

# 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

大木 協<sup>1</sup>・馬 駿<sup>2</sup>・羽田野 袈裟義<sup>3</sup>・朝位 孝二<sup>4</sup>・中野 陽一<sup>5</sup>・  
藤里 哲彦<sup>6</sup>・福本 裕輝<sup>7</sup>・原田 利男<sup>8</sup>

<sup>1</sup>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: k.ohgi@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 新光産業(株)開発部 (〒759-0207 山口県宇部市大字際波1440)

E-mail: ma-s@ube-shinko.co.jp

<sup>3</sup>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)

<sup>4</sup>正会員 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)

<sup>5</sup>正会員 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2-12-1)

<sup>6</sup>非会員 (有)パブルタンク (〒755-0808 山口県宇部市西平原4-10-30)

<sup>7</sup>非会員 (株)日本港湾コンサルタント (〒141-0031 東京都品川区西五反田8-3-6 TK五反田ビル)

<sup>8</sup>非会員 宇部工業高等専門学校 技術室 (〒755-8555 山口県宇部市常盤台2-12-1)

湖沼や海域の水質改善, 特にDO改善を目的として著者らが開発中の液膜式気体溶解技術の概要を述べ, そのDO改善性能に関する室内実験の結果を検討する. 本方式は, 処理対象水を気泡液膜の構成要素にして液相中の気体濃度の勾配を大きくすることにより気体溶解を効率的に行う. また管内の浅い部分で曝気してエアリフト効果を利用して深部の水のDO改善を行うため稼働に必要なエネルギーが小さい. 室内実験の結果から装置内にハニカムを装着することの影響を評価した. また, 酸素溶解能力およびエネルギー効率の最適条件について調べ, 管内径に対して最適の空気流量があること, h型管の水平部の水面からの高さを抑える方が有利であること, エネルギー効率は空気流量が小さいほど有利であることなどを明らかにした.

**Key Words :** water quality, DO improvement, bubble cluster, energy saving, oxygen dissolution flux, energy efficiency

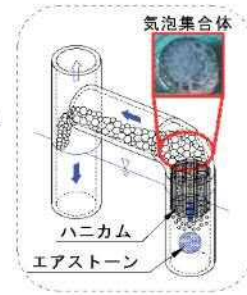
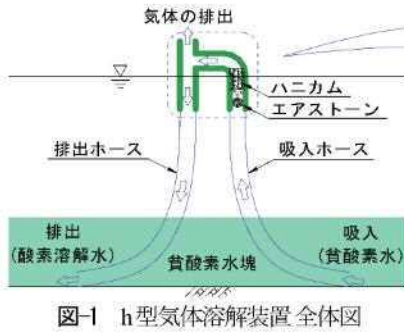
## 1. はじめに

近年, 湖沼や河川或い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. 貧酸素化は水中の溶存酸素(DO)が著しく低下した状態で, 貧酸素化により, 底泥からの重金属や栄養塩の溶出の問題<sup>1)~3)</sup>が指摘され, その改善策として様々な方法で曝気が試みられてきた. しかしながら, 従来の曝気の方法には効率やコスト, 維持管理の面で更に改善の余地があるように思われる.

従来行われてきた曝気の主要な技術として深層曝気が挙げられる<sup>4)~6)</sup>. この技術は, 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ものであるが, その特性上, 装置の主要部分が水面下深くにあるため, 維持管理が困難である. また, 压力容器内でノズル噴射などにより強制された気液二相流を作り, 酸素溶解を図る技術<sup>7)~10)</sup>が提案されている. しかしながら

エネルギー効率と気液接触面積の両面から見て, これらの技術にもまだ改善の余地があるように思われる. そのような状況で, 著者ら<sup>11) 12)</sup>のグループは現地で少量のエネルギーを用いて低コストで稼働することができる溶存酸素改善方法として, 管内曝気による液膜式の気体溶解技術を開発中である. なお, 本提案の技術はよく用いられている微細気泡とは異なり, 処理対象水をいったんの気泡集合体の構成要素にすることにより, 効果的な酸素溶解を目指すものである.

本研究では, 著者らが開発中のh型気体溶解装置の稼働の概要を述べ, 次いでそのDO増加性能に関する実験結果から, 装置内に設置されているハニカムが処理水流量およびDO増加量に与える影響について評価する. そして, 酸素溶解能力およびエネルギー効率の最適条件について検討する.



## 2. 気体溶解装置について

本研究対象のh型気体溶解装置の構成と稼働の原理を以下に示す。図-1は本装置を現地に設置した場合の全体図、そして図-2はh型気体溶解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付近にハニカム(写真-2)を設置し、さらにその下方に気泡を発生させるためのエアストーンを配置している。2本のホース末端を隔離して配置し、酸素溶解処理して排出された水が吸入ホースに吸入されることがないようにする。

この構成で、管内で曝気すると気泡群が管内を上昇し、それによって管内の水の上昇流が誘起される、いわゆるエアリフト現象が発生する。この管内のエアリフト分を補償するため、吸入ホースの先端から水域の水が連続的に取り込まれる。気泡と共に管内を上昇し、ハニカムを通過した水はハニカム上端部で気泡集合体を形成する。これは、ビールをコップに注いだ時にコップの上半部のできる泡の重なった状態と同様である。この状態では、一定体積の水に対する気液境界面積が通常の湛水状態に比べて格段に大きくなっている(図-2の写真参照)。気泡と共に上昇した水はほとんど全てがハニカム上端部でいったん気泡集合体の液膜の構成要素となり、気相・液相間での気体成分の交換は液相内の溶存気体濃度を大気圧下での飽和濃度に近づけるように行われる。水温20(°C)では、曝気に用いる気体が純酸素の場合では飽和DO濃度は44.3(mg/L)<sup>13)</sup>、空気の場合では8.84(mg/L)<sup>14)</sup>である。この場合重要なことは、酸素溶解処理すべき水をいったん気泡集合体の構成要素に変換し、この状態で気相・液相間の気体成分の交換が行われることである。

観察によると、気泡集合体は次から次へと下方から上昇する気泡を取り込む一方でほぼ同量の気泡が破裂する。このため、気泡集合体は装置の定常運転中はほぼ同一の形状を保ち続ける。また、気泡集合体は図-2のように1つの流れのような状態で管の水平部を伝って直管部へと運ばれる。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。そして、気体溶解

された水は直管内を下方に流下し、排出ホースを經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。このような構成と稼働によって酸素溶解が行われる。

これらについて考える。まず、気体溶解の性能であるが、気相・液相間の気体成分の交換フラックス(液相への気体溶解フラックス) $J$ は、液相中の溶存気体濃度を $C$ 、気液境界面積を $A$ 、気液境界面と法線方向の長さを $n$ 、係数を $K$ として次式

$$J = -K \frac{\partial C}{\partial n} A \quad (1)$$

で与えられるが、気泡集合体を形成する気泡の場合、気泡の膜厚を $\delta$ 、液膜の両方の表面における濃度の差を $\Delta C$ として $J \propto \Delta C \times A / \delta$ となり、膜厚 $\delta$ が小さいこと、および気液境界面の総面積が大きいことから大きな $J$ が得られる。

次に、稼働に必要なエネルギーについて考える。曝気に要する仕事率 $P$ は水力発電の理論水力と同様の考え方から、水の単位体積重量 $w$ 、曝気深度 $H$ 、空気流量 $Q_g$ を用いて次式

$$P = wHQ_g \quad (2)$$

で表現される。本方式では、管内水中の浅い部分で曝気することにより曝気位置より深い部分の水を連結ホースの先端から吸入して酸素溶解処理することができる。本研究に用いた装置は、管内径 $D=5(\text{cm})$ 、球形エアストーン外径 $D_s=3(\text{cm})$ であり、この条件では曝気水深はh型管の直径の5~6倍程度でよく、かなり浅い位置での曝気で機能を発揮する。なお、軸対象浮力噴流の研究結果によると、濃度の半値幅 $b_z$ は噴流の出口からの鉛直方向距離 $z$ に対して $b_z=0.12z$ で拡がること示されている<sup>15)</sup>。本装置は管内曝気により浮力噴流を発生させるが、噴流幅の拡がりに及ぼす管の存在の効果を無視すると、管内径 $D$ 、球形エアストーン外径 $D_s$ とすると、濃度の半値幅 $b_z$ が管内径 $D$ に一致する $z$ の値は、 $z = 4 \times (D - D_s)$ となる。本装置では $b_z = 83(\text{cm})$ となるが、実験によると、これより小さい $z$ で気泡が管断面全体に及ぶことが確認されている。実際に現地で使用する際には、管内径 $D=5(\text{cm})$ 程度のh型管を複数用いることを想定している。

