

高周波帯域プローブを想定した 超音波顕微鏡による二次元音速分布の測定*

◎小林 玲奈¹, 小林和人², 荒川元孝¹

(¹東北大, ²本多電子)

1 はじめに

超音波顕微鏡は、水などのカプラを介して観察対象に超音波を照射し、反射波を解析することで形態のイメージングが可能である。また、音響特性（音速、厚さ）の計測により、組織の大きさや形の計測だけでなく、その組織が含む物質や微細構造の推定も可能である^[1]。さらに、細胞を計測する際に染色の必要がないことから、生きたままの細胞の音響特性を計測できる。超音波顕微鏡の課題として、光学顕微鏡よりも解像度が低いことが挙げられる。画像の解像度を向上するには、超音波の周波数を高める必要がある。そこで、本研究グループでは、解像度の高い音響特性分布の計測を目標としている。

厚さが薄い観察対象の音速を計測するために、パルススペクトル法^[2]が有用である。パルス波を用い、反射波を周波数領域で解析し、厚さを求めることにより音速を算出する。高周波帯域で計測する際、プローブの帯域幅によって低周波領域の情報が欠落してしまい、正確な音速を算出できないという課題があった。そこで、本報告では帯域幅があることを想定し、低周波領域の情報を信号処理によって補間することで、音速二次元分布図を計測した

2 原理

2.1 厚さ、音速の算出

図1に、超音波顕微鏡により音速と厚さを計測するための実験構成を示す。試料をスライドガラスなどの基板の上に載せ、水などをカプラとして超音波を照射する。試料が数 μm 程度と薄いため、試料表面からの反射波 s_s と試料裏面と基板の界面からの反射波 s_d は時間上で分離されず、合成波 $s_{\text{tgt}} (=s_s+s_d)$ として計

測される。基板が露出している面からの反射波 s_{ref} を参照信号として計測する。

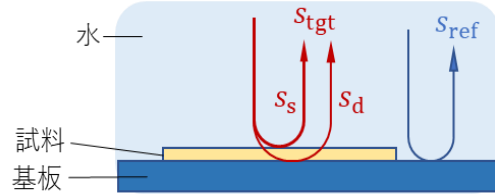


図1：超音波顕微鏡による計測信号

s_s と s_d が分離できない場合、パルススペクトル法により、音速と厚さを同時に求めることが可能である。 s_{ref} $s_{\text{tgt}} (=s_s+s_d)$ をそれぞれフーリエ変換した S_{ref} および $S_{\text{tgt}} (=S_s+S_d)$ は、反射波間の伝播時間の差から位相差が生じる。周波数領域において被測定信号 S_{tgt} を参照信号 S_{ref} で正規化し、振幅スペクトルと位相スペクトルを得る。 S_s と S_d の位相差に伴い、正規化振幅スペクトルは極大、極小をとる。極大点における周波数を f_m 、そのときの位相を ϕ_m とする。これらの関係を利用して、試料の厚さ d 、音速 c は次式で表わされる。

$$d = \{\phi_m + 2n\pi\} \frac{c_0}{4\pi f_m} \quad (1)$$

$$c = \left\{ \frac{1}{c_0} - \frac{\phi_m}{4\pi f_m d} \right\}^{-1} \quad (2)$$

ここで、カプラ(本報告では水)の音速を c_0 、 S_d に対する S_s の位相回転数を n (n : 整数)とした。上式より、厚さ d 、音速 c を求めるためには、周波数 f_m のときの正規化位相 ϕ_m 、および位相回転数 n を求める必要がある。

2.2 位相回転数 n の推定方法

高周波帯域のプローブを用いると、帯域制限によって正規化スペクトルの低周波成分が得られないため、位相回転数 n を正確に求めることができない場合がある。正規化振幅スペクトル $|S_s+S_d|$ は周期性を持つことから、

* Two-dimensional sound velocity distribution measurement by ultrasonic microscopy assuming a high-frequency band probe, by KOBAYASHI, Rena¹, KOBAYASHI, Kazuto², and ARAKAWA, Mototaka¹ (¹Tohoku University, ²Honda Electric Co., Ltd.)

