

窓ガラスの光熱性能と技術動向

Optical and thermal performance of window glazing and the latest technical trend

日本板硝子株式会社
Nippon Sheet Glass Co., Ltd.

木下 泰斗
Taito KINOSHITA

キーワード： 光学特性 熱貫流率 日射熱取得率 Low-E ガラス 調光ガラス
keyword: Optical properties U-value g-value Low-E glass Smart glass

1 はじめに

窓の構成材料の主役はガラスである。ガラス建築と呼ばれる総ガラス張りの建築物においては外皮の主役とも言えよう。透明な一枚ガラスが使用されていた過去には窓は建築の熱的弱点などとされていたが、近年は建物外皮の高断熱化のニーズを受けて Low-E 複層ガラスに代表される高断熱ガラスの普及がめざましく、ガラス建築を可能にしてきた。

本報告では、窓ガラスの熱性能を特徴付ける各種板ガラスの分光特性と板ガラスの組み合わせ構成例について述べ、窓ガラスの光熱性能の定義を示し、窓としての熱・エネルギー性能の評価の現状に触れる。また、さらなる高性能化と高機能化を狙った窓ガラスの最近の技術動向について紹介する。

2 窓ガラスの分光特性と光熱性能

2.1 分光特性

各種板ガラスの光熱性能は、可視光、日射、常温熱放射のそれぞれの波長領域での分光特性によって特徴づけられる。図 1 に可視光、日射、常温熱放射のエネルギー分布を、図 2 に各種板ガラスの分光特性を示す。

a) 透明フロート板ガラス

フロート板ガラスは、フロート法により製造される、平滑性に優れたゆがみの少ない板ガラスである。フロート法とは、イギリスの板ガラスメーカー

Pilkington 社によって開発された板ガラス製造方法で、フロートバスと呼ばれる窯の中で熔融スズの上に溶かしたガラスを流し込むと、ガラスがスズ上に浮き、ガラス両面が極めて平滑な板状となる。透明のフロート板ガラスが最も多く使用されるが、後述する熱線吸収板ガラスや高透過ガラスもフロート法により製造される。ガラス素地を送る速度を調節すること

でガラス板厚を変えることができ、現在は 2～25 ミリ厚のものが製造されている。厚い板では約 3m×約 13m の最大級の板ガラスが施工された例もある。

透明フロート板ガラスの分光特性（図 2 a）は、可視光を含む日射の波長領域全体にわたり透過率が高い。また、遠赤外領域では吸収率が高く透過はない。常温での放射率はこの領域の吸収率で表され、 $\varepsilon = 0.9$ 程度となる。

フロート板ガラスの用途は、住宅、店舗、一般建築物、高層建築物などの内外装用、ショーケース、ディスプレイ、水槽や温室、家具、額縁などと幅広い。成膜、合わせ、強化、複層など二次加工用の素板としても多く使われる。

b) 熱線吸収板ガラス

板ガラス組成に鉄、コバルトなどの金属成分を混合することで板ガラスを着色したものである。透明な板ガラスに比べて日射の波長領域の透過率が低くなるため、日射熱の室内への侵入を抑えることができるが、同時に可視光領域の透過率も低くなる。遠赤外領域では透明板ガラスと同様に吸収率が高く、放射率は $\varepsilon = 0.9$ 程度である。

グレー、ブロンズ、グリーン、ブルーなどの色種類が製造されているが、特にグリーン色のものは他に比べると、可視光領域の透過率を高く保ったまま、近赤外線領域の透過率を抑えることができる（図 2 b）。

c) 高透過ガラス

普通の透明板ガラスは、組成中に鉄分などが含まれているために、透明とは言え若干青みがかっている。高透過ガラスは、原料と製造条件を調整することにより可視光領域の分光透過特性をできるだけ均一にした板ガラスである。そのため、ガラスを通して物体の色を正しく見せることができる。色の再現

性が重要となる博物館・美術館の展示ケース、ブティックや呉服店のショーウィンドウ、各種ショールームなどに使用される。また、欧州、特にドイツでは、透明建築と環境建築を両立させるために、高透過ガラスを基板とした合わせガラスや Low-E 複層ガラスをふんだんに用いた建築物が注目を集めている。

d) 熱線反射ガラス

板ガラス表面に酸化物、窒化物、金属などの薄膜を施し、日射領域の反射と吸収の特性を高めたものである。成膜方法には、フロート板ガラスの製造工程中に成膜するものと、真空チャンバ内でスパッタリング法により成膜するものの2通りある。

スパッタリング法によるものは高性能熱線反射ガラスと呼ばれ、薄膜構成の自由度が高く、色味や性能のバリエーションが豊富である。日射の波長領域全体にわたり透過率が低いため日射遮蔽性に優れる

が、可視光透過率も低くなる（図 2 c）ので、採光性が劣り、人工照明に頼ることとなる。冷房負荷低減のために事務所ビルなどに多く使用される。

e) Low-E ガラス

Low-E ガラスは、板ガラス表面に酸化スズや銀などの薄膜を施したもので、この Low-E 膜が遠赤外線領域での反射率を高めるため、熱放射が伝わりにくい。この領域の吸収率、すなわち、放射率は $\varepsilon = 0.05 \sim 0.15$ となる。Low-E とは Low Emissivity の略で低放射を意味する。Low-E ガラスは複層ガラスや真空ガラスに用いられ、Low-E 膜面を中空層に向けて配置することで、中空層での放射による熱伝達を低減し、断熱性を高めることができる。なお、Low-E ガラスでは、薄膜の特殊設計により可視光線を透過させながら近赤外線を透過させるものと反射させるものがある。前者が日射取得型（図 2 d）、後者が日射

