研究最先端

調光ミラーを用いた複層ガラスの実現に向けて

(独)産業技術総合研究所　サステナブルマテリアル研究部門
山田　保誠

Toward the Realization of Pair Glass Using Switchable Mirrors

Yasusei Yamada
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology（AIST）
Materials Research Institute for Sustainable Development

1．はじめに

窓ガラスは外光を室内に取り入れるために必須であるが，同時に大きな熱の出入り口となっており，建築物の断熱を悪くする主要因となっている。そのため，low-E ガラスを用いるだけで冷暖房負荷が 3 割から 4 割低減できると試算されている。しかし，low-E ガラスはその光学特性を使用中に変化させることができないため，夏もしくは冬のどちらかで適するように光学特性が設計されており，さらに太陽放射の約半分を占める可視光の制御を行うことができない。そのため，外気温や日射の強さに応じて，光や熱の流入・流出を可視光を含めて制御（調光）することができる窓ガラス：スマートウィンドーを利用すれば，low-E ガラスよりさらにエネルギーを節約することが期待できる。

スマートウィンドーに適した材料として，これまで酸化タングステン等の酸化物が広く研究されている。この酸化物を使用したスマートウィンドーは，日射が強いときには濃い青に着色し太陽光を「吸収」することにより室内に侵入することを防ぎ，日射が弱いときには透明状態にして太陽光を室内に取り入れることができ，アメリカでは最近市販化されている[1)]。しかし，このタイプのスマートウィンドーは太陽光を「吸収」することによって調光するため，日射の強い日本では表面温度が上昇し，その熱が再放射して室内に侵入するため，冷房負荷低減効果が阻害される。そのため，さらに効果的な調光は，日射が強いときには太陽光を「反射」させることにより室内に侵入することを防ぎ，日射が弱いときには透明になり太陽光を室内に取り入れるという，窓ガラスの光学特性を「鏡状態」と「透明状態」との間をスイッチングさせることである。

2．反射型調光材料：調光ミラー

このような反射型の調光特性を有する材料は 1996 年オランダ・アムステルダム自由大学のグループによって発見され，”Switchable Mirror”（日本名：調光ミラー）と名付けられた[2)]。この調光ミラーはガラス基板上に Y（イットリウム）や La（ランタン）の薄膜（調光層）とごく薄い Pd（パラジウム）薄膜（触媒層）の 2 層膜で構成されている。成膜直後は Y，La

〒463-8560　名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98
TEL　052-736-7474
FAX　052-736-7406
E-mail : yasusei-yamada@aist.go.jp

