

(II-41) 二成層水域でのガス交換を伴う Bubble Plume についての実験的検討

宇都宮大学 学生員 佐々木俊典
宇都宮大学 正会員 池田 裕一
宇都宮大学 フェロー員 須賀 堯三

1. はじめに

閉鎖性水域の富栄養化対策に散気管による曝気循環法がよく用いられる。その期待される効果として、我が国では水域の成層破壊が主である。しかし、曝気の本来の要素は貧酸素解消であり、今後は曝気の様々な側面を利用し、きめの細かい水質保全を行うことが必要である。そこで本研究では、曝気循環時に形成される Bubble Plume 内のガス交換に着目し、Bubble Plume の新たな側面を検討している。室内実験により、貧酸素水を用いた二成層状態をつくり、そこで曝気循環をし、ガス交換が Bubble Plume の流動特性に与える影響や水域への酸素供給を検討している。

2. 実験装置および方法

実験には、図-1 に示すような装置を用いた。断面が $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 、深さ 1.5m のアクリル製水槽を用い、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 0.5 、 1.5 、 3.2 、 5 、 9mm の 5 種類について実験できるようにした。二成層の実験を行うにあたり、塩水によって密度成層を、窒素曝気により貧酸素状態と飽和酸素状態の成層を形成させた。

実験条件は、表-1 に示すようなコンセプトで行った。H0 シリーズは一様水域・一様貧酸素状態で、酸素曝気をし、水域全体でのガス交換を検討し、A0 シリーズは二成層水域・下層貧酸素状態で、酸素曝気をし、下層でのガス交換を検討し、SA シリーズは二成層水域・一様飽和酸素状態で、空気曝気をし、流動特性について検討する。D0・DA シリーズは二成層水域・下層貧酸素状態で、気泡直径の違いによるガス交換を検討するものである。また、Type I は下層水がドーム上になるタイプで、Type II は下層水が水面に達するタイプである。

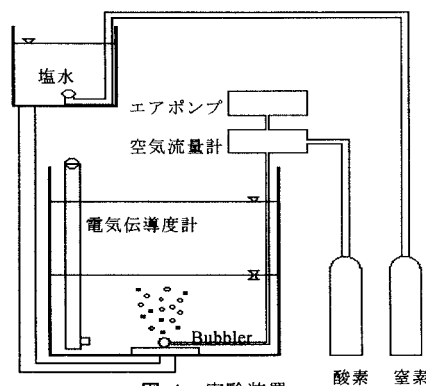


図-1 実験装置

表-1 実験条件

シリーズ	気泡径(mm)	Type	曝気ガス
H0(2)	0.5	II	酸素
A0(4)	0.5	I・II	酸素
SA(3)	0.5	I	空気
DO(8)	1.5・3.2・5・9	I・II	酸素
DA(8)	1.5・3.2・5・9	I・II	空気

() 内の数字は実験ケースの個数

3. 実験結果および考察

(1) 流動形態の特徴：図-2 に Type I の鉛直分布の時間変化の例を、図-3 に Type II の鉛直分布の時間変化を示す。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。Type II では大量の下層水が上層に連行されるため下降ブルームの密度は上層のものに近い値をとる。鉛直 D0 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 D0 の増加分より下層での D0 の増加が大きいこと

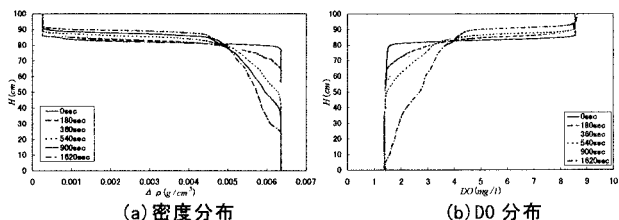


図-2 鉛直分布時間変化 ($Q=2.5 \times 10^{-6}(\text{m}^3/\text{s})$, $\Delta \rho = 6.26 \times 10^{-3}(\text{g}/\text{cm}^3)$)

