

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 金炫児^{*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^①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^②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る。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^③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 ³]	1.43 [g/cm ³]
重量[kg/m ²]	約43 [kg/m ²](湿潤時) 約31 [kg/m ²](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 ²](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抑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軸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軸体自身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

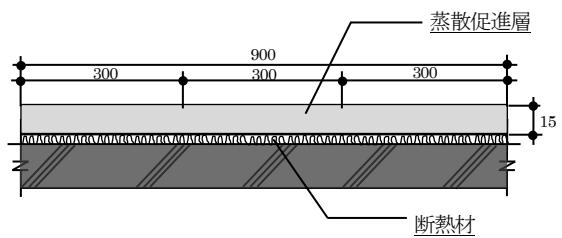


図1 標準断面図

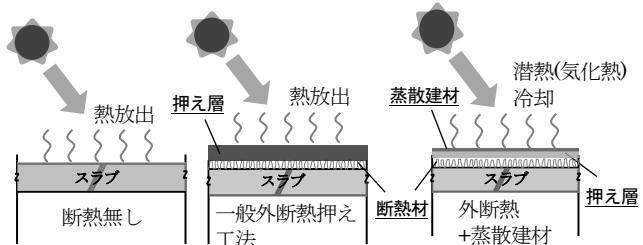


図2 従来工法と蒸散建材の除熱・冷却
メカニズムの比較

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出の模式図を示す。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

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

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

蒸散建材を設置していない場合の流入熱量 q_o

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

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

蒸散建材に水分が含まれている場合の流入熱量 q

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

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

(1)-(3)式において未知数となるのは、蒸散建材の表面温度 θ_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。

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

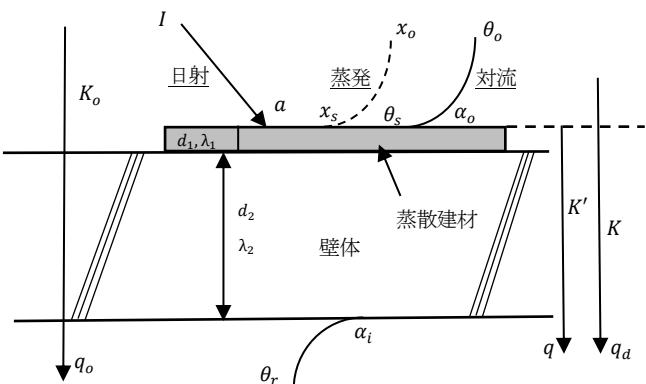


図3 蒸散建材を設置した建物の屋上部分における熱の流入出

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/m²]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 θ_s [°C]と、数値が明確な外気温度 θ_o [°C]の他に、外表面熱伝達率 α_o [W/(m²·K)]が含まれる。

外表面熱伝達率 α_o [W/(m²·K)]は以下の式より求まる。

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

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

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

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

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 γ [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/(m²·s)]及び蒸散建材の表面温度 θ_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/(m²·s)]は以下の式より求まる。

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

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

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 θ_s に対する飽和絶対湿度 x_s [kg/kg]は θ_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 θ_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/(m²·K)]、室温 θ_r [°C]の他に、未知数である蒸散建材の表面温度 θ_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 θ_s [°C]が未知数として残る式となる。

蒸散建材の表面温度 θ_s に対する飽和絶対湿度 x_s は θ_s によって求まるので、蒸散建材の表面温度 θ_s [°C]に仮の値を与えて蒸散建材の表面温度 θ_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とした。

まず始めに、蒸散建材の表面温度 θ_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]以下の方で求められる。

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

最後に、ここまでに示した計算のプロセスによって求まつた(5)式を満たす蒸散建材の表面温度 θ_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·K)]と0.5[W/(m·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·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⁴⁾。A社技術研究所屋上の熱貫流率は0.8[W/(m²·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·K)]、室温を26°Cと

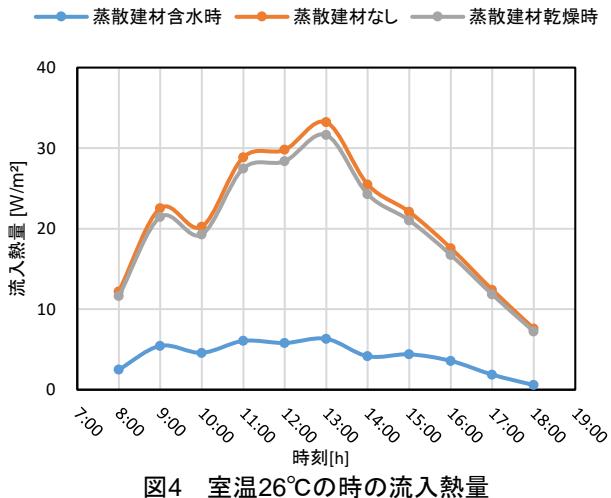


図4 室温26°Cの時の流入熱量

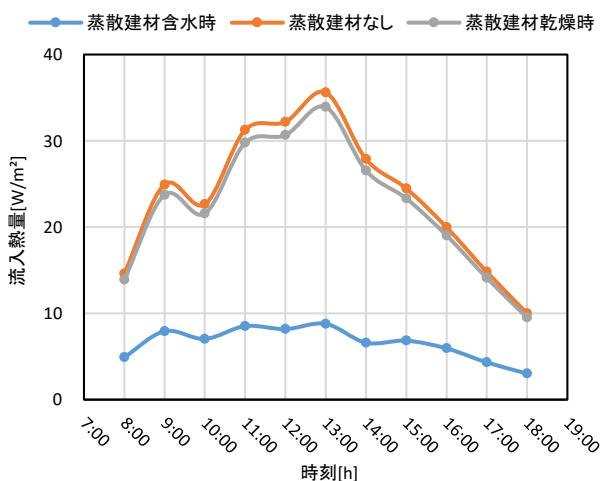


図5 室温23°Cの時の流入熱量

した場合、図5は熱伝導率を1[W/(m·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、

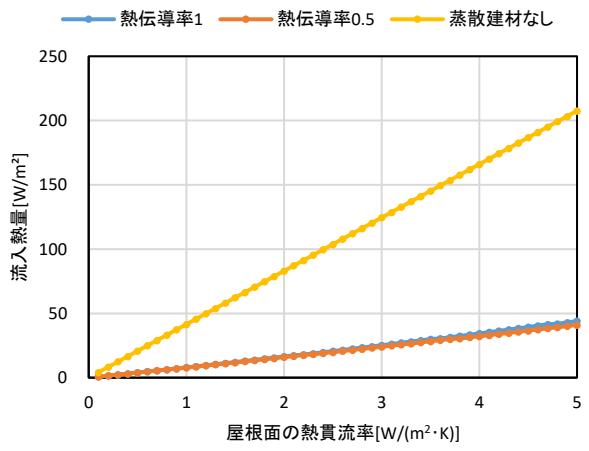


図6 屋根面の熱貫流率と流入熱量との関係
(室温26°C)

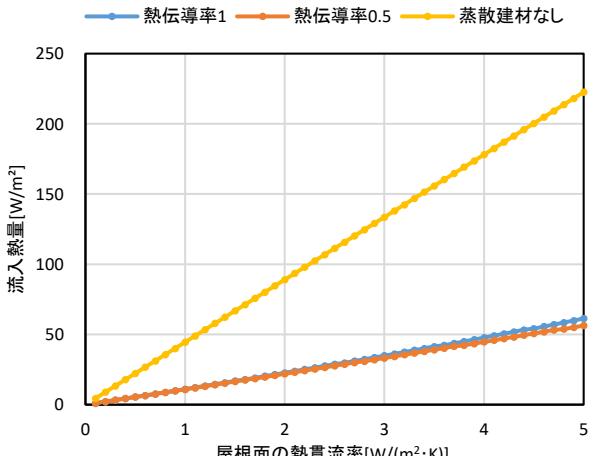


図7 屋根面の熱貫流率と流入熱量との関係
(室温23°C)

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が分る。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ないことも分る。

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/m²] (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。

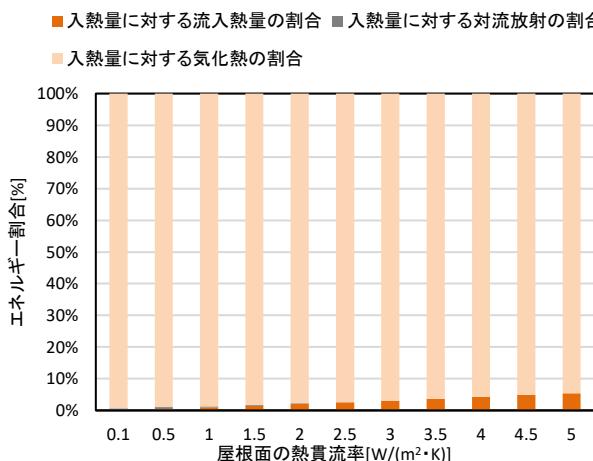


図8 エネルギーフロー(室温26°C、熱伝導率1)

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%削減できることが分かった。
- 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できた。

今後、年間を通じ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

θ_o	外気温度	°C
θ_s	蒸散建材の表面温度	°C
θ_r	室温	°C
α_o	外表面熱伝達率	W/(m ² ·K)
α_i	内表面熱伝達率	W/(m ² ·K)
a	日射吸収率	9 [W/(m ² ·K)] 含水時 0.9 ／その他 0.8
x_o	外気の絶対湿度	kg/kg'
x_s	θ_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 ² ·s)
I	日射量	W/m ²
d_1	蒸散建材の厚さ	m
d_2	壁体の厚さ	m
λ_1	蒸散建材の熱伝導率	W/(m·K)
λ_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 ² ·K)
K'	蒸散建材外表面から室内までの熱貫流率	W/(m ² ·K)
K_o	蒸散建材を設置していない場所の熱貫流率	W/(m ² ·K)
γ	水の蒸発潜熱	kJ/kg
α_{oc}	対流熱伝達率	2501 [kJ/kg]
α_{or}	放射熱伝達率	W/(m ² ·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	1.006 [kJ/(kg·K)]
C_{pw}	水蒸気の定圧比熱	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 θ_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
- 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

Stu. , Dept. of Perceptual Sciences and Design Engineering, Yamaguchi Univ.

