

温帯地域における UASB リアクターの下水処理性能および保持汚泥特性の評価

水圏土壌環境制御研究室 大矢明子
指導教員 山口隆司

1. はじめに

UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) 法は、曝気動力不要で省エネルギーであるなどの理由から主に熱帯・亜熱帯地域において下水処理への適用が進められてきた。近年では温帯地域への適用も検討されているが、その場合冬期の水温低下に伴い微生物活性が低下するため、処理水質の低下や固形性有機物のリアクター内への蓄積が懸念される。従って、温帯地域において UASB 法を普及させるためには、冬期の固形性有機物の蓄積による処理水質の低下を回避する適切な運転管理方法が必要である。そこで本研究は、温帯地域の下水を対象とした UASB 法における汚泥保持に関する基礎的知見の収集を目的として、処理性能、保持汚泥特性の評価を行った。

2. 実験装置

本実験装置は、高さ 4 m、カラム内径 0.56 m、全容積 1148 l のパイロットスケール無加温 UASB リアクター (以下 UASB と称す) を用いた。植種汚泥は、中温下水消化汚泥を用いた。流入下水はスクリーン通過後の実下水とした。HRT (水理的滞留時間) は 8 時間に設定した。

3. 実験結果

3.1 UASB 下水処理性能

全 COD は流入水で 342 ± 135 (平均 \pm 標準偏差) $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、処理水で平均 118 ± 40 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ となり、全 COD 除去率は平均 $63 \pm 13\%$ となった (図 1)。また SS は流入水で平均 120 ± 66 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、処理水で平均 37 ± 23 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であり、SS 除去率は平均 $66 \pm 20\%$ となった。UASB 単独での下水等の廃水処理では、処理水の全 COD は一般的に $100\sim 200$ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 程度が限界であるとされている

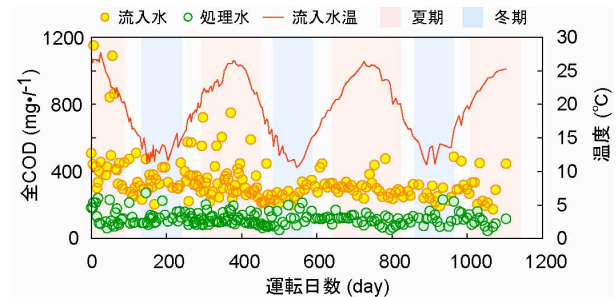


図 1 全 COD の経日変化

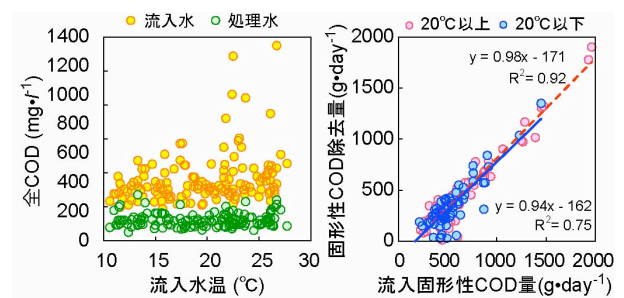


図 2 全 COD と温度 (左)

図 3 固形性 COD の流入と除去量 (右)

(Lettinga, et al., 1983; Sanz, et al., 1989) が、本 UASB も同程度で土った。流入水質に対し、処理水質の変動は小さいことから UASB は安定した処理性能を発揮したと言える。

図 2 に示されるように、水温の変動に対して処理水質は変化しなかった。冬期においても全 COD 除去率は $58 \pm 13\%$ であり、十分な処理性能を得ていた。固形性有機物の分解・蓄積挙動の把握として高さ方向のセルロース濃度プロファイルを行った結果、セルロース (難分解性物質) は UASB 下部に捕捉され分解していた (データ非表示)。捕捉機能は低温条件でも発揮されており (図 3)、処理水質の安定化に寄与していたと考えられる。

これらの結果から、都市下水を対象とした UASB の水温に対する処理安定性については、 $10\sim 15^\circ\text{C}$ の期間が 3 ヶ月程度であれば 流入水温の低下にも対応可能であると考えられた。

3.2 保持汚泥量

カラム有効容積当たりの平均 MLSS および MLVSS は、全運転期間では徐々に増加する傾向を示した。また、1年スパンでは、冬期（低水温期）に上昇し、夏期（高水温期）に低下する変動を見せた（図4(A)）。

UASB 下部（0.50 m）の保持汚泥濃度は、運転開始から半年で 19 から 32gVSS・l⁻¹と増加し、その後変動は小さくなった（図4(B)）。一方、中部（1.75 m）では、下部の汚泥濃度安定後、約 10 g・l⁻¹から 50 g・l⁻¹まで増加した。また、上部（3.25 m）の汚泥濃度は 20 g・l⁻¹に達したが、GSSの気固液分離が効果的に機能したため、処理水中に流出したSSは平均 0.040 g・l⁻¹に抑えられた。中部および上部の運転日数の経過とともに増加する傾向が見られたが、下部では運転3年目頃から緩やかに減少していった。

