

高反射率塗装による吸収日射低減効果に関する研究 第2報 折板屋根への二点校正法の適用に関する検討

A Study on the Effect due to the Reduction of Absorbed Solar Radiation by Cool Painting

Part.2 An application of the 2 point correction method for the folded-plate roof

村田泰孝*¹
Yasutaka MURATA

酒井孝司*²
Koji SAKAI

三木勝夫*³
Katsuo MIKI

石原 修*⁴
Osamu ISHIHARA

Abstract

Authors propose the 2 point calibration method as insolation reflectivity measuring method in the roof plane which constructed cool painting. As a result of applying the proposal method to the horizontal surface, it has been confirmed to have the sufficient accuracy as a field measuring method. In this paper, possibility of application of 2 point collection method is examined for folded-plate roof with cool painting. And, multiple absorption of the folded-plate roof was examined by observation and numerical analysis. So, it was confirmed that the 2 point correction method estimates real solar reflectivity after interreflection of the folded-plate roof. Then, factors of variability of estimated solar reflectivity with the 2 point correction method were examined at buildings with folded-plate roof. It was thought that the variability mainly due to directional reflection, shade cast by folded-plate and spectral distribution of solar radiation.

キーワード：高反射率塗料，日射反射率，二点校正法，折板屋根，現場測定

Key Words: cool painting, solar reflectivity, the 2 point correction, folded-plate roof, field measurement

1. はじめに

ヒートアイランド現象の緩和や冷房負荷削減のために屋根の日射反射率を高くする方法がある。屋根の日射反射率を高くする材料として高反射率塗料がある。この塗料は可視域の日射反射率は同色の一般塗料と同程度であるが近赤外域の日射反射率が高いという特徴がある。そのため、目視ではその効果が確認できないので、塗装後にその日射反射率を評価することが必要である。また、高反射率塗装による屋根面での吸収日射低減効果を検討する際、日射反射率は重要なパラメータである。

そこで、前報¹⁾では、水平面の日射反射率を屋外で評価する方法として提案している二点校正法²⁾による日射反射性能の推定精度向上に関して検討を行った。本報では、折板屋根の日射反射率を屋外で評価するために二点校正法を用いることの妥当性について検討し、建物の折板屋根で日射反射率を評価した結果について報告する。

折板屋根は工場などで多く採用されているが、屋根面積が大きく、断熱性が低い建物が多く、冷暖房負荷が大きい

ため、高反射率塗装の効果が大きいと考えられている。従って、折板形状の屋根についても日射反射率を現場で評価する方法を確立しておくことが重要と考えられる。

2. 二点校正法の折板への適用について³⁾

2.1 二点校正法による日射反射率の推定

日射反射率を評価する際、日射計で全天日射量と反射日射量を測定するが、反射日射量には対象面以外からの反射日射が含まれる。二点校正法は、周囲環境からの反射日射の影響を除外するために、日射反射率が既知の白および黒の標準板を設置して測定を行い、対象面の日射反射率を推定する方法である。Fig.1 に二点校正法の概念を示す。二点

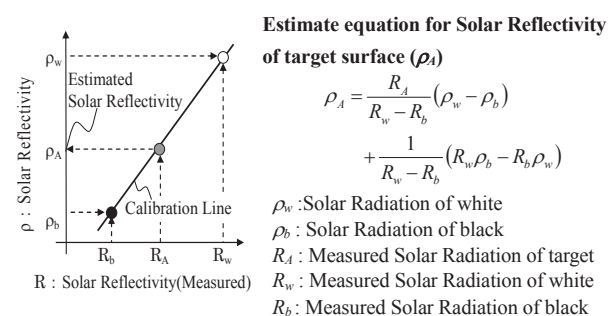


Fig.1 Concept of the 2 point correction method

*1 崇城大学工学部准教授 (〒860-0082 熊本市西区池田 4-22-1)
e-mail: ymurata@arch.soj-u.ac.jp

*2 明治大学理工学部

*3 三木コーティング・デザイン事務所

*4 尚綱大学

(原稿受付 2013 年 7 月 11 日)

校正法では、白、黒標準板を設置して測定した日射反射率 R_w 、 R_b および分光反射率から求めた日射反射率 ρ_w 、 ρ_b を用いて校正線を引き、測定対象面の日射反射率の測定値 R と校正線の交点より対象面のみの日射反射率 ρ_A を推定することになる。この時、 ρ_w 、 ρ_b は、分光光度計で測定した分光反射率に、日射の分光特性に対応する重係数を乗じて算出した値(以下、日射反射率(性能値)という)を用いる。本報告では JIS K5602⁴⁾ に示される方法で日射反射率(性能値)を求めた。

