

I - 4

パルスエコー法による3次元欠陥の識別

○東北大学工学部 学生員 早川洋行
 東北大学大学院 学生員 村上賢治
 東北大学大学院 正 員 北原道弘

1. はじめに

超音波を利用して、部材内部に存在する欠陥の内部と境界を再構成する二つの逆散乱解析法¹⁾を組み合わせることにより、クラックのような面状欠陥をボイドのような体積型欠陥から分離・識別しようとする試みは、二次元欠陥について既に行なわれている。本報告では、三次元欠陥に対する識別の可能性について、解析と計測の両面から検討する。

2. 三次元逆散乱法

以下では、超音波の送受信を同一の点で行なうパルスエコー法を採用するものとする。

2.1 ボルン逆解析

ボルン近似を導入して線形化した、遠方の計測点 $\mathbf{y}$ における縦波散乱振幅は次式のようになる。

$$A_m(k_L, \hat{\mathbf{y}}) = 2u^0 \hat{\mathbf{y}}_m k_L^2 \int_D \Gamma(\mathbf{x}) e^{-2ik_L \hat{\mathbf{y}} \cdot \mathbf{x}} dV \quad (1)$$

ここで、 $\Gamma(\mathbf{x})$ は欠陥の領域内でのみ値を有する特性関数である。また、 k_L は縦波の波数、 $\hat{\mathbf{y}}$ は計測点の方向を向く単位ベクトルである。式(1)の右辺の積分は $\mathbf{K} = 2k_L \hat{\mathbf{y}}$ とすれば、特性関数 Γ の $\mathbf{K}$ 空間におけるフーリエ変換になっている。これを逆フーリエ変換することにより、 $\Gamma(\mathbf{x})$ は次式のように表せる。

$$\Gamma(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \oint \int_0^\infty \frac{\hat{\mathbf{y}}_m A_m(k_L, \hat{\mathbf{y}})}{2u^0 k_L^2} e^{2ik_L \hat{\mathbf{y}} \cdot \mathbf{x}} \times 8k_L^2 dk_L d\Omega(\hat{\mathbf{y}}) \quad (2)$$

ここに、 $d\Omega(\hat{\mathbf{y}})$ は微小立体角である。

2.2 キルヒホフ逆解析

キルヒホフ近似を導入して線形化した、遠方の計測点 $\mathbf{y}$ における縦波散乱振幅は次式のようになる。

$$A_m(k_L, \hat{\mathbf{y}}) = 2iu^0 \hat{\mathbf{y}}_m k_L \int_D \gamma(\mathbf{x}) e^{-2ik_L \hat{\mathbf{y}} \cdot \mathbf{x}} dV \quad (3)$$

ここで、 $\gamma(\mathbf{x})$ は入射波が直接到達する境界部分のみで値を有する特異関数である。式(3)の逆フーリエ変換より、 $\gamma(\mathbf{x})$ は次式のように表せる。

$$\gamma(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \oint \int_0^\infty \frac{\hat{\mathbf{y}}_m A_m(k_L, \hat{\mathbf{y}})}{2iu^0 k_L} e^{2ik_L \hat{\mathbf{y}} \cdot \mathbf{x}} \times 8k_L^2 dk_L d\Omega(\hat{\mathbf{y}}) \quad (4)$$

式(2)と(4)から $\hat{\mathbf{y}}_m A_m(k_L, \hat{\mathbf{y}})$ が与えられれば $\Gamma(\mathbf{x})$ と $\gamma(\mathbf{x})$ が求まり、 $\Gamma(\mathbf{x})$ と $\gamma(\mathbf{x})$ を空間上にプロットすることにより欠陥形状を再構成することができる。

3. 数値解析による形状再構成

ここでは数値解析から得られる散乱振幅を用いて逆解析を試みた。図-1に示すように三次元無限弾性体内の座標原点に欠陥の中心を配置し、境界要素法を用いて遠方散乱振幅を求め、式(2)と(4)を適用し、 $\Gamma(\mathbf{x})$ と $\gamma(\mathbf{x})$ を空間上にプロットした。散乱振幅の計算は $\theta = 0 \sim 180^\circ$ 、 $\phi = 0 \sim 360^\circ$ を 10° おきで、無次元化縦波波数 ak_L を $0.01 \sim 7.0$ の範囲で求めた。

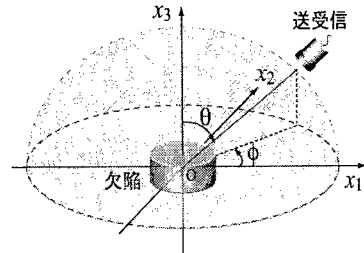


図-1 数値解析モデル

3.1 円柱型欠陥の形状再構成

ここでは半径が a で、厚さがそれぞれ a , $0.1a$, $0.05a$ の円柱形状ボイド、及び半径 a 、厚さ 0 の円形クラックに対して再構成を行い、欠陥の厚さと逆解析結果の関係を調べた。再構成結果の断面図を図-2に示す。