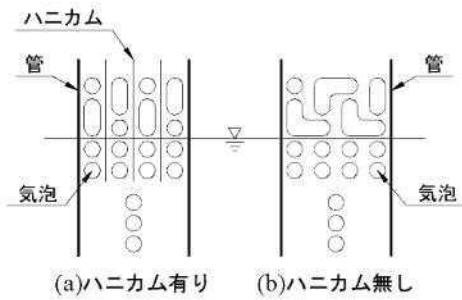


図-3 管内曝気の気泡の模式図

この他の特徴として次のことが挙げられる。

- 装置が簡単な構成で低コスト。
- ホースの使用により処理対象水の吸入位置及び処理後の水の排出位置を自由に設定できる。
- 装置の主要な部分が水面上にあるため維持管理が容易。
- 水域の水の循環を伴わないため躍層を破壊しない。
- 管内曝気の隔離効果のため、曝気によって DO 濃度が上昇した水を再度曝気するような無駄を避けることができる。

装置内にハニカムを設置することの効果として期待されることを以下に述べる。管内の流動はハニカムが無い場合は管内を上昇する気液二相流において上昇する部分と下降する部分が入り乱れて存在し、3 次元的に干渉し合う流動である。一方、ハニカムがある部分はセル単位で気液二相流が 1 次元的に運動し、あるセル内では上昇し、あるセル内では下降または揺動している状態がある。この場合、隣のセル内の流体とは運動量交換、すなわち内部摩擦が無いため比較的抵抗なく上昇し、処理水流量が増大する状況が生まれることが考えられる。これを整流効果と呼ぶことにする。また、ハニカムには壁面摩擦により損失を増加させて処理水流量を減少させる効果がある。本論文では流体力学に則り内部摩擦と壁面摩擦の両方を考慮して摩擦損失を考慮する。

図-3 はハニカムの有無による管内曝気の気泡の比較の模式図である。管内曝気により放出された気泡は管内の水面より上方で気泡集合体を形成するが、ハニカムを設置すると水平方向に隣接する気泡同士の合体による気液境界面積の減少にもなう気体溶解能力の減少を抑えることができると推察する。そして、第 4 章(2)節 f)で述べるが、管径一定の条件で空気流量を増加させると、最初は小さな気泡が合体や分裂を起こすことなく、ほぼ一様の気泡径と分布で管内を上昇する“均一気泡流動”であるが、ある空気流量以上では管径の大きさの気泡(スラグ)が管内を上昇する“スラグ流動”に変化する。このようにスラグが管内を上昇してきた場合に、ハニカムによってスラグをセルの大きさに細分化することによって、気泡集合体における気液境界面積を大きくすることができると推察する。

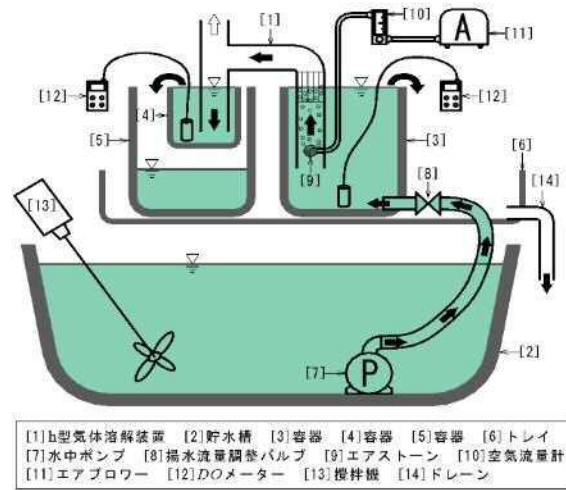


図-4 実験装置模式図

### 3. DO増加実験と実験条件

室内実験により本装置のDO増加性能を調べた。その概要を以下に述べる。

#### (1) 実験装置と方法

図-4 は実験装置の模式図である。実験装置の主要構成は、h 型気体溶解装置[1]、気体溶解処理対象の水を貯め入れる貯水槽[2]、その水を汲み上げる水中ポンプ[7]、処理対象の水を貯め置く容器[3]、処理後の水を受け止める容器[4]、容器[4]からオーバーフローした処理後の水を受け止める容器[5]、エアストーンに空気を送るエアブロー[11]などからなる。容器[3]からオーバーフローした水は一旦トレイ[6]で受け止めて排水されるようになっている。実験は次のような手順で行った。

1. 貯水槽[2]に水道水を 200(L)貯め、攪拌機[13]で攪拌しながら水温を 22(C)に調節・維持した。
2. 貯水槽に亜硫酸ナトリウムを約 12~15(g)と微量の塩化コバルトを触媒として投入し、DO 濃度が低下したところで攪拌を停止した。
3. 水中ポンプ[7]により貯水槽から容器[3]に水を汲み上げ、容器[3]からトレイ[6]にオーバーフローしている状態でエアストーン[9]から空気を放出させて装置[1]を稼働し、処理を開始した。
4. 処理された水が容器[4]から容器[5]にオーバーフローし始めてから適当な処理時間だけ処理を継続し、この処理時間を計測した。
5. 処理終了後、直ちにDOメーター[12]を用いて容器[3]と容器[4]のそれぞれの水のDO濃度を測定し、これを処理前後のDO濃度とした。
6. 容器[5]内の水重量を測定し、処理時間を用いて単位時間当たりの処理水流量 $Q_w$ を算出した。

なお、以後は h 型管の排出側へとオーバーフローした水量を処理水流量と呼ぶ。

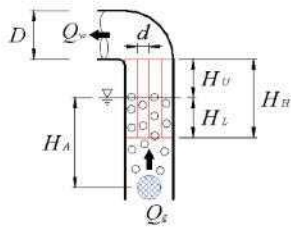


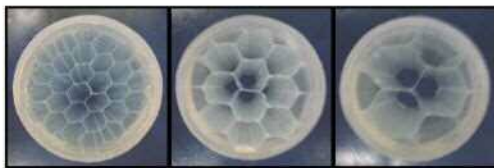
図-5 諸量の定義

表-1 実験条件

管内径 : $D$ (mm)		50
水温 : $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )		22
曝気深度 : $H_A$ (mm)		140, 230, 320
空気流量 : $Q_g$ (L/min)		10, 20, 30, 40
ハニカム	セルサイズ : $d$ (mm)	8, 13, 20
	全長 : $H_H$ (mm)	60, 90, 120, 150
	水平管内底高さ : $H_V$ (mm)	20, 50, 80, 110, 140
無		



写真-1 h型気体溶解装置



(a)  $d=8(\text{mm})$  (b)  $d=13(\text{mm})$  (c)  $d=20(\text{mm})$

写真-2 ハニカムの設置状態

(2) 実験条件

図-5は装置の諸量の説明図である。本実験は装置の諸量を表-1のように変化させ、その全ての組み合わせ(564通り)について実験を行った。写真-1は本実験で使用したh型気体溶解装置である。本装置に使用した管材は透明硬質塩化ビニール管であり、管内の流動状態を目視にて確認することができる。ハニカムは硬質塩化ビニールフィルム製であり、そのフィルム厚はセルサイズが $d=8, 13(\text{mm})$ のハニカムでは $100(\mu\text{m})$ 、 $d=20(\text{mm})$ のハニカムでは $120(\mu\text{m})$ である。写真-2はハニカムを装置に設置した様子である。

4. 実験結果及び考察

第3章で示した実験で得られた結果を考察する。まず、ハニカムが処理水流量 $Q_w$ およびDO増加量に与える影響を評価し、次に装置の酸素溶解能力及びエネルギー効率について考察し、それぞれの最適条件を検討する。

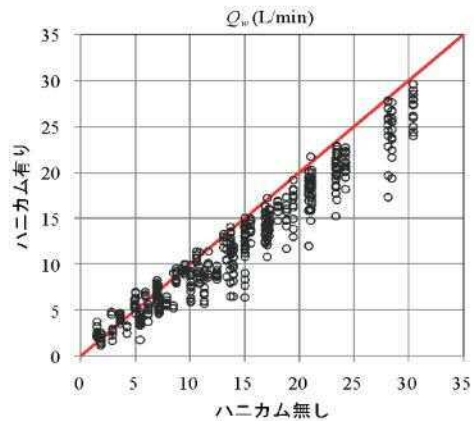


図-6 ハニカムの有無と $Q_w$ の関係

(1) ハニカムの効果の評価

ハニカムが処理水流量 $Q_w$ およびDO増加量に及ぼす効果を評価する。

a) 処理水流量 :  $Q_w$

ハニカムの有無による処理水流量の違いを考察する。ハニカムは第2章で述べたように、その整流作用により管内流の内部摩擦を減少させて処理水流量を増加させる効果と、逆に、壁面摩擦を増加させて処理水流量を減少させる効果の両方を併せ持つと考えられる。ここでは内部摩擦と壁面摩擦の両方を考慮した摩擦損失の大小関係により処理水流量を評価する。

