

二成層水域でのガス交換を伴う Bubble Plume の 流動特性と酸素供給についての実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON FLOW CHARACTERISTICS AND OXYGEN SUPPLY BY A
BUBBLE PLUME WITH GAS EXCHANGE IN A TWO-LAYRED STRATIFICATION

池田裕一¹・佐々木俊典²・須賀堯三³

Hirokazu Ikeda, Toshinori Sasaki, Kyoza Suga

¹正会員 博(工) 宇都宮大学助教授 工学部 建設学科 (〒321-0912 栃木県宇都宮市陽東7丁目)

²学生員 宇都宮大学大学院 工学研究科博士前期課程 建設学専攻 (同上)

³フェロー員 工博 宇都宮大学教授 工学部 建設学科 (同上)

Laboratory experiments were performed to consider flow characteristic and oxygen supply by a bubble plume in two-layered stratification which density and anoxic. Experimental results are follows. Flow shape varies initial airflow rate. This confirms by vertical density and DO distributions. Oxygen supply are confirmed to compare entrainment volume whether it involves gas exchange or not from upper or lower layer. The efficiency of oxygen supply was evaluated to use the oxygen volume of increase and provided oxygen volume. As a result influence factors are provided airflow, bubble diameter, initial height of density surface and flow shape. Allowing for them, evaluation factor was introduced. Value of experimental and evaluation are in a 1 to 1 ratio in a logarithmic faction.

Key Words: Bubble Plume, Gas exchange, flow characteristics, oxygen supply, two-layered

1. はじめに

湖沼やダム貯水池などの閉鎖性水域では、水温変化、濁水長期化、富栄養化等の水質障害が発生する。特に富栄養化については人為的汚染源がある場合は急速に進行するので、世界各地で問題となっている。富栄養化の進行は、水域の成層状態にも大きな影響を受ける。すなわち、夏期において上層と下層に安定した水温成層が形成され、上層では植物プランクトンの増殖、下層では植物プランクトンの死骸を微生物が分解する際に大量の酸素を消費するため無酸素状態になり、底層から栄養塩の溶出が生ずる。このように成層化した閉鎖性水域の水質保全対策として、曝気循環を行うことが多い。これはほとんどの場合、水域下方から気泡を連続的に放出する Bubble Plume を形成させるものである。その期待される効果として我が国では水温成層を破壊し流動促進をねらうものがほとんどであり、Bubble Plume の挙動や成層の混合効率に関する研究も数多く行われている。^{1)~5)}

ところが、曝気法の元々の目的は、下層への酸素供給であった。今後は曝気循環のこうした他の側面についても検討を加え、きめの細かい保全を行う必要がある。Wuest⁶⁾は Bubble Plume 内の気泡によるガス交換を考慮することの必要性を指摘し、ガス交換は初期気泡径の大きさと、初期空気量に依存していることを挙げて、それを現地実験、鉛直1次元モデルにより検討している。しかし、DO 収支の時間変化や酸素供給の効率などには触れていない。また、化学の分野において液相中の酸素の溶解度に関する研究はなされているが、水質改善の研究には関連付けられていない^{7) 8) 9)}。

本研究では、二成層水域でのガス交換を考慮した Bubble Plume に関する実験を行い、Bubble Plume の流動特性と曝気による水域への酸素供給について考察するものである。

