層状基板における漏洩ラム波の伝搬特性と すだれ状トランスデューサの動作特性

非会員 藤田 剛* 正員 戸田 耕司*

Propagation Characteristics of Leaky Lamb Waves in Layered Substrate and Operation Performances of Interdigital Transducer

Takeshi Fujita*, Non-member, Kohji Toda*, Member

Propagation characteristics of seven lowest modes of leaky Lamb waves in a layered substrate composed of a piezoelectric ceramic plate and an acrylic plate, under the condition of a liquid-solid boundary at the acrylic plate side, are described in the relationship with operation performances of an interdigital transducer (IDT) for underwater ultrasound. The IDT operates effectively for radiating or detecting via a mode conversion from the leaky Lamb wave to a longitudinal wave in a liquid. The incorporation of a layered substrate is useful for multiple-modes operations with higher transducer efficiencies, while retaining sufficient mechanical strength. It is noticeable that the cross points of the velocity curves of the leaky Lamb wave modes and the longitudinal wave modes in two kinds of thin plates for the layered substrate are unique for the transducer operations. The transducer operations are examined in the construction of a liquid delay line. The transducers designed for operating on the cross points of three modes are well explained in comparison between the calculated and experimental results.

キーワード：漏洩ラム波，伝搬特性，すだれ状トランスデューサ，液中超音波

Keywords: leaky Lamb wave, propagation characteristics, interdigital transducer, underwater ultrasound

1. まえがき

漏洩ラム波の伝搬問題は非破壊的材料評価の観点から大きな関心を集めている^{(1)~(4)}。音波の伝搬媒体はほとんどの場合、金属などの非圧電体である。非圧電体への弾性波の励起には、外部からの超音波の照射⁽²⁾や、レーザ光の照射による熱弾性効果が一般に用いられている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これらの研究は、伝搬媒体としての基板材料の評価に主眼が注がれており、液中超音波用のトランスデューサとの関係からの議論は、ほとんどなされていない。液中超音波の使用は、非破壊検査等の音響撮像⁽⁸⁾⁽⁹⁾、超音波診断⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、流量・流速測定⁽¹²⁾⁽¹³⁾、キャピテーションによる音響化学変化⁽⁷⁾等の分野で盛んに研究がなされている。

液中超音波計測技術の骨幹として、トランスデューサの設計は非常に重要である。異方性を有する圧電板における漏洩ラム波の伝搬問題を基に、液中超音波用トランスデューサの動作特性を明確にし、設計指針を得ることは有用と考

えられる。液中超音波用トランスデューサには厚み振動モードを用いたバルク波タイプのものが一般的に使用されている。この場合、超音波ビームの液中への放射方向は基板面に対して垂直方向で⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、動作周波数は基板の寸法に制限される。

一方、液体負荷の状態にある基板を伝搬する漏洩弾性波は、液中への縦波超音波にモード変換される⁽¹⁴⁾。このような漏洩弾性波から液中縦波へのモード変換は、液中超音波の斜め方向の放射に有効である。伝搬媒体が圧電性を有する場合には、漏洩ラム波の励起・受波のためにすだれ状トランスデューサ (IDT) の使用が有効と考えられる。圧電磁器板単体での漏洩ラム波の伝搬を液中超音波用のトランスデューサに用いる場合、有効に機能するモード数が少なく、しかも高周波化のためには基板の厚さが極めて薄くなり、機械的強度上の問題が存在する⁽¹⁵⁾。IDTの高機能な動作を引き出すためには、基板を伝搬する弾性波の伝搬特性の本質的な理解及びラム波の多モード動作を効果的に実現するための条件を把握する必要がある。

本論文では、圧電磁器薄板とアクリル薄板からなる層状基板での漏洩ラム波の伝搬特性の数値解析結果を用いて、液中超音波用すだれ状トランスデューサの動作特性を明ら

* 防衛大学校 電気情報学群 電気電子工学科
〒 239-8686 横須賀市走水 1-10-20
Dept. of EE, National Defense Academy
1-10-20, Hashirimizu, Yokosuka 239-8686

