

日射遮蔽シートを用いた折板屋根の遮熱効果予測手法に関する研究 (第2報) 日射遮蔽シート敷設屋根と天井間の熱移動解析

Prediction Method of Solar Shielding Effect of Roof with Sunshade Sheets (Part 2) Heat Transfer Analysis through Roof with Sunshade Sheets and Ceiling

正 会 員 〇山中 俊夫 (大阪大学) 正 会 員 LIM EUNSU (九州大学)
正 会 員 甲谷 寿史 (大阪大学) 正 会 員 桃井 良尚 (大阪大学)
正 会 員 相良 和伸 (大阪大学) 学 生 会 員 相馬 真子 (大阪大学)

Toshio YAMANAKA^{*1} Eunsu LIM^{*2} Hisashi KOTANI^{*1}
Yoshihisa MOMOI^{*1} Kazunobu SAGARA^{*1} Masako SOMA^{*2}
^{*1} Osaka University ^{*2} Kyushu University

In order to cut down the heat load for indoor cooling, it is important to control solar radiation. Therefore, the purpose of this study is to examine how the indoor heat load for cooling and indoor thermal environment can be decreased by thermal shielding. This paper shows the adaptation of sunshade sheets over roof and the analysis of heat transfer between shaded roof and ceiling by the simulation with a heat transfer model. It is clarified that using sunshade sheets is useful to reduce air-conditioning load at daytime in summer.

1. はじめに

前報¹⁾では、日射遮蔽シート(以下、遮蔽シート)による夏季冷房負荷削減効果の実証計測を行い、遮蔽シートの遮熱効果について報告した。しかし、遮蔽シートによる屋根の遮熱性能向上効果を定量的に評価するためには、室内への流入熱量を精度よく予測できる伝熱モデルの構築が必要となる。日射遮蔽シートを敷設した金属製折板屋根の定常伝熱モデルとして安積ら²⁾の研究がある。しかし、このモデルでは、遮蔽シートと屋根との間の空間における換気は考慮されていない。本報では、遮蔽シート下部空間での換気による排熱量を考慮するとともに、より精密な対流・放射計算による遮蔽シート・屋根と天井間の熱移動解析モデルを構築し、シート敷設有無が流入熱量低減に及ぼす影響について報告する。

2. 解析概要

2.1 解析手法

図-1に示すとおり、外気⇄遮蔽シート⇄鋼板屋根⇄天井を通る熱移動と遮蔽シートの下部空間(以下、シート下部空間)の換気による排熱量を考慮してモデルを構築した。遮蔽シート敷設時の屋根と天井間における熱移動解析は、遮蔽シートを平鋼板屋根上に敷設した場合と敷設しない場合の2条件で行った。

2.2 遮蔽シート敷設屋根の定常伝熱モデル

遮蔽シートから室内への伝熱モデルの概念図を図-1に、モデルの温度定義位置を図-2に示す。遮蔽シート上面における大気からの流入熱量は、図-1に示した各面での伝導、対流、放射現象によって室内へ伝わる。日射遮蔽シートを敷設した折板屋根からの流入熱量予測モデルを図-3に示す。各方程式の解は、エクセルのソルバー

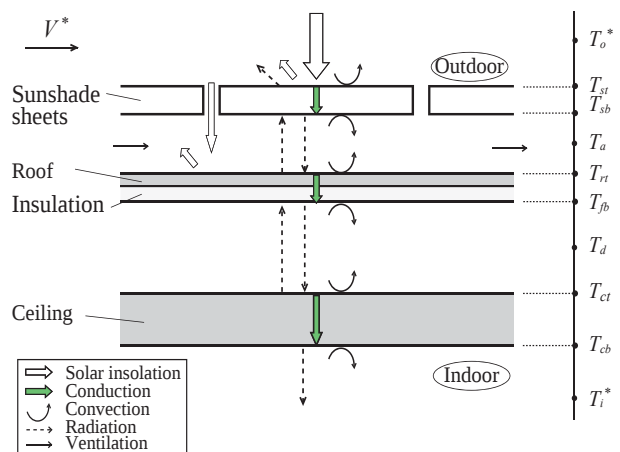


図-1 解析モデルの概念図

図-2 温度定義点
(*: 境界条件)

