

(19) メタン菌固着生物膜の酢酸除去速度に及ぼす温度の影響

THE EFFECT OF TEMPERATURE ON ACETATE REMOVAL RATES
WITHIN A METHANOGEN ATTACHED BIOFILM

榊 原 豊*, 湯 沢 恩*, 黒 田 正 和*
Yutaka SAKAKIBARA*, Megumu YUZAWA* and Masao KURODA*

ABSTRACT; The effect of temperature on acetate removal rates within a methanogen attached biofilm reactor was studied theoretically and experimentally. A mathematical biofilm model was developed considering the dependencies of substrate diffusion and decomposition rates on temperature, furthermore the relations between removal rates and the non-dimensional parameters which specified treatment characteristics were also examined. Isothermal experiments on mesophilic acetate treatments were carried out, and the non-dimensional parameters, i.e. biofilm property(Ms) and operation parameter (Pes), were obtained. Then, non-isothermal experiments were executed, and the variations of the acetate removal rates with temperature were examined and analyzed by using the present model.

The following results were obtained.

- (1) Treatment characteristics of acetate were evaluated accurately in a range of 15~37°C by using the normalized biofilm property(Ms), operation parameter(Pes) and the activation energy(ΔE) of substrate decomposition rate.
- (2) The effect of temperature on acetate removal rates differed with organic loading rates, but the activation energy(ΔE) was regarded as a constant value of 12.1kcal/mol.
- (3) Acetate was converted to methane at a yield of 0.91 mol-CH₄/mol-Ace except when the temperature was less than approximately 10°C.

KEYWORDS; Biofilm reactor, Biofilm model, Diffusion, Methanogenesis, Acetate

1. まえがき

近年、嫌気性(メタン発酵)生物膜処理法が活性汚泥法の代替法として注目され、種々の廃水に対する適応性あるいは操作条件などの処理性能に関する検討が行われている。¹⁾²⁾⁴⁾⁶⁾⁷⁾

嫌気性処理における有機物分解は、酸生成過程とメタン生成過程からなる逐次反応とみなすことができ、³⁾⁴⁾処理性能は各過程の有機物除去速度に依存する。よって、合理的な処理性能の評価を行うためには、各過程の有機物除去速度の検討が必要である。また、有機物除去速度は生物付着量の増加につれ膜内の物質拡散速度に影響され、⁸⁾除去速度の検討に際しては膜内の拡散現象に対する定量的な評価も必要である。^{9)~12)}さらに、有機物除去速度は処理温度に大きく影響されることから、^{5)~7)}各過程の除去速度に対する温度の影響を解析することも重要である。

しかしながら、嫌気性生物膜法に関するこれまでの研究の多くは種々の操作条件における全過程の総括的な処理速度を検討したもので、各過程の有機物除去速度と拡散速度との関係及びこれらの関係と処理温度との関係を検討した研究はあまりみられない。著者らは先に、嫌気性生物膜法の処理特性に関する基礎的研究として、中温域(37°C)におけるメタン菌固着膜の酢酸除去速度と膜内の拡散速度について解析し、処理特性の検討を行った。^{10)~12)}

よって、本研究は、先の生物膜モデル¹⁰⁾¹¹⁾¹³⁾を展開し、メタン菌固着膜の酢酸除去速度及び膜内の拡散速度に及ぼす処理温度の影響について理論的及び実験的検討を行った。

* 群馬大学工学部建設工学科 (Dept. of Civil Eng., Gunma University.)

