

U.D.C 628.111

ヒートアイランド緩和技術の開発（その3） －雨水貯留型人工地盤システムの改良と計測結果－

宇多 寛人* 福田 淳**

要約： ヒートアイランド現象は、都市中心部の気温が郊外に比べて高く、高温域が形成されることにより気温の等温線が島状になる現象である。現在、都市部では駅周辺等で再開発事業が多く計画されているが、計画要件にヒートアイランド対策への配慮を求められるようになってきている。そこで、筆者らは、主に駅前広場やペDESTリアンデッキに適用することを想定して、ヒートアイランド現象緩和効果のある雨水貯留型人工地盤の開発を行なっている。これは、人工地盤上に降った雨を地中に貯留し、その雨水を人工地盤の表面温度低減のために利用するものである。

本報告では、既報に引き続き、この雨水貯留型人工地盤の表面温度を一層下げることが目的に改良したシステムの概要とフィールド実験の結果、並びに数値解析の結果を示す。フィールド実験によりシステム改良の有効性を示すことができた。また、数値解析で給水中の表面温度変化を再現した上で、ブロック表面の蒸発量を算出し、給水中のシステムの水収支を明らかにした。

キーワード： ヒートアイランド、雨水利用、保水性ブロック、表面温度、伝熱現象

- 目次：**
- | | |
|-------------------|------------|
| 1. はじめに | 6. 実験結果と考察 |
| 2. 保水性人工地盤システムの概要 | 7. 解析概要 |
| 3. システムの改良 | 8. 解析結果と考察 |
| 4. 砂の選定実験 | 9. まとめ |
| 5. フィールド実験概要 | |

1. はじめに

ヒートアイランド現象は、都市中心部の気温が郊外に比べて高く、高温域が形成されることにより、気温の等温線が島状になる現象である。この現象は、都市の人工化がもたらした典型的な都市環境問題として捉えられている。平成16年3月にはヒートアイランド対策大綱¹⁾が策定されるなど、国、地方公共団体を始めとして、ヒートアイランド対策に関する各種の施策が講じられてきている。

ヒートアイランド現象に対して有効な対策手法としては、建物や自動車からの排熱の削減や緑地の増加とともに舗装面の改善が挙げられる。舗装面改善手法の一つに保水性舗装がある。これは、舗装材に水を貯え、水の気化熱で舗装面の温度を低下させようという技術である。当社は、これまでにいくつかの緑化や雨水利用に関する技術開発を行なっており、ヒートアイランド現象に対する総合的な対策技術を確認する為に、これらを組み合わせたヒートアイランド緩和技術（雨水貯留型人工地盤システム）の開発を東京都市大学との産学共同研究として実施している。

既報その1²⁾では、システムの概要と2007年度フィールド実験の結果を、既報その2³⁾では、システムの伝熱現象の簡易モデル化と数値計算を行ない実験結果との

比較・考察を行なった結果を報告した。

本報では、保水性人工地盤の表面温度を一層下げることが目的に改良したシステムの概要と、2008年度フィールド実験の結果、並びに、様々な給水条件での数値解析結果について報告する。

