

光散乱ポリマーの液晶バックライトへの応用

堀部 晃啓・小池 康博

時々刻々と進歩する科学技術の中で近年の液晶ディスプレイの発展は非常にめざましいものであり、未だとどまる所を知らず、さらなる性能向上を遂げている。その中で液晶パネルを背面から照射するための平面光源（バックライト）の性能は、消費電力に始まり、薄型軽量、輝度の角度特性、色の均一性等に至るまで、液晶ディスプレイの性能を広範囲にわたって支配するものである。

この液晶バックライトシステムにも目的に応じてさまざまな構成が考えられるが、ここでは特に、低消費電力化を課題とする液晶ディスプレイを対象とした、光散乱ポリマー導光体を用いた高効率バックライトシステム^{1,2)}について詳細に紹介する。

1. 液晶用バックライトシステム

従来、低消費電力化を目的とするバックライトシステムでの主な構成部材は、図1(a)に示したように冷陰極管、および、ランプからの距離に応じて密度分布を有する微細な印刷パターン処理や粗面加工などを施された導光体、その他にも光制御部材として拡散シートやプリズムシート等が用いられており、1灯式のエッジライト型バックライトが一般的であったといえる。そこで用いられている照明用導光体は限りなく透明なものほどすぐれた材料であるとされてきた。これに対し、筆者らは、新しいコンセプトの下に、光散乱導光体を提案し、その液晶用バックライトへの応用を試みた。この材料はポリマー内部に特定の不均一構造を有し、光の導波と拡散射出の2つの働きを合わせもつ新しい照明用導光体である。その内部の多重光散乱現象をモンテカルロ法を用いたシミュレーションプログラムによ

って解析し、液晶用バックライトに応用するために最適化を図った。その結果、従来の透明導光体を用いたものよりすぐれた性能を有するバックライトの作製に成功した。光散乱ポリマーを用いたバックライトシステムの構成を図1(b)に示した。導光体内部の光散乱効果によって、印刷パターンと同時に拡散シートも不要となる。この結果、非常に簡素な構成で設計が可能となった。

2. 光散乱ポリマー導光体

これまで、光ファイバーのような光学材料中の不均一構造は光を減衰させるものとして、その材料の透明化に多くの努力がなされてきた。しかし、実際には、ポリマー内部の不均一構造は光を減衰させるのではなく散乱させているのであり、この不均一構造に起因する散乱現象を制御することで、その導光体内部で光の強度と方向をさまざまに変化させることが可能である。

すなわち、指向性の強い光線をこの光散乱ポリマー導光体に入射させた場合でも、入射光を有効に導光体表面から均一照射させることができる。この現象は光散乱導光体内部で生じる多重散乱現象に基づく光の均一化効果によるものである。

このポリマー材料はアクリル樹脂に不均一構造となる散乱子を含有させることで容易に作製できる。このポリマー材料の光照射特性は主にその散乱子の大きさおよび散乱子とマトリックスの相対屈折率をコントロールすることによりさまざまに変化させることが可能である。

3. 光散乱理論

式(1)~(4)で示されるミー散乱理論³⁾を用いて、1つの真球粒子からの散乱光強度分布を求めることができる。

$$I(\alpha, \theta) = \lambda^2 (\dot{i}_1 + \dot{i}_2) / 8\pi^2 \quad (1)$$

慶應義塾大学理工学部物理情報工学科 (〒223-0061 横浜市港北区日吉 3-14-1)
 神奈川科学技術アカデミー (〒236-0004 横浜市金沢区福浦 1-1-1)
 E-mail: koike@apple.keio.ac.jp

