

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. 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多くの基礎的研究が行われてきた。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が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、高温嫌気性汚泥消化について、“微生物汚泥”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検討を加えた。すなわち、アルカリ発酵期における最小滞留時間として5日消化、wash-outとして3日消化を求めることができた。これらの結果は実験結果とよく一致していることが認められた。この場合の微生物汚泥は微生物集団として有機物と菌体が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)と定義した。本研究は微生物汚泥の振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3～60日消化とした。合成基質では5～30日消化であった。表-1は、下水汚泥および合成基質の性質を示したものである。反応槽の引抜き投入は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ヶ月以上馴致した。実験は3ヶ月間行ない、各実験資料は消化状態が十分動的平衡状態が維持されたと考えられた最後の2週間の平均値である。

表-1 基質および下水汚泥の性質

| 測定項目  | pH   | COD <sub>cr</sub><br>(mg/ℓ) | BOD<br>(mg/ℓ) | 有機酸<br>(mg/ℓ) | SS<br>(mg/ℓ) | VSS<br>(mg/ℓ) | TS<br>(mg/ℓ) | VS<br>(mg/ℓ) | T-N<br>(mg/ℓ) |
|-------|------|-----------------------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| 基質の性質 |      |                             |               |               |              |               |              |              |               |
| 合成基質  | 6.95 | 43700                       | 37333         | 52.0          | 痕跡           | 痕跡            | 38700        | 35500        | 3310          |
| 下水汚泥  | 5.64 | 24568                       | 9732          | 1499.0        | 15667        | 13194         | 19174        | 14819        | 1061          |

### 3. 微生物汚泥の振舞

#### (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-floc)は表-1から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、反応槽内フロックを微生物フロックとしてVSSmg/ℓを菌体量として取り扱うことができた。しかしながら、嫌気性汚泥消化における投入下水汚泥は表-1で示されているように、TSの90%はSSで、VSの92%はVSSである。このことより、汚泥消化における反応系では、微生物は汚泥中のSSを担体として、微生物-SS系(以下M-SS系)を形成するものと考えられる。このM-SS系の形成機構は酵素の場合と同様、担体結合法、加橋法および包括法等が考えられるが、汚泥が担体の場合は個々の微生物とSSの間で上記の結合法が複合的に、しかも複雑に絡み合っているものと考えられることができる。この様にして形成された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<sup>A</sup>)

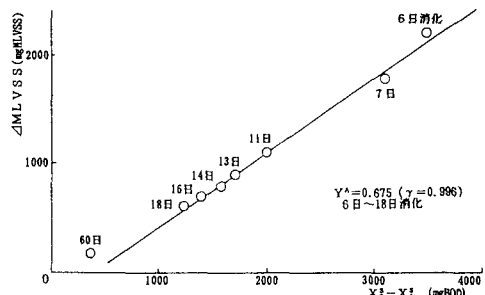
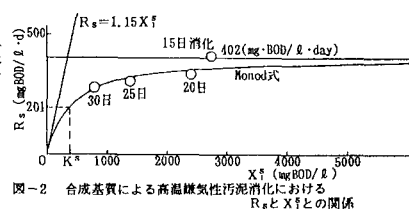
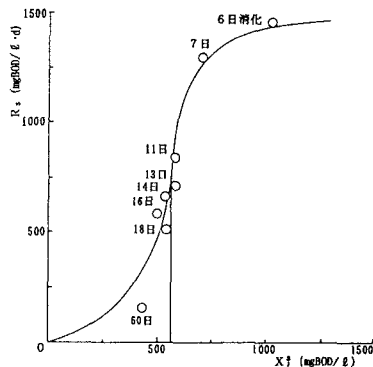
微生物汚泥収率(Y<sup>A</sup>)を微生物の場合と同様に、(1)式のように定義した。図-1は定義(1)式に基づいて高温嫌気性汚泥消化

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

における $\Delta MLVSS$ (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 $Y^A = 0.68 \text{ mgVSS/mgBOD}$ (VS/TS=0.77)であった。また、合成基質による高温嫌気性消化における $\Delta VSS$ 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 $Y_{0.0}^{0.0} = 0.096 \text{ mgVSS/mgBOD}$ ( $Y_{0.0}^{0.0} = 0.057 \text{ mgVSS/mgCOD}$ )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 $Y_0^0$ に比較してほぼ7.1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、

