建材の日射透過および反射性能における分光感度特性

A STUDY ON SPECTRAL SENSITIVITY OF SOLAR TRANSMISSION AND REFLECTION
PERFORMANCE OF ARCHITECTURAL MATERIALS

一ノ瀬 雅之*, 石野 久彌**, 永田 明寛***

Masayuki ICHINOSE, Hisaya ISHINO and Akihiro NAGATA

This paper presents variations of the solar heat gain coefficient and solar reflectance, derived from spectral selectivity of materials and variation of solar spectrum, through spectral sensitivity analysis using multitudes of spectral data of available commercially architectural materials and several calculated typical solar spectrums. To reflect spectral characteristics on the actual calculation, this paper purposes the use of two waveband value: ultraviolet-visible (UV+V) and near-infrared (NIR).

Keywords: Glass, Architectural material, Solar heat gain coefficient, Solar reflectance, Spectral characteristics, Ultraviolet-visible region, Near-infrared region

ガラス, 建材, 日射熱取得率, 日射反射率, 分光特性, 紫外可視光域, 近赤外域

1 はじめに

近年, アトリウムのような特殊な建築に限らず, 一般的なオフィスビルや住宅などの建築においても, 眺望の確保や昼光利用といった観点から開口面積は増大する傾向であり, 透過日射が居住環境へ及ぼす影響や日射熱侵入による熱負荷への影響を, より詳細かつ正確に予測する必要がある。日射の分光分布は太陽高度や大気の状態, 直達および拡散日射によって異なるものであるが, 従来は計算の煩雑さや物性値変化への影響の小ささから¹⁾ 基準太陽光の分光分布を想定した日射物性値²⁾ が一般的に用いられてきた。しかしながら, 近年広く普及するようになった波長選択性の高いガラスにおいては, この単一の指標が日射熱取得算出の誤差要因となることが指摘されている³⁾。また, 波長特性が人体の温熱感に与える影響⁴⁾などを考慮した繊細な環境計画を考える上では, 指標として不足している。

一方, 屋外都市空間に目を向けると, 空間を構成する外皮は, 例えば建築室内への熱負荷低減を目的とした低放射ガラスや, 固有の光学的性質を有する金属パネルなど多様な人工建材で構成されており, これら外皮を介して屋外居住域へ伝達する反射日射は, 近赤外域の成分を多く含むなど天空下とは異なる波長特性となっていることが考えられる。また, 都市を大きなスケールで捉えれば, 近年重要視されるようになったヒートアイランド対策の一環として波長選択性が高い遮熱塗料が用いられることがあり, このような表面の反射日射量の算定において日射の分光分布の変化と併せて誤差要因となり得る。

従来の基準太陽光に対する単一の指標に起因する誤差を明らかにするため, 筆者らはガラスメーカー提供による分光透過および反射率のデータ, 収集した市販建材サンプルを分光放射計で測

定した分光反射率のデータをもとに, 夏季および冬季を代表する日射の分光分布に対するガラスの日射熱取得率および建材全般の日射反射率の感度特性を分析した。ここで, 実用的な計算において詳細な波長毎の計算を行うことはあまり現実的ではないことから, 780nmを境界とする紫外可視光域:UV+V(ultraviolet-visible)および近赤外域:NIR(near-infrared)の2波長帯^{注1)}によって, ガラスの日射熱取得率および建材表面の日射反射率を評価する方法を提案し, 2波長帯による指標の精度を検討した。

なお, 本論文は文献⁵⁾⁶⁾を加筆修正してまとめたものである。

2 日射の分光特性

2.1 Birdの分光日射モデル

地表面近傍における日射の分光分布を与えるモデル式は数多くあるが, Birdのモデル⁷⁾は比較的容易な計算で晴天時の多様な大気状態下での, 波長 λ における法線面直達日射量 $I_{DN}(\lambda)[W/(m^2 \cdot nm)]$ および水平面拡散日射量 $I_{SH}(\lambda)[W/(m^2 \cdot nm)]$ の分光分布を得ることができる。このモデルは簡易な数式と数表で構成されており, 300-4000nmの波長域を扱っている。

実際には, 122の波長に対する大気圏外日射量および大気の吸収係数の数表を入力条件として計算している。大気の状態を表す主要なパラメータは, 太陽高度 h° , 波長500nmにおける大気の混濁度指数 $\tau_{05}[-]$, オゾン厚さ $O_3[atm \cdot cm]$, 可降水量 $W[cm]$ である。大気の状態に応じて, レイリー散乱, エアロゾル減衰, オゾン吸収, 水蒸気吸収および混合ガス吸収の透過率を算出する過程が, このモデルの中心となっている。詳細については文献⁷⁾を参照されたい。

* 東京都立大学大学院工学研究科 博士課程・工修
** 東京都立大学大学院工学研究科 教授・工博
*** 東京都立大学大学院工学研究科 助教授・博士(工学)

Graduate Student, Graduate School of Eng., Tokyo Metropolitan Univ., M. Eng.
Prof., Graduate School of Eng., Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.