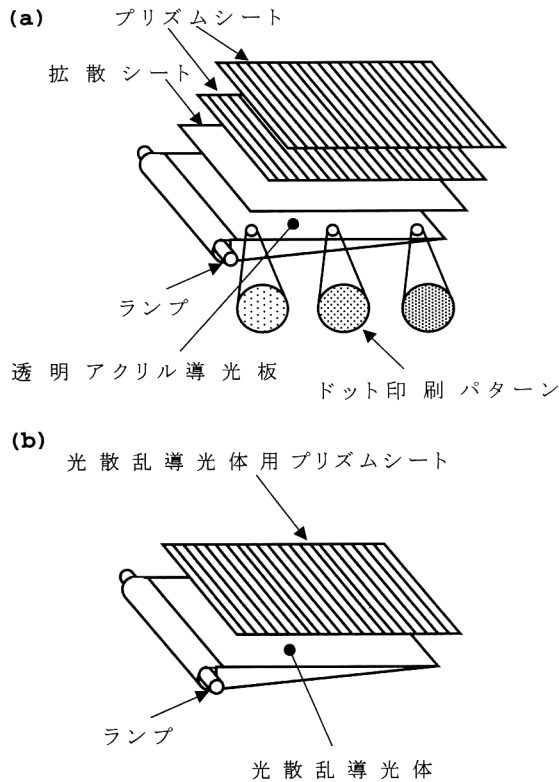


図1 液晶バックライトの構成図。(a) 従来のシステム, (b) 光散乱ポリマー導光体を用いたシステム。

$$\alpha = 2\pi r / \lambda \quad (2)$$

$$i_1 = \left| \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{2\nu+1}{\nu(\nu+1)} \left\{ a_{\nu} \frac{P_{\nu}^1(\cos \theta)}{\sin \theta} + b_{\nu} \frac{dP_{\nu}^1(\cos \theta)}{d\theta} \right\} \right|^2$$

$$i_2 = \left| \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{2\nu+1}{\nu(\nu+1)} \left\{ b_{\nu} \frac{P_{\nu}^1(\cos \theta)}{\sin \theta} + a_{\nu} \frac{dP_{\nu}^1(\cos \theta)}{d\theta} \right\} \right|^2 \quad (3)$$

$$a_{\nu} = \frac{\psi_{\nu}'(m\alpha) \psi_{\nu}(\alpha) - m \psi(m\alpha) \psi_{\nu}'(\alpha)}{\psi_{\nu}'(m\alpha) \xi_{\nu}(\alpha) - m \psi(m\alpha) \xi_{\nu}'(\alpha)}$$

$$b_{\nu} = \frac{m \psi_{\nu}'(m\alpha) \psi_{\nu}(\alpha) - \psi(m\alpha) \psi_{\nu}'(\alpha)}{m \psi_{\nu}'(m\alpha) \xi_{\nu}(\alpha) - \psi(m\alpha) \xi_{\nu}'(\alpha)} \quad (4)$$

ここで、 α はサイズパラメーター、 m は粒子とマトリックスの相対屈折率、 $P_{\nu}^1(\cos \theta)$ はルジャンドル多項式、 ψ_{ν} 、 ξ_{ν} はそれぞれ1, 2次の Ricatti-Bessel 関数を示す。この式より図2に示すような散乱光強度分布が厳密に求められる。図中の α はサイズパラメーターを示す。この単一粒子からの散乱現象をもとに、次に述べるモンテカルロ法を応用した多重散乱解析シミュレーションにより光散乱導光体内部の多重散乱現象の解析を行った。

