

(47)

多段型 UASB による高濃度脂質・固形物含有

パームオイル圧搾廃液 (POME) の高速処理と保持汚泥の変遷

Process Performance and Sludge Behaviors of Multi-staged UASB reactor for Treatment of Palm Oil Mill Effluent (POME)

クーシヴィライ パイラヤ*, 大橋晶良*, 原田秀樹*

Pairaya KUCIVILIZE*, Akiyoshi OHASHI*, Hideki HARADA*

ABSTRACT ; A multi-staged UASB reactor was applied to Palm Oil Mill Effluent (POME) which contains high strength of particulate organics and lipid. Two sets of laboratory-scale reactor were operated for 15 months in parallel at different temperature; 55°C and 35°C. The thermophilic reactor accommodated a COD loading rate of 25 kg COD-m⁻³·d⁻¹ with COD removal of 73.9±9.6, while the mesophilic reactor achieved 10 kg COD-m⁻³·d⁻¹ with COD removal of 84.9±5.4. Throughout the whole duration the methane conversion (defined by methane COD recovered per COD removed) was higher by 14% by the thermophilic reactor than by the mesophilic reactor. Both reactors performed satisfactory lipid removals of above 80%. The extent of accumulation of un-degraded organic solids in the mesophilic reactor was more significant rather than in the thermophilic reactor. Both reactors eventually exhibited stable reactor performance over 7 months at each maximum organic loading rate, showing no sign of process failure throughout the period.

KEYWORDS ; Palm Oil Mill Effluent, Methane fermentation, Multi-staged UASB.

1. はじめに

マレーシアは、世界のパームオイル総生産の約半分を占める国である。2002 年におけるマレーシアの Crude Palm Oil は 11,900,000 トン生産された。一トン当たりの Crude Palm Oil の生産には平均 140 kg COD に相当する 2.5m³ の廃液 (Palm Oil Mill Effluent: POME) が発生する¹⁾。現状での POME の処理はほとんど (99% 以上) は嫌気性ラグーン法が用いられているため、年間におよそ 8,750,000 トンの CO₂ に相当する温室効果ガスを放出し、これが地球温暖化の原因となっている。本研究は POME からのエネルギー回収と地球温暖化の抑制を目的として、多段型 UASB リアクター^{2), 3), 4), 5)}による POME の処理の実用化に向けて、研究を進めた。POME は高濃度の脂質・固形物含有廃液であり、高温で排出されているため、高温の嫌気性処理がより効果的だと考えられる。そのため、本研究は中温および高温プロセスによる処理特性の比較を行い、プロセスの選択としての基礎的データを得ることとした。また保持汚泥への脂質・固形物の蓄積の可能性が考えられるため、汚泥性状の変化についても比較検証を行った。

* 長岡技術科学大学 環境システム工学系 (Dept. of Environ. Systems Engineering, Nagaoka University of Technology)

2. 実験方法

2.1 多段型 UASB リアクター

実験に用いた多段型 UASB リアクターの概要図を Fig.1 に示した。リアクターは、高さ 100 cm、内径 15×10 cm (最大断面)であり、高さ方向 30、60、77 cm に 3 つの気・固液分離装置 (GSS) を設置し、GSS 気相部を除いたリアクターの液張り実容量は 9.5 L である。容積負荷と HRT の算定にはこの実容量を基準とした。高温リアクターは加温循環水槽によってリアクターの温度を 55℃前後に維持し、中温リアクターは 35℃の恒温室内に設置することで所定温度に維持した。

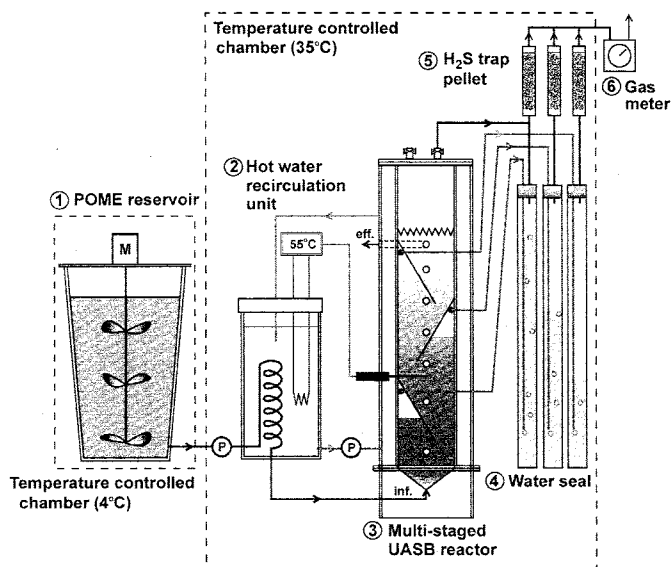


Fig. 1 Experimental setup of multi-staged UASB reactor. The thermophilic UASB was maintained at 55℃ by hot-water jacket.

