



Title	ステップ流入二段嫌気好気活性汚泥法の最適運転方法に関する考察
Author(s)	川口, 幸男; 堺, 好雄; 藤田, 正憲
Citation	日本水処理生物学会誌. 1999, 35(3), p. 165-176
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/3308">https://hdl.handle.net/11094/3308</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

# ステップ流入二段嫌気好気活性汚泥法の 最適運転方法に関する考察

## A Study on Optimum Operation of Four-Stage Denitrification-Nitrification Process with Step-Inlet

川口幸男<sup>1</sup>、堺 好雄<sup>1</sup>、藤田正憲<sup>2</sup>

<sup>1</sup>日本下水道事業団／〒335-0034 埼玉県戸田市下笹目5141

<sup>2</sup>大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻／〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1

YUKIO KAWAGUCHI<sup>1</sup>, YOSHIO SAKAI<sup>1</sup>, and MASANORI FUJITA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Japan Sewage Works Agency/5141, Shimosasame, Toda, Saitama 335-0034, Japan

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Osaka University

/2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

### Abstract

The four-stage denitrification-nitrification system with step-inlet was developed in order to prevent operational troubles in activated sludge plants, such as filamentous bulking, pH drop of the effluent because of advanced nitrification, and so on. Pilot-scale treatment experiments using municipal wastewater were conducted to clear the treatment characteristic and the optimum operating condition of this process.

The equations were introduced to simulate microbial behavior in this process based on population dynamics. Then, the coefficients of these equations were determined by the results of pilot-scale treatment experiments and some reference, and it was revealed that the simulated water qualities in the reactor agreed with the results of pilot-scale treatment experiments. The simulation results suggested that this process is more suitable than the conventional activated sludge process to prevent the filamentous bulking and pH drop of the effluent because of advanced nitrification, within wide operation range of primary settling tanks. The nitrification-suppressed operation was more effective than the nitrification-enhanced operation to prevent the filamentous bulking, also, the shorter solids retention time (SRT) was effective to prevent it. The four-stage denitrification-nitrification process with step-inlet can also prevent the filamentous bulking, if nitrification-suppressed or nitrification-enhanced operation was switched according to the nitrification activity with wide range of water temperature.

**Key Words** : four-stage denitrification-nitrification process with step-inlet, filamentous bacteria, bulking, nitrification, solids retention time (SRT), growth rate, nitrification-suppressed operation, nitrification-enhanced operation

### 1. はじめに

嫌気好気活性汚泥法は、糸状性バルキングの処理障害を抑制することから、標準活性汚泥法の改善対策として多くの下水処理場で採用されている<sup>1)</sup>。この方法を修正したステップ流入二段嫌気好気活性汚泥法（以下、「A<sub>2</sub>O<sub>2</sub>法」という。）とは、嫌気・好気槽を交互に繰り返し、汚水を第1槽及び第3槽へ分配流入させることを特徴とし、バルキング抑制のみならず脱磷細菌群による溶解性BODの除去も期待できることが実験的に知られている<sup>2)</sup>。

ここでは、A<sub>2</sub>O<sub>2</sub>法のパイロットプラントによる実験成績<sup>3,4)</sup>と既往文献をもとに、A<sub>2</sub>O<sub>2</sub>法の処理特性を明らかにするとともに、糸状性バルキングや硝化による処理水pHの低下などの処理障害を抑制するための流入水質に応じた反応タンクの最適運転方法について検討している。

### 2. 反応タンクにおける微生物動力学

#### 2.1 微生物の増殖速度式

本研究で用いたA<sub>2</sub>O<sub>2</sub>法の反応タンク容量比は、第1槽：第2槽：第3槽：第4槽＝1：1.5：1.5：2.25と設定されており、汚水量の収支を示せばFigure 1のようになる。反応タンク内の特定の微生物濃度をXとすれば、その時間変化は次式で表現できる。以下、表中のものを含めて記号はまとめて末尾に記している。

$$\frac{dX}{dt} = Q \cdot X_0 - [Q_w \cdot X_4 + (Q - Q_w) \cdot X_e] + V \cdot r'_c \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、反応タンクにおける水理学的滞留時間（HRT；θ）と活性汚泥滞留時間（SRT；θ<sub>c</sub>）は次のように定義できる。

$$\theta = \frac{1}{6.25} \cdot \left( \frac{2.5}{\epsilon} + 3.75 \right) \cdot \frac{V}{Q} = \frac{V}{\beta_1 \cdot Q} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\theta_c = \frac{V \cdot X \cdot M}{Q_w \cdot X_{M4} + (Q - Q_w) \cdot X_{Me}} = \frac{V \cdot \beta_2 \cdot X_{M4}}{Q_w \cdot X_{M4} + (Q - Q_w) \cdot X_{Me}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $\frac{1}{\beta_1} = \frac{1}{6.25} \cdot \left( \frac{2.5}{\epsilon} + 3.75 \right)$

$$\beta_2 = \frac{2.5}{6.25} \cdot \left( \frac{-1+r}{\epsilon+r} + 1.5 \right)$$

ここで、反応タンク内の特定の微生物が活性汚泥内に均一に存在し、その存在比をαと仮定すると、X<sub>4</sub>/X<sub>M4</sub>＝X<sub>e</sub>/X<sub>Me</sub>＝αと置けるから、θ<sub>c</sub>は次式で表される。

$$\theta_c = \frac{V \cdot \beta_2 \cdot X_4 / \alpha}{Q_w \cdot X_4 / \alpha + (Q - Q_w) \cdot X_e / \alpha} = \frac{V \cdot \beta_2 \cdot X_4}{Q_w \cdot X_4 + (Q - Q_w) \cdot X_e} \quad \dots\dots\dots (4)$$

定常状態ではdX/dt＝0となり、(1)、(4)式より、特定の微生物種のθ<sub>c</sub>は次式で表される。

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{X_0}{\theta \cdot X'} + \frac{r'_c}{X'} \quad \dots\dots\dots (5)$$

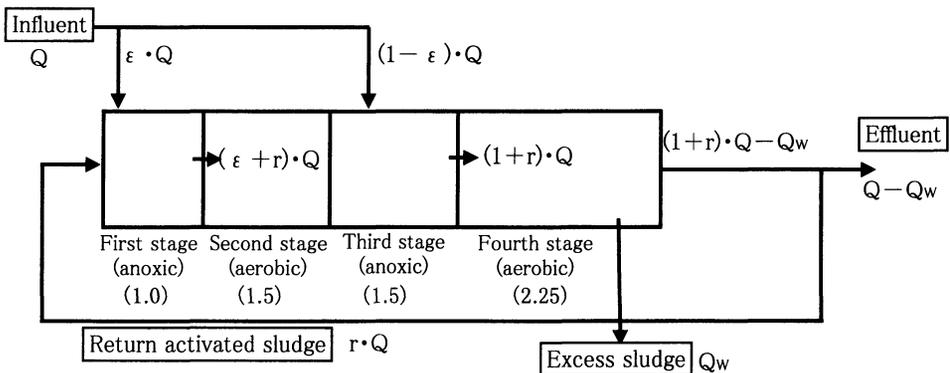


Fig. 1 Flow balance of four-stage denitrification-nitrification process with step-inlet

