

距離分解能の向上を目指した 二端子対網回路の縦続逆行列による 超音波トランスジューサの狭帯域特性の改善法

木村 友久 浅井 仁 金井 浩 中鉢 憲賢

High-Resolution Determination of Transit Time of Ultrasound in Thin Layer by Improving Characteristics of Ultrasonic Transducer Using Cascade Inverse Matrix of 2-Terminal-pair Network

Tomohisa KIMURA, Hitoshi ASAI, Hiroshi KANAI and Noriyoshi CHUBACHI

Abstract

We propose a new method for improving the characteristics of the piezoelectric transducer using by the inverse matrix of the cascade system so that time resolution in the determination of transit time of ultrasound signals in a thin layer is increased. The complete set of characteristic of the pulse-echo system is described by a cascade of distributed-constant systems for the ultrasonic transducer, matching layer, and acoustic medium. Acoustic input impedance and reflection characteristics are estimated by using the inverse matrix of the cascade system and the voltage and the current signal at the electrical port. From the inverse Fourier transform of the resultant reflection characteristic, transit time in an object that forms a thin layer is accurately determined with high time-resolution. The principle of the method was confirmed by simulation experiments and experiments using a water tank.

Key Words

Acoustic input impedance, Cascade matrix, Reflection characteristic, 2-Terminal-pair network, Ultrasonic transducer

1. ま え が き

近年、ガンや動脈硬化の非侵襲診断方法として超音波による画像診断が重要視されている。しかし、用いられる超音波トランスジューサは一般に共振系の狭帯域伝達特性を有することから、そのままでは、放射される超音波パルスは長い時間応答をもつ。そのため、反射波の振幅を輝度変換する超音波画像においては、境界が不鮮明で、空間分解能が低くなるという問題が生じる。

実際の超音波プローブでは、バッキング材や1/4波長音響整合層を用いるなど、長い応答を短くするため

の対策がなされている。しかし、これらの手法を用いてもトランスジューサの応答を十分改善することは難しく、厚さ測定を困難にする一つの原因となっている。特に対象物の厚さが波長程度の場合には、対象物内部を伝搬する超音波の往復伝搬時間がトランスジューサの応答よりも短くなるため大きな問題となる。

圧電トランスジューサの応答に関しては、Masonの等価回路¹⁾を用いて、Redwood²⁾やHunt³⁾が報告している。また、特性改善のための逆フィルタに関する多くの研究がなされているが、それらの報告のほとんどにおいては、超音波トランスジューサを含むパルスエコーシステムを、入力と出力にそれぞれ1端子をもつ

東北大学工学部電気工学科 (Department of Electrical Engineering Tohoku University Faculty of Engineering, Aramaki-aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-77, Japan)

(Received Feb 27, 1996; Accepted in final form Apr 26, 1996)

た一端子対網回路として扱い、デコンボリューション演算による狭帯域特性の改善法について比較検討を行っている⁴⁾⁷⁾。さらに、逆フィルタリングにおける雑音成分の増幅を抑制するために、ウィナーフィルタを導入する⁸⁾などのさまざまな試みも行われてきた。しかしながら、超音波トランスジューサは電気端子では電圧と電流、音響端子では力と粒子速度を有するため、4端子を持つ二端子対網回路として扱うことが妥当であり、デコンボリューション演算も二端子対網回路に対して行う必要がある。

そこで我々は、超音波パルスエコーシステムを二端子対網回路の縦続接続として表現し、狭帯域特性の原因となっている超音波トランスジューサ部の縦続逆行列を用いて狭帯域特性を改善するための方法について検討を行ってきた⁹⁾¹⁰⁾。

本論文では、さらに実際の超音波トランスジューサの縦続行列要素の推定方法を提案し、シミュレーション実験と水槽実験により対象物内部の超音波往復伝搬時間の推定を行い、本手法の有効性を示す。本手法により、狭帯域特性を改善することで、超音波計測にお

ける距離分解能を向上させることができ、超音波による厚さの高精度計測が可能になる。

2. 原理

2.1 縦続逆行列による超音波トランスジューサの特性改善

Fig.1 (a) に示すように、超音波トランスジューサに用いられる圧電振動子の1つの音響端子を音響インピーダンス Z_b で終端し、近距離音場の範囲において、超音波を平面波伝搬と仮定する。このとき Fig.1 (a) のパルスエコーシステムは、Fig.1 (b) のように超音波トランスジューサ、音響整合層、伝搬媒質のそれぞれの二端子対網回路 K_{tr} , K_m , K_w と、測定対象物の縦続接続とみなすことができる。ただし、 Z_w , Z_{obj} , $Z_{w'}$ は、それぞれ媒体1、対象物、媒体2の音響インピーダンスであり、 l_{obj} , γ_{obj} は対象物の長さおよび伝搬定数である。超音波トランスジューサの電気端子における電圧 V_3 および電流 I_3 と、対象物表面に相当する音響端子に作用する力 F_{obj} および粒子速度 v_{obj} の関係は、トランスジューサ、音響整合層、伝搬媒質の各線路の縦続行列 K_{tr} , K_m , K_w により、

$$\begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} = K_{tr} K_m K_w \begin{bmatrix} F_{obj} \\ v_{obj} \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} F_{obj} \\ v_{obj} \end{bmatrix} \quad (1)$$

と表記できる。ここで、縦続行列 K は、次式のように定義している。

$$K = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \stackrel{\text{def}}{=} K_{tr} K_m K_w \quad (2)$$

式 (1) に対して縦続逆行列 K^{-1} を左から掛けることによって、次式のように対象物表面における力 F_{obj} と

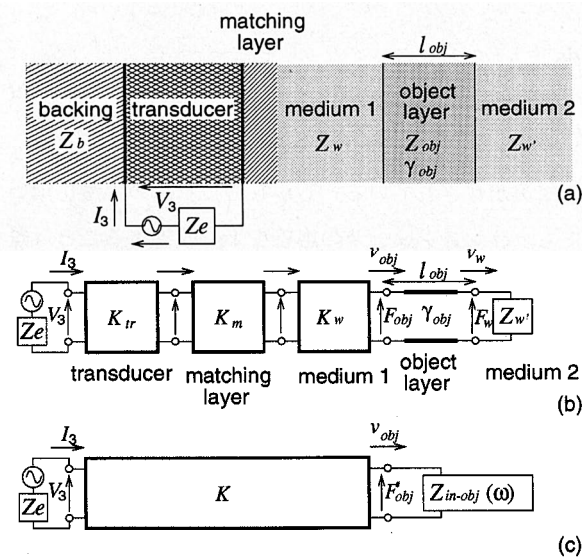


Fig.1 (a) Physical model for estimating of thickness of an object from electrical port of the transducer via the matching layer and acoustical medium 1. (b) Exact equivalent circuit of the model for the compressional-plane wave using a backing material. (c) The acoustical port on the surface of the object is described by the acoustic input impedance $Z_{in-obj}(\omega)$.