2.2 パラメータの設定

前項で述べたモデルが示唆するように、大気の状態によって時々刻々と日射の分光分布は変化する。日射の分光分布に大きく影響を与える要素を列挙すると以下ようになる。

- 太陽高度はレイリー散乱に大きく影響し、太陽高度が高い場合は分光日射量のピークが短い波長にあり、太陽高度が低い場合は長い波長に推移する。
- 大気混濁度が大きくなると、直達日射の可視光域が減衰し、拡散日射の近赤外域が増加する。
- 可降水量が増大すると、水蒸気吸収帯の減衰が大きくなる。

表 1 分光日射の計算条件 (北緯 35.7°, 東経 139.8°)

	月日	時間	h [°]	τ_{05} [-]	W [cm]
夏	7/21	12:00	74.5	0.3	2.9
		17:00	21.0		
冬	1/21	12:00	34.2	0.1	0.9
		16:00	9.0		

本論文ではこれらの変動要因を反映させつつ、真夏と真冬における代表的な分光日射を再現するため、表 1 に示すようにパラメータを設定した。O3 は 0.34、地表面アルベド ρ_G は 0.2、エアロゾルの粒径分布に関する係数 α は 1.14 とした。プログラムは NREL : National Renewable Energy Laboratory にて公開されている SPCTRAL2 を若干変更したものを使用した。

2.3 日射物性値算出に用いた日射の分光分布

図 1 に、上記の条件で算出した法線面直達及び水平面拡散日射量の分光分布を示す。それぞれ基準太陽光 ($\tau_{05}=0.27, O_3=0.34, W=1.42$, エアマス 1.5, 傾斜角 37° における傾斜面日射量) の分光分布を併せて示す。凡例に示す各日射の名前は夏/冬、数値は太陽高度、法線面直達/水平面拡散をそれぞれ表す。凡例の横に全波長域 (300-4000nm) の積分日射量を併記する。図中の縦線は可視光域の終端 (780nm) を示している。太陽高度が高いときの直達日射は基準太陽光と比較的近い分光分布であるが、太陽高度が低いときは分光日射量のピーク位置が大きく異なってくる。拡散日射では基準太陽光と比較して、ピークから近赤外域にかけての低下が急である。

また、図 2 は、これらの分光日射の全波長域積分値に対する各波長までの積分値の割合を示したものである。凡例横の値は、紫外可視光域 UV+V と近赤外域 NIR の日射量比率である。基準太陽光では可視光域終端までの割合が 56% である。太陽高度の低い直達日射では 37% と小さくなるのに対して、夏の日中の拡散日射では 79% まで達しており、エネルギーの分布が大きく異なっていることがわかる。

3 板ガラスの日射物性値の分光感度特性

3.1 ガラスのデータサンプル

検討に用いたガラスの分光透過率および反射率データは、ガラスメーカー提供によるものである^{注2)}。ガラスの種類は、透明 (単層 3, 複層 2), 熱線吸収 (単層 4, 複層 3), 熱線反射 (単層 5, 複層 5), 高遮蔽性能熱線反射 (単層 6, 複層 6), 低放射ガラス (複層 4) の 5 種類 (合計 38) であり、各ガラスとも 5-6mm 厚のデータを選定した。波長域は 300-2100nm までとなっている。

図 3 に、5 種類の代表的なガラスの分光透過率を示す。透明ガ

図 1 Bird モデルによる日射の分光分布

図 2 全波長域積分値に対する各波長までの積分値の割合

ラスは高い透過率で、高遮蔽性能熱線反射ガラスは低い透過率で比較的分光特性である。その他のガラスは 600nm 付近でのピークから近赤外域にかけての減衰が大きく、特に低放射ガラスは紫外可視光域と近赤外域での透過率の差が大きい。このような波長選択性はガラスの原料に添加する金属類やガラス表面に施す金属膜によって生じるものであり、使用する金属の種類や量によって変化してくるが、本論文で扱ったガラスに関しては、ガラス種類ごとに上記のような傾向が見られた。

3.2 代表的なガラスにおける透過率の分光感度特性

一般的な熱負荷計算では、本来傾斜面日射量である基準太陽光の分光分布を平行光線の法線入射と想定して JIS R 3106²⁾ に示されている方法で日射透過率や日射熱取得率を算出しており、直達日射に対しては時々刻々と変化する入射角に応じた入射角特性の係数を、拡散日射に対しては半球積分の係数を乗じて、透過日射量や侵入日射量の算出を行う。ここで、本論文では建材の分光特性に起因する、日射の分光分布の変化によって生じる波長積分値の偏差のみを検討するために、SPCTRAL2 により算出した代表的な 4 つの日時における直達日射及び拡散日射が有する分光分布による平行光線の法線入射を想定して、式 (1) で 300-2100nm の波長積分値を算出し、基準太陽光を用いた既往の算出方法と同列に扱った。ただし、入射角による日射透過率の変化は大きく、特にガラスの屈折率または吸収係数の波長分散が大きい場合やガラスが空気以外の水など波長選

