

窓用遮熱コーティング材の熱光学特性および視覚的特性の 経時変化に関する基礎的研究

富田 泰宇 添田 智美
佐々木 仁 佐々木 聡

概 要

窓面からの日射熱取得を抑制し空調負荷を低減させる技術として窓用遮熱コーティング材が使用されている。しかし、窓用遮熱コーティング材に要求される性能の耐久性に関しては得られている知見が少ない。本稿ではどのような測定項目が窓用遮熱コーティング材の各性能の耐久性評価に有効かを検討するため、熱光学特性および視覚的特性に関する測定項目を設定し、促進耐候性試験結果および屋外暴露試験結果の検討を行った。実験結果により、日射透過率の変化は主に近赤外線透過率の変化の影響によって生じること、および美観の評価項目としては可視光透過率の変化よりも、色差、ヘーズ、光沢度の変化の方が適していることなどが考えられた。

Study on the degradation thermo-optical properties and visual characteristics of insulating coatings for windows over time

Abstract

Insulating coatings for windows are used in order to reduce acquisition of heat from solar radiation and reduce the resulting air conditioning load. However, to-date there has not been a great deal of research into durability of required performances. In this report, various thermo-optical properties and visual characteristics were chosen and their variation measured in accelerated weathering and outdoor exposure tests in order to identify which characteristics provided the best estimate of durability of the required performance of insulating coatings. According to the results, variation of solar transmittance is mainly influenced by variation of near-infrared transmittance, and variation of colour component, haze and glossiness are more effective in estimating appearance than variations in visible transmittance.

キーワード： 窓用遮熱コーティング材、経時変化、促進耐候性試験、屋外暴露、日射透過率

§1. はじめに

地球環境保護のために省エネ・省 CO₂ は早急に取り組まなければならない課題である。近年、省エネ・省 CO₂ 対策技術として、窓ガラスに塗布することで日射熱の流入を抑え空調負荷を低減する塗料(以降、窓用遮熱コーティング材と表記する)が用いられ始めている。

窓用遮熱コーティング材には遮熱性および採光性が要求される他、窓面であるため美観の維持も要求される。また窓用遮熱コーティング材は、多くの製品において紫外線を遮蔽する機能が付加されているため、紫外線遮蔽性能の評価も必要であると考えられる。さらに、窓用遮熱コーティング材は、日射にさらされ易い窓ガラスに使用することを目的としていることと、各性能が低下すると室内環境に大きな影響を及ぼすことから、耐久性を評価することも重要である。窓用遮熱コーティング材の性能の評価では、一般的に遮熱性に関する項目として遮蔽係数が用いられ遮蔽係数には日射透過率が大きく影響する。また、採光性に関する項目として可視光透過率が用いられている。

また、窓用遮熱コーティング材は環境技術実証事業^{1),2)}の対象技術であり、冷房負荷低減効果等の性能の実証が進められている。環境技術実証事業では、測定項目として促進耐候性試験前後の日射透過率・日射反射率および可視光透過率の測定を行い、さらに空調負荷低減効果を計算によって求め、消費者が遮熱性、採光性を比較検討するための有用なデータとなっている。

しかし各性能の耐久性に関する研究はあまり行われていない。例えば、遮熱性の耐久性に関しては、日射透過率の変化が主にどの波長域の透過率の変化が影響して生じるかについての研究はあまり見られない。また、紫外線遮蔽性の耐久性について検討された研究も少なく、美観については耐久性の評価方法が確立しているとは言えない。このように窓用遮熱コーティング材は、各性能の耐久性を評価するのにどの様な測定項目が有効であるかを検証する必要があると考えられる。

§2. 窓用遮熱コーティング材の概要と研究の目的

図 1 に窓用遮熱コーティング材の概要を示す。一般の窓ガラスは日射の大部分が透過し、日射による熱取得が空調負荷の一部となる。一方、窓用遮熱コーティング材を塗布した窓ガラスは塗料に含まれる金属酸化物によって日射の吸収率を高め、吸収された熱の多くは屋外に排出されるため、一般窓ガラスよりも空調負荷を低減することができる。また、窓面においては日射熱の取得を低減することが望まれる一方で、採光性も要求される。そのため、窓用遮熱コーティン

