

h 型気体溶解装置の吸入ホースの水頭損失を考慮した処理流量の評価について

山口大学 学生会員 ○福嶋 孝博 (株)間組 正会員 井田 真人
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)パルタンク 非会員 藤里 哲彦

1. 序論

湖や貯水池等の閉鎖性水域では貧酸素化により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．当研究室では貧酸素水塊に酸素を供給する装置として，エアリフトの原理を利用した h 型気体溶解装置を開発中である^{1)~3)}(図 - 1, 図 - 2 参照)．既報¹⁾において，本装置の酸素溶解能力は処理流量 Q_w に大きく依存することが確認されている．また，詳細は後述するが，本装置では h 型管内のエアリフトによる上昇水を補償するため，吸入ホースの先端から水域の貧酸素水を連続的に吸入する．この際，吸入ホース内で発生する水頭損失のため，エアリフトによる揚水流量，すなわち処理流量 Q_w が低下することを考慮する必要がある．本研究では，まず，既往のエアリフトのエネルギー式を用いて h 型管部分の水理検討を行い，次いで，吸入ホースによる損失水頭を考慮した処理流量 Q_w の評価を行う．

2. h型気体溶解装置について

h 型気体溶解装置の構成と稼働の原理を簡単に述べる(図 - 1, 図 - 2 参照)．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くなるように固定し，h 型管の曲がり部下方の水面下に曝気のための散気体を配置している．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起こり，管内のエアリフト分の水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吸入される．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となり，このときに気相・液相間で気体成分の交換が活発に行われる．そして気体溶解し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，水は直管内を下方に流下して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て大気中に排出される．

3. エアリフトのエネルギー式と h 型管への適用

本研究では，既往のエアリフトのエネルギー式を h 型管に適用するが，式中に表れる揚程は h 型管においては未知量である．そこで，著者らが過去に行った処理流量計測の実験結果¹⁾から逆算によりこれを求める．なお，その実験では，

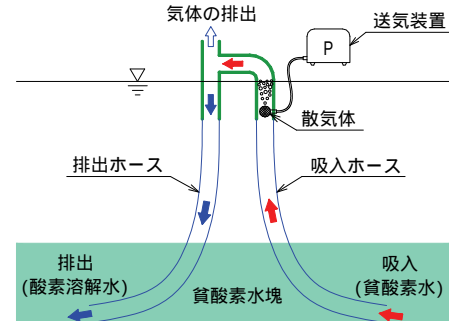


図 - 1 h 型気体溶解装置全体図

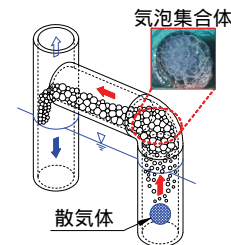


図 - 2 h型気体溶解装置の中核部分

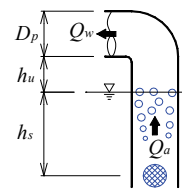


図 - 3 諸量の説明図

表 - 1 処理流量計測実験条件¹⁾

管内径: D_p [m]	0.05
水平管高さ: h_u [m]	0.02, 0.05
曝気深度: h_s [m]	0.14, 0.23, 0.32
空気流量: Q_a [L/min]	10, 20, 30, 40

図 - 3 に示す h 型管の諸量を表 - 1 に示す全ての組み合わせで処理流量 Q_w を計測している．

3.1. エアリフトのエネルギー式

図 - 4 はエアリフトのモデル図である．これに対してエネルギー式は式(1)により与えられる⁴⁾．式(1)の左辺は，水面下で放出された気泡が水面に達するまでに等温膨張により周囲の水に対してなす仕事率であるが，空気を散気体に送り込むために単位時間になされる仕事，すなわち単位時間のエネルギー入力である．一方，右辺は単位時間に失われるエネルギーを表す．

$$W_a p_a v_a \log \left(\frac{p_s}{p_a} \right) = W_w (h_d + h_f + h_v) \quad (1)$$

ここで， W_a は単位時間の空気消費重量， p_a は大気圧， v_a は大気圧での比容積(空気の単位重量あたりの容積)， p_s は散気体位置での空気圧， W_w は単位時間の揚水重量， h_d は揚程， h_f は $(h_d + h_s)$ 間の総損失水頭， h_s は曝気深度， h_v は気液二相流の吐出部での速度水頭である．

3.2. h型管に適用したエアリフトのエネルギー式

次に図 - 5は ,エアリフトのエネルギー式(式(1))をh型気体溶解装置のh型管部分に適用した場合のモデル図である .これにエアリフトのエネルギー式を適用すると次のように表わされる .

$$W_a p_a v_a \log \left(\frac{p_s}{p_a} \right) = W_w (h_d' + h_{fh} + h_v + h_{sc} + h_{se}) \quad (2)$$

ここで , h_d' は h 型管において , 仮に曲がりがないとしたときに想定される揚程で , 本研究ではみなし揚程と呼ぶことにし , 未知数と考える . h_u は水平管高さ , h_{fh} は $(h_u + h_s)$ 間の摩擦損失水頭である . また , 散気体による形状損失として , 散気体前後における断面の縮小および拡大に伴う損失水頭を急縮小の損失 h_{sc} および急拡大の損失 h_{se} として考慮した .

