漏れラム波用すだれ状トランスデューサを用いる 表面波速度分布の測定

正 員 澤 口 明 廣 (防衛大学)

正 員 戸 田 耕 司 (防衛大学)

Measurement on Distribution of Surface Acoustic Wave Velocity Using Interdigital Transducer for Leaky Lamb Wave

Akihiro Sawaguchi, Member, Kohji Toda, Member (The National Defense Academy)

A system of measuring the distribution of the surface acoustic wave (SAW) velocity on a test sample is constructed by incorporating leaky Lamb wave interdigital transducers (IDT). The ultrasonic bulk wave, which is mode-converted in a form of the radiation into a liquid from a leaky SAW on the surface of the test sample, is obtained as a delayed electrical signal at a receiving IDT. The phase difference of the output signals obtained at two IDTs on the same substrate surface depends on the leaky SAW velocity. It is essential for the measurement of the SAW velocity that the incident angle of the ultrasonic beam is nearly equal to the Rayleigh angle. This means the prerequisite that the velocity of the leaky Lamb wave is very near the SAW velocity on the test piece. The system using leaky Lamb wave transducers has an advantage of having a very broad measurable region of SAW velocity over the use of a leaky SAW transducer, because of plural leaky Lamb wave modes having dispersive characteristics. Operation frequency region suitable for a measured sample can be selected from numerical analysis results on the performances of the leaky Lamb wave transducers at liquid-solid interface are shown for practical device configurations. A system for measuring SAW velocity distribution on a test sample is presented and experimental results for piezoelectric ceramic plates are successfully demonstrated.

キーワード：漏れラム波，すだれ状トランスデューサ，表面波速度，レイリー角，速度分布

1. ま え が き

材料の特性を評価するうえで超音波の使用は有効な手法の一つである。なかでも試料を伝搬する音速の測定は材料評価の基本的なものといえる。このようなことから固体の弾性表面波速度や試料における弾性表面波 (SAW) の伝搬は、媒体の弾性的な性質と直接関連していることから、SAW 速度の分布の測定は、材料の非破壊的特性評価や表面波デバイス用基板の品質管理を行ううえで有効である。特に SAW デバイスの生産のためには、一つのウェハ上の速度のばらつきが問題であり、ウェハ上の SAW 速度分布を簡単に

測定する方法が望まれている⁽¹⁾。

試料の SAW 速度の測定法としては、様々な報告がなされている。最も基本的なものとして、圧電材料については、試料に複数個のすだれ状トランスデューサ (IDT) を設け、送波用と受波用 IDT 間の表面波伝搬時間や位相差から求める方法⁽²⁾⁽³⁾、非圧電材料にくさび形探触子を用いる方法⁽⁴⁾などがある。基板面内の SAW 速度の分布を求めるうえでは簡便な方法といえず実用的でない。一方、超音波顕微鏡を用いて試料との距離を変化させることによって得られる $V(z)$ 曲線から求める方法がある^{(5)~(8)}。しかしながら、この方法においては試料を高価な機械的ステージに設置する

必要があると共に、測定系の調整が多少やかいかとなるため、必ずしも迅速な測定方法とはいえない。漏れ SAW 速度の分布を求めるもう一つの方法として、漏れ表面波用 IDT への印加信号の周波数を変化させ、二つの出力用 IDT での受信信号の位相差の変化の周期から測定する $V(f)$ 曲線法が提案されている⁽⁹⁾。この方法では試料への水中バルグ波の入射角度がレイリー臨界角の近傍に限定されることから、測定できる試料はトランスデューサ用基板の表面波速度と極めて近い場合に制限されるという問題点がある。

ラム波は板状弾性体を伝搬する波動であるが、複数個のモードが存在し、なかには速度分散の大きいものも含まれている⁽¹⁰⁾。従って、薄板状圧電体に IDT を設け、圧電体の一方の面が水に接触させる構成をとることによって、液中に放射される超音波の放射角は速度分散を有する複数のモードの使用によって、測定可能な試料の表面波速度の範囲が極めて広くなり、非圧電材料の SAW 速度の評価も可能となる。本研究においては、表面波速度分布の測定を前提とした漏れラム波トランスデューサ動作特性とこれを用いた実際のシステムについて検討している。以下、測定原理、測定システムの構成および測定結果について述べる。