グ材は採光のために可視光透過率は高く保持しつつ、遮熱性を向上させるために近赤外線の吸収率を高めている。また採光性に加えて、窓越しの物の見え方や曇りなどが無いことなど、美観に関する要求もあり、さらに窓用遮熱コーティング材は付加的な機能として紫外線遮蔽機能が求められる場合が多い。

そこで、本研究では窓用遮熱コーティング材に求められるこれらの性能の耐久性を評価する方法について検討することとした。各要求性能に対して設定した測定項目を表 1 に示す。熱光学特性については各波長域の変化について検討するため、可視光に加えて近赤外線、紫外線の透過率も測定し、美観については一般的に視覚的特性の評価に用いられる、色差、ヘーズ、光沢度を設定し、耐久性の評価にこれらが有効であるかを検証した。

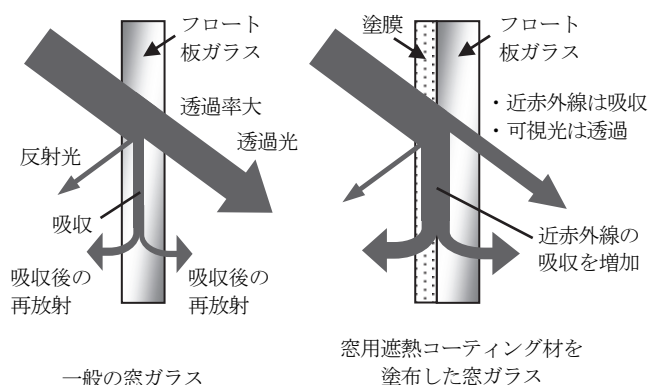


図 1 窓用遮熱コーティング材の概要

表 1 要求性能と測定項目

要求性能	測定項目
遮熱性	日射透過率、近赤外線透過率
採光性	可視光透過率
紫外線遮蔽性	紫外線透過率
美観	色差、ヘーズ、光沢度
耐久性	上記 4 性能の耐久性

§3. 試験方法

3.1 試験概要

試験概要を表 2 に示す。窓用遮熱コーティング材は 4 種類選定し (A～D)、比較用に窓用遮熱コーティング材を塗布しないガラス試験体 (G) を合わせた 5 種類の試験体とした。試験体の作製にあたり、実建物で窓用遮熱コーティング材を屋外側に塗布して使用することを想定した試験体とするため、塗布面を暴露面および測定面として試験を行った。

窓用遮熱コーティング材の各物性値の経時変化を評価するために促進耐候性試験および屋外暴露試験を行い、各経過時間後に表 1 に示す各測定項目の評価を行った。

表 2 試験概要

試験水準	4 種類の窓用遮熱コーティング材（塗料 A～塗料 D）および未塗布のガラス試験体（G）の計 5 種類
塗布面	試験体は屋外施工を想定して塗布面を暴露面および測定面とした

3.2 促進耐候性試験

促進耐候性試験条件を表 3 に示す。促進耐候性試験は JIS K 5600-7-7 に準拠してキセノンランプ法によって行った。ただし、放射照度については本来 300nm～400nm の間で 60W/m² の強度で行うべきところ、機器の特性により 300nm～700nm の間で 390W/m² の強度で行った。

促進耐候性試験に供した試験体の寸法は 70 mm×150 mm でガラスの厚さは 3 mm とし、試験体数は n=2 とした。

3.3 屋外暴露試験

屋外暴露試験条件を表 3 に示す。屋外暴露試験は JIS K 5600-7-6 に準拠して行った。暴露地は神奈川県中部の丘陵地帯に位置し、3 階建て建物の屋上に、南向きで、水平面との角度 45° で設置した。

物性値の測定に関して、塗料上に付着する汚れは日射透過率などの結果に影響すると考えられるが、汚れの影響も含めた状態で窓としての物性値を評価することとし、汚れの清掃は行わずに測定した。ただし、試験体裏面は屋内側を想定しているため、測定前に汚れの清掃を行った。

