親水・吸水性塗膜を施した表面濡れ性が高いパッシブクーリング ルーバーシステムの開発と屋外実験による基本性能の把握

Development of a Surface Wetting Passive Cooling Louver System with Hydrophilic and Water Absorbing Coating Film and an Evaluation of its Fundamental Performance by Outdoor Experiment

平山 由佳理*1	太田 勇*1	梅干野 晁*2
Yukari Hirayama	Isamu Ohta	Akira Hoyano

*1 ㈱ミサワホーム総合研究所 Misawa Homes Institute of Research and Development Co., Ltd. *2 放送大学 The Open University of Japan

Corresponding author: Yukari HIRAYAMA, Yukari_Kezuka@home.misawa.co.jp

ABSTRACT

A Passive cooling louver system (PC louver) coated with hydrophilic and water absorbing film is developed in order to form cool microclimate in outdoor and semi-outdoor spaces. The PC louver was designed to shade direct solar radiation, provide radiation cooling and cool airflow. The results from the PC louver's outdoor experiment show that when more than 1 kg/h of water evaporated per vertical surface area (m²) during the day, PC louver's surface temperature was kept approximately to the ambient wet bulb temperature throughout the day, and air temperature passing through the PC louver decreased by -3 °C at most when enough water was supplied to wet the whole PC louver's surface.

キーワード: 蒸発冷却, ルーバーパーティション, アルミ, 多孔質材, 光触媒 *Key Words*: Evaporative cooling, Louver partition, Alumina, Porous medium, Photocatalyst

1.はじめに

夏季日中の暑さが深刻化する中,空調機器等に頼らずに 涼を得る方法として,屋外におけるクールスポットの形成 とその利用が注目されている^{(1)~(3)}。建築外部空間にクール スポットを形成する手法の一つとして,近年では蒸発冷却 手法を壁体や壁面にも適用させる技術が開発されている。 白井らによる透水性・保水性孔あきレンガ⁽⁴⁾や梅干野らに よる高揚水性セラミックパイプ⁽⁵⁾を用いた蒸発冷却壁体シ ステム (Passive Cooling Wall,以下 PCW)は、吸水した壁 体から水が蒸発する際に奪う気化熱によって壁体が冷却さ れ、壁体からの冷放射と、壁体を通過する空気の冷却によ る冷気の生成が期待できる。しかしこれら PCW は吸水・ 保水性に優れたセラミックスを用いており、保水性を有す るが故に構造的に弱い等の課題がある。このため実用化に 向けて、構造強度および設計自由度を高めた蒸発冷却壁体 システムの開発が求められていると言える。

表面の濡れ性状が冷却性能を規定する蒸発冷却手法においては、部材の表面を濡らすことができれば表面と基材の 素材を分けることができる。そして基材には、強度があり 加工性や耐久性が良い材料を選ぶことができるようになる。 そこで本研究では、基材には近年外構部材に汎用的に用いられているアルミ材を用い、部品としては、構造上の観点 と微気候形成の観点から,面構成の設計自由度が高く,日 射遮蔽と通風性を有するルーバーパーティションに着目し て研究開発を行う。

本研究では、上記ルーバーに潅水するシステムを含めて 「パッシブクーリングルーバーシステム」(Passive Cooling Louver System,以下 PC ルーバー)と呼び、PC ルーバーの 開発および PC ルーバーを適用した空間における微気候を 予測・評価する手法を構築することを目的に、以下の項目 について検討を行っていく。①PC ルーバーの基本構成の提 案と基本性能の把握、②PC ルーバーにより形成される微気 候の予測・評価手法の構築、③実在空間における PC ルー



図1PC ルーバーの適用空間とクールスポット形成のイメージ

バーの適用空間の提案とその微気候の予測・評価。

本報では1つ目の項目として,PC ルーバーの基本構成の 提案と基本性能の把握を行う。蒸発冷却性能を有する部材 の基本性能として,まずルーバー全面に水が濡れ拡がる塗 膜の開発と,日射遮蔽機能を有し,かつルーバー部材各段 に水を受け渡すのに最適な断面形状について検討する。そ して PC ルーバーの実証モデルを作製し,屋外実験により その熱的特性を明らかにする。

2. 親水性・吸水性塗膜の開発

2.1 既往の蒸発面形成技術

建材の表面を濡らすには、前述したように吸水性のある 多孔質セラミック材等による毛細管力を利用した方法の他 に、化学的に表面組成を変えることによって親水性を高め る方法がある。親水化技術のうち最も普及している手法の 1 つに光触媒があり、その多くは防汚性を目的としている ものの⁽⁶⁾、近年では光触媒を外壁等に適用した場合の蒸発 冷却効果に関する報告も見られる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。しかし既往の手法 ではある大きな面を対象とする場合が多く、角材のように 複雑な形状を対象に光触媒を塗布した例は見られない。

2.2 親水性・吸水性塗膜試験体の作成

PC ルーバーでは、ルーバー部材の4面全てを濡らすこと を目的として、基材のアルミ材に直接塗布可能なアクリル 性親水性樹脂塗料をベースに、光触媒もしくは多孔質材, さらにその両方を組合せた塗膜を検討した。そこで、A.親 水性樹脂塗材のみ、B.親水性樹脂塗材+光触媒、C.親水 性樹脂塗材+多孔質材,D.親水性樹脂塗材+多孔質材+光 触媒の4ケースについて試験体を作成した。

