

蒸発冷却壁体で構成された半囲み空間内に形成されるクールスポットに関する研究
— 夏季屋外実測による冷気分布の実態把握 —
Research on cool spot formed in semi-enclosed space constructed by Passive Cooling Walls
— Measurement of air temperature distribution by outdoor experiment —

平山 由佳理*¹ 梅干野 晁*² 太田 勇*³
Yukari Hirayama Akira Hoyano Isamu Ohta

Keywords: Evaporative Cooling, PCW, Semi-enclosed Space, Cool Air Flow,
Isothermal Diagram,

蒸発冷却, PCW, 半囲み空間, 冷気流, 等温線図,

1. はじめに

夏季における建築外部空間の熱環境緩和手法として、水の蒸発潜熱による冷却効果を用いた手法が注目されている^{1)~3)}。その一つとして筆者らは、生活空間の微気候調整を目的とした蒸発冷却壁体システム (Passive Cooling Wall, 以下 PCW) を開発した⁴⁾⁵⁾。PCW は、透水性・保水性孔あきレンガを用いたものや高揚水性セラミックパイプ材を用いたものがあり、給水システムと合わせたユニットにより構成される (図 1)。これにより、吸水した壁体から水が蒸発する際に気化熱を奪うことで壁体が冷却され、壁体からの冷放射と、壁体を通過する際に生成される冷気流によってクールスポットを創出することを目的としている。

PCW によるクールスポットの形成については、これまでもバス停留所や休憩所等の半囲み空間を対象として数値解析による評価を行ってきた⁶⁾⁷⁾。そして空間を PCW で囲むことにより、平均放射温度が気温以下まで低下すること、また定常状態を対象とした SET* では、半囲み空間内の SET* が外部に比べ最大 4°C 程度低下すること等を確認している。

しかし気温低減効果については、PCW に流入する外部風向・風速によって生成される冷気の特徴が異なること、また白井らの被験者実験により、一定風速以上による気流感以外にも、断続的に移流する冷気塊によって涼しさを感じていること等が明らかになっている⁸⁾。このため、いつ、どのような条件で冷気が形成されるのか、またそれが半囲み空間内でどのように拡がっていくのかについて明らかにすることも、蒸発冷却手法によるクールスポット形成の評価においては重要であると考ええる。

そこで本研究では、実際に屋外の風環境下において PCW による小規模な半囲み空間を構成し、その内外に移流する冷気の実態を外部風との関係から整理し、その特徴を把握することを目的とする。

2. 蒸発冷却壁体による半囲み空間の形成

2.1 実験場所と空間構成

実験場所は神奈川県横浜市緑区に位置する東京工業大学構内の二階建て建物の屋上であり、周囲が開放的な空間であった (図 2b)。日射が遮蔽された冷涼な空間を構成するため、側面 3 面に高揚

*1 ㈱ミサワホーム総合研究所/
東京工業大学 大学院生 修士 (農学)

*2 放送大学 教授・工博

*3 ㈱ミサワホーム総合研究所 工博

Misawa Homes Institute of Research and Development Co., Ltd./
Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M.Agr.

Prof., The Open University of Japan, Dr. Eng.

Misawa Homes Institute of Research and Development Co., Ltd., Dr. Eng.

水性セラミックパイプを用いた PCW を、天面には厚さ 0.1m の発泡ウレタンボードを設置した (図 2a)。実験場所の風環境特性については 3.1 に記述するが、PCW を通して外部風を取り込むために、当実験場所において出現頻度が高い南、西、北の 3 面に PCW を配置した。また相対的に風速が大きい南から西の風により PCW から移流する冷気が半囲み空間内に溜まりやすいよう、風下側となる北側 PCW についてはセラミックパイプの列数を増やした構成とした (図 2d)。

半囲み空間への直達日射の遮蔽と開口部から流入する風を減衰させる目的で、出入り口として開けた東面に対して南面は塩ビ管群 (H=1.8m, 開口率 8%) によって壁を延長し、さらに南面と東面にレンガ壁体 (H=1.2m, 開口率 30%) を設置した (図 2c, d)。

