

早稲田大学理工学部 学生員 ○富沢儀生
早稲田大学理工学部 正会員 遠藤郁夫
国土館大学工学部 正会員 金成英夫

1. 緒言 反応動力学モデルとして完全混合型反応槽を用いて、嫌気性高温消化実験を行ない、基質および微生物の物質収支について検討を加えた。この際、微生物比増殖速度式として Monod 式は単純化しすぎたモデルといわれている。しかしながら、阻害要因を考慮して複雑な式を使用すれば、その解析は極めて困難となる。Monod 式が現在なお広く使用されている現状を考慮して Monod 式を適用して反応動力学的解析を行なった。

本研究は、反応動力学モデルから求めたモデル定数と実験から直接求めた値と理論値等との比較、更に反応動力学モデル解析から求めた微生物最大比増殖速度、Wash-Out 等の実証性について検討を行なったものである。

2. 実験方法 合成基質を用いて、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53℃とした。種汚泥は高温汚泥消化実験で十分馴致した消化汚泥を、合成基質によって約6ヶ月間馴養したものを用いた。消化日数は25日、30日、35日、40日、45日および50日消化とした。基質の引き抜き投入は1日1回とし、攪拌は槽内混合液が十分均一になる程度に1日2回振とう攪拌を行なった。合成基質は、酢酸、プロピオン酸およびn-酪酸をそれぞれ、5：3：2の割合で混合し、これに数種の栄養塩類を加えたものを使用した。

3. 反応動力学モデル解析 3.1 物質収支 完全混合型反応槽における微生物および基質の物質収支式は、嫌気性消化が円滑に進行して、動的平衡状態が維持され、安定した定常状態が確立している場合、 $dX^0/d\theta = 0$ 、或るいは $dX^s/d\theta = 0$ と置くことによって、反応槽内微生物濃度 (X^0) および基質濃度 (X^s) を、それぞれ (1) 式或るいは (2) 式で示することができる。すなわち、

$$X^0 = \frac{Y^0(X^s_0 - X^s_1)}{1 + K^d \theta^r} \quad \dots (1) \quad X^s_1 = \frac{K^s(1 + K^d \theta^r)}{\theta^r K^m - (1 + K^d \theta^r)} \quad \dots (2)$$

X^s_0 : 流入基質濃度, X^s_1 : 反応槽内基質濃度, K^d : 微生物の比死滅速度, K : 微生物の比増殖速度
 X : 流入量, V : 反応槽容積, θ^r : 滞留時間 (F/V), Y : 菌体収率, K^m : 微生物比最大増殖速度
 K^s : Michaelis-Menten Constant (飽和定数)

また、(1) 式および (2) 式を逆数形した、Lineweaver-Burk Plot 法を用いて、 Y^0 , K^d , K^m および K^s をグラフから直接求めることができる。

3.2 最大増殖速度および Wash-Out (2) 式に希釈率 D を導入すると、反応槽内の微生物増殖速度は (7) 式で表わされる。
($D + K^d$) $X^0_1 = D Y^0 (X^s_0 - X^s_1)$

$$= D Y^0 \left\{ X^s_0 - \frac{K^s}{K^m - (D + K^d)} \right\} \quad \dots (3)$$

したがって、微生物増殖速度が最大となる D の値 D_m は (3) 式を微分することによって求められ、(4) 式となる。また、希釈速度が D_m 以上に大きくなれば微生物の増殖が追いつけなくなり反応槽内基質濃度 X^s_1 は、ついには投入基質濃度 X^s_0 に近い値となる。このような現象が Wash-Out で、この場合の滞留時間 θ_w は (2) 式に $X^s_1 = X^s_0$, $\theta^r = \theta_w$ として θ_w について解けば (5) 式が求まる。

$$D_m = K^m - K^d - \left\{ \frac{K^s K^m (K^m - K^d)}{X^s_0 + K^s} \right\} \quad \dots (4)$$

$$\theta_w = \frac{1}{K^m X^s_0 / (K^s + X^s_0) - K^d} \quad \dots (5)$$

4. 実験結果と考察 4.1 反応動力学モデル定数および Monod 式 合成基質による半連続投入消化実験を行ない、消化が十分に進行して、動的平衡状態が維持されている場合の混合液の性質は25日～50日消化の範囲では、pH=7.3～7.7、ガス発生量 8～10倍、および有機物の分解率81～96%の範囲であった。これらの消化実験に Lineweaver-Burk Plot 法を用いて Y^0 , K^d , K^m および K^s 等を図-1および図-2から直接求めた。また Monod 式は次の様に示すことができた。

