

# エアレーションによるDO増加過程に 気泡径および水質が及ぼす影響の研究

## INFLUENCE OF BUBBLE DIAMETER AND WATER QUALITY ON DISSOLVED OXYGEN TRANSFER DUE TO AERATION

木俣陽一<sup>1</sup>・京藤敏達<sup>2</sup>・歌川紀之<sup>3</sup>

Yoichi KIMATA, Harumichi KYOTOH and Noriyuki UTAGAWA

<sup>1</sup>正会員 若築建設株式会社 (〒153-0064 東京都目黒区下目黒2-23-18)

<sup>2</sup>正会員 工博 筑波大学助教授 システム情報工学研究科 (〒305-873 茨城県つくば市天王台1-1-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 佐藤工業株式会社 (〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山14-10)

At the aqua-area with water pollution, the improvement of the water environment has been attempted by increasing the dissolved oxygen (DO) in terms of various ventilations. In the present study, an efficient method for aeration was investigated through the aeration experiments carried out in tap water, pond water and salt water, where the DO, the pH, and the redox potential were measured and examined. The DO-increase experiments for pond water showed that the efficiency of aeration strongly depends on the water quality. As the ventilation increases, the pH increases in the air-stone and the single micro-bubble generator for tap and pond water, but in the series micro-bubble generator it increases initially and decreases later. The ORP of tap water increases initially and decreases later, and that of pond-water decreases strongly. Moreover, an increase of the dissolved oxygen of pure water by aeration is evaluated it by the numerical analysis.

**Key Words :** *aeration, micro-bubbles, bubble diameter, dissolved oxygen, Henry's law, water quality, aerators structure*

### 1. はじめに

水質が汚濁した水域では、人間活動に起因した流入負荷が水域の持つ自浄能力を超え、底層付近では溶存酸素(以下、DO)が消費され貧酸素状態を呈している。このような水域は、流入負荷が軽減されても自浄能力のポテンシャルが低下しており、水質の回復には多くの時間を要する。効率的な水質浄化には、低下した自浄能力を回復させることが重要であり、ひとつの手法として曝気によるDOの増加が図られている。曝気によるDOの上昇を図る上で考慮すべき要因は、水深、躍層および水質であり、効率的な曝気にはこれらの状況を把握した適切な気体の選定、気泡径や気体流量の設定が必要である。また、微小気泡による水域環境改善の効果が注目され、泡沫浮上分離、DOの上昇、洗浄効果や生物活性の向上に対し多くの研究がなされてきた<sup>1),2)</sup>。しかし、DOの上昇については、気泡径がDO上昇に及ぼす効果を定量的に検証した研究例は少ないのが現状である。

本研究は、曝気をおこなう上で必要となる水域に応じた空気量や気泡径を設定するための基礎資料の取得を目

的に、水質が異なる水を用いた水槽試験によりO<sub>2</sub>供給量に対するDO増加量および水質変化を調査した。また、DOの増加が気泡径をパラメータとした数値解析により、評価可能であるか、実験シミュレーションを実施することにより検証した。

### 2. 曝気試験方法

#### (1) 水質によるDOの増加(CASE-A, B)

##### a) 試験装置

試験は、図-1に示すアクリル製円筒水槽(φ23cm×H50cm)を用い、試験水を水深40cm(水量:16.6L)まで注水して行った。水中への給気は、循環水の放出口に縮流部、直管部および急拡部からなる図-2に示す直径13mmの旋回流式マイクロバブル発生装置(以下、MB発生装置)<sup>3)</sup>を用いて10mL/minの純酸素(酸素ポンプ)を微細気泡として供給した。なお、純酸素は、循環水管路の途中から注入し、陸上ポンプ(Ebara Pump 揚程 5.2m, 100V, 180W)で試験水を6L/minで循環させた。

