調光ガラスの動向

Technology Trend of Light-Modulating Glass

1944年生。1970年東京大学工学部工業化学科修士課程卒。現在、旭硝子㈱技術本部知的財産部主幹技師。

神 森 忠 敏
Tadatashi Kamimori

◀キーワード：調光ガラス、エレクトロミックガラス、サーモクロミックガラス、フォトクロミックガラス、液晶調光ガラス、省エネルギー特性

1. はじめに

光を制御するガラスを調光ガラスと称する。窓ガラスとして実用上は、太陽光中の可視及び近赤外光の透過・反射・吸収・散乱を制御するもので、暑さ低減・省エネルギー・防眩・視線遮断・プライバシー確保などの効果をもたらす。夢のガラスとして各種の技術開発が進められているが、価格・耐久性などの課題が未解決のため現状では一部の技術がごく限られた用途にのみ適用されている。

本稿では、各種調光ガラスの原理・特徴を紹介して、今後の展開について述べる。

2. 各種調光ガラスの原理と特徴

調光ガラスは、制御因子により以下に分類される。

- (1) 光による制御（フォトクロミックガラス；PC）
- (2) 熱による制御（サーモクロミックガラス；TC）
- (3) 電気による制御（エレクトロクロミックガラス；EC、液晶調光ガラス；LC、サスペンデッドパーティクルガラス）
- (4) 機械的制御（調光ブラインド、液循環システムなど）

その他の外部刺激による制御のアイデアもあるが、実用性の観点から本章では、(1)、(2)、(3)に関して主に紹介する。

2.1 フォトクロミックガラス

フォトクロミズムは、光照射により着色し暗所に戻すと可逆的に消色する現象である。光励起により構造あるいは電子状態が変化して可視域で発色する材料は各種あるが、無機材料としてはハロゲン化銀、有機材料としてはアゾベンゼン系あるいはスピロピラン系化合物がよく知られている。形状としては、バルクガラス、樹脂への練り込み、基板へのコーティングなどがある。

バルクガラスとしてのフォトクロミックガラスは、アルカリアルミノ硼珪酸（ほうけいさん）ガラス組成に塩化銀などを微量添加した原料を1500℃で加熱溶解・徐冷してガラス化した後、550℃で再加熱して塩化銀粒子を析出させて作る¹⁾。着消色機構は、白黒フィルムの現像機構と同様であるが、ガラスの持つ固溶性・化学安定性・ガス不透過性が十分生かされている。すなわち、光照射により塩化銀が分解してできた銀原子は、集合して銀コロイドを生成して黒く着色するが、塩素はガラス媒体に

閉じこめられて揮散せずに残る。照射を止めると定量的に再結合して元の塩化銀に戻る。従って、ほぼ完全に可逆的であり、百万回以上の着消色繰り返しも疲労は見られない。反応に温度依存性が大きく、かつ消色時間が長いのが欠点である。図1に米国コーニング社製PCガラスの30℃及び-4℃での応答特性例を示す。銅イオンなどの微量添加による光増感効果、熱処理条件の調整などによる応答性改善も可能である。バルクガラスはサングラスなどの小物ガラスとして実用化されているが、大面積の窓ガラスは、再現性・均一性・コストなどの点から製造困難である。板ガラスへのコーティングによるフォトクロミック窓も検討されている。

有機系フォトクロミック材料では、光励起による幾何異性化・開閉環・解離などの可逆的光反応を応用している²⁾。各種置換基により化合物の電子状態を変化させて発色時の色を変えることが可能であるが、励起状態の安定性が不十分であり耐久性に乏しい。材料の高分子化・材料を包接するマトリックス材料選択などによる改善が試みられている。

2.2 サーモクロミックガラス

サーモクロミズムは、熱により光学特性が可逆的に変化する現象である。熱励起により分子構造・相転移・相分離などの変化が生じて、色・反射率・透過率などが変化する材料も各種あるが、実用的な温度域で可逆的かつ効果的に変化するものは限られている。良く知られている材料としては、無機系では二酸化バナジウム（VO₂）、

図1 フォトクロミックガラスの応答特性

有機系ではヒドロゲルポリマーがある。

VO₂は常温で半導体であるが、60℃近辺で結晶構造が変化しバナジウムの原子間距離が近くなるため電子伝導体に転移する。その結果、可視域の吸収が変化すると同時に近赤外域の反射率が上がる。反応性蒸着によりガラス上に50nmのVO₂薄膜をコートした試料の、20℃及び85℃における透過率及び反射率の変化を図2に示す³⁾。調光窓として実用化するためには、転移温度を30℃付近まで下げること及び室温での透過率を上げることが必要である。タングステン、モリブデンなどの金属あるいはフッ素の添加による転移温度低下及び多層膜化による透過率上昇などの検討がなされている。

