

アレイ探触子の最適化に関する研究

東京工業大学 学生会員 藤原 昌之  
 東京工業大学 正会員 木本 和志  
 東京工業大学 正会員 廣瀬 壮一

1. はじめに

超音波探傷試験を土木構造物に適用する場合、検査領域が広く探触子の走査が必要のため、時間・費用の面で非効率になりがちである。医学分野で既に実用化されているフェーズドアレイ探触子を利用すれば、試験の効率を大幅に向上できると考えられる。アレイ探触子とは独立に駆動できる複数の振動子から構成されており、それらを電子的な制御により、適当な時間差をつけて駆動することで様々な方向に強い超音波を放射できる(図 1)。この技術はビームステアリングと呼ばれ、瞬時に広い領域を探傷することができ、非常に効率的である。ビームステアリングの原理は単純で分かり易いが、その結果作られる波動場は振動子のサイズや配置に影響を受け、特に固体中では複雑な挙動を示す。そのため望ましい超音波ビームを得るにはそれらの設計変数を選ぶ際に注意が必要である。しかしながら、アレイ探触子の設計パラメータをいかに決定するかについて、合理的で明確な方法は示されていない。そこで本研究は アレイ探触子が固体中に入る射波動場の解析を行い、その結果得られる放射パターンを用いて探触子の性能を評価する指標を導入し、さらに導入した指標に照らして最適な設計パラメータを決定する方法を提案することを目的として研究を行った。

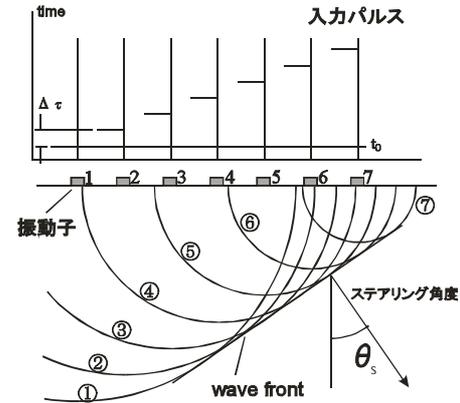


図 1 ビームステアリングの原理

2. リニアアレイ探触子からの入射波動場解析

リニアアレイ探触子の解析モデルを図 2 に示す。ここではアレイ要素を半無限体表面上の N 個の a × L の面積を持つ矩形領域 S<sub>j</sub>(j=1, …, N) に分布する一様な鉛直力 f(t) で置き換える。このモデルを用いると、周波数域での入射変位場 u(x, y) は、自由表面上 y の鉛直集中荷重が作る変位を U(x, y) として

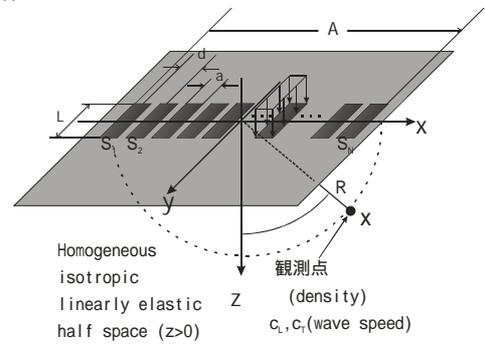


図 2 アレイ探触子の解析モデル

$$u(x, \omega) = \sum_{j=1}^N \exp(i\omega(j-1)\Delta\tau) \int_{S_j} U(x, y, \omega) dS_j(y) \quad (1)$$

と表される。ここに θ は図 1 に示したステアリング角度 θ<sub>s</sub> と要素間隔 d より θ = d sin θ<sub>s</sub> で与えられる遅延時間を表す。U(x, y) は Lamb の解として知られ、厳密解が得られているが陽な形ではないのでここでは計算効率を考え、漸近近似解

$$U^{far}(x, y, \omega) = \frac{f(\omega)}{2\pi\mu} \sum_{\beta=L,T} K_{\beta}(\theta) \frac{\exp(ik_{\beta}R)}{R} \mathbf{d}^{\beta}(\theta) \quad (2)$$