2. 測定原理

図 1 は表面波速度分布測定のために薄板状圧電体上に設ける漏れラム波用すだれ状トランスデューサの形状を示したものである。1 組の送波用 IDT と 2 組の受波用 IDT から構成されている。図 2 は漏れラム波用 IDT による水中バルグ波ビームの励振・受波ならびに試料表面での反射および表面波にモード変換された後に再び液中に放射される波の伝搬経路を示している。圧電板の一面上に設けた IDT に高周波電気信号を印加すると、圧電薄板上にラム波が励振される。ここで圧電板の一面が水との接触状態にあるときには、基板に対して斜め方向に水中バルグ波が放射され、その放射角度 θ_w は次式で与えられる⁽¹⁰⁾。

$$\theta_w = \sin^{-1}(v_w/v_L) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 v_w : 液中での放射バルグ波の速度、
 v_L : 漏れラム波速度

この関係式は液中から固体弾性体に音波が、入射する場合にも有効である。そのときには、表面波にモード変換されるが、固体と液体との界面に沿って伝搬しながら液中に超音波が放射される。

(1) 式から明らかなように、表面波速度が水中バルグ波速度よりも遅い場合には上述の議論は成立しな

図 1 表面波速度分布測定のための漏れ表面波用すだれ状トランスデューサ
 Fig.1. Leaky Lamb wave transducer for measuring system.

図 2 表面波速度分布測定の実験図
 Fig.2. Principle of measuring for SAW velocity distribution.

い。ここで圧電薄板上に励振されるラム波の速度が試料の漏れ表面波速度に近い値をとるようにすると、試料への水中バルグ波の入射角が(1)式でのレイリー臨界角度に近くなる。その結果として、一部は鏡面反射されるが、残りは水中にエネルギーを放射しながら試料表面を伝搬する漏れ表面波にモード変換される^{(11)~(13)}。この液中に再放射されたバルグ波は二つの受波用 IDT に到達し、遅延電気信号として取出される。

本システムにおいては超音波ビームのレイリー臨界

角近傍での入射が根本であることから、そのことを可能ならしめるためのトランスデューサ設計が重要な課題となる。ここでは、固体・液体界面での動作する IDT の挙動を数値解析し、その結果を上述の目的に生かせるようにトランスデューサを設計した。漏れラム波用トランスデューサは多くのモードで駆動できるという長所を有するが、このことは裏をかえせばその扱いが複雑となることを意味する。従って、漏れラム波モードの動作特性を明らかにするための解析は必要不可欠である。

解析においては圧電薄板内における運動方程式と圧電方程式を基本式として、二つの界面における電氣的、機械的境界条件を満足する漏れラム波速度を数値代入法により求めている。この場合、ラム波の変位 U_i および電位 ϕ の一般解を次のように定義している。

$$U_i = A_i \exp(ikbx_3) \exp\{ik(x_1 - vt)\} \quad (j=1, 2, 3) \dots\dots\dots (2)$$

$$\phi = A_4 \exp(ikbx_3) \exp\{ik(x_1 - vt)\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 A_i, A_4 : 振幅、 b, k, v : それぞれ減少定数、波数、ラム波速度

このために Farnell の手法⁽¹⁴⁾を次の点において拡張している。漏れラム波が水中にエネルギーを放射しながら減衰していく波動であるため、ラム波速度を複素数の形で表すと共に、固体・液体界面での変位、応力および電束密度の連続性を考慮した。基板材料として圧電磁器薄板 NEPEC-6 (Tokin 製) を選んだが、その物理定数は以下のとおりである。

$$[c^E] = \begin{bmatrix} 12.8 & 6.9 & 6.6 & 0 & 0 & 0 \\ 6.9 & 12.8 & 6.6 & 0 & 0 & 0 \\ 6.6 & 6.6 & 11.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.0 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)} \dots\dots\dots (4)$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 11.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 11.3 & 0 & 0 \\ -6.1 & -6.1 & 15.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ (C/m}^2\text{)} \dots\dots\dots (5)$$

$$[\epsilon^S] = \begin{bmatrix} 520 & 0 & 0 \\ 0 & 520 & 0 \\ 0 & 0 & 740 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

$$\rho = 7,730 \text{ kg/m}^3 \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 c^E, e, ϵ^S, ρ : それぞれ弾性定数、圧電定数、比誘電率および密度

図 3 漏れラム波モードの速度分散特性
Fig. 3. Velocity distribution of leaky Lamb modes.

図 4 トランスデューサの実効変換効率の計算結果
Fig. 4. Calculated results of transducer efficiency.

