

## 3-D MGB モデルの精度検証と欠陥からのエコー波形の数値解析

愛媛大学大学院 学生員 石川千智  
 愛媛大学大学院 正会員 中畑和之  
 東京工業大学大学院 正会員 廣瀬壮一

## 1. はじめに

超音波探傷用の探触子は、圧電素子を使用したものが多く使われており、電圧を印加すると素子が振動することによって超音波を発振する。探触子から発振される超音波の音場に関する研究は数多く行われており<sup>1)</sup>、定常音場を計算するモデルとして広く使われているのはレイリー積分法<sup>2)</sup>である。近年では、Schmerr によって探触子からの放射音場を高速に計算するマルチガウシアンビーム (MGB) モデル<sup>3)</sup>が提案されている。本研究は、MGB モデルを用いて探触子からの放射音場を 3 次元的に数値計算し、レイリー積分法による計算結果と比較する事によって MGB モデルの精度、および適用限界について検証を行う。また、MGB モデルを境界要素法等の数値解析と組み合わせることによって、欠陥からのエコーがシミュレーションできる<sup>4)</sup>。ここでは、裏面き裂の高さを評価する SPOD 法<sup>5)</sup> に本シミュレータを適用し、き裂からのエコーを数値解析する。

## 2. 3-D MGB モデルによる放射音場の表現式

Schmerr によれば、 $x_1$  軸方向と  $x_2$  軸方向の長さがそれぞれ  $2a_1$  と  $2a_2$  である矩形探触子から放射される流体中の音場  $p$  は以下のように表される<sup>3)</sup>。

$$p(x_1, x_2, x_3) = \sum_{r=1}^{10} \sum_{q=1}^{10} \rho_1 c_1^L v_0 \frac{A_r}{\sqrt{1 + (iB_r x_3 / D_{R1})}} \times \frac{A_q}{\sqrt{1 + (iB_q x_3 / D_{R2})}} \exp(ik_1^L x_3) \times \exp\left(\frac{i\omega \mathbf{x}^T M_{rq} \mathbf{x}}{2}\right) \quad (1)$$

ここで、 $c_1^L$  と  $\rho_1$  はそれぞれ流体の音速と密度、 $v_0$  は探触子面上の振動速度、 $k_1^L$  は波数、 $D_{R1} = k_1^L a_1^2 / 2$ 、 $D_{R2} = k_1^L a_2^2 / 2$  である。また、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$  であり、 $\mathbf{x}^T$  の  $T$  は転置を表す。式 (1) 中の  $M$  は伝達マトリクスと呼ばれる  $2 \times 2$  の行列であり、次式で表される。

$$M_{rq} = \begin{bmatrix} \frac{iB_r D_{R1} / c_1^L}{1 + (iB_r x_3 / D_{R1})} & 0 \\ 0 & \frac{iB_q D_{R2} / c_1^L}{1 + (iB_q x_3 / D_{R2})} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式 (1) と (2) における  $A$  と  $B$  は複素数からなる 10 個のビームパラメータである。なお、MGB モデルの場合、 $10 \times 10$  回の加算を行えば音場を計算する事ができ、計算時間はごくわずかである。

## 3. 3-D MGB モデルの精度検証

矩形探触子の表面積を  $100\text{mm}^2$  に固定し、アスペクト比 ( $a_1$  と  $a_2$  の比) を変化させた場合の 3-D MGB モデルによる水中 ( $c_1^L = 1480\text{m/s}$  と  $\rho_1 = 1000\text{kg/m}^3$ ) の放射音場を図-1 に示す。ここでは、比較のためレイリー積分法による音場も計算している。図-1 は、5MHz の超音波を送信した場合の  $x_3$  軸上の音場の絶対値  $|p|$  をプロットしたものである。図-1 の上から (a)  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 、(b)  $5\text{mm} \times 20\text{mm}$ 、

