

早稲田大学理工学部 学生員 ○山崎 睦史
早稲田大学理工学部 正会員 遠藤 郁夫

1. 緒言 嫌気性消化実験において、反応動力学的解析を行なう場合、反応槽内混合液中の菌体量は、純粋基質或いは合成基質ではMLVSS、ATP/l、或いはATP/g·viable cell等をもって菌体量に近似することができる。しかしながら、嫌気性汚泥消化実験の場合、基質としての下水汚泥は、有機物および無機物等が、溶解性物質或いは浮遊物質となって種々の形態で存在する。従って、MLVSSは、合成基質の場合と異なり、直接菌体量を示すことはできない。しかしながら、菌体は、反応槽のある条件のもとでは、その表面に有機物を吸着しているもの、或いは有機物に付着しているもの等様々な状態であると考えることができる。特にこの様な状態で存在する菌体と有機物は、一つの複合体を形成し“微生物学的振舞”をするものと考え、包括的に微生物汚泥(Active Biological Solid)と定義した。この微生物汚泥の指標は、反応槽内混合液のMLVSSとした。この微生物汚泥を用いて反応速度論的解析を行ない、Moser-Model定数を決定し、中温嫌気性汚泥消化に関する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37℃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を用いた。消化日数は、6~30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. 反応速度論的解析 図-1に示したような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。

基質容積負荷 L_v 、反応槽内の基質消費率 α はそれぞれ

$$(1) \text{式および(2)式で示すことができる。}$$

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

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

基質消費速度 R_s は、(1)および(2)式より、(3)式となる。

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

反応槽内の微生物汚泥の物質収支は、

$$\theta \frac{dX_1^o}{d\theta} = X_0^o + Y^A R_s \theta - K^d X_1^o \theta - X_1^o \quad (4)$$

となる。動的平衡状態では、 $dX_1^o/d\theta = 0$ 、また流入微生物汚泥量=0とすると、

$$X_1^o = \frac{R_s \theta Y^A}{1 + \theta K^d} \quad (5)$$

となる。また、線形化すれば(6)式を得ることができる。

$$\frac{R_s}{X_1^o} = \frac{1}{Y^A} \cdot \frac{1}{\theta} + \frac{K^d}{Y^A} \quad (6)$$

θ ; 滞留時間、 K^d ; 微生物汚泥比死滅速度、

Y^A ; 微生物汚泥収率

$Y^A = \frac{\text{形成された微生物汚泥量} (\Delta \text{MLVSS})}{\text{利用された基質量} (\Delta \text{BOD or COD})}$

微生物汚泥増殖速度 M_r は、

$$M_r = K \cdot X_1^o \quad (7)$$

である。従って、基質消費速度と微生物汚泥増殖速度との関係は(8)式で示すことができる。

$$R_s = \frac{M_r}{Y^A} = K \cdot \frac{X_1^o}{Y^A} = \frac{X_0^o}{Y^A} \cdot \frac{K^m \cdot (X_1^s)^n}{K^s + (X_1^s)^n} \quad (8)$$

線形化すると、 $\frac{X_1^o}{R_s} = \frac{Y^A}{K^m} + \frac{Y^A}{K^m} \cdot \frac{K^s}{K^m} \cdot \left(\frac{1}{X_1^s}\right)^n$ (9)

$$K; \text{微生物汚泥比増殖速度}, K = \frac{K^m \cdot (X_1^s)^n}{K^s + (X_1^s)^n} \quad (10)$$

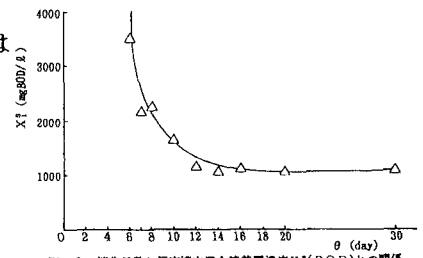
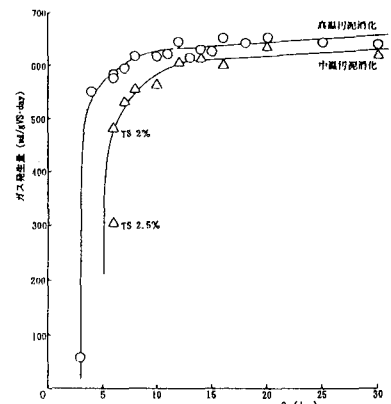
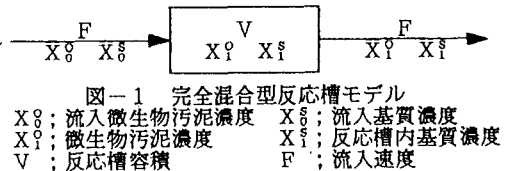
K^m ; 最大微生物汚泥比増殖速度、

