

修士学位論文要約 (平成24年3月)

## 超音波加振による生体軟組織のずり波伝播計測に関する研究

山口 潤

指導教員：金井 浩

### A study on measurement of shear wave in biological soft tissue generated by ultrasound actuation using acoustic radiation force

Jun YAMAGUCHI

Supervisor: Hiroshi KANAI

It is important to diagnose conditions of muscle and tendon. However, quantitative and noninvasive diagnosis methods have not yet been established. In the previous study, we developed an evaluation method, which used dual ultrasonic acoustic radiation pressure irradiated from different directions. This method was shown to be able to deform an object effectively. In the present study, in an *in vitro* experiment using chicken breast muscle shear wave was generated in the muscle by the actuation using ultrasonic acoustic radiation pressure and it was measured. Furthermore, shear modulus was estimated using velocity of shear wave. Shear moduli along fiber and across fiber,  $G_{\parallel}$  and  $G_{\perp}$ , were  $G_{\parallel} = 14$  kPa and  $G_{\perp} = 0.10$  kPa, respectively. These results show the possibility of the proposed method for the noninvasive and quantitative assessment of elasticity in biological soft tissue.

#### 1. はじめに

筋肉や腱をはじめとする生体軟組織に関する非侵襲的かつ定量的な診断手法はいまだ十分に確立されていないのが現状である。

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的に組織特性を計測する試みが Fatemi と Greenleaf から報告されている [1, 2]。本研究の目的は、非侵襲的な生体軟組織の弾性特性評価であり、弾性特性を評価するためには、組織に変形を発生させる必要がある。そこで、2つの音響放射圧を異なる方向から照射し、対象物を加振することで、効率的に軟組織内部に変位・歪みに伴う変形を発生させる。さらに、加振超音波と異なる超音波を用いて組織内部の変形により発生する歪みとその伝播(ずり波伝播)を計測してずり波伝播速度を算出し、それを用いてずり弾性率を推定する。

#### 2. 超音波加振およびずり波伝播速度を用いた対象物内部のずり弾性率推定の原理

定常な超音波ビームが媒質を伝播するとき、その進路上にある媒質にビームの進行方向に向かって働く力を音響放射力という [3]。また、単位面積あたりに働く音響放射力を音響放射圧という。対象物に上方から単一の音響放射圧を加えた場合、主に上下方向の位置変化が生じてしまい、効率的に歪み(組織変形)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の長谷川ら

は、効率的に対象物内部に歪みを発生させるために2つの音響放射圧を用いた [4]。周波数  $f_0$  と  $(f_0 + \Delta f)$  の連続波正弦波を重ね合わせることで、差の周波数  $\Delta f$  で周期的に変動する音響放射圧を発生させ、それらを図1のように2つの異なる方向から同時に印加する。対象物内部で超音波トランスジューサからの距離方向に減衰係数  $\alpha$  で伝播し、差の周波数  $\Delta f$  で変動する音響放射圧  $P_R(z, t)$  は次式で与えられる [5]。

$$P_R(z, t) \cong \frac{(2\alpha)p_0^2}{2\rho c^2} e^{-2\alpha z} (1 + \cos 2\pi\Delta f t) \quad (1)$$

ここで、 $p_0$ ,  $\rho$ ,  $c$  はそれぞれ送信波音圧振幅、対象物の密度、音速を表す。 $\Delta f$  で変動する2つの音響放射圧に挟まれる領域は水平( $x$ )方向に圧縮されるが、対象物が生体軟組織の場合、その非圧縮性により垂直( $z$ )方向に伸展する。本研究では、中心周波数  $f_0 = 1$  MHz、加振周波数  $\Delta f = 5$  Hz で超音波加振実験を行い、対象物の応答を高空間分解能に計測する手法として、位相差トラッキング法を適用して変位の計測を行う [6, 7]。

図1のように、超音波加振により生じる  $z$  方向の振動は、振動方向とは垂直な方向に伝播する(ずり波)。対象物内部のずり弾性率  $G$  は、対象物のずり波伝播速度  $c_s$  と密度  $\rho$  を用いて次式で与えられる。

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

$\rho = 1.0 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> とし、 $c_s$  を計測することで、(2)式よりずり弾性率  $G$  [Pa] を推定することができる。

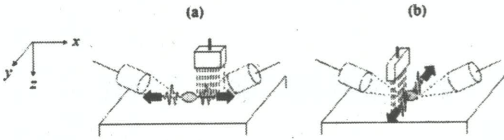


図1 超音波加振により発生するずり波の伝播の計測の模式図。

3. トリささみ肉を用いた弾性異方性計測 *in vitro* 実験

図2に計測用リニアアレイプローブの中心(ビーム番号63)で対象物表面から深さ2 mmの位置における、対象物の回転角 $\theta$ に対する超音波加振によって生じた(a)瞬時変位および(b)歪み分布計測結果を示す。筋線維方向と加振方向が平行である場合( $\theta = 0^\circ, 180^\circ, 360^\circ$ )、瞬時変位・歪みともに極大になり、筋線維方向と加振方向が垂直( $\theta = 90^\circ, 270^\circ$ )付近で極小になっていることが観察され、筋線維組織が異方性弾性体であることが示唆される。

