

# 調光ミラーガラスの開発

## — 実用化のための研究戦略 —

吉村 和記\*、田窪 一樹、山田 保誠

「調光ミラー」は透明な状態と鏡の状態がスイッチングできる新しい薄膜材料で、これを窓ガラスに用いると、太陽光を効果的に遮ること、特に夏の冷房負荷を大きく低減できる省エネルギーガラスを実現することができる。この調光ミラーガラスを実用化するために、これまでどのような研究戦略を立て取り組んできたかを紹介する。単に材料自体の研究開発にとどまらず、実際にそれを建物に用いた場合の省エネルギー性能の計測も行い、その結果を材料研究にフィードバックすることで、より省エネルギー性能の大きな窓の開発を行っている。

**キーワード:** 調光ガラス、省エネルギー、冷房負荷、クロミック材料、耐久性

## Development of switchable mirror glass

### – R&D strategy toward its practical use –

Kazuki YOSHIMURA\*, Kazuki TAJIMA and Yasusei YAMADA

“Switchable mirror glass” is a new thin film material that can be switched between transparent and mirror states. Using this material in window glass saves energy by effectively shading rooms from heat-generating sunlight, thereby decreasing cooling load in summer. In this paper, we introduce our R&D strategy for further development and practical deployment of this material. In addition to R&D of the material itself we also measured the amount of energy saved when the material was used in the windows of buildings. The results we obtained from such field tests will enable us to develop a window glazing with better energy-saving performance.

**Keywords:** Smart window, energy efficiency, cooling load, chromogenic material, durability

### 1 はじめに

サステナブルマテリアル研究部門では、民生部門におけるCO<sub>2</sub>の排出量削減に役立つ材料として、「省エネルギー型建築部材」の研究に取り組んでいるが、環境応答機能薄膜研究グループでは、その中の窓ガラスの研究を受けもっている。民生部門のエネルギー消費の中で、冷暖房の占める割合は約30%に達するが、その冷暖房のエネルギーに大きな影響を与える部材が窓である。窓の目的は光を取り入れることにあるが、通常の窓ガラスでは可視光以外に熱も透過し、建物の断熱性を悪くする要因になっている。したがって、窓の断熱性を高めるだけでも大きな省エネルギー効果があり、最近では、断熱性の高い複層ガラスやLow-eガラスの普及が進んできている。しかし、夏暑い日本ではこの断熱に加え、外部からの日差しを効果的に遮る（遮熱する）ことでさらに省エネルギー効果を高めることができる。このような目的で、光や熱の出入りをガラス自身でコントロールする窓ガラスが調光ガラスである。

調光ガラスは、光学的性質を可逆的に可変できる薄膜材料（クロモジュニック材料）をガラスにコーティングすることで実現することができる。調光ガラスにもさまざまな種類があり、例えば、電氣的にスイッチングできるガラスはエレクトロクロミック（electrochromic）ガラス<sup>[1]</sup>、温度によって変化するガラスはサーモクロミック（thermochromic）ガラス<sup>[2]</sup>、まわりの雰囲気（ガス）で変化するガラスはガスクロミック（gasochromic）ガラス<sup>[3]</sup>と呼ばれる。これらの調光ガラスの中でもエレクトロクロミックガラスは研究の歴史も長く、外国では一部商品化も行われている。

日本では、1990年代までは大手ガラスメーカーを中心にエレクトロクロミック調光ガラスの研究が盛んに行われ、筆者（吉村）も、産総研中部センターの前身である名古屋工業技術研究所の時代から、サンシャイン計画・ニューサンシャイン計画におけるパッシブ型省エネルギー材料の一つとして調光材料の研究に携わっていた。しかし、性能的には優れた物が作製できるようになったものの、コスト面等

産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98  
Materials Research Institute for Sustainable Development, AIST 2266-98 Anagahora, Shimo-Shidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan  
\* E-mail: k.yoshimura@aist.go.jp

Original manuscript received April 6, 2012, Revisions received May 16, 2012, Accepted May 18, 2012

で実用化のめどが立たないということで、2000年頃にはいずれも研究が終了してしまい、いわゆる「死の谷」（「悪夢の時代」）に入り込んでしまっていた。

その頃、筆者（吉村）が、この調光ガラスの研究を再び活発にする起爆剤になるかもしれないと着目した材料が「調光ミラー」である。調光ミラーは、1996年にオランダで発見された新しい調光材料<sup>[4]</sup>で、これまでの調光材料が、透明な状態から濃い青色に変化するのに対して、透明状態から鏡状態に変化するという特徴がある。鏡状態では太陽光を反射して遮蔽できることから、実用化すれば、これまでの調光ガラスよりも、より遮蔽性能に優れた窓にすることができる。調光ミラー薄膜の研究を進めるにあたっては、当初から、単に材料の研究を行うだけでなく、省エネルギー窓ガラスとして実用化するという念頭において研究を進めてきた。この論文では、この調光ミラーガラスを実用化するために、どのように研究を進めてきたかを紹介する。

## 2 調光ミラーを実用化するための課題

産総研で調光ミラーの研究を始めた2001年当時、実用化するために解決しなければならない課題として、(1) 光学特性の改善、(2) 耐久性の改善、(3) エレクトロクロミック調光ミラーの開発等があり、これらに取り組んだ。

