

折板状反射体の日射反射性能に関する研究

-折板形状による反射率の異方性発現効果-

RESEARCH ON REFLECTION PERFORMANCE OF FOLDED PLATE -EXPRESSION EFFECTS OF ANISOTROPY REFLECTANCE BY FOLDED PLATE SHAPE-

地域環境計画分野 永目 享大

Division of Regional Environmental Planning Kodai NAGAME

ヒートアイランドの抑制策として、また夏季・冬季の冷暖房負荷の抑制策として、夏季には半球反射率を高め、かつ天空方向への反射量を増やし、冬季には半球反射率を抑える反射技術が求められる。そこで本研究では、折板状反射体に着目し、数値シミュレーションにより、反射体の形状・反射面の素材が日射反射性能に及ぼす影響について明らかにした。結果として、天空方向への反射量を高めた上で、南面においては季節により日射吸収率を最大 27% 変化させることができた。

A reflection technique that can change the performance of reflecting solar radiation such as solar radiation absorptivity rate while controlling the direction of reflection is required, as a method for controlling heat island phenomenon and as a method for controlling the cooling and heating load in summer and winter. In this paper, focusing on the folded plate, numerical simulation revealed the influence of the shape of the reflector and the material of the reflective surface on the performance of reflecting solar radiation. As a result, it is possible to change the solar radiation absorptivity rate by 27% in the south and possible to reflect the sunlight upwards.

1. はじめに

近年、都心部でヒートアイランド現象が顕在化しており、これに対する抑制策として建物外皮を高反射化し、日射受熱量を低減する対策が普及しつつある。代表的な方法として、高反射率塗料を用いる方法があるが、高反射率塗料は拡散反射性を持つため、(1) 低層面や壁面に適用した場合、図 1 のように反射日射が周辺の建物や地物に吸収され、日射の吸収位置が移転するだけの結果となってしまう。(2) また、冬季においては高反射化により、受熱量が低減することで暖房負荷が増加してしまうといった問題が挙げられる。これらの問題を踏まえて、図 2 のように、夏季には、半球反射率を大きくし、かつ天空方向への反射量を大きくする。その上で冬季には、半球反射率を低くすることができれば、より有用性の高い技術と言えるだろう。

上記のような反射技術として、折板状反射体に着目した。折板状反射体は 2 つの反射面から構成されており、その構造から太陽光を上方向へと反射することを狙っている。また、2 つの反射面にそれぞれ反射性能の異なる反射材を設置することで、太陽高度

の変化に対する、半球反射率の異方性を発現させることが期待される。

既往研究において、古林ら^[1]は季節によって反射率が変化する折板状反射体を提案・試作し、BRDFを測定することでその有用性を示した。しかし、冷暖房負荷に影響を及ぼす日射吸収率を季節により、どの程度変化させることができるのか、また折板状反射体を設置した際に地表面や周辺建物への反射量がどの程度あるのか把握できていない現状にある。また、季節・時刻により細かく変化する太陽高度と、折板状反射体の複雑な形状から、日射反射性能の実験的検討は困難が予想される。

そこで本研究では、数値シミュレーションによって評価を行うこととし、折板状反射体の形状・反射面の素材が日射吸収率や上方向反射率などの日射反射性能に及ぼす影響についてケーススタディを通じて明らかにすることを目的とする。また、折板状反射体の街路壁面設置を想定し、街路を模擬した数値計算により、周辺建物や地表面に与える影響についても検討を行う。

2. 本研究で対象とする折板状反射体

本研究では、異なる3種類の折板状反射体について検討を行う。2枚の反射面のプロポーシオンから1:1型折板状反射体(略称1:1型)、1:2型折板状反射体(1:2型)、1:3型折板状反射体(1:3型)と呼ぶこととする。それぞれの反射体寸法の詳細を図3,図4,図5に示す。1:1型は最も標準的な再帰反射体の形状であり、反射体開口部に垂直に入射する光に対して再帰反射量が最も大きくなるように設計されている。1:2型、1:3型は天空方向への反射量を増やすことを狙った形状となっている。