ここで、反応タンク内の微生物の増殖は、基質濃度と分子状酸素、硝酸イオン、硫酸イオン等の酸化剤濃度の両方に制約され<sup>5)</sup>、また、酸化剤の酸化力は分子状酸素>硝酸イオン>硫酸イオンの順で、かつ、上位の酸化剤が存在する場合は下位の酸化剤は酸化剤として機能せず、さらに、自己分解は分子状酸素濃度が存在するときのみ進行すると仮定すれば、増殖速度は次式で表される。

$$\begin{aligned} r'_c &= \sum n (h_{on} \cdot r_{oxn}) - h_a \cdot r_D \\ &= \sum n (h_{on} \cdot \mu_{mn} \cdot \frac{S_n}{K_{Sn} + S_n} \cdot \frac{O_n}{K_{On} + O_n}) \cdot X' \\ &\quad - h_a \cdot \delta_x \cdot X' \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ただし、 $\sum n$ ：酸化剤1～nまでの合計

(5)式の $r'_c$ に(6)式を代入すれば、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\theta_c} &= \frac{X_0}{\theta' \cdot X'} + \frac{\sum n (h_{on} \cdot r_{oxn}) - h_a \cdot r_D}{X'} \\ &= \frac{X_0}{\theta' \cdot X'} + \sum n (h_{on} \cdot \mu_{mn} \cdot \frac{S_n}{K_{Sn} + S_n} \cdot \frac{O_n}{K_{On} + O_n}) - h_a \cdot \delta_x \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

上式を用いれば、反応タンク各槽の滞留時間、基質濃度、酸化剤濃度が分かれば、特定の微生物の増殖に必要なSRTが算出できることになる。

次に、活性汚泥中の特定の微生物濃度は、以下のように導かれる。

酸化剤nが働く反応タンク特定の微生物の増殖速度 $r_{oxn}$ と基質利用速度 $r_{suxn}$ は、 $Y_{Xn}$ （酸化剤nが働く反応タンク特定の微生物の収率）を用い、次式で表現できる。

$$r_{oxn} = -Y_{Xn} \cdot r_{suxn} = Y_{Xn} \cdot \frac{dS_{Xn}}{\theta' \cdot h_{on}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

(7)式の1行目に(8)式を代入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\theta_c} &= \frac{X_0}{\theta' \cdot X'} + \frac{1}{X'} \cdot (\sum n (h_{on} \cdot Y_{Xn} \cdot \frac{dS_{Xn}}{\theta' \cdot h_{on}}) \\ &\quad - h_a \cdot r_D) \\ &= \frac{X_0}{\theta' \cdot X'} + \frac{1}{X'} \cdot (\sum n (Y_{Xn} \cdot \frac{dS_{Xn}}{\theta'}) - h_a \cdot \delta_x) \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

上式を $X'$ について整理すると次式となる。

$$X' = \frac{\theta_c}{\theta'} \cdot \frac{X_0 + \sum n (Y_{Xn} \cdot dS_{Xn})}{1 + h_a \cdot \delta_x \cdot \theta_c} \quad \dots\dots\dots (10)$$

上式の $X_0 + \sum n (Y_{Xn} \cdot dS_{Xn})$ は、活性汚泥全体を対象とした場合、その増殖量を表し、これは経験的に $a \cdot S_{BDi} + b \cdot S_{SSi}$ で示される<sup>6)</sup>。従って、活性汚泥全体の場合、この関係を用いれば次式になる。

$$X'_M = \frac{\theta_c}{\theta'} \cdot \frac{a \cdot S_{BDi} + b \cdot S_{SSi}}{1 + h_a \cdot \delta_x \cdot \theta_c} \quad \dots\dots\dots (11)$$

(10)式及び(11)式の比より、硝化やバルキング、異常発泡・スカムなどに関与する特定の微生物の活性汚泥中の存在比 $\alpha$ は、次式になる。

$$\alpha = \frac{X'}{X'_M} = \frac{X_0 + \sum n (Y_{Xn} \cdot dS_{Xn})}{a \cdot S_{BDi} + b \cdot S_{SSi}} \cdot \frac{1 + h_a \cdot \delta_x \cdot \theta_c}{1 + h_a \cdot \delta_x \cdot \theta_c} \quad \dots\dots\dots (12)$$

以上より、 $A_2O_2$ 法における各微生物群の増殖速度、増殖に必要なSRT及び存在比を表す式を整理するとTable 1のようになる。ただし、嫌気槽を設置した反応タンクにおいては脱磷細菌は好気性従属栄養細菌群とみなした。以下では、脱磷細菌、脱窒細菌及び処理障害の原因にならない活性汚泥微生物群を総称して「従属栄養生物群」という。また、脱窒反応及び磷溶出反応では溶解性BODが、好気槽では溶解性BODとSS性BODの両方が利用され、磷溶出反応は溶存酸素及び硝酸イオンが消失したときに起こると仮定した。放線菌は、溶存酸素を酸化剤として利用し、油分を基質として利用する好気性従属栄養細菌群とした<sup>7)</sup>。糸状性細菌は、溶存酸素又は硝酸イオンを酸化剤として利用し、溶解性有機物を基質として利用する好気性従属栄養細菌群とした<sup>8)</sup>。

## 2.2 各槽における基質の挙動

$A_2O_2$ 法では、各反応タンクへの流入基質濃度は前段の反応タンクの影響を受けるから、上流側の反応タンクから順次基質の収支を検討する必要がある。そこで、Table 2に、溶解性BODを例として各反応タンクにおける基質の収支式を示す。他の基質を含めて、各反応槽では以下の条件を仮定した。

第1槽（嫌気槽）では、 $NO_x-N$ を利用した脱窒反応が優先し、 $NO_x-N$ 濃度が低下した後、脱磷細菌による磷の溶出が起こる。また、摂取される溶解性BOD量は、流入水中の溶解性BOD量を上限として、 $NO_x-N$ の供給量及び脱磷細菌が過剰に蓄積している磷の溶出量に合わせた分とする。アンモニア性窒素、SS性BOD量は変化がなく、出口濃度は流入水と返送汚泥の平均値になるものとする。

Table 1 Growth rate and microbial ratio of activated sludge of four-stage denitrification-nitrification process with step-inlet

