

LCD パネルにおける水分拡散と膨潤応力による反り解析

水谷 友徳*, 池田 徹*, 三宅 清**, 宮崎 則幸*

Warpage Analysis in LCD Panel under Moisture Diffusion and Hygroscopic Swelling

Tomonori MIZUTANI*, Toru IKEDA*, Kiyoshi MIYAKE** and Noriyuki MIYAZAKI*

* 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

** 日東電工株式会社基幹技術センター (〒567-8680 大阪府茨木市下穂積1-1-2)

*Department of Mechanical Engineering and Science, Graduate School of Engineering, Kyoto University (Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto 606-8501)

**Core Technology Center, Nitto Denko Corporation (1-1-2 Shimohozumi, Ibaraki-shi, Osaka 567-8680)

概要 液晶ディスプレイの大型化に伴い、さまざまな光学的不均一さ“ムラ”が目立ちやすくなってきた。この原因には、材料の不均質さや生産プロセスでの処理条件の変動によるもの、また環境温度や湿度変化によって発生する歪みが考えられる。本研究では、環境変化においても光学特性に変化が生じないような材料設計が重要になることから、光学フィルム内部の水分拡散と膨潤応力解析技術を開発した。はじめに液晶ディスプレイで使用されている光学フィルム単体の吸湿関連の材料物性値を評価した。この材料物性値を用いて、光学フィルム単体の解析精度を検証したところ、吸湿歪みの計算値と測定値は定量的に非常に良い一致を見た。次に偏光板においては、計測された吸湿歪みと計算値には定量的に多少差違が見られたが概ね一致した。最後に液晶ディスプレイの吸湿/乾燥過程における反りを解析したところ、計算結果と実験結果は定性的に良好な一致が見られた。

Abstract

As liquid crystal displays (LCDs) become larger, the homogeneity of the LCD panel becomes very important for the quality of the image. The inhomogeneity of an LCD panel can be caused by many factors: the inhomogeneity of materials, the production process, warping of the panel due to changes in temperature and humidity, and so on. In this study, we developed a scheme of hygro-mechanical analyses to predict the warpage of LCDs. First, the diffusion coefficient, Henry's law coefficient, and the coefficient of moisture expansion (CME) of each LCD component were measured. To confirm the validity of the analyses, the hygro-mechanical deformations of the various components in an LCD were analyzed using these measured material properties. The deformations obtained from the analysis correspond with the quantitative measurement results obtained experimentally. Finally, the warpage of an LCD panel was analyzed, and the analysis corresponds with the measurements qualitatively.

Key Words: Liquid Crystal Display Panel, Hygroscopic Strain, Coefficient of Moisture Expansion, Finite Element Method, Warpage

1. 緒 言

液晶ディスプレイ（以下LCD）は身の回りのさまざまな家電機器に利用されており、セルガラス、保護フィルム、偏光子、液晶などによってFig.1のように構成されている。その構成材料の1つである偏光子はポリビニルアルコール（以下PVA）を一軸延伸して二色性色素を吸着させたフィルム材料であり、延伸方向（以下MD方向）とその垂直方向（以下TD方向）とで物性値が異なる直交異方性の性質を有している。また偏光子は吸湿性に富み、他のLCD構成材料と比較して吸湿膨張と乾燥収縮を生じやすい。この偏光子の吸湿性が原因となって、LCD中の偏光板におけるき裂やLCD全体の反りを発生している。

そこで本研究では有限要素法を用いて吸湿・乾燥時にお

ける水分拡散と膨張・収縮応力を解析する手法を開発し、その検証を行った。

検証の手順としてはまず材料単体での実験結果と解析結果とを比較して解析手法の検証を行い、次に偏光子の両面に保護フィルムを貼り合わせた偏光板の実験結果とその解

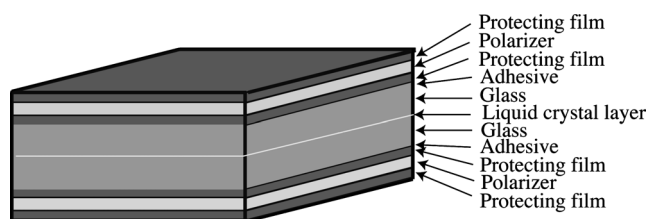


Fig. 1 Structure of an LCD Panel (the MD directions of the upper and lower polarizer sheets are orthogonal)

析結果とを比較した。そして最後にLCDパネルの吸湿試験結果と解析結果を比較し、解析手法の検証を行うとともに、保護フィルムの違いや偏光板の配置方向がLCDパネルの反りに与える影響を検討した。

2. 解析手法

水分拡散は、次式のフィックの拡散方程式で表現でき、吸湿ひずみは式(2)で示されるものと仮定する。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\varepsilon_\beta = \beta \times \Delta C \quad (2)$$

ここで C は水分濃度、 D は拡散係数、 t は吸湿時間、 β は膨潤係数、 ε_β は吸湿ひずみである。また各材料がとりうる最大水分濃度は次式のヘンリーの法則で表されるものとする。

$$C_{max} = \rho HP_s \quad (3)$$

ここで、 C_{max} は最大水分濃度、 ρ は相対湿度、 H は溶解度係数、 P_s は飽和水蒸気圧である。

一般的に溶解度係数 H は個々の材料によって異なる。しかし式(1)を用いて水分拡散解析を行う場合、異種材界面において水分濃度が連続となる。そのため異種材界面において一方の材料では水分濃度がその材料の最大水分濃度以下であるのに、他方の材料では水分濃度が最大水分濃度を超えるといった解析上の不都合が生じる。そこで、式(4)のように水分濃度 C の正規化を行った変数 w を用いて、材料間で連続となる新たな変数を定義した^{1)~3)}。この変数を正規化水分濃度と呼ぶことにする。ここで、下限 $w=0$ は絶乾、上限 $w=1$ は相対湿度 100%RH に対する最大水分濃度に達していることを意味する。

$$w = \frac{C}{HP_s} \quad (0 \leq w \leq 1) \quad (4)$$

ここで、 HP_s は、相対湿度 100% RH に対する最大水分濃度であり、飽和水分濃度 C_{sat} として、次式のように定義する。

$$C_{sat} = HP_s \quad (5)$$

式(4)で定義した正規化水分濃度を用いて式(1)を書き直すと次式のようになる³⁾。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

さらに解析対象内の温度が変化する場合、最大水分濃度が各ステップ間で変化するので、正規化水分濃度もそれに伴い値が変化する。よって本研究では、時刻 $t+\Delta t$ における正規化水分濃度 $w(t+\Delta t)$ に対し、式(7)のように温度変化に対応する更新を行った。

$$w'(t+\Delta t) = w(t+\Delta t) \frac{C_{sat}(T)}{C_{sat}(T')} \quad (7)$$

Table 1. Relationship between the thermo-mechanical analysis and the hygro-mechanical analysis

