

低温度での嫌気性消化における 加水分解と酸生成

田中修三*

Hydrolysis and Acidogenesis in Anaerobic Digestion at a Low Temperature

by Shuzo TANAKA

ABSTRACT; The acidification of whole milk in anaerobic digestion was investigated to obtain more information on both hydrolysis and acidogenesis at a low temperature. Four continuously-fed digesters with hydraulic retention times (HRT) of 12, 24, 36 and 48 hours were operated at 20°C and one with HRT of 24 hours at 37°C. Acid production at 20°C was less than at 37°C in digesters with the HRT of 24 hours. A little increase of HRT, however, could make up for the decrease of bioactivity caused by lowering temperature. The change of methane content in gas phase indicated that the growth rate of H_2 -utilizing methanogenes was greatly increased between HRTs of 12 and 24 hours, although methane production was always less than 4% of substrate COD. The hydrolysis rate was described by a first order reaction as a function of biodegradable unsoluble matters remaining. Values of the kinetic parameters determined at 20°C were 0.179 hour^{-1} for the hydrolysis rate constant, $0.385 \text{ g cell COD/g COD}$ utilized for the cell yield and $0.00036 \text{ hour}^{-1}$ for the cell decay.

1. はじめに

嫌気性消化法は、近年のエネルギー事情の悪化に伴い省エネルギー化が推進される中で、廃棄物処理法としてのみならずバイオガスによるエネルギー回収技術としても再び注目されはじめている。ここに、本法の効率化すなわち滞留時間の短縮、加温エネルギーの節減、プロセスの安定性の向上などが望まれ、各種の実験研究が試みられている。嫌気性消化における基質分解過程は酸生成相とメタン生成相から成り、各相における細菌群の増殖・生理学的特性は大きく異なる。これらの二つの細菌群を別々の反応槽に分離することにより各々の生物反応を最適な条件下で行なわせようとする相分離も、消化効率の改善に大きく寄与するものと期待されている。

* 理工学部土木工学科専任講師 衛生工学

本実験の目的は、相分離を前提として、低温度（20℃）での酸生成相における代謝特性の把握と加水分解を考慮した動力学的考察を行うことである。実験は、複合基質であるミルクの分解過程を回分式および連続式反応槽により追跡検討した。

2. 酸生成相の動力学

酸生成相における生化学反応は、基質中の生分解可能な固形分の加水分解（ここでは固形分の可溶化のみを考える）と、その分解を受けたものを含む溶解分を利用する酸生成反応から成る。下水汚泥のように多くの固形分を含む基質の場合、酸生成相の律速段階は酸生成反応ではなく加水分解であることが報告されており¹⁾、消化の効率化に当って加水分解は重要な制限因子となる。酸生成相における動力学的モデルはいくつかの文献^{2),3)}に報告されているが、加水分解と酸生成反応の両方のモデル化は Eastman の報告¹⁾を除き他に見当たらない。ここでは Eastman のモデルを参考にしながら、加水分解および菌体増殖に関する動力学的定数の決定式の導出を行う。

連続式反応槽で基質、菌体および産物の全成分を COD 当量に換算して、各々に関する物質収支をとると以下のように表わされる。

$$\text{基質固形分: } (dF/dt)V = Q(F_0 - F) - Vr_h \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{基質溶解分: } (dS/dt)V = Q(S_0 - S) + Vr_h - V(\mu/Y)X \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{菌 体: } (dX/dt)V = Q(X_0 - X) + V\mu X - Vk_dX \quad \dots\dots\dots(3)$$

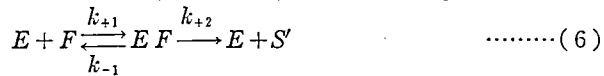
$$\text{産 物: } (dP/dt)V = Q(P_0 - P) + V(1/Y - 1)\mu X + Vk_dX \quad \dots\dots\dots(4)$$

式(1)～(4)において定常状態では左辺の微分項=0 となり、各式を加算すると次式を得る。

$$(F_0 - F) + (S_0 - S) + (X_0 - X) + (P_0 - P) = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 F : 生分解可能な基質固形分濃度、 S : 基質溶解分濃度、 X : 菌体濃度、 P : 代謝産物濃度、 r_h : 加水分解速度、 μ : 比増殖速度、 Y : 菌体収率、 k_d : 死滅係数、 V : 槽容積、 Q : 流入水量、 t : 時間、添字 0 は $t=0$ のときの値を示す。

基質固形分〔 F 〕の加水分解は酸生成菌の細胞外酵素の働きによる反応である。最も簡単な酵素反応は Michaelis-Menten によって次のように表わされている。



$$\text{濃度: } e \quad F \quad (eF) \quad e \quad s'$$

ここに、 e : 酵素 E の濃度、 k : 反応速度定数、 S' : 可溶化された基質、 s' : S' の濃度である。 E と F は酵素と基質の複合体 (EF) と平衡状態にあり、 $E + S'$ への反応 (加水分解) は不可逆であると仮定する。この加水分解速度 [r_h] は Michaelis-Menten の表現に従うと式 (7) のようになる。

$$\frac{dF}{dt} = r_h = \frac{k_{+2}e_0F}{K_m + F} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 $e_0 = e + (eF)$ 、 K_m : Michaelis 定数であり、 $k_{+2}e_0$ は最大反応速度に等しい。また、式 (7) は e_0 を菌体濃度 [X] で置き換えると Monod 式と同形となる。

