調 光 ガ ラ ス

多 田 弘 明*

要 旨

現在までに提案されている各種 chromogenic を用いた代表的な調光ガラスを取り上げ、建築、車両における省エネ性能に重点を置いて性能比較を行った。冷暖房および照明負荷の軽減効果の代用特性として、太陽光透過率変化幅および視感透過率変化幅を用いることができることを示した。解析の結果、フォトクロミック素子は照明負荷を軽くするが、冷暖房負荷の軽減効果は小さい。また、サーモクロミック素子はその逆であり、さらにポリマー分散型液晶素子はいずれの効果にも乏しいことがわかった。これに対して、エレクトロクロミック素子、さらに我々が最近作製した TiO_2N_x 微粒子を用いた素子が省エネ性能の点で有望であることを明らかにした。これらの大きな省エネ効果は、いずれも可視から近赤外域の光に対する大きな透過率変化に起因するものである。さらに、各種調光ガラスの課題を明確にし、今後の展望について述べた。

1. は じ め に

光、電気または熱などの外部刺激により物質の色が可逆的に変化することをクロミック (chromic) 現象と呼ぶ。調光ガラスとはこのような物質 (chromogenic) を用いた透過率 (広義では光学特性) 可変ガラスのことであり、特に建築、車両用窓への応用が期待されている。

調光ガラスの効果には (i) 視覚的快適性、(ii) 熱的快適性、(iii) プライバシー保護の他に (iv) 太陽エネルギー有効利用 (省エネルギー) がある。米国 DOE 関連の研究者の報告によると、全米における年間消費エネルギーの 20% がビル空調に使われ、その内 25% が窓からの光、熱の流入に伴うものであるという。地球規模のエネルギー、環境問題が叫ばれ始めた現状を踏まえると、年間消費エネルギーの 5% を削減できる可能性を有する調光ガラスに求められる最も重要な性能は省エネ性能であるといえる。

本論文では、調光ガラスの概念を明らかにした上で、各種 chromogenic を用いた調光ガラスの動作原理について説明する。また、それらの諸特性を省エネ性能に焦点を当てながら比較検討する。さらに、最近我々が作製した異方性無機微粒子を用いた新規調光ガラスについて

紹介する¹⁾。最後に、今後の課題と展望について私見を述べたい。

2. 使 用 方 法

図-1 は建築分野における調光ガラスの使用法の一例を示している。冷房中の夏のオフィスビルの一室を考

Fig. 1 A way how to use smart window

平成 5.1.18 受理

Smart Windows

Hiroaki TADA

* 日本板硝子(株)中央研究所

兵庫県伊丹市鴻池字街道下 1 (〒664)

えると、窓から強い日射（波長，0.3～3 μm ）が入ると、冷房効率の低下を招くことになる。逆に、冬期における暖房中の部屋を考えると、窓を通して室内から熱線（波長，3～30 μm ）が流出することにより、暖房効率が低下する。従って、夏または冬には、オフィスビルの窓に設置された調光ガラスを低透過率状態に制御することで、太陽光および熱線が遮断され、室内の冷暖房負荷が軽減されることになる。

一方、温暖な気候の下では、ビルの消費エネルギーの内、照明エネルギーが重要になる。調光ガラスを高透過率状態に変えて可視光線を取り込むことで、照明負荷を軽くすることができる。

このように、調光ガラスを適用することにより、省エネを計りながら快適なオフィスビル空間が得られることになる。また、車両用窓に応用した場合にも同様な冷暖房負荷の軽減効果が得られる。ここでは、理解を容易にするために、調光ガラスの使用法を単純化して示したが、さらに、気温、天候の変動に応じたきめ細かい透過率制御を行えば、それだけ大きな省エネ効率が得られることはもちろんである。

