

(8) 無加温パイロットスケール UASB と固定床型接触曝気槽による
都市下水連続処理

Feasibility study of the pilot-scale sewage treatment system
combining of UASB and aerated fixed bed reactor under ambient temperature

角野晴彦*, 高橋優信 **, 山口隆司****, 阿部憲一****, 荒木信夫****
山崎慎一****, 霜崎敏*****, 長野晃弘*****, 西尾直道*****/**

Haruhiko SUMINO, Masanobu TAKAHASHI, Takashi YAMAGUCHI, Kenichi ABE, Nobuo ARAKI,
Shinichi YAMAZAKI, Satoshi SHIMOZAKI, Akihiro NAGANO, Naomichi NISHIO

ABSTRACT; A feasibility test of a 17 m³ pilot-scale sewage treatment system was carried out by continuous feeding of raw municipal sewage under ambient temperature conditions. The system consisted of an UASB and an aerated fixed bed reactor as a first unit and as a second unit, respectively. A part of the effluent from the fixed bed reactor was returned to the influent of UASB in order to supply sulfate sources. The total BOD of 148-162 mg/L at influent was reduced desirably to 11-25 mg/L at final effluents with a condition of the overall HRT of 24 hr and the recirculation ratio of 2-0.3 throughout the experimental period. The final effluent also showed superior quality with respect to low SS (10-32 mg/L) and high phosphorus removal efficiency. Vial activity tests of retained sludge in the UASB was conducted to evaluate an impact of temperature on the activity of microorganism. The methane-producing activities from acetate and H₂/CO₂ gas at 10 °C were only 2 % and 0 % of those at 35 °C, respectively. On the other hand, sulfate-reducing activities of the UASB sludge showed relatively high at 10 °C such as 18 % for acetate and 9 % for H₂/CO₂ gas compared to the activities at 35 °C. Therefore, BOD oxidization by sulfate reduction in the UASB could be dominant rather than methane production under low temperature condition. This sulfate-reducing activity tended to be proportional to the copy number of adenosine-5'-phosphosulfate (APS) reductase genes in DNA extracted from the sludge.

KEYWORDS; Domestic sewage, pilot-scale UASB, aerated fixed bed, sulfate reducing activity, *apsA* gene

1 はじめに

現在、都市下水の処理は、活性汚泥法に代表される好気性生物処理法によって主に行われているが、動力エネルギー消費の低減、余剰汚泥排出量の削減が求められている。これをクリアする方法として、嫌気性処理法の下水処理への導入が挙げられる。嫌気性微生物の増殖に至適な比較的温暖な地域では、嫌気性処理法のひとつである UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) 法が、フルスケ

*岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科 (Dept. of Civil Eng., Gifu National College of Technology)

**広島県産業科学技術研究所 (Hiroshima Prefectural Institute of Industrial Science and Technology)

***呉工業高等専門学校 環境都市工学科 (Dept. of Civil Eng., Kure National College of Technology)

****長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 (Dept. of Civil Eng., Nagaoka National College of Technology)

*****高知工業高等専門学校 建設システム工学科 (Dept. of Civil Eng., Kochi National College of Technology)

*****寿工業 (株) 化工機事業部 (New Product and Business Planning Office, Kotobuki Eng. & Mfg. Co., Ltd)

*****三機工業 (株) 環境システム事業部 (Environmental Systems Division, Sanki Eng. Co., Ltd.)

*****広島大学大学院 先端物質科学研究科 (Dept. of molecular biotechnology, Hiroshima university graduate school of advanced sciences of matter)

ールプラントで既に稼働を開始している^{1) 2) 3) 4)}。しかしながら、UASB 単独での処理性能は COD 除去率で 60~80%にとどまり放流に適したレベルにまで達しにくいことから、後段処理の研究・開発も盛んに行われている^{5) 6) 7) 8)}。中でも原田らのグループで開発した DHS (Downflow Hanging Sponge) 型後段処理技術は、インドでの実規模プラントにおいて UASB 処理水をわずか 1.5 時間で放流基準を満たす技術レベルにまで至っている^{9) 10)}。

一方、近年では、低温・低濃度排水処理への嫌気性処理の適用に関する研究も進展しつつある。既往の研究^{11) 12) 13) 14) 15)}では、排水処理温度が 20℃以下となる低温条件下においても、反応槽の線流速を増大し有機性成分と微生物の接触効率を上げる等の措置により有機物を除去できる報告がなされている。しかしながら、その処理水のレベルは、有機物の前段処理程度にとどまり、放流レベルにまで達していないのが現状である。