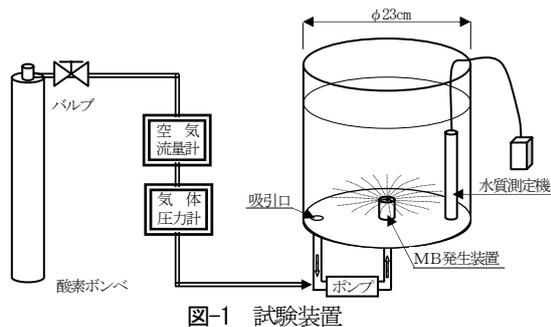


図-1 試験装置

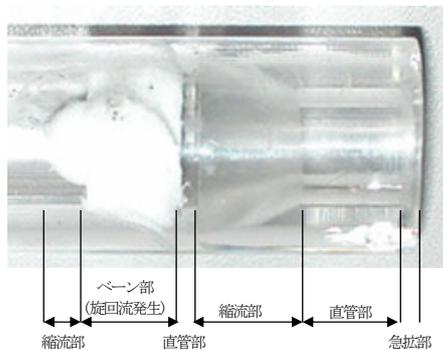


図-2 旋回流式マイクロバブル発生装置

表-1 試験水

CASE	水質	備考
A1	水道水	試験直前に採取
A2	純水	共栄製薬(株)製
A3	蒸留水	和光純薬工業(株)製
A4	池水	筑波大内の池より採取
B1	水道水	試験直前に採取
B2-1	池水	筑波大学内の池より採取
B2-2		霞ヶ浦(掛馬沖)より採取
B2-3		霞ヶ浦(土浦沖)より採取
B3-1	食塩水	水道水に食塩を1%添加
B3-2		水道水に食塩を2%添加

## b) 試験水

水中での気体の溶解速度は、気体の表面積、水との接触時間、水の温度および塩分濃度などが影響することが知られている。このため、池水などの浮遊物質を含む水は、気体の表面に浮遊物質が付着し有効表面積を減少させ、気泡の溶解速度を低下させる。言い換えれば、不純物が含まれない清澄な水は、気泡の溶解速度が速く、気体の溶解量の増加が容易であるといえる。

試験は水質が気体の溶解速度に与える影響の把握を目的に、CASE-Aでは清澄水の水質、CASE-Bでは含有物質の濃度に観点を置き、表-1に示す試験水を用いた。

## c) 水質測定

水質の変化は、水槽内に投げ込み式のセンサープローブを設置し、水温、DO、pH、酸化還元電位（以下、ORP）を連続的に測定した。なお、酸素の供給は、測定機の性能よりDOが20mg/Lまでとした。また、センサープローブは気泡の付着を抑制するために間欠的に水槽内で振動を加えた。

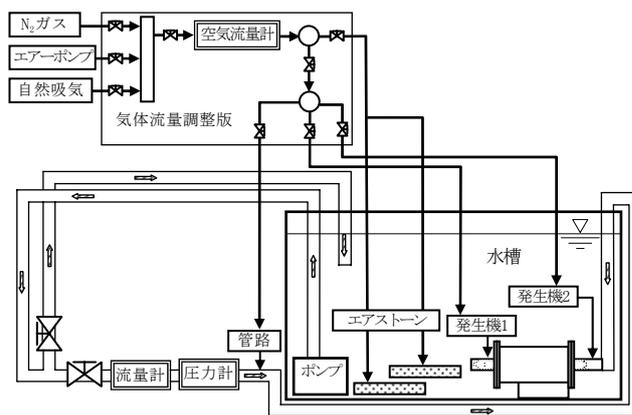
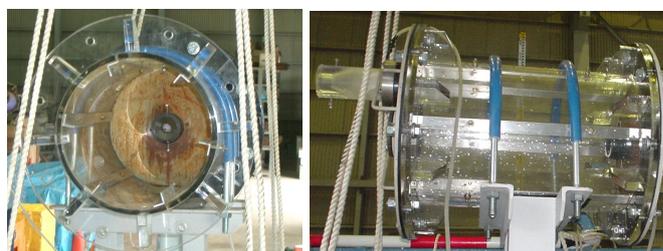


図-3 試験装置

表-2 試験パラメータ

CASE	給気装置	空気量	備考
C1	エアストーン	15.0L/min	
C2	MB発生装置単独	1.0L/min	循環水量の1%添加
C3	MB発生装置連結	1.0L/min	〃



(a) MB発生装置単独 (b) MB発生装置連結

図-4 発生装置

## (2) 気泡径によるDO増加量の確認 (CASE-C)

### a) 試験装置

試験は、図-3に示す鋼製角形水槽（L3.3m×B1.7m×H1.8m）に水道水を水深1.6m（水量：9.0m<sup>3</sup>）まで注水して行った。給気装置は、エアストーン（セラミック製、気孔径：平均15μm）と実機を想定し2章(1)節で使用したMB発生装置（図-2参照）をφ5.0cmに大型化したものを用いた。給気装置の設置水深は、エアストーンは水深1.6mに、MB発生装置は給気位置の中心部が水深1.1mの位置とした。MB発生装置による給気は、高揚程水中ポンプ（鶴見ポンプ：KTV-37H 口径2インチ、全揚程30m）を接続した管路の途中に空気を注入し、MB発生措置により微小気泡を発生させた。なお、本ポンプにより水槽内で、100L/minの水が循環する。

