

修士学位論文要約 (平成19年 3月)

超音波メスによる軟組織切離における周波数依存性に関する研究 海老名孝介, 長谷川英之, 金井 浩

Study on Frequency Characteristics in Cutting of Soft Tissue Using Ultrasonic Surgical Knife

Kosuke EBINA, Hideyuki HASEGAWA and Hiroshi KANAI

In this paper, the operation frequency of a surgical knife is focused. Prototype ultrasonic knives which are operated at 24.3 kHz, 44.3 kHz, and 71.9 kHz were constructed. Differences of effects on soft tissue due to the operation frequency was investigated using these knives. Frequency characteristics were measured using two parameters, namely, *coagulation ratio* and *coagulated depth*. For the same vibration velocity, the distribution of the coagulated tissue at a higher frequency was shallower and narrower around the center of the tip than that at a lower frequency. For the same vibration amplitude, coagulated depth was similar for these frequencies. Furthermore, the dependence of tissue coagulation on the vibration velocity, pressure load, contact of the tip with tissue, and direction of vibration were investigated. From these investigations, it was found that the mechanical effect is a dominant factor in tissue coagulation rather than ultrasound absorption.

1. はじめに

本論文では、強力超音波による超音波治療応用技術の1つである超音波メスに注目する。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り、他の機械的メスと比較して、比較的低温で蛋白質変性による止血を行うことが可能であるが故に、適用中の患者へのダメージが少ないという大きな利点を持ち、外科手術に広く適用されてきた [1]。しかし、「20~100 kHz程度の超音波振動が軟組織にどのような生物学的作用を与えるのか」という根本の原理を詳細に調査した例は少ない [2]。特に、刃先において発生する強力な縦振動が組織に与える影響は、物理的振動およびキャビテーションといった現象がある程度理解されているだけで、詳細は明らかになっていない [2]。したがって、刃の先端部における超音波振動が軟組織に与える影響の調査は、超音波メスの安全性の向上や高効率化を目指す上で必要不可欠であると考えられる。本研究では、超音波メスの振動周波数に着目し、周波数の違いによる蛋白質変性の変化から、超音波メスの振動が組織に与える作用を検討する [3]。

2. プロトタイプ超音波メス

本研究では、20 kHz, 39 kHz および 60 kHz のボルト締めランジュバン型振動子 (本多電子製, HEC-3020P2B, HEC-3039P4B, HEC-1560P4B) を用いてプロトタイプ超音波メスを作製した。概略図を図1に示す。振動増幅部は、2段接続段つきホーンで、振動の節となる部分に固定用フランジを設けた。ホーン

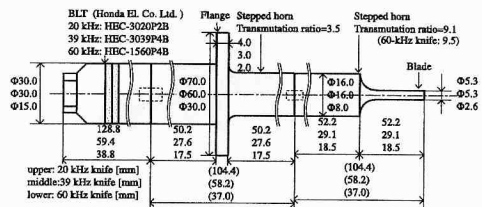


図1: 超音波メス概略図。

3. 実験方法

図2に組織変性試験の実験システムを示す。メスはフランジ部で固定し、レーザー・ドプラ速度計を振動速度測定に用いた。本研究では、組織変性を定量的に評価するために、2つのパラメータを用いた。第1は凝固比で、メスの刃先の面積と組織変性面積の比で定義され、組織変性表面における変性を評価する。第2は凝固深さで、深さ方向 (z 方向) の評価に用いる。本研究では、振動速度、振幅、押圧および振動方向の変化による組織変性の変化を検討する。

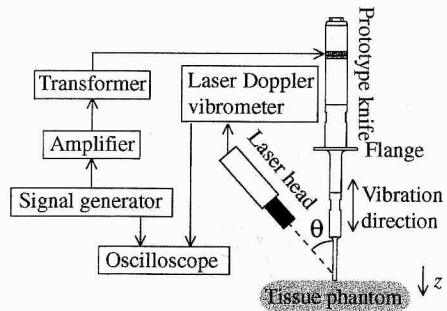


図2: 実験システム。

4. 組織変性試験結果

図 3(a), (b) は、振動速度を 2 m/s に固定し、10 秒間駆動した場合における各周波数の凝固比および凝固深さの測定結果である。図 3(a) より、表面の組織変性は周波数が高いほど大きくなった。一方、図 3(b) より、深さ方向の変性は、周波数が低いほど深くなった。図 3(c), (d) は、振動振幅を 4 μm に固定し、10 秒間駆動した場合における測定結果である。図 3(d) より、深さ方向の組織変性が周波数によらずほぼ等しくなったことから、深さ方向の組織変性は振動振幅に関係すると考えられる。また、図 3(c) より、表面における組織変性が高周波になるほど大きくなった。これは振幅が等しい条件において、周波数が高いほど、振動速度が大きくなった結果だと考えられる。図 (a) から (d) では、組織に刃先を接触させた状態において駆動して組織を変性させたが、刃先に押圧を加えた場合における組織変性の変化を示した結果が、図 3(e), (f) である。図 3(e), (f) より、押圧が大きくなるにつれて、周波数によらず組織変性領域が大きくなった。これは、組織が押圧によって圧縮されることで、組織の粘弾性係数が変化した結果と考えられる。