筆者らは、二点校正法を平面に適用した際の妥当性を確認し、精度向上について検討を行ってきた^{1),2)}。この方法を折板面に適用して折板の日射反射率(性能値)を推定できるかを確認した。Fig.2-a)に対象とした折板を Fig.2-b)に二点校正用の標準板の設置状況を示す。また、二点校正のための測定概要を Table 1 に示す。折板の方位は南向きを 0° とし、時計回りに 45° 、 90° 回転した場合を検討した。折板の塗装は分光反射率が平坦なつや消しの灰色を用いた。折板の塗料と標準板の分光反射率を Fig.3 に示す。測定は、天候、太陽位置、折板の向きが推定精度に及ぼす影響を検討するため、Table 2 に示す 6 ケースについて 2007 年 8 月～11 月に行った。Fig.4 に二点校正法による日射反射率の推定結果を示す。推定は Table 2 に示す時刻の前後での測定値を 10 分間平均した値を用いた。推定値は日射反射率(性能値)より低く、0.06～0.11 程度の差であった。これは折板内部での相互反射の影響と考えられる。また、晴天時の方位 0° でばらつきが小さく、方位が 45° 、 90° の時には 0° の時より推定値が低くなった。太陽高度が低い場合には推定値が若干高くなる傾向がみられた。

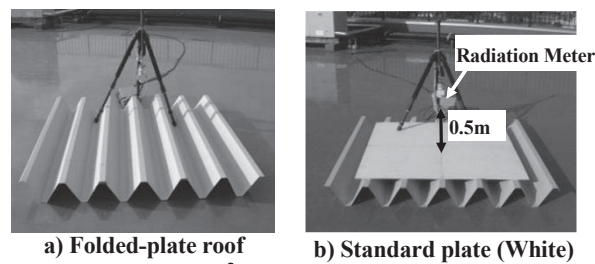


Fig.2 Measurement situation of folded-plate

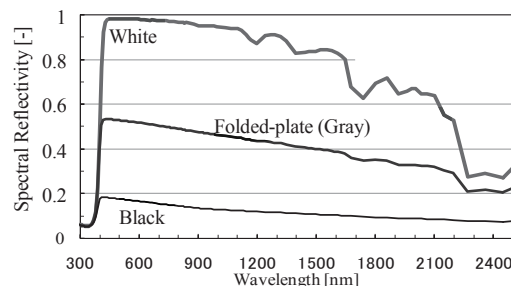


Fig.3 Spectral reflectivity

Table 1 Measurement data

	Folded-plate Roof	Standard Plate
Size	1.6m×1.6m×0.15m	1.2m×1.2m
Color	Gray	White / Black
Solar Reflectivity	0.464	0.886 / 0.145
Trench Direction[°]	0(south), 45, 90	
Place: Rooftop of Meiji Univ. Solar Reflectivity of roof top: 0.14		

Table 2 Measurement cases

Trench Direction	Fine Weather (date : hour)	Cloudy (date : hour)
0°	Aug.22: 10.5, 12.5, 14	Oct.3: 10, 12, 14, 15.5
45°	Nov.12: 10.5, 12.5, 14	Sep.18: 10.5, 12.5, 14.5, 16
90°	Oct.24: 10, 12, 14, 15	Aug.27: 10.5, 12.5, 14.5, 16

