

Simulation Analysis of Effect of Switchable Mirror Windows on heating/cooling loads in residential buildings

調光ミラー窓の導入による住宅建物の暖冷房負荷への熱的効果のシミュレーション

Hiroshi KAKIUCHIDA
垣内田 洋¹Kazuki YOSHIMURA
吉村 和記^{1 ‡}Masato TAZAWA
田澤 真人¹

Abstract

Switchable mirror windows are expected to allow seasonal control of solar irradiation into buildings. We investigated the thermal effect of these windows installed in residential buildings through a year by transient thermal simulations based on realistic models with regard to building structures and living environment. We demonstrated a switching sequence between transparent and mirror states in the simulation, and then quantitatively found that the cooling load was reduced by 30%.

Keywords: switchable mirror, heating and cooling loads, solar shading, heat insurance, TRNSYS, energy-saving building component

キーワード：調光ミラー、暖冷房負荷、遮熱、断熱、TRNSYS、省エネルギー建材

1. はじめに

国内全体の最終エネルギー消費の内、暖冷房で消費される割合は、約 9%とかなり大きい部分を占めている⁽¹⁾。これは、建物の内外を熱が移動して生じるエネルギー損失が主な原因である。建物を通して生じる熱流を建築部位ごとで見ると、開口部(窓)の出入りが非常に大きいことが知られ、単板ガラスの場合、暖房期では 48%が流出し、冷房期では 71%が流入するとされている⁽²⁾。近年、開口部には複層ガラスなどが普及して断熱性が向上してきたが、壁や天井など、その他の部位も格段に断熱性が良くなり、結果的には、未だに開口部が熱の出入りの大きい部位と考えられる。

開口部の熱の出入りが大きい理由には、前述の断熱性が他の部位に比べ劣ること以外に、日射が直接室内に侵入する経路であることが挙げられる。直達日射のエネルギーは膨大で、冷房期での日射の室内への侵入は大きな熱負荷となる。そのため、近年、断熱だけでなく日射遮蔽(遮熱)の重要性が認識され始め、窓メーカーや化学フィルムメー

カーが、遮熱タイプ Low-E 複層ガラスや遮熱フィルムを市場に出し、普及が始まっている⁽³⁾。ただ遮熱を行う場合、冷房負荷は下がるが、暖房負荷は逆に上がるということに注意する必要がある。特に、南に近い方角を向いた窓では、冬の日射の方が夏の日射より強いいため、この方向で遮熱を行うと、透明ガラスと比較した場合、冷房負荷の低減量よりも暖房負荷の増加量の方が大きく、年間を通じた暖冷房負荷は逆に増加してしまう⁽⁴⁾。

この解決に向け、「調光ガラス」と呼ばれる季節に応じて室内への日射透過を適切に制御する、いわゆるパッシブ制御技術が提案されている⁽⁵⁾。この背景の下、冷房期では日射を効率よく遮り、暖房期では日射を透過するよう切り換わる薄膜材料「調光ミラー」の開発が実用化に向けて進められている。本研究では、調光ミラーを開口部に導入した際の、住宅建物の温熱環境をシミュレーションし、通年の暖冷房負荷への効果を分析した。

2. 調光ミラーとは

調光ガラスは、クロモジェニック材料と呼ばれる外部から刺激により光学的性質が可逆的に変わる薄膜材料をコーティングすることで実現することができる。外部刺激により分類すると、エレクトロクロミック、サーモクロミック

*1 産業技術総合研究所構造材料研究部門(〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98)

‡e-mail: k.yoshimura@aist.go.jp

(原稿受付：2016年12月28日、受理日2017年3月17日)

ク、ガスクロミックなど様々なタイプがある^(5,6)。現在実用化されている調光ガラスは、透明から濃い青色に変化するものがほとんどで、太陽光を吸収することで遮熱をコントロールするため、吸収・再放射という形で日射のエネルギーが透過してしまい、十分に遮熱性能を上げることができない。