*2 山口大学大学院創成科学研究科 教授

Prof. , Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.

*3 山口大学大学院創成科学研究科 助教

Assi. Prof. , Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.

*4 山口大学工学部技術部 技術専門職員

Technical Staff, Technical Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ.

*5 海水化学工業株式会社

Kaisui Chemical Industry Co., Ltd.

蒸散冷却建材による冷房負荷低減に関する研究

準会員 ○弘中甫英^{*1} 正会員 小金井真^{*2} 正会員 金 炫児^{*3}
非会員 山下哲生^{*4} 非会員 永橋和雄^{*5} 非会員 常森喬紀^{*6}

蒸散冷却建材 冷房負荷 非定常解析

1. はじめに

建設業界では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、都市部におけるヒートアイランド対策の推進等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一つとして、ヒートアイランド緩和や省エネルギー等の効果が期待できる屋上緑化や高反射特性を有した遮熱塗料¹⁾が注目されている。しかし、それらの効果を維持する上で、適切な管理やメンテナンス等が必要であり、多額の維持管理費がかかることから普及が進んでいない。本状況下で、比較的維持費が安く、建物の冷房負荷削減や夏期における室内環境の改善等が期待できる蒸散冷却建材が新たに注目され始めている。

前年度の研究²⁾では、蒸散冷却建材の持つ省エネルギー効果について、実際の気象データを用いた定常解析による室内流入熱量を調べた。しかし、定常解析では壁体の熱容量による室内流入熱の時間遅れを考慮できていなかった。また、蒸散冷却建材の蒸散速度を定量的に評価できていなかった。

そこで、本研究では、蒸散冷却建材を実際の建物に施工した場合の室内流入熱量等を非定常解析によって評価するとともに、蒸散冷却建材の蒸散速度を実験によって調べた。

2. 蒸散冷却建材の概要²⁾

2.1 対象とする蒸散冷却建材の特徴

表1に研究対象の蒸散冷却建材の基本性能を示す。本研究で対象とする蒸散冷却建材は、「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、蒸散冷却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1~3[mm]である。

図1に対象の蒸散冷却建材を施工した場合の屋上断面を示す。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・蒸散促進層で断熱材が積層されたパネルと組み合わせて使用されている。

表1 蒸散冷却建材の基本性能

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 ³]	1.43 [g/cm ³]
重量[kg/m ²]	約 28.0 [kg/m ²] (湿潤時) 約 19.3 [kg/m ²] (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]
比熱[J/kg·K]	440 [J/kg·K] (乾燥時) ※コンクリートの約 50%の比熱

Study on the Cooling Load Reduction by Using the Transpiration Cooling Building Materials

2.2 蒸散冷却建材による除熱・冷却の原理²⁾

従来工法と蒸散冷却建材を施工した場合の除熱・冷却メカニズムを比較する。断熱を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。また、外断熱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、蒸散冷却建材を施工した建物では、蒸散冷却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抑え室内の温度上昇を抑えることができる。

つまり、断熱無しの場合及び一般外断熱工法を用いた場合には建物の躯体を冷やすことはできないが、蒸散冷却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。よって、蒸散冷却建材を屋根面に設置することで、屋根面から室内への流入熱量を減らし、直下の空間の空調負荷を低減できると考えられる。

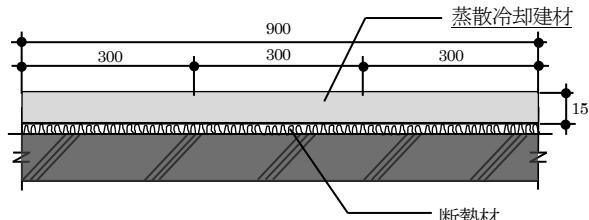


図1 蒸散冷却建材を施工した場合の屋上断面

3. 蒸散冷却建材による除熱・冷却に関する理論解析

3.1 理論解析の概要

本研究で対象とする蒸散冷却建材を実際の建物に施工した場合の屋根面からの室内流入熱量を定常・非定常解析によって、定量的に評価する。

前年度は定常解析によって、室内流入熱量を求める評価した²⁾。本研究では非定常解析によって、室内流入熱量の経時変化を調べる。

3.2 一次元非定常熱伝導方程式

固体中において時間に対する温度変化は、非定常熱伝導方程式により表すことができる。i-1番目の位置の温度を t_{i-1} [°C]、i+1番目の位置の温度を t_{i+1} [°C]とすると、一次元非定常熱伝導方程式の差分法による近似解は、次の式(1)となる³⁾。

$$t'_i = \frac{1}{2} (t_{i-1} + t_{i+1}) \quad (1)$$

Yoshiteru HIRONAKA, Makoto KOGANEI,
Hyuntae KIM, Tetsuo YAMASHITA,
Kazuo NAGAHASHI, Itsuki TSUNEMORI

t_{i-1} [°C] と t_{i+1} [°C] の平均が、次の時間ステップにおける i 番目の位置の温度 t'_i [°C] となる。

ここで、固体中の分割間隔を Δy [m]、時間間隔を $\Delta \tau$ [s] とする
と、式(2)に示す関係が成り立つ。

$$\frac{(\Delta y)^2}{a \Delta \tau} = 2 \quad (2)$$

図2に境界条件を示す。垂直方向 (y 方向) の熱の流れを考える。一次元非定常熱伝導における屋外側の蒸散冷却建材表面部(屋上面)を境界部1、材質が異なる2つの材料間を境界部2、屋内側の天井表面部を境界部3とする。なお、本解析において蒸散冷却建材内の温度分布は考慮していない(蒸散冷却建材外表面温度=裏面温度=屋根面温度)。

境界部1において、次の式(3)が成り立つ。

$$\alpha_s \cdot I = \alpha_0(\theta_s - \theta_a) + \beta \cdot \gamma \cdot kx(x_s - x_a) + \frac{\lambda_1}{\Delta y_1}(\theta_s - \theta_{s-1}) \quad (3)$$

式(3)は蒸散冷却建材表面での熱平衡式²⁾である。ここで、 β は蒸散冷却建材の水分蒸散効率を表す。蒸散効率とは、水面からの蒸散速度と比較した蒸散速度比のことである。

境界部2において、材料1と材料2の分割間隔をそれぞれ Δy_1 [m]、 Δy_2 [m]、熱伝導率をそれぞれ λ_1 [W/m · K]、 λ_2 [W/m · K] とすると、a 領域から b 領域へ流入する熱量 q_{ab} [W] は次の式(4)となる。

$$q_{ab} = \frac{\lambda_1 \Delta x z}{\Delta y_1} (t_a - t_b) \quad (4)$$

同様に b 領域から c 領域へ流入する熱量 q_{bc} [W] は次の式(5)となる。

$$q_{bc} = \frac{\lambda_2 \Delta x z}{\Delta y_2} (t_b - t_c) \quad (5)$$

ここで z は奥行である。式(4) (5) の熱の流入が $\Delta \tau$ [s] 時間続いた場合の b 領域(直方体 d,e,f,g)の蓄熱量 q_0 [J] は次の式(6)となる。

$$q_0 = (q_{ab} - q_{bc}) \Delta \tau = \Delta x z \left\{ \frac{\lambda_1}{\Delta y_1} (t_a - t_b) - \frac{\lambda_2}{\Delta y_2} (t_b - t_c) \right\} \Delta \tau \quad (6)$$

この熱量が与えられると、直方体 d,e,f,g の温度は $\Delta \tau$ [s] 時間の間に t_b [°C] から t_b' [°C] に変化する。ここで、容積比熱 ρc [J/m³ · K] (密度 [kg/m³] × 比熱 [J/kg · K]) として材料1側の容積比熱 $\rho_1 c_1$ [J/m³ · K]、材料2側の容積比熱 $\rho_2 c_2$ [J/m³ · K] と表すと、蓄熱量 q_0 [J] は次の式(7)となる。

$$q_0 = \frac{\Delta x z}{2} (\Delta y_1 \rho_1 c_1 + \Delta y_2 \rho_2 c_2) (t_b' - t_b) \quad (7)$$

したがって、式(6)と式(7)を等しいと置くと、次の式(8)が得られる。

$$\Delta x z \left\{ \frac{\lambda_1}{\Delta y_1} (t_a - t_b) - \frac{\lambda_2}{\Delta y_2} (t_b - t_c) \right\} \Delta \tau = \frac{\Delta x z}{2} (\Delta y_1 \rho_1 c_1 + \Delta y_2 \rho_2 c_2) (t_b' - t_b) \quad (8)$$

ここで、式(2)の条件を用いて、式(8)を整理すると、次の式(9)となる。

$$t_b' = \left(\frac{\lambda_1}{\Delta y_1} t_a + \frac{\lambda_2}{\Delta y_2} t_c \right) / \left(\frac{\lambda_1}{\Delta y_1} + \frac{\lambda_2}{\Delta y_2} \right) \quad (9)$$

境界部3において、エネルギーバランスを考えると、天井面表面温度 θ_{is} [°C] は次の式(10)で求められる^{4, 5)}。

$$\theta_{is} = \frac{(\theta_r - \theta_{is+1})}{\frac{\lambda_2}{h} + \frac{\Delta y_2}{2}} \frac{\Delta y_2}{2} + \theta_{is+1} \quad (10)$$