3. 要 求 性 能

調光ガラスに求められる各種性能をまとめて表-1に示す。冷暖房における省エネ性能を表す指標としては、一般に、(1)式で定義される太陽光透過率変化の大きさ($\Delta T_g/\%$)が用いられる。これは、全太陽光エネルギーの透過率変化幅である。

$$T(\lambda)/\% = \frac{\int T(\lambda)E(\lambda)d\lambda}{\int E(\lambda)d\lambda} \quad (340 < \lambda < 2100 \text{ nm}) \quad (1)$$

Table 1 Properties needed for smart windows

Properties	Demands
Solar transmittance change	>30%
Luminous transmittance change	>30%
Memory	1~24 hours
Response	<10(am ^a), <1)sec
Switching times	>10 ⁶
Temperature range	-20~70(am, -30~90)degree
Timing of the transmittance change	at will
Colour	grey, bronze
Durability	>10 years
Size	>1 m ²

a), am denotes usage for automobiles

上式において、 $T(\lambda)$ および $E(\lambda)$ はそれぞれ波長 λ におけるガラスの透過率および太陽光エネルギーである。

調光ガラスにおいて、 ΔT_g は冷暖房における省エネ効率に直結した最も重要な性能であり、この値が大きいかほど省エネ性能は良好であるといえる。太陽スペクトルを図-2に示す。太陽光の波長は0.3～5.0 μm の広い範囲に分布しており、そのエネルギー量の内訳は、可視域(0.4～0.8 μm)、近赤外域(0.8～2.5 μm)でそれぞれ約50%である。従って、(1)式から明らかなように、大きな ΔT_g を得るためには、可視から近赤外域の広い範囲で大きな透過率変化が起こらなければならない。各種調光ガラスの現状を考慮すると、30%以上の ΔT_g が当面の目標になろう。

照明エネルギーの軽減という観点からは、 T_g の変化を前提にして考えると、可視光透過率が大きく変化することが重要である。従って、(2)式で与えられる視感透過率(T_l)変化を照明エネルギー軽減効果の指標として用いることにする。

$$T_l = \frac{\int T(\lambda)E(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda}{\int E(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda} \quad (400 < \lambda < 700 \text{ nm}) \quad (2)$$

$\bar{y}(\lambda)$ は比視感度係数である。

ΔT_l が大きいほど照明エネルギーの軽減効果は大きくなると考えられる。 ΔT_g と同様に、30%以上の ΔT_l を当面の目標にして良いであろう。

さらに、 ΔT_g および ΔT_l 以外に駆動に伴う消費エネルギーが小さいということも重要である。例えば、同じ電気駆動でも、電界駆動の方が電流駆動よりも良い。また、電流駆動の場合には、外場が解除された時の透過率がそのまま維持される、いわゆるメモリー効果を利用できることが望ましい。さらに、電界駆動で、かつ、メモ

Fig. 2 Spectral distribution of solar radiation (Air Mass 2, solid line) and thermal blackbody (broken line)

リー効果を持つものが理想的ということになる。

表示素子とは対照的に、調光ガラスでは応答速度はそれほど大きな問題とはならず、建築用では約 10 秒以下であれば良い。しかし、自動車用ではトンネル走行時などの安全性確保のために、よりスピーディーな応答が求められる (<1 秒)。サイクル駆動寿命は、 10^6 回以上が求められている。これは調光ガラスの総合寿命を 10 年としたときに、約 270 回/日のスイッチングが許容できることを意味している。各用途の窓材が曝される外気温の変化を考えて、建築用では $-20 \sim 70^\circ\text{C}$ 、また、車両用では $-30 \sim 90^\circ\text{C}$ の動作温度範囲が要求される。外部環境に応じて自然に透過率が変わる (自動性) のではなく、ユーザーが変えたい時に透過率を変えることができる、いわゆる任意性のニーズが大きいという。実際の駆動に際しては、任意性と自動性の選択可能なものがベストであろう。ガラス本来の特徴がその透明性にあること、また、特に車両用における安全性の点から、調光ガラスが寿命に到達した最終状態で高透過率状態になる、いわゆるフェイルセーフティーが要請される。色調としては一般に、建築、車両の両分野において、グレー、ブロンズ系が好まれるようである。半永久的な寿命を持つ通常の板ガラスの代替として調光ガラスが実際に使用されるためには、10 年以上の総合寿命が要求される。窓ガラスは、過酷な紫外線、熱に曝され、いわば毎日耐候性テストにかけられているのと同じであることを考えると、かなり厳しい要求である。

