

湿潤舗装システム「打ち水ペープの開発」(その3)

—— 温熱環境評価と実務への適用 ——

赤川 宏幸 小宮 英孝

Development of Wet Pavement System "UCHIMIZU-PAVE" (Part 3)

—— Evaluation of Thermal Environment and Application to Practical Work ——

Hiroyuki Akagawa Hidetaka Komiya

Abstract

"Uchimizu-Pave" is a wet pavement system that decreases emission of thermal radiation from a pavement, thus improving its thermal condition in summer. This report describes (1) heat balance simulation for estimation of thermal diffusion coefficient of materials and surface wetness, (2) evaluation of thermal environment by subjects, and (3) the applied system in actual works. Thermal parameters make it possible to estimate the thermal effect under other weather conditions. The thermal sensation votes by subjects on asphalt and those on Uchimizu-Pave shown to be different and the effect of Uchimizu-Pave is demonstrated on the basis of human sensation. A culvert water supply system and its application to a slope are introduced. "Uchimizu-Turf" is the another type of Uchimizu-Pave that uses artificial grass with sand as the surface material.

概要

舗装面の蒸発冷却により輻射熱を減少させて夏の屋外暑熱環境を改善する湿潤舗装システム「打ち水ペープ」に関して、第一報¹⁾の基本システムの機能評価につづき、温熱環境の性能評価と応用システムについて報告する。まず舗装面の熱収支に関して、熱収支計算を行い、表面での熱バランスをアスファルトと比較し、熱拡散率や蒸発率と言った熱物性値を推定した。温熱環境評価では、打ち水ペープ上の被験者を対象に温冷感、快適感等の申告実験を行った。アスファルト上と比較をしたところ、申告値は打ち水ペープの効果を有意に示すものであった。実際の物件においては、第一報で紹介したような基本システムの応用として、給水部を暗渠化した方法や、斜面に対応した給水方法、また砂入り人工芝に応用した「打ち水ターフ」について紹介する。

1. はじめに

湿潤舗装システム「打ち水ペープ」は、舗装面下にある水を、導水シート、サンドクッション、および舗装材の毛細管現象を利用して舗装面まで引き上げ、表面を常に湿潤状態に保つシステムである。蒸発冷却によって表面温度は夏季日中で乾燥時よりも約10℃、アスファルトよりも約25℃低くなる¹⁾。また散水と異なり、蒸発に必要な水量だけを供給するため経済的と言える。使用しない季節は水を供給せず、通常の舗装として使用する。標準システムの断面図はFig.1の通りである。

Wは後述の熱収支計算の結果から0.70と仮定した。

第二の方法では、蒸発計の測定値から潜熱流束を求める式(4)を用いた。ここでは蒸発率 W (舗装表面からの蒸発量/蒸発計の蒸発量)を蒸発計基準の蒸発率とし、前者と同様に0.70と仮定した。2つの方法で算出した1日の積算潜熱流束は前者が3370Wh/m²・day、後者が3000Wh/m²・dayと両者の差は比較的小さい。従って1日の平均潜熱流束は蒸発計から推定することも可能である。

Fig.2は各舗装表面における熱収支の日変化を示す。各熱収支項の計算には式(1)~(3), (5), (6)を用いた。ただし、アスファルト面からの潜熱流束は0と仮定し

2. 熱物性値の推定

2.1 舗装表面の熱収支

打ち水ペープからの潜熱流束 HL を既存の経験式を用いる方法、および蒸発皿を用いる方法で算出した。第一の方法では、式(1)のように舗装表面と空気の水蒸気圧差から求めた。表面の湿気伝達率 α_w はルイスの式(2)から、熱伝達率 α_c はユルグスの式(3)から求めた。蒸発率

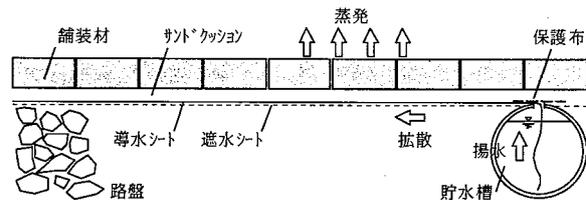


Fig.1 「打ち水ペープ」標準断面図
Sectional Figure of Standard "Uchimizu-Pave"