4. 多重散乱現象の解析

筆者らの作成したシミュレーションプログラムでは、フォトン の進行方向・距離および反射・屈折についてモンテカルロ法の手法を利用した⁴⁾。計算手順を以下に示す。こ

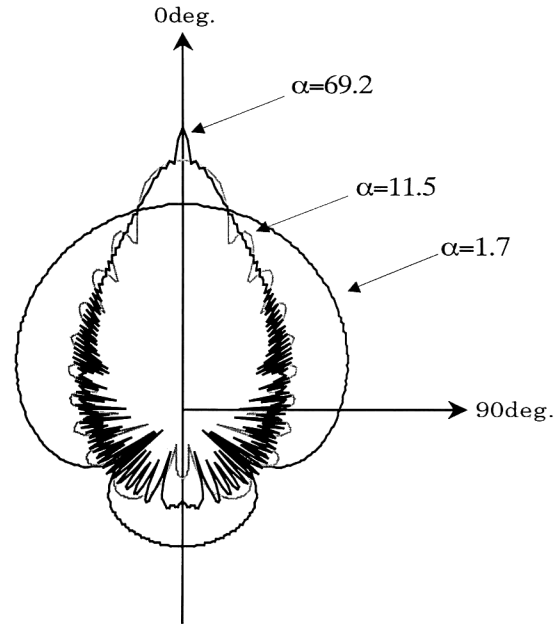


図2 ミー散乱理論から求めた単一粒子からの散乱光強度分布。

で述べるフォトンとは光の場を確率的に解析するために、仮想的な光の粒子を想定したものを意味する。

先のミー散乱理論から求めた散乱光強度分布に基づいて確率密度分布 $F(\theta)$ (式(5))を算出し、乱数 random 1 (ゼロから1の間の一様乱数)を用いて、散乱点でのフォトン の進行方向 θ を決定した(式(6))。また、フォトン の予測光路長 L は式(7) (C は濃度、 K はミー散乱理論から得られる散乱効率)によって定義される消衰係数 σ をもとに乱数 random 2 (ゼロから1の間の一様乱数)を用いて決定した(式(8))。

$$F(\theta) = \frac{\int_{\theta}^{\pi} I(\theta) d\theta}{\int_{\theta}^{\pi} I(\theta) d\theta} \quad (5)$$

$$\theta = F^{-1}(\text{random } 1) \quad (6)$$

$$\sigma = \pi r^2 CK \quad (7)$$

$$L = -\ln(\text{random } 2) / \sigma \quad (8)$$

また、反射・屈折はその反射率を各光線の入射角と導光体の屈折率より求め、上記と同様な手法を用いて決定した。以上の計算方法で $10^5 \sim 10^6$ 個のフォトン の追跡を行った。

このようなモンテカルロ法を用いることにより、光散乱導光体内部の多重散乱現象を定量的に解析することが可能となる。実際に、図3に示すような光学系を用いて10 mm ϕ の円柱形状の光散乱導光体の半径方向の側面からレーザー光を入射させ、出射光の角度依存性を計算値と比較検討した。その結果を図4に示した。各濃度においてほぼ完全な一致を示している。したがって、このシミュレーション

