

光触媒建築用膜材料の蒸発冷却実測調査とシミュレーション
 ---建築用膜材料を使用した愛知万博休憩所とモックアップの検証---
 Survey and Simulation of Evaporation Cooling at Photocatalyst-Coated Architectural
 Membrane Materials
 ---Examination of Rest Station with Architectural Membrane Materials Skins at the
 International Exposition in Aichi and Mock-up---

武田 仁*1、本田 貴久*2、中田 貴之*3

Hitoshi TAKEDA, Takahisa HONDA and Takayuki NAKATA

A method of decreasing the air-conditioning load through the evaporation cooling, which utilizes the hydrophilic photocatalyst, was proposed. As it had been found that construction material with a large overall heat transfer coefficient was effective as building exterior in lowering the load, architectural membrane material was observed this time. In this report, it was introduced by 2 steps examination. The first step, it was introduced about mock-up of confirmed basic data which was calculated and examined the mass transfer coefficient of architectural membrane materials by watering the mock-up with a sprinkler system. The second step, it was introduced about mock-up of confirmed real condition data which was built at 2005 World Exposition, Aichi, Japan as the rest station. Then, the architectural membrane material of the rest station was surveyed and grasped the volume of saved energy and other conditions. The results of a simulation on the temperature, which was based on the mass transfer coefficient of the first step mock-up, were similar to those from the survey.

Keywords: Photocatalyst, Hydrophilicity, Water Spraying, Mass Transfer Coefficient, Cooling Load

光触媒、親水性、散水、物質移動係数、冷房負荷

1 はじめに

建物のパッシブクーリングシステムの手法として、自然界の原理を利用するものは放射冷却と蒸発冷却が考えられる。放射冷却は天空からの大気放射量と壁体表面温度の放射収支となり、壁体の形態係数、放射率、表面温度に関係するが、計画工夫することは限られている。一方、蒸発冷却は種々の手法が考えられる。

ここでは蒸発冷却を促す手法として物体表面を光触媒塗膜することを考えた。酸化チタン光触媒¹⁾(以下、光触媒と称す)には、紫外線照射により2つの機能が発現する。1つは有機物を分解する酸化分解機能である。もう1つは親水化機能であり、紫外線が当たる光触媒表面に水滴が付着すると水と表面の接触角が0°近くになり、均一に広がる機能である。この超親水性を日射が当たる建物外皮に利用し、蒸発冷却効果を促進させ、冷房負荷削減を図る。建物外皮に散水することは外気温度を下げヒートアイランド防止にも役立つ。

この論文では筆者らの蒸発冷却システムの開発研究⁸⁾で判明したことを踏まえ、熱的に薄い(貫流率が大きい)部位、建築用膜材料に注目した。過去の関連する論文として、石川らは屋根散水³⁾、浦野らは壁体散水の実験⁴⁾を行なっているが、光触媒塗膜を用いていない。渡辺は放射冷却、蒸発冷却⁵⁾の原理を解いている。光触媒関係

では長沼らのパネル実験¹⁰⁾があるが表面のみの実験であり、武田らのスクリーン実験¹¹⁾は趣旨が異なる。筆者らは建築用膜材料実験^{6),7),9)}を踏まえ、建築用膜材料モックアップ実験により物質移動係数を算出し、光触媒建築用膜材料を用いた愛知万博休憩所を検証したので報告する。

2 蒸発冷却の理論式

外界条件による仮想一定室温(t_r)による外表面熱流を q_1 、室温と仮想一定室温(t_r)による偏差による外表面熱流を q_2 とすると外表面熱平衡式 q は

$$q = q_1 + q_2 \dots (1)$$

建築用膜材料は熱的に薄く、蓄熱を無視できる定常伝熱と考えられるので

$$\begin{aligned} & \alpha_o \left[\left\{ t_a + \frac{a}{\alpha_o} J - \frac{W}{\alpha_o} (\varepsilon \sigma T_s^4 - J_a) - \frac{\gamma}{\alpha_o} k_x (X_s - X_a) \right\} - t_s \right] \\ & + C_{pw} \cdot W_s (t_{ws} - t_s) - C_{pw} \cdot W_r (t_s - t_{wr}) \\ & = K \left[\left\{ t_a + \frac{a}{\alpha_o} J - \frac{W}{\alpha_o} (\varepsilon \sigma T_s^4 - J_a) - \frac{\gamma}{\alpha_o} k_x (X_s - X_a) \right\} - t_r \right] \\ & - K (t_i - t_r) \dots (2) \end{aligned}$$

透過日射量 τJ [W/m²] (内部発熱と同様室温上昇に寄与) $\dots (3)$

*1 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博

*2 東京理科大学理工学研究科建築学専攻 修士課程

*3 太陽工業株式会社

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science, Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science