Thermo-mechanical analysis	Hygro-mechanical analysis
Temperature: T	Moisture wetness: $w (=C/C_{sat})$
Density: ρ	1
Coefficient of heat conduction: κ	DC_{sat}
Specific heat capacity: C_p	HP_s
Coefficient of linear thermal expansion: α	Coefficient of moisture expansion: βC_{sat}

ここで w 、 w' は温度変化に対する更新前後の正規化水分濃度、 T は時刻 t における温度、 T' は時刻 $t+\Delta t$ における温度である。

なお本研究では、LCD パネルおよびその構成材料を解析対象としており、LCD パネルは厚さ方向に薄い構造をしている。そこで本研究では外部環境の温度は一瞬にしてパネルに伝わると仮定し、LCD パネル内の温度は外部環境と等しいものとして解析を行った。また材料表面の水分濃度はヘンリーの法則によって次式で与えられる。

$$C_{surface} = \rho HP_s \quad (8)$$

ここで $C_{surface}$ は材料表面での水分濃度である。式(4)、式(8)より次式が得られる。

$$w_{surface} = \rho \quad (9)$$

ここで $w_{surface}$ は材料表面での正規化水分濃度である。よって式(9)より本研究では外部との境界条件として相対湿度を与えた。

なお、実際の解析には、商用有限要素法コードの MSC. Marc を用いた。本研究における解析は、拡散解析と膨潤応力解析の弱連成解析となるが、拡散解析と非定常熱伝導解析、膨潤応力解析と熱応力解析は、いずれも全く同じ支配方程式を解くことになる。このため、Marc には拡散解析と膨潤応力解析の弱連成問題を解く機能はないが、非定常熱伝導解析と熱応力解析の弱連成問題を解く機能を利用して、Table 1 に示すように物性値を読みかえることで解析を行った。なお、式(7)の温度変化に伴う正規化水分濃度の更新は、Marc のユーザーサブルーチンに自作のプログラムを組み込むことで実現した。また、温度変化に伴う熱応力については、やはり Marc を用いて通常の熱応力解析を行い、その結果を膨潤応力に加算した。

3. 吸湿特性の測定と物性値の妥当性の検証

3.1 湿度制御型 TGA 試験を用いた溶解度係数、拡散係数の算出

溶解度係数、拡散係数を算出するために湿度制御型 TGA (Thermo-gravimetric Analyzer : ハイデン社製、IGA SORP) 試験を行った。その概要を示す。

まず試験片を十分な時間真空乾燥させて絶乾状態とした

Table 2. Conditions of moisture controlled TGA experiments of PRTF1, PRTF2, adhesive, polarizer

	Temperature	Relative Humidity	
		PRTF1, PRTF2, Adhesive	Polarizer
Experiment A	40°C	90% RH	60% RH
Experiment B	60°C	90% RH	60% RH
Experiment C	70°C	90% RH	60% RH

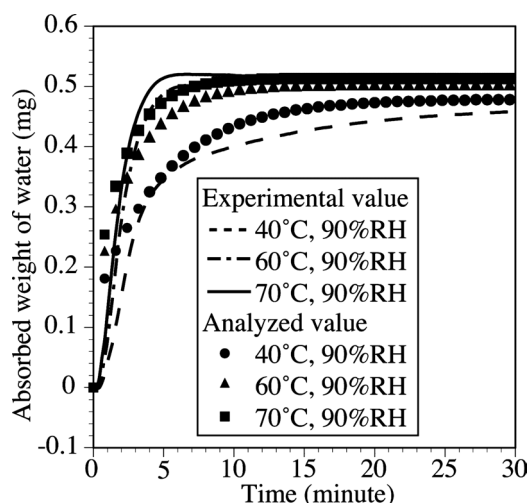


Fig. 2 Measured and analyzed absorbed weight of water in PRTF1

後に Table 2 に示すように温度、湿度が一定の環境条件下に置いて絶乾状態からの重量変化量を求めた。用いた試験片は2種の保護フィルム(PRTF1, PRTF2)と偏光子、フィルム化した粘着剤(ガラスと偏光板を貼り合わせるためのもの)であり、試験片寸法はPRTF1が20 mm×10 mm×0.042 mm, PRTF2が30 mm×10 mm×0.042 mm, 偏光子が17.3 mm×17.3 mm×0.027 mm, 粘着剤が10 mm×10 mm×0.2 mmである。実験結果をFigs. 2~5に示す。吸湿重量が定常に達したとき、試験片内部の吸湿率は一樣になり、式(3)の C_{max} に達していると考えられる。すなわち、吸湿重量を試験片の体積で除したものが C_{max} であるので、式(3)で示すヘンリーの法則を用いて溶解度係数を算出した。この溶解度係数は温度の関数となるので、次式のアレニウスの式で近似した。

$$H = H_0 \exp\left(\frac{-E_H}{RT}\right) \quad (10)$$

ここで H_0 は頻度因子、 E_H は活性化エネルギー、 T は絶対温度、 R は気体定数(8.314 J/mol·K)である。Table 3に最小二乗法により求めた各材料のアレニウスの式の係数を示す。また、Fig. 6に求めた溶解度係数の近似式と計測値を示す。これより、計測値はアレニウスの式でよく近似できていることが確認できる。