これに対して、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タイプの薄膜材料で、これを窓ガラスに用いると、吸収ではなく、反射をコントロールすることにより、太陽光の室内への入射が効率的に制御され、冷房負荷を大きく低減する省エネガラスを実現することが可能になる。

この調光ミラー薄膜は1996年にオランダで発見された、新しい調光材料で⁽⁷⁾、(国研)産業技術総合研究所(以下、産総研)では、この調光ミラー薄膜を用いた調光ガラスを、省エネルギー効果に優れた窓ガラスとして実用化するための研究を行っている⁽⁵⁾。

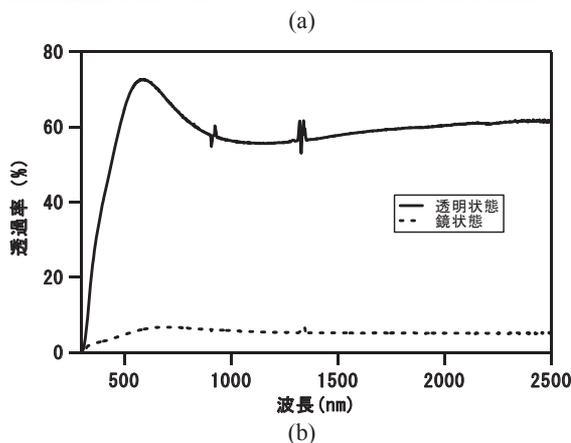
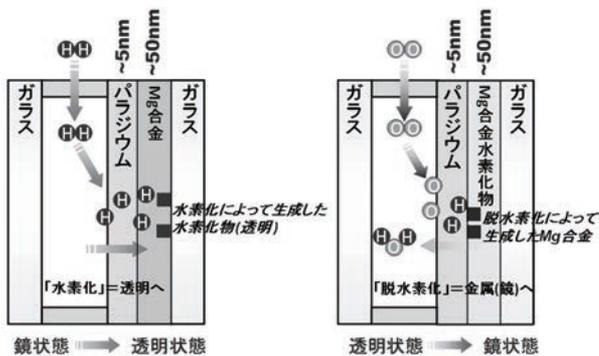


Fig. 1 Scheme of switchable mirror. (a) Dynamics of switchability between mirror and transparent states.

(b) Optical spectral transmittances in mirror and transparent states.

図1 調光ミラーガラスの(a)スイッチング原理と、(b)鏡・透明状態の分光透過率⁽⁸⁾

図1(a)に示すように、調光ミラーガラスは、透明ガラス板上に、厚さ約40nmのマグネシウム合金薄膜(現在はMg-

Y薄膜を使用)と、厚さ約4nmのパラジウム薄膜を蒸着したもので、これをもう一枚の透明ガラスとでペアガラスとした構造を持っている。この内部の空間に水を電気分解して発生した濃度1%程度の希薄な水素を導入すると、マグネシウム合金薄膜がパラジウムの触媒作用で水素化されて金属の状態から絶縁体の状態に変化し、ガラスは鏡状態から透明状態に変わる。この際の透過スペクトルの変化を図1(b)に示す⁽⁸⁾。次に、水を電気分解して発生した酸素を導入すると、酸素が合金薄膜に入った水素をH₂O(水蒸気)として引き抜き、膜は鏡の状態に戻る。このように、希薄な水素と酸素を含むガス(雰囲気)でスイッチングを行うことから、このようなガラスは、ガスクロミック方式の調光ガラスと呼ばれる。

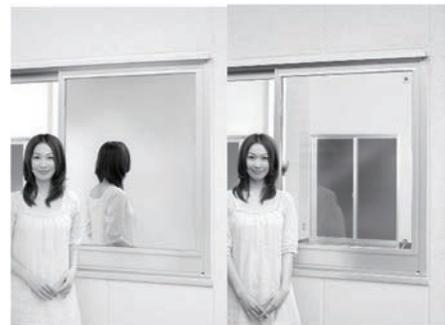
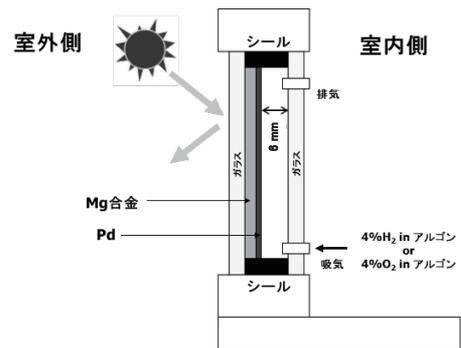


