

特殊舗装面を用いた都市暑熱環境緩和に関する実験的研究 (第1報)

- 熱収支的にみた微気象の評価 -

松本 太* 福岡 義隆* 中川 清隆*
 山本 享** 林 宏三郎*** 磯部 裕介*
 桑原 明子*

キーワード：ヒートアイランド、舗装素材、暑熱緩和、区画による気温差

1. はじめに

昨今、ヒートアイランドに象徴される都市の温暖化が熱中症発生や熱帯夜日数の増加といった形で、人間生活にも影響を与えているといわれており、問題が顕在化しつつある。都市においては地表面がアスファルトやコンクリートなど人工構造物に覆われる割合が高く、これらの環境下においては、特に夏季には日射によって相当の高温に達する。そのヒートアイランド緩和対策の1つとして、コンクリートやアスファルトに代わる舗装素材の開発、利用が挙げられる。そこで、本研究ではコンタイプブロック工法とよばれる保水性、透水性の大きいブロックと芝生とを組み合わせた素材を用いて、暑熱緩和に対する有効性の評価を目的とした気象観測を行っている。

今年度の実験に先立ち、2005年度では材質の異なる7種類のブロックを用いて、12パターンの環境を設定し、微気象観測を行った。その結果、地表面温度や地上気温などの観測データから、セラック（透水性素材）、エコプレート（保水性素材）の有効性がある程度示唆された（小松、2006；福岡ほか、2006）。しかし、地表面温度と地上気温との関係性は説明が十分できておらず、その説明のためには地表面の熱収支的なメカニズムについて評価を行う必要がある。

そこで、今年度はそれら2種類の素材に着目し、3m×3mの区画を設定し、放射収支、地中温度などの項目を増やし、微気象観測を行った。どちらの素材が暑熱緩和に有効と成りうるか、すなわち芝生に近い効果があるのかを、熱収支的な評価によって裏付けることを目的とした。

本報告では主として2006年夏季の調査、解析結果を報告する。

2. 調査対象及び方法

(1) 研究材料について

コンタイプブロック工法は、緑化駐車場に利用する目的で林物産株式会社において考えられたものである。ヒートアイランド緩和効果を目的とするなら、緑化駐車場はすべて芝生面にすればよいが、強度に難点が出てくる。すなわち芝生が自動車の重みに耐えられず枯れてしまう。そこでそれを和らげるために芝生の上にブロックを敷き詰め、ブロックの間から芝生を生やす工法が考案された（図1）。さらにブロックの素材として保水性、透水性舗装素材を使えば暑熱緩和の目的には効果的である。

保水性、透水性舗装素材についてはもともと都市環境に基づいている降雨による水溜りをなくし、歩きやすくするためという目的があったが、ヒートアイランド対策として注目を集めている。

以上の点でコンタイプブロック工法は、一石三鳥の素材となりうる可能性がある。

なお本研究で用いた保水性素材、エコプレートはスーパーソル（廃ガラス利用材）を活用した製品でセルプストーン（琉球石灰岩、本部石の石粉を主原料とし、土、金属酸化物、発泡石等を混合したりサイクルストーン）を含んでいる。保水性に優れ、断熱効果が高い。

一方透水性素材、セラックはガラスの廃材を利用した

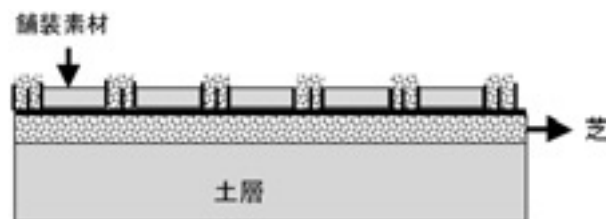


図1 コンタイプブロックの概要

* 立正大学地球環境科学部

** いであ株式会社

*** 株式会社林物産

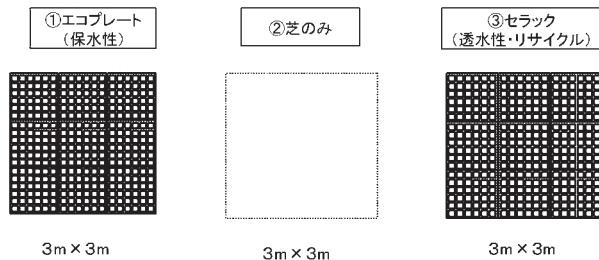


図2 実験施設の概要

下水道汚泥セラミックブロック。下水道の汚泥を焼却した陶磁器・汚泥焼却灰を成分調整したもので、透水性と熱循環作用に優れている。

(2) 実験施設の概要

実験施設は3m x 3mを整地し、芝生を植え、その上に2種類のコンタイプブロックの区画を設定した(図2)。

1区画にはプラスチックポットに小型のブロックを324個、はめ込む形となっている。一方の区画は透水性の素材(セラック)、他方は保水性の素材(エコプレート)を用いた。またコントロール面として芝生だけの区画を設定した。

