

液膜を利用するDO改善技術に関する 基礎的研究

羽田野袈裟義¹・馬 駿²・今井 剛³・藤里哲彦⁴・原田利男⁵

¹フェロー会員 山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: khadano@yamaguchi-u.ac.jp

²学生会員 山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: majuncn2004@hotmail.com

³正会員 山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8555 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: imai@yamaguchi-u.ac.jp

⁴(有)バブルタンク (〒755-0808 山口県宇部市西平原4-1-30)

E-mail: fujisato5102@hotmail.com

⁵宇部工業高等専門学校 物質工学科 (〒755-8555 山口県宇部市常盤台2-14-1)

E-mail: toshio@ube-k.ac.jp

湖沼や海域の水質改善, 特にDO改善を目的として, 気体溶解技術を提案すると共にその性能について実験的検討を行なった. その原理は, 貧酸素水塊と連通した筒状体を水中に略鉛直に立て, その内部の水中に気泡発生器とその上方にハニカムを設置し, 筒状体内で発生した気泡群がハニカム上で気泡集合体を形成し, 被処理液を一旦はすべて気泡薄膜の構成要素とすることで高効率の酸素溶解を達成する. 本論文では, 種々の空気流量, ハニカムの構造とハニカム高さでDOや処理流量などを調べ, 気体溶解効率を最大とするハニカム径が存在すること, そしてその条件は気液相対速度がスラグ流速と同程度であるときに実現されることなどを明らかにした.

Key Words : water quality, DO improvement, accumulated bubbles, contact area increment

1. はじめに

近年, 湖沼や河川或は内湾の水質の悪化が大きな問題となっている. これは主として水域の富栄養化と貧酸素化の形で顕在化している. 貧酸素化の問題は, 底泥からの金属や栄養塩の溶出の問題^{1)~3)}が指摘され, 改善策が鋭意検討されている. しかしながら, 湖沼や内湾などの水域の貧酸素状態およびこれに起因する問題は依然として解決の兆しが見えない状況である. この問題に対して, 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, 同一体積の気体に対して接触面積を大きくとろうとすれば気泡径が小さいことが望ましいが, 気泡径を小さくしたときに気体体積がどれほど取れるか, の問題がある. 気泡がある程度大きいと, 水中を上昇する過程で酸素が完全に溶解する前に気泡が水面に達することがあり, 投入した空気あるいは酸素により如何に有効にDO改善が達成されるか疑

問である.

一方, 単なる気泡の水中放出だけに頼らずに気体溶解を行なう方法として, エジェクター⁷⁾を用いる, 気液混合体を攪拌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, 気体と接触する水の要素と気液境界面から離れた水の要素との置き換え, すなわち, 気体溶解した水とそれ以外の水との配置交換, あるいは混合が不十分で処理能力があまり期待できない.

そのような状況で, 著者らのグループでは貧酸素化した環境水を新型曝気装置内に取り込み, この中で酸素を飽和濃度に近い状態に溶解した水をつかって周囲に戻す方法について検討してきた¹⁰⁾. その基本原理は, 圧力を制御した耐圧タンク内に設けた容器の中に上方から被処理液を噴射して容器内の底

部に多数の気泡を発生させて容器内の上半部に気泡集合体をつくる．この気泡集合体は、コップにビールを注いだ時にコップ内の液面部分にできるものと同様である．こうして、被処理液をすべて一旦は気泡表面の液薄膜の構成要素とすることにより高効率で気体溶解するものである．これは、液膜の利用に加え、気体の飽和濃度が圧力に比例するというヘンリー法則を利用し、高能力の気体溶解を目指したものである．これは純酸素を用いる場合に特に有効である．また、著者ら¹¹⁾は現地で少量のエネルギーを用いて手軽に稼動することを想定し、大気圧下で空気を用いるのに有利な方法についても検討を行っている．これは、気泡集合体を利用する点では前者の技術と共通するが、圧力の効果を利用しない．その具体的な方法は次のようである．貧酸素水塊と連通して水中に略鉛直に立てた筒状体の中にエアストーンとハニカムを配置し、エアストーンにより気泡群を発生させる．この気泡群が上昇して筒状体内の上部にその上端が水面高さより少し高く設置されたハニカム構造体を通してハニカム構造体の上に前述の気泡集合体を作り、気泡と共にハニカム構造体を通して被処理液が一旦はすべて気泡薄膜の構成要素とすることにより気液混合体の単位体積あたり気泡境界面の総面積を増大させ高効率の酸素溶解を達成しようとするものである．しかしながら、既往の研究¹¹⁾では系統的な測定がなされていない．

本研究では、気体溶解能力の定量評価を目的として、羽田野らが確立した¹¹⁾技術について、空気流量やハニカムの構造およびハニカム高さを変えてDOや処理流量などを調べ、後述の気体溶解効率を最大とする条件などについて検討した．

2. 気泡発生方法の原理

(1) 気泡の発生と気体溶解

本提案技術の装置を稼動している状況を図-1に示す．本提案技術の装置は、図のように、L型に曲げたパイプと略鉛直なパイプを接続させたものである．L型パイプの略鉛直な部分は大抵が水中にあり、略鉛直な部分の中に気泡発生器と小さなパイプ群からなるハニカム構造体が内蔵されている．ハニカム構造体の上端は水面より少し高い位置にセットされており、気泡発生器により発生した気泡群が水中を上昇する時に周囲の水を連行しこれを上昇させる．そしてパイプ内を上向きに運ばれる被処理水を補償するため、パイプ下端から周囲の被処理水が次々に供給される．こうして略鉛直なパイプ内では

