

〈特別研究課題〉 蒸発潜熱を用いたクーリング建材の研究開発  
助成研究者 名古屋工業大学 セラミックス基盤工学研究センター  
藤 正督



## 蒸発潜熱を用いたクーリング建材の研究開発

藤 正督  
(名古屋工業大学)

## Research and Development of Cooling Building Materials using Evaporative Latent Heat

Masayoshi Fuji  
(Nagoya Institute of Technology)

### Abstract

We have developed water-retentive porous ceramics for mitigating heat-island effect, which has not only high performance of thermal insulation, but also high water absorption and retention. In this study, we investigated the relationship between water absorption and water retention within the pore structures of porous ceramics. The raw materials of the ceramics were used waste resources. The structures were changed by different state foaming additive. It was found that the water absorption was dependent on open porosity and the pore size. The water retention was reduced excessively with high porosity. Accordingly, the control of pore structure was described in details in this study. Moreover, we have constructed walls garden for an actual field test in NIT's campus, and the cooling effect of the wall was investigated.

### 1. 緒言

都市部におけるヒートアイランド現象は近年大きな問題となっている<sup>[1]</sup>。このような現象の要因は、生活の中で排出される地球温暖化ガスや空調による排熱、緑地及び水面の面積の減少、建築物による熱の停滞などが挙げられる。これらの要因の解決策として、建築物の高断熱化による使用エネルギーの削減、屋上緑化による熱量の低減が実施されている<sup>[2,3]</sup>。このような対策を施す場合、断熱材や土壌を設置することによる建築物への負荷重量の増加や、施工方法等が問題となることが多い。また、用いられる材質の耐候性も大きな問題となる。緑化を行う場合には、施工箇所に合わせて、

重量や保水性の調整も必要となる。特に保水性は、植物の育成や蒸発時の気化熱による冷却効果などにおいて、重要な特性である。

セラミックスタイルは、意匠性、耐候性に優れ、長い間外壁材として使用されてきた。近年では、タイル表面に触媒効果を持たせ、防汚性、大気浄化等の機能性を持たせた製品も提案されている。しかしながら、吹きつけ材などと比較して重量が重い、加工性が悪いなどの欠点により、需要が伸び悩んでいるのが現状である。

我々のグループでは、窯業残渣やセラミックス系の廃棄物を利用した多孔質セラミックスの作製方法及び特性評価について研究を行ってきた<sup>[47]</sup>。タイルを多孔質化することで、その欠点である重量、加工性を改善し、吸音性や断熱性などの機能性を付加することができる。また、これらの特性は気孔構造に依存しており、その制御についても検討を行っている。

本研究では、廃棄物を原料とした多孔質セラミックスタイルの吸水性及び保水性について研究を行った。気孔構造と吸水／保水特性の関係を調べ、特性制御の指針を得ることを目的とした。さらにヒートアイランド現象緩和効果を確認するために、名古屋工業大学キャンパス内の施設棟屋上に施工、フィールドテストを行い、その環境効果について検討した。

## 1. 廃棄物を利用した保水性多孔質セラミックスの開発

本開発プロセスの特徴として、(1) 気孔源として空気を主原料とするため低コストかつ低環境負荷プロセスである、(2) セラミックス原料として利用されてこなかった資源（窯業原料廃材、ガラス瓶など一般家庭から回収されたゴミ及び各種産業界から排出される廃棄物）を90%以上使う原料組成、(3) ガラス廃材等の活用により、現在の窯業建材焼成温度よりも低温での焼成が可能である、(4) 気泡量の制御により高气孔率化が容易であり、従来製品に比べて半分以下の軽量化が可能である、(5) 粘土等を用いない製法であり、製品寿命終了後にはこの建材の原料としてリサイクルが可能である、などが挙げられる。セラミック内部の気孔構造は、保水性や断熱性に直結するが、従来のセラミック製造技術では多孔体の構造制御は困難であった。本開発プロセスの最大の利点は、気孔構造制御が安易に行えることである。

### 2.1 実験方法

原料として、約15 $\mu$ mに粉碎した窯業残渣や工業廃棄物等の低級シリカ、ガラス、アルミナ粒子を使用した。成形助剤として、廃棄物成形助剤を使用した。クエン酸アンモニウム塩を粒子分散剤として使用した。スラリーの組成を表1に示す。

