屋外測定による再帰反射材の日射に対する再帰反射率推定 OUTDOOR MEASUREMENT OF SOLAR REFLECTIVE PERFORMANCE OF RETROREFLECTIVE MATERIALS

酒井 英樹*, 小林 春奈**, 永村 一雄***, 井川 憲男****

*Hideki SAKAI, Haruna KOBAYASHI, Kazuo EMURA
and Norio IGAWA*

The solar reflective performance of several retroreflective materials are evaluated by outdoor measurements. Their reflectances were derived from the quantity of heat energy received, which were calculated from temperature data. By correcting the measured data to fit the reflectivities of several non-retroreflective materials, the value of retroreflective component can be determined with an accuracy of about 1 percent, irrespective of measurement date. The measured retroreflective components are 5 and 13 percent for the bead-embedded type, 18 percent for the capsule-lens type, and 24 and 30 percent for the prism-array type.

Keywords: Retroreflection, Solar Reflectance, Heat Island, Reflected Heat, Outdoor Measurement

再帰反射, 日射反射率, ヒートアイランド, 照り返し, 屋外測定

1. はじめに

再帰反射材とは、光源から入射された光を再び入射方向へ反射する性質（再帰反射性）を有する材料である。現在、この再帰反射材は、夜間の視認性を高める目的で、交通標識の基板や衣料品のマーカーとして広く使われているが^{1),2)}、本研究では、これを建物外皮に用いて、入射した日射を確実に天空方向へ返すことで、地表面での日射受熱量を減らし、都市部で年々深刻化している夏場のヒートアイランド現象を抑制するという再帰反射材の新たな利用方法を検討している^{3),4)}。ヒートアイランド対策の1つとして、日射反射率の高い塗料によって建物外皮を高反射化する方法があるが^{5),6),7)}、可視から近赤外域において再帰反射性を示す材料を建物外皮に使うことで、どのような方向から入射した日射であっても確実に天空方向に跳ね返すことができれば、適用した建物の受熱量を減らすだけでなく、通常の日射高反射材で問題^{8-11),注1)}となる周辺への照り返し日射を抑制することができると考えられる^{3),4),12)}。

再帰反射材には、プリズムの反射や球状レンズの屈折を利用するなどの発現機構があるが、その反射性能の評価は、これまで視認性の観点から行われており^{注2)}、日射に対する反射性能を評価した報告はほとんど見受けられない^{3),4),12)}。現時点では、日射反射の観点から設計・製造された再帰反射材料は存在せず、交通標識用などとして夜間の視認性を向上する目的でのみ開発されている。しかし、視認性のよいものが必ずしも日射反射に適しているとは限らないことから^{注3)}、再帰反射材の日射に対する反射性能の評価を行うことは、今後、再帰反射材を日射照り返し抑制効果を持つ建材として実用化し、

さらに、その目的に適した材料開発を行うために必要である。

筆者らは前報^{3),4)}において、再帰反射材の照り返し抑制効果を実証するとともに、日射反射の観点から必要とされる再帰反射成分の測定法の検討を行った。しかし、測定法の妥当性の検証を主な目的としたため、同じ条件で繰り返し実験することができるよう、照射源としては、実際の日射ではなく赤外線ランプを用いていた。

そこで、本論文では、標識用として市販されている5種類の再帰反射材を屋外に設置し、実際の日射に対する再帰反射率を初めて測定した。屋外測定では、測定日の気象条件によって、反射率の算出値がばらつくが¹³⁾、日射反射率が既知の再帰反射性のない材料を元に補正することで、測定日によらず精度よく再帰反射率を推定することができた。その補正方法と、日射量など反射率を算出するために必要となる測定項目、および、実測結果について報告する。

2. 測定方法

2.1 測定方法の概要

建築材料の日射反射率の測定法としては、(1) 日射照射時の表面温度上昇から材料面の受熱量を推定し、入射日射量との比較から反射率を算出する（温度測定）、(2) 日射計で入射日射量、反射日射量を同時測定し、その比率から反射率を算出する（アルベド測定）、(3) 分光光度計で材料面の分光反射率を測定し、日射分光分布を掛け合わせて反射率を算出する（分光測定）、などが考えられる。

既報¹³⁾で論じたように(1)の温度測定と(2)のアルベド測定で得られる反射率は、測定時の日射の状態に依存してしまうため、正

本論文は、日本建築学会学術講演梗概集 D2, pp.113-114, 2007.8を基にしている。

* 大阪市立大学大学院生活科学研究科 講師・博士(理学)

** 大阪市立大学大学院生活科学研究科前期博士課程
大学院生

*** 大阪市立大学大学院生活科学研究科 教授・工博

**** 大阪市立大学大学院生活科学研究科 教授・博士(工学)

Lecturer, Graduate School of Human Life Science, Osaka City Univ., Dr. Sci.
Graduate Student, Graduate School of Human Life Science, Osaka City Univ.