Group name	Microbial growth rate ( $r'_c$ )	Required SRT for microbial growth ( $1/\theta_c$ )	microbial ratio in activated sludge ( $\alpha$ )
Aerobic heterotrophic bacteria except filamentous bacteria	$\left\{ \left( h_1 \cdot \frac{S_{BD1}}{K_{SBD} + S_{BD1}} + h_3 \cdot \frac{S_{BD3}}{K_{SBD} + S_{BD3}} \right) \cdot \mu_{mB} + (h_2 + h_4) \cdot (\mu_{mB} - k_{pp}) \right\} \cdot X'_B$ $- (h_2 + h_4) \cdot \delta_{XB} \cdot X'_B$	$\frac{X_{B1}}{\theta' \cdot X'_B} + \left\{ \left( h_1 \cdot \frac{S_{BD1}}{K_{SBD} + S_{BD1}} + h_3 \cdot \frac{S_{BD3}}{K_{SBD} + S_{BD3}} \right) \cdot \mu_{mB} + (h_2 + h_4) \cdot (\mu_{mB} - k_{pp}) \right\} - (h_2 + h_4) \cdot \delta_{XB}$	$\frac{X_{B1} + Y_B \cdot (dS_{BBDn} + dS_{BBSa} - dS_{PBB})}{a \cdot S_{BD1} + b \cdot S_{SSi}}$ $\frac{1 + (h_2 + h_4) \cdot \delta_M \cdot \theta_c}{1 + (h_2 + h_4) \cdot \delta_{XB} \cdot \theta_c}$
	Notes) BOD with orthophosphate uptake : $k_{pp} = k_{B/P} \cdot dS_{PT} / (h_a \cdot X_P)$ , Oxygen uptake rate coefficient without nitrification : $k_{PBA} = k_{B/P} \cdot dS_{PT} / h_a$ , Oxygen uptake rate without nitrification : $dS_{PBB} = k_{B/P} \cdot dS_{PT}$		
Nitrifying bacteria	$\left( h_2 \cdot \frac{O_{a2}}{K_{ON} + O_{a2}} + h_4 \cdot \frac{O_{a4}}{K_{ON} + O_{a4}} \right) \cdot \mu_{mN} \cdot X'_N$ $- (h_2 + h_4) \cdot \delta_{XN} \cdot X'_N$	$\left( h_2 \cdot \frac{O_{a2}}{K_{ON} + O_{a2}} + h_4 \cdot \frac{O_{a4}}{K_{ON} + O_{a4}} \right) \cdot \mu_{mN} \cdot X'_N - (h_2 + h_4) \cdot \delta_{XN}$	$\frac{Y_N \cdot dS_{NA}}{a \cdot S_{BDn} + b \cdot S_{SSi}}$ $\frac{1 + (h_2 + h_4) \cdot \delta_M \cdot \theta_c}{1 + (h_2 + h_4) \cdot \delta_{XN} \cdot \theta_c}$
actinomycetes ( <i>Gordonia amarae</i> , <i>Rhodococcus</i> sp.)	$\left( h_2 \cdot \frac{O_{a2}}{K_{OH} + O_{a2}} + h_4 \cdot \frac{O_{a4}}{K_{OH} + O_{a4}} \right) \cdot \mu_{mH} \cdot X'_H$ $- (h_2 + h_4) \cdot \delta_{XH} \cdot X'_H$	$\frac{X_{H1}}{\theta' \cdot X'_H} + \left( h_2 \cdot \frac{O_{a2}}{K_{OH} + O_{a2}} + h_4 \cdot \frac{O_{a4}}{K_{OH} + O_{a4}} \right) \cdot \mu_{mH} - (h_2 + h_4) \cdot \delta_{XH}$	$\frac{X_{H1} + Y_H \cdot dS_{HT}}{a \cdot S_{BDn} + b \cdot S_{SSi}}$ $\frac{1 + (h_2 + h_4) \cdot \delta_M \cdot \theta_c}{1 + (h_2 + h_4) \cdot \delta_{XH} \cdot \theta_c}$
Filamentous bacteria	$\mu_{mF} \cdot X'_F - (h_2 + h_4) \cdot \delta_{XF} \cdot X'_F$	$\frac{X_{F1}}{\theta' \cdot X'_F} + \mu_{mF} - (h_2 + h_4) \cdot \delta_{XF}$	$\frac{X_{F1} + Y_F \cdot (dS_{FBDn} + dS_{FBDa})}{a \cdot S_{BDn} + b \cdot S_{SSi}}$ $\frac{1 + (h_2 + h_4) \cdot \delta_M \cdot \theta_c}{1 + (h_2 + h_4) \cdot \delta_{XF} \cdot \theta_c}$

第2槽(好気槽)では、全ての好気性微生物により基質の摂取が行われる。SS性BODは従属栄養生物群により利用される。溶解性の磷酸は脱磷細菌以外に摂取されない。油分は放線菌に利用され、かつ、放線菌の周囲に遍し濃度律速にはならない。アンモニア性窒素は硝化細菌により硝化される。以上の仮定より、溶解性BOD以外の摂取量は次式で表される。

$$dS_{BS2} = \theta' \cdot h_2 \cdot \frac{\mu_{mB}}{Y_B} \cdot X_{B2} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$dS_{PT2} = \theta' \cdot h_2 \cdot \frac{1}{k_{B/P}} \cdot \frac{1 - Y_B}{Y_B} \cdot \mu_{mB} \cdot X_{B2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$dS_{HT2} = \theta' \cdot h_2 \cdot \frac{\mu_{mH}}{Y_H} \cdot \frac{O_{a2}}{K_{OH} + O_{a2}} \cdot X_{H2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$dS_{NA2} = \theta' \cdot h_2 \cdot \frac{\mu_{mN}}{Y_N} \cdot \frac{O_{a2}}{K_{ON} + O_{a2}} \cdot X_{N2} \quad \dots\dots\dots (16)$$

第3槽(嫌気槽)では、第2槽で生成したNO<sub>x</sub>-Nを利用した脱窒反応と脱りん細菌によるりん溶出に伴う溶解性BODの摂取反応に優先して、第2槽から流入する溶

存酸素による溶解性BODの酸化が進行する。Table 2に示した溶存酸素による酸化反応と脱窒反応に伴う糸状性細菌/従属栄養微生物群摂取量比は、両反応速度に関わる溶解性BOD濃度が同一と仮定したため、第1槽の式に(2・S<sub>BDS</sub>/(K<sub>BS</sub>+2・S<sub>BDS</sub>))を乗じた形式になっている。その他の反応条件は第1槽と同様であり、濃度に関する項目では、新たに流入水がステップ流入する分を考慮した式で表される。

第4槽(好気槽)では第2槽と同様の反応が起こるので、第2槽で用いられている第1槽に関わる記号を第3槽のものに置き換えた式で表される。

最終沈殿池では、溶解性基質濃度は変化がなく、SS性基質及び微生物濃度が最終沈殿池のSS除去率に見合った分除去される。また、汚泥返送途中での基質濃度及び微生物濃度の変化はない。

これらの条件をもとに、各槽における基質濃度及び微生物濃度の表現式を作成し、これらを連結してA<sub>2</sub>O<sub>2</sub>法の水質予測式を作成した。予測式は、返送汚泥を考慮した循環式になるため、予測値は、反復計算時の変化の最大値が0.001以内になったときに計算を完了する収束計算により算出することにした。

Table 2 Mass balance equations of dissolved BOD in four-stage denitrification-nitrification process with step-inlet

