〈論文〉

嫌気性汙床法における基質分解および 細菌分布に及ぼす汙材の充填形態の影響

高野 卓* 野池 達也**

Effects of Packing Methods of the Filter Media on Substrate Degradation and Bacteria Distribution in Anaerobic Filter System

Makoto TAKANO and Tatsuya NOIKE

* Kajima corporation, Minatoku, Tokyo, 107 Japan

** Department of Civil Engineering, Tohoku University, Aoba, Sendai, 980 Japan

Abstract

In order to make clear the ability of treatment and the retaining characteristics of the anaerobic bacteria in the reactor, experiments were conducted employing four packing methods of the filter media in laboratory-scale anaerobic filters using synthetic sewage. The accumulation of high concentrations of biological solids in the anaerobic filter permits COD removal efficiency of 70~85%. There was no significant difference of treatment efficiency among the four methods, but the numbers of bacteria and their activities were really different from each other in the reactors. The investigation on the characteristic of bacterial distribution showed that the number of bacteria attached to the filter media was the largest in all of the reactors, these attached bacteria had greater treatment ability than that of the bacteria sedimenting and accumulating on the bottom of the reactors when hydraulic retention time was shorter than 6 hours. The numbers of the acidogenic bacteria and methanogenic bacteria attached to the filter media were respectively 10^{10} cells 10^9 cells in the reactors.

Key words: anaerobic filter, packing methods, bacterial distribution, methanogenic bacteria, acidogenic bacteria

1. はじめに

富栄養化現象によるわが国の湖沼の汚濁は著しく、全国のおよそ60%の湖沼が環境基準値を超えている。水域に対する汚濁負荷のうち、最も大きな原因となっているのは生活雑排水である。それは、生活雑排水が法的な規制がほとんどないため、大部分の場合、未処理のまま放流されているためである。このような生活雑排水により、下水路や側溝、灌漑用水路、河川や湖

沼などの水域や地下水の汚染の大きな原因となっている¹⁾。

嫌気性汙床法は、生活雑排水のような低濃度の有機性排水から省エネルギー的に有機物を除去することを目的として、1960年代後半から開発が進められてきた生物処理法である。これらの研究開発の結果、Youngら(1969)、Jennettら(1975)により $BOD1,000mg \cdot l^{-1}$ 程度の有機性排水に、また、稲森ら(1982, 1983)、北尾ら(1982)により、 $BOD200mg \cdot l^{-1}$ 程度の有機性

* 鹿島建設株式会社技術本部環境開発部 〒107 東京都港区赤坂

** 東北大学工学部土木工学科 〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉

排水に本法が適用可能なことが明らかにされるようになってきた²⁾。この方法では、一般的に菌体量が多いほど処理性能が増大すると報告されている。すなわち、菌体の捕捉性が高い汙材を用い、槽内に高い濃度の菌体を維持するほど処理性能が高くなると考えられている。稲森ら(1982)³⁾、Young ら(1983)⁴⁾、片岡ら(1986)⁵⁾は、汙材の影響、すなわち汙材の菌体に対する捕捉性を解明するために、汙材の種類、形状を変化させ処理性能の違い等の研究を行っている。また、最近では、嫌気性汚泥床法の上部のみに汙材を充填したハイブリッド型リアクターと呼ばれる嫌気性汚泥床法と嫌気性汙材法を組合わせた反応槽が提案された^{6),7)}。本法は、現在もっとも高い菌体保持能力を持ち、しかも反応槽内に汙材を充填しないため、汙床法を用いた処理において問題となる閉塞が起きにくいなどの利点を持つ嫌気性汚泥床法の特徴と、嫌気性汙材法の優れたSS除去能といった双方の利点を兼ね備えたものである。

本研究では上記の認識に基づき、菌体の捕捉性において大きな影響を及ぼす汙材に注目して、汙材の充填方法をそれぞれ変化させ、嫌気性汙床法における汙材の充填方法による除去性能の違いとその汙床内の嫌気性微生物の存在状況を検討したものである。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験装置は Fig. 1 に示したように、高さが50cm、底面積が81cm²のアクリル樹脂製二重角型槽である。基質は汙床底部からローラーチューブ・ポンプにより連

Fig. 1 Experimental apparatus

続的に注入し、処理水は嫌気性状態が保たれるように反応槽上部より、エアポンプによるガス循環によって生じる吸引力によって連続的かつ嫌気的に系外へ引き抜いた。また、発生ガスは、消化ガスが溶解しないように硫酸酸性の飽和食塩水を用いたガス捕集装置で捕集した。槽内の温度は、反応槽外槽に温水を循環させ、 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ に保った。

