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

EFFECT OF A PASSIVE COOLING WALL TO FORM MICRO-CLIMATE
IN A SEMI-OUTDOOR SPACEFormation of outdoor and semi-outdoor comfortable space through evaporative cooling
by water-permeable perforated wall Part 2

白井一義*, 梅干野 晃**, 小栗 健***, 永田達也****

Kazuyoshi SHIRAI, Akira HOYANO, Ken OGURI
and Tatsuya NAGATA

Passive Cooling Walls (PCWs) were built with water-permeable perforated bricks and the micro-climate was investigated in semi-outdoor structures incorporating the PCW. To investigate spatial distribution of the climate, a new position-identifying system was developed. By this system, spatial characteristics of the climate, e.g. constantly lower temperature inside the corner formed by the PCW, was obtained. Furthermore, fluctuations of air temperature, humidity and velocity at the points downwind of the PCW were investigated. Consequently, intermittent drops of temperature and increase of humidity and velocity were observed.

Keywords: passive cooling, brick, outdoor and semi-outdoor space, micro climate, moving measurement

パッシブクーリング、レンガ、屋外・半屋外空間、微気候、移動計測

1 はじめに

筆者らは、屋外・半屋外空間を対象とした蒸発冷却手法として、透水性の孔あきレンガを用いた蒸発冷却機能を持つ壁体・パッシブクーリングウォール（以下PCW）を提案した^{1) 2)}。これは湿潤に保たれた壁体からの水の蒸発により壁面を冷却して放射熱を低減し、さらに壁面に開けられた孔を空気が通ることにより、気温の低下した気流による快適感を得ることを目的としたものである。既報¹⁾では透水性孔あきレンガと壁体の試作および基本的な冷却性能の把握を行い、本論文の第1報²⁾ではレンガの設計資料として、通気孔の形状と通気性能および空気の冷却性能の関係に関する検討を行った。本報では、前報²⁾におけるスリット型および開口型のレンガ（図1）をそれぞれ用いて製作したPCWによって、半屋外空間に形成される局所的な温湿度・風速分布、すなわち微気候を実測により把握した結果を報告する。

本研究では、まずPCWと仕切り壁により構成された小空間を例として、内部に形成される温湿度・風速分布を、新たな測定方法を用いた移動測定により把握し、その空間的特徴を明らかにする。しかしながら、PCWにより形成される微気候は、外部の風向・風速の影響を受けて刻々と変動する。この変動は熱的快適性を論ずる上で重要であり、微気候の把握には空間分布に加え、変動にも着目す

る必要があると考えられる。そこで、本論文の後半ではPCWを風上側に持つ半屋外空間において、PCWからの距離および高さの異なる各点での気温変動と、そのときの風速・湿度変動の測定により、PCWが形成する微気候の変動の特徴を示す。

2 パッシブクーリングウォールの製作

透水性孔あきレンガを用いてPCWを製作するにあたっては、組積造となるため何らかの補強が必要であり、かつそれは通気孔などの機能を阻害しないようにする必要がある。そこで、構造の補強と給水システムを兼ねた鋼材を用いてPCWをユニット化した。図2に示すように中央に溝を設けたレンガを上下からU字鋼で挟み、それを水を溜める受け皿（トレー）として用い、水面に接した個々のレンガの下部から浸透させる。これにより、構造の面では①レンガの安定②補強材による通気孔スペースの損失の低減、給水の面では①個々のレンガに独立に給水することによる壁面の上下の給水状態の均一化②トレーに一定の水位の水が保たれることによる給水量の安定化、などの利点があげられる。さらに、破れ目地などデザインの自由度が高くなると考えられる。なお本実験ではレンガの下端と水を確実に接触させるため、トレーの中にスポンジを敷いてある。

1体のPCWユニットは人間の身長程度の高さを考えて、高さ

* 太平洋セメント 博士(工学)
(当時東工大 大学院生)

** 東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授・工博

*** INAX 空間デザイン研究所

**** INAX 国際統括部

Taiheiyo Cement Corporation, Dr. Eng.

