

建物屋上遮熱技術の開発

－遮熱性能の検証および解析的評価方法の検討－

Development of Heat Shielding Technology for Roofs of Buildings

- Investigation of Methods for Verifying and Analytically Assessing the Thermal Screening Performance -

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、屋上緑化や遮熱塗料、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、保水シートを用いた屋根遮熱システムを開発した。大型モデル実験で夏期における遮熱性能が断熱二重屋根とほぼ同程度確保できることを、実大モデル実験では施工性の良いことが確認できた。また、システムを設置した場合の屋根表面温度低減量をシミュレーションにより算出可能となり、遮熱性能の評価ができるようになった。

キーワード：折板屋根、保水シート、散水、日除け、水蒸散

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、屋上緑化や遮熱塗料の使用、屋根散水等がある。当社でも緑化については、ミドリンラップ工法を開発し、実物件へ適用してきた。東京都では遮熱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、緑化よりも安価でメンテナンスの省力化を図った保水シートを用いた屋根遮熱システムの開発を行った。

開発に当たっては、屋根遮熱システムの性能目標値を設定した。次に、縮小モデル実験でシステム（案）を絞り込み、更に、実大建物を模擬した大型モデル実験体で検証実験を行った。その結果、考案したシステムの遮熱性能は目標をほぼクリアできることが確認できた。また、システムの遮熱効果を算出するための評価式を構築し、実験値と比較を行った。評価式から求めたシステムの遮熱性能は実験値と良好な対応を示すことが確認でき、本システムの遮熱性能の評価ができるようになった。

本報ではシステムの概要、各実験を通して検証した内容と、システムの評価方法について報告する。

2. 開発背景

遮熱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、表面が乾燥しやすく、常に散水していないと屋根表面温度の低減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、散水した水を貯留し効率良く蒸散させて屋根表面温度を低減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

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

屋根遮熱システムは、金属屋根上（以後、折板屋根と称す）に設置した不燃性の保水シートに散水することで期待できる水蒸散効果と、日射遮蔽による日除け効果で夏期の屋根表面温度を低減し、室内温熱環境を向上させる技術である。図-1にシステムの概略を示す。

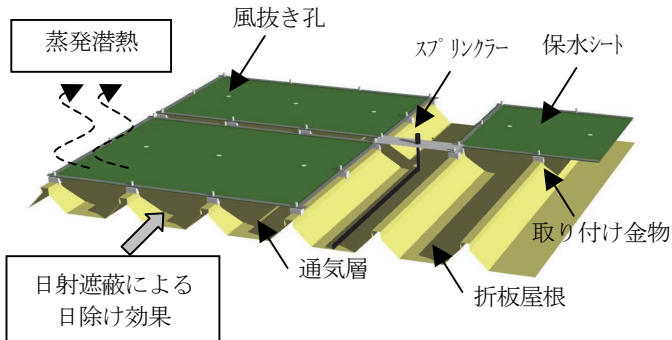


図-1 システムの概略

3.2 特長

屋根遮熱システムは断熱二重屋根よりも施工性が良く、夏期は同程度の遮熱効果が見込める。また、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. 耐候性の向上
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が防止できる。
- ii. 遮熱性能が優れている
遮熱塗料で遮熱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. ヒートアイランド現象の抑制
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。
- iv. 適用範囲が広い
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でも適用可能である。

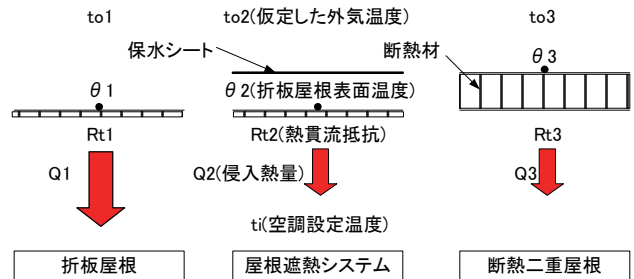
4. 遮熱性能の目標値

屋上緑化、遮熱塗料、屋根散水に比べて断熱二重屋根は遮熱性能が高い。そのため、断熱二重屋根の遮熱性能を屋根遮熱システムの性能目標とした。断熱二重屋根と同等の遮熱効果を得るためには、システム設置により夏期の折板屋根表面温度を大幅に低減させる必要がある。

