

# 保水性舗装の実用的水分蒸発モデルに関する研究

— 舗装用コンクリートブロックの蒸発性能 —

地域環境計画研究室

北島 洋平

## Abstract

ヒートアイランド現象の緩和対策の一つとして保水性舗装が挙げられるが、現在、その蒸発性能を表す指標が存在しない。そこで、蒸発挙動に対応する物理モデルを構築し、そのモデルパラメータを用いて性能評価指標を確立する。本研究では、実験対象とする20種類、約60個の舗装用コンクリートブロックで実験を行なった。その結果、高性能のブロックにおいては、恒率蒸発期の蒸発性能を重視すべきであるということがわかった。そこで、恒率蒸発期の蒸発量と蒸発効率を指標としモデル化を行ない、室内試験により得られた指標に基づいて求めた予測値と夏の強い日射環境下の蒸発実験から得られた蒸発量の実測値を比較して、モデルの精度を検証した。その結果、実測値と予測値が十分な精度で一致することが確認できた。

## 1 研究の背景と目的

ヒートアイランド現象緩和対策の一つとして保水性舗装が挙げられる。しかし、現在、その蒸発性能を表す指標が存在しない。

崎ら<sup>1)</sup>は保水性舗装の蒸発特性を把握することを目的として、水分蒸発モデルの構築を行い、蒸発を恒率蒸発期と減率蒸発期に分けて取り扱えること、さらに、水分浸透率が減率蒸発期の蒸発性能を支配する指標であることを示した。なお、恒率蒸発期とは蒸発速度が最大かつ一定の期間のことで、減率蒸発期とは蒸発速度が減少していく期間のことである。

本研究ではコンクリートブロック製品を幅広く収集し室内蒸発実験を行なう。多くのブロックの蒸発挙動を分析することで、蒸発性能の水準を把握すると共に、蒸発性能指標となりうる水分物性値を提案する。特に崎が取り扱わなかった恒率蒸発期で、蒸発性能指標となりうる水分物性値を提案し、それを既存モデルのパラメータとして組み込むことで、恒率蒸発期と減率蒸発期の一貫した水分蒸発モデルを構築する。そして、日射のあたる屋外で蒸発実験を行ない、蒸発量実測値と予測値を比較することで、提案した水分物性値が蒸発性能指標となりうるかを検討することを目的とする。

## 2 恒温恒湿槽での蒸発実験

幅広い種類のブロックで蒸発実験を行なうことで、蒸発性能の良いものにはどのような特徴があるのかを分析していく。本研究では、取り扱うブロック数が多く、多数のブロックを迅速かつ簡単に測定することを方針とする。そのため、山口<sup>3)</sup>が提案した、ブロック

の質量を経時計測せず、ある数時点のみの手動計測を行なう簡易ステップ応答実験を行なう。

### 2.1 ステップ応答実験

20種類、約60個のブロック(縦100mm×横200mm×厚60mm)を対象に恒温恒湿槽内(設定温度:40℃、設定湿度:50%)で蒸発実験を行う。実験方法はブロックを約24時間水に浸し、約30分間水切りを行う。その後ブロックの表面からしか水分・熱移動が起こらないように、側面と底面をプラスチックラップフィルム(以降ラップ)で覆い、さらにその上から断熱材で覆い試験体を作成する(図1)。そして恒温恒湿槽内に約12時間置いて馴染ませ(この時ブロックの表面からの蒸発を防止するために、試験体表面をラップで覆う)。その後試験体表面のラップを取ることで表面に湿度ステップ(100%→50%)を与え、蒸発を開始させる。測定項目等は表1に示す。質量測定は蒸発開始後5,10,25時間後、さらに恒率蒸発期終了時点と思われるブロックの表面温度が上昇し始めた時点の計4点で電子天秤によって手動計測している。なお、1度の実験で4つの試験体を実験する(図2のように、恒温恒湿槽内の位置を上段左・右、下段左・右と呼ぶことにする)。

表1 測定項目・機器と測定範囲

測定項目	測定機器	測定範囲
水面温度[°C]	放射温度計 (IRTS-P,Campbell製)	0.00~50°C
槽内温度[°C]・湿度[%]	温湿度計 (CS500,Campbell製)	-40.00~60°C 0.00~100%
蒸発量[°C]	電子天秤 (UW6200H,島津製作所製)	0.001~6200g

