

下水管内硫化水素発生抑制のための 酸素注入技術の能力評価

九州産業大学 ○羽田野袈裟義・岩満公正
(株)大広エンジニアリング 盛谷悠介・宮本拓実
(有)バブルタンク 藤里哲彦

1. はじめに

下水道施設に関わる近年の問題として、下水道管路施設からの悪臭とコンクリート構造物の腐食による道路陥没事故が挙げられる。これらは下水中の硫化水素発生が原因である。下水中の硫化水素は貧酸素化状態で発生する。下水管で悪臭として認知されるのは、圧送管吐出し先、落差・段差の大きい箇所、伏せ越し下流部などで、これらの箇所はいずれも貧酸素となった部分の下流に位置する^{1)、2)、3)}。

本提案の技術は、硫化水素を発生させる微生物が貧酸素状態を嗜好することに着目し、硫化水素発生を抑える方法として下水中の溶存酸素濃度を一定以上に保つことを目的とする効率的な液膜式曝気技術である。本研究では、本提案技術の気体溶解と脱気の効率評価の基礎となる溶解・脱気的能力評価に取り組む。

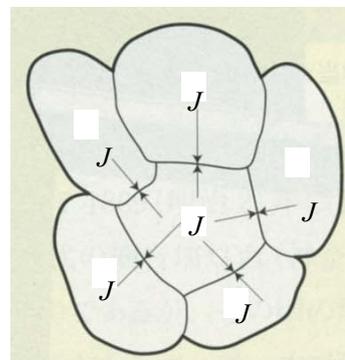
2. 本提案技術の説明⁴⁾

本提案技術の目的は、硫化水素の発生原因である硫酸塩還元菌の活動を抑えるため、効率的な曝気により下水中の溶存酸素濃度を一定以上に保持することである。これを効率的に行なうため、図1(a)のように、貧酸素の下水を酸素雰囲気の中で容器内に噴射し、気泡集合体をつくる。気泡集合体の中で個々の気泡が次から次に生じては破裂しながら全体形状をほぼ一定に保つ状態をつくり出す。この状態で酸素が気相から液相へと移動し酸素が液相中に溶解する模式図を図1(b)に示す。図には複数の気泡が接して存在する状態が示されており、図中の J は酸素移動の向きを示す。このとき液相中に溶解している気体成分が脱気して液相から気相へと移動する現象が同時に生じる。すなわち、所定の気体雰囲気下での飽和溶解に向かうように気相・液相間で気体成分が移動する。

液膜における気体成分の液相・気相間の移動量(流束)の評価を試みる。この流束は、液薄膜を液相と考え、液相内のある気体成分の濃度を C として式(1)の J で与えられるが、液膜の厚さを $2t$ とすると、溶解していく気体成分の流束は式(2)、そして脱気(気泡化)する気体成分の流束は式(3)により見積もられる。



(a) 噴射による生じる液膜



(b) 液膜での気体溶解

図1 本提案の液膜式曝気の実現象と性質の説明図

$$J = -K \frac{\partial C}{\partial n} \quad (1), \quad J_{G \rightarrow L} \approx K \frac{C_G - C_L}{t} \quad (2), \quad J_{L \rightarrow G} \approx K \frac{C_L - C_G}{t} \quad (3)$$

ここで、 K は物質移動の係数、 n は物質が向かう方向（ここでは液膜表面に平行な面への法線方向）の長さ、 C_G と C_L は注目する気体成分のそれぞれ気相中および液相中の濃度である。 t は1mm程度以下であるから、式(2)と(3)は液膜式曝気による気相・液相間の気体移動の高効率特性を示唆する。

