

# 高アルベド塗料の塗布によるコンクリート表面の温度および熱収支特性の変化

平野勇二郎<sup>1</sup>・新津潔<sup>2</sup>・大橋唯太<sup>3</sup>・一ノ瀬俊明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 埼玉大学大学院理工学研究科 学振特別研究員 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

<sup>2</sup>修士 (独)国立環境研究所 CGER NIESアシスタントフェロー (〒305-8506 つくば市小野川 16-2)

<sup>3</sup>正会員 博(理) 岡山理科大学講師 総合情報学部 (〒700-0005 岡山市理大町1-1)

<sup>4</sup>正会員 博(工) (独)国立環境研究所 CGER 主任研究員 (〒305-8506 つくば市小野川 16-2)

都市の高アルベド化による暑熱環境緩和効果を明らかにするため、コンクリート面に高アルベド塗料を塗布した際の表面温度と熱収支の変化について観測を行った。とくに本研究では白色塗料だけでなく、近赤外域の反射率が高い有色の高アルベド塗料についても評価を行った。この結果、白色塗料の表面温度は、日中・夜間とも気温とほぼ一致し、塗布を行っていないコンクリート面とは日中に10℃以上の温度差が生じた。また、この塗布面は草地の表面温度とほぼ同程度であり、乾燥した土壌面との温度差は日中に約20℃に及んだ。熱収支解析の結果、午前中の温度上昇時は塗布面では大気から塗布面への下向き顕熱フラックスが生じ、これにより表面温度が上昇していることが示された。

**Key Words :** *high-albedo paint, surface temperature, surface heat budget, observation, urban thermal environment*

## 1. はじめに

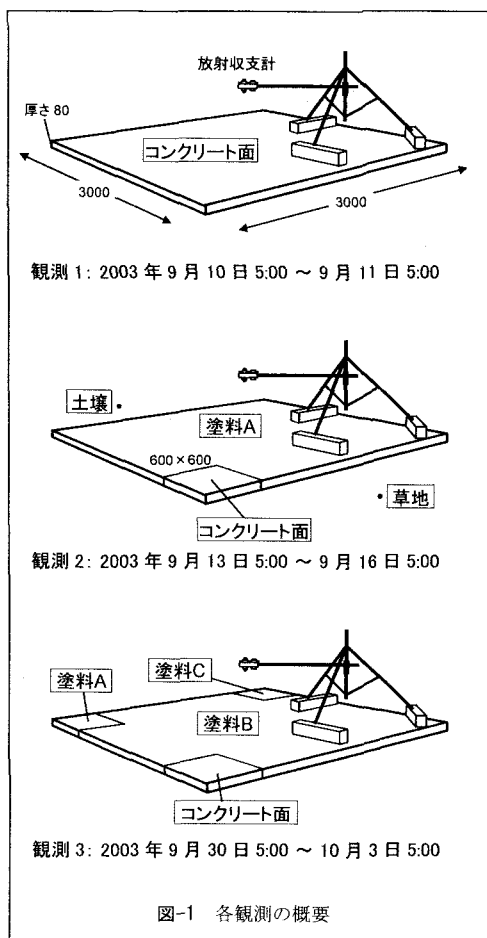
都市の表面の高アルベド化、すなわち日射反射率を高める方策により、冷房負荷軽減やヒートアイランド緩和などの効果が期待できる<sup>1,2)</sup>。都市の高アルベド化の効果について主にアメリカのLawrence Berkeley National Laboratoryなどを中心に数多くの評価が行われてきたが<sup>3,4)</sup>、日本の気候条件における評価事例は多いとは言えない。とくに実測に基づく評価は特定の気象条件・地域条件の下で行わざるを得ないため、一般的な知見を得るには今後、評価事例を増やしていくことが必要である。また近年は白色塗料だけではなく有色の高アルベド塗料も開発されているため<sup>5)</sup>、これらの利用も検討する価値がある。例えば冷蔵倉庫の屋根などであれば、白色に塗装することで空調負荷軽減などのメリットが得られることが十分に期待できる。しかし通常の都市街区においては、眩しさによる不快感の問題や自動車運転時の安全性、街区の美的景観、建築のデザイン性といった観点から、極度の白色化は避ける必要がある。一方、有色の高アルベド塗料は、可視域は自由に調色できるが、近赤外域の反射率が高いため、同色の一般塗料よりもアルベドが高いという性質があ

