

## I-5 リニアアレイ探触子への逆散乱イメージング法の適用

愛媛大学大学院 学生員 ○松岡ちひろ  
愛媛大学大学院 正 員 中畑和之

### 1. はじめに

リニアアレイ探触子<sup>1)</sup>は独立に駆動できる複数の小さな振動素子を直線状に配置し、これらを電子的に制御することによって超音波の送受信を行う探触子である。この探触子は従来のように機械的に走査して欠陥エコーを収集する必要があるため、短時間に広範囲のエコーデータを取得することができる。ここでは、2次元フーリエ変換を基本構造とした周波数域開口合成法<sup>2)</sup>の理論を線形化逆散乱法<sup>3)</sup>に応用した逆散乱イメージング法を提案し、これをリニアアレイ探触子と組み合わせて用いる場合について検討を行う。本報告の前半で、低周波数域の近似を導入したボルン逆散乱イメージング法と、高周波数域の近似を導入したキルヒホフ逆散乱イメージング法について述べる。後半では、境界要素法によって数値的に計算した欠陥エコーを逆散乱イメージング法にインプットすることによって、欠陥の再構成シミュレーションを行う。この結果を基に、リニアアレイ探触子の素子配置が欠陥像の再構成性能におよぼす影響について報告する。

### 2. 逆散乱イメージング法

2次元直交座標を  $(x_1, x_2)$  とし、角振動数を  $\omega$  とする時間調和な波動場を考えると、SH波(横波)の運動を支配する面外の変位  $u$  は次の運動方程式を満足する。

$$\mu[\Delta u(x, \omega) + k_T^2 u(x, \omega)] = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\mu$  はせん断弾性係数、 $k_T (= \omega/c_T)$  は横波の波数、 $c_T$  は横波の波速である。本イメージング法で対象とする超音波の送受信概要図を図-1に示す。均質等方な弾性体  $D$  内に散乱体  $D^c$  が存在しているものとする。ここで扱う逆散乱問題とは、アレイ探触子  $y$  から  $u^{in}$  を送信し、散乱体  $D^c$  によって散乱された  $u^{sc}$  を同じ位置で受信して、この散乱波形から逆に散乱体の形状を推定しようとするものである。以下では、散乱

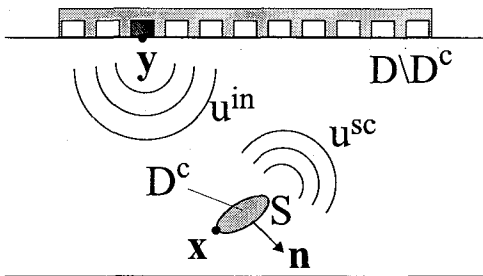


図-1 アレイ探触子による超音波の送受信概要

体  $D^c$  を空洞欠陥と仮定し、本イメージング法のキーとなる式のみ示すことにする。

#### 2.1 ボルン逆散乱イメージング法

ここでは、欠陥  $D^c$  の領域内部において値を有する特性関数  $\Gamma(x)$  を定義する<sup>3)</sup>。ボルン近似を導入すれば、欠陥エコー  $\bar{u}^{sc}$  は

$$\bar{u}^{sc}(k_1, y_2, k_T) = \left( \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{u^0 \exp(ik_2 y_2)}{4\pi \sqrt{i\pi y_2 k_2}} \times \iint_{-\infty}^{\infty} \Gamma(x) \exp\{-i(k_1 x_1 + k_2 x_2)\} dx_1 dx_2 \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、 $k_2 = \sqrt{4k_T^2 - k_1^2}$  である。上式の  $\bar{u}^{sc}$  は散乱波  $u^{sc}$  を  $y_1$  についてフーリエ変換したもの：

$$\bar{u}^{sc}(k_1, y_2, k_T) = \int_{-\infty}^{\infty} u^{sc}(y_1, y_2, k_T) \exp(-ik_1 y_1) dy_1 \quad (3)$$

である。式(2)は座標  $(x_1, x_2)$  について2次元フーリエ変換の構造を有するので、これをフーリエ逆変換することによって特性関数  $\Gamma(x)$  を得る。

$$\Gamma(x) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{4\pi \sqrt{i\pi y_2 k_2} \bar{u}^{sc}}{\left( \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}{2} \right)^{\frac{3}{2}} u^0 \exp(ik_2 y_2)} \times \exp\{i(k_1 x_1 + k_2 x_2)\} dk_1 dk_2 \quad (4)$$