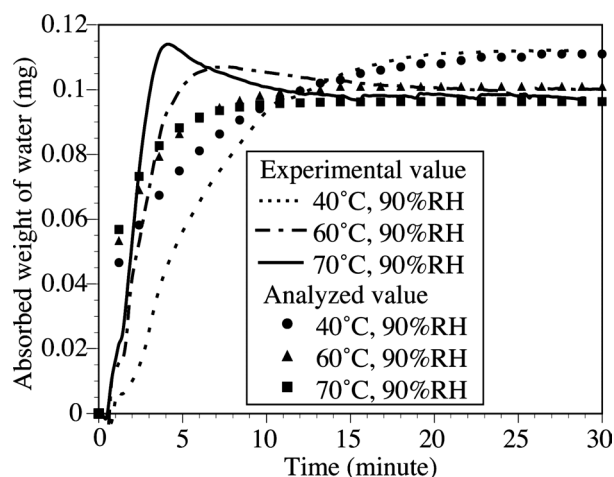


Fig. 3 Measured and analyzed absorbed weight of water in PRTF2

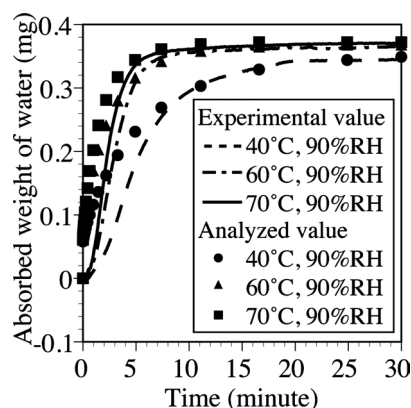


Fig. 4 Measured and analyzed absorbed weight of water in adhesive

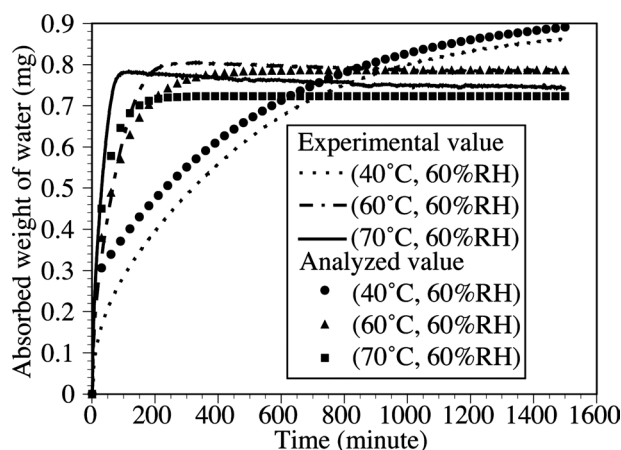


Fig. 5 Measured and analyzed absorbed weight of water in polarizer

次に拡散係数の算出を行った。はじめに拡散係数 D は定数であると仮定する。PRTF1, PRTF2, 偏光子, 粘着剤は、いずれも非常に薄いフィルムであるので水分拡散は厚さ方向の一次元拡散と近似した。一次元拡散方程式は式(11)で与えられ、初期条件、境界条件は式(12)で与えられ

Table 3. Frequency factor and activation energy

	PRTF1	PRTF2	Adhesive	Polarizer
H_0 (mg/mm ³ MPa)	1.31×10^{-6}	1.58×10^{-8}	3.19×10^{-7}	3.01×10^{-7}
E_H (J/mol)	-4.09×10^4	-4.74×10^4	-4.15×10^4	-4.74×10^4
D_0 (mm ² /hour)	8.83×10^1	2.68×10^3	3.92×10^4	3.93×10^8
E_D (J/mol)	2.73×10^4	3.69×10^4	3.59×10^4	8.18×10^4

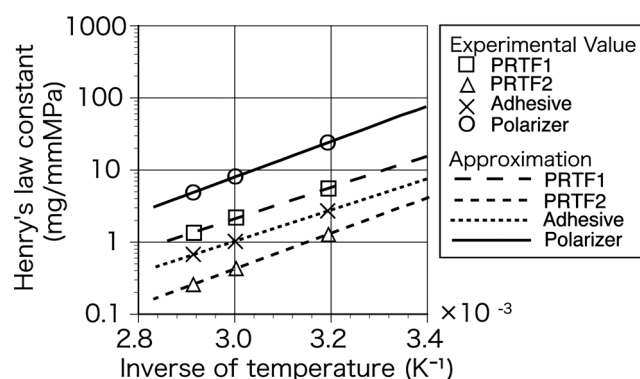


Fig. 6 Arrhenius plot of Henry's law constant

る。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (11)$$

$$C(x, 0) = 0, \quad (0 < x < L, t = 0)$$

$$C(0, t) = C_{max} = \rho H P_s, \quad (x = 0) \quad (12)$$

$$C(L_3, t) = C_{max} = \rho H P_s, \quad (x = L_3)$$

式(12)の条件の下で式(11)を解くと、理論解は式(13)で与えられる^{4),5)}。

$$C(x, t) = C_{max} \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} \exp\left(-\frac{(2k+1)^2 \pi^2}{L_3^2} Dt\right) \sin \frac{(2k+1)\pi x}{L_3} \right\} \quad (13)$$

ここで L_3 は試験片の厚さである。また試験片の水分吸湿率は W_R は次式で表される。

$$W_R = 100 \times \frac{L_1 \times L_2 \times \int_0^{L_3} C(x, t) dx}{m_{initial}} \quad (14)$$

ここで L_1 は試験片長さ、 L_2 は試験片幅、 $m_{initial}$ は試験片の初期重量を示す。式(14)から求められる一次元拡散による吸湿率の理論解が実験結果を最もよく再現するように試行錯誤法により拡散係数を決定した。さらに溶解度係数と同じく拡散係数を式(15)で示すアレニウスの式で近似した。

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_D}{RT}\right) \quad (15)$$

ここで D_0 は頻度因子、 E_D は活性化エネルギー、 T は絶対温度、 R は気体定数 (8.314 J/mol·K) である。Table 3 に各材料

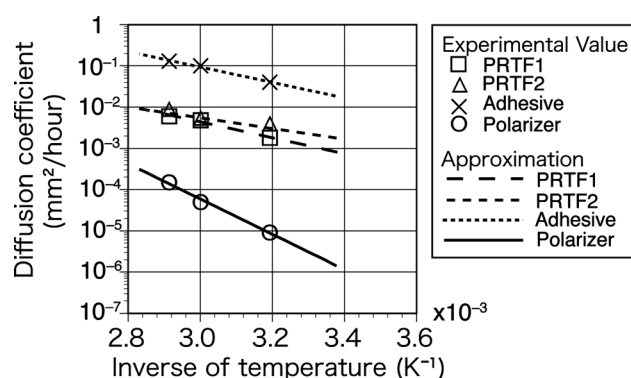


Fig. 7 Arrhenius plot of diffusion coefficient

の拡散係数をアレニウスの式で近似したときの係数の値を示す。Fig. 7 に求めた拡散係数の近似式と計測値を示す。これより、計測値はアレニウスの式でよく近似できていることがわかる。

3.2 解析による TGA 試験の再現性

3.1 節で求めた溶解度係数、拡散係数の近似式の妥当性を見るため、実験値と式(13)を用いた解析値との比較を行った。その結果を Figs. 2~5 に示す。Figs. 2~5 の結果を見ると最終的には解析値は実験値とほぼ同じ値に落ち着いている。このため溶解度係数は各材料の飽和水分濃度を再現できる正しい値が得られていることがわかる。

