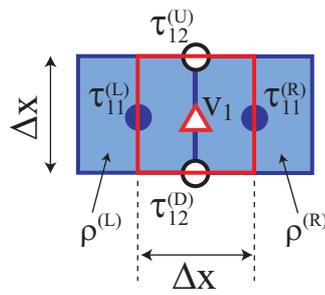


図 7 EFIT における  $v_1$  の積分セル

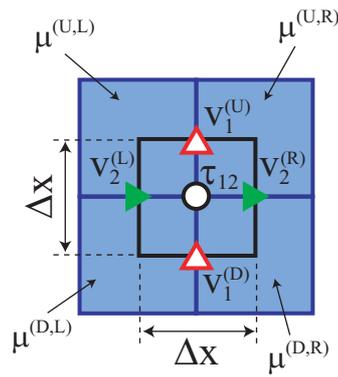


図 8 EFIT における  $\tau_{12}$  の積分セル

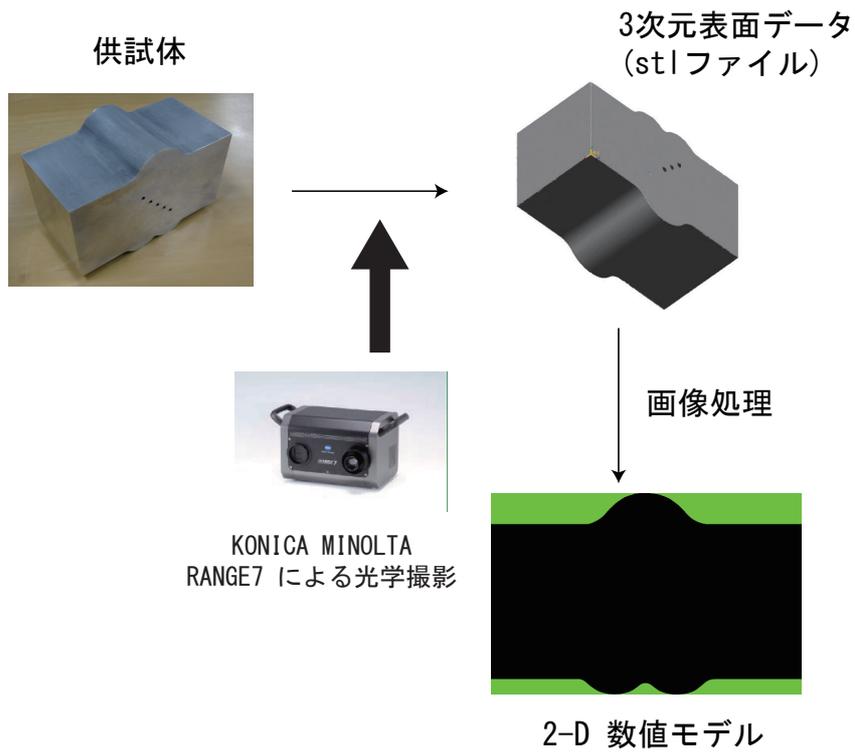


図9 イメージベースモデリングによる数値モデルの作成

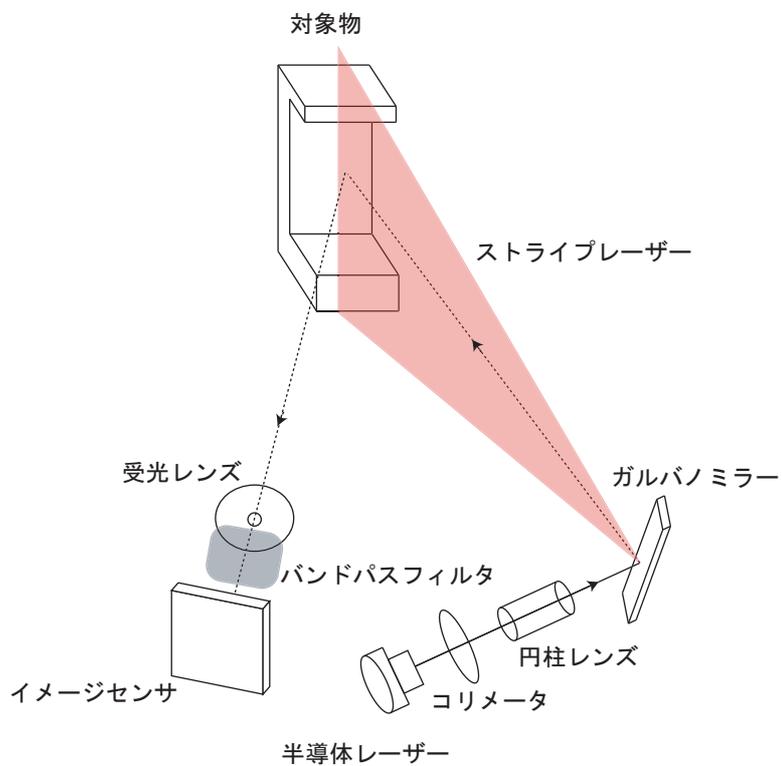


図10 RANGE7の測定原理

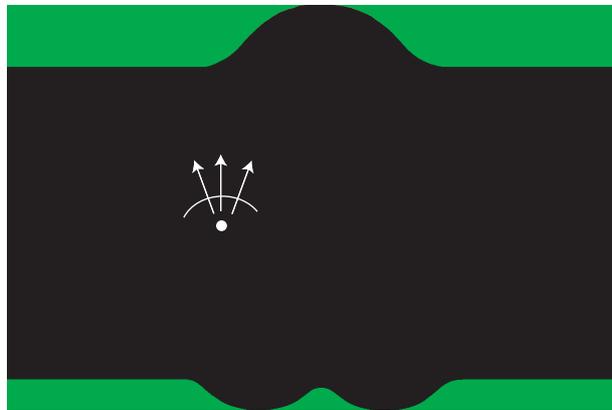
