2 種の表面波の分散曲線を用いた薄膜の 弾性係数, 密度および膜厚の測定*

西 田 政 弘^{*1}, 前 田 憲 一^{*2}
足 立 忠 晴^{*3}, 松 本 浩 之^{*3}

Measurement of Elastic Moduli, Density and Thickness of Thin Film by Dispersion Curves of Two Kinds of Surface Waves

Masahiro NISHIDA, Kenichi MAEDA,
Tadaharu ADACHI and Hiroyuki MATSUMOTO

In this paper, a new method is suggested for the nondestructive measurement of elastic moduli, density and thickness of film by the dispersion curves of the two kinds of surface waves. It is confirmed that the surface wave velocities (Sezawa mode and Rayleigh mode) for gold on fused quartz substrate are simultaneously determined from the reflectance function obtained by the measured complex $V(z)$ curve. The dispersion curves of two surface waves for thin film with the thickness of approximately $0.2\ \mu\text{m}$ are measured in the frequency from 240 to 400 MHz with 20 MHz increment. The elastic moduli, density and thickness of film were simultaneously identified by computer fitting to two measured dispersion curves using the direct search method. The elastic moduli and density of film were about 10% and 7% less than those of bulk, respectively. The film thickness determined by this method is in good agreement with that observed by scanning electron microscope.

Key Words: Nondestructive Inspection, Material Testing, Experimental Mechanics, Thin Film, Acoustic Microscope, Elastic Modulus, Complex $V(z)$ Curve, Reflectance Function, Ultrasonics

1. 緒 言

近年, 薄膜被覆材料は表面の機能改善や新機能の付与などの目的から, 機械工学や電子工学など広い分野に用いられ, 開発が盛んに行われている。薄膜材料の力学的特性は薄膜の作製法や膜厚などにより変化し, バルク材の値と異なる場合があることから, 特に品質管理の面において, 力学的特性の非破壊的測定法の確立が望まれている。

薄膜材料の力学的特性のうち弾性係数は最も基本的な特性の一つである。また密度および膜厚は薄膜材料の品質を評価するために重要である。

薄膜材料の弾性係数を評価する方法として, 超微小硬さ試験による押し込み力-押し込み深さ曲線から求める方法^{(1)~(3)}などが提案されているが, 薄膜を傷つけないためには薄膜の品質管理に用いることは困難である。膜厚の測定法として, 水晶振動子法,

光干渉法などが一般に用いられている⁽⁴⁾が, 測定用の薄膜を別に作製する必要があるなどの問題がある。また密度は膜厚を測定する際にバルク材の値と同じもしくは極めて小さいなどと仮定される場合が多く⁽⁴⁾, 薄膜材料の密度を非破壊的に測定する方法は少ない。

材料を非破壊的に評価する方法として X 線, 磁気および超音波を用いる方法などが研究されている。超音波は適用材料が多結晶, 単結晶および非晶質材料と広く, 取扱いが比較的安全という利点があるため, 材料特性を非破壊的に測定する方法として用いられている。なかでも超音波顕微鏡は, 試料の表面近傍の 1mm^2 以下の局所領域の弾性波の伝ば速度を測定・解析することにより, 材料特性および応力状態を非破壊的に評価する方法として近年注目されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

超音波顕微鏡では, 一般に, 音響レンズを試料に垂直方向 (z 方向) に移動させて, 反射波の振幅に対応するトランスデューサ出力である $V(z)$ 曲線を求め, その周期 Δz から, 固体試料の弾性波の伝ば速度が算出されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。これまで $V(z)$ 曲線解析法により表面波 (Sezawa モードもしくは Rayleigh モード) の伝ば速度を測定し薄膜材料の弾性係数, 密度もしくは膜厚などを求める方法は報告されている^{(9)~(18)}。弾性波の

* 原稿受付 1997 年 5 月 6 日。

^{*1} 正員, 東京工業大学工学部 [現: 名古屋工業大学 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)]。

^{*2} 東京工業大学大学院 [現: 三菱電機(株)]。

^{*3} 正員, 東京工業大学工学部 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

伝ば速度を用いて薄膜材料の弾性係数、密度および膜厚を求める場合、同定理論の解の安定性および精度の指標となる目的関数を効果的に得る必要があるため⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾、弾性係数、密度および膜厚を同時かつ非破壊的に測定することは困難であった。