正規化振幅スペクトルを逆フーリエ変換することで、帯域内の平均的な周期を求め、位相回転数 n を推測することを考える。また、計測した正規化振幅スペクトルには、試料内の超音波の減衰に伴う低周波成分を含むため、二次曲線近似^[3]しそれで除することで $|S_s + S_d|$ の干渉成分のみを取り出す。逆フーリエ変換後のスペクトルにおいてピークを取るときの時間を t_i とすると、正規化振幅スペクトル $|S_s + S_d|$ の干渉成分の周期 T は、 t_i の逆数 ($1/t_i$) で表される。正規化振幅スペクトルにおいて、 $f = 0$ Hz のとき極大値をとることから、 $|S_s + S_d|$ の干渉成分は、図2の橙線で示す正規化振幅スペクトルの干渉成分に対しては、同図の青線のように推測できる。周波数 f_m における位相回転量 N は、式(3)のように f_m と周期 T で表される。しかし、式(1)における位相回転数 n は整数であるため、 N を四捨五入した値とする。

$$N = \frac{f_m}{T} \quad (3)$$

$$n = \text{round}(N) \quad (4)$$

ここで、 $\text{round}(\cdot)$ は、四捨五入関数を表す。得られた位相回転数 n を用いて厚さ d 、音速 c を算出することができる。

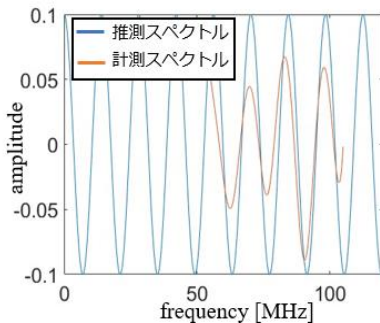


図2：計測した正規化振幅スペクトルの干渉成分と IFFT によって推測したスペクトル

3 実験

シリコンゴムは音響インピーダンスが生体組織に近いことから、生体組織を模擬した試料として、スライドガラスに薄く伸ばしたシリコンゴム(信越シリコン, KE-4896-T, 東京)を用意した。自動 XY ステージ, 手動 Z ステージ, パルサーレーザ (HPR-400F-26, 本多電子), オシロスコープ (PicoScope 5000, PicoTechnology), コン

ピュータ等を組み合わせ、超音波顕微鏡を自作した。超音波プローブとして、PVDF を超音波トランスデューサとする中心周波数 80 MHz の凹面振動子 (HTD80-1215A, 本多電子) を用いた。2.4 mm × 2.4 mm の範囲を 8 μm × 8 μm おきに、音速と厚さの二次元分布を測定した。なお、シリコンゴムの音速の文献値は 1025 m/s^[4]あり、水の音速は 1480 m/s と仮定した。

4 結果・考察

図3, 4, 5 に、それぞれ C モード画像、音速二次元分布、厚さの二次元分布の測定結果を示す。試料が均一であることから、音速は試料上のすべての点において一定の値をとるべきである。