式 (7) において、 F と K_m の相対的な大きさから 2 つの単純化した反応式を考え、実験値との適合性を検討する。

$$F \gg K_m \text{ のとき, } r_h = k_{+2}e_0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$F \ll K_m \text{ のとき, } r_h = \left(\frac{k_{+2}e_0}{K_m} \right) F \quad \dots\dots\dots (9)$$

式 (8) と (9) において, 実処理場の反応槽では e_0 の定量は容易ではないと思われるので, X で代用されると仮定する。すなわち, r_h が X の関数である場合と, 最大反応速度 $[k_{+2}e_0]$ は一定であるとする場合について考えてみる。式 (8) において,

$$k_{+2}e_0 \text{ が一定のとき, } r_h = k_h \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$r_h \text{ が } X \text{ の関数のとき, } r_h = k_{+2}e_0 \equiv k_h' X \quad \dots\dots\dots (11)$$

式 (9) において,

$$k_{+2}e_0 \text{ が一定のとき, } r_h = k_h F \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$r_h \text{ が } X \text{ の関数のとき, } r_h = \left(\frac{k_{+2}}{K_m} \right) e_0 F \equiv k_h' X F \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに, k_h と k_h' は加水分解速度定数であり, r_h が X の関数である場合に k_h' を用いることとした。因に, 式 (12) が Eastman の用いた加水分解速度式である。

連続式反応槽における k_h および k_h' は式 (10)~(13) を式 (1) に代入することにより求められる。但し, 反応系は定常状態にあるとして式 (1) の微分項=0 とする。

$$\text{式 (10) より,} \quad k_h = \frac{\Delta F}{\theta} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\text{式 (11) より,} \quad k_h' = \frac{\Delta F}{\theta X} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{式 (12) より,} \quad \theta = F_0 \left(\frac{\theta}{\Delta F} \right) - \frac{1}{k_h} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\text{式 (13) より,} \quad \theta X = F_0 \left(\frac{\theta X}{\Delta F} \right) - \frac{1}{k_h'} \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここに, $\Delta F = F_0 - F$, θ : 滞留時間 ($= V/Q$) である。

また, 酸生成相の動加学モデルを完成するためには菌体増殖に関する定数, たとえば μ が Monod 式で表わされる場合, 最大比増殖速度 $[\mu_m]$, 飼和定数 $[K_s]$ および Y や k_d を決定する必要がある。しかし, 後述する実験結果によれば Monod 式を適用することはできなかったため, Y と k_d のみを以下の式で求める。式 (3) において定常状態で $X_0 = 0$ とすると,

$$\mu = \frac{1}{\theta} + k_d \quad \dots\dots\dots (18)$$

式 (1), (2), (18) より

$$\frac{1}{\theta} = Y \left(\frac{\Delta F + \Delta S}{\theta X} \right) - k_d \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここに, $\Delta S = S_0 - S$ である。

回分式反応槽における加水分解は, 式 (1) において $Q=0$ であるから,

$$\frac{dF}{dt} = -r_h \quad \dots\dots\dots (20)$$

となる。ここで, 連続実験の結果から式 (12) のみを検討すると, 式 (20) は $(dF/dt) = -k_h F$ となり解は次のようになる。

$$F = F_0 e^{-k_h t} \quad \dots\dots\dots (21)$$

k_h は次式より片対数紙にプロットすると求まる。

$$\ln F = \ln F_0 - k_h t \quad \dots\dots\dots (22)$$

3. 実験方法

回分実験は 120 ml のバイアルびんを用い、50 ml の種汚泥に 10 ml の濃縮基質を投与して気相部を N_2 ガスで置換した後、20°C 恒温室内の振とう器に設置した。混合液の分析は適宜 1 本ずつ開栓して行った。連続実験では 20°C 恒温室内に設置した図 1 のような装置で容積 2.2 l の広口びんを用い、滞留時間 (HRT) を短くすることによりメタン菌の washout を図った。

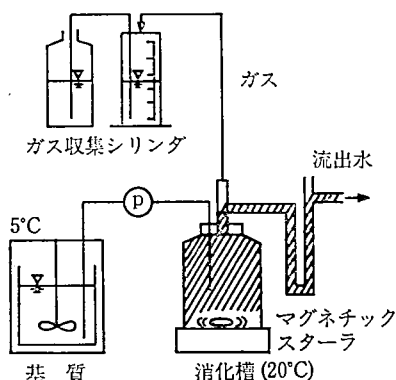


図 1 連続実験装置

実験用種汚泥を得るために、東京都内の下谷下処理場の初沈汚泥を最初の種汚泥として、20°C 恒温室内で 6 ヶ月間の半連続培養を行った。基質は M 社製育児用粉ミルク（重量比率で炭水化物 57%，蛋白質 13%，脂肪 25%）を 3 g/l の濃度（4,500 mg COD/l）で水道水に溶かし、反応槽内の混合液 pH が 6 付近に保たれるようリン酸緩衝剤を加えた。基質を 0.45 μm のメンブランフィルターで濾過した結果、COD 濃度で約 51% が固形分として残った。以下、基質溶解分とは 0.45 μm の濾液、固形分とは残渣をさす。

