

# 蒸散建材による建物の除熱・冷却効果に関する研究

蒸散建材                      冷却                      性能

準会員    ○小井塚咲花\*1    正会員    小金井真\*2  
 正会員    金炫兌\*3                非会員    山下哲生\*4  
 非会員    永橋和雄\*5              非会員    常森喬紀\*5

## 1. はじめに

建築業界では ZEB(ゼロ・エネルギー・ビル)や ZEH(ゼロ・エネルギー・ハウス)の普及推進や、ヒートアイランド対策の推進などの地球温暖化対策が講じられている。ヒートアイランド対策の1つとして屋上緑化<sup>1)</sup>が注目されているが、メンテナンスに多額の費用がかかり維持費が高いため普及が進んでいない。また、この屋上緑化と同様にヒートアイランド対策に有効な遮熱塗料<sup>2)</sup>も、数年ごとに塗料を塗り直す必要があり、メンテナンスの費用が高いため普及が進んでいない。

しかし、最近、急速な市場拡大が続くインターネットデータセンター(IDC)をはじめとする通年除熱を要する建物における省電力ニーズが高まっており、これらの技術が再注目され始めている。

このような状況の中で、維持費のかからない蒸散建材が新たに注目されはじめています。しかし、蒸散建材の持つ省エネ効果について定量的な評価はほとんどなされていないのが現状である。

そこで、近年注目を集めている蒸散建材について、実際の建物に施工した場合の蒸散冷却効果についてシミュレーションにより検討を行った。

## 2. 蒸散建材の概要

### 2.1 対象とする蒸散建材の特徴

表1に研究対象の蒸散建材<sup>3)</sup>の基本性能を示す。本研究で対象とする蒸散建材は、「毛細管連続性」を有しており、水が下部から上部へ毛細管現象によって移動するため、効率的に建材表面に水を供給でき、蒸散建材の表面を常に濡れている状態に保つことができる。その骨材は、珪藻土由来で平均直径が1~3mmである。

図1に対象の蒸散建材の標準断面図を示す。この建材は、親水性の特殊バインダーで骨材同士が密接するように結合した、板状の保水性不燃・蒸散促進層と、断熱材が積層されたパネルによって構成されている。

表1 蒸散建材の基本性能 (※厚さ30mm時)

素材	【蒸散促進層】極細毛細管保水性セラミック粒結合板
密度[g/cm <sup>3</sup> ]	1.43 [g/cm <sup>3</sup> ]
重量[kg/m <sup>2</sup> ]	約43 [kg/m <sup>2</sup> ](湿潤時) 約31 [kg/m <sup>2</sup> ](乾燥時)
熱伝導率 [W/m・K]	【蒸散促進層】(乾燥時)0.24 [W/m・K]
保水性	【蒸散促進層】約40 [%vol] 保水量: 約12.4 [kg/m <sup>2</sup> ](湿潤時)
比熱[J/kg・K]	440 [J/kg・K](乾燥時) ※コンクリートの約50%の比熱

## 2.2 蒸散建材による除熱・冷却の原理

図2に従来工法と蒸散建材の除熱・冷却メカニズムの比較を示す。断熱等何もしていない建物では、日射熱がスラブに浸入・蓄熱し、その熱が建物内に流入することにより室内の温度が上昇する。次に、外断熱押え工法によって施工した建物では、断熱材によって熱の流入速度は低下するが、スラブへの日射熱の浸入・蓄熱は避けられずいずれは熱が室内に流入する。

一方蒸散建材を施工した建物では、蒸散建材内に保水した水が気化する際に、潜熱(気化熱)を奪うことにより屋上面・スラブの温度を下げて、室内への熱の貫流を押え室内の温度上昇を抑えることができる。