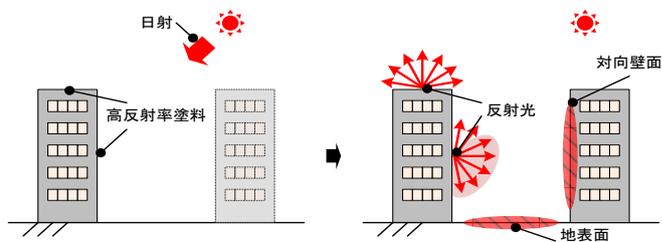


図1 高反射率塗料概要

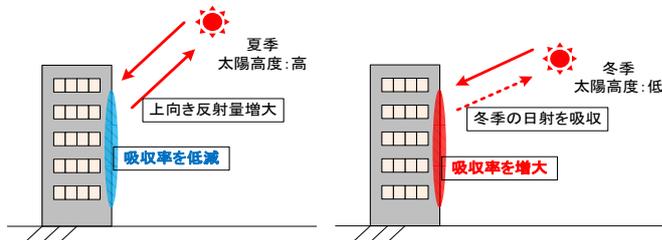


図2 壁面に求められる性能

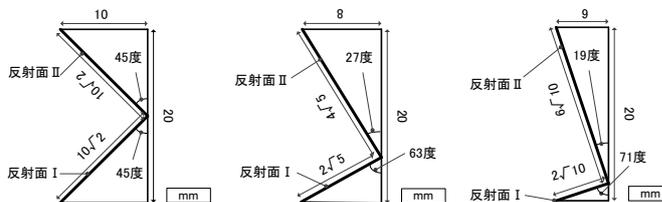


図3 1:1型

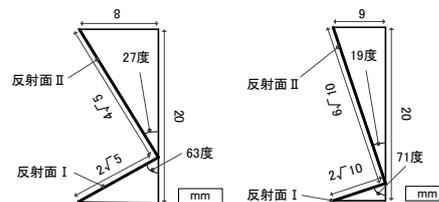


図4 1:2型

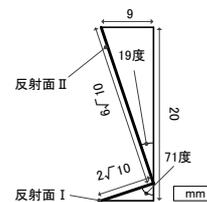


図5 1:3型

3. 数値計算概要

3.1. 使用する反射モデル

鏡面反射面については式(1)で表される修正 Phong モデルを用い、拡散反射面については Lambert モデルを用いる。尚、本研究で反射素材として用いる鏡面反射面はアルミ製輝面であり、太陽熱発電などに用いられる極めて高反射な素材である。鏡面反射面における拡散反射率 k_d 、鏡面反射率 k_s は反射率測定により算出し、BRDF(式(1)の ρ)はある入射角に対する反射角別の反射強度を測定することで決定する。この測定値を用いると式(1)における未知パラメータは n のみとなり、最小自乗法によりこれを決定する^[2]。拡散反射面における拡散反射率 k_d は鏡面反射率 k_s を0とし、半球反射率の測定値をもとに決定する^[1]。本研究で反射素材として用いる白色拡散面・灰色拡散面・黒色吸収面・アルミ輝面におけるパラメータを表1に纏める。また、アルミ輝面におけるBRDFの計測値と計算値を図6に示す。

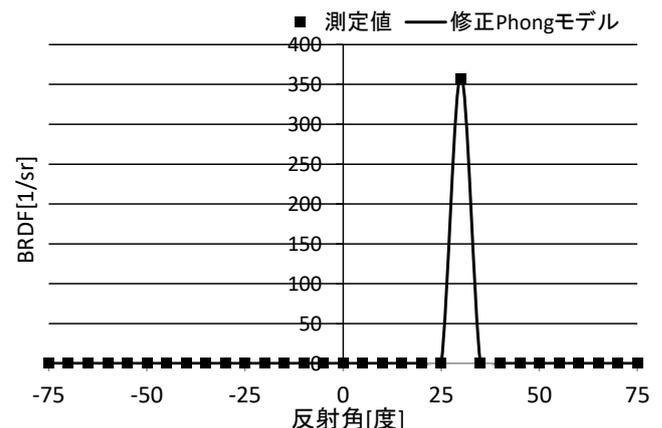


図6 アルミ輝面 BRDF 値

$$\rho = k_d \frac{1}{\pi} + k_s \frac{n+2}{2\pi} \cos^n \alpha \quad \text{式(1)}$$

