

II-423

高温嫌気性汚泥消化に関する反応速度論的解析について

早稲田大学理工学部 学生員 ○吉澤 正宏
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 嫌気性消化実験において、反応動力学的解析或いは反応速度論的解析を行なう場合、反応槽内混合液中の菌体量は、合成基質では反応槽内混合液のVSS (MLVSS)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、反応槽内混合液中のVSSは、合成基質の場合と異なり、直接菌体量を示すとは考えることはできない。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られることができる。特にこの様な状態で存在する菌体と有機物は酵素の場合のように、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VSS (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、Monod-Model定数を決定し、高温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を用いた。消化日数は、3~60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. 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)式および(2)式で示すことができる。

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

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

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

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

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。

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

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

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

K^m ; 最大微生物汚泥比増殖速度、 K^s ; 飽和定数

(10)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。(10)式は $n=1$ でMonod式となるが、 $n>1$ では、 $X_1^s = \{(n+1) \cdot K^s / (n+1)\}^{1/n}$ 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 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 $X_1^s = 0.57 \text{ kgBOD/m}^3$ 付近であることが認められた。図-3

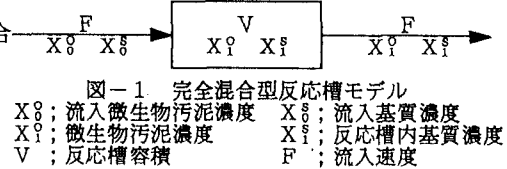


図-1 完全混合型反応槽モデル

X_0^s ; 流入微生物汚泥濃度 X_1^s ; 流入基質濃度
 X_1^o ; 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

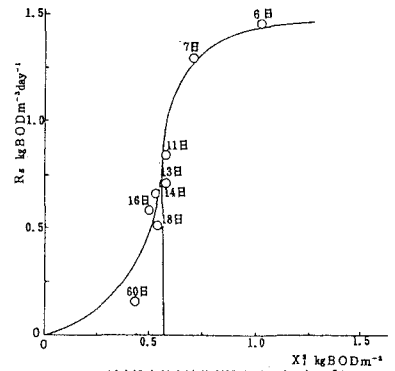


図-2 反応槽内混合液基質濃度 (BOD) X_1^s と基質消費速度 R_s との関係

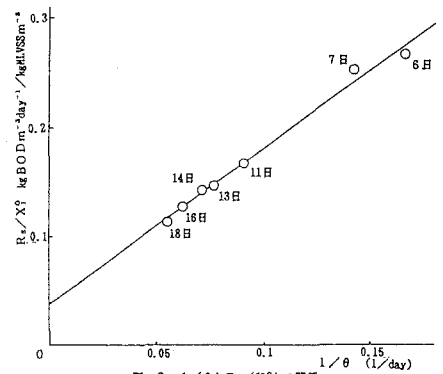


図-3 $1/\theta$ と R_s/X_1^o との関係

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

$$\frac{X_1^0}{R_s} = \frac{Y^A}{K^m} + \frac{Y^A}{K^m} \cdot K^s \left(\frac{1}{X_1^0} \right)^2 \quad \text{----- (11)}$$

となる。図-4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は図-3及び図-4から求めたMonod-Model定数である。

$n=2$ の場合のMonod-Model式は

$$K = \frac{K^m \cdot (X_1^0)^2}{K^s + (X_1^0)^2} = \frac{0.414 \cdot (X_1^0)^2}{0.974 + (X_1^0)^2} \quad \text{----- (12)}$$

となる。この関係を図-5に示した。変曲点を(12)式より求めると、

$$X_1^0 = \left(\frac{n-1}{n+1} \cdot K^s \right)^{1/n} = \left(\frac{2-1}{2+1} \cdot K^s \right)^{1/2} = 0.57 \text{ kg BOD/m}^3$$

となった。この値は図-2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(13)式より得ることができる。

$$X_0^s - \left\{ \frac{K^s (D_{\max} + K^d)}{K^m - (D_{\max} + K^d)} \right\}^{1/n} - \frac{D_{\max} K^s K^m}{\{ K^m - (D_{\max} + K^d) \}^2} \times \left\{ \frac{K^s (D_{\max} + K^d)}{K^m - (D_{\max} + K^d)} \right\}^{1/n-1} = 0 \quad \text{---- (13)}$$

$n=2$ の場合、 $D_{\max}=0.201 \text{ day}^{-1}$ となる。従って最小消化日数 $\theta_{\min}$ は

$$\theta_{\min} = \frac{1}{D_{\max}} = \frac{1}{0.201} = 4.96 \approx 5 \text{ 日消化}$$

となる。アルカリ発酵期における最小消化日数 $\theta_{\min}$ は5日消化と考えることができた。

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、反応槽内微生物汚泥 X_1^0 (MLVSS)収支式は(14)式となる。すなわち、

$$\theta = \frac{1}{(K - K^d)} = \frac{1}{\frac{K^m \cdot (X_1^0)^2}{K^s + (X_1^0)^2} - K^d} \quad \text{---- (14)}$$

