

# ヒートアイランド緩和技術の開発（その2）

## — 雨水貯留型人工地盤の伝熱現象の簡易モデル化と解析結果 —

宇多 寛人\* 遠藤 修\*\* 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、都心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、駅前広場やペDESTリアンデッキを念頭に置き、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、人工地盤上等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システムである。

本報告では、この人工地盤システムの熱的性能を把握し、給水方法の最適化や実用段階でのシステム設計に役立てることを目的として、人工地盤の伝熱現象の簡易なモデル化と数値計算を行ない、前報で報告したフィールド実験結果と比較・考察した結果を示す。検討の結果、給水と水分蒸発の有無を考慮した上で、人工地盤のブロック表面温度変化を精度良く再現することができた。

**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          | 3. 給水と蒸発を考慮した簡易モデル |
| 2. 給水の無い場合の簡易モデル | 4. まとめ             |

### 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、都市の人工化を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<sup>1)</sup>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。当社においては、これまで緑化や雨水利用に関する技術開発を行なってきたおり、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、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）の開発を武蔵工業大学との産学共同研究として実施している。

本報では、雨水貯留型人工地盤システムの熱的性能を把握し、給水方法の最適化や実用段階でのシステム設計に役立てることを目的として、人工地盤の伝熱現象の簡易なモデル化と数値計算を行ない、前報<sup>2)</sup>で報告したフィールド実験の測定結果との比較・考察を行なった結果を報告する。

### 2. 給水の無い場合の簡易モデル

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のモデルを作成した。

雨水貯留型人工地盤の断面と温度測定ポイントを図1に、人工地盤最上部の保水性ブロックをモデル化した断面図を図2に示す。

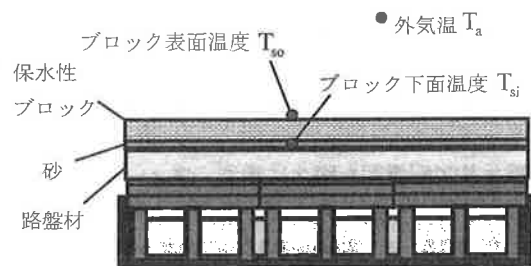


図1 雨水貯留型人工地盤断面と温度測定ポイント

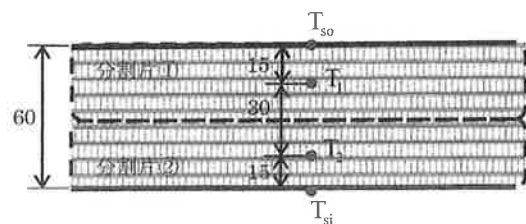


図2 保水性ブロック断面モデル

\* 建築本部 設備部 \*\* 土木総本部 環境技術部

式(1)は、時刻  $n$  におけるブロック表面での単位時間当たりのエネルギー収支式である。

$$aI(n) + \varepsilon q_{es} + h_0(T_a(n) - T_{so}(n)) = {}_{so}C_1(T_{so}(n) - T_1(n)) \quad (1)$$

左辺の第一項はブロック表面に吸収される日射エネルギーの移動量を、第二項は天空からの実効放射エネルギーの移動量を、第三項は外気とブロック表面間のエネルギー移動量を表している。また、右辺はブロック表面と内部のエネルギー移動量を表している。

次に、図2に示す通り、保水性ブロック（厚さ 60mm）が厚さ 30mm のブロック二層で構成され、各層の中心に質点があるとして仮想モデル化した。各質点（1が上部、2が下部）について時間  $\Delta t$  のあいだのエネルギー収支式を立てると、式(2)と式(3)が得られる。

$${}_{so}C_1(T_{so}(n) - T_1(n))\Delta t = c_1\rho_1l_1(T_1(n) - T_1(n-1)) + {}_{+1}C_1(T_1(n) - T_2(n))\Delta t \quad (2)$$

$${}_{-1}C_2(T_1(n) - T_2(n))\Delta t = c_2\rho_2l_2(T_2(n) - T_2(n-1)) + {}_{si}C_2(T_2(n) - T_{si}(n))\Delta t \quad (3)$$

左辺は質点  $k-1$  と質点  $k$  との間の温度差により、質点  $k$  に入るエネルギー移動量を、右辺第一項は質点  $k$  に溜まるエネルギー量を、右辺第二項は質点  $k$  から質点  $k+1$  に出るエネルギー量を表している。