図3 代表的なガラスの分光透過率

図4 日射の分光分布による代表的なガラス透過率の変化

択性のある媒体にガラスが接している場合などは、入射角特性も日射の分光分布ごとに変化が生じるが、本論文ではそこまで立ち入らずに、特定の方位の鉛直面を想定しない法線入射による感度解析と位置付けている。

$$\tau = \int \tau(\lambda) I(\lambda) d\lambda / \int I(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

ここで、

τ : 或る分光分布の入射日射に対する透過率 [-]

$\tau(\lambda)$: 波長 λ における分光透過率 [-]

$I(\lambda)$: 波長 λ における入射日射の日射量 [$W/(m^2 \cdot nm)$]

図4に、上記5つのガラスにおける複数の日射の分光分布に対する日射透過率の変化を、可視光透過率と併せて示す。全般的には、基準太陽光の場合と比較して、直達日射に対しては小さく、拡散日射に対しては大きい値となっている。また、太陽高度が高い時の方が透過率は大きい値となっている。特に、波長選択性の高い熱線吸収、熱線反射および低放射ガラスにおいては有意な差が見られる。

直達日射は拡散日射と比較して長波長側に日射量が分布していること、太陽高度が高い時の日射に対して低い場合の方が同様に長波長側に分布があることにより、可視光域に対して近赤外域での透過率が小さくなるガラスの波長選択性と併せてこのような結果になったことが説明できる。

(a) ガラスの波長選択性と η 値の相関 (b) 日射の状態と η 値の相関図5 ガラスの波長選択性・日射の状態と η 値の偏差との相関性

3.3 2 波長帯による波長選択性の評価

前項の結果は、波長選択性の高いガラスにおいて、日射の分光分布の変動が日射熱取得の計算に誤差を生じさせることを示唆しているが、建築の実用的な熱計算において数多くの波長毎に日射の計算を行うのは煩雑である。そこで、本論文では式(1)での積分波長域を紫外可視光域:UV+V(300-780nm)および近赤外域:NIR(780-2100nm)の2つに分割した指標による評価方法を提案する。なお、反射率および吸収率(分光透過率および反射率から算出)の積分も式(1)と同様に行った。

2波長帯の物性値は例えば透過率であれば紫外可視光域については τ_{UV+V} 、近赤外域については τ_{NIR} のように表記する。これらの値は、各波長帯の日射量^{注3)} I_{UV+V} および $I_{NIR}[W/m^2]$ が乗じる対象であり、数式で表すと式(2)となる。また、基準太陽光の分光分布に対する物性値にはサフィックス^{STD}を付記する。

$$\tau = I_{UV+V} / I \cdot \tau_{UV+V} + I_{NIR} / I \cdot \tau_{NIR} \quad (2)$$

3.4 日射熱取得率の分光感度特性

日射熱取得率(以下 η 値)の算出にあたっては、熱伝達率および温度条件についてはJIS R 3106²⁾に記述されている夏季鉛直面を想定した方法を用いた。日射の透過・反射・吸収率については、3.2節で述べたように直達および拡散日射について平行光線の法線入射を想定した波長積分を行っている。

表2 代表的なガラスの基準太陽光に対する波長帯別の物性値 (“ALL” は全波長帯 300-2100nm での積分値, “可視光” は可視光透過・反射率)

