

II-457

高温嫌気性消化に関する基礎的研究(II)

早稲田大学理工学部 学生会員 ○古沢浩之
 早稲田大学理工学部 正会員 遠藤郁夫
 日本大学生産工学部 正会員 永田伸之

1. 緒言 高温嫌気性消化について合成基質の実験結果に基づき、反応動力学的解析を行なった。反応動力学モデルの解析に際して、高温嫌気性消化では微生物比増殖速度式として、特に阻害要因を考慮して複雑な式を用いなくとも、Monod 式を適用することによって十分良好な結果が得られることが基礎的研究(I)によって認められた。本研究は、基礎的研究(I)の結果を参考として、反応動力学モデルに Monod式を適用して高温嫌気性消化について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投入実験を行なった。消化温度は53℃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6ヶ月間十分馴致したものを用いた。消化日数は5日, 8日, 12日, 15日, 20日, 25日および30日消化とした。基質の引抜き投入は1日1回とし、攪拌は反応槽内混合液が十分均一になる程度に1日2回振とう攪拌を行なった。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、嫌気性消化が円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 $dX^0/d\theta = 0$ 、また基質の物質収支式は $dX^s/d\theta = 0$ 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^d : 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。反応槽内の微生物濃度 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。

$$D = \frac{1}{\theta^r} = K - K^d = \frac{K^m X^s_1}{K^s + X^s_1} - K^d \dots (3)$$

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

(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、微生物の増殖速度が最大となるDの値D_mは(4)式を微分して求めることができる。すなわち $\frac{d\{(D+K^d)X^0\}}{dD} = 0 \dots (5)$ $D^m = K^m - K^d - \left\{ \frac{K^s K^m (K^m - K^d)}{X^s_0 + K^s} \right\}^{1/2} \dots (6)$

となる。しかしながら、希釈率がD_m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。したがって、このような場合、反応槽内の基質濃度 X^s 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、 $X^0 = 0, X^s_1 = X^s_0$ 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。

$$\theta_w = \frac{1}{K^m X^s_0 / (K^s + X^s_0) - K^d} \dots (7)$$

$$\theta_m = \frac{X^0_1 V}{X^0_1 F + K^d X^0_1 V} = \frac{1}{1/\theta^r + K^d} \dots (8)$$

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 $X^0 = 0$ 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。完全混合型反応槽から引抜かれた混合液と槽内に残留した混合液とは本質的には同一と考えることができる。反応槽から引出した混合液において、n日滞留以下の汚泥を含む割合は(10)式で表わすことができる。

$$\sum \frac{1}{\theta^r} \left(1 - \frac{1}{\theta^r}\right)^{n-1} = \frac{1}{\theta^r} + \frac{1}{\theta^r} \left(1 - \frac{1}{\theta^r}\right) + \dots + \frac{1}{\theta^r} \left(1 - \frac{1}{\theta^r}\right)^{n-1} = 1 - \left(1 - \frac{1}{\theta^r}\right)^n \dots (9)$$

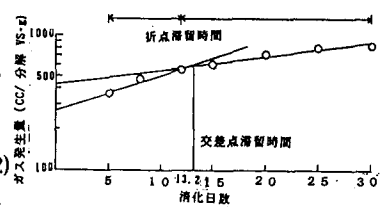


図-1 消化日数とガス発生量

表-1 酸性発酵期とアルカリ発酵期の折点滞留時間および交差点滞留時間

	pH	ガス発生量cc 分解された有機物	COD _c mg/l	BOD mg/l	揮発性有機酸 mg/l	MLVSS mg/l	Cl ₂ %
折点滞留時間 day	7.6	645	4974	3267	1504	378	65.2
交差点滞留時間 day	15	12	12	12	15	15	15
不発酵 滞留時間 day	13.3	13.2	12	8.9	15	15	13.5

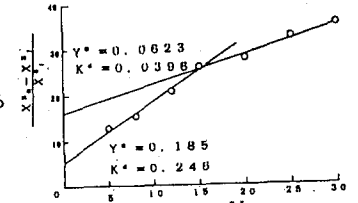


図-2 θ^r と $\frac{X^s_0 - X^s_1}{X^s_0 X^0}$ との関係 (COD_cおよびMLVSS Basis)

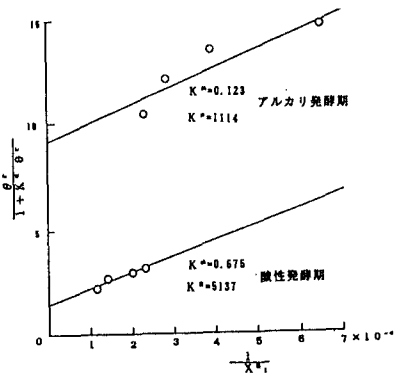


図-3 $\frac{1}{X^0} \theta^r$ と $\frac{1}{1 + K^d \theta^r}$ との関係 (COD_cおよびMLVSS Basis)

