

感温性を有する保水性舗装による ヒートアイランド緩和効果に関する研究

三坂 育正* 成田 健一** 綿貫 良太**
横山 仁 山口 隆子 石井康一郎
(*株式会社竹中工務店技術研究所 **日本工業大学工学部)

要 旨

ヒートアイランド対策として適用される保水性舗装に関して、雨水の有効活用の観点から、感温性を有するシステムを開発し、その熱収支特性や蒸発効率を指標とした蒸発特性に関する評価を行った。実験結果より、開発した舗装システムでは、蒸発による効果で表面温度の上昇抑制や顕熱フラックス低減の効果があり、また、感温性を有することでその効果が持続することも確認できた。

キーワード：保水性舗装、蒸発効率、感温性、ハイドロゲル

A Study of Mitigating Urban Heat Island by Water Retentive Pavement System with Thermo-Sensitive Hydro Gel

MISAKA Ikusei *, NARITA Ken-ichi **, WATANUKI Ryota **
YOKOYAMA Hitoshi, YAMAGUCHI Takako, ISHII Koichiro
* Takenaka Corporation R&D Institute,
** Nippon Institute of Technology

Summary

To evaluate the effects of mitigating urban heat island by thermo-sensitive pavement system, which is, developed from the point of view of using rainwater effectively, basic experiment about evaporation efficiency using as an index of thermal and evaporation characteristics was carried out.

The results of heat balance analysis show the latent heat consumption of evaporation at pavement system to prevent increase sensible heat. The effect mitigating urban heat island by this pavement system was confirmed and this effect is found to be kept up by thermo-sensitivity.

Key Words : Water retentive pavement, Evaporation efficiency, Thermo-sensitive, Hydro gel

1 はじめに

近年、都市域がその周辺地域よりも高温となる、いわゆるヒートアイランド現象は、熱中症患者の増加や熱帯夜日数の増加に伴う健康影響、都市型集中豪雨による洪水や冷房負荷増大に伴うエネルギー消費量の増加など、大きな社会問題となっている。ヒートアイランド現象の主な形成要因の一つとして、都市化に伴う地表面の不透水化がある。この対策として植物の蒸発散効果を利用した屋上緑化や都市緑化が注目されており、国や自治体の指導の下、広がりを見せている。特に屋上緑化に関しては、システム開発と併せて、その効果について多くの研究例が報告されている^{1, 2)}。しかしながら、都市部における限られた緑化スペースを踏まえると、より効果的な地上の緑化の普及は、容易ではないと考えられる。

そこで、近年、蒸発効果により路面温度の上昇を抑制する保水性舗装が注目されている。車道部での活用を前提とした特殊舗装工法の開発が進められており、これらの代表的なものとしては、地下水の涵養や都市型洪水の防止を目的とした透水性舗装や、舗装表面に水膜が張ることを防ぐための排水性舗装がある。しかし、これらの舗装は表層に水分を保持する機能が無いため、持続的な蒸発冷却は望めない。一方、近年開発が進む保水性舗装は、降雨などで供給された水分を舗装内の保水材で保持し、長時間の蒸発冷却を意図したものである。既往の研究例として、表面温度の低下など保水性舗装による効果の一部が報告されているが、効果の持続性、特に蒸発冷却効果の持続性に関しては、十分な検討がなされているとはいえない。東京都では、保水性舗装に対して、散水車による散水を行うことで水の供給を行っているが、東京における7、8、9月の降水量の平年値は、それぞれ161、155、208 mmであり、これらを有効に活用できれば、1日5 mm程度の蒸発を連続的に達成できることになる。

本研究では、従来の道路に使用されるアスファルト系の保水とは別に、歩道や建物の外構部において使用でき、さらに雨水の有効利用の観点から貯水機能と、感温性による蒸発の効率化を図った保水性舗装システムを考案し、その保水性能評価を屋外にて実施した。本報告の特徴は、蒸発効果を直接表す「蒸発効率」を指標に、効果の持続性を施工現場で確認できる評価手法を提案している点にもある。

