

生体組織の組織性状の評価を目指した
超音波散乱の周波数特性の計測に関する基礎研究

鈴木 彩美

指導教員：金井 浩， 研究指導教員：長谷川英之

Fundamental Study on Measurement of Frequency Characteristic of Ultrasonic
Scattering for Tissue Characterization

Ayami Suzuki

Supervisor: Hiroshi Kanai, Research Advisor: Hideyuki Hasegawa

Tissue characterization plays an important role to support early detection of various diseases. The purpose of this study is to investigate ultrasonic scattering for quantitative method of ultrasonic tissue characterization. For this purpose, power spectra of scattered echoes were focused in the present study. By normalizing the measured power spectrum of a scattered echo by that of an echo from a glass plate (reflector), the frequency responses of transmitting and receiving transducers were removed from the power spectrum of an echo from a scatterer. The spectral slope of the normalized power spectra of echoes from microspheres made from vanadium dichloride-acrylic polymer was dependent on scatterer size. These results show the possibility of the proposed method for tissue characterization by measuring the scatter size.

1. 結論

近年、食生活の欧米化や高齢化社会の進展、現代の生活習慣などにより、癌や動脈硬化症などの様々な疾患を持つ患者が増えつつあり、それらの早期発見が重要視されている。組織性状診断は組織の微細構造や組成など細胞レベルで質的な違いを診断することであり、疾患等の早期発見に有用である。超音波 RF 信号には、散乱や減衰、弾性などの情報が含まれており^{1, 2)}、超音波 RF 信号の解析により組織性状を定量的に評価できると考えられている。その中でも高周波超音波は顕微鏡レベルでの組織性状診断に用いられている。本研究では生体組織の組織性状の評価のための基礎研究として、60 MHz の超音波を用いた散乱体サイズ推定の可能性を示す。

2. 原理

波長より小さい対象物からの受信超音波 RF 信号の振幅は非常に小さく、RF 信号の振幅のみを表示した B モード断層画像を用いた診断、評価が困難である。そのため、本研究では散乱体の周波数特性に着目し、超音波 RF 信号に離散フーリエ変換を適用し周波数解析を行う。

例えば波長 ($\lambda = 25 \mu\text{m}$ at 60 MHz) に対し約 1/10 の大きさである血小板 (約 2~3 μm) はレイリー散乱に近い振る舞いをし、散乱波のパワースペクトルは周波数の 4 乗に漸近する。波長と近い大きさである腫瘍 (約 10~20 μm) の場合はミー散乱となり、散乱体の大きさ

によりパワースペクトルの傾きは異なる。波長より対象物が十分に大きい場合は反射となり、周波数に依存しない。散乱体サイズによりパワースペクトルの傾きが変化し、散乱体サイズが大きくなるにつれ、パワースペクトルの周波数依存性は小さくなる。球状の散乱体の表面に無限小の点音源が無数位置しているモデルを仮定した場合の散乱波の理論パワースペクトルの式を示す³⁾。

$$\frac{Q(ka)}{\pi a^2} = 4 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)}{(ka)^2} \sin^2[\delta_n'(ka)] \quad (1)$$

ここで、 $Q(ka)$ は散乱断面積、 n は点音源の数、 k は波数、 a は散乱体の半径、 $\delta_n'(ka)$ は入射波と散乱波の位相差の微分を表す。

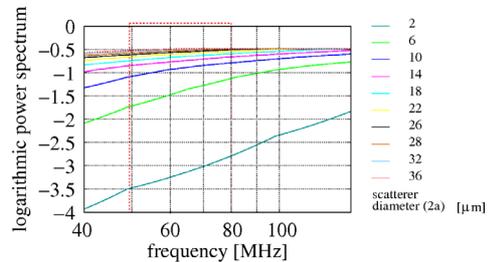


図 1 対数散乱パワースペクトル
(式(1)による理論値)。

散乱パワースペクトル $P_s(f)$ には散乱体からの散乱特性 $S(f)$ とトランスデューサの特性 $G(f)$ 、伝播経路に

おける減衰特性 $A_1(f)$ が含まれる。散乱特性のみを抽出するため、反射パワースペクトルを用いて正規化を行う。反射パワースペクトルには、反射体からの反射特性 $R(f)$ の他にトランスデューサの特性 $G(f)$ 、伝播経路における減衰特性 $A_2(f)$ が含まれる。伝播経路を散乱体計測時と反射体の計測時で等しくなるように計測することで、正規化により伝播経路の減衰特性も除去できると考えられる。