(3) 気象観測の概要(表1および図3)

気温

透水面、芝面、保水面の中央の高さ20cmと50cmに、自記録式温湿度計(ティアンドデイ社製 Thermo Recorder RTR-53)を設置し、10分ごとの気温と湿度を観測した。放射よけを考慮した通風筒を自作し、その中に温湿度計のセンサーが取り付けられている。

地温

透水面、保水面のそれぞれ芝上、芝下、深さ5cm、10cmの4ヶ所、芝面では芝下、深さ5cm、10cmの3ヶ所に地温センサーホボU12屋外用外部入力4チャンネルロガー(クリマテック社製)を設置して自記録で10分ごとに地温の観測を行った。

日射量、赤外放射量、地表面温度

芝面に放射収支観測システム(クリマテック社製)を設置し、自記録で10分ごとに日射(短波放射)量および赤外放射(長波放射)量を測定した。また、透水面、芝面、保水面の各1地点(計3地点)の地表面温度を放射温度計によって自記録で10分ごとに測定した。

以上是自記録式ロガーを用いて観測を行っているが、上記のほかに特別観測として、人工降雨(散水)を設定し、その日には放射温度計やサーモグラフィによる地表面温度の観測を行った。

表1 気象観測項目(自記録式)

観測項目	観測機器	高度(cm)
風向・風速	三杯式マイクロアネモ風向・風速計 (牧野応用測器研究所製)	2高度 (20、50)
気温・相対湿度	サーミスタ温湿度計(通風装置自作)(T&D社製おんどとりRTR53型)	2高度 (20、50)
地中温度	水/地温温度センサー (HOBO社製TMC20-HD)	4高度 (芝上、芝下 0・5・10)
地表面温度	放射温度計 (CML-303N Type)	0
土壌水分	ECHO誘電性土壌水分センサー (Decagon Devices, Inc.製)	2高度 (芝下10・20)
正味放射	放射収支計 (CPR-CNR1Type)	50

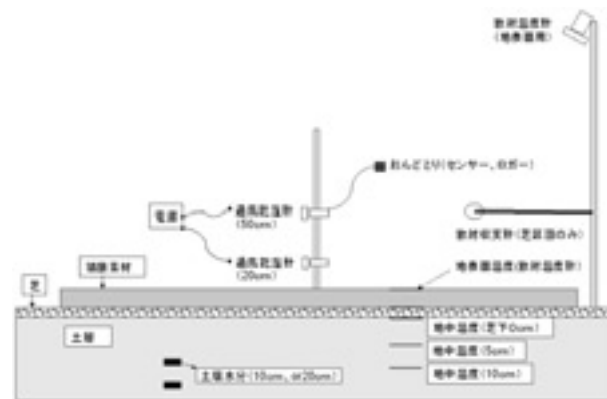


図3 観測装置の概要

(4) ポーエン比法による解析方法

地表面が吸収する正味放射量 R_n は、アルベドを α 、水平面日射量(下向き短波放射)を $S \downarrow$ 、大気からの下向き長波放射(赤外放射)量を $L \downarrow$ 、地表面温度に対する黒体放射量を σT_s^4 とすると、(1)式で定義される。なお σT_s^4 は実質上、上向きの長波放射量として見積られる。

$$R_n = (1 - \alpha)S \downarrow - \epsilon(\sigma T_s^4 - L \downarrow) \quad (1)$$

ここで、 σ : ステファンボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)、 T_s : 地表面温度、また長波放射に対する射出率(黒体度) ϵ は近似的に1に等しいので、 $\epsilon = 1$ とする。

