超音波顕微鏡による局所領域の弾性係数測定*

西 田 政 弘^{*1}, 遠 藤 富 男^{*2}
足 立 忠 晴^{*3}, 松 本 浩 之^{*3}Measurement of Elastic Moduli in Local Area
by Scanning Acoustic MicroscopeMasahiro NISHIDA, Tomio ENDO,
Tadaharu ADACHI and Hiroyuki MATSUMOTO

In the present paper, a new method is suggested for the nondestructive measurement of elastic moduli in a local area (100-400 μm in diameter) by the scanning acoustic microscope (SAM). The complex $V(z)$ curve which denotes the amplitude and phase of reflected ultrasonic waves from a specimen is measured for the variable distance through liquid occupying the space between the acoustic lens and the specimen. After inverse Fourier transform of the complex $V(z)$, the reflectance function of the liquid-specimen interface is computed. The velocities of the longitudinal, transverse and Rayleigh waves in the specimen can be estimated from the reflectance function. Then, Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio of the specimen can be determined from the measured wave velocities and the density, according to the elastodynamic theory. The experimental results of six kinds of materials including alloy and ceramics agree with the elastic moduli obtained by other methods. It is shown that the present method is very useful in determining the elastic moduli in local areas.

Key Words: Nondestructive Inspection, Material Testing, Fast Fourier Transform, Experimental Mechanics, Ceramics, Scanning Acoustic Microscope, Elastic Modulus, $V(z)$ Curve, Reflectance Function, Ultrasonics, Surface Wave, Al Alloy

1. 結 言

マイクロマシンに代表される機械の微細化, 材料科学の分野におけるデバイスの品質管理, 複合材料や傾斜機能材料などの不均質性を有する材料の評価, またき裂先端部の塑性変形領域の測定⁽¹⁾などの損傷評価の要求から, 局所領域における材料の力学的特性を非破壊的に測定する方法の確立が望まれている。

その中でも弾性係数は固体材料の機械的特性を判断する上で, 評価すべき重要な基本的特性の一つである。特にセラミックスのような脆性材料では, 線形弾性体として扱うことのできる応力領域において破壊が生じるので, この領域における応力-ひずみ関係を規定する弾性係数を知ることは, 不可欠である。

弾性係数の測定法としてひずみゲージや変位計などを用いて, 引張試験により得られる応力-ひずみ曲線などから求める静的測定法⁽²⁾および加振される棒状

試料の伸縮, 曲げまたはねじりの固有振動数などから求める動的測定法⁽³⁾が従来から一般的に用いられてきた。いずれの方法も数 mm^2 以上の領域を平均化して測定をしており, 1 mm^2 以下の局所領域の弾性係数を非破壊的に測定することは困難であった。

局所領域の弾性係数が測定可能な方法として, 負荷応力に対するひずみから求める X 線法⁽⁴⁾, 材料中の波動の伝ば速度から求める超音波法などが提案されている。超音波法は材料の精密な表面仕上げが必要であることや不連続境界近傍では測定が困難となるなどの問題があるものの, 多結晶, 単結晶および非晶質材料ともに測定が可能であり, 取扱いが安全という利点があるため, 局所領域の弾性係数を非破壊的に測定する新たな方法として期待されている。

超音波により材料の局所領域の弾性係数の測定を試みた研究には次のようなものがある。Kushibiki ら⁽⁵⁾はパルス干渉法から得られる縦波の伝ば速度および超音波顕微鏡で得られる漏えいレイリー波の伝ば速度より弾性係数を求める方法を提案している。また Mihara ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾は超音波顕微鏡で得られる漏えい擬縦波および漏えいレイリー波の伝ば速度から弾性係数を求める方法を提案している。また小林ら⁽⁸⁾は超音波顕微鏡を,

* 原稿受付 平成 5 年 5 月 31 日。

^{*1} 准員, 東京工業大学大学院 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。^{*2} 正員, オリパス光学工業(株) (〒192 八王子市石川町2951)。^{*3} 正員, 東京工業大学工学部。