我々の研究グループでは、UASB と好気処理を組み合わせたシステムを用い、微生物の硫黄サイクルを活かした有機物除去機能に着目し、特に、低温条件下での有機物除去について研究を行ってきた^{16) 17) 18) 19)}。その中で、低温条件下においては、硫酸塩還元菌による有機物除去が有効な方法であることを見出してきている。

本研究では、微生物による硫黄サイクル機能を活性化した新規排水処理システムを実下水に適用し、その処理特性と寄与する微生物について評価を行った。実験では、パイロットスケールの UASB と固定床型接触曝気槽を組み合わせたシステムを用い、都市下水の連続処理を行った。

2 実験方法

2.1 実験装置

Fig. 1 に本実験に用いた処理装置の概略図を示す。構成と処理フローは次の通りである。原水として用いたスクリーン通過後の下水は、脱窒槽と UASB で嫌気的に前段処理される。UASB 流出水は、固定床型接触曝気槽（以降、接触曝気槽と呼ぶ）で好気性処理が行われた後、沈澱槽を経て処理水となる。循環ラインを沈澱槽下部から脱窒槽（原水流入箇所）に設け、沈澱した SS 成分を含む接触曝気槽内の水を返送した。また、リン除去のために、PAC 溶液を接触曝気槽に添加するポンプを設け、169~245 日目に添加した。

各槽の詳細は Fig. 1 に示す通りで、システム全体の有効容積は 17.0m³ となる。脱窒槽と接触曝気槽には、板状の支持体にそれぞれ 10mm, 5mm 厚のスポンジを両面に貼り合わせた担体を設置した。担体の見掛け充填率は、脱窒槽 21%, 接触曝気槽 13%とした。接触曝気槽は、全面曝気方式とした。なお、脱窒槽と UASB からの生成ガスは、回収は行わず、曝気用のブローで吸引し、接触曝気槽を通過して排出される。

植種汚泥は、UASB には食品廃水処理を行っていた中温メタン発酵グラニュールを 3.9m³、好気槽には活性汚泥を 0.1m³ 投入した。

実験装置は、広島県の東広島浄化センター内の屋外に設置し、無加温の条件で、平成 15 年 6 月中旬より運転を開始した。連続処理実験の採水は、原水はコンポジットサンプリングとし、UASB 流

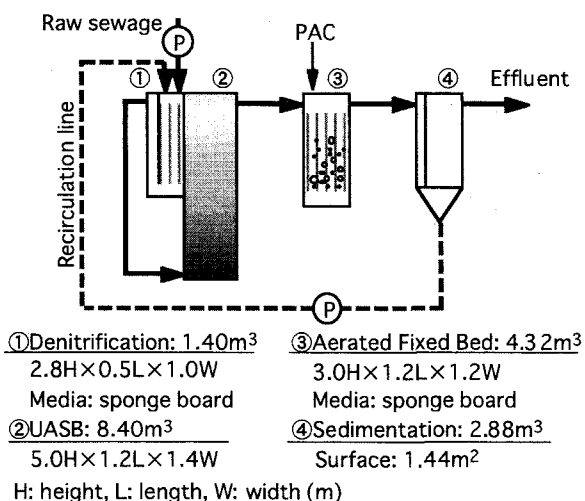


Fig. 1 Schematic representaion of the sewage treatment process.

出水、接触曝気槽、循環水及び処理水は午前 9～10 時のスポットサンプリングとした。

2.2 UASB 保持汚泥活性

UASB 保持汚泥について、メタン生成活性 (MPA) 及び硫酸塩還元活性 (SRA) を測定した。測定に供する汚泥は、UASB 高さ方向 1.0m の採水口から引き抜いた。試験は既報²⁰⁾に準じた 122mL バイアルによる方法とした。基質は、酢酸 (バイアル内混合液 2000mgCOD/L) と水素 ($H_2/CO_2 = 80/20$, 1.4atm) を用いた。SRA の測定では、硫酸ナトリウムをバイアル内混合液で 100mgS/L とし、メタン生成を停止させるためにクロロホルムを 5mg/L となるように添加した。活性値はいずれも gCOD/gVSS/day 基準で評価した。

2.3 硫酸塩還元菌の機能遺伝子による評価

SRA 測定に用いたものと同様の汚泥サンプルに対し、機能遺伝子 (Adenosine-5'-phosphosulfate Reductase: APS 遺伝子) の PCR 増幅を試みた。サンプルから Bead-beater 法²¹⁾を用いて抽出した DNA に対し、APS 遺伝子のサブユニットである *apsA* 遺伝子を標的として PCR を行った。プライマーセットには APS7F-8R を用い、95℃で 7 分間のホットスタート後、95℃で 45 秒間の変性、57℃で 50 秒間のアニーリング、72℃で 2 分間の伸長反応を 1 サイクルとし、25 サイクル行い、最後に 72℃で 3 分間の伸長反応を行った。Table 1 に APS7F-8R のシーケンスを示す。増幅産物はアガロース電気泳動で分離し、バンド強度を画像解析 (EDAS290, Kodak) から得た。

Table 1 Primer used for PCR amplification in this study.

