

超音波による物性測定に関する基礎的研究

○井納伸宜 春田峰雪 村山嘉延 尾股定夫 (日本大学)

Fundamental research on physical properties of tumor using ultrasonic wave method

*M. Date, N. Ino, M. Haruta, Y. Murayama, and S. Omata (Nihon University)

Abstract— Methods for measuring hardness in both the medical and industrial fields are highly necessary. Current technology such as ultrasonography can determine the shape, size and position of an internal organ, but cannot measure local hardness. Furthermore, industrial hardness measurements usually involve stress and distortion thereby causing damage to the measured objects. Thus, we developed a sensor for non-contact measurement of hardness based on the phase shift method and tested its viability by measuring the hardness of silicone gum. Although strong correlation between independently measured stiffness value of silicone gum and corresponding phase shift measurements was demonstrated ($R^2 = 0.9823$), the method of measurement was very difficult as it depends on the control of many outside factors.

Key Words: Phase shift method in transducer, non-contact

1. はじめに

現在、超音波診断装置は臓器の形状・大きさ・位置などを把握するために医療現場で用いられている代表的な医療機器の一つである。近年、臓器の形状・大きさ・位置だけではなく硬さ情報を加味することで良性・悪性腫瘍の診断などで大幅な医療の進展が見込めることから簡易な硬さ測定法が望まれている。一方生体組織スライス切片の力学特性を得るには一般に応力・歪による測定法を用いる。しかし応力・歪による測定法はスライス切片を加圧して測定するため超粘性特性を有する生体組織については本来の物性を失うことになる。そこで、本研究では硬さと相関のある音響インピーダンスを計測するために位相シフト法を用い、センサで生じる位相シフト量を調べ、硬さとの比較を行った。

2. 原理

硬さと相関のある音響インピーダンスを判別するためには被測定物からの反射波強度を精度良く検知する必要がある。Fig. 1、Fig. 2 に原理図を示す。Fig. 1 に示すように、送波用振動子に連続波交流電圧を印可したとすると、受波用振動子は送波用振動子から直接伝搬する音波 p_D と被測定物からの反射波 p_R により励震される。

ここで、音波 p_D により生じる励震力 f_D を

$$f_D = F_m \sin \omega t \quad (1)$$

反射波 p_R による励震力 f_R を

$$f_R = F_r \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

ω : 角周波数

θ : 位相遅れ

とすると、振動子を励震する励震力は f_D と f_R の和より

$$f_p + f_r = \sqrt{P_D^2 + 2P_D P_R + P_R^2} \sin(\omega t + \theta') \quad (3)$$

$$\theta' = \frac{P_R \sin \theta}{P_D + P_R \cos \theta} \quad (4)$$

と表すことができる。ここで受波用振動子を Fig. 2 のように機械定数であるバネ定数 k と粘性抵抗 r 、そして振動子の質量 m から構成されているとすると、output から出力される電気信号は、機械振動における速度応答 v に相当するので速度応答 v を求めると

$$v = \omega X_m \cos(\omega t - \phi) \quad (5)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{r\omega - (k - m\omega^2) \tan \theta}{(k - m\omega^2) + r \omega \tan \theta} \quad (6)$$

となる。次に振動子と被測定物間の間隔を変化させて θ の値を変え、位相 ϕ の計算を行った結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、反射波 p_R が大であれば、位相波形の振幅が大きく、小であれば振幅が小さい。本研究では、以上の基本原理を利用し反射波の強さを位相波形の振幅の大きさで調べた。

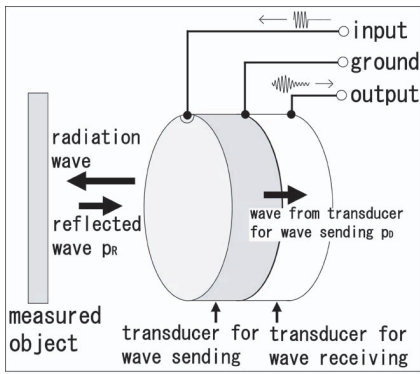


Fig.1 PZT transducer

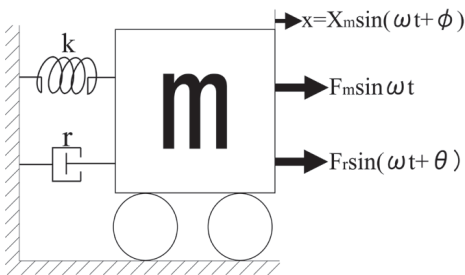


Fig.2 Mechanical oscillating model

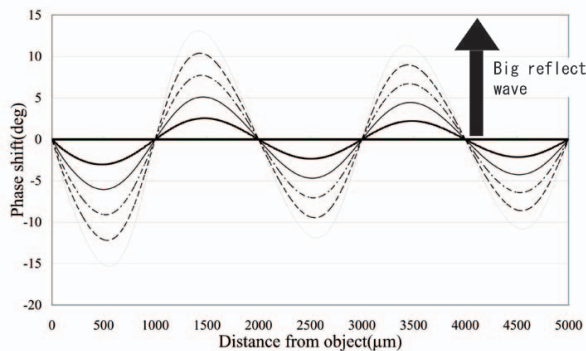


Fig.3 Distance from object vs. Phase shift based the theory.