### 2.1 光学特性の改善

図1(a)に示したのが調光ミラーの基本構造で、調光層となるマグネシウム合金薄膜の上に薄い触媒層をコーティングした構造になっている。成膜直後の状態でマグネシウム合金層は金属状態なので鏡状になっているが、薄い水素を含む雰囲気にとさらすと、パラジウムの触媒作用で調光層が水素化され絶縁体になって透明になる。次に酸素を含む雰囲気にとさらすと、同じくパラジウムの触媒作用で水素化物中の水素が酸素と反応してH<sub>2</sub>Oとして引き抜かれ、金属の状態に戻って鏡状になる。このように鏡状態と透明状

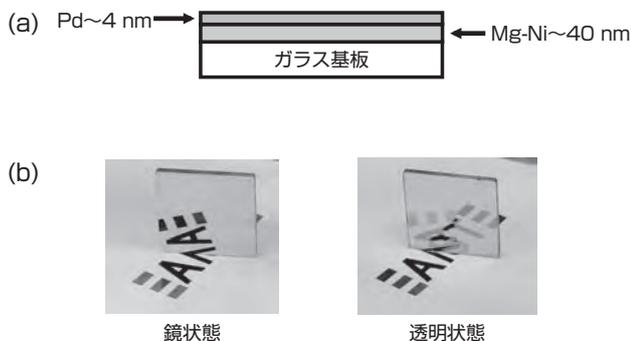


図1 (a) 調光ミラーの基本構造と、(b) 産総研で開発した光学特性に優れたマグネシウム・ニッケル系調光ミラー薄膜(Pd/Mg<sub>6</sub>Ni)

表1 調光ミラー薄膜材料の種類

第1世代	希土類金属 Y <sup>[4]</sup> , La <sup>[4]</sup> 等 アムステルダム自由大学 1996年
第2世代	希土類・マグネシウム合金 Gd-Mg <sup>[6]</sup> , Sm-Mg <sup>[6]</sup> , Y-Mg <sup>[7]</sup> 等 フィリップス 1997年
第3世代	マグネシウム・遷移金属合金 Mg-Ni <sup>[8]</sup> , Mg-Ti <sup>[9]</sup> , Mg-Co <sup>[10]</sup> 等 ローレンス・バークレー研究所 2001年
第4世代	マグネシウム・アルカリ土類金属合金 Mg-Ca <sup>[11]</sup> , Mg-Ba <sup>[12]</sup> , Mg-Sr <sup>[12]</sup> 産総研 2009年

態がスイッチングする調光ミラー状態は、最初イットリウムやランタンといった希土類金属薄膜で見つかったが、その後、いくつかの新しい材料が見つかった（表1）。2001年にアメリカで見つかったマグネシウムと遷移金属の合金は、希土類を含むものに比べて耐久性が高いと考えられることや、材料がより安価であることから、大型ガラスへの応用により適した材料と期待され、産総研でもこの材料に着目し、日本で最初に研究を開始した。ただ、この材料が見つかった当時は透明時における可視光透過率は20%程度しかなく、色も焦げ茶色をしており、とても実用的に使えるものではなかった。産総研では、まず調光ミラーの透明時における可視光透過率を高める研究に取り組み、図1(b)に示したようなマグネシウムの比率の高いMg-Ni合金薄膜を用いることで、透明時の可視光透過率を50%程度まで高くできることを見だし<sup>[13]</sup>、実用化に向けて大きく前進することができた。

ただ、調光ミラー層としてMg-Ni合金薄膜を用いると、優れたスイッチング特性をもった試料が得られるが、透明状態では少し茶色を帯びている。この系統の色は建物や乗り物の窓としてはあまり好まれない色とされている。そこで、この透明時の色を改善する研究を行った結果、調光層として、Mg-Ti合金<sup>[14]</sup>やMg-Nb合金<sup>[15]</sup>を用いると、水素化した場合に、およそ無色にできることを見いだした。ただ、Mg-Ti合金薄膜やMg-Nb合金薄膜は、透明時に無色ではあるが、可視光透過率はMg-Ni合金薄膜に比べて劣る。我々の研究グループでは、最近Mg-Ca<sup>[11]</sup>、Mg-Ba、Mg-Sr等<sup>[12]</sup>の合金薄膜を用いると、水素化時に無色であると同時に可視光の透過率も高くできることを発見した。図2に、それぞれの材料の透明状態における光学透過スペクトルを示す。マグネシウム・アルカリ土類金属系の材料は、これまでの調光ミラー薄膜のカテゴリーのものと異なり、いわば産総研オリジナルの第4世代材料と呼べるもので、その実用化が期待される。

透過率および反射率の変化幅をどの程度に設定するかは

用途によって変わるが、例えば、自動車のフロントガラスに用いるためには、透明時 70 % 以上の可視光透過率が必要で、現状でこの条件はクリアできていない。このレベルまで透過率を上げるためには、マグネシウム合金薄膜からなる調光層だけでなく、パラジウム層や保護膜層も合わせた多層薄膜全体の光学設計を行う必要があり、現在その開発に取り組んでいる。

## 2.2 耐久性の改善

調光ミラー薄膜材料では、その光学特性については、かなり実用に近い性能を持つものも得られるようになってきている。しかし、この材料の最大の問題点は、スイッチングの繰り返しに対する劣化が早いということである。例えば、図 3 (a) に示したのは、Pd/Mg<sub>4</sub>Ni 薄膜について、アルゴンで 4 % に希釈した水素ガスを用いて、スイッチングを繰り返した場合の波長 670 nm における光学透過率の変化を示したものである。スイッチングの繰り返しのに伴い、光学的な変化幅が段々と小さくなっていき、特に 140 回を過ぎてからは急激に劣化していることがわかる<sup>[16]</sup>。調光ミラーの実用化にあたっては、この耐久性の向上が最も重要な課題であり、我々もさまざまな試みを行ってきた。