### b) 試験パラメータ

給気装置により発生した気泡の径（表面積）が、DOの増加に影響を与えるため、発生する気泡径が異なると考えた3種類の発生装置（図-4参照）を用いた。なお、MB発生装置では、給気量が流量の0.5%で半径50μm、1%で100μmの気泡が多く生成されることが確認されている。給気装置毎の空気添加量は、表-2に示す量に設定した。

### c) 試験方法

発生機の効率、水中に曝気した空気によるDOの上昇

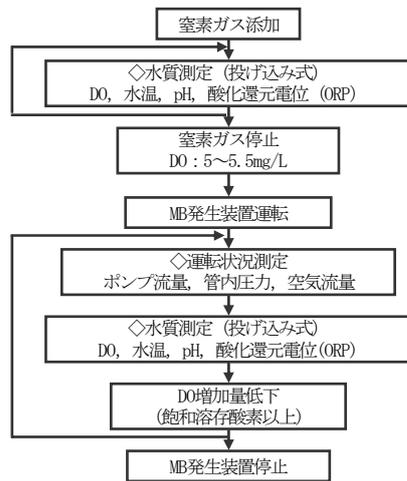


図-5 試験フロー

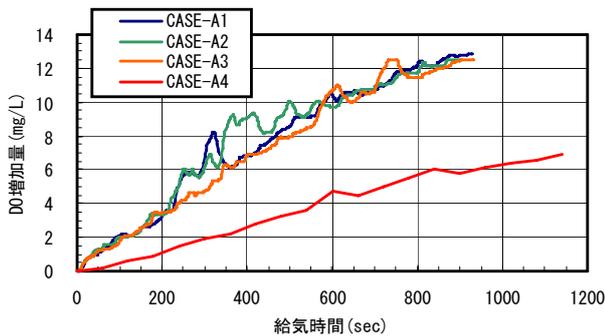


図-6 給気時間とDO増加量 (CASE-A: 清澄水)

量で判定した。試験は図-5に示すフローで実施した。なお、3種類の発生装置による水質の変化の測定は、空気の供給前に水槽内に窒素ガスをエアストーンから供給し、DOを5~5.5mg/Lまで低下させた状態から開始した。水質の測定は、水槽内に投げ込み式のセンサープローブを水深0.8mの位置に設置し、水温、DO、pH、ORPを連続的に測定した。なお、気泡の付着は、間欠的にセンサープローブへ振動を加えたことで抑止した。

### 3. 曝気試験結果

#### (1) 清澄水の質の違いによるDOの増加 (CASE-A)

清澄水 (水道水、純水および蒸留水) に一定量で酸素を供給した時の給気時間とDO増加量の関係を図-6に示す。DOの増加量で比較したのは、試験毎の初期DOが異なったためである。池水は清澄水との比較のために用いた。

DOは、いずれの水も給気時間に対して直線的な増加を示し、三つの清澄水はほぼ同じDO増加勾配となったが、池水のDO増加勾配は清澄水の約半分であった。また、気泡発生時の水槽内は、清澄水はわずかに白濁した程度であったが、池水は背面が透視できないほどであった。これは、今回の気泡径では、池水では気泡に不純物が付着し、気泡が残留し溶解速度が低下したことを示している。

給気時間と水質 (pH、ORP) の変化を図-7に示す。pH

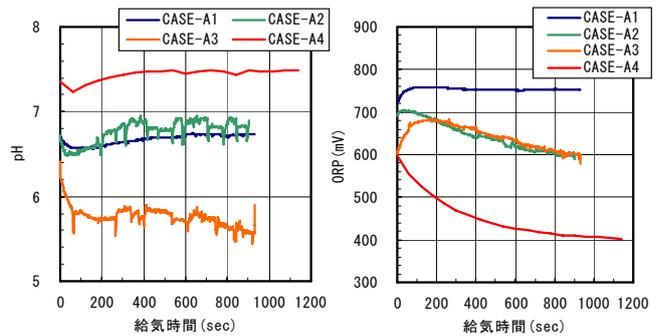


図-7 給気時間と水質変化 (CASE-A: 清澄水)

