液膜を利用するh型気体溶解装置に関する研究

新光産業(株) 正会員 〇馬 駿 山口大学大学院 学生会員 福本 裕貴 山口大学理工研究科 フェロー会員 羽田野 袈裟義 (有)バブルタンク 藤里 哲彦 宇部高等専門学校 原田 利男

1. はじめに

近年,湖沼や河川あるいは内湾の溶存酸素の欠 乏に伴う水質の悪化が問題視されている.水域の貧 酸素化がもたらす問題として,底泥からの金属や栄 養塩の溶出^{1)~3)}が指摘され,改善策が鋭意検討さ れている.例えば,気泡を水中に放出して,気泡と 水との接触により酸素溶解を達成しようとする試み がなされている^{4)~8)}.この場合,気泡径を小さく すれば比表面積が大きくなるが溶解しうる気体の絶 対量は限界があり,気泡径が大きいと気体・水の接 触面積が大きく取れないので溶解量が制限される.

一方,強制的な流れにより気体溶解する方法として,エジェクター⁷⁾を用いる,気液混合体を撹拌⁸⁾ する,被処理液を邪魔板に噴射⁹⁾して気泡を発生させて気液接触により溶解を促進する,噴霧状⁹⁾に噴射して被処理液の比表面積を増加させて高濃度溶解 を図るなどの方法が提案されている.これらは,気体と液体の接触面積を増大することに着目している が,被処理水のうち気体と接して存在し気体を溶解 した後の水とそれ以外の水との置き換えが不十分で 処理能力があまり期待できない.

著者らは、被処理水の気泡集合体をつくり被処理 水を一旦すべて気泡液膜の構成要素とすることによ り高効率で気体溶解する技術を開発中である.

図-1に示すように、貧酸素水塊と連通して水中 に略鉛直に立てたh型の筒状体の中にエアストーン とハニカムを配置し、ハニカムの上端を水面より少 し高く配置する.エアストーンにより気泡群を発生 させると、この気泡群は周囲の水を連行しながら上 昇し、筒状体内の上部のハニカム構造体を通過する 際にハニカム構造体の上下端の上下に接して気泡集 合体を作る.連行されて上昇する筒状体内の水を補 償するため、筒の下端から周囲の水が吸い込まれ る.ハニカム構造体を通り過ぎた気泡は、ハニカム



気泡集合体

図-1 装置の概要図

上端からこぼれる形で図の水平部を処理水と共に水 平に移動してT字状のパイプに達すると気泡は上方 に水は下方に排出される。

著者ら¹¹⁾は、この方法の装置について、種々の 送気流量、ハニカム径、ハニカム上端高さの条件で 基本的性質を調べ、ハニカム上端を水面上高くする と処理水のDO値は上昇するが、処理流量の低下に より酸素溶解能力や気体溶解効率が低下すること、 気体溶解効率を最大とするハニカム径が存在するこ となどを明らかにした.しかしながら、装置の設計 に結びつくような定量的な知見は得られていない. また、被処理水のDO値の影響が出ており、このこ れへの対処がなされていない.

本研究は,著者らの実験データ¹¹⁾をさらに詳細に 検討し,空気の送気流量が酸素溶解能力に及ぼす効 果を重点的に検討した.データ解析において,被処 理液のDO値で補正することを試みている.

2. 実験装置と方法の概要

実験装置の概要は図-2に示すようである.パイプの内直径は50mm,ハニカム構造体は長さ7cmであり,ハニカムの径やハニカム構造体の上端の水面からの高さ,送気流量等の条件は表-1に示すとおりである.実験時の水温は11℃~12℃であった.装置等の条件は表-1のようである.なお,表中でハニカム径50mmと示したものはハニカム構造体を挿入しなかったものである.

表-1 実験条件

ハニカム	15mm,30mm,60mm,100mm
上端高さ	
ハニカム	6mm,9mm,13mm,50mm
の径	
空気流量	8.4L/min,17.1L/min,24.8L/min,342.L/min

実験は次の手順で行った. 1)前処理として亜硫 酸ナトリウムを水1リットル当たり0.1g入れて水槽 F中の被処理液のDOの除去を行う. 2)DO除去し た被処理水を水中ポンプにより容器G(左)に汲み 上げる.実験中は容器からオーバーフローさせて容 器内の水位を一定に保つ. 3)実験装置本体Eをh 型の下部が2つの容器Gに跨るように設置する. 4) 実験装置本体内部に設置したエアストーンとエアー ブロワを接続する. 5)エアーブロワに電源を入れ, 気泡を発生させて取水部Dからオーバーフローする 水の流量を計測する. 6)処理前と後の水をサンプ リングし,ウインクラーアジカナトリウム法による 酸素固定法によりDOを測定する.

