

微生物膜バイオリアクターによる汚濁水の浄化 —固定化担体の違いによる浄化への影響—

成田 素子, 村上 和雄, 斉藤 丈士*, 女屋 英明*,
根本 明*, 白鳥 秀幸*, 秋山 堯, 木浪美智子,
須藤 恵美, 中山 中**

(東京家政大学環境情報学科, * (株) 内山アドバンス中央技術研究所, ** 東京都立目黒高等学校)

原稿受付平成 18 年 10 月 13 日; 原稿受理平成 19 年 3 月 3 日

Purification of Polluted Water with a Microbe Membrane Bioreactor —Effect of Purifying Wastewater with Variation to Immobilized Support—

Motoko NARITA, Kazuo MURAKAMI, Takeshi SAITOU, * Hideaki ONAYA, * Akira NEMOTO, *
Hideyuki SHIRATORI, * Takashi AKIYAMA, Michiko KINAMI,
Emi SUDOU and Ataru NAKAYAMA **

Faculty of Home Economics, Tokyo Kasei University, Itabashi-ku, Tokyo 173-8602

**Uchiyama Advance CO., LTD., Urayasu 279-0043*

***Meguro High School, Meguro-ku, Tokyo 153-0052*

A purification effect for polluted water by a difference of an immobilization supports was studied using a microbial membrane bioreactor system. This system consisted of two types of bioreactors to immobilize anaerobic and aerobic microorganism. The river water of high degree of pollution was examined by this system. In this study, a porous sintered material was used for an anaerobic reactor. For water purification, two types of urethane (AQ-3, AQ-4) and a porous sinstered material were examined for adequacy as an immobilization support for aerobic reactors. By exchanging one type of support by another type, a purification effect was examined in terms of BOD, COD, TP (total phosphorus) and TN (total nitrogen). The purification effect of the porous sintered material and that of AQ-3 or expensive urethane of high vesicularity were more or less on the same level while the purification effect of AQ-4 or urethane of low vesicularity was on a level lower than the other two supports. In terms of maintenance of the system, AQ-3 was considered the best as an immobilization support. The purification efficiency of AQ-3 in optimal operating conditions was BOD 92%, COD 64%, TP 38%, and TN 34%. In conclusion, when installed in the home drainpipe, this system would be quite effective for purifying domestic wasted water.

(Received October 13, 2006; Accepted in revised form March 3, 2007)

Keywords: water pollution 水質汚濁, domestic wastewater 生活雑排水, microbe membrane bioreactor 微生物膜バイオリアクター, porous sintering material 多孔質焼結体, urethane for biological polluted water purification 生物処理用ウレタン.

1. 緒 言

人類は豊かで便利な生活を追求してきた代償としてさまざまな環境問題を引き起こした。工場・事業場排水、家庭排水の河川や湖沼、海域への流入による水質汚染はその一つである。工場・事業場から公共用水域

へ排出される排水の規制については、水質汚濁防止法（水濁法）・湖沼水質保全特別措置法（湖沼法）・ダイオキシン類対策特別措置法（ダイオキシン法）といった法律に加えて、各自治体による排水の規制や指導があって水質は改善されている。しかし、家庭から出る

生活雑排水には法的規制がなく、水濁法では国民に対して「何人も、公共用水域の水質に保全を図るため、調理くず、廃食用油等の処理、洗剤の使用等を適正に行うように心がけ、また、排水処理設備の整備に努めなければならない」(法第14条要旨)¹⁾と求めているだけである。私たちは洗濯、台所、入浴等の日常生活から出す生活雑排水中のBOD負荷量は1日1人当たり平均約30gと言われており、毎日の日常生活の中でさほど意識なく環境を汚染している。家庭からの生活排水処理は下水道処理施設、合併浄化槽等、無処理放流に3分類される。平成16年における日本の下水道普及率は全国で平均約68%と普及率は年々高くなっているが²⁾、未だ下水道処理の整備されていない地域があり、生活雑排水がそのまま河川に垂れ流される無処理放流により、悪臭、汚泥の堆積などで周辺住民に被害を与え、問題となっている。

