

マイクロ波測定による脂肪中の筋肉組織の検出

A New Method to Detect a Piece of Muscle in Fat Tissue by Microwave Measurements

山本 幸男
Yukio Yamamoto

Abstract

A New method to detect a piece of muscle in fat tissue is proposed. The fat tissue is filling up the quasi-hemisphere microwave cavity of which volume is 175cm³. The resonance frequencies of the resonator are 7-11GHz and its Q values are about 30. The reason for these low Q value is that biological tissue fat has much microwave loss. When a piece of muscle tissue 4mm cubic is inserted in the resonator filled with fat, these resonance frequencies decrease about 10MHz and the the Q values increase to about 50. These responses are not affected by the location of the muscle tissue inserted.

These studies illustrate the potential of the microwave detection of tumor in mamma tissue by this method.

1. まえがき

近年、X線被曝の恐れのないがん検診法として、マイクロ波CTが研究されている。これはビーム状に集束したマイクロ波で生体を走査し透過信号強度の情報からコンピュータを用いて断面像を再構成するものである。しかしX線に比べて遙かに波長の長いマイクロ波では、分解能の上で困難が多い。また生体でのマイクロ波の減衰が多いためCTの形では実用化の目処はたっていない。一方X線CTと違ってマイクロ波による診断では信号の位相情報が利用できる。マイクロ波照射はX線被曝ほど人体に悪影響を与えない点を考えるとCTの様ながんの像を描く方法ではなくて、単にがんの有無を検出するだけでも集団検診に用いると得策である。CTとは逆に生体組織の腫瘍化の情報をその位置情報と区別して検出出来ればよい。その際、マイクロ波の振幅と位相の両方の情報が利用できる。その一方法を探查する手始めとして何らかの共振器中での生体組織の異組織化が、どの程度検出出来るかを実験的に調べた。生体組織はマイクロ波の減衰が大きいので、共振器を形成するのに困難が予想されたが、脂肪を充填した共振器のQ値は検出可能な値であった。そのため脂肪中の筋肉の例では、4mm角の筋肉を検出できた。

2. 検出原理

生体組織はマイクロ波領域で考えると比誘電率 ϵ と減衰率 α の大きい誘電体と考えることができる。著者は先に筋肉、脂肪、乳組織等のXバンドでの複素誘電率の測定から生体組織の組織成分を確度高く決定出来ること [1]、また生体組織の複素誘電率の実数部と虚数部の

平成元年3月15日原稿受理

大阪産業大学 工学部

値には相関があること [2, 3] を示した。これらの結果から共振器中の生体組織に誘電率の異なる別組織が生じるとマイクロ波帯での共振状態の変化が観測されると予想される。

生体組織をマイクロ波共振器に入れると生体組織の組成によって定まった共振周波数 f_0 と Q 値を示す。共振回路に蓄えられている時間平均はエネルギーを W とし、 $\omega_0 = 2\pi f_0$ とすると、 Q 値は次式で表される。

$$Q = \omega_0 W / (-dW/dt) \quad (1)$$

共振器から 1 秒間に失われるエネルギー $(-dW/dt)$ として、共振器自身の中に消費されるエネルギーのみをとると無負荷 Q (Q_0) が、共振回路に結合する伝送線の整合負荷に消費されるエネルギーのみをとると外部 Q (Q_{ext}) が、両者を合わせると負荷 Q (Q_L) が得られる。3 者の間には、

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ext}} \quad (2)$$

の関係がある。さらに共振器自身で失われるエネルギーの内、共振器壁での損失が原因である Q_{wall} と、共振器内の誘電体損失による Q_{diel} を考えることが出来て、

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_{wall}} + \frac{1}{Q_{diel}} \quad (3)$$

の関係がある。

共振器内部に充填した生体試料の組織成分が変化すると比誘電率に合わせて共振周波数 f_0 が変化する。それと共に Q_{diel} 、したがって Q_0 が変化する。この f_0 と Q_0 値、あるいは反射測定で得られるスミス図表の変化から生体組織の異組織化が特定できれば上記の目的に近づくことになる。

