

# 建物屋上遮熱技術の開発

## ーその2 遮熱性能の検証および空調エネルギー削減量の算出ー

### Development of Heat Shielding Technology for Roofs of Buildings

#### - Part 2 Verification of the Heat Insulation Performance and Calculating the Reduction in Energy Consumption for Air Conditioning -

小河義郎\* 茂木正史\* 中村裕介\* 西野晃平\*\*

#### 要旨

ヒートアイランド現象の緩和や建物屋根の表面温度を低下させ室内温熱環境の向上を図る技術として、屋上緑化や熱反射塗料、屋根散水等が開発されてきた。このように建物外皮を遮熱する技術が求められる中、折板屋根を対象として屋上緑化よりも安価で施工性が良い、保水シートや遮熱シートを用いた屋根遮熱システムを開発した。縮小モデル実験からは保水シートシステムは断熱二重屋根よりも、遮熱シートシステムは熱反射塗料よりも夏期の遮熱性能が優れていることが、実建物への適用からは室内温度の上昇を抑制できることが確認できた。また、システム設置による空調エネルギー削減量をシミュレーションにより算出できるようになった。

キーワード：保水シート、遮熱シート、日除け、水蒸散、日射反射

#### 1. まえがき

ヒートアイランド現象の緩和や建物屋根の表面温度を低下させ室内温熱環境の向上を図る技術として、屋上緑化や熱反射塗料の使用、屋根散水等がある。当社でも緑化については、ミドリシラップ工法を開発し、実物件へ適用してきた。東京都では熱反射塗料や保水性建材による「ヒートアイランド対策ガイドライン」を策定し、ヒートアイランド対策を推進している。

建物外皮で日射を遮断し、屋根表面温度を低下させる技術が求められる中、緑化より安価でメンテナンスの省力化を図った保水シートや遮熱シートを用いた屋根遮熱システムの開発を行った。

年報 No. 33 で、縮小モデル実験からシステム設置による金属屋根表面温度の低下量を算出し、システムの遮熱効果の評価式を構築した内容について報告した<sup>1)</sup>。

本報ではシステムの概要と縮小モデル実験により他の断熱工法と遮熱性能を比較した結果、実建物での遮熱効果の検証結果について、また、評価式からシステム設置による年間の空調エネルギー削減量を概算した結果を報告する。

#### 2. 開発背景

熱反射塗料は色相により効果が一定でなく、屋上緑化は高価でメンテナンスの手間がかかる。また、従来の屋根散水は散水した水が水下へ流出し、表面が乾燥し易く、常に散水していないと屋根表面温度の低下が期待できないという欠点があった。そのため、断熱性能が低い金属屋根を対象として、夏期における屋根表面温度を低下する屋根遮熱システムの開発を行った。

表-1 に建物外皮を遮熱する従来技術の特徴を示す。

表-1 従来技術の特徴

	屋上緑化	屋根散水	熱反射塗料
遮熱性能	高い	常に散水していないと期待できない	白に近い色相ほど効果が小さい
イニシャルコスト	高価	安価	比較的安価
ランニングコスト	灌水や剪定、施肥費用がかかる	散水費用がかかる	無し
メンテナンス	剪定や施肥の必要性あり	スプリンクラーの点検程度	塗り替え必要
：デメリット			

\*技術研究所 \*\*東京支社建築設計部

### 3. 屋根遮熱システムの概要

#### 3.1 遮熱システムの概略

開発したシステムは、保水シートを用いたシステムでは日除けと水蒸散効果で、遮熱シートを用いたシステムでは日除けと日射反射効果で、夏期の屋根表面温度を低下し、屋根からの輻射熱を抑えることにより室内温熱環境を向上させる金属屋根（以後、折板屋根と称す）を対象とした技術である。