3. 実験⁵⁾

3.1 実験の概要 実験装置全体の模式図を図2に示す。ただし寸法比は実際と異なる。実験装置は、曝気処理対象の水を溜めたバケツ、ポンプ、噴射ノズル、円錐台形の噴射受け容器、容器からの溢流水を集める集水凹部から構成される。ポンプは120Wモーターポンプ（寺田ポンプ社・型式CMP1-60.1：口径25mm）で、バケツ・ポンプ間、ポンプ・噴射ノズル間はビニールホース（内径20mm×長さ115cm；内径10mm×長さ210cm）で連結した。ノズルは5mm径で噴射受け容器の上端より4.3cm上方に配置した。また集水凹部からパイプ（内径40mm）を用いてバケツに排水した。噴射受け容器は上端内寸38mm、最大内寸90mm、高さ15.5cmであった。こうして、バケツ→噴射ノズル→円錐台容器→集水凹部→バケツと水を循環させた。実験ではバケツに45lの水を入れ、ポンプを稼働して水循環した。循環流量はバルブ操作で0.152~0.181l/sの範囲とした。実験に先立ちバケツの水の温度とDO濃度を測った。測定は実験開始後1、2、4、6、8、10、12、16、18、20、25、30分に行ない記録した。温度とDO濃度の測定はYSI社ProODOにより行った。バケツ内は羽根つき攪拌機で攪拌したそのセンサーをバケツ内の底部に沈め、手元の読み取り器でDO濃度を読んだ。

実験は空気雰囲気（酸素溶解）、酸素雰囲気（酸素溶解）、窒素雰囲気（酸素脱気）の下で液膜生成を行った。空気雰囲気実験は図2の装置のまま空気中で行ったが、酸素雰囲気と窒素雰囲気の実験は、噴射部と台座を囲む部分を透明中空容器（外寸40cm、厚さ5mmの下部開口の立方体：図の点線）で囲み、上方置換や下方置換により酸素や窒素をポンベから微加圧で透明直方体容器に注入し続け、それぞれの気体雰囲気を保った。酸素雰囲気や窒素雰囲気の達成度は、火がついた線香を容器の小穴から差し込み、線香の火が炎になったり消えたりすることを観察して判断した。

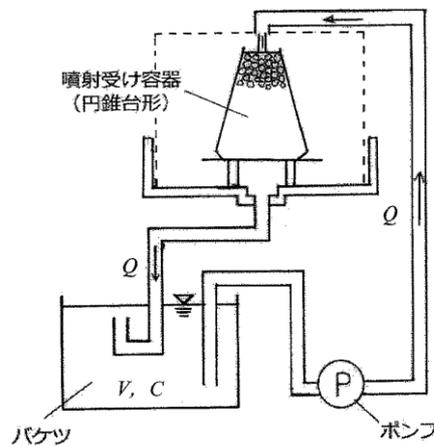


図2 実験装置全体構成の模式図

3.2 DO濃度の時系列計算式の試み

上述の実験のDO濃度時系列の再現計算式を試みた。図2の設定で、酸素の溶解と脱気の効率をそれぞれ E_D および E_S とし、DO濃度の時系列データからこれらを同定する。そして E_D と E_S の同定値を用いてDO濃度時系列データの再現を試みる。装置の水循環の系全体の水の体積を V 、その平均のDO濃度を C 、水循環流量を Q 、所定の気体雰囲気でのDO濃度の飽和値を C_S 、DOセンサー位置のDO濃度を C_M 、ポンプに通じる吸引部のDO濃度を C_i とし、 $C=C_M=C_i$ と仮定すると、溶存酸素に係る一連の式は次のようである。

酸素溶解：溶存酸素全量の収支式は式 (4)、装置の定常運転 (V 、 Q 、 C_s 一定) で E_D も一定として初期条件 $t=0$ で $C=C_0$ の下で得られる濃度の時系列は式 (5)、そして E_D の同定は時系列 t_i ($i=1\sim n$) で DO 濃度の測定値を C_{Mi} として式 (6) の E を最小とする E_D として与えられる。

$$V \frac{dC}{dt} = E_D C_s Q - C_i Q \quad (4), \quad C = C_M = E_D C_s + (C_0 - E_D C_s) \exp\left(-\frac{Q}{V} t\right) \quad (5)$$