実験では、DOメーターで実験に使用している水のDO値の大体の数値を確認し、DOが高くなっていたらその都度薬品を追加しDOを下げて行った.

3. 実験結果とその考察

(1)気体溶解性能の評価法

まず DO 増分の測定値の評価法を述べる. 原水が 溶存酸素を含まない状態では装置の溶解性能は DO 増分と処理水流量の積 Δ DO×Q_Iの指標を用いて評 価できる.しかし,一般に原水の DO はゼロではな く,この場合には他の条件を同一とするとき原水が 酸素を含まない場合に比べて小さい Δ DO 値を示す. このため, Δ DO の測定値に対して,DO の飽和値 を DO_s,原水の DO を DO_vとして次式

 $\Delta DO \times DO_{s} / (DO_{s} - DO_{v})$ (1) で定義される換算 ΔDO を用いる。これは、仮に原 水の DO がゼロであるとしたときの DO の増分量で



A:エアポンプ B:水中ポンプ C:エアストーン
D:取水部 E:実験装置本体 F:水槽 G:容器
図-2 実験システム説明図

あり, DO改善のポテンシャルである. 文献¹¹⁾で は本方式において重力の作用で気泡群が水と分離し て気泡集合体を形成することが気体溶解の重要な鍵 であるとして,その分離過程を排液の現象により説 明した.式(1)の換算係数は,本方式でどの程度 理想的に気泡集合体と液体水との分離がなされるか, の度合いを示す指標でもある.

(2)実験結果の検討

実験結果を図-3~図-7に示す.これらの図中にお いて、水流量をQ₁、空気流量をQ_g,DOの飽和濃度 をDO_s、原水DOをDO_v、空気放出位置水深をh, そして水の単位重量をwで表示している.図-3は 気泡発生により装置本体を経由して取水部Dにオー バーフローした水の流量を送気した空気流量に対し て図示したものである.図より空気流量が小さい間 は空気流量が増加すると共に水流量が増加し、空気 流量がある程度以上になると水流量の増加が鈍化す



図-3 水流量と送気流量の関係

る傾向があることがわかる.空気流量が比較的小さ い領域で空気流量の増加と共に水流量が単調に増加 することは次のような事情によると考えられる.空 気流量が多いほど発生している気泡の全体積が大き くまた気泡の数も多い.このため,気泡の前方の水 を押し上げたり気泡の後流域の水を誘引したりする 形で上昇させる効果が大きい他,気液境界の接触面 積が広いため摩擦応力の効果などにより効果的に水 を連行するのである.

また、ハニカム上端高さの高低による比較では、 これが高いと水流量が少ない。これは次のように説 明される.この方式の場合、水面より上へは水が重 力に逆らって動くための動力が必要であるが、この 必要エネルギーはハニカム上端高さと流量の積に比 例する.したがって、空気の送気により与えられる 一定のエネルギー(空気流量よって違う)では水流 量がハニカム高さに逆比例することになる.ただし、 文献¹¹⁾で示した水流量とハニカム上端高さの関係は、 負の相関であるが逆比例とはなっておらず、投入さ れたエネルギーが水の押し上げに用いられた割合が 条件によって異なると考えられる.ハニカムの径に よる系統的な差異は認められないようである.

図-4は実験で得られたDOの増分ΔDOと空気流量 の関係を種々のハニカム上端高さとハニカム径につ いて示す.ハニカムによる相違として、ハニカムが ない場合ではΔDOが空気流量とともに増大するが、 ハニカムがある場合では空気流量の増大によるΔDO の系統的な変化が判然としない.また、空気流量が 少ないうちはハニカムがある場合の方がΔDOの値が 大きいが、送気流量が大きいと大小関係は逆転する ケースがある.また、ハニカム上端高さに対する DO増分の変化も不明である.

図-5は、式(1)により原水のDOがゼロの場合 に換算したDOの増分を空気流量に対して示したも のである.それによると、空気流量による変動が小 さく、またハニカム径による相違があまり認められ ず、図-4に比べてデータの分布がかなりまとまっ ている.なお、ハニカム上端高さが高くなると換算 されたDO増分量は大きくなり、この効果を確認す ることができる.

