

複数連結された h 型気体溶解装置の酸素溶解能力の増加特性について

山口大学 学生会員 ○福 嶋 孝 博 山口大学 正 会 員 大 木 協
山口大学 フェロー会員 羽田野 袈裟義 宇部高専 正 会 員 中 野 陽 一
(有)バブルタンク 非 会 員 藤 里 哲 彦

1. はじめに

近年、湖沼やダム貯水池などの閉鎖性水域で貧酸素化問題が生じている。貧酸素化とは底層の溶存酸素が欠乏した状態のことで、水棲生物の斃死や、大量に流出した栄養塩による水域の富栄養化、そして溶出した重金属を水棲生物が摂取したり水道水に混入するなど、深刻な問題を引き起こす。著者らは貧酸素化問題の改善技術として液膜利用の h 型気体溶解装置(図-1 参照)¹⁾の研究を行っている。この装置は h 型の管に接続された 2 本のホースで構成されており、管内の水面下の浅い位置からの曝気により処理対象水(貧酸素水)を気泡集合体に変換して酸素溶解処理を行うものである。気体溶解装置の酸素溶解能力は酸素移動速度 $N_{(20)}$ で表されるが、既報¹⁾によると、本装置 1 台の酸素移動速度 $N_{(20)}$ は実際に現地で処理を行うには小さいため、水域に多数の装置を設置する必要がある。しかし、設置数を増やすと台数分だけ吸入・排出ホースを設置することになり、装置の設置・撤去作業および維持管理が困難となるため、複数の装置を連結してホースの数を減らすことが賢明である。そこで、連結方法による酸素移動速度 $N_{(20)}$ の増加特性を評価する方法を提案し、実験値との比較によって妥当性を検証し、最適な連結方法について考察する。

2. 連結方法と酸素移動速度 $N_{(20)}$ の評価方法

装置を連結する方法として、直列連結と並列連結を提案する。各々の連結方法によって k [台]の装置を連結した場合の酸素移動速度 $N_{(20)k}$ は、処理水分離型換算 ΔDO 法²⁾に準拠して導出する。処理水分離型換算 ΔDO 法では、換算 ΔDO と処理流量 Q_w の積として酸素移動速度 $N_{(20)}$ を与える。ここで、換算 ΔDO とは装置による処理前後の DO 濃度増加性能のポテンシャルを表す指標で

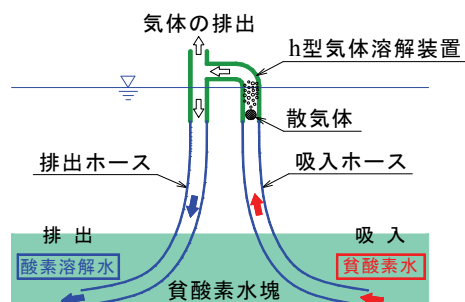


図-1 h型気体溶解装置概略図

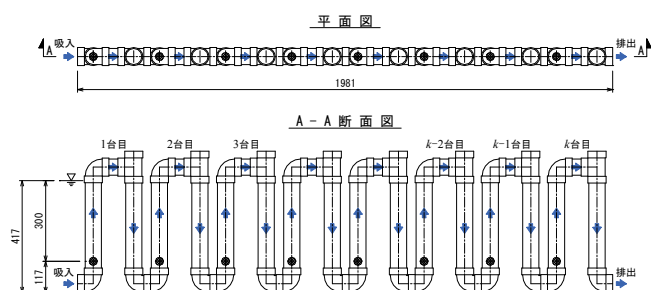


図-2 直列連結の配管図

あり、仮に初期 DO 濃度がゼロの水を処理した場合に得られると想定される DO 濃度増分である。さらにこれを水温 $20[^\circ\text{C}]$ に補正し、添え字で表して“ $\Delta DO_{0(20)}$ ”と表現する。すなわち、本方法では酸素移動速度 $N_{(20)}$ は式(1)のように表される。

$$N_{(20)} = \Delta DO_{0(20)} \cdot Q_w \quad (1)$$

2.1. 連結方法と計算式

k [台]の装置を連結した場合の酸素移動速度 $N_{(20)k}$ は装置 1 台の場合の基本性能、すなわち装置 1 台の場合の換算 ΔDO と処理流量 Q_w を用いて表現するものとする。

