

早稲田大学 ○吉澤 正宏
早稲田大学 遠藤 郁夫

1. はじめに

最近における嫌気性分解に関する研究は、有機酸に無機栄養塩類を添加した合成基質或いはTryptone、Beef Extract等有機物に無機塩類を添加するなどした合成基質等を用いて、基礎的研究が行なわれてきた。本研究は汚泥消化について解析的研究をするため合成基質並びに汚泥による消化実験について総括反応速度による解析を行ない、両者を対比させながら検討を加えた。また合成基質では20日消化、汚泥消化では15日消化を用いて投入基質濃度の影響を明らかにし、特にSelf-Control Actionについて考察を加え、高温嫌気性汚泥消化の高率化に関して二、三の知見を得ることができた。

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。3. 2における消化実験の滞留時間は合成基質では5～30日消化、下水汚泥では3～60日消化とした。3. 3では合成基質消化実験では20日消化、投入合成基質濃度2,803、4,650、7,091、9,294、14,083、18,885、30,344および33,345mgCOD/ℓとした。汚泥消化実験では、投入汚泥濃度は5,200、7,600、15,200、19,300、25,000、30,20039,300および48,000mgTS/ℓとした。濃縮は遠心分離機で行なった。表-1には、原合成基質および原下水汚泥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。

3. 1 総括反応速度による解析

図-1に示したような完全混合型反応槽モデルについて、総括反応速度による解析を行なった。反応槽内の微生物汚泥の物質収支は、動的平衡状態では $dX_p^0/d\theta = 0$ 、また流入微生物汚泥量=0とし、線形化すれば、(1)式を得ることができる。

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

R_s ; 基質消費速度、 $R_s = \frac{X_0^s - X_f^s}{\theta}$ 、 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
 $Y^A = \frac{\text{形成された微生物汚泥量 (MLVSS)}}{\text{利用された基質量 (BOD or COD)}}$

表-1 原合成基質および原下水汚泥の性質

測定項目	pH	COD _{Cr} (mg/ℓ)	BOD (mg/ℓ)	有機酸 (mg/ℓ)	SS (mg/ℓ)	VSS (mg/ℓ)	TS (mg/ℓ)	VTS (mg/ℓ)	T-N (mg/ℓ)
原合成基質	6.95	43700	37333	52.0	痕跡	痕跡	38700	35500	3310
原下水汚泥	5.64	24568	9732	1498.9	19687	13194	19174	14819	1061

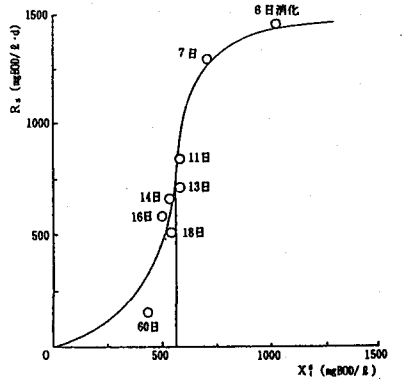
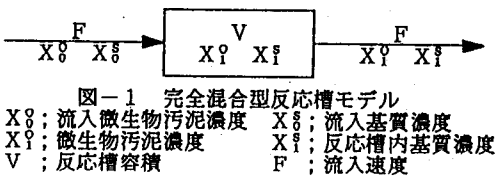


図-2 反応槽内混合基質濃度(BOD) X_1^s と基質消費速度 R_s との関係

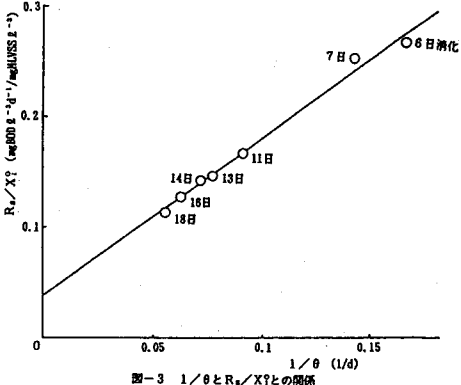


図-3 $1/\theta$ と R_s/X_1^0 との関係

また、微生物汚泥増殖速度 $M_r = K \cdot X_i^s$ として、基質消費速度と微生物汚泥増殖速度との関係は、線形化すると、(2)式で示すことができる。