となる。この場合、wash-out現象が起こる滞留時間では、 $\theta = \theta_w$ 、 $X_1^0 = X_0^s$ となるから(14)式は

$$\theta_w = \frac{1}{\frac{K^m \cdot (X_0^s)^2}{K^s + (X_0^s)^2} - K^d} \quad \text{----- (15)}$$

となる。(15)式から、wash-outの滞留時間を求めるとアルカリ発酵期では、 $\theta_w=2.6 \text{ 日} \approx 3 \text{ 日消化}$ となった。図-6は消化日数とガス発生量である。ガス発生量は有機物含有量によって若干差異があるが、4日消化の500 $\text{mL/VTS} \cdot \text{g} \cdot \text{day}$ から10日消化までは徐々に増加している。10日消化から30日消化の間ではほぼ飽和状態で600 $\sim 650 \text{ mL/VTS} \cdot \text{g} \cdot \text{day}$ であった。しかしながら、3日消化では、 $\text{pH}=5.8$ 、ガス発生量は急激に減少して、23 $\sim 56 \text{ mL/VTS} \cdot \text{g} \cdot \text{day}$ であった。図-7は、発生ガス中の CH_4 含有率である。5日消化から60日消化までの範囲では有機物含有量によって若干の差異は認められるが、 CH_4 含有率%は $\text{VTS/TS}=0.78 \sim 0.84$ では65%、 $\text{VTS/TS}=0.69$ では60%であった。すなわち、5日 $\sim$ 10日消化の範囲では、10日消化に比べてガス発生量は若干減少しているが、 CH_4 含有率はほぼ一定であったことから、5日消化以上では、アルカリ発酵期であると考えられた。このことはアルカリ発酵期のwash-outが3日消化であることと全く符合していることが認められた。従って、酸性発酵期は3日消化以下と考えられた。

5. 総括および結論 高温嫌気性汚泥消化において微生物汚泥を定義し、反応速度論的解析を行ない、Monod-Model定数を決定し高温嫌気性汚泥消化について、二、三の知見を得ることができた。

(1) 高温嫌気性汚泥消化では、微生物汚泥の概念を導入することによって、Monod-Modelは2次式($n=2$)で示すことができた。

(2) アルカリ発酵期のwash-out θ_w は3日消化であることが実験および反応速度論的解析によって確かめられた。

(3) アルカリ発酵期の最小滞留時間 $\theta_{\min}$ は5日消化であることが認められた。

(4) アルカリ発酵期は5日消化以上である。このことは CH_4 の含有率%からも確認された。

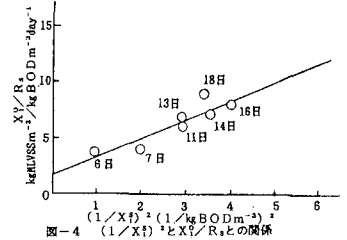


図-4 $(1/X_1^0)^2$ と X_1^0/R_s との関係

表-1 $n=2$ の場合のMonod-Model定数

Model定数	アルカリ発酵期
Y^A (kg MLVSS/kg BOD)	0.705
K^d (1/day)	0.0262
K^s (1/day)	0.414
K^m (kg BOD/m ³) ²	0.974
(BOD basis)	

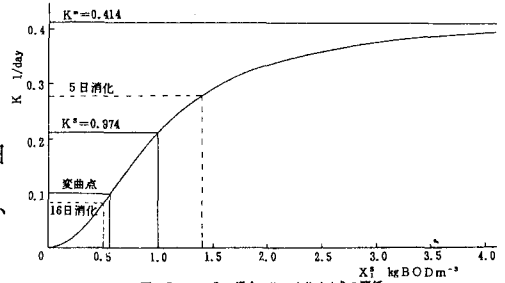


図-5 $n=2$ の場合のMonod-Model式の関係

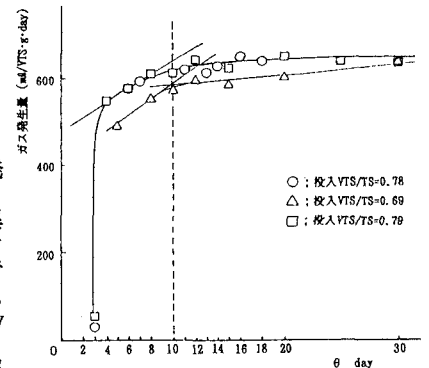


図-6 消化日数とガス発生量との関係

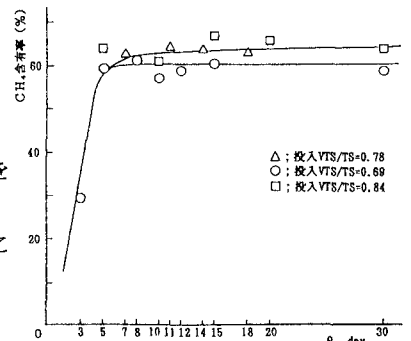


図-7 消化日数と CH_4 含有率との関係