バイオフィルター用テーラーメイド細孔構造を有する 窒化ケイ素多孔体の開発 V. 微生物コンソーシアム形成の確認*

植 田 亘¹ 太 田 能 生² 北 山 幹 人²

Development of Porous Silicon Nitride with Tailor-made Pore Structure for Bio-Filter: V. Verification of the microbe consortium formation

by Wataru UETA^a, Yoshio OHTA^a and Mikito KITAYAMA^{a*}

a. Department of Life, Environment and Materials Science, Fukuoka Institute of Technology,
Fukuoka, 811-0295 Japan (*Corresponding author, E-mail: kitayama@fit.ac.jp)

In order to develop the “Bio-filter”, silicon nitride porous bodies with micro-macro complex pore structure were fabricated using the tape casting process. Using *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus casei* as the aerobic and anaerobic model microbes, aqueous solutions containing these microbes were passed through the porous bodies for 72 hrs. Then, the aqueous solution of 1% glucose saturated with oxygen in air was passed through them. It was confirmed that both microbes were simultaneously fixed on the surface of the macro-pores with the formation of the bio-film, suggesting the successful formation of the microbe consortium. In the case that only *Saccharomyces cerevisiae* was fixed on the surface of the macro-pores, the formation of the bio-film was hardly observed. In contrast, when only *Lactobacillus casei* was used, the network structure of the bio-film was observed inside the micro-pores between the macro pores. The pH values and the kinds and concentrations of the products contained in the effluents were different for these three cases. It was found that the concentration of lactic acid was much larger in the case that two microbes were simultaneously fixed than in the case that only *Lactobacillus casei* was fixed, suggesting the successful formation of the anaerobic condition through the oxygen consumption by the aerobic metabolism of *Saccharomyces cerevisiae*.

KEY WORDS: Silicon Nitride, Porous Body, Bio-Filter, Complex Pore Structure, Microbe Consortium

1. 緒 言

生物膜による水処理，特に，多孔質濾材を生物膜の担体とする生物膜濾過装置（以下，バイオフィルターと称する）は，有機性排水を浄化する処理技術として活性汚泥法と共に古くから用いられている¹⁾。多孔質濾材として無機材料が使用された例としては，コーゼライトハニカムセラミックスを用いたバイオリアクターによる醸造食品の製造例²⁾や，ガラスセラミック多孔体を用いたバイオフィルターによって有害重金属含有排水を処理した例³⁾が報告されている。微生物と同程度の大きさ（サブミクロン～数ミクロン）の細孔構造（以下，マイクロ細孔と呼ぶ）を有する多孔質担体には，微生物がよく生育することが知られている。マイクロ細孔から成る多孔質担体中に，Fig. 1に示すように，数十～数百ミクロン程度の間隔で処理水が通過する直径数十～数百ミクロンの細孔（以下，マクロ細孔と呼ぶ）を設ければ，処理水に直接ふれるマクロ細孔表面には処理水中の栄養分を好氣的に分解す

る好気性微生物層が形成され，マクロ細孔間のマイクロ細孔には酸素が供給され難いため嫌気性微生物層が形成されることが期待される。好気性微生物と嫌気性微生物は，お互いに栄養分や酵素を補完しあう共同体（コンソーシアム）を形成し，単独の場合に比べ遥かに大きな分解効率を示す可能性があり，通常の微生物による水処理では浄化することが難しいトリクロロエチレン，ポリ塩化ビフェニル（PCB），ダイオキシン等の有害有機物質含有排水処理や，高濃度の有機物質を含む排水の効率的な処理が期待される。さらに，微生物は，しばしば，他の微生物の増殖や機能を阻害する物質である抗生物質を産生するため，通常の自然界には存在しない「好気性－嫌気性微生物コンソーシアム」は，単独の微生物では生産することのできなかった有用物質の生産もターゲットとしている。

