

無機微粒子を用いた調光ガラス

日本板硝子株式会社中央研究所 多田 弘明

Smart Window Using Inorganic Fine Particles

Hiroaki Tada

Central Research Laboratory

Nippon sheet Glass Co, Ltd

Abstract

From the viewpoint of the application to the "Smart Window", three types of devices prepared using rod-like TiO_2N particles were evaluated. All of them essentially take advantage of the particle chain formation along the electric field due to the interaction between the electrically induced dipole moments of the particles. A liquid type dipole particle suspension (DPS) device provides a great solar transmittance change of 54.1 %, however, the aggregation and sedimentation of the particles became significant above the switching times more than 10^4 times. A solid type dipole particle chain (DPC) device shows a large angular selectivity in light transmittance (ΔT ($\phi = 0^\circ$, $\phi = 60^\circ$) $\sim 40\%$, $\phi = \text{incident angle of light}$), whereas it is not a dynamic device. In a shear-stress type DPC device, a reversible great solar transmittance change of ca. 40 % was obtained by applying shear stress between the substrates. Further, examining from various aspects revealed it to be a very promising candidate for the smart window.

1. はじめに

一般に、光透過率可変ガラスは調光ガラス (Smart Window) と呼ばれ、エネルギー、環境問題が重要になるにつれて、“地球にやさしい窓ガラス”としてクローズアップされてきている。それは、建築、自動車用窓に用いることにより、室内の冷暖房負荷を著しく軽減できる可能性があるからである。¹⁾

今までに、エレクトロクロミック (EC) 素子を初め²⁾、フォトクロミック (PC)³⁾、サーモクロミック (TC)⁴⁾、液晶 (LC) 素子⁵⁾ など種々のデバイスが調光ガラスとして提案され

てきた。これらの中で実用化に至っているのは、大面積化および高耐候性を可能にした高分子分散型液晶デバイス (PDLCD) のみである⁶⁾。しかしながら残念なことに、PDLCD のエネルギー調節機能は不十分なのが現状である。

本論文では、優れたエネルギー調節機能を持つ“無機微粒子を用いた新規調光デバイス”について紹介する。

2. セル作製方法

液体型 DPS (Dipole Particle Suspension) 素子 ; SiO_2 膜でコーティングされた針状 TiO_2N 微粒子 ($x \sim y \sim 0.75$ 、平均の長軸長 = $0.43 \mu\text{m}$ 、短軸長 = $0.07 \mu\text{m}$) をポリジメチルシロ

〒644 伊丹市鴻池字街瀬下1

* 現在、日本板硝子テクノリサーチ株式会社
基盤研究グループ (住所同上)

キサン (PDMS) 誘導体中に分散された。2枚の透明導電膜 (ITO) 付きガラス基板を対向させたセル (セルギャップ $\sim 24\mu\text{m}$) 中に分散液を注入することにより、液体型DPS素子を作製した。このセルは、電圧印加/解除を繰り返すことにより大きな透過率変化 (ON時-高透過率状態、OFF時-低透過率状態) を示した。顕微鏡観察の結果、電界 ($E > 1\text{ kV/mm}$) の下で微粒子鎖状体が電場に平行な方向に形成されるのが確認された (図1参照)。

固定型DPC (Dipole Particle Chain) 素子; PDMS誘導体の代りに熱硬化性PDMSを分散媒として液体型DPS素子を作製し、電界を印加したままセルを加熱することによりTiO₂N_y微粒子鎖状体がマトリックス中に強固に固定化された固定型DPC素子を得た。後述のように、このセルは透過率の著しい入射角依存性を示した。

SS (Shear Stress) -型DPC素子; 熱硬化性PDMSの代りに熱ゲル化性PDMSを分

散媒として用いる他は固定型DPCの場合と全く同様な方法で、ゲル中に微粒子鎖状体がソフトに固定化されたセルを得た。このセルの2枚のガラス基板にせん断応力を印加/解除すると、透過率が可逆的に大きく変化した。これをSS型-DPC素子と呼ぶことにする。