2.2 測定方法

測定項目と機器を表 1 に、測定位置を図 2 に

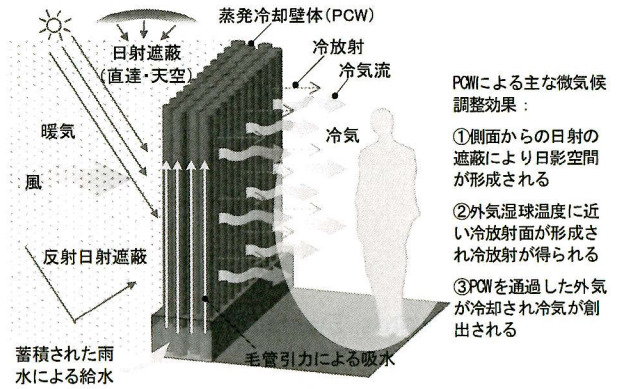
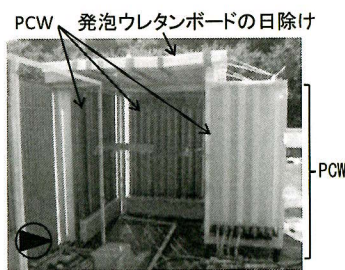


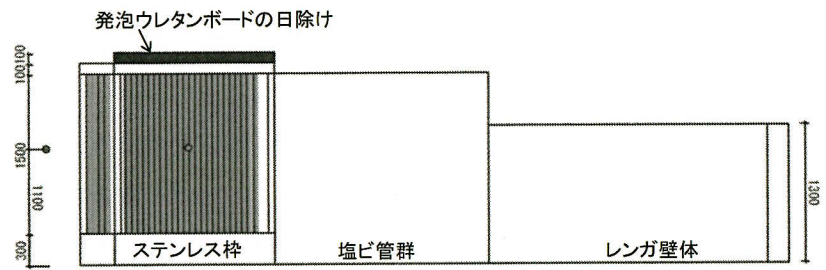
図 1: 蒸発冷却壁体システムの考え方

表 1 測定項目

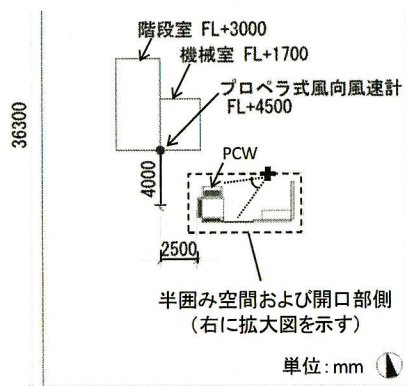
測定項目	測定位置	測定機器	仕様
風向 風速	上空 FL +4.5m	プロベラ式 風向風速計	風速測定範囲 0.4~70m/s 風向測定範囲 0~540°
	半囲み空間外部 FL +1.1m	3次元超音波 風速計	風速測定範囲 0~40m/s 風向測定範囲 0~360°
風速	半囲み空間内	プローブ熱線式 風速計	風速測定範囲 0~30m/s
気温	半囲み空間内外	T型熱電対	線径: 0.1mm 時定数: 1.1秒 ¹²⁾
表面温度	FL +1.5m より撮影	赤外線放射 カメラ	波長域 8~14μm
鉛直面 日射	南面・西面 FL +2m	日射計	波長域 0.3~2.8μm



