

水浸超音波探触子の振動特性同定のための逆解析手法に関する研究

東京工業大学大学院 正会員 ○木本 和志
 東京工業大学大学院 正会員 廣瀬 壮一
 AT & T 水島 勇人

はじめに

超音波探傷試験を適切にモデル化するためには探触子によって形成される入射波動場を正確に評価しておく必要がある。水浸探触子が作る入射波動場に関しては、これまで探触子面上の速度分布 v と水中の圧力場 p を関係付けるレイリーの積分式 (1) が用いられてきた。レイリーの式により圧力場を計算するには速度分布を与えておく必要があるが、探触子内部の圧電素子はその厚さ方向にのみ振動するように設計されているため、従来 v が一定という仮定が用いられてきた。しかしながら、この仮定のもとに計算される放射場は実測値と一致しない場合があることも報告されている¹。その理由として、非一様な速度分布や圧電素子内に発生する板波の影響などが考えられる。本研究では一般的に v は非一様であるとし、実測データからその分布を推定する逆解析手法を開発することを目的として行ったものである。このような逆解析手法は、探触子の挙動について知るためのみならず、個々の探触子の特性を考慮したシミュレーションを行う場合などにも有用となる。

定式化

図 1 に示すような円形の振動面 S をもつ探触子を考える。 S は $z = 0$ 面内にあり、 $z = 0$ 面のうち S 以外の部分では速度 $v = 0$ であるとする。このとき圧力場 $p(x, \omega)$ は

$$p(x, \omega) = -\frac{i\omega\rho}{2\pi} \int_S \frac{e^{ikR}}{R} v(y, \omega) dS_y \quad R = |x - y| \quad (1)$$

によって与えられる。ただし、 ω は角周波数を、 k は波数を表す。モデルの対称性から v は z 軸からの偏心距離 r のみに依存するものとし、簡単のため探触子内部の Lamb 波等の影響は考えず、速度分布は $v(y, \omega) = V(r)F(\omega)$ のように r 方向には進行しないものを仮定しておく。このようにして定義される $V(r)$ をここでは特に振動モードとよび、以下では測定データから $V(r)$ を推定する方法について述べる。

本研究では、装置が比較的安価で測定も容易な圧電型探触子を用いたピッチキャッチ法によるデータ取得を想定している。その場合、測定波形 $o(x, \omega)$ は受信探触子の特性に影響されており一般に圧力 p そのものではない。そこで、逆解析には $o(x, \omega)$ をそのまま用いるのではなく、受信探触子の特性がキャンセルされるように、ある観測点 x_0 で測定される参照波形 $o(x_0, \omega)$ でそれ以外の点で得られた波形を無次元化して用いる²。すなわち、測定値から算出される $o(x, \omega)/o(x_0, \omega)$ と、振動モード $V(r)$ から予想される $p(x, \omega)/p(x_0, \omega)$ の差からコスト関数 C を定義する。

$$C = \frac{\int \left[\frac{o(x, \omega)}{o(x_0, \omega)} - \frac{p(x, \omega)}{p(x_0, \omega)} \right]^2 dx}{\int \left[\frac{o(x, \omega)}{o(x_0, \omega)} \right]^2 dx} \quad (2)$$

式 (2) に含まれる $V(r)$ は適当な内挿関数 $\phi_n(r)$ を用いて表現し、

$$V(r) = \sum_{n=1}^N A_n \phi_n(r) \quad (A_1 = 1) \quad (3)$$

と表しておく。式 (3) を式 (1) に代入して (2) に用いれば、

$$C = \frac{\int \left[\frac{o(x, \omega)}{o(x_0, \omega)} - \frac{\sum_{n=1}^N A_n \int_S \phi_n \exp(ikR)/R dS_y}{\sum_{n=1}^N A_n \int_S \phi_n \exp(ikR_0)/R_0 dS_y} \right]^2 dx}{\int \left[\frac{o(x, \omega)}{o(x_0, \omega)} \right]^2 dx} \quad R_0 = |x_0 - y| \quad (4)$$