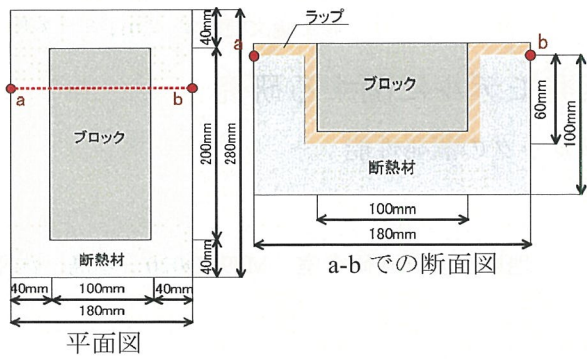


図 1 試験体の平面図と断面図

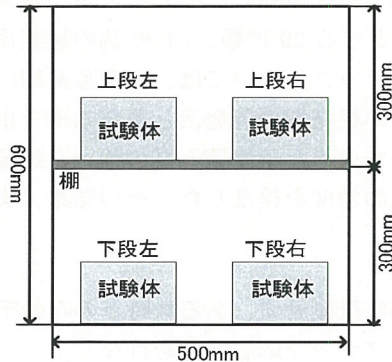


図 2 槽内の試験体設置図

## 2.2 蒸発量の比較

図 5 はそれぞれのブロック (A~E はブロックの製造会社の違い、RorN は保水ブロックか普通ブロックか、GorW は灰色か白色かを示している。ただし、保水性と色に関しては製造会社によって明度が異なるので、参考程度に見る。) の恒率と減率の蒸発量と保水量<sup>注 1)</sup>を、図 3 は蒸発量同士 (恒率・減率)、図 4 は蒸発量と保水量を比較した図である。これらの図より、蒸発性能が良いブロックは、恒率蒸発期の蒸発量が大きくなっていること、また保水量も大きい傾向が見られる。さらに、減率蒸発期の蒸発量は、恒率蒸発期の蒸発量ほど各ブロック間で差がないことがわかる。よって、ブロックの蒸発性能を考える場合、恒率蒸発期の蒸発量が重要となると言える。

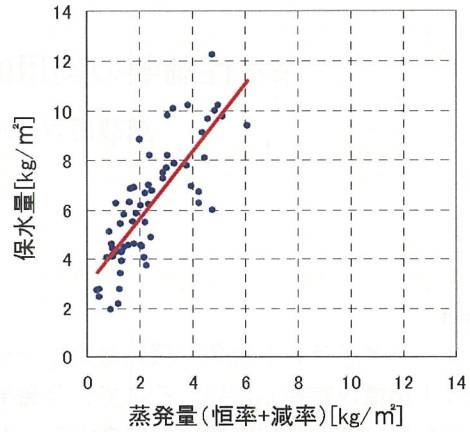


図 3 恒率・減率の蒸発量

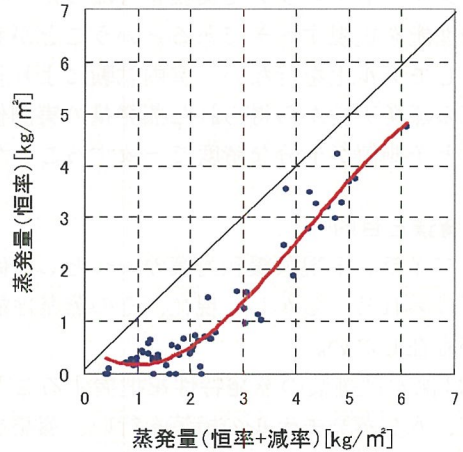


図 4 保水量と蒸発量

## 3 水分蒸発性能指標の提案と算出

### 3.1 恒率蒸発期の蒸発性能

ブロックの蒸発性能は、減率蒸発期よりも恒率蒸発期の蒸発性能の影響を受けることがわかったため、恒率蒸発期について分析する。崎らは、恒率蒸発期の蒸発量計算に式(1)を用いていた。さらに、崎らは恒率蒸発期におけるブロックの蒸発効率を 1.0 として計算している。一般的に蒸発効率が 1.0 であるのは水面である。水面での湿気伝達率と崎が求めたブロックの湿気伝達率が一致するかを調べる。

