

## (77) 流入負荷変動に対する高負荷二点DO制御OD法の 適応性と制御因子の検討

中町 和雄<sup>1\*</sup>・藤原 拓<sup>2</sup>・陳 小強<sup>3</sup>, 川口 幸男<sup>4</sup>, 橋本 敏一<sup>5</sup>, 津野 洋<sup>6</sup>

<sup>1</sup>前澤工業株式会社 開発本部 (〒332-8556埼玉県川口市仲町5-1-1)

<sup>2</sup>高知大学 教育研究部自然科学系 農学部門 (〒783-8502高知県南国市物部乙200)

<sup>3</sup>愛媛大学大学院 連合農学研究科 (〒790-8556愛媛県松山市樽見3-5-7)

<sup>4</sup>日本下水道事業団 技術戦略部戸田技術開発分室 (〒335-0037埼玉県戸田市下笹目5141)

<sup>5</sup>日本下水道事業団 技術戦略部水処理技術開発課 (〒160-0004東京都新宿区四谷三丁目3-1)

<sup>6</sup>京都大学 大学院工学研究科 都市環境工学専攻 (〒615-8540京都市西京区京都大学桂)

\* E-mail: kazuo\_nakamachi@maezawa.ac.jp

著者らは、オキシデーションディッチ(OD)の2か所にDO計を設置し曝気と循環流速を独立に制御することで流入負荷変動に対し好気・無酸素ゾーンを維持可能な、高負荷二点DO制御OD法の開発を行ってきた。本研究では、流入負荷変動に対する本法の適応性および制御因子を明らかにする目的で、ベンチスケール実験およびモデルによる検討を行った。その結果、一点DO制御や曝気量一定制御と比較して、二点DO制御は流入負荷変動に対して好気ゾーン末端DOおよび好気・無酸素ゾーン比率を一定に維持しやすく、ゾーン運転での二点DO制御の優位性が示された。さらに、流速の制御範囲に制約のある実施施設においても、上流側のDO設定値を変化させることで、幅広い流入負荷変動に本法が適応しうる可能性が示された。

**Key Words:** オキシデーションディッチ法, ゾーン運転, 二点DO制御, 制御因子, 負荷変動

### 1. 序論

2010年度末時点での我が国の下水道の普及率は72.7%<sup>1)</sup>だが、12の県では普及率が50%未満にとどまっている。下水道未普及地域の解消や既存施設の能力アップ、高度処理化・省エネ化などを実現する小規模向けの効率的な処理技術の開発が求められている。

オキシデーションディッチ(OD)法はHRT24時間以上の低負荷条件を前提に標準化され小規模下水処理場を中心に普及が進んでいる。周長が短いODでは好気・無酸素ゾーンを同時に確保するのが難しいとの報告<sup>2)</sup>もあり、大半の処理場で時間的に好気と無酸素を繰り返す間欠運転を行っている<sup>3)</sup>。また、既往の研究<sup>4,5)</sup>はHRTが24時間以上の低負荷条件を前提としており、高負荷条件での設計操作因子について実証的に検討した事例は少ない。

高負荷二点DO制御OD法は従来のOD法より高負荷・省スペース・省エネルギーに配慮したシステムであると同時に生物学的に窒素・リンの高度処理が可能なシステ

ムとして開発中である。本法は、排水処理施設の統廃合を念頭に置いた既存施設の能力アップや負荷変動への対応などに有効と考えられる。藤原ら<sup>7)</sup>はOD槽を想定した1槽37.5Lの8槽完全混合槽列実験装置を用いた高負荷二点DO制御OD法のベンチスケール実験を行い、滞留時間11時間程度と従来のOD法より高負荷条件にも拘らず二点DO制御により空間的に適切な好気・無酸素ゾーン比を出現させ、平均87.6%と高い溶解性窒素除去率を得ている。また、Chenら<sup>8)</sup>は本法におけるOD槽での高い窒素除去率が嫌気槽へ返送される硝酸性窒素量を低減させ、結果的に本法がりん除去にも有効であることを示している。さらに、藤原ら<sup>9)</sup>は実規模施設に本法を適用し処理水平均全窒素1.3mg/lの処理成績が得られたと報告している。

本研究では、高負荷二点DO制御OD法の流入負荷変動に対する適応性を明らかにするとともに、ゾーン運転ODにおける二点DO制御法の有効性を他の制御法と比較・評価する目的で、ベンチスケール実験およびモデル

による検討を行った。さらに、二点DO制御における制御因子について検討するとともに、実施設への本法の摘要可能性についても検討を加えた。

2 実験方法

(1) 実験装置

ベンチスケール実験装置のフローを図-1に示す。原水は目幅2mmのスクリンを通過後に、原水ポンプにより供給される。OD槽は8槽完全混合槽列の反応槽で第1槽が流入部、第8槽が流出部となり、OD槽無終端水路の流動を模擬するために、第8槽から第1槽へ内部循環を行うための循環ポンプを設けた。第8槽から流出した活性汚泥混合液は最終沈殿池（容積151L）に流入し、固液分離を行い、沈殿汚泥は返送汚泥ポンプにより嫌気槽へ返送した。流入水のC/N比を高く保ち脱窒のための有機物を確保するために、一般的なOD法と同様に最初沈殿池は設けなかった。生物反応槽の流動特性をインパルス応答<sup>10)</sup>法により確認した結果、一周の流下に関しては完全混合槽列モデルにおける槽列数が $N \approx 8$ と押し出し流れに近く、循環を行った場合には槽全体の流動に関しては $N=12$ と完全混合とみなしうることが確認され、OD法の流動を模擬しうると考えられた<sup>11)</sup>。