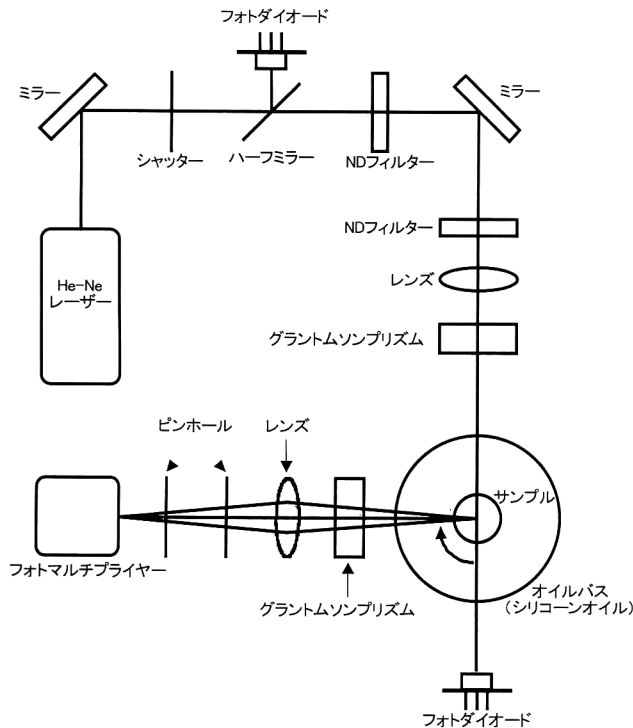


図 3 光散乱強度分布測定装置の光学系。

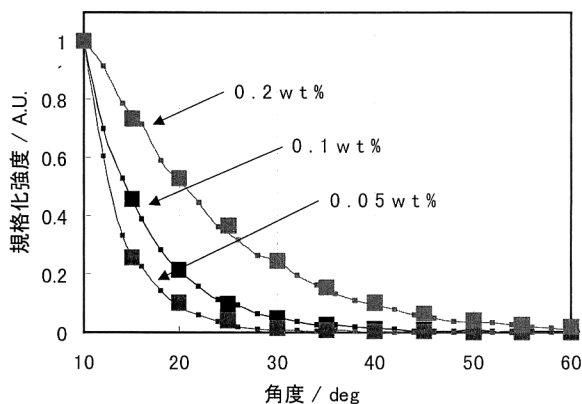


図 4 10 mm ϕ の円柱形状の光散乱導光体からの散乱光の角度分布 (大きいドットが実測値, 小さいドットを含む実線が計算値。10°での強度を1に規格化した)。

モンテカルロシミュレーションを用いることで、任意の粒径、屈折率、濃度をもつ散乱子を有する光散乱ポリマー導光体内部での光の多重散乱現象の厳密な解析が可能であり、その散乱挙動から散乱子の最適条件を正確に決定することができる。ただし、厳密に言えば、このシミュレーション方法では粒子間距離が極端に短くなると実験値との間にずれが生じるが、ここで用いる粒子濃度は平均自由行程にしておよそ数百 μm から数mm程度であり、はるかに希薄なため、実験値との十分な一致が得られる。また、先に述べた方法は、単一粒子からの散乱光強度分布がミー散乱理論に一致する場合に限られるが、一致しない場合は単一粒子からの散乱光の実測値

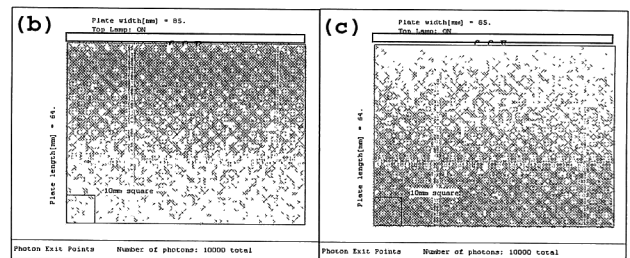
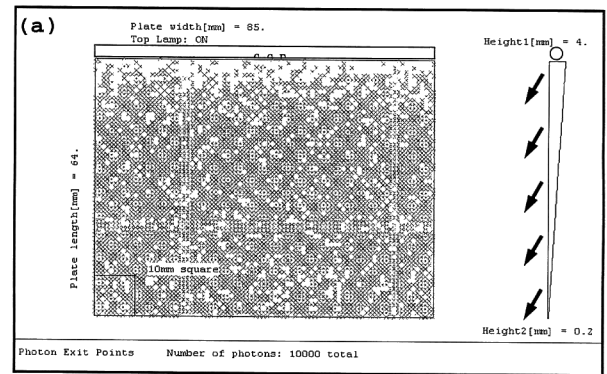


図 5 モンテカルロシミュレーションによるバックライトの最適化。(a) 最適値, (b) 高濃度, (c) 低濃度。

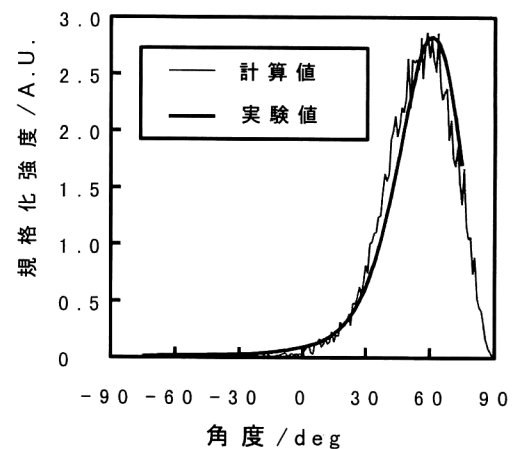


図 6 光散乱ポリマーを用いた液晶用バックライトの輝度の角度特性。

を用いて、多重光散乱効果を考慮することによりその散乱効率を求めることができる。したがって、実験的に散乱光強度分布、および散乱効率を求めることで、任意の多重光散乱現象を定量的に解析することも可能である。