相澤ら⁽⁹⁾は超音波スペクトラム顕微鏡⁽¹⁰⁾を用いて、漏えいレイリー波の伝ば速度と超音波の周波数から逆問題的に材料の弾性係数を評価する方法を提案している。

超音波顕微鏡は音響レンズからカップラ(液体)を通して固体材料に超音波を入射し、反射波を解析することにより材料特性を評価するシステムである。反射波には固体材料とカップラ(液体)の両側の材料特性が複合しているので、 $V(z)$ 曲線解析法⁽¹¹⁾で測定される速度はカップラ(液体)の影響を含んだ固体材料の漏えい弾性表面波の伝ば速度であった。そこで位相を考慮した複素 $V(z)$ 曲線を測定し、解析することにより固相と液相の反射関数を求め、カップラ(液体)の影響を除いた固体材料のみの波動伝ば特性を分離する解析法が提案されている。

Liang ら⁽¹²⁾は複素 $V(z)$ 曲線(強度と位相)をフーリエ逆変換することにより反射関数を求め、固相のみの縦波、横波、レイリー波の伝ば速度を直接解析できることを提案した。また Endo ら⁽¹³⁾は、400 MHz の高周波領域において実験的に確認を行った。

本研究では、Liang らおよび Endo らによって提案された複素 $V(z)$ 曲線の解析法に基づいて得られる材料の縦波、横波の伝ば速度を求め、これより表面近傍の局所領域($\phi 100 \sim 400 \mu\text{m}$)の弾性係数を非破壊的に測定する方法を明らかにすることを目的とする。

2. 反 射 関 数

図1のように試料としての固相とカップラとしての液相の境界面上を原点とする (x, y, z) 座標軸を定める。液相を伝ばする波動の速度ポテンシャル ϕ^f は入射波と反射波の和として次式に示される。

図1 固相/液相境界における波動の反射・透過

$$\begin{aligned} \phi^f = & \phi_{\text{IN}}^f \exp[i\{(x \sin \theta_L^f + z \cos \theta_L^f)k_L^f - \omega t\}] \\ & + \phi_{\text{OUT}}^f \exp[i\{(x \sin \theta_L^f - z \cos \theta_L^f)k_L^f - \omega t\}] \\ & \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここで ϕ_{IN}^f および ϕ_{OUT}^f はそれぞれ入射波および反射波の振幅である。また θ_L^f , k_L^f , ω および t は超音波の入射角、液相の縦波の波数、角振動数および時間である。なお i は虚数単位である。

また固相の変位 u_i および応力 σ_{ij} ($i, j = x, z$) は Helmholtz の定理により、縦波および横波を表す変位ポテンシャル ϕ, ψ を用いて次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} u_x &= \partial \phi / \partial x - \partial \psi / \partial z \\ u_z &= \partial \phi / \partial z + \partial \psi / \partial x \\ \sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu) \partial u_x / \partial x + \lambda \partial u_z / \partial z \\ \sigma_{xz} &= \mu (\partial u_x / \partial z + \partial u_z / \partial x) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで λ, μ はラーメの定数である。

固相と液相の境界面 ($z=0$) において z 方向の垂直応力および変位速度が等しく、またせん断応力が作用しないものと仮定して、式(1)および式(2)から入射波の振幅に対する反射波の振幅の比である反射関数 R は次のように求められる⁽¹⁴⁾。

$$R = \frac{Z_L^f \cos^2 2\theta_L^f + Z_L^s \sin^2 2\theta_L^f - Z_L^f}{Z_L^f \cos^2 2\theta_L^f + Z_L^s \sin^2 2\theta_L^f + Z_L^f} \dots\dots\dots (3)$$

ここで $Z_n^m = \rho_n^m C_n^m$ ($m=f, s$, $n=L, T$)、 ρ_n^m は密度、 C_n^m は波動伝ば速度であり、上添字 f および s は液相および固相を、下添字 L および T は縦波および横波を示す。

図2に固相を熔融石英、液相を水とした場合の式(3)で示される反射関数 R を示す。数値計算を行うにあたって以下の数値を用いた。

$$\left. \begin{aligned} C_L^f &= 1500 \text{ [m/s]}, \rho^f = 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]} \\ C_L^s &= 5970 \text{ [m/s]}, C_T^s = 3760 \text{ [m/s]} \\ \rho^s &= 2200 \text{ [kg/m}^3\text{]} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