4. 各種調光ガラスの性能比較

現在までに研究されてきた主な調光ガラスには、エレクトロクロミック (EC) 素子を初め、フォトクロミック (PC)、サーモクロミック (TC)、カプセル液晶 (PDL CD)、異方性無機微粒子を用いた液体型素子 (Dipole Particle suspension, DPS) および固体型素子 (Shear Stress-Type Dipole Particle Chain, SS-Type DPC) を応用したものがあ。これらの代表的な系を取り上げて、その動作原理を簡単に説明した後に、それぞれの長所、短所を整理してみたい。

4.1 EC 素子

物質の酸化還元反応に伴う可逆的な色変を利用するので、代表的な素子構成として透明導電膜 (TEC)/酸化タングステン (WO_3) 膜/電解質 (EL)/プルシアンブルー (PB) 膜/TEC 系を取り上げる²⁾。 WO_3 および PB の酸化還元反応はそれぞれ (3)、(4) 式で表される。

ES は PB の還元体であるエヴェリット塩の略である。

但し、 M^+ はアルカリ金属イオンを示す。

この素子は、 WO_3 側を負に、PB 側を正に分極すると、両者共に青色に着色し、低透過率状態になる。また、逆方向に分極すると、両者共に消色し、高透過率状態になる。このように、電極の極性を切り換えることにより、可逆的に透過率を変化させることができる。 M_xWO_3 および PB の着色はそれぞれ 5 価と 6 価の W イオンおよび 2 価と 3 価の Fe イオン間の原子価間移動吸収によるものと説明されている³⁾。

図-3 は全固体型 EC 素子 (TEC/ WO_3 /高分子固体電解質/PB/TEC) の通電に伴う透過スペクトル変化を示している。通電により可視から近赤外領域のかなり広い範囲にわたって、透過率が大きく減少していることがわかる。約 40% の ΔT_g がこの素子で得られている。この値は従来の調光デバイスの中では最も大きな値であり、EC 素子が調光ガラスの最も有望な素子として期待されている由縁である。また、 ΔT_l を計算すると、46.8% の値が得られた。この値も群を抜いて大きな値であり、EC 素子が照明エネルギーの軽減にも効果的であることがわかる。EC 素子は電流駆動であるが、メモリー効果を有するおかげで駆動に伴う消費電力は著しく減少する。 WO_3 膜の作製には、真空蒸着法が用いられてきたが、最近では調光ガラスのような大型デバイスに適した液相法の研究も盛んになっている⁴⁾。電解質としては

Fig. 3 Transmission spectra of the EC device before and after the application of the electric voltage: solid line, electricity = 0; thicknesses of WO_3 and PB films were 0.23 and 0.93 μm , respectively; cell gap, 120 μm ; broken line, electricity = 6.91 mC cm^{-2}

高い導電率を有する液体系が用いられていたが、大型化さらには破損時の安全性を考慮して、無機、更には高分子固体電解質が主に用いられるようになってきている⁵⁾。さらに、特に信頼性の向上を目的に、ダイナミクスを中心とした基礎的な研究に立ち帰るという動向も見受けられる⁶⁾。

EC 調光ガラスの最大の課題は大面積化に伴う応答性の低下を克服することであろう。現状では、 $30 \times 30 \text{ cm}^2$ サイズのセルでさえも着色に2分以上かかっている。さらに、 $60 \times 90 \text{ cm}^2$ サイズのセルで同じ応答性を得るためには、高透過率を保ちながら TEC の低抵抗化 ($1 \Omega/\text{square}$) を実現する必要があるという⁷⁾。また、色調はほとんどが青色であり、そのヴァリエーションを広げることも今後の課題となろう。

