厚いセル内のLB膜上液晶分子の全反射減衰法による評価

学生員 馬場 暁 (新潟大)

正員 金子双男 (新潟大)

正員 新保一成 (新潟大)

正員 加藤景三 (新潟大)

正員 小林敏志 (新潟大)

正員 若松 孝 (茨城高専)

An Evaluation of Liquid Crystal Molecules on Polyimide Langmuir Blodgett Films in the Thick Cell using the Attenuated Total Reflection Method

Akira Baba, Student Member, Futao Kaneko, Member, Kazunari Shinbo, Member,

Keizo Kato, Member and Satoshi Kobayashi, Member (Niigata University)

Takashi Wakamatsu, Member (Ibaraki National College of Technology)

Behaviors of liquid crystal molecules, 5CB, have been investigated in the thick cells having aligning layers of the polyimide (PI) Langmuir-Blodgett (LB) films on the aluminum electrodes using the attenuated total reflection (ATR) measurement method. The ATR curves strongly depended upon the AC voltages applied to the cell and upon temperatures. The resonant excitations of the surface plasmon polariton (SPP) were observed in the broad region of the incident angle in the ATR measurements. The tilt angles of the liquid crystal molecules were calculated by fitting the theoretical ATR curves to the experimental ones. The results showed that the ATR measurement method was very useful for evaluating the behaviors of liquid crystal molecules in thick cells.

キーワード：全反射減衰 (ATR) 法, 5CB液晶, ポリイミド (PI) LB膜, チルト角, 表面プラズモンポラリトン (SPP)

1. まえがき

液晶表示デバイスの開発において、配向膜上での液晶分子の配向を評価することは、非常に重要な課題である。しかしながら、いままでは液晶セルのバルク中での液晶分子の配向評価や配向膜表面近傍での評価が主であり、配向膜表面から深さ方向に関する液晶分子の配向評価についてはほとんど報告がなされていない。

最近、我々は可視光の全反射減衰 (Attenuated Total Reflection: ATR) 法を用いて、比較的薄いセル内のLB配向膜表面近傍からセルの中間層に至る液晶分子の評価を行っている⁽¹⁾⁽²⁾。ATR法とは、金属薄膜表面に局在する表面プラズモンを可視光により共鳴励起し、この共鳴励起した表面プラズモンポラリトン (SPP)⁽³⁾が金属薄膜表面近傍の媒質に敏感に変化することを利用して、金属薄膜表面近傍の数nmから数百nm程度の情報を高感度で得ることのできる光学的測定法の一つである⁽⁴⁾⁽⁷⁾。我々は、これまでATR法を用いて銀あるいはアルミニウム (Al) 薄膜上の種々の有機超薄膜について詳しく調べてきている⁽⁸⁾。

銀薄膜上での配向膜/液晶分子のATR法による配向評価については、いくつか報告がある⁽⁶⁾⁽⁷⁾が、Al薄膜上での配向膜/液晶分子の配向評価は、ATR特性が銀薄膜ほど敏感ではないために報告がない。しかしながら、SPP励起のためにAl薄膜を用いた場合、銀を用いた場合よりもAl/配向膜/液晶界面での液晶層へのSPPの侵入長が深い (260nm程度、銀では140nm程度) ために、電圧印加による配向膜表面近傍から中間層に至る液晶分子の配向変化が評価できると考えられる。また、Al薄膜上にはラングミュアプロジェクト (LB) 膜の累積が銀薄膜上よりも容易であるという利点もある⁽⁸⁾。

本研究では、まず、Al薄膜上にラビングフリーの液晶配向膜として期待されているポリイミド (PI) LB膜⁽⁹⁾の液晶配向膜を用いた比較的厚いセル厚の液晶セルを作製し、いくつかの温度で電圧印加によるLB膜上での液晶分子の振る舞いについてATR法を用いて調べた。前報⁽¹⁾では、液晶セルの厚さが薄い (5360nm) ためにSPPと導波モードを同時に共鳴励起するATR特性が観測されたが、今回は厚いセル (10数 μ m) を用いたために、配向膜表面近傍からセルの内部に至る液晶分子の配向状態に依存するS

