

[醸酵工学会誌 第70巻 第5号 371-377. 1992]

## 多段塔型曝気槽を用いる活性汚泥プロセスの処理特性

清水 達雄\*・工藤 憲三・那須 義和

北海道大学工学部衛生工学科  
〒060 札幌市北区北13条西8丁目

(平成4年5月6日受付 平成4年6月18日受理)

Characteristics of activated sludge process using a multistage tower aeration tank. TATSUO SHIMIZU,\* KENZO KUDO, and YOSHIKAZU NASU (*Department of Sanitary and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060*) *Hakkokogaku* 70: 371-377, 1992.

The objective of this study was to clarify experimentally the advantages, if any, of a vertical multistage tower aeration tank system, particularly with respect to purification efficiency and sludge settleability, in comparison with a complete mixing system. The following conclusions could be drawn by comparing both systems. (1) The experimental results showed that in a multistage tower aeration tank with a large Peclet number, the effluent  $COD_{Cr}$  concentration and sludge yield can be reduced and activated sludge with good settleability can be produced for any applied  $COD_{Cr}$  loading rate compared with a complete mixing aeration tank. (2) The distribution of the  $COD_{Cr}$  concentration and respiration rate of activated sludge showed that organic substances were rapidly transferred from the liquid phase to activated sludge floc by biosorption in the inlet compartment and that subsequent oxidative biodegradation occurred throughout the other compartment. (3) The removal of organic substances by the biosorption mechanism followed the first order reaction kinetics. The biosorption rate constant and maximum adsorbed organic substance content of activated sludge were  $25 \text{ m}^3/\text{kg MLSS}\cdot\text{d}$  and  $0.53 \text{ kg } COD_{Cr}/\text{kg MLSS}$ , respectively.

活性汚泥プロセスによる下・廃水処理において、処理水の水質、活性汚泥の沈降性や余剰汚泥の生成量などは、有機物負荷量などの操作条件と曝気槽内の混合特性によって影響を受ける。Milbury,<sup>1)</sup> Shimizu ら<sup>2)</sup>は押し出し流れに近づけるほど良好な処理水が得られることを実験的に明らかにし、過負荷現象の影響を考慮すると、完全混合と押し出し流れの中間的混合状態がもっともすぐれていることを報告している。また Chudoba,<sup>3-5)</sup> Rensink<sup>6)</sup> および Shimizu ら<sup>7)</sup>は糸状性バルキングを阻止し、沈降性のよい汚泥を得るための適切な流動状態が存在することを報告している。

そこで本研究では完全混合と押し出し流れの中間的混合特性を持つ多段塔型曝気槽を用いて、種々の有機物負荷量で連続処理を行い、その処理能力を実験的に

検討し、完全混合型曝気槽と比較した。さらに多段塔型曝気槽のように槽内に活性汚泥濃度や基質濃度分布が存在する活性汚泥プロセスにおける有機物除去特性および活性汚泥増殖特性を明らかにした。また活性汚泥プロセスの処理能力の評価に必要な動力的知見も得られたので報告する。

## 実験方法

**供試活性汚泥と廃水組成** 連続処理実験に用いた廃水は Table 1 に示すようにペプトンおよび肉エキスを主成分とする人工廃水を適当に希釈したものである。また実験に使用した活性汚泥は札幌市創成川下水処理場より採取した汚泥を上述の人工廃水で2ヶ月間馴養したものである。

**実験装置と運転条件** 連続処理実験に使用した曝気槽は完全混合型曝気槽と完全混合と押し出し流れと

\* 連絡先, Corresponding author.

Table 1. Composition of synthetic wastewater.

Peptone	6.0 g	KCl	0.14 g
Meat extract	4.0 g	CaCl <sub>2</sub>	0.14 g
Urea	1.0 g	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.10 g
NaCl	0.3 g	Tap water	1 l
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	1.0 g	pH	7.0

COD<sub>Cr</sub> concentration is approximately 10,000 mg/l. COD<sub>Cr</sub>:N:P=100:15.6:5.6. The above wastewater, properly diluted, was used for this study.

