

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 学生員 尾澤 勲
早稲田大学理工学部 正会員 遠藤 郁夫

1. はじめに 有機物の嫌気性分解過程は極めて複雑で、しかもそれは基質毎に異なるから、有機性廃水或いは下水汚泥の様な複雑な基質では、純粹基質や合成基質の嫌気性分解で得られた研究結果を直接施設的设计或いはプロセス制御に結び付けることは困難と考えられる。このような背景から、実際の廃水についての反応動力学的解析の試みがなされたが、必ずしも十分な結果が得られていない。また下水汚泥についての研究例は極めて少ないのが現状である。このような観点から、嫌気性汚泥消化について“微生物汚泥”を定義して、反応動力学式としてMoser-Modelを用い、総括反応速度論的解析を行ない、滞留時間について極めて良好な結果を得た。この場合の“微生物汚泥”は菌体が、浮遊性有機物を担体として1つの複合体を形成し、“微生物学的振る舞い”をするものと考え、包括的な意味で微生物汚泥 (Active Biological Solid) と定義した。本研究は微生物汚泥の振る舞いについて解析的な説明を試みたものである。

2. 実験方法 消化実験はケモスタット型実験装置を用いた。反応槽全容積は3.0ℓ、混合液容量は2.4ℓとした。消化温度は53±0.2℃とした。消化実験の滞留時間は下水汚泥では3～30日消化とした。合成基質では5～30日消化であった。反応槽の引き抜き投入は1日1回として半連続投入実験を行なった。攪拌は反応槽内混合液が十分均一になる程度に1日2回振盪攪拌を行なった。植種汚泥は高温嫌気性汚泥消化槽からの消化汚泥を用い、6か月以上馴到した。実験は4か月間行ない、各実験資料は消化状態が十分動的平衡状態として維持されたと考えられた最後の2週間の平均値である。

3. 微生物汚泥の振る舞い

(1) 微生物汚泥 反応槽内の微生物反応系を考えた場合、合成基質の場合の様に反応槽内の微生物フロック (Bio-flock) は投入基質が溶解性物質であることから、微生物フロックの組成はほとんどすべてが微生物集塊と考えることができた。すなわち、VSS/ℓを菌体量として取り扱うことができた。合成基質ではVSS/SS%は82～95%の範囲であることが認められた。高温嫌気性汚泥消化では、VSS/SS%は59～60%とほぼ一定で、無機物は40%であった。MLVSSを直接菌体量とすることはできない。しかしながら表-1に示した様に、反応槽内混合液の基質濃度BODの配分はSS中に67～71%、分離液中に29～33%で、基質濃度の主たる部分はSS側であることが認められた。またSS/TS%は87%がSSであることが分かった。このことから、嫌気性汚泥消化では、菌体はSSを担体としてSS表面に吸着して微生物-SS系 (以下M-SS) を形成しているものと考えられた。このM-SS系の機構は酵素の場合と同様、担体結合法、包括法等が考えられるが、汚泥が担体の場合には個々の微生物とSSの間では複合的に、しかも複雑に絡み合っているものと考えられた。また、一部には微生物の表面に溶解性有機物を吸着している場合も当然考えられるが、微生物汚泥との重量比では無視できる程度の量と考えた。このようにして形成されたM-SS系を微生物汚泥 (Active Biological Solids) と定義した。

(2) 微生物汚泥収率 (Y^A) 微生物汚泥収率 (Y^A) を微生物の場合と同様に、(1)式のように定義した。図-1は定義(1)式に基づいて高温嫌気性汚泥消化

$$Y^A = \frac{\text{形成された微生物汚泥量 } (\Delta \text{MLVSS})}{\text{利用された基質量 } (\Delta \text{BOD or COD})} \quad (1)$$

における ΔMLVSS (以下VSSとする) と $(X_0^s - X_1^s)$ との関係である。この直線の勾配から微生物汚泥収率を求めることができた。アルカリ発酵期における微生物汚泥収率 $Y^A = 1.008 \text{ mgVSS/mgBOD (VS/TS} = 0.802)$ であった。また、合成基質による高温嫌気性消化における ΔVSS と $(X_0^s - X_1^s)$ との関係では、アルカリ発酵期の菌体収率 $Y_{\text{BOD}}^0 = 0.096 \text{ mgVSS/mgBOD (} Y_{\text{COD}}^0 = 0.057 \text{ mgVSS/mgCOD)}$ であった。高温嫌気性汚泥消化における微生物汚泥収率 Y^A は菌体収率 Y^0 に比較してほぼ10.5倍大きいことが認められた。これは、微生物汚泥が、担体としてのSS (Active Solid) を包括しているから大きな値を示すもので、あくまでも微生物汚泥収率であって、菌体収率ではないことから理解できる。