2. 実験装置および方法

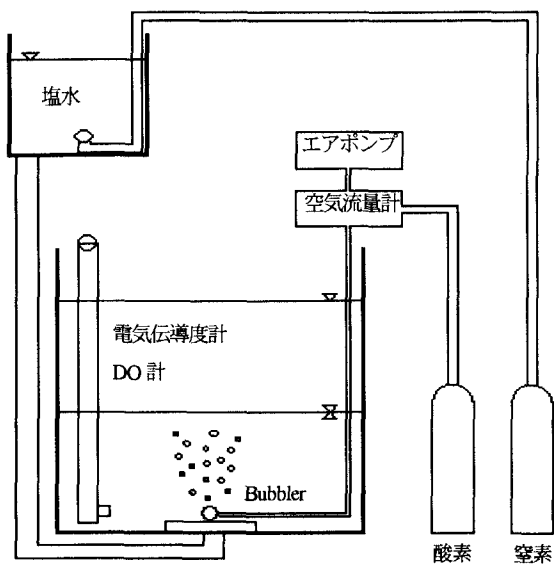


図-1 実験装置

実験には、図-1 に示すような装置を用いた。実験水槽には断面が1.5m×1.5m、高さ1.5mのアクリル製水槽を用いた。気泡発生器は水槽底部中央、高さ10cmに設置した。発生器の先端を交換することで、気泡径を5種類に変化させ実験できるようにした。発生器からの気泡量が安定するまでは混合が始まらないように、水面にまで達するパイプをかぶせてアイドリングを行った。二成層の実験を行うにあたり、塩水と淡水によって密度二成層を、窒素曝気をすることにより貧酸素状態と飽和酸素状態の二成層を形成させた。

実験開始と同時にパイプを取り除き一定時間混合を進めたところでまたパイプをかぶせて混合を停止させる。その後、水槽内の流れが静穏になったところで成層の密度分布およびDO分布を測定した。密度分布の測定には電気伝導度計を、DO分布の測定には溶存酸素計を用い、鉛直方向に密度、DOの変化が大きいくところでは1cmごとに、それ以外は5cmごとに測定を行った。流れの構造は、シャドウグラフ法により観察、撮影した。

実験条件は表-1 に示すとおりである。H0 シリーズは一樣水域で上下層が貧酸素状態であり、水域全体でのガス交換を検討するものである。A0 シリーズは二成層水域で下層が貧酸素状態であり、下層でのガス交換と下層と上層の混合による影響を検討するものである。SA シリーズは二成層水域で上下層とも飽和酸素状態であり、ガス交換がこれ以上行われなしとして検討するものである。DO・DA シリーズは二成層水域で下層が貧酸素状態であり、気泡径を1.5、3.2、5.0、9.0mmと変化させ、ガス交換への影響を検討するものである。H0、A0、SA シリーズは気泡径が0.5mmのケースである。A004 は他のシリーズに比べ空気流量が大きいものであり、流動形態の違いを検討するものである。送入気体はH0、A0、DO シリーズにおいて酸素を、SA、DA シリーズにおいて空

表-1 実験条件

Run	水深 (m) H	界面高さ (m) Z ₀	上下層 密度差 (g/cm ³)	上層 DO濃度 (mg/l)	下層 DO濃度 (mg/l)	送入 気体	送入気体流量 (m ³ /s) Q ₀	気泡直径 (mm) d
HO01	1.00	-	0.00000	1.03	1.02	O ₂	2.50E-06	0.5
HO02	1.00	-	0.00000	1.4	1.38	O ₂	1.03E-06	0.5
A001	1.00	0.39	0.00682	9.25	1.07	O ₂	2.50E-06	0.5
A002	1.00	0.60	0.00596	9.11	0.07	O ₂	1.03E-06	0.5
A003	1.00	0.82	0.00626	8.55	1.37	O ₂	2.50E-06	0.5
A004	1.00	0.52	0.00682	9.06	1.09	O ₂	2.50E-05	0.5
SA01	1.00	0.42	0.00702	8.99	9.08	Air	2.50E-06	0.5
SA02	1.00	0.60	0.00682	9.21	9.26	Air	1.03E-06	0.5
SA03	1.00	0.82	0.00610	9.36	9.45	Air	2.50E-06	0.5
DO01	0.85	0.32	0.00902	8.09	1.33	O ₂	2.83E-06	1.5
DO02	0.85	0.32	0.00936	9.17	1.46	O ₂	2.83E-06	3.2
DO03	0.85	0.29	0.00932	8.56	1.39	O ₂	2.83E-06	5.0
DO04	0.85	0.34	0.01052	6.11	1.28	O ₂	2.83E-06	9.0
DO05	0.95	0.35	0.00828	6.71	1.28	O ₂	3.83E-05	1.5
DO06	0.95	0.35	0.00860	6.1	1.29	O ₂	3.83E-05	3.2
DO07	0.95	0.37	0.00736	6.47	1.31	O ₂	3.83E-05	5.0
DO08	0.95	0.38	0.00700	6.7	1.41	O ₂	3.83E-05	9.0
DA01	0.85	0.29	0.00782	6.57	1.39	Air	2.83E-06	1.5
DA02	0.85	0.29	0.00888	6.59	1.40	Air	2.83E-06	3.2
DA03	0.85	0.28	0.00866	7.40	1.38	Air	2.83E-06	5.0
DA04	0.85	0.30	0.01000	6.91	1.22	Air	2.83E-06	9.0
DA05	0.95	0.37	0.00342	7.46	1.49	Air	3.83E-05	1.5
DA06	0.95	0.39	0.00726	6.59	1.4	Air	3.83E-05	3.2
DA07	0.95	0.39	0.00778	9.74	1.4	Air	3.83E-05	5.0
DA08	0.95	0.39	0.00786	9.28	1.46	Air	3.83E-05	9.0