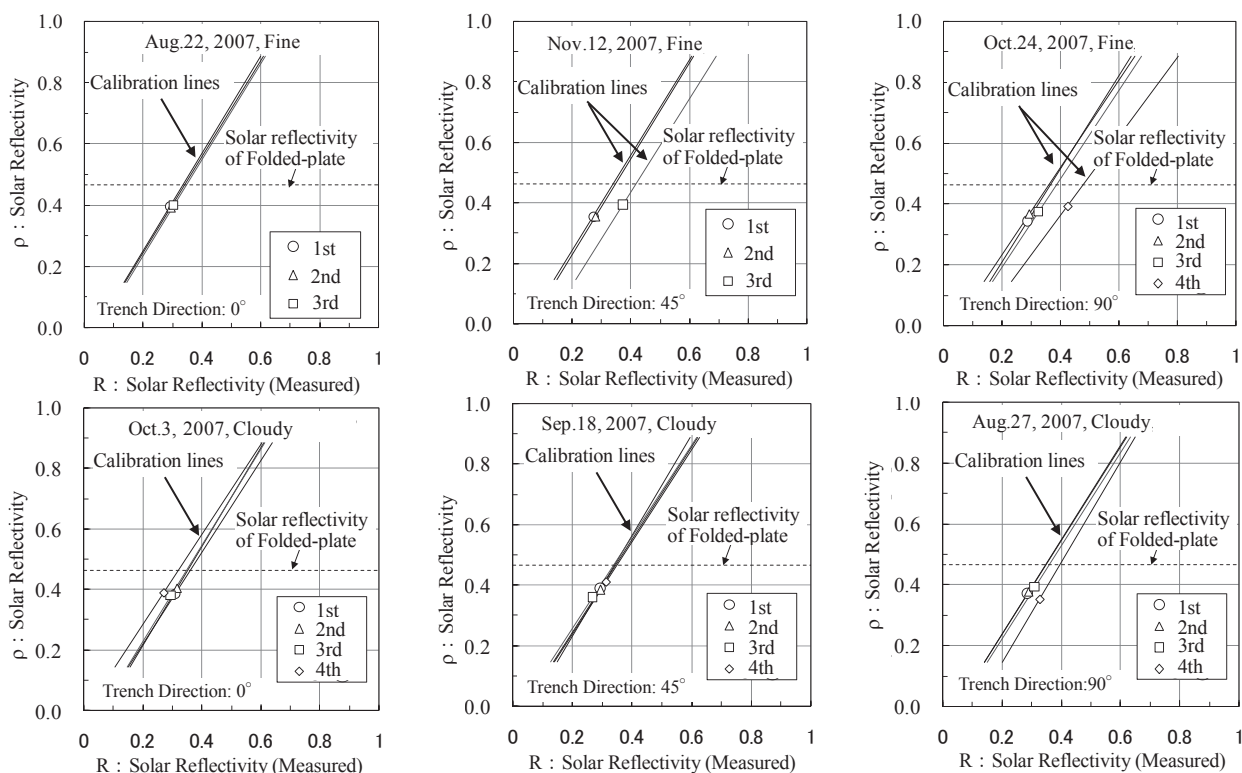


Fig.4 Estimated Solar Reflectivity by 2 point correction method

2.2 折板の日射反射解析

(1) 解析モデル 測定状況をモデル化し、折板表面の日射反射について数値解析を行った。解析モデルを Fig.5 に示し、基礎式⁵⁾を Table 3 に示す。計算簡便化のため、折板と標準板の大きさは同一とし、折板表面の日射反射は完全拡散を仮定した。折板面を 25×16 面の面素に分割し、各面間の面対面形態係数をモンテカルロ法⁶⁾(放射束 10 万本)により求め、Gebhart の吸収係数⁵⁾を算出した。日射データには、全天日射量の実測値を渡辺の式⁷⁾で直散分離した結果を用いた。影率は折板各面素の面積に対する影面積の割合であり、面素を 100 分割して解析時刻毎に算出した⁸⁾。なお、本報の解析では、分光特性は考慮していない。

式(8)は、折板から天空に反射される実質の日射量で、右辺第 2 項が多重反射による反射量減少分となる。この項中の吸収係数は、折板の形状、吸収率に依存する。従って、これらが異なる場合、反射性状も変化する。式(9)は、折板面全体の実質反射率を表す。日射計受感部を微小点と考えると、反射日射計への入力は、式(10)で表される。

(2) 測定結果と解析結果の比較 前節の測定日について 30 分毎に日射反射解析を行い、同一時刻における解析結果を用いて二点校正を行った。Fig.6 に二点校正法の結果を示す。a)は Fig.4 の実測結果をまとめたもので、b)は折板面の日射反射解析結果、c)は折板と同サイズの平板を設置した解析結果である。平板の結果は塗料の日射反射率(性能値)とほぼ一致している。折板の結果は、日射反射率(性能値)と比べて 0.1 程度低い結果となった。この低下は折板内部での相互反射によるものである。実測値による推定結果は解析値による推定結果と比べ、同程度か若干高い程度である。実測値による推定結果が日射反射率(性能値)に比べて低くなるのは、相互反射による実質反射率の低下が主因と考えられる。また、実測値が解析値より高い推定結果となる主因として、反射日射の指向性を考慮していないことが考えられるが、平板での二点校正法における推定誤差の範囲内であった。

以上より、折板に平板の標準板を設置して二点校正を行うことで、相互反射後に日射計に入射する反射日射(実質反射)を評価していることがわかる。実質反射率は、塗料自体の性能を直接評価するものではないが、屋根面から正味反射される日射量を評価する上で有用である。

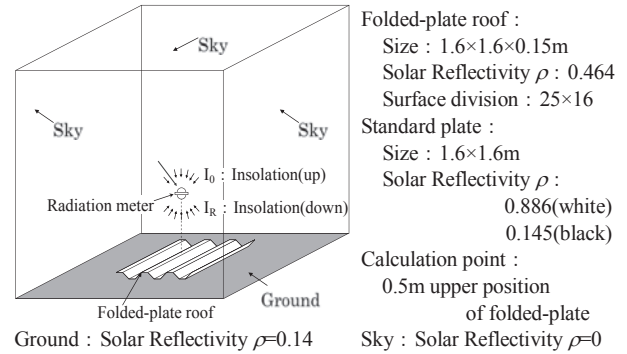


Fig.5 Simulation model

Table 3 Basic equation of reflectivity simulation

$$\text{Direct Insolation} : R_{D_i} = I_{D_n} \cos \theta \cdot \beta_i \cdot A_i \quad (1)$$

