

酸素移動速度の新しい計測・評価方法の提案と妥当性の確認

(学)香川学園 宇部環境技術センター ○大 木 協
山口大学名誉教授 羽田野 袈裟義
北京藍星環境工程公司 馬 駿
宇部工業高等専門学校 物質工学科 中野 陽一
元 宇部工業高等専門学校 技官 原田 利男
(有)バブルタンク 藤里 哲彦

1. 緒言

湖や貯水池等の閉鎖性水域の水が貧酸素化することで引き起こされる底泥からの重金属や栄養塩等の溶出が問題となっている。この問題を解決する為に様々な気体溶解装置が開発されてきた。これらの気体溶解装置の性能を評価する上で重要な指標として酸素移動速度($N_{(20)}$ [mg/min])が挙げられる。酸素移動速度($N_{(20)}$)とは気相中の酸素が水に溶解する速度を酸素の質量を用いて表現したものであり、一般的な基準として次の3つの条件が挙げられている¹⁾。

- [1]水温は 20[°C](常温)とする。
- [2]水は塩類やその他の溶解物質の少ない清水とする。
- [3]推進力が最大である状態($DO=0$ [mg/L])とする。

$N_{(20)}$ の一般的な測定方法は次のとおりである。図-1は一般的な測定方法に用いる実験装置の概念図である。図に示すように、 DO 濃度を低下させた水を貯めた一つの水槽内で気体溶解処理を行い、その間の DO 濃度の時系列変化から総括酸素移動容量係数 KLa を算出する。そして、 KLa を用いて酸素移動速度 $N_{(20)}$ を算出する方法である。この方法では、 KLa の算出が必須であり、その実験操作に長い時間が掛かる、 KLa の計算方法が煩雑である、などの短所がある。本研究ではこれらの短所を補うことができる $N_{(20)}$ の測定方法を新しく提案し、その妥当性を検証することを目的としている。^{2),3)}

2. h型気体溶解装置について

本研究で用いた気体溶解装置は著者らが開発を行ってきたh型気体溶解装置²⁾⁻⁶⁾である。本装置の構成と稼働の原理を簡単に述べる。図-2は装置を現地に設置した場合の全体図、図-3は装置の中核部分の概要図である。2本のホースにより貧酸素水塊と連通されたh型管を管水平部の内側底面が水面より少し高い位置になるように固定し、h型管の曲がり部下方の水面下に気泡を発生させるためのエアストーンを配置している。この構成で、管内で曝気すると気泡群が管内を上昇してエアリフト現象が発生し、管内のエアリフト分を補償するため、吸入ホースの先端から水域の水が連続的

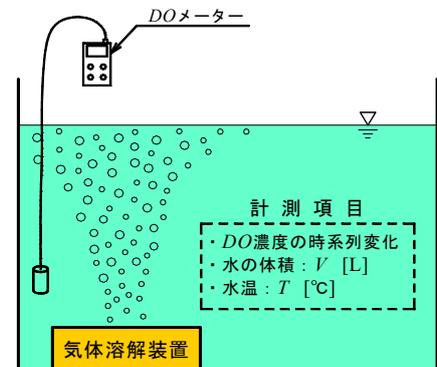


図-1 処理水循環型酸素溶解実験装置概念図

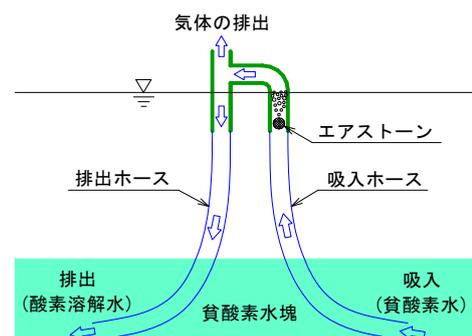


図-2 h型気体溶解装置全体図

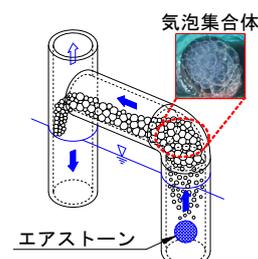


図-3 h型気体溶解装置の中核部分

に取り込まれる。気泡と共に管内を上昇した水はh型管内の曲り部付近でほとんど全てがいったん気泡集合体の液膜の構成要素(図-3の写真参照)となり、このときに気相・液相間での気体成分の交換が行われる。そして気体溶解された水と残存する気泡は管の水平部を伝って直管部に送られる。気体溶解された水は直管内を下方に流下し、排出ホースを経由して水域に戻される。気泡は適宜破裂して気泡内の気体は管内を上昇し、大気中に排出される。