2.1.1. 直列連結

図-2 は直列連結の配管図である。この連結方法は、装置の排出側と次の装置の吸入側を次々に直列に連結する方法であり、連結数 k [台]の増加に伴って換算 ΔDO が増大することで酸素移動速度 $N_{(20)}$ が増加する。連結数 k [台]の場合

の換算 $\Delta DO(\Delta DO_{0(20)k})$ は装置 1[台] の場合の換算 $\Delta DO(\Delta DO_{0(20)1})$ を用いて式(2)のように導出した．なお，式中， $X = \Delta DO_{0(20)1} / DO_{s(20)}$ ， $DO_{s(20)}$ は水温 20[℃] における飽和 DO 濃度である．

$$\Delta DO_{0(20)k} = \Delta DO_{0(20)1} \left\{ \frac{1 - (1 - X)^k}{X} \right\} \quad (2)$$

よって，連結数 k [台] の場合の酸素移動速度 $N_{(20)k}$ は $\Delta DO_{0(20)k}$ と処理流量 Q_w の積として次のように表される．

$$N_{(20)k} = \Delta DO_{0(20)1} \left\{ \frac{1 - (1 - X)^k}{X} \right\} \times Q_w \quad (3)$$

2. 1. 2. 並列連結

図-3 は並列連結の配管図である．複数の装置の吸入側及び排出側を別々に取りまとめて連結する方法であり，処理流量 Q_w が連結数 k [台] に比例して増大することで $N_{(20)}$ が増加する．連結数 k [台] の場合の酸素移動速度 $N_{(20)k}$ は次のように表される．

$$N_{(20)k} = k \times \Delta DO_{0(20)1} \times Q_w \quad (4)$$

2. 2. 基本性能の測定実験と酸素移動速度の評価

式(3)，(4)において，装置 1[台] の場合の基本性能，すなわち換算 $\Delta DO(\Delta DO_{0(20)1})$ と処理流量 Q_w は処理水分離型換算 ΔDO 法²⁾に準拠した実験によって測定した値を用いる．なお，装置の諸量の実験条件は，管内径 $D=50$ [mm]，水平管高さ $H_U=20$ [mm]，曝気深度 $H_A=300$ [mm]，空気流量 $Q_g=15$ [L/min] で一定とした．(図-5 参照) 図-4 は実験装置の概略図である．実験手順は次のとおりである．

- [1] 貯水槽に貯めた水道水の DO 濃度を薬剤によって低下させた．
- [2] 貯水槽内の水道水を水中ポンプにより容器[3]に揚水し，容器[3]から越流している状態で処理を開始した．
- [3] 処理水が容器[4]から容器[5]に越流し始めた時点から適当な処理時間 t で処理を終了した．
- [4] 処理終了後，直ちに処理前後の DO 濃度 (DO_1 ， DO_2) と処理水の体積 V_2 ，水温 T [℃] を計測した．

