

# [18] 呼吸率活性による活性汚泥プロセスの監視と制御

(株)明電舎 水処理技術部 富士元 英二 ○関 根 孝 夫

## 1 はじめに

活性汚泥処理プロセス、特にエアレーションタンクにおける基質除去能力に関する評価方法として活性度<sup>(1)</sup>が用いられている。活性度は微生物の反応過程によって一般に次の2段階に大別することができる。

- (1) 基質の活性汚泥への吸着及び細胞内への取り込みによる除去活性
- (2) 取り込んだ基質の酸化分解による除去活性 (代謝活性)

また、活性度の測定方法としては ATP 活性、呼吸率活性等が用いられている。今回、我々は DO 計を用いたプロセス用の呼吸率計 (r<sub>r</sub>計) を開発<sup>(2)</sup>し、都市下水処理場 (処理能力 30,000 m<sup>3</sup>/日) において連続測定を行い、その結果呼吸率活性が DO 制御の効果の評価として、また適正な DO 設定値の監視として有効であることを、数値モデルによる解析を含め確めたのでその概要を報告する。

## 2 実験方法

今回の実験で用いた制御回路を図-1に示す。処理施設は2系列運転で、一方のエアレーションタンク、B、C、D回路に DO 計を設置し、Bは監視用として、C、D回路は制御用として使用した。当処理施設は流入負荷変動が大きいいため流入水 (処理水) 量によるフィードフォワード的な要素を加味し、プロワの吸込弁を操作し送風量の制御を行った。

### 2-1 実験内容

本実験は、定風量運転 (RUN 1) と D 回路の DO 計を用いた DO 制御運転 (RUN 2) からなり、それぞれ各運転条件下で2週間以上経過した時の水質データを求め比較検討した。流入水は A、B 回路に通水した。返送汚泥量は 540 m<sup>3</sup>/h の定量運転とした。また、余剰汚泥は 1 日 1 回排出した。本実験期間中は SRT 15 日で運転した。

### 2-2 数値モデル式

エアレーションタンクは整流壁にて A~E 回路の 5 回路に分割されていることから、各回路は完全混合として近似できるためその列モデルにより解析した。また、最終沈殿池は押し出し流れとし、反応は進行しないものとした。エアレーションタンク内において用いた数値モデルを表-1に示す。

### 2-3 呼吸率活性

エアレーションタンク内で消費される酸素量は、基質の酸化分解に利用される酸素量と、活性汚泥の内生呼吸に必要な酸素量の和として式-(7)で示される。この両辺を M L V S S で割ると、呼吸率 kr を求めることができる。ここで、基質除去に必要な割合を kr-L、内生呼吸に必要な割合を kr-e と定義すれば次の関係式が得られる。

$$kr = kr - L + kr - e \quad (9)$$

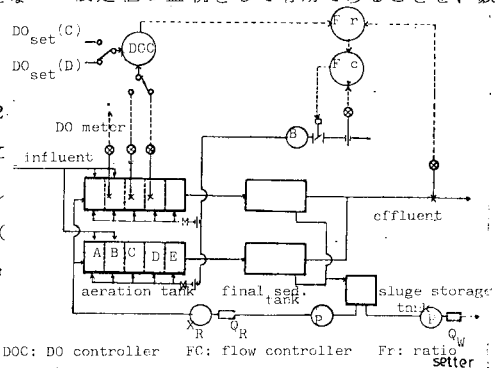


Fig.1 Automatic DO control system

Table 1 Mathematical models (aeration tank)

Item	Fundamental model and condition
Substrate concentration	1. $dL/dt = -K_d \cdot X \cdot L$ (first order equation) (1)
	2. when DO is below critical DO concentration $dL/dt = (C_s - C) \cdot n \cdot \frac{dL}{dt}$ (2)
NH <sub>3</sub> -N	1. $dN/dt = -K_d \cdot X \cdot N$ (first order equation) (3)
	2. when DO is below critical DO concentration $dN/dt = (C_s - C) \cdot n \cdot \frac{dN}{dt}$ (4)
MLSS concentration	1. $dX/dt = Y_L \cdot dL/dt - K_d \cdot X$ (5) 2. No sludge growth of NH <sub>3</sub> -N oxidation
DO concentration	1. $dC/dt = K_L a (C_s - C) - r_r$ (6) 2. $dC/dt = 0$ under DO constant control
Respiration rate	$r_r = n_e \cdot dL/dt + n_g \cdot dN/dt + bX$ (7)
Overall oxygen transfer coefficient	$K_L a = k_1 \cdot C_s \cdot n_1$ (empirical formula) (8)

