

日射遮蔽シートによる屋根の遮熱効果予測手法に関する研究 (その1) 日射遮蔽シート・屋根・天井間の熱移動解析

正会員○相馬 真子^{*1} 同 山中 俊夫^{*2} 同 LIM EUNSU^{*3}
同 甲谷 寿史^{*4} 同 桃井 良尚^{*5} 同 相良 和伸^{*6}

4. 環境工学 -8. 遮熱

日射遮蔽 折板屋根 熱移動解析

1. はじめに

近年、環境負荷低減に向け、省エネルギーに対する関心も高い。冷暖房設備に頼った室内環境制御だけではなく、建物内への熱負荷を削減し、室内を快適に保つ上で建物の遮熱性能評価が重要視されており、建物外表面での日射遮蔽が極めて重要となる。そこで本研究では、金属製折板屋根の上に日射遮蔽シート（以下、遮蔽シート）を施工し、太陽の直射光を遮ることによる空調負荷削減効果と室内の温熱環境の快適性向上効果を検証し、遮蔽シートによるこれらの効果を定量的に予測する手法の開発を行うことを目的としている。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し、間接放射計算による屋根と天井間の熱移動解析モデルの構築を行い、実測結果との比較によるモデルの精度検証を行った結果について報告する。

2. 日射遮蔽シート敷設建物

2.1 遮蔽シートの概要

評価対象の遮蔽シートは幅 30cm の带状で、シート間の隙間からの通気によりシートと屋根間に停滞しやすい高温空気の除去が促進されと考えられる。遮蔽シートは黒色ポリエチレン樹脂織物で、シートの上面はステンレス蒸着が施されている。遮蔽シートの施工例を図1に示す。

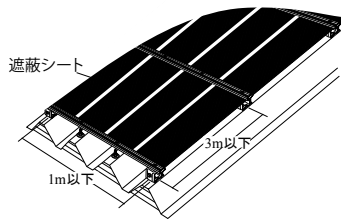


図1 遮蔽シート施工例

2.2 測定概要

測定は2010年5月19日～2011年2月28日（うち2010年7月29日-8月9日は遮蔽シートなし）において、金属製屋根（大阪市東成区4階建て建物屋上の建屋）に遮蔽シートを施工して行った。建物の平面図と断面図を図2、3に示す。水平面全天日射量、外気の風向・風速を10分間隔で、室内外温度・湿度を5分間隔で、流入熱流量を1分間隔で測定した。

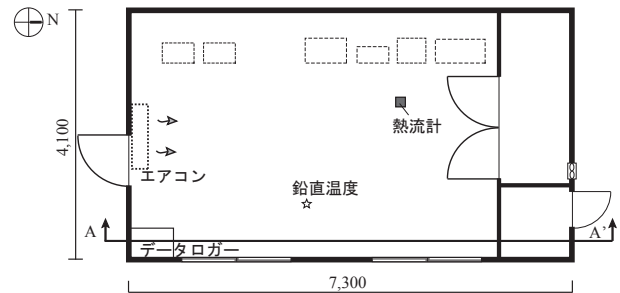


図2 対象建物の平面図（単位：[mm]）

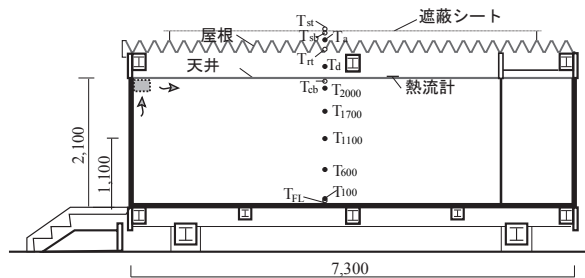


図3 対象建物のA-A'断面図（単位：[mm]）

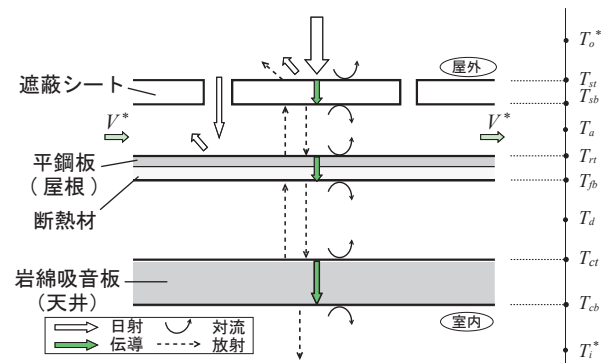


図4 伝熱モデルの概念図

図5 温度定義点
(*: 境界条件)

