水質浄化技術における *DO*改善性能評価方法について

羽田野袈裟義（理工学研究科）・大木協（理工学研究科）・馬駿（新光産業(株)）
朝位孝二（理工学研究科）・中野陽一（宇部高専）・藤里哲彦（(有)バブルタンク）

DO Improvement Performance Evaluation For Water Purification Technology

Kesayoshi HADANO (Graduate School of Science and Engineering) , Kyo OHGI (Graduate School of Science and Engineering) , Jun MA (Sinko Sangyo), Koji ASAI (Graduate School of Science and Engineering), Yoichi NAKANO (Ube National college of Technology), Tetsuhiko FUJISATO (Bubble Tank)

In order to improve the *DO* condition of a lake or sea, authors are developing the liquid film gas dissolution technique. This paper presents a summary of this technique, experimental results of *DO* improvement, and performance evaluation method for the *DO* improvement considering the *DO* concentration of the water to be treated. This *DO* improvement method transforms the water into bubble clusters which essentially makes water elements of the thin film of bubbles. This method yields a large value of the dissolved gas concentration gradient in the water and therefore attains an efficient gas dissolution. Also, this method treats deep water utilizing the airlift effect by aeration in the shallow part of the pipe, thus saving energy. The authors have shown experimentally that the *DO* increment depends on the *DO* concentration of the water to be treated, and proposed the equivalent *DO* increment as an index of the *DO* increment which can be used irrespective of the *DO* concentration to be treated and which indicates the potential of the *DO* increment for the same working condition from the theory of the aeration device. The validity of this index was checked using the result of the present experiments.

Key Words: *water quality,DO improvement,bubble cluster,energy saving,equivalent DO increment*

1．はじめに

近年，湖沼や河川或いは内湾の水質の悪化が大きな問題となっている．これは主として水域の富栄養化と貧酸素化の形で顕在化している．貧酸素化は水中の溶存酸素(*DO*)が著しく低下した状態で，貧酸素化により，底泥からの重金属や栄養塩の溶出の問題[1)~3)]が指摘され，その改善策として様々な方法で曝気が試みられてきた．しかしながら，従来のこれらの方法には効率面やコスト面で大きな問題があり，依然として問題解決の兆しが見えない状況である．

そのような状況で，著者ら[4),5)]のグループは少量のエネルギーを用いて低コストで稼働し，且つ高効率な溶存酸素改善方法としてh型気体溶解装置を開発中である．

本研究で著者らが着目したのは，各種の*DO*改善装置による*DO*改善ポテンシャルを表現する方法である．*DO*改善処理においては同一条件で処理を行った場合でも，処理前の*DO*値によって処理後の*DO*値は変化する．つまり，単純に*DO*増分を比較したのでは*DO*改善ポテンシャルを比較したことにならない．現在，*DO*改善性能を評価する方法として曝気装置の理論式(式(3))に示されているガス移動係数K_L，またはこれに$a=A/V$(A：気液界面積，V：液の容量)を乗じた総括ガス移動容量係数K_Laが用いられている．しかし，総括ガス移動容量係数K_Laはaの値によって変化するため*DO*改善ポテンシャルを表現する方法として適切でないことは明らかである．次に，ガス移動係数K_Lは*DO*改善装置によって決まる数値であり，*DO*改善ポテンシャルを表現していると言える．しかし，ガス移動係数K_Lを算出するには$a=A/V$(A：気液界面積，V：液の容量)の値を求める必要があるが，一般に*DO*改善装置では気液間の界面積Aを求めるのは困難な場合が多い．したがって，ガス移動係数K_Lを正確に算出することは難しい．

そこで本研究では，著者らが開発中の液膜式のh型気体溶解装置の稼働の概要を述べ，酸素溶解の性能に関する実験結果を示す．そして，曝気装置の理論を用いて処

理前の*DO*値に依存せず，且つ容易に求めることができる*DO*改善ポテンシャルを評価する方法として換算Δ*DO*を提案し，実験結果によりその指標の妥当性を検討する．また，酸素溶解ポテンシャルを評価する方法として換算酸素溶解能力を提案する．