波数 k と圧電薄板の厚さ d の積の関数の形で漏れラム波の速度の数値計算結果が、実験値と共に図 3 に示されている。図中の A は反対称モード、 S は対称モードを示しており、またそれぞれの添字はモード次数に対応している。図から明らかのように、漏れラム波には多数のモードが存在し、それぞれが固有の速度

分散特性を有していることがわかる。速度の観点から眺めると、(1)式の分母の値が広範囲に及ぶこととなり、ラム波の使用の有効性が明らかである。図4はIDTに加える電気信号が水中バルク波に変換される割合を示す実効変換率 η を示している。この結果はIDTの効率の観点からも、ラム波の使用が可能であることを支持している。文献(9)におけるように漏れ表面波用IDTを使用するシステムでは、IDT基板の表面波速度と被検体試料での速度が近い場合にのみその測定が可能である。これに対して、漏れラム波用IDTを使用するシステムならば、様々な表面波速度の試料についても測定が可能となり、被検体の対象が大幅に拡大されることになる。このことが、漏れラム波用すだれ状トランスデューサを本目的に用いることの本意である。

3. 測定システム

漏れラム波用トランスデューサから水中に放射された超音波は、被検体試料にレイリー臨界角で入射するとき、被検体上での漏れ表面波にモード変換され、この波は直ちに水中超音波として再放射され、受波用トランスデューサであるIDT2とIDT3の部分に到達する。これらの波はIDTの部分で遅延電気信号として検出されるが、伝搬経路長の差に対応する位相差が存在する。ここでのラム波デバイスには図1、図2に示されるように、3組のIDT中間部に音波の吸収体が対着されている。これは、超音波ビームの広がりを防ぐことによって、漏れ波の長いテールの鏡面反射成分が受波用IDTに入射するのを防止すると共に、2組の受波出力を独立な信号の形で扱うためである。上

述の状況下で受波用のIDT2とIDT3で検出される波は、試料上の点P2、P3で再放射される超音波 W_2, W_3 に対応し、それぞれ次のように表示される。

$$W_2 = A_2 \exp \{-j\omega(l_w/v_w)\} \exp \{j\omega\Delta l_1/v_s\} \dots\dots\dots (8)$$

$$W_3 = A_3 \exp \{-j\omega(l_w/v_w)\} \exp \{j\omega(\Delta l_1 + \Delta l_2)/v_s\} \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 V_s : 試料上の漏れ表面波速度、 V_w ,
 l_w : 水中での音速および音波伝搬距離

上式の指数項の第1項は水中での、第2項は試料上での伝搬に伴う位相遅延に対応している。位相差と振幅変化がそれぞれ伝搬経路で生じており、各媒体での速度と減衰に寄与している。従って、試料を回転あるいは二次元的に機械走査しながら振幅と位相差を測定することによって、試料の異方性と速度と減衰の分布状態を評価することが可能である。

本研究では、単結晶やセラミック試料の異方性が評価できることを主眼にして、構造が簡単な正規形すだれ状トランスデューサの使用を試みた。実験に用いたトランスデューサは図1に示す形状の電極パターンを有し、電極周期長が380 μ m (No.1)と210 μ m (No.2)の2種類である。圧電基板材料は数値計算にけると同じでTokin製NEPEC-6である。上述のデバイス構成のもとで、トランスデューサの中心周波数と電極周期長の積から求めたラム波速度が実験値として図3に示されている。No.1のトランスデューサの S_0 モードは、変換効率 η の値が大きく、速度分散の大きい周波数領域での駆動が可能であることから、速度の測定範囲が比較的大いという点で有効である。すだ

図5 表面波速度分布測定システムの構成図

Fig. 5. Block diagram of measuring system for distribution of SAW velocity.

れ状電極への印加信号は、電気的直達波や多重回反射波の影響を抑えるために RF パルス信号を用いた。

図5は、表面波速度分布を測定するためのシステムとして実際に構成した構成図である。ここでは、IDT2で受波される波を参照信号として、IDT3で受波される信号との位相比較を行っている。参照用信号は90度移相器を介して位相比較回路に入力される。このことにより SAW 速度の変化の検出感度を高めている。試料面での SAW 速度の変化がない場合には出力が一定であるが、局所的な速度変化がある場合に二つの信号間の位相差が変化し、対応する形の出力電圧の変化が生じる。このときの相対的な位相差 $\Delta\phi$ は次のように速度変化 ΔV_s に比例する。

$$\Delta\phi = \omega \Delta l_2 \Delta V_s / V_s^2 \dots\dots\dots (10)$$

この速度変化に対応した出力電圧の変化は A/D コンバータによりデジタル信号としてコンピュータに取込んでいる。本方式においては、被検体上の表面波伝搬距離 Δl_2 の部分での速度のばらつきが直流出力の変化の形で検出される。