2.2 投入基質

実験に用いた投入基質組成は、Table 1 に示すように、ペプトン、酵母エキスを主体に栄養塩を添加して濃度が、 $\text{BOD} : 200\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}} : 230\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ になるような人工合成下水を用いた。

2.3 実験条件

運転条件は Table 2 に示すように汙材として用いた

Table 1 Composition of mixed substrate

Dextrin		30.6	($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
Pepton		65.4	($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
Yeast Extract		65.4	($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
Meat Extract		74.6	($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
Mineral A		10.0	($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
Mineral B		18.6	($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
Buffer		25 ~ 35	($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
Mineral A	NaCl	670	($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
	MgSO ₄	400	($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
	KCl	1340	($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
Mineral B	KH ₂ PO ₄	18.6	($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
Buffer	NaHCO ₂	25 ~ 35	($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)

Table 2 Experimental conditions

	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
Reactor Volume (ℓ)	4.0	4.0	4.0	4.0
Liquid Volume (ℓ)	3.2	3.2	3.2	3.2
Temperature (°C)	35 ± 1			
Filter Media	Ringrace			
Packing Condition	なし	31cm×21	31cm×9	16cm×21

モル状固定化担体の充填量および充填方法をそれぞれ変化させた反応槽を4基用いて連続実験を行った。Run 1は汙材を充填せず、Run 2は全体的に密に、Run 3は全体的に粗に、Run 4は汙床上部半分のみに密に汙材を充填した。

また、流入基質濃度を一定にし、水理学的滞留時間(HRT)を48時間にセットし、各反応槽が定常状態に達するまで運転を行った。その際、HRTは反応槽内の液相部体積(3.2l)基準で計算した。定常状態に達したとみなした後、流入基質濃度は変化させずにHRTで負荷変化をすべての反応槽で同時に行い24時間に変化させた。その後定常状態に達するごとに、12時間、6時間、3時間と全部で5段階に変化させ400日間運転した。なお、本実験では、除去率、ガス生成量が一定となったときを定常状態と見なした。

種汚泥は、下水処理場から採取したものを2年間培養しそれをそれぞれ1 lずつ植種した。

2.4 分析方法

分析項目は以下に示すものをカッコ内の分析方法で分析した。処理水のpH、ORP(ガラス電極法)、化学的酸素要求量(CODと略す、重クロム酸法)、揮発性脂肪酸濃度(VFAと略す、FID式ガスクロマトグラフ法)、ガス発生量(水上置換法)およびガス組成(TCD式ガスクロマトグラフ法)を測定した。また、菌体の測定においては、李らの分析方法⁸⁾を参考にMPN法を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 経日変化によるCOD除去の挙動

すべての系におけるCOD除去の挙動をFig. 2に、それぞれの定常データをTable 3に示す。汙材を充填しない系は、HRT12時間よりも長ければ、今回の実験のようにフロックができやすく沈降性の良い種汚泥を植種した場合、除去率60%前後の除去能が得られた。汙材を充填した系においてはHRT 6時間までは70~80%と高い除去率を示し、運転期間を通して汙材の充填方法にかかわらずほとんど変化がなかった。しかしHRTが3時間になると除去能が40~60%に急激に悪化した。これは、短絡が起こったためと考えられる。

定常状態における各系のCOD負荷量と除去率は高い相関があり、負荷量が増大するにつれて除去率は低下している。Run 1を除く他の系はほぼ同様な挙動を示しているため、一次式によって表現することができる($y = -15.0x + 86.2 (r = 0.96)$)。また、定常時における各系のCOD負荷量とメタン生成量においては、Run 1の菌体の流出が起こり除去率が急激に悪化し

Fig. 2 Time course of COD removal

たHRTが3時間の時の値を除くと、すべての系において $y = 504x$ の式が得られ、相関係数は0.99と正の相関が得られている。

3.2 汙床の高さ方向における基質分解

処理性能においては各系による違いは表れなかったが、汙床内での各系の分解挙動においては汙材の充填方法による違いが顕著に表れた。Fig. 3は各HRTにおけるRun 1のpH、ORP、COD濃度およびVFA濃度の汙床の高さ(汙床底面を0 cmとする)方向における挙動を示している。pHは、6.9~7.1の間であり菌体に対して影響を及ぼさない程度であり、汙床の高さ方向に関しては一定値を示している。ORPは-300~-250mVの間で変動しているが汙床の高さ方向において変化はしておらず、HRTが48時間から24時間までは増大しており、HRTが24時間より短くなるとまた低下する傾向が見られた。この傾向は、流出水内のSS濃度がHRTが24時間までは増大し変動が大きくなるが、その後安定する傾向と関係があると考えられる。COD濃度の挙動を見るとHRTが12時間までは、汙床内の最深部(5 cm以下)でほとんどの処理が行われているが、HRTが6時間になると汙床全体で4倍ほど濃度が急激に増大する傾向が見られ、最深部では除去されないが汙床最上部では未分解基質の残存濃度が10%になるまで徐々に減少した。これは、HRTが6時間になると汙床下部に沈降した菌体よりも浮遊性の菌体による働きが基質の分解に大きな役割を占めていることを示している。VFA濃度を見るとすべてのHRTにおいて10cm以上の上部では30mgCOD・l⁻¹以下で安定していた。しかし、HRTが12時間より短くなると汙床底部でVFAの蓄積が起こった。このことより、HRTが6時間になると、汙床底部で酸生成菌の増殖・代謝機能が高まり、メタン菌の活性が機能する適正条件が維持されなかったためメタン反応が抑制されているが、高さ方向においてメタン菌によるVFAの資化性が徐々に高まり最終的にはVFAがメタン化さ