で代用する。ここに L, T により縦波、横波を表し、f(ω) は f(t) のフーリエ変換、μ はせん断剛性、d は変位方向ベクトル、k は波数を表す。R = |x - y| であり、K(θ) は指向性を示す関数である。

図 3 に式(1)を用いて行った計算結果の一例を示す。この図は y = 0 面における P 波による変位場を示したもので、(a, L, d) = (0.5, 5, 0.75) L、N = 20、ステアリング角度を 40 度としている (L は波長)。探触子直下から 40 度の方向に強い超音波が入射されている様子がわかる。

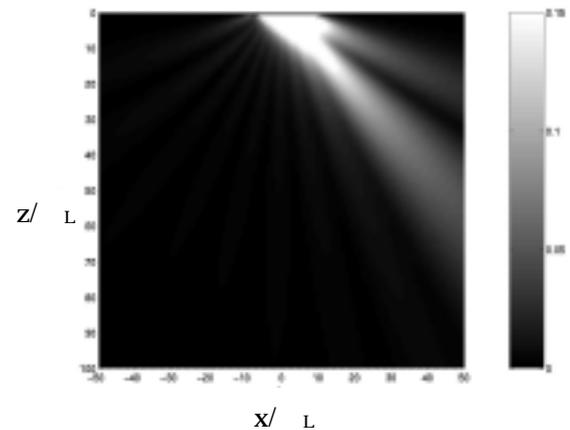


図 3 v=0 平面内での変位場

3. アレイ探触子の性能評価指標

アレイ探触子の性能を評価するためにここでは、放射パターンから計算することのできる指標を導入する。放射パターンとは、超音波ビームの放射の様子を示したもので、ここではステアリング角度 θ<sub>s</sub> に対して角度 θ 方向の単位面積を通過するエネルギーの時間平均 E(θ, θ<sub>s</sub>) を指す。理想的な放射パターンとはステアリング角度 θ<sub>s</sub> 方向にエネルギーが集中しており、図 4 のように大きなサイドローブやグレーティングローブのないものである。

キーワード フェーズドアレイ探触子 ビームステアリング 放射パターン 設計パラメータ 最適化  
 連絡先 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 東京工業大学大学院情報理工学研究所 TEL 03-5734-2692

本研究では、 $E(\theta, \theta_s)$ の最大値を与える位置  $\theta_{max}$  まわりの  $E(\theta, \theta_s)$ の二次モーメントから次の量

$$S(\theta_s) = \sqrt{\frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} (\theta - \theta_{max})^2 E(\theta, \theta_s) d\theta}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} E(\theta, \theta_s) d\theta}} \quad (3)$$

を  $\theta_s$ を変えてビームステアリングを行ったときごとに計算し、その最大値  $S_{max}$  を探触子の性能評価指標として用いる。 $\theta_s$ と  $\theta_{max}$ は必ずしも一致しないが、遅延時間  $\Delta\tau$  の与え方を調整することで簡単に一致させられると考えられる。 $S_{max}$ には大きなサイドローブやグレーティングローブの出現を値の変化から検知でき、その計算も  $E(\theta, \theta_s)$ の局所的な変動に左右されず機械的に行うことができる利点がある。

#### 4. 最適設計パラメータの決定方法

ここでは  $a, d, N, L$  を設計パラメータとし、これらのパラメータを  $S_{max}$ が十分小さく、 $N$ が大きくなり過ぎないように決定する一つの方法を提案する。最終的に得られる規準は式(7)に要約されるが、以下ではそれに至る考え方を4段階に分けて述べる。