光触媒は TiO₂ を主成分とする現場吹付けも可能な常温 乾燥型を用いた。多孔質材は、毛細管力により水が孔隙内 に吸水される径として,数~数十µmが好適であることか ら⁽⁹⁾, 上記細孔径を有する多孔質材を選定した。またアル ミ材に接着する多孔質材として、平板の場合薄いと割れや すく,厚いと重量が嵩み構造設計上の問題が出てくること から,薄い樹脂塗材を介して,粒状の多孔質材を付着させ ることとした。その際、粒状の多孔質材は樹脂塗材に混練 してから塗布すると樹脂が孔隙を塞いでしまうため、樹脂 塗材を塗布した後、乾燥する前に多孔質材を吹付けて付着 させた。この手法では、原理的には接着層が部材表面のみ となり1層分しか多孔質材が付着しない(図2)。このため 粒径は小さい方が高密度に付着できるため望ましいと言え るが、①小さすぎると吹付けの際に舞ってしまう、②接着 できるだけの吹付け圧が得られない、などの製造上の問題 が生じたため、粒子径の分布範囲が 300~1000µm である発 泡ガラスビーズを用いた(表1)。選定した多孔質材の特徴 および多孔質材を塗布した試験体 (ケース D) 表面の SEM (走査型電子顕微鏡) 画像を図3に示す。

表1 多孔質材の粒度分布

粒径[<i>µ</i> m]	<-300	300~500	500 ~ 1000	1000~2800
割合 [%]	7.3	23.0	63.6	6.1



図2 アルミ材表層断面



試験体は長さ 10cm のアルミ角材を用いた。まず全試験体 について,水滴下時の水の拡がり具合の観察を目視により行

について、水滴下時の水の拡がり具合の観察を目視により行った。水の滴下は実使用を想定して水道水とし、水平および3°の傾斜(詳細後述)を付けた試験体の5cm上方からスポイトで1gの水を滴下した。

続いて水拡散性の評価には、ケース A と B は液適法によ り、水と試験体表面との間の接触角の測定(Dropmaster DM-301,協和界面科学)を行った。一方、ケース C と D については、多孔質材に水が吸収されてしまうため接触角 の測定が不可能であることから、水滴下試験時の水の拡が りが良好であったケース D について吸水試験を行った。吸 水量は、吸水前後の重量差(ma)によって求めた。試験体は 2 体用い、まず 50℃で 2 時間乾燥させ重量を測定した後(m1)、 室温にならした 1L の水に浸水させた(図 3)。任意の時間 浸水後、取り出してすぐに濡らした布で余分な水滴を拭い てから吸水時の重量(m1)を測定した。吸水量はルーバー部 材表面 1 m² あたりの吸水量として下式の通り算出した。試 験片は重量測定後すぐにまた新しい水に浸水し、吸水量が 安定するまで繰返し測定を行った。

$$m_a = (m_i - m_I) / A \qquad \dots (1)$$

ma:吸水量[g/m²], *mi*:乾燥重量[g], *mi*:浸水から*i*時間後の重量[g], *A*:ルーバー部材表面積[m²]

2.4 評価結果

(1)水滴下後の水の拡がり ケース A,B は水平状態の上 面に対しては良い拡がりが見られたが,ルーバー部材の 3° の傾斜で上方側面には水が拡がらない結果となった。ケー ス C は全方位に対して水が拡がったものの,ケース A,B よ り水が拡がらない結果となった。一方,ケース D は多孔質 材に吸水され,かつ多孔質材間を縫うように水が拡がる様

2.3 評価手法

子が見られ,表面から水(液面)が見えなくなるほどであった(図4)。

(2) 水の接触角 ケース A, B の試験体に対する水の接触 角は,ケースAは43.2°と親水性を示したものの,ケース B では 6.2°まで低下し, TiO₂による親水化の効果が顕著に 現れた(図 5)。

(3) 吸水試験 光触媒と多孔質材を両方組み合わせたケ ースDを浸水させた結果,最初の1時間で170g/m²吸水し,

その後も吸水量は増加し続け,最大 450g/m²まで増加した (図 6,7)。毛細管力による吸水は数~数十 µm の細孔が好 適であるが,吸水量が安定するまでに数百時間を要したの は,図 3 の SEM 画像でも見られたように数~数十 µm より 小さな細孔径の分布と細孔の構造に因ると推察される。こ のため水滴下直後の拡がりに対して全ての細孔が寄与して いるわけではないが,相対的に径が大きい細孔から順次吸 水していくものと思われる。

よって,光触媒による多孔質材および樹脂塗材表面の親水 性,多孔質材間の適当な距離(数~数十µm),多孔質材の吸 水性,が合わさったケース D の仕様において,本研究で要 求する角材の4面に対して水が濡れ拡がる性能が得られた。

3. パッシブクーリングルーバーの構成

3.1 水の流れを考慮したルーバー部材の断面設計

具体の設計を行う上で、人の滞在空間としてテラス空間を 想定し、パーゴラに PC ルーバーを取り付けた場合の水の流 れを図 8 に示す。ルーバー部材の断面は、蒸発冷却面として 表面積をできるだけ大きく取るため、外構用アルミ材の中か ら奥行き 75mm、厚み 20mm の比較的薄い形状を選定した。 またルーバー部材を 3°テラス側に傾け、さらにテラス側側 面を 45°切り込んだ菱形とした。これにより、パーゴラ梁 から滴下した水のうち多孔質材に吸水されなかった水がテ ラス側側面をつたって下段の中央付近に滴下するよう誘導 し、水の拡がり易さや強風時の周囲への飛散防止に配慮した。

