

表面熱収支の解析と数値シミュレーションによる高アルbedo塗料の表面温度低下効果の検証

Evaluation of Cooling Effects of High-Albedo Paints by Data Analysis and Numerical Simulation of Surface Heat Budget

平野 勇二郎・大橋 唯太・藤野 毅

Yujiro HIRANO, Yuditaka OHASHI and Takeshi FUJINO

2005年11月

環境情報科学論文集19 別刷  
Papers on Environmental Information Science, No.19  
November 2005

社団法人 環境情報科学センター  
Center for Environmental Information Science, Tokyo

# 表面熱収支の解析と数値シミュレーションによる高アルbedo塗料の表面温度低下効果の検証

## Evaluation of Cooling Effects of High-Albedo Paints by Data Analysis and Numerical Simulation of Surface Heat Budget

平野勇二郎\*・大橋唯太\*\*・藤野 毅\*\*\*  
Yujiro HIRANO\*, Yukitaka OHASHI\*\* and Takeshi FUJINO\*\*\*

**要旨:**本研究は都市における暑熱環境緩和方策の基礎研究として、高アルbedo塗料を塗布したコンクリート表面における熱収支観測データの解析とモデリングを行い、高アルbedo化による表面温度低下効果を検証した。まず観測データから熱収支解析を行い、表面熱収支の日変化パターンを明らかにした。この結果、例えば高アルbedo塗料の塗布面では顕熱フラックスがほとんど生じていないことなどの知見を得た。次にこの熱収支解析を検証するために1次元熱収支・熱伝導モデルを作成しシミュレーションを行った結果、観測から得られた表面温度や熱収支を概ね再現することができた。

**キーワード:** 高アルbedo塗料, 表面熱収支, 数値シミュレーション, 都市熱環境

**Abstract:** In order to evaluate surface-cooling effects of high-albedo paints, we analysed the surface heat budget of concrete blocks coated with high-albedo paints by observational data and numerical model. The analytic results based on observational data showed, for example, that the downward sensible heat flux from air to white-painted blocks appeared in the daytime. To validate these results, we developed a one-dimensional surface heat-budget and heat-conduction model. From the results of numerical simulations, characteristics of surface temperature and heat budget were well represented by the model.

**Key Words:** high-albedo paint, surface heat budget, numerical simulation, urban thermal environment

### はじめに

都市の表面の高アルbedo化, すなわち日射反射率を高める方策により, 冷房負荷軽減やヒートアイランド緩和などの効果が期待できる(例えば, 二階堂ほか, 1999; 近藤ほか, 2000 など)。高アルbedo化の効果についてはこれまで主にアメリカにおいて数多くの評価が行われてきたが(例えば, Taha *et al.*, 1999; Akbari *et al.*, 2001 など), 日本の気候条件における評価事例は多いとは言えない。国内では高アルbedo化による表面温度の変化についての実測評価事例は若干あるものの(二階堂ほか, 1999; 近藤ほか, 2000), 熱収支変化に関する評価事例はきわめて少ない。こうした実測評価は特定の気象条件の下で行わざるを得ないので, 一般的な知見を得るには今後さらに評価事例を増やしていく必要がある。また, 近年は国内

でもシミュレーションによる評価事例が増えつつあるが(例えば, 亀卦川ほか, 2002; 佐藤ほか, 2004), 一般にシミュレーションには多くの仮定が含まれるから, 的確なパラメータや検証データの取得のために実測事例の蓄積が必要である。

こうした問題意識から, 平野ほか(2004)は高アルbedo塗料を塗布したコンクリート面において表面温度と熱収支の観測を行った。この結果, 最もアルbedoが高い白色塗料を塗布した場合, 10°C以上の大きな表面温度低下効果が得られることや, 日中でも大気からコンクリート面への下向き顕熱フラックスが生じることなどが示された。しかしながらこの研究は, 例えば蓄熱量を無視して熱収支解析を行っていることなど, 検討課題がまだ残されており, 物理的なメカニズムを含めた解明・検証が必ずしも十分になされたとは言えない。