著者らは化学薬品を使わず、微生物の力を利用し、取り扱いが簡単で、しかもエネルギーの消費を最小限に抑えた省資源型の汚濁水浄化システムの検討を行っている。その浄化システムは、水中や川底に存在する微生物が汚濁有機物を分解、除去する浄化作用を利用した嫌気性微生物と好気性微生物を担体に固定化して汚濁河川水を浄化する微生物膜バイオリアクターである。本リアクターシステムを家庭からの排水が集まる排水マスに設置すれば生活雑排水の浄化にも利用できる。

これまで著者らの研究した微生物膜バイオリアクターシステムは、嫌気性リアクターと好気性リアクターから成り、それぞれに従来廃棄物であった岩石粉碎工程で生じる汚泥を成型・焼成し製造した多孔質焼結体が充填され、その表面・一部・内部に嫌気性と好気性の

微生物が固定化されている。そして、浄化効果は高効率を示したことはすでに報告しているが³⁾⁴⁾、リアクター運転上に問題点があった。即ち、好気性リアクターでは好気状態にするためエアレーションを行うが、その際、多孔質焼結体がこすれあい、生じた粉体により流路を塞ぎ、運転停止することがあった。そこで、好気性リアクターの固定化担体に生物処理用に調製されたウレタンの利用を試みた。ウレタンは軽く、引張り等の物理的強度が大きく、クッション性に優れ、網目構造から構成されているため空隙率が高く、表面積も大きいので微生物が固定化しやすく、排水処理に適している。もちろん、多孔質焼結体のような摩擦による粉体の生成による流路の目詰まりの心配もない⁵⁾。

本稿では好気性リアクターの固定化担体に多孔質焼結体と2種類のウレタン素材を用い、3種類の固定化担体の違いによる浄化効果を比較検討した。

2. 実 験

(1) 微生物膜バイオリアクター

1) 固定化担体

多孔質焼結体：コンクリート骨材製造時に生じた汚泥から水分を取った砕石汚泥脱水ケーキを脱水後、加湿・成型し、1,120～1,140℃で約35分焼成し製造した。本研究では、粒径10～15mm、比重0.7～0.8の多孔質焼結体を使用した。多孔質焼結体の原料と化学組成を表1に、物性を表2に示した。

樹脂発泡体(ウレタン)：(株)イノアックコーポレーション製水処理用生物処理担体、ウオーターフレックスAQ-3、AQ-4を用いた。この2種の担体をそれぞれ好気性リアクター中に隙間なく密に詰めて充填した。AQ-3、AQ-4の物性を表3に、耐薬品性を表4に示

表1. 原料(乾燥砕石汚泥脱水ケーキ)と多孔質焼結体の化学組成

(単位: wt%)

材料	水分	Ig・loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
原料	20.5	6.6	60.8	18.4	4.8	1.3	2.5	0.12	1.18	4.10
多孔質焼結体	—	0.2	67.5	18.5	4.8	0.9	2.8	0.11	1.00	3.60

表2. 本システムに使用した多孔質焼結体の物性

粒径 (mm)	絶乾比重	表乾比重	容積重量 (g/cc)	実績率 (%)	吸水率 (%)	B. S. 強度 (tf)
10～15	0.70～0.80	0.85～0.95	0.43～0.51	62.0～64.0	15.0～17.0	4.0～6.5

B. S. 強度: 10%破砕値 (tf)。

微生物膜バイオリアクターによる汚濁水の浄化

表 3. AQ-3, AQ-4 の物性

	AQ-3	AQ-4
材質	ポリウレタン	
直径 (cm)	1	1
密度 (kg/m ³)	50	30
発泡 (倍)	20	33
空孔率 (%)	96	97
真比重 (g/cm ³)	1.1	1.1
表面積 (m ² /m ³)	7,500	1,500
セル径 (mm)	0.42	1.18
引張強さ (kPa)	300	120

表 4. AQ-3, AQ-4 の耐薬品性 (重量保持率)
(単位: %)

	AQ-3	AQ-4
硝酸 (0.1%)	99.7	100.8
水	99.5	99.5
アンモニア	99.7	99.5
水酸化ナトリウム	99.9	100
次亜塩素酸ナトリウム (1.0%)	59	51.4

浸漬時間 5 時間.