3.2 ルーバー部材の間隔

ルーバー部材の間隔は通過する空気の力学的抵抗,ルー バー表面と空気との対流熱伝達量,そして蒸発量にも影響 を与えるが,ここではエネルギー量が大きい直達日射の遮 蔽を考慮して間隔を決定した。ルーバー部材間を直達日射 が透過し始める太陽高度を表2に示す。

PC ルーバーに入射する日射の方位は, PC ルーバーに対 して法線方向から入射する場合にルーバー部材間を通過す る距離が最短となり,日射遮蔽に対して不利になる。この ため法線方向から入射する場合を想定して計算すると,① 実開口幅を 5mm にした場合には,実開口率は 20%,直達 日射が透過し始める太陽高度は 8°以下に抑えられる。し かしルーバーに 3°の傾斜を付けているため,垂直投影面 上の開口幅(以下,見付け開口幅)は 0.3mm となり,正面 から見た時に視線が抜けず閉塞感が生じる(表 2)。設置空



3 親水性樹脂塗材+多孔質材
 ④ 親水性樹脂塗材+多孔質材+光触媒
 図4水滴下後の拡散性の観察(水平状態)



図5 PC ルーバー表面上の水の接触角



表2 ルーバー部材間	『を直達日射が透過	し始める太陽局度
------------	-----------	----------

	1	2	3
実開口幅 [mm]	5	10	15
実開口率 [%]	20	33	43
見付け開口幅 [mm]	0.3	5.3	10. 3
ルーバー部が間を直達日射が 透過し始める太陽高度[[°]]	8	13	18

* ルーバー材幅は 20mm

間において閉塞感を感じないためには視線が抜けることが 重要であるため、②実開口幅を10mmに拡大すると見付け 開口幅は5.3mmとなり、視線が抜けるようになる(図9)。

②実開口幅を10mmとした場合には、法線方向から直達 日射が透過し始める太陽高度は13°となるが、透過日射量 はPCルーバーの設置方位および季節によって異なる。そ こで南、南西、西面にPCルーバーを設置することを想定 した場合の鉛直面直達日射量および透過する直達日射量を 算出した結果を図10に示す^(注1)。図10より、南面に設置 した場合には日射の透過は見られない。これはPCルーバ ーに入射する時間帯の太陽高度が高いことによる。一方、 南西面および西面では、太陽高度が低くなる日没前の15 分~30分程度の間日射が透過するが、透過率が大きくなる 時間帯には鉛直面直達日射量が小さくなっているため、透 過直達日射量は最大でも南西面で10W/m²、西面で50W/m² 程度となった。当計算より、直達日射が透過する時間およ び量は十分に少ないと考え、②の実開口幅を採用した。

3.3 PC ルーバーの構成

最終的に決定した PC ルーバーの構成および仕様をまと めると次のようになる。ルーバー部材断面は表面から光触 媒,多孔質材,親水性樹脂塗材,アルミ材となる。実開口 幅は 10mm,見付け開口幅は 5.3mm である。また有効蒸発 面積は 5.3m²/m² である。パーゴラ柱内を立ち上げた潅水チ ューブにより,梁下の 5cm ピッチの孔からルーバー最上段 に水が滴下される^(注 2)。ルーバーに滴下した水はルーバー 表面を四方に拡がりながら,余剰水は 3°傾き,かつ中央 よりに側面が切り込まれた側を流れて下段へと滴下してい く。そして最下段まで達した水は樋により回収され,地面 (下草植栽もしくは砕石層)に排水される。



と透過直達日射量



図 11 PC ルーバー表面の熱収支





(a) 立面(正面,南西向き)
 (b) 断面(長手方向,北西面)
 図 12 PC ルーバー実証モデルの設置と測定位置

4. PC ルーバーの実証モデルと熱的特性の把握

4.1 PC ルーバー表面の熱収支

熱的観点から見た PC ルーバーの要求性能は図1のイメ ージの通り直達日射が遮蔽されること(日射遮蔽),全面が 濡れて表面温度が低下すること(冷放射面の形成), PC ル ーバーを通過する空気温度が低下すること(冷気の生成) である。これらの性能を評価するためには, PC ルーバー表 面の熱収支を明らかにする必要がある。PC ルーバー表面の 熱収支は図11のように考えられる。PC ルーバー表面の日 射吸収量は,顕熱輸送量,正味長波長放射量,潜熱輸送量 の和と等しくなる。このうち顕熱輸送量は PC ルーバー表 面と外気との対流熱伝達量に加え,水の流下に伴う熱伝達 量がある。なお,ルーバー部材は厚み約2mmの中空材で あり,熱容量は十分に小さいと考え,ここでは蓄熱量は無 視する。

以上を踏まえ, PC ルーバーの実証モデルを作成し, 屋外 実環境下における熱的特性の把握から, 開発設計時の個々 の要求性能に対する評価を行うと共に, PC ルーバー表面の 熱収支を明らかにするための基礎的検討を行った。