4.1 算出方法

室内温度(t_i :空調設定温度)を27℃として折板屋根表面温度(θ_1)をパラメータにして定常計算により外気温度(t_{o1})を仮定した。その外気温度($t_{o3}=t_{o1}$)を用いて

断熱二重屋根の屋外から侵入する熱量(Q_3)を算出した。この熱量(Q_3)と屋根遮熱システムの侵入熱量(Q_2)を等しいとすることにより断熱二重屋根と屋根遮熱システムの遮熱性能(断熱性能)が同等である考え、熱量(Q_2)から逆算してシステムを設置した場合の折板屋根表面温度(θ_2)を求めた。図-2にシステムを設置した場合の折板屋根表面温度の算出方法の概要を示す。



- 1) θ_1 をパラメータとして t_{o1} , t_{o3} を算出
$$t_{o1} = (\theta_1 - t_{i1}) \times Rt1 / (Rt1 - 1/\lambda) + t_{i1} = t_{o3}$$
- 2) t_{o1} , t_{o3} から Q_1 , Q_3 を算出
$$Q_1 = 1/Rt1 \times (t_{o1} - t_i), Q_3 = 1/Rt3 \times (t_{o3} - t_i)$$
- 3) Q_3 と Q_2 が同等となるような t_{o2} を算出
$$Q_3 = Q_2 = 1/Rt2 \times (t_{o2} - t_i) \rightarrow t_{o2} = Q_3 \times Rt2 + t_i$$
- 4) t_{o2} から θ_2 を算出(λ :屋外熱伝達率)
$$t_{o2} = (\theta_2 - t_{i2}) \times Rt2 / (Rt2 - 1/\lambda) + t_{i2}$$

$$\rightarrow \theta_2 = (t_{o2} - t_{i2}) / Rt2 \times (Rt2 - 1/\lambda) + t_{i2}$$

図-2 折板屋根表面温度の算出方法の概要

4.2 表面温度低減量の目標値

図-3にシステムを設置した場合の折板屋根表面温度の低減量の目標値を示す。

夏期では日射の影響を受け折板屋根近傍の温度が外気温度よりも高くなる。夏期の平均的な条件として折板屋根の日射吸収率(α)を0.7、外気温度(t_o)を32℃、日射量(I)を800W/m²、屋外熱伝達率(λ)を25W/m²Kと仮定すると、相当外気温度は約55℃となる。

$$T = \alpha / \lambda \times I + t_o = 0.7 / 25 \times 800 + 32 = 54.4^\circ\text{C}$$

相当外気温度 T は屋根表面温度(θ_1)に相当する。断熱二重屋根と同等の遮熱効果を得るためには、システム設置により折板屋根表面温度を約25℃低減しなければならないことが分かった。

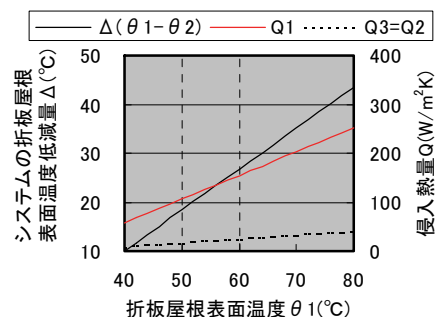


図-3 折板屋根表面温度の低減量の目標値

5. 縮小モデルでの実験

5.1 実験概要

一斗缶容器(亜鉛鉄板製)の蓋表面を折板屋根に模擬した縮小モデル試験体に赤外線ランプを照射して、考案した遮蔽式や断熱式等の屋根遮熱システムの効果を確認した。写真-1に実験状況を、写真-2に試験体のタイプを、表-2に試験体のパラメータを示す。

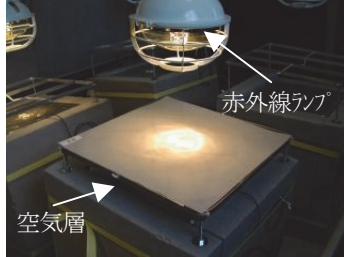


写真-1 実験状況 (A: 遮蔽式)