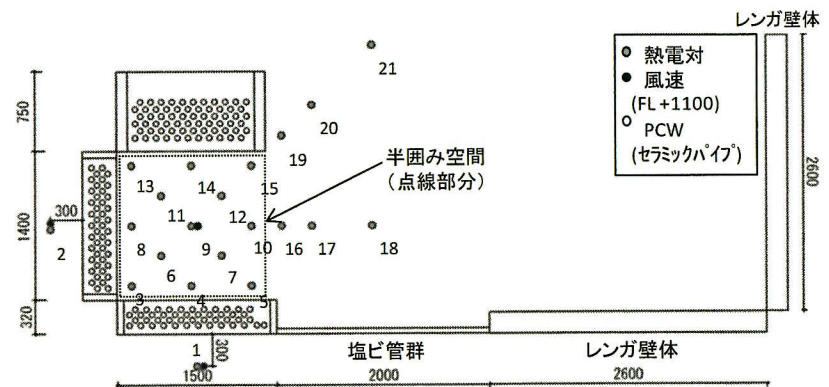
(a) PCWによる半囲み空間 (下図+より撮影)



(c) PCWによる半囲み空間立面図



(b) 屋上平面図



気温測定点 1-2: 外部風上側, 3-15: 半囲み空間内, 16-21: 外部開口部側
(d) PCWによる半囲み空間および開口部側の平面拡大図 (左図破線部分)

図 2: 実験場所の平面図と半囲み空間の立面/平面図

示す。実験場所の代表風向・風速として全方位に対して開けている屋上床面+4.5mの上空風を用いた。

本実験では、滞在空間における周囲からの風に対する半囲み空間内外への冷気の移流特性を明らかにすることを目的として、床上高さ1.1mのPCW近傍の風向・風速および気温を図2dに示す通り複数点で測定した。半囲み空間の天面の温度上昇を防ぎ重力方向の温度勾配を小さくするよう工夫した上で、今回は平面的な冷気分布について評価を行った。

気温の測定にあたっては、日射および周辺地物からの反射と再放射が気温測定値に与える影響を抑えるため、感温部の直径が0.1mmのT型熱電対を使用した。半囲み空間外部(図2dの点1, 2)および開口部側(図2dの点16~21)における測定点については、既往研究を踏まえ⁹⁾アルミ箔で包装した遮蔽板を上下に設置した^{注1)}。遮蔽板の間は自然通風状態とした。

測定は夏季晴天日として、2010年8月31日、9月2日、9月7日、9月22日の4日間、朝、昼、午後にそれぞれ30分間ずつ行った(ただし9月7日は朝のみ測定)。各気温・風向・風速の測定は時々刻々と変化する気温分布を見る

ため2秒間隔の瞬時値を記録した。また、PCWを含む各面の表面温度を実測開始直後から約10分おきに赤外線放射カメラを用いて取得した。

3. 実験結果および考察

3.1 実験期間中の上空風向・風速の特徴

実験場所の風環境の特徴として、対象地上空の風速出現頻度および風速別風向出現頻度を図3に示す。測定期間中の実験場所の平均風速は1.1m/s、乱れの強さは0.83^{注2)}であった。同図より、風速が0.4~2m/sの時には全風向の出現が見られるものの、風速が大きくなるにつれ出現風向が南よりに偏る傾向が見られた。また風