表-3 池水の性状

CASE	濁度	pH	ORP (mV)	備考
B2-1	2.7	9.83	510	学内池採取
B2-2	23.5	7.79	459	霞ヶ浦採取
B2-3	15.7	7.69	439	〃

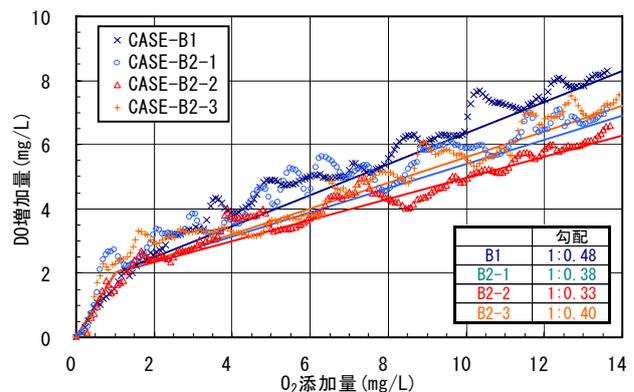


図-8 O<sub>2</sub>添加量とDO増加量 (CASE-B2: 湖沼水)

は給気量の増加に伴い、蒸留水を除く3種類は増加、蒸留水は低下した。これは、蒸留水の場合、水面から溶け込むCO<sub>2</sub>の影響でpHが低下し、他の三種類の水では試験開始時に溶存したCO<sub>2</sub>が酸素の増加により大気中に排出されpHが増加したと考える。ORPは、水道水、純水と蒸留水、池水で異なる傾向を示した。これは、MB発生装置で負電荷に帯電した気泡の供給と水中の不純物の影響で、水道水は残留塩素による増加、他は水中の微細気泡の増加で低下したと考える。なお、蒸留水の初期ORPの増加はpHの低下と同調しており、CO<sub>2</sub>の増加が原因と言える。

#### (2) 不純物質のDOの増加への影響 (CASE-B2)

##### a) 湖沼水

試験に用いた湖沼水の性状を表-3に示す。なお、池水は強いアンモニア臭がし、pHが高かった。

湖沼水のO<sub>2</sub>添加量とDO増加量の関係を図-8に示す。湖沼水のDOの増加は、不純物の影響で水道水に比べ69~83%と低いものであった。不純物の中で濁り (濁度) に着目すると霞ヶ浦の水 (B2-2、B2-3) は、図-8に示すように濁りの多いB2-2の方がDOの増加勾配が小さいものであった。これは、気泡に濁り物質が付着することで溶解速度が低下したためと考える。また、水質が異なるB2-1とB2-3では濁りの多いB2-3の増加勾配が大きく、DO増加

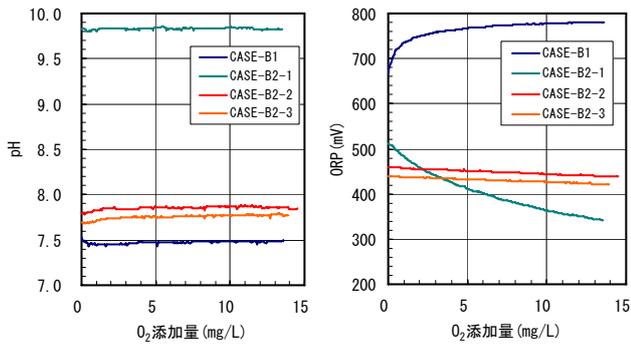


図-9 O<sub>2</sub>添加量と水質変化 (CASE-B2: 湖沼水)

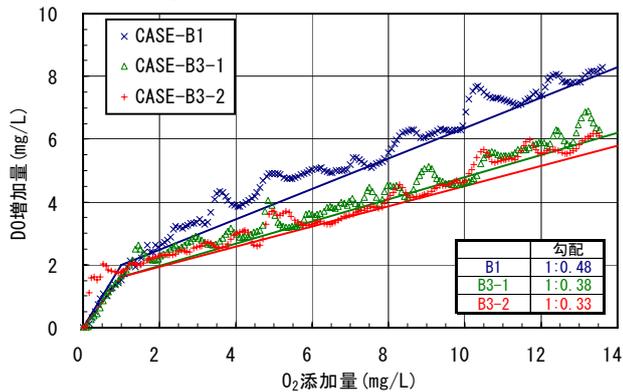


図-10 O<sub>2</sub>添加量とDO増加量 (CASE-B3: 食塩水)