次に拡散係数についてであるが、Fig. 3 の 60°C、70°C の実験値では吸湿開始段階で最大値を取り、その後一定値へ収束している。吸湿開始段階で値が極大値をとるのは結露が原因と思われる。PRTF2 は元々溶解度係数の値がその他の材料に比べて非常に小さく、飽和水分濃度の値が小さい。そのため他の材料に比べて測定値は材料表面への結露によって大きな影響を受ける。吸湿初期に最大値を取る現象は Fig. 2 の 70°C、Fig. 5 の 70°C の実験値でも若干ではあるが見て取れる。これも結露によるものと思われる。

Figs. 2, 4, 5 より PRTF1、粘着剤、偏光子では解析値は実験値から大きく外れることなく実験値を再現していることが見て取れるので、これらの拡散係数の値を LCD パネル全体の解析に用いても問題はないと考えられる。

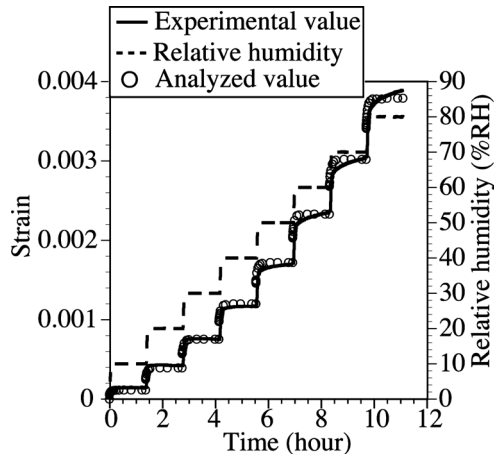
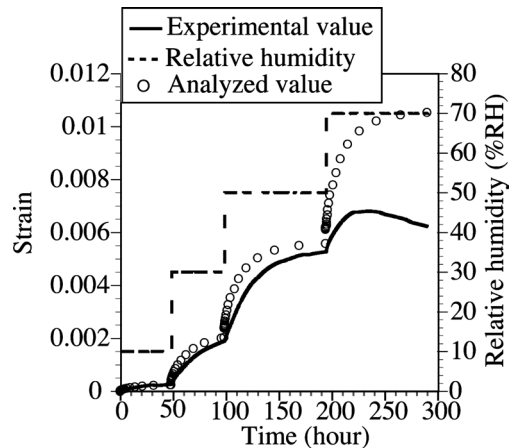
PRTF2 では先ほど述べたように結露のため吸湿初期段階では実験値と解析値とで差が見られるが、定常状態に達する時刻はほぼ等しい。よってある程度妥当な値が得られていると考え、この値を LCD パネルの解析に用いることとした。

3.3 湿度制御型 TMA 試験を用いた膨潤係数の算出

膨潤係数を算出するために湿度制御型 TMA (Thermo-mechanical analyzer: ブルカー・エイエックスエス社製、湿度雰囲気対応型 TMA) 試験を行った。その概要を示す。なお用いた試験片は TGA 試験と同じく 2 種の保護フィルム (PRTF1、PRTF2) と偏光子であり、試験片寸法は PRTF1 が 20 mm×10 mm×0.04 mm、PRTF2 が 20 mm×10 mm×

Table 4. Conditions of humidity-controlled TMA measurements in PRTF1 and PRTF2

		Temperature	Relative humidity
PRTF1 and PRTF2	Experiment 1	30°C	10%RH→20%RH→30%RH→40%RH→50%RH→60%RH→70%RH→80%RH
	Experiment 2	40°C	10% RH→20% RH→30% RH→40% RH→50% RH→60% RH→70% RH→80% RH
	Experiment 3	50°C	10% RH→20% RH→30% RH→40% RH→50% RH→60% RH→70% RH→80% RH
	Experiment 4	60°C	10% RH→20% RH→30% RH→40% RH→50% RH→60% RH→70% RH→80% RH
	Experiment 5	70°C	10% RH→20% RH→30% RH→40% RH→50% RH→60% RH→70% RH→80% RH
Polarizer	Experiment	40°C	10% RH→30% RH→50% RH→70% RH

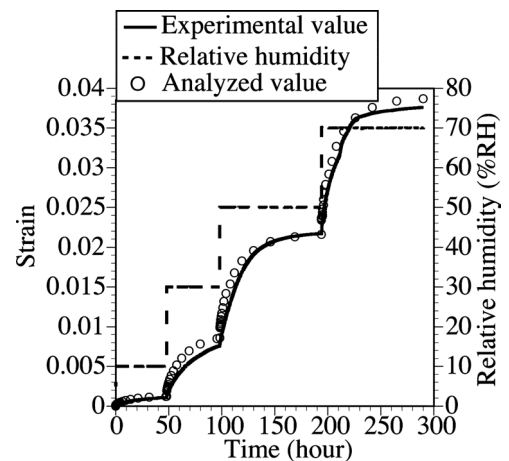
**Fig. 8** Measured and analyzed hygroscopic strain of PRTF1 at 40°C**Fig. 9** Measured and analyzed hygroscopic strain of polarizer whose longitudinal direction corresponds with the MD direction at 40°C

0.04 mm, 偏光子が 20 mm×10 mm×0.025 mm である。偏光子は横等方性弾性体であり、膨潤係数も 1 軸方向 (MD 方向) と 2, 3 軸方向 (TD 方向) とで異なるので MD 方向, TD 方向の膨潤係数を測定した。

まず温度が 70°C, 相対湿度が 5%RH 下で十分な時間初期乾燥させた。その後、吸湿ひずみを計測したい温度まで試験装置の環境温度を下げ、相対湿度を 5%RH で維持して定常状態になるまで放置した。この段階を基準として吸湿ひずみを計測した。またこのときの試験片長さを L_1 とする。定常状態に達した後、相対湿度を一定値まで上げて試験片を吸湿膨張させ、ひずみを計測した。さらにひずみが定常値に達した後、再び相対湿度を上げてひずみを計測した。これを繰り返し、ある温度下においてさまざまな相対湿度で吸湿させたときの吸湿ひずみを計測した。実験条件を Table 4 に示す。ひずみの算出は吸湿前 (上記の L_1) の試験片長さを L_1 , 吸湿後の試験片長さを L_2 として、次式より求めた。

$$\varepsilon = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \quad (16)$$

Fig. 8 に PRTF1 の 40°C での実験結果を一例として示す。また偏光子の実験結果を Figs. 9, 10 に示す。なお PRTF2 ではほとんどひずみが計測されなかったため、膨潤係数は 0

**Fig. 10** Measured and analyzed hygroscopic strain of polarizer whose longitudinal direction corresponds with the TD direction at 40°C

