

II-192 下水汚泥の接触湿式酸化メタン発酵プロセスの動力学的研究

○京都大学工学部 学員 宋 在峻
 京都大学工学部 正員 平岡正勝
 京都大学工学部 正員 武田信生

1. はじめに

嫌気性処理は長年にわたり都市下水汚泥の安定化に用いられており、最近では上昇流嫌気性スラッジベッド(Upflow Anaerobic Sludge Bed:UASB)法が注目されている。しかしUASB法の設計や運転の最適なプロセス情報が検討されている例は多くない。最近の研究により嫌気性処理における微生物学や生物化学に関する理解が深まってきたが、システム解析や設計に合理的な基礎を与えるため、さらにはプロセスの動力学を評価するためには、このプロセスの性質を調べる必要がある。本研究で対象とするプロセスは、前処理として高温高压の条件下で特殊な触媒を用いて下水汚泥を部分酸化・可溶化させ、この処理水からUASB法による嫌気性消化処理によってエネルギーとしてメタンガスを回収しようというものである。難分解性物質を含む下水汚泥に対しては従来の嫌気性消化ではCOD除去率が50%程度で限界となる場合があるが、このプロセスによりCOD除去率を向上させ、同時に除去されたCODをメタンガスとしてエネルギー回収できる。本研究の目的は接触湿式酸化法(Catalytic Wet Oxidation Process)とUASB法を組み合わせたシステムを確立することであり、ここでは接触湿式酸化した下水汚泥を対象としてUASB法による有機物質除去の動力学を実験的に検討した。この実験では次の3つを仮定した。

- ①UASB法は種々の成分を代謝する微生物群からなるメタン生成プロセスである。
- ②反応容器内の基質は循環によって完全に混合している。
- ③反応容器内の非生物性有機物濃度は小さく、かつ無視できる。

2. 理論的考察

嫌気性処理は動力学的の見地からすれば、(a)複雑な物質の加水分解、(b)酸生成、(c)メタン発酵、というプロセスで記述される。嫌気性処理のような多段階プロセスでは、最も遅い反応が全体の速度を支配する。嫌気性処理におけるこの最も遅い反応は加水分解段階の反応であり、この段階が全過程の律速段階であるということが最近の研究によって明らかとなってきた。下水汚泥の接触湿式酸化処理水から生成するメタンの約85%に相当する部分が先駆物質として酢酸とプロピオン酸を経由する。したがって、これらの酸のメタン発酵動力学を知ることが、このシステムの解析と設計を合理的に進める重要な鍵となる。この研究ではメタン先駆物質である揮発性脂肪酸のうち酢酸の利用速度を実験的に求め、その結果を評価することである。

2-1. UASB法の動力学

Heukelekianら¹⁾はバッチシステムにおける微生物の正味の増加を時間の関数として記述する経験式を導いている。UASB法における微生物の正味の増加を記述する式は次のとおりである。

$$dM/dt = a(dF/dt) - bM \quad (1)$$

ここで、 dM/dt : 反応容器単位容積あたりの微生物増加速度($M/L^3 \cdot \theta$)、 dF/dt : 反応容器単位容積あたりの基質利用速度($M/L^3 \cdot \theta$)、 M : 微生物濃度(M/L^3)、 a : 収率係数(-)、 b : 微生物死滅速度係数($1/\theta$)

有機物消化の容積速度(dF/dt)は反応器における有機物の濃度と関係がある。この関係を表わす式は、菌体増殖速度と増殖制限基質型の濃度の関係を表わすMonod式と同じ型のものである。

$$dF/dt = [KMS/(K_s + S)] \quad (2)$$

ここで、 S : 反応器における基質濃度(M/L^3)、 k : 基質利用最大速度($1/\theta$)、 K_s : 飽和定数

式(1)と(2)を合わせると次式が導かれる。

$$(dM/dt)/M = [aK_s/(K_s + S)] - b \quad (3)$$

左辺の $(dM/dt)/M$ は、単位時間、微生物単位重量あたりの正味増殖速度に等しく、正味増殖速度 μ として表される。このプロセスは、SSが1,000~1,200ppm以下の廃水処理に使われている。連続流動システムとして操作するとき最終的に定常状態に達する。