２．h型気体溶解装置について

h型気体溶解装置の原理は次のとおりである．**図-1**は本装置を現地に設置した場合の全体図，そして**図-2**はh型気体溶解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鉛直部の管内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，それによって管内の水の上昇流が誘起される，いわゆるエアリフト現象が発生する．この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管曲り部で気泡集合体を形成する．すなわち，気泡と共に上昇した水はほとんど全てが管内の外水位より少し高い位置(図の管曲り部)でいったん気泡集合体の液膜の構成要素となり，曝気気体と大きな比表面積で接触するため効率的な気体溶解が行われる．これについて後で詳述する．その後，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．そして，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．

このような構成と稼働により効率的な酸素溶解が行われ，また，管内曝気の効果で通常の曝気に比べて明らかに省エネルギーとなる．これらについて述べる．まず，気体溶解の性能であるが液体中の気体溶解フラックス*J*は，気体の溶存濃度を*C*，気液境界面と法線方向の長さを*n*，係数を*K*として次式

$$J = -K\frac{\partial C}{\partial n} \tag{1}$$

で与えられ，液膜の場合，膜厚をδ，液膜の両方の表面における濃度の差をΔCとして$J \propto \Delta C/\delta$となり，$\delta$が小さいことから大きな*J*が得られる．

次に，省エネルギー性について述べる．曝気に要する仕事率*P*は水力発電の理論水力と同様の考え方から，水の単位体積重量*w*，曝気深度*H*，空気流量Q_gを用いて次式

$$P = wHQ_g \tag{2}$$

で表現される．本方式では，水深の浅い部分で管内曝気をすることによって曝気位置よりも深い部分の水を連結ホースの先端から吸入して酸素溶解処理することができる．曝気位置はh型管の直径の5～6倍程度でよく，かなり浅い位置での曝気で機能を発揮する．実際に現地で使用する際には，直径5cm程度のh型管を複数用いることを想定しており，曝気水深を浅くとれることの優位性は明らかである．

この他の特徴として，装置が簡単な構成で低コストである，ホースの使用により処理対象の水の吸入位置及び処理後の水の排出位置を自由に設定できる，装置の主要な部分が水面上にあるため維持管理が容易である，水域の水の循環を伴わないため躍層を破壊しない，管内曝気のため曝気によって*DO*濃度が上昇した水を再度曝気するような無駄がない，などを挙げることができる．

３．*DO*改善の実験とその結果

室内実験により本装置の*DO*改善性能を調べた．その概要を以下に述べる．

(1) 実験装置と方法

図-3は実験装置の模式図である．実験装置の主要構成は，気体溶解処理対象の水を入れる貯水容器(②)，その水を汲み上げる水中ポンプ(⑦)，処理対象の水を貯め置く容器A(③)，処理後の水を受け止める容器B(④)，容器Bからオーバーフローした処理後の水を受け止める容器C(⑤)，エアストーンに空気を送るエアブロワー(⑪)などからなる．容器Aからオーバーフローした水は一旦トレイ(⑥)で受け止めて排水されるようになっている．

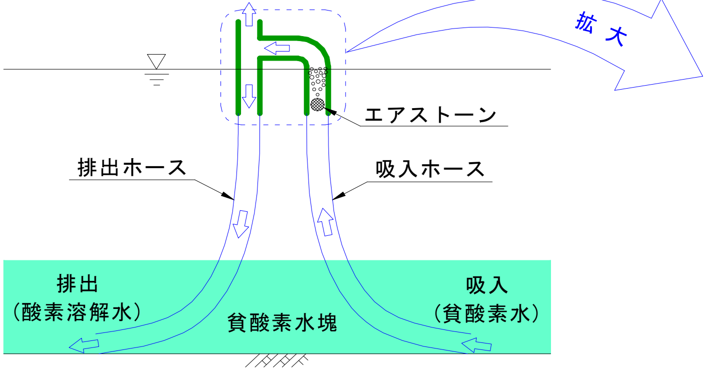


図-1 h型気体溶解装置 全体図

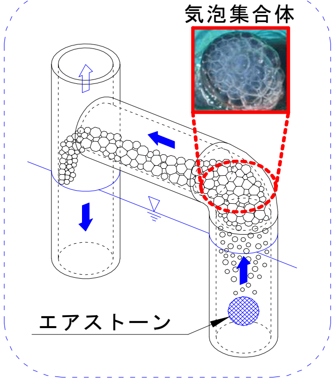


図-2 h型気体溶解装置の中核部分

実験は次のような手順で行った.