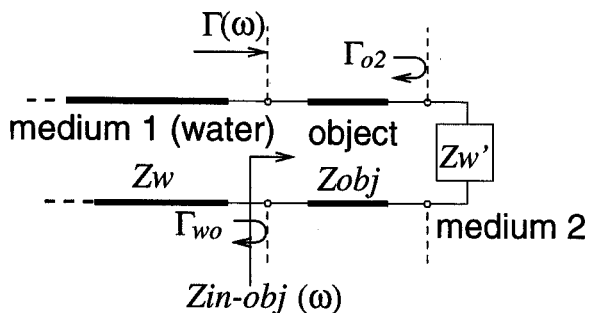


Fig.2 Hypothetical model of infinite line with the characteristic impedance Z_w contacted with the object surface.

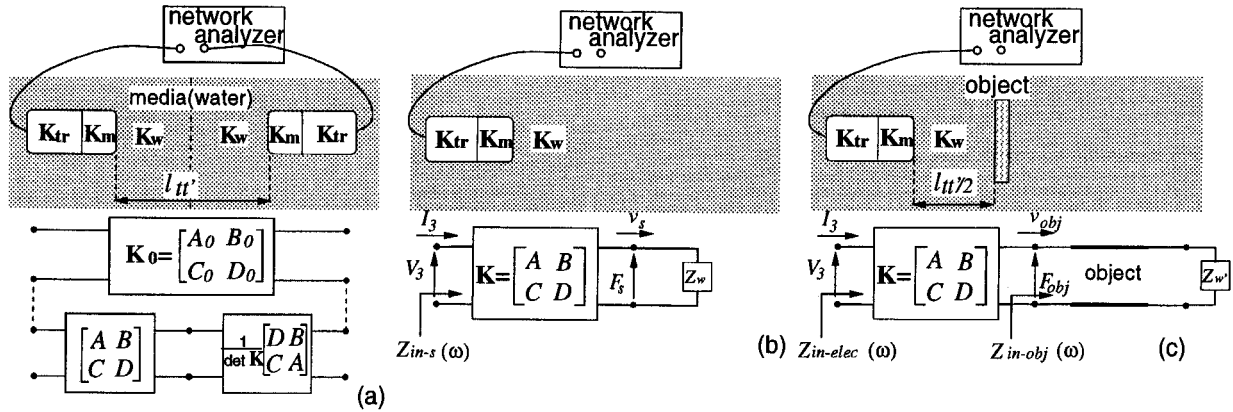


Fig.3 (a) Illustration explaining the proposed method to determine each element of the cascade matrix K_0 including ultrasonic transducer K_{tr} , a matching layer K_m , and the medium 1 K_w . (b) Illustration explaining the method used to estimate acoustic impedance $Z_{in-s}(\omega)$ the electrical port when the acoustical port on the object surface is terminated by the acoustic impedance Z_w . (c) Illustration explaining the method to estimate acoustic impedance $Z_{in-obj}(\omega)$ at the surface of the object layer.

粒子速度 v_{obj} が推定できる。

$$K^{-1} \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{obj} \\ v_{obj} \end{bmatrix} \quad (3)$$

さらに、推定された対象物表面の力 F_{obj} と粒子速度 v_{obj} の比の値から、Fig.1 (c) における媒質 1 から見た対象物表面の音響入力インピーダンス $Z_{in-obj}(\omega)$ は次式のように推定できる。

$$\hat{Z}_{in-obj}(\omega) = \frac{\hat{F}_{obj}}{\hat{v}_{obj}} \quad (4)$$

2.2 対象物内部での超音波の往復伝搬時間の推定原理

一方、対象物の音響インピーダンス Z_{obj} 、伝搬定数 γ_{obj} および厚さ l_{obj} を用いることによって、Fig.1 (b) において媒質 1 から見た測定対象物の音響入力インピーダンス $Z_{in-obj}(\omega)$ は、

$$Z_{in-obj}(\omega) = Z_{obj} \frac{1 + \Gamma_{o2} \exp(-2\gamma_{obj} l_{obj})}{1 - \Gamma_{o2} \exp(-2\gamma_{obj} l_{obj})} \quad (5)$$

と記述できる。ここで、 Γ_{o2} は対象物から媒質 2 への音圧反射係数であり、次式のように定義する。

$$\Gamma_{o2} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{Z_{w'} - Z_{obj}}{Z_{w'} + Z_{obj}} \quad (6)$$

次に、Fig.2 に示すように対象物表面に相当する音響端子の左側を、媒質 1 と同じ音響インピーダンス Z_w を持つ無限長の媒質で仮想的に終端した場合を考える。このとき対象物表面における反射特性 $\Gamma(\omega)$ は、

式 (5) の対象物表面の音響入力インピーダンス $Z_{in-obj}(\omega)$ を用いて次式のように定義される。

$$\Gamma(\omega) = \frac{Z_{in-obj}(\omega) - Z_w}{Z_{in-obj}(\omega) + Z_w} \quad (7)$$

この右辺に式 (5) を代入すると、次のように整理できる。

$$\Gamma(\omega) = \frac{\Gamma_{wo} + \Gamma_{o2} \exp(-2\gamma_{obj} l_{obj})}{1 + \Gamma_{wo} \Gamma_{o2} \exp(-2\gamma_{obj} l_{obj})} \quad (8)$$

ただし、 Γ_{wo} は、媒質 1 から対象物への音圧反射係数で次のように定義している。

$$\Gamma_{wo} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{Z_{obj} - Z_w}{Z_{obj} + Z_w} \quad (9)$$

さらに式 (8) は、

$$\Gamma(\omega) = \Gamma_{wo} + (1 + \Gamma_{wo}) \cdot \frac{\Gamma_{o2} \exp(-2\gamma_{obj} l_{obj})}{1 + \Gamma_{wo} \Gamma_{o2} \exp(-2\gamma_{obj} l_{obj})} (1 - \Gamma_{wo}) \quad (10)$$

と記述でき、第二項を級数展開することで次式を得る。

$$\Gamma(\omega) = \Gamma_{wo} + (1 + \Gamma_{wo}) \Gamma_{o2} e^{-2\gamma_{obj} l_{obj}} (1 - \Gamma_{wo}) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{-n} \{\Gamma_{wo} \Gamma_{o2} e^{-2\gamma_{obj} l_{obj}}\}^n \quad (11)$$

対象物での減衰定数および縦波音速を、それぞれ α_{obj} および v_o とすると、伝搬定数は

$$\gamma_{obj} = \alpha_{obj} + \frac{j\omega}{v_o} \quad (12)$$

とおけることから、

$$\gamma_{obj} l_{obj} = \alpha_{obj} l_{obj} + j\omega\tau_{obj} \quad (13)$$

と表すことができる。ただし、 τ_{obj} は対象物内での超音波の片道伝搬時間で、次式で表される。

$$\tau_{obj} = \frac{l_{obj}}{v_o} \quad (14)$$

式(7)の反射特性 $\Gamma(w)$ の逆フーリエ変換を行うことによって得られる時間応答波形の推定値 $\hat{f}(t)$ は、式(11)から、次式のような意味をもつことが分る。

$$\begin{aligned} \hat{f}(t) = & \Gamma_{w0} \delta(t) + (1 + \Gamma_{w0})(1 - \Gamma_{w0}) \\ & \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-\Gamma_{w0})^{n-1} \Gamma_{o2}^n e^{-2n\tau_{obj} l_{obj}} \delta(t - 2n\tau_{obj}) \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 $\delta(t)$ はディラックのデルタ関数である。よって $\hat{f}(t)$ は時間領域において、測定対象物内における超音波の往復伝搬時間に相当するパルス間隔 $2\tau_{obj}$ をもつインパルス列となる。