ρ	:BRDF	k_d	:拡散反射率
k_s	:鏡面反射率	n	:Phong のパラメータ

3.2. 数値計算方法

本研究では、数値計算法として、モンテカルロパストレーシング法を用いる。この方法を用いた放射伝熱解析では、日射を複数のエネルギー粒子として表し、乱数を用いて決定したエネルギー粒子の吸収や反射といった挙動の追跡を行うことで解析を行う。反射面に入射したエネルギー粒子においては式(2)、式(3)によって確率的に反射方向を決定する。拡散反射面では、Lambertの余弦法則をもとに鏡面反射面では、修正 Phong モデルをもとに重点サンプリング法を適用する。尚、反射面に入射した光源の挙動は拡散反射率 k_d 、鏡面反射率 k_s 、0~1の一様乱数 ξ_3 を用いて以下の式(4)より判別する。^[3]

$$(\theta, \phi) = (a \cos \sqrt{\xi_1}, 2\pi \xi_2) \quad \text{式(2)}$$

$$(\alpha, \phi) = (a \cos \xi_1^{1/(n+1)}, 2\pi \xi_2) \quad \text{式(3)}$$

θ	:表面法線との仰角	ξ_1	:0~1の一様乱数
ϕ	:方位角	ξ_2	:0~1の一様乱数
α	:正反射方向と反射方向の成す角		

$0 < \xi_3 < k_d$:拡散反射	式(4)
$k_d < \xi_3 < k_d + k_s$:鏡面反射	
$k_d + k_s < \xi_3 < 1$:吸収	

表1 反射素材のパラメータ

	k_d	k_s	n
白色拡散面	0.85	0	—
灰色拡散面	0.32	0	—
黒色吸収面	0.09	0	—
アルミ輝面	0.09	0.71	3137

4. 数値計算と実験の比較

4.1. はじめに

前章では、数値計算による平滑な面における反射特性の再現方法について説明したが、折板状反射体の数値計算を行うにあたっては、その確からしさを検証する必要がある。そこで本章では、折板状反射体における BRDF を数値計算により算出し、実験結果^[1]との比較を行う。

4.2. 数値計算概要

折板状反射体における数値計算は図 7 のように 5 面から成る閉空間を形成し行う。図 7 の A 面は日射の入射位置となる折板状反射体における開口部であり、本稿では、反射体の「開口面」と呼ぶ。開口面では、エネルギー粒子の射出と反射した粒子の吸収が行われ、吸収した粒子の方向ベクトルと、その粒子数により反射方向とその方向別の反射強度を算出する。

射出点は図 8 のように開口面を三角形に等しく分割し、その重心に配置する。エネルギー粒子は入射条件を与えて射出し、受照面 (図 9) に粒子が到達すると、そこで反射モデルに従い、拡散反射、あるいは鏡面反射が起きる。そして反射位置、および反射日射の方向ベクトルを求め、次の到達面への粒子を追跡する。周期境界面 (図 10) へと到達した粒子は、図 10 に示すように反対側の面へ x だけ平行移動させることで、連続した空間を想定する。

最終的にエネルギー粒子が開口面に到達するまで、この操作を繰り返せば、入射から反射に至るプロセスを計算することができる。

4.3. 計算条件と検討ケース

反射体開口面に与える射出粒子数は 524288 点としており、エネルギー粒子の射出は反射体への入射角が夏季、春秋、冬季南中時の太陽高度を想定した 70 度、50 度、30 度となるような条件で射出する。入射角と反射角は反射体開口面の法線に対して図 3、図 4、図 5 における反射面 II 側を正、反射面 I 側を負とする。反射面 I・II の素材構成を表 2 に示す。

4.4. 計算結果

本稿では、入射角 50 度の条件のみ結果を示す。入射角 50 度における BRDF 値の実験結果と数値計算結果の比較を図 11 に示す。両者を比較すると BRDF 値は概ね一致していることから数値計算の整合性を確認することができた。