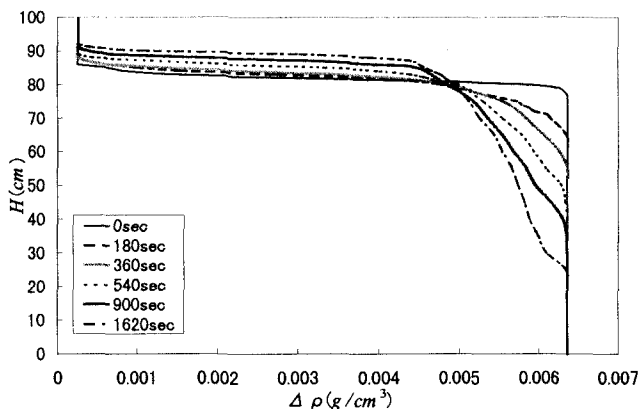


図-2 鉛直密度分布の時間変化 (AO03)

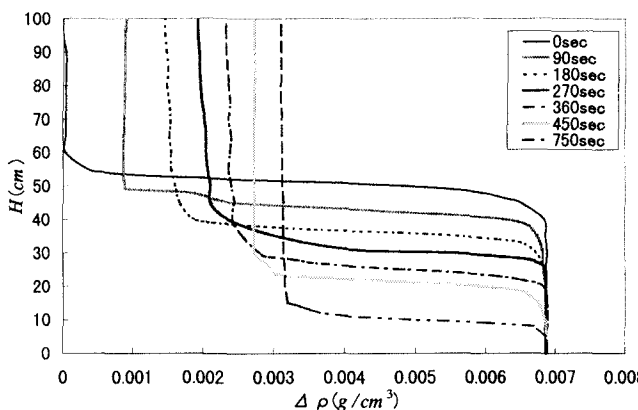


図-3 鉛直密度分布の時間変化 (AO04)

気を使用した。

3. 鉛直密度・DO分布の時間変化

(1) 流動形態の特徴

図-2、3 に鉛直密度分布の時間変化の例を、それに対応するDO分布の時間変化を図-4、5 に示す。

図-2、3 とでは、明らかに成層の混合の様子が異なる。

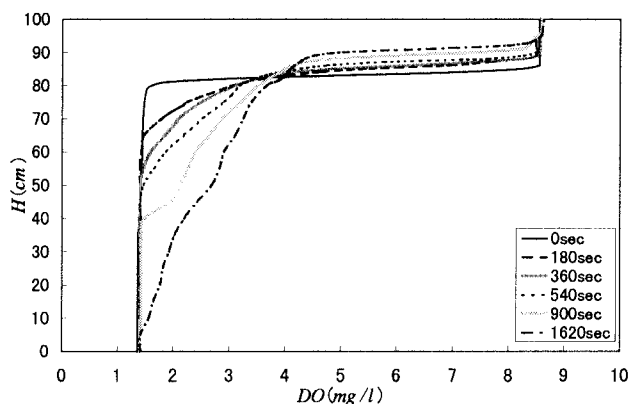


図-4 鉛直 DO 分布の時間変化 (AO03)

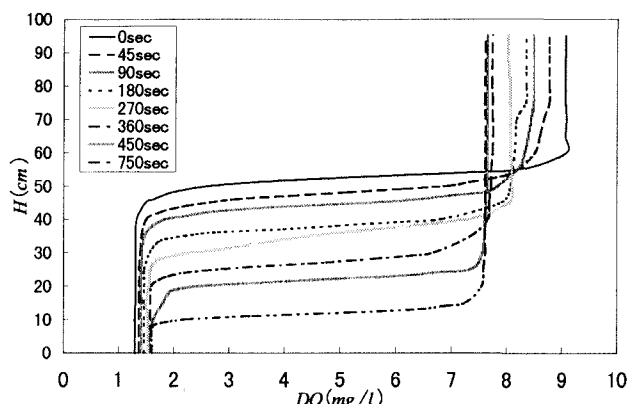


図-5 鉛直 DO 分布の時間変化 (AO04)

