

低温域における嫌気性酸発酵の動力学的特性 に及ぼす温度の影響

車 基詰*・李 玉友**・野池達也***

温度条件を15°Cから30°Cまで変化させ、溶解性デンプンを基質として用いた連続実験を行い、低温域における嫌気性酸発酵の動力学的特性に及ぼす温度の影響について検討を行った。同一温度条件における比基質消費速度はContois型動力学式によって表現された。温度の上昇に伴い、最大比基質消費速度(ν_{max})は増大したのに対して、飽和定数(k_{sv})および増殖収率(Y)は低下した。動力学定数の温度依存性は $\nu_{max} > k_{sv} > Y$ の順にあることが分かった。また、20°Cから30°Cの温度域で温度依存性に対するシミュレーションモデルが得られた。

Keywords : anaerobic digestion, acidogenesis, temperature dependence, low temperature, simulation model

1. はじめに

近年、省資源・省エネルギー型廃水、汚泥処理法の開発の重要性が認識され、メタン生成の機能を有する嫌気性消化法は、唯一のエネルギー回収型生物学的処理法として国の内外で注目されるようになった。一般に、嫌気性消化プロセスは酸生成およびメタン生成の二相によって構成され、各相を担う細菌群の緊密な相互作用により有機物は最終的にメタンおよび二酸化炭素に転換される。嫌気性消化法の効率化のためには、各物質代謝過程に関与する細菌群の代謝および分布特性を詳細に解明し、最適操作条件を把握する必要がある。嫌気性消化プロセスの酸生成相およびメタン生成相の物質代謝特性や微生物の増殖特性に関する研究は数多く行われてきているが、その大部分は中温および高温域におけるメタン発酵の研究に集中しており^{1),2)}、また酸発酵に関する研究が報告されているが³⁾、低温域における酸発酵特性に関する研究は少ない。一般に、生物反応においては温度が10°C上昇することに伴い反応速度が2~3倍になると言われているが、低温域、中温域、高温域における微生物はそれぞれの温度特性を持ち、各温度域における微生物の反応速度に及ぼす温度の影響は差違があると考えられる。一方、最近の工場廃水の嫌気性消化プロセスにおいては二相嫌気性消化法の適用例も見られるようになり、無加温の酸発酵槽も数多く設置されている。また、無加温嫌気性消化法を採用している処理場では冬期において消化槽内の温度が10°C近くまで降下することが報告されている⁴⁾。従って、無加温嫌気性消化の効率化のためには低温域における酸発酵特性を解明することが必要で

ある。著者らは、酸発酵条件における物質分解特性および細菌群の分布特性に及ぼす温度と滞留時間の影響について報告している⁵⁾。しかし、嫌気性酸発酵に及ぼす温度の影響を動力学的見地から検討した研究はほとんどないのが現状である。そこで、本研究は溶解性デンプンを基質として用い、温度を30°Cから15°Cまでに変化させ、水理学的滞留時間(hydraulic retention time, 以下HRTとする。)を0.25日~2日の条件で連続実験を行い、酸発酵における細菌の増殖と基質消費相互間の関係に及ぼす温度と滞留時間の影響について動力学的検討を行ったものである。

2. 実験装置および方法

(1) 実験装置

実験装置は、Fig.1に示すように、基質をマイクロチューブポンプを用いて連続的に投入し、発生する消化ガスを循環させることによって反応槽内を攪拌し、同時に生ずる吸引力によって消化混合液の引き抜きを連続的に行う嫌氣的ケモスタット型反応槽である。また、温度をコントロールするために反応槽を恒温槽内に設置した。発生したガスは、水中に溶け込まないように硫酸酸性の飽和食塩水($H_2SO_4 \cdot 2\% \text{ Vol}$)による水上置換法を用いて収集した。基質である溶解性デンプンは室温の条件下では変質しやすいので、冷却装置を用いて基質タンク内の温度を $\pm 1^\circ\text{C}$ に保持した。

(2) 種汚泥

本実験に用いた種汚泥は、仙塩流域下水処理場の下水汚泥消化槽より採取した消化汚泥に溶解性デンプンを半連続的に投入して、35°CおよびHRT 20日の条件で3ヶ月以上馴養したものである。

(3) 投入基質

本実験に用いた基質は、Table 1に示すように、溶解性デンプンに無機栄養塩を配合した合成基質である。

* 学生会員 工修 東北大学大学院博士課程

(〒980 仙台市荒巻字青葉)

** 正会員 工博 香港大学 土木及結構工程系

*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

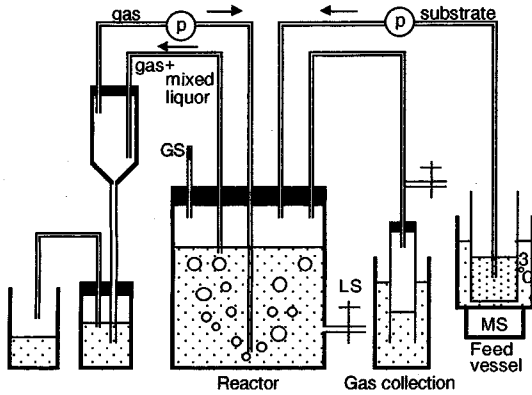


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus; (GS) gas sampling port, (LS) mixed liquor port, (MS) magnetic stirrer