主な分析項目と方法を表 1 に示す。菌体量は混合液中の DNA を測定して、菌体の DNA 含有率から求めた Active biomass として表示した。反応物と生成物の物質収支を直接とれるように、全ての生成物を COD 当量で表示した。

また、揮発酸や CH_4 の生成量を表わすのに、投与 COD に対する各産物の COD 転換率を用いた。

表 1 主な分析項目と方法

項 目	分 析 方 法
ガ ス 成 分	ガスクロマトグラフ (TCD)
有機酸・アルコール	ガスクロマトグラフ (FID)
炭 水 化 物	フェノール硫酸法
蛋 白 質	TCA で沈殿後 Lowry らの方法
脂 肪	Bligh & Dyer 法により抽出後酸化法
DNA	STS 法にて抽出後ジフェニルアミン法
COD	重クロム酸カリウム法

4. 実験結果と考察

以下に回分実験と連続実験における代謝特性を述べ、動力学的考察を行う。連続実験においては運転開始後約 40 日で定常に達したので、その後の分析結果を用いた。

4.1 代謝特性

(A) 回分実験

生成ガスおよび混合液性状に関するデータを表 2 に示した。ガスの生成速度とその組成から反応初期に急激に CO_2 が生成されていることがわかり、この時期に酸生成菌の活性が非常に高いことを示している。生成ガスの中に H_2 は検出されなかったが、反応初期から CH_4 が生成された。これは主として H_2 利用メタン生成菌による H_2 を基質とした CO_2 の還元反応による CH_4 生成であるものと考えられる。

図 2 は各代謝産物の COD 転換率の時間変化を追跡したもので、比較のために 37°C での回分実験結果も示した。図中の TOTAL は全酸生成量に相当（菌体への転換分は無視）するものである。 20°C の場合酸生成の立ち遅れはあるが、消化 120 時間では 37°C と同

表 2 回分実験のガスおよび混合液性状に関するデータ

消化 時間 (h)	ガ				
-----------------	---	--	--	--	--

a 種汚泥の DNA/VSS 比 (0.0227) を用いて算出

b (Total COD+ガス COD) の投与 COD に対する回収率

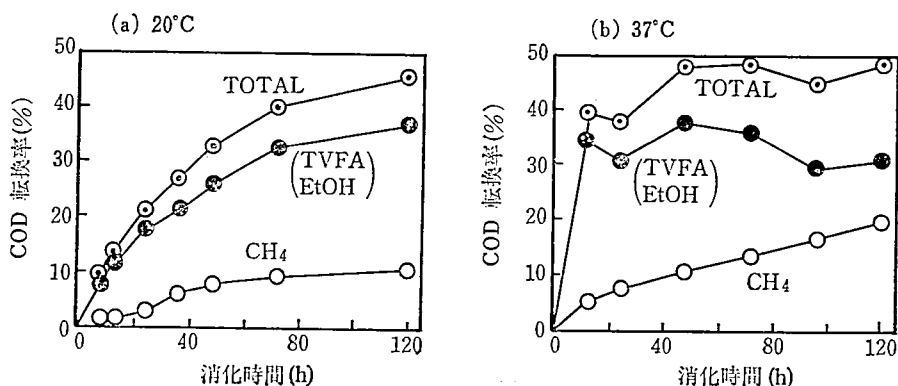


図 2 代謝産物生成に対する消化時間の影響（回分実験）

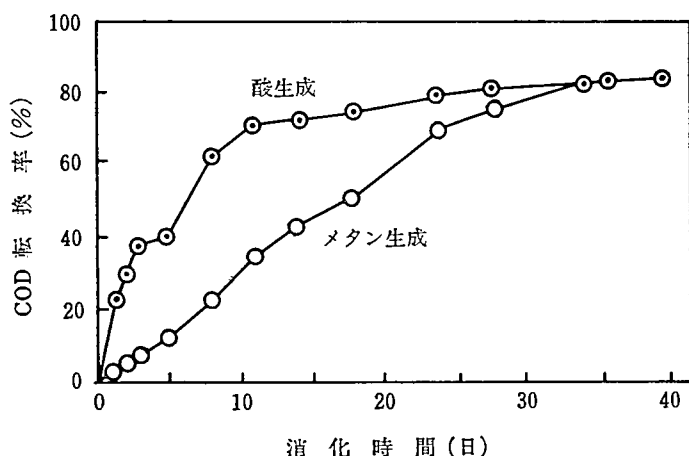


図3 ミルク分解における酸およびメタン生成過程 (回分実験)