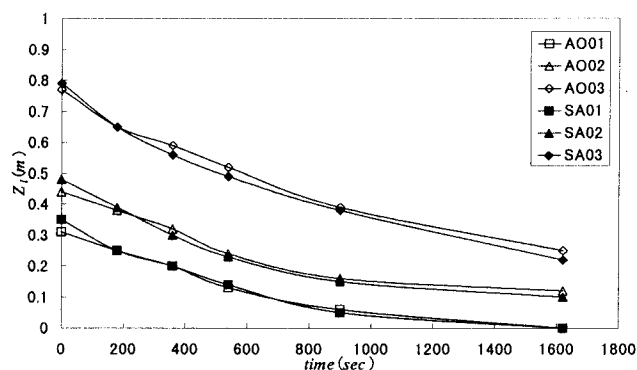


図-6 下側フロント位置の時間変化

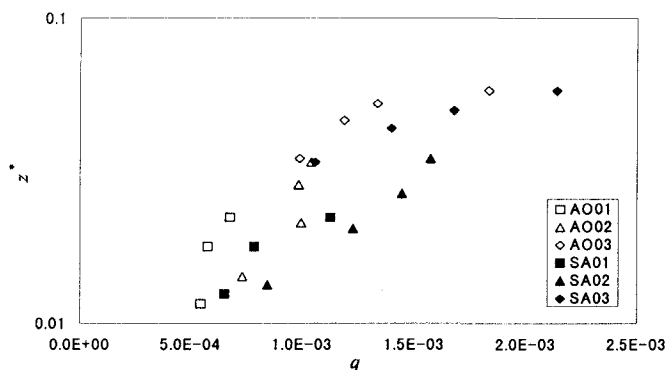


図-7 下層無次元連行量

これは可視化した流動形態から説明できる。流動形態の特徴として、気泡量が小さくて成層強度が相対的に強い場合（図-2）、気泡の浮力によって密度界面に持ち上げられた下層水は、上層内でドーム状の盛り上がりを見せるだけで、常時水面に達することはない（Type I とする）。下層水はドームの頂部に達するとドームの斜面に沿って密度界面まで降下し、周囲に広がり中間層を形成していく。また、気泡量が大きく相対的に成層強度が弱い場合（図-3）、下層水を連行したプルームが水面にまで達し、水面に達した流れは水面に沿って外側まで広がり、その後、水面下に沈み込んでいく。沈み込んだ水塊は中間層内において周囲と密度が等しくなる高さで貫入し、中間層を形成していく（Type II とする）。この流動形態の違いは分布形を見てもわかるとおり中間層の発達の方に大きな違いがある。Type I ではドームに連行される上層水の量が少ないので、中間層の密度は下層のものに近い値をとる。したがって、中間層は上層と明確な密度界面を持っているのに対して、下層との密度差は顕著ではない。一方、Type II では大量の下層水が上層に連行されるため下降プルームの密度は上層のものに近い値をとる。そのため、中間層と下層の間には明確な密度界面があるのに対して上層との密度差は明確でない。

(2) 流動形態の違いによるガス交換について

鉛直 DO 分布も鉛直密度分布と同様な分布形をもつ。Type I では、上層の DO の増加分より下層での DO の増

加が大きいため、下層内での酸素供給と上層との混合により酸素供給されている。Type II では、水域全体が激しく混合され、DO 分布は上層の DO 濃度に近い値で一様になっていくことから、大量の貧酸素化した下層水の連行と上層との混合によって酸素供給が行われていると考えられる。

4. ガス交換が流動特性に与える影響

(1) 下層からの連行

図-6 は AO・SA シリーズの下側フロント位置の時間変化を示したもので、これをみると、ガス交換がある下層が貧酸素状態のケースとガス交換のない水域全体が飽和酸素状態のケースでは、どのケースにおいても、ガス交換があるケースの下側フロントの位置が高い位置にある。これは、下層で酸素供給のために気泡が小さくなりプルームの浮力が減少し、それに伴い運動量が減少したためだと考えられる。