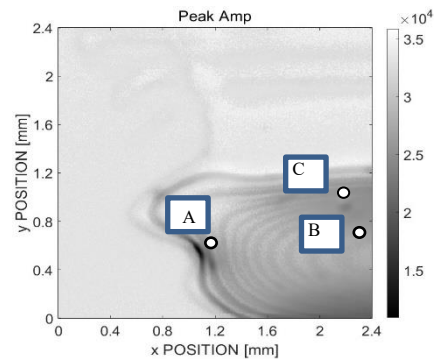


図3：Cモード像

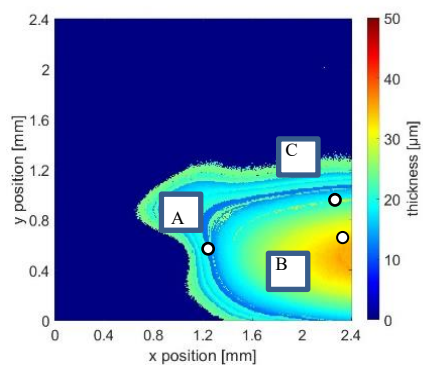


図4：厚さ二次元分布

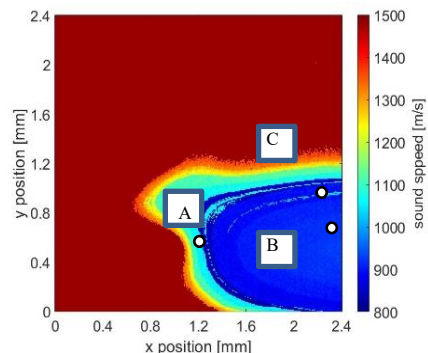


図5：音速二次元分布

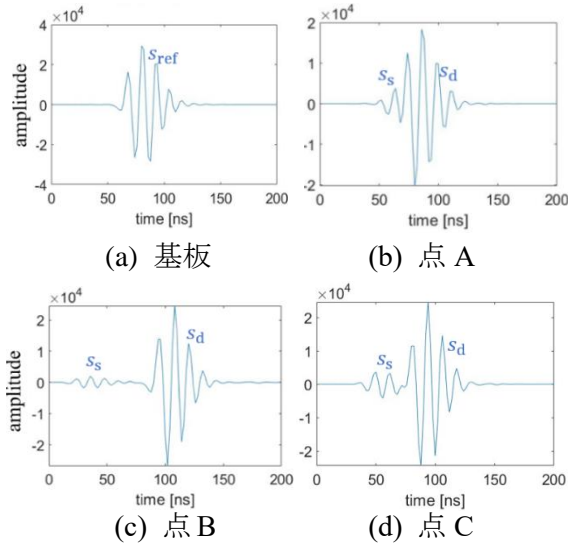


図6：基板，および点A, B, Cからの反射信号

しかし，式(1)における位相回転数 n が正しく推定されなかったために，この値とは異なる音速で計測される領域がみられた．これらの領域を2種類に分類した．1つ目は，点Aのように，試料の辺縁部で厚さが薄いため，適切な音速が算出できない点である．2つ目は，点Cのように，試料の厚さが一定 ($14\ \mu\text{m}$) 以上ではあるが，適切な音速が算出できない領域である．点A, 点CのRF信号を，正確な音速を算出できる領域の点Bおよび基板からのRF信号と併せて図6に示す．図6(b)より，点Aは s_s と s_d の伝播時間差が小さく試料の厚さが薄いことがわかる．

4.1 試料の厚さが薄い領域で正確な音速が計測できない原因

点Aにおける正規化振幅スペクトルを図7に示す．1つ目の極大値の位相回転数 n は2，厚さ $13.3\ \mu\text{m}$ ，音速 $1106\ \text{m/s}$ と計測された．点Aにおいては，試料の厚さが薄いため，超音波プローブの帯域内における正規化振幅スペクトルの波連長が少ない．また，計測したスペクトルは測定誤差を含んでおり，逆フーリエ変換によって求めた周期が正確でなくなり，位相回転数 n が正確に算出できなかったと考える．これは，高周波で帯域幅の広いデバイスを作製することで改善すると考えられる．