一方、ヒドロゲルポリマーの系は、ポリマー水溶液に各種添加剤を加えたゲル状物質を2枚のガラスの間に挟み周辺をシールした形状のもので、室温では透明なガラスだが、温度が上昇するとポリマー相が溶媒相から分離・凝集して白濁してくる。転移温度は、ポリマーの種類・濃度・添加剤などにより調節可能であり、通常使用

では30℃近辺に設定される。図3に透過率の温度依存性の一例を示す⁴⁾。温度上昇に伴い太陽光中の熱線部分(近赤外・赤外域)をカットするので、窓に使用した場合には冷房負荷低減による省エネルギー効果が期待できる。実使用の際には、紫外線への安定性、透過率変化時の不均一性、繰り返しサイクル寿命などが課題である。

2.3 エレクトロクロミックガラス

エレクトロクロミズムは、電気を流すことにより電気化学的な酸化還元反応がおり、分子構造や電子状態が変化し可逆的に色調が変化する現象である。有機材料、無機材料ともに数多く知られている。電極表面で酸化体が電子を注入されて還元され、電荷を中和するために周囲の陽イオンをまとめて還元体となる。電極での電子移動と電解質でのイオン移動の両方が必要である。

有機材料の代表例としては、ビオロゲン、アントラキノ、フェナントロリン、テトラシアフルバレンなどの化合物誘導体があり、適当な電解質溶液として電圧を印加していくと固有の酸化還元電位以上で無色から青・赤などの色に変化し、逆電圧を印加することにより元に戻る。これら有機EC材料は各種の鮮やかな色調を発現するが、PC材料と同様、励起状態での安定性が不十分のためスイッチング時の二次反応防止が困難であり、これがこれまで実用化を阻んでいた。近年、材料系の改善とコントロールシステムの構築により安定性が大幅に向上し、ジェンテックス社(米)により自動車用防眩ミラーとして広く実用化されるに至っている。但し、大面積の窓としての展開には解決すべき課題が多い。

一方、無機系材料では、1969年に酸化タングステン(WO₃)膜のエレクトロクロミズムが発見されて以来、当初は液晶に代わる表示素子として、最近では調光ガラスとして活発な研究開発が継続している。WO₃を一極として1.5V程度の直流電圧を印加すると、無色の6価Wが還元されて青色の5価Wとなり、同時に電荷の中性を保つために、電解質中のH⁺あるいはLi⁺のようなイオン半径の小さな陽イオンがWO₃膜中に侵入する。従って、WO₃膜は結晶のように緻密でなく、非晶質で適当にルーズな構造でなければならない。着色度合(透過率変化量)は注入電荷量(クーロン/cm²)すなわち電流と時間で制御される。逆電圧を印加することにより元に戻る。電流を流してWO₃膜を着色させるためには二次電池と同様に対極側でも電荷のやり取りが無ければならない。また、イオンを移動させるための電解質も必要である。

窓として使用するためには、電極材料は透明で無ければならない。対向電極、電解質などの相違により図4(a)~(d)に示すようにいくつかの構成が考えられている。透明電導膜(酸化インジウム/錫(すず)(ITO)膜あるいはフッ素添加酸化錫膜)を使用するのは共通しているが、(a)は前述の有機系でありWO₃膜は使用しない。(b)は

図2 VO₂薄膜のサーモクロミック特性

図3 ヒドロゲルポリマーのサーモクロミック特性

電解質中にレドックス剤を含むので、WO₃膜は使うが対向電極は不要である。(c)と(d)は対向電極を使用するが、電解質がポリマーか薄膜かの違いがある。(a)～(c)は周辺を完全に密閉シールさせた2枚の膜付ガラスの間に電解質を封じ込めるが、(d)は1枚のガラスの上に真空蒸着あるいはスパッタなどの方法で薄膜を順次積層していく。但し、外部の湿度などの影響を防ぎ、かつキズ・汚れなどを防止するために保護層が必要である。透明電極に集電部（バスバー）を設け、リード線をつけて直流電源に接続することにより調光ガラスとなる。印加電圧は、高すぎると電気分解による副反応が生じる。図5に(b)の構成の調光ガラスの光学特性を示す⁹⁾。

