

高揚水性レンコン型多孔質セラミックス材料の作製とその蒸発冷却効果

Preparation of Lotus-type Porous Ceramics with High Water Pump-up Ability and Its Cooling Effect by Water Vapor Evaporation

岡田 清*¹ 亀島 欣一*¹ 中島 章*¹ Chengala D. Madhusoodana*²
Kiyoshi Okada Yoshikazu Kameshima Akira Nakajima Chengala D. Madhusoodana

*¹ 東京工業大学大学院理工学研究科材料工学専攻 Department of Metallurgy and Ceramics Science, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

*² Ceramic Technological Institute, BHEL, India

Corresponding author: Kiyoshi Okada, kokada@ceram.titech.ac.jp

ABSTRACT

Porous cordierite ($Mg_2Al_4Si_5O_{18}$) ceramics with oriented through hole pores were prepared by an extrusion method. A paste for the extrusion was prepared by mixing cordierite powder and nylon fibers as pore formers with cellulose binder and water, and extruded by a piston extruder. After drying, the extruded rods ($400 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}^\phi$) were heated at 1250°C for 4 h. The resulting porous ceramics had an apparent porosity of 46.6%, water absorption of 34.9% and bulk density of 1.34 g/cm^3 (relative density of 53.4%). The microstructure shows orientation of cylindrical pores parallel to the extruded direction. The ceramics showed water pump-up ability of about 1 h for 400 mm height (h) by the capillary force. The possible pump-up height estimated from the pump-up rate ($h=61.3t^{0.438}$) is about 900 mm by 8 h and the pump-up height as high as 800 mm was confirmed by stacking of two pieces of ceramics rods. The wet ceramic rod pump-upped water showed 8.7°C lowering of the surface temperature compared with dry ceramics when its surface temperature is 38°C .

キーワード: ヒートアイランド, 揚水能, レンコン型多孔質セラミックス, 蒸発冷却効果

Key Words : Urban heat island, Water pump-up ability, Lotus-type porous ceramics, Evaporation cooling effect

1. はじめに

セラミックス材料の中には、ゼオライト⁽¹⁾のように非常に小さなマイクロ細孔 (国際純正化学・応用化学連合(IUPAC)の定義では $\leq 2 \text{ nm}$ の細孔)⁽²⁾を持ち、触媒や吸着材として幅広く用いられているものから、自動車の排ガス浄化に用いられているハニカムセラミックス⁽³⁾のように mm オーダーの大きな孔を持ったものまで、多様な多孔体があり、広く環境浄化などに利用されている。通常、多孔質のセラミックスは、有機物などの熱分解性の粉末 (造孔材) をセラミックスの粉末に混合し、これを焼成して作製される。このため、有機物の熱分解によって導入される気孔は、セラミックス素地中にランダムに分布している。多孔質セラミックスを触媒、触媒担体、吸着材、フィルター材などとして利用するためには貫通孔の存在が必要である。しかし、それらの機能性を高めるために気孔率を高くすると、材料として重要な機械的な特性が低下する。一般に、両者はト

レードオフの関係であるため、この方法では高機能かつ高強度の多孔体を作製することは困難である。これを実現するためには、多孔体中の気孔の大きさ、形状、分布などを高度に制御する必要がある

そこで、著者らはセラミックス材料の製造に広く利用されている押出成形法を利用して、繊維形状の気孔が一次的に配向して貫通孔を形成した、“レンコン”型多孔質セラミックスの作製について検討してきた。この方法では、セラミックス原料粉末に熱分解性の繊維を造孔材として混合して水、結合剤、分散剤などと混練してペーストを調製し、これをピストンなどで押出成形する際に混合した繊維が一次的に配向する現象を利用している。これまでに、炭素繊維やナイロン繊維を用いてレンコン型組織を有する多孔質アルミナセラミックスが作製できることを報告した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。レンコン型多孔質アルミナセラミックスで得られた特性を通常の方法で作製した多孔質アルミナセラミックスと比較すると、気孔率が約 40%の試料で、曲げ強度は 130 MPa と

2倍以上高く、一方、窒素ガスの透過率は2000倍以上高くなった⁽⁶⁾。組織中での気孔の制御によりこれまで困難であった、高強度と高ガス透過率を両立できたことが分かる。