そこで本研究の目的は平野ほか(2004)の観測結果に

\* 埼玉大学大学院理工学研究科(学振特別研究員), \*\* 岡山理科大学総合情報学部, \*\*\* 埼玉大学大学院理工学研究科

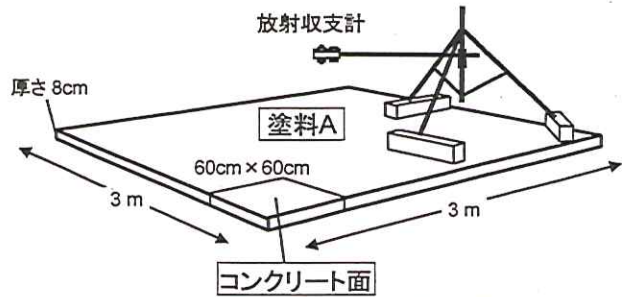
さらなる検討を加え、高アルbedo塗料による熱収支変化と表面温度低下効果を実証することである。具体的にはまず平野ほか (2004) の観測データにさらに計測と解析を加えて、より詳細な熱収支解析を行う。その上で、より一般的な知見を得るため1次元熱収支・熱伝導モデルを作成し、アルbedoと熱収支や表面温度の関係についてシミュレーションにより検証する。

### 1. 観測の概要とデータ処理

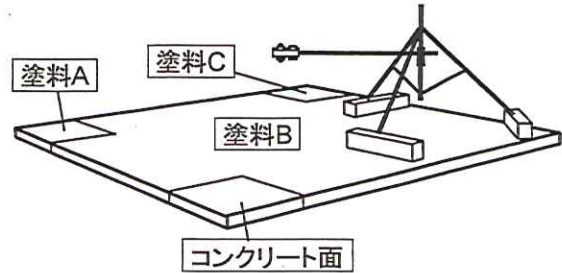
本研究では平野ほか (2004) と同様に白色、淡いクリーム色、濃い赤茶色の3色の塗料を評価対象とした(以下、それぞれ塗料 A, 塗料 B, 塗料 C と呼ぶ)。各塗料のアルbedoと射出率を表1に示す。塗料 B, 塗料 C は可視域に対して近赤外域の反射率が高い有色の高アルbedo塗料である。有色の高アルbedo塗料では外見上は白色化しないため、眩しさによる不快感の軽減や街区の美的景観、建築のデザイン性、自動車運転時の安全性などの問題に配慮しつつ、街区の日射反射率を高めることができる。

本研究は主に平野ほか (2004) が行った3通りの観測のうち、予備実験である観測1を除き、観測2および観測3で得られたデータを用いて解析を行った。観測サイトでは図1に示した通り、厚さ8cmのコンクリートブロックを土の上に並べた3m×3mのコンクリート面を設置し、上面に塗料を塗布して観測を行った。観測2は最も反射率が高い塗料Aと塗布を行っていないコンクリート面との比較、観測3は3種類の高アルbedo塗料(塗料 A, B, C) とコンクリート面との比較を目的としている。なお観測2、観測3の観測期間はいずれも降雨はなく、平均日最高気温はそれぞれ31.9℃、25.3℃であった。観測2は9月中旬に行ったが、気温は比較的高く、暑熱環境を評価する上では良好な気象条件であったと言える。一方、観測3は快晴日を含みいずれも好天静穏日であったが、すでにほぼ秋季の気象条件となっており、気温は観測2と比較して低めであった。

本研究で用いた観測項目のうち短波・長波放射量、気温、風速、放射温度計による表面温度に関しては、平野ほか (2004) と同様である。さらに本研究では、次の通りにデータを加えて解析を行った。まず表面温度は、放射温度計のみでは時間分解能に限界があるため、表面に貼り付けたサーミスタ式の接触型温度計 (T and D 社, RTR-52) を併用した。ただし接触型温度計では日射の影響を受けた場合にセンサーの温度とコンクリートの表面温度とを完全に一致させることは困難である。そこで、絶対値は放射温度計に合わせて、サーミスタ温度計により時間的な補完を行うことで表面温度の10分値を得た。