PPのみを共鳴励起することができた。このATR測定結果と理論計算を比較することで、厚いセルにおいても配向膜表面近傍から液晶セルの中間層にいたる液晶分子の配向変化と、さらに、温度の違いによる液晶分子の配向変化を評価することができたので報告する。

2. 測定試料の作製と全反射減衰 (ATR) 法

〈2.1〉 全反射減衰 (ATR) 法 図1に本研究で用いたクレッチマン配置⁽¹⁰⁾のATR試料配置を示す。図1のような屈折率の大きいプリズム上に金属薄膜（ここではAl）や誘電体が存在すると、全反射領域であっても金属や誘電体中にはZ方向に指数関数的に振幅が減衰し、X方向へ伝搬する電磁波、エバネッセント波が存在する。金属薄膜の厚さが十分に薄いとき（Alで15nm程度）、このエバネッセント波は誘電体層（配向膜や液晶層）まで浸み出す。全反射領域で入射角度 θ を変化させ、X方向の波数が表面プラズモンの波数と等しくなると、表面プラズモンがエバネッセント波と結合し、SPPが共鳴励起される。SPPの共鳴励起によって、エバネッセント波のエネルギーがSPPの励起エネルギーとして奪われるために、全反射領域でSPPの共鳴励起角度に対応して反射光強度が減衰する。SPPの共鳴励起の条件は、金属薄膜およびその近傍の媒質の膜厚や光学定数に強く依存し、共鳴励起角度や反射光の減衰特性が敏感に変化する⁽⁸⁾。

図2に、図1のATR配置での入射角度に対応する反射率の計算値を示す。図のように、液晶セル中でのネマティック液晶分子のチルト角が一様に 0° 、 45° 、 90° と変化したとき、ATR特性はチルト角に対して高感度に変化する。また、この場合低角度領域での導波モードは現れなかった⁽¹⁾⁽²⁾。なお、計算にはAlの厚さを15nm（プリズム側）、Alの酸化膜を3nm、PI LB膜の厚さを4nm、液晶セルの厚さが十分に厚い (∞) とし、液晶分子の屈折率は報告された値を用いた⁽¹¹⁾。この計算とは逆に、ATR特性の実験値に理論計算をカーブフィットすることで液晶分子のチルト角が求まる。理論計算には伝達マトリクス法を用いた⁽¹²⁾⁽¹³⁾。理論計算における反射率 R の関数は、

$$R = \frac{\left((m_{11} + m_{12}q_{n+1})q_0 - (m_{21} + m_{22}q_{n+1}) \right)^2}{\left((m_{11} + m_{12}q_{n+1})q_0 + (m_{21} + m_{22}q_{n+1}) \right)^2} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 m_{11} 、 m_{12} 、 m_{21} 、 m_{22} は 2×2 特性マトリクス $[M]$ の成分であり次式で示される。

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^n [M_j] \quad (2)$$

また、 j 層目の特性マトリクス $[M_j]$ は

$$[M_j] = \begin{bmatrix} \cos k_{zj} d_j & -\frac{i}{q_j} \sin k_{zj} d_j \\ -iq_j \sin k_{zj} d_j & \cos k_{zj} d_j \end{bmatrix} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 d_j は j 層目の厚さ、 k_{zj} は j 層目の z 方向の波数ベクトルを、 q_j は j 層目の実効屈折率により決められる値である。計算においては、液晶分子がLB膜の累積方向に一軸配向しているとして⁽¹⁴⁾液晶層の誘電率を一軸誘電テンソル $\epsilon_x = \epsilon_y \neq \epsilon_z$ とした。

図1 ATR試料配置

Fig. 1. The ATR configuration.

図2 ATR理論曲線

Fig. 2. Theoretical ATR curves.