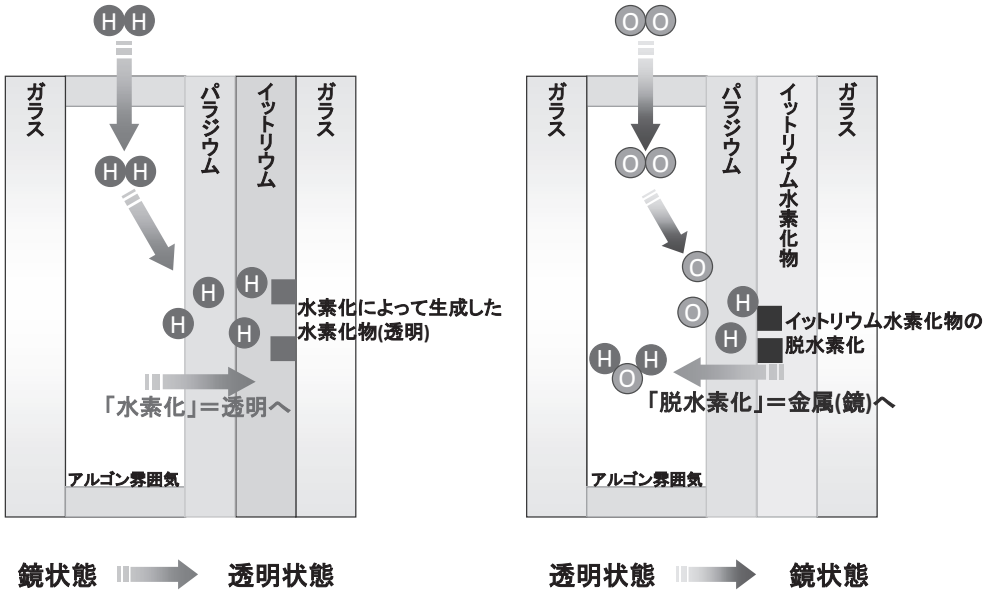

図1　調光ミラーのスイッチング原理

およびPdのすべてが金属であるため，調光ミラーは銀白色の鏡状態を示す。この状態の調光ミラーに2〜4%に希釈した水素ガスを晒すと，Pdの触媒作用によって水素分子が乖離吸着し，原子状の水素が調光層に拡散，常温・常圧でY，Laと化学反応することでY，Laの水素化物が生成する。生成した水素化物は透明であるため，調光ミラーの光学特性は鏡状態から透明状態に変化する。透明状態の調光ミラーに，空気を晒すと水素化物中の水素と空気中の酸素が化学反応し，水蒸気の形で水素化物から水素が放出され，金属状態（鏡状態）に戻る。Pdは触媒作用以外にY，Laの酸化を防ぐ働きもする。以上のように調光ミラーは調光層の「水素化」，「脱水素化」によって光学特性をスイッチングさせている（図1）。

3．ガスクロミック方式の特徴

調光ミラーのスイッチング方式には水素ガスと酸素ガスを用いた「ガスクロミック方式」と，電気を用いた「エレクトロクロミック方式」の2種類がある。エレクトロクロミック方式は電気の配線をすれば光学特性を切り替えることができるため利便性が良い。しかし，透明導電膜，イオン貯蔵層，固体電解質層等の酸化物層が必要となりデバイス構造が複雑である。さらに，蒸着速度が高くない酸化物の層厚が数百nm必要であるため生産性が低く製造コストがかかる。また，大型になるとスイッチングに要する時間が極端にかかる。以上から，エレクトロクロミック方式は小型で高付加価値な応用には適しているが，窓への応用にはあまり適していない。

これに対し，ガスクロミック方式は，構造が簡単，蒸着速度の高い金属のスパッタリングであるため生産性が高く安価に製造が可能，大型化が容易，ガスの拡散とその後の反応がスイッチング速度を律速するため大型化してもスイッチングに要する時間が極端に遅くならない等の特長を持つ。他方，スイッチングに水素及び酸素ガスが必要なため，別途ガス発生と導入システムが必要である。さらに，エレクトロクロミック方式の調光ミラーに比べてスイッチングに対する繰り返し耐久性が著しく低いという問題点があった。

4．スイッチングに対する繰り返し耐久性に優れたMg–Y合金薄膜を用いた調光ミラー[3)]

これまでわれわれの研究グループでは，透明状態における光学特性向上の観点から，マグネシウム合金を用いた調光ミラーについて研究を行ってきた。この研究から，ガスクロミック方式によるスイッチングに対する繰り返し耐久性を向上させるには，マグネシウム組成が低い方が望ましいことがわかった。しかし，これまで選択してきたマグネシウム合金は，マグネシウム組成が低くなるにしたがって透明状態における光学特性が劣化するという問題点があった。そこで本研究では，調光層として広いMg組成範囲で透明状態において比較的良好な光学特性を示すと報告されているフィリップスのグループによって開発されたMgとYの合金[4)]に着目した。この合金を用いた調光ミラーの光学特性等は報告されているが，そのスイッチングに対する繰り返し耐久性についてはほとんど報告されていない。そこで，40 nmのMg–Y合金薄膜と7.5 nmのPd触媒層の2層膜からなる調光ミラーを作製し，そのスイッチングに対する繰り返し耐久性を調べた。この際，1サイクルは「Arで4%に希釈した水素ガスに95秒，大気に900秒」とした。その結果，マグネシウム組成が0.5未満の合金を用いることで，透明状態と鏡状態間のスイッチングを10,000サイクル以上繰り返しても鏡状態および透明状態における透過率は繰り返しサイクル数によらず一定の値を示し，劣化していないことを確認した。しかし，Pd触媒層の膜厚（7.5 nm）が従来の調光ミラーより厚いため，透明状態における透過率があまり高くなかった。これはPd層が水素化しても金属状態で，透過率が低いためである。そこで，Pd層厚を薄くすることにより，透明状態における透過率の向上を図った。しかし，耐久性（スイッチングできるサイクル数）はPd層の膜厚に強く依存し，その膜厚が薄くなるにしたがって急速に減少し，Pd触媒層の膜厚が3 nmでは鏡状態から透明状態に変化さえしなかった。この問題を解決するために，調光層とPd触媒層の間に2 nm程度の極薄い中間層を挿入した。これにより，図2に示すとおりPd触媒層の膜厚を3 nmまで薄くしても10,000サイクル以上の耐久性を維持することができ，触媒層の厚さを薄くすることで透明状態における透過率が～50%に向上した。比較として，これまで開発してきた調光ミラーで最も耐久性が良かったMg–Ni合金薄膜を用いた調光ミラーの結果を併せて示す。Mg–Ni合金薄膜を用いた調光ミラーでは，透明状態における透過率が低く，1,500サイクル程度で透過率