装置は二点DO制御を行うために酸素供給と循環流量を独立に制御可能な散気式ODを模擬し、送風機および散気装置を用いて第5槽で曝気を行った。生物学的りん除去を目的としてOD槽の前段に1槽37.5Lの嫌気槽を設置した。原水および返送汚泥は嫌気槽に流入させ、嫌気槽の流出水をOD第1槽に流入させた。なお、嫌気槽は放流水質目標などにより必要に応じて設置するものである。

(2) 実験方法

高知県香南市野市浄化センターの沈砂池流出水を原水とし、2008年12月から約1年間の連続実験を行った。日変動特性の把握および物質収支解析を行う目的で通日試験を2009年2月23日(RUN2-1)、6月9日(RUN3)、8月4日(RUN4)の計3回実施した。RUN番号は通日試験実施日を含む各

表-1 実験条件

| 項目                     |                      | RUN2-1     | RUN3      | RUN4      |
|------------------------|----------------------|------------|-----------|-----------|
| 年月日                    | —                    | 09/2/23~24 | 09/6/9~10 | 09/8/4~5  |
| HRT (OD槽/嫌気槽)          | h                    | 13.5 /1.7  | 11.4 /1.4 | 11.4 /1.4 |
| 循環時間                   | min                  | 18.8       | 14.1      | 19.6      |
| DO (6槽/8槽)             | mg/l                 | 1.43/0.13  | 1.15/0.16 | 1.28/0.14 |
| 好気/無酸素ゾーン比             | —                    | 0.38/0.50  | 0.38/0.50 | 0.38/0.50 |
| OD槽水温                  | ℃                    | 15.7       | 25.1      | 28.4      |
| MLSS濃度                 | mg/l                 | 4014       | 2828      | 2345      |
| BOD容積負荷                | kg/m <sup>3</sup> /d | 0.15       | 0.21      | 0.13      |
| NH <sub>4</sub> -N容積負荷 | kg/m <sup>3</sup> /d | 0.009      | 0.016     | 0.013     |
| 全炭酸化物容積負荷              | kg/m <sup>3</sup> /d | 0.193      | 0.282     | 0.185     |
| 返送汚泥率                  | %                    | 76%        | 50%       | 48%       |
| SRT (OD槽)              | d                    | 23.6       | 14.8      | 20.3      |

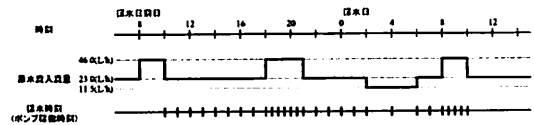


図-2 流入水量日間変動と採水時間

実験期間の番号を示す。本研究では通日試験の結果を基に流入負荷変動とその影響について検討する。

表-1に通日試験時の実験条件を示す。ここで好気ゾーン比および無酸素ゾーン比はDO値がそれぞれ0.5mg/l以上および0.1mg/l以下の槽がOD全体に占める割合から計算した。好気ゾーンおよび無酸素ゾーンのいずれにも属しない中間的なゾーンも全体の約1割強存在した。SRTは通日試験実施日を含むRUNの平均値を示す。HRTは従来のOD法の約半分の12時間を目安に設定し、小規模施設の流入変動を模擬するために図-2に示すような変動比（最大/平均）が約2の流入変動を与えた。循環時間はOD槽容積を系内を循環する流量で除したもので、式(1)により定義した。循環液量 $Q_R$ が流入水量 $Q_{inf}$ に対して数十倍と大きいため、循環時間は十数分と非常に短かった。

$$\text{循環時間 } T_R = \frac{V_{OD}}{Q_{inf} + Q_R + Q_r} \quad (1)$$

ここで  $T_R$ : 循環時間(h)

$V_{OD}$ : OD槽容積(m<sup>3</sup>)

$Q_{inf}$ : 流入水量(m<sup>3</sup>/h)

$Q_R$ : 循環液量(m<sup>3</sup>/h)

$Q_r$ : 返送汚泥量(m<sup>3</sup>/h)

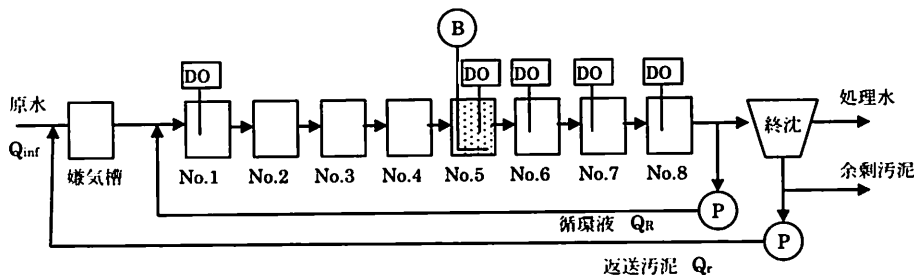


図-1 ベンチスケール実験装置フロー

### (3) 制御方法

流入負荷変動に対して好気・無酸素ゾーンを一定に保つために二点DO制御を行った。第6槽のDO値を一定に保つために曝気風量を調節し、第8槽のDO値を一定に保つために循環流量を調節した。

### (4) 分析・測定方法

採水は流入水、嫌気槽、第8槽、返送汚泥および終沈流出水（以下流出水）で行った。表-2に主要な水質分析項目および測定法を示す。

図-1に示すように、第1槽および第5～8槽のDO値(COS SLim48)および各流量値(原水、循環、返送)(電磁流量計山武Magnew3000)を連続測定し、2秒毎にデータロガー(Keyence GR3500)に記録した。