スミス図表はマイクロ波の反射係数 Γ の複素平面上に、マイクロ波複素インピーダンスの図表を描いたもので、マイクロ波反射特性を表現するのによく用いられる。スミス図表上で損失のある空洞共振器がどう表現されるか検討してみる。

空洞の離調時短絡 (DSC) 面から見た規格化入力インピーダンスは

$$\frac{Z_{in}}{Z_0} = \frac{\frac{1}{Q_{ext}}}{j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) + \frac{1}{Q_0}} \quad (4)$$

となり [4]、反射係数 Γ は

$$\Gamma = |\Gamma| \exp(j\theta) = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (5)$$

であるから、 Γ の複素平面であるスミス図表上で、共振器からの反射波は周波数とともに回る円に近い軌跡を描く。この円に近い軌跡Pの中心とスミス図表の中心Oを結ぶ直線と軌跡Pの交点のうちOに近い点が共振周波数 f_0 に対応する。両交点の定在波比を σ_0 、 σ_1 ($\sigma_0 < \sigma_1$) とする。

σ_0 と σ_1 が点0の両側にある場合を over couple, 同一の側にある場合を under couple という。各場合に次式により $|\Gamma_{ext}|$ を求める。

overcoupling の場合

$$|\Gamma_{ext}| = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - 1)^2 (\sigma_0 \sigma_1 - 1)^2 + \sigma_1^4 (\sigma_0 - 1)^2}{(\sigma_1 + 1)^2 (\sigma_0 \sigma_1 - 1)^2 + \sigma_1^4 (\sigma_0 + 1)^2}} \quad (6)$$

$$Q_0 / Q_{ext} = \sigma_0 - 1 / \sigma_1 \quad (7)$$

undercoupling の場合

$$|\Gamma_{ext}| = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - 1)^2 (\sigma_1 - \sigma_0)^2 + \sigma_1^4 (\sigma_0 - 1)^2}{(\sigma_1 + 1)^2 (\sigma_1 - \sigma_0)^2 + \sigma_1^4 (\sigma_0 + 1)^2}} \quad (8)$$

$$Q_0 / Q_{ext} = 1 / \sigma_0 - 1 / \sigma_1 \quad (9)$$

σ_{ext} は次式で与えられる。

$$\sigma_{ext} = \frac{1 + |\Gamma_{ext}|}{1 - |\Gamma_{ext}|} \quad (10)$$

スミス図表上で、この σ_{ext} に対応する2周波数の差を Δf とすると、

$$Q_{ext} = f_0 / \Delta f \quad (6)$$

となるので、(7)または(9)式から Q_0 が求められる。

この様にして求めた f_0 、 Q_0 あるいはスミス図表の変化から共振器内の誘電体である生体組織の異組織化を探知する可能性をさぐるため、その基礎的なデータを得ようとするのが本研究の目的である。

しかし生体組織のマイクロ波吸収率、即ち複素誘電率の虚数部の値は大きいので、生体組織を充填した共振器は通常のマイクロ波共振器のように大きいQ値を示さないと考えられる。マイクロ波共振器のQ値は数1000になるものが多いが、LC回路では数10から数100の領域で使用されており、生体組織充填によりQ値が下がっても、数10の値があれば測定可能で、異組織化の検出に利用出来ると考えられる。その点では筋肉組織などより、マイクロ波比誘電率、減衰定数共に小さい脂肪や乳組織中の異組織の方が測定にかかりやすい。この理

由から本報告では乳器官を想定して共振器を選び、充填する組織として脂肪を選んだが、臨床実験に到るには解決すべき問題は多い。

3. 使用共振器と測定回路

実験に使用した共振器は市販のアルミニウム製食器と厚み 5mm の銅板を利用して構成したもので、図 1 に示すように半球に近い形をしている。x y 断面模式図に示すように異組織挿入用の直径 5mm の穴が 13 個あけられている。測定回路との結合は同軸線路で行い、結合アンテナは後述するように実験的に定めた。

