

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560722

研究課題名(和文)都市キャニオンの日射反射環境の調整を目的とする指向性反射外壁の研究

研究課題名(英文)SPECULAR SOLAR REFLECTORS AIMED AT INCREASING SOLAR REFLECTIVITY OF BUILDING ENVELOPE

研究代表者

西岡 真稔(NISHIOKA, MASATOSHI)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40287470

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：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、再帰性反射体の面平均反射量、かつ、広い角度範囲におけるBRDFを測定できる装置を製作した。また、測定機器の精度を検証するとともに、再帰性反射体のBRDFの測定を行った。再帰性反射体のBRDFを測定値より、再帰反射方向においてBRDFのピークを示し、そこから離れるに連れてBRDFは低下するような再帰性反射の分布形状を測定することができた。

研究成果の概要(英文)： We have studied the solar retroreflectors, as the urban heat island countermeasure. In this study, to fabricate a Goniometer which can measure the BRDF facet average amount of reflection and wide angle range. 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.

研究分野：都市熱環境工学

キーワード：ヒートアイランド現象 指向性反射 建材 計測方法 双方向反射率

1. 研究開始当初の背景

(1) 熱による健康被害

2010年の夏は記録的な猛暑であり、全国的に多数の熱中症による死者が出た。また、2011年の夏は節電による冷房利用の自粛も加わり熱中症が多発した。夏季の都市ではヒートアイランド現象と異常気象が相まって劣悪な熱環境が出現しており、これを管理・調整する技術が必要である。

(2) 高反射率塗料の問題点

ヒートアイランド化を抑制するために、建物外皮を高反射化する技術が開発されており、普及の進みつつある高反射率塗料(通称遮熱塗料)はその代表例である。高反射率塗料は拡散反射、つまり半球方向に一定の放射輝度で反射する。周囲遮蔽物の少ない建物屋上面では反射日射が天空へ向かうが、建物側壁面で反射させると対向する壁面や下方の道路面へ向かう反射(有害反射)が50%以上生じることになる。この有害反射は、反射部位が地表に近いほど大きくなる。また近年の流行である全面ガラス貼り建物では、日射が鏡面反射して地表へ向かう現象も起きている。夏季の日射に対して、屋根面における対策が重要であることは周知のことであるが、中高層建物では側壁面における日射受熱も大きいので、有害反射を減じるべく反射方向制御できる反射し、側壁面で有効に反射する技術が求められることになろう。

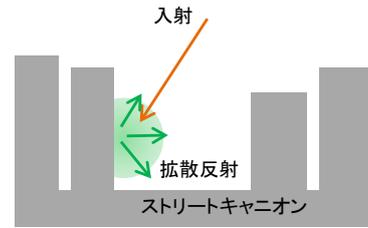
2. 研究の目的

ヒートアイランド化を抑制するためには建物外皮の高反射化を進める必要があるが、中高層建物では屋上部のみ高反射化では量的に不十分であり、側壁部についても広げる必要がある、しかし、無計画に高反射化を行うと、反射日射が街路空間へ向かいヒートアイランド抑制に寄与せず、また歩行者等に吸収されて暑熱化を助長することにもなりかねない(図1(a))。高反射化が有効であるためには、日射の反射方向を天頂付近を中心とする天空領域に限定することが必要である(図1(b))。本研究では、指向性を有する反射体に期待される反射性能を把握し、ヒートアイランド抑制効果への寄与を評価する基礎資料を得ることを目指している。

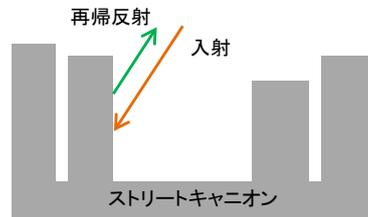
3. 研究の方法

有効な日射反射(一般には天頂付近)を最大化し、障害反射(隣棟や地表に向かう反射)を最小化するような指向性反射体の試作品を作成するとともに、その反射性能を評価することを目的とする。

試作品の性能評価は、実測及び数値シミュレーションを併用する。建築外皮として現実的な反射ユニット(反射体アレイを構成する基本ユニット)のサイズは数cm程度と予想されるが、市販されている変角光度計により測定可能な試料サイズはこれより微小であり、反射モジュールの測定ができないため、変角反射率測定装置を構築し、太陽光暴露下で性



