

早稲田大学理工学部 学生員 ○大野 崇
早稲田大学理工学部 学生員 吉沢 正宏
早稲田大学理工学部 正会員 遠藤 郁夫

1. 緒言 合成基質による高温嫌気性消化実験における反応動力学的解析、或いは反応速度論的解析では、Monod-Model定数は両解析法ともよく一致していることが認められた。しかしながら高温嫌気性汚泥消化実験において、反応槽内混合消化液（混合消化汚泥）中の菌体として、如何なる指標をとるべきかが重要な問題となり、しばしば反応動力学的解析が困難であった。本研究は、嫌気性汚泥消化について菌体収率に相当する指標として“活性微生物汚泥”（Active Biological Solid）を定義して、反応速度論的解析を行ない、Monod-Model定数を決定し、嫌気性汚泥消化に関する基礎的諸問題、特に滞留時間について明らかにしようとするものである。

2. 実験方法 下水汚泥を用いて、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槽からの消化汚泥を、下水汚泥によって約3ヵ月間十分馴養したものを用いた。消化日数は、6～60日消化とした。汚泥の引抜き、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回振動攪拌を行なった。

3. 実験結果と考察 完全混合型反応槽モデルについて、反応速度論的解析を行なった。図-1は完全混合型反応槽モデルである。

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。

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

活性微生物汚泥増殖速度 M_a は

$$M_a = K X_1^a \quad (4)$$

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。

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

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

$$K; \text{活性微生物汚泥比増殖速度、} K = \frac{K^m (X_1^s)^n}{K^s + (X_1^s)^n} \quad (7)$$

K^m ; 最大活性微生物汚泥比増殖速度、 K^s ; 飽和定数

$Y^a = \frac{\text{形成された活性微生物量 (MLVSS)}}{\text{利用された基質量 (BOD or COD)}}$

(7) 式は、 $n=1$ のとき Monod-Model となる。一般的微生物反応において、反応槽内基質濃度 X_1^s と微生物比増殖速度 K との関係或いは反応槽内基質濃度 X_1^s と基質消費速度 R_s との関係を説明するモデルとして、Moser の式が広く用いられている。(7) 式は $n=1$ 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 との関係を示したものである。

図-2 から、 X_1^s と R_s との関係はシグモイド曲線で、しかもその曲線の変曲点は $X_1^s = 0.5 \text{ BOD}_d/\text{kg MLSS} \cdot \text{day}^{-1}$ 付近であることが認められた。また、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、

$$X_1^a = \frac{R_s \theta Y^a}{1 + \theta K^d} \quad (8)$$

$$(8) \text{ 式を線形化すると、} \frac{R_s}{X_1^a} = \frac{1}{Y^a} \cdot \frac{1}{\theta} + \frac{K^d}{Y^a} \quad (9)$$

となる。ここで、 K^d ; 活性微生物汚泥比死滅速度

図-3 は反応槽内基質濃度を BOD とした場合の (9) 式を示したものである。(6) 式において、 $n=2$ とすると、

$$\frac{X_1^a}{R_s} = \frac{Y^a}{K^m} + \frac{Y^a}{K^m} \cdot K^s \left(\frac{1}{X_1^s} \right)^2 \quad (10)$$

となる。図-4 は基質濃度を BOD とした場合、(10) 式

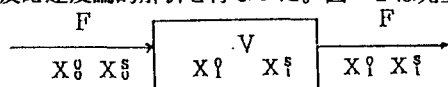


図-1 完全混合型反応槽モデル

X_0^s ; 流入微生物濃度 X_1^s ; 流入基質濃度
 X_1^a ; 活性微生物汚泥濃度 X_1^s ; 反応槽内基質濃度
 V ; 反応槽容積 F ; 流入速度