ところで、Bubble Plume によって下層内に上昇流領域が形成されると、それが密度界面を突き抜けて下層水を上に運び込むために中間層の下側界面は下降することになる。すなわち下側フロントは、上方へ運び上げられる水塊の体積分だけ下方に移動することになるから、下層からの上昇流量は、次式により算出できる。

$$Q_l = -\frac{dz_l}{dt} A \quad \dots (1)$$

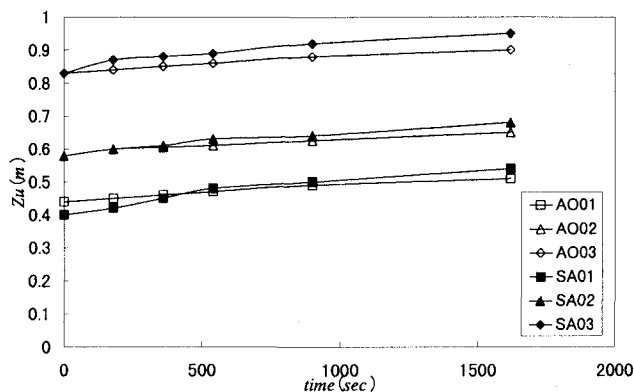


図-8 上側フロント位置の時間変化

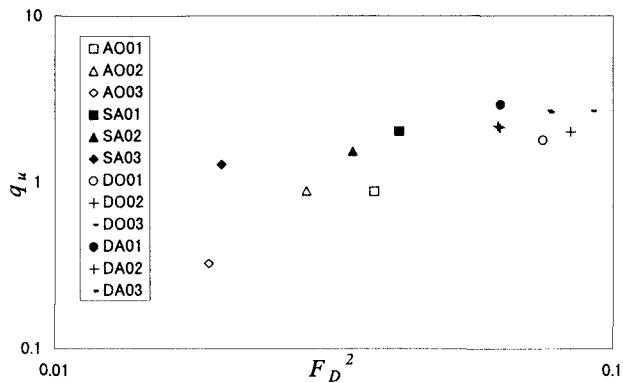


図-9 上層無次元連行量

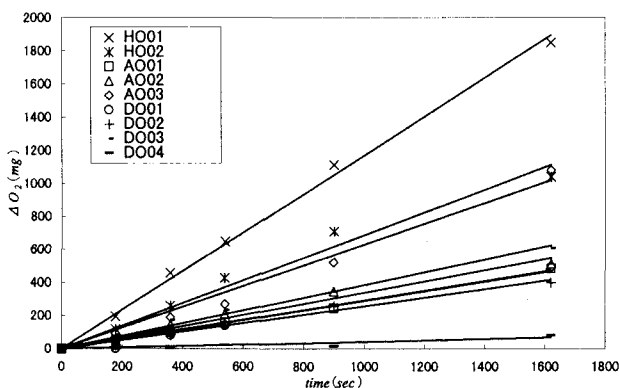


図-10 酸素増加量の時間変化 (Type I)

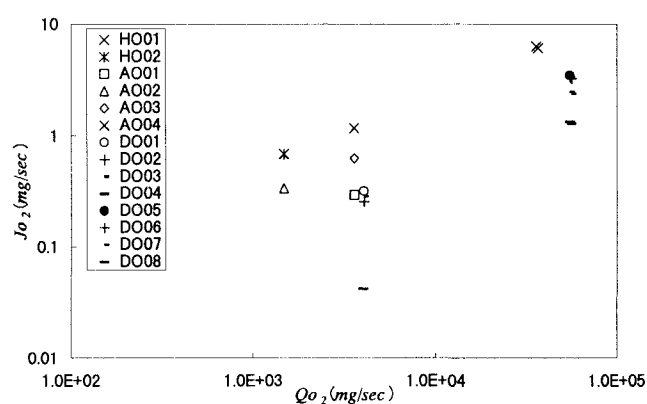


図-11 単位時間あたり酸素供給率

ここに、 Q_l ：下層界面における上昇流量、 z_l ：下側界面位置、 A ：水槽断面積である。

図-7 は下層からの無次元連行量と無次元高さの関係を示したものである。下層無次元連行量は、池田¹⁾にならい、式 (2) のようにした。

$$q_l = \frac{Q_l}{4\pi\alpha^2 H_T^2 M_z^{1/3} u_s} \quad \dots (2)$$

ここに、 α ：連行係数 ($=0.083$)、 H_T ：絶対圧力水頭 ($=H_a + H$ 、 H_a は大気圧水頭)、 u_s ：気泡のスリップ速度である。また、 M_z は気泡の上昇速度を表す無次元量であり、式 (3) で定義される¹⁾。

