

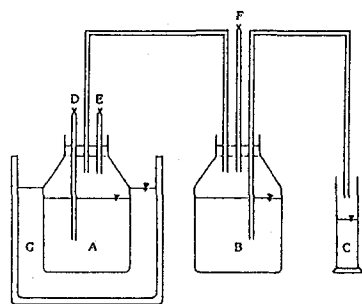
早稲田大学 ○尾澤 勲, 遠藤 郁夫
 東南大学 王 世 和

1. はじめに

下水汚泥の組成は、蒸発残留物の大部分が浮遊物質(87%)で、溶解性物質は13%程度であった。また浮遊物質の85%が有機物で、下水汚泥中に含まれる有機物の90%以上が浮遊物質に由来することが認められた。浮遊物質の組成は、大小様々の浮遊物質、コロイド性浮遊物質および嫌気性微生物などが考えられる。本研究は我が国の平均気温より若干高い地域(平均気温25℃)の無加温の嫌気性汚泥消化槽を考慮して、低温域25℃における嫌気性汚泥消化実験を行ない、分解しやすい有機物と比較的難分解性有機物との消化速度並びに消化速度定数を明らかにし、更に“微生物汚泥”の概念を導入して、総括反応速度式にMoser-Model式を適用して、嫌気性汚泥消化について、直接解析できる可能性を示した。また、ガス発生量、pH、および有機物分解率等を勘案して低温汚泥消化(25℃)における滞留時間の配分(二段消化方式)について、若干の示唆を与えることができた。

2. 実験方法

消化実験はケモスタト型実験装置を用いた。Fig. - 1は実験装置である。消化温度は $25 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 、滞留時間は、8日、10日、12日、15日、20日、25日、30日、40日、60日、80日、100日、120日、150日および200日消化とした。反応槽容積は、8日~80日消化では3.0ℓ、混合液容量は2.4ℓとした。100日~200日消化では反応槽容積は5.0ℓ、混合液容量は4.0ℓとした。反応槽の引抜きは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。種汚泥は下水汚泥を約8ヵ月間十分馴養したものを用いた。投入下水汚泥はS下水処理場の消化槽投入汚泥(初沈+余剰)を用いた。実験は10ヵ月間行ない、各実験結果は反応槽内混合液のpH、揮発性有機酸、BOD、およびMLVSS等諸項目について、平衡状態が十分維持されたと考えられた期間、約3週間の平均値である。



A ; Reactor
 B, C ; Gas collection system
 D ; Mixed liquor sampling port
 E ; Feed Substrate port
 F ; Safety valve
 G ; Fixed temperature water Bath

Fig - 1 Experimental Apparatus

3. 実験結果と考察

(1) ガス発生量、pH、BOD、および有機物分解率

滞留時間(day)とガス発生量($\text{mL}/\text{VS}\cdot\text{g}\cdot\text{day}$)との関係をFig-2に示した。低温域25℃における嫌気性汚泥消化(以下低温汚泥消化(25℃))のガス発生量は、12日~200日消化では $465 \sim 635 \text{ mL}/\text{VS}\cdot\text{g}\cdot\text{day}$ (8~11倍)の範囲で漸増傾向が認められた。中温(37℃)および高温汚泥消化(53℃)におけるガス発生量のplateau領域($600 \text{ mL}/\text{VS}\cdot\text{g}\cdot\text{day}$)と同程度のガス発生量を得るためには低温汚泥消化(25℃)では150日以上の滞留時間が必要であることが認められた。また、Fig-2より、反応槽内混合液のpHが6.8以上になる滞留時間は10日消化以上、7.0以上では30日消化以上がそれぞれ必要であった。30日消化における混合液BODおよび揮発性有機酸はそれぞれ $2113 \text{ BODmg}/\ell$ 、 $490 \text{ CH}_3\text{COOHmg}/\ell$ であった。有機物分解率は、8~30日消化の範囲で急激に増加し、40日消化以上では、有機物分解率は48%から漸増し、150~200日消化では55%に達した。有機物分解率50%以上を得るためには、少なくとも60日消化が必要であることが認められた。