一方、反射波の振幅と位相の両方を考慮した複素 $V(z)$ 曲線を測定・解析して求められる反射関数を介して波動の臨界角から伝ば速度を求める複素 $V(z)$ 曲線解析法が提案されている⁽²¹⁾。複素 $V(z)$ 曲線解析法では、試料と超音波伝達媒体（カップラ）の境界の反射関数を得ることができることから、表面波だけでなく試料の各種波動の伝ば速度を同時に測定することができる⁽²²⁾。したがって薄膜被覆材料や異方性材料など波動の伝ば挙動が複雑な材料において材料の各種波動を同時に測定できる可能性がある⁽²³⁾。ところで薄膜被覆材料では、基板材料および薄膜材料が均質等方性で基板材料の横波が薄膜材料の横波よりも速い場合、RayleighモードおよびSezawaモードの複数の表面波が励起することが知られている⁽²⁴⁾。

本研究では複素 $V(z)$ 曲線解析法により薄膜被覆材料の2種の表面波（SezawaモードおよびRayleighモード）の分散曲線を同時に測定することにより、薄膜材料の弾性係数、密度および膜厚を同時かつ非破壊的に求めることを試みる。

2. 反射関数

図1のように試料（固体）とカップラ（液体）の境界面上に原点を有する (x, z) 座標軸を定め、 x - z 平面での2次元問題として考える。ここで、薄膜、基板ともに均質等方性材料とし、流体側から入射する平面波の反射係数を求める。

Helmholtzの定理により、固体中の変位 u_i および応力 σ_{ij} ($i, j = x, z$) は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⁽²⁵⁾。

$$u_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (1)$$

Fig.1 Wave vectors of incident, reflected and refracted plane waves at a boundary between fluid and thin film layer on substrate

$$u_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (3)$$

$$\sigma_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \quad (4)$$

ここで、 λ および μ は Lamé 定数である。

また、流体、薄膜および基板でのポテンシャルは、それぞれ次式で与えられる⁽²⁶⁾。

$$\Phi^f = (\phi_1^f e^{i\alpha_L^f z} + \phi_2^f e^{-i\alpha_L^f z}) e^{i(\beta x - \omega t)} \quad (5)$$

$$\Phi^l = (\phi_1^l e^{i\alpha_L^l(z-d)} + \phi_2^l e^{-i\alpha_L^l(z-d)}) e^{i(\beta x - \omega t)} \quad (6)$$

$$\Psi^l = (\psi_1^l e^{i\alpha_T^l(z-d)} + \psi_2^l e^{-i\alpha_T^l(z-d)}) e^{i(\beta x - \omega t)} \quad (7)$$

$$\Phi^s = \phi_1^s e^{i\alpha_L^s(z-d)} e^{i(\beta x - \omega t)} \quad (8)$$

$$\Psi^s = \psi_1^s e^{i\alpha_T^s(z-d)} e^{i(\beta x - \omega t)} \quad (9)$$

ここで、 ϕ および ψ は未知振幅、 d は膜厚、 ω は角振動数、 t は時間、 α および β は z および x 方向の波数である。また上付添字 f, l, s はそれぞれ流体、薄膜および基板を、下付添字 1 および 2 は入射および反射を、 L および T は縦波および横波を示す。なお、 x 方向の波数 β は、Snell の法則より流体、薄膜および基板において縦波および横波ともに等しいので、添字による区別は行わない。

試料とカップラの境界面 ($z = 0$) において z 方向の変位速度および垂直応力は等しく、 x 方向のせん断応力は作用しないものとする。薄膜と基板の界面 ($z = d$) においては x 方向および z 方向の変位、 z 方向の垂直応力および x 方向のせん断応力はそれぞれ界面の上下で等しいものとする。このとき、式(1)～式(9)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は、次のように求められる。

$$R = \frac{\phi_2^f}{\phi_1^f} = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \quad (10)$$

