

早稲田大学理工学部 学生員 ○林 正智
早稲田大学理工学部 学生員 奥津 宜幸
早稲田大学理工学部 正会員 遠藤 郁夫

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、反応動力学的解析と反応速度論的解析を行ない、Monod-Model定数を求め、反応槽内の基質濃度、および比微生物増殖速度について、両解析的手法について比較検討を行なったものである。

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3ヵ月間十分馴養したものをを用いた。消化日数は、5~30日消化とした。基質の引抜き、投入は1日1回とし、攪拌は槽内混合液が十分均一になる程度に一日2回振動攪拌を行なった。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. 理論的解析

(1) 反応速度論的解析

完全混合型反応槽モデルを図-1に示した。

基質容積負荷 L_v 、反応槽内の基質消費率 α はそれぞれ(1)式および(2)式で示すことができる。

$$L_v = \frac{F}{V} \cdot X_0^s = \frac{X_0^s}{\theta} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{X_0^s - X_1^s}{X_0^s} = 1 - \frac{X_1^s}{X_0^s} \quad (2)$$

基質消費速度 R_s は、(1)および(2)式より、(3)式となる。

$$R_s = \alpha \cdot L_v = \alpha \cdot \frac{X_0^s}{\theta} = \frac{X_0^s - X_1^s}{\theta} \quad (3)$$

菌体増殖速度 M_a は $M_a = K X_1^q$ — (4)

である。従って基質消費速度と菌体増殖速度との関係は(5)式で表すことができる。

$$R_s = -\frac{M_a}{Y^0} = K - \frac{X_1^0}{Y^0} = \frac{X_1^0}{Y^0} \cdot \frac{K^m (X_1^s)^n}{K^s + (X_1^s)^n} \quad (5)$$

線形化すると、 $\frac{X_1^0}{R_s} = \frac{Y^0}{K^m} + \frac{Y^0}{K^m} \cdot K^s \left(\frac{1}{X_1^s} \right)^n$ — (6)

ここで、 K ；比増殖速度 $K = \frac{K^m (X_1^s)^n}{K^s + (X_1^s)^n}$ — (7)

$n=1$ のとき、(7)式はMonod Modelとなる。

K^m ；最大比増殖速度、 K^s ；飽和定数、 Y^0 ；菌体収率
反応槽内の微生物の物質収支式から、(8)式を得ることができる。すなわち、

$$X_1^q = \frac{R_s \theta Y^0}{1 + \theta K^s} \quad (8)$$

(8)式を線形化すると、 $\frac{R_s}{X_1^q} = \frac{1}{Y^0} \frac{1}{\theta} + \frac{K^d}{Y^0}$ — (9)

となる。ここで、 K^d ；比死滅速度

(2) 反応速度論的解析によるMonod-Model定数の算定

基質濃度 X_1^s と比増殖速度 K との関係は、Monod式表されるが、一般的な微生物反応においては、 X_1^s と K 、或いは X_1^s と R_s 等の関係を説明するモデルとしては、Moserの式(7)式が広く用いられている。

$n=1$ でMonod式となるが、 $n>1$ では $X_1^s = (K^s)^{1/n}$ を変曲点とするシグモイド曲線となる。図-2は X_1^s と R_s との関係である。図-2からは曲線のシグモイド性は見られず、 $n=1$ であることが認められた。従って、(6)式は(10)式となる。

$$\frac{X_1^0}{R_s} = \frac{Y^0}{K^m} + \frac{Y^0}{K^m} \cdot K^s \cdot \frac{1}{X_1^s} \quad (10)$$

図-3および図-4は反応槽内基質濃度をBODとした場合の(9)式および(10)式をそれぞれ示したものである。表-1は基質濃度をCODおよびBODとした場合のMonod Model定数である。

(3) 反応動力学的解析

(1) 完全混合型反応槽が動的平衡状態が維持され、定常状態

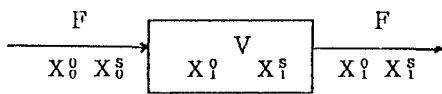


図-1 完全混合型反応槽モデル

X_0^s ；流入微生物濃度、 X_1^s ；流入基質濃度
 X_1^q ；反応槽内微生物濃度、 X_1^s ；反応槽内基質濃度
 V ；反応槽容積、 F ；流入速度