表-2 主要水質分析項目

| 採水地点                                                             | 分析方法・測定方法            |
|------------------------------------------------------------------|----------------------|
| BOD                                                              | 下水試験法に準拠             |
| CODcr                                                            | JIS K0102 及び下水試験法に準拠 |
| SS, VSS                                                          | 下水試験法に準拠             |
| TN                                                               | 同上                   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N                                  | インドフェノール-4青吸光度法      |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | イオンクロマトグラフ法          |
| TP, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P                             | 下水試験法に準拠             |

## 3. 流入負荷変動がDO勾配に及ぼす影響

### (1) 流入負荷変動による酸素消費速度(OUR)の変動

流入負荷変動に応じてOD槽内の酸素消費速度(OUR)も変動し、系内のDO勾配や好気・無酸素ゾーン比に影響を与えるため、流入負荷変動がOURの時間変動に与える影響について検討する必要がある。また、曝気装置の酸素供給能力を決定する上でもOURの変動比(最大/平均)は重要な設計因子のひとつである。

#### a) 通日試験における流入全被酸化物負荷の時間変動

ベンチスケール実験では流入負荷日間変動比率(時間最大/時間平均)を約2に設定して実験を行った。OD法処理場の実態調査<sup>12)</sup>によると、80%以上の処理場で流入水量の日間変動比率が200%以下であったとされており、本設定は妥当と考えられる。

図-3に通日試験における全被酸化物負荷の時間変動を平均値を1とした相対値で示す。ここで全被酸化物負荷は式(2)により計算した。流入水量は1時間平均値を用い、流入水質は2時間おきのデータを直線補間して計算した。全被酸化物負荷は朝8時前後と夜20時前後にほぼ同じ高さのピークが見られた。最大ピークの値が日間変動比率に相当し、その値は1.91～2.15の範囲内であった。

全被酸化物負荷(gO<sub>2</sub>/h)

$$= \text{流入 BOD 負荷} + 4.57 \times \text{流入 TKN 負荷} \quad (2)$$

$$= \text{流入水量} \times \{\text{流入 BOD} + \text{流入 TKN} \times 4.57\}$$

ここで TKN: 全ケルダール性窒素

#### b) 通日試験におけるOURの時間変動

3回の通日試験データからOURの経時変化を計算した。OURは第6槽と第8槽のDOデータおよび循環時間から式(3)を用いて計算したもので、第7,8槽の平均OURを表す。表-3に示した各RUNの24時間平均OURを1とした場合の相対OURを計算し、図-4に示した。

$$r_{7-8}(\text{mg/l/h}) = \frac{r_7 + r_8}{2}$$

$$= \frac{1}{2} \left( \frac{C_6 - C_7}{T_R/N} + \frac{C_7 - C_8}{T_R/N} \right) = \frac{C_6 - C_8}{2 T_R/N} \quad (3)$$

ここで、 $r_i$ : 第*i*槽平均O(mg/h)  
 $C_i$ : 第*i*槽DO(mg/l)  
 $T_R$ : 循環時間(h)  
 $N$ : 槽数(=8)

図-4よりOURの時間変動パターンは図-3に示される全被酸化物負荷のピーク形状と比べてなだらかであった。また、日間変動比率も約1.4で全被酸化物負荷の変動比率の約2と比べて小さかった。

表-3 通日試験における 24 時間平均 OUR

| RUN               | RUN2-1 | RUN3 | RUN4 |
|-------------------|--------|------|------|
| 24h 平均 OUR mg/l/h | 15.8   | 16.2 | 13.4 |

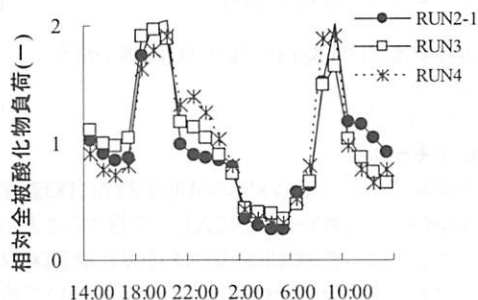


図-3 相対全被酸化物負荷の経時変化

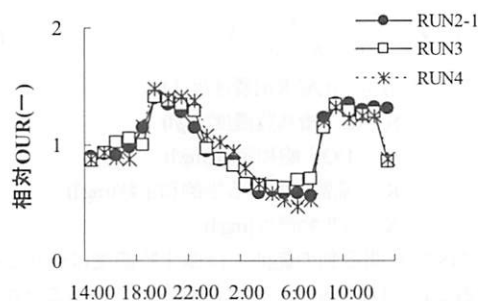


図-4 相対 OUR の経時変化

Ekamaら<sup>13)</sup>は標準活性法における全被酸化物負荷とOURの時間変動比の関係について式(4)を提示している。

$$\text{OUR 変動比} = 1 + 0.5 \times (\text{全被酸化物負荷変動比} - 1) \quad (4)$$

今回の結果に当てはめると全被酸化物負荷変動比2に対するOUR変動比は1.5で実験結果とほぼ一致する。OURの時間変動は反応槽での希釈効果、流入COD組成や分解速度、内生呼吸などの影響を受けると考えられる。