Primer	Sequence(5'-3') ^b	Primer binding site ^a	Ref.
APS7F	GGGYCTKTCCGCTATCAAYAC	206-236	22)
APS8R	GCACATGTCGAGGAAGTCTTC	1139-1159	22)

^a Positions of the *Desulfovibrio-vulgaris* *ApsA* and *DsrAB* open reading frame.

^b D, not C; K, G or T; R, G or A; S, C or G; Y, C or T.

3 実験結果と考察

3.1 連続処理特性

Fig. 2 に実験期間中の流入下水の日平均・最高・最低水温と、HRT・循環比の経日変化を示す。Table 2 には、本実験に用いた下水と各反応槽流出水の代表的な組成を、夏期・秋期・冬期に大別したものを示す。以降、夏期を 46～76 日目、秋期を 107～137 日目、冬期を 184～229 日目とする (冬期は検体数確保のため期間日数を長くした)。流入下水の水温は、夏期の平均値が 27.1℃となり、その後徐々に低下し、冬期の平均値が 9.7℃となった。流入下水における 1 日の最高・最低の温度差は、夏期で約 6℃、冬期で約 11℃であった。システム全体の HRT (水理学的滞留時間) は 24hr、処理水量は 17.0m³/day で制御した。循環比 (循環水量/原水流入量) は、0～183 日目: 2, 184～272 日目: 0.3, 273～318 日目: 1 で運転を行った。

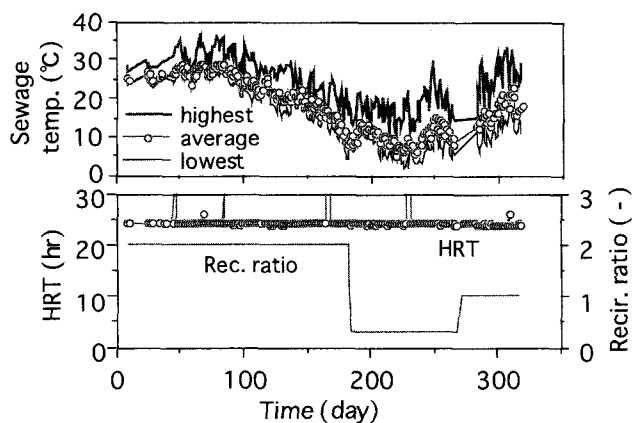


Fig. 2 Time course of sewage temperature, HRT and recirculation ratio.

Fig. 3 には、流入下水と UASB 流出水及び処理水の全 BOD、溶解性 BOD の経日変化を示す。流入下水の BOD は、全成分で夏期：148mg/L、秋期：131mg/L、冬期：162mg/L の平均値を示した。BOD は、運転 1 ヶ月後には全成分、溶解性ともに安定した処理をみせた。処理水の全 BOD 平均値は、夏期：11mg/L、秋期：18mg/L、冬期：25mg/L と高い有機物除去性能を発揮した。SS についても夏期：10mg/L、秋期：15mg/L、冬期：32mg/L と良好な処理水質が得られた。

250 日目より、UASB から汚泥が度々ウォッシュアウトした。処理水の BOD が悪化したため、298 日目に UASB、接触曝気槽、沈澱槽から汚泥引き抜きを実施した。汚泥引き抜き後は、直ちに全 BOD は 20mg/L 以下となった。汚泥引き抜き量 (89,000gSS) は、システム全体に留まった累積 SS (下水 SS-処理水 SS) の 10%となる。今後は、更なる長期実験により汚泥管理の運転因子を整理する必要がある。

Fig. 4 には、UASB 流出水の硫化物の経日変化を示す。循環比 2：0～183 日では、UASB 流出水の硫化物は概ね 10mgS/L 以下であった。Table 2 の流入下水の硫酸塩濃度 (夏期：72mgS/L、秋期：61mgS/L) から考えると、循環比 2 における硫酸塩還元は活発であるとは言えない。165 日目の MPA、SRA を測定したところ、ともに低い値を示した (詳細は次節で後述する)。そこで、嫌気性微生物活性の向上を図るために 184 日目より循環比を 0.3 とした。循環比を変更直後から、UASB 流出水の硫化物は急激に増加し、冬期の平均値で 24mgS/L となった。硫化物の生成が安定したことから、273 日目より循環比を 1 とした。循環比 1 においても、引き続き硫化物

Table 2 Summarized overview of process performance.