図-1 にシステムの概略パースを、図-2 にシステムの遮熱機構を示す。

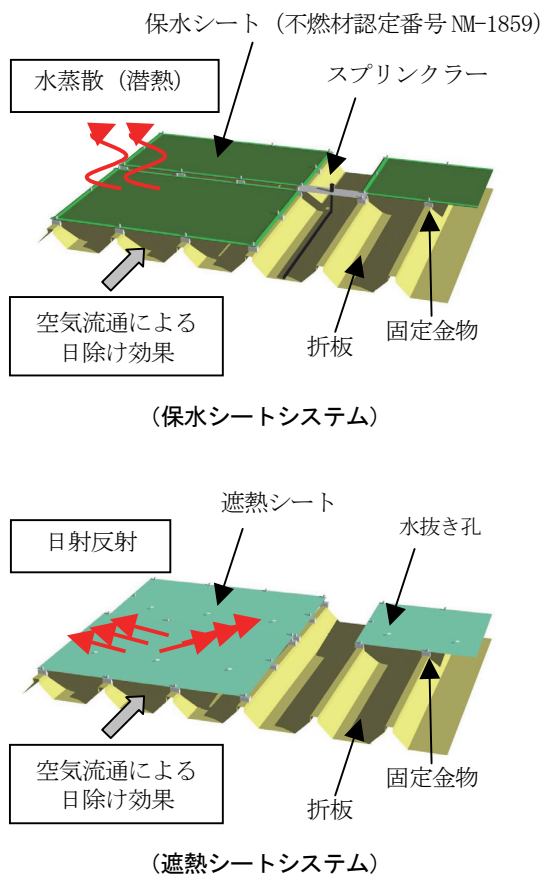


図-1 システムの概略パース

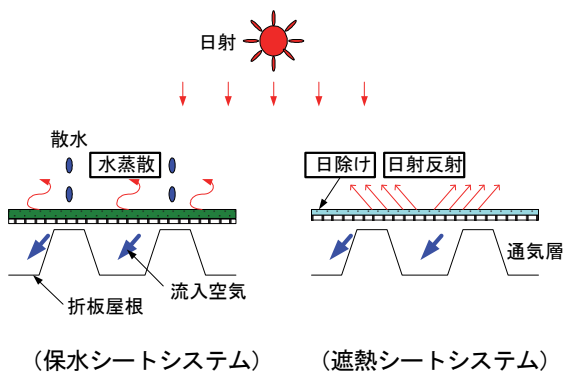


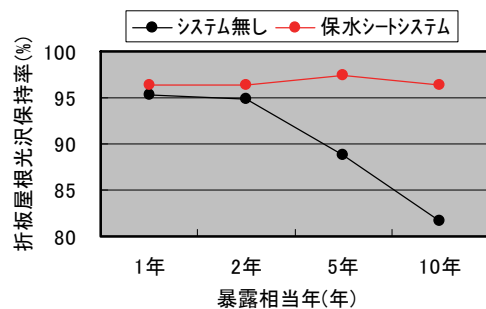
図-2 システムの遮熱機構

#### 3.2 特長

屋根遮熱システムは緑化と比較すると、安価で、省メンテナンスである。

以下にシステムの主な特長を示す。

- i. 折板屋根を覆うようにシステムを構築するので、紫外線による屋根の劣化を防止できる (図-3)
- ii. 遮熱塗料の効果が見込めない白色系の屋根でも、日除けと水蒸散効果で遮熱性の向上が図れる
- iii. 保水シートシステムについては最大で約 30℃、遮熱シートシステムについても最大で約 20℃の折板屋根外表面温度の低下が可能
- iv. 水蒸散効果や空調エネルギー低減による CO2 削減によって、ヒートアイランド現象の抑制に貢献できる
- v. 保水シートは軽量な不燃材料なので、準防火地域や防火地域等、屋根の仕様制限が求められる地域の新築建物や既存建物にも適用しやすい (図-4)