Prof., Graduate School of Human Life Science, Osaka City Univ., Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Human Life Science, Osaka City Univ., Dr. Eng.

確な評価には (3) の分光測定が望ましい。しかし、再帰反射材に対しては、状況が異なる。つまり、分光光度計を用いて光学的に反射率を測定する場合^{14),15)}、入射光軸に完全に一致した場所に受光部を置くと、入射光を妨げることになるため、再帰反射率 (Retroreflection, ρ_{Ret}) は測定できない。分光測定で得られるのは、再帰反射以外の反射成分、つまり、鏡面反射率 (Specular reflection, ρ_{Spe}) と拡散反射率 (Diffuse reflection, ρ_{Dif}) である。一方、温度測定では、吸収された熱量から反射率を算出するため、鏡面反射、拡散反射、再帰反射すべてを含んだ全反射率 (Total reflection, ρ_T) が得られる。

以上のことから、再帰反射率 ρ_{Ret} は直接測定することはできないが、(1) の温度測定で求めた全反射率 ($\rho_T = \rho_{Spe} + \rho_{Dif} + \rho_{Ret}$) から、(3) の分光測定で求めた鏡面および拡散反射率 ($\rho_{Spe} + \rho_{Dif}$) を差し引くことで、再帰反射率 ρ_{Ret} の値を間接的に求めることができる^{3),4)}。

本論文においても、この測定手順、つまり、分光光度計による分光測定 (2.2 節) と屋外暴露時の温度測定 (2.3 節) とを併用することで、再帰反射率の測定を行う。ただし、測定精度を担保するため、大気の状態によって刻々と変化する日射量を含む気象要素を総合的に測定するとともに、同じ気象条件下で、再帰反射性を持たない塗膜試料 (分光測定で正確に反射率が測定できる) についても温度測定を行い、それら試料の日射反射率の値を使って再帰反射材の補正を行う (3.2 節)。

2.2 分光光度計による分光測定

試験試料には、標識用として市販されている再帰反射材 5 種 (表 1 の試料番号 6~10) と、日射反射率の校正用に反射率の異なる塗膜 5 種 (表 1 の試料番号 1~5) の計 10 種類を用いた。各試料の詳細は、表 1 の備考欄および注 2 を参照のこと。

まず、各試料の鏡面および拡散分光反射率 $\rho_{Spe}(\lambda) + \rho_{Dif}(\lambda)$ と、鏡面成分を光学吸収体で取り除いた拡散反射成分だけの分光反射率 $\rho_{Dif}(\lambda)$ とを^{注 4)}、文献 13 の測定手順に従って、積分球付分光光度計 (島津製作所 UV-3600, 積分球 LISR-3100, 内径 150mm ϕ , 7° 入射 (垂直入射を 0°)) により測定した。測定波長は、 $\lambda = 300 \sim 2500\text{nm}$ (間隔 5 nm)、測定温度は約 23°C (室温) であった。分光光度計の反射率校正は、米国 Labsphere 社製、標準反射板 Spectralon (反射率 99%) を用いた。鏡面および拡散分光反射率 $\rho_{Spe}(\lambda) + \rho_{Dif}(\lambda)$ の測定結果を図 1 ((a)塗膜 5 種, (b)再帰反射材 5 種) に示す。

つぎに、測定した鏡面成分を含む分光反射率に板ガラス類の日射反射率算出の際に用いる JIS R 3106 付表 2 の直達日射の分光分布¹⁶⁾ を掛け合わせて求めた鏡面および拡散日射反射率 $\rho_{Spe} + \rho_{Dif}$ を、表 1 の第 2 列に、拡散成分のみの分光反射率に同じく日射分光分布を掛けて算出した拡散日射反射率 ρ_{Dif} を、表 1 の第 3 列に示す。第 4

図 1 分光光度計 (7° 入射, 積分球受光) で測定した分光反射率

列は、両者の差から計算した鏡面日射反射率 ρ_{Spe} である。ここで、実際の日射には天空成分も含まれ、さらに、気象条件によってその分光分布は時々刻々と変化するため^{17),18)}、厳密には、試料の設置場所や測定時の気象条件を特定しなければ日射反射率は定まらない。しかし、材料の評価指標としては、標準的な日射分光分布を決めることが必要である¹³⁾。そこで、建築材料の評価に広く用いられていること、さらに、再帰反射材の利用目的としては、主に直達日射を想定していることから、本論文では、JIS R 3106 に定められた直達日射に対する反射率を基準値と定め、表 1 の値を使って、温度測定から求めた反射率の補正を行うこととする。