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

K ; 微生物汚泥比増殖速度、
 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

$$K = \frac{K^m \cdot (X_i^s)^n}{K^s + (X_i^s)^n} \quad \text{..... (3)}$$

(3)式は、 $n=1$ のとき Monod-Model となる。一般的に微生物反応において、反応槽内基質濃度 X_i^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_i^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。(3)式は $n=1$ で Monod 式となるが、 $n>1$ では、

$$X_i^s = \left(\frac{n-1}{n+1} \cdot K^s \right)^{1/n} \quad \text{..... (4)}$$

を変曲点とするシグモイド曲線になる。

3. 2 下水汚泥および合成基質による消化実験

図-2 は汚泥消化の場合の X_i^s と R_s との関係を示したものである。図-2 から、 X_i^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 $X_i^s = 570 \text{ mgBOD/l}$ 付近であることが認められた。図-3 は汚泥消化の場合、槽内基質濃度を BOD、 $n=2$ とした場合の(1)式を示したものである。図-4 は汚泥消化の場合、槽内基質濃度を BOD とし、(2)式に $n=2$ を代入したものである。表-3 は図-3 及び図-4 から求めた汚泥消化の場合の Moser-Model 定数である。

$n=2$ の場合汚泥消化の場合の Moser 式は

$$K = \frac{K^m \cdot (X_i^s)^2}{K^s + (X_i^s)^2} = \frac{0.414 \cdot (X_i^s)^2}{(987)^2 + (X_i^s)^2} \quad \text{..... (5)}$$

となる。この関係を図-5 に示した。変曲点は(4)式より求めると、 570 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。

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った。この様な場合には、 $X_i^s - R_s$ の関係は、曲線にはシグモイド性が現われず(3)式は $n=1$ となり、Monod-Model で表されることが認められた。また、表-2 は合成基質消化実験による Monod-Model 定数である。しかしながら、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

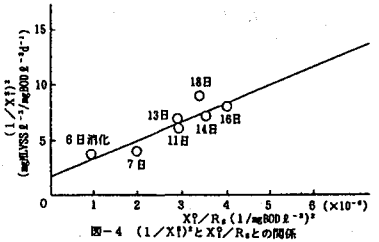


表-2 合成基質の消化実験による Monod-Model 定数 ($n=1$)

Y^A (mg VSS/mg COD)	K^A (1/day)	K^m (1/day)	K^s (mg COD/l)	摘要
0.185	0.246	0.673	5090	Basis 発酵期
0.0623	0.0396	0.123	1110	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 (mg VSS/mg BOD)	K^A (1/day)	K^m (1/day)	K^s (mg BOD/l) ²	摘要
0.705	0.0262	0.414	(987) ²	Basis 発酵期
				BOD アルカリ発酵期

*: Moser-Model の定数

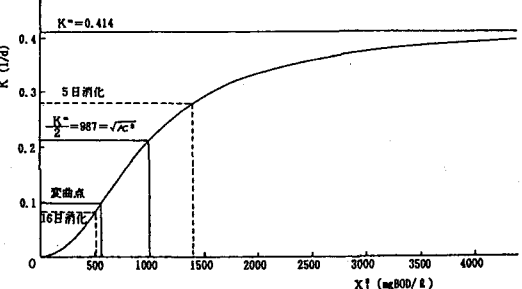


図-5 $n=2$ の場合の Moser-Model 式の関係

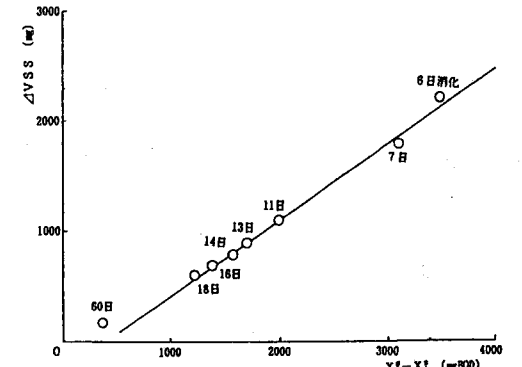


図-6 反応槽内で利用された BOD ($X_i^s - X_i^0$) と形成された微生物汚泥 ΔVSS との関係

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(Biological Solids)と定義した。図-2、図-3、図-4、図-5および図-6等の一連の関係からこの微生物汚泥は汚泥消化の反応系では微生物と同じような挙動を示すものと考えた。

3.3 基質濃度の影響特にSelf-Control Actionについて

図-7は投入合成基質濃度2,803~33,345mgCOD/ℓの範囲の8種類の濃度について、十分安定した消化日数として20日消化を用いた場合の投入基質濃度 X_0 と反応槽内

