

修士学位論文要約 (平成19年 3月)

超音波ビーム偏向による  
対象物表面のマイクロオーダーの粗さ推定に関する研究  
工藤和樹, 長谷川英之, 金井 浩

Study on Estimation of Micro-Order Surface Roughness  
by Ultrasonic Beam Steering

Kazuki KUDO, Hideyuki HASEGAWA and Hiroshi KANAI

Atherosclerosis is the main cause of circulatory diseases, and it is very important to diagnose atherosclerosis in its early stage. In an early stage of atherosclerosis, the luminal surface of an arterial wall would become rough due to the injury of the endothelium. Conventional ultrasonic diagnostic equipments cannot detect such micron-order surface roughness because their spatial resolution is approximately 100 μm. In this study, for the accurate detection of surface roughness, ultrasonic beams were insonified from various angles relative to the surface of an object which has a micron order asperity. Then, we focused on the angular dependence of the echo amplitude and frequency characteristics in both temporal and spatial domains. Using this method, it is shown that the angular dependence and frequency characteristics vary when the object has a minute surface roughness which cannot be detected by conventional B-mode imaging using linear scanning.

1. はじめに

健全な動脈の内腔面は一層の内皮細胞に覆われており、その表面は滑らかであるが、動脈硬化の初期段階では内皮に障害が起こり、内皮表面が粗くなるため、数十マイクロ程度凹凸が生じると言われている [1]. そのため、動脈硬化の早期診断にはマイクロオーダーの凹凸を検出する必要があるが、従来の超音波診断装置のBモード断層像は、深さ方向、横方向ともに数百マイクロ程度の分解能しか持たない。

本報告では、波長以下の表面粗さをもつ対象物に対して、超音波ビームを偏向して様々な角度から超音波を照射することで、反射超音波の角度依存性から対象物表面粗さの評価が可能か検討を行った [4].

2. 計測方法

計測システム、およびビーム偏向の概略図をそれぞれ図 1 (a), (b) に示す。図 1(b) に示すように、本実験では中川らによって提案された超音波ビーム偏向法を用いており [2], この手法を用いることで、様々な角度から照射した超音波ビームが、対象物表面の関心点  $O_j$  を通過するように設定できる。中心位置  $a_i$  の開口から超音波ビームを照射したときのビーム偏向角度  $\theta_i$  は以下の式で示される。

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{L \cdot \left( i - \frac{N-1}{2} \right)}{l} \quad (1)$$

本実験ではプローブから対象物表面までの距離  $l$  は 9.4 mm に設定しているため、式 (1) よりビームの最大偏向角度  $\theta_{max}$  は 32.6° となる。

本研究で用いた超音波診断装置 (Aloka SSD-6500)

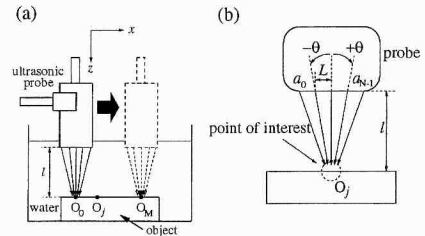


図 1: (a) 実験システム, (b) ビーム偏向の概略図.

のリニア型プローブは、中心周波数  $f_0 = 10$  MHz,  $L = 0.4$  mm ピッチで  $N = 30$  点から超音波ビームを走査することにより、各点において超音波パルスの送受信を行なう。また、受信した超音波 RF 信号は 40 MHz, 16 bit で標本化される。

本研究では、対象物表面の多点で計測を行なうために、図 1(a) に示すように超音波プローブを自動 XYZ ステージを用いて速度  $v_{st} = 2.17$  mm/s (=5 μm/フレーム) で 2 秒間機械的に  $x$  方向に移動させながら、フレームレート FR=434 フレーム/秒で 400 点分の反射超音波の計測を行なった。  $j$  番目のフレームにおける超音波プローブ位置は  $x_j$  で示され、このとき超音波ビームは対象物表面上の関心点  $O_j$  を通過するように照射される。

また、本実験においては、対象物表面にマイクロオーダーの粗さをもつ対象物として、表面形状の異なる 4 つの金属を用いた。図 2 に、触針式段差計によって計測された対象物 No. 1~No. 4 の表面形状を

