液晶ダイレクタ配向と SH 波伝搬速度の関係の評価

学生員 井 上 勝 (大阪大学)

正 員 吉 野 勝 美 (大阪大学)

正 員 森 武 洋 (防衛大学校)

正 員 戸 田 耕 司 (防衛大学校)

Evaluation of relationship between liquid-crystal director orientation and SH wave velocity

Inoue Masaru, Student Member, Yoshino Katsumi, Member (Osaka University), Moritake Hiroshi, Member, Toda Kohji, Member (National Defense Academy)

The orientation of liquid-crystal directors in the vicinity of an interface between a glass plate and a liquid-crystal layer is studied under shear horizontal (SH) wave propagation. Propagation characteristics of SH wave in a trilayer structure composed of a liquid-crystal layer sandwiched between two glass plates are numerically analyzed in the form of taking into account the anisotropy of the viscous tensor. The dependence of the acoustic phase delay change on the applied voltage to the liquid crystal layer is numerically related to the liquid-crystal director-angle. The applied voltage dependence of the director-angle is evaluated under the propagation of the 0th and 1st modes of SH wave, when the two modes have the different displacement distributions in the vicinity of the interface with the glass plate. The present technique is promising for evaluating the orientation of liquid-crystal directors without requiring a complicated experiment setup and valid for real-time measurement.

キーワード：弾性波、ネマティック液晶、ダイレクタ、配向測定

1. はじめに

基板界面近傍における液晶分子の配向状態は、物理的な観点のみならず、液晶ディスプレイ等の応用や技術的な観点からも非常に重要である。基板界面近傍での液晶の配向状態は、液晶ディスプレイの視野特性に影響を与えるリタデーション ($\Delta n d$: Δn は液晶の複屈折率、 d は液晶層の厚み) に関与することから、ラビング等の液晶の配向制御の観点から評価が実施されている⁽¹⁾⁽²⁾。また、基板界面における液晶分子の配向状態と関連してアンカリングエネルギーが重要であるが、プレチルト角からアンカリングエネルギーを評価する方法や⁽³⁾、強電場法を用いたアンカリングエネルギーの評価等⁽⁴⁾が知られている。特に近年では、SHG(Second-harmonic generation) を用いて、基板界面の極近傍領域における液晶分子の配向状態の測定を行う方法や^{(5)~(7)}、全反射エリプソメトリーを用いる方法等が試みられている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

弾性波のデバイスへの応用は、情報通信技術の分野やセンサとしても実現されている。^{(10)~(13)} 中でも Rayleigh 波や Lamb 波が、固/液界面を伝搬する際に液体中への縦波にモード変換されることから、これらの漏洩波モードを用い

て、超音波撮像、非破壊検査等が実現されている。^{(14)~(16)} SH 波 (shear horizontal wave) を用いたデバイスでは、固/液界面を伝搬する際に生じる伝搬損失が非常に小さいことから、粘度や誘電率、質量等、液体の物性に関わる測定のために研究が進められている。^{(17)~(19)} 一方、固/液からなる 2 層構造中を伝搬する弾性波や^{(20)~(23)}、液晶中を伝搬する縦波や横波については検討されているものの^{(24)~(27)}、液晶層を含む多層構造中を伝搬する弾性波については、ほとんど検討されておらず、特に異方性を考慮に入れた形の解析はなされていないのが現状である。

本研究では、異方性を有する液体としてネマティック液晶である 4-cyano-4'-pentylbiphenyl (5CB) を取りあげ、液晶セルと同じ構造である固/液/固の 3 層構造を伝搬する SH 波の伝搬特性の数値解析を行った。この際、液晶の異方性を反映させるため、液晶の粘性応力テンソルを考慮し⁽²⁸⁾、SH 波の伝搬速度と液晶分子の配向方向の関係について検討した。本論文では、液晶分子の平均の配向方向はダイレクタによって表示されている。実験においては、通常のホモジニアス (横方向に平行) 配向に加え、2 つのガラス基板の上下界面で配向状態が異なるハイブリッド配向の液晶セ

図1 解析に用いた座標系

Fig. 1. Coordinate system in numerical analysis.