折板屋根（縮小試験片）を保水シートで覆ったものと、覆わない試験片を促進耐候性試験装置に入れ、UV（紫外線）を照射し、試験前後の光沢を測定

図-3 システム設置による折板屋根の光沢保持率

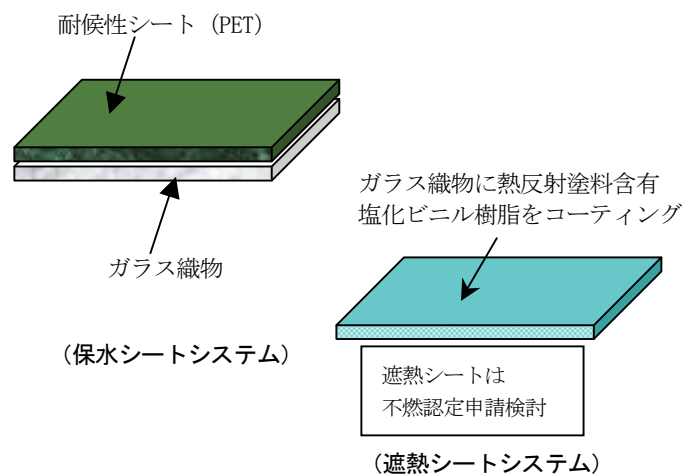


図-4 システムに使用するシートの構成

4. 縮小モデルでの実験

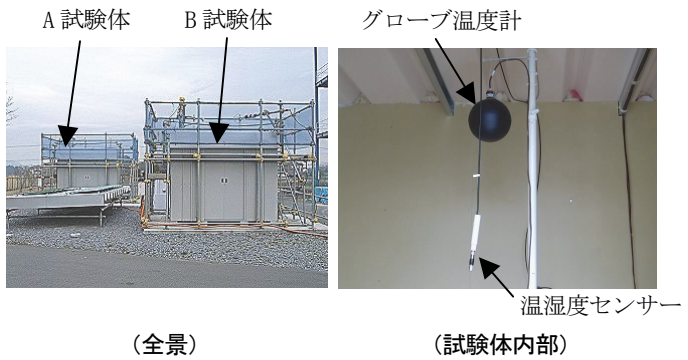
4.1 実験概要

実建物を模擬した縮小モデル試験体(間口 1.7m×奥行 2.7m×高さ 1.8m、容積 8.3m³)を屋外に施工し、遮熱効果を検証した。年報 No. 33 ではシステム設置方法や散水パターンでの性能比較について報告した。

実験では、折板屋根の断熱工法として知られる断熱二重屋根や熱反射塗料との比較を行った。

なお、本試験体の壁から侵入する熱の影響を少なくするために、屋根の断熱仕様に比べて壁の断熱仕様を高めている。

写真-1 に実験状況を、表-2 に実験パラメータを示す。



部位	仕様
屋根	ポリエチレン 3mm
壁	グラスウール 100mm

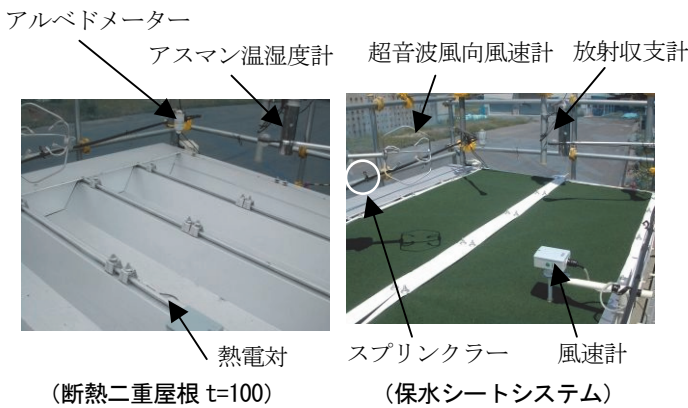


写真-1 実験状況 (縮小モデル実験)