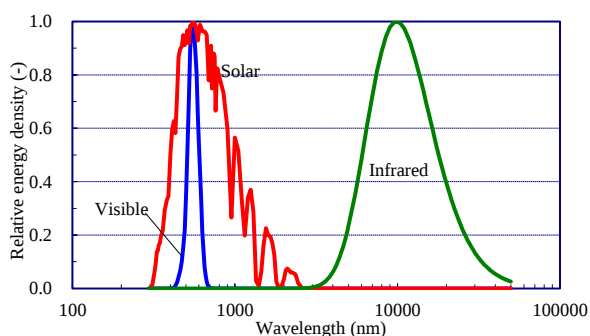
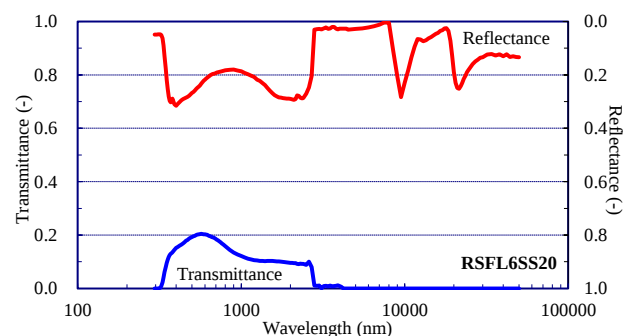
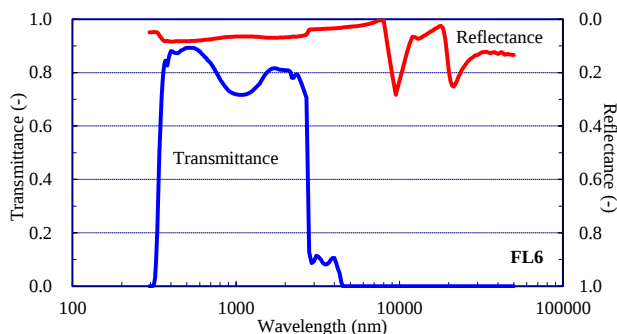


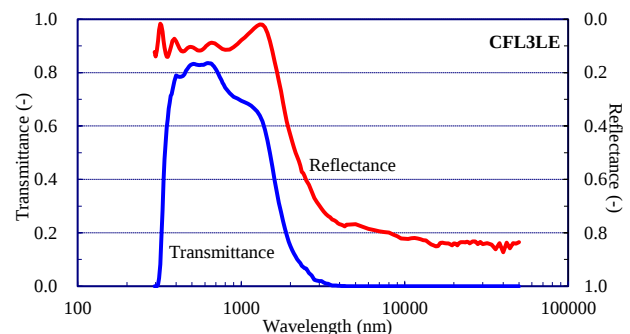
図 1 可視光、日射、常温熱放射のエネルギー分布



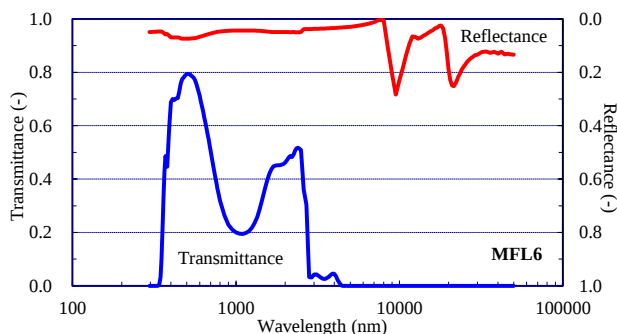
c) 高性能熱線反射ガラス (SS20, 6 ミリ)



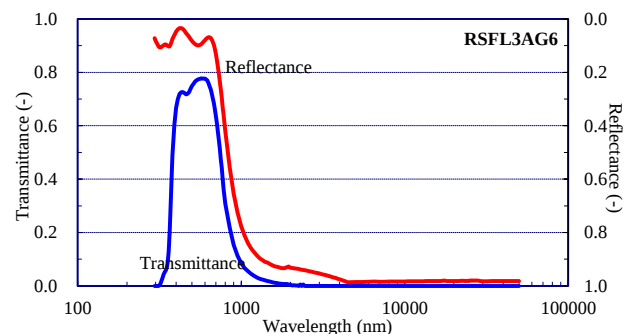
a) 透明フロート板ガラス (6 ミリ)



d) Low-E ガラス (日射取得型, 6 ミリ)



b) 熱線吸収板ガラス (グリーン, 6 ミリ)



e) Low-E ガラス (日射遮蔽型, 6 ミリ)

図 2 各種板ガラスの分光特性

遮蔽型（図 2 e）として使用される。『Low-E ガラスは日射遮蔽性能が高い』と誤解されがちであるが、Low-E の定義から言えば、Low-E 複層ガラスは薄膜の低放射率により断熱性能を高めたものであり、その中に日射取得/日射遮蔽のバリエーションが取り揃えられているのである。日射遮蔽型は冷房負荷低減に、日射取得型は暖房負荷低減に、それぞれ効果的であり、地域、方位、建物用途、住まい方に応じて選択されるべきである。

2.2 光学特性

板ガラスの可視光、日射、紫外線に対する光学特性（透過率、反射率）は JIS 規格¹⁾や ISO 規格²⁾に計算法が規定されており、次式のように対象とする波長領域の板ガラスの分光特性から光源のエネルギー分布を重係数とする加重平均で計算される。

$$\tau_v = \frac{\int_{\lambda=380nm}^{\lambda=780nm} D(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda=380nm}^{\lambda=780nm} D(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} = \frac{\sum_{\lambda=380nm}^{\lambda=780nm} D(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380nm}^{\lambda=780nm} D(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \quad (1)$$

$$\tau_e = \frac{\int_{\lambda=300nm}^{\lambda=2500nm} S(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda=300nm}^{\lambda=2500nm} S(\lambda) d\lambda} = \frac{\sum_{\lambda=300nm}^{\lambda=2500nm} S(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300nm}^{\lambda=2500nm} S(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \quad (2)$$

$$\tau_{UV} = \frac{\int_{\lambda=300nm}^{\lambda=380nm} S(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda=300nm}^{\lambda=380nm} S(\lambda) d\lambda} = \frac{\sum_{\lambda=300nm}^{\lambda=380nm} S(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300nm}^{\lambda=380nm} S(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \quad (3)$$

ここに、 τ_v : 可視光透過率 [-]
 τ_e : 日射透過率 [-]
 τ_{UV} : 紫外線透過率 [-]
 $\tau(\lambda)$: 分光透過率 [-]
 $D(\lambda)$: CIE 昼光 D65 光源スペクトル [-]
 $V(\lambda)$: CIE 明順応標準比視感度 [-]
 $S(\lambda)$: 標準日射スペクトル [-]
 λ : 波長 [nm]
 $\Delta\lambda$: 波長幅 [nm]