ルを用意して測定を実施した。液晶セル部を伝搬する SH 波は、伝搬基板界面での液晶分子の配向状態の影響のみを強く受けることが明らかになり、本測定システムが基板界面近傍での液晶分子の配向状態を測定するのに有効な方法であることが分かった。

2. 数値解析

〈2・1〉数値解析方法 図1は SH 波の伝搬並びに本実験で用いた液晶セルの構成における座標系を示している。厚さ d の 2 枚のガラス板の間に厚さ pd ($0 \leq p \leq 1$) の液晶層が挟まれており、下側のガラス板と液晶層の境界面に座標の原点が設定されている。SH 波の伝搬方向は X_1 軸、振動方向は X_2 軸であり、基板の厚さ方向が X_3 軸である。

図1のような構造中を伝搬する弾性波の変位 U_j は以下の式で表される。

$$U_j = \sum_{m=1}^6 Z_m C_j^{(m)} \exp(ikb^{(m)}X_3) \exp\{ik(X_1 - vt)\},$$

$$(j = 1, 2, 3) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 k は波数、 v は位相速度、 $b^{(m)}$ は X_3 方向の減衰定数、 $C_j^{(m)}$ は振幅であり、 Z_m は境界条件の下で決定される係数である。ガラスと液晶層の境界条件は、ネマティック液晶の粘性応力テンソル⁽²⁸⁾

$$\sigma_{ij} = 2\nu_2 A_{ij} + 2(\nu_3 - \nu_2)(A_{ik}n_k n_j + A_{jk}n_k n_i) + 2(\nu_1 + \nu_2 - 2\nu_3)n_i n_j n_k n_l A_{kl}, \dots\dots\dots (2)$$

を考慮して決定される。ここで、 ν_i ($i = 1, 2, 3$) は粘性係数、 A_{ij} は速度勾配テンソル、 n_i は液晶ダイレクタである。また粘性係数 ν_i は、Leslie の粘性係数 α_i ($i = 1 \sim 6$) と以下の式によって関係づけられる⁽²⁸⁾。

$$2\nu_2 = \alpha_4,$$

$$2\nu_3 = \alpha_4 + \alpha_5 - \alpha_2(\gamma_2/\gamma_1),$$

$$2\nu_1 = \alpha_1 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6, \dots\dots\dots (3)$$

$$\gamma_1 = \alpha_3 - \alpha_2,$$

$$\gamma_2 = \alpha_6 - \alpha_5 = \alpha_3 + \alpha_2$$

液晶セル中を伝搬する SH 波が X_2 軸方向のみの変位成分を有することを考慮するとともに、ガラスと液晶層との境界面における境界条件 T_{32}^{LC} は、伝搬する SH 波の周波数が 8~13MHz 程度であること、及び実験での液晶配向がラビング処理によって実現されていることから、液晶層と固体層の変位及び応力が連続であるとして取り扱った⁽²⁹⁾。これは、強いアンカリングで液晶分子が界面に固定されている状態に相当する。このとき、ガラスと液晶層との境界面における境界条件 T_{32}^{LC} は、以下の関係式で表示される。

$$T_{32}^{LC} = i\omega\eta_e \frac{\partial U_2}{\partial X_3}, \dots\dots\dots (4)$$

$$\eta_e = \nu_3 + 2(\nu_1 + \nu_2 - 2\nu_3) \sin^2 \theta \cos^2 \theta. \dots (5)$$

ここで、 ω は角周波数、 η_e は有効粘性率、 θ は、図2に示す液晶ダイレクタと X_2 軸のなす角度である。上記液晶の異方性を考慮に入れて、SH 波の伝搬特性の解析を Farnell 及び Campbell & Jones の手法を基にして、固/液構造から、固/液/固の 3 層構造に拡張して実施した。^{(30)~(32)} 表1は数値解析に必要な材料定数の一覧を示している。固体層には等方性媒体のガラス (Corning:7059) を、液晶は 5CB を用いており、Nematic 相から Isotropic 相への相転移温度は 35.5 度である。

〈2・2〉数値解析結果 図3は、ガラス/液晶/ガラスの 3 層構造の液晶セル中を伝搬する SH 波の速度分散曲線

図2 SH 波の伝搬方向と液晶ダイレクタの関係
Fig. 2. Relationship between propagation direction of SH wave and liquid-crystal director.