3. センサ構成

Fig. 4 に使用したセンサの構成を示す。センサは直径 6mm、厚み 0.5mm の圧電セラミック振動子 (PZT) を送波用と受波用の為にそれぞれ 1 枚ずつ張り合わせ、直径 10mm、長さ 15mm のステンレスパイプ中でダンピングの為に用いたシリコンゴムで固定し、防水のために厚さ 0.1mm の薄膜ビニールを送受波面とセンサ背面に接着した。

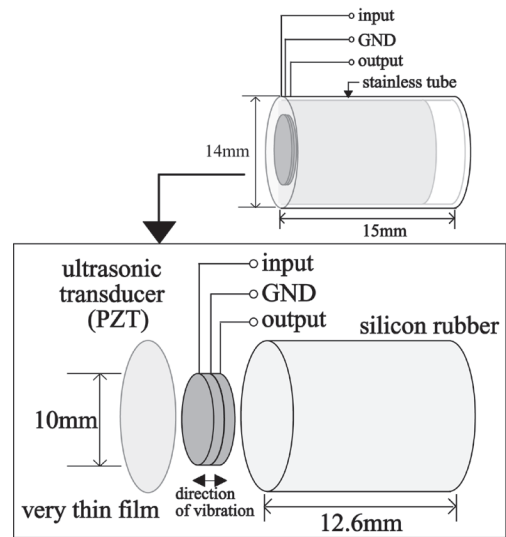


Fig.4 PZT transducer

4. 測定方法

(1) センサと被測定物間距離を変化させたときの位相特性

きの位相特性

本測定で使用した測定システムを Fig. 5 に示す。厚みの等しいシリコンゴムを測定する際にはセンサの利得ピーク周波数 375kHz のバースト信号により励振されたセンサを被測定物表面から 7000 μm まで 100 μm 毎に矢印の方向へ移動させ、100 μm 毎に測定した位相をコンピュータに取り込んで Fig. 3 のような位相特性を求めた。また出力信号の FFT 区間は 0~20 μm とした。

厚みの異なるシリコンゴムを測定する際には、センサの共振周波数 4.3MHz のバースト信号をセンサに印可し、被測定物表面から 300 μm まで 10 μm 毎に矢印の方向へ移動させ、同様の計測を行った。FFT 区間はシリコンゴム背面からの反射波が 5 μs 以降に返ってくるので 0~5 μs とし、シリコンゴム表面のみの反射による位相の変化量を測定した。

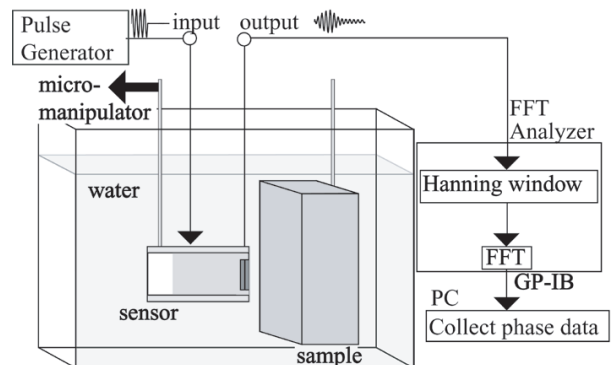


Fig.5 Measuring system to sense the Phase shift of PZT transducer and its analyzing system

(2) X-Y スキャニングによる位相特性

測定システムを Fig. 6 に示す。用いている使用器具はセンサと被測定物間の距離に対する位相測定の際と同様である。

測定の際にはセンサと被測定物間の距離を、距離に対する位相波形のマイナスのピークが現れる $1100\mu\text{m}$ 一定とし、センサをマイクロマンピュレータで $2\text{cm}\times 2\text{cm}$ の範囲を図の矢印の方向へ $400\mu\text{m}$ 毎に移動させ、 $400\mu\text{m}$ 毎に測定した位相をコンピュータに取り込み Fig. 11 に示す位相特性を計測した。測定範囲は異種シリコン埋没部分を中心に測定した。

