

立面を濡らす難しさと工夫 —蒸発冷却ルーバーの開発—
Difficulties and scheme to wet the elevation surface
-Development of Evaporative Cooling Louvers-

工学院大学 建築学部 まちづくり学科
Kogakuin University, School of Architecture, Department of Urban Design and Planning
平山 由佳理
Yukari HIRAYAMA

キーワード: 暑さ対策 (Heat Measure)、パッシブクーリング (Passive Cooling)、クールスポット (Cool Spot)、
エクステリア (Exterior)、表面濡れ性 (Surface Wettability)

1. はじめに

2023年7月の世界平均気温の産業革命前と比べて上昇幅が 1.5°C のラインに到達したことが、欧州連合 (EU) などの気象情報機関「コペルニクス気候変動サービス (C3S)」より報告された⁽¹⁾。これまでも月平均気温が 1.5°C ラインを越えたことはあったが、冬から春先にかけての時期に多く、今回は夏季の気温上昇であることから人々への影響はより大きい。

暑さ対策は、対象とする空間や時間帯によって手法が変わるが、屋外の歩行・滞在空間においては直達日射のエネルギー量が大きく、まずは日射を遮蔽することが基本である。しかし日射遮蔽だけでは気温 (ambient temperature) 以下となる空間をつくることは不可能で、“涼しさ”を得るためには何かしらの冷源が必要である。自然界では、林床や樹冠内の、日射がほとんど当たらない葉や湿潤な土壌の表面における蒸発散が表面温度を下げ、気温以下まで低下させる。また水の流れがあれば、水しぶきなどで周囲の空気が加湿冷却される場合もある。洞窟やトンネルなどでは、地中の水分の蒸発により相対湿度が100%近くなることが多いが、蓄冷も合わせ、表面温度が低く保たれている。

自然のエネルギーを建築に用いることをパッシブデザインと呼ぶが、自然界では水の顕熱・潜熱を利用した温度調整機能がよく働いているのに対し、建築・都市空間では水の利用が圧倒的に少ない。その理由として、物質循環に重要な藻やカビ、そして微生物を、自然界のバランスが崩れた“まち”においては、“汚れ”として排除する傾向にあるからだろう。

しかし近年、建築・都市空間の暑さ対策として様々なパッシブ手法が見直され、適用検討が行なわれている⁽²⁾。その手法を見ると、日射反射率を高めたテント (オーニング)、建築仕上げ材や舗装材、そしてフラクタルなど熱伝達率を高めた形状の日除け、樹木、壁面緑化、保水性・透水性舗装、ミストなどがあるが、そのほとんどが日射反射率を高めるか、水の潜熱を利用したものである。結局、建築・都市空間においても、人の滞在・歩行空間などの微気候を調整するために水は不可欠なのである。一方で、パッシブ手法は、ある単体の技術では涼しさを感じられるほどに空間を冷涼に保つことは難しく、日射の調整と水の蒸発冷却、さらに風による気流感および熱と水蒸気の除去などの手法を組み合わせ、人の体感温度に影響する環境4要素 (気温、放射、湿度、気流) を調整していくことが必要である。そして日変動や季節変動が大きい屋外環境においては、例えば風がある時には気流感を、風がない時には放射による涼しさを得るといったような、複数の効果が得られる工夫が求められると考えている。そのためには、ある手法単体の評価に留まらず、空間としての作り込みを行なった上での評価が重要である。そして、空間を作り込むには、対象空間の上、下、横に対して、適材適所に選択できる手法や材料があること必要がある。

そこで本報では、建築・都市空間に気温および平均放射温度が周囲の気温以下となる冷涼な空間（以下、クールスポット）を創出することを目的として、既存の手法の中でも選択肢が少ない立面の蒸発冷却手法に着目し、立面を濡らすことの難しさと工夫について述べた後、開発した手法の冷却性能評価、そして蒸発冷却手法の普及に向けた今後の課題について述べる。

2. 立面を冷却する効果

クールスポットの創造にあたっては、適材適所に選択できる多様な手法や材料があることが重要だと先に述べたが、既存の手法は上面と下面の対策が多く、日射遮蔽と、高反射性または保水性・透水性舗装となっている。一方で横に対する対策は、樹木や生垣、緑化ルーバーなど、植物によるものが多い。しかし人の背丈くらいの立面を対象とすると、植物の生育環境として一定規模の空間が必要となり、また生育には日射も必要であることから、都市部においては空間の確保が課題となる。このため、日陰や、土壌がない建築空間においても立面に適用可能な蒸発冷却手法があれば、より多様なクールスポットの形成が可能になると考えられる。