**アレイ要素の奥行き  $L$ :**  $L$ は  $y = 0$  面内での放射パターンに影響を与えないため、波長の数倍程度で入射波のエネルギーが小さくなりすぎないように選ばばよい。

**開口幅  $A$ :** 開口幅  $A$  は次式で定義される。

$$A = (N - 1)d + a \quad (4)$$

探触子の振動面近傍では各アレイ要素からの波動が複雑に干渉し滑らかな波面が得られない。その結果、観測点が遠方にある場合と比べてビーム幅をうまく絞ることができない。そのような限界の距離は near field distance として知られており

$$R_N = A^2 / \lambda \quad (5)$$

で与えられる。すなわち  $R < R_N$ はその探触子では探傷できない領域である。 $R_N$ の上限  $R_N^{max}$ は、被検査材の寸法や予想される欠陥位置により与えられることから、開口幅  $A$  の上限も決まる。入射波のエネルギーは開口幅に比例し、可能な限り大きいことが望ましい。そこで、最大の開口幅として  $A = 2\sqrt{\lambda R_N^{max}}$

を採用する。

**$a/d$ と  $N$ が満たすべき関係:** 上述のように  $A$  が決まれば、残るパラメータは  $a, d, N$ のうち任意の二つとなる。そこで独立なパラメータを  $q = a/d, N$ に選び、 $S_{max}$ を様々な  $(q, N)$ の組に対して計算し、 $q-N$ 平面にプロットすると図5のようになる。この結果は  $N$ を増加させると  $N=11$  付近で  $S_{max}$ の値が急激に減少し、その後ほとんど変化しなくなることを示している。 $N=11$  近辺での放射パターンを具体的に調べてみると、これを境にグレーティングローブの発生が抑えられることがわかる。一方、音響波に対して導かれているグレーティングローブを発生させないための条件  $d/\lambda \leq 1/2$  を式(4)に用いると具体的には次の関係が得られる。

$$q + N \geq 1 + 4\sqrt{R_N^{max} / \lambda} \quad (6)$$

この式の等号が成り立つ位置は図5で大きな値を持つ  $N=11$  付近の大きな変化を示す部分とよく対応しており、 $q$ と  $N$ が満たすべき条件として式(6)を用いることができることを示している。

**アレイ要素数  $N$ :** 図5より式(6)が成立する限り、 $q$ は放射パターンにほとんど影響しない。入射波のエネルギーを大きくするという観点から  $q=1$ とできることが望ましいが、そのとき  $N$ の下限  $N_l$ が  $N_l = 4\sqrt{R_N^{max} / \lambda}$ となる。これを単位長さあたりのアレイ要素数  $\bar{N}$  に対する条件として書くと  $\bar{N} = N/A$   $N_l/A = 2/\lambda$  の関係が得られる。

#### 5. まとめ

アレイ探触子からの入射波動場の解析を行い、その結果得られる放射パターンを用いて探触子の性能評価を行う手法を考案した。また考案した指標に基づき探触子の設計パラメータを決定する方法の提案を行った。今後の課題として時間域波形を用いて同様な設計変数決定を行うこと、平面アレイ探触子やアレイ要素間隔が一定でない場合の設計パラメータ並びに制御法最適化が挙げられる。

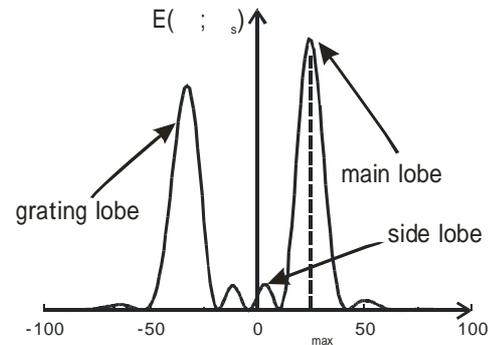


図4 放射パターンの一例

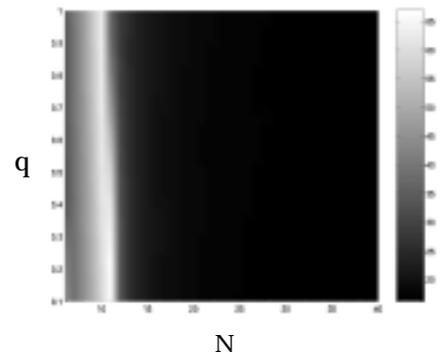


図5  $S_{max}$ の  $q-N$ 平面における分布