調光ガラスへの応用に先駆けて、EC 素子を用いた自動車用の防眩バックミラー、透過率可変めがねが実用化された⁸⁾。これらは、EC 素子の特に可視域の大きな透過率変化とメモリー効果が巧みに利用された産物といえる。

4.2 PC 素子

PC 素子の代表例は、ハロゲン化銀微結晶 (粒径、 $500 \sim 1500 \text{ nm}$) 含有ガラスであり、既にメガネに実用化されている。この着消色メカニズムは (6) 式で表される。すなわち、光照射により、 Ag^+ イオンが還元され、 Ag コロイドが生成し着色が起こる。この着色は Ag コロイド中の自由電子のプラズマ吸収に基づくものである。光照射を止めると、逆反応により、消色が起こる。

但し、 X はハロゲン原子である。

また、最近では PC 性を有する有機色素をガラス、ポリマーなどの固体マトリックス中に分子分散させた系での研究が盛んになっている。これは、主に有機色素分子の光吸収による π 電子共役状態の変化を利用したものである。その一例は、スピロインドリノナフトキサジン (SINX) であり、その着消色メカニズムは (7) 式で表される⁹⁾。これより、光を吸収することにより SINX 分子のスピロピラン環が開環し、 π 電子共役系が広がることがわかる。

図-4 は紫外光照射前後における可視光透過スペクトルの変化を示している。これより、透過率変化は大きいものの、 $450 \sim 700 \text{ nm}$ の比較的狭い波長範囲に限られていることがわかる。従って、色調の変化は鮮やかであるが、省エネ性能には乏しい。(1) 式から計算した ΔT_g は 11.8% である。これに対して、 ΔT_i としては 37.4% という大きな値が得られる。これはもちろん可視域の大

Fig. 4 Transmission spectra of the PC device before (solid line) and after (broken line) irradiation of light

きな透過率変化に起因するものであり、PC 素子の特徴といえる。また、調光ガラスに応用された PC 素子は、太陽光を吸収することにより自動的に透過率が変化する、すなわち任意性がないことも避け難い問題である。最近、調光ガラスの他に、PC 分子分散系の Photochemical Hole Burning (PHB) 現象を利用したメモリー素子の実用化にも大きな期待が寄せられている¹⁰⁾。

4.3 TC 素子

現在、TC 素子として最も有望なのは VO_2 系であろう。これは、半導体から金属への温度変化に伴う相転移を利用しており、その着消色メカニズムは (8) 式で表される。

Fig. 5 Transmission spectra of the TC device below (solid line) and above (broken line) the transition temperature (T_t)

$$\begin{aligned} T > T_c \text{ (転移温度)} \\ \text{VO}_2 \text{ (semiconductor)} &= \text{VO}_2 \text{ (metal)} \quad (8) \\ T < T_c \end{aligned}$$

VO_2 の転移温度は 68°C であるが、微量の W, Mo などの遷移金属をドーピングすることにより、転移温度が低下することが知られている¹¹⁾。図-5 は転移前後における TC 素子の可視から近赤外領域における透過スペクトルを示している。PC 素子とは対照的に、可視光透過率変化は小さいものの、近赤外で大きく透過率が変化することがわかる。これは、自由電子のプラズマ周波数が約 1400 nm にあり、近赤外域の反射率が変わるためである。 ΔT_g は比較的大きく 13.4% であるものの、 ΔT_t は高々 6.4% であり、照明エネルギーの軽減効果は乏しい。また、TC 素子も PC 素子同様に任意性の点で課題を残している。