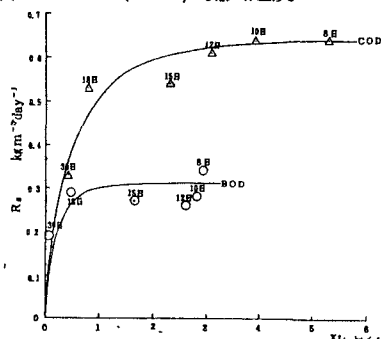


図-2 基質消費速度 R_s と基質濃度 X_1^s との関係

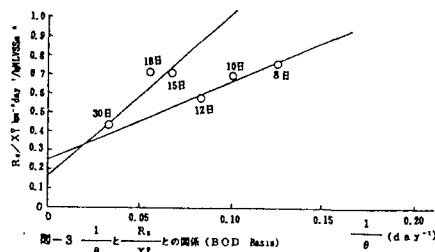


図-3 $\frac{1}{X_1^q}$ と $\frac{1}{R_s}$ との関係 (BOD Basis)

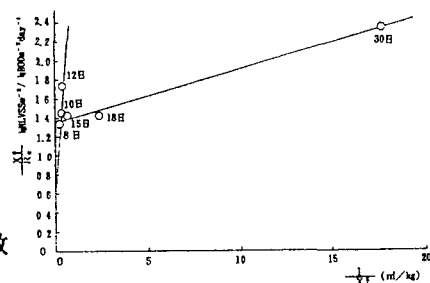


図-4 $\frac{1}{X_1^q}$ と $\frac{1}{R_s}$ との関係 (BOD Basis)

が確立している場合の反応槽内微生物濃度 X_I^0 、および基質濃度 X_I^s として、反応動力学的解析を行なうと、それぞれ(11)式および(12)式で表すことができる。

$$X_I^0 = \frac{Y^0 (X_0^0 - X_I^s)}{1 + K^d \theta} \quad (11)$$

$$X_I^s = \frac{K^s (1 + K^d \theta)}{\theta K^m - (1 + K^d \theta)} \quad (12)$$

(4) 反応動力学的解析による Monod-Model 定数の算定

(11) 式及び (12) 式を線形化して、基質濃度 COD の場合について図-5 及び図-6 に示した。表-2 は、基質濃度 COD および BOD の場合の Monod-Model 定数を示したものである。

4. 実験結果と考察

完全混合型反応槽内基質濃度は、反応速度論的解析では (10) 式より、また反応動力学的解析では (12) 式より、それぞれ求めることができる。

反応速度論的解析

$$X_I^s = \frac{(X_0^s - K^s - \frac{\theta X_I^0 K^m}{Y^0}) + (X_0^s - K^s - \frac{\theta X_I^0 K^m}{Y^0})^2 + 4 X_0^s K^s}{2} \quad (13)$$

反応動力学的解析

$$X_I^s = \frac{K^s (1 + K^d \theta)}{\theta K^m - (1 + K^d \theta)} \quad (12)$$

図-7 および図-8 は (13) 式および (12) 式の関係について計算値と実験値をそれぞれ示したものである。両者とも良く一致していることが認められた。(5) 式から (14) 式が得られる。

$$R_s = \frac{M_G}{Y^0} = K \frac{X_I^0}{Y^0} \quad (5)$$

$$\frac{Y^0}{X_I^0} R_s = K = \frac{K^m \cdot X_I^s}{K^s + X_I^s} \quad (14)$$

(14) 式の左辺は菌体の比増殖速度である。菌体の増殖速度は対数増殖期において、単分子反応に従うものとされている。嫌気性汚泥消化の様に活性汚泥法に比較して滞留時間の非常に長い場合には、菌体の増殖は死滅速度を考慮する必要がある。また、死滅速度は微生物濃度により例示と考えられている。すなわち、

