

1. はじめに 嫌気性分解の反応動力学的解析は純粋基質或いは合成基質について基礎的研究が行なわれてきた。しかしながら、実際の廃水についての反応動力学的解析の試みは若干の研究例があるのみで、下水汚泥についての研究例は殆どないのが現状である。これらのことは、有機性基質の嫌気性分解過程が極めて複雑多岐で、しかも分解過程が基質ごとに異なるため、純粋或いは合成基質の素反応から研究することの困難さに基因するものと考えられる。従って、現状では基礎的研究結果を施設の設計或いはプロセスの制御に直接結びつけることは極めて困難である。このような観点から、中温嫌気性汚泥消化実験を行ない、巨視的解析手法として総括反応速度を用いた。微生物集団としては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、包括的な意味で、微生物汚泥 (Active Biological Solid) を定義した。また、反応動力学的モデルとして Moser-Model を用い、最も基礎的な問題として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。種汚泥は中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)式および(2)式で示すことができる。

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

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

基質消費速度 R_s は、(1)および(2)式より、(3)式となる。

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

反応槽内の微生物汚泥の物質収支は、

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

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、

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

となる。また、線形化すれば(6)式を得ることができる。

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

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

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

微生物汚泥増殖速度 M_r は、

$$M_r = K \cdot X_1^o \quad \text{.....(7)}$$

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。

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

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

反応槽内基質濃度 X_1^s と基質消費速度 R_s との関係を示明するモデルとして、Moser の式がしばしば用いられている。(10)式は $n=1$ で Monod 式となるが、 $n>1$ では $X_1^s = \left\{ \frac{(n+1)}{(n+1) \cdot K^s} \right\}^{1/n}$ 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 $X_1^s = 850 \text{ mg BOD/l}$ 付近であることが認められた。図-3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、 $n=2$

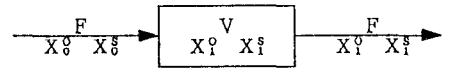


図-1 完全混合型反応槽モデル
 X_0^s ; 流入微生物汚泥濃度 X_1^s ; 流入基質濃度
 X_1^o ; 微生物汚泥濃度 X_1^s ; 反応槽内基質濃度
 V ; 反応槽容積 F ; 流入速度

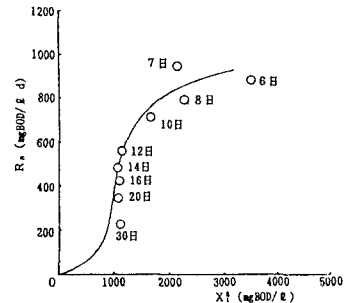


図-2 反応槽内基質濃度 (BOD) X_1^s と基質消費速度 R_s との関係

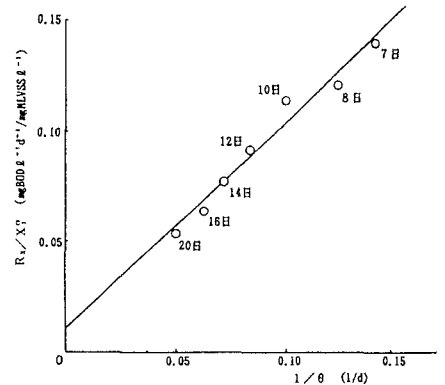


図-3 $1/\theta$ と R_s/X_1^o との関係

とすると

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

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Moser-Model定数である。

$n=2$ の場合のMoser-Model式は

$$K = \frac{K^m \cdot (X_1^s)^2}{\kappa^s + (X_1^s)^2} = \frac{0.204 \cdot (X_1^s)^2}{(1444)^2 + (X_1^s)^2} \quad \text{-----(12)}$$

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、

$$X_1^s = \left(\frac{n-1}{n+1} \cdot \kappa^s \right)^{1/n} = \left(\frac{2-1}{2+1} \cdot \kappa^s \right)^{1/2} = 834 \text{ mgBOD/l}$$