2. 保水性人工地盤システムの概要

図1に保水性人工地盤原型の概要を示す。2007年度フィールド実験に用いたシステムの構造は次のようなも

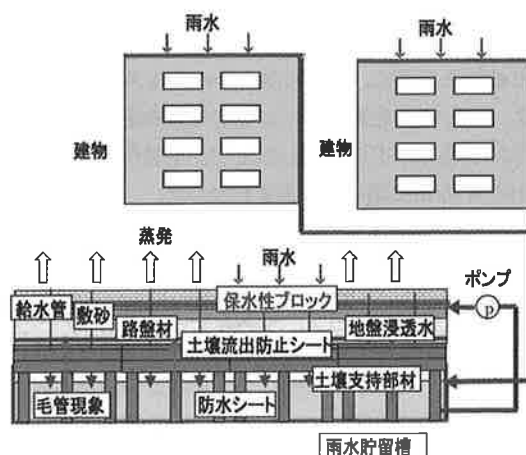


図1 保水性人工地盤システム概要

* 建築本部 設備部 ** 土木総本部 環境技術部

のであった。まず、1体あたり5本の中空の脚(φ60mm)をもつ土壌支持部材(500×500×h290)と防水シートによって雨水貯水槽を構築し、雨水貯水槽の上には順番に土壌流出防止シート、毛管現象力の高い路盤材(標準 t=100mm)、不陸整正用の敷砂(標準 t=30mm)、保水性ブロック(100×200×t60mm)を設置する。雨水貯留槽には直上の保水性ブロックを浸透した雨水や建物屋上等に降った雨水を導いて貯留する。土壌支持部材の脚のうち、平面的に見て中心に位置する脚中に毛管現象力の強い路盤材を入れて毛管現象用給水路として路盤材の毛管現象力によって保水性ブロックへ給水する。同時に、保水性ブロック下に400mm間隔で給水孔がある外径18mmの給水管を保水性ブロック下に水平方向に900mm間隔で敷設し、タイマー制御したポンプ(出力120W)によって給水を行なう。

3. システムの改良

システムの改良点を表1に示す。旧システムは保水性ブロックの下に不陸整正用の敷砂、その下に多孔質礫状人工土壌を設置する二層構造であり、多孔質礫状人工土壌と敷砂の毛管現象によって雨水貯留槽から保水性ブロックへ水が移動することを期待したが、2007年度フィールド実験では水の移動がはっきりと確認できなかった。

この原因について、多孔質礫状人工土壌は様々な粒径の土粒子で形成されており、様々な毛管現象力の間隙水が存在するのに対し、敷砂はほぼ均一な土粒子であり、一定の毛管現象力の間隙水しか存在しないので、多孔質礫状人工土壌に存在する水のうち、敷砂の毛管現象力以下の水しか多孔質礫状人工土壌から敷砂に移動できないのではないかと推測された。そのため、毛管現象で水が上昇する経路を一層構造にし、資材には保水性ブロックの不陸整正に適した砂を採用することにした。

また、砂と保水性ブロックで材質が異なり、水が十分に移動しない可能性も考えられたため、保水性ブロックの目地幅を広げて、その目地の砂からも蒸発するようにした。さらに、毛管現象による水の移動距離を短くするように構造上の工夫を施した上で、毛管現象路を4路/m²から8路/m²に増やす改良を行なった。

4. 砂の選定実験

雨水貯留槽の水を保水性ブロックに効率的に供給するため、路盤材となる砂の種類を選定する実験を行なった。

供試体は、コストを考慮して、砕砂2種(厚木産・奥多摩産)、珪砂3種(4~6号)の計5種を選択し、毛管現象による給水能力を実験により比較することとした。図2に実験装置の概要を示す。水槽内に土壌支持部材を

表1 システム改良点

改良点	旧システム	改良型
・毛管現象経路の一層化	2層 (砂と多孔質礫状人工土)	1層 (砂)
・保水性ブロック長手方向目地幅拡大(mm)	-	5
・保水性ブロック下の砂薄層化	120~250	50~160
・毛管現象用の経路増加(路/m ²)	4	8