反射関数の強度では縦波 (∇A) および横波 (∇B) の臨界角に一致したときの入射角 14.6 deg. および 23.5 deg. (規格化波数 $k_L^f/k_L^s = 0.967$ および 0.917) に対して反射関数の強度が急変することがわかる。また位相ではレイリー波 (∇C) の臨界角に一致したときの入射角 26.1 deg. (規格化波数 $k_L^f/k_L^s = 0.897$) に対して位相が 360 deg. 近く変化している。

それぞれの臨界角に対する波数と波動伝ば速度には、Snell の法則より

$$\left. \begin{aligned} (k_L^f/k_L^s)_A &= 1 - C_L^f/C_L^s \\ (k_L^f/k_L^s)_B &= 1 - C_L^f/C_T^s \\ (k_L^f/k_L^s)_C &= 1 - C_L^f/C_R^s \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

の関係がある。ここで C_R^s は固相のレイリー波の伝ば速度を示す。反射関数から求められる臨界角に対する

波数より、固相の波動伝ば速度が得られる。

それぞれの波動の伝ば速度と固相の弾性係数には弾性論により次の関係がある⁽¹⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} E &= \rho^s \frac{3C_L^{s2} C_T^{s2} - 4C_T^{s4}}{C_L^{s2} - C_T^{s2}} \\ G &= \rho^s C_T^{s2} \\ \nu &= \frac{C_L^{s2} - 2C_T^{s2}}{2(C_L^{s2} - C_T^{s2})} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで E, G および ν は縦弾性係数、横弾性係数およびポアソン比である。固相の密度が既知であれば式(6)に従って波動伝ば速度からそれぞれの弾性係数を決定することができる。

3. 超音波顕微鏡

3.1 測定原理 2章の基礎理論に基づいて超音波顕微鏡を利用して固相の弾性係数を決定する。超音波顕微鏡の測定原理の概念図を図3に示す。

(a) 強度

(b) 位相

図2 反射関数の計算結果(水に接する熔融石英)

試料に垂直に入射して反射する鏡面反射波(経路EO'E)と、試料とカップラ(液体)の境界を伝ばする漏えい弾性表面波の伝ば速度の臨界角 θ_{LSAW} で入射して表面波に変換され、その表面波が漏えいして発生する超音波(経路ABCD)とは干渉し合う。試料を音響レンズの焦点面までの距離から近づけていくと経路EO'Eと経路ABCDに差が生じ、干渉は周期的に変化する。この干渉が音響レンズのトランスデューサ出力として測定され複素 $V(z)$ 曲線が得られる。

$V(z)$ 曲線の表現式はポイントフォーカスレンズのような球面波を放射するレンズを用いた場合には、音響レンズの伝達関数である瞳関数を P とおくと反射関数と瞳関数から次式で表される⁽¹²⁾。

$$V(z) = a \int_{k_L}^{k_L \cos \theta_0} P^2(k_L z) R(k_L z) \times \exp(-i2k_L z) dk_L z \dots\dots\dots (7)$$

ここで

$$a = \left[\int_{k_L}^{k_L \cos \theta_0} P^2(k_L z) dk_L z \right]^{-1} \dots\dots\dots (8)$$

であり、 θ_0 は音響レンズの開口半角である。

図4(a)に複素 $V(z)$ 曲線(熔融石英の計算値)を示す。横軸は音響レンズの焦点と試料表面の距離である。焦点面を $z=0$ 、音響レンズと試料が近づく方向を負とすると、 $z<0$ の領域では強度、位相ともに周期的変化を示している。この周期、超音波の周波数およびカップラ(液体)の縦波の伝ば速度より漏えい弾性表面波の伝ば速度が求められる⁽¹⁶⁾。

3.2 複素 $V(z)$ 曲線による波動伝ば測定 $V(z)$ 曲線の強度のみからは漏えい弾性表面波の伝ば速度しか求められない。これに対し位相を考慮した複素 $V(z)$ 曲線を測定して反射関数を求めることにより、励起されるすべての波の臨界角を検出する方法が提案されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

