

II-501

高温汚泥消化に関する基礎的研究

早稲田大学理工学部 学生員 ○富沢 儀生
早稲田大学理工学部 学生員 倉持 古沢
早稲田大学理工学部 正会員 遠藤 都夫

1. 緒言 嫌気性高温汚泥消化について、合成基質の実験に基き、反応動力学モデルを用いて解析を行った。また下水汚泥を用いて、高温汚泥消化実験を行い、滞留時間を中心に基礎的諸問題を明らかにしようとするものである。

2. 実験方法 合成基質を用いて、完全混合型反応槽による半連続実験を行った。消化温度は53°Cとした。種汚泥は高温汚泥消化実験で十分馴致した消化汚泥を、合成基質によって約3ヶ月間十分馴養したものをを用いた。消化日数は、20日、22日、25日および30日消化とした。基質の引き抜き、投入は1日1回とし、攪拌は槽内混合液が十分均一になる程度に1日2回振盪攪拌を行った。合成基質は、酢酸、プロピオン酸およびn-酪酸をそれぞれ5:3:2の割合で混合し、これに数種の栄養塩類を加えたものを使用した。また、高温汚泥消化実験には、T市下水処理場の生汚泥を使用して、合成基質の場合と同様な実験条件で行った。

3. 実験結果と考察

3.1 反応動力学モデル解析 完全混合型反応槽において、基質および微生物の物質収支について検討を加える場合 Monod式は単純化しすぎたモデルといわれている。しかしながら、阻害要因を考慮して複雑な式を使用すれば、その解析は極めて困難となる。Monod式が現在なお広く使用されている現状を考慮して、本研究においても Monod式を適用して、反応動力学的解析を行った。

完全混合型反応槽において、嫌気性消化が円滑に進行して動的平衡状態が維持され、安定した定常状態が確立している場合、微生物の物質収支式は $dX_1/d\theta = 0$ 、また、基質の物質収支式は $dX_0/d\theta = 0$ となる。したがって、微生物濃度 X_1 、および基質濃度 X_1 はそれぞれ(1)式および(2)式で表わすことができる。

$$X_0 = \frac{Y^*(X_0^0 - X_1)}{1 + k^d \theta^r} \quad \dots\dots (1) \quad X_1 = \frac{k^*(1 + k^d \theta^r)}{\theta^r k^m - (1 + k^d \theta^r)} \quad \dots\dots (2)$$

X_0^0 : 流入基質濃度, X_1 : 反応槽内基質濃度, X_1 : 反応槽内微生物濃度, k^d : 微生物の比死滅速度, θ^r : 滞留時間 (V/F), F : 流入量, V : 反応槽容積, k^m : 微生物最大比増殖速度, k^* : Michaelis-Menten Constant (飽和定数), Y^* : 菌体収率

(1)式および(2)式より、 X_1 と X_1 を直接求めることが困難であるから、Lineweaver-Burk plot法を用いて反応動力学モデル定数、 Y^* , k^d , k^* および k^* 等を求めることができる。反応槽内の微生物濃度 X_1 は、定常状態では、(1)式で表わされるが、希釈率 D (day^{-1})を導入すると、(3)式となる。

$$(D + k^d)X_1 = DY^*(X_0^0 - X_1) = DY^*\{X_0^0 - \frac{k^*(D + k^d)}{k^m - (D + k^d)}\} \quad \dots (3) \quad D = \frac{1}{\theta^r} = k - k^d = \frac{k^m k^* X_1}{k^* + X_1} - k^d$$

(3)式は反応槽内の微生物増殖速度を示している。この場合、微生物の増殖速度の最大値は(3)式を微分して、(4)式より求めることができる。

$$\frac{d\{(D + k^d)X_1\}}{dD} = 0 \quad \dots\dots (4) \quad D_{\max} = k^m - k^d - \left\{ \frac{k^* k^m (k^m - k^d)}{X_0^0 + k^*} \right\}^{1/2} \quad \dots\dots (5)$$