Taiyo Kogyo Corporation

となり、現時点の定常熱平衡式になる。表面温度 t_s で整理し、前時刻の表面温度を初期値として、収束計算を行なう。飽和絶対湿度 X_s は t_s より Goff-Gratch の式で求める。 t_s の誤差が 0.05°C 以下で計算を終了する。なお、顕熱量は循環式散水方式の場合、面に当たる日射量での熱の収支はあるが、定常的には無視してよい。従って

$$C_{pw} \cdot W_s (t_{ws} - t_s) - C_{pw} \cdot W_r (t_s - t_{wr}) \doteq 0 \quad \dots (4)$$

となる。

但し、

- α_o : 室外側総合熱伝達率 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$)、23 程度)
- t_a : 外気温度 ($^\circ\text{C}$)
- t_s : 物体の表面温度 ($^\circ\text{C}$)
- a : 日射吸収率
- τ : 日射透過率
- J : 面に当たる日射量 (W/m^2)
- ψ : 形態係数 (水平 1.0、垂直 0.5)
- ε : 物体の放射率 (0.9 程度)
- σ : Stefan-Boltzmann 定数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)、 5.67×10^{-8})
- T_s : 物体の表面の絶対温度 (K)、 $T_s = 273.15 + t_s$)
- J_a : 大気放射量 (W/m^2)
- γ : 蒸発潜熱 ($\text{W} \cdot \text{h}/\text{kg}$)、694.8)
- k_x : 絶対湿度基準物質移動係数 ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg}/\text{kg}'))$)
- X_s : 物体表面温度の飽和絶対湿度 (kg/kg')
- X_a : 外気の絶対湿度 (kg/kg')
- C_{pw} : 水の比熱 ($\text{W} \cdot \text{h}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)、1.159)
- W_s : 散水量 (kg/h)
- t_{ws} : 散水温度 ($^\circ\text{C}$)
- W_r : 散水戻り水量 (kg/h)
- t_{wr} : 散水戻り水温 ($^\circ\text{C}$)
- d : 物体の厚さ (m)
- λ : 物体の熱伝導率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)
- K : 熱貫流率 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$)
- α_i : 室内側総合熱伝達率 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$)、9 程度)
- t_i : 室内温度 ($^\circ\text{C}$)

3 建築用膜材料モックアップ

3-1 モックアップ概要

建築用膜材料散水効果と物質移動係数算出及び蒸発冷却計算の検証のためにモックアップを京都府船井郡瑞穂町に 2004 年 3 月作製した。建築用膜材料モックアップ図を図 1 に示す。真南に面し、縦 3.5m、横 4.4m、高さ 2.3~3.15m (R=10.8m の屋根) となっており、内部空間は断熱材(押し出し法ポリスチレンフォーム)200mm の間仕切りによって 2 分されている。周囲外壁と床は断熱材(押し出し法ポリスチレンフォーム)100mm と合板で作製し、屋根部は建築用膜材料を張った。西側の空間を BOX1、東側の空間を BOX2 と称する。散水システム系統図を図 2 に示す。散水は循環システムとし、タンクからポンプにより汲み上げられた水は BOX1、BOX2 それぞれ別系統で散水する。散水は部材表面に万遍なく散水させることを目的としてミストノズルにより霧状に噴霧し、膜表面で蒸発しなかった水は再度タンクに回収される。蒸発水量はタンク内の水位計で計測する。

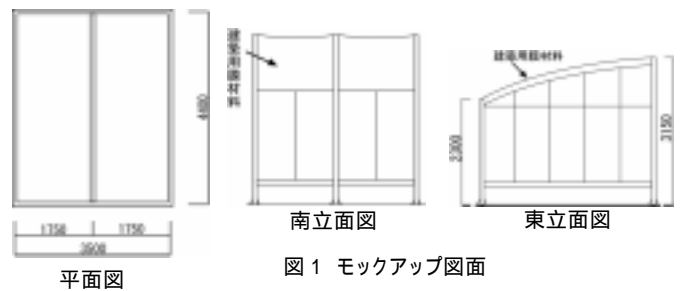


図 1 モックアップ図面

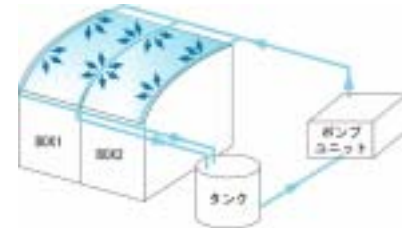


図 2 モックアップ散水システム系統図

3-2 実測方法

散水方法はミストノズルによる間欠散水方式(30秒間散水・4分間停止の繰り返し、平均約 $53\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$)を採用した。散水時間は蒸発冷却効果のある 9 時から 20 時とした。実測はデータロガーを用い、表 1 に示す測定項目を 2 分間隔で 24 時間連続計測した。