天井面から分割間隔 $\Delta y_2/2$ [m] 離れた位置における温度 θ_{is-1} [°C] は、次の式(11)で表すことができる。 θ_{is-1} [°C] は、次の時間ステップの θ_{is+1} [°C] を求めるのに必要な温度である。

$$\theta_{is-1} = \frac{(\theta_r - \theta_{is+1})}{\frac{\lambda_2}{h} + \frac{\Delta y_2}{2}} \Delta y_2 + \theta_{is+1} \quad (11)$$

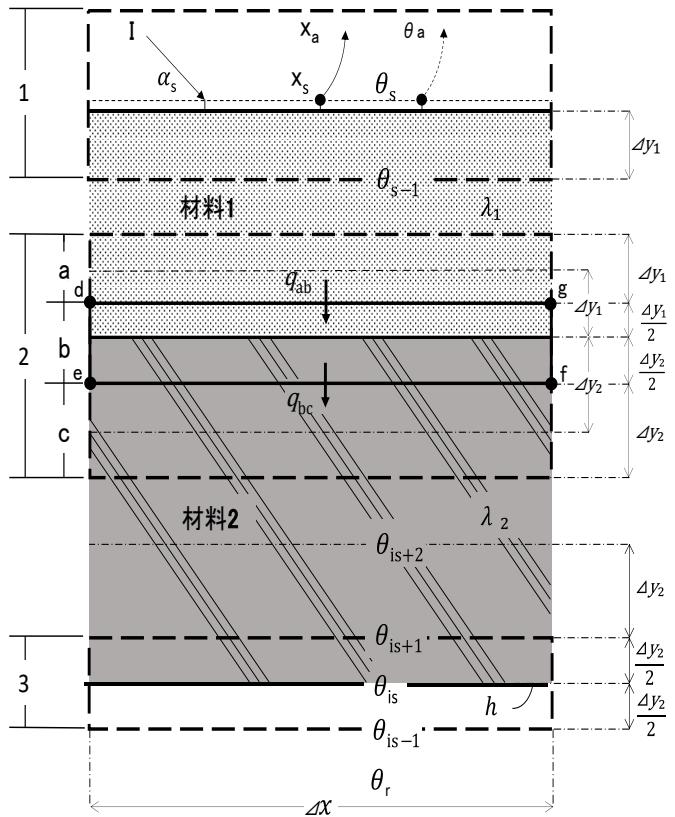


図2 蒸散冷却建材施工時の屋上スラブの境界条件

4. 非定常熱伝導解析による試算

4.1 試算概要

屋根面に蒸散冷却建材を設置した場合と設置しなかった場合の室内流入熱量を計算し、両者を比較した。

図3に計算対象建物の屋根面構造の模式図・仕様を示す。本計算ではA社技術研究所の屋根面構造に類似させた。表2に計算条件を示す。初期温度として蒸散冷却建材表面温度を外気温度、天井面温度を室温、その間の軸体温度は外気温度と室温で線形補間した温度を用いた。後述するが、ここでは蒸散冷却建材表面での熱平衡式(式(3))における気化熱項に乘ずる係数(蒸散効率)を $\beta=1$ とした。水の蒸発潜熱は $\gamma=2501$ [kJ/kg] とした。なお、屋上面に設置想定した蒸散冷却建材は厚さ15 [mm] で、含水時熱伝導率、比熱及び密度は、それぞれ約0.8 [W/m · K]、約2111 [J/kg · K] 及び約1.2 [g/cm³] である。

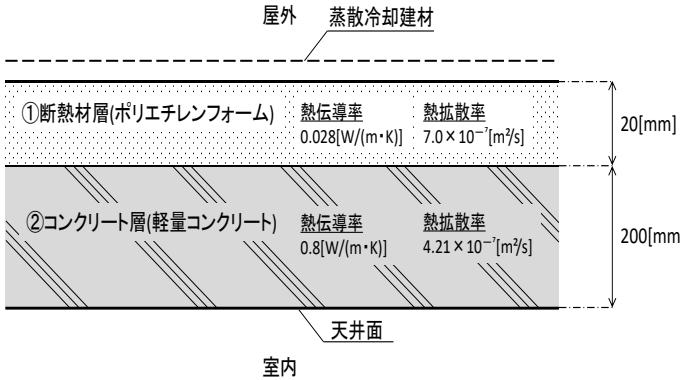


図3 屋根面構造の模式図・仕様

表2 計算条件

試算地点	東京
試算期間	2019/7/1～2019/8/31
使用気象データ	気温[°C]、相対湿度[%]、風速[m/s]、全日照量[MJ/(m²・h)]、気圧[hPa]
室内温度	26[°C] (固定値)
天井面熱伝達率	9[W/(m²・K)] (固定値)
屋上面日射吸收率	0.9 (固定値)
蒸散冷却建材の設置	有り時、無し時を選択
計算時間間隔	1[s]

※気象データはアメダス 10 分間値を利用 (全日照量は 1 時間値)

4.2 試算結果

図4に試算期間内(8/4～8/6)の屋根面及び天井面の温度の経時変化を蒸散冷却建材の有無で示す。屋上面温度の最大値は、蒸散冷却建材を設置した場合に約35[°C]、設置しなかった場合に約68[°C]となり、両者に大きな差が出た。天井面温度の最大値は設置した場合に約26.4[°C]、設置しなかった場合に約28[°C]となった。

図5に定常計算時と非定常計算時の室内流入熱の比較を示す。定常解析では、室内流入熱は正午前後に最大になっており、蒸散冷却建材を設置した場合に約8.5[W/m²]、設置しなかった場合に約37[W/m²]となった。一方、非定常解析では19時頃に室内流入熱が最大になっており、蒸散冷却建材を設置した場合に約4[W/m²]、設置しなかった場合に約18[W/m²]となった。実際の室内への熱流入は非定常状態となるため、非定常解析の結果が実建物での熱流入状況に近くなると考えられる。本試算条件において、蒸散冷却建材を設置した場合と設置しなかった場合を比較すると、最大室内流入熱を約78%削減できた。全試算期間内(7～8月)における室内流入熱量の最大値は、蒸散冷却建材を設置した場合に4.7[kJ/(m²・日)](8/2/19:25)、設置しなかった場合に18.6 [kJ/(m²・日)](8/5/19:09)となった。

図6に全試算期間内の定常計算時と非定常計算時における日別の室内流入熱量[kJ/(m²・日)]を示す。図6より定常計算時と非定常計算時の結果を比較すると、蒸散冷却建材を設置しなかった場合、室内流入熱量のばらつきが見られるが、設置した場合、両者は近い値となっていることが分かる。

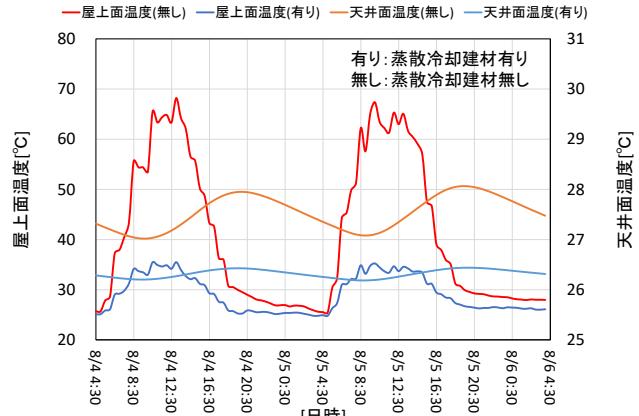


図4 屋根面温度及び天井面温度の経時変化

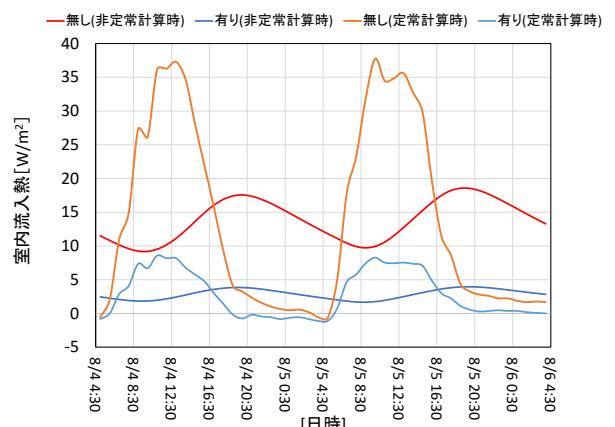


図5 定常計算時と非定常計算時の室内流入熱の比較

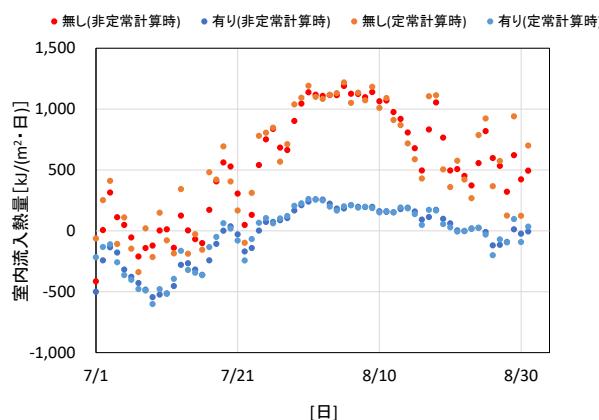


図6 定常計算時と非定常計算時における日別の室内流入熱の比較

5. 蒸散量評価実験

5.1 実験概要

前年度の実験では、蒸散冷却建材の蒸散速度を水面からの蒸散速度と同等であると仮定していた。本実験では、蒸散冷却建材の蒸散速度を定量的に評価し、蒸散冷却建材表面での熱平衡式(式(3))における気化熱項に乘ずる係数(蒸散効率) β を調べた。実験方法として、水を含ませた蒸散冷却建材と容器に入れた水の蒸散量の経時変化を比較し、蒸散冷却建材の蒸散速度を調べることで、蒸散効率 β を求めた。表3に実験条件を示す。