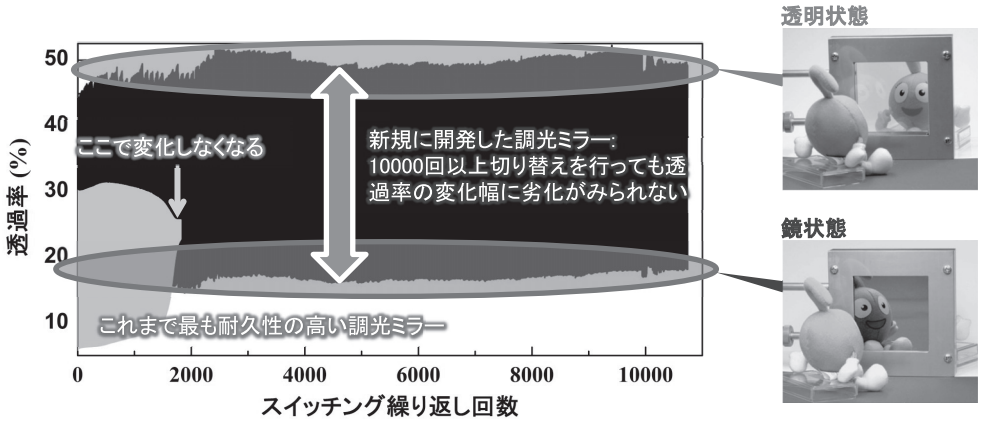

図2　Mg–Y合金薄膜を用いた調光ミラーのスイッチングに対する繰り返し耐久性の評価，これまで作製した中で最も耐久性の高かった調光ミラーも併せて示す。

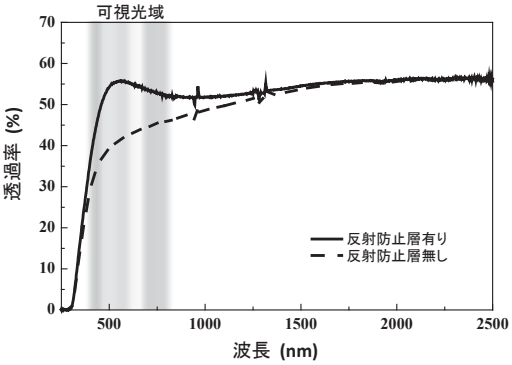

図3　反射防止膜があるときと無いときの透明状態における透過率スペクトルの比較。可視光域をハッチで示す。

の変化幅が極端に小さくなりスイッチングしなくなることがわかる。10,000サイクルという数は，1日に朝と夕方で2回の切り替えを行った場合，30年に相当する数であり，この耐久性の飛躍的な向上により，調光ミラーを用いた窓ガラスをオフィスビルで使用するなどの実用化が期待される。

さらに，パラジウム触媒層の上に反射防止膜をコーティングすることで，スイッチングに対する耐久性は維持しつつ，図3に示すとおり透明状態における可視光透過率（T_{vis}）が41%から55%に向上し，無色性も向上した。

そこで，Mg-Y合金調光ミラーの典型的な光学特性を用いて，空気層6 mmの複層ガラスの第2面に当該調光ミラーを蒸着した窓ガラスを仮定し，その鏡状態と透明状態におけるη値とU値を見積もった。まとめた結果を表1に示す。透明状態における透過率およびスイッチングの幅が十分とは言い難く，さらなる光学特性の向上が望まれる。