Table 1 Composition of the synthetic substrate

Components	Concentration (mg/L)
Starch	10500
NH ₄ HCO ₃	4740
NaHCO ₃	2000
K ₂ HPO ₄	125
MgCl ₂ ·6H ₂ O	100
MnSO ₄ ·5H ₂ O	15
CuSO ₄ ·5H ₂ O	5
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.125
FeSO ₄ ·7H ₂ O	25

Table 2 Experimental conditions

HRT (=SRT) (d)	0.25 . 0.5 . 1 . 2
Temperature (°C)	30 → 25 → 20 → 15

有機物の濃度は炭水化物のグルコース換算濃度として 9 040 mg/L である。

(4) 実験条件

実験条件は、Table 2 に示すように、実験温度を 30°C から 15°C まで、5°C 間隔に実験温度を変化させ、各実験温度に対して 0.25 日、0.5 日、1 日および 2 日の HRT を設定した。温度に対する馴養を図るために、温度変化は 1 週間に 1°C ずつ徐々に下げ、各実験温度に対して約 2 ヶ月間の連続運転を行った。また、各 HRT の実験に対して定常状態に達したことを確認するために、ガス生成量、ガス組成、揮発性脂肪酸 (volatile fatty acid, 以下 VFA とする) 濃度および COD 濃度などに関して、1 週間に 1~2 回の測定を行った。測定値の変動範囲が平均値の 10% 以下になった時、定常状態が達成されたと思なし、定常状態における 5 回測定の実験データを平均して各実験温度での代表値とした。

(5) 分析方法

各溶解性水質項目は混合液を 10 000 rpm で 10 分間遠

心分離し、その上澄液について分析したものである。

MLVSS は下水試験方法、炭水化物はアンスロン—硫酸法によりそれぞれ測定した。

3. 動力学式の展開

完全混合連続一過流反応槽内微生物の増殖と基質の消費に対する物質収支は次式で示される^{6),7)}。

$$V(dX/dt) = V(dX/dt)_c - Q \cdot X \dots\dots\dots (1)$$

$$V(dS_e/dt) = Q \cdot S_i - Q \cdot S_e - V(dS_e/dt)_c \dots\dots\dots (2)$$

ここで、Q: 流入および流出水量 (L/d), X: 槽内および流出微生物濃度 (mg/L), V: 槽容量 (L), S_i: 流入基質濃度 (mg/L), S_e: 流出基質濃度 (mg/L), (dX/dt): 槽内微生物濃度の時間変化 (mg/L/d), (dS_e/dt): 槽内基質濃度の時間変化 (mg/L/d), (dX/dt)_c: 槽内微生物の増殖速度 (mg/L/d), (dS_e/dt)_c: 基質除去速度 (mg/L/d) である。定常状態下では (dX/dt) および (dS_e/dt) は 0 となるので、式 (1) および式 (2) は、それぞれ式 (3) および式 (4) に書き換えられる。

$$(dX/dt)_c = (Q \cdot X) / V = X / HRT \dots\dots\dots (3)$$

$$(dS_e/dt)_c = Q(S_i - S_e) / V = (S_i - S_e) / HRT \dots\dots\dots (4)$$

ここで、HRT: 水理学的滞留時間 (d) である。式 (3) および式 (4) より、微生物の比増殖速度 (μ) と比基質消費速度 (ν) は次式で示される。

$$\mu = (dX/dt)_c \cdot (1/X) = (Q \cdot X) / V \cdot (1/X) = (X/HRT) \cdot (1/X) = 1/HRT = 1/SRT \dots\dots\dots (5)$$

$$\nu = (dS_e/dt)_c \cdot (1/X) = \{Q(S_i - S_e) / V\} \cdot (1/X) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、SRT (solids retention time): 固形物滞留時間 (d) である。また、槽内微生物の増殖と基質除去との関係は実験的に次式で示される。

$$(dX/dt)_c \cdot (1/X) = Y \cdot (dS_e/dt)_c \cdot (1/X) - k_d \dots\dots\dots (7)$$

$$\mu = (Y \cdot \nu) - k_d = 1/SRT \dots\dots\dots (8)$$

ここで、Y: 収率係数 (mg MLVSS/mg Glucose), k_d: 自己分解係数 (1/d) である。式 (8) で、ν が最大比基質消費速度 (ν_{max}) になると、式 (8) は次式で示される。

$$\mu_{max} = (Y \cdot \nu_{max}) - k_d \dots\dots\dots (9)$$

一般に、制限基質濃度と比基質消費速度との関係は Monod 型動力学式によって表現できるとされているが、本研究において得られたデータは Monod 型動力学式には適合せず、Contois 型動力学式によく適合した。したがって、比基質消費速度は次式で示される。

$$\text{比基質消費速度} (\nu) = \frac{\nu_{max} \cdot (S/X)}{K_s \nu + (S/X)} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、ν_{max}: 最大比基質消費速度 (1/d), K_sν: 飽和定数である。式 (10) を式 (6) に代入すると、式 (11)