$$M_z = \frac{Q_0 g H_a}{4\pi\alpha^2 z (H_a + H - z) u_s^3} \quad \dots (3)$$

ここに、 Q_0 ：送入空気量、 g ：重力加速度である。高さ z は次のように無次元化した¹⁾。

$$z^* = z / H_T \quad \dots (4)$$

図-7 をみると、ガス交換のあるケースの連行量が明らかに少ない。これより、ガス交換の効果が伺える。しかし、AO・SA シリーズよりも気泡径の大きい DO・DA シリーズでは AO・SA シリーズほどの明確な違いは確認できなかった。

(2) 上層での混合量

図-8 は AO・SA シリーズの上側フロント位置の時間変化を示したもので、SA シリーズより AO シリーズの方がフロント位置の上昇が小さい傾向を示しており、ここでもガス交換の影響が出ている。

ところで、Bubble Plume の上層での混合は、上層水が Bubble Plume に連行され行われるので、上側フロントはこの連行され中間層が発達する分だけ上方に移動することになる。よって上層での混合量は、上層水の単位時間あたりの流量を Q_u 、上側フロント位置を z_u とすれば、式 (5) のように書ける。

$$Q_u = \frac{dz_u}{dt} A \quad \dots (5)$$

図-9 は上層での無次元連行量を示したものである。上層無次元連行量はやはり池田¹⁾にならい、式 (6) のように定義する。

$$q_u = \frac{Q_u}{4\pi\alpha^2 z_u^2 u_s M_z^{1/3}} \quad \dots (6)$$

また、密度フルード数の無次元量を池田¹⁾にならい、式 (7) のように定義する。

$$F_D^2 = \frac{z_u D \left(\frac{Q_0 g H_a}{H_T - z_u} \right)^{1/3}}{z_u^2 u_s M_z^{1/3}} \quad \dots (7)$$

ここに、 D ：実験で測定したドーム高さである。

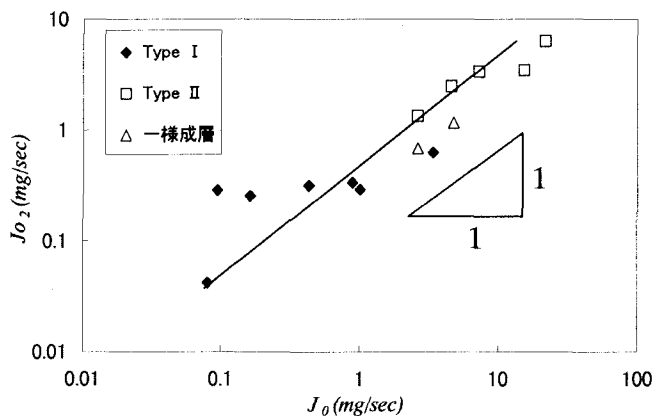


図-12 酸素供給効率の評価式との対応関係

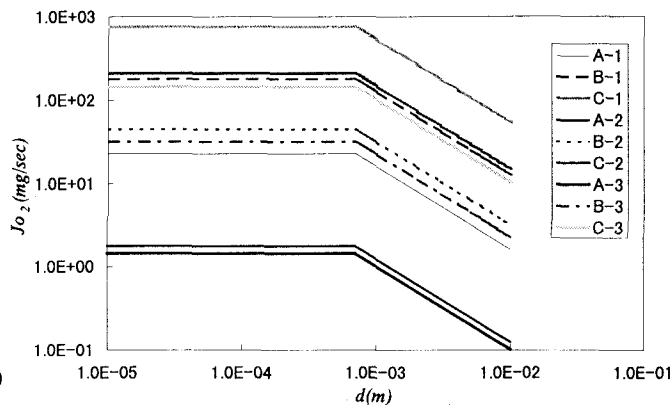


図-13 気泡径による酸素供給率

図-9 を見ると、ガス交換があるケースの連行量が少ないのがわかる。

ドーム高さと密度界面上の密度フルード数より、ドーム高さがガス交換の有無による影響を考察したが明確な違いは見られなかった。ドーム高さの可視化での誤差やドーム高さが明確に変化するほどガス交換が行われていないことが挙げられる。