窒化ケイ素焼結体は，その原料粉末である α -Si₃N₄ が液相焼結中に相転移し， β -Si₃N₄ の針状結晶が絡み合った微細組織を発達させるため，強度，靱性，耐熱衝撃性，耐摩耗性に優れた材料として知られている⁴⁾。また，窒化ケイ素焼結体は，構成する2つの相，すなわち，窒化ケイ素結晶相とオキシナイトライドガラス粒界相が共に化学的に極めて安定であるため⁵⁻⁷⁾，耐熱性，耐腐食性の面でも優れた材料であり，窒化ケイ素多孔体は，現在，高温の排ガスフィルター⁸⁾や精密（限外）ろ過フィルター⁹⁾等へ応用され始めている。本研究が目的としているバイオフィルター

*2014年1月17日受付 2014年4月4日受理

1. 福岡工業大学大学院生

2. 正会員 福岡工業大学大学院工学研究科 生命環境科学専攻 教授

[著者連絡先] FAX: 092-606-0728

E-mail: kitayama@fit.ac.jp

キーワード：窒化ケイ素，多孔体，バイオフィルター，複合細孔構造，微生物コンソーシアム

Fig. 1 Schematics demonstrating the concept of "Bio-filter".

には Fig. 1 に示すような直径数十～数百ミクロンのマクロ細孔を導入する必要があるため、破壊靱性の小さなガラスやアルミナ等の一般的なセラミックス材料を用いた場合、著しく強度が低化することが予想される。以上の理由から、破壊靱性の大きな窒化ケイ素は、本研究が目的とするバイオフィルター用多孔体に最適な材料であると思われる。

著者等によるこれまでの研究により、マイクロマクロ複合細孔構造を有する窒化ケイ素多孔体を作製する技術が開発され^{10, 11)}、用いる微生物に対して細孔径を最適化する (=Tailor-made) 手法も見出された¹²⁾。さらに、既報¹³⁾では、酵母菌と乳酸菌をそれぞれ好気性と嫌気性のモデル微生物として用い、窒化ケイ素多孔体のバイオコンパティビリティが評価された。その結果、バイオフィルムが多孔体表面に形成された場合にのみ、多くの微生物が多孔体表面に固定されることが確認された。バイオフィルムの形成は、酵母菌と乳酸菌による微生物コンソーシアムの発現を示唆している。

以上、一連の研究によって、Fig. 1 にコンセプトを示す「バイオフィルター」の研究を実施する準備が整った。本報告は、開発されたマイクロマクロ複合細孔構造を有する窒化ケイ素多孔体を用い、既報¹³⁾と同様、酵母菌と乳酸菌をそれぞれ好気性と嫌気性のモデル微生物として用い、「好気性-嫌気性微生物コンソーシアム」の発現を確認することを研究の目的とする。

2. 実験

マイクロマクロ複合細孔構造を有する窒化ケイ素多孔体試料は、既報¹²⁾に準じて作製した。本検討で使用する多孔体の焼成条件は、3・1において後述する理由から、1850℃・8 h を選択した。

微生物を扱うすべての作業はクリーンベンチ内で実施し、すべての実験器具と水溶液は、オートクレーブ中 121℃ で 20 分間滅菌処理した。YM 液体培地¹⁴⁾に酵母菌 (*Saccharomyces cerevisiae*) を植菌し、30℃ で 3 日間振とう培養することにより、酵母菌の懸濁溶液を作製した。また、GYP 培地¹⁵⁾に乳酸菌 (*Lactobacillus casei*) を植菌し、30℃ で 3 日間静置培養することにより、乳酸菌懸濁溶液を作製した。

作製された窒化ケイ素多孔体試料を 15x25x5 mm の大きさに切削加工し、滅菌処理した後、Fig. 2 に示す担体試料ホルダー内にマクロ細孔が流束に平行になるように固定した。Fig. 3 に概略を示す実験装置を 30℃ の恒温槽内に設置後、作製した微生物懸濁

Fig. 2 Schematics showing the holder structure of the Si₃N₄ porous body with micro-macro complex pore structure. The direction of macro pore is parallel to the liquid flow.