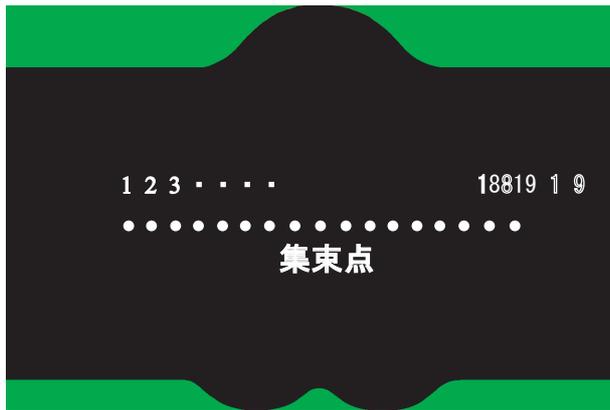


図 11 集束点の設定

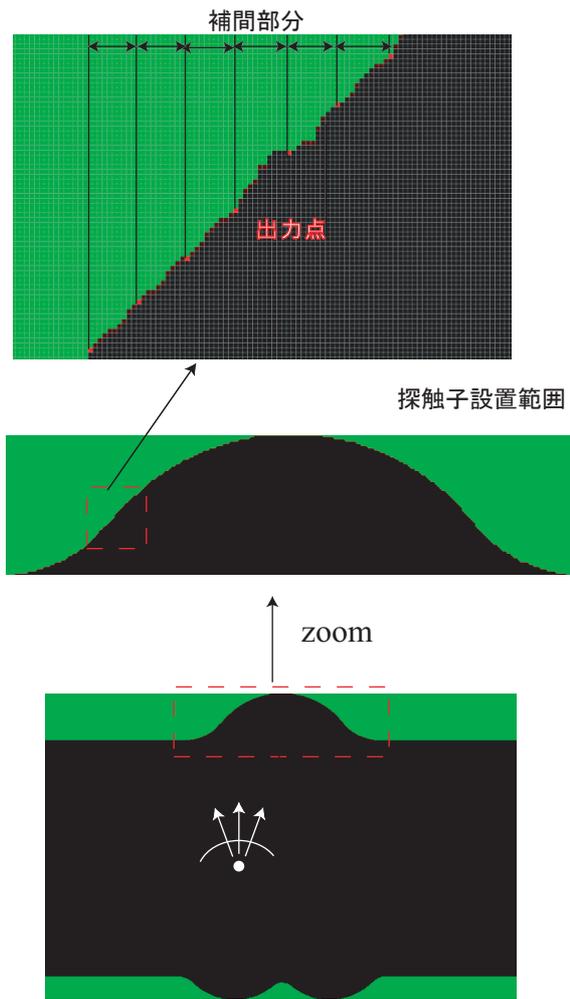


図 12 出力点とデータ補間

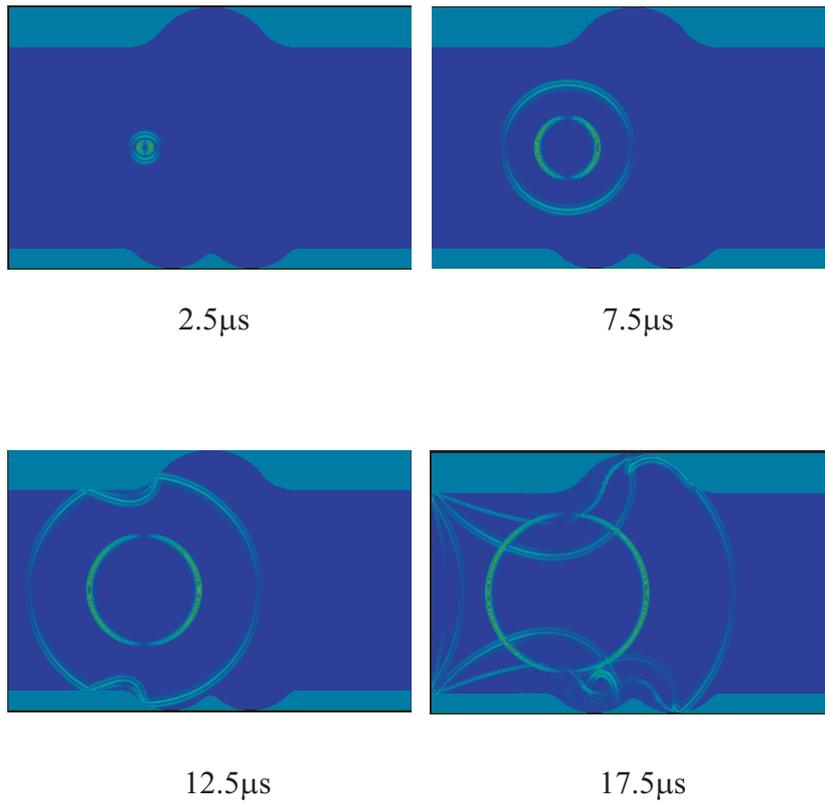


図 13 集束点を波源にした場合の超音波伝搬の可視化

## 4. セクタスキャンによる画像化

本節では、はじめに本実験で用いた2つのアルミニウム供試体の仕様について述べる。次に、EFITを用いて求めたディレイの一例を示す。最後に、求めたディレイを超音波電子スキャン装置に入力し、セクタスキャンによる欠陥の画像化を行った結果を述べる。