Table 3 Experimental results under steady state condition

Temp. (°C)	HRT (d)	Carbohydrate ^{a)}		MLVSS (mg/L)
		Eff. Conc. (mg/L)	Removal (%)	
30	0.25	910	90	1693
	0.5	651	93	1790
	1	205	98	1905
	2	189	98	2050
25	0.25	1760	81	1532
	0.5	1122	88	1605
	1	374	96	1806
	2	350	96	1850
20	0.25	2390	74	1450
	0.5	1400	85	1503
	1	450	95	1706
	2	382	96	1891
15	0.25	6695	26	476
	0.5	5400	40	950
	1	2893	68	969
	2	838	91	1152

a) as Glucose

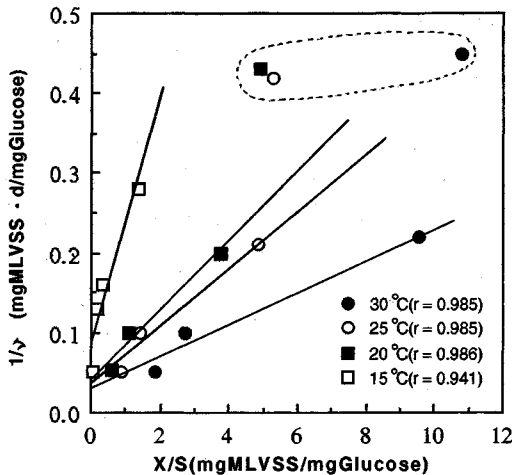


Fig.2 The relationship between 1/v and X/S

が得られる。

$$\frac{Q \cdot (S_i - S_e)}{V \cdot X} = \frac{\nu_{max} \cdot (S/X)}{K_s \nu + (S/X)} \dots (11)$$

式(11)を式(8)に代入すると、式(12)が得られる。

$$1/SRT = Y \cdot \frac{\nu_{max} \cdot (S/X)}{K_s \nu + (S/X)} - k_d \dots (12)$$

細菌はSRTが最大比増殖速度より短い場合、増殖できずに系外へ排出される。この臨界滞留時間が最小菌体滞留時間 (SRT_{min}) であり、次式で示される。

$$SRT_{min} = 1/\mu_{max} \dots (13)$$

比増殖速度と共に、細菌の増殖速度を表すのにしばしば使われる値は倍加時間で、細菌が2倍になるのに要する最小時間 (G_{min}) である。この値は次式により求められる。

$$G_{min} = \ln 2 \cdot (1/\mu_{max}) \dots (14)$$

Table 4 Kinetic constants for contois model

Temp. (°C)	μ_{max} (1/d)	ν_{max} (*)	$K_s \nu$	Y ^{**}	k_d (1/d)	SRT _{min} (d)	G _{min} (d)
30	7.2	35.4	0.71	0.206	0.054	0.14	0.09
25	6.5	31.0	1.15	0.210	0.019	0.15	0.10
20	5.4	25.1	1.08	0.219	0.083	0.18	0.12
15	2.5	12.2	1.84	0.211	0.094	0.40	0.28

(*) mgGlucose/mgMLVSS/d

(**) mgMLVSS/mgGlucose

4. 結果および考察

Table 3は本研究において温度およびHRTを変化させて得られた定常状態におけるデータの平均値を示す。

溶解性デンプンの分解は温度とHRTの影響を受け、同一HRT条件で温度が低いほど、かつ同一温度条件でHRTが短いほど分解率は低下した。また、MLVSS濃度は同一HRT条件で温度が高いほど高く、同一温度条件ではHRTが長いほど高いことが分かった。以上の実験データを用い、細菌の増殖と基質消費相互間の関係に及ぼす温度およびHRTの影響について動力学検討を行う。

(1) 動力学式の適合性

式(10)をLineweaver-Burk型に変換させると式(15)になる。

$$1/\nu = (K_s \nu / \nu_{max}) \cdot (X/S) + (1/\nu_{max}) \dots (15)$$

式(15)を用いて実験データを解析したプロットはFig.2に示す。Fig.2における点線内のデータは帰帰分析から外した。なぜなら、これらの条件ではHRTが長く、酸発酵が十分進行し、また細菌群の分布特性に及ぼす温度と滞留時間の影響を検討した結果⁵⁾、主に水素資化性のメタン生成細菌の関与割合が大きいため、酸生成相の動力学解析には適さないからである。Fig.2より明らかのように、各温度条件において高い相関係数が得られている。この結果は式(15)がよく適用できることを示唆している。これより同一温度条件の溶解性デンプンの酸発酵における基質濃度と比基質消費速度との関係はContois型動力学式によってよく表現できることが分かる。

(2) 動力学定数の決定

式(9)、式(12)および式(15)より各温度条件での動力学定数を求め、その結果をTable 4に示した。反応槽内の酸生成細菌の最大比増殖速度 (μ_{max}) および最大比基質消費速度 (ν_{max}) は15°C~30°Cの温度範囲においてそれぞれ7.2~2.5 (1/d)、35.4~12.2 (1/d)の範囲にあり、温度が低いほど減少した。SRT_{min}は全温度範囲で0.14~0.40 (d)であり、温度が高いほど減少した。これはZoetemeyer et al.⁸⁾が報告した酸生成細菌