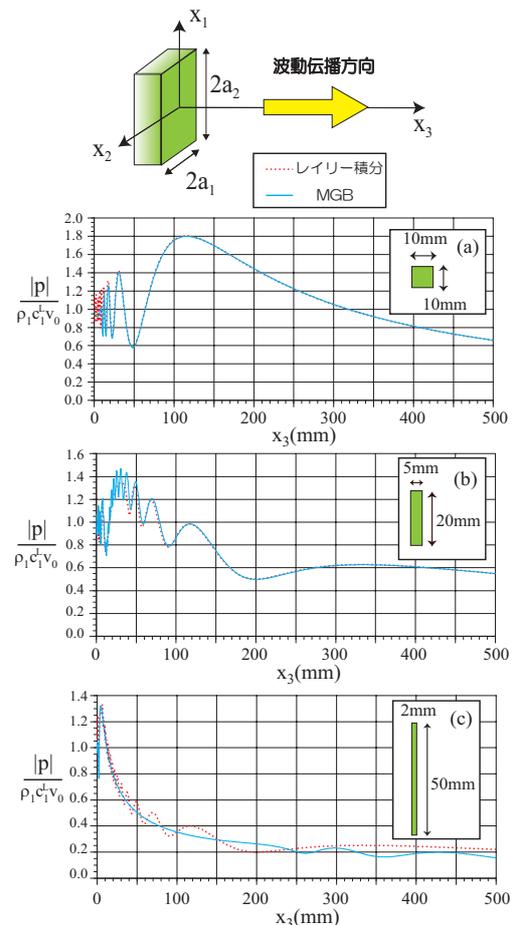


図-1 矩形探触子においてアスペクト比を変化させた場合の MGB とレイリー積分の比較

キーワード：超音波，マルチガウシアンビームモデル，矩形探触子，境界要素法，エコーシミュレーション

〒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

(c)2mm×50mm の矩形探触子である。(a) と (b) の矩形探触子に関しては、探触子の近傍を除き、MGBモデルとレイリー積分の結果はほぼ一致しているが、(c) の矩形探触子で  $|p|$  の値に違いが生じている。しかし(c) のような非常に細長い表面形状の探触子は一般的に超音波探傷では使用されることはない。以上の結果から探触子表面のアスペクト比が極端でない限り、MGBは音場を精度良く計算でき、実用的であるといえる。

#### 4. SPOD 法における欠陥エコーのシミュレーション

ここでは送信探触子を裏面き裂の斜め上方に設置し、き裂の先端回折波  $L_1$  と回折波の底面反射波  $L_2$  をき裂の真上に置いた探触子によって受信する SPOD 法<sup>5)</sup> をモデル化する。このとき、受信探触子で計測され、オシロスコープに記録される欠陥エコーの出力電圧  $V$  は次式で表される<sup>4)</sup>。

$$V(\omega) = \left( \frac{4i}{k_2^L a_1 a_2} \frac{\rho_2 c_2^L}{\rho_1 c_1^L} \right) S(\omega) M(\omega) C_{in}(\omega) C_{sc}(\omega) A(\omega) \quad (3)$$

ここで、 $c_2^L$  と  $\rho_2$  はそれぞれ固体の縦波音速と密度、 $k_2^L$  は縦波の波数を表している。式(3)中の  $S$  は計測装置の影響関数、 $M$  は超音波が伝播する媒質の波動減衰量、 $A$  は欠陥による散乱波、 $C_{in}$  と  $C_{sc}$  はそれぞれ送信および受信探触子によるビームプロファイルの関数を表している。なお、式(1)で表された放射音場  $p$  は、式(3)中の  $C_{in}$  に組み込まれている。また、本解析ではき裂の高さは奥行き方向に一定であると、 $A$  を求めるに際して、2次元面内波動場に対する境界要素法を適用している。

本研究では、高さ5mmの裏面き裂に対して、SPOD法を適用した場合の受信エコーのシミュレーションを実行する。ここでは、 $c_2^L=5900\text{m/s}$  と  $\rho_2=7690\text{kg/m}^3$  であるステンレス鋼を被検体とし、その厚さは20mmである。また、探触子の素子は  $a_1=a_2=5\text{mm}$  の正方形とし、ウエッジは  $c_1^L=2730\text{m/s}$  と  $\rho_1=1120\text{kg/m}^3$  のアクリルとしている。この探触子から中心周波数4MHzの縦波パルス(1.5波)を屈折角  $\theta_2^L=30^\circ$  と  $45^\circ$  で送信した場合の受信エコーを、それぞれ図-2の上と下に示す。SPOD法によれば、 $L_1$  と  $L_2$  のエコーが現れる時刻をそれぞれ  $t_1$  と  $t_2$  とすれば、裏面き裂の高さは、