2 感温性を有する舗装技術

今回実験に使用した舗装技術の断面構成を図1に示す。この舗装技術は主に歩道部分での適用を想定している。

インターロッキングブロックの下部に設置した厚さ50 mmのウレタンマットには貯水機能としての役割を期待しており、水分の有効利用を図る目的で、ウレタンマットには感温性ハイドロゲル^{3, 4)}を充填している。ここでいうハイドロゲルとは、水溶性ポリマーの網目構造と水からなるやわらかい構造体で、紙オムツ等に使われる高吸水性ポリマー、食品のゼラチン、寒天などがこれにあたる。その中でも、感温性ハイドロゲルとは、低温で水を吸収・保持し、特定の温度（以下感温点と呼ぶ）を超えると吸収保持していた水を外部に排出する感温性の吸排水性樹脂である（図2）。具体的には、N-イソプロピルアクリルアミド等のN-アルキルアクリルアミドを主成分モノマーとして重合架橋させた樹脂等を例示することができる。このタイプの感温性ハイドロゲルは、N-アルキルアクリルアミドと共重合するモノマーを適当に選択することにより、感温点を任意に設定することが可能になる。

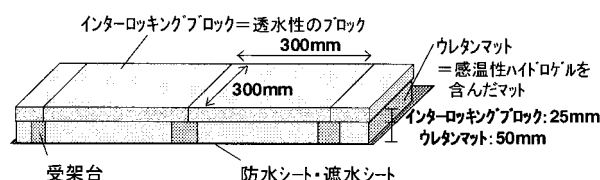


図1 感温性を有する舗装の断面構成

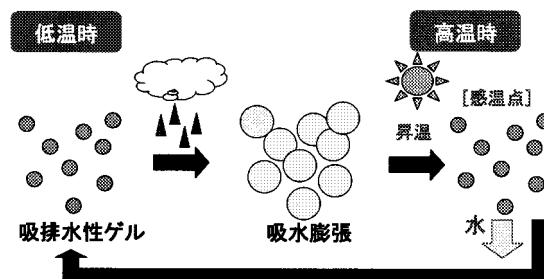


図2 感温性を有する吸排水性樹脂の特性

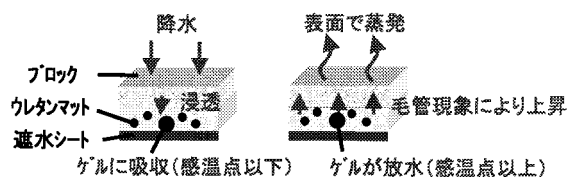


図3 感温性を有する舗装の機能

なお、今回の実験で用いた吸排水ハイドロゲルの感温点は、20、25、30、35℃が1：3：5：4の比率でブレンドされている。ウレタンマットには1リットルあたり10gのハイドロゲルが含まれており、吸水倍率を100倍とすると、吸水量は約50mmである。

今回の舗装に期待する機能・効果の概念図を図3に示す。雨天時には、低温であるためハイドロゲルが雨水を吸収し、晴天時温度が上昇すると水を放出する。放出された水は、インターロッキングブロックの毛細管力で表面に上昇し、蒸発冷却により表面温度の上昇を抑制する効果が期待される。

3 実験概要

(1) 試験体および測定方法

実験は、東京都環境科学研究所（東京都江東区）自動車排ガス実験棟屋上に試験体を施工して行った。舗装システムの試験体は、図1に示した断面構成に従って2004年8月9日に施工した。なお、試験区の大きさは、各辺にインターロッキングブロック（300×300mm）を10枚並べることで、3m×3m=9m²とした。試験体の写真を図4に示す。