として図は割愛する。

次に実験データから膨潤係数を算出する。まず PRTF1 について説明する。ある相対湿度下での PRTF1 の最大水分濃度は、式 (3) のヘンリーの法則により求められる。そこでひずみが定常状態に達したときの試験片の水分濃度を x 軸に、そのときの温度を y 軸に、吸湿ひずみを z 軸に取ると Fig. 11 のようになり、吸湿ひずみは温度に対して一次関数で近似

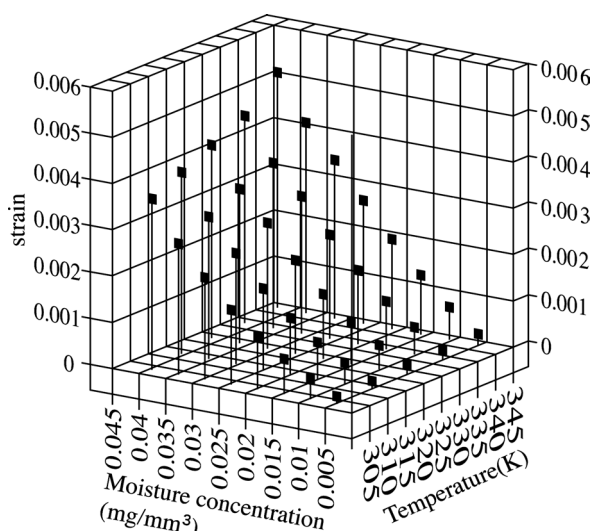


Fig. 11 Moisture concentration-Hygro-strain-Temperature in PRTF1

できることがわかる。そこで吸湿ひずみを式(17)のように温度に対しては一次関数、水分濃度に関しては二次関数で近似を行う。

$$\varepsilon = (p + rT) \frac{C^2}{2} + (s + qT)C + w \quad (17)$$

ここで C は水分濃度 (mg/mm^3)、 T は温度 (K)、 ε は吸湿ひずみ、 p , q , r , s , w は係数である。今回の実験で計測されたひずみは、相対湿度 5% RH での試験片長さを基準に取っているので $C = 0.05C_{\text{sat}}$ を代入したときに $\varepsilon = 0$ となる。よって式(17)に $C = 0.05C_{\text{sat}}$ を代入して w を求めると式(18)のようになる。よって式(17)は式(19)のようになる。

$$w = -(p + rT) \frac{(0.05C_{\text{sat}})^2}{2} - (s + qT)(0.05C_{\text{sat}}) \quad (18)$$

$$\varepsilon = (p + rT) \frac{C^2}{2} + (s + qT)C - (p + rT) \frac{(0.05C_{\text{sat}})^2}{2} - (s + qT)(0.05C_{\text{sat}}) \quad (19)$$

この式(19)の係数を式(20)のように最小二乗法によって決定した。

$$Q = \sum_i \sum_j (\varepsilon_{ij} - \varepsilon) \quad (20)$$

$$\frac{dQ}{dp} = 0, \quad \frac{dQ}{dq} = 0, \quad \frac{dQ}{dr} = 0, \quad \frac{dQ}{ds} = 0$$

ここで ε_{ij} は吸湿ひずみの実験値である。最小二乗法から $p = 10.712 \text{ (mm}^6/\text{mg}^2)$, $q = 1.1013 \times 10^{-3} \text{ (mm}^3/\text{K} \cdot \text{mg})$, $r = -2.4371 \times 10^{-2} \text{ (mm}^6/\text{K} \cdot \text{mg}^2)$, $s = -3.1087 \times 10^{-1} \text{ (mm}^3/\text{mg})$ と求められる。また膨潤係数は、次式から求められるので、式(19)および求めた係数により、PRTF1の膨潤係数は式(22)

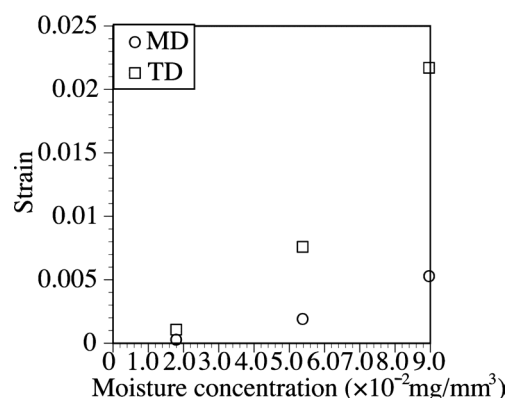


Fig. 12 Moisture concentration-Hygro-strain in Polarizer

で示される。

$$\beta = \frac{\partial \varepsilon}{\partial C} \quad (21)$$

$$\beta = 10.712C + 1.1013 \times 10^{-3}T - 2.4371 \times 10^{-2}CT - 3.1087 \times 10^{-1} \quad (22)$$

次に偏光子の膨潤係数の算出を行う。PRTF1と同じく、ある相対湿度下での偏光子の最大水分濃度は式(3)のヘンリーの法則により求められるので、ひずみが定常状態に達したときの試験片の水分濃度を横軸に、そのときの吸湿ひずみを縦軸にとると Fig. 12 が得られ、偏光子も吸湿ひずみは水分濃度の2次関数で近似できることがわかる。よって PRTF1 と同様に膨潤係数の値を求めると、偏光子の MD 方向の膨潤係数は式(23)、TD 方向の膨潤係数は式(24)のように求まった。

$$\beta_{\text{MD}} = 1.2268C + 1.5873 \times 10^{-2} \quad (23)$$

$$\beta_{\text{TD}} = 5.3368C + 5.3033 \times 10^{-2} \quad (24)$$

ただし偏光子の膨潤係数を算出する際、相対湿度 70% RH 下での吸湿ひずみの実験結果は除外した。なぜなら、Fig. 9 をみると相対湿度 70% RH 下では吸湿ひずみはいったん最大値を取った後、定常状態とはならず減少している。この原因として考えられるのは、高分子構造の再構成であり、延伸方向に並んでいた分子の緩和現象が起き、延伸前の状態に戻りかけていると思われる。この緩和現象により偏光子は延伸方向(MD)に大きく収縮する。この収縮が吸湿による膨張よりも大きいために偏光子は相対湿度 70% RH 下で縮んでいると思われる。また延伸が緩和されると偏光子は横等方性弾性体の性質を失い、偏光特性も失うと考えられる。偏光子が偏光特性を失った場合、LCD パネルは本来の機能を失うので、本研究ではこのような緩和現象は考慮しなかった。なお、偏光子についても PRTF1 と同様に、温度を変化させた場合の膨潤係数について評価を行うのが望ましいと考えられたが、1つの温度・湿度条件での TMA 試験に一月以上を要するため、本研究では 40°C における試験しか実施できなかった。