$$d = \frac{c_2^L}{2} (t_2 - t_1) = \frac{c_2^L \Delta t}{2} \quad (4)$$

で求められる。図-2のシミュレーションより、 $\theta_2^L=30^\circ$  と  $45^\circ$  の場合のいずれも  $\Delta t=1.704\mu\text{s}$  と得られたので、これを式(4)に代入すれば  $d=5.03\text{mm}$  となる。この結果より、SPOD法は非常に精度良くき裂の高さを求めることができることがわかる。

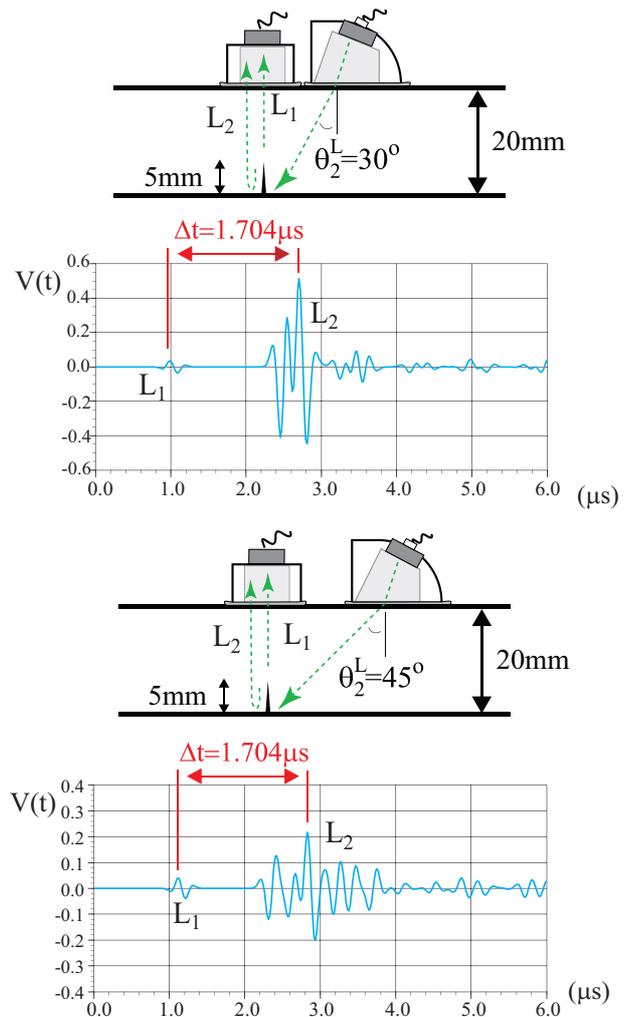


図-2 SPOD法における受信エコーのシミュレーション(上:屈折角  $\theta_2^L=30^\circ$ , 下:屈折角  $\theta_2^L=45^\circ$ )

#### 5. 結論

本研究では、超音波探触子からの放射音場を高速に計算する3-D MGBモデルの有用性について検証を行った。矩形探触子表面の形状が極端に細長くなれば、3-D MGBは音場を精度良く計算できることがわかった。また、3-D MGBモデルと境界要素法を組み合わせることによって欠陥からの散乱波形を推定するエコーシミュレータをSPOD法に適用した。シミュレーションでは、裏面き裂から2つのエコーが受信でき、このエコーの時間差を基にき裂の高さを推定した結果、SPOD法は非常に精度良くき裂の高さを求めることができることが示された。

#### 参考文献

- 1) 福原照明: 平成17年春季大会講演概要集, p.27-28, 2005.
- 2) Rayleigh, J.W.S.: *The Theory of Sound*, Dover Publications, New York, 1945.
- 3) Schmerr, L.W.: *Materials Evaluation*, Vol.58, No.7, pp.882-888, 2000.
- 4) 中畑和之, 廣瀬壯一: 非破壊検査, 54巻, 10号, pp.562-570, 2005.
- 5) 福富広幸, 林山, 緒方隆志: 第13回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, pp.115-124, 2006.