表1 数値計算に用いた材料定数⁽³³⁾

Table 1. Material constants of glass and liquid crystal (5CB).

材料定数		値	単位
ガラス	c44	2.64	$\times 10^{10} [\text{N/m}^2]$
	密度	2760	kg/m^3
液晶	粘性係数 α_1	-0.011	$\text{Pa}\cdot\text{s}$ (27°C)
	α_2	-0.07	
	α_3	-0.0038	
	α_4	0.071	
	α_5	0.051	
	α_6	-0.028

図3 液晶セル中を伝搬する SH 波の速度分散曲線

Fig. 3. Velocity dispersion curves of three lowest modes of SH wave in liquid-crystal cell.

で、液晶層の厚さが $25\mu\text{m}$ の場合の数値解析結果である。図から、3つのモードの速度分散曲線は、ガラス薄板中を伝搬する SH 波の伝搬特性と酷似しているが、中央部分の液晶層の存在によって、位相速度は虚数成分を有している。0次モードはほとんど分散性を有さず、ガラスの横波速度である 3091m/s に近い値であるが、1次以上の高次のモードは大きな分散性を有しており、 fd の増大とともに、0次モードの位相速度に漸近する。

図4は液晶セル中での SH 波の振動変位 (X_2 軸方向) の厚さ方向の分布を示している。図中の実線及び点線は、それぞれ周波数 8.26 及び 13.2MHz の場合であり、0次モード及び1次モードに相当する。図から明らかなように、いずれのモードの場合においても、SH 波の変位は液晶層中で急速に減衰している。変位振幅が 10% に減少する厚さは、0次モードで $2.2\mu\text{m}$ 、1次モードで $1.8\mu\text{m}$ であり、液晶層の界面から約 $3\mu\text{m}$ でほとんど減衰してしまっている。また、0次モードよりも1次モードの方が減衰の度合いが大きい。

図5は SH 波の速度変化率 ($\Delta V/V$) と液晶ダイレクタの角度との関係を示す計算結果である。なお速度変化率は $\Delta V/V = (V - V_{ref})/V_{ref}$ で定義され、 V_{ref} は液晶セルに電圧が印加されていない初期状態での弾性波の伝搬速度であり、 V は液晶ダイレクタの角度変化に伴う SH 波の伝搬速度に対応している。図中の実線は0次モード、点線は1次モードに対応している。ダイレクタ角との関係において、1次モードは0次モードの約2倍の速度変化率を有しており、また、両モードともに角度 45 度において最大の速度変化率を取り、 90 度で初期配置と同じになる。この結果は、

SH 波の伝搬速度と液晶ダイレクタの配向方向を結びつけるものとして、後述する実験結果に有意義に関係づけられる。

3. 実験

〈3・1〉 実験方法 図6は本研究で用いたデバイスの構成と測定システムを示している。トランスデューサ部は、厚さ $400\mu\text{m}$ のガラス薄板 (Corning, 7059) の上側に厚さ $200\mu\text{m}$ の圧電磁器薄板 (TDK, 101A) が接着されている。この圧電磁器薄板上には電極周期長が $400\mu\text{m}$ のすだれ状トランスデューサ (Interdigital transducer: IDT) が配置されている。左右両側の2組のトランスデューサの中間部には、同じガラス薄板を用いて液晶セルが構成されている。この液晶セルの液晶層の厚さは、PET フィルムによって $25\mu\text{m}$ に調整されている。液晶セルの長さ (SH 波と液晶との相互作用長) は 15mm である。ガラス薄板には透明電極 (ITO) が付着されており、ガラス薄板に対して垂直方向に電界の印加が可能である。液晶が充填された状態で、電界を印加した際の SH 波の伝搬遅延位相及び伝搬損失の変化をネットワークアナライザ (HP, 4195A) を用いて室温下で測定した。