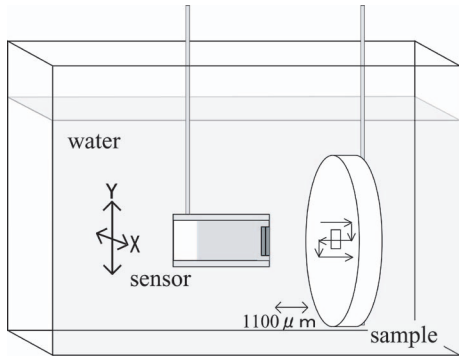


Fig.6 Measuring system using X-Y scanning method

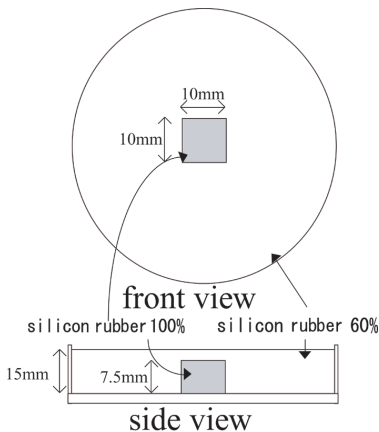


Fig.7 Cross section of Phantom made of silicon rubber

分かる。水中の音速が 1500m/s 、そして FFT 結果の位相スペクトルから 375kHz の周波数成分を測定結果 Fig. 8 にプロットしたとすると、センサと被測定物間では多重反射が起きていることにより半波長毎の距離で位相波形にピークが表れるはずである。よってセンサ放射面は被測定物表面に対して水平に面して測定できていることが結果より認められる。

次に位相波形の振幅を各シリコンゴムについて比較すると、シリコンゴム 60%、70%、80%、90%、100% の順に振幅の値が大きくなっている。位相波形の振幅と応力歪みより得られるスティフネスとの相関を調べた結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 より位相波形と振幅の間に相関が見られることからシリコンゴムの測定に関しては反射強度と硬さの間で相関が確認できたと考えられる。

厚みの等しいシリコンゴムの硬さ判別が可能であることが Fig. 8、Fig. 9 で示されたが、実際の測定では測定対象のシリコンゴムがすべて同じ厚みであることは希である。次に厚みの異なるシリコンゴムの場合についての結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 よりシリコンゴム 60% の位相の変化量は $5.2\sim 5.7(\text{degree})$ 、シリコンゴム 80% では $4.5\sim 4.8(\text{degree})$ 、シリコンゴム 100% では $2.9\sim 3.1(\text{degree})$ であった。よって厚みが異なってもシリコンゴム 60%、80%、100% の硬さが判別可能であることが確認された。

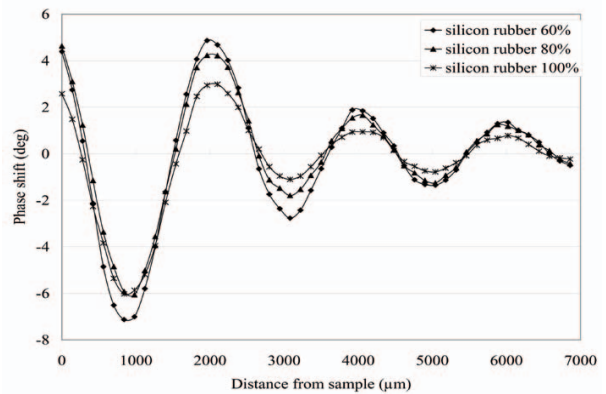


Fig.8 Distance from object vs. Phase shift

5. 測定結果

(1) センサと被測定物間距離を変化させたときの位相特性

きの位相特性

位相特性の結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 には図を見やすくするためにシリコンゴム 60%、80%、100% のみを取り上げた。図より、センサと被測定物間の距離が増加するごとに距離に対する位相波形の振幅が減少している。また、距離に対する位相波形のピーク間距離を測定すると図より $2000\mu\text{m}$ であることが