以上より、本手法においては、

- (a) まず、式(3)を用いて、超音波トランスジューサの狭帯域特性を表す縦続行列の逆行列 \mathbf{K}^{-1} を用いて、対象物表面に作用する力 F_{obj} と粒子速度 v_{obj} を推定する。
- (b) 次にこれら F_{obj} と v_{obj} を用いて、被測定対象物表面から見た音響入力インピーダンス $\hat{Z}_{in-obj}(w)$ を、式(4)によって推定する。
- (c) さらに、その $\hat{Z}_{in-obj}(w)$ を用いて、式(7)の反射特性 $\hat{\Gamma}(w)$ を算出する。このとき Z_w は既知であるものとする。
- (d) 最後に反射特性 $\hat{\Gamma}(w)$ の逆フーリエ変換を行って、対象物表面でのインパルス応答の推定

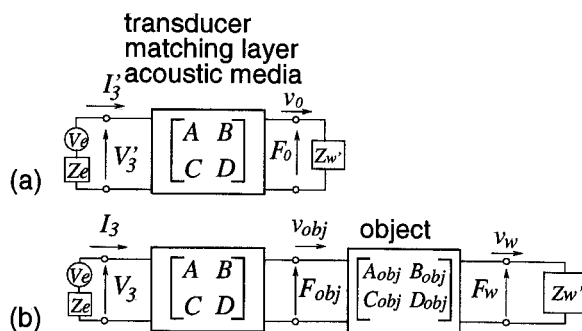


Fig. 4 (a) Illustration explaining a method for designing the inverse filter. (b) A pulse-echo system described by the 2-terminal-pair network.

値 $\hat{f}(t)$ を得る。このインパルス列は、式(15)の物理的意味をもつことから、そのパルス間隔から、測定対象物での超音波の往復伝搬時間を推定する。

(b)で推定された $Z_{in-obj}(w)$ の特性は理想的には、超音波トランスジューサや音響整合層の特性、電気端での入力電圧特性を含まない対象物そのものの特性である。そのため、 $\hat{\Gamma}(w)$ の逆フーリエ変換により得られるインパルス列 $\hat{f}(t)$ においては、超音波トランスジューサのインパルス応答が抑制でき、より高い時間(空間)分解能をもって、被測定対象物内における超音波の往復伝搬時間 $2\tau_{obj}$ が推定できる。

2.3 超音波トランスジューサの縦続行列の各要素の推定方法

本手法において、超音波トランスジューサ、音響整合層および伝搬媒質の縦続行列 \mathbf{K} の行列要素 A, B, C, D をあらかじめ推定しておく必要がある。次にその決定方法を説明する。

まず、Fig. 3 (a)に示すように、特性のほぼ同じ2つのトランスジューサを水槽内で l_w の距離で向い合わせた二端子対網回路の \mathbf{S} パラメータ($S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$)をネットワークアナライザによって測定する。測定された \mathbf{S} パラメータから次の変換式によって二端子対網回路の縦続行列 \mathbf{K}_0 を求める。

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_0 = & \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2S_{21}} \\ & \cdot \begin{bmatrix} -\det\mathbf{S} + S_{11} - S_{22} + 1 & \det\mathbf{S} + S_{11} + S_{22} + 1 \\ \det\mathbf{S} - S_{11} - S_{22} + 1 & -\det\mathbf{S} + S_{11} + S_{22} + 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

ただし、

$$\det\mathbf{S} = S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12} \quad (17)$$

である。この縦続行列 \mathbf{K}_0 は、Fig. 1 (b)の二端子対網回路の縦続行列 $\mathbf{K} = \mathbf{K}_r \mathbf{K}_m \mathbf{K}_w$ を用いると、次式のように表される¹¹⁾。

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_0 = & \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{bmatrix} \\ = & \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \frac{1}{\det\mathbf{K}} \begin{bmatrix} D & B \\ C & A \end{bmatrix} \\ = & \frac{1}{\det\mathbf{K}} \begin{bmatrix} AD + BC & 2AB \\ 2CD & AD + BC \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