測定は、日射量、気温・湿度、風向・風速および降

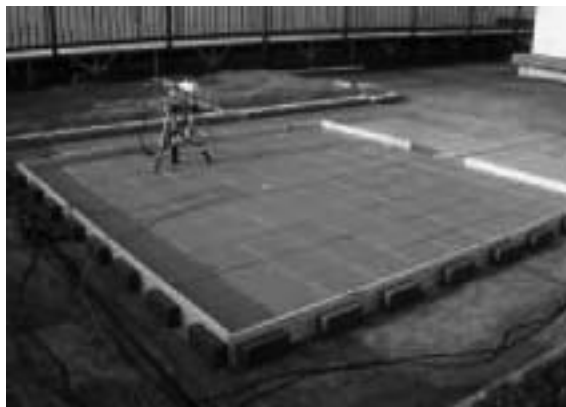


図4 試験体設置状況

表1 測定項目と測定方法・機器

測定種別	測定項目	測定機器	点数	備考
外界条件	気温・湿度	高温湿度計 DVS-HMP-45D	1	測定タワーを設置
	風向・風速	風車型風速計 DVS-S103	1	
	雨量	放射式雨量計 DDT-34T	1	
放射特性 温熱環境	上・下長波放射量	長波放射計 MR-40	1	
	表面温度	赤外線熱電計 IR-L/C SV-T-65F	1	
	サーモカメラ	TH702	1	
	地中温度	T型熱電対 T-TC0	3	
	伝導熱量	熱流計 CPR-PHF-G1	3	
データ収集	データロガー	データロガー D-12H10X	1	1分間隔でサンプリング
	データロガー	データロガー D-12H10X	1	
濾紙実験	伝導熱量	超微量熱流計 DA500-3TV	1	試験体上面1点
	表面温度	サーモカメラ	1	
	湿度	電子天秤	1	実験開始前値
	データロガー	データロガー	1	1分間隔でサンプリング

雨量などの外界条件と、試験体の放射特性や熱収支特性を評価する項目について行った。測定項目、データのサンプリング間隔、測定機器等に関しては表1に示す通りである。通常の舗装との効果を比較する目的で、建物屋上面についても、放射収支や温度・伝導熱流の計測を実施した。試験体に設置した測定機器の測定位置については図5に示す。

実験は、試験体施工後の2004年8月14日から連続で計測を行った。試験体には、施工直後の8月10日に30mmの散水を行ったが、その後人工的な散水は行わず、散水は降雨のみで賄うこととした。

(2) 伝達率評価のための濾紙実験

濾紙実験は、舗装表面における熱伝達率・物質伝達率を評価する目的で実施した。測定項目および方法は表-1に示す通りである。測定は、2005年2月15日から3月20日までの天気の良い日に行った。なお、1回の実験に要した時間は30～40分であった。

4 気象状況および表面温度特性

実験は、試験体設置後8月14日から連続で9月22日まで行った。この実験期間中の天候は、8月中旬は比較的晴れの日が多く、最高気温も30℃を超える日が続いたが、その後8月後半から9月中旬にかけては雨天が多く、最高気温が30℃に達する日も少なかった。その後、9月中旬では降雨のない日が10日ほど続いた。

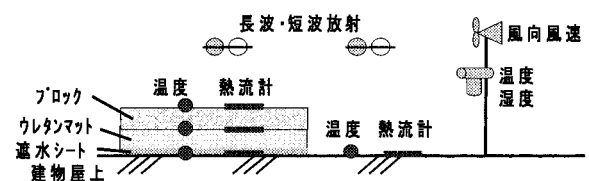


図5 測定項目と測定点

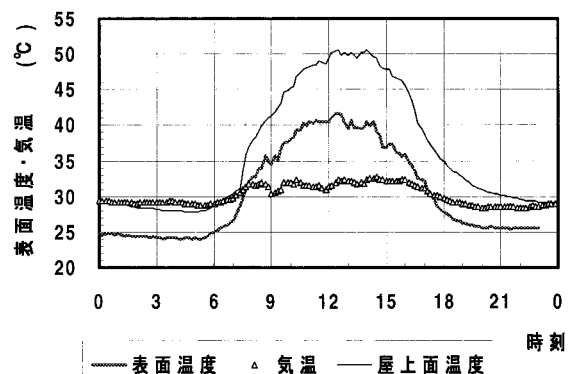


図6 気温・表面温度の経時変化（8月19日）

詳細の解析は、天候に恵まれた日の中から、8月19日を対象として行った。8月19日における気温と試験体表面温度および屋上面の温度の経時変化を図6に示す。図より、屋上面では日中に表面温度が50℃を超えているのに対し、舗装システムの表面温度は40℃と10℃程度表面温度が低く維持されていることが確認できる。また、夜間においては、屋上面温度は気温とほぼ同じであるのに対し、舗装表面温度は気温より5℃程度低く推移している。以上の結果から、本舗装システムは、表面温度の上昇を抑制し、周辺の暑熱環境を緩和する効果を有していることが期待できる。