かにすることを主眼として研究した結果について述べている。アクリル板の使用は、高周波動作での圧電薄板の機械的強度を補強するために、高次モード動作を意図したことによる。圧電磁器薄板とアクリル薄板の層状基板における固体・液体界面での7つの低次モードの漏洩ラム波の伝搬特性とともに、各ラム波モードの分散曲線の交点近傍、並びに2種類の縦波の分散曲線との交点近傍にIDTの動作特性に優位性が認められる点が存在することを明らかにしている。2つのモードが共存する領域では、モードの交叉もしくは反発により特異な動作特性の存在が考えられることから、電気機械結合係数又はモード変換効率に極値が存在することが期待される。本文では、それらの極値点近傍での動作に着目すべきであることを示している。さらに、極値点近傍での動作を確認するために、1枚の層状基板上に2組のIDTを用いた液体遅延線を構成し、実験によって検討している。

速度分散曲線全体の理解の上に、極値点近傍でのIDTの動作に着目することにより、電気機械結合係数及びモード変換効率が共に極大値を有する液中超音波用トランスデューサ、あるいは電気機械結合係数が大きくモード変換効率が極小を示す液相センサとして機能するトランスデューサの作成に有効な情報を得ることが可能となる。ここでは7つの低次モードを取り扱っているが、第8モード以上の高次モードの伝搬特性は類似の傾向にある。実験に用いた液体遅延線では、入力用IDTから液中に放射された超音波ビームは、液体層を介して反射板によって反射された後、もう1組のIDTで遅延電気信号として出力される。この液体遅延線を用いて、超音波ビームの放射方向と周波数の関係から、基板を伝搬する漏洩ラム波の位相速度を実験的に検証している。

2. 漏洩ラム波の伝搬特性

液体との界面を有するアクリル薄板と圧電磁器薄板との層状基板において、漏洩ラム波の伝搬特性とIDTの動作特性の関係を数値解析によって明らかにすることが本節での基本である。漏洩ラム波の伝搬特性の解析には、圧電性を有する基板材料での異方性とともに、液体との界面での境界条件を考慮する必要がある。このため、Farnellの手法⁽¹⁶⁾とともにCambellら⁽¹⁷⁾の手法を組み合わせる形で拡張し、層状基板における固体・固体及び固体・液体界面での境界条件下で拡張し、数値代入法によって計算を行っている。そのため、位相速度を複素数表示し、その虚数成分を漏洩波の減少定数と関係づけるとともに、各界面での変位、応力及び電束密度の連続性が満足されることに留意している⁽¹⁸⁾。ここで用いたアクリル薄板は住友化学製テクノロイで、厚さは125 μm である。圧電磁器薄板は厚さが218 μm のTOKIN製NEPEC-6で、分極軸は厚さ方向にある。計算に必要な材料定数は文献⁽¹⁹⁾に示されている。

図1は計算に用いた座標系と2組のIDTを用いた液体遅延線の構成を表している。圧電磁器薄板とアクリルとの

図1 層状基板上に2組のIDTを有する漏洩ラム波デバイスと液体遅延線の構成

Fig. 1. Schematic of leaky Lamb wave device with two IDTs on layered substrate and construction of liquid delay line.

接触面上に原点を配置して、IDTの電極指と垂直かつ基板面と平行な方向をX軸、基板と垂直な方向をZ軸としている。圧電磁器薄板の片面が空気、反対側の面がアクリルと接しており、アクリルのもう一方の面は水と接している。圧電磁器薄板の空気側の面上に送受2組のIDTが設けられている。層状基板と平行に水の層を介した状態で液中超音波の反射板が配置されており、その離間距離は可変である。RF発振器からの電気信号が入力用IDTに印加されると、層状基板に対し水中へ斜め方向に縦波超音波が放射される。この超音波は層状基板と平行に配置した真鍮板によって反射され、もう一方のIDTで遅延電気信号として検出される。ここで、基板面からの超音波の放射角度は次式を満足する⁽²⁰⁾。

$$\theta_W = \sin^{-1} \frac{v_W}{v}, \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 θ_W 、 v_W 、 v は基板の垂線からの液中超音波の放射角度、液中縦波及び漏洩ラム波の位相速度である。