Stage name	Dissolved BOD utilized in each stage	Effluent dissolved BOD in each stage
First stage (anoxic)	$dS_{BD1} = dS_{BDn1} + dS_{BDp1} = k_{BN} \cdot O_{Nu1} + k_{BP} \cdot S_{Pu1}$ (utilization ratio of filamentous bacteria (F)/aerobic heterotrophic bacteria without filamentous bacteria (B)) $dK_{F/B1} = dS_{FBD1} / dS_{BBD1} = \frac{\mu_{mF} \cdot Y_B \cdot K_{SB} + S_{BD1}}{\mu_{mB} \cdot Y_F \cdot K_{SF} + S_{BD1}} \cdot \frac{X'_F}{X'_B}$	$S_{BD1} = \frac{\epsilon}{\epsilon + r} \cdot S_{BD1} + \frac{r}{\epsilon + r} \cdot S_{BDn} - (k_{BN} \cdot O_{Nu1} + k_{BP} \cdot S_{Pu1})$
	Notes) $S_{Pu1} \leq S_{PS1} = \theta_c / \theta' \cdot (S_{PT1} - S_{PTe}) - k_{PM} \cdot X'_M$	$O_{Nu1} \leq O_{NS1} = r / (\epsilon + r) \cdot k_{ON4} \cdot S_{NA3}$
Second stage (aerobic)	$dS_{BD2} = \theta' \cdot h_2 \cdot \left( \frac{\mu_{mB}}{Y_B} \cdot \frac{S_{BD2}}{K_{SB} + S_{BD2}} \cdot X_{B2} + \frac{\mu_{mF}}{Y_F} \cdot \frac{S_{BD2}}{K_{SF} + S_{BD2}} \cdot X_{F2} \right)$ (utilization ratio of F/B) $dK_{F/B2} = \frac{\mu_{mF} \cdot Y_B \cdot K_{SB} + S_{BD2}}{\mu_{mB} \cdot Y_F \cdot K_{SF} + S_{BD2}} \cdot \frac{X'_F}{X'_B}$	$S_{BD2} = S_{BD1} - \theta' \cdot h_2 \cdot \left( \frac{\mu_{mB}}{Y_B} \cdot \frac{S_{BD2}}{K_{SB} + S_{BD2}} \cdot X_{B2} + \frac{\mu_{mF}}{Y_F} \cdot \frac{S_{BD2}}{K_{SF} + S_{BD2}} \cdot X_{F2} \right)$
Third stage (anoxic)	$dS_{BD3} = dS_{BDn3} + dS_{BDp3} = k_{Ba} \cdot O_{Au3} + k_{BN} \cdot O_{Nu3} + k_{BP} \cdot S_{Pu3}$ (utilization ratio of F/B) $dK_{F/B3} = \frac{\mu_{mF} \cdot Y_B \cdot K_{SB} + S_{BD3}}{\mu_{mB} \cdot Y_F \cdot K_{SF} + S_{BD3}} \cdot \frac{2 \cdot S_{BD3}}{K_{SB} + 2 \cdot S_{BD3}} \cdot \frac{X'_F}{X'_B}$	$S_{BD3} = \frac{1 - \epsilon}{1 + r} \cdot S_{BDn} + \frac{\epsilon + r}{1 + r} \cdot S_{BD4} - (k_{Ba} \cdot O_{Au3} + k_{BN} \cdot O_{Nu3} + k_{BP} \cdot S_{Pu3})$
	Notes) $S_{BD3} \geq dS_{BBD3}$ $O_{Nu3} \leq O_{NS3} = (\epsilon + r) / (1 + r) \cdot O_{A2}$	$O_{Nu3} \leq O_{NS3} = (\epsilon + r) / (1 + r) \cdot k_{ON2} \cdot S_{NA1}$ $S_{Pu3} \leq S_{PS3}$
Fourth stage (aerobic)	$dS_{BD4} = \theta' \cdot h_4 \cdot \left( \frac{\mu_{mB}}{Y_B} \cdot \frac{S_{BD4}}{K_{SB} + S_{BD4}} \cdot X_{B4} + \frac{\mu_{mF}}{Y_F} \cdot \frac{S_{BD4}}{K_{SF} + S_{BD4}} \cdot X_{F4} \right)$ (utilization ratio of F/B) $dK_{F/B4} = \frac{\mu_{mF} \cdot Y_B \cdot K_{SB} + S_{BD4}}{\mu_{mB} \cdot Y_F \cdot K_{SF} + S_{BD4}} \cdot \frac{X'_F}{X'_B}$	$S_{BD4} = S_{BD3} - \theta' \cdot h_4 \cdot \left( \frac{\mu_{mB}}{Y_B} \cdot \frac{S_{BD4}}{K_{SB} + S_{BD4}} \cdot X_{B4} + \frac{\mu_{mF}}{Y_F} \cdot \frac{S_{BD4}}{K_{SF} + S_{BD4}} \cdot X_{F4} \right)$
Final settling tank		$S_{BDe} = S_{BD4}$

2. 3 予測式に用いた微生物の増殖係数と境界条件

文献値と実験値を基に決定した活性汚泥微生物の増殖速度等に関わる各係数を Table 3 に示す。脱磷細菌に関してはほとんど増殖係数が明らかになっていないため、ここでは BOD 細菌と同一とした。また、表に示した以外では、脱磷反応に関与しない活性汚泥中の磷濃度を 20mg-P/g-VSS<sup>(3)</sup>、増殖速度の計算に用いる反応槽内基質濃度を反応槽流入濃度の 1 / 2<sup>(4)</sup> と仮定した。また、SVI は、実験結果の解析により最も高い相関性が得られた水温、SRT 及び PO<sub>4</sub>-P の溶出により摂取される分を除いた溶解性 BOD の全反応タンク容量に対する容積負荷の 3 項で表した次式を用いて予測した。

$$S_1 = 0.563 \cdot V_{BnF}^{0.327} \cdot T^{0.647} \cdot \theta_c^{0.812} \quad (r = 0.977) \quad \dots\dots\dots (17)$$

3. 予測式の適用性の検討

予測式の検証に用いた A<sub>2</sub>O<sub>2</sub>法のパイロットプラント

は、図-1 に示した処理フローの最初沈殿池を使用する系列と使用しない系列の 2 系列を並行して設置し、大都市近郊地帯にある YT 処理場の沈砂池越流水を用いて行なった。運転期間は 8 月末～3 月中旬の 7 ヶ月間であり、水質分析を週 1 回の頻度で実施した。各系列への流入下水量は、処理場の流入パターンに合わせて日平均流入量に対して 40～180% の間で変動させた。また、硝化の進行を確保するため、水温の低下に合わせて反応タンク滞留時間が 7.5 時間、10 時間、12.5 時間となるように、1 日間の流入下水量を 3 段階に調整した。以下の実験シリーズとは、反応タンク滞留時間の設定区分による連続する運転期間を示す。

実験結果のうち、最初沈殿池使用系列の冬季実験シリーズの運転条件を予測式に代入して得られた槽内水質の計算値と実測値の関係を Fig. 2 に、また、他の実験シリーズも含めて槽内水質と SVI における計算値と実測値の関係を Fig. 3 に示す。なお、予測計算では、実験シリーズの平均流入水質を用いて活性汚泥の生物相を決定し、槽内水質を実測したときの流入水質を用いて各水質を計算した。Fig. 2 より、NH<sub>4</sub>-N 及び溶解性 PO<sub>4</sub>-P の計

Table 3 Coefficients of the equations to simulate the microbial behavior in  $A_2O_2$ -process<sup>7-12)</sup>