2.3 屋外における温度測定

屋外測定の実施は以下の通りである。各試料 (試料面寸法 75mm $\times$ 70mm) を、大阪市立大学生活科学部棟屋上 (北緯 34° 36' , 東経 135° 30') に、測定日の南中時刻に直達日射が約 7 度で入射するよう南方向きに傾斜させて設置した。(7 度にした理由は、分光測定に用いた分光光度計の入射条件が 7 度に固定されているためである。一般に、反射率は、入射角に依存するため^{5),19)}、分光測定と温度測定の結果を比較するには、入射角を一致させる必要がある。) 各試料の裏面は、厚さ 30mm の断熱材 (発泡スチロール) を 2 枚貼り合わせたもので断熱し、試料ごとに、試料裏面中央部 1 点と断熱材 (30mm 厚) を 1 枚はさんだ 1 点の計 2 点の温度を、T 型熱電対で測定した。気象条件として、全天・天空日射量、法線面直達日射量、外気温、相対湿度、風速を 1 分間隔で測定した^{20),21),注 5)}。

実験期間は 2006 年 10 月から 2007 年 2 月であり、このうち、南中時刻前後に穏やかで快晴となった、11 月 29 日、12 月 4 日、12 月 5 日、1 月 29 日を測定日とした。

つぎに、日射照射時の試料面での熱収支は、定常状態を仮定し、1 次元の熱流方向における式で計算した。

$$J_i \cdot (1 - \rho_{temp}) = q_s + q_{cv} + q_{cd} \tag{1}$$

表 1 各試験試料の分光測定による日射反射率 (JIS R 3106 ¹⁶⁾)				
試料	$\rho_{Spe} + \rho_{Dif} [\%]$	$\rho_{Dif} [\%]$	$\rho_{Spe} [\%]$	備考 (製品名称)
1: 塗膜 (高反射白)	84.8	83.2	1.6	太陽熱高反射塗料白色
2: 塗膜 (高反射灰)	64.1	62.5	1.6	太陽熱高反射塗料灰色
3: 塗膜 (高反射黒)	35.0	33.2	1.8	太陽熱高反射塗料黒色
4: 塗膜 (一般白)	74.7	72.5	2.2	一般塗料白色
5: 塗膜 (一般黒)	7.2	4.9	2.3	一般塗料白色
6: 再帰材 (プリズム)	48.2	43.8	4.5	N社プリズム型超高輝度
7: 再帰材 (カプセル)	42.1	36.6	5.5	N社カプセルレンズ型超高輝度
8: 再帰材 (封入)	55.6	51.9	3.7	N社封入レンズ型
9: 再帰材 (封入)	62.2	57.5	4.7	U社封入レンズ型広角タイプ
10: 再帰材 (プリズム)	47.5	36.0	11.6	S社プリズム型超高輝度

ここで、 J_i : 試料面に入射する日射量[W/m²]^{注6)}で、右辺の各項は、以下の式に測定値を代入して計算した。

まず、試料面からの長波長放射量 q_s [W/m²]は、

$$q_s = -F_{sa}\varepsilon_s\varepsilon_a\sigma T_a^4 - F_{sw}\varepsilon_s\varepsilon_w\sigma T_w^4 + \varepsilon_s\sigma T_s^4 \quad (2)$$

ただし、 F_{sa} : 試料面から大気をみる形態係数 ($1+\cos\theta_s)/2$,
 F_{sw} : 試料面から地物をみる形態係数 ($F_{sw}=1-F_{sa}$), ε_s : 試料面の放射率, ε_a : 大気の放射率, ε_w : 地物の放射率, T_a : 外気温[K],
 T_w : 地物表面温度[K], T_s : 試料面温度[K], とする。

つぎに、対流熱量 q_{cv} [W/m²]は、

$$q_{cv} = \alpha_c(T_s - T_a) \quad (3)$$

ただし、 α_c : 対流熱伝達率[W/(m²·K)] とし、ユルゲス (Jürges) の式 (風速 $v \leq 4.9$ [m/s] のとき $\alpha_c = 5.6 + 3.9v$, $v > 4.9$ m/s のとき $\alpha_c = 7.2 v^{0.78}$) で計算する^{22),23)}。

最後に、伝導熱量 q_{cd} [W/m²]は、

$$q_{cd} = \frac{\lambda}{d}(T_s - T_d) \quad (4)$$

ただし、 λ : 断熱材の熱伝導率[W/m], d : 断熱材厚み[m], T_d : 断熱材面の温度[K], とする。

以上の値を (1) 式に代入して、未知数である日射反射率 ρ_{temp} (温度測定による全反射率) を求める。

3. 結果と考察

3.1 測定結果

測定を行った4日間の天空日射および法線面直達日射の日変化を図2に示す (全天日射量は省略)。分析には、各測定日の南中時刻を含む1時間 (図2の正午前後の2本の垂直線間) の日射量の平均値を使用した。表2に全天日射量 (J_H), 天空日射量 (J_{SH}), 法線面直達日射量 (J_{DN}) の1時間平均と、それらを (A1) 式^{注6)}に代入して算出した試料面に入射する日射量 (J_i) を示す。