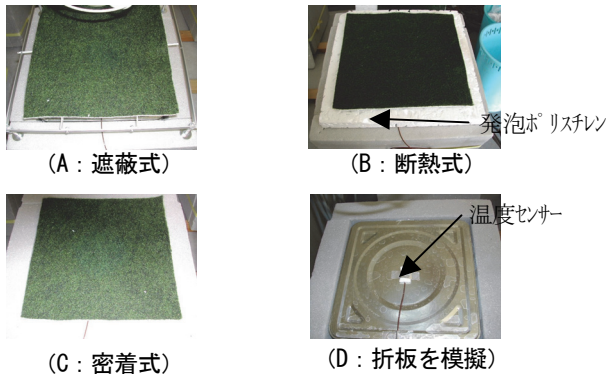


写真-2 試験体のタイプ

表-2 試験体のパラメータ

No	A	B	C	D
システム(案)	遮蔽式	断熱式	密着式	折板
保水シートの有無	有	有	有	—
散水の有無	有	有	有	有, 無
発泡ポリスチレン	—	25mm	—	—
空気層	50mm	—	—	—

※散水量は1時間に1回50mL/枚(1L/m²)散水

5.2 実験結果および考察

図-4に一斗缶容器の蓋表面温度の推移を示す。

上蓋に直接不織布を設置した密着式Cは、熱を吸収した不織布の熱伝導により散水前の温度が高くなった。一方、空気層を有する遮蔽式Aや発泡ポリスチレンの断熱層を有する断熱式Bは、散水前は折板を模擬した試験体Dに比べて温度が低下していた。また、散水後も試験体Dに比べ温度が上昇し難く保水シート設置による温度低減が見られた。試験体D(散水無)と遮蔽式A(散水有)の温度差は約23℃であった。試験体Dの蓋が反射色が強い銀色であったことを考慮すると、表面温度低減量の目標値25℃(折板表面温度が55℃の場合の低減量)をクリアできることが予測された。

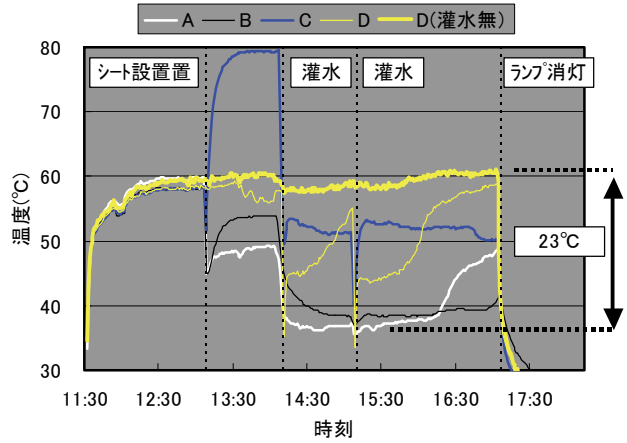


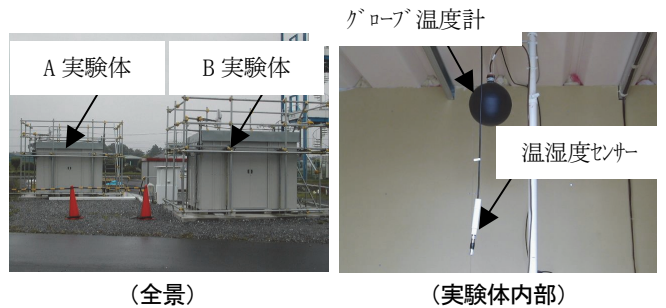
図-4 一斗缶容器の蓋表面温度の推移

6. 大型モデルでの実験

6.1 実験概要

縮小モデルでの実験で、保水シートと折板屋根との間に密閉されていない空気層を有する遮蔽式の遮熱性能が高いことが分かった。そのため、実建物を模擬した大型モデル実験体(内寸: B×L×H=1700×2700×1800)を屋外に施工し、遮蔽式の屋根遮熱システム設置の有無や散水パターンを実験パラメータにして遮熱効果を検証した。