る。したがって、外見上は白色化をせずに反射率を高めることが可能であり、都市街区における暑熱環境緩和・冷房負荷低減の方策として有益であると考えられる。

そこで本研究ではその適用性を検討するため、コンクリート面に色の異なる3種類の高アルベド塗料(以下、塗料A、塗料B、塗料Cと呼ぶ)を塗布し、表面温度と熱収支の変化について観測を行った。

## 2. 観測概要

本研究では図-1に示した通りの3通りの観測を行った。塗料Aは最もアルベドが高い白色塗料、塗料Bは外見上はコンクリート面とほぼ同程度の明るさである淡いクリーム色の塗料、塗料Cは外見上は明らかにコンクリート面よりも濃色の赤茶色の塗料である。これらはそれぞれ長島特殊塗料株式会社「ミラクール F200」の「クールホホワイト」、「ニューアイボリー」、「レンガ」である。観測1では、比較のためまず塗布前のコンクリート面について観測を行った。ただしこれは熱収支解析の参考データとしてのみ用いる。観測2では、最も反射率が高い塗



料Aを塗布し、塗布を行っていないコンクリート面と比較した。また、比較のため草地および土壌についても表面温度を計測した。観測3では、3種類の高アルbedo塗料（塗料A、B、C）を塗布し、これらとコンクリート面とを比較した。なお、これらの観測期間はいずれも無降水であり、いずれの日もほぼ晴天日であった。

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、塗料を塗布した。この観測サイトは国立環境研究所の「勝連トラパーチン」観測サイト<sup>6)</sup>を利用したものである。この観測サイトにおいて放射温度計（HORIBA社製、IT-340）により日中は2時間、夜間は4時間おきに表面温度を観測した。またコンクリートの中央付近に放射収支計（Kipp&Zonen社製、CNR-1）を設置し、短波・長波放射を観測した。コンクリートの脇に気象

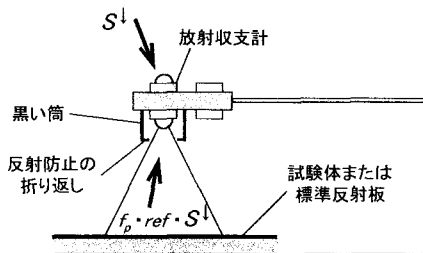


図-2 アルベドの計測方法

計（DAVIS社製）を設置し、気温・風速等の気象要素を観測した。

### 3. アルベドおよび射出率のパラメータ計測

#### (1) アルベド

各塗料およびコンクリート面のアルベドは、試験体の大きさの制約から、放射収支計の上向き・下向き短波放射量のデータからそのまま算出することは不適切であると考えられる。そこで、ここでは図-2の通りに放射収支計の短波放射センサー部分に艶の少ない黒い筒を取り付け、周辺からの反射を除去した上で反射率を計測した。ここで黒い筒のアルベドを0とし、次式よりアルベドを計測した。

$$S^{\uparrow}_P = -f_p \cdot \text{ref} \cdot S^{\downarrow} \quad (1)$$

ここで、 $S^{\uparrow}_P$ ：筒を取り付けた場合の上向き短波放射の観測値、 $S^{\downarrow}$ ：下向き短波放射、 $\text{ref}$ ：アルベド、 $f_p$ ：筒を取り付けた場合のセンサー側からみた試験体の形態係数である。ここでは $\text{ref} = 1$ とみなせる標準反射板を用いて $f_p$ を得た。この方法では鏡面反射成分については的確に計測できないが、今回の塗料やコンクリートはほぼ拡散反射面であると考えられるため、大きな誤差にはならないと考えられる。得られたアルベドは、塗料Aは0.830、塗料Bは0.640、塗料Cは0.368、コンクリート面は0.430である。