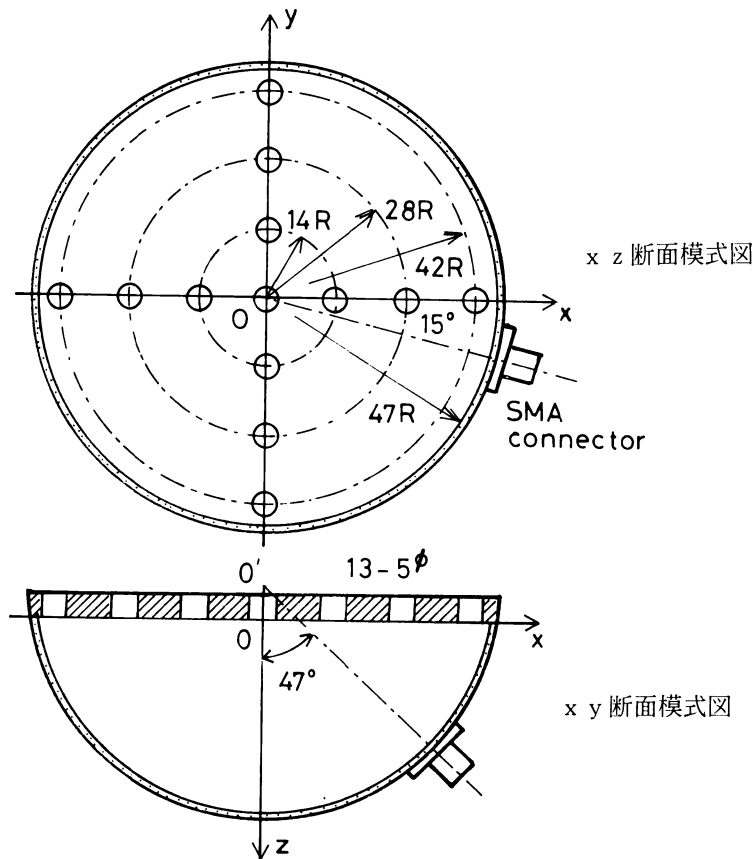


図 1 試作準半球共振器の構造

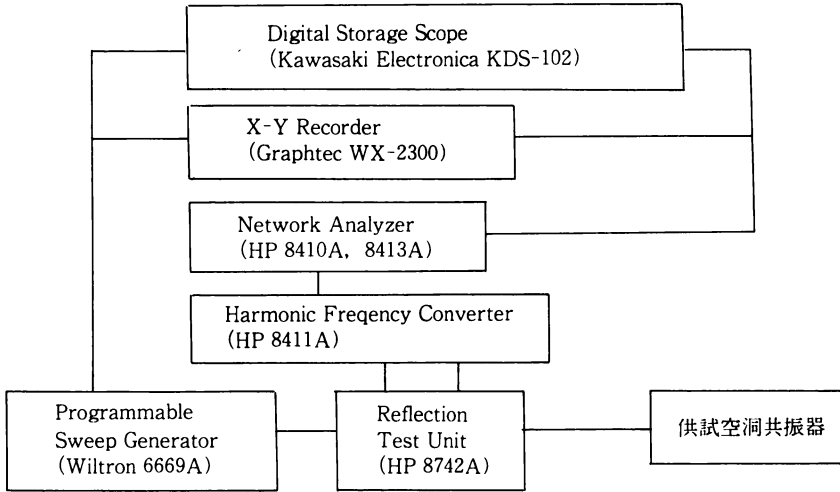


図2 反射係数測定ブロック図

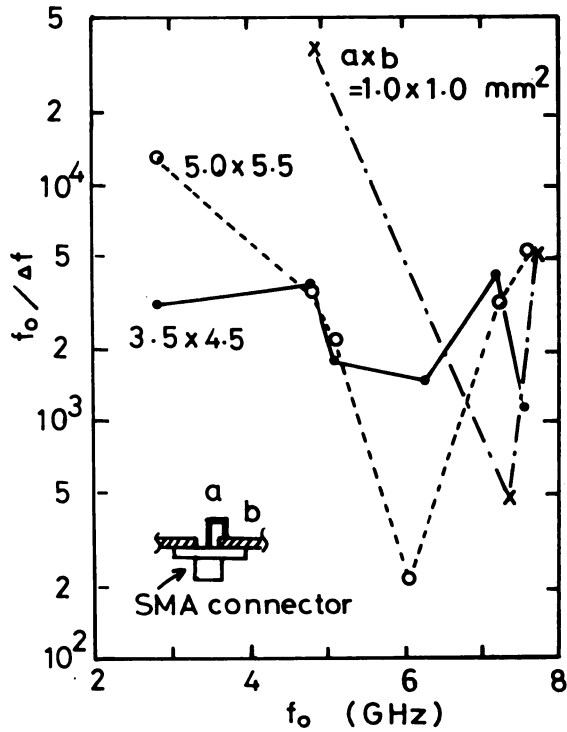


図3 ループ形状による $f_0 / \Delta f$ の変化

入出力線路との最適結合方法を探すためにいくつかの結合アンテナについて反射特性の測定を行った。

測定はスカラネットワークアナライザを用いて行った。その回路構成を図2に示す。

同軸線路と空洞共振器の結合方法としてはプローブによる電界結合とループアンテナによる磁界結合があるが、プローブ結合では十分な共振特性が得られなかったため、ループ結合の場合の結果のみ図3に示した。図中の Δf は反射電力の半値幅で、 $f_0 / \Delta f$ は共振の鋭さをみる目安である。この結果から、広帯域性を考慮して太さ1mmの錫メッキ線を3.5mm×4.5mmの長方形に加工したループアンテナを採用した。

後で述べるベクトルアナライザを用いたスミス図表作成のための測定回路を図4にしめす。最近ではCRT上にスミス図表を直接表示するベクトルアナライザがあるが、ここでは図4のように、アナログ出力のベクトルアナライザの信号をA/D変換し、CPUとXYプロッタを用いてスミス図表を描かせた。