した.

2) 試料汚濁河川水

浄化試験に用いた試料河川水は、千葉県浦安市を流れる堀江川の河川水を用いた。この河川周辺は、下水道整備されているが、下水道と接続していない家庭からほとんど無処理の生活雑排水がそのまま排出され、河川へかなりの量が流入している。そのため、夏期には悪臭を放ち、周辺住民からの苦情が多くある。

河川水の採水は、毎回、14 時から 15 時の間に行った。

3) 装 置

図 1 は本研究に使用した装置である。バイオリアクターシステムは内径 70 mm、高さ 400 mm のアクリルパイプ 2 本をシリコンチューブで直列に接続した。嫌気性リアクターには多孔質焼結体を、好気性リアクターには多孔質焼結体と 2 種類のウレタン AQ-3, AQ-4 を充填し、3 種類のバイオリアクターシステムを作成した。アクリルパイプの外側は外套管があり、恒温水を送ってリアクター内の温度を一定とした。好気性リアクターはエアポンプで空気を送り、好気性状態とした。本システムは送液ポンプ、好気性にするためのエアレーションポンプ、温度制御装置のみの単

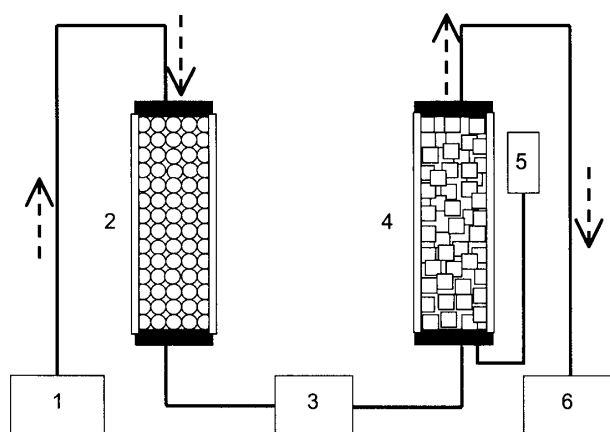


図 1. 微生物膜バイオリアクター

1. 汚濁河川水, 2. 嫌気性リアクター, 3. ポンプ, 4. 好気性リアクター, 5. エアポンプ, 6. 通過水.

純な省エネルギータイプである。

(2) 微生物膜バイオリアクターによる浄化実験

1) 微生物の固定化

各担体への微生物の固定化は、試料とする河川水中に汚濁成分を資化する微生物が多く棲息していると考え、堀江川の河川水をリアクターシステムに約 3 週間流し続けて固定化した。リアクターシステムの運転温度は、温度の除去率への影響を調べる試験を除き、25℃で運転した。各固定化担体のリアクターに対する充填率は多孔質焼結体が約 60%、AQ-3, AQ-4 は充填した体積は約 150%であるが発泡しているため充填率は約 70%である。また、試料が並列した 2 つのリアクター内を流動する時間は、流量 200 ml/h のとき、多孔質焼結体約 6 時間、ウレタンが約 5 時間である。

