

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

准会員 ○明珍幸樹*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

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、比較することを目的とする。

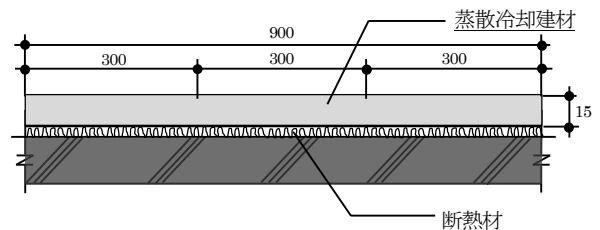


図 1 蒸散冷却建材を施工した場合の屋上断面

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。

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

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

(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' ($^{\circ}\text{C}$)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。

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

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。

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

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。

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

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 $I(\text{W}/\text{m}^2)$ 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 ($^{\circ}\text{C}$)と、数値が明確な外気温度 θ_o ($^{\circ}\text{C}$)の他、外表面熱伝達率 $\alpha_o(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$ が含まれる。

外表面熱伝達率 $\alpha_o(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$ は以下の式で求められる。

$$\alpha_o = \alpha_{oc} + \alpha_{or}$$

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

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

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

右辺第2項には、数値が明確な水の蒸発潜熱 $\gamma(\text{kJ}/\text{kg})$ 、外気絶対湿度 $x_o(\text{kg}/\text{kg}')$ 、絶対湿度基準物質移動係数 $k_x(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 及び、蒸散冷却建材の表面温度 θ_s ($^{\circ}\text{C}$)に対する飽和絶対湿度 $x_s(\text{kg}/\text{kg}')$ が含まれる。

絶対湿度基準物質移動係数 $k_x(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$ は以下の式によって求められる。

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

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

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 ($^{\circ}\text{C}$)を含む項となる。

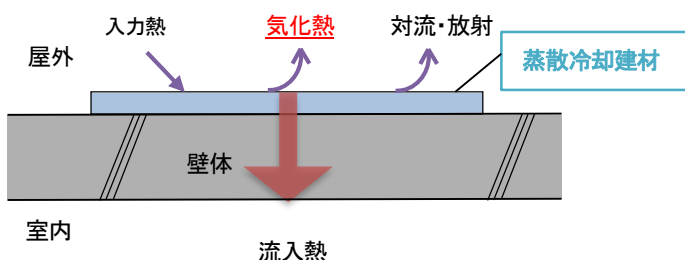


図2 蒸散冷却建材設置時の熱流入・流出の模式図

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 $K'(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、室温 θ_r ($^{\circ}\text{C}$)の他、未知数である蒸散冷却建材の表面温度 θ_s ($^{\circ}\text{C}$)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 ($^{\circ}\text{C}$)が未知数として残る式になる。

ある温度 t ($^{\circ}\text{C}$)での飽和水蒸気圧 e_s (hPa)は以下の式で求められる。

$$e_s = 6.1078 \times 10^7 \frac{7.5t}{t+237.3} \quad \dots (10)$$

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。

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

重量絶対湿度 x は以下の式で求められる。

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

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 ($^{\circ}\text{C}$)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 ($^{\circ}\text{C}$)を代入する

最後にここまで示したプロセスによって定まった(4)式を満たす蒸散冷却建材の表面温度 θ_s ($^{\circ}\text{C}$)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 $\gamma=2501(\text{kJ}/\text{kg})$ 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($0.19\text{W}/[\text{m}^2 \cdot \text{K}]$)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 $100\text{W}/\text{m}^2$ 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 $0.1\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ 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 $0.1\sim 0.16^{\circ}\text{C}$ 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に示すように指数関数に近似され、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℃・相対湿度 60%・日射量 600W/m²・風速 3m/s の条件から外気温 1℃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℃の増加を示す。