表 1 モックアップ測定項目表

測定項目	測定数	測定機器
テント膜裏面温度	14	熱電対
架台内部温度	8	
タンク水温	2	
外気温度	1	MT-060(英弘精機)
外気湿度	1	KDC-S4(コーナシステム)
風向・風速	1	
水平日射量	1	MS-601(英弘精機)
タンク内水位	2	WL300(メテオ電子)
雨量	1	KDC-S13-34T(コーナシステム)
試験体温度分布	-	TVS-700(日本アビオニクス)

3-3 実測パターン・実測期間

表 2 モックアップ実測パターン表

	BOX1		BOX2		実測期間
	光触媒有無	散水有無	光触媒有無	散水有無	
パターン1				×	7/20~8/8
パターン2			×		8/9~8/30
パターン3	×		×	×	8/31~9/9
パターン4			×	×	9/23~10/20

注) 印は有、×印は無

光触媒と散水の効果を測定するため、表 2 に示す 4 パターンで実測を行なった。実測期間は 2004 年 7 月下旬から 10 月中旬までである。なお、建築用膜材料の物性値を表 3 に、散水用ミストノズルを写真 1 に示す。

表 3 建築用膜材料値

項目	テント
厚さ	0.58 [mm]
質量	814 [g/m ²]
熱伝導率	0.1035 [W/mK]
日射透過率	14.84 [%]
日射反射率	76.09 [%]
日射吸収率	9.07 [%]



写真 1 散水用ミストノズル

3 - 4 実測結果・考察

(1) 建築用膜材料裏面温度

パターン1において、BOX1、BOX2のいずれも光触媒塗膜で散水あり、散水なしである7月24日の建築用膜材料裏面温度比較を図3に示す。散水時間帯の平均外気温は27.9℃、平均外気湿度は48%である。建築用膜材料裏面温度は散水あり、散水なし共に日射量に1時間ほど遅れてほぼ同じ変動をしており、散水なしは13時ごろ約43℃となった。散水による建築用膜材料裏面温度の蒸発冷却効果は約10℃程度である。

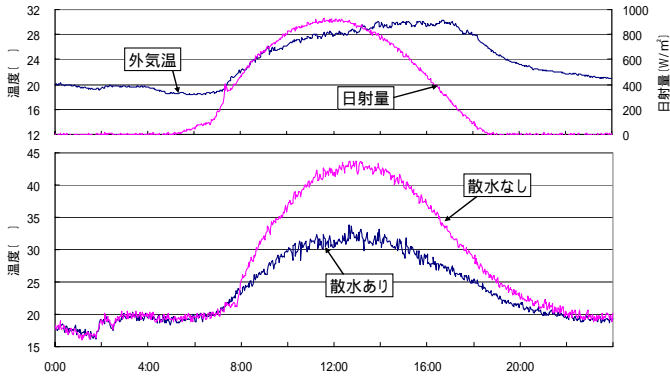


図3 散水有無による建築用膜材料裏面温度比較

(2) モックアップ内部空間温度

同様に7月24日におけるBOX1(散水あり)、BOX2(散水なし)の内部空間温度を図4に示す。内部空間温度は日射量から2時間ほど遅れてほぼ同じ変動をしており、散水なしが14時頃最高で約40℃となっている。散水ありと散水なしの差は最大約6℃となった。

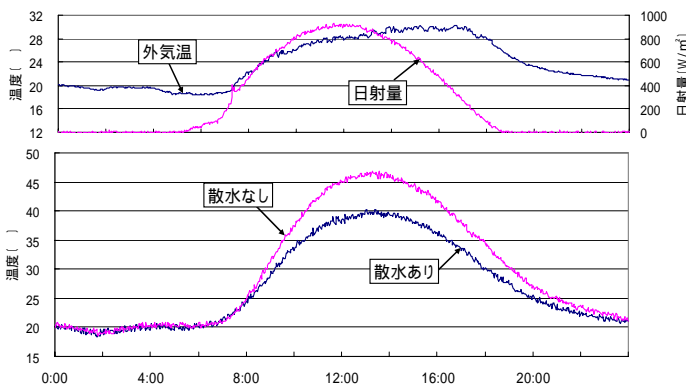


図4 散水有無によるモックアップ内部空間温度比較

(3) 物質移動係数の算出

建築用膜材料の物質移動係数 k_x は下式を用いて算出した。

$$M = k_x (x_s - x_a) \cdots (5)$$

ただし M : 物質移動量 (蒸発量) [kg/m²・s]

k_x : 物質移動係数 [kg/m²・s・(kg/kg')]

x_s : 素材表面飽和絶対湿度 [kg/kg']

x_a : 外気絶対湿度 [kg/kg']