〈2.2〉 ATR測定試料の作製 図1のATR測定試料配置について説明する。まず、半径7.5mm、高さ23mmの半円柱型のATRプリズム（HOYA(株) SF6 $n=1.79882$ ($\lambda=632.8\text{nm}$)）及びスライドガラス（18mm $\times$ 24mm $\times$ 1mm t）上にAl薄膜を真空蒸着法により、それぞれ約15nm（プリズム上）と約100nm（スライドガラス上）形成した。

それらの上に液晶配向膜として、PILB膜⁽¹⁵⁾を累積速度10mm/min、表面圧25dyn/cmで9層累積した。プリズムとスライドガラスはLB膜の累積方向が平行になるように、エポキシ樹脂を用いて貼り合わせ液晶を注入した。液晶にはネマティック液晶5CB（メルクジャパン(株)）を用いた。そして、励起されるSPPがLB膜の累積方向（図1のX方向）に沿って伝搬するような配置でレーザ光を入射し17.0℃～25.0℃の温度範囲で、セルに交流20kHzの電圧を印加してATR測定を行った⁽¹⁶⁾。温度の制御には、ペルチェ素子を用いて±0.1℃の精度で行った。なお、ATR特性の実験値に理論計算値をカーブフィットする際、プリズム上のA1やPILB膜の膜厚と複素比誘電率をあらかじめ求めておく必要がある。そこで、図1の液晶セルに用いたプリズム上と同時に、顕微鏡用カバーガラス上にもA1を蒸着した試料と、さらにその上にPILB膜を累積した配向膜のみの試料についてもATR測定を行った。このようにしてカバーガラス上のA1やPILB膜について得られた光学定数を、プリズム上の液晶セルのATR測定での理論フィッティングにも用いた。なお、図1のA1薄膜はイミド化のため250℃で熱処理されている。これと条件を等しくするために、A1薄膜のみについても測定の前に250℃で1時間熱処理した。この測定からA1の酸化膜(Al_2O_3)の厚さは3nmと評価された。また、A1とPILB膜のみのATR測定においては屈折率 $n=1.515$ ($\lambda=632.8\text{nm}$)の半円柱型プリズム(BK-7)を用いた。

図3 ATR測定装置

Fig. 3. The experimental system of the ATR measurements.

図3に本研究で用いた、角度スキャン型のATR測定装置を示す。光源には波長632.8nmのHe-Neレーザ（NEC GLG5370、出力1mW、ビーム径約0.65mm、ビーム広がり角約1.2mrad）を用いている。レーザからの光は偏光子（Polarizer）を通過することによりp偏光にし、さらにシリンドリカルレンズを通過することにより、プリズム中で平行光となる。プリズムは θ -2 θ ステージ上のゴニオメータ（ α, β, x, y, z 軸の各ステージにより構成）に固定され、入射角の初期調整を±0.05°の精度で行った。 θ -2 θ ステージはパルスモータ(PM)で制御され、レーザ光の入射角度 θ を

0.1°づつ変化させて測定を行った。ATR試料からの反射光は、 θ -2 θ ステージ上のシリコンフォトダイオード（PD1: 浜松ホトニクスS1227-1010BR）で検出した。なお、レーザ光の出力変動を取り除くために、入射光の一部をビームスプリッタ(BS)で分岐し、フォトダイオード(PD2)で検出した。反射率は、PD1とPD2の比から計算した。また、正確な反射率測定のために、試料のついていないATRプリズムのみの反射率を補正値として用いた。

3. 実験結果

〈3.1〉 液晶セルのATR特性 図1の液晶セルに対して、17.0℃、21.5℃、25.0℃の各温度で、印加電圧を0Vから25Vまで5V置きに変化させたときのATR特性を図4に示す。今回の測定では、低角度で細かい振動を示す導波モード⁽¹⁾⁽²⁾は観測されなかった。図より各温度において、電圧の増加に伴うディップ角度の高角度側へのシフトが観測されている。このようなディップ角度の高角度側へのシフトは、図2の理論計算でも示したようにチルト角が増加していることを示している。この結果は、ATR法によって配向膜-液晶界面での電圧変化によるチルト角の変化が高感度に測定できることを示している。図4において同じ電圧を印加したとき、各温度で表面プラズモンの共鳴励起によるディップの角度位置は少し異なっているが、各電圧で曲線形状は類似の変化をしているのがわかる。これは、同じ印加電圧ではこの温度範囲で、チルト角の変化はほぼ類似の変化をしていることが考えられる。これについては、次節において詳しく検討する。

図4 各温度での電圧印加による液晶セルのATR特性

Fig. 4. ATR properties of the liquid crystal cell caused by the voltages applied at each temperature.