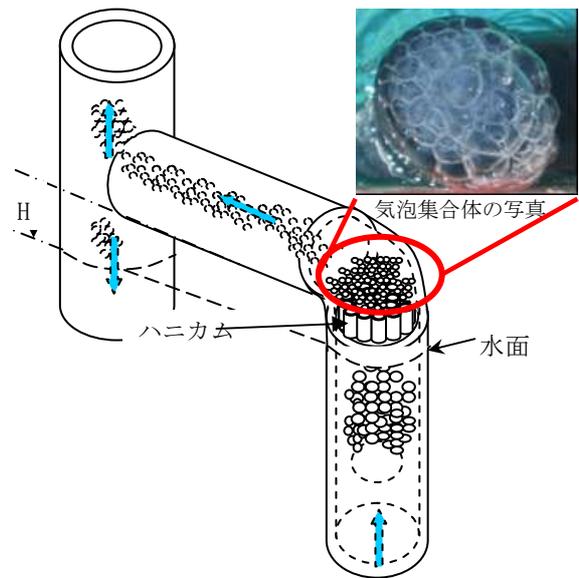


図-1 装置の概要図

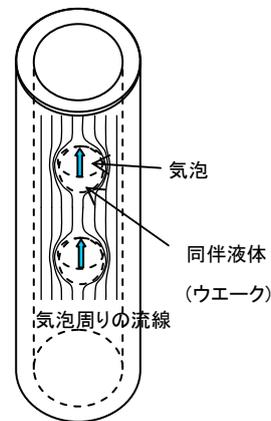


図-2 パイプ内を上昇する気泡と水の運動状態

気泡群と水の上昇流が発生し、気泡と水がハニカム構造体を通して、ハニカム構造体の上には気泡集合体が形成される．すなわち被処理液の殆んど全てが一旦は気泡薄膜の構成要素となることで高効率の気体溶解が行われる．これらの気泡群と気体を溶解した水はL字型パイプの略水平部からもう一方の略鉛直なパイプ内に運ばれ、このパイプの中で水は下方に運ばれて下端から周囲に排出され、気泡は上昇して気体が空气中に放出される．このように、貧酸素状態の水を酸素溶存量の多い水に作り変える．この方式では、ハニカム構造体の上に形成される気泡が折り重なった上記の気泡集合体になることに加え、ハニカム構造体を通してときに気泡と水との接触が確保されることにより高効率の気体溶解を達成する．そしてその特徴として、エアストーンの位置を水面下25cm程度に設置して稼動することができ、空気をほぼ常圧で送り込むため消費電力を抑えることができる．

本技術の実用上の観点からは、気泡と水がハニカム構造体を通してハニカム構造体の上に気泡が折り重なった状態を作るのに適した条件を特定することが重要である。これを探る立場からL字型パイプの上部に配置されたハニカム構造体を気泡と水が通過するとき生じる現象を説明する。その基本的問題として、鉛直な円管内の水中を気泡が上昇する場合の流れの現象を、図-2を用いて検討する。実験によれば、気泡の大きさがハニカム構造体の構成要素の管と同程度のときにハニカム構造体の上に気泡集合体が効率的に形成されるようである。前述のようにこの方式では、気泡が次々に発生してハニカム構造体の上に気泡が多数重なった気体集合体になり、気泡集合体の上端部の気泡が次々に破裂することで気液境界面の面積を格段に増加させ通過水量を確保することに加え、ハニカム構造体を通過するとき気泡と水との接触の状態が確保されることにより高効率の気体溶解を達成する。ここで、気体溶解の基本的な考え方を示し、次いで本装置の気体溶解の鍵となるこれらの2つの現象について検討する。

(2) 気体溶解の定量評価の考え方

常圧状態下において、気泡群を含む水の混合体の単位体積・単位時間あたり気泡中の気体が水中に溶解する質量 q は、混合体の単位体積あたりの気泡境界面の総面積を A として次式で与えられる。

$$q = JA \quad (1)$$

$$J = K_L(C_{\infty air} - C_{\infty water}) \quad (2)$$

ここで、 J は水中への物質フラックス[$\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$]、 K_L は物質輸送係数、 $C_{\infty air}$ は空気中の境界層外縁での気体濃度、 $C_{\infty water}$ は水中の境界層外縁での気体濃度である。なお、圧力が大気圧と異なる場合には圧力の効果を入れる必要がある。

式(1)から気泡群から液体中への気体の移動量は、気泡と水の混合体の単位体積あたり気泡の表面積 A が大きいほど大きいことがわかる。したがって、特定の体積の気体を多くの気泡に分割した場合を考えると、気泡の平均径を d 、ボイド率を ε とすると次の関係がある。

$$A = \frac{6\varepsilon}{d} \quad (3)$$

式(3)を式(1)に代入すると、

$$q = J \frac{6\varepsilon}{d} \quad (4)$$

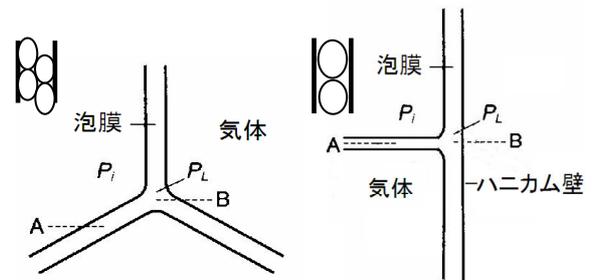


図-3 表面張力によるプラトー境界での排液¹²⁾

(3) 気泡のハニカム通過の現象

図-2に示すように、先行する第1の気泡（図の上の気泡）の上昇速度と形状は後続の第2気泡の影響を受けないが、第2の気泡は第1の気泡のウエークに取り込まれる。これはウエークが低圧で吸引効果があるためである。第2の気泡は上昇速度や形状を変化させ、第1の気泡に接触し、気泡膜が破裂して合体する。気泡同士が合体すると、合計の気体の界面積の A が小さくなるため、溶解速度が下がる。

