処理プロセスと実廃水への適用*

伊 東 崇 鈴 木 恒 男 榊 原 豊

1. 処理プロセスの特徴

反応器内の微生物を固定化し、適切なレベルまで集積させることによって、嫌気性処理プロセスの適用範囲とその効率は大きく向上する。最近の実規模で稼働している高効率プロセスを微生物の固定化方法に基づいて分類すると、①固定床法、②流動床法および膨張層法、③UASB法に大別される。

①の固定床法は、槽内に充填した支持材の表面に微生物を固着あるいは間隙に捕捉させ、比較的緩やかな流動状態 ($0.1 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$) で微生物と廃水を接触させる方法である¹⁾。他のプロセスに比べて処理操作が簡単であるが、支持材の選択によっては偏流や閉塞を起

こす場合がある。

②の流動床法および膨張層法は、通常 1 mm 以下の砂などの担体表面に微生物を固着・生物膜化させ、上昇流によって担体を浮遊・流動化させる方法である。固定化微生物と廃水との接触面積が最も大きくバイオマス濃度を高くとれるが、流動化のために比較的に大きな上昇流速 (ほぼ $3 \sim 30 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$) を必要とする²⁾。

③のUASB法は、微生物の自己造粒作用によってグラニュール化した汚泥 (粒径 $1 \sim 3 \text{ mm}$) を、流動床法と同様に上向流によって浮遊あるいは流動化させる方法である。固定化微生物と廃水との接触面積および上昇流速は、固定床法と流動床法のほぼ中間程度である³⁾。

このように嫌気性微生物の固定化方法はそれぞれ異なるが、充分に集積された微生物の活性はプロセスによらずほぼ同様な値となっている。例えば、各プロセスが許容できるCOD負荷の上限値として揮発性脂肪酸の最大分解速度を考えると、各プロセスともほぼ $2 \sim 3 \text{ (kg-COD} \cdot \text{kg-VS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ 前後の値が報告されている²⁾。なお、既往研究の多くはこの値よりかなり低い負荷条件 ($0.1 \sim 1 \text{ kg-COD} \cdot \text{kg-VS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) でプロセスを操作し、その結果COD値で数百～数万 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ の廃水に対して、高い処理安定性と $60 \sim 90\%$ 以上のCOD除去率を得ている。

表1は、産業廃水を対象として、現在稼働している実規模プラントの操作条件^{1)~3)}を比較したものである。容積負荷をみると、固定床法は他に比べて若干低く設定されているものの、各プロセスとも $3,000 \text{ mg-COD} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上の産業廃水に対して $10 \text{ kg-COD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ の負荷が許容できる。ただし、既存プロセスからの汚泥供給が望めない場合、所要の性能を得るために数カ月程度のスタートアップ期間が必要とされる。スタートアップには、通常消化汚泥の接種と回分培養の後、連続操作で徐々に負荷を増加させる方法が取られる。これら操作の最適方法についてはまだよく分っていないが、グラニュール化促進担体の添加、凝集剤の添加、加温、担体・支持材の改良、攪拌や固液分離の改善など、物理的ならびに化学的操作によって期間短縮の試みがなされている。

なお、最近では $100 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 前後の都市下水処理を対象とした研究が精力的に行われている。低濃度排

Takashi Ito
昭和48年 名古屋大学工学部卒業
同年 関西原環境衛生研究所入社
〔趣味〕 登山 日曜大工

Tsuneo Suzuki
昭和49年 東京教育大学農学部卒業
同年 住友重機械工業㈱入社
〔趣味〕 ゴルフ 水泳

Yutaka Sakakibara
昭和54年 群馬大学工学部卒業
56年 群馬大学大学院工学研究科
修士課程修了
57年 群馬大学工学部助手
平成2年 群馬大学工学部講師
工学博士
〔趣味〕 野球 テニス

* Anaerobic Treatment Process and its Application to Raw Wastewater, 1990年7月10日受理

表1 実規模プロセス^{1),2),3)}の操作条件 (COD 除去率60~90%)

プロセス	流入濃度 (g-COD/ℓ)	容積負荷 (kg-COD/m ³ d)	HRT (hr)	充填物比表面積 (m ² /m ³), 粒径(mm)	バイオマス 濃度(kg-VS/m ³)	反応器容積V(m ³) 上昇流速u(m/hr)
固定床法	3 ~ 28 (85)	2 ~ 15	12 ~ 90	100~200 m ² /m ³	—	V=90~12500, u=0.05~0.5(1~3)*
流動床法	3 ~ 12	10 ~ 30	2 ~ 20	0.1~0.6 mm	10~50	V=120~700, u=10~30
UASB法	3 ~ 20	5 ~ 30	5 ~ 40	1~3 mm	20~60	V=70~11000, u≈1