複層ガラスの場合、これを構成する各板ガラス間での多重反射を考慮して構成体としての分光特性を求める必要がある（図 3）。 n 枚の板ガラスから成る構成体の分光透過率 $\tau_{1,n}(\lambda)$ 、分光反射率 $\rho_{1,n}(\lambda)$ 及び $\rho'_{n,1}(\lambda)$ は、室外側から数えて i 番目から j 番目までの $(j-i+1)$ 枚のガラス板から成る部分構成体の分光透

過率 $\tau_{ij}(\lambda)$ 、分光反射率 $\rho_{ij}(\lambda)$ 及び $\rho'_{ji}(\lambda)$ を次式により逐次計算することで求めることができる。

$$\tau_{i,j}(\lambda) = \frac{\tau_{i,j-1}(\lambda) \cdot \tau_{j,j}(\lambda)}{1 - \rho_{j,j}(\lambda) \cdot \rho'_{j-1,i}(\lambda)} \quad (4)$$

$$\rho_{i,j}(\lambda) = \rho_{i,j-1}(\lambda) + \frac{\tau_{i,j-1}^2(\lambda) \cdot \rho_{j,j}(\lambda)}{1 - \rho_{j,j}(\lambda) \cdot \rho'_{j-1,i}(\lambda)} \quad (5)$$

$$\rho'_{j,i}(\lambda) = \rho'_{j,j}(\lambda) + \frac{\tau_{j,j}^2(\lambda) \cdot \rho'_{j-1,i}(\lambda)}{1 - \rho'_{j-1,i}(\lambda) \cdot \rho_{j,j}(\lambda)} \quad (6)$$

ここに、 $\tau_{ij}(\lambda)$: $i \sim j$ 番目のガラス板から成る部分構成体の分光透過率 [-]

$\rho_{ij}(\lambda)$: $i \sim j$ 番目のガラス板から成る部分構成体の室外側からの入射に対する分光反射率 [-]

$\rho'_{ji}(\lambda)$: $i \sim j$ 番目のガラス板から成る部分構成体の室内側からの入射に対する分光反射率 [-]

ただし、 $1 \leq i \leq j \leq n$ とし、 $i=j$ のとき、 $\tau_{ij}(\lambda)$ 、 $\rho_{ij}(\lambda)$ 及び $\rho'_{ji}(\lambda)$ は、室外側から j 番目のガラス板の分光透過率及び分光反射率とする。

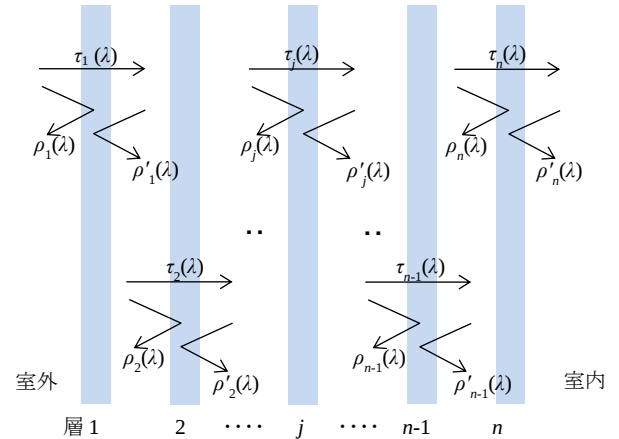


図 3 n 枚の板ガラスから成る複層ガラス

2.3 断熱性能

建築用板ガラスの断熱性能は一般に熱貫流率（U-value, Thermal transmittance）を用いて評価され、その算定には日本では JIS R 3107³⁾、欧州では EN 673⁴⁾、ISO 10292⁵⁾、米国では ASHRAE Standard 142⁶⁾、ISO 15099⁷⁾などに規定される方法が用いられる。熱貫流率とは、室内外気温差により壁体を通過する単位時間・単位面積・単位気温差あたりの熱量を表すので、これが小さいものほど壁体を通過する熱量が少なく断熱性能が高い。上記の各規格の算定式(式 7)によると、熱貫流率は室内外間の一次元伝熱モデルにおいて、室内外の表面熱伝達抵抗、板ガラスの熱

伝導抵抗，中空層の熱抵抗など，全ての熱抵抗の合計の逆数で表される。したがって，室内外間のいずれかの熱抵抗を大きくすることで，板ガラスの熱貫流率を小さく，すなわち，断熱性能を良くできることが明らかである。

$$U_g = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum \frac{d_g}{\lambda_g} + \sum \frac{1}{h_a} + \frac{1}{h_i}} \quad (7)$$

ここに， U_g ：ガラスの熱貫流率 [W/m²K]
 h_e ：室外側表面熱伝達係数 [W/m²K]
 h_i ：室内側表面熱伝達係数 [W/m²K]
 h_a ：中空層熱コンダクタンス [W/m²K]
 d_g ：板ガラス厚み [m]
 λ_g ：板ガラス熱伝導率 [W/mK]

一般的な複層ガラスは，二枚の板ガラスの間に中空層を設け，空気の熱抵抗を利用して断熱性能を高めたものであるが，中空層の伝導・対流・放射の熱伝達抵抗を大きくすることで，さらに断熱性能を向上させることが可能である。表1に高断熱ガラスの例を示す。このような高断熱性能を持つガラスは，暖房エネルギーを削減するだけでなく，特に冬期に窓際の冷放射やコールドドラフト，窓ガラス面の結露などを解消して，室内温熱快適性を向上することができる。

2.4 日射取得/日射遮蔽性能

建築用板ガラスの日射取得/日射遮蔽性能は一般に日射熱取得率（日射侵入率，Solar Heat Gain Coefficient (SHGC), Total solar energy transmittance）で表され，日本では JIS R 3106¹⁾，欧州では EN 410⁸⁾，ISO 9050²⁾，米国では ASHRAE Standard 142⁶⁾，ISO 15099⁷⁾などにその試験方法と算定方法が規定されている（式 8,9）。