## (2) DO制御方法がDO勾配に及ぼす影響

### a) 簡易DO収支モデル

OURの時間変動はOD水路内のDO勾配に影響を及ぼし、好気・無酸素ゾーン比が変化する。そこで二点DO制御の有効性を明らかにすることを目的に簡易DO収支モデルを構築し、OURの時間変動が好気・無酸素ゾーン比に与える影響を検討する。

図-1に示すようなOD槽を模擬したN槽完全混合槽列モデル(N=8)で、各槽のDOの収支式は式(5)で表される。

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{C_{i-1} - C_i}{T_R / N} + \alpha \cdot K_L a_i (\beta \cdot C_s - C_i) - r_i \quad (5)$$

ここで、 $\alpha K_L a_i$ : 第i槽汚水総括酸素移動容量係数(1/h)  
 $\beta C_s$ : 汚水飽和溶存酸素濃度(mg/l)

図-1の曝気槽(i=5)について考えると、一定の無酸素ゾーンが形成されている条件下では $C_5=0$ であり、定常状態を仮定すると式(6)が導かれる。

$$0 = \frac{-C_5}{T_R / N} + \alpha \cdot K_L a_5 (\beta \cdot C_s - C_5) - r_5 \quad (6)$$

非曝気槽では $\alpha K_L a_i=0$ となり式(7)が導かれる。

$$0 = \frac{C_{i-1} - C_i}{T_R / N} - r_i \quad (7)$$

### b) OURモデル

非曝気槽である第6,7,8槽のOURは式(7)にDO濃度および循環時間の実測データを代入して計算することができる。ここでは、実測OURおよびDOを基に簡易DO収支モデルに組み込むためのOURのモデル式について検討する。OURは一般にDOおよび基質濃度、微生物濃度の関数として式(8)のように表すことができる。

$$r_i = \mu_{O2} \times \frac{C_i}{K_O + C_i} \times \frac{S_i}{K_S + S_i} \times X \quad (8)$$

ここで  $\mu_{O2}$ : 比酸素消費速度(1/h)

$S_i$ : 第i槽基質濃度(mg/l)

$K_O$ : DO半飽和定数(mg/l)

$K_S$ : 基質に関する半飽和定数(mg/l)

$X$ : 微生物濃度(mg/l)

式(8)で日間変動の範囲では微生物濃度は一定とみなせること、DO勾配は一定に制御されていることから、図-4に示したようなOURの経時変化は基質濃度の時間変

化に起因すると考えられる。

また、式(8)で微生物濃度は空間的にも均一と考えられるため、同一時間帯におけるOURの空間分布はDO勾配および基質濃度勾配の影響を受けている可能性がある。ここで、2(1)で述べたようにOD槽内は高い循環倍率により $N=1.2$ と装置全体で完全混合に限りなく近いため、基質濃度は均一で濃度勾配は無視しようと考えられる。一方、DOは1周回ごとに曝気による上昇と酸素消費による下降を繰り返しておりその濃度勾配は無視できない。

以上の考察から、式(8)右辺のDO項以外を最大OURとして $r_{\max}$ で表現し、 $r_{\max}$ は各槽共通で時間帯毎に変化すると考え、各槽のOURを式(9)に示すDO濃度の関数として表した。

$$r_i = r_{\max} \times \frac{C_i}{K_O + C_i} \quad (9)$$

ここで  $r_{\max}$ : 最大OUR(mg/h)

次に、 $r_i$ および $C_i$ の実測値および式(9)を用いて、パラメーター $r_{\max}$ および $K_O$ を推定する方法について以下に検討する。まず、 $K_O$ はDOに関する半飽和定数<sup>14)</sup>で硝化細菌に対して0.5mg/l、従属栄養細菌に対して0.2mg/lなどの値が報告されており実験条件により変化する可能性がある。しかし、時間帯毎に $r_{\max}$ と $K_O$ が独立に変化すると考えた場合、 $(C_i, r_i)(i=6\sim 8)$ の3組のデータから2つのパラメーター $r_{\max}$ と $K_O$ を推定することとなり難しい。そこでひとまず $K_O$ はRUN内では変化しないものと仮定して、各時間帯の $r_{\max}$ を最小二乗法により推定した後、 $K_O$ の適合性について検討することとした。

パラメーターの推定には通日試験における第6, 7, 8槽のDOおよびOURの1時間平均値(データ数72)を用いた。第7槽DO計が故障したRUN3のデータは対象外とした。推定した $r_{\max}$ と $K_O$ を用いて式(9)より計算したOURと実測OURの相関係数を求めた。さらに、 $K_O$ を0.0~1.0mg/lに変化させその影響を検討した。

各RUNにおける $r_{\max}$ の24時間平均値および計算値と実測値の相関係数を図-5に示す。RUN2-1では $K_O=0.1\sim 0.2$ 、RUN4では $K_O=0.4\sim 0.5$ 付近で相関係数が最大となったが、0.1~0.4の範囲では相関係数の変化は小さかった。そこで、以下の計算では $K_O=0.2\text{mg/l}$ を共通のパラメーターと

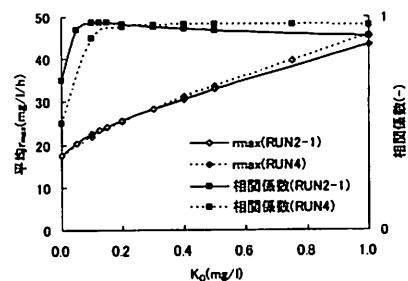


図-5 定数 $K_O$ と平均 $r_{\max}$ および相関係数

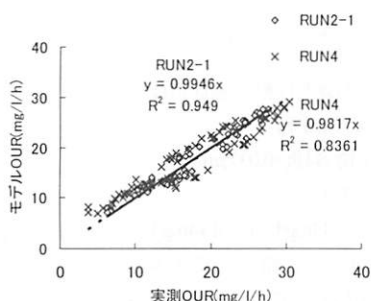


図-6 実測 OUR とモデル OUR

して用いることとした。  $K_0=0.2\text{mg/l}$  とした場合の実測 OUR およびモデル式(9)による計算値を図-6に示す。 RUN2-1 および RUN4 とともに回帰直線の傾きは約 1 で実測 OUR と計算値の平均はほぼ一致した。

