超音波探傷試験による欠陥形状再構成へのリニアサンプリング法の適用

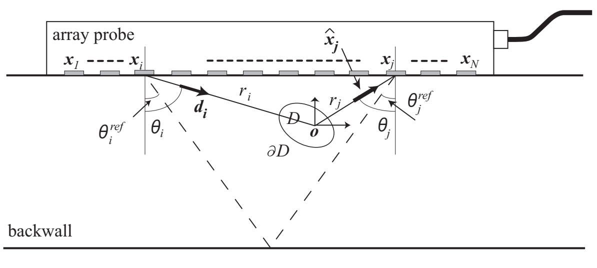
○東京工業大学大学院　正　員　木本 和志
東京工業大学大学院　学生員　藤原 昌之
東京工業大学大学院　正　員　廣瀬 壮一

1.　はじめに

超音波探傷試験によって得られたデータから材料内部の欠陥形状を再構成する際、開口合成法や回折波トモグラフィーなどの方法がしばしば用いられる。これらの手法は、広帯域計測が可能な場合に有効な手法である。一方、Colton らによって開発されたリニアサンプリング法 (以下 LSM) は、周波数域で定式化され、単一の周波数成分を利用して逆散乱解析を行う。従って、LSM は狭帯域波形しか得られない場合にも利用できる等の利点が考えられるが、これまで計測した超音波波形からの欠陥形状再構成に利用された例はほとんどない。本研究では，LSM の計測データに対する適用性について検討すべく、人工欠陥のアレイ探傷結果を入力として、LSM により欠陥形状の再構成を行った。また、境界要素法によって作成したシミュレーション波形を使った逆解析も同様な条件で行った。以下では、それらの結果について報告する。

2.　問題設定

図 1 に示すように、内部に空洞を含む板材の探傷試験を考える。空洞の境界を ∂D その内部を D によって表す。超音波の送受信にはリニアアレイ探触子を用い、各アレイ素子の位置は $\boldsymbol{x}_i, (i = 1, \cdots N)$ によって表す。i 番目の素子で送信し、j 番目の素子で受信された時間波形を $v_{ij}(t)$ そのフーリエ変換を $V_{ij}(\omega)$ と書くことにする。ここで考える問題は、アレイ探傷データ $\{V_{ij}(\omega), i, j = 1, \cdots, N\}$ が計測によってえられたときに、欠陥の形状 ∂D あるいは D の占める範囲を推定するものである。ここでは問題を 2 次元空間で考え、板内部を伝播する超音波はヘルムホルツ方程式に従う面外波であるとする。また、∂D および板表面上ではノイマン条件が満たされるものとし、板表面と散乱体の間の多重散乱効果は無視できるものとしておく。



図–1　内部欠陥のアレイ探傷.

3.　リニアサンプリング法[1)]

散乱体に平面波 $u^{in}(\boldsymbol{x}) = \exp(ik\boldsymbol{d} \cdot \boldsymbol{x})$ が入射したときに発生する散乱波を $S(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{d})$, その散乱振幅を $S_\infty(\hat{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{d})$ と書く。ただし, k は横波波数を表し、$\hat{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{x}/|\boldsymbol{x}|$ は単位ベクトルを表す。単位円 Ω 上の関数 $g(\boldsymbol{d}) \in L^2(\Omega)$ に作用する散乱振幅作用素を

$$(Fg)(\hat{\boldsymbol{x}}) := \int_\Omega S_\infty(\hat{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{d}) g(\boldsymbol{d}) ds(\boldsymbol{d}) \tag{1}$$

と定義したとき, LSM は次の散乱振幅方程式に基づく.

$$(Fg)(\hat{\boldsymbol{x}}) = G_\infty(\hat{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{z}) \tag{2}$$

ここで $G_\infty(\hat{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{z})$ は $\boldsymbol{z}$ を源点とする基本解 $G(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{z})$ の散乱振幅である．式 (2) を $g(\boldsymbol{d})$ の方程式と見ると、$g(\boldsymbol{d})$ は $\boldsymbol{z}$ の関数であるため改めて $g(\boldsymbol{d}, \boldsymbol{z})$ と書く．$g(\boldsymbol{d}, \boldsymbol{z})$ は

$$\lim_{z \to \partial D} \|g(\cdot, \boldsymbol{z})\| = \infty, \quad (\boldsymbol{z} \in D) \tag{3}$$

となることが数学的に示されている．そこで、$\|g(\cdot, \boldsymbol{z})\|$ を $\boldsymbol{z}$ の関数として表示すれば、散乱体境界付近で値が急激に変化し、散乱体形状の推定を行うことができる.