表-2 実験パラメータ

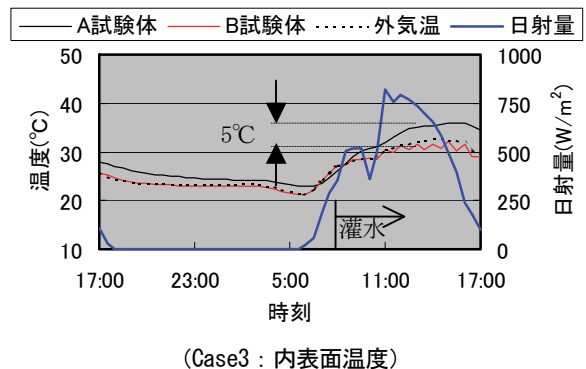
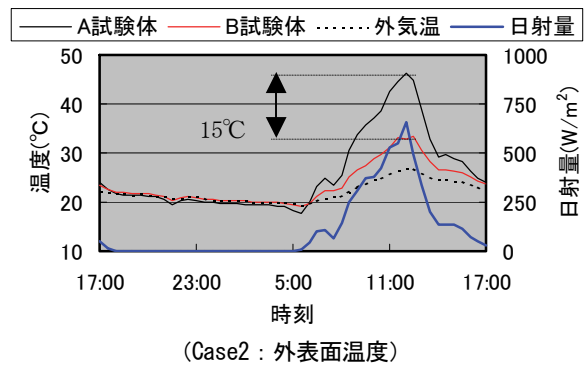
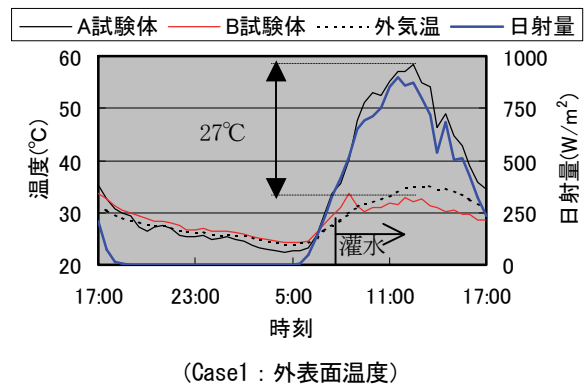
実験 Case	実験日	A 試験体	B 試験体
1	8/20	システム無し	保水シート
2	9/2	熱反射塗料	遮熱シート
3	9/20	断熱二重屋根	保水シート

遮熱シート、熱反射塗料の日射反射率は共に 50%程度  
保水シートの散水量は 8~16 時の正時に 1 分間 1L/m²

4.2 実験結果

試験体内の温湿度や輻射温度等を測定し、その結果を検討した。ここではその一例として、図-5 に試験体の折板屋根表面温度の推移を示す。

保水シートシステムを設置し散水を行った場合はシステムを設置しないものに比べて最大で約 27°C の温度低下が見られた (Case1)。遮熱シートシステムを設置すると熱反射塗料を塗布したものよりも試験体の折板外表面温度で約 15°C の低下が (実験 Case2)、また、保水シートシステムを設置し散水した場合には断熱二重屋根よりも内表面温度 (断熱材下端) で約 5°C の低下が見られた (実験 Case3)。



外気温度は屋根上 1m での測定

図-5 試験体の折板屋根表面温度の推移

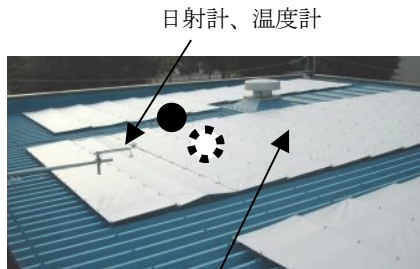
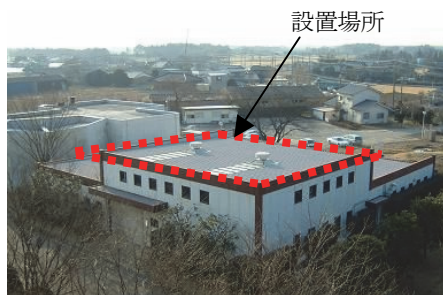
## 5. 実建物での遮熱効果の検証