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Space Design R&D Center, INAX Corporation
International Strategic Dept., INAX Corporation

図2 PCWユニット(単位:mm)

図3 PCWの外観

図1 透水性孔あきレンガの
通気孔形状(単位:mm)

図4 消費水量の日変化

図5 日平均乾湿球温度差と
日消費水量の関係

166cm、幅102cmとした。ユニットの構成はトレーとレンガの組み合わせが14段と最下段の化粧用のレンガ1段であり、その下に貯水槽が設けられている。水は最上部のトレーから順次オーバーフローし、側方の支柱内を通して下のトレーに送られ、最後に貯水槽に貯まり、ポンプで再び最上部に送られる。なお本実験では給水にポンプを用いているが、本来は動力を用いない給水方法が望ましい。給水を他の方法で置き換え、トレーの水位により給水量を制御する方法等については今後の検討課題である。

本システムの夏季における消費水量を把握するため、5章で用いたPCWの配置(図13、14、外観は図3)において、PCWユニットの給排水量を電磁流量計で測定した。給排水量の差を消費水量として、その日変化の例を図4に、また測定日の天候を表す値として日平均の乾湿球温度差をとった場合の、消費水量の日積算値との関係を図5に示す。データ数や精度の限界からスリット型と開口型の違いには言及できないが、消費水量は晴天日の最大値で壁面1m²あたり20~30ml/min、日積算値で最大15l/day程度であった。

3 微気候の移動測定のための3次元位置測定装置

3.1 分布計測の現状

PCWを用いた空間の微気候は、PCWの配置や開口部の影響により空間的な特徴が大きく現れると考えられる。これを把握することはPCWを用いた設計を行ううえで有効な資料となりうる。

過去、このスケールでの分布計測は、対象空間に直線状や格子状

に温湿度等のセンサーを配置しての測定や、センサーを移動させて場所と時刻を記録しながらの測定などが主流であった。多点配置による方法では同時刻に多数の測定データが得られるが、センサーの個数の制限や設置の煩雑さ、センサーが空間を占有するなどの問題がある。移動測定の場合は空間の占有度が比較的小さく、センサーが1個の場合は個体差を考慮する必要がないなどの利点はあるが、測定時に位置と時刻を記録する必要があるため、位置の特定できないような自由な移動は不可能である。石田ら³⁾は両者の中間ともいえる自走式の温湿度測定装置を製作しているが、これも垂直断面などの限られた温湿度分布が求まるのみである。微気候の空間的特徴の発見段階では、広範囲を自由に動け、かつ測定者の意志により注目すべき点は密に、そうでない点は疎にと、自由に判断しながら測定できる装置が有効であると考えられる。

3.2 装置の概要

本研究においては、超音波を用いた3次元位置測定装置を開発し、微気候の測定に用いた。本装置の概要を図6に示す。本装置は、温湿度等のセンサーに発信器を取り付け、そこから一定間隔で発信される超音波パルスが位置が既知の複数(最大8個)の受信器で受信し、その伝播時間によって発信器から各受信器までの距離を測定して、発信器の3次元座標を算出するものである。装置は、温湿度等の環境データを収集し、また位置測定用の超音波パルスを発信するための移動部と、パルスを受信して位置を算出し、また移動部から送信された環境データを受信して収録するための基地部からなる。

図6 超音波式3次元位置測定装置の概要

表1 測定項目	
項目	測定機器
気温	0.1mmφT熱電対
相対湿度	高分子容量式湿度計
風速	サーミスタ風速計
外部風向・風速	超音波風速計

図7 実験の配置図

測定者は移動部を携帯して自由に移動し、環境データの収録を行う。このとき、測定者自身による微気候への影響も当然生じるが、実際の測定対象空間は人間が滞っておよび移動する場であることを考えると、ある程度実状を反映したものといえよう。なお、現時点ではバッテリーやデータロガーの重量により、実際に移動部全体を携帯することは困難であるので、移動部は台車に積載し、センサーと発信器部分のみを携帯している。

3.3 位置の測定精度に関する考察

装置は1mから50m四方程度の空間を対象としており、精度は無風時で±0.5% (Read)である。風により音速が影響を受け、精度は低下するが、一様な風速分布と仮定すると1m/sにつき0.3%程度であり、微気候計測には十分な精度と考えられる。また気温変化による音速の変化に伴う誤差に関しては、例えば早朝に較正した距離算出用係数が日中でも利用可能なように、気温を随時測定し係数の補正を行っている。

その他の分布計測上の誤差要因としては、①測定者や壁面などの障害物による超音波の遮断・回折・反射、②センサーと発信器の間の位置のずれ、③環境データの収録と超音波の発信のタイミングのずれによる位置のずれなどが考えられる。障害物に関しては、現在のシステムにおいては、最大で8個の受信器を用いて4通りの組み合わせで位置算出を行い、その中から目視で正解を選んでいるが、これを自動化することにより障害物の影響を最小にすることが可能であると考えられる。センサーの位置ずれに関しては補正が容易なように取り付け位置を設定することが必要である。測定タイミングに関しては、現時点ではデータロガーのチャンネル数によっては1秒以上の時間差が生じるが、時間差による位置のずれが大きく生じ