観測2: 2003年9月13日5:00 ~ 9月16日5:00



観測3: 2003年9月30日5:00 ~ 10月3日5:00

図1 各観測の概要

表1 アルbedoおよび射出率 (平野ほか, 2004)

	アルbedo	射出率
コンクリート	0.430	0.958
塗料A	0.830	0.960
塗料B	0.640	0.959
塗料C	0.368	0.962

補完の方法は差の線形内挿とした。またコンクリートの温度プロファイルについて、表面温度およびコンクリート内部(深さ2.5cm, 4.5cm)、下端(深さ8cm)においてサーミスタ温度計およびT型熱電対により計測したデータも用いた。また、コンクリート下面と土壌の間に入れた熱流板(REBS社, PHF-01)により計測した熱流のデータも用いた。ただし表面温度は各塗料およびコンクリート面について観測したが、内部・下部温度および熱流はいずれも3m×3mのコンクリートブロックの中心部のみ、すなわち観測2は塗料A、観測3は塗料Bのみを計測した。なお、サーミスタ温度計は17~36℃の範囲でアスマン通風乾湿温度計の乾球温度と合わせることでより器差補正を行った。また放射温度計は水温5~50℃の範囲で、水をかき混ぜながら放射温度計により水面の温度を測定し、同時にサーミスタ温度計により水温を測定して、これらにより器差補正を行った。ただし、放射温度計は対象物からの長波放射を計測して表面温度を算出するため、接触型温度計による温度の計測値に合わせる補正式を作成することは厳密な温度補正法とはいえない。

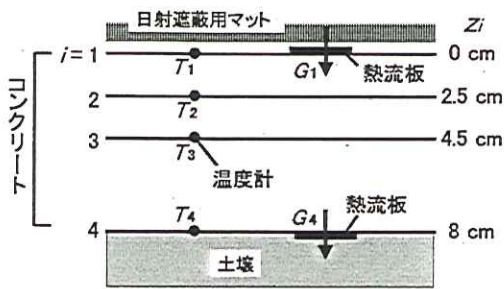


図2  $c_p$  と  $\lambda$  の計測方法の模式図

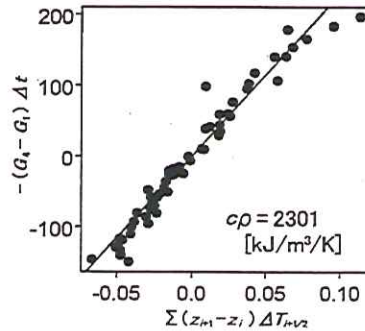


図3  $c_p$  の計測結果

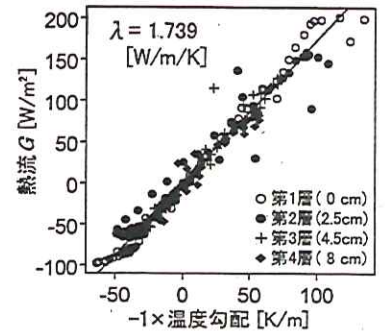


図4  $\lambda$  の計測結果

い。なぜなら、計測した長波放射から表面温度を算出する際に反射成分を分離する必要があるが、そのために必要な入射量や射出率が計測環境や対象により異なるためである。そのためここでは温度ではなくセンサーが受け取る長波放射量を合わせる補正式を作成した。熱電対は水温の計測値をサーミスタ温度計と合わせる形で器差補正を行った。

