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

RELATIONSHIP BETWEEN VENTILATION/COOLING CAPABILITY AND
VENTILATION CHANNEL SHAPE OF
WATER-PERMEABLE BRICKSFormation of outdoor and semi-outdoor comfortable space through evaporative cooling
by water-permeable perforated wall Part 1

白井一義*, 梅干野 晃**, 永田達也***, 小栗 健****

Kazuyoshi SHIRAI, Akira HOYANO, Tatsuya NAGATA
and Ken OGURI

The relationship between ventilation/cooling capability and channel length, width and interval of water-permeable perforated bricks, which form the Passive Cooling Wall as an outdoor/semi-outdoor evaporative cooling method, was investigated using the theory of pressure loss and heat transfer in ducts. In addition, additive materials to increase water permeability of the brick under general baking temperatures was investigated. Based on the analyses, two types of bricks were made which are characterized by ventilation and cooling capability, respectively. These capabilities were measured and the appropriateness of the calculation was confirmed.

Keywords: passive cooling, brick, evaporative cooling, ventilation, outdoor and semi-outdoor space

パッシブクーリング、レンガ、蒸発冷却、通気、屋外・半屋外空間

1 はじめに

夏季の都市熱環境の悪化が進む中、中庭、ベランダ等の半屋外空間や、あずまや等の休憩施設、歩行者通路などは、オアシス的な快適空間、すなわちクールスポットとしての活用が望まれる空間である。それらの空間の材料として、土に代表される多孔質材料は都市に潤いや落ち着きをもたらす、都市緑化との相性も良好なことから、積極的に取り入れていくべきであると考えられる。

屋外・半屋外のクールスポットの形成には日射遮蔽、通風と並んで蒸発冷却の活用が有効であり、筆者らはその考えから透水性孔あきレンガを用いた蒸発冷却壁体を提案し、その試作と基本的な冷却性能の把握を行った¹⁾。居住空間の快適性向上を目的とした多孔質材料による蒸発冷却手法は、Givoni²⁾等によりまとめられているように、中近東などを中心に古くから素焼きの壺などを用いて行われている。しかし我が国や東南アジアのような高温多湿の気候を考えると、半屋外空間を形成する壁体に対して、図1に示すように壁体全体を冷却して熱放射を低減し、なおかつ壁体を孔あきとして視覚的にも外部風に対しても幾分開放的な空間とし、気流の揺らぎによる快適性を得ることが蒸発冷却の活用法として有効であると考えられる。さらに、壁体の孔表面の蒸発冷却により形成される冷氣塊が、気流によって断続的に居住域の人体付近に運搬されることが、快適性

の向上により寄与するのではないかと考えられる。

本研究ではこれをパッシブクーリングウォール（以下PCW）と呼ぶこととし、PCWの開発および半屋外環境における冷却効果の評価を行うことを目的とする。具体的には、①PCWの構成材料となる透水性孔あきレンガについて、製法の観点から素材の再検討を行う。また、レンガが飽和時の通気孔の形状と通気・空気冷却性能の関係について把握し、レンガの設計資料とする。②透水性孔あきレンガを用いて給水システムと一体化したPCWユニットを作成し、これにより片面にPCWを配した基本的な小空間を形成、そこに生

図1 透水性の孔あき壁体による蒸発冷却手法

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科 大学院生・修士 (工学)

** 東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授・工博

*** INAX 環境美研究所 所長

**** INAX 環境美研究所

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Manager, Space Design R & D Center, INAX Corporation

Space Design R & D Center, INAX Corporation

じる気温・湿度分布の特徴を把握し、PCWの微気候形成範囲を明らかにする。③半屋外居住空間の原形となるPCWで囲まれた小空間において、熱的快適性の向上を内部の熱環境の実測および在室者の申告によって示すことにより、PCWのクールスポット形成材料としての効果を実証する。本報では①についての報告を行う。