図8 PCWを組み合わせた小空間

ないように、チャンネル数や移動速度に配慮する必要がある。本実験ではチャンネル数を最小限にすることにより、タイミングのずれを0.3秒以内とした。

4 パッシブクーリングウォールにより形成される微気候の空間的特徴の把握

4.1 実験概要

PCWにより形成される微気候の空間的特徴を、PCWを組み合わせた小空間を一例として移動測定により把握した。実験場所は、十分な外部風が得られる開放空間として、東京工業大学構内（横浜市）の緑地に囲まれた2階建RC造建物の屋上とした。作成した半屋外空間を図7、図8に示す。実験空間は平面が約2.5m×2.5mのあずまや風の小空間である。主に主風向である南西側にPCWを用い、PCWによりL字型に囲まれた部分や、比較的外部に対し開放的な部分など、変化のある空間とした。空間はPCWと白色ポリスチレン仕上げの仕切り壁からなり、仕切り壁はPCWに外部風を取り込めるように、PCWの面から外側に張り出させた。なお、測定空間および南西側の開口部外側は、上面にアルミを貼り付けたウレタンシートの屋根により日射遮蔽した。

測定項目および用いた機器を表1に示す。測定は気温・相対湿度・風速のセンサーと超音波発信器を携帯し、空間内を歩行することにより行った。本実験では環境測定点と発信器の位置ずれを最小にするため、センサーと発信器が平面上で同一点になるように固定した。なお湿度測定に用いた高分子容量式センサーは、応答速度が上がるように防塵フィルターをはずして使用した。またPCWの影響のない外部（高さ1.5m）において、超音波風速計による外部風向・風

29.5-30.0 29.0-29.5 28.5-29.0 28.0-28.5
 27.5-28.0 27.0-27.5 26.5-27.0 [°C]

a) 水平面 (すべての高さを含む)

b) 南北断面 (a 図中 b の箇所)

c) 東西断面 (a 図中 c の箇所)

図9 PCW空間内の気温分布

76- 74-76 72-74 70-72 [%]

図10 PCW空間内の水平面湿度分布
(すべての高さを含む)

2.0- 1.5-2.0 1.0-1.5 0.5-1.0 0-0.5 [m/s]

図11 PCW空間内の水平面風速分布
(すべての高さを含む)

図12 外部風の風配図および各気象要素の平均値

図16 PCW表側 (風下側) 熱画像
(外気乾燥温度 32°C、湿球温度 24°C)

速の測定を行った。超音波風速計の測定値は、各成分を1秒ごとに平均した後、水平成分の合成により風向風速を求めた。

実験における測定点の移動は、高さ別に数十cm/sの速度で水平面上にセンサーを移動させることにより行った。測定インターバルは1秒とした。空間全体を一通り測定するのに要する時間は約10分である。なお、測定期間中も微気候の変動は生じるが、分布の全体的な傾向を把握するうえでは問題ではないと考えられる。受信器は図8中に示すように6個配置し、これにより2通りの位置の測定値を取得した。位置の決定には比較的安定した一方を用い、移動経路を考慮して障害物等により測定値が欠けていたり大きく外れているものは除外し、他方の測定値で補完した。

4.2 移動測定により得られた微気候の特徴

(1) 気温分布

夏季晴天日の14:10から14:20にかけて測定した温湿度・風速分布を、水平および垂直断面上にプロットしたものを図9～図11に、測定中の風配図および各気象要素の平均値を図12に示す。まず水平面に投影した空間内気温分布（すべての高さを含んだもの）を図9(a)に、L字型部分を中心にした東西・南北断面の気温分布をそれぞれ図9(b)(c)に示す。まず水平面分布をみると、測定値は時間的変動も含むため、同じ測定点での温度には幅があるが、全体的には場所ごとの特徴が現れている。南西と北東の開口部を結んで29～30℃の高温部分が分布し、PCWをL字型に直交して配置した部分を中心に、27～28.5℃の低温部分が見られる。低温になっているのはスリット型のPCWの冷却効率の高さと、L字型の平面のため外気の流入が少ないことによると考えられる。南北断面および東西断面は、どちらもPCW近傍での気温の低下が目立ち、外部風が通過する中央部分との違いが明確であるが、この測定では上下の温度分布は明確ではない。