## 2. 体積熱容量, 熱伝導率の計測

本研究の観測で用いたコンクリートブロックについて体積熱容量  $c_p$  と熱伝導率  $\lambda$  のパラメータを次の通りに計測した。まず図2に示した通りにコンクリートを第1層～第4層(深さ0cm, 2.5cm, 4.5cm, 8cm)の4つの層に分割し、各層の温度と上端、下端の熱流を計測した。この計測はコンクリートの上側の日射を遮蔽する必要があったため、観測2, 観測3の観測期間とは別の晴天日に行った。ここで各層の温度(K), 熱流( $W/m^2$ ), 深さ(m)をそれぞれ  $T, G, z$  とし、添え字の  $i$  は第  $i$  層を、 $i+1/2$  は第  $i$  層と第  $i+1$  層の中間点を意味する。また時間(sec)を  $t$  とし、 $\Delta t$  は時間方向の差分を意味する。 $c_p$  と  $\lambda$  は次式より求まる。

$$-\frac{\partial G}{\partial z} = c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$-G = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

ただし、 $G_2, G_3$  の計測値がないので、以下の通りに算出した。まず各層間の温度勾配を均一と仮定して式(1)を差分化すると、

$$-\frac{G_{i+1} - G_i}{z_{i+1} - z_i} = c_p \frac{\Delta T_{i+1/2}}{\Delta t} \quad (3)$$

となる。これを  $i=1\sim 3$  で積算すると、式(4)が得られる。

$$c_p = -\frac{(G_4 - G_1)\Delta t}{\sum_{i=1}^3 (z_{i+1} - z_i)\Delta T_{i+1/2}} \quad (4)$$

この式(4)に従い、図3に示した通り原点を通る回帰式により  $c_p$  を算出した。データは20分平均値を用いた。また、ここで得られた  $c_p$  を用い、 $G_1$  と式(3)から  $G_2, G_3$  を算出し、式(2)から  $\lambda$  を算出した。 $\lambda$  は各層について算出できるが、ここでは均一とし、図4に示した通り原点を通る回帰直線により  $\lambda$  を算出した。これらの結果、 $c_p = 2301 [kJ/m^3/K]$ ,  $\lambda = 1.739 [W/m/K]$  を得た。

## 3. 表面熱収支の日変化

平野ほか(2004)は熱収支解析により塗料A, Bでは負の顕熱フラックスが生じることを示しているが、主に蓄熱量を無視するため日積算値に基づいて検討しており、各熱収支要素の日変化についての検討は十分とは言えない。また、コンクリート内部や下側の温度を比較していないため、実際には日積算値であっても蓄熱量が無視できるとは限らず、十分な検証ができていない。そこで本研究ではコンクリート内の温度プロファイルや下側の熱流を計測した観測2の塗料A, 観測3の塗料Bについて、コンクリートの内部温度や下部の熱流のデータと前章の体積熱容量の計測値から各熱収支要素の日変化を算出した。熱収支式を次に示す。

$$(1 - ref)S^{\downarrow} + \varepsilon(\sigma T_s^4 + L^{\downarrow}) + H + G = 0 \quad (5)$$

ここで、 $S^{\downarrow}$ : 下向き短波放射 ( $W/m^2$ ),  $L^{\downarrow}$ : 下向き長波放射 ( $W/m^2$ ),  $ref$ : アルベド (-),  $\varepsilon$ : 射出率 (-),  $T_s$ : 表面温度 (K),  $H$ : 顕熱フラックス ( $W/m^2$ ),  $G$ : 地中熱伝導 ( $W/m^2$ ) である。 $G$  は、コンクリートの温度(深さ0cm, 2.5cm, 4.5cm, 8cm)と体積熱容量  $c_p$  から算出した蓄熱量と、コンクリート下部の熱流板のデータから得