液晶セル内には、誘電異方性が正のネマティック液晶 5CB を封入した。封入された液晶は、ガラス基板にラビング処理を施すことにより、ダイレクタの初期配向方向が制御されている。液晶分子とガラス基板が平行な配向を実現する場合には、基板表面へのポリイミド膜の塗布後にラビング処理を行い、液晶分子のガラス基板への垂直配向の場合には、シラン系カップリング剤でガラス基板表面を処理した。実験に用いた液晶セルの配向状態が図7に示されている。図中の (a) は、液晶ダイレクタの初期配向方向が SH 波の

図4 SH 波の2つのモードの振動変位分布

Fig. 4. Calculated mechanical displacement distributions of U_2 in liquid-crystal cell for 0th and 1st modes.

図5 SH波の速度変化率と液晶ダイレクタの角度との関係

Fig. 5. Fractional velocity changes of 0th and 1st mode SH waves as function of director-angle.

図6 デバイスの構成図及び実験系

Fig. 6. Schematic of device construction and measurement system.

振動方向 (X_2 軸) に平行な配向状態のセル (以下平行配向と記述) であり、(b) 及び (c) は上下ガラス基板の配向方向が異なるハイブリッド配向状態のセル (以下ハイブリッド配向と記述) を示している。(b) の状態では下側のガラス基板、すなわち SH 波が伝搬するガラス基板側の液晶分子はホメオトロピック配向状態にあり、上側のガラス基板は平行配向である。一方、(c) は (b) の逆状態であり、下側のガラス基板側の液晶分子は平行配向状態にある。

図8は図6の構成のデバイスにおいて、2組の IDT 間の伝搬損失の周波数特性の測定結果を示している。図中の実線は液晶セル中に液晶が存在しない場合であり、点線は液晶が挿入されている場合の結果にそれぞれ対応している。図から、液晶セル中での液晶の存在の有無に関わらず、デバイスの伝搬損失はほとんど差異がないことが分かる。こ

図7 本実験で用いた液晶の配向状態

Fig. 7. Orientation direction of liquid-crystal directors in liquid-crystal cell for present experiment.

の結果から、固/液界面を伝搬する SH 波が、液体側に振動エネルギーをほとんど漏洩することなく伝搬することを理解することができる。

〈3・2〉 実験結果及び考察

〈3・2・1〉 平行セルの場合 図9は平行配向セルにおいて、SH 波の伝搬損失と伝搬遅延位相の電圧印加に伴う変化の様子の測定結果を示している。図中の黒丸及び白丸は 8.26 MHz 及び 13.2MHz での測定結果で、それぞれ 0 次モードと 1 次モードの結果に対応している。この図から、伝搬損失及び伝搬遅延位相ともに、電圧の上昇と伴に一旦減少した後、極小値を取り、その後増大していることが確認できる。また、0 次モードよりも 1 次モードの方が大きな伝搬損失及び伝搬遅延位相の変化を示している。図5に

図8 デバイスの伝搬損失の周波数依存性

Fig. 8. Measured frequency dependences of propagation losses of the SH wave device.

図 9 平行配向セルにおける (a) 伝搬損失及び (b) 伝搬遅延位相の変化の電圧依存性

Fig. 9. Measured applied voltage dependences of (a) propagation loss change and (b) acoustic phase-delay change in parallel-orientation cell.