図2(a)には、層状基板を伝搬する7つの低次モードの漏洩ラム波の位相速度が、周波数 f と圧電磁器薄板の厚さ d の積の関数の形で示されている。この場合、圧電磁器薄板とアクリル薄板との厚さの比 r は0.573であり、実験との整合性を計った値である。ここでの圧電磁器薄板の電気的境界条件は、空気側が短絡(short)、アクリル側は開放(open)状態である。図中の数字は各モードの通し番号である。 L_p 及び L_a は、層状基板の厚さが限りなく0に近い場合での、圧電磁器薄板単体及びアクリル板単体中の縦波速度の分散曲線(実線)である。

図2(b)は圧電磁器薄板単体を伝搬する5つの低次モード漏洩ラム波の位相速度の fd 依存性を示しており、層状基板での結果と比較するために、同じ fd 値の範囲での結果である。図(a)には各漏洩ラム波モードでの交点部分が存在するが、図(b)には認められない。 L_p あるいは L_a のラインと各漏洩波モードの交点は両図においてともに認められるが、交点の数は層状の場合に2倍以上となる。

図2(a)における第6と第7モードの速度分散曲線の交点近傍でのモードの場合には、互いの位相速度が交叉する。漏洩ラム波のモードの交叉もしくは反発の判断は、複素数

図2 漏洩ラム波モードの位相速度の fd 依存性
(電気的境界条件: short/open; 印は実験値,
(a): 層状基板, (b): 圧電磁器板単体)

Fig. 2. Velocity dispersion curves of leaky Lamb wave modes as function of fd under electrically shorted/opened condition; filled circles are experimental data, (a) for layered substrate and (b) for only piezoelectric substrate.

で表される各モードの位相速度の実部及び虚部の連続性を考慮することにより可能である。この場合、実部及び虚部共に近い値を有しているため、単純に速度の連続性からモードの連続性を判断することが困難である。このような場合の判別のためには、基板中の変位分布の連続性が有効である。図3は第6モードと第7モードの fd 値が3.01と3.02 MHz·mm の場合の Z 方向の変位分布の計算結果である。縦軸は、圧電磁器薄板とアクリル板の境界面を原点と

図3 第6, 7モードの変位分布の計算結果
(fd : 3.01, 3.02 MHz·mm)

Fig. 3. Calculated mechanical displacements of 6th and 7th modes for two fd values of 3.01 and 3.02 MHz·mm.

して、圧電磁器薄板の厚さを100として規格化されている。横軸は、変位の最大値で規格化された変位振幅を表している。第6モードでは節の数が3箇所、第7モードでは4箇所存在し、変位分布の連続性と矛盾しないことが分かり、 fd 値が3.01と3.02 MHz·mm の間で、2つのモードが交叉すると判断できる。更に、この変位分布の結果は、アクリル板側での弾性振動変位の局在を示すものであり、液中への放射効率の向上に有効であることを示唆している。このような振動変位の偏った分布は、圧電磁器薄板単体での対称(S)モードあるいは反対称(A)モードと比べて複雑である。

図4は、圧電磁器薄板の空気側がIDT(open及びshort)、アクリル側の電気的境界条件が開放(open)の場合の電気機械結合係数 k^2 の fd 依存性の計算結果であり、次式を基にして導かれている⁽¹⁸⁾。

$$k^2 = \frac{2|v_o - v_s|}{v_o}, \dots \quad (2)$$

ここでの v_o, v_s は、圧電磁器薄板の空気側の電気的境界条件が開放(open)あるいは短絡(short)状態で、アクリルとの接触面が開放(open)状態での漏洩ラム波の位相速度である。図中の●印は各ラム波モード、縦波速度の速度曲線の交点付近に存在する極大あるいは極小値を示したものである。ここで、3.2 MHz·mm 近傍での●印は、第3, 4,

図 4 電気機械結合係数 k^2 の fd 依存性 (電気的境界条件: IDT/open)

Fig.4. Calculated electromechanical coupling constant k^2 as function of fd , under IDT/opened condition.

図 5 実効変換効率 η の fd 依存性の計算結果 (電気的境界条件: IDT/open)

Fig.5. Calculated transducer efficiency η as function of fd , under IDT/opened condition.