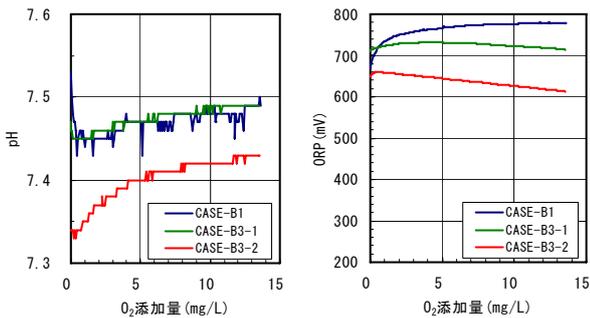


図-11 O<sub>2</sub>添加量と水質変化 (CASE-B3: 食塩水)

には濁り以外の不純物の影響も大きいと言える。

O<sub>2</sub>添加量による水質 (pH, ORP) の変化を図-9に示す。pHはO<sub>2</sub>添加によるDOおよび帯電した微小気泡の増加で微増、ORPはO<sub>2</sub>添加の増加に伴い低下した。また、初期pHが高い池水は150mV以上の低下を示した。これは、試験終了後にアンモニア臭が低下したことより、アンモニアが水中より析出され、ORPが低下したと考える。

### b) 食塩水

O<sub>2</sub>添加量とDO増加量の関係を図-10に示す。食塩水のDOの増加は水道水に比べ低く、塩分濃度の増加により増加勾配は低下した。試験に用いた食塩水は、水道水に食塩を加え1日間放置したもので不純物の含有量は少なく、DOの増加勾配の低下は塩分濃度の増加が影響したと言える。今回の試験は水道水に食塩を溶かした不純物の少ない水を使用した。海域の海水は塩分濃度が試験水より更に高いこと、かつ多くの不純物を含むことより、海域でのDOの増加勾配は更に小さくなるのが予想される。

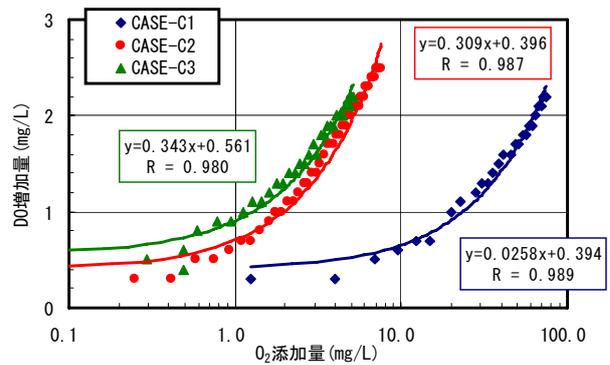


図-12 O<sub>2</sub>添加量とDO増加量 (CASE-C)

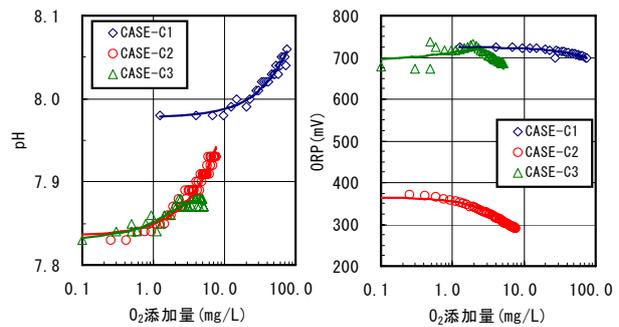


図-13 O<sub>2</sub>添加量と水質変化 (CASE-C)

水質 (pH, ORP) の変化を図-11に示す。pHは、いずれもO<sub>2</sub>添加量の増加に伴いDOおよび帯電した微小気泡の増加により微増した。ORPは、O<sub>2</sub>添加量の増加に伴い一旦上昇した後に低下した。食塩水 (水道水で製作後に1日間放置) は、採取直後の水道水に比べ残留塩素が少なく (ORPの増加量が小さい)、O<sub>2</sub>添加量に伴い増加した負電荷に帯電した微小気泡により低下したと考える。また、塩分濃度が高い2%食塩水では、1%食塩水に比べORPの低下が約40mV多いのは、DOの増加が小さくかつ、微小気泡による白濁が多かったことから、負電荷に帯電した微小気泡の濃度がより高くなったためと言える。