ここで改めて立面を冷却する意義を考えると、建築空間は複数の立面から構成されており、空間に対する横（側面）の形態係数は大きい。特に滞在者近傍の立面の形態係数は大きくなる（図1）。このため、蒸発冷却の代表的な手法として、打ち水という地面に水を撒くイメージが強いが、滞在者の体感温度を下げるという点では、人の顔の高さ辺りまである立面を濡らした方が効果が大きくなる。また風は基本的に地面に対して水平方向に吹いているため、透過性（以下、通風性）のある材料で立面を構成した場合、立面の部材表面と通過空気との間で熱交換が行なわれ、空気を冷却することが可能となる。このため通風性のある立面の冷却は、一定の通風がある場合には気流感と冷気の移流を、そして通風がない場合には冷放射と冷気の溜まりによる涼しさを供する空間を創造することが期待でき、建築・都市空間におけるクールスポットの形成における役割は大きい。

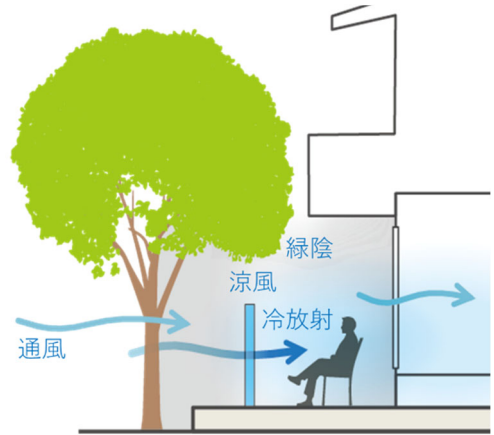


図1 建築空間、屋外空間において立面の冷却を利用したクールスポットの概念

3. 毛細管力と親水性を組み合わせた蒸発冷却ルーバーの開発

立面への蒸発冷却手法の適応における最大の課題は、水の表面張力である。“水みち”という言葉があるように、傾斜のある面に水を流すと、水は一度流れた後をなぞるように流れ、拡がらない（図2）。しかし蒸発冷却手法においては、濡れた面から水が蒸発する際に気化熱を奪うことで表面温度が低下することから、いかに水を拡げ表面を濡らせるかがポイントとなる。このように、液体が固体表面を覆うことを“濡れ性”というが、濡れ性を高めるためによく用いられる方法は2つある。1つは毛細管力を高めること、そしてもう1つは固体表面の親水性を高めることである。

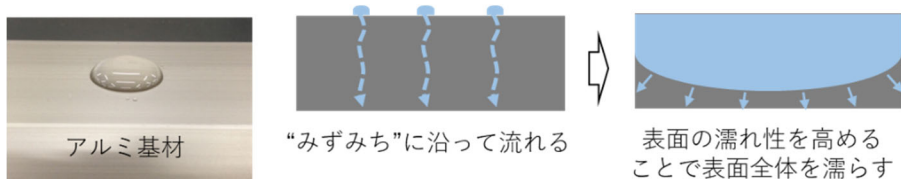


図2 アルミ材の上の水滴と濡れの考え方

毛細管力を利用した伝統的な手法として、テラコッタなどの多孔質な陶器に水を吸わせ、表面から蒸発冷却させる方法がある。しかし第1章で述べたように、近年の建築・都市空間では藻やカビを汚れとして嫌うことから、部材そのものに吸水させ、蒸発させる方法は受け入れられづらいと考えられた。そこで基材としてはエクステリア部材として汎用的に用いられているアルミを用いつつ、その表面の親水性を高めることによって水を濡れ広げる方法を検討した。

液滴の接線と固体表面とのなす角度 θ を「接触角」(Contact Angle)というが、親水性のある樹脂塗材をアルミの表面に塗布し、アルミと水滴との接触角を図3に示す⁽³⁾。接触角は約43度と親水性を示したが、全体に水が広がる様子は見られなかった。このため酸化チタンの光触媒を親水性樹脂塗材の上に塗布したところ、接触角は6.2度となり、高い親水性を示した。これにより全方向に水が広がる様子が見られたが、僅かにでも傾斜があるとその方向には水が広がらず、施工精度の観点から扱いが難しいと考えられた。そこで親水性塗材を塗布後、乾燥する前に表1に示す多孔質な発泡ガラスビーズを吹きつけ、表面塗膜に毛細管力を持たせた上で光触媒を塗布し、毛細管力と親水性の両方の機能を有する塗膜を作成した(図4)。結果、数度程度の傾斜があっても全方向に水が広がり、アルミの角材全面が濡れることが確認された⁽³⁾。