多孔体の作製プロセスを図1に示す。スラリーはボールミルによって作製した。そして、界面活性剤を加え、回転速度900 rpmのダブルブレードのミキサーにより攪拌を行った。含気泡スラリーを金属製の型に注型し、型に入れた状態で50 $^{\circ}$ C、70 hの条件下で乾燥を行った。その後、試料を脱型し、1070 $^{\circ}$ Cで2 h焼成した。

表1 廃棄物系スラリー組成

substance	Amount (mass%)
wastes	73.1
distilled water	25.8
dispersant	0.1
forming additive	1.0

試料の嵩比重、全気孔率、開気孔率はアルキメデス法により求めた。緻密体の理論密度(2.62 g/cm<sup>3</sup>)を気孔率の計算に用いた。水銀圧入法(測定範囲: 4 nm - 600 μm)により、開気孔率及び平均気孔径の測定を行った。

乾燥した試料を24h、水に浸漬し、以下の式により吸水率を測定した。

ここでaは吸水率、m<sub>1</sub>は試料の乾燥重量、m<sub>2</sub>は含水重量である。

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

恒温恒湿槽内に乾燥した試料を吊り下げ、重量変化を測定し吸湿性の試験を行った。測定温度は温度25℃とした。湿度は70%、90%、99%の三種類について行った。

保水性試験として、水に24h浸漬させた試料を25℃、湿度60%の恒温恒湿槽内に吊り下げ重量変化を測定し、試料が含む水の重量減少率を保水性能として評価した。また、試料の含水状態をマイクロフォーカスX線CT装置(SMX-90CT、SHIMADZU Corp.、Japan)を用いて観察を行った。

非定常熱線法により熱伝導率の測定を行った。試料の保水率を0%、50%、100%にして、それぞれの熱伝導率を測定した。さらにその環境効果を確認するため、大学施設等屋上でのフィールド試験を実施した。1日1回、施工した多孔質セラミックスの飽和水量まで散水し、その表面温度および階下の室温を比較、検討し、ヒートアイランド現象緩和効果について調査した。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 多孔体物性値

表2に得られた試料の嵩比重、全気孔率、開気孔率を示す。アルキメデス法による開気孔率と水銀圧入法による開気孔率に大きな違いが見られた。この差は装置の測定限界である600μm以上の粗大な孔径を示している。また、水銀圧入法の測定原理から、平均気孔径は気孔の連通部分の開口径であると考えられる。吸水率は全気孔率の高い物が高い値を示す傾向が見られた(図2)。

表2 得られたサンプルの多孔体特性

Sample number	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Total porosity (%)	Open porosity (%)	Average pore size (μm)
1	0.68	73.9	72.2	11.92
2	0.64	75.6	73.8	7.08
3	0.53	79.7	78.7	20.85
4	0.39	85.3	83.6	4.80

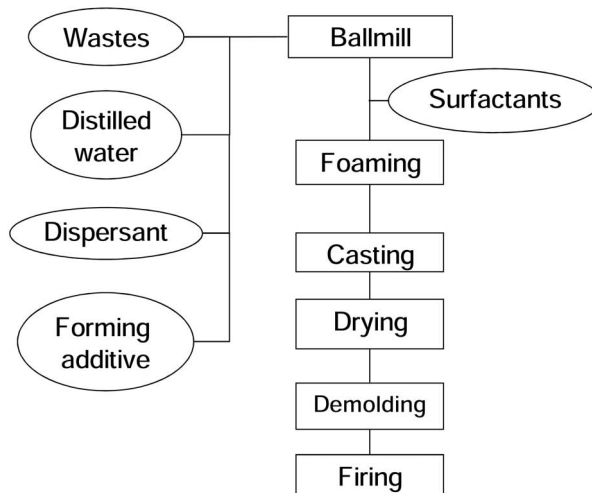


図1 多孔体の作製プロセス

しかし、試料2は試料1よりも気孔率が高いにもかかわらず、低い吸水性を示した。試料2の平均気孔径は試料1よりも小さい。連通部の開口径が狭いことで、吸水が阻害されたと考えられる。試料4は気孔率が最も大きく、吸水率が高いが、平均気孔径は最も小さかった。アルキメデス法による開気孔率と水銀圧入法による開気孔率の差が非常に大きいことから、600 $\mu\text{m}$ 以上の大きな口径の連通部が多いと考えられる。試料内部にまで十分に吸水させるためには、約10 $\mu\text{m}$ より大きな孔径で連通していることが必要と考えられる。

### 3.2 保水性試験

図3に吸湿性の測定結果を示す。各湿度において、試料の重量変化は非常に微小であり、吸湿性はほとんど無かった。このことから、保水性測定に対する吸湿性の影響は無視できると考えられる。