### 5.1 実験概要

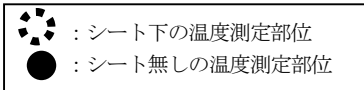
縮小モデル実験からシステム設置による屋根表面温度の低下が確認できた。しかしながら、実際の建物は縮小モデル実験体よりも天井が高いので、屋根表面温度の低下が室内温度の上昇の抑制にどの程度の効果をもたらすのかが分からなかった。そのため、当社技術研究所の実験施設(間口 14.5m×奥行 16.5m×高さ 6.5m、容積 1,555m<sup>3</sup>)でシステムの遮熱効果を検証した。

なお、設置したシステムは保水シートシステムよりも屋根表面温度の低下が小さい遮熱シートシステムである。

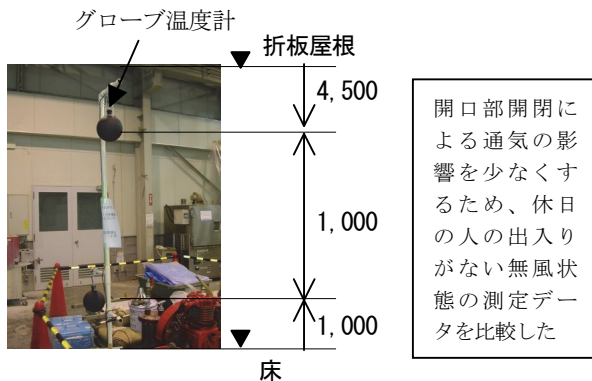
写真-2 に実験状況を示す。



遮熱シート (日射反射率 50%程度)



(実験施設屋根：折板屋根シート設置後)



(実験施設内)

写真-2 実験状況 (実建物での検証)

### 5.2 実験結果

図-6 に屋外温度、日射量の推移を、図-7 に実験施設の折板屋根外表面温度の推移を、図-8 に実験施設内の温度の推移を示す。

気象条件について見てみると、システムを設置していた日は設置していない日と比べて日射量が多く外気温度が若干高いもののほぼ同じ条件での測定ができた。

遮熱シートシステムを設置していた日の折板屋根外表面温度は設置していない日と比べて約 18℃低下していた。また、実験施設内の、温度は約 2~3℃ (H=2m) の低下が見られた。