ここで正味放射量 R_n は、潜熱 LE と顕熱 H と地中伝導熱 G に配分される。これを式で表すと、(2)式で定義される。

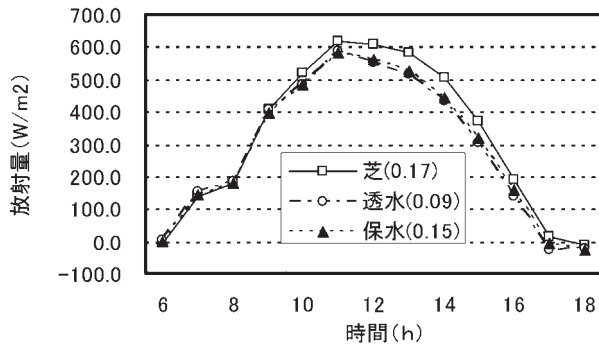


図4 夏期晴天日における各面の正味放射量

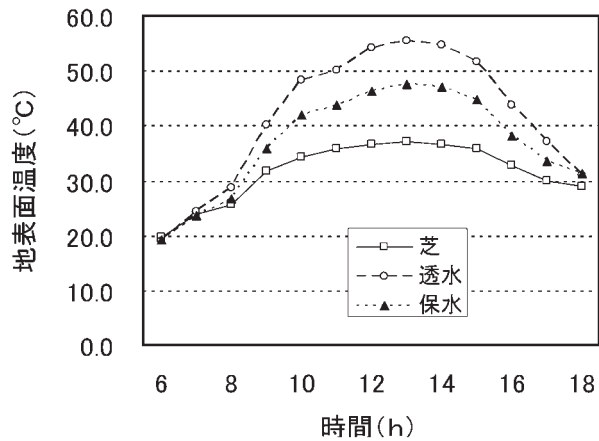


図5 各面における各面の地表面温度 (2006年8月13日)

$$R_n = LE + H + G \quad (2)$$

ボーエン比法では2高度で観測した気温、湿度のデータから、潜熱フラックスに対する顕熱フラックスの割合(ボーエン比)がもとめられる(式3)。その値が小さいと地表面温度、気温の上昇が抑えられ、大きいと地表面温度、気温が上昇することを意味する。

$$B_o = H / LE = \{C_p(T_1 - T_2)\} / \{l(e_1 - e_2)\} \quad (3)$$

ここで、 B_o : ボーエン比、 C_p/l : 乾湿計定数(ここでは0.65とする)、 T_1 : 高さ20cmにおける気温、 T_2 : 高さ50cmにおける気温、 e_1 : 高さ20cmにおける水蒸気圧、 e_2 : 高さ50cmにおける水蒸気圧である。

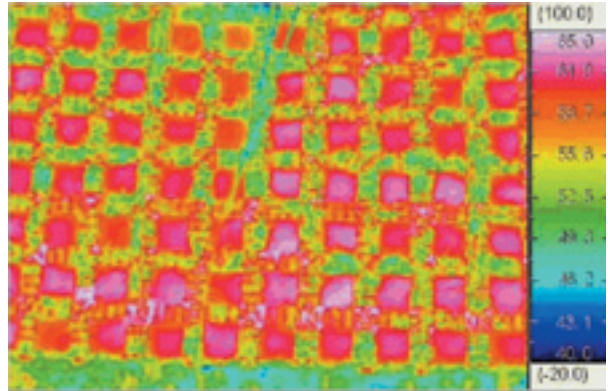
3. これまでの結果および考察

(1) 放射収支

図4は夏期晴天日における各面の正味放射量、図5は各面の地表面温度を示している。

透水性舗装面のアルベドの値が芝、保水性に比べて低くなっている。正味放射量は日中に芝面で最も大きい値を示しており、透水面、保水面で類似した時間変化の傾

(透水面)



(保水面)

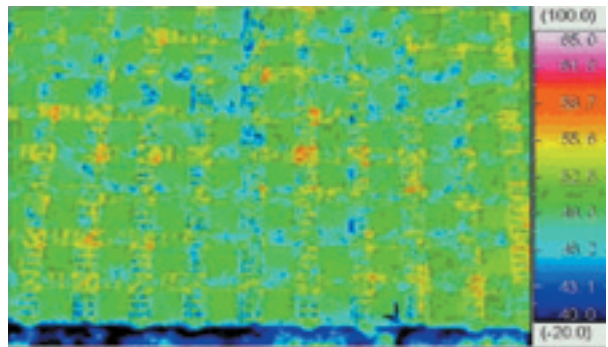


写真1 夏期晴天日南中時におけるサーモグラフィの熱画像 (2006年8月13日12時)

向がみられる。

地表面温度は南中時に最も違いが見られ、高い順から芝面、透水面、保水面となっている。その様子はサーモグラフィの熱画像による面的な温度分布でも確認できる(写真1)

(2) 地上20cmの気温

図6に夏季晴天日における地上20cmの気温の観測結果を示す。各区画とも13:00~15:00頃で気温が高くなっており、高い方から透水素材、保水素材、芝生の順になっていることがわかった。図7は地上20cmにおける芝面と透水面、保水面との気温差を示している。区画間の気温差も13:00~15:00で最も大きくなっており、保水面より透水面のほうが芝生との気温差が大きくなっているのが見てとれる。区画間の気温差は最大で0.8であった。以上の結果は(1)で述べた地表面温度の時間変化と類似した傾向が見られることから、地表面温度が地上20cmの気温へ影響を与えていることが推察される。