示した数値解析結果から、SH 波の速度変化率は液晶ダイレクタの配向角度に依存する。5CB は誘電異方性が正であることから、ダイレクタは電圧の印加によって電界と同じ方向へと配向状態が変化する。図 9 の実験結果は、電圧の印加とともに液晶ダイレクタの角度が 0 度から 90 度へ向かう再配向過程に対応しているものと理解できる。

〈3・2・2〉ハイブリッドセルの場合 図 10 はハイブリッド配向セルの場合における SH 波の伝搬損失と伝搬遅延位相の電圧依存性を示している。図中の白丸は SH 波が伝搬する下側のガラス基板がホメオトロピック配向、上側のガラス基板が平行配向 (Homeotropic-Parallel 配向: 図 7 の (b) に対応) に、黒丸は逆の配向 (Parallel-Homeotropic 配向: 図 7 の (c) に対応) 状態での結果を示している。Homeotropic-Parallel 配向の場合には、印加電圧を増大させても伝搬損失及び伝搬遅延位相ともに変化が全く認められないが、Parallel-Homeotropic 配向の場合には、図 9 での平行配向セルの場合の結果と同様の特性を確認することができる。

図 10 ハイブリッド配向セルにおける (a) 伝搬損失及び (b) 伝搬遅延位相の変化の電圧依存性

Fig. 10. Measured applied voltage dependences of (a) propagation loss change and (b) acoustic phase-delay change in two types of hybrid-orientation cells.

液晶の初期配向がホメオトロピック配向の場合には、電圧の印加によって液晶分子の再配向が生じない。このため、SH 波の伝搬遅延位相に変化が発生しない。

図 11 は SH 波の液晶層への侵入長 δ と液晶分子との配向状態との関係を説明するための図である。Parallel-Homeotropic 配向の状態では、下側のガラス基板界面の液晶分子が電界の印加によって配向変化をし、SH 波の位相速度に変化が生じている。このことは、SH 波の液晶層への侵入長 δ が下側のガラス基板からわずかの領域であることを示している。粘性流体中での横波は指数関数的に減衰することとともに⁽³⁴⁾、横波伝搬による液晶の粘度測定における議論を参考にすることによって⁽³⁵⁾、本研究での SH 波の周波数における侵入長は数 μm のオーダーと評価される。これらのことは、図 4 で得られた変位分布とともに、図 10 で得られた実験結果が下側のガラス基板界面から数 μm の範囲での液晶ダイレクタの配向変化を測定していることの

妥当性を支持するものである。

〈3・3〉 配向角度の評価 前節までの結果から、本測定システムで測定される液晶セル中での伝搬損失及び伝搬遅延位相の変化は、SH 波が伝搬するガラス基板の界面付近の液晶分子の配向状態を反映しているものと理解できる。液晶セルへの電圧印加によって、液晶ダイレクタが図2に示す $X_2 - X_3$ 軸面内で再配向するが、その配向角度は図5の数値解析結果を用いて導出することができる。ここで液晶セルの長さを L 、周波数を f 、実験によって測定される伝搬遅延位相の変化を $\Delta\phi$ 、液晶セルに電圧が印加されない初期状態での SH 波の伝搬時間を T_{ref} 、ダイレクタの配向変化に伴う伝搬時間変化を ΔT とすると、SH 波の位相速度 V は $V = L / (T_{ref} + \Delta T)$ で与えられる。ここで、 $\Delta T = \Delta\phi / 2\pi f$ の関係を用いると、次式が得られる。

$$V = \frac{L}{\frac{\Delta\phi}{360 \times f} + \frac{L}{V_{ref}}}, \dots\dots\dots (6)$$

結果として、実験値の $\Delta\phi$ から速度変化分 ΔV が求められ、数値解析結果である図5の関数と関連付けることができる。

図12は液晶ダイレクタの配向角度の電圧依存性の結果を示している。図中の白丸は液晶セルが平行配向の場合、黒丸は Parallel-Hoemotropic 配向の場合の結果で、それぞれ

図11 SH波の液晶層への侵入長と液晶分子の配向状態との関係

Fig. 11. Relationships between penetration depth of SH wave and orientation states of liquid crystal.

図12 液晶の配向角度の電圧依存性 (平行及びハイブリッド配向)

Fig. 12. Applied voltage dependences of evaluated liquid-crystal director angle in two cases of parallel and hybrid orientations.