以上の様な方法で、分散媒の種類を変えることにより、動作原理および性能の異なる3種類の調光デバイスを作製した。

3. 調光性能

3.1 液体型DPS素子

液体型DPS素子の駆動原理 (左半分はモデル図、右半分が光学顕微鏡写真である) を図1に示す。無電界状態 (A) では、微粒子は熱運動 (いわゆるブラウン運動) をしており、ランダムな配向状態にある。電界 ($E = 2\text{ kV/mm}$) を印加すると、2秒以内に微粒子が電場に平行な方向に鎖状体を形成するのが顕微鏡で観察された (B)。これは、電界で微粒子表面に誘起

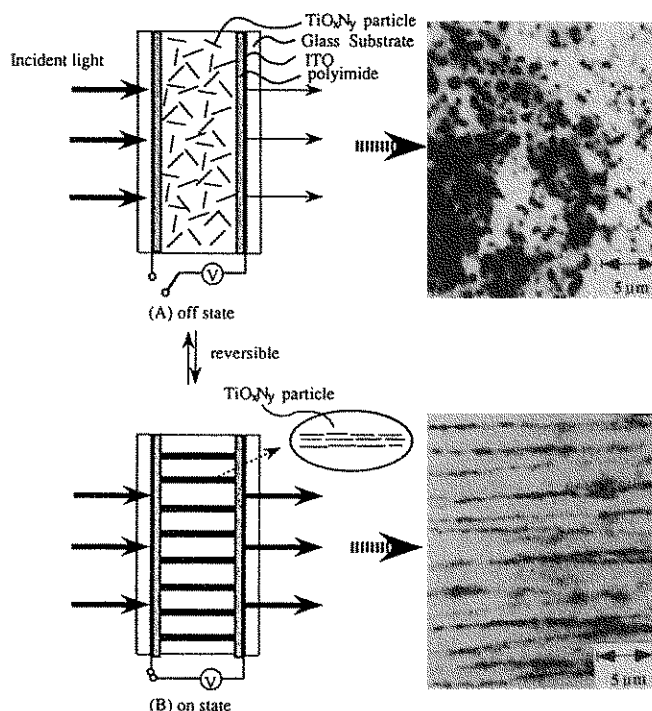


Fig.1 Schematic illustration of the operating principle of the DPS device; on the right are pictures of the particles in each state.

されるダイポール間の引力相互作用によるものと考えられる。⁷⁾

図2は液体型DPS素子の可視～近赤外透過スペクトル(340<波長<2100nm)を示している。

(A)および(B)はそれぞれ電界および無電界下におけるスペクトルである。外部電場の無い状態では、ブラウン運動している微粒子が有効に光を吸収するために、全波長領域の透過率は約10%以下である。電圧を印加することにより、全波長領域における透過率は劇的に増大し、波長500nmにおける透過率は70%を越えている。その結果、調光ガラスの省エネ性能を表す太陽光透過率(ΔT_g)として54.1%という、従来の素子の値を越える大きな値が得られている。この優れた調光性能は微粒子の大きな吸光係数および鎖状体形成能に起因していることが今までの研究によって既に明かにされている。⁸⁾

液体中における微粒子の分散安定性を改善することにより、 10^4 回以上のスイッチングが達成されているが、実用化のためには微粒子の凝集、沈降に対する抜本的な解決策が必要である。

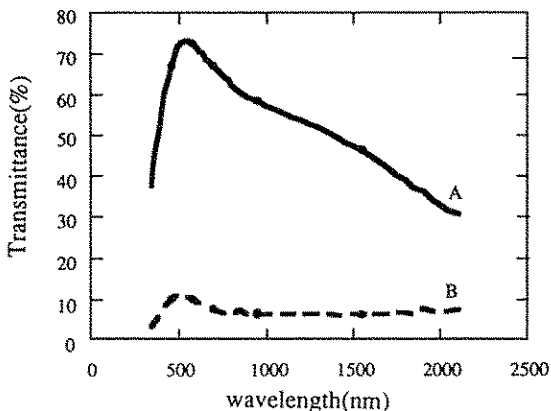


Fig. 2 Transmission spectra for the DPS device with an applied electric field of 2 kV mm^{-1} (frequency; 200 Hz), (A) and without field (B).