3. 遮蔽シート敷設屋根の定常伝熱モデル

3.1 解析概要

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）の水平方向の換気及び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考慮しモデルを構築した。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、実測を

遮蔽シート上面の熱収支式

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

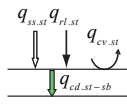
ただし

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

$$q_{rl.st} = (\sigma\epsilon_g T_o^4 - \sigma\epsilon_{st} T_{st}^4)(1-\tau_s) \quad (3)$$

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

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



遮蔽シート下面の熱収支式

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

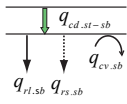
ただし

$$q_{rl.sb} = (1-\tau_s)\sigma\epsilon_{sb} T_{sb}^4 - (\sigma\epsilon_{sb} T_{sb}^4 + I_{lsb})(1-\tau_s)\epsilon_{sb} \quad (7)$$

$$q_{cv.sb} = \alpha_{c_{sb}}(T_{sb} - T_a)(1-\tau_s) \quad (8)$$

$$q_{rs.sb} = -\frac{(1-\tau_s)(1-r_{sb})r_{rt}\tau_s}{1-(1-\tau_s)r_{sb}r_{rt}}J \quad (9)$$

$$I_{sb} = \frac{(1-\epsilon_{rt})\{\tau_s\sigma\epsilon_g T_o^4 + (1-\tau_s)\sigma\epsilon_{sb} T_{sb}^4 + (1-\tau_s)(1-\epsilon_{sb})\sigma\epsilon_{rt} T_{rt}^4\}}{1-(1-\tau_s)(1-\epsilon_{sb})(1-\epsilon_{rt})}$$



屋根上面の熱収支式

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

ただし

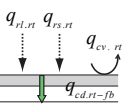
$$q_{rl.rt} = \{\tau_s\sigma\epsilon_g T_o^4 + (1-\tau_s)\sigma\epsilon_{sb} T_{sb}^4 + I_{lrt}\}\epsilon_{rt} - T_{rt}^4 \quad (11)$$

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

$$q_{cv.rt} = \alpha_{c_{rt}}(T_d - T_{rt}) \quad (13)$$

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

$$I_{rt} = \frac{(1-\tau_s)(1-\epsilon_{sb})[\sigma\epsilon_{rt} T_{rt}^4 + (1-\epsilon_{rt})\{\tau_s\sigma\epsilon_g T_o^4 + (1-\tau_s)\sigma\epsilon_{sb} T_{sb}^4\}]}{1-(1-\tau_s)(1-\epsilon_{sb})(1-\epsilon_{rt})}$$



屋根下面の熱収支式

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

ただし

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

$$\epsilon_{fb-ct} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{fb}} + \frac{1}{\epsilon_{ct}} - 1}$$

$$q_{cv.fb} = \alpha_{c_{fb}}(T_{fb} - T_{ct}) \quad (17)$$

天井上面の熱収支式

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

ただし

$$q_{cv.ct} = \alpha_{c_{ct}}(T_d - T_{ct}) \quad (19)$$

$$q_{cd.ct-cb} = \frac{\lambda_c}{l_c}(T_{ct} - T_{cb}) \quad (20)$$

天井下面の熱収支式

$$q_{cd.ct-cb} = q_g \quad (21)$$

ただし

$$q_g = (\alpha_{c_{cb}} + \alpha_{r_{cb}})(T_{ct} - T_{cb}) \quad (22)$$

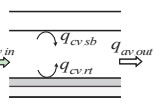
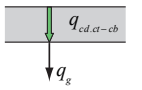
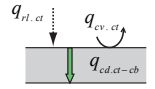
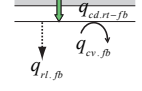
シート下部空間の熱収支式

$$q_{cv.sb} + q_{v.ain} = 1.65q_{cv.rt} + q_{v.aout} \quad (23)$$

ただし

$$q_{v.ain} = \frac{C\rho_o k_{sb} V x h T_o}{xy} \quad (24)$$

$$q_{v.aout} = \frac{C\rho_a k_{sb} V x h T_a}{xy} \quad (25)$$



[記号]