[1] 貯水容器(②)に水道水を200(L)貯め，撹拌機(⑬)で撹拌しながら水温を12(℃)に調節・維持した.

[2] 貯水容器に亜硫酸ナトリウムを約12～15(g)と微量の塩化コバルトを触媒として投入し，*DO*濃度が低下したところで撹拌を停止した.

[3] 水中ポンプ(⑦)により貯水容器から容器A(③)に水を送り，容器Aからトレイ(⑥)にオーバーフローしている状態でエアストーン(⑨)から空気を放出させて装置(①)を稼働し，処理を開始した.

[4] 処理された水が容器B(④)から容器C(⑤)にオーバーフローし，処理量が約10(L)に達したところで装置を停止し，処理を終了した.

[5] 処理終了後，直ちに*DO*メーター(⑫)を用いて容器Aと容器Bのそれぞれの水の*DO*濃度を測定し，これを処理前後の*DO*濃度とした.

実験は**表-1**の条件で行った．表中の諸量の定義を**図-4**に示している.

(2) 実験結果及び考察

図-5に実験結果を示す．図では，処理後の*DO*濃度(DO_2)と*DO*濃度増分(ΔDO)を処理前の*DO*濃度(DO_1)に対してプロットしている．図より，どの空気流量においても処理前の*DO*濃度(DO_1)が大きいほど処理後の*DO*濃度(DO_2)は大きくΔDOは小さいことがわかる．したがって，*DO*改善の工法を実施した時，その効果を評価する場合，単に*DO*濃度増分(ΔDO)を評価するだけでは駄目であり，処理前の*DO*濃度(DO_1)とセットで評価しなければならない.

4．*DO*改善の性能評価方法の提案

(1) 曝気装置の理論の帰結

前章で示した実験結果より，同一の条件で酸素溶解処理を行っても，処理前の*DO*濃度(DO_1)により*DO*濃度増分(ΔDO)が異なり，濃度増分(ΔDO)と処理前の*DO*濃度(DO_1)をセットで示す必要があることを示した．そこで，*DO*改善ポテンシャルを表現する方法として，“換算ΔDO”による評価方法を提案する．以下にその導出方法を述べる.

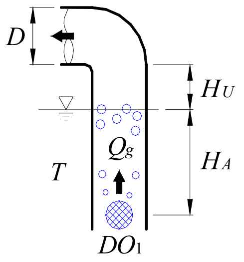


図-4 諸量の定義

表-1 実験条件

水 温: T (℃)	12
管 内 径: D (mm)	50
水平管内底高さ: H_U (mm)	20 , 50
ｴｱｽﾄｰﾝ深度: H_A (mm)	140 , 230 , 320
空 気 流 量: Q_g (L/min)	10 , 20 , 30 , 40
処理前*DO* 濃度: DO_1 (mg/L)	1 , 3 , 7