本多孔体の特長は、径が数〜数10 μm で繊維形状の気孔が一方に配向していることである。この多孔組織は、いわば植物の茎や幹に見られる“道管”と類似している。ヒートアイランドの抑制には地表の緑化が有効なことは広く知られているが、この作用は、根から葉まで水を揚水してそれを水蒸気として蒸散させることによる効果である。揚水作用には道管の毛細管張力が働いている。これらのことから、筆者らが開発したレンコン型多孔質セラミックスはその毛細管張力によりこれまでのセラミックスには乏しかった揚水能（揚水高さと揚水量の両特性）が期待できると考えた。

本論文では、ナイロン繊維を造孔材として混合したコーディエライト($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$)ペーストを調製し、これを押出成形後、焼成して繊維状気孔が一方に配向したレンコン型多孔質セラミックスを作製した。そして、その揚水高さを測定し、併せて蒸発冷却効果について検討した。

2. 実験方法

2.1 試料の作製

炭酸マグネシウム(MgCO_3)、カオリナイト($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)とケイ石(SiO_2)粉末を $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ のコーディエライト組成になるよう調合し、これを固相混合、焼成して調製したコーディエライト粉末(平均粒径5 μm)を出発原料として用いた。この粉末5kgに500gのナイロン繊維(800 $\mu\text{m}\times 14\mu\text{m}^\phi$, 中部パイル工業(株))と250gのセルロースバインダー(LOBA Chemicals, インド)を加えて乾式混合した後、1200mlの水を加えてミキサー混練してペーストを調製した。このペーストをピストン式押出機(AJ Walls, 米国)に入れて5分間真空脱気した後、内径が60mmの口金から押し出し、400mmの長さにワイヤーでカットした。この円筒状成形体を湿度制御した乾燥チャンバー中で3日間乾燥した後、大気中110 $^\circ\text{C}$ で12時間乾燥した。乾燥試料は1 $^\circ\text{C}/\text{min}$ の速度で昇温して1250 $^\circ\text{C}$ で4時間焼成した後、3 $^\circ\text{C}/\text{min}$ の速度で冷却した。なお、昇温時にはセルロースの熱分解及び粘性流動などの焼結現象に伴う急激な収縮変化を避けるため、600 $^\circ\text{C}$ で3時間及び1000 $^\circ\text{C}$ で4時間保持しながら焼成した。

2.2 キャラクターゼーション

作製した試料から20 \times 20 \times 30 mm^3 の大きさの試験体を切り出し、かさ密度、吸水率、相対密度を常法により測定した⁽⁷⁾。組織は走査型電子顕微鏡(SEM; JSM-531, 日本電子(株))を用いて、押出方向に対して垂直面と平行面とを観察した。なお、観察は、試料表面にPt薄膜をスパッターコートし、加速電圧20kVで行った。試料中の気孔径分布は、水銀ポロシメーター(Autopore, Micromeritics, 米国)を用

いて測定した。

2.3 揚水試験

サイホン式自動給水タンクをつけた水槽を用いて液面の高さを一定に保ちながら揚水実験を行った。長さ400mmの試験体の下端部を20mm程度水中に浸し、試験体に水が揚水されて行く様子を所定時間ごとにデジタルカメラで撮影した。なお、測定時の温度は22 $^\circ\text{C}$ 、相対湿度は50 \pm 3%であった。また、この試験体の上に薄く脱脂綿を敷き、その上に長さ400mmの試験体を乗せ、この状態で上に乗せた試験体への揚水挙動を観察した。

2.4 蒸発冷却効果試験

容積約100 m^3 の室内の南に面した窓ガラス際で日射が当たる場所に水を吸水させた試料と乾燥試料とを置き、所定時間ごとにそれぞれの試験体の温度(試料表面から1cmの位置)を0.1 $^\circ\text{C}$ の温度表示のデジタル温度計(DE-20W, Der Ee Electrical Instrument, 台湾)で測定し、それらの温度差から本試料による蒸発冷却効果について調べた。