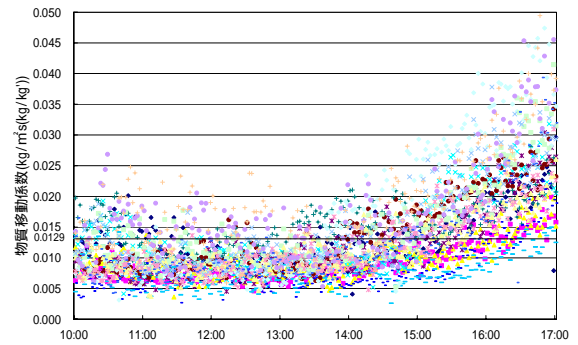


図5 建築用膜材料物質移動係数

建築用膜材料物質移動係数の7月22日から8月26日までの2分間瞬時値を図5に示す。変動が相当ある。10時から17時の絶対湿度差が大きくなり、物質移動係数が比較的安定する晴天日の日射量500w/m²以上の平均値を算出すると $k_x=0.0129$ [kg/m²・s・(kg/kg')] となった。これは建築用膜材料の実用物質移動係数とも呼べるものである。

3 - 5 モックアップの理論値と実測値の検証

多数室非定常熱負荷計算プログラムLESCOM¹²⁾に蒸発冷却の理論式を組み込みLESCOM-vaporを作成した。このプログラムにモックアップの実測より算出した物質移動係数、建物条件及び気象条件をインプットして、理論値を計算した。散水有無による建築用膜材料裏面温度の理論値と実測値の比較を図6に示す。計算結果は予備計算日4日(7月20日から計算開始)を行い5日目の結果(7月24日)である。実測値と理論値の温度変動の形状は散水あり、散水なし共に日射のない時間帯はよく一致し、日射のある昼間はやや誤差を生じ、散水ありの方の誤差が大きい。いずれも理論値が低い。これは表面温度を測定する際、熱電対の先端をアルミ箔で貼付し、透過日射を遮ったため、実測値が高くなったことが考えられる。しかし、日平均誤差は散水ありで2.1℃、散水なしで2.0℃程度である。

散水有無による内部空間温度の理論値と実測値の比較を図7に示す。この計算結果も5日目(7月24日)のものである。散水ありの内部空間温度の理論値は実測値の変動をよく捉えている。日平均誤差は0.5℃で非常に小さい。散水なしの内部空間温度も理論値と実測値はよく一致している。日平均誤差は約1.1℃である。

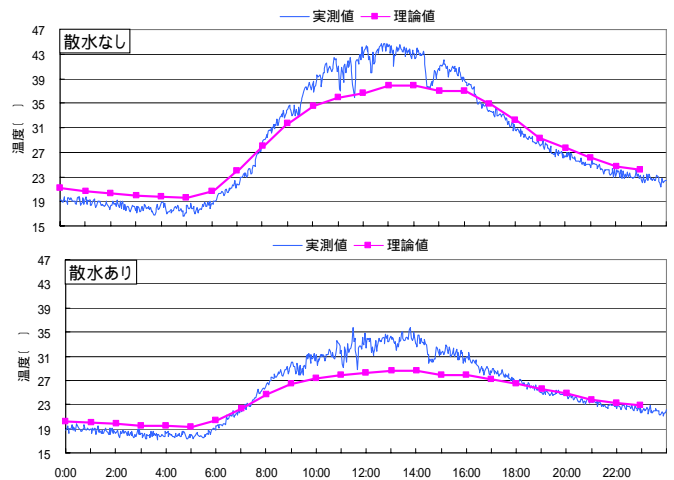


図6 散水有無による建築用膜材料裏面温度の理論値と実測値の比較

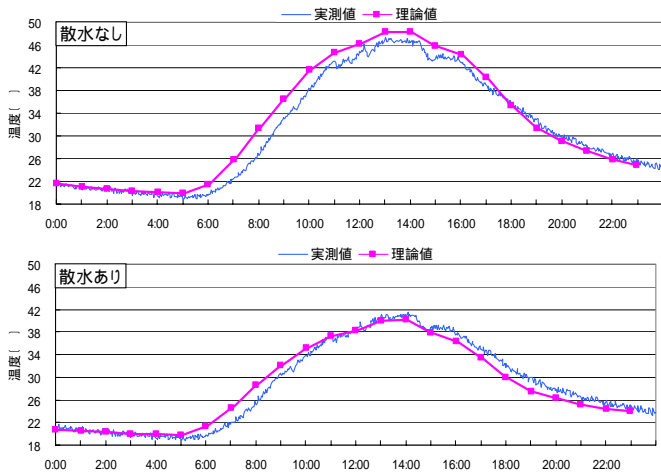


図7 散水有無による内部空間温度理論値と実測値の比較

4 実証実験棟(愛知万博休憩所)

4-1 実証実験棟概要

愛知万博長久手会場に建築用膜材料を使用した休憩所を建設し、実証実験棟とした。万博は2005年3月25日開会し、9月25日閉会した。実証実験棟の概要図を図8に、外観を図9に示す。