伝搬遅延位相の結果から算出されている。両配向での結果は、ともに電圧の増大に伴って液晶分子の配向角度が増大することを示している。平行配向よりもハイブリッド配向の場合の方が液晶ダイレクタの角度が増大している。このことはハイブリッド配向における液晶分子の方が、電圧印加に伴う液晶ダイレクタの再配向が容易であるためと考えられる。

図13は、Parallel-Hoemotropic 配向セルにおける液晶ダイレクタの配向角度の電圧依存性を、2つのモードでの伝搬において得られた結果で、白丸は0次モード、黒丸は

図13 0次、1次モードの伝搬下でのハイブリッド配向における液晶ダイレクタの配向角度

Fig. 13. Applied voltage dependences of evaluated liquid-crystal director angle under 0th and 1st mode propagation in hybrid orientation.

1次モードに対応している。0次モードよりも1次モードの伝搬下で、液晶ダイレクタの配向角度の変化が小さいことが分かる。このことは、図4の数値解析結果からも分かるように、1次モードの方が0次モードよりもSH波の振動変位の液晶層中での存在域が小さいことと関係しており、SH波の伝搬がより基板界面に近い液晶ダイレクタの配向状態を反映しているためであると考えられる。電圧印加時における液晶ダイレクタの角度プロファイル⁽⁹⁾と図4の数値解析結果から評価された配向角度を比較すると、本研究で測定している液晶ダイレクタの配向角度は、ガラス基板との界面から数百nm～数 μm 以下の領域の平均値を観察していると考えられる。

4. む す び

本論文では、SH波伝搬を用いて液晶セル中での基板界面近傍の液晶ダイレクタの配向状態を評価した結果について述べた。セル中でのSH波の伝搬速度の変化率と、液晶ダイレクタの配向角の関係を数値解析によって明らかにするとともに、実験的に検討を行った。実験では上下のガラス基板との界面付近で液晶ダイレクタの配向状態が異なるハイブリッドセルを含めて、3種類の代表的なセル構造のもとで測定を行い、液晶セル中でのSH波の伝搬は、伝搬する基板側の配向状態に強く支配されることを明らかにした。また、SH波の0次モードと1次モードの液晶層中での存在域が異なることとの関係において、それぞれのモードが基板界面から異なる範囲での液晶分子の配向角度を測定していることを示した。本方法による測定は、ガラスとの基板界面近傍における液晶ダイレクタの配向角度の実時間測定に有効であり、しかも測定装置とともに方法が簡便であるという特徴を有している。

(平成13年7月4日受付, 同13年9月25日再受付)

