

透湿性防水膜を用いた蒸発冷却パネルの蒸発特性

EVAPORATION CHARACTERISTICS OF EVAPORATIVE COOLING PANEL BY USING MOISTURE PERMEABLE WATERPROOF MEMBRANES

地域環境計画分野 森畠 輝

Division of Regional Environmental Planning Hikaru MORIHATA

都市部において緑地の減少、人口被覆面の増大により蒸発冷却効果が減少し、温熱環境が悪化している。改善手法の一つとして、本研究では透湿性防水膜を利用した蒸発冷却手法を提案する。蒸発機構の概念は、透湿性防水膜で袋状に設計したものの内部に液水を貯留し、袋表面から蒸発させるものである。そこでまず、透湿性防水膜で区切られた気液界面の透湿抵抗を測定する実験を行う。その後、蒸発モデル式を構築しモデルにより推定する透湿防水膜の表面温度等を実験により検証する。

In the urban area, the evaporative cooling effect decreases due to the reduction of the green space, and the thermal environment deteriorates. As an improvement method, this study proposes an evaporative cooling method using moisture permeable waterproof membranes. The evaporation mechanism stores liquid water in a bag-like design with moisture permeable waterproof membranes and evaporates it from the bag surface. First, an experiment to measure the moisture permeation resistance of the gas-liquid interface delimited by the moisture permeable waterproof membranes is performed. Then, the evaporation model formula is constructed and the surface temperature of estimated moisture permeable waterproof membranes is verified experimentally.

1. 研究の背景と目的

都市部において、緑地の減少や人口被覆面の増大によって温熱環境が悪化し、大きな社会問題となっている。その改善手法の一つとして、蒸発冷却手法を壁体や壁面に適用する技術が開発されている。梅干野ら⁽¹⁾は高揚水性セラミック材の毛管引力を用いた蒸発冷却壁体を考案し、蒸発対象面全体を常に濡らすことのできる給水システムを開発している。しかし、簡素な装置構成でかつ冷却効率のよいシステムの提案が課題として残されている。そこで本研究では、蒸発面を常に維持できることに加え、簡素な構成で冷却効率の良いものとして、透湿性防水膜（以下、膜とする）を用いた蒸発冷却手法を提案する。蒸発機構の概念は、膜で袋状に設計したものの内部に液水を貯留し、袋表面から蒸発させるものである。実用形態としては、膜をフレーム材に取り付けて薄いパネル状（図 1）としたものを、図 2 のように複数枚並べてスリット状に配置することで、蒸発冷却効果を期待する。

そこで本研究では、まず膜で区切られた気液界面の水分移動をモデル化するにあたり重要なパラメータとなる透湿抵抗を測定する実験を行う。実験結果を基に、図 1 を想定して自作した蒸発冷却パネルの蒸発モデルを構築し、膜表面における熱収支式より推定される膜の表面温度、および蒸発量を実験により検証する。

また、その熱収支式に標準年 EA データ（大阪）を与え、夏季の建物南面における蒸発冷却パネルの蒸発特性を把握することで蒸発冷却効果を検討することを目的とする。

2. 透湿抵抗測定法に関する検討

2.1 はじめに

透湿抵抗を測定する手法として、まず実用形態と同様な気液界面とする供試体（図 3）を用いて式 (1) より透湿抵抗を測定する。この測定法を水-空気法と称す。また、JIS L 1099, 繊維製品の透湿度試験方法⁽²⁾である塩化カルシウム法、酢酸カリウム法に従い得られた透湿度を、式 (2)(3)を用いて透湿抵抗を算出し、水-空気法との実験結果と比較することで透湿抵抗の確からしさを検討する。

2.2 各測定法の概要と水分移動モデル

(1) 水-空気法

図 3 の供試体は、内部に水を水深 15 mm になるまで入れ、供試体上部を密閉させることで、膜からのみ下向きに蒸発を促すように設計する。膜は恒温恒湿層内において蒸発が促せるように供試体下部に 100 mm ほどのスペースの保つことのできる三脚台を用意し、設置する。所定温湿度条件下において、一定時間経過後の質量減少量を測定し、透湿面積 $A \text{ m}^2$ と経過時間で