2.2 植種汚泥

高温リアクターには 55℃でミルク廃液の処理を行った高温グラニューール汚泥³⁾ (約 4 年間 4℃保存、VSS/SS 0.71、SVI 30.7 ml·gVSS⁻¹) を用いた。中温リアクターには 35℃でミルク廃液の処理を行った中温グラニューール汚泥 (約 3 年間常温保存、VSS/SS 0.69、SVI 66.5 ml·gVSS⁻¹) を用いた。それぞれ、リアクター内汚泥量が 170 g VSS/reactor (18,000 mg·l⁻¹) 前後になるように投入を行った。

2.3 パームオイル圧搾廃液 (POME)

実験に用いた POME はマレーシアのパームオイル圧搾工場より空輸したものであり、その性状を Table1 に示した。全 COD の約 60% が固形物によるものであり、固形物は g VSS 当たりの全 COD の 37% が脂質、34% がタンパク質、26% が糖である。全脂質 COD 濃度中の脂肪酸の割合は主にオレイン酸 (C_{18:1}) 33%、パルミチン酸 (C_{16:0}) 31%、リノール酸 (C_{18:2}) 9% で占めている。リアクターへの供給時は、全 COD_C 濃度が 1,000–3,000 mg COD·l⁻¹ になるように水道水で希釈を行い、重炭酸ナトリウムによりアルカリ度を添加した。なお、用いた POME には K 2,470 mg·l⁻¹、Ca 860 mg·l⁻¹、Mg 800 mg·l⁻¹、Fe 126 mg·l⁻¹ などを含含有しており、無機塩類および微量元素の添加は一切行わなかった。

2.4 分析項目

供給廃水流量、供給廃水及び処理水の pH、SS、VSS、全 COD、溶解性 COD (0.4 μm ろ紙に通過したろ

Table 1 Representative characteristics of POME.

Parameter	conc.
pH	4.2
COD _{total} (mg COD · l ⁻¹)	89,933
COD _{soluble} (mg COD · l ⁻¹)	38,850
SS (mg · l ⁻¹)	30,504
VSS (mg · l ⁻¹)	27,226
Lipids total (mg COD · l ⁻¹)	25,340
Lipids soluble (mg COD · l ⁻¹)	8,005
Proteins total (mg COD · l ⁻¹)	19,427
Proteins soluble (mg COD · l ⁻¹)	781
Carbohydrate total (mg COD · l ⁻¹)	29,384
Carbohydrate soluble (mg COD · l ⁻¹)	16,050
C/N ratio	18

液)、揮発性有機酸 (VFA : Volatile Fatty Acids)、生成バイオガス量、生成バイオガスの組成の測定を毎日行った。供給廃水及び処理水中の脂質の測定を週に二回行った。COD の測定は、HACH : 化学的酸素要求量分析方法によった。生成バイオガスの発生量は、脱硫剤を充填したアクリル製カラムに通して、硫化水素を除去した後、ガスメーターを通過させて測定を行った。バイオガス組成は、TCD 型検出器ガスクロマトグラフ (Shimadzu GC-8A、Packing material: Unibeads C60/80 mesh、Carrier gas : Argon) で測定した。VFA 濃度の測定は、FID 型検出器ガスクロマトグラフ (Shimadzu GC-1700、Packing material: Thermon-3000 5%、Shincarbon-A 60/80 mesh、Column Temperature 125°C、Carrier gas : Nitrogen) で行った。廃水中の脂質の抽出は Bligh-Dyer 法に準じ、ヘキサン-iso-プロパノール溶媒で抽出を行った後、COD_G 滴定法 (1998 年版下水試験法) で脂質含有濃度を測定した。