記号一覧

- a, b : 通気孔断面の各辺の長さ [m]
 C : 空気の比熱 [J/kgK]
 C_d : 管摩擦抵抗計算時の係数
 D_e : 通気孔の等価直径 [m]
 L : 通気孔長さ [m]
 ΔP : 圧力損失 [Pa]
 Re : レイノルズ数
 T_i, T_o : 通気孔入口温度および出口温度 [°C]
 T_w : 通気孔内表面温度 [°C]
 T_a : 通気孔内空気温度 [°C]
 u : 通気孔内平均風速 [m/s]
 x : 通気方向の変位 [m]
 α : 通気孔内平均対流熱伝達率 [W/m²K]
 α_c : 対流熱伝達率 [W/m²K]
 α'_s : 絶対湿度基準の湿気伝達率 [kg/m²s (kg/kg')]
 ξ_i, ξ_o : 通気孔入口および出口の形状抵抗係数
 λ : 管摩擦係数
 ρ : 空気の密度 [kg/m³]

2 製法面からみたレンガの素材の再検討

PCWにおいては、構成する個々のレンガの下端からの毛管上昇による給水を想定しており、レンガ1個分の高さに速やかに吸水が行われる必要がある。そこでレンガの吸水性能を十分に高めるため、まず素材について再検討を行った。既報¹⁾のレンガの主原料である瓦土を焼成温度を変えて焼成し、既報の調合のレンガとともにポロシメータ法により細孔径分布を、また既報と同様の方法で24時間吸水率、小口面からの毛管上昇による浸透高さを測定した。なお、浸透高さに関しては試験体の高さが約70mmのため最長で90分程度での検討となるが、温度による浸透高さの順序の相対的な比較には十分と考えられる。

図2に細孔径分布、図3に吸水率、90分後の浸透高さおよび容積基準メジアン細孔径を示す。吸水率は焼成温度が低いほど大きくなるが、900℃以下では変化がなくなる。また既報同様、1000℃の瓦土がもっとも浸透高さが高くなり、次いで1100℃が高いことがわかる。しかし製法面・実用面から考えると、1100℃の方が浸透高さの割に吸水率が小さいため凍害の心配が少なく、かつ素材強度が大きい。また既存設備を利用して製造でき、温度コントロールが容易である。以上から、0.1～1μmの細孔量が多い1000℃の細孔径分布を1100℃で再現するため、瓦土に炭酸カルシウム、ワラストナイト(CS)および水滓を添加した。これを6種類の調合で1000℃、1050℃および1100℃で焼成し、浸透高さの比較を行った。表1に用いた添加材とその比率を示す。添加材の調合比が最大のものはNo.3で、50%のCSの添加である。

調合および焼成温度による浸透高さの違いを図4に示す。添加した炭酸カルシウム、水滓等は1100℃程度で反応するため、温度別では1100℃のものが最も浸透性が高くなった。最も浸透性の低いNo.1の浸透高さの変化をみると(図5)、それでも1100℃の試験体で約3

図2 瓦土の焼成温度による細孔径分布の違い
(軸名は容積基準での各孔径の孔量の範囲)

図3 瓦土の焼成温度による吸水率・浸透高さの違い

表1 添加材料と調合比

No.	添加材	%
1	炭酸カルシウム	12
2	CS	30
3	CS	50
4	水滓(細)	20
5	水滓(細)	30
6	水滓(細)	10
	水滓(粗)	10

図4 調合による浸透高さの違い
(8時間後)

図5 焼成温度による浸透高さの違い (No.1: 炭酸カルシウム添加後)

図6 通気孔形状検討時のパラメータ

時間ではほぼレンガ1個分の100mmに達しており、十分な性能といえる。無添加の1100℃では図3等の結果から考えてこれを大きく下回ると考えられる。以上からすべての調合でPCWとして十分な吸水性が得られると考えられるが、この結果と質感・コスト等を考慮し、No.1の調合を採用した^{注1)}。

3 通気・冷却性能からみた孔あきレンガの通気孔形状の検討

3.1 通気孔の設計上のパラメータ

PCWはその通気孔形状により、外部風に対する通気性能や通気時の空気冷却性能が異なる。それらの性能に影響を与える形状面のパラメータとしては、孔の長さ（壁厚）、大きさ（径）、壁面積に対する孔の断面積の割合（開口率）、孔の断面形状、奥行き方向の形状変化、および通気孔内外の表面性状等があげられる。ここでは通気孔の形状をもっとも基本的かつ実用的な長方形とし、奥行き方向の形状変化や表面性状の違いは考慮せずに、孔の長さ、大きさ、縦横比、開口率を対象として通気・冷却性能の違いを検討する。またそれらを検討する際には、給水方法がレンガ下端からの浸透であることを考えてレンガの高さは固定とし、通気孔の開口幅と間隔を変えることに伴って大きさ、縦横比、開口率が変化することとする（図