3. 結果と考察

3.1 試料のキャラクターゼーション

まず、試料の体積と質量から求めたかさ密度は、1.34 g/cm^3 で、開気孔と閉気孔の合計からなる見かけの気孔率は46.6%(相対密度=53.4%)となった。一方、水を溶媒として求めた吸水率は34.9%であったことから、本試料の開気孔率は34.9%、閉気孔率は11.7%となる。これまでオーガ

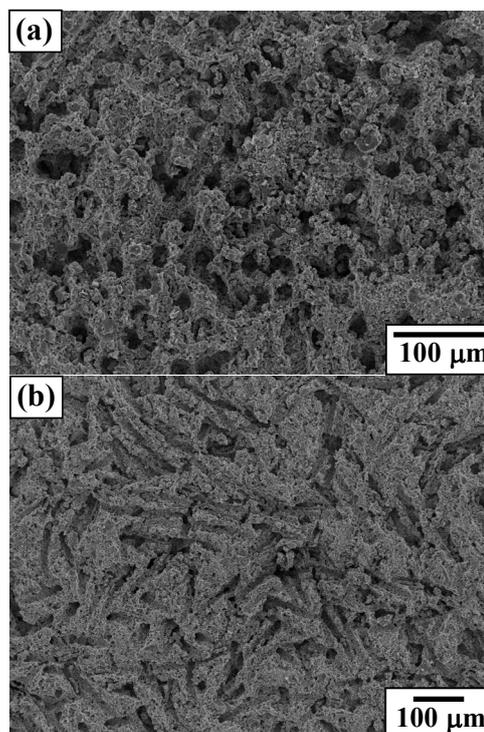


図1 押出方向に垂直(a)及び平行面(b)の組織。

一型（スクリー式）の押出成形機を用いて作製したロータス型多孔質アルミナセラミックス⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾では、造孔材の繊維により形成される気孔はその高い配向状態によりほとんど貫通して開気孔となったのと比べて、本試料では閉気孔率がそれよりも大幅に高い。ピストン型押出機は、スクリー式のオーガー型よりも配向効果が低いことが関係しているものと考えられる。

図 1 に試料の押出方向に対して垂直(a)及び平行な面(b)の SEM 写真を示す。図 1(a)の垂直面の組織には、繊維断面に対応する 10 μm 程度の大きさの丸い孔が多数観察される。このことから、混合した繊維は押出方向に配向していることが分かった。一方、平行面の図 1(b)を観察すると、確かに繊維が観察面に平行に分布していることがその気孔形状から分かるが、一方向への配向の程度はあまり高くない。そのため、本試料では閉気孔率が高くなったと解釈できることが分かった。

図 2 に水銀ポロシメーターで測定した気孔径分布を示す。累積曲線のデータから、全細孔容積は 0.4 ml/g であることが分かる。一方、微分曲線には繊維径に相当する 10 μm 付近に鋭いピークが観察された。このピークは過去の結果

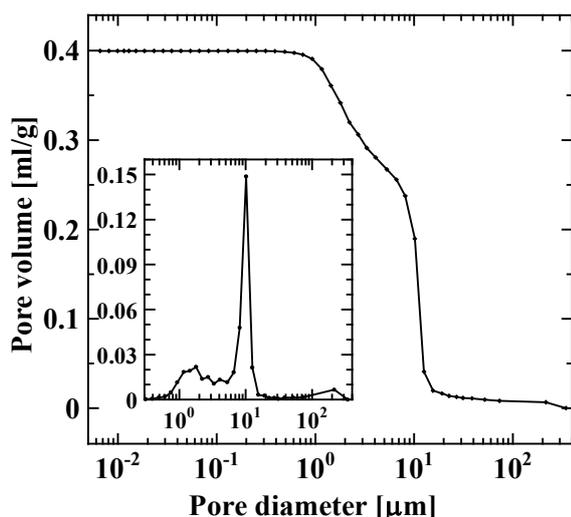


図 2 試料の気孔径分布（水銀圧入法）。

⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾から考えて繊維同士が接触して形成された“連結径”に対応する。連結径は、原料粉末／繊維径が小さくなると小さくなり、その比が大きくなると大きくなる関係⁽⁶⁾にある。本試料では比較的粒径の大きな原料粉末を使っているため、その連結径は繊維径とほぼ同じ大きさになったものと考えられる。