劣化はいくつかの要因が重なって起こっているが、一つは水素化・脱水素化の繰り返しにより、Mg-Ni 薄膜の中の Mg が Pd 層を抜けて表面に移動（マイグレーション）することにある。我々は、Ti 等の金属薄膜をバッファ層として Pd 層と Mg-Ni 層の間に挿入することで、この Mg の移動を抑制することができることを見いだした<sup>[17]</sup>。図 3 (b) にみるようにバッファ層を挿入すると 400 回程度まで劣化が起こらなくなる。しかし、この試料でもその後急激な劣化が起こっている。これは水素化・脱水素化に伴う体積変化のために、Pd 層がダメージを受けてしまうためである。こ

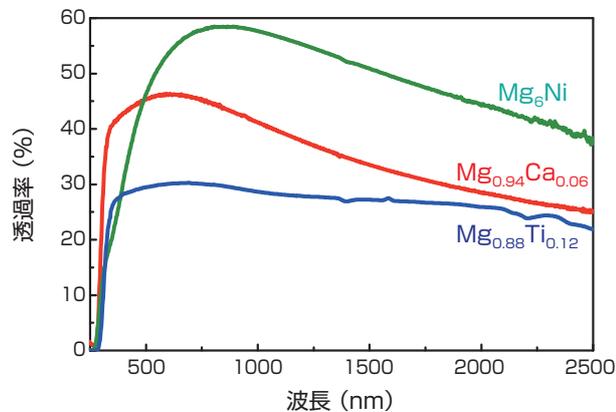


図 2 マグネシウム・ニッケル系調光ミラー (Mg<sub>6</sub>Ni)、マグネシウム・チタン系調光ミラー (Mg<sub>0.88</sub>Ti<sub>0.12</sub>)、マグネシウム・カルシウム系調光ミラー (Mg<sub>0.94</sub>Ca<sub>0.06</sub>) の透明状態における透過スペクトルの比較

れを防ぐにはある種の保護膜が有効で、例えば、Ti バッファ層を挿入した試料の表面にテフロン (PTFE) の保護膜を蒸着すると、1,500 回程度まで繰り返しができるものも作製することができた (図 3 (c))<sup>[18]</sup>。とはいえ、実用的には 10,000 回程度の耐久性は必要であり、現在も耐久性のさらなる向上を目指した研究を続けている。

## 2.3 エレクトロクロミック調光ミラーの実現

調光ミラーをガスクロミックでスイッチングするためには、どうしても二重ガラス (ペアガラス) で使用する必要がある。用途によってはそれが難しい場合もあり、その場合には電気的なスイッチングが必要となる。エレクトロクロミック方式のスイッチングに関して、当初はアルカリ水溶液を用いたデバイスを研究したが、溶液を使用するデバイスでは、調光薄膜側にプラスの電位をかけるとマグネシウムが溶解してしまうことから、透明状態から鏡状態に戻すのに短絡するしかなく、実用的でないことがわかった。そこで我々は、溶液を用いない、全固体型エレクトロクロミック調光ミラーの開発を行った<sup>[19]</sup>。

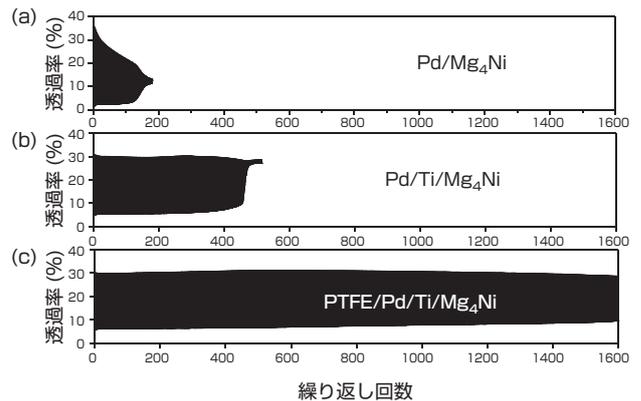


図 3 スwitching 耐久性の比較 (a) マグネシウム合金層とパラジウム層のみの調光ミラー薄膜、(b) バッファ層を挿入した調光ミラー薄膜、(c) バッファ層を挿入し保護膜 (テフロン層) をコーティングした調光ミラー薄膜