本実験での位相差と出力電圧の関係の測定結果が図6に示されている。参照波に対して、位相差が $\pm 45^\circ$ の範囲でほぼ直線的に変化している。システムの感度は位相検波器の分解能によって決まるが、使用した位相検波器が約 0.5° の分解能を有していることから、検知可能な速度変化は相対値で 0.01% 程度である。一般的に SAW デバイスの速度のばらつきはフィルタ用で $\pm 0.1\%$ 以下、共振器用で $\pm 0.04\%$ 以下であることが望まれていることから⁽¹⁾、本システムの検出能力

は十分なものであると考えられる。

4. 測定結果

超音波デバイスの実用的な材料の一つとして PZT 系セラミックスがよく用いられている。デバイスの特性は材料の弾性的性質のばらつきに左右されることが多い。ここでは図7に示すように直径 50 mm、厚さ 10 mm のものと、長さ 50 mm、幅 30 mm、厚さ 10 mm の2種類の PZT ウェハについて実験を行った。当初、本システムにより X、Y 軸上それぞれ 5 mm の間隔で試料の表面波速度の変化分を測定した。その後、表面波速度の各測定点に2組の正規形すだれ状電極を蒸着してそれぞれの周波数特性を測定した。この場合の電極周期長は $240 \mu\text{m}$ 、電極対数は 5、2 組の電極の離間距離は 1.44 mm である。PZT セラミック基板での表面波速度が $2,400 \text{ m/s}$ であることから、ラム波デバイスとして電極周期長が $210 \mu\text{m}$ のトランスデューサ No.2 を用いて、 S_0 モードで駆動した。

図8に本システムによる表面波速度のばらつき Δv_s と SAW デバイスとしての中心周波数のばらつき Δf_c の測定結果が示されている。ここでの結果は試料の中心部に該当する原点での測定値を基準とした偏差値で表示されている。両者の比較から、一部を除いて全般的に傾向の一致が認められ、表面波速度のばらつきの測定がデバイスとしての特性の評価に有効であることが明らかである。なお、(a)図の $x = -1.5 \text{ mm}$ にお

図6 位相変化量と出力との関係
Fig. 6. Relation between output and phase shift.

図7 測定した PZT セラミックス試料
Fig. 7. PZT ceramic samples for measurement.

(a)

(b)

図 8 試料(a)の表面波速度と SAW フィルタの中心周波数のばらつきの測定結果
Fig. 8. Measured results of distribution of SAW velocity and center frequency for sample (a).

図 9 セラミックス試料(a)の面内表面波速度のばらつき

Fig. 9. Distribution of SAW velocity of the ceramic sample (a).

いて両者の傾向が異なる結果が得られているが、これはフィルタを設けた部分に測定分解能に比べて小さい局所的な欠陥が存在するためと考えている。フィルタ特性はこの欠陥の影響を直接反映しているのに比べて、速度の測定値はより広い範囲の平均値となっていることによっている。図 9 は試料(a)の面内での表面波速度の分布状況をマッピングしたものである。ここ

図 10 圧電セラミック試料(b)の表面波速度の伝搬方向依存性

Fig. 10. Propagation dependence of SAW velocity for piezoelectric ceramic sample (b).

で準備した試料の面内での表面波速度のばらつきが、 $\pm 0.4\%$ の範囲で分布していることがわかる。

圧電セラミックスの圧電性は直流電界の印加による分極処理によって付与されるものであり、分極軸に対して垂直な面内においては本来等方性である。従って、分極軸と平行な面内においては等方性ではなくなる。そこで図 7 (b)のような試料について、表面波速度の伝搬方向依存性を電極周期長が $380 \mu\text{m}$ のトランスデューサ No. 1 を用いて A_0 モードラム波によって測定した。図 10 に数値計算によって求めた表面波速度の変化と本システムにより得られた表面波速度のばらつきの実験結果が示されている。実験結果は計算結果の変化量に比べて幾分小さいが、その傾向は一致している。実験値に不連続な部分がみられるが、これは駆動周波数を切換えながら測定したためである。駆動周波数の掃引が可能なのは、かなり広範囲な速度の測定に応じ得るということで極めて有効である。このように本システムは、材料の弾性的異方性を評価するうえでも有効であるものと考えられる。