Fig. 2 Snapshots of prototype switchable mirror window during mirror/transparency transformation. 図2 プロトタイプの調光ミラーガラスの構造とスイッチングの様子⁽⁹⁾

産総研では、図2のような構造を持つ実際の建物に取り付けることのできるプロトタイプの調光ミラーガラスを試作し、当研究所が保有する実験棟に取り付けてその効果の検証を行った。本検証での開口部の構成は、室外側のガラスに調光ミラー薄膜を蒸着した大きさ1.2m×0.8mの複層ガラスになっており、透明複層ガラスを入れた部屋と比較して、夏の冷房負荷については、最大30%程度の削減効果があることを実証している⁽⁹⁾。

本論文では、この調光ミラーガラスを実際の住宅に使用した場合に、年間の暖冷房負荷がどの程度削減できるかを明らかにするため、シミュレーションによる解析を行った。

3. シミュレーション条件の設定

本研究では、多数室熱負荷シミュレーションソフト TRNSYS16 (ウィスコンシン大学ソーラーエネルギー研究所)を用い、非定常熱シミュレーションを行った。また、調光ミラーを導入した際の開口部の光学的・熱的データを、WINDOW6.3 (ローレンスバークレイ国立研究所)⁽¹⁰⁾を用いて作成し、これらのデータを TRNSYS に組み込んで、ダイナミック特性が変わる開口部を含めたシミュレーションを可能とした。

本シミュレーションでは、温暖地の6地域(東京)⁽⁴⁾に住むサラリーマン四人家族の戸建住宅を想定し、開口部に従来型の窓ガラスと調光ミラーとを適用した際の建物の熱負荷を計算し比較した。シミュレーションで考慮すべき条件には、建物構成、内部発熱、気象があり、以下、詳細に説明する^(11,12)。

3.1 建物構成

国土交通省国土技術政策総合研究所と(独)建築研究所により進められている「自立循環型住宅開発プロジェクト」にて設定された住宅モデルを用いた。建物は二階建てで、図3に示すように、リビング・ダイニング(LD)、和室、寝室、子供室を南向きに置いた間取りとした⁽¹⁰⁾。

建築部材は、6地域の断熱等級4仕様とし、天井、壁、階間、床には必要な厚みで断熱材を入れ、それぞれの室外との接続部の熱抵抗値(R (m^2K/W)))を、4.11、2.21、2.21、2.44とした。尚、開口部の特性は、4章で記す。



Fig. 3 Floor plan of detached house.

図3 戸建住宅の建物平面図

3.2 建物の熱環境条件(開口部を除く)

室内の熱環境は、居住者の生活様式およびそれに応じた内部発熱スケジュールに依存する。

ここでは、内部発熱スケジュールとして、空調・居住者の発熱・機器発熱・照明設備を考慮した。本シミュレーションでは、家族構成を、世帯主(会社員)・配偶者(専業主婦)・第一子(高校生)・第二子(中学生)の四人と想定し、平日が五日間、休日が二日間の一週間を一年間継続して繰り返す生活スケジュールとし、それに応じた内部発熱スケジュールを設定した。在室時の発熱量は一人当たり100W(顕熱60W、潜熱40W ISO7730に基づく)としている。

空調、機器発熱、照明設備の稼働は、生活スケジュールに合わせて詳細に設定した⁽¹²⁾。例として、表1および2に、それぞれ室内の在室および空調スケジュールを示す。本モデルでは、空調は常時運転とせず、居住者の各部屋での居住状況に合せたスケジュール運転とした。例えば、夜間就寝時では、冷房期は、寝室・子供室で稼働するが、暖房期は稼働させないといった設定である。暖房および冷房が稼働する際は、室内の温湿度が表3に示す値となるように設定した。