#### (2) 射出率

射出率 $\epsilon$ は長波放射を遮断するカバーを用いて計測した。カバーには放射温度計により計測するための穴を開けておき、屋外においてカバーを試験体に

被せた場合と被せていない場合について表面温度の観測を行った。その際の放射温度計の $\varepsilon$ の設定を1とした。同時に放射温度計によりカバーの温度を計測した。また、天頂角約 $50^\circ$ の方向へ向けた放射温度計により空の有効温度<sup>7)</sup>を計測した。ここで、カバーの射出率は1とし、また各試験体の射出率が波長に依存しないと仮定すれば、次式が成立する。

$$\sigma T_c^4 - \sigma T_n^4 = (1 - \varepsilon) \cdot (\sigma T_{COV}^4 - \sigma T_{SKY}^4) \quad (2)$$

ただし、 $T_c$ : カバーを被せた場合の放射温度計の観測値、 $T_n$ : カバーを被せていない場合の放射温度計の観測値、 $T_{COV}$ : カバーの表面温度、 $T_{SKY}$ : 空の有効温度である。ここで観測値から算出した $\sigma T_c^4 - \sigma T_n^4$  および $\sigma T_{COV}^4 - \sigma T_{SKY}^4$ を用い、直線回帰により $\varepsilon$ を算出した。得られた $\varepsilon$ は、塗料Aは0.960、塗料Bは0.959、塗料Cは0.962、コンクリート面は0.958である。

#### 4. 表面温度の観測結果

放射温度計による観測2、観測3の表面温度のデータを図-3に示す。なおここでは観測時の放射温度計の射出率 $\varepsilon$ の設定は1に固定し、放射収支計による下向き長波放射 $L^{\downarrow}$ および射出率 $\varepsilon$ の計測値を用いて反射成分を分離した。観測2の草地と土壌の $\varepsilon$ は文献<sup>7)</sup>よりそれぞれ0.98、0.965と仮定して計算した。

この図-3から、最もアルベドが高い塗料Aの表面温度は気温とほぼ一致して推移しており、コンクリート面と比較し日中に $10^\circ\text{C}$ 以上の温度差があることが分かる。

観測2では日中の土壌面の表面温度が突出して高いことも特徴的である。土壌はアルベドが低く熱容量が小さいことなどから日中に温度が上がりやすく、またこの観測期間は表面が乾燥していたため、非常に高温になったと考えられる。このため、塗料Aを塗布したコンクリートとは約 $20^\circ\text{C}$ の温度差が生じている。一方、草地面の温度は日中は塗料Aとほぼ同