### 4.1 アルミニウム供試体

本実験で用いたアルミニウム供試体(a)を図14に示す。横幅は100mm、高さが65mm、奥行が50.4mmである。この供試体の上下表面には2種類の曲率を持つ凹凸があり、上面は幅30mm、高さ10mmの凸形状を有する。下面には、幅20mm、高さ5mmの凸形状を2つ有している。内部には、人工欠陥として、直径が2.0mmの貫通横穴を作成しており、鉛直方向と水平方向に5.0mmずつずれた位置に計5つ存在する。3番目に深い欠陥の中心は、供試体上表面から35mmの深さにある。なお、縦波音速は、 $c_L=6343\text{m/s}$ である。

アルミニウム供試体(b)を図15に示す。上表面に、幅40mm、高さ10mmの凸形状を有している。横幅が80mm、高さが50mm、奥行が50mmである。人工欠陥として、供試体の底面中央に高さ4mm、幅0.3mmのスリットが入っている。縦波音速は $c_L=6335\text{m/s}$ である。

### 4.2 ディレイ分布曲線

本節では、イメージベースEFITによって求めたフレキシブルアレイ探触子のディレイについて述べる。図16の上図のように、フレキシブルアレイ探触子の先端を供試体の左から30mmの位置に設置した場合を考える。ここでは、図16で示す供試体モデルの左下を原点(0,0)として、座標(15mm,30mm)、(37mm,30mm)、(50mm,30mm)、(63mm,30mm)、(85mm,30mm)の点をそれぞれ集束点1~5とする。赤色は素子部分を示し、素子番号1~24は0.9mmピッチで左から並んでいる。この時、各素子に設定するディレイを図16の下図に分布曲線で示す。集束点3はディレイが小さいが、これは供試体上面の凸形状自体が供試体内部に集束するような音響レンズのような役割をしているためである。

### 4.3 欠陥の画像化

本節では、イメージベースEFITで求めたディレイをES3100に入力し、セクタスキャンによる欠陥の画像化の結果を示す。図17~23では、フレキシブルアレイ探触子のゴム部分を白色、素子部分を赤色で示し、セクタスキャンの画像化範囲を水色で囲み、スキャンの角度を記す。また、図中の白点は各実験で設定した集束点を表している。

#### 4.3.1 アルミニウムの欠陥画像化(円形空洞)

図14で示したアルミニウム供試体(a)の円形空洞の画像化を行う。超音波ビームの集束点は供試体の上から35mmの高さにあるおよそ0.8mm間隔の91点を設定した。探触子の位置は、図17の上図に示すように供試体の左から20mmの位置にフレキシブルアレイ探触子の先端を合わせるように設置した。セクタスキャンによる画像化の結果を図17の下図に示す。なお、実際の欠陥位置を黒丸で表わしている。この結果、欠陥像が実際の欠陥位置とほぼ等しい位置に現れており、曲率を有する部分からの欠陥画像化が可能であることがわかる。

また、探触子の設置位置を変えた画像化結果を図18と図19に示した。探触子の設置位置はそれぞれ供試体の左から30mmと40mmの位置とした。この2つの供試体での集束点は、先程と

同じ点に設定している．画像化の結果から，どちらも欠陥像が実際の欠陥位置とほぼ等しい位置に現れていることが分かる．

次に，供試体を下面の凸形状の一部にフレキシブルアレイ探触子を設置させて，欠陥の画像化を行った．集束点は，供試体の上から 30mm の高さにある位置に設定した．集束点の間隔は，およそ 0.7mm 間隔で 91 点を設定した．探触子は供試体の左から 20mm の位置に設置した．結果を図 20 に示す．この結果から，曲率半径の小さな凸面にフレキシブルアレイ探触子を設置しても高精度な画像化ができることが分かる．

#### 4.3.2 アルミニウムの欠陥画像化(スリット)

図 15 で示したアルミニウム供試体 (b) のスリットの画像化を行う．この供試体では，超音波ビームの集束点を底面深さとし，およそ 0.4mm 間隔の 121 点に設定して実験を行った．フレキシブルアレイ探触子の先端を供試体の左から 10mm，20mm，30mm の位置に設置した時の画像化結果をそれぞれ図 21，図 22，図 23 に示す．黒線がスリットの実際的位置を表す．画像化の結果を見ると，供試体の底面とともにスリットの端部が現れていることが分かる．探触子の設置位置にかかわらず，スリットの位置と高さを精度良く判断できる．