4.2 実証モデルの概要

PC ルーバーの実証モデルは周囲が開放的な住宅の南西 (220°)向きテラスに設置した。実験場所の主風向は南で あり、ルーバー前面の南西から南よりにかけて風が流入しや すい環境となっている。実証モデルの設置状況を図 12 に示 す。(a)は PC ルーバー正面の立面,(b)は長手方向の断面図 である。実使用上ではクールスポットが形成されやすいよ うにテラスの 2 面ないし 3 面を PC ルーバーによって囲う ことを想定しているが、本実験では PC ルーバーの

基礎的データを取得するため,住宅の正面にのみ設置して測定を行った。テラスの床面は透水性樹脂舗装,天面は淡色のオーニング(日射透過率 8%)とし,パーゴラに幅 1.29m,高さ 1.61m の PC ルーバーを 2 面並列に取付けた。これら2面のうち,東側の PC ルーバーは潅水あり(以下,濡れルーバー),西側は潅水なし(以下,乾燥ルーバー)とした。

4.3 測定方法

測定項目およびそれぞれの測定位置を図 12 に記載した。 測定機器の主な仕様を表 3 にまとめた。以下に主要な測定 方法について説明する。

(1)測定データの収録方法および測定期間 測定間隔は 1秒,10秒,1分のいずれかで行い,各子機ロガーの測定 データを無線で親機に飛ばし,同期させて収録した。ただ し排水量のみ別ロガーにより1分もしくは10分間隔で測定 した。測定期間は2012年10月1日および2013年8月4 日から2013年11月29日までであり,潅水量や潅水時間を 変えながら断続的に行った。本解析に用いた測定日の潅水 条件を表4に示す^(注3)。潅水量は,PCルーバーの鉛直見付 け面積あたりの潅水量である。 以下,各測定項目については,個別に記載がない限り測 定高さは地上面から 1.5m であり,PC ルーバーの中央高さ で行っている。

(2) 反射日射量と透過日射量 パーゴラ支柱外部側鉛直 面にて PC ルーバーに対する入射日射量を, PC ルーバーの 中心から外部, テラス側にそれぞれ 0.1m の位置で,反射日 射量と透過日射量を測定した。また一定間隔で部材が取り付 けられている PC ルーバーでは鉛直方向に分布が生じること が考えられたため,透過日射量測定はルーバー部材高さと部 材間高さの 2 点で測定を行った。

(3)風向・風速 PC ルーバーの中心から前後 0.15m の風 向・風速を 3 次元超音波風速計により測定した。また風上 側風向・風速条件として, PC ルーバーから外部側 1m の地 点にて 3 次元超音波風速計により測定した。さらに図 12

表 3 測定機器

測定項目	測定器(設置場所)	仕様	測定 間隔	
代表気温	複合気象観測装置 (WXT520, Vaisala)	測定範囲:-52~+60℃ 測定精度:±0.3℃ 測定範囲:0~100%		
代表湿度	(GL +9m)	测定精度:±5%	14	
代表風向	ベーン式	測定範囲:0.~540° 測定精度:±5°	מי	
代表風速	(GL +2.3m)	測定範囲:0.4~70m/s 測定精度:±0.3m/s		
外部乾球温度 外部湿球温度	T型熱電対 (常時強制通風有筒内)	線径:0.1mm		
水平面全天日射量 鉛直面入射日射量 鉛直面反射日射量 鉛直面透過日射量	ネオ日射計 (パーゴラ支柱上部) (支柱外部側側面) (ルーパー外部側0.1m) (ルーパー内部側0.1m)	波長域:0.3~2.8µ m 測定精度:±5%		
風向 風速	3次元超音波風速計 (外部側:ルーパーから1m テラス側ルーパーから0.15m)	測定範囲:0~360° 測定精度:±2° 測定範囲:0~40m/s 測定精度:±0.1m/s	1秒 / 10秒 /	
気温	T型熱電対 (ルーバー前後0.1m 常時強制通風有塩ビ管内)	線径:0.1mm	1分	
湿度	電子式高分子湿度センサ (ルーパー前後0.1m 常時強制通風有塩ビ管内)	測定範囲:5~95% 測定精度:±5%		
ルーパー表面温度	T型熱電対	線径:0.1mm		
表面温度分布	赤外線放射カメラ	波長域:8~14µ m 測定精度:±2℃	1時間	
潅水量	重量計(パーゴラ梁下)	秤量:g	切替時	
排水量	転倒升型雨量計 (φ 20cm)	測定精度:±3%	1分/ 10分	

表4 潅水条件と測定日

測定期間	収録間隔	潅水時間	流入水温度[°C]	潅水量[kg/(m²·h)]
10/1*	1s	11:20-12:40	-	3.89
8/4	1min	7:00-19:00	26.5	3.80
8/5	1min	7:00-19:00	28.1	3.80
8/6	1min	7:00-14:30	27.4	3.80
8/7	1s	9:10-19:00	29.0	3.80
8/9	1s	7:00-19:00	28.9	3.80
8/15	1s	24hr連続	31.8	1.40
8/16	1s	24hr連続	32.5	1.20
9/19	10s	24hr連続	26.1	2.65
9/20	10s	24hr連続	25.8	2.65
9/21	10s	24hr連続	26.3	2.65
11/28**	-	24hr連続	-	-
11/29**	-	 24hr連続	-	-

*2012 年に測定 ** 濡れルーバーの入射・反射・透過日射量の測定のみ



には記載されていないが,対象地の代表風向・風速として, 周囲が開けている南側敷地境界にてプロペラ風向風速計によ り測定を行った。

(4) 表面温度 表面温度は日射の影響を軽減するため線径 0.1mmの熱電対を用い,ルーバー部材4面の多孔質材間にそれぞれクリアーの接着剤を用いて固定した。PCルーバーの 外部側乾球・湿球温度は強制通風筒内に線径 0.1mmのT型 熱電対を挿入し,PCルーバーから1mの地点にて測定した。