図-6は全ての実験条件に対して処理水流量 $Q_w$ をハニカムの有無で比較してプロットしたグラフであり、プロットが対角線より上にある場合はハニカムが有る方が有利、対角線より下にある場合はハニカムが無い方が有利なことを表している。図より、処理水流量 $Q_w$ は全体的にハニカムが無い方が有利であることがわかる。また、処理水流量 $Q_w$ が約 $10(\text{L}/\text{min})$ より小さい範囲にハニカムが有る方が有利な条件が存在していることもわかる。この事情について図-7を用いて考察する。図-7は水平管内底高さ $H_V$ と処理水流量 $Q_w$ の関係をハニカムのセルサイズ $d$ 毎に示した一例であり、図中の点線はハニカムが無い場合の $Q_w$ である。図より、処理水流量 $Q_w$ は水平管内底高さ $H_V$ とともに減少することがわかる。また、処理水流量 $Q_w$ は、水平管内底高さ $H_V$ が低い条件ではハニカムが無い方が大きく、 $H_V$ が高い条件ではハニカムが有る方が大きくなる傾向が認められる。これは、水平管内底高さ $H_V$ が高い、すなわち処理水流量 $Q_w$ が小さい場合、摩擦損失はハニカムが有る方が無い場合よりも小さいことを示している。つまり、ハニカムを設置することによる壁面摩擦の増加よりも整流効果による内部摩擦低減の効果が大きいことを示唆している。

ハニカムが有る場合は、セルサイズ $d$ が小さいほど処理水流量 $Q_w$ が小さくなっている。そこで、図-7のデータのセルサイズ $d$ の効果を調べるため管内の気液二相流の流量( $Q_w+Q_g$ )を用いて平均上昇速度を求め、その速度

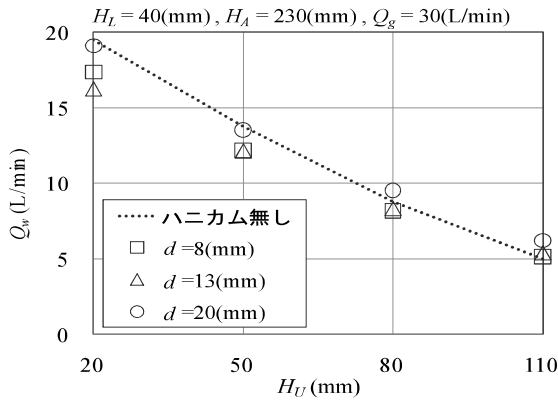


図-7  $H_U$ と $Q_w$ の関係

とセルサイズ $d$ (ハニカム無しの場合は管内径 $D$ )を用い、レイノルズ数 $Re$ およびこれに対する摩擦損失係数 $f$ をMoody図<sup>16)</sup>より算定した。表-2はその結果を示す。この気液二相流の動粘性係数 $\nu$ の値は明らかではないが、ここでは清水の値( $\nu=0.01(\text{cm}^2/\text{s})$ )を用いた。表より、 $d=13(\text{mm})$ の場合に $f$ が大きいが、これは乱流遷移の $Re$ より少し大きい $Re$ であることによる。次に、表-3は表-2の数値を用いて得た摩擦損失水頭 $h_f$ と処理水流量 $Q_w$ の実験値を示す。表より、ハニカムが有る場合に限定すると、 $d$ による $Q_w$ の相違は $d$ による $h_f$ の相違と対応することがわかる。すなわち、セルサイズ $d$ が小さいと摩擦損失水頭 $h_f$ が大きくなり処理水流量 $Q_w$ は小さくなる。また、ハニカムが有る方が $Q_w$ が大きくなる条件、すなわち $H_U$ が高い80(mm)、110(mm)の条件では $d > 20(\text{mm})$ の範囲に最適なセルサイズ $d$ が存在していることが示唆される。

なお、ハニカムの互いに隣接するセル内の流れはセル下端を介して干渉する。実験時の目視により、連続して気泡が上昇しているセルの隣のセル内では気泡が上昇しない、もしくは下降する現象が確認されたが、この現象も見かけの摩擦損失として表れる。なお、図-7にみられる傾向は他の条件においても同様に認められた。

**b) DO増加量：換算 $\Delta DO$**

同一条件で曝気処理を行っても処理対象水のDO濃度が違えばDO増加量が異なる。したがって、処理対象水のDO濃度によらず曝気処理のDO増加の能力を示す指標が必要となる。馬<sup>17)</sup>はこの指標として換算 $\Delta DO$ を提案した。本研究でも換算 $\Delta DO$ を用いて評価する。

ここで換算 $\Delta DO$ の考え方を示す。曝気装置内に清水を満たし、これに酸素消費物質がない条件で曝気を行うと、DO濃度は次第に上昇する。曝気理論によると、このときのDO濃度の上昇過程は、飽和DO濃度を $DO_s$ 、総括酸素移動容量係数を $K_L a$ として次式で与えられる<sup>18)</sup>。

$$\frac{dDO}{dt} = K_L a(DO_s - DO) \quad (3)$$

$K_L a$ を一定として式(3)を $t=t_1 \sim t_2$ で積分すると、

$$\ln\left(\frac{DO_s - DO_1}{DO_s - DO_2}\right) = K_L a(t_2 - t_1) \quad (4)$$

表-2  $Re$ と $f$ の値

$H_U$ (mm)	パラメータ	ハニカム			
		無し	$d=20(\text{mm})$	$d=13(\text{mm})$	$d=8(\text{mm})$
20	$Re$	21,010	8,340	5,106	3,218
	$f$	0.0266	0.0342	0.0407	0.0199
50	$Re$	18,570	7,392	4,654	2,865
	$f$	0.0272	0.0361	0.0416	0.0223
80	$Re$	16,475	6,718	4,230	2,594
	$f$	0.0279	0.0375	0.0424	0.0247
110	$Re$	14,850	6,152	3,908	2,389
	$f$	0.0285	0.0386	0.0164	0.0268

表-3  $h_f(\text{cm})$ と $Q_w(\text{L/min})$ の値

$H_U$ (mm)	パラメータ	ハニカム			
		無し	$d=20(\text{mm})$	$d=13(\text{mm})$	$d=8(\text{mm})$
20	$h_f(\text{cm})$	0.120	0.181	0.228	0.207
	$Q_w(\text{L/min})$	19.5	19.1	16.3	17.4
50	$h_f(\text{cm})$	0.107	0.186	0.256	0.232
	$Q_w(\text{L/min})$	13.7	13.5	12.2	12.2
80	$h_f(\text{cm})$	0.096	0.190	0.269	0.256
	$Q_w(\text{L/min})$	8.8	9.6	8.3	8.2
110	$h_f(\text{cm})$	0.087	0.192	0.137	0.278
	$Q_w(\text{L/min})$	5.0	6.2	5.4	5.2

ここで、 $DO_1$ と $DO_2$ はそれぞれ時刻 $t_1$ と $t_2$ におけるDO濃度である。これより次式が得られる。

$$\frac{DO_2 - DO_1}{DO_s - DO_1} = 1 - \exp\{-K_L a(t_2 - t_1)\} \quad (5)$$

この式から、 $K_L a$ と時間差 $(t_2 - t_1)$ が一定であれば、 $(DO_2 - DO_1)/(DO_s - DO_1)$ が一定となる。 $(t_2 - t_1)$ はDO改善プロセスの時間に対応するから、DO改善のための機器を同一の出力で定常運転する場合、 $(t_2 - t_1)$ は一定と考えてよい。したがって、処理前のDO濃度 $(DO_1)$ が異なる2つの試料水A、Bに同一条件でDO改善処理を行う場合、 $(DO_2 - DO_1)/(DO_s - DO_1)$ が同一となる。すなわち、2つの試料水A、Bに適用すると、

$$\frac{DO_{2A} - DO_{1A}}{DO_s - DO_{1A}} = \frac{DO_{2B} - DO_{1B}}{DO_s - DO_{1B}} \quad (6)$$

式(6)の分子 $(DO_{2A} - DO_{1A})$ および $(DO_{2B} - DO_{1B})$ はそれぞれ試料水AおよびBのDO濃度増分であり、それぞれ $\Delta DO_A$ および $\Delta DO_B$ と考えればよい。