汚泥の性状の測定は、採取した汚泥を 3,000 rpm、5 min、4°C で遠心分離し、基質洗浄を行ってから測定を行った。脂質の測定は廃水中の脂質の測定と同様な方法で行った。タンパク質の測定は Lowry 法に準じて測定を行った。DNA 含有量は、試験汚泥をビースビーダー法⁶⁾により全 DNA を抽出し、Picogreen dsDNA 定量法により定量した。C/N 比は CN Corder (Yanaco MT-700) を用いて測定した。

保持汚泥メタン生成活性試験⁷⁾はリアクター高さ 21cm から採取した保持汚泥について行った。高温リアクター試験汚泥は 55°C、中温リアクター試験汚泥は 35°C の温度条件下で行った。試験基質には、酢酸、水素 ($H_2:CO_2 = 80:20$, 1.4 atm) 及びパルミチン酸を用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 処理特性

Fig.2 にスタートアップから 440 日間の連続運転期間における処理特性の結果を示した。両リアクターは並列にスタートアップを行った。中温リアクターは 128 日目に COD 容積負荷 $13 \text{ kg COD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ に増加させたが、処理が徐々に悪化したため、149 日目から容積負荷を $10 \text{ kg COD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ に戻して以降維持した。高温リアクターは 213 日目に最大 COD 容積負荷 $25 \text{ kg COD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ に達した。これより、多段型 UASB による POME 処理は、高温プロセスは中温プロセスより 2.5 倍高い処理速度を許容できることが明らかとなった。また、

Table 2 Performance of thermophilic and mesophilic multi-staged UASB reactor.

		Thermophilic (55°C)	Mesophilic (35°C)
Experiment duration		Day 213 – 440	Day 149 – 440
COD loading	($\text{kg COD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	25.2 ± 1.7	10.3 ± 0.7
HRT	(h)	2.93 ± 0.01	4.79 ± 0.06
Influent COD total	($\text{mg COD} \cdot \text{l}^{-1}$)	3087 ± 211	2058 ± 135
Total COD removal	(%)	73.9 ± 9.6	84.9 ± 5.4
Soluble COD removal	(%)	89.3 ± 1.9	90.4 ± 2.8
SS loading	($\text{kg SS} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	8.0 ± 1.4	3.6 ± 0.7
SS removal	(%)	64.6 ± 24.7	89.5 ± 7.2
Lipids loading	($\text{kg COD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	9.9 ± 0.7	4.1 ± 0.3
Lipids removal	(%)	80.9 ± 8.9	86.7 ± 6.1
CH ₄ conversion*	(%)	77.4 ± 17.1	61.4 ± 11.4

* (CH_4 -COD recovered / COD eliminated)

既報の POME のメタン発酵処理と比べて、最も高い許容容積負荷を發揮し、かつ長期間運転での安定な処理結果が得られた。

Table 2 に両リアクターの最大許容負荷運転期間での処理特性を要約した。POME のような難分解性廃水の嫌気性処理では、未分解物質が反応器内に蓄積する可能性が高く、COD 除去率のみでは処理能力を把握するには不十分である。反応器内の基質分解能の評価は、除去した COD からのメタン転換率で行うことが