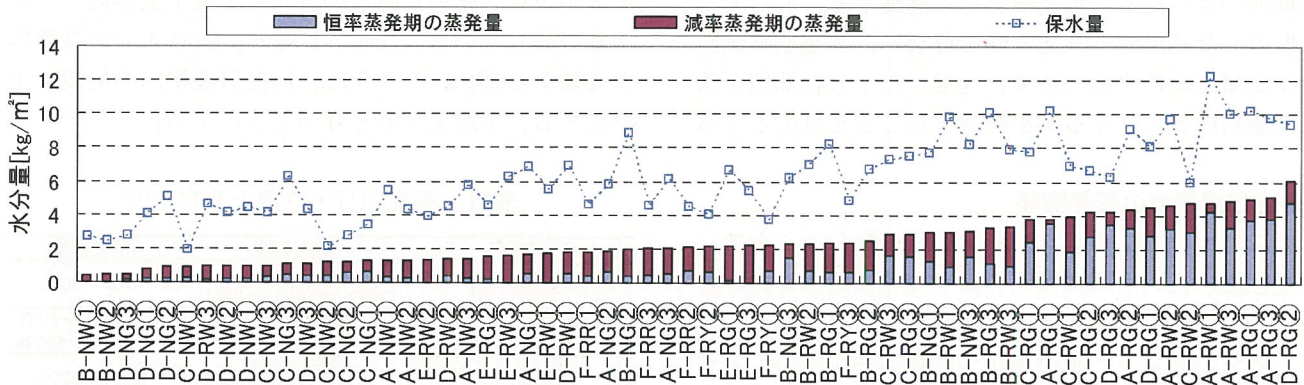


図 5 それぞれのブロックでの積算蒸発量と保水量

### 3.1.1 湿気伝達率算出実験（濾紙法）

水面からの蒸発効率は 1.0 と見なせるため大気の水蒸気伝達率を求めることができる。濾紙法とは十分に水を含んだ濾紙を用いて大気の水蒸気伝達率を測定する方法である。十分に水分を含んだ濾紙は水面とみなすことができ、蒸発効率は 1.0 とみなせる。図 6 のように断熱材を用いて試験体を作成し、恒温恒湿槽内(40℃、50%)の下段右の位置での湿気伝達率を求めていく。図 6 ではあえて試験体で水面を作るために濾紙の表面が水に浸るようにしている特殊な濾紙法である。測定項目は表 1 と同じである。質量測定は蒸発開始から 1 時間ごとに 3 回、電子天秤によって手動計測する。式(1)（梗概の末尾に記載）を用いて算出した結果を図 7 に示す。これより、槽内の下段右での湿気伝達率はおよそ  $2.5 \times 10^{-2} [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1} (\text{kg}/\text{kg})^{-1}]$  程度であることがわかる。