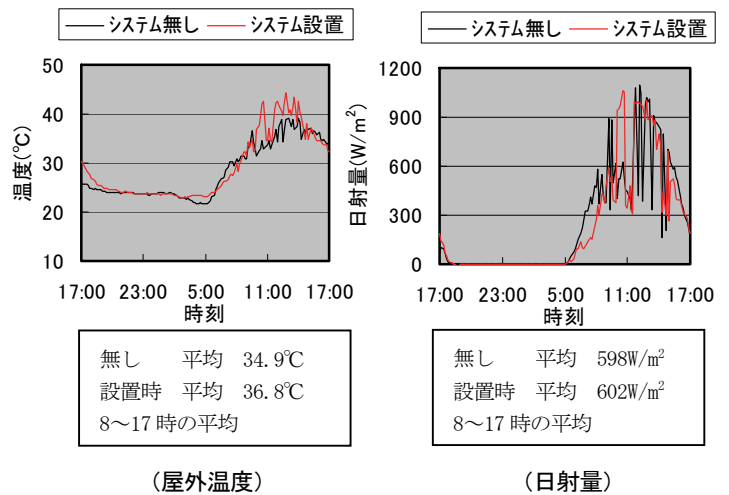


図-6 屋外温度、日射量の推移

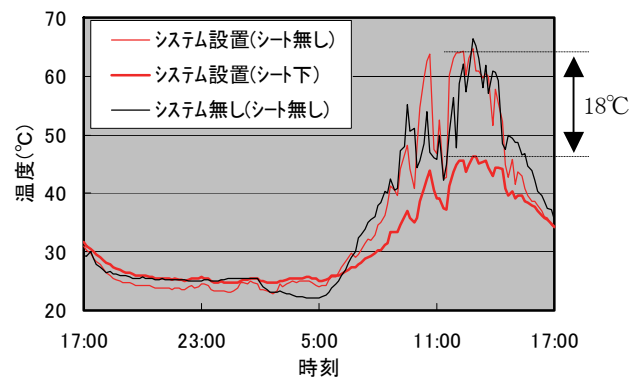


図-7 実験施設の折板屋根外表面温度の推移

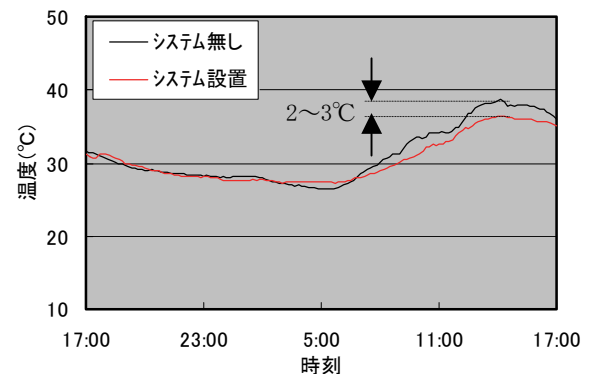


図-8 実験施設内(H=1m)の温度の推移

## 6. システム設置による空調エネルギー削減量の算出

### 6.1 評価式について

図-9 にシステムの遮熱効果の算出手順を示す。

年報 No. 33 では、屋根遮熱システムの遮熱効果をシートの日射吸収率を低減することにより相当外気温度の算出式<sup>2)</sup>を用いて算出することが可能であることを、縮小モデルの実験値と比較することにより明らかにしている。

① 折板屋根表面温度 (相当外気温度) の算出式  
システムを設置しない場合の折板屋根表面温度  
 $tf = I / \lambda_o \cdot \alpha + t_o$   
システムを設置した場合の折板屋根表面温度  
 $stf = I / \lambda_o \cdot \alpha_s + t_o$

$\alpha$  : 折板屋根の日射吸収率,  $\alpha_s$  : システムの日射吸収率  
 $I$  : 日射量 ( $W/m^2$ ),  $t_o$  : 外気温度 ( $^{\circ}C$ )  
 $\lambda_o$  : 屋外表面熱伝達率 ( $W/m^2K$ )

↓ ※I,  $t_o$  は気象データを利用

② 保水シートの水蒸散効果  
水蒸散効果による日射吸収率の低減量  $\alpha_1 = Y/I$

$Y = 0.65X_1$  (日射量) +  $10X_2$  (温度) -  $3X_3$  (湿度) - 17  
: 保水シートの蒸発潜熱量 ( $W/m^2$ )  
(保水シートに散水した水の蒸散試験から、日射、温度、湿度を説明変数とする蒸発潜熱量の重回帰式を算出)

↓ ※ $X_1 \sim X_3$  は気象データを利用

③ シート設置による日除け効果<sup>3)</sup>  
日除け効果による日射吸収率の低減量  $\alpha_2 = C_p \cdot V / C_{ns}$

$C_p = 1.31$  : 空気 の容積比熱 ( $kJ/m^3K$ )  
 $V = 3600vd$  : 空気層への進入空気量 ( $m^3/h$ )  
 $v$  : 風速 ( $m/s$ ),  $d$  : 折板屋根とシート間の平均距離 ( $m$ )  
 $C_{ns} = 13$  (保水シート散水無し), 37 (保水シート散水有り), 163 (遮熱シート)  
: シートの熱コンダクタンス ( $W/m^2K$ )

↓ ※:  $v$  は気象データを利用

④ システムの日射吸収率  
 $\alpha_s = (\alpha_r - \alpha_1) / (\alpha_2 + 1)$  (保水シート散水時)  
 $= \alpha_r / (\alpha_2 + 1)$  (保水シート散水時以外)  
 $= \alpha_i / (\alpha_2 + 1)$  (遮熱シート)

$\alpha_r$  : 保水シートの日射吸収率,  $\alpha_i$  遮熱シートの日射吸収率

↓

⑤ システムの遮熱効果  
 $\Delta tf = tf - stf$   
(システム設置による折板屋根表面温度の低減量)