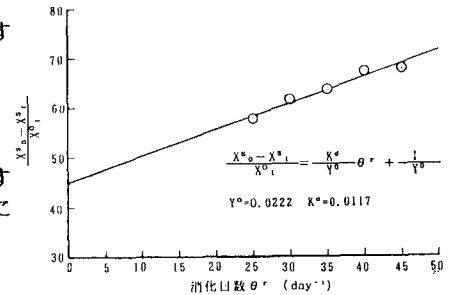


図-1 消化日数と $(X^s_0 - X^s_1)/X^0_1$ との関係 (OD, M.VSS Basis)

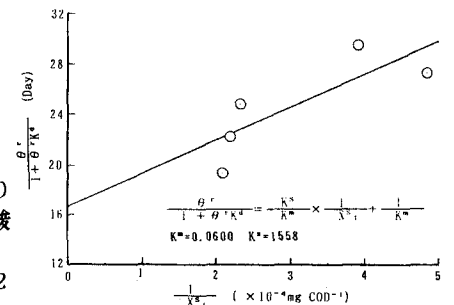


図-2 $1/X^s_1$ と $\theta^r/(1 + \theta^r K^d)$ の関係 (OD, M.VSS Basis)

(1) COD の場合

$$K = \frac{0.0600 X_s^1}{1558 + X_s^1} \quad K^0 = \frac{0.0600 X_s^1}{1558 + X_s^1} - 0.0117$$

(2) BOD の場合

$$K = \frac{0.0560 X_s^1}{417.7 + X_s^1} \quad K^0 = \frac{0.0560 X_s^1}{417.7 + X_s^1} - 0.0177$$

K , K^0 と X_s^1 の関係を図-3 (COD MLVSS Basis) に示す。 K^0 は正味の微生物比増殖速度である。図-3に実験から直接求めた比増殖速度をプロットすると、 K^0 によく近似していることが認められた。

4.2 菌体収率 菌体収率 Y^0 は次のように定義されている。すなわち、 Y^0 = 菌体増殖量/利用された基質量となる。従って、本研究に使用した合成基質では、理論的菌体収率 Y_{th}^0 、実験から直接求めた菌体収率 Y^0 および反応力学モデルから求めた菌体収率 Y^0 等について表-2にそれぞれ示した。この表に認められるように、菌体収率は、CODおよび MLVSS Basisでは、 Y_{cod}^0 あるいは Y_{ex-cod}^0 において 0.02 であった。また、BODおよび MLVSS Basisでは、 Y_{bod}^0 および Y_{ex-bod}^0 において、0.02~0.04 であった。このことから、菌体収率 Y^0 は理論値を含めて、0.02~0.04 の範囲と考えることができる。

4.3 最大増殖速度および Wash-Out 微生物増殖速度が最大となる D の値 D_m は (4) 式より次のように求めることができる。

$$D_{m-cod} = K^m - K^d - \left\{ \frac{K^s K^m (K^m - K^d)}{X_{s0}^1 + K^s} \right\}^{1/2} = 0.0339 \text{ (day}^{-1}\text{)}$$

一方、滞留時間 θ^r と希釈率 D との関係は $\theta^r = 1/D$ であるから、 D_m と θ_{min}^r との関係は、 $\theta_{min}^r = 1/D = 1/0.0339 = 29.5 \div 30$ 日消化となる。 θ_{min}^r は合成基質による高温嫌気性消化における良好なメタン発酵状態が得られる最小滞留時間と考えることができる。しかしながら、図-4に見られるように、微生物増殖速度は、最大増殖速度の起る付近では僅かの D の変化に対して極めて不安定であることから、プロセスの安定性の観点からは最大増殖速度の起る希釈率 D よりも若干小さくする必要がある。すなわち、 θ_{min}^r より若干大きい滞留時間を採用することが重要であると考えられる。

