

早稲田大学理工学部 正員 ○遠藤 郁夫
 東南大学環境工程系 王 世 和
 早稲田大学理工学部 学生員 尾澤 勲

1. はじめに 嫌気性汚泥消化実験では、基質としての下水汚泥は、有機物及び無機物等を溶解性物質或いは浮遊物質など、種々の形態として含有している。従って反応槽内のMLVSSは合成基質の場合と異なり直接菌大量を示すことが出来ない。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、或いは浮遊性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出来る。12日消化、30日消化および150日消化における反応槽内混合液基質濃度の性質を検討すると、TS中にしめるSSは各消化日数とも85~88%の範囲、混合液基質濃度(mgBOD/l)に対して、分離液基質濃度は21~23%、浮遊物質基質濃度77~79%であった。このことから、菌体はむしろSSを担体として付着しているものと考えられ、反応槽内では菌体とSSとの複合体を形成し、微生物学的振舞をするものとして、包括的に微生物汚泥(Active Biological solid)と定義した。微生物汚泥の指標はMLVSSとした。この微生物汚泥の概念を用いて、反応速度論的解析を行ない、Moser-Model定数を決定し、25℃における低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25℃とした。種汚泥は下水汚泥を約8ヵ月間十分馴養したものをを用いた。消化日数は、8~200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。各関係式を下記に示した。

$$\text{基質容積負荷; } L_v = \frac{F}{V} \cdot X_0^s = \frac{X_0^s}{\theta} \quad (1) \quad \xrightarrow{X_0^s \quad X_0^s} \begin{matrix} V \\ X_1^s \quad X_1^s \end{matrix} \xrightarrow{X_1^s \quad X_1^s} F$$

$$\text{基質消費率; } \alpha = \frac{X_0^s - X_1^s}{X_0^s} = 1 - \frac{X_1^s}{X_0^s} \quad (2)$$

$$\text{基質消費速度; } R_s = \alpha \cdot L_v = \frac{X_0^s - X_1^s}{\theta} \quad (3) \quad \begin{matrix} X_0^s; \text{流入微生物汚泥濃度} & X_1^s; \text{流入基質濃度} \\ X_1^s; \text{微生物汚泥濃度} & X_1^s; \text{反応槽内基質濃度} \\ V; \text{反応槽容積} & F; \text{流入速度} \end{matrix}$$

$$X_1^s \text{の増減; } \theta \frac{dX_1^s}{d\theta} = X_0^s + Y^A R_s \theta - K^d X_1^s \theta - X_1^s \quad (4)$$

$$\frac{dX_1^s}{d\theta} = 0, X_0^s = 0; X_1^s = \frac{R_s \theta Y^A}{1 + \theta K^d} \quad (5)$$

$$(5) \text{ 式の線形化式; } \frac{R_s}{X_1^s} = \frac{1}{Y^A} \cdot \frac{1}{\theta} + \frac{K^d}{Y^A} \quad (6)$$

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

$$Y^A = \frac{\text{形成された微生物汚泥量} (\Delta \text{MLVSS})}{\text{利用された基質量} (\Delta \text{BOD or COD})} \quad (7)$$

$$\text{微生物汚泥増殖速度 } M_r; M_r = K \cdot X_1^s \quad (8)$$

$$R_s \text{ と } M_r \text{ の関係; } R_s = \frac{M_r}{Y^A} = \frac{X_1^s}{Y^A} \cdot \frac{K \cdot (X_1^s)^n}{s + (X_1^s)^n} \quad (9)$$

$$(9) \text{ 式の線形化式; } \frac{X_1^s}{R_s} = \frac{Y^A}{K^m} + \frac{Y^A}{K^m} \cdot s \left(\frac{1}{X_1^s} \right)^{n-1} \quad (10)$$

$$\text{微生物汚泥比増殖速度; } K = \frac{K^m \cdot (X_1^s)^n}{s + (X_1^s)^n} \quad (11)$$

K^m ; 微生物汚泥比増殖速度

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

4. 実験結果と考察

滞留時間とガス発生量との関係を図-2に示した。10日消化以下では、中温汚泥消化の方が若干少ないが、12日~30日消化では、中・高温両者とも600~630ml/g・VS・day(8~9倍)と飽和状態を示していることが認められた。低温汚泥消化(25℃)のガス発生は、12日~200日消化では460~635ml/g・VS・day(8~11倍)の範囲で漸増傾向が認められた。中温および高温汚泥消化のplateau領域と同程度 of ガス発生量を得るためには、150日消化以上の滞留時間が必要であることが解った。