$\Delta Q = Q - sQ = K (tf - t_i) - sK (stf - t_i) \dots (1)$   
(空調エネルギー削減量  
= システム設置による熱損失量の低減量)

$K$  : 折板屋根の熱貫流率 ( $W/m^2K$ )  
 $sK = (1 / (1 / \lambda_o + 1 / sC_n + 1 / \lambda_i))$  : 保水シートシステムの熱貫流率 ( $W/m^2K$ )  
 $sC_n = (C_n \cdot (C_p \cdot V + C_n) / (C_p \cdot V + C_{ns} + C_n))$  ( $W/m^2K$ )  
: 屋根遮熱システムの熱コンダクタンス  
 $C_n$  : 折板屋根の熱コンダクタンス ( $W/m^2K$ )  
 $\lambda_i$  : 屋内表面熱伝達率 ( $W/m^2K$ ),  $t_i$  : 空調設定温度 ( $^{\circ}C$ )

図-9 システムの遮熱効果の算出手順

### 6.2 空調エネルギー削減量の算出

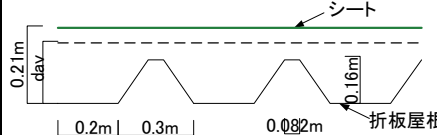
#### a. 概要

折板屋根 (100 $m^2$ ) に屋根遮熱システムを施工した場合の空調エネルギー削減量を、評価式 (図-9 ⑤) の式 (1) を用いて算出した。また、比較用に熱反射塗料を折板屋根に塗布した場合も算出した。

#### b. 計算条件

計算条件を表-3 に示す。

表-3 計算条件

対象地域	福岡、大阪、横浜
対象時期	下記空調運転期間での算出
建物	高さ (折板屋根高さ) : $h=10m$ 建物設置場所の地面の状態 : $p=0.002$ (森林、高い建物が無い市街地)
折板屋根の仕様	製品 : 丸馳折板 II 型 (三晃金属工業) 平均空気層の厚み : $d_{av}=0.149m$  熱貫流率 : $K=3.89W/m^2K$ 熱コンダクタンス : $C_n=7.81W/m^2K$ 日射吸収率 : $\alpha=0.75$
気象データ	1981~1995 年の過去 15 年間のアメダス気象データ (各時刻の時間平均の 365 日データ) の外気温度 $t_o$ 、日射量 $I$ (冬期の日射取得率 0.5)、風速 $v$
空調条件	夏期 : 6/1~9/30 7~19 時 28 $^{\circ}C$ 冬期 : 12/1~3/31 7~19 時 20 $^{\circ}C$
散水条件 (保水シートシステム)	夏期 : 7/15~9/15 8~16 時 水量 : 1.0L/ $m^2$
シート、熱反射塗料の日射吸収率	保水シート $\alpha_r=0.9$ 遮熱シート $\alpha_i=0.5$ 熱反射塗料 $\alpha_p=0.5$
その他の熱物性値	屋外表面熱伝達率 : 23.3W/ $m^2K$ (夏期) 35.0W/ $m^2K$ (冬期) 屋内表面熱伝達率 : 11.6W/ $m^2K$

#### c. 計算結果

表-4、図-10 にシステム設置による空調エネルギー削減量 (熱損失量の低減量) を示す。

冬期はシート設置による日射吸収の低下が影響して空調エネルギーの使用量が多くなる。しかしながら、年間を通して保水シートシステム > 遮熱シートシステム > 熱反射塗料の順で空調エネルギーを低減でき、約 3,000~6,000kWh (100 $m^2$  当り) の削減が見込める。

表-4 空調エネルギーの削減量 (年・100m<sup>2</sup> 当り)

			福岡	大阪	横浜
保水シートシステム	$\Delta Q^{*1}$	kWh	5,900	5,100	5,000
	$\Delta CO2^{*2}$	kg	2,200	1,880	1,840
遮熱シートシステム	$\Delta Q$	kWh	4,400	3,400	3,600
	$\Delta CO2$	kg	1,600	1,300	1,350
熱反射塗料	$\Delta Q$	kWh	2,000	1,700	1,700
	$\Delta CO2$	kg	750	650	650