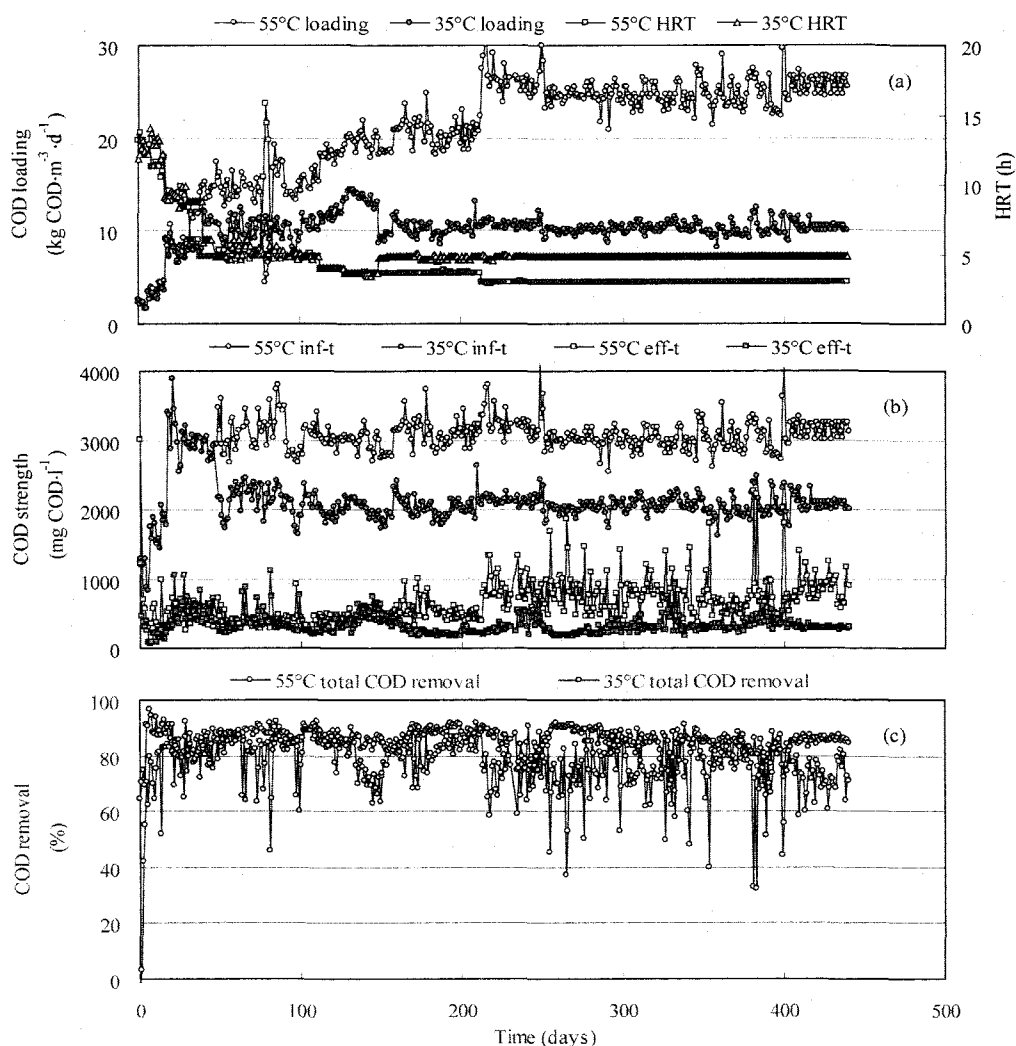


Fig.2 Process performance of thermophilic (55°C) and mesophilic (35°C) multi-staged UASB reactors treating POME.

手法として考えられる。しかしながら、POME には高濃度の固形物が含まれているため、処理水採取時における固形物の流出の変動によって処理水の全 COD が左右され、結果として本実験ではメタン転換率が大きい変動幅を示した。が、それぞれのリアクターの最大容積負荷運転時での平均値を比べると、高温リアクターは中温よりメタン転換率が 16%高い値を示し、より良好な分解能力をもっていることが見られた。高温リ

アクターでは 2.9 h の HRT でより高い液上昇線流速 (高温 : maximum liquid velocity (max. L. V.) $0.37 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 、中温 : max. L. V. $0.23 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$) で運転していることで、基質中の固形物の混合がよく、処理水中に SS が混ざって流出した結果、SS 除去率が中温より 24.9% 低い値を示した。流出 SS がより高いことによって、高温リアクターの全 COD 除去率は中温よりも 11% 低い値を示した。脂質除去率については、両リアクターとも 80% 以上を示し、良好な脂質除去率を示した。処理水中の VFA の蓄積も見られなかった (両リアクターともに処理水中の総 VFA 濃度は $50 \text{ mg COD} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下であった)。

3.2 中温リアクターと浮上汚泥の問題

中温リアクターには浮上汚泥・スカム発生の問題が観察されたのに対し、高温リアクターは 440 日間の運転期間中ではそのような問題は発生しなかった。そのため中温リアクターでは、処理水出口のつまりを防ぐために、浮上汚泥・スカムの人為的除去が行われた。除去した浮上汚泥の性状の分析結果を Table 3 に示した。Table 5 にまとめたリアクター高さ 21cm から採取した保持汚泥の性状と比較すると、g VSS 当たりの脂質 COD 濃度は 1.5 倍高い濃度を示した。C/N 比についても、保持汚泥が 6 程度に対し、浮上汚泥は 7.14 であった。未分解の POME 中の脂質と SS が汚泥表面に付着し浮上を引き起こしたと考えられる。浮上汚泥・スカムの高級脂肪酸の成分はほとんどがパルミチン酸 ($\text{C}_{16:0}$) であった。POME に含まれる高級脂肪酸の主成分がオレイン酸 ($\text{C}_{18:1}$ 33%) とパルミチン酸 (31%) であることから、パルミチン酸のみが蓄積しているのは、オレイン酸の分解速度はパルミチン酸よりも速く⁸⁾、オレイン酸の分解には中間生成物質としてパルミチン酸が生成される^{9), 10)}ためだと考えられる。多くの脂質含有廃水の嫌気性処理ではパルミチン酸が最も蓄積しやすいことが報告されている^{3), 4), 11)}。