(5) 気温・湿度 PC ルーバーの中心から前後 0.1m にて近 傍気温を測定した。屋外の気温測定では,放射の影響を軽 減するため遮蔽板等を用いる例が多く見られる。しかし PC ルーバーに用いた塗膜の日射反射率は 0.63^(注4) と高いこと から,本実測では PC ルーバーからの反射を遮蔽しつつ近 傍の気温を測定する必要があった。そこで線径 0.1mm の熱 電対を開口部外周をアルミ箔で遮蔽した φ 13mm の塩ビ管 内に格納し,さらに塩ビ管端部をファンに接続して,開口 部付近の流速が1.5m/s以上となるよう吸引しながら測定を 行った^(注5)。さらに実験場所の代表温湿度として,隣接す る住宅の屋根上にて気温と湿度を測定期間中1分間隔で測 定した。

(6) 蒸発量 濡れルーバー面からの蒸発量は,ルーバー上 部からの潅水量とルーバー下部からの排水量の差によって 求めた。潅水量は各パターンの切り替え前後にパーゴラ梁 直下で集水して重量を計測し,排水量はルーバー下部に取 り付けた樋に集水した水量を雨量計にて計測した^(注6)。

4.4 測定結果

(1)PC ルーバー表面の日射収支 入射する鉛直面全天日 射量に対する反射・透過・吸収日射量の測定結果を図 13,14 に示す。ここでは PC ルーバーの外部側から日射が入射す る時間帯についてのみ記載する。図 13 より,ルーバー部材 間高さと部材後方高さの2 点間の差は最大でも5W/m²以下 であったことから鉛直分布は無視できるものとして,以降 の解析においてはルーバー間高さのデータを用いる。

夏季,秋季それぞれの晴天日における透過日射量は25~ 45W/m²程度であった。図10と同様の方法で,測定時の透 過直達日射量を試算した結果,日射の透過は日没前15分~ 30分程度,日射量にして最大で10W/m²程度であった。図 14の透過日射量データは天空,反射成分を含むものである が,当時間帯に顕著な増加は見られず,試算結果が妥当で あると考えられた。また図14の14:15分頃に透過日射量が 増加しているが,これはPC ルーバーに対して太陽が法線 方向に位置する時間帯であり,反射成分が大きくなったた めと思われる。

(2) ルーバー各面の表面温度の日変化 曇天日から快晴 日まで様々な夏季気象条件を含む,8月4日~7日の濡れル ーバー・乾燥ルーバーそれぞれの部材4面の表面温度変化 を図15に示す。一定風速以上の通風環境下における日射が 当たらない完全濡れ面の温度は湿球温度相当になることか ら,PCルーバー部材の表面温度変化および各面の温度分布 は湿球温度との差異に着目して考察していく。

8月4日~6日では、濡れルーバーの表面温度は、上・下・ テラス側側面が湿球温度+1.5℃以内で推移していた。この時、 直達日射が当たる外部側側面の表面温度においても最大で 湿球温度+3.5℃程度であった。一方、乾燥ルーバーの表面温 度はほとんどの時間帯で気温以上であり、かつ濡れルーバー に比べ 6~10℃程度高かったことから、PC ルーバーの表面 が濡れたことによる蒸発冷却効果であることが確認された。

8月7日は潅水開始時間が遅く,すでに日射量と気温が 高くなった後であったことから,ルーバー部材全面に水が 拡がるのに時間がかかった。このため昼頃までルーバー部 材下面の温度が高く,その結果全体的に PC ルーバーの表 面温度が湿球温度より 2~6℃程度高くなった。この日の気 象条件に対して水量が不足していたと考えられ,またその 様な状況ではルーバー部材の下面に水が回りにくいこと, そして4面全てが濡れていない場合には,濡れている他の 面の温度も湿球温度より高くなることがわかった。

(3) PC ルーバーの両側面の表面温度分布 同8月7日に おいて, PC ルーバーの下面にも水が回った後の熱画像を図 16 に示す。最上段を除いて,濡れルーバーの表面温度は26 ~29℃程度まで低下しており,全体で3℃程度の分布が見 られた。一方,外部側側面では,図17に見られるように局 所的に顕著な受熱日射量の分布ができていたにも関わらず 表面温度差は見られなかった。これは,ルーバー部材の日 射反射率が大きいこと,熱伝導性の高いアルミを基材とし て使用していること,そして吸収日射量に対して蒸発潜熱 量が大きいこと等に因るものと考えられる。

(4)水の流下による顕熱輸送 8月4日から8月7日の潅 水量が3.8kg/(m²・h)と少量であったことや配管温度による 影響もあり,潅水パイプの吐出口で測定した流入水温は25 ~29℃程度の範囲で変動した(図 15)。しかしこの期間, いずれの流入水温であってもPCルーバーの表面温度は流入 水温より低下し,湿球温度+3.5℃以下まで低下していた。既 往研究では,何江らが光触媒外装建材に水を流下した際の流 下水膜の温度分布を試算した結果がある^(®)。この計算では, 潅水部から下数+cmまでしか表面温度に分布が生じないと 報告している。本実験においても,表4に示す潅水量および 水温の範囲内では,最上段を除いて表面温度の鉛直分布はほ とんど見られなかった。表面温度分布が最上段のみとなり何