の中間的混合特性を有する多段塔型曝気槽である。その処理プロセスの概略図を Fig. 1 に示す。多段塔型曝気槽は 8 段と 16 段のものを使用し、操作容量 10 l、高さ 1.4 m、直径 10 cm のアクリル製円筒形反応器で、各段には 3 個の直径 7 mm のホールを有する仕切板を取り付けた。廃水は最上部より流入させ、塔の上段から第 1 段、第 2 段……と命名し、最下段に容積 4 l の沈殿槽を付設し、汚泥を最上部へ返送し、偶数段に取り付けた散気孔より通気させる方式を採用した。

完全混合型曝気槽は多段塔型と同容量の 10 l とし、4 l の沈殿槽を付設した。廃水の供給、汚泥返送および汚泥の引き抜きは定量ポンプを使用した。ここで、廃水供給速度を 20 l/d とした。廃水供給速度を変える

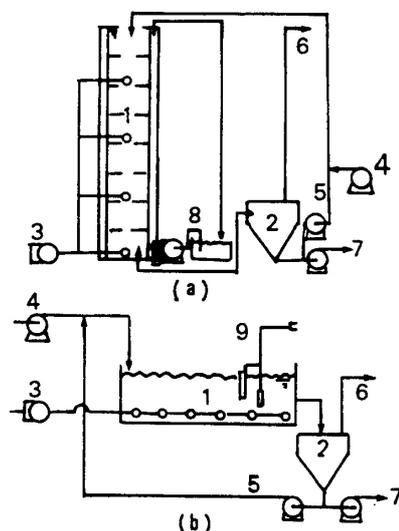


Fig. 1. Schematic outline of experimental apparatus: (a) Multistage tower aeration system, (b) Complete mixing aeration system. 1, Aeration tank; 2, sedimentation tank; 3, air supply; 4, feed line of wastewater; 5, recycling of activated sludge; 6, effluent; 7, disposal of excess activated sludge; 8, temperature control unit; 9, thermister, heater, and control unit.

Table 2. Operating conditions of the activated sludge process.

Aeration tank volume, $V$	10 l
Feed rate of wastewater, $Q$	20 l/d
Recycle ratio of return sludge, $\alpha$	0.25~0.5
Aeration time, $V/(1+\alpha)Q$	8.0~9.6 h
Influent COD <sub>Cr</sub> concentration	Variable
Average MLSS concentration	3000 mg/l
Air flow rate	0.25~0.5 vvm
Temperature	25°C
pH	7.0

と、曝気槽内混合特性が変化するので、有機物負荷量は流入廃水濃度を変更することによって変化させた。いずれの曝気槽を用いる連続処理実験においても、同一操作条件で運転した (Table 2)。

トレーサー応答実験 曝気槽の混合特性はパルス入力によるトレーサー応答実験によって求めた。滞留時間を 8.0 h、通気量 0.3 vvm に設定し、トレーサーとして NaNO<sub>3</sub> を投入し、出口の NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度を測定して、出口滞留時間分布曲線を求めた。NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度は Hitachi 124 spectrophotometer を用いて、260 nm の吸光度を測定して求めた。パルス応答曲線から分散、 $\sigma^2$  を求め、(1) 式からペクレ数、 $uL/D$  および完全混合槽列モデルで表現できるとしたときの槽列数、 $j$  を求めた。<sup>9)</sup>

$$\sigma^2 = \frac{1}{j} = 2\left(\frac{D}{uL}\right) - 2\left(\frac{D}{uL}\right)^2 (1 - e^{-uL/D}) \quad (1)$$

ここで  $u$ ; 線速度 (cm/s),  $L$ ; 曝気槽の長さ (cm),  $D$ ; 拡散係数 (cm<sup>2</sup>/s). 各曝気槽のペクレ数と  $j$  値を Table 3 に示す。

分析方法 COD<sub>Cr</sub> 濃度, MLSS 濃度, SVI および呼吸速度の測定は下水試験方法に従った。活性汚泥への吸着有機物量は汚泥混合液を 12,000 × g で 10 分間遠心分離後、汚泥を 1/15 M リン酸緩衝液に再懸濁し、

Table 3. Mixing characteristics of aeration tank.