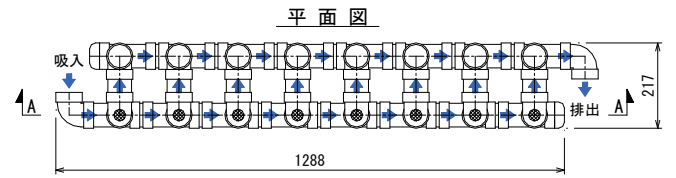


図-3 並列連結の配管図

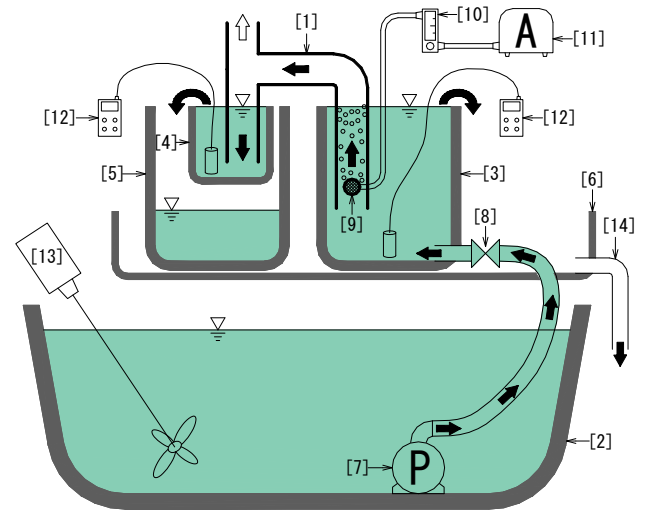


図-4 処理水分離型実験装置概略図

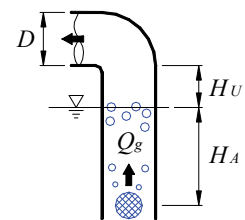


図-5 諸量の定義

これらの計測値を用いて，処理水分離型換算 ΔDO 法に準拠して装置の基本性能を算出した．その結果，換算 ΔDO は $\Delta DO_{0(20)1}=3.37$ [mg/L]，処理流量は $Q_w=26.32$ [L/min] と算出された．

次いで，これらの値を式(3)，(4)に代入して各々の連結方法による連結数 k [台] の場合の酸素移動速度 $N_{(20)k}$ を計算した．

3. 検証実験

前節で提案した複数連結した場合の酸素移動速度 $N_{(20)k}$ の評価方法の妥当性を検証するため、実際に h 型気体溶解装置を連結させて酸素移動速度 $N_{(20)k}$ を測定した。ただし、複数連結された装置では処理水分離型実験を行うのは困難であるため、既往の測定方法に基づいて測定した。図-6 は酸素移動速度の既往の測定方法による実験装置の概略図である。実験の手順は次のとおりである。

- [1] 貯水槽に貯めた水道水の DO 濃度を薬剤によって低下させた。
- [2] 貯水槽の水表面にシートを設置した。
- [3] 複数連結した装置を稼働させ、DO 濃度の時系列データと水温を測定した。

これらの計測値を用いて、総括酸素移動容量係数 $K_L a_{(20)}$ を算出し、貯水槽の水の体積を V [L] として酸素移動速度 $N_{(20)k}$ を式(5)によって算出した。

$$N_{(20)k} = K_L a_{(20)} \cdot DO_{s(20)} \cdot V \quad (5)$$

また、装置の諸量の実験条件は前述と同様であるが、連結数は $k=1 \sim 8$ [台]、水の体積は $V=200$ [L] または 700 [L] である。なお、水表面にビニール製のシートを設置することで大気からの酸素溶解を防ぎ、装置自身のみによる酸素移動速度を測定している。

4. 実験結果と考察

提案した連結方法による酸素移動速度 $N_{(20)k}$ の評価方法の妥当性を検証実験による実験値と比較することで検討する。図-7 は酸素移動速度 $N_{(20)}$ の計算値と検証実験による実験値を比較したグラフである。図より、計算値、実験値共に並列連結の方が直列連結よりも大きな値を示している。また、直列連結では実験値と計算値がよく一致していることから計算式(3)が妥当であることがわかる。しかし、並列連結では連結数が 4 [台] 以下では実験値と計算値がよく一致しており計算式(4)の妥当性が確認できるが、5 [台] 以上では実験値が計算値を大きく下回っており、この範囲では計算式は妥当ではない。なお、並列連結の実

