

フェーズドアレイ探触子によるパルス波の音場解析

愛媛大学大学院 正会員 中畑和之
 (株)日立製作所 非会員 河野尚幸
 東京工業大学大学院 正会員 廣瀬壮一

1. 緒言

超音波フェーズドアレイ探触子（以下、アレイ探触子）は、ディレイ（振動遅延時間）を設定して各振動素子を駆動することで電子的に超音波の送信方向や焦点を制御できる。この制御は、それぞれビームステアリング、ビームフォーカシングと呼ばれており、これらを活用して探傷を行うためには、アレイ探触子による超音波の伝搬特性を把握することが必要である。

これまでにアレイ探触子から発振される超音波の音場をシミュレーションする研究は多数行われているが、その多くが定常場の音場について解析したものの^{1,2)}であり、アレイ探触子による超音波の伝搬挙動を示した研究は少ない。そこで、本研究は非定常場を対象に解析モデルを構築し、パルス波を送信した場合の固体内音場についてシミュレーションすることを試みる。アレイ探傷法では、素子の配置間隔や周波数によって、グレーティングローブ³⁾と呼ばれる意図しない方向へのビームが放射されることが実験的に知られている。ここでは、欠陥からのエコーとグレーティングローブによる底面エコーを比較し、これらの波形の違いについて述べる。

2. アレイ探触子のモデル化と散乱波の解析法

アレイ探触子は、各振動素子にディレイを設定することによりビームステアリングやフォーカシングが可能となる。ディレイの設定方法については Azar らの論文⁴⁾を参考にしており、以下にその概要を述べる。本解析では横波が伝搬する波動場を対象とし、図-1に示すように、振動素子が中心間距離（ピッチ） d で平面上に N 個配置されているものとする（ N は偶数）。アレイ探触子の中心を O とし、そこから見た焦点位置までの距離を F 、送信方向を θ とする。このとき、 n 番目の素子は、 0 番目の素子（最右端）よりも

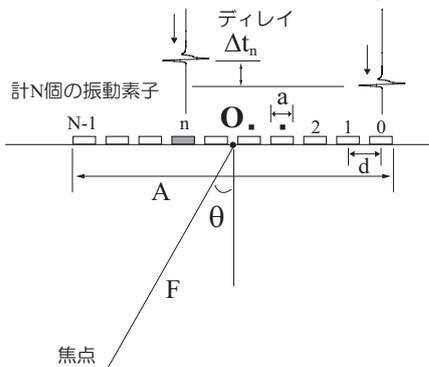


図-1 アレイ探触子の配置概要と焦点

Δt_n だけディレイを設けて駆動する。

$$\Delta t_n = \frac{nd}{c_T} \sin \theta + \frac{d^2 (nN - n^2 - n)}{2c_T F} \cos^2 \theta \quad (1)$$

ここで、 c_T は横波の伝搬速度である。

個々の素子にディレイをつけて駆動することで、アレイ素子と被検体の接触面には表面力 $\bar{t}_n(z, \omega)$ が発生する。この表面力を素子幅 a で積分し、各素子による表面力の総和をとれば、アレイ探触子による固体内の点 x の定常音場 $u^I(x, \omega)$ が計算できる。

$$u^I(x, \omega) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{i}{2\mu} \int_a \bar{t}_n(z, \omega) H_0^{(1)}(k_T |x-z|) dS_z \quad (2)$$

ここで $H_0^{(1)}$ は第1種0次のハンケル関数、 μ はせん断弾性係数、 k_T は波数、 $\omega (= k_T c_T)$ は角振動数である。

次に欠陥による散乱波を境界要素法 (BEM) を用いて計算する過程について述べる。欠陥と被検体裏面の境界をそれぞれ S と ∂D とすると、境界上の音場 $u(x, \omega)$ は式 (2) で得られた $u^I(x, \omega)$ を用いて次の積分方程式を解くことによって求められる。

$$\frac{u(x, \omega)}{2} = \int_{S+\partial D} U(x, y) t(y, \omega) dS_y - \int_{S+\partial D} T(x, y) u(y, \omega) dS_y + u^I(x, \omega) \quad (3)$$