(3) ボーエン比による地表面温度の地上気温への影響評価

図8は各面における地上20cmと50cmとの気温差、

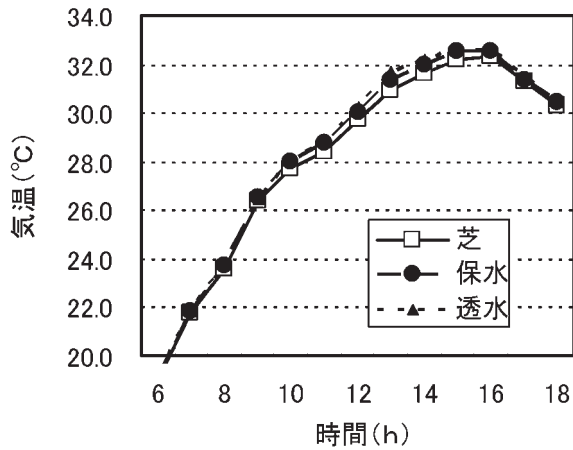


図6 地上20cmの気温 (2006年8月13日)

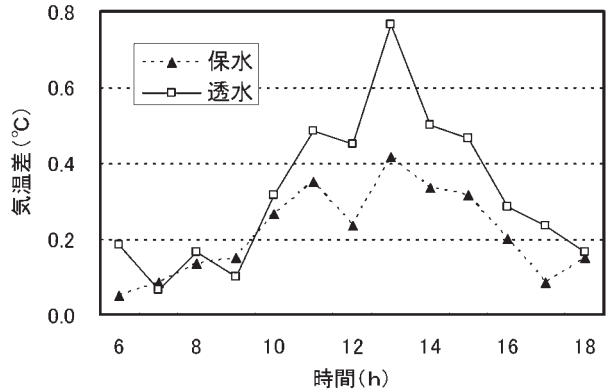


図7 地上20cmの芝面との気温差 (2006年8月13日)

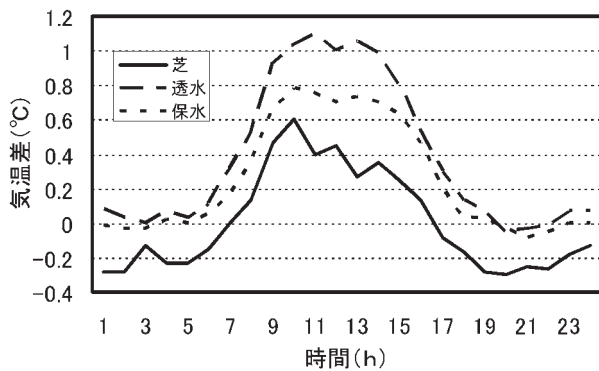


図8 各面における地上20cmと50cmとの気温差 (晴天日: 2006年8月13日)

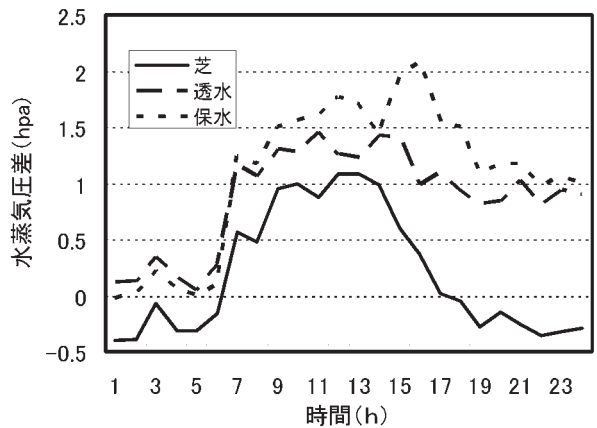


図9 各面における地上20cmと50cmとの水蒸気圧差 (晴天日: 2006年8月13日)

図9は各面における地上20cmと50cmとの水蒸気圧差を示している。これらのデータにもとづいて晴天日における各面のポーエン比を算出した (図10)。

芝面と保水面のポーエン比が類似した傾向を示しており、透水面と比較して低い値で推移しているのがみとれる。潜熱の効果がうかがえる。芝面は保水面のポーエン比が小さく推移しているのは、上下の水蒸気圧差が大きいことに起因していると考えられる。一方、透水面のポーエン比が高くなっている理由としては上下の気温差が大きい割に、水蒸気圧差が小さいためであると考えられる。とくに日中の時間帯で保水面と透水面における上下の気温差と水蒸気圧差が互いに対極的な値を示していることがわかる。