日射熱取得率は，窓ガラスに入射する日射熱に対する室内へ侵入する熱の比で表される。ここで，室内へ侵入する熱とは，ガラスを直接透過する成分とガラスに吸収されて室内側に再放出される成分を合計したものである。なお，各規格ではガラス面に対して垂直に日射が入射する条件を想定していることに注意されたい。

$$\eta = \tau_e + \sum_j N_j \cdot \alpha_{e,j} \quad (8)$$

表1 高断熱ガラスの例

三層複層ガラス	三枚の板ガラスを使い，熱抵抗となる中空層を二つ設けた複層ガラス。
Low-E 複層ガラス	Low-E とは Low Emissivity の略で低放射を意味する。Low-E ガラスは板ガラス表面に酸化スズや銀などの薄膜を施し，常温物体の熱放射領域である遠赤外線の反射率を高めたもので，これを中空層に面する板ガラス表面の一方（または両方）に用いることで，放射による熱伝達を低減し，普通の複層ガラスよりも断熱性能を向上させることができる。
ガス入り複層ガラス	空気の代わりにアルゴン，クリプトンなど熱伝導率が小さい気体を中空層に封入した複層ガラス。伝導による熱伝達を低減する。通常 Low-E ガラスと併用され，放射による熱伝達も低減する。
真空ガラス	中空層を真空にすることで，伝導と対流による熱伝達を除去することができる。真空の場合，間隙の距離は熱性能に無関係となるため，中空層を極めて薄くすることができる。これにも Low-E ガラスが使われ，ガラス厚が薄くても，高い断熱性が得られる。
真空複層ガラス	真空ガラスと単板ガラスとを複合ガラス化したものの。3枚の板ガラスの中空層の一方を真空層，他方をアルゴンガス層とし，Low-E ガラスを使用したものは，外壁並みの断熱性能を実現する。

$$N_j = \frac{R_e + \sum_{k=1}^j R_{k-1,k}}{R_e + \sum_{k=1}^n R_{k-1,k} + R_i} \quad (9)$$

ここに， η ：日射熱取得率 [-]
 n ：複層ガラスを構成する板ガラスの層数
 τ_e ：日射透過率 [-]
 $\alpha_{e,j}$ ：層 j のガラスの日射吸収率 [-]
 N_j ：層 j のガラスの吸収日射熱が室内側へ再放出される割合 [-]
 R_e ：室外側表面熱伝達抵抗 [m²K/W]
 R_i ：室内側表面熱伝達抵抗 [m²K/W]
 $R_{k-1,k}$ ：層 $k-1$ と層 k の間の中空層の熱抵抗 [m²K/W]

複層ガラスの場合には，構成する板ガラスの組み合わせ方によって，日射熱取得率に変化を持たせることができる。熱線吸収板ガラスや熱線反射ガラス，

Low-E ガラスなど日射吸収の大きいガラスを室外側へ配置すると、中空層が熱抵抗となるために、室外側ガラスで吸収された日射熱は室内へ伝わりにくく、日射熱取得率は小さくなる。逆に、日射吸収の大きいガラスを室内側に配置すると、吸収された日射熱は室外へ逃げにくく、日射熱取得率が大きくなる。特に、Low-E 複層ガラスでは中空層の熱抵抗が大きいために、この変化が著しい。

日射熱取得率の値が小さいもののほど冷房エネルギー低減に効果的である。逆に日射熱取得率が大きいものは、日射取得型の窓ガラスとして寒冷地や北面など暖房効果を重視する部屋の窓で使用されるほか、ブラインドや庇などの日射遮蔽物を併用することで季節に応じて日射遮蔽性をコントロールすることが可能である。表 2 に日本国内の代表的ガラス品種の光熱性能⁹⁾を示す。

3 窓としての総合評価

3.1 窓としての熱性能

前節まではガラス中央部の熱性能について述べたが、窓全体としての熱性能はフレーム、ガラス、日射遮蔽物の組み合わせにより評価しなければならない。この計算法の JIS 規格として、熱貫流率には JIS A 2102^{10),11)}、日射熱取得率には JIS A 2103¹²⁾がある。

JIS A 2102 は、国際規格 ISO 10077^{13),14)}を原案として JIS 化され、窓とドアの熱貫流率の簡易計算法を規定する。第 1 部¹⁰⁾では一般的な計算法と計算に用いる数表が与えられ、第 2 部¹¹⁾ではフレーム部の熱性能の数値計算法が規定されている。各種仕様のガラスとフレームからなる窓・ドアを適用範囲としているが、フレームに支持されないカーテンウォールや特殊ファザードは適用範囲外で、日射、漏気、結露、二重窓の換気などの影響は考慮されない。計算の基礎式は第 1 部に規定されており、ガラス部・フレーム部それぞれの熱貫流率の面積加重平均にガラスとフレームの接合部の貫流熱を加味して算出される(式 10)。ガラス部の熱貫流率は JIS R 3107 により、フレーム部の熱貫流率と接合部の線熱貫流率は第 2 部により、それぞれ算出することとされているが、代表的なガラス品種・フレーム種類についてはそれらの性能値を整理した数表が第 1 部の附属書に与えられている。元規格の ISO 10077 では屋外シャッターの密閉性によって付加熱抵抗が整理されているが、日本の雨戸やシャッターに適用するには根拠不十分であること、日本では和障子やカーテンやブラインドなどその他の日射遮蔽物も広く普及していることから、JIS 化の際に屋外シャッターの考慮を除外することとなった。その後、佐久間ら¹⁵⁾によって数多く

表 2 代表的ガラス品種の光熱性能⁹⁾

ガラス構成・種別			熱貫流率 [W/m ² K]	日射熱取得率 [-]	可視光透過率 [%]
単板	3	透明	6.0	0.88	90.1
	6	熱線吸収	5.8	0.63	75.5
	6	熱線反射	4.6	0.22	8.0
複層	3+A12+3	透明	2.9	0.79	81.8
	6+A12+6	熱線吸収	2.9	0.51	67.4
	6+A12+6	熱線反射	2.3	0.15	7.3
三層複層	3+A12+3+A12+3	透明	1.9	0.72	74.7
Low-E 複層		日射取得型	1.9	0.74	75.5
	3+A12+3	日射遮蔽型	1.6	0.39	69.7
ガス入り複層		日射取得型	1.6	0.74	75.5
	3+Ar12+3	日射遮蔽型	1.3	0.39	69.7
真空		日射取得型	1.4	0.66	75.5
	3+V+3	日射遮蔽型	1.0	0.49	70.8
真空複層		日射取得型	0.85	0.58	63.8
	3+Ar12+3+V+3	日射遮蔽型	0.76	0.34	58.2

