

1. はじめに

嫌気性菌のグラニュール化を利用するUASB法は、ここ数十年で世界的に普及し、産業廃水の嫌気性処理の分野ではほぼ確立された技術とみなされている。これには汚泥の形態や沈降性の維持が可能、ひいては保管や移送が容易という、グラニュール汚泥の特性が大きく貢献している。しかし、その一方でグラニュール化現象そのものについては微生物学的かつ工学的に不明瞭な点が数多く残されている。

本研究では、スイートコーン洗浄廃水を用いてUASBのパイロットプラント実験を実施した。スタートアップにおけるグラニュール形成を観察したところ、グラニュール形成に必要な汚泥負荷はこれまでの報告より高めの結果が得られた。そこで、本報ではそのような現象が見られた原因を整理し、考察を加えてみた。

2. 実験方法

2.1 原水

原水は、北海道内にある缶詰工場より排出されたスイートコーン洗浄廃水である。2ヵ月ほどの季節操業であるため、工場内の廃水貯留池で貯められていた廃水を実験には使用した。

2.2 種汚泥

嫌気性消化を採用しているし尿処理施設より採取し、SS34.5 g/l、VSS21.2 g/lのものを2.4 m³投入した(リアクター平均VSS濃度10.2 g/l)。

2.3 実験装置

実験フローシートを図-1に示す。UASBリアクターの前には原水タンク(2 m³)と分離タンク(1.33 m³)を設けてあり、原水タンクではNaOHによるpH調整(pH設定値約6)、分離タンクでは原水由来のSS除去が可能である。

UASBリアクターは、断面積1 m²、有効水深5 mの直方型で(有効容積5 m³)、処理水の循環が可能である。リアクターの加温には、原水タンクに接続されたボイラーと、補助的にリアクターに巻いたテープヒーターを使用した(リアクター温度約30℃)。また、リアクター底部における流入水の注入には、下向きの注入ノズルを一つ用いた。

2.4 分析方法

一般的な項目についてはJIS K 0102工場排水試験方法に従った。また、全VFAの分析にはpH3.75から5.75への滴定法(酢酸換算)を用い、有機物全体から蛋白質、脂質および全VFAを差し引いた残りを炭水化物成分とした。

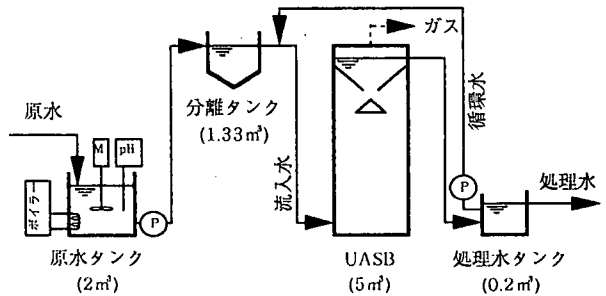


図-1 パイロットプラント実験装置

表-1 供試廃水の平均濃度(g/l)

	原水	UASB 流入水
COD _{Cr}	9.1	7.7
溶解性COD _{Cr}	8.6	7.0
BOD	7.3	6.0
SS	0.14	0.28
全VFA	0.90	3.7

3. 実験結果

3.1 原水およびUASB流入水の水質

実験期間中の平均廃水濃度を表-1に示す。廃水貯水池で懸濁物質が沈殿したために、供試原水のSS濃度は排出直後よりかなり低くなった。その結果、懸濁性有機物の占める割合は全有機物の約10%以下となり、分離タンクはこのような状況では不要と考えられた。炭水化物成分が原水有機物の74~94%を占め、 BOD_5/COD_{Cr} 比も0.75~0.8と高く、生物分解性の良い廃水であることがわかる。 $COD_{Cr}:N:P$ 比は100:0.9~1.1:0.3~0.5であり、栄養塩類NとPに関しては必要量が満たされていると思われる。

UASB流入水(分離タンク流出水)では、原水タンクで酸生成が進行した結果、全有機物の半分近くを有機酸が占めていた。

3.2 処理結果

本実験における運転および処理結果を図-2に示す。また、リアクター内汚泥の縦方向濃度と粒径分布をまとめたものを図-3に示す。

実験期間中のリアクター温度は $31.3 \pm 2.7^\circ\text{C}$ 、UASBの流入水、処理水のpHはそれぞれ 6.1 ± 0.2 、 7.2 ± 0.2 であった。また、実験初期の流入量が少ない期間、処理水の循環を採用した。上昇流速としておよそ0.3m/h以上あるように設定し、流入水量が増してきた50日目以降は循環を停止した。