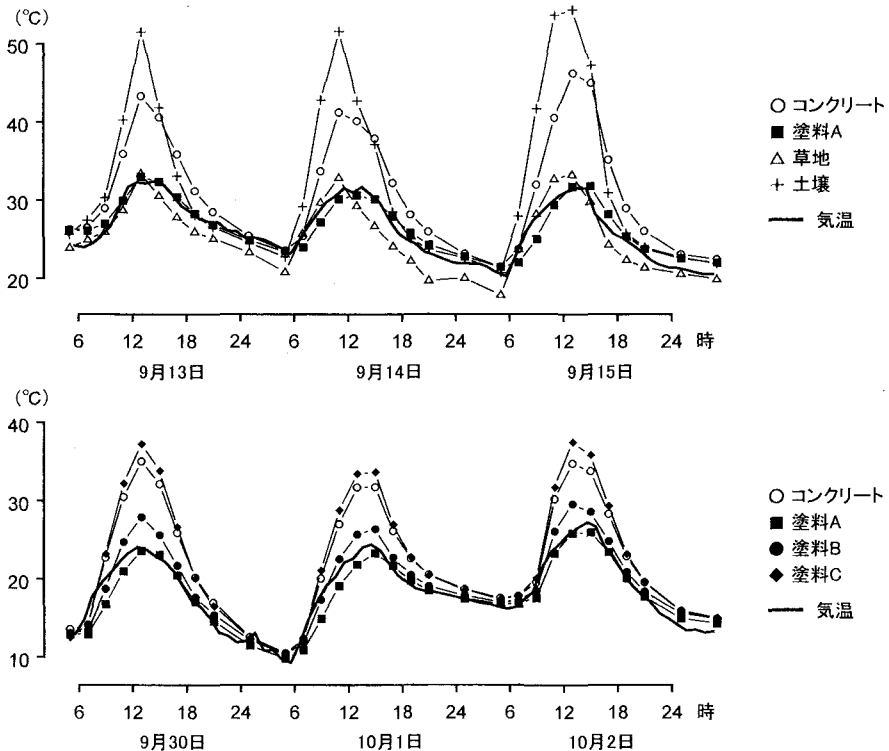


図-3 表面温度および気温の日変化 (上段: 観測2, 下段: 観測3)

程度である。これは主に草地は蒸発散の効果により表面温度が上がりにくいためであると考えられる。

観測3は躯体はいずれもコンクリートであるために日変化パターンは類似しているが、温度差はアルベドと対応して明瞭に生じている。前述した通り、塗料B、塗料Cは近赤外線を反射するため、外見上の明度の割にアルベドが高いという特性がある。このため、塗料Bは外見上はコンクリート面とほぼ同程度の明るさであるが、日中にコンクリート面より約8℃ほど低温である。また塗料Cはコンクリートと比較して明らかに濃色であるが、コンクリート面よりも日中に約2℃高い程度である。

### 5. 熱収支の観測結果

次に高アルベド塗料の塗布による熱収支変化について考察した。ここでは地表面に入射する方向を負とし、次式により正味短波放射  $S_{net}$ 、正味長波放射  $L_{net}$  を算出した。

$$S_{net} = (1 - ref)S^{\downarrow} \quad (3)$$

$$L_{net} = \varepsilon(\sigma T_s^4 + L^{\downarrow}) \quad (4)$$

ただし、 $T_s$ : 表面温度、 $L^{\downarrow}$ : 下向き短波放射である。また、観測開始時と終了時の表面温度に大きな違いがないことから、観測期間の積算値では蓄熱量は無視できると考えられる。そこで

$$\int H dt = - \int (S_{net} + L_{net}) dt \quad (5)$$

として顕熱フラックス  $H$  の積算値を算出した。この日積算の熱収支を図-4に示す。この結果、熱収支残差による日積算顕熱量では塗料Aと塗料Bが負値となっており、大きな熱収支変化が生じていることが推察される。ただしこれは残差であるためさまざまな誤差要因が集積されていると考えられるので、値についてはさらに精査が必要である。ここで、この  $H$  の日変化を明らかにするため、式(6)に示すユルゲス式<sup>8)</sup>を適用した。なお、ここでは気象データと対応させるため、表面温度は時間内挿を行い毎時のデータとした。