ここで

$$\det\mathbf{K} = AD - BC \quad (19)$$

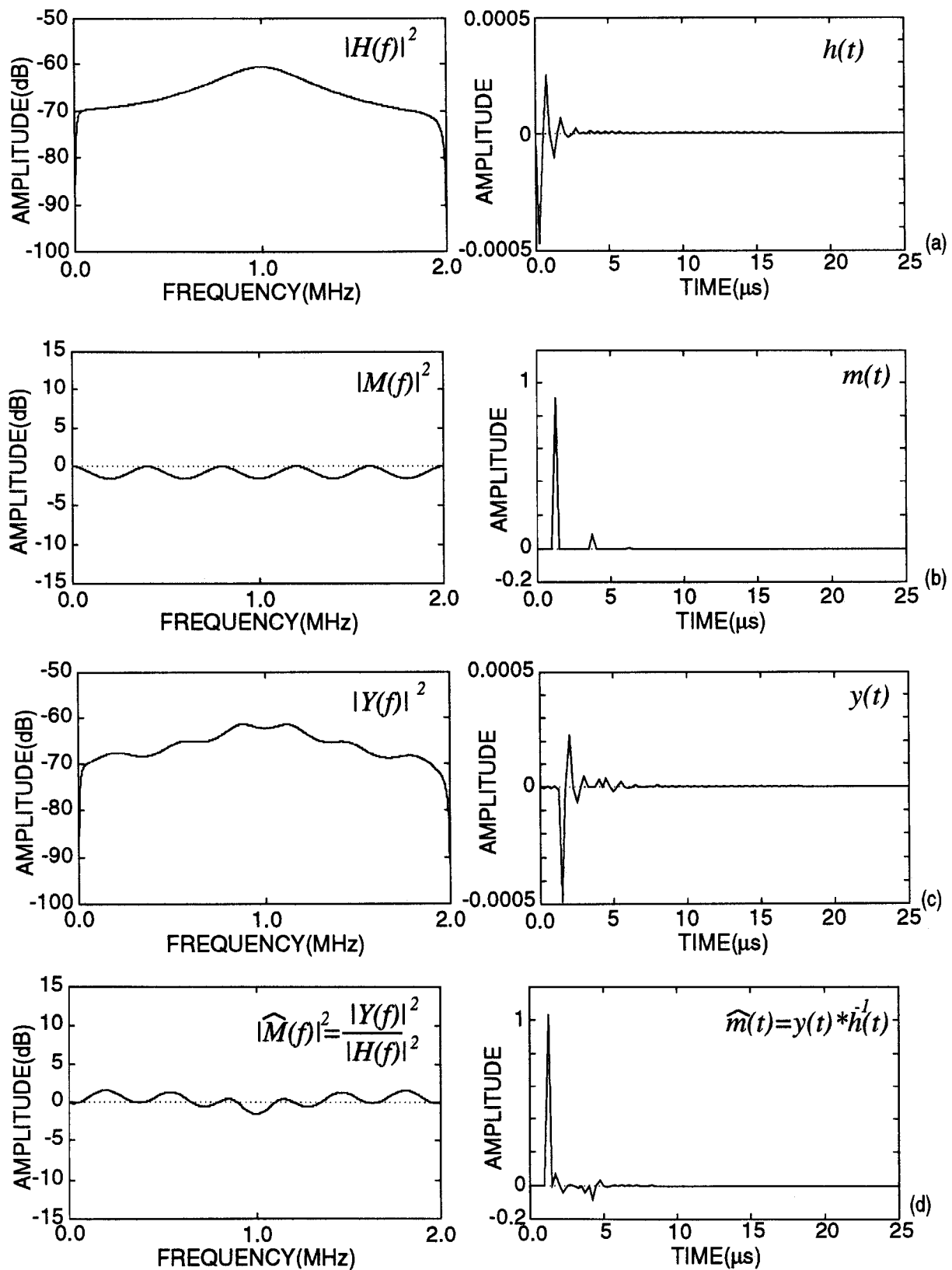


Fig.5 (a) Transfer characteristic $H(f)$ from V_3 to F_0 and its time response $h(t)$. (b) Transfer characteristic $M(f)$ in the object and its time response $m(t)$. (c) Transfer characteristic $Y(f)$ from V_3 to F_w and its time response. (d) Frequency characteristic $\hat{M}(f)$ of the object estimated by the standard deconvolution method and its time response $\hat{m}(t)$.

である。式 (18) より,

$$\frac{AD+BC}{\det \mathbf{K}} = A_0 = D_0 \quad (20)$$

$$\frac{2AB}{\det \mathbf{K}} = B_0 \quad (21)$$

$$\frac{2CD}{\det \mathbf{K}} = C_0 \quad (22)$$

式 (19) と式 (20) より,

$$AD = BC \frac{A_0 + 1}{A_0 - 1} \quad (23)$$

が得られる。さらに、両辺から BC を引くと,

$$AD - BC = \det \mathbf{K} = BC \frac{2}{A_0 - 1} \quad (24)$$

となる。ここで、式 (21) 式と式 (24) 式より B と \det

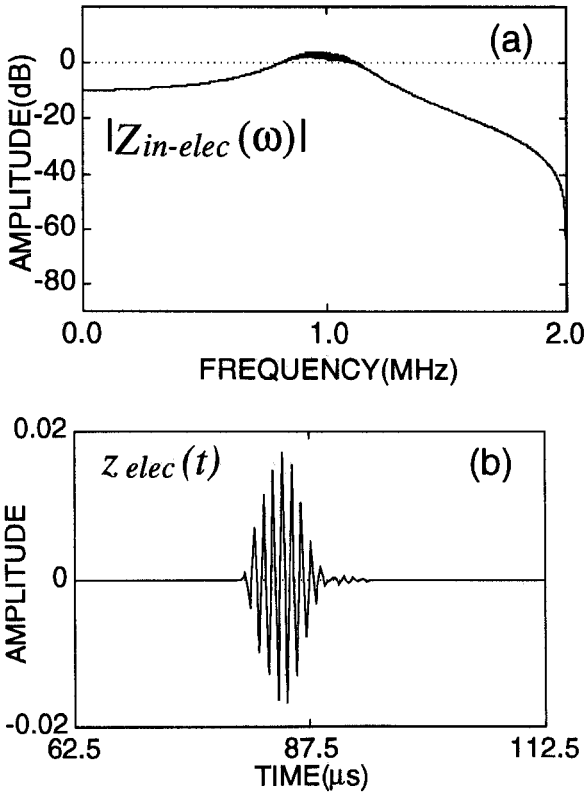
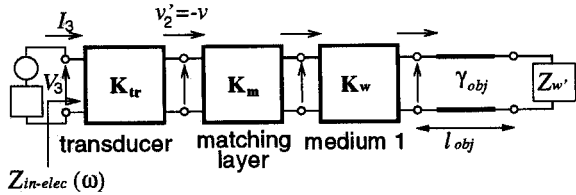


Fig. 6 Input impedance $Z_{in-elec}(\omega)$ at the electrical port. (a) Frequency characteristic of $Z_{in-elec}(\omega)$. (b) Time response $Z_{elec}(t)$ obtained by the inverse Fourier transform of $Z_{in-elec}(\omega)$.

\mathbf{K} を消去することによって,

$$A = \frac{B_0}{A_0 - 1} C \quad (25)$$

一方、式 (22) と式 (24) より C と $\det \mathbf{K}$ を消去すると,

$$D = \frac{C_0}{A_0 - 1} B \quad (26)$$

となる。よって、式 (25) と式 (26) から縦続行列 \mathbf{K} は,

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{B_0}{A_0 - 1} C & B \\ C & \frac{C_0}{A_0 - 1} B \end{bmatrix} \quad (27)$$

と表される。

次に、縦続行列 \mathbf{K} で表される二端子対網回路の音響端子を、Fig. 3 (b) に示すように、既知の音響インピーダンス Z_w をもつ媒質 (例えば水) で終端する場合を考える。この場合の電気端子電圧 V_3 、電流 I_3 と、その音響端子の力 F_s 、粒子速度 v_s の関係は次式のように表される。

$$\begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} F_s \\ v_s \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} Z_w v_s \\ v_s \end{bmatrix} \quad (28)$$

式 (27) と式 (28) から、そのときの電気端子から見た入力インピーダンス $Z_{in-s}(\omega)$ は、次式で表される。

$$Z_{in-s}(\omega) = \frac{V_3}{I_3} = \frac{\frac{c}{B} B_0 Z_w + A_0 - 1}{\frac{c}{B} (A_0 - 1) Z_w + C_0} \quad (29)$$

ここで、 $\eta(\omega)$ を

$$\eta(\omega) = \frac{C}{B} = \frac{A_0 - 1 - Z_{in-s}(\omega) C_0}{Z_{in-s}(\omega) Z_w (A_0 - 1) - B_0 Z_w} \quad (30)$$

とおく。この $\eta(\omega)$ は測定値から決定できる関数である。 $\eta(\omega)$ を用いると、式 (27) の行列 \mathbf{K} は、次のように表される。