図4に保水性試験結果を示す。試料3、4は、試験開始から約30分間に大きく保水量が低下している。多孔体上部に含まれていた水が重力により下部へ移動し、液滴として試料外部に流れたと考えられる。また、気孔率の大きい試料ほど保水率の低下が大きい。しかし、平均気孔径の影響は見られない。蒸発時には水は気化しているため、気孔径の影響をあまり受けずに、気孔内を移動して試料外へ散逸していると考えられる。試料1は最も保水性に優れ、約24h、水を保持した。水を保持している間は、水の気化熱による温度低減効果が得られると考えられる。

図5にX線CTによる保水状態の評価として、試料の水平方向に切断した面と、垂直方向に切断した面における水の蒸発経過の観察画像を示す。白い部分が多孔体のマトリクス、黒い部分が気

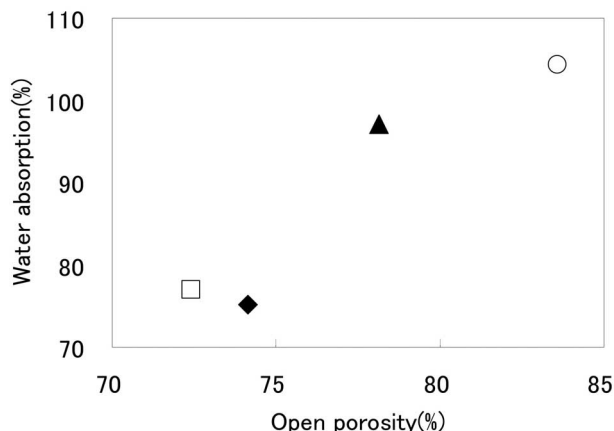


図2 多孔体サンプルにおける開基気孔率と吸収率の関係

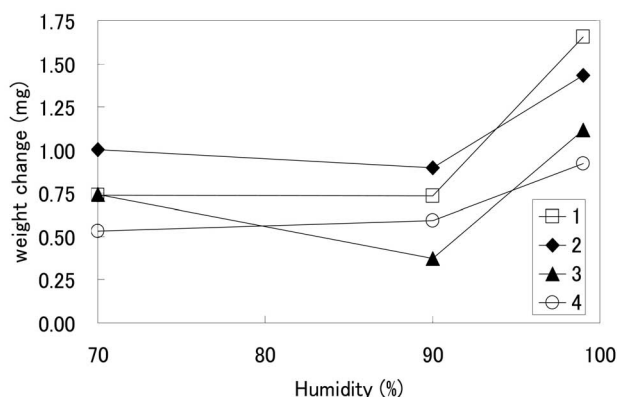


図3 多孔体サンプルの吸湿特性

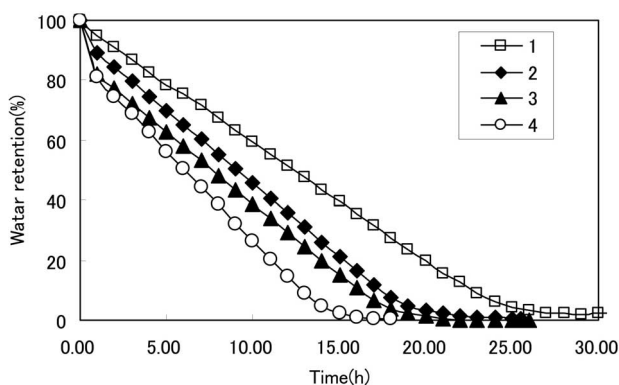


図4 多孔体サンプルにおける保水特性

孔、グレーの部分が水であり、(A)24h吸水直後、(B)1h後、(C)10h後の状態である。吸水直後の試料(A)では、ほとんどの気孔が水で満たされており、その保水率は64%である。1h経過後(B)には保水率は57%となり、試料外周部の気孔から水が無くなっている事が観察された。更に10h後(C)には全ての水分は蒸発した。また、垂直断面の画像より、観察開始の段階で、試料上部の気孔から、水が抜けている部分があることが確認できた。これらの観察結果は、保水性試験の結果の考察と一致する。

### 3.3 断熱性試験

各試料とも、含水率の増加とともに熱伝導率が上昇した。含水率100%の状態において、最も高い熱伝導率で1.09 W/m·Kであった。これは、一般的なコンクリートなどよりも、若干低い値である。水を含まない状態では、0.18～0.30 W/m·Kと低い熱伝導性を示した。