5 舗装システムの蒸発特性評価

(1) 舗装面の熱および物質伝達率

本研究では、保水性舗装の保水性能評価指標として、水面蒸発量に対する舗装材蒸発量の比で表わされる蒸発効率(β)を用いる。ここでは、濾紙面蒸発量を利用した物質伝達率(k)の測定⁵⁾から熱伝達率(α)を求めることとした。算出にあたって用いる式は下記に示す通りである。

$$k = E / \Delta x \quad \text{--- (式 1)}$$

k: 物質伝達率 [kg/(m²・s・(kg/kg'))]

E: 蒸発速度 [kg/m²・s]

Δx: 表面と大気の絶対湿度の差 [kg/kg']

$$\alpha / C = 0.83 k \quad \text{--- (式 2)}$$

α: 対流熱伝達率 [W/m²・K]

C: 湿り空気比熱 [J/kg・K]

$$H = \alpha (\theta_s - \theta_a) \quad \text{--- (式 3)}$$

H: 顕熱フラックス [W/m²]

θ_s: 表面温度 [℃]

θ_a: 外気温度 [℃]

$$L = 2.5 \times 10^6 - 2400 \times \theta_s \quad \text{--- (式 4)}$$

L: 気化の潜熱 [J/kg]

$$Rn = H + G + LE \quad \text{--- (式 5)}$$

Rn: 正味放射量 [W/m²]

G: 伝導熱フラックス [W/m²]

LE: 潜熱フラックス [W/m²]

$$E = \beta k (x_s - x_a) \quad \text{--- (式 6)}$$

β: 蒸発効率

x_s: 表面の絶対湿度 [kg/kg']

x_a: 外気の絶対湿度 [kg/kg']

物質伝達率(k)の測定に際しては、厚さ5mmのアクリル板に濾紙を貼り付けた60cm×60cmの試料を用いた(図7)。濾紙に滴り落ちない程度の水を含ませ、施工した試験体付近で15～30分間暴露し(図8)、その重量変化(0.1g単位で計測)から物質伝達率を算出した(式1)。重量変化量は平均で35.9gであった。蒸発面の絶対湿度の算定に必要な表面温度は、濾紙の表面直下に直径1mmのテフロン皮膜のサーミスタ

温度計を側面から挿入して測定した。延べ5日間、計27ケースのデータを取得し、物質伝達率と近傍高さ1.0mの風速との対応関係を求めた(図9)。なお、風速は、各ケースの暴露時間における平均風速とした。次に、物質伝達と熱伝達のアナロジーを仮定し、熱伝達率(α)を算出した(式2)。図10は、熱伝達率と近傍風速との関係を示したものである。物質および熱伝達率とも、近傍風速との対応関係が良いことが確認できる。通常の熱収支残差として求める顕熱フラック

