

# 高反射性舗装によって形成される温熱環境の実測と評価

地域環境計画 若間 賢志

## 1. はじめに

屋根面に高反射性塗装を施した場合に冷房負荷削減効果のあることはすでに良く知られている。このような高反射性塗料をアスファルト舗装の表面処理に用いた場合、表面温度低下が期待できるが、一方で反射日射の増大による人体への影響が懸念される。本研究では大学構内でおこなった高反射性塗装を排水性アスファルト舗装表面に施した場合の表面温度、舗装面の放射収支の実測と、実道で行った高反射性舗装の放射収支の実測結果を示す。また、舗装を高反射化した場合の、反射日射の影響をみるために舗装上の作用温度を計算で求めて人体への温熱感の影響を評価する。最後に数値計算による表面温度の予測をし、日射反射率と表面温度低減の関係を示す。

## 2. 舗装面の放射収支と表面温度の実測

### 2-1. 実験概要

実験場所は大阪市立大学構内、実験期間は2002年8月1日～2002年10月18日である。図1は実験場でのセンサー位置設置を表した平面図、表1は測定項目である。図1の「アスファルト」区画とは塗装を施さない通常の排水性アスファルト表面である。高反射性舗装面では3種の塗色（黒色・灰色・白色）の区画を設置している。放射収支計、高さ方向気温計測はそれぞれ2セット用意した。「アスファルト」と高反射性舗装を同時に計測し比較するため、一方をアスファルト区画に固定し、他方は黒色、灰色、白色の順に移動させた。アルベドメータについては1セットを「アスファルト」、黒色、灰色、白色の順に移動し、計測した。

### 2-2. 実験結果

実験区画には隣接した建物などが影をおとす。実験区画全面が直達日射にさらされている時間帯は11:00～14:00ごろである。本研究の実験結果は影の影響のない11:00～14:00を中心に分析を行う。図3は2002年8月26日の各区画の舗装表面温度、表2は各面の11:00～14:00の平均値から決めた日射反射率を示す。図4は2002年8/30,9/2,9/10の地表面から+1500mmの高さの気温の計測値より、高反射各色面上の気温から「アスファルト」面上の気温を引いた差である。8/30は「高反射（黒）」、9/2は「高反射（灰）」、9/10は「高反射（白）」の気温差を示している。図5は各色塗装面

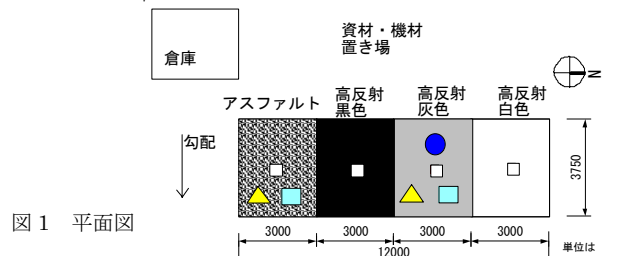


図1 平面図

表1 測定項目

測定項目	計測機器	舗装表面からの高さ(mm)
舗装表面温度	熱電対 (T型)	-5
気温	熱電対 (T型)	+1500
地中温度	熱電対 (T型)	-25、-75、-150
放射収支	放射収支計	+500
日射・反射日射	アルベドメータ	+650

表2 日射反射率

舗装面	日射反射率
アスファルト	0.06
8/26 高反射(黒)	0.25
8/30 高反射(灰)	0.4
9/2 高反射(白)	0.6
9/10 高反射(白)	0.6

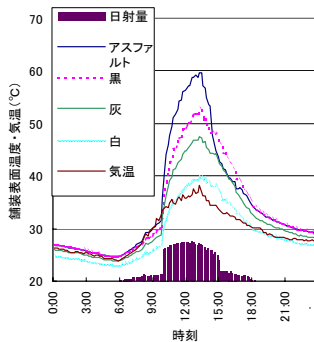


図3 表面温度の低下

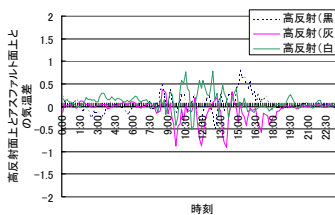


図4 高反射面とアスファルト面とでの気温差 (高さ+1500mm)