3.2 固定型DPC素子

固定型DPC素子の可視光透過率の入射角(ϕ)依存性を図3に示している。 ϕ の増加と共に透過率は顕著に減少している。従来、Cr等の斜め蒸着法により角度選択性透過ガラスが作

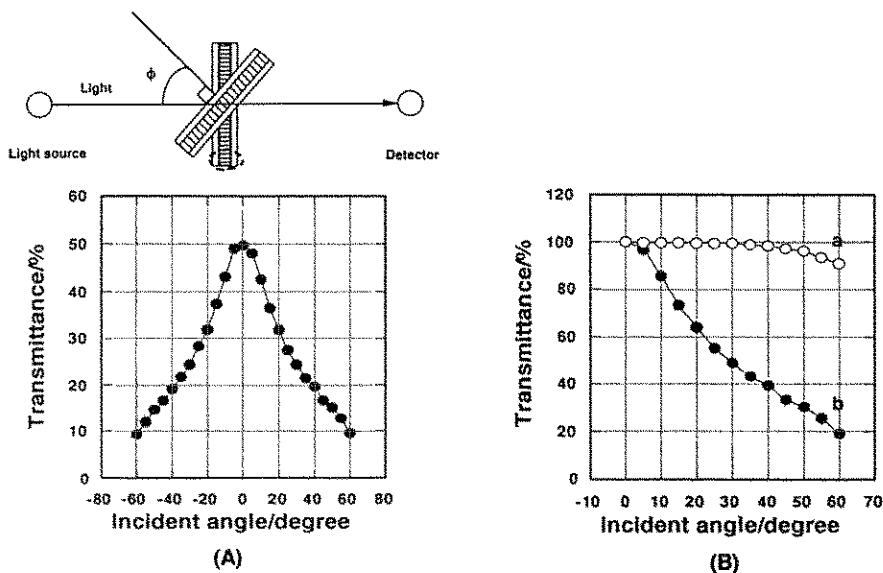


Fig. 3 (A) Angular dependence of the visible transmittance on the incident angle; (B) data for the samples with (b) and without (a) TiO_xN_y particle chains in the gel layer; both the transmittances are normalized with respect to the values at $\phi = 0^\circ$, respectively.

製されているが⁹⁾、その透過率変化幅 ΔT ($\phi = 0^\circ$ 、 $\phi = 60^\circ$) はせいぜい10%程度であるのに対して、本素子では ΔT ($\phi = 0^\circ$ 、 $\phi = 60^\circ$) = 40%という値が得られている。また、透過率は $\phi = 0$ 軸に対してほぼ完全な対称形になっていることがわかる。

(B) にはセルの透過率をソーダ石灰ガラスの透過率と比較して示している。 $\phi > 40^\circ$ でガラスの透過率が僅かながら減少しているのは、表面反射によるものである。さらに、セルの反射率を測定したところ、ソーダ石灰ガラス反射率にほぼ一致した。

これらの結果から、固定型DPC素子における透過率の著しい入射角依存性は、大きな吸光係数を有する微粒子鎖状体が基板に垂直に、セルギャップ間にわたって成長していることに起因しているものと考えられる(図1参照)。¹⁰⁾

固定型DPC素子は透過率を任意に制御することができないので、用途型には限定されるであろう。しかし、微粒子の凝集、沈降の問題がないことから、実用化の点では液体型DPS素子に比べて大きく前進していると言える。

3.3 SS型DPC素子

SS型DPC素子の駆動原理を図4に示す。外部応力が無い時は、高透過率状態にある。基板間にせん断応力を印加すると、応力方向に微粒子鎖状体が傾き、光の吸収断面積が増加するために、低透過率状態になる。このことは、微粒子の複屈折性を無視した幾何光学計算により、データが良く再現されるという事実によって支持された(図5の実線参照)。¹¹⁾ 外場印加時に低透過率状態になる点では、液体型DPS素子、PDLCD素子などとは逆モードである。