なお、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仕様を高めている。写真-2に実験状況を、表-3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

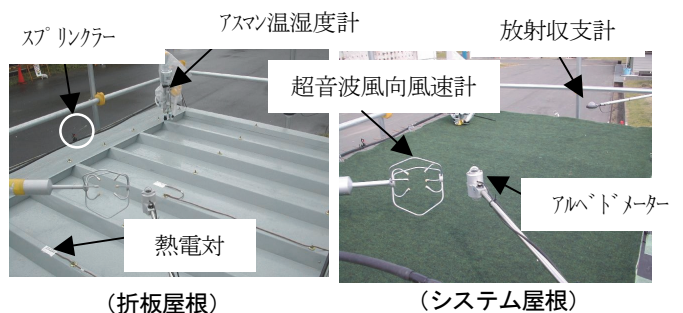


写真-3 実験状況 (大型モデル実験)

表-3 実験パラメータ

実験 case	実験日		A 実験体		B 実験体	
			システムの有無	散水	システムの有無	散水
1	夏期	7/14	—	—	—	有, 少
2		7/27	—	—	有	—
3		8/7	—	—	有	有, 多
4	中間期	11/2	—	—	有	—
5	冬期	12/11	—	—	有	—

- ・ 散水量：1 時間に 1 回 1 分間散水 (1L/m²)
- ・ 散水時刻：少=12, 13, 14, 15 時
多=10, 11, 12, 13, 14, 15 時

6.2 実験結果

実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に折板屋根表面温度の推移を示す。

夏期について見てみると、折板屋根に少量の水を直接散水しても水勾配により水が流出し表面温度を大きく低下させることができなかった (Case1)。しかしながら、システム設置のみの場合でも日射量が多いと約 10℃低下した (Case2)。また、システムを設置し散水を行った場合は、約 20~25℃の温度低下が見られた (Case3)。

中間期について見てみると、日射量が比較的多い (最大で 600W/m²) 日には表面温度で約 10℃低下し、実験体の内部でも 3℃程度低下していた。しかしながら、内部温度は外気温度 20~22℃よりも高いことから中間期においては日除けによるマイナス効果は少ないものと考えられる (Case4)。また、冬期については日射量が比較的多い (最大で 500W/m²) 日には表面温度で約 15℃低下し、実験体内部でも 3℃程度低下していた。システム設置により低下した内部温度は外気温度並みであり、暖房設定温度を 22℃とすると、冬期においてはマイナス効果になるものと考えられる (Case5)。