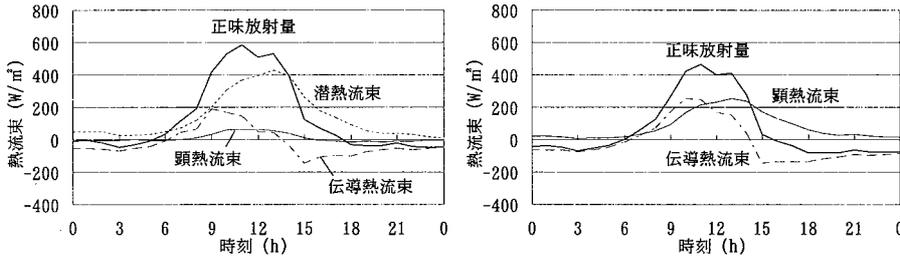


Fig.2 熱流束の日変化 (1998年8月23日) 打ち水ペーパー (左) アスファルト (右)
Diurnal Variations of Heat Fluxes Uchimizu-Pave(L) Asphalt(R)

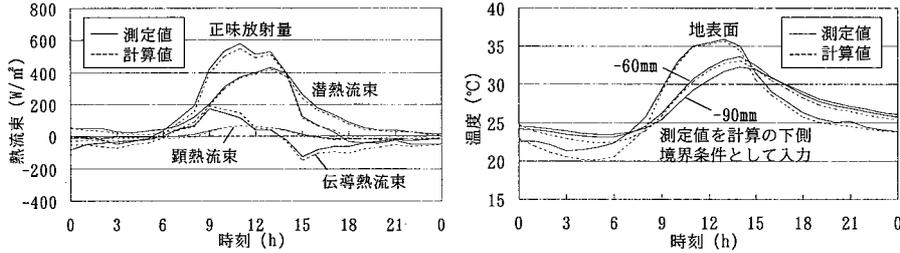


Fig.4 測定値と計算値の比較 (1998年8月23日) 熱流束 (左) 断面温度 (右)
Comparison of Measurement and Calculation Heat Fluxes(L) Ground Temperature(R)

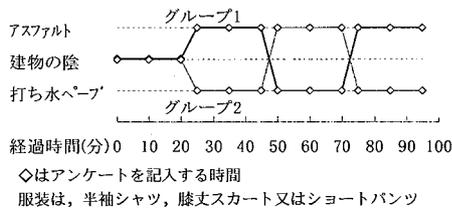


Fig.5 実験スケジュール
Time Chart of Experiment

| | 温冷感 | 快適感 | 放射感 | 発汗感 |
|----|------|------|------|------|
| 顔面 | 寒い 1 | 不快 1 | なし 1 | なし 1 |
| 腕 | 中立 4 | 中立 4 | あり 5 | あり 5 |
| 胸体 | 暑い 7 | 不快 7 | なし 1 | なし 1 |
| 大腿 | 不快 1 | 不快 1 | あり 5 | あり 5 |
| 下腿 | 不快 1 | 不快 1 | あり 5 | あり 5 |
| 全身 | 不快 1 | 不快 1 | あり 5 | あり 5 |

Fig.6 アンケート項目と
カテゴリースケール
Questionnaire and Category Scale

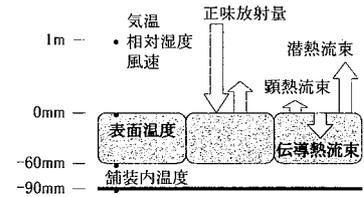


Fig.3 熱収支計算の概念図
Heat balance Component

式 Equations

$$\begin{aligned}
 HL &= (V_a^* - V_{sat}(T_s)) l \alpha_w W & (1) \\
 \alpha_w &= (0.622 / 760) (\alpha_c / C_p) & (2) \\
 \alpha_c &= 1.163 (5.3 + 3.6 U_a^*) & U_a^* < 5.0 & (3) \\
 HL &= l E_g W / 3600 & (4) \\
 HS &= \alpha_c (T_a^* - T_s^*) & (5) \\
 G &= Rn^* - HS - HL & (6) \\
 Rn &= HS + HL + G & (7) \\
 Rn &= (1 - a) \Gamma + L - \epsilon OT_s^4 & (8) \\
 HS &= \alpha_c (T_a^* - T_s) & (9) \\
 HL &= (V_a^* - V_{sat}(T_s)) l \alpha_w W & (10) \\
 G &= -\lambda \partial T / \partial z & (T_{90}^* \text{を境界条件}) & (11) \\
 C_p \rho \partial T / \partial t &= \lambda \partial^2 T / \partial z^2 & (12) \\
 T_{a^*} - T_s^* &= 0.93 T_{a^*} - T_s + 0.07 T_{z1} & (13) \\
 T_{z1(0)} &= 0.52 T_{z1} + 0.48 T_{a^*} - T_s & (14)
 \end{aligned}$$