T : 絶対温度 [K]
 A : 日射吸収率 [-]
 τ : 透過率 [-]
 J : 水平面全天日射量 [W/m²]
 ϵ_g : 大気放射率 [-]
 ϵ : 長波長放射率 [-]
 α_c : 対流熱伝達率 [W/(m²·K)]
 α_r : 放射熱伝達率 [W/(m²·K)]
 λ : 熱伝導率 [W/(m·K)]
 l : 厚さ [m]
 I : 日射量の間接成分 [W/m²]
 r : 反射率 [-]
 V : 上空の平均風速 [m/s]
 k : 風速比 [-]

[添え字]

s : 遮蔽シート f : 断熱材 i : 室内 mt : m の上面
 a : 平鋼板裏空間 d : 岩綿吸音板裏空間 o : 屋外 mb : m の下面
 r : 平鋼板 c : 岩綿吸音板

σ : ステファンボルツマン定数
 5.67×10^{-8} [W/(m²·K⁴)]
 h : シート下部空間高さ [m]
 C : 定圧比熱 [J/(kg·K)]
 ρ : 密度 [kg/m³]
 xy : 面積 [m²]
 q_{ss} : 日射受熱量 [W/m²]
 q_{rl} : 長波長放射量 [W/m²]
 q_{rs} : 短波長放射量 [W/m²]
 q_{cv} : 対流熱流量 [W/m²]
 q_{cd} : 伝導熱流量 [W/m²]
 q_g : 総合熱伝達量 [W/m²]
 $q_{v.ain}$: 換気による流入熱量 [W/m²]
 $q_{v.aout}$: 換気による流出熱量 [W/m²]

行った対象建物において、遮蔽シートを平鋼板屋根上に敷設する条件と敷設しない条件で行った。

遮蔽シートから室内への伝熱モデル概念図を図4に、温度定義点位置を図5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4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。

3.2 各面での熱収支式

各面における熱収支式を式(1)～(22)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。

遮蔽シート上面での熱収支式を式(1)～(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¹⁾($\epsilon_g = 0.526 + 0.076\sqrt{f}$

f : 地表付近の空気の水蒸気分圧 [mmHg]) により評価

する。遮蔽シート上下面及び平鋼板(以下、屋根)上面の対流熱伝達率は、ユルゲスの式(普通面 $\alpha_{c,s} = 5.8 + 3.9k_m/V$ ($V \leq 5$ [m/s]))より算出した。遮蔽シート下面の熱収支を式(6)～(9)に、屋根上下面の熱収支を式(10)～(14)に示す。シート下面と屋根上面の放射は、シートの隙間から屋根に入射する大気放射とシートの隙間から侵入した日射によるシートと屋根間での反射、吸収による放射熱移動を考慮し、式(7)と(9)、式(11)～(12)を導いた。屋根及び断熱材における伝導と対流の熱移動量には、屋根面積に対する折板屋根の表面積比1.65を乗じた。

3.3 シート下部空間の熱収支式

換気による熱移動の熱収支を式(23)～(25)に示す。シート下部空間において、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方向の換気による排熱量を考慮し、シートと屋根間の換気をモデル化した(図6)。尚、シート下部空間の高さ(h)はシートと折板

屋根間の山谷
の高さを平均
した 0.145[m]
とした。

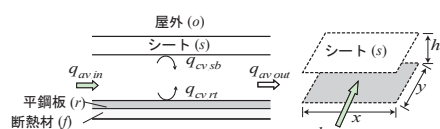


図 6 シート下部空間のモデル化概念図

3.4 解析条件

計算で用いた物性値を表 1 に示す。外気温 (T_o) と室温 (T_i)、風速 (V) は、境界条件として実測値を与え、遮蔽シート上面 (T_{st}) から岩綿吸音板 (以下、天井) の下面 (T_{cb}) までの温度を求めた。

