

〈研究発表〉

散気式オキシレーションディッチでのオフガス法を用いた酸素溶解効率の連続測定

円谷 輝美¹⁾, 中町 和雄¹⁾, 藤原 拓²⁾, 橋本 敏一³⁾, 川口 幸男⁴⁾

1) 前澤工業株式会社 開発本部(〒332-8556 埼玉県川口市仲町 5-11,

E-mail:terumi_tsumuraya@maezawa.co.jp,kazuo_nakamachi@maezawa.co.jp)

2) 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,

E-mail:fujiiwarat@kochi-u.ac.jp)

3) 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 番 1 号 富士国際連ビル,

E-mail: Hashimotot@jswa.go.jp)

4) 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,

E-mail:Kawaguchiy@jswa.go.jp)

概要

オフガス法は混合液中の酸素溶解効率を測定する方法の一つである。今回、散気式オキシレーションディッチ曝気部において、オフガス法による混合液中の酸素溶解効率の連続測定を行った。また、得られた酸素溶解効率と送気ガス量から酸素移動速度の計算を行い、流入負荷およびオキシレーションディッチ槽内条件から算出した必要酸素量との比較を行った。

キーワード: オフガス法、オキシレーションディッチ、酸素溶解効率

1. はじめに

混合液中での酸素溶解効率を測定する手法として定常法¹⁾、不活ガストレーサー法やオフガス法²⁾などがある。定常法では溶存酸素(以下 DO)濃度と酸素消費速度(以下 OUR)を複数回測定しなければならないほか、OURの範囲を広くとるよう測定する必要があるなど、作業が容易ではない。また、不活ガストレーサー法では放射性物質を使用するために、取り扱いに注意が必要なほか費用も高くなる。

一方、オフガス法は空気中の N₂ ガスが曝気槽内で増減しないという仮定のもとに、送気ガスおよび排ガス(以下オフガス)中の N₂ ガスに対する O₂ ガスの割合から酸素の溶解効率を測定するもので、オフガス測定装置の設置後は酸素溶解効率の測定が連続で行える等の利点がある。

本研究では、DO 制御を行っている実施設において、混合液中の酸素溶解効率をオフガス法により連続測定し、酸素移動速度の経時変化を求めた。

また、オキシレーションディッチ(以下 OD)槽の流入負荷の経時変化を測定し、オフガス法での測定結果と比較検討したので報告する。

2. 実験方法

2.1 実験設備およびオフガス分析装置

実験設備およびオフガス分析装置の概略を Fig.1 に示す。

周長約 165m の OD 無終端水路の曝気部に 32 枚/基の散気装置が約 3m ピッチで 6 基、計 17m の範囲で配置されていた。曝気部上流側端部より 1m 上流側を基点とし、下流側 6m, 12m, 18m 付近の地点で活性汚泥混合液の DO 濃度(YSI Model-58)を測定するとともに、6m, 12m, 18m 付近の 3 箇所水面に浮かべたフードから吸引ポンプを用いてオフガスを捕集し、オフガス分析装置へ送り込んだ。

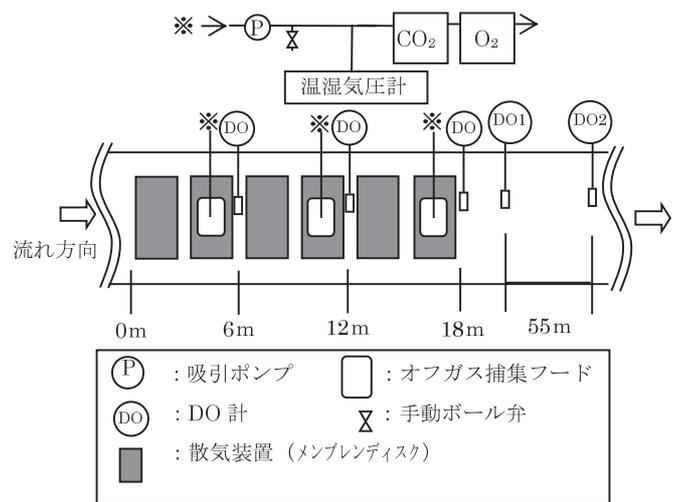


Fig.1: Experimental facility and off-gas analysis device

2.2 オフガス分析装置

オフガス分析装置は、吸引ポンプ、温湿気圧計(テューアンドデイ, TR-73U: 隔膜式およびピエゾ抵抗式)、CO₂ 濃度計(新コスモス電機, IRC-630: 赤外線式)、O₂ 濃度計(飯島電子工業, G-103: 隔膜式ガルバニ電池式)からなる。捕集したオフガスを約 3.5L/min の