文 献

- (1) N. A. J. M. van Aerle, M. Barmantlo, and R. W. J. Hollering: "Effect of rubbing on the molecular orientation within polyimide orienting layers of liquid-crystal displays", *J. Appl. Phys.* **74** 3111-3120 (1993).
- (2) J. M. Geary, J. W. Goodby, A. R. Kmetz and J. S. Patel: "The mechanism of polymer alignment of liquid-crystal materials", *J. Appl. Phys.* **62** 4100-4108 (1987).
- (3) K. H. Yang: "On the determination of liquid crystal-to-wall anchoring anisotropy by the surface-plasmon polariton technique", *J. Appl. Phys.* **53** 6742-6745 (1982).
- (4) H. Yokoyama and H. A. van Sprang: "A novel method for determining the anchoring energy function at a nematic liquid crystal-wall interface from director distortions at high fields", *J. Appl. Phys.* **57** 4520-4526 (1985).
- (5) M. B. Feller, W. Chen and Y. R. Shen: "Investigation of surface-induced alignment of liquid-crystal molecules by optical second-harmonic generation", *Phys. Rev. A* **43** 6778-6792 (1991).
- (6) M. Barmantlo, R. W. J. Hollering, and N. A. J. M. van Aerle: "Correlations between surface and bulk liquid-crystal alignment observed with optical second-harmonic generation", *Phys. Rev. A* **46** R4490-R4493 (1992).
- (7) M. Barmantlo, N. A. J. M. van Aerle, R. W. J. Hollering and J. P. M. Damen: "Surface induced liquid-crystal alignment studied by optical second-harmonic generation", *J. Appl. Phys.* **71** 4799-4804 (1992).
- (8) S. Okutani, M. Kimura and T. Akahane: "Analysis of liquid crystal orientation at interface between liquid crystal and alignment film by total reflection ellipsometry", *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** L600-L602 (1998).
- (9) S. Okutani, M. Kimura, H. Toriumi, K. Akao, T. Tadokoro and T. Akahane: "Observation of nematic liquid crystal director reorientation at the interface between substrate and liquid crystal layer by total reflection ellipsometry", *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 244-249 (2001).
- (10) J. Tsutsumi, T. Matsuda, O. Ikata and Y. Satoh: "A Novel Reflector-Filter Using a SAW Waveguide Directional Coupler", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control.* **47** 1228-1233 (2000).
- (11) L. Reindl, G. Scholl, T. Ostertag, H. Scherr, U. Wolff, and F. Schmidt: "Theory and Application of Passive SAW Radio Transponders as Sensors", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control.* **45** 1281-1291 (1998).
- (12) F. Bender, R. Dahint, and F. Josse: "Acoustic Wave-Based Sensors Using Mode Conversion in Periodic Gratings", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control.* **46** 1497-1503 (1999).
- (13) J. J. Caron, R. B. Haskell, P. Benoit, and J. F. Vetelino: "A Surface Acoustic Wave Mercury Vapor Sensor", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control.* **45** 1393-1397 (1998).
- (14) R. M. White and S. W. Wenzel: "Fluid loading of a Lamb-wave sensor", *Appl. Phys. Lett.* **52** 1653-1655 (1988).
- (15) K. Toda and A. Sawaguchi: "Ultrasonic imaging system using a leaky SAW transducer composed of piezoelectric ceramic and fused quartz", *J. Appl. Phys.* **69** 103-108 (1991).
- (16) V. Gusev and P. Hess: "Theory of photothermal depth profiling via Rayleigh-type surface acoustic wave detection", *Appl. Phys. A*, **61** 299-310 (1995).
- (17) F. Josse and Z. A. Shana: "Acoustoionic Interaction of SH Surface Waves with Dilute Ionic Solutions", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control.* **38** 297-304 (1991).
- (18) R. D. Costley, V. V. Shah, C. B. Winstead, and J. P. Singh: "Viscosity measurement with laser-generated and detected shear waves", *J. Acoust. Soc. Am.* **105** 1630-1637 (1999).
- (19) E. B. Molz and J. R. Beamish: "Leaky plate modes: Radiation into a solid medium", *J. Acoust. Soc. Am.* **99** 1894-1900 (1996).
- (20) P. B. Nagy: "Longitudinal guided wave propagation in a transversely isotropic rod immersed in fluid", *J. Acoust. Soc. Am.* **98** 454-457 (1995).
- (21) R. D. Costley, V. V. Shah, C. B. Winstead, and J. P. Singh: "Viscosity measurement with laser-generated and detected shear waves", *J. Acoust. Soc. Am.* **105** 1630-1637 (1999).
- (22) A. H. Nayfeh and H. -T. Chien: "Wave propagation interaction with free and fluid-loaded piezoelectric substrates", *J. Acoust. Soc. Am.* **91** 3126-3135 (1992).
- (23) A. H. Nayfeh and H. -T. Chien: "The influence of piezoelectricity on free and reflected waves from fluid-loaded anisotropic plates", *J. Acoust. Soc. Am.* **91** 1250-1261 (1992).
- (24) K. Miyano and J. B. Ketterson: "Ultrasonic study of liquid crystals", *Phys. Rev. A* **12** 615-635 (1975).
- (25) H. Imura and K. Okano: "Temperature Dependence of the Viscosity Coefficients of Liquid Crystals", *Jpn. J. Appl. Phys.* **11** 1440-1445 (1972).
- (26) P. C. Martin, O. Parodi and P. S. Pershan: "Unified Hydrodynamic Theory for Crystals, Liquid Crystals, and Normal Fluids", *Phys. Rev. A* **6** 2401-2420 (1972).
- (27) James D. Lee and A. Cemal Eringen: "Wave Propagation in Nematic Liquid Crystal", *J. Chem. Phys.* **54** 5027-5034 (1971).
- (28) D. Forster, T. C. Lubensky, P. C. Martin, J. Swift and P. Pershan: "Hydrodynamics of Liquid Crystals", *Phys. Rev. Lett.* **26** 1016-1019 (1971).
- (29) D. K. Gramotnev and M. L. Mather: "Anomalous absorption of bulk shear acoustic waves by an ultra-thin layer of a non-Newtonian fluid", *J. Acoust. Soc. Am.* **106** 2552-2559 (1999).
- (30) G. W. Farnell: "Symmetry Considerations for Elastic Layer Modes Propagating in Anisotropic Piezoelectric Crystals", *IEEE Trans. Sonics & Ultrason.* **17** 229-238 (1970).