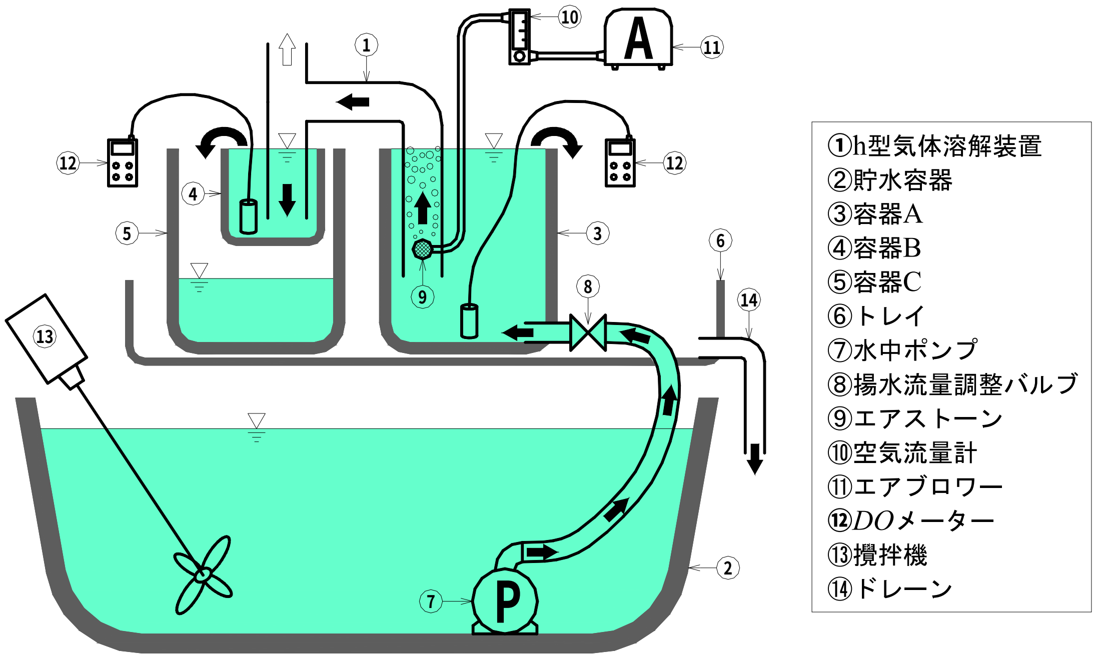
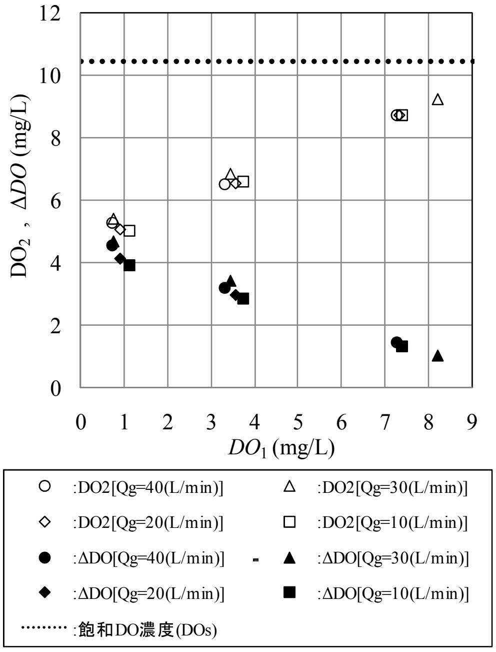
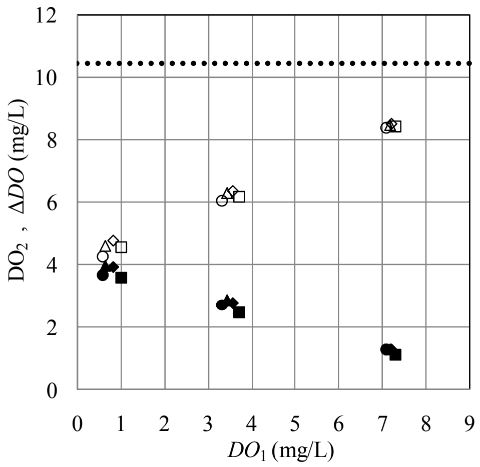