2. 生物膜処理特性に対する温度の影響

2.1 基礎式

完全混合型の生物膜槽を考え、生物膜における有機物の分解に対する有機物拡散速度及び温度 T の影響について検討する。定常状態における生物膜内の有機物(基質)の濃度 C_s は、先の生物膜モデルに従って、次式のように表す。^{10) 11) 13)}

$$D_s \frac{d^2 C_s}{d y^2} - \frac{\hat{\nu}_s \cdot \rho \cdot \alpha_s \cdot C_s}{K_s + C_s} = 0 \quad (1)$$

ここに、 D_s は生物膜内の基質の有効拡散係数、 $\hat{\nu}_s$ 、 ρ 、 α_s 、 K_s はそれぞれ最大比基質分解速度、生物膜密度、生物膜の微生物比率及び飽和定数である。

Eq.(1)の境界条件は基材表面($y=0$)と膜表面($Y=L$)で次式のように表されるとする。

$$D_s \frac{d C_s}{d y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (2), \quad D_s \frac{d C_s}{d y} \Big|_{y=L} = \frac{C_{sf} - C_s^*}{a \cdot \bar{\theta}} \quad (3)$$

ここに a は生物膜の比表面積、 $\bar{\theta}$ はHRT、 C_{sf} は基質の流入濃度、 C_s^* は基質の膜表面濃度である。

Eq.(1)中の $\hat{\nu}_s$ はArrhenius式で表され、また D_s はWilke & Changの推算式¹⁴⁾により求められるとする。

$$\hat{\nu}_s = A_0 \cdot e^{\frac{-\Delta E}{RT}} \quad (4), \quad D_s = k_0 \cdot \frac{T}{\mu} \quad (5)$$

ここに μ は粘性係数、 A_0 及び k_0 は定数、 ΔE は活性化エネルギー、 R は気体定数である。

Eqs.(1)–(3)は、膜特性値 M_s と操作的因子 P_{es} 、 B_{sf} の無次元変数により、次式のように変換される。

$$\frac{d^2 \omega_s}{d Y^2} - \frac{M_s^2 \cdot \omega_s}{1 + B_{sf} \cdot \omega_s} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d \omega_s}{d Y} \Big|_{Y=0} = 0 \quad (7), \quad \frac{d \omega_s}{d Y} \Big|_{Y=1} = P_{es} \cdot (1 - \omega_s^*) \quad (8)$$

ここに、

$$\omega_s = \frac{C_s}{C_{sf}}, \quad \omega_s^* = \frac{C_s^*}{C_{sf}}, \quad Y = \frac{y}{L} \quad (9)$$

$$M_s = L \left(\frac{\hat{\nu}_s \cdot \rho \cdot \alpha_s}{K_s \cdot D_s} \right)^{1/2} \quad (10)$$

$$B_{sf} = \frac{C_{sf}}{K_s}, \quad P_{es} = \frac{L}{a \cdot \bar{\theta} \cdot D_s} \quad (11)$$

Eq.(10)の M_s 及びEq.(11)の P_{es} は、ある基準温度 T_0 における膜特性値 $M_s|T_0$ 、 $P_{es}|T_0$ を用い、またEqs.(4), (5)に従って、次式のように表されるとする。

$$M_s = M_s|T_0 \cdot e^{\frac{\Delta E(T-T_0)}{2RTT_0}} \cdot \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu|T_0} \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$P_{es} = P_{es}|T_0 \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{\mu}{\mu|T_0} \quad (13)$$

処理槽における除去率 E_s 及び単位面積当たりの除去速度 N_{sflux} は、流出する基質の無次元濃度 $B_s = C_s^*/K_s$ を用いて以下のように表す。

$$E_s = \frac{B_{sf} - B_s}{B_{sf}} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 N_{sf} \text{flux} &= \frac{B_{sf}}{M_s} \cdot \frac{d \omega_s}{d Y} \Big|_{Y=1} \cdot (N_s)_{\max} \\
 &= \frac{B_s}{M_s} \cdot \frac{d f_s}{d Y} \Big|_{Y=1} \cdot (N_s)_{\max}
 \end{aligned} \quad (15)$$

ここに、 $f_s = \omega_s / \omega_s^*$ 、 $(N_s)_{\max}$ は温度 T における最大基質除去速度で、基準温度 T_0 における最大除去速度 $(N_s)_{\max}|_{T_0}$ 及び Eq. (4) を用いて次式のように表されるとする。

$$(N_s)_{\max} = \hat{\nu}_s \cdot \rho \cdot \alpha_s \cdot L = e^{\frac{\Delta E(T-T_0)}{RTT_0}} \cdot (N_s)_{\max}|_{T_0} \quad (16)$$