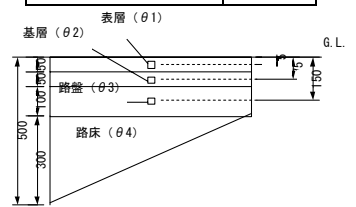


図2 地中温度の測定

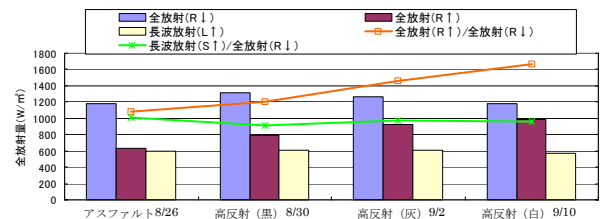


図5 舗装面上の放射収支 (H=650mm)

表3 計算に使用した比熱および密度 (文献1))

舗装材料の種類	比熱 (kJ/kg/K)	密度 (kg/m³)	熱容量 (kJ/m³/K)
表層 排水黒	0.9	2000	1800
基層 密粒黒	0.9	2350	2115
路盤 粒状材	1.2	2200	2640
路床 粒状材	1.2	2200	2640

での 13:00 の下向き・上向き全放射量 ( $R\downarrow \cdot R\uparrow$ )・上向き長波放射量 ( $L\uparrow$ ) と、下向き全放射量 ( $R\downarrow$ ) に対する上向き全放射量 ( $R\uparrow$ ) と上向き長波放射の割合を示す。

### 2-3. 地中伝導熱量

図 2 で計測した地中温度より各舗装面の地中伝導熱量を求める。計算方法を以下に示す。

$$G = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (1)$$

$G$  は地中伝導熱量、 $Q_{1\sim 4}$  はそれぞれ表層、基層、路盤、路床の蓄熱の変化量。舗装表面から 50 cm 下の温度差を 0 と想定している。

$$Q_k = C_k \rho_k \Delta \theta_k h_k A \quad (2)$$

$C_k$  は比熱、 $\rho_k$  は密度、 $\Delta \theta_k$  は単位時間における温度差、 $h_k$  は層厚、 $A$  は単位面積。 $\Delta \theta_k$  は  $1/2 \Delta \theta_{\beta}$  の値を使用。

表 3 は計算に使用した比熱および密度である。

図 6 は 9/2 の地中伝導熱量である。「アスファルト」区画は 14:00 の段階ですでに周囲の建物の影がおちているので単純に高反射区画と比較することはできないが、反射率の高い順に昼間の地中伝導熱量が減少し、夜間の放熱量も減少していることがわかる。

### 2-4. 作用温度差の試算

高反射性舗装を舗装表面に用いた場合の人体の作用温度 (以下 OT と略す) を試算し、「アスファルト」舗装の場合との OT の差で評価する。計算では、気温差の結果 (図 4) を見ると反射率による気温差は見られないので、舗装面上の気温は同一とし、また下向きの直達日射量、天空日射量は塗装種別によらず同一とする。上向き長波放射量と反射日射量は午前 11:00 の測定データを使用する。本研究では塗装種別によって生じる OT の差に着目するので上向きの放射量のみが計算の対象となる。

OT の計算方法を述べる。まず測定データより舗装面の真上 (高さ 500mm) での舗装面からの全放射量を計算する。

$$R_{500} = 1.0 \times L\uparrow + 0.7 \times S\uparrow \quad (3)$$

1.0、0.7 はそれぞれ人体への長波放射率、日射吸収率。文献 2)  $L\uparrow$  は上向き長波放射 (実測)、 $S\uparrow$  は反射日射 (実測)。

\*高さ 500mm からみた舗装面の形態係数は 92.8% であるが、本研究では形態係数を 100% として計算を進める。

次に式 (3) を用い、地表面から高さ 1000mm に設置し

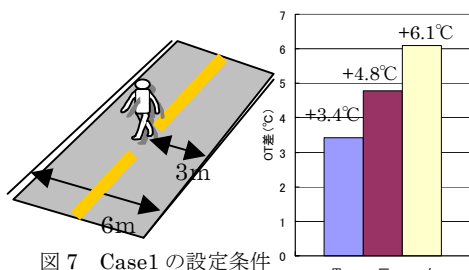


図 7 Case1 の設定条件

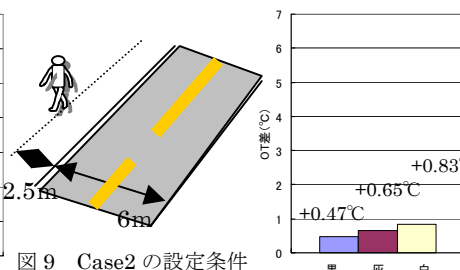


図 8 アスファルトとの OT 差 (Case1)