外気温湿度、風速 (表2), および、各試料面温度も同様に、南中時刻を含む1時間の平均をとり、それらの値を (2) - (4) 式に代入し、長波長放射量 q_s , 対流熱量 q_{cv} , 伝導熱量 q_{cd} を算出した。

最後に、これらの値を (1) 式に代入して、測定日ごとの試料の日射反射率 ρ_{temp} を求めた。表3に温度測定に基づく日射反射率 ρ_{temp} を、2.2節で求めた分光反射率から求めた日射反射率 $\rho_{Spe} + \rho_{Dif}$ とともに示す。

表3を見ると、塗膜、再帰反射材ともに、温度測定から求めた日射反射率 ρ_{temp} は、11/29と12/4の値はほぼ一致しているが、残り2日とは一致しない。日射反射率が測定日によって変動する原因としては、比較的安定した晴天日を選んで測定したもの、熱収支を定

表2 平均日射量 (実測および計算値) と平均風速

測定日	時刻	平均日射量 [W/m ²]			計算値* 入射 J_i	平均風速 v [m/s]
		全天 J_H	天空 J_{SH}	直達 J_{DN}		
2006/11/29	11:17-12:17	579.1	183.7	677.1	939.5	1.78
2006/12/4	11:19-12:19	568.0	87.1	841.4	986.6	3.09
2006/12/5	11:19-12:19	472.6	176.3	515.1	761.2	1.21
2007/1/29	11:42-12:42	638.0	129.9	778.8	980.6	2.69

*測定値から (A1) 式を使って計算した試料面への入射日射量

図2 天空日射量および法線面直達日射量の日変化

常状態かつ1次元と仮定していることや、測定日によって日射量や風速など気象条件が異なることに起因する誤差、さらに、実際に日射の分光分布が変動しているなど^{13),17),18)}、様々な要因が考えられ、その特定は難しい。ただし、このような変動は、屋外測定でよく報

表3 分光測定および温度測定に基づく試料の日射反射率

試料	分光測定[%] $\rho_{Spe} + \rho_{Dif}$	温度測定 ρ_{temp} [%]			
		11/29	12/4	12/5	1/29
1: 塗膜(高反射白)	84.8	79.5	79.3	75.2	76.8
2: 塗膜(高反射灰)	64.1	66.0	66.2	62.4	63.7
3: 塗膜(高反射黒)	35.0	48.0	49.4	43.9	47.5
4: 塗膜(一般白)	74.7	73.2	73.3	68.7	71.3
5: 塗膜(一般黒)	7.2	27.9	29.4	22.8	28.1
6: 再帰材(プリズム)	48.2	75.0	75.3	71.3	72.7
7: 再帰材(カプセル)	42.1	64.0	63.6	59.1	61.6
8: 再帰材(封入)	55.6	68.8	69.4	65.1	66.9
9: 再帰材(封入)	62.2	67.9	68.4	64.5	65.9
10: 再帰材(プリズム)	47.5	70.6	70.9	66.5	68.9

告される現象である。そこで、これを回避するために、日射反射率が既知の試料を同時に測定し、それらの値を参照することで、試験試料の日射反射率を補正して標準的な日射に対する反射率を推定する簡易測定法が屋外測定では用いられる⁵⁾。

本論文の実験結果について、表3の値を図示すると(図3)、測定日ごとの変動は規則的で試料間の相対的な位置関係は保たれていることが分かる。よって、測定日ごとに統制された条件で測定できていること、反射率が既知の試料に基づいて補正をすることで測定日によらない日射反射率を推定することが可能であると考えられる。次節で、正確な日射反射率が分光測定で求められる塗膜試料を反射率が既知の参照試料として用いることで、再帰反射材の日射反射率の補正を行う。なお、図3において、塗膜試料(番号1~5、破線)の測定日ごとの日射反射率 ρ_{temp} の試料間の相対的な関係は、分光測定から求めた日射反射率に対しても保たれているが、再帰反射試料(番号6~10、実線)では、相対的な位置関係が変わり、また、試料番号9を除き^{注7)}、分光測定から求めた日射反射率が極端に低下している。これは、2.1節で説明したように、光学的な手段である分光測定で求めた反射率には、入射光軸の方向に反射される再帰反射成分が含まれないためであり、この目減りした反射分が、再帰反射成分に相当すると考えられる。よって、塗膜試料の反射率を元に補正を行うことで、再帰反射試料の正確な日射反射率が推定できるだけでなく、それらを、表1の再帰反射材の分光測定値と比較することで、分光光度計で捉えることができない再帰反射成分(再帰反射率)を算出することが可能となる^{3),4)}。