5.2 実験結果

図7に蒸散冷却建材からの蒸散量と水面からの蒸散量の経時変化の比較結果を示す。横軸は時刻、縦軸は1時間当たり $1[m^2]$ 当たりの蒸散量を表す。図7より水を含ませた蒸散冷却建材と容器に入れた水の1時間当たりの蒸散量はほぼ同等であることが分かる。よって、本試算において蒸散冷却建材表面での熱平衡式(式(3))における気化熱項に乘ずる係数(蒸散効率) β は1とした。

表3 実験条件

実験場所	山口大学常盤キャンパス本館屋上(山口県宇部市)
実験日時	2020/10/26 12:15~16:15
天気	晴れ
気象データ (アメダス)	平均気温:19.5[°C] (宇部市) 平均風速:2.5[m/s] (宇部市) 平均日射量:495.3[W/m ²] (下関市)

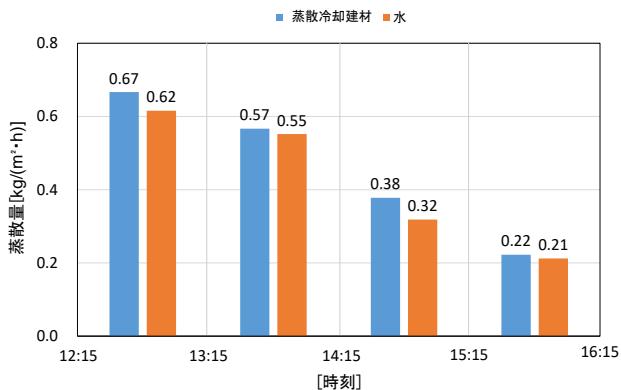


図7 蒸散冷却建材からの蒸散量と水面からの蒸散量の経時変化の比較

6. まとめ

蒸散冷却建材について、実際の建物に施工した場合を想定して夏期における2ヶ月間の気象データを与えて、非定常解析により室内流入熱量を調べ、前年度実施した定常解析の結果と比較した。その結果、以下の知見が得られた。

- 室内流入熱は定常解析で正午前後、非定常解析で19時頃に最大となり、壁体の熱容量による室内流入熱の時間遅れを確認できた。
- 蒸散冷却建材を設置した場合には設置しなかった場合に比べて、最大室内流入熱を約78%削減できることが分かった。
- 水を含ませた蒸散冷却建材の蒸散速度は、水面からの蒸散速度とほぼ同等であることが分かった。

今後、BESTなどの計算ソフトを用いて、年間を通したエネルギー・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、空調電力の削減をはかるための蒸散冷却建材の効率的な運用方法を検討していく予定である。

記号一覧

Δx	単位幅	m
Δy	分割間隔	m
Δy_1	材料1の分割間隔	m
Δy_2	材料2の分割間隔	m
z	奥行	m
θ_a	外気温度	°C
θ_s	蒸散冷却建材の表面温度	°C
θ_{s-1}	屋根面から $-\Delta y_1$ 離れた位置の温度	°C
θ_{is-1}	天井面から $-\Delta y_1/2$ 離れた位置の温度	°C
θ_{is}	天井面表面温度	°C
θ_{is+1}	天井面から $\Delta y_1/2$ 離れた位置の温度	°C
θ_{is+2}	天井面から $\Delta y_1/2 + \Delta y_2$ 離れた位置の温度	°C
θ_r	室温	°C
t'_i	$\Delta\tau$ 時間後のi番目の位置の温度	°C
t_{i-1}	i-1番目の位置の温度	°C
t_{i+1}	i+1番目の位置の温度	°C
t_a	a領域の温度	°C
t_b	b領域の温度	°C
t_c	c領域の温度	°C
t_b'	$\Delta\tau$ 時間後のb領域の温度	°C
q_{ab}	a領域からb領域へ流入する熱量	W
q_{bc}	b領域からc領域へ流入する熱量	W
q_0	蓄熱量	J
$\Delta\tau$	時間間隔	s
α	温度伝導率(熱拡散率)	m ² /s
α_o	外表面熱伝達率	W/(m ² ·K)
h	天井面熱伝達率	W/(m ² ·K)
γ	水の蒸発潜熱	kJ/kg
β	蒸散効率	-
α_s	日射吸収率	-
x_a	外気の絶対湿度	kg/kg
x_s	θ_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 ² ·s)
I	日射量	W/m ²
λ_1, λ_2	材料1及び材料2での熱伝導率	W/(m·K)
ρ_1, ρ_2	材料1及び材料2での密度	kg/m ³
c_1, c_2	材料1及び材料2での比熱	J/kg · K

参考文献

- 日本建築学会:クールルーフガイドブック 都市を冷やす技術 初版、地人書館、pp.16-18 42-44
- 小井塚咲花他:蒸散建材による建物の除熱・冷却効果に関する研究、日本建築学会中国支部研究報告集(2020_3)
- 萩三二:新版 热伝達の基礎と演習 改訂新版、東海大学出版部、pp.90-91
- J. P. ホールマン:伝熱工学 上 第1版、ブレイン図書出版株式会社、pp.117-118
- 北山直方:図解伝熱工学の学び方、オーム社、pp.68-70

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。ここに記して感謝の意を表します。

*1 山口大学工学部感性デザイン工学科 学生

Stu. , Dept. of Perceptual Sciences and Design Engineering, Yamaguchi Univ.

*2 山口大学大学院創成科学研究科 教授

Prof. , Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.

*3 山口大学大学院創成科学研究科 助教

Assi. Prof. , Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.

*4 山口大学工学部技術部 技術専門職員

Technical Staff, Technical Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ.

*5 海水化学工業株式会社

Kaisui Chemical Industry Co., Ltd.

蒸散冷却建材の冷却効果及び最適運用方法に関する研究

準会員 ○明珍幸樹^{*1} 正会員 小金井真^{*2} 正会員 金 炫児^{*3}
非会員 山下哲生^{*4} 非会員 永橋和雄^{*5} 非会員 常森喬紀^{*6}

蒸散冷却建材 冷却性能 シミュレーション

1. はじめに

建設業界では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、都市部におけるヒートアイランド対策等の温暖化対策が講じられている。ヒートアイランドの対策として遮熱塗料の使用、もしくは屋上緑化などの策が講じられているがメンテナンスや管理等の手間、維持費の面などから普及が進んでいないのが現状である。そこで近年、維持費を抑えられ、メンテナンスの手間も少ない蒸散冷却建材が注目されている。

昨年の研究では蒸散冷却建材使用時の室内流入熱量を非定常解析により評価し、流入熱の時間遅れの確認、また蒸散冷却建材設置時の水の蒸散速度の検証を行った。これまでの検証では実際の天候データは使用してはいるが単一の地域での検証となっており地域差などを考慮していなかった。

そこで本研究では蒸散冷却建材設置時の気象条件の影響などから最適な設置地域を検討するとともに遮熱塗料使用時との比較を行った。

2. 蒸散冷却建材の概要

2.1 対象とする蒸散冷却建材の特徴

表1に本研究対象の蒸散冷却建材の基本性能を示す。蒸散冷却建材は、「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、効率的に建材表面へ水を供給し、蒸散冷却建材表面を常に湿っている状態に保つことができる。昨年の研究で蒸散冷却建材の表面からの蒸散速度は水面と同等であると判明した。骨材は珪藻土由来で平均直径は1~3mmである。

図1に対象の蒸散冷却建材を施工した場合の屋上断面を示す。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・蒸散促進層で断熱材が積層されたパネルと組み合わせて使用されている。

表1 蒸散冷却建材の基本性能(厚さ15mm)

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 ³]	1.43[g/cm ³]
重量[kg/m ²]	約28.0[kg/m ²](湿潤時) 約19.3[kg/m ²](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]
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 蒸散冷却建材による除熱・冷却の原理

従来工法と蒸散冷却建材を施工した場合の除熱・冷却メカニズムを比較する。断熱を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。また、外断熱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、蒸散冷却建材を施工した建物では、蒸散冷却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抑え室内の温度上昇を抑えることができる。

つまり、断熱無しの場合及び一般外断熱工法を用いた場合には建物の躯体を冷やすことはできないが、蒸散冷却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。よって、蒸散冷却建材を屋根面に設置することで、屋根面から室内への流入熱量を減らし、直下の空間の空調負荷を低減できると考えられる。

3. 蒸散冷却建材による除熱・冷却に関する理論解析

3.1 理論解析の概要

蒸散冷却建材の設置によって期待される効果として屋根面からの流入熱量の削減により直下の部屋の空調負荷を軽減できる点が挙げられる。

したがって本研究で対象とする蒸散冷却建材を屋根面に設置した場合の屋根面から建物への流入熱を定量的に評価することが重要となる。本理論解析では蒸散冷却建材に散水した水が蒸散する際に潜熱を奪うことで屋根面の冷却を行うメカニズムを数式化し、実際の気象データを代入することで、蒸散冷却建材設置時の冷却効果を算定した。

3.2 屋根表面での熱平衡式

図2に蒸散冷却建材を設置した建物の屋根面の熱の出入りの模式図を示す。本シミュレーションでは蒸散冷却建材の含水時及び蒸散冷却建材非設置時の流入熱を求める、比較することを目的とする。