5 の 3 つのモードが重複する部分であるため 1 つの ● 印で表示されている。第 4, 5 モードの 3.1MHz·mm 付近にはモード反発により生じた極大点が存在する。これらの極大点での k^2 値は大きく, SAW デバイスの基板として一般的に用いられる 128°YXLiNbO₃ の k^2 値が自由境界面で約 5.5%⁽²¹⁾ であることと比較すると, ここでの値は評価し得る値である。圧電磁器板単体の場合における L_p との交点での A_1 モードの k^2 値は約 20%, S_1 モードは約 12%であ

り, 圧電磁器単体基板に匹敵する効率値である。

漏洩ラム波は層状基板を伝搬する間に, 水中縦波へとモード変換され, そのモード変換効率 C は次式によって定義される。

$$C = 1 - \exp \frac{4\pi \text{Im}(v)}{\text{Re}(v)} \dots \dots \dots (3)$$

図 5 はトランスデューサの実効変換効率 η の fd 依存性の計算結果で, 電気的境界条件は図 4 の場合と同様に, IDT

は空気側，アクリル側は開放状態の場合である。ここでの η は， k^2 値と C 値の積で定義され，IDT の液中超音波用トランスデューサとしての評価の目安を与えるものである。図中の ● 印は図 4 の場合と同様に，速度分散曲線上の交点近傍に η の極大あるいは極小値が存在することが認められる。ここで， k^2 値に極値がなく η 値が極値を取るのは， C 値が極値であることを意味する。図 4 での第 3 モードの ● 印に対応する k^2 値は極値を取らないものの， C 値は零に近く，結果として η 値は極小値を取ることが図 5 から明らかである。このような動作点を選択することによって，SH 波を用いた液相センサと同様の動作が可能である。

3. IDT の動作特性の実験的検証

実験に用意した IDT の電極周期長 p は， $400, 320\mu\text{m}$ の 2 種類で，本論文ではそれぞれ Tr1, Tr2 と呼称される。電極指の重なり幅 w は 5.0mm ，対数は 10 対である。動作の確認には，図 1 で示した液体遅延線の構成において，基板と超音波の反射板との離間距離を任意に変えられるように配置し，挿入損失の周波数依存性の測定によって検討している。ここで，液中超音波の放射角度は式 (1) の関係により，漏洩ラム波の位相速度に依存し，基板と反射板との離間距離に応じて出力が最大となる放射角度が決まる。実験に用いた液体遅延線では，入力用 IDT から液中に放射された超音波ビームは，液体層を介して反射板によって反射された後，もう 1 組の IDT で遅延電気信号として出力される。IDT への印加電気信号の周波数を変化させることによって動作モードの選択が可能である。基板から斜め方向への超音波ビームの放射角度は，漏洩ラム波の位相速度と液中超音波の速度の比で決まり，印加周波数によって制御される。このことは，超音波ビームの放射方向と周波数の関係を実験的に調べることによって，基板を伝搬する漏洩ラム波の位相速度を推定できることを意味している。図 6 は，Tr-1 を用いて液体遅延線を構成し，第 6 モードと第 7 モードの交点に対応する周波数 14.0MHz の RF パルスを入力信号とした場合に，出力が最大となるように離間距離を調整することによって得られた時間応答特性の測定結果である。IDT と反射板との離間距離が 8.9mm で，式 (1) より液中超音波の放射角度が 15.6 度であることから，液中超音波の伝搬経路長は 18.5mm となる。この値は，図 6 での水中超音波の伝搬遅延時間と水中での縦波速度から求めた伝搬経路長 18.4mm とよく一致する。この結果からの送受の IDT の離間距離は 5.0mm で，2 つの電極パターンの IDT の中心間距離 6.0mm よりも少し短い値である。このことは，モード変換効率 C が 1 ではないために，液中超音波の実際の放射位置が IDT の中心部から少しシフトしていることによるものである。

図 2(a) 中の直線 Tr-1 及び Tr-2 は，本研究で用意した 2 種類のトランスデューサの動作直線を表し， $v = pf$ の関係を満足している。ここで直線の傾き p は，IDT の電極周期長に相当する。IDT の有効な動作は，この動作直線と

図 6 液体遅延線における RF パルスの時間応答特性の測定結果

Fig. 6. Observed input and output signals in case of Tr1 for 7th mode at carrier frequency of 14.0MHz .