3.2 日射反射率および再帰反射率の推定

表3の結果を、横軸を温度測定による日射反射率 ρ_{temp} 、縦軸を分光測定から求めた日射反射率 $\rho_{spe} + \rho_{dif}$ としたグラフを図4に示す。4日間とも5種の塗膜試料(●で表示)が、ほぼ直線上に位置していることから、測定日ごとに、これら5種の塗膜試料の $\rho_{spe} + \rho_{dif}$ を ρ_{temp} から推測する式を直線回帰(最小二乗法)で求めた。得られた回帰直線を実線で示す(図4)。また、図の枠内にその回帰式 ρ_{fit} と R^2 値を示す。各測定日とも R^2 値は0.998以上で、 ρ_{temp} から精度よく日射反射率(全反射率)を推定することができている。

一方、図4において、再帰反射試料(○で表示)は、温度測定に基づく反射率 ρ_{temp} に含まれている再帰反射成分が、分光測定の反射率 $\rho_{spe} + \rho_{dif}$ には含まれていないことから、回帰直線の下側に位置している。測定日ごとに ρ_{temp} の値を回帰式に代入し、得られる値が

図3 分光測定および温度測定に基づく試料の日射反射率 (図中の数字は試料番号、再帰反射材は実線、塗膜は破線。)

図4 温度測定に基づく日射反射率 ρ_{temp} と分光測定に基づく日射反射率 $\rho_{spe} + \rho_{dif}$ との関係

再帰反射成分を含む全反射率である。このようにして求めた推定日射反射率 ρ_{fit} を表4に示す。表4中段の“温度測定 ρ_{fit} (補正)”欄の値が、推定された再帰反射材の全反射率である。温度測定から直接求めた反射率 ρ_{temp} は、測定日によって変動しているが、このような補正を施すことで、測定日によらずほぼ一定(1%程度の範囲)の値を得ることができた。日射反射率が1%程度の精度で推定できれば、建築材料の評価としては十分な精度であると考えられる。

ただし、(3)式の対流熱伝達率は風速による影響を受けやすく^{22),23)}、風速が大きくなると誤差要因となる。今回の実験条件は、4日間とも平均風速が3[m/s]程度以下であった(表2の最右列)。風速がこれより大きくなると、測定精度が低下する可能性がある。

表4 日射反射率および再帰反射率の回帰式による推定

	測定日	塗膜					再帰反射材				
		1 高反 射白	2 高反 射灰	3 高反 射黒	4 一 般白	5 一 般黒	6 ブリ ズム	7 カブ セル	8 封入 レン ズ	9 封入 レン ズ	10 ブリ ズム
分光 $\rho_{spe} + \rho_{dif}$		84.8	64.1	35.0	74.7	7.2	48.2	42.1	55.6	62.2	47.5
温度測定 ρ_{temp}	11/29	79.5	66.0	48.0	73.2	27.9	75.0	64.0	68.8	67.9	70.6
	12/4	79.3	66.2	49.4	73.3	29.4	75.3	63.6	69.4	68.4	70.9
	12/5	75.2	62.4	43.9	68.7	22.8	71.3	59.1	65.1	64.5	66.5
	1/29	76.8	63.7	47.5	71.3	28.1	72.7	61.6	66.9	65.9	68.9
温度測定 ρ_{fit} (補正)	11/29	84.3	63.9	36.7	74.7	6.3	77.5	60.8	68.1	66.7	70.8
	12/4	84.2	63.6	37.3	74.8	6.0	78.0	59.5	68.7	67.1	71.1
	12/5	83.8	64.9	37.2	74.2	5.8	78.0	59.9	68.8	67.9	70.9
	1/29	84.1	63.2	37.1	75.3	6.1	77.5	59.7	68.3	66.7	71.4
反射率差 $\rho_{fit} - (\rho_{spe} + \rho_{dif})$	11/29	-0.5	-0.2	1.6	0.0	-1.0	29.3	18.7	12.5	4.4	23.3
	12/4	-0.6	-0.5	2.2	0.1	-1.2	29.7	17.4	13.1	4.9	23.5
	12/5	-1.1	0.8	2.2	-0.5	-1.4	29.8	17.7	13.2	5.7	23.4
	1/29	-0.7	-0.9	2.1	0.6	-1.1	29.3	17.6	12.8	4.5	23.8
反射率差の平均		-0.7	-0.2	2.0	0.1	-1.2	29.5	17.8	12.9	4.9	23.5
反射率差の範囲		0.5	1.7	0.6	1.1	0.5	0.5	1.3	0.7	1.2	0.6

*図4中に記載されている回帰式に ρ_{temp} を代入して求めた値 単位[%]

最後に、全反射率 ρ_{fit} (補正) から鏡面および拡散反射率 $\rho_{\text{Spe}} + \rho_{\text{Dif}}$ を差し引くことで、分光測定では測定できない再帰反射率を算出した。表 4 下段の“反射率差”の値をみると、試料番号 1〜5 の塗膜試料は、ほぼ 0% であるが、試料番号 6〜10 の再帰反射試料は、5% から 30% 程度となっており、これが、今回求めた再帰反射率 ρ_{Ret} である。温度測定による全反射率 ρ_{fit} (補正) と同じく、測定日間の差は小さく (試料番号 7 の 1.3% が最大)、測定日によらず精度よく推定できている。よって、以下、4 日間の平均値 (表 4 下段の“反射率差の平均”) を使って議論する。