外気温度は折板屋根上 1m での測定

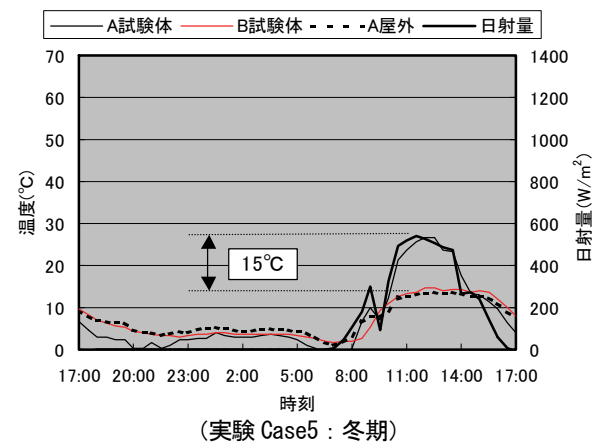
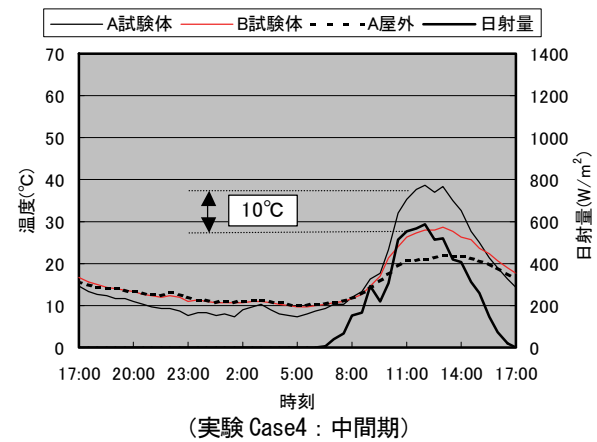
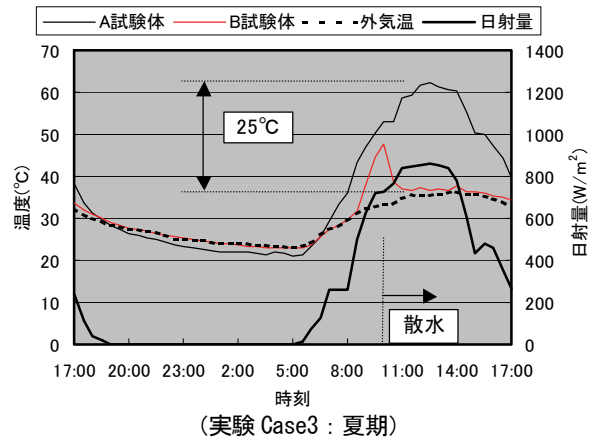
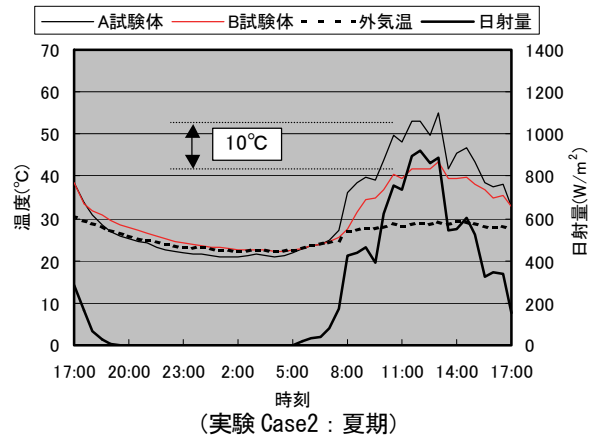
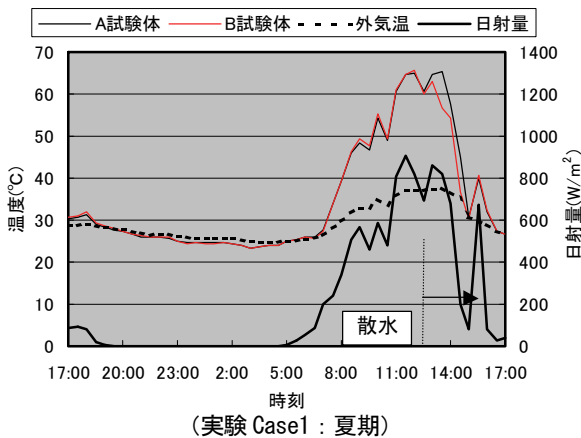


図-5 折板屋根表面温度の推移

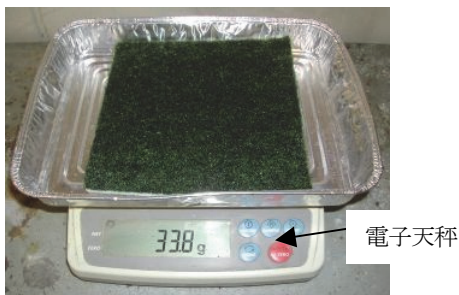
7. 解析的評価方法の検討

システムを用いた場合の折板屋根表面温度が計算により求めることができれば、空調エネルギー削減量が試算可能となる。そのため、算出方法を検討し、実験結果と比較した。

7.1 保水シートの蒸散性能の確認試験

蒸発潜熱量は日射量、温度、湿度と相関がある。保水シートの水蒸散性能を算出するために、保水したシートを屋外に15分間放置し、蒸散水量を電子天秤にて測定して計算により蒸発潜熱量を算出した。

なお、試験のばらつきを考慮し、同時に4試験片にて測定を行い、平均値を算出した。写真-4に試験状況を、図-6に蒸発潜熱量と日射量の関係を、蒸発潜熱量と日射量、温度、湿度の重回帰式を示す。