Table 3 Steady state experimental results of runs

	COD Loading Rate ($g \cdot \ell^{-1} \cdot d^{-1}$)	HRT (day)	Volume of Influent Volume ($m\ell \cdot d^{-1}$)	Methane Production Volume ($m\ell \cdot d^{-1}$)	Total COD Concentration of Effluent ($mg \cdot \ell^{-1}$)	Soluble COD Concentration of Effluent ($mg \cdot \ell^{-1}$)	COD Removal Efficiency (%)
RUN 1	0.110	2.09	1531.7	26.2	56.1	32.1	75.2
RUN 2	0.109	2.06	1557.1	35.7	42.7	23.5	83.0
RUN 3	0.116	2.05	1559.4	32.9	32.4	21.2	86.3
RUN 4	0.114	2.06	1554.7	36.9	38.4	19.8	85.3
RUN 1	0.219	0.99	3228.1	70.1	67.6	35.8	70.4
RUN 2	0.233	1.00	3185.0	87.1	47.4	23.5	79.8
RUN 3	0.229	1.01	3173.7	87.6	39.4	15.3	83.0
RUN 4	0.226	1.01	3165.8	84.4	40.6	24.6	83.4
RUN 1	0.478	0.52	6140.7	208.5	70.4	30.5	61.3
RUN 2	0.450	0.50	6387.1	216.4	48.7	22.9	79.1
RUN 3	0.406	0.51	6287.6	169.3	51.7	26.0	76.0
RUN 4	0.422	0.50	6353.9	215.7	48.1	23.6	80.8
RUN 1	0.925	0.29	10953.1	411.3	122.5	60.8	53.1
RUN 2	0.967	0.26	12156.5	554.8	60.3	28.8	76.1
RUN 3	0.945	0.26	12141.1	525.2	62.7	28.0	75.3
RUN 4	0.954	0.26	12147.7	531.7	65.5	33.4	72.1
RUN 1	1.821	0.14	23278.7	516.8	246.6	138.1	1.5
RUN 2	1.830	0.14	22205.7	1045.0	111.1	51.9	53.3
RUN 3	1.836	0.14	22179.2	790.8	107.3	68.9	62.6
RUN 4	1.920	0.15	21899.5	961.1	128.5	81.7	55.8

Fig. 3 Influence of HRT on pH, ORP, VFA concentration and COD concentration at different height of reactor

タン化され除去能が高く維持されたものと考えられる。

Fig. 4 に示すように、Run 2 の pH は 6.9~7.1 の間であり、ORP は -350~-250mV の間で HRT によって変動しているが、pH と同様に汚床の高さ方向に対しての変動はほとんどなかった。また、HRT が 48 時間から 12 時間までは 50mV ずつ上昇しているが、それより HRT が短くなると再び減少を示した。Run 1 と同様にこの傾向は流出 SS 濃度と関係があると考えられる。床内の COD 濃度の挙動を見ると HRT が 12 時間までは、汚材に接触する前の最深部における未分解基質の残存濃度は、流入基質濃度の 15% 以下となっており、汚床底部で 80% 以上の基質がすでに変換されてしまっている。

HRT が 6 時間になると汚材充填部分手前の最深部においてのみ、分解基質の残存 COD 濃度が 55% と増大しているが、流出時にはほとんど全部の基質が分解されている。これは、汚材充填部で速やかに分解が行われていることを示している。VFA 濃度の挙動についてみると、HRT が 12 時間までは汚床の高さ方向に

Fig. 4 Influence of HRT on pH, ORP, VFA concentration and COD concentration at different height of reactor

における VFA 濃度は 10~25mgCOD $\cdot$ l $^{-1}$ で安定している。これは、汚床下部で酸生成菌によって 80% 以上分解された基質は、直ちにメタン菌によってガス化されたものと考えられる。しかし、HRT が 6 時間になると、汚床底部に高濃度の VFA が蓄積しているが、これは流速が増したため汚床底部のメタン菌が浮上してしまったためだと考えられる。また、汚材充填部で COD 濃度が減少しているにもかかわらず VFA 濃度が一定であったが、これは汚材に捕捉されたメタン菌によってガス化されていることを示している。