Group name	Reactor condition	Coefficient name	Symbol	Value	Unit
activated suludge	Both condition	Gross yield coefficient / dissolved organic matter	a	0.4	g-SS/g-BOD
		Gross yield coefficient /SS	b	0.95	g-SS/g-SS
	Anoxic	Oxidized organic matter/denitrification nitorogen	$K_{BN}$	2.86	g-BOD/g- $NO_3$ -N
	Aerobic	Autolysis coefficient	$\delta_M$	0.05	g-SS/g-SS/day
Aerobic heterotrophic bacteria except filamentous bacteria	Both condition	Maximum growth rate	$\mu_{mB}$	3	g-SS/g-BOD/day
	Anoxic	Substrate (dissolved organic matter) saturation coefficient with denitrification	$K_{SBD}$	60	mg-BOD/l
		Gross yield coefficient with denitrification	$Y_{Bn}$	0.5	g-VSS/g-BOD
		Organic matter uptake/leached $PO_4$ -P	$k_{BP}$	6.9	g-BOD/g- $PO_4$ -P
	Aerobic	Organic matter utilized/ $PO_4$ -P uptake	$k_{B/P}$	1.83	g-BOD/g- $PO_4$ -P
		Gross yield coefficient	$Y_{Ba}$	0.6	g-VSS/g-BOD
		Autolysis coefficient	$\delta_{XB}$	0.06	g-SS/g-SS/day
Nitrifying bacteria	Aerobic	Maximum growth rate (10~13°C) (13~25°C)	$\mu_{mN}$	$0.246 \cdot 1.54^{(T-13)}$ $0.246 \cdot 1.08^{(T-13)}$	g-SS/g- $NH_4$ -N/day
		Oxidizing agent saturation coefficient	$K_{ON}$	0.75	mg- $O_2$ /l
		Autolysis coefficient	$\delta_{XN}$	0.05	g-SS/g-SS/day
		Gross yield coefficient	$Y_N$	0.20	g-VSS/g- $NH_4$ -N
actinomycetes ( <i>Gordona amarae</i> , <i>Rhodococcus</i> sp.)	Aerobic	Maximum growth rate	$\mu_{mH}$	2.0	g-SS/g-Hexane extracts/day
		Oxidizing agent saturation coefficient	$K_{OH}$	0.5	mg- $O_2$ /l
		Autolysis coefficient	$\delta_{XH}$	0.04	g-SS/g-SS/day
		Gross yield coefficient	$Y_H$	0.41	g-VSS/g- Hexane extracts
Filamentous bacteria	Both condition	Maximum growth rate	$\mu_{mF}$	3.8	g-SS/g-BOD/day
	Anoxic	Gross yield coefficient	$Y_{Fn}$	0.5	g-VSS/g-BOD
	Aerobic	Autolysis coefficient	$\delta_{XF}$	0.04	g-SS/g-SS/day
		Gross yield coefficient	$Y_{Fa}$	0.53	g-VSS/g-BOD

notes) T ; water temperature (°C)

算値が実測値より低くなっている。また、Fig. 3においても低濃度側で計算値が低くなる項目がある。これは、実測値では汚泥の分解に伴う溶出量が上乘せされていることが原因と考えられるが、その差は大きくない。従って、ここに設定した予測式は、 $A_2O_2$ 法の処理特性を反映しており、その処理状況を十分再現できるといえる。

#### 4. 処理障害抑制効果の予測

$A_2O_2$ 法における処理障害抑制効果を微生物構成比、SVI及び処理水質を指標として推定した。反応槽の容量は、HRT=8時間となるように設定し、第1槽へのステップ流入比は0.5、汚泥返送率は50%とした。流入水質

は、BOD 200mg/l (内溶解性 BOD 93mg/l)、SS 濃度 180mg/l、Kj-N 濃度 35mg/l (内  $NH_4$ -N 26mg/l)、T-P 4 mg/l (内溶解性  $PO_4$ -P 2.2mg/l) とし、SRT の影響以下の項では、最初沈殿池の SS 除去率を50%とした。

##### 4. 1 最初沈殿池除去率が与える影響

流入水温20°Cで活性汚泥濃度 (MLSS) を1,500mg/lに固定し、最初沈殿池の SS 除去率を0~90%まで変化させたときの処理水の  $NO_3$ -N と SVI 及び活性汚泥中の糸状性細菌存在比の関係を Fig. 4 に示す。Fig. 4 には全槽好気運転した場合 (全面好気) の結果も併せて示した。Fig. 4 より、SVI は、いずれの処理法でも最初沈殿池除去率の増加に伴って上昇している。しかし、全面好気で

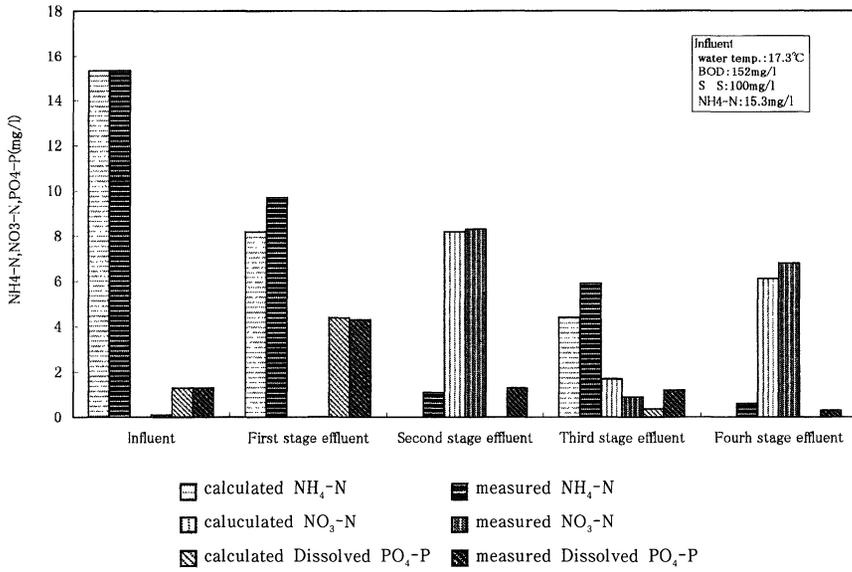


Fig. 2 Relationship between experimental results and calculated value of effluent water qualities in each stage

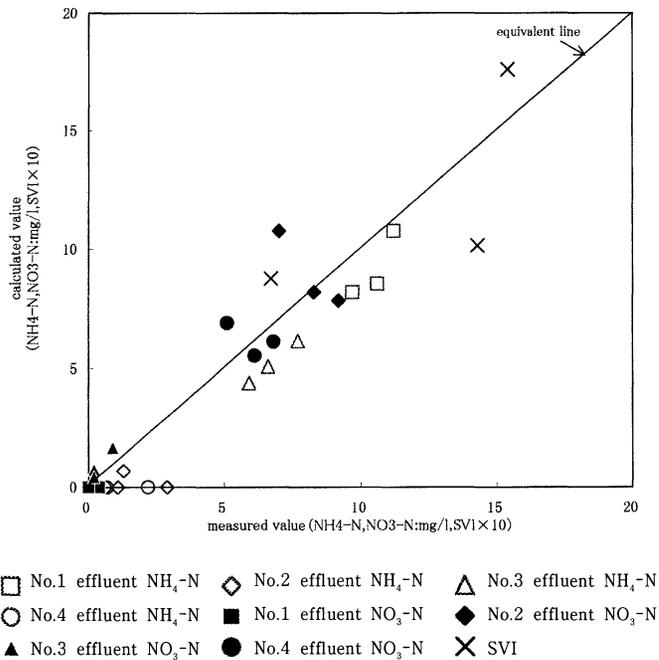


Fig. 3 Relationship between measured value and calculated value fo effluent water qualities

は最初沈殿池除去率80%以上ではSVIが250を超えてバルキング状態になっているのに対して、 $A_2O_2$ 法では、全ての除去率においてSVIが全面好気を下回り、最初沈殿池除去率90%でも200程度に収まっており、最初沈殿池除去率の広い範囲に渡ってバルキングが抑制されている。最初沈殿池除去率の増加に伴ってSVIが上昇するのは、最初沈殿池除去率が増加するほど反応タンクに流入するSS性BODが減少し、溶解性BODの相対的な濃度が上昇するため、活性汚泥中の糸状性細菌存在比が増加することが原因である。また、全面好気において糸状性細菌存在比が高いのは、脱窒細菌による溶解性BODの摂取が行われないことが原因である。