種別	色・厚さ	透過率 [-]				反射率 [-]				η 値 [-]		
		UV+V	NIR	ALL	可視光	UV+V	NIR	ALL	可視光	UV+V	NIR	ALL
透明	3mm	0.878	0.829	0.858	0.902	0.081	0.076	0.079	0.082	0.892	0.862	0.880
	5mm	0.855	0.781	0.817	0.893	0.076	0.069	0.073	0.078	0.878	0.819	0.855
	6mm	0.841	0.732	0.797	0.880	0.078	0.066	0.073	0.080	0.868	0.801	0.841
熱線吸収	ブルー 5mm	0.704	0.442	0.598	0.779	0.068	0.052	0.062	0.072	0.782	0.615	0.715
	グレー 5mm	0.506	0.499	0.503	0.492	0.055	0.056	0.056	0.054	0.656	0.651	0.654
	ブロンズ 5mm	0.552	0.578	0.562	0.558	0.057	0.060	0.058	0.057	0.686	0.702	0.692
	グリーン 5mm	0.597	0.242	0.454	0.732	0.062	0.047	0.056	0.068	0.714	0.485	0.622
熱線反射	クリア 6mm	0.602	0.653	0.622	0.630	0.297	0.123	0.227	0.323	0.636	0.729	0.674
	ブルー 6mm	0.474	0.329	0.415	0.538	0.218	0.086	0.157	0.252	0.580	0.537	0.562
	グレー 6mm	0.317	0.385	0.344	0.301	0.112	0.072	0.096	0.107	0.513	0.571	0.536
	ブロンズ 6mm	0.355	0.460	0.397	0.352	0.126	0.083	0.109	0.130	0.533	0.617	0.567
高遮断性能 熱線反射	グリーン 6mm	0.389	0.165	0.299	0.496	0.168	0.048	0.120	0.219	0.541	0.435	0.498
	シルバー 6mm	0.081	0.060	0.072	0.092	0.389	0.298	0.352	0.419	0.227	0.236	0.231
	シルバー 6mm	0.189	0.141	0.170	0.204	0.221	0.180	0.205	0.231	0.358	0.336	0.349
	シルバー・グレー 6mm	0.326	0.258	0.298	0.342	0.110	0.093	0.103	0.115	0.503	0.462	0.486
高遮断性能 熱線反射	ブルー 6mm	0.268	0.171	0.229	0.300	0.151	0.158	0.154	0.160	0.440	0.370	0.412
	ライトブルー 6mm	0.336	0.233	0.294	0.365	0.184	0.128	0.161	0.192	0.484	0.430	0.462
	シルバー・ライトブルー 6mm	0.272	0.172	0.231	0.300	0.286	0.168	0.238	0.308	0.400	0.364	0.386
透明 (複層)	3mm+空気 6mm+透明 3mm	0.781	0.692	0.745	0.820	0.144	0.128	0.138	0.150	0.811	0.762	0.790
	5mm+空気 6mm+透明 5mm	0.743	0.584	0.679	0.802	0.133	0.110	0.123	0.141	0.792	0.700	0.753
	ブルー 5mm+空気 6mm+透明 5mm	0.615	0.340	0.505	0.700	0.108	0.066	0.091	0.120	0.692	0.490	0.606
	グレー 5mm+空気 6mm+透明 5mm	0.439	0.384	0.417	0.441	0.076	0.074	0.075	0.073	0.546	0.528	0.539
熱線吸収 (複層)	ブロンズ 5mm+空気 6mm+透明 5mm	0.479	0.444	0.465	0.500	0.081	0.083	0.082	0.082	0.578	0.579	0.579
	クリア 6mm+空気 6mm+透明 5mm	0.529	0.490	0.513	0.576	0.325	0.153	0.256	0.355	0.572	0.611	0.589
	ブルー 6mm+空気 6mm+透明 5mm	0.420	0.250	0.351	0.492	0.236	0.075	0.171	0.275	0.501	0.408	0.462
	グレー 6mm+空気 6mm+透明 5mm	0.278	0.291	0.283	0.274	0.120	0.083	0.105	0.115	0.403	0.444	0.420
熱線反射 (複層)	ブロンズ 6mm+空気 6mm+透明 5mm	0.311	0.347	0.325	0.321	0.136	0.098	0.121	0.140	0.427	0.491	0.454
	グリーン 6mm+空気 6mm+透明 5mm	0.347	0.127	0.259	0.454	0.181	0.050	0.128	0.239	0.453	0.301	0.388
	シルバー 6mm+空気 6mm+透明 5mm	0.071	0.046	0.061	0.084	0.390	0.298	0.353	0.420	0.169	0.168	0.168
	シルバー 6mm+空気 6mm+透明 5mm	0.166	0.108	0.143	0.186	0.224	0.181	0.207	0.234	0.283	0.250	0.269
高遮断性能 熱線反射 (複層)	シルバー・グレー 6mm+空気 6mm+透明 5mm	0.285	0.195	0.249	0.310	0.119	0.097	0.110	0.124	0.407	0.351	0.384
	ブルー 6mm+空気 6mm+透明 5mm	0.236	0.129	0.193	0.272	0.157	0.160	0.158	0.157	0.355	0.278	0.323
	ライトブルー 6mm+空気 6mm+透明 5mm	0.294	0.176	0.246	0.332	0.192	0.132	0.168	0.203	0.399	0.329	0.369
	シルバー・ライトブルー 6mm+空気 6mm+透明 5mm	0.237	0.130	0.194	0.270	0.292	0.170	0.243	0.315	0.330	0.275	0.307
低放射 (複層)	グリーン 6mm+空気 6mm+透明 5mm	0.536	0.072	0.349	0.638	0.135	0.459	0.265	0.130	0.616	0.165	0.424
	シルバー 6mm+空気 6mm+透明 5mm	0.618	0.277	0.481	0.703	0.178	0.297	0.226	0.176	0.675	0.394	0.556
	ニュートラルグリーン+空気 6mm+透明 5mm	0.563	0.084	0.370	0.676	0.118	0.447	0.250	0.101	0.638	0.179	0.443
	クリア+空気 6mm+透明 5mm	0.664	0.302	0.518	0.750	0.120	0.263	0.178	0.122	0.724	0.425	0.597