屋外暴露試験に供した試験体の寸法は 150 mm×150 mm でガラスの厚さは 3 mm とし、試験体数は n=3 とした。

表 3 促進耐候性試験および屋外暴露試験条件

促進耐候性試験	試験体	70 mm×150 mm 厚さ 3 mm のフロート板ガラスで作製
	試験体数	n=2
	サイクル	照射 102 分、照射+散水 18 分（120 分 1 サイクル）
	放射照度	300nm～700nm において 390W/m ²
	物性評価時の劣化時間	0hr, 300hr, 600hr, 1200hr, 2500hr
	使用機器	キセノンウェザーメーター
屋外暴露試験	試験体	150 mm×150 mm 厚さ 3 mm のフロート板ガラスで作製
	試験体数	n=3
	暴露場所	神奈川県厚木市（東経 139° 19′, 北緯 35° 26′）
	暴露地環境	丘陵地帯の 3 階建て建物屋上
	方位・角度	南向き、水平面との角度 45°
	暴露期間	2011 年 8 月～2012 年 8 月
	物性評価時の劣化時間	0 ヶ月, 1 ヶ月, 3 ヶ月, 6 ヶ月, 9 ヶ月, 12 ヶ月

3.4 日射・可視光・紫外線透過率の測定

日射透過率・可視光透過率・紫外線透過率の評価は JIS R 3106 に準拠して行った。測定条件を表 4 に示す。

窓用遮熱コーティング材を屋外側に塗布した場合を想定して塗布面側から測定を行い、紫外可視近赤外分光光度計によって 300nm～2500nm の波長域において 5nm ごとの分光透過率を測定した。この分光透過率に表 5 に示す重価係数を掛けて加重平均し、各物性値を算定した。

表 4 各種透過率の測定条件

測定波長範囲	300nm～2500nm
測定波長間隔	5nm 間隔で測定
参考重価係数	日射透過率 : JIS R 3106 紫外線透過率 : ISO 9050 可視光透過率 : JIS R 3106
測定機器	紫外可視近赤外分光光度計

3.5 近赤外線透過率の測定

2.窓用遮熱コーティング材の概要で述べたように、窓用遮熱コーティング材は塗料中の金属酸化物によって、近赤外線波長域の日射を選択的に吸収することで、可視光透過率を高く維持しつつ日射熱取得率を低減することを目的としている。そこで、780nm～2500nm の範囲の重価係数に分光透過率を掛けて加重平均した値を近赤外線透過率 (τ_{nir}) とし、日射透過率などと共に各塗料の遮熱性能の経時変化の評価を行った。なお、計算に用いる分光透過率は、3.4 で測定した結果を用いた。

近赤外線透過率の計算式を式(1)に示す。

$$\tau_{nir} = \frac{\sum_{780}^{2500} E\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot \tau(\lambda)}{\sum_{780}^{2500} E\lambda \cdot \Delta\lambda} \quad (1)$$

ただし、 τ_{nir} : 近赤外線透過率
 $E\lambda \cdot \Delta\lambda$: JIS R 3106 付表 2 の重価係数
 $\tau(\lambda)$: 各波長における分光透過率

3.6 色差の測定

経時変化による塗料の色の変化を評価するために色差の測定を行った。色差は JIS K 5600-4-6 に準拠して測定した。測定条件を表 5 に示し、測定位置および測定時の試験体設置状況を図 2 および写真 1 に示す。ただし、本実験の試験体は透過性のある物体であるため、試験体裏側に Yxy の値が既知である機器校正用の白色校正板を置いて測定を行った。そのため、本報で示す色差の値は一般的に論じられる、物体表面の反射光を測定した色差とは異なるが、ここでは同条件で測定した色差を相対的に評価する目的で使用するものとした。