また、ポーエン比の区間間の差が最高気温時前後の時間帯で大きくなっている。日の出、日の入りの時間帯では各面とも同様なポーエン比となっている。

以上の結果から、保水面の方が透水面より芝生に近い効果を発揮しうる、すなわち暑熱緩和に有効と成りうる可能性があると考えられる。

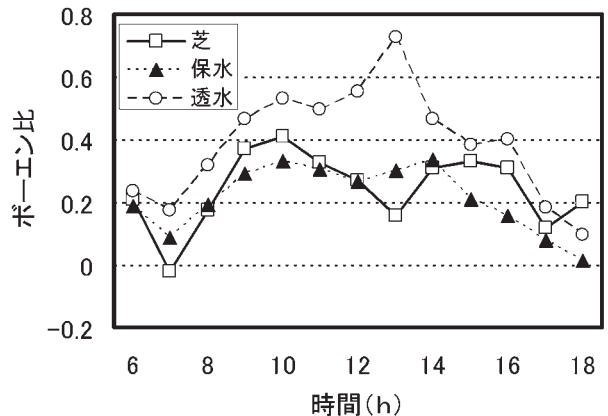


図10 各面におけるポーエン比 (晴天日: 2006年8月13日)

(4) 散水時におけるポーエン比の評価

本来保水性舗装や透水性舗装の特徴を活かすことを考えるとすれば、降水後の暑熱環境下で素材に含まれる水分量がどれだけ持続するかという評価が重要である。そこで本研究では夏季晴天日に人工的に散水を行い、地表面温度、ポーエン比などの気象データの推移を比較する

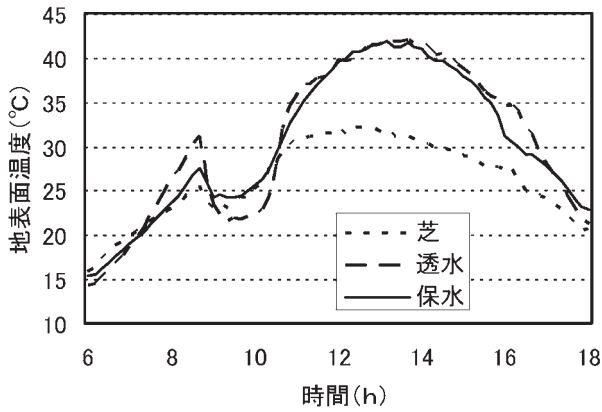


図11 散水日における地表面温度の時間推移
(晴天日：2006年9月20日) 水面

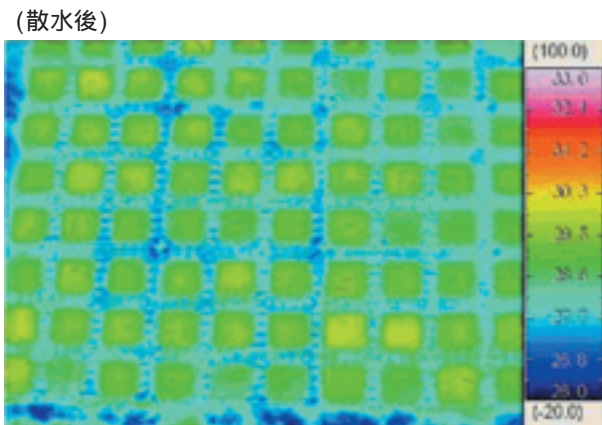
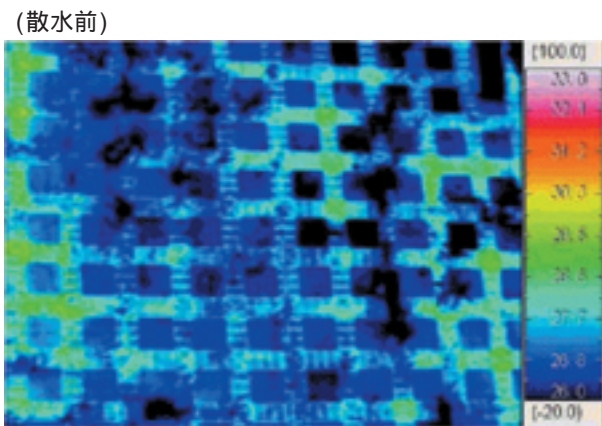