なお、これらの式の中に用いた記号の説明を表1に示す。

式(1)～式(3)を  $T_{so}(n)$ 、 $T_1(n)$ 、 $T_2(n)$  についての連立方程式として、日射量・実効放射量・外気温を上側の境界条件、ブロック下面温度を下側の境界条件として解くことにより、ブロック表面温度の経時変化が計算できる。

実験エリア配置図を図3に示す。フィールド実験を行った2007年7～9月の中で、動力による給水を行なわなかった8/15と、7:00～8:10に給水を行なった8/22の計測データを用いて数値計算と比較考察を行なうこととした。また、ブロック下面温度と表面温度の測定値は、図3に示す領域3中央部のデータを用いた。なお、図4と図5に示す通り、8/15と8/22の日射量測定値には雲の影響がほとんど見られず、酷暑日であったと言える。

外気温と日射量の測定値、ブロック下部温度測定値（図3のポイントD）を入力し、計算を行なって得られた表面温度を、ブロック表面温度測定値（図3のポイントB）とともに示したのが図6と図7である。

表1 式(1)～(3)に用いた記号

|               |  |
|---------------|--|
| $a$           | : ブロック表面日射吸収率[-]   |
| $\varepsilon$ | : ブロック表面長波長吸収率[-] (0.9とした。)  |
| $I$           | : 全日射量[W/m <sup>2</sup> ]  |
| $q_{es}$      | : 天空からの実効放射量[W/m <sup>2</sup> ] (-50W/m <sup>2</sup> とした。)   |
| $h_0$         | : ブロック表面総合熱伝達率[W/(m <sup>2</sup> ·K)] (20 W/(m <sup>2</sup> ·K)とした。)   |
| $T$           | : 温度[°C] (添字 $a$ は外気、 $so$ はブロック表面、 $si$ はブロック下面、 $k$ は質点を表す)  |
| ${}_{-1}C_k$  | : 質点 $k-1$ と質点 $k$ の間の熱コンダクタンス[W/(m <sup>2</sup> ·K)] (ただし、本報では、対象質点がブロックの表面や下面となる場合は、 ${}_{so}C_1(= {}_{-1}C_1)$ 、 ${}_{si}C_2(= {}_{+1}C_2)$ のように記号で明示した。) |
| $\Delta t$    | : 時間間隔[s] (300sとした。)   |
| $c_k$         | : ブロックの比熱[J/(kg·K)] (960 J/(kg·K)とした。)   |
| $\rho_k$      | : ブロックの密度[kg/m <sup>3</sup> ] (2100 kg/m <sup>3</sup> とした。)  |
| $l_k$         | : ブロックの質点ごとの厚さ[m] (0.03mとした。)  |

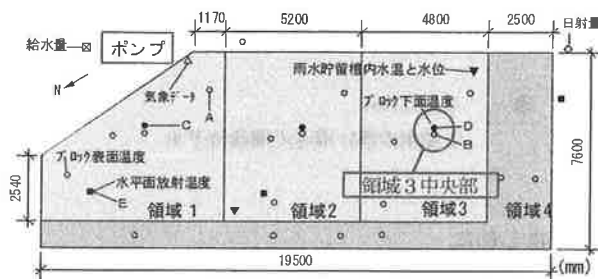


図3 実験エリア配置図

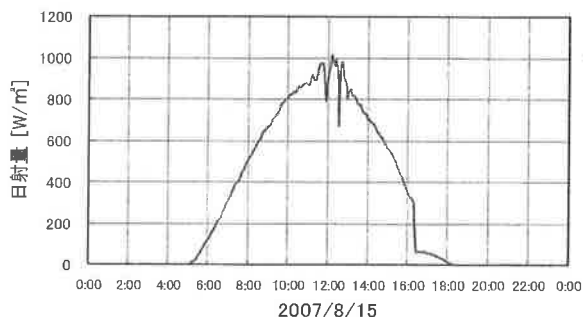


図4 日射量測定値 (8/15)

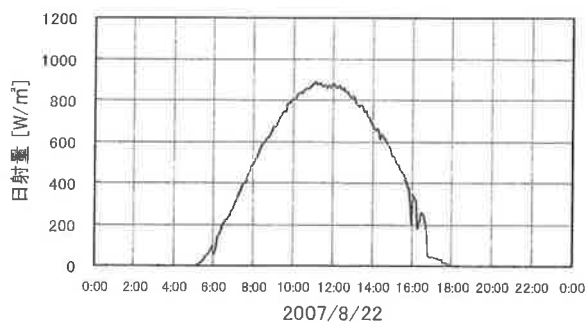


図5 日射量測定値 (8/22)