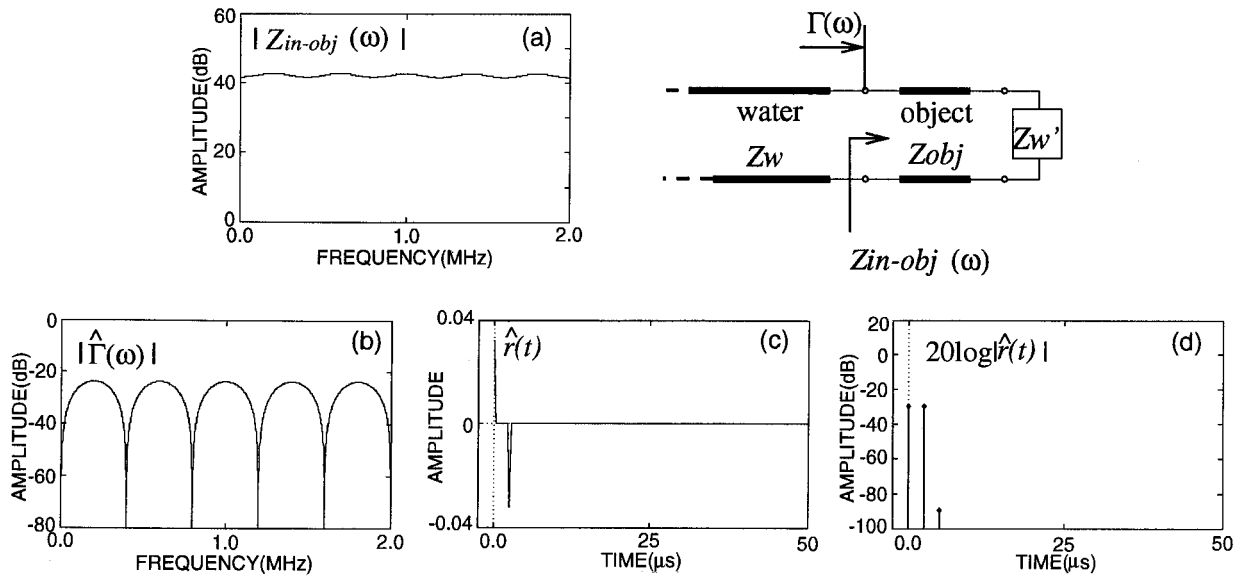


Fig. 7 Acoustic input impedance $Z_{in-obj}(\omega)$ at the object surface and the reflection characteristic $\Gamma(\omega)$. (a) Frequency characteristic $Z_{in-obj}(\omega)$ of acoustic input impedance. (b) Reflection characteristic $\Gamma(\omega)$ at the object surface. (c) Time response $\hat{r}(t)$ obtained by the inverse Fourier transform of $\Gamma(\omega)$. (d) Logarithm $20 \log |\hat{r}(t)|$ of the time response $\hat{r}(t)$ in Fig. (c), above.

$$\mathbf{K} = B \begin{bmatrix} \frac{B_0}{A_0-1} \frac{C}{B} & 1 \\ \frac{C}{B} & \frac{C_0}{A_0-1} \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} \frac{B_0}{A_0-1} \eta(\omega) & 1 \\ \eta(\omega) & \frac{C_0}{A_0-1} \end{bmatrix} \quad (31)$$

したがって、**Fig. 3 (a)**と**Fig. 3 (b)**の測定によって、縦続行列 \mathbf{K} の行列要素 A , C , D は、いずれも要素 B との積として表され、要素 B は未知の変数のまま残ることになる。

しかしさらに、被測定対象物表面の音響入力インピーダンスを推定することによって、この問題を以下のように解決できる。**Fig. 3 (c)**に示すように、縦続行列 \mathbf{K} の二端子対網回路の音響端子、つまり超音波トランスジューサから距離 $l_{tr}/2$ に対象物をおいた場合の、電気端子と対象物表面に相当する音響端子との関係は、式 (31) における縦続行列 \mathbf{K} を用いると、

$$\begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} \frac{B_0}{A_0-1} \eta(\omega) & 1 \\ \eta(\omega) & \frac{C_0}{A_0-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{obj} \\ v_{obj} \end{bmatrix} \quad (32)$$

と記述できるので、対象物表面の力 F_{obj} と粒子速度 v_{obj} は次式のように推定できる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_{obj} \\ v_{obj} \end{bmatrix} &= \mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\det \mathbf{K}} \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \\ &= \frac{B}{\det \mathbf{K}} \begin{bmatrix} \frac{C_0}{A_0-1} & -1 \\ -\eta(\omega) & \frac{B_0}{A_0-1} \eta(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (33) \end{aligned}$$

したがって、式 (4) の対象物表面の音響入力インピーダンスの推定値 $Z_{in-obj}(\omega)$ は次式のように算出できる。

$$\begin{aligned} Z_{in-obj}(\omega) &= \frac{F_{obj}}{v_{obj}} \\ &= \frac{1}{\eta(\omega)} \cdot \frac{C_0 Z_{in-elec}(\omega) - A_0 + 1}{(1 - A_0) Z_{in-elec}(\omega) + B_0} \quad (34) \end{aligned}$$

ここで、 $Z_{in-elec}(\omega)$ は、**Fig. 3 (c)** の電気端子における入力インピーダンスを表す。式 (31) において未知の変数であった行列要素 B は、このように式 (34) で力 F_{obj} と粒子速度 v_{obj} の比をとることによって相殺させ除くことができる。

3. シミュレーション実験と理論的考察

圧電振動子に、中心周波数 1 MHz、直径 10 mm の PZT-5A ($Z_0 = 33.7 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $h = 21.5 \times 10^8 \text{ V/}$

m) を想定し、シミュレーション実験により $S/N=\infty$ の場合におけるデコンボリューション演算と本手法との比較を行った。1/4 波長音響整合層の音響インピーダンスおよび厚さを、それぞれ $Z_m=4.0\times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ および $l_m=0.63 \text{ mm}$ とした。また、媒質 1 と媒質 2 および測定対象物のパラメータを、 $Z_w=Z_w'=1.5\times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $Z_{obj}=1.6\times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $l_w=60 \text{ mm}$, $l_{obj}=2 \text{ mm}$ および $v_0=1.6\times 10^3 \text{ m/s}$ と仮定し、伝搬による減衰はないものと仮定した。

3.1 従来のデコンボリューションによる対象物内部の伝達特性

まず、逆フィルタの設計のために、Fig.4 (a) のように既知のインピーダンス Z_w' により音響端子を終端する。このときの電気端子の電圧 V_3' から音響端子の力 F_0 への伝達特性 $H(f)$ は、

$$H(f) = \frac{F_0}{V_3'} = \frac{Z_w'}{AZ_w' + B} \quad (35)$$

と表すことができる。従来のデコンボリューション法においては、測定系のインパルス応答 $h(t)$ のフーリエ変換により求められる $H(f)$ の逆特性 $1/H(f)$ が逆

フィルタとなる。この伝達特性 $H(f)$ とその時間応答 $h(t)$ を Fig.5 (a) に示す。

次に、対象物をパルスエコーシステムに入れる。Fig.4 (b) のように、パルスエコーシステムを二端子対回路の縦続接続として考えた場合、力 F_{obj} から力 F_w への対象物内部での伝達特性 $M(f)$ は次式で表される。

$$M(f) = \frac{F_{obj}}{F_w} = \frac{Z_w'}{A_{obj}Z_w' + B_{obj}} \quad (36)$$

上記条件における式 (36) の対象物内部での伝達特性 $M(f)$ とその逆フーリエ変換による時間応答 $m(t)$ は Fig.5 (b) のようになる。

このときの電気端子の電圧 V_3 、電流 I_3 と、音響端子の力 F_w 、粒子速度 v_w の関係は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{obj} & B_{obj} \\ C_{obj} & D_{obj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_w \\ v_w \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} AA_{obj} + BC_{obj} & AB_{obj} + BD_{obj} \\ CA_{obj} + DC_{obj} & CB_{obj} + DD_{obj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_w \\ F_w/Z_w' \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (37)$$