$$\text{Sky Insolation} : R_{S_i} = I_{S_h} \cdot F_{is} \cdot A_i \quad (2)$$

$$\text{Direct absorption} : S_{D_i} = \alpha_i (R_{D_i} + R_{S_i}) \quad (3)$$

$$\text{Direct reflection} : S_{R_i} = (1 - \alpha_i) (R_{D_i} + R_{S_i}) \quad (4)$$

$$\text{Real absorption} : S_{A_i} = S_{D_i} + \sum_{j=1}^n (B_{ji} \cdot S_{R_j}) \quad (5)$$

$$\text{Absorption factor} : \sum_{k=1}^n B_{kj} (1 - \alpha_k) F_{ik} - B_{ij} = -\alpha_j F_{ij} \quad (6)$$

$$\text{Real incidence} : E_{D_i} = S_{D_i} + S_{R_i} = R_{D_i} + R_{S_i} \quad (7)$$

$$\text{Real reflection} : E_{R_i} = E_{D_i} - S_{A_i} = (1 - \alpha_i) (R_{D_i} + R_{S_i}) - \sum_{j=1}^n (B_{ji} \cdot S_{R_j}) \quad (8)$$

$$\text{Real reflectivity} : \rho_{bp} = \sum_{i=1}^n E_{R_i} / \sum_{i=1}^n E_{D_i} \quad (9)$$

Incidence of downward insolation meter :

$$I_R = \sum_{i=1}^n \frac{\phi_i}{A_i} \left((1 - \alpha_i) (R_{D_i} + R_{S_i}) + \frac{1 - \alpha_i}{\alpha_i} \sum_{j=1}^n (B_{ji} \cdot S_{R_j}) \right) + \phi_{other} \cdot \rho_{other} \cdot I_{G_h} \quad (10)$$

I_G : Global Insolation, I_D : Direct Insolation, I_S : Sky Insolation, suffix n : normal, suffix s : horizontal, suffix i : surface number, θ : Angle between normal vector of surface and sun location vector, β : Shade rate of surface ($0 \sim 1$, light = 1, shade = 0), A : area of surface, F_{is} : shape factor from surface i to sky, α_i : Insolation absorptance of surface i ($= 1 - \rho_i$), B_{ji} : Absorption factor of Gebhart, F_{ij} : Shape factor from surface i to surface j , ϕ_i : Shape factor from Insolation meter to surface i , ϕ_{other} : Shape factor from Insolation meter to surface outside Folded-plate roof, ρ_{other} : Solar Reflectivity of surface outside Folded-plate roof

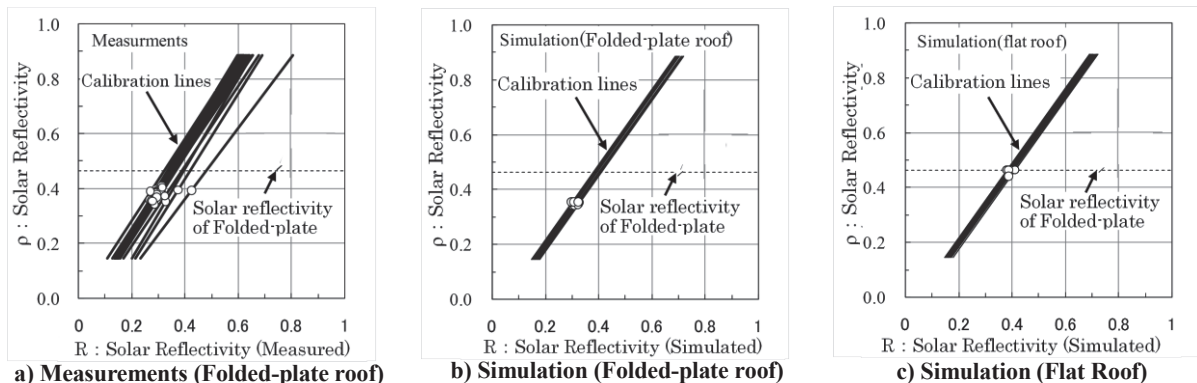


Fig.6 Estimated Solar Reflectivity by the 2 point collection method using results of reflectivity simulation

3. 折板屋根での日射反射率の推定

3.1 塗装初期状態での日射反射率の推定⁹⁾

通常、塗装後は屋根表面に汚れが付着し、日射反射率は低下するが、ここでは、塗装直後の日射反射率を評価するために、表面の汚れを拭き取り測定を実施した。測定対象は熊本大学工学部の実習棟である。建物の外観を Fig.7 に示す。この建物は2棟で構成されているが、使用頻度の高い棟の屋根に白色高反射率塗料を塗装した。塗装した折板屋根の流れ方向は南北方向であるのに対し、未塗装の屋根の流れ方向は東西方向である。塗装完了は2009年6月末である。Fig.8に塗料の分光反射率および二点校正法に用いた標準板の分光反射率を示す。また、JIS K5602による日射反射率を Table 4 に示す。