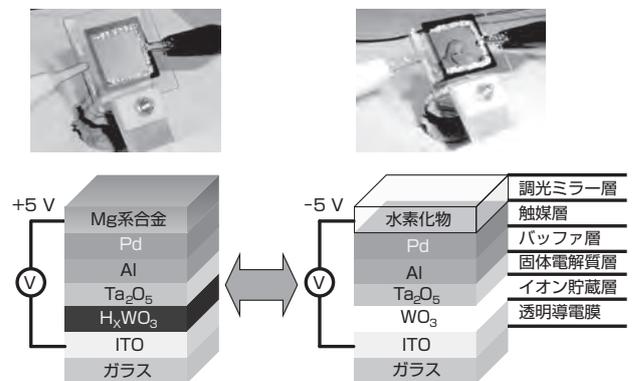


図 4 全固体型エレクトロクロミック調光ミラーデバイスの構造と写真

図4に、現在作製している全固体型調光ミラーデバイスの構造を示す<sup>[20]</sup>。ガラス等の透明基材の上に、透明導電膜 (ITO)、酸化タンゲステン薄膜、酸化タンタル薄膜、Al 薄膜、Pd 薄膜、Mg-Ni 合金薄膜を積層した構造をもっている。それぞれの膜の作製はマグネトロン・スパッタ法を用いて行っている。酸化タンゲステン薄膜は水素イオンを貯蔵するための層、酸化タンタル薄膜は電解質層、Pd 薄膜は水素の出入りを促進するための層、また、Mg-Ni 合金薄膜は鏡の状態と透明な状態に切り替わる調光層である。Al 薄膜はバッファ層で、スイッチングの繰り返しによりPdが酸化タンタル層の中に拡散するのを防いでいる。作製したデバイス（大きさ3 cm 四方）のスイッチングの様子を図4に示す。調光ミラー薄膜側に-5 Vの電圧をかけると、酸化タンゲステン薄膜中の水素イオンが移動してMg-Ni層が水素化し、20秒程度で鏡状態から透明状態に変化する。逆に+5 Vをかけると、Mg-Ni層から水素イオンが抜けて酸化タンゲステン薄膜に移動し、15秒程度で透明状態から鏡状態に変化する。

調光ミラーデバイスでは、成膜を行う上で基板を選ばないという特徴がある。したがって、ガラス基板の代わりに透明なプラスチック基板を用いると、折り曲げることのできる調光ミラーフィルムも作製することができる。すでに、ガラス基板同様のスイッチングができるデバイスの開発に成功している<sup>[21]</sup>。調光ミラーフィルムが実用化できれば、既存のガラスに貼り付けるだけで調光ミラー特性をもたせることができるため、応用先を広げる上での意義は大きい。

ただ、ガスクロミック方式の調光ミラーでは、大型のスパッタ装置を用いるだけで大面積のサンプルが容易に作成でき、またスイッチング速度についても、メートルサイズでも20秒程度で行えるのに対して、エレクトロクロミック方式の調光ミラーの場合は、サイズが大きくなるとスイッチングの速度が急激に遅くなり、当初は、例えば15 cm角程度でも1時間程度かかってしまうという欠点があった。これまでさまざまな手法を用いてこのスイッチング速度の向上に取り組む、現在は15 cm角のサンプルを30秒程度でスイッチングできるようになっている。しかし、より大型のエレクトロクロミック調光ミラーを実現するためには、さらなるブレークスルーが必要で、現在もエレクトロクロミック方式の調光ミラーにおける最も重要な課題として取り組んでいる。

### 3 調光ミラーガラス実用化のため研究シナリオ

調光ミラーガラスを実用化するためには、ガラスメーカーとの共同研究が不可欠である。ただ、「はじめに」でも触れたように、日本のガラスメーカーは2000年頃までに調光ガラスに関する研究を打ち切ってしまった歴史的な経緯が

あり、調光ガラスの研究開発を再開してもらうためには、このガラスが実用化可能であり、また実用化に値するガラスであることを認識してもらう必要がある。そのため、現時点でまだ解決できていない課題の解決を急ぐとともに、このガラスを用いた場合にどの程度の省エネルギー性能が得られるかを示していくことが重要だと考えた。

サステナブルマテリアル研究部門では、単に部材そのものを研究するだけでなく、それらを用いた場合の省エネルギー性能についても実測するための専用の建屋をもっている。図5がその環境調和実験棟の写真で、名古屋にある産総研中部センターの中に建てられている。この実験棟の3階部分は1辺が約2.5 mの小さい部屋に分かれており、各部屋の南側に窓が一つあり、2枚の窓ガラスが装着されている。また、各部屋に同じ空調装置があり、それぞれの空調装置で消費される電力が個別にモニターできるようになっている。したがって、各部屋の窓にさまざまな種類の窓ガラスを装着することで、ある設定温度にした場合の各部屋の空調負荷を比較することができる。次章で紹介するように、建物に実装できる調光ミラーガラスを実際に作製してその省エネルギー性能を評価し、これまでの省エネルギーガラスと比較して、大きな冷房負荷低減効果があることを実証した。また、この実環境での測定を行うことで、材料の研究だけを行っている場合には得られないような重要な知見、例えば、省エネルギーガラスでは窓の方位がとても重要なことや、太陽光の入射条件をよく考慮する必要があること等がわかり、それらを材料開発にフィードバックすることで、より省エネルギー性能の高いガラスの開発に生かしている。

一方、調光ミラー薄膜には、これまでになかった新しいスイッチングができる材料として、建物用ガラス以外にもさまざまな用途がある。図6に代表的な応用先を示したが、これらの材料の実用化については、比較的簡単に商品化できるものから、かなり難しいものまである。我々も、最終的には、調光ミラーを建物や乗り物の窓ガラスとして実用化することを目指しているが、そこに至るまでの過程で、実用化できるものから順次製品化していくということも重要な戦略とし