表1　空気層6 mmの複層ガラスの第2面にMg-Y合金調光ミラーを蒸着した窓ガラスの鏡状態と透明状態におけるη値，U値，可視光透過率，可視光反射率，色度座量

	鏡状態	透明状態
η値	0.18	0.49
U値 (W/m^{2}K)	2.94	3.28
可視光透過率 (%)	10.1	43.7
可視光反射率 (%)	35.1	14.1
色度座量 (x, y)	(0.32, 0.34)	(0.31, 0.33)

5．調光ミラー複層ガラスの省エネルギー性能の評価

同じサイズの2つの部屋に0.8 m×1.2 mの調光ミラー複層ガラスと参照用の透明複層ガラスを設置し，室温を28℃に設定した際のクーラーの電力使用量をモニタリングして，その値を比較することで調光ミラー複層ガラスの冷房負荷低減効果を見積もった。

8月中旬の晴天の日の午前6時から午後6時における調光ミラー複層とガラス透明複層ガラスを設置したそれぞれの部屋の冷房にかかる電力積算量は，透明複層ガラスでは1065 Whであったのに対して，鏡状態にした調光ミラー複層ガラスでは720 Whであった。2つの部屋の断熱性の差を考慮すると調光ミラー複層ガラスには約35%の冷房負荷低減効果があることがわかった。なお，本実験は調光層にMg-Ni合金を用いた調光ミラーを使用した。

6．調光ミラー複層ガラスの実現可能性

調光ミラーの製造には貴金属であるPdが必要である。しかし，その膜厚は3 nm程度と非常に薄いため使用量が少なく，調光ミラー1 m^{2}あたりの材料コストは150円程度と見積もられる。そのため，製造コストの多くは装置等のイニシャルコスト，減価償却，歩留まり，生産性等であると考える。しかしいずれも金属ターゲットの直流スパッタリングを用いるため，low-Eガラスの製造コストと同程度と予想する。調光ミラー複層ガラスを建物に用いる場合，建物内にガスボンベを設置することは現実的でないため，水素と酸素を発生させるシステムおよび調光ミラー複層ガラスへの組み込み方法を確立することが重要になる。最近，大気中の水分を電気分解することで水素を発生させ，その水素を利用した新規のスイッチング方式を開発した[5]。この方式では発生する水素の分圧

が爆発限界に達することがないため安全性に全く問題がない。以上を勘案すると，耐久性を向上させた本調光ミラーを用いることで調光ミラー複層ガラスの実現可能性は非常に高いと考える。

7．まとめ

これまでの研究成果より，ガスクロミック方式による調光ミラーを用いた複層ガラスの実現における問題点の多くを解決してきた。ガスクロミック方式は実用上有利な点が数多く存在する。今後は透明状態におけるさらなる透過率の向上，スイッチング速度の向上を目指して研究開発を進めていく。

謝辞

本研究開発の一部は，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の平成20年度産業技術研究助成事業による支援を受けて行った。

参考文献

1）SAGE webサイト：http://sageglass.com/
2）J. N. Huiberts, R. Griessen, J. H. Rector R. J. Wijngaargen, J. P. Dekker, D. G. de Groot, and N. J. Koeman: “Yttrium and lanthanum hydride films with switchable optical properties” Nature, Vol. 380, No. 21, pp. 231–234（1996）.
3）産総研2012年9月20日プレス発表“調光ミラーの鏡状態と透明状態の切り替えに対する耐久性を飛躍的に向上”－オフィスビルなどの冷房負荷の大幅な低減に期待－, http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr 2012/pr 20120920/pr 20120920.html
4）P. van der Sluis, M. Ouwerkerk, and P. A. Duine: “Optical switches based on magnesium lanthanide alloy hydrides”Appl. Phys. Lett., Vol. 70, No. 25, pp. 3356–3358（1997）.
5）産総研2013年1月23日プレス発表“新たなガスクロミック方式の調光ミラーシートを開発”－省エネルギー窓ガラスに向けた新技術－, http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr 2013/pr 20130123/pr 20130123.html