式(7)を z についてフーリエ逆変換すれば次式が求められる。

図3 $V(z)$ 曲線の測定原理

$$P^2(k'_L)R(k'_L) = \frac{1}{2\pi\alpha} \int_{-\infty}^{\infty} V(z) \exp(i2k'_L z) dz \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)から、複素 $V(z)$ 曲線をフーリエ逆変換すれば、瞳関数の二乗と反射関数の積が得られることがわかる。

熔融石英について計算した結果を図4に示す。解析に用いた数値は式(4)と同様である。また瞳関数は、近似式⁽¹³⁾として

$$P(k'_L) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\pi \frac{k'_L/k_L - 1}{\cos \theta_0 - 1} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (10)$$

を用いた。瞳関数が比較的なだらかに変化する場合には、複素 $V(z)$ 曲線のフーリエ逆変換結果に反射関数による縦波(∇A)および横波(∇B)の伝ば速度に関する極大の信号、レイリー波(∇C)の伝ば速度に関する位相の変化が確認できる。

4. 測 定

4.1 試料 多結晶窒化けい素、多結晶炭化けい素、多結晶アルミナ[以上(株)日本セラテック]、単結晶アルミナ(r 面)、熔融石英およびアルミニウム合金(A6063)を試料として用いた。表1に用いた超音波顕微鏡の測定領域、試料の平均粒径を示す。また比較のために引張試験、パルスエコー法または文献による弾

性係数、ポアソン比および密度を示す。なお超音波顕微鏡の測定領域の直径 D は表面波の波動伝ば経路から幾何学的に決まり、レンズの作動距離および試料の漏えい弾性表面波を W_D および C_{LSAW}^* とすれば、次のように表すことができる⁽¹⁶⁾。

$$D = 2W_D \tan \{ \sin^{-1} (C_L/C_{LSAW}^*) \} \quad \dots\dots\dots (11)$$

多結晶窒化けい素、多結晶炭化けい素は針状結晶であることから、表1では直径×長さとして粒径を表示した。多結晶材料では、すべて粒径に比べて測定領域が25倍以上となっている。いずれの試料も $\phi 1 \mu\text{m}$ のダイヤモンドペーストにより表面仕上げを行っている。試料は測定結果に底面の影響がないように厚さを縦波の波長の10倍以上とした。

4.2 測定条件 4.1節で示した試料の波動伝ば速度を、位相検出型超音波顕微鏡[オリンパス光学工業(株)製]により測定を行った。測定条件として400 MHz(パースト波)の音響レンズを使用して z 方向移動ステップ $0.8 \mu\text{m}$ 間隔に走査し、512点のデータから複素 $V(z)$ 曲線を求めた。音響レンズとしてポイントフォーカスレンズを用いたため測定結果は測定領域の平均値である。またカップラとして 25°C の水を使用した。

また今回用いた音響レンズの瞳関数の二乗の測定結果を図5に示す。この瞳関数の二乗の強度は比較的な

図4 熔融石英の複素 $V(z)$ 曲線とフーリエ逆変換結果(計算)

だらかに変化しており、位相はほぼ 0 deg. で一定値であることがわかる。したがってこのレンズを用いることにより波動伝ば速度に関する信号が確認でき、波動伝ば速度の測定が可能である⁽¹³⁾。

瞳関数はレンズの開口角内に縦波の臨界角が存在せず、波動伝ば速度が遅く、瞳関数がほぼ一定となる試料の複素 $V(z)$ 曲線を測定することにより実験的に求められる。図 5 はテフロンを用いて 5 ケ所でそれぞれ 1 回測定した結果の平均値である。テフロン縦波の伝ば速度は 1400 m/s で水の縦波の伝ば速度 1500 m/s (25°C) より小さいので瞳関数が測定可能である。ただし、複素 $V(z)$ 曲線の測定結果は水の吸収の効果を除去しており、位相に関する結果には試料とレンズの距離の移動に伴う水中での位相変化を取り除いてある。またテフロン反射関数は k_L^t/k_L^r が大きくなるにつれてわずかではあるが小さくなるため、その効果を理論値により補正している。またフーリエ変換を行う際ダミーデータとして零を加え見掛け上のデータ数を 2^{14} (=16384) としてスペクトルが多く分解できるよう