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

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

ここで、 $T_a$ : 気温、 $U$ : 風速である。ただし実際の対流熱伝達率は試験体の粗度や風速の観測高度等の諸要因に依存するため、ユルゲス式が適用できるかどうかはそのつど検討する必要がある。そこでユルゲス式による  $H$  と図-4の熱収支残差による  $H$  との日積算値での比較を行なった(図-5)。この図から、絶対値としてはユルゲス式の方が若干大きめであるが、概ね対応していることが分かる。この誤差は平均1.9 MJ/m<sup>2</sup>/日 (22 W/m<sup>2</sup>) であった。このユルゲス式による  $H$  の日変化を図-6に示す。この図から、コンクリート面や塗料Cからの  $H$  は日中に大きく、ピーク時は100~120 W/m<sup>2</sup>に達している。これに対し、塗料Aはとくに午前中の温度上昇時を中心に負の値になっている。塗料Aの表面温度は気温とほぼ一致しているが、若干のタイムラグが生じているため(図-3参照)、こうした結果となった。塗料Aは日射の大半を反射するため日の出の後すぐには塗布面の温度は上昇しないが、気温は周辺の表面温度に影

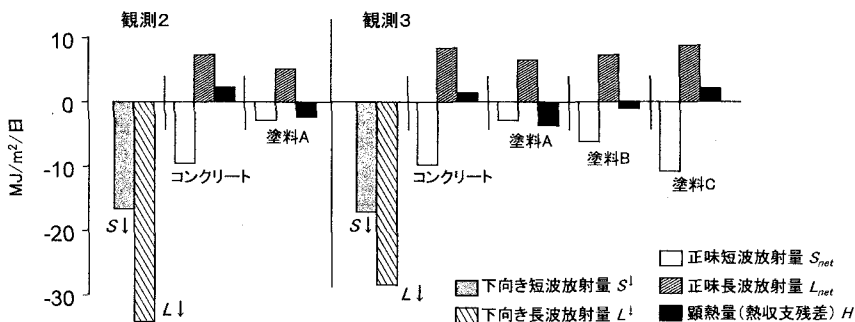


図-4 観測2、観測3における各熱収支要素の日積算値

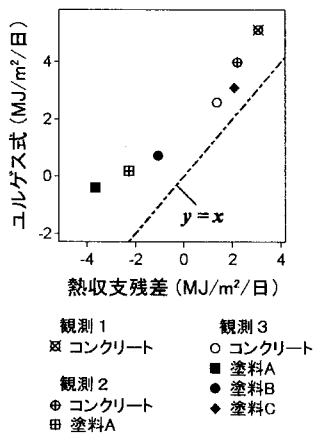


図-5 日積算顕熱量の比較

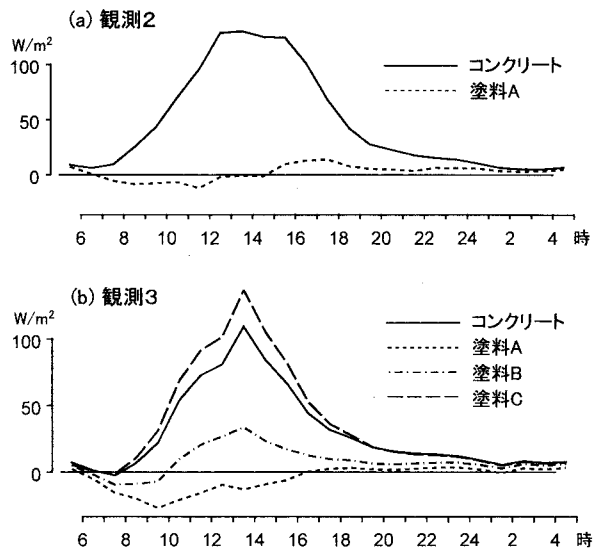


図-6 顕熱フラックスの日変化 (3日間の平均値)

響されて上昇するため、大気からの顕熱により塗布面の温度が上昇していると解釈できる。ただしこれは気温変化が無視できるような小さな面に塗布したために得られた結果である。したがって、より広域に普及した場合には気温低下効果が大きく生じ、それに対応して表面温度の変動もさらに小さくなることが予想される。