再帰反射性の発現方式別に反射率を見ていくと、試料番号 6 と 10 のプリズム型再帰反射材の再帰反射率が、29.5%、23.5% と高く、つぎに、試料番号 7 のカプセルレンズ型が、17.8%、さらに、試料番号 8 と 9 の封入レンズ型が、12.9%、4.9% と続く。この傾向は、視認性の観点からの評価である再帰反射係数^{注 2)}の優劣とほぼ一致している。すなわち、視認性に関する一般的な傾向として、再帰反射機構のうち、全反射を利用したプリズム型の再帰反射性能が高く、ガラスビーズを空気層で包むことで、ビーズのレンズ効果を最大限利用したカプセルレンズ型がそれに続き、ガラスビーズを樹脂に埋め込む封入レンズ型が一番性能が低いとされているが、今回の測定では、日射反射に関しても同様の傾向が見られた。

3.3 今後の課題

本論文で使用した再帰反射材は、標識用として視認性の観点からのみ設計されたものであるが、プリズム型の 1 つ (試料番号 6) は入射した日射のうち、30% 近くを入射した方向に返しており、これをそのままビル壁面などの外皮に使用しても、十分な日射照り返し抑制効果があると考えられる。ただし、表 1 第 4 列に示すように塗膜に比べると、鏡面反射率 ρ_{Spe} は大きくなっている。これは、今回使用した再帰反射材は、標識用として、文字等を印刷できるようになめらかな樹脂で表面がコーティングされており、多少光沢があるためと考えられる。試料番号 10 を除けば、鏡面反射率は、高々数% であり、照り返しの総量としては小さい。よって、都市のスケールで見れば、日射受熱量の抑制の効果はあると考えられる。しかし、鏡面反射光は一点に集中するため、光害となる恐れがある。また、日射に限らず、自動車のヘッドライトなどの光も再帰反射してしまうため、ビル壁面のような大面積で使用すると夜間の視認性を阻害するなどの弊害も起こりうる。よって、今後、再帰反射材を、照り返し抑制建材として実用化していくためには、反射防止膜で鏡面反射を抑制したり、目に見えない近赤外線のみで再帰反射性を示し、可視域では拡散性反射させたりするなどの改良が必要であろう。

また、再帰反射材は、レンズの屈折を利用するなど表面に複雑な構造をもつため、塗膜など拡散性の高い反射面と比べて入射角依存性が高いと考えられる。本論文では、使用した分光光度計の入射角が 7 度に固定されている制約から、7 度入射時の反射率の測定を行ったが、太陽の位置が季節、時間によって変わるため、日射方向は刻々と変化する。よって、今後、建材としての性能評価を包括的に行うには、反射率の入射角依存性を評価する必要がある^{注 7)}。

4. まとめ

本論文では、照り返し抑制効果が期待できる再帰反射材料について、その基本性能である日射に対する再帰反射率の算出方法を提案

し、5 種類の再帰反射材料について、実測を行った。屋外測定では測定日の気象条件の違いによって、日射反射率の算出値がばらつくが、日射反射率が既知の材料を元に補正をすることで、測定日によらず精度よく (風速が小さければ、反射率 1% 程度の範囲で) 再帰反射率を推定することができた。本論文で実施した測定および補正方法は、今後、再帰反射材を照り返し抑制建材として開発していく上で、有効な評価手法となりうる。

謝辞

本論文の一部は平成 19 年度科学研究費補助金 (基盤研究(C)、課題番号:19560578、代表:酒井英樹) およびトステム助成(No.07-55、代表:永村一雄)の援助を受けた。記して謝意を表する。

注

注 1) 日射反射率の高い塗料を適用した屋根・屋上面は、屋上緑化とともにクールルーフと称され、周りに高い構造物がなければ反射日射を天空へ返すことができることからすでに実用化されている。しかし、周りに高い建物がある場合や、壁面を高反射化する場合は、たとえ拡散性の高い塗膜であっても、一定の割合で反射日射が隣接する建物や道路に吸収されるため、周辺を高温化してしまう恐れがある⁸⁻¹¹⁾。高反射材を適用した建物単体に対する効果を否定するものではないが、天空率は小さくとも直達日射が到達する面 (例えば、高層ビル群を通過する東西道路に面したビルの南側壁面など) に、通常の高反射材を適用すると、天空率が小さいほど、反射日射が天空に返ることなく、周りの建物への照り返しとなる。これに対して、再帰反射材は、天空率が小さく拡散反射では大部分が周辺の建物に吸収されてしまうような箇所であっても、入射した日射を確実に天空方向 (太陽の方向) へ返すことができるという利点がある^{3),4),12)}。再帰反射材は、低層面や壁面など照り返しが問題となって現在の高反射材の使用には難のある箇所にも使用できるため、高反射化の適用範囲をさらに広げることができると考えられる。