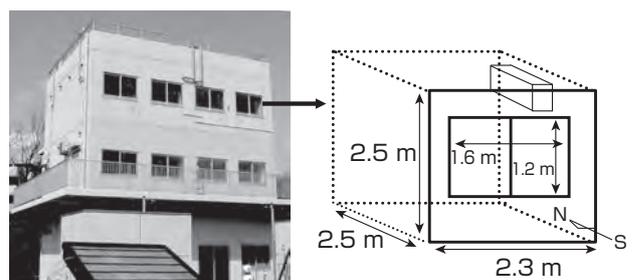


図5 環境調和実験棟

ている。

例えば、調光ミラー薄膜は水素を含んだ雰囲気と接すると光学的な変化が起こるため、これを観察することで水素の検知ができる<sup>[22]</sup>。これまでの水素センサーは加熱して使用する物が多く、水素がもれた場合にセンサーが着火源になってしまう可能性もあるが、調光ミラー薄膜を用いた水素センサーは室温で水素と反応するため加熱の必要がなく、また、光ファイバーの先端に蒸着した調光ミラー薄膜をセンサーとして、もう一方のファイバー端でその反射率変化をモニターできるため、検知部に電気的な回路を一切もたず、着火源になる危険性の無い水素センサーになる。また、この材料独自のユニークな用い方として、リトマス試験紙のように水素が含まれているかどうかを目視でチェックする「水素可視化シート」にもなる。この用途については、比較的簡単に実用化できることから、共同研究を行っているアツミテック株式会社で商品化され、2010年から販売が始まっている。また、昨年度からは、サイズの比較的小さい応用先について具体的な商品への適応を目指した共同研究も開始している。

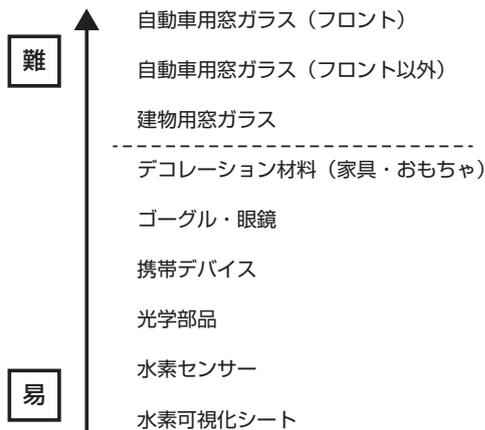


図6 調光ミラー薄膜の応用先

#### 4 省エネルギー性能の実証

調光ミラーの薄膜の応用先の中で、最も大きな効果が期待されるのは省エネルギー窓ガラスとしての応用である。ただ、調光ミラーガラスを用いた場合に、どの程度の省エネルギー性能が得られるのかはこれまでわかっていなかった。そこで、我々は、建物に実装できる大型の調光ミラーガラスを作製し、その省エネルギー性能の実測を行った<sup>[23]</sup>。

建物に実装できる窓ガラスとして、図7(a)に示したような構造をもつ調光ミラーガラスを作製した。厚さ5 mmの透明ガラスを8 mmの空隙をもったペアガラスとし、室外側のガラスの内側に調光層として  $Mg_4Ni$  薄膜を用いた調光ミラー薄膜が蒸着されている。アルミサッシに装着した大きさは、縦1.2 m、横0.8 mとなっている。図7(b)と(c)が、作製した実サイズ調光ミラー窓ガラスの、それぞれ鏡状態と透明状態の写真である。これは建物の外から調光ミラー窓を見たもので、鏡状態ではおよそ完全な鏡に見え室内はほとんど見えない。これに対して透明状態にすると、室内を通して反対側の窓ガラスが見えており、透明なガラスに近くなる。また、鏡状態においても、室内側から室外を見ると外の景色が見えるのも調光ミラーガラスの特徴である。

作製した実サイズ調光ミラー窓ガラスを図5の環境調和実験棟に設置し、冷房負荷の測定を行った。図8は8月下旬に行った測定例を示したものである。測定に先立ち、まず二つの部屋に同じ透明2重ガラスを取り付け、設定温度を28℃にして、冷房負荷が同じになることを確かめた。次に、一つの部屋の窓ガラスを調光ミラーガラスに取り替えて鏡状態にし、その冷房負荷電力を測定した。この日、透明ガラス窓の部屋の冷房負荷は1,065 Whであるのに対して鏡状態の調光ミラー窓の部屋の冷房負荷は720 Whで、34%程度エネルギーを節約できたことになる。このように、窓ガラスを調光ミラーにして鏡状態にした場合、特に日射量の多い日では大きな冷房負荷の低減効果があることを実証することができた。