ここで、

$$R_1 = n_{23}n_{41} - n_{21}n_{43} \quad (11)$$

$$R_2 = \frac{\rho^l \alpha_T^l}{\rho^f \omega} (n_{31}n_{43} - n_{33}n_{41}) \quad (12)$$

$$n_{ij} = g_{ij} + g_{ij+1} \quad (13)$$

であり、 g_{ij} は、行列 G の各成分である。ただし、行列 G, T および O は次式となる。

$$G \equiv T \cdot O^l(-1) \cdot O^l(0)^{-1} \cdot O^s(0) \quad (14)$$

$$T = \begin{pmatrix} -i\omega & -i\omega & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$O^q(x) = \{O_{ij}^q\} \quad (16)$$

$$O_{11}^q = i\beta \cos \alpha_L^q x, \quad O_{12}^q = -\beta \sin \alpha_L^q x$$

$$\begin{aligned}
O_{13}^q &= -i\alpha_T^q \cos \alpha_T^q x, & O_{14}^q &= \alpha_T^q \sin \alpha_T^q x \\
O_{21}^q &= -\alpha_L^q \sin \alpha_L^q x, & O_{22}^q &= i\alpha_L^q \cos \alpha_L^q x \\
O_{23}^q &= -\beta \sin \alpha_T^q x, & O_{24}^q &= i\beta \cos \alpha_T^q x \\
O_{31}^q &= \rho^q (-C_L^{q2} k_L^{q2} + 2C_T^{q2} \beta^2) \cos \alpha_L^q x \\
O_{32}^q &= i\rho^q (-C_L^{q2} k_L^{q2} + 2C_T^{q2} \beta^2) \sin \alpha_L^q x \\
O_{33}^q &= -2\rho^q C_T^{q2} \beta \alpha_T^q \cos \alpha_T^q x \\
O_{34}^q &= -2i\rho^q C_T^{q2} \beta \alpha_T^q \sin \alpha_T^q x \\
O_{41}^q &= -2i\rho^q C_T^{q2} \beta \alpha_L^q \sin \alpha_L^q x \\
O_{42}^q &= -2\rho^q C_T^{q2} \beta \alpha_L^q \cos \alpha_L^q x \\
O_{43}^q &= i\rho^q C_T^{q2} (\alpha_T^q - \beta) \sin \alpha_T^q x \\
O_{44}^q &= \rho^q C_T^{q2} (\alpha_T^q - \beta) \cos \alpha_T^q x
\end{aligned}$$

ここで C は波動伝ば速度, k は波数, ρ は密度, $i = \sqrt{-1}$ で, 上付添字 q は l もしくは s となる.

2種の表面波 (Rayleigh モードおよび Sezawa モード) が励起されるように, 基板を熔融石英, 薄膜を金, 液体を水とした場合の反射関数を, 規格化波数の関数として計算した結果を図2に示す. 計算を行うにあたり, 次項以下の実験に対応する次の数値を用いた (27)(28).

$$\left. \begin{aligned}
C_L^f &= 1500 \text{ [m/s]}, & \rho^f &= 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \\
C_L^l &= 3240 \text{ [m/s]}, & C_T^l &= 1220 \text{ [m/s]} \\
\rho^l &= 19.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, & d &= 0.2 \text{ } \mu\text{m} \\
C_L^s &= 5953 \text{ [m/s]}, & C_T^s &= 3757 \text{ [m/s]} \\
\rho^s &= 2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3
\end{aligned} \right\} \dots\dots (17)$$

図2において反射関数の位相は横軸の変化に対し変動し, 入射角 35.5° . (規格化波数 $k_{Lz}^f/k_L^f = 0.8141$, 波動伝ば速度 2583m/s) で 180° を示す (∇B). ここで, k_{Lz}^f はカップラの縦波の波数 k_L^f の z 方向成分である. さらに入射角 18.0° . (規格化波数 $k_{Lz}^f/k_L^f = 0.9511$, 波動伝ば速度 4856m/s) において, 振幅および位相が急激に変化 (∇A) している. ∇A および ∇B は, それぞれ表面波の Sezawa モードおよび Rayleigh モードの臨界角に対応している. 波動の臨界角と伝ば速度は, Snell の法則より関係づけられるため, 反射関数を解析すれば, 波動の臨界角から伝ば速度が得られる.