図 9 Case2 の設定条件

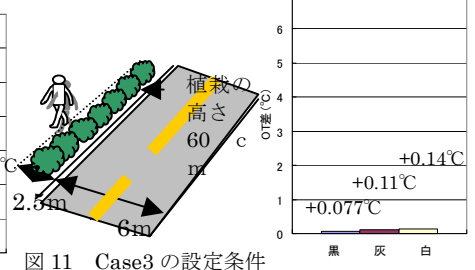


図 11 Case3 の設定条件

図 12 アスファルトとの OT 差 (Case3)

た微小立方体の各面 ( $i=1, 2, 3, 4$  は微小立方体の側面。 $i=5, 6$  は上下面) への舗装面からの全放射量と大気からの長波放射量の和を計算する。

$$R_{1000,i} = F_i \times R_{500} + \sigma(1 - F_i)(\theta_a + 273.15)^4 \quad (4)$$

$\theta_a$  は気温、 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$  <ステファンボルツマン定数>  $F_i$  は高さ 1m に設置した微小立方体の各面から舗装面をみた形態係数。

式 (4) を用い、各面の平均放射温度を計算する。

$$\theta_{MRT,i} = \frac{R_{1000,i} - \sigma(\theta_m + 273.15)^4}{4\sigma(\theta_m + 273.15)^3} + \theta_m \quad (5)$$

$\theta_m$  は 30 (°C) を使用

次に各面の  $\theta_{MRT,i}$  に重み係数をかけることで人体の形状と対応する平均放射温度へと変換する。

$$\theta_{MRT} = 0.238 \cdot \theta_{MRT,1} + 0.238 \cdot \theta_{MRT,2} + 0.238 \cdot \theta_{MRT,3} + 0.238 \cdot \theta_{MRT,4} + 0.024 \cdot \theta_{MRT,5} + 0.024 \cdot \theta_{MRT,6} \quad (6)$$

0.238、0.024 は各面の重み係数。文献 3)

式 (6) を用いて OT を計算する。

$$OT = \frac{\alpha_c \theta_a + \alpha_r \theta_{MRT}}{\alpha_c + \alpha_r} \quad (7)$$

対流熱伝達率  $\alpha_c = 8 \text{ W/m}^2$ 、放射熱伝達率  $\alpha_r = 5 \text{ W/m}^2$

式 (7) を用い、「アスファルト」と高反射各色との OT 差を算出する。本研究では次に示す 3 種の条件で計算した。Case1 は舗装の中心に人が立つ想定である。Case2 は車道を高反射化し、その脇の歩道「アスファルト」に人が立つ想定である。Case3 は歩道と車道の間に反射日射遮蔽物 (植栽など) がある想定である。図 7、図 9、図 11 に設定条件を、図 8、図 10、図 12 に「アスファルト」との OT 差のグラフを示す。Case1 は人体への影響が最大となる設定条件であり黒色塗装では 3.4°C、白色塗装に至っては 6.1°C の差が生じる。

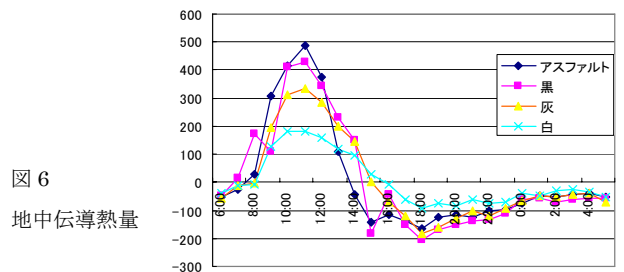


図 6 地中伝導熱量

しかし、車道のみを高反射化する設定条件では、OT差は1℃以下に小さくなる。

### 2-5. 実道における試験施工区間の実測事例

実道に施工された5種の高反射性舗装について、放射収支を計測して既設舗装と比較する。施工場所は兵庫県宝塚市の片側1車線(幅2.8m)の車道であり、既設の密粒アスファルトの上に高反射塗装を施した試験施工区間が設けられている。試験区間は南側から1,2,3,4,5工区と20mごとに施工されており、その北側には既設舗装が残されている。計測日は2003年8/4と9/18でどちらも晴天日である。測定項目と設置位置を表4に示す。