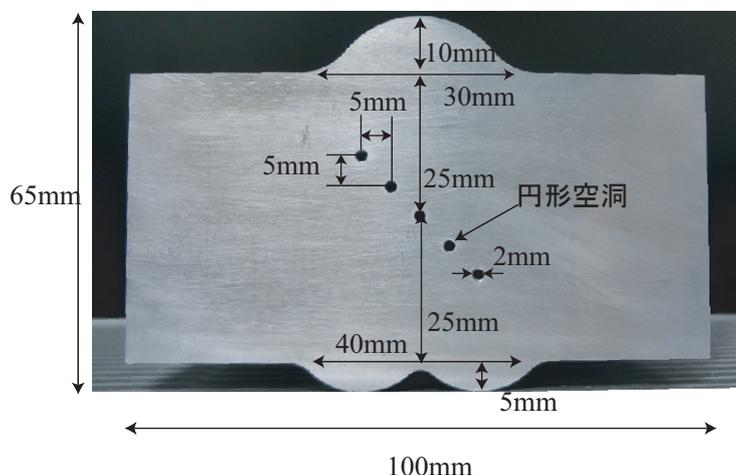


図 14 アルミニウム供試体 (a)

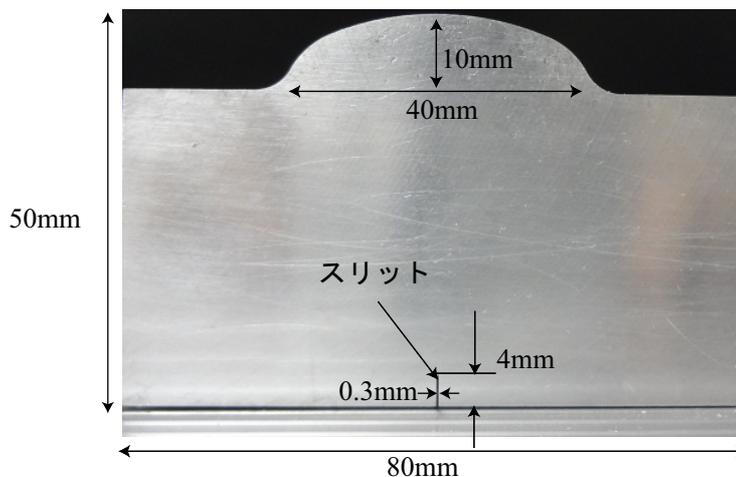


図 15 アルミニウム供試体 (b)

素子番号 1・・・24

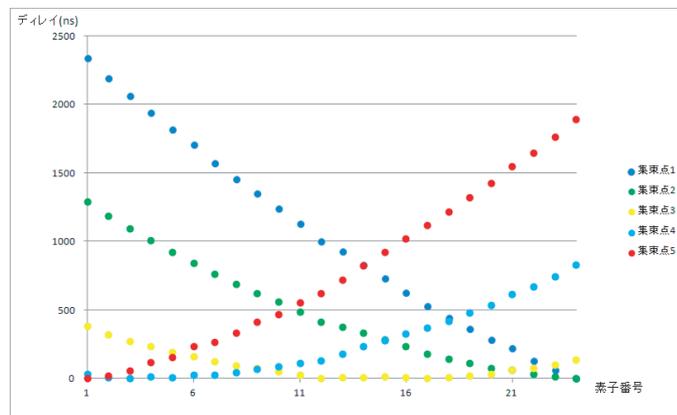
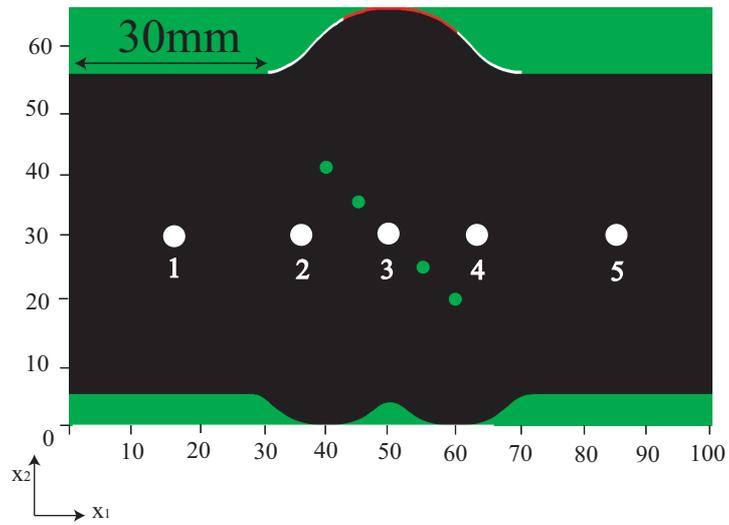