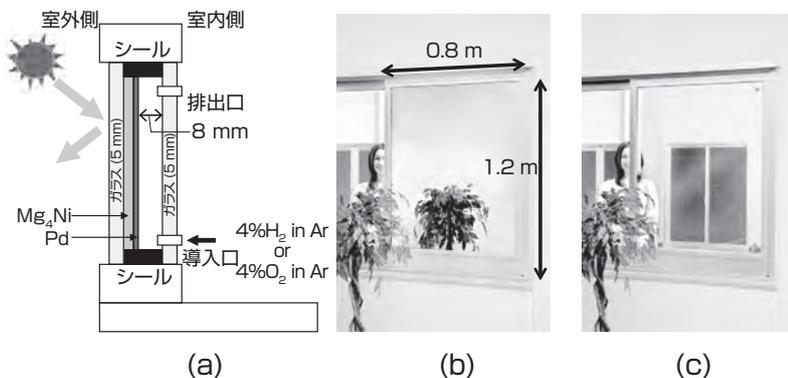


図7 実サイズ調光ミラー窓ガラス  
(a) 構造 (b) 鏡状態 (c) 透明状態

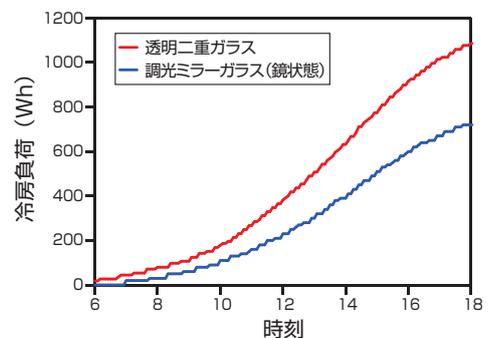


図8 透明二重ガラスと調光ミラー窓ガラスの冷房負荷比較

## 5 むすび

研究を開始してから約 10 年、調光ミラーを実用化するための研究を行ってきた。比較の実用化しやすい応用先については、一部商品化まで行うことができるようになった。

また、調光ミラー薄膜を省エネルギー窓ガラスとして用いるための研究では、材料自身の研究開発だけでなく、実際に建物に用いた場合の省エネルギー効果の測定も行い、その結果を材料開発にも反映させることで、より省エネルギー性能の高い窓ガラスの実現を目指した研究を行っている。

これまで得られた実験結果でも、調光ミラー窓ガラスを用いることによる冷房負荷低減効果は従来報告されているほどの省エネルギー窓ガラスの効果よりも大きいことがわかっており、これをできるだけ早く実用化することで、民生部門における CO<sub>2</sub> 削減に貢献したいと考えている。

## 謝辞

この研究の一部は（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成で実施されました。共同研究者だった包山虎産総研特別研究員（現在中国上海珪酸塩研究所）に謝意を表します。

## 参考文献

- [1] C. G. Granqvist: *Handbook of Inorganic Electrochromic Materials*, Elsevier, Amsterdam, (1995).
- [2] P. Jin, G. Xu, M. Tazawa and K. Yoshimura: Design, formation and characterization of a novel multifunctional window with VO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> coatings, *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 77, 455-459 (2003).
- [3] V. Wittwer, M. Datz, J. Ell, A. Georg, W. Graf and G. Walze: Gasochromic windows, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 84, 305-314 (2004).
- [4] J. N. Huiberts, R. Griessen, J. H. Rector, R. J. Wijngaarden, J. P. Dekker, D. G. de Groot and N. J. Koeman: Yttrium and lanthanum hydride films with switchable optical properties, *Nature*, 380, 231-234 (1996).
- [5] P. van der Sluis, M. Ouwerkerk and P. A. Duine: Optical switches based on magnesium lanthanide alloy hydrides, *Applied Physics Letters*, 70, 3356-3358 (1997).
- [6] M. Ouwerkerk: Electrochemically induced optical switching of Sm<sub>0.3</sub>Mg<sub>0.7</sub>H<sub>x</sub> thin layers, *Solid State Ionics*, 113-115, 431-437 (1998).
- [7] D. G. Nagengast, A. T. M. van Gogh, E. S. Kooij, B. Dam and R. Griessen: Contrast enhancement of rare-earth switchable mirrors through microscopic shutter effect, *Applied Physics Letters*, 75, 2050-2052 (1999).
- [8] T. J. Richardson, J. L. Slack, R. D. Armitage, R. Kostecki, B. Farangis and M. D. Rubin: Switchable mirrors based on nickel-magnesium films, *Applied Physics Letters*, 78, 3047-3049 (2001).
- [9] B. Farangis, P. Nachimuthu, T. J. Richardson, J. L. Slack, B. K. Meyer, R. C. C. Perera and M. D. Rubin: Structural and electronic properties of magnesium-3D transition metal switchable mirrors, *Solid State Ionics*, 165, 309-314 (2003).
- [10] T. J. Richardson, J. L. Slack, B. Farangis and M. D. Rubin: Mixed metal films with switchable optical properties,

*Applied Physics Letters*, 80, 1349-1351 (2002).