*)リサイクル条件

水の処理では容積負荷は表1の値よりもかなり低く(大略1/10前後)なり, また流入 SO_4^{2-} および SS 濃度が溶解性有機物濃度に比べて相対的に高くなる等の問題があるが, 50~80%前後の COD 除去率が報告されている^{1),2)}。

2. 嫌気好気汚床法による小規模下水の運転実績

2.1 処理施設の概要

山梨県高根町清里地区に建設された「清里クリーンセンター」は, わが国で最初に嫌気好気汚床法を採用した特定環境保全公共下水道処理施設である。当地区は, 八ヶ岳山麓に位置する典型的な避暑地型観光地で, 夏季シーズンには1日当たり1万人前後の観光客が訪れ, その賑わいは相当なものである。

嫌気好気汚床法は, 処理工程の前段に嫌気性処理を採用しているため, ①汚泥発生量が少ない, ②省エネルギーである, ③維持管理が容易である等の特徴をもっており, 小規模下水処理には適した処理方式の1つと言える。当センターでは, 嫌気性処理として SS 除去率が高く, 運転が容易な嫌気性固定床法を採用している。また, 後段の処理工程には, コンパクトで, 処理効率が高い好気性汚床法を採用している。

処理施設の全景およびフローシートを写真1, 図1に示す。計画日最大汚水量は $1,101\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ (8月)であるが, シーズンオフは $400\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ の設計となっている。

写真1 処理施設全景

図1 フローシートと計画水質

反応槽は4系列で構成されており, 嫌気汚床は上向流2段方式で, 槽内にはプラスチックメディアが充填されている。設計滞留時間は, 嫌気汚床全体で23h, 好気汚床1.6hである。

2.2 処理施設の運転状況

当センターは, 昭和62年5月に供用開始してから約3年が経過している。流入水量は, 初年度こそ少なかったものの, 2年度以降はシーズン(夏季)中で $700\sim1,100\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, シーズンオフ(冬季)で $250\sim400\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ と計画値の50~100%となっている。反応槽の運転は, 嫌気汚床が年間を通じて全系列運転, 好気汚床は流入水量に応じてシーズン中3~4系列, シーズンオフで1~2系列運転されている。

処理水質は, 表2に示したように年間を通じて良好な水質が得られている。特に嫌気汚床は, 水温が冬季7~9℃, 夏季19~20℃, 年間平均でも15℃以下と相当厳しい条件ではあるが, 冬季には低負荷となることもあって, 低水温期にも安定した処理機能を発揮している。夏季のピーク時には, 短期間に流入水量, 水質が増大し, 一時的に負荷が高くなるために, 嫌気汚床流出水質がやや高くなる傾向がみられたが, 処理水質は常に放流基準値を満足している。

汚泥発生量については, なお定常状態に達していないために正確な数値は不明であるが, 約3年間で濃縮汚泥 40m^3 を搬出処分したのみであるから, 他の処理方式に比べて相当少ないものと思われる。

本処理方式の留意点としては, ①嫌気性処理により硫化水素等が発生するため脱臭・防蝕対策を十分行う,

表2 各処理工程の運転結果と平均水質

	シ ー ズ ン (8月)			シーズンオフ (12～3月)		
	流入水	嫌気汚床	好気汚床	流入水	嫌気汚床	好気汚床
水温 (°C)	19～21	—	—	7～10	—	—
滞留時間 (h)		23～24	1.3～1.5		60～100	2.0～3.0
BOD 負荷 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)		0.18～0.25	0.8～1.6		0.02～0.05	0.2～0.5
SS ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	188	36	8	109	14	2
BOD ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	233	60	10	97	23	3
S-BOD ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	138	46	8	—	—	—
COD _{cr} ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	519	162	54	—	—	—
COD _{Mn} ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	—	—	—	66	23	10

表3 UASB 装置例

適 用 排 水	実績中の最大反応槽容量
甜 菜 糖	3040m ³
じゃがいも 澱粉	5500
小麦澱粉	4200
大麦澱粉	420
ビ ー ル	9500
紙パルプ	15600
乳 業	450
合成化学	1350
農産加工 (野菜, 果物)	500
クエン酸加工	4200
酵母発酵	5000
アルコール発酵	3000
菓 子	100
飲 料	700
ジャム, ゼリー	650
液 糖	30
じゃがいも加工	2200
澱粉加工	880
医 薬 品	100