Fig. 3 Schematics showing the experimental set-up for 1) fixing the microbes in the Si₃N₄ porous body by circulating the liquid culture medium through the macro pores (using N₂ gas in this case), and 2) sampling the effluent from the 'Bio-filter' by passing the 1% glucose aqueous solution saturated with oxygen through the macro pores (using air in this case).

溶液を蒸留水で 20 倍希釈し、それぞれ単独で、あるいは混合して、担体試料ホルダー内に 0.1 ml/min の流速で 3 日間通液することにより、3 種類の微生物担持処理、すなわち、a) 酵母菌のみ担持、b) 乳酸菌のみ担持、c) 酵母菌と乳酸菌を同時に担持、のそれぞれを別個の窒化ケイ素多孔体試料に対して施した。

それぞれの微生物担持処理に続いて、0.45 μm メンブレンフィルターで濾過した空気を 2 ml/min の流速で連続してバブリングすることにより酸素を飽和させた 1% のグルコース水溶液 (pH 6.9) を、0.1 mL/min の流速で担体試料ホルダーに計 36 時間通液した。グルコース水溶液通液開始後、2, 4, 8, 16, 32 時間後に担体試料ホルダーからの流出液をサンプリングし、pH 測定を行った後、15000 rpm・5min 遠心分離し、上澄みを 0.45 μm メンブレンフィルターに通過させ、高速液体クロマトグラフィー (HPLC : 島津製作所社製 LC-10AD) による代謝物の分析を実施した。HPLC による成分分析は、Shodex Asahipak NH2P-504E パックドカラム (昭和電工社製) を用い、20 mmol/L リン酸ナトリウム緩衝液 (pH 2.5) を溶離液とし、温度 35℃、流速 1.0 mL/min の条件下、UV (210 nm) 検出器で実施した。流出液中の酢酸と乳酸の濃度は、試料溶液 500 μL に対して 0.1 mol/% に調製した乳酸と酢酸の水溶液を 10 μL ずつ添加する標準添加法によって決定した。

Fig.4 SEM photographs of *Saccharomyces cerevisiae* fixed on the surfaces of macro pores in the Si_3N_4 porous body with micro-macro complex pore structure.

Fig.5 SEM photographs of *Lactobacillus casei* fixed on the surfaces of macro pores in the Si_3N_4 porous body with micro-macro complex pore structure. Note the formation of the bio-film.

上記の実験終了後、担体試料ホルダー内に 0.1 mol/L リン酸緩衝液 (pH 7.0) を 0.5 mL/min の流速で 1 時間通液した。次に、担体試料ホルダーから窒化ケイ素多孔体試料を取り出し、4℃の 25% グルタルアルデヒド水溶液に 2 時間浸漬することにより、微生物の固定化処理を行った。0.1 mol/L リン酸緩衝液 (pH 7) 中、多孔体試料を軽く揺すって洗浄する作業を 3 回繰り返して行った後、50, 70, 90, 99.5% のエタノール水溶液に順次 10 分間ずつ浸漬した後、デシケーター中 1 晩減圧乾燥を行った。乾燥後、多孔体試料をマクロ細孔に沿って平行に、或いは、垂直に破壊し、破断面を金コーティングした後、走査型電子顕微鏡 (SEM: キーエンス社製 VE-7800) を用いて、担持された微生物の観察を行った。