実証実験棟は木造平屋建て110㎡、建築用膜材料屋根と南面ガラスに光触媒が塗膜されている。北東側に入り口、風除室があり、休憩室と休憩ロビーが計測対象室となっている。散水は循環システムを採用し、タンクからポンプによって汲み上げられた水は、建築用膜材料に対してはミストノズルにより霧状に噴霧した。表面で蒸発しなかった水は再度タンクに回収した。ガラス面に対しては、2cmピッチで0.5mm口径の穴を開けた塩ビ管(シャワーフィット)を使用し、水道水を散水した。なお、万博終了後も約1ヶ月間、人の出入りのない実測パターンの実験をおこなった。

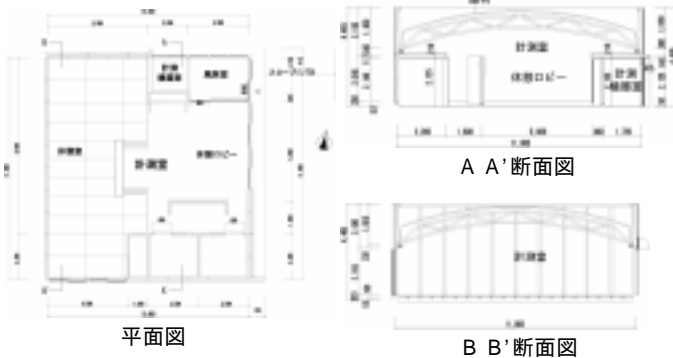


図8 実証実験棟概要図



図9 実証実験棟外観図

4-2 実測方法

建築用膜材料に対する散水はミストノズルによる間欠散水方式(1分間散水・1分間停止の繰り返し、平均約120ml/(min・㎡))で、

南面ガラスにはシャワーフィットによる連続散水方式を採用した。散水時間は、万博開催中は主に8時30分から22時とし、万博終了後は9時から18時とした。計測点を表4に示す。計測はデータロガーで1分間隔24時間連続計測した。

表4 実証実験棟測定項目表

対象	測定項目	測定数	計測機器
屋外	日射量	2	MS-601(英弘精機)
	風向	1	KDC-S4(コーナシステム)
	風速	1	
	温度	1	MT-060(英弘精機)
	湿度	1	
テント膜	表面温度	3	熱電対
	裏面温度	1	
ガラス	表面温度	3	熱電対
	裏面温度	1	
空調機器 (南北2台)	吸い込み温度	3	熱電対
	吹き出し温度	3	
	吸い込み湿度	2	THT-B(神栄機器)
	吹き出し湿度	2	
電力量	FCU消費電力	2	トランスデューサー(横河電機)
	照明消費電力	3	
在室者数	入場者数	1	人感光センサー
	退場者数	1	
タンク内水位	水位	1	WL300(メテオ電子)

4-3 実測パターン・実測期間

実測パターン・実測期間を表5に示す。万博開催中は建物を観客が自由に使用し、内部発熱をコントロールできない。この期間は実使用状態における散水有無の2パターンを行なった。万博終了後は照明なし、人の出入りなしとし、散水有無、空調有無の4パターンを行なった。

表5 実証実験棟実測パターン表

	冷房有無	散水有無	内部発熱	主な実測日
パターン1		x	あり	8/2~8/5
パターン2			あり	8/6~8/11
パターン3		x	なし	10/20~10/22
パターン4				10/16~10/19
パターン5	x			10/1~10/7
パターン6	x	x		10/8~10/15

注) 印は有、x印は無

4-4 実験結果・考察

(1) 建築用膜材料裏面温度

万博開催中で、日射量が多く、天気によく似た日を選び比較した。8月2日(散水なし・冷房あり)、8月8日(散水あり・冷房あり)の外気条件を図10に示す。同一日のテント裏面温度を図11に示す。散水ありの日の日平均外気温は30.9℃、日積算日射量は4387wh/㎡で、散水なしの日の日平均外気温は31.4℃、日積算日射量は4166wh/㎡である。散水なしの建築用膜材料裏面最高温度は約34℃、散水ありの最高温度は23℃となり、蒸発冷却による温度降下は約11℃となった。

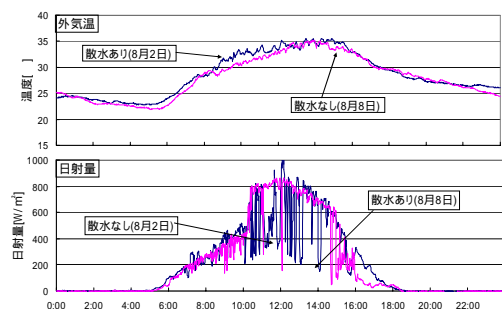


図 10 外界条件比較

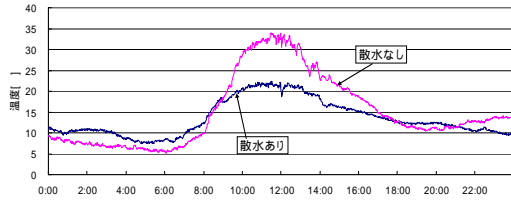


図 11 散水有無による建築用膜材料裏面温度

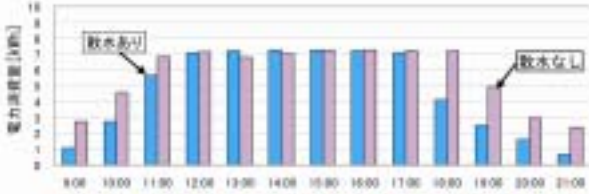


図 12 散水有無の冷房消費電力量の比較(万博開催中)