### (3) 気泡径によるDO増加量 (CASE-C)

水道水を用いたMB発生装置によるO<sub>2</sub>添加量とDO増加量の関係を図-12に示す。なお、試験では空気を用いたが、空気中のO<sub>2</sub>分圧からO<sub>2</sub>添加量を算出し示した。

CASE-C2のMB発生装置単独 (以下、MB単独) の場合は、エアストーンより細かな微細気泡を供給することで約12倍のDO増加効果を発揮した。MB発生装置連結 (以下、MB連結) は、最初のMB発生装置で発生した気泡が更にせん断の場を通過することでより細泡化し、MB単独の1.1倍に酸素の溶解速度を向上させた。しかし、MB発生装置で飽和DO値を超えた水は、曝気を停止すると直ぐに飽和DO値以下に低下する傾向を示した。これは、溶解速度が遅い窒素の溶解で、水中での窒素の分圧が高くなったためと考える。

また、実験条件や着目したDOのレンジが異なるが、気体の種類に着目すると、MB単独のDOの増加勾配は純酸素 (CASE-B1) では0.48、空気 (CASE-C2) では0.31であっ

た。空気の給気で純酸素と同じ量のDOを増加させるには、空気中の酸素の分圧を考慮すると7.4倍の空気量の供給が必要であり、空気中の窒素の存在がDOの増加を抑制させていると思われる。このことより、純酸素を用いることはDOの速やかな増加や給気装置の小型化に優位である。O<sub>2</sub>添加量による水質 (pH, ORP) の変化を図-13に示す。なお、MB単独のORPの初期値が小さいのは、2日間静置した水道水を用いたため残留塩素の低下が原因である。O<sub>2</sub>の供給量の増加に伴うpHの変化は、CASE-C2とC3を比較すると、CASE-C2は上昇、CASE-C3は一旦上昇後に低下した。O<sub>2</sub>の供給量の増加に伴うORPは、CASE-C2は低下(残留塩素が低い)、CASE-C3は一旦上昇後低下した。また、供給気体が異なるがCASE-B1のORPは、供給量の増加に伴い増加した。

これらの結果より、MB連結 (CASE-C3) では最初のMB発生装置で発生した微小気泡を再度せん断の場に供給し、気泡の微細化と帯電量の増加という効果を発揮したと考えられる。

#### 4. 気体の溶解を支配する条件

水域におけるDOの上昇には、水深、波や流れ、密度成層などの物理的要因や水質などの生物化学的要因を事前に把握し、それに合った曝気条件、例えば、気体の流量や気泡径、気体の種類を選定する必要がある。

本章では、気体の溶解の理論式を用い、気体の溶解に影響する因子を整理するとともに、その結果を用いて、前章で実施した実験の溶存酸素上昇を予測する。

##### (1) 気体の溶解の基礎方程式

気泡内気体の溶出速度はヘンリーの法則にしたがって次式で算定される<sup>4)</sup>。

$$\frac{dM_j}{dt} = \frac{4\pi R^2 K_L}{H_j} (p_j - p_j) \quad (1)$$

ここで、M<sub>j</sub>は気泡内の気体のモル数、K<sub>L</sub>は気体溶解速度、Rは気泡半径、H<sub>j</sub>はHenry定数である。また、下付き添字 j はOもしくはNであり、それぞれ酸素および窒素を表す。p<sub>j</sub>およびP<sub>j</sub>はそれぞれ気泡内と液体内における気体の分圧である。

気体溶解速度K<sub>L</sub>は、①清澄水などの場合はK<sub>L</sub>=D<sub>j</sub>S<sub>j</sub>/2R、②汚れた水の場合はK<sub>L</sub>=αR : R ≤ R<sub>c</sub>、K<sub>L</sub>=αR<sub>c</sub> : R ≥ R<sub>c</sub>となる。ここで、D<sub>j</sub>は気体の液体内における拡散係数、S<sub>j</sub>はSherwood数、α、R<sub>c</sub>は実験定数である。

清澄水の場合、Sherwood数は気泡周りの液体の流速場から決定され<sup>5)</sup>、

$$S_j = 1 + (1 + Re S_{cj})^{1/3} \quad ; \quad Re < 1 \quad (2)$$

$$S_j = 1 + \left( S_{cj} + \frac{1}{Re} \right)^{1/3} Re^{0.41} \quad ; \quad 1 < Re < 400 \quad (3)$$