程度の酸生成量となっている。このことは酸槽の 20℃ 運転の可能性を示唆している。図3は消化温度 20℃ で酸およびメタンの生成が終了するまで消化を続けたものである。約35日で消化は完了しており、20℃でも十分消化反応は進行することがわかる。酸生成過程を見ると、COD 転換率 40% 付近で一時的な停滞が生じている。これはミルク中の脂肪の加水分解の結果生じた高級脂肪酸の影響であることを他の実験で確認している⁴⁾。

生成された揮発酸およびアルコールの種類について言えば、図4に示したように酢酸 (HAc)、プロピオン酸 (HP)、酪酸 (HB)、吉草酸 (HV) が主な酸であり、消化時間が長くなるにつれて炭素数の多い酸が生成され始めた。アルコールとして検出されたのはエタノール (EtOH) のみであり、反応初期に生成され、その後速やかに分解されている。エタノールの分解は H_2 を生成する反応であり、Acetogenic 菌と H_2 利用メタン生成菌の共生体によって行なわれる⁵⁾。エタノールの分解は消化時間 24 から 48(h) にかけて

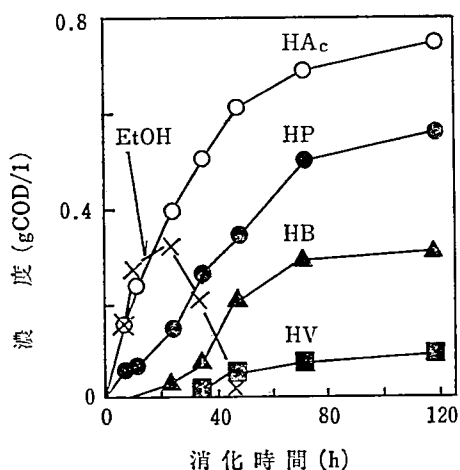


図4 個々の揮発酸とアルコールの生成 (回分実験)

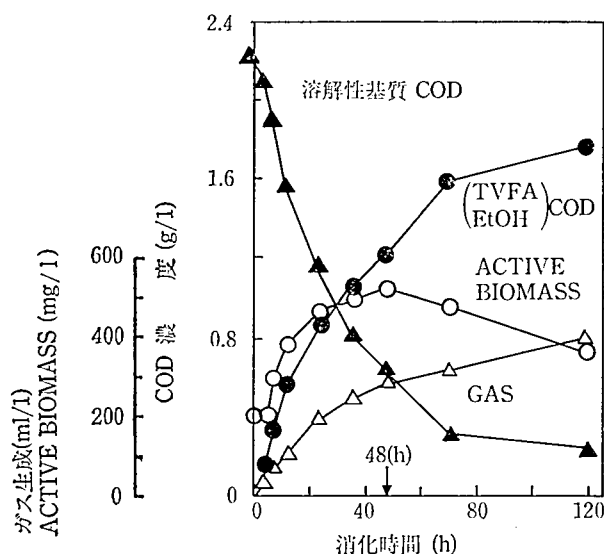


図 5 溶解性基質菌体量，代謝産物の時間変化（回分実験）

進行しており，これに対応して図 2 (a) に示されているように H_2 経由と考えられる CH_4 の生成が増加している。

菌体増殖と産物生成の関係は，図 5 に示されたように，消化 48(h) までは増殖し続けるがそれ以後菌体量は減少しているにもかかわらず基質消費は続き，揮発酸やガスなどが生成されている。これは菌体の維持エネルギーのための基質消費による産物生成であると考えられ，言い換えれば産物生成と増殖が連動していないことになる。回分式の場合は初期の菌体量によってその増殖カーブは異ってくるが，初期量が 200 (mg/l) 以下の場合，図 5 の反応初期の増殖速度から判断して増殖カーブはあまり変化しないものと考えられる。従って，ミルク基質においては最大で概ね消化 48(h) までは増殖連動型の産物生成であると言えよう。

以上の回分実験の結果をそのまま連続式反応槽に適用することはできないが，次の連続実験では，酸生成菌の活性が高く，代謝産物の生成が増殖と連動していると推測される滞留時間 (HRT) の範囲で実験を行った。

(B) 連続実験

表 3 に生成ガスおよび混合液性状に関するデータ，図 6 には各 HTR での代謝産物の生成量を表わす COD 転率を示した。表 3 にあるように HRT 24(h) 以上では生成ガスの約 80% が CH_4 であるが，図 6 からわかるようにその COD 転換率はいずれの HRT においても 4% 未満であり，メタン生成菌の washout は十分達成されている。HRT 12(h) の系では H_2 の生成が盛んであり，運転開始直後は生成ガスの約 70% を占め，定常に達してからは 47% であった。HRT が 12 から 24(h) になると H_2 はほとんど検出されず， CH_4 の生成量が増加してきた。このことから，回分実験でも述べたように，生成された CH_4 は H_2 利用メタン生成菌によって CO_2 が還元されたものと考えられる。これらのメタン生成菌の増殖速度は，通常の嫌気性消化法におけるメタン発酵槽の菌体滞留時間から判断すると，かなり速いと言える。Shea らは H_2 利用メタン生成菌の最小菌体滞留

