

山口大学大学院理工学研究科 学生会員○井田 真人
 山口大学大学院理工学研究科 学生会員 大木 協
 山口大学大学院理工学研究科 フェロー会員 羽田野 袈裟義
 新光産業(株) 非会員 馬 駿
 宇部工業高等専門学校 物質工学科 正会員 中野 陽一
 宇部工業高等専門学校 非会員 原田 利男
 (有)バブルタンク 非会員 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 K_La を算出する．そして， K_La 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， K_La の算出が必須であり，その実験操作に長い時間が掛かる， K_La 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. 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当研究室で研究開発中のh型気体溶解装置^{2),3)}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

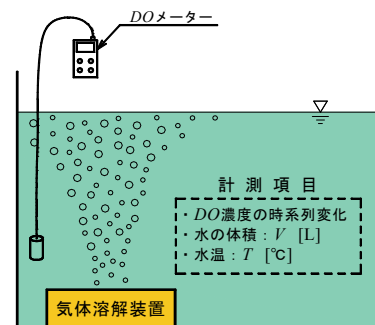


図-1 処理水循環型酸素溶解実験装置 概念図

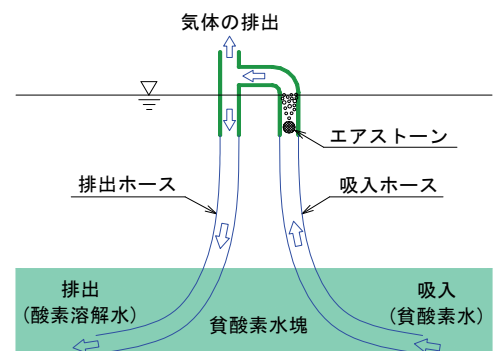


図-2 h型気体溶解装置全体図

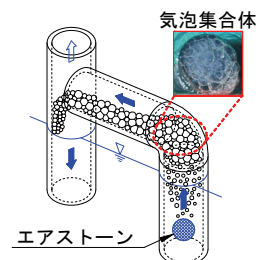


図-3 h型気体溶解装置の中核部分

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),4)}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-3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($K_L a$)を算出した。 $K_L a$ 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⁵⁾を用いて水温 T [°C]における総括酸素移動容量係数($K_L a(T)$)を算出した。式(1)¹⁾によって $K_L a(T)$ を $K_L a_{(20)}$ 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。

$$K_L a(T) = K_L a_{(20)} \times \theta^{T-20} \quad (1)$$

そして、式(2)¹⁾により $N_{(20)}$ を算出した。ここで、 $\text{DO}_{s(20)}$ は水温20[°C]における飽和 DO 濃度であり、その数値は数表⁶⁾から読み取った。

$$N_{(20)} = K_L a_{(20)} \times \text{DO}_{s(20)} \times V \quad (2)$$

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。
- ・ $K_L a$ の算出方法が煩雑。
- ・ $K_L a$ の算出方法によっては処理対象水の DO 濃度を0にする必要があり、これは精度の悪化につながる。
- ・実験時の水表面からの酸素溶解量の評価が困難。

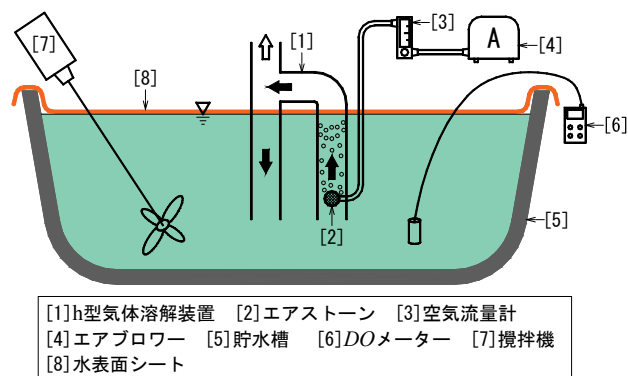


図-4 処理水循環型酸素溶解実験装置 概略図

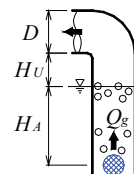


図-5 諸元の説明図

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

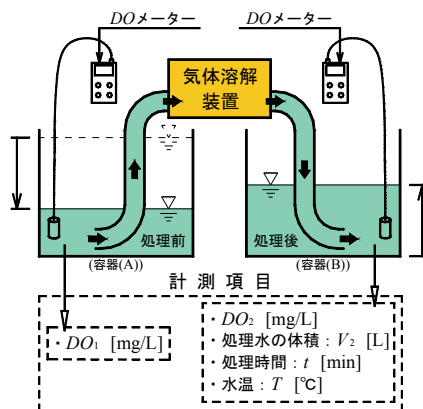


図-6 処理水分離型酸素溶解実験装置 概念図

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])を計測し、式(3)のように処理水流量(Q_w [L/min])を求める。