Table 3 Characterization of scum/floating sludge in the mesophilic reactor.

	g COD · g VSS ⁻¹	%
COD	1.50	100
Lipids	0.243	16.2
Proteins	1.04	69.3
C/N ratio 7.14 (-), $\text{C}_{16:0}$ 39.8% of lipids COD		

3.3 保持汚泥の性状変化

UASB リアクターによる高濃度脂質・固形物含有廃水の処理では、反応器底部に固形物が蓄積する問題¹²⁾や、グラニュー汚泥表面への脂質の付着問題¹³⁾が報告されている。多段型 UASB の特徴である、高い汚泥保持能力を生かし、上記の問題を抑制するために、本研究では基質濃度を低く設定し、HRT を短縮させることにより、上昇線流速を増大させることにした。また、もう一つの特徴である反応器内水素分圧の低減効果²⁾により、従来型 UASB リアクターよりも脂質分解速度の促進効果が得られることが考えられ、これらの問題を軽減することができると期待される。これら問題の抑制効果を保持汚泥の性状の変遷により確認することにした。

Table 4 Time shift in some properties of thermophilic (55°C) and mesophilic (35°C) sludge.

Test Day		Thermophilic (55°C)					Mesophilic (35°C)				
		d0	d176	d265	d354	d438	d0	d176	d265	d354	d438
COD	(g COD · g VSS ⁻¹)	1.76	1.72	1.76	1.76	1.76	1.44	1.63	1.59	1.84	1.85
Lipids	(g COD · g VSS ⁻¹)	0.20	0.15	0.29	0.12	0.08	0.20	0.15	0.15	0.16	0.12
C/N ratio	(-)	4.72	5.91	6.58	6.12	6.00	5.81	5.93	6.33	6.01	6.21
DNA content	(mg · g VSS ⁻¹)	6.62	-	2.50	-	4.50	4.27	-	3.36	-	3.98
Sludge amount	(g VSS/reactor)	189	247	262	353	358	150	184	277	282	272

Table 4 に高温及び中温リアクターの高さ 21cm から採取した汚泥の性状の変遷とリアクター内保持汚泥量をまとめた。比較するために、われわれの研究室が所有する固形物と脂質が含まれていない人工廃水 (Sucrose+VFA) を処理している高温(55°C)及び中温 (35°C) 従来型 UASB リアクターの保持汚泥の性状を Table5 にまとめた。

Table 5 Characteristics of thermophilic and mesophilic granular sludge treating SS- and lipid-free artificial wastewater (Sucrose + VFA).

	COD*	Lipids*	C/N ratio(-)
Thermophiic (55°C)	1.78	0.137	4.20
Mesophilic (35°C)	1.73	0.127	4.71

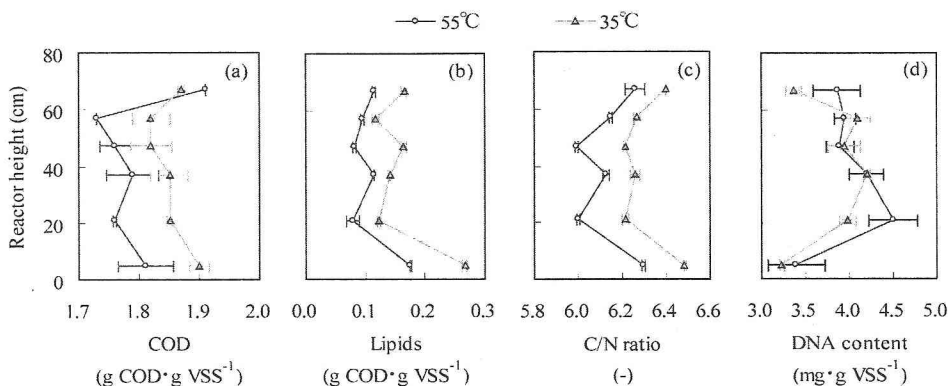


Fig. 3 Profiles of sludge properties along the reactor height. Sludge sample was harvested on the day 438 from thermophilic (55°C) and mesophilic (35°C) multi-staged UASB reactor.