を用いた準ニュートン法によって求めた。

2.3 各面での熱収支式

各面における熱収支式を式(1)～式(24)に示す。各面での単位面積あたりの流入熱量は、上から下を正として定義した。遮蔽シートはメッシュシート製により通気性を有するため、シートとシートの隙間からの透過分も含めた透過率(τ_s)を考慮し、モデル化を行った。

遮蔽シート上面における熱収支を式(1)～式(5)に示す。日射、対流、放射によって遮蔽シートへ熱が伝わる。大気放射率 ε_g は、Bruntの式³⁾により評価する。遮蔽シート上下面及び屋根上面の対流熱伝達率は、ユルグスの式より算出した。遮蔽シート下面の熱収支を式(6)～式(9)に、屋根上下面の熱収支を式(10)～式(14)に示す。遮蔽シート下面と屋根上面の放射は、遮蔽シートの隙間から屋根に入射する大気放射と、日射による遮蔽シートと平鋼板間での反射、吸収による放射熱移動を考慮し、式(7)

on top surface of the sheet

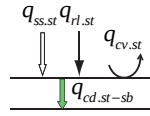
$$q_{ss,st} + q_{rl,st} + q_{cv,st} = q_{cd,st-sb} \quad (1)$$

$$q_{ss,st} = A_s (1 - \tau_s) J \quad (2)$$

$$q_{rl,st} = (\sigma \varepsilon_g T_o^4 - \sigma \varepsilon_{st} T_{st}^4) (1 - \tau_s) \quad (3)$$

$$q_{cv,st} = \alpha_{cst} (T_o - T_{st}) (1 - \tau_s) \quad (4)$$

$$q_{cd,st-sb} = \frac{\lambda_s}{l_s} (T_{st} - T_{sb}) (1 - \tau_s) \quad (5)$$



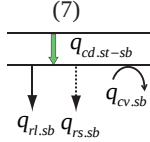
on bottom surface of the sheet

$$q_{cd,st-sb} = q_{rl,sb} + q_{rs,sb} + q_{cv,sb} \quad (6)$$

$$q_{rl,sb} = (1 - \tau_s) \sigma \varepsilon_{sb} T_{sb}^4 - (\sigma \varepsilon_{rt} T_{rt}^4 + I_{rt}) (1 - \tau_s) \varepsilon_{sb} \quad (7)$$

$$q_{rs,sb} = -\frac{(1 - \tau_s)(1 - r_{sb})r_{rt}\tau_s}{1 - (1 - \tau_s)r_{sb}r_{rt}} J \quad (8)$$

$$q_{cv,sb} = \alpha_{csb} (T_{sb} - T_a) (1 - \tau_s) \quad (9)$$



on top surface of the roof

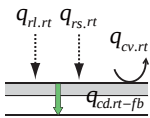
$$q_{rl,rt} + q_{rs,rt} + 1.65q_{cv,rt} = 1.65q_{cd,rt-fb} \quad (10)$$

$$q_{rl,rt} = \{ \tau_s \sigma \varepsilon_g T_o^4 + (1 - \tau_s) \sigma \varepsilon_{sb} T_{sb}^4 + I_{rt} \} \varepsilon_{rt} - \sigma \varepsilon_{rt} T_{rt}^4 \quad (11)$$

$$q_{rs,rt} = \frac{\tau_s(1 - r_{rt})}{1 - (1 - \tau_s)r_{sb}r_{rt}} J \quad (12)$$

$$q_{cv,rt} = \alpha_{crt} (T_a - T_{rt}) \quad (13)$$

$$q_{cd,rt-fb} = \frac{1}{\frac{l_r}{\lambda_r} + \frac{l_f}{\lambda_f}} (T_{rt} - T_{fb}) \quad (14)$$