活性汚泥法のように比較的滞留時間の短い場合

$$\frac{dX_I^0}{d\theta} = K X_I^0 \quad (15)$$

嫌気性消化法のように滞留時間の長い場合

$$\frac{dX_I^0}{d\theta} = (K - K^d) X_I^0 \quad (16)$$

となる。従って、(14) 式は

$$\frac{Y^0}{X_I^0} R_s = K - K^d \quad (17)$$

となる。(5) 式において、 $n=1$ とすれば、

$$\frac{Y^0}{X_I^0} R_s = \frac{K^m X_I^s}{K^s + X_I^s} - K^d \quad (18)$$

となる。図-9 は (18) 式について、BOD の場合をプロットしたものである。酸性発酵期、およびアルカリ発酵期においてもかなり良く一致していることが認められた。COD の場合についても同様であった。

5. 結論

合成基質を用いた嫌気消化実験では、合成基質濃度と微生物比増殖速度との関係はその曲線にシグモイド性がなく $n=1$ 、すなわち、Monod-Model が成立することが認められた。また、Monod-Model 定数は反応速度論的解析或いは反応動力学的解析によって求めた場合、両者ともよく一致していることが認められた。

表-1 基質濃度 COD および BOD とした場合の Monod-Model 定数

	COD		BOD	
	酸性発酵期	アルカリ発酵期	酸性発酵期	アルカリ発酵期
Y^0 (gMLVSS/g)	0.323	0.050	0.241	0.115
K^s (day ⁻¹)	0.378	0.005	0.005	0.013
K^m (day ⁻¹)	0.304	0.101	0.324	0.088
K^d (day ⁻¹)	1002	640	4531	43

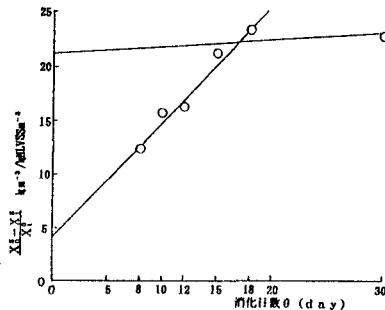


図-5 消化日数 θ と $\frac{X_I^0}{X_I^0 - X_I^s}$ との関係 (COD Basis)

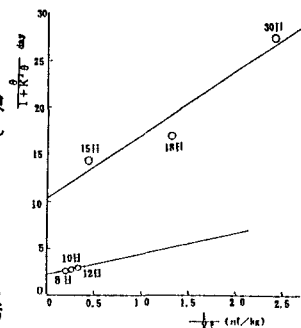


図-6 $\frac{1}{X_I^0}$ と $\frac{1}{X_I^0 - X_I^s}$ との関係 (COD Basis)

表-2 基質濃度 COD および BOD とした場合の Monod-Model 定数

	COD		BOD	
	酸性発酵期	アルカリ発酵期	酸性発酵期	アルカリ発酵期
Y^0 (gMLVSS/g)	0.323	0.047	0.235	0.103
K^s (day ⁻¹)	0.260	0.003	0.049	0.011
K^m (day ⁻¹)	0.461	0.087	0.374	0.076
K^d (day ⁻¹)	1058	654	4517	41

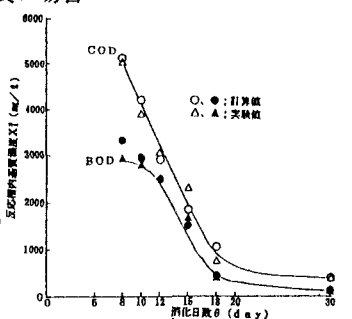


図-7 反応速度論的解析による消化日数 θ と反応槽内基質濃度 X_I^s との関係

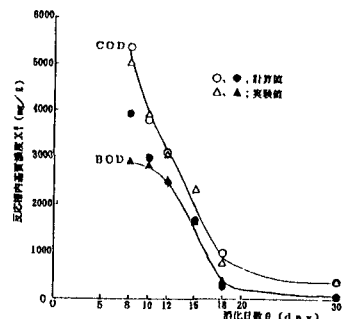


図-8 反応動力学的解析による消化日数 θ と反応槽内基質濃度 X_I^s との関係

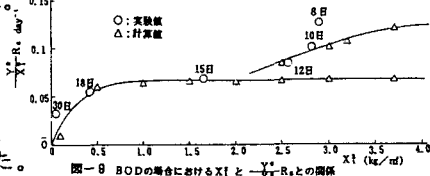


図-9 BOD の場合における X_I^s と $\frac{1}{X_I^0 - X_I^s}$ との関係