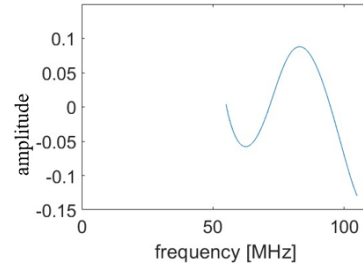


図7：点Aの正規化振幅スペクトルの干渉成分

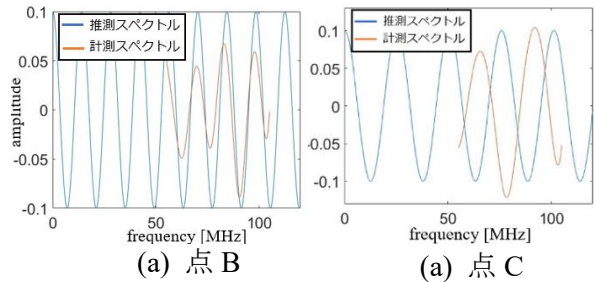


図8：点B, Cの正規化振幅スペクトルの干渉成分

4.2 試料の厚さが一定以上ある領域で正確な音速が計測できない原因

試料の厚さが一定以上ある領域においても，帯域幅内の振幅スペクトルの波連長は2以上あるが，適切な音速が算出できない場合がある．正確な音速が算出された点(点B)と算出されなかった点(点C)の計測した正規化振幅スペクトルの干渉成分と逆フーリエ変換により推定した周期より求めたスペクトルを図8に示す．

帯域幅内の最初の極大値の位相回転数 n ，厚さ d ，音速 c の結果を表1に示す．図8より，点Cは推測スペクトルと計測スペクトルと間の位相のずれが大きい．この位相のずれを示す指標として位相回転数誤差 $\Delta N (= |n - N|)$ を設定した． ΔN の値が大きいほど，音速と厚さの計測値の信頼度が低くなる．信頼度の低い値は省く必要性があると考え， $\Delta N > 0.3$ を満たす領域を厚さ $0\ \mu\text{m}$ ，音速 $1480\ \text{m/s}$ と設定した厚さと音速の二次元分布をそれぞれ図9, 10に示す．図9, 10では，図4, 5において試料の厚さがある正確に計測できない点を除くことができた．

表1:点Bと点Cにおける位相回転数, 音速, 厚さの計測値

| | 点 B | 点 C |
|--------------------------|------|------|
| 位相回転数 n | 5 | 3 |
| 厚さ d [μm] | 32.6 | 24.1 |
| 音速 c [m/s] | 909 | 1055 |

参考文献

- [1] 穂積直裕, 西條芳文, 応用物理, **12**, 935 (2018).
- [2] N. Hozumi, et. al., Acoust. Sci. & Tech. **24**, 6 (2003).
- [3] 小林 他, 電気関係学会東北支部連合大会, 2F06-10-04 (2024).
- [4] 菊池年晃, 日本音響学会誌, **35**, 29 (1979).

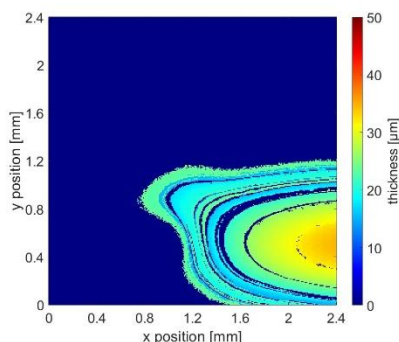


図9: 信頼度の低い領域を除いた厚さ分布

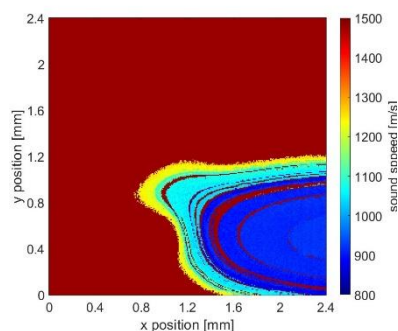


図10: 信頼度の低い領域を除いた音速分布

5 結論

本報告では, 生体模擬試料としてシリコーンゴムを用いて, 超音波トランスデューサの帯域制限により低周波領域の情報が欠落した周波数スペクトルにおける周期性を利用して, 低周波数領域における位相回転量を補間することで, 厚さ, 音速の二次元分布図を算出した. 一部の点で適切な厚さ, 音速を算出できなかったことから, 信頼度の高いデータであるかについて, 位相回転数誤差 ΔN を用いて判別し, 信頼性の低い計測点を除去することができた. 本実験では, 中心周波 80 MHz のプローブで厚さ 15 μm 以上のシリコーンゴムを計測できたことから, 250 MHz のプローブで 8 μm 以上の生体組織の計測が可能であり, 生体組織の計測に有用である.