両リアクターの汚泥保持量は最大容積負荷長期安定処理時 (高温 : 354 日目以降、中温 265 日目以降) では一定な量を確保することができたことが明らかとなり、多段型 UASB リアクターの高い汚泥保持能力の効果が証明された。汚泥の性状の変遷については、両リアクターの保持汚泥の C/N 比は植種汚泥と比べて増加し、6 程度となった。人工廃水処理グラニュール汚泥の C/N 比は 4 程度を示すこと、また、汚泥の DNA 含有量も植種汚泥と比べて低下したことから、POME の固形物が保持汚泥に付着した可能性が示唆された。しかし、その変動は極めて僅かであった。保持汚泥の脂質含有濃度については中温リアクターの方が最終的にわずかながら高い値を示したが、人工廃水処理グラニュール汚泥と比べるとほぼ同程度の濃度を示したため、保持汚泥への未分解脂質の付着はほとんどなく、脂質以外の未分解固形物が付着している可能性が考えられた。

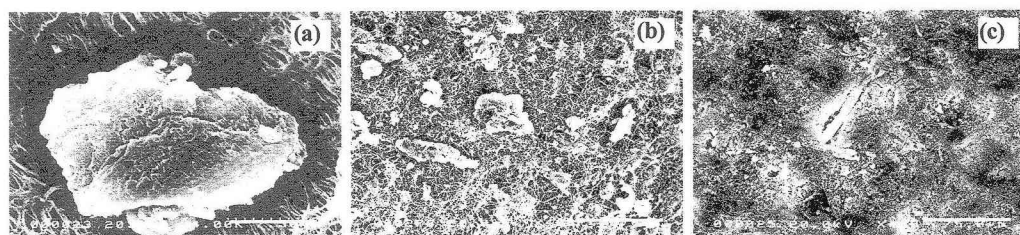


Fig.4 Scanning electron micrographs.

- (a) : SS fraction present in POME (bar length 7.50 μ m).
- (b) : the outer surface of mesophilic granular sludge (bar length: 75.0 μ m) on the day 260.
- (c) : the outer surface of thermophilic granular sludge (bar length 75.0 μ m) on the day 260.

Fig.3 に 438 日目の両リアクター高さ方向の汚泥性状プロファイルを示した。中温汚泥は高温汚泥より C/N 比、g VSS 当たり COD、脂質濃度において高い値を示した。両リアクターの高さ 5 cm の汚泥では流入 POME の VSS も汚泥と混合しているため、脂質濃度が高さ 21 cm 以上の汚泥と比べて 2 倍高い値を示したと考えられる。両リアクターの高さ 67 cm の汚泥は高さ 21 cm から 57 cm の間の汚泥と比べて C/N 比、COD 濃度が高く、DNA 含有量が低いことから、未分解の固形物が比較的付着した汚泥または未分解の固形物が存在していることが明らかになった。

Fig.4 に POME 中の固形物(a)、260 日目の中温リアクターグラニュール汚泥(b)及び高温リアクターグラニュール汚泥(c)の表面写真を示した。中温グラニュール汚泥の方が高温グラニュール汚泥に比べて多くの POME 固形物の付着が観察された。