2) 水質各項目の測定

試料河川水と微生物膜リアクター処理後の浄化水の水質は以下の公定法に従い測定した。

BOD: 工業用水試験方法 JIS K 0102

COD: 工業用水試験方法 JIS K 0102

全リン: 工業用水試験方法 JIS K 0102

全窒素: 工業用水試験方法 JIS K 0102

使用した試薬はすべて特級である。

本研究では、微生物膜バイオリアクターによる浄化前後の水質項目の測定値ではなく、BOD, COD, 全リン, 全窒素の除去率で考察した。

3. 結果および考察

(1) 試料河川水の汚濁状況

図 2 は試料とした河川水の 2003 年 7 月から 2004 年

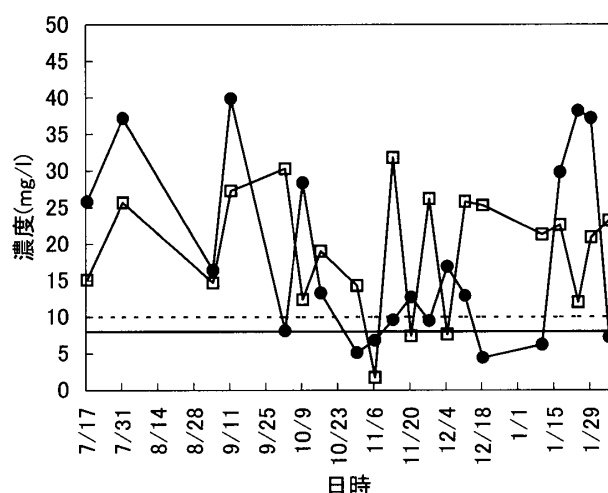


図2. 試料とした河川水のBOD・COD経日変化

● BOD, □ COD, — BOD 環境基準値, ---- COD 環境基準値.

2月までのBOD, CODの経日変化である. BOD 4.4~40 mg/l, COD 1.7~32 mg/lと, 環境基準値 (BOD 10 mg/l, COD 8 mg/l) を大きく超えている日が多い. 試料採取の当日, あるいは前日の降雨により, 流入する水の状態が変わり, BOD, CODの値に大きなばらつきが見られた. 河川の汚濁指標であるBOD値は家庭雑排水のうちの食物成分を含む台所からの排水が支配している. 採水時間が14時から15時であるため, BOD値が小さいときもあるが, 本データのBOD値が大きいことは, 家庭からの雑排水の流入が多いことを裏付けている. また同期間における全窒素の経日変化は, 0.7~4.5 mg/l, 平均1.9 mg/lで, 環境基準値 (1 mg/l 以下) を上回り, 値の変化が大きいことから気候などの環境変化の影響を受けやすいと考えられる. また全リンは, 0.3~3.2 mg/l, 平均0.8 mg/lでほとんど環境基準値 (1 mg/l) を下回っていた.

(2) 固定化担体の違いとBOD除去率

図3は嫌気性リアクターの担体を多孔質焼結体とし, 好気性リアクターの固定化担体を多孔質焼結体と2種類のウレタンAQ-3, AQ-4を用い, 固定化単体の違いと, リアクター流量の違いによるBOD除去率への影響を示した.

多孔質焼結体は流量109~260 ml/hまではBOD除去率93~98%を示したが, それ以上になると急激に除去率は低下した. AQ-3は流量110~260 ml/hまではBOD除去率92~95%で, それ以上になると除去率は低下した. AQ-4のBOD除去率はAQ-3より低く,

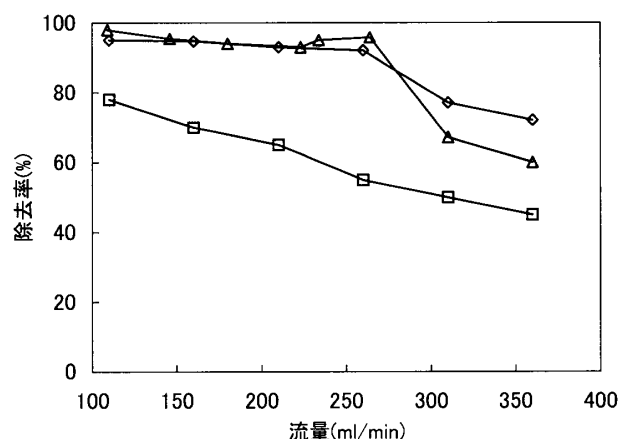


図3. 流量と固定化担体の違いによるBOD除去率への影響

△多孔質焼結体, ◇AQ-3, □AQ-4.