3. 従来の方法による $N_{(20)}$ の測定

従来の一般的な測定方法^{1),7)}によってh型気体溶解装置の $N_{(20)}$ を測定した。図-4は実験装置(処理水循環型酸素溶解実験装置)の概略図であり、実験方法は次のとおりである。実験条件は表-1に示すとおりであり、図-5は諸元の説明図である。

- ① 貯水槽[5]に水温 T [°C]の水道水($V=200$ [L])を貯めた。
- ② 攪拌しながら Na_2SO_3 と微量の触媒(CoCl_2)を加えてDO濃度を0[mg/L]まで低下させた。
- ③ 実験条件に応じて水表面シート[8]を設置した。
- ④ 攪拌しながらエアストーン[2]から送気を開始し、DOメーターによりDO濃度の時系列変化を計測した。

次に、実験で得られたDO濃度の時系列変化から総括酸素移動容量係数(K_La)を算出した。 K_La の計算方法についてはこれまでいくつか提案されているが、ここでは実験値と近似線との相関性が最も高かったTableCs法⁸⁾を用いて水温 T [°C]における総括酸素移動容量係数($K_La(T)$)を算出した。式(1)¹⁾によって $K_La(T)$ を $K_La_{(20)}$ に水温補正した。ここで、 θ は水温補正係数であり、通常は1.02を用いる。

$$K_La_{(T)} = K_La_{(20)} \times \theta^{T-20} \quad (1)$$

そして、式(2)¹⁾により $N_{(20)}$ を算出した。ここで、 $DO_{s(20)}$ は水温20[°C]における飽和DO濃度であり、その数値は数表⁹⁾から読み取った。

$$N_{(20)} = K_La_{(20)} \times DO_{s(20)} \times V \quad (2)$$

ただし、この方法は全ての気体溶解装置に適用可能という長所があるものの、次のようないくつかの短所が挙げられる。

- DO濃度の時系列変化を観測するため1回の実験操作に長い時間が必要。
- 総括酸素移動容量係数($K_La(T)$)の算出方法が煩雑。
- 実験時の水表面からの酸素溶解量の評価が困難。

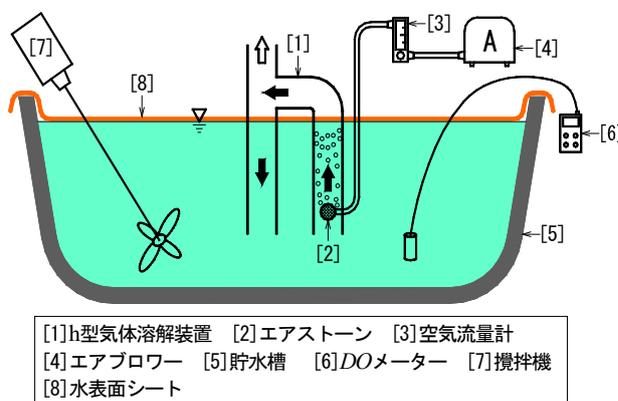


図-4 処理水循環型酸素溶解実験装置概略図

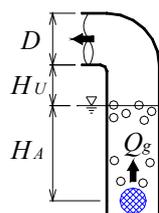


図-5 諸元の説明図

表-1 実験条件

処理水循環型	水温: T [°C]	11 ~ 23
	管内径: D [mm]	50
	水平管内底高さ: H_U [mm]	20, 50, 80
	曝気深度: H_A [mm]	140, 230, 320
	空気流量: Q_g [L/min]	20
	攪拌機の回転数: - [rpm]	600
	水表面シート: -	有, 無

4. $N_{(20)}$ の新しい測定方法の提案

図-6に示すような処理前後の水を分離する形式の実験装置において、処理前後のDO濃度(DO_1 , DO_2 [mg/L]), 処理水の体積(V_2 [L]), 処理時間(t [min]), 水温(T [°C])を計測する。

処理水流量(Q_w [L/min])を式(3)のように求める。

$$Q_w = \frac{V_2}{t} \quad (3)$$

DO増加性能のポテンシャルを表現する方法として換算 ΔDO (ΔDO_0)を用いる^{2),3),6)}。換算 ΔDO とは、仮に、DO濃度が0[mg/L]の水を処理した場合に得られるDO濃度増分(ΔDO)であり、曝気装置の理論式(式(4))より式(5)のように導かれる。添え字の(T)は水温である。

$$\frac{dDO}{dt} = K_L a (DO_s - DO) \quad (4)$$

$$\Delta DO_{0(T)} = \frac{DO_{s(T)}}{DO_{s(T)} - DO_1} \cdot \Delta DO \quad (5)$$