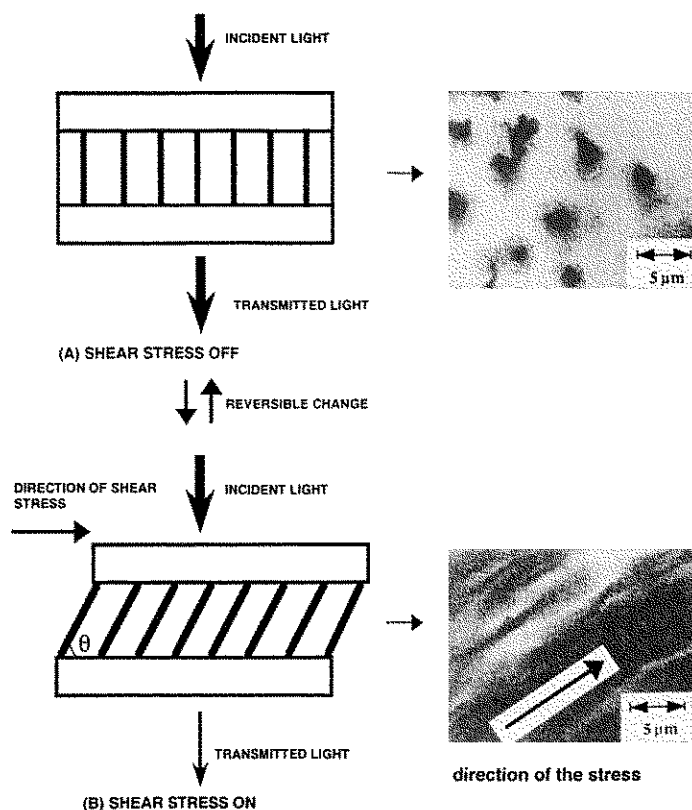


Fig. 4 Schematic representation of the operating principle of the SS-type DPC; left-hand figures are models of the states without (A) and with (B) the application of shear stress; right hand are pictures taken just above the cell in each state.

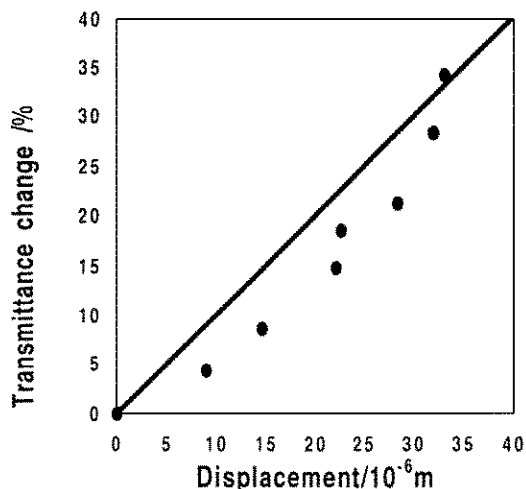


Fig. 5 Dependence of the visible transmittance change on displacement between the substrates; (●), experimental data; (—), line calculated based on geometric optics; the absorption coefficient of the TiO_xN_y particles is $6.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ and the cell gap is approximately $46 \mu\text{m}$.

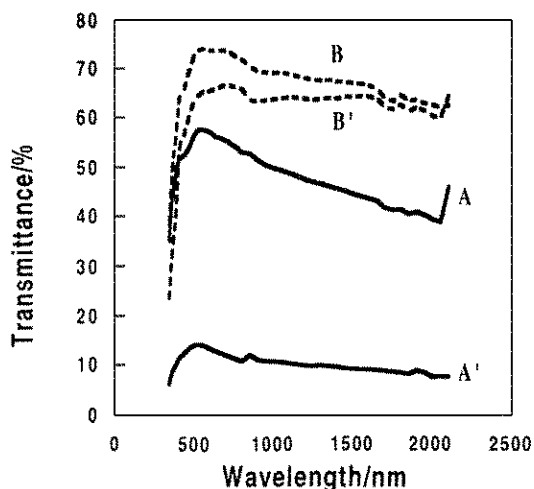


Fig. 6 The change in the transmission spectra of the SS-type DPC using TiO_xN_y particles in the absence (A) and (A') of shear stress, and using TiO_2 particles in the absence (B) and presence (B') of shear stress; the displacement was kept at $35 \mu\text{m}$.