3.2 試料の揚水能

Kelvin 式⁽⁸⁾から毛細管張力による揚水高さ (h) は式(1)で与えられる。

$$h = 2\gamma \cos\theta / (g \cdot \rho r) \quad (1)$$

ここで、 γ は水の表面張力 (0.073 N/m)、 θ は水と気孔壁と

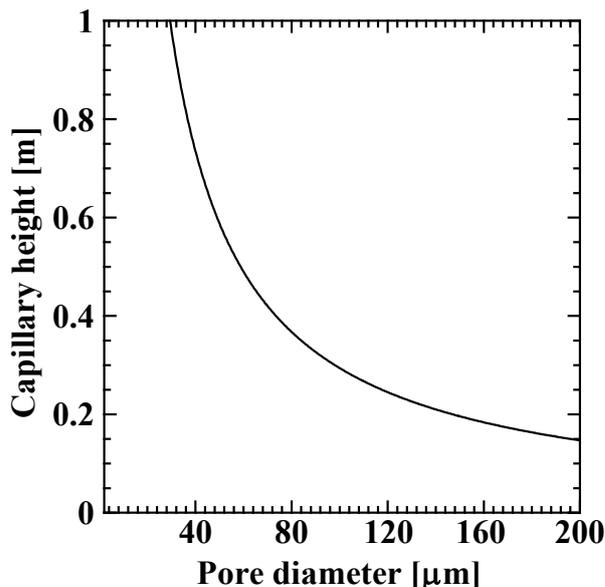


図 3 気孔径と毛細管張力による揚水高さの関係。

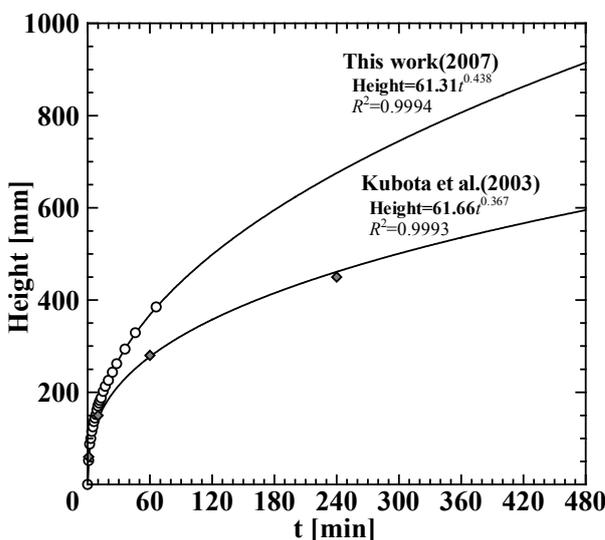


図 4 本試料及び久保田ら⁽⁹⁾の揚水高さとの関係。

の接触角（酸化物セラミックスではほぼ 0° と近似できる）、 g は重力の加速度 (9.8 m/s^2)、 ρ は水の密度 ($1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)、 r は気孔の半径である。そこで揚水高さ (h) と気孔径 ($2r$) との関係を求め、図 3 に示す。毛細管張力だけを考えた単純な条件では、本試料のように 10 μm の大きさの毛細管を気孔として有する場合には、揚水高さは約 3 m となる。しかし実際には、さまざまな抵抗力が働くと思われるため、このような揚水高さが実現できるか否かは実測してみないと分からない。

図 4 に本試料及び久保田ら⁽⁹⁾によって報告されている揚水高さとその時間依存性のグラフを示す。ここで、久保田らの用いた試料は、連続気孔を有する“おこし”状の組織をした多孔質ボード ($450 \times 450 \times 30 \text{ mm}^3$) で、かさ密度が 1.05 g/cm^3 、見掛け密度が 53.1%、吸水率が 47%である。ただし、気孔径のデータは報告されていない。グラフの比較から明らかなように、本試料の方が吸水率は 10%以上低いものにも