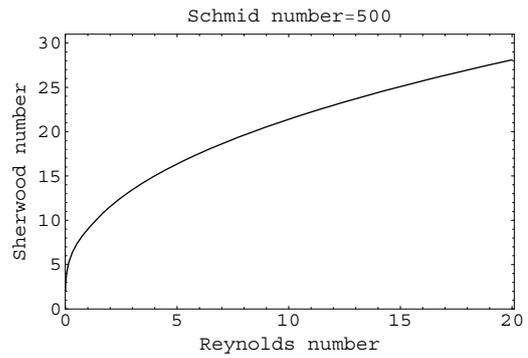


図-14 Sherwood数のReynolds数依存性

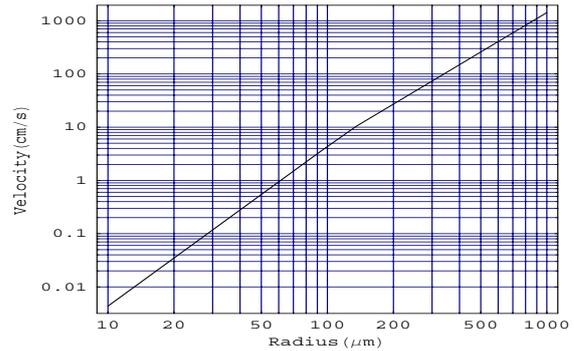


図-15 気泡半径と浮上速度の関係 (R<sub>0</sub>=100 μm)

となる。ここで、R<sub>e</sub>はReynolds数 (R<sub>e</sub> = 2RU/ν)、S<sub>Cj</sub>はSchmid数 (S<sub>Cj</sub> = ν/D<sub>j</sub>)、Uは気泡の上昇速度であり次式で与えられる<sup>5)</sup>。

$$\text{固体球: } U = (2R)^2 \frac{\rho_l g}{18\mu} \quad \text{for } R < R_b \quad (4)$$

$$\text{流体球: } U = \frac{0.38g^{50/61} R^{89/61} \rho_l^{39/61}}{\mu^{39/61}} \quad \text{for } R > R_b \quad (5)$$

また、R<sub>b</sub>は気泡表面の汚れにより気泡が流体球から固体球となる際の気泡径の境界値であり水質に依存する。気泡内部気体の分圧とモル数の関係を式(6)に示す。

$$p_j = C_j (R_l/R)^{3\kappa} M_j \quad (6)$$

指数κは等温変化で1、断熱変化では7/5となる。C<sub>j</sub>は温度に依存する定数である。

最後に、気泡半径はRayleigh-Plessetの方程式<sup>6)</sup>

$$\rho_l \left( R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right) + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu\dot{R}}{R} - (p - P) = 0$$

$$p = p_N + p_o \quad \dots\dots\dots (7)$$

と式(6)を連立することにより計算される。ここでρ<sub>l</sub>は液体密度、σは表面張力係数、μは液体の粘性係数、Pは気泡位置における液体の圧力である。

##### (2) 気体の溶解に関する考察 (①清澄水などの場合)

図-14に式(2)(3)から算定したSherwood数のReynolds数依存性を示す。低Reynolds数域ではSherwood数は2程度であり、Reynolds数の増加に伴ってSherwood数が増加することを示している。気泡径が大きくなると静水中に

おける浮上速度が増大しReynolds数は大きくなり、さらに気体溶解速度は $S_g R$ に比例するため、結果的に大きな気泡の気体溶解速度は大きいことが分かる。

図-15に式(4)(5)から算定した気泡半径と浮上速度の関係を示す。この図からマイクロバブルはミリバブルの1/1000倍程度の浮上速度であり、浮上中の気体の溶解時間も長くなるため有利であることが分かる。

したがって、溶存酸素を効率良く上昇させるためには、与えられた水深で浮上中にほぼ溶解する最大の気泡径を持つ気泡を生成させることが必要となる。また、気泡の浮上のみでなく、水流を起こし、流体および気泡の拡散を促進させることも有効と考えられる。

### (3) 曝気試験のシミュレーション (②汚れた水の場合)

2章で実施した曝気試験(CASE-C1, C2)のシミュレーションを実施した。試験条件に合わせ、10m<sup>3</sup>水槽(L3.3m×B1.7m×H1.8m)を対象に、水深1.6mにおいて、適当な気泡径を持つ空気気泡を連続的に与えた場合のD0の変化を計算した。ここで、初期のD0および窒素の濃度は67.9%、100%とした。