ここで、ハニカム構造体内での気体溶解にとって望ましい気泡の存在状態について考える。気泡の径が一定の場合、気体溶解に理想的な状態は、気泡の合体が発生せず気液境界面の総表面積が最大となるものとして、合体せずに満遍なく均一に気泡が間隔を置いて近接して配置された状態である。気泡と気泡の間は適量の水が存在している。また、実験でハニカム構造体内の流れは空気流速によって異なる。空気流量の増大により、均一流体的流れ→不均一流体的流れ→スラグ流→フロス流→環状流などの形で変化する。これについては実験結果との関係で後に述べる。

(4) ハニカム構造体上の気泡集合体

本システムでは気泡集合体を構成する個々の気泡の膜厚が薄い状態で実現されることが鍵である。これは気泡集合体から排液が生じることにより達成される。ここでこのプロセスを説明する。

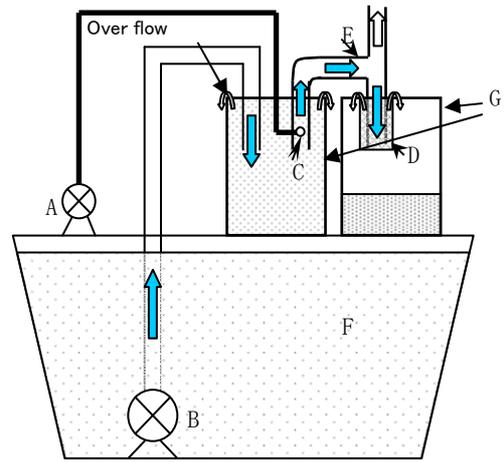
図-3は、互いに接触して存在する気泡の存在形態と排液のプロセスの模式図を、側壁の影響が小さい場合（左図）と側壁の影響の大きい場合（右図）について示す。

前者は、気泡集合体が安定な形態として、三つの気泡が泡膜角120度で接触しているプラトー境界¹²⁾の状態を示している。三つ以上の気泡が接するプラトー境界では二つの気泡が接触した場合の平面境界に比べ曲率が大きくなる。図-3の左の図でAとBでの圧力差 ΔP はA、Bでの曲率半径を R_A 、 R_B と

すると、

$$\Delta P = 2\sigma \left(\frac{1}{R_B} - \frac{1}{R_A} \right) \quad (5)$$

となり、 $R_A > R_B$ の関係から液体はAからBに向けて移動し排液が起こる。そして R_A と R_B の差が大きいほど、また泡膜液の表面張力 σ が大きいほど圧力差は大きくなり排液が促進される。一方、後者はハニカム内での状態に対応し、相接して存在する2つの気泡はハニカム内でハニカム壁に沿って液膜を作ると共に、ちょうど竹の節のように水平に近い境界の液膜を形成する。この場合も、AとBの曲率半径の大小関係は $R_A > R_B$ となり、式(5)に従ってAからBに向けて液体が移動し、排液が起こる。



A: エアブロー 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-4 実験システム説明図

3. 実験装置と実験方法の概要

(1) 実験装置

実験装置の概要を図-4に示す。エアポンプAから送り出された空気が実験装置本体Eに設置したエアストーンEを通過して気泡となり、気体溶解装置のパイプ内を気泡が上昇してハニカム構造体内を通過する。この時に酸素溶解が行われる。パイプの内径は50mmであり、ハニカム構造体は、長さ7cmで、直径6mm, 9mm, 13mmのパイプ群を束ねた構造となっている。また、前述のように、ハニカムを喫水面から1~2cm程度高くなるように設置していることと、ハニカムに用いたパイプの径が小さいことにより、ハニカム構造体を設置していない場合に比べて処理流量の増加とDOの一層の改善が見込まれる。

(2) 実験方法

実験は水温11℃~12℃の条件で次の手順で行った。

- 1) 亜硫酸ナトリウムを水 1 リットルあたりに 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) 実験装置を容器に設置する。
- 4) 実験装置内部に設置したエアストーンとエアブローを接続する。
- 5) エアブローに電源を入れた時間を計って水流量を計測する。
- 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。

- 7) 3)~5)までの操作をハニカムの径と喫水面からハニカムまでの高さを変化させて繰り返し行う。その際、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を下げて行う。

4. 実験結果とその考察

2章で見たように、気液混合体の単位体積あたり、単位時間に気体が溶解する質量、すなわち、気液混合体の単位体積あたりの溶解フラックスは式(4)の q で与えられる。本実験で用いた装置の気体溶解速度は、DO増分と水流量の積、すなわち、 $\Delta DO \times Q_{l0}$ で評価されるが、これは流量 $Q_{l0} + Q_{g0}$ で継続的に装置を通過する気液混合体により達成される。従って、 $\Delta DO \times Q_{l0}$ は単位体積あたりの溶解フラックス q を用いて $q(Q_{l0} + Q_{g0})$ で与えられる。すなわち、

$$\Delta DO \times Q_{l0} = q(Q_{l0} + Q_{g0}) = J \frac{6\varepsilon}{d} \cdot (Q_{g0} + Q_{l0}) \quad (6)$$

$\Delta DO \times$ 水流量は実験装置の気体溶解速度である。本実験では気泡発生部の構造を変えていないので単位電力に対応する空気の量が一定である。したがって $\Delta DO \times$ 水流量/空気流量は装置の溶解速度を単位電力あたりで表現したことと事実上同じ意味があり、気体溶解効率と定義しても差し支えない。