Season		Summer	Autumn	Winter
Period		8/1～8/31	10/1～10/31	12/17～1/31
(day)		46～76	107～137	184～229
Temp.(°C)	Sewage	27.1 (1.2)	21.4 (1.7)	9.7 (2.1)
HRT (hr)		24.5 (2.6)	24.0 (0.1)	24.4 (2.9)
Recir. ratio		2.0 (0.0)	2.0 (0.0)	0.3 (0.1)
Total BOD	Sewage	148 (32)	131 (15)	162 (33)
(mg/L)	UASB eff.	39 (9)	46 (4)	92 (10)
	AFB eff.	28 (26)	33 (4)	63 (11)
	Final eff.	11 (5)	18 (3)	25 (5)
Soluble BOD	Sewage	31 (3)	29 (6)	46 (24)
(mg/L)	UASB eff.	21 (5)	18 (2)	52 (10)
	AFB eff.	8 (10)	6 (2)	6 (1)
	Final eff.	5 (2)	8 (3)	7 (1)
Total CODcr	Sewage	324 (73)	316 (24)	354 (67)
(mg/L)	UASB eff.	103 (25)	107 (7)	173 (17)
	AFB eff.	96 (73)	109 (8)	168 (41)
	Final eff.	54 (14)	66 (12)	65 (8)
Soluble CODcr	Sewage	70 (7)	69 (6)	77 (20)
(mg/L)	UASB eff.	57 (11)	52 (3)	96 (13)
	AFB eff.	43 (21)	35 (3)	29 (4)
	Final eff.	39 (7)	39 (5)	29 (4)
SS	Sewage	168 (57)	158 (22)	175 (28)
(mg/L)	UASB eff.	26 (8)	37 (6)	47 (15)
	AFB eff.	39 (32)	52 (5)	107 (35)
	Final eff.	10 (6)	15 (4)	32 (11)
SO ₄ ²⁻	Sewage	72 (25)	61 (24)	130 (49)
(mgS/L)	UASB eff.	48 (22)	62 (24)	80 (34)
	AFB eff.	68 (21)	63 (22)	128 (77)
	Final eff.	64 (32)	59 (21)	102 (23)
Sulfide	UASB eff.	9 (5)	6 (2)	24 (7)
(mgS/L)	Final eff.	0	0	0
T-N	Sewage	38 (6)	46 (5)	48 (7)
(mgN/L)	Final eff.	30 (6)	39 (11)	43 (5)
T-P	Sewage	5 (3)	3 (0)	4 (0)
(mgP/L)	Final eff.	3 (0)	2 (0)	1 (0)

() : standard deviation

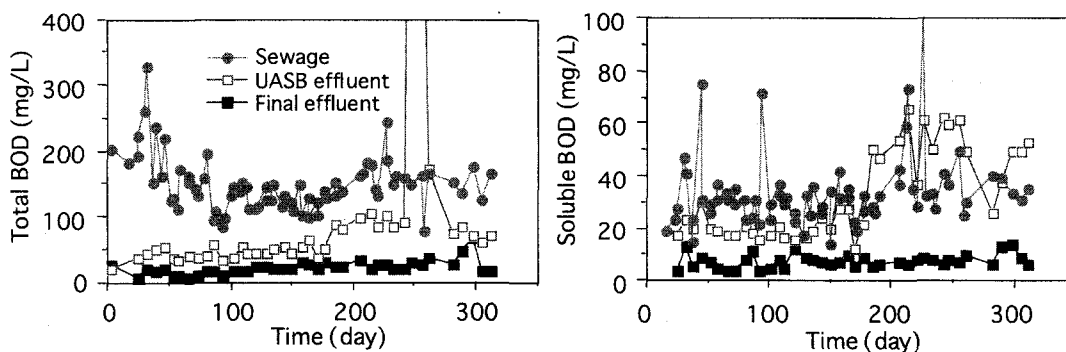


Fig. 3 Time course of BOD.