	Variance	Peclet number	$j^*$
Complete mixing type	0.98	0.05	1.0
Eight-stage	0.54	2.2	1.9
Sixteen-stage	0.36	4.5	2.8

\*  $j$  is the number of aeration tanks, assuming that the real aeration tank can be represented as tanks in a series model.

0.1 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>を加え、pHを2~3に調整して約1時間攪拌した後、0.45 μのメンブレンフィルターでろ過したろ液のCOD<sub>Cr</sub>濃度を測定することによって求めた。

### 実験結果および考察

COD 負荷率および混合特性と処理性との関係  
混合特性の異なる多段塔型および完全混合型曝気槽を用いて連続処理実験を行い、COD 負荷率および槽内混合特性と有機物除去率、余剰汚泥発生量、汚泥の沈降性などとの関係を検討した。Fig. 2はCOD 負荷率と処理水のCOD<sub>Cr</sub>濃度との関係を図示したものである。COD 負荷率の増加にしたがって、処理水のCOD<sub>Cr</sub>濃度は高くなるが、ペクレ数の大きな多段塔型曝気槽の方が処理水COD<sub>Cr</sub>濃度が低くなる傾向を示した。汚泥収率は多段塔型曝気槽の方が完全混合型曝気槽よりも低く、その差はCOD 負荷率が増加するに従って増大し、著者ら<sup>2)</sup>が以前に報告した結果と同様であった。以上の結果から、曝気槽の混合状態を完全混合と押し出し流れの中間的な混合状態にすると、処理効率が高められることおよび余剰汚泥の生成量を少なくできることが明らかになった。活性汚泥の沈降性は、完全混合型曝気槽ではCOD 負荷率が1.0 kg COD<sub>Cr</sub>/kg MLSS·d以上になると、負荷率の増加に伴って、SVI値が急激に増加し、沈降性の悪化が観察されたが、多段塔型曝気槽では、COD 負荷率1.5~

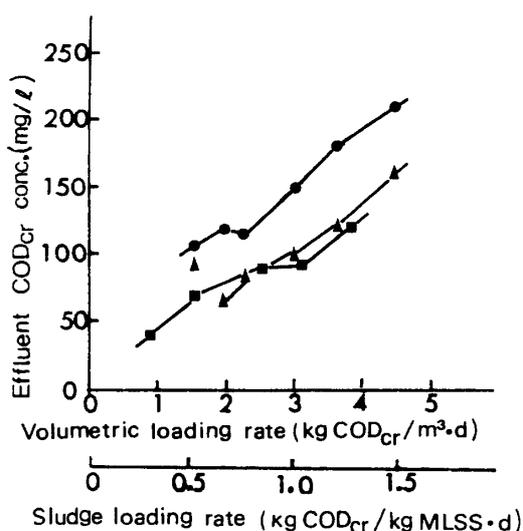


Fig. 2. Relationship between COD<sub>Cr</sub> loading rate and COD<sub>Cr</sub> concentration in effluent. Symbols: ●, complete mixing aeration tank; ▲, eight-stage tower aeration tank; ■, sixteen-stage tower aeration tank.

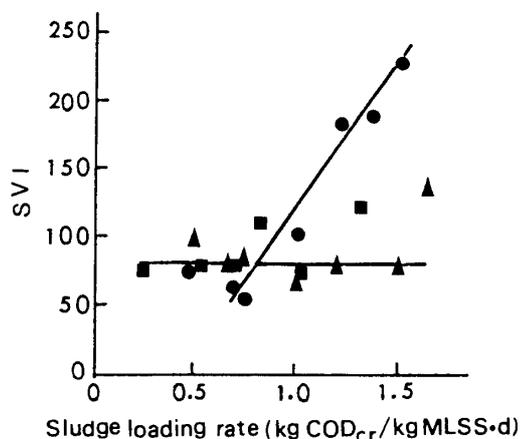


Fig. 3. Relationship between sludge loading rate and SVI. Symbols: ●, complete mixing aeration tank; ▲, eight-stage tower aeration tank; ■, sixteen-stage aeration tank.