応答性を制御する因子としては、WO₃膜及び対向電極膜の物性（膜厚・密度・電極特性・イオン拡散定数など）、電解質のイオン伝導度、透明電導膜の抵抗などがある。電流が流れることにより透過率が変化するので、大面積の調光ガラスでは、電導膜の抵抗値が高いと、電圧降下により周辺のバスバー部分が濃くなり着色が不均一となる。10cm角の素子では、透過率が80%から20%に変化するのに30秒程度だが、1 m角の調光ガラスでは、同様の

図4 エレクトロクロミックガラスの構成例

図5 エレクトロクロミックガラスの光学特性 (レドックス剤内蔵型)

応答時間を得るためには透明電導膜のシート抵抗は 1 Ω 以下にする必要がある。

2.4 液晶調光ガラス

現在、調光ガラスとして市場にでている商品は、この液晶ガラスのみである。光学特性を図6に示す⁶⁾。液晶は、表示素子として我々の生活に深く浸透しているが、調光ガラスとして使用する場合には、材料・素子構造は表示用途とは異なる。いくつかの方法が提案されているが、基本的には液晶モノマーをポリマーマトリックス中に球状に分散させて、透明電導膜をコートしたガラスあるいはフィルムの上に挟み込んで作成する。液晶分子は、通常はランダムに配列しており、複屈折によりポリマー/液晶界面で屈折された入射光は多重散乱されて内外に拡散し曇りガラスのように不透明であるが、交流電圧を印加することにより、瞬間的に液晶分子が電界に沿って配向し、ポリマーマトリックスと屈折率を一致させておくことにより、界面での光散乱がなくなり透明ガラスとなる。

このガラスは、調光ガラスというよりは視界を調節するガラスで、通常は採光したいが必要な際にはプライバシーを確保したい窓（あるいはその逆、会議室・個室・風呂場など）には最適であるが、太陽光中の熱エネルギーは透過するのでECのような省エネルギー効果はあまり期待できない。電圧オフ時には外が全く見えなくなるので、自動車の窓などにもあまり向いていない。有機材料を使用しているので、紫外線への耐久性も十分ではないが、10年ほど前から商品化されていて1 m×2 mの大型窓も製造可能である。原理的にECのように電気化学反応が生じず、電界による物理変化に基づくものである。室内用途での実用耐久性は十分である。また、大面積のものでも透明電導膜のシート抵抗は30Ω程度で良いのも、ECと比較しての利点である。

透明時のクリアさの改良、消費電力の改善、低コスト化などの課題解決の検討が継続されている。

図6 液晶調光ガラスの光学特性

2.5 サスペンデドパーティクルガラス

液晶調光ガラスの場合には、透明から光散乱による白濁へのスイッチングであり、色を変える試みもあるが実現していない。サスペンデドパーティクルの場合は、原理的には液晶と同様で、電圧印加により微粒子がランダム状態から電界に並行な配向へ変化する現象を応用しているが、配向材料が針状の色素結晶であるため色に変化し、かつランダム配向時には外光の散乱でなく吸収が起こるため、ECと同様に透過率が低下しても視界は保持される。図7に素子の構成及び光学特性を示す⁷⁾。

使用される材料としては、光吸収性で形状異方性や誘電異方性を示す微粒子でヘラパサイト（重硫酸キニン過よう化物・青色）などのアルカロイド酸塩過ハロゲン化物が検討の中心となっているが、他の無機系微粒子も種々提案されている。これらの色素の1 μm 長程度の針状結晶を比重・屈折率を調整した溶媒に懸濁させるか、ポリマーゾル中に分散させて、周囲を密閉した2枚の透明導電膜をコートしたガラスの間に封じ込める。ランダム状態では結晶の濃度に応じた透過率の青色のガラスであるが、電圧印加により透明ガラスとなる。液晶同様、色変化は化学反応でなく物理現象なので、大面積でも瞬間的に透過率が変化し、かつ繰り返しサイクル寿命などの信頼性は高いが材料自身の耐光性・微粒子の凝集・沈降性・液の密閉性など、窓としての実用耐久性の面では検討の余地が多い。

近年、微粒子を粘弾性ポリマーマトリックス中に固定化する技術が進歩して、1 m角程度のサイズのものも試作されている。ポリマー化により、結晶の凝集・沈降あるいは素子の液漏れの問題は低減されたが、配向に要する交流電圧が高くなる。

2.6 その他

電気で制御する素子として、銀イオンなどの金属イオンの可逆的電着現象を応用した調光ガラスも検討されている。その他の外部刺激として磁気、応力、動力などがある。

磁場によるファラデー効果、応力・音場による光弾性

図7 サスペンデドパーティクルガラスの光学特性

効果や音響光学効果も可逆的に光学特性を変化させるが、変化幅が微小であり、調光ガラスとしての実用化は極めて困難である。マイクロモーター、アクチュエーターなどを利用してブラインド、スリット、着色液体などを動かして透過率を変化させるシステムは、一部調光ブラインドとして実用化されている。WO₃膜の酸化・還元による着消色現象を利用して、WO₃膜に白金の触媒層を薄くコートしたガラスに希薄水素ガスを通して、青く着色させ酸素ガスに置き換えることにより透明化させるアイデアも検討されている。