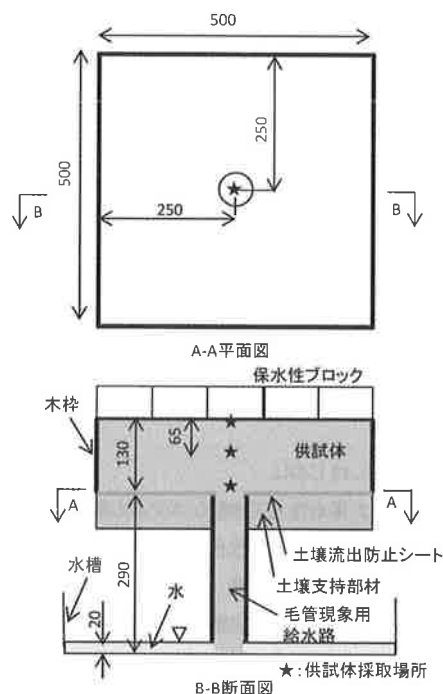


図2 実験装置概要

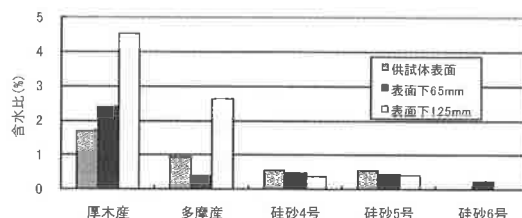


図3 含水比の測定結果

置き、その上に木枠(外寸500×500×H130mm)を設置した。木枠内には供試体の砂を充填し、その上に保水性ブロックを設置した。実験開始時の水槽の水位は、雨水貯水槽の水位が低い状態を想定して20mmとし、その後24時間静置させた。毛管現象による給水能力は、供試体の含水比で把握することとし、実験開始から24時間後の供試体表面、表面から65mm下、125mm下(土壌支持部材上5mm)の供試体中央部の供試体採取し直ちに質量を計測した後、110℃の乾燥炉で24時間乾燥させた供試体質量を測定し、含水比を求めた。

含水比の測定結果を図3に示す。いずれの位置でも含水比が最も高かったのは厚木産の砕砂であった。そのため厚木産砕砂を採用することにした。

5. フィールド実験概要

実験は東京都市大学横浜キャンパス(神奈川県横浜市)に表2, 図4に示す内容の実験場を設置し, 2008/7/17から計測を開始した。実験場は北に向かって約1/100勾配で高くなっているため, 同じ領域でも情報メディアセンター側の砂の層が厚い構造となっている。

図5に実験場の断面構造を示す。給水管に開けてある給水穴1個あたりの給水量は2ℓ/hであり, 給水穴は1㎡あたり3箇所である。表3に各ポンプ給水パターンの給水時間を示す。ポンプ給水は原則月曜日～金曜日まで同じパターンで給水し, 土日は影響を無くするためポンプ給水をせず, 次の月曜日から別の給水パターンを行うサイクルを実施した。

測定項目については, その1)と同様に熱電対で各所温度を測定すると共に, 気象計・日射計による測定を行なった。また, サーモカメラ(日本アビオニクス社製, TVS-200)で8/20と9/3のポンプ給水前・給水中・給水後に表面温度を測定した。

6. 実験結果と考察

本実験では表2に示した領域①～④について, ポンプによる給水の有無や時間を変えて計測を行なったが, 以下では実験期間中最も晴天日であったCパターンのポンプ給水を行なった8/20の結果を中心に述べる。

図6に8/20の気温と日射量を示す。最大日射量は930W/m², 最高気温は33.9℃であり, 酷暑日であった。この日以前1週間の降雨は3日前4.3mm, 6日前3.5mmであり保水性ブロックへの影響はないと考えられる。

図7にサーモカメラと熱電対で測定した8/20と9/3(給水Eパターン)における, 給水前・中・後の茶色保水性ブロック(以下, 茶ブロックと記す。)の表面温度を示す。表面温度は給水前・中・後の順番に下がる傾向を示した。これは給水の効果と考えられる。サーモカメラよりも熱電対の測定温度が高いのは, 茶色に着色したアルミテープで熱電対を茶ブロックに貼り付けたため, 熱電対周囲の熱が放熱されず, 昇温したものと考えられる。