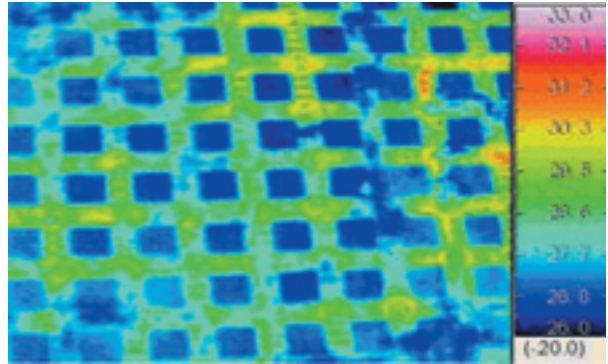
写真2 散水前と散水後における透水面のサーモグラフィの熱画像 (熱画像の温度レンジは各図とも上限33.0、下限26.0で統一してある)

ことにより、各素材の有効性を検証することを試みた。

散水は快晴の日を選び、2006年9月20日の8:25~9:55に行った。散水量は各面に対して総雨量40mmに相当する量である360ℓとした(保水性舗装技術研究会、2006を参考)。

図11は地表面温度の時間推移を示している。散水前は地表面温度の高い方から透水面 保水面 芝面の順となっているが、散水途中、および散水直後の10時付近は透水

(散水前)



(散水後)

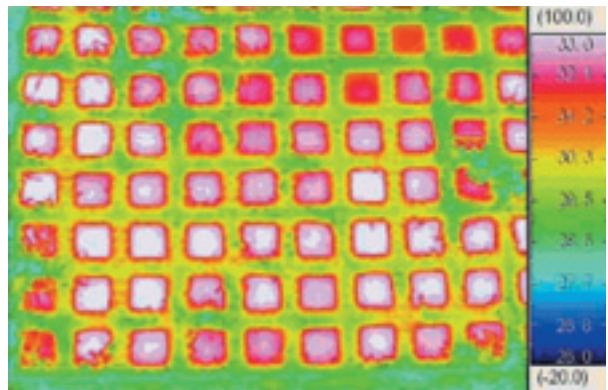


写真3 散水前と散水後における保水面のサーモグラフィの熱画像 (熱画像の温度レンジは各図とも上限33.0、下限26.0で統一してある)

面が最も低くなっているのがみてとれる。その後地表面温度は透水面、保水面が同様に推移しているが、透水面の方がやや高い時間帯が多くなっている。

なお、以上の結果は写真2、写真3のサーモグラフィによる熱画像からもうかがうことができる。すなわち、散水前は透水面の地表面温度が保水面より全体的に高いが、散水後は透水面の方がやや低くなっている。

図12は散水日における地上20cmの気温を示している。散水中または散水直後の9:00~10:30で気温上昇が抑えられていることがうかがえる。図13は地上20cmにおける芝面と透水面、保水面との気温差を示している。散水直後の時間帯(10:00前後)保水面の方が気温が高くなっているが、11:00以降は逆転し、透水面の方が高く推移している。この傾向は散水中、散水直後における各面の地表面温度の傾向と類似している。よって、散水時においても地表面温度が地上20cmの気温へ影響を与えていることが推察される。

図14は散水時における地上20cmと50cmとの気温差、図15は各面における地上20cmと50cmとの水蒸気圧差を示している。これらのデータにもとづいて散水時に

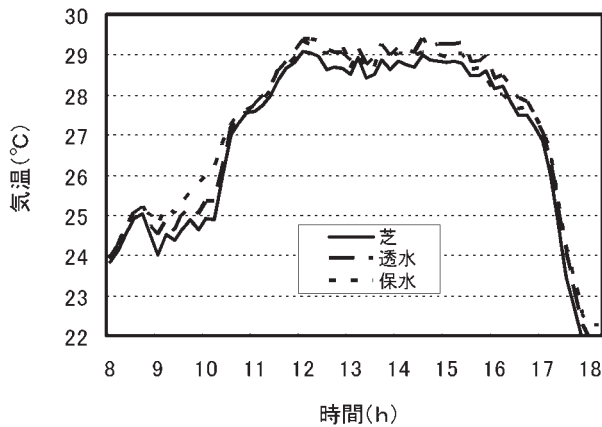


図12 各面における地上20cmの気温(散水日)