となる。しかしながら、希釈速度が $D_{\max}$ 以上に大きくなれば、微生物の増殖が追いつけなくなり、菌体濃度 X_1 は急激に小さくなる。したがって、このような場合、反応槽内の基質濃度 X_1 は、ついに投入基質濃度 X_0^0 に近い値となる。このような現象が washoutである。この場合の滞留時間 θ_w は、定常状態における完全混合型反応槽の菌体収支式(5)に、 $X_0 = 0$, $X_1 = X_0^0$ のとき、 $\theta^r = \theta_w$ として、 θ_w について解けば(6)式が得られる。

$$V \frac{dX_1}{dt} = F X_0^0 - F X_1 + (k - k^d) X_1 V \quad \dots\dots (6) \quad \theta_w = \frac{1}{k^m X_0^0 / (k^* + X_0^0) - k^d} \quad \dots\dots (7)$$

3.2 合成基質による嫌気性消化実験 合成基質による半連続投入消化実験を行い、消化が十分に進行して、動的平衡状態が維持されている場合の混合液の性質は20日~30日消化の範囲では、pH 7.1~7.5、ガス発生量8~11倍および有機酸の分解率は85~95%の範囲であった。これらの消化実験に、Lineweaver-Burk plot法を用いて、 Y^* , k^d , k^* および k^* 等を図-1および図-2から直接求めた。これらのモデル定数を表-1に示した。図-1および図-2に見られるように、消化日数20日、22日、25日および30日消化の狭い範囲の4点で決定しているので、厳密な意味の信頼性については今後の研究によらなければならないが、特に菌体収率 Y^* について考察すれば、 Y^* は細菌増殖相によってかなり異なることが知られているし、また、必ずしも定数でないとも言われている。しかしながら、試的に求めた合成基質の理論的菌体収率 $Y_{th}^* = 0.037 \text{ mg C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} / \text{mg COD}$

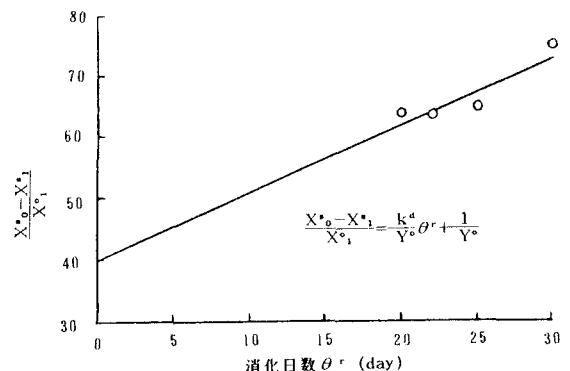


図-1 消化日数と $(X_0^0 - X_1) / X_1$ との関係

Lawrence等の実験結果 $Y^0=0.044\text{mg}\cdot\text{MLVSS}/\text{mg}\cdot\text{COD}(35^\circ\text{C})$ 等にかなり近似した値が得られたものと考えることができた。増殖速度の最大値は(5)式から $D_{\max}=0.044\text{day}^{-1}$ となる。この場合の滞留時間は、 $\theta^r_g=23\text{day}$ を得ることができた。

$$D_{\max}=0.082-0.027-\left\{\frac{535\times0.082\times(0.082-0.027)}{19838+535}\right\}^{1/2}=0.044(\text{day}^{-1})$$

$$\theta^r_g=\frac{1}{D_{\max}}=22.7\approx 23\text{ day}$$

また、washoutの場合の滞留時間 θ_w は、(6)式より求めることができた。

$$\theta_w=\frac{1}{\{0.082\times19838/(535+19838)\}-0.027}=18.9\approx 19\text{ day}$$

図-3は希釈率と微生物濃度および基質濃度と微生物増殖速度等の関係を示したものである。この図から、 $D_{\max}=0.0441(\text{day}^{-1})$ の時、最大増殖速度が生じている。また、wash-out $\theta_w=18.9\text{ day}$ の時、 X^0_1 および $X^0_1(D+k^d)$ は共に0になり、 $X^0_1=x^0_1$ となっていることが認められた。図-4は washoutの生じると考えられる滞留時間18日消化の実験結果である。実験開始後20日目から、ガス発生量(cc/投入有機酸/g·day)は急激に減少して、27日目には完全にストップした。また、pHは実験開始後14日間7.2が維持されたが、15日目は6.9となり、20日目からしだいに低下して、27日目には遂に5.2となり、消化作用が事実上停止した。これは、Washoutの計算結果と良く一致している。