Fig. 5 より、Run 3 の pH と ORP の挙動は、Run 2 とほぼ同様であった。COD 濃度の挙動についてみると、HRT が 24 時間までは汚床最深部で基質が 90% 以上分解されているが 12 時間になると 80% まで減少し、6 時間では 50% まで減少する現象が見られた。しかし、流出部ではほとんどの基質が分解されていた。このことは分解能は、HRT が 24 時間より短くなると汚材充填部の菌体の働きが大きな役割を占めていることを示している。しかし、HRT が 3 時間になると COD 濃度は急激に増大し汚床最深部ではほとんど除去されず汚

Fig. 5 Influence of HRT on pH, ORP, VFA concentration and COD concentration at different height

材中を通過するうちに分解されるが、未分解基質が20 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ も残存していた。これはメタン菌の wash-out が生じたことによるものだと考えられる。VFA 濃度の挙動は負荷の増大に伴って汚床全体で増大していく傾向が見られた。

HRT が24時間までは汚床最深部で基質がほとんど分解されているにもかかわらず VFA 濃度が10 $\text{mgCOD} \cdot \text{l}^{-1}$ 前後と非常に低いことから、酸生成菌によって生成された VFA が速やかにメタン菌によりガス化されていると考えられる。しかし、HRT が6時間および3時間になるとメタン菌の wash-out によって揮発酸が汚床内に多量に残存している傾向が見られる。HRT が3時間の系では、汚材中間部での VFA 濃度が50 $\text{mgCOD} \cdot \text{l}^{-1}$ と増大していることから汚材充填部の下部と上部でメタン菌が捕捉されていると考えられ、特に汚材上部でのメタン菌の活性が高いことが VFA 濃度の急激な減少によって示されている。

Fig. 6 より、Run 4 の pH および ORP は Run 2 および Run 3 の場合とほぼ同様な傾向を示している。

COD 濃度の挙動について見ると、HRT が24時間ま

Fig. 6 Influence of HRT on pH, ORP, VFA concentration and COD concentration at different height of reactor

では汚床最深部でほとんどの基質が分解されており、未分解基質の残存濃度は20 $\text{mgCOD} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下になるのが認められた。HRT が12時間になると最深部での分解率は40%ほどであるが汚材充填部手前でほとんど分解されていた。HRT が6時間では汚床下部の基質が75%程度しか分解されず、未分解の基質が70 $\text{mgCOD} \cdot \text{l}^{-1}$ 程度残存している。しかし、汚材充填部の残存基質はほとんどすべて分解されており、大部分の基質除去が汚材充填部の下部で行われている。HRT が3時間になると、汚材充填部に至るまでに35%程度しか分解されず、150 $\text{mgCOD} \cdot \text{l}^{-1}$ 程度の未分解基質が汚材充填部分に流入した。流出水中には流入基質の20%程度のみ未分解基質が残存しており、汚材充填部分での基質の分解は40%ほどであり良くない。汚床の高さ方向における VFA 濃度の挙動は、HRT が12時間までは20 $\text{mgCOD} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下でほとんど一定である。これは、汚床下部で分解された基質が速やかにメタン菌によりガス化されたためと考えられる。また、HRT が6時間では汚床最深部でのメタン菌が減少しているため VFA の蓄積が見られたが、上部に行くにつれて減少してい

る。これは浮遊性のメタン菌および汙材に付着したメタン菌の働きによることを示している。しかし、HRT が 3 時間になると汙床下部での VFA 濃度は $70 \text{ mgCOD} \cdot \text{l}^{-1}$ もありほとんどガス化されずに蓄積しているが、汙床上部で急激に減少していることから、汙材中にはメタン菌が多く存在していることを示している。

以上の結果より、Run 2 および Run 4 においては、汙材底部の酸生成菌およびメタン生成菌の活性が高く、また捕捉されたメタン菌の活性も高いうえに汙材が密に充填されたメタン菌の wash-out がおこりにくいため、両菌群の良好な共生関係が維持され、基質の高い分解能が得られたものと考えられる。しかし、Run 3 においては汙材が粗に充填され付着しにくいメタン菌が wash-out されやすくなり、共生関係のバランスが崩れたために残存 VFA 濃度が HRT の変化に対応して増大する傾向がみられた。

3.3 菌体の分布特性

嫌気性汙床における処理機能についての以上の結果を微生物レベルからも検討するために、HRT が 3 時間で連続実験終了後、Run 1 を除く汙材を充填した系を解体し汙床底部に沈降・蓄積した菌体（蓄積菌体と略称）、汙材に付着している菌体（付着菌体と略称）、汙床内に浮遊している菌体（浮遊菌体と略称）の量および活性をそれぞれ測定した。