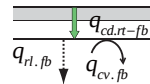


on bottom surface of the roof

$$1.65q_{cd,rt-fb} = q_{rl,fb} + q_{cv,fb} \quad (15)$$

$$q_{rl,fb} = \varepsilon_{fb-ct} \sigma (T_{fb}^4 - T_{ct}^4) \quad (16)$$

$$q_{cv,fb} = \frac{1}{\frac{1}{1.65\alpha_{c_{fb}}} + \frac{(l_d/2)}{\lambda_t}} (T_{fb} - T_d) \quad (17)$$



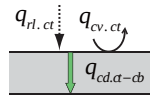
on top surface of the ceiling

$$q_{rl,ct} + q_{cv,ct} = q_{cd,ct-cb} \quad (18)$$

$$q_{rl,ct} = q_{rl,fb} \quad (19)$$

$$q_{cv,ct} = \frac{1}{\frac{1}{1.65\alpha_{c_{ct}}} + \frac{(l_d/2)}{\lambda_t}} (T_d - T_{ct}) \quad (20)$$

$$q_{cd,ct-cb} = \frac{\lambda_c}{l_c} (T_{ct} - T_{cb}) \quad (21)$$

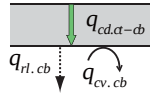


on bottom surface of the ceiling

$$q_{cd,ct-cb} = q_{rl,cb} + q_{cv,cb} \quad (22)$$

$$q_{rl,cb} = \alpha_{rcb} (T_{cb} - T_i) \quad (23)$$

$$q_{cv,cb} = \alpha_{ccb} (T_{cb} - T_i) \quad (24)$$



at the space between roof and sheet

$$q_{cv,sb} + q_{v,ain} = 1.65q_{cv,rt} + q_{v,aout} \quad (25)$$

$$q_{v,ain} = \frac{C\rho_a k_{sb} V x h T_o}{xy} \quad (26)$$

$$q_{v,aout} = \frac{C\rho_a k_{sb} V x h T_a}{xy} \quad (27)$$

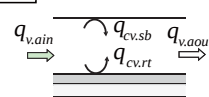


図-3 日射遮蔽シート敷設した折板屋根を通る流入熱量予測モデル

と式 (8)、式 (11) ～式 (12) を導いた。屋根及び岩綿吹付け断熱材における伝導と対流の熱移動量には、折板屋根の形状が影響すると考え平鋼板面積に対する折板屋根の表面積比で求めた形状定数 1.65 を乗じている。

2.4 シート下部空間と天井裏空間の熱収支式

換気による熱移動の熱収支を式 (25) ～式 (27) に示す。

postscript

$$\varepsilon_g = 0.526 + 0.076\sqrt{f} \quad (28)$$

$$\alpha_{cm} = 5.8 + 3.9k_m V \quad (29)$$

$$I_{sb} = \frac{(1 - \varepsilon_{rt}) \{ \tau_s \sigma \varepsilon_g T_o^4 + (1 - \tau_s) \sigma \varepsilon_{sb} T_{sb}^4 + (1 - \tau_s) (1 - \varepsilon_{sb}) \sigma \varepsilon_{rt} T_{rt}^4 \}}{1 - (1 - \tau_s)(1 - \varepsilon_{sb})(1 - \varepsilon_{rt})} \quad (30)$$

$$I_{rt} = \frac{(1 - \tau_s)(1 - \varepsilon_{sb}) [\sigma \varepsilon_{rt} T_{rt}^4 + (1 - \varepsilon_{rt}) \{ \tau_s \sigma \varepsilon_g T_o^4 + (1 - \tau_s) \sigma \varepsilon_{sb} T_{sb}^4 \}]}{1 - (1 - \tau_s)(1 - \varepsilon_{sb})(1 - \varepsilon_{rt})} \quad (31)$$

$$\varepsilon_{fb-ct} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{fb}} + \frac{1}{\varepsilon_{ct}} - 1} \quad (32)$$