- [11] Y. Yamada, S. Bao, K. Tajima, M. Okada and K. Yoshimura: Optical properties of switchable mirrors based on magnesium-calcium alloy thin films, *Applied Physics Letters*, 94, 191910 (2009).
- [12] Y. Yamada, H. Sasaki, K. Tajima, M. Okada and K. Yoshimura: Optical switching properties of switchable mirrors based on Mg alloyed with alkaline-earth metals, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 99, 73-75 (2012).
- [13] K. Yoshimura, Y. Yamada and M. Okada: Optical switching of Mg-rich Mg-Ni alloy thin films, *Applied Physics Letters*, 81, 4709-4711 (2002).
- [14] S. Bao, K. Tajima, Y. Yamada, M. Okada and K. Yoshimura: Color-neutral switchable mirrors based on magnesium-titanium thin films, *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 87, 621-624 (2007).
- [15] S. Bao, K. Tajima, Y. Yamada, P. Jin, M. Okada and K. Yoshimura: Optical properties and degradation mechanism of magnesium-niobium thin film switchable mirrors, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 116, 771-775 (2008).
- [16] K. Yoshimura, Y. Yamada, S. Bao, K. Tajima and M. Okada: Degradation of switchable mirror based on Mg-Ni alloy thin film, *Japanese Journal of Applied Physics*, 46, 4260-4264 (2007).
- [17] S. Bao, Y. Yamada, M. Okada and K. Yoshimura: Titanium-buffer-layer-inserted switchable mirror based on Mg-Ni alloy thin film, *Japanese Journal of Applied Physics*, 45, L588-590 (2006).
- [18] S. Bao, K. Tajima, Y. Yamada, M. Okada and K. Yoshimura: Metal buffer layer inserted switchable mirrors, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, 216-223 (2008).
- [19] K. Tajima, Y. Yamada, S. Bao, M. Okada and K. Yoshimura: Durability of all-solid-state switchable mirror based on magnesium-nickel thin film, *Electrochemical and Solid State Letters*, 10, J52-J54 (2007).
- [20] K. Tajima, Y. Yamada, S. Bao, M. Okada and K. Yoshimura: Aluminum buffer layer for high durability of all-solid-state switchable mirror based on magnesium-nickel thin film, *Applied Physics Letters*, 91, 051908 (2007).
- [21] K. Tajima, Y. Yamada, S. Bao, M. Okada and K. Yoshimura: Flexible all-solid-state switchable mirror on plastic sheet, *Applied Physics Letters*, 92, 041912 (2008).
- [22] K. Yoshimura, S. Bao, N. Uchiyama, H. Matsumoto, T. Kanai, S. Nakabayashi and H. Kanayama: New hydrogen sensor based on sputtered Mg-Ni alloy thin film, *Vacuum*, 83, 699-702 (2008).
- [23] K. Yoshimura, Y. Yamada, S. Bao, K. Tajima and M. Okada: Preparation and characterization of gasochromic switchable-mirror window with practical size, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93, 2138-2142 (2009).

## 執筆者略歴

吉村 和記（よしむら かずき）

1986 年筑波大学物質工学専攻博士課程修了。工学博士。同年名古屋工業技術試験所（現産総研中部センター）入所。サンシャイン計画・ニューサンシャイン計画の基で調光ガラスの研究に従事。1993 年フリッツナー・ハーバー研究所（ドイツ）客員研究員。現在、サステナブルマテリアル研究部門環境応答機能薄膜研究グループ長。2010 年調光ミラーに関する研究で電気化学会会棚橋賞を受賞。2004 年より岐阜大学客員教授を兼務。この研究では、研究の総括および省エネルギー性能の評価を担当。



田嶋 一樹（たじま かずき）

2003年東北大学大学院工学研究科博士後期3年の課程修了、同年産業技術総合研究所特別研究員。2006年産業技術総合研究所入所。博士（工学）。以後、電氣的に駆動するエレクトロクロミック方式調光ミラーの研究開発に従事。現在、サステナブルマテリアル研究部門環境応答機能薄膜研究グループ主任研究員。専門は金属材料（薄膜、バルク）、機能性セラミックス材料、およびそれらを用いたデバイスの物性解析など。最近是有機高分子材料の適用など新規材料開発も行っている。2010年電気化学会棚橋賞受賞。この研究では、エレクトロクロミック型調光ミラーを担当。



山田 保誠（やまだ やすせい）

1998年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程材料機能工学専攻修了。博士（工学）。同年、名古屋工業技術研究所（現産総研中部センター）入所。2005年より1年間スウェーデン・ウプサラ大学オングストローム研究所客員研究員、帰国後1年間企画本部企画主幹を務める。2007年より5年間豊田工業高等専門学校非常勤講師を兼務。現在、サステナブルマテリアル研究部門環境応答機能薄膜研究グループ主任研究員。2010年電気化学会棚橋賞受賞。この研究では、薄膜の評価およびガスクロミック型調光ミラーを担当。



## 査読者との議論

### 議論1 Mg-Ca、Mg-Ba、Mg-Sr系調光ミラー用材料の発見の経緯

質問（村山 宣光：産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門）

Mg-Ca、Mg-Ba、Mg-Sr が調光ミラー用材料として優れた特性を持っていることを発見されたことは、すばらしい成果です。この発見の経緯を教えてください。ある程度予想された上で特性を評価されたのでしょうか。あるいは、セレンディピティ的な発見だったのでしょうか。

回答（山田 保誠）

全く目的の異なった研究ですが、サステナブルマテリアル研究部門の別の研究グループでは、発火しやすいことから扱いにくい金属であるマグネシウムを難燃性にする研究を行っており、マグネシウムにカルシウムを添加することで燃えにくくなるということを発見していました。調光ミラーでは、耐久性を高めるためにマグネシウムの酸化を抑える必要があるのですが、この成果を知って、カルシウムを加えることで燃えにくくなるのであれば、酸化もしにくくなるのではないかと考えたことが、この材料の研究を始めたきっかけです。作製して測定してみると、むしろ光学特性は優れていることがわかり、新材料系の発見につながりました。一般的に、カルシウムはとても活性が強く不安定な金属とされていますから、我々も、もしサステナブルマテリアル研究部門にいないければ、完全に異分野の研究である難燃性マグネシウムのことを知る機会はなく、したがって、元々活性の強いマグネシウムにカルシウムを添加する等という発想は思い浮かばなかったと思います。