また両辺を $kr$ で割ることにより、呼吸率に対する基質分解の割合と内生呼吸の割合を求めることができる。

$$\left(\frac{kr-L}{kr}\right) + \left(\frac{kr-e}{kr}\right) = 1 \quad (10)$$

一般に、システムの適正な運転管理を行っている場合、エアレーションタンク出口では活性汚泥細胞中に貯留されている基質はほとんどなくなり( $kr-L \approx 0$ )、適正な内生呼吸段階( $kr \approx kr-e$ )を程することが知られている。一方、過負荷状態で運転している場合は、エアレーションタンク出口においても活性段階にあり、基質が細胞内に残留し、この状態が長時間続くと処理水質が悪化する原因となる。そこで、エアレーションタンク出口での呼吸率が基質の吸着、貯留量を示すと考えられることから、内生呼吸率( $kr-e$ )に対する呼吸率( $kr$ )の比( $kr-e/kr$ )を呼吸率活性と定義した。この呼吸率活性は、0~1の範囲をとり、一般にエアレーションタンク入口側ほど小さく、出口側で内生呼吸段階に入るとほぼ1に近い値となる。

#### 2-4 内生呼吸率 ( $kr-e$ )

$kr-e$ は、エアレーションタンク出口(D回路)に設置した $r_r$ 計<sup>(2)</sup>で同一の検水を繰り返し測定して求めた。

内生呼吸段階では式(7)で、 $dL/dt=0$ 、 $dN/dt=0$ となり

$$r_r(t) = b \cdot X(t) \quad (11)$$

また汚泥の増殖式(式(5))も同様に、 $dL/dt=0$ から次式となる。

$$\frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} = -kd \quad (12)$$

式(12)を $X$ について解き、式(11)に代入し両辺の対数をとると、式(13)が得られる。

$$\ln r_r(t) = \ln r_{r0} - kd \cdot t \quad (13)$$

活性汚泥が内生呼吸段階に入ると、式(13)が成り立ち、この直線上に繰り返し測定データのデータがのることになる。この直線を $t=0$ に外そうすることにより内生呼吸度( $r_{r0}$ )を求めることができ、初期汚泥濃度 $X_0$ で割ることにより $kr-e$ を求めることができる。

#### 3 結果及び考察

当処理場への流入下水量の経時変化は、家庭下水の処理を中心とした処理場に特有な変動を示し、9時~13時頃は流入水量のピークを示し、4時~8時頃は極端に減少する。このように流入負荷変動が大きいことから、従来の定風量運転(9時~18時の間が約7000 $m^3/h$ 、18時~9時の間が約5000 $m^3/h$ )では、DO濃度がかかなり大きく変動した(図-2、RUN1)。

このため高負荷時の11時頃から17時頃は、DO濃度がエアレーションタンク出口付近(D回路)で0.5 $mg/l$ 程度まで低下した。一方、D回路で設定値2.5 $mg/l$ で制御を行った場合(RUN2)は一部の時間帯を除き、設定値の $\pm 0.2$  $mg/l$ の幅で制御することができた(図-2、RUN2)。このような定風量運転とDO制御時のDO濃度の経時変化の相違は、エアレーションタンク出口(D回路)の呼吸率や処理水質にも影響を示した。一般にDO濃度がある値(0.5 $mg/l$ 程度)以下では活性汚泥の基質除去速度はDO濃度に依存して低下するといわれている。<sup>(3)</sup>定風量運転では、DO濃度の低い状態(約0.5 $mg/l$ )が長時間続いたため基質の除去速度が低下し、その結果DO制御に比較して、エアレーションタンク出口(D回路)でも、 $kr$ の高い状態(ピーク時30 $mgO_2/g-VSS/h$ )がみられた(図-3)。また、日平均 $kr$ 値の高い定風量運転下では、エアレーションタンク出口でも基質が十分酸化分解されず細胞内貯留分がDO制御時よりも