3.4 メタン生成活性の変化

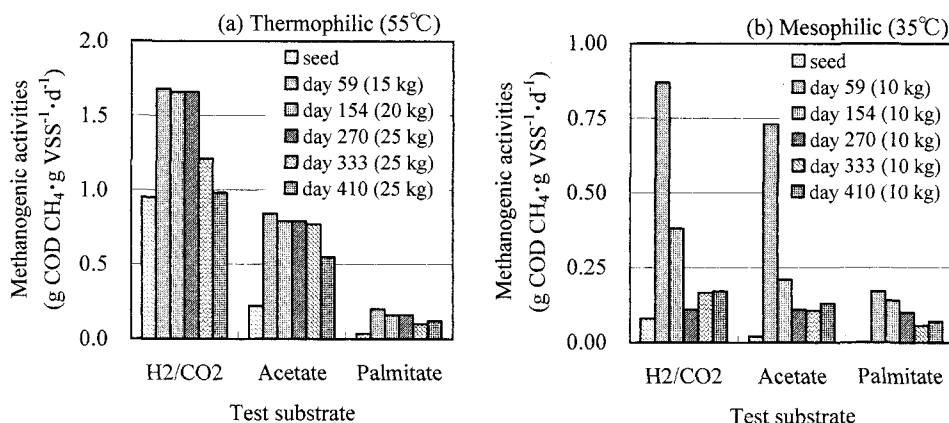


Fig. 5 Methanogenic activities of retained sludge. Sludge sample were taken out from (a) thermophilic (55°C) UASB reactor and (b) mesophilic (35°C) UASB reactor. The methanogenic activity tests were conducted at 55°C for thermophilically-grown sludge and at 35°C for the mesophilically-grown sludge.

Fig.5 に両リアクターの高さ方向 21 cm の汚泥におけるメタン生成活性の変化を示した。メタン生成活性は試験汚泥の g VSS 当たりで生成されたメタンの速度で表しているため、有機性固形物が汚泥に付着すると活性値が見かけ上低くなると考えられる。両リアクターの保持汚泥は 59 日目には全ての試験基質において最大の活性値を示したが、その後活性値が減少した。中温汚泥は、59 日目に比べて 154 日目は急激に減少した (H₂/CO₂ 0.44、酢酸 0.26、パルミチン酸 0.82 倍に減少) が、高温汚泥はほぼ同程度の値を示した。このことから、中温リアクターの方が高温リアクターと比べて固形物の蓄積の進行が早いことが考えられる。410 日目におけるメタン生成活性値は、高温汚泥は中温汚泥と比べて、H₂/CO₂ で 5.8 倍、酢酸で 4.2 倍、パルミチン酸で 1.7 倍高い活性 (高温 : H₂/CO₂ 0.98 ; 酢酸 0.55 ; パルミチン酸 0.12、中温 : H₂/CO₂ 0.17 ; 酢酸 0.13 ; パルミチン酸 0.07 g COD · g VSS⁻¹ · d⁻¹) を示した。殆ど固形物を含わない易分解性廃水 (焼酎廃液) を処理した高温グラニュール汚泥 (容積負荷 10 kg COD · m⁻³ · d⁻¹、COD 除去率 90%) ⁵⁾ と比較すると H₂/CO₂ で 0.19 倍、酢酸で 0.26 倍しか活性を示さなかった。類似廃水 (脂質含有) である廃牛乳希釈水を処理した高温グラニュール汚泥 (容積負荷 35 kg COD · m⁻³ · d⁻¹、COD 除去率 90%) ³⁾ と比較すると、H₂/CO₂ で 0.17 倍、酢酸で 0.95 倍、パルミチン酸で 0.57 倍の活性を示した。基質の組成の違いという原因の他に、固形物の蓄積により、

メタン生成活性値が見かけ上低い値を示したと考えられる。

4. 結論

多段型 UASB による高温 v.s. 中温での POME の処理は、7 ヶ月間以上の最大容積負荷の連続処理実験結果から、

1. 高温リアクターは中温リアクターより 2.5 倍高い最大容積負荷である $25 \text{ kg COD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ を許容し、処理水中に VFA の蓄積がなく、全 COD 除去率が $73.9 \pm 9.6\%$ で、メタン転換率は中温処理より 16% 高く、脂質除去率は $80.9 \pm 8.9\%$ で安定な処理を維持した。
2. 高温リアクターはスカム・浮上汚泥の問題は観察されなかったが、中温リアクターのスカム・浮上汚泥は頻繁に生じ、その脂質含有濃度はリアクター高さ 21 cm の保持汚泥より 1.5 倍高く、蓄積する脂質は高級脂肪酸のパルミチン酸のみであった。
3. 保持汚泥性状の変化より、両汚泥には POME の固形物が非常にゆっくり蓄積し、高温汚泥より中温汚泥の方が固形物の蓄積が見られた。
4. リアクターの高さ方向の汚泥性状プロファイルより、反応器底部 (5cm) での汚泥脂質濃度は他の部位の汚泥より 2 倍高く、リアクター上部と下部の汚泥の C/N 比は中部より高く、DNA 含有量はより低かった。これより、POME 中の脂質含有固形物はリアクター下部に蓄積し、比較的固形物を付着しているグラニューール汚泥はリアクター上部に偏在していたことが観察された。
5. 中温汚泥のメタン生成活性の急激な減少 (59 日目と 154 日目との比較: H_2/CO_2 0.44、酢酸 0.26、パルミチン酸 0.82 倍に減少) により中温リアクターの方が高温リアクターと比べて固形物の蓄積の進行が早いということが考えられる。また、高温汚泥は中温汚泥より約 2 から 6 倍高い活性を示したが、固形物の蓄積により、メタン生成活性値が見かけ上低い値となった。