(a) 拡散反射



(b) 再帰性反射

図1 ストリートキャニオンにおける反射の状況

能を検証するための計測手法を確立する。これによって、試作反射体の指向反射特性が実証できる。

4. 研究成果

(1) 双方向反射率(BRDF)の測定方法

① 変角放射輝度計の構造

BRDFは、式1で定義される。

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

BRDF: 双方向反射率分布関数 [1/sr]

L: 放射輝度 [W/(m²sr)]

E: 放射照度 [W/m²]

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2)。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(以下、装置)を設計した(図3)。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。装置は赤道儀に乗せ、装置のX軸が常に太陽方向を向いて測定する。装置上に設けた放射照度センサー①より法線面全天日射量を測定する。また、再帰反射方向では、光源と受光器が重なるため、光路の途中にハーフミラーを設け、受光器と照射光が干渉しないよう設計した。

図3に示す変角放射輝度計において、照射角を変える場合は、試験体上に回転軸を設けこれを中心に回転する。受光角を変える場合は、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 遮光筒式輝度計

図 4 に示す遮光筒式輝度計は、視野角 θ が 2.5, 4.7, 6.8 度の 3 種類を用いる。本装置において、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変えた。また、測器には放射照度センサー (DeltaOHM : LP471RAD) を用いた (表 1)。

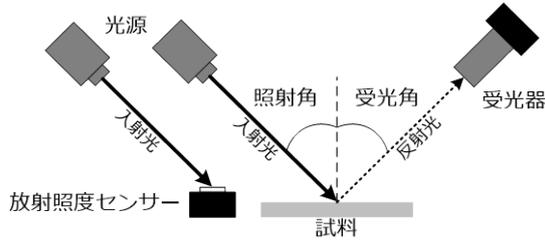


図 2 BRDF の基本的測定方法

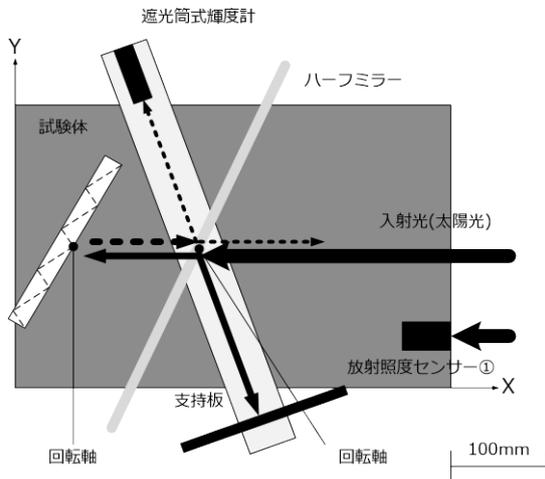


図 3 変角放射輝度計 (平面図)

表 1 測定機器の仕様

LP471RAD (DeltaOHM)	測定範囲	$0.1 \times 10^{-3} \sim 1999.9$ [W/m ²]
	分解能	0.1×10^{-3} [W/m ²]
GCMS-4 (村上色彩技術研究所)	波長範囲	390-730 [nm]
	波長間隔	10 [nm]

表 2 ハーフミラーの透過率と反射率の積

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

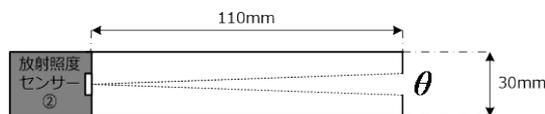


図 4 遮光筒式輝度計 (断面図)

$$L = \frac{L_R}{\rho_M} \quad \text{式 2}$$

$$E = \tau_M E_S \cos \theta_i \quad \text{式 3}$$

$$BRDF = \frac{L}{\tau_M \rho_M E} \quad \text{式 4}$$

$$\tau_M \rho_M = \frac{1}{E_S} \cdot \frac{\pi L_S}{\rho_W} \quad \text{式 5}$$

L_R : 輝度計の測定値 [W/(m²sr)]

E_S : 放射照度センサーの測定値 [W/m²]

ρ_W : 白色平板の反射率 0.97 [-]

ρ_M : ハーフミラーの反射率 [-]

τ_M : ハーフミラーの透過率 [-]

(2) 指向性反射体

試験体である指向性反射体は、複数の反射材を組み合わせる構成とした。反射面 a~d に反射材を接着し、再帰性反射体を製作する。反射体の寸法は図 5 の通りであり、本研究ではこれらを 25 個連結させたアレイ型の再帰性反射体を製作した。