3. 結果と考察

3・1 窒化ケイ素多孔体のマイクロ細孔の設計

本研究の目的であるバイオフィルター、すなわち、好気性-嫌気性微生物コンソーシアムを担持した複合細孔構造を有する窒化ケイ素多孔体は、Fig. 1 に示すように、マクロ細孔表面に存在する好気性微生物が酸素を消費することによってマクロ細孔間のマイクロ細孔内に嫌気性雰囲気を作成することを特徴とするため、好気性微生物がマクロ細孔表面近傍に優先的に担持され、嫌気性微生物がマイクロ細孔内に担持されなければならない。これを達成する最も容易な手段は、異なるサイズの微生物をマイクロ細孔によって篩分けすることである。今回、酵母菌 (*Saccharomyces cerevisiae*) と乳酸菌 (*Lactobacillus casei*) を、それぞれ、好気性と嫌気性のモデル微生物として用いた理由は、どちらも自然界に極めて一般的に存在する微生物であることもさることながら、酵母菌は平均で 5 μm 前後の球状の形態を有するのに対し、乳酸菌は太さが 0.5 μm 前後で長さが 2 μm 前後の桿状の形態を有しているため、適切なマイクロ細孔径の担体を準備すれば、微生物サイズの大きな違いによって篩分けが可能になることである。既報¹²⁾に示したように、 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 種結晶の添加によってオストワルド成長が促進される結果、窒化ケイ素多孔体のマイクロ細孔径を焼成時間によって制御することが可能になった。今回の研究を実施するに当たって、既報¹²⁾に掲載された 1850℃ -4h, 8h, 及び、16h

の条件で焼成した多孔体の SEM 写真と細孔径分布を、再度、詳細に検討した。種結晶を添加し 1850℃ -16h の条件で焼成した多孔体の平均細孔径は約 0.9 μm であるため上記の篩分けが可能と考えられるが、その SEM 写真には 5 μm を超える大きさの細孔が多数観察されるため、酵母菌がマイクロ細孔内にまで侵入することが予想される。これに対して、1850℃ -8h の条件で焼成した多孔体の平均細孔径は 0.7 ~ 0.8 μm であり、その SEM 写真には 5 μm を超える大きさの細孔はほとんど観察されないため、酵母菌がマイクロ細孔内に侵入することは難しいと思われる。一方、1850℃ -4h の条件で焼成した多孔体の平均細孔径のピークは 0.4 ~ 0.5 μm にあり、SEM 写真からも直径約 0.5 μm で長さが約 2 μm の桿菌である乳酸菌がマイクロ細孔内に侵入することは、難しいと判断される。以上の理由から、今回の実験においては、1850℃ -8h の条件で焼成した多孔体を用いることにした。

3・2 窒化ケイ素多孔体担体への微生物の担持

a) 酵母菌のみを担持した場合 Fig. 4 (a), (b) に示す SEM 画像は、酵母菌のみを担持した窒化ケイ素多孔体担体のマクロ細孔表面において微生物が担持されている様子を現す代表視野である。既報¹³⁾において報告されたようなバイオフィルムの形成は観察されず、結果として、多孔体表面に観察された酵母菌の数は極めて少なかった。図に示すように、観察された酵母菌のほとんどは、マイクロ細孔間に挟まったものであった。本観察結果は、酵母菌だけではバイオフィルムが形成されないため、酵母菌は多孔体に固定され難いことを示唆している。

b) 乳酸菌のみ担持した場合 Fig. 5 (a) ~ (c) に示す SEM 画像は、乳酸菌のみを担持した窒化ケイ素多孔体担体のマクロ細孔表面において微生物が担持されている様子を現す代表視野である。また、Fig. 6 (a) ~ (c) に示す SEM 画像は、マクロ細孔間の破断面の代表視野である。Fig. 5 より、マクロ細孔表面に存在するマイクロ細孔は、乳酸菌とフィルム状物質によってほぼ埋め尽くされている様子が観察できる。また、Fig. 6 (a) の低倍率画像は、数十 μm スケールのネットワーク構造の存在を示している。Fig. 6 (b), (c) の高倍率画像は、このネットワーク構造が上記と同様な乳酸菌とフィルム状物質によって構成されていることを示している。

Fig.6 SEM photographs of *Lactobacillus casei* fixed in the micro pores between the macro pores. Note the formation of network structure composed of the EPS and microbes.

Fig.7 SEM photographs of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus casei* fixed on the surfaces of macro pores in the Si_3N_4 porous body with micro-macro complex pore structure. Note the formation of the bio-film.

Fig.8 SEM photographs of the fracture surface of the Si_3N_4 porous body with micro-macro complex pore structure. Note the EPS formation around the surface of the macro pores.