全COD汚泥負荷は保持汚泥濃度の上昇に伴って低減し、運転期間後期には 0.05 gCOD・gVSS⁻¹・day⁻¹程度に低く維持された。高濃度汚泥保持による全COD汚泥負荷の低レベルでの維持は、水温低下に伴う単位汚泥当たりの加水分解速度の低下を補っていたと考えられる。

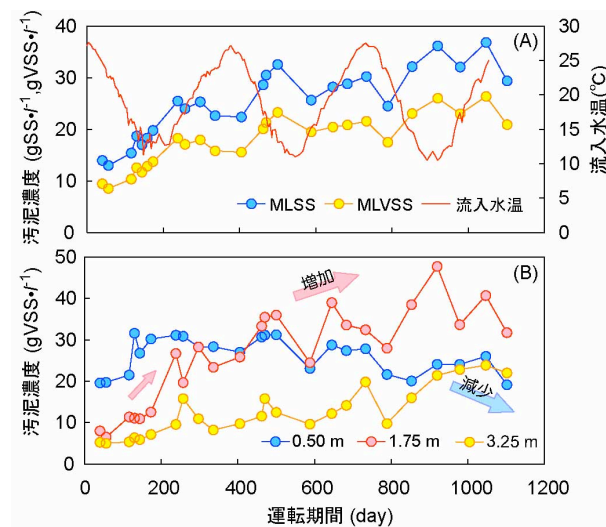


図4 保持汚泥濃度の経日変化
(A) MLSS、MLVSSの経日変化
(B) 高さ方向の経日変化

この結果としてUASBは冬期においても安定したCOD除去性能を保持できたと考えられる。さらに、除去CODあたりのVSS転換率は、全運転期間を通して 0.015 gVSS・gCODremoved⁻¹ (2.1%)、さらに2年目以降は、0.006 gVSS・gCODremoved⁻¹ (0.8%)と非常に低いレベルであった。これは低負荷運転による基質供給律速で自己分解が促され、増殖抑制が起こったものと考えられる。

3.3 保持汚泥性状

無加温低濃度廃水処理を行う本UASBにおいても分散状の中温消化汚泥から優れた処理性能や沈降性の鍵となるグラニュール汚泥が形成された（図5）。グラニュール化は保持汚泥の沈降性を良好にするが（SVI 20~60 ml・gSS⁻¹）、一方で肥大化は問題となる。粒径が大きくなった場合、基質拡散律速となるため自己分解が進行し、空洞化してしまう。本UASBにおいても比較的粒径の大きいグラニュールがGSS上部まで浮上する現象を確認した。また、浮上グラニュールは処理水中に流出することなく1ヶ月程度で沈降した。運転後期に下部の保持汚泥が減少したが（図3）、その原因は汚泥の浮上であることが示唆された。

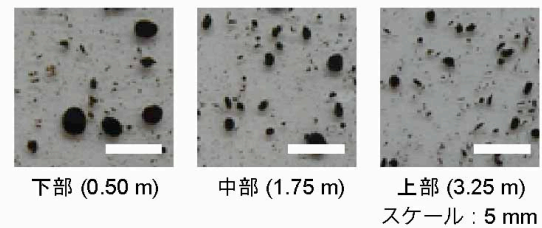


図5 グラニュール写真

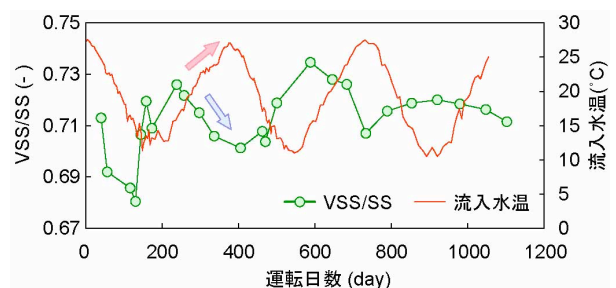


図6 VSS/SS比の経日変化

保持汚泥の VSS/SS 比は温度下降時に増加し、上昇時には低下する傾向が見られた(図 6)。流入下水の VSS/SS 比は平均 0.85 と保持汚泥よりも高いことから冬期における MLSS の増加は流入固形物、特に有機物の蓄積によるものと考えられる。また、水温の上昇とともに VSS/SS 比は低下することから未分解の有機物は、水温の上昇とともに分解することが示唆された。また、長期連続運転において VSS/SS 比の変動は収束しており、保持汚泥内の微生物割合が増加していると考えられた。

Zeeman らは下水処理 UASB において保持汚泥の固形性有機物の加水分解速度とメタン生成活性を維持するためには、水温が 25℃以上では 15 日以上、15℃以下では 100 日以上 SRT を維持することが求められると報告している (Zeeman, et al., 1999)。本 UASB の SRT は実験期間を通じて約 240 日に達していた。UASB における長い SRT は、セルロースなどの固形性有機物の一時蓄積と分解に寄与し処理水質の安定化を可能にしていることがわかった。