つまり、断熱無し、一般外断熱押え工法を用いると建物の躯体を冷やすことはできないが、蒸散建材を用いると建物の躯体自体を冷却できることになる。

## 3. 蒸散建材による除熱・冷却に関する理論解析

### 3.1 理論解析の概要

蒸散建材を屋根面に設置することで期待される効果としては、屋根面からその内部に流入する熱量を減らすことにより、直下の空間の空調負荷を低減することである。

従って、本研究の研究対象である蒸散建材を屋根面に設置した場合の、屋根面から建物内への熱の流入量を定量的に評価することが重要である。本理論解析では「建材に保水した

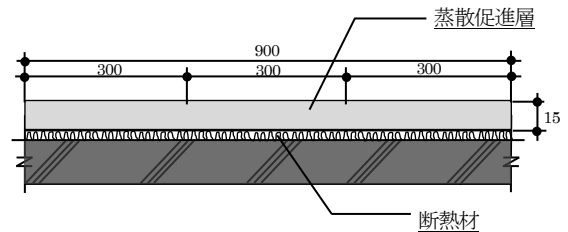


図1 標準断面図

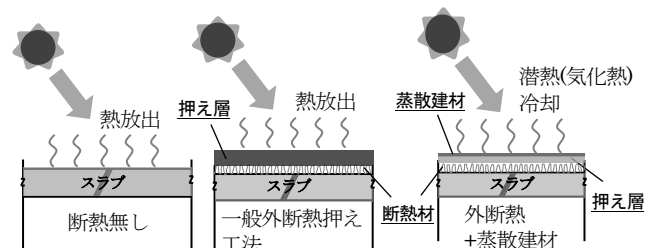


図2 従来工法と蒸散建材の除熱・冷却メカニズムの比較

水が蒸発する際に、潜熱(気化熱)を奪うことで、建物の除熱・冷却を行う」メカニズムを数式化し、実際の気象データを用いて、蒸散建材を設置した場合の建物内への流入熱量の削減率を推定した。

### 3.2 蒸散建材表面での熱平衡式

図3に蒸散建材を設置した建物の屋上部分における熱の流入の模式図を示す。本シミュレーションでは「蒸散建材が乾いている場合」、「蒸散建材に水分が含まれている場合」及び「蒸散建材を設置していない場合」の3つの場合の建物内への流入熱量を求め、比較することを最終目的としている。

これら3つの流入熱量は、以下の式で表すことができる。

蒸散建材が乾いている場合の流入熱量  $q_d$

$$q_d = K \left\{ \left( \theta_o + \frac{a}{\alpha_o} I \right) - \theta_r \right\} \quad \dots\dots (1)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_o} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_i}$$

蒸散建材を設置していない場所の流入熱量  $q_o$

$$q_o = K_o \left\{ \left( \theta_o + \frac{a}{\alpha_o} I \right) - \theta_r \right\} \quad \dots\dots (2)$$

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_o} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_i}$$

蒸散建材に水分が含まれている場合の流入熱量  $q$

$$q = K'(\theta_s - \theta_r) \quad \dots\dots (3)$$

$$\frac{1}{K'} = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_i} = \frac{1}{K} - \frac{1}{\alpha_o}$$

(1)-(3)式において未知数となるのは、蒸散建材の表面温度  $\theta_s$  [°C]であり、3つの流入熱量を比較するにはこの未知数を求める必要がある。

水分を含んだ蒸散建材の表面から空気への伝熱量  $q_w$  は以下のように表すことができる。

$$q_w = \alpha_o(\theta_s - \theta_o) + \gamma \cdot k_x(x_s - x_o) \quad \dots\dots (4)$$

ここで、蒸散建材の表面は全体が濡れていることを想定している。蒸散建材の表面での熱平衡式は以下のように表すことができる。

$$a \cdot I = \alpha_o(\theta_s - \theta_o) + \gamma \cdot k_x(x_s - x_o) + K'(\theta_s - \theta_r) \quad \dots\dots (5)$$

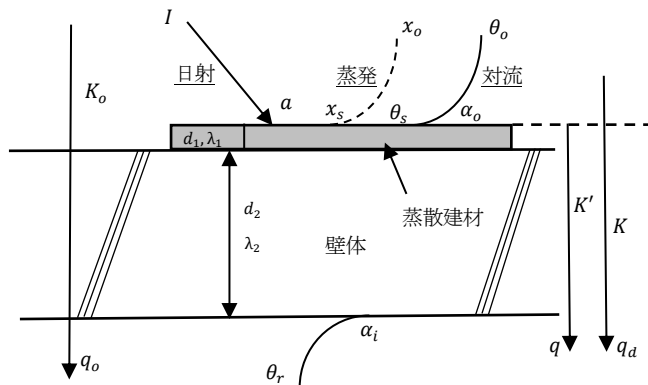


図3 蒸散建材を設置した建物の屋上部分における熱の流入

①左辺第1項  $a \cdot I$

この項は、日射吸収率  $a$  と日射量  $I$  [W/m<sup>2</sup>] の積であるため、これらの値を代入すれば良い。

②右辺第1項  $\alpha_o(\theta_s - \theta_o)$

この項には、未知数である蒸散建材の表面温度  $\theta_s$  [°C] と、数値が明確な外気温度  $\theta_o$  [°C] の他に、外表面熱伝達率  $\alpha_o$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] が含まれる。