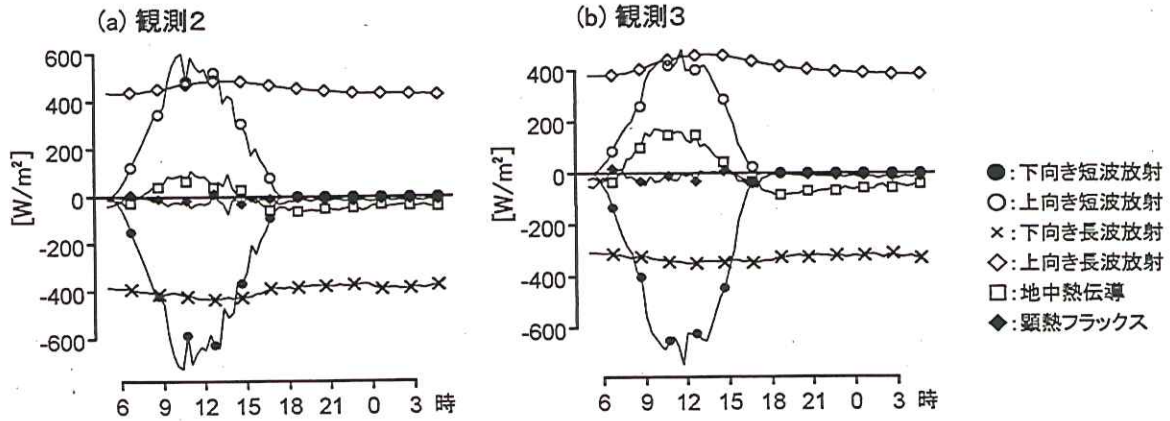


図5 観測データによる表面熱収支算定結果 (観測2の塗料A, 観測3の塗料B)

た。また、 $H$ は式(5)の熱収支残差により算出した。これらにより得られた熱収支各要素の日変化についてそれぞれ3日間の平均値を図5に示す。

この図から、熱収支残差として得た顕熱フラックスは熱収支全体の中で非常に小さいが、全体として負の値となっていることが読み取れる。本研究では蓄熱の影響も考慮して平野ほか(2004)より厳密な解析を行っているが、やはり日中に負の顕熱フラックスが生じることは十分に起こり得ると結論付けられる。ただし、熱収支残差は他の熱収支要素の誤差が集積されており、この結果から顕熱フラックスの日変化パターンを詳細に議論することには無理がある。また、コンクリート内部の温度プロファイルや下面の熱流の計測は観測2では塗料A, 観測3では塗料Bについてのみしか行っていないため、これ以上の検討は次章に譲る。

#### 4. 熱収支・熱伝導モデルによる検証

前章では観測値に基づいた熱収支解析を行ったが、観測値には諸要因による誤差が含まれるため、精度や物理的な整合性については疑問が残る。そこで、これらの妥当性を確認し、より一般的な知見を得るため、1次元熱収支・熱伝導モデルを作成した。

このモデルでは各塗料およびコンクリート面についてアルベドと射出率のパラメータのみを個別に設定し、外部気象条件などの境界条件は共通の条件の下でコンクリートの温度や熱収支を算出する。作成したモデルは基本的には式(5)の熱収支式に基づくが、顕熱フラックスは式(6)に示すユルゲス式(近藤, 2001)を用いた。ユルゲス式は対流熱伝達率を風速のみの関数とする単純な式であるが、本研究の観測サイトにおいて概ね妥当な結果が得られることは既に確認している(平野ほか, 2004)。

$$H = (5.8 + 4.0U)(T_s - T_a) \quad U \leq 5 \text{ m/s}$$

$$H = 7.2U^{0.78}(T_s - T_a) \quad U > 5 \text{ m/s} \quad (6)$$

ここで、 $T_a$ : 気温 (K),  $U$ : 風速 (m/s) である。また地中熱伝導  $G$  は式(7)に示す熱伝導方程式により算出する。このためコンクリート内部は厚さ 1cm で 8層に、コンクリートより下の土壌部分は地下 6m までを不等間隔格子で 20層に分割した。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (7)$$

このモデルでは式(5)~(7)を連立方程式として解くことで、表面温度やコンクリート内部温度、熱収支などを得る。境界条件となる下向き短波・長波放射および気温、風速は前述した観測値を用いた。アルベドと射出率のパラメータは表1の通りに設定した。コンクリートの体積熱容量  $c\rho$ , 熱伝導率  $\lambda$  は前述の計測値を用いた。下層の土壌については近藤(1994)に基づき  $c\rho = 1300$  [kJ/m<sup>3</sup>/K],  $\lambda = 0.3$  [W/m/K]とした。