(1) ハニカム上端の高さの効果

ハニカム上端高さは本装置の性能に極めて大きな

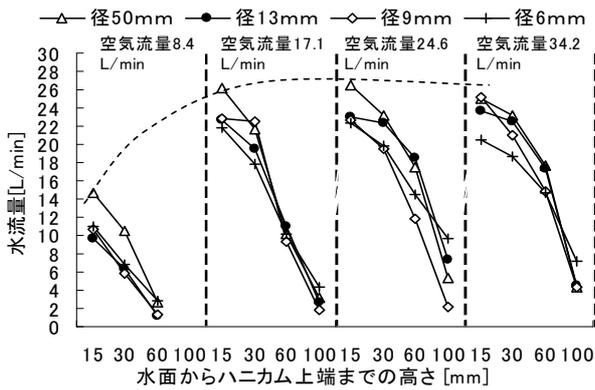


図-5 水流量とハニカム上端高さの関係

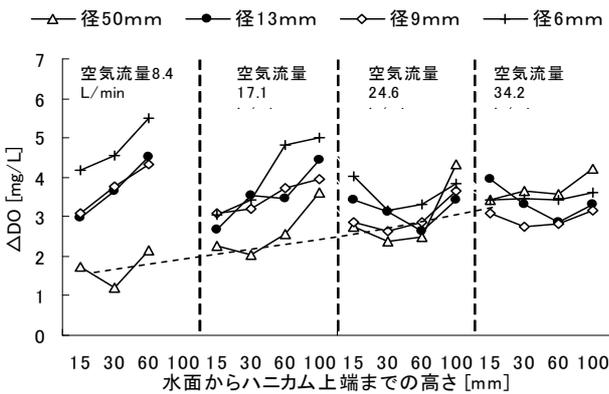


図-6 ΔDO とハニカム上端高さの関係

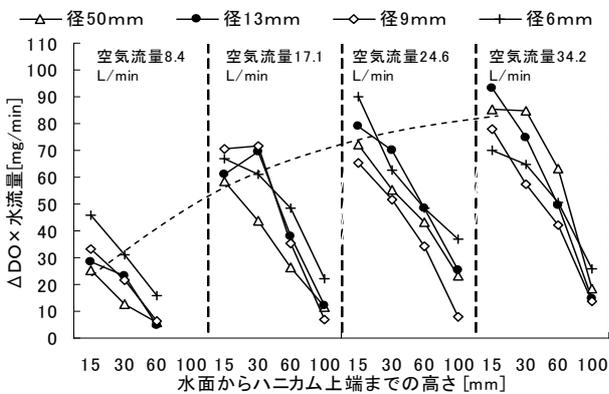


図-7 ΔDO × 水流量とハニカム上端高さの関係

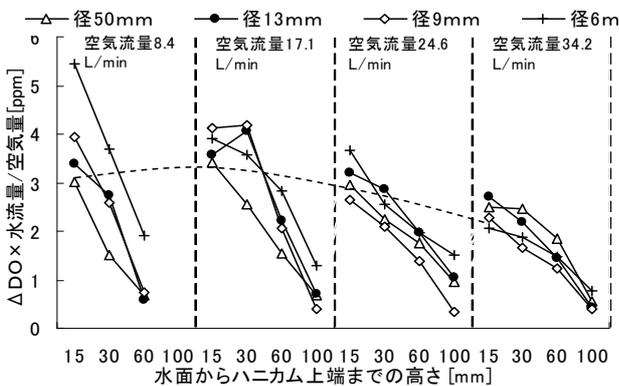


図-8 気体溶解効率とハニカム上端高さの関係

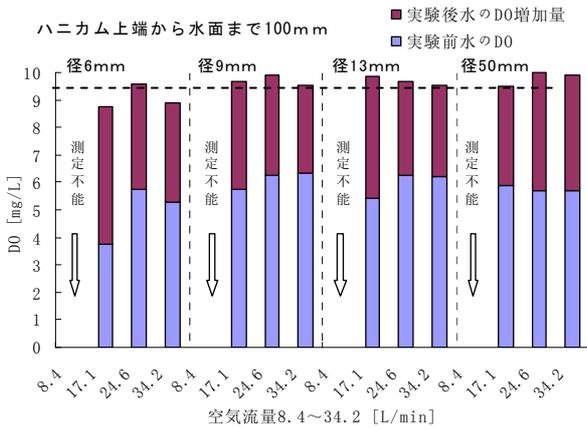
影響を与える。図-5～9はパイプ内に誘発される水流の流量，処理後のDO増分 ΔDO ， $\Delta DO \times$ 水流量，および気体溶解効率に及ぼすハニカム上端高さの効果を調べた結果の例を示す。なお，図中の空気流量の単位はリットル/分であり，ハニカム構造体を構成する細管の径でデータ点の記号を変えて示している。

まず図-5であるが，共通して水流量はハニカム上端高さが高いほど小さい。これは，ハニカム上端高さが高いとその分の位置エネルギーに逆らって水が上昇するのに大きなエネルギーを要するからである。また，ハニカム上端高さと同じで空気流量が異なるデータ点をたどると，空気流量が8.4リットル/分から17.1リットル/分に増加すると水流量は顕著に増加するが，空気流量が17.1リットル/分から24.6リットル/分に増加しても水流量の増加はあまり見られない。ハニカム構造体を構成するパイプの径による系統的な変化については確かなことがいえない。

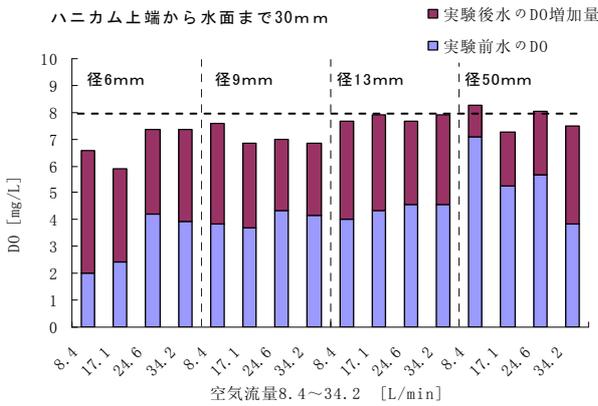
次に図-6を用いてDO増分に関する結果を述べる。なお，空気流量8.4リットル/分の場合，ハニカム上端高さ100mmでは，気泡がハニカム上端まで達しなかったために測定できなかった。図によると，空気流量が小さいとハニカムの有無やハニカムを構成する細管の径の影響が現れるが，空気流量が大きくなると径の影響が目立たなくなる。また，空気流量が小さいと，ハニカム上端高さの影響が大きいが，空気流量が大きくとハニカム高さの影響が小さくなる。また，一部の条件について点線で示しているが，同一のハニカム径，同一のハニカム上端高さの条件で空気流量の異なる条件では，空気流量により緩やかに変化することがわかる。