図7 通気孔開口幅、長さによる圧力損失の違い
(通気孔高さ: 52mm、通気孔間隔: 10mm)

6)。なお以下の解析における開口率算出時は、単純化のため上下の目地幅10mmは考慮しているが、レンガの左右の端部は考慮していない。

3.2 通気・冷却性能の計算方法

孔あきレンガの通気孔開口幅および間隔と、通気性能・冷却性能との関係を検討した。以下に詳細を示す。

1) 通気性能

通気性能は通気孔による圧力損失で表す。実空間では前後の気流性状による通気孔内部への影響も考えられるが、ここでは単純化して通気孔内の気流は一意に定まるものとし、内部風速に相応する通気抵抗の結果として圧力損失を考える。通気孔により生じる抵抗は通気孔入口・出口の形状抵抗と管内壁面による摩擦抵抗の和として表され、圧力損失は次式により計算される。

$$\Delta P = 1/2 \cdot \{\zeta_i + \zeta_o + \lambda(L/D_e)\} \rho u^2 \quad (1)$$

入口・出口の形状抵抗係数としてはダクトの急縮小・急拡大の値³⁾を適用し、縮小・拡大時の断面積比としてレンガの開口率を与えた。通気孔内の摩擦抵抗係数は相対粗度0.01としてムーディー線図により与え、 $Re < 2000$ では式

$$\lambda = C_d / Re \quad (2)$$

を用いた。 C_d の値は正方形断面で57とし³⁾、断面の縦横比による違いは文献⁴⁾により与えた。なお $2000 < Re < 4000$ の遷移域においても暫定的に層流域の式を用いた。

2) 冷却性能

冷却性能に関しては、レンガ表面を完全飽和と仮定すると熱伝達と物質伝達のアナロジーよりレンガ全体を外気湿球温度に等しいとみなせるので^{注2)}、形状による冷却性能の比較である今回の検討では、表面を飽和とし湿球温度において、外気乾湿球温度差に対する温度低下の割合を冷却効率と以下に示すように定義して、これを用いた。

孔表面での熱伝達率に関しては、 $Re < 2000$ においては、Wibulswas

図8 通気孔開口幅、長さによる冷却効率の違い
(通気孔高さ: 52mm)

による速度・温度境界層ともに管入口から発達する長方形断面の管内層流の平均ヌセルト数⁴⁾を用いて求めた。 $Re>3000$ においてはBlasiusの式により管摩擦係数を求め、Gnielinskiの式により平均ヌセルト数を計算し、直角の管入口における補正式により補正して用いた⁵⁾。なお通気孔の開口幅を52mm、間隔を20mmとした場合でも通気孔内部表面とレンガ前後の外表面の面積比は6.2:1であるので、外表面での蒸発による吹出し温度への影響は無視した。以上より、孔内任意の断面の平均温度 T_x に関して次式が成り立つ。

$$-Cpabu \frac{dT_x}{dx} + \alpha(T_w - T_x) \cdot 2(a+b) = 0 \quad (3)$$

上式を解き、冷却効率 $(T_i - T_o)/(T_i - T_w)$ を次式により計算した。

$$\frac{T_i - T_o}{T_i - T_w} = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha \cdot 2(a+b)L}{Cpabu}\right) \quad (4)$$

3.3 通気孔の長さ・開口幅と通気・冷却性能の関係

(1)式および(4)式に従い、通気孔内風速2.5m/s以下の範囲について、0.1m/sごとに圧力損失および冷却効率を計算した。通気孔の長さおよび開口幅による通気・冷却性能の違いとして、通気孔長さを50mm, 100mm, 200mm, 300mm, 開口幅を8mm, 10mm, 13mm, 26mm, 52mmと変えたときの通気孔内風速と圧力損失の関係を図7に、通気孔内風速と冷却効率の関係を図8に示す。なお、用いた計算式の違いにより、 $Re=2000$ および4000を境に線種を変えて表示しており、冷却効率については、計算対象外となる $2000 < Re < 3000$ ではその前後から補間している。

まず圧力損失に関しては、開口幅8mmと52mmでは、同じ風速に対して52mmの方が半分程度である。このとき得られる風量は52mmの方が大きいため、通気性能に関しては非常に有利といえる。また通気孔の長さが50mmから300mmに増えた場合でも圧力損失は1.5倍程度であり、通気孔長さを長くすることはそれほど通気性能に対して不利とはなっていない。

