

修士学位論文要約（平成21年 3月）

超音波メスによる軟組織の粘弾性特性推定に関する研究

鈴木 直貴

指導教員：金井 浩， 研究指導教員：長谷川英之

Measurement of Soft Tissue Viscoelasticity by Ultrasound Surgical Knife

Naoki SUZUKI

Supervisor: Hiroshi KANAI, Research Advisor: Hideyuki HASEGAWA

Estimation of heat generation is important for efficient and safe use of an ultrasonic surgical knife to suppress undesirable damage to normal tissue. For this purpose, it is necessary to measure viscoelastic constants of the tissue prior to application of a knife. In this study, viscoelastic constants were estimated by measuring admittance characteristics of the knife with and without being contacted with an object. Measured resistance r and capacitance C of the equivalent electric circuit correspond to elastic modulus G and inverse of viscosity coefficient η of the object, respectively. The estimated elastic modulus of soft tissue (98 kPa) was in good agreement with that reported in literature (100 kPa).

1. はじめに

近年、超音波診断技術が非常に大きな発展を遂げるとともに、診断で用いる超音波よりも数桁以上強度が大きい強力超音波による超音波治療応用技術が精力的に研究されている [1]。本報告では、超音波治療応用技術の1つである超音波メスに着目した [2]。超音波メスは、20~100 kHz 程度の周波数で長軸方向に刃を振動させることで軟組織の切断および止血を同時に行う医療機器である。凝固の際に発生する煙が比較的少ないという利点を有することから、内視鏡手術での有効性が報告されている [3]。超音波メスが軟組織に与える影響として、機械的振動による切開効果と超音波吸収、キャビテーション、組織の応力-ひずみ特性に関する熱的効果がある。熱的効果については組織の応力-ひずみ特性による発熱が支配的であるということが報告されており、組織の粘弾性特性を測定することによって組織の発熱を推定することが可能になると考えられる。

そこで本研究の目的は超音波メスを軟組織に接触させた際の組織の粘弾性特性を測定し、発熱量と凝固範囲を見積もることである。

2. 原理

生体組織は、一般的に粘性と弾性を持ち合わせる粘弾性体であるため、本報告では軟組織の力学モデルとして図 1(a) の様なモデルを仮定する。プロトタイプ超音波メスは単振動で駆動されるため、応力 $\sigma(t)$ も (1) 式の単振動になると考える。

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin \omega t \quad (1)$$

ここで、 σ_0 は応力の振幅である。この力学モデルで

表現できる粘弾性体の応力 $\sigma(t)$ およびひずみ $\gamma(t)$ は以下の式を満たす。

$$\sigma(t) = m \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + \eta \frac{d\gamma}{dt} + G\gamma \quad (2)$$

$$\gamma(t) = \frac{\sigma_0}{\sqrt{(G - m\omega^2)^2 + (\omega\eta)^2}} \sin(\omega t - \theta) \\ \theta = \tan^{-1} \frac{\omega\eta}{G - m\omega^2} \quad (3)$$

ここで、 G 、 η と m は、それぞれ弾性率、粘性係数および等価質量である。ひずみ γ は応力に対して位相遅れ θ を生じるため、図 1(b) のようなヒステリシス曲線を描く。このヒステリシス曲線で囲まれる面積 S に相当して消散されるエネルギーが、超音波メスによって軟組織を加振した際に発生する熱量 W に対応する。粘弾性特性を推定することにより、ヒステリシス曲線の面積を推定することができ、発熱量を見積もることが可能となると考えられる。

$$W = S = \oint \sigma d\gamma \\ = \pi \sigma_0 \gamma_0 \sin \theta \quad (4)$$

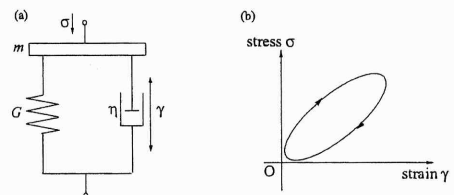


図 1: (a) 力学モデル. (b) 応力-ひずみ特性.