表5. 3種の固定化担体の細孔径

(単位: μm)

多孔質焼結体	10~50
AQ-3	200~300
AQ-4	500~600

流量とともに徐々に低下した. 食物成分を含む河川水の浄化は, 多孔質焼結体を用いた本リアクターシステムは極めて有効であることはすでに報告しているが³⁾⁴⁾, AQ-3の場合も同じように浄化効率が高いことを示している. 多孔質焼結体では, 流量が250 ml/hを超えると急激に除去率が低下しているが, AQ-3にはそれが見られず徐々に除去率が低下している. これは, 多孔質焼結体は多孔質であるが, その細孔は, 極めて小さく, この細孔中に微生物が必ずしも固定化されていない. そのため, 流量が大きくなると, 表面にだけ微生物が固定している多孔質焼結体では, BOD成分を含む汚濁水との接触時間が短くなり急激に除去率が低下すると考えられる. 表5は, 3種の固定化担体の細孔径を示した.

一方, 20倍発泡したAQ-3は, 微生物が生育する適度な空間があり, ウレタン内部まで微生物が固定化されていると考えられる. そのため, 流量が大きくなっても汚濁水がウレタンの内部を通り抜けるので微生物との接触時間が短くなるが, BOD除去率は急激に低下することなく, 徐々に低下していくと考えられる. AQ-3とAQ-4の除去率の違いは発泡率にある. 20倍と33倍で表面積はAQ-4の発泡率が高いためウレタンの空隙が大きく, 微生物が固定化するための表面積

微生物膜バイオリアクターによる汚濁水の浄化

がAQ-3に比べ小さく、微生物固定化量も小さくなると考えられる。

(3) 固定化担体の違いとCOD除去率

図4は、固定化担体が異なるときのリアクター流量によるCOD除去率への影響を示した。多孔質焼結体は流量109~312 ml/hまではCOD除去率は68~78%の範囲にあり316 ml/h以上でBODの除去率の場合と同様に急激に低下した。AQ-3のCOD除去率は多孔質焼結体と比べると約10%低く、流量と共に徐々に低下した。AQ-4はAQ-3に比べさらに低く、160 ml/h以上で急激に低下した。3つの固定化担体のCOD除去率は、BOD除去率と比べるといずれも低い。それは採水した河川水には、家庭雑排水が多いため、河川水には、BODに影響する成分を分解する微生物が多く棲息し、固定化された微生物も同様と考えられる。COD除去率が低いのはCODに影響する成分は微生物では分解しにくい。そのためCOD除去率を上げるには活性炭の活用が効果的であるとの報告がある⁶⁾。

固定化担体の違いによるCOD除去率の差は、固定化担体の水に対する性質の違いがCODに影響する成分を資化する微生物の固定化に影響していると考えられる。多孔質焼結体の表面は無数の細孔があり、長時間河川水と接触していると、親水性が増しCODに影響する成分を分解する微生物が棲息しやすくなる。一方、ウレタンは本来、疎水性であり、微生物は多孔質焼結体に比べ固定化されにくいと考えられる。

多孔質焼結体の表面は無数の細孔があり、長時間河川水と接触していると、親水性が増し、微生物が棲息

しやすくなる。一方、ウレタンは本来、疎水性であり、微生物は多孔質焼結体に比べ固定化されにくいと考えられる。

(4) 固定化担体の違いと全リン、全窒素除去率

図5, 6は、固定化担体が異なるときのリアクター流量による全リン、全窒素除去率への影響を示した。BOD, COD除去率と比べると、3担体とも全リン、全窒素の除去率は高くない。全リンの除去率は、3担体とも流量140 ml/hのとき、同程度の約45%程度であり、除去率への流量の影響も流量と共に低下する傾向はほぼ同じ変化であった。全窒素の除去率は、多孔質焼結体よりウレタンAQ-3, AQ-4の方が高かった。試料として採水した堀江川の2003年7月から2004年2月までの全リンの平均は0.8 mg/l、全窒素は1.9