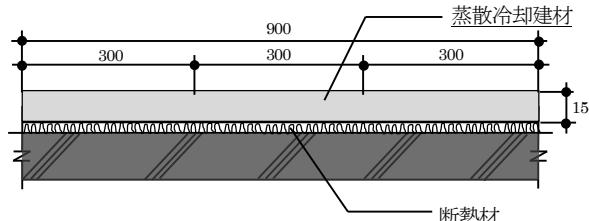


図1 蒸散冷却建材を施工した場合の屋上断面

これらの2ケースの流入熱量は以下の式で示すことができる。

蒸散冷却建材非設置時の流入熱量

$$q' = K'(\theta_s' - \theta_r) \quad \cdots (1)$$

蒸散冷却建材含水時の流入熱量

$$q = K(\theta_s - \theta_r) \quad \cdots (2)$$

(1)、(2)式において未知数であるのは屋根面表面温度 θ_s 、 θ_s' (°C)であり、二つの流入熱量を比較するためにこの未知数を求める必要がある。

含水時の蒸散冷却建材の表面から外気への伝熱量 q_w は以下の通り示すことができる。

$$q_w = \alpha_o(\theta_s - \theta_o) + \gamma \cdot k_x(x_s - x_o) \quad \cdots (3)$$

よって蒸散冷却建材表面の熱平衡式は次のように示すことができる。

$$a \cdot I = \alpha_o(\theta_s - \theta_o) + \gamma \cdot k_x(x_s - x_o) + K(\theta_s - \theta_r) \quad \cdots (4)$$

また蒸散冷却建材非設置時の熱平衡式は次のように示すことができる。

$$a \cdot I = \alpha_o(\theta_s' - \theta_o) + K'(\theta_s' - \theta_r) \quad \cdots (5)$$

ここで(4)式の各項について以下に述べる。

左辺第1項は日射吸収量で、日射吸収率 a と日射量 I (W/m²)の積である。

右辺第1項には、未知数の蒸散冷却建材の表面温度 θ_s (°C)と、数値が明確な外気温度 θ_o (°C)の他、外表面熱伝達率 α_o (W/m²·K)が含まれる。

外表面熱伝達率 α_o (W/m²·K)は以下の式で求められる。

外表面熱伝達率 $\alpha_o = \alpha_{oc} + \alpha_{or}$

$$\alpha_{oc} = 5.6 + 3.9v \quad (v \leq 4.9 \text{ m/s}) \quad \cdots (6)$$

$$\alpha_{oc} = 7.2v^{0.78} \quad (v > 4.9 \text{ m/s}) \quad \cdots (7)$$

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

右辺第2項には、数値が明確な水の蒸発潜熱 γ (kJ/kg)、外気絶対湿度 x_o (kg/kg')、絶対湿度基準物質移動係数 k_x (kg/m²·s)及び、蒸散冷却建材の表面温度 θ_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/m²·s)は以下の式によって求められる。

$$k_x = \frac{\alpha_o}{1000 \cdot C_s} \quad \cdots (8)$$

$$C_s = C_{pa} + C_{pw} \cdot x_m \quad \cdots (9)$$

なお境界層内の平均絶対湿度 x_m は x_o (外気絶対湿度)と x_s (表面温度 θ_s に対する飽和絶対湿度)の平均値とする。

蒸散冷却建材の表面温度 θ_s に対する飽和絶対湿度 x_s は θ_s の関数となるため、この項は未知数である蒸散冷却建材の表面温度 θ_s (°C)を含む項となる。

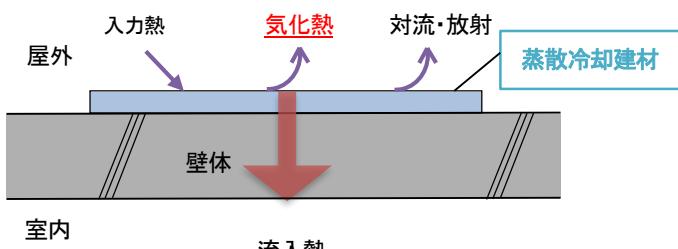


図2 蒸散冷却建材設置時の熱流入・流出の模式図

右辺第3項には、蒸散冷却建材外表面から室内までの熱貫流率 $K'(W/m^2 \cdot K)$ 、室温 θ_r (°C)の他、未知数である蒸散冷却建材の表面温度 θ_s (°C)が含まれる。

以上より熱平衡式(4)には蒸散冷却建材の表面温度 θ_s (°C)が未知数として残る式になる。

ある温度 t (°C)での飽和水蒸気圧 e_s (hPa)は以下の式で求められる。

$$e_s = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5t}{t+237.3}} \quad \cdots (10)$$

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。

$$e = e_s \times \frac{RH}{100} \quad \cdots (11)$$

重量絶対湿度 x は以下の式で求められる。

$$x = \frac{0.62198 \times e}{1013.25 - e} \quad \cdots (12)$$

x_o (外気絶対湿度)を求める際には RH に外気相対湿度(%)、 t には外気温度 θ_o (°C)を代入する。 x_s (θ_s に対する飽和絶対湿度)を求める際には RH に100(%)、 t には蒸散冷却建材の表面温度 θ_s (°C)を代入する

最後にここまで示したプロセスによって定めた(4)式を満たす蒸散冷却建材の表面温度 θ_s (°C)を求め、これを(2)式に代入すれば建物への流入熱量が求められる。

4 シミュレーション概要

4.1 気象条件を変化させた場合の影響

外気温・相対湿度・日射量・風速の4つの要素のうちの1つを変化させて蒸散冷却建材を設置した場合と設置しない場合の屋根面表面温度降下度を計算し、各要素の変化による冷却効果への影響を調べた。

なおここでは水の蒸発潜熱は $\gamma=2501$ (kJ/kg)とし、蒸散冷却建材設置時の屋根面日射吸収率は0.85、蒸散冷却建材非設置時(一般建物)の屋根面日射吸収率は0.7とした。また蒸散冷却建材自体の断熱性能は小さいため、設置の有無に関わらず屋根熱貫流率は固定値(0.19W/[m²·K])とした。また、室温は26°Cとした。

図3~6に蒸散冷却建材設置時の4要素と蒸散冷却建材設置による屋根表面温度降下度との関係を示す。

日射量を変化させた場合、図3に示すように一次関数に近似され、日射量100W/m²増加ごとに2°C程度の表面温度降下度の増加を示した。

日射量と同様に外気温と屋根表面温度降下度との関係も図4に示すように一次関数に近似でき、日射量と相対湿度の条件により傾きが異なるが外気温1°C上昇ごとに約0.1~0.4°Cの範囲内で表面温度降下度の増加が示された。

相対湿度と屋根表面温度降下度との関係も図5に示すように一次関数に近似でき、相対湿度1%低下ごとに約0.1~0.16°Cの範囲内で表面温度降下度の増加が示された。

風速と屋根表面温度降下度との関係は図6に示すように指數関数に近似され、風速が小さくなるほど非設置時に比べ高い屋根表面の冷却効果が見込める。

また外気温 30°C・相対湿度 60%・日射量 600W/m²・風速 3m/s の条件から外気温 1°C の上昇、相対湿度 2.6% の降下、日射量 15W/m² の上昇によってそれぞれ屋根表面温度降下度 0.3°C の増加を示す。

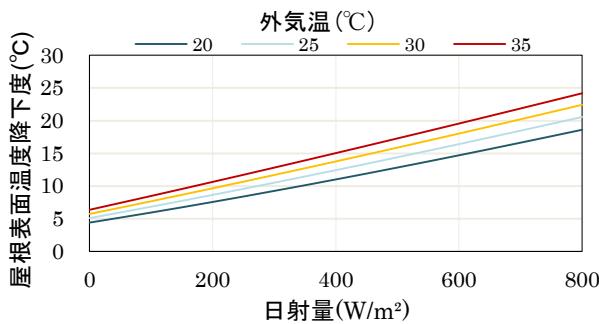


図3 日射量と屋根表面温度降下度との関係
(相対湿度60%、風速3m/s固定)

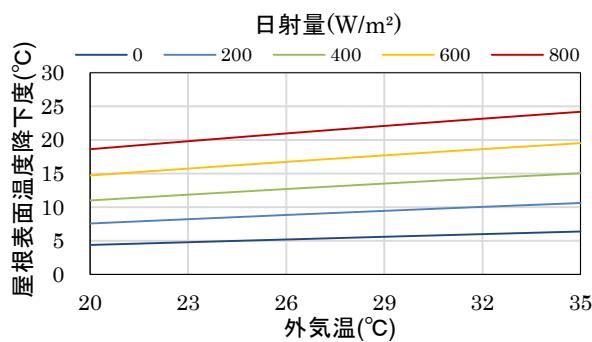


図4 外気温と屋根表面温度降下度との関係
(相対湿度60%、風速3m/s固定)

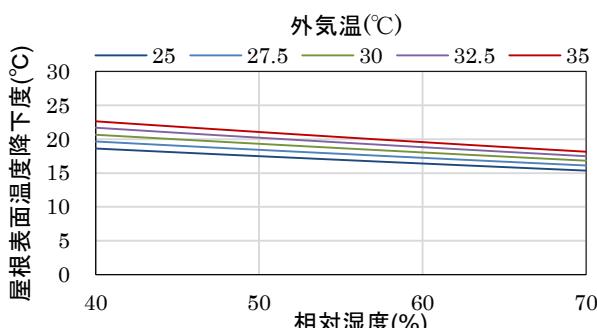


図5 相対湿度と屋根表面温度降下度との関係
(日射量600W/m²、風速3m/s固定)

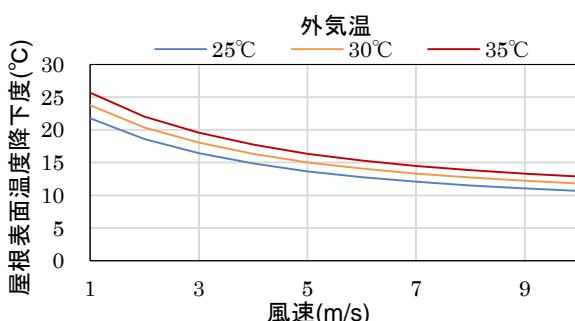


図6 風速と屋根表面温度降下度との関係
(相対湿度60%、日射量600W/m²固定)