ここで、試料水Aとして処理前のDO濃度がゼロの水を考え、試料水Bとして処理前のDO濃度がゼロでない任意の値の試料水を考える。そして、試料水Aに対する量として式(6)の分子を $\Delta DO_0$ とおき、任意の初期DO値を持つ試料水Bに対する量を示す添字Bを省いて示すと、式(6)は次のように書き換えられる。

$$\frac{\Delta DO_0}{DO_s} = \frac{\Delta DO}{DO_s - DO_1} \quad (7)$$

これより次式を得る。

$$\Delta DO = \frac{DO_s - DO_1}{DO_s} \cdot \Delta DO_0 \quad (8)$$

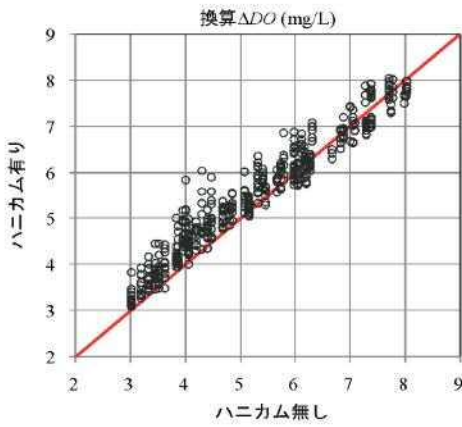


図-8 ハニカムの有無と換算 ΔDO の関係

すなわち、DO 濃度がゼロの試料水と  $DO_1$  の試料水に対して全く同じ条件で DO 改善処理を行うと、濃度が  $DO_1$  の試料水の DO 濃度増分(ΔDO)は、DO 濃度がゼロの試料水の DO 濃度増分(ΔDO<sub>0</sub>)の  $(DO_s - DO_1)/DO_s$  倍となり、ΔDO<sub>0</sub> に比べて小さくなることわかる。したがって、DO 改善機器の DO 増加性能は、次式の ΔDO<sub>0</sub> により評価されるべきであることがわかる。

$$\Delta DO_0 = \frac{DO_s}{DO_s - DO_1} \cdot \Delta DO \quad (9)$$

上式の ΔDO<sub>0</sub> は、仮に DO 濃度がゼロの水に DO 改善処理をした時に得られると想定される DO 濃度増分値で、DO 増加ポテンシャルを表現するパラメータである。現地実験では処理前の DO 値(DO<sub>1</sub>)は様々な値を示すので、同一機器の同一の運転状態でも DO 増加量(ΔDO)の値が様々な値を示すが、式(9)の換算 ΔDO を用いることで処理前の DO 値(DO<sub>1</sub>)の影響を除去することができる。

図-8 は全ての実験条件に対して換算 ΔDO をハニカムの有無で比較してプロットしたグラフであり、前掲の図-6 と同様にプロットが対角線より上にある場合はハニカムが有る方が有利、対角線より下にある場合はハニカムが無い方が有利なことを表している。図より、換算 ΔDO は全体的にハニカムが有る方が有利であることがわかる。また、換算 ΔDO が約 6(mg/L)より大きい範囲にハニカムが無い方が有利な条件が存在していることもわかる。この事情について図-9 を用いて考察する。図-9 は水平管内底高さ  $H_U$  と換算 ΔDO の関係をハニカムのセルサイズ  $d$  毎に示した一例であり、図中の点線はハニカムが無い場合の換算 ΔDO である。図より、換算 ΔDO は水平管内底高さ  $H_U$  とともに増加することがわかる。また、換算 ΔDO は、 $H_U$  が低い条件ではハニカムが有る方が大きく、 $H_U$  が高い条件ではハニカムが無い方が大きくなる傾向が認められる。これは、前掲の図-7 に示したように、水平管内底高さ  $H_U$  が高くなるにつれて処理水流量  $Q_w$ 、すなわち管内の全体的な流動の速度が減少

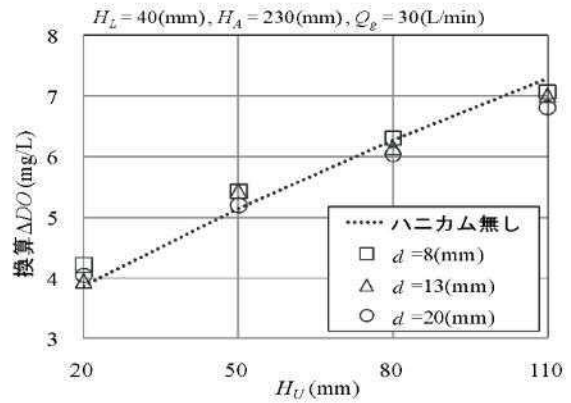


図-9  $H_U$  と換算 ΔDO の関係

するため気液接触時間が長くなり、気泡集合体内部における排液時間が長いことにより排液効果<sup>12)</sup>が高まるためと考えられる。ここで、排液とは気泡集合体の気泡液膜の部分に存在する水が重力により気泡液膜に沿って下方に流れ落ちることである。水平管内底高さ  $H_U$  が高いほど換算 ΔDO が大きい、これは  $H_U$  が高いほど排液効果が大きく気泡集合体を構成する気泡液膜の膜厚が薄くなり、液相である液膜内の溶存酸素の濃度勾配が大きくなるため気体溶解フラックスが大きくなった結果と考えられる。ハニカムの有無による違いについては、図-9 において水平管内底高さ  $H_U$  が高い条件では換算 ΔDO はハニカムが無い方が大きい。これは、図-7 より  $H_U$  が高い条件では、処理水流量  $Q_w$  すなわち管内の流動の速度はハニカムが有る場合に比べて無い方が小さく、したがって気液接触時間が長く排液効果が大きいためと考えられる。また、ハニカムが有る場合は、セルサイズ  $d$  が小さいほど換算 ΔDO が大きくなっているが、これも図-7 に示したように、セルサイズ  $d$  が小さいほど処理水流量  $Q_w$  が小さく、気液接触時間が長く排液効果の影響が出やすいことに起因していると考えられる。なお、図-9 にみられる傾向は他の条件においても同様に認められた。

以上、a)、b)より、ハニカムが処理水流量  $Q_w$  と換算 ΔDO に与える影響について次のように取りまとめることができる。

ハニカムの有無による換算 ΔDO の違いは、ハニカムの有無による処理水流量  $Q_w$  の違いにより決まる。すなわち、処理水流量  $Q_w$  が小さいほど換算 ΔDO は大きくなる。水平管内底高さ  $H_U$  が高い条件では、処理水流量  $Q_w$  はハニカムが有る方が摩擦損失が小さいため大きく、換算 ΔDO は小さい。水平管内底高さ  $H_U$  が低い条件では、処理水流量  $Q_w$  はハニカムが無い方が摩擦損失が小さいため大きく、換算 ΔDO は小さい。なお、第 4 章(1)節 a) で述べたように、実験時の目視により、連続して気泡が上昇しているセルの隣のセル内では気泡が上昇しない、もしくは下降する現象が確認された。

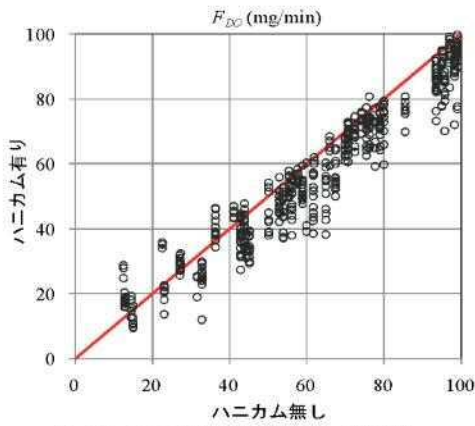


図-10 ハニカムの有無と  $F_{DO}$  の関係

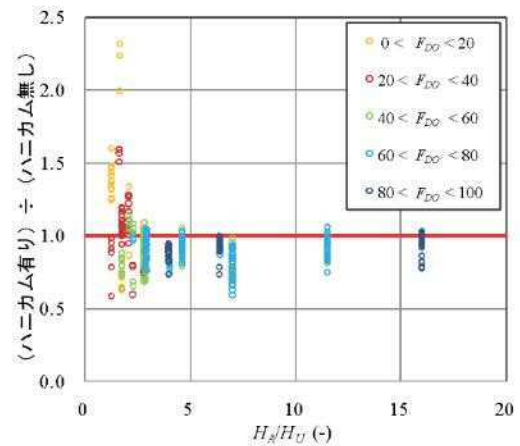


図-11  $F_{DO}$  の比と  $H_A/H_U$  の関係

(2) 換算酸素溶解能力:  $F_{DO}$

ここでは、装置の酸素溶解能力を表すパラメータとして、処理水流量  $Q_w$  と換算  $\Delta DO$  との積で与えられる換算酸素溶解能力  $F_{DO}(\text{mg}/\text{min})$  を用いる。これは、仮に  $DO$  濃度がゼロの水を  $DO$  改善処理した時に単位時間に水に溶解すると想定される酸素の質量を表わす。以下では、換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  と諸量の関係を考察し、高能力の条件を検討する。