4.4 カプセル液晶

現在、調光ガラスとして唯一実用化に至っているのが、カプセル液晶を用いた素子である¹²⁾。それは、大面積化と耐候性という難問をブレイクスルーできたからに他ならない¹³⁾。その光学変化の原理を図-6 に示す。電場が存在しない場合には、液晶分子は、カプセルの界面力により、壁面に沿って配向している。この場合、液晶の複屈折性により、カプセル/液晶界面および液晶内部で入射光はランダムな方向に散乱されるために、セルは白濁状態となり、視野は完全に遮られる。電圧を印加すると、正の誘電異方性を有する液晶分子の主軸は電界に平行に配向し、この時の屈折率をマトリックスポリマーの屈折率と一致するように設計しておけば、入射光は散乱されずにそのまま透過する。従って、セルは透明状態となり、良好な透視性が得られる。電圧印加-解除により、この二つの状態間を可逆的にスイッチングすることが可能になるわけである。

(A) Voltage-off (milky white)

(B) Voltage-on (transparent)

Fig. 6 Optical switching principle of the PDLCD device

図-7 は PDLCD セルの電圧印加および解除時の可視から近赤外域における透過スペクトルを示している。可視から近赤外域にわたり透過率変化が認められるが、その変化幅は小さく、省エネ性能は不十分である。このデータに基づいて ΔT_g を計算すると、 5.4% になる。また、 ΔT_t も 6.9% でしかない。最近、電界非印加時における後方散乱を強めることで PDLCD にエネルギー制御機能を付与する試みがなされ、注目を集めている¹⁴⁾。

4.5 SS-Type DPC 素子

セル構成を図-8 に示す。電場の下で形成された針状

Fig. 7 Transmission spectra of the PDLCD device in the absence (solid line) and presence (broken line) of the electric field

Fig. 8 Schematic representation of the operating principle of the SS-type DPC

の TiO_xN_y 微粒子の鎖状体がゲルマトリックス中にソフトに固定されている。微粒子は導電性を有することから、 SiO_2 膜でコーティングされている。

動作原理を図-8 に合わせて示している。基板間に応力を印加しない場合には、入射光の大半がそのまま透過し、高透過率状態になっている。これに対して、応力印加により基板間に相対的な変位を与えると、微粒子の鎖状体が応力方向に傾くために、入射光の大半は微粒子によって吸収され、低透過率状態になる。ここで重要なこ

Fig. 9 Dependence of the transmittance change on the relative displacement between the substrates; cell gap, $46 \mu\text{m}$

Fig. 10 Transmission spectra of the SS-type DPC devices in the absence and presence of shear stress: particles, TiO_xN_y (A, A'); particles, TiO_2 (B, B')

とは、マトリックスとして弾性体を用いていることから、応力印加-解除によりセルの透過率を可逆的に変化させることができるという点である。

図-9 はセルの透過率変化幅を基板間の相対変位量に対してプロットしたものである。透過率変化幅は基板間の相対変位量と共に増大し、基板間変位量が $35 \mu\text{m}$ 以下の範囲では両者の間にはほぼ比例関係が成立することがわかる。基板間の相対変位量を適当に選ぶことによって、セルの透過率をある範囲で任意に制御することができるわけである。

図-10 は応力印加-解除時のセルの透過スペクトルを示している。比較のために、可視～近赤外域でほとんど吸収を持たない TiO_2 微粒子の透過率変化を合わせて示している。 TiO_2 微粒子系では小さな透過率変化しか示さないが、 TiO_xN_y 微粒子系においては可視から近赤外領域の広い範囲で大きな透過率変化が得られていることがわかる。この結果より、大きな透過率変化を得るためには(1)式から期待されるように、微粒子が広い波長範囲で強い吸収を有する必要があることがわかる。この素子では、約 40.7% の ΔT_g が得られた。この値は、EC 素子に匹敵する大きな値である。比較のために、従来のヘラパサイト微粒子を用いた微粒子分散液 (DPS) 素子の電圧印加、解除時の透過スペクトルを図-11 に示す¹⁵⁾。約 $600 \sim 800 \text{ nm}$ の狭い範囲でしか透過率が変化しておらず、 ΔT_g は約 9% に過ぎない。また、 TiO_xN_y 微粒子系では、 ΔT_i も 47.3% という EC 素子に匹敵する値が得られている。さらに、この全固体化素子では電気泳動素子や DPS 素子などの微粒子分散液を用いた電気光学素子に共通した微粒子の経時的な凝集および沈降という最大の問題点を解決することができた。さらに、電界効果を利用してセルを作製することから、基本