表 5 色差測定条件

測定項目	L*a*b*
測定方法	Y=94.3, x=0.3142, y=0.3205 の白色校正 板を試験体の下に置き、塗布面を測定

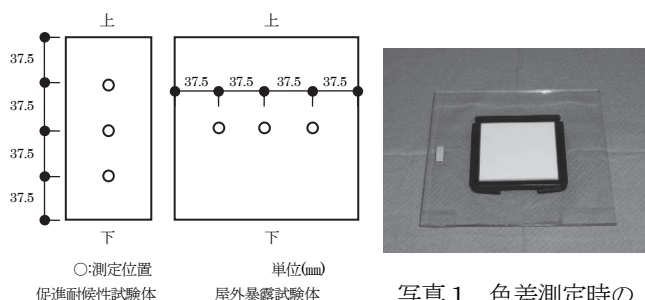


図 2 測定位

写真 1 色差測定時の
試験体設置状況

3.7 ヘーズの測定

経時変化による塗膜の曇り度合いを評価するために、ヘーズの測定を行った。ヘーズは JIS K 7136 に準拠して測定した。

3.8 光沢度

塗膜の劣化状況を評価するため、光沢度の測定を行った。光沢度は JIS K 5600-4-7 に準拠して 60° 鏡面光沢度を測定した。試験体が透過性のある物体であるため、機器の校正時に光沢度 0 の調整に用いる光トラップを試験体裏側に設置して測定した。ただし、この測定方法においても、測定値には試験体裏面のガラスと空気の境界で反射する光を含んでいるため、一般的な光を透過しない塗料の光沢度とは扱いが異なるが、ここでは同条件で測定した本実験の結果を相対的に評価する目的で用いることとした。測定方法および測定時の試験体設置状況を図 3 および写真 2 に示す。測定位置に関しては促進耐候性試験体、屋外暴露試験体ともに図 2 と同じ位置で測定した。

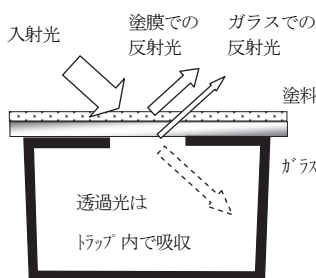
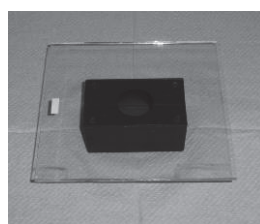


図 3 光沢度の測定方法

写真 2 光沢度測定時の
試験体設置状況

§4. 試験結果・考察

4.1 日射・可視光・近赤外線透過率の試験結果と考察

促進耐候性試験および屋外暴露試験の測定値として、図 4,5 に日射透過率、図 6,7 に可視光透過率、図 8,9 に近赤

外線透過率の結果を示す。

図 5,7,9 の屋外暴露試験結果では、劣化時間ごとに測定値のばらつきがあり、これは汚れの影響と考えられる。図 5 の日射透過率、図 9 の近赤外線透過率の結果を見ると、ばらつきはあるものの屋外暴露 12 ヶ月の時点で塗料 B および塗料 C に増加の傾向が見られる。これは図 4,8 の促進耐候性試験の結果と同様の傾向を示している。

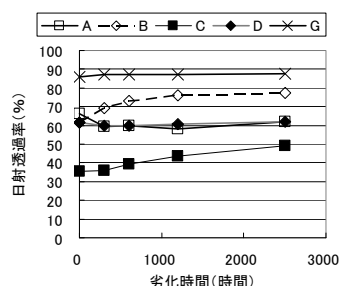
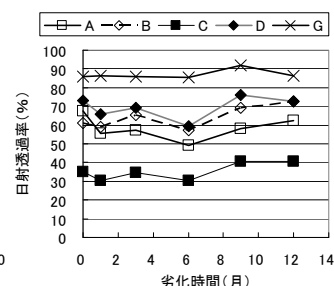
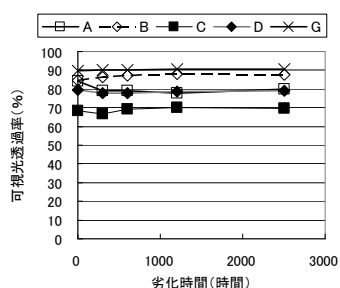
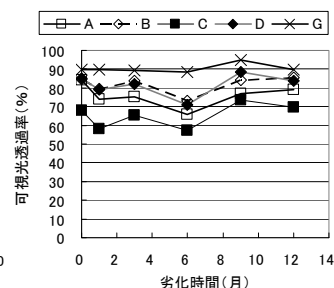
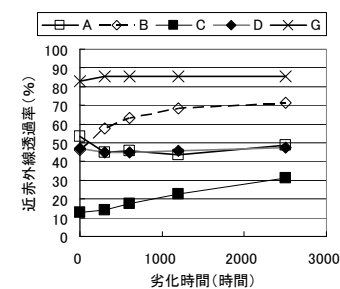
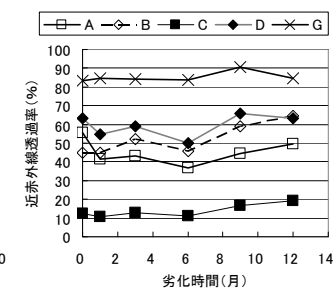
図 4 日射透過率
(促進耐候性試験)図 5 日射透過率
(屋外暴露試験)図 6 可視光透過率
(促進耐候性試験)図 7 可視光透過率
(屋外暴露試験)図 8 近赤外線透過率
(促進耐候性試験)図 9 近赤外線透過率
(屋外暴露試験)