4.2 設置場所を変えた場合の検討

那覇・熊本・広島・高松・大阪・名古屋・甲府・東京の8都市に蒸散冷却建材を設置した場合の夏季（6月21日～9月22日）の冷却効果を試算した。なお年ごとの偏りをなくすため、期間は2016年から2020年のデータを使用し、一時間ごとの気象データをそれぞれ同じ日時で平均したものを使用した。

またここでは水の蒸発潜熱は $\gamma=2501(\text{kJ/kg})$ とし、蒸散冷却建材設置時の屋根面日射吸收率は 0.85、蒸散冷却建材非設置時（一般建物）の屋根面日射吸收率は 0.7 とし、夜間でも冷房を使用する冷蔵倉庫を想定した。計算条件は室温 5°C、熱貫流率は 0.19W/(m²・K)、使用気象データ（外気温[°C]・相対湿度[%]・日射量[W/m²]・風速[m/s]）はアメダス 1 時間値を使用した。

表2にピーク時の表面温度降下度、流入熱削減量総和及び流入熱量削減率を求めた結果を示す。

特に広島・大阪・甲府で高い冷却効果が見込めることが分かった。広島はピーク時の表面温度降下度はあまり大きくなりが流入熱削減量総和と削減率が大きいのは1日を通して相対湿度が低いため夜間でも比較的高い冷却効果が発揮されることが要因として挙げられる。大阪は気象条件の各要素が少しずつ有利な条件になっているため総合的に高い効果を発揮している。甲府は風速の条件が有利で、また相対湿度と日射量の条件も比較的良いため高い効果を発揮できたと考えられる。

那覇と東京では比較的冷却効果が小さいことが判明した。那覇では外気温と日射量の条件がよいものの、相対湿度と風速の条件が悪く、東京では相対湿度と日射量の条件が悪いためと考えられる。

表2 地域ごとの蒸散冷却建材設置時の冷却効果

	12～14時平均の夏季平均屋根表面温度降下度(°C)	夏季流入熱削減量総和(kJ/m ²)	流入熱削減率(%)
那覇	13.8	9119	20.7
熊本	17.5	11059	25.2
広島	17.5	12444	29.0
高松	17.8	11862	26.8
大阪	19.0	12545	28.0
名古屋	17.4	11669	27.1
甲府	21.4	12646	29.1
東京	14.1	8613	21.6

4.3 遮熱塗料使用時との比較

4.2の結果特徴の出た那覇・広島・大阪・甲府・東京の5都市について遮熱塗料使用時と蒸散冷却建材設置時との比較を行った。なお遮熱塗料使用時の日射吸收率を 0.1 とし、その他の条件は4.2の試算と同様とする。

表3に蒸散冷却建材と遮熱塗料の流入熱の総和と削減率を示す。検証した5都市すべてにおいて蒸散冷却建材設置時のほうが室内流入熱量の総和は小さくなつた。

遮熱塗料使用時にも地域差が生じており、蒸散冷却建材の設置を検討する場合、この点を考慮した比較が必要である。

図7に甲府における夏季平均屋根面表面温度を示す。日の出～正午の時間帯においては冷却効果の差が小さく、その他の時間帯においては蒸散冷却建材のほうが冷却効果は大きくなる。特に夕方～夜の時間帯では日射量は小さいものの、外気温は高く、相対湿度が小さい状態であるため、蒸散冷却建材の方が遮熱塗料に比べ、より高い冷却効果が見込める。

表3 蒸散冷却建材と遮熱塗料の夏季流入熱比較

	蒸散冷却建材設置時		遮熱塗料使用時	
	流入熱量総和 (MJ/m ²)	流入熱削減率(%)	流入熱量総和 (MJ/m ²)	流入熱削減率(%)
広島	30.5	29.0	35.2	17.9
大阪	32.2	28.0	36.1	19.4
甲府	30.8	29.1	33.9	22.0
那覇	35.0	20.7	37.9	14.1
東京	31.3	21.6	33.2	17.0

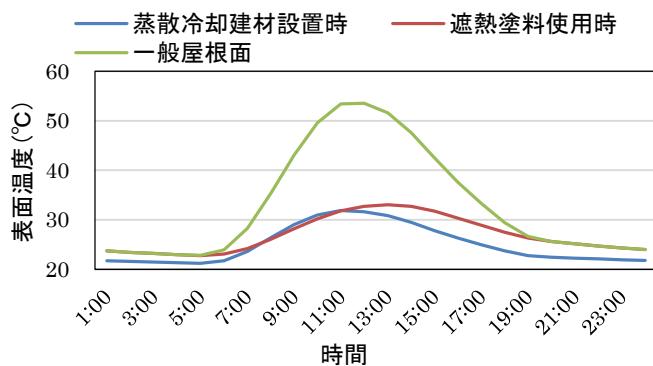


図7 甲府における夏季平均屋根面表面温度

5.まとめ

- 蒸散冷却建材を実際の建物に設置した場合を想定し、気象条件を変化させた場合及び設置地域を変えた場合などについて検討を行った結果、以下の知見が得られた。
- 1) 蒸散冷却建材は①外気温が高い、②相対湿度が小さい、③日射量が大きい、④風速が小さい、条件において設置によるメリットが大きくなる。
 - 2) オフィス想定の場合、外気温30°C・相対湿度60%・日射量600W/m²・風速3m/sの条件から外気温1°Cの上昇、相対湿度2.6%の降下、日射量15W/m²の上昇によってそれぞれ0.3°Cの屋根表面温度降下度の増加を示す。
 - 3) 冷蔵倉庫に蒸散冷却建材を設置した場合、広島・大阪・甲府で高い効果を発揮でき、夏季流入熱量の約30%削減が可能である。また那覇・東京では比較的の冷却効果が小さくなるものの、流入熱量を夏季に約20%削減できる。
 - 4) 冷蔵倉庫において夏季に蒸散冷却建材と遮熱塗料を比較すると、日の出～正午の時間帯では遮熱塗料とほぼ同等の冷却性能となるが、その他の時間帯においては蒸散冷却建材のほうが高い冷却効果を発揮できる。

今後は流入熱の時間遅れを考慮したうえで蒸散冷却建材の設置費や使用水量などのコストと遮熱塗料の施工費・維持費などを比較、また蒸散冷却建材の期間性能を把握し、より具体的な運用方法の検討を行う予定である。

記号一覧

θ_o	外気温度	°C
θ_s	蒸散冷却建材表面温度	°C
θ_s'	屋根表面温度	°C
θ_r	室温	°C
a	日射吸収率	-
x_o	外気の絶対湿度	kg/kg'
x_s	θ_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 ² ·s)
I	日射量	W/m ²
λ_1	蒸散建材の熱伝導率	W/(m·K)
λ_2	壁体の熱伝導率	W/(m·K)
K	蒸散冷却建材(含水状態)設置時の熱貫流率	W/(m ² ·K)
K'	蒸散冷却建材非設置時の熱貫流率	W/(m ² ·K)
γ	水の蒸発潜熱	kJ/kg
α_o	総合熱伝達率	W/(m ² ·K)
α_{oc}	対流熱伝達率	W/(m ² ·K)
α_{or}	放射熱伝達率	W/(m ² ·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)
C_{pw}	水蒸気の定圧比熱	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 θ_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

- 1) 小井塚咲花他:蒸散建材による建物の除熱・冷却効果に関する研究、日本建築学会中国支部研究報告集(2020_3)
- 2) 弘中甫英他:蒸散建材による冷房負荷軽減に関する研究、日本建築学会中国支部研究報告集(2021_3)
- 3) 横口貴祐:機能性塗料最近の動向、表面技術(Vol.69, No.7, 2018)
- 4) 鈴木健次:高等専門学校学生寮の温熱環境改善の推移、豊田工業高等専門学校研究紀要第52号(2020)

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。ここに記して感謝の意を表します。

*1 山口大学工学部感性デザイン工学科 学生

Stu. , Dept. of Perceptual Sciences and Design Engineering, Yamaguchi Univ.

*2 山口大学大学院創成科学研究科 教授

Prof. , Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.

*3 山口大学大学院創成科学研究科 助教

Assi. Prof. , Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.

*4 山口大学工学部技術部 技術専門職員

Technical Staff, Technical Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ.

*5 海水化学工業株式会社

Kaisui Chemical Industry Co., Ltd.