Fig. 11 Transmission spectra of the DPS device in the presence (solid line) and absence (broken line) of electric field

Fig. 12 Plots of luminous transmittance change vs. solar transmittance change of various kinds of smart windows: the inset shows the simulated cooling and lighting loads when various kinds of optical switching devices are used as window glasses

的には大面積化が可能なのと期待される。

4.6 性能比較

図-12 は各種素子を用いた調光ガラスの ΔT_g と ΔT_l の関係で、相対的な冷房、照明負荷の軽減効果を示している。PC の透過率変化は主に可視域で起こることから、照度調整機能は期待できるものの、冷暖房負荷の軽減効果は小さい。逆に、TC は 20~25°C で半導体/金属-相転移が起こるようにすれば、冷房負荷の軽減はある程度

期待できるが、可視域の透過率変化が小さいことから、照明負荷の軽減効果は小さい。また、カプセル液晶は可視~近赤外全域で透過率変化が小さく、省エネ性能は劣る。これらの素子に対して、EC 素子は、特に可視域で大きな透過率変化が起こり、透明導電膜を利用していることもあり、照明負荷ばかりでなく、冷暖房負荷をも軽減できる。さらに、4.5. の説明から明らかなように、SS-Type DPC 素子は EC 素子に優るとも劣らない性能を有している。従って、総合的な省エネ性能の観点からは、従来の素子の中では EC 素子が、さらには最近現れた SS-Type DPC 素子が最も有望ということになる。図-12 の挿入図は、Selkowski による各種調光ガラスを用いた時の冷房負荷と照明負荷のシミュレーション結果である¹⁶⁾。両図を比較すると、各種調光ガラスの相対的な位置関係が良く対応していることがわかる。この結果は、省エネ性能を表す指標として ΔT_g と ΔT_l を採用することの妥当性を支持している。

次に、調光ガラスとしての総合的な評価結果を特に実用化における問題点に着目して述べる。表-2 に典型的な各種 chromogenic 材料を用いた調光ガラスの省エネ以外の性能を示す。PC は消色速度が遅く、可逆性が不十分であること、また、任意性がないことが問題となる。TC は大面積調光ガラスに応用した場合の色むら、また、任意性がないことが問題である。カプセル化液晶は、全体としての完成度は最も高く、今後の省エネ性能の向上が期待される。EC は、前述の通り、大面積化を実現するためには、低抵抗の透明導電膜を使用する必要があること、また、耐候性の向上が今後の課題となっている。SS-Type DPC は総合的に最も高いポテンシャルを有しているといえる。しかしながら、実用化に至るまでには耐候性の向上、大面積化技術の確立など課題も多い。

5. 今後の課題および展望

以上述べてきたように、エネルギー、環境問題がクロージアップされる中で、調光ガラスは特にガラスメーカーが時代的、社会的要請の下に取り組むべき研究テーマである。現在、様々な材料を用いた素子の研究が盛んに行われているが、全ての必要特性を満足するものは残念ながら現れていない。この原因を一言でいえば、調光ガラスの要求性能が多岐にわたっていること、また、その難度が高いということであろう。従って、実用化の観点からは、全ての調光ガラスに共通して求められる (i) 省エネ性能 (ii) 大面積 (iii) 耐候性という必須条件をまず満足するものを作製し、その他の性能は各種用途に