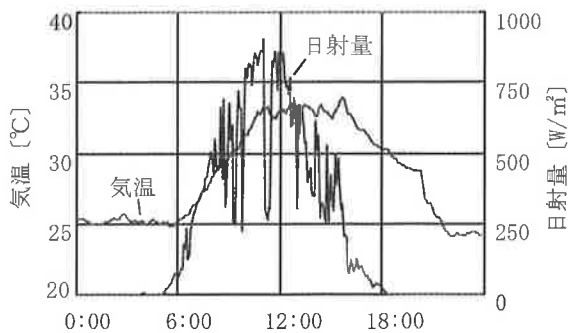


図6 気温と日射量(8/20)

表2 各領域の構成

領域	保水性ブロック 長手方向 目地幅 (mm)	保水性 ブロック下 の質材	保水性ブロック下 の砂厚さ (mm)	毛管現象用 給水路 (路/㎡)	貯水槽	備考
①	-	砂	-	-	無	保水性ブロック舗装のみ
②-1	5	砂	60	8	有	改良型
②-2	5	砂	160	8	有	改良型
③-1	-	砂	60	8	有	改良型
③-2	-	砂	160	8	有	改良型
③-3	-	砂	50	8	有	改良型
③-4	-	砂	130	8	有	改良型
④	-	砂と 多孔質礫状 人工土壌	120～ 250	4	有	旧システム

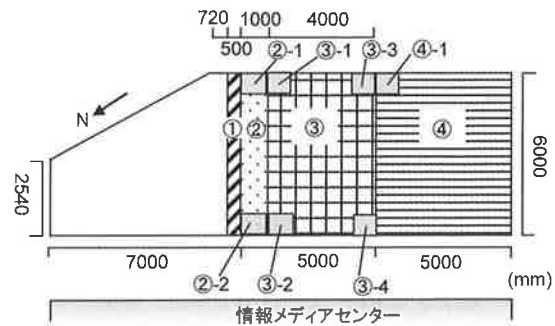


図4 実験場 平面図



図5 断面構造

表3 各ポンプ給水パターンの給水時間

パターン	A	B	C	D	E
給水時間	7:00～8:10 (70分)	7:00～9:20 (140分)	7:00～8:10 12:00～13:10 (70分×2)	-	12:00～13:10 (70分)

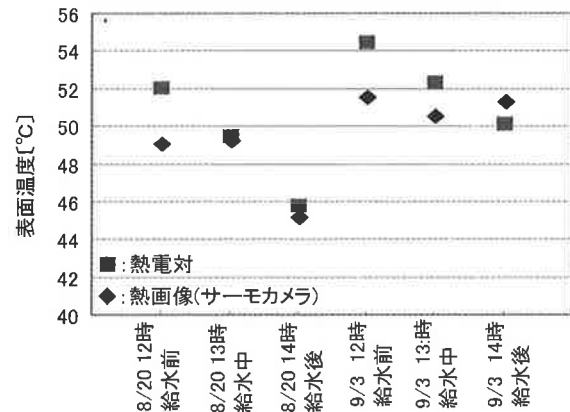


図7 茶ブロック表面温度

図8に8/20 昼の給水前の熱画像を、図9に給水中の熱画像を、図10に熱画像から得られた各領域の給水前と給水中の表面温度を示す。目地幅5mm及び保水性ブロック下の砂厚さ60mmと改良した②-1は保水性ブロック舗装のみ(①)より4℃以上、旧システム(④)より2℃以上、アスファルトより13~16℃低い温度を示し、システム改良による表面温度の低減効果が表れている。これは毛管現象で水を揚げている砂が雨水貯留槽から目地の間を通して地表面まで短い距離で繋がっており、保水性ブロックに水を供給すると同時に、広げた目地にある砂中の水も蒸発し、地表面の熱を奪ったためと考えられる。なお、図8と図9を比較すると、給水を行っていない保水性ブロック舗装のみ(①)周辺の温度が大きく上昇しているのに対し、給水を行なっている②~④のエリアは温度上昇が抑えられており、給水による温度低減効果を示しているものと考えられる。