3. 超音波顕微鏡の測定原理

音響レンズの伝達関数およびカップラと試料の反射関数をそれぞれ P および R とすれば, 点集束レンズの場合の $V(z)$ 曲線は,

$$V(z) = \int_{k_L^f}^{k_L^f \cos \theta_0} P^2(k_{Lz}^f) R(k_{Lz}^f) \times \exp[-i2k_{Lz}^f z] dk_{Lz}^f \dots (18)$$

のように表すことができる⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾. ここで θ_0 は音響レンズの開口半角である. 式(18)より, $V(z)$ 曲線を z に

Fig.2 Theoretical results of reflectance function (water / gold on fused quartz), film thickness $0.2\mu\text{m}$, frequency 320MHz , ∇A : Sezawa mode, ∇B : Rayleigh mode

ついて Fourier 変換すれば, レンズの伝達関数 P^2 と反射関数 R の積が得られることがわかる. すなわち複素 $V(z)$ 曲線からレンズの伝達関数の影響を含んだ反射関数が求められることになる. そこでレンズの伝達関数が k_{Lz}^f に対し比較的なだらかに変化する場合には, 反射関数を求めることにより波動の臨界角信号が確認でき, 伝ば速度を求めることができる⁽²²⁾.

4. 波動伝ば速度の測定

4.1 試料 基板材料を熔融石英 (東芝セラミックス (株) 製 T-4040) とし, 十分洗浄した後, 真空蒸着により金膜を被覆したものを試料として用いた. なお, 蒸発源材料として, 99.99% の金を使用し, 蒸発源材料を蒸発させる際の残留ガス圧は, $5 \times 10^{-5}\text{Pa}$ とした. また膜厚は $0.2\mu\text{m}$ を目標として作製した.

4.2 基板材料の弾性係数の測定 位相検出型超音波顕微鏡 (オリンパス光学工業 (株) 製) を用いて, 音響レンズと試料との距離 z を $0.8\mu\text{m}$ 間隔で移動させ, 512 点の測定データから複素 $V(z)$ 曲線を求め, Fourier 変換した結果を図3に示す. カップラは蒸留水, 周波数は 400MHz (バースト波) とした. 用いた音響レンズの測定領域は, 直径約 $300\mu\text{m}$ である. なお, 振

Fig.3 Fourier transform of measured complex $V(z)$ curve for water/fused quartz, 400MHz, ∇C : longitudinal wave, ∇D : transverse wave

幅の縦軸は、最大値が1になるように正規化した。

振幅では縦波および横波の臨界角に対応する信号が ∇C および ∇D に確認できる。それぞれの信号の規格化波数から、縦波および横波の伝ば速度が6190m/sおよび3730m/sとして得られる。さらに、同一点における5回の測定結果の平均を求めると、縦波および横波の伝ば速度はそれぞれ6171m/sおよび3730m/sで、標準偏差は21m/sおよび4m/sであった。

縦弾性係数 E および横弾性係数 G は、固体材料の縦波 C_L および横波 C_T の伝ば速度と密度 ρ により次のように表わされる⁽²⁵⁾。

$$E = \rho \frac{3C_L^2 C_T^2 - 4C_T^4}{C_L^2 - C_T^2} \dots\dots\dots (19)$$

$$G = \rho C_T^2 \dots\dots\dots (20)$$

薄膜被覆材料を調べる準備として、基板材料である熔融石英の縦弾性係数および横弾性係数を求めた。その結果、縦弾性係数は74GPa、横弾性係数は31GPaであった。波動伝ば速度は、同一点における5回の測定結果の平均値を用いた。なお、密度は試料全体の密度が均一と仮定して得られるバルク材料の値 $2.20 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いた⁽³¹⁾。後節において、薄膜の弾性係数、密度および膜厚を求める際に、基板材料の弾性係数にこの値を用いた。

Fig.4 Fourier transform of measured complex $V(z)$ curve for water/gold on fused quartz, 320MHz, ∇A : Sezawa mode, ∇B : Rayleigh mode

4.3 薄膜被覆材料の反射関数の測定 薄膜被覆材料の複素 $V(z)$ 曲線 ($0.8\mu\text{m} \times 512$ 点) を測定し、Fourier変換した結果を図4に示す。カップラは蒸留水、周波数は320MHzである。また用いた音響レンズによる試料の測定領域は、直径約500 μm である。なお、振幅の縦軸は、最大値が1になるように正規化した。

まず位相においてRayleighモードの表面波の励起を示す変化(∇B)が確認できる。さらにSezawaモードの表面波の励起を示す変化(∇A)が振幅および位相において確認される。それぞれの規格化波数からSezawaモードおよびRayleighモードの表面波の伝ば速度を求めると、4840m/sおよび2600m/sであり、第2章の理論結果とほぼ一致する値であった。また同一点において表面波の伝ば速度を5回測定し、その標準偏差を求めたところ、SezawaモードおよびRayleighモードにおいてそれぞれ34m/sおよび25m/sであった。