5. 高輝度液晶バックライトへの応用

次に、光散乱ポリマー導光体のエッジライト型導光方式バックライトシステムへの応用を検討した。先にも述べたように、従来のエッジライト型バックライトには光透過率の高い透明な導光体が不可欠であり、さらに面全体から均一に照射させるために微細な印刷処理や拡散シートなどの

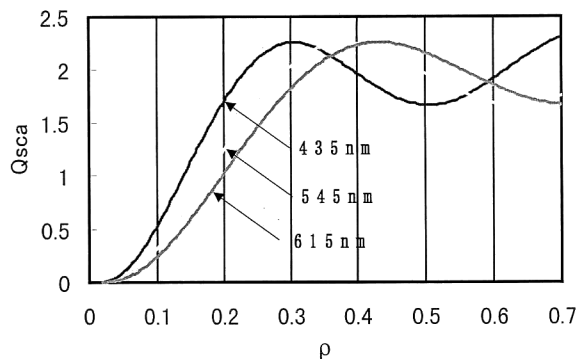


図7 ミー散乱理論から求めた各波長の散乱効率 (435, 545, 615 nm は冷陰極管の代表3波長)。

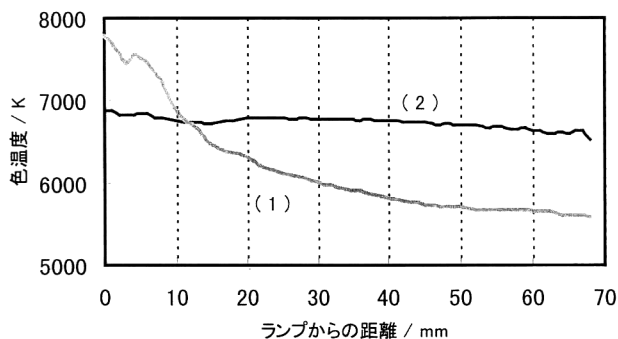


図8 バックライトのランプ直方向の色温度の長さ依存性。(1) $\rho=0.1$ の粒子を用いた光散乱方式バックライト (最適化前), (2) $\rho=0.5$ の粒子を用いた光散乱方式バックライト (最適化後)。

光拡散部材が必要とされているが、現状のこの方式では十分な特性が得られていない。液晶ディスプレイの本来もっている特徴である、薄型、低消費電力の特性を有効に発揮するためには、少しでも光の利用効率にすぐれ、輝度の高い、高品質なエッジライト型バックライトが必要とされている。そこで実際に光散乱ポリマー導光体を用いてバックライトを作製し、市販のバックライトと比較、評価した。

その最適化のために、先のシミュレーションを用いて、散乱子が真球微粒子であることを条件として、その屈折率と粒径を検討することにより、出光面からの出射特性の最適化を試みた。光子数は100万個程度とし、ホルダーに覆われたランプからの出射特性、およびそのスペクトルの測定を行い、それらのデータを用いて計算した。図5は実際に光散乱導光体を用いた4インチサイズの1灯式バックライト内部での光子の軌跡をシミュレーションした結果である。図中の面上にある×印が光子の出射点を示し、多重散乱に基づく均一化効果によって出光面全体から均一に光が出ていることがわかる (図5(a))。また、図5(b), (c) はそれぞれ濃度が最適値より高いものと低いものの計算結果である。また、図6は図5(a)の画面中央で