K^s ; $n=1$ のときMonod-Modelの K^s に相当する定数

(10)式は、 $n=1$ のときMonod-Modelとなる。一般的に微生物反応において、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。(10)式は $n=1$ でMonod式となるが、 $n>1$ では $X_1^s = \{(n-1)/(n+1) \cdot K^s\}^{1/n}$ を変曲点とするシグモイド曲線となる。

4. 実験結果と考察

図-2は汚泥消化におけるガス発生量を示した。中温では、7日~12日消化の範囲で530~600



ml/gVS·dayと徐々に増加し、12日～30日消化では、600～630ml/gVS·day（8～9倍）と飽和状態を示していることが認められた。中温および高温汚泥消化では、ガス発生量において大差はなく、Plateau領域で20 ml/gVS·day程度の差異が認められたに過ぎなかった。また図-3は消化日数と反応槽内混合液のBODとの関係を示した。中温では、消化日数12日消化まで急激に減少していることが認められた。すなわち、ガス発生量、反応槽内混合液のBODおよび有機酸等についてPlateau領域の最小消化日数は、中温汚泥消化では12日消化であると考えることができた。図-4は X_i^s と R_s との関係を示したもので、 X_i^s と R_s との関係はシグモイド曲線である。しかもその曲線の変曲点は中温では $X_i^s=850\text{mgBOD}/\ell$ 付近であることが認められた。図-5は反応槽内基質濃度をBOD、 $n=2$ とした場合の(6)式を示したものである。同様に(9)式において、 $n=2$ とすると、

$$\frac{X_i^s}{R_s} = \frac{Y^A}{K^m} + \frac{Y^A}{K^m} \cdot \kappa^S \left(-\frac{1}{X_i^s} \right)^2 \quad \text{----- (11)}$$

となる。図-6は基質濃度をBODとした場合、(11)式を示したものである。表-1はMoser-Model定数である。(10)式に表-1の各定数を代入すると(12)式となる。この関係を図-7に示した。

$$K = \frac{K^m \cdot (X_i^s)^2}{\kappa^S + (X_i^s)^2} = \frac{0.204 \cdot (X_i^s)^2}{(1444)^2 + (X_i^s)^2} \quad \text{----- (12)}$$

変曲点を(12)式より求めると

$$X_i^s = \left(\frac{n-1}{n+1} \cdot \kappa^S \right)^{1/n} = \left(\frac{2-1}{2+1} \cdot \kappa^S \right)^{1/2} = 834\text{mgBOD}/\ell \quad \text{----- (13)}$$

となった。この値は図-4から求めた変曲点とよく一致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を維持している場合、希釈率 $D=1/\theta$ とすると、最大希釈率 $D_{\max}$ は(14)式より得ることができる。

$$X_0^s - \left\{ \frac{\kappa^S (D_{\max} + K^d)}{K^m - (D_{\max} + K^d)} \right\}^{1/n} - \frac{D_{\max} \kappa^S K^m}{n} \times \left\{ \frac{1}{K^m - (D_{\max} + K^d)} \right\}^2 \cdot \left\{ \frac{\kappa^S (D_{\max} + K^d)}{K^m - (D_{\max} + K^d)} \right\}^{1/n-1} = 0 \quad \text{----- (14)}$$

$n=2$ の場合、 $D_{\max}=0.149\text{ day}^{-1}$ となる。従って最小消化日数 $\theta_{\min}$ は、

$$\theta_{\min} = \frac{1}{D_{\max}} = \frac{1}{0.149} = 6.71 \approx 7\text{ 日消化}$$