目視による観察においては、多少の振動を加えても菌体は付着したままであり、粘性が強く膜厚も大であった。生物膜の外側は粘性の強い灰色の膜であり、強固に付着していたが、中心部は黒色のフロックに捕捉されており剝離しやすかった。この黒色のフロックは硫酸還元菌によって還元された硫化物の色であり、このことより硫酸還元菌が反応槽内に多量に存在していると考えられる。これは、生成ガスに硫化水素の臭

Fig. 7 Total MLVSS concentration in reactors

気があることから推察できる。

(1) 槽内総菌体量

Fig. 7 に示す槽内の総 VSS 量は Run 2 では、 $5.9 \text{ gVSS} \cdot \text{l}^{-1}$ 、Run 3 では $3.1 \text{ gVSS} \cdot \text{l}^{-1}$ 、Run 4 では $3.0 \text{ gVSS} \cdot \text{l}^{-1}$ であり、Run 2 は、Run 3 および Run 4 における総 VSS 量のほぼ 2 倍の量の菌体が存在していることが分かる。しかしこの値⁹⁾は他の嫌気性汙床の文献と比較して、1/3~1/6 と非常に少なかった。これは、本実験においては有機物負荷が低かったことによるものと考えられる。一方、汙床内の菌体の分布状況においては、浮遊菌体量は全体からみると少なく、ほとんどが汙材に付着している菌体で占められている。また、付着菌体は汙材充填量にほぼ比例し、Run 2 は Run 3、Run 4 の 2 倍ほどである。蓄積菌体は汙材の充填密度が粗な Run 3 がもっとも少なく、これは蓄積していた菌体が上昇流によって浮上し、汙材に捕捉された結果によるものであると考えられる。

(2) 菌数

Fig. 8 に各反応槽における酸生成菌数の分布状況を示した。ただし、以下の数値はすべて反応槽内全体の菌数である。図より、Run 3 の菌数がもっとも多く、次いで Run 2 である。特にこの違いが顕著であるのは浮遊菌体であり、その菌数は $4.4 \times 10^9 \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ で他の系と比較して 2 オーダーも異なっている。また、付着菌体においても Run 3 がもっとも高く $2.2 \times 10^{12} \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ で、次いで Run 2 の $1.1 \times 10^{12} \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ 、Run 4 の $8.8 \times 10^{10} \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。しかし、蓄積菌体は Run 2、Run 3、Run 4 とともに $2.1 \times 10^{10} \sim 3.4 \times 10^{10} \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ でほぼ同量であった。一方 VSS あたりの菌数をみると、蓄積菌体では $9.7 \times 10^6 \sim 1.1 \times 10^8 \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ 、付着菌体は $5.3 \times 10^4 \sim 5.6 \times 10^5 \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ であったが、浮遊菌体においては Run 2 と Run 4 は $1.0 \sim 1.1 \times 10^6 \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ 程度なのに対して、Run 3 は $3.8 \times 10^7 \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ と 1 オーダーも異なっていた。

Fig. 9 に各反応槽におけるメタン生成菌数の分布状況を示した。生菌数に関して Run 2 および Run 4 においてはほぼ同数であるが、それと比較して Run 3 が

Fig. 8 Acidogenic bacteria of runs

Fig. 9 Methanogenic bacteria of runs

非常に少ないことが分かる。これは、前述したように汚材が粗に充填されているため、メタン菌が生成されたガス気泡とともに wash-out したことを示している。付着菌体においてはすべての反応槽において $5.6 \times 10^{10} \sim 1.5 \times 10^{11} \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ とそれほど変らないが、蓄積菌体と浮遊菌体において Run 3 は他の系と比較して 1 オーダー少ない。これより、付着しているメタン菌にとっては、汚材の充填方法の違いによる菌数に対する影響は見られないが、蓄積および浮遊しているメタン菌には充填方法の違いが菌数に対して大きな影響を及ぼすと考えられる。一方、1 mgVSS あたりのメタン菌の菌数においては 10^5 程度とほぼ同等の値であるが、酸生成菌においては $10 \sim 10^3$ 倍ほど存在しているといえる。