図-1 高温嫌気性汚泥消化における $\Delta MLVSS$ と $X_0^S - X_1^S$ との関係(微生物汚泥収率)図-2 合成基質による高温嫌気性汚泥消化における $R_s$ と $X_1$ との関係図-3 高温嫌気性汚泥消化における $R_s$ と $X_1$ 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、

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

$X_i^0$ ; 合成基質の場合、アルカリ発酵期MLVSS≒一定であった。

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。図-2は合成基質による関係である。この曲線は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。図-3は高温嫌気性汚泥消化における $R_s$ と $X_i^s$  (mgBOD/l) との関係である。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 $X_i^s = 570 \text{ mgBOD/l}$ 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、 $X_i^s = 570 \text{ mgBOD/l}$ となる。従って、高温嫌気性汚泥消化における微生物汚泥比増殖速度式はMoser式で、 $n=2$ 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-4、(7)式の関係が図-5である。いずれの場合も相関係数 $r=0.9 \sim 0.99$ 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-6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、希釈率 $D=1/\theta$ とすると、最大希釈率 $D_{\max}$ 式を求めることができる。この式に表-3の各定数を代入すると、 $D_{\max}=0.201 \text{ day}^{-1}$ となる。従って最小消化日数 $\theta_{\min}=1/D_{\max}=1/0.201=5$ 日消化 となった。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。同様にして、wash-outの滞留時間 $\theta_w=2.6 \approx 3$ 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、微生物汚泥を定義し、総括反応速度論的解析を行ない、微生物汚泥比増殖速度式としてMoser式 ( $n=2$ ) が適用できることを示した。このMoser式を用い反応動力学的解析を行ない高温嫌気性汚泥消化におけるアルカリ発酵期の最小消化日数は5日消化、wash-out現象の起こる消化日数は3日消化であることを求めることができた。一方、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。

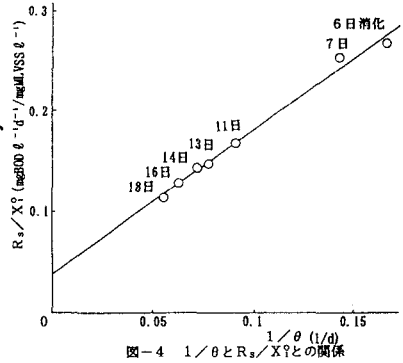


図-4  $1/\theta$ と $R_s/X_i^0$ との関係

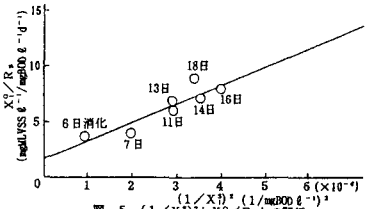


図-5  $(1/X_i^s)^2$ と $R_s/X_i^0$ との関係

表-2 合成基質の消化実験によるMonod-Model定数 ( $n=1$ )

| $Y^A$<br>(mgVSS/mgBOD) | $K^s$<br>(1/day) | $K^m$<br>(1/day) | $K^s \cdot K^m$<br>(mgBOD/l) | 基質  | 備考      |
|------------------------|------------------|------------------|------------------------------|-----|---------|
| 0.185                  | 0.246            | 0.673            | 5990                         | COD | 発酵期     |
| 0.335                  | 0.290            | 0.712            | 2850                         | BOD | 酸性発酵期   |
| 0.0623                 | 0.0396           | 0.123            | 1110                         | COD |         |
| 0.112                  | 0.0519           | 0.122            | 350                          | BOD | アルカリ発酵期 |

表-3 下水汚泥の消化実験によるMoser-Model定数 ( $n=2$ )

| $Y^A$<br>(mgVSS/mgBOD) | $K^s$<br>(1/day) | $K^m$<br>(1/day) | $K^s \cdot K^m$<br>(mgBOD/l) | 基質  | 備考      |
|------------------------|------------------|------------------|------------------------------|-----|---------|
| 0.705                  | 0.0262           | 0.414            | (987) <sup>a</sup>           | BOD | アルカリ発酵期 |

\*: Moser-Modelの定数

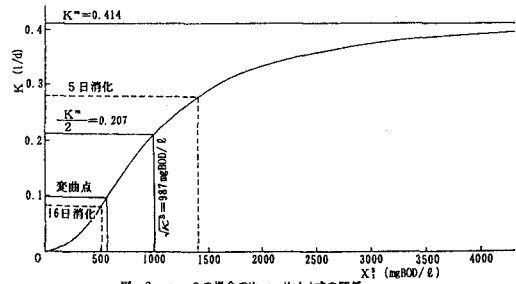


図-6  $n=2$ の場合のMoser-Model式の関係