解析対象日は、観測2, 観測3とも各観測期間の3日間のアンサンブル平均による仮想的な1日を設定した。実際にはアンサンブル平均により得られた気象条件に物理的な整合性があるとは限らないが、ここでのシミュレーションの目的では日による気象条件のばらつきを除去することが望ましいことと、観測2, 観測3とも観測期間中に大きな気象条件の変化がなかったことから、今回は平均化することが適切と判断した。ただし、助走計算を行うにあたり連続したデータとする必要があるため、平均化の際に1日目と3日目には24時間の間にそれぞれ0→1, 1→0と変化する重みをつけた。この仮想的な1日のデータを周期定常の気象条件と見なし、20日分を繰

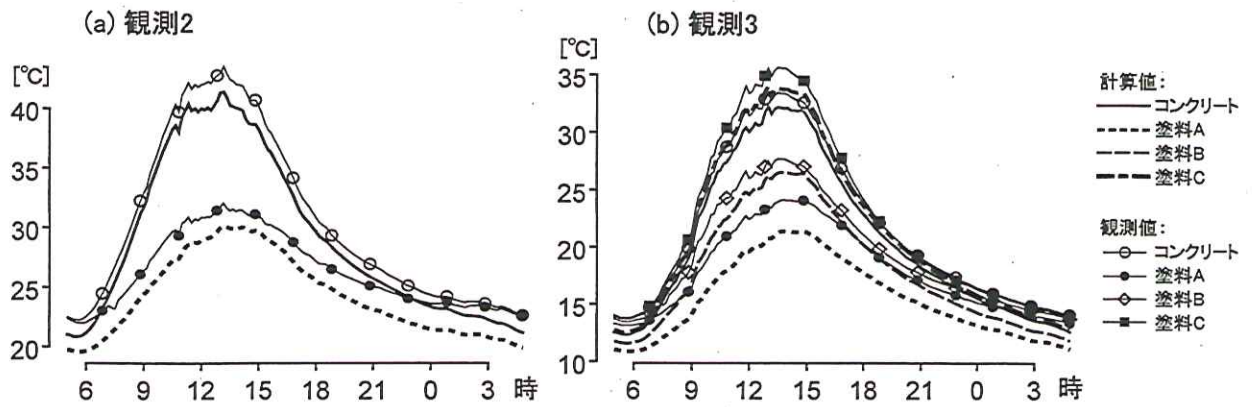


図6 表面温度の観測値と計算値の比較

り返して助走計算を行い、その後の計算結果を解析に用いた。地中温度の初期値は、実験的に最下層が収束するまでの長期積分を行った結果をもとに、観測2は28.5°C、観測3は20.0°Cと決定した。

この計算結果の再現性を検証するため、表面温度の計算値と実測値を比較した(図6)。この結果、計算値の方が若干温度が低めとなっているものの、全体としては概ね一致しており、各塗料の特徴はよく表現できていると言える。もちろん、ユルゲス式や土壌の $c_p$ や $\lambda$ のパラメータなどには仮定が入るため精度向上の余地はあるが、ここでの目的としては精緻に再現することよりも、一般的な場における塗料の効果を明らかにすることが重要であるから、必要な精度は確保されていると考えられる。図6から、計算により得られた高アルベド塗料の温度低下効果は、例えば塗料Aならばコンクリートと比較して日中に約10°Cとなっており、平野ほか(2004)の観測に基づく知見と一致した。次にシミュレーションにより得られた表面温度とアルベドの関係を図7に示す。この図から、アルベドと温度の関係はほぼ直線となっていることが分かる。観測値に基づいて同様に図化した例では日

中にやや曲線的な関係となる傾向が生じたが(平野ほか, 2004), 図7からはそうした傾向は読み取れない。一方、温度上昇時(図7実線)の方が温度下降時(図7破線)よりもアルベドによる温度差が大きく生じる傾向は、観測値と同様に明確に生じていることから、これは一般的な傾向であると考えられる。