2.2 流入負荷と温度依存性

基質除去速度 $N_{sf} \text{flux}$ は Eqs. (6)–(8) 及び Eq. (15) に示したように、膜特性値 M_s と流入負荷 (B_{sf} , P_{es}) によって変化する。Fig.1 は、流入濃度 B_{sf} をパラメーターとして Eqs. (15), (16) より得られる無次元化除去速度 $N_s^* = N_{sf} \text{flux} / (N_s)_{\max}|_{T_0}$ と処理温度 T との関係を求め、その結果を Arrhenius plot と同様に示したものである。ここで基準温度 T_0 は 37°C とし、 $M_s|_{T_0} = 4$, $P_{es}|_{T_0} = 0.2$ ($B_{sf} = 50$ で除去率 E_s が略 90 % となる操作条件) とした。また、飽和定数 K_s は各処理温度で近似的に等しいとした。図からわかるように種々の温度における N_s^* は B_{sf} の増加につれ増加するが、 B_{sf} が小さい条件では温度低下に対する N_s^* の減少率は小さくなっている。 B_{sf} が小さい条件では流出する基質濃度は低く、 N_s^* の減少率は膜内の拡散抵抗に影響される。 M_s が大きくなると N_s^* の減少率はさらに小さくなり、逆に M_s が小さい系では大きくなる。 B_{sf} が 100 あるいはそれ以上の条件では、 N_s^* の対数値と T の逆数とはほぼ直線関係にあり、また流入濃度によらず一定値となっている。これは B_{sf} が大きい条件では流出濃度 B_s が 1 に比べて非常に大きく、拡散抵抗の影響が小さくなるためである。Fig.2 は、Fig.1 で示した計算結果をもとに次式に従って N_s^* の温度変化率と ΔE との比 ϕ を求め、種々の流入濃度における温度依存性を比較したものである。

$$\phi = \frac{RT^2}{\Delta E} \cdot \frac{d \ln(N_s^*)}{d T} \quad (17)$$

図からわかるように B_{sf} が 100 以上の高負荷条件では ϕ は略 1 であるが、 B_{sf} が小さくなると温度の増加につれ 1 から減少している。よって低負荷条件ほど N_s^* の温度依存性は小さいが、 N_s^* は負荷の増加につれ、また温度の低下につれ活性化エネルギー ΔE に対応した温度依存性をとることがわかる。

3. 実験装置及び方法

3.1 実験装置

Fig.3 は実験装置の概略図である。処理槽は先の報告と同じく完全混合型の嫌気性充填ろ床で、^{10) 12)} 液容積は 2.7 L、充填基材の比表面積 a は $0.792(1/\text{cm})$ である。基質溶液及び無機塩溶液の供給はマイクロチューブポンプにより連続的に行い、両液は処理槽の直前で混合させた。槽内処理水はリサイクルポンプによって 5~7 L/min で循環させ、処理水の排出は溢流管を通し行った。処

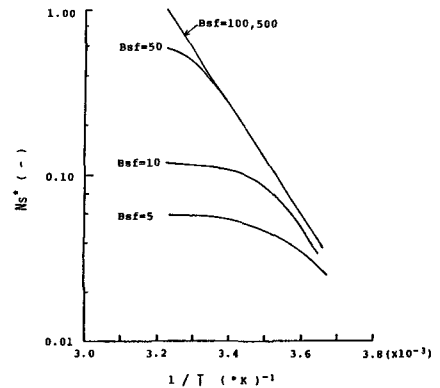


Fig.1 Variations of normalized substrate removal rates with absolute temperature at various influent concentrations ($M_s|_{37} = 4$, $P_{es}|_{37} = 0.2$)