表 1 伝熱モデルの各変数に与える値

o	$\alpha_{cs} = f(k_s V)$	$A_{st} = 0.90$	$\varepsilon_{st} = 0.83$
s	$\lambda_s = 0.3$	$l_s = 0.0008$	$\tau_s = 0.0216$
a	$\alpha_{csb} = f(k_{sb} V)$	$A_{sb} = 0.93$	$\varepsilon_{sb} = 0.97$
r	$\alpha_{cr} = f(k_r V)$	$A_{rt} = 0.90$	$\varepsilon_{rt} = 0.90$
f	$\lambda_r = 45$	$l_r = 0.0008$	$r_{sb} = 0.05$
	$\lambda_f = 0.04$	$l_f = 0.002$	$r_{rb} = 0.20$
d	$\alpha_{cb} = 4.4$	$\varepsilon_{cb} = 0.90$	
	$\alpha_{ct} = 4.4$	$\varepsilon_{ct} = 0.90$	
c	$\lambda_c = 0.21$	$l_c = 0.009$	
i	$\alpha_{ci} = 4.4$	$\alpha_{rb} = 4.7$	

*注 $f(V)$: ユルゲスの式

4. 定常伝熱モデルの精度検証

モデルを構築し、精度検証を行うため、実測結果と比較した。

表 2 検討ケース

	遮蔽シート	実測条件の代表日
caseS	有	2010年8月15日
caseN1	無	2010年8月1日
caseN2	無	2010年8月15日

検討ケースを表 2 に示す。遮蔽シートを敷設する条件と敷設しない条件での測定期間中、快晴日で外気条件が最も近い日を代表日とし、その結果を計算結果と比較した。計算に用いた外気条件は、水平面全日射量、外気温、相対湿度、風速の測定値 (10 分平均値) である。

今回、便宜的に 8 月 15 日の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_{cs} , α_{csb}) 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求めた。従って、上下面における局所風速は、遮蔽シート上部においては風速比 (k_{st}) 1.0 を、シート下部空間においては風速比 (k_{sb}) 0.05 を用いた (表 1)。尚、caseN1 と caseN2 では屋根上部の局所風速に風速比 1.0 を用いた。

屋根下面の断熱材について、実際の施工図面での厚さ ($l_f=0.015[m]$) を用いると、計算上断熱効果が大きく見積もられてしまう傾向にあった。これは、吹付け断熱材の時間経過による剥離や天井裏空間の熱橋等不明な熱流が原因していると考えられる。よって、これらの要因は、断熱材の厚さを小さくすることにより考慮するこ

ととした。今回の計算では、断熱材厚さを $l_f=0.002[m]$ (表 1) として計算を行った。

4.1 一日の時系列温度変化

caseS の条件における一日の各部温度の時系列変化を図 7 に、caseN1 の各部温度の時系列変化を図 8 に示す。両条件ともに、全体的に計算結果は実測結果と概ね一致していることがわかる。

実測結果の図 7-(1) 及び図 8-(1) より屋根上面温度 (T_n) について、12 時前後に、遮蔽シートを敷設する条件 (caseS) では約 40℃で、遮蔽シートを敷設しない条件 (caseN1) の約 60℃より約 20℃低い。一方、計算結果の図 7-(2)、図 8-(2) より 12 時前後の屋根上面温度は、caseS で約 45℃と、caseN1 の約 55℃に比べて約 10℃低い。遮蔽シート敷設時の屋根上面温度低減効果は計算により再現できたが、シートなしの屋根上面温度の計算結果は実測結果に比べ低い温度を示していた。これは、実測では折板屋根の谷の部分の屋根上面温度を測定しているため、局所的には屋根面からの放射や対流が小さくなったことが原因の一つであると考えられる。