これより、電気端子の電圧 V_3 から音響端子の力 F_w への伝達特性 $Y(f)$ は次式で表される。

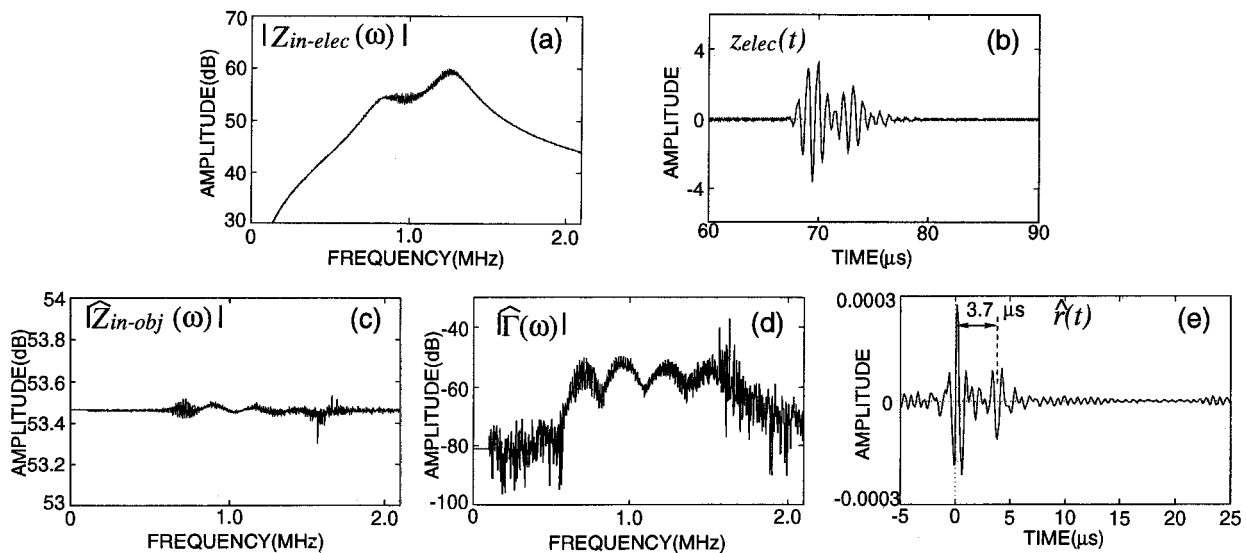


Fig.8 Experimental results with an ultrasonic transducer (for 3 mm rubber plate). (a) Amplitude of the input impedance $Z_{in-elec}(\omega)$ at the electrical port. (b) Time response $z_{elec}(t)$ at the electrical port obtained from the inverse Fourier transform of $Z_{in-elec}(\omega)$. (c) Amplitude of the acoustic input impedance $\hat{Z}_{in-obj}(\omega)$ at the surface of the object estimated using the inverse cascade matrix K^{-1} . (d) Amplitude of the reflection characteristic $\hat{\Gamma}(\omega)$ at the surface of the object estimated from $\hat{Z}_{in-obj}(\omega)$. (e) Time response $\hat{r}(t)$ at the surface of the object obtained from the inverse Fourier transform of $\hat{\Gamma}(\omega)$.

$$\begin{aligned}
Y(f) &= \frac{F_w}{V_3} \\
&= \frac{Z_{w'}}{(AA_{obj} + BC_{obj})Z_{w'} + (AB_{obj} + BD_{obj})}
\end{aligned}
\tag{38}$$

この伝達特性 $Y(f)$ とその逆フーリエ変換による時間応答 $y(t)$ を Fig.5 (c) に示す。Fig.5 (c) の $Y(f)$ は、Fig.5 (b) の対象物内部の伝達特性 $M(f)$ と、Fig.5 (a) の測定系の伝達特性 $H(f)$ の周波数領域における積として近似的に表すことができる。

$$Y(f) = H(f) \cdot M(f) \tag{39}$$

従来のデコンボリューション演算においては、伝達特性 $Y(f)$ と $H(f)$ の比をとることで対象物内部での伝達特性 $M(f)$ を推定している。したがって、式 (38) と式 (35) を用いることによって、デコンボリューション演算で得られる推定値 $\hat{M}(f)$ の特性は、次のように表される。

$$\begin{aligned}
\hat{M}(f) &= \frac{Y(f)}{H(f)} \\
&= \frac{F_w V_3'}{V_3 F_0}
\end{aligned}$$

$$\frac{AZ_{w'} + B}{(AA_{obj} + BC_{obj})Z_{w'} + (AB_{obj} + BD_{obj})}
\tag{40}$$

デコンボリューション演算により推定された伝達特性 $\hat{M}(f)$ の周波数スペクトルと、その逆フーリエ変換により求められる時間応答 $\hat{m}(t)$ を Fig.5 (d) に示す。Fig.5 (d) と Fig.5 (b) とを比較すると、デコンボリューション演算により推定された伝達特性 $\hat{M}(f)$ の周波数スペクトルにおいては中心周波数付近に歪みが生じており、時間応答においても完全なインパルスではない。これは式 (40) において、狭帯域特性を有する縦続行列要素 A と B が残っているためである。つまり S/N が無限大である場合においても、デコンボリューション演算では狭帯域特性を完全に改善することができないことを示している。

3.2 本手法による音響入力インピーダンス

$Z_{in-obj}(w)$ と反射特性 $\Gamma(w)$

Fig.4 (b) の超音波パルスエコーシステムの電気端子における入力インピーダンス $Z_{in-elec}(w)$ の周波数特性を Fig.6 (a) に示す。Fig.6 (b) は $Z_{in-elec}(w)$ の逆フーリエ変換によって得られた時間応答 $z_{elec}(t)$ であ