※ JIS R 3106, JIS R 3107 による。ガラス構成・種別の数値はガラス厚・中空層厚(ミリ)、A: 空気層, Ar: アルゴンガス層, V: 真空層, 熱線吸収はグリーン色, 熱線反射はシルバー系 SS8

の日射遮蔽物の有無状態での熱貫流率測定結果から各種遮蔽物の付加熱抵抗の値が整理されており、JIS規格に反映されることが待たれる。

$$U_w = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_f U_f + \sum l_g \Psi_g}{\sum A_g + \sum A_f} \quad (10)$$

ここに、 U_w : 窓の熱貫流率 [W/m²K]
 U_g : ガラス部の熱貫流率 [W/m²K]
 U_f : フレーム部の熱貫流率 [W/m²K]
 A_g : ガラス部の面積 [m²]
 A_f : フレーム部の面積 [m²]
 Ψ_g : ガラスとフレームの接合部の線熱貫流率 [W/mK]
 l_g : ガラスとフレームの接合部の周長[m]

一方の JIS A 2103 は、国際規格 ISO 15099 を参考にしつつも日本独自の規格として開発され、窓とドアの日射熱取得率の計算法を規定し、各種仕様のガラス・フレーム・日射遮蔽物からなる窓およびドアを適用範囲とする。計算の基礎式（式 11）は、JIS A 2102 と同様に基本的にはガラス部とフレーム部の面

積加重平均で規定されるが、ガラスと日射遮蔽物との組み合わせをグレージング複合体と定義し、その層間の多重反射や付加熱抵抗を考慮した計算法となっており、特に、ベネシャンプラインドの場合には、スラットの断面形状と反射性状とからブラインドの層としての分光特性を求める計算が複雑となる。そこで、任意のガラス構成と日射遮蔽物を組み合わせたグレージング複合体としての日射熱取得率の計算プログラムを開発した（図 3）。本プログラムでは JIS A 2103 の標準条件以外にブラインドスラット角度や日射入射角度を変更した条件での日射熱取得率も算定することができる。

$$\eta_w = \frac{\sum \eta_{glz} A_{glz} + \sum \eta_f A_f}{\sum A_{glz} + \sum A_f} \quad (11)$$

ここに、 η_w : 窓の日射熱取得率 [-]
 η_{glz} : グレージング複合体の日射熱取得 [-]
 η_f : フレーム部の日射熱取得率 [-]
 A_{glz} : グレージング複合体の面積 [m²]
 A_f : フレーム部の面積 [m²]