$$E_{Air} = \frac{1}{R'_f + R'_c} (f_s(T_s) - f_a) \quad (1)$$

$$E_{CH_3COOK} = \frac{1}{2R'_f} (f_{sw}(T_w) - f_k(T_k)) \quad (2)$$

$$E_{CaCl_2} = \frac{1}{R'_A} (f_a - f_{CaCl_2}) \quad (3)$$

$$E = \frac{w_1 - w_2}{A(t_2 - t_1)} \quad (4)$$

<記号表>

E : 透湿度 [g/(m ² h)]	A : 透湿面積[m ²]
$w_1 - w_2$: 質量変化量[g]	$t_2 - t_1$: 経過時間[h]
R'_f : 透湿抵抗[(Pa・m ² ・h)/g]	
R'_c : 表面湿気伝達抵抗[(Pa・m ² ・h)/g]	
R'_A : 塩化カルシウム法における全抵抗[(Pa・m ² ・h)/g]	
$f_s(T_s) - f_a$: 水-空気法における飽差[Pa]	
$f_{sw}(T_w) - f_k(T_k)$: 酢酸カリウム法における飽差[Pa]	
$f_a - f_{CaCl_2}$: 塩化カルシウム法における飽差[Pa]	

表 1 3種類の透湿抵抗測定方法における違い

測定方法	(a) 酢酸カリウム法	(b) 水-空気法	(c) 塩化カルシウム法
水分移動モデル	CH ₃ COOK ↑ $f_k(T_k)$ ↓ $f_{sw}(T_w)$ H ₂ O	H ₂ O ↑ $f_s(T_s)$ ↓ f_a Air	Air(高湿度) ↑ f_a ↓ f_{CaCl_2} Air CaCl ₂
温湿度条件	23℃ 50%	30℃ 50% 40℃ 50%	30℃ 90% 40℃ 90%
測定間隔	15分	60分	120分

除することで透湿度を求める。算出式を式(4)に示す。また、膜を通した蒸発現象は表1(a)の水分移動モデルとして考えられ、これより蒸発速度は式(1)で表される。なお、表1(a)の湿度境界層における表面湿気伝達抵抗 R'_c は、ろ紙法⁽³⁾により別途算出した結果、2.44 Pa・m²・h/gを得た。

(2) 塩化カルシウム法、酢酸カリウム法

大田⁽⁴⁾は、塩化カルシウム法と酢酸カリウム法を実施し、式(4)を用いて透湿度を算出し、表1(b)(c)に示す水分移動モデルに即した式(2),(3)より、透湿抵抗を算出した。

2.3 透湿抵抗 R'_f の測定結果

図4に示すように、水-空気法の実験結果では、透湿抵抗 R'_f 7.4 Pa・m²・h/gを得た。また、酢酸カリウム法、塩化カルシウム法においても水-空気法の実験結果と近い値をとった。3種類の測定法において透湿抵抗の値はほぼ一致したため、水-空気法の水分移動モデルと同様である蒸発冷却パネル表面における蒸発現象は確からしいと判断できる。