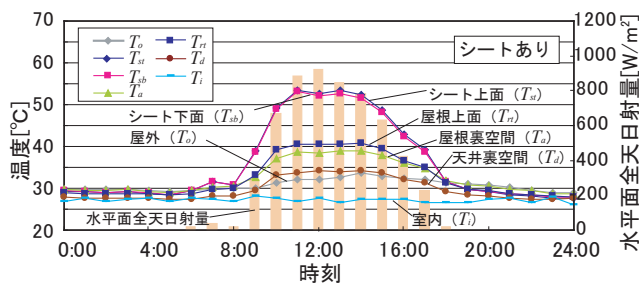
夜間の 0 時～6 時、18 時～0 時の時間において、実測値及び計算値ともに、屋根上面温度はシートのない caseN1 がシートのある caseS より低くなっている。これは、夜間の天空への放射が遮蔽シートにより遮られるためであると考えられる。遮蔽シートの省エネルギー性を評価する際には夏期の昼間及び冬期の夜間における空調負荷削減効果だけではなく、夏期の夜間と冬期の昼間における負荷増大効果についても考慮に入れる必要があると言える。

4.2 室内への流入熱量

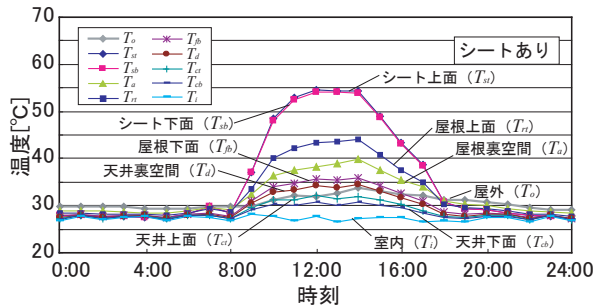
天井から室内への流入熱量 (図 7-(3)、図 8-(3)) を比較すると、計算値は実測値とほぼ一致する結果となった。日中、実測値と計算値ともに、caseS の方が caseN1 より最大約 30[W/m²] 低い。日射遮蔽シートによる屋根面への直達日射量の低減により、室内への流入熱量が低減されたと考えられる。一方、夜間の 0 時～6 時においては、caseN1 では実測値、計算値ともに室内から室外への流出熱量が見られるものの、caseS では見られず、夜間の保温効果が計算でも再現できた。

4.3 鉛直温度分布

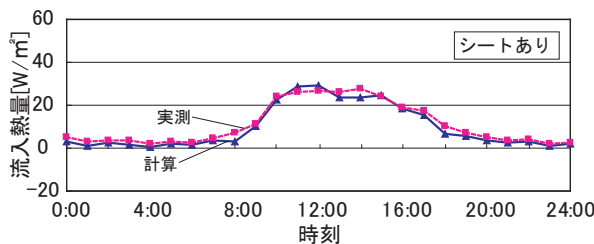
同じ外気条件で遮蔽シート有無による計算結果を比較するため、8 月 15 日の外気条件で caseS と caseN2 の条



(1) 全日射量と各部温度の時系列変化 (実測)



(2) 各部温度の時系列変化 (計算)



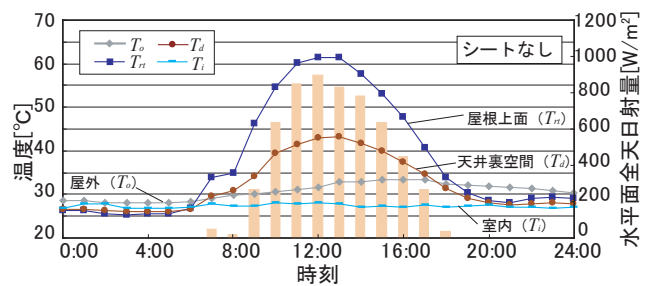
(3) 天井からの流入熱量 (実測・計算)

図7 実測及び計算結果 (caseS, 2010年8月15日)

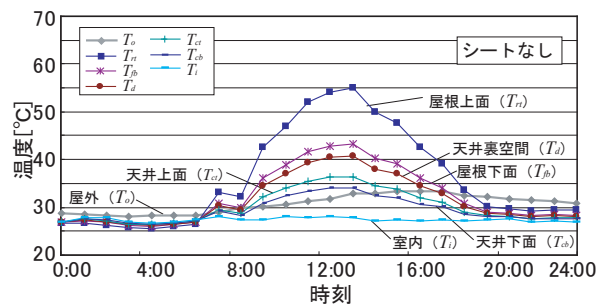
件で計算した鉛直温度分布の結果を図9に示す。日中、屋根上面温度 (T_{rt}) から下部の温度は、caseSの方が温度が低く抑えられている。日射の影響を受ける昼間には、シート有無による差が大きいことがわかる。12時には、屋根上面温度について、caseSがcaseN2より約7℃低い結果となった。20時は屋根上面温度にほとんど差異はないが、caseSよりcaseN2がやや低く、日中と逆転した。