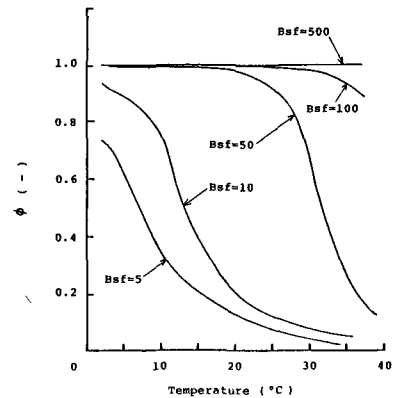


Fig.2 Normalized relation of the removal rate dependency on temperature ($M_s|_{37} = 4$, $P_{es}|_{37} = 0.2$)

理槽は任意温度に設定可能な水槽内に浸せし、発生ガスは飽和食塩水を封液としたガスホルダーにより水上置換法で捕集、計量した。

3.2 実験方法

(A) 投入基質

供給下水は酢酸を単一有機物源とする合成下水を用いた。なお、酢酸は水酸化カルシウムで中和して用いた。使用した無機塩溶液の組成は、Table 1 に示した。

(B) 等温処理実験

処理温度を $37 \pm 1^\circ\text{C}$ に設定し、酢酸の流入負荷を種々変化させ、定常状態における流出酢酸濃度及び酢酸除去速度を測定した。

(C) 非等温処理実験

実験は、流入酢酸濃度及び HRT を一定として、処理温度を 37°C から 10°C 前後まで略 $1\sim 2^\circ\text{C}/\text{d}$ の昇降温速度で順次変化させて行い、種々の処理温度における流出酢酸濃度、酢酸除去速度、全ガス発生速度及びメタン発生速度を測定した。流入酢酸濃度は $387\sim 1600\text{mg-C}/\ell$ の間で変化させ、HRT は略 10h とした。なお、等温及び非等温処理実験において、ガス組成は TCD ガスクロマトグラフィーにより分析し、処理水の溶解性有機炭素 (DOC) 濃度は TN・TC ガスクロマトグラフィーにより測定した。また処理水の酢酸濃度は細管式電気泳動分析器及び FID ガスクロマトグラフィーにより測定した。

Table 1 Composition of inorganic solution

$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	343 (mg/l)
K_2HPO_4	11 (mg/l)
KH_2PO_4	13 (mg/l)
NaCl	6 (mg/l)
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	25 (mg/l)
CaCl_2	7 (mg/l)
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	12 (mg/l)

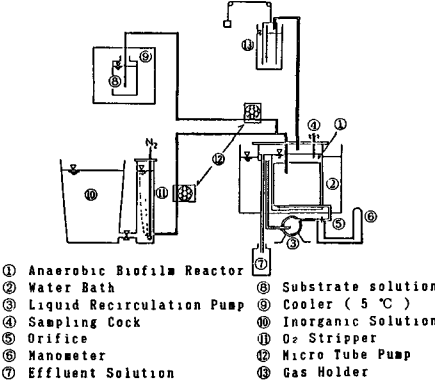


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

4. 実験結果及び考察

4.1 等温処理における膜特性値と操作的因子

Fig. 4 は、 37°C 等温処理における定常状態の流出酢酸濃度と酢酸除去速度との関係を示したものである。酢酸除去速度 N_{sflux} は、次式のように Monod 型の速度式で表され、実測値の逆数プロット (Lineweaver - Burk plot) によって飽和定数 $K_s^* = 97\text{mg-C}/\ell$ 、最大酢酸除去速度 $(N_s)_{\text{max}}|_{37} = 5.37\text{mg-C}/\text{cm}^2\text{d}$ が得られた。(図中の実線)

$$N_{\text{sflux}} = \frac{(N_s)_{\text{max}} \cdot C_s^*}{K_s^* + C_s^*} \quad (18)$$

K_s^* 及び $(N_s)_{\text{max}}$ の値から、膜特性値 M_s 及び操作的因子 P_{es} が解析され、

$$M_s|_{37} = 5.6, \quad P_{\text{es}}|_{37} = 0.0932 (a \cdot \bar{\theta})^{-1}$$