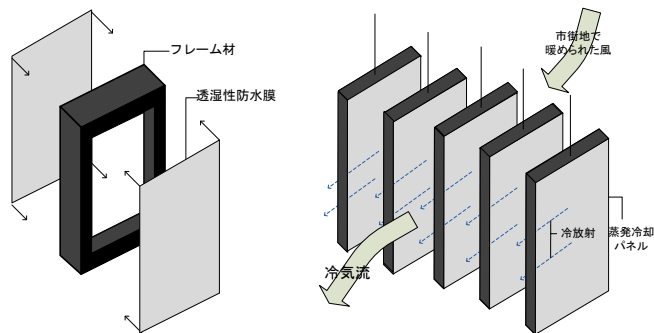


図 1 蒸発冷却パネル 図 2 パネルによる効果

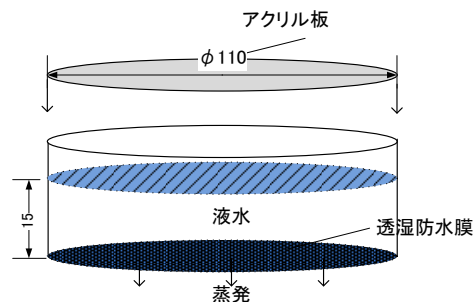


図 3 水-空気法の供試体模式図

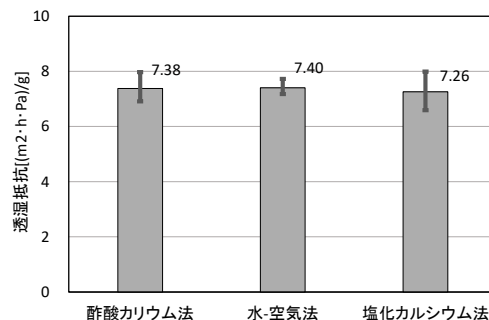


図 4 透湿抵抗測定結果

3. 蒸発冷却パネル表面における熱的性能

3.1 はじめに

透湿抵抗を用いた蒸発モデルの妥当性を検証するため、図1を想定した蒸発冷却パネルを作成し、実験により蒸発特性を把握する。

3.2 蒸発冷却パネルの構成と実験概要

作成する蒸発冷却パネルは、フレーム材としてプラダン(W340×H280×D5 mm)を図6のようにW4×H9 mmに格子状にくり抜き、片面に金属板、もう片面に第2章で測定された透湿防水膜を張り合わせる。次に、プラダン内部に液水を供給することで液水と膜が直接接触し、蒸発が起こる仕組みとなる。パネル底面はエポキシパテを用いて止水させておく。蒸発冷却効果を最大限利用するためには両面を膜とすることが好ましいが、実利用において屋外環境に設置する場合、膜の耐候性が弱いことが懸念されるため日射などの熱源は金属板で受けることとし、片面蒸発のパネルを作成する。

作成したパネルを図6のW340×H600×D100 mmのアクリル箱と一定の気流(1.0 m/s程度)で運転するクロスフローファンを合わせた装置の中央に設置する。

アクリル箱片面は断熱材にシリコンラバーヒーター (W250×H300 mm) を貼り合わせたものとし、ヒーター温度約 60 °C に設定した状態で、パネルの金属板に対してヒーターの放射加熱を与える。実験の環境条件は、気温 23~25°C、相対湿度 30~40 % で制御された室内である。

実験のスケジュールは、I~IV区間で実験条件を変化させる。まず区間Iでは、乾燥状態のパネルのまま放置する。区間IIでは、ヒーター加熱を行う。区間IIIでは、ヒーター加熱状態のまま、パネル内部に一樣に給水する。区間IVでは、ヒーター加熱を停止させる。区間ごとの実験時間はI、IIで、1時間、III、IVで2時間とする。

3.3 計測機器と計測方法

図6断面図に示すセンサー配置 T_{sh} 、 T_{sa} 、 $T_1 \sim T_4$ はクリアな接着剤を用いて熱電対を接着させる。 T_1 と T_2 、 T_3 と T_4 の測定点は、パネル鉛直方向に 100 mm の距離を設ける。 $TH1$ はヒーター加熱の影響を受けない場所に、 $TH2$ は膜近傍に設置する。区間III、IVの各区間の水分減少量はスポイトによりパネル上部から給水した量とする。各種計測項目と機器は表2に纏める。

3.4 蒸発冷却パネル表面における熱収支

図5に示すようにパネル表面において熱収支式を作成する。ヒーター加熱側の金属板の熱収支を式(5)、膜表面の熱収支を式(6)とする。また、式(5)、(6)における各フラックスは式(7)~(13)によって与える。パネル近傍の気流速度は予め計測した結果約 1.0 m/s であったため、式(12)、(13)を用いて α_c 、 R'_c を求めると、9.5 W/(m²K)、4.37 Pa·m²·h/g と得た。またパネル内部に液水がない区間I、IIでは、水の熱伝導率の代わりに空気の熱伝導率 0.022 W/(mK) を与えるものとする。

3.5 結果、考察

(1) パネル表面における計測点の表面温度

図8は、各計測点の表面温度からアクリル箱内の空気温度を引いたものである。各区間で20分程度経過すると定常状態となった。区間Iでは表面温度と空気温度が等しい状態であることが確認できる。区間IIでは、金属板で放射加熱を受け、表面温度が6°C程度上昇した。 T_1 と T_2 で約 1°C の上下で温度差が生じており、ヒーターの放射加熱がファンの影響により温度分布が生じたことが推察される。区間IIIでは、パネル内部の熱伝導率が大きくなるため、パネル表裏の温度差が区間IIでの5°C程度の温度差から約 1°C程度となる。かつ膜表面からの蒸発により、区間IIに比べ、金属板側で表面温度が低下した。区間IVでは、ヒーターからの放射加熱がなくなり、パネル表裏の温度差はほとんど生じず、両面ともに空気温度よりも2°C程度低い値を示した。

表2 計測項目と機器

計測項目	計測機器	仕様	数量	データ記録	測定間隔
水分減少量	電子天秤 UW-6200H	最大秤量6.2kg 分解能±0.01g	1台	目視	2時間
透湿防水膜表面温度	放射温度計 IRTS-P	分解能±0.05°C 精度±0.2°C	1点	midi LOGGER GL840	1分 (全期間)
ヒーター表面温度	T型熱電対	分解能±0.1°C 精度±0.5°C	2点		
金属板表面温度			1点		
アクリル箱表面温度			2点		
			1点		
アクリル箱内温度	温湿度センサー CS500-L	温度: 分解能±0.01°C 精度±0.6°C 湿度: 分解能±0.01% 精度±3%	2点		