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。

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

$n=2$ の場合、 $D_{max}=0.149 \text{ day}^{-1}$ となる。従って最小化日数 θ_{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 θ_{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(14)式となる。すなわち、

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

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

$$\theta_w = \frac{1}{\frac{K^m \cdot (X_0^s)^2}{\kappa^s + (X_0^s)^2} - K^d} = \frac{1}{\frac{0.204 \cdot (8778)^2}{(1444)^2 + (8778)^2} - 0.015} = 5.34 \approx 5 \text{ 日消化} \quad \text{-----(15)}$$

となる。図-6は消化日数とガス発生量である。投入汚泥濃度TS 2%における6日消化では、 $pH=7.1$ 、ガス発生量 $480 \text{ ml/gVS} \cdot \text{day}$ であったが、投入汚泥濃度TS 2.5%では、 $pH=6.6$ 、ガス発生量 $300 \text{ ml/gVS} \cdot \text{day}$ 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。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TS 2%)では68~71%の範囲であった。ガス発生量(図-6)および CH_4 含有率(図-7)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日消化であることが認められた。

5. 総括および結論 中温嫌気性消化実験において、微生物汚泥を定義し、反応動力学的モデルとしてMoser-Modelを用い、総括反応速度による巨視的解析を行ない、滞留時間について、二、三の知見を得ることができた。

(1) 中温嫌気性汚泥消化では、微生物汚泥の概念を定義し、反応動力学的モデルとしてMoser-Modelの2次式($n=2$)を用い、総括反応速度論的解析すると、実験結果とよく一致することが認められた。

(2) 中温嫌気性汚泥消化のアルカリ発酵期における最小滞留時間は7日消化であった。また、アルカリ発酵期のwash-out現象の起こる滞留時間は5日消化と考えることができた。

(3) 中温嫌気性汚泥消化における酸性発酵期は5日消化以下であると考えられた。

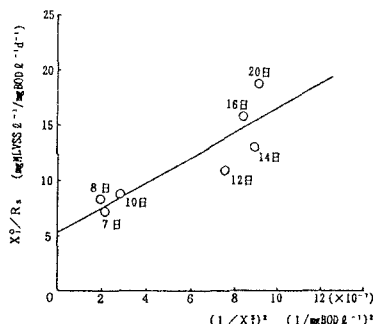


図-4 $(1/X_1)^2$ と X_1^0/R_s との関係

表-1 $n=2$ の場合のMonod-Model定数

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

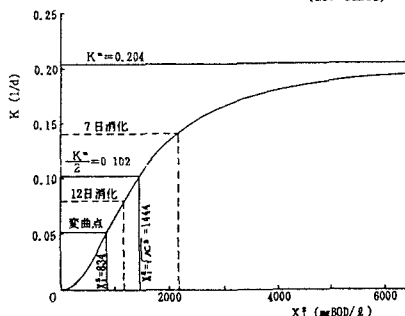


図-5 $n=2$ の場合のMoser-Model式の関係

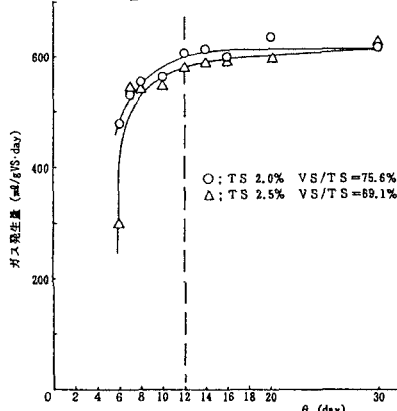


図-6 消化日数とガス発生量との関係

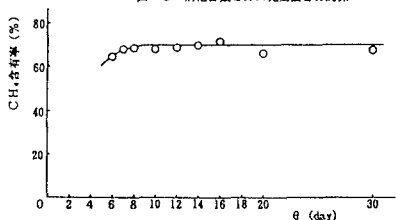


図-7 消化日数と CH_4 含有率との関係