江らの計算結果より小さい結果となったのは、何江らが滑ら かな鉛直面を対象としているのに対し、PC ルーバーは4面 からなる角材であり、水の流れ方、特にルーバー部材上面に おける水の滞留やルーバー間の水の滴下が影響していると 推察された。

(5) 蒸発潜熱量の日変化 晴天日で蒸発量が多い日の代 表例として、9月19日の蒸発量の日変化を図18に示す。 日中は鉛直面見付け面積あたり1kg/(m²·h)以上の蒸発量が あり、午後の最大時には1.6kg/(m²·h)であった。これは 3.8MJ/(m²·h)の潜熱量に相当する。日積算蒸発量は約 14kg/m²となり、保水性舗装面からの蒸発量が約5~7kg/m² であるのに対し⁽¹¹⁾⁽¹²⁾2~3倍近い蒸発量となった。また他 の素材を用いた蒸発冷却壁体システムの例として、透水性 孔あきレンガの日積算蒸発量は最大で15kg/m²⁽¹³⁾、高揚水 性セラミックパイプ群の日積算蒸発量は最大で18.8 kg/m² ⁽⁵⁾であるのに比べ、PC ルーバーは奥行きが75mmしかない ことを考慮すると、コンパクトながら高い蒸発量が得られ ていると言える。

(6) 蒸発量と気象条件 蒸発量に影響する要因として, 日射受熱による表面温度の上昇,風速の増加による拡散速 度の増加,飽差などがある。飽差とは大気中の飽和水蒸気 と大気中の水蒸気圧の差(Vapor Pressure Deficit [hPa])で ある。十分な潅水により PC ルーバー表面全体が濡れてい た日において,日射が PC ルーバーの外部側から入射する 時間帯を対象に,上記各環境要因と日中の蒸発量との関係 を図 19 に示す^(注7)。

ばらつきは大きいものの,全体としては(a)鉛直面全天日 射量と(b)飽差の増加に伴い蒸発量が増加する傾向が見ら れた。外壁などの鉛直面においては,鉛直面に入射する日 射量と蒸発量には正の相関が見られるとの報告があるが ⁽¹⁴⁾, PC ルーバーでは外側側面は全体面積の16%程度であ り,反射日射等を考慮しても全表面積に占める受熱面積が 小さいため,壁面に比べ影響が小さく出たものと考えられ る。(c)風速と蒸発量の関係では,測定された風速は1m/s 前後の弱風が多く,当風速範囲では蒸発量のばらつきが大 きくなった。しかし都市部の住宅地では平均的な風速の範 囲内であることから,住宅地内に設置した PC ルーバーの 蒸発量については,風速よりも飽差と日射の影響の方が大 きいと言える。

(7) PCルーバー前後の風速比 PCルーバーの空気力学的 抵抗を把握するにあたり, PCルーバーを通過する空気の風 上(外部)側風速と風下(テラス)側風速を測定した結果を 図 20に示す。この時,超音波風速計はPCルーバー前後0.15m の位置に設置しており,風上側風向が PCルーバーの法線方 向に対して±22.5°以内となる時間帯を抽出して10秒間平 均化したデータを用いて作図した。同図より, PCルーバー 前後の風速比は0.78 であった。

(8) PC ルーバー近傍に生成される冷気温度 PC ルーバー の法線方向(南)から流入する風向を0°とし,南西(0°) から南東より(-90°)の風向が多く見られた時間帯におけ る PC ルーバー近傍の気温変動の特徴を示す時間帯として, 8月7日13:55から10分間の1秒間隔データを図21に示 す。当時間帯では、ルーバー部材の上面表面温度が湿球温 度+1℃、下面表面温度が湿球温度+3℃程度となっていた。

風上(外部) 側風向が 0°~±90°の時(13:56~13:58), 風下(テラス) 側の気温が風上側の気温に対し 2~3℃低下 する傾向が見られた。すなわち, PC ルーバーを通過するこ とによって2℃以上低下した冷気が生成され,風下側に移流 していた。また風速が 0.5m/s 程度の微風時(13:59, 14:04) にも,風下側の気温が風上側の気温より 2℃程度,最大で 3℃



図 20 PC ルーバー前後の風速比 (2012/10/1 10 時~12 時)

低下していた。一方,ルーバーに対して平行な流れ(風向 -90°)となった14:02~14:03 は、風上側気温も風下側気温 も乾球温度と同程度となり、冷気の移流が見られなくなった。 そこで、PCルーバーに対して法線方向から風が流入する 時の冷却性能として、次式の通り湿球温度に対する冷却効 率を評価した^(注8)。

$$\beta = (T_a - T_o) / (T_a - T_{wb}) \qquad \dots \qquad (2)$$

β: 冷却効率, T_a: 風上(外部)側気温[℃], T_{wb}: 湿球温度[℃],
 T_o: 風下(テラス)側近傍の気温[℃]