図 16 集束点 1～5 に設定した場合のディレイ分布

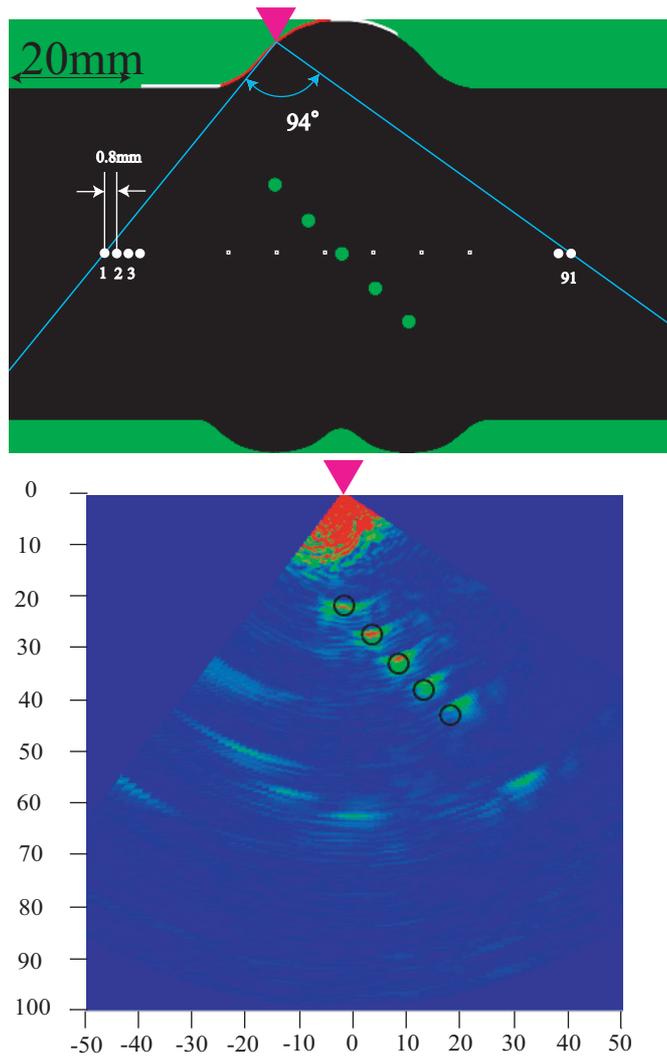


図 17 探触子を供試体左から 20mm に設置した場合の欠陥画像化 (円形空洞)

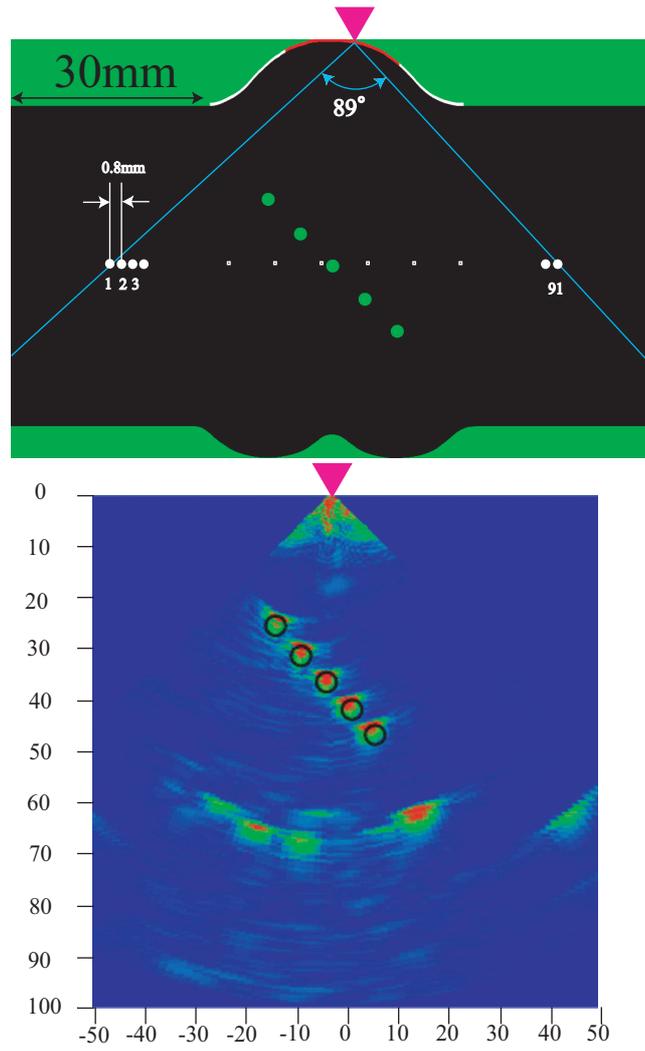


図 18 探触子を供試体左から 30mm に設置した場合の欠陥画像化 (円形空洞)