外表面熱伝達率  $\alpha_o$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] は以下の式より求まる。

$$\text{外表面熱伝達率 } \alpha_o = \alpha_{oc} + \alpha_{or} \quad \dots\dots (6)$$

$$\alpha_{oc} = 5.6 + 3.9v (v \leq 4.9 \text{ m/s}) \quad \dots\dots (7)$$

$$\alpha_{oc} = 7.2 \cdot v^{0.78} (v > 4.9 \text{ m/s}) \quad \dots\dots (8)$$

$$\alpha_{or} = 5.1 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]} \quad \dots\dots (9)$$

③右辺第2項  $\gamma \cdot k_x(x_s - x_o)$

この項には、数値の明確な水の蒸発潜熱  $\gamma$  [kJ/kg]、外気の絶対湿度  $x_o$  [kg/kg] の他に、絶対湿度基準物質移動係数  $k_x$  [kg/(m<sup>2</sup>·s)] 及び蒸散建材の表面温度  $\theta_s$  [°C] に対する飽和絶対湿度  $x_s$  [kg/kg] が含まれる。

絶対湿度基準物質移動係数  $k_x$  [kg/(m<sup>2</sup>·s)] は以下の式より求まる。

$$k_x = \frac{\alpha_o}{1000 \cdot c_s} \quad \dots\dots (10)$$

$$C_s = C_{pa} + C_{pw} \cdot x_m \quad \dots\dots (11)$$

ここで、境界層内の平均絶対湿度  $x_m$  は  $x_o$  と  $x_s$  の平均値とした。

蒸散建材の表面温度  $\theta_s$  に対する飽和絶対湿度  $x_s$  [kg/kg] は  $\theta_s$  の関数となる。よって、(5)式の右辺第2項は未知数である蒸散建材の表面温度  $\theta_s$  [°C] を含む項となる。

④右辺第3項  $K'(\theta_s - \theta_r)$

蒸散建材外表面から室内までの熱貫流率  $K'$  [W/(m<sup>2</sup>·K)]、室温  $\theta_r$  [°C] の他に、未知数である蒸散建材の表面温度  $\theta_s$  [°C] が含まれる。

以上より熱平衡式(5)は蒸散建材の表面温度  $\theta_s$  [°C] が未知数として残る式となる。

蒸散建材の表面温度  $\theta_s$  に対する飽和絶対湿度  $x_s$  は  $\theta_s$  によって求まるので、蒸散建材の表面温度  $\theta_s$  [°C] に仮の値を与えて蒸散建材の表面温度  $\theta_s$  に対する飽和絶対湿度  $x_s$  [kg/kg] を求め、(5)式を満たすまで反復計算を行うことにした。

まず始めに、蒸散建材の表面温度  $\theta_s$  [°C] を  $t$  [°C] と仮定すると、その温度  $t$  [°C] での飽和水蒸気圧  $e_s$  [hPa] は次の式で求められる。

$$\text{飽和水蒸気圧 } e_s = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5t}{t+237.3}} \quad \dots\dots (12)$$

相対湿度  $RH$  [%] に相当する水蒸気圧  $e$  [hPa] は以下の式で求められる。

$$\text{水蒸気圧 } e = e_s \times \frac{RH}{100} \quad \dots\dots (13)$$

重量絶対湿度  $x'$  [kg/kg] 以下の式で求められる。

$$\text{重量絶対湿度 } x' = \frac{0.62198 \times e}{1013.25 - e} \quad \dots\dots (14)$$

最後に、ここまで示した計算のプロセスによって求めた(5)式を満たす蒸散建材の表面温度  $\theta_s$  [°C] の値とその他の値を(1)・(2)・(3)式に代入して建物への流入熱量を求める。