一方、処理水の $NO_3-N$ は、 $A_2O_2$ 法では最初沈殿池除去率10%以上で残留し始め、40~50%以上で9mg/l程度で一定になっている。全面好気では、最初沈殿池除去率10%以下でもほぼ完全硝化されており、18mg/l程度で一定である。全面好気で $NO_3-N$ 濃度が高くなる原因は、脱窒反応による $NO_3-N$ の消費がほとんど起こらないためである。我が国ではアルカリ度が低いため、硝化反応のみが進行して脱窒反応が起こらない場合は、処理水の $NO_3-N$ 濃度が高くなり、pHが排水基準値を守れないケースが多い<sup>15)</sup>ため、全面好気では最初沈殿池除去率の広い範囲で処理水のpHが問題になる。

これらより、 $A_2O_2$ 法は、全面好気運転と比較して、活性汚泥中の糸状性細菌存在比が低くなるため、最初沈殿池除去率の広い範囲にわたってバルキングを抑制する効果が高く、また、硝化の進行に伴う処理水の $NO_3-N$ 濃度が低くなるため、処理水pHの低下を抑制する効果も高いといえる。

#### 4. 2 SRTの影響

最初沈殿池除去率を50%に固定したときのSRTと処理水の $NH_4-N$ 、 $NO_3-N$ 、平均MLSS、SVI及び活性汚泥中の糸状性細菌存在比の関係をFig. 5に示す。Fig. 5より、SRTが3日以上になると硝化が進行し始め、SRT 6日以上では完全硝化が行われている。SVIは、SRT 4~6日にかけて急激に増加しているが、その後の増加は緩やかである。SVIの急激な増加は硝化の進行と一致しており、糸状性細菌が脱窒反応による溶解性BODの摂取を始めるため、活性汚泥中の糸状性細菌存在比が急激に増加することが原因である。これより、硝化抑制運転は、硝化促進運転に比べてバルキング抑制効果が高く、また、硝化促進運転では、SRTを短く運転した方がバルキング抑制効果が高いといえる。なお、SRT 4~6日の範囲の

ような硝化が中途半端に進行している状況下では、残存するアンモニア性窒素の影響で処理水のT-BODが上昇するので、運転方法としては好ましくない。

#### 4. 3 水温の影響

硝化抑制運転及び硝化促進運転における水温とMLSS、SVIの関係をFig. 6に示す。Fig. 6より、MLSSの管理範囲を1,000~3,000mg/lとすれば、水温20℃以上では硝化抑制運転の維持が困難であり、水温13℃以下では硝化促進運転の維持が困難になる。従って、年間の水温が13~20℃の範囲を超えて変動する地域では、流入水温に応じて硝化抑制運転と硝化促進運転を切換えて運転する必要がある。しかし、前述のように運転の移行期には中途半端な硝化により処理水中のT-BODが高くなるから、移行期間はなるべく短縮することが求められる。硝化細菌の増殖は水温が高く、溶存酸素濃度が高いほど速いため、硝化促進運転への切り換えは水温がなるべく高い時期に溶存酸素濃度を高めて行ない、硝化抑制運転への切り換えは水温のなるべく低い時期に溶存酸素濃度を低めて行う方が移行期間を短縮できる。図には水温が12℃~28℃の間で変化する場合のMLSSの操作例も併せて示したが、硝化促進運転への切り換えは水温20℃の時期に汚泥の引抜きを停止してMLSSを一気に増加しながら供給空気量も増加して行ない、硝化抑制運転への切り換えは水温13℃の時期にMLSSを一気に低下するとともに供給空気量も減少して行う。また、硝化促進運転期間中は、なるべくMLSSを下げた方がバルキングを抑制でき、硝化抑制運転期間中はなるべくMLSSを上げた方が処理水のBODを低くできる。なお、例示した運転方法では、図のSVIグラフに示すように切り換え運転を行なってもSVIは150以下で推移するため、バルキングの発生をほとんど抑制できると予測される。

### 5. まとめ

パイロットプラントによる実験成績と既往文献調査から得られたデータを基に、 $A_2O_2$ 法の処理特性を解明するとともに予測式を作成し、糸状性バルキングや硝化による処理水pHの低下などの処理障害を抑制するための最適な運転方法について検討したところ、以下の結論が得られた。

- (1)  $A_2O_2$ 法の処理状況予測式によるシミュレーション結果とパイロットプラントの実験結果は良く一致し、この予測式が $A_2O_2$ 法の処理状況を反映したものであ

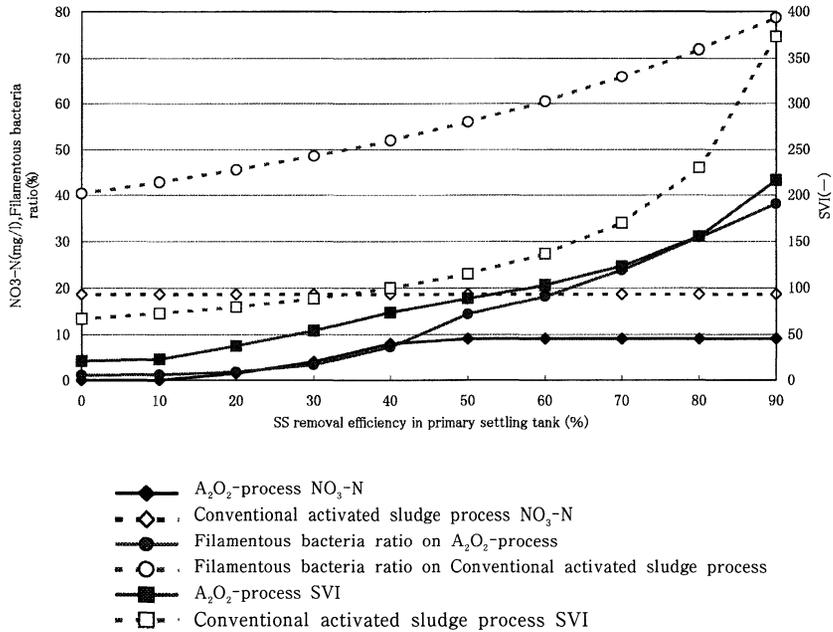


Fig. 4 Influence of SS removal efficiency in primary settling tank on effluent water qualities in various wastewater treatment process