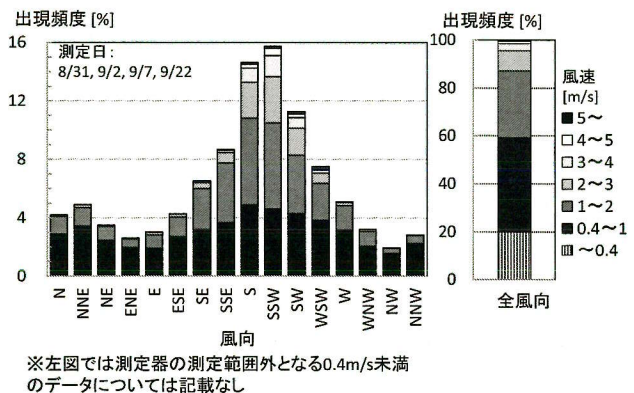


図3: 風速別風向出現頻度

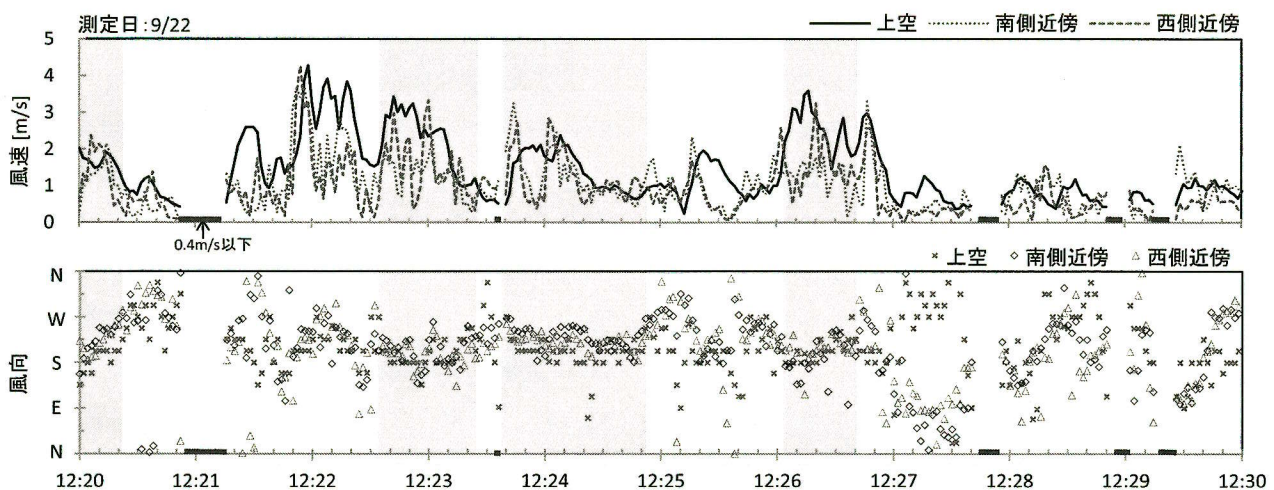


図4: 上空風と半囲み空間近傍の風速(上)風向(下)

速 2m/s 以上ではほぼ南、南南西、南西の 3 風向に限定されており、実験場所が位置する南関東の夏季日中の風環境として一般的な傾向を示した¹⁰⁾。

3.2 上空風と PCW 近傍の風環境

半囲み空間内外の冷氣分布の特徴を上空風に着目して整理していくにあたり、まず上空風と PCW 近傍の風向・風速の関係を整理した^{注3)}。

様々な条件が見られる時間帯として、12:15:20~30 の上空と半囲み空間近傍の風速および風向データを図 4 に示す。上空風向が階段室のある北西風向を含む場合（例えば 12:27 以降）については上空風と PCW 近傍風の差異が大きいが^{注4)}、上空風向が南~西の場合には 45 度程度の方位幅で同様となる傾向が見られた（図 4 網掛け部分）。そこで半囲み空間内の冷氣分布変動を議論する際には、上空風向が南の時間帯に着目し、上空風の特徴と合わせて考察した。

3.3 上空風と半囲み空間内部の風速比

上空風向が南の時の、上空風速と半囲み空間内中央位置にて測定した風速の関係を図 5 に示す。上空の最大風速が 7.6m/s となった風環境下においても半囲み空間内の風速は最大で 2.3m/s となっており、強風時の風速が大きく減衰した環境となっている（図 5a）。また風速が大きくなるに従い上空風と PCW 近傍の風速比は 0.25 程度に収束する傾向が見られた（図 5b）。

3.4 等温線図による冷気流変動の把握

続いて、上空風向が南に安定した時間帯において、半囲み空間内の気温が低下する過程および気温低下後の安定性について、気温の等温線図を用いて考察していく。

3.4.1 等温線図の作成

気温データは、測定点の範囲外も含めて滑らかな曲面を作成する Spline 法を用いて内挿補間を行った。また熱的快適性を評価する上で必要となる冷気流の特徴を明らかにすることを目