COD_{Cr} 容積負荷は約 $1.5\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ より開始し、徐々に負荷を上げていくとリアクター内平均VSS濃度が $2,000\text{mg}/\ell$ を切るまで汚泥が流出した。その後、さらに負荷を上げると60日目付近で沈降性の良いグラニュール汚泥が形成され始め、汚泥界面が明確に観察されるようになった。同時に、リアクター内汚泥の粒径も 0.21mm 以上のものが50%以上占めるようになった。この時の汚泥負荷は $3\text{kg } COD_{Cr}/\text{kg VSS}\cdot\text{d}$ 程度と高く、一方で処理水質が悪くなり、除去率が低下した。グラニュール形成後は、汚泥量は順調に増加して汚泥界面が徐々に高くなっていき、逆に汚泥負荷の方は低くなっていった。結果的に、 COD_{Cr} 容積負荷が約 $10\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ に到達するに約2カ月を要し、通常報告されるよりは早めであった。

なお、経過日数100日過ぎに装置の故障等のため運転を約1カ月間休止したが、復帰後約2週間で COD_{Cr} 容積負荷が $10\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ 程度に達し、再スタートアップの早さと容易さがうかがえた。

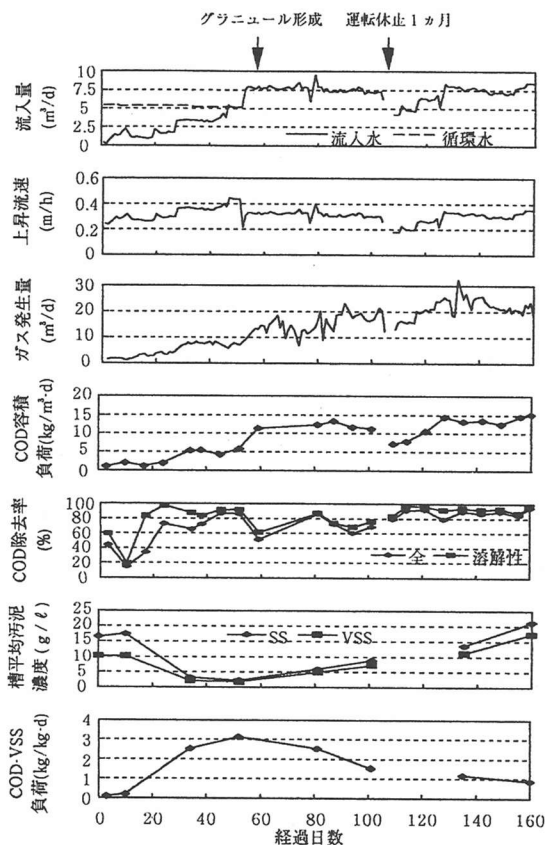


図-2 経日変化

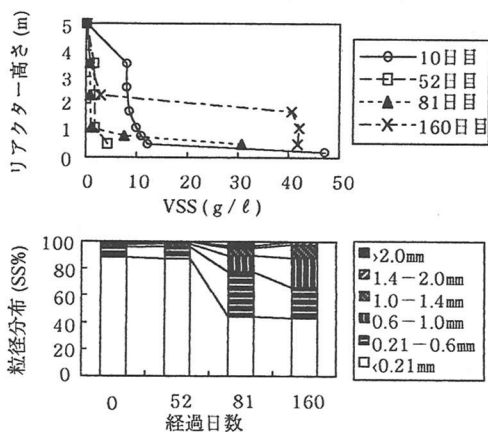


図-3 リアクター内汚泥の濃度と粒径分布の変化

3.3 水理特性

101日目にトレーサー試験を実施したところ (COD_{Cr} 容積負荷 $11.2\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ 、HRT 0.68 日、図示なし)、N値では2.3の値が得られ、水理特性はかなり完全混合型に近い結果であった。また、本実験ではリアクター縦方向の溶解性 COD_{Cr} 濃度も定期的に測定したが(図示なし)、縦方向の濃度変化は常に少なく、実験初期の低負荷時から完全混合型に近い水流パターンが保たれていたと思われる。