時間は 37°C で 19(h) という結果を得ており⁶⁾、本実験の結果もこれに近い値となっている。

表 3 連続実験のガスおよび混合液性状に関するデータ

HRT (h)	pH	ガ				
------------	----	---	--	--	--	--

a, b 表 2 に同じ。

c Inf. = Influent

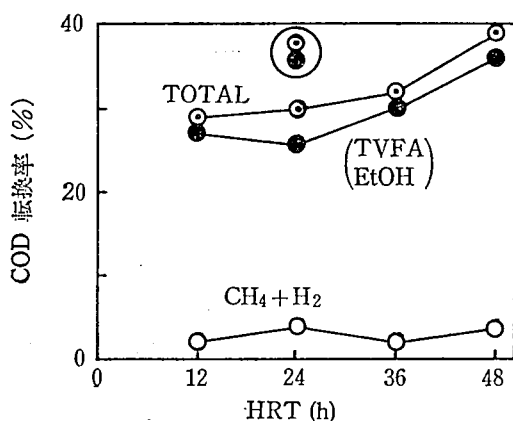


図 6 代謝産物生成に及ぼす HRT の影響
円で囲まれたシンボルは 37°C での
データ (連続実験)

一方、酸の生成量は COD 転換率にして 30~40% (図 6 の TOTAL) であった。HRT 24(h) における 37°C 消化での結果と比較すると、酸生成量が COD 転換率で約 8% 低くなっている。しかし、HRT を 48(h) 程度にすれば、37°C 消化の HRT 24(h) とほぼ同程度の反応が 20°C 消化でも進行することがわかる。

生成された揮発酸の種類について言えば、図 7 より HRT 12(h) では HAc の他に HP, HB, HV 等が同程度生成されており、比較的酸化レベルの低い揮発酸の占める割合が大きい。一方、HRT 24(h) 以上になると、それ程極端な差ではないが、HAc の占める割合が増大している。

以上のことより、HRT 24(h) 以上では酸生成菌と H₂ 利用メタン生成菌のいわゆる “interspecies H₂ transfer” を通しての共生関係が成立しているものと考えられる。酸生成菌の増殖に対してこの共生関係は必須条件ではないが、この共生関係が成立していることにより、ATP 生成の増加やメタン生成菌が直接基質として利用することのできる HAc の増加等の点で有利となる。従って、ミルクあるいはこれに類する成分から成る廃水に対

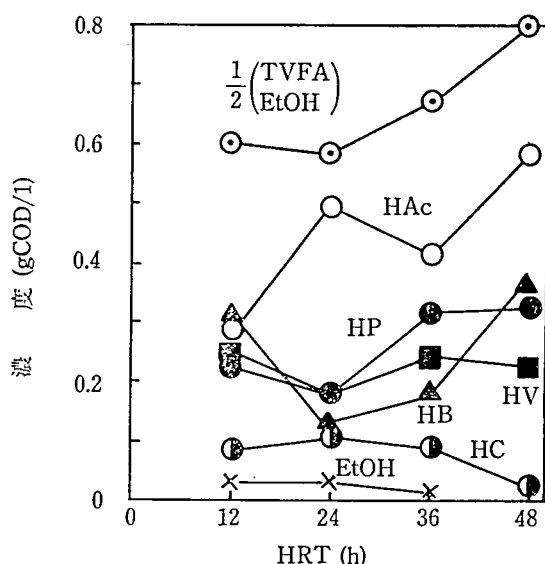


図 7 個々の揮発酸とアルコールの生成に及ぼす HRT の影響 (連続実験)

しては、酸槽の HRT を 24(h) 程度あるいはそれ以上にする方が好ましいと言える。

次に、ミルクの分解を成分別に調べた結果を表 4 に示した。炭水化物（全量が溶解しており、その内約 90% が乳糖）は非常に分解され易く約 95% が分解しており、蛋白質は約 60% の分解を示した。一方、脂質の分解は約 30% と低く、ミルク基質においては脂質分解が酸生成反応の律速因子となる可能性があることを示している。

表 4 ミルクの成分別分解

HRT (h)	成 分 (mg/l)		
	炭 水 化 物 (as glucose)	蛋 白 質 (as albumin)	脂 質 (as COD)
Inf.	1680	320	2100
12	90 (95)	150 (53)	1410 (33)
24	95 (94)	150 (53)	1430 (32)
36	60 (96)	120 (63)	1520 (28)
48	65 (96)	115 (64)	1450 (31)

() は分解率を示す。

以上が代謝に関する特性であるが、混合液の顕微鏡観察によればいずれの HRT でも球菌（単球菌と双球菌）と短桿菌が多く見られた。また、HRT 12(h) の槽では全く観察されなかった連鎖状球菌が HRT 24(h) 以上の槽になると出現し始めた。