次に , 実験では空気流量 Q_a が実験条件として与えられ , 実験結果として処理流量 Q_w が計測されている . このため , 式(2)中の W_a , W_w , h_{fh} , h_v , h_{sc} , および h_{se} を空気流量 Q_a と処理流量 Q_w によって表す .

これを以下に示す .

[1] 単位時間の空気消費重量 : W_a

$$W_a = \rho_a g Q_a \quad (3)$$

ここで , ρ_a は空気の密度 , g は重力加速度である .

[2] 単位時間の揚水重量 : W_w

$$W_w = \rho_w g Q_w \quad (4)$$

ここで , ρ_w は水の密度である .

[3] 散気体より上方の摩擦損失水頭 : h_{fh}

$$h_{fh} = f_h \cdot \frac{(h_u + h_s)}{D_p} \cdot \frac{1}{2g} \cdot \left\{ \frac{4(Q_a + Q_w)}{\pi D_p^2} \right\}^2 \quad (5)$$

ここで , D_p は管内径である . また , 式中の f_h は摩擦損失係数であり , 気液二相流における値は不明であるが , 単相流と同様次式を用いる .

$$f_h = \frac{124.5n^2}{D_p^{1/3}} \quad (5.1)$$

ここで , n は粗度係数であり , “ 新しい塩化ビニール管 ” として 0.012 を用いた .

[4] 気液二相流の吐出部での速度水頭 : h_v

$$h_v = \frac{1}{2g} \left\{ \frac{4(Q_a + Q_w)}{\pi D_p^2} \right\}^2 \quad (6)$$

[5] 急縮小による損失水頭⁵⁾ : h_{sc}

$$h_{sc} = \zeta_{sc} \frac{1}{2g} \left\{ \frac{4Q_w}{\pi(D_p^2 - D_d^2)} \right\}^2 \quad (7)$$

ここで , D_d は散気体の直径 , $\{\}$ 内は散気体と管の隙間を通

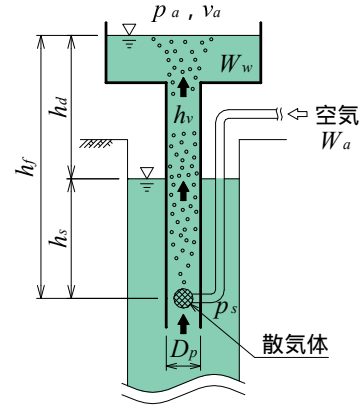


図 - 4 エアリフトのモデル図

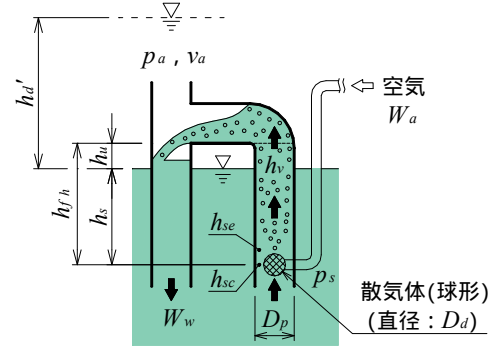


図 - 5 h 型管部分のモデル図

表 - 2 断面急縮小の損失係数⁵⁾

A_1/A_2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
ζ_{sc}	0.41	0.38	0.34	0.29	0.24
A_1/A_2	0.6	0.7	0.8	0.9	1
ζ_{sc}	0.18	0.14	0.089	0.036	0

過する水の流速 , ζ_{sc} は急縮小による損失係数であり , 表 - 2⁵⁾から最適値を選択する .

ここでは A_1 は散気体部分での通水断面積 (0.0013[m²]) , A_2 は散気体を通過した後の通水断面積 , すなわち管断面積 (0.0020[m²]) であるから A_1/A_2 は 0.6 である よって ζ_{sc} は 0.18 である .

[6] 急拡大による損失水頭⁵⁾ : h_{se}

$$h_{se} = \zeta_{se} \frac{1}{2g} \left\{ \frac{4Q_w}{\pi(D_p^2 - D_d^2)} \right\}^2 \quad (8)$$

ここで , ζ_{se} は急拡大による損失係数であり , 次式により与えられる⁵⁾ .

$$\zeta_{se} = \left\{ 1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \right\}^2 \quad (8.1)$$

ここで A_1 , A_2 は急縮小損失の場合と同じ値を用いて $\zeta_{se}=0.1296$ となる .

$$\delta = -\frac{\rho_a Q_a}{8\rho_w} \pi^2 g p_a v_a \log\left(\frac{p_s}{p_a}\right) \quad (17)$$