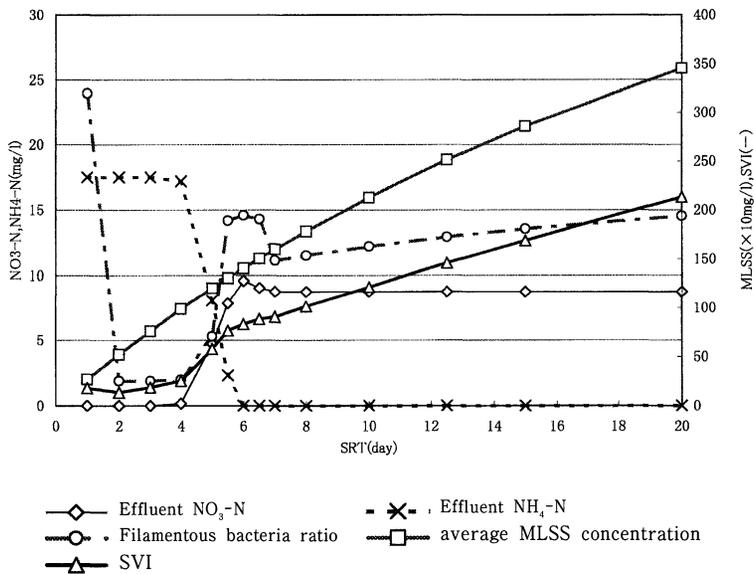


Fig. 5 Influence of SRT on water qualities

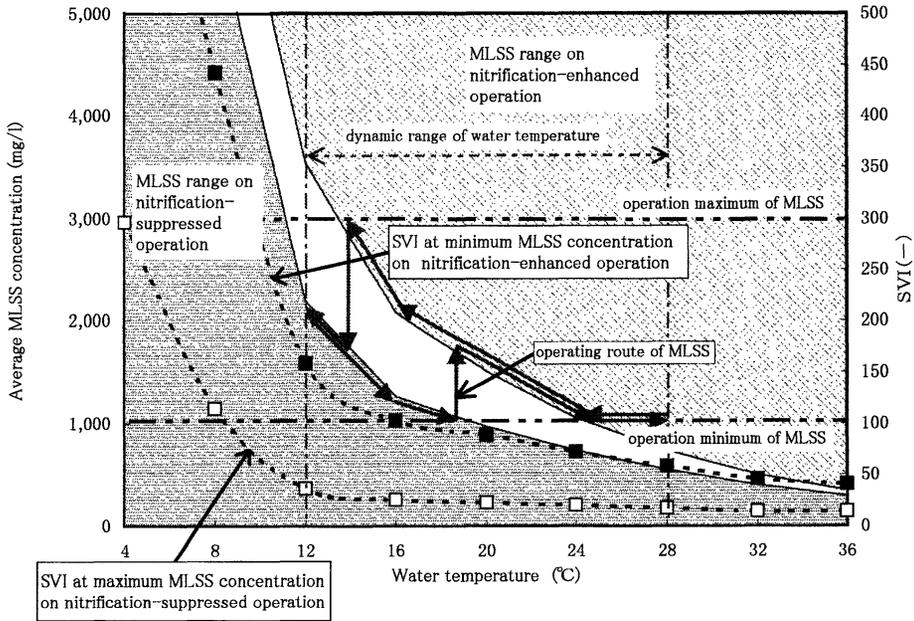


Fig. 6 Influence of water temperature and average MLSS concentration on nitrification-suppressed operation-enhanced operation

- ることが確認された。
- (2) A<sub>2</sub>O<sub>2</sub>法は、最初沈殿池除去率の広い範囲において、全面好気運転された標準活性汚泥法に比べて高いバルキング抑制効果と処理水のNO<sub>3</sub>-N濃度抑制効果があることが確認された。
- (3) 硝化抑制運転は硝化促進運転に比べてバルキングが抑制され、また、硝化促進運転でもSRTが短いほどバルキングが抑制されると予測された。
- (4) MLSS管理範囲の制約により、多くの地域では水温変動に応じて硝化抑制運転と硝化促進運転を切替えて運転する必要があるが、A<sub>2</sub>O<sub>2</sub>法はこの場合でもバルキングを十分抑制できると予測された。

記号 (ABC順)

添字 1, 2, 3, 4 : 各槽番号

添字 i, e : 反応タンク流入水, 処理水

$\alpha_B, \delta_{XB}, \mu_{mB}, K_{SB}, X_B, X'_B, X_{B1}, Y_B$   
: 従属栄養生物群に係る各係数

$\alpha_F, \delta_{XF}, \mu_{mF}, K_{SF}, X_F, X'_F, X_{F1}, Y_F$   
: 糸状性細菌に係る各係数

$\alpha_H, \delta_{XH}, \mu_{mH}, K_{SH}, X_H, X'_H, X_{H1}, Y_H$   
: 放線菌に対する各係数

$\alpha_N, \delta_{XN}, \mu_{mN}, K_{ON}, K_{SN}, X_N, X'_N, Y_N$   
: 硝化細菌に対する各係数

$\alpha$  : 任意の微生物の活性汚泥内存在比 (mg/mg)

$\beta_1$  : 換算係数 (-)

$\beta_2$  : 平均 MLSS 換算係数 (-)

$\delta_M$  : 活性汚泥の自己分解係数 (1/日)

$\delta_X$  : 微生物の自己分解係数 (1/日)

$\epsilon$  : 第1槽ステップ流入比 (-)

$\theta$  : 反応タンク水理学的滞留時間 (HRT) (日)

$\theta'$  : 修正 HRT (日)  $\theta' = \beta_1 \cdot \theta$

$\theta_c$  : 反応タンク汚泥滞留時間 (SRT) (日)

$\mu_m$  : 特定の微生物の最大比増殖速度 (1/日)

$\mu_{mn}$  : 酸化剤 n が働くときの微生物の最大比増殖速度 (1/日)

a : 溶解性 BOD に対する汚泥転換率 (g-MLSS/g-BOD)

b : SS に対する汚泥転換率 (g-MLSS/g-SS)

$dK_{F/B}$  : 各槽内の従属栄養生物群の溶解性 BOD 摂取量に対する糸状性細菌の溶解性 BOD 摂取量の比 (-)

$dS_{BBD}$  : 各槽内の脱氮反応による従属栄養生物群の溶解性 BOD 摂取量 (mg/l)

$dS_{BBOn}$  : 嫌気槽 (第1槽 + 第3槽) における従属栄養生物群の基質摂取量 (mg/l)