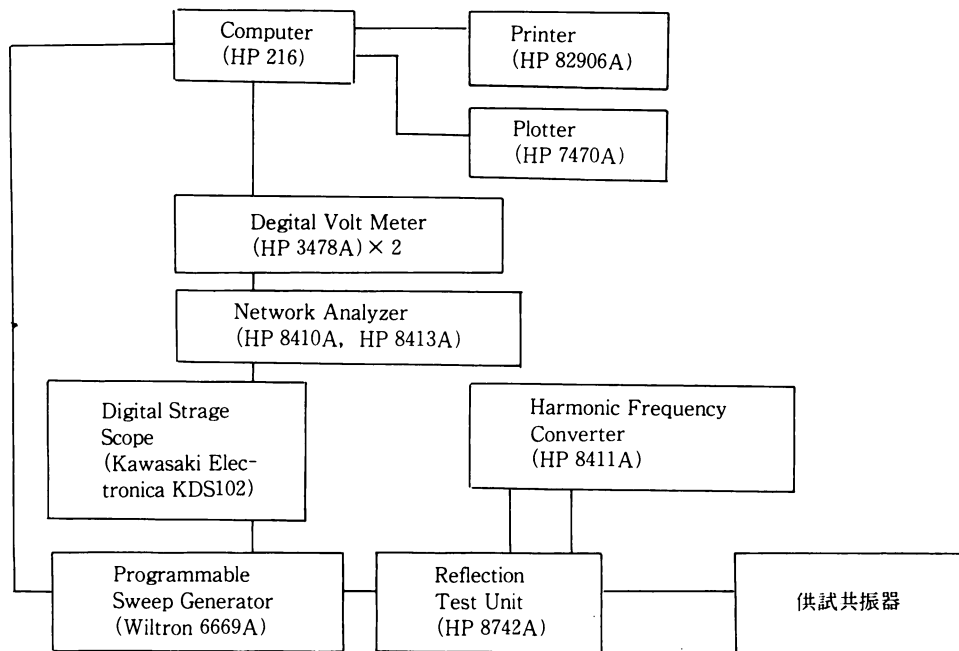


図4 スミス図表作成のための測定回路

4. 脂肪を充填した場合の共振特性

生体試料を充填しないでこの共振器の共振周波数およびQ値を測定すると、数多くの共振が観測された。これらの共振モードの電磁界分布は特定するに到っていないが、これらの共振の内、この共振器に牛の脂肪を徐々に充填していった時、いくつかのモード（特に低周波モード）は消滅した。共振器に脂肪を充填しても観測出来た共振周波数のいくつかをプロットしたものが図5である。この際、共振器全体を恒温装置で37℃に保った。共振器内の脂肪量が増えるに従い各共振とも共振周波数が減少している様子がわかる。脂肪量70cm³と115cm³

で変極点が観測されたが、これは脂肪の表面がループアンテナを通り抜ける状態に対応しており、その影響であると考えられる。共振器に100%脂肪を充填した状態が脂肪量187cm³に相当し、それ以外の点でプロットがなくなっている曲線はQ値が下がって、共振が測定出来なかったことを示している。各曲線とも160cm³以上で共振周波数が変化しなくなっている。すなわち共振器の体積の約85%以上の脂肪量があれば共振周波数が変化しないことが示されており、この結果は共振器に生体資料を充填する際に厳密さをそれほど要求されない点で有用である。