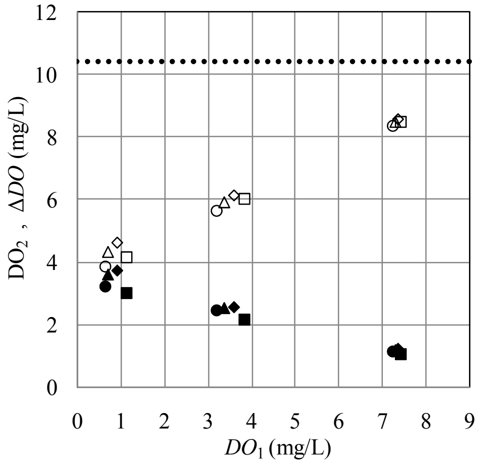
図-3 実験装置模式図



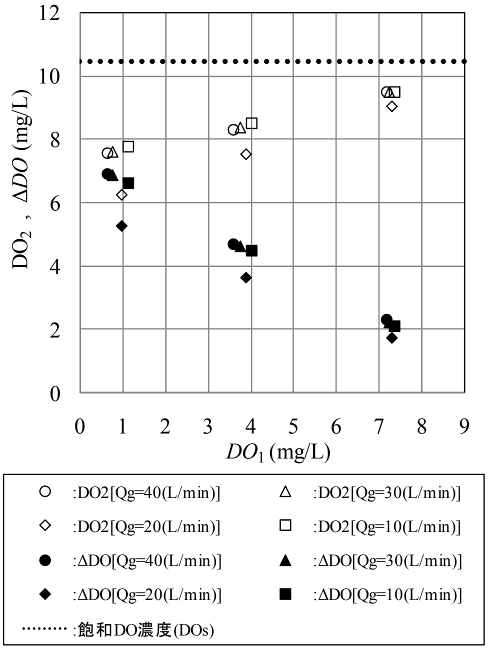
(a) $H_U = 20$(mm), $H_A = 140$(mm)



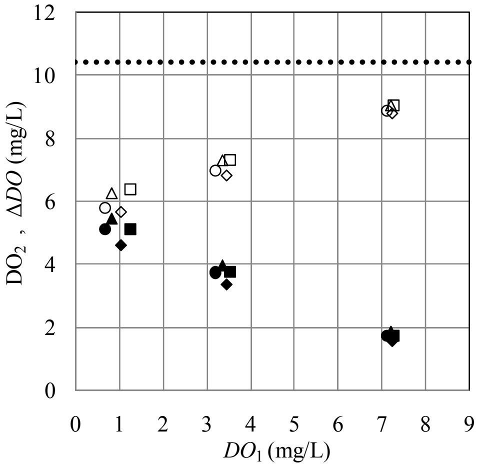
(b) $H_U = 20$(mm), $H_A = 230$(mm)



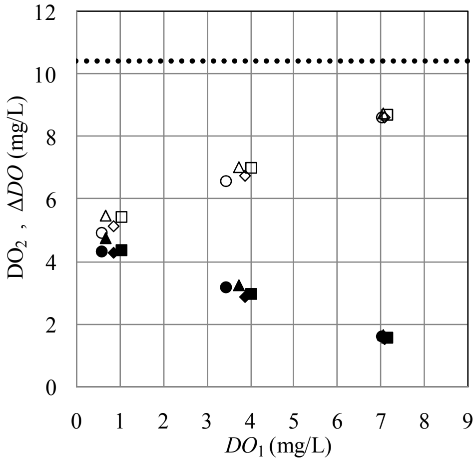
(c) $H_U = 20$(mm), $H_A = 320$(mm)



(d) $H_U = 50$(mm), $H_A = 140$(mm)



(e) $H_U = 50$(mm), $H_A = 230$(mm)



(f) $H_U = 50$(mm), $H_A = 320$(mm)

図-5 DO_2及びΔDOとDO_1の関係

曝気装置内に清水を満たし，これに酸素消費がない条件で曝気を行うと，溶存酸素濃度DOは次第に上昇する．曝気理論によると，このときの DO の上昇過程は，飽和濃度を DO_s，総括酸素移動容量係数を K_Laとして次式で与えられる[6]．

$$\frac{dDO}{dt} = K_L a(DO_s - DO) \tag{3}$$

K_Laを一定として式(3)を$t = t_1$〜t_2で積分すると，

$$\ln\left(\frac{DO_s - DO_1}{DO_s - DO_2}\right) = K_L a(t_2 - t_1) \tag{4}$$

ここで，DO_1とDO_2 はそれぞれ時刻 t_1とt_2 における溶存酸素濃度である．これより，

$$\frac{DO_2 - DO_1}{DO_s - DO_1} = 1 - \exp[-K_L a(t_2 - t_1)] \tag{5}$$

この式から，K_Laと時間差$(t_2 - t_1)$が一定であれば，$(DO_2 - DO_1)/(DO_s - DO_1)$が一定となる．

$(t_2 - t_1)$はDO改善プロセスの時間に対応するから，DO改善のための機器を同一の出力で定常運転する場合，$(t_2 - t_1)$は一定と考えてよい．したがって，処理前のDO濃度(DO_1)が異なる2つの試料水A，Bに同一条件でDO改善処理を行う場合，$(DO_2 - DO_1)/(DO_s - DO_1)$が一定となる．すなわち，2つの試料水$A$，$B$に適用すると，

$$\frac{DO_{2A} - DO_{1A}}{DO_s - DO_{1A}} = \frac{DO_{2B} - DO_{1B}}{DO_s - DO_{1B}} \tag{6}$$