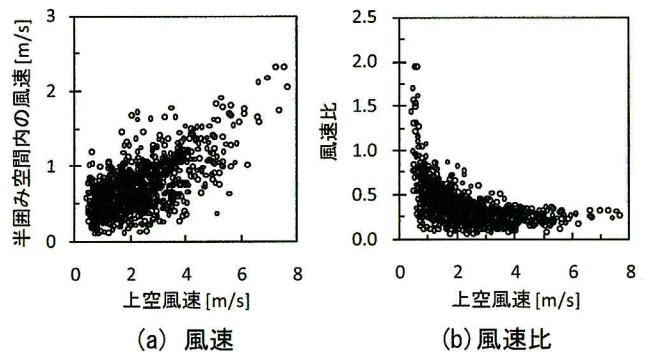


図 5: 上空風と半囲み空間内の風速の関係

的として、2 秒間隔の瞬時値を用いて等温線図を作成した。等温線図の温度レンジについても、同様の目的から 0.25℃刻みとし、冷気の流れ方向を見やすくした。さらに半囲み空間外部の測定点についても同じレンジで色を与えた。同図の中に、各時刻の上空風向・風速を黒い矢印で、PCW 近傍の風向をグレーの矢印で併記した。

3.4.2 PCW から移流する冷気の実態把握

図 3 の風速別風向出現頻度分布図より、上空風速の違いにより風向の出現頻度、つまり風向の安定性が異なる傾向を踏まえ、当実験場所の主風向である南よりの風について(a)上空風速が 1m/s 以下の弱風時と、(b)上空風速が 2m/s 以上の強風時について、それぞれ図 6 の等温線図を見ながら冷気の流れ特性を考察する。

(a) 上空風速 1m/s 以下の弱風時

上空風速が 1m/s 以下の弱風時（図 6a）では 2 秒間隔の等温線図によって冷気流の軌跡がよく現れている。上空風と PCW 近傍風の双方が南から吹いている場合には、主に南側の PCW から外気より 2℃以上低い冷気が移流している。しかしこの時、測定点 5 や 10（位置は図 2d に記載）など開口部に近い点で気温の上昇が見られ、外部の空気が半囲み空間内開口部付近まで流入していると推察された。

14:15:30以降、上空風が南風のみでも PCW 近傍の風が西や北に乱れると、北側 PCW から

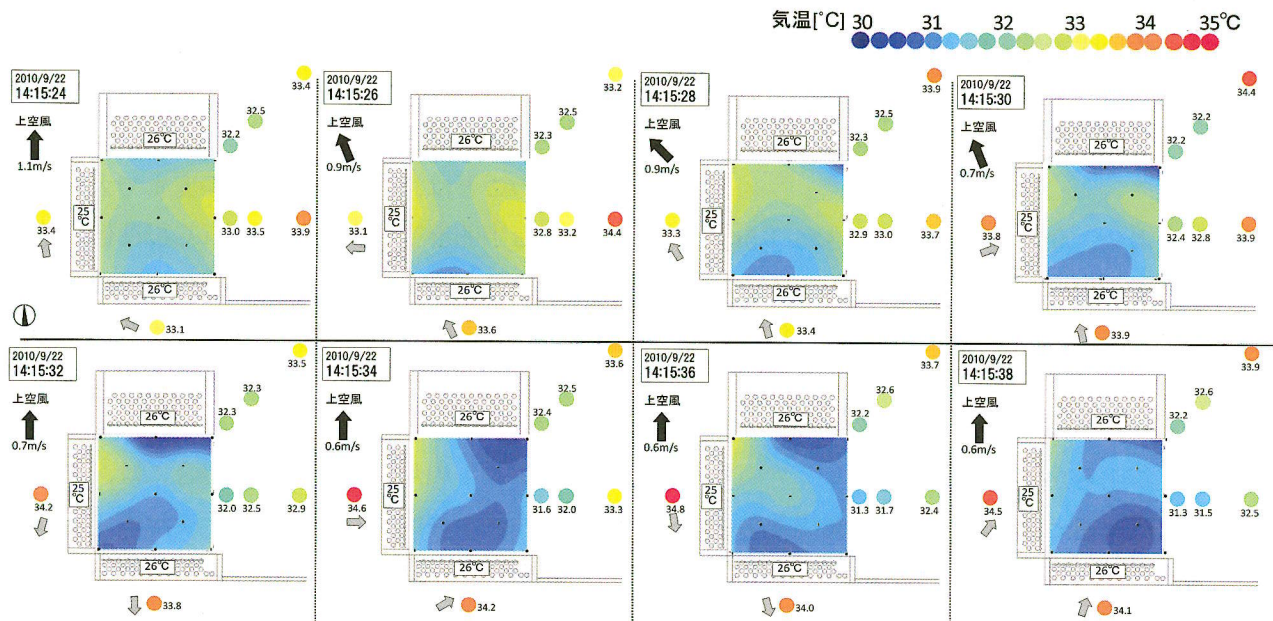
の冷気の移流が顕著となった。そして、南側と北側から移流する冷気により半囲み空間内全体に冷気が広がると、開口部東側の気温も低下し始め、半囲み空間から外部に向かって冷気が溢れでていくような現象が見られた。