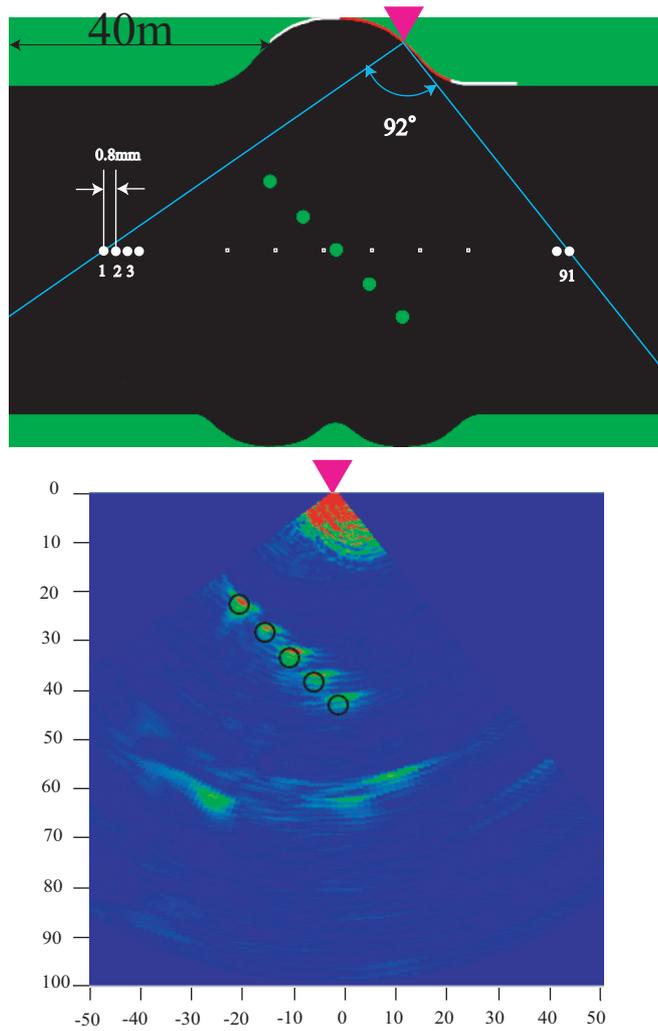


図 19 探触子を供試体左から 40mm に設置した場合の欠陥画像化 (円形空洞)

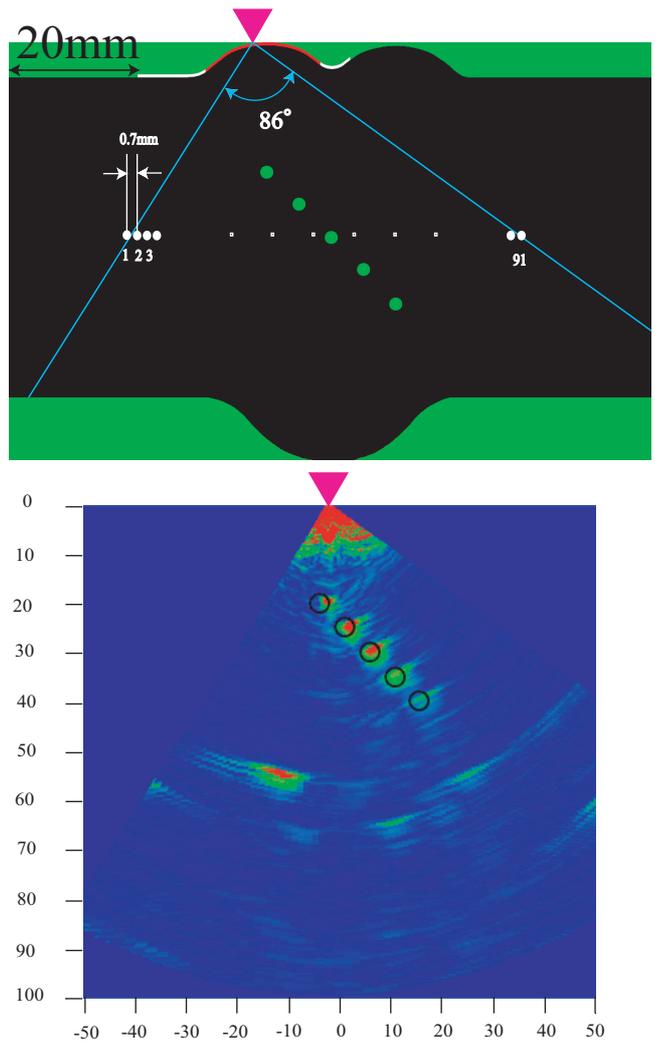


図 20 異なる曲率に設置した場合の欠陥画像化

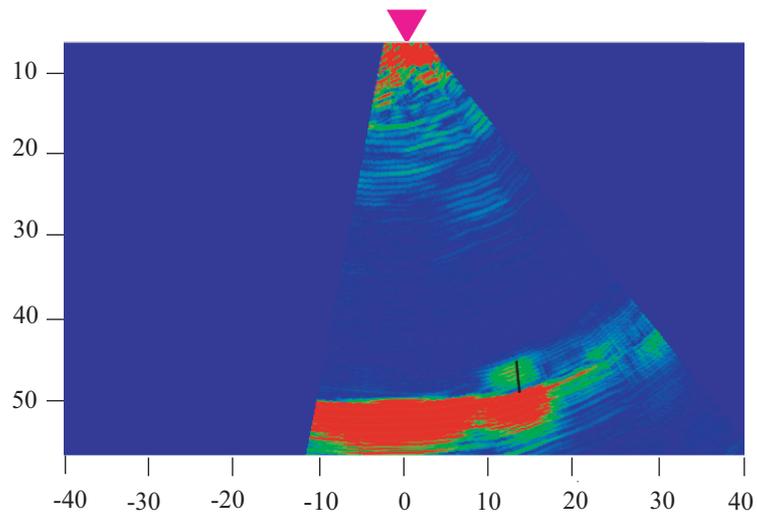
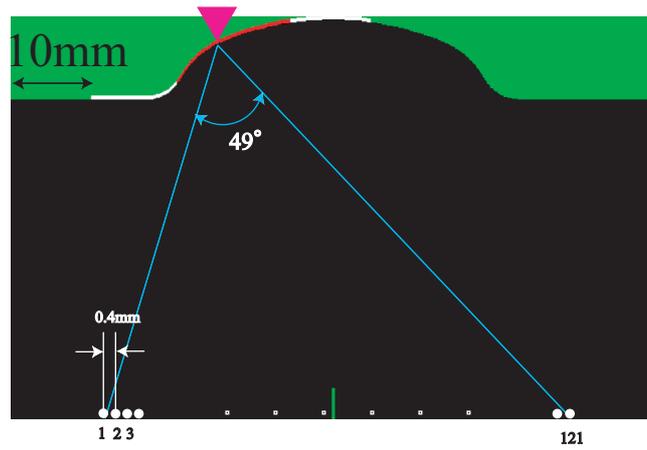