の SRT_{min} とほぼ一致している。一方、メタン生成反応における SRT_{min} は $30^{\circ}C$ から $15^{\circ}C$ の温度条件で 4.98 ~ 6.82 (d) にあることが報告されている⁹⁾。これは酸生成細菌の増殖速度がメタン生成細菌のそれより大きいことを示唆している。本研究より得られた酸生成細菌の増殖収率 (Y) は全温度範囲で 0.206 ~ 0.219 であるが、Lin et al.⁹⁾ は本研究と同じ温度条件におけるメタン生成細菌の増殖収率は 0.022 ~ 0.056 にあることを報告している。一方、李ら¹⁰⁾ は本研究と同一の基質を用いて好気性消化実験を行った結果、 $15^{\circ}C \sim 30^{\circ}C$ の温度条件における増殖収率は 0.220 ~ 0.383 にあることを報告している。また、橋本ら¹¹⁾ は $15^{\circ}C \sim 30^{\circ}C$ の温度条件で活性汚泥法における好気性細菌の増殖収率は 0.428 ~ 0.474 にあることを報告した。これらの結果より $15^{\circ}C \sim 30^{\circ}C$ の温度範囲における酸生成細菌の増殖収率はメタン生成細菌のそれより約 1 オーダーほど大きい、好気性細菌の増殖収率よりは小さいことが分かる。また、本研究から得られた酸生成細菌の増殖収率は温度にあまり影響されないものの、 $20^{\circ}C \sim 30^{\circ}C$ の温度範囲では温度の低下とともに若干低くなる傾向が見られた。

(3) 動力学定数の温度依存性

消化槽内での反応は微生物の生物化学反応を利用する方法であるため、温度の影響を受ける。生物処理プロセスにおける温度の影響については、多くの関係式が実験的に求められているが、一般に次式のような Streeter-Phelps 式で示される¹²⁾。

$$K_{T2}/K_{T1} = \theta^{(T2-T1)} = \theta^{AT} \dots \dots \dots (16)$$

ここで、 K_{T1} : 温度 T_1 における反応速度定数、 K_{T2} : 温度 T_2 における反応速度定数、 θ : 温度係数である。

Lawrence et al.¹³⁾ は $K_s \nu$ と温度との関係は Arrhenius 式で表現されることを、また Novak¹⁴⁾ は ν_{max} および $K_s \nu$ と温度は指数関係にあることをそれぞれ報告している。したがって、本研究では ν_{max} および $K_s \nu$ に対する温度の影響を式 (16) で表わすと、式 (17) と式 (18) が得られる。

$$(\nu_{max})_{T2} = (\nu_{max})_{T1} \cdot \theta \nu^{AT} \dots \dots \dots (17)$$

$$(K_s \nu)_{T2} = (K_s \nu)_{T1} \cdot \theta_k^{AT} \dots \dots \dots (18)$$

ここで、 $(\nu_{max})_{T2}$: 温度 T_2 における ν_{max} 、 $(\nu_{max})_{T1}$: 温度 T_1 における ν_{max} 、 $(K_s \nu)_{T2}$: 温度 T_2 における $K_s \nu$ 、 $(K_s \nu)_{T1}$: 温度 T_1 における $K_s \nu$ 、 $\theta \nu$: ν_{max} に対する温度係数、 θ_k : $K_s \nu$ に対する温度係数である。増殖収率 (Y) は全温度領域において、温度変化に対する影響をあまり受けないので、 Y と温度に関する関係式で表現することができないと報告されているが^{15), 16)}、本研究では特定の温度範囲において Y 値の変化傾向が見られている。そこで、特定の温度範囲 ($20^{\circ}C \sim 30^{\circ}C$) における Y と温度との関係を関係式で表現できると仮定し、Streeter-

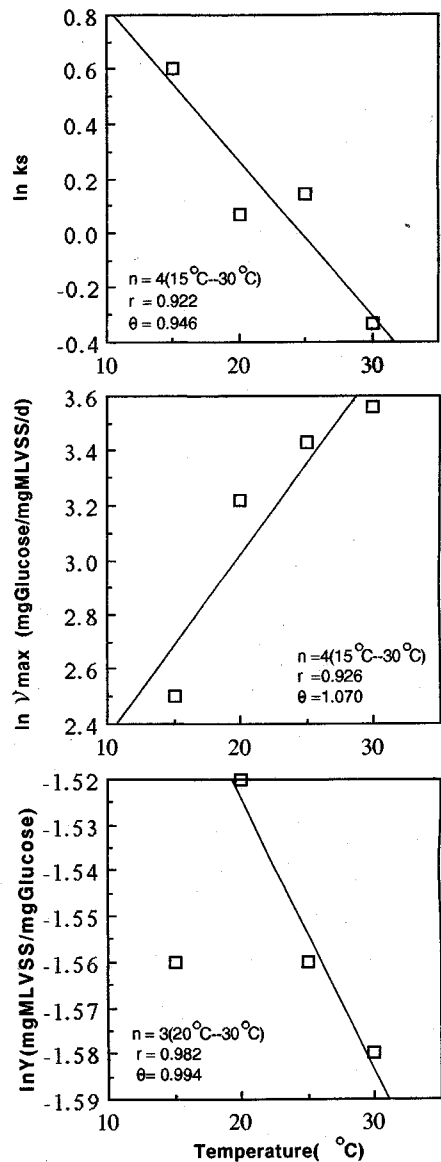


Fig.3 The temperature dependent characteristics of the kinetic constants

Phelps 式で表現すれば、次式になる。

$$(Y)_{T2} = (Y)_{T1} \cdot \theta_Y^{AT} \dots \dots \dots (19)$$

ここで、 $(Y)_{T2}$: 温度 T_2 における Y 、 $(Y)_{T1}$: 温度 T_1 における Y 、 θ_Y : 増殖収率に対する温度係数である。本研究より得られた各温度における ν_{max} 、 $K_s \nu$ 、 Y のデータを $20^{\circ}C$ を基準温度として式 (17)、式 (18) および式 (19) で解析した結果を Fig.3 に示す。Fig.3 より $15^{\circ}C \sim 30^{\circ}C$ の温度範囲における ν_{max} および $K_s \nu$ と温度との関係は Streeter-Phelps 式で表現できることが分かる。また、 Y と温度との関係は特定の温度範囲 ($20^{\circ}C \sim 30^{\circ}C$) で Streeter-Phelps 式に従うことも明らかである。