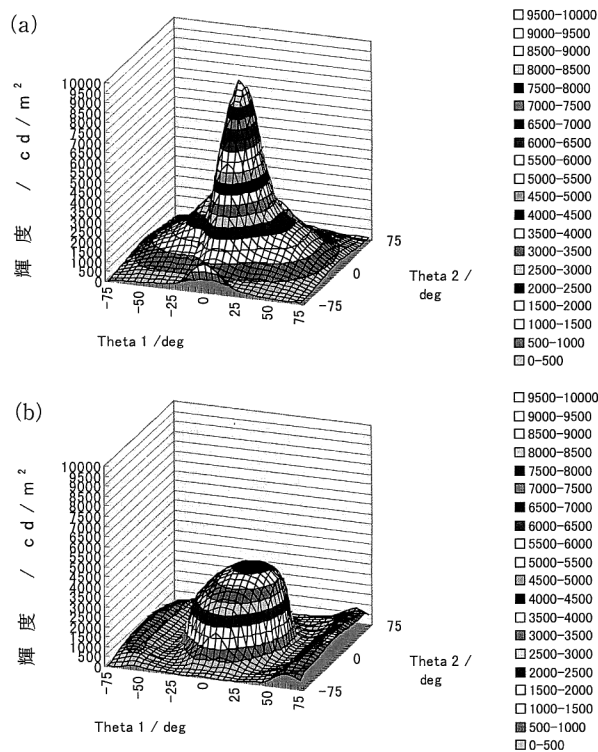


図9 バックライトの輝度分布。(a) 光散乱ポリマーバックライト, (b) 従来のバックライト。

の角度分布である。このように画面上での輝度の均斉度および60°付近での光の集光特性から光散乱方式のバックライトシステムの最適化を行うことができる。

その計算結果に基づいて実際にバックライトシステムを作製した。その結果、現在市販されているバックライトより簡単な構成 (図1) であるにもかかわらず、光散乱導光体を用いたバックライトシステムが2倍の輝度を有することが確認された。光散乱導光体の光利用効率の高さとその導光体からの出射プロファイルに最適化して作製した新規プリズムシートの集光特性の2点がこの高輝度化に寄与している。既存のプリズムシートは代表光線のみを法線方向に角度変換することを考慮したものであったが、ここで用いた光散乱導光体用のプリズムシートは導光体からの出射光特性をもとに全光線追跡を行い最適化されたものである。この解析により代表光線以外の光も法線方向に集光可能なプリズム角が存在することを発見し、およそ30%の高輝度化に貢献している。また、バックライトの面全体の輝度の均一性に関して従来品と同様に90%以上の均斉度を有していることが確認されている。また、この光散乱導光体は、多くの市販品同様アクリルを主たる母材としているため (散乱子の含有量はおよそ0.1 wt%以下)、その機械特性や作製方法は従来と変更なくキャスト法および射出成形法において容易に作製可能である。現時点において、12.1イ

ンチまでのバックライトの試作に成功している。

6. 色むらの改善

液晶ディスプレイにおいて、画面の色の均一性は視野角依存性のみならず、面内の法線方向での均一性も重要である。射出成型時の導光板のわずかな黄変も、色の均一性に影響することが確認されている。そこで、筆者らは光散乱導光体内部の不均一構造を制御することにより、その色むらの改善を試みた。

日常生活の中で代表的な光散乱現象は夕焼けが例に挙げられる。可視光の波長域の中で比較的波長の短い青い光が大気中の水やちり等によって散乱されやすく、長波長である赤い光が比較的多く透過し、赤い夕焼けとして観察される。このような散乱現象は波長オーダーもしくはそれ以下の微粒子によって起こる現象である。図7にミー散乱理論から計算される散乱効率を示した^{5,6)}。この図の横軸は