#### c) DO 制御方法の違いによるゾーン比変動の検討

式(9)を式(7)に代入し、  $C_1$  に関する二次方程式として解くと、式(10)が導かれる。

$$C_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4 \times K_0 \times C_{i-1}}}{2} \quad (10)$$

ここで  $b = r_{\max} \times T_R / N + K_0 \times C_{i-1}$

なお、  $\sqrt{b^2 + 4 \times K_0 \times C_{i-1}} - b > 0$  より  $C_1 > 0$  を満たす解を採用した。式(10)は  $C_1$  の漸化式となるため、起点となる槽の DO 値が 1 箇所定めれば曝気槽を除く上下流側の DO 値を逐次計算できる。

次に、曝気量一定制御、上流側の DO を曝気量で制御する一点 DO 制御、および上下流 2 箇所の DO 値を制御する二点 DO 制御の 3 ケースにおける好気・無酸素ゾーン比の時間変動について、上記のモデルを用いて検討した。

$r_{\max}$  を与条件とし、定常状態での各槽の DO 収支から式(6)(曝気槽)および式(7)(非曝気槽)を用いた連立  $N$  元方程式 ( $\beta C_5$  は定数とする)を立てた場合、  $N+2$  個の変数 ( $C_1 \sim C_N, \alpha K_L a$  および  $T_R$ ) のうち 2 個の変数の値を定めると残り  $N$  個の変数値が計算可能となる。

曝気量一定制御の場合は、  $\alpha K_L a$  および  $T_R$  が固定され、任意の  $r_{\max}$  に対して式(6)より曝気部の  $C_5$  を計算し、式(7)より下流側に向かって DO が逐次計算できる。

一点 DO 制御の場合は、  $C_6$  および  $T_R$  が固定され、任意の  $r_{\max}$  に対して式(6)(7)(9)を用いて上下流側の DO が計算できる。二点 DO 制御の場合は  $C_6, C_8$  が固定されるように、  $\alpha K_L a$  および  $T_R$  を繰り返し計算で求めることができる。

#### d) 計算結果と考察

RUN2-1 の通日試験結果から、表-4 に示す条件を設定し計算を行った。図-7 中に灰色実線で示す  $r_{\max}$  の経時変化を計算条件とした。

図-7 に  $\alpha K_L a$  および  $T_R$  の計算結果を示す二点 DO 制御のケースでは  $r_{\max}$  が上昇する朝夜の高負荷時間帯に  $\alpha K_L a$  は

上昇し  $T_R$  は減少した。

図-8 に無酸素ゾーン比の時間変動の試算結果を二点 DO 制御の実験データと合わせて示す。曝気量一定制御および一点 DO 制御では負荷の変動により無酸素ゾーン比が変動したが、二点 DO 制御では上下流側の DO 値が同時に制御され安定した無酸素ゾーン比が維持された。

表-4 DO 勾配計算条件

| 項目             | 単位   | 曝気量一定 | 一点 DO 制御 | 二点 DO 制御 |
|----------------|------|-------|----------|----------|
| $\beta C_5$    | mg/l | 10    | 10       | 10       |
| $K_0$          | mg/l | 0.2   | 0.2      | 0.2      |
| $\alpha K_L a$ | 1/h  | 7.7   | 可変       | 可変       |
| $T_R$          | h    | 0.25  | 0.25     | 可変       |
| $C_6$          | mg/l | 変化    | 1.43     | 1.43     |
| $C_8$          | mg/l | 変化    | 変化       | 0.13     |

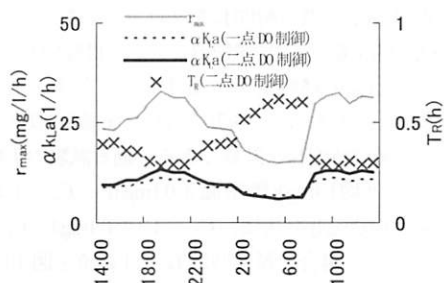


図-7  $r_{\max}$ 、 $\alpha K_L a$  および  $T_R$  の経時変化

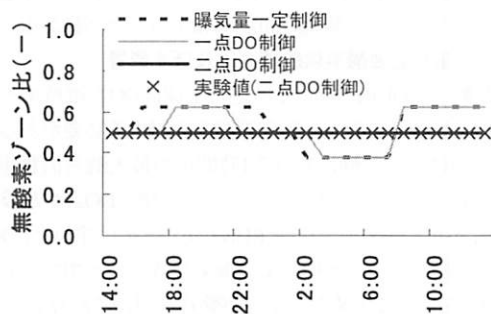


図-8 無酸素ゾーン比の経時変化

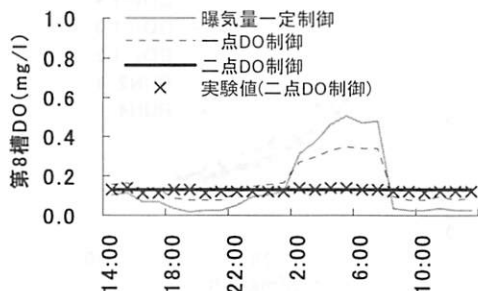


図-9 好気ゾーン末端(第8槽) DO の経時変化

図-9に好気ゾーン末端(第8槽)のDO計算値および二点DO制御による実験データを示した。曝気量一定制御および一点DO制御の場合 $C_8$ は大きく変動したが、二点DO制御の場合は計算値、実験値共に一定に維持された。