次に、式(1)と式(4)から、実験時の水温(T [°C])における換算 ΔDO ($\Delta DO_{0(T)}$)を水温20[°C]に補正する関数(式(6))を得る。

$$\Delta DO_{0(20)} = DO_{s(20)} \times \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\Delta DO_{0(T)}}{DO_{s(T)}} \right)^{\theta \cdot (T-20)} \right\} \quad (6)$$

以上、式(3)と式(6)より、 $N_{(20)}$ は式(7)のように表される。

$$N_{(20)} = \Delta DO_{0(20)} \times Q_w \quad (7)$$

ここで、 $DO_{s(T)}$, $DO_{s(20)}$ は気体溶解装置内での処理プロセスにおける飽和DO濃度であり、処理プロセスにおいて加圧タンクなどを用いて圧力を変化させる場合にはこれらの値を補正する必要がある。数表⁹⁾から読み取った飽和DO濃度($DO_{s(T)}$)は1[atm]の空気による飽和DO濃度であるから、圧力補正後の飽和DO濃度($DO_{s(T)}$)は、処理プロセスにおける酸素の分圧(P_{O_2} [MPa]), 1[atm]の空気における酸素の分圧(0.021[MPa])を用いてヘンリーの法則に従って式(8)のように表される。

$$DO_{s(T)}' = DO_{s(T)} \times \frac{P_{O_2}}{0.021} \quad (8)$$

5. 提案した方法による $N_{(20)}$ の測定

図-7はh型気体溶解装置(ワンパス型)を用いた実験装置(処理水分離型酸素溶解実験装置)の概略図であり、実験方法は次のとおりである。実験条件は表-1に示す。

- ① 貯水容器[2]に水道水($V=200$ [L])を貯めた。
- ② 攪拌しながら Na_2SO_3 と微量の触媒($CoCl_2$)を加えてDO濃度を低下させた。
- ③ 貯水容器[2]から容器[3]に揚水し、越流させ続けることで容器[3]の水位を一定に保った。
- ④ エアストーン[9]から送気を開始し、処理水が容器[4]から[5]へ越流し始めてから送気を停止するまでの処理時間(t)を計測した。

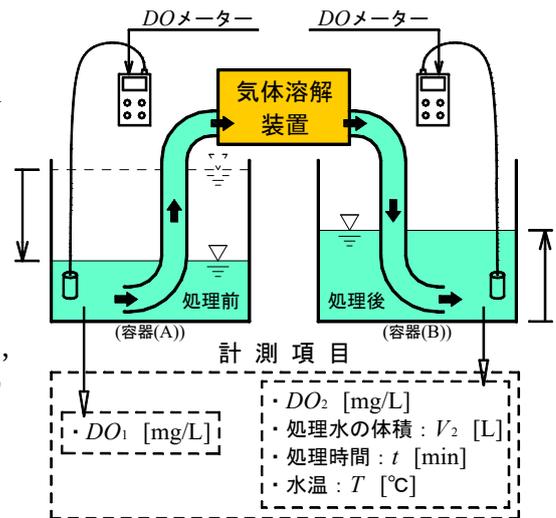
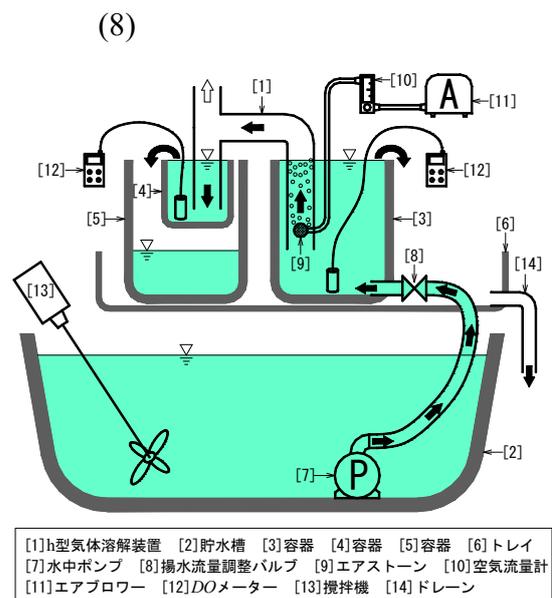


図-6 処理水分離型酸素溶解実験装置概念図



[1]h型気体溶解装置 [2]貯水槽 [3]容器 [4]容器 [5]容器 [6]トレイ [7]水中ポンプ [8]揚水流量調整バルブ [9]エアストーン [10]空気流量計 [11]エアブロー [12]DOメーター [13]攪拌機 [14]ドレーン

