

超音波トランスジューサによる二端子対網回路を用いた 対象物の音響インピーダンスの非接触推定に関する研究

中澤一宏

指導教員：金井 浩， 研究指導教員：長谷川英之

Contactless Estimation of Acoustic Impedance of Object by Based on Two-port Circuit of Ultrasonic Transducer

Kazuhiro NAKAZAWA

Supervisor: Hiroshi KANAI, Research Advisor: Hideyuki HASEGAWA

Recently, the number of people who suffer from illness, such as cancer or arterial sclerosis, increases. It has been known that hardness of the diseased tissue is different from that of normal tissue. Therefore, it is very important to estimate hardness of tissue. In this study, we investigated contactless probing of characteristic acoustic impedance of an object. It has been known that acoustic impedance is a parameter representing hardness. Ultrasound wave reflected from an object depends on the acoustic parameters of the object, propagation medium and propagation distance. Therefore, we try to model the pulse echo system with two-port circuit and estimate acoustic impedance of the object without contact. The estimated acoustic impedance was in good agreement with that obtained from its density and longitudinal wave velocity.

1. はじめに

近年、悪性腫瘍や動脈硬化症などの重病疾患を持つ患者が増加しつつあり、それらの早期発見が重要視されている。動脈の状態によって硬さの指標となる音響インピーダンスが変化することは報告されているため、硬さの定量計測は病変やその進行程度を知る指標と言える [1]。硬さの定量的評価に関する研究に関しては、組織に外部から静的な応力を加え、生じたひずみから組織の弾性率を推定する方法や、組織に振動を与え、その振動の伝搬速度から弾性率を推定する方法、負荷接触時と振動子のみの場合の共振周波数の変動から組織の音響インピーダンスを推定する方法等が提案されているが、内部の応力分布の測定の難しさや、非接触評価が出来ないなどの問題がある [2,3]。

本研究の目的は超音波送受信システムを理想的に扱うことができる二端子対網回路を用いて超音波トランスジューサと伝搬媒質をモデル化し、対象物の音響インピーダンスの推定を非接触で行うことである。

2. 原理

超音波送受信システムは、電気端に電圧と電流の成分を有し、音響端に音圧と粒子速度の成分を有するため、それらを理想的に扱うには、超音波トランスジューサと伝搬媒質を二端子対網回路で扱う必要がある。図 1(a) に示すような超音波送受信システムを縦続行列を用いて二端子対網回路として表すと図 1(b) のようになる [4]。

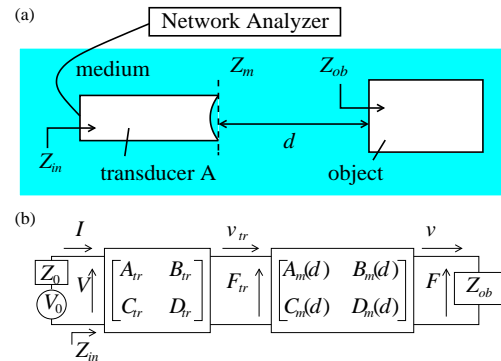


図 1: (a) 超音波送受信システムの概略図. (b) 二端子対網回路による等価モデル.

ここで、 \mathbf{K}_{tr} はトランスジューサの縦続行列を、 $\mathbf{K}_m(d)$ は伝搬媒質の縦続行列を表す。また、 Z_{in} は電気端での入力インピーダンス、 Z_{ob} は対象物の音響インピーダンスをそれぞれ表す。ここで、 \mathbf{K}_{tr} と $\mathbf{K}_m(d)$ の縦続接続による行列を $\mathbf{K} = \mathbf{K}_{tr}\mathbf{K}_m(d)$ とすると、 Z_{in} は (1) 式のように表すことができ、これを Z_{ob} について解くと (2) 式が得られる。ただし、 A, B, C, D は \mathbf{K} の要素を表す。

$$Z_{in} = \frac{V}{I} = \frac{AF + Bv}{CF + Dv} = \frac{AZ_{ob} + B}{CZ_{ob} + D} \quad (1)$$

$$Z_{ob} = -\frac{DZ_{in} - B}{CZ_{in} - A} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{K} の要素を求めるため、トランスジューサの焦点距離にガラス板などの完全反射体を置いた場合、音響インピーダンス既知のウレタンゲルを置いた場合、焦点距離に対象物がなく反射がない場合、それぞれについて電気端の入力インピーダンス Z_{open} , Z_{known} , $Z_{nonreflect}$ を計測し、ウレタンゲルと伝搬媒質の音響インピーダンスをそれぞれ Z_p , Z_m とすると \mathbf{K} の要素を校正することができ、最終的に対象物の音響インピーダンス Z_{ob} は (3) 式として表すことができる。

$$\hat{Z}_{ob} = \frac{Z_p(Z_{known} - Z_{open})(Z_{in} - Z_{nonreflect})}{(Z_{nonreflect} - Z_{known})(Z_{open} - Z_{in})} - \frac{Z_m(Z_{nonreflect} - Z_{open})(Z_{in} - Z_{known})}{(Z_{nonreflect} - Z_{known})(Z_{open} - Z_{in})} \quad (3)$$