にした。その結果、フーリエ逆変換上の波動伝ば速度の誤差は 0.4% 以下である。

4.3 波動伝ば速度の測定 溶融石英の複素 $V(z)$ 曲線の測定結果を図 6 に示す。強度および位相において $z < 0$ の領域では漏えいレイリー波の伝ば速度に近い周期で変化している。図 6 の複素 $V(z)$ 曲線のフーリエ逆変換結果を図 7 に示す。強度では横波の臨界角に対応する信号 (7B) が、位相ではレイリー波の臨界角に対応する信号 (7C) が確認できる。それぞれの信号の波数から、横波およびレイリー波の伝ば速度が 3740 m/s および 3420 m/s として得られる。縦波の臨界角に対応する信号 (7A) は信号が確認できるものの微弱である。

次にアルミニウム合金の複素 $V(z)$ 曲線のフーリエ逆変換結果を図 8 に示す。強度では縦波および横波の臨界角に対応する信号 (7A および 7B) が、位相ではレイリー波の臨界角に対応する信号 (7C) が確認できる。それぞれの信号の波数から、縦波、横波およびレイ

表 1 測定に用いた試料の材料特性

Sample	Measured Area [μm]	Mean Grain Size [μm]	Young's Modulus [GPa]	Shear Modulus [GPa]	Poisson's Ratio	Density [10^3kg/m^3]	Test Method
Fused Quartz	$\phi 300$	—	73.1	31.2	0.17	2.2	Ref. (17)
Al Alloy (A6063)	$\phi 380$	$\phi 80$	69.3	25.8	0.34	2.7	Tensile Test
SiC (Poly.)	$\phi 140$	$\phi 5 \times 10$	382	165	0.16	3.12	Ultrasonic Pulse Echo Method
Si_3N_4 (Poly.)	$\phi 170$	$\phi 4 \times 10$	314	124	0.27	3.21	
Al_2O_3 (Poly.)	$\phi 160$	$\phi 12$	402	162	0.24	3.99	
Al_2O_3 (Single)	$\phi 160$	—	425	173	0.23	3.99	Ref. (4)

Poly. : Polycrystal
Single : Single Crystal

(a) 強度

(b) 位相

図 5 音響レンズの瞳関数の二乗の測定結果

リー波の伝ば速度が6450 m/s, 3050 m/sおよび2830 m/sとして得られる。これらの波動伝ば速度はレイリー波の伝ば速度に関する式(12)⁽¹⁵⁾を満足する。

$$\frac{C_R^{s2}}{C_T^{s2}} \left[\frac{C_R^{s6}}{C_T^{s6}} - 8 \frac{C_R^{s4}}{C_T^{s4}} + C_R^{s2} \left(\frac{24}{C_T^{s2}} - \frac{16}{C_L^{s2}} \right) \right]$$