図5は全38のガラスを対象に8種類の入射日射で算出したη値についてガラスの波長選択性と日射の分光分布の関係を分析したものである。図5(a)ではガラスの波長選択性とη値の偏差の関係を検討した。横軸にガラスの波長選択性の指標として基準太陽光での紫外可視光域:UV+V積分値と全波長域積分値の比 $\eta_{UV+V}^{STD}/\eta^{STD}$ を、縦軸にη値の偏差として各入射日射と基準太陽光でのη値の比 η/η^{STD} をとった。横軸の数値が大きいほど、可視光域の日射をよく透過して近赤外域の日射を遮蔽する、室内側にとっては性能の高いガラスの指標といえる(注4)。図中で低放射ガラスは $\eta_{UV+V}^{STD}/\eta^{STD}$ が約1.4で他のガラスより高い値であり、 η/η^{STD} は最小0.8から最大1.2となり、単一の指標 η^{STD} を用いた場合は日射の分光分布によって、約±20%の日射熱取得率の偏差が生じているということになる。その他のガラスは10%以内の偏差である。また、凡例横に回帰式 $y = a(x - 1) + 1$ の係数aおよび相関係数を示しているが、日射の条件(直達・拡散、太陽高度)ごとに波長選択性とηの偏差に高い相関性があることがわかる。

また、図5(b)に示すように横軸に日射の分光分布を表す指標として近赤外域の日射量の全波長域に対する比率 I_{NIR}/I を、縦軸に図5(a)における各日射の分光分布に対する回帰式の係数aをとったところ、高い相関性で回帰式を得た。

ここで、紫外可視光および近赤外域での波長分散が全く無い場合は基準太陽光下の η^{STD} を用いて任意の分光日射下のηは式(3)で表せることから、ガラスの波長選択性を表す $\eta_{UV+V}^{STD}/\eta^{STD}$ と、日射の分光分布を表す I_{NIR}/I によって、全波長域について波長積分した精算のη値に対する補正係数は式(4)で表される。式中の係数は基準太陽光における波長帯日射量の割合を表しており、0.44は I_{NIR}^{STD}/I^{STD} 、2.27は I^{STD}/I_{NIR}^{STD} の値である。この式(4)に対して図5(b)における回帰式による係数は殆ど同じであることから、表2に一覧を示したガラスについては、2波長帯による評価によって精度良く詳細な分光特性を反映することができるといえる。ただし、

本論文で扱わなかった、各波長帯での波長分散が大きいガラスでは、誤差が大きくなることが考えられる。

$$\eta = I_{UV+V} / I \cdot \eta_{UV+V}^{STD} + I_{NIR} / I \cdot \eta_{NIR}^{STD} \quad (3)$$

$$\eta/\eta^{STD} = -2.27(\eta_{UV+V}^{STD}/\eta^{STD} - 1)(I_{NIR}/I - 0.44) + 1 \quad (4)$$

4 建材全般の日射反射率の分光感度特性

4.1 測定対象の建材

表3に測定対象とした建材サンプル100個の一覧を示す。これらの大半は建材メーカー提供によるものであり、一般に市販されているものである。これらの分類および種類はメーカーが表示している用途等に基づいたものである。塗料系に分類した遮熱塗料については、『断熱塗料』と称しているもの等も含めた。各同一種類の建材は、グレー・白を中心に色を揃えた。

表3 測定対象の建材サンプル一覧

分類	種類	数量
タイル系	外壁用タイル	3
	舗装用タイル	3
	レンガ	1
金属板	アルミサッシ	4
	アルミパネル(ポリエスチル樹脂塗装)	6
	ステンレスパネル(樹脂塗装)	15
石材	大理石(天然・人造)	7
	御影石	16
	砂岩・スレート	6
塗装系	一般塗料(アクリル・ウレタンゴム)	5
	遮熱塗料(『断熱塗料』など4社の製品)	16
コンクリート	コンクリート製品(コンクリート、ALC)	2
その他	伝統材料(漆喰・珪藻土など)	5
	舗装材(樹脂系・骨材系)	5
	化粧板(珪酸カルシウム板)	6
計		100

4.2 測定装置の概要

図6に分光反射率計測に用いた分光放射計 (Analytical Spectral Devices, Inc. 製 “Field Spec Pro Full Range JR.”) のシ