冷却効率についてみると、開口幅8mmと52mmでは、風速の小さい領域で特に大きな差が見られる。しかし52mmでも風速の大きい領域で一定以下には冷却効率は低下せず、長さ200mmで0.12以上は得られる。一方通気孔長さの効果を見てみると、開口幅8mmでは長さ200mm、風速0.2m/sで0.9に達しており、この程度の開口幅・風速ならば200mmで充分といえる。また、仮に冷却効率0.5を得るためには長さ50mmではほとんど不可能であり、200mmでようやく0.5を超える部分が増えてきている。

3.4 一定の圧力差が生じたときの通気孔の開口幅・間隔と風下風速・冷却効率の関係

外部風により通気孔前後に一定の圧力差が生じたときに、通気孔の開口幅および間隔の違いにより通気・冷却性能がどの程度異なるかを検討する。図9に、長さ200mm、高さ52mmの通気孔を持つ孔あきレンガの前後に2Paの圧力差が生じたときの(a)風下風速と(b)冷却効率を、開口幅と間隔をx、y軸とした平面上に描いた等値線図を示す。なお風下風速は、風速が吹出し後に一様分布するものとみなし、算出された通気孔内風速に開口率を掛けたものとした。図中には等開口率線および通気孔の等風速線も示す。

a) 風下風速
(通気孔内風速×開口率により算出)

b) 冷却効率

△: スリット型 ◇: 開口型の位置

図9 2 Paの圧力差を与えたときの通気孔幅・間隔と通気・冷却性能の関係

図10 透水性孔あきレンガ

同図より、風下等風速線は等開口率線の傾きとほぼ等しく、風下風速は開口率によりほぼ決まるといえる。一方冷却効率に関しては、通気孔間隔の違いによる影響はほとんどない。また開口幅10mm程度以下では等値線の密度が大きくなり、この範囲での開口幅の設定は冷却効率に大きく影響することがわかる。

ここで(a)図において算出範囲での通気孔内風速と風下風速の分布幅に着目すると、通気孔内風速の分布幅は1.4m/s～2.1m/sとそれほど大きくないが、開口率の違いにより風下風速は0.15m/s～1.0m/sと分布幅が大きく、風下空間での気流感に大きく影響すると思われる。しかし逆に、風下風速の点で不利である開口幅の小さい通気孔においても、出口直後では開口幅の大きいレンガの7割程度の風速は得られることから、通気孔開口幅の小さいレンガはPCWの直後で冷気を感じられるような用途に用いると、より有効であると考えられる。

4 孔あきレンガの作成と通気実験による通気・冷却性能の把握

4.1 透水性孔あきレンガの作成

以上の考察をもとに実験用の孔あきレンガを作成した。作成したレンガの形状を図10に示す。通気孔の長さは先述の考察と壁体としての通常の値を踏まえて200mmとした。レンガは通気孔の開口幅を小さくし十分な冷却効率を持たせ、かつ製作上可能な限り間隔を狭くしたスリット型（開口幅10mm、間隔8mm）と、通気性能を十分に得る目的で開口幅を大きく取り、正方形断面とした開口型（開口幅52mm、間隔16mm）の2種類を製作した。両者の通気・冷却性能における位置づけを図9中に示す。なおレンガの寸法はデザイン上の観点や運搬時の重量、施工性なども考慮して決定した。

4.2 通気実験による通気・冷却性能の把握

これらのレンガの通気性能、冷却性能について、既報¹⁾と同様の簡易風洞による通気実験を行った。図11に実験装置を示す。既報と異なる点は、風洞壁面の影響を小さくするためレンガを3段重ねて中央の通気孔で測定を行ったことと、測定項目に通気孔前後の圧力損失を加えた点である。図中の測定点において、気温をT熱電対、湿度を高分子容量型湿度計を用いて測定した。圧力損失は隔膜式差圧計を用い、風洞にチューブを垂直に挿入して測定した。風速の測定は通気孔出口においてサーミスタ風速計を用いて行った。

圧力損失の測定は乾燥レンガを用いて通気風速を逐次変えて行った。温度測定は、気温32℃、湿度60%の環境制御室内において、レンガを気温に等しい水中で飽和させた後、風洞に設置して一定通気のもとで行った。