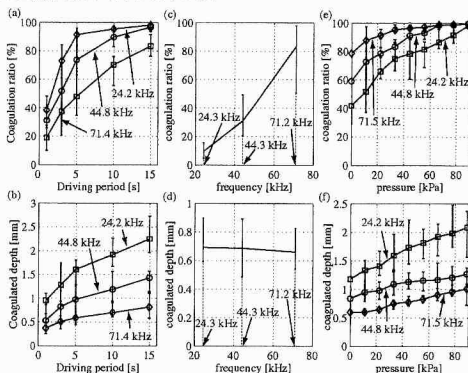


図 3: 組織変性試験結果. (a) 振動速度=2 m/s 固定時における駆動時間-凝固比. (b) 駆動時間-凝固深さ. (c) 振動振幅=4 μm 固定時における周波数-凝固比. (d) 周波数-凝固深さ. (e) 振動速度 2 m/s 固定時の押圧-凝固比. (f) 押圧-凝固深さ.

5 組織変性における支配的作用の同定

超音波メスの振動が軟組織に与える作用には、摩擦や刃先の振動が組織を伸縮させる「機械的作用」と、振動によって発生した音波、それに付随するキャビテーションや吸収といった「音響的作用」に大別される。そこで、これらの作用のどちらが組織変性において支配的な役割かを検討するために、刃先を組織表面から離し、音響的作用のみが働く環境で駆動した。接触時と非接触時における組織表面写真を図 4(a), (b) に示す。また、駆動周波数は 44.3 kHz である。図 4(a) では、黒点線で囲まれるメスの刃先

に対応する範囲内で組織変性が確認できるものの、図 4(b) では、表面組織の剥離が存在する程度で、図 4(a) のような組織変性は見られない。したがって、図 4(a) で得られた組織変性は、刃先による組織の伸縮に伴う発熱現象による熱変性だと考えられる。

また、組織のひずむ方向による組織変性の変化を検討するため、横振動(刃の側面接触)および縦振動(刃先接触)のそれぞれについて振動速度を 2 m/s に固定し、10 秒間駆動した。結果を図 4(c), (d) に示す。図 (c) より、縦振動においては組織が変性しているにも関わらず、横振動においては組織変性が見られなかった。振動速度を 4 m/s にして駆動した結果、両方向において組織変性は見られたものの、凝固深さは縦振動、横振動においてそれぞれ 2.67 mm, 0.67 mm となった。これらより、振動方向によって発熱量に差が現れ、縦ひずみによる発熱とずりひずみによるそれには、大きな差があり、縦ひずみに起因する発熱量 g の方が大きいことが示された。これは、縦弾性率の方がずり弾性率よりも大きいことに対応すると考えられた。

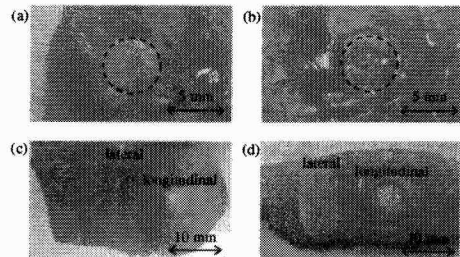


図 4: 組織表面像. (a) $l=0.0$ mm (刃先接触時). (b) $l=0.5$ mm (非接触時). (c) 振動速度=2 m/s, 横振動(左), 縦振動(右). (d) 振動速度=4 m/s, 横振動(左), 縦振動(右)

6. 結論

本論文では、超音波メスの振動が軟組織へ及ぼす作用を、振動周波数という視点から検討した。その結果、振動振幅、粘弾性係数、周波数および振動方向が組織変性に影響を及ぼすパラメータであることが示された。

これらの結果は、超音波メスの刃の先端部における軟組織への機械的作用を理解する上で重要なデータであると考えられる。

文献

- [1] T. Isomura, H. Suma, T. Sato, and T. Horii: *Euro. J. Cardio-thorac. Surg.*, Vol. 14, pp. 101-103, 1998.
- [2] C. Koch, M. Borys, T. Fedtke, and U. Richter: *2001 IEEE Ultrasonics Symp.*, pp. 1393-1396, 2001.
- [3] K. Ebina, H. Hasegawa, and H. Kanai: *Jpn. J. Appl. Phys.*, (submitted).