ここで U と T は面外波動問題の基本解、 t は表面力である。式 (3) を解くことによって定常解 $u(x, \omega)$ が求まると、非定常解 $u(x, t)$ は $u(x, \omega)$ をフーリエ変換することによって得られる。

3. アレイ探触子による放射音場の特性

鋼材（横波速度 $c_T=3000\text{m/s}$ 、密度 $\rho=7690\text{kg/m}^3$ ）の表面に設置されたアレイ探触子から横波を入射したときの固体内音場について述べる。図-2に示すように、素子幅 $a=0.5\text{mm}$ 、ピッチ $d=0.75\text{mm}$ 、素子数 $N=24$ 個で構成されるアレイ探触子から、焦点距離 $F=50\text{mm}$ 、送信角 $\theta=30^\circ$ で超音波を送信する。図-2は、式 (2) を用いて計算した $|u^I|$ をプロットしたものである。図-2(a) は意図した方向にのみビーム（メインローブ）が送信されているが、(b) ではそれ以外の方向にグレーティングローブが発生しているのが観察できる。ステアリングだけを行う場合（フォーカシングはしない）にグレーティングローブが発生しない条

キーワード：超音波、フェーズドアレイ探触子、BEM、シミュレーション、グレーティングローブ

〒790-8577 松山市文京町3, TEL: 089-927-9812, FAX: 089-927-9840, E-mail: nakahata@dpc.ehime-u.ac.jp

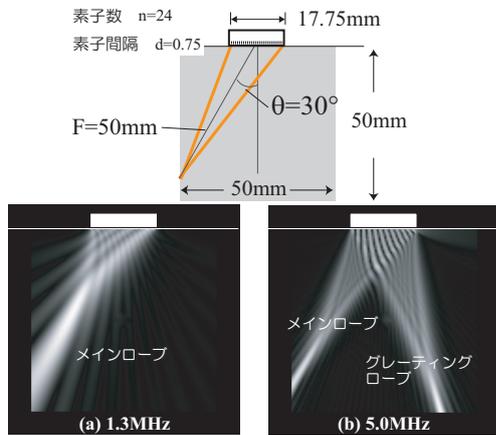


図-2 メインローブとグレーティングローブ

件²⁾として、次々が知られている。

$$d \leq d_{cr} = \frac{c_T}{f(1 + \sin \theta)} \quad (4)$$

ここで、 f は送信波の周波数である。図-2 の場合 ($\sin \theta = 30^\circ$, $d = 0.75\text{mm}$) に当てはめて考えてみると、周波数 $f = 1.3\text{MHz}$ のとき $d \leq d_{cr} \doteq 1.54\text{mm}$ であるから、式(4)によればグレーティングローブは発生しない。一方、 $f = 5.0\text{MHz}$ のとき、 $d_{cr} \doteq 0.4\text{mm}$ であるから、 $d > d_{cr}$ よりグレーティングローブが発生する条件に当てはまる。図-2 は焦点を $F = 50\text{mm}$ とした結果であるが、式(4)はフォーカシングを実行しても成立しているのがわかる。

4. 超音波伝搬シミュレーション

厚さ 50mm の鋼材の上側に設置されたアレイ探触子からパルス波を送信した場合の超音波の伝播挙動と、欠陥による散乱波形を図-3 に示す。ここで、直径 4mm の円形欠陥が深さ 25mm の位置に存在しており、アレイ探触子は図-2 と同じ仕様のものを用いている。ビームの焦点距離 $F = 50\text{mm}$ 、送信方向 $\theta = 30^\circ$ とし、送信方向の延長上に欠陥があるものとする。図-3(1) ではメインローブによる波動が欠陥に向かって伝搬しており、(2) ではグレーティングローブ成分から成る波動が鋼材底面に向かって伝播しているのがわかる。さらに、欠陥による散乱波が(3)で見られ、この波動はアレイ探触子にて欠陥エコーとして計測される。また、グレーティングローブの波動成分が底面で反射したものが底面エコーとしてアレイ探触子で計測される。アレイ探触子で観測される波動のうち、欠陥エコーと底面エコーに相当する部分を抽出し、図-4 にプロットした。なお、図-4 には素子を駆動した波形も示している。ここでは中心周波数 5MHz で素子を駆動しているが、欠陥エコーのピークは 5MHz よりも低周波側にシフトしており、逆に底面エコーは高周波成分を多く含むことがわかる。