注 2) 再帰反射材の反射性能の評価法には 2 つの日本工業規格^{1),2)}があるが、これらは、入射光軸から 12'、20' 及び 2° とわずかにずれた角度から観測した場合の単位照度当たりの反射輝度である再帰反射係数[cd/(lx・m²)]を性能指標としている。これらの規格は、日射に含まれる近赤外線を測定対象にしていなくても、日射反射の観点から必要とされる入射光軸に一致した反射光、つまり、入射光のうちどの程度が実際に再帰反射しているのかということについては、測定法が示されていない。これは、入射光軸と完全に一致した反射光を光学的に測定することが難しいことに加え、現在の再帰反射材は、夜間の視認性を高める目的で使用されており、そこでは、自動車のヘッドライトによって照射された際に、わずかにずれた角度のある運転手の目線に対する反射成分こそが、運転手が感じる明るさ (必要とされる反射性能) に対応しているからである。つまり、これらの日本工業規格^{1),2)}は、本論文で問題にしている再帰反射成分の日射反射率には直接は関係しない。ただし、本論文で使用した再帰反射材は標識用として市販されているものであり、JIS Z 8714¹⁾に基づく再帰反射係数の値がメーカーによって公表されている (試料番号 9 を除く)。参考までに、その値 (製品カタログまたは仕様書で保証されている値) を表 A-1 に示す。

表 A-1 本論文で使用した再帰反射材の再帰反射係数 (仕様)

観測角	入射角	6: プリズム	7: カプセル	8: 封入	9: 封入	10: プリズム
12'	5°	625	250	140	-	800
	30°	325	150	60	-	450
	40°	-	110	20	-	-
20'	5°	500	180	95	-	550
	30°	225	100	45	-	265
	40°	-	95	17	-	-
2°	5°	6.00	5.0	-	-	-
	30°	3.75	2.5	-	-	-
	40°	-	1.5	-	-	-

単位 [cd/(lx・m²)]

注 3) 一例を挙げると、入射光軸からわずかにずれた角度における反射成分（不完全な再帰反射成分）は、運転手が感じる明るさに対応するため、視認性の観点からはむしろ好ましい^{注2)}。よって、標識用の再帰反射材の中には、不完全な再帰反射成分がある程度含まれるように、意図的にばらつきを持たせて設計・製造されているものがある。一方、日射反射の観点からは、適用した面と太陽との間に建物がある場合、光害となる恐れがあるため、不完全な成分は極力少ない方がよいと考えられる。

注 4) 本論文で使用した積分球付属分光光度計は、積分球内部の鏡面反射条件の位置に、光学吸収体が設置できるようになっており、吸収体の有無によって、鏡面反射成分を含めた反射率（吸収体無し）と、含めない反射率（吸収体有り）との両方を測定することができる。吸収体が有るときに測定される分光反射率が拡散分光反射率 $\rho_{\text{Di}}(\lambda)$ であり、吸収体が有るときと無いときの反射率の差分が、鏡面分光反射率 $\rho_{\text{Spe}}(\lambda)$ である。

注 5) 気象観測に使用した測定機器について、全天、天空、直達日射は、英弘精機製、精密全天日射計 MS-802、直達日射計 MS-53 を、風速は、KAJIO Sonic 社製、超音波風高風速計 SAT-530 を、外気温度・相対湿度は、神栄テクノロジー社製、温湿度計 THT-B4T を用いた。これらの観測機器は、大阪市立大学生活科学部棟屋上（大阪市住吉区、北緯 $34^{\circ} 36'$ 、東経 $135^{\circ} 30'$ ）に常設された太陽放射昼光測定システム^{20),21)}の一部であり、その観測地点近傍に試験試料を設置した。

注 6) 試料に入射する日射量 $J_{\text{[W/m}^2\text{]}}$ は、実測した法線面直達日射量と全天日射量を Perez/Ineichen モデルに代入して求めた^{24),25),26)}。

$$J_i = J_{\text{DN}} \cdot \cos \theta_i + J_{\text{SH}\theta} + J_H \cdot \alpha \cdot \frac{1 - \cos \theta_s}{2} \quad (\text{A1})$$

J_{DN} : 法線面直達日射量[W/m²], $J_{\text{SH}\theta}$: Perez の斜面日射量[W/m²], J_H : 水平面全天日射量[W/m²], α : 地物のアルベド係数, θ_i : 直達日射の試料面への入射角, θ_s : 試料の傾斜角。

注 7) 試料番号 9 の再帰反射材は、広角タイプと言われる製品である。表 A-1 に示すように通常の再帰反射材（9 以外の試料）では入射角が小さい（垂直入射）ほど、反射輝度が高いのに対して、広角タイプのものは、入射角が大きい（すれすれ角入射）ほど、反射輝度が高くなるように設計されている（ガードレールなど自動車に対して平行に設置する部位に使用されることを想定した製品）。よって、本論文の測定条件である入射角 7° では本来の再帰反射性能が発揮されていないと考えられる。