3.4 解析によるTMA試験の再現性

3.3節で求めた膨潤係数の近似式の妥当性を見るため、PRTF1と偏光子単体の膨潤吸湿について、実験値と解析値との比較を行った。解析は、2章に説明した方法にしたがって、MSC. Marcを用いて行った。この解析には、前述の拡散係数、溶解度係数、膨潤係数以外に弾性定数が必要となる。偏光子については、延伸方向に垂直な断面が等方性となるような横等方性材料を仮定した。このとき、応力-ひずみ関係は、次式で示される。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu_{23})/E_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (25)$$

ここで、 ε_x , ε_y , ε_z , γ_{yz} , γ_{zx} , γ_{xy} は工学ひずみを、 σ_x , σ_y , σ_z , σ_{yz} , σ_{zx} , σ_{xy} は、応力を示す。この式において、 ν_{12} と ν_{23} は0.3と仮定し、MD, TD方向の引張試験から、それぞれ E_1 と E_2 を、45°方向の引張試験から G_{12} を決定した。得られた偏光子の弾性定数と線膨張係数をTable 5に示す。また、他の材料の材料定数をTable 6に示す。

吸湿膨潤解析の結果をFigs. 8~10に示す。PRTF1においては解析値は実験値に近い値を示していることがわかる。

Table 5. Measured elastic constants and CTE of polarizer

Temperature	Elastic constants (MPa)			Coefficient of thermal expansion (CTE) (ppm/°C)	
	E_1	E_2	G_{12}	α_1	$\alpha_2=\alpha_3$
25°C	26400	7400	5830	1	60
40°C	16000	3140	658	1	60
60°C	16000	3140	797	1	60
90°C	12000	3100	—	1	60

ν_{12} and ν_{23} are assumed to be 0.3.

Table 6. Elastic constants and CTEs of PRTF1, PRTF2, adhesive and glass

Material		PRTF1	PRTF2	Adhesive	Glass
Young's Modulus (MPa)	25°C	4200	2300	100	73100
	40°C	3800	2100	70	
	60°C	3500	2000	60	
	90°C	2300	1900	50	
Poisson's ratio	25°C–90°C	0.3	0.3	0.45	0.244
CTE (ppm/°C)	25°C–90°C	90	69	400	2.4

CTE: Coefficient of thermal expansion

偏光子においてはFig. 10のTD方向では解析値は実験値をよく再現している。またFig. 9のMD方向においては緩和現象が起きる70% RH以外では解析値は実験値をよく再現している。よって膨潤係数はPRTF1および偏光子とも妥当な値が得られていると考えられる。ちなみにFig. 8の図をよくみると、PRTF1では高湿側において解析値は実験値よりも早く定常状態に達している。これは拡散係数を温度のみの関数としたことが原因と思われる。一般的に高分子の拡散係数は水分濃度に依存し、水分濃度の増加に伴って拡散係数が小さくなることが知られている⁶⁾。しかし、本研究では問題の単純化のため、拡散係数は温度のみの関数として取り扱った。

4. 複合材料での解析値の妥当性

本章では前章までで求めた物性値を用いて、偏光子と保護フィルム（ここではPRTF1を用いる）の複合材料である偏光板およびLCDパネルの実験を解析でどこまで再現できるかの検証を行った。これらの解析も2章で述べたとおり、MSC. Marcを用いて行った。

4.1 偏光板の膨潤解析の妥当性

ポリビニルアルコールを一軸延伸して二色性色素を吸着させて製造された偏光子はTD方向に非常に割れやすい材料であり、取り扱いが難しい材料である。そこで一般的には機械的な強度を持たせるために偏光子の上下に保護フィルムが貼り付けられる。これを偏光板という。この偏光板を用いて吸湿実験を行い、その際に得られた吸湿ひずみと解析結果とが一致するかどうか検証した。

まず偏光板を縦20 mm, 横5 mmの大きさに切り、試験片とした。なお偏光子の長手方向がMD, TDの2種類の試験片を用意し、それぞれMD偏光板, TD偏光板と呼ぶこととする。この試験片を60°C, 相対湿度5% RH下で十分な時間初期乾燥させた。その後試験環境を40°C, 相対湿度5% RHに保ち、定常状態となるまで放置し、この段階を基準として吸湿ひずみを計測した。またこのときの試験片長さを L_1 とする。定常状態に達した後、試験環境を40°C, 相対湿度30% RHとして偏光板を吸湿膨張させ、吸湿ひずみを計測した。ひずみは式(16)を用いて求めた。

実験結果と解析値との比較をFig. 13に示す。Fig. 13より実験値はTD偏光板の方がMD偏光板よりも大きな吸湿ひずみを計測した。解析値もTD偏光板の方がMD偏光板よりも大きな吸湿ひずみを示しており、解析は実験値と定性的に一致している。しかし定常状態に達するまでの時間は実験値と解析値とで大きな差がある。この原因として考えられるのが、解析における保護フィルムと偏光子間の接着剤層の未考慮である。保護フィルム-偏光子間の接着剤層は偏光子、保護フィルムと比べて非常に薄く、水分拡散やパネルの変形挙動への影響は非常に小さいと考え、モデル化を行わなかった。しかし偏光板の実験結果と解析結果を

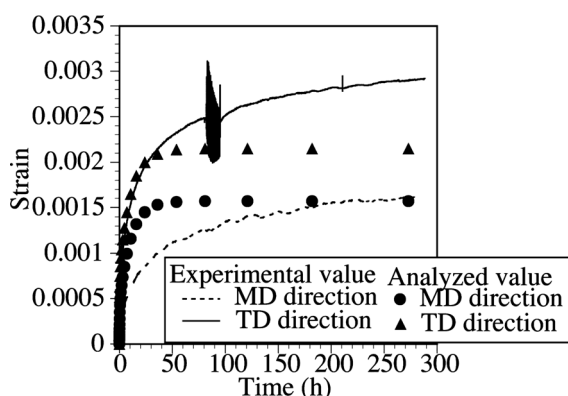


Fig. 13 Measured and analyzed hygroscopic strain of the polarizing plate at 40°C and 60% RH