試験片(150□)に1L/m²相当の水を保水させ屋外に放置

写真-4 試験状況

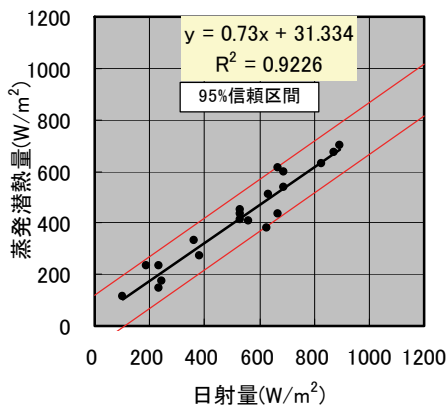


図-6 蒸発潜熱量と日射量の関係

蒸発潜熱量と日射量、温度、湿度の重回帰式
(説明変数選択基準 $R_u=0.955$)
 $Y(\text{蒸発潜熱量}) = 0.6X_1(\text{日射量}) + 17X_2(\text{温度}) - 0.56X_3(\text{湿度}) - 410$

7.2 評価式について

屋根遮熱システムの遮熱効果を保水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¹⁾を用いて屋根表面温度低減量から求めた。

散水した保水シートが日射を受けてシート表面の熱(潜熱)を奪う水蒸散効果と、保水シートによる屋根の日射遮蔽による日除け効果の組み合わせで屋根表面温度が低減できると考えた。図-7にシステムの遮熱機構を、以降に算出手順を、図-8に折板屋根表面温度の計算値と実験値の比較を示す。

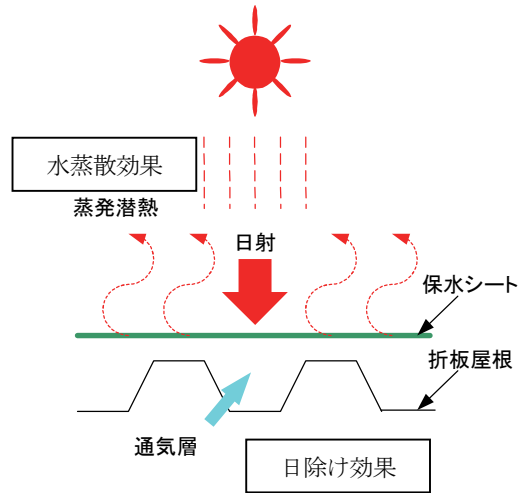


図-7 システムの遮熱機構 (システム断面)

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
 $tf = I/\lambda \cdot \alpha + t_o$
 ↓
 システムを設置した場合の折板屋根表面温度
 $tf' = I/\lambda \cdot \alpha' + t_o$
 α : 折板屋根の日射吸収率, α' : システムの日射吸収率
 I : 日射量(W/m²), t_o : 外気温度(°C)
 λ : 屋根近傍の屋外熱伝達率(W/m²K)

※I, t_o は気象データ

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 $\alpha_e = Y/I$
 Y : 保水シートの蒸発潜熱量(W/m²)
 (蒸発潜熱量と日射量, 温度, 湿度の重回帰式より算出)