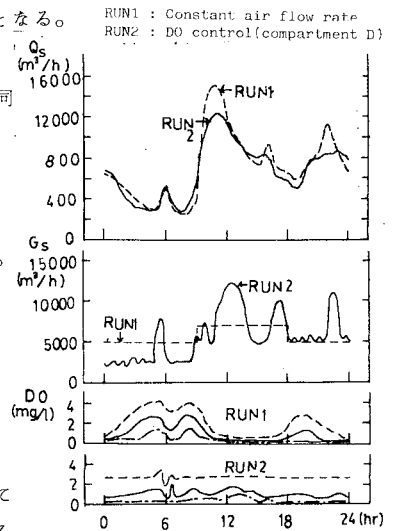


Fig.2 Hourly variation of influent flow rate, air flow rate and DO level

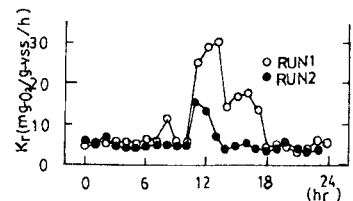


Fig.3 Hourly variation of  $K_r$

多いことが予想される。これは、図-4に示す処理水COD値からも明らかで、DO制御によりCOD濃度変動が大きく緩和され、さらにその値も2~3mg/l程度低い値で安定していることがわかった。以上の実験結果について、呼吸率活性の面から考察を行った。まず、実験期間中に(2-4)に示した方法により、内生呼吸率( $Kr-e$ )を測定した結果を図-5に示す。これより、 $Kr-e$ は平均4.5mg $O_2$ /g- $VSS/h$  )となった。この値を用いてRUN1、RUN2の呼吸率活性を計算した結果を図-6に示す。DO制御下では、1日のうちで内生呼吸に入っている時間帯(活性度 $\approx 1.0$ )が8時間以上あるのに対して、定風量では逆に活性度が約0.2の時間帯が7時間も続いた。これはエアレーションタンク出口においてもまだ高い活性状態にあることを示しており、この結果処理水質も悪化したと考えられる。

#### 4 数値モデル式による考察

表-1に示した数値モデル式を用い、その列モデルのシミュレーションを行い、DO設定値と呼吸率活性及び処理水との関係を解析した。定数の推定方法は、各定数に密接に関連する実測データと計算値の比較により最小二乗法により求めた。その結果を表-2に示す。その他の入力データを表-3に示す。ただし、 $Y$ 及び $k_d$ は系内汚泥量の物質収支より求めた<sup>(4)</sup>。D回路のDO設定値を0.2mg/lから2.5mg/lまで変えたときのエアレーションタンク出口における呼吸率の経時変化を図-7に示す。これよりDO設定値が1.0mg/l以下では、 $Kr$ が顕著に増加していることがわかる。ただし、図-7は基質除去速度のDO濃度による律速がない状態に、式-(2)、式-(4)、式-(7)を用いて計算した結果であり、実際のエアレーションタンク内での呼吸率は、図-8のように臨界DO濃度( $C^* = 1.0$ )以下の0.6、0.2mg/lの場合、DOの律速により低い値となっている。また、DO設定値が、臨界濃度以上の1.0、2.5mg/lの場合、図-7の呼吸率と実際のエアレーションタンク内の値がほぼ等しいことを示している。逆に言えば、臨界DO濃度以下では、基質の除去速度がDO濃度により抑制されているため、基質が活性汚泥内に残留し、その結果 $Kr$ 計

による測定値が高い値をとることになる。各DO設定値と呼吸率活性の関係を図-9に示す。また設定値と処理水CODの関係を図-10に示す。これより明らかなように、DO設定値が1mg/l以下では、活性度の低下、即ち、細胞内基質量の増加に伴い処理水質も急激に低下していることがわかる。

#### 5 おわりに

呼吸率活性が、エアレーションタンク内の微生物反応過程の定量的な指標として有効である

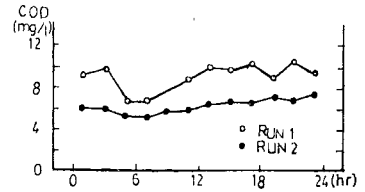


Fig.4 Hourly variation of effluent COD

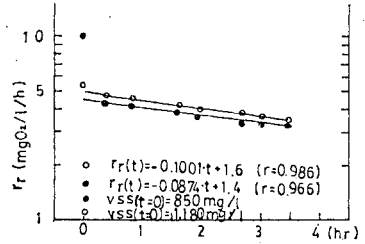


Fig.5 Endogenous respiration rate taken from periodic measurement

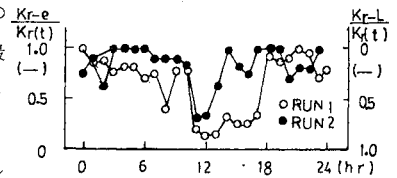


Fig.6 Hourly variation of respirometric activity

Table 2 Coefficients calculated by the least squares method

$K_L$	$0.8 \times 10^{-3}$ (mg/l/day) <sup>-1</sup>
$K_N$	$0.5 \times 10^{-3}$ (mg/l/day) <sup>-1</sup>
$a_1$	1.5 (mg- $O_2$ /mg-COD)
$b$	0.04 (1/day)
$n^*$	0.5