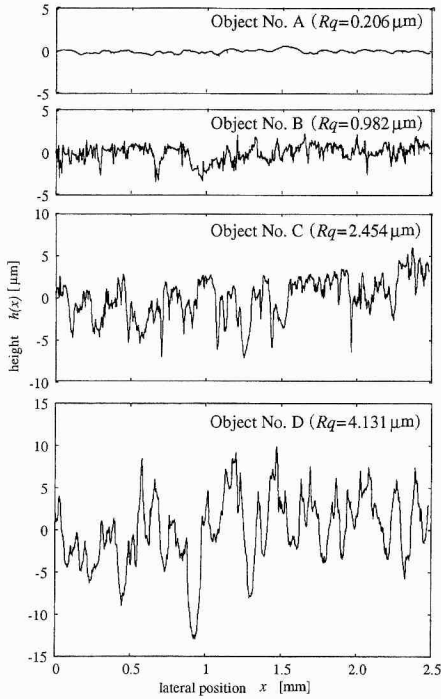


図 2: 触針式段差計で計測された対象物の表面形状を示す。

表面粗さを示すパラメータとしては、対象物表面形状の高さの標準偏差 ( $Rq$ ) が用いられる [3]。  $h(x_i)$  を対象物の水平方向の位置  $x_i$  における高さとする、表面粗さ  $Rq$  は以下の式で示すことができる。

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \{h(x_i) - \overline{h(x)}\}^2} \quad (2)$$

ここで、 $\overline{h(x)}$  は表面形状の高さの平均値である。図 2 に各対象物の表面粗さ  $Rq$  を示す。

### 3. 対象物表面の粗さ推定

図 3(a) と (b) に、object No. 1 ( $Rq=0.206 \mu\text{m}$ ) と、object No. 4 ( $Rq=4.131 \mu\text{m}$ ) からの各偏向角度  $\theta_i$  における反射 RF 波形をそれぞれ示す。対象物の表面が滑らかな場合には、図 3(a) に示されるように、偏向角度が  $\theta = 20^\circ$  以上の場合には、反射波が計測されない。一方、対象物表面が粗さを持つ場合には、図 3(b) に示されるように、偏向角度が  $\theta = 30^\circ$  まで偏向角度を大きくしても、反射波が計測されていることが分かる。したがって、以上の結果より、偏向角度が  $\theta \geq 20^\circ$  の領域においては、対象物の表面が粗くなることによって、表面が滑らかな場合と比較して反射波のパワーが大きくなることが予想される。

そこで、反射波のパワーを (3) 式のように定義して各偏向角度  $\theta$  における反射波のパワーを求めた。

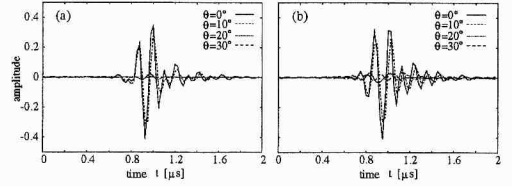


図 3: 各偏向角度  $\theta_i$  における対象物からの反射 RF 波形。(a) Object No. 1 ( $Rq=0.206 \mu\text{m}$ )。 (b) Object No. 4 ( $Rq=4.131 \mu\text{m}$ )。

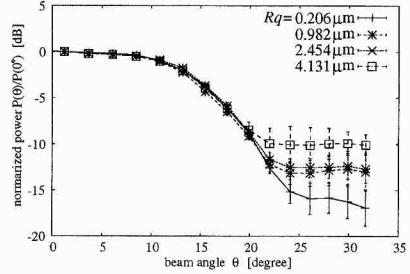


図 4: 表面粗さ  $Rq$  が異なる場合の各偏向角度  $\theta_i$  における反射波のパワー。

反射波のパワーは以下の式で示される。

$$P(\theta_i) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} \sqrt{(V(t; \theta_i) - \overline{V(\theta_i)})^2} \quad (3)$$

式 (3) において、 $V(t; \theta_i)$  は時間  $t$  における反射 RF 信号の振幅値、 $\overline{V}$  は反射 RF 信号の平均値、 $N$  は信号長である。図 4 は表面粗さ  $Rq$  が異なる場合の各偏向角度  $\theta_i$  における反射波のパワーである。図 4 において、反射波のパワーは、計測された全 400 点分の計測結果を加算平均したものを表示しており、また、それぞれの対象物について偏向角度  $\theta = 0^\circ$  の時のパワーを 0 dB として正規化を行なっている。図 4 から分かるように、偏向角度が  $\theta \geq 20^\circ$  以上の領域において、表面粗さ  $Rq$  が大きくなることによって反射波のパワーが増大していることが確認できる。

### 4. 結論

本論文では、表面が一様に粗い対象物を用いた基礎実験を行なった。その結果、偏向角度が  $\theta \geq 20^\circ$  のビームに注目すると、表面が粗くなるにつれて、反射波のパワーが増大することが確認できた。本手法を用いることによって、波長の 1/100 以下の表面粗さを定量的に推定できる可能性を示した。

### 文献

- [1] R. Ross: New Engl. J. Med. **340** (2004) 115.
- [2] N. Nakagawa, H. Hasegawa and H. Kanai: Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) 3220.
- [3] D. D. Sukmana and I. Ihara: Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) 4417.
- [4] K. Kudo, H. Hasegawa and H. Kanai: Jpn. J. Appl. Phys. (in press).