太陽光に対する屋外環境表面の分光反射特性に関する研究*

吉田 篤正^{*1}, 出井 誠一^{*2}
富永 和秀^{*3}, 故国 友孟^{*1}

Spectral Reflectances of Environmental Surfaces for Solar Radiation

Atsumasa YOSHIDA, Seiichi IDEI,
Kazuhide TOMINAGA, and Takeshi KUNITOMO

Field investigations on spectral hemispherical reflectances of typical natural and artificial surfaces in urban and rural areas (environmental surfaces) have been performed for solar irradiation in the wavelength range from 0.4 to 1.7 μm . Reflectance measurement is carried out accurately by a newly designed compact field spectrometer using an optical fiber and an integrating sphere with a wide view angle, regardless of the angular distribution of incident and reflected solar radiation. The reflectances of all environmental surfaces except snow cover are low in the visible region. A large difference is found between real surfaces and clean specimens. As the solar height decreases, the reflectances of vegetative fields become clearly higher in the infrared region. As the water content increases, the reflectances of permeable environmental surfaces become lower mainly in the infrared region.

Key Words: Thermal Radiation, Environmental Engineering, Spectral Hemispherical Reflectance, Environmental Surface, Solar Energy, Field Measurement

1. 緒 言

地球-大気系の熱環境から、都市のヒートアイランド現象のような都市スケールの熱環境、さらによりミクロなスケールの熱環境までを正確に把握し制御して行くうえで、種々の気象条件下に置かれる実在表面(層)、すなわち、環境表面における熱輸送状況を知ることが重要である。その基礎となるのが環境表面の太陽光に対する分光半球反射率である。これまでにリモートセンシング、バイオテクノロジーなどの観点から測定は行われてきたが、反射率の定義が不明確であったり、対象とする波長域が限られている研究例が多かった⁽¹⁾。

測定は対象とする環境表面のある現場において、表面状態を変えることなく、手軽に測定できることが大切である。また、その環境表面を代表する反射率を得るためには、検知器が対象とする環境表面の広い領域を見ている必要がある。

本研究では、これらの点に留意しながら、屋外で手

軽に測定ができるコンパクトな分光半球反射率測定装置を開発する。半球的に入射してくる太陽光(直達光成分と拡散光成分)および反射光を広い視野角で集光するため、集光部に積分球を用いる⁽²⁾。このため、指向性の強い光が入射してくる場合でも正確な測定が可能となる。また、装置の設置による反射光への影響を最小にするため、集光部と分光・検知部を分離し両者を光ファイバで結ぶ。この装置を用い、環境表面の太陽光入射に対する半球反射率を、地表面に到達する太陽ふく射エネルギーの大部分を占める0.4~1.7 μm の波長域にわたって分光学的にフィールド測定をする。その際、入射太陽光の直達光と拡散光成分の比率とそれらのスペクトル分布に影響を与える天候、太陽高度(直達光の入射角度)など太陽光の入射条件と含水率などの表面状態を考慮する。

2. 測定装置と測定方法

測定装置の概略を図1(集光部)、図2(分光・検知部)に示す。集光部に用いた積分球は直径160 mmである。その内面にはBaSO₄粉末を塗布する。集光部と分光・検知部を分離するのにコア径800 μm の石英ファイバを7本束ねたバンドルタイプのものを使用する。測定に際しては、直達光の一次反射光が直接光フ

* 昭和60年5月22日 第22回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和62年5月11日。

^{*1} 正員、京都大学工学部 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

^{*2} 京都大学大学院。

^{*3} 京都大学工学部。

ファイバに入射しないよう積分球の設置の方位を考慮した。

図1に示すように、半無限的に広がった測定面に一様に入射した太陽光は半球状に反射する。このとき、測定面からある高さにおける水平面において、上方と下方からのエネルギー流束の比が対象測定面の太陽光入射に対する半球反射率である。測定表面の材質の不均一性や凹凸面などの影響はそのスケールに対して十分に高い位置で測定すれば解消できる。実際には、積分球の高さを変えて予備測定を行い、反射率が同じ値を示す高さ以上で本測定を行った。本研究では積分球の高さを約1~2mとした。

測定方法は、(1)まず、上部シャッターのみを開け太陽光を積分球内に入射させる。(2)次に、上部シャッターを閉じ下部シャッターを開け反射光を入射させる。(3)最後に下部シャッターも閉じる。この一連の測定に要する時間は1波長点について約20秒であるので、天候の急激な変化がある場合を除いて測定は十分に可