a) ハニカムによる影響

図-10 は全ての実験条件に対して換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  をハニカムの有無で比較してプロットしたものであり、プロットが対角線より上にある場合はハニカムが有る方が有利、対角線より下にある場合はハニカムが無い方が有利なことを表している。図より、換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  が  $50(\text{mg}/\text{min})$  程度以下の範囲にハニカムが有る場合の方が有利な条件が存在しているが、全体的にハニカムが無い場合の方が有利であることがわかる。

b) 処理水流量  $Q_w$  と換算  $\Delta DO$  による影響

第 4 章(1)節で述べたとおり、処理水流量  $Q_w$  はハニカムが無い方が有利であり、換算  $\Delta DO$  はハニカムが有る方が有利であるが、図-10 よりこの 2 つのパラメータの積である換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  はハニカムが無い方が有利であることから、本実験の範囲では換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  は処理水流量  $Q_w$  の影響をより強く受けており、換算  $\Delta DO$  による影響は小さいと考えられる。

c) 水平管内底高さ  $H_U$  とエアストーン深度  $H_A$  との関係

図-11 は全ての実験条件に対してハニカムが有る場合と無い場合の換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  の比とパラメータ  $H_A/H_U$  の関係を  $F_{DO}$  の範囲毎にプロットしたものである。図の縦軸が 1 より大きい範囲にあるプロットはハニカムが有る方が有利であることを示している。そして、図-11 を視覚的に捉えやすくするために換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  の範囲ごとに色分けしたものが図-12 である。この図より、換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  が大きい値(約  $60 \sim 100(\text{mg}/\text{min})$ )を示すのはパラメータ  $H_A/H_U$  が約 3 より大きい

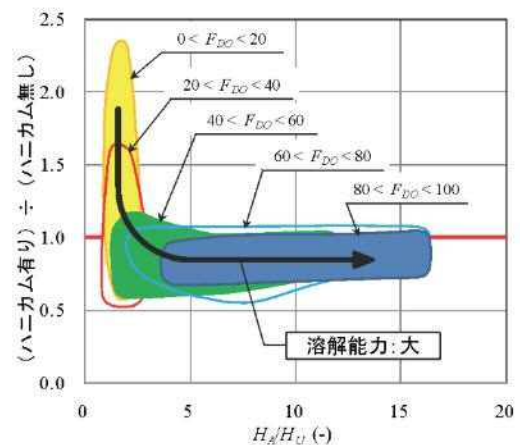


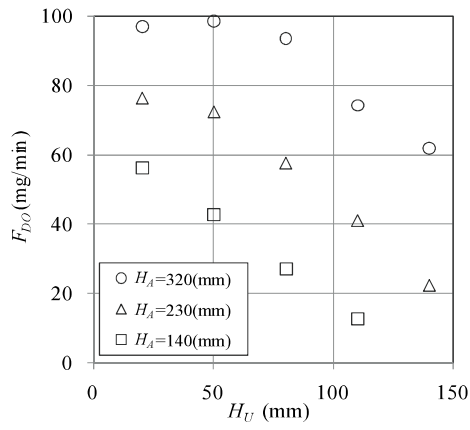
図-12  $F_{DO}$  の比と  $H_A/H_U$  の値の範囲

範囲であり、この範囲ではハニカムが無い方が有利である。逆に、換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  が小さい値(約  $0 \sim 40(\text{mg}/\text{min})$ )を示すのはパラメータ  $H_A/H_U$  が約 3 より小さい範囲であり、この範囲にはハニカムがある方が有利な条件が存在している。ここで、実用上重要な換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  が大きい範囲ではハニカムは不必要であることから、以降の考察ではハニカムを考慮しないものとする。

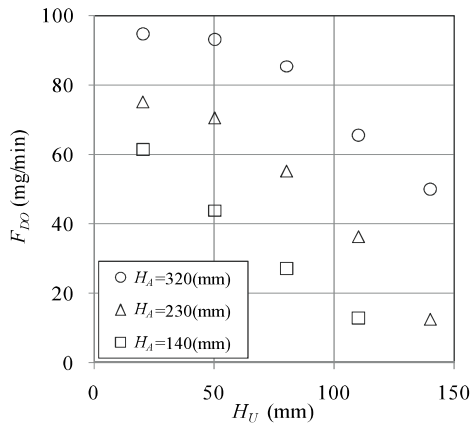
図-13 は水平管内底高さ  $H_U$  と換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  の関係を種々の空気流量  $Q_g$  についてエアストーン深度  $H_A$  ごとに示したグラフである。図より、換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  はエアストーン深度  $H_A$  が深く水平管内底高さ  $H_U$  が低いほど大きいことがわかる。これは、図-12 から得られた結果、すなわち、パラメータ  $H_A/H_U$  が大きい範囲で換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  が大きいことと対応している。

d) 換算  $\Delta DO$  と空気流量  $Q_g$  の関係

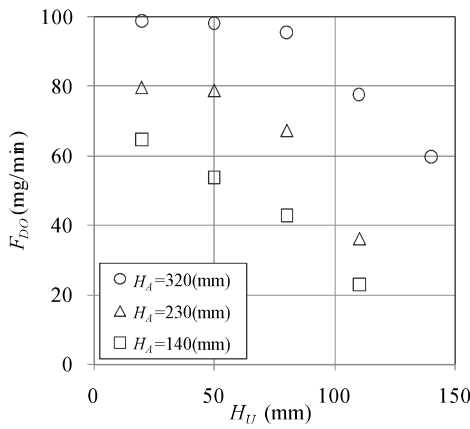
図-14 はパラメータ  $H_A/H_U$  と換算  $\Delta DO$  の関係を空気流量  $Q_g$  毎に示したグラフである。図より、パラメータ  $H_A/H_U$  が大きくなるに従って換算  $\Delta DO$  は小さくなるが、空気流量  $Q_g$  による差は小さいことがわかる。つまり、換算  $\Delta DO$  はパラメータ  $H_A/H_U$  に大きく依存しており、空気流量  $Q_g$  による影響は小さい。ただし、b) で述べたように、換算  $\Delta DO$  が換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  に与える影響は小さい。