3. 今後の展開

これまで各種調光ガラスの原理と特徴について述べてきた。調光ガラスの効果としては、(1)視覚的快適性（眩しさ、視界、色などの制御）、(2)熱的快適性（暑さ、寒さなどの制御）、(3)太陽エネルギーの有効利用（省エネルギー、蓄熱、発電など）などが考えられる。

光、熱で制御される素子は、自立応答性素子とも呼ばれ、構成が簡単かつ外部コントローラも不要であり製造コストも安い。任意に調節できないので用途は限られる。一方、電気で制御できるECは注入電荷量に応じて任意透過率調節が可能なのでコントローラ・センサなどと組み合わせて太陽光の室内入射量の最適化を図る事により、建物の冷暖房・照明などの電力負荷を大幅に低減する事が可能である。図8に各種窓ガラスの基礎データ及び米国エネルギー省開発の、ビル総エネルギー消費量試算モデルをベースに、米国カリフォルニア州でモデルビルに各種窓ガラスを取り付けた場合の月毎の総エネルギー消費量の試算結果を示す⁸⁾。制御できないガラスに比べてECは年間で30%以上の省エネルギー効果を示すが、制御できるPCあるいはブラインド付ガラスと比較しても夏場でのECの省エネルギー効果は明確である。

このように、素材としてのECは優れたものであるが、実使用時の信頼性とコストが実用化での大きな障害と

図8 各種窓ガラス使用ビルの年間総エネルギー消費量計算結果(月毎)ビル面積：558m²、窓/壁比：0.3

なっている。過酷な光と熱の共存環境下で電気化学反応を10年以上保持するためには、各種の補償機能を持つ駆動制御システムが必要である。一方コストとしては2万円/m²程度に落とさないと市場への浸透は困難といわれている。極く最近、ドレスデン（独）の銀行のビルに400 m²ほど施工された例があるが、今後も少量のモニタ的建物に取り付け、信頼性・省エネルギー効果の実績を評価しながらコストダウンの努力が続けられるものと思われる。

4. おわりに

主として建築用窓ガラスとしての調光ガラスの技術動向に関して解説してきた。調光ガラスには、建築以外にも自動車用、VDT フィルタ、光学フィルタ、照明用など多くの応用分野が考えられる。形態、サイズ、特性、価格なども用途によって異なる。各種の技術が課題を解決

しつつ、商品コンセプトに応じた棲みわけをしていくものと思われる。

参考文献

- (1) 作花, 境野, 高橋編: ガラスハンドブック, 朝倉書店, p.992 (1975).
- (2) 日本化学会編: 化学便覧基礎編II, 丸善, p.412 (1984).
- (3) Babulanam, S. M., Eriksson, T. A., Niklasson, G. A. and Granqvist, C. G.: Solar Energy Materials 16, pp.347-363 (1987).
- (4) Wilson, H. R.: Proc. of Windows Innovation 95 Toronto, Canada, p.489 (1995).
- (5) Kamimori, T., Nagai, J. and Mizuhashi, M.: Solar Energy Materials 16, pp.27-38 (1987).
- (6) Lampert, C. M.: Proc. SPIE, Vol. 3138, pp.206-216 (1997).
- (7) Yu, B. S., Kim, E. S. and Lee, Y. W.: Proc. SPIE, p.2531 (1997).
- (8) Selkowitz, S. E. and Lampert, C. M.: SPIE Institute Series, Vol. IS4, p.22 (1990).

研究調査委員会報告書頒布のお知らせ

「照明用電子安定器における入力電流高調波問題の研究」報告書 (JIER-063)

1. まえがき
2. 高調波問題の概要
3. 照明における高調波問題の特徴
4. 高調波対策技術の一般動向
5. 電子安定器の高調波対策
6. 今後の課題
7. あとがき

編集: 平成11年5月

印刷: 平成11年7月

発行: 平成11年7月

頒布価格: 会 員1500円 (税抜価格)

非会員2000円 (税抜価格)

送 料: 1冊230円

申込方法: 必要事項(書籍名, 住所, 氏名, 電話, FAX, 会員は会員番号)をご記入の上, 事務局へお申し込みください。

FAX: 03-5294-0102