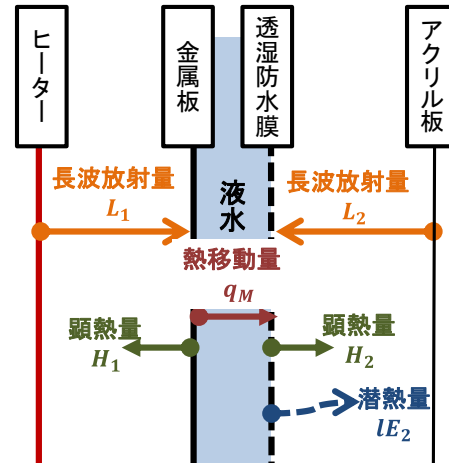


図5 蒸発冷却パネル表面における熱収支

$$L_1 - H_1 - q_M = 0 \quad (5)$$

$$L_2 - H_2 - lE_2 + q_M = 0 \quad (6)$$

$$L_1 = \alpha_{r1}(T_{sh} - T_{s1}), L_2 = \alpha_{r2}(T_{sa} - T_{s2}) \quad (7)$$

$$H_1 = \alpha_c(T_{s1} - T_{a1}), H_2 = \alpha_c(T_{s2} - T_{a2}) \quad (8)$$

$$lE_2 = \frac{l}{R'_f + R'_c} (f_s(T_{s2}) - f_a) \quad (9)$$

$$q_M = \lambda/\Delta x(T_{s1} - T_{s2}) \quad (10)$$

$$\alpha_r = 4\varepsilon_1\varepsilon_2\sigma T_m^3 \quad (11)$$

$$\alpha_c = \frac{Le \cdot P \cdot C_{pa}}{0.622R'_c} \quad (12)$$

$$\alpha_c = 5.6 + 3.9v (v \leq 4.9\text{m/s}) \quad (13)$$

<記号表>

L : 長波放射量[W/m ²]	H : 頭熱量[W/m ²]
lE : 潜熱量[W/m ²]	q_M : パネル内部熱移動量[W/m ²]
α_r : 放射熱伝達率[W/(m ² K)]	T_{sa} : アクリル箱表面温度[°C]
T_{sh} : ヒーター表面温度[°C]	T_s : パネル表面温度[°C]
α_c : 表面对流熱伝達率[W/(m ² K)]	T_a : 空気温度[°C]
$f_s(T_s)$: 表面飽和水蒸気圧[Pa]	f_a : アクリル箱内水蒸気圧[Pa]
λ : 水の伝導率[W/(mK)](0.582)	Δx : パネル厚み[m]
$\varepsilon_1\varepsilon_2$: 長波放射率[-](0.96)	l : 蒸発潜熱[kJ/kg](2.5×10 ³)
σ : ステファンボルツマン定数[W/m ² K ⁴](5.67×10 ⁻⁸)	
T_m : 代表温度[K](T_{sa} , T_{sh} と T_s の平均温度とする)	
Le : ルイス数[-](0.9)	P : 大気圧[Pa]
C_{pa} : 湿り空気比熱[kJ/(kgK)]	v : 気流速度 [m/s]