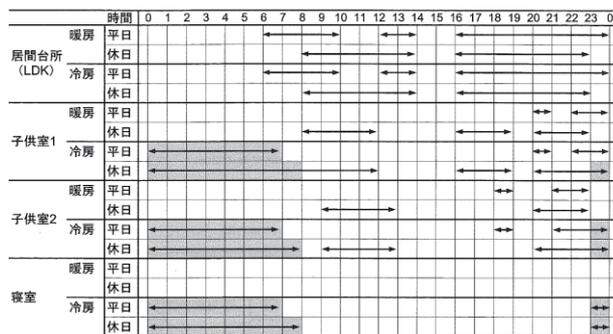
Table 1 Schedule of residents.

表1 在室スケジュール

居室名		在室人数(人)													
		AM 12-13	0-1 13-14	1-2 14-15	2-3 15-16	3-4 16-17	4-5 17-18	5-6 18-19	6-7 19-20	7-8 20-21	8-9 21-22	9-10 22-23	10-11 23-24		
居間台所 (LDK)	平日							1	2	1	1				
	AM							1	2	2	3	3	2	1	1
	PM	1	1												
	休日											3	2	2	2
子供室1	平日			1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1
	AM							2	3	3	4	2	2	1	
	PM	1	1	1	1	1	1	1	1	1					
	休日														
子供室2	平日														
	AM	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1
	PM														
	休日														
寝室	平日														
	AM	2	2	2	2	2	2	2	1						
	PM														
	休日														2

Table 2 Schedule of heater and cooler.

表2 空調スケジュール



* 矢印は空調時間帯、網掛け部分は就寝時を示す。

Table 3 Operation conditions of heater and cooler in building.

表 3 建物内の空調の運転条件

暖房設定		冷房設定	
温度	温度	湿度	備考
20℃	27℃	60%	就寝時以外
	28℃	60%	就寝時

部屋の空気は換気を行い、部屋の換気回数を 0.5 回/h、屋根裏と床下については 10 回/h とし、熱容量 1.2 kJ/m³K の空気の換気を行った。床下空間については、基礎床コンクリート 450 mm があると想定し、その下に土壌（ローム質）1.0 m²K/W の熱抵抗があるとして、その地盤温度を 15℃一定とした。外壁および屋根の日射吸収率はそれぞれ 0.6、0.8 とした。

3.3 気象条件

本シミュレーションは、時々刻々と変わる気象に応じた時系列応答の計算となる。ここでは気象データとして、拡張アメダス(EA)気象データ 1981-2000(日本建築学会)を採用した⁽¹²⁾。計算地点は、地域区分 6 の「東京」で、シミュレーションでは、15 分毎の気象データを用いた時系列応答の計算を行った。図 4 に、上述の気象データより求めた月毎の平均・最高・最低気温および積算日射量を示す。

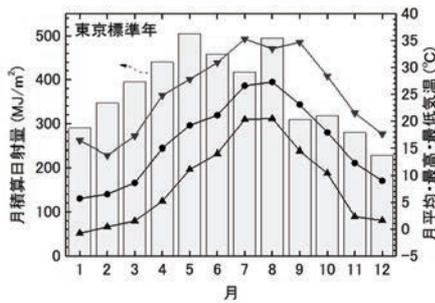


Fig. 4 Average, highest, and lowest temperatures, and total solar irradiation in every month, estimated from the data used for the simulations (Area 6: Tokyo).