汚材（リングレース 1 本当たり）に付着している酸生成菌とメタン生成菌の菌数を Table 4 に示した。この表より、Run 4 を除く他の系は酸生成菌の方がメタン菌よりも多く、Run 2 においては $5.5 \times 10^8 \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $7.5 \times 10^8 \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ で、Run 3 は $2.5 \times 10^{10} \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $6.5 \times 10^8 \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ でありほぼ 1 オーダー異なっている。しかし、Run 4 においては酸生成菌よりメタン菌のほうが多く、 $8.3 \times 10^8 \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $1.2 \times 10^9 \text{ MPN} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。これは、酸生成菌においては、汚材の流れ方向の長さによる違いが出てきていると考えられ、メタン菌においては、浮遊しているメタン菌が汚材に捕捉され、単位長さ当たりの菌数が多くなったと考えられる。また、他の系と比較して Run 4 の酸生成菌とメタン菌の共生関係が良かったためとも考えられる。

(3) 活性

酸生成菌の活性については、Table 5 に示す。これより、菌体当たりの最大酸生成速度は付着菌体がもっとも高く、次いで浮遊菌体であった。蓄積菌体の酸生成速度がすべての系においてももっとも低かった。一方、Run 4 においてのみ汚材に菌体を付着させたまま酸生成速度の測定をした。測定方法は、汚材から菌体が脱落しないように注意して素早く取り出し、細口瓶内に

Table 4 Attached acidogenic and methanogenic bacteria of runs

Attached Bacteria*		MLVSS (mg/cm)	Bacteria Population	
			(cells/cm)	(cells/mgVSS)
RUN 2	Acidogenic	24.2	5.5×10^9	2.3×10^8
	Methanogenic		7.5×10^8	3.1×10^7
RUN 3	Acidogenic	34.5	2.5×10^{10}	7.2×10^8
	Methanogenic		6.5×10^8	1.9×10^7
RUN 4	Acidogenic	24.5	8.3×10^8	3.4×10^7
	Methanogenic		1.2×10^9	4.9×10^7

**) per one filter media (ringrace)

$\text{N}_2 + \text{CO}_2$ ガスで嫌気性状態に保ってある $2,000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ の基質にミネラルおよびビタミン等を加えた溶液にそれを沈め、ゴム栓で蓋をした。その後、恒温槽内 ($35 \pm 1^\circ \text{C}$) にそれを放置し随時 VFA 濃度を測定した。その結果、汚材から剥離させて測定した菌体と比較して 2 倍その値が大きかった。これは、水素生成性アセトジェニック菌と水素資化性酢酸生成細菌、メタン生成細菌において、ほとんどの場合菌種間水素伝達による相利共生系として構成されている¹⁰⁾ため、付着させたままのほうがその共生関係が良好であったからではないかと考えられる。測定値より計算した全有機酸生成量においては、Run 3 がもっとも多く約 $30 \text{ gCOD} \cdot \text{l}^{-1}$ で、特に付着菌体からの生成量が他の系の 3 倍の $23 \text{ gCOD} \cdot \text{l}^{-1}$ も生成されていた。また、どの系においても付着菌体からの生成量が多くなり、全量に対する割合は Run 2 において 56%、Run 3 が 77%、Run 4 が 57% であり、特に Run 3 は全生成量の 8 割近くをも付着菌体が担っていた。しかし、Run 2 と Run 4 の生成量においてその割合はほぼ同様であり、蓄積菌体：付着菌体：浮遊菌体 = 1 : 2 : 1 である。次に、酢酸資化性メタン菌の活性を Table 6 に示す。菌体当たりの最大メタン生成速度をみると、酸生成速度と異なり付着菌体の活性がもっとも低いことが知られる。活性実験より換算した槽内の全メタン生成量を比較すると Run 2 が約 $2,000 \text{ mgCH}_4\text{COD} \cdot \text{d}^{-1}$ ともっとも多く他の系の 3 倍ほど生成されたが、Run 3 と Run 4 はほぼ同じであった。Run 2 は、蓄積菌体と付着菌体からのメタン生成量がほとんどであり、その量は約 $1,000 \text{ mgCH}_4\text{COD} \cdot \text{d}^{-1}$ でほぼ同量である。Run 3 は、蓄積菌体からの生成量が多くなり、その生成量のほとんどが付着菌体と浮遊菌体からでありその比は 2 : 1 である。これは、Run 3 の汚材は粗に充填されてい

Table 5 MLVSS concentration and specific acidogenic activity of acidogenic bacteria of runs