漏洩ラム波の速度分散曲線との交点近傍において可能である。○印で示した実験データは，離間距離をパラメータとして液体遅延線の挿入損失の測定から得られた中心周波数と IDT の電極周期長の積から求めた速度である。2 種類の IDT (Tr1 と Tr2) に対応する動作直線と漏洩ラム波の各モードの速度分散曲線の交点では，数値計算結果と良く一致している。ここで着目すべきことは，IDT の動作直線が，複数個の速度分散曲線と交点を結ぶことであり，周波数の選択により，多モードでの動作が可能であることである。

図 7 には， fd 値が $3.0\text{MHz}\cdot\text{mm}$ 近傍での第 6 モードと第 7 モードの分散曲線，並びに IDT (Tr1) の動作直線が拡大した形で示されている。図中の 2 つのラム波モードの交点付近でトランスデューサを動作させた場合には，図 5 から明らかなように，第 6 モードは極小値を取り，第 7 モードが支配的である。

基板と超音波の反射板との離間距離を変化させることにより，この動作点近傍での挿入損失の周波数特性の測定結果が図 8 に示されている。第 7 モードでの反射遅延信号が最大となる中心周波数では，第 6 モードでの k^2 値は極小値を取り，無視できるレベルであるため，実質的に単 1 モードでの液中超音波トランスデューサとして機能している。ここで，基板に対する液中超音波の放射角度は，式 (1) より漏洩ラム波の位相速度に依存する。速度分散性の大きい場合には，動作周波数の少しの変化により液中超音波の放射もしくは受波角度を大きく変化することができる。図 8 での周波数領域では，図 2(a) から明らかなように，帯域内で速度分散性を有効に利用することが可能である。このことは離間距離の変化を周波数変化によって追従しようという利点につながる。以上の点からも非常に有効な動作点であると考えられる。第 6 と第 7 の 2 つのモードには，この動作点よりも低周波側で， k^2 , η の大きい領域が存在す

図7 層状基板における第6, 第7モードの交点近傍での速度分散曲線 (電氣的境界条件: short/open; 印は動作点に対応)

Fig.7. Velocity dispersion curves of 6th and 7th modes of leaky Lamb wave in layered substrate around crossing point, under electrically shorted/opened condition; filled circles correspond to respective operation points.

図8 液体遅延線の挿入損失の周波数特性の測定結果

Fig.8. Measured frequency dependences of insertion loss of liquid delay line.

ることが図4, 図5から明らかである。この領域での液体遅延線としての動作では, 2つのモードの中心周波数が近接し, 干渉等の影響を受け易いという問題点が生ずる。

図9は第2モードとアクリル中の縦波速度 (L_a) との交点付近を IDT (Tr2) の動作直線を含めて表している。こ

図9 層状基板での第2モード漏洩ラム波とアクリル板単体での縦波の交点付近の速度分散曲線 (電氣的境界条件: short/open; 印は動作点に対応)

Fig.9. Velocity dispersion curves of 2nd mode of leaky Lamb wave in layered substrate and longitudinal wave in only acrylic plate around crossing point, under electrically shorted/opened condition; filled circle is operation point.

図10 液体遅延線の挿入損失の周波数特性の測定結果 (図9の動作ポイントに対応)

Fig.10. Measured frequency dependence of insertion loss of liquid delay line, corresponding to operation point in Fig. 9.

こでの交点近傍において k^2 値及び C 値はともに極大値を持つため, η 値は極大となる。図10は, 第2モードとアクリル中の縦波速度 (L_a) との交点近傍での動作において, 液体遅延線の挿入損失が最小となるように離間距離を設定した場合の, 挿入損失の周波数依存性の測定結果である。こ

図 11 層状基板での第 3 モード漏洩ラム波と圧電磁器板単体中の縦波の交点近傍での速度分散曲線 (電気的境界条件: short/open)

Fig. 11. Velocity dispersion curves of 3rd mode of leaky Lamb wave in layered substrate and longitudinal wave in only piezoelectric ceramic plate around crossing point, under electrically shorted/opened condition.