以上より、上空風速が 1m/s 以下の弱風時では、上空風向が安定しても PCW 近傍では風向

の変化が大きく、その結果、多方向の PCW から冷気が移流することで半囲み空間内全体の気温が低下していくことが明らかとなった。

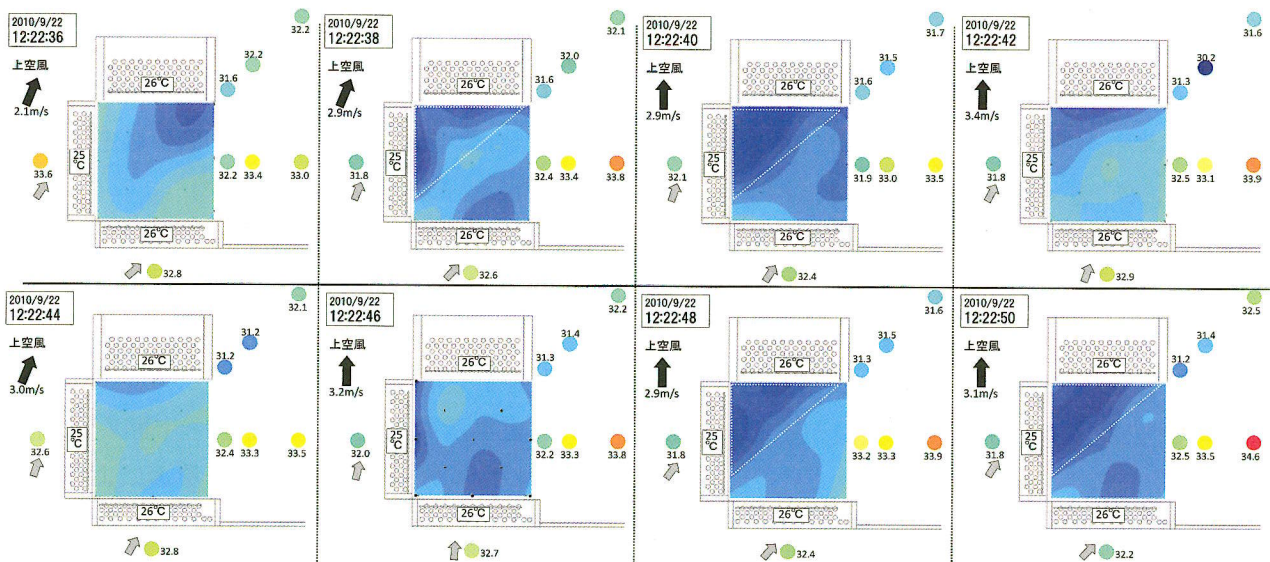
(b)上空風速 2m/s 以上の強風時

上空風速が 2m/s 以上の強風時 (図 6b) では、例えば 12:22:38,40,48,50 のように北西 (風下側) 角部の気温が低下し、北西角から南東角に