Table 5 Characteristics of sensitivity models

Sub.	ΔT ($^{\circ}C$)	Model ^{a)} No.	General Formulation ($\Theta \nu_k$)	S=0 S= ∞		Reference
Starch	5 (30 \rightarrow 25)	IVb	$\Theta = [1.14\{(1.15+S/X) \cdot (0.71+S/X)^{-1}\}]^{0.2}$	1.130	1.027	This study (Acidogenesis)
	5 (25 \rightarrow 20)	III ^{b)}	$\Theta = [1.24\{(1.08+S/X) \cdot (1.15+S/X)^{-1}\}]^{0.2}$	1.044	1.044	
	5 (20 \rightarrow 15)	IVb	$\Theta = [2.06\{(1.84+S/X) \cdot (1.08+S/X)^{-1}\}]^{0.2}$	1.285	1.156	
	10 (30 \rightarrow 20)	IVb	$\Theta = [1.41\{(1.08+S/X) \cdot (0.71+S/X)^{-1}\}]^{0.1}$	1.079	1.034	
	10 (25 \rightarrow 15)	IVb	$\Theta = [2.54\{(1.84+S/X) \cdot (1.15+S/X)^{-1}\}]^{0.1}$	1.151	1.098	
15 (30 \rightarrow 15)	IVb	$\Theta = [2.90\{(1.84+S/X) \cdot (0.71+S/X)^{-1}\}]^{0.07}$	1.152	1.074		
HAC+HPR +HBU	5 (30 \rightarrow 25)	IVb	$\Theta = [1.11\{(233+S) \cdot (214+S)^{-1}\}]^{0.2}$	1.039	1.021	Lin ⁹⁾
	15 (35 \rightarrow 20)	IVb	$\Theta = [2.93\{(419+S) \cdot (166+S)^{-1}\}]^{0.07}$	1.143	1.075	(Methanogenesis)

a) Benedict et al.¹⁷⁾ が提案した温度敏感係数モデル
 b) $K_s^1 \nu$ (1.08) および $K_s^2 \nu$ (1.15) のデータはほぼ同一値として見なした。

Fig.3 のプロットより求めた温度係数 θ_ν , θ_k , θ_Y はそれぞれ 1.070, 0.946, 0.944 であった。 θ 値が 1.0 に近くなれば反応速度に及ぼす温度の影響はほとんど受けないうことにより、本研究における動力学的定数の温度依存性は $\nu_{max} > K_s \nu > Y$ の順にあることが分かる。 Lin et al.⁹⁾ によって報告されたメタン生成反応における動力学的定数の温度依存性は、本研究における温度依存性と同一の順である。これは酸生成細菌およびメタン生成細菌は、類似の温度依存性を有することを示唆している。また、本研究より得られた各温度係数 θ_ν , θ_k , θ_Y を式 (17), 式 (18) および式 (19) にそれぞれ代入し、20 $^{\circ}C$ を基準温度とすると、式 (20), 式 (21) および式 (22) がそれぞれ得られる。

$$(\nu_{max})_T = 25.1(1.070)^{(T-20)} \quad (15^{\circ}C \leq T \leq 30^{\circ}C) \dots\dots\dots (20)$$

$$(K_s \nu)_T = 1.08(0.946)^{(T-20)} \quad (15^{\circ}C \leq T \leq 30^{\circ}C) \dots\dots\dots (21)$$

$$(Y)_T = 0.219(0.994)^{(T-20)} \quad (20^{\circ}C \leq T \leq 30^{\circ}C) \dots\dots\dots (22)$$

(4) 温度変化に対する基質消費速度の敏感度

温度 T における基質消費速度は Contois 式で表わすと、式 (23) になる。

$$\nu_T = \frac{(\nu_{max})_T \cdot (S/X)}{(K_s \nu)_T + (S/X)} \dots\dots\dots (23)$$

温度が T_1 から T_2 まで $\Delta T^{\circ}C$ 変動することに伴う基質消費速度の変化を解析するために、式 (23) を用いて同一 (S/X) 条件における温度 T_1 と T_2 での基質消費速度の比を求めると、式 (24) が得られる。

$$\frac{\nu_{T2}}{\nu_{T1}} = \frac{(\nu_{max})_{T2} \cdot (K_s \nu)_{T1} + (S/X)}{(\nu_{max})_{T1} \cdot (K_s \nu)_{T2} + (S/X)} \dots\dots\dots (24)$$

$\Theta \nu_k^{\Delta T} = \nu_{T2} / \nu_{T1}$ と仮定して、式 (24) を Streeter-Phelps 式の形式に書き表わすと、式 (25) になる。