Nomenclature

T	: temperature [K]
A	: absorption coefficient for solar radiation [-]
τ	: transmissivity [-]
J	: solar radiation [W/m ²]
ε_g	: emissivity of atmospheric radiation [-]
ε	: emissivity of long-wave radiation [-]
α_c	: convective heat transfer coefficient [W/(m ² ·K)]
α_r	: radiative heat transfer coefficient [W/(m ² ·K)]
λ	: thermal conductivity [W/(m·K)]
l	: length [m]
I	: indirect solar radiation [W/m ²]
r	: reflectance [-]
V	: mean velocity of outdoor air [m/s]
k_m	: ratio of local velocity to outdoor air mean velocity at surface m [-]
σ	: Stefan – Boltzmann constant 5.67×10^{-8} [W/(m ² ·K ⁴)]
h	: distance between roof and sheet [m]
C	: specific heat at constant pressure [J/(kg·K)]
ρ	: density [kg/m ³]
xy	: area (= $x \times y$) [m ²]
q_{ss}	: radiative heat flux by solar radiation [W/m ²]
q_{rl}	: radiative heat flux by long wave [W/m ²]
q_{rs}	: radiative heat flux by sort wave [W/m ²]
q_{cv}	: convective heat flux [W/m ²]
q_{cd}	: conductive heat flux [W/m ²]
$q_{v,ain}$	: inflow heat flux by ventilation between roof and sheet by ventilation [W/m ²]
$q_{v,aout}$	: outflow heat flux by ventilation between roof and sheet by ventilation [W/m ²]

Subscripts

s	: sunshade sheet
a	: space between roof and sheet
r	: folded-plate roof
f	: insulation
d	: space between ceiling and folded-plate roof
c	: ceiling
i	: inside the room
o	: outside the room

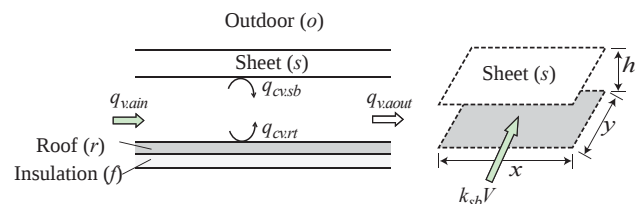


図-4 換気モデル

シート下部空間において、遮蔽シートと屋根間の水平方向の換気、シート間の隙間を通しての上下方向の換気による排熱量を合わせて考慮し、遮蔽シートと屋根間の換気としてモデル化した(図-4)。シート下部空間の高さ(h)は、シートから折板屋根の山谷高さを平均した0.145[m]とした。天井裏空間の対流成分による熱移動は、空気層の熱伝導抵抗を考慮し、見かけの熱伝導率⁵⁾ λ_t を用いて算出する(式(17)、式(20))。

2.5 物性値及び解析条件

計算で用いた物性値を表-1に示す。外気温度 T_o と、水平面全天日射量 J 、風速 V は、境界条件として測定値を与え、室内温度は実測結果の床上1700mmの値を与え、遮蔽シート上面から天井下面までの各部位温度の計算を行った。今回、便宜的に鉛直温度分布の実測結果と計算結果の誤差が小さい遮蔽シート上下部の局所風速を検討し、対流熱伝達率 α_{cst} 、 α_{csb} 、 α_{crt} を求めた。遮蔽シート上下部の局所風速は上空風速に対する風速比で表し、風速比を上空風速に乗じて対流熱伝達率を定めた。今回の計算では、実測値から求めた流入熱量と最も誤差が小さかった0.3を遮蔽シート上部風速比(k_{st})、シート下部空間の風速比(k_{sb})、屋根上部空間の風速比(k_{rt})として用いた。

解析条件を表-2に示す。シート敷設条件caseCS、シートを未敷設のcaseCNについて、実測の代表日8月15日、8月11日～17日の1週間、8月1日～31日までの1ヶ月の計算を行い、実測結果との比較、シート有無の比較を行った。1ヶ月の計算では室内温度を28℃一定で24時間運転する室を想定して計算を行った。