以上のように、測定された複素 $V(z)$ 曲線のFourier変換結果からSezawaモードおよびRayleighモードの表面波の伝ば速度を同時に測定することができた。

4.4 分散曲線 周波数240~400 MHzまでの範囲について、20 MHzずつ変化させ、各々5回ずつ複素 $V(z)$ 曲線を測定し、その結果から臨界角を求め、表

Fig.5 Dispersion curves of measured velocities of surface wave for gold on fused quartz

面波の伝ば速度の分散曲線を測定した。その測定結果を図5に示す。周波数を変化させることにより Sezawa モードおよび Rayleigh モードの表面波の伝ば速度が変化している。すなわち波動の分散効果が表れていることが確認できる。これは周波数の増加によって波長が減少することにより、波長に対する薄膜の相対的厚さが増加するために反射関数に及ぼす膜の影響が大きくなるためである。

5. 薄膜の弾性係数、密度および膜厚の同定

表面波 (Sezawa モードおよび Rayleigh モード) の伝ば速度の分散曲線を利用して、薄膜の弾性係数、密度および膜厚の同定を試みる。

Sezawa モードおよび Rayleigh モードの2種のモードの波動伝ば速度を同等に扱うために、次のような残差関数を用いた。

$$f = \sqrt{f_S^2 + f_R^2} \dots\dots\dots (21)$$

$$f_S = \sum_{i=1}^{N_S} \left| \frac{C_S^{(M)} - C_S^{(C)}(C_L^i, C_T^i, \rho^i, d)}{C_S^{(C)}(C_L^i, C_T^i, \rho^i, d)} \right|^2 / N_S \dots\dots (22)$$

$$f_R = \sum_{i=1}^{N_R} \left| \frac{C_R^{(M)} - C_R^{(C)}(C_L^i, C_T^i, \rho^i, d)}{C_R^{(C)}(C_L^i, C_T^i, \rho^i, d)} \right|^2 / N_R \dots\dots (23)$$

ここで、 $C^{(M)}$ は測定値、 $C^{(C)}(C_L^i, C_T^i, \rho^i, d)$ は計算値、 N はデータ数である。また下付添字 S は Sezawa モード、R は Rayleigh モードの表面波を表す。なお、波動伝ば速度の計算値は第2章に示した反射関数から求めた。

まず、この残差関数と波動伝ば速度、密度および膜厚との関係を把握するために、式(17)の値を用いた計算値 $C^{(C)}(C_L^i, C_T^i, \rho^i, d)$ を $C^{(M)}$ とし、4種のパラメータのうち2種を変化させ、残差関数を調べた。

その結果、密度および膜厚に対して、残差関数の等高線は式(17)の値の数%の領域で閉じなかったため、

(a)

(b)

(c)

Fig.6 Results of f for elastic properties of (a) density versus longitudinal wave velocity, (b) longitudinal wave velocity versus transverse wave velocity and (c) transverse wave velocity versus density

4種のパラメータを独立に求めることは困難であると考へた。さらに密度および膜厚に対して残差関数の挙動が似ていることから、式(24)に示すように薄膜の質量 M を膜の面積 A で割った単位面積当たりの質量

Fig.7 Result of f for elastic properties of transverse wave velocity versus density by Sezawa mode

(a)

(b)

Fig.8 Observations of specimen by scanning electron microscope

が、密度 ρ と膜厚 d との積に等しくかつ一定であると仮定し、独立するパラメータを3種と考え、残差関数の計算を行った。なお、膜の質量および薄膜の面積は測定により求めた。

$$\rho^l \times d = M/A (= \text{constant}) \dots\dots\dots (24)$$

残差関数の計算結果を図6に示す。波動伝ば速度の

Table1 Measured properties of gold on fused quartz

	Reference ⁽²⁷⁾	This method
Yang's modulus [GPa]	78.0	70.0 (−10%)
Shear modulus [GPa]	27.0	24.1 (−11%)
Density [$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$]	19.3	18.0 (−7%)
Film thickness [μm]	—	0.202