図 4,6,8 の促進耐候性試験結果では、塗料 B および塗料 C の日射透過率および近赤外線透過率において明確な変化が生じた。塗料 B および塗料 C とともに図 6 の可視光透過率の変化は小さく、図 8 の近赤外線透過率は図 4 の日射透過率の変化と傾向が類似し、変化量はより大きい結果となった。日射の大部分は可視光と近赤外線で占められているため、可視光透過率がほぼ変化しない場合には、日射透過率は主に近赤外線透過率の変化に伴って変化すると考えられる。

塗料 A～塗料 D の促進耐候性試験結果における、日射透過率、近赤外線透過率、可視光透過率の初期値からの変化率を算出し、日射透過率の変化率と近赤外線透過率の変化率の関係を図 10 に、日射透過率の変化率と可視光透過率の変化率の関係を図 11 に示す。図 10 から、全試験体において、日射透過率の変化率と近赤外線透過率の変化率がほぼ比例の関係となっている。一方で図 11 から、可視光透過率がほぼ変化していない状態において、日射透過率の変化率が非常に大きい試験体がある。

本研究で選定した窓用遮熱コーティング材の結果からは、可視光透過率は変化しづらい傾向が見られるため、近赤外線透過率の変化は日射透過率の変化と相関があり、かつ、変化量が判断し易いため遮熱性の評価項目として有効であると考えられる。

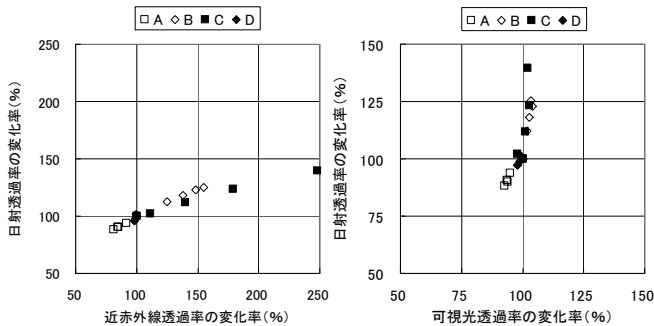


図 10 日射透過率と近赤外線透過率の変化率の比較

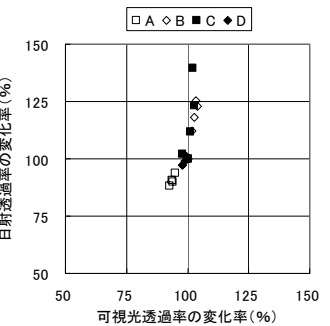


図 11 日射透過率と可視光透過率の変化率の比較

4.2 紫外線透過率の試験結果と考察

促進耐候性試験と屋外暴露試験の紫外線透過率を図 12,13 に示す。また、促進耐候性試験の日射透過率と紫外線透過率の変化を比較した図を、図 14,15 に示す。

促進耐候性試験結果では、日射透過率が増加した塗料 B および塗料 C は紫外線透過率も大きく増加した。一方で日射透過率がほぼ変化していない塗料 D においても、増加量が小さいものの紫外線透過率が増加傾向にある。また日射透過率と紫外線透過率の増加量を比較すると、日射透過率の増加量に対する紫外線透過率の増加量は試験体ごとに大きく異なっている。これらの結果から紫外線透過率の変化と日射透過率の変化には明確な相関が見られないため、紫外線遮蔽性の評価は他の測定項目から正しく予測することが難しいと考えられる。

屋外暴露試験の結果について図 5 の日射透過率、図 7 の可視光透過率および図 9 の近赤外線透過率は、劣化時間ごとの測定値のばらつきが大きい、図 13 の紫外線透過率は劣化時間ごとの測定値のばらつきが小さい。紫外線透過率の変化は、暴露開始後 1 年程度の結果でもある程度正確に変化の傾向を読み取ることが可能であると考えられる。