※Y は気象データから求めた値

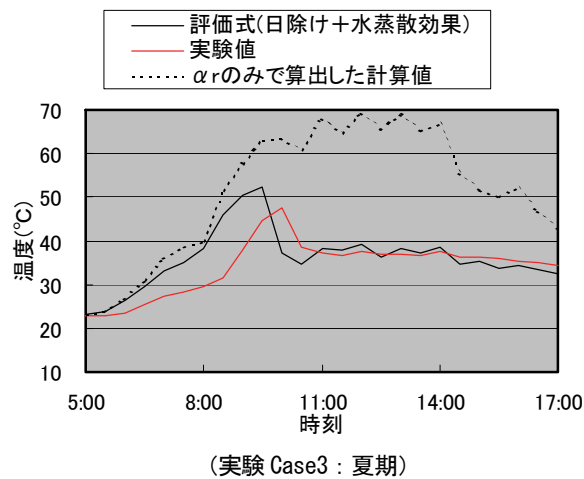
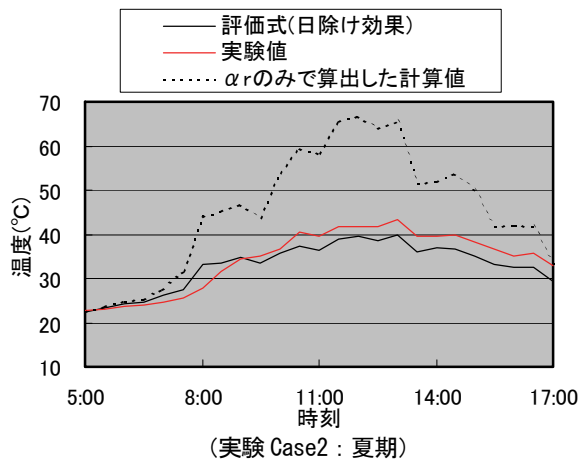
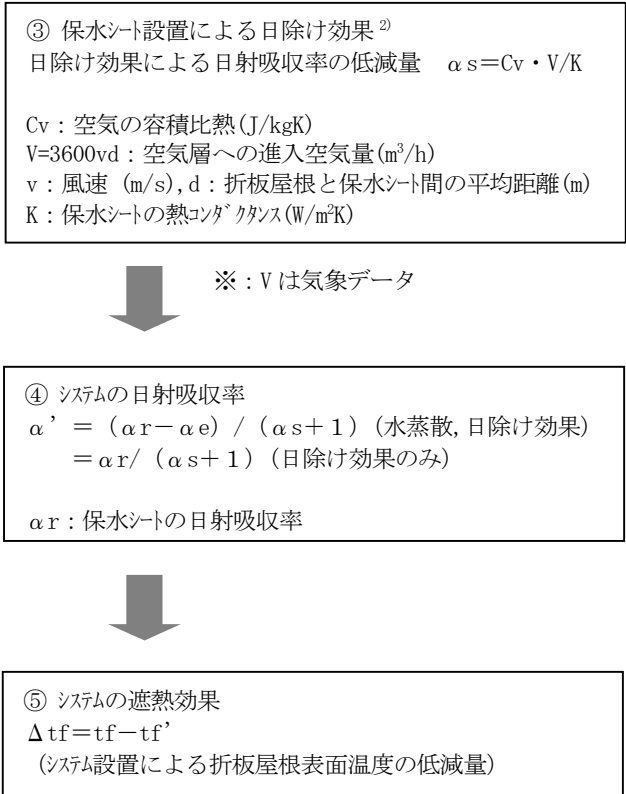


図-8 折板屋根表面温度の計算値と実験値の比較

計算値は若干実験値を危険側に評価するものの、比較的良い精度で実験値と対応した。計算値を安全側に補正する必要はあるが、システムを設置した場合の折板屋根表面温度を本評価式で算出でき、遮熱効果を求めることが可能であることが分かった。

8. まとめ

屋根遮熱システムの遮熱性能の検証実験および評価方法の検討結果から以下のことが確認できた。

i. 性能

1 時間に 1 回少量の水を保水シートに散水するシステムの夏期遮熱性能は、断熱二重屋根と同程である。

ii. 折板屋根表面温度の低減量

日射量が多い場合には日除け効果で折板屋根表面温度を約 10°C 低下できた。また、散水することにより約 25°C の低下が見込める。

iii. 遮熱性能の評価

システムの遮熱性能は日除け効果と水蒸散効果を、保水シートの日射吸収率を低減することで反映し、相当外気温の算出式より求めることができる。

9. あとがき

次年度は、開発中の保水シートの不燃性能、耐抗菌防カビ性能、耐候性についての検討を進めてゆく。また、大型モデル実験にて遮熱塗料との性能比較を行うとともに、実建物での検証を行いたい。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) 井上宇市、「空気調和ハンドブック」、丸善、p. 12、1967
- 2) (財) 建築環境・省エネルギー機構、「SMASH for Windows」、Ver. 2、p. 128、2000