式(6)の分子$(DO_{2A} - DO_{1A})$および$(DO_{2B} - DO_{1B})$はそれぞれ試料水AおよびBのDO濃度増分であり，それぞれΔDO_AおよびΔDO_Bと考えればよい．

ここで，試料水Aとして処理前のDO濃度がゼロの水を考え，試料水Bとして処理前のDO濃度がゼロでない任意の値の試料水を考える．そして，試料水Aに対する量として分子をΔDO_0とおき，任意の初期DO値を持つ試料水Bに対する量を示す添字Bを省いて示すと，式(6)は次のように書き換えられる．

$$\frac{\Delta DO_0}{DO_s} = \frac{\Delta DO}{DO_s - DO_1} \tag{7}$$

これより，

$$\Delta DO = \frac{DO_s - DO_1}{DO_s} \cdot \Delta DO_0 \tag{8}$$

すなわち，DO濃度がゼロの試料水とDO_1の試料水に対して全く同じ条件でDO改善処理を行うと，濃度がDO_1の試料水のDO濃度増分(ΔDO)は，DO濃度がゼロの試料水のDO濃度増分(ΔDO_0)の$(DO_s - DO_1)/DO_s$ 倍となり，ΔDO_0に比べて小さくなることがわかる．したがって，DO改善機器のDO増加能力は，次式のΔDO_0により評価されるべきであることがわかる．

$$\Delta DO_0 = \frac{DO_s}{DO_s - DO_1} \cdot \Delta DO \tag{9}$$

ΔDO_0は，仮にDO濃度がゼロの水にDO改善処理をした時に得られると想定されるDO濃度増分値で，本論文では換算ΔDOと呼ぶことにする．

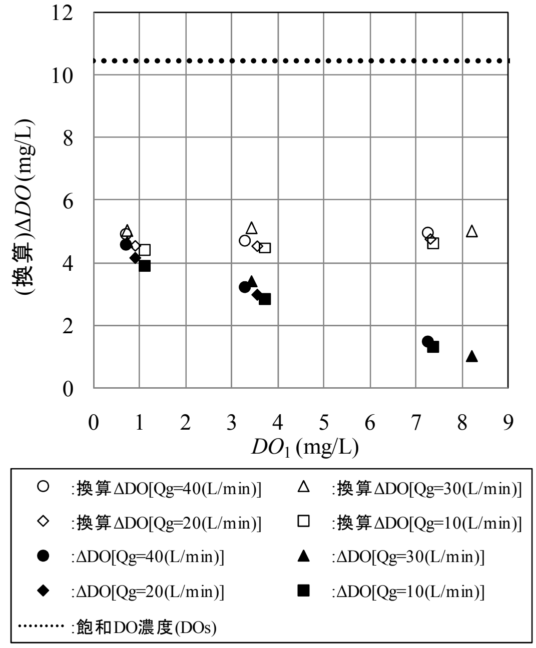
(2) 実験データによる換算ΔDOの確認

前節で提案した換算ΔDOを本実験について調べた．その結果を**図-6**に示す．図には前節の**図-5**に示したΔDOを併記している．図より，水平管内底高さ(H_U)，エアストーン深度(H_A)，空気流量(Q_g)，を一定とした場合，換算ΔDOは処理前のDO濃度(DO_1)によらずほぼ一定値をとることがわかる．上記の条件設定は，この機器の稼働条件を固定するものであり，図の結果は，同一条件でDO改善処理を行う時のDO改善ポテンシャルが一定であり，処理前のDO濃度(DO_1)に依存しないことを示している．このことから，ここで提案した換算ΔDOはDO改善ポテンシャルと言ってよい．ただし，この換算ΔDOは，著者らが開発しているh型気体溶解装置のように，処理前後の水を分離できる形式のDO改善装置に適用できる指標であり，深層曝気などのように処理前後の水が循環して分離できない形式のDO改善装置には適用できない．