## 4 解析結果及び考察

### 4.1 シミュレーション条件

蒸散建材表面での熱平衡式に実際の気象データを入力し、A社技術研究所屋上に蒸散建材を設置した場合の建物内流入熱の削減率を推定した。なお、気象データは「気象庁アメダスデータの東京2019年8月4日7:00~19:00の1時間値」を使用した。室温はオフィスを想定した26°Cの場合と、データセンターを想定した23°Cの2つの場合を仮定した。また本シミュレーションでは、研究対象の蒸散建材の熱伝導率が不明であるが、主な構成材が珪藻土と約40%をしめる水、セメント系バインダーであることから推測した結果、熱伝導率として $1[W/(m \cdot K)]$ と $0.5[W/(m \cdot K)]$ の2つの値を選定した。なお、乾燥時の蒸散建材の熱伝導率については表1より $0.24[W/(m \cdot K)]$ とした。さらに、日射吸収率の値は蒸散建材が水を含んでいる場合は0.9、それ以外の蒸散建材が乾いている場合及び蒸散建材を設置していない場合は0.8としている<sup>4)</sup>。A社技術研究所屋上の熱貫流率は $0.8[W/(m^2 \cdot K)]$ とした。

### 4.2 シミュレーション結果

図4は蒸散建材の熱伝導率を $1[W/(m \cdot K)]$ 、室温を26°Cと

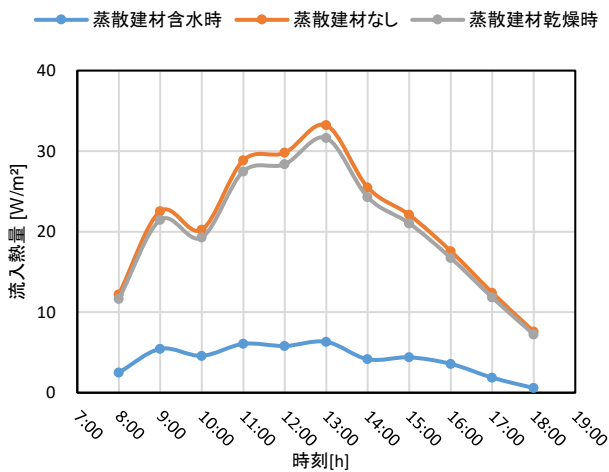


図4 室温26°Cの時の流入熱量

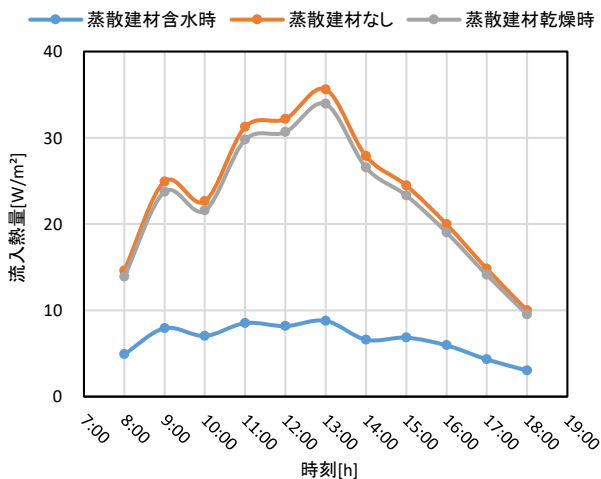


図5 室温23°Cの時の流入熱量

した場合、図5は熱伝導率を $1[W/(m \cdot K)]$ 、室温を23°Cと仮定した場合の時間毎の建物への流入熱量を示している。

蒸散建材含水時は、一日を通して建物への流入熱量が大幅に低下しており、ピーク時(13時)には室温26°Cの場合は約81%、23°Cの場合は約75.3%の建物への流入熱量をカットしている。一方で、蒸散建材乾燥時には、建物への流入熱量は蒸散建材無しの場合とほぼ同じで、除熱効果はほとんどなかった。このことから、本研究で対象とした蒸散建材自体には熱抵抗はほとんど無く、水を含ませることで蒸散建材の除熱・冷却効果が発揮されることが分る。なお、蒸散建材の熱伝導率が不明であるため熱伝導率を仮に0.5とした場合についても、建物内への流入熱量の計算結果はほぼ同等であった。

図6と図7は様々な屋根面熱貫流率について、建物への流入熱量を計算した結果を示している。

屋根面の熱貫流率によらず、建物への流入熱量は蒸散建材がない場合に比べて同じ割合で低下しており、室温26°Cの場合は約80%、室温23°Cの場合は約75%の流入熱をカットできている。屋根面の熱貫流率が小さい場合、つまりもともと建物の断熱性能が高い場合には蒸散建材による流入熱量の減少値が小さいが、一方で、屋根面の熱貫流率が大きい場合、