また、図-3は消化日数と有機物分解率との関係を示した。中温・高温ではガス発生量のplateau領域では、有機物分解率は55~63%の範囲であった。低温汚泥消化では、40日消化以上では、有機物分解率は48%からは漸増し、150日~200日消化では55%に達した。すなわち、有機物分解率55%以上を得るためには、中高温汚泥消化では、12日消化以上、低温汚泥消化は150日消化以上が必要であることが認められた。図-4は反応槽内基質

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^s ; 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

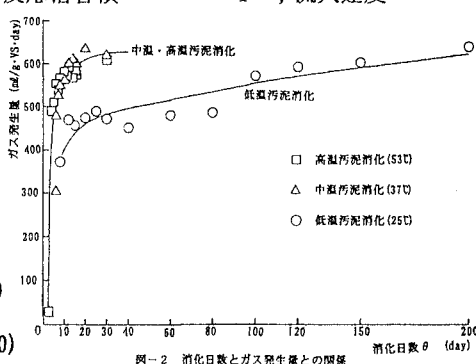


図-2 消化日数とガス発生量との関係

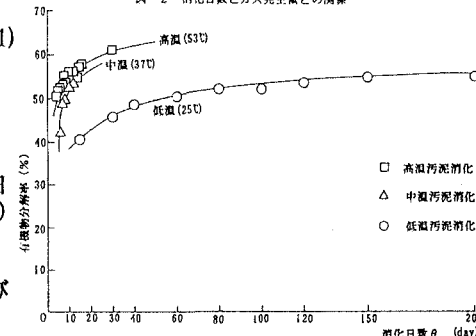


図-3 消化日数と有機物分解率との関係

濃度 (X_i^s , mgBOD/ℓ) と基質消費速度 (R_s , mgBOD/ℓ·day) との関係を示した。図-4における X_i^s と R_s との関係はシグモイド (sigmoid) 曲線である。しかもその曲線の変曲点は, $X_i^s=2100$ mgBOD/ℓ 付近であることが明らかに認められた。このシグモイド性から, Moser の式の n は, $n>1$ で本研究では $n=2$ と考えることができた。

図-5は $1/\theta$ と R_s/X_i^s との関係, (6) 式を示したものである。

同様に, 図-6は (10) 式において, $n=2$ とした場合の $(1/X_i^s)^2$ と X_i^s/R_s との関係を示した。図-5および図-6の線形化式より, Moser-Model 定数を求め表-1に示した。図-7は Y^A を (7) 式の定義に従って, 直接求めるため ΔBOD と $\Delta MLVSS$ との関係を示した。この関係から $Y^A=1.4$ であった。Moser-Model から求めた Y^A は 1.5 であった。微生物汚泥の概念 (7) 式から求めた Y^A と, Moser-Model を用いて求めた Y^A とはよく一致しているものと考えることができた。Moser-Model 定数を (11) 式に代入し, 微生物汚泥比増殖速度式 (12) を求めることができた。

$$K = \frac{K^m \cdot (X_i^s)^2}{K^s + (X_i^s)^2} = \frac{0.276 \cdot (X_i^s)^2}{(3618)^2 + (X_i^s)^2} \quad (12)$$

(12) 式の変曲点を求めると次のようになる。

$$X_i^s = \left(\frac{n-1}{n+1} \cdot K^s \right)^{1/n} = 2088 \text{ mgBOD/ℓ}$$

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

この値は図-5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。 $n=2$ の場合, $D_{\max}=0.1497 \text{ day}^{-1}$ となる, 従って最小化日数 $\theta_{\min}$ は,

$$\theta_{\min} = \frac{1}{D_{\max}} = \frac{1}{0.1497} = 6.68 \approx 7 \text{ 日消化}$$

となる, アルカリ発酵期における最小消化日数 $\theta_{\min}$ は 7 日消化となる。8 日消化の pH が 6.8, 5 日消化では wash-out 現象の起こることから, 実験結果とよく一致しているものと考えられた。また, 動的平衡状態が維持されている場合, 反応槽の滞留時間は (14) 式で表すことができる。