図-7は， $\Delta DO \times$ 水流量をハニカム上端高さに対して示している。図より $\Delta DO \times$ 水流量はハニカム上端高さが高くなると減少することがわかる。また，空気流量が多いほど $\Delta DO \times$ 水流量は大きな値を示す。同一のハニカム径について，ハニカム上端高さが同一で空気流量の異なるデータを連ねると滑らかな曲線が描かれ，ハニカムの径が6mmの場合には実験の範囲で最適な空気流量があることが認められる。他のハニカム径についても最適な空気流量の存在が示唆される。

図-8は $\Delta DO \times$ 水流量/空気流量で評価した気体溶解効率とハニカム上端高さの関係である。図の縦軸の単位はppmである。なお，本実験では気泡発生器の構造を変えていないので，単位電力に対応する空気量が一定となり，したがって $\Delta DO \times$ 水流量/空気流量は装置の溶解速度を単位電力あたりで表わした



(a) ハニカム上端高さ100mm



(b) ハニカム上端高さ30mm

図-9 DOと空気流量の関係

ことと同等であり、気体溶解効率と考えてよい。まず、ハニカム上端高さが高くなるにつれて気体溶解効率は低下する。ハニカム上端高さと同径が同一で空気流量が異なるデータを連ねると滑らかな曲線が描かれることは前の3つの図と同様である。

次に処理前後のDOの変化について述べる。図-9はハニカム径6mm, 9mm, 13mm, およびハニカムなしのケースについて種々の空気流量について処理前後のDOの値をハニカム上端高さ100mmと30mmのケースについて示す。図中の棒グラフは左から順にハニカム径6mm, 9mm, 13mm, およびハニカムなしの場合を各々毎分の空気流量8.4, 17.2, 24.6および34.2リットルの4ケースずつ示しており。図中の青の棒グラフは処理前のDOを示す。また、処理前水のDOは亜硫酸アトリウムで処理した後水のDO, 図よりハニカム上端高さが100mmと高いケースで処理後のDOが高い値を示すことがわかる。

(2) 気体溶解に及ぼす諸要因の効果の検討

次に、ハニカム上端高さ15mmの場合について、式(4)のボイド率 ϵ を計算した¹³⁾。

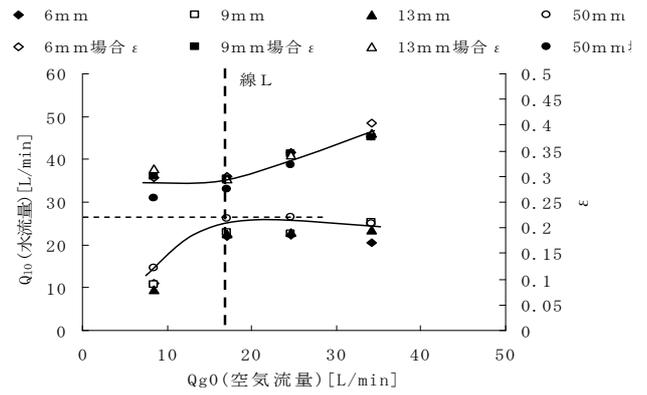


図-10 空気流量による水流量と ϵ の変化

$$\epsilon = K\beta \tag{7}$$

$$\beta = \frac{w_{g0}}{w_{g0} + w_{l0}} \tag{7a}$$

ここで、 β は気液混合流体の流れの気体の容積流量割合で、 w_{g0} と w_{l0} はそれぞれ気体と液体の流速である。 K は流量、圧力、あるいは管路形状などにより定まる量である。 ϵ については次に示す井上・青木の公式:

$$\epsilon = 1 / \left[1 + 0.0025 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right) \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)^{0.25} + \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \right] \tag{8}$$

が与えられており、ここではこの式を用いて ϵ を求めた。

図-10は空気流量に対して ϵ と水流量の実験値を図示したものである。空気流量の変化による水流量の変化に着目すると、本実験の範囲ではいずれの実験ケースについても空気流量が増加すると水流量が増大してその後増大が鈍化し、空気流量が大きい範囲では幾分減少する傾向が見られる。 ϵ は空気流量とともに単調増加するが、空気流量が大きくなると ϵ の増加は促進される傾向にある。

上でみた水流量を最大とする空気流量について少し検討する。柘植他¹²⁾によると、気泡が2つ集合した状態と3つ集合した状態では3つ集合した状態の方が大きい排水量になる。排水量が多いことは気泡と液体の分離が盛んなことを意味し、本実験では水流量が小さいことに対応する。また、本実験で空気流量が大きいことはプラトー境界において多数の気泡が集合していることに対応する。このような事情で、図中の線Lより右の空気流量が大きい部分で水流量が減少することが示唆される。線Lより左の部分では、いわゆる付加質量的なものと考えられる。すなわち、水中で気泡が上昇することにより水が気泡と共に運動する形で水が上昇するメカニズムが支