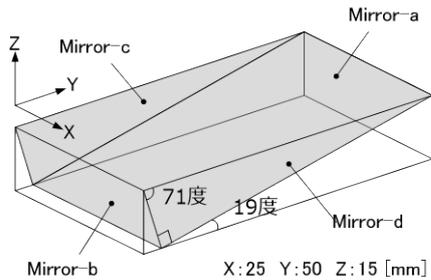


図 5 反射体の構成



図 6 反射体 A



図 7 反射体 AL

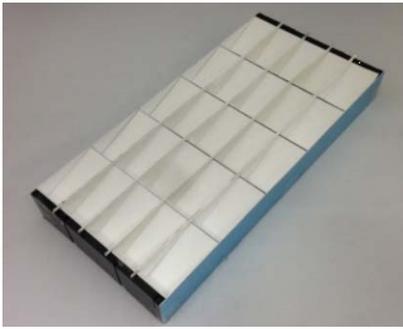


図 8 反射体 W

(3) 測定結果

測定条件として、照射角は、71 度、30 度とした。受光角は、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。輝度計の視野角は、輝度計から覗く反射体の見かけの面積に合わせて表 3 とした。

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、受光角毎に 1 分間隔で測定を行った。

① 平板に関する測定結果

本装置ならびに GCMS-4 で測定した反射材 AL、白色平板の BRDF を図 9、図 10 に示す。本装置は受光角 0~10 度、測定間隔 1 度の測定値、GCMS-4 は受光角 0~45 度、測定間隔 5 度の測定値を図中に示す(注 2)。

白色平板の BRDF は本装置と GCMS-4 とともに受光角 0~10 度の範囲で BRDF=0.3[1/sr] とほぼ一定の値を示した。また、白色平板は均等拡散反射の性質を有するため、理論値である $\rho W/\pi$ [1/sr] とほぼ一致する。

反射材 AL の BRDF は本装置と GCMS-4 とともに受光角 0 度で BRDF=3.0[1/sr] とピークを示し、受光角 10 度では BRDF=1.3[1/sr] まで低下した。

本装置と GCMS-4 の測定値(受光角 0~10 度)を比較してみると、絶対値はほぼ一致していた。よって、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。

② 指向性反射体に関する測定結果

変角放射輝度計で測定した反射体 A、AL の BRDF を図 11、図 12 に示す。また、図中には、アレイ型の反射体 A に白色塗料を塗装した反射体 W(図 7)の BRDF も参考として示す。

反射体 A については、照射角 71 度では受光角 71 度で 54.4[1/sr]、照射角 30 度では受光角 29 度で 13.9[1/sr] とピークを示し、そこから離れるに連れて BRDF は減少した。但し、照射角 71 度と 30 度ではピークの絶対値が大きく異なった。これは、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 AL については、照射角 71 度では受光角によらず 3.0[1/sr] となり、照射角 30 度についても受光角によらず 0.2[1/sr] となった。但し、絶対値については、照射角 71 度と 30 度で大きく異なった。これは、反射体 A と同様に、反射回数の差による反射率の低下が影響していると考えられる。

反射体 W については、照射角 71 度、30 度の測定値ともに 0.3[1/sr] と受光角によらずほぼ一定の値となった。また、白色平板の測定値と比較すると、これらの値は一致した。

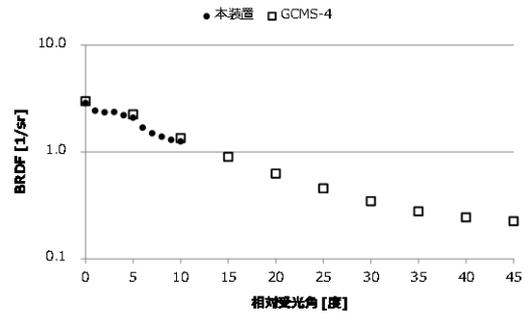


図 9 白色平板の BRDF(注 2)

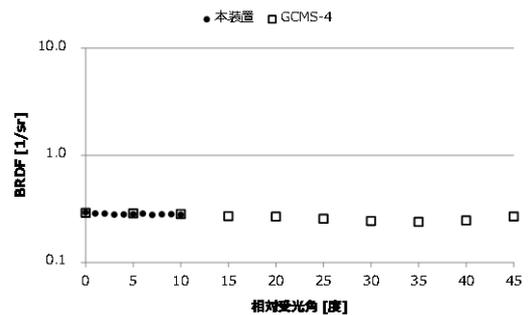


図 10 反射材 AL の BRDF(注 2)