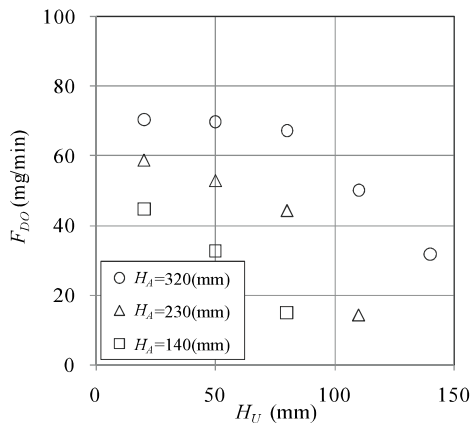
(a)  $Q_g=40(\text{L/min})$



(b)  $Q_g=30(\text{L/min})$



(c)  $Q_g=20(\text{L/min})$



(d)  $Q_g=10(\text{L/min})$

図-13  $H_U$ と $F_{DO}$ の関係

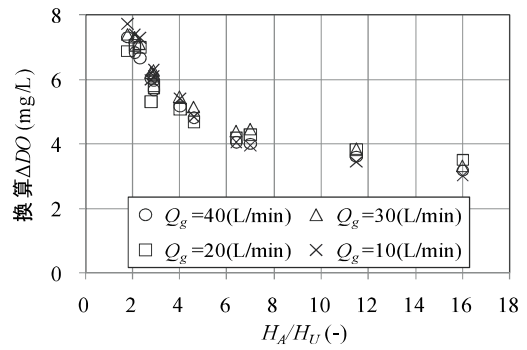


図-14  $H_A/H_U$ と換算 $\Delta DO$ の関係

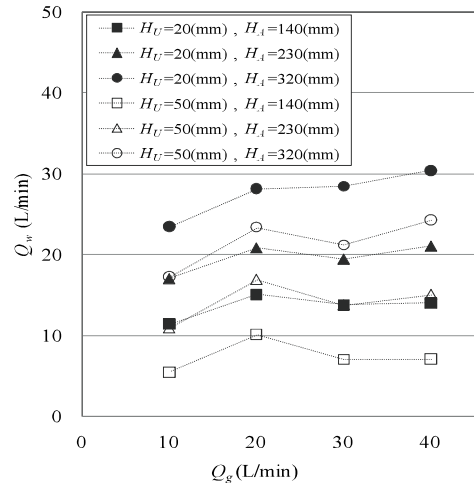


図-15  $Q_g$ と $Q_w$ の関係

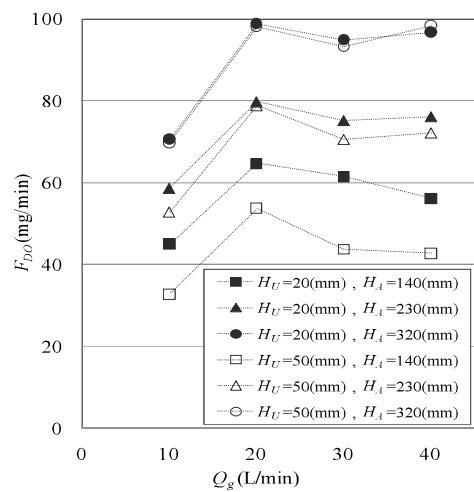


図-16  $Q_g$ と $F_{DO}$ の関係

e) 処理水流量  $Q_w$  および換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  と空気流量  $Q_g$  の関係

図-15 および図-16 はそれぞれ空気流量  $Q_g$  と処理水流量  $Q_w$  の関係および空気流量  $Q_g$  と換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  の関係を水平管内底高さ  $H_U$  とエアストーン深度  $H_A$  の組み合わせごとに示したグラフの一例である。これらの図より、処理水流量  $Q_w$  と換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  は空気流量  $Q_g=10\sim 20(\text{L/min})$  の範囲では  $Q_g$  の増加と共に増大するが、空気流量  $Q_g=20\sim 40(\text{L/min})$  の範囲では  $Q_g$  が増加してもほぼ一定、もしくは緩やかに減少しており、その値は水平管内底高さ  $H_U$  が低いほど、エアストーン深度  $H_A$  が



深いほど大きいことがわかる。すなわち、処理水流量  $Q_w$  と換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  は空気流量  $Q_g=20(\text{L}/\text{min})$  の時に最大値を示し、その数値は前述のパラメータ  $H_A/H_U$  が大きいほど大きい。なお、この傾向は他の水平管内底高さ  $H_U$  の条件においても同様に認められた。

#### f) 流動状態との関係

処理水流量  $Q_w$  と空気流量  $Q_g$  の関係について e) で述べたが、その傾向には管内を流れる気液二相流の流動状態が関与していると思われる。

柘植・海野<sup>19)</sup>によると、常圧下での標準型気泡塔内の気液二相流の流動状態は図-17 に示すように塔径が 10(cm) 以下の場合には、空気流量の増加とともに、ほぼ均一な径の気泡が合体や分裂をおこさず、ほぼ一様に分布して塔内を上昇する均一気泡流動域から塔径程度の大きさの気泡(スラグ)が塔内を上昇するスラグ流動域に変化する。そして、塔径が 15(cm) 以上の場合には、均一気泡流動域から空気流量の増加とともに気泡の合体や分裂が頻繁に起こり、その結果生成する大気泡が塔中心部を上昇し、塔径規模の循環流が生成する不均一気泡流動域へと変化するとしている。なお、原著では気泡の「合一・分裂」と表記しているがここでは表現を少し変えている。また、図に示すように均一気泡流動域からスラグ流動域および不均一気泡流動域に変化する途中の流動状態を遷移流動としている。つまり、気泡の流動状態は塔径、すなわち管内径  $D$  と空気流量  $Q_g$  によって決まる。そこで、本実験と照合して検討する。本実験では管内径  $D=5(\text{cm})$  であるから、図-17 によると管内の気液二相流の流動状態は、空気流量  $Q_g$  の増加にともない均一気泡流動、遷移流動、スラグ流動へと変化する。図-17 のガス空塔速度  $U_G$  はホットワイヤーを用いて計測しているが、本実験では空気流量  $Q_g=10, 20, 30, 40(\text{L}/\text{min})$  の場合のそれぞれの流動状態を、管内のエアストーンから水面までの間において目視によって判別した。その結果、空気流量  $Q_g=10\sim 20(\text{L}/\text{min})$  では均一気泡流動、空気流量  $Q_g=20\sim 40(\text{L}/\text{min})$  では遷移流動であることが確認された。遷移流動では、小気泡群に交じってスラグほどではないが大きな気泡が時折上昇する様子が確認された。この結果および図-15 と図-16 より、処理水流量  $Q_w$  と換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  は、流動状態が均一気泡流動の範囲( $Q_g=10\sim 20(\text{L}/\text{min})$ )では空気流量  $Q_g$  の増加と共に増大するが、遷移流動の範囲( $Q_g=20\sim 40(\text{L}/\text{min})$ )では空気流量  $Q_g$  が増加しても増大しないことが確認される。すなわち、処理水流量  $Q_w$  と換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  は管内の気液二相流の流動状態に影響される。なお、この傾向は他の水平管内底高さ  $H_U$  の条件においても認められた。

以上、a)~f)より、本実験の範囲における換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  と諸量の関係、高い能力で稼働する条件は次のとおりである。

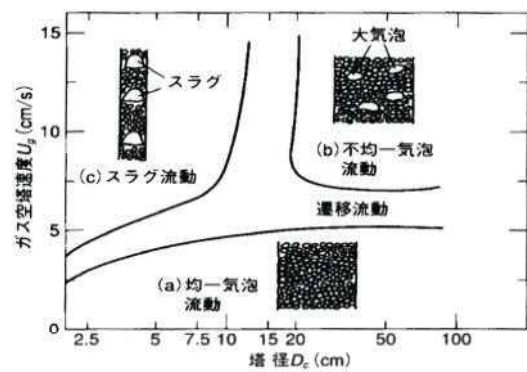


図-17 標準型気泡塔内の流動状態<sup>19)</sup>

1. 高能力の範囲ではハニカムは不必要である。
2. 換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  は処理水流量  $Q_w$  に大きく影響され、換算  $\Delta DO$  の影響は小さい。
3. エアストーン深度  $H_A$  が深く水平管内底高さ  $H_U$  が低いほど酸素溶解能力が高い。本実験の範囲では、 $H_A=320(\text{mm})$ 、 $H_U=20(\text{mm})$  の場合に最大の酸素溶解能力  $F_{DO}$  を示した。
4. 均一気泡流動として最大の処理水流量  $Q_w$  を生じさせる空気流量  $Q_g=20(\text{L}/\text{min})$  の場合に最大の酸素溶解能力  $F_{DO}$  を示す。

#### (3) エネルギー効率(対仕事率 換算酸素溶解能力) : $R_{DO}$

エネルギー効率の評価は、単位仕事率当たりの換算酸素溶解能力( $\text{mg}/\text{min}/\text{W}$ )を用いて行う。なお、ここでのエネルギー効率は( $\text{mg}/\text{min}/\text{W}$ )で評価しているが、 $J=W \times s$  の関係からこれは投入したエネルギー当たりの酸素溶解量(例えば( $\text{mgO}_2/\text{J}$ ))を単位時間で評価したことになる。ここではこれを対仕事率換算酸素溶解能力  $R_{DO}$  と呼び、式(10)のように表現される。

$$R_{DO} = \frac{F_{DO}}{P} \quad (10)$$

ここで、 $P$  は仕事率であり、水の単位重量  $w$ 、エアストーン深度  $H_A$ 、空気流量  $Q_g$  を用いて  $P=wH_AQ_g$  で評価する。本節では、エネルギー効率  $R_{DO}$  が高い稼働条件について検討する。なお、第 4 章(2)節において、換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  が高い範囲ではハニカムは不必要であることが確認されたため、本節ではハニカム無しの条件で検討を行う。図-18 は水平管内底高さ  $H_U$  とエネルギー効率  $R_{DO}$  の関係を、種々の空気流量  $Q_g$  についてエアストーン深度  $H_A$  ごとに示したグラフである。図より、水平管内底高さ  $H_U$  が低いほどエネルギー効率  $R_{DO}$  が高いことがわかる。そして、水平管内底高さ  $H_U$  が約 50(mm) 以下の範囲ではエアストーン深度  $H_A$  が浅いほどエネルギー効率が大きく、 $H_U$  が約 50(mm) 以上の範囲では  $H_A$  が深いほどエネルギー効率  $R_{DO}$  が高いことがわかる。このように、高いエネルギー効率  $R_{DO}$  を示すエアストーン深度  $H_A$  の大小関係が水平管内底高さ  $H_U$  が約 50(mm) を境に逆転している事情について検討する。前述のように、エネルギー

