

## 再帰性日射反射体の実験的性能評価法

### —変角放射輝度計の製作と BRDF の測定—

#### EXPERIMENTAL STUDY ON PERFORMANCE EVALUATION OF SOLAR DIRECTIONAL REFLECTOR - FABRICATION OF GONIORADIOMETER AND MEASUREMENT OF BRDF -

地域環境計画分野 太田翔也

ヒートアイランド抑制対策として、天空への日射反射量を大きくできる性質をもつ再帰性反射体の研究を進めてきた。本研究では、再帰性反射体の平均的 BRDF、かつ、広い範囲における BRDF を測定できる装置を製作した。また、測定装置に用いる機器の測定精度を検証し、再帰性反射体の BRDF の測定を行った。再帰性反射体の BRDF は、再帰反射方向で BRDF のピークを示し、そこから離れるに連れて BRDF は低下する、一般的な再帰性反射の分布形状を測定することができた。

I have studied the solar retroreflectors, as the urban heat island countermeasure. In this study, to fabricate a Gonioradiometer which can measure the average BRDF and wide range of BRDF. Also, to verify the accuracy of the instruments and measure the BRDF of retroreflector. Measurement of the BRDF show peak in retro-reflect direction and BRDF is decreased as it goes away from there. Measurement of the BRDF is general retroreflective distribution which measured.

#### 1. はじめに

近年、都市部においてヒートアイランド現象が顕著となりつつある。この原因として、建物の凹凸の増加のための風通しの悪さや日射吸収率の増加、建物からの人工排熱の増加などの問題が指摘されている。

この現象を抑制する対策として、建物表面の反射率を高める高反射率塗料などの技術が普及しつつある。しかし、この反射は拡散反射が主体なため、天空率が1に近い開放的な建物屋根面では日射が天空へ戻るが、周囲を建物が囲む都市キャニオンでは、表面の反射の半分以上が地上へと向かい、最終的に吸収されてしまうことが考えられる。そこで、都市内の建物壁面において、夏季の太陽光を天空方向へ反射することができればこの問題を解決できるはずである。

本研究では、ヒートアイランド現象の抑制対策として、照射方向と同方向に光を反射する性質を持つ再帰性反射体の性能評価に関する研究を進めてきた。再帰性反射体の性能は、その反射特性を測定することで評価することができる。しかし、本研究では 5~10[cm] の寸法の反射体を対象としているため、市販の光度計では、測定できる寸法に制限があることや再帰反射方向の測定をする場合、光源と受光器が重なり測定することができない。

既往研究<sup>(1)</sup>では、再帰性反射体の反射特性を測定できる装置を製作し、その双方向反射率分布関数(以下、BRDF)の測定を試みた。

しかし、この測定では、用いた輝度計の視野角が小さく反射体の部分毎の BRDF しか測定できなかった。

また、BRDF とはある照射方向に対して広い角度範囲(受光角)における反射率の分布関数であるのに対して、測定できる角度に制限があり、照射角0度に対して受光角が0~25度のみ測定しか出来なかった。

本研究では、輝度計の視野角を広げて反射体全体の平均的 BRDF の測定を可能とし、かつ、広い範囲における BRDF を測定できる装置を製作する。また、測定装置に用いる機器の測定精度を検証し、再帰性反射体の BRDF を測定する。

#### 2. 変角放射輝度計について

##### 2.1 変角放射輝度計の製作

BRDF は、式 1 で定義される。光源から試料への入射光の放射照度を測定するとともに、試料の反射光の放射輝度を受光器で測定する(図 1)。BRDF は照射角と受光角によって変わる材料固有の分布形状となる。そこで、光源と受光器を動かし、照射角と受光角毎の反射率を求めることにより BRDF の分布形状が測定される。