測定誤差に等しい 4×10^{-6} の領域は、それぞれのパラメータの基準値である式(17)の値に対し数%の領域で閉じており、薄膜の縦弾性係数、横弾性係数、密度および膜厚の同定は可能であると考えられる。

Sezawa モードもしくは Rayleigh モードのみを用いて残差関数を計算した結果の1例として、Sezawa モードのみを用いた残差関数の横波と密度の関係を図7に示す。2種のモードを用いて計算した図6の場合に比べ同じ等高線の領域が広く、波動伝ば速度の測定結果のわずかな変化により薄膜の弾性係数、密度および膜厚の同定結果が変化する可能性があることがわかる。したがって、Sezawa モードおよび Rayleigh モードの両方を用いる薄膜の弾性係数、密度および膜厚の同定法により安定して結果が得られると考えられる。

そこで残差関数が最も小さくなる波動伝ば速度および密度を座標方向逐次探索法⁽³²⁾により求めた。逐次探索の初期値として式(17)に示した文献値を用い、分散曲線における同一周波数の5回の測定結果の平均値を測定値として用いた。同定された弾性係数、密度および膜厚を表1の右列に示す。弾性係数は同定された波動伝ば速度および密度より式(19)および式(20)を用いて求めた。弾性係数および密度は、左列に示したバルク材の値⁽²⁷⁾に比べ減少している。

図8(a)に走査電子顕微鏡による表面の観察結果を示す。小さいボイドが多く観察でき、弾性係数および密度のバルク材の値との差はこの影響によるものと考えられる。図8(b)に試料断面の観察結果を示す。その結果から膜厚は約 $0.2 \mu\text{m}$ で、同定結果とほぼ一致している。

6. 結言

基板の横波が薄膜の横波よりも速い薄膜被覆材料に対して、複素 $V(z)$ 曲線解析法を用いて波動の臨界角から薄膜被覆材料の Sezawa モードおよび Rayleigh モードの表面波の伝ば速度を同時かつ非破壊的に測定することができた。さらに2種の表面波の伝ば速度の分散曲線を用いることにより薄膜材料の弾性係数、密度

および膜厚を同時かつ非破壊的に同定することができた。しかし、4種のパラメータを独立に求めることは困難であった。4種のパラメータを独立かつ精度良く求めるには、別の波動の伝ば速度など新たな情報が必要であると考えられ、今後検討が必要である。

本研究では、基板の横波が薄膜の横波よりも速い場合における薄膜材料の弾性係数、密度および膜厚の評価を行ったが、それ以外の場合に適した弾性係数の同定について考察する必要がある。さらに基板材料および薄膜材料が異方性を有する場合にはより複雑になることが予想され本研究で用いた方法を適用するには改良が必要である。

最後に、本研究の遂行にあたり、薄膜材料の作製にご協力頂いた東京工業大学 山路昭彦教授ならびに試料を提供して頂いた東芝セラミックス(株) 坂下伊佐男氏に感謝いたします。