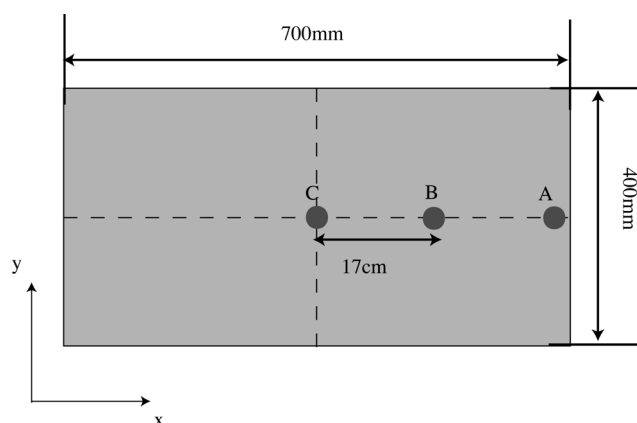


Fig. 14 Locations of strain gauges on an LCD panel

比較すると少なくとも水分拡散においては大きな影響があると考えられる。よって水分拡散過程での解析の精度を向上するためには接着剤層の物性値を測定し、解析に組み込むことが必要だと思われる。

4.2 LCD パネルでの解析の妥当性

LCD パネルの実験結果を解析によってどれほど再現できるか検証を行った。LCD パネルは周りをベゼル（外枠）で囲まれ、バックライトがパネルの下側にセットされている。温度、湿度を計測するためにパネル上下に温湿度計をセットした。LCD パネルを 40°C、相対湿度 70% RH 下で吸湿させた後、バックライトを点灯させて LCD パネルのひずみを計測した。この際、上板付近の環境は測定により 40°C、相対湿度 10% RH、下板付近の環境は 40°C、相対湿度 30% RH であった。上板、下板ともに Fig. 14 に示す位置にひずみゲージを貼り付け、ひずみ ϵ_{xx} を計測した。上板の計測結果を Fig. 15 に、下板の計測結果を Fig. 16 に示す。この実験結果によると上板、下板ともに吸湿段階ではパネルの端部で非常に大きなひずみを計測し、端部から中央に向かうにつれて急速にひずみの値が小さくなっている。また乾燥段階においては自由端であるパネル端部のひずみ（A 点におけるひずみ）以外は上板の方が下板のひずみよりも値が小さく、両方とも正の値を示している。よって、乾燥段階

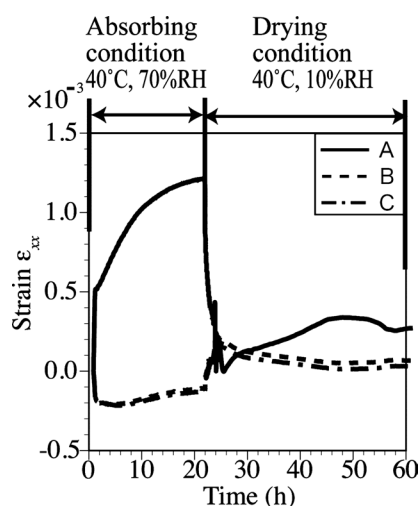


Fig. 15 Measured hygro-strain on an upper surface

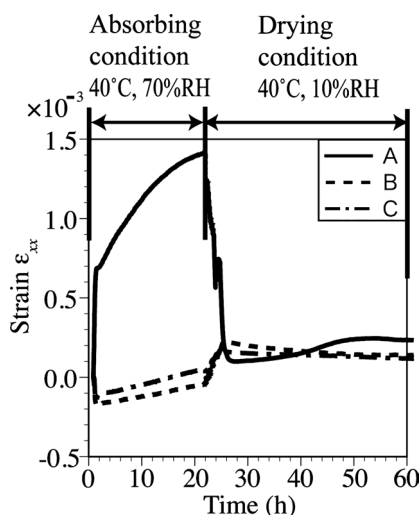


Fig. 16 Measured hygro-strain on a lower surface

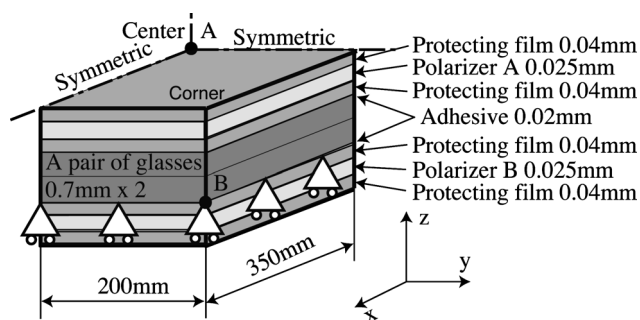


Fig. 17 Analyzed model of a quarter of an LCD

では x 方向においては上板の方が下板よりも早く収縮することがわかる。

この現象が解析でも再現できるかどうかを調べた。解析モデルには、Fig. 17 に示す 1/4 モデルを用いた。境界条件としてガラス下部の端部を z 方向固定した。要素数、節点数はそれぞれ 48,000、52,111 である。なお保護フィルムの種類は PRTF1 である。ひずみゲージの位置と同じ位置のひずみをプロットした結果を Figs. 18, 19 に示す。解析結果

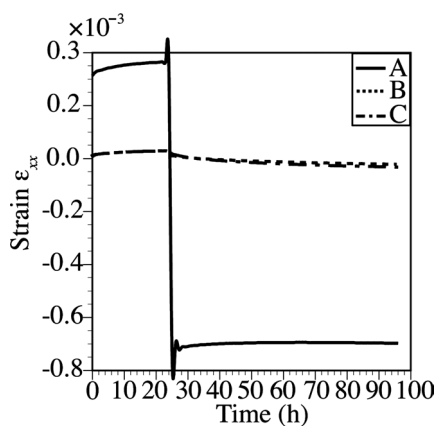


Fig. 18 Analyzed hygro-strain on an upper surface

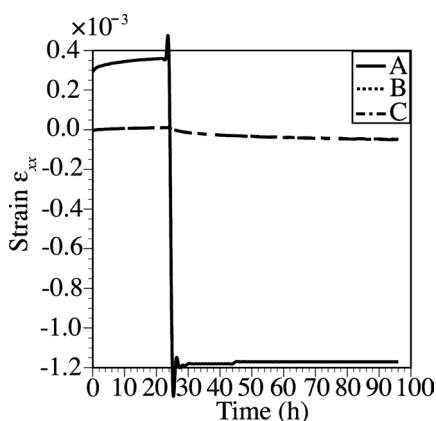


Fig. 19 Analyzed hygro-strain on a lower surface

を見ると実験値と同じくパネル端部で非常に大きなひずみが観測され、パネル中央部に向かうにつれてひずみが急激に小さくなるのがわかる。この点においては実験値の傾向と一致している。パネル端部でひずみの変化が大きくなるのは、LCDパネルの構成材料で最も膨潤係数の大きな偏光子が保護フィルムで覆われており、パネル端部の切断面でのみ偏光子が直接雰囲気と接しているためと考えられる。また実験ではパネルは下に凸（上に凹）であった。解析においてもパネルは下に凸であり、実験と定性的に一致している。