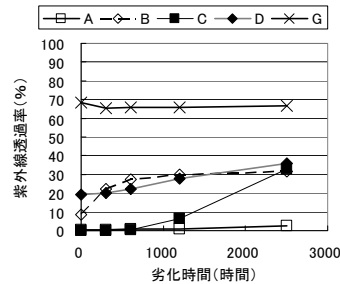


図 12 紫外線透過率 (促進耐候性試験)

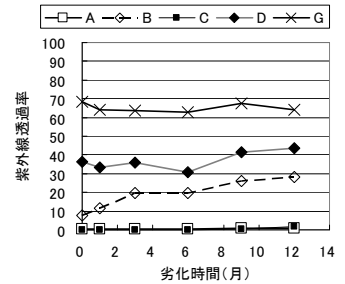


図 13 紫外線透過率 (屋外暴露試験)

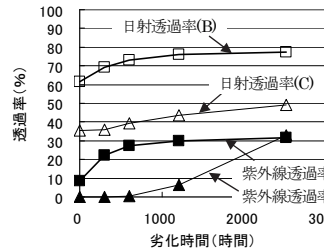


図 14 日射・紫外線透過率 (変化が同様な試験体(B, C))

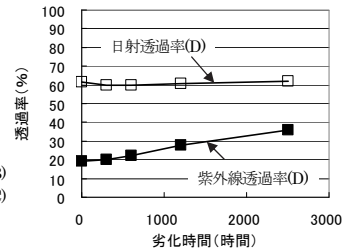


図 15 日射・紫外線透過率 (変化が異なる試験体(D))

4.3 色差・ヘーズ・光沢度の試験結果と考察

促進耐候性試験および屋外暴露試験の測定値として、図 16,17 に色差、図 18,19 にヘーズ、図 20,21 に光沢度の結果を示す。

屋外暴露試験の結果について、促進耐候性試験で光沢度が低下した試験体は屋外暴露試験においても光沢度が低下し同様の傾向を示したが、ヘーズは全試験体で大きな変化が生じておらず、色差は劣化時間ごとの測定値のばらつきが大きく、ヘーズ・色差ともに促進耐候性試験結果と傾向が異なった。傾向が異なった要因として、色差では汚れの影響が大きく、ヘーズでは劣化時間が短いために測定値に大きな変化が生じていないことが考えられる。

次に、促進耐候性試験の色差、ヘーズおよび光沢度の変化と可視光透過率の変化の関係を検討する。可視光透過率と色差の関係を図 22 に、可視光透過率とヘーズの関係を図 23 に、可視光透過率と光沢度の関係を図 24 に示す。全試験体において、色差、ヘーズ、光沢度が変化しても可視光透過率にはほぼ変化が生じていない。特に塗料 A および塗料 C は色差、ヘーズ、光沢度の全てにおいて変化量が大きいものの可視光透過率は初期値からほぼ変化していない。促進耐候性試験を 2500 時間実施した後にに行った目視確認では、塗料 C に白濁が見られ、塗料 A に虹彩が見られた。目視によって変化が確認された試験体は色差、ヘーズ、光沢度には変化を生じたが可視光透過率にはほぼ変化が生じていないため、美観の評価項目としては可視光透過率の変化よりも、色差、ヘーズ、光沢度の変化の方が適していると考えられる。

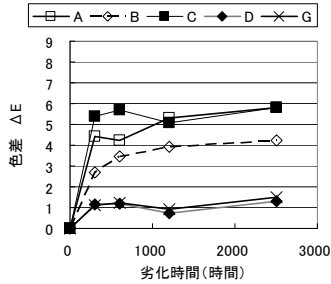


図 16 色差
(促進耐候性試験)

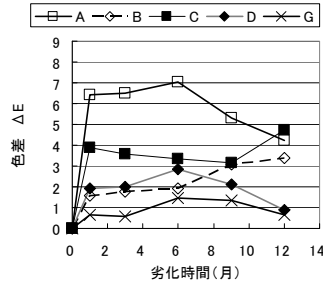


図 17 色差
(屋外暴露試験)

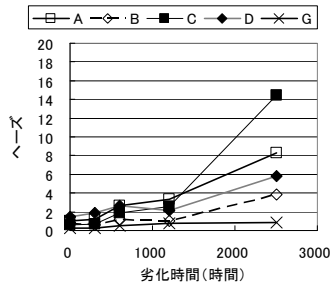


図 18 ヘーズ
(促進耐候性試験)