以上の検討により、他の制御法と比べて二点DO制御では流入負荷変動に対して好気ゾーン末端DOおよびゾーン比率を一定に保ちやすいことが示された。

#### 4. 二点DO制御OD法の制御因子

##### (1) OURが必要循環時間に及ぼす影響

二点DO制御OD法において、変動するOURに対し下流側のDO値を一定に維持するためには、循環時間の制御範囲について検討する必要がある。

図-10に通日試験での測定値から得られた1時間毎の最大酸素消費速度 $r_{\max}$ と循環時間 $T_R$ をプロットした。ただし、第7槽のDO計が故障していたRUN3のデータは除いた。

図-7に示した $r_{\max}$ の経時変化を条件として与え、上下流2点のDO値を設定すると、3(2)で示した簡易DO収支モデルを用いて循環時間 $T_R$ を計算できる。通日試験の実験データ、 $C_6$ =平均1.3mg/l(標準偏差0.1mg/l)、 $C_8$ =平均0.14(標準偏差0.02mg/l)を基に、 $C_6 = 1.3 \pm 0.1\text{mg/l}$ 、 $C_8 = 0.14\text{mg/l}$ に設定した場合の循環時間 $T_R$ の計算値を図-10に合せて示す。

本図より $r_{\max}$ と $T_R$ は逆相関の関係にあり、DO設定値によりその相関曲線が変化することがわかる。また $r_{\max}$ が低下すると急激に循環時間が増加することがわかる。

##### (2) OURが必要酸素供給能力に及ぼす影響

変動するOURに対して一定の上流側DOを維持するためには酸素供給能力の制御範囲を検討する必要がある。

図-11に通日試験における1時間毎の最大酸素消費速度 $r_{\max}$ と $K_La$ をプロットした。ただし、第7槽のDO計が故障して $r_{\max}$ が求められなかったRUN3のデータは除いた。 $K_La$ は曝気槽と同一の水槽および曝気装置で清水中での非定常法<sup>15)</sup>を行って求めた以下の実験式を用いて計算した。

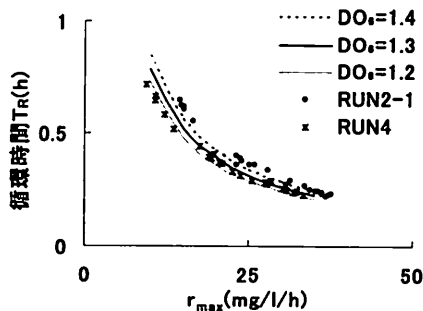


図-10  $r_{\max}$ が $T_R$ に及ぼす影響

$$K_La(1/h) = 0.952 \times G_s^{0.864} \div V \times 1.02^{T-20} \quad (11)$$

ここで  $K_La$ : 総括酸素移動容量係数(1/h)

$G_s$ : 曝気量( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$V$ : 曝気槽容積( $=0.0375\text{m}^3$ )

$T$ : 水温( $^{\circ}\text{C}$ )

同じく図-11に $C_6=1.43\text{mg/l}$ 、 $C_8=0.14\text{mg/l}$ とした場合の $r_{\max}$ に対する $K_La$ の計算値を $\alpha$ 値ごとに3本の直線で示す。ここで $K_La$ の計算値は以下の手順で算出した。

- ① 第6槽を起点として式(7)を用いて下流側に向かって計算した第8槽DO値が設定値0.14mg/lと一致するように繰り返し計算を行い、 $T_R$ を決定する。
- ② ①で求めた $T_R$ を式(6)に代入し第5槽DO値を求める。
- ③ 式(9)を式(6)に代入し $\alpha K_La$ について整理した式(12)を用いて $\alpha K_La$ を求める。

$$\alpha K_La = \frac{C_s / (T_R / N) + r_{\max} \frac{C_s}{K_La \cdot C_s}}{\beta C_s - C_s} \quad (12)$$

- ④ ③で求めた $\alpha K_La$ を $\alpha$ で割って $K_La$ を計算する。

ここで、 $\alpha$ は $K_La$ の汚水/清水換算係数で、曝気方式、水質、搅拌強度、MLSS濃度などの影響を受けて変化することが報告<sup>16)</sup>されており、散気式エアレーションの場合0.3~0.9<sup>17)</sup>の値が報告されている。

図-11より $r_{\max}$ と $K_La$ は正の相関が見られた。実験データのプロットは計算曲線とは異なる傾きを示したが、 $\alpha = 0.6 \sim 1.0$ の計算値の範囲に入った。

EPA(1989)<sup>18)</sup>によると8か所の実下水処理場における $\alpha$ 値の24時間変動について調査し、最大/平均の値が1.08~1.47であったと報告されている。 $r_{\max}$ と $\alpha$ には正の相関が見られたが、これは曝気量制御による曝気部搅拌強度の変化などの影響が考えられ、今後の検討課題である。

##### (3) 二点DO制御法の上流側DO設定値の検討

本法では上下流二点のDO値を制御するが、下流側のDO値は無酸素ゾーン確保のために低く保つ必要があり大きく変化させられない。一方、上流側のDO設定値は硝化反応を維持し曝気能力の範囲内で変更が容易である。

