

h型気体溶解装置の吸入ホースの摩擦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 ○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)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において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．著者ら^{1)~3)}は貧酸素対策として液膜利用のh型気体溶解装置を研究開発中である．図-1は本装置を現地に設置した場合の全体図である．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，h型管内の上昇水を補償するため，吸入ホースの先端から水域の底層部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損失水頭のため揚水流量，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．そこで，本研究では，既往のエアリフトのエネルギー式を用いて吸入ホースの摩擦損失の影響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

本研究で用いた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-2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曝気の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に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．なお，h型管部の管内径 D は製品規格や取り扱いの手頃さを考慮して50[mm]で一定としている．

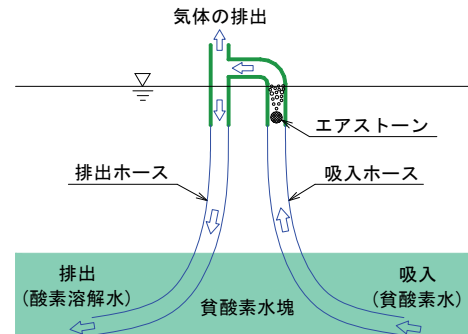


図-1 h型気体溶解装置全体図

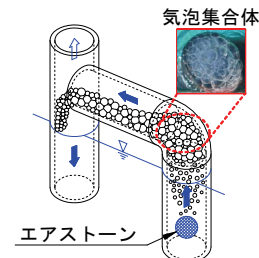


図-2 h型気体溶解装置の中核部分

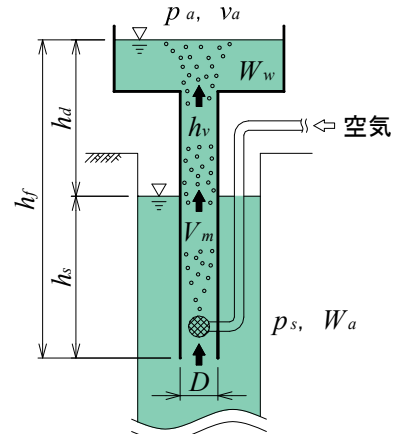


図-3 エアリフトのモデル図

3. 処理流量 Q_w の評価

本研究ではエアリフトのエネルギー式⁴⁾を用いて処理流量を評価することを試みる．図-3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．

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

ここで， W_a は単位時間に消費される空気重量， p_a は大気圧， v_a は大気圧での比容積， p_s は吸入管入口での空

気圧, W_w は単位時間の揚水重量, h_d は揚水高さ, h_f は($h_d + h_s$)間の摩擦損失水頭, h_v は気液二相流の吐出部での速度水頭である.

3.1. h型管への適用と摩擦損失係数 f の評価

エアリフトのエネルギー式(式(1))をh型気体溶解装置に適用し, 得られた式に実験値を代入してh型管内の散気体より上方の摩擦損失係数 f の評価を行う. 図-4は, エアリフトのエネルギー式(式(1))をh型気体溶解装置に適用した場合のモデル図である. これに対するエアリフトのエネルギー式を次のように表す.

$$W_a p_a v_a \log \left(\frac{p_s}{p_a} \right) = W_w (h_d + h_f + h_v + h_b) \quad (2)$$

ここで, h_b は管の曲りによる損失水頭である.

次に, 式(2)の右辺に表れる W_w , h_f , h_v , h_b を処理流量 Q_w によって表すと次のようである.

[1] 単位時間の揚水重量: W_w

$$W_w = \rho g Q_w \quad (3)$$

ここで, ρ は水の密度, g は重力加速度である.

[2] 散気体より上方の摩擦損失水頭: h_f

$$h_f = \frac{f(h_d + h_s) \left\{ \frac{4(Q_g + Q_w)}{\pi D^2} \right\}^2}{2gD} \quad (4)$$

$$= \frac{f(h_d + h_s) V_m^2}{2gD} \quad (4.1)$$

ここで, f はh型管部分の摩擦損失係数, D は管内径であり, V_m は気液二相流速である.

[3] 気液二相流の吐出部での速度水頭: h_v

$$h_v = \frac{\left\{ \frac{4(Q_g + Q_w)}{\pi D^2} \right\}^2}{2g} \quad (5)$$

$$= \frac{V_m^2}{2g} \quad (5.1)$$

[4] 管の曲りによる損失水頭: h_b

$$h_b = \zeta_{b1} \zeta_{b2} \frac{\left\{ \frac{4(Q_g + Q_w)}{\pi D^2} \right\}^2}{2g} \quad (6)$$

$$= \zeta_{b1} \zeta_{b2} \frac{V_m^2}{2g} \quad (6.1)$$

ここで, ζ_{b1} , ζ_{b2} は曲りによる損失係数であり, 管の曲率半径 $\rho_D = 0.025[\text{m}]$, 曲りの中心角を 90°]としてそれぞれ $\zeta_{b1} = 0.33$, $\zeta_{b2} = 1.0$ とした⁵⁾.