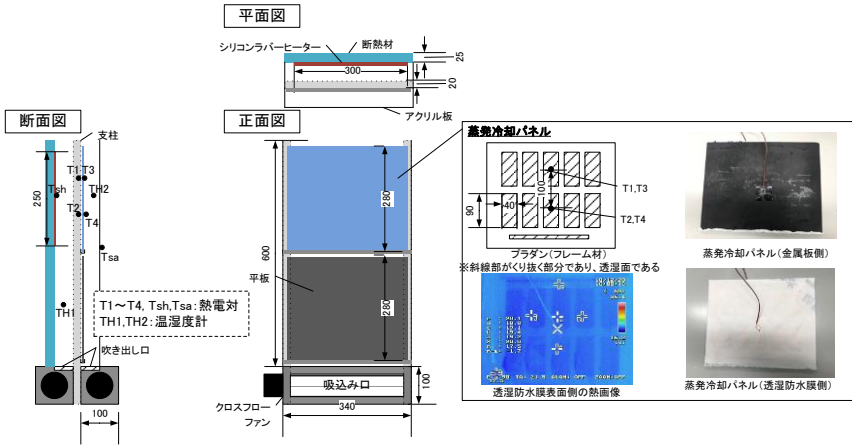


図 6 実験装置と蒸発冷却パネル

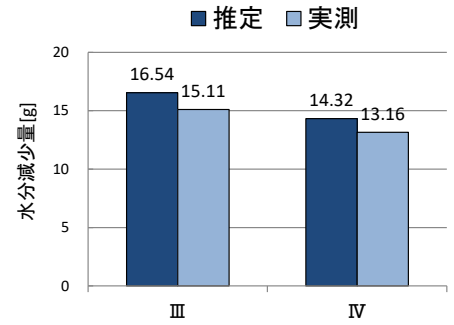


図 7 水分減少量における推定値と実測値

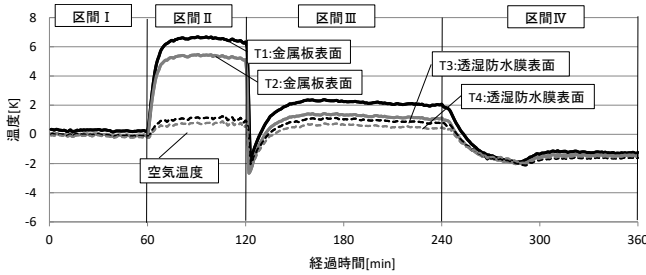


図 8 パネル表面温度の時間変化

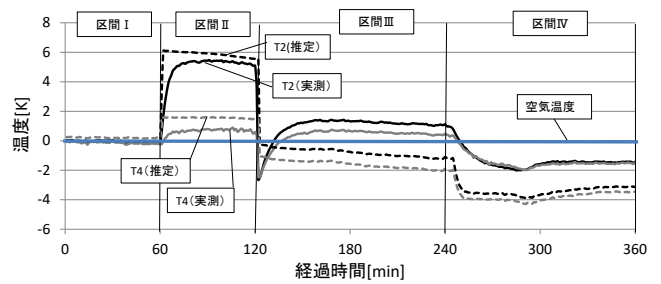


図 9 表面温度における推定と実測値

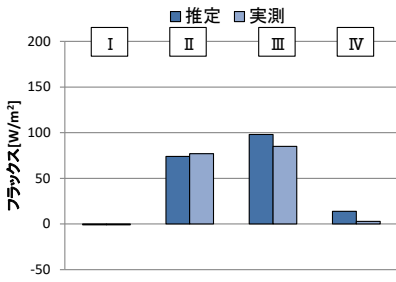


図 10 L_1 (推定と実測)

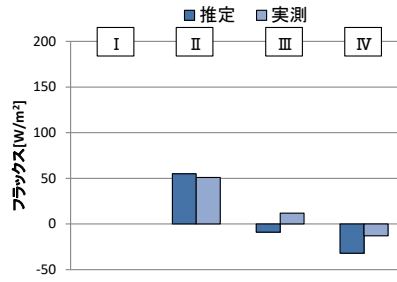


図 11 H_1 (推定と実測)

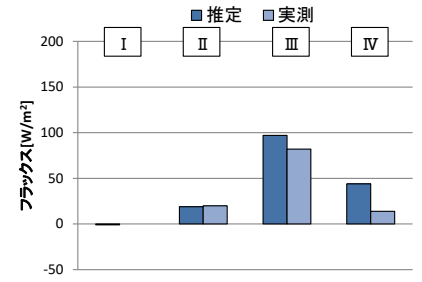


図 12 q_M (推定と実測)

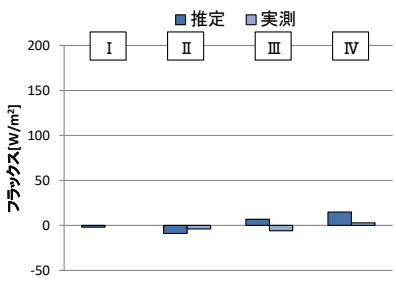


図 13 L_2 (推定と実測)

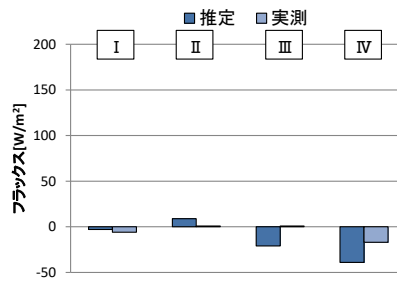


図 14 H_2 (推定と実測)

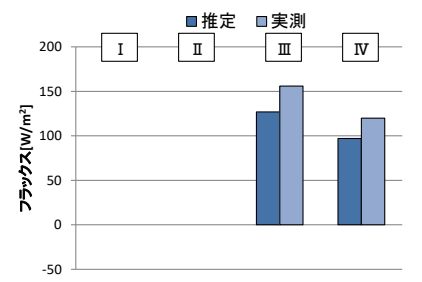


図 15 IE_2 (推定と実測)