能である。シャッターは分光・検知側から遠隔操作する。(1)~(3)の状態の検出器の出力をそれぞれ E_s , E_g , E_0 とすれば、測定面の半球反射率 R_h は次式で表される。

$$R_h = (E_g - E_0) / (E_s - E_0) \quad \dots\dots\dots (1)$$

各状態において積分球内部は、入射エネルギー流束に比例した空間放射強度を有し、その一部が光ファイバを通して分光・検知側へ導かれる。図2に示すように、光ファイバを出た光は光学チョップ、レンズ、光学フィルタを通過し、分光器で分光された後、検知器により検出される。光ファイバ出口以降の定常的な光はチョップとロックインアンプを同期させることにより無視できる。検知器は波長1.0 μm 以下ではシリコンフォトダイオード、1.0 μm 以上ではPbSセルを-10°Cまで冷却して用いた。

3. 結果と考察

図3~16に屋外環境表面の代表的なものについての測定結果を示す。図中に測定時の天候、太陽高度(入射角度) h を示す。

図1 測定装置概略図(集光部)

図3 砂面の分光半球反射率

図2 測定装置概略図(分光・検知部)

図4 砂質土壌の分光半球反射率

3.1 砂面と土壌 (図3~5) 図中に含水率 M. C. を示す。含水率は次の手順で求めた。測定面数箇所からサンプルを採取し重さを測定する。自然乾燥した後もう一度重さを測定し、その比から含水率を求めた。半球反射率 R_h は可視域から徐々に上がり、近赤外域では可視域に比べてかなり高くなる傾向が全般に見られる。砂面、砂質土壌、粘質土壌の順に R_h は低くなる。いずれの面も水分を含むと R_h は低下し、その傾向は近赤外域で顕著である。波長 $1.4 \mu\text{m}$ に水の吸収帯が現れている。粘質土壌では含水率が零に近い状態でも水の吸収帯が見られる。この土壌が元来構造的に水を含むためである。

3.2 砂利面と石畳面 (図6, 7) 砂利面の半球反射率 R_h は、ほぼ 10 % の低い値で波長依存性はない。砂面の R_h と傾向が異なるのは、花こう岩など低反射率の材質⁽³⁾から構成されているためである。石畳面の R_h は砂面と砂利面の中間の値を有している。

図5 粘質土壌の分光半球反射率

図6 砂利面の分光半球反射率

図7 石畳面の分光半球反射率

3.3 コンクリート面とアスファルト面 (図8, 9)

図8, 9の*印は散水後の状態を表す。汚れ、劣化のない清浄なコンクリート面の半球反射率は30%前後で波長依存性はあまりないが⁽³⁾、実在表面は砂面や土壌に近い R_h を有している。これはコンクリート表面に土砂がついて汚れているためである。含水状態でも砂面や土壌と同じく近赤外域で大きく R_h は低下し、水の吸収帯が現れている。アスファルト面は舗装時に原液に砂利などを混入するため、原液の R_h (5%以下で一定⁽³⁾) に比べて高い値を示している。散水後も R_h の明らかな低下は見られなかった。

3.4 屋上用材料 (図10) 合成樹脂系統の防水および断熱ラバー3種の結果である。試料1, 2が緑色、試料3が灰色であった。可視域で色合いに応じた波長依存性を示すが、近赤外域ではほぼ一定である。

図8 コンクリート面の分光半球反射率

図9 アスファルト面の分光半球反射率

図10 屋上用材料の分光半球反射率

3.5 水面 (図 11) 全体的に反射率は低い。可視域では下面 (水ごけ) の反射の影響が出ていると考えられる。水深は約 0.1 m であった。波長 0.9 μm より長い波長域では水の吸収係数の増大とともに、反射率スペクトルは界面反射に支配される。太陽高度の低下とともに近赤外域で R_h は増加しているが、その増加の大きさは水平面に対する界面反射 (フレネル反射) の上昇ほどではない。これは水の流れにともなう波面の影響である。

3.6 植生と人工芝 (図 12~15) 図 12 は緑色の天然植生 (天然芝) の結果であり、構成する葉の分光反射特性⁽⁴⁾に似た形状を示す。可視域では波長 0.4~0.5, 0.65 μm にクロロフィルの吸収が見られ、低い反射率 R_h を示す。0.75 μm から R_h は急激に増大し、1.3 μm

までかなり高い値を示す。この領域では細胞間空げきによる散乱が支配的である。それより長波長側では水の吸収が反射率スペクトルを支配している。太陽高度が低くなるほど R_h は増加している。これは植生内部への光の侵入程度によると考えられる。図 13 は天然芝が枯れた場合の結果である。天然芝の場合 (図 12) と比べるとクロロフィルの吸収がなくなり、可視域で R_h は直線的に増加している。一方、近赤外域の 1.4 μm までの反射率の低下が大きい。刈入直前の稲のスペクトル (図 14) は枯芝のそれと似た形状を示す。 R_h の太陽高度依存性は天然芝の場合より大きく、植物の高さが影響していると考えられる。また、近赤外域のほうが太陽高度の影響を受けやすい。これは、入射太陽光のなかで占める直達光の割合が可視域に比べて大きいためである。人工芝の半球反射率 R_h は水の吸収帯がない以外は緑色の天然芝 (図 12) の傾向とよく似ているが、反射率の値はやや低い。