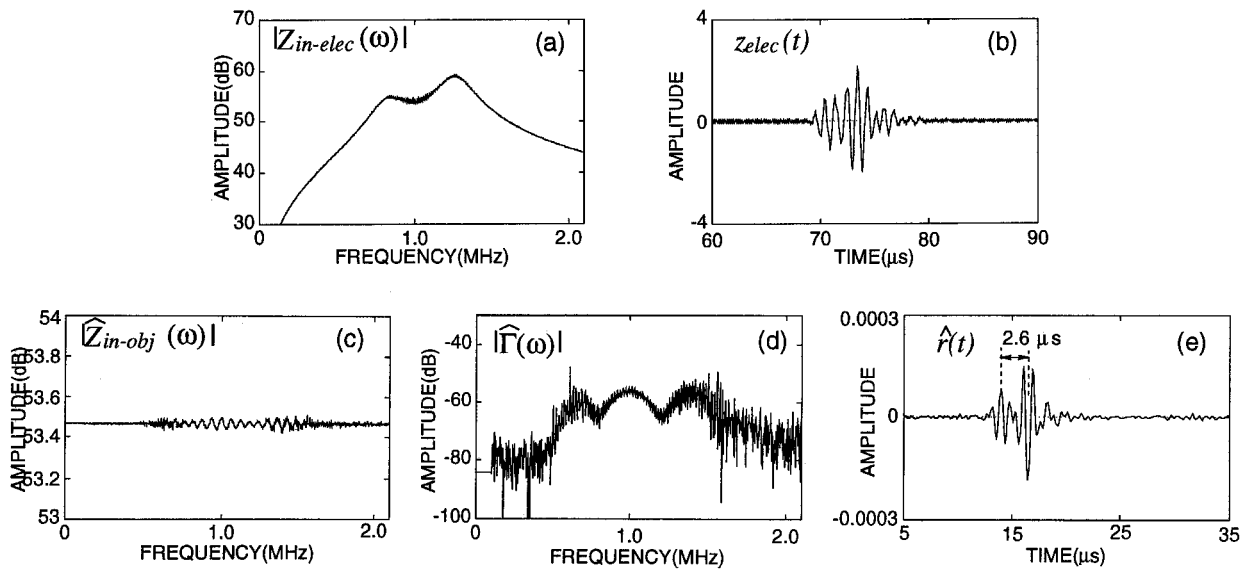


Fig.9 Experimental results with an ultrasonic transducer (for 2 mm rubber plate).

(a) Amplitude of the input impedance $Z_{in-elec}(w)$ at the electrical port. (b) Time response $z_{elec}(t)$ at the electrical port obtained from the inverse Fourier transform of $Z_{in-elec}(w)$. (c) Amplitude of the acoustic input impedance $\hat{Z}_{in-obj}(w)$ at the surface of the object estimated using the inverse cascade matrix K^{-1} . (d) Amplitude of the reflection characteristic $\hat{\Gamma}(w)$ at the surface of the object estimated from $\hat{Z}_{in-obj}(w)$. (e) Time response $\hat{f}(t)$ at the surface of the object obtained from the inverse Fourier transform of $\hat{\Gamma}(w)$.

る。トランスジューサの応答が長い場合、被測定対象物内での超音波の往復伝搬時間を推定することは難しい。

Fig.7 (a) は、式 (4) に相当する対象物表面での音響入力インピーダンス $Z_{in-obj}(w)$ の周波数特性である。**Fig.7 (b)** は、式 (7) に相当する反射特性 $\Gamma(w)$ の周波数特性であり、**Fig.7 (c)** はその逆フーリエ変換によって得られるインパルス列 $f(t)$ 、**Fig.7 (d)** はその対数表示である。時間領域におけるパルス間隔が、対象物内での往復伝搬時間 $2\tau_{obj}$ に相当する。**Fig.7 (a)** に示すように、対象物表面の音響入力インピーダンス $Z_{in-obj}(w)$ においては、トランスジューサの狭帯域特性が完全に改善されている。

以上の結果より、縦続逆行列を用いる本手法は、パルスエコーシステムにおける超音波トランスジューサの狭帯域特性の理想的改善方法であると言える。

4. 対象物内部での超音波往復伝搬時間の推定実験

中心周波数 1 MHz、直径 20 mm の PZT 平板トランスジューサ (トキメック社製、1 Z 20 I-C) を用いて、水槽実験による被測定対象物内部での往復伝搬時間の推定を行った。本実験においては、同じ特性をもつ 2 つのトランスジューサを **Fig.3 (a)** のように距離 $l_{tr} = 10 \text{ cm} = 70 \mu\text{s} \times v_w$ (v_w : 水の音速で 1500 m/s としている) で対向させた回路の S パラメータをネットワークアナライザ (ヒューレット・パッカード社製、HP 8751 A) により測定し、式 (16) により縦続行列 \mathbf{K}_0 を求めた。また、**Fig.3 (b)** と **Fig.3 (c)** に示すように二端子対網回路の音響端子に、水と対象物をおいたときの、電気端子からの入力インピーダンス $Z_{in-s}(w)$ と $Z_{in-elec}(w)$ をネットワークアナライザによりそれぞれ測定し、式 (34) より対象物表面の音響入力インピーダンス $Z_{in-obj}(w)$ および反射特性 $\Gamma(w)$ を算出した。さらに反射特性 $\Gamma(w)$ の時間応答 $f(t)$ から、対象物内部での超音波往復伝搬時間の推定を行った。

4.1 実験結果

3 mm のゴム板をトランスジューサから距離 $l_{to} = 35 \mu\text{s} \times v_w = 52.5 \text{ mm}$ 、すなわち **Fig.3 (c)** のようにトランスジューサからの距離 $l_{tr}/2$ に設置し実験を行った。用いた超音波トランスジューサのフレネル長は約

67 mm であるため、 l_{to} の距離においては平板と仮定している。

Fig.8 (a) は、電気端子における入力インピーダンス $Z_{in-elec}(w)$ の周波数特性、**Fig.8 (b)** は $Z_{in-elec}(w)$ の逆フーリエ変換によって得られた時間応答 $z_{elec}(t)$ を示している。また **Fig.8 (c)** は式 (34) によって求められる音響入力インピーダンス $Z_{in-obj}(w)$ である。**Fig.8 (d)** は式 (7) によって求められる対象物表面での反射特性 $\hat{\Gamma}(w)$ で、**Fig.8 (e)** は反射特性 $\hat{\Gamma}(w)$ の逆フーリエ変換によって得られた時間応答 $f(t)$ である。

Fig.8 (a) の電気端子における入力インピーダンス $Z_{in-elec}(w)$ では超音波トランスジューサの狭帯域特性が支配的であるのに対し、**Fig.8 (c)** の本手法により推定した被測定対象物表面での音響入力インピーダンス $Z_{in-obj}(w)$ は広帯域の周波数特性となることが分る。また $Z_{in-obj}(w)$ から推定された **Fig.8 (d)** の反射特性 $\hat{\Gamma}(w)$ では、時間領域における 2 つのパルスの干渉によると推測されるディップがはっきりと認められる。時間領域においても、**Fig.8 (b)** の電気端子の入力インピーダンスの時間応答 $z_{elec}(t)$ がトランスジューサの狭帯域特性の影響を受けているのに対して、**Fig.8 (e)** の時間応答 $f(t)$ ではその影響が軽減され、2 つのパルスの間隔から対象物内部での超音波の往復伝搬時間がより明確に推定できる。得られた時間応答 $f(t)$ から、ゴムの内部での超音波の往復伝搬時間は $3.7 \mu\text{s}$ と推定される。さらに、ゴムの音速 $v_g \approx 1.6 \times 10^3 \text{ m/s}$ を用いて、ゴムの厚さは約 3.0 mm と推定できる。

対象物として厚さが 2 mm および 1 mm のゴム板を用いた場合の、電気端子入力インピーダンス $Z_{in-elec}(w)$ 、音響入力インピーダンス $Z_{in-obj}(w)$ 、および反射特性 $\Gamma(w)$ の推定結果をそれぞれ **Fig.9** および **Fig.10** に示した。