天井表面温度: 32.7°C, 床面表面温度: 28.3°C

(a) 上空風速1m/s以下, 風向変動が大きい中で南よりの風が数秒間出現



天井表面温度: 31.7°C, 床面表面温度: 27.6°C

※ 白点線は特徴的に見られる気温低減箇所を示す

(b) 上空風速2m/s以上, 上空風向が南よりに安定

図 6: 半囲み空間内外の気温分布

かけて温度勾配が見られた。またこの時、1m以上離れた北東風下側まで冷気が到達しており、風下方向への冷気の流れが顕著であった。

図5より、当時間帯では半囲み空間内の風速は1m/s弱であると推定され、2秒間隔の測定では都度半囲み空間内の空気が入れ替った状態であったと考えられる。このことより、半囲み空間内の空気が秒単位で入れ替わるような強風時には、数秒間でも風向が南向きになれば同様の特徴を持つ冷気分布が現れると推察され、また実際に他の時間帯においても同様の現象が確認された。

以上より、今回構成した奥行きが1.5mの小規模半囲み空間において数秒単位で中の空気が入れ替わるような風速時には、風向によって特定の冷気分布が見られるものの、各時刻の変化が大きく、冷気の生成と消失が繰り返されていることが明らかになった。

3.5 上空風速と半囲み空間内外気温差の関係

前節では等温線図による空間的・時間的な冷気分布の変動の把握から、風速によって冷気の溜まり方が異なることを示した。特に弱風時には、多方向のPCWから冷気が移流しながら空間全体の気温が低下していく現象が見られたことから、ここでは空間平均としての内外気温差を評価する。そこで半囲み空間外部風上側(測定点1, 2)と半囲み空間内部13点の平均気温の差を「内外気温差[°C]」として算出した。弱風時には冷気が移流し始めてから空間全体の気温が低下するまでに時間を要するため、上空風が6秒以上南に安定した時間帯に着目し、各時刻の上空風速に対する内外気温差を算出した(図7)注5)。

半囲み空間内外気温差は風速が弱いほど大きく、最大で3°C程度であった。風速が大きくなるにつれ内外気温差は小さくなり、風速2.5m/s

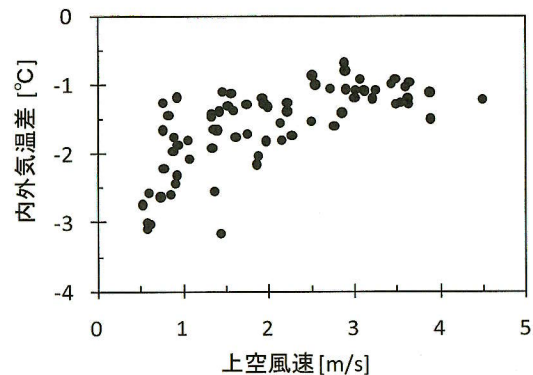


図7: 上空風速と半囲み空間内外気温差

以上では1.0~1.5°C程度となった。

このことは、風速が4m/s程度まで大きくなっても半囲み空間内の気温が1°C程度低い状態が維持されることを示している一方で、弱風時ほど半囲み空間内に冷気が溜まり、空間全体が冷えることを示している。したがってPCWの冷放射の効果に加え、気温の低下も含めたクールスポットの形成を期待する場合には、多方向から冷気が移流するようPCWを配置することが重要であると言える。また、より風速が大きい環境に適用するためには、PCWの気流抵抗を増すこと等が改善策として挙げられる。

6. 結論

PCWによる小規模半囲み空間を構成し、上空風と対象空間内の気温分布の関係性を整理した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 3面をPCWにより構成した小規模半囲み空間では、PCWから移流した冷気によって半囲み空間内の気温が低下する空間となることを示した。
- 2) 測定場所の上空風卓越風向と半囲み空間内外の冷気分布との関係では、風速によって半囲み空間内の気温分布に与える影響が異なることを示し、弱風時には風向の不安定さにより多方向のPCWから冷気が移流して空間