図 22 は前述した図 21 の測定期間を含めた同日の 12:00~ 15:00 に測定した1秒間隔のデータのうち, PC ルーバーの 法線方向±22.5℃の風向が3秒以上連続した時のデータを抽 出して作成したものである。図中の横軸と縦軸がそれぞれ PC ルーバー風上側風速と冷却効率となっている。風上側風 速が1m/s以下の場合,冷却効率は0~0.4の範囲に分布して おりばらつきが大きかった。図 21 においても弱風時には風 向変動が大きかったことから、1m/s 以下の弱風時には冷却 された空気が PC ルーバー近傍に滞留している状態であると 考えられる。そして風速が増すにつれ冷却効率が0.2程度に 収束する傾向が見られた。弱風時ほど冷却効率のばらつきが 大きいが、最も冷却効率が高くなるのも弱風時である傾向は、 既往の高揚水性セラミックパイプ群により構成された蒸発 冷却壁体システムにおいても見られた傾向である(5)(13)。よっ て弱風時おいてもPCルーバーにより生成された冷気が対象 空間に移流する手法を検討していく必要があると共に,弱風



時の気温低減効果の評価方法について、今後検討していく必要がある。

5. まとめ

本研究では、親水・吸水性塗膜を施した、アルミを基材 とするパッシブクーリングルーバーシステム(PC ルーバ ー)を開発し、屋外実環境下における熱的特性の把握を行 った。PC ルーバーの主な仕様および明らかとなった熱的特 性は以下の通りである。

- 光触媒による多孔質材および樹脂塗材表面の親水性,多 孔質材間の適当な距離(数~数+µm),多孔質材の吸水 性を合わせることによって,ルーバー部材の4面に水が 濡れ拡がる表面塗膜を開発した。
- 2. ルーバー部材を奥行き方向に長い菱形として、テラス側 に 3°傾きを付けることで、見付け開口幅を 5.3mm 確保



しながらも直達日射を遮蔽する断面を構成した。

- 3. PC ルーバーの表面全体が濡れている状態では,表面温度 分布が小さく,表面温度は最大でも湿球温度+3.5℃程度 であった。
- 4. 連続潅水した場合のPCルーバーからの1日の蒸発量は、 夏季晴天日において 14kg/m²程度であり、保水性舗装面 や光触媒を塗布した建物外壁面等と比べ高い蒸発潜熱ポ テンシャルが期待できることが確認された。また、蒸発 量については飽差と日射の影響が大きい傾向が見られた。
- 5. PC ルーバーの法線方向から流入する風の速度は, PC ル ーバーの抵抗により約2割減衰する。
- 6. PC ルーバーを法線方向から通過する空気の冷却効率は 風速によって異なるものの,最大で0.4 程度であった。

今後,本実験で得られたデータを用いて PC ルーバーの伝 熱モデルを作成し, PC ルーバーを適用した空間設計におけ る微気候予測・評価手法を構築していく。

謝辞

本研究の試験体作成にあたってアイカ工業株式会社に多大な協力を頂いた。ここに記し、深謝の意を表す。

注

注1) 太陽高度(h)および方位角(a)は,緯度(φ),日赤緯(δ),時角(t) を用いて下式より算出した。tは1時間を15°として,15分 間隔で算出した。

 $sin h = sin \varphi sin \delta + cos \varphi cos \delta cos t$

 $\sin \alpha = (\cos \delta \sin t) / \cos h$

ただし $\sin \alpha > 1$ は $|\alpha| > 90^{\circ}$ となる時には下式による。

 $\cos \alpha = (\cos h \sin \varphi - \sin \delta) / (\cos h \cos \varphi)$

また地表面の法線面直達日射量(*I_{DN}*)を,大気透過率(*P*)を 0.69として太陽常数(*I*₀)から求め,

 $I_{DN} = I_0 P^{1/\sin h}$

さらに垂直面直達日射量(*I_{DV}*)を垂直面の入射角(*y*)を用いて以下の通り算出した。

 $I_{DV} = I_{DN} \times \cos h \cos \gamma$

また入射角に対してルーバー間を透過し始める太陽高度(h,) については、 y からルーバーを通過する距離(d)を算出し、次 式より求めた。

$tan h_t = s / d$

ここで*s*はルーバー間実開口幅であり,10mmである。 また東西方向に対称であるとみなし,図10ではPCルーバー を南~西面に設置した場合,かつ12時以降の時間帯について のみ記載した。

- 注2) 潅水チューブは 15cm 間隔でエミッターがついた孔が空いて おり,最大 6m までは,末端まで均等に水が出るよう調整さ れている。孔1個あたりの最大吐出量は 32g/min.だが,今回 は10~20g/min.程度の水量で使用した。
- 注3) PC ルーバーへの潅水は,水の利用効率の点からは各時刻の 蒸発見込み分のみ潅水することが理想である。しかしルーバ 一表面での水の拡がりを確保するためには実際の蒸発量より

多くの水を流す必要があり、今回は十分に濡れた時の冷却性 能を確認することを目的としていたため、やや多めの水量を 供給した。最適な潅水量については今後整理していく。 また排水を循環させることも考えられるが、ポンプの稼働に 伴うエネルギー消費が発生することや、汚れ等が懸念された ため本実験では使用しなかった。

- 注4) 24 時間吸水させた試験片について表面が濡れた状態のまま, 190~2500nm の波長帯を垂直に照射させた時の分光反射率と 太陽光の分光放射エネルギー強度分布を乗じた値の積算値。
- 注 5) 当測定法により,日中 1000W/m²程度の日射条件下において も,気温の測定誤差は 0.7℃程度であった(強制通風筒内の 乾球温度との比較)。この誤差は,吸引した空気がアルミテ ープや塩ビ管の温度上昇により温められたことが要因であ ると考えられる。ただし図 20 にも見られるように,日射量 が 400W/m² 程度の時には風上側外気温として測定した強制 通風筒内の気温と外部側ルーバー近傍気温の差はほとんど ない。