一方、実OD施設の流速は最低0.1m/s、平均0.25m/s程度<sup>19)</sup>とされているため、水路長の条件によって循環時間の制

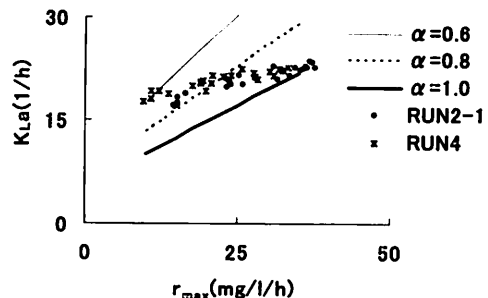


図-11  $r_{\max}$ が $K_La$ に及ぼす影響

御範囲に制約が生じる。その場合、循環流速に加えて上流側DO設定値を変化させることでより広い範囲の条件において好気・無酸素ゾーンの制御が可能となる。

図-12に示すようなOD水路内のDO勾配を想定し、3(2)で示した簡易DO収支モデルを用いて上流側DO設定値とOURの関係について検討を行う。上流側設定値 $DO_{up}$ 、下流側設定値 $DO_{down}$ とすると、所与の $r_{max}$ に対して $DO_{up}$ および $DO_{down}$ を設定値に維持するための、 $\alpha K_L a$ および循環時間 $T_R$ が計算される。

次に、実施における流速制御範囲を0.1～0.3m/sと想定し、中間値の0.2m/sに設定した。最大酸素消費速度 $r_{max}$ を変化させた場合の必要水路長 $L$ を式(13)より計算した。

$$L = v \times T_R \times 3600 \quad (13)$$

ここで、 $L$ ：水路長(m)

$v$ ：平均流速(m/s)

$DO_{up}$ を1.0～3.5mg/lに変化させ、 $DO_{down}$ を0.2mg/lに固定した場合の計算結果を図-13に示す。なお、 $DO_{down}$ を0.2mg/lとした場合に、5槽目のDOが0.1mg/l以下となり無酸素ゾーン比0.5が確保できることは実験データから確認している。

本図より設計OURおよびDO設定値から、二点DO制御法でゾーン運転を行うための水路長の適用範囲が求められる。例えば、 $r_{max}$ が20mg/h程度の場合、水路長が最低120m程度必要となることがわかる。 $r_{max}=20\text{mg/h}$ は $K_L a=0.2\text{mg/l}$ 、 $DO=1.0\text{mg/l}$ における $OUR=16.7\text{mg/h}$ に相当し、表-3に示した通日試験の各平均OURと同程度である。また、藤原<sup>20)</sup>は本法におけるOURが流入BOD容積負荷と正の相関があることを示している。

水路長が適正範囲より短い場合やOURが低い場合は、DOが下がりきらず無酸素ゾーンが形成できないため、ゾーン運転の適用は難しいと考えられる。

一方、水路長が適正範囲より長い場合やOURが高い場合には十分な好気ゾーンが確保できない恐れがあるが、この場合は散気装置を複数個所に設置し複数の好気無酸素ゾーンを設けることで対応できると考えられる。

実際の施設では水路長は固定されているが、流速の制御範囲に制約のある実施施設においても、上流側DO設定値の変更を組み合わせることで幅広いOURの変動に適用できる可能性が示唆された。

## 5. 結論

本研究では、高負荷二点DO制御OD法の実下水を用いたベンチスケール実験の通日試験結果およびモデルを用いて、流入負荷変動に対する高負荷二点DO制御OD法の適応性と制御因子の検討を行い、以下の知見を得た。

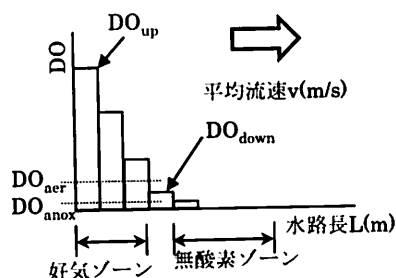


図-12 OD水路内DO勾配

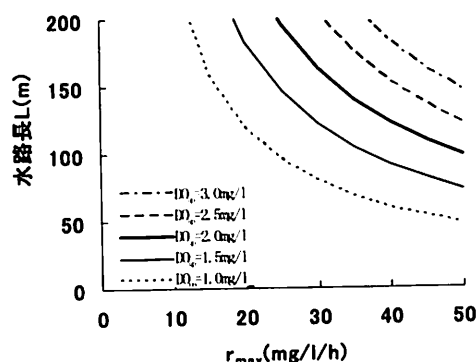


図-13  $r_{max}$ と水路長の試算結果

槽列モデルにおけるDO収支式から簡易DO収支モデルを構築し、DO勾配の時間変動をシミュレーションした。通日試験で得られたOURを与条件とした結果、曝気量一定および一点DO制御では無酸素ゾーン比率および好気ゾーン末端DOが大きく変動したが、二点DO制御では一定に保たれた。この結果より、ゾーン運転ODでの二点DO制御の有効性が確認された。

二点DO制御OD法におけるOURと制御因子の関係について通日試験データおよび簡易DO収支モデルを用いて検討した。OURと循環時間は逆相関の関係にあり、DO設定値によってその相関曲線が異なること、OURが低下すると循環時間が急激に増加することがわかった。一方、OURと $K_L a$ は正の相関関係にあり、実験データは $\alpha$ 値0.6～1.0の場合の計算値の範囲に入った。また上流側のDO設定値を変化させることで、流速の制御範囲に制約のある実施施設においても、幅広いOURの変動に適用できる可能性が示された。