(2) 湿度および風速分布

水平面に投影した湿度分布と風速分布を、それぞれ図10、図11に示す。湿度は気温の低下した部分で上昇しており、PCWの蒸発冷却による特有の微気候の形成が示されている。風速に関しては、南西の開口部および北側の仕切り壁近傍での増加が目立つ。測定時の外部風向がほぼ西南西であることから、北側の壁の張り出しにより開口型PCWを通しての通風が促進されていると考えられる。

以上のように、PCWにより形成される微気候の空間的特徴を、移動測定によってある程度示すことが可能であり、PCWにより形成される微気候は空間的に変化に富んだものとなることが明らかになった。今後の展望としては、この結果と、熱画像等を用いた長波

長放射の分布、さらに短波長放射の分布を合成することにより、熱環境の空間的特徴をより総合的に表現できると思われる。

5 パッシブクーリングウォールの風下に形成される微気候の測定

5.1 実験概要

PCWにより形成される微気候は、空間的特徴とともに時間変動の側面も持ち、特に屋外空間における熱的快適性に関しては、この時間変動が大きな意味を持つと思われる。引き続いて本研究では、1枚のPCWの風下において温湿度および風速を連続的に測定し、PCWにより形成される微気候の時間変動の把握の基礎としてのデータを提供する。

測定は前章と同じ実験場に、3m×4.5mの広さを持つ空間をスリット型用、開口型用に2ヶ所設置して行った（図13）。空間には主風向の風上側である南西面にPCWを設置し、その両端の側面には白色ポリスチレン仕上げの仕切り壁（厚さ5cm）を長さ2mにわたって設置した。外部風をPCWに取り込むため、仕切り壁はPCWの前方に張り出させた。張り出しの長さは50cmとした。空間の背後の北東面にも同様に壁面を設置した。また空間上方は白色のテントと白色のウレタン製シートを用い、間に空気層を設けて二重に日射遮蔽した（図14）。

PCW後方の測定点を図15に示す。PCWの通気孔出入口およびPCW後方0.5m、1m、2mにおける高さ0.5m、1m、1.5mの点で気温を、通気孔出入口およびPCW後方0.5m、1mにおける高さ1mの点で風速を、風速測定点に加えPCW後方2mにおける高さ1mの点で相対湿度を測定した。用いたセンサーは前章と同様である。以上の測定は数日間にわたり、晴天日の午前から夕方にかけて1回につき約20分ずつ数回、スリット型と開口型の空間を交互にセンサー一式を移動して行った。測定インターバルは2秒とした。本報ではその中から特徴的な部分を抽出して考察する。

5.2 PCW表面温度

赤外線放射カメラにより撮影したPCW風下側表面の熱画像を図16に示す。外気温24℃、湿球温度24℃のときに周囲の面は32℃以上になっているが、PCWの表面は26℃付近まで低下している。

5.3 空間内各点の温湿度・風速変化

温湿度・風向風速変化の一部を図17に表す。まず風向風速(a)についてみると、外部の風向はややばらつきはあるがほぼ南西、風速は0.2m/s～2m/sの範囲で変動する。通気孔出口の風速は開口型の方がやや大きく、空間内の風速もレンガの製作時に意図したとおり、開口型の方が大きい。

図13 実験の配置図

図14 実験空間

図15 PCW後方の測定点

図 17 PCW の風下空間の風速・気温・湿度変化例

続いて気温変化(b, c)をみると、スリット型、開口型ともに空間内は断続的な気温低下が生じる。外部風向が南西になりPCWを外気を通るような状況で、空間内が低温になる。外気との差はPCWから0.5m、高さ1mの点ではスリット型で3～3.5℃(外気乾湿球温度差の約50%)、開口型で約1.5℃程度(外気乾湿球温度差の約25%)である。湿度変化(d)に関しては、センサーの応答性の限界があるため変化の立ち上がりはそれほど速くないが、気温低下時の湿度の上昇が特にスリット型で明確である。

スリット型と開口型の微気候の違いとしては、スリット型においては弱風時に上下の気温差が生じる。また、風が吹くとPCWに近い点から順に気温が低下し、強風時にはほぼ全体が低下する。一方開口型においては、同様に強風時には全体の気温が低下するが、空間内の風速や乱れが大きいため、PCWからの距離や高さによる気温変化の特徴は、スリット型ほど明確ではない。

5.4 風下空間内の気温分布の変化例

風速変化に伴うPCW後方の空間の気温分布の変化を、気温低下が大きいスリット型で、弱風—強風—弱風と変化する場合について取り出し図18に示す。なお気温は外気温との差で表し、その際の外気温には、短周期の変動の影響を避けるため1分周期未満の変動を除去した値を用いた。