一方 (9) 式から n 日以上滞留する汚泥の割合 Y は

$$Y = (1 - 1/\theta^*)^n \dots (10) \quad Y: n \text{ 日以上滞留する汚泥の割合}$$

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～30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ガス発生量、pH、揮発性有機酸、およびMLVSS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。その代表例として、ガス発生量と滞留時間との関係を図-1に示した。また、図-1に示した様に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12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Linerweaver-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と考えられる。従って、本研究では、表-1に示した折点滞留時間が7項中4項目が15日消化であることから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て、Linerweaver-Burk plot法を適用した。図-2および図-3は反応槽内基質濃度 X^s_1 (COD), 反応槽内細菌濃度 X^o_1 (MLVSS), 折点滞留時間15日消化としてLinerweaver-Burk plot法を適用したものである。これらの図から、反応動力学モデル定数を求めて、表-2に示した。表-1に見られるように交点滞留時間は8.9日～15日消化であった。特に、pH、ガス発生量およびガス組成(CH₄)では、13.2～13.5日消化であった。従って酸性発酵期とアルカリ発酵期の境界滞留時間は、測定項目によって9～15日消化の範囲と考えることができる。

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_m を求めた。図-4で見られるように希釈率 D_m 付近では微生物の増殖速度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、 $D = 1/\theta^*$ であるから、最小消化日数(θ^*_{min})は次の様に定義することができる。すなわち、 $\theta^*_{min} = 1/D_m$ 、しかしながら前述の様に、 D_m 付近では微生物の増殖速度は不安定であるから、プロセスの安定性の観点からは、最小消化日数は θ^*_{min} より若干大きい値が必要であろうと考えられる。表-3に D_m および θ^*_{min} を示した。また、(7)式よりWash-out、 θ_w を求めた。表-3に示した様に係数算定条件として、菌体量としてMLVSSを使用した場合、COD BasisでもBOD Basisでもほとんど差は認められなかった。

4.3 汚泥滞留時間(SRT) (8)式より θ^*_{min} および θ_w の場合の汚泥滞留時間を求めて表-4に示した。最小消化日数 $\theta^*_{min} = 18$ 日消化の場合の汚泥滞留時間 θ_m は11日であった。従って、各消化日数において11日以上滞留する汚泥の割合を(10)式より求めて図-5に示した。また、図-5にはガス発生量、メタンガス含有率およびpH等も示した。ガス発生量は20日消化以上が飽和領域と考えると $\theta^*_{min} = 18$ 日消化付近と考えることができる。また、この場合の汚泥の組成は11日以上滞留する汚泥割合が57%であった。メタン含有率からすれば、12日消化以上が安定領域と考えられ、消化日数はwash-out付近でもある。この場合の汚泥割合は38%であった。

5. 総括および結論 本研究は高温嫌気性汚泥消化実験において消化日数5日～30日消化のpHの変化範囲(pH=6.21～7.6)とほぼ同程度の変化範囲(pH6.9～7.8)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て基礎的研究(1)を参考として、Monod式を適用して微生物増殖速度が最大となる希釈率 D_m を求め θ^*_{min} を定義した。また、 θ^*_{min} および θ_w について、それぞれの場合の θ_m を求め、ガス発生量、メタンガス含有率、pHおよび汚泥組成等について総括的に検討を加え、嫌気性消化に関して合理的な知見を得ることができた。

表-2 反応動力学モデル定数

消化日数 day	Y^o mgVSS/mgCOD	K^d day ⁻¹	K^m day ⁻¹	K^s mg/l	係数算定 条件
5～15	0.185	0.246	0.676	5137	COD, VSS
15～30	0.0632	0.0396	0.123	1114	

表-3 D_m , θ^*_{min} および θ_w

消化日数 day	D_m day ⁻¹	θ^*_{min} day	θ_w day	係数算定 条件
5～15	0.132	8	4	COD, MLVSS
15～30	0.056	18	13	
5～15	0.153	7	4	BOD, MLVSS
15～30	0.052	19	15	

表-4 θ^*_{min} および θ_w の場合の汚泥滞留時間

消化日数 day	θ^*_{min} day	θ_m day	θ_w day	係数算定 条件
5～15	8	3	4	COD, MLVSS
15～30	18	11	13	
5～15	7	2	4	BOD, MLVSS
15～30	19	10	15	

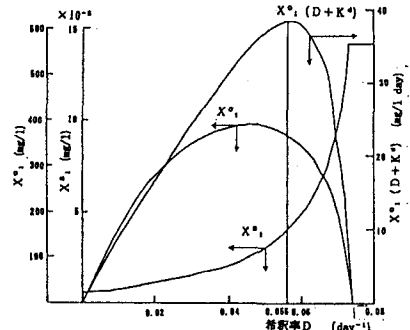


図-4 希釈率と基質濃度、微生物濃度および微生物増殖速度の関係 (15～30日: COD Basis)

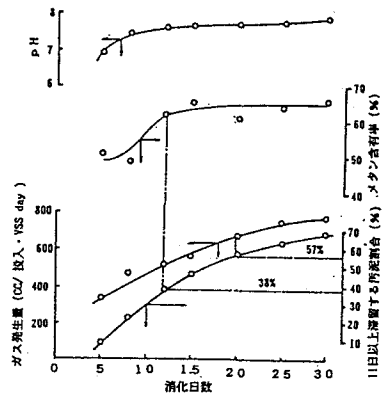


図-5 各消化日数におけるガス発生量およびメタン含有率