以上の基本測定法に準じて変角放射輝度計を設計した(図 2)。本研究では、試験体全体に均等な平行光を照射するため光源として太陽光を用いることにした。また、再帰性反射体を測定対象とするため、再帰反射方向では、光源と受光器が重なることが考えられるため、光路の途中にハーフミラーを固定し、受光器と照射光の光路が干渉しないように設計した。ハーフミラーとは、光束を2つに分割する鏡のことで、一部がミラーを透過し、一部がミラーで反射する。図 2 に示す変角放射輝度計において、照射角を変える場合は、試験体上の軸を中心に回転する。受光角を変える場合は、測定装置上で三角形の位置関係に配置されている試験体、ハーフミラー、遮光筒式輝度計の位置関係を維持したまま、支持板上の軸を中心として回転する。

## 2.2 遮光筒式輝度計

図 3(A)に示す、遮光筒式輝度計とは、視野角  $\theta$  を定めれば、その立体角内に入射する光を測定する。本研究で用いる遮光筒式輝度計の視野角は、図 4 に示す密になった整列配置をとる再帰性反射体の1つのユニットの開口面の大きさ(50×25[mm])と遮光筒式輝度計から試験体までの距離(500[mm])を勘定すると、6.5 度以上であれば反射体の開口面よりも測定範囲が大きくなる。但し、照射角を変角する場合、輝度計から覗く反射体の見かけの面積が小さくなる。そこで、見かけの面積に合わせて視野角を 2.5, 4.7, 6.8 度とした。

しかし、実際には図 3(B)に示す、 $\theta'$  で照射する光を若干含む。一方で、この  $\theta'$  の範囲は不明であり、この範囲が再帰性反射体の開口面より大きければ、試験体以外からの反射光を測定していることが考えられる。そこで、この不明である  $\theta'$  を予め確認する。

輝度計は、放射照度センサー(DeltaOHM:LP471RAD)を用いるため、測定値が放射照度となる。一方で輝度計は、その立体角内に入射する放射束と開口部の面積によって放射輝度が決まるため、式 2 を用いて放射照度を放射輝度に変換し、これを輝度計の測定値とする。

## 2.3 BRDF の算出方法

式 1 で示される BRDF において、放射輝度は図 2 の輝度計の測定値を式 3 より変換する。輝度計の測定値は、ハーフミラーを介して測定されているためハーフミラーの反射率  $\rho_M$  で補正する。

放射照度は、図 2 の放射照度センサーの測定値を式 4 より変換する。試験体に照射する放射照度は、ハーフミラーを透過した値であるため、ハーフミラーの透過率  $\tau_M$  で補正する。

すると、式 1 は式 5 で表される。本研究では、式 5 より BRDF を算出する。

表 1 測定器の仕様

LP471RAD (DeltaOHM)	測定範囲(W/m <sup>2</sup> )	0.1×10 <sup>-3</sup> ~999.9×10 <sup>-3</sup> , 0.1×10 <sup>-3</sup>
	分解能(W/m <sup>2</sup> )	1.000~19.999, 0.001
		20.00~199.99, 0.01
		200.0~1999.9, 0.1
	波長範囲	400~1050
UV-3600 (SHIMADZU)	測定波長範囲(nm)	185~3300
	測定波長間隔(nm)	1
GCMS-4 (MCRL)	測定波長範囲(nm)	390~730
	測定波長間隔(nm)	10