〈3.2〉 実験曲線への理論フィッティング 図4で示した各温度、各印加電圧での液晶セルのATR曲線に対して、図5に示すモデルを用いて理論カーブフィッティングを行った。まず、図4のATR曲線の0Vについて考える。0Vでは温度の違いによるディップ角の変化はほとんど観測されていない。また、この場合にはSPPの共鳴励起による大きな減衰が明確に現れている。そこで、0Vでは液晶セル中において液晶分子のチルト角が一様に配向しているとして、プリズム/A1薄膜/A1₂O₃/PILB膜/液晶の層構造に対して理論カーブフィッティングを行った。図6の(a),(b)に、各温度におけるATR特性の電圧依存性の計算結果と実験値を示す。ここで、実験値を実線で示し、理論計算値を点で示した。上述の方法で計算した、図6の各図の0VでのATR特性の理論値は実験値によく一致している。この結果より、電圧を印加しない時(0V)のPILB膜上における5CB液晶分子のチルト角は、前報と同様に8°が得られた⁽¹⁾。

図5 理論フィッティングにおける液晶セルのモデル
Fig. 5. A model of liquid crystal cell in the theoretical curve fittings.

次に、電圧印加時のセル中における液晶分子の配向について考える。図4で示したように、電圧印加時のATR曲線においては、どの温度でも低角度側で反射率が低下し、また、全体的になだらかな曲線となっているのが観測された。液晶セル中において液晶分子のチルト角が一様に配向している場合、図2の理論曲線に示したようにATR曲線は、SPPの共鳴励起による大きな反射率の減衰が明確に観測される。一方、図4の電圧印加時の低角度側では液晶層へのSPPの侵入長(260nm程度)内において、チルト角の急激な変化が起こったために、SPPの共鳴励起条件が配向膜表面近傍で変化し、そのために明確な共鳴励起が起きず、図のようななだらかなATR曲線になったと考えられる。そこで、図5のような液晶分子が配向膜表面から連続的に変化するモデルを考え、液晶に作用するトルクの釣り合いの方程式を用いて、液晶層を2.5nmずつ区切ることで実験曲線に理論フィッティングを行った⁽¹⁷⁾。この結果も

図6の(a),(b)に示した。なお、25Vについては実験値への良い一致が見られなかったために今回は省いた。これについては今後の詳しい検討が必要であると考え。20V以下では各温度ともに多少不一致が観られるが、全体的に実験値と理論計算値はよく一致しており、上述のモデルで測定結果を十分に説明できると考える。実験値と計算値の不一致の原因は、現状では明確でないが、層構造の乱れやチルト角の面内での乱れが発生していることも考えられる。現状では今回の計算結果が最も実験値に一致しており、測定結果を適切に説明していると考え。

図6の結果より、PILB膜表面からセルの内部に至るチルト角の変化が評価された。PILB膜上での各温度、各電圧における配向膜からの距離に対するチルト角の変化を図7に示す。ここで、17.0°Cを実線で、21.5°Cを点線で、25.0°Cを破線で示した。この結果は、各電圧ともに同一の

(a)

(b)

図6 液晶セルのATR曲線の計算値と実験値、
(a)17.0°C、(b)25.0°C

Fig. 6. Experimental ATR curves of the liquid crystal cell and the calculated ones:
(a) at 17.0°C and (b) at 25.0°C.

図7 各温度、電圧における配向膜表面近くの計算されたチルト角

Fig. 7. Calculated tilt angles of the liquid crystal molecules near the aligning layer at various applied voltages and at temperatures.

(a)

(b)

図8 (a)薄いセルの10V,25°CでのATR特性と(b)薄いセルと厚いセルの配向膜表面近くにおける計算されたチルト角の比較

Fig. 8. (a) Experimental and calculated ATR properties of the thin cell at 25°C and (b) A comparison of calculated tilt angles of the liquid crystal molecules near the aligning layers between the thin cell and the thick cell.