こでの中心周波数での挿入損失は約 30dB である。この値は液体遅延線の構成, 超音波非破壊検査のためのトランスデューサとして十分に機能するレベルである。

つぎに電気機械結合係数が大きく, モード変換効率が非常に小さい動作点の存在について述べる。図 11 は第 3 モードの速度分散曲線と圧電磁器薄板の縦波速度 (L_p) 及び IDT ($Tr1$) の動作直線の交点近傍の特性を示している。この交点に対応する fd 値が 2.0MHz·mm 近傍で, 第 3 モードの C 値がほぼ零であることから, η 値が零に近いことが図 5 から明らかである。水を負荷しない場合でのデバイスの挿入損失は約 19dB であり, 水を負荷した状態では, 1dB 未満の変化に抑えられることが実験によって確認された。このような液体負荷状態で, 液中への縦波超音波の漏洩が非常に少ないことは, SH 波を用いた負荷液体の材料物性の評価のためのデバイスと同様な構成が可能である。SH 波に比べて振動変位が 2 方向, すなわち伝搬方向と基板面と垂直方向に存在するために, SH 波を用いたセンサと競合あるいは補間する形で, 高感度での動作が期待できる^{(22)~(24)}。

4. む す び

低次側の 7 つの漏洩ラム波モードで動作するすだれ状トランスデューサの動作特性を, 層状構造基板における漏洩ラム波の伝搬特性との関係において, 数値解析と実験の両面から検討を行った結果について述べた。圧電磁器薄板とアクリル板の層状基板を伝搬する漏洩ラム波の伝搬特性から, 漏洩ラム波の速度曲線の各ラム波モード間の交点並び

に 2 層を構成する各基板単体での縦波速度との交点の近傍で, IDT の電気機械結合係数とモード変換効率の積の形を取る実効変換効率は, 極大あるいは極小値を取ることが明らかになった。このような速度分散曲線上の極値点での動作に着目することは, IDT を漏洩ラム波トランスデューサとして液中超音波用, あるいは負荷液体の物性評価のためのデバイスの構成に有効な情報を与えるものである。ここでの計算結果を基にして, 層状基板に 2 組の IDT を有するデバイスを構成し, 液体遅延線としての動作特性の測定から, 数値計算と実験との良い一致が確認された。これらの結果は, 層状構造基板での多モード動作を活用する漏洩ラム波用 IDT を構成する際に, 有効な動作点の選択に有用な情報として考えられるものである。

(平成 15 年 2 月 18 日受付, 平成 15 年 12 月 12 日再受付)

文 献

- (1) M. Deschamps and O. Poncelet: "Transient Lamb waves: Comparison between theory and experiment," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.107, No.6, pp.3120-3129 (2000-6)
- (2) O.I. Lobkis, D.E. Chimenti, and H. Zhang: "In-plane property characterization in composite plates," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.107, No.4, pp.1852-1858 (2000-4)
- (3) D.E. Chimenti and R.W. Martin: "Non destructive evaluation of composite laminates by leaky Lamb waves," *Ultrasonics*, Vol.29, No.1, pp.13-21 (1991-1)
- (4) A.K. Mal, P.C. Xu, and Y. Bar-Cohen: "Leaky Lamb waves for the ultrasonic nondestructive evaluation of adhesive bond," *J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME*, Vol.112, No.3, pp.255-259 (1990-7)
- (5) A. Cheng, T.W. Murray, and J.D. Achenbach: "Simulation of laser-generated ultrasonic wave in layered plates," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.110, No.2, pp.848-855 (2001-8)
- (6) S.J. Davis, C. Edwards, G.S. Taylor, and S.B. Palmer: "Laser-generated ultrasound: its properties, mechanism, and multifarious applications," *J. Phys. D.*, Vol.26, pp.329-348 (1993)
- (7) S. Umemura, K. Kawabata, and K. Sasaki: "In Vitro and In Vivo enhancement of sonodynamically active cavitation by second-harmonic superimposition," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.101, No.1, pp.569-577 (1997-1)
- (8) K. Kim, H. Fukuhara, and H. Yamawaki: "Ultrasonic imaging of welded metals using simplified ultrasonic computerized tomography," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.41, No.1, pp.374-378 (2002-1)
- (9) W.F. Walker: "C- and D-Weighted Ultrasonic Imaging Using the Translating Apertures Algorithm," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, Vol.48, No.2, pp.452-461 (2001-3)
- (10) T. Takt and G.V. Frolova: "Noise robust one-dimensional blind deconvolution of medical ultrasound images," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, Vol.46, No.2, pp.291-299 (1999-3)
- (11) S. Saitoh, T. Takeuchi, T. Kobayashi, K. Harada, S. Shimanuki, and Y. Yamashita: "An improved phased array ultrasonic probe using 0.91Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.09PbTiO₃ single crystal," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.38, 1, No.5B, pp.3380-3384 (1999-5)
- (12) M. Calzolari, L. Capineri, A. Fort, L. Masatti, S. Rocchi, and M. Scabia: "A 3-D PW Ultrasonic Doppler Flowmeter: Theory and Experimental Characterization," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, Vol.46, No.1, pp.108-113 (1999-1)
- (13) K. Kobayashi, T. Moriizumi, and K. Toda: "Longitudinal acoustic wave radiated from an arched interdigital transducer," *J. Appl. Phys.*, Vol.52, No.8, pp.5386-5388 (1981)
- (14) K. Toda and Y. Murata: "Acoustic focusing device with