\* 1 : システム設置による熱損失量の低減量(空調エネルギー削減量)

\* 2 : CO2 排出係数 0.37kg/kWh で換算

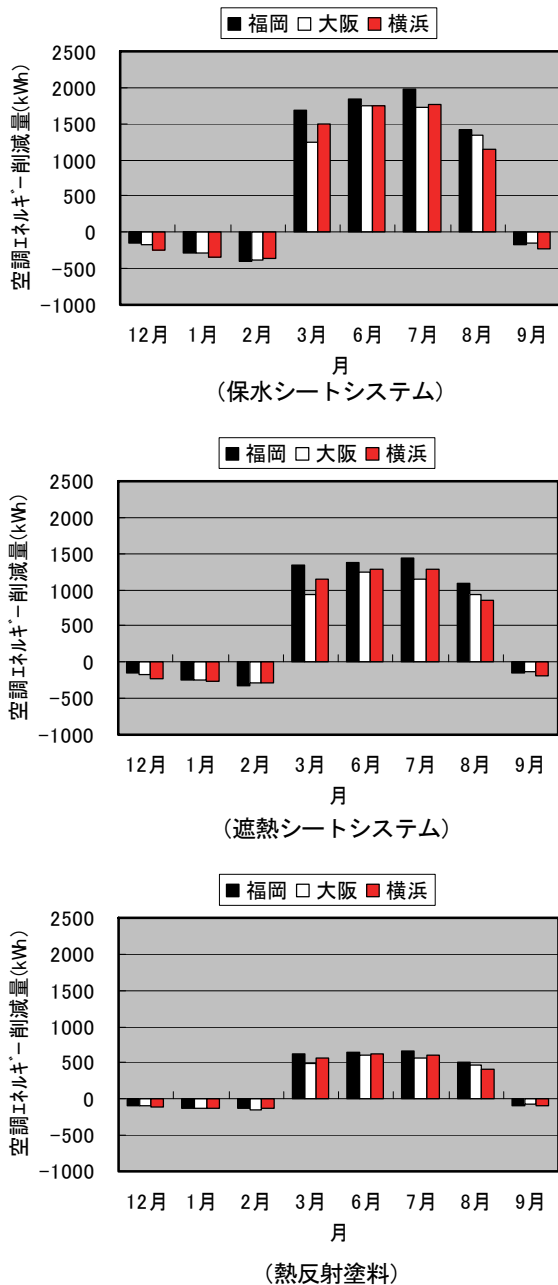


図-10 空調エネルギー削減量 (100m<sup>2</sup> 当り)

## 7. まとめ

屋根遮熱システムの遮熱性能の検証実験および空調エネルギー削減量の算出結果から以下のことが確認できた。

- i. 保水シートシステムは断熱二重屋根よりも、遮熱シートシステムは熱反射塗料よりも夏期の遮熱性能(折板屋根表面温度の低下量)が優れている
- ii. 高さ 6.5m 程度の空間内の温度を約 2~3℃低減できた
- iii. 年間を通して、保水シートシステム>遮熱シートシステム>熱反射塗料の順で空調エネルギーを削減でき、評価式からは、約 3,000~6,000kWh (100m<sup>2</sup> 当り) の低減が見込める

## 8. あとがき

本年ではほぼ遮熱性能や施工性が良好なことが確認できた。次年度は、実建物への適用を進めていく。

なお、屋根遮熱システムは、帝人ファイバー(保水シートの開発担当)と、三晃金属工業(施工担当)の3社で共同開発した技術である。

### 【参考文献】

- 1) 小河義郎、茂木正史、中村裕介、西野晃平、「建物屋上遮熱技術の開発」、奥村組技術研究年報、No. 33、pp. 137-143、2007
- 2) 井上宇市、「空気調和ハンドブック」、丸善、p. 12、1967
- 3) (財) 建築環境・省エネルギー機構、「SMASH for Windows」、Ver. 2、p. 128、2000