風下気温は通気風速による違いはあるが、通気開始後数分から1時間で定常に達した。その時の測定値を用いて外気乾湿球温度差に対する冷却効率を算出した。スリット型と開口型の孔あきレンガにおける、通気孔出口風速と圧力損失および冷却効率の関係を、計算による通気孔内風速とそれらの関係とともに図12に示す。なお風速は通気孔出口において計測しているため、孔内の風速分布の影響で通気孔内の平均風速と一致しない可能性はある。圧力損失については、流れの性状がダクトの場合とやや異なるため、風速が2m/sを超えるような場合には実験値の方が大きくなるが、計算により比較的良好に再現されている。冷却効率に関しても、実験値と計算値は比

図11 通気実験装置

a) 通気性能

b) 冷却性能

図12 通気実験による透水性孔あきレンガの通気・冷却性能

較的良好な対応を示している。実験値の方がわずかに効率が高くなるが、その原因としては通気孔表面の粗度による熱伝達係数の増加などが考えられる。

5. 結論

本研究では、パッシブクーリングウォール（PCW）を用いた蒸発冷却による屋外・半屋外の快適空間の形成のための基礎検討として、PCWを構成する透水性孔あきレンガの性能を、素材および通気孔形状の面から検討した。得られた知見を以下に示す。

1) 素材の再検討の結果、添加材料を用いて0.1～1μmの気孔を

増加させることにより、1100℃の焼成温度において十分な吸水性能を持つレンガが作成された。

2) 長方形断面の通気孔を持つ孔あきレンガの通気孔形状と通気性能・冷却性能の関係を、ダクトの通気抵抗および管内熱伝達の実験式を用いて検討した。通気孔形状を通気孔長さおよび通気孔開口幅・通気孔間隔をパラメータとして表したときの、各要素と性能の関係を表し、それらの違いによる風下の気温および風速の違いを示した。

3) その結果をもとに特徴の異なる2種類の透水性孔あきレンガを作成した。孔あきレンガを用いて通気実験により通気性能・冷却性能を測定し、レンガの性能を確認した。

次報では給水システムを組み込んでPCWをユニット化し、PCWを用いて屋外小空間を作成、内部に形成される微気候の特徴について実験的に明らかにした結果を報告する。さらに第3報では、屋外の日陰空間、およびPCWを乾燥状態にした場合と比較して、熱環境の実測および在室者の申告により、PCWによる快適性の向上効果を明らかにする予定である。

注

1) 添加材を混入した調合物の単価は、高い順にNo.3、2、5、1、4(=6)となる。図4、図5より、いずれの添加材によっても1100℃で透水性レンガとして十分な性能を得ることができると考えられるので、コスト・質感等を考慮して最終的にNo.1を採用した。

2) 通気孔に空気を流した場合の、空気およびレンガ内部の温度分布を、表面完全飽和、湿気伝達率を $\alpha_s' = 0.083 \text{ a} / \text{C}^6$ 、固体内を熱伝導のみとして計算すると、レンガの温度は全体的に外気湿球温度に等しくなる。したがってレンガが湿球温度より高くなるのは表面が非飽和であること、外部の放射熱の影響等が考えられる。しかし通気実験では追加的な給水がなくともある程度の時間ほとんど表面が湿球温度に保たれること、今回は主として形状のみの検討であることから、表面を完全飽和として扱った。

3) 本研究は1997年度日本建築学会大会（関東）において発表した内容（D-2環境工学Ⅱ、pp.415-416）を加筆・再編集したものである。

参考文献

- 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) Givoni B.: Passive and Low Energy Cooling of Buildings, An International Thomson Publishing Company, 1994
- 3) 空気調和・衛生工学会編：空気調和衛生工学便覧Ⅰ、第11版、pp.224、1987
- 4) Shah R.K., London A.L.: Advances in Heat Transfer, Supplement 1, Laminar Flow Forced Convection in Ducts, Academic Press, pp.196-222, 1978
- 5) 日本機械学会編：伝熱工学資料、第4版、pp.55-57、1986
- 6) 尾崎明仁、渡辺俊行、龍 有二、長谷川敬一郎、熊添有一、片山忠久、浦野良美：建築外表面の熱・水分伝達に関する実験的研究 風洞実験による水平試料上面の熱・水分伝達について、日本建築学会計画系論文報告集、第407号、pp.11-25、1990.1

(1997年9月10日原稿受理、1998年2月2日採用決定)