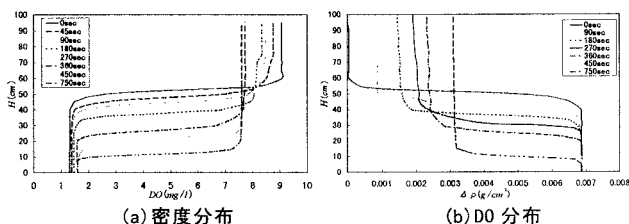


図-3 鉛直分布時間変化 ($Q=2.5 \times 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$, $\Delta \rho = 6.28 \times 10^{-3}(\text{g}/\text{cm}^3)$)

キーワード：Bubble Plume、ガス交換、溶存酸素、二成層水域

連絡先：〒321-0904 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部建設学科水工学研究室 TEL 028-689-6214 FAX 028-689-6230

から、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、D0 分布は上層の D0 濃度に近い値で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。

(2) **上下層連行量**：図-4 は A0・SA シリーズの下層無次元連行量を示したもので、これをみると、ガス交換があるケースとないケースでは、ガス交換のあるケースの連行量が明らかに少ない。これは、下層で酸素供給のために気泡が小さくなりブ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。図-5 は A0・SA・D0・DA シリーズの上層連行量を示したものであるが、やはりガス交換のあるケースは連行量が少ない。しかし、A0・SA シリーズよりも気泡径の大きい D0・DA シリーズでは A0・SA シリーズほどの明確な違いは確認できなかった。

(3) **酸素増加量**：図-6 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 (1) に示す。 $\Delta O_2 = \int_0^H (DO_i - DO_0) Adz \cdots (1)$ 図-6 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。よって、式 (2) のようになる。 $Jo_2 = \Delta O_2 / t \cdots (2)$

(4) **酸素供給率**： Jo_2 への影響を空気流量、初期密度界面高さ、気泡径で見ると、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、 Jo_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。これらを考慮して簡便な評価式 (3) を導入することにする。

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

ここに、 γ_a ：体積あたりの気泡表面積(cm^2)、 β ：酸素溶解度(cm/s)、 C_{Os} ：飽和酸素濃度(mg/l)、 Q_0 ：送入空気量(m^3/s)、 H_e ：密度界面位置(m)、 H_a ：大気圧水頭(m)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 H ：全水深(m)である。図-7 は実験で得られた Jo_2 と式 (3) で得られた J_0 を比較したものである。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、おおよそ式 (4) が得られた。 $Jo_2 = 0.3 J_0 \cdots (4)$

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-7 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ので、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。

4. おわりに

1) Bubble Plume の流動形態は、2 種類に分類できて、それは密度分布、D0 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き、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。

参考文献 池田裕一：貯水池内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。
 Alfred Wuest：Bubble Plume Modeling for Lake Restoration, Water Resources Research, vol.28, No.12, pp.3235-3250, 1992.

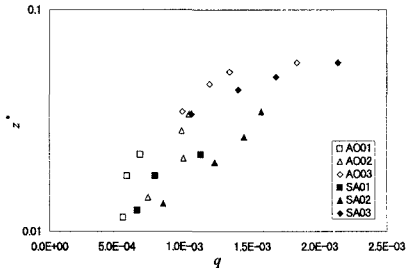


図-4 下層無次元連行量

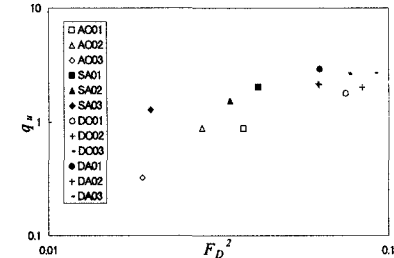


図-5 上層無次元連行量

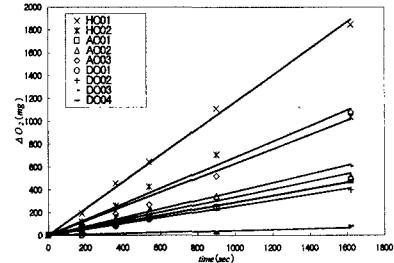


図-6 酸素増加量

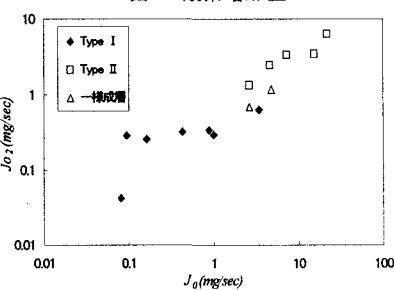


図-7 酸素供給効率の評価式との対応