流量に調整し CO₂、O₂、気温、相対湿度および気圧を測定した。送気ガス量はマスフローメーター（オーバル、454FTB-12-HT）を用い基準状態（0℃、101.3kPa）で測定した。

2.3 測定方法

オフガス法を用いて酸素溶解効率の連続測定を行った。曝気部の異なる地点（6m、12m、18m 付近の 3 箇所）から均等に捕集した混合ガスで測定を行い、曝気部の代表値とした。混合液中の DO 濃度は 6m、12m、18m 付近で測定し、平均値を用いた。

送気ガス中の O₂ 濃度及び CO₂ 濃度は現地での大気測定値を用い、連続測定中は変化しないと仮定し計算を行った。

データは 1 分間隔でデータロガーを用いて収集し、1 時間の平均値を用いた。

BOD、SS、T-N、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、MLSS の分析については、2 時間毎にサンプリングを行い、下水試験方法により分析した。

また、Kj-N は T-N から NO₃⁻-N、NO₂⁻-N を差し引いて求めた。

2.4 実験条件

実験は高知県香南市野市浄化センターにおいて平成 23 年 2 月 23 日 14:00~2 月 24 日 14:00 の 24 時間行った。

OD 槽内水深 1.5m、水温 18.1℃、MLSS 3600mg/l、DO 2.26±0.75mg/l、好気ゾーン比 0.37 の条件で測定を行った。

なお、本研究では DO 0.5mg/l 以上の領域を好気ゾーンと定義し、反応槽容量に対する比率から式 (1) により好気ゾーン比を求めた。

$$\text{好気ゾーン比} = \frac{\text{DO } 0.5\text{mg/l 以上の容積 (m}^3\text{)}}{\text{反応槽容積 (m}^3\text{)}} \quad (1)$$

実験条件を Table1 に示す。

Table1 : Experimental conditions

項目	単位	数値
水深	m	1.5
水温	℃	18.1
大気圧	kPa	101.9
DO濃度	mg/l	2.26±0.75 (S.D.)
好気ゾーン比	—	0.37
MLSS	mg/l	3,600
MLVSS	mg/l	3,200

連続測定期間中の原水流入水量は 1,300m³/day、原水 T-BOD は 140mg/L、流入 Kj-N は 26mg/l であった。

流入条件を Table2 に示す。

Table2 : Influent conditions

項目	単位	数値	備考
流入水量	m ³ /day	1,300	積算値
T-BOD	mg/l	140	平均値
S-BOD	mg/l	46	平均値
SS	mg/l	140	平均値
T-N	mg/l	26	平均値
NH ₄ ⁺ -N	mg/l	15	平均値
Kj-N	mg/l	26	平均値

2.5 酸素溶解効率および酸素移動速度の計算方法

酸素溶解効率（以下 OTE_f）、酸素移動速度（以下 OTR_f）については米国土木学会（ASCE）標準³⁾に基づき計算を行った。

混合液中での OTE_f は式(2)により計算できる。

$$\text{OTE}_f = \frac{\text{MR}_i - \text{MR}_e}{\text{MR}_i} \times 100 \quad (2)$$

ただし OTE_f : 混合液中の酸素溶解効率 (%)

$$\text{MR}_i = \frac{Y_i}{1 - Y_i - Y_{\text{CDi}} - Y_{\text{Wi}}}, \quad \text{MR}_e = \frac{Y_e}{1 - Y_e - Y_{\text{CDe}} - Y_{\text{We}}}$$

MR_i, MR_e : 送気ガスおよびオフガス中の N₂ に対する O₂ の割合

Y : 各気体のモル分率 (—)

Y_i, Y_e : 送気ガスおよびオフガスの O₂

Y_{CDi}, Y_{CDe} : 送気ガスおよびオフガスの CO₂

Y_{Wi}, Y_{We} : 送気ガスおよびオフガスの H₂O

OTE_f と送気ガス量から式 (3) より OTR_f を求めた。

$$\text{OTR}_f = \text{OTE}_f \times G_s \times \rho \times O_w / 100 \quad (3)$$

ただし

OTR_f : 混合液中での酸素移動速度 (kg-O₂/hr)

G_s : 1 時間あたりの基準状態 (0℃、101.3kPa) における送気ガス量 (Nm³/hr)

ρ : 空気密度 (1.293kg/Nm³)

O_w : 空気中の酸素含有量 (0.233 kg-O₂/Air-kg)

