

超音波顕微鏡による 固体表面力学特性微細分布の迅速測定

北見工業大学 柴野純一・小林道明・大森誠一

1. はじめに

超音波顕微鏡はこれまで、工学分野における材料内部の欠陥検出や医学分野における組織観察など、主に画像観察に用いられてきた。一方、著者らのひとり小林は、試料からの超音波反射強度と試料表面を伝搬する弾性表面波から密度や弾性率などの材料特性、力学特性を評価する方法を提案し医工学的にも有用な成果を得てきた⁽¹⁾⁽²⁾。最近のIT技術の進展や生体組織・材料への関心の高まりから測定対象は微細化かつ複合・不均質化している。それに伴い、微小領域における不均一な力学特性の正確な評価手法が望まれている。有力な手法としてナノインデンテーション法があるが、圧痕間を一定距離だけ離す必要性から測定点は離散的とならざるを得ない。またX線回折法でも微小領域の測定は可能であるが、弾性率の測定のためには負荷環境下での測定が必要となる。超音波顕微鏡を用いた従来手法においては、非接触、無負荷で力学特性の評価ができるので、微小領域の力学特性を連続的に測定することが可能である。しかしながら、測定点毎に材料・力学特性に関連する超音波反射強度を測定しなければならないため測定点が多い場合は時間がかかることから、その改善が課題となっていた。

本研究では、超音波顕微鏡による試料観察で用いられるCモード画像が材料表層の材料特性や力学特性を反映していることに着目し、さまざまな材料におけるCモード画像の輝度値と超音波反射強度の関係を調べた。その結果を基に、Cモード画像輝度値から超音波反射強度を推定する方法を提案し、XZモードによる表面波音速測定結果と合わせて、微小領域の材料・力学特性を連続的にかつ迅速に測定するシステムを開発したので紹介する。

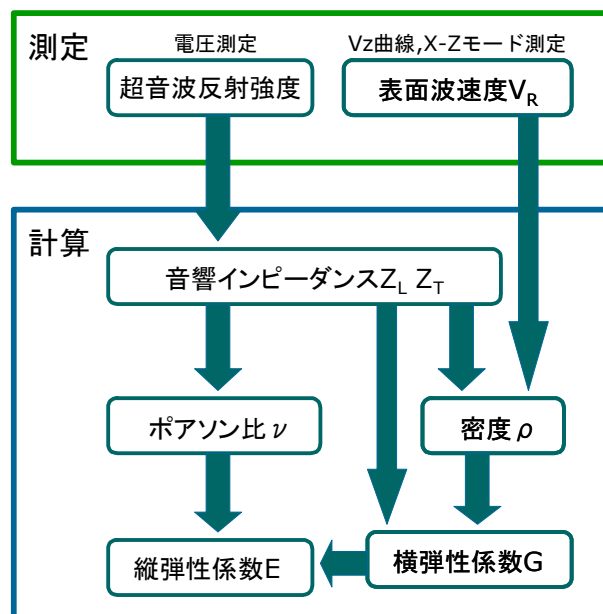
2. 測定理論

第1図に超音波顕微鏡による固体表面材料・力学特性の評価の流れを示す。まず、試料表面を伝搬する漏洩弾性表面波の音速 V_R は、第2図に示す従来法の $V(z)$ 曲線を用いて式(1)で求める⁽³⁾。

$$V_R = \frac{V_W}{\left[1 - \left(1 - \frac{V_W}{2F\Delta z}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \quad \dots (1)$$

ここで、 V_W は媒質の音速、 F は超音波周波数、 Δz は $V(z)$ 曲線の周期である。

第3図に示すように、超音波を試料に入射すると試料から直接反射される波がある。入射した縦波の試料に対する反射係数を R_s とすれば、試料とカップラントである水の縦波に対する音響インピーダンス Z_{Ls} 、 Z_w との間には式(2)の関係がある。



第1図 超音波顕微鏡による固体表面材料・力学特性評価の流れ

$$R_s = \frac{(Z_{L_s} - Z_W)}{(Z_{L_s} + Z_W)} \quad \dots (2)$$

式(2)から Z_{L_s} を求めたいが、必要となる R_s の絶対値を正確に測定することが難しい。そこで、音響インピーダンスが明らかなアルミニウムの反射係数 R_a を同一条件で測定すると式(3)の関係が得られる。