Table 3 Input data for mathematical modeling

Temp.	24(°C)	$C_s$	8.34(mg/l)
$Y$	1.55(mg- $ss$ /mg-COD)	$K_d$	0.017(1/day)
$k_1$	$2.57 \times 10^{-5}$	$n_1$	1.62
$C^*$	1.0(mg/l)	$a_n$	4.57(mg- $O_2$ /mg-NH <sub>3</sub> -N)

( ) : DO set value (compartment D)

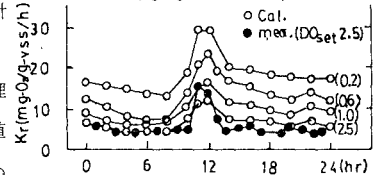


Fig.7 Hourly variation of  $Kr$  taken from meas. and results calculated by models

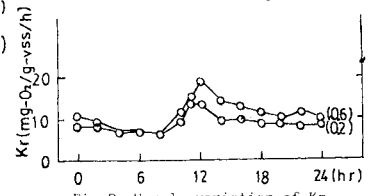


Fig.8 Hourly variation of  $Kr$

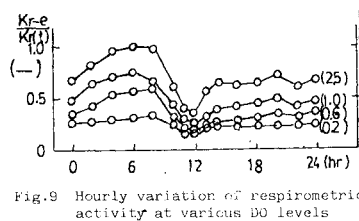


Fig.9 Hourly variation of respirometric activity at various DO levels

ことを確めた。

また $r_r$ 計による繰り返し測定により、内生呼吸率 $kr_{\text{end}}$ を求めることが可能となった。

DO濃度による基質除去速度の律速条件を考慮した数理モデル式を用いて、DO制御における設定値と呼吸率活性の関係を明らかにすることができた。

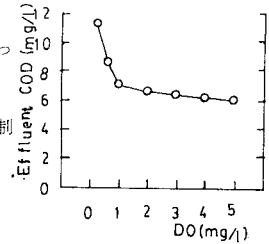


Fig. 10 Effect of DO levels on effluent COD

Notation

N: $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration	(mg/l)	b: Endogenous rate constant	(1/day)
X: MLVSS concentration	(mg/l)	$r_r$ : Respiration rate	( $\text{mg-O}_2/\text{l/hr}$ )
C: DO concentration	(mg/l)	$K_{\text{La}}$ : Overall oxygen transfer coefficient	(1/hr)
$C_s$ : Saturation concentration of oxygen in pure water	(mg/l)	$C_L$ : Critical DO concentration of carbonaceous substrate	(mg/l)
$Q_s$ : Influent flow rate	( $\text{m}^3/\text{hr}$ )	$C_N$ : Critical DO concentration of $\text{NH}_3\text{-N}$	(mg/l)
$Q_R$ : Return sludge flow rate	( $\text{m}^3/\text{hr}$ )	$n$ : Constant on limitation of substrate utilization rate	(-)
$G_s$ : Air flow rate	( $\text{Nm}^3/\text{hr}$ )	$k_1, n_1$ : Constant	(-)
$K_L$ : Rate kinetics constant on utilization of carbon substrate	( $\text{mg/l/day}$ ) <sup>-1</sup>	L: Carbonaceous substrate concentration	(mg/l)
$K_N$ : Rate kinetics constant on utilization of $\text{NH}_3\text{-N}$	( $\text{mg/l/day}$ ) <sup>-1</sup>		
$Y_L$ : Yield coefficient	(-)		
Kd: Decay coefficient	(1/hr)		
$a_L$ : Mass of oxygen utilization per unit of carbonaceous substrate removed	( $\text{mg-O}_2/\text{mg-COD}$ )		
$a_N$ : Mass of oxygen utilization per unit of $\text{NH}_3\text{-N}$ removed	( $\text{mg-O}_2/\text{mg-NH}_3\text{-N}$ )		

(参考文献)

- (1) 中西弘：“活性汚泥生物反応に関する予備的諸問題—活性汚泥法微生物反応に関する研究（その1）—”，下水道協会誌，Vol. 3，NO. 30，（1966）
- (2) 富士元，岩堀，佐藤：“下水処理場における呼吸測定の自動測定”，下 wastewater 処理の自動制御と水質の計測監視ワークショップ，（1980）
- (3) Eckenfelder, W. W. and O'Conner, D. J. : 廃水の生物学的処理，岩井重久訳，コロナ社（1971）
- (4) 古屋，富士元，関根，田村：“SRT制御に関する研究”，下水道協会誌，Vol. 16，NO. 180，（1979）