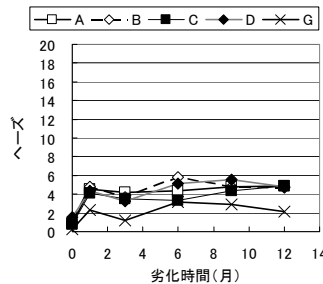


図 19 ヘーズ
(屋外暴露試験)

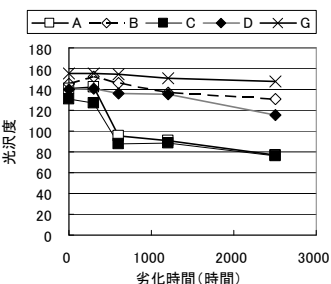


図 20 光沢度
(促進耐候性試験)

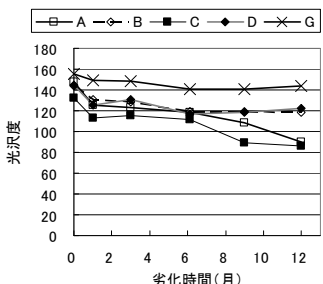


図 21 光沢度
(屋外暴露試験)

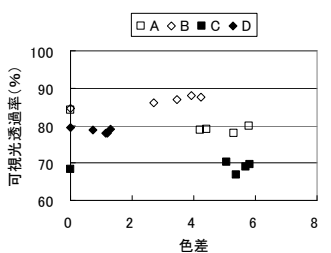


図 22 可視光透過率と
色差の関係

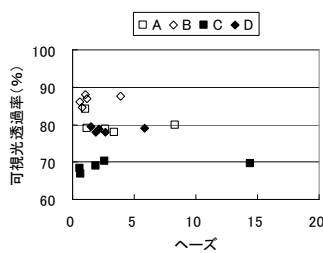


図 23 可視光透過率と
ヘーズの関係

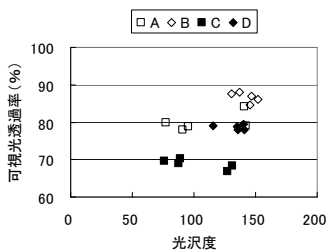


図 24 可視光透過率と
光沢度の関係

§5. まとめ

本報では窓ガラスからの日射熱の流入を抑え、空調負荷低減効果のある窓用遮熱コーティング材の各性能の耐久性の評価項目として、近赤外線透過率、紫外線透過率、色差、ヘーズ、光沢度が有効であるかを検証するため、促進耐候性試験および屋外暴露試験の各劣化時間に、日射透過率および可視光透過率に加えて上記の項目の測定を行った。測定結果から各評価項目の有効性について検証し、得られた知見を以下に示す。

- 1) 可視光透過率は全試験体でほぼ変化せず、近赤外線透過率は変化の大きい塗料があった。日射透過率の変化はほぼ近赤外線透過率の変化の影響のみで生じているので、近赤外線透過率の変化を評価することは遮熱性の評価として有効であると考えられる。
- 2) 紫外線透過率の変化と日射透過率の変化には明確な相関性が見られないため、紫外線遮蔽性の評価は他の測定項目から正しく予測することが難しいと考えられる。
- 3) 白濁や虹彩現象が生じた試験体では、可視光透過率の変化は生じず、ヘーズの増加・光沢度の低下・色差の変化は大きかった。美観の変化の評価項目としては可視光透過率の変化よりも色差、ヘーズ、光沢度の変化の方が適していると考えられる。

謝辞

実験に際し塗料の提供および試験体の作製など多大な御協力を頂いた関係各位に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省:環境技術実証事業実施要領,H24.4
- 2) 環境省:ヒートアイランド対策技術分野(建築物外皮による空調負荷低減等技術)実証試験要領,H24.6
- 3) 崔哲,水谷章夫,青木哲:暖房時における各種透明ガラスから日射が透過した場合での室内熱収支の検討,日本建築学会環境系論文集,第665号,pp.587-594,2011.7
- 4) 堤純一郎,仲松亮:ガラス面吹付け塗料による日射遮蔽効果に関する実証実験,日本建築学会九州支部研究報告,第50号,pp.357-360,2011.3

ひとこと

省エネ・省 CO₂に限らず環境負荷の低減に貢献する建築材料は数多くありますので、今後もこれらの技術の研究に取り組んで行きたいと思っています。



富田 泰宇