#### 日射反射率と放射収支

表5に各舗装の日射反射率を示す。1工区が0.37と最も高く、2工区~4工区はそれぞれ0.25、0.24、0.27と0.25前後の値であり、5工区は0.12で既設と変わらない。図13~図17に各区画の長波放射・全放射を示す。上向きの長波放射(長波放射↑)は日射反射率の最も高い1工区が576W/m<sup>2</sup>で、既設と比較して40W/m<sup>2</sup>の低減がみられる。2~4工区では30W/m<sup>2</sup>の低減がみられる。上向きの全放射(全放射↑)をみると、既設と比較して1工区では120W/m<sup>2</sup>、2~4工区では40~80W/m<sup>2</sup>増大し、大学構内における実験と同様の結果が得られ、反射日射が高くなるにつれ増大することが確認された。

### 3. 高反射性舗装の表面温度の推定

反射率増加による表面温度低減効果を予測できるように、気象条件(気温と日射量)を境界条件として与えて、舗装表面温度を予測する方法について検討する。以下では、大学構内の実測結果を元に検討を進める。

#### 3-1. 熱物性値の算出方法

舗装の熱物性値として熱伝導率と容積比熱が不明であるので、次に示す方法でこれを求める。

境界条件として相当外気温度 $\theta_{SAT}$ と深さ150mmの地中温度を与えて、深さ25mmの地中温度を計算によって求める。その計算値と実測値とを比較し、その誤差が最小となる $\lambda$ (熱伝導率)・ $c\gamma$ (容積比熱)の組み合わせが求める物性値である。総合熱伝達率は $\alpha = 13\text{W/m}^2\text{K}$ と仮定し、図18のように計算条件を設定した。図19は9/2の実測値を用いて灰色塗装区画の平均誤差を求めた例である。誤差最小となる組み合わせは $\lambda = 2.2\text{W/m}^2\text{K}$ 、 $c\gamma = 1300\text{kJ/m}^3\text{K}$ となった。

#### 3-2. 表面温度の予測方法

以上で求めた $\lambda$ と $c\gamma$ を用いて、差分法による非定常熱伝導計算を行う。相当外気温度 $\theta_{SAT}$ を舗装の上部境界条件として与える点は、熱物性値の算出と同じであるが、下部の境界条件は、深さ500mmの地中温度として日平均気温を仮定する方法に変える。図20にその計算条件を示す。一般に入手可能な気象条件のみで計算を可能とするために、地中温度を計算の必要条件から外し、舗装

上部の気象条件のみで計算を実行することにした。なお、 $\theta_{SAT}$ は次の(8)式で与えられ、日射反射率の違いはここで加味される。

$$\theta_{SAT} = \theta_{ao} + (aJ_s - F_{sa}J_n) / \alpha \quad (8)$$

$\theta_{ao}$ : 外気温  $a$ : 日射吸収率  $J_s$ : 日射量  $J_n$ : 夜間放射量  
 $F_{sa}$ : 舗装表面から大気をみる形態係数  $\alpha$ : 総合熱伝達率

表4 測定項目と設置位置

計測項目	計測機器	設置位置
気温	温湿度計	車道と歩道の間 高さ1500m
湿度		
長波放射量	長短波放射 収支計	車道の中心 高さ650mm
短波放射量		

表5 日射反射率

	高反射区画	既設舗装	計測日
1工区	0.37	0.11	8/4
2工区	0.25	0.11	8/4
3工区	0.24	0.14	9/18
4工区	0.27	0.14	9/18
5工区	0.12	0.12	8/4