図 4 シミュレーションに用いたデータから求めた月別の平均(●)・最低(▲)・最高(▼)気温および積算日射量(6 地域：東京)⁽¹³⁾

4. 開口部のモデル化

開口部は、金属性サッシの複層ガラスの構成とし、窓部 85%、サッシ部 15%とした。従来型の窓ガラスとしては、透明複層ガラスを対象とした。それぞれの日射熱取得係数、熱貫流率は、表 4 の通りである。開口部を通して生じる室内への熱的影響は、基本的に日射透過の直接的な影響と、窓ガラスおよびサッシで吸収された日射熱による赤外放射と対流による間接的な伝達成分、さらに開口部の外側と内側の温度差による熱移動の成分に分類され、本シミュレーションでは全てを考慮し計算を行った。窓面を透過し、

室内に直接侵入した日射エネルギーの内、床面に 50%、その他の面(内壁、天井)には、残り 50%が各面積按分による割合で吸収されるとした。

調光ミラーガラスは、図 2 で示した構成の開口部とした際の性能値(熱貫流率、日射熱取得係数)を、実際の測定で得た調光ミラー薄膜の光学的・熱的物性値⁽⁸⁾を基に計算し、それらの性能値に最も近い開口部データ(熱貫流率、日射熱取得係数、日射透過率、日射反射率、可視透過率)を、WINDOW6.3 に装備されているライブラリーより選んだ。表 4 に記載された ID30003、ID30014、ID2 は、シミュレーションで用いた調光ミラーの透明および鏡状態、そして従来型の窓ガラスの開口部データの ID 番号である⁽¹⁰⁾。

Table 4 Setups of conventional double-glazing and switchable mirror windows, and their optical and thermal properties.

表 4 シミュレーションで用いた従来型の窓(透明複層ガラス)および調光ミラーガラス窓の開口部構成と光学的・熱的特性

	ID	Structure 窓構成	U-value 熱貫流率	g-value 日射熱取得 係数	Solar transmittance 日射透過率	Solar reflectance 日射反射率	Visible transmittance 可視透過率
従来型省エネ窓材	No. 2	3/6/3	3.35	0.782	0.741	0.136	0.819
調光ミラー 透明状態	No. 30003	5.7/5.6/5.7	3.28 (3.28) [*]	0.7 (0.7) [*]	0.607	0.114	0.786
調光ミラー 鏡状態	No. 30014	5.8/7.5/5.8	2.8 (2.75) [*]	0.195 (0.196) [*]	0.025	0.232	0.041

※上記表の括弧内は実測より求めた値

調光ロジックは、表 5 に示すように、日中と夜間で表 4 に示す透明・鏡状態間をスイッチングするように設定した。日中と夜間の判別は、太陽高度 0°を境に行った。一日の中での鏡と透明状態の切り換えロジックは、暖房期と冷房期で逆転させている。これは、今回の調光ミラーの日射熱取得係数と熱貫流率の値を考慮したものである。夏季の日中では、遮熱性と断熱性の両者を高めて冷房負荷を下げることが求められるため、日射熱取得係数および熱貫流率の低い鏡状態とした。これに対し夏季の夜間では、野外の方が室内より涼しくなる傾向があることから、熱貫流率が比較的高い透明状態とすることが妥当と考えた。一方、冬季の日中では、日射を積極的に室内に取り込むことが求められるため、透明状態とし、夜間は、室内の熱が室外に逃げないように断熱性を高めるため、熱貫流率の低い鏡状態となるよう切り換えロジックを設定した。

Table 5 Conditions to transform switchable mirror between mirror and transparent states.

表 5 調光ミラーの鏡・透明の切り換えロジック

	日中	夜間
冷房期	鏡状態	透明状態
暖房期	透明状態	鏡状態

5. シミュレーション結果と考察

5.1 通年の熱負荷計算結果

図5に、戸建住宅の建物全体の暖房、冷房顕熱、冷房潜熱それぞれを負荷を示す。冷房負荷については、調光ミラーモデルは従来型省エネ窓材モデルと比較して、顕熱負荷で40%、全熱負荷で30%抑えられ、調光ミラー(鏡状態)による冷房負荷低減効果が確認された。