5. まとめ

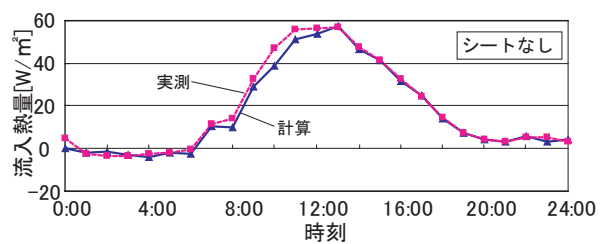
日射遮蔽シートを敷設した建物の遮熱性能評価を行うため伝熱モデルを構築し、精度検証を行った。計算の結果、遮蔽シート上面から天井下面までの温度は、実測結果と概ね一致した。また、室内への流入熱量も実測値とほぼ一致した。日射遮蔽シートにより、昼間には天井からの流入熱量の大幅な低減が期待できることがわかった。ただし、夜間には天空への放射が遮られるため、屋根面が若干冷えにくいことがわかった。



(1) 全日射量と各部温度の時系列変化 (実測)



(2) 各部温度の時系列変化 (計算)



(3) 天井からの流入熱量 (実測・計算)

図8 実測及び計算結果 (caseN1, 2010年8月1日)

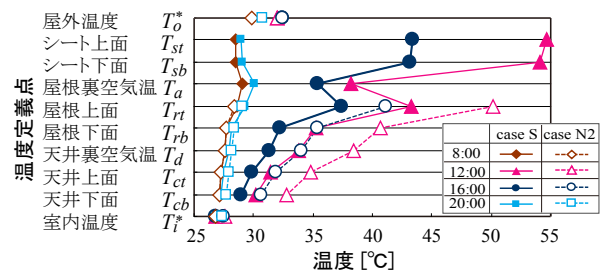


図9 鉛直温度分布 (計算 caseS, caseN2, 2010年8月15日)

今後は、各熱容量を考慮して伝熱モデルの精度向上を図った上で非定常解析を行い、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年間の熱負荷削減効果についても検討を行う所存である。

参考文献

- 1) 田中他：最新建築環境工学，井上書院，2006. 03
- 2) 安積他：屋根用外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) 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
- 4) 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。

* 1 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻
* 2 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻
* 3 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻
* 4 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻
* 5 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻
* 6 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻

博士前期課程
教授・博士 (工学)
特任研究員
准教授・博士 (工学)
助教・博士 (工学)
教授・工学博士

Graduate Student, Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University
Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng.
Special Appointed Researcher, Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng.
Associate Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng.
Assistant Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng.
Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng.

熱収支式

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

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

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

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

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

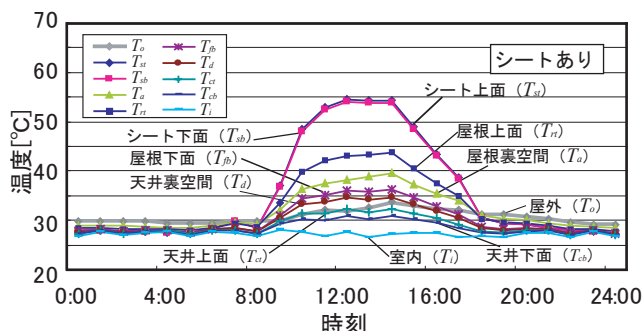
$$q_{cv.fb} = \alpha_{c_{fb}} (T_{fb} - T_d) \quad (17)$$