$$R_a = \frac{(Z_{L_a} - Z_W)}{(Z_{L_a} + Z_W)} \quad \dots (3)$$

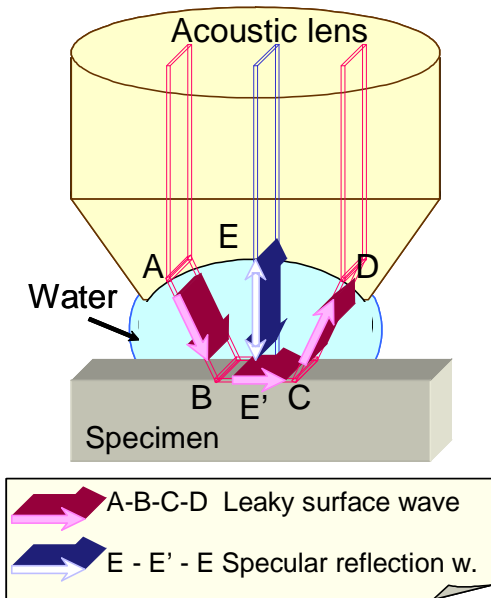
式(2)、(3)から比 $X=R_s/R_a$ を求めると式(4)となる。

$$X = \frac{R_s}{R_a} = \frac{(Z_{L_s} - Z_W)(Z_{L_a} + Z_W)}{(Z_{L_a} - Z_W)(Z_{L_s} + Z_W)} \quad \dots (4)$$

式(2)、(3)、(4)から試料の音響インピーダンス Z_{L_s} は式(5)で求められる。

$$Z_{L_s} = \frac{Z_{L_a} + Z_W + (Z_{L_a} - Z_W)X}{Z_{L_a} + Z_W - (Z_{L_a} - Z_W)X} Z_W \quad \dots (5)$$

密度やポアソン比の算出には横波に対する試料の音響インピーダンスが必要となるが、その絶対値も



第2図 漏洩弾性表面波の音速測定

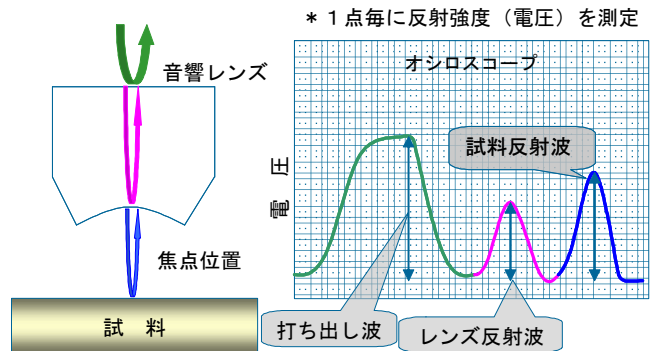
正確に測定することが難しい。著者らによるこれまでの研究により第4図に示す関係が得られており、横波に対する音響インピーダンス Z_T は縦波の反射強度比 $X=R_s/R_a$ から式(6)で求めることができる。

$$Z_T = 0.157e^{4.047X} \quad \dots (6)$$

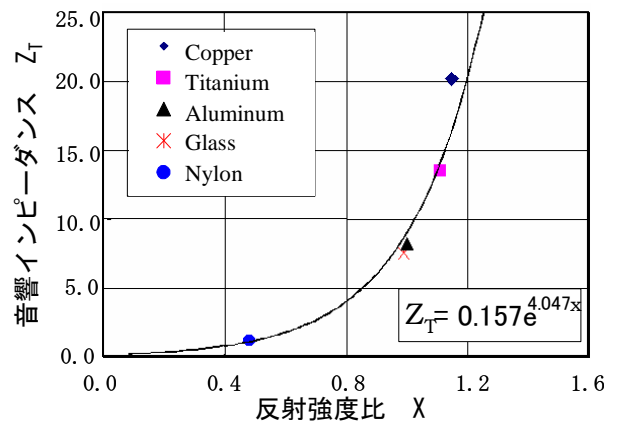
試料の表面を伝搬する弾性表面波速度 V_R と縦波、横波の速度 V_L 、 V_T には式(7)の関係がある。

$$\left(\frac{V_R}{V_T}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_T}\right)^4 + 8\left(\frac{V_R}{V_T}\right)^2 \left\{3 - 2\left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2\right\} - 16\left\{1 - \left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2\right\}^2 = 0 \quad \dots (7)$$

また、試料の縦波、横波の速度 V_L 、 V_T と密度 ρ_s 、縦波、横波に対する音響インピーダンス Z_{L_s} 、 Z_{T_s} には式(8)、(9)の関係がある。