図-6は実験で得られたDO増分と水流量の積 ΔDO×水流量を送気流量に対して示したものである. 縦軸はこの積は酸素溶解能力を示すが,その値は, ハニカム上端高さ100mmの場合を除くと,送気流 量が小さい領域では送気流量と共に増大し,送気流 量が大きい領域では送気流量による増加傾向が鈍化 している.ただ,この鈍化はハニカムを挿入しない 場合ははっきりしない.この鈍化が空気流量,した



図-4 ΔDOと送気流量の関係







図-6 酸素溶解能力と送気流量の関係

がって水流量の大きい範囲で認められることを考え 合わせると、図の縦軸の値の鈍化がハニカムを通過 するときの流れ抵抗と何らかの関係をもつことが考 えられる.しかし、諸量の間のこまかい関係は不明 で、今後究明する必要がある.

図-7は原水のDOがゼロであると換算した場合の DO増分と水流量の積を送気流量に対して示したも



図-7 換算酸素溶解能力と送気流量の関係

のである.図-6と同様に、ハニカム上端高さが 100mmの場合を除くと、縦軸の値は送気流量の増加 と共に増加し、送気流量が大きい領域で送気流量に よる増加傾向が鈍化する傾向が認められる.データ の分布は図-6に比べてまとまっている.特にハニ カムの有無による相違が目立たなくなっている.

5. 結語

以上,液膜式酸素溶解技術における送気流量の効 果を検討した.本研究で得られた主要な知見は次の ようである.

(1)酸素溶解性能の評価には式(1)を用いて 原水のDOを加味することで有用な指標を得る.

(2) 水流量は送気流量と共に増加するが,送気流 量が大きい領域では送気流量による増加は鈍化する. また,ハニカム上端高さが水面から高いほど水流量 は小さい値となる.

(3) 原水DOがゼロである場合に換算されたDO増 分は送気流量によってあまり変化せず, ハニカム上 端高さが大きいほど大きい.

(4) 原水DOがゼロである場合に換算した酸素溶 解能力は送気流量の増加と共に増大するが,送気流 量が大きい領域ではその増加傾向が鈍化する.そし て,ハニカム上端高さが高いと小さな値を示す.

今後は更に広範囲の条件で確認すると共に,酸欠 が著しい現地の湖沼でのDO改善実験に取り組む予 定である.

謝辞:本研究にあたり深川勝之宇部工業高等専門学

校名誉教授に種々ご議論を,株式会社建設技術研究 所および新光産業株式会社には多岐にわたるご支援 を賜った.記して深甚の謝意を表わします.

参考文献

- Kawai, A. and Maeda, H.: Oxygen consumption in the bottom water related 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) 浅枝 隆, Jorg Imberger,: 連続成層中の Bubble Plume の挙動について, 土木学会論文集, 第411号, pp.55-62, 1989.
- 5) 道奥康治,神田 徹,大成博文,守口昌仁,松尾昌和, 白澤静敏,松尾克美:マイクロバブルによる富栄養化 貯水池の水質改善工と浄化効率,水工学論文集,第45 巻,pp.1201-1206,2001.
- 6)豊島 靖,天野邦彦,田中康泰:ダム貯水池における 曝気循環による成層破壊状況の現地観測と評価,水工 学論文集,第47巻,pp.1243-1248,2003.
- 7)特許公報,特開2001-70773:微細気泡発生装置,日本 国特許庁,2001.
- 8)特許公報,特開2003-265938:微細気泡発生装置および 微細気泡発生システム,日本国特許庁,2003.
- 9)特許公報,特開2004-188263:水中への酸素供給装置, 日本国特許庁,2004.
- 10) 今井 剛, 沙重 啓, 浮田正夫, 関根雅彦, 樋口隆哉, 深川勝之, 藤里哲彦:ダム湖等閉鎖性水域の底質浄化 のための高濃度気体溶解装置の開発, 第39回環境工学 フォーラム講演集, pp.10-13, 2002.
- 11) 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.
- 12)柘植秀樹,海野 肇: 『泡』技術,工業調査会, 2004.
- 13)赤川浩而:気液二相流,コロナ社, pp.37-55, 1974.
- 14) Graham B. Wallis : One-dimensional Two-phase Flow, McGraw-Hill Book Company, pp.283-295, 1969