(2) 水収支における実測と推定水分減少量の関係

区間III、IVにおいて、式(1)より表面温度測定値(T_4)を用いて、蒸発速度を求める。その値にパネルの透湿面積 ($A=0.0381 \text{ m}^2$) を掛けたものを、区間における水分減少量の推定値とする。また、各区間においてスポットにより給水した水分量を実測値とする。結果、図7と得られ、実測値の方が、IIIでは 1.43 g 、IVでは 1.16 g 、小さい。その差は、推定された水分減少量に対する実測値で評価すると区間IIIでは 9 point、区間IVでは 8

point である。よって、実測値と推定値は概ね一致すると判断できる。但し、実測値を用いて、式(1)の膜表面温度を未知数として解くと、実測値の表面温度よりも両区間で約 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度低く算出される。よって約 1 g の水分減少量の差は表面温度に換算すると 1°C 程度の差と言える。

(3) 熱収支における実測と推定表面温度の関係

式(5)、(6)に計測した表面温度等を用いて熱収支を計算した。その結果、区間II、IIIにおいて金属板側の熱

収支で約 $+140 \text{ W/m}^2$ の残差が生じた。図 8 において区間Ⅱ、Ⅲでヒーターの放射加熱に鉛直分布が生じることを考慮し、熱収支が閉じるように正味のヒーター表面温度を求めると $42.5 \text{ }^\circ\text{C}$ となった。そこで正味のヒーター表面温度、温湿度測定結果を用いて、金属板表面温度 ($T2$) と膜表面温度 ($T4$) を未知数として解くと、図 9 となった。区間Ⅰ、Ⅱではヒーターの正味の表面温度を用いているため、実測値とよく合う。しかし、区間Ⅲ、Ⅳでは、定常状態において、両面ともに $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度実測値よりも低く推定された。そこで、推定された表面温度を式 (4)、(5) に代入し、各フラックス別に求めたものと、実測表面温度から求めるフラックスを定常状態において比較すると、図 10～図 15 となった。各項それぞれで、差が生じることにより、膜表面の熱収支で約 -100 W/m^2 の残差分となり、表面温度の推定値に影響を与える。水収支では、表面温度の $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度の差は水分減少量の総量の約 $1/10$ 以下でありさほど影響を与えないが、熱収支におけるフラックス成分ではその差が与える影響は大きい。よって、水収支より膜表面における蒸発モデルの妥当性は示すことが出来たが、一方で熱収支式による表面温度推定では、フラックスごとの精度向上が求められる。

4. 夏季における蒸発冷却パネルの蒸発特性の把握

4.1 はじめに

第 3 章で構築した熱収支式を用いて表面温度を推定すると、実測値との誤差を生むことを考慮しつつ、本章では、熱収支式に、夏季の標準年 EA データ⁽⁵⁾ (大阪) を用いて、夏季における膜表面温度、および蒸発量を試算する。また、その結果を受けパネルの蒸発性能として、気流速度や日射量を変化させた場合の膜表面温度、蒸発速度の関係を示し、蒸発冷却パネルの蒸発特性を把握することとする。

4.2 熱収支式と蒸発冷却パネルの条件

式 (5)、(6) に対して 8/15～8/21 における標準年 EA データを与える。式 (5) には、金属板の日射吸収率を 0.6

とした日射量の項を加える。パネルは南鉛直面に設置するものとし、アクリル板、およびヒーター表面温度は、気温と同じとする。蒸発冷却効果を比較するために、乾いたパネルの表面温度を試算する。パネル表面温度は、蒸発作用のあるパネルを $Ts1(evp), Ts2(evp)$ 、乾いたパネルを $Ts1, Ts2$ と表記する。

4.3 シミュレーション結果

1 週間のパネル表面温度の計算結果と条件を図 16 に示す。上段は、気温とパネルの表面温度、下段は、日射量、潜熱量と相対湿度の関係を示す。中段は、金属板、膜表面について乾いたパネルと蒸発作用のあるパネルの表面温度差、気温と蒸発作用のあるパネルの表面温度差を表す。図 16 中段より表面温度差を比較すると、金属板側で約 $9 \text{ }^\circ\text{C}$ 差、膜表面では $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 差の昇温抑制効果を示すことが分かる。気温との関係では、日射の多い時間帯では、気温よりも金属板では $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度高くなるが、膜表面は、気温と同程度に抑えられることが分かった。夜間では、日射受熱がないため気温よりも蒸発冷却パネルは $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度低く算出された。