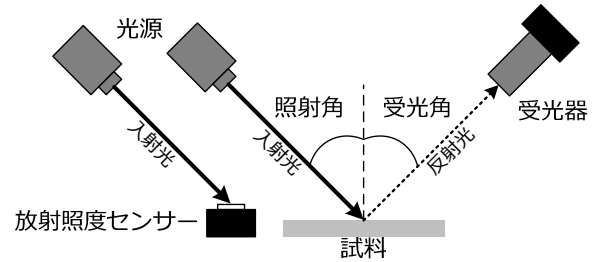


図 1 BRDF の基本的測定方法

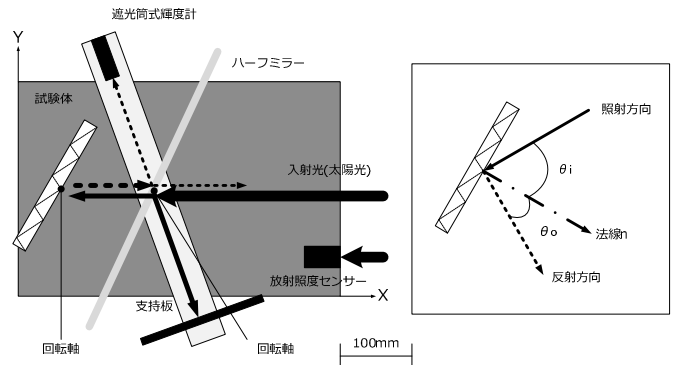


図 2 変角放射輝度計 (平面図)

$$BRDF = \frac{L}{E} \quad \text{式 1}$$

$$L_R = \frac{1}{\omega} \cdot E_R \cdot S_S \cdot \frac{1}{S_O} \quad \text{式 2}$$

$$L = \frac{L_R}{\rho_M} \quad \text{式 3}$$

$$E = \tau_M E_S \cos \theta_i \quad \text{式 4}$$

$$BRDF = \frac{L_R}{\tau_M \rho_M E_S} \quad \text{式 5}$$

BRDF: 双方向反射率分布関数 [1/sr]

L: 放射輝度 [W/m<sup>2</sup>sr]

L<sub>R</sub>: 式 2 より算出した放射輝度 [W/m<sup>2</sup>sr]

E: 放射照度 [W/m<sup>2</sup>]

E<sub>R</sub>: 輝度計の測定値 [W/m<sup>2</sup>]

E<sub>S</sub>: 放射照度センサーの測定値 [W/m<sup>2</sup>]

ω: 輝度計の立体角 [sr]

ρ<sub>M</sub>: ハーフミラーの反射率 [-]

τ<sub>M</sub>: ハーフミラーの透過率 [-]

S<sub>S</sub>: 放射照度センサーの受感部の面積 [m<sup>2</sup>]

S<sub>O</sub>: 輝度計の開口部の面積 [m<sup>2</sup>]

### 3. 測定器の精度の確認

#### 3.1. ハーフミラーの透過率と反射率の積の算出

BRDF の算出には式 5 に示すハーフミラーの透過率と反射率の積  $\tau_M \rho_M$  が必要になる。そこで、反射率が既知である反射材を用いて  $\tau_M \rho_M$  を算出する。

$\tau_M \rho_M$  は、図 2 に示す装置上に反射率  $\rho_W$  が既知である反射材を設置し、放射照度センサーと輝度計より  $E_S$ ,  $L_R$  を測定し、式 6 を用いて算出する。反射材には、白色拡散板を用いた。また、式 6 は、式 4 と式 7 より算出した。測定は晴天時に行い、放射照度センサーは 1 秒間隔に設定し、各視野角の輝度計毎に 5 分間隔で測定を行った。

表 2 に示す測定結果より、輝度計の視野角によらず透過率と反射率の積  $\tau_M \rho_M$  は一定となった。本研究では、式 6 より算出したハーフミラーの透過・反射率を用いて、BRDF の計算を行う。