図6は8/15、図7は8/22の比較結果である。計算値を算出する上で、ブロック等の物性値は表1中に記載したものをを用いた。なお、ブロックは表面が茶色のものと白色のものがあって、これらを全体として眺めた時に均等な色に見えるように配置してあるが、温度計測値は茶色のブロックについて得られているので、これに対応する日射吸収率 $a=0.7$ を仮定した。また、領域3の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0.2を掛けて補正することにした。

図6を見ると、この簡易なモデルは、測定値を精度良く再現できていることがわかる。一方、図7では、給水を行なった7:00~8:10の、直後の時間帯(8:00過ぎ~10:00頃)において、測定値と計算値とに5~8°Cの乖離が見られる。これは、式(1)~式(3)のモデルでは蒸発を無視しているためである。

### 3. 給水と蒸発を考慮した簡易モデル

ブロック表面での水分蒸発による温度低減効果を把握するために、式(1)に液体水の出入りと蒸発による伝熱の項を追加したのが式(4)である。

$$\begin{aligned}
 & aI(n) + \varepsilon q_{es} + h_0(T_a(n) - T_{so}(n)) \\
 & + c_{pw}\rho_w V_{win}(n)(T_w(n) - T_a(n)) \quad (4) \\
 & = c_1(T_{so}(n) - T_1(n)) + \gamma(T_{so}(n-1))M(n-1) \\
 & + c_{pw}(\rho_w V_{win}(n) - M(n-1))(T_{so}(n) - T_a(n))
 \end{aligned}$$

ここに、 $\gamma(T_{so}(n)) = (2500 - 2.34T_{so}(n)) \times 1000$

$$\begin{aligned}
 M(n) &= W(n)k_x(X_{so}(n) - X_a(n)) \\
 &= \frac{W(n)\alpha_c(X_{so}(n) - X_a(n))}{c_{pa} + c_{pu} \frac{X_{so}(n) + X_a(n)}{2}}
 \end{aligned}$$

式(4)の左辺第四項と右辺第二・三項が、給水と蒸発にかかわる項である。左辺第四項はブロックへの供給水が保有するエネルギーを表しており、水の供給によってブロック表面に入ってくる。右辺第二項はブロック表面での蒸発によるエネルギー移動量を示す。右辺第三項はブロックへの供給水のうち蒸発せずに排除される余剰水が保有するエネルギーを表している。なお、時刻 $n$ の蒸発潜熱 $\gamma(T_{so})$ 、蒸発量 $M$ の算出では、計算を簡単にするために、これらの式の右辺にある温湿度の値には時刻 $n-1$ のものをを用いることにした。

この式中に表1から追加して用いた記号の説明を表2に示す。

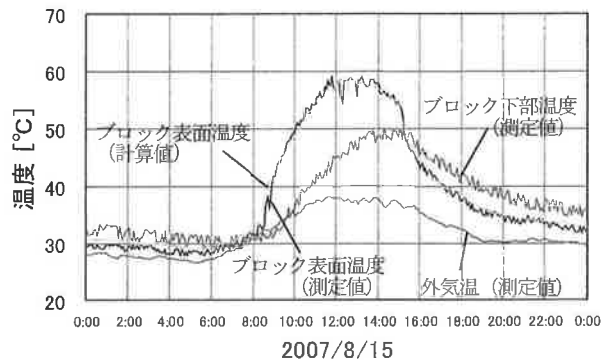


図6 計算値と測定値の比較 (給水無)

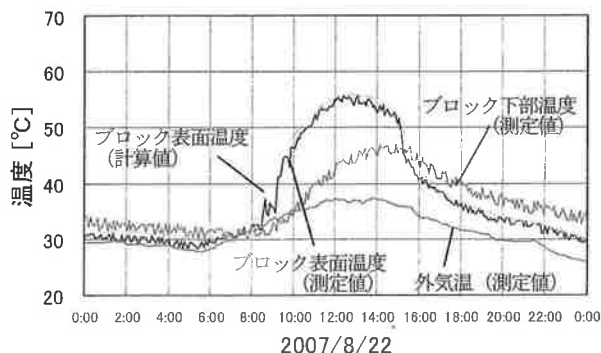


図7 計算値と測定値の比較 (給水有)