表 3 測定条件

照射角[度]	71		30
受光角[度]	66~73	74~76	10~50
視野角[度]	2.5	4.7	6.8

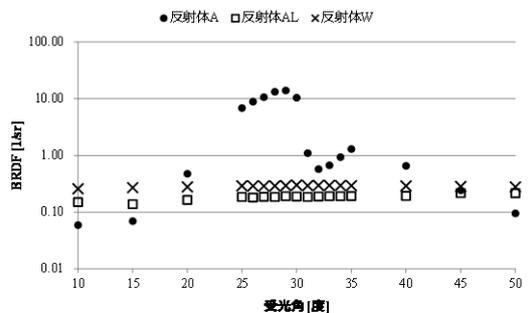


図 11 反射体 A、AL、W の BRDF
[照射角：71 度 受光角：66~76 度]

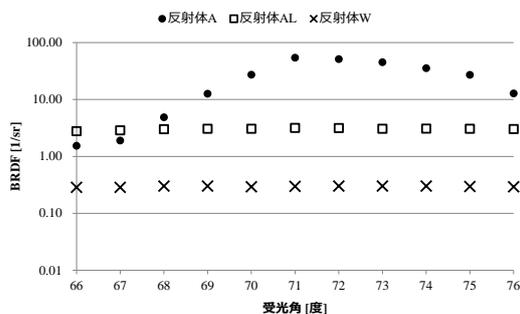


図 12 反射体 A, AL, W の BRDF
[照射角 : 30 度 受光角 : 10~50 度]

③ まとめ

以上のように変角放射輝度計を設計・製作するとともに、これを用いて双方向反射率 (BRDF) を測定し、その測定精度を検証した。平板型反射体については、市販の測定器 GCMS-4 による測定が可能であるため、これと比較した結果、本装置の測定結果はこれとよく一致することを確認した。その後、試作した指向性反射体について、再帰反射方向から ±20 度の範囲で BRDF を測定し、その反射特性を明らかにした。今後、測定された反射特性を基に、ヒートアイランド抑制対策としての性能評価へと研究を進める予定である。

(注 1) 式 3 は本来直達日射であるときに成立するが、ここでは ES として法線面日射量を与え求めることにした。

(注 2) 図中に示す GCMS-4 で測定した BRDF は、正反射方向からの測定値である受光角 30~75 度までの測定値を相対的に受光角 0~45 度の値として示している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① Masatoshi Nishioka, Craig Farnham, Minako Nabeshima, Masaki Nakao: NUMERICAL STUDY ON SPECULAR SOLAR REFLECTORS AIMED AT INCREASING SOLAR REFLECTIVITY OF BUILDING ENVELOPE, Proceedings of Building Simulation 2013, 査読有り, 2013, pp.3041-3046

[学会発表] (計 7 件)

① 古林薫, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 指向性反射壁面の下方反射に対する簡易測定法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読なし, 2015, 印刷中

② 太田翔也, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 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 の測定結果—, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 査読なし, 2015, 印

刷中

③ 古林薫, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 指向性反射壁面の下方反射に対する簡易測定法の提案, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 査読なし, 2015, 印刷中

④ 太田翔也, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 指向性日射反射体の性能評価のための BRDF 測定器の開発—遮光筒式輝度計の視野の検討—, 日本ヒートアイランド学会第 9 回年会予稿集, 査読なし, 2014/7/26, pp.96-97, 佐賀大学 (佐賀県佐賀市)

⑤ 太田翔也, 西岡真稔, 中尾正喜, 鍋島美奈子, 再帰性反射体に関する反射特性の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読なし, pp.29-30, 2013/8/30, 北海道大学 (北海道札幌市)

⑥ 西岡真稔, 「都市の表面・建築の外皮」, 第 42 回熱シンポジウム資料, 査読なし, 2012/11/16, pp.61-65, 建築会館ホール (東京都港区)

⑦ 西岡真稔, 鍋島美奈子, 中尾正喜, 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資料, 査読なし, 2012/10/4, pp.152-154, 大阪市立大学 (大阪府大阪市)

[その他]

研究成果公開ホームページ

http://masa2.urban.eng.osaka-cu.ac.jp/reg_home/report.html

6. 研究組織

研究代表者

西岡 真稔 (NISHIOKA MASATOSHI)

大阪市立大学大学院・工学研究科・准教授

研究者番号 : 4 0 2 8 7 4 7 0