蒸散冷却建材による冷房負荷低減に関する研究

正会員 ○弘中甫英^{*1} 正会員 小金井真^{*2} 正会員 金 炫児^{*3}
非会員 山下哲生^{*1} 非会員 永橋和雄^{*4} 非会員 常森喬紀^{*5}

蒸散冷却建材 冷房負荷 非定常解析

1. はじめに

建設業界では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、都市部におけるヒートアイランド対策の推進等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一つとして、屋上緑化や遮熱塗料^①が注目されている。しかし、それらの効果を維持する上で、適切な管理やメンテナンス等が必要であり、多額の維持管理費がかかることから普及が進んでいない。本状況下で、比較的維持費が安く、建物の冷房負荷削減や夏期における室内環境の改善等が期待できる蒸散冷却建材が新たに注目され始めている。

前年度の研究^②では、蒸散冷却建材による冷房負荷低減効果を定常解析によって調べた。しかし、定常解析では壁体の熱容量による室内流入熱の時間遅れを考慮できていなかった。また、蒸散冷却建材の蒸散速度を定量的に評価できていなかった。

そこで、本研究では、蒸散冷却建材を実際の建物に施工した場合の室内流入熱量等を非定常解析によって評価するとともに、蒸散冷却建材の蒸散速度を実験によって調べた。

2. 蒸散冷却建材の概要^②

表1に研究対象の蒸散冷却建材の基本性能を示す。本研究で対象とする蒸散冷却建材は、「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、効率的に蒸散冷却建材表面に水を供給でき、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1~3[mm]である。

図1に対象の蒸散冷却建材を施工した場合の屋上断面を示す。この建材は、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と組み合わせて使用されている。

表1 蒸散冷却建材の基本性能

素材	極細毛細管保水性セラミック粒結合板
密度[g/cm ³]	1.43[g/cm ³] (乾燥時)
重量[kg/m ²]	約28.0[kg/m ²] (湿潤時) 約19.3[kg/m ²] (乾燥時)
熱伝導率[W/m·K]	0.24[W/m·K] (乾燥時)
保水性	約40[%vol]
比熱[J/kg·K]	440[J/kg·K] (乾燥時) ※コンクリートの約50%の比熱

3. 非定常熱伝導解析による試算

3.1 試算概要

屋根面に蒸散冷却建材を設置した場合と設置しない場合の室内流入熱量を非定常解析^③によって計算し、両者を比較した。

図2に計算対象建物の屋根面構造の模式図・仕様を示す。本計算ではA社技術研究所の屋根面構造に類似させた。表2に計算条件を示す。初期温度として蒸散冷却建材表面温度を外気温度、天井面温度を室温、その間の軸体温度は外気温度と室温で線形補間した温度を用いた。水の蒸発潜熱は $\gamma=2501[\text{kJ/kg}]$ とした。なお、屋上面に設置想定した蒸散冷却建材は厚さ15[mm]で、含水時熱伝導率、比熱及び密度は、それぞれ約0.8[W/m·K]、約2111[J/kg·K]及び約1.2[g/cm³]である。

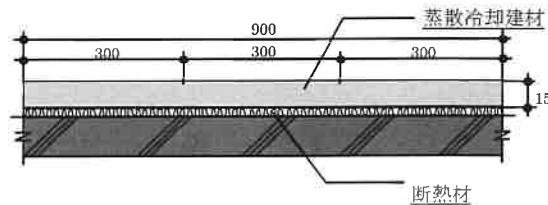


図1 蒸散冷却建材を施工した場合の屋上断面

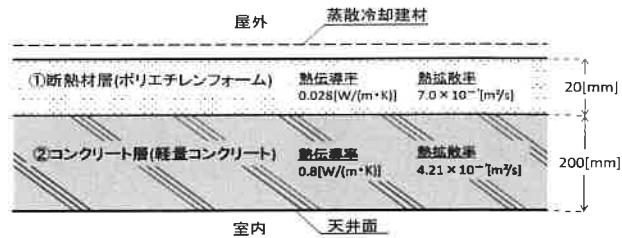


図2 屋根面構造の模式図・仕様

表2 計算条件

試算地点	東京
試算期間	2019/7/1~2019/8/31
使用気象データ	気温[°C]、相対湿度[%]、風速[m/s]、全天日射量[MJ/(m ² ·h)]、気圧[hPa]
室内温度	26[°C] (固定値)
天井面熱伝達率	9[W/(m ² ·K)] (固定値)
屋上面日射吸收率	0.9 (固定値)
蒸散冷却建材の設置	有り時、無し時を選択
計算時間間隔	1[s]

※アメダス10分間値を利用 (全天日射量は1時間値)

A study on the Cooling Load Reduction
by Using the Transpiration Cooling Building Materials

Yoshiteru HIRONAKA, Makoto KOGANEI, Hyuntae KIM,
Tetsuo YAMASHITA, Kazuo NAGAHASHI, Itsuki TSUNEMORI

3.2 試算結果

図3に定常計算時と非定常計算時の室内流入熱の比較を示す。定常解析では、室内流入熱は正午前後に最大になっており、蒸散冷却建材を設置した場合に約8.5[W/m²]、設置しない場合に約37[W/m²]となった。一方、非定常解析では19時頃に室内流入熱が最大になっており、蒸散冷却建材を設置した場合に約4[W/m²]、設置しない場合に約18[W/m²]となった。実際の室内への熱流入は非定常状態となるため、非定常解析の結果が実建物での熱流入状況に近くなると考えられる。本試算条件において、蒸散冷却建材を設置した場合と設置しない場合を比較すると、最大室内流入熱を約78%削減できた。

4. 蒸散量評価実験

4.1 実験概要

前年度の実験では、蒸散冷却建材の蒸散速度を水面からの蒸散速度と同等であると仮定していた。本実験では、蒸散冷却建材の蒸散速度を定量的に評価し、蒸散冷却建材の蒸散効率を調べた。蒸散効率とは、水面からの蒸散速度と比較した蒸散速度比のことである。実験方法として、水を含ませた蒸散冷却建材と容器に入れた水の蒸散量の経時変化を比較し、蒸散冷却建材の蒸散速度を調べることで、蒸散効率を求めた。表3に実験条件を示す。

表3 実験条件

実験場所	山口大学常盤キャンパス本館屋上(山口県宇部市)
実験日時	2020/10/26 12:15~16:15
気象データ (アメダス)	天気:晴れ 平均気温:19.5[°C] (宇部市) 平均風速:2.5[m/s] (宇部市) 平均日射量:495.3[W/m ²] (下関市)

4.2 実験結果

図4に蒸散冷却建材からの蒸散量と水面からの蒸散量の経時変化の比較結果を示す。横軸は時刻、縦軸は1時間当たり1[m²]当たりの蒸散量を表す。水を含ませた蒸散冷却建材と容器に入れた水の1時間当たりの蒸散量はほぼ同等であることが分かる。よって、本試算において蒸散効率は1とした。

5. まとめ

本研究で対象とした蒸散冷却建材について、以下の知見が得られた。

1) 室内流入熱は定常解析で正午前後、非定常解析で19時頃に最大となり、壁体の熱容量による室内流入熱の時間遅れが確認できた。

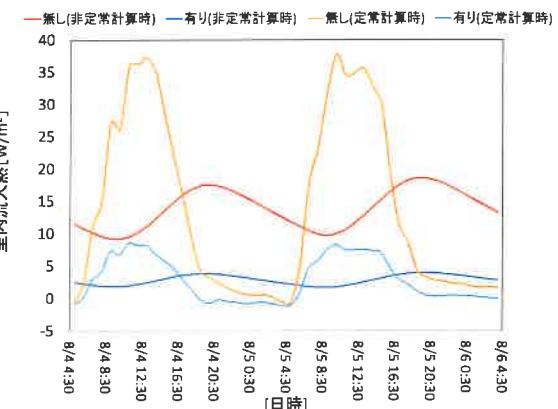


図3 定常計算時と非定常計算時の室内流入熱の比較

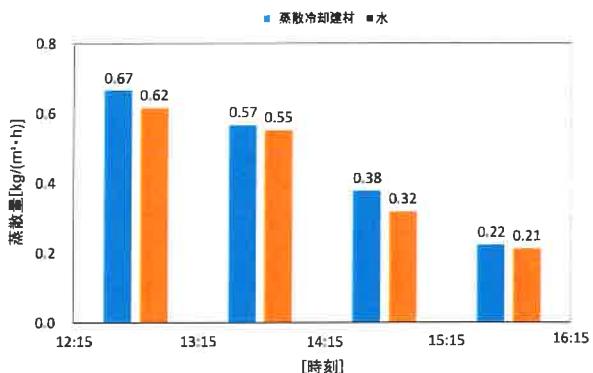


図4 蒸散冷却建材からの蒸散量と水面からの蒸散量の経時変化の比較

- 2) 蒸散冷却建材を設置した場合には設置しなかった場合に比べて、最大室内流入熱を約78%削減できる。
- 3) 水を含ませた蒸散冷却建材の蒸散速度は、水面からの蒸散速度とほぼ同等であることが分かった。

今後、BESTなどの計算ソフトを用いて、蒸散冷却建材の効率的な運用方法を検討していく予定である。

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。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)日本建築学会:クールルーフガイドブック 都市を冷やす技術 初版、地人書館、pp.16-18_42-44
- 2)小井塚咲花他:蒸散建材による建物の除熱・冷却効果に関する研究、日本建築学会中国支部研究報告集(2020_3)
- 3)弘中甫英他:蒸散冷却建材による冷房負荷低減に関する研究、日本建築学会中国支部研究報告集(2021_3)

*1 山口大学大学院創成科学研究科 修士課程

Grad. Stu. , Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.

*2 山口大学大学院創成科学研究科 教授

Prof. , Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.

*3 山口大学大学院創成科学研究科 助教

Assi. Prof. , Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.

*4 山口大学工学部技術部 技術専門職員

Technical Staff, Technical Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ.

*5 海水化学工業株式会社

Kaisui Chemical Industry Co., Ltd.