3. 結果と考察

3.1 伝熱モデル計算の精度検証

伝熱モデルを構築し、精度検証を行うため、遮蔽シートを敷設する条件で実測期間中の1日(2010年8月15日)を代表日として、その結果を計算結果と比較した。

3.2 各部位の温度と流入熱量の計算値と測定値の比較

2010年8月15日、シートの上面温度と屋根の上面温度の計算結果(caseCS)と実測結果(caseMS)の比較を図-5に示す。昼間においてシート上面温度は測定値より計算値が高いが、屋根表面温度はよく再現できており、全体的に計算結果は実測結果と概ね一致した。

流入熱量の計算結果と実測結果の比較を図-6に示す。昼間において計算結果が実測結果より最大約5[W/m²]低い結果が得られた。図-5の実際は天井に温度分布が生じていること、屋根表面温度が精度よく再現されていることより、計算結果は精度よく予測されているが実測値とは差が生じていると考えられる。

3.3 遮蔽シートの有無が屋根上面温度に及ぼす影響

2010年8月11日～8月17日の遮蔽シート有の条件caseCSと遮蔽シート無の条件caseCNにおける屋根上面

表-1 各部の物性値

o	$\alpha_{cst} = 5.8 + 3.9k_{st}V$	$A_{st} = 0.90$	$\varepsilon_{st} = 0.83$
	$\lambda_s = 0.3$	$l_s = 0.0008$	$\tau_s = 0.0216$
s	$\alpha_{csb} = 5.8 + 3.9k_{sb}V$	$A_{sb} = 0.93$	$\varepsilon_{sb} = 0.97$
	$\alpha_{crt} = 5.8 + 3.9k_{rt}V$	$A_{rt} = 0.80$	$\varepsilon_{rt} = 0.90$
a	$\lambda_r = 45$	$l_r = 0.0008$	
	$\lambda_f = 0.04$	$l_f = 0.015$	
r	$\alpha_{cph} = 6.4(1)$		$\varepsilon_{ph} = 0.90$
	$\alpha_{cph} = 1.7(1)$		
d	$\lambda_t = 58(1)$	$l_d = 0.2$	
	$\lambda_t = 1.16(1)$		
c	$\alpha_{cct} = 6.4(1)$	$\varepsilon_{ct} = 0.90$	
	$\alpha_{cct} = 1.7(1)$		
i	$\lambda_c = 0.21$	$l_c = 0.009$	
	$\alpha_{cib} = 6.4(1)$		
	$\alpha_{cib} = 1.7(1)$		
	$\alpha_{rit} = 4.7$		
$k_{st} = k_{sb} = k_{rt} = 0.3$			

表-2 解析条件

	case	condition	period
measurement	MS	with sheets	8.15
calculation	CS	with sheets	8.15
	CN	without sheets	8.11~8.17 8.1~8.31

温度(T_{rt})の時系列変化を図-7に示す。全体的に昼間には遮熱シート無のcaseCNでは約65℃まで上昇しており、遮蔽シート有のcaseCSが遮熱シート無のcaseCNより最大20℃低い、夜間においては約1.5℃ほど高い温度を示す。これは夜間において日射遮蔽シートが屋根面から天空への放射がささざるためであると考えられる。24時間空調運転を行う建物においては昼間の空調負荷低減効果とは逆に空調負荷増大効果がややあることが言える。

3.4 遮蔽シートの有無が流入熱量に及ぼす影響

2010年8月11日～8月17日の遮蔽シート有の条件caseCSと遮蔽シート無の条件caseCNにおける天井から室内への流入熱量の時系列変化を図-8に示す。図-7の屋根表面温度(T_{rt})の結果と同様に昼間には遮蔽シート有のcaseCSが遮熱シート無のcaseCNに比べて、流入熱量が大幅低減でき、晴れた日の12時頃は、約30[W/m²]小さいことが分かる。これより、夏季において日射遮蔽シートが、天井から流入熱量を低減することに有効であると言える。

3.5 等価外気温と屋根上面温度・流入熱量の関係

2010年8月における等価外気温と屋根上面温度の関係を図-9、等価外気温と流入熱量の関係を図-10に示す。等価外気温 θ_e は前報の式(1)より算出した。昼間においては等価外気温と熱流量は遮蔽シートの有無に関わらず、相関が高い。等価外気温 θ_e が大きくなるにつれ、遮蔽シート敷設による効果が大きくなる。等価外気温60℃の場合、天井からの流入熱量はcaseNがcaseSより約20[W/m²・h]大きい、夜間には等価外気温 θ_e がエアコン設定温度(28℃)より低い時には、caseCNの方がcaseCSより室内からの流出熱量が大きいことが分かる。