5. パネルの反りを軽減する材料の組み合わせの検討

実在する2種類の保護フィルムの物性値を用いて水分拡散解析、膨潤応力解析、熱応力解析を行い、どちらの保護フィルムがより反り量を減少させるかどうか検証した。なお用いた保護フィルムはPRTF1、PRTF2である。解析モデルはFig. 17に示す1/4モデルを用いた。解析条件は温度60℃、相対湿度70% RH下で24時間吸湿させた後にパネル上部が温度40℃、相対湿度10% RH、パネル下部が温度40℃、相対湿度30% RHの環境になったと仮定して解析した。解析の種類をTable 7に示す。Table 7中のPolarizer A、Polarizer BはそれぞれFig. 17中のPolarizer A、Polarizer B

Table 7. Analysis types

	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Panel 4
Protecting film	PRTF1	PRTF1	PRTF2	PRTF2
The longitudinal direction of the Polarizer A	TD	MD	TD	MD
The longitudinal direction of the Polarizer B	MD	TD	MD	TD

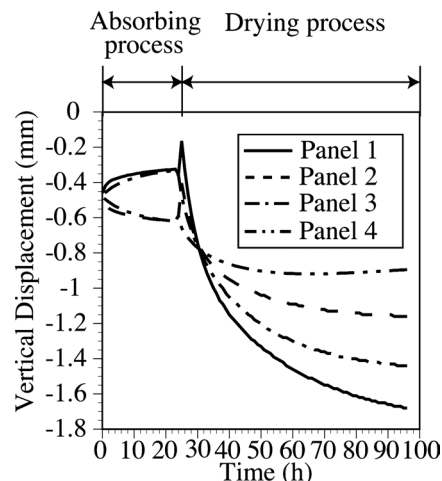


Fig. 20 Variations of the vertical displacements at the centers of LCD panels

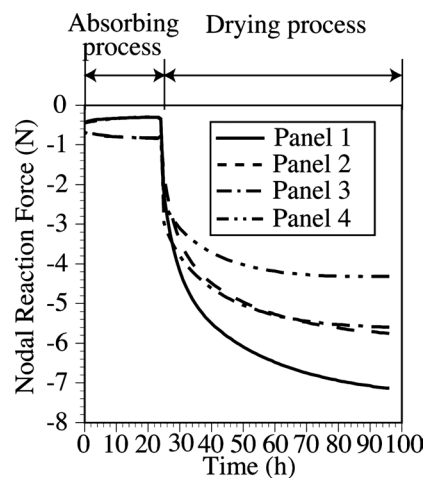


Fig. 21 Variations of the nodal reaction forces at the corners of LCD panels

に対応する。パネル中央部（Fig. 17のA点）の z 方向変位をFig. 20に、ガラス角部（Fig. 17のB点）での反力をFig. 21に示す。なお今回の条件では熱ひずみは吸湿ひずみに比べて非常に小さかったので、Figs. 20, 21では膨潤応力解析のみの結果を示している。

Fig. 20のPanel 1とPanel 3、Panel 2とPanel 4を比較することにより、保護フィルムにPRTF2を用いた方がPRTF1を用いるよりも解析終了段階での反り量が小さいことがわかる。これは、PRTF2の方がPRTF1よりも溶解度係数と

膨潤係数が小さいためと考えられる。また Panel 1 と Panel 2, Panel 3 と Panel 4 の比較により上側の偏光子 (Polarizer A) の長手方向を MD, 下側の偏光子 (Polarizer B) の長手方向を TD とした方が解析終了段階での反り量が小さくなることがわかる。これは、偏光子は TD 方向の方が膨潤係数が大きいため、より乾燥しやすい上部の長手方向を MD 方向にした方が、上部の収縮量を抑えられるためと考えられる。Fig. 21 より反力に関しても同様の傾向が見られる。ガラス角部の反力は LCD パネルの角部に大きなひずみを発生させ、パネルの角部から光が漏れる、「光抜け」と呼ばれる現象を引き起こす原因になると考えられるので、より角部の反力が小さい方が光抜けを起こしにくいと予測される。よって、保護フィルムは溶解度係数、膨潤係数がより小さい PRTF2 を用い、偏光子は上側の偏光子の長手方向を MD, 下側の偏光子の長手方向を TD とする場合が反りと光抜けの発生を最も低減できるものと予測された。

6. 結 論

本研究で用いた水分拡散解析、膨潤応力解析手法から以下の結論を得た。

- (1) 材料単体では解析は実験を定量的に再現することができ、本手法は有効である。
- (2) 偏光板では解析は実験と定性的な一致は見たが、水分拡散過程においては定量的に一致しなかった。これは偏光子、保護フィルム間の接着剤層の未考慮が影響していると思われる。
- (3) 解析によって、LCD パネルの吸湿乾燥時の変形挙動を定性的に予測できることが確認された。
- (4) 解析による LCD パネル構成部材の組み合わせについてのケーススタディの結果、保護フィルムにヤング

率、膨潤係数が小さい PRTF2 を用い、上側の偏光子の長手方向を MD 方向、下側の偏光子の長手方向を TD 方向とした場合が、パネルの反りと光抜けの発生を最も低減できるものと予測された。このように、本手法を用いて使用時の吸湿乾燥による LCD ディスプレイの反りと光抜けの発生を軽減する材料の組み合わせを検討することが可能である。

(2008.5.21-受理)

文 献

- 1) T. Y. Tee and Z. Zhong: "Integrated Vapor Pressure, Hygroswelling, and Thermo-mechanical Stress Modeling of QFN Package during Reflow with Interfacial Fracture Mechanics Analysis", *Microelectronics Reliability*, Vol. **44**, pp. 105–114, 2004
- 2) E. H. Wong, K. C. Chan, R. Rajoo and T. B. Lim: "The Mechanics and Impact of Hygroscopic Swelling of Polymeric Materials in Electronic Packaging", *Electronic Components and Technology Conference*, pp. 576–580, 2000
- 3) E. H. Wong, R. Rajoo, S. W. Koh and T. B. Lim: "The Mechanics and Impact of Hygroscopic Swelling of Polymeric Materials in Electronic Packaging", *Transactions of the ASME*, Vol. **24**, pp. 122–126, 2002
- 4) H. S. Carslaw and J. C. Jeager: "Conduction of Heat in Solids", Oxford: Clarendon Press, 1993
- 5) Ozlsik and M. Necati: "Heat Conduction", New York: Wiley, 1980
- 6) J. Crank: "The Mathematics of Diffusion", Oxford Science Publications, p. 2, 1956