参考文献

1) JIS Z 8714-1995 再帰性反射体-光学的測定-測定方法, 日本規格協会 1995
2) JIS Z 9117-1984 保安用反射シート及びテープ, 日本規格協会 1984
3) 酒井英樹, 永村一雄, 井川憲男: 再帰反射材の日射反射特性 (その 1) 照り返し抑制効果の実証実験, 日本建築学会学術講演梗概集 D2, pp.111-112, 2007.8
4) 酒井英樹, 永村一雄, 井川憲男: 再帰反射材の照り返し抑制効果, 日本建築学会構造系論文集 第 630 号, pp.1239-1244, 2008.8
5) 藤本哲夫, 岡田朋和, 近藤靖史: 高反射率塗料の日射反射特性に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 601 号, pp.35-41, 2006.3
6) 近藤靖史, 長澤康弘, 入交麻衣子: 高反射率塗料による日射熱負荷軽減とヒートアイランド現象の緩和に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, Vol.78, pp.17-25, 2000.7
7) Akbari, H.: Cool Roofs Save Energy, ASHRAE Technical Data Bulletin, Vol.14, No.2, pp.1-6, 1998
8) 西岡真稔: 道路舗装による街路の熱環境調整, 環境工学研究 No.253, pp.27-33, 2005.4
9) 西岡真稔: 放射伝熱の観点から見た都市表面の伝熱特性に関する基礎的解析, 日本建築学会環境系論文集, 第 602 号, pp.61-68, 2006.4
10) 近藤靖史, 大木泰祐: クールルーフによるヒートアイランド対策, 建材試験情報, Vol.42, pp.6-14, 2006.5
11) 赤川宏幸, 竹林英樹, 森山正和: 湿潤舗装と遮熱舗装上の温熱環境改善効果に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 623 号, pp.85-91,

2008.1

12) 西岡真稔, 井上智, 中村三智之, 中尾正喜, 鍋島美奈子: 再帰反射を利用した反射パネルの日射反射特性の分析その 1 数値計算方法と再帰反射ユニットの基本特性, 日本建築学会学術講演梗概集 D1, pp.663-664, 2006.9
13) 酒井英樹, 永村一雄, 井川憲男: 分光反射率に基づく建築材料の日射反射率の測定方法-測定条件の妥当性の検討-, 日本建築学会環境系論文集, 第 616 号, pp.31-36, 2007.6
14) JIS Z 8722: 2000 色の測定方法-反射及び透過物体色, 日本規格協会 2000
15) CIE Technical Report, CIE Publication No.15: 2004, Colorimetry, CIE Central Bureau, Vienna, 2004
16) 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, 日本規格協会 1998
17) 馬場弘, 金山公夫, 遠藤登, 金澤浩志: 太陽エネルギー利用のための分光日射量の測定と整理 (第 1 報, Bird のモデルに基づく分光日射特性の比較), 日本機械学会論文集 (B 編) 62 巻 559 号, pp.2847-2853, 1996.7
18) 一ノ瀬雅之, 石野久彌, 永田明寛: 建材の日射透過および反射性能における分光感度特性, 日本建築学会環境系論文集, 第 583 号, pp.15-21, 2004.9
19) 大西晃: 宇宙用熱制御材料の太陽光吸収率の入射角依存性と全半球放射率の温度依存性に関する測定データ, 宇宙科学研究所報告, 第 113 号, pp.1-16, 2000.12
20) Igawa, N. Emura, K. Nimiya, H. and Kikuchi, T.: A Solar Radiation and Daylight Measurement System in Osaka, Japan, 26th Session of the CIE, Beijing, pp. D3.191-D3.194, 2007.7
21) 井川憲男, 永村一雄, 二宮秀典, 菊池卓郎: 大阪市立大学における太陽放射昼光測定システム, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D1, pp.285-286, 2006.9
22) 浦野良美, 中村洋編著: 建築環境工学 森北出版 1996, p.208, 2004
23) 萩島理, 谷本潤, 成田健一: 都市表面の対流熱伝達率に関する既往研究のレビュー, 水文学・水資源学会誌 Vol.17, No.5, pp.536-554
24) R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, and R. Stewart: Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance, Solar Energy vol.44, No.5, pp.271-289, 1990
25) P. Ineichen: The Importance of Correct Albedo Determination for Adequately Modeling Energy Received by Tilted Surface, Solar Energy, vol. 39, No. 4, pp. 301-305, 1987
26) N. Igawa, Y. Koga, T. Matsuzawa, H. Nakamura: Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution, Solar Energy 77, pp. 137-157, 2004

(2008年3月10日原稿受理, 2008年6月27日採用決定)