なお、恒温恒湿槽内の湿気伝達率の分布については、図 2 の 4 箇所での湿気伝達率がほぼ一定となることを濾紙法によって確かめた。

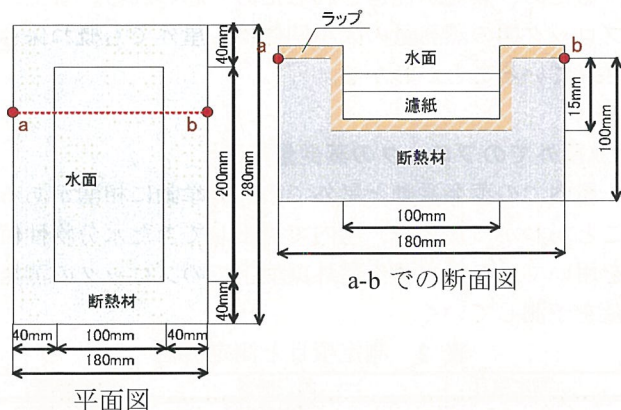


図 6 水面実験の試験体の平面図と断面図

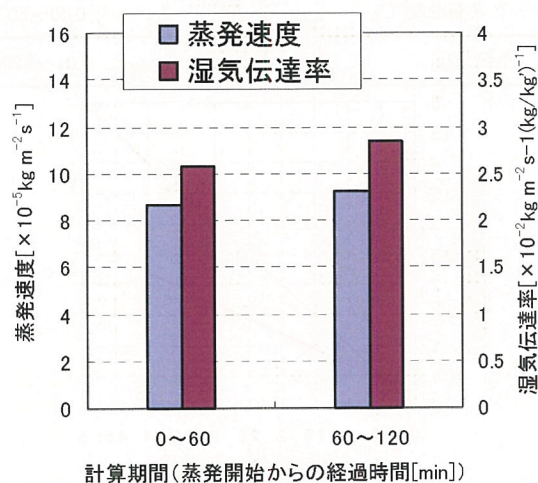


図 7 水面からの蒸発速度と槽内湿気伝達率

### 3.1.2 蒸発性能指標の提案

崎は 4 種類のブロックでステップ応答実験を行っており、ブロックの蒸発効率を 1.0 として湿気伝達率を求めている。その結果、ブロックによって値は異なるが平均するとおよそ  $9.0 \times 10^{-3} [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1} (\text{kg}/\text{kg})^{-1}]$  であった。蒸発効率が 1.0 である水面で求めた通り、槽内の湿気伝達率は  $2.5 \times 10^{-2} [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1} (\text{kg}/\text{kg})^{-1}]$  であり、式(1)より、ブロックの蒸発効率は 1.0 より小さく、ブロックの種類により値が異なるということがわかる。

よって、本研究では蒸発効率を恒率蒸発期の蒸発性能と提案する。また、恒率蒸発期の蒸発量が恒率蒸発期持続時間に影響を与えることから、恒率の蒸発量も重要な性能値となる。恒率蒸発期では蒸発速度は一定であるため、蒸発効率は一定値である。式(1)より、蒸発効率のみが未知であるため、水面より求めた槽内の湿気伝達率・湿度ステップ (100%→50%) による絶対湿度差、実測によって得られた蒸発速度を用いて蒸発効率を求める。図 8 はそれぞれのブロックの恒率蒸発期の蒸発量と蒸発効率を表している。これより、蒸発効率が 0.5 以下の場合では恒率蒸発期蒸発量が大きくならないことがわかる。さらに、0.5 以上からは蒸発効率と蒸発量では相関があまり見られず、それぞれが独立した性能値となることもわかる。

### 3.2 減率蒸発期の蒸発性能

減率蒸発期での蒸発性能は水分浸透率によって支配されている<sup>2)</sup>。式(4)、式(5)を用いて、それぞれの水分浸透率を求める。計算に用いるデータは、ブロックの表面温度が上がり始めた時点以降の表面温度と蒸発量である。(水分浸透率は質量測点が 3 点あれば十分な精度で求めることができると山口ら<sup>3)</sup>によって示されている。) 算出結果を図 9 に示す。水分浸透率は減率蒸発期の蒸発量を用いて求めているため、図のように、減率蒸発期の蒸発量と算出した水分浸透率が相関関係にあることにより、各ブロックの水分浸透率がうまく算出されていることがわかる。また、水分浸透率と蒸発量の数値的な対応関係も把握することができる。

### 3.3 蒸発量予測

室内実験により恒率蒸発期の蒸発効率と蒸発量、減率蒸発期の水分浸透率の値を算出したが、これらが正しく求められているか同定値（求めた水分物性値）を用いて室内での蒸発量を計算する。恒率蒸発期には式(1)、減率蒸発期には式(4)(5)を用いることによって蒸発を求める。図 10 は B-NG①の屋内実験の蒸発量実測値と計算値を比較したものである。図のように実測値と予測値がよく一致していることから、蒸発効率・水分浸透率がうまく算出されていることがわかる。