文 献

- (1) 柳沢, ナノインデンターによる薄膜の硬度, 弾性の測定法, トライボロジスト, **40**-3, (1995), 199-204.
- (2) 松岡・宮原・長島・田中, AFM超微小硬さ試験機による弾性常数と降伏応力の測定, 機論, **62**-598, A(1996), 1432-1437.
- (3) DWYER-JOYCE・牛島・村上・渋谷, 微小硬度法による薄膜のヤング率の評価, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集 Vol. B, No. 96-10, (1996), 469-470.
- (4) 金原, 薄膜の基本技術 [第2版], (1987), 89-131, 東京大学出版会.
- (5) Briggs, A., *Acoustic Microscopy*, (1992), Oxford Science Publications.
- (6) 福岡・戸田・平尾, 音弾性の基礎と応用, (1993), 58-61, オーム社.
- (7) Atalar, A., An Angular Spectrum Approach to Contrast in Reflection Acoustic Microscope, *J. Appl. Phys.*, **49**-10 (1978), 5130-5139.
- (8) Kushibiki, J. and Chubachi, N., Material Characterization by Line-focus-beam Acoustic Microscope, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, **SU-32**(2) (1985), 189-212.
- (9) Weglein, R. D., SAW Dispersion and Film-thickness Measurement by Acoustic Microscopy, *Appl. Phys. Lett.*, **35**-3 (1979), 215-217.
- (10) Kushibiki, J., Ishikawa, T. and Chubachi, N., Cut-off Characteristics of Leaky Sezawa and Pseudo-Sezawa Wave Modes for Thin-film Characterization, *Appl. Phys. Lett.*, **57**(2) (1985), 189-212.
- (11) Tsukahara, Y., Nakaso, N., Kushibiki, J. and Chubachi, N., An Acoustic Micrometer and Its Application to Layer Thickness Measurements, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, **36**-3 (1989), 326-331.
- (12) Kim, J. O. and Achenbach, J. D., Line Focus Acoustic Microscopy to Measure Anisotropic Acoustic Properties of Thin Films, *Thin Solid Films*, **214** (1992), 25-34.
- (13) Swain, M. V. and Weppelmann, E. R., A Simple Method for Determination of the Elastic Modulus of Thin Films on a Substrate, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 308, (1993), 177-182.
- (14) 轟・小林・中村・朴・荒居・飯田, 超音波顕微鏡による薄膜弾性係数測定手法の検討, 機論, **59**-568, A(1993), 2977-2983.
- (15) 井原・相澤・古口・木原, 超音波反射率測定に基づくスペクトロピー法による材料表面層の超音波減衰評価, 機論, **60**-574, A(1994), 1444-1449.
- (16) Lee, Y.-C., Achenbach, J. D., Nystrom, M. J., Gilbert, S. R., Block, B. A. and Wessels, B. W., Line-Focus Acoustic Microscopy Measurements of Nb₂O₅/MgO and BaTiO₃/LaAlO₃ Thin-Film/Substrate Configuration, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, **42**-3 (1995), 376-380.
- (17) Kundu, T., Inversion of Acoustic Material Signature of Layered Solids, *J. Acoust. Soc. Am.*, **91**-2, (1992), 591-600.
- (18) Yamanaka, K., Nagata, Y., Nakano, S., Koda, T., Nishino, H., Tsukahara, Y., Cho, H., Inaba, M., Satoh, A., SAW Velocity Measurement of Crystals and Thin Films by the Phase Velocity Scanning of Interference Fringes, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, **42**-3 (1995), 381-386.
- (19) 井原・古口・相澤・木原・岩住, 弾性表面波による多層コーティング薄膜の膜厚評価—第1報: 逆解析手法の適用—, 非破壊検査, **46**-3, (1997), 214-222.
- (20) 井原・古口・相澤・木原・岩住, 弾性表面波による多層コーティング薄膜の膜厚評価—第2報: 実験的検証—, 非破壊検査, **46**-4, (1997), 281-285.
- (21) Liang, K.K., Kino, G.S. and Khuri-Yakub, B.T., Material Characterization by the Inversion of $V(z)$, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, **SU-32**(2), (1985), 213-224.
- (22) 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.*, supplement **31**-1, (1992), 160-162.
- (23) 西田・遠藤・足立・松本, 超音波顕微鏡による異方性材料の局所領域の弾性係数測定 (立方晶系単結晶の場合), 機論, **63**-611, A(1997), 1467-1474.
- (24) 鈴木(柴山監修, 電子情報通信学会編), 弾性表面波工学, (1983), 43-45, コロナ社.
- (25) Y.C. ファン(大橋・村上・神谷共訳), 固体の力学/理論, (1970), 177-188, 培風館.
- (26) Brekhovskikh, L. M. and Godin, O. A., *Acoustic of Layered Media I*, (1990), 1-34, Springer-Verlag.
- (27) 東京天文台編, 理科年表, (1993), 486-488, 丸善.
- (28) Kushibiki, J., Wakahara, T., Kobayashi, T. and Chubachi, N., A Calibration Method of the LFB Acoustic Microscope System Using Isotropic Standard Specimens, *Ultrasonic Symp.*, (1992), 719-722.
- (29) Atalar, A., A Physical Model for Acoustic Signatures, *J. Appl. Phys.*, **50**-12 (1980), 8237-8239.
- (30) Somekh, M.G., Briggs, G.A.D. and Ilett, C., The Effect of Elastic Anisotropy on Contrast in the Scanning Acoustic Microscope, *Phil. Mag. A*, **49**-2 (1984), 179-204.
- (31) 東芝セラミックス(株) 技術資料
- (32) 尾田・佐藤・車古・鶴崎, 工学のためのコンピュータプログラミング, (1980), 173-180, 実教出版.