7. 解析概要

既報告その2³⁾では、人工地盤の表面温度を把握することを主眼として、保水性ブロック内とその表面におけるエネルギー収支を定量的に記述するために、鉛直方向の一次元伝熱を想定した差分計算モデルを作成した上で、液体水の出入りと蒸発による伝熱の項を追加し、ブロック表面での水分蒸発による温度低減効果の把握を試みた。

本報では、改良後のシステムの測定結果を用いてその2と同じモデルを用いた数値計算を行ない、表面温度測定値の再現性を確認した上で、ブロック表面からの蒸発量を算出し、蒸発性能を考察することとした。

なお、6.に述べたとおり、熱電対による表面温度測定値とサーモカメラによる熱画像から得られた表面温度測定値を比較すると、熱電対の測定値の方が明らかに高めの傾向が見られたため、サーモカメラの測定値を正として、熱電対の測定値を補正することとした。領域③と④の茶ブロックと白ブロックについて、同時刻に得られた測定値を散布図上にプロットし回帰式を求めて、これを日射がある時間帯の表面温度補正式とすることにした。その結果を図11に示す。回帰式を求めた結果、補正式として、 $Y=0.9611X$ が得られた。Yは熱画像から得られる表面温度、Xは熱電対で得られる表面温度である。

ブロック等の物性値は、その2と同様の値を用いた。ブロック表面の日射吸収率は、茶ブロックは0.7、白ブロックは0.6とした。また、表面が建物等の影となる時間帯を写真撮影により確認して、日影となる時間帯については日射量の測定値に係数を掛けて補正した。係数の値については、東京の夏季晴天日方位別全日射量の水平面の計算例⁴⁾を参考に、影により直達日射(全日射の

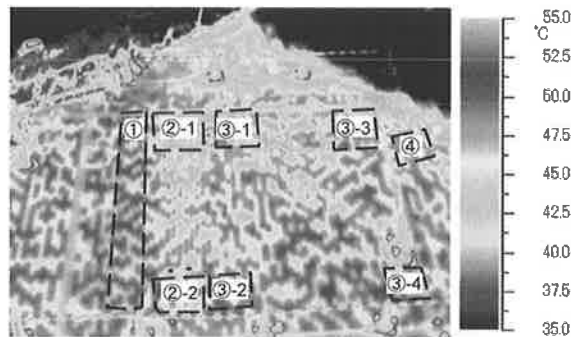


図8 熱画像 給水前(8/20, 12時)

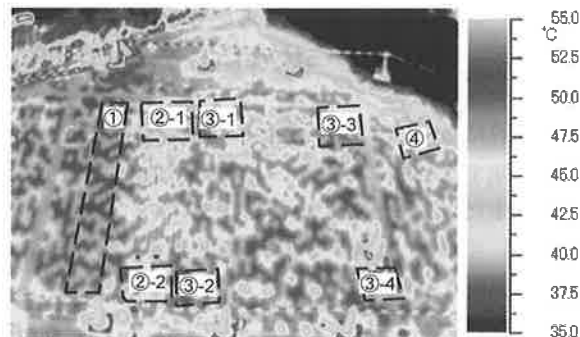


図9 熱画像 給水中(8/20, 13時)

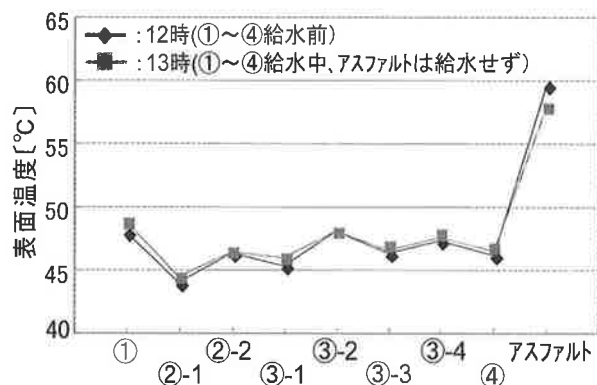


図10 各領域の給水前と給水中 表面温度(8/20)