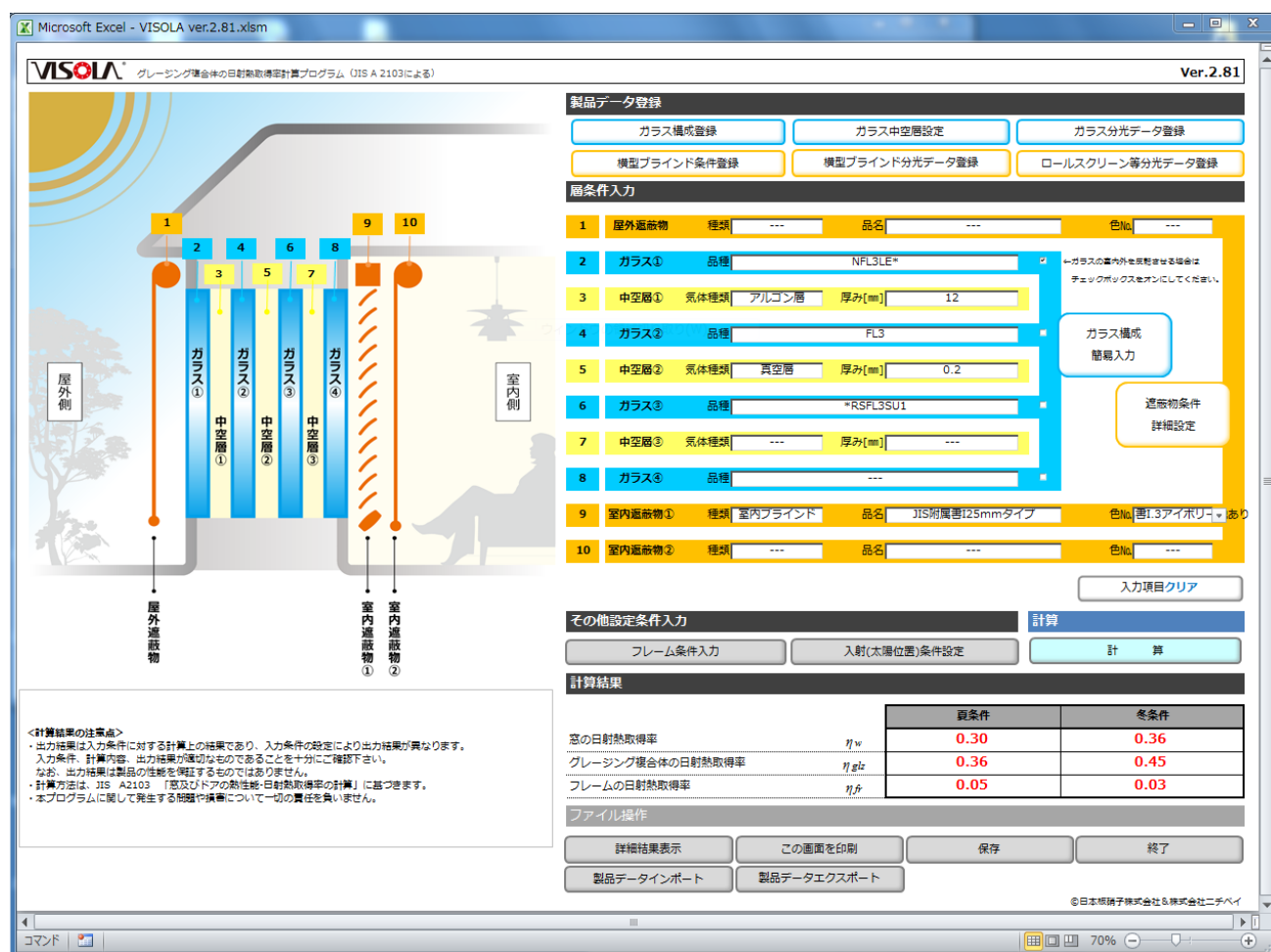


図 3 グレージング複合体の日射熱取得率計算プログラム"VISOLA"メイン画面

3.2 窓のエネルギー性能

窓の熱性能は、前述の断熱性能（熱貫流率）と日射取得／日射遮蔽性能（日射熱取得率）のほかに気密性能（漏気率）で評価されるが、近年は、これら熱性能を熱負荷レベルで統合化した窓のエネルギー性能による評価が欧州などで導入され、これにより窓製品の格付けが行われている。例えば、欧州では EWERS（European Window Energy Rating System）、英国では BFRC（British Fenestration Rating Council）、カナダでは CSA（Canadian Standard Association）において、熱貫流率と日射熱取得率と漏気率の線形結合の形で窓のエネルギー性能の評価式が規定され、各項の係数には国や地域の気象と建物と暖冷房使用条件を考慮した値が設定されている。また、これらの既存規格をもとに窓のエネルギー性能評価手法に関する国際規格 ISO 18292¹⁶⁾が 2011 年に発行され、その後、欧州各国ではこの ISO 規格による窓のエネルギー性能評価に基づいた窓製品の格付けとラベリングが普及している。日本国内においては、ISO 18292 による窓のエネルギー性能の評価を日本の住宅の窓製品に適用することを目的として、日本の気象と標準住宅に適した評価手法の構築に関する研究を行い、（一社）日本建材・住宅設備産業協会内に設置された「窓のエネルギー性能評価法原案作成分科会」において 2014 年度から三ヶ年で窓のエネルギー性能評価法の JIS 原案作成を完了し、JIS 発行を待っているところである。なお、日本では Window Energy Performance を略して"WEP"と呼んでいる。

この JIS 案による窓のエネルギー性能の例として表 3 に試算条件を、図 4 に試算結果を示す¹⁷⁾。

4 窓ガラスの光熱性能の技術動向

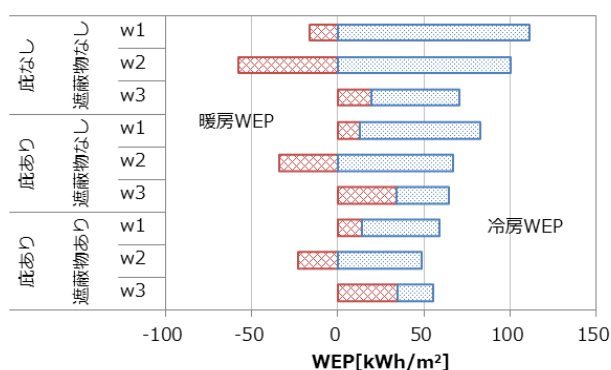
4.1 高断熱化

最近の窓ガラス製品では、表 1 の複数の方法を組み合わせることで断熱性能の向上が図られている。欧州、特にドイツでは最も普及型とされるアルゴンガス入り Low-E 三層複層ガラス（中空層 16 ミリ×2）で熱貫流率 $0.6\text{W/m}^2\text{K}$ 、クリプトンガスを用いたものが $0.5\text{W/m}^2\text{K}$ を達成している。また、熱貫流率の算定法を定める欧州規格 EN 673⁴⁾では、中空層ガス種類としてアルゴン・クリプトンに留まらずキセノンの熱物性値まで記載されており、さらなる高断熱化を視野に入れていることが窺える。

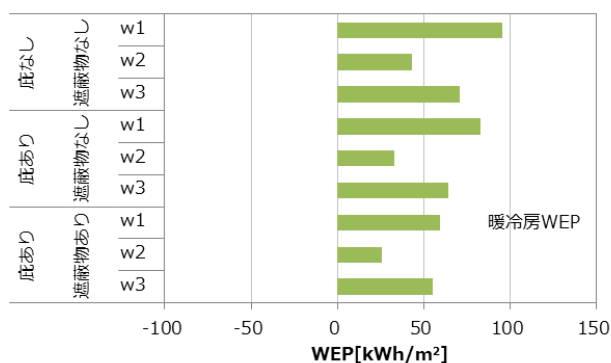
理論上はさらに多層化することで高断熱化が可能ではあるが、ガラスの総厚と重量が大きくなり、透

表 3 窓のエネルギー性能の試算条件¹⁷⁾

標準建物	省エネ基準検討用戸建住宅モデル
気象データ	6 地域（岡山）
暖冷房	暖房 20℃，冷房 28℃
窓寸法	W1650×H2100
窓方位	8 方位
窓種類と熱性能	w1：アルミフレーム＋透明複層ガラス $U_w=4.0\text{W/m}^2\text{K}$ ， $g_w=0.63$ ，気密 A-4 等級 w2：アルミ樹脂複合フレーム＋Low-E 複層ガラス（日射取得型） $U_w=2.3\text{W/m}^2\text{K}$ ， $g_w=0.51$ ，気密 A-4 等級 w3：アルミ樹脂複合フレーム＋Low-E 複層ガラス（日射遮蔽型） $U_w=2.3\text{W/m}^2\text{K}$ ， $g_w=0.32$ ，気密 A-4 等級
庇	なし あり（窓上端から 480mm，出寸法 910mm）
日射遮蔽物	なし あり（室内ブラインド白色，季節に応じて開閉）



a) 暖房，冷房



b) 暖冷房合計

図 4 年間合計の窓のエネルギー性能¹⁷⁾

6 地域（岡山），南面

過率が低くなるため、実用的には限りがある。そこで、近年は、超薄板ガラスやPET フィルムを用いて中空層を多層に仕切った複層ガラス製品、Low-E 膜を中空層内だけでなく室内側表面に配して室内環境との放射熱伝達を低減した Low-E 複層ガラス製品、真空層を支えるピラー配列の数を減らして熱橋現象を抑制した真空ガラス製品（図 5）など、新たな高断熱化の技術を採用した窓ガラスが開発され上市されている。