*は実測値。記号は慣例に従う。

Table 1 測定概要
Outline of Measurement

| 測定項目 | 測定器 |
|-----------|----------------------------------------------|
| 気温 | T型熱電対 (φ0.2mm) |
| 相対湿度 | 高分子式湿度センサ 精度±2%RH |
| 風向・風速 | 風速センサ 0~45m/s, 精度0.1m/s 風向センサ 0~360°, ±4° |
| 日射量 | 日射計 精度0.1%/°C |
| 正味放射量 | 正味放射計 精度±5% |
| 黒球温度 (注1) | クレープ球 (φ15cm) T型熱電対 (φ0.2mm) |
| 舗装表面温度 | 放射温度計 (ε=0.95) |
| 舗装内温度 | T型熱電対 (φ0.3mm) |
| 皮膚温 | 放射温度計 (ε=0.95) |

た。また地中への伝導熱流束 G は熱収支式の残差に等しいと仮定した。アスファルトの方がアルベド(日射反射率)が小さいが、正味放射量 Rn は、打ち水ペーパーの方が最大 $100W/m^2$ 程度大きい。これはアスファルト表面からの輻射が大きいからである。顕熱流束 HS は打ち水ペーパーが日中最大で約 $70W/m^2$ であるのに対し、アスファルトは $260W/m^2$ であり、後者の方が大気を加熱する量が多いことが分かる。打ち水ペーパーからの潜熱流束は最大で約 $430W/m^2$ であり、受け取った熱の大部分を潜熱として放出していることが分かる。

2.2 熱拡散率と蒸発率の推定

熱収支の測定時に、舗装システム内の温度を鉛直に3点(0, -60, -90mm)測定した。ここでは断面温度分布と熱収支項に関して、実測値と計算値との誤差をできるだけ小さくするような材料の熱拡散率と、表面の蒸発率を試行錯誤的に求めた。地表面における熱収支計算は式(7)~(11)を用いた。また、一次元熱収支計算の概念図をFig.3に示す。大気放射量 L にはプラントの式を、湿気伝達率、熱伝達率にはそれぞれ式(2), (3)を用いた。アルベド a は実測から0.16とした。舗装材料中の断面温度分布は、式(12)をクラックニコルソンの差分スキームで解いた。下側境界は-90mmの温度の測定値を用いた。また舗装材料中の水分移動は解かず、水を含んだ材料の物性値を扱うこととした。水分を含んだ舗装材とサンド

クッションの熱拡散率 $\lambda/C_p \rho$ 、および舗装表面の蒸発率 W を変化させて熱収支計算をした結果、 $\lambda/C_p \rho = 0.00126 m^2/h$ (舗装材, サンドクッションとも), $W = 0.70$ の時にFig.4のように実測と計算との間の最も良い一致が得られた。この値は第一報¹⁾のモデル実験で得られた蒸発計基準の蒸発率 $W = 0.77$ に近い値である。

3. 被験者実験

3.1 目的

打ち水ペーパーの効果が人間の温冷感や快適感に対し、どの程度効果があるのかを把握するために、被験者を用いたアンケート調査による申告実験を行った。

3.2 実験方法

被験者実験は1999年7月28日, 8月3日~6日の5日間の日中(12:30~), および夕方(16:00~)に, Fig.5に示した実験スケジュールで行った(8月6日は日中のみ)。実験時はおおむね晴天であった。1回の実験の被験者はグループ1, 2それぞれ2名ずつで, 25分毎(移動5分)に, アスファルト上と打ち水ペーパー上へ移動する。初めの20分間は全員建物の陰で椅座姿勢で安静にする。各舗装上には, 日射透過のほとんどない緑色キャンパス地のパラソルを置き, 被験者はその下の椅子に座る(Photo 1)。実