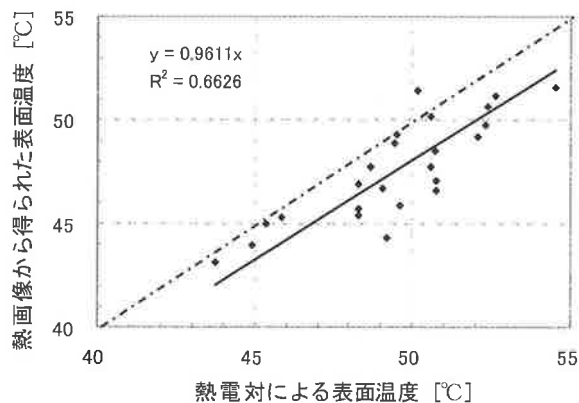


図11 表面温度測定値の散布図と補正式

約8割)が届かなくなると考え、0.2を採用した。

また、ブロック表面は自由水面とは異なるため、蒸発が起きる湿潤な表面の割合として、その2において導入した濡れ率 W を本報でも同様に用いるものとしたが、使い方としては、給水後にある程度の時間を置いてブロック表面が湿潤になるという仮定の下、 W の値をいくつか変えて計算し、表面温度の測定値に最も近くなる温度計算結果を与える W の値を求めることにした。

8. 解析結果と考察

外気温と日射量、ブロック下面温度、ブロックへの供給水量、ブロックへの供給水温、外気の混合比(絶対湿度)の測定値を入力として計算を行なって得られた表面温度を、上述の補正後の測定値とともに示したものの一例が図12である。図12は、実験パターンA(7:00~8:10に給水)で実験を行なった2008年7月17日の領域③の茶ブロックの測定値を使用している。

給水時の濡れ率を $W=0$ として計算したため、給水時の表面温度計算値と測定値の間には乖離が見られる。一方、濡れ率 W の値をいくつか変えて計算し、測定値に最も近くなった状態として、給水時間7:00~8:10に対し、時間遅れを考慮して、8:00~10:20についてのみ $W=0.1$ 、他の時間帯は $W=0$ として計算した結果が図13である。図13を見ると、図12に比べ、給水時間における測定値を精度良く再現できていることがわかる。

同様に、領域③茶ブロックにおける実験パターンB(7:00~9:20に給水)の計算結果を図14、実験パターンC(7:00~8:10と12:00~13:10に給水)の計算結果を図15、実験パターンE(12:00~13:10に給水)の計算結果を図16に示す。いずれも濡れ率 $W=0.1$ として計算した結果である。朝方や夕方の一部を除き、昼間の給水時間帯については測定値を精度良く再現できていることがわかる。

図示した4つの実験パターンの領域③と④を合わせた蒸発量は、実験パターンA: $8.1\text{kg}(0.016\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、B:

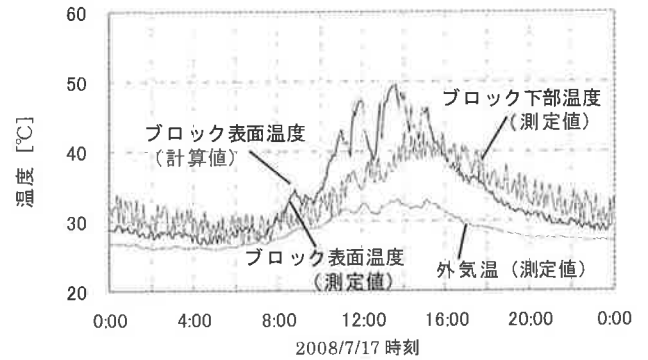


図12 計算値と測定値の比較(実験A・ $W=0$)