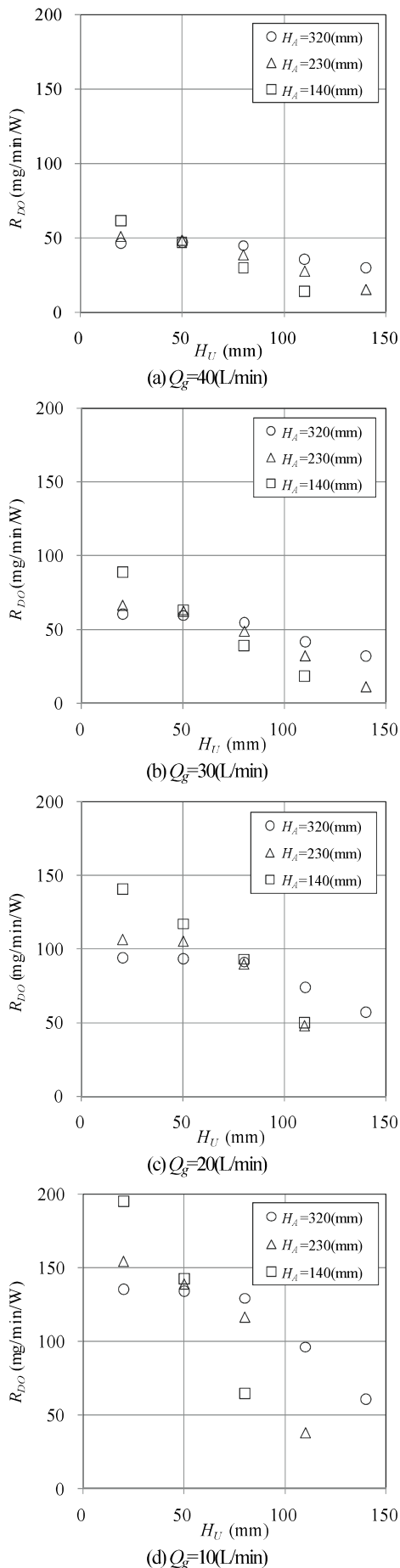


図-18  $H_U$ と $R_{D0}$ の関係[エアストーン深度 $H_A$ 別]

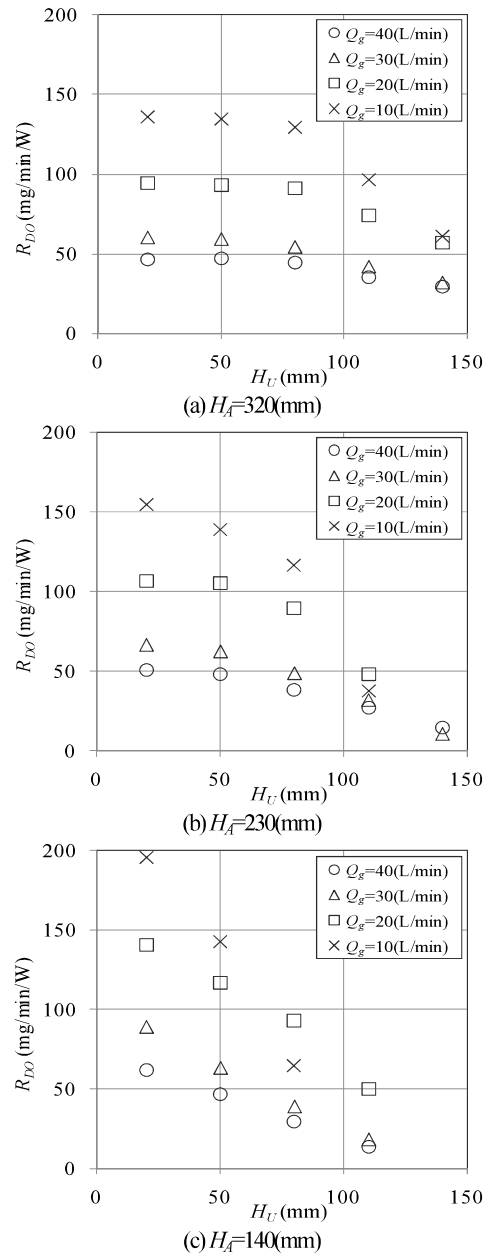


図-19  $H_U$ と $R_{D0}$ の関係[空気流量 $Q_g$ 別]

効率  $R_{D0}$ は式(10)のように表現されるが、図-18のグラフの場合、凡例の系列ごとにエアストーン深度  $H_A$ 、空気流量  $Q_g$ は一定であるから式(10)の右辺の分母の仕事率  $P$ も凡例の系列ごとに一定である。したがって、エネルギー効率  $R_{D0}$ が示す傾向は分子の換算酸素溶解能力  $F_{D0}$ の傾向と対応する。また、前掲の図-13より、換算酸素溶解能力  $F_{D0}$ は全体的には水平管内底高さ  $H_U$ の増加とともに減少するが、 $H_U$ が約 50(mm)以下でエアストーン深度  $H_A$ が深い条件ではほぼ一定となる傾向がある。このため、図-18のプロットの傾向が水平管内底高さ  $H_U = 50 \sim 80$ (mm)を境に変わっている。

図-19は水平管内底高さ  $H_U$ とエネルギー効率  $R_{D0}$ の関係を空気流量  $Q_g$ ごとに示したグラフである。図より、水平管内底高さ  $H_U$ が低いほど、そして、空気流量  $Q_g$ が少ないほどエネルギー効率  $R_{D0}$ が高いことがわかる。

次に、エアストーン深度 $H_A$ の効果を示す。図-20は、空気流量 $Q_g=20(L/min)$ の場合の換算 $\Delta DO$ 、処理水流量 $Q_w$ 、換算酸素溶解能力 $F_{DO}$ 、エネルギー効率 $R_{DO}$ をエアストーン深度 $H_A$ に対して示している。なお、水平管内底高さ $H_U=140(mm)$ の条件では、エアストーン深度 $H_A=120, 230(mm)$ の場合には処理対象水がh型管を越流せず処理不能であったため、 $H_A=320(mm)$ の場合のみプロットしている。図より、水平管内底高さ $H_U$ が20(mm)、50(mm)と低い場合はエアストーン深度 $H_A$ が増大するにつれて換算 $\Delta DO$ は減少し、処理水流量 $Q_w$ が増加するが、 $H_A$ による換算 $\Delta DO$ の相対的变化に比べて $Q_w$ の変化が大きいいため、換算酸素溶解能力 $F_{DO}$ は $H_A$ と共に増大することがわかる。エネルギー効率 $R_{DO}$ の変化は換算酸素溶解能力 $F_{DO}$ の相対的变化が仕事率(式(2))の相対的变化より小さいことを反映し、エアストーン深度 $H_A$ の増加と共に減少する傾向が認められる。水平管内底高さ $H_U$ が80(mm)以上の条件では、換算 $\Delta DO$ 、処理水流量 $Q_w$ 、換算酸素溶解能力 $F_{DO}$ のエアストーン深度 $H_A$ による変化は上記と同様であるが、換算酸素溶解能力 $F_{DO}$ の相対変化と必要仕事率の相対変化の大小関係が上記と逆になり、その場合はエネルギー効率 $R_{DO}$ がエアストーン深度 $H_A$ と共に増大する。

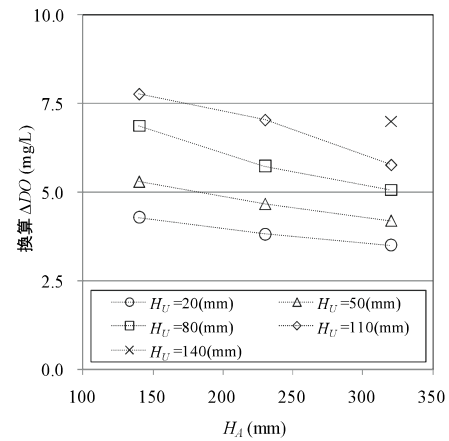
以上より、本提案の装置におけるエネルギー効率  $R_{DO}$  が高い稼働条件は次のとおりである。

1. 水平管内底高さ  $H_U$  が低く、空気流量  $Q_g$  が小さい。
2. エアストーン深度  $H_A$  が浅い。ただし、水平管内底高さ  $H_U$  が約 80(mm)以上の範囲ではエアストーン深度  $H_A$  が深いほどエネルギー効率が高い。