5. 酸素供給について

(1) 酸素増加量

図-10 は Type I での水域内全体の酸素増加量の時間変化 ΔO_2 を示したものである。これはある時刻での DO_i 、初期 DO を DO_0 として、式 (8) のように示す。

$$\Delta O_2 = \int_0^H (DO_i - DO_0) Adz \quad \dots (8)$$

図-10 より酸素増加量が直線的に増加していることがわかる。これは、混合が初期段階であるため、飽和状態には程遠く、貧酸素状態の水域に酸素を供給しているため、このような傾向を示している。また、Type II でも同様な結果であった。この直線の勾配を単位時間あたりの酸素供給率とする。すなわち、

$$J_{O_2} = \Delta O_2 / t \quad \dots (9)$$

と表される。

図-11 は J_{O_2} と Q_{O_2} (単位時間あたりの送入酸素量) の対応を示したものである。これより、空気流量、初期密度界面高さ、気泡径の J_{O_2} への影響を見ることができる。空気流量が大きいほど酸素供給率は大きい。初期密度界面については、同一の空気流量で比較すれば初期密度界面高さが高いほど、 J_{O_2} の値は高く、下層の貧酸素水域が大きいほど酸素供給率が高いという結果が得られた。気泡径については同一の空気流量で比較すれば、0.5mm のものが J_{O_2} の値は高く、9mm の J_{O_2} の値は低い。1.5mm～5mm のものについては明確な違いは見られずほぼ同様なオーダーとなっている。これは、気泡径が小さくなるほど体積あたりの表面積が大きくなり、水域に酸素が吸収される効率が高いためである。

表-2 評価条件

run	水深 H (m)	He (m)	空気流量 Q_0 (m^3/s)
A-1	25	25	1.49E-03
B-1	50	50	8.10E-03
C-1	80	80	2.77E-02
A-2	25	15	6.36E-05
B-2	50	35	1.32E-03
C-2	80	60	4.16E-03
A-3	25	12.5	6.36E-05
B-3	50	25	1.32E-03
C-3	80	40	4.16E-03

(2) 酸素供給率

前述したように J_{O_2} の支配要因として、空気流量、初期密度界面、気泡径を挙げたが、これらを考慮して簡便な評価式を導入することにする。

気泡単位面積あたりの時間当たり酸素供給率は β をガス移動係数 (cm/sec)、下層はほぼ無酸素状態なので、 C_α を飽和溶存酸素濃度 (mg/l) として、

$$\beta C_\alpha \quad \dots (10)$$

のように与える。単位時間あたりに水平断面を通過する気泡総面積は r_a を体積あたりの面積として、 $r_a Q_0$ である。すると、単位高さあたりの気泡総面積は、鉛直方向の流速を W として、

$$r_a Q_0 / W \quad \dots (11)$$

と書ける。次に、単位高さあたりの時間当たり酸素供給率は、 $r_a Q_0 \beta C_{O_s} / W$ となるので、ガス交換に関わる高さを H_e とすると、全体の時間あたり酸素供給率は、式 (12) のようになる。

$$J_{O_2} = \frac{r_a Q_0}{W} \beta C_{O_s} H_e \quad \dots (12)$$

H_e は Type I では下層域でのガス交換が支配的なので、密度界面の高さをとり、Type II では下層水は水面まで連行され、ガス交換を行うことから全水深をとる。したがって、式 (13) のように定義する。

$$H_e = \begin{cases} z_0 & (\text{Type I}) \\ H & (\text{Type II} \cdot \text{一様成層}) \end{cases} \quad \dots (13)$$

Wについては次のように考える。まず、Plume の浮力スケールが、式 (14) のように書ける。

$$J_B = \frac{Q_0 g H_a}{H_a + H - H_e} \quad \dots (14)$$

すると、速さスケールはやはり H_e を用いて、式 (15) のようになる。

$$W \sim (J_B / H_e)^{1/3} \quad \dots (15)$$

結局、単位時間当たりの酸素供給率はおよそ次式のようなスケールとみることができる。

$$J_0 = \beta C_{Os} \frac{\gamma_a Q_0 H_e^{4/3}}{\left(\frac{Q_0 g H_a}{H_a + H - H_e} \right)^{1/3}} \\ J_0 = \gamma_a \beta C_{Os} \frac{Q_0^{2/3} H_e^{4/3}}{\left(\frac{g H_a}{H_a + H - H_e} \right)^{1/3}} \quad \dots (16)$$