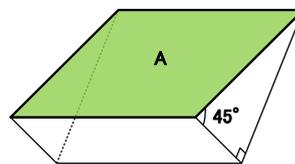


図 7 開口面

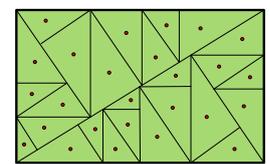


図 8 射出点イメージ

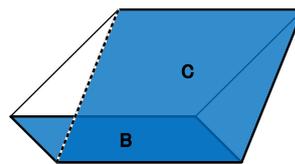


図 9 受照面

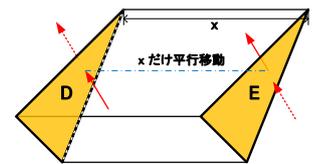
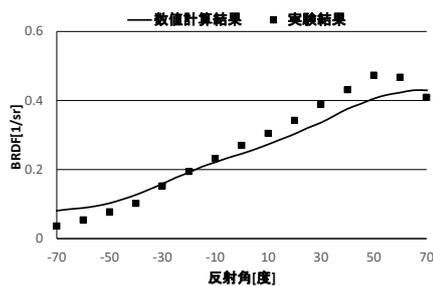


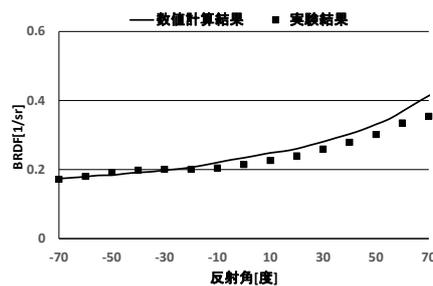
図 10 周期境界面

表 2 反射面の素材構成

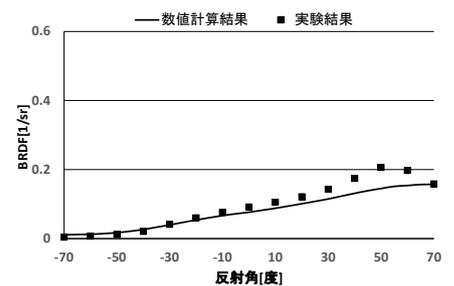
面構成名称	反射面 I	反射面 II
W/W	白色拡散面	白色拡散面
G/G	灰色拡散面	灰色拡散面
W/B	白色拡散面	黒色吸収面



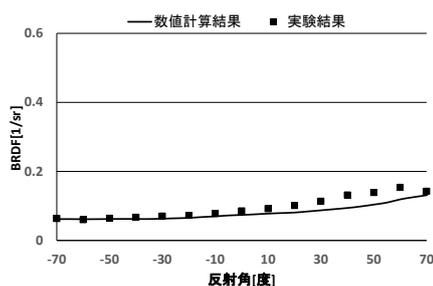
(a) 入射角 50 度 (1 : 1 型・W/W)



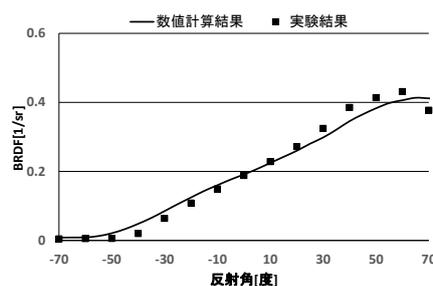
(b) 入射角 50 度 (1 : 3 型・W/W)



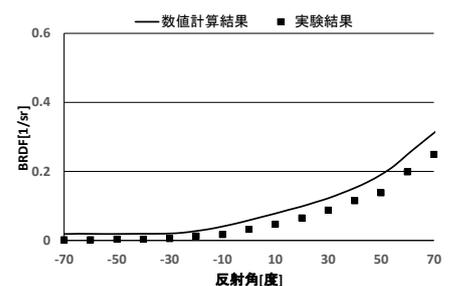
(c) 入射角 50 度 (1 : 1 型・G/G)



(d) 入射角 50 度 (1 : 3 型・G/G)



(e) 入射角 50 度 (1 : 1 型・W/B)



(f) 入射角 50 度 (1 : 3 型・W/B)