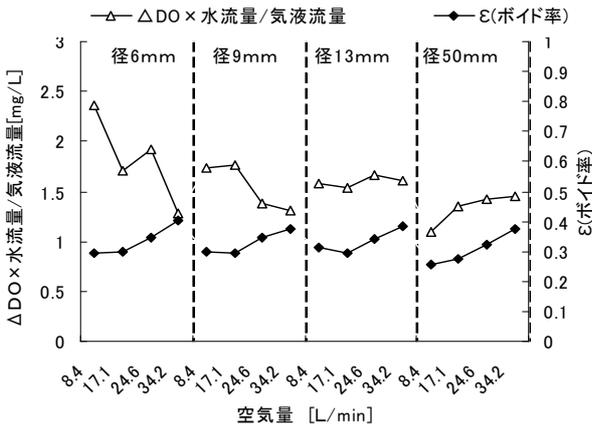


図-11 ボイド率および単位体積あたり気体溶解速度と空気流量の関係

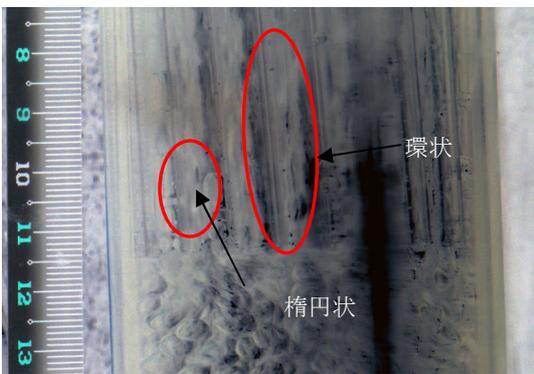


写真-1 気泡の状態 (空気流量17.40 /分)



写真-2 気泡の状態 (空気流量8.20 /分)

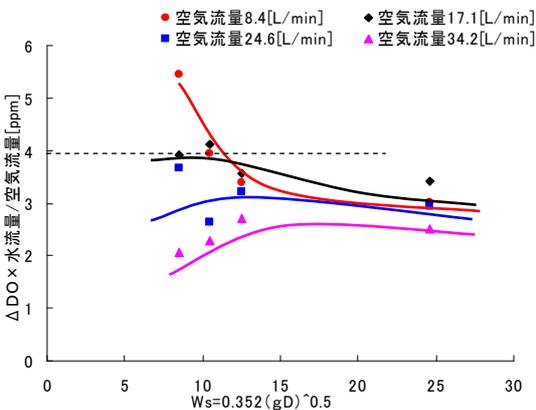


図-12 気体溶解効率とハニカム径の関係

配的で空気流量が増えるほど上昇する水の流量が増えることを反映していると考えられる。

ハニカムを用いた本実験においては、与えられたパイプとハニカム構造の諸元によりプラトー境界での排液の影響が相対的に大きくなり始める空気流量が異なることが示唆される。

図-11は、ボイド率および単位体積あたり気体溶解速度の空気流量による変化を調べた結果である。同図より、ボイド率は空気流量の増大と共に増大することが認められる。単位体積あたり気体溶解速度の変化特性はハニカム径により異なる。ハニカム径が6mmの場合は空気流量の増加と共に単位体積あたり気体溶解速度が減少しており、ハニカム径が大きくなるにつれてその減少傾向がなくなり、ハニカム径13mmの場合にはほぼ一定に近い。そしてハニカムがない場合には、空気流量と共に増大する傾向を示している。単位体積あたり気体溶解速度について言えば、式(6)中の ϵ と d の両方とも空気流量により増大するが、その変化のしかたが異なりこれは図-11の結果に反映していると見てよい。

実験で観察された気泡の状態を写真に写したものを写真1および2に示す。写真-1と2において楕円で囲んだ部分の下端がハニカムの下端とほぼ一致している。少し見づらいが、気泡の形状を比べると空気流量が大きい写真-1では気泡が変形した形で、空気流量が小さい写真-2の場合には気泡が接触や合体をせずに運動している状況が認められる。写真-1は後出の図-13の(c)に相当し、写真-2は同図(a)と(b)に相当する。

図-12は、最大気体溶解効率($\Delta DO \times$ 水流量/空気流量)とハニカム径 D (mm)の関係を、空気流量ごとに示したものである。横軸は式(12)のスラグ気泡速度である。それによると気体溶解効率は、空気流量が34.2リットル/分の場合はハニカム径が小さくなるにつれて少し増大した後最大値に達して減少しているのに対し、空気流量が8.4リットル/分の場合はハニカム径の減少と共に増大し本実験の範囲では減少傾向が見られない。その中間の空気流量24.8リットル/分と17.1リットル/分の場合はハニカム径が減少すると気体溶解効率が一度少し増加してその増加が鈍化する状況が認められる。なお、あまり顕著でないが、空気流量17.1リットル/分のケースでもハニカム径が最も小さい実験で気体溶解効率が小さくなっている状況がみとめられる。

ここで基本的な問題として、空気流の違いによるパイプ内の流動形態の差異について文献を参照しながら検討する。図-13は、赤川¹³⁾が鉛直な管内における気液二相流の流動形式を示したものである。

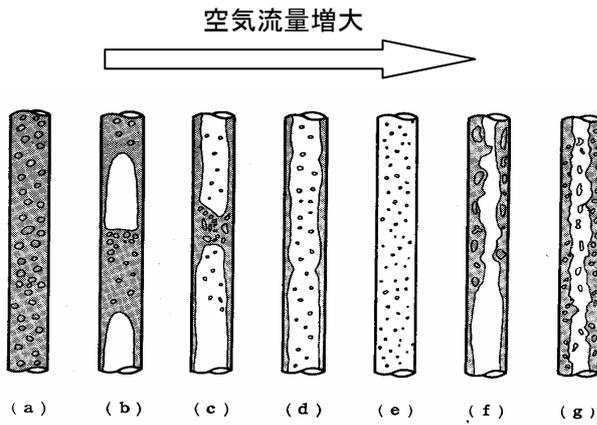


図-13 気流速によるパイプ中気泡の変化¹³⁾

赤川によると、図の (a) から (e) の順は、一定の液流量に対して気体流量が大きくなる順に対応して示している。(a)は気泡流(bubble flow)と呼ばれるもので、液相中に小さい気泡が分散した流れである。(b)はスラグ流(slug flow)で、ほぼ管路断面一杯となり周囲に液膜をもつ砲弾形の大気泡(Taylor bubble)と、液体中に小気泡を含む部分(液体スラグ)とが交互に存在する流れである。