$$q_g = (\alpha_{c_{cb}} + \alpha_{r_{cb}}) (T_{cb} - T_i) \quad (22)$$

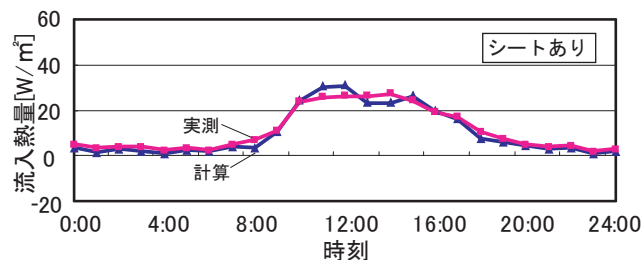
表1 伝熱モデルの各変数に与える値

o	$\alpha_{c_{st}} = f(k_{st}V)$	$A_{st} = 0.90$	$\varepsilon_{st} = 0.83$
s	$\lambda_{ss} = 0.3$	$l_s = 0.0008$	$\tau_s = 0.0216$
a	$\alpha_{c_{sb}} = f(k_{sb}V)$	$A_{sb} = 0.93$	$\varepsilon_{sb} = 0.97$ $r_{sb} = 0.05$
r	$\alpha_{c_{rt}} = f(k_{rt}V)$	$A_{rt} = 0.90$	$\varepsilon_{rt} = 0.90$ $r_{rb} = 0.20$
f	$\lambda_r = 45$	$l_r = 0.0008$	
	$\lambda_f = 0.04$	$l_f = 0.015$	
d	$\alpha_{c_{fb}} = 4.4$	$\varepsilon_{fb} = 0.90$	
	$\alpha_{c_{ct}} = 4.4$	$\varepsilon_{ct} = 0.90$	
c	$\lambda_{cc} = 0.21$	$l_c = 0.009$	*注 $f(V)$: ユルゲスの式
i	$\alpha_{c_{cb}} = 4.4$	$\alpha_{r_{cb}} = 4.7$	

*訂正箇所を○で囲む

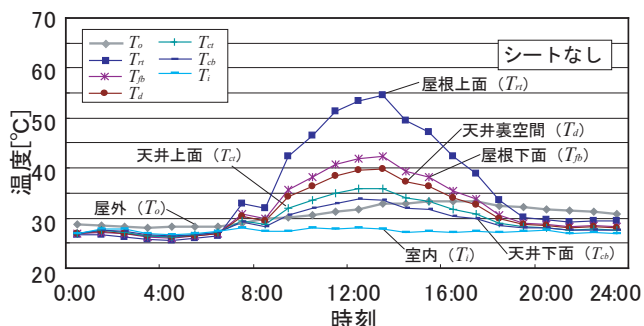


(2) 各部温度の時系列変化 (計算)

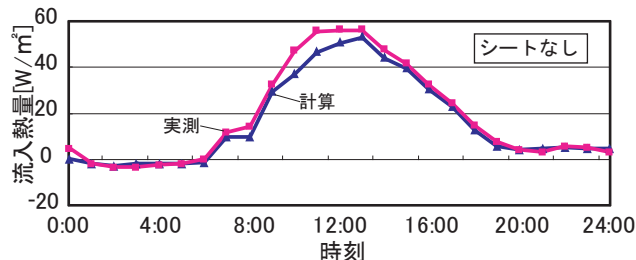


(3) 天井からの流入熱量 (実測・計算)

図7 実測及び計算結果 (caseS, 2010年8月15日)



(2) 各部温度の時系列変化 (計算)



(3) 天井からの流入熱量 (実測・計算)

図8 実測及び計算結果 (caseN1, 2010年8月1日)

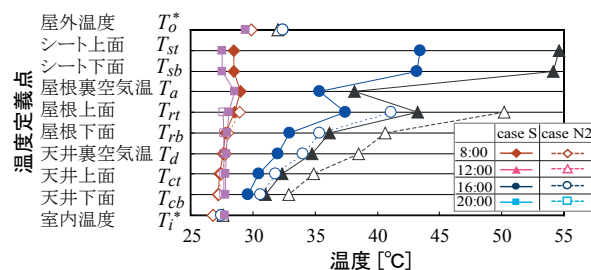


図9 鉛直温度分布 (計算 caseS, caseN2, 2010年8月15日)