図 11 実験結果と数値計算の BRDF 値比較

5. 折板状反射体の日射反射性

5.1. はじめに

前章で折板状反射体における数値計算の整合性を確認した。本章では、実験での検討が困難である季節・時刻における特性を把握する。

5.2. 計算条件とケーススタディの構成

東京の緯度・経度の位置に折板状反射体を設置する条件でケーススタディを行う。反射体開口面に与える粒子数は、先ほどと同様に 524288 点としている。また、この前提条件では、入射粒子の個数を N_{in} 、反射計算の結果、開口面に吸収された粒子数を N_r 、反射粒子のうち、折板状反射体の法線に対して上方向に射出された粒子数を N_{up} とすると日射吸収率は式(5)で、上方向反射率は式(6)で表される。

$$a_{in} = 1 - \frac{N_r}{N_{in}} \quad \text{式(5)}$$

$$\rho_{up} = \frac{N_{up}}{N_{in}} \quad \text{式(6)}$$

a_{in} : 日射吸収率 ρ_{up} : 上方向反射率

表3 計算条件とケーススタディ

設置方位	南面		
計算日	8月21日	12月21日	
計算時刻	真太陽時 8時~16時		
反射体形状	1:1型	1:2型	1:3型

表4 反射面素材構成

パターン名称	反射面 I	反射面 II
W/B	白色拡散面	黒色吸収面
MIRO/B	アルミ輝面	黒色吸収面

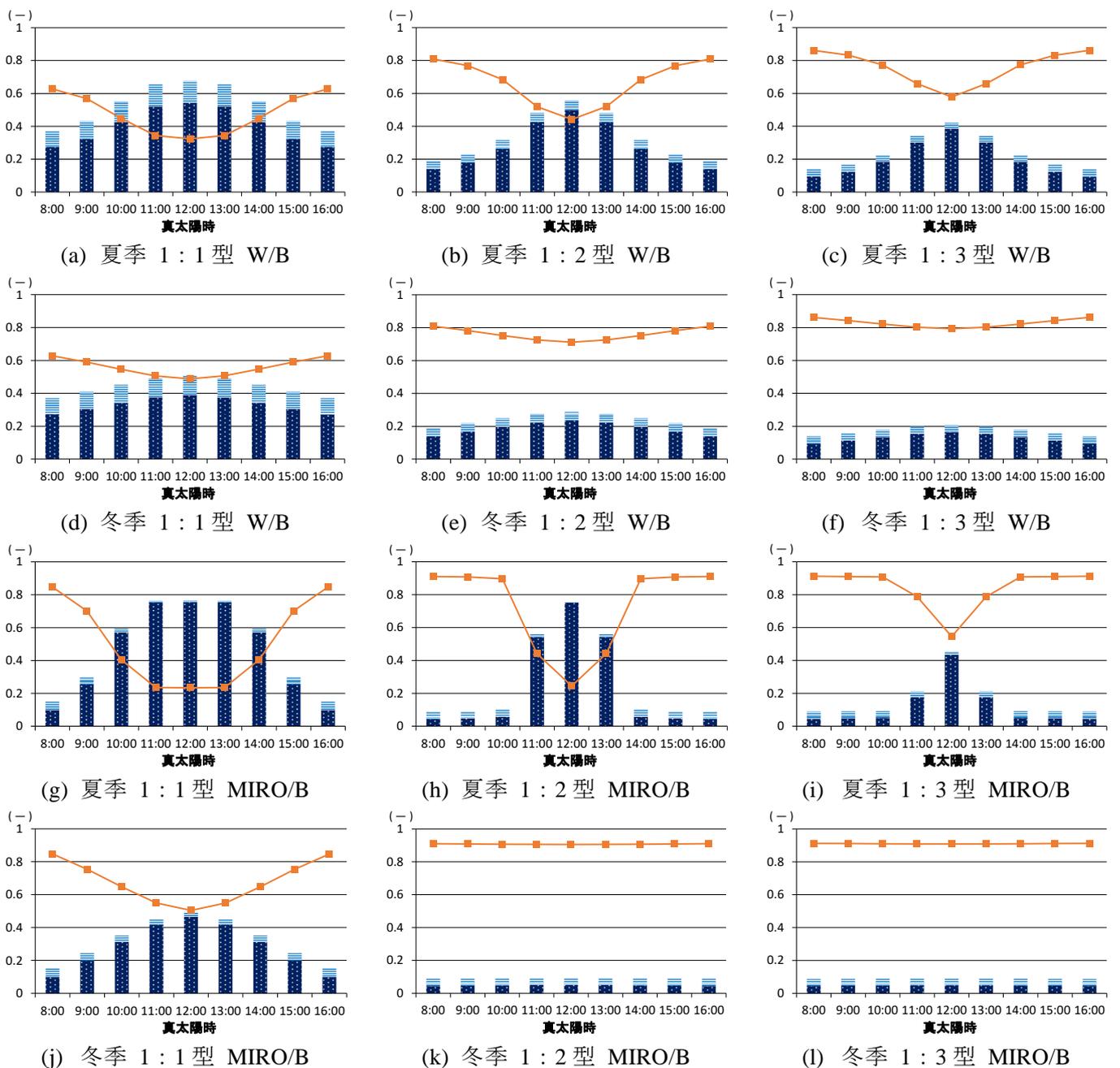


図12 日射吸収率・反射率(時別値)

■ 上方向反射率 ■ 下方向反射率 — 吸収率

5.3. 日射反射性能の算出（時別値）

夏季・冬季の代表日として 8/21、12/21 を取り上げ、反射体の形状・反射面の素材が日射反射性能に与える影響を調べた。結果を図 12 に示す。

a) W/B

夏季においては、時刻変化に伴う太陽高度の違いにより日射吸収率の差が生まれており、その変化量は 1:2 型が最大で 12 時と 16 時の値を比較すると差は 36.7point であった。また、下方向反射に寄与する反射面Ⅱが黒色吸収面のため、上方向反射率の割合が大きくなっている。冬季においても時刻による日射吸収率の変化が見られるが、太陽高度の変化が小さいため、その変化量は小さくなっている。