こうして完成した毛細管力と親水性を有する塗膜を用いたアルミ製の蒸発冷却ルーバーの製品写真を図5に、また施工事例としてモデルガーデン内に建設した東屋を図6に、K市役所前のバス停の待ちスペースを図7に示す。

	①親水性樹脂塗材	②親水性樹脂塗材+光触媒
1回目	43.0	7.8
2回目	44.5	4.7
3回目	42.2	6.0
平均値	43.2	6.2

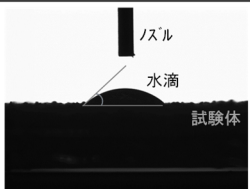
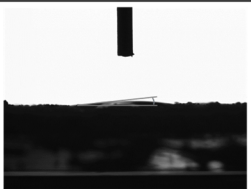
水滴と接触角		
--------	---	---

図3 アルミ基材と水の接触角

表1 多孔質材の粒度分布

粒径[μm]	<-300	300~500	500~1000	1000~2800
割合 [%]	7.3	23.0	63.6	6.1

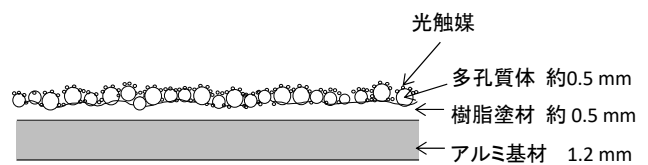


図4 毛細管力と親水性の機能を有する塗膜の断面



図5 完成製品写真⁽⁴⁾

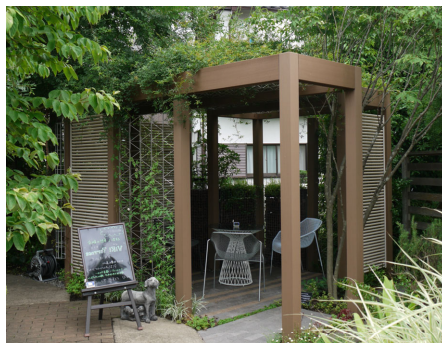


図6 施工事例1 モデル住宅の東屋



図7 施工事例2 K市役所前バス停⁽⁴⁾

4. 水滴の下垂と落下を利用した蒸発冷却ルーバーの開発

毛細管力と親水性を組み合わせた蒸発冷却ルーバーは、アルミのルーバーパーテーションを全体的に塗らし、表面温度を蒸発潜熱によって冷却できるという点で当時画期的な製品であったが、毛細管力と親水性を有する

塗膜は製造工程が多く、また使用材料も多かったため製造コストが高かった。このため立面の蒸発冷却手法を普及させるためにはコストダウンが必要であったが、何よりもっとシンプルに製作できる必要があると考えられた。蒸発冷却手法において重要なのは、冷放射においては面全体を濡らすこと、そして冷気の生成においては、通過空気と冷却面の接触面積を一定量確保するということであるから、アルミルーバーは使いつつ、アルミ表面を直接濡らすということに力点を置き、塗膜を使わない方法を模索した。

そこで考えられたのが、パンチングメタルのように小さな孔をたくさん設け、そこから水滴が落下する際に、周囲に水が飛散しつつ広げるという方法であった⁽⁵⁾。また小さな孔に水滴が下垂することでその水滴の表面が蒸発冷却面となるが、水滴の表面は、吸水された面からの蒸発と違って拡散抵抗が小さく、蒸発効率が1となることも特徴である (図8)。