$$-16 \left(1 - \frac{C_T^{s2}}{C_L^{s2}} \right) = 0 \dots\dots\dots (12)$$

したがって、波動伝ば速度を複素 $V(z)$ 曲線のフーリエ逆変換から求める方法は妥当であることが確認できた。

4.4 弾性係数測定結果と考察 式(6)により縦

(a) 強度

(b) 位相

図6 溶融石英の複素 $V(z)$ 曲線の測定結果

(a) 強度

(b) 位相

図7 溶融石英の複素 $V(z)$ 曲線のフーリエ逆変換結果

(a) 強度

(b) 位相

図8 アルミニウム合金の複素 $V(z)$ 曲線のフーリエ逆変換結果

表 2 超音波顕微鏡による各試料の弾性係数の測定結果

Sample	Young's Modulus [GPa]	Shear Modulus [GPa]	Poisson's Ratio	Sample	Young's Modulus [GPa]	Shear Modulus [GPa]	Poisson's Ratio
Fused Quartz				Si ₃ N ₄ (Poly.)			
No.1	7.5×10	3.1×10	2.2×10 ⁻¹	No.1	2.88×10 ²	1.08×10 ²	3.3×10 ⁻¹
No.2	7.6×10	3.1×10	2.4×10 ⁻¹	No.2	2.93×10 ²	1.08×10 ²	3.5×10 ⁻¹
No.3	7.3×10	3.0×10	2.5×10 ⁻¹	No.3	2.86×10 ²	1.10×10 ²	2.9×10 ⁻¹
No.4	7.6×10	3.0×10	2.6×10 ⁻¹	No.4	2.85×10 ²	1.09×10 ²	3.0×10 ⁻¹
No.5	7.4×10	3.1×10	2.1×10 ⁻¹	No.5	2.87×10 ²	1.10×10 ²	2.9×10 ⁻¹
mean value	7.5×10	3.1×10	2.4×10 ⁻¹	mean value	2.87×10 ²	1.09×10 ²	3.2×10 ⁻¹
Al Alloy (A6063)				Al ₂ O ₃ (Poly.)			
No.1	6.8×10	2.5×10	3.7×10 ⁻¹	No.1	3.82×10 ²	1.60×10 ²	2.0×10 ⁻¹
No.2	6.6×10	2.4×10	3.5×10 ⁻¹	No.2	3.93×10 ²	1.62×10 ²	2.1×10 ⁻¹
No.3	6.7×10	2.5×10	3.6×10 ⁻¹	No.3	3.47×10 ²	1.50×10 ²	1.6×10 ⁻¹
No.4	6.6×10	2.4×10	3.7×10 ⁻¹	No.4	3.79×10 ²	1.57×10 ²	2.0×10 ⁻¹
No.5	6.7×10	2.5×10	3.5×10 ⁻¹	No.5	3.97×10 ²	1.59×10 ²	2.5×10 ⁻¹
mean value	6.7×10	2.5×10	3.6×10 ⁻¹	mean value	3.79×10 ²	1.57×10 ²	2.0×10 ⁻¹
SiC (Poly.)				Al ₂ O ₃ (Single)			
No.1	3.82×10 ²	1.64×10 ²	1.6×10 ⁻¹	No.1	4.17×10 ²	1.71×10 ²	2.2×10 ⁻¹
No.2	4.26×10 ²	1.79×10 ²	1.9×10 ⁻¹	No.2	4.23×10 ²	1.68×10 ²	2.4×10 ⁻¹
No.3	3.69×10 ²	1.59×10 ²	1.7×10 ⁻¹	No.3	4.21×10 ²	1.68×10 ²	2.5×10 ⁻¹
No.4	3.91×10 ²	1.74×10 ²	1.2×10 ⁻¹	No.4	4.28×10 ²	1.70×10 ²	2.6×10 ⁻¹
No.5	3.83×10 ²	1.65×10 ²	1.6×10 ⁻¹	No.5	4.20×10 ²	1.73×10 ²	2.1×10 ⁻¹
mean value	3.90×10 ²	1.68×10 ²	1.6×10 ⁻¹	mean value	4.22×10 ²	1.70×10 ²	2.4×10 ⁻¹

Poly. : Polycrystal
Single : Single crystal

波および横波の伝ば速度と試料の密度から弾性係数およびポアソン比を求めた。アルミニウム合金を除いた5種の試料では溶融石英と同様に縦波の伝ば速度を複素 $V(z)$ 曲線のフーリエ逆変換から測定することはできなかった。そこで縦波の伝ば速度は式(12)を用いて横波およびレイリー波の伝ば速度から計算した。また密度は試料全体の密度が均一と仮定してアルキメデスの原理により求められる表1の巨視的な密度を用いた。

測定はそれぞれの試料について一つの点を中心にその点と、0.5 mm 離れ 90 deg. ずつ回転した4ヶ所の計5ヶ所で、それぞれ1回ずつ測定した。その5ヶ所の測定結果を表2に示す。

いずれの試料に対しても5ヶ所の測定結果の平均値は他の方法で測定された表1の値とほぼ一致した縦弾性係数および横弾性係数が求められている。ポアソン比の測定結果では全体的には比較的近い値が得られているものの、溶融石英については若干大きい結果となった。