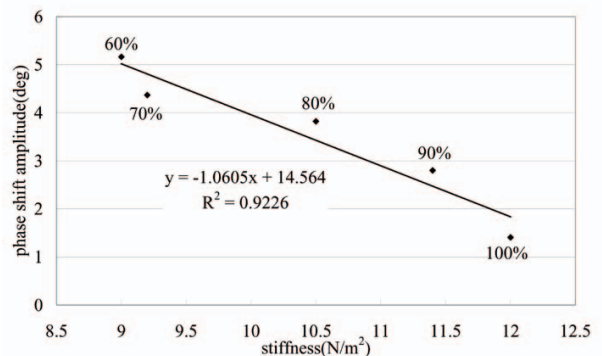


Fig.9 Phase shift vs. stiffness for silicone rubber

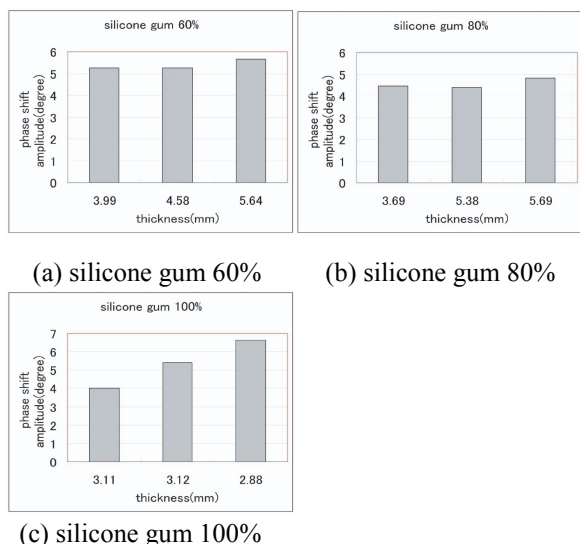


Fig.10 Phase shift vs. thickness for silicone gum

(2) 位相変化量を増大させるための信号処理法

本実験では位相特性が極めて重要であることから、精度良く信号処理を行うことが重要となる。Fig. 11 は計測結果の一例であるが gate delay が大である位相波形のほうが gate delay が小である位相波形に比して位相波形の振幅が大であることが分かる。交流電圧をセンサに印可したときは、gate delay を変化させてもバースト波を印可したときのように時間的な振動の減衰がないため、非常に位相の変化が小であった。よって反射強度が極めて小である場合には FFT する gate 範囲を gate delay によって調整して計測すると高感度な測定が期待できる。FFT をする範囲である gate length は $10 \mu s$ とした。

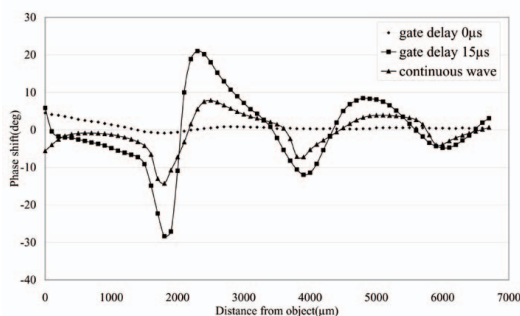


Fig.11 Distance from sample vs. phase shift

(3) X-Y スキャニングによる位相特性

位相変化量を増大させるために FFT の gate delay を $15 \mu s$ として測定した結果を Fig. 12 に示す。また異種シリコンゴムの境界面を示すために Fig. 13 に超音波診断装置の B モード画像を示す。Fig. 12 より、異種シリコンゴムの埋没した部分が黒く映し出

されており、硬さの異なるシリコンゴムを検出できていることが分かる。

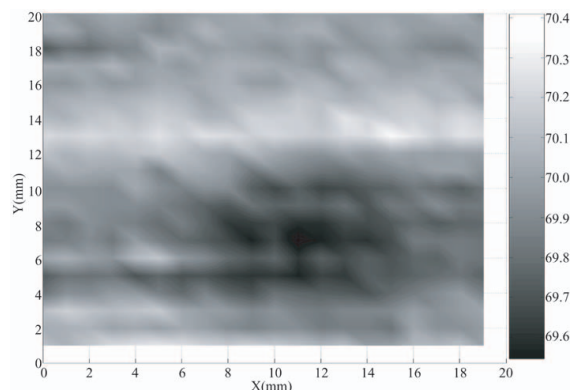


Fig.12 Phase shift of PZT transducer for X-Y scanning method

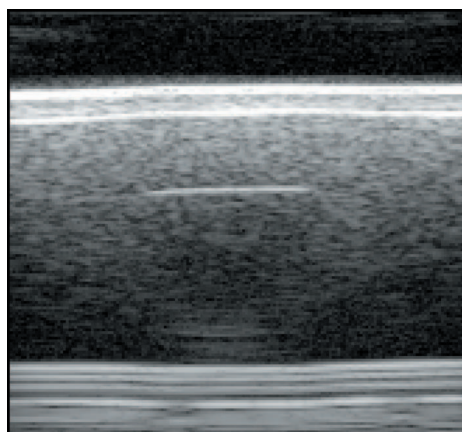


Fig.13 B mode picture of Phantom model, measured by Ultrasound Diagnosis instrument

6. 考察

シリコンゴムの硬さと位相波形の振幅値との間で高い相関が得られ、反射強度を精度良く検出できていることが分かった。また位相シフト法を用いた反射強度計測は、高感度な測定を期待できることも示された。しかし、現段階ではセンサと被測定物間の距離をマイクロン単位で調整しないと高感度な反射強度測定を望むことはできない。よって、センサと被測定物間の距離を常に一定とし、定量性の高い測定をする必要があると考えられる。

7. 参考文献

- 1) Omata and Terunuma, (1992)
Sensors and Actuators A. 35, 9-15
- 2) Y. Murayama et al,
Sensors and Actuators A. 109, 202-207