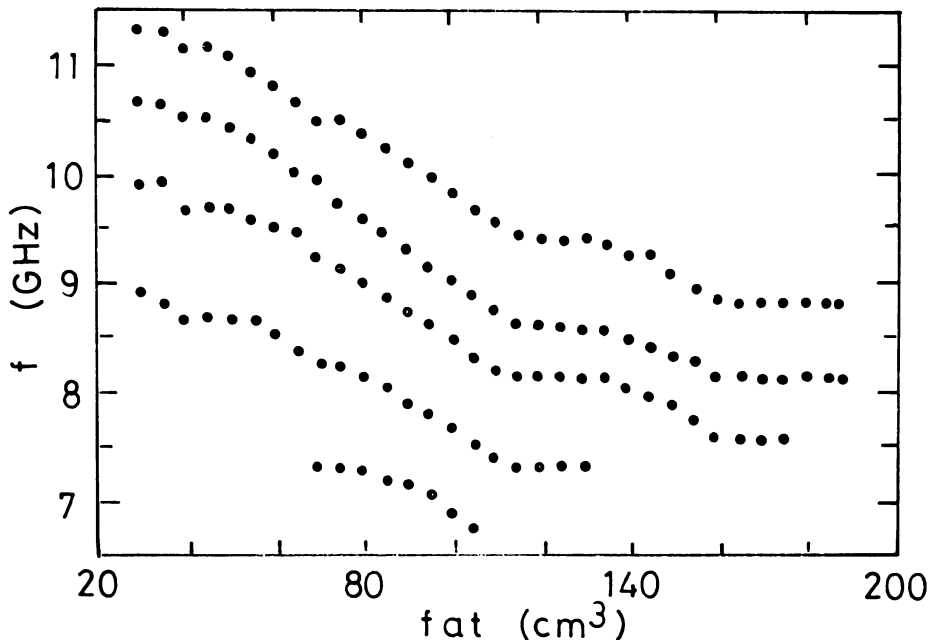


図5 共振器内に挿入した脂肪量による共振周波数の変化

5. 筋肉を挿入した場合の共振特性

牛の脂肪を充填した共振器のマイクロ波反射測定から得られたスミス図表を図6に示す。共振周波数 f_0 は6.65GHz、 $Q_0=30$ であった。これに対し、共振器の平板底から1cm、円盤の中心から2.1cmの位置に4mm角の牛の筋肉を挿入した場合のスミス図表を図7に示す。筋肉小片が共振器壁に接触する場合と、結合ループアンテナごく近傍にある場合を除いて、平板底から1cm、3cm、中心から半径42mm以内では、ほぼ同じ結果が得られた。