b) MIRO/B

夏季においては、ある時刻を境に急激に日射吸収率が小さくなっている。また、上方向反射率の割合も W/B と比較して大きくなっている。冬季の 1:2 型、1:3 型では、太陽高度が低い場合、日射が面Ⅱの黒色吸収面に直接されるか、あるいは面Ⅰのアルミ輝面で反射後、面Ⅱにより吸収されるため、一日を通して日射吸収率が非常に大きくなっている。

5.4. 日射反射性能の算出（積算値）

前節で折板状反射体における各季節の時刻による日射吸収率・反射率を算出したが、一日を通じた日射反射性能の評価を行う場合、入射する直達日射

量が時刻により異なることを考慮する必要がある。そこで、南向き壁面へと入射する直達日射量より日射吸収量・上方向反射量・下方向反射量の日積算日射量を算出する。入射する直達日射量は Bouger の式により算出する。日積算日射量の結果を図 13、14 に示す。

5.5. 日射反射性能の季節による比較

上述のように算出した日積算日射量をもとに 1 日を通じた日射吸収率・上方向反射率を図 15、16 のように算出し、季節による結果の比較を行う。

a) W/B

季節による日射吸収率の変化量が最も大きいのは 1:2 型であり、13point となった。

b) MIRO/B

季節による日射吸収率の変化量は 1:2 型が最大で 27point となり、1:1 型が 21point となった。

ここで、夏季の日射吸収率に着目すると 1:2 型の W/B、1:2 型の MIRO/B は約 60%、1:1 型の MIRO/B は約 40% であった。これは JIS 規格の高反射率塗料の日射吸収率を満たす程度の値であり、かつ冬季においては日射吸収率を上記のように高める効果が得られたことから、冷暖房負荷の抑制につながる結果となった。また、夏季における上向き反射率もほとんどの形状で 80% 以上であり、ヒートアイランド抑制にもつながる結果となった。