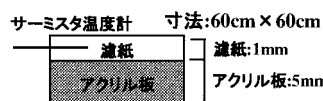


図7 濾紙法の断面図



図8 濾紙法実験状況

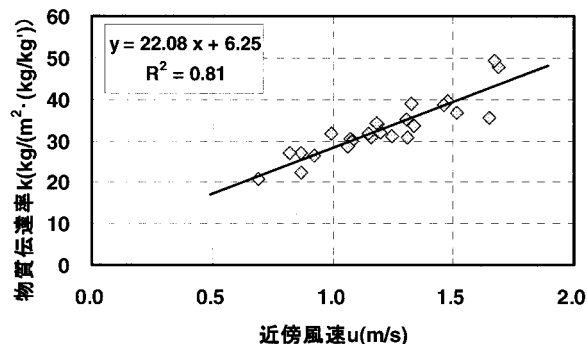


図9 物質伝達率と風速の関係

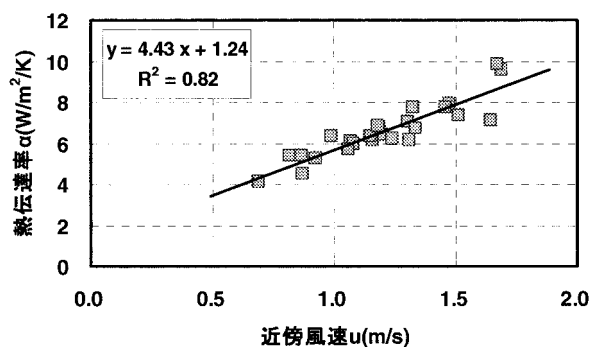


図10 熱伝達率と風速の関係

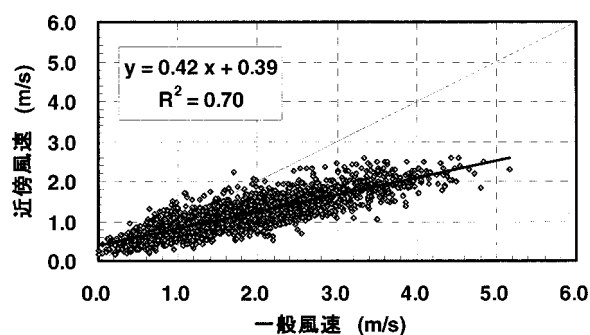


図11 一般風速と近傍風速の関係

スから対流熱伝達率を求める方法に比べ、ばらつきの少ない良好な関係が得られており、対流成分を直接測定する濾紙法の優位性が示されたといえる。図 11 に示すように、近傍風速と連続で計測した一般風速との関係も良好であったことから、一般風速を用いて伝達率の算出が可能であると考えられる。図 10 の関係により、一般風速のデータから下記に行った実験期間について熱伝達率が得られることになる。そこで、この熱伝達率および舗装システムの表面温度と気温から顕熱フラックス (H) を算出し (式 3)、熱収支式 (式 5) の残差により潜熱フラックス (LE) を求めることにした。

(2) 熱収支特性

舗装システム表面における熱収支については、熱収支式 (式 5) に従い算出した。ここで、正味放射量と伝導熱フラックスについては、長短波放射計および熱流計により直接測定を行った。顕熱フラックスは、濾紙実験で得られた一般風速と熱伝達率の関係を用いて算出し、潜熱フラックスは熱収支式の残差として算出した。なお、屋上面については、正味放射量と伝導熱フラックスを同様に直接測定し、熱収支式の残差として顕熱フラックスを算出した。

8 月 19 日における舗装面と屋上面の熱収支の経時変化を図 12 に示す。舗装面では、潜熱フラックスの値が大きく、正味放射の 80 % 程度を潜熱で消費していることにより、顕熱や伝導熱フラックスが小さくなっていることがわかる。一方で、屋上面においては、顕熱フラックスが正味放射量とほぼ同じレベルで推移しており、日中における舗装面の顕熱フラックスは、屋上面の 20 % 程度であった。このことから、本保水舗装システムでは、蒸発冷却効果によって、大気を加熱する顕熱フラックスが低減されており、ヒートアイランド現象の緩和に効果的であると考えられる。

(3) 蒸発効率を用いた蒸発特性評価

蒸発効率 β は、(式 6) に従い、熱収支式の残差で得られる潜熱フラックスと、物質伝達率と表面と外気の絶対湿度差からの蒸発速度より算出した。なお、蒸発効率は表面と外気の絶対湿度差が 0.003 (kg/kg') 以上の条件で算出した。算出した 8 月 19 日における蒸発効率と表面温度の経時変化を図 13 に示す。蒸発効率は、日中 0.4 ~ 0.5 で推移し、舗装表面は蒸発冷却により、屋上面に比べ表面温度の上昇が抑えられてい