2-2. 2段階メタン発酵

反応器の中で数種の重要な揮発性脂肪酸がメタンと二酸化炭素とに生物学的に転化されるプロセスは、数種類のメタン菌を必要とする多段階プロセスである。ある細菌は多くの長鎖揮発酸をメタン、二酸化炭素、より短い鎖の第二の揮発酸に転化する。この第二の揮発酸は別の種類の細菌によって同じように発酵転化される。このように与えられた揮発酸が安定化する総括速度は、2つまたはこれ以上の異なる転化速度を合成したものになることが多い。プロピオン酸がその例であるが、酢酸の場合はただ一つの段階で安定化される。

Table 1.Characteristic of Laboratory Reactor

Reactor No.	1	2	3	4
Dimension(cm):Width	16	16	16	16
Dimension(cm):Height	60	60	100	100
Working Volume(VL)	3.08	3.08	7.8	7.8
Sludge Bed Volume(VL)	1.30	1.34	3.61	3.56
S/W Ratio(V/v)*	0.423	0.435	0.463	0.457
Velocity(m/h)	0.516	0.528	0.498	0.524
Number of Sampling Ports	6	6	8	8

*S/W Ratio :Sludge Bed Volume and Reactor Volume Ratio

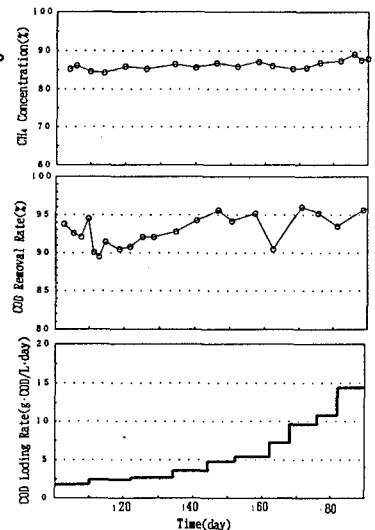
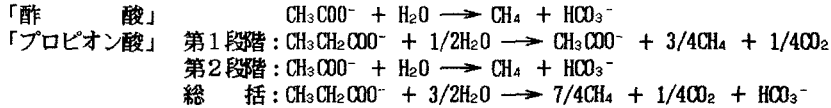


Fig.1 The Result of Treatment Sewage Wastewater in UASB



3. 実験

Table.1は本実験で用いた反応器の仕様である。この反応器は、(a)定量ポンプによって供給液が連続供給され、(b)廃水の流入モードは上昇流であり、(c)反応器底部から廃水は均一分散流入し、(d)生成ガスによるベッド内は完全混合である。実験は反応器のCOD負荷を $0.5\text{kgCOD}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ からスタートさせ、処理水の回収メタンガス量から計算したCOD回収率が90%を超えることを管理目標とし、負荷を $20\text{kgCOD}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ まで段階的に増加させた。種汚泥はK市下水処理場の消化槽から採取し、この消化汚泥を種付け前に 0.5mm メッシュにかけ、さらに遠心分離によって $19,200\text{mgMLSS}/\text{L}$ (VS/SS=63%)に濃縮したものである。この濃縮種汚泥 2L をUASB法反応器中に投入し、酢酸、グルコース、微量金属、無機塩類(COD:N:P=100:2:1)で3ヶ月間培養してから実験を行った。全実験期間を通じて供試廃水のpHは $7.2 \sim 7.4$ に維持した。人工基質の実験に用いた反応器は内径 8cm 、塔高 100cm の亚克力製カラムであり、反応器容積は 7.8L (直円筒部容積は 3.5L)である。反応器は二重構造でジャケットに高温水を循環することによって反応温度を $35 \pm 1^\circ\text{C}$ にコントロールした。発生したガス量は湿式ガスメータにより測定した。高さ 85cm の位置に逆ロート状のじゃま板が設置され、汚泥とガスの分離、汚泥の沈降とガスの捕集が行われている。接触湿式酸化下水汚泥の実験に用いた反応器は透明亚克力製の円筒形で高さ 60cm 、内径 8cm 、反応器容積 3.08L である。高さ 50cm の位置に逆ロート上のじゃま板が設置され、汚泥とガスの分離、下水汚泥の沈降とガス捕集が行われている。反応器を保温ボックスにおき、反応温度は電気ファンヒータにより $35 \pm 1^\circ\text{C}$ とした。発酵過程は混合液のアモニア性窒素含量と溶解性CODの定期的測定より観察した。TS、SS及びそれぞれの揮発性部分の分析は下水試験法に基づいた。低級脂肪酸の定量はHPLCを用いた。ガス組成はGCで測定した。COD分析は重クロム酸カリウムによるJISK0102に準拠して行った。実験中のCOD除去率、COD容積負荷、メタン含有率をFig.1に示す。