図6 測定に用いた分光放射計システムを示す。開口角 25° のグラスファイバーを有する本体と、計測制御およびデータ保存を行う PC、開口角を変更するアタッチメント (1°, 180°) からなる。センサは可視光域 (350-1000nm)、近赤外 1 (1000-1800nm)、近赤外 2 (1800-2500nm) の 3 つが内蔵されており、350-2500nm まで 1nm 間隔で分光放射輝度 $[W/(m^2 \cdot sr \cdot nm)]$ を得る。白色標準試料として SpectralonTM を用いて、入射角 45° における半球分光反射率 $\rho(\lambda)[-]$ を計測した (注5) 注6)。

4.3 分光反射率の特性

図7に半球分光反射率の測定結果の一部を建材の種類別に示す。全般的に紫外可視光域よりも近赤外域での反射率が高い傾向にあるが、a)に示すタイル系のレンガは原料である土の分光特性に由来して、そのような傾向になると考えられる。b)に示す金属板も近赤外域が高くなる傾向にあるが、材料そのものというよりは表面の処理方法や表面皮膜の素材に大きく左右されるようであった。最も波長選択性が大きく見られたのは d)に示す塗料系の遮熱塗料であり、ウレタンゴム塗装 (グレー) と遮熱塗料 (グレー) は同じ色で可視光域でのフラットな特性も類似しているが、近赤外域以降での分光分布は全く異なっている。遮熱塗料は製品による固体差がかなり大きく、表面に微小な凹凸を設けて近赤外域の波長特性を変化させる等の特徴があった。これらの近赤外域の反射率が高くなる材料に対しては、色などによる反射率の推定が難しいといえる。それに対して、c)に示す石材や e)に示すコンクリートは比較的フラットな分光特性である。また、石材やコンクリートと同様に f)に示したその他の漆喰においても 1400nm および 1900nm 付近における水蒸気の吸収による反射率の低下が大きく見られ、含水率によってこの低下の程度が変化する。しかしながら、波長積分値への影響は小さいものと思われる。

4.4 分光感度特性と相関性の分析

ガラスと同様に紫外可視光域 UV+V(350-780nm) および近赤外域 NIR(780-2500nm) の波長帯で分割して日射反射率を評価する。なお、反射率の波長積分は 3.2 節で示したガラスの透過率算出と同様に、拡散・直達日射を平行光線の法線入射と想定して式 (5) で行った。

$$\rho = \int \rho(\lambda) I(\lambda) d\lambda / \int I(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

図8(a)は、横軸に反射率の波長選択性を表す指標として基準太陽光下での近赤外域反射率の全波長域の反射率に対する比 $\rho_{NIR}^{STD}/\rho^{STD}$ をとり、縦軸に任意の入射日射による反射率の

(a) 材料の波長選択性と反射率の変動の相関

(b) 日射の状態と反射率変動の相関

図8 建材の波長選択性・日射の状態と日射反射率の偏差との相関性

基準太陽光下での反射率に対する比 ρ/ρ^{STD} をとったものである。これらは表3に示した100種類の建材を対象にした結果である。図中で横軸 1.7 以上を示しているプロットは図7において高い波長選択性を有していた遮熱塗料であり、日射の分光分布の変化によって基準太陽光での反射率に対して最大で ±40% 程度の偏差が生じることがわかる。また、ガラスの η 値と同様に、日射の分光分布ごとに波長選択性と反射率の変動との間に強い相関性が見られ、各日射ごとに回帰式を作成した。

また、図8(b)に示すように、横軸に近赤外域日射量 I_{NIR} の全波長域の日射量 I に対する比率 I_{NIR}/I と、縦軸に図8(a)における回帰式の傾き a をとったところ、高い相関性で回帰式を得た。

ここで、紫外可視光域および近赤外域における反射率の波長分散が全く無い場合は、基準太陽光下の ρ^{STD} を用いて任意の分光日射下の ρ は式 (6) で表せることから、建材の波長選択性を表す $\rho_{NIR}^{STD}/\rho^{STD}$ と、日射の分光分布を表す I_{NIR}/I によって、全波長域について波長積分した精算の反射率に対する補正係数は式 (7) で表される。式中の係数は基準太陽光における波長帯日射量の割合を表しており、0.44 は I_{NIR}^{STD}/I^{STD} 、1.79 は I^{STD}/I_{UV+V}^{STD} の値である。この式 (7) に対して図8(b)による回帰式の係数は、ガラスの場合ほど近い値とはならないが、図7や表4に一部を示した建材についても、概ね2波長帯

図7 種類別の代表的な建材の分光反射率（入射角 45° 時の半球積分値）

で評価できるといえる。図7や表4は、本論文で対象とした建材試料を具体的な数値として示したものであるが、汎用的に扱うにはより多くの建材データを集積する必要がある。

$$\rho = I_{UV+V} / I \cdot \rho_{UV+V}^{STD} + I_{NIR} / I \cdot \rho_{NIR}^{STD} \quad (6)$$

$$\rho / \rho^{STD} = 1.79 (\rho_{NIR}^{STD} / \rho^{STD} - 1) (I_{NIR} / I - 0.44) + 1 \quad (7)$$