るのがわかる。また、図 14 には蒸発効率と表面温度の関係を示す。なお、今回のシステムにおいては、感温点の異なるハイドロゲルがブレンドされており、その配合の比率から重み付けをした平均感温点は 29.2°C となる。そのため、表面温度が 25°C を越えた付近から蒸発効率が大きくなり、平均感温点の 29°C 付近で蒸発効率が 0.4 程度で安定する傾向が見られる。しかしながら、今回の実験では、表面温度がほぼ感温点以上で推移しているため、気象条件や感温点などによる

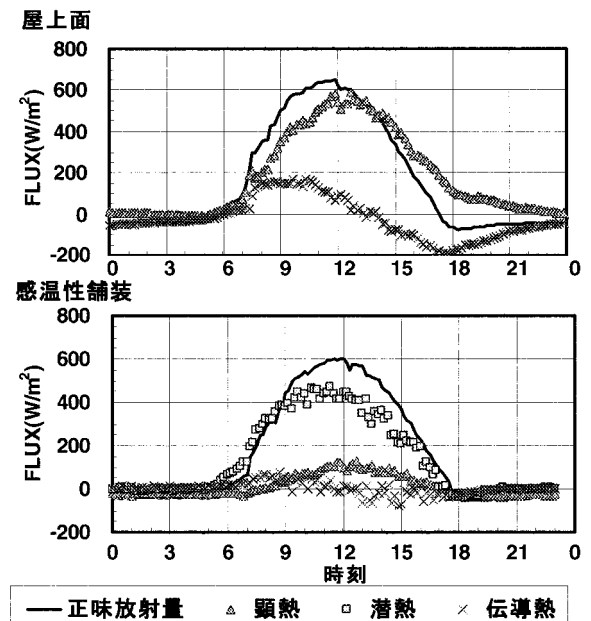


図 12 熱収支の経時変化 (8 月 19 日)

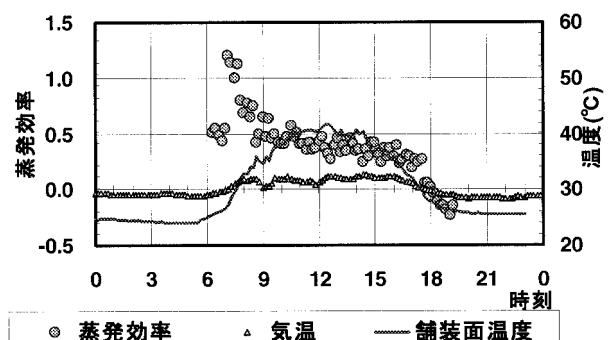


図 13 蒸発効率と気温・表面温度の経時変化 (8 月 19 日)

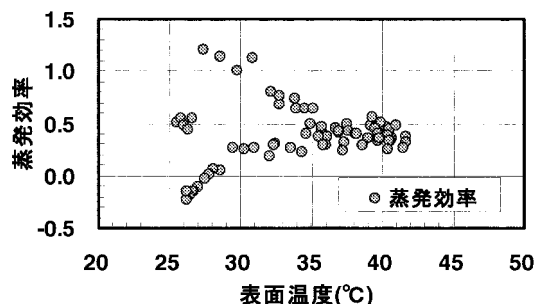


図 14 蒸発効率と表面温度の関係 (8 月 19 日)

効果の違いについても今後詳細な検討が必要になるものと考えられる。

(4) 蒸発持続性の評価

8月14日から9月22日までの期間で、日射量および蒸発量を日積算した値と舗装面の日最高温度の変化を図15に示す。降雨があった日の日積算降水量も併せて示した。図より、日射量と蒸発量との対応が確認できる。舗装には、8月10日の30mmの散水以降は、散水を実施していないが、降水を貯留することで蒸発効果が持続している。特に9月9日以降は10日以上降雨が無かったが、安定した蒸発が見られる。8月中旬における日積算蒸発量が5mm程度、降雨の無かった9月中旬でも3mm程度の蒸発が見られる。また、舗装面の最高温度は、測定期間中、晴天日においても40℃程度で安定していることが確認できる。