その様子は挿入位置と f_0 、 Q_0 の関係を示した図8にも現れている。しかしスミス図表では軌跡の僅かな違いとして識別できる差のある結合アンテナ近傍も f_0 、 Q_0 の値としては表に現れていない。

図8の結果では筋肉小片の位置によらず、共振周波数で約10MHzの減少が観測され、Q値で30から40~50への増加が観測された。y=0、z=20でx方向に移動した場合だけQ値が40になっている理由は明らかでないが、これらの変化は予想していた値より大きく、十分観測可能である。

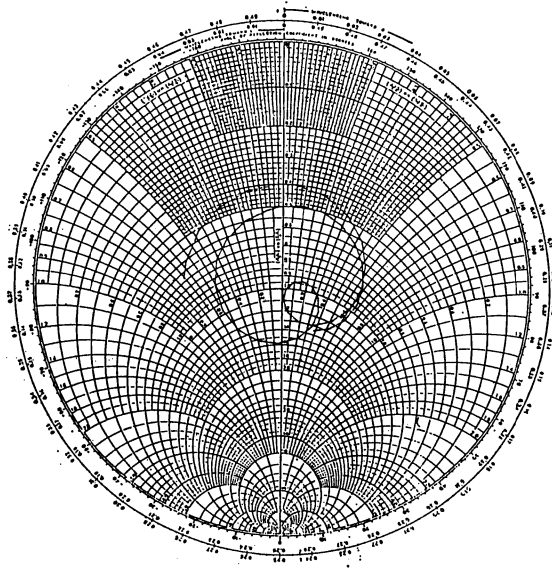
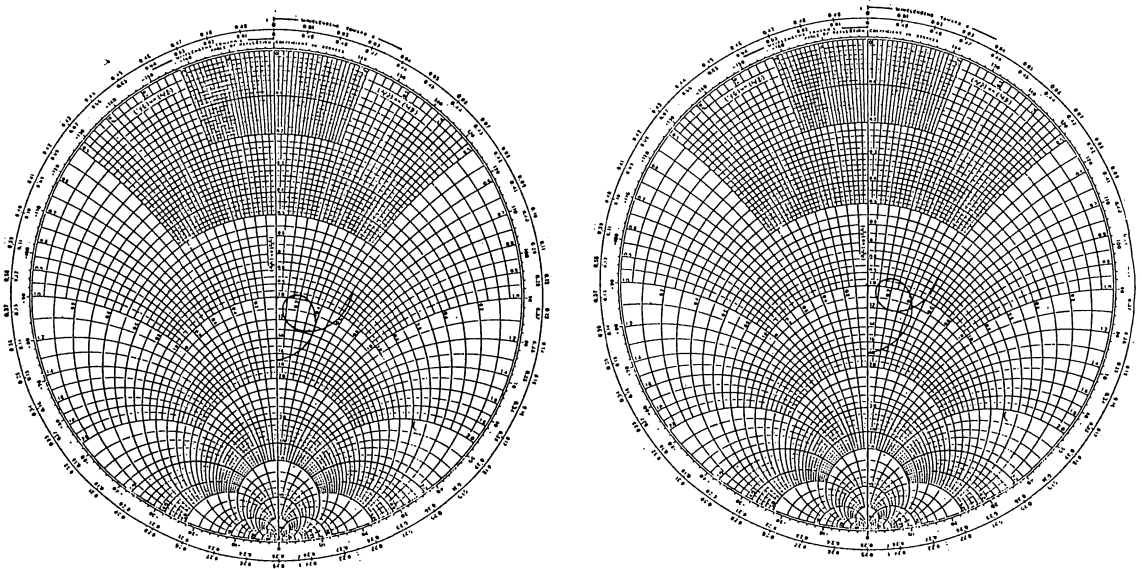