2.0 kg COD<sub>Cr</sub>/kg MLSS·d以下ではSVI値の顕著な変化は観察されず100前後であった (Fig. 3)。

この結果は汚泥の沈降性が槽内の混合状態に強く影響されるという2~3の研究者<sup>3-7)</sup>の報告と一致した。すなわち完全混合よりも、完全混合と押し出し流

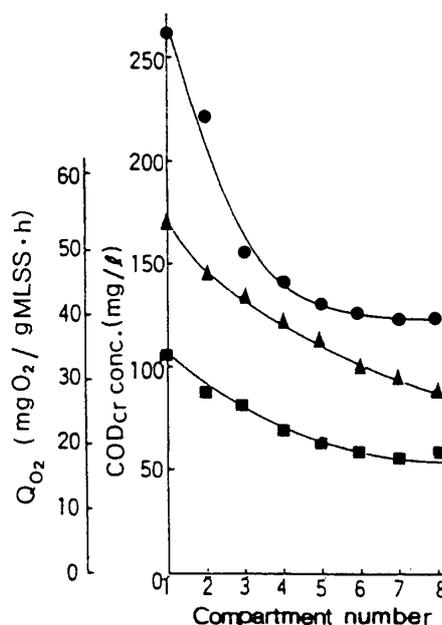


Fig. 4. Profiles of COD<sub>Cr</sub> concentration, Q<sub>O2</sub> of activated sludge in mixed liquor and Q<sub>O2</sub> of activated sludge in phosphate buffer along the eight-stage tower aeration tank. Volumetric loading rate is 3.6 kg COD<sub>Cr</sub>/m<sup>3</sup>·d. Symbols: ●, COD<sub>Cr</sub> concentration; ▲, Q<sub>O2</sub> of activated sludge in mixed liquor; ■, Q<sub>O2</sub> of activated sludge in phosphate buffer.

れの中間的混合状態の曝気槽を用いると、沈降性を悪化させる糸状性細菌の増殖を阻止し、沈降性のよい汚泥が生成した。

**COD<sub>Cr</sub> 濃度および呼吸活性の槽内分布特性** Fig. 4は段数8段の多段塔型曝気槽を用いて、COD容積負荷率3.6 kg COD<sub>Cr</sub>/m<sup>3</sup>·d(汚泥負荷率=1.2 kg COD<sub>Cr</sub>/kg MLSS·d)で連続処理した場合を例として、曝気槽内における溶解性COD<sub>Cr</sub>濃度分布と呼吸速度分布を示している。COD<sub>Cr</sub>濃度がほぼ一定となった段数以後の曝気槽区画においても、呼吸速度、 $Q_{O_2}$ が徐々に低下するという分布特性が得られた。COD<sub>Cr</sub>濃度が一定になった後にも呼吸速度の低下が観察されるのは、活性汚泥へ移行した吸着有機物の濃度分布が存在するためであると考えられた。そこでこの考察が妥当であるかを確認するために、1/15 Mリン酸緩衝液中で比較的容易に抽出される吸着有機物含有量を測定し、多段塔型曝気槽内における分布特性を検討した。Fig. 5に示すように、曝気槽入り口では、吸着有機物含有率は約5%であるが、出口に近づくにつれて低下し、出口付近では1.5%まで低下した。また吸着有機物含有量が高くなるに従って、呼吸速度が増加するという結果が得られた(Fig. 6)。