表4 代表的な市販建材の基準太陽光に対する波長帯別の日射反射率

分類	種類：色	UV+V	NIR	ALL
タイル系	レンガ	0.18	0.53	0.34
	外壁タイル：茶	0.23	0.38	0.30
	外壁タイル：グレー	0.25	0.36	0.30
金属板	アルミ板：ゴールド	0.59	0.83	0.70
	ステンレス板：青	0.23	0.41	0.31
	ステンレス板：ベージュ	0.25	0.38	0.31
	ステンレス板：黒	0.06	0.11	0.08
石材	大理石：白	0.57	0.49	0.53
	大理石：アイボリー	0.45	0.64	0.53
	御影石：赤	0.27	0.35	0.31
	スレート：緑	0.18	0.16	0.17
塗装系	遮熱塗料：白	0.95	0.93	0.94
	遮熱塗料：グレー	0.16	0.57	0.34
	遮熱塗料：青	0.10	0.56	0.31
	ウレタン系塗料：白	0.91	0.91	0.91
	ウレタン系塗料：グレー	0.24	0.19	0.21
コンクリート	ALC素地	0.56	0.62	0.59
	コンクリート	0.31	0.40	0.35
その他	樹脂系舗装材：青	0.25	0.39	0.32
	珪酸カルシウム板：青	0.31	0.59	0.43
	珪酸カルシウム板：茶	0.41	0.43	0.42
	漆喰	0.73	0.88	0.80

5 まとめ

1. ガラスメーカー提供の分光データを元に算出した η 値の分光感度解析から、波長選択性の高い高性能なガラスほど

入射日射の分光分布による偏差が大きく、直達・拡散日射および太陽高度の高低といった変化に対して、従来の単一の η 値では熱負荷計算などにおいて無視できない誤差が生じ得ることがわかった。

2. 市販建材の分光反射率の測定結果から、近赤外域での反射率が高くなるものが多いことがわかった。特にタイル、金属板や遮熱塗料でその傾向は顕著であった。測定データを元に算出した日射反射率の分光感度解析から、波長選択性の高い遮熱塗料では日射の状態によって、従来の単一の日射反射率の指標が大きな誤差要因となることがわかった。
3. 建材が有する分光特性と日射の分光特性を紫外可視光域:UV+Vと近赤外域:NIRの2波長帯によって簡易的に扱い、代表的な数種類の分光日射での精算値との比較を行なった結果から、詳細な波長毎の評価を行わなくても2波長帯による評価によって日射および建材の分光特性を概ね反映できることがわかった。
4. 紫外可視光域と近赤外域における建材物性値の分光特性と、日射の分光特性から、波長毎の精算値を得られる近似式を示した。本論文で扱った建材試料の解析結果による回帰式と近似式の係数は近い値であったが、この近似式をあらゆる建材に適用できるかについては、より多くの試料を用いた検証が必要である。また、本論文で扱った建材試料の波長帯別の物性値を示したが、これらについても今後より多くのデータ蓄積が必要である。

【注記】

注1) 本論文で波長帯を2つに分ける波長を780nmとした理由は、日射の2波長帯モデル化⁹⁾という面では、水蒸気による吸収が780nm以下で殆ど無視できること、日射のレイリー散乱の影響が近赤外域で殆ど無くなること、大気圏外の日射エネルギーが780nmで約半分(55:45)に分けられることなどから日射のモデル化が容易であるためである。建材側では、780nmが可視光域の終端であるた

めである。また、ASHRAE Fundamentals⁸⁾において、ガラスの物性値を2波長帯で扱う概念の記述がある。

注2) ガラスの分光透過反射率の計測方法および使用した分光測光器はJIS R 3106²⁾による規定(波長範囲:300-2500nm, 分解能:5-50nm, 測光精度:測光値の正確さは最大目盛りの1-2%以下で繰り返し精度は0.5-1%以下, 波長精度:波長目盛りの偏りは分光器の透過波長帯域の中心波長から1-5nm, これらの条件を満たした分光光度計に受光用の積分球を付属した分光測光器を用い, 透過率は入射角0°にて空気のみとの比較, 反射率は入射角15°以内に標準試料との比較によって計測)に従ったものである。

注3) 晴天日における紫外可視光域および近赤外域の波長帯別の日射量については、永田によって近似式が示されている⁹⁾。

注4) 波長選択性を表す指標として佐野による熱光比¹⁰⁾(=可視光透過率 η 値)による検討も行ったが、相関性が低くなった。ここでは2波長帯による評価の精度を検討することを目的としているので、より相関性が高かった $\eta_{UV+V}^{STD}/\eta^{STD}$ を指標とした。

