

II-476

中温嫌気性消化における滞留時間に関する研究

早稲田大学理工学部 学生員 ○渡辺修治
早稲田大学理工学部 正会員 遠藤郁夫
群馬工業高等専門学校 正会員 大森 忠

1. 緒言

反応動力学モデルとして、完全混合型反応槽を用いて、合成基質による中温嫌気性消化実験を行ない、基質および微生物の物質収支について、解析を行なった。また、反応動力学の観点より、最小消化日数を定義し、最小消化日数およびwash-out等について検討を加えたものである。この際、微生物比増殖速度として、Monod 式を使用した。Monod 式は単純化しすぎたモデルといわれているが、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Monod 式を適用して反応動力学の解析を行なった。

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投入実験を行なった。消化温度は37℃とした。種汚泥は中温汚泥消化実験で十分馴致したものをを用いた。消化日数は 5日～40日消化とした。合成基質はTrypton, Dextrose, Beef Extract およびYeast Extract 等を2:1:0.48:0.12 の割合に混合し、これに数種の栄養塩類を加えたものを使用した。

3. 反応動力学モデル解析

完全混合型反応槽において、嫌気性消化が平滑に進行して動的平衡状態が維持され定常状態が確立している場合、微生物の物質収支式は $dX^0/dt=0$ 、また基質の物質収支式は $dX^s/dt=0$ となる。

従って、微生物濃度 X^0 、および基質濃度 X^s はそれぞれ(1) 式および(2) 式で表わすことができる。

$$X^0 = \frac{Y^0 (X^s_0 - X^s_1)}{1 + K^d \theta^r} \dots (1) \quad X^s_1 = \frac{K^s (1 + K^d \theta^r)}{\theta^r K^m - (1 + K^d \theta^r)} \dots (2)$$

X^s_0 : 流入基質濃度, X^s_1 : 反応槽内基質濃度, X^0 : 反応槽内微生物濃度, K^d : 微生物比死滅速度,

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^s : Michaelis-Menten Constant (飽和定数), Y^0 : 菌体収率

(1) 式および (2) 式にLineweaver-Burk plot法を適用して反応動力学モデル定数、 Y^0 , K^d , K^m および K^s 等を求めることができる。反応槽内微生物濃度 X^0 は定常状態では(1) 式で表わされるが、希釈率D(day⁻¹)を(3)式に導入すると(4) 式を得ることができる。

$$D = \frac{1}{\theta^r} = K - K^d = \frac{K^m X^s_1}{K^s + X^s_1} - K^d \dots (3) \quad (D + K^d) X^0_1 = D Y^0 (X^s_0 - X^s_1) = D Y^0 \left\{ X^s_0 - \frac{K^s (D + K^d)}{K^m - (D + K^d)} \right\} \dots (4)$$

(4) 式は反応槽内の微生物増殖速度を表わしている。この場合、微生物増殖速度が最大となるDの値 D_{max} は(4) 式を微分して求めることができる。すなわち

$$\frac{d \{ (D + K^d) X^0_1 \}}{dD} = 0 \dots (5) \quad D_{max} = K^m - K^d - \left\{ \frac{K^s K^m (K^m - K^d)}{X^s_0 + K^s} \right\}^{1/2} \dots (6)$$

となる。しかしながら、希釈率が 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^0 は急激に減少する。従って、このような場合、反応槽内基質濃度 X^s_1 は、ついに投入基質濃度 X^s_0 に近い値となる。このような現象がwash-out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基質濃度を示す(2) 式において、 $X^0_0=0$, $X^s_1=X^s_0$ のとき $\theta^r=\theta_w$ として θ_w について解けば(7) 式が得られる。

$$\theta_w = \frac{1}{K^m X^s_0 / (K^s + X^s_0) - K^d} \dots (7) \quad \theta_m = \frac{X^0_1 V}{X^0_1 F + K^d X^0_1 V} = \frac{1}{1/\theta^r + K^d} \dots (8)$$