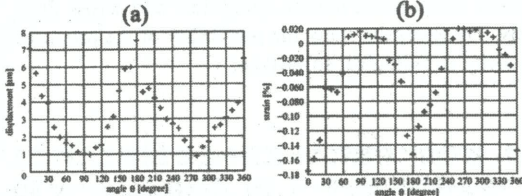


図2 超音波加振によって生じたトリささみ肉の回転角 $\theta$ に対する(a)瞬時変位および(b)歪み分布。

4. トリ胸肉を用いたずり弾性率推定のための *in vitro* 実験

図3に、ビーム番号10~6までの深さ4 mmの位置における、(a)筋線維方向( $\parallel$ )および(b)筋線維に垂直な方向( $\perp$ )の(1)時間変位波形と(2)5 Hzにおける位相スペクトルを示す。図2(a-2), 2(b-2)中の点曲線および直線は、各ビームの変位の5 Hzにおける位相スペクトルと最小二乗法により推定した位相スペクトルの近似直線にそれぞれ対応している。この時、あるビームと*i*番だけ離れた別のビームの変位波形間の $\Delta f = 5$  Hzにおける位相差を $\Delta\theta_i$ 、時間差を $\Delta t_i$ と置くと、ずり波の伝播速度 $c_s$ は次式で与えられる。

$$c_s = \frac{2\pi\Delta f}{\frac{\Delta\theta_i}{\Delta x \cdot i}} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta x$ はビーム間隔(2.75 mm)である。(3)式より、加振周波数 $\Delta f$ とビーム間隔 $\Delta x$ は実験条件により設定される(既知)ことから、位相差 $\Delta\theta$ を計測することで伝播速度 $c_s$ が求められる。(3)式の分母は図3で求めた近似曲線の傾きに対応しており、筋線維方向とそれに垂直な方向での傾きの値はそれぞれ 0.023

rad/mm, 0.27 rad/mmである。これらを用いて(3)式から伝播速度 $c_s$ を算出し、(2)式よりずり弾性率 $G$ を推定した結果を表1に示す。表1より、各方向の伝播速度およびずり弾性率は $c_{s\parallel} = 3.7$  m/s,  $G_{\parallel} = 14$  kPa,  $c_{s\perp} = 0.32$  m/s,  $G_{\perp} = 0.10$  kPaと文献値と同様の結果となっている[8]。また、 $c_{s\parallel} > c_{s\perp}$ ,  $G_{s\parallel} > G_{s\perp}$ という傾向も、文献と同様に示すことができた[9]。

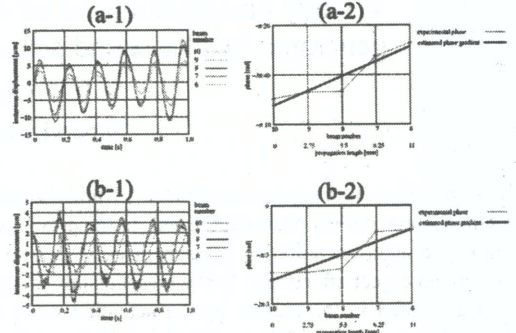


図3 ビーム番号10~6において計測された(1)変位波形および(2)5 Hzにおける位相スペクトル。(a)筋線維方向。(b)筋線維と垂直方向。

表1 トリ胸肉内部のずり波伝播速度 $c_s$ およびずり弾性率 $G$ の推定結果。

	along fiber ( $\parallel$ )	across fiber ( $\perp$ )
$c_s$ [m/s]	3.7	0.32
$G$ [kPa]	14	0.10

5. まとめ

本論文では、点集束トランスジューサを用いた超音波加振により、筋組織内部の弾性異方性の計測およびずり波伝播速度を用いたずり弾性率推定を行い、本手法による筋組織内部の非侵襲かつ定量的な弾性特性評価の可能性を示した。

文献

- 1) M. Fatemi, et al., *IEEE Trans. Med. Imag.*, **21** (2002) 1-8.
- 2) M. Fatemi and J. F. Greenleaf, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **96** (1999) 6603-6608.
- 3) G. R. Torr, *Am. J. Phys.*, **52**, (1984) 402-408.
- 4) H. Hasegawa, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 4706-4711.
- 5) A. J. Livett, et al., *J. Sound. Vib.*, **76** (1981) 1-11.
- 6) H. Kanai, et al., *IEEE Trans. UFFC*, **43** (1996), 791-810.
- 7) H. Kanai, et al., *IEEE Trans. UFFC*, **44** (1997) 752-768.
- 8) A. P. Sarvazyan, et al., *Acoust. Imag.*, **21** (1995) 223-240.
- 9) J. L. Gennisson, et al., *Ultrasound. Med. Biol.*, **36** (2010) 789-801.