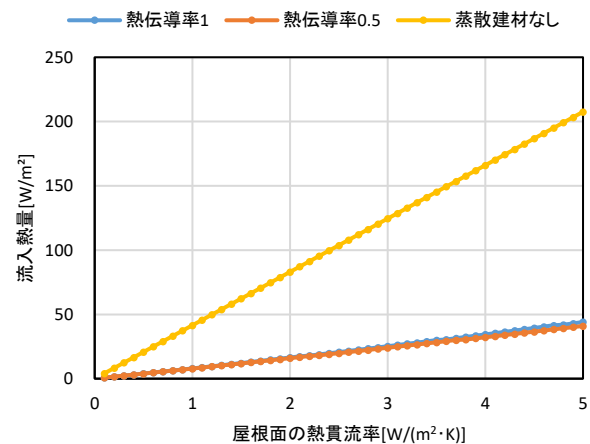


図6 屋根面の熱貫流率と流入熱量との関係 (室温26°C)

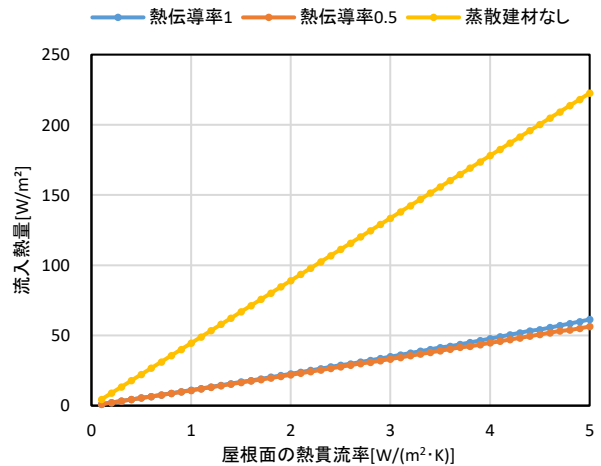


図7 屋根面の熱貫流率と流入熱量との関係 (室温23°C)

つまりもともと建物の断熱性能が低い場合には蒸散建材による流入熱量の減少値が大きくなること分る。また、蒸散建材の熱伝導率 1 の場合と 0.5 の場合との間にほとんど差が無いことも分る。

図 8 に一例として、室温 26°C、熱伝導率 1[W/(m・K)]、日射エネルギー900[W/m<sup>2</sup>] (2019 年 8 月 4 日 13:00 東京)の場合の、入熱量  $a \cdot I$  に対する「建物内への流入熱量」、「対流放射によって空気中に放熱される熱量」、「気化熱によって空気中に放熱される熱量」の割合を示した。

いずれの屋根面熱貫流率においても、入熱量の 90%以上が気化熱として空気中に放熱されていることが分る。ただし、今回のシミュレーションでは蒸散建材の表面全体がすべて濡れている状態を想定したため、気化熱の割合が実際の蒸散建材を使用した場合に比して大きく見積もられていると考えられる。

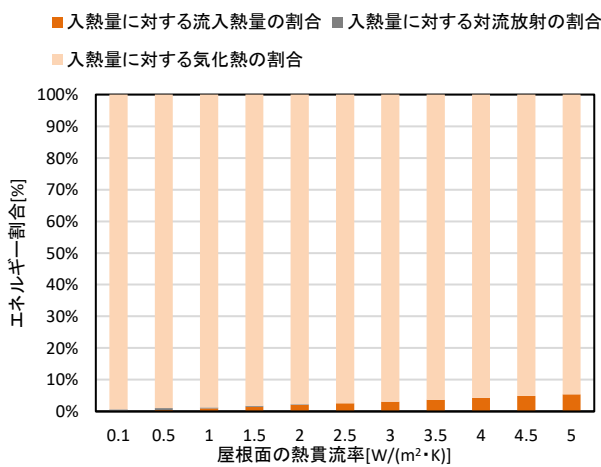


図8 エネルギーフロー(室温26°C,熱伝導率1)

## 5 まとめ

近年注目を集めている蒸散建材について、実際の建物屋上に施工した場合を想定して夏期の気象データを与えて、屋根面の熱貫流率や室温などの条件を変えた場合のシミュレーションを行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 対象とした蒸散建材は、水を含ますことで、建物への熱流入量をピークの13時において室温26°Cの場合は約81%、室温23°Cの場合は約75.3%削減できると分かった。
- 対象とした蒸散建材への日射による入熱量のうち90%以上が気化熱として空気中に放出されることが分かった。
- 屋根面の熱貫流率に応じた、建物への流入熱量の減少値を明らかにすることができた。