が得られた。¹⁰⁾⁻¹²⁾ここに、 $a: 1/\text{cm}$, $\bar{\theta}: \text{d}$

4.2 非等温条件における酢酸処理

Fig. 5 は、非等温処理結果の 1 例で、処理温度を 37°C から 10°C 前後まで順次低下させた場合の全ガス発生速度、メタン発生速度及び流出酢酸濃度の経日変化を示したものである。ここで、図中の Run-A は流入酢酸濃度 $C_{\text{sf}} = 1170\text{mg-C}/\ell$ 、 $\text{HRT} = 9.45\text{h}$ 、Run-B は $C_{\text{sf}} = 387\text{mg-C}/\ell$ 、 $\text{HRT} = 10.9\text{h}$ で操作した。槽内処理水の pH は $6.8\sim 7.8$ に制御し、処理水の DOC 濃度は酢酸の炭素濃度とはほぼ等しかった。また、処理水の酸化還元電位は $-200\sim -300\text{mV}$ ($\text{Ag}|\text{AgCl}|\text{KCl}(3.3\text{M})$ Electrode) に保持されていたが、

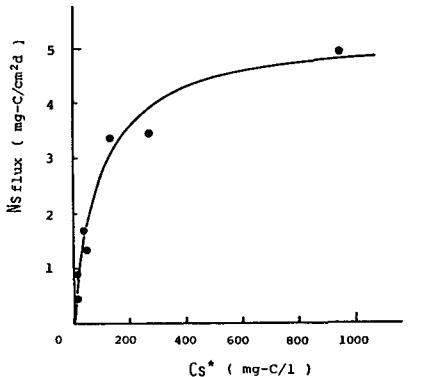


Fig. 4 Relation between acetate removal rate and effluent acetate concentration at 37°C

処理温度 10℃ 前後の条件では ORP は上昇する傾向がみられた。

図からわかるように、処理温度の低下につれ全ガス及びメタンガス発生速度は減少し、一方流出酢酸濃度は増加した。Run-A と Run-B の処理結果を比較すると、Run-A の条件では全操作を通じて流出酢酸濃度は高く、全ガス及びメタンガス発生速度は大きかった。また、メタンあるいは全ガス発生速度の温度低下に対する減少割合は、高負荷条件ほど大きかった。

4.3 酢酸除去速度とメタン発生速度

Fig.6 は非等温処理における酢酸除去速度とメタン発生速度との関係を示したものである。10℃ 前後の処理条件ではメタン発生量は低下する傾向がみられたが (図中の黒マル)、それ以上の温度域ではメタン発生速度は酢酸除去速度とほぼ線形関係にあった。図中の直線の勾配からメタン転化率を求めると 0.91 mol-CH₄/mol-Ace が得られ、37℃ 等温処理における定常状態の転化率とはほぼ一致した。^{10) 12)}

10℃ 前後の処理条件におけるメタン転化率の減少については ORP 等の環境因子も含め今後さらに検討する必要がある。

4.4 活性化エネルギー

Fig.7 は、種々の流入濃度における無次元化除去速度 N_s^{*} と処理温度との関係を示したものである。ここで、N_s^{*} は酢酸除去速度を 37℃ の最大酢酸除去速度 (N_s)_{max} | 37 で除して求めた。

流入濃度 C_{sf} が 1170 mg-C/l 以上の条件では、N_s^{*} は基質濃度に関係なくほぼ等しく、また N_s^{*} の対数値と絶対温度の逆数は直線関係 (図中の実線) にあり、この直線関係は 37℃ で N_s^{*} = 1 (図中の黒マル) となった。しかしながら、処理温度が 10℃ 以下になると、N_s^{*} はこの直線の値よりかなり小さくなる (C_{sf} = 387 mg-C/l の条件で N_s^{*} は 略 0.04 前後) 傾向がみられた。