高温プロセスの方が中温プロセスより POME 分解能が高く、処理速度や保持汚泥のメタン生成活性値が高いことが検証され、多段型 UASB リアクターの特徴を生かし、短い HRT による運転により汚泥への固形物の蓄積を低減することができた。

謝辞

本研究は NEDO エネルギー・環境国際共同研究事業 (平成 13 年度、代替-#1 51101583、研究代表者: 原田秀樹) によって援助を受けた。また、連続実験は中村玲美氏 (当時修士 1 年)、加藤海氏 (当時学部 4 年) の労苦に負うところが多い。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Yeoh B.G. *et al.* (Eds.): Waste Management in Malaysia: Current Status and Prospects for Bioremediation, Ministry of Science, Technology and Environmental, Malaysia, 111-136, 1993
- 2) 原田秀樹、珠坪一晃、大橋晶良、関口勇地、多川正: 新規の多段型高温 UASB リアクターによる超高速廃水処理装置の実現化、環境工学研究論文集、34、327-336、1997
- 3) 多川正、大橋晶良、原田秀樹: 新規の多段型高温 UASB リアクターによる高濃度脂質含有廃水の嫌気性処理特性、環境工学研究論文集、35、51-60、1998
- 4) Tagawa T., Takahashi H., Sekiguchi Y., Ohashi A., and Harada H.: Pilot-plant study on anaerobic treatment of lipid - and protein - rich food industrial wastewater by a thermophilic multi-staged UASB reactor, *Wat. Sci. Tech.* **45**(10), 225-230, 2002
- 5) クーシヴィライ・パイラヤ、多川正、関口勇地、大橋晶良、原田秀樹: 多段型 UASB リアクターに

よる焼酎蒸留粕廃液の超高速メタン発酵処理—スタートアップ期間及び再スタートアップ期間のプロセス挙動—、環境工学研究論文集、39、77—85、2002

- 6) Miller D. N., Bryant J. E., Madsen E. L., and G. W. C. : Evaluation and optimization of DNA extraction and purification procedures for soil and sediment samples, *Appl. Environ. Microbiol.* **65**, 4715 – 4724, 1999
- 7) Syutsubo K., Harada H., Ohashi A., and Suzuki H. : An effective start-up of thermophilic UASB reactor by seeding mesophilically-grown granular sludge, *Wat. Sci. Tech.* **36(6-7)**, 391-398, 1997
- 8) Novak J. T., and Carlson D. A. : The kinetics of anaerobic long chain fatty acid degradation, *J. Water Pollut. Control Fed.* **42**, 1932-1943, 1970
- 9) Lalman J. A., and Bagley D. M. : Anaerobic degradation and methanogenic inhibitory effects of oleic and stearic acids, *Wat. Res.* **35(12)**, 2975-2983, 2001
- 10) Hanaki K., Matsuo T., and Nagase M. : Mechanism of inhibition caused by long-chain fatty acids in anaerobic digestion process. *Biotechnology and Bioengineering* **23**, 1591-1610, 1981
- 11) Hwu C-S., van Lier J. B., and Lettinga G. : Physicochemical and biological performance of expanded granular sludge bed reactors treating long-chain fatty acids, *Process Biochemistry* **33(1)**, 75-81, 1998
- 12) Lettinga, G., and L. W. Hulshoff Pol. : UASB-process design for various types of wastewaters, *Wat. Sci. Tech.* **24**, 87-107, 1991
- 13) Hwu, C-S., S.-K. Tseng, C.-Y. Yuan, Z. Kulik, and G. Lettinga : Biosorption of long-chain fatty acids in UASB treatment process, *Wat. Res.* **32**, 1571-1579, 1998