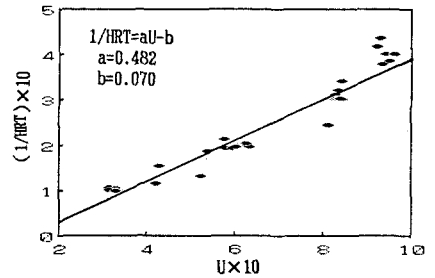


Fig.2 Growth Coefficient a and b Acetate Fermentation in UASB

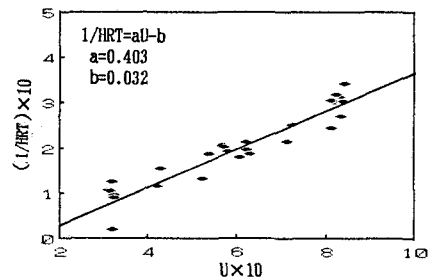


Fig.3 Growth Coefficient a and b Sewage Wastewater Fermentation in UASB

4. 解析

4-1. 動力学係数の計算

各種の実験条件の結果を動力学モデル式(3)の係数a、b、K、 K_s の計算に用いた。この動力学モデル式(3)の係数を求めるために、微生物単位重量、単位時間あたりに転化する基質の重量として定義される比利用率Uを計算した。次式が増殖係数a、bの値を決めるのに使われた。

$$1/\text{HRT} = aU - b \quad (U = dF/dt/M) \quad (4)$$

ここで、U:比利用率(θ^{-1})

式(2)は次のようにKと K_s に関して線形式となる。

$$1/U = (K_s/K)(1/S) + 1/K \quad (5)$$

データをこれらの形で整理し、定常状態でバランスしている間の

HRT、S、Uの平均値について計算した。

4-2. 動力学モデル

式(3)を使って各反応器についての広範囲のHRT値に対応した微生物濃度と基質除去率との計算を行い、データの分布と得られ式とを比較した。Fig.2、Fig.3はこの結果を示す。

5. 結論

本研究に利用した動力学係数はここでのモデルとともに溶解性基質を処理するUASB反応器の性能の予測に用いることができる。本研究から次の結論が得られた。

- ①実験に用いた試料の揮発酸のメタン発酵に対して、菌体滞留時間あるいはその逆数である、正味比増殖速度と流出揮発酸濃度との間の定常状態動力学関係は $\text{HRT}^{-1} = \mu = aK_s/(K_s + S) - b$ によって表される。
- ②実験から得られた人工基質と下水汚泥接触湿式酸化処理水の収率係数と微生物死滅速度係数はそれぞれ 0.482 と 0.07 、 0.403 と 0.032 である。また下水汚泥接触湿式酸化水は易分解性となったことが確認された。
- ③異なる基質とさまざまな有機物負荷の条件において、(定常モデルが実験値と一致する場合には)これらのパラメータをUASBの設計と運転に応用することができる。
- ④酢酸ではグラニュールの形成は速いが、負荷の上昇に伴いグラニュールの肥大や崩壊という現象が起りやすい。また、グルコースのような発酵性基質の場合、トラブルにより容易にpHの低下が起こるという不安定性がある。