(2) 消化速度 (基質消費速度)

Fig-3から一次反応消化速度定数を, Fig-4から二次反応消化速度定数を, それぞれ求めTable-1に示した。これらの図で認められるように, 2つの直線で示すことができた。

反応消化速度定数比について一次反応型では, 15日~60日消化では, 80日~200日消化の6.7倍, 二次反応型では, 4.2倍であった。このことから低温汚泥消化(25℃)では, 60日消化までは分解しやすい有機物, 80日~200日消化の範囲では比較的難分解性有機物が逐次分解されるものと考えられた。また, Fig-2から低温汚泥消化(25℃)における有機物分解率は200日消化55%が事実上の限度ではないかとも考えられた。一方, Fig-3およびFig-4から, 汚泥消化では反応槽内混合液の反応速度は一次反応型か, 或いは二次反応型かは, 相関係数も殆ど等しく判別することは全く困難であった。Fig-5は総括基質消費速度 (或いは総括汚泥消化速度) R_{cons} と反応槽内混合液基質濃度 X_1^s (BODmg/ℓ) との関係を示した。

$$R_{cons} = \frac{X_0^s - X_1^s}{\theta} \quad (1)$$

X_0^s ; 投入基質濃度 (投入下水汚泥濃度) [BODmg/ℓ]

X_1^s ; 反応槽内混合液基質濃度 [BODmg/ℓ]

θ ; 滞留時間 [day]

Fig-5における曲線はシグモイド曲線であることから, Moser-Modelにおいて $n > 1$ であることが示唆される。

R_{cons} とMoser-Modelとの関係に“微生物汚泥”の概念*を導入すると, 次のような関係を得ることができた。

$$\text{微生物汚泥増殖速度 } R_m; R_m = K X_1^0 \quad (2)$$

R_{cons} と R_m との関係;

$$R_{cons} = \frac{X_0^s - X_1^s}{\theta} = \frac{R_m}{Y^A} = \frac{1}{Y^A} K X_1^0 \quad (3)$$

$$\text{Moser-Model式}; K = \frac{K^m \cdot (X_1^s)^n}{\kappa^s + (X_1^s)^n} \quad (4)$$

Y^A ; 微生物汚泥収率

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

κ^s ; $n=1$ のときMonod-Model式の K_1^s に相当する定数

(4) 式の変曲点を求めると

$$X_1^0 = \left(\frac{n-1}{n+1} \cdot \kappa^s \right)^{1/n} \quad (5)$$

(3) 式を(4)式に代入すると,

$$R_{cons} = \frac{R_m}{Y^A} = \frac{X_1^0}{Y^A} \cdot \frac{K^m \cdot (X_1^s)^n}{\kappa^s + (X_1^s)^n} \quad (6)$$

$$\frac{R_{cons}}{X_1^0} = \frac{K^m}{Y^A} \cdot \frac{1}{\kappa^s + (X_1^s)^n} \cdot (X_1^s)^n \quad (7)$$

となる。Moser-Model式の n の次数を推定する方法のひとつにシグモイド曲線の変曲点の位置が実験値とMoser-Model式から求めた解析値との整合性がある。

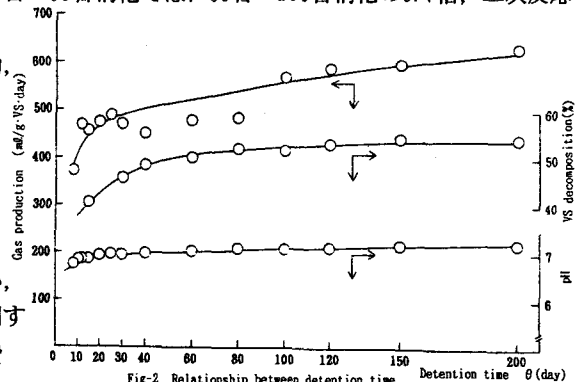


Fig-2 Relationship between detention time and gas production, pH, VS decomposition