図6 脂肪を充填した共振器のスミス図表



a) $x = 0, y = 0, z = 10\text{mm}$

b) $x = 42\text{mm}, y = 0, z = 10\text{mm}$

図7 筋肉小片を挿入した時のスミス図表

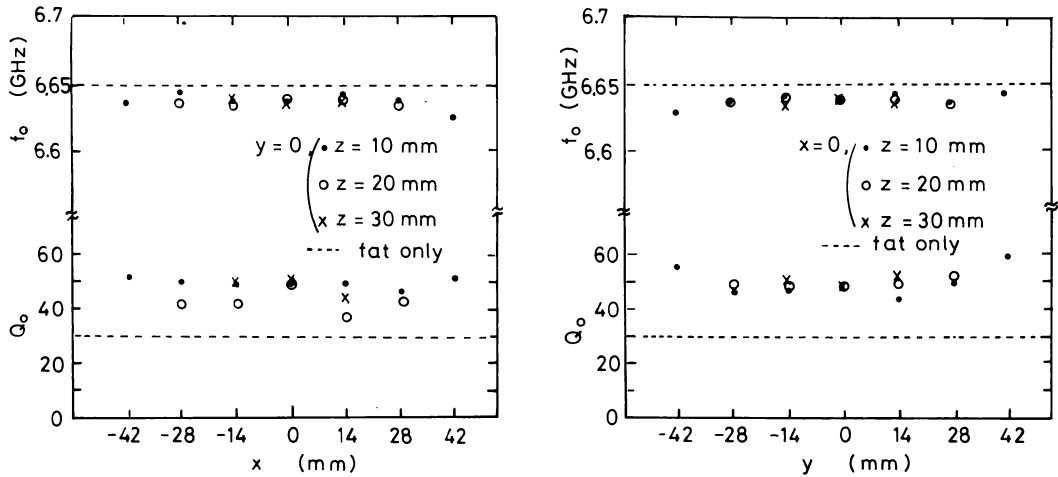


図8 筋肉小片挿入位置と f_0 、 Q_0 値の関係

6. まとめ

共振器中の生体組織の1部が異組織化したことをどの程度検出できるかを調べる基礎的な実験を行った。今回はマイクロ波減衰率と比誘電率ともに小さい脂肪を試料として使用した。脂肪量が共振器容積より15%程度少なくとも共振周波数 f_0 が変化しないこと(図5)は充填に厳密さがそれほど要求されないという実用上の利益がある。このことは、図8で示した f_0 、 Q_0 の変化が脂肪量の多少によらず検出できることを示している。図8で示した4mm角の筋肉を挿入した場合の f_0 、 Q_0 値の変化が10MHz、20と比較的大きく、しかも挿入位置によらないという結果はこの方法による異組織化の検出に見通しを与えるものである。今後乳組織等についても実験を行い、適当な共振モード、周波数の選定など、基礎的データの集積をすすめる必要がある。

最後に、卒業研究の一環として実験に協力された1988年度卒業生 利川友基、中島照夫、九十九正美君に謝意を表します。

文献

1. Y. Yamamoto, K. Fujisawa: "Dielectric Measurements in the X-Band of Mamma Tissue from Cattle", Electron. Lett. 17 (1981) pp.690-691
2. 山本幸男: "8-12GHz帯における生体組織の複素誘電率測定", 大阪産業大学論集自然科学編 75号(1987) pp39-43
3. Y. Yamamoto: "Characteristics of Complex Permittivity of Biological Tissues in the X-Band", Trans. IEICE E70 (1987) pp.1106-1107
4. 藤澤和男: "改版マイクロ波回路", 26版, コロナ社 (1986)