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 -

西岡

真稔

永目 享大 (大阪市立大学)

鍋島 美奈子 (大阪市立大学)

Kodai NAGAME<sup>\*1</sup> Masatoshi NISHIOKA<sup>\*1</sup> Minako NABESHIMA<sup>\*1</sup>

\*<sup>1</sup>Osaka City University

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 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 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)低層面や側壁面 に適用した場合、Fig.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、Fig.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<sup>山</sup>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。

(大阪市立大学)

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。



Fig.2 Useful reflection technology

#### 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ョンから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Fig.3,4,5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。

- 3. 数値計算概要
- 3.1. 使用する反射モデル

反射面については式(1)で表される修正Phongモデルを 用い、反射特性を再現する。鏡面反射面における拡散反 射率k<sub>d</sub>、鏡面反射率k<sub>s</sub>は分光光度計 UV-3600 (SHIMADZU)により測定した分光反射率をもとに算出 する。BRDF (式(1)のp) については変角光度計 GSMS-4 (MCRL)により入射角が-45度に対する反射角別の反射 強度を反射角-75度~75度の範囲において5度ピッチで 測定する。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、既往研究<sup>[2]</sup>と同様に最小自乗法 によりこれを決定する。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、既往研究<sup>[1]</sup>により測定され た半球反射率をもとに決定する。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 Table.1 に纏める。 尚、本研究 で鏡面反射面として用いるアルミ製輝面は、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。

|       | $\rho = k_d \frac{1}{\pi} + k_s \frac{r}{2}$ | $\frac{n+2}{2\pi}\cos^n\alpha$ | (1)                   |  |  |
|-------|--|--------------------------------|-----------------------|--|--|
| ρ     | :BRDF  | k <sub>d</sub>                 | :Diffuse reflectivity |  |  |
| $k_s$ | :Specular reflectivity                       | n                              | :Phong parameter      |  |  |
|       |  |                                |                       |  |  |

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),(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 $\xi_3$ を用いて以下の式(4)より判別する。<sup>[3]</sup>

### 3.3. 数値計算概要

折板状反射体における数値計算は Fig.6 のように 5 面 から成る閉空間を形成し行う。Fig.6 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 Fig.7 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与 えて射出し、受照面 (Fig.8) 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 (Fig.9) へと到達した粒子は、Fig.9 に示すように反対側 の面へ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. 折板状反射体の日射反射性能

# 4.1. 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、524288点としている。ケーススタディと反射面の素材構成をTable.2,3に示す。

4.2. 検討方法

上述の検討ケースを対象に数値計算を行い、以下のス テップに従い検討を行う。

## (1) STEP1 日射反射性能(時別値)の算出

入射粒子の個数をN<sub>in</sub>、開口面を通過した粒子数をN<sub>r</sub>、 反射粒子のうち、折板状反射体の開口面の法線に対して 上方向に射出された粒子数を N<sub>up</sub>とすると日射吸収率 は式(5)で、上向き反射率は式(6)で表される。この計算に より1日の時刻別の日射反射性能を算出する。結果の一 例をFig.10に示す。



(2) STEP2 日射反射性能(積算値)の算出

入射する直達日射量が時刻により異なることを考慮す るために、STEP1により算出した時刻別の吸収率・反射 率と入射する直達日射量により各日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(大気透過率 =0.7)により算出する。尚、本稿では日射の入射方向に 対する反射特性の把握を趣旨としているため、指向性を 持たない天空日射については分析を行わない。

### (3) STEP3 日射反射性能の比較

STEP2 により算出した日積算日射量をもとに1日を通 した日射吸収率・上向き反射率を算出し、季節による比 較を行う。W/B における結果を Fig.12 に、MIRO/B にお ける結果を Fig.13 に示す。この結果をもとに以下で考察 を行う。

## 4.3. 考察

1:2型の MIRO/B では、夏季の日射吸収率を約 60% 程度に抑え、冬季は約90%程度まで高める効果が得られ、 夏の冷房負荷を抑制し、さらに冬季の暖房負荷を低減す ることが期待できよう。また、夏季の上向き反射率も 90%以上と大きい値を示し、ヒートアイランド抑制につ ながる結果となった。

Table.2 計算条件とケーススタディ

| Orientation     | South side           |   |             |            |  |
|-----------------|----------------------|---|-------------|------------|--|
| Date            | August 21            |   | December 21 |            |  |
| Times of day    | True solar time 8-16 |   |             |            |  |
| Reflector shape | 1 : 1 type           | 1 | : 2 type    | 1 : 3 type |  |

Table.3 Construction of reflective surface material



Fig.11 Daily solar radiation







Fig.13 Comparison of reflection performance (MIRO/B)

#### 5. 街路モデルを用いた数値計算

#### 5.1. はじめに

これまでに、折板状反射体単体の数値計算概要と結果 について示してきたが、街路を模擬した数値計算におい ては、その計算方法を拡張する必要がある。拡張の方法 としては、まず折板状反射体を設置した壁面に粒子が入 射した場合、反射体における開口面の入射点をランダム に決定し、その点から入射した粒子の反射計算を行う。 その計算から得られた粒子の反射方向を保存し、壁面の 入射点において保存した方向へと再び粒子を射出する。 5.2. 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。Fig.14 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、Fig.15 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。

5.3. 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・春秋季・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<sub>ray</sub>、反射体設置壁面へ入射したエネルギー粒子 数をN<sub>in</sub>、反射体を設置した壁面に吸収された粒子数を N<sub>absorb</sub>、地表面に吸収された粒子数をN<sub>ground</sub>、対向壁 面に吸収された粒子数をN<sub>wall</sub>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 Table.4 に示す。 5.4. 計算結果

上述のように算出した反射性能を Fig.16 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





Fig.16 Reflection performance in street model

面方向の反射量が大きくなってしまうことが分かった。

6. 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、季節によって反射 率が可変であることを明らかにした。また、街路モデル を用いた数値計算により、夏季、冬季ともに側壁面の高 反射化対策としての有用性を示した。

#### 【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 modelified Phong reflectance model for physically based rendering" Technical Report CW197, Dept. Comp. Sci, K.U. Leuven(1994)

$$\rho_{ground} = \frac{N_{ground}}{N_{in}} \tag{7}$$

$$\rho_{wall} = \frac{N_{wall}}{N_{in}} \tag{8}$$

$$a_{in} = \frac{N_{absorb}}{N_{in}} \tag{9}$$

 $\rho_{ground}$ : Ground reflectivity  $\rho_{wall}$ : Opposing wall reflectivity  $a_{in}$ : Receiving surface absorptivity

 Table.4
 Calculation condition and case study

f

| Number of particles         | 8120 pieces |            |            |  |
|-----------------------------|-------------|------------|------------|--|
| Angel of incidence          | 30°         | 50°        | 70°        |  |
| Reflector shape             | 1 : 1 type  | 1 : 2 type | 1 : 3 type |  |
| Reflective surface material | W/B         | W/W        | MIRO/B     |  |
| Z                           |             | Z          |            |  |





Fig.15 Periodic interface