4.2 加水分解および増殖に関する動力学

前述した動力学定数を決定するためには、基質固形分の加水分解量 $[AF]$ 、基質溶解分 $[S]$ および消費量 $[AS]$ 等を知る必要がある。複合基質であるミルクの場合、これらの値を直接測定することはできないが、式 (5) の COD 収支から計算することができる。

表 5 連続実験における基質の加水分解と消費

HRT (h)	溶解性 COD (mg/l)				基 質 COD (mg/l)			
	Filtrate	ガス	^a 菌 体 [X]	Total	加水分解量 [ΔF]	^b 消 費 量 [ΔF + ΔS]	[ΔS]	[S]
Inf.	2200	—	—	2200 (=S ₀)	—	—	—	2200
12	1800	80	790	2670	470	2070	1600	600
24	1660	170	865	2695	495	2200	1705	495
36	1720	100	910	2730	530	2350	1820	380
48	1685	165	945	2795	595	2710	2115	85

a 菌体組成 (C₅H₇O₂N) に基づいて求めた菌体の COD 変換係数 (1.42 g COD/g VS) より計算した。

b TVFA, EtOH, ガス, 菌体の合計 COD

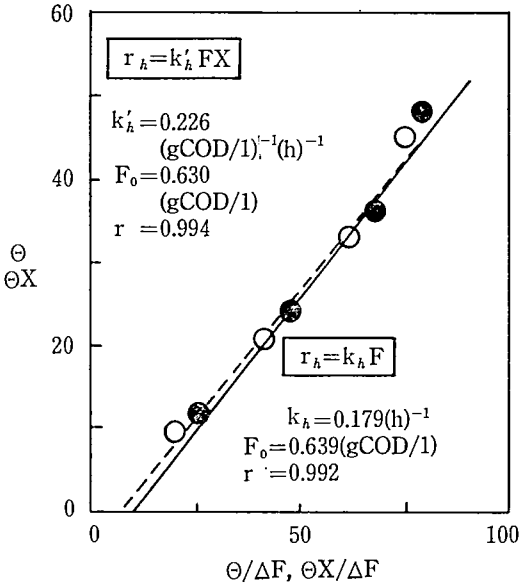


図 8 加水分解速度定数 $[k_h, k'_h]$ の計算 (連続実験)

この結果を連続実験については表 5, 回分実験については表 7 に示した。

(A) 連続実験

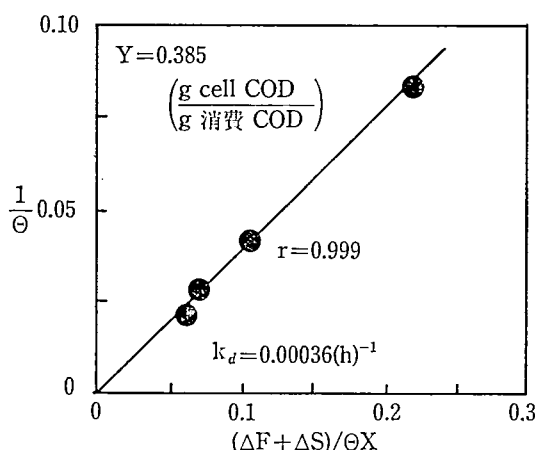
表 5 で求めた ΔF を式 (14)~(17) に代入して k_h および k'_h を計算する。式 (14) と (15) に代入した場合は k_h あるいは k'_h は一定値とならず適用できない。一方, 式 (16) と (17) の場合は図 8 に示したようにいずれの式にもよく適合しており, それぞれの直線の切片から k_h あるいは k'_h を計算できる。式 (16) すなわち $r_h = k_h F$ とした場合 $F_0 = 0.639$ (g COD/l), $k_h = 0.179$ (h)⁻¹ となり, 式 (17) すなわち $r_h = k'_h FX$ とした場合 $F_0 = 0.630$ (g COD/l), $k'_h = 0.226$ (g COD/l)⁻¹(h)⁻¹ となった。 F_0 の値は基質の種類によって異なるが, 本実験条件下でミルク基質の固形分の約 28% が生分解可能であることになる。

実験値が式 (16), (17) のいずれに対しても同様に適合しているのは, 菌体量の変化が

表 6 k_h , Y , k_d に関する他基質との比較

基 質	温 度 (°C)	k_h (h ⁻¹)	Y ($\frac{\text{g cell COD}}{\text{g 消費 COD}}$)	k_d (h ⁻¹)
活性汚泥 ⁷⁾	37	—	0.40	0.013
初沈汚泥 ¹⁾	35	0.125	0.48	0.018
ドッグフード ¹⁾	35	0.65	0.60	0.06
	25	0.25	0.60	0.06
ミルク ²⁾	20	0.179	0.385	0.00036

a) 本研究

図 9 菌体収率〔 Y 〕と死滅係数〔 k_d 〕の計算(連続実験)

小さかったことが主な原因と考えられる。これについては (C) 加水分解モデルにて論ずる。表 6 には、消化温度が異なるが、式 (12) で表現した場合の k_h に関して他基質との比較を示した。