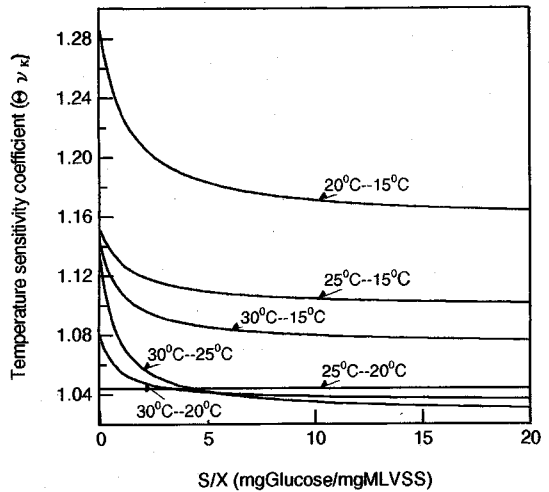


Fig.4 The temperature sensitivity response model

$$\Theta \nu_k = \left(\frac{\nu_{max}^2 \cdot K_s^1 \nu + S/X}{\nu_{max} \cdot K_s^2 \nu + S/X} \right)^{1/\Delta T} \dots\dots\dots (25)$$

ここで、 $\Theta \nu_k$: ΔT の温度変化に対する基質消費速度の敏感係数、 ν_{max}^1 と ν_{max}^2 : 温度 T_1, T_2 における ν_{max} の値、 $K_s^1 \nu$ と $K_s^2 \nu$: 温度 T_1, T_2 における $K_s \nu$ の値、 ΔT : $T_2 - T_1$ ($^{\circ}C$), $T_2 > T_1$ である。式 (25) と Streeter-Phelps 式を比較すると、基質消費速度の温度敏感係数 ($\Theta \nu_k$) は ν_{max} と $K_s \nu$ に対する温度敏感係数とも言える。しかし、式 (25) によれば、温度敏感係数 ($\Theta \nu_k$) の値は S/X および ΔT によって変化する。Table 5 に式 (25) により得られた温度敏感係数 ($\Theta \nu_k$) を示す。ここで、Benedict et al.¹⁷⁾ が提案した III および IV b の温度敏感モデルに従うことにした。また、Fig.4 に本研究の温度敏感係数 ($\Theta \nu_k$) と S/X との関係を示す。

基質消費速度の温度敏感係数 ($\Theta \nu_k$) は S/X の増大に伴い低下する。同一 S/X において 5 $^{\circ}C$ の温度変化における基質消費速度の温度敏感係数 ($\Theta \nu_k$) は、20 $^{\circ}C \rightarrow$ 15 $^{\circ}C$ の温度変化に対する $\Theta \nu_k$ 値が 30 $^{\circ}C \rightarrow$ 25 $^{\circ}C$ および

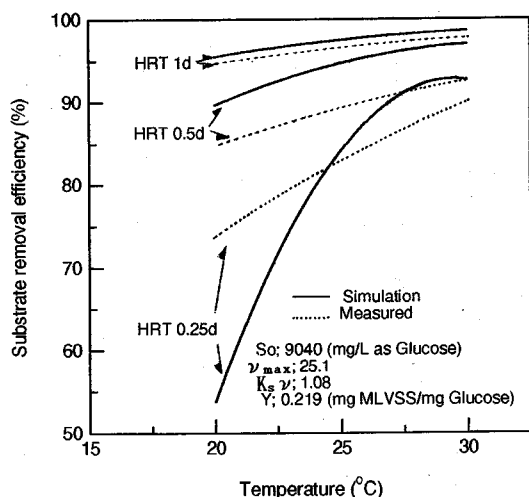


Fig.5 An application of temperature model equation to predict process efficiency at several values of HRTs (reference temperature=20°C)

25°C→20°Cの温度変化に対する θ_{vk} 値より高い値を示している。また、10°Cの温度変化における基質消費速度の温度敏感係数(θ_{vk})は、25°C→15°Cの温度変化に対する θ_{vk} 値が30°C→20°Cの温度変化に対するそれより高い値を示している。これらの結果は同じ幅の温度変化による基質消費速度への影響は温度が低ければ低いほど大きくなることを示唆している。すなわち、酸発酵において、同じ温度変化幅に対する基質消費速度の敏感度は消化温度が低ければ低いほど大きい。一方、Lin et al.⁹⁾はメタン生成相における基質消費速度の温度敏感係数を求めている。それによると、30°C→25°Cの温度変化に対するメタン生成相の θ_{vk} 値は基質濃度の増大に伴い、本研究で得られた酸生成相の同一温度変化の θ_{vk} 値より著しく低くなる。このことより、30°C→25°Cの温度変化に対しては、S/Xの増大に伴いメタン生成相より酸生成相の基質消費速度に及ぼす温度の影響が大きくなることが分かる。

(5) 動力学定数によるシミュレーション

本研究において動力学モデルおよび動力学定数が決定されたので、それらを用いて基質分解率のシミュレーションを行うことができる。式(20)、式(21)および式(22)を式(12)に代入すると、温度変化に対する反応槽内の滞留時間と基質濃度との関係は式(26)になる。(ここで、各温度条件におけるKd値は無視される程度の低い値であるので、式(26)には示さなかった。)

$$1/SRT = \frac{(5.50) \cdot (1.064)^{(T-20)} \cdot (S/X)}{(1.08) \cdot (0.946)^{(T-20)} + (S/X)} \dots\dots\dots(26)$$