Table 2 Properties of smart window using various chromogenics

Device	EC	PC	TC	PDLCD	Liquid-type DPS	SS-type DPC
typical material	WO ₃ /PB	SINX	VO ₂	Nematic LC	Herapathite	TiO _x N _y
driving force	DC 1.5 V	light	heat	AC 30~100 V	AC 5~60 V	Mechanical force
memory	○	×	×	×	×	○
response/sec (size=30×30 cm ²)	~1 min	~5 min	~1 min	10 m sec	0.1~1 sec	~1 sec
switching times	>10 ⁶	3×10 ⁵	— ^{a)}	>10 ⁶	~10 ⁵	~10 ⁶
temperature range/degree C	—	-30~90	-30~90	-30~80	—	—
arbitrariness	○	×	×	○	○	○
fail-safety	○	×	×	×	×	○
colour	blue	blue	blue	colorless	blue	grey
durability	—	1~2 year	—	—	—	—
size/cm ²	<30×30	>30×30	—	>90×100	<30×30	—

a) data are not available

応じて素子を使い分けることが重要であろう。

最後に、SS-Type DPCは全固体化により微粒子の凝集沈降に対して一つのブレイクスルーを成し遂げ、ECを越える ΔT_g を得ることに成功したが、いまだ研究の途に付いたばかりであり、今後の課題も多い。微粒子の作製および分散など、この研究は色材との関連が深いことから、専門家の方々からの御意見、御助言をお願いする次第である。

参 考 文 献

- 1) H. Tada, Y. Saito, M. Hirata, M. Hyodo and H. Kawahara : *J. Appl. Phys.*, 73, 489 (1993)
- 2) 馬場, 山名, 山本編: “エレクトロクロミックディスプレイ”, p.122, 産業図書 (1991); H. Tada, Y. Bito, K. Fujino and H. Kawahara : *Solar Energy Mater.*, 16, 509 (1987)
- 3) Y. Hiruta, M. Kitao and S. Yamada : *Jpn. J. Appl. Phys.*, 23, 1624 (1984)
- 4) 合田, 吉野, 馬場 : *DENKI KAGAKU*, 51, 213 (1983); K. Yamanaka, H. Okamoto, H. Kidou and T. Kudo : *Jpn. J. Appl. Phys.*, 25, 1420 (1986)
- 5) M. B. Armand, J. M. Chabango and M. Duclot : “Fast Ion Transport in Solids”, p.131, Elsevier (1979); H. Tada and H. Kawahara : *J. Electrochem. Soc.*, 135, 1728 (1988); M. Morita, T. Fukumasa, M. Motoda, H. Tsutsumi and Y. Matsuda : *J. Electrochem. Soc.*, 137, 3401 (1990)
- 6) O. Bohnke, M. Rezaei, B. Vuillemin, C. Bohnke, P. A. Gillet and C. Rousselot : *Solar Energy Mater.* : 25, 361 (1992)
- 7) J. Nagai, T. Kamimori and M. Mizuhashi : *Solar Energy Mater.* : 14, 175 (1986)
- 8) M. Mizuno, T. Niwa and T. Endo : *Proc. Japan Display '89 Kyoto* 110 (1989); T. Niwa, K. Uchiyama and T. Endo : '86 Tokyo 372 (1986).
- 9) N. Y. C. Cyu : *Solar Energy Mater.*, 14, 215 (1986)
- 10) T. Tani, H. Namikawa, K. Arai and A. Maki-shima : *J. Appl. Phys.*, 58, 3559 (1985); D. Avnir, D. Levy and R. Reinsfeld : *J. Phys. Chem.*, 88, 5956 (1984)
- 11) G. V. Jorgenson and J. C. Lee : *Solar Energy Mater.*, 14, 205 (1986)
- 12) 日本板硝子 ガラス カタログ, 瞬間調光 ガラス “UMU”
- 13) J. L. Fergason : *SID '85 Digest*, 68 (1985)
- 14) P. S. Drzaic, R. Willey, J. McCoy and A. Guille-zume : *SID '90 Digest*, 210 (1990); G. P. Montgomery, Jr., J. L. West and W. Tamura-Lis : *J. Appl. Phys.*, 63, 1605 (1991)
- 15) A. M. Marks : *Appl. Opt.*, 8, 1397 (1969)
- 16) 種村, 吉村 : サンシャインジャーナル, 11, 25 (1990)