そこで活性汚泥の呼吸速度から吸着有機物量の推定を試みた。活性汚泥の酸素消費は吸着有機物の酸化と

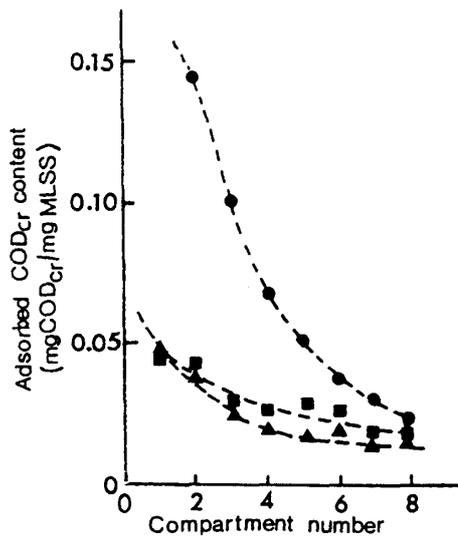


Fig. 5. Profiles of adsorbed COD<sub>Cr</sub> content along the eight-stage tower aeration tank. Volumetric loading rate is 3.0 kg COD<sub>Cr</sub>/m<sup>3</sup>·d. Symbols: ■, measured value; ●, estimated from  $Q_{O_2}$  of activated sludge in mixed liquor; ▲, estimated from  $Q_{O_2}$  of activated sludge in phosphate buffer.

維持代謝の二つの項に分けられる。

$$Q_{O_2} = \beta\nu + Q_{O_2}^{end} \quad (2)$$

ここで最大呼吸速度は

$$Q_{O_2}^{max} = \beta\nu_{max} + Q_{O_2}^{end} \quad (3)$$

さらに吸着有機物の酸化速度が Monod 式で表せるとすると

$$\nu = \frac{\nu_{max} \cdot C_2}{K + C_2} \quad (4)$$

(2)~(4)式から吸着有機物濃度は呼吸速度の関数となる。

$$C_2 = \frac{K(Q_{O_2} - Q_{O_2}^{end})}{Q_{O_2}^{max} - Q_{O_2}} \quad (5)$$

ここで  $Q_{O_2}$  ; 呼吸速度 (kg O<sub>2</sub>/kg MLSS·d)

$\nu$  ; 比有機物分解速度 (kg COD<sub>Cr</sub>/kg MLSS·d)

$\beta$  ; 定数 (kg O<sub>2</sub>/kg COD<sub>Cr</sub>)

$C_2$  ; 吸着有機物濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$K$  ; 飽和定数 (kg/m<sup>3</sup>)

添字: max; 最大値, end; 内生呼吸

実験的に  $K \approx 0.1$  kg/m<sup>3</sup>,  $Q_{O_2}^{end} \approx 0.24$  kg O<sub>2</sub>/kg MLSS·d = 10 mg O<sub>2</sub>/g MLSS·h,  $Q_{O_2}^{max} \approx 1.32$  kg O<sub>2</sub>/kg MLSS·d = 55 mg O<sub>2</sub>/g MLSS·h が求められた。(5)式を用いて、混合液およびリン酸緩衝液中での活性汚泥の  $Q_{O_2}$  値から、それぞれ吸着有機物含有量を求めた。リン酸緩衝液中での  $Q_{O_2}$  から推定される吸着有機物含有量は実測値とはほぼ一致した。また混合液中での  $Q_{O_2}$  から推定さ

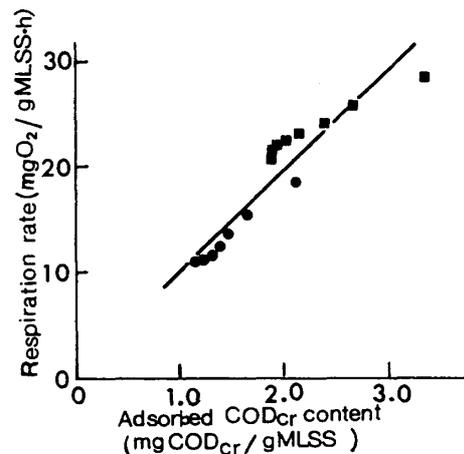


Fig. 6. Relationship between adsorbed COD<sub>Cr</sub> content of activated sludge and specific respiration rate. Volumetric loading rate: ●, 0.52; ■, 0.84 kg COD<sub>Cr</sub>/kg MLSS·d.