キーワード： 水浸探触子、振動モード、逆解析

連絡先: 〒158-8552 目黒区大岡山 2-12-1、(電話)03-5734-2692、(fax)03-5734-2692

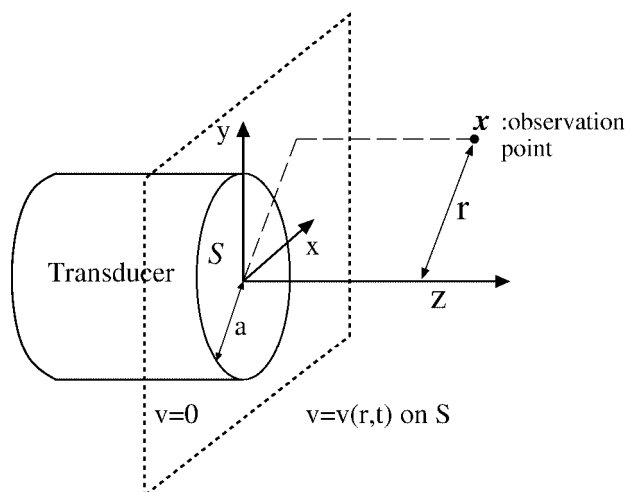


図 1: 円形振動面 S を有する水浸探触子の数値解析モデル

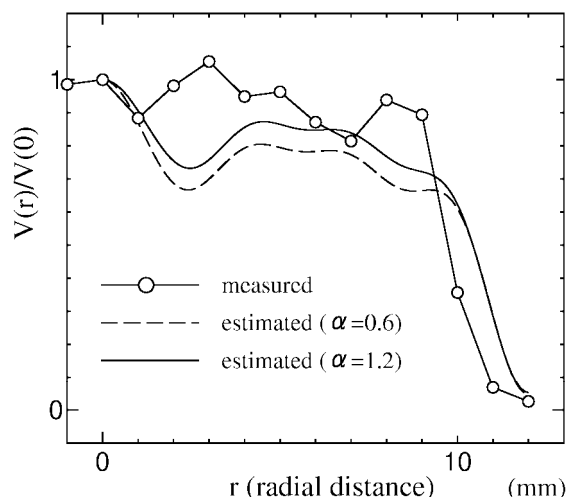


図 2: 逆解析およびレーザー振動計により測定した探触子面の振動モード $V(r)$

となり、 C を最小化するという条件のもとに A_n すなわち $V(r)$ を決定することができる。しかしながら、式 (4) を用いた逆解析では内挿関数の数 N を多くした場合や遠方場での測定データを用いたときに解が非常に不安定になることが知られている。そこで、本研究では式 (4) に $\alpha \frac{d^2 V(r)}{dr^2}$ を正則化項として加えて逆解析を行った。

逆解析結果

図 2 に実験データを用いて行った逆解析結果を示す。実験に用いた探触子の径は送信、受信それぞれ 24mm と 6mm であり、波形の計測は $z = 15\text{mm}$ の面内で $r = 0 \sim 15\text{mm}$ 間を 1mm 間隔で探触子を移動させて計 16 点から行った。逆解析には $\phi_i = \cos\{(n-1)\pi r/a\}$ を内挿関数として用い、様々な正則化パラメータ α に対して計算を行った。図にはそのうち代表的な結果を示してある。一方、白丸で示したものは、レーザー振動計を用いて空気中で行った探触子表面の速度分布から算出した振動モードである。いずれの結果も探触子中央付近で大きく、縁の部分では非常に振幅が小さくなっており全体的な分布形状は一致しているといえる。しかしながら、推定結果では探触子中央部での振幅がより突出しており、これは接触面周縁で 2 次的に発生する Lamb 波が中央に伝播して増幅される現象を反映しているものと考えられる。

まとめ

本稿では、圧電型水浸探触子を用いたピッチキャッチ法によって取得した超音波波形データをもとに、探触子表面上の速度分布を推定する逆解析手法について示した。ここで示した逆解析法により推定された速度分布と、レーザー振動計での測定から得られた分布形状はおおむね一致しており、同手法が空間的に非一様な振動面の速度を推定するのに有効であることが示された。今後は探触子内部に発生する Lamb 波の影響をモデルに取り込んだより高精度な逆解析手法の開発や、同様な手法の接触型探触子への拡張が課題である。

参考文献

1. D. Cathignol, O. A. Sapozhnikov, and J. Zhang, "Lamb waves in piezoelectric focused radiator as a reason for discrepancy between O'Neil's formula and experiment", J. Acoust. Soc. Am. 101, 1286-1297(1997)
2. L. W. Schmerr, Jr., "Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation", Plenum Press, New York, 1998