3. 実験結果及び考察

3.1 流入負荷の経時変化

流入下水中には有機物や窒素が含まれており、それらの酸化には酸素を必要とする。被酸化物の指標として BOD およびケルダール窒素（以下 Kj-N）を用い、式 (4) により時間あたりの被酸化物容積負荷を計算した。

$$\text{被酸化物容積負荷} = Q_{in} \times \left(\frac{\text{BOD}_{inf} + \text{Kj} \cdot \text{N} \times 4.57}{V \times 1000} \right) \quad (4)$$

ただし

被酸化物容積負荷：(kg/hr/m³)

Q_{in}：原水流入流量 (m³/hr)

BOD_{inf}：流入BOD (mg/l)

Kj-N：流入ケルダール窒素 (mg/l)

V：反応槽容積 (m³)

被酸化物容積負荷の経時変化を Fig.2 に示す。

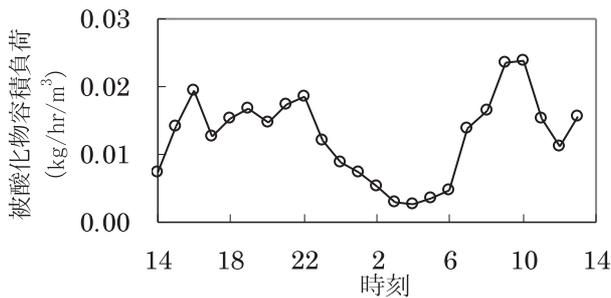


Fig.2: Time course of oxidizable material

被酸化物容積負荷は平均 0.012kg/hr/m³ で、朝晩にピークがあり夜間低下した。変動比(最大値/平均値)は 1.9 であった。

3.2 オフガスの連続測定結果

DO 一定制御の条件で被酸化物の流入が多くなれば、酸化に必要な酸素は多くなり、OTR_f は増加すると考えられる。オフガスの連続測定より求めた OTR_f と被酸化物容積負荷の経時変化を Fig.3 に示す。

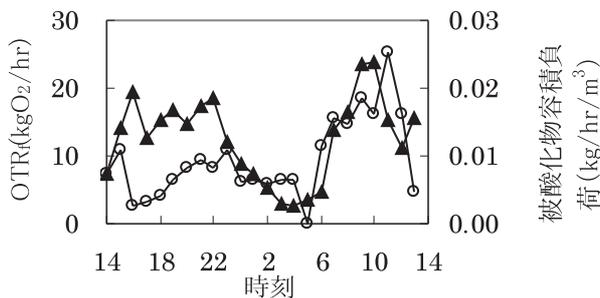


Fig.3: Time change of OTR_f and oxidizable material

被酸化物容積負荷の経時変化における増減と同様に OTR_f も増減することが確認された。16:00~22:00 の時間帯では OTR_f は容積負荷と比較して低い数値であった。

3.3 OTR_f と OUR

DO 一定制御の条件で混合液中で OUR が大きくなれば、混合液中の DO 濃度を維持するための酸素がより多く必要となるため、OTR_f は大きくなると考えられる。そこで、反応槽内の OUR と OTR_f の関係を確認した。

なお、OUR は曝気部直下および下流側の 2 地点の DO 濃度 (DO1, DO2) および循環流速から式 (5) により算出した。

$$\text{OUR} = \frac{\text{DO1} - \text{DO2}}{L/v} \quad (5)$$

ここで

OUR：酸素消費速度 (mg/l/hr)

DO1, DO2：混合液中 DO 濃度 (mg/l)

L：DO 値測定間距離 (約 55m)

v：循環流速 (m/hr)