すなわち、 $\bar{u}^{sc}$  を用いて欠陥の領域形状  $\Gamma(x)$  が再構成される。

#### 2.2 キルヒホフ逆散乱イメージング法

欠陥の境界部  $S$  において値を有する特異関数  $\gamma(x)$  を定義する<sup>3)</sup>。キルヒホフ近似を用いれば欠陥エコー  $\bar{u}^{sc}$  は次式のように表すことができる。

$$\bar{u}^{sc}(k_1, y_2, k_T) = \left( \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{i u^0 \exp(ik_2 y_2)}{4\pi \sqrt{i\pi y_2 k_2}} \times \iint_{-\infty}^{\infty} \gamma(x) \exp\{-i(k_1 x_1 + k_2 x_2)\} dx_1 dx_2 \quad (5)$$

これを逆フーリエ変換すると、欠陥の境界形状  $\gamma(x)$  が再構成できる。

$$\gamma(x) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{4\pi \sqrt{i\pi y_2 k_2} \bar{u}^{sc}}{\left( \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}{2} \right)^{\frac{1}{2}} u^0 \exp(ik_2 y_2)} \times \exp\{i(k_1 x_1 + k_2 x_2)\} dk_1 dk_2 \quad (6)$$

### 3. 欠陥像のイメージングシミュレーション

平らな表面をもつ被検体 (ステンレス:  $c_T = 3000\text{m/s}$ ,  $\rho = 7800\text{kg/m}^3$ ) の内部に欠陥が存在する場合について, 境界要素法によって得られた波形データを用いて欠陥の再構成シミュレーションを行った. ここでは, 受信超音波の最高周波数を  $f^{\max} = 2.39\text{MHz}$  とした.

4つの円形空洞欠陥に対する再構成結果を図-2に示す. 左側は素子間隔  $1.0\text{mm}$ , 素子幅  $0.8\text{mm}$  の計64個の素子をもつリニアアレイ探触子であり, 右側は素子数が左側の倍の128個の素子をもつリニアアレイ探触子である. ボルン逆散乱イメージング法によって欠陥領域が, キルヒホフ逆散乱イメージング法によって欠陥境界部が再構成されている. 被検体の上側表面で超音波を送受信しているため, 欠陥の上側部分が再構成されているのがわかる. 64個の素子を用いた場合, 空洞欠陥が横に細長く歪んでいるが, 128個の素子を用いた場合にはほぼ半円状に表現されている. これは, 素子数が増加すれば, 欠陥の形状再構成に寄与するデータが多く計測できるためであると考ええる.

次に, 中心間距離が  $3\text{mm}$  の2つの円形空洞欠陥の再構成を図-3に示す. 図-3の左側は素子間隔  $1.0\text{mm}$ , 素子幅  $0.8\text{mm}$  の計64個の素子をもつリニアアレイ探触子であり, 右側は素子数が計32個のリニアアレイ探触子を用いたものである. 図-3より, 素子数が多い場合には2つの欠陥形状が明確に分離して再構成されているのがわかる. 探触子の開口幅が大きいほど, 分解能も向上することがわかる.

### 4. 結論

本研究では, リニアアレイ探触子で得られるエコーを基に鋼材内部の欠陥形状を再構成する逆散乱イメージング法を提案し, その性能を数値シミュレーションによって検証した. この結果, ボルン逆散乱イメージング法は欠陥領域を, キルヒホフ逆散乱イメージング法は欠陥境界部を再現することが示された. 欠陥形状をより正確に再現するためには, 開口幅の大きなリニアアレイ探触子を用いることが肝心であり, これは分解能の観点からも有効であることが示された.

### 参考文献

- 1) 小島 正: アレイ探触子, 非破壊検査, Vol.51, No.11, pp705-709, 2002.
- 2) Nagai, K.: A new synthetic-aperture focusing method for ultrasonic B-scan imaging by Fourier transform, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, Vol.SU-32, No.4, pp531-536, 1985.
- 3) Kitahara, M., Nakahata, K. and Hirose, S.: Elastodynamic inversion for shape reconstruction and type classification of flaws, *Wave Motion*, Vol.36, pp.443-455, 2002.