式 (2) を解く際には、Tikhonov の方法により正則化して特異値分解を利用する。正則化パラメータ $\gamma(> 0)$ に対する正則化解 g_γ は, 作用素 F の特異値分解 $F = USV^*$ を用いれば

$$\|g(\cdot, \boldsymbol{z})\|^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{s_i}{s_i^2 + \gamma} \right)^2 |U_i^* G_\infty(\cdot, \boldsymbol{z})|^2 \tag{4}$$

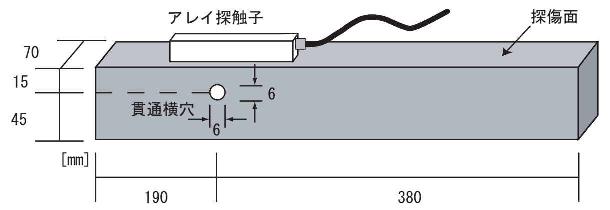
で与えられる．ただし, s_i は F の特異値を, U_i は列直交行列 U の第 i 列ベクトルを, $G_\infty(\cdot, \boldsymbol{z})$ は $\{G_\infty(\boldsymbol{d}_j, \boldsymbol{z}), j = 1, ...n\}$ を成分とする列ベクトルである．また, 以上で $(\cdot)^*$ は行列 $(\cdot)$ の共役転置行列を表す．正則化パラメータは実験データに含まれる誤差レベルを見積もれば、Morozov の原理と少々の簡単な計算から決定することができる。

4.　欠陥形状の再構成

(1)　実験概要

矩形断面をもつ鋼棒の深さ 15mm の位置に貫通横穴を加工してこれを欠陥と見立て, その断面形状の再構成を行う。超音波探傷試験は, 東芝製アレイ探傷システムに, 中心周波数 2MHz の接触型 SH 波リニアアレイ探触子を用いて行う。アレイ探触子の素子数は 32、素子幅, 素子間隔はそれぞれ 0.7mm, 2mm であり．探傷は板上面の一箇所で

Key Words: リニアサンプリング法、形状再構成、超音波探傷試験
〒 152-8552　東京都目黒区大岡山 2-12-1　TEL 03-5734-3587　FAX 03-5734-3587　E-mail kimoto@cv.titech.ac.jp



図–2 試験体の形状と寸法.

行い計 32×32=1024 個の A スコープ波形を取得する。取得した波形のフーリエ変換を $\{V_{ij}(\omega)\}$ として形状再構成に用いる. LSM の直接の入力である散乱振幅 $S_\infty(\hat{\boldsymbol{x}},\boldsymbol{d})$ は、探傷システムがいくつかの線形時不変システムによって構成されていると考えれば, 次の近似式により計測波形 V_{ij} と参照波として用いる底面エコー V_{ij}^{ref} から計算することができる.[2)]

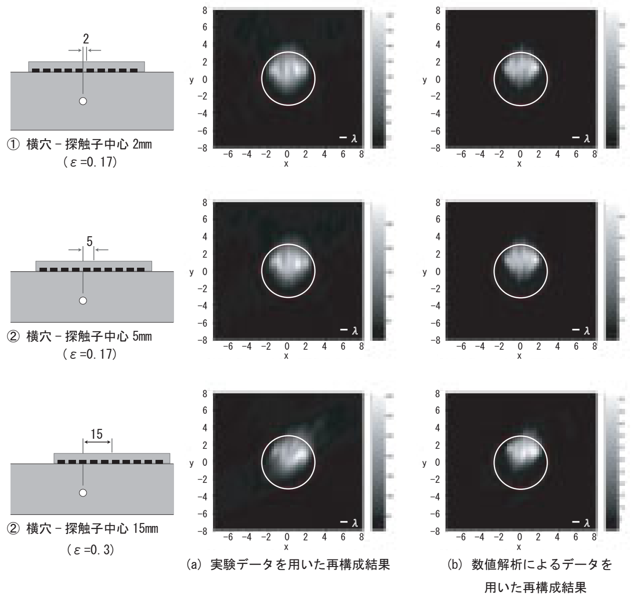
$$S_\infty(\hat{\boldsymbol{x}}_j,\boldsymbol{d}_i)\simeq\frac{e^{\frac{i\pi}{4}}}{\sqrt{8\pi k}\mu}\frac{D(\theta_i^{ref})D(\theta_j^{ref})}{D(\theta_i)D(\theta_j)}\times\frac{G(\boldsymbol{x}_j^*,\boldsymbol{x}_j)}{G^{far}(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{o})G^{far}(\boldsymbol{x}_j,\boldsymbol{o})}\frac{V_{ij}}{V_{ij}^{ref}} \tag{5}$$