第3図 試料の超音波反射強度の測定



第4図 縦波反射強度比 X と横波音響インピーダンス Z_T の関係

$$V_{Ls} = \frac{Z_{Ls}}{\rho_s} \quad \dots(8)$$

$$V_{Ts} = \frac{Z_{Ts}}{\rho_s} \quad \dots(9)$$

式(7)に式(8)、(9)を代入して式(10)が得られる。

$$\left(\frac{V_R}{Z_{Ts}}\right)^6 \rho_s^6 - 8\left(\frac{V_R}{Z_{Ts}}\right)^4 \rho_s^4 + 8\left(\frac{V_R}{Z_{Ts}}\right)^2 \times \left\{3 - 2\left(\frac{Z_{Ts}}{Z_{Ls}}\right)^2\right\} \rho_s^2 - 16\left\{1 - \left(\frac{Z_{Ts}}{Z_{Ls}}\right)^2\right\} = 0 \quad \dots(10)$$

漏洩弾性表面波速度 V_R は超音波顕微鏡の $V(z)$ 曲線法により求めることができ、縦波と横波に対する音響インピーダンス Z_{Lb} 、 Z_{Tb} は式(5)、(6)より求めることができる。したがって、式(10)は ρ_s^2 の3次方程式となり、この3次方程式を解くことにより試料の密度 ρ_s を得ることができる。

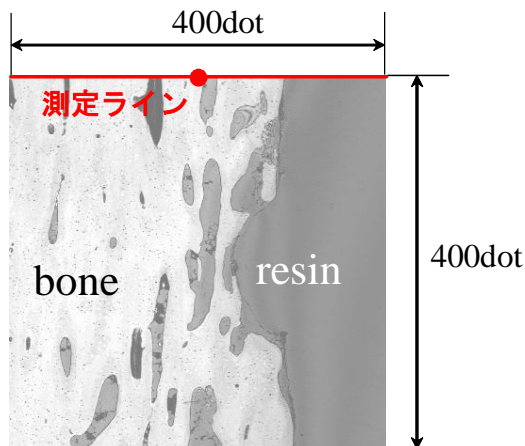
ポアソン比 ν は、横波、縦波の音速 V_{Ls} 、 V_{Ts} とそれぞれの音響インピーダンス Z_{Ls} 、 Z_{Ts} との関係式(11)から求められる。

$$\frac{V_{Ts}}{V_{Ls}} = \frac{Z_{Ts}}{Z_{Ls}} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad \dots(11)$$

等方性を仮定すると試料の横弾性係数 G_s 、縦弾性係数 E_s はそれぞれ次式によって求めることができる。

$$G_s = \frac{Z_{Ts}^2}{\rho_s} \quad \dots(12)$$

$$E_s = 2(1+\nu)G_s \quad \dots(13)$$



第5図 樹脂包埋生体骨のCモード画像

3. Cモード画像を利用した力学特性分布の迅速測定方法

超音波顕微鏡には試料の平面画像を表示するCモード機能がある。これは試料の力学特性を反映した超音波反射エコーを輝度変調して表示する機能である。そこで本研究では、輝度値と反射強度値の関係を求め、各点の輝度値から反射強度を推定する方法を考案した。Cモード画像は第5図のように400×400点で構成され、それぞれの輝度値は試料反射エコーの強さに比例し256階調に分けられる。

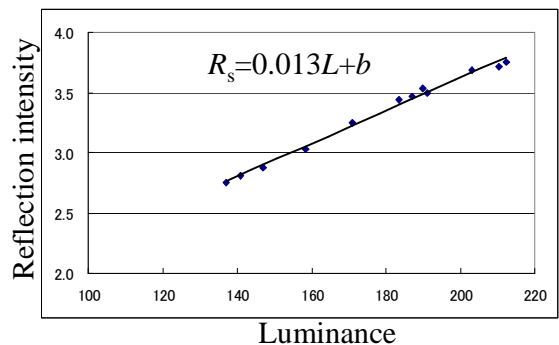
まず、Cモードによる試料表面画像における各点の輝度値 L と反射強度値 R_s の関係を示す第6図から実験式(14)を求めた。

$$R_s = 0.013L + b \quad \dots(14)$$

定数 b は、X-Zモードによる音速測定ごとに測定ライン上の1点における反射強度値 R_s をオシロスコープで測定し、試料表面画像による同一点の輝度値 L を読み取り、それらを式(14)に代入することで決定できる。

この方法により試料の1ライン上の最大400点の反射係数 R_s が求められるので、さらにX-Zモードにより同一ライン上の音速を細かく測定すれば、式(10)～(13)により材料・力学特性の連続した微細な分布を算出することができる。