図 21 探触子を供試体左から 10mm に設置した場合の欠陥画像化 (スリット)

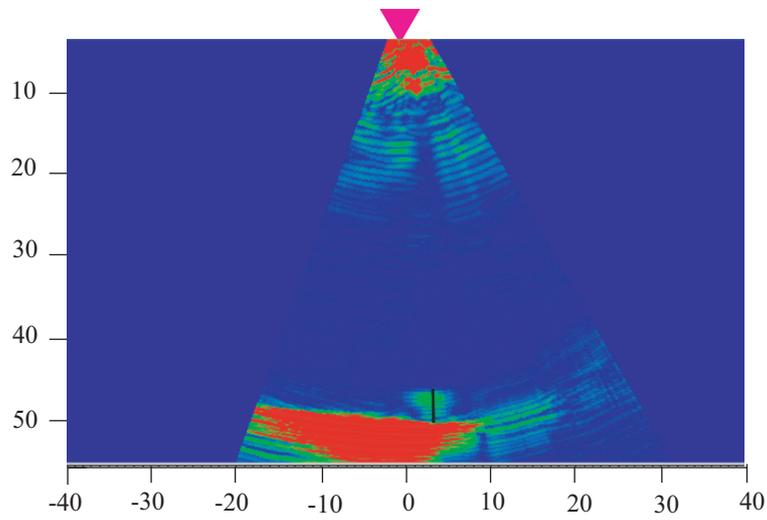
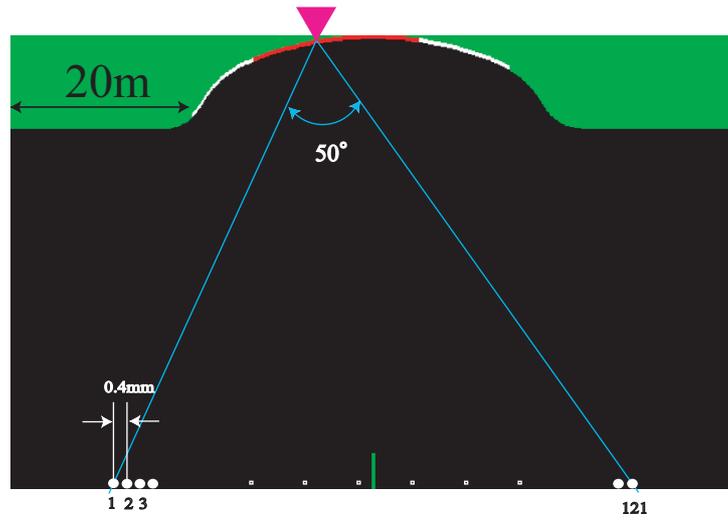


図 22 探触子を供試体左から 20mm に設置した場合の欠陥画像化 (スリット)