3. アドミタンス測定方法

本研究では軟組織の粘弾性特性を推定する際に、軟組織の力学的モデルと電気的なモデルとを対応させて考える。応力 σ と電圧 $V(t)$ 、ひずみ速度($=d\gamma/dt$)と電流 $i(t)$ とを対応させて考えることができる。その電気的モデルは式(5)で表される。

$$V(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt. \quad (5)$$

インダクタンス L 、抵抗 R 、キャパシタンス C と等価質量 m 、粘性率 η 、弾性率 G の逆数がそれぞれ対応する。組織のアドミタンス $Y(\omega)$ 特性を測定する際に、本研究室で作成した40 kHz用のプロトタイプ型超音波メスを用いて、実験を行う。HP社製ネットワークアナライザ HP 8751Aを用いて、40 kHzプロトタイプ型超音波メスと試料を軽く接触させた時と非接触時のアドミタンス $Y(\omega)$ の測定を行った。また押し圧を1 kPaから30 kPaまで変化させて測定を行った。試料として軟組織(鶏胸肉)および弾性率 G が既知であるシリコンゴム(4.88×10^4 Pa)を用いて実験を行った。軟組織(鶏胸肉)とシリコンゴムの大きさはそれぞれ7 cm × 5 cm × 0.5 cmと7 cm × 10 cm × 1 cmである。

4. アドミタンス測定結果

試料に接触させた際のアドミタンスサークルを図2(a)に示す。軟組織の負荷抵抗 ΔR 、負荷キャパシタンス ΔC および負荷インダクタンス ΔL の値はそれぞれ17.4 Ω 、3.1 nF、3.8 mHとなり、シリコンゴムの負荷抵抗 ΔR 、負荷キャパシタンス ΔC および負荷インダクタンス ΔL はそれぞれ44.1 Ω 、6.5 nF、2.8 mHであった。軟組織のキャパシタンスとシリコンゴムのキャパシタンスを比べると2倍程、異なっていることが分かった。キャパシタンスの逆数が軟組織の弾性率 G に対応し、シリコンゴムの弾性率は 4.88×10^4 Paであるので、軟組織の弾性率はシリコンゴムの弾性率の2倍の 9.8×10^4 Paと推定された。この値は文献値 1.0×10^5 Pa [4]と非常に近い値であった。

押し圧を1 kPaから30 kPaまで変化させたときのアドミタンス特性を図2(b)に示す。図2(c)のように、押し圧を大きくするにつれて、粘性を表す ΔR の値が大きくなっていくことが分かった。同様に弾性率も図2(d)のように増加した。ヒステリシスループの傾きと面積は弾性率と粘性率によって決まることから、押し圧によってヒステリシス曲線の傾きや面積が変化すると考えられる。

5. 結論

本報告ではネットワークアナライザを用いて超音波メスの電気端から、超音波メス先端に接する軟組織の等価電気抵抗、インダクタンス、キャパシタンスの測定を行い、粘性率、等価質量、弾性率との対

応づけを行った。超音波メスが軟組織に与える応力-ひずみ特性の予測を行うことができ、超音波メスが軟組織に与える発熱量の計算などに役立つと考えられる。

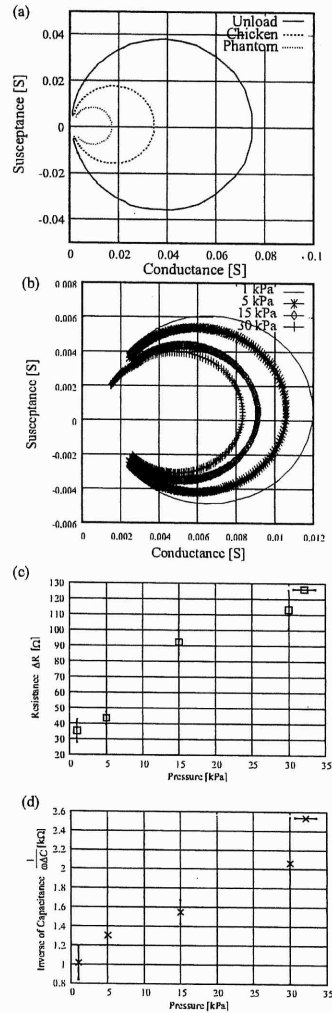


図2: (a) 無負荷時と負荷接触時のアドミタンスサークル。 (b) 押し圧を加えたときのアドミタンスサークル。 (c) 押し圧と抵抗値。 (d) 押し圧とキャパシタンス。

文献

- [1] X. Xi, and P. Zhong: *Ultrasound Med. Biol.*, **26**, 3 (2000).
- [2] U. Tsuda, E. Mori and S. Ueba: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **22**, 105 (1983).
- [3] K. Kawahara, Y. Yamashita and T. Shirakusa: *JSES.*, **2**, 3 (1997).
- [4] M. Saitoh: "Biological Engineering" Corona Publishing Co., Ltd., Tokyo, p. 17 (1985).