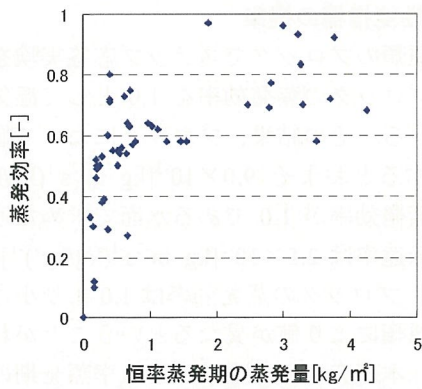


図 8 恒率蒸発期蒸発量と蒸発効率

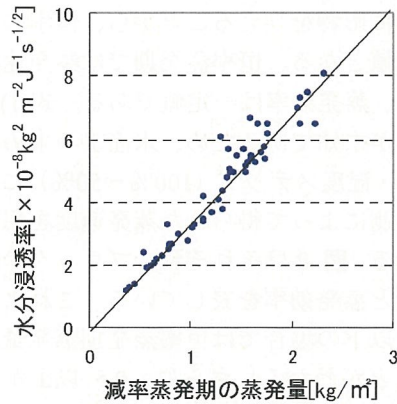


図 9 減率蒸発期の蒸発量と水分浸透率

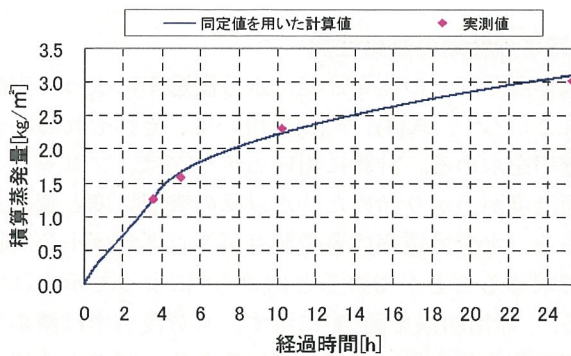


図 10 蒸発量計算値と実測値(B-NG①)

#### 4 屋外暴露環境下でのブロックの蒸発量予測

各ブロックの水分物性値を求めてきたが、ブロックの蒸発挙動が、日射のある屋外暴露環境下でも保存されなければ水分物性値は性能評価指標として成り立たない。よって、日射のある屋外暴露環境下で蒸発実験を行ない、恒温恒湿の単純な雰囲気条件での蒸発量と比較していく。さらに、室内実験により得た水分物性値を用いて蒸発量を予測していく。

##### 4.1 実験概要

夏の晴天日（2010年8月）に大阪市立大学工学部G棟屋上において、種々のブロックで蒸発実験を行なった。屋内での実験と同様に、表面以外を室内実験の場

合同同様に断湿・断熱し試験体を作成する。その後、試験体を日当たりの良い場所で蒸発させる。測定項目と測定機器を表 2 に示す。なお、一日で実験できるブロック数は測器の都合上 5 つまでである。また、質量測定は、蒸発開始前、蒸発開始 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 7.5, 9 時間後の計 11 回手動で行なう。測定日は 15, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 25 の 8 日間である。風速のデータ<sup>注2)</sup>は工学部棟に隣接する生活科学部棟の屋上で計測されたデータを用いる。

##### 4.2 蒸発量測定結果

屋上実験を行なったブロックにおいて、屋内での蒸発量と屋外暴露環境での蒸発量を比較したものが図 11 である。ただし、この蒸発量は屋内での蒸発開始 5 時間後の蒸発量と屋外での蒸発開始 5 時間後の蒸発量である。蒸発開始 5 時間後であれば、ほとんどのブロックが減率蒸発期に入っているため、恒率だけの蒸発量にはなっていない。この図より、屋内の蒸発量よりも日射のある屋外での蒸発量の方が大きいことがわかる。これは、日射によってブロックの表面温度が上昇するため、蒸発が促進されるためと思われる。また、ブロック間の蒸発量の大小関係は、屋外でも概ね保存されていることがわかる。