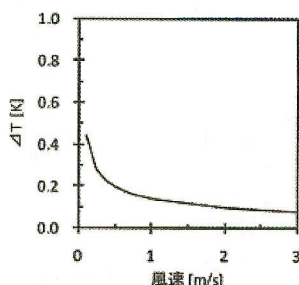
全体が冷えること、また強風時には風向・風速条件によって特徴的な冷気の分布が見られるものの、冷気の生成と消失が繰り返されていることを明らかにした。

謝辞

本研究の一部は、当時東京工業大学院生であった大吉直幸氏の多大なるご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

注

注 1) 本実験中における遮蔽板および PCW と熱電対感応部との表面温度差は最大で 5°C 程度である。その場合の測定誤差は、龍谷らの熱収支式から算出すると補図 1 の通りである⁹⁾。風速 0.2m/s 以上の場合の誤差は 0.25°C 以下であるため、実測データは補正は行わずそのまま用いることとした。



補図 1: 風速に対する感応部と気温の測定誤差

注 2) 乱れの強さは $\sqrt{\langle u'^2 \rangle} / \langle u \rangle$ により 10 分間ごとの値を算出し、測定期間中の平均を求めた¹¹⁾。

ここで $\sqrt{\langle u'^2 \rangle}$: 標準偏差, $\langle u \rangle$: 平均風速 [m/s] である。

注 3) 図 2b に示す通り、半囲み空間近傍と上空風測定位置では高さ方向で約 3.5m、水平距離で約 4m 離れていることを踏まえ、2 点間の風向・風速の差異を検証した。

注 4) 上空風向が北西の時、西側 PCW 近傍の風

速の減衰が顕著になる場合が見られる。この時、西側の PCW 近傍の風向が北～北東よりに変化している場合が多く、屋上床面付近では階段室などの影響で乱れが大きくなったと推察される。

注 5) 本実測の測定範囲である上空風速 0.4m/s 以上の風が奥行き 1.5m の半囲み空間上を通過する時間として、安全を見て 6 秒以上と判断した。

引用文献

- 1) 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, No.481, p.41-49, 1996.3
- 2) 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, 第 530 号, p.79-85, 2000.4
- 3) 浅輪貴史, 何江: 光触媒外装材への散水による屋外熱環境の改善効果—土地利用と土地被覆の異なる実在街区を対象として数値解析—, 日本ヒートアイランド学会論文集 Vol.2, p.6-13, 2007
- 4) 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, 第 527 号, p.21-27, 2000.1
- 5) 梅干野晁, 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, 第 641 号, p.775-782, 2009.7
- 6) 何江, 梅干野晁, 町田康幸, 中大窪千晶, 巖泰潤: 蒸発冷却型孔空きレンガ壁体を利用した都市・建築空間における熱環境の予測・評価手法の開発

- に関する研究,日本建築学会技術報告書,第 15 卷,第 29 号,p.179-182,2009.2
- 7) 何江,梅干野晁,高橋晁一郎: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,第 15 卷,第 31 号, p.839-842,2009.10
- 8) 白井一義,梅干野晁,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,第 552 号, p.15-20, 2002.2
- 9) 龍谷光三,清家清,梅干野晁:輻射環境下における気温測定装置の試作とその検討(照り返しに関する基礎的研究・その 1),日本建築学会論文報告集,第 245 号, p.91-100, 1976.7
- 10) 日本建築学会編著:拡張アメダス気象データ,日本建築学会,2000, p.184
- 11) 日本建築学会編著:市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック,日本建築学会,2007,p.2
- 12) 鍋島美奈子,古崎靖朗,中尾正喜,西岡真稔:移動観測によるヒートアイランド現象の実測 大阪平野の夜間気温分布,日本ヒートアイランド学会論文集,Vol.1,2006

(原稿受理日 2013 年 10 月 10 日)
(原稿採用決定日 2014 年 2 月 26 日)