れる値は溶解性 COD<sub>Cr</sub> の分解も含んでいるので高くなるが、溶解性 COD<sub>Cr</sub> 濃度が低くなる曝気槽区画では実測値に近い値となった。

以上の曝気槽内各種成分の分布特性から、完全混合と押し出し流れとの中間的混合特性を有する曝気槽では、安定化された活性汚泥（吸着有機物含有量の低い汚泥）が常に第1段へ返送されるため、入り口付近の曝気槽区画では生物吸着による有機物の活性汚泥への急激な移行が起こり、汚泥が曝気槽各区画を通過する間に汚泥へ移行した有機物が酸化分解されることが明らかになった。したがって、多段塔型曝気槽を用いる活性汚泥プロセスは、同一反応槽内で対数増殖相で見られる高い有機物除去能力と汚泥の安定化を行わせしめる能力とを發揮できるプロセスであると考えられた。

**動力学パラメータの決定** 前述の結果から、多段塔型曝気槽のように曝気槽内に濃度分布が存在するような活性汚泥プロセスの設計および操作条件の設定には有機物の活性汚泥への吸着と吸着有機物の酸化分解に関する動力学的知見が必要であると考えられる。第1槽に比して第2槽の操作容量を大きくして（第1槽容積/第2槽容積=1/10）、第2槽から流出する吸着有機物含有量の低い汚泥を沈殿槽で分離し、第1槽へ供給する2槽連続処理系を用いて、生物吸着速度に関して検討した。Fig. 7は第1槽での有機物除去速度すなわち吸着速度と COD<sub>Cr</sub> 濃度との関係を示したものである。この結果は溶解性有機物の活性汚泥への生物吸着による有機物除去反応が1次反応に従うことを示

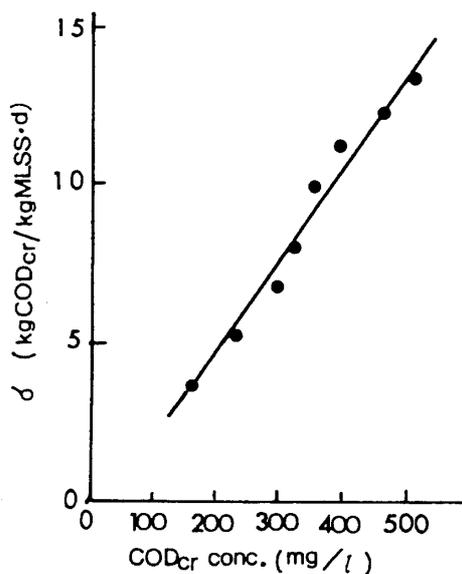


Fig. 7. The effect of COD<sub>Cr</sub> concentration on the specific adsorption rate of organic substances.

している。

$$\sigma = -\frac{1}{X} \frac{dC_1}{dt} = k_1 C_1 \quad (6)$$

ここで  $C_1$  ; 溶解性 COD<sub>Cr</sub> 濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$X$  ; 活性汚泥濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\sigma$  ; 比有機物吸着速度 (kg COD<sub>Cr</sub>/kg MLSS·d)

$k_1$  ; 吸着速度定数 (m<sup>3</sup>/kg MLSS·d)

Fig. 7 の直線の傾きから求められる  $k_1$  の値は 25 m<sup>3</sup>/kg MLSS·d であり、吸着有機物をほとんど含有しない活性汚泥の有機物除去速度定数である。