#### 3.2. 遮光筒式輝度計の視野角の確認

遮光筒式輝度計の視野角は、視野角確認用の試料を製作し、本装置ならびに分光光度計よりその反射率を測定し、両者を比較して検証する。

視野角確認用の試料を図 5 に示す。試料は白色の水彩用紙(以下、反射材 A)と黒色紙(以下、反射材 B)で構成した。なお、反射材 A, B は拡散性が高く、反射材 A, B の日射反射率  $\rho_A$ ,  $\rho_B$  は 89.4[%], 4.0[%]である。なお、日射反射率は、分光光度計(SHIMADZU : UV-3600)により分光反射率を測定し、JIS K 5602 に規定された基準太陽光の重加係数を適用して日射反射率を算出した。この時、輝度計から覗く試料の視野の面積を  $S$  とし、反射材 A の面積を  $S_A$  とすると反射材 B の面積は  $(S-S_A)$  となる。すると、試料の平均反射率  $\rho_S$  は式 8 で表せるが、面積  $S$  が未知であるため式 8 より反射率を算出することができない。そこで、式 9 より試料の平均反射率  $\rho_S$  を算出する。ここで、必要となる放射輝度、放射照度は輝度計、放射照度センサーの測定値より与え、対象試料によって値が異なる。試料における反射材 A の面積  $S_A$  の直径を視野角  $\theta$  に合わせて、順次大きくすると反射率  $\rho_S$  は、この面積に比例して大きくなる。ここで、必要となる、反射材 A の面積は、輝度計から反射体の距離と視野角の幾何学的関係より大きさを決定した(表 3)。設計値とは、輝度計の受感部を点として考え、そこから開口部までの距離と開口部の長さより算出した視野角  $\theta$  と輝度計の受感部から試料までの距離で算出した値である。反射率  $\rho_S$  の増大が止まった点が面積  $S$  であり、これは  $\theta'$  と対応する範囲にある。なお、測定は晴天時に行い、放射照度センサーは 1 秒間隔で測定し、各視野角の輝度計毎に 1 分間隔で行った。

表 2 透過率と反射率の積  $\tau_M \rho_M$

視野角	透過率と反射率の積
[度]	[-]
2.5	0.27
4.7	0.28
6.8	0.26

表 3 測定項目

視野角	設計値	反射材Aの直径
[度]	[mm]	[mm]
2.5	21.5	15.0
		20.0
		21.0
		22.0
		35.0
4.7	41.0	40.0
		41.0
		42.0
		55.0
		58.0
6.8	59.3	59.0
		60.0
		60.0

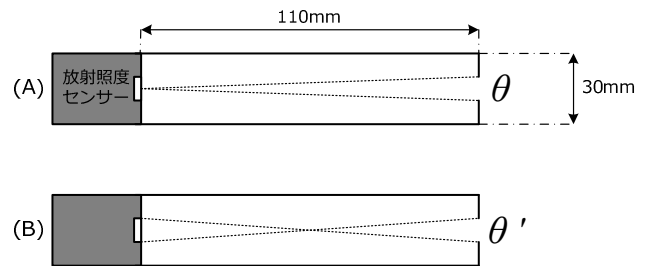


図 3 遮光筒式輝度計 (断面図)

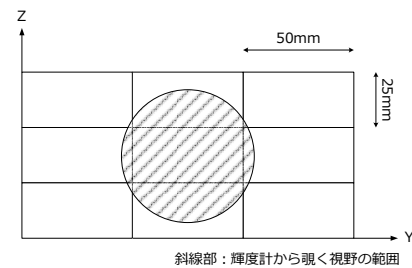


図 4 輝度計から覗く視野の範囲

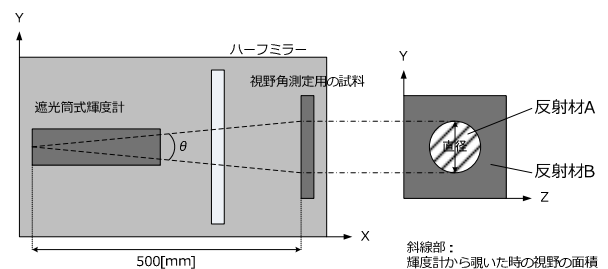


図 5 試料の大きさと輝度計の関係

$$\tau_M \rho_M = \frac{1}{E_S} \cdot \frac{\pi L_R}{\rho_W} \quad \text{式 6}$$

$$E_W = \frac{\pi L_R}{\rho_M \rho_W} \quad \text{式 7}$$

$L_R$ : 白色拡散板測定時の輝度計の測定値 [W/m<sup>2</sup>sr]