##### 4.3 屋外でのブロックの蒸発量予測

屋内での蒸発挙動と屋外での蒸発挙動に相関があることがわかったため、屋内で算出してきた水分物性値を用いて、日射のある屋外環境下でのブロックの蒸発量を予測していく。

表 2 測定項目と測定機器

測定項目	測定機器	測定範囲
気温[°C]、相対湿度[%]	温湿度計	-40.00~60°C
	(CS500,Campbell製)	0.00~100%
全天日射量[W/m²]	精密全天日射計	305~2800nm
	(MS-801F,英弘精機製)	
ブロック表面温度[°C]	放射温度計	0.00~50°C
	(IRTS-P,Campbell製)	
蒸発量[g]	電子天秤	0.01~6200g
	(UW6200H,島津製作所製)	

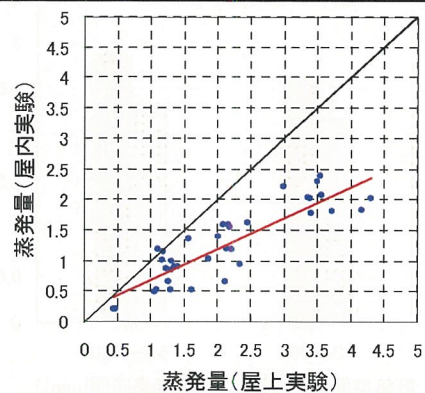


図 11 屋上と屋内での蒸発量

#### 4.3.1 屋外での湿気伝達率算出

屋外での湿気伝達率が未知であるため、ブロックの実験データを用いて求めていく。式(1)において、未知なのは湿気伝達率のみである。よって、ブロックの表面温度、蒸発量、室内で求めた蒸発効率を用いて各ブロックと大気との間の湿気伝達率を求めていく。求めた湿気伝達率を比較したところ、同じ実験日のものは近い値を示していたため、実験日同士で平均し、各実験日の湿気伝達率を求めた。図 12 は求めた各実験日の湿気伝達率と風速（蒸発量が大きくなると思われる 10 時～14 時までの平均風速）を比較した図である。図 12 より湿気伝達率と風速に相関が見られ、湿気伝達率がうまく求められていることがわかる。

#### 4.3.2 蒸発量予測

図 13 は屋外実験を行なった全てのブロックにおいて、式(4)と式(5)を用いて蒸発量を予測し、実測値と比較したものである。蒸発量は同様に蒸発開始 5 時間後のものを用いている。図より、予測値が蒸発量実測値よりも、全体的に  $0.5[\text{kg}/\text{m}^2]$  程度小さくなっているものの、屋外での蒸発量実測値の大小関係と予測値の大小関係が一致していることがわかる。

図 14 は、B-NG①の積算蒸発量予測値と実測値を時系列（蒸発開始～9 時間後）で比較したものである。図のように蒸発挙動をうまく再現できていることがわかる。

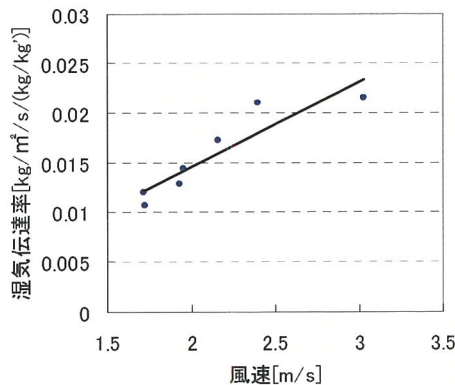


図 12 湿気伝達率と風速

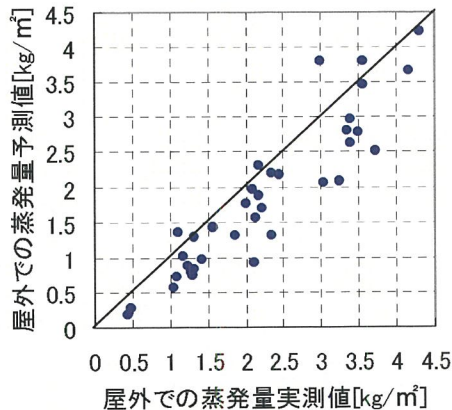


図 13 蒸発量実測値と予測値

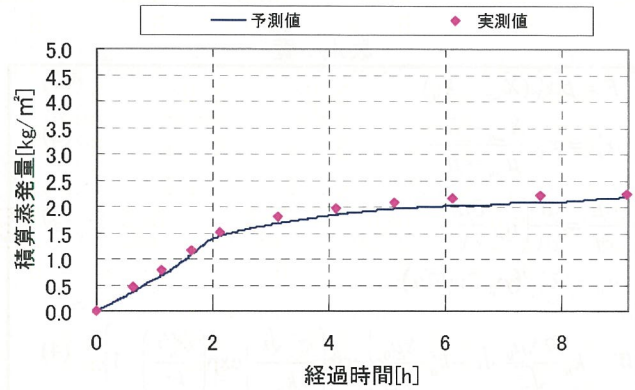


図 14 積算蒸発量予測値と実測値 (B-NG①)