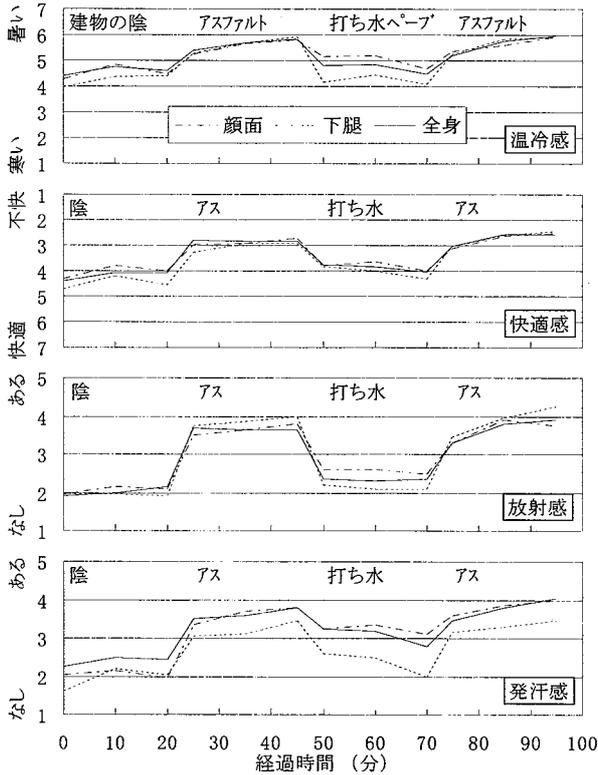


Fig.7 申告値の平均値の推移(日中, グループ1)
Time Variations of Mean Sensation Vote (Daytime, G-1)

験中, 被験者はFig.6に示すアンケート用紙を記入する。被験者の延べ人数は日中20人, 夕方16人である。被験者実験時の気象要素の測定概要をTable 1に示す。

3.3 実験結果

3.3.1 申告実験 Fig.7は温冷感, 快適感等4つのアンケート項目に関して, 顔面, 下腿, および全身の申告値の平均値の変化を示したものである。グラフは日中のグループ1の10人の平均値を示す。4つの項目全てにおいて, いずれの部位にもアスファルト上と打ち水ペーブ上の明瞭な差が見られた。特に路面に近い下腿での差は大きく, 温冷感, 快適感では(1~2)/7のカテゴリー差が見られた。ここで/7はカテゴリーのスケールが7段階であることを意味する。放射感も(1.5~2)/5のカテゴリー差が見られ, これから, 打ち水ペーブ上では輻射熱低減効果が期待できることが分かった。発汗感アスファルト上では下腿が最も低く, 他のアンケート項目と傾向が異なる。これは発汗に対し, 相対湿度(日中約50~60%)と風速(2m/s前後のことが多かった)が関係していると考えられる。夕方も日中と同様に, 全てのアンケート項目について顕著な差が見られたが, 差の大きさは若干小さかった。日中, 夕方とも打ち水ペーブ上は, 建物の陰とほぼ同じ条件であった。

Fig.8は日中の申告時のSET*^{注2)}と, 実験開始時を基準とした申告値との関係を, 温冷感と快適感について示したものである。いずれもアスファルト上と打ち水ペーブ上の分布域の違いが明確で, 回帰直線の傾きから, SET*が高くなるにつれ申告値が「暑い」, および「不快」側

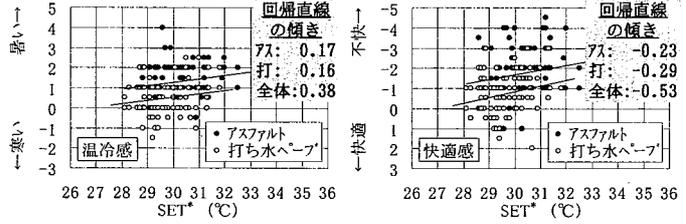


Fig.8 SET*と申告値(実験開始時基準)の関係(日中)
温冷感(左) 快適感(右)
Relation between SET* and Sensation Vote (Daytime)
Temperature Sensation (L) Comfort Sensation (R)

