

修士学位論文要約（平成17年3月）

位相制御された2つの音響放射圧による対象物内部ひずみ発生に関する研究
西尾吉史, 長谷川英之, 金井 浩

Study on Generation of Strain Inside Object Using
Two Phase-Controlled Acoustic Radiation Forces
Yoshifumi NISHIO, Hideyuki HASEGAWA and Hiroshi KANAI

Recently, there are some reports on assessment of the mechanical properties of tissue by measuring its minute displacement induced by acoustic radiation force which is generated by two ultrasounds at slightly different frequencies. However, when an object exists in the soft tissue, these methods may generate only the change in position of the object, and the strain of the object is hardly generated. Therefore, in such cases, the mechanical properties of the object can not be measured. Even in such cases, we aim to generate the regional strain inside the object by using two phase-controlled acoustic radiation forces. The generation of the strain inside the object was realized using two cyclic acoustic radiation forces, which are radiated at two different points in the object from the opposite directions. In basic experiments, the minute strain of several micrometers generated in a gel phantom was measured using a high speed video camera and the ultrasonic *phased tracking method*.

1. はじめに

本研究グループでは、対象物の数ミクロンの微小な変位と厚み変化を位相差トラッキング法 [1] により超音波計測している。この手法を用いて、拍動に伴う数十ミクロンの動脈壁厚変化を超音波計測することにより血管壁の弾性率を、非侵襲的に計測している。しかし、乳房や肝臓といった動脈以外の部位において非侵襲的に弾性率の評価をするためには応力を加えることが必要である。そこで、音響放射圧を応力として対象物に適用し、対象物のひずみを計測することにより応力のない部位での弾性率の評価ができる可能性がある。

従来から行われてきた音響放射圧による超音波加振では、図1(a)のように1つの音響放射圧を対象物に照射する。このとき、対象物の弾性率が周辺組織(媒質)の弾性率に比べ非常に大きい場合、つまり、対象物の周辺組織が軟らかい場合では、1つの音響放射圧だけでは対象物に上下方向の位置変化(並進運動)が生じるだけであり、対象物の変形(ひずみ)は発生せず、機械的特性を評価できない。

そこで、本研究では図1(b)に示すように対象物の両側から同位相で変動する2つの音響放射圧を2台の加振用トランスジューサから照射する。それぞれの音響放射圧により、2つの照射領域は同時刻において反対方向に変位するため、対象物内部に局所的な変形(ひずみ)を生じさせることができる。

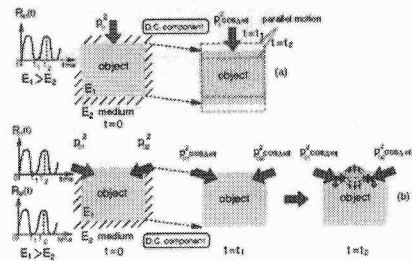


図1: (a) 1つの音響放射圧による対象物の並進運動模式図(従来法). (b) 2つの音響放射圧を用いた対象物ひずみ発生模式図(本提案法).

2. 2つの音響放射圧の位相制御の方法

(1) 式は対象物の境界面上にはたらく音響放射圧を示す [2].

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

ここで p_0 , θ_i , および $\Delta\omega$ はそれぞれ、音圧 $p(t)$ の振幅値, 2つの音響放射圧の位相差, 差の角周波数 ($\Delta\omega = 2\pi\Delta f$) である。同位相で変動する音響放射圧を2つ用いるために、式(1)において $\theta_1 = \theta_2 = 0$ とし、対象物に適用する音響放射圧 $P_{R1}(t)$, $P_{R2}(t)$ は(2), (3) 式ようになる。

$$P_{R1}(t) = (1 + R^2) \frac{p_0^2}{\rho_1 c_1^2} \cos(\Delta\omega t) \quad (2)$$

$$P_{R2}(t) = (1 + R^2) \frac{p_0^2}{\rho_1 c_1^2} \cos(\Delta\omega t) \quad (3)$$

3. ハイスピードカメラによる振動撮影結果

超音波加振の際に、超音波の焦点や照射角度等の影響により対象物内には複雑な振動が生じていることが推測される。そこで、対象物内に実際に生じている振動を明らかにすることを目的として、ハイスピードカメラにより対象物振動の様子を撮影した。図2にそれぞれの加振用超音波(1 MHz)の焦点位置、ゲルのサイズを示す。図2の点 a, b, c, d における振動撮影結果を図3に示す。加振の周波数は $\Delta f = 10$ Hz とした。撮影終了時刻から 0.01 秒間隔で 10 コマ分(1 周期分) さかのぼり表示した。a 点では右斜め下に変動している。b 点では音響放射圧が強くなるにつれて上に変動(上下に変動)していることがわかる。c 点では左斜め下に変動している。d 点ではほとんど変動していない。