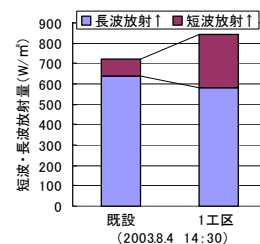


図13 1工区の上向き放射

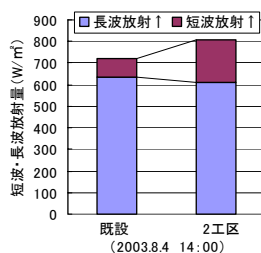


図14 2工区の上向き放射

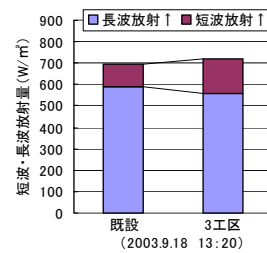


図15 3工区の上向き放射

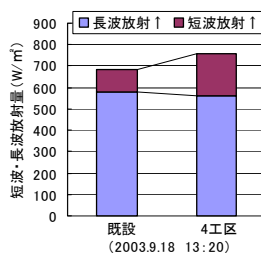


図16 4工区の上向き放射

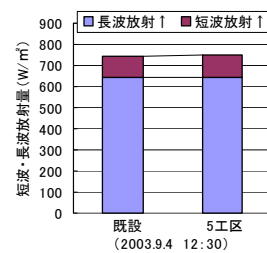


図17 5工区の上向き放射

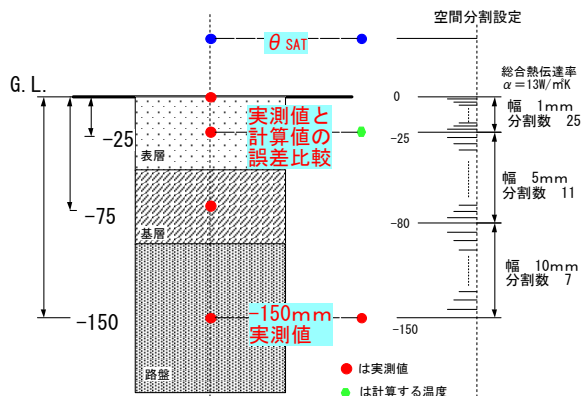


図18 熱物性値算出の計算条件

### 3-3. 表面温度の予測結果

各塗装色の舗装材は、表面色を除き全て共通の材料であるので、熱物性値 $\lambda$ と $c\gamma$ は全て同一である。

図 21~図 24 に 9/10 の気象条件を与えて、表面温度の実測値と予測値を比較する。「アスファルト」の 14:00 以降は影の影響で実測値と予測値が一致していないが、これを除けばアスファルト、黒、灰ともに実測値と予測値がほぼ一致している。反射率が大きくなると誤差は少し大きくなり、白では最大で 4°C 程度の誤差があらわれる点は、今後の検討する余地がある。

### 3-4. 日射反射率と表面温度低減効果

図 25 は日射反射率を 0~1 の範囲で変化させた条件で計算した舗装表面温度である（気象条件は 2003 年 9 月 2 日）。また図 26 には反射率 0 の表面温度を基準として、反射率増大と温度の低下の関係を示す。反射率が 0.1 上がると、表面温度が最高となる時刻（14:00）では 3.9°C、最低となる（6:00）では 0.2°C、また日平均では 1.6°C の温度低減が生じる結果が得られた。

### 4. まとめ

舗装面を高反射化することにより、舗装表面温度は大きく低減され、日中の地中蓄熱を減じ、夜間の放熱も減少させる。一方反射日射の増大が舗装の射出する長波放射量の低減効果を上回り、放射環境は悪化する結果が得られ、フィールド実験でも校内実験と同様の結果となった。反射日射の影響をみるために路上の温熱環境についてケーススタディを行うと、高反射舗装の直上の人体に対して OT が 3~6°C 程度増大する計算結果となったが、車道から離れたり、日射遮蔽物を設置することで OT 差は 1°C 以下となった。表面温度低減効果をみるために、排水性高反射性舗装の熱物性値を把握することで表面温度を推定し、反射率を 0.1 上げることで昼間の表面温度の最高値が約 4°C 低減できることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 福田他：冬季自然状態における保水性舗装の熱環境特性に関する実験的研究、土木学会論文集、pp243-254、1999
- 2) 鄭、堀越他：都市の街路空間および開放空間における熱放射環境が人体に及ぼす影響、日本建築学会計画系論文、pp77-84、1997
- 3) 中村：建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現方法について、日本建築学会計画系論文集、pp29-35、1986
- 4) 浦野・中村 著：建築環境工学、森北出版株式会社、1999