4. まとめ

日射遮蔽シートを敷設した建物の遮熱性能評価を行うため、伝熱モデルを構築し、精度検証を行った。計算の結果、遮蔽シート上面から天井までの温度は、実測結果と概ね一致した。夏季において昼間には遮熱シートより

天井からの流入熱量を大幅低減できること、夜間には屋根面の放射が遮られ、やや負荷増大効果があることなどが分かった。今後は、様々な要因が遮熱効果に及ぼす影響を明らかにするとともに、他の日射遮蔽手法との比較も行い、最適な遮熱性能向上手法を検討する所存である。

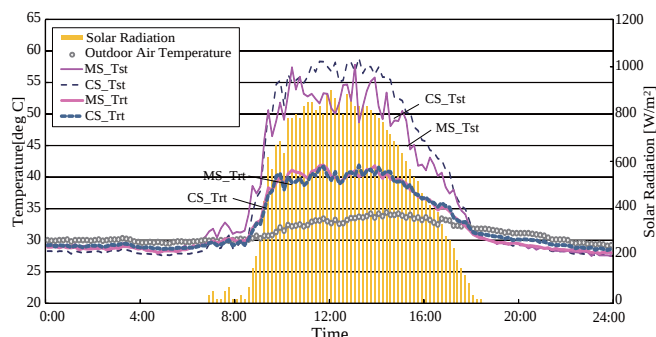


図-5 屋根表面温度の実測と計算結果の比較 (2010. 8. 15)

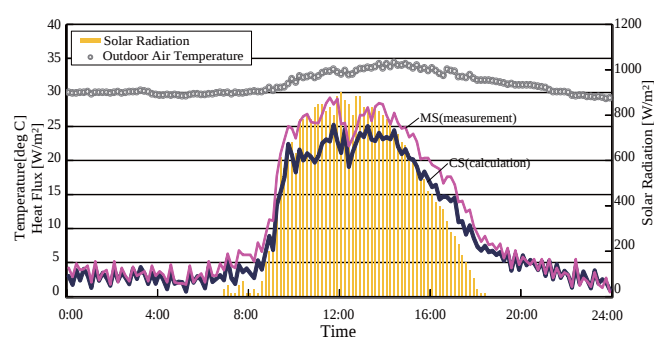


図-6 流入熱量の実測と計算結果の比較 (2010. 8. 15)

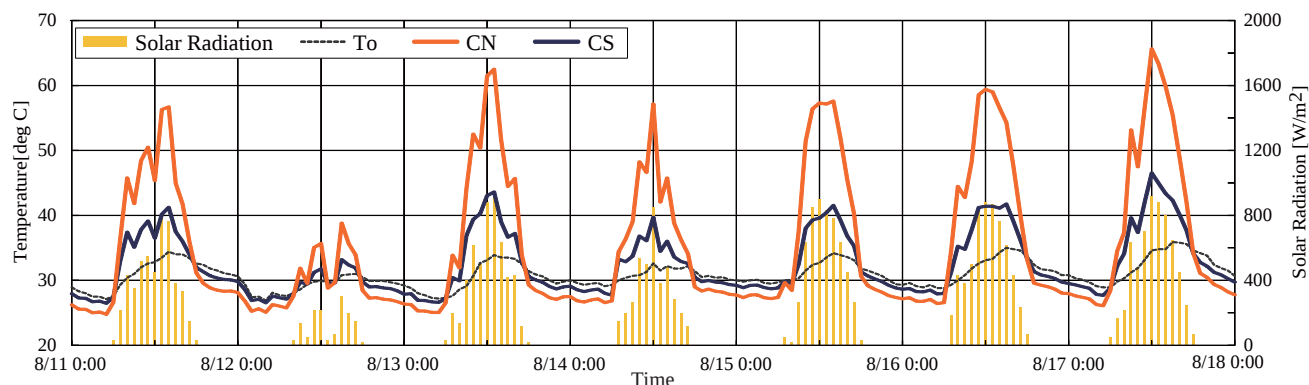


図-7 日射遮蔽シート有無が屋根表面温度に及ぼす影響 (2010. 8. 11-8. 17 の時系列変化)