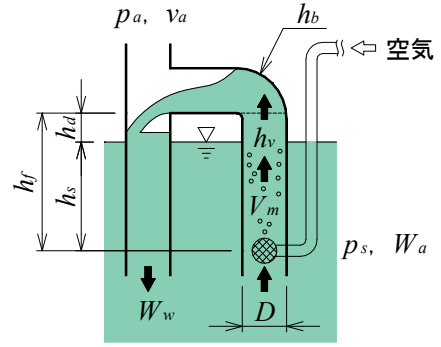


図-4 h型気体溶解装置のモデル図

以上, 式(3), 式(4.1), 式(5.1), 式(6.1)を式(2)に代入して摩擦損失係数 f について解くと, 式(7)を得る.

$$f = \frac{2D}{\rho Q_w (h_d + h_s) V_m^2} \times \left[W_a p_a v_a \log \left(\frac{p_s}{p_a} \right) - \rho g Q_w \left\{ h_d + \frac{V_m^2}{2g} (1 + \zeta_{b1} \zeta_{b2}) \right\} \right] \quad (7)$$

式(7)に実験値(管内径 $D = 0.05[\text{m}]$, 水平管高さ $H_U = h_d = 0.05[\text{m}]$, 曝気深度 $H_A = h_s = 0.32[\text{m}]$, 空気流量 $Q_g = 20[\text{L/min}]$ の場合の処理流量 $Q_w = 23.41[\text{L/min}]$)を代入して解くと, 本計算条件におけるh型管内の散気体より上方の摩擦損失係数 f は平均的に $f = 1.11$ と算出された. この値は普通の管路の値に比べると2桁程大きい, これは, 管路の途中に散気体の流れを邪魔する形で存在していることや, 散気体より上方の流れは水の単相流ではなく気液二相流となっていることなどに起因していると考えられる.

3.2. 吸入ホースの摩擦損失 h_{fi} を考慮した Q_w の評価

h型気体溶解装置に適用したエアリフトのエネルギー式(式(2))に吸入ホースの摩擦損失を考慮して処理流量 Q_w を算出する. なお, 現地で本装置を使用する際には, 維持管理や装置の設置および撤去の面から複数の装置を連結させることが賢明である³⁾. その一例として, 複数連結させたh型気体溶解装置を現地に係留した筏に設置した場合のイメージ図および処理流量計算のモデル図を図-5に示す. 図では, 周囲 $1.8[\text{m}] \times 1.8[\text{m}]$ の正方形の筏の4辺のそれぞれに6台の装置を並列連結したユニットを取り付けている. このような構成とすることで, 1台の筏に24台の装置を設置し, 吸入ホースおよび排出ホースがそれぞれ4本ずつの構成となっている. 図-5(b)は側面図(処理流量計算のモデル図)である. 図に示すように, 連結数 $k = 6[\text{台}]$, 吸入ホースの内径を D_i , 吸入ホースの長さを l_i , 吸入ホースの摩擦損失係

数を f_i とすると、吸入ホースによる摩擦損失水頭を h_{fi} は式(8)のように表される。

$$h_{fi} = f_i \frac{l}{D_i} \frac{1}{2g} \left(\frac{4kQ_w}{\pi D_i^2} \right)^2 \quad (8)$$

ここで、吸入ホース内の流れは水の単相流であるから、摩擦損失係数 f_i はマンニングの式(式(9))から算出する。 n は粗度係数であり、“新しい塩化ビニール管”として0.012とした。

$$f_i = \frac{124.5n^2}{D_i^{1/3}} \quad (9)$$

また、この場合のエネルギー式は、式(2)に式(8)で表される吸入ホースによる摩擦損失水頭 h_{fi} を追加して次式のように表される。

$$W_a p_a v_a \log \left(\frac{p_s}{p_a} \right) = W_w (h_d + h_f + h_v + h_b + h_{fi}) \quad (10)$$