図-7 処理水分離型酸素溶解実験装置概略図

- ⑤ 装置の停止後, DOメーターを用いて容器[3][4]のDO濃度(DO_1 , DO_2)と水温(T [°C])を計測した。
- ⑥ 容器[5]の水の体積(V_2 [L])を測定し,処理時間(t)を用いて式(3)のように処理水流量(Q_w)を算出した。
- ⑦ 式(5)~(7)を用いて $N_{(20)}$ を算出した。

6. 測定方法の評価

図-8 は上記 2 手法によって算出した酸素移動速度($N_{(20)}$)の値を比較したグラフである。プロットがグラフ中の対角線に近いほど 2 つの測定方法による $N_{(20)}$ の値が近いことを表している。図より, 水表面シート無しの条件で得られた $N_{(20)}$ の値は処理水循環型酸素溶解実験(従来法)の値の方が若干大きくなっている。これは, 処理水循環型酸素溶解実験(従来法)において水表面シートを設置しなかった場合には, 実験操作中に水表面から酸素が溶解し, この影響が気体溶解装置の $N_{(20)}$ に上乗せする形で表れたためと考えられる。これに対して, 水表面シート有りの条件では 2 手法による $N_{(20)}$ の値は概ね近い値(決定係数 $R^2=0.9612$, 相関係数 $R=0.9804$)を示していることから, 新しく提案した測定方法は妥当であると言える。

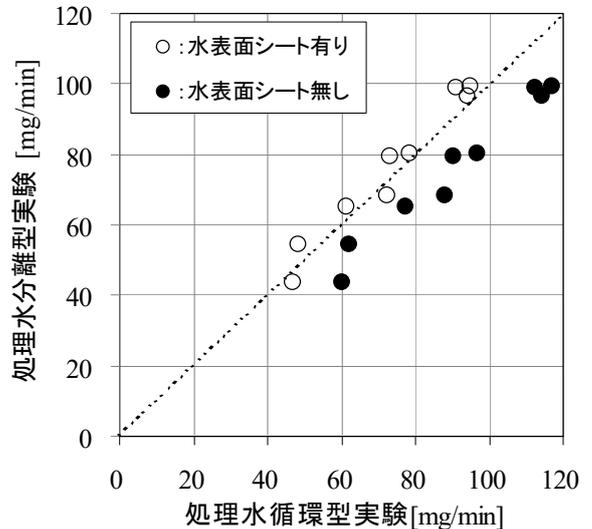


図-8 処理水分離型及び循環型酸素溶解実験による $N_{(20)}$ の比較

7. 考察

従来の方法と新しく提案した方法で測定した $N_{(20)}$ がほぼ等しい値を示していることから, 提案した測定方法は妥当であると言える。また, この測定方法はワンパス型の気体溶解装置にしか適用できないという短所があるものの, 次のような長所を持つ。

- ・酸素移動速度($N_{(20)}$)をリアルタイム(即時)且つ連続的に計測・評価できる。
- ・総括酸素移動容量係数(KLa)を算出する必要が無い。
- ・試験時に初期 DO 濃度を 0[mg/L]まで低下させる必要がない。
- ・試験操作に必要な時間が短く, 多くの実験条件をこなすことができる。
- ・水表面からの酸素溶解量を無視できる。(気体溶解装置の正味の酸素移動速度が計測できる。)

(参考文献)

- 1) 井出哲夫：水処理工学(理論と応用), 技報堂出版(株), pp.247-249.
- 2) 大木協, 羽田野袈裟義, 馬駿, 朝位孝二, 中野陽一：処理水分離型実験による気体溶解装置の酸素移動速度測定を試み, 土木学会論文集 B, Vol.66, No.4, pp.407-418, 2010.
- 3) 大木協：DO 改善のための気体溶解装置の性能評価に関する実験的研究, 山口大学学位論文, 2011 年.
- 4) 羽田野袈裟義, 馬駿, 今井剛, 藤里哲彦：溶存気体を利用する環境改善, 土木学会誌, 第 91 巻, 第 11 号, pp.78-79, 2006.
- 5) 羽田野袈裟義, 馬駿, 今井剛, 藤里哲彦, 原田利男：液膜を利用する DO 改善技術に関する基礎的研究, 土木学会論文集 G, Vol.63, No.1, pp.1-11, 2007.
- 6) 馬駿：液膜を利用する気体溶解技術に関する基礎的研究, 山口大学学位論文, 2008 年.
- 7) 建設省都市局下水道部, 厚生省生活衛生局水道環境部：下水試験方法(上巻)(2012 年版), (社)日本下水道協会, pp.690-691, 2021.
- 8) 平山公明：表面曝気における総括酸素移動容量係数の算出方法に関する一考察(山梨大学工学部研究報告).
- 9) (財)日本規格協会：JIS ハンドブック 53 環境測定II水質, p781, 2008.