- $dS_{BBSa}$  : 好気槽(第2槽+第4槽)における従属栄養生物群の基質摂取量 (mg/l)  
 $dS_{BDA}$  : 無酸素槽(第3槽)に流入した溶存酸素による溶解性BOD摂取量 (mg/l)  
 $dS_{BDn}$  : 各槽内の脱窒反応に伴う溶解性BOD摂取量 (mg/l)  
 $dS_{BDP}$  : 各槽内のりん酸溶出反応に伴う溶解性BOD摂取量 (mg/l)  
 $dS_{BS}$  : SS性BODの摂取量 (mg/l)  
 $dS_{FBD}$  : 各槽内の脱窒反応による糸状性細菌の溶解性BOD摂取量 (mg/l)  
 $dS_{FBDa}$  : 好気槽(第2槽+第4槽)における糸状性細菌の基質摂取量 (mg/l)  
 $dS_{FBDn}$  : 嫌気槽(第1槽+第3槽)における糸状性細菌の基質摂取量 (mg/l)  
 $dS_{HT}$  : 油分摂取総量 (mg/l)  
 $dS_{NA}$  : アンモニア性窒素摂取総量 (mg/l)  
 $dS_{PBP}$  : りん酸イオンの吸収によるBOD消費量 (mg/l)  
 $dS_{PT}$  : 脱りん細菌によるりん酸イオンの吸収量 (mg/l)  
 $dS_{Xn}$  : 酸化剤nが働く反応タンク内の特定の微生物の基質摂取量 (mg/l)  
 $dX/dt$  : 微生物の時間変化 (mg/l・日)  
 $h_1, h_2, h_3, h_4$  : 第1槽~第4槽の滞留時間比 ( $h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = 1, h_1 : h_2 : h_3 : h_4 = (1+r)/(\epsilon+r) : 1.5 \cdot (1+r)/(\epsilon+r) : 1.5 : 2.25$ )  
 $h_a$  : 1日当たりの好気状態に維持される時間比 (-)  
 $h_{On}$  : 1日当たりの増殖に必要な酸化剤nが有効に機能する時間比 (-)  
 $k_{BN}$  : 消費 $NO_x-N$ に対する溶解性BOD摂取量の比 (g-BOD/g-N)  
 $k_{B/F}$  : りん酸イオンの吸収量に対するBOD消費量の比 (g-BOD/g-P)  
 $k_{BP}$  : 溶出りん酸に対する摂取された溶解性BOD量 (-)  
 $k_{ON}$  : 各槽内のアンモニア性窒素の硝化率 (-)  
 $k_{PM}$  : 通常の活性汚泥中の活性汚泥濃度に対するりん酸化合物の含有比 (g-P/g-MLSS)  
 $k_{Pp}$  : りん酸化合物合成時の基質消費速度係数 (1/日)  
 $K_O$  : 溶存酸素に対する飽和定数 (mg/l)  
 $K_{On}$  : 酸化剤nに対する飽和定数 (mg/l)  
 $K_S$  : 基質飽和定数 (mg/l)  
 $K_{SBD}$  : 溶解性BODに対する従属栄養生物群の基質飽和定数 (mg/l)  
 $K_{Sn}$  : 酸化剤nが働くときの基質飽和定数 (mg/l)  
 $O_a$  : 各槽内の溶存酸素濃度 (mg/l)  
 $O_{as}$  : 各槽への溶存酸素の供給量 (mg/l)  
 $O_{au}$  : 無酸素槽(第3槽)における消費溶存酸素濃度 (mg/l)  
 $O_n$  : 反応タンク内酸化剤nの濃度 (mg/l)  
 $O_{NS}$  : 反応タンクへの $NO_x-N$ の供給量 (mg/l)  
 $O_{Nu}$  : 各槽内の消費 $NO_x-N$ 濃度 (mg/l)  
 $Q$  : 反応タンクへの流入水量 ( $m^3$ /日)  
 $Q_w$  : 反応タンクからの余剰汚泥引抜量 ( $m^3$ /日)  
 $r$  : 汚泥返送比 (-)  
 $r_D$  : 微生物の自己分解速度 (mg/l・日)  
 $r'_G$  : 自己分解を考慮した増殖速度 (mg/l・日)  
 $r'_{GF}$  : 糸状性細菌の増殖速度 (mg/l・日)  
 $r'_{GH}$  : 放線菌の増殖速度 (mg/l・日)  
 $r'_{GN}$  : 硝化細菌の増殖速度 (mg/l・日)  
 $r_{GXn}$  : 酸化剤nが働く反応タンク内の特定の微生物の自己分解速度を考慮しない増殖速度 (mg/l・日)  
 $r_{SUXn}$  : 酸化剤nが働く反応タンク内の特定の微生物の基質利用速度 (mg/l・日)  
 $S_{BD}$  : 各槽内の溶解性BOD (mg/l)  
 $S_I$  : 活性汚泥容量指標SVI ( $m/g$ -MLSS)  
 $S_n$  : 酸化剤nが働く反応タンク内基質濃度 (mg/l)  
 $S_{NA}$  : 各槽内のアンモニア性窒素濃度 (mg/l)  
 $S_{PSK}$  : 脱りん細菌が蓄積したポリりん酸化合物態P濃度 (mg/l)  
 $S_{PT}$  :  $PO_4-P$ 濃度 (mg/l)  
 $S_{Pu}$  : 各槽内において脱りん細菌が溶出したポリりん酸化合物濃度 (mg/l)  
 $S_{SS}$  : SS濃度 (mg/l)  
 $T$  : 水温 ( $^{\circ}C$ )  
 $V$  : 反応タンクの容積 ( $m^3$ )  
 $V_{BnP}$  :  $PO_4-P$ の溶出により摂取される分を除いた溶解性BOD反応タンク容積負荷 (g/日/ $m^3$ )  
 $X_0$  : 流入水の微生物濃度 (mg/l)  
 $X$  : 各槽内の特定の微生物濃度 (mg/l)  
 $X'$  : 反応タンク内の特定の微生物の平均濃度 (mg/l)  
 $X' = \beta_2 \cdot X_4$   
 $X'_M$  : 反応タンク内の平均活性汚泥濃度 (SS濃度) (mg/l)  
 $X_M$  : 各槽内の活性汚泥濃度 (SS濃度) (mg/l)  
 $Y$  : 特定の微生物の収率 (-)  
 $Y_{Xn}$  : 酸化剤nが働く反応タンク内の特定の微生物の収率 (-)

## 参考文献

- 1) M. Fujita, K. Iwahori, Y. Kawaguchi, Y. Sakai : A Survey of Operating Problems Associated with Sewage Treatment Plants in Japan, *Japanese Journal of Water Treatment Biology*, 32 (4), 257-267 (1996)
- 2) 川口幸男：スカム、パルキングを考慮した活性汚泥法の設計手法, *月刊下水道*, 15 (12), 11-15 (1992)
- 3) 神奈川県大和市下水道部, 日本下水道事業団：分流式下水道における終末処理場の処理機能に係る技術調査(平成2年度), 日本下水道事業団業務部 (1990)
- 4) 神奈川県大和市下水道部, 日本下水道事業団：分流式下水道における終末処理場の処理機能に係る技術調査(平成3年度), 日本下水道事業団業務部(1991)
- 5) 角野立夫, 森直道, 川口幸男, 多田實：固定化硝化菌を用いた浮遊循環型窒素除去プロセスの検討, 第25回下水道研究発表会講演集, 412-414, 日本下水道協会 (1988)
- 6) エッケンフェルダール Jr., W.W., オコンナー, D.J. (岩井重久訳)：廃水の生物学的処理, コロナ社 (1965)
- 7) 堺好雄：活性汚泥法における放線菌障害とその制御に関する研究, 12, 大阪大学学位論文 (1988)
- 8) 日本下水道事業団業務部：平成元年度活性汚泥の固液分離障害に関する報告書, 日本下水道事業団業務部 (1989)
- 9) 建設省都市局下水道部, 滋賀県土木部, 日本下水道事業団：試験部報告56-016 循環式窒素除去プロセスの運転管理に関する技術調査, 日本下水道事業団試験部 (1982)
- 10) 医科学研究所学友会編：改訂5版 細菌学実習提要 (1976)
- 11) 大庭真治：単槽式嫌気・好気活性汚泥法による下水の高度処理に関する研究, 東北大学学位論文(1995)
- 12) 深瀬哲朗：嫌気・好気活性汚泥法による廃水のリン除去に関する研究, 東京大学学位論文 (1986)
- 13) 味埜俊, 松尾友矩, 川上智規：活性汚泥のリン代謝とリン組成に関する研究(第2報), *下水道協会誌*, 20 (229), 22-29 (1983)
- 14) 田中和博：循環式硝化脱窒プロセスのモデル解析, *下水道協会誌*, 18 (209), 36-45 (1981)
- 15) 建設省都市局下水道部・厚生省生活衛生局水道環境部監修：下水道維持管理指針ポンプ場・処理場施設編 -1991年版-, 752, 日本下水道協会 (1991)  
(受付 1998. 12. 9)  
(受理 1999. 3. 8)