酸発酵における各HRT条件で温度変化に対する炭水化物の分解率の実測値と式(26)のシミュレーションモデルにより求めた炭水化物の分解率をFig.5に示す。

HRT 2日および1日における分解率の実測値と予測値は各温度条件ではほぼ一致しているが、HRT 0.5日以下の条件では温度の低下に伴い分解率の実測値と予測値は一致しなくなる。これは温度が低く、HRTが短いほど動力学定数を用いたシミュレーションモデルは適合しないことを示唆している。一方、酸発酵においては低い温度条件で、HRTを長くすることにより高い分解率を図ることができる。HRTが0.25日より短い場合、温度の低下に伴い分解率は急激に低下するが、HRTが0.5日以上の場合、予測値は90%、実測値は85%以上の分解率が得られた。これは20°Cの温度条件で高い分解率を得るためには酸発酵におけるHTRは0.5日以上の滞留時間が必要とされることを示唆している。

5. 結 論

溶解性デンプンを基質として、15°C～30°Cにおける連続実験を行い、酸発酵における細菌と基質消費相互間の関係に及ぼす温度と滞留時間の影響について動力学的検討を行った結果、次のような知見が得られた。

- (1) 溶解性デンプンの分解は、温度とHRTの影響を受け、同一HRT条件で温度が低いほど、あるいは同一温度条件でHRTが短いほど分解率は低下した。
- (2) 同一温度条件における制限基質濃度と比基質消費速度との関係はContoisモデルによってよく表現できた。
- (3) 15°C～30°Cの温度範囲における酸生成細菌の増殖収率(Y)は0.206～0.219であり、メタン生成細菌の増殖収率より大きい、好気性細菌の増殖収率より小さい値を示した。
- (4) 動力学定数の温度依存性はStreeter-Phelps式によって表現され、温度係数の値は $\theta_{\nu_{max}} > \theta_Y > \theta_{K_s}$ の順であり、 ν_{max} の温度依存性はもっとも大きい。
- (5) 同じ幅の温度変化による基質消費速度への影響は温度が低いほど大きい。また、30°C→25°Cの温度変化に対しては、S/Xの増大に伴いメタン生成相より酸生成相の基質消費速度に及ぼす温度の影響が大きくなる。
- (6) 20°Cの温度条件で85%以上の溶解性デンプンの分解率を得るためには、0.5日以上のHRTが必要とされる。20°C～30°Cの温度条件で得られた温度依存モデルは次式の通りである。

$$1/SRT = \frac{(5.50) \cdot (1.064)^{(T-20)} \cdot (S/X)}{(1.08) \cdot (0.946)^{(T-20)} + (S/X)}$$

謝 辞：本研究を行うに当り、実験の面でご尽力いただいた東北大学工学部土木工学科学生(当時)三宅 将君に心より感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Mackie, R.I. and Bryant, M.P. : Metabolic activity of fatty acid oxidizing bacteria and CO₂ to methanogenesis in cattle waste at 40°C and 60°C, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol.41, pp.1363~1373, 1981.
- 2) Chen, M. : Difference in sporogenous bacterial populations in thermophilic (55°C) and mesophilic (35°C) anaerobic sewage digestion, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol.53, pp.2414~2419, 1987.
- 3) Boelhouwer, C. : Aspects of the two-stage anaerobic digestion of organic waste, special Lecture in Tohoku Univ, Sendai, Japan, 1979.
- 4) 秋田湾・雄物川流域下水道事業維持管理年報 (臨海処理区) : 秋田県中央流域下水道事務所, 1990年.
- 5) 車 基喆・李 玉友・野池達也 : 低温域における酸発酵特性に及ぼす温度と HRT の影響, 衛生工学研究論文集, Vol. 28, pp. 29~37, 1992年.
- 6) 山根恒夫 : 生物反応工学, 産業図書, 1991年.
- 7) 合葉修一・永井史郎 : 生物化学工学—反応速度論, 化学技術社, 1988年.
- 8) Zoetemeyer, R.J. et al. : Influence of temperature on the anaerobic acidification of glucose in a mixed culture forming part of a two-stage digestion process, *Water Research*, Vol.16, p.313, 1982.
- 9) Lin, C.Y. et al. : Temperature characteristics of the methanogenesis process in anaerobic digestion, *Water Science and Technology*, Vol.19, Rio., pp.299~310, 1987.
- 10) 李 宅淳ほか : 好気性消化法の有機物除去機構に及ぼす消化温度の影響に関する研究, *水質汚濁研究*, Vol. 9, No. 3, pp.169~178, 1986年.
- 11) 橋本 奨・鳥山明夫 : 活性汚泥法の浄化機構に及ぼす水温の影響に関する動力学的研究 (第2報)—Monod型動力学式による回分実験の水温影響解析, *下水道協会誌*, Vol.14, No.161, pp. 32, 1977年.
- 12) Benedict, A.H. and Carlson, D.A. : The real nature of the Streeter-Phelps temperature coefficient, *Water and Sewage Works*, Vol.117, pp.54~57, 1970.
- 13) Lawrence, A.W. and McCarty, P.L. : Kinetics of methane fermentation in anaerobic treatment, *Journal of Water Pollution Control Federation* Vol.41, No.2, R 1~R 7, 1969.
- 14) Novak, J.T. : Temperature-substrate interactions in biological treatment, *Journal of Water Pollution Control Federation*, Vol.46, No.8, pp.1984~1995, 1974.
- 15) Topiwala, H. and Sinclair, C.G. : Temperature relationship in continuous culture, *Biotechnology and bioengineering*, Vol.13, pp.795~813, 1971.
- 16) Benefield, L.D. et al. : The stimulation of filamentous microorganisms in activated sludge by high oxygen concentration, *Water Air, and Soil pollution*, Vol.5, p.113, 1975.
- 17) Benedict, A.H. and Carlson, D.A. : Rational assessment of the Streeter-phelps temperature coefficient, *Journal of Water Pollution Control Federation*, Vol.46, No.7, pp.1993~1999, 1974.