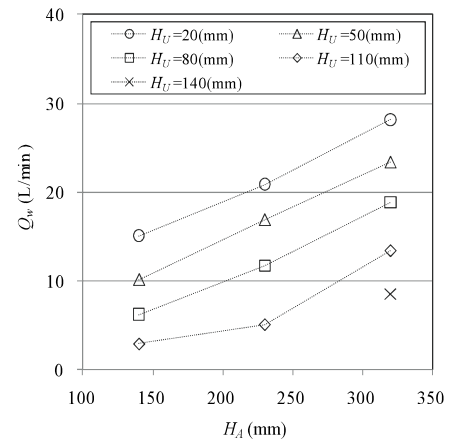
### 5. 結語

以上、著者らが開発中の管内曝気による液膜式気体溶解技術を利用した h 型気体溶解装置の稼働の概要を述べ、その酸素溶解性能に関する実験の結果を報告するとともに、その性状に関する検討を行なった。本研究で得られた主要な知見は以下のようである。

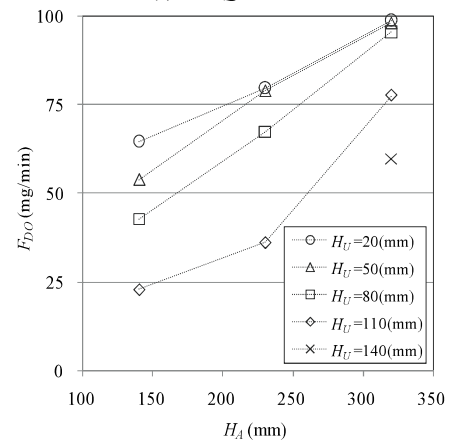
1. ハニカムが処理水流量  $Q_w$  および換算  $\Delta DO$  に与える影響について考察した。ハニカムの有無による換算  $\Delta DO$  の違いは、ハニカムの有無による処理水流量  $Q_w$  の違いにより決まる。すなわち、処理水流量  $Q_w$  が小さいほど換算  $\Delta DO$  は大きくなる。水平管内底高さ  $H_U$  が高い条件では、処理水流量  $Q_w$  はハニカムが有る方が摩擦損失が小さいため大きく、換算  $\Delta DO$  は小さい。また、水平管内底高さ  $H_U$  が低い条件では、処理水流量  $Q_w$  はハニカムが無い方が摩擦損失が小さいため大きく、換算  $\Delta DO$  は小さい。なお、第 4 章 (1) 節 a) で述べたように、実験時の目視により、連続



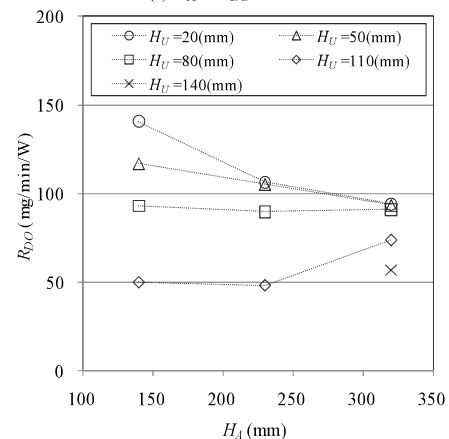
(a)  $H_A$  と換算  $\Delta DO$  の関係



(b)  $H_A$  と  $Q_w$  の関係



(c)  $H_A$  と  $F_{DO}$  の関係



(d)  $H_A$  と  $R_{DO}$  の関係

図-20  $H_A$  による諸量の変化 [ $Q_g=20(L/min)$ ]

して気泡が上昇しているセルの隣のセル内では気泡が上昇しない、もしくは下降する現象が確認された。

2. 換算  $\Delta DO$  と処理水流量  $Q_w$  の積で定義される換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  と諸量の関係を考察した。その結果、高能力の範囲ではハニカムは不必要で、換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  は処理水流量  $Q_w$  に大きく影響され、換算  $\Delta DO$  の影響は小さい。エアストーン深度  $H_A$  が深く水平管内底高さ  $H_U$  が低いほど換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  が高く、均一気泡流動として最大の処理水流量  $Q_w$  を発生させることができる空気流量  $Q_g=20(L/min)$  の場合に最大の換算酸素溶解能力  $F_{DO}$  を示すことなどがわかった。
3. 式(10)で定義される酸素溶解のエネルギー効率が低い稼働条件について検討した。その結果、図-18 に示すように、水平管内底高さ  $H_U$  が低く、エアストーン深度  $H_A$  が浅い場合にエネルギー効率が低いことがわかった。ただし、酸素溶解能力  $F_{DO}$  の小さい水平管内底高さ  $H_U$  が約 80(mm)以上の範囲ではエアストーン深度  $H_A$  が深いほどエネルギー効率が低い。また、図-19 に示すように、空気流量  $Q_g$  が少ないほどエネルギー効率が低いことがわかった。

本文中で述べたように、本方式では気泡と共に上昇した水はハニカム上端部でいったん気泡集合体の液膜の構成要素となり、気相・液相間での気体成分の交換は液相内の気体濃度を大気圧下での飽和濃度に近づけるように行われる。そして、酸素溶解処理すべき水を気泡集合体の構成要素に変換するため、気相・液相間の気体成分の交換が効率的に行われる。

今後は、酸素以外の気体を高濃度に溶解した水の処理に対して基礎的実験を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) Kawai, A. and Maeda, H.: Oxygen consumption in the bottom water with the production of sulfides in the bottom sediments, *Nippon Suisan Gakkaishi*, Vol.50, pp.119-124, 1984.
- 2) 松本治彦, 城田久岳, 羽田野袈裟義, 齊藤隆: 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, 齊藤敦: 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) 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.
- 5) 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.
- 6) 鯉淵幸生 他: 微細気泡の最新技術, NTS, pp.161-184, 2006.
- 7) 特許公開 2003-112023: 気体溶解装置, 日本国特許庁, 2003.
- 8) 特許公開 2001-120970: 水圧を利用した酸素溶解方法, 日本国特許庁, 2001.
- 9) 特許公開 2000-189774: 気体溶解装置, 日本国特許庁, 2000.
- 10) 特許公開 2003-190750: 気体溶解装置, 日本国特許庁, 2003.
- 11) 羽田野袈裟義, 馬駿, 今井剛, 藤里哲彦: 溶存気体を利用する環境改善, 土木学会誌, 第 91 巻, 第 11 号, pp.78-79, 2006.
- 12) 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 G, Vol.63, No.1, pp.1-11, 2007.
- 13) 日本化学会: 改訂 3 版 化学便覧 基礎編 II, 丸善, p.158, 1984.
- 14) (財)日本規格協会: JIS ハンドブック 53 環境測定 II 水質, p.781, 2008.
- 15) Fischer, H. B., List, J. E., Koh, R. C. Y., Imberger, J. and Brooks, N. H.: *MIXING in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, pp.319-333, 1979.
- 16) (社)土木学会: 水理公式集, 技報堂出版, p.25, 1985.
- 17) 馬駿: 液膜を利用する気体溶解技術に関する基礎的研究, 山口大学博士論文, 2008.
- 18) 合田健: 水質環境科学, 丸善, p.207, 1985.
- 19) 柘植秀樹, 海野肇: 『泡』技術, 工業調査会, pp.81-82, 2004.

(2009. 8. 26 受付)

EVALUATION OF THE *DO* IMPROVEMENT PERFORMANCE OF THE  
TECHNIQUE OF MAKING THE WATER MEMBRANE BY AERATION IN A PIPEKyo OHGI, Jun MA, Kesayoshi HADANO, Koji ASAI, Yoichi NAKANO,  
Tetsuhiko FUJISATO, Yuki FUKUMOTO and Toshio HARADA

This paper gives the results of the laboratory experiments on the *DO* improvement technique for the water of natural surroundings such as lake or sea. This technique forms bubble cluster on the water surface in a h-shaped pipe by aerating water to be treated introduced into the pipe. The bubble cluster has high rate of gases exchange between gas and liquid phases due to the high gradient of *DO* concentration in the liquid phase of water film of bubble. Evaluation of the *DO* improvement is done by using the equivalent *DO* increment devised to eliminate the influence of the *DO* concentration of the water before treatment. Performance of the device has been investigated by the quantity of oxygen dissolution flux evaluated by the product of the equivalent *DO* increment and the rate of the water treatment, and the ratio of this flux to the power required for aeration. Present experiment showed that the good condition for oxygen dissolution is accomplished at some optimum flow rate of air for aeration, that the elevation of the horizontal part of h-shaped pipe above the outer water surface should be as low as possible, and that the energy efficiency becomes high as the flow rate of air is low.