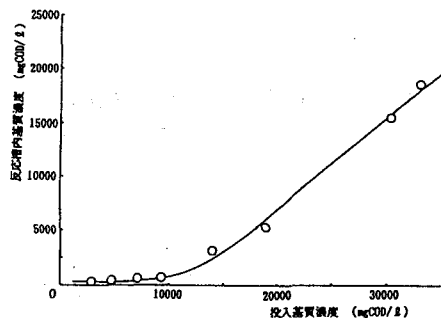


図-7 合成基質の消化実験によるSelf-Control Action

基質濃度 X_1 との関係である。投入基質濃度3,000~9,000mgCOD/ℓの範囲では、Self-Control Actionが現れているのが認められた。しかしながら、この範囲でも微視的には反応槽内基質濃度は、346~604mgCOD/ℓと徐々に増加していることから、厳密な意味でのSelf-Control Actionは投入基質濃度

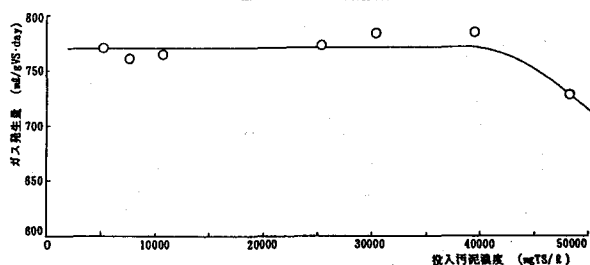


図-8 投入汚泥濃度とガス発生量との関係

3,000mgCOD/ℓより更に低い濃度で起こるものと考えられた。また、この濃度範囲における反応槽内基質濃度は346mgCOD/ℓよりかなり低い濃度で、Monod式の飽和定数 $K^s=1,100\text{mgCOD}/\ell$ と比較すれば $X_0 \ll K^s$ と考えられ、微生物比増殖速度が基質濃度に比例する範囲とも考えることができた。高温嫌気性汚泥消化では表-3からアルカリ発酵期における最小消化日数

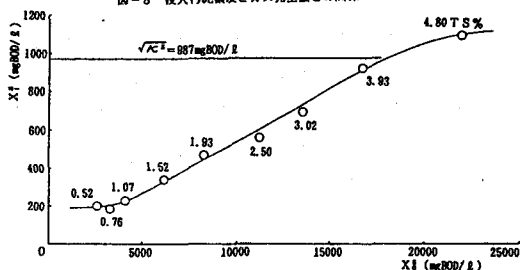


図-9 下水汚泥の消化実験によるSelf-Control Action

θ_{min} は、 $D_{max}=0.201\text{d}^{-1}$ から、5日消化、また、wash-out θ_w は3日消化と考えられた。従って、十分安定した消化日数として15日消化を用いて、投入汚泥濃度5,200~48,000mgTS/ℓの範囲について、投入汚泥濃度の影響に関する消化実験を行なった。図-8

におけるガス発生量は770ml/gVS·dayとほぼ一定で、それ以上の濃度では減少した。図-9は反応槽内混合液BOD濃度mg/ℓである。図-8および図-9より限界投入汚泥濃度は40,000mgTS/ℓであることが認められた。この場合の微生物汚泥比増殖速度は表-3のMoser-Model定数を用いて(3)式から、 K/K^s は46.4%で、また投入汚泥濃度5,200mgTS/ℓでは $K=0.017\text{d}^{-1}$ 、 K/K^s は4.13%であった。一般的に汚泥消化槽の投入汚泥濃度は20,000~25,000mgTS/ℓの場合が多い。この場合、15日消化では、 K/K^s は19~25%である。従って、この範囲の K は $\sqrt{K^s}$ 以下であり、十分M-SS系は形成されているものと考えられ、反応槽の攪拌は汚泥投入時に全体が十分均一になる程度で十分であると考えることができた。また、図-9において、投入汚泥濃度 X_0 2,500~4,000mgBOD/ℓの範囲で水平となり、Self-Control Actionが現れていることが認められた。この場合の X_1 は表-3の $\sqrt{K^s}=987\text{mgBOD}/\ell$ に比較すると極めて低い200mgBOD/ℓ付近であった。 X_1 が $\sqrt{K^s}$ 以上となれば、M-SS系は飽和或いは過飽和になることが考えられ、槽内混合液には投入生汚泥が混入する恐れがある。従って、投入下水汚泥BOD濃度は図-9より18,000mgBOD/ℓ以下、すなわち、VS/TS≒78%では、TS濃度40,000mgBOD/ℓ以下とすべきであると考えられた。また、投入汚泥濃度30,000~40,000mgTS/ℓでは、 K/K^s は30~50%となり、連続攪拌による完全混合が極めて重要な意義をもっていることが理解できた。

4. 総括および結論 総括反応速度およびMoser-Modelを用いて、高温嫌気性汚泥消化について、解析的な検討を試みることもできた。