(1992. 2. 6 受付)

THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE KINETIC CHARACTERISTICS OF ANAEROBIC ACIDOGENESIS IN THE LOW TEMPERATURE RANGE

Gi Cheol CHA, Yu-You LI and Tatsuya NOIKE

The effect of temperature on the kinetic characteristics of acidogenesis in anaerobic digestion was investigated using anaerobic chemostat-type reactor to which soluble starch was fed as a substrate. The digestion temperature ranged from 15°C to 30°C. It became clear that the relationship between the substrate concentration and specific substrate utilization rate at same temperature is suitably expressed by the Contois kinetic model. The maximum specific substrate utilization rate (ν_{max}) increased, as the temperature increased, while the saturation constant ($k_s\nu$) and the growth yield (Y) decreased. The temperature characteristics of the kinetic constants are expressed using exponential equations. The extent of temperature dependence of the kinetic constants decrease in the order of $\nu_{max} > Y > k_s\nu$. The simulation model to express the temperature characteristics of the acidogenesis is obtained in the temperature range from 20°C to 30°C.

SAT/UNSAT

(SATURATED / UNSATURATED ANALYSIS PROGRAM)

適用例

- ダムや堤体の外水位の上昇・
下降や 降雨に伴う地下水
解析
- トンネル掘削等による地下水
への影響解析
- 矢板や連続壁による水の回
り込みや止水効果の評価

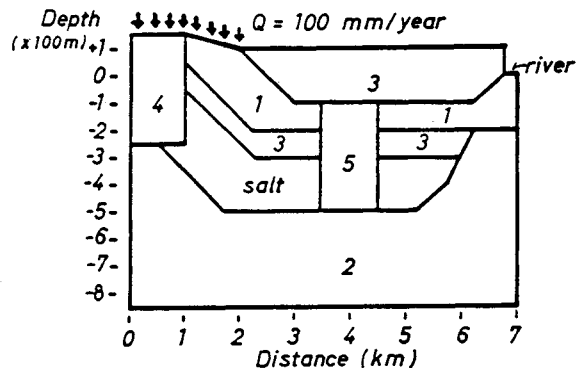


図1 放射性廃棄物処理場モデル

1: Sandstone 2: Sandstone 3: Shale 4: Limestone
5: Rubble zone Salt: Unpermeable

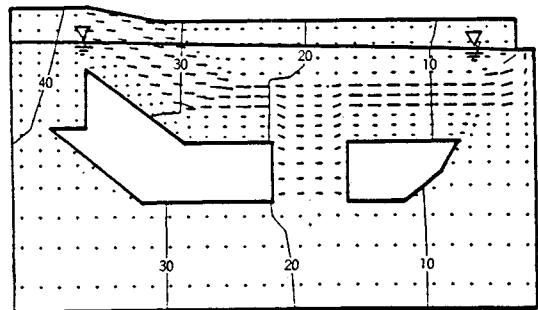


図2 放射性廃棄物処理場モデルの定常浸透流

EWS版 新発売!!

グラフィック機能に優れ、しかもコストパフォーマンスの高い
エンジニアリング・ワークステーション(EWS)上で、ご利用
いただけます。

NEWS, SUN, HP 等に対応。

あの地下水解析ソフトがさらに機能充実!

UNISSF_{ユニセフ(V-2)}

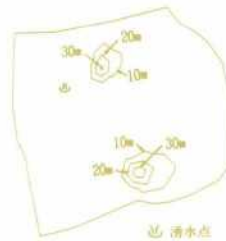
スピーディな同定・安価な解析



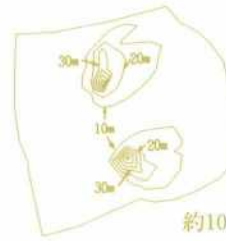
初期状態の地下水流



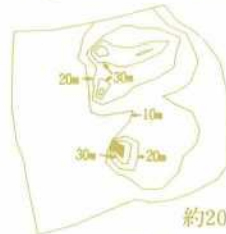
トンネル掘削開始直後



約4日後



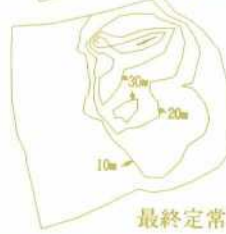
約10日後



約20日後



約30日後



最終定常状態

特長 ○有限要素法による準3次元解析を中心とした地下水の流れのトータルシステムです。

○観測水位と計算水位より、非線形最小二乗法を用いて帯水層定数の同定が可能です。(逆解析手法)

○建設・土木工事(掘削・ディープウェルその他)の解析に対応する多くの機能を備えています。

○メッシュ・ジェネレータにより、モデル(要素分割)作成の手間を軽減できます。

○図化処理プログラムにより、結果の確認が容易に行えます。

適応機種: SUN, NEWS, HP,
IBM 30XX, FACOM-Mシリーズ 他

このシステムは、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。

IPA 情報処理振興事業協会

株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

問合せ先
〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当: 岩崎
(03) 3665-9741 本社窓口: 菅原