5. む す び

材料の非破壊的評価手段の一つとして、被検体試料の表面波速度分布の測定に漏れラム波用すだれ状トランスデューサを用いる手法について述べた。漏れレイリー波の使用に限定する方法では、測定可能な試料に著しい制約が存在する。本研究でのラム波トランスデューサの使用の場合には、固体・液体界面で動作するすだれ状トランスデューサがかなり広い速度範囲にわたって動作が可能であるという特徴を有する。本方式は複雑なアライメントを必要とせず、温度や電気的機械的な外部からの影響はほとんど無視するという利

点も備えている。本論文では音速の変化分の分布の測定について述べたが、減衰のばらつきについても二つの出力信号の振幅レベルを比較することにより原理的に測定が可能であり、現在この点についても検討中である。

本研究の遂行に際しては有益な御助力を頂きました本学 葉山賢氏に対して感謝の意を表します。

(平成2年4月6日受付, 同2年7月18日再受付)

文 献

- (1) K. Yamada, T. Omi, S. Matsumura & T. Nishimura : "Characterization of 4-inch LiTaO₃ single crystals for SAW device application", Proc. IEEE Ultrason. Symp., p. 243 (1984)
- (2) G. Sagnes, G. Bastide, G. Cambon & M. Rouzeyre : "Use of a sampling oscilloscope for velocity measurements and frequency comparisons of impulse acoustic surface waves", *Electron. Lett.*, 8, 421 (1972)
- (3) J. Temmyo, I. Kotaka, T. Inamura & S. Yoshikawa : "Precise measurement of SAW propagation velocity on LiNbO₃", *IEEE Trans. Son. & Ultrason.*, SU-27, 218 (1980)
- (4) R. G. Pratt & T. C. Lim : "Acoustic surface waves on silicon", *Appl. Phys. Lett.*, 15, 403 (1969)
- (5) R. D. Weglein & R. G. Wilson : "Characteristic material signatures by acoustic microscopy", *Electron. Lett.*, 14, 352 (1978)
- (6) C. Quate A. Atalar & H. K. Wickramasinghe : "Acoustic microscopy with mechanical scanning-a review", *Proc. IEEE*, 67, 1092 (1979)
- (7) J. Kushibiki, A. Ohkubo & N. Chubachi : "Anisotropy detection in sapphire by acoustic microscope using line-focus beam", *Electron. Lett.*, 17, 534 (1981)
- (8) J. Kushibiki, K. Horii & N. Chubachi : "Velocity measurement of multiple leaky waves on germanium by line-focus-beam acoustic microscope using FFT", *ibid.*, 19, 404 (1983)
- (9) T. Nomura, T. Yasuda & S. Shikawa : "Precise measurement of surface acoustic wave velocity using a swept frequency IDT-NDE system" *Jpn. J. Appl. Phys.*, 27, Suppl. 27-1, 160 (1987)
- (10) K. Toda : "An acoustic focusing device with an interdigital transducer on a thin piezoelectric plate", *Proc. IEEE*, 67, 1173 (1979)

- (11) W. G. Neubauer : "Ultrasonic reflection of a bounded beam at Rayleigh and critical angles for a plane liquid-solid interface", *J. Appl. Phys.*, 44, 48 (1973)
- (12) H. L. Bertoni T. Tamir : "Unified theory of Rayleigh-angle phenomena for acoustic beams of liquid-solid interfaces", *Appl. Phys.*, 2, 157 (1973)
- (13) M. A. Breazeale, L. Adler & G. W. Scott : "Interaction of ultrasonic wave incident at the Rayleigh angle onto a liquid-solid interface", *J. Appl. Phys.*, 48, 530 (1977)
- (14) G. W. Farnell : "Symmetrical consideration for elastic layer modes propagation in anisotropic piezoelectric crystals", *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, SU-17, 229 (1970)

澤 口 明 廣 (正員)

昭和35年4月2日生。63年3月防衛大学校理工学研究科電子工学専攻修了。現在、同大研究員。音響撮像の研究に従事。

戸 田 耕 司 (正員)

昭和15年11月12日生。39年3月防衛大学校(電気工学専攻)卒業。44年3月京都大学大学院工学研究科電気系修士課程修了。同年4月防衛大学校電気工学教室助手。48~49年スタンフォード大学電気工学科客員助教授。現在、防衛大学校電子工学科教授。工学博士。表面波デバイス、強誘電体材料、音響撮像、センサなどの研究に従事。47年度電子通信学会米沢賞, 60年度科学技術庁長官賞受賞。Sigma Xi 会員。