(c)はフロス流(froth flowまたはchurn flow)と呼ばれるもので、液体スラグ部分が短くこの部分の気体含有量が多く、液体が網目状になった流れである。(d)は環状噴霧流(annular-mist flow)と呼ばれ、管壁に液膜があり、気相のコア部には液滴が含まれている流れである。(e)は噴霧流(mist flow)と呼ばれるもので、管壁面上に連続した液膜がなく気相中に液滴が含まれる流れである。

本実験では図-13の流動形態のうち(a), (b), (c)の形態が現れた。このことを念頭において、気体液体の相対速度とスラグ気体流速の比率を検討する。図-14は気体液体相対速度/スラグ気体流速の比を空気流量に対して図示したものである。ここで、気体液体相対流速とスラグ気体流速は赤川¹³⁾にならい次式で評価した。

気体の実流速:

$$w_g = \frac{w_{g0}}{\varepsilon} \quad (9)$$

水の実流速:

$$w_l = \frac{w_{l0}}{1 - \varepsilon} \quad (10)$$

気液間の相対速度:

$$w_r = w_g - w_l \quad (11)$$

スラグ気泡の速度:

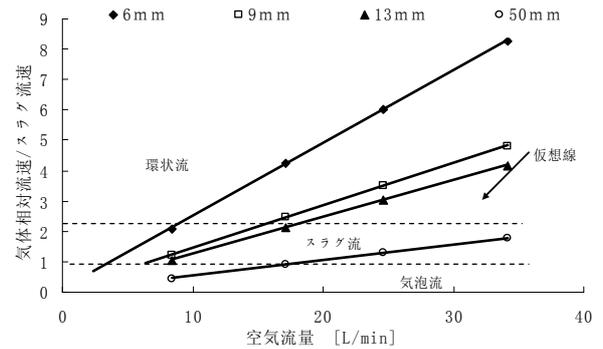


図-14 気体相対速度/スラグ気体流速と空気流量の関係

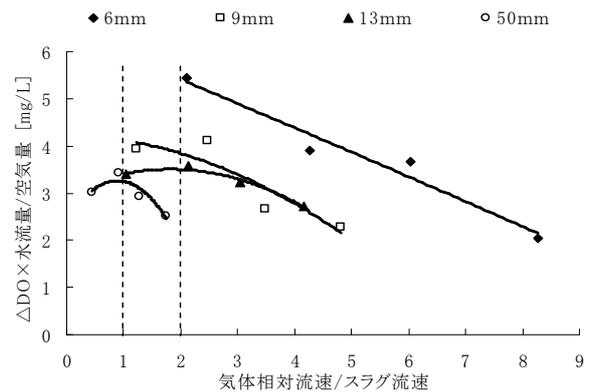


図-15 溶解効率と気体相対流速/スラグ状態気体流速

$$w_g = 0.352\sqrt{gD} \quad (12)$$

図-14によると、いずれのハニカム径の場合も空気流量の増加と共に気体液体相対速度/スラグ気体流速の比が増大しており、その増加率はハニカム径が小さいほど急激である。また、スラグ流は管のほぼ全断面にわたる大きさの気泡の流れでその速度は気泡流(図-13(a))を構成する小さな気泡の上昇速度に比べて大きいことから図の縦軸が1より小さい領域は図-13の(a)の気泡流に対応すると見られる。また、図中の仮想線を境に縦軸の値がこれより大きな環状流とこれより小さいスラグ流・フロス流の集合とに分けられる。なお、図の縦軸の分母のスラグ流速は式(12)によりひとつの基準として評価されるもので、実際のスラグ流では気体上昇速度が上記のスラグ流速より多少大きい状態にある。

図-15と図-16は気体溶解効率の最適条件を検討するため、気体溶解効率を気体相対速度/スラグ状態気体流速の比との関係を調べたものである。図-16でプロットを結び線は2次回帰曲線を示す。図よりハニカム径が小さいほど気体溶解効率が高いことがわかる。

また、図では気体相対速度/スラグ状態気体流速が1~2程度より大きい領域では気体溶解効率は気体

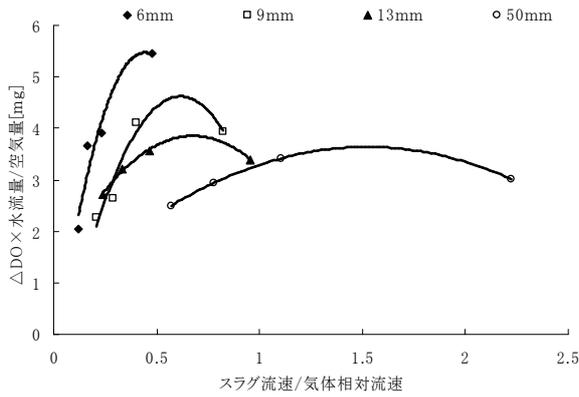


図-16 溶解効率とスラグ状態気体流速/気体相対流速

相対速度/スラグ状態気体流速の増加により減少する傾向にある。一方、ハニカム径が6mmでは不明であるが、気体相対速度/スラグ状態気体流速が1程度より小さい領域では気体溶解効率が気体相対速度/スラグ状態気体流速の低下と共に減少する傾向が見られ、気体溶解効率を最適とする気体相対速度/スラグ状態気体流速の存在が示唆される。

そして、式(6)の変形として

$$\frac{\Delta DO \times Q_{l0}}{Q_{g0}} = \frac{J \frac{6\varepsilon}{d} \cdot (Q_{g0} + Q_{l0})}{Q_{g0}} \quad (6a)$$