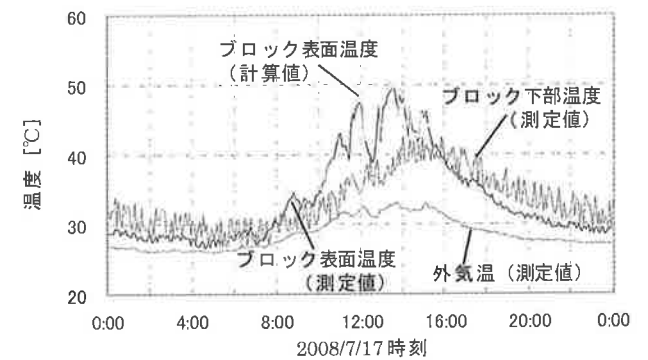


図13 計算値と測定値の比較(実験A・ $W=0.1$)

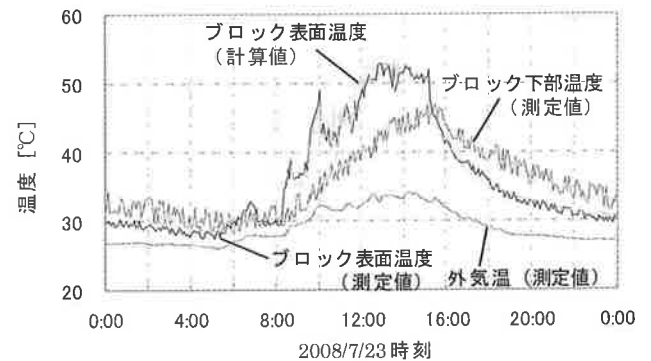


図14 計算値と測定値の比較(実験B・ $W=0.1$)

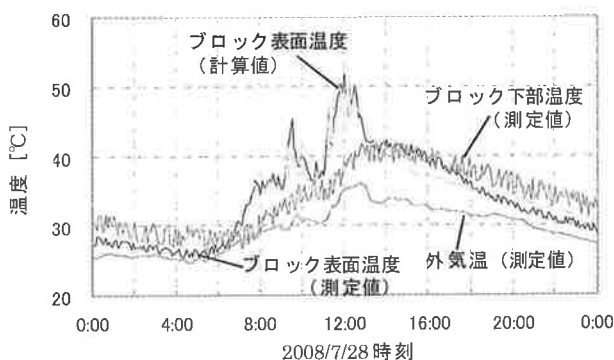


図15 計算値と測定値の比較(実験C・ $W=0.1$)

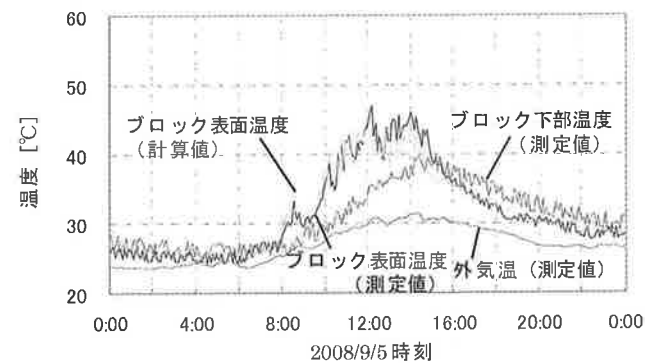


図16 計算値と測定値の比較(実験E・ $W=0.1$)

21.9kg(0.030g/m²・s), C : 30.8kg(0.031g/m²・s), E : 17.8kg(0.035g/m²・s)と計算された。これは、地球全体の平均蒸発速さ 0.03g/m²・s の前後の値となった。室内実験⁵⁾による毛細管現象の測定結果 0.056g/m²・s より小さいので、さらなるシステム改良の余地があるものと考えられる。