表2 式(4)に用いた記号

|                  |   |
|------------------|---|
| $c$              | : 定圧比熱[J/(kg·K)]<br>(添字 pw は水 (4186 J/(kg·K)とした。)、pa は乾燥空気 (1005 J/(kg·K)とした。)、pv は水蒸気 (1846 J/(kg·K)とした。)) |
| $\rho_w$         | : 水の密度[kg/m <sup>3</sup> ] (1000 kg/m <sup>3</sup> とした。)  |
| $V_{win}$        | : ブロックへの供給水量[m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·s)]   |
| $T_w$            | : ブロックへの供給水温[°C]  |
| $X_{so}$         | : $T_{so}$ と同じ温度の飽和空気の混合比 (絶対湿度) [kg/kg']   |
| $X_a$            | : 外気の混合比 (絶対湿度) [kg/kg']  |
| $\gamma(T_{so})$ | : 水温 $T_{so}$ における水の蒸発潜熱[J/kg]  |
| $M$              | : 蒸発量[kg/s]   |
| $k_x$            | : 物質移動係数[kg/(m <sup>2</sup> ·s·(kg/kg'))]   |
| $\alpha_c$       | : 対流熱伝達率[W/(m <sup>2</sup> ·K)] (12 W/(m <sup>2</sup> ·K)とした。)  |
| $W$              | : ブロック表面の濡れ率[-]   |

式(4)と式(2)・(3)を連立方程式として解くことにより、蒸発を考慮した場合の、ブロック表面温度の計時変化が計算できる。

水に関わる物性値は表2中に記載したものをを用い、 $V_{win}$ 、 $T_w$ 、 $X_a$ の測定値を入力としてブロック表面温度を計算した結果を測定値と比較したものが図8である。

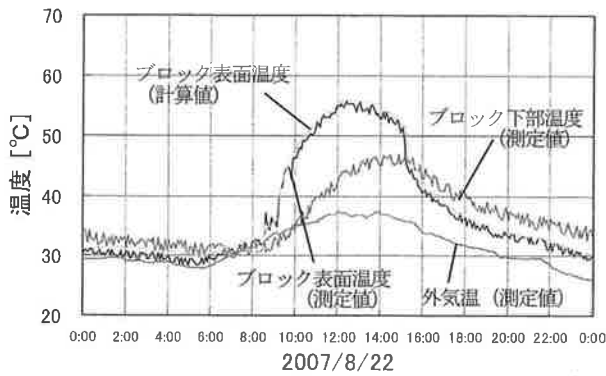


図8 計算値（給水・蒸発考慮）と測定値の比較（給水有）

図7に比べて、計算値が給水中の測定値を精度良く再現できていることがわかる。なお、給水は7:00～8:10に行なったが、水が埋設してある給水管からブロック表面に達するまでの時間遅れを考慮して8:00～9:10について式(4)を使った。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濡れ

#### 謝辞

本研究は、武蔵工業大学との産学共同研究として実施しました。武蔵工業大学環境情報学部 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・椿雅俊・他3名：ヒートアイランド緩和技術の開発、東急建設技術研究所報、No.33、pp.31-36、2008年2月
- 3) 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 (PART2) — SIMPLE MODELING OF THE SYSTEM AND THE RESULTS OF SIMULATION —

H.Uda, O.Endo and A.Fukuda

The pavement system with shallow rainwater storage tank has developed for the mitigation of Heat-Island Effect. 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 2007 to September 2007 at Musashi Institute of Technology (Yokohama Campus).

In this report, simple modeling for heat transfer phenomenon of the system and the results of simulation are reported for optimizing the water supply method. And, the result of doing the comparison consideration of the field test and the result of simulation is reported. At last, thermal efficiency of the pavement system became clear.

率 $W$ を導入し、値を変えて計算したところ、 $W=0.6$ とした時に測定値に最も近くなった。

#### 4. まとめ

システムの簡易モデル化とその数値計算により以下の知見を得た。

- 1) 給水と蒸発を考慮しないモデルにより、給水を行なわなかった場合のブロック表面温度変化を精度良く再現できた。
- 2) 1)のモデルに給水と蒸発の項を追加することにより、給水を行なった場合のブロック表面温度変化を精度良く再現できた。
- 3) 給水と蒸発を考慮するにあたり、ブロック表面から蒸発が起きる湿潤な表面の割合として濡れ率 $W$ を導入した。また、 $W=0.6$ とした時に測定値に最も近くなることがわかった。

今後は、本報に述べたモデルを使って蒸発量と給水量の収支を比較した上で、給水方法の最適化やシステムの改良を行なっていく予定である。