(2) 散水の有無による冷房消費電力量の比較

蒸発冷却による冷房電力削減効果の算出を行った。万博開催時で散水の有無を比較した同一日の冷房電力量を図 12 に示す。昼間の冷房負荷が大きく冷房電力量が大きい時は削減量が小さい。しかし、朝夕は散水有無の差が顕著に表れる。一日を通しての削減は 17.4%であった。万博終了後の比較ではパターン 3、4 で比較的外界条件の似ている 10月 21日 (散水なし・冷房あり)、10月 19日 (散水あり・冷房あり) を選んだ。外界条件を図 13 に示す。10月 21日は日平均外気温 15.8℃、日積算日射量 2630Wh/m²で、10月 19日は日平均外気温 16.6℃、日積算日射量 2860Wh/m²であった。冷房消費電力量を図 14 に示す。削減量は 17 時が最大で約 0.4kW であった。散水時間帯である 9時から 18時では合計で約 1.5kWh、割合にすると 28.8%の削減効果が得られた。

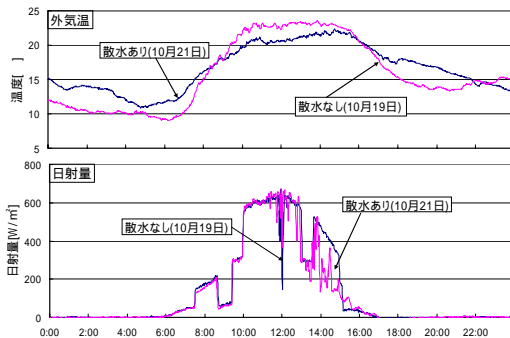


図 13 外界条件比較

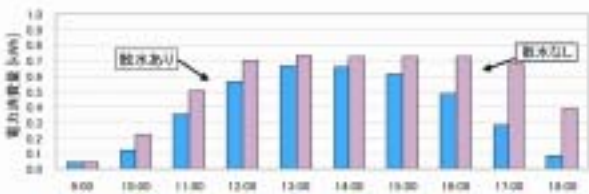


図 14 散水有無の冷房消費電力量の比較(万博終了後)

(3) 散水の有無による冷房消費電力量削減効果

万博開催中の冷房消費電力量と外界条件との関係を調べた。図 15 に外気温と散水有無の冷房消費電力量をプロットした。散水あり・

散水なしの近似直線の傾きは類似しており、外気温 28℃の時の散水なしが 30kWh、散水ありが 26kWh となり、冷房消費電力量削減効果は 13.4%となる。図 16 に日積算日射量と散水有無の冷房消費電力量の関係を示す。外気温の相関と同様、散水の有無の近似直線の傾きは類似しており、日積算日射量 3kWh/m²の時の散水なしが 33kWh、散水ありが 26kWh となり、21.2%の削減効果があった。