#### 5 まとめ

本研究では、舗装用コンクリートブロックの蒸発性能指標作成に向け、大幅にブロックの数を増やすことにより、様々な蒸発性能を持つブロックで蒸発実験を行なった。室内において多くのブロックで迅速かつ簡易に実験を行なうため、恒温恒湿槽での簡易化ステップ応答実験により一度に 4 つのブロックを実験した。さらに夏の強い日射環境下でのブロックの蒸発挙動を分析するため、屋外実験を行なった。これらの実験を行なうことにより、以下のことが示せた。

- 1) 室内実験により、ブロックの蒸発性能は恒率蒸発期の蒸発性能に大きく影響を受け、蒸発性能が良いブロックは、効率蒸発期での蒸発性能が良いということがわかった。
- 2) 式(1)において、蒸発効率を湿気伝達率と分離し、ブロックの水分物性値とした。その蒸発効率、水分浸透率をパラメータとしてモデルへ組み込み、恒率蒸発期と減率蒸発期の一貫した蒸発モデルを構築した。屋外実験を行ない検証した結果、強い日射環境下において  $R=0.92$  で予測することができ、ブロック間の蒸発量のおおまかな大小関係を把握することができた。また、ブロックの蒸発挙動もうまく再現することができた。

数式一覧

$$E = \beta \alpha'_x (X_{sat} - X_a) \quad (1)$$

$$\alpha'_\mu = \alpha'_x \frac{X_{sat} - X_a}{\mu_{sat} - \mu_a} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a_\mu \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$a_\mu = \lambda'_\mu / (\rho_w \partial w / \partial \mu)$$

$$W = k_\mu \frac{2\Delta\mu_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{t} + k_\mu^2 \frac{\Delta\mu_0}{\alpha'_\mu} \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{\alpha'_\mu \sqrt{t}}{k_\mu} \right) \exp \left( \frac{\alpha'^2_\mu t}{k_\mu^2} \right) - 1 \right\} \quad (4)$$

$\mu$ : 水分化学ポテンシャル [J/kg]  $t$ : 時間[s]  $x$ : 位置[m]

$\lambda'_\mu$ :  $\mu$ 勾配依存の水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]

$\rho_w$ : 水の密度 [kg/m<sup>3</sup>]  $w$ : 体積含水率 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$W$ : 積算蒸発量 [kg/m<sup>2</sup>]  $\Delta\mu_0$ : 大気 $\mu$ のステップ変化幅 [J/kg]

$\alpha'_\mu$ :  $\mu$ 基準湿気伝達率 [kg/m<sup>2</sup>s(J/kg)]

$k_\mu$ : 水分浸透率 [kg<sup>2</sup>J<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>s<sup>-1/2</sup>]

$\alpha'_x$ : 湿気伝達率 [kg/m<sup>2</sup>s(kg/kg')]  $\beta$ : 蒸発効率 [-]

$X$ : 絶対湿度 [kg/kg'] ( $sat$ : 表面飽和、 $a$ : 大気)

注 1) 保水量は以下のよう求める。

$$\text{保水量}[\text{g}/\text{cm}^3] = \frac{\text{湿潤質量}[\text{g}] - \text{絶乾質量}[\text{g}]}{\text{ブロックの体積}[\text{cm}^3]}$$