5. 結論

本研究ではアレイ探触子を数理的にモデル化し、パルス波を送信した場合の固体内音場についてシミュレーションした。本モデルによる定常場の解析では、実際の探傷で問題となるグレーティングローブ(不要放射波)の発生が確認でき、周波数およびピッチに依存してグレーティングローブの発生する方向が変化する様子を示すことができた。ま

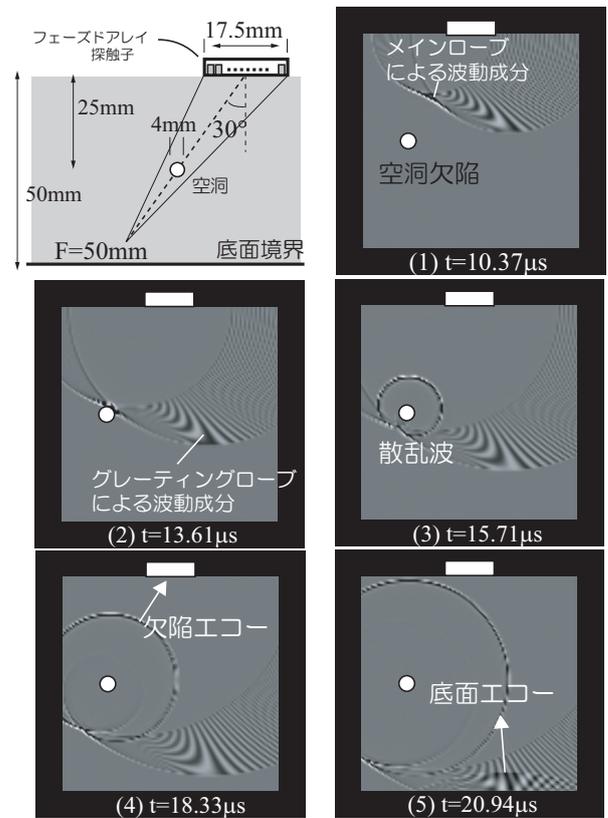


図-3 フェーズドアレイ探触子による入射波と欠陥による散乱波の伝搬挙動

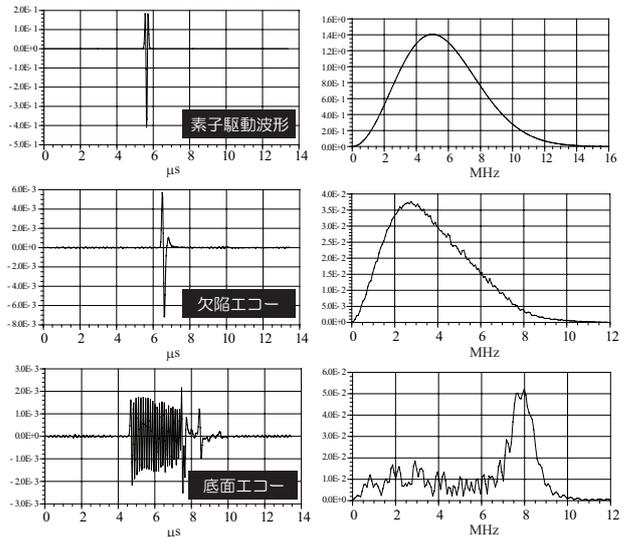


図-4 フェーズドアレイ探触子で計測される欠陥エコーと底面エコー、及びそのフーリエスペクトル

た、非定常場の解析では、メインローブとグレーティングローブの波動成分が伝搬する様子を可視化することができた。欠陥からのエコーとグレーティングローブによる底面エコーの波形を比較した結果、これらのスペクトル分布は大きく異なることがわかった。

参考文献

- 1) S.J. Song and C.H. Kim: *Ultrasonics*, Vol.40, pp.519-524, 2002.
- 2) S.C. Wooh and Y. Shi: *Wave Motion*, Vol.29, pp.245-265, 1999.
- 3) 藤原昌之, 木本和志, 廣瀬壮一: 応用力学論文集, Vol.6, pp.1089-1096, 2003.
- 4) L. Azar, Y. Shi and S.C. Wooh: *NDT&E Int.*, Vol.33, pp.189-198, 2000.