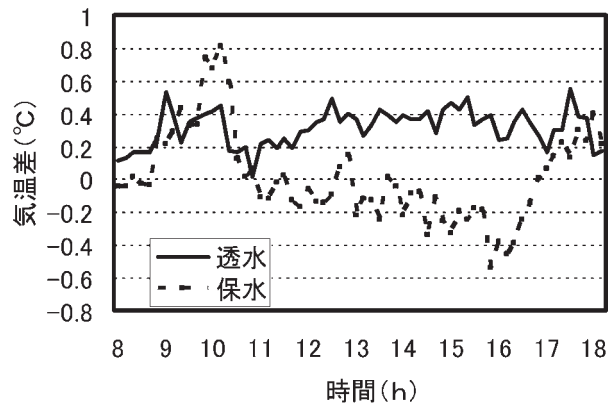


図13 地上20cmの芝面との気温差(散水日)

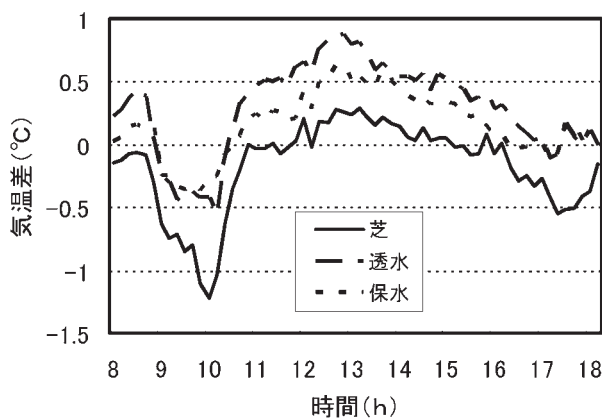


図14 各面における上下の気温差(散水日)

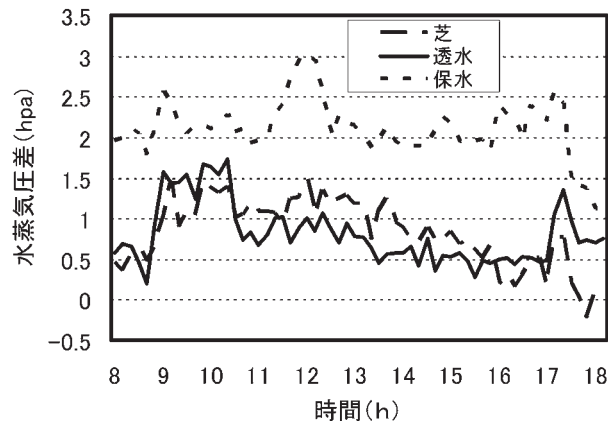


図15 各面における上下の水蒸気圧差(散水日)

ける各面のボーエン比を算出した(図16)。

散水中、散水直後では芝面と透水面のボーエン比が低くなっている。その後11:00位からは透水面のボーエン比が高く推移しており、保水面は比較的低い値で推移しているのがみてとれる。保水面の水蒸気圧差がコンスタントに大きい値で推移しているのが特徴的で、ボーエン比の値はそこで生じる潜熱フラックスに起因していると考えられる。一方、透水面に関しては散水直後、上下の水蒸気圧差が比較的大きいが、その後は小さく推移しており、この傾向がボーエン比にも反映していると考えられる。また、これらの各面におけるボーエン比の傾向は地表面温度の推移、地上20cmの気温の結果とも対応している。よって散水日における地表面温度と地上20cmの気温との関係はメカニズム的にも裏付けられる。

以上の結果から、散水直後は透水面の方が気温上昇が抑制されるが、ある程度時間がたてばその効果は保水面の方が上回ることが示唆される。いいかえれば保水面の方が長く保持されていると推察される。散水直後以外は、前述した散水していない晴天日の傾向と同様である。

現段階では保水面の方が透水面より芝生に近い効果を

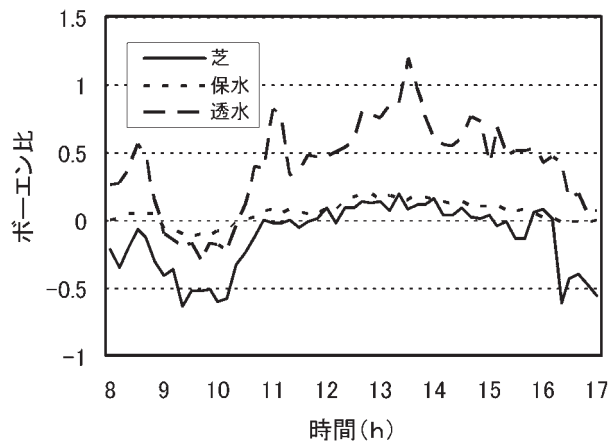


図16 各面におけるボーエン比(散水日)