$E_W$ : 式 7 を用いて算出した放射照度 [W/m<sup>2</sup>]

$\rho_W$ : 白色拡散板の反射率 0.97 [-]

図 6 に示す各視野角の測定値より算出した反射率  $\rho_S$  は、反射材 A の面積が大きくなるにつれて、増加した。また、反射率  $\rho_S$  は、反射材 A の直径が設計値より算出した値で、UV-3600 の測定値とほぼ一致した。

測定値より算出した輝度計の視野角の範囲  $\theta'$  は、輝度計の視野角が 2.5, 4.7, 6.8 度において 2.4~2.5, 4.7~4.8, 6.7~6.8 度となった。

よって、各視野角における輝度計の測定範囲  $\theta'$  は、2.4~2.5, 4.7~4.8, 6.7~6.8 度とする。

## 4. 再帰性反射体について

### 4.1. 再帰性反射体の構成

再帰性反射体は、複数の反射材を組み合わせる構成とする。反射体の構成は、西岡<sup>(2)</sup>を参考にした。反射体は建物南向きに設置することを考え、反射面 b が夏季(8月)の南中時の照射方向(71度)に正対する角度とし、反射面 a, b の成す角を 90 度とした(図 7)。図 8 に示す、内面 a~d に反射材を接着して再帰性反射体を製作する。反射体 1 個体あたりの寸法は、輝度計の視野角と反射体までの距離の関係より、 $X : 25 \times Y : 50 \times Z : 15$  [mm] とし、図 8 に示す、反射体を 25 個連結させたアレイ型の反射体を製作した。

### 4.2. 再帰性反射体の種類

本研究では 2 種類の再帰性反射体を製作した。図 9 に示す反射体 A は、反射面 a~d に鏡面反射率の高い素材であるアルミ輝面(ACA : ProtectAL)を接着した。図 10 に示す反射体 ABG は、反射面 b~d にアルミ輝面、反射面 a に反射率の低い素材である黒色紙(EO : 光吸収暗幕シート)を接着し、更に、その上に単板ガラス(厚さ : 3mm)を接着した。西岡<sup>(2)</sup>より、反射体 A はアルミ輝面で構成されているため、冬季においては、反射光が周囲に散乱し障害光となる可能性が高い。そこで、反射面 a に黒色紙を用いた反射体 ABG であれば、冬季における障害光の低減となることを示唆している。

## 5. BRDF の測定結果

### 5.1 測定条件

測定は晴天日に行った。また、放射照度センサーは 1 秒間隔で測定し、受光角毎に 1 分の測定を行った。

本研究における照射・受光角の定義は図 11 に示す通りである。照射角は、開口面における法線方向  $n$  と照射光が成す角度  $\theta_i$  と定義する。受光角についても、照射角と同様に、開口面における法線方向  $n$  と反射光が成す角度  $\theta_o$  と定義する。