の生成が認められた。生成された硫化物は、接触曝気槽で硫酸塩に再生され、UASB 流出水以外では硫化物は検出されなかった。

連続実験における有機物除去は、季節による温度変化があるにも関わらず、安定して行うことができた。冬期のような低温条件の UASB では、有機物除去を行う手段として硫酸塩還元が効果的であることが示された。

Fig. 5 に、流入下水と処理水のリンの経日変化を示す。PAC を添加した 169~245 日では、直後から効果が認められた。添加量は AL/P (モル比) =1~2 で調整し、処理水で全リン 1mgP/L 以下となった。PAC 添加によるリン以外の処理水質への影響は、確認できなかった。

窒素除去は、夏期で 20%程度の低い除去率であった。これは、接触曝気槽流出水での酸化態窒素が平均 4mgN/L と硝化反応が進行していないことが、一因と考えられる。

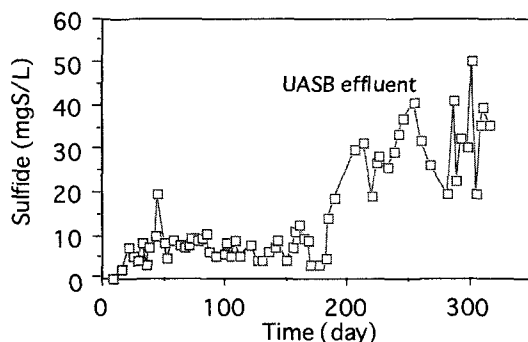


Fig. 4 Time course of sulfide.

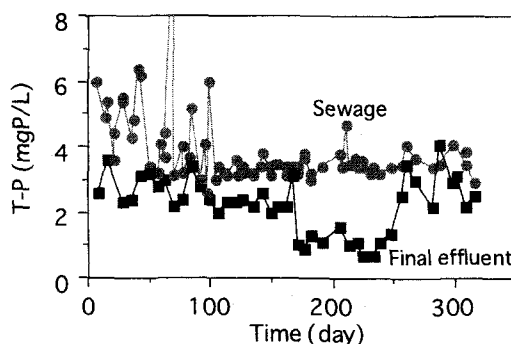


Fig. 5 Time course of total phosphate.

3.2 UASB 保持汚泥活性

Fig. 6 に、UASB 保持汚泥について試験温度 35℃での MPA, SRA の変化を示す。MPA は、植種と 79 日目では酢酸・水素基質において SRA を卓越した。これは、植種汚泥が中温メタン発酵グラニューールであったために、植種から流入水温が高い期間で活性を維持していたと考えられる。165 日目では、流入水温の低下に従い、MPA は植種時よりも酢酸基質で 0.20 倍、水素基質で 0.16 倍まで減少した。165 日目の SRA は、植種時から酢酸基質で 1.4 倍、水素基質で 1.2 倍に増加し、SRA/MPA

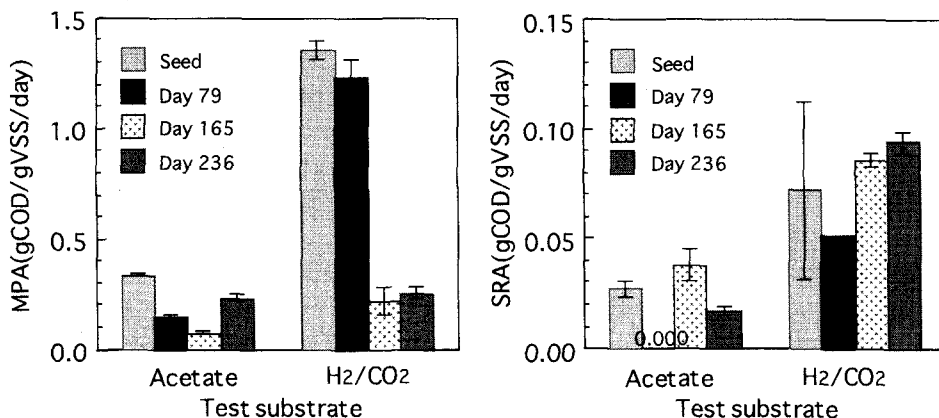


Fig. 6 Changes in methane producing activity (MPA) and sulfate reducing activity (SRA) of sludge retained in the UASB reactor. The activities were determined by vial tests at 35℃ with acetate and H₂/CO₂ gas as a test substrate.

が酢酸基質で 0.58, 水素基質で 0.41 となり, UASB での有機物除去に, 硫酸塩還元への寄与率が高くなった。

Fig. 7 には, 236 日目の UASB 保持汚泥について, 実際の処理温度に合わせた試験温度 10℃で行った MPA, SRA の結果を示す。試験温度 35℃では, 両基質において MPA が SRA より高い値を示していた。試験温度 10℃では, 酢酸基質で MPA : 0.005gCOD/gVSS/day と SRA : 0.003gCOD/gVSS/day が同レベルとなった。水素基質では MPA がゼロとなったが, SRA は 0.008gCOD/gVSS/day となった。活性残存率 (10℃活性値/35℃活性値) は, MPA : 酢酸基質で 2%, 水素基質で 0%となり, SRA は, 酢酸基質 : 18%, 水素基質 : 9%となる。よって, SRA が MPA と比較し温度低下に影響を受けにくいことが分かった。