活性汚泥の増殖速度と有機物除去速度との関係は

$$\frac{dX}{dt} = Y_G \left( -\frac{dC'_1}{dt} \right) - k_3 X \quad (7)$$

これを変形すると

$$\frac{1}{X} \frac{\Delta X}{\Delta t} = Y_G \left( -\frac{1}{X} \frac{\Delta C'_1}{\Delta t} \right) - k_3 \quad (8)$$

$$C'_1 = C_1 - C^*_0 \quad (9)$$

ここで  $C'_1$  ; 生物分解性 COD<sub>Cr</sub> 濃度

$C^*_0$  ; 生物非分解性 COD<sub>Cr</sub> 濃度

$Y_G$  ; 真の増殖収率 (-)

$k_3$  ; 自己酸化速度定数 (d<sup>-1</sup>)

したがって完全混合型曝気槽を用いて連続処理を行ったときの定常状態における有機物除去速度と余剰汚泥の引き抜き速度との関係から真の増殖収率、 $Y_G$  と自己酸化速度定数、 $k_3$  を決定することができる。Fig. 8 から、 $Y_G = 0.28$ ,  $k_3 = 0.05 \text{ d}^{-1}$  を得た。

有機物の活性汚泥による分解速度は Monod 式に従った。

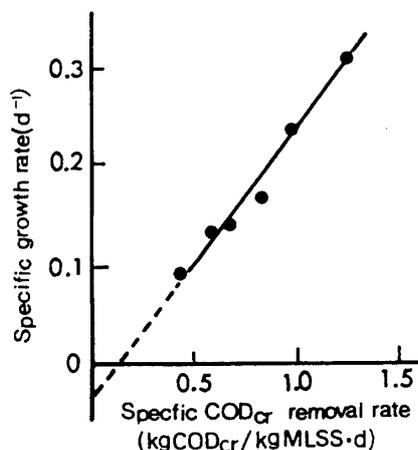


Fig. 8. Relationship between specific growth rate and specific COD<sub>Cr</sub> removal rate.

Table 4. Kinetic parameters.

Adsorption rate constant	$k_1$	25	$\text{m}^3/\text{kgMLSS}\cdot\text{d}$
Maximum specific growth rate	$k_2$	0.65	$\text{d}^{-1}$
Endogenous respiration rate constant	$k_3$	0.05	$\text{d}^{-1}$
Saturation constant	$K$	0.10	$\text{kgCOD}_{\text{Cr}}/\text{m}^3$
Maximum growth yield	$Y_G$	0.28	—
Maximum adsorbed $\text{COD}_{\text{Cr}}$ content	$\delta$	0.53	$\text{kgCOD}_{\text{Cr}}/\text{kgMLSS}$
Conversion factor of activated sludge	$\gamma$	1.33	$\text{kgCOD}_{\text{Cr}}/\text{kgMLSS}$
Conversion factor of adsorbed organic substances	$\alpha$	0.94	$\text{kg dry wt.}/\text{kgCOD}_{\text{Cr}}$

$$\nu = \frac{1}{X} \frac{dC'_1}{dt} = \frac{k_2}{Y_G} \frac{C'_1}{K + C'_1} \quad (10)$$

ここで  $k_2$  ; 最大比増殖速度 ( $\text{d}^{-1}$ )

完全混合型曝気槽を用いて流入下水の  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  濃度を約  $1.0 \text{ kg}/\text{m}^3$  とし, 供給量を変化させて連続処理を行った実験結果から, 比  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  分解速度と  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  濃度との関係を求めた. その結果を Fig. 9 に示す. 最大  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  分解速度が  $2.3 \text{ kg COD}_{\text{Cr}}/\text{kg MLSS}\cdot\text{d}$ ,  $K=0.1 \text{ kg}/\text{m}^3$  の値が得られ, 本研究で用いた人工廃水では, 流入  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  成分の約 8% が生物分解の困難な成分であることが判った. また最大比増殖速度  $k_2$  は  $0.65 \text{ d}^{-1}$  であった. 活性汚泥の最大  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  含有率は吸着有機物を含有しない汚泥 (1/15 M リン酸緩衝液中で 12 時間曝気して得られた汚泥) を用いて, 呼吸阻害剤として  $\text{NaN}_3$  を  $1000 \text{ mg}/\text{l}$  添加して, 回分培養を行い,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  濃度変化を追跡して吸着平衡に達したときの  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  濃度から求めた. 汚泥の最大  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  含有率,  $\delta$  は  $0.53 \text{ kg COD}_{\text{Cr}}/\text{kg MLSS}$  であった. 以上の実験結果から得られた活性汚泥の有機物除去および増殖に関