今回実験に用いた乳酸菌である *Lactobacillus* 属は通性嫌気性微生物であるが、同じ乳酸菌であるビフィズス菌 *Bifidobacterium* 属等の偏性嫌気性微生物と異なり、好気性雰囲気下でも死滅することはない。しかしながら、多孔体のマクロ細孔に供給されるグルコース水溶液は酸素で飽和されているため、直接溶液に曝されるマクロ細孔表面では生育することができない。今回観察されたフィルム状物質＝バイオフィームによって、マクロ細孔の内側に存在する乳酸菌は直接溶存酸素に曝されることなく増殖していると考えられる。しかしながら、マイクロ細孔にも僅かながら酸素飽和グルコース水溶液は浸透する¹³⁾。よって、本実験結果は、バイオフィームが溶存酸素濃度を乳酸菌が生育可能なレベルまで低下させる働きを有することも示唆している。マクロ細孔表面で溶存酸素に曝された乳酸菌は、自らを守るために EPS を生成し、バイオフィームを形成する。バイオフィームの内側に存在する乳酸菌は生育可能となるため、その周りにバイオフィームの壁を形成しながらコロニーを形成する。これが、今回観察されたネットワーク構造形成のメカニズムと推測されるが、形成の時間変化を追跡する等、今後の詳細な検討を待つ。

c) 酵母菌と乳酸菌を同時に担持した場合 Fig. 7 (a), (b) に示す SEM 画像は、酵母菌と乳酸菌を同時に担持した窒化ケイ素多孔体担体のマクロ細孔表面において微生物が担持されている状況を現す代表視野である。また、Fig. 8 (a) ~ (c) に示す SEM 画像

は、マクロ細孔間の破断面の代表視野である。既報¹³⁾と同様、バイオフィームが形成されており、酵母菌のみを担持した場合に比べて遥かに多くの酵母菌が乳酸菌と共に担持されている様子が観察される。Fig. 8 (a) に示す破断面の低倍率画像は、Fig. 6 (a) に示す低倍率画像において観察されたような数十 μm スケールのネットワーク構造を示していないが、それに代って、マクロ細孔を取り囲むように 10 μm 前後の気孔の存在しない領域が形成されていることが分かる。この領域は、担体表面を覆っているバイオフィームと同様に、微生物集団と微生物が生産する EPS (Extracellular polymeric substance) からなる 3 次元構造体と考えられ、内部では複数の微生物による共同体 (コンソーシアム) が形成されており、種々の微生物が高密度で棲息して代謝物やエネルギーのやり取り、情報交換を含むさまざまな微生物間相互作用が営まれていることが報告されている¹⁶⁾。本実験ではマクロ細孔を取り囲む EPS に酵母菌が存在するため、グルコース水溶液中の酸素は酵母菌の呼吸によって消費される結果、その周囲が嫌気性雰囲気になっていることが期待される。

3・3 バイオフィルター流出液の分析結果 Fig. 9 は、3 種類の微生物担持処理、すなわち、a) 酵母菌のみ担持 (only *Saccharomyces*)、b) 乳酸菌のみ担持 (only *Lactobacillus*)、c) 酵母菌と乳酸菌を同時に担持 (*Saccharomyces* and *Lactobacillus*)、それぞれを施した窒化ケイ素多孔体担体 (バイオフィルター) を封入し

Fig.9 Time dependence of the effluent pH sampled from the bio-filter fixing a) only *Saccharomyces cerevisiae*, b) only *Lactobacillus casei*, and c) *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus casei*.