(3) 微生物汚泥比増殖速度式 微生物汚泥増殖速度 M は(2)式で示すことができる。すなわち、

表-1 高温嫌気性汚泥消化における反応槽内混合液の性質

消化 日数	pH	有機酸 (mg/l)	総酸度 (mg/l)	総アルカリ度 (mg/l)	B/A (%)	TS (mg/l)	VSS (mg/l)	VS/TS (%)	SS (mg/l)	VSS/SS (%)	VSS/TS (%)	SS/TS (%)
6日	7.3	232	2036	668	32.8	14421	9090	63.0	12646	7776	61.5	87.7
8日	7.3	404	1812	590	32.6	14029	8538	60.9	12240	7458	60.9	87.3
10日	7.3	363	1550	493	31.8	13905	8352	60.1	12114	7262	60.0	87.1
12日	7.3	372	1513	477	31.5	13832	8327	60.0	12097	7142	59.0	86.8
15日	7.3	220	1355	431	31.8	13830	8143	58.9	12122	7106	58.6	87.7
30日	7.4	271	1391	404	29.0	12864	7424	57.3	11260	6333	56.2	86.9

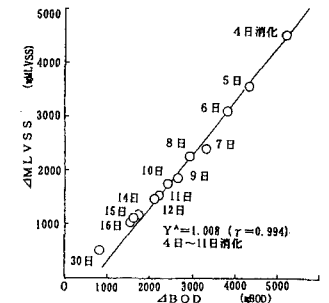


図-1 高温嫌気性汚泥消化における ΔMLVSS と ΔBOD との関係 (微生物汚泥収率)

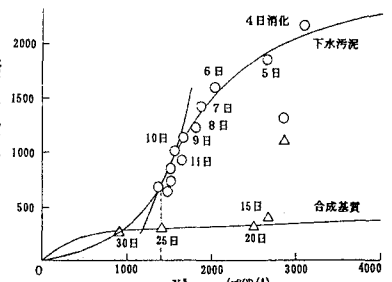


図-2 合成基質及び下水汚泥の高温嫌気性消化における反応槽内基質濃度 X^s と基質消費速度 R_s との関係

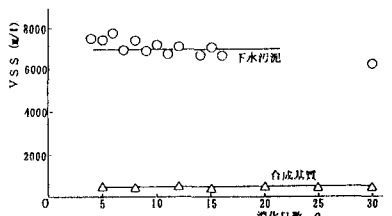


図-3 消化日数と $\text{MLVSS } (X^s)$ との関係

$$M_r = K \cdot X_i^0 \quad (2)$$

K ; 微生物汚泥比増殖速度

X_i^0 ; MLVSS

基質消費速度(総括反応速度) R_s と微生物汚泥増殖速度 M_r との関係は(3)式となる。(3)式の関係から K の曲線形を検討するため、

$$R_s = \frac{X_i^0 - X_i^s}{\theta} = \frac{M_r}{Y^A} = \frac{1}{Y^A} \cdot X_i^0 \cdot K \quad (3)$$

X_i^0 ; アルカリ発酵期のMLVSSで、合成基質および下水汚泥の場合ほぼ一定であった(図-3)。

基質消費速度 R_s と反応槽内基質濃度 X_i^s との関係を図-2に示した。合成基質による曲線はMonod曲線に酷似している飽和曲線である。微生物増殖速度としてMonod式が適用できることを示している。高温嫌気性汚泥消化における R_s と X_i^s (mgBOD/l) との関係はシグモイド曲線(Sigmoid curve)が得られた。シグモイド曲線の変曲点は図上より $X_i^s = 1400 \text{ mgBOD/l}$ であることが認められた。このように R_s - X_i^s の関係がシグモイド曲線を示す場合、(3)式における K 、すなわち、微生物汚泥比増殖速度曲線がシグモイド曲線であることから、微生物汚泥比増殖速度式はMoser式が適用できるものと考えられた。すなわち、

$$K = \frac{K^m \cdot (X_i^s)^n}{K^s + (X_i^s)^n} \quad (4)$$

K^m ; 最大微生物汚泥比増殖速度、

K^s ; $n=1$ のときMonod式の K^s に相当する定数

(4)式の変曲点を求めると、

$$X_i^s = \left(\frac{n-1}{n+1} \cdot K^s \right)^{1/n} \quad (5)$$

となる。 $n=2$ を(5)式に代入すると、 $X_i^s = 1380 \text{ mgBOD/l}$ となった。また、反応槽内混合液基質濃度の反応速度定数を反応速度論的解析より求めた。図-4は二次反応型のプロットである。この図より4日~10日消化では二次反応と考えられ、反応速度定数は $6.56 \times 10^{-4} \text{ day}^{-1} [\text{mgBOD/l}]^{-1}$ であった。Moser-Modelの式では $n=2$ であると考えることができた。