以上のように複素 $V(z)$ 曲線を解析し、局所領域における弾性係数およびポアソン比を非破壊的に測定する本方法は妥当であり、また実用上有効であることが確認された。

5. 結 言

超音波顕微鏡により測定される縦波および横波の伝ば速度から局所領域 ($\phi 100 \sim 400 \mu\text{m}$) の弾性係数およびポアソン比を非破壊的に測定する方法を提案した。その結果、本手法ではセラミックなどのように波動伝ば速度が速く作動距離内に $V(z)$ 曲線の周期が少ないため従来測定精度が低下すると考えられていた材料でも弾性係数およびポアソン比は測定可能であることがわかり、局所領域の材料評価などが可能であることが示唆できた。しかしポアソン比の測定結果は他の方法および文献値の測定結果に近い結果が得られない場合があった。

本研究の遂行に当たり、適切なお助言をいただいた東京工業大学工学部機械工学科・山路昭彦教授、戸倉和助教授、宇治橋貞幸教授に感謝の意を表す。

文 献

- (1) Takeda, N., Miyasaka, C. and Nakata, K., In-Situ Scanning Acoustic Microscopy for Damage Progress Characterization in Thermoplastic Composites, *Non-destr. Test. Eval.*, 8-9(1992), 813-824.
- (2) 日本機械学会編, 技術資料 金属材料の弾性係数, (1980), 4, 日本機械学会.
- (3) Spinner, S. and Tefft, W. E., A Method for Determining Mechanical Resonance Frequencies and for Calculating Elastic Moduli from These Frequencies, *Proc.*

- ASTM, 61(1961), 1221-1238.
- (4) 田中・松井・栗村・秋庭, 焼結アルミナのX線の弾性定数, 材料, 36-407(1987), 792-798.
  - (5) Kushibiki, J., Ueda, T. and Chubachi, N., Determination of Elastic Constants by LFB Acoustic Microscope, *IEEE Ultrasonics Symp. Proc.*, (1987), 817-821.
  - (6) Mihara, T. and Obata, M., Elastic Constant Measurement by using Line-Focus-Beam acoustic microscope, *Exp. Mech.*, 32(1992), 30-33.
  - (7) 三原・浅野・小幡・渡辺・川崎, 線集束型超音波顕微鏡によるジルコニア/ステンレス鋼焼結複合材料の弾性定数の評価, 金属, 56-3(1992), 321-326.
  - (8) 小林・轟・中村・朴・飯田, 超音波顕微鏡による薄膜材料の弾性係数測定, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, No. 920-72(1992-9), 653-654.
  - (9) 相澤・伊藤・木原, 超音波スペクトロスコピー法によるPVD-TiN被覆WC/Co材料評価, 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集, No. 930-9(1993-4), 309-311.
  - (10) Tsukahara, Y., Nakaso, N. and Ohira, K., Angular Spectral Approach to Reflection of Focused Beams with Oblique Incidence in Spherical-Planar-Pair Lenses, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, 38-5(1991), 468-480.
  - (11) Kushibiki, J. and Chubachi, N., Material Characterization by Line-Focus-Beam Acoustic Microscope, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, SU 32-2(1985), 189-212.
  - (12) Liang, K. K., Kino, G. S. and Khuri-Yakub, B. T., Material Characterization by The Inversion of $V(z)$, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, SU32-2(1985), 213-224.
  - (13) Endo, T., Sasaki, Y., Yamagishi, T. and Sakai, M., Determination of Sound Velocities by High Frequency Complex $V(z)$ Measurement in Acoustic Microscopy, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31-1(1992), 160-162.
  - (14) Brekhovskikh, L. M. and Godin, O. A., *Acoustics of Layered Media I*, (1990), 91-97, Springer-Verlag.
  - (15) Y. C. ファン, 固体の力学/理論, (1970), 179-182, 培風館.
  - (16) Parmon, W. and Bertoni, N., Ray Interpretation of The Material Signature in The Acoustic Microscope, *Electron Lett.*, 15-21(1979), 684-686.
  - (17) 東京天文台編, 理科年表, (1985), 488-489, 丸善.