発揮しうる、すなわち暑熱緩和に有効と成りうる可能性があると考えられる。

4. まとめと今後の課題

本研究の結果をまとめると以下ようになる。

散水していない晴天日では透水面の方が保水面より地表面温度、地上20cmの気温が高くなっている。ま

た、ポーエン比の値もその傾向に対応している。また日中の最高気温時前後の時間帯で区間の差が大きくなっている。

散水日に関しては散水中および散水直後は透水面の方が保水面より、地表面温度、気温で低くなっているが、ある程度の時間後は保水面と逆転している。ポーエン比の解析でも同様の傾向が見られ、保水面の方が、芝面に近い値が出ていることが明らかとなった。

、の結果から散水直後は透水面の方が気温上昇が抑制されるが、ある程度時間がたてばその効果は保水面の方が上回ることが示唆される。保水面の方が長く保持されていると推察される。散水直後以外は散水していない晴天日と同様の傾向を示している。よって現段階では保水面の方が透水面より芝生に近い効果を発揮しうる、すなわち暑熱緩和に有効と成りうると考察される。

今後の課題としてはコンクリート面やアスファルト面との比較観測を行い、本研究で用いた素材に関して都市環境の現実に応じた有効性を検討し、暑熱緩和効果を見積もる必要がある。また、本研究で明らかになった現象には各素材の熱的な性質が大きく関与しているものと考えられる。各舗装素材の熱的性質をもとめ、地中への貯熱を含めた詳細な熱収支的な評価を行うことによって、現象をメカニズム的に裏付ける必要がある。そのためには地中への貯熱量、伝熱量を求める必要がある。目下各素材とポット等の熱容量 (C_p) を算出する実験を行い検討中である。この解析結果は次報にて述べることにしたい。

ヒートアイランドによる暑熱の緩和対策については、日差しが強く、暑熱の影響が大きいと考えられる夏季における評価が非常に重要になってくると考えられる。現在の都市空間においては、コンクリート、アスファルト面の急速な減少、あるいは緑地面積の増加は望めない。しかし、都市公園や遊歩道、駐車場などの舗装面、あるいは屋上空間などでは、少なからず改善の余地があると

考えられる。

環境省ほか各省庁、自治体で政策策定に関して検討を行っている。その判断材料として、どのくらいの緑地面積でどれくらいの暑熱緩和効果があるのかを評価する必要があるが、研究サイドでも結論が得られていない。

本研究の意義として、実験で用いた舗装素材は素材の間に芝生を生やす構造になっているので、素材に占める芝生のパーセンテージを算出し、それによる潜熱の効果がどれくらいかなどを見積もることが出来れば、部分的緑化施設における暑熱緩和効果のモデルケースとして、バーチャル的に評価することも可能である。

都市環境に関しては、これからの時代は環境共生型のまちづくりやアメニティの創造といった価値観が今まで以上に問われてくる中で、大気・熱環境の保全といった面から環境を考慮した街づくりを行うためにも、本研究のような取り組みを進めていくことが今後大事になってくるであろう。

謝 辞

株式会社林物産から実験素材の提供をいただきました。また、本調査をすすめるにあたって、立正大学環境気象学研究室の3年生、4年生及び大学院生に気象観測のご協力をいただきました。以上の方々に記して心より感謝するとともに深くお礼申し上げます。

参考文献

- 磯部祐介 (2007) : ヒートアイランドを緩和する透水性・保水性ブロックを用いた特殊舗装面の熱収支的研究, (立正大学地球環境科学部卒論)
- 桑原明子 (2007) : 特殊舗装面におけるヒートアイランド緩和効果に関する研究, (立正大学地球環境科学部卒論)
- 小松由香梨 (2006) : ヒートアイランド緩和に対する舗装素材の実験的研究 (立正大学地球環境科学部卒論)
- 福岡義隆・松本太・丸本美紀 (2006) : 都市の温暖化対策としての屋上緑化と特殊舗装面に関する微気象的研究, 関東の農業気象 (日本農業気象学会関東支部誌) 2, 20 - 23.
- 保水性舗装技術研究会 (2002) : 『保水舗装 技術資料』.

Experiment Study on Weakening Urban Heat Environment by Pavement Materials(1) Micro-climatological Evaluation from the view point of Heat Balance

Futoshi MATSUMOTO*, Yoshitaka FUKUOKA*, Kiyotaka NAKAGAWA*,
Takashi YAMAMOTO**, Kozaburo HAYASHI***, Yusuke ISOBE*, Akiko KUWAHARA

*Faculty of Geo Environmental Science, Rissho University

** Idea Company

*** Hayashi Bussan Company

Keywords: Heat island, Pavement material, Weakening heat,
Temperature distribution among blocks