今後、年間を通したシミュレーションを行い、建物用途や地域条件に応じた解析を行うことで、蒸散建材の効率的な運用方法を検討していく予定である。また、本シミュレーション

では壁体の熱容量による時間遅れを考慮していない。今後、壁体の熱容量を考慮した非定常解析も実施する予定である。

### 記号一覧

$\theta_o$	外気温度	°C	
$\theta_s$	蒸散建材の表面温度	°C	
$\theta_r$	室温	°C	
$\alpha_o$	外表面熱伝達率	W/(m <sup>2</sup> ·K)	
$\alpha_i$	内表面熱伝達率	W/(m <sup>2</sup> ·K)	9 [W(m <sup>2</sup> ·K)] 含水時 0.9 /その他 0.8
$a$	日射吸収率		
$x_o$	外気の絶対湿度	kg/kg'	
$x_s$	$\theta_s$ に対する飽和絶対湿度	kg/kg'	
$k_x$	絶対湿度基準物質移動係数	kg/(m <sup>2</sup> ·s)	
$I$	日射量	W/m <sup>2</sup>	
$d_1$	蒸散建材の厚さ	m	
$d_2$	壁体の厚さ	m	
$\lambda_1$	蒸散建材の熱伝導率	W/(m·K)	
$\lambda_2$	壁体の熱伝導率	W/(m·K)	
$K$	蒸散建材(乾燥時)を設置している場所の熱貫流率	W/(m <sup>2</sup> ·K)	
$K'$	蒸散建材外表面から室内までの熱貫流率	W/(m <sup>2</sup> ·K)	
$K_o$	蒸散建材を設置していない場所の熱貫流率	W/(m <sup>2</sup> ·K)	
$\gamma$	水の蒸発潜熱	kJ/kg	2501 [kJ/kg]
$\alpha_{oc}$	対流熱伝達率	W/(m <sup>2</sup> ·K)	
$\alpha_{or}$	放射熱伝達率	W/(m <sup>2</sup> ·K)	
$v$	外部風速	m/s	
$C_s$	空気の湿り比熱	kJ/(kg·K)	
$C_{pa}$	空気の定圧比熱	kJ/(kg·K)	1.006 [kJ/(kg·K)]
$C_{pw}$	水蒸気の定圧比熱	kJ/(kg·K)	1.805 [kJ/(kg·K)]
$x_m$	境界層内の平均絶対湿度	kg/kg'	
$t$	蒸散建材の表面温度 $\theta_s$ [°C] に与える仮の値	°C	
$e_s$	$t$ [°C]での飽和水蒸気圧	hPa	
$e$	水蒸気圧	hPa	
$RH$	相対湿度	%	
$x'$	重量絶対湿度	kg/kg'	

### 参考文献

- 豊原憲子他:既存の公開型屋上緑化施設における緑化の目的と維持管理に関する考察、日本緑化学会誌、33巻1号(2007)、pp.307-310
- 田村昌隆:高日射反射率塗料の評価方法と効果について、コンクリート工学、48巻9号(2010-9)、pp.9\_110-9\_114
- 海水化学工業株式会社 環境バイオ事業部 (参照2019.11)  
[https://www.kaisuikagaku.com/biosys/escon\\_gaiyou.html](https://www.kaisuikagaku.com/biosys/escon_gaiyou.html)
- 田中俊六他:建築環境工学 改訂4版(2014-2)、pp.190 表6-3、井上書院

### 謝辞

本研究は、令和元年度戦略的基盤技術高度化支援事業による助成を受け、山口県産業技術センター、海水化学工業㈱、山口大学の3者共同研究として実施したものである。

\*1 山口大学工学部感性デザイン工学科 学生  
\*2 山口大学大学院創成科学研究科 教授  
\*3 山口大学大学院創成科学研究科 助教  
\*4 山口大学工学部技術部 技術専門職員  
\*5 海水化学工業株式会社

Stu., Dept. of Perceptual Sciences and Design Engineering, Yamaguchi Univ.  
Prof., Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.  
Assi. Prof., Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.  
Technical Staff, Technical Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ.  
Kaisui Chemical Industry Co., Ltd.