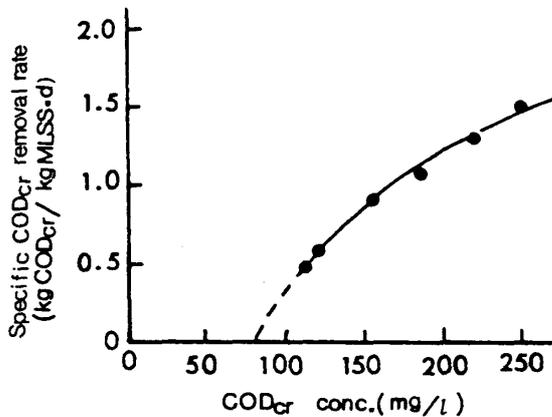


Fig. 9. Relationship between  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  concentration and specific  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  removal rate.

する動力学定数を Table 4 に示す. これらの動力学パラメータは曝気槽内に濃度分布が存在する活性汚泥プロセスの処理能力の評価に利用できると考えられる.

## 要 約

本研究において, 完全混合と押し出し流れの中間的混合特性を有する多段塔型曝気槽を用いた活性汚泥プロセスの有機物除去能力, 汚泥生成量, 汚泥の沈降性および処理水の水質に関して実験的に検討を行い, 次の結論を得た.

1. ベクレ数の大きな多段塔型曝気槽を用いると, すべての  $\text{COD}$  負荷率に対して, 完全混合型曝気槽よりも処理水の  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  濃度および汚泥収率を低くすることができ, さらに沈降性のすぐれた汚泥が生成されることが明らかになった.
2. 多段塔型曝気槽における  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  濃度および呼吸速度の分布を検討した結果,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  濃度が一定となる曝気槽区画においても, 呼吸速度が徐々に低下するという分布特性が得られた. この現象から, 活性汚泥に吸着した有機物の濃度分布が存在することおよび吸着有機物が曝気槽各区画を通過する間に酸化分解されることが明らかになった.
3. 活性汚泥への有機物の吸着現象に関して検討した結果, 吸着は一次反応に従い, 吸着速度定数は  $25 \text{ m}^3/\text{kg MLSS}\cdot\text{d}$ , 最大吸着量は  $0.53 \text{ kg COD}_{\text{Cr}}/\text{kg MLSS}$  であった.

## 文 献

- 1) Milbury, W. F., Pipes, W. O., Grieves, R. B.: *J. Sanit. Eng. Div. ASCE*, **91**, SA3, 45-60 (1965).
- 2) Shimizu, T., Hisatomi, S., Suga, K., Ichikawa, K.: *J. Ferment. Technol.*, **58**, 287-297 (1980).
- 3) Chudoba, J., Ottova, V., Madera, V.: *Water Res.*, **7**, 1163-1182 (1973).

- 4) Chudoba, J., Cech, J. S., Farkac, J., Grau, P.: *Water Res.*, **19**, 191-196 (1985).
- 5) Chudoba, J.: *Water Res.*, **19**, 1017-1022 (1985).
- 6) Rensink, J. H.: *Journal WPCF*, **46**, 1888-1894 (1974).
- 7) Shimizu, T., Wakimura, K., Tanemura, K., Ichikawa, K.: *J. Ferment. Technol.*, **58**, 275-286 (1980).
- 8) Levenspiel, O.: *Chemical Reaction Engineering*, Wiley and Sons Inc., New York, p. 260 (1962).