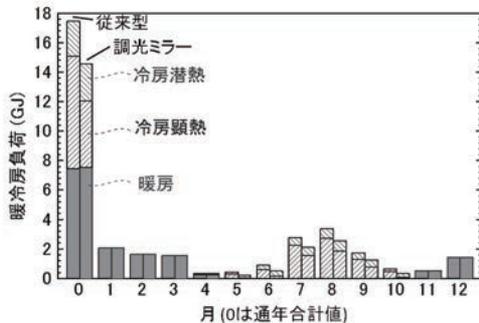


Fig. 5 Monthly and annual heat loads due to heating and cooling in the whole area of detached house where conventional or switchable-mirror window is installed. The load of the cooler is the sum of sensible and latent heat components.

図5 従来型ガラスおよび調光ミラーを窓に施工した戸建住宅の建物全体の暖房、冷房顕熱、冷房潜熱負荷の月毎および通年の計算結果

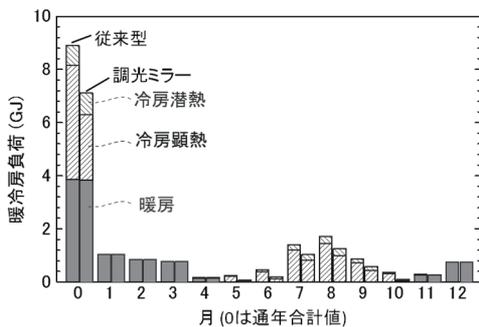


Fig. 6 Monthly and annual heat loads due to heating and cooling in living and dining rooms of detached house where conventional or switchable-mirror window is installed. The load of the cooler is the sum of sensible and latent heat components.

図6 従来型および調光ミラーを窓に施工した戸建住宅のリビング・ダイニングの暖房、冷房顕熱、冷房潜熱負荷の月毎および通年の計算結果

暖房負荷については、調光ミラーモデルは従来型省エネ窓材モデルと比較して僅かに大きくなった。これは、日中の透明状態の日射熱取得係数(0.7)が、従来型省エネ窓材の値(0.782)より小さいことが影響していると考えられる。東

と南に面するLD室の暖房、冷房顕熱、冷房潜熱負荷を図6に示す。暖房負荷では、調光ミラーモデルは従来型省エネ窓材モデルとほぼ等しいのに対し、冷房負荷では、調光ミラーモデルは従来型省エネ窓材モデルと比較して顕熱負荷で40%程度、全熱負荷で35%小さいという結果が得られ、建物全体の負荷の約50%を占めるLD室で、調光ミラーの冷房負荷低減を確認できた。

5.2 暖冷房期の熱データの経時変化

調光ミラーの導入による効果を暖房期と冷房期で、より詳細に示す。図7は、暖房期の代表日五日間のLD室の気温、放射温度(Mean radiant temperature: MRT)、透過日射量、空調負荷を外気温と併せて示した時系列データである。1月16日を除く日射の多い晴天日に着目すると、日中12時前後は、暖房運転がオフとなるようスケジュールした時間帯があり、この自然状態にある時間帯での室内の気温およびMRTは、従来モデルの方が高くなっている。これは、透過日射データで明らかのように、調光ミラー(透明状態)より若干透過率が高い従来モデルの方が、日射の室内への侵入量が多かったことによる。その後、午後から夕方にかけての暖房負荷を見ると、僅かであるが従来型省エネ窓材モデルの方が小さくなっている。一方、夜間0時近傍から朝にかけて暖房がオフとなる時間帯の自然状態では、僅かであるが、調光ミラーモデルの方で室内の気温、MRTの降下幅が小さく出ており、これにより暖房の朝の立ち上がり負荷で調光ミラーの方がやや抑えられたと考えられる。調光ミラーの導入による暖房期での効果は、上記の効果が合わさって、年間の暖房負荷では、正味、調光ミラーの方がやや大きくなるという計算結果になったと考えられる。