3. 対象物の音響インピーダンスの推定結果

本研究では、HP 社製のネットワークアナライザ 8751A を用いて、凹面トランスジューサ 15Z6I-PF30-C-K446 への印加電圧を周波数掃引し、トランスジューサの焦点距離に対象物を置いた場合、ガラス板を置いた場合、音響インピーダンス既知(事前に密度と音速を測定)のウレタンゲル ($1.67 [10^6 \text{Ns/m}^3]$) を置いた場合、対象物がなく反射がない場合、それぞれについて電気端の入力インピーダンスの計測を行った。対象物は2種類の特性の異なるシリコン TSE3502 (直径 85 mm, 厚さ 11 mm), YE5643 (直径 85 mm, 厚さ 11 mm) を用いた。掃引した周波数は 5 MHz-25 MHz とした。また、伝搬媒質としては水を用いた場合と鶏ささみ肉を用いた場合に関して測定を行っている。この時の対象物の音響インピーダンスの推定結果を図2に示す。推定結果より 18.07 MHz にピークがあり、ピークにおける音響インピーダンス $|\hat{Z}_{ob}|$ の推定値5回分の加算平均値と標準偏差は、伝搬媒質が水の場合は、 $\hat{Z}_{TSE} = 1.44 \pm 0.01 [10^6 \text{Ns/m}^3]$ および $\hat{Z}_{YE} = 1.12 \pm 0.01 [10^6 \text{Ns/m}^3]$ であった。また、伝搬媒質が鶏ささみ肉の場合は、 $\hat{Z}_{TSE} = 1.46 \pm 0.03 [10^6 \text{Ns/m}^3]$ および $\hat{Z}_{YE} = 1.13 \pm 0.03 [10^6 \text{Ns/m}^3]$ であった。また、別途計測した対象物の密度、縦波音速の積から求めた音響インピーダンスはそれぞれ $\hat{\rho}\hat{c}_{TSE} = 1.42 [10^6 \text{Ns/m}^3]$ および $\hat{\rho}\hat{c}_{YE} = 1.12 [10^6 \text{Ns/m}^3]$ であり、本手法の推定結果と良く一致した。

4. 結論

本研究では超音波送受信システムと伝搬媒質を理想的に扱える二端子対網回路を用いてモデル化を行い、対象物の音響インピーダンスの非接触推定を行った。推定値は別途計測した密度、縦波音速から求めたものと良く対応していることから本手法の可能性を示せた。

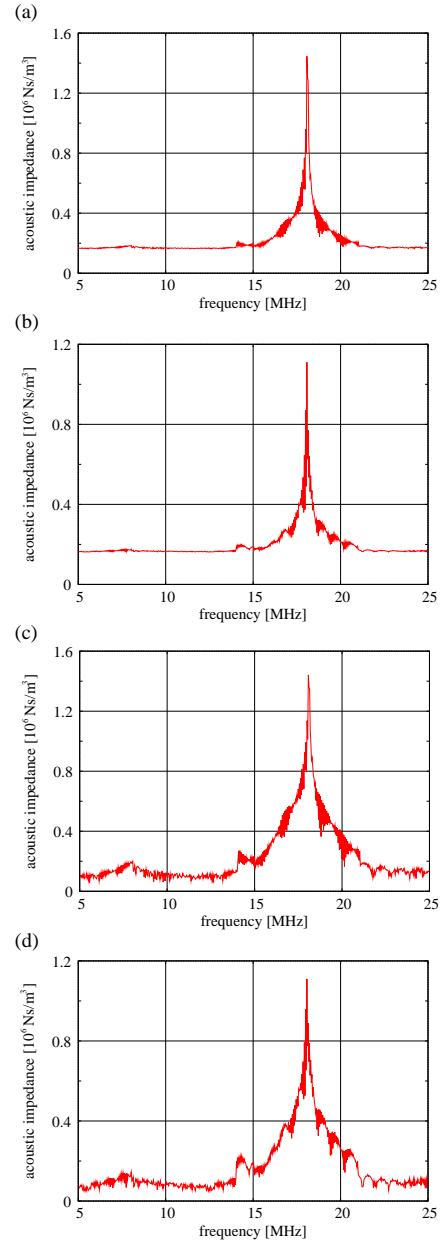


図2: 各伝搬媒質を用いた場合のシリコン毎の推定された音響インピーダンスの周波数特性。(a) 水, TSE3502. (b) 水, YE5643. (c) 鶏ささみ肉, TSE3502. (d) 鶏ささみ肉, YE5643

文献

- [1] J. F. Greenleaf, F. A. Duck, W. F. Samayoa and S. A. Johnson: *IEEE Ultrason. Symp. Proc.*, 783 (1974).
- [2] J. Ophir, I. Cespedes, H. L. Ponnekanti, Y. Yazdi and X. Li: *Ultrason. Imag.*, **13**, 111 (1991).
- [3] C. Kleesattel and G. M. L. Gladwell: *Ultrasonics*, **6**, 175, (1968).
- [4] T. Kimura, H. Kanai and N. Chubachi: *IEICE Trans. Fund. Elect.*, **E78**, 1677, (1995).