4.4 日射量と膜表面温度、蒸発量の関係

図 17 図 18 図 19 は、夏季日中を想定し、気温 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 相対湿度 50% 、気流速度 1.0 m/s の条件において、日射量を $0 \sim 400 \text{ W/m}^2$ の範囲内での膜表面温度、および蒸発速度を表す。凡例には、透湿抵抗がない、露出した水面の場合と透湿抵抗を無限大にした、非透湿の場合を比較対象として記載する。図 19 より露出した水面、膜、非透湿の順に蒸発速度は小さくなることで、図 17、図 18 より金属板、膜ともに表面温度では順に高くなる。図 17、図 18 において気温 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ を基準に昇温抑制効果が得られる日射量は、金属板では 200 W/m^2 、膜表面では 300 W/m^2 であることが分かった。図 19 において膜と露出した水面の蒸発速度の割合から、蒸発効率を算出すると 0.6 程度実現することが分かった。

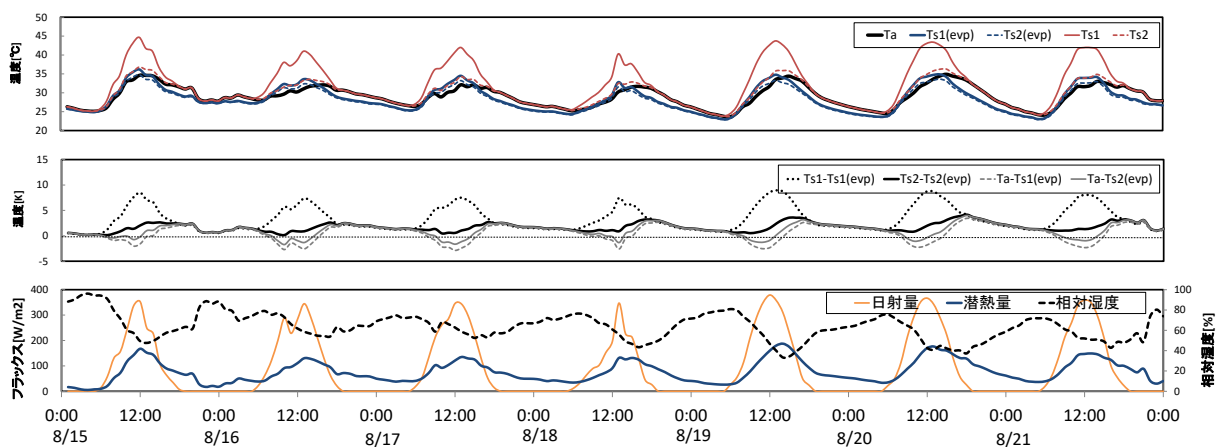


図 16 標準年 EA データ条件とパネル表面温度、潜熱量の時間変化

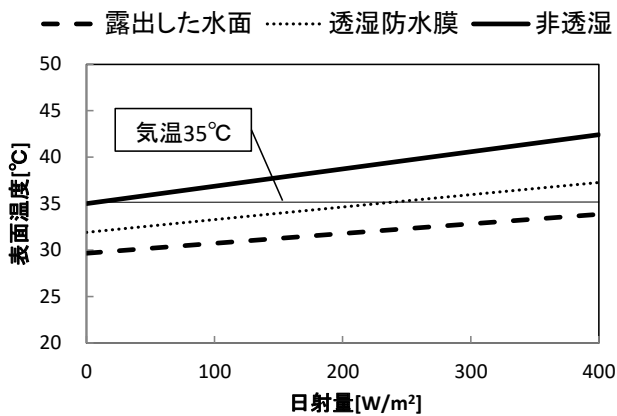


図 17 金属板表面における日射量と表面温度

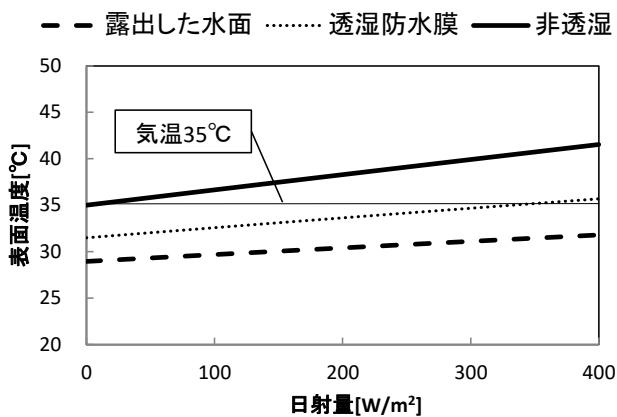


図 18 透湿防水膜表面における日射量と表面温度

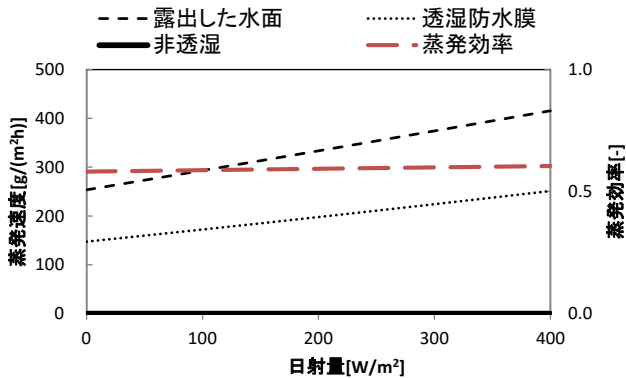


図 19 透湿防水膜表面における日射量と蒸発速度

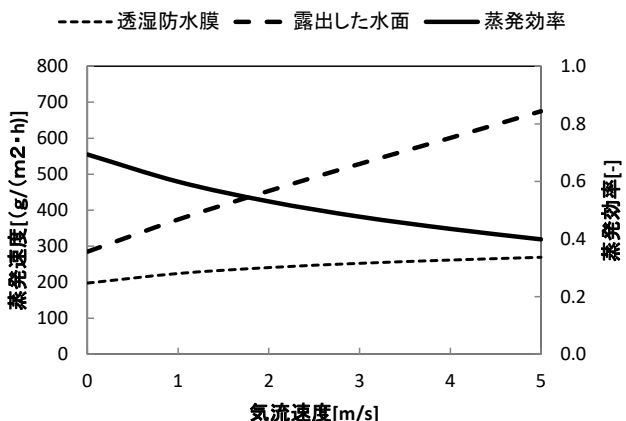


図 20 気流速度と蒸発速度

4.5 気流速度と蒸発量の関係

図 20 は、夏季日中を想定し、気温 35 °C、相対湿度 50 %、日射量 300 W/m² の条件において、気流速度を 0 ~ 5 m/s で変化させたときの、膜、および露出した水面の蒸発速度と、蒸発効率を表す。気流速度が上がるにつれ、表面湿気伝達抵抗 R'_c が減少し、透湿抵抗が蒸発速度に寄与する割合が大きくなることで蒸発効率が 0.7~0.4 程度まで低下することが分かった。よって、蒸発効率を考慮すると、蒸発冷却パネルは気流速度を上げない条件で使用する方が好まれると言える。