屋根面の日射反射率測定を、7月、9月、10月の晴天日に実施した。なお、9月、10月の測定では未塗装の屋根も同時に測定を行った。測定日および測定手順を Table 5 に示す。対象面、白、黒の測定は各10分、サンプリング間隔20秒で実施した。Fig.9に測定器の設置状況を Fig.10に折板の形状を示す。

Fig.11に全天日射量および日射反射率(測定値)を示す。9月6日の測定中に太陽に雲がかかり測定値の変動が大きい時間帯があった。この時間帯については、前報¹⁾で提案した晴天指数 $K_t \geq 0.5$ で20秒間での晴天指数の変動が ± 0.1 以内を安定した晴天として抽出した測定値を示した。白、黒、未塗装部の測定値は終日安定していたが、塗装部では回次によりばらつきがあり、10分間の平均値の回次間の差は10月の測定で大きく、0.03程度あった。また、10月の測定では9月より測定値が平均で0.01程度高い。

Fig.12に二点校正の結果を示す。塗装面の日射反射率の推定値は0.81~0.86程度となり平均0.835であった。未塗装部は0.03~0.06となり平均0.049であった。塗装部、未塗装部とも10月の推定値が高い。これは、白、黒標準板の測定平均は大きく変化していないが、対象面の測定値が高くなったためである。白標準板の日射反射率(性能値)は可視域と近赤外域で0.08程度の差はあるが、測定値は大きく変化していないことから、測定時の日射分光分布の影響は小さいと考えられ、折板表面での指向性反射により対象面の測定値が高くなったと推察される。

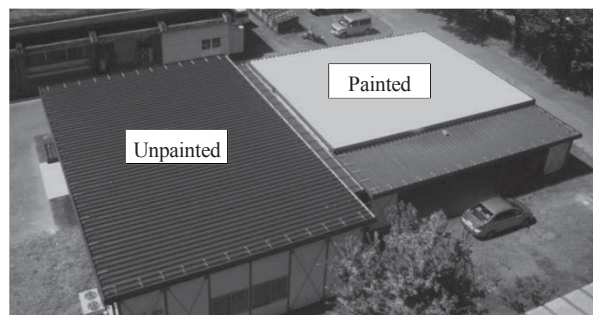


Fig.7 Perspective view of measured building

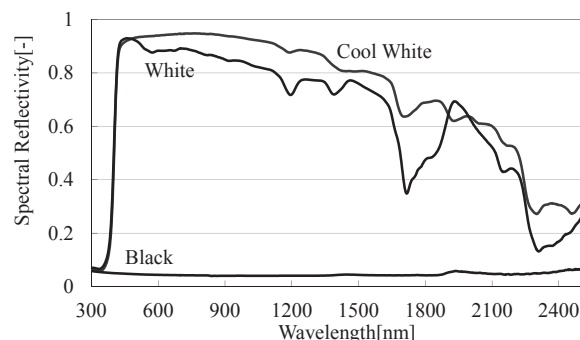


Fig.8 Spectral reflectivity

Table 4 Solar reflectivity by JIS K5602

	Cool White	White	Black
300-2500nm	0.862	0.800	0.044
300-780nm	0.854	0.754	0.042
780-2500nm	0.903	0.835	0.046

Table 5 Measuring procedure

<JUL.6>			
Target	→ White	→ Black	→ Target
<SEP.6, OCT.22>			
White → Black → Target	↗ Target	→ White → Black → Target	
	↘ Target	→ White → Black → Target	