含水時は水の気化熱による温度低減が期待できる。また、乾燥時においても、低熱伝導性による断熱効果が得られると考えられる。

### 3.4 フィールド試験

図6に名古屋工業大学キャンパス内の施設棟屋上の施工写真を示す。施設棟屋上の半分に多孔質セラミックスを施工し、残り半分は現状のコンクリート床とし、その表面温度や階下の室温等を比較した。図7に施工した多孔質セラミックス及び未施工のコンクリート屋上表面の温度の比較を示す。多孔質セラミックスの表面温度は未施工部分のコンクリート表面温度に比べて約20℃低く、その日の外気温とほぼ同じ温度であった。図8に階下の室温の比較を示す。多孔質セラミックスを施工した階下にある部屋の室温は、コンクリート階下の部屋と比べ、約2℃程度低くなった。また散水なしでも若干の冷却効果があり、これは多孔体による断熱効果によるものと考え

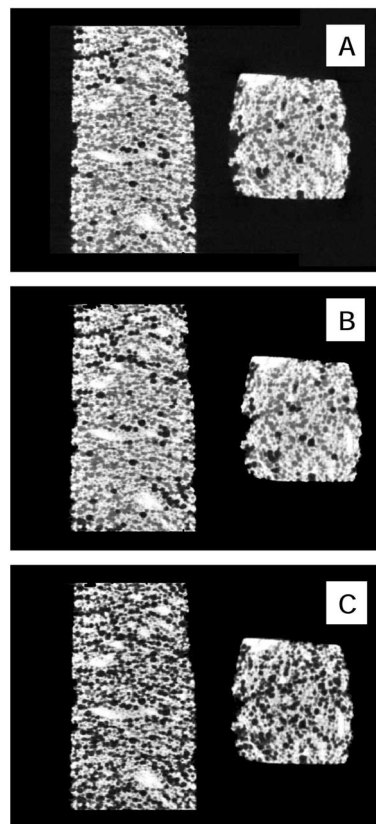


図5 X線CTによる保水状態の評価

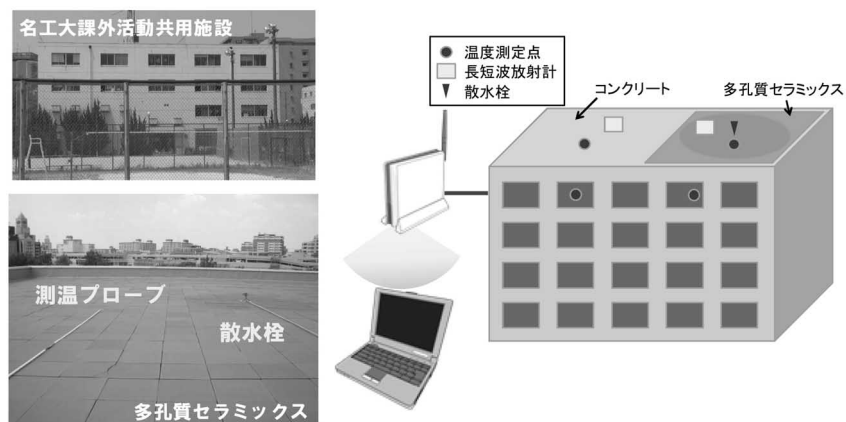


図6 名古屋工業大学キャンパス内の施設棟屋上の施工写真

られる。さらに熱収支量を比較すると（図9）、コンクリート材側では入射したエネルギーが顕熱フラックスにより外気に流出し、ヒートアイランド現象を促進していることが分かった。一方、多孔質セラミックス側では潜熱により顕熱フラックスが消滅し、ヒートアイランド現象緩和に貢献していることが分かった。