Table-1 Reaction velocity constant and the ratio

	反応消化速度定数
15日~60日消化 有機物分解率 $\alpha=41 \sim 51\%$	一次反応型, $k_{wl-1} = 4.76 \times 10^{-2} (\text{day})^{-1}$ 二次反応型, $k_{wl-2} = 5.32 \times 10^{-4} (\text{BODmg}/\ell)^{-1} \cdot (\text{day})^{-1}$
80日~200日消化 有機物分解率 $\alpha=52 \sim 55\%$	一次反応型, $k'_{wl-1} = 7.13 \times 10^{-2} (\text{day})^{-1}$ 二次反応型, $k'_{wl-2} = 1.27 \times 10^{-4} (\text{BODmg}/\ell)^{-1} \cdot (\text{day})^{-1}$
反応消化速度定数比	一次反応型, $\frac{k_{wl-1}}{k'_{wl-1}} = 6.7$ 二次反応型, $\frac{k_{wl-2}}{k'_{wl-2}} = 4.2$

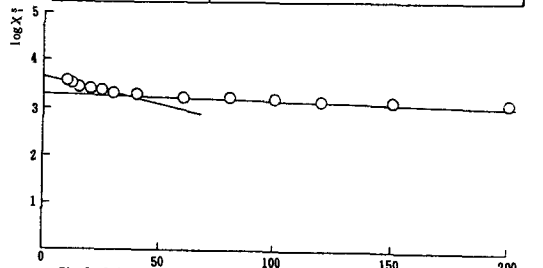


Fig-3 Relationship on Mixed liquor between detention time and $\log X_1^s$

Table-2 Moser-Model Constant ($n=2$)

Model Constant	Alkaline fermentation Stage
$Y^A (\text{MLVSS}_g/\text{BOD}_g)$	1.51
$K^A (1/\text{day})$	0.0442
$K^m (1/\text{day})$	0.276
$\kappa^s (\text{BODmg}/\ell)^2$	$(3618)^2$

(BOD basis)

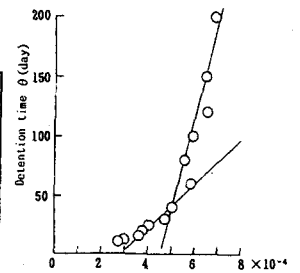


Fig-4 Relationship between $(1/X_1^s)$ and detention time in Mixed liquor

実験値から求めた変曲点は $X_i^s = 2050 \text{ BODmg/l}$ (Fig-5) と、 $n=2$ として (5) 式から求めた解析値 $X_i^s = 2088 \text{ BODmg/l}$ と全くよく一致することが確かめられた。また、Fig-4 の μ_{ML-2} と μ'_{ML-2} との交点を求めると、 $X_i^s = 1923 \text{ BODmg/l}$ であった。これらのことから Moser-Model 式において $n=2$ とした。(7) 式に $n=2$ を代入して、

$$\frac{K^m}{Y^A} \cdot \frac{1}{K^s + (X_i^s)^n} = \beta \cdots (8) \quad \text{とおくと、} \quad \frac{R_{cons}}{X_i^0} \cdot \frac{1}{(X_i^s)^2} = \beta \cdots (9)$$

となり、 β を実験値より求めることができる。Fig-6 は消化日数と β との関係を示したものである。 β は

15日～60日消化の範囲 $\beta_1 = 9.21 \times 10^{-9} (\text{BODmg/l})^{-1} (\text{day})^{-1} (\text{VSSmg/l})^{-1}$

80日～200日消化の範囲 $\beta_2 = 5.18 \times 10^{-9} (\text{BODmg/l})^{-1} (\text{day})^{-1} (\text{VSSmg/l})^{-1}$