Wash-Out の滞留時間 θ_w は (5) 式により $\theta_{w-cod} = 1 / \{ K^m X_{s0}^1 / (K^s + X_{s0}^1) - K^d \} = 22.7 \div 23 \text{ (day)}$ となる。実験によれば滞留時間20日付近で、Wash-Out現象が認められた。

4.4 ガスの組成およびメタンガス発生量 滞留時間とメタンガス含有量との関係を図-5に示した。図-5から認められるように、30日消化以上が良好でしかも安定したメタン発酵が行なわれていると考えられ、 θ_{min}^r とよく一致することが認められた。また、メタンガス発生量は、消化日数30~50日消化の範囲では理論値と実験値がかなり一致していると考えられた。

5. 総括および結論 合成基質を用い、高温嫌気性消化実験を行ない、Monod式を適用して反応動学的解析を行ない、反応動力学モデル定数を求めた。Monod式および菌体収率等が実験から求めたものとよく一致していることが認められた。また、微生物増殖速度が最大となる D_m および Wash-Out等を求め、メタンガス発生量およびその含有量について実験結果を合理的に説明することができた。

表-1 菌体収率

Y ⁰ 種別	Y ⁰		備 考
	有効数字3桁	有効数字1桁	
Y _{th} ⁰	0.0354	0.04	理論値
Y _{cod} ⁰	0.0229	0.02	反応動力学モデル
Y _{bod} ⁰	0.0368	0.04	
Y _{ex-cod} ⁰	0.0158	0.02	実験から直接求めた平均値
Y _{ex-bod} ⁰	0.0229	0.02	

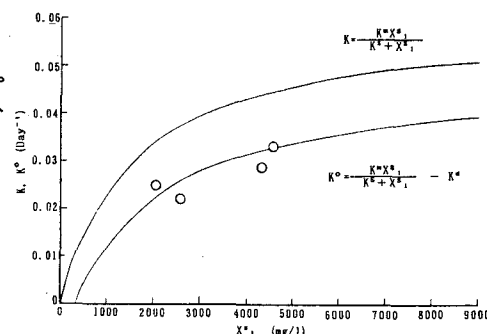
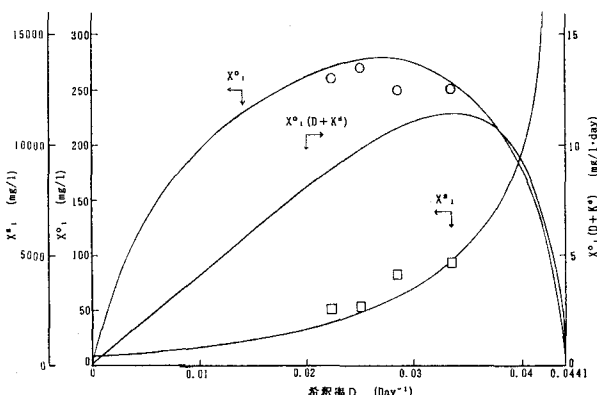

図-3 比増殖速度 K , K^0 と X_s^1 の関係


図-4 希釈率と基質濃度、微生物濃度および微生物増殖速度の関係

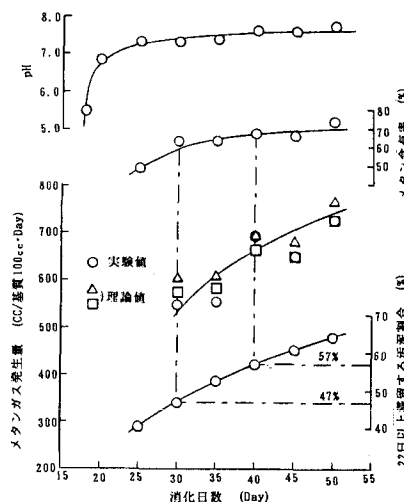


図-5 各消化日数におけるメタン発生量およびメタン含有率