注5) 板ガラスの分光反射・透過率の測定方法としてJIS R 3106²⁾に記述されている積分球を用いた計測方法があるが、拡散性の高い材料の測定方法は確立されていないと云われている¹¹⁾。本論文では図A-1に示す入射角と反射角を任意に設定可能な計測台を用いて、入射角45°における反射輝度の分布を入射面内について18点計測し、式(A-1)により算出した単位立体角あたりの反射率 $\rho(\theta_I; \theta_R, \phi_R)$ [1/sr]の角度分布について、拡散反射成分と指向反射成分への分離および関数化を牧野¹²⁾による方法で行ない、式(A-2)による半球方向への積分で半球反射率を算出した。なお、建材表面の反射指向特性は入射角によって大きく変化するが、本論文は波長特性に関する感度解析という位置付けであるので角度特性については扱っていない。また、入射角は45°として測定しているが、建材の分光反射特性に大きく影響する拡散反射成分は入射角による変化は少ないので、本論文の検討において問題ないと判断した。

$$\rho(\theta_I; \theta_R, \phi_R) = RD(\theta_R, \phi_R) / I(\theta_I) \quad (A-1)$$

$$\rho(\theta_I) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi/2} \rho(\theta_I; \theta_R, \phi_R) \cos \theta_R \sin \theta_R d\theta_R d\phi_R \quad (A-2)$$

ここで、

$RD(\theta_R, \phi_R)$: 反射放射輝度測定値 [W/(m²·sr)]
 $I(\theta_I)$: 光源から試料面への入射放射照度 [W/m²]
 (白色標準板の反射輝度測定値から算出)

図A-1 反射率角度分布の測定装置

注6) 本論文では、文献¹²⁾を参考に正反射方向から前後5°以内は2.5°刻み、15°以内は5°刻み、それ以外は5-15°刻みと、指向特性のピークが生じる正反射方向付近の計測点数を細かくして計18点としたが、計測点数を30点とした場合と比較したところ、18点の場合と比べて半球反射率が高々2%以内の差であった。また、測定は入射面内のみであるが、図A-2に示すように等方散乱を仮定した反射モデルとの相関性がよいことから、入射面外の反射成分を測定していないことに起因する誤差は小さいものと判断した。また、計測の再現性について5回の試行を行ったところ、半球反射率で1%程度の誤差（各波長について変動係数で確認）であったことから再現性について問題はないと判断した。また、分光放射計の精度はガラスの測定についてのJIS R 3106²⁾の基準と同等の性能を有しており、測光精度についても問題はないと判断した。

図A-2 反射率角度分布の測定値とモデルによる関数化（入射面内 $\phi_R=0^\circ$ ）

【謝辞】

旭硝子(株)からガラスの分光データの提供を、工学院大学野部達夫助教授から漆喰など伝統建材の利用を、また、多数の建材メーカーから建材サンプルの提供を得た。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 宿谷昌則：数値計算で学ぶ光と熱の建築環境学, pp.167-173, 丸善, 1993 年
- 2) 日本規格協会：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
- 3) W.Ross McCluney, Sensitivity of Fenestration Solar Gain to Source Spectrum and Angle of Incidence, ASHRAE Transactions, Vol.102 Part2, pp.112-122, 1996
- 4) 成田千恵, 田辺新一, 尾関義一, 小西正哲：日射の波長特性が温熱感に与える影響に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集第545号, pp.29-35, 2001 年7月
- 5) 一ノ瀬雅之, 石野久彌, 永田明寛：建材表面の日射反射率における分光感度特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D2, pp.373-374, 2003 年9月
- 6) 一ノ瀬雅之, 石野久彌, 永田明寛, 松本光代：窓システムの分光感度特性と配光特性に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.21-24, 2003 年9月
- 7) Richard E. Bird, A Simple, Solar Spectral Model for Direct-Normal and Diffuse Horizontal Irradiance, Solar Energy, Vol.32 No.4, pp.461-471, 1984
- 8) ASHRAE. 2001. 2001 ASHRAE handbook - Fundamentals, 30.21 - 25, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- 9) 永田明寛：2波長域に分けた日射量近似モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D2, pp.49-50, 2003 年9月
- 10) 佐野武仁：膜構造建築に用いる塩ビ膜とフッ素樹脂膜の光特性と熱特性に関する実験研究, 日本建築学会計画系論文報告集第451号, pp.19-27, 1993 年9月
- 11) 石積広行, 倉山千春, 上乘正信, 斉藤栄亮：開口部構成部材の光学特性 その1 フレーム部における光学性能の測定及び色による分類, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D2, pp.369-370, 2003 年9月
- 12) 牧野俊郎, 中村彰成, 若林英信：金属のあらい表面におけるふく射反射の角度特性とその伝熱パラメータ表現, 日本機械学会論文集(B編) 65巻630号, pp.324-330, 1999 年2月

(2003年11月7日原稿受理, 2004年5月11日採用決定)