なお、図 5 では単位を [kg/m<sup>2</sup>] に換算している。

ただし、湿潤質量とはブロックを水に十分浸した後、30 分間水を切った時のブロック質量である。

注 2) 大阪市立大学生活科学部の井川憲男教授からデータの提供を受けた。

<参考文献>

- 1) 崎浩二ほか、保水性舗装の実用的水分蒸発モデルに関する研究—半無限体の線形水分移動方程式の適用可能性に関する検討—、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp363-364、2007
- 2) 西岡真穂ほか、保水性舗装の実用的水分蒸発モデルに関する研究—その 3 保水性ブロックの水分伝導率と水分容量の算出—、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp221-222、2009
- 3) 山口祥平ほか、保水性舗装の実用的水分蒸発モデル作成に関する研究—水分浸透率同定実験の簡易化に関する研究—、2009 年度大阪市立大学工学部卒業論文
- 4) 伊牟田ほか、都市表面物質伝達率測定を目的とした濾紙蒸発法の検証、九州大学大学院総合理工学報告、第 28 巻 第 1 号 31-33 項 2006 年 6 月

## 討 議 等

### ◆討議[鍋島美奈子先生]

1. 図 9 のグラフは取り扱った全てのブロックを示しているのか。
2. 蒸発効率  $\beta$  が大きいブロックは水面の蒸発と同じと考えてよいのか。
3. 実際の道路を計算する上で、簡易のために一般的な道路の  $\beta$  を一様に扱うと思われる。しかし、この研究では  $\beta$  はコンクリートブロックの種類により大きくことなる ( $0 \leq \beta \leq 1$ ) と示しており、実際の道路を計算する場合は、ブロックの蒸発効率をそのつど求めて計算すべきということなのか。
4. 減率蒸発期では、 $\beta$  は時間変化するのか。

### ◆回答

1. 20 種類、約 60 個のブロック全てにおける水分浸透率と蒸発量の関係を示しています。
2. 全く同じではありません。ただ、水面では  $\beta$  が 1.0 なので、その値に近づくと、水面の蒸発模様にならんと考えてよいです。
3. ブロックの種類ごとに  $\beta$  を求めるので、どの種類のブロックが一般に多く用いられているかを調べなくては、蒸発量の計算はできません。
4. 本研究のモデルでは  $\beta$  は恒率蒸発期に一定値として計算しており、減率蒸発期では  $\beta$  は用いていません。

### ◆討議[重松孝昌先生]

5. 恒率蒸発期と減率蒸発期の違いは何なのか。
6. 水に浸したとき、保水量によって  $\beta$  や恒率の期間が変わるのか。

### ◆回答

5. 蒸発速度に関して言うと、恒率蒸発期は蒸発速度が一定である期間で、減率蒸発期は蒸発速度が減少していく期間です。マクロな視点から見ると、恒率蒸発期では、ブロック内の水の通り道である毛細管が多く存在し、表面への水の輸送が多い。しかし、減率蒸発期では、蒸発による水の減少によって、毛細管が少なくなり下層から表層への水の輸送が制限されている。このことにより、減率蒸発期では蒸発速度が減少していく。さらに、熱に関しては、水の移動模様の影響を受けるため、恒率蒸発期では水の蒸発潜熱が多く、熱が大気へと輸送されており、表面温度が低くなっています。減率では水の蒸発潜熱が少なくなるため、表面温度が上昇し始めます。

6. 大まかに言えば、保水量によって蒸発量も変わります。しかし、 $\beta$  と恒率の継続時間については、保水量に依存しているとは断言できません。

### ◆討議[矢持進先生]

7. 恒温恒湿槽の内部は、ファンによって空気が循環しているのか。

### ◆回答

7. ファンによって槽内空気が循環しており、槽内の空気は一様になっています。

### ◆討議[水谷聡先生]

8. 恒率蒸発期と減率蒸発期は、ブロック表面はどのような違いがあるのか。乾いたりしているのか。
9. ブロックの構造を工夫することでブロックの蒸発性能を向上させることができるのか。

### ◆回答

8. 減率蒸発期は、下層から表層への水の輸送が小さくなるために乾燥過程である。よって、外見では、表面は乾いているように見られる傾向がある。
9. 蒸発速度に関して言うと、ブロックの構造とも関係があるため、性能を向上させることができるでしょう。本研究で用いていたブロックのなかに、同じ素材であるが表面の構造が違うものがあつたのですが、それらは蒸発性能がちがいました。