### 議論2 Mg-Ca、Mg-Ba、Mg-Sr系調光ミラー用材料の知財戦略

質問（村山 宣光）

Mg-Ca、Mg-Ba、Mg-Sr 系材料の調光ミラー用材料としての知財取得で、可能な範囲で結構ですので、工夫された点や苦労された点を教えてください。

回答（山田 保誠）

調光ミラーに関する特許は、日本国内では我々のグループが基本的な材料特許を取得していますが、欧米では、マグネシウムとほとんどすべての遷移金属との合金薄膜の特許がすでに押さえられてしまっていました。そこで、この制約からのがれるため、マグネシウムとアルカリ土類金属の合金薄膜を用いた調光ミラー材料という形で特許出願しました。その際、これまでの遷移金属の添加に比べてアルカリ土類金属の添加がなぜ有効なのかということ詳しく調べ、その優位性について、単に現象論的に効果を述べるのではなく、理論的な観点から強調するようにしました。これにより、アルカリ土類金属を添加したマグネシウム合金薄膜が、調光ミラー材料として新しいカテゴリーの材料であることを主張しました。どうしても、基になる材料特許を押さえられてしまうと、それを用いたデバイスに関して、いくら構造等に工夫を加えても、ひっかかってしまうということがありますから、基本的な材料特許として独自の材料を申請できた意義は大きいと思います。

### 議論3 全固体型調光ミラーデバイスの新規性

質問（村山 宣光）

全固体型調光ミラーデバイスは、著者らのアイデアなのでしょう。

回答（吉村 和記）

酸化タングステン薄膜等を調光層に用いるこれまでのエレクトロクロミック材料においては、全固体型のデバイスが開発されていましたが、マグネシウム合金薄膜を用いた調光ミラーについてはまだ実現していませんでした。当初、これまでの全固体エレクトロクロミック素子の構造に準じて、調光層、電解質層、対極層と積層して作製したところ、動作するものができませんでした。なぜうまく動かないのかを検討した結果、調光ミラーでは積層順を逆にする方が良いのではないかと思いつき、その構造のデバイスの研究を行ったところ、良好なスイッチングを示すデバイスを開発することができました。この逆積みの多層薄膜構造が我々のオリジナルです。

### 議論4 調光ミラーガラスの実用化に向けた課題の整理

質問（五十嵐 一男：国立高等専門学校機構）

調光ミラーガラスを実用化するための3つの課題として、光学特性の改善、耐久性の改善、エレクトロクロミック方式の開発を挙げていますが、前者二つは、本質的にクリアしなければならない課題である一方、3項目は用途によってであり必ずしも実用化の必要条件ではないように思われますが、その点はいかがでしょう。

回答（吉村 和記）

ガスクロミックだけではどうしても用途が限定されてしまうため、エレクトロクロミック方式でスイッチングできることは実用化を目指す上で重要です。2002年の時点では、マグネシウム合金薄膜系の調光ミラーがエレクトロクロミックでスイッチングできるかどうかは全くわかっておらず、調光ミラーの実用化研究において重要な課題でした。

### 議論5 調光ミラーガラスの実用化にとっての大型化技術の位置付け

質問（五十嵐 一男）

実験室レベルから実使用レベルのサイズに大型化することによって光学特性、耐久性ともに新たな課題が生じることが想定されます。したがって、大型化も実用化にとっては大きな課題と思われるのですが、この論文では一切触れられていません。実用化戦略の中で大型化の位置付けはどのように理解すればいいのでしょうか。

回答（田嶋 一樹）

ガスクロミック方式については、大型化は比較的簡単にできますが、エレクトロクロミック方式ではこれが問題になります。そのあたりの記述を追加しました。

## 議論6 調光ミラーの耐久性

質問（村山 宣光）

調光ミラーの実用化においては、スイッチングの繰り返しに対する耐久性は現在 1,500 回程度とのことです。耐久性を 10,000 回程度まで伸ばす見通しはいかがでしょうか。

回答（山田 保誠）

耐久性については、ごく最近ですが、大きな進展があり、ほとんど劣化しない調光ミラー材料も開発できるかもしれないということがわかってきました。この技術を発展させることで、10,000 回程度の耐久性をもつ材料についても、本年度中に開発できる見通しが立ちました。

## 議論7 調光ミラーガラスの実用化のための取り組み

質問（村山 宣光）

環境調和実験棟にて、調光ミラーガラスの省エネ効果を定量的に実証されましたが、その結果、産業界の調光ミラーガラスのとらえ方はどのように変わりましたか。また、調光ミラーガラスの実用化シナリオとして、企業コンソーシアムの設立等、ご検討されている計画がありましたら教えてください。

回答（吉村 和記）

調光ミラーについては、2003 年頃より特にガラスメーカーの方々に新しい調光材料として注目していただいていたのですが、この論文に書いたような歴史的な経緯もあり、本当に使える材料になるかを見定めたいとされていました。そのような状況の中、実際に建物に実装できる調光ミラーガラス窓を作製し、さらに、他の省エネルギーガラスと比較して大きな冷房負荷低減効果があることを実証したことは、かなりのインパクトをもって受け取っていただきました。現在ガラスメーカーの方でも、具体的に共同研究等に進められないかを検討いただいています。

調光ミラーガラスを、建物用の窓ガラスとして使える実際の商品までもっていくためには、調光ミラー薄膜以外の部分についても、例えば、実際の窓ガラスで使用できるスイッチングシステムの開発やスイッチング用電源供給システムの開発が必要です。現在、そのための研究を行っていますが、これらが解決できればかなり実用化に見通しがつきます。その段階でガラスメーカーにも積極的にアピールを行い、できればコンソーシアムを組んだような形で、実用化研究を加速的に進めていきたいと思っています。