以上より、本舗装システムが貯水層や感温性を有することで、蒸発冷却効果を連続的に可能にしていることが期待できる。

6 まとめ

感温性を有する保水性舗装システムを開発し、その熱収支特性や蒸発特性に関して評価を行った。

得られた結果は以下の通りであった。

- 1) 濾紙法による物質および熱伝達率の算出から得られた熱収支特性では、本舗装システムでは蒸発冷却効果により、表面温度が屋上面に比べて最大10℃程度低く、顕熱フラックスも80%近く低減できた。
- 2) 本舗装システムは、感温性を有することにより、蒸発効率に温度依存の傾向が見られた。また、日積算蒸発量では、10日ほど降雨のなかった時期においても、持続的な蒸発が見られ、貯水と感温性の効果が現れたものと考えられる。

以上の結果から、感温性を有する保水性舗装システムは、雨水を有効に活用しながら、ヒートアイランド緩和に貢献できるものと期待される。今後、更なる効果の検証と実用化に向けた仕様作りが必要である。

本報は、2005年日本建築学会大会にて発表したものの⁷⁾に、加筆・修正を行い、まとめたものである。

引用文献

- 1) 萩島理、成田健一、谷本潤、三坂育正、松島篤、尾之上真弓：大規模な階段状緑化屋根を有する建築物周辺の微気象に関する実測調査、日本建築学会環境系論文集、No.577、pp.47-54 (2004)。
- 2) 横山仁、山口隆子、石井康一郎：屋上緑化のヒートアイランド緩和効果 — 軽量・薄層型屋上緑化に関する検討 —、東京都環境科学研究所年報2004、pp.3-10 (2004)。
- 3) 感温性吸水樹脂、公開特許広報、特開平7-224119 (1995)
- 4) 石川幸雄、三坂育正：感温性ハイドロゲルを用いた建築壁体の水分蒸発冷却効果に関する研究、日本建築学会大会論文梗概集 (2001)
- 5) 成田健一、野々村善民、小笠頭：都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究 (その1)、日本建築学会計画系論文集、No.491、pp.49-56 (1997)
- 6) 成田健一、三坂育正、国島武史、中山康志、若林伸介：蒸発効率を用いた保水性舗装の性能評価、日本建築学会技術報告集、No.20、pp.187-190 (2004)
- 7) 三坂育正、成田健一：保水舗装による都市暑熱環境緩和に関する研究 その2 感温性を有する舗装の蒸発特性評価、日本建築学会大会論文梗概集 (2005)

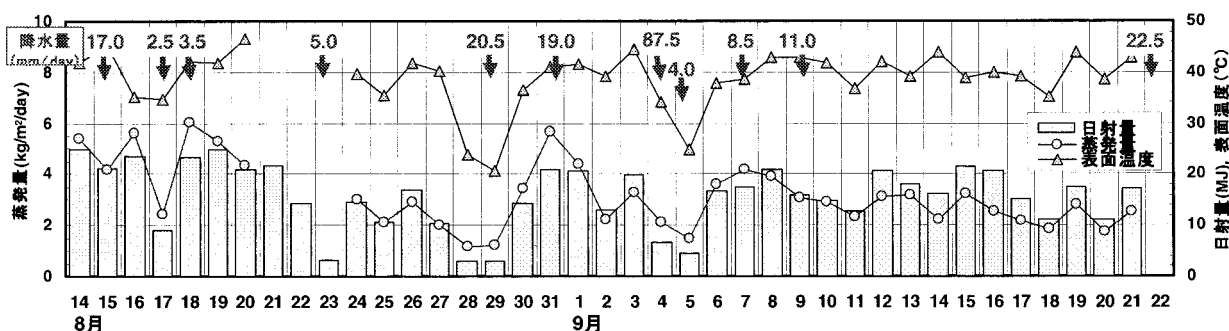


図15 日積算日射量・蒸発量と舗装表面の日最高温度