Table 2 温冷感等の申告値と測定環境要素との相関
Correlation between Thermal Sensation Vote and Measurement Factors

| | | 気温 | 風速 | 反射日射 | 路面温度 | 黒球温度 | 皮膚温 |
|-----|----|-------|-------|------|------|------|------|
| 温冷感 | 顔面 | 0.16 | -0.25 | 0.61 | 0.84 | 0.87 | 0.79 |
| | 下腿 | 0.11 | -0.13 | 0.65 | 0.94 | 0.90 | 0.90 |
| | 全身 | 0.21 | -0.23 | 0.69 | 0.90 | 0.91 | |
| 快適感 | 顔面 | 0.16 | -0.24 | 0.64 | 0.90 | 0.89 | 0.80 |
| | 下腿 | 0.01 | -0.08 | 0.59 | 0.91 | 0.86 | 0.86 |
| | 全身 | 0.15 | -0.19 | 0.66 | 0.93 | 0.91 | |
| 放射感 | 顔面 | 0.18 | -0.18 | 0.69 | 0.94 | 0.92 | 0.83 |
| | 下腿 | 0.08 | -0.09 | 0.64 | 0.98 | 0.94 | 0.92 |
| | 全身 | 0.13 | -0.14 | 0.66 | 0.97 | 0.95 | |
| 発汗感 | 顔面 | -0.08 | -0.03 | 0.63 | 0.86 | 0.83 | 0.66 |
| | 下腿 | -0.05 | -0.05 | 0.51 | 0.93 | 0.87 | 0.92 |
| | 全身 | -0.02 | -0.11 | 0.55 | 0.88 | 0.85 | |

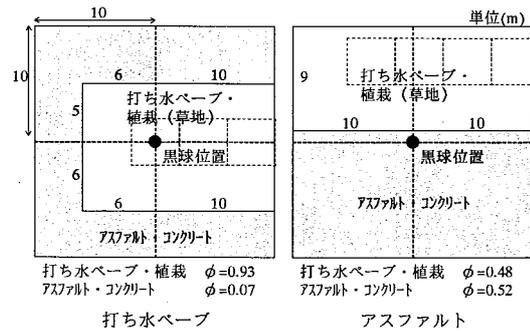


Fig.9 黒球から見た形態係数
Shape Factor from Black Globe

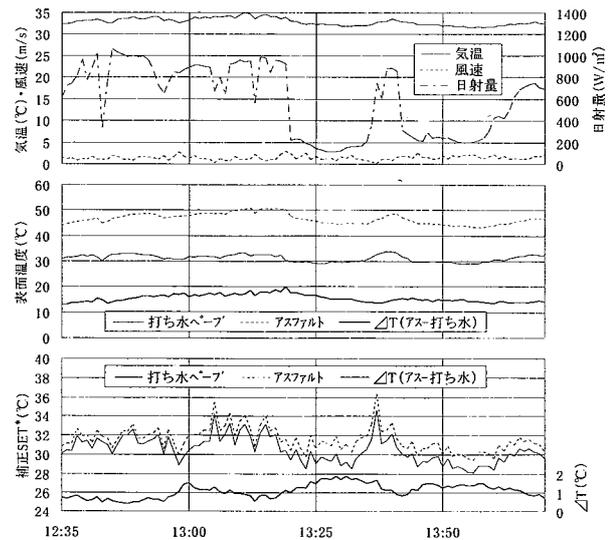


Fig.10 気象測定結果と補正SET*(1999年8月5日)
Meteorological Data and Corrected SET*

注1) 直径15cmの黒色中空金属球の中心温度。路面上高さ50cmに設置した。
注2) 標準新有効温度。風速, 気温, 相対湿度, グローブ温度(黒球温度), 着衣量(0.5), 代謝量(1.2)から計算される温熱指標。