4.2 高透過と日射遮蔽の両立

過去には日射遮蔽に優れるハーフミラー状の高性能熱線反射ガラスが事務所ビル・商業ビルなどを中心に多用されてきたが、近年はガラス本来の透明感と日射遮蔽を両立する窓ガラス品種が好まれる傾向にある。図 6 に各種ガラスの可視光透過率と日射熱取得率の分布を示す。従来のガラス品種である透明・熱線吸収・熱線反射・高性能熱線反射では、可視光透過率と日射熱取得率はほぼ比例関係にある。つまり、透明性の高いガラス品種では日射熱取得が大きく、日射遮蔽性の良いものでは可視光透過が少なく室内が暗くなりがちとなる。可視光域が日射の波長域に含まれるため、これは不可避なことであつた。しかし、近年、薄膜の特殊設計により可視光を透過させながら近赤外線を反射または吸収させることが可能となり、Low-E ガラスでは可視光透過率の比較的高い範囲に様々な日射熱取得率のガラス品種が数多く分布している。現在、日射熱取得率を可視光透過率の 1/2 程度に抑えたものが透明性と日射遮蔽性を最も両立するものとして知られている。

なお、Low-E ガラス製品では、例えば可視光透過率 50%、日射熱取得率 0.25 の場合は「〇〇〇5025」というように、可視光透過率と日射熱取得率の値を併記する製品名称が多く見られる。

4.3 日射調光

図 6 に示したように、近年の Low-E ガラスでは可視光透過率を高く保ったまま、日射取得型／日射遮蔽型のバリエーションが豊富に取り揃えられているが、日射熱取得率が不変であるために、特に住宅において日射遮蔽型のものは夏涼しいが冬には室内で日射の暖かさを得られないという声も少なくない。このようなニーズに応えるために、日射熱取得率を可逆的に変化させることのできる調光機能をもつ窓

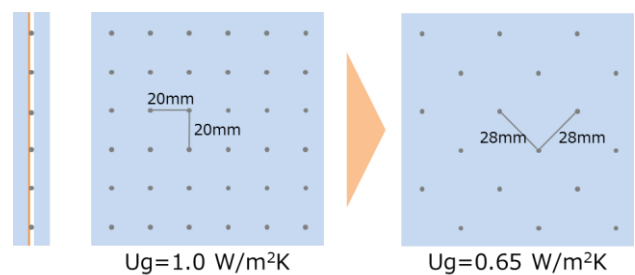


図 5 真空ガラスの高断熱化

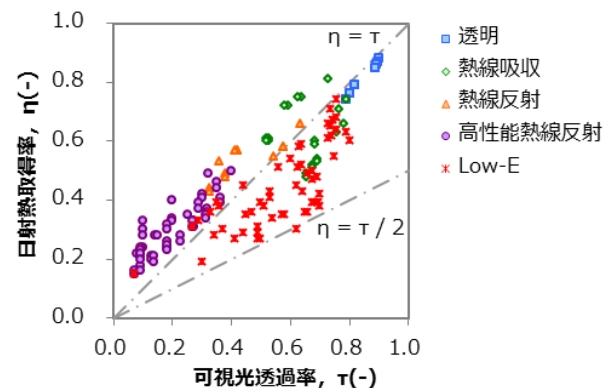


図 6 各種ガラスの可視光透過率と日射熱取得率の分布

ガラスの研究開発が数多く進められている。ここではこの一例を紹介する。

a) サーモトロピックガラス (Thermotropic Glass)¹⁸⁾

普段は透明であるが、ガラス温度が上昇すると白濁して日射遮蔽し、常温になると再び透明に戻るように、温度によって自律的に可逆変化する窓ガラスが開発された（写真 1）。二枚の板ガラス間に 0.5mm 厚のハイドロゲルを封入したもので自律応答型調光ガラスまたはサーモトロピックガラスと呼ばれる。白濁開始温度は任意に設計可能で、白濁時には日射熱取得率を約 35%に抑える。さらに紫外線カットの効果も備える。これと透明板ガラスや Low-E ガラスとを組み合わせることで、断熱性能も併せ持たせることができ、実際の建築物を用いた省エネルギー効果の検証が行われている¹⁹⁾。図 7 に透明時・白濁時の分光透過率・分光反射率特性を示す。

b) サーモクロミックガラス (Thermochromic Glass)

サーモクロミックガラスは、サーモクロミック機能を持つフィルムを 2 枚のフロート板ガラスで挟み込んで接着した合わせガラス構造としたものであり、ガラス温度によって光学的性質が可逆的に変化する。サーモクロミック材料には、ニッケル金属錯体を添

加した材料が使用されており、金属の添加量によって光学的性質の変化する温度を室温以下から高温まで自由に調節することができる。図 8 にサーモクロミック調光ガラスの可視光特性、日射特性の温度依存性を示す²⁰⁾。

c) ガスクロミックガラス (Gaschromic Glass)²⁴⁾

板ガラスにマグネシウム・ニッケル合金やマグネシウム・チタン合金の薄膜をスパッタ成膜し、これを中空層側に配置した複層ガラス構成となっている。中空層に低濃度の水素を含むガス、あるいは酸素を含むガスを導入することで、透明な状態と鏡の状態をスイッチングできる。2006年産業技術総合研究所が実用寸法の試作品の開発に成功し、建築物や乗り物の窓ガラスに用いると冷房エネルギーを30%以上削減することが可能と試算されている。

d) エレクトロクロミックガラス (Electrochromic Glass)²¹⁾

窓の透明な視界を維持したまま、窓からの昼光や日射の入射を動的に制御することができる。エレクトロクロミック材料は、ガラスやプラスチックに蒸着が可能な多層積層膜であり、導電膜・エレクトロクロミック層・イオン伝導層からなる。導電膜に加える電圧の向きにより、紺青と透明の状態の可逆変化を起こす。写真2に、透明と着色の状態の様子を示す。

e) SPD ガラス (Suspended Particle Device Glass)²²⁾

透明導電層がコーティングされた二枚の PET (ポリエチレンテレフタレート) のフィルム間に配向粒子を含ませた液滴を配置した調光フィルムを二枚の板ガラスで接着した合わせガラス構成となっている。電圧を負荷しないときには配向粒子が無秩序な状態となり入射光は粒子に吸収されて着色し、電圧を負荷すると粒子が整列して入射光が透過し透明となるしくみである。また、着色と透明の状態の切り替えが瞬時～数秒と、応答の速さが特徴的である。