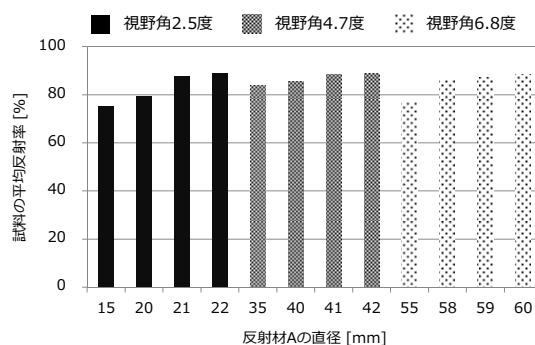


図 6 試料の平均反射率  $\rho_S$

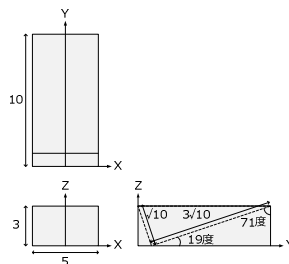


図 7 反射体の構成①

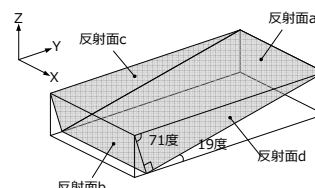


図 8 反射体の構成②



図 9 反射体 A

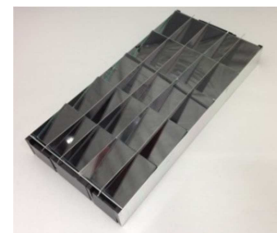


図 10 反射体 ABG

$$\rho_S = \left( \frac{S_A \rho_A + (S - S_A) \rho_B}{S} \right) \quad \text{式 8}$$

$$\rho_S = \frac{\pi L_R}{\tau_M \rho_M E_S} \quad \text{式 9}$$

$$BRDF = \frac{\rho_W}{\pi} \quad \text{式 10}$$

$\rho_S$  : 視野角測定用の試料の平均反射率 [%]

$\rho_A$  : 反射材 A の反射率 [%]

$\rho_B$  : 反射材 B の反射率 [%]

$S$  : 輝度計からみた視野の範囲 [ $m^2$ ]

$S_A$  : 反射材 A の面積 [ $m^2$ ]

### 5.2. 平板反射材の BRDF

変角放射輝度計で測定した反射材 Almite, 白色拡散板の BRDF を図 12, 図 13 に示す。なお、図には変角光度計(MCRL : GCMS-4)で測定した BRDF も同時に示す。ここで、反射材 Almite は、建材として用いられることの多い陽極酸化処理(シルバー)を施した反射材であり、拡散主体の反射材である。

本装置の測定条件として、照射角については、0 度とした。受光角については、0~10 度まで 1 度間隔で測定した。また、輝度計の視野角は 2.5 度とした。

GCMS-4 は照射角 30 度、受光角±75 度まで 5 度間隔で測定を行った。但し、図に示す測定値は、受光角 30~40 度までの測定値を 0~10 度までの測定値として示している。

測定結果より、本装置と GCMS-4 の BRDF は再帰反射方向で BRDF=3.0[1/sr]とピークを示し、そこから離れるに連れて BRDF は減少し、受光角 10 度では 1.3[1/sr]となった。本装置と GCMS-4 の測定値を比較してみると、絶対値は一致しており、GCMS-4 と同等の精度で BRDF が測定できた。

白色拡散板の BRDF は、式 10 に示す通り、どの受光角においても BRDF=1/π となる。但し、本研究でもちいた白色拡散板の反射率  $\rho_w$  は 0.97[-]であるため、BRDF=0.31 となる。

測定結果より、本装置と GCMS-4 の BRDF はどの角度においても一定の値となり、BRDF=0.29[1/sr]となった。また、式 10 より計算した理論値 0.31[1/sr]と比べると BRDF は 0.02[1/sr]の差があるが、この差は小さく概ね BRDF は一致していた。この測定結果より本装置は GCMS-4 と同等の精度で BRDF の測定が行えたことがわかった。

### 5.3. 再帰正反射体の BRDF

照射角については、夏季・冬季の日射の照射方向を想定し、71 度、30 度とした。

受光角については、再帰反射方向でピークを示すことが予想されたので、再帰反射方向から±5 度の間は 1 度間隔で測定し、それ以外の角度は 5 度間隔で測定した。

照射角 71 度では輝度計の視野角を 2.5, 4.7 度とし、照射角 30 度では、輝度計の視野角を 6.8 度とした。照射角 71 度の測定では、輝度計から覗く反射体の見かけの面積が小さくなる。そこで、見かけの面積に合わせて視野角を小さくした。

変角放射輝度計で測定した反射体 A, ABG の BRDF を図 14, 図 15 に示す。

照射角 71 度、30 度の測定値は、それぞれ再帰反射方向で BRDF=54.4, 35.3, 13.9, 1.0[1/sr]とピークを示し、そこから離れるに連れて BRDF は低下した。また、反射体 A, ABG のピークの絶対値については、照射角 71 度、30 度ともに大きく異なった。