直線の勾配から活性化エネルギーを求めると、ΔE = 12.1 kcal/mol が得られた。Eq. (16) を次式で近似し、温度係数 θ を求めると、

$$(N_s)_{max} = \theta^{T-T_0} \cdot (N_s)_{max}|_{T_0} \quad (19)$$

θ¹⁰ = 2.0 が得られ、Huser ら¹⁵⁾ が報告する Methanothrix soehngenii の θ¹⁰ = 2.05 と一致した。著者らは先に 37℃ 等温処理における酢酸除去特性は Methanothrix の特性とほぼ一致することを明らかにしているが、^{10) 12)} 本研究

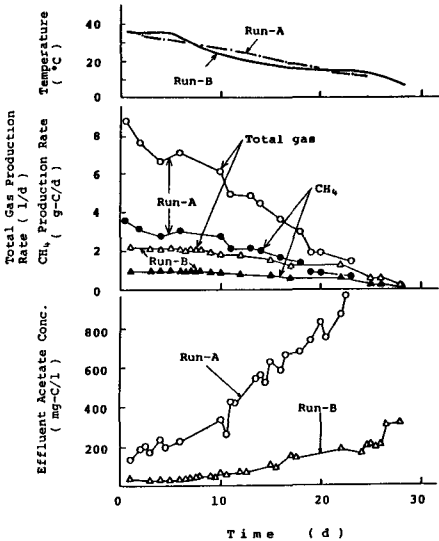


Fig.5 Total gas production rate, methane production rate and effluent acetate concentration in non-isothermal condition

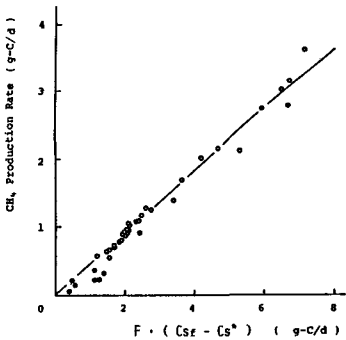


Fig.6 Relation between methane production rate and acetate removal rate (F : Flow rate)

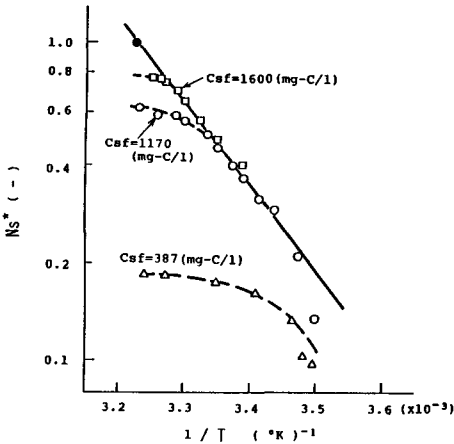


Fig.7 Relations between normalized acetate removal rate and absolute temperature

においても同様の結果が得られた。

5. 処理特性のシミュレーション

種々の処理条件におけるメタン菌固着膜槽の酢酸除去速度、流出酢酸濃度及び除去率は、Eqs.(6)–(16)より理論的に計算することができる。

Fig.8は、種々の負荷条件における酢酸除去速度の計算値と実測値とを対比させ示したものである。ここで、Eq.(11)の K_s は各処理温度で近似的に等しいとし、37°Cにおける $16\text{mg-C}/\ell^{10/12}$ を用い、またEq.(16)の ΔE は 12.1kcal/mol 、Eqs.(12)、(13)の $M_s|T_0$ 、 $P_{es}|T_0$ は37°Cにおける値とした。図からわかるように、10°C前後の処理温度で実測値は計算値よりかなり小さい値となっているが、15~37°Cの温度範囲で両者はよく一致した。除去率 E_s (Fig.9)、流出濃度 B_s (Fig.10)に対しても同様に、略15~37°Cの温度範囲でよく一致したが、10°C前後では実測値と計算値の差は大きくなった。

嫌気性消化処理では、処理温度が極めて低くなると処理速度は急激に低下することが知られており、⁵⁾⁶⁾10°C前後及びそれ以下の処理条件については今後さらに検討が必要である。