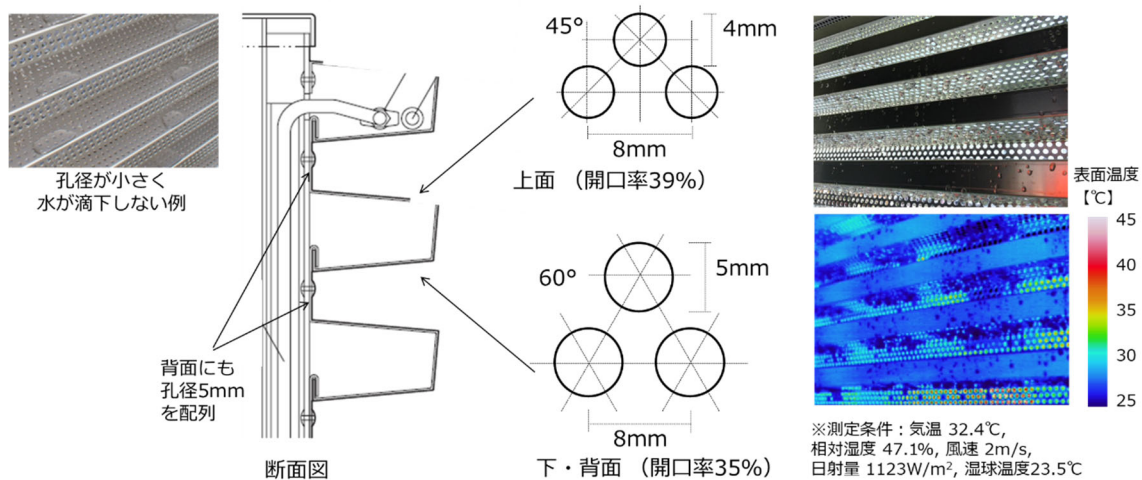


図8 ドリッパルーバーの上下孔径と開口率 (左) と熱画像 (右)

ではどのような大きさの孔をどれくらい開けたら良いのか。アルミの強度から開口率は40%以下とすることとし、一方で、できるだけ水を広げるために孔径は小さくすることを考え、孔径3、4、5、6、7mmに対し、それぞれ孔配列60°の千鳥格子とした場合の水滴の落下時下垂量と落下量を計測した結果が図9である。落下時下垂量も落下量も4mmの時に最も小さいが、これは、3mmだとアルミの上で複数の孔を覆うように水の膜ができ、水滴が落下する際にまわりの水も引き込むためである。4mm以降は孔径が大きくなるにつれ下垂量も落下量も大きくなっている。ただし8mmを越えると水滴が下垂せずにそのまま落下してしまう確率が高くなるため、水滴を下垂させるためには7mmが上限であると考えられた。

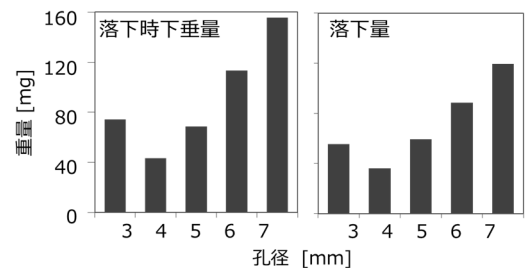


図9 水滴の落下時下垂量と落下量

以上を踏まえ、できるだけ水を広げるために孔径を4mmとしつつも、落下してくる水滴は大きい方が水が飛散する範囲を広げることができるという考えから、上面の孔径を4mm、下面の孔径を5mmとして孔径を設定した。なお下垂した水滴が落下するタイミングは、孔の毛細管力に対して水滴にかかる重力の方が大きくなる時であるが、水の場合、重量の約4割が落下し、約6割は毛細管力と水の表面張力によって残る特性を示すことを書き添えておく (図9)。

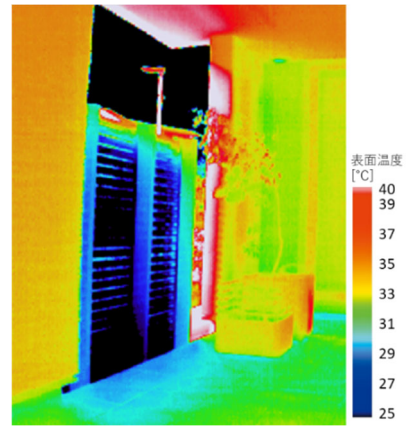
以上を踏まえて完成した、水滴の下垂と落下を利用した蒸発冷却ルーバーの製品写真を図10に、また施工事例として住宅テラスの写真とその熱画像を図11に示す。



