

修士学位論文要約（平成20年3月）

# 鍼灸治療による筋肉弛緩特性の評価を目指した 双方向からの超音波加振によるひずみの空間分布計測に関する研究

小田切善孝

指導教員：金井 浩，研究指導教員：長谷川英之

## A Study on Ultrasonic Measurement of Strain Distribution Inside Object Cyclically Compressed by Dual Acoustic Radiation Force for Evaluation of Acupuncture Therapy

Yoshitaka ODAGIRI

Supervisor: Hiroshi KANAI, Research adviser: Hideyuki HASEGAWA

Many studies have been conducted to measure mechanical properties of tissues by applying an ultrasound-induced acoustic radiation force. To assess mechanical properties, strain of an object must be generated. However, one radiation force is not effective because it also generates translational motion when the object is much harder than the surrounding medium. In this study, two cyclic radiation forces are synchronously applied to a muscle phantom from two opposite horizontal directions so that the object is cyclically compressed in the horizontal direction. By the horizontal compression, the object is vertically expanded due to the incompressibility. The resultant vertical displacement is measured using another ultrasound. Each of two ultrasonic transducers for actuation was driven by sums of two continuous sinusoidal signals at two slightly different frequencies (1 MHz and (1 M+5) Hz). The displacement of several micrometers in amplitude, which fluctuated at 5 Hz, was measured by the ultrasonic *phased tracking method*. Upward displacements at the surface were found when acoustic radiation forces increased. Such displacements correspond to the vertical expansion due to the horizontal compression.

### 1. はじめに

近年、超音波ビームから生じる音響放射圧を生体組織に加え、その応答を解析することにより非侵襲に組織特性の計測を試みる報告がなされている<sup>1)</sup>。これらの報告では、1つの音響放射圧を用いて加振を行っている。しかし、対象物周辺の媒質が対象物に比べて非常に軟らかい場合、上から1つの音響放射圧を加えても主に鉛直方向の位置変化が生じてしまい、対象物に変形を発生させることができず、対象物の機械的特性を評価することができない。そこで本研究グループでは、対象物内部にひずみを発生させる手法として、2つの音響放射圧を用いた<sup>2)</sup>。周波数  $f$  と  $f + \Delta f$  の連続正弦波を重ね合わせることで、周期的に変動する音響放射圧を発生させ、それを2つの異なる方向から同時に印加した。この場合、2つの超音波ビームが重なる領域より浅い領域では、対象物は水平方向に圧縮され、ひずみが発生する。本研究では、同じ超音波音圧でこれまでの研究より大きな変位振幅を得るために、加振用に連続波超音波を用いた。フィルタ処理により計測用の超音波パルスに混入した加振用の連続超音波 (1 MHz) を除去するために、中心周波数が 16 MHz の高周波超音波を変位計測に用いた。これらの実験システムを用いて、従来の間欠的加振より大きな振幅で安定した加振を行い、それにより生じる対象物内部の変位分布を高空間分解能に超音波計測することで、対

象物内部に発生するひずみについて検討を行った<sup>3)</sup>。

### 2. 原理・実験方法

密度  $\rho_1$ 、音速  $c_1$  の伝搬媒質に密度  $\rho_2$ 、音速  $c_2$ 、音圧反射率  $R$  の対象物を挿入し、周波数が  $\Delta f$  だけ異なる  $f$  と  $f + \Delta f$  の2つの連続波を重ね合わせた超音波ビームが対象物に垂直に入射する場合の音響放射圧は次式で表される。

$$P_R(t) = (1 + R^2) \frac{p_0^2}{\rho_1 c_1^2} (1 + \cos \Delta \omega t) \quad (1)$$

ここで、 $p_0$ 、 $\Delta \omega$  はそれぞれ音圧の振幅、差の角周波数  $\Delta \omega = 2\pi \Delta f$  を表す。以上より、周波数が異なる2つの連続正弦波を重ね合わせることで、超音波の焦点において、差の周波数  $\Delta f$  で対象物を加振することが可能となる。差の周波数で変動する2つの音響放射圧を対象物の両側から印加することで、対象物は水平方向に周期的に圧縮され、対象物の表面付近では上向き、内部では下向きの変位が発生すると考えられる。本計測では凹面超音波トランスジューサに、送信周波数が 1 MHz 及び 1 MHz+5 Hz の連続波正弦波を加算した信号を印加し、トランスジューサを駆動させて対象物に超音波を照射する。トランスジューサから対象物までの距離は 50 mm であり、これはトランスジューサ焦点距離に相当する。またトランスジューサの照射角度  $\phi$  を 25° に設定した。高空間分解能で変

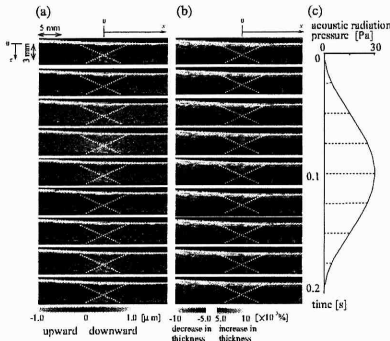


図 1: 焦点間距離が 8 mm の場合における (a) 対象物内変位分布. (b) 対象物内厚み変化分布. (c) 音響放射圧時間波形.