- an interdigital transducer," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.62, pp.1033-1035 (1977)
- (15) T. Fujita and K. Toda: "Operation performance of a liquid delay line oscillator using multi-mode leaky Lamb wave transducers," *IEICE Trans.*, Vol.J85-C, No.5, pp.348-355 (2002-5) (in Japanese)
藤田 剛・戸田耕司: "多モード漏洩ラム波すだれ状トランスデューサを用いた液体遅延線発振器の動作特性," 信学論 (C), **J85-C**, 5, pp.348-355 (2002-5)
- (16) G.W. Farnell: "Symmetry considerations for elastic layer modes propagating in anisotropic piezoelectric crystals," *IEEE Trans. Sonics & Ultrason.*, Vol.SU-17, No.4, pp.229-238 (1970)
- (17) J.J. Campbell and W.R. Jones: "A method for elastic layer modes propagating in anisotropic piezoelectric crystals," *IEEE Trans. Sonics & Ultrason.*, Vol.SU-15, No.4, pp.209-217 (1968)
- (18) K. Toda and K. Ibuki: "Analysis of performance of leaky Lamb wave transducer operating at liquid-solid interface," *Ferroelectrics*, Vol.73, pp.419-430 (1987)
- (19) Tokin Product catalogue (piezoelectric ceramics)
- (20) K. Toda: "An acoustic focusing device with an interdigital transducer on a thin piezoelectric plate," *Proc. IEEE*, Vol.67, No.8, pp.1173-1174 (1979)
- (21) 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会編: 弾性波素子技術ハンドブック, pp.160, オーム社 (1991)
- (22) F. Bender, R. Dahint, and F. Josse: "Acoustic wave-base sensors using mode conversion in periodic gratings," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, Vol.46, No.6, pp.1497-1503 (1999-11)
- (23) F. Josse and Z. Shana: "Effects of liquid relaxation time on SH surface waves liquid sensors," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.85, pp.1556-1559 (1989)
- (24) M. Inoue, K. Yoshino, H. Moritake, and K. Toda: "Evaluation of nematic liquid-crystal director-orientation using shear

horizontal wave propagation," *J. Appl. Phys.*, Vol.91, No.5, pp.2798-2802 (2002-3)

藤田 剛 (非会員) 1995 年 4 月防衛大学校電子工学科卒業。2000 年 3 月同理工学研究科電子工学専攻修了。2001 年 4 月同理工学研究科後期課程電子情報工学系専攻在学。弾性波デバイスを用いたセンサの研究に従事。

戸田 耕司 (正員) 1964 年防衛大学校 (電気工学専門) 卒業。1969 年京都大学大学院工学研究科修士課程電気系専攻修了。同年 4 月防衛大学校電気工学教室助手。1986 年 4 月同教授。1973 年 9 月から 1 年間 Stanford 大学電気工学科客員助教授。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。1972 年電子情報通信学会米沢賞, 1985 年科学技術庁長官賞受賞。電気学会, 応用物理学会, 日本音響学会会員。米国音響学会フェロー。米国 Sigma Xi 会員。