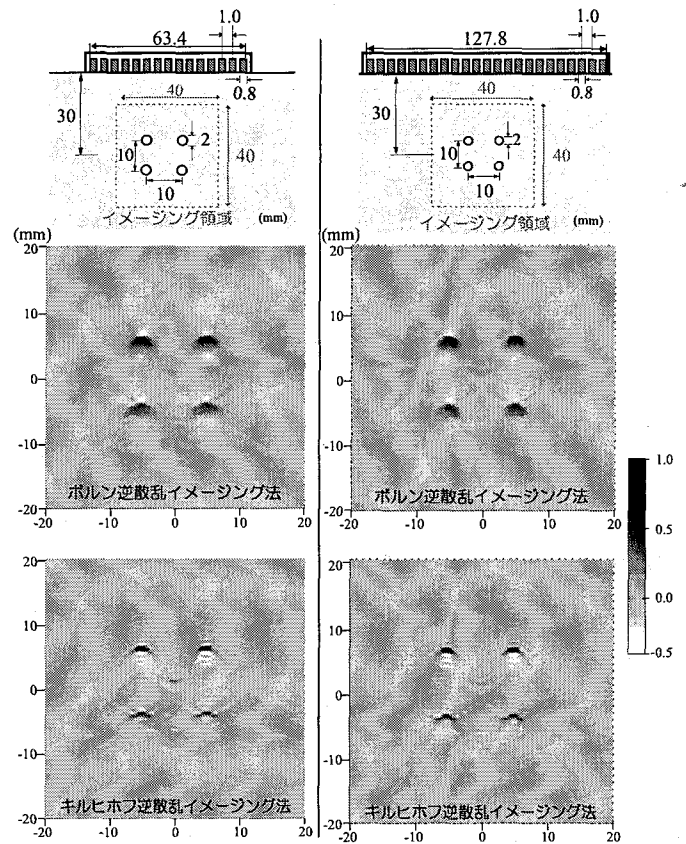


図-2 4つの円形空洞欠陥の再構成図

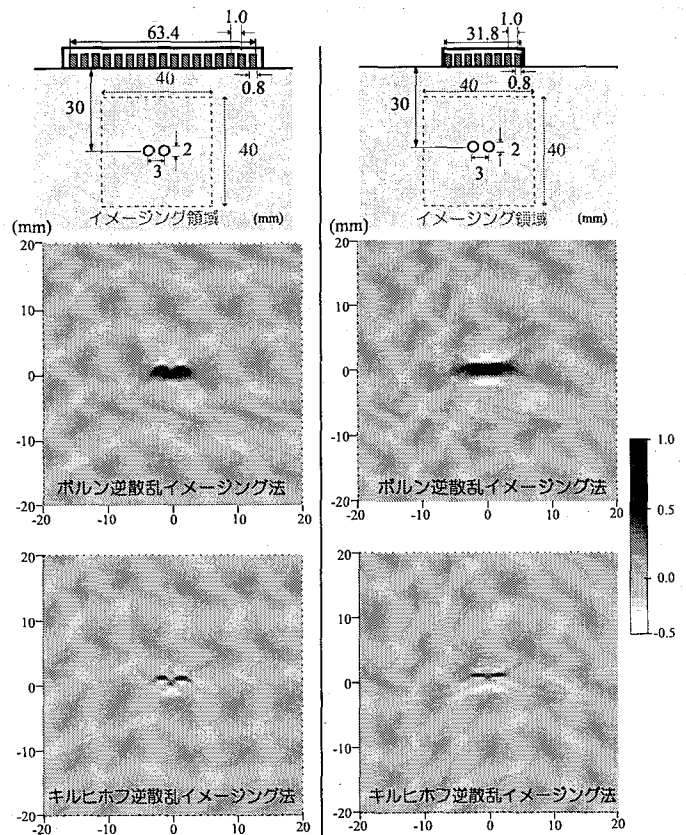


図-3 中心間距離  $3\text{mm}$  の円形空洞欠陥の再構成図