となる。アルカリ発酵期における最小消化日数 $\theta_{\min}$ は7日消化となり、実験結果とよく一致した。

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、反応槽の滞留時間 θ は(15)式となる。すなわち、

$$\theta = \frac{1}{(K - K^d)} = \frac{1}{\frac{K^m \cdot (X_i^s)^2}{\kappa^S + (X_i^s)^2} - K^d} \quad \text{----- (15)}$$

となる。この場合、wash-out現象が起こる滞留時間 $\theta = \theta_w$ では、 $X_i^s = X_0^s$ となる。従って(15)式は、

$$\theta_w = \frac{1}{\frac{K^m \cdot (X_0^s)^2}{\kappa^S + (X_0^s)^2} - K^d} = \frac{1}{\frac{0.204 \cdot (8778)^2}{(1444)^2 + (8778)^2} - 0.015} = 5.34 \approx 5\text{ 日消化} \quad \text{----- (16)}$$

となる。図-2は消化日数とガス発生量である。投入汚泥濃度TS2%における6日消化では、 $pH=7.1$ 、ガス発生量480 ml/gVS·dayであったが、投入汚泥濃度TS2.5%では、 $pH=6.6$ 、ガス発生量300ml/gVS·dayとなり、6日消化は投入汚泥濃度により極めて不安定であることが認められた。このことはwash-outが5日消化であることによく符合していることが認められた。また、発生ガス中の CH_4 含有率は7～30日消化（投入汚泥濃度TS2%）では58～61%の範囲であった。ガス発生量および CH_4 含有率から、アルカリ発酵期における最小消化日数は解析結果から7日消化であることと一致していることが認められた。

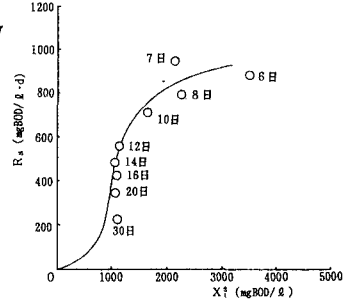


図-4 反応槽内混合液基質濃度(BOD) X_i^s と基質消費速度 R_s との関係

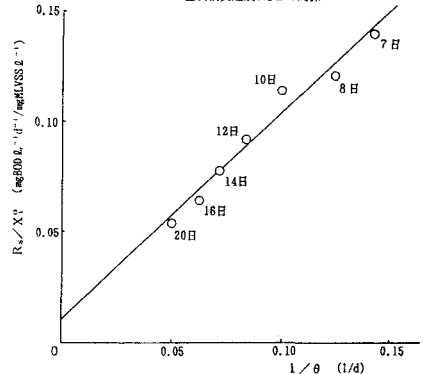


図-5 $1/\theta$ と R_s/X_i^s との関係

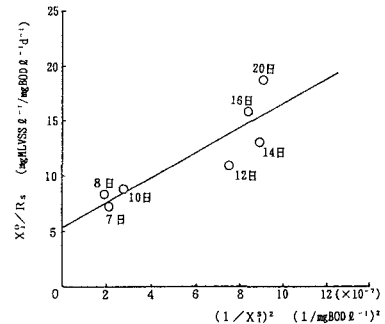


図-6 $(1/X_i^s)^2$ と X_i^s/R_s との関係

表-1 $n=2$ の場合のMoser-Model定数

Model定数	アルカリ発酵期
$Y^A(\text{mgBOD}/\text{mgBOD})$	1.086
$K^d(1/\text{day})$	0.0115
$K^m(1/\text{day})$	0.204
$\kappa^S(\text{mgBOD}/\ell)^2$	$(1444)^2$ (BOD basis)

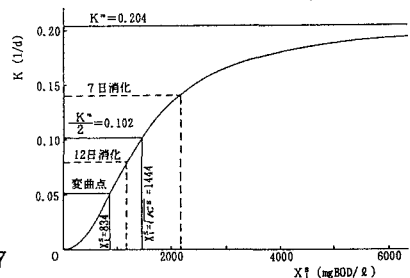


図-7 $n=2$ の場合のMoser-Model式の関係