従来のメタン発酵では, 有機物の分解過程から生成される水素を速やかに消費 (メタン化) できなければ, プロセスダウンを導く。Fig. 7 の結果より, 本システムの UASB では処理温度が低下しても, 水素消費者としてメタン菌の代替を硫酸塩還元菌が担えと考えられる。そのため, 酢酸基質の MPA が失活することはなく, グラニユール構成の優先菌種である酢酸資化性メタン生成菌²³⁾が保持されていると推測できる。

3.3 UASB 保持汚泥性状

Fig. 8 に, UASB 内の 133・246 日目の汚泥濃度と 246 日目の SVI の高さ方向プロファイルを示す。133 日目の VSS プロファイルは, 汚泥界面より上部 (2.5m 以上) では, 汚泥はほとんど存在せず, 明確な固液層の区別が見られた。246 日目では, UASB 特有のスラッジベッドは下部に形成されたままであったが, 高さ 2.5m 以上で 5200~2800mgVSS/L の汚泥が拡散していた。SVI は, 高さ 2.0m 未満が 35~43mL/gSS, 2.5m 以上では 78~90mL/gSS と 2 層に大別された。この下層の汚泥は, 目視でグラニユール形状と観察できた。本実験の低有機物濃度・無加温という条件で, 長期運転を行ってもグラニユール形状は維持可能であった。

3.4 硫酸塩還元菌の機能遺伝子による評価

SRA 試験に用いたものと同じサンプルに対し, FISH 法を用いて硫酸塩還元菌の検出を試みたが, サンプル中には実下水由来のクリスタル等の夾雑物が多量に混在していたため, 硫酸塩還元菌を検出することはできなかった。そこで, 硫酸塩還元菌数を評価するために汚泥から DNA を回収し, *apsA* 遺伝子量の定量を試みた。*apsA* 遺伝子は, 硫酸塩還元反応を担う酵素をコードする機能遺伝子のひとつで, 全ての硫酸塩還元菌が保有していることから²²⁾, 多様性の大きい硫酸塩還元菌を網羅して

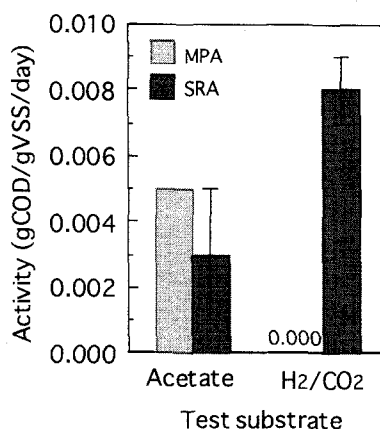


Fig.7 Methane producing activity (MPA) and sulfate reducing activity (SRA) at 10 °C. The sample sludge was taken from the UASB at the day 236.

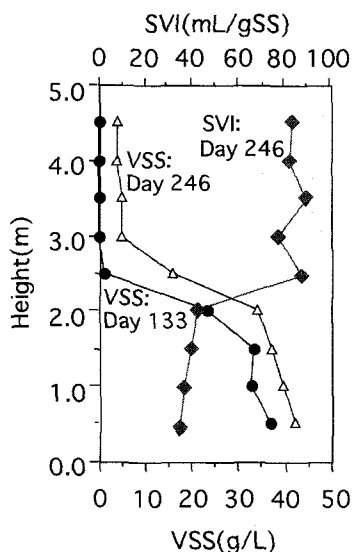


Fig. 8 Profile of sludge properties along the UASB reactor height.

検出できると判断した。Fig. 9 に *apsA* に特異的な APS7F-8R プライマーセットによる PCR 増幅産物のアガロースゲル電気泳動の写真を示す。PCR では各サンプルの DNA テンプレート量を同じに設定し、PCR サイクル数は増幅量がプラトーに達しないように 25 サイクルに設定した。APS7F-8R は汚泥から回収した DNA から *apsA* 遺伝子の特異的な増幅に機能し、理論通り約 900bp の増幅断片が得られた。次に、得られた電気泳動バンドの画像解析から、回収 DNA あたりの *apsA* 遺伝子量を測定した。Fig. 10 に、種汚泥の *apsA* 遺伝子量を 100% とした各測定日の遺伝子量の比を示す。*apsA* 遺伝子量は、79 日目に一旦低下し、その後は徐々に増加している。これは、硫酸還元活性試験の結果と合致しており、水温が高い時期（79 日目）には、メタン生成菌が優勢に活動しているため硫酸塩還元菌が減少し、165、236 日目では、メタン生成菌の活性が低下し硫酸塩還元菌が増加したと考えられる。硫酸塩還元菌の機能遺伝子 *apsA* をモニターすることは、UASB の硫酸塩還元ポテンシャルを把握する指標となりうる。

