

SH波のアレイ探傷データを用いた欠陥画像の再構成に関する研究

東京工業大学大学院 学生員 松江 剛士
 東京工業大学大学院 正 員 木本 和志
 東京工業大学大学院 正 員 廣瀬 壮一

1. はじめに

多点計測によって得られる A スコープ波形を用いる代表的な欠陥像の画像化手法に開口合成法がある。原理は単純であり計算も比較的高速に行うことができる。さらに計測点を欠陥を囲む全集方向にとることができ入射波の波長が欠陥寸法に比べて短い場合には、欠陥形状をうまく再構成できることが知られている。一方この方法を板材における探傷結果に適用すると、計測点を板表面にしか取ることができないために開口が制限され欠陥形状の再構成能力は著しく低下する。開口角が制限されることはやむを得ないが送受信点の配置を最適化し、多重反射波を利用することによって開口合成像は改良されうると考えられる。本研究ではよりよい開口合成像を得るための送受信点位置や、多重反射波の利用法について明らかにすることを目的とする。以下では、初めに既知の欠陥形状について、数値シミュレーションにより求め、次に開口合成法を用いて欠陥画像を再構成し送受信点位置の影響を評価し、その結果を考察する。

2. 数値解析

(1) 解析モデル

解析モデルは図 1 に示すように空洞を有する無限弾性板を考える。空洞には円及びスリットを考え、それぞれの形状寸法に関しては図の下方に、モデルの寸法及び材料定数も同図に示している。入射波は、面外方向集中荷重として x_i から入射され、 x_j において観測される散乱波を u_{ij} とする。 x_i 及び x_j はどちらも板表面上に等間隔に並べられた 16 点、 $x_1 \sim x_{16}$ のうちの一つである。 u_{ij} は全ての x_i, x_j の組み合わせに対して求める。

(2) 定式化及び数値解析手法

点波源 x_i からの二次元面外波動場の支配方程式は以下のような非斉次なヘルムホルツ方程式で与えられる。

$$\nabla^2 u(\mathbf{x}, \omega) + k_T^2 u(\mathbf{x}, \omega) = -\mu^{-1} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) F(\omega). \quad (1)$$

ここで、 ω を角振動数、 k_T 、 μ をそれぞれ横波の波数とせん断剛性とし、 $F(\omega)$ を表面力の周波数スペクトルとする。また、板表面及び空洞境界において以下のような境界条件

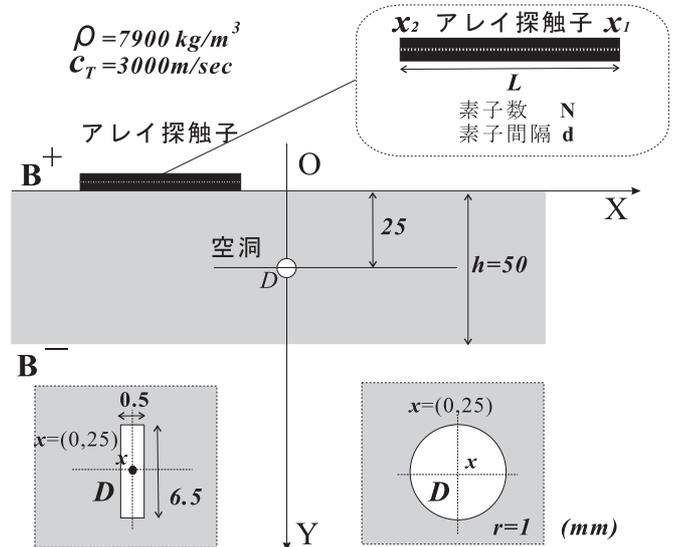


図-1 解析モデル

を満たすものとする。

$$t^n(x) = \mu \frac{\partial u}{\partial n} = 0, \quad (x \in B^+ \cup B^- \cup \partial D) \quad (2)$$

式 (1), (2) で表される境界値問題を境界要素法 (BEM) を用いて解き、式 (3) で表されるフーリエ変換によって、時間領域の波形 $u_{ij}(t)$ を得る。

$$u_{ij}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) u(x_i, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (3)$$

3. 開口合成法

(1) 開口合成法のアルゴリズム

開口合成法では、時刻 t に観測されるエコー $|u_{ij}(t)|$ を、対応する空間位置 x にプロットすることで散乱体形状を再構成する。ここに、 t と x には次のような関係がある。

$$c_T t = |x - x_i| + |x - x_j| \quad (4)$$

多くの波形を利用し、同様にエコー高さをプロットしていくと徐々に散乱体が強調され、最終的には欠陥表面の形状が画像化される。さらに、板上下面での多重伝播経路を考慮し、式 (5) のような空間位置にも観測されるエコーをプロットすれば、再構成能は向上すると考えられる。

$$c_T t = r_i^{(l)} + r_j^{(m)} \quad (5)$$

Key Words: SH波、アレイ探傷子、開口合成、欠陥形状再構成

〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 TEL 03-5734-3587 FAX 03-5734-3587 URL <http://www.cv.titech.ac.jp/>

ここに、 $r_i^{(m)}$ は m 回の板表面での反射を伴う x から x_i を結ぶまでの伝播経路の長さである。これらをまとめると、開口合成像 $S(x)$ は式 (6) のようになる。

$$S(x) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \sum_{l,m=0}^M \sqrt{r_i^{(l)} r_j^{(m)}} \left| u_{ij} \left(\frac{r_i^{(l)} + r_j^{(m)}}{cT} \right) \right| \quad (6)$$