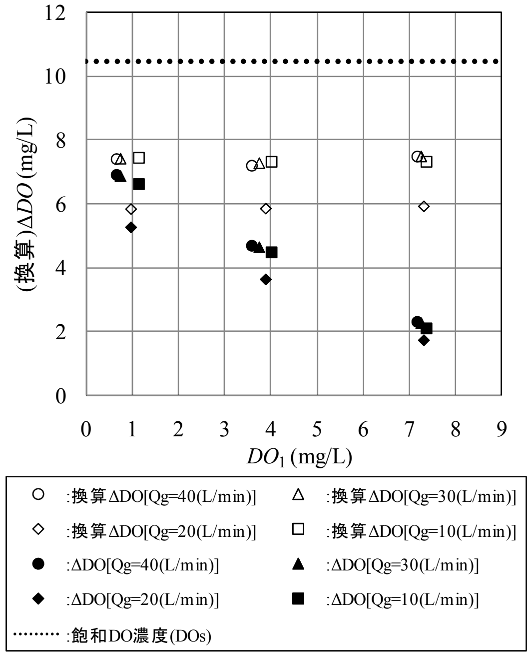
(3) 酸素溶解能力について

換算ΔDOは，あるDO改善装置による処理前後の水の単位体積当たりのDO改善ポテンシャル[mg/L]を評価するものであるが，実際に現地でDO改善装置を使用する際に重要なのは酸素溶解能力[mg/min]，すなわち単位時間に溶解させることができる酸素の質量である．処理前後の水を分離できる形式のDO改善装置では処理水流量[L/min]を計測することができるから，これと換算ΔDO[mg/L]の積によって表わされるパラメータは，仮にDO濃度がゼロの水にDO改善処理をした時に溶解すると想定される酸素の質量を意味しており，DO改善装置の酸素溶解ポテンシャルを評価している．ここではこれを換算酸素溶解能力[mg/min]と呼ぶ．

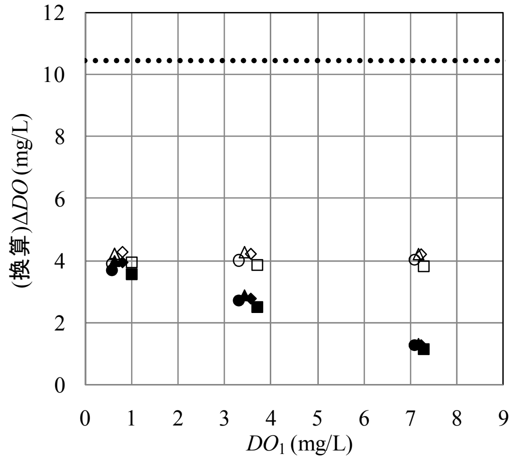
各種のDO改善装置の酸素溶解能力を換算酸素溶解能力で表現することで，それぞれの装置の酸素溶解能力を平等に比較することができる．



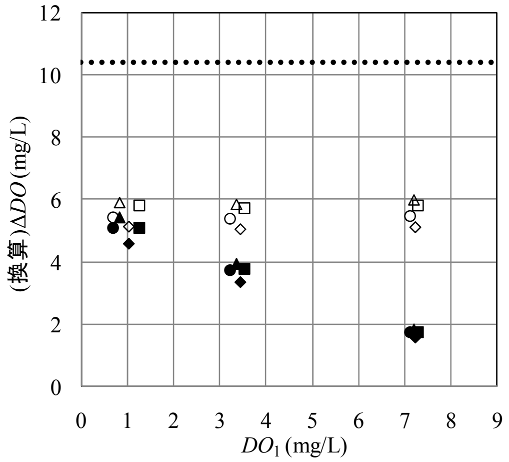
(a) $H_U = 20$(mm),　$H_A = 140$(mm)



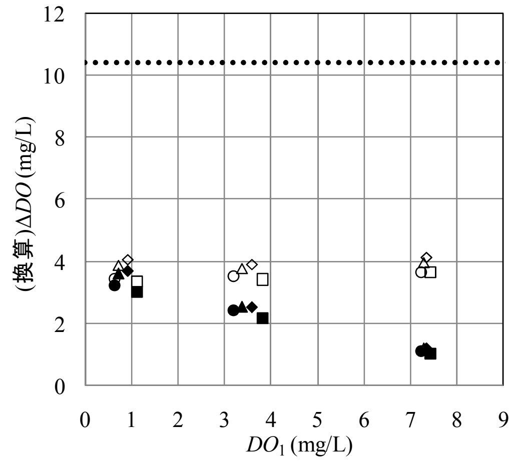
(d) $H_U = 50$(mm),　$H_A = 140$(mm)