図-12 は実験で得られた Jo_2 (図-11) と式 (16) に条件を代入し得られた J_0 をプロットしたものである。横軸には実験値、縦軸には理論値を無次元化してとることにする。(16) 式への数値の代入に際して、 γ_a は [1/L] の次元を持っているので、気泡直径の逆数をもってこれに充てた。 β は気泡直径によって変化し、次式のように与えた⁹⁾。

$$\beta (\text{cm/sec}) = \begin{cases} 0.057d & (d < 0.7(\text{mm})) \\ 0.04 & (d \geq 0.7(\text{mm})) \end{cases} \quad \dots (17)$$

図-12 より、多少のばらつきはあるものの、 Jo_2 は J_0 の1乗に比例しており、このデータを回帰した結果、およそ

$$Jo_2 = 0.3J_0 \quad \dots (18)$$

となった。0 次近似としては良好な結果が出たと考えられる。また、図を見てもわかるように、Type I、Type II においてもこの関係は成り立っているため、流動形態の違いによらず評価することができたといえる。

図-13 は表-2 に示す実スケールを想定して式 (18) を用いて Jo_2 を計算したものである。これより、界面高さが高いほど効率は高いことがわかる。また、どのケースでも気泡径が 0.7mm 以上になると効率は下がり、1.0cm になると1オーダー以上減少している。水深の大きさによって同じ気泡径でも Jo_2 にかなり違いがあり、現地の水域に合わせた気泡径の選択が必要である。

6. おわりに

二成層水域での Bubble Plume による流動特性と酸素供給について検討した結果本研究で得られた結果以下の知見が得られた。

1. Bubble Plume の流動形態は、2 種類に分類でき、それは密度分布、DO 分布に影響する。
2. ガス交換の連行特性への影響が、上下層の連行量を検討することで明らかになった。
3. 酸素供給率を簡便に評価する式を導いた。この式が、流動形態を問わず、酸素供給効率を総合的に評価できることを示した。

今後の課題として、本論文ではガス交換によって気泡が小さくなりそれによって減少する浮力や水面付近での空気量まで考慮に入れることができなかった。これらのことを考慮に入れ、ガス交換を伴う Bubble Plume のモデル化を検討していきたい。

参考文献

- 1) 池田裕一：貯水池温度成層における曝気循環流の特性と環境制御への適用に関する研究，東京工業大学学位論文，1995。
- 2) 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，No.411/II-12，pp.55-62，1988。
- 3) 浅枝隆・池田裕一・Jorg Imberger：不連続な密度界面をもつ成層中における Bubble Plume の挙動と成層の時間推移，土木学会論文集，No.438/II-17，pp.22-30，1991。
- 4) E. J. List・Jorg Imberger：Turbulent Entrainment Buoyant Jet and Plumes，Journal of Hydraulics Division，pp.1461-1473，1973。
- 5) 松梨史郎・宮永洋一：気泡噴流における水理学的富栄養化対策の有効性に関する考察，電力中央研究所報告，No.U88066，1989。
- 6) Alfred Wuest：Bubble Plume Modeling for Lake Restoration，Water Resources Research，vol.28，No.12，pp.3235-3250，1992。
- 7) 例えば、石井猛 他：微細気泡発生器による曝気槽の研究，水処理技術，vol.32，No.6，pp.37-42，1991。
- 8) 例えば、岩井芳夫 他：塩および糖を含む水溶液に対する酸素の溶解度の測定ならびに相関，化学工学論文集，第16巻，第6号，pp.1247-1251，1990。
- 9) 例えば、佐藤一省 他：攪拌槽型気液接触装置の吸収効率，化学工学論文集，第15巻，第4号，pp.733-739，1989。
- 10) 池田裕一：曝気循環でのガス交換を考慮した Bubble Plume の解析，第5回シンポジウム 環境用水の汚濁とその浄化，pp.74-77，1998。

(1999. 9. 30. 受付)