た試料ホルダー内に酸素飽和 1% グルコース水溶液を導入し、担体からの流出液の pH 時間変化を示す。10 時間を過ぎると、いずれの場合もほぼ一定の pH 値になっているが、その値はすべて異なることから、溶出液の成分がそれぞれ異なることが予想される。

Fig. 10 は、上記 a) ~ c) の流出液 (4 時間後) を HPLC を用いて分析したクロマトグラムを示す (それぞれのクロマトグラム上に、(a), (b), (c) と示してある。また、酢酸と乳酸のピークは、矢印で示してある)。酵母菌の代謝物の一つに酢酸がある¹⁷⁾。3・2 で述べたように、担体に対する酵母菌 (*Saccharomyces cerevisiae*) の担持量は少ないため、(a) のクロマトグラムで観察される溶出ピークは非常に小さいが、酢酸が生産されていることが標準添加法によって確認された。一方、乳酸菌 (*Lactobacillus casei*) はホモ乳酸菌であり、グルコースの代謝物としては乳酸しか生成しない

(ヘテロ乳酸菌は、酢酸など他の有機酸も生成する)。(b) のクロマトグラムで観察される溶出ピークは、主な代謝物が乳酸であることが標準添加法によって確認された。(c) のクロマトグラムに現れている酢酸と乳酸のピークは、単独の場合に比べて遥かに大きい。酢酸のピークが単独の場合より大きいことは、バイオフィルムの形成によって酵母菌の担持量が極めて多くなっていることにより説明される。しかしながら、乳酸菌のみを担持した場合は、バイオフィルムの形成によって極めて多くの乳酸菌が担持されているにも関わらず、乳酸菌と酵母菌を同時に担持した場合の方が乳酸のピークが単独の場合より大きくなっている。既に述べたように、10 μm 前後の EPS 層がマクロ細孔を取り囲むように形成されており、この層で酵母菌が酸素を消費することで、マクロ細孔間のマイクロ細孔が嫌気性雰囲気になっているからではないかと推測される。さらに注目すべき事は、(c) のクロマトグラムには、(a) と (b) のクロマトグラムにはない遥かに多くのピークが現れていることである。このことは、単独の微生物から生成する代謝物に比べ、微生物コンソーシアムから多くの異なる代謝物が生成していることを、更には、緒言で述べたように、バイオフィルターがターゲットとしている「単独の微生物では生産することのできない有用物質の生産」の可能性を示唆している。本実験で用いられた HPLC 分析法では、一般に、pKa の高い有機酸から順に溶出してくることが分かっているため、乳酸と酢酸のピークの前に現れている 2 つのピークはクエン酸とピルビン酸、後に現れている 2 つのピークはレブリン酸とプロピオン酸、また、これらの後に出てくるブロードなピークは (a) ~ (c) 共通に出ていたのでグルコースと推測される。グルコースと思われるピークの後にさらに幾つかの未知の成分のピークが (c) のクロマトグラムに観察されることは注目すべきことであるが、酢酸と乳酸以外の成分の標準添加法による同定は未実施のため、今後の検討を待つ。

Table 1 は、HPLC 標準添加法によって決定した a) ~ c) の流出液 (4 時間後) 中の酢酸と乳酸の濃度を示す。酢酸と乳酸の pKa は、

Fig.10 HPLC chromatograms of the effluent sampled from the bio-filter fixing a) only *Saccharomyces cerevisiae*, b) only *Lactobacillus casei*, and c) *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus casei*.

Table 1 Acetic and lactic acid Concentrations of effluents from the β -Si₃N₄ porous bodies with micro-macro complex pore structure fixing a) *Saccharomyces cerevisiae*, b) *Lactobacillus casei* and c) the microbe consortium containing two microbes shown in a) and b) .

Fixed microbe(s)	Acetic acid Concentration	Lactic acid Concentration
	(mol/L)	(mol/L)
a) <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	1.20x10 ⁻³	0
b) <i>Lactobacillus casei</i>	0	9.50x10 ⁻³
c) microbe consortium	6.80x10 ⁻³	2.49x10 ⁻²

それぞれ、4.76 と 3.86 であり、a) と b) の各濃度から予想される pH は、存在する有機酸が酢酸と乳酸のみと仮定して、それぞれ、3.84 と 2.94 である。Fig. 10 に示すように、実際の pH はこれらの値より高いが、アミノ酸等の緩衝作用を有する他の成分が存在するためと思われる。注目すべきことは、c) の溶出液中の酢酸と乳酸の濃度は、a) と b) の濃度に比べて遥かに大きいにも関わらず、その pH は a) と b) の値より高いということである。この結果は、上記で述べた、微生物コンソーシアムから酢酸と乳酸以外の代謝物が生成していることを支持している。