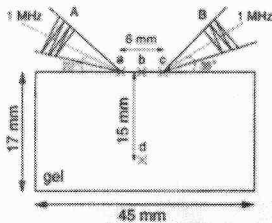


図 2: 対象物の被撮影領域。

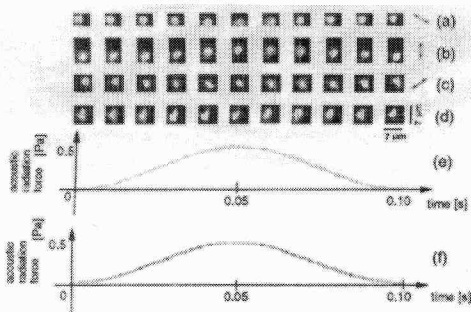


図 3: 対象物振動撮影結果. (a) a 点における撮影結果. (b) b 点における撮影結果. (c) c 点における撮影結果. (d) d 点における撮影結果. (e) トランスジューサ A から照射した音響放射圧. (f) トランスジューサ B から照射した音響放射圧.

4. 超音波による対象物深さ方向変位分布計測結果

図4(a)~(f)に、対象物表面から超音波ビームに沿って深さごとの変位を計測した結果を示す。図4(a)はトランスジューサAから照射される音響放射圧波形、図4(b)はトランスジューサBから照射される音響放射圧波形である。図4(c)は対象物表面、図4(d)は表面から1.0 mmの深さ、図4(e)は表面から1.1 mmの深さ、図4(f)は表面から3.8 mmの深さにおける変位計測結果である。図4(a), (b)から2つのトランスジューサによる音響放射圧が同位相

で加わり、区間 A の中心時刻で最大値をとっていることが分かる。この区間において、対象物表面では上向きに変位していることが分かる。また、1.1 mm 付近の深さでは下向きに変位していることが分かる。つまり、表面から 1.1 mm の深さまでの領域は音響放射圧が加わるにより厚くなっていることが確認できた。

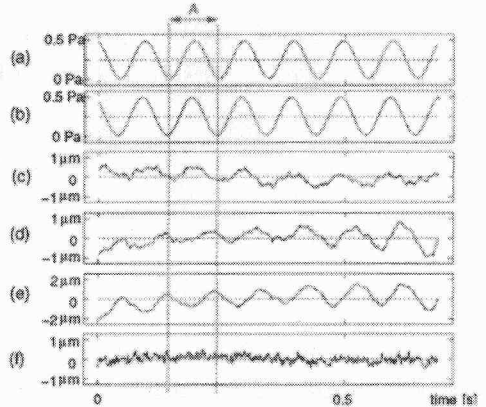


図 4: 対象物深さ方向における変位計測結果 (差の周波数 $\Delta f(t) = 10$ Hz). (a) 音響放射圧 $P_{R1}(t)$ の時間波形. (b) 音響放射圧 $P_{R2}(t)$ の時間波形. (c) 対象物表面における変位計測結果. (d) 深さ 1.0 mm での変位計測結果. (e) 深さ 1.1 mm での変位計測結果. (f) 深さ 3.8 mm での変位計測結果.

5. 結論

本論文では、対象物の弾性率が周辺組織(媒質)の弾性率に比べ非常に大きい場合を条件としている。この条件下において、従来法である1つの音響放射圧では対象物にひずみを発生させることができない。そこで、2つの音響放射圧を用いることでひずみを発生させる方法を提案し、基礎実験から検討した。

実際に生じている複雑な対象物振動を明らかにするためにハイスピードカメラおよび超音波を用いて対象物振動計測を行った。得られた結果から本提案法を用いることにより、対象物の弾性率が周辺組織(媒質)の弾性率に比べ非常に大きい場合でも、2つの音響放射圧を用いることにより非侵襲的に対象物にひずみを発生させられることができることを示した。

文献

[1] H. Kanai, M. Sato, Y. Koiwa, and N. Chubachi, "Transcutaneous Measurement and Spectrum Analysis of Heart Wall Vibrations," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 43, pp. 791-810, 1996.
 [2] 高木堅志郎 他, 超音波便覧, 丸善, pp. 42-43, 196-198, 426-427 (1999).