②低水温期を考慮した反応槽の設計, ③流量変動対策等を考慮して計画する必要がある。なお, 嫌気性処理のスタートアップは一般に長時間を要するが, 当センターの場合, 供用開始当初は流入水量が少なかったため, 特に問題なく対応できた。

3. UASB 法の適用例

3.1 処理システムの概要

CSM 社が世界で初めて UASB 法を実装置化して以来, UASB 法は急速に実用化され現在では200基前後の実装置が全世界で稼働している。適用排水も多岐に渡り, また, かなりな大規模装置も建設されている。表3に UASB 適用排水例およびそのリアクター容量の1例を示す。

基本的な UASB システムのフローは図2のように, 調整槽と反応槽から構成される。

調整槽では, 排水中の高分子有機物を低分子化させる酸生成だけでなく, 他にいくつかの目的を有する。例えば温度, pH の調整, 栄養塩などの添加, 混合, 変動の安定化などである。

反応槽の目的は, 調整槽で生成された有機酸を効率良くガス化させることである。反応槽にはグラニュール汚泥が高濃度に保持され, ディストリビューターとセトラーが設置される。

ディストリビューターは調整槽から送られた原水と反応槽のグラニュール汚泥 (sludge bed) を効果的に接触させ (反応槽全面積へ均一にフィード), 生物反応を円滑に進行させる。セトラーは発生ガス, 汚泥, 処理水の三相分離を効率的に行う。

発生ガスはセトラーのガスボックスへ集まり, ボイラなどの次工程へ送られる。処理水は放流または必要に応じさらに好気処理される。

3.2 システム設計上の留意点

UASB システムを実装置化するに当たり留意すべき事項として以下の点が挙げられる。

- ①排水水質および水量に応じ, 調整槽の容量, 運転方法を選び安定運転を容易とすること。
- ②反応槽全面に均一に原水を供給するとともに, 汚泥や原排水中の SS により目詰りが起こらないようなディストリビューターの構造, 設計, 運転方法。
- ③ガス, 汚泥, 処理水の三相分離が効率良く行われるだけでなく, 良質なグラニュール汚泥の形成も促進するようなセトラー構造。
- ④嫌気性消化汚泥を種汚泥とした場合, 100%負荷運転が可能となるまで立ち上げに長期間を要することになるため, その間の対策が必要となる。ただし, グラニュール汚泥を種汚泥とした場合は1カ月程度の短期間での立ち上げが可能となる。写真2にグラニュール汚泥の外観を示す。直径2～4mm程度の比較的強固な粒状が特徴である。写真

図2 BIOTHANE システムのフロー

写真2 グラニューール汚泥の外観

写真3 グラニューール汚泥の断面

3はその断面の電子顕微鏡写真であるが「竹のふし状」の外観を特徴とするメタン細菌である *Methanothrix* が見られる。

- ⑤メタン細菌は増殖速度が遅く、一旦ダメージを受けると回復に非常に時間を要するため、重要な運転パラメーターである温度、pH については自動コントロール化が望ましく、さらにセンサー等の万一の故障発生に対しても支障のないようなバックアップシステムの配慮が必要である。

3.3 応用例

UASB システムの実績は表3に示したが、食品を中心に広範囲な産業排水に適用されている。特徴的な点は、紙パルプや合成化学といったメタン発酵処理には従来困難と考えられていた排水への実績を有していることである。とくに合成化学排水のようにNi, Co, Fe等

の微量栄養塩を全く含まない排水の場合、メタン細菌の生育に必要な量を補給し円滑な運転を可能にしている。日本においてはビール排水等の食品排水を中心に実装装置化がなされており、今後更なる普及が期待される。

引用文献

- 1) Young, J.C. and Yang, B.S. (1989) Design considerations for full-scale anaerobic filters, *Jour. WPCF*, **61**, 1576-1587.
- 2) Heijinen, J.J., Mulder, A., Enger, W., and Hoeks, F. (1986) Review on the application of anaerobic fluidized bed reactors in wastewater treatment, *Anaerobic Treatment A Grown-up Technology*, EWPCF, Amsterdam, 159-173.
- 3) Borghans, A.J.M.L., van Gils, W.M.A., Huisman, B.C. and Wind, E. (1986) 10 years experience of the full scale anaerobic treatment of sugar industry waste water in the Netherlands with BIOTHANE[®] process, *Anaerobic Treatment A Grown-up Technology*, EWPCA, Amsterdam, 245-257.