3.7 雪面 (図 16) 測定地域 (福井市郊外) の積雪は約 0.8 m であった。測定結果とともに Wiscombe ら⁽⁵⁾による計算結果も示す。破線は雪を球形の水から

図 11 水面の分光半球反射率

図 12 天然芝の分光半球反射率

図 13 枯芝の分光半球反射率

図 14 稲の分光半球反射率

図 15 人工芝の分光半球反射率

なるものと仮定して計算した散乱アルベド ω , 実線は太陽高度 $h=30^\circ$ のときの半球反射率 R_h である。可視域では散乱アルベドが1に近く散乱が支配的であり、高い R_h を有している。波長の増加とともに水の吸収が支配的になり、測定結果が示すように波長 1.05, 1.25, 1.5 μm に水の吸収帯が見られる。可視域では図 16 に示した計算値および他の雪面のデータ⁽⁶⁾と比べて低い値を示している。これは雪がエアロゾルなどにより汚れているためと考えられる。近赤外域では時間の経過（測定はデータ 1→2→3 の順に行った）とともに半球反射率 R_h は大きく低下している。これは気温が上昇し、表面から融解が進み、空気が解けた水で満たされたためである。近赤外域でその影響が大きいのは水の吸収係数が大きいからである。

3.8 全半球反射率（アルベド） 本測定で得られた分光半球反射率を用いて、快晴時のエアマス=2の太陽光スペクトル $F(\lambda)$ ⁽⁷⁾ に対し、次式よりアルベド r を算出した。

$$r = \frac{\int F(\lambda) \cdot R_h(\lambda) d\lambda}{\int F(\lambda) d\lambda} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 λ は波長である。その結果を表 1 に示す。表中の番号はそれぞれの環境表面の測定条件（図 3～16）を示す。環境表面に入射する太陽ふく射エネルギーの反射率を表すアルベドは環境表面あるいはそれを含む系の熱環境を評価する際の重要な指標である。しかし、表 1 に示すように砂面、土壌面、コンクリート面および雪面は環境表面の状態（含水率、融解の程度）により、植生面は入射太陽光の条件などによりアルベドの値が大きく影響される。屋外環境表面のアルベドの大小関係を見ると、雪面は他の屋外環境表面に比べてかなり

高いアルベドを有している。一方、水面のアルベドが最も小さい。

4. 結 言

(1) 屋外における環境表面の太陽光に対する半球反射率を分光学的に手軽に測定できる集光部に積分球を用いる装置を開発した。この装置を用い、代表的な屋外環境表面において測定を行い、分光半球反射率を正確に測定できることを示した。

(2) 雪面の反射率スペクトルは他の環境表面と異なり、近赤外域より可視域でかなり高い傾向を示し、アルベドも屋外環境表面の中では最も高い。

(3) コンクリートとアスファルトの実在表面は、表面の汚れ、劣化により反射率が大きく変化する。

(4) 植生面では、植物が枯れると反射率スペクトルは大きく変化する。また、近赤外域の分光反射率に太陽高度（入射角度）依存性が見られ、植物の高さが高い程顕著である。

(5) 透水性の環境表面は、含水率が増加すると主に近赤外域で反射率が低下する。

表 1 屋外環境表面の太陽光に対するアルベド (%)

Sand	Stone Pavement	2	27
1 40	1 26	3	31
2 39	2 25	4	24
3 38	3 25	Dead Lawn	
4 30	Concrete	1	23
Sandy Soil	1 23	2	24
	2 23	3	25
	3 22	4	23
	4 13	Rice Field	
4 25	Asphalt	1	22
5 21	1 14	2	23
6 22	2 15	3	24
7 21	3 15	4	26
8 18	4 14	5	27
Clayey Soil	Roof Materials	6	30
1 15	1 13	7	20
2 10	2 12	Artificial Lawn	
3 11	3 16	1	16
4 9	Water Surface	2	16
Gravel	1 10	3	18
	2 8	4	19
	3 6	Snow	
3 12	Natural Lawn	1	74
4 12	1 25	2	67
		3	61

図 16 雪面の分光半球反射率

文 献

- (1) 例えば, Doda, D. D. and Green, A. E. S., *Appl. Opt.*, 19 (1980), 2140.
- (2) 羽生・ほか2名, 電子技術総合研究所研究報告, 830 (昭58), p. 175.
- (3) Kunitomo, T., ほか3名, *Res. Natural Energy*, 8 (1984), 75.
- (4) Gates, D. M., ほか3名, *Appl. Opt.*, 4 (1965), 11.
- (5) Wiscombe, W. J. and Warren, S. G., *J. Atmos. Sci.*, 37 (1981), 2712.
- (6) Choudhury, B. J. and Chang, A. T. C., *J. Geophys. Res.*, 86 (1981), 465.
- (7) Valley, S. L., *Handbook of Geophysics and Space Environments*, (1965), p. 683, McGraw-Hill.