汚泥滞留時間(SRT) θ_m は、定常状態において、流入基質中の微生物量 $X^0_0=0$ とした場合、微生物総量に対する微生物流出量と死滅量の和との比となるから(8) 式で示すことができる。

4. 実験結果と考察

4.1 酸性発酵とアルカリ発酵

酸性発酵とアルカリ発酵について反応動力学的解析を行なうため、滞留時間を 5日～40日消化とした。各反応槽の消化が十分進行して、動的平衡状態が安定して維持されている場合のpH、ガス発生量、COD、BOD、揮発性有機酸、およびCH₄含有率等について滞留時間との関係を求めた。酸性発酵期およびアルカリ発酵期では、それぞれ滞留時間との間に単分子反応型の関係があることが認められた。図-1に示した様に、滞留時間 5日消化は対数増殖期から変位していることから遅退期、また40日消化は細胞内呼吸期と考えられた。酸性発酵期とアルカリ発酵期とにそれぞれ最小二乗法を適用した場合の境界点を折点滞留時間(ガス発生量の場合15日消化)とした。またそれらの直線の交点を交点滞留時間として表-1に示した。酸性発酵期とアルカリ発酵期の折点滞留時間を如何にすべきかはLineweaver-Burk plot法を用いて反応動力学モデル定数を求めるに際して最小二乗法の適用範囲に直接影響する重要な要素である。従って、

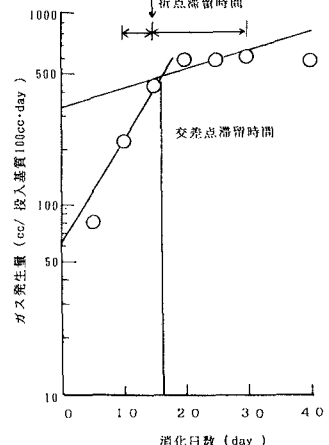


図-1 消化日数とガス発生量との関係

本研究では、表-1に示した様に、15日消化を折点滞留時間とし、15日消化以下を酸性発酵、15日消化以上をアルカリ発酵とした。また、反応槽内基質濃度 S^0 (COD)，反応槽内細菌濃度 X^0 (MLVSS)，折点滞留時間15日消化として5日および40日消化を除いて、Lineweaver-Burk plot法を適用したものである。これより反応動力学モデル定数を求めて表-2に示した。

4.2最大増殖速度とwash-out

表-2のモデル定数を(6)式に代入して増殖速度が最大となる希釈率 D_{max} を求めた。図-2はアルカリ発酵期における希釈率と、基質濃度、微生物濃度および微生物増殖速度との関係を示したものである。図-2に見られるように希釈率 D_{max} 付近では微生物の増殖速度および微生物濃度等は極めて不安定であることが認められた。一方、希釈率と消化日数との関係は、(3)式から、 $D=1/\theta^r$ であるから、最小消化日数 θ_{min}^r は次の様に定義することができる。すなわち、

$$\theta_{min}^r = 1/D_{max} \dots (9)$$

となる。従って、アルカリ発酵期における最小消化日数は次の様に示すことができた。

$$\theta_{min}^r = 1/0.0684 = 14.6 \div 15 \text{日消化}$$

図-2における D_{max} 付近では、その点を過ぎると微生物の増殖速度 $(D+K^*)X^0$ 、並びに濃度 X^0 は急激に減少することが認められる。従って、プロセスの安定性の観点からは極めて不安定な領域と考えられる。すなわち、最小消化日数付近は反応槽の滞留時間の僅かな変化にたいしても、反応槽内基質濃度 S^0 が敏感に大きく変

表-1 折点および交点滞留時間

消化日数 との関係	pH	ガス発生量cc 投入基質 100cc・day		COD ^r mg/l	BOD mg/l	揮発性 有機酸 mg/l	CH ₄ %	平均
		折点 滞留時間 day	交点 滞留時間 day					
折点 滞留時間 day	15	15		15	15	15	15	15
交点 滞留時間 day	15		16	17	16	18	15	16