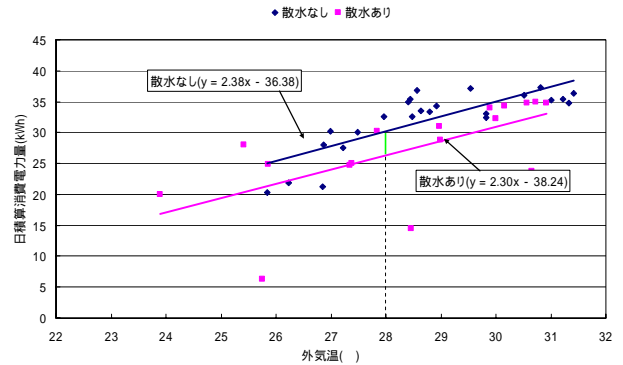


図 15 外気温と散水有無の冷房消費電力量の関係

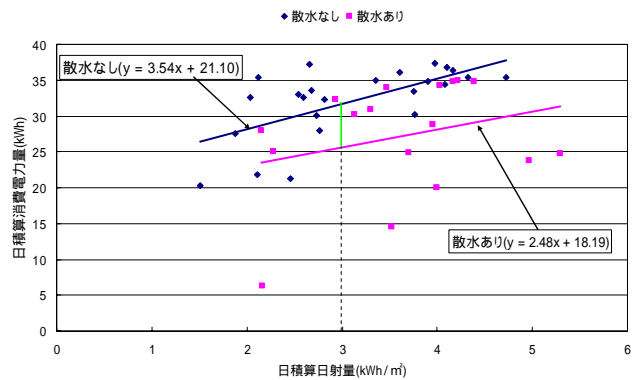


図 16 日積算日射量と散水有無の冷房消費電力量の関係

4 - 5 実証実験棟の理論値と実測値の検証

(1) 万博開催中

モックアップと同様多数室非定常熱負荷計算プログラム LESCOM-vapor を用いて検証した。理論計算には外界条件および内部発熱条件を用い、外界条件はデータロガーによる計測値、内部発熱の照明は実際に点灯している蛍光灯の発熱量、人体発熱は光センサーの計測による人数をインプットした。換気回数は推定で、3回/hとした。冷房除去顕熱量はダクト内の風速と空調機の出入口温度差より算出した。パターン 1 (散水なし、7月 15日) の理論値と実測値の比較を図 17 に示す。

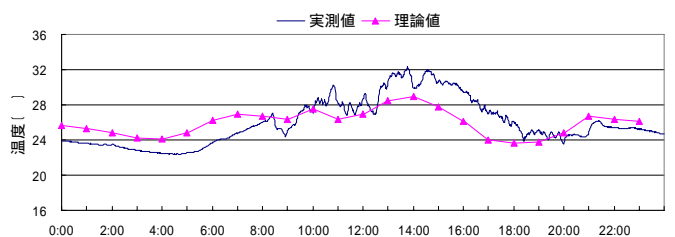


図 17 散水なし実証実験棟室内温度

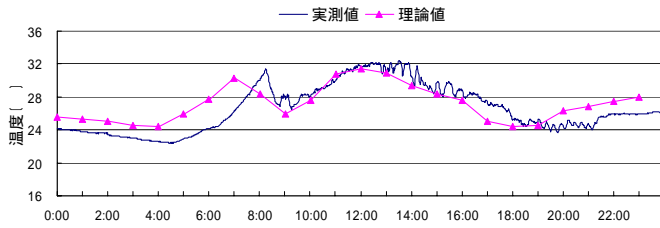


図 18 散水あり実証実験棟室内温度

日平均誤差が 1.6℃となった。同様にパターン 2 (散水あり、7 月 18 日) の比較を図 18 に示す。日平均誤差が 1.3℃となった。パターン 1・2 共に誤差が相当大きいのは冷房除去熱量、人体発熱、人の出入りに伴う換気量等が正確に捉えきれていないためと思われる。

(2) 万博終了後

9 月 25 日閉会后、内部発熱なしで実測を行った。図 19 にパターン 6 (散水なし、冷房なし、10 月 12 日) の理論値と実測値の室内温度を示す。日平均誤差は約 1.0℃で、真夜中と日射のある午前中、理論値が実測値より低くなっている。午前中実測値の変動が激しく理論値は追従しきれていない。しかし、おおよその室温変動は再現されている。

図 20 にパターン 5 (散水あり、冷房なし、10 月 2 日) の理論値と実測値の室内温度を示す。理論値が常に高く、日平均誤差が約 1.6℃となった。理論値の室温変動の形状は実測値を比較的追従している。

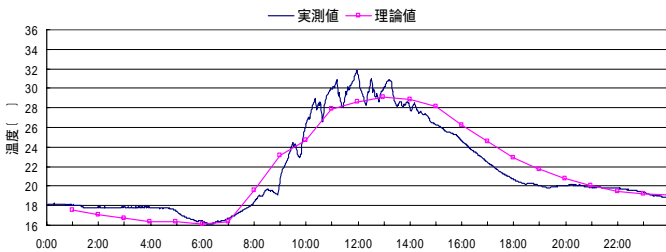


図 19 散水なし実証実験棟室内温度

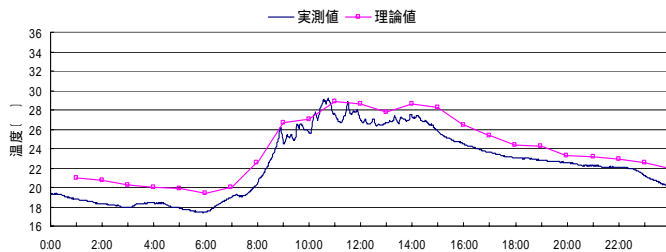


図 20 散水あり実証実験棟室内温度

4 - 6 期間散水シミュレーション

モックアップ、愛知万博の実測より得られた結果を踏まえ、名古屋の標準気象データ¹²⁾を用いて、実証実験棟の散水を伴う期間冷房負荷シミュレーションを行った。

主な計算条件 冷房期間 4/1~9/30

物質移動係数 $0.0129[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg}/\text{kg}^?)]$

散水時間 9:00~22:00 設定温湿度 25℃, 50% (9:00~22:00)