Acidogenic Bacteria		Maximum Acidogenic Activity ($\text{mgCOD} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	Specific Acidogenic Activity		Total MLVSS Concentration in the Reactor (mgVSS)	Total Acid Produced in the Reactor ($\text{mgCOD} \cdot \text{d}^{-1}$)
			($\text{mgCOD} \cdot \text{mgVSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	($\text{mgCOD} \cdot \text{cells}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)		
RUN 2	Sediment	6940.0	0.89	2.9×10^{-8}	3132.7	2776.0
	Attached	1549.1	0.55	6.4×10^{-7}	15741.6	8675.0
	Suspended	1439.3	33.24	1.0×10^{-5}	121.2	4030.1
RUN 3	Sediment	4844.5	6.09	1.8×10^{-8}	318.2	1937.8
	Attached	6419.6	2.40	1.3×10^{-6}	9632.7	23110.7
	Suspended	1827.5	43.93	3.7×10^{-7}	116.5	5117.1
RUN 4	Sediment	5512.3	2.14	3.2×10^{-8}	1031.0	2204.9
	Attached	1745.9	0.89	5.4×10^{-6}	8238.3	7333.0
	Suspended	1215.5	13.06	3.7×10^{-6}	260.7	3403.4
	Attached*	2254.2	1.61	1.4×10^{-5}	—	—

*) The measurement was undertaken on the condition of bacteria attached on the media without any treatment

Table 6 MLVSS concentration and specific methanogenic activity of methanogenic bacteria of runs

Methanogenic Bacteria		Maximum Methanogenic Activity ($\text{mgCH}_4\text{COD} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	Specific Methanogenic Activity		Total MLVSS Concentration in the Reactor (mgVSS)	Total Methane Produced in the Reactor ($\text{mgCH}_4\text{COD} \cdot \text{d}^{-1}$)
			($\text{mgCH}_4\text{COD} \cdot \text{mgVSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	($\text{mgCH}_4\text{COD} \cdot \text{cells}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)		
RUN 2	Sediment	1703.0	0.28	4.0×10^{-6}	3132.7	877.2
	Attached	133.5	0.07	4.0×10^{-7}	15741.6	1101.9
	Suspended	14.8	0.45	6.4×10^{-7}	121.2	54.5
RUN 3	Sediment	54.9	0.14	7.0×10^{-7}	318.2	44.6
	Attached	54.3	0.04	4.2×10^{-7}	9632.7	385.3
	Suspended	46.5	1.48	9.5×10^{-6}	116.5	172.4
RUN 4	Sediment	366.4	0.19	1.1×10^{-6}	1031.0	195.9
	Attached	64.6	0.04	1.3×10^{-7}	8238.3	329.5
	Suspended	36.7	0.52	1.5×10^{-6}	260.7	135.6

るため、メタン菌が wash-out されやすく蓄積菌体のほとんどが浮遊してしまったためだと考えられる。Run 4 は、付着菌体からの生成量が多く浮遊と蓄積はほぼ同量である。しかし、Run 3 と比較して蓄積菌体からのガス生成量が多いことより、充填量が同じであっても密に充填してある方が wash-out しにくいと考えられる。

以上の結果より、酸生成菌およびメタン生成菌の菌数については、汙材に付着している菌体をもっとも多く、また活性も高い。このことは、汙床高における分解挙動で述べた HRT が短くなると汙床底部に沈降蓄積している菌体よりも汙材に付着した菌体や浮遊している菌体の働きが、基質分解に対して大きな役割を占めていることと一致している。さらに、酸生成菌においては、付着菌体からの生成量が大きな割合を占めており、汙材の充填量には相関がないが、メタン生成量については、汙材の充填量による影響が顕著に示された。本研究においては基質が低濃度であったため、汙材の充填方法の違いに対しては処理性能にほとんど影響がなかったが、分解挙動および菌数に対してはその影響が表われた。しかし、基質濃度が大きい場合は Young らの報告⁴⁾にあるように、汙材の充填方法が処理性能に対しても影響を及ぼすと考えられる。

4. おわりに

低濃度有機性廃水を用いた嫌気性汙床法における汙材の充填方法による処理性能の違いについて、汙床内での嫌気性菌の菌数および菌の活性によって、水理学的滞留時間の変化による連続実験に基づき比較検討した。本研究を通じて得られた知見を総括すると以下のような結論が得られる。

1. 低濃度有機性廃水における嫌気性汙床法の処理性能はそれぞれ異なった汙材の充填方法において HRT が 48h ~ 6 h の間では COD 除去率が 70 ~ 85 % と変化がなかった。
2. メタン菌数は、汙材を密に充填した系ではほぼ同量であったのに対して、汙材を粗に充填した系では wash-out 現象が起きたため非常に少なかった。
3. 菌体の槽内の分布は、すべての系において汙材に

付着している菌体をもっとも多かった。このことから槽内における基質分解能は、水理学的滞留時間が 6 時間よりも短くなると汙材底部に沈降蓄積した菌体よりも汙材に付着している菌体の働きが大きいことが分かった。

4. 汙材に付着している菌体において酸生成菌の菌数は 10^{10} 程度であるが、メタン菌の菌数はそれより 1 オーダー低かった。
5. 混合培養系からなる嫌気性汙床内においては、流入する負荷条件が許容範囲内であればそれに応じて高さ方向に沈降、付着、浮遊の三形態で存在するメタン菌と酸生成菌の分布あるいは活性が変化し適正な共生関係が形成され基質分解が進行することが分かった。