図 10 ドリップルーバー⁽⁴⁾



図 11 施工事例 住宅テラスの写真（左）と熱画像（右）⁽⁴⁾



5. 通風性を有する立面（壁体）の気温低減効果の比較

本研究で開発した蒸発冷却ルーバーは、毛細管力と親水性を有する塗膜を用いたものと水滴の下垂と落下を利用したものと2種類あるが、どちらも冷却性能としては同程度を目指して開発したことから、ここでは毛細管力と親水性を有する塗膜を用いた蒸発冷却ルーバーと、樹木（シラカシ）、そして多孔質な溶岩を密に蛇籠内に充填した溶岩ウォールとの間で冷却性能の比較を行なった⁽⁶⁾。

完全濡れ面の表面温度は、放射の影響のない通風環境下では湿球温度相当まで低下することから、冷却性能の評価指標には湿球温度を基準とした冷却効率を用いる。すなわち、冷放射面の冷却効率 β [-]は式(1)の通り表される。

$$\beta = (T_a - T_s) / (T_a - T_{wb}) \quad \dots \text{式(1)}$$

ここで、 T_a :代表気温[°C]、 T_s :表面温度 [°C]、 T_{wb} :代表湿球温度[°C]

結果、樹木は葉面温度が代表気温以下となる葉があるものの、ばらつきが大きく $\beta = 0.12$ 、蒸発冷却ルーバーは $\beta = 0.55$ 、溶岩ウォールは $\beta = 0.76$ （局所的に水の経路から外れた部分では表面温度が高くなったため面平均とすると $\beta = 0.56$ ）となった。

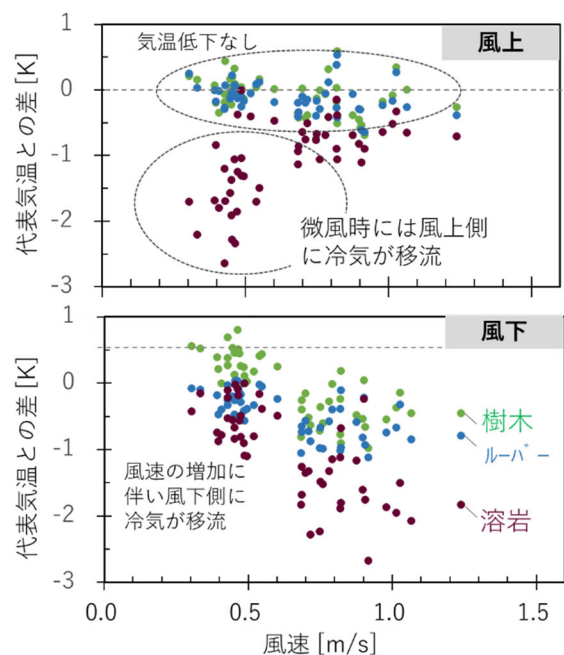
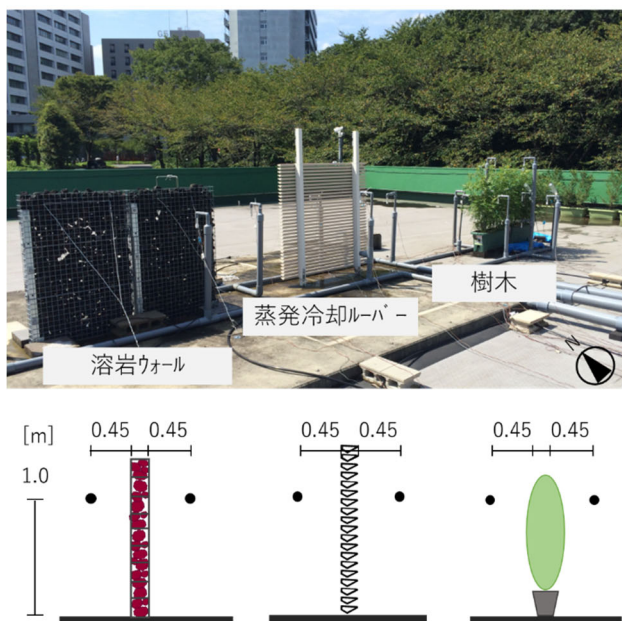


図 12 風速測定位置：植栽前 FL+1.0m, 測定期間：9/30, 10/3 10時～14時

表 2 流入風速と立面蒸発冷却壁体の気温低減効果

	微風 (0.5m/s 以下)	有風 (0.5m/s 超え)
樹木	風上側、風下側とも代表気温より 空気温度が高くなる場合がある	風下側の空気温度が最大約 1.0℃低下
蒸発冷却ルーバー	風上側は空気温度はほとんど変わらない 風下側は気温が以下	風下側の空気温度が最大約 1.2℃低下
溶岩ウォール	風上側の空気温度が低下 最大 2.7℃低下	風下側にも冷気が移流。最大 2.7℃低下