照明発熱 1860W (9:00~22:00) 人体発熱 30 人(9:00~22:00)

換気回数 3 回/h(9:00~22:00 その他の時間は 0.5 回/h)

計算結果を図 21 に示す。削減量は 8 月が最大で約 5.92GJ であった。冷房期間の積算削減量は 26.8GJ で 19.0%の省エネルギーになった。

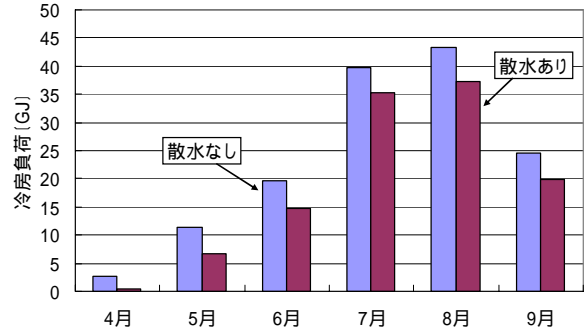


図 21 散水による冷房負荷シミュレーション

5 まとめ

光触媒の親水性を利用して蒸発冷却による冷房負荷削減方法を提案した。建物外皮として、熱貫流率の大きい建材が有効であることより、今回、建築用膜材料を取り上げた。建築用膜材料にミストノズルで散水する方法の物質移動係数を算出するため、モックアップを作製し実験を行なった。その結果、物質移動係数 $0.0129 [\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg}/\text{kg}^?)]$ となり、蒸発冷却の理論式を組み込んだ多数室非定常計算プログラム(LESCOM-vapor)による検証を行なうと、室温、表面温度ともに比較的一致した。次いで実物件の建築用膜材料を使用した愛知万博休憩所の実測調査を行い、建築用膜材料に散水することによる省エネルギー効果は 13~21%程度であることが分かった。さらに、モックアップで得られた物質移動係数を持ちいて、建築用膜材料休憩所の室温検証を行なうと、人体発熱、証明がなく、換気量の比較的少ない万博終了後は比較的追従することが分かった。また、熱負荷シミュレーションでは散水の有無の冷房負荷削減は約 19%になった。

今後、計画段階でこのプログラムを用いて精度良く予測することは可能と思われる。

謝辞

この研究は NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の課題設定型産業技術開発費助成事業によるものである。また、シミュレーションは武田研究室・磯崎恭一郎氏、実測データ整理は、卒研生杉浦直隆氏にお世話になりました。感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Rong Wang, Kazuhiro Hashimoto, Akira Fujishima et al.: Light-induced amphiphilic surfaces, NATURE Vol.388, pp.431-432, 1997.7
- 2) W.K.Lewis: The Evaporation of A Liquid into A Gas-A Correction, Mechanical Engineering, Vol.55, pp.567-573, 1933
- 3) 石川幸雄, 木村建一: 湿相当外気温度に基づく屋根散水の熱的效果に関する研究, 日本建築学会論文報告集 No.334, pp.89-100, 1983.12

- 4) 浦野良美, 渡辺俊行, 林徹夫, 龍有二, 尾崎明仁 : 大気放射・水分蒸発冷却を利用した二重外皮方式によるパッシブクーリングシステムの実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, No391, pp.50-59, 1988.9
- 5) 渡辺俊行 : 放射冷却・蒸発冷却, 日本建築学会環境工学委員会第 18 回熱シンポジウム pp.63-70, 1988.9
- 6) 武田仁, 宮道智嗣 : パッシブクーリングシステムに関する研究～光触媒テント膜による屋根散水の熱的検証と物質移動係数の算出～, 日本建築学会学術講演梗概 D-2, pp.345-346, 2004.8
- 7) 安藤邦明, 浅田秀男, 武田仁 : 光触媒建築用膜材料を用いるシステムの放熱効果に関する実測, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 I, pp.525-528, 2004.8
- 8) 宮道智嗣, 武田仁 : 光触媒の親水性を利用した蒸発冷却効果に関する研究－光触媒外装材を用いたオフィスビル実験棟の散水システムによる蒸発冷却効果－空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 I, pp.661-664, 2005.8
- 9) 中田貴之 : 光触媒を塗布した膜構造建築物への散水による冷房効果の実験検証、日本建築学会学術講演梗概 D-2, pp.133-134, 2005.9
- 10) 長沼宏, 岡建雄, 首藤治久, 佐藤和君 : 超親水性光触媒を施した外壁表面の水膜形成による冷却効果に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No.596, pp.109-115, 2005.10
- 11) 武田仁, 胡震洪 : 光触媒利用外付け日除けスクリーンによる建物温熱評価, 日本建築学会技術報告集 第 22 号, pp.285-289, 2005.12
- 12) 武田仁, 稲沼實, 吉澤望, 磯崎恭一郎 : 標準気象データと熱負荷計算プログラム LESCO, 井上書院, 2005.3