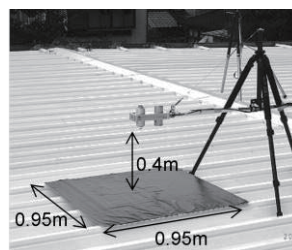


Fig.9 Measurement situation

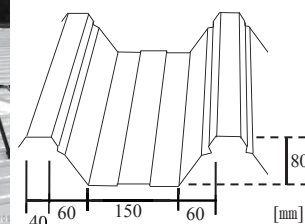


Fig.10 Feature size of folded-plate

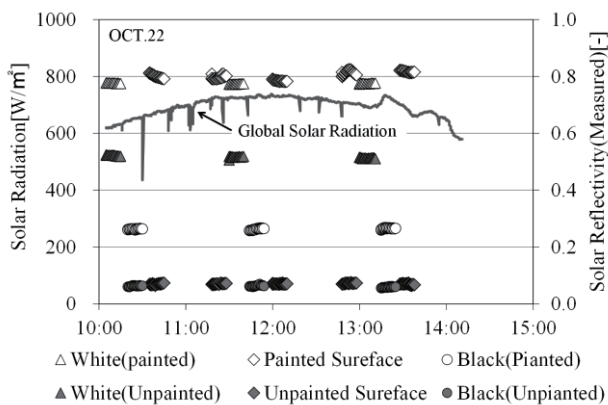
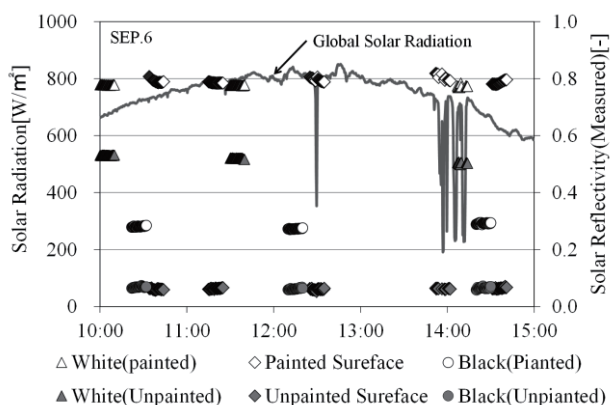


Fig.11 Measured solar reflectivity

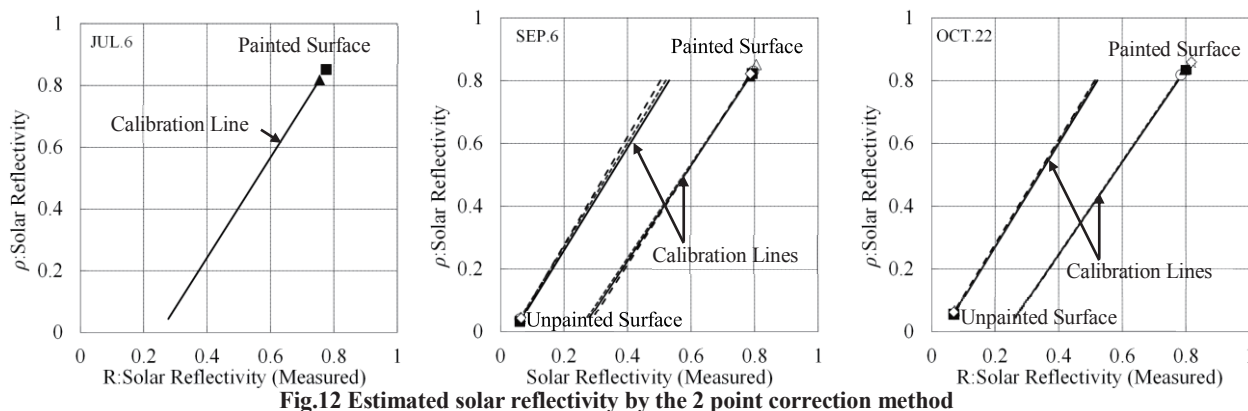


Fig.12 Estimated solar reflectivity by the 2 point correction method

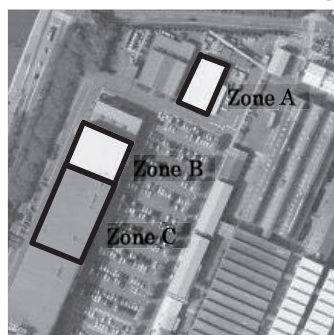


Fig.13 Painted zone

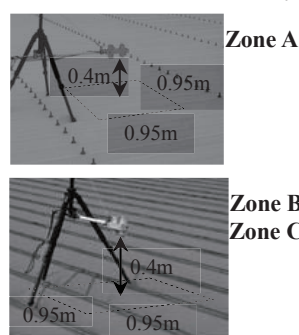


Fig.14 Measurement situation

3.2 塗装後の日射反射率の保持状況^{10), 11)}

表面の汚れの影響による高反射率塗装の日射反射率保持状況を確認するために福岡県北九州市にある工場の屋根にて約3年間の日射反射率の変化を検討した。塗装はFig.13に示す3つのゾーンに施した。ゾーンAおよびゾーンBは2008年11月末に塗装が完了し、ゾーンCは2009年10月末に塗装が完了した。ゾーンAは平屋建ての屋根、ゾーンB、ゾーンCは地上4階建の建物の屋根の一部である。塗料は白色高反射率塗料であり、前節での塗料と同一である。