- (31) J. J. Campbell and W. R. Jones: "Propagation of Surface Waves at the Boundary Between a Piezoelectric Crystal and a Fluid Medium", IEEE Trans. Sonics & Ultrason. **17** 71-76 (1970).
- (32) K. Toda and K. Ibuki: "Analysis of performance of leaky Lamb wave transducer operating at liquid-solid interface", Ferroelec. **73** 419-430 (1977).
- (33) K. Negita: "Electrorheological effect in the nematic phase of 4-n-pentyl-4'-cyanobiphenyl", J. Chem. Phys., **105** 7837-7841 (1996).
- (34) ランダウ、リフシッツ: 流体力学 1 (1970) 東京図書
- (35) P. G. de Gennes and J. Prost: The Physics of Liquid Crystals (1995) Oxford, NewYork.

戸田 耕 司 (正員) 1940年11月12日生まれ。64年防衛大学校(電気工学専門)卒業。69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。86年4月同教授。73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。72年電子情報通信学会米沢賞、85年科学技術庁長官賞受賞。電気学会、電子情報通信学会、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。

井 上 勝 (学生員) 1968年7月27日生まれ。92年3月防衛大学校電子工学科卒業。97年3月同理工学研究科電子工学専攻修了。99年4月同理工学研究科修士課程電子工学専攻在学。弾性波デバイス及び液晶を用いたセンサの研究に従事。電気学会、日本液晶学会会員。

吉 野 勝 美 (正員) 1941年12月10日生まれ。64年大阪大学工学部電気工学科卒業。69年同大学院工学研究科博士課程修了。同年大阪大学工学部助手、88年同教授。96年から2000年東北大学工学部電子工学科教授併任。74年から1年間ベルリン、ハーンマイトナー原子核研究所客員研究員。工学博士。主として、導電性高分子、絶縁性高分子光機能性高分子、液晶、液体、強誘電体、超電導体などの

電気電子材料に関する研究に従事。84年応用物理学会賞、90年大阪科学賞、97年電気学会著作賞、98年電気学会業績賞。電気学会、電子情報通信学会、日本物理学会、応用物理学会、日本液晶学会、高分子学会、レーザー学会会員。

森 武 洋 (正員) 1968年5月22日生まれ。91年3月大阪大学工学部電子工学科卒業。95年3月同大学院博士後期課程電子工学専攻修了。同年4月日本学術振興会特別研究員。同年10月防衛大学校電子工学科助手。98年4月同講師。博士(工学)。2000年4月同校電気情報学群電気電子工学科講師。液晶の電気的光学的性質と電気光学効果、弾性波デバイスをを用いたセンサの研究に従事。98年電気学会優秀論文発表賞受賞。電気学会、電子情報通信学会、応用物理学会、日本液晶学会会員。