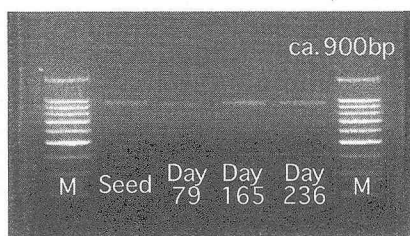


Fig. 9 PCR amplification of *apsA* gene of sludge retained in the UASB reactor.

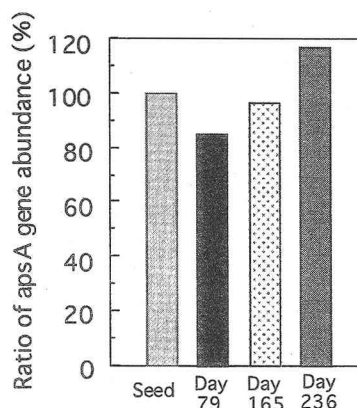


Fig. 10 Changes in *apsA* gene abundance in total DNA extracted from the UASB sludge. The bar color is according to the Fig. 6.

4 まとめ

UASB と接触曝気槽を組み合わせたシステムに、HRT24hr・無加温の条件下で、実下水を連続供給し、以下の知見を得た。

- (1) 処理水の全 BOD 平均値が夏期：11mg/L，秋期：18mg/L，冬期：25mg/L まで処理できた。SS についても夏期：10mg/L，秋期：15mg/L，冬期：32mg/L と良好な処理水質が得られた。全リンは、PAC を添加することで、1mgP/L 以下まで除去できた。
- (2) UASB 保持汚泥のメタン生成活性（MPA）と硫酸塩還元活性（SRA）を、試験温度 35℃と 10℃で評価した。その結果、試験温度 35℃では、両基質において MPA が SRA を上回った。試験温度 10℃では、酢酸基質で MPA と SRA が同レベルとなった。水素基質では MPA がゼロとなったが、SRA は 0.008gCOD/gVSS/day となった。処理温度が低下した UASB では、水素消費者としてメタン菌の代替を硫酸塩還元菌が担い、グラニューール構成に必要なメタン生成菌が保持されていると考えられる。
- (3) 硫酸塩還元菌の機能遺伝子である *apsA* 遺伝子を標的とした PCR を行い、増幅産物の評価を行った結果、SRA 経時変化と同じ傾向が得られた。*apsA* 遺伝子をモニターすることは、UASB の硫酸塩還元ポテンシャルを把握する指標となりうる。