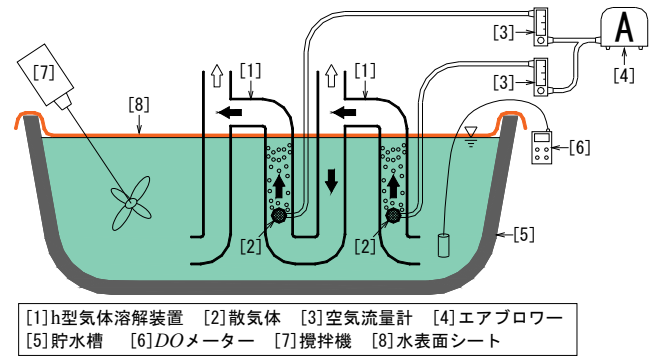


図-6 処理水混合型実験装置概略図

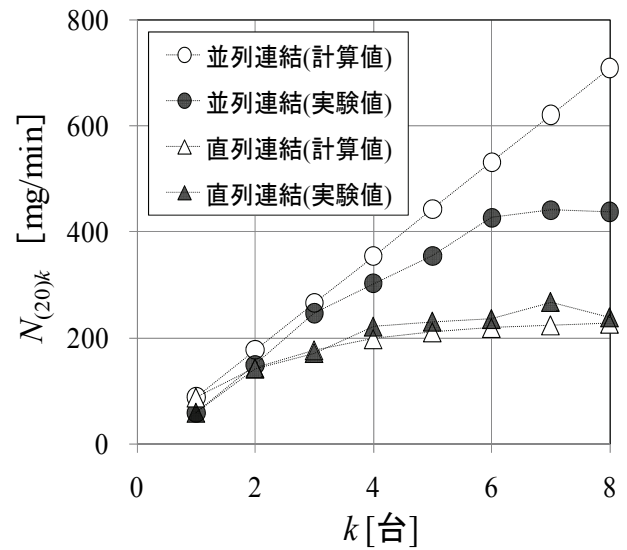


図-7 $N_{(20)k}$ と k の計算値と実験値の比較

験値によると酸素移動速度は 4 [台] 以上で増加率が減少するものの、6 [台] までは増加を続け、連結数が 6 [台] 以上では実験値は増加せずほぼ一定となっていることから、本実験条件では並列連結の有効連結数は 6 [台] である。この原因として次のことが考えられる。並列連結の場合、実験時の目視により連結数が増えるのに伴って排出側の鉛直管内の水面が上昇し、4 台以上では上昇量が水平管高さ $H_U=20$ [mm] より高くなって越流し、吸入側の直管方向に向かって逆流する様子が確認されている。これは、連結数 k [台] に比例して増大した処理流量 Q_w が排出側の合流管の損失水頭を増加させ、排出側の鉛直管内の水面の上昇を引き起こしたことが原因であると考えられる。

5. 結論

本研究では、h 型気体溶解装置を現地で利用する際に複数の装置を連結することを提案した。そして、装置の連結方法と評価方法を提案し、妥当性を検証するための実験を行った。ここで得られた主要な知見は次のとおりである。

1. h 型気体溶解装置の連結方法として、並列連結、直列連結を提案し、それぞれについて装置の基本性能(装置 1 台の場合の換算 ΔDO と処理流量)を用いて連結数 k に対して酸素移動速度 $N_{(20)k}$ を表現する式を得た。
2. 本提案の評価方法によると、酸素移動速度 $N_{(20)k}$ が大きい順に、並列連結、直列連結となった。また、並列連結では酸素移動速度 $N_{(20)k}$ は連結数 k に比例して増加する。これに対して、直列連結の場合には酸素移動速度 $N_{(20)k}$ は連結数 k とともに増加するが、その増加は次第に鈍化する。
3. 本提案の評価方法の妥当性の検証実験を行い、酸素移動速度 $N_{(20)k}$ の計算値と実験値を比較検討した。その結果、直列連結では計算式の妥当性が確認されたが、並列連結では 4[台]以下においてのみ妥当性が確認された。
4. 直列連結の酸素移動速度は計算値・実験値ともに、検討した連結方法の中で最も小さいが、高い DO 濃度の処理水を必要とする場合には直列連結が有効である。
4. 本実験条件では並列連結の有効連結数は 6[台]であるが、これは合流後の管内径を大きくして損失水頭を低減させることで増やすことができると考えられる。
5. 連結が可能な一過性気体溶解装置に対して、装置の基本性能(装置 1 台の場合の換算 ΔDO と処理流量)を測定しておけば、本評価方法を用いることで種々の連結方法による酸素移動速度を評価できることが示唆された。特に、直列連結の場合は従来の酸素移動速度の測定方法では計算不可能であり、処理水分離型換算 ΔDO 法の固有の特徴と言える。

(参考文献)

- 1) 大木 協 他：管内曝気による液膜方式の気体溶解装置の DO 改善性能に関する実験的検討，土木学会論文集 B, Vol.66, No.3, pp.235-247, 2010.
- 2) 大木 協 他：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の試み，土木学会論文集 B, Vol.66, No.4, pp.407-418, 2010.