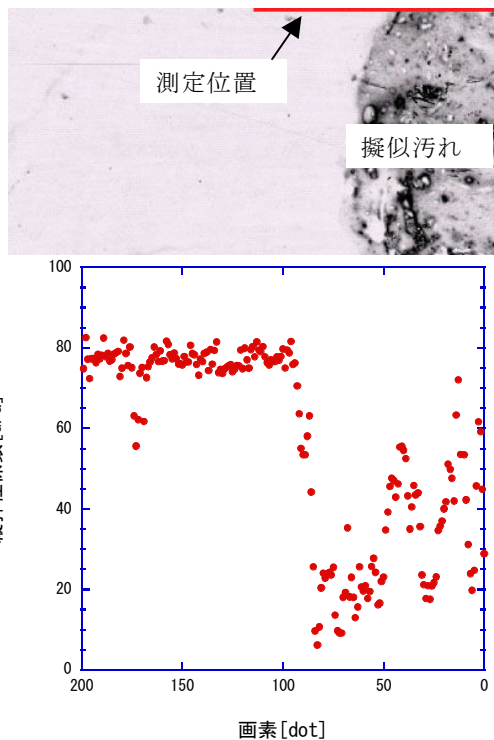
測定例として、第7図にアルミニウムの縦弾性係数分布を示す。超音波顕微鏡は日立建機製のHSAM 200を使用した。超音波周波数は200MHzとした。画素94～199の位置の平均縦弾性係数76.1GPaであり妥当な値を示している。図の測定位置右側(画素0～93)の暗い領域は油性マジックインキによる



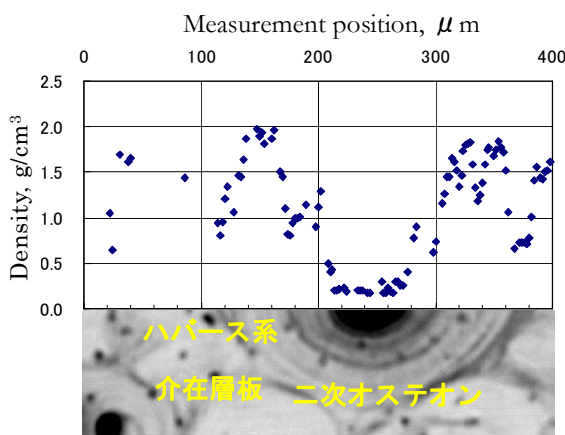
第6図 試料Cモード画像輝度値と超音波反射強度の関係

擬似汚れである。この領域の輝度値が低くなるため弾性率も低くなっている。このように試料表面の汚れによって測定精度が影響を受けるので注意が必要である。第8図に生体骨のハバース系周辺の密度分布を示す。2次オステオンや介在層板内で密度が変化している様子がよくわかる。

本法により超音波反射強度測定時間の大幅な短縮が図れる。従来技術ではこれまで1測定点あたり3～5分かかるため、例えば測定点が200点の場合、



第7図 アルミニウムの縦弾性係数分布



第8図 生体骨の密度分布

600分～1000分かかることになる。それに対し、本法ではCモード画像の測定と中央1点の反射強度を測定すれば、計算によって連続した点の超音波反射強度が得られるので、測定点数に関係なく約10分しかかからない。これにより、力学特性微細分布の迅速測定、測定効率向上、コスト低減などが期待できる。さらに測定可能な材質も金属、セラミックス、高分子材料、生体硬組織と多種であり、測定形態は非接触、非破壊であるので、本法は下記に示すさまざまな材料の評価に有用であると考えている。

- 1) LSI製造工程における品質評価
- 2) ミクロ構造物の機械的信頼性評価
- 3) 複合材料の力学特性マイクロレベル評価
- 4) 生体硬組織の力学特性微細分布評価

4. おわりに

超音波顕微鏡による試料観察で用いられるCモード画像が材料表層の材料特性や力学特性を反映していることに着目し、Cモード画像輝度値から超音波反射強度を推定する方法を提案した。XZモードによる表面波音速測定結果と合わせて、微小領域の材料・力学特性を連続的にかつ迅速に測定するシステムを開発した。実際にアルミニウムや生体骨の材料・力学特性を測定し本法の有効性を確認した。

<参考文献>

- (1) 中土幸男・小林道明・野村彰夫・吉田郁夫・森泉哲次：”超音波顕微鏡を用いた皮質骨および骨折部の音響的異方性の観察”、日本臨床バイオメカニクス、Vol. 20、pp. 213-217、1999.
- (2) 青木大輔・小林道明・中土幸男・井上昌信・佐藤浩史・吉田郁夫：”超音波顕微鏡による骨組織の力学特性評価”、日本機械学会論文集A編、Vol. 67、No653、pp. 175-183、2001.
- (3) 社団法人日本非破壊検査協会編：”音弾性”、pp. 42-53、1994.