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

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⁷⁾。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 $(T[^\circ\text{C}])$ における換算 $\Delta DO(\Delta DO_{0(T)})$ を水温 $20[^\circ\text{C}]$ 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⁶⁾から読み取った飽和 DO 濃度($DO_{s(T)}$)は $1[\text{atm}]$ 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($P_{O_2}[\text{MPa}]$)， $1[\text{atm}]$ の空気における酸素の分圧($0.021[\text{MPa}]$)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．

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

また，ヘンリーの法則の適用範囲はガス成分のモル分率表示の溶解度が $0.03[\text{mol/mol}]$ 以下とされている⁸⁾．そこで，特許庁のホームページ⁹⁾に掲載されている種々の加圧型気体溶解装置の加圧タンク内の圧力を調査すると，最大でも $1[\text{MPa}]$ に満たない値であった．よって，水温 $0[^\circ\text{C}]$ ， $P_{O_2}=1[\text{MPa}]$ として式(8)によって $DO_{s(T)'}$ を算出し，これをモル分率表示の溶解度に単位変換すると $0.00038[\text{mol/mol}]$ となる．この値は $0.03[\text{MPa}]$ より小さいため式(8)はヘンリーの法則の適用範囲内であり，種々の加圧型の気体溶解装置に適用可能であることが確認された．

また，この測定方法は実験操作の都合上，処理前後の水を分離できる形式(ワンパス型)の気体溶解装置のみに適用可能である．

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．

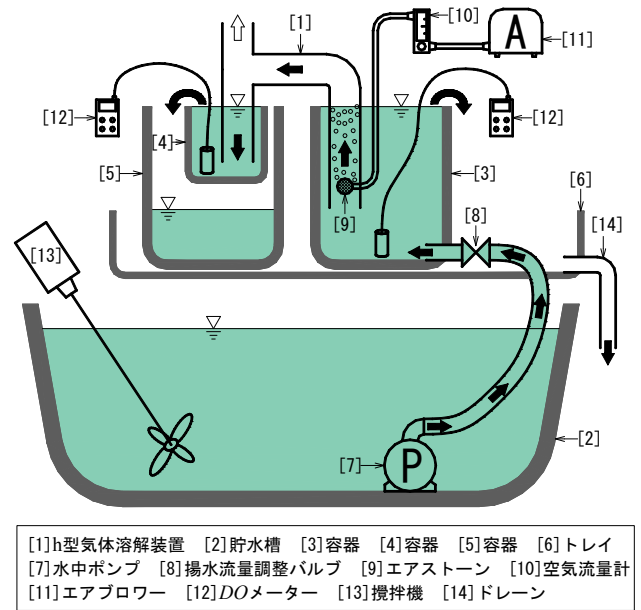


図-7 処理水分離型酸素溶解実験装置 概略図

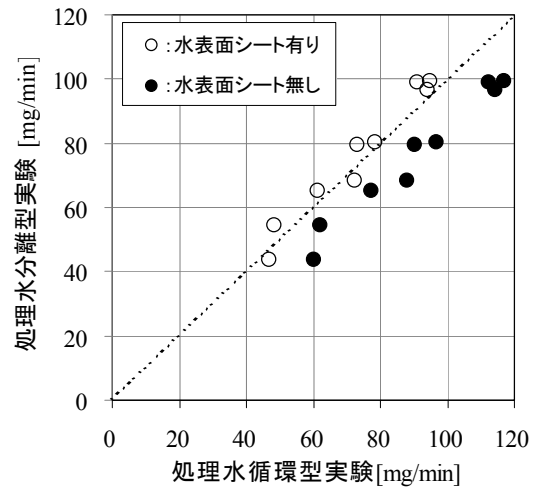


図-8 処理水分離型及び循環型酸素溶解実験による $N_{(20)}$ の比較

- (1) 貯水容器[2]に水道水($V=200[\text{L}]$)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．
- (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 $(T[^\circ\text{C}])$ を計測した．
- (6) 容器[5]の水の体積($V_2[\text{L}]$)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場合で得られた $N_{(20)}$ の値は処理水循環型酸素溶解実験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 $N_{(20)}$ に上乘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。

7. 考察

従来の方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。

- ・ K_La を算出する必要が無い。
- ・ 処理前の DO 濃度を 0 にする必要が無い。
- ・ 実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見捨てる。

8. 今後の予定

今後は、酸素以外の気体を高濃度に溶解した水に対するh型気体溶解装置の性状についての基礎的実験を行う予定である。

(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) 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
- 3) 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
- 4) 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)(1997 年版)，(社)日本下水道協会，pp.275-276，1997
- 5) 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)
- 6) (財)日本規格協会：JIS ハンドブック 53 環境測定Ⅱ水質，p781，2008
- 7) 馬駿：山口大学学位論文(2008 年)
- 8) 化学工学会：化学工学便覧，pp.80-81，1999
- 9) 特許庁 HP：<http://www.jpo.go.jp/>