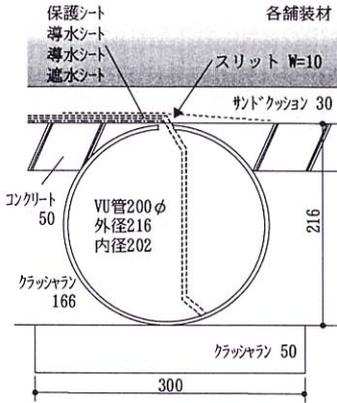


Fig.11 暗渠型給水部断面
Sectional Figure of
Culvert Water Supply System

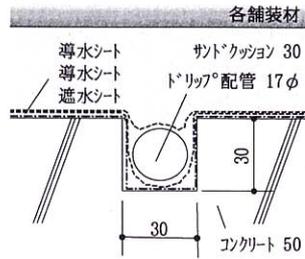


Fig.12 斜面对応型給水部断面
Sectional Figure of the
System Applied to Slope



Photo 1 被験者実験の様子
Subjects under the Sunshade



Photo 2 改良型実証モデル
Reformed Mock-Up Model

へ移動することが分かる。アスファルト上と打ち水ペーブ上との差は申告値でおおむね1/7カテゴリーである。

Table 2は温冷感等の申告値と測定要素との相関を示す。網掛部は相関係数0.9以上である。気温、風速、反射日射は被験者に直接影響を及ぼすと考えられる項目であるが申告値との相関は小さい。路面温度、黒球温度、皮膚温は申告値との相関が高く、特に下腿の値が高い。

3.3.2 SET*の補正 Fig.9は被験者実験を行った場所周辺の概略平面図である。黒球から見た打ち水ペーブ、およびアスファルトの実質の形態係数を求め、近似式(13)、(14)から形態係数がそれぞれ1の時の黒球温度を推定した。ここで、 T_{a-c} 、 T_{ra} は補正後(下方に対する形態係数が1の時)の各舗装上の黒球温度(摂氏)、 $T_{a-c(e)}$ 、 $T_{ra(e)}$ は実際に測定で得られた黒球温度である。この時、表面温度の日変化傾向から、コンクリートはアスファルトで代表し、同様に草地は打ち水ペーブで代表した。実測では、黒球は被験者と同様にパラソルの陰に置いた。 T_{a-c} から算出した打ち水ペーブ上の補正後のSET*を測定データとともにFig.10に示す。日射量の変動とそれによる路面温度、反射日射の変動に追従し、補正SET*も変動している。アスファルト上と打ち水ペーブ上の補正SET*の差は日射量の多い時に1°C程度、曇った時に1.5~2°C程度となる。補正SET*の差が2°Cの時、前述のFig.8の回帰直線の傾きから、温冷感で最大0.76/7カテゴリー、快適感で1.06/7カテゴリーの差となる。

4. 実用化

4.1 給水部の暗渠化と斜面のある場所への適用

第一報¹⁾で紹介した基本システムでは給水部が側溝を兼ねており、雨水の利用等も考慮していたが、機能評価の結果、塵や砂の流入や植物の繁茂等の恐れが生じた。そこでFig.11に示すように直径約20cmの塩ビ管を暗渠化したものを貯水槽とする方式を考案した。この方式では水頭差10cm程度の勾配まで適用可能である。

また、さらに勾配のある場所では貯水槽を複数設置しなければならないことから、貯水槽は別に設け、配管を通じて給水する方式を考案した(Fig.12)。配管には灌水

に使われる定量点滴方式のものを採用し、蒸発量に見合った水量を給水制御する。使用水量は少量(夏季で約5 $\mu\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}$)なので、工業用水を含む市水を用いる方が経済的な場合もある。

4.2 人工芝タイプ「打ち水ターフ」の開発

Photo 2は4.1項の給水システムを採用した実証モデルである。手前の人工芝タイプのものは、舗装材、サンドクッションの代わりに砂入り人工芝を用いたものである。乾燥した砂入り人工芝との表面温度差は、夏季日中で約12~15°C程度となり、打ち水ペーブよりも蒸発冷却が大きく、温冷感に対する効果も同等以上と言える。

5. まとめ

実測と熱収支計算によって、打ち水ペーブの材料の熱拡散率と表面の蒸発率を推定した。これにより任意の気象条件、反射率などに対する温度特性を推定することが可能となった。また打ち水ペーブの温冷感、快適感等に対する評価を、被験者による申告実験によって行った。これにより打ち水ペーブの人体への定量的効果を把握することができた。実務への適用として、暗渠型や斜面对応型の給水部の設計断面を提案した。またシステムの応用として、人工芝タイプの「打ち水ターフ」を開発した。

参考文献

- 1) 赤川, 小宮, 他: 湿潤舗装システム「打ち水ペーブ」の開発(その1), 大林組技術研究所報, No.58, (1999.1)