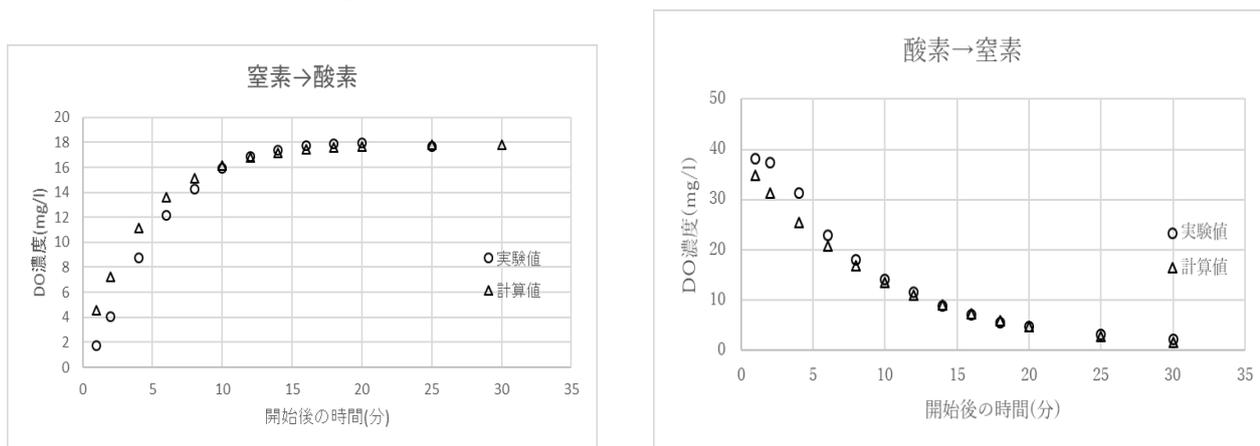
$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| E_D C_s + (C_0 - E_D C_s) \exp\left(-\frac{Q}{V} t_i\right) - C_{Mi} \right| \quad (6)$$

酸素脱気：溶存酸素全量の収支式は式 (7)、装置の定常運転で E_S も一定として初期条件 $t=0$ で $C=C_0$ の下で得られる濃度の時系列は式 (8)、そして E_S の同定は時系列 t_i ($i=1\sim n$) で DO 濃度の測定値を C_{Mi} として式 (9) の E を最小とする E_S として与えられる。

$$V \frac{dC}{dt} = -E_S C_i Q \quad (7), \quad C = C_M = C_0 \exp\left(-\frac{E_S Q}{V} t\right) \quad (8), \quad E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| C_0 \exp\left(-\frac{E_S Q}{V} t_i\right) - C_{Mi} \right| \quad (9)$$

3.3 実験結果への適用

前節の計算を実験に適用した結果の例を図3に示す。(a)図は窒素雰囲気中で酸素脱気したのち酸素雰囲気とした場合、(b)図は酸素雰囲気中で溶存した後に窒素雰囲気中で酸素脱気した場合である。いずれも変化傾向を表現している。図の例では E_D と E_S の値が 0.5 程度となっているが、より大きい 0.8 程度の値も見られた。



(a)酸素溶解 $Q=0.171\text{l/s}$, $E_D=0.40$

(b)酸素脱気 $Q=0.142\text{l/s}$, $E_S=0.55$

図3 酸素溶解と酸素脱気の実験の DO 濃度時系列の再現計算の例

4. 結び

以上、硫化水素発生による下水管の劣化を防止するために液膜式曝気による溶存酸素濃度確保の方法を説明すると共に、その室内実験を示し、実験装置の水循環系の DO 濃度の時系列再現計算の可能性を示した。今後は、系統的な調査を行ない、酸素溶解と酸素脱気の効率 E_D と E_S の値と噴射条件の関係を求める。

参考文献： 1) 日本下水道協会：下水道管路施設腐食対策の手引き (案)、2002。 2) 木下勲：下水道コンクリート構造物の腐食について、材料、Vol.47、No.10、pp.1031-1040、1998。 3) 須賀雄一：いまさら訊けない下水道講座 7 <硫酸によるコンクリート腐食>、日本下水道事業団、2010。 4) 羽田野ら：噴射式の液膜生成器を用いる酸素溶解技術の水理に関する研究、日本流体力学会 2017 年年会講演集、USB、2017。 5) 盛谷ら：酸素注入による下水管内硫化水素発生防止に関する基礎実験、土木学会令和元年度年次学術講演会講演集、CD-ROM、2019。

九州産業大学、〒813-8503 福岡市東区松香台 2-3-1、092-673-5683、E-mail : hadano@ip.kyusan-u.ac.jp