Fig.9 においては内部往復伝搬時間が超音波トランスジューサの時間応答に比べ短いために、**Fig.9 (b)** の電気端子の入力インピーダンスの時間応答では、超音波トランスジューサの狭帯域特性の影響によって 2 つのパルスを区別することは難しい。しかし本手法による反射特性の時間応答 (**Fig.9 (e)**) では 2 つのパルスを明確に区別できる。これよりゴム内部での超音波の往復伝搬時間を推定すると $2.6 \mu\text{s}$ である。ゴムの音

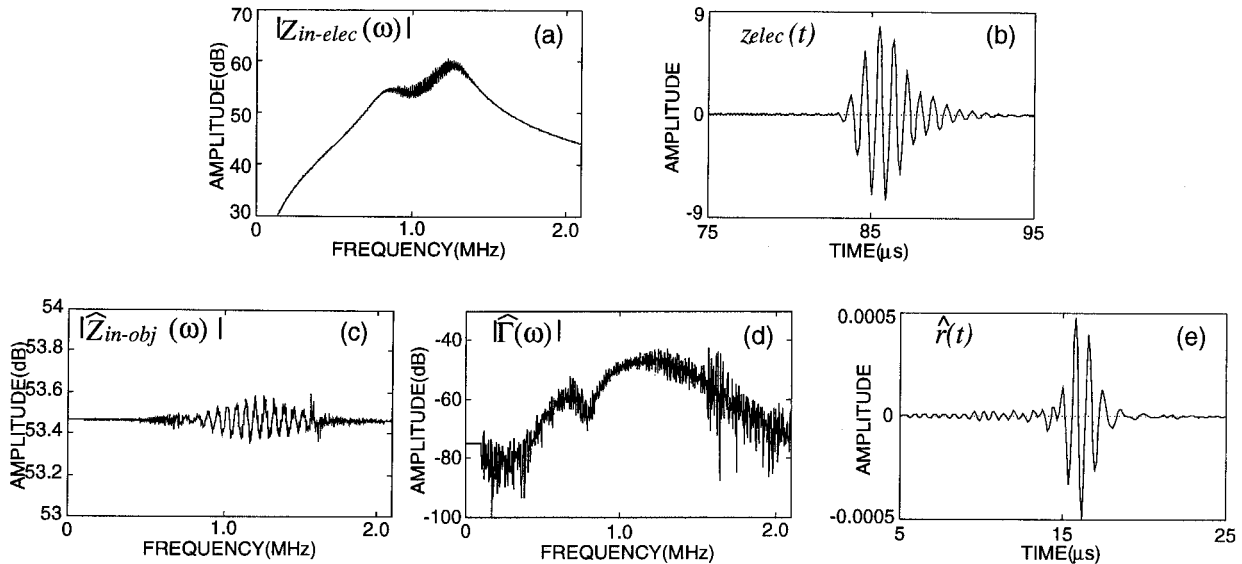


Fig.10 Experimental results with an ultrasonic transducer (for 1 mm rubber plate). (a) Amplitude of the input impedance $Z_{in-elec}(\omega)$ at the electrical port. (b) Time response $z_{elec}(t)$ at the electrical port obtained from the inverse Fourier transform of $Z_{in-elec}(\omega)$. (c) Amplitude of the acoustic input impedance $Z_{in-obj}(\omega)$ at the surface of the object estimated using the inverse cascade matrix \mathbf{K}^{-1} . (d) Amplitude of the reflection characteristic $\hat{\Gamma}(\omega)$ at the surface of the object estimated from $\hat{Z}_{in-obj}(\omega)$. (e) Time response $\hat{f}(t)$ at the surface of the object obtained from the inverse Fourier transform of $\hat{\Gamma}(\omega)$.

速 $v_2 \approx 1.5 \times 10^3$ m/s より厚さは約 2.0 mm と推定される。

一方, Fig.10 においては, 波長 (≈ 1.6 mm) に対して対象物の厚さが薄いためさらに内部往復伝搬時間が短くなり, 本手法を用いてもパルスが重なりあって推定は難しい。

これらの結果より, 本手法により狭帯域特性を改善することで, 対象物内部の超音波往復伝搬時間を高精度に推定することが可能であると言える。ただし, 用いる超音波トランスジューサの S/N は無限大ではないため, 本手法においても測定限界が存在する。

5. 結 語

本論文では, 超音波パルスエコーシステムを二端子対網回路の縦続接続と考え, 縦続逆行列による系統的な超音波トランスジューサの狭帯域特性の改善法を提案した。また, 実際の超音波トランスジューサの縦続行列要素の推定法, および対象物表面の音響入力インピーダンスの推定法について述べ, 水槽実験により対象物内部での超音波の往復伝搬時間の推定を行い, 本手法の有効性を検討した。その結果, 波長程度の厚さの対象物に対して内部での超音波の往復伝搬時間を推

定することが可能となった。今後, 本手法の生体内計測への適用を検討する予定である。また, 本手法のモデルでは, 超音波を平面波伝搬と近似しているが, この近似に関しても今後検討する予定である。

文 献

- 1) W. P. Mason : An Electromechanical Representation of a Piezoelectric Crystal Used as a Transducer. *Proceeding of IRE* Vol. 23, No. 10 1935 ; 1252-1263.
- 2) M. Redwood : Transient Performance of a Piezoelectric Transducer. *The Journal of Acoustical Society of America* Vol. 33, No. 4, 1961 ; 527-536.
- 3) J. W. Hunt, M. Arditi, F.S. Foster : Ultrasound Transducer for Pulse-Echo Medical Imaging. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* Vol. BME-30, No. 8, 1983 ; 453-481.
- 4) 陸 清明, 塚田章, 川原田淳ほか : 超音波反射波改善用逆フィルタの設計・試作と性能評価. 電子情報通信学会技術研究会報告 MBE 95-92, 1995 ; 23-30
- 5) J. Schmolke, D. Hilter, H. Ermert, et al : Generation of optimal input signals for ultrasound pulse-echo systems. *IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings* 1982 ; 929-934.
- 6) M. Eriksen : Noninvasive measurement of arterial diameters in humans using ultrasound echoes with prefiltered waveforms. *Med Biol Eng Comput* 1987 ; 189-194.
- 7) 渋谷昇, 伊藤健一, 高橋哲英ほか : 超音波による生体眼の膜厚の計測. 第 41 回日超医論文集 1982 ; 259-260.
- 8) A.C. Kak, K.A. Dines : Signal Processing of Broad-band Pulsed Ultrasound : measurement of Attenuation

- of Soft biological Tissues. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* Vol. BME-25, No. 4, 1978 ; 321-344.
- 9) H. Kanai, T. Kimura, N. Chubachi : Accurate Determination of Transit Time of Ultrasound in a Thin Layer. *IEEE Electronics Letters* Vol. 31, No. 13, 1995 ; 1109-1110.
- 10) T. Kimura, H. Kanai, N. Chubachi : High-Resolution Determination of Transit Time of Ultrasound in a Thin Layer in Pulse-Echo Method. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences* Vol. E 78-A, No. 12, 1995 ; 1677-1682.
- 11) 渡辺和 : 線形回路理論. 東京, 昭晃堂, 1971.