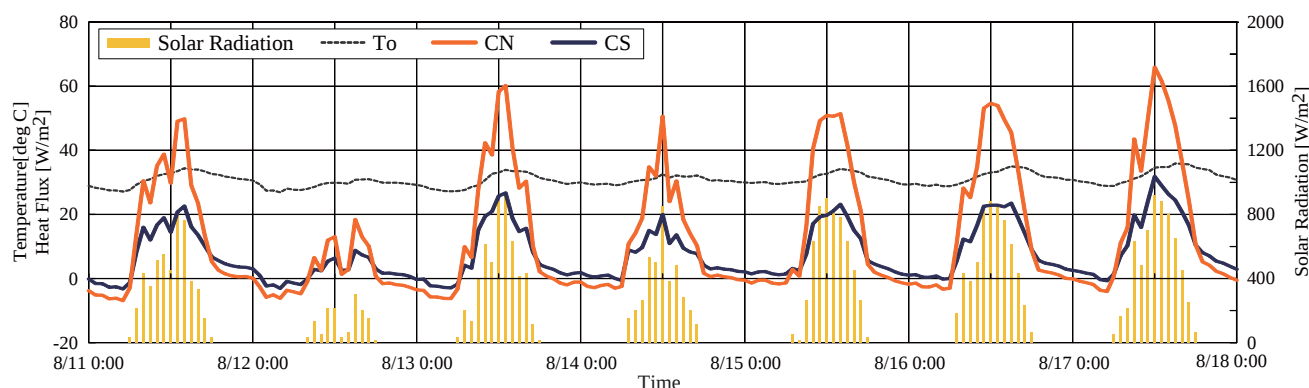


図-8 日射遮蔽シート有無が室内への流入熱量に及ぼす影響 (2010. 8. 11-8. 17 の時系列変化)

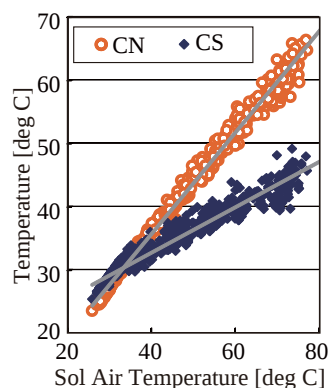


図-9 水平面の等価外気温と屋根表面温度の関係 (8月)

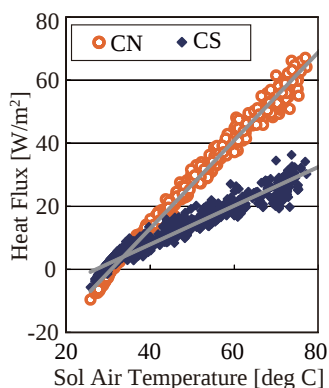


図-10 水平面の等価外気温と流入熱量の関係 (8月)

参考文献

- 1) LIM 他：同題（第1報）日射遮蔽シートによる夏季屋根からの流入熱量低減効果の実測，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2011. 09 掲載予定
- 2) 安積 他：屋根外用遮熱シートの暖冷房負荷計算による遮熱性能評価，GBRC, vol. 35, No. 4, pp. 28-35, 2010. 10
- 3) 田中 他：最新建築環境工学，井上書院，2006. 03
- 4) 白石 他：対流・放射連成解析による通気層を有する二重屋根の遮熱特性に関する検討，日本建築学会計画系論文集，vol. 556, pp. 23-29, 2002. 06
- 5) 戸河里 他：大空間における上下温度分布の予測モデル，日本建築学会計画系論文集，vol. 427, pp. 9-19, 1991. 09

付記

本研究の一部は、日本ワイドクロス株式会社からの委託によるものである。