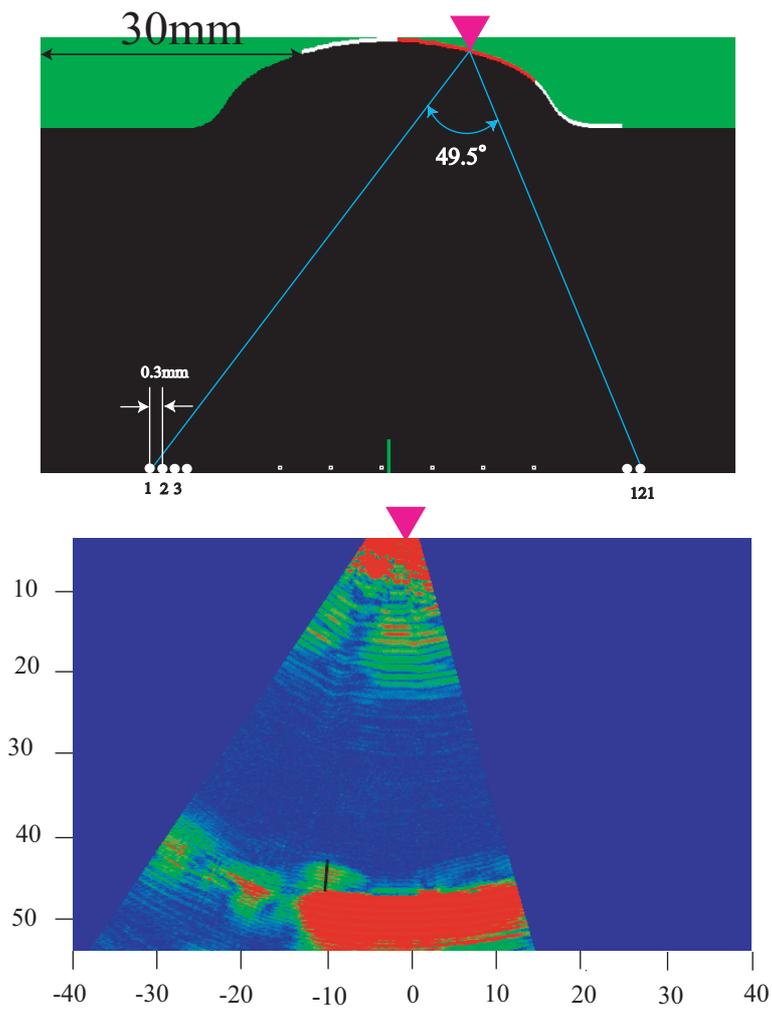


図 23 探触子を供試体左から 30mm に設置した場合の欠陥画像化 (スリット)

## 5. 結論

本研究は、凹凸や曲率を有する部材に対して超音波探傷を行うために、フレキシブルアレイ探触子を用いた欠陥の映像化に関する基礎的研究を行った。フレキシブルアレイ探触子と電子スキャン装置を用いて、供試体の狙った位置に超音波ビームを集束させるためには、各素子に印加する電圧のディレイの適切な設定が重要となる。凹凸を有する場合、ディレイを単純に計算することは容易ではないので、ここではイメージベース EFIT を援用してディレイを数値的に求めた。計算されたディレイを超音波電子スキャン装置に入力することでセクタスキャンによる画像化を行った。以下に、各節で得られた内容についてまとめる。

第2節では、フレキシブルアレイ探触子とそれを制御する超音波電子スキャン装置について述べた。また、セクタスキャンの仕組みを示した。

第3節では、イメージベース EFIT を用いたフレキシブルアレイ探触子のディレイ計算方法について述べた。ここでは、イメージベース EFIT のシミュレーションで、集束点から超音波を伝搬させ、アレイ素子に到達した縦波の時間差を元にディレイを計算した。

第4節では、アルミニウム供試体中の人工欠陥の画像化を試みた。ここでは、第3節で求めたディレイを用いてセクタスキャンによる画像化を行った。この結果、凹凸面にフレキシブルアレイ探触子を設置した場合でも、空洞欠陥やスリットの位置が正確に評価できることを示した。

今後の課題として、フレキシブルアレイ探触子を用いてセクタスキャン以外の画像化手法 (FSAP 方式<sup>[11]</sup> や開口合成法<sup>[12-14]</sup> 等) を行いたい。また、今回はフレキシブルアレイ探触子の設置面の形状の再現を他の計測会社に依頼したが、今後は自前のツールで設置面の形状が構成できるように工夫していきたい。

## 参考文献

- [1] 廣瀬壯一：定量的超音波非破壊評価とその周辺技術，応用力学論文集，Vol.7, pp.3–12, 2004.
- [2] 横野泰和：フェイズドアレイ UT の適用事例及び標準化の世界的動向，非破壊検査，Vol.56, No.10, pp.510–515, 2007.
- [3] Olfa, T.R. and Stephan, W.S.: Beam steering with linear arrays, *IEEE Transactions on Biomed.Eng.*, Vol.BEM-30, No.8, pp.438–452, 1983.
- [4] <http://www.jp-probe.com/kiji/FlexibleArray.pdf>
- [5] 安本浩二：超音波の基礎，日本放射線技術学会雑誌，Vol.60, No.1, pp.49–56, 2004.
- [6] 橋本修：実践 FDTD 時間領域差分法，森北出版，2006.
- [7] 中畑和之，木本和志，廣瀬壯一：動弾性有限積分法を用いた波動伝搬解析のためのイメージベースモデリング，計算数理工学論文集，Vol.7, No.2, pp.267–272, 2008.
- [8] 安部芳久，山口亘，河野利夫，向井隆晋：非接触 3 次元デジタル RANGE7 のコア技術，Konica Minolta technology report 6, pp.92–96, 2009.
- [9] <http://www.konicaminolta.jp/about/index.html>
- [10] 中畑和之，木本和志：イメージベースシミュレーションを援用した時間反転法による固体内欠陥の映像化の試み，電子情報通信学会．US，超音波 Vol.111, No.88, pp.1–6, 2011.
- [11] 中畑和之，平田正憲，廣瀬壯一：全波形サンプリング処理方式を利用した散乱振幅からの欠陥再構成，非破壊検査，Vol.59, No.6, pp.277–283, 2010.
- [12] Schmitz, V., Chakhlov, S. and Müller, W.: Experiences with synthetic aperture focusing technique in the field, *Ultrasonics*, Vol.38, pp.731–738, 2000.
- [13] Langenberg, K.J., Berger, M. and Kreutter, Th.: Synthetic aperture focusing technique signal processing, *NDT International*, Vol.19, pp.177–189, 1986.
- [14] Müller, W., Schmitz, V. and Schäfer, G.: Reconstruction by the synthetic aperture focusing technique (SAFT), *Nuclear Engineering and Design*, Vol.94, pp.393–404, 1986.