参考文献

- 1) 細見正明, 原沢英夫, 須藤隆一 (1988) 生活雑排水の汚濁負荷原単位と発生源対策, 用水と廃水, 30 (6), 23-29.
- 2) 松重一夫, 稲森悠平, 岡田光正, 砂原広志, 須藤隆一 (1988) 嫌気性汙床法の負荷変動下における浄化特性に関する研究, 下水道協会誌, 25 (293), 69-80.
- 3) 稲森悠平, 佐野亮一, 田安克彦, 岡田光正, 須藤隆一 (1982) 嫌気性プロセスを組み込んだ生活廃水の処理, 用水と廃水, 24 (9), 55-67.
- 4) J.C. Young and M.F. Dahab (1982) Effect of media design or the performance of fixedbed anaerobic reactors, *Water Science and Technology*, 15, 369-383, Copenhagen.
- 5) 片岡正治, 赤間泰, 中島一郎 (1981) 嫌気性汙床法による下水処理, 第24回下水道研究発表会講演集, 6-56.
- 6) Maxham, J.V. and W. Wakayama (1980) Innovative biological wastewater treatment technologies applied to the treatment of biomass gasification wastewater, Proc. of the 35th industrial waste conference, Purdue University, West La-fayette, 80-94.
- 7) 富沢健二, 木全隆 (1987) 嫌気性微生物を利用した新しい下水処理技術の開発調査, 技術開発部報, 日本上下水道事業団技術開発部, 77-97.
- 8) 李玉友, 野池達也 (1989) 余剰活性汚泥の嫌気性消化に及ぼす前熱処理および滞留時間の影響, 水質汚濁研究, 12, 12-121.
- 9) 井上雄三 (1986) 嫌気性生物膜の特徴, 土木学会衛生工学委員会付着微生物研究分科会報告書, 10-28.
- 10) 遠藤銀朗 (1984) メタン発酵に関する微生物の生態について—総説—, 荏原インフィロコ時報, 第91号, 22-29.

論文要旨

嫌気性汙床法における基質分解および細菌分布に及ぼす汙材の充填形態の影響

高野 卓* 野池 達也**

* 鹿島建設株式会社 ** 東北大学工学部土木工学科

〈水質汚濁研究 Vol.13 No.6 (1990) pp. 357~366〉

汙材の充填方法の異なった4種類の反応槽を用いて低濃度の人工合成下水を処理し、それぞれの菌体保持特性や処理性能を比較・検討した。その結果、低濃度有機性廃水における嫌気性汙床法の処理性能は、70~85%で汙材の充填方法が異なっても変化がないが、汙床内部の分解挙動、すなわち槽内の菌数およびその菌の活性が大きく異なることが分かった。また、すべての系において槽内の菌体の分布状況は、汙材に付着している菌数をもっとも多いこと、また、嫌気性汙床内の分解性能においては水理学的滞留時間が6時間よりも短くなると汙床底部に沈降、蓄積した菌体よりも汙材に付着している菌体による働きが大きいことが示された。さらに、汙材に付着している菌体において酸生成菌の菌数は、 10^{10} 程度であるが、メタン菌の菌数はそれより1オーダー低いことがわかった。

周防灘西部海域堆積物中多環芳香族炭化水素の分布

永淵 修* 黒川 陽一* 桜木 建治* 松尾 宏* 徳永 隆司* 永淵 義孝*

岸川 昭夫** 杉原 真司***

* 福岡県衛生公害センター ** 福岡県下水道公社 *** 九州大学アイソトープ総合センター

〈水質汚濁研究 Vol.13 No.6 (1990) pp. 367~373〉

周防灘西部海域堆積物中の多環芳香族炭化水素(PAH:ベンゾ(a)ピレン, ベンゾ(k)フルオランテン, ベンゾ(b)フルオランテン)を蛍光検出器付高速液体クロマトグラフで測定した。表層堆積物のBaPの濃度は $10.4\text{--}338\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}\text{-dry}$ の範囲であり、灘東側よりの灘中央および西側が高濃度であった。

柱状堆積物中PAH濃度はSt.1およびSt.23両地点とも亜表層で極大値を示し、30~40cm層(St.1), 40~45cm層(St.23)以深は一定値であった。また、St.23における40~45cm層は年代測定の結果から、約1920年頃と推定された。

表層堆積物中PAHの相対組成比からDistance Indexを求め、その結果に基づいて各地点のグループ分けを行ったところ、当海域は2つのグループI, IIとグループIII, IVに大別できた。

グループI, IIとグループIII, IVの海域におけるPAHの負荷形態は異なることが示唆された。