反射体 A については、照射角 71 度では、1 回の反射で再帰反射方向へ照射光が反射するのに対し、照射角 30 度では、2 回の反射で再帰反射方向へ照射光が反射するため、反射率が低下し BRDF が小さくなったと考えられる。

反射体 ABG についても、反射体 A と同様に、反射率が低下し、BRDF が小さくなった。ガラス面の反射特性が影響していることが考えられる。但し、反射体 A と比べ BRDF の低下が大きいのは、ガラスの反射特性が影響していると考えられる。ガラスは、面に入射する光の角度によって反射量が大きく変化する。よって、照射角 30 度の測定条件では、反射体に照射した日射のほとんどがガラスを透過し、黒色紙で吸収されたため、再帰反射方向での BRDF がより小さくなったと考えられる。

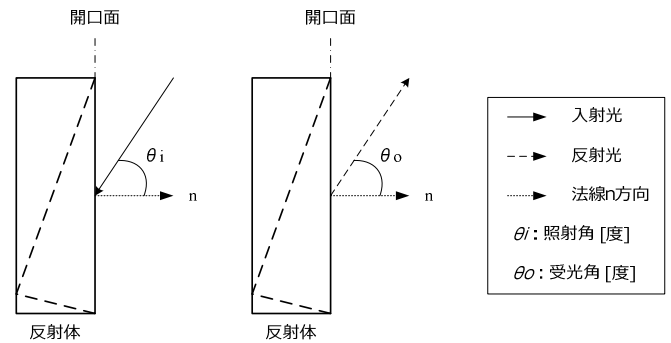


図 11 照射角と受光角の定義

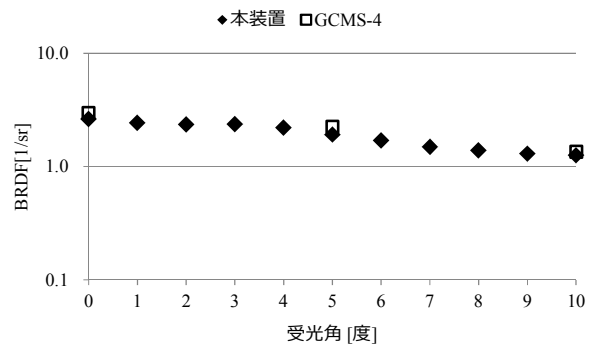


図 12 反射材 Almite の BRDF [照射角 0 度 受光角 0~10 度]

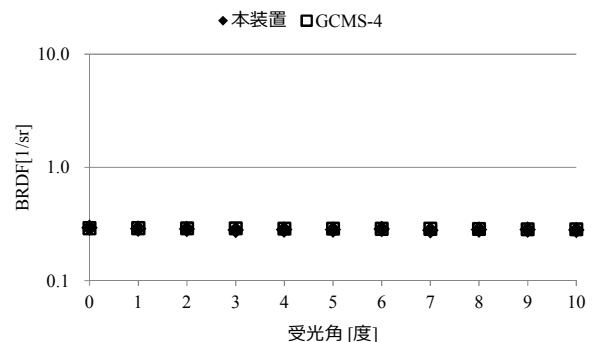


図 13 白色拡散板の BRDF [照射角 0 度 受光角 0~10 度]