4.2. 処理流量 Q_w の評価

吸入ホースによる摩擦損失を考慮した処理流量 Q_w は、式(13)において Q_w の3次方程式を数値的に解くことで算出される。表-3に計算条件を示す。

処理流量計測の実験¹⁾によると、h型気体溶解装置の処理流量が最大となる条件は実験条件の範囲内では空気流量 $Q_a=20$ [L/min]、水平管高さ h_u が低く曝気深度 h_s が深い、すなわち $h_u=0.02$ [m]、 $h_s=0.32$ [m]であったが、ここでは現地の風波の影響などを考慮して、 h_u はやや高く 0.05 [m]としている。なお、この条件におけるみなし揚程 h_d' は前章において $h_d'=0.259$ [m]と算出されている(図-6参照)。

図-8に処理流量の計算結果を示す。図より、吸入ホース長さ l_i [m] が長く、ホース内径 D_i [m] が小さくなるにつれて処理流量 Q_w が減少することがわかる。また、ホース内径 $D_i=0.20$ [m] の場合では、処理流量 Q_w はほとんど減少しないことがわかる。すなわち、吸入ホースの内径 D_i を大きくすることで摩擦損失が小さくなり、処理流量に対して有利になる。

以上、h型管部分による処理流量を室内実験により計測することで、実際に現地で得られる処理流量を見積もることができることが示唆された。

5. 結論

以上、エアリフトのエネルギー式を用いて、h型管の水理解析を行い、処理流量の評価を行った。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) エアリフトのエネルギー式をh型管部分に適用し、式中の未知量であったh型管部分によるみなし揚程 h_d' を実験により評価した。なお、みなし揚程 h_d' は空気流量と処理流量の比 Q_a/Q_w に大きく依存しており、空気流量 Q_a の増加に伴って増大するが、その増加率は Q_a が 20 [L/min] 以下の場合よりも 20 [L/min] 以上の方が大きい。
- (2) 室内実験によってh型管による処理流量 Q_w が計測されれば、エアリフトのエネルギー式を用いることにより吸入ホースの摩擦損失水頭 h_{fi} を考慮した処理流量 Q_w 、すなわち実際に現地で得られる処理流量 Q_w を見積もることができることを示した。なお、吸入ホースの内径 D_i を大きく、そして長さ l_i を短くするほど摩擦損失が小さく、処理流量 Q_w に対して有利になる。

本研究で検討した複数連結型のフィールドでの実証実験を宇部市内の常盤湖で行う予定で、現在準備中である。

表-3 計算条件

h型管部分	管内径: D_p [m]	0.05
	散気体直径: D_d [m]	0.03
	水平管高さ: h_u [m]	0.05
	曝気深度: h_s [m]	0.32
	空気流量: Q_a [L/min]	20
	みなし揚程: h_d' [m]	0.259
	連結数: k [台]	10, 20, 30, 40
吸入ホース	内径: D_i [m]	0.05, 0.10, 0.20
	長さ: l_i [m]	0 ~ 50

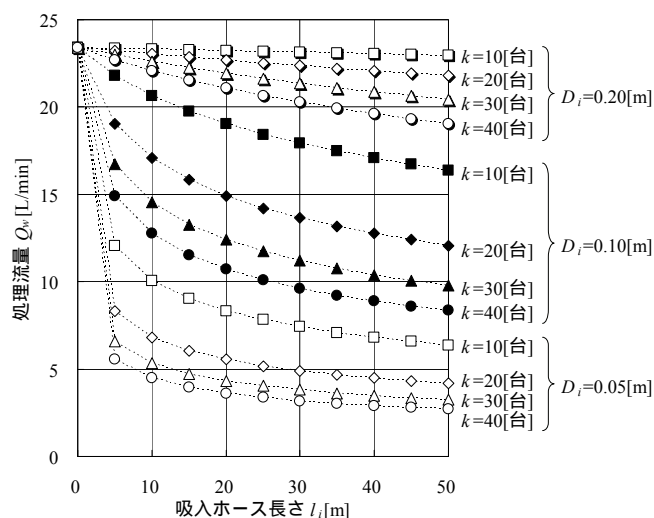


図-8 処理流量 Q_w と吸入ホース長さ l_i の関係

(参考文献)

- 1) 大木協, 馬駿, 羽田野袈裟義, 朝位孝二, 中野陽一, 藤里哲彦, 福本裕輝, 原田利男: 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, 羽田野袈裟義, 馬駿, 朝位孝二, 中野陽一, 藤里哲彦, 福本裕輝, 原田利男: 管内曝気によるDO改善の試み, 河川技術論文集, 第16巻, pp.323-328, 2010.
- 3) 国際公開番号 WO2005/121031: 曝気方法と曝気装置と曝気システム, 日本国特許庁, 2008.
- 4) A.I.ステパノフ, 今市憲作 他 訳: ポンプとブロウ - 二相流を中心に -, 産業図書, pp.236-261, 1979.
- 5) 榎東一郎: 水理学, 森北出版株式会社, pp.112-113, 1995.
- 6) 福嶋孝博: 複数連結されたh型気体溶解装置の酸素溶解能力の増強について, 山口大学卒業論文, 2011.3.