であった。この範囲でほぼ constant と見做することができる。(7) 式は近似的に

$$\frac{R_{cons}}{X_i^0} = \beta (X_i^s)^2 \cdots (10)$$

と考えることができた。その関係を Fig-7 に示した。すなわち、低温汚泥消化 (25℃) において、分解しやすい有機物並びに比較的難分解性有機物ともそれぞれ反応槽内混合液 BOD 濃度 X_i^s と R_{cons}/X_i^0 との間で二次放物線で近似できるものと考えられた。すなわち、単位容積当りの微生物汚泥量に対する基質消費速度 (R_{cons}/X_i^0) は X_i^s に対して 15日～60日消化、ならびに 80日～200日消化の範囲でそれぞれ二次反応型と考えることができた。

以上のことから、Moser-Model 式に $n=2$ として、10日～30日消化の範囲で解析して、Moser-Model 定数を Table-2 に示した。Moser-Model 定数をもちいて、(7) 式から X_i^s と R_{cons}/X_i^0 との関係を Fig-7 に示した。10日～60日消化の範囲、とくに 10日～30日消化の範囲ではよく一致していることが認められた。

4. 総括および結論

低温域 25℃ における低温汚泥消化実験を行ない、Moser-Model 式の適用性について検討を加え、次のような結論を得ることができた。

(1) 総括基質消費速度 (総括汚泥消化速度) R_{cons} と反応槽内混合液 BOD 濃度 X_i^s との関係はシグモイド曲線を示すことから、Moser-Model 式において $n > 1$ であることが認められた。

(2) 消化日数 15日～60日消化、80日～200日消化の範囲では X_i^s と R_{cons}/X_i^0 との関係は 2 次式で近似することができた。

(3) 2 次反応型における交点 (Fig-4)、シグモイド曲線の変曲点 (Fig-5)、Moser-Model 式から求めた変曲点 ($n=2$, (5) 式) の各点 X_i^s は全くよく一致した。

(4) 有機物分解率は事実上 55% (200日消化) が限度と考えられた。したがって、30日消化では、分解可能な有機物の 84%、60日消化では 90% であることから、低温汚泥消化 (25℃) では消化速度定数より、消化日数は 60日消化とし、pH、ガス発生量および有機物分解率等を勘案して 1 次消化タンク 30日消化、2 次消化タンク 30日消化とする二段方式が考えられた。

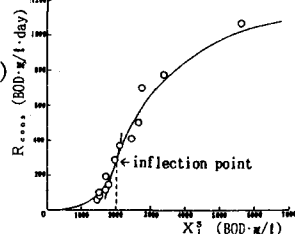


Fig-5 Relationship between substrate concentration in the reactor and substrate consumption rate

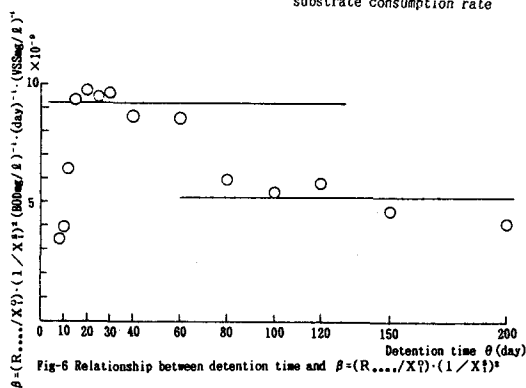


Fig-6 Relationship between detention time and $\beta = (R_{cons}/X_i^0) \cdot (1/X_i^s)^2$

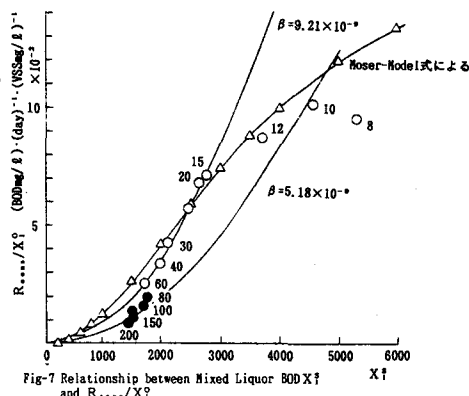


Fig-7 Relationship between Mixed Liquor BOD X_i^s and R_{cons}/X_i^0