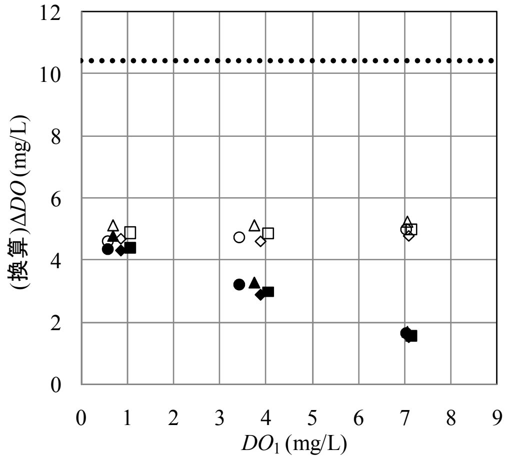
(b) $H_U = 20$(mm),　$H_A = 230$(mm)



(e) $H_U = 50$(mm),　$H_A = 230$(mm)



(c) $H_U = 20$(mm),　$H_A = 320$(mm)



(f) $H_U = 50$(mm),　$H_A = 320$(mm)

図-6 換算Δ*DO*及びΔ*DO*とDO_1の関係

５．結語

以上，著者らが開発中の液膜式h型気体溶解装置の稼働の概要を述べ，酸素溶解の性能に関する実験結果を示した．そして，装置の*DO*改善ポテンシャルを評価する方法として換算Δ*DO*を提案し，実験結果によりその妥当性を確認した．また，装置の酸素溶解能力を評価する方法として換算酸素溶解能力を提案した．主要な知見は以下のとおりである．

1. h型気体溶解装置は管内で曝気して気泡集合体を作ることで大きな気体溶解フラックスを得る，管内の浅い部分で曝気して深層水を吸入して省エネルギーで酸素溶解する，処理対象の水の吸入位置および処理後の水の排出位置を自由に設定できるなどの利点を持つ．
2. 処理前の*DO*濃度を種々に変化させた実験で，処理後の水の*DO*濃度を測定し，処理前の*DO*濃度が大きいほど処理後の*DO*濃度は大きくΔ*DO*は小さいことを確認した．
3. 曝気装置の理論から，*DO*改善のポテンシャルを表現する指標として換算Δ*DO*を式(9)として提案した．処理前の*DO*濃度を種々変化させた実験で換算Δ*DO*を調べ，これが処理前の*DO*濃度によらずほぼ一定値をとることを確かめた．したがって，換算Δ*DO*は装置自体の*DO*改善ポテンシャルを表現する指標として使用することができる．ただし，この指標を適用できるのは，処理前後の水を分離できる形式の*DO*改善装置である．
4. *DO*改善装置の処理水流量[L/min]と換算Δ*DO*[mg/L]の積によって表わされる換算酸素溶解能力[mg/min]は*DO*改善装置の酸素溶解ポテンシャルを表現しており，これを用いることで各種の*DO*改善装置の酸素溶解能力を比較することができる．

本研究では，*DO*改善装置の性能を表現する指標として換算Δ*DO*[mg/L]と換算酸素溶解能力[mg/min]について述べた．今後，現地での実証実験を行う予定であり，これについては別の機会に報告する．

謝辞：本研究に御支援頂いた宇部高専 原田利男氏，(株)日本港湾コンサルタント 福本裕輝氏(当時山口大学学生)に深甚の謝意を表します．

参考文献

1) Kawai , A. and Maeda , H.: Oxygen consumption in the bottom water with the production of sulfides in the bottom sediments , *Nippon Suisan Gakkaishi* , 50 , pp.119-124 , 1984
2) 松本治彦，城田久岳，羽田野袈裟義，斉藤隆：異常水温成層を形成するダム貯水池の水の挙動と指標物質，水環境学会誌，第16巻，第10号，pp.696-703 , 1993
3) 道奥康治，松尾昌和，香川健一，斉藤敦：貯水池の富栄養化にともなう熱塩成層のモデル化，水工学論文集，第47巻，pp.1237-1242 , 2003
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) 合田健：水質環境科学，丸善(株) , p.207

（平成21年9月30日受理）