OTR_f と OUR の関係を Fig.4 に示す。

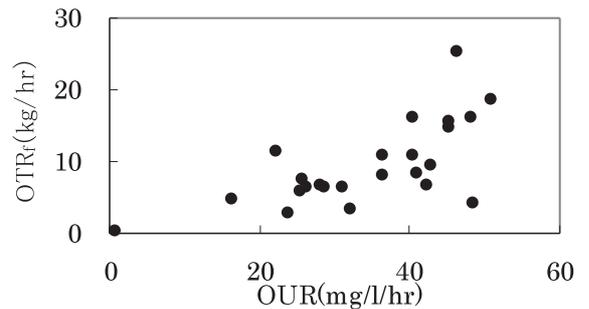


Fig.4: Relation between OUR and OTR_f

OTR_f と OUR とでは正の相関が確認され、混合液中の OUR が大きくなれば、OTR_f も同様に大きくなることが確認された。

3.4 OTR_f と必要酸素量

以上の検討により流入負荷と OTR_f の経時変化には一定の相関があることが確認された。

ここでは流入負荷から求めた必要酸素量 (以下 AOR) とオフガス法で求めた OTR_f の絶対値を日平均データを用いて比較した。

AOR の算出は、下水道施設計画・設計指針と解説⁴⁾の式に準拠し、計算に用いた係数は中間値を用いた。

Table3 に AOR の算出に使用した係数を示す。

Table3 : Coefficients of calculations

項目	単位	係数	備考
A	kg-O ₂ /kg-BOD	0.6	0.5~0.7
B	kg-O ₂ /(kg-MLVSS・d)	0.1	0.05~0.15
C	kg-O ₂ /kg-N	4.57	—
K	kg-BOD/kg-N	2.5	2~3
a	mg-MLSS/mg-BOD	0.5	0.4~0.6
b	mg-MLSS/mg-SS	0.95	0.9~1.0
c	1/d	0.04	0.03~0.05

① 有機物の酸化に必要な酸素量 : D_B

$$D_B = ((C_{BOD,in} - C_{BOD,eff}) \times Q_{in} \times 10^{-3} - (L_{NOX,DN} - L_{NOX,A}) \times K) \times A \quad (6)$$

ただし

C_{BOD,in} : 流入水 BOD (mg/l)

C_{BOD,eff} : 処理水 BOD (mg/l)

Q_{in} : 反応タンク流入水量 (m³/day)

L_{NOX,DN} : 無酸素タンク NO_x⁻-N 負荷量 (kg-N/day)

L_{NOX,A} : 無酸素タンク NO_x⁻-N 流出量 (kg-N/day)

K : 脱窒により消費される BOD 量 (kg-BOD/kgN)

A : 除去 BOD 当りに必要な酸素量 (kg-O₂/kgBOD)

② 硝化反応に必要な酸素量 : D_N

$$D_N = C \times \text{硝化した K}_j\text{-N 量 (kg-N/day)} \quad (7)$$

ただし

C : 硝化反応に伴い消費される酸素量 (kg-O₂/kg-N)

硝化した K_j-N : (流入水 K_j-N 量) - (流出水 K_j-N 量) - (余剰汚泥に転換された K_j-N 量)

③ 内生呼吸に必要な酸素量 : D_E

$$D_E = B \times V_A \times \text{MLVSS} \quad (8)$$

ただし

B : 単位 MLVSS 当りの内生呼吸による酸素消費量 (kgO₂/(kgMLVSS・d))

V_A : 好気部分の反応タンク容量 (m³)

MLVSS : 活性汚泥有機性微生物 (kg-MLVSS/m³)

なお、系外へ流出する DO については考慮しなかった。

式 (8) の V_A は反応槽内の好気部容量を示す。本式では好気部が空間的あるいは時間的に明確に区別されており、好気部の DO が十分高いことが前提条件となっている。

一方本研究では連続曝気によるゾーン運転を行って

おり空間的に DO 勾配が形成されうえ、水路内の平均 DO 値も低いため計算式の条件と必ずしも一致しない。

そこで、好気ゾーン比と反応槽容量から好気部容積を式 (9) により求めた。

$$V_A = \text{好気ゾーン比 (0.37)} \times \text{反応槽容積} \quad (9)$$

オフガス法により算出した 1 日あたりの OTR_f と流入負荷から算出した AOR を Table4 に示す。

Table4 : Calculation result of OTR_f and AOR

AOR (kgO ₂ /day)	OTR _f (kgO ₂ /day)
243	226

オフガス法により求めた OTR_f は 226kgO₂/day であり、流入負荷から算出した AOR の計算値 243 kgO₂/day と同等の結果であった。

4. まとめ

DO 一定制御を行っている実施において、オフガス法の連続測定結果から以下の知見を得た。

- ① 流入被酸化物容積負荷と OTR_f の経時変化は同様の傾向を示し、容積負荷の増減に伴って OTR_f も増減することが確認された。
- ② DO 一定制御の条件で OUR が増加すると OTR_f も増加し相関関係が確認された。
- ③ 流入負荷から算出した 1 日あたりの AOR は 243kg-O₂/day、OTR_f は 226kg-O₂/say で同等の結果であった。

参考文献

- 1) 日本下水道協会 : 下水試験方法 (上巻) 1997 年版 上巻, 1997, pp.275-278
- 2) ASCE : Standard Guidelines for In-Process Oxygen Transfer Testing (ASCE-18-96), 1997, pp.9-15
- 3) 2) に同じ
- 4) 日本下水道協会 : 下水道施設計画・設計指針と解説 (後編) 2009 年版, 2009, pp.34,38,39