図-2に見られるように、欠陥モデルの厚さが小さくなるにつれてボルン逆解析による再構成像は薄くなり、厚さのないクラックになると解析上のノイズレベルとなる。一方、キルヒホフ逆解析では欠陥の厚さにかかわらず境界が再構成されていることがわかる。この結果から、ボルン逆解析とキルヒホフ逆解析を組み合わせることにより、クラックのような面状欠陥とボイドのような体積を有する欠陥を識別することが可能になると考えられる。

3.2 複合型欠陥の再構成と識別

3.1の結果を踏まえ、欠陥として図-3に示すような円形クラックと球形ボイドの複合欠陥を対象として、逆解析による形状再構成を試みた。逆解析を行なった結果を図-4に示す。

図-4にみられるように、ボルン逆解析においては球形のボイド部分が再構成され、キルヒホフ逆解析においてはクラック部分の境界とボイド部分の境界が再構成されていることが分かる。

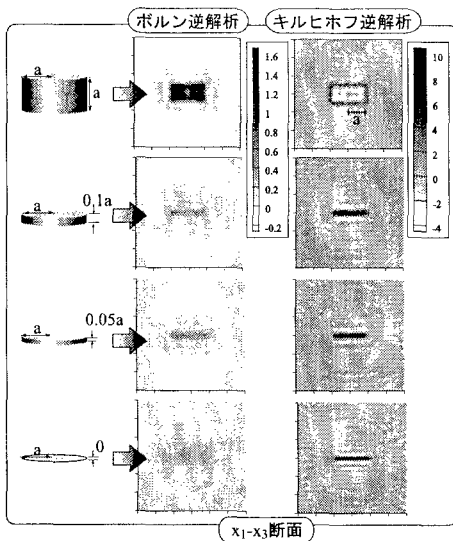


図-2 円柱の厚さと再構成結果の対応

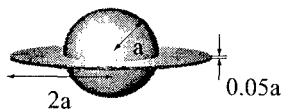


図-3 複合型欠陥モデル

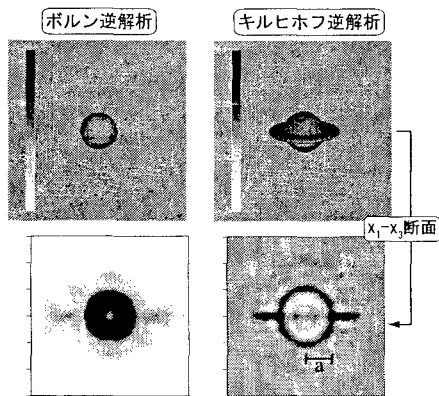


図-4 複合型欠陥の逆解析結果

4. 計測波形による形状再構成

計測波形を基にして欠陥形状の再構成を試みるため、図-5に示すような空洞欠陥を有するアルミニウム供試体を作成した。供試体中には、半径5mmの円柱空洞の先端に、半径5mmの半球空洞と半径10mmで幅約1mmの円形空洞スリットを加工してある。超音波の送受信には水浸法を採用し、計測装置を用いて $\theta = 0 \sim 90^\circ$ を 5° おきで、 $\phi = 0 \sim 360^\circ$ を 10° おきで散乱振幅を計測した。超音波の送受信には直径25.4mm、中心周波数1MHzの探触子を用いた。

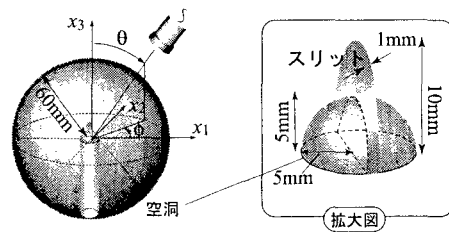


図-5 アルミニウム供試体

計測から得られた散乱振幅の時間域データを周波数域にフーリエ変換し、波形処理を行った後、上半球部($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$)について逆解析を行った結果を図-6に示す。

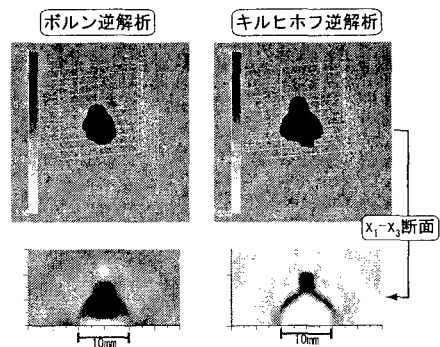


図-6 逆解析結果

図-6において、ボルン逆解析では欠陥の半球部分とスリットの一部分が再構成されている。キルヒホフ逆解析では半球面とスリット部が再構成されている。ボルン逆解析において、スリットの一部分が再構成された理由として、供試体のスリット部の厚さが約1mmあり、その領域が反応していることが考えられる。

5. 結論

数値解析を基にした三次元逆散乱逆解析結果からは、クラックとボイドの識別が可能であることが確認できた。三次元欠陥モデルの作成において有限なスリット幅の問題があり、計測波形からクラックの識別が可能であることを示すことはできなかったが、ボルン逆解析とキルヒホフ逆解析両者の反応状況を調べるにより、面状に近い欠陥か、体積型の欠陥かを判断するための情報は得られるといえる。

参考文献

- 1) 中畑和之, 北原道弘: 計測波形による欠陥形状の再生と使用周波数帯域関する考察, 応用力学論文集, Vol.3, pp.91-98, 2000.