6. まとめ

中温メタン菌固着膜槽の酢酸除去速度に及ぼす処理温度の影響について理論及び実験的検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) 膜特性値 M_s 、操作的因子 P_{es} 及び活性化エネルギーを解析することによって、略15~37°Cの処理特性を推算することができる。
- (2) メタン菌固着膜の酢酸除去速度は処理温度の低下につれ減少し、最大除去速度の活性化エネルギーは略 12.1kcal/mol であった。
- (3) 酢酸からメタンへの転化率は略 $0.91\text{mol-CH}_4/\text{mol-Ace}$ が得られ、10°C前後の低温域を除いてほぼ一定値とみなすことができる。

10°C前後の酢酸除去速度及びメタン発生速度は温度低下につれ急激に低下する傾向がみられ、低温域における処理特性についてはORP等の環境因子も含めさらに検討が必要である。

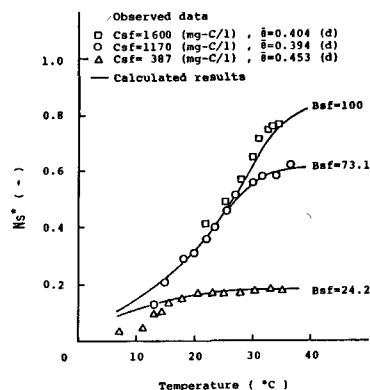


Fig.8 Comparisons of calculated and observed results of normalized acetate removal rates at various treatment temperatures

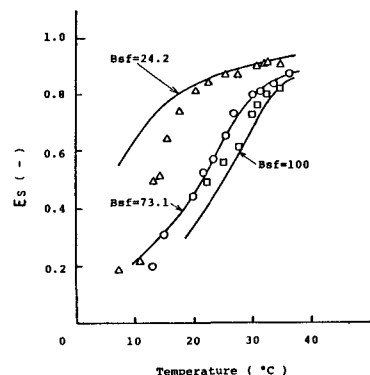


Fig.9 Comparisons of calculated and observed results of acetate removal efficiencies at various treatment temperatures

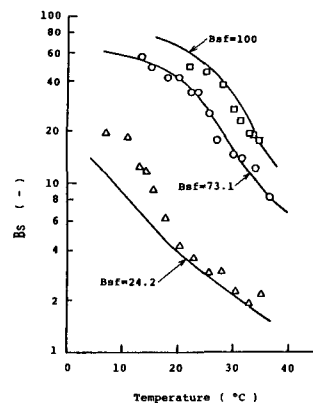


Fig.10 Comparisons of calculated and observed results of normalized effluent acetate concentrations at various treatment temperatures

謝 辞：本研究の一部は文部省科学研究費(奨励研究(A), No.59750448)の補助により行われた。記して、謝意を表する。また、本研究の遂行にあたって実験に協力をいただいた当時群馬大学学生、吉岡順一氏(現：安中市役所)に感謝の意を表します。

[使用記号]

a	: Specific area of biofilm (1/L)
Cs	: Substrate concentration in biofilm (M/L ³)
Csf	: Influent concentration of substrate (M/L ³)
Cs*	: Substrate concentration at biofilm surface (M/L ³)
Ds	: Effective diffusion coefficient of substrate in biofilm (L ² /T)
F	: Flow rate (L ³ /T)
Ks	: Half-velocity coefficient of substrate decomposition (M/L ³)
Ks*	: Half-velocity coefficient of biofilm based on bulk substrate concentration (M/L ³)
L	: Biofilm thickness (L)
Nsflux	: Substrate removal rate of biofilm (M/L ² T)
(Ns)max	: Maximum removal rate of substrate (M/L ² T)
R	: Gas constant (cal/mol ^o K)
T0, T	: Reference temperature and temperature (°C or °K)
y	: Distance from support surface (L)
ΔE	: Activation energy (cal/mol)
ρ	: Density of biofilm (M/L ³)
μ	: Viscosity (M/LT)
ψs	: Maximum specific rate of substrate decomposition (1/T)
θ	: Hydraulic retention time (T)