謝 辞

この成果は、広島県産業科学技術研究所の西尾プロジェクトの研究によるものです。装置の設置・運用には東広島市にご協力を頂いております。また、実験は、広島県産業科学技術研究所の倉本恵治氏をはじめとするスタッフの方々と、呉高専の文後佳久氏の協力を得て遂行した。記して、関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) Aris Schellinkhout : UASB technology for sewage treatment: Experience with a full scale plant and its applicability in Egypt, *Water Science and Technology*, Vol.27, No.9, 173-180, 1993
- 2) Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, Jorge Martins Borges : Evaluation and start up of a full scale UASB reactor treating domestic sewage. Case study, *Proceeding 8th International conference on Anaerobic Digestion*, Vol.2, 192-199, 1997
- 3) 永田伸之, 鈴木薫 : わが国およびインドにおける嫌気性処理法を用いた下水処理の実例とバランスシートを応用した運転データの解析, *下水道協会誌*, Vol.35, No.422, 66-77, 1998
- 4) L. Florencio, M., Takayuki Kato, J. Cardoso de Moraes : Domestic sewage treatment in full-scale UASBB plant at Mangueira, Recife, Pernambuco, *Water Science and Technology*, Vol.44, No.4, 71-77, 2001
- 5) Andrea Tilche, Giuseppe Bortone, Gilberto Garuti, Fabrizio Malaspina : Post-treatments of anaerobic effluents, *Antonie van Leeuwenhoek* 69, 47-59, 1996
- 6) C.A.L. Chernicharo, M.C.P. Nascimento : Feasibility of a pilot-scale UASB/trickling filter system for domestic sewage treatment, *Water Science and Technology*, Vol.44, No.4, 221-228, 2001
- 7) C.A.L. Chernicharo, R. da Silveira Cota, A.M. Zerbini, M. von Sperling, L.H. Novy Castro Brito : Post-treatment of anaerobic effluents in an overland flow system, *Water Science and Technology*, Vol.44, No.4, 229-236, 2001
- 8) E. Foresti : Perspectives on anaerobic treatment in developing countries, *Water Science and Technology*, Vol.44, No.8, 141-148, 2001
- 9) 桐島佳宏, 大久保努, イザルル マクダル, 大橋晶良, 原田秀樹 : 途上国に適用可能なエネルギー最小型の新規下水処理プロセスの国際共同開発 -インドでの (UASB+DHS) システムの実証テスト-, *土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集第Ⅶ部門*, 599-600, 2003
- 10) 大久保努, 桐島佳宏, 大橋晶良, 原田秀樹 : インドでのエネルギー最小消費型下水処理システム (UASB+DHS) の実規模実証実験, *第 38 回日本水環境学会年会講演集*, 229, 2004
- 11) Jules B. van Lier, Salih Rebac, Piet Lens, Friso van Bijnen, Stefanie J. W. H. Oude Elferink, Alfons J. M. Stams, Gatzke Lettinga : Anaerobic treatment of partly acidified wastewater in a two-stage expanded granular sludge bed (EGSB) system at 8°C, *Water Science and Technology*, Vol.36, NO.6-7, 317-324, 1997
- 12) Gatzke Lettinga, Salih Rebac, Sofia Parshina, Alla Nozhevnikova, Jules B. van Lier, Alfons J. M. Stams : High-rate anaerobic treatment of wastewater at low temperature, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol.65, No.4, 1696-1702, 1999
- 13) Largus T. Angenent, Gouranga C. Banik, Shihwu Sung : Anaerobic migrating blanket reactor treatment of low-strength wastewater at low temperature, *Water Environment Research*, Vol.73, No.5, 567-574, 2001
- 14) T. Elitwalli, Gr. Zeeman, G. Lettinga : Anaerobic treatment of domestic sewage at low temperature, *Water Science and Technology*, Vol.44, No.4, 33-40, 2001
- 15) Tarek A. Elimitwalli, Vladimir Sklyar, Grietje Zeeman, Gatzke Lettinga : Low temperature pre-treatment of domestic sewage in an anaerobic filter reactor, *Bioresource Technology*, 82, 233-239, 2002

- 16) 角野晴彦, 山口隆司, 谷川大輔, 岡崎優子, 荒木信夫, 川上周司, 山崎慎一, 原田秀樹 : 前段 UASB と後段好気槽を組み合わせたシステムの硫黄酸化還元サイクルを利用した下水処理, 環境工学研究論文集, Vol.40, 431-440, 2003
- 17) 角野晴彦, 山口隆司, 長野晃弘, 山崎慎一, 荒木信夫, 原田秀樹 : UASB と好気槽による硫黄サイクル活性型の低温低濃度排水処理, 用水と廃水, Vol.46, No.2, 72-78, 2004
- 18) 山崎慎一, 山口隆司, 荒木信夫, 原田秀樹 : UASB-接触酸化下水処理システムによる有機物と窒素の同時除去特性, 土木学会論文集, No.734/VII-27, 135-142, 2003
- 19) H. Sumino, Y. Bungo, T. Yamaguchi, A. Nagano, N. Araki, S. Yamazaki, H. Harada : Development of novel wastewater treatment process by activated sulfur-redox action at low temperature, Proceedings of the 10th International Conference on Anaerobic Digestion, Vol.3, 1517-1520, 2004
- 20) Yamaguchi T., Harada H., Tseng I-C : Competitive exclusion of methane-producing bacteria by sulfate-reducing bacteria in anaerobic degradation of long chain fatty acid, Proceedings of the 8th International Conference on Anaerobic Digestion, Vol.2, 362-370, 1997
- 21) Miller, D. N., J. E. Bryant, E. L. Madsen, and W. C. Ghiorse : Evaluation and optimization of DNA extraction and purification procedures for soil and sediment samples, Applied and Environmental Microbiology, 65, 4715-4724, 1999
- 22) Friedrich, M. W. : Phylogenetic analysis reveals multiple lateral transfers of adenosine-5'-phosphate reductase genes among sulfate-reducing microorganisms, Journal of Bacteriology, 184, 278-289, 2002
- 23) 多川正, 関口勇地, 荒木信夫, 大橋晶良, 原田秀樹 : UASB 廃水処理プロセスでの嫌気性微生物群集の分子生物学的手法による動態解析, 環境工学研究論文集, Vol.38, 151-162, 2001