図8は、冷房期の代表日五日間のLD室の気温、MRT、透過日射量、空調負荷を外気温と併せて示した時系列データである。透過日射量のデータから明らかのように、調光ミラーの遮熱効果は圧倒的に高く、日中のMRTは、調光ミラーモデルが従来型より2~3℃低い傾向を示している。とくに、日中12時前後、冷房オフ時の自然状態での室温を見ると、調光ミラーモデルの方が1~2℃低く、一方で、冷房オン時の負荷は、調光ミラーモデルと従来型省エネ窓材モデルとを比較して、12時と16時の立ち上がり負荷で30~40%、その他でも10~30%の差が見られ、これが通年で顕著な冷房負荷低減として現れたと考えられる。

6. 終わりに

調光窓の建物熱負荷低減の効果を明らかにするため、国内の温暖地で標準的な住宅建物の開口部に調光ミラーを適用し、鏡と透明状態が日中と夜間で切り換わり、さらにその切り換わりを暖房期と冷房期で逆転させるというロジックを持たせて、通年での暖冷房負荷への効果と、その詳細な熱データを示した。暖房期全体では、従来型と調光ミラー窓(暖房期の日中は透明状態)では、同等の暖房負荷

であるのに対し、冷房期全体では、調光ミラー窓(冷房期の日中は鏡状態)の冷房負荷は、従来型の窓より 30%程度抑えられ、その結果、暖冷房期通年で 15%以上の負荷削減を確認した。

本シミュレーション手法は拡張性が高く、今回の調光ミラーに留まらず、様々な次世代型の省エネルギー建築部材への適用が可能であり、新しい材料の可能性を見積もる上で強力なツールになると期待される。

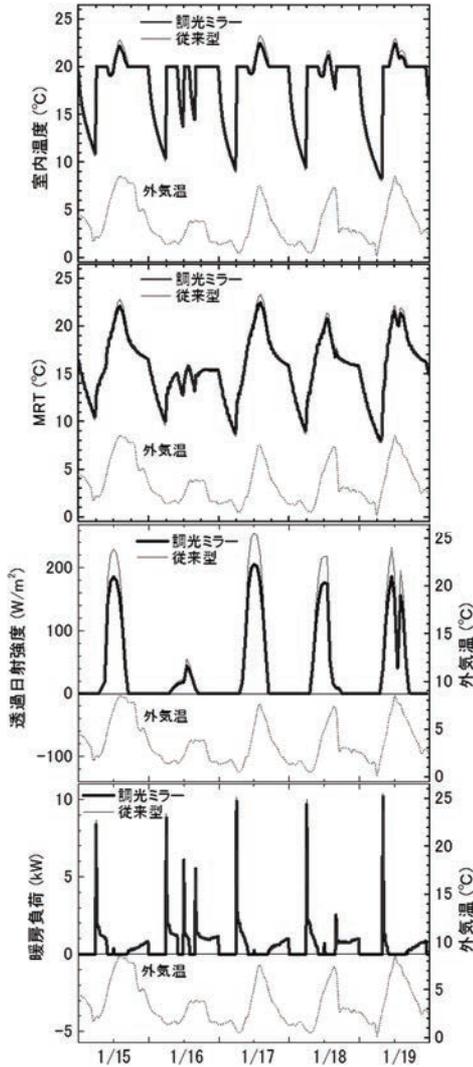


Fig. 7 Outdoor temperature, and room temperature, mean radiant temperature (MRT), solar intensity passing through windows and heating load in LD room for typical five days in cold season.

図7 外気温、LD室内の気温、放射温度(MRT)、透過日射強度、暖房負荷の暖房期5日間の振る舞い(調光ミラーおよび従来型の窓を施工した場合で比較)

今回、広く一般に受け入れられると見込まれる建物立地・生活様式・建物部位を一つ選定してシミュレーションを行ったが、実際には、集合住宅やオフィスといった建物構造、寒冷地や暑熱地といった様々な条件が想定され、そのようなモデルを構築し熱負荷をシミュレーションすることが、調光ミラーの開発方針を考える上で重要であろう。