平均汚泥滞留時間(SRT) θ_m は、反応槽内の微生物総量に対する微生物増殖量と流入基質中の微生物量との和との比である。定常状態では、微生物総量に対する微生物流出量と死滅量の和との比になるから、(8)式となる。

$$\theta_m=\frac{X^0_1V}{X^0_1F+k^dX^0_1V}=\frac{1}{1/\theta^r+k^d}\dots\dots\dots(8)$$

$$\theta_c=\frac{VX^0_1}{FX^0_1}=\theta^r\dots\dots\dots(9)$$

平均細胞滞留時間(mean cell residence time) θ_c は定常状態では、(9)式で示す事ができる。表-2は各消化日数の θ_m と θ_c である。

3.3 高温汚泥消化実験 消化日数 3~30日の範囲について、高温汚泥消化実験を行った。消化日数 4~30日消化の範囲では、ガス発生量は、550~639cc/VS·g·day、pHは7.2~7.6の範囲であった。特に、15日消化以上では、ガス発生量約640cc/VS·g·day、pHは7.5~7.6の範囲で、極めて良好な消化状態が得られた。反応槽内混合液強熱減量(MLVSS)を“微生物学的振舞をする汚泥濃度”として考え、 X とすれば、定常状態におけるSRTを θ_m とすれば、

$$\theta_{ms}=\frac{XV}{XF+k^dX^0_1V}=\frac{1}{1/\theta^r+k^d\cdot X^0_1/X}\approx\theta^r(X^0_1\ll X)\dots\dots\dots(10)$$

となる。合成基質の実験より、 $k^d=0.027\text{ day}^{-1}$ 、 $X^0_1=300\text{ mg/l}$ である。また、消化作用が円滑に進行する場合の最小滞留時間を23日消化とすれば、 $\theta_m=14.1\text{ day}$ である。汚泥消化実験では、 $X=8584\text{ mg/l}$ である。したがって、(10)式において、 $\theta_{ms}=14.1\text{ day}$ とすれば、

$$\theta_m=\theta_{ms}=\frac{1}{1/\theta^r+0.027\times300/8584}=14.1$$

$$\theta^r=14.3\text{ day}$$

となる。この滞留時間は、高温汚泥消化において、メタン発酵が円滑に進行する場合の最小滞留時間(θ^r)minであると考えることができる。

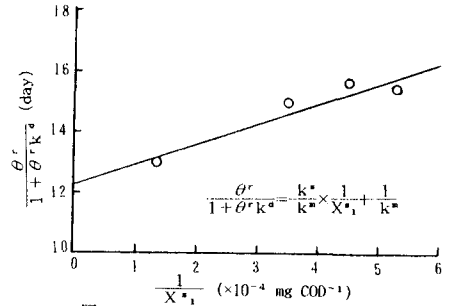


図-2 $1/X^0_1$ と $\theta^r/(1+\theta^r k^d)$ の関係

表-1 反応動力学モデル定数

Y^0	K^d	K^m	k^*	消化温度
mg MLVSS/mg COD	day ⁻¹	day ⁻¹	mg/l	53 °C
0.025	0.027	0.082	535	

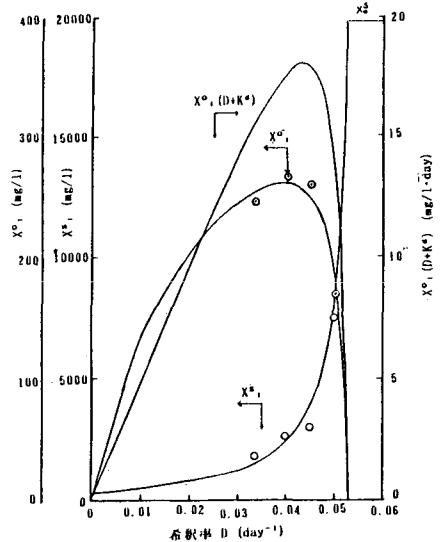


図-3 希釈率と基質濃度、微生物濃度および微生物増殖速度の関係

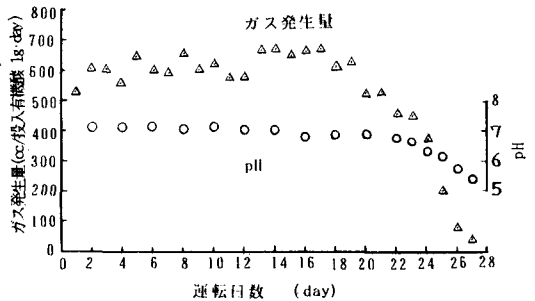


図-4 18日消化のガス発生量およびpH