電圧を印加したときにおいては、より温度が低い場合に於いてチルト角が大きく、表面近傍での変化が大きくなっていることを示している。また、図7の結果は温度の上昇によってチルト角の変化が小さくなるとする液晶分子の温度特性に⁽¹⁸⁾一致しており、実験結果が妥当なものであると考えられる。

〈3.3〉 薄いセルと厚いセルでの特性比較 前報⁽¹⁾⁽²⁾で示した、薄いセル（セル厚5.36 μm ）に対して25.0°Cで直流電圧6Vを印加した時のATR実験曲線と理論曲線を図8(a)に示す。セル厚が薄いためにSPPと導波モードが同時に共鳴励起したATR特性が観測された。この時も、液晶分子が連続的に変化するモデルを考えることで、配向膜表面からセルの中部に至るチルト角の変化を求めることができた⁽²⁾。図中での実験値と理論値の不一致については文献を参照されたい⁽²⁾。この結果と、前節で求めた厚いセル（セル厚10数 μm ）に対して25°Cで電圧を20V印加したときの配向膜表面近くの計算されたチルト角の変化を図8(b)に示す。今回、厚いセルの正確なセル厚が求まらなかったために同じ電界強度での比較はできないが、電界強度はほぼ同じ程度と考えられる。図のように薄いセルと厚いセルにおいて、若干特性は異なるが表面近くでの液晶分子のチルト角は類似の変化をしている。このことから、厚いセル厚においてもATR特性を細かくフィッティングすることで、セル内の液晶分子の配向変化を評価できると考える。

4. まとめ

アルミニウム（Al）薄膜上に、ポリイミド（PI）LB膜を液晶配向膜としてセル厚の厚い液晶セルを作製し、測定温度を変えて印加電圧に対する液晶分子のチルト角を全反射減衰（ATR）法を用いて評価した。セル厚が厚いため本測定では導波モードは観測されなかった。表面プラズモンポラリトン（SPP）の共鳴励起にAlを用いたため、液晶層へのSPPの侵入長が深く、配向膜表面からセルの内部に至る液晶分子の変化にSPPの共鳴励起が強く依存した。本研究では、これまでに報告のない低角度側において反射率が低下したならかなATR曲線が得られた。このATR測定結果に対して理論曲線をフィッティングすることで、液晶層の配向膜表面近傍からセルの内部に至る液晶分子のチルト角の変化を温度や印加電圧に対して評価することができた。

本研究で示したように、比較的厚いセルに対しても深さ方向の液晶分子のチルト角を評価できることは今後の液晶セルの評価に有効であると考えられる。

本研究の一部は文部省科研費の援助による。また、一部は（財）佐々木環境技術振興財団の補助による。議論していただいた電総研の横山浩博士に感謝する。本研究を行う

にあたり、プリズムガラスを提供していただいたHOYA (株) R & Dセンターの田島英身氏、スペーサ材料を提供していただいた東工大の高西陽一助手に感謝する。さらに、本研究に協力いただいた本学川上貴浩技官に感謝する。

(平成10年5月25日受付, 平成10年9月16日再受付)