計算では、式(1)(6)(7)を用い、時間発展させながら溶存気体濃度の時間変化を求めた。まず、式(6)(7)から、ある時間の各気体分圧および気泡半径を計算し、それらを式(1)(ヘンリーの法則)に代入し、気泡内の各気体の溶出速度を求める。最後に増加した液体中の気体モル数からその時間の気体分圧、溶存気体濃度(%)を求める。上記の手法に従い、CASE-C2を想定し、半径60, 100  $\mu\text{m}$ の気泡を1L/min発生させた結果(図-16)、CASE-C1を想定し、半径100, 500  $\mu\text{m}$ の気泡を15L/min発生させた結果(図-17)を示す。図中黒丸は試験値である。図-16および図-17よりMB発生装置の気泡(CASE-C2)は半径60~100  $\mu\text{m}$ 程度、エアストーン(半径500  $\mu\text{m}$ )の気泡(CASE-C1)は半径500  $\mu\text{m}$ 程度であったと考えられる。また、図-17より、MB発生装置により半径100  $\mu\text{m}$ の気泡を15L/min供給した場合は、エアストーン(半径500  $\mu\text{m}$ の気泡供給)に比べ10倍の速さでD0が飽和濃度に達することが予想される。

## 5. まとめ

曝気による水域浄化では、水域の特性に応じた気泡の添加が有効と考え、水質および曝気手法を変えた水槽試験を行った。その結果、D0の増加速度は、供給側では気泡径および気体の種類、受給側では水中の浮遊物質および溶解した不純物質により大きく影響を受けた。気体の溶解の理論式および気体の溶解に影響する因子を整理することで、D0の効率的な増加には、与えられた水深で浮上中にほぼ溶解する気泡径を持つ気泡の生成が有効であることが証明された。また、この理論式を用いることで、

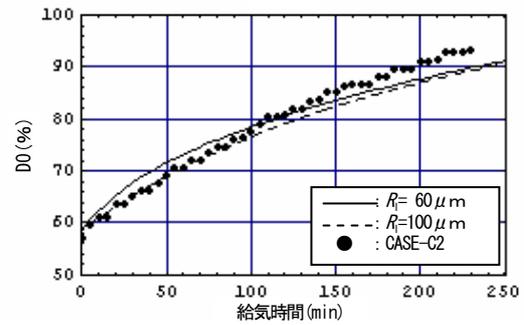


図-16 D0の増加 (CASE-C2, 空気量: 1L/min)

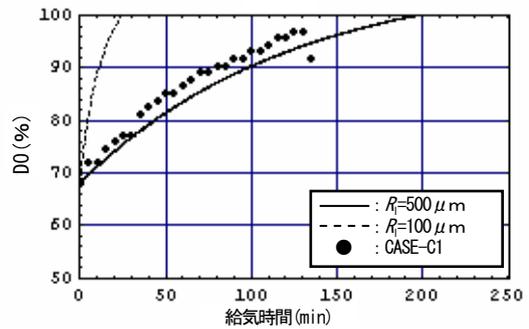


図-17 D0の増加 (CASE-C1, 空気量: 15L/min)

試験で得られたD0の上昇が再現できることが確認された。今回の結果は、曝気による水質浄化に活用できるものとする。しかし、限られた水質での検証であることから、更に対象水質を増やし、水質の影響を加味した曝気効果を検証していく所存である。

**謝辞:** 本論文は(学)筑波大学、佐藤工業(株)と若築建設(株)の共同研究成果の一部の紹介であり、本論文をまとめるにあたって協力いただいた方々に謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 道奥康治, 神田徹, 大成博文, 森口昌仁, 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.
- 2) 大成博文, 前田邦男, 松尾克美, 山原康嗣, 渡辺勝利, 石川並木: マイクロバブル技術によるカキ養殖効果, 水工学論文集, 第46巻, pp. 1163-1168, 2002.
- 3) 辻村太郎, 京藤敏達: 風波によるマイクロバブルの分散・拡散とマイクロバブル浄化法の効果に関する研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1121-1125, 2005.
- 4) D. F. McGinnis and J. C. Little: Predicting diffused-bubble oxygen transfer rate using the discrete-bubble model, Water Research 36, pp.4627-4635, 2002.
- 5) R. Clift, J.R. Grace and M.E. Weber: Bubbles, Drops, and Particles, Academic Press, 1978.
- 6) M. S. Plesset and A. Prosperity: Bubble dynamics and cavitation, Ann. Rev. Fluid Mech., 9, pp.145-185, 1977.