地中熱伝導モデル部分について妥当性を検討するため、観測データから得た熱流と計算値とを比較した(図8)。観測データから算出した熱流は、深さ0cmは前章と同様のコンクリートの温度変化およびコンクリート下部の熱流板からの計算値であり、深さ8cmは熱流板の観測値である。したがって0cmのデータについては体積熱容量

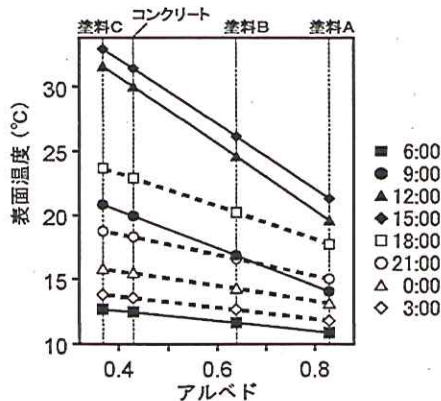


図7 アルベドと表面温度の関係(観測3)

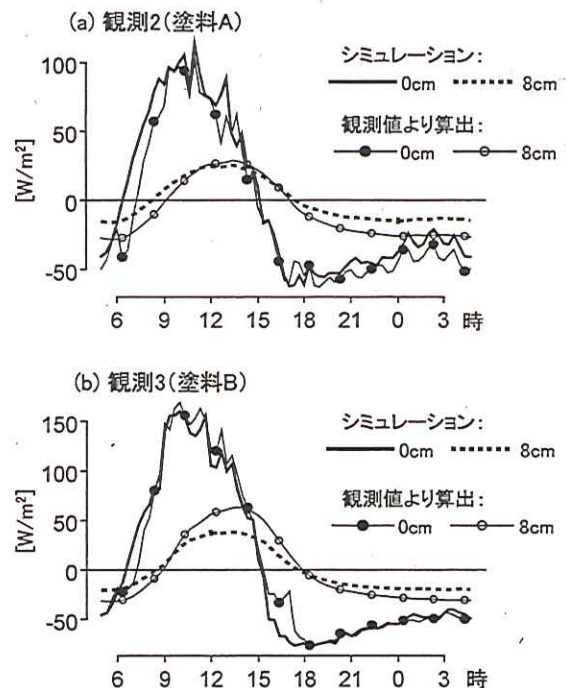


図8 熱流の観測値と計算値の比較

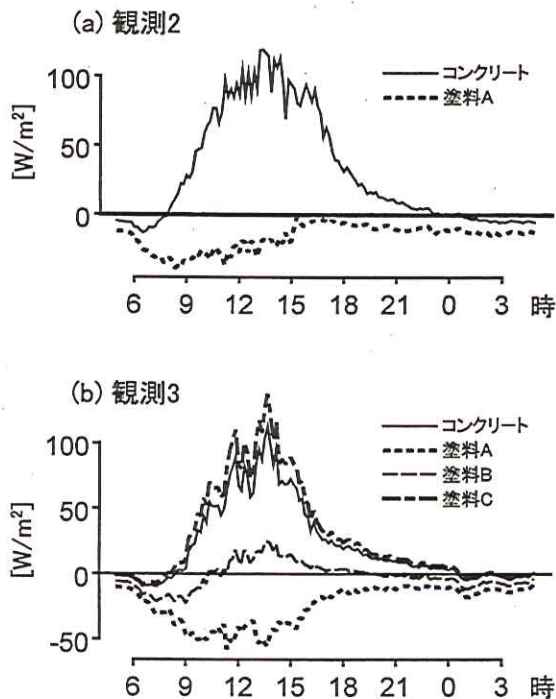


図9 顕熱フラックスの計算結果

$c_p$  は同一のパラメータを用いているので厳密な検証とは言えないが、この図から判断できる範囲ではいずれもよく再現されていると言える。

モデルにより再現された顕熱フラックスの日変化を図9に示す。この図からやはり塗料Aや塗料Bの午前中にはやはり負の顕熱フラックスが生じており、前章の熱収支解析とも矛盾しない結果となった。平野ほか(2004)の顕熱フラックスの日変化と比較すると、いずれもユルゲス式を用いているため結果は類似しているが、物理的な整合性が確認できているという点で、本研究の計算結果はより信頼性がある。ただし、負の顕熱フラックスが生じている場合は表面近傍での自然対流の性状が異なることが予想されるため、こういう条件下でのユルゲス式の適用性については今後検証が必要であると考えている。