が得られる。ここで上式の左辺を B と定義する。すなわち

$$\frac{\Delta DO \times Q_{l0}}{Q_{g0}} = B$$

と定義すると、式(7a)と式(6a)から次の関係が得られる。

$$\varepsilon = \frac{Bd\beta}{6J}$$

また、式(9)、(10)、および(11)を組み合わせると次の式を得る。

$$w_r = \frac{w_{g0}}{\varepsilon} - \frac{w_{l0}}{1-\varepsilon} = kw_s \quad (13)$$

これより ε に関する次の2次方程式が得られる。

$$\varepsilon^2 w_r - \varepsilon(w_{g0} + w_{l0} + w_r) + w_{g0} = 0 \quad (13a)$$

上式の根は次のようになる^{13), 14)}。

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left[\frac{w_{g0} + w_{l0} + w_r}{w_r} \pm \sqrt{\left(\frac{w_{g0} + w_{l0} + w_r}{w_r} \right)^2 - 4 \frac{w_{g0}}{w_r}} \right] \quad (13b)$$

$$\cong \frac{w_{g0}}{w_{g0} + w_{l0} + w_r}$$

これは、 $w_r \ll w_r + w_{l0} + w_{g0}$ の条件から得られる。

そして、式(7)と(7a)の関係式を式(13b)に代入すると次のようになる。

$$\frac{Bd\beta}{6J} \cong \frac{w_{g0}}{w_{g0} + w_{l0} + w_r}$$

これより

$$\frac{Bd}{6J} \cong \frac{w_{g0} + w_{l0}}{w_{g0} + w_{l0} + w_r} \quad (14)$$

そして相対速度を書き換えると

$$B \cong \frac{6J(w_{g0} + w_{l0})}{d(w_{g0} + w_{l0} + 0.352k\sqrt{gD})}$$

さらに書き換えて、

$$B \cong \frac{6J}{d \left(1 + \frac{0.352k\sqrt{gD}}{w_{g0} + w_{l0}} \right)}$$

上の一連の関係式において、 k は装置の管径 D によって異なるが、 $k = 1 \sim 2$ 程度のとき気体溶解効率 B が最大値になる。これは図-14からも示唆される。しかし、本提案の装置でスラグ気泡を発生させることは困難であり、上記の結果はあくまで速度がほぼ同じ程度であるということである。

以上のように、気体溶解効率が最大値をとる時、空気流速、 ΔDO 、スラグ流速、気泡径の間には次の関係がある。

$$B \cong \frac{6J}{d \left(1 + \frac{0.352k\sqrt{gD}}{w_{g0} + w_{l0}} \right)} = \frac{\Delta DO \times Q_{l0}}{Q_{g0}} \quad (15)$$

5. 結語

以上、主要部を水中に略鉛直に立てた筒状体の中で気泡群を発生させ、筒体内の上部に上端が水面より少し高くなるように設置したハニカム構造体上

に気泡集合体を生成させる効果により気体溶解する装置の気体溶解性能について実験的検討を行った。本研究で得られた主要な知見は以下のようである。

1. ハニカム上端高さが増大すると処理水のDOが高くなるが、その反面水流量は減少し結果的に酸素溶解効率が低下する。
2. 気体溶解効率 ($\Delta DO \times \text{水流量} / \text{空気流量}$) は、ハニカム上端高さが高くなると低下する。
3. パイプの径、空気流量を一定とした場合には、気体溶解効率を最大にするハニカム径の値が存在することを示唆する結果を得た。
4. 気体溶解効率とハニカム構造体内の気液混合流体の流れの状態の関連について、写真1と2および図-13と15を用いて定性的に明らかにした。
5. 気体溶解効率の値は気体相対流速/スラグ流速の比が1~2程度の値で最大となることを示唆する結果を得た。しかし、スラグ気泡を本提案の装置で発生させることは困難である。

なお、図-10では空気流量を増やしたときの Q_{10} の振る舞い、図-12でハニカム径をさらに小さくさせたときの気体溶解効率の振る舞い、そして図-15で気体相対流速/スラグ流速の比をさらに小さくしたときの溶解効率の振る舞いが明らかでない。今後より系統的な実験によりこれらを究明する必要がある。また、既に別の気体を飽和に近い状態で溶解している水に酸素を溶解させる時と水が気体を全く溶解していない時とで気体を溶解する能力が異なることが考えられ、この点についても究明する必要がある。また、本研究と並行して現地実験も行っており、その結果を別の機会に発表する予定である。

謝辞：本研究にあたり、宇部工業高等専門学校深川勝之名誉教授に種々ご議論を賜った、査読者には有益なコメントを賜った。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, 汐重 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, 奥 貴則, 馬 駿, 原田 利男, 藤里 哲彦: 水質浄化技術の水理に関する研究, 第61回年次学術講演会講演概要集, CD-ROM, pp.395-396, 2006.
- 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) Wallis, G. B.: *One-dimensional Two-phase Flow*, McGraw-Hill Book Company, pp.283-295, 1969.

(2006. 5. 22受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON THE INCREMENT OF DISSOLVED OXYGEN IN
THE WATER BY MEANS OF THIN FILMS OF BUBBLES

Kesayoshi HADANO, Jun MA, Tsuyoshi IMAI, Tetsuhiko FUJISATO
and Toshio HARADA

In order to improve DO condition of lake or sea, this paper proposes a method of increment of DO in the water and gives an experimental investigation for the method. A vertical pipe connected to the waters where DO is poor is set in the water, inside of which are located an air -stone and a honeycomb above it. Bubbles formed accumulate on the top of the honeycomb, and all water to be treated becomes the elements of thin film of bubbles. Thus high performance gas dissolution is achieved. Quantities such as DO, rate of treatment etc. were examined for various conditions. It has been shown that there is an optimal size of honeycomb from gas resolution rate and that the optimal condition is realized when the relative velocity of the gas and liquid is almost the same as the slug velocity.