またそれぞれの風上側と風下側の気温の低下と上空風速との関係を図 12 に、風速 0.5m/s を境に微風、有風時の気温低減効果を表 2 に示す。樹木と蒸発冷却ルーバーについては、風上側の気温低下はほぼ見られなかったが、溶岩ウォールは微風時に風上側近傍の気温が代表気温に比べ最大 2.7℃低下した。風下側はいずれの試験体も有風時に気温の低下が見られ、風速 0.51~1.2m/s の感屋範囲内では、樹木が最大 1.0℃、蒸発冷却ルーバーが最大 1.2℃、溶岩ウォールが最大 2.7℃低下した。

当実験で用いた試験体は幅 1.4~2.0m の単体であったため、試験体を通過した流れに加え、周囲からの風の回り込みの影響も受け複雑な流れ場を形成していたと考えられるが、風速が一定以上になれば風下側の気温が低下することが確認された。また本報告では詳しい実験結果は割愛するが、蒸発冷却ルーバーによる囲み空間を形成した場合、蒸発冷却ルーバーの近傍では 3℃程度、囲み空間の中央付近では 1~2℃、安定して気温が低下することが確認されている⁽⁶⁾。詳しくは文献(6)を参照されたい。

通風性を有する立面の評価は、単体の評価に加え空間的な評価が必要であり、また空間（クールスポット）の作り方とその時の測定位置によっても効果の表われ方が大きく異なるため評価が難しい。しかし蒸発冷却面の近傍や対象空間の中央、人の滞在が想定される場所などで連続的に測定することにより、無風時、有風時の冷気の分布や冷放射（平均放射温度）の効果を評価することができる。また今後、気候変動により日中の気温や大気中の水蒸気量が上昇し、蒸発冷却性能が影響を受ける可能性が予想されるため、今後も多様な空間の創造およびそれぞれの空間における性能の検証を積み重ねていく必要がある。

6. まとめ -普及に向けた課題-

本報では建築・都市空間において、気温および平均放射温度が周囲の気温以下となるクールスポットの創出を目的として、立面の蒸発冷却手法の開発について述べた。以下は冷却性能の話から逸れるが、本技術の普及に向けた課題点を記す。

蒸発冷却手法の適用においては、冷放射面の形態係数を高めるため、また適度に冷気を溜めるため、空間がある程度囲うことが望ましいが、利用者にとって視線の遮蔽（視認性：防犯、景観：周辺環境との調和）とならうよう注意が必要である。また立面の施工は構造物となるため大掛かりとなりやすく、施工費が大きくなりやすい。一方で、夏季限定とするなど季節に応じて移動（撤去）できることが空間の有効活用の面からは望ましいが、安全な施工を行なう上で仮設は難しい課題である。また水質への懸念から現在は水道水を使用しているが雨水に替えていくことが望ましく、集水面積、貯留量と散水量の検討が今後の課題となっている。

上記課題を克服するためには、対象空間の利用条件や要求性能などの目標値を明確に設定しておくことが必要であろう。またパッシブ手法の適用においては他の技術との組合せが必要であるが、他のどの技術との組合せが効果的か、気温、熱放射、気流、湿度の相互関係を踏まえ、総合的に空間を評価してゆくことが重要である。

参考文献

- (1) The Copernicus Climate Change Service (C3S), <https://climate.copernicus.eu/july-2023-sees-multiple-global-temperature-records-broken> [最終閲覧日：2023年8月9日]
- (2) まちなかの暑さ対策ガイドライン 改訂版：環境省，平成30年3月
- (3) 平山由佳理ら：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，日本ヒートアイランド学会論文集，Vol.10，pp.24-34，2015
- (4) ミサワホーム株式会社、提供
- (5) 平山由佳理，太田勇：水滴の下垂と落下を利用した蒸発冷却ルーバーの開発，日本ヒートアイランド学会第13回大会全国大会予稿集，pp.177，2018.8
- (6) 平山由佳理ら：パッシブクーリング技術の複合による冷涼な半屋外空間の形成手法に関する研究，日本建築学会環境系論文集，No. 744，pp. 29-36，2018.2