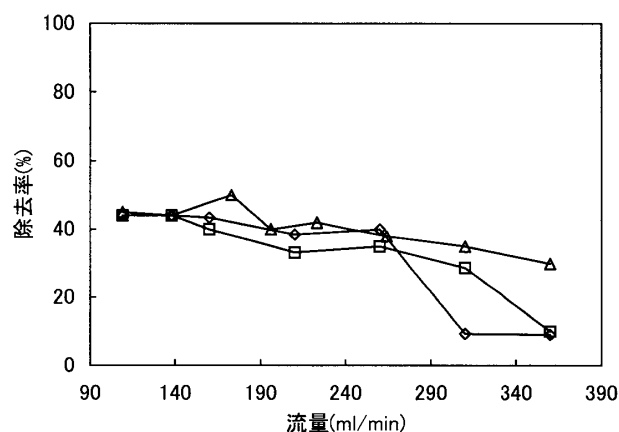


図5. 流量と固定化担体の違いによる全リン除去率への影響

△多孔質焼結体, ◇AQ-3, □AQ-4.

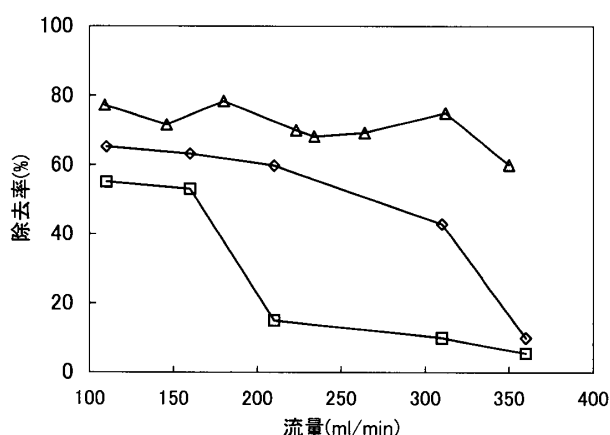


図4. 流量と固定化担体の違いによるCOD除去率への影響

△多孔質焼結体, ◇AQ-3, □AQ-4.

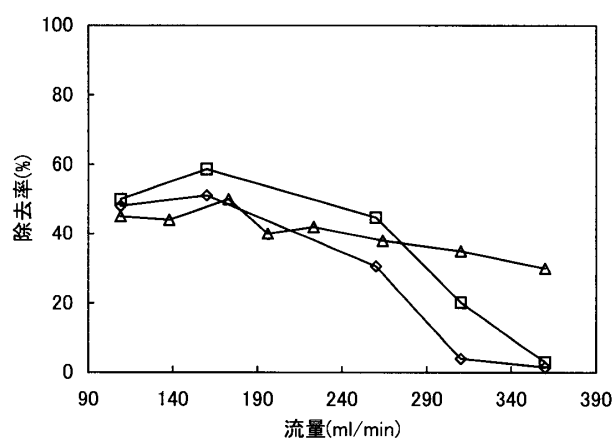


図6. 流量と固定化担体の違いによる全窒素除去率への影響

△多孔質焼結体, ◇AQ-3, □AQ-4.

mg/l とそれほど高くはなく、河川中にはこれら汚濁物質を資化する微生物があまり多く棲息していないと考えられる。

(5) リアクター運転温度と除去率

微生物の活動は棲息する水の温度で影響を受ける。そのため汚濁成分の資化の程度にも影響が見られるかを検討した。図7～図10は流量160 ml/h、リアクター温度25～40℃におけるBOD、COD、全リン、全窒素の除去率を示した。BOD以外のCOD、全リン、全窒素の除去率は各担体とも30℃または35℃以上になると低下した。これは、30℃または35℃までは固定化した微生物は活発に活動するが、それ以上になると微生物が棲息するには水温が高すぎ、資化作用も低下すると考えられる。全窒素除去率への温度による影響の

パターンは全リンへの影響と同じであった。図9、10の全リン、全窒素の場合、多孔質焼結体では、30℃を超えると除去率に大きな低下があったが、ウレタンにはそれが見られなかった。これは、微生物が多孔質焼結体は、担体表面近くに固定化しているのに対し、ウレタンは、内部の多数の穴に多く固定化しているためと考えられる。

(6) 3種の固定化担体に固定された微生物

表6は、3種の固定化担体に固定化され、同定された微生物名を示した。3種の担体に固定化された微生物は同じであった。担体の違いによる固定化量の差は各担体から固定化された微生物をうまく採取できず、求められなかった。棲息微生物から、嫌気性リアクターは空気を遮断していても、河川水に酸素が溶存してい