かかわらず、最初の数分以降は顕著な揚水スピードの違いが認められた。これらのデータは $h=at^b$ (t : 時間 (min)) の式で近似でき、図4のように良いフィッティング結果が得られた。そこで、これらの実験式から図に示すように8時間後の揚水高さを見積もると、久保田らの試料が約600mmであるのに対して、本試料では900mmとなり、有為に揚水能が優れていることが分かった。これは、繊維形状の気孔を配向させたことによる効果といえる。

現時点では、装置上の制限から400mmの長さの試料しか作製できないため、直接上記の推定揚水高さを確認することはできない。そこで、400mmの長さの試料にもう一つ同じ長さの試料を積み上げて揚水挙動を調べた。その結果、継ぎ目のところで揚水に少し時間を要するが、2本目の上端部分まで自力で揚水することが確かめられた。このことから、図4で推定された揚水高さに見合う揚水高さが実現できることが分かった。

3.3 蒸発冷却効果

吸水させていない乾燥試料の温度を乾燥試料温度 (Dry ceramics temp., T_D)、揚水能を利用して自律吸水させた400mmの試料の温度を吸水試料温度 (Wet ceramics temp., T_W)、日射の当たらない室内の温度を室温 (Room temp., T_R) として測定した結果を吸水試料温度と乾燥試料温度の温度差と併せて図5に示す。室温が日中で26°C程度の時に、日射があると乾燥試料温度は最高で約38°Cまで上昇した。このように乾燥試料温度が高いときでも、吸水試料温度は30°Cを下まわり、期待通りに蒸発冷却の効果があることが分かった。

各温度差、($T_W - T_D$)、($T_D - T_R$)、($T_W - T_R$)と乾燥試料温度 (T_D) との関係を図6に示す。乾燥試料温度が20°Cでは冷却効果は約1.4°Cしかないが、25→35°Cと乾燥試料温度が高くなるに従い、吸水試料温度との差は大きくなり、本測定において最高温度であった38°Cでは8.7°Cの冷却効果となる。真夏にはさらに乾燥試料温度が上昇すると予想されるが、これに見合う吸水量が可能であると仮定すれば、10°C以上の冷却効果が期待できる。この冷却効果は屋上緑化⁽¹⁰⁾や壁面緑化⁽¹¹⁾で報告されている場合と同程度である。本試料の場合、地中に貯水槽などを設置すれば、通常必要なポンプなどによる給水の必要が無く、維持管理も容易で省エネ効果も大きい。

以上の結果から、本材料はヒートアイランド対策に資することのできる有効な新機能性材料として期待できる。

4. まとめ

レンコン型多孔質組織を有するコーディエライト ($Mg_2Al_4Si_5O_{18}$) セラミックスをナイロン繊維を造孔材とした押出法により作製した。得られたセラミックスは、見かけ気孔率が46.6%で開気孔率が34.9%、閉気孔率は11.7%であった。造孔材によって焼成後のセラミックスに形成され