蒸散冷却建材の冷却効果及び最適運用方法に関する研究

正会員 ○明珍幸樹^{*1} 正会員 小金井真^{*2} 正会員 金 炫允^{*3}
非会員 山下哲生^{*1} 非会員 永橋和雄^{*5} 非会員 常森喬紀^{*5}

蒸散冷却建材 冷却性能 シミュレーション

1. はじめに

ZEB や ZEH の普及推進、都市部でのヒートアイランド防止の手段の1つとして維持費が比較的低く、メンテナンスの手間が少ない蒸散冷却建材が注目されている¹⁾。

著者らは蒸散冷却建材使用時の室内流入熱量を非定常解析により評価し、建物内への流入熱の時間遅れの確認、蒸散冷却建材設置時の水の蒸散速度の検証などを行った^{2),3)}。

表1に本研究対象の蒸散冷却建材の基本性能、図1に対象の蒸散冷却建材を施工した場合の屋上断面を示す。蒸散冷却建材は、「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、効率的に建材表面へ水を供給し、蒸散冷却建材表面を常に湿っている状態に保つことができる。

本研究では気象条件の影響などを考慮して蒸散冷却建材の最適な設置地域を検討するとともに遮熱塗料使用時との比較を行った。

表1 蒸散冷却建材の基本性能(厚さ15mm)

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 ³]	1.43 [g/cm ³] (湿潤時)
重量[kg/m ²]	約28.0 [kg/m ²] (湿潤時) 約19.3 [kg/m ²] (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]
比熱[J/kg·K]	440 [J/kg·K] (乾燥時) ※コンクリートの約50%の比熱

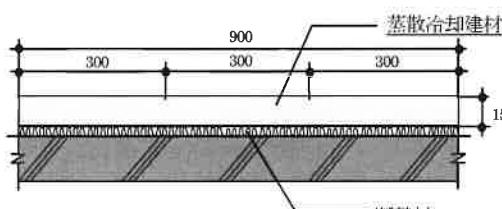


図1 蒸散冷却建材を施工した場合の屋上断面

2 シミュレーション概要

本解析では蒸散冷却建材に散水した水が蒸発する際に潜熱を奪うことで屋根面の冷却を行う状態を数式化し、定常状態での解析を行うことにより蒸散冷却建材設置時の冷却効果を算定した。(詳細は文献4)を参照)

2.1 気象条件を変化させた場合の影響

外気温・相対湿度・日射量・風速の4つの要素のうちの1つを変化させて蒸散冷却建材を設置した場合と設置しない場合の屋根面表面温度降下度を計算し、各要素の変化による冷却効果への影響を調べた。

なおここでは水の蒸発潜熱は $\gamma=2501\text{[kJ/kg]}$ とし、蒸散冷却建材設置時の屋根面日射吸收率は0.85、蒸散冷却建材非設置時(一般建物)の屋根面日射吸收率は0.7とした。また蒸散冷却建材自体の断熱性能は小さいため、設置の有無に関わらず屋根熱貫流率は固定値(0.19W/[m²·K])とした。また、室温は26°Cとした。

日射量もしくは外気温を増加させた場合、それぞれ非設置時に対する屋根表面温度降下度はそれらに比例して増加し、相対湿度を増加させた場合、屋根表面温度降下度は相対湿度に比例して降下し、風速と屋根表面温度降下度との関係は指數関数に近似されることが分かった。このうち日射量と風速について屋根表面温度降下度との関係をそれぞれ図2及び図3に示す。

外気温30°C・相対湿度60%・日射量600W/m²・風速3m/sの条件から外気温1°Cの上昇、相対湿度2.6%の降下、日射量15W/m²の上昇によってそれぞれ屋根表面温度降下度0.3°Cの増加を示すことが分かった。

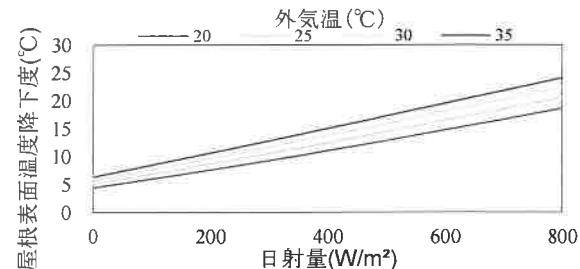


図2 日射量と屋根表面温度降下度との関係
(相対湿度60%、風速3m/s固定)

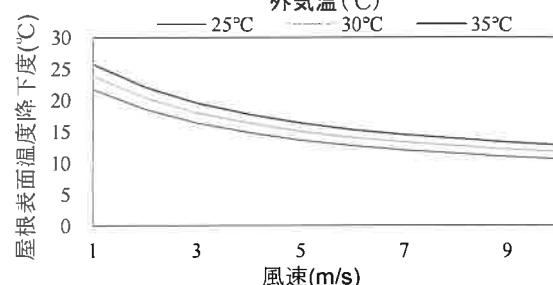


図3 風速と屋根表面温度降下度との関係
(相対湿度60%、日射量600W/m²固定)

2.2 設置場所を変えた場合の検討

那覇・熊本・広島・高松・大阪・名古屋・甲府・東京の8都市に蒸散冷却建材を設置した場合の夏季(6月21日～9月22日)の冷却効果を試算した。

またここでは夜間でも冷房を使用する冷蔵倉庫を想定した。計算条件は室温5°C、熱貫流率は0.19W/(m²·K)、使用気象データ(外気温[°C]・相対湿度[%]・日射量[W/m²]・風速[m/s])は2016～2020年のアメダス1時間値を使用した。

表2にピーク時の表面温度降下度、流入熱削減量総和及び流入熱量削減率を求めた結果を示す。

特に広島・大阪・甲府で高い冷却効果が見込め、逆に那覇と東京では比較的の冷却効果が小さいことが分かる。

2.3 遮熱塗料使用時との比較

2.2の結果特徴の出た那覇・広島・大阪・甲府・東京の5都市について遮熱塗料使用時と蒸散冷却建材設置時との比較を行った。なお遮熱塗料使用時の日射吸収率を0.1とし、その他の条件は2.2の試算と同様とする。

表3に蒸散冷却建材と遮熱塗料の流入熱の総和と削減率を示す。図4に甲府における夏季平均屋根面表面温度を示す。日の出～正午の時間帯においては冷却効果の差が小さく、その他の時間帯においては蒸散冷却建材のほうが冷却効果は大きくなる。

3.まとめ

蒸散冷却建材を実際の建物に設置した場合を想定し、気象条件を変化させた場合及び設置地域を変えた場合について冷却効果の検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 蒸散冷却建材は①外気温が高い、②相対湿度が小さい、③日射量が大きい、④風速が小さい、条件において設置によるメリットが大きくなる。
- 2) オフィス想定の場合、外気温30°C・相対湿度60%・日射量600W/m²・風速3m/sの条件から外気温1°Cの上昇、相対湿度2.6%の降下、日射量15W/m²の上昇によってそれぞれ0.3°Cの屋根表面温度降下度の増加を示す。
- 3) 冷蔵倉庫に蒸散冷却建材を設置した場合、広島・大阪・甲府で高い効果を発揮でき、夏季流入熱量の約30%削減が可能である。また那覇・東京では比較的の冷却効果が小さくなるものの、流入熱量を夏季に約20%削減できる。
- 4) 冷蔵倉庫において夏季に蒸散冷却建材と遮熱塗料の流入熱を比較すると、日の出～正午の時間帯では遮熱塗料とほぼ同等の冷却性能となるが、その他の時間帯においては蒸散冷却建材のほうが高い冷却効果を発揮できる。

今後は蒸散冷却建材の設置費や使用水量などのコストを考慮して蒸散冷却建材の期間評価を行い、より具体的な運用方法の検討を行う予定である。

表2 地域ごとの蒸散冷却建材設置時の冷却効果

	12～14時平均の夏季平均屋根表面温度降下度(°C)	夏季流入熱削減量総和(kJ/m ²)	流入熱削減率(%)
那覇	13.8	9119	20.7
熊本	17.5	11059	25.2
広島	17.5	12444	29.0
高松	17.8	11862	26.8
大阪	19.0	12545	28.0
名古屋	17.4	11669	27.1
甲府	21.4	12646	29.1
東京	14.1	8613	21.6

表3 蒸散冷却建材と遮熱塗料の夏季流入熱比較

	蒸散冷却建材設置時		遮熱塗料使用時	
	流入熱量総和(MJ/m ²)	流入熱削減率(%)	流入熱量総和(MJ/m ²)	流入熱削減率(%)
広島	30.5	29.0	35.2	17.9
大阪	32.2	28.0	36.1	19.4
甲府	30.8	29.1	33.9	22.0
那覇	35.0	20.7	37.9	14.1
東京	31.3	21.6	33.2	17.0

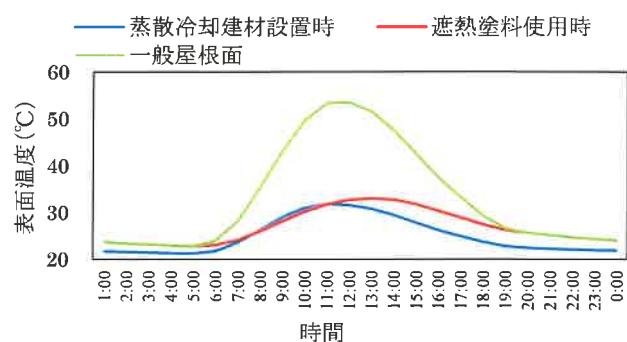


図4 甲府における夏季平均屋根面表面温度

参考文献

- 1) 海水化学工業株式会社環境バイオ事業部 <https://www.kaisuikagaku.com/> (参照2022_3)
- 2) 小井塚咲花他:蒸散建材による建物の除熱・冷却効果に関する研究、日本建築学会中国支部研究報告集(2020_3)
- 3) 弘中甫英他:蒸散建材による冷房負荷軽減に関する研究、日本建築学会中国支部研究報告集(2021_3)
- 4) 明珍幸樹他:蒸散冷却建材の冷却効果及び最適運用方法に関する研究、日本建築学会中国支部研究報告集(2022_3)
- 5) 横口貴祐:機能性塗料最近の動向、表面技術(Vol.69, No.7, 2018)
- 6) 鈴木健次:高等専門学校学生寮の温熱環境改善の推移、豊田工業高等専門学校研究紀要第52号(2020)

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。ここに記して感謝の意を表します。

*1 山口大学大学院創成科学研究科 修士課程

*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

Grad Stu., Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, 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.