本研究では正規化した散乱波のパワースペクトルからその傾きを求める。傾きを算出する周波数範囲を選定するために重み関数を導入した。重み関数は振幅二乗コヒーレンス関数を用いた。雑音は信号との相関がないと考えられ、振幅二乗コヒーレンス関数を重み関数と定義することにより、受信信号の周波数成分ごとに SN 比の評価が可能であると考えられる。

3. 基礎実験

本研究では中心周波数 60 MHz ($\lambda = 25 \mu\text{m}$)、開口直径 2.4 mm、焦点距離 3.2 mm の凹面振動子である超音波トランスデューサを使用した。データを取得する際、オシロスコープで加算平均を 200 回行った RF 信号をもとに B モード断層像を構築した。スペクトル解析においては、送受信間隔 2.3 ms で M モード計測を行った。周波数特性を求める際には窓幅が $0.080 \mu\text{s}$ ($120 \mu\text{m}$)、窓の中心を散乱体からの超音波 RF 信号の最小値の位置としたハニング窓を用いた。

マイクロスフェアを用いて、模擬実験を行った。マイクロスフェアはサイズが $3\sim 7 \mu\text{m}$ の塩化バナジウム (II)-アクリル系ポリマーで、中に液体の低沸点炭化水素が封入されている。マイクロスフェアが動かない

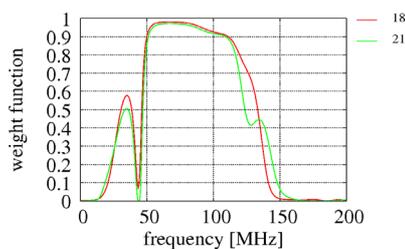


図 2 ビーム 18 と 21 における散乱波に対する重み関数。

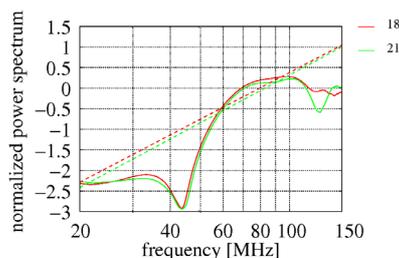


図 3 ビーム 18, 21 における散乱波の正規化パワースペクトル。

ようにするため、ゼラチンで固めて計測を行った。本研究では、散乱体サイズと散乱波のパワースペクトルの傾きとの対応を取るため、顕微鏡により散乱体サイズを計測し理論値とした。

マイクロスフェアからの散乱波が含まれる超音波ビーム位置について解析を行った。図 2 に散乱波のパワースペクトルに対する重み関数、図 3 に散乱波の正規化パワースペクトルを示す。18, 21 はビーム番号を示す。図 2 に示した重み関数より、傾きを求める周波数範囲を $50\sim 110 \text{ MHz}$ とした。図 3 よりビーム 18 に存在するマイクロスフェアからの散乱正規化パワースペクトルについては傾きが 3.8、ビーム 21 に存在するマイクロスフェアからの散乱波の正規化パワースペクトルは傾きが 3.9 となった。それぞれのスフェアのサイズを顕微鏡で計測するといずれも $6.2 \mu\text{m}$ であった。理論パワースペクトルにおいて周波数範囲 $50\sim 110 \text{ MHz}$ の傾きは $1.58\sim 2.45$ であった。理論パワースペクトルの傾きと一致しなかったのは、43 MHz 付近に生じたディップにより傾きに影響を及ぼしたと考えられる。

図 4 に顕微鏡より計測した散乱体サイズと解析より求めた傾きの関係について示す。図 4 より散乱体サイズが異なると傾きに違いが生じることが分かった。よって散乱波の正規化パワースペクトルの傾きより散乱体のサイズ推定が可能であると考えられる。

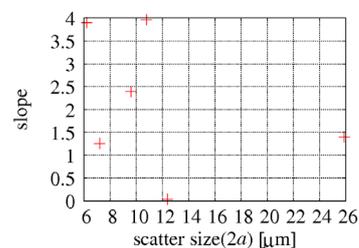


図 4 顕微鏡より計測した散乱体サイズと解析より求めた傾きの関係。

4. 結論

本研究では、正規化した超音波散乱波のパワースペクトルの傾きが散乱体サイズの違いにより異なることが示され、散乱波のパワースペクトルの傾きを用いた散乱体サイズ推定の可能性を示すことができた。

文献

- 1) M. F. Insana, R. F. Wagner, D. G. Brown, and T. J. Hall: *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 87, No. 1, pp. 179-192, 1990.
- 2) G. E. Sleepe and P. P. Lele: *Ultrasound Med. Biol.*, Vol. 14, No. 8, pp. 709-727, 1988.
- 3) P. M. Morse and H. Feshbach: *Methods of Theoretical Physics*, McGraw-Hill, New York (1953).