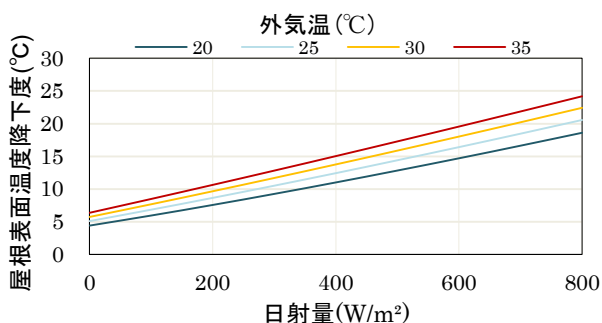


図3 日射量と屋根表面温度降下度との関係
(相対湿度60%、風速3m/s固定)

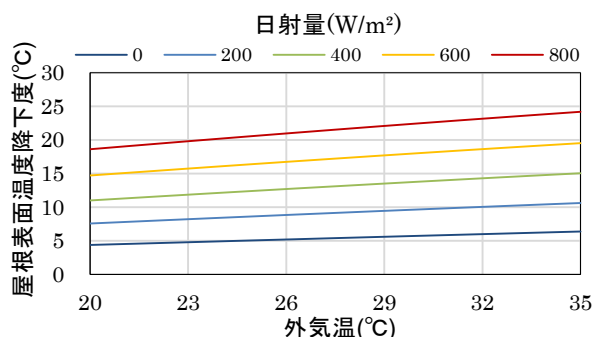


図4 外気温と屋根表面温度降下度との関係
(相対湿度60%、風速3m/s固定)

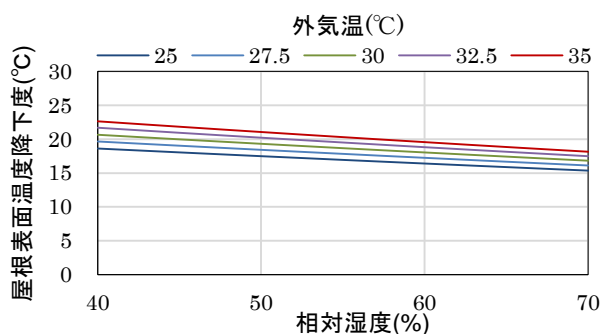


図5 相対湿度と屋根表面温度降下度との関係
(日射量600W/m²、風速3m/s固定)

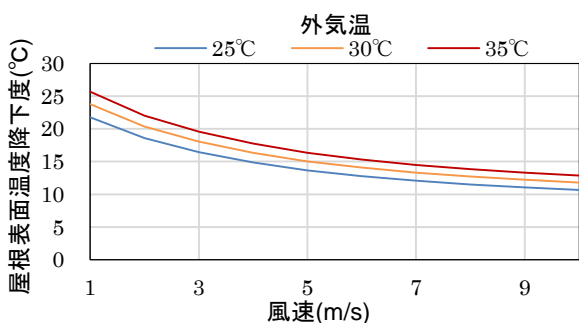


図6 風速と屋根表面温度降下度との関係
(相対湿度60%、日射量600W/m²固定)

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るため、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に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、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℃、熱貫流率は $0.19\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、使用気象データ(外気温[℃]・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い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く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好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低い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(℃)	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収率を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った。

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

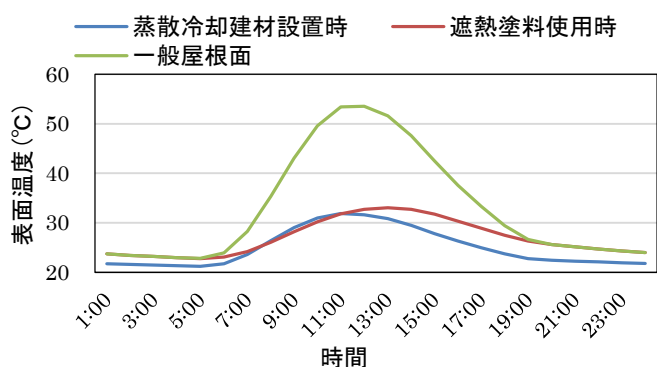


図7 甲府における夏季平均屋根面表面温度

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。

- 蒸散冷却建材は①外気温が高い、②相対湿度が小さい、③日射量が多い、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。
- 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。
- 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。
- 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) 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 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

- 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)
- 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)
- 樋口貴祐:機能性塗料最近の動向、表面技術(Vol.69, No.7, 2018)
- 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
 *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.