Dimensionless parameters

Bsf, Bs	: Bsf= Csf/Ks , Bs= Cs*/Ks
Es	: Removal efficiency of substrate
fs	: fs= ωs/ωs*
Ms	: Biofilm property (= L · (ψs · ρ · αs / Ks · Ds) ^{1/2})
Ns*	: Normalized substrate removal rate (= Nsflux / (Ns)max T0)
Pes	: Operation parameter (= L / a · θ · Ds)
Y	: Y= y/L
αs	: Mass fraction of microorganism in biofilm
ωs, ωs*	: ωs= Cs/Csf , ωs*= Cs*/Csf
⊙	: Temperature coefficient
φ	: Normalized removal rate dependency on temperature

$$(= \frac{RT^2}{\Delta E} \cdot \frac{d \ln(N_s^*)}{d T})$$

[参考文献]

- 1) Braun, R. and Huss, S. : Anaerobic Filter Treatment of Molasses Distillery slopes, Water Res., Vol.16, pp.1167-1171, 1982
- 2) Jewell, W.J. et al. : Municipal Waste water Treatment with the Anaerobic Attached Microbial Film Expanded Bed Process, Jour. WPCF, Vol.53, No.4, pp.482-490, 1981
- 3) 黒田正和・榊原豊: 畜産廃棄物の嫌気性消化処理に対する速度論的研究、土木学会論文報告集、Vol.342, pp.1-13, 1984
- 4) 黒田正和・湯沢恩・榊原豊: 嫌気性細菌固着ハニカム固定床による希薄有機性廃水処理、下水道協会誌、Vol.23, No.265, pp.31-37, 1986
- 5) Speece, R.E. and Jan A. Kem : The Effect of Short-term Temperature Variations on Methane Production, Jour.WPCF, Vol.42, No.11, pp.1990-1996, 1970
- 6) 稲森悠平・岡田光正・須藤隆一: 嫌気性処理プロセスを組み込んだ生活排水の処理、用水と廃水, Vol.24, 1017, 1982
- 7) 黒田正和・湯沢恩・榊原豊・高野栄一: 嫌気(メタン菌固着)生物膜槽と回転円板型好気生物膜槽とを組み合わせた2槽生物膜方式による下水処理(温度の影響): 土木学会年次学術講演会講演概要集、2-412、1984
- 8) Bungay, H.R. et al. : Microprobe Techniques for Determining Diffusivities and Respiration Rates in Microbial Slime Systems, Biotechnol.Bioeng., Vol.6, pp.765-772, 1968
- 9) Atkinson, B. and Daoud, I.S. : Diffusion Effects within Microbial Films, Trans. Instn Chem. Engrs, Vol.48, pp.245-254, 1970
- 10) 榊原豊・湯沢恩・黒田正和: メタン菌固着生物膜槽における酢酸除去速度の解析、土木学会論文報告集、第375号/II-6, 1986
- 11) 黒田正和・湯沢恩・富沢正彦・榊原豊: 生物付着量の増加に伴う速度パラメーターの変化—生物膜モデルからの検討、水質汚濁学会講演集、p.233, 1986
- 12) 榊原豊・湯沢恩・黒田正和: メタン菌固着膜槽の酢酸除去特性、水質汚濁学会講演集、p.253, 1986
- 13) 榊原豊・黒田正和: 有機物分解が逐次反応である場合の生物膜処理特性、衛生工学研究論文集、Vol.21, pp.133-143, 1985
- 14) Wilke, C.R. and P.Chang : Correlation of Diffusion Coefficients in Dilute Solutions : A.I.Ch.E., Vol.1, No.2, pp.264-270, 1955
- 15) Huser, B.A. et al. : Methanotrix soehngeni gen. nov. sp. nov., a New Acetotrophic Non-hydrogen-oxidizing Methane Bacterium, Arch.Microbiol Vol.132, pp.1-9, 1982