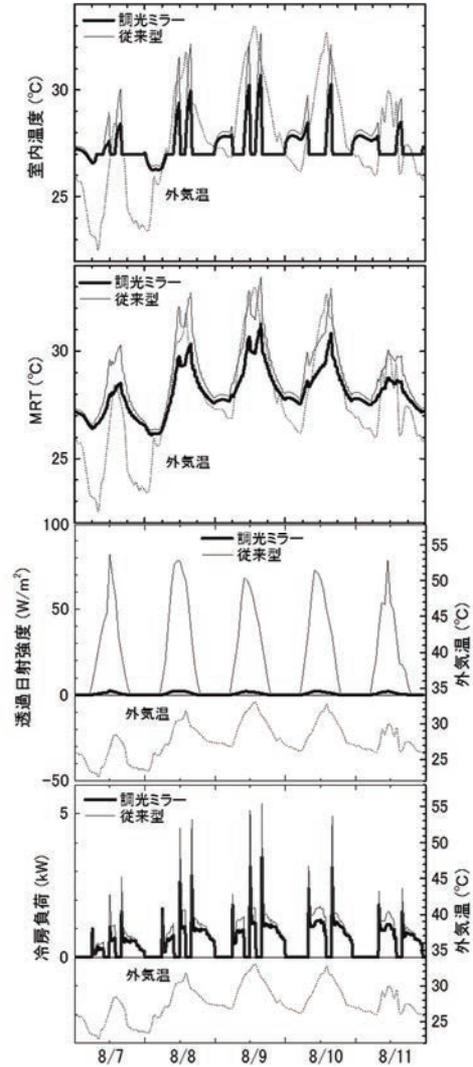


Fig. 8 Outdoor temperature, and room temperature, mean radiant temperature (MRT), solar intensity passing through windows and cooling load in LD room for typical five days in hot season.

図8 外気温、LD室内の気温、放射温度(MRT)、透過日射強度、冷房負荷の冷房期5日間の振る舞い(調光ミラーおよび従来型の窓を施工した場合で比較)

7. 謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものである。本シミュレーションは、著者らの指示の下、(株)アーキテックコンサルティングで行われた。

8. 参考文献

- 1) 資源エネルギー庁, エネルギー白書 2015, <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015pdf/>
- 2) 坂本雄三, 住宅の省エネルギー基準 早わかりガイド, 18-19, (財法)建築環境・省エネルギー機構・(社法)日本建材産業協会.
- 3) 板硝子協会, 複層ガラス/ Low-E 複層ガラス普及率の推移 (2016), http://www.itakyo.or.jp/upload/ecoglass_penetration_20160506.pdf
- 4) K. Yoshimura, Direction dependence of savings on cooling and heating loads by energy efficient windows, *Journal of Energy and Power Engineering*, **8**, 2012-2016 (2014).
- 5) 吉村和記, 田嶋一樹, 山田保誠, 調光ミラーガラスの開発 - 実用化のための研究戦略 -, *シンセシオロジー*, **5**, 253-260 (2012).
- 6) 吉村和記, 金平, 新しい調光ガラス~多機能調光ガラスと調光ミラー~, *太陽エネルギー*, **32**, 9-12 (2006).
- 7) 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).
- 8) Y. Yamada, M. Miura, K. Tajima, M. Okada, and K. Yoshimura, Influence on optical properties and switching durability by introducing Ta intermediate layer in Mg-Y switchable mirrors, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **125**, 133-137 (2014).
- 9) 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).
- 10) THERM 6.3 / WINDOW 6.3 NFRC Simulation Manual, Berkeley Lab WINDOW, <https://windows.lbl.gov/software/NFRC/SimMan/NFRCsim6.3-2013-07-Manual.pdf>
- 11) 自立循環型住宅への設計ガイドラインのケーススタディ一般モデル, (財法)建築環境・省エネルギー機構 (2005).
- 12) 住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説, (財法)建築環境・省エネルギー機構 (2009).
- 13) 拡張アメダス気象データ(1981-2000), (一社法)日本建築学会.