5. まとめ

- 1) 透湿抵抗の測定法として、実用形態に近いモデルとして水-空気法を提案し、透湿抵抗を測定した。また、発展形として塩化カルシウム法、酢酸カリウム法によって算出された透湿抵抗は、水-空気法の結果とほぼ一致することを確認した。
- 2) 透湿防水膜を用いた蒸発冷却パネルを製作し、ヒーター加熱実験を行った結果、水分収支は概ね一致することを確認した。しかし、膜表面の熱収支の残差により、表面温度の推定値は実測値よりも 2°C 程度低い結果となった。
- 3) 熱収支式に夏季における標準年 EA データを用いて表面温度、蒸発速度を算出した結果、蒸発作用のあるパネルは乾いたパネルと比較すると金属板側で最大で 9 °C 程度の昇温抑制効果を示した。
- 4) 蒸発冷却パネルに与える日射量の変化に対して、金属板では、約 200 W/m²、透湿性防水膜表面では、300 W/m² まで表面温度が気温よりも低いことが分かった。
(条件：雰囲気 35 °C 50 %、気流速度 1.0 m/s)
- 5) 蒸発冷却パネル表面の気流速度の変化に対して、気流速度が上がるにつれ、透湿抵抗の寄与が高くなり、蒸発効率は低下することが分かった。
(条件：雰囲気 35 °C 50 %、日射量 300 W/m²)

【参考文献】

- (1) 梅干野 晃他, 高揚水性セラミック材を用いた蒸発冷却壁体システムの開発-制作したセラミック材の基本性能と試験壁体の冷却効果等の把握実験: 日本建築学会環境系論文集 第 74 巻 第 641 号 775-782 2009 年 7 月
- (2) 日本工業規格: 繊維製品の透湿度試験法, JIS L 1099, 平成 5 年 1 月 1 日改正
- (3) 伊牟田 航生他: 都市表面物質伝達率測定を目的としたろ紙蒸発法の検証, Engineering sciences report kyusyu University vol.28, No.1, pp.31-33 Jun.2006
- (4) 大田: 透湿性防水膜の透湿抵抗測定法に関する実験的研究, 大阪市立大学卒業論文, 2019 年 2 月
- (5) 日本建築学会, 拡張アメダス気象データ