3.4 微生物群集構造解析

統計解析 (Chao1, ACE) により保持汚泥内に存在する細菌の種数 (ファイロタイプ数) を推定した結果、運転 336 日目では 157~189 種となった。運転日数の経過とともに種数は増加し、920 日目では 203~247 種となった。また、それぞれの微生物はほぼ均等 (evenness = 0.91~0.97) に存在しており、多様性に富んだ群集構造であることが明らかとなった。一方、アーキアは偏りのあった群集構造から均等なものへと変化した。下水は温度、濃度や組成などが変動するため、微生物種の増加や均等化に影響を与えたと考えられる。

細菌の系統分類を行った結果、全運転期間を通して *Proteobacteria* 門、*Bacteroidetes* 門および *Firmicutes* 門に属するクローンが多くを占めていた (図 7)。*Proteobacteria* 門に属していたクローンは多くが硫酸還元菌であった。*Bacteroidetes* 門

および *Firmicutes* 門は有機物の加水分解、酸生成に関わるとされている。また、セルロースを分解する細菌が多く属している *Ruminococcus* 属に分類されるクローンも検出した。

アーキアの系統分類を行った結果、酢酸資化性の *Methanosaeta* 属が優占していた。また、運転に伴い水素資化性の *Metanospirillum* 属と *Methanobacterium* 属の存在割合は増加した。各基質資化性のメタン生成古細菌の存在割合は、メタン生成活性値と異なった (酢酸基質からの活性が非常に低い)。そこで存在量が活性に依存する 16S rRNA を標的とした解析を行った。

結果は予想に反し、*Methanosaetaceae* 科が優占、*Methanobacteriaceae* 科が減少する結果となった。活性値との違いは、基質の濃度阻害など別の要因があるものと考えられる。16S rRNA 遺伝子と

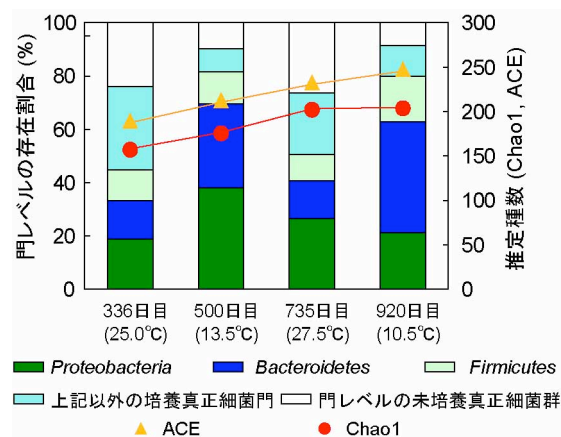


図 7 バクテリアの系統分類

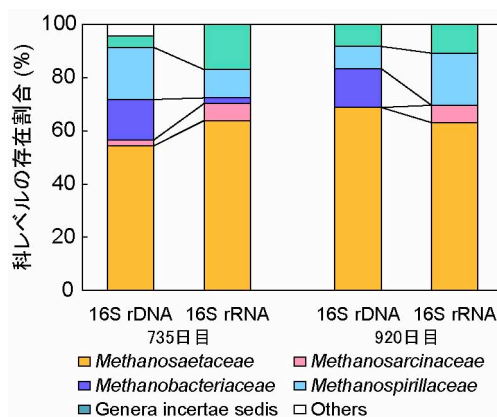


図 8 アーキアの系統分類

16SrRNA の標的の違いと汚泥の季節の結果で変化が現れたのは *Methanospirillaceae* 科の存在割合である (図 8)。遺伝子を標的とした場合、夏期に多く、冬期に少なかった *Methanospirillaceae* 科が、RNA を標的とした場合、逆転した。この結果から、冬期においても活性低下の割合が他のメタン生成古細菌よりも小さかったと考えられる。本 UASB 内に存在する *Methanospirillum* は好冷もしくは耐冷性がある種であることが示唆された。

4. まとめ

本研究では、UASB リアクターにより無加温、HRT 8 時間の条件で、下水の長期連続処理運転を行い、その処理特性および保持汚泥性状を評価した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 11~15°Cの期間が3か月程度であれば水温低下にも対応可能であり、また水温変動に対しても安定的であった。
- (2) 保持汚泥濃度は運転に伴い増加するが、増加速度は遅く、2年目以降では0.8%となった。高濃度汚泥保持による自己分解・増殖抑制が起

こったためであると考えられる。

- (3) 中温下水消化汚泥を植種した場合においても、グラニュール化し良好な沈降性 (SVI 20~60 ml·gSS⁻¹) を得た。その結果、SRT は約 240 日に達した。長い SRT を保ち有機物を一時蓄積・分解することで処理水質を安定化させていた。
- (4) 保持汚泥の微生物群集は、組成が変化する下水、低温条件に対応可能な構造へ徐々に変化して行った。

参考文献

- Lettinga, G., R.R., Grin, P. (1983). Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperature using a granular bed UASB reactor. *Biotech. Bioeng.* 115, 1701-1723
- Sanz I., P.F.F. (1989). Anaerobic treatment sewage in UASB and AFBR reactors. *Environ. Tech. letters* 10, 453-462
- Zeeman, G. and Lettinga, G. (1999). The role of anaerobic digestion of domestic sewage in closing the water and nutrient cycle at community level, *Wat. Sci. Technol.*, 39, 187-194