ここに、$D(\theta_i)$, $D(\theta_j)$ はアレイ素子の送受信指向性を, $\boldsymbol{x}_i^*$ は $\boldsymbol{x}_i$ の板表面に関する鏡像点を, $G^{far}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ は, ヘルムホルツ方程式の基本解 $G(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ の遠方近似表現を表す. θ_i,θ_j 等は図 1 を参照するものとし、$\boldsymbol{o}$ は散乱体近傍にとった座標原点であることに注意する。参照波として用いる底面エコーは、試験体の空洞のない箇所で測定を行う。

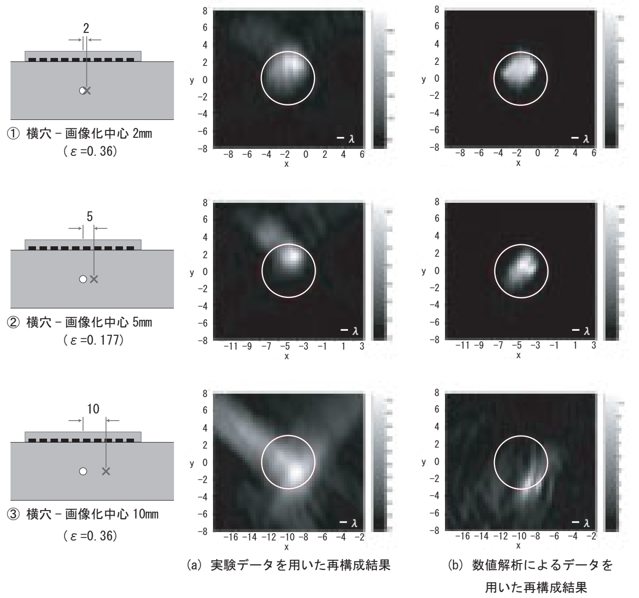
(2) 形状再構成結果

実験データを用いた形状再構成の結果を, 対応するシミュレーションデータを用いた場合の結果と共に示す. シミュレーションデータは境界要素法によって求めた散乱変位に, 乱数発生ルーチンで作成したノイズ成分を加えて作成した. 図 3 に示す結果は、探触子の設置位置を空洞の直上から少しずつずらした場合の結果である。超音波が入射される側である空洞の上半分が再構成されており、実験データとシミュレーションデータを用いた両者の結果もよく一致している。

一方、図 4 は探触子位置は空洞の直上とし、形状再構成を行う際の座標原点 $\boldsymbol{o}$(図 1) を空洞中心から少しずつずらした場合の結果である. 原点 $\boldsymbol{o}$ が空洞中心から離れるに従いうまく像が結ばれなくなることがわかる。これは、式 (5) による計測波形から散乱振幅への変換において、原点位置がずれることにより精度が得られなくなるためである。従って、欠陥位置が不明な場合、原点の位置 $\boldsymbol{o}$ は慎重に決定する必要ある。許容しうる原点位置のずれ量を見積り、画像化領域をそれと同程度の大きさのサブ領域に分割してサブ領域ごとに画像化を行うという方法は、この問題に対する一つの対策であると考えられる。



図–3 形状再構成結果 (探触子位置を変化させた場合)



図–4 形状再構成結果（画像化中心位置 $\boldsymbol{o}$ を変化させた場合)

5. まとめ

超音波探傷試験によって得られた波形データ用いて, LSM により人工欠陥の形状再構成を行った。再構成結果は、対応するシミュレーションデータを用いた結果ともよく一致し、適当な条件下では LSM が実験データに対しても機能するということがわかった。ただし、LSM の入力である散乱振幅の評価は正確に行う必要があるため、近距離場での計測結果を利用するには, いかにその精度を確保するかが問題となる。この点は今後の課題であると考える。

参考文献

1) D. Colton, J. Coyle and P. Monk: Recent Developments in Inverse Acoustic Scattering Theory, *SIAM Rivew*, Vol.**42** No.**3** (2000), pp 369-414.
2) K. Kimoto and S. Hirose: A Flaw Shape Reconstruction from SH-wave Array Ultrasonic Data Using Time Domain Linearized Inverse Scattering Method, *Review of Progress in QNDE*, **24A**(2005) to appear.