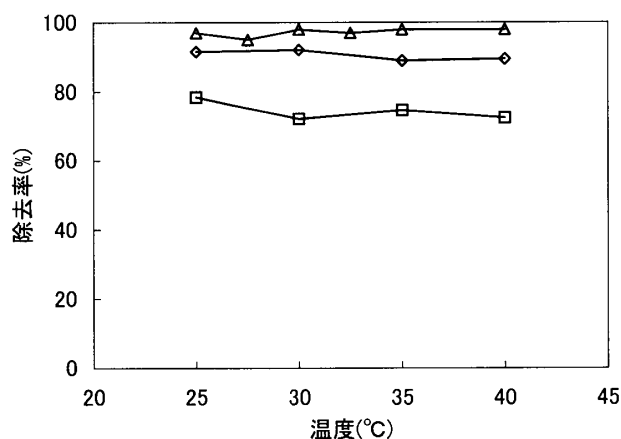


図7. 温度と固定化担体の違いによるBOD除去率への影響

△多孔質焼結体, ◇AQ-3, □AQ-4, 流量160 ml/h.

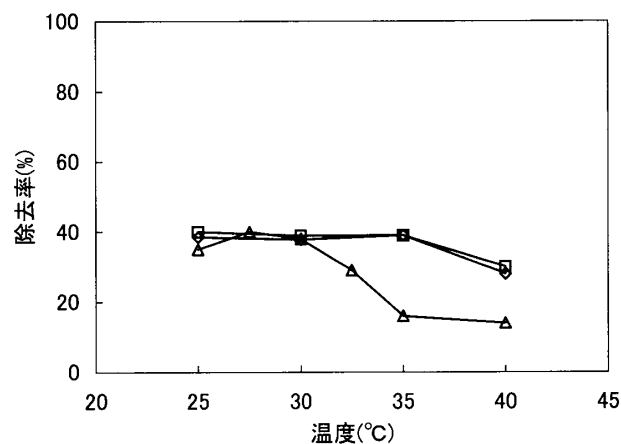


図9. 温度と固定化担体の違いによる全リン除去率への影響

△多孔質焼結体, ◇AQ-3, □AQ-4, 流量160 ml/h.

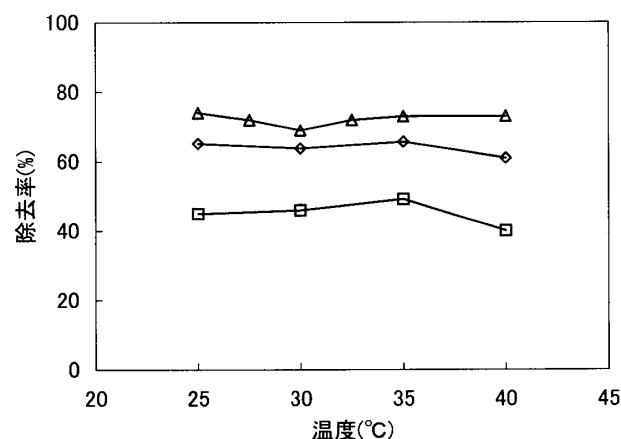


図8. 温度と固定化担体の違いによるCOD除去率への影響

△多孔質焼結体, ◇AQ-3, □AQ-4, 流量160 ml/h.

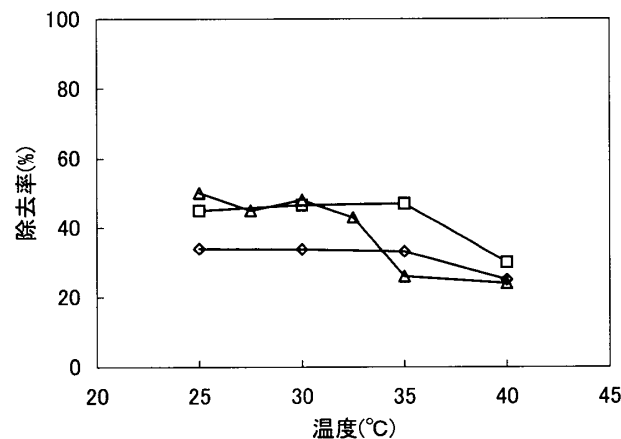


図10. 温度と固定化担体の違いによる全窒素除去率への影響

△多孔質焼結体, ◇AQ-3, □AQ-4, 流量160 ml/h.