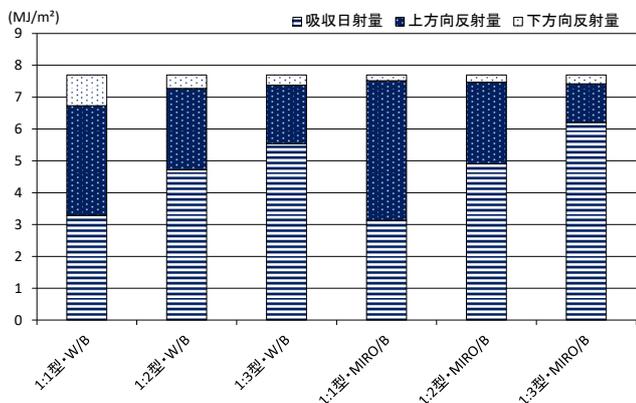


図 13 日積算日射量（夏季）

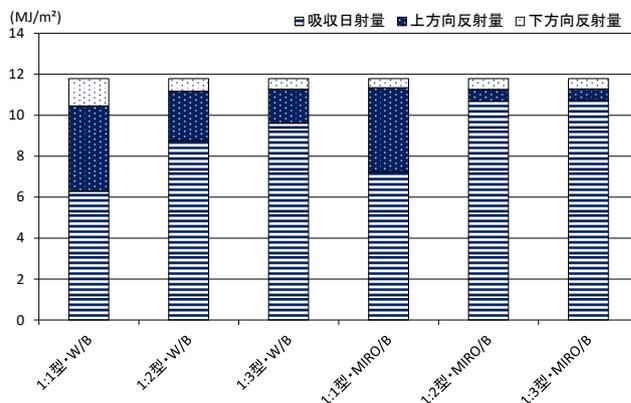


図 14 日積算日射量（冬季）

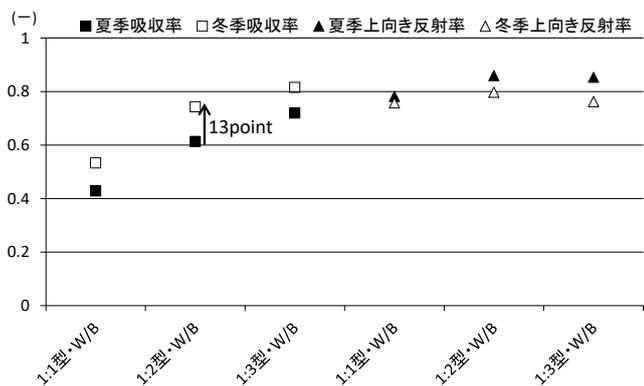


図 15 日射反射性能の比較（W/B）

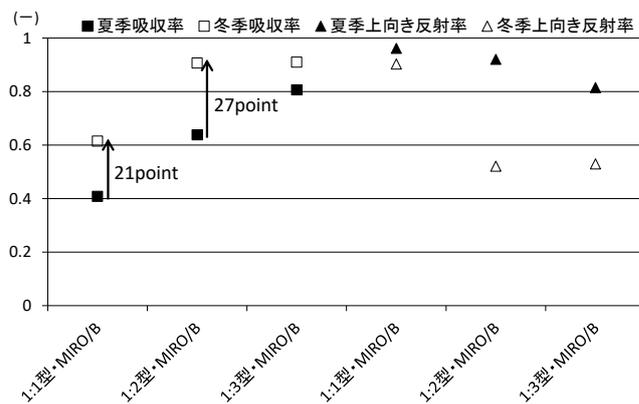


図 16 日射反射性能の比較（MIRO/B）

6. 実街路における数値計算

6.1. はじめに

前章では折板状反射体における数値計算を行い、反射体の形状・反射面の素材が日射反射性能に与える影響について明らかにした。本章では、折板状反射体の壁面設置を想定し、ヒートアイランド抑制の観点から地表面や対向壁面への反射量を把握する。

6.2. 街路形状モデル

本研究では、Y 軸正を北、X 軸正を東とした D/H (建物間隔 D に対する建物高さ H) が 1 の街路形状モデルを作成した。図 17 の射出面よりエネルギー粒子を射出する。射出した粒子は折板状反射体を設置した壁面へと入射し、反射あるいは吸収される。対向壁面と地表面は完全吸収面としており、最終的にこの面に吸収された粒子数により、反射量を算出する。尚、図 18 のように壁面と地表面を周期境界面で囲むことで無限に長い東西街路を想定する。

6.3. 計算条件とケーススタディの構成

計算条件として、射出面に与える粒子数は 8120 点とし、入射角は夏季・春秋・冬季の南中時太陽高度を基に設定している。この前提条件のもと、エネルギー粒子の粒子数を N_{ray} 、反射体設置壁面へ入射したエネルギー粒子数を N_{in} 、反射体を設置した壁面に吸収された粒子数を N_{absorb} 、地表面に吸収された粒子数を N_{ground} 、対向壁面に吸収された粒子数を N_{wall} とし、以下の式(7),(8),(9)に示す項目を算出する。これにより、折板状反射体を壁面に設置した際に地表面や対向壁面へと与える影響を把握する。計算条件とケーススタディを表 5 に示す。