(a)は弱風が約40秒続いた後であり、空間内は外気とほぼ等しいが、高さによる気温の違いが1.5～2℃みられる。通気孔出口には冷気の滞留が生じている。(b)は強風時であり、孔出口風速0.7～

1.7m/s(外部風速0.3～2m/s)で約30秒経過後、孔出口風速が瞬間的に2m/sに増加した時点である。この時点ではPCWから生じた冷気により、2m地点まで温度が低下している。孔出口では風速の増加のため逆に気温低下量が小さい。(c)は(b)の後、逆風(外部風速約1m/s)で4～6秒、さらに順風(外部風速1m/s)で4～6秒経過後の分布である。空間後方の上方において気温が上昇している。後方の壁面により外部風は直接空間内には入りにくいいため、この気温上昇は温度差による冷気の流出によると考えられる。

5.5 風下空間内の風速と気温の関係

風速と気温を同時に測定している通気孔出口、PCWから0.5mおよび1mのそれぞれ高さ1mの点における、5.3節で取り上げた3分間の風速と気温の関係を図19に示す。前節と同様に、気温は外気温との差で表し、外気温は1分周期未満の変動を除去した値を用いた。まず通気孔出口(a)では、順風時には前報²⁾の通気実験同様、風速が小さいほど冷却効率が高い。外気温付近まで上昇しているのは逆風の場合である。開口型では全体的に気温低下が小さく、風速が大きい。PCWからの距離0.5m(b)および1m(c)の点では、各点への冷気の到達に伴う風速増加、気温低下が現れている。逆風により風速のみが増加する場合も見られる。

以上のように、PCW後方は外部風の変動により気温分布が変化する、蒸発冷却により気温の低下した空気が、気流を伴って断続的に到達する空間となっている。

図 18 外部風の変化に伴う気温分布の変化

図 19 PCW 風下各点の風速と気温の関係

6 まとめ

本報では、前報²⁾で製作した透水性孔あきレンガを用いてパッシブクーリングウォール (PCW) を製作し、それにより形成される半屋外空間の微気候の概要を、温湿度および風速の実測により明らかにした。

(1) PCW への給水方法の一提案として、構造の補強と給水システムを兼ねたトレーを用いて PCW をユニット化した。夏季屋外におけるユニットの給排水量の実測により、このシステムの消費水量の概略値を得た。

(2) PCW による微気候の空間的な特徴を把握するため、測定者の自由な移動による分布測定が可能な、超音波式 3 次元位置測定装置を開発した。

(3) 2 種類の孔あきレンガを用いて PCW を組み合わせた半屋外空間を作成し、その微気候の空間分布を位置測定装置を用いて測定した。外気の通過により気温低下が生じない部分、冷気が滞留する部分、壁の張り出しにより PCW への通気が促進される部分など、微気候の空間的な特徴が把握された。

(4) 2 種類の孔あきレンガをそれぞれ用いて風上側に PCW を持つ半屋外空間を作成し、空間内の PCW からの距離および高さの異なる各点で温湿度・風速変動の実測を行った。その結果、風向が PC

W に垂直な有風時には、ほぼ空間全体にわたって PCW によって数度気温の低下した気流が得られること、無風時には温度差によって冷気が流出することなどにより、全体として断続的な気温低下が得られることがわかった。

本報で明らかになった微気候の、人間の「涼しさ」の感覚への効果については、次報その 3 で報告する予定である。

注

本論文は、文献 4 に新たな内容を加え、再編集したものである。

引用文献

- 1) 白井一義、梅干野晃、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、第 487 号、pp. 61-68、1996. 9
- 2) 白井一義、梅干野晃、永田達也、小栗 健：透水性孔あきレンガの通気孔形状と通気・冷却性能の関係 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 1、日本建築学会計画系論文集、第 509 号、pp. 9-14、1998. 7
- 3) 石田秀樹、荒谷 登：建物南北に形成される夏の空気性状分布 夏の屋外に形成される微気候の性状把握に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第 459 号、pp. 9-15、1994. 5
- 4) 小栗 健、梅干野晃、白井一義、奥田知康、永田達也：透水性孔あきレンガを用いたパッシブクーリングウォールの開発 その 2 パッシブクーリングウォールによる微気候形成効果、日本建築学会大会 (関東) 学術講演梗概集 D-2、pp. 417-418、1997. 9

(1999年 4 月 20 日原稿受理、1999年 8 月 16 日採用決定)