試みとして、実験パターンCで実験を行なった 2008 年 8 月 20 日について、熱画像から給水中の給水ポイント付近の表面温度を読み取った上で、その表面温度に最も近くなる温度計算結果を与える W の値を求めると W =0.2 となり、その場合の蒸発量は 61.8 kg(0.061g/m²・s)と計算された。これは、0.056g/m²・s と同程度の値であり、給水時に最も湿潤になる表面では、理想的な蒸発が起きていたのではないかと考えられる。

本システムの給水時の水源である雨水貯留槽の水位が適切に計測できた日について、1日あたりの水位変化から求めた減水量と、上述した計算方法にしたがって得られた蒸発量、平均蒸発速さを表4に示す。雨水貯留槽の減水量と蒸発量とを比べると、蒸発量の方が小さく、蒸発せずに流出した水が多いと推測された。今後、水の流出を防ぐための工夫が必要と考えられる。

謝 辞

本研究は東京都市大学との産学共同研究として実施しました。東京都市大学環境情報学部 宿谷昌則教授、同横浜事務室 吉村俊夫室長、同横浜事務室総務課 佐々木暢俊係長をはじめ関係各位には大変お世話になりました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) ヒートアイランド対策関係府省連絡会議：ヒートアイランド対策大綱，2004年3月
- 2) 遠藤修・宇多寛人・他3名：ヒートアイランド緩和技術の開発(その1)，東急建設技術研究所報，No.33，pp.31-36，2008年2月
- 3) 宇多寛人・遠藤修・福田淳：ヒートアイランド緩和技術の開発(その2)，東急建設技術研究所報，No.34，pp.71-74，2009年3月
- 4) 宇田川光弘・近藤靖史・他2名著：建築環境工学－熱環境と空気環境－，朝倉書店，pp.27-31，2009年5月
- 5) 伊藤義隆・宿谷昌則・他2名：屋外熱環境緩和への毛細管現象の利用可能性に関する実験的検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.565-566，2008年9月
- 6) 宿谷昌則著：光と熱の建築環境学，丸善，pp.85-119，1993年7月

DEVELOPMENT OF THE MITIGATION SYSTEM OF HEAT-ISLAND EFFECT (PART3) — SYSTEM IMPROVEMENT AND SOME MEASURED RESULTS —

H.Uda and A.Fukuda

The pavement system with shallow rainwater storage tank for the mitigation of Heat-Island Effect has improved. This system stores the rain which fell with respect to artificial ground, and that rainwater is utilized for surface temperature decrease of artificial ground. The field test of the system was done already from July 2008 to September 2008 at Tokyo City University (Yokohama Campus).

In this report, system improvement, some measured results and numerical analysis by the simple model are reported for optimizing the water supply method.

表4 蒸発量と単位面積あたり平均蒸発速さ

実験日	実験パターン	雨水貯留槽の水位変化から求めた減水量 [kg/日]	計算によって得られた蒸発量 [kg/日]	単位面積あたり平均蒸発速さ [g/m ² ・s]
7/21	B	700.9	15.6	0.022
7/22	B	604.1	28.6	0.040
7/23	B	592.2	21.9	0.030
7/24	B	641.9	24.3	0.034
7/26	C	721.1	36.0	0.036
7/27	C	575.3	23.0	0.023
7/28	C	657.4	30.8	0.031
9/1	E	586.2	12.2	0.024

9. まとめ

保水性人工地盤システムを改良して行なったフィールド実験及び数値解析の結果、以下の知見を得た。

- 1) 給水中の保水性人工地盤表面温度は、アスファルト表面温度より 13~16°C，保水性ブロック単体より 4°C，旧システムより 2°Cの低減効果があり，システム改良の有効性を示した。
- 2) 簡易モデルによる解析で給水中の表面温度の再現性を確認した上で，ブロック表面からの蒸発量を算出し，給水中のシステムの水収支を明らかにした。今後は，さらに毛管現象を促進するためのシステム改良を行なった上で，実用化を図る予定である。