次に、式(10)の右辺の W_w , h_f , h_v , h_b , h_{fi} を式(3), 式(4), 式(5), 式(6), 式(8)を用いて処理流量 Q_w によって表現し、さらに Q_w について解くと次のように Q_w に関する3次方程式を得る。

$$\alpha Q_w^3 + \beta Q_w^2 + \gamma Q_w + \delta = 0 \quad (11)$$

ここで、各項の係数 $\alpha \sim \delta$ は次のとおりである。

$$\alpha = \rho \left(B + \frac{8f_i l_i k^2}{\pi^2 D_i^5} \right) \quad (12)$$

$$\beta = 2\rho Q_g B \quad (13)$$

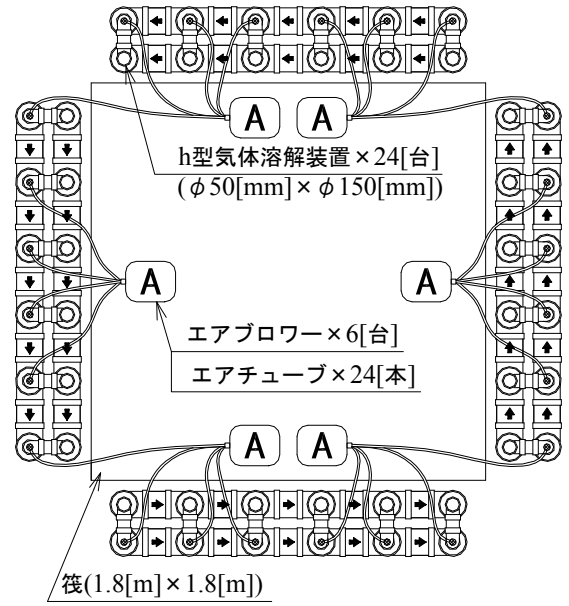
$$\gamma = \rho (gh_d + Q_g^2 B) \quad (14)$$

$$\delta = -W_a p_a v_a \log \left(\frac{p_s}{p_a} \right) \quad (15)$$

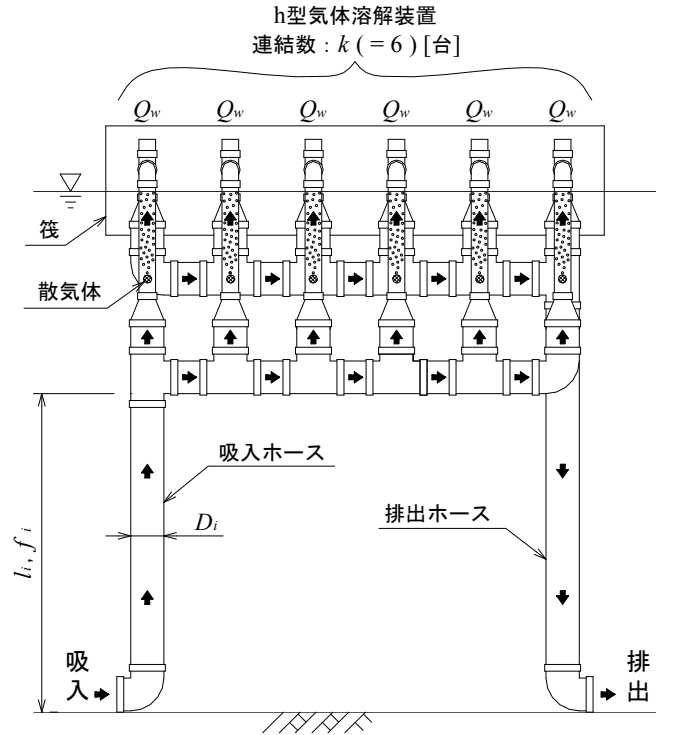
ここで、

$$B = \frac{8}{\pi^2 D^4} \left\{ 1 + \frac{f}{D} (h_d + h_s) + \zeta_{b1} \zeta_{b2} \right\} \quad (16)$$

以上より、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(11)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。



(a) 平面図



(b) 側面図(モデル図)

図-5 現地設置イメージ図および処理流量計算のモデル図

4. 計算条件と計算結果

吸入ホースの摩擦損失の影響を考慮した処理流量 Q_w [L/min] の計算は表-1 に示す計算条件について行った。図-6 は計算結果である。図より、吸入ホースの長さ 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 が減少している。これは、式(8)からも明らかのように、吸入ホースの摩擦損失水頭 h_{fi} [m] は、

吸入ホースの長さ l_i [m] が長く、ホース内径 D_i [mm] が小さいほど大きくなるためである。また、h 型管部の管内径 $D=50$ [mm] の通水断面積 $\times k(=6$ [台]) を満たす直近上位のホースの内径 $D_i=150$ [mm]、また、これよりさらに大きい $D_i=200$ [mm] の場合では、処理流量 Q_w [L/min] はほとんど減少しないことがわかる。