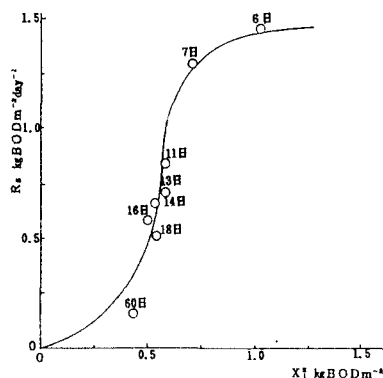


図-2 反応槽内混合基質濃度 (BOD) X_1^s と基質消費速度 R_s との関係

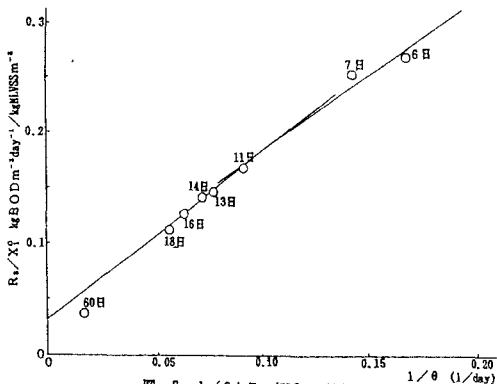


図-3 $1/\theta$ と R_s/X_1^a との関係

を示したものである。表-1は図-3及び図-4から求めたMonod-Model定数である。特に、 Y^A は微生物反応の菌体収率に相当する定数であるが、嫌気性汚泥消化槽では、反応槽内混合液中の菌体を定量することがきわめて困難であるため、反応槽内MLSSを活性微生物汚泥

(Active Biological Solid)として考え、MLVSSを活性微生物汚泥量とした。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)式から求めることができる。すなわち、

$$(X_1^S)^3 - (X_0^S - \theta \frac{K^m}{Y^A} X_1^S)(X_1^S)^2 + K^S X_1^S - X_0^S K^S = 0 \quad (11)$$

となる。(10)式に $Y^A=0.738$ 、 $K^m=0.305$ 、 $K^S=0.455$ 、 $X_0^S=9.732$ を代入して、 $\theta=6$ 、7、11、13、14、16及び18日消化の場合の X_1^S 、すなわち反応槽内混合液BODを求めた。図-5は計算値と実験値である。かなり良く一致していることが認められた。

また、基質消費速度 R と活性微生物比増殖速度 K との関係は、(5)式より、(12)式を得ることができる。

$$R_s = \frac{M_0}{Y^A} = K \frac{X_1^S}{Y^A} \quad (5)$$

$$\frac{Y^A}{X_1^S} R_s = K = \frac{K^m \cdot X_1^S}{K^S + X_1^S} \quad (12)$$

比死滅速度を考慮すると(12)式は

$$\frac{Y^A}{X_1^S} R_s = K - K_d = \frac{K^m \cdot X_1^S}{K^S + X_1^S} - K_d \quad (13)$$

となる。この関係を図-6に示した。

酸性発酵期及びアルカリ発酵期においても計算値と理論値がかなり符合していることが認められた。

完全混合型反応槽が動的平衡状態が維持されている場合、反応槽内活性微生物汚泥 X_1^S (MLVSS)収支式は(15)式となる。すなわち、

$$\frac{V}{F} = \frac{X_1^S}{(K - K_d) X_1^S} = \frac{1}{(K - K_d)}$$

$$\theta = \frac{1}{(K - K_d)} = \frac{1}{\frac{K^m (X_1^S)^2}{K^S + (X_1^S)^2} - K_d} \quad (15)$$