次に、式 (19) を用いて菌体収率〔 Y 〕と死滅係数〔 k_d 〕を求めるために、表 5 から計算される $(\Delta F + \Delta S)/\Theta X$ と $1/\Theta$ の値をプロットしたのが図 9 である。回帰分析により $Y = 0.385$ (g cell COD/g 消費 COD), $k_d = 0.00036$ (h⁻¹) という結果を得た。 Y については消化温度 37°C についても求めてみたが、ほぼ同じ収率を得ている⁹⁾。他基質における Y との比較を示した表 6 を見ると、ミルク基質の場合は活性汚泥を基質とした場合と近い収率となっている。

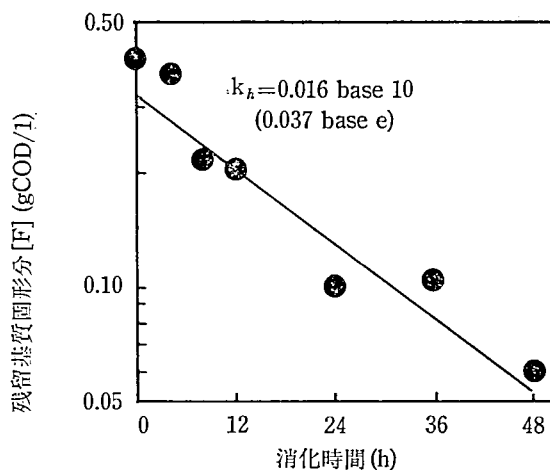
酸生成相の動力学モデル作成のために、式 (18) より求まる μ と表 5 の S との関係を Monod 式および Contois 式に当てはめてみたが、いずれも適合しなかった。これは、式 (2) からわかるように増殖制限基質の変化に消費 ($\mu X/Y$) と補給 (r_h) が同時進行していることが関係しているものと考えられる。また、代謝産物の比生成速度〔 π 〕は式 (4) の右辺第 2 項より $\pi = (1/Y - 1)\mu$ で表わされ、 $\pi = 1.6\mu$ となる。すなわち、代謝産物の生成は増殖連動型であることがわかる。菌体増殖に関する数式モデルについては、単純な Monod 式ではなく、たとえば基質中に最初から存在する溶解分と固形分の加水分解による溶解性基質の 2 成分を制限因子としたモデル検討する必要がある。

表 7 回分実験における基質の加水分解と消費

消化時間 (h)	溶 解 性 COD (mg/l)				基 質 COD (mg/l)	
	Filtrate	ガ ス	^a 菌 体 [X]	^c Total	加水分解量 [ΔF]	^b 消 費 量 [$\Delta F + \Delta S$]
0	2250	—	290	2250(=S ₀)	—	—
4	2260	30	290	2290	40	185
8	2265	40	425	2440	190	530
12	2130	60	550	2450	200	890
24	2050	145	650	2555	305	1385
36	1890	235	715	2550	300	1710
48	1800	335	750	2595	345	2040
72	1885	395	665	2655	405(=F ₀)	2345
120	1995	430	510	2645	395	2410

a, b 表 5 と同じである。

c Filtrate, ガス, 菌体の合計 COD から初期菌体 COD 290 (mg/l) を差し引いた。

図 10 加水分解速度定数 $[k_h]$ の計算 (回分実験)

(B) 回分実験

連続実験の結果を基に加水分解速度は式 (12) に従うものとする。表 7 で求めた加水分解量 $[\Delta F]$ より仮に $F_0 = 0.405$ (g COD/l) として $F (=F_0 - \Delta F)$ の値を計算し、式 (22) に従って片対数紙にプロットすると図 10 のようになる。回帰分析の結果、 $F_0 = 0.324$ (g COD/l), e を底として $k_h = 0.037$ (h^{-1}) という値となり、回分式反応槽で求めた k_h と連続式反応槽による k_h に差が出て来た。

(C) 加水分解モデル

菌体の増殖速度を Monod 式やその他の式で近似できなかったので酸生成相モデルを完成することはできないが、加水分解については次のようにまとめられる。

連続実験の結果から判断すると、加水分解速度は式 (12) あるいは (13) のいずれでも表現できた。これは、前述したように菌体量の変化が小さかったことと主な原因と考えら