$$\rho_{ground} = \frac{N_{ground}}{N_{in}} \quad \text{式(7)}$$

$$\rho_{wall} = \frac{N_{wall}}{N_{in}} \quad \text{式(8)}$$

$$a_{in} = \frac{N_{absorb}}{N_{in}} \quad \text{式(9)}$$

ρ_{ground} : 地表面方向反射率 ρ_{wall} : 対向壁面方向反射率
 a_{in} : 折板状反射体設置壁面吸収率

6.4. 計算結果

上述のように算出した反射性能を図 19 に示す。

地表面方向への反射量は W/B、MIRO/B において W/W と比較すると全ての形状で抑制することができた。対向壁面方向への反射量も W/B、MIRO/B では、ほとんどのケースで抑制することができたが、MIRO/B 1:1 型の 50 度・70 度では、鏡面反射の反射角が小さくなるため、対向壁面方向の反射量が大きくなってしまったことが分かった。

7. まとめ

折板状反射体における数値計算により、1:2 型の MIRO/B では、夏季に日射吸収率を 60% 程度に抑え、冬季には約 90% まで高めることができ、冷暖房負荷抑制につながる結果が得られた。また、街路モデルを用いた数値計算により、地表面方向・対向壁面方向への反射量が極めて小さいことを示し、ヒートアイランド抑制につながる結果が得られた。

【参考文献】

- [1] 古林薫ほか「折板状反射面を有する建物壁面の下向き日射の低減効果」空気調和・衛生工学会論文集 (247), 1-7, 2017-10
- [2] 西岡真稔ほか「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—」日本熱物性シンポジウム講演論文集, 2012-10, pp.152-154
- [3] E. Lafortune.et.al “Using the modeified Phong reflectance model for physically based rendering” Technical Report CW197, Dept. Comp. Sci, K.U. Leuven(1994)

表 5 計算条件とケーススタディ

粒子数	8120 個		
入射角	30 度	50 度	70 度
反射体形状	1 : 1 型	1 : 2 型	1 : 3 型
反射面素材	W/B	W/W	MIRO/B

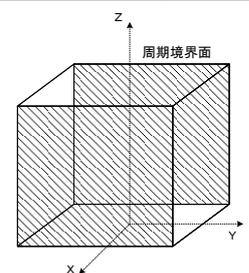
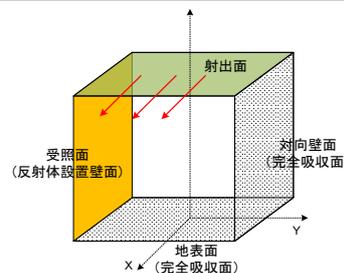


図 17 街路モデル面構成

図 18 周期境界面

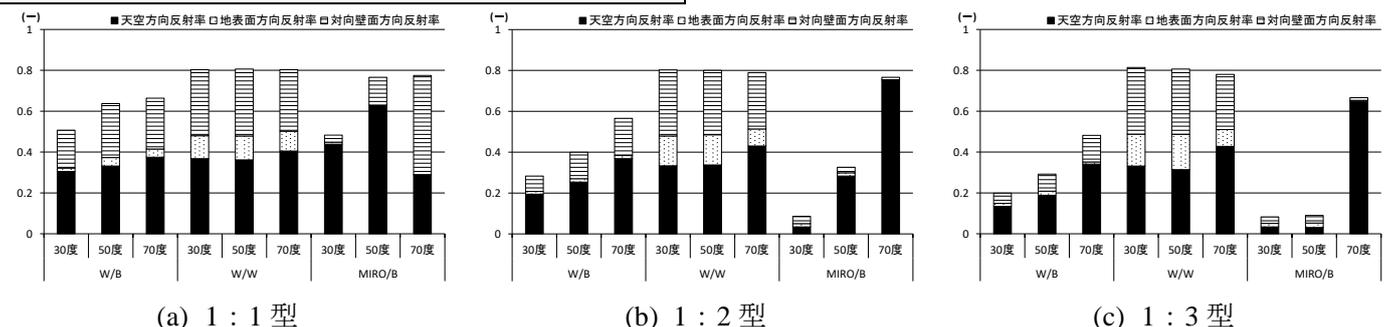


図 19 実街路における反射性能