## 6. まとめ

変角放射輝度計を製作し、再帰性反射体の BRDF を測定した。装置は、再帰反射方向から $\pm 20$  度の範囲で BRDF の測定を行えた。

変角放射輝度計で反射率が既知である反射材の BRDF を測定したところ、分布形状は一致し、また、絶対値もほぼ同等の値となった。

再帰性反射体の BRDF は、再帰反射方向でピークを示し、そこから離れるに連れて BRDF が減少する分布となり、再帰反射の反射特性を示した。

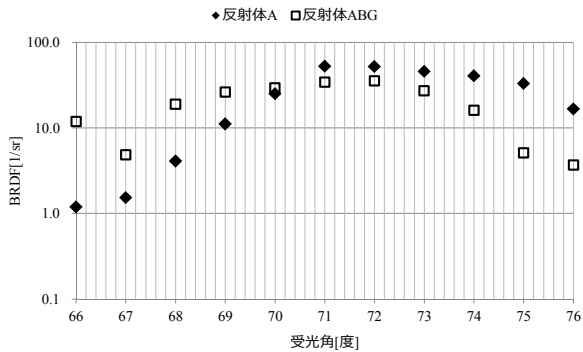


図 14 反射体 A, ABG の BRDF  
[照射角 : 71 度 受光角 : 66~76 度]

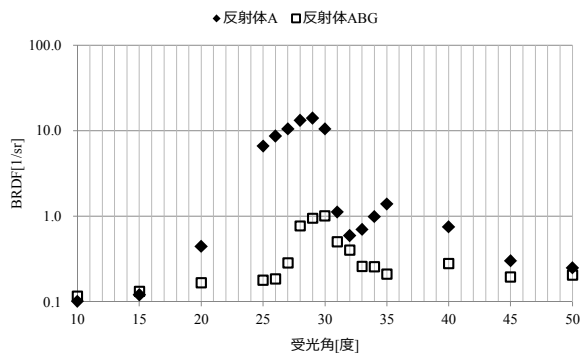


図 15 反射体 A, ABG の BRDF  
[照射角 : 30 度 受光角 : 10~50 度]

### 【参考文献】

- (1) 太田ら「再帰性日射反射体に関する反射特性の測定」『日本建築学会 学術講演梗概集 2013(環境工学Ⅱ)』, pp.29-30
- (2) 西岡ら「建物外皮の高反射化を目的とする指向性反射体の研究—コーナーキューブ型反射体の数値シミュレーション—」『第33回日本熱物性シンポジウム講演論文集』, pp152~154

## 討議

### 討議[鍋島美奈子准教授]

反射体 A, ABG の照射角 71 度の測定値において、ピークがあると言っていいのか、また、より広い範囲で測定しないとわからないのではないか。

### 回答

反射体 A の再帰反射方向である受光角 71 度の BRDF=54.4[1/sr]であるのに対して、受光角 66 度、76 度では、1.5[1/sr]、12.8[1/sr]と値が小さくなっている。よって、再帰反射方向では、受光角 66 度、76 度の値よりも BRDF は十分に大きく、ピークがあると言える。

### 討議[鍋島美奈子准教授]

照射角 30 度の測定値において、受光角 30 度と 35 度で 2 つのピークがあると見ていいのか。

### 回答

本研究では、反射体の寸法と輝度計の視野角の大きさより幾何学的に開口面の測定範囲を計算しており、1 個体からの BRDF を測定している。本来は、より大きな視野角で複数体からの BRDF を測定するべきであるが、1 個体からの BRDF を測定しているため、測定位置によっては、BRDF にばらつきがでる事が予想される。そのため、受光角 35 度で山なりの値が出てしまったと考えられる。

### 討議[鍋島美奈子准教授]

2 回反射による影響はどこに出ているのか。

### 回答

反射体 A の測定値を見ると、照射角 71 度の条件では再帰反射方向で BRDF=54.4[1/sr]、照射角 30 度の条件では再帰反射方向で BRDF=13.9[1/sr]となっている。この BRDF には 3 倍以上の差があり、この差が反射回数による影響である。

### 討議[瀧澤重志准教授]

測定は南中時の条件で行っているのか、また、方位角を変えた場合の測定も可能であるのか。

### 回答

本研究では、変角放射輝度計を赤道儀に固定して、測定を行なっている。赤道儀上で、変角放射輝度計の光軸を調整すれば、常に一定の方向から日射が入射する。ここで、試験体の位置や変角放射輝度計の位置を調整することで、自由に測定位置を変えることができる。