(4) Moser式($n=2$)の定数決定

反応槽内の微生物汚泥の物質収支式は動的平衡状態では、

$$\frac{R_s}{X_i^0} = \frac{1}{Y^A} \cdot \frac{1}{\theta} + \frac{K^d}{Y^A} \quad (6)$$

となる。また、基質消費速度と微生物汚泥増殖速度との関係(3)式の K にMoser式($n=2$)を代入して線形化すると、

$$\frac{X_i^0}{R_s} = \frac{Y^A}{K^m} + \frac{Y^A}{K^m} \cdot K^s \left(\frac{1}{X_i^s} \right)^2 \quad (7)$$

となる。(6)式の関係が図-5、(7)式の関係が図-6である。

いずれの場合も相関係数 $r = 0.96 \sim 0.99$ の範囲で極めてよく適合していることが認められた。表-2に合成基質の場合のMonod式の定数を、表-3には高温嫌気性汚泥消化の場合のMoser式の定数をそれぞれ示した。菌体収率および微生物汚泥収率が図-1の実験値とほぼ一致していることが認められた。図-7はMoser式($n=2$)による微生物汚泥比増殖速度曲線である。

完全混合型反応槽が動的平衡状態を維持している場合、アルカリ発酵期における最小消化日数は、 $n=2$ とした場合のMoser-Model定数を用いて、 $\theta_{min} = 4$ 日消化、wash-outの消化日数 $\theta_w = 3$ 日消化であった。これらの消化日数は実験結果とよく一致していることが認められた。

4. 総括および結論

高温嫌気性汚泥消化実験において、微生物汚泥収率 $Y^A = 1.04$ 、シグモイド曲線の変曲点 $X_i^s = 1380 \text{ mgBOD/l}$ 、更に混合液基質濃度の変化量が二次反応型で $k = 6.56 \times 10^{-4} \text{ day}^{-1} [\text{mgBOD/l}]^{-1}$ 、等であることから、Moser-Modelの n は、 $n=2$ であると考えることができた。また、Moser-Modelを用いて総括反応速度論的解析によって得られた、最小消化日数、wash-out等は実験結果とよく一致していることが認められた。

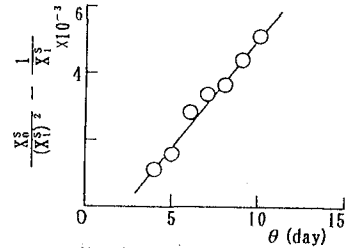


図-4 高温嫌気性汚泥消化における総括反応速度による二次反応型プロット

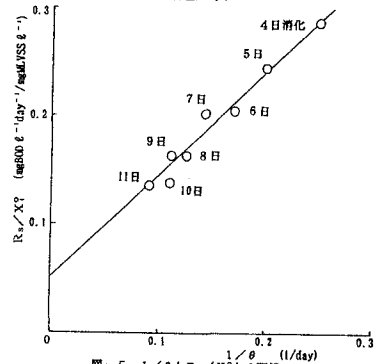


図-5 $1/\theta$ と R_s/X_i^0 の関係

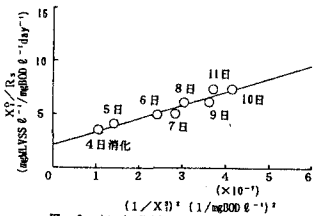


図-6 $(1/X_i^s)^2$ と X_i^0/R_s との関係

表-2 合成基質の消化実験によるMonod-Model定数 ($n=1$)

$\frac{R_s}{X_i^0}$ ($\text{mgBOD}/\text{mgBOD} \cdot \text{day}$)	K^d ($1/\text{day}$)	K^m ($1/\text{day}$)	K^s (mgBOD/l)	基質	発酵期
0.185	0.246	0.673	5090	Basis	発酵期
0.335	0.290	0.712	2850	BOD	酸性発酵期
0.0623	0.0396	0.123	1110	COD	アルカリ発酵期
0.112	0.0519	0.122	350	BOD	

表-3 下水汚泥の消化実験によるMoser-Model定数 ($n=2$)

$\frac{R_s}{X_i^0}$ ($\text{mgBOD}/\text{mgBOD} \cdot \text{day}$)	K^d ($1/\text{day}$)	K^m ($1/\text{day}$)	K^s (mgBOD/l)	基質	発酵期
1.040	0.0512	0.487	(2866) ²	BOD	アルカリ発酵期

* ; Moser-Modelの定数

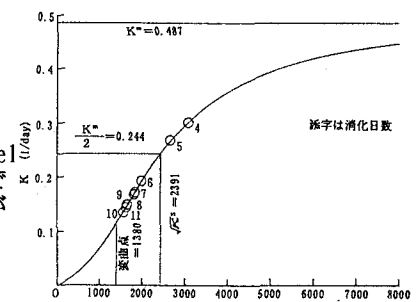


図-7 $n=2$ の場合のMoser-Model式の関係