以上の検討により二点DO制御OD法の実用化と利点に関して有用な知見を得ることができた。

本研究は日本下水道事業団、高知大学、前澤工業の共同研究「エネルギー消費抑制型下水処理技術の開発—高負荷二点DO制御を用いた効率的なOD法の開発—」の内容の一部である。また、実験は香南市および高知県との共同研究として実施した。

## 参考文献

- 1) 日本下水道協会: <http://www.jswa.jp/suisai/land/3-3.html>
- 2) 荒木宏之, 楠田哲也, 古賀謙一, 井前勝人, 栗谷陽一, 松尾保成: 活性汚泥の曝気運転による窒素除去, 下水道協会誌, Vol.25, No.289, pp.38-50, 1988
- 3) 日本下水道事業団: 活性汚泥の曝気運転の評価に関する第3次報告書, 2001
- 4) S. Furukawa, K. Tokimori, J. Hirotsuji, S. Shiono: New operational support system for high nitrogen removal in oxidation ditch process, Water Science and Technology, Vol.37, No.12, pp.63-68, 1998
- 5) 堺好雄, 三宅晴男, 若山正憲: 活性汚泥の曝気運転の新しい設計手法について, 下水道協会誌, Vol.39, No.471, pp.85-101, 2002
- 6) 清水達雄, 工藤憲三, 泥俊和, 那須義和: 実施設の活性汚泥の曝気における有機物, 窒素およびりん除去, 下水道協会誌論文, Vol.6, pp.41-51, 1992
- 7) 藤原拓, 稲森奨, 中町和雄, 大年邦雄, 津野洋, 西村文武: 高負荷オキシデーションディッチ法における実下水からの有機物・窒素同時除去の操作因子に関する研究, 下水道協会誌論文, Vol.45, No.552, pp.121-131, 2008
- 8) X. Chen, T. Fujiwara, K. Ohtoshi, S. Inamori, K. Nakamachi, H. Tsuno: Evaluation of a novel oxidation ditch system for biological nitrogen and phosphorus removal from domestic sewage, Water Science and Technology, vol.62, No.8, pp.1745-1754, 2010
- 9) 藤原拓, 中町和雄, 陳小強, 川口幸男, 橋本敏一, 津野洋: 実規模高負荷二点DO制御OD法における下水処理性能の評価, 第48回下水道研究発表会, pp.806-808, 2011
- 10) 土木学会 環境工学委員会: 環境工学公式・モデル・数値集, 丸善, pp.3-6, 2003
- 11) 7)に同じ
- 12) 3)に同じ
- 13) G. Ekama and G. Marais: The dynamic behavior of the activated sludge process, Research report W27, Univ. of Cape Town, Dept. of Civil Eng, Rondebosch 7701, Cape Town, South Africa, 1978
- 14) 下水道新技術推進機構, 活性汚泥モデル利活用マニュアル, p.資21, 2010
- 15) 日本下水道協会: 下水試験方法上巻—1997年版, 1997
- 16) M. Stenstrom and R. Gilbert: Effects of alpha, beta and theta factor upon the design, specification and operation of aeration systems, Water Research, Vol.15, No.15, pp.643-654, 1981
- 17) 建設技術評価「省エネ型散気曝気装置の開発」建技評第81103号, p.88, 1982
- 18) EPA: Design manual, Fine pore aeration systems, EPA 625/1-89/023, Risk Reduction labs, USEPA, pp.59, 1989
- 19) 日本下水道協会: 下水道施設計画・設計指針と解説, 後編 p.124, 2001
- 20) 7)に同じ

(2011年5月30日受付)

## Factors regulating a novel high-loading oxidation ditch system with dual dissolved oxygen(DO) control technology for flexibility under influent load fluctuation

Kazuo NAKAMACHI<sup>1</sup>, Taku FUJIWARA<sup>2</sup>, Xiaoqiang Chen<sup>3</sup>, Yukio KAWAGUCHI<sup>4</sup>, Toshikazu Hashimoto<sup>5</sup> and Hiroshi TSUNO<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Maezawa Industries, Inc.

<sup>2</sup>Agriculture Unit, Natural Sciences Cluster, Research and Education Faculty, Kochi University

<sup>3</sup>The united Graduate School of Agricultural Sciences, Ehime University

<sup>4</sup>Wastewater treatment R&D division, Technology & Strategy Department, Japan Sewage Works Agency

<sup>5</sup>Toda R&D branch office, Technology & Strategy Department, Japan Sewage Works Agency

<sup>6</sup>Dept. of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

The authors have developed a high-loading oxidation ditch (OD) system with dual dissolved oxygen (DO) control, which is used to maintain a constant aerobic/anoxic zone ratio under fluctuation of influent load by controlling the aeration and internal circulation rates independently.

In this study, the flexibility and the regulating factors of this technology under influent load fluctuation were investigated using the bench-scale experiment results and a mathematical model. From a result of this study, the advantage of dual DO control is clear with regard to the zone operation of OD when compared to other control methods such as the single (conventional) DO control method and the constant air flow-rate method. When the dual DO control maintained a stable DO value at the end of the aerobic zone, a constant aerobic/anoxic zone ratio was achieved. Moreover, the applicability to the wide range of influent load, which was achieved by controlling the DO set value at upstream, was suggested even in the full-scale plant at which the range of the circulation velocity was restricted.