4. 考察

本実験で観察されたグラニュール形成過程は次のようである。実験開始後より増殖した*Methanothrix* spp.と思われる糸状性菌が、時には束になって汚泥フロックをルーズに取り巻く状態が続いた。この状態から負荷をさらに高めると、それらが突然合体して粒状のグラニュールが形成された。グラニュールの種類としては、糸状性に分類されると考えられる¹⁾。処理水質が一時期悪化したことにより*Methanosarcina* spp.も相当数出現し、実験終了時まで存在していた。そして、この菌が集塊したものがグラニュールの核となっているものもあることが観察された。一方ではまた、グラニュール汚泥とみなされない浮遊汚泥が実験終了時においてもベット部にかなり存在していた(例えば、粒径 0.21mm 以下は全体の40%前後)。通水速度が大きくなかったため、比較的沈降性の良い汚泥がリアクター内に蓄積していたことがその理由と考えられる。

有機物の汚泥負荷については COD_{Cr} -VSS負荷約 $3\text{kg}/\text{kg}\cdot\text{d}$ 、 COD_{Cr} 除去率から計算した比基質消費速度約 $2\text{kg}/\text{kg}\cdot\text{d}$ という高めの状態でグラニュール化が進行した。負荷の上げ方が早すぎたために汚泥の増殖が追いつかず値が高く出た感があるが、グラニュール形成には最低 $0.6\text{kg}/\text{kg}\cdot\text{d}$ 程度は必要という^{1), 2)}、実験室規模の小規模装置を用いた報告値よりはかなり高い。その理由として、1)規模の違い；小規模装置ではより押し出し流れ型に近く、先頭部に高い負荷がかかるが、大規模装置ではより完全混合型に近く、負荷が均一になる、2)グラニュールの種類の違い；桿菌と糸状性グラニュールの違いであり、桿菌グラニュールは比較的低い選択圧や長いSRTの状態よく観察される³⁾、3)処理水の循環；流出汚泥の返送は避けるべきといわれており⁴⁾、本実験では処理水の循環を50日目まで行った、4)廃水の性状；炭水化物を多く含む廃水で培養された酸生成菌のポリマーや微量元素の欠乏がグラニュール化を妨げたりする^{5), 6)}、5)グラニュール形成の定義の違い、などが考えられる。ただし、種汚泥については別の汚泥を用いても同様な微生物相が観察され、その影響は小さそうに見えた。

このように幾つもの要因が存在するが、グラニュール形成時に*Methanosarcina* spp.が頻繁に観察されることから⁷⁾、筆者らは相当高い負荷がグラニュール化に必要なのではないかと考えている。しかし、規模が違ってくるのと1)の水理特性に関わる影響が大きくなることが避けられず、小規模装置ではリアクター全体での汚泥負荷は見かけ上低く見積もられると推測している。加えて、小規模装置は高い汚泥保持能力も有している。

5. おわりに

スイートコーン洗浄廃水を用いた本パイロットプラント実験では $3\text{kgCOD}_{\text{Cr}}/\text{kgVSS}\cdot\text{d}$ 付近で初めてグラニュール汚泥が観察され、これより過去の報告値がかなり下回っている理由として装置規模の違いなどを指摘した。理由はともかく、約 $1\text{kgCOD}_{\text{Cr}}/\text{kgVSS}\cdot\text{d}$ 以下でのグラニュール形成は例外的で、多くの場合にグラニュール化が進行する汚泥負荷を高めに見直す必要があり、この汚泥負荷の高さがスタートアップの難しさにつながっていると思われる。

末筆ながら、本論文を故早川登氏(前(株)西原環境衛生研究所社長)に捧げ、ご冥福をお祈りいたします。

<参考文献>

- 1) L. W. Hulshoff Pol et al.: Wat. Sci. Technol., Vol. 15, 291-304, 1983.
- 2) W. Wu et al.: Anaerobic Dig. 1985, 339-351, 1985.
- 3) E. Colleran: in Granular anaerobic sludge; microbiology and technology, Pudoc, 237-240, Netherlands, 1988.
- 4) G. Lettinga et al.: Wat. Sci. Technol., Vol. 15, 177-195, 1983.
- 5) 依田元之ほか：第22回水質汚濁学会講演集, 327-328, 1988.
- 6) S. R. Guiot et al.: Anaerobic Dig. 1988, 47-54, 1988.
- 7) W. de Zeeuw: in Granular anaerobic sludge; microbiology and technology, Pudoc, 132-145, Netherlands, 1988.