表-2 反応動力学モデル定数

消化日数 day	Y^0 mgVSS/mgCOD	K^a day ⁻¹	K^m day ⁻¹	K^* mg/l	係数算定 条件
10~15	0.088	0.0410	0.169	1680	COD, MLVSS
15~30	0.0582	0.00986	0.0991	699	

表-3 アルカリ発酵期における θ_{min}^r 、 θ_w および θ_m

消化日数 day	θ_{min}^r		θ_w		係数算定条件
	θ_{min}^r day	θ_m day	θ_w day	θ_m day	
15~30	14.6	12.8	11.8	10.6	COD, MLVSS

化する消化日数の範囲でもある。このようなことから、最小消化日数は少なくとも15日、或はそれより若干大きい値をとる必要があるものと考えられる。また、(7)式よりwash-out、 θ_w を求め表-3に示した。図-3は消化日数とCH₄含有率%との関係を示した。15日消化以上で飽和状態を示している。10日~15日消化の間で急激に減少していることが認められた。これらの現象は、アルカリ発酵期における最小消化日数および、wash-outによって説明できるものと考えられた。また θ_{min}^r および θ_w の場合のSRT(θ_m)を表-3に示した。完全混合型反応槽において、n日以上滞留する汚泥の割合は、 $Y = (1 - 1/\theta^r)^n \dots$

(10)となる。従ってwash-outにおいて θ_{min}^r 以上滞留する汚泥の割合は、

$$Y = (1 - 1/11.8)^{14.6} = 0.24 \text{ すなわち24\%}$$

となるから、反応槽から発生するCH₄はwash-outに達しても直ちにゼロとはならず徐々に減少するものと考えられる。

5. 総括および結論

本研究は中温嫌気性汚泥消化実験において消化日数5日~40日消化のpHの変化範囲(pH=6.2~7.6)とほぼ同程度の変化範囲(pH=6.0~7.5)をもつことを一つの特徴とする合成基質を使用して、基礎的研究を行なった。反応動力学モデル解析に際しMonod式を適用してアルカリ発酵期における微生物比増殖速度が最大となる希釈率 D_{max} を求め最小消化日数 θ_{min}^r を定義し、中温嫌気性消化における最小消化日数について検討を加えた。また、wash-outおよび汚泥滞留時間等を求めることができた。

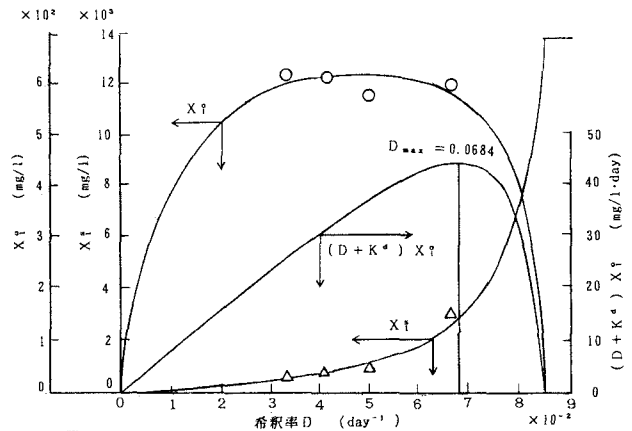


図-2 アルカリ発酵期における希釈率と基質濃度、微生物濃度および微生物増殖速度の関係(15~30日消化: COD Basis)

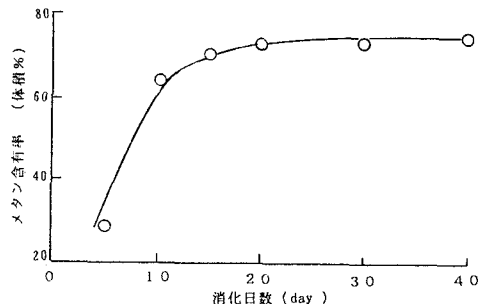


図-3 消化日数とメタン含有率との関係