Fig.15に二点校正法による日射反射率の推定結果を示す。二点校正法に用いた標準板は前節と同一である。対象面、白、黒の測定はサンプリング間隔20秒で10分間行った。ゾーンAでは塗装直後の推定値は0.89とJIS K5602の値より高くなった。これは、測定が12月であり、太陽高度が低かったことが要因と考えられる。8ヶ月経過以降は、初期より日射反射率は低下し、その後の時間経過に伴う日射反射率の低下は見られない。このことから、屋根表面の汚れは堆積し続けるのではなく、雨や風により流されていることが推測される。8ヶ月経過以降の推定値の変動幅は最大0.07程度あるが、表面の汚れの程度による影響と考えられる。ゾーンBの塗装直後の日射反射率は0.82であり、ゾーンAとは異なりJIS K5602による値より低くなった。測定日はゾーンAと同じであったことから、折板の形状によって指向性反射の影響度が異なることが推測される。塗装後の日射反射率の変化は小さく同程度の反射率を保持していると考えられる。ゾーンCはゾーンBより塗装直後の日射反射率が高く、その後も高い値で推移している。測定日は同じであるから、日射の分光分布や指向性反射ではない要因があると考えられる。この要因の一つとして、施工時の

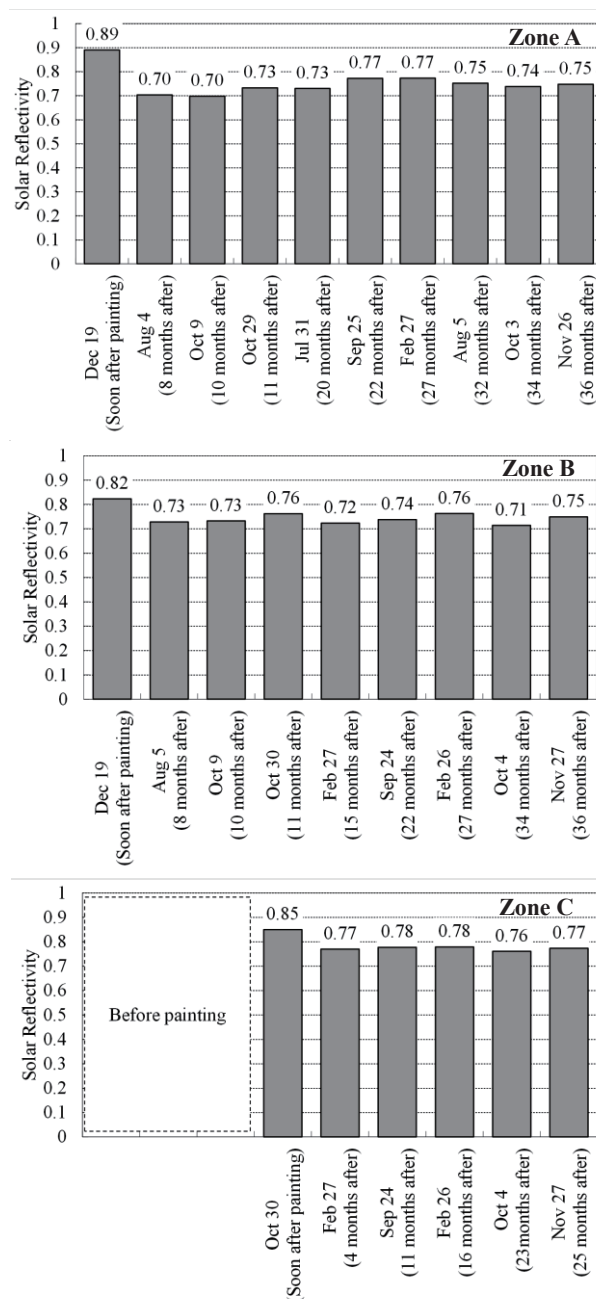


Fig.15 Aging variation of estimated solar reflectivity (Zone A, Zone B, Zone C)

天候等の条件の違いが考えられる。ゾーン A, B では 2008 年 11 月に塗装作業を行ったが、雨天が多く、塗装期間が 1 か月以上であった。ゾーン C では 2 週間程度で塗装が完了している。通常、高反射率塗料は 2~3 層で構成されるので、層と層の間に汚れが混入しゾーン B では日射反射率が低下したと推測される。

4. 折板の流れ方向の違いによる反射日射量の変化

3.1 の建物では、塗装部と未塗装部の折板の流れ方向が異なる。この影響について試験体の流れ方向を南北、東西に設置して検討した。測定場所は熊本大学工学部の校舎屋上である。Fig.16 に測定状況を示す。折板試験体は Fig.10 と同形状でサイズは、1m×1m である。この折板試験体に白、黒、高反射白に塗装した物および、未塗装の物を使用した。ここでは白を塗装した試験体の結果を示す。南北方向の測定日は 2009 年 11 月 28 日、東西方向は 2010 年 1 月 17 日である。Fig.17 に全天日射量、日射反射率(測定値)および平均影率を示す。平均影率は、折板各面にできる影の割合を面積加重平均した値である。日射反射率(測定値)は、南北方向に設置した場合の方が 0.03 程度高くなる。平均影率は東西方向の方が高く、折板内部の影が影響したと考えられる。このことから、太陽高度の低い冬季には東西方向の測定値が低下すると考えられ、二点校正法の推定値も低くなると考えられる。なお、他の試験体の測定結果から、影の影響は、反射率の高い表面で顕著に表れることも確認した。