れる。式 (13) においては、基質固形分の加水分解（可溶化）を行う酵素の量が菌体量に比例すると仮定してモデルを検討して来た。しかし、酸槽内の全ての細菌が同じ加水分解酵素を一樣に分泌するとは限らないので、菌体量と酵素量の関係は酵素活性そのものを測定しなければ正確には把握できない。従って、本実験の結果から r_h と X との関係を一義的にとらえるのは無理があるので、式 (13) の取り扱いを保留し、式 (12) により加水分解モデルを作成する。すなわち、加水分解速度は残留している生分解可能な基質固形分量に関して一次反応で表わされることになる。式 (12) を式 (1) に代入することにより次式を得る。

$$F = \frac{F_0}{1 + k_h \theta} \quad \dots\dots\dots (23)$$

ここで、先に求めた k_h を使って、連続式については上式 (23)、回分式については式 (21) により加水分解曲線を描くと図 11 のようになる。

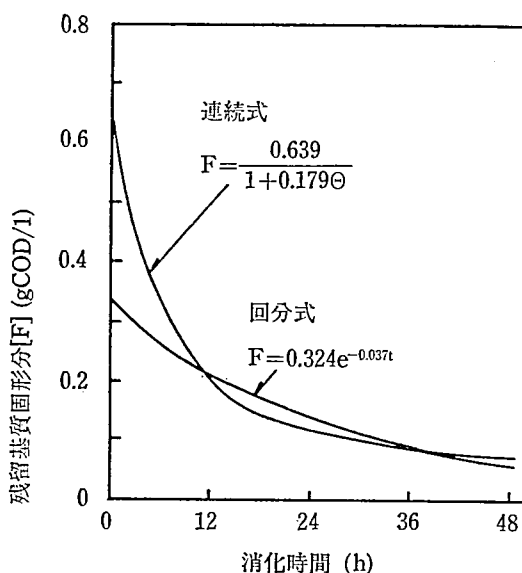


図 11 酸生成相における加水分解モデル

連続式と回分式で k_h に差がでてきたが、消化 12(h) 以後では同様な加水分解曲線となった。また、消化初期（連続式においてはごく短い HRT の系）には基質溶解分が菌体増殖に対して十分存在すると考えられるので、実際には図 11 の加水分解の開始にある程度の遅滞が生ずるものと推測される。

5. ま と め

本実験から得られた知見を要約すると以下のようになる。

- (1) 20℃ 消化では 37℃ 消化に比べて酸生成の立ち遅れが生ずるが、消化時間（あるいは滞留時間）を若干長くすることにより同程度の酸生成反応が進行する。
- (2) ミルクを基質とした回分実験によれば、消化時間が最大で 48 時間程度までは代謝産物の生成と菌体増殖が連動しているが、それ以上では増殖非連動型となる。

- (3) HRT が 12(h) から 24(h) になると急激に H_2 経由の CH_4 生成が盛んになり、 H_2 利用メタン生成菌が増殖しているものと考えられる。従って、HRT が 24(h) 程度であれば、酸生成相においても interspecies H_2 transfer を通した酸生成菌とメタン生成菌の共生関係が維持されよう。
- (4) ミルク中の炭水化物は HRT 12(h) の系で 95% 以上が分解されるが、脂質の分解は HRT 48(h) の系でも約 30% と低い。
- (5) 加水分解速度は残留している生分解可能な基質固形分量に関して一次反応で表わすことができる。
- (6) 本実験により得られた動力学定数は次のとおりである。

連続式反応槽：加水分解速度定数 $k_h=0.179\text{ (h}^{-1}\text{)}$

菌体収率 $Y=0.385\text{ (g cell COD/g 消費 COD)}$

死滅係数 $k_d=0.00036\text{ (h}^{-1}\text{)}$

回分式反応槽：加水分解速度定数 $k_h=0.037\text{ (h}^{-1}\text{)}$ (e を底とする)

本実験では動力学モデルを完成することはできなかったが、槽の設計に動力学定数は不可欠であり、今後さらに数式モデル確立のための検討が必要である。そのためには、基質・固形分の加水分解に関与する酵素量を測定し、活性酵素量と菌体量あるいは加水分解速度との関係を明らかにする必要がある。

6. おわりに

本研究を進めるに当たり有益な御指導を頂いた東京大学工学部都市工学科松尾友矩教授に深く感謝の意を表します。なお、本研究の一部は“衛生工学研究論文集, Vol. 20”にて発表したものであることを付記しておく。

参考文献

- 1) Eastman, J. A., "Solubilization of Organic Carbon During the Acid Phase of Anaerobic Digestion." Ph. D Thesis, University of Washington, Seattle (1977)
- 2) Ghosh, S., Conrad, J. R., and Klass, D. L., "Anaerobic Acidogenesis of Wastewater Sludge." J. of WPCF, Vol. 47, No. 1, 30 (1975)
- 3) Massey, M. L. and Pohland, F. G., "Phase Separation of Anaerobic Stabilization by Kinetic Control." J. of WPCF, 2204 (1978)
- 4) 田中修三, "二相嫌気性消化における基質分解特性および上向流汚床の応用." 東京大学学位論文 (1983)
- 5) Bryant, M. P., Wolin, E. A. and Wolfe, R. S., "*Methanobacillus omelianskii*, a Symbiotic Association of Two Species of Bacteria." Archiv für Mikrobiologie, Vol. 59, 20 (1967)
- 6) Shea, T. G., et al., "Kinetics of Hydrogen Assimilation in the Methane Fermentation." Water Research, Vol. 2, 833 (1968)
- 7) Ghosh, S., et al., "Anaerobic Acidogenesis of Wastewater Sludge." J. of WPCF, Vol. 47, 30 (1975)