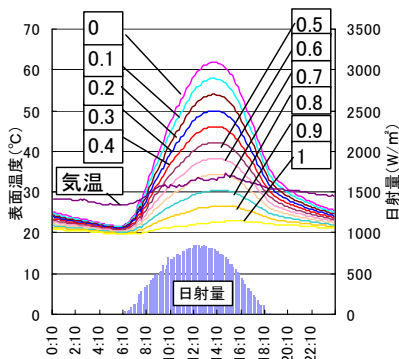


図 25 表面温度の算出

図 26

日射反射率と表面温度低減の関係

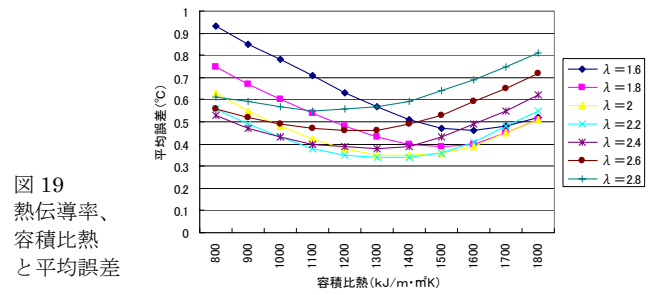


図 19 熱伝導率、容積比熱と平均誤差

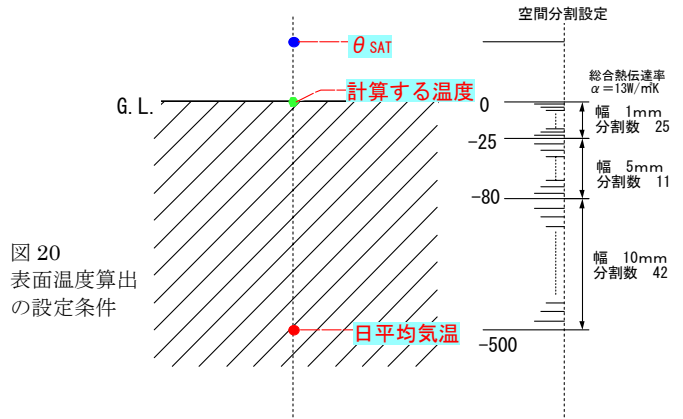


図 20 表面温度算出の設定条件

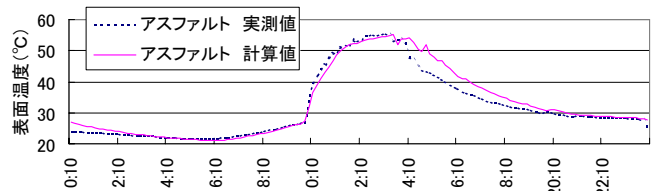


図 21 表面温度の実測値と計算値（アスファルト）

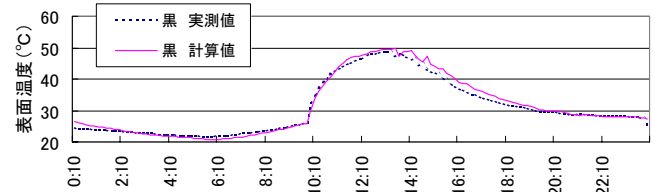


図 22 表面温度の実測値と計算値（黒）

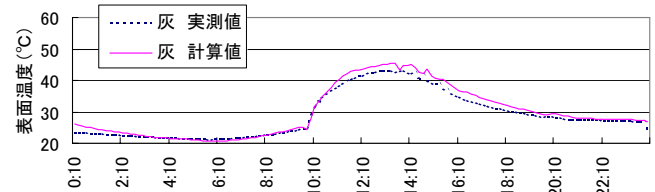


図 23 表面温度の実測値と計算値（灰）

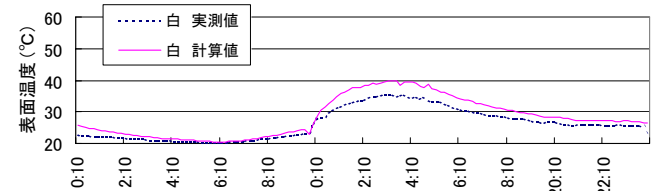


図 24 表面温度の実測値と計算値（白）