## 6. おわりに

本研究では白色塗料（塗料A）および近赤外域の反射率が高い有色の高アルベド塗料（塗料B、塗料C）をコンクリート面に塗布し、表面温度と熱収支の観測を行った。

塗料Aの表面温度は、日中・夜間とも気温とほぼ一致し、塗布を行っていないコンクリート面とは日中に10℃以上の温度差が生じた。また、この塗布面は草地の表面温度とほぼ同程度であり、乾燥した土壌面との温度差は日中に約20℃に及んだ。また外見上はコンクリートとほぼ同程度の明度であった塗料Bの塗布面の表面温度は、コンクリート面より日中に8℃ほど低温であった。コンクリートよりも明らかに濃色であった塗料Cの塗布面でも、コンクリート面より約2℃高い程度であった。

熱収支解析の結果、午前中の温度上昇時は塗料Aの塗布面では大気から塗布面への下向き顕熱フラッ

クスが生じ、これにより表面温度が上昇していることが示された。ただしこれは気温変化が無視できるような小さな面に塗布したために得られた結果である。したがって広域に普及した場合に生じる気温低下効果は、観測された表面温度の日変化から予想される以上に大きなものとなる可能性がある。この点については今後、都市気候シミュレーションなどの手法による大気との相互作用を含めた評価が必要である。著者らは今後、本研究の成果を活用し、より広域に普及した場合のヒートアイランド緩和や省エネルギー効果についてシミュレーション評価を行う予定である。

**謝辞：**本研究を進めるにあたり産業技術総合研究所の近藤裕昭氏、玄地裕氏、井原智彦氏、株式会社富士総合研究所の亀卦川幸浩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。反射除けの筒を用いたアルベド計測方法は電力中央研究所の田村英寿氏にアドバイスを頂きました。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。

## 参考文献

- 1) 近藤靖史, 長澤康弘, 入交麻衣子: 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, Vol. 78, pp. 15-24, 2000.
- 2) 二階堂稔, 寺内伸, 水野民雄, 石原真興, 館山陽介 : 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, pp. 625-626, 1999.
  - 3) Akbari, H., M. Pomerantz and H. Taha : Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas, *Solar Energy*, Vol.70, No.3, pp.295-310, 2001.
  - 4) Taha, H., St. Konopacki and S. Gaberseck : Impacts of large-scale surface modifications on meteorological conditions and energy use: a 10-region modeling study, *Theor. Appl. Climatology*, Vol.62, pp.175-185, 1999.
  - 5) 深江典之 : 遮熱塗料の遮熱機能と省エネルギー効果, 省エネルギー, Vol. 55, No. 10, pp. 27-32, 2003.
  - 6) 一ノ瀬俊明, 新津潔, 小野塚孝, 神野充輝 : 勝連トラパーチン舗装工のヒートアイランド現象抑制効果の定量化研究, 土木学会 地球環境シンポジウム講演論文集, pp. 233-240, 2004.
  - 7) 近藤純正 : 地表面に近い大気科学, 東京大学出版会, 東京, 324pp., 2000.
  - 8) 近藤裕昭 : 人間空間の気象学, 朝倉書店, 東京, 156pp., 2001.

## CHANGE OF SURFACE TEMPERATURE AND HEAT BUDGET OF CONCRETE BY THE HIGH-ALBEDO PAINTS COATING

Yujiro HIRANO, Kiyoshi NIITSU, Yukitaka OHASHI and Toshiaki ICHINOSE

In order to evaluate the effect of increasing urban albedo on urban thermal mitigation, we measured the changes of surface temperature and heat budget due to high-albedo painting. The observations were made with the concrete blocks settled on the grounds in an area of 3 m square. We coated high-albedo paints to these concrete blocks and measured surface temperature, downward shortwave and longwave radiations, air temperature, and wind speed. We also measured albedos and emissivities of each paint and bare concrete surface. The observation result showed that the daytime surface temperature of white-painted blocks was more than 10 °C lower than that of bare concrete. Additionally, the analytic results of surface heat budget showed that the downward sensible heat flux from air to white-painted blocks appeared in the daytime.