図5は可視光透過率変化量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。これより、可視光透過率変化量は基板間変位量にほぼ比例して増大することがわかる、換言すれば、基板間の変位量を選ぶことによって、透過率を10～約50%（図6参照）の範囲で任意に制御できることになる。

図6は、 TiO_xN_y 微粒子(A、A')および TiO_2 微粒子(B、B')を用いた2種類のSS型DPC素子の相対変位量 $35 \mu\text{m}$ におけるスペクトル変化を示している。これより、 TiO_2 微粒子系の透過率変化が僅かであるのに対して、 TiO_xN_y 微粒子系では可視から近赤外域にかけて大きく透過率が変化していることがわかる。こ

Table 1 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_2N_y
driving force	DC 1.5 V	light	heat	AC 30~100 V	AC 5~60 V	Mechanical force
memory	○	×	×	×	×	○
response/sec (size= $30 \times 30 \text{ cm}^2$)	~1 min	~5 min	~1 min	10 m sec	0.1~1 sec	~1 sec
switching times	$>10^8$	3×10^5	— ^{a)}	$>10^8$	~ 10^5	~ 10^8
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	$<30 \times 30$	$>30 \times 30$	—	$>90 \times 100$	$<30 \times 30$	—

a) data are not available

のデータに基づいて太陽光透過率を計算すると、それぞれ 6.9 および 40.7% が得られる。

本素子は、固体型素子であり、微粒子の凝集、沈降の問題が無い上に、優れたエネルギー制御機能を有するという意味で、液体型 D P S と固体型 D P C 素子の機能を合わせ持っていると言える。また、無機物質から構成されており高耐候性も期待される。さらに、透過光の指向性を有することから、従来の調光ガラスに比べて、制御できるパラメーターが新しく加わったことになり、質的にも向上したと言える。

3.4 各種デバイスの性能比較

ここまで、省エネ性能に焦点を絞って、3種類の“無機微粒子を用いた調光ガラス”の説明を行ってきた。次に、調光デバイスに求められるその他の性能について、今までに提案された調光デバイス間で簡単に比較してみたい(表1参照)。

E C 同様、メモリー効果を有する他に、E C で問題となる応答速度も 30cm×30cm サンプルで約 1 秒と調光ガラスとしては十分である。さらに前述の通り、外場が無い時に高透過率状態であることは、フェイルセーフティという意味で車両等に使用した場合には特に重要な機能になる。

以上総合的に見ても、このデバイスが調光ガラスとして非常に魅力的な素子であることがわかり頂けたと思う。

4. 結 び

微粒子分散媒を変えただけで、駆動原理、性能が異なる 3 種類の“微粒子を用いた調光ガラス”について紹介した。中でも、S S 型-D P C 素子は優れた省エネ性能に加えて、透過光の

方向選択性を有するというユニークなものである。今までの基礎研究の中で、その調光ガラスとしてのポテンシャルの高さを実証してきたが、今後実用化に際して、大面積素子の作製方法、また、その駆動方法に関してさらに研究開発を進める必要が有る。

参考文献

- 1) C. B. Greenberg, J. Electrochem. Soc., 140, 3332 (1993).
- 2) C. M. Lampert and C. Q. Granqvist, Eds., Large-Area Chromogenics: Materials and Devices for Transmittance Control, Vol. IS-4, SPIE (Optical Engineering Press, Billingham, WA, 1989).
- 3) N. Y. C. Chu, Sol. Energy Mater., 14, 215 (1986).
- 4) G. V. Jorgernson and J. C. Lee, Sol. Energy Mater., 14, 205 (1986).
- 5) J. L. Fergason, SID '85 Digest, 68 (1985).
- 6) 日本板硝子ガラスカタログ, 瞬間調光ガラス“UMU”.
- 7) T. Morimoto and T. Iwaki, J. Chem. Soc. Faraday Trans. 1, 83, 943 (1987).
- 8) Y. Saito, M. Hirata, H. Tada and M. Hyodo, Appl. Phys. Lett., 63, 1319 (1993).
- 9) G. Mbiase, G. B. Smith, G. A. Niklasson and C. G. Graqvist, Appl. Phys. Lett., 54, 987 (1989).
- 10) H. Tada, M. Hirata, Y. Saito and M. Hyodo, J. Electrochem. Soc., 140, L173 (1993).
- 11) H. Tada, Y. Saito, M. Hirata, M. Hyodo and H. Kawahara, J. Appl. Phys., 73, 489 (1993).