但し、 N を送受信点の数、 M を式 (6) で考慮する最大反射回数とする。今回の研究では、数値解析によって得られた波形を利用し、式 (6) の N, M の条件及び送受信点の位置を変えて空洞形状を再構成する。

4. 開口合成像の結果

(1) 多重反射経路の影響

図 2 は円及びスリットにおける開口合成像をグレースケールで左右にそれぞれ示したものである。結果を比較するために、実際に空洞表面がある位置に白線を描いている。ここでは式 (6) の M を変化させている。結果をみると、明らかに $M=0$ のときと比較して $M=1,2$ としたときの方が板表面の反射の影響を考えているので、より多くの境界表面を再構成している。また、スリットにおいてはどの場合においても端部がはっきりと画像化されている。これは端部エコーが広い方向に伝播するためであると考えられる。

(2) 探触子位置の影響

図 3 は三カ所の異なる場所にアレイ探触子を置いた場合の解析結果を示したものである。三カ所の位置を $\bar{x}=25,65,85\text{mm}$ とする。 \bar{x} とは、空洞中心からアレイ探触子中心までの距離を示したものである。このとき、円とスリットでは開口合成像の再構成のされ方が大きく異なっている。探触子位置が遠く離れていくにつれて、円の場合では境界表面の左側が明確に再構成されてくるが、スリットの場合はぼやけてきている。一方、スリットでは最も明確に再構成されるのは探触子位置が画像化領域のごく近傍にあるときである。理由として、スリットの場合境界面が特定の方向を向いており、その面からの散乱波を観測できるのが、画像化領域のごく近傍にあるときのみであり、円の場合では散乱波がどの場所でも同様に観測できるからであると考えられる。

5. まとめ

本研究では、数値解析によって得られた SH 波のアレイデータを開口合成法によって円及びスリットの空洞像を再構成した。多重反射波を考慮することによって、開口合成像は大幅に改善されることが分かった。また、送受信点位置の影響も調べたところ、円とスリットで開口合成像を再構成するための最適な送受信点位置が異なることも分かった。

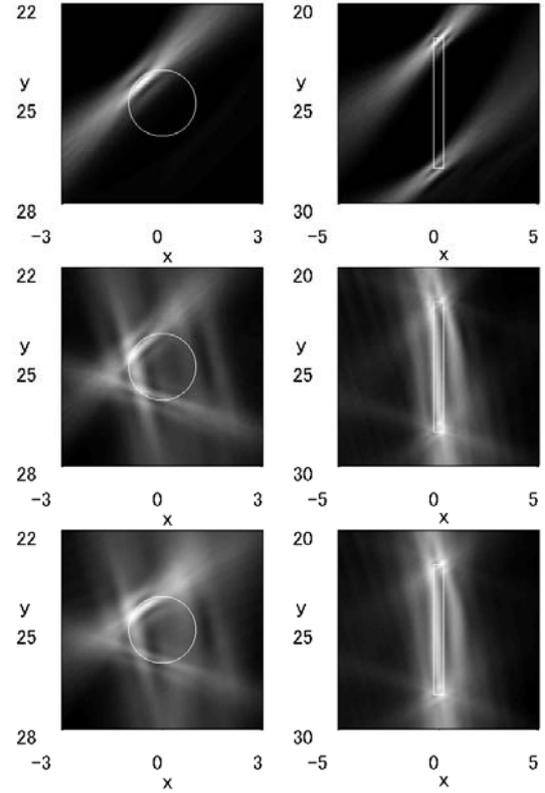


図-2 多重反射を考慮したときの開口合成像
M=0(上段), M=1(中段), M=2(下段)

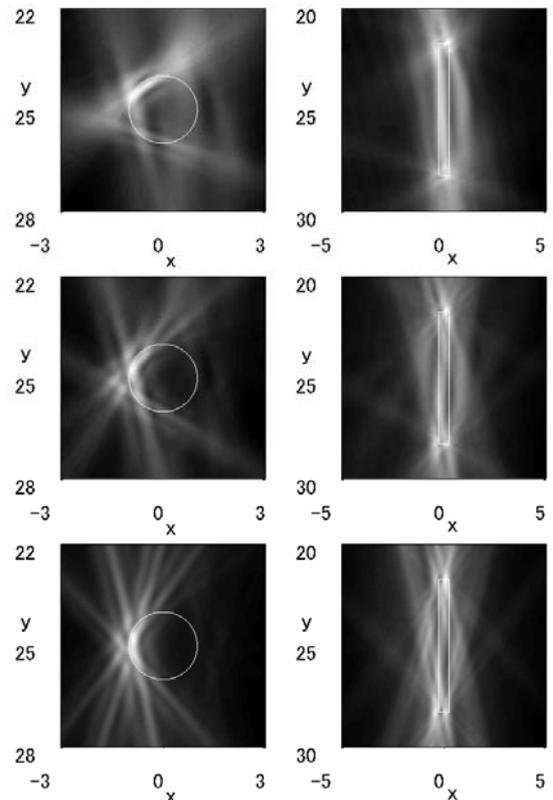


図-3 探触子位置を変化させたときの開口合成像
 $\bar{x}=25\text{mm}$ (上段), $\bar{x}=65\text{mm}$ (中段), $\bar{x}=85\text{mm}$ (下段)