文 献

- (1) 馬場 暁・金子双男・新保一成・加藤景三・小林敏志: 「全反射減衰法によるポリイミドLB配向膜上液晶層の評価」, 電学論A, 117-A, 1223 (平9-12)
- (2) A. Baba, F. Kaneko, K. Shinbo, K. Kato, S. Kobayashi & T. Wakamatsu: "Evaluation of Tilt Angles of Nematic Liquid Crystal Molecules on Polyimide Langmuir Blodgett Films using the Attenuated Total Reflection Measurement Method", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37, 279 (1998)
- (3) See for example, the review papers in *Surface Polaritons*, eds. V. M. Agranovich and D. L. Mills (North-Holland, Amsterdam, 1982)
- (4) J. D. Swalen and G. J. Sprokel: "Liquid Crystal - Surface Interactions by Surface Plasmons", *Physics and Chemistry of Liquid Crystals*, Plenum (1980)
- (5) G. J. Sprokel, R. Santo and J. D. Swalen: "Determination of the surface tilt angle by attenuated total reflection", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 68, 29 (1981)
- (6) X. T. Li, B. X. Chen, Y. Iimura & S. Kobayashi: "Measurement of tilt angle of nematic liquid crystal near the surface of rubbed polyimide by means of the ATR method", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 275, 135 (1996)
- (7) E. F. Aust, S. Ito, M. Sawodny and W. Knoll: "Investigation of polymer thin films using surface plasmon modes and optical waveguide modes", *TRIP*, 2, 313 (1994)
- (8) 例えば, 金子双男・本田章作・若松 孝・新保一成・加藤景三・小林敏志: 「全反射減衰法による金属薄膜上のアラキジン酸カドミウム塩LB超薄膜の構造評価」電学論A, 115-A, 1137 (平7-11)
- (9) H. Ikeno, A. Ohasaki, M. Nitta, N. Ozaki, Y. Yokoyama, K. Nakayama & S. Kobayashi: "Electrooptic bistability of a ferroelectric liquid crystal device prepared using polyimide Langmuir-Blodgett orientation films", *Jpn. J. Appl. Phys.* 27, L475 (1988)
- (10) E. Kretschmann: "Die Bestimmung optischer Konstanten von Metallen durch Anregung von Oberflächenplasmaschwingungen", *Z. Phys.* 241 313 (1971)
- (11) Liquid Crystal products information (BDH Chemicals Ltd)
- (12) P. Yen: *Optical Waves in Layered Media* (John Wiley & Sons, New York, 1988)
- (13) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics* (Pergamon, Oxford・New York・Seoul・Tokyo, 1974)
- (14) 馬場 暁・新保一成・加藤景三・金子双男・小林敏志: 「全反射減衰法によるLB膜上液晶層の評価」, 電子情報通信学会信越支部大会講演論文集, 17, 273, (1996)
- (15) M. Kakimoto, M. Suzuki, T. Konishi, Y. Imai, M. Iwamoto & T. Hino: "Preparation of mono- and multilayer films of aromatic polyimides using Langmuir-Blodgett technique", *Chem. Lett.*, 823 (1986)
- (16) 例えば, 電子材料別冊「液晶ディスプレイ技術1995年一構成部品・材料から製造プロセスまで」工業調査会 (1995)
- (17) 例えば, 岡野光治・小林駿介 共編: 「液晶 基礎編」, 培風館 (1985)
- (18) H. Yokoyama: "Surface Anchoring of Nematic Liquid Crystals", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 165, 265 (1988)

馬場 暁 (学生員) 1973年1月6日生。1997年3月新潟大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了。同年同自然科学研究科博士後期課程入学, 現在に至る。電気電子材料に関する研究に従事。応用物理学会, 日本液晶学会会員。

金子双男 (正員) 1950年4月1日生。1974年3月新潟大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月東京工業大学工学部助手。1981年4月新潟大学工学部助教授, 1992年4月同教授, 現在に至る。この間, 1986年3月～1987年1月MIT客員研究員。工学博士。電気電子材料, 有機薄膜の研究に従事。電子情報通信学会, 応用物理学会, 日本液晶学会会員。

新保一成 (正員) 1967年6月17日生。1995年3月新潟大学大学院自然科学研究科博士課程修了。同年4月同大学院助手, 1997年4月同大学工学部講師, 1998年2月同助教授, 現在に至る。博士(工学)。機能性有機薄膜の研究に従事。応用物理学会会員。

加藤景三 (正員) 1959年5月21日生。1987年3月東京工業大学大学院理工学研究科博士課程電気・電子工学専攻修了。同年4月新潟大学工学部助手。現在, 同大学院自然科学研究科助教授。工学博士。電気電子材料, 機能性薄膜に関する研究に従事。応用物理学会, 電子情報通信学会, レーザー学会会員。

小林敏志 (正員) 1943年3月2日生。1965年3月信州大学工学部通信工学科卒業。1970年3月東北大学大学院工学研究科博士課程修了。同年4月新潟大学工学部講師, 1971年4月同助教授, 1981年4月同教授, 現在に至る。工学博士。化合物半導体, 有機薄膜などの電気電子材料の研究に従事。電子情報通信学会, 応用物理学会会員。

若松 孝 (正員) 1963年5月30日生。1987年3月新潟大学理学部物理学科卒業。1989年3月東北大学大学院工学研究科博士前期課程電子工学専攻修了。同年4月茨城工業高等専門学校電子情報工学科助手, 1998年4月同校電気工学科講師, 現在に至る。博士(工学)。電気電子材料、特に有機薄膜物性の研究に従事。応用物理学会会員。