た気孔は押出方向にかなりの程度配向した組織を示した。

このセラミックスの揚水スピードを測定したところ、400mmの高さまで約1時間で揚水でき、8時間後には約900mm

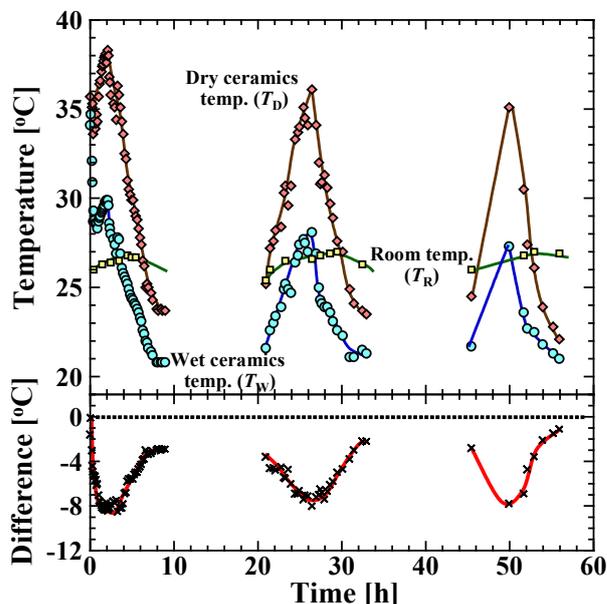


図5 乾燥試料温度(T_D)、吸水試料温度(T_W)、室温及び両温度差($T_W - T_D$)。

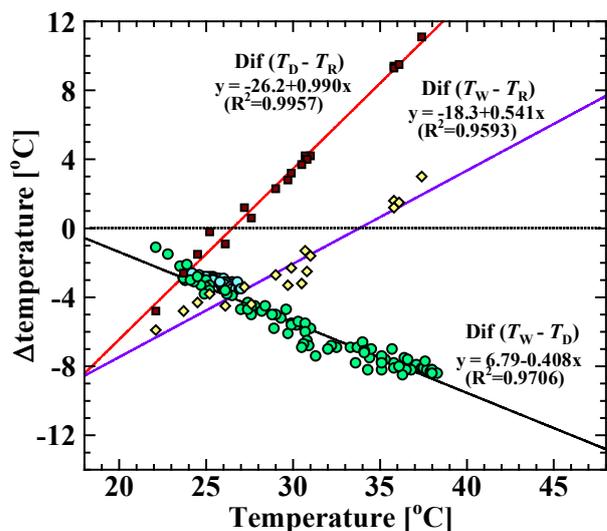


図6 乾燥試料及び吸水試料と室温との温度差と乾燥試料温度との関係。

までの揚水高さに達するものと見積もられた。また、実際に400mmの試料を2つ積み重ねて少なくとも800mmの高さまで揚水可能なことを確かめた。

その蒸発冷却効果を測定したところ、日射温度が38°Cで8.7°Cの冷却効果を実証され、屋上や壁面などの緑化で見られる冷却効果と遜色のないことが分かった。本材料は、材料自身が有する自律的な揚水能によりポンプなどの給水設備を必要としないことから、省エネかつ維持管理が容易なヒートアイランド対策材料として有望であると考えられた。

5. 参考文献

- (1) 小野嘉夫・八嶋建明, セオライトの科学と工学(2000), 講談社サイエンティフィク.
- (2) K.S.W.Sing, D.H.Everett, R.A.W.Haul, L.Moscou, R.A. Pierotti, J.Rouquerol and T.Siemieniewska, Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity, *Pure Appl. Chem.* 57-4 (1985), pp.603-619.
- (3) 齋藤肇(監), ファインセラミックスの活用, 上巻(1986), 大河出版.
- (4) T.Isobe, T.Tomita, Y.Kameshima, A.Nakajima and K.Okada, Preparation and Properties of Porous Alumina Ceramics with Oriented Cylindrical Pores Produced by an Extrusion Method, *J. Europ. Ceram. Soc.* 26-6 (2006), pp.957-960.
- (5) T.Isobe, T.Tomita, Y.Kameshima, A.Nakajima, K.Okada and Y.Hotta, Extrusion Method Using Nylon 66 Fibers for the Preparation of Porous Alumina Ceramics with Oriented Pores, *J. Europ. Ceram. Soc.* 26-13 (2006), pp.2213-2217.
- (6) T.Isobe, T.Tomita, Y.Kameshima, A.Nakajima, K.Okada and Y.Hotta, Gas Permeability of the Porous Alumina Ceramics with Uni-directionally Aligned Pores by Extrusion Method, *J. Europ. Ceram. Soc.* 27-1 (2007), pp.53-59.
- (7) 日本セラミックス協会(編), セラミックスのキャラクター化技術(1987), 日本セラミックス協会.
- (8) 日本化学会(編), コロイド科学, 1(1995), 東京化学同人.
- (9) 久保田孝幸・杉本英夫・小宮英孝, 揚水性セラミックボードによる多機能緑化壁システムの研究開発, 大林組技術研究所報告, 67 (2003), pp.1-6.
- (10) 橋本幸博, 屋上緑化の熱的評価に関する研究(第1報), 空気調和・衛生工学会論文集, 120-3 (2007), pp.33-40.
- (11) 鈴木弘孝・三坂育正・田代順孝, 蒸発散量の計測によるパネル型緑化の温熱環境改善効果, 日本緑化工学会誌, 32-1 (2006), pp.80-85.

(Received July 2, 2007, Accepted August 1, 2007)