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

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

$$\theta_w = \frac{1}{\frac{K^m \cdot (X_0^s)^2}{K^s + (X_0^s)^2} - K^d} = \frac{1}{\frac{0.276 \cdot (12843)^2}{(3618)^2 + (12843)^2} - 0.0442} = 4.74 \approx 5 \text{ 日消化}$$

5 日消化の実験では, pH=5.8, ガス発生量 70 ml/gVS·day となり極めて不安定な状態であった。このことから, wash-out が 5 日消化であることとよく符合していることが認められた。

4. 総括および結論 低温域 25℃ における低温嫌気性汚泥消化実験を行ない, Moser-Model による反応速度論的解析では, 最小滞留時間 (7 日消化) 及び wash-out (5 日消化) 等, 滞留時間についてきわめて良好な解析結果を得ることができた。中・高温では, ガス発生量の plateau 領域では 12 日消化以上で 600 ml/g·VS·day 以上であった。低温でこれと同程度のガス発生量は 150 日消化以上であった。一方有機物分解率 50% 以上とすると低温では 60 日消化 (中温 10 日消化, 高温 5 日消化) であった。55% では低温で 150 日消化 (中温 14 日消化, 高温 8 日消化) 以上が必要であった。このことから, 消化温度 25℃ では 60 日以上 150 日消化の範囲が必要と考えられた。この場合の滞留時間の変動には, 急激でなければ 10~20 倍に耐えられるものと考えられた。

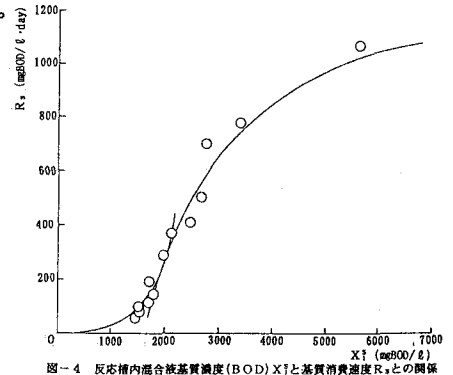


図-4 反応槽内混合液基質濃度 (BOD) X_i^s と基質消費速度 R_s との関係

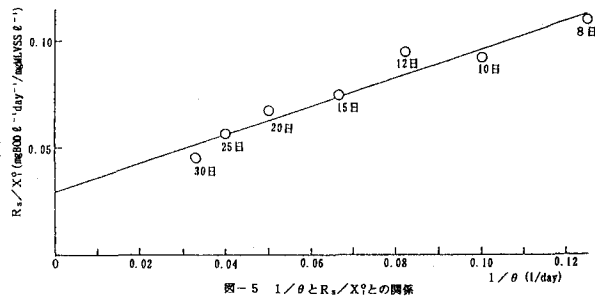


図-5 $1/\theta$ と R_s/X_i^s との関係

表-1 $n=2$ の場合の Moser-Model 定数	
Model 定数	アルカリ発酵期
Y^A (gMLVSS/gBOD)	1.51
K^d (1/day)	0.0442
K^m (1/day)	0.276
K^s (mgBOD/ℓ) ²	(3618) ²
	(BOD basis)

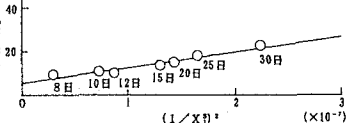


図-6 $(1/X_i^s)^2$ と X_i^s/R_s との関係

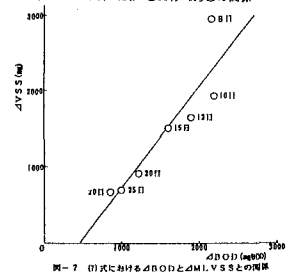


図-7 (7) 式における ΔBOD と $\Delta MLVSS$ との関係

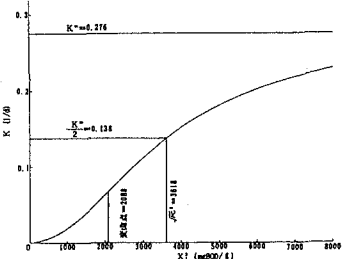


図-8 $n=2$ の場合の Moser-Model 式との関係