5. 考察

以上、エアリフトのエネルギー式を用いて吸入ホースによる摩擦損失を考慮した処理流量の評価を行った。その結果は以下のとおりである。

吸入ホース長さ l_i [m] が長く、ホース内径 D_i [mm] が小さくなるにつれて処理流量 Q_w [L/min] が減少することがわかった。また、h 型管部の管内径 $D=50$ [mm] の通水断面積 $\times k(=6$ [台]) を満たす直近上位のホース内径 $D_i=150$ [mm]、および、これよりさらに大きい $D_i=200$ [mm] の場合では、処理流量 Q_w [L/min] はほとん

ど減少しないことがわかった。すなわち、吸入ホースの内径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。

表-1 計算条件

h 型 気 体 溶 解 装 置	管 内 径 : D [mm]	50
	水 平 管 高 さ : H_U [mm]	50
	曝 気 深 度 : H_A [mm]	320
	空 気 流 量 : Q_g [L/min]	20
	処 理 流 量 : Q_w [L/min]	23.41
	h 型 管 部 分 の 摩 擦 損 失 係 数 : f [-]	1.11
吸 入 ホ ー ス	連 結 数 : k [台]	6
	ホ ー ス 内 径 : D_i [mm]	50, 75, 100, 150, 200
	ホ ー ス 長 さ : l_i [m]	0 ~ 100

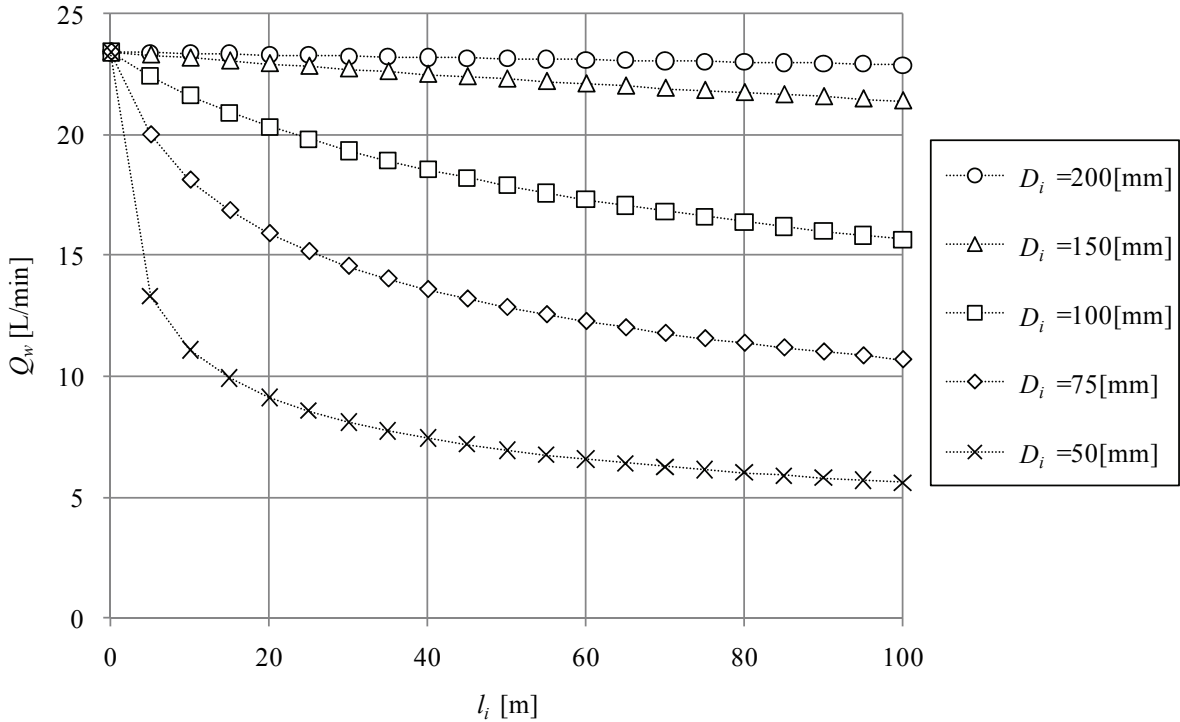


図-6 処理流量 Q_w と吸入ホース長さ l_i の関係

(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) 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.

4) A.J.ステパノフ, 今市憲作 他 訳: ポンプとブロー二相流を中心にー, 産業図書, pp.236-261, 1979.

5) 椿東一郎: 水理学 I, 森北出版株式会社, pp.112-115, 1995.