$$\rho = D\Delta n \quad (9)$$

であり、 D (μm) は粒径、 Δn はマトリックスと散乱子の屈折率差を示している。すなわち、空気中の水を想定したとき、散乱効率の1つめのピークは約 $1\mu\text{m}$ 程度である。この値は粒径が大きくなるに従って2に収束するものである。この図からわかるように、粒径が小さい領域では常に短波長の光の散乱効率が大きくなっている。したがって、この領域の粒子を光散乱導光体に用いた場合、ランプ近傍から遠方にかけて出射光が徐々に黄色味を帯びていくことがわかる(図8(1))。これに対して、青よりも赤を強く散乱させるような特定の粒径をもつ散乱子を選択した場合、その色むらの発生をなくすことが可能である。この際、厳密には、冷陰極管の代表3波長に対して、それぞれの散乱効率だけでなく散乱光強度分布をも考慮することが必要であるが、実質的にバックライトに応用する光散乱ポリマーの色むらの改善を考える場合、散乱効率が支配的となる。このような考えに基づき、およそ $\rho \approx 0.5$ に対応する散乱子を用いた実際のバックライトの測定結果を図8(2)に示した。この横軸は、ランプ直行方向でのランプからの距離を示し、縦軸は、その色温度を表している。ここで、 $\rho = 0.5$ 付近では、逆にランプから遠方において青みが強くなってしまふことが予想されるが、実際にはアクリルの成形時におけるわずかな黄変のために、散乱効率が各波長で近い値になる $\rho = 0.4$ や $\rho = 0.6$ 付近よりもその黄変をキャンセルするために $\rho = 0.5$ 付近であることが望ましい。

7. 輝度の視角特性

図9にバックライトの輝度特性を示す。図9(a)は従来

のバックライトからの出射特性であるが、約 $\pm 40^\circ$ より広角においてほとんど光が出射していない。このことは、実際のディスプレイ上において急激な輝度の変化が発生し、表示特性に悪影響を与えることになる。これに対し、光散乱導光体を用いたバックライトシステムでは正面方向において従来のシステムの2倍の輝度を有する(消費電力を同じとした場合)とともにピークの10%以上の輝度をおよそ $\pm 60^\circ$ 付近まで維持しており(図9(b))、実際に液晶透過後の表示特性にすぐれていることが確認されている。この輝度の視野角特性は導光体からの出射プロファイルとそれに対応させたプリズムシートの集光特性の両方が依存しており、一方のみの最適化ではなし得ないものである。このように、高い輝度の維持と輝度分布の広視野角化は近年の液晶パネルの広視野角化と低消費電力化の双方をカバーするためにますます重要な課題になってくると考えられる。

液晶ディスプレイの高性能化が進む中で、バックライトもその一役を担っている。今回はその中で筆者らの提案する光散乱ポリマー導光体を用いた高効率バックライトシステムについて紹介した。導光体内部の散乱子を制御することで輝度と色むらの最適化を行った。また新規なプリズムシートの開発により、さらなる高輝度化を達成した。今後、ますます液晶ディスプレイの高性能化が進む中で、さらなる光利用効率の向上、輝度および色むらの改善に取り組む必要がある。また、今回紹介したシステムは低消費電力化を目的としたものであるが、今後、大型モニター用のバックライトシステムの開発も大きな飛躍が必要とされる分野である。

文 献

- 1) A. Horibe, M. Izuhara, E. Nihei and Y. Koike: "Brighter backlights using highly scattered optical-transmission polymer," *J. Soc. Inf. Disp.*, **3** (1995) 169-171.
- 2) A. Horibe, E. Nihei and Y. Koike: "Bright LCD backlight using high-scattering optical-transmission polymer," *Society of Information Display 96 Digest* (1996) 577-579.
- 3) G. Mie: "Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen," *Ann. der phys.*, **25** (1908) 377-445.
- 4) I. Lux and L. Koblinger: *Monte Carlo Particle Transport Methods: Neutron and Photon Calculations* (CRC Press, Boca Raton, 1991).
- 5) M. Kerker: *The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation* (Academic Press, San Diego, 1969).
- 6) H. C. van de Hulst: *Light Scattering by Small Particles* (Dover Publication, New York, 1957).

(1997年10月2日受理)