直径 1.3cm の塩ビ管径による吸引量については,約200cm³ の空気を毎秒吸引していることになる。これは,開口部近傍 から均等に吸引していると仮定した場合,半径約3.6cm の球 体積に相当する。PC ルーバー中心と測定位置は10cm 離れて おり,これは流入風速が0.1m/sの時においても,1s間で空気 が移動する距離より小さい。完全な無風状態にはならない屋 外環境における本実験では影響のない吸引量である。



- 注 6) 流量の測定方法が異なることから,相互の検証として,ルー バー上部で測定した潅水量に対してほとんど蒸発が行われな い夜間 3 時-5 時の排水量を比較したところ,樋下の潅水量と の差は±0.03kg/(m²・h)程度であった。また PC ルーバー近傍 の風速が 3m/s以上と大きくなると周囲への水の飛散が見られ るため,飛散分も含めた誤差であると考えられるが,今回議 論している PC ルーバーの見付け面積あたりの蒸発量が数 kg/(m²・h)であるのに対してその量は十分に小さい。
- 注7)一日の中で相互に影響しながら気象条件が変化すため、比較 的安定する11時~16時の時間帯を対象とした。
- 注8) 蒸発冷却手法の最大ポテンシャルとして,一定風速以上の通 風環境下における完全濡れ面の表面温度は湿球温度と等し くなる。全面が濡れたルーバーを通過した空気は完全に顕熱 および潜熱が交換されたとすれば,空気の温度は湿球温度ま で低下することになる。そこで梅干野らは,外気乾湿球温度 差に対する空気温度低下「風上気温(外気乾球温度)一風下 気温」の割合を冷却効率と定義し,これまでに開発した蒸発

冷却壁体についても本指標を用いてルーバーの空気冷却性 能を評価してきた⁽⁵⁾。なお、外気が飽和状態(相対湿度が 100%)になるような気象条件は適用範囲外とする。

参考文献

- (1) 例えば、谷本潤・木村建一・佐藤隆満、涼房手法を用いた屋外 休憩施設に関する実験的研究、日本建築学会計画系論文集、 481(1996-3), pp.41-49.
- (2) 尹奎英・山田英貴・奥宮正哉・辻本誠、ドライミスと冷却効果の 検証と CFD 解析 ドライミストを用いる採涼システムに関する 研究,日本建築学会環境系論文集,633(2008-11), pp.1313-1320.
- (3) 白井一義・梅干野晃・小栗健,パッシブクーリングウォールにより構成された空間における涼しさの評価 透水性孔あき壁体を利用した蒸発冷却による屋外・半屋外快適空間の形成その3,日本建築学会計画系論文集,552(2002-2), pp.15-20.
- (4) 白井一義・梅干野晁・堀口剛, 透水性孔あきレンガを用いた蒸発冷 却壁体の開発, 日本建築学会計画系論文集, 487(1996-7), pp.61-68.
- (5) 梅干野泉・何江・小川俊輔・安藤純一・山村真司・赤川宏幸・ 中島古史郎・岡田清・倉田泰輔,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,641(2009-7), pp.775-782.
- (6) 例えば、犬飼達雄・本橋健司・小西敏正、光触媒を利用した外装仕上材料の水接触角による防汚性評価、日本建築学会構造系論文集、578(2004-4)、pp.21-26.
- (7) 武田仁・井上賢治,光触媒外装材撒水システムによる戸建て住 宅の冷房負荷低減に関する研究,日本建築学会環境系論文集, 606(2006-8), pp.37-42.
- (8)何江・梅干野晁,光触媒外装建材を用いた蒸発冷却システムの都市・建築熱環境改善効果 第1報-数値シミュレーションによる評価手法に関する検討,空気調和・衛生工学会論文集, 124(2007-7), pp.19-26.
- (9) 近藤純正・柳原あずさ・三枝信子,土壌の蒸発パラメータに 関する実験的研究,天気,40(12)(1993-12), pp.11-17.
- (10)何江・梅干野晁・高橋晃一朗,蒸発冷却孔空きレンガ壁体を利用した都市・建築空間における微気候の予測・評価手法の開発に関する研究,日本建築学会技術報告書,15(2009-10), pp.839-842.
- (11) 赤川宏幸・小宮英孝,表面を連続的に湿潤できる舗装体に関する
 実験的研究,日本建築学会計画系論文集,530(2000-4), pp.79-85.
- (12) 梅千野泉・円井基史・松本明広・浅輪貴史,雨水貯留と毛管 吸収に着目した蒸発冷却舗装システムにおける夏季屋外実験 による舗装体の形状と断面構成の検討,日本ヒートアイラン ド学会論文集,6(2011), pp.30-38.
- (13) 白井一義・梅干野晁・小栗健・永田達也,パッシブクーリング ウォールの半屋外空間における微気候形成効果 透水性の孔あ き壁体を利用した蒸発冷却による屋外・半屋外快適空間の形成 その2,日本建築学会計画系論文集,527(2000-1), pp.21-27.
- (14) 武田仁・安藤邦明,光触媒外装材を用いた実証実験棟の温熱 環境実測,日本建築学会環境系論文集,606(2006-8), pp.31-36.

(Received Dec 11, 2013, Accepted Sep 3, 2015)