となる。この場合、wash-out現象が起こる滞留時間では、 $\theta = \theta_w$ 、 $X_1^S = X_0^S$ となるから(15)式は

$$\theta_w = \frac{1}{\frac{K^m (X_0^S)^2}{K^S + (X_0^S)^2} - K_d} \quad (16)$$

となる。(16)式から、wash-outの滞留時間を求めると、

酸性発酵期 $\theta_w = 3.71 \text{ 日} \approx 4 \text{ 日消化}$

アルカリ発酵期 $\theta_w = 4.36 \text{ 日} \approx 4.4 \text{ 日消化}$

となった。図-7は滞留時間と CH_4 ガス含有百分率である。この関

係から、5日消化の CH_4 ガス(%)は59%、しかもこの際の反応槽内のpHは7.10であった。また、3日消化では、 CH_4 ガスは29%でpH5.8であった。これらの実験結果を勘案するとwash-outの計算値と実験値はよく符合するものと考えられた。

4. 総括及び結論 完全混合型反応槽において、高温嫌気性消化実験によって、反応速度論的解析を行ない、Monod-Model定数を求めた。Model定数から求めた計算値と、実験値がかなり良く一致していることが認められた。これらのModel定数から嫌気汚泥消化の滞留時間に関する基礎的諸問題の解明に有効ではないかと考えることができた。

表-1 n=2の場合のMonod-Model定数 (BOD basis)

	酸性発酵期	アルカリ発酵期
$Y^A (\text{kgMLVSS/kgBOD})$	0.738	0.671
$K^m (1/\text{day})$	0.0342	0.0211
$K^S (1/\text{day})$	0.305	0.252
$K^S (\text{kgBOD/g})$	0.455	0.528

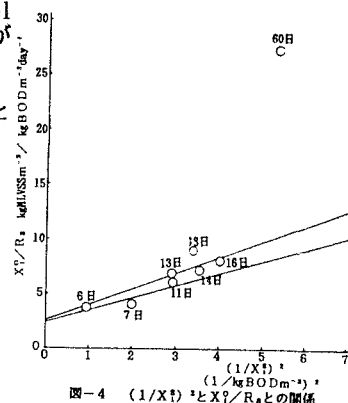


図-4 $(1/X_1^S)^2$ と X_1^S/R_s との関係

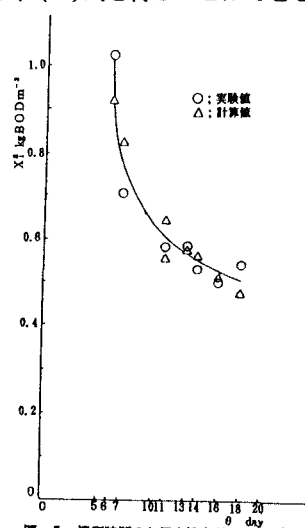


図-5 滞留時間 θ と反応槽内混合液基質濃度(BOD) X_1^S との関係

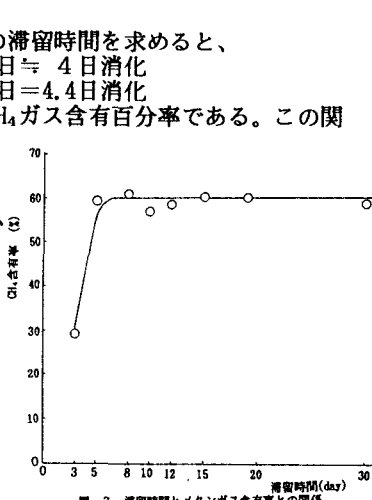


図-7 滞留時間とメタンガス含有率との関係

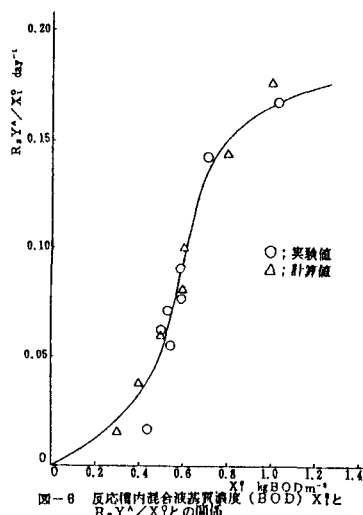


図-8 反応槽内混合液基質濃度(BOD) X_1^S と R_s との関係