#### おわりに

本研究では、平野ほか(2004)の観測データに基づいて熱収支解析とシミュレーションにより高アルベド塗料による熱収支変化と表面温度低下効果を検証することを目的とした。本研究の成果をまとめると次の通りとなる。(1) コンクリートの物性値を計測し、蓄熱の効果を含めて熱収支解析を行った。これにより高アルベド化した表面での各熱収支要素の日変化が示された。熱収支残差により得られた顕熱フラックスは種々の誤差要因によるば

らつきが大きく詳細な分析は困難であったが、負の顕熱フラックスが生じることは十分起こり得ることが示された。

(2) 観測および解析結果について検証し、より一般的な知見とするため、1次元熱収支・熱伝導モデルを作成してシミュレーションを行った。アルベドと射出率のパラメータのみを各塗料について個別に設定し、共通の境界条件の下でシミュレーションを行った結果、各塗料の特徴を概ね再現することができた。これにより、平野ほか(2004)が観測から得た一連の知見について、このシミュレーションにより再現することができた。

本研究により、平野ほか(2004)の観測結果が物理的に裏付けられ、高アルベド塗料の表面温度低下効果についての実証ができたと考えている。しかし本研究においてもやはり、高アルベド塗料が広域に普及した場合に生じる気温低下効果については評価できていない。今後、大気側のシミュレーションを含めて検討する必要がある。

#### 謝辞

本研究で用いた観測データの利用には国立環境研究所の一瀬俊明氏、新津潔氏にご協力頂きました。モデル作成については九州大学の萩島理氏にご指導を頂きました。高アルベド塗料の利用に関しては長島特殊塗料株式会社の深江典之氏にご協力頂きました。ここに深謝の意を表します。本研究は文部科学省科学研究費補助金(特別研究員奨励費)を受けて実施された。

#### 引用文献

- Akbari, H., M. Pomerantz and H. Taha (2001) Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295~310.
- 平野勇二郎, 新津潔, 大橋唯太, 一瀬俊明 (2004) 高アルベド塗料を塗布したコンクリート面の表面温度と熱収支の観測. *環境情報科学論文集*, No.18, 247~252.
- 亀井川幸浩, 玄地 裕, 近藤裕昭, 花木啓祐 (2002) 街区構造に応じた高温化対策の導入が都市空調エネルギー需要に及ぼす影響. *エネルギー・資源*, 23(3), 200~206.
- 近藤裕昭 (2001) 人間空間の気象学. 朝倉書店, 東京, 156pp.
- 近藤純正 (1994) 水環境の気象学. 朝倉書店, 東京, 348pp.
- 近藤靖史, 長澤康弘, 入交麻衣子 (2000) 高反射率塗料による日射熱負荷軽減とヒートアイランド現象の緩和に関する研究. *空気調和・衛生工学会論文集*, 78, 15~24.
- 二階堂稔, 寺内伸, 水野民雄, 石原真興, 館山陽介 (1999) 光の高反射・熱の高放射塗料の開発 (その2). *日本建築学会大会学術講演梗概集*, A-1, 625~626.
- 佐藤大樹, 村上周三, 大岡龍三, 吉田伸治, 原山和也, 近藤裕昭 (2004) ヒートアイランド緩和方策が夏季と冬季の都市熱環境へ及ぼす影響の数値解析. 夏季・冬季の都市気候特性の分析及び緑化と高アルベド化の効果の検討. *日本建築学会環境系論文集*, No.577, 55~62.
- Taha, H., St. Konopacki and S. Gaberseck (1999) Impacts of large-scale surface modifications on meteorological conditions and energy use: a 10-region modeling study. *Theor. Appl. Climatol.*, 62, 175~185.