位分布を計測するために、中心周波数 16 MHz のリニアプローブを用いた超音波診断装置を使用した。また、筋肉を模擬した対象物として、直方体のシリコンゲル (横 45 mm × 奥行 45 mm × 厚さ 17 mm, 静的弾性率  $E_s$ : 6.3 kPa) を用いた。

### 3. 実験結果

図 1 に 2 つの加振用超音波の焦点間距離が 8 mm の場合の音響放射圧 1 周期における各時刻での変位分布, 厚み変化分布を示す。位相差トラッキング法<sup>4)</sup>を適用することで変位分布の計測を行い、深さ幅 1.5 mm 毎の変位分布から、最小二乗法を用いて変位勾配を求めることで厚み変化 (ひずみ) 分布を求めている。図 1(c) の破線はそれぞれの分布が計測された時のタイミングを示している。図 1(a) と図 1(b) に、それぞれ下部に示されたカラーコードを用いて変位分布, ストレイン分布を B モード像に重ねて表示した結果を示す。

図 1(a) では、2 つの音響放射圧が重なる領域 (深さ 1.8 mm 付近) において他の領域に比べ大きな変位が生じている。2 つの音響放射圧に挟まれる領域では、音響放射圧の水平方向の成分により水平方向に圧縮されていると考えられるが、音響放射圧は鉛直下向き成分も持つため、全体としては音響放射圧の増加に伴い、下向きの変位が生じる結果となった。図 1(b) より、音響放射圧が増加すると 2 つの音響放射圧で挟まれる領域では、厚みが増していることが分かる。この結果は、対象物が水平方向に圧縮され、対象物の非圧縮性により鉛直方向に伸張したことに加えて、ビームが重なる領域での音響放射圧の合力が空間的に不均一であるために生じたものである。

### 4. *in vitro* 実験

ブタの肝臓を対象物として用いて *in vitro* 実験を行い、本研究が生体組織に適用可能であるか検討した。焦点間距離を 8 mm に設定し、ブタ肝臓がシリコンゴムに比べ軟らかいことを考慮して、ブタ肝臓を用いた実験では、加振のために加える音響放射圧を、シリコンゴムの場合の 1/5 程度の強さ (生体安全基準内) で照射した。

図 2 にそれぞれ、(a) 対象物 B モード像および音響放射圧 1 周期における (b) 変位分布と (c) ス

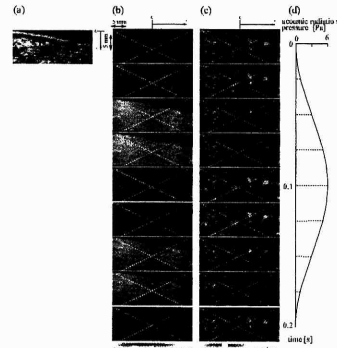


図 2: 焦点間距離が 8 mm の場合における (a) ブタ肝臓内変位分布. (b) ブタ肝臓内厚み変化分布. (c) 音響放射圧時間波形.

トレインを下部に示したカラーコードを用いて B モード像に重ねた結果を示す。図 2(d) にはそれぞれの分布が計測された時のタイミングを示している。図 2(b) より、小さい強度で音響放射圧を加えたにもかかわらず、シリコンゴムよりも大きな変位が生じている。また、ブタ肝臓がシリコンゴムに比べ非常に軟らかいため、音響放射圧が加わる領域から外側に向かい、横波の伝搬の様子が確認された。横波伝搬速度、 $c_s$  を計算すると 1.3 m/s であった。肝臓を密度  $\rho$  を  $1.0 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> の非圧縮性の媒質と仮定すると、ずり弾性率  $G$  は以下の式で表すことができる。

$$G = \rho c_s^2 \quad (2)$$

図 2 の計測結果から算出したずり弾性率  $G$  は 1.7 kPa であり、これは文献値<sup>5)</sup>と類似した結果となる。この結果より横波の伝搬速度から弾性特性の評価を行える可能性が示される。

図 2(a) の赤枠で囲まれた領域では対象物内に血管が走行しているのが確認できる。図 2(b) より、肝臓内の血管の上部で大きな厚み変化が生じていることが分かる。これは血管が肝臓に比べ非常に硬いため生じたと考えられる。

### 5. まとめ

本手法を用いることで、筋肉、肝臓、乳房のような、変形させるためには外力を必要とする生体軟組織の弾性特性を定量的に評価できる可能性を示した。

### 文献

- 1) M. Fatemi, L. E. Wold, A. Alizod and J. F. Greenleaf: IEEE Trans. Med. Imaging **21**, 1 (2002).
- 2) H. Hasegawa, M. Takahashi, Y. Nishio and H. Kanai: Jpn. J. Appl. Phys. **45**, 4706 (2006).
- 3) Y. Odagiri, H. Hasegawa, and H. Kanai: Jpn. J. Appl. Phys. **47**, (in press).
- 4) H. Kanai, M. Sato, Y. Koiwa, and N. Chubachi: IEEE Trans UFFC **44**, 791 (1996).
- 5) E. J. Chen, J. Novakofski, W. K. Jenkins and W. D. O'Brien Jr: IEEE Trans. UFFC. **43**, 191 (1996).