5. 結論

本報告では、二点校正法の折板屋根への適用について検討を行い、以下の知見が得られた。

- ・折板屋根に二点校正法を適用して算出される日射反射率は、折板内部での相互反射後に天空へ射出される反射日射を評価していることに相当する。
- ・測定時刻、時期により日射反射率(測定値)が変動するが、白、黒標準板の測定値に大きな変化はなく、対象面の日射反射率(測定値)が高くなっていたことから、折板内部での指向性反射の影響であると考察され、これが二点校正法の推定値に影響する。
- ・折板の流れ方向が異なる場合、太陽高度の低い時期には内部の影が測定値に影響し、二点校正法の推定値に影響する。
- ・同一地点の日射反射率の保持状況を評価する場合、表面の汚れの状態が測定日によって異なり、二点校正法の推定値に影響する。

謝辞

本研究の測定は、当時熊本大学学生の猿渡菜奈子君、黒田朋昭君、当時明治大学学生の伊藤統君、加藤貴弘君、当時崇城大学学生の岩永隼人君の労によるものである。また、屋根の日射反射率測定では、熊本大学工学部、TOTO 株式会社の関係各位に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

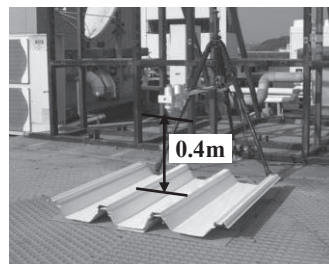


Fig.16 Measurement situation

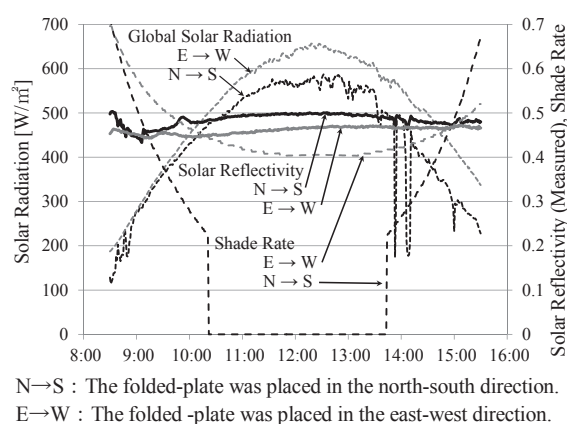


Fig.17 Solar reflectivity and Shade rate

参考文献

- 1) 村田,酒井,三木,石原：高反射率塗装による吸収日射低減効果に関する研究 第 1 報屋外での日射反射率測定の精度向上に関する検討, 太陽エネルギー, Vol.38.No.3, pp.59-66, 2012.5
- 2) 村田,酒井ほか：高反射塗料施工面の日射反射率現場測定法に関する研究—標準板二点校正法の提案および水平面における精度確認—,日本建築学会環境系論文集, Vol.73 No.632, pp.1209-1215, 2008.10
- 3) 酒井,村田,松尾,三木,村瀬：高反射塗料を施工した折板面の日射反射率測定法に関する研究, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2008, pp.529-532, 2008.11
- 4) JIS K5602:2008：塗膜の日射反射率の求め方, 日本工業標準調査会, 2008
- 5) 村上：CFD による建築・都市の環境設計工学, 東京大学出版会, pp.83-98, 2000.9
- 6) 谷口ほか：モンテカルロ法による放射伝熱解析, pp.48-50, コロナ社, 1994.1
- 7) 渡辺ほか：水平面全天日射量の直散分離と傾斜面日射量の推定, 日本建築学会論文報告集, 第 330 号, pp.96-108, 1983.8
- 8) 酒井,石原：庇の日射遮蔽効果検証に関する研究, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2005, pp.95-98, 2005.10.
- 9) 石原,村田：金属折板屋根の高反射化による室内温熱環境への影響に関する研究その 2 熊本大学ものづくり実習棟における温熱環境評価, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2010, pp.75-78, 2010.11
- 10) 村田,石原,三木：金属折板屋根の高反射化による室内温熱環境への影響に関する研究その 1 北九州市にある事務用途建物における温熱環境評価, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2010, pp.71-74, 2010.11
- 11) 村田,石原,三木：屋根高反射率化による建物冷暖房用エネルギーへの影響に関する研究-金属折板屋根建物での冷暖房用電力消費の検討-,太陽/風力エネルギー講演論文集 2010, pp.63-66, 2010.11