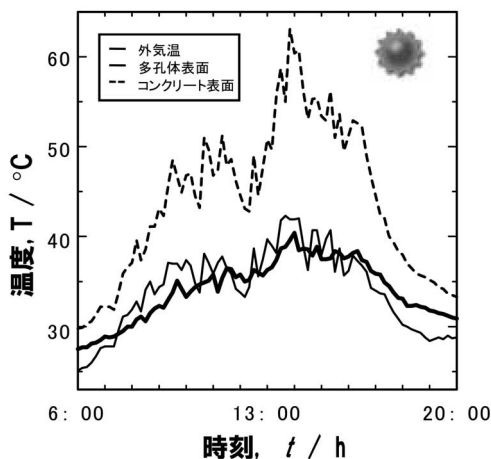


図7 施工した多孔質セラミック及び施工のコンクリート屋上の表面温度の比較

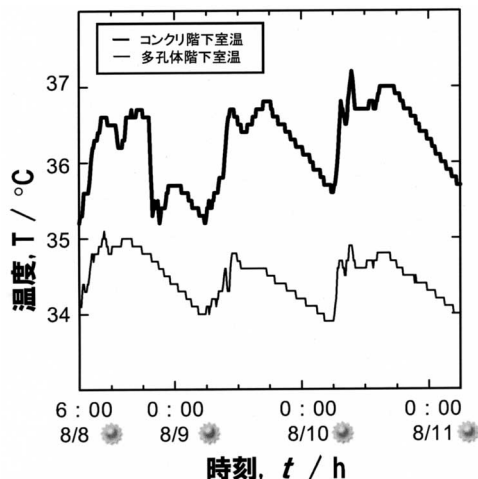


図8 施工した多孔質セラミック及び未施工のコンクリート階下の室温

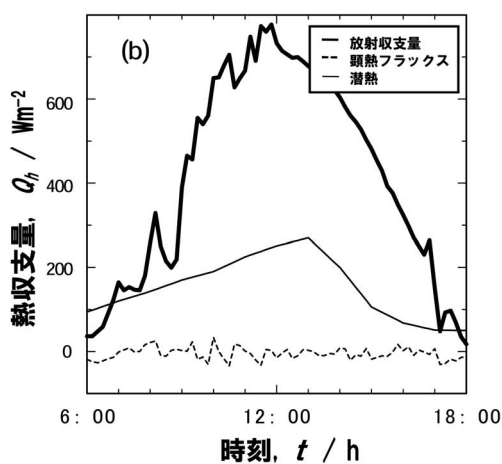
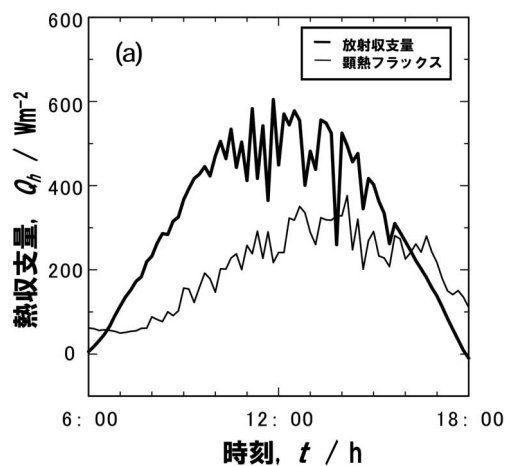


図9 表面における熱収支量  
(a)コンクリート表面、(b)多孔質セラミック表面

#### 4. 結論

廃棄物を原料とした多孔質セラミックスにおいて、優れた保水性能が得られた。高い吸水性を持たせるためには、連通部の口径を $10\mu\text{m}$ より広くする必要があった。また、高すぎる気孔率は保水性を低下させる事が確認された。今回最も優れた保水性を示した多孔体は、全気孔率73.9%、開気孔率72.4%、平均気孔径 $11.9\mu\text{m}$ であった。多孔体の熱伝導率は保水状態においても一般的なセラミックス建材と同等か低い値を示した。水の蒸発による冷却効果及び低熱伝導率による建築物の温度低減に効果が有る物と考えられる。

## 5. 参考文献

- 1) D. Narumi, K. Sakaguchi, A. Kondo, Y. Shimoda and M. Mizuno, J. Environmental Engineering, 612 (2007) 89-96.
- 2) K. Goto, K. Tachiiri and K. Kojima, Soil Mechanics and Foundation Engineering, 50 (2002) 18-20.
- 3) T. Inui, C. Mizuniwa and M. Kondo, The Japanese institute of Landscape Architecture, 167 (2004) 479-482.
- 4) K. Jono, M. Fuji and M. Takahashi, J. Ceram. Soc. Japan, 112 (2004) 138-143.
- 5) K. Adachi, M. fuji and M. Takahashi, Materials Processing for Properties and Performance (MP3), 2, Institute of Materials East Asia (2004) 219-225.
- 6) F. Zhang, T. Kato, M. Fuji and M. Takahashi, J. Eur. Ceram. Soc., 26 (2006) 667-671.
- 7) M. Fuji, T. Kato, F. Zhang and M. Takahashi, Ceram. Inter., 32 (2006) 797-802.