微生物膜バイオリアクターによる汚濁水の浄化

表 6. 固定化された微生物一覧

	好気性	嫌気性
(細菌類)		
鉄細菌類		
<i>Gallionella</i> spp.	++	++
<i>Leptothrix orchracea</i>	+	-
分離不能種	+	+
(藻類)		
藍藻類		
<i>Anabaena</i> spp.	+++	+++
<i>Homoeothrix janthina</i>	++	++
<i>Oscillatoria</i> spp.	++	++
<i>Phormidium</i> spp.	+	+
緑藻類		
<i>Dictyosphaerium</i> sp.	+	+
<i>Coelastrum</i> sp.	+	+
<i>Ankistrodesmus</i>	+	-
分離不能種	+	-
(珪藻類)		
<i>Achnanthes</i>	+++	+++
<i>A. minutissima</i>	+	+
<i>A. spp.</i>	+	+
<i>Cymbella ventricosa</i>	+	+
<i>Navicula pupula</i>	+	+
<i>Nav. spp.</i>	++	++
<i>Nitzschia palea</i>	+++	+++
<i>Nit. spp.</i>	++	++
合計	19 種	16 種

+++：多量に出現した種，++：出現した種，+：少量に出現した種，-：未出現した種，～sp.：1 種，～spp.：2 種。

るので完全な嫌気性ではなく、むしろ貧酸素状態であることを本研究で確認できた。

4. 結 論

3 種の固定化担体による浄化効果を検討したが、BOD, COD 除去率は多孔質焼結体が最も高く、次に AQ-3、そして AQ-4 であった。全リン、全窒素除去率は 3 担体にほとんど差がなかった。BOD, COD 除去に関して、AQ-3 は多孔質焼結体と若干の差があるものの同じように使用できることがわかった。ウレタンの固定化担体は、発泡の程度が小さい AQ-3 は発泡したときにできる穴が小さく、多数あるので表面積が大きくなり、発泡の程度が大きい AQ-4 は、発泡してできる穴が大きくなるため表面積が小さくなり、微生物の固定化量に差ができるものと考えられる。この結果より、多孔質焼結体の代わりに AQ-3 を用いれば、流路を塞ぐことなくリアクターシステムを順調に運転でき汚濁水を浄化できることがわかった。

さらに、本システムは運転上の面倒な操作がないので各家庭の排水マスに本システムを設置すれば生活雑排水の浄化に非常に有効であると考ええる。

引 用 文 献

- 1) 才木義夫：『地球環境を守るために』，神奈川新聞社，横浜，110（2006）
- 2) 国土交省ホームページ：http://www.mlit.go.jp/（2006）
- 3) 村上和雄，奈良禧徳，秋山 堯，成田素子，須藤絵美：微生物膜バイオリアクターによる汚濁河川水の浄化，東京家政大学研究紀要，**44**，127-131（2004）
- 4) 村上和雄：省資源型微生物膜バイオリアクターによる汚濁水浄化システム，ケミカルエンジニアリング，**51**，30-35（2006）
- 5) 村上和雄，成田素子，斉藤丈士，女屋英明，根本 明，秋山 堯，木浪美智子，須藤恵美：微生物膜バイオリアクターによる汚濁河川水の浄化，第 15 回廃棄物学会研究発表会予稿集，1352（2004）
- 6) 村上和雄，福島由美子，石垣晶子，奈良禧徳，須藤絵美：砕石汚泥利用多孔性焼結体を固定化担体とする生物膜バイオリアクターによる汚濁河川水の浄化微生物膜，第 11 回廃棄物学会研究発表会予稿集，402-403（2000）