5 まとめ

本報告では、各種板ガラスの分光特性の特徴と板ガラスの組み合わせ構成例から窓ガラスの断熱性能と日射取得/日射遮蔽性能を示し、窓としての熱とエネルギーの性能評価の現状について述べた。さらに、光熱性能に関する最近の窓ガラスの技術動向から新しい超高断熱ガラスや日射調光ガラスを紹介した。



写真 1 サーマトロピックガラスの施工例¹⁸⁾

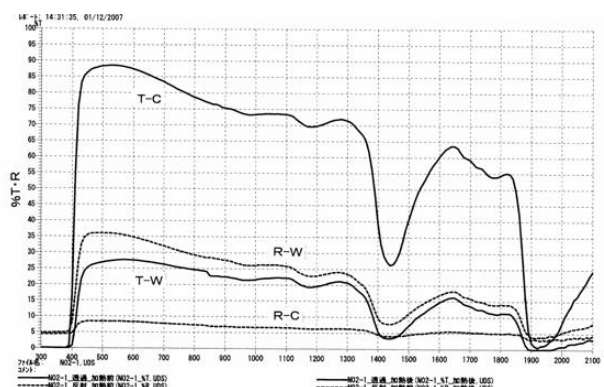


図 7 サーマトロピックガラスの分光特性¹⁸⁾

T-C：透明時透過率，T-W：白濁時透過率，R-C：透明時反射率，
R-W：白濁時反射率

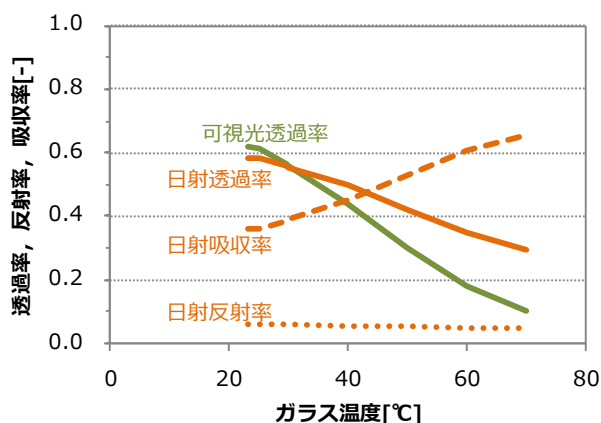


図 8 サーマクロミック調光ガラス 6 ミリの光学特性の温度依存性²⁰⁾

これらのことが、ペリメータ空間の省エネルギーと室内環境の向上を目指した建築外皮及び建築設備の設計の一助となれば幸いである。

参考文献：

- 1) JIS R 3106:1998, 板ガラス類の透過率・反射率・放射率・日射熱取得率の試験方法
- 2) ISO 9050:2003, Glass in building - Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors
- 3) JIS R 3107:1998, 板ガラス類の熱抵抗および建築における熱貫流率の算定方法
- 4) EN 673:2011, Glass in building - Determination of thermal transmittance (U value) - Calculation method
- 5) ISO 10292:1994, Glass in building - Calculation of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing
- 6) ASHRAE standard 142 draft, Standard Method for Determining and Expressing the Heat Transfer and Total Optical Properties of Fenestration Products
- 7) ISO 15099:2003, Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations
- 8) EN 410:2011, Glass in building - Determination of luminous and solar characteristics of glazing
- 9) ガラス建材総合カタログ, 日本板硝子
- 10) JIS A 2102-1:2011, 窓及びドアの熱性能－熱貫流率の計算－第1部：一般
- 11) JIS A 2102-2:2011, 窓及びドアの熱性能－熱貫流率の計算－第2部：フレームの数値計算方法
- 12) JIS A 2103:2014, 窓及びドアの熱性能－日射熱取得率の計算
- 13) ISO 10077-1:2006, Thermal performance of windows, doors and shutters -- Calculation of thermal transmittance -- Part 1: General
- 14) ISO 10077-2:2003, Thermal performance of windows, doors and shutters -- Calculation of thermal transmittance -- Part 2: Numerical method for frames
- 15) 佐久間英二：窓に付属する日射遮蔽物の断熱性能に関する研究, 鹿児島大学博士学位論文, 2017年3月
- 16) ISO 18292:2011, Energy performance of fenestration systems for residential buildings -- Calculation procedure
- 17) 木下泰斗ほか：窓のエネルギー性能の評価法の日本の住宅への適用に関する研究, 日本建築学会第46回熱シンポジウム, 2016.10
- 18) www.afty.jp, 自律応答型調光ガラス技術資料, アフィニティー社
- 19) 井上隆：自律応答型調光ガラスによる省エネルギー, 建築雑誌, Vol.120, No.1535, 2005年7月
- 20) 木下泰斗, 塩崎智子, 西川祥子：拡張アメダス気象データとユーティリゼーションファクタ法を用いたサーモクロミック調光ガラス窓の住宅暖冷房負荷計算, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.1089-1092, 2016
- 21) エネルギー効率の良いエレクトロクロミック窓, NEDO 海外レポート, No.996, pp.78-83, 2007年3月
- 22) 東田修ほか：アクティブ型調光ガラス用フィルム, 日立化成テクニカルレポート, No.49, pp.7-10, 2007年



日射取得時（透明）



日射遮蔽時（紺青）

写真2 エレクトロクロミックガラス（室内視）

米国 LBNL 実証棟にて。右写真で欄間ガラスが調光されている状態。