4. 結 論

酵母菌と乳酸菌をそれぞれ好気性と嫌気性のモデル微生物として用い、開発されたマイクロマクロ複合細孔構造を有する窒化ケイ素多孔体担体に、それぞれの微生物を単独で、或いは混合して担持し、酸素飽和グルコース水溶液を通液した。酵母菌単独では、バイオフィームは形成されず、結果として担持された微生物の量は極めて少なかった。これに対して、乳酸菌単独では、バイオフィームが形成され、マクロ細孔表面のみならず、マクロ細孔間のマイクロ細孔内にも微生物と EPS から成るネットワーク構造を形成した。酵母菌と乳酸菌を同時に担持した場合もバイオフィームが形成され、酵母菌と乳酸菌の微生物コンソーシアムが発現した。乳酸生成量の増加は、マクロ細孔を取り囲むように EPS が形成された結果、マクロ細孔間のマイクロ細孔内が嫌気性雰囲気になっていることを示唆する。さらに、微生物コンソーシアムからは、単独の場合には観察されなかった多くの代謝物の生成が確認され、このことは、バイオフィルターがターゲットとしている

「好気性-嫌気性微生物コンソーシアム」からの「単独の微生物では生産することのできない有用物質の生産」の可能性を示唆している。

謝辞 本研究は、文部科学省ハイテクリサーチセンター整備事業（平成 17 年度～平成 21 年度）による私学助成を得て行われた。微生物担持実験を担当した井上 翔麻君、泰良 和樹君、新川 太一君等の協力を深く感謝する。

References

- 1) Encyclopedia of Environmental Technology and Equipment, (SANGYO CHOSAKAI, Tokyo, 2003) , pp.117-125.
- 2) H. Horitsu: Ceramics, **24** (1989) , 628-632.
- 3) A. M. Garcia, D. A. Moreno and C. Ranninger: Am. Ceram. Soc. Bull., **83** (2004) , 18-21.
- 4) G. Ziegler, J. Heinrich and G. Wötting: J. Mater. Sci., **22** (1987) , 3041-3086.
- 5) F. L. Riley: J. Am. Ceram. Soc., **83** (2000) 245-262.
- 6) G. H. Frischat and K. Sebastian: J. Am. Ceram. Soc., **68** (1985) , C-305-307.
- 7) B. Steffestun and G. H. Frischat: J. Am. Ceram. Soc., **76** (1993) , 699-704.
- 8) I. Hayashi, N. Shinohara, T. Watanabe, H. Takahashi: Research Report of Asahi Glass, **56** (2006) , 25-27.
- 9) J.-J. Park: Chemical Engineering, **69** (2005) , 444-446.
- 10) T. Anan, M. Kitayama and Y. Ohta: Journal of MMIJ, **124** (2008) , 245-248 .
- 11) T. Matsuoka, R. Shiraishi, Y. Ohta and M. Kitayama: J. MMIJ, **125** (2009) , 502-506.
- 12) R. Shiraishi, Y. Ohta and M. Kitayama: Journal of MMIJ, **128** (2012) , 173-177.
- 13) W. Ueta, Y. Ohta and M. Kitayama: Journal of MMIJ, **129** (2013) , 165-170.
- 14) L. J. Wickerham: U.S. Dept. Agric. Tech. Bull., **1029** (1951) , 1-19.
- 15) Experimental manual for lactic acid bacterium-from separation to characterization-, (Asakura Publishing Co., Ltd., Tokyo, 1992) , pp.30.
- 16) Encyclopedia of Environmental Technology and Equipment, (SANGYO CHOSAKAI, Tokyo, 2003) , pp.178.
- 17) S. Akamatsu, H. Kamiya, N. Yamashita, T. Motoyoshi, N. Goto-Yamamoto, T. Ishikawa, N. Okazaki, and A. Nishimura: J. Biosci. Bioeng., **90** (2000) , 555.