

宇都宮大学 学生員 ○佐々木俊典

宇都宮大学 正 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良く用いられる。その期待される効果としては、我が国ではもっぱら水域の成層破壊である。しかし、曝気の用途には貧酸素状態の解消もあり、今後はこうした曝気法のような側面を利用することにより、きめこまかな水質保全を行う必要がある^{1) 2)}。

本研究は微細気泡発生装置を用い、微細気泡と過飽和酸素水を放出させる混合噴流による曝気を行い、酸素供給が混合噴流により形成された曝気循環流の流動形態に与える影響や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

実験装置は図-1に示すような実験装置を用いた。実験水槽には断面が1.5m×1.5m、高さ1.5mの亚克力製水槽を用いた。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。

微細気泡を発生させるにあたり、微細気泡発生装置を用いた。本機は压力容器内で約2.5kgf/cm²の圧力を加えることにより酸素を水に溶解させ、溶解水が大気圧内に放出されると、高圧下で溶解していた酸素が、直径20～30μmの微細気泡となる。

一定時間曝気を行ったところで曝気を停止させ、水槽内の流れが静穏になったところで成層の密度分布、DO濃度分布を鉛直方向に1～5cm間隔に測定した。また、鉛直方向10cm間隔に、曝気中の軸上の水をサンプリングし、密度、DO濃度を測定した。軸上流速も同様に10cm間隔で測定した。

実験条件は表-1に示すような4ケースを行った。MB01～03は二成層水域であり、初期密度界面高さ、上下層密度差を変化させている。MH01は一様密度成層で、水域全体が貧酸素状態である。

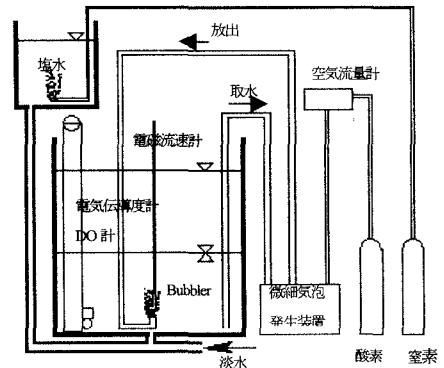


図-1 実験装置

表-1 実験条件

Run	水深 (m)	界面高 (m)	上下層 密度差 (g/cm ³)	上層 DO濃度 (mg/l)	下層 DO濃度 (mg/l)	送入気体流量 (m ³ /s)	吸引流量 (m ³ /s)
MB01	1.00	0.40	0.00876	10.76	1.21	9.66E-06	1.18E-04
MB02	1.00	0.80	0.0063	8.29	1.58	9.66E-06	1.20E-04
MB03	1.00	0.40	0.01178	1.87	0.88	9.66E-06	1.19E-04
MH01	1.00	-	0	1.85	1.65	9.66E-06	1.20E-04

3. 実験結果および考察

(1) 流動形態について

可視化結果より、微細気泡を有する混合噴流では、数mmの粒径によるBubble Plume（以下BP）とは異なる流動形態が見られた。微細気泡は、ブルーム速度と気泡の上昇速度との相対速度が非常に遅いため、密度界面を突き抜けずに密度界面下方でかなりの厚みをもって滞留する。その後、密度界面の中心軸付近から押し上げられるように上層へ、ある程度の幅を持ちながらゆっくりと上昇していく。これらの特徴は、周囲水の鉛直密度、DO濃度分布にも現われている。図-2、3に周囲水の鉛直密度、DO濃度分布を示す。これらより、密度分布では上層の密度の増加、DO濃度分布では、密度界面下方でのDO濃度のピークの発生や上層でのDO濃度の減少がみられる。上層の密度増加とDO濃度の減少は、微細気泡はある程度の幅を持ち上昇するため、下層水が連行されたものである。密度界面下方のDO濃度の増加は、過飽和酸素水と微細気泡が密度界面下方で滞留するため、その付近での酸素供給が盛んであったためである。

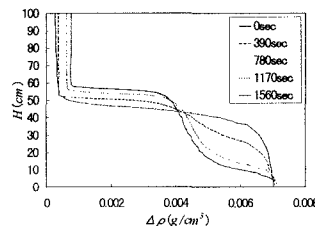


図-2 鉛直密度濃度分布

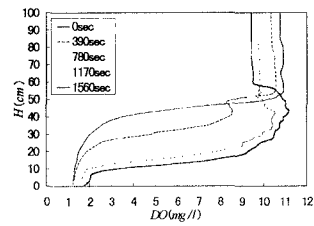


図-3 鉛直DO濃度分布

キーワード：富栄養化、マイクロバブル、Bubble Plume、溶存酸素、二成層

連絡先：〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東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

軸上 DO 濃度分布を図-4 に示す。これより、相対速度の非常に遅い微細気泡を有することで、過飽和酸素状態で放出された DO 濃度は密度界面高さ付近まで減少するが、上層の飽和濃度程度の DO 濃度を保ちながら上昇する。

(2) 酸素供給について

図-5 に水域内全体の酸素増加量の時間変化 ΔO_2 を示す。これより、上下層密度差が 2 倍程度異なる MB01 と MB03 では、成層強度の強い MB03 の方が増加量は多い。これは成層強度が強いと密度界面下方で滞留する気泡量が多くなるため、気泡と貧酸素水の接触時間が長くなり、ガス交換がより盛んに行われたと考えられる。また、一様成層の MH01 は増加量が少ないが、これは二成層とは異なり、微細気泡は滞留することなく水面にまで達するため、ガス交換の効果が他と比較して小さいと考えられる。ここで、図-5 の直線の勾配を時間あたりの酸素増加率 ($J_{O_2} = \Delta O_2 / t$) とする。

次に、上述のガス交換による酸素増加率について、簡便な予測式を導出する。まず、鉛直一次元モデルのスケールを考慮することで時間あたり酸素増加率は (1) 式のように書くことができる³⁾。

$$J_0 = 0.3\gamma_a \beta \frac{G_0}{W} (C_{O_s} - C_{O_a}) H_e \quad \dots (1)$$

ここに、 γ_a : 体積あたりの気泡表面積 (cm^2)、 β : ガス移動係数 (cm/s)、 W : 軸上流速 (m/s)、 G_0 : 送入酸素量 (m^3/s)、 C_{O_s} : 飽和酸素濃度 (mg/l)、 C_{O_a} : 周囲水酸素濃度 (mg/l)、 C_{O_0} : 放出水酸素濃度 (mg/l)、 z_i : 初期密度界面高 (m)、 r_0 : 放出口半径 (m) である。(1) 式中の H_e はガス交換に関わる高さであり、式 (2)、(2') のように定義する。(2') 式中の z_s は、微細気泡のケースでは過飽和酸素水も同時に放出されるため、過飽和酸素水による酸素供給に関わる高さであり、ブルーム半径 r を用い (3) 式のように表す。 c_0 は補正係数で $c_0=5.0$ としている⁴⁾。

$$H_e = \begin{cases} z_i & (\text{Type I}_{BP}) \\ H & (\text{Type II}_{BP}) \end{cases} \quad \dots (2) \quad H_e = \begin{cases} z_i - z_s & (\text{Type I}_{MB}) \\ H - z_s & (\text{Type II}_{MB}) \end{cases} \quad \dots (2')$$

図-6 に実験値 J_{O_2} と (1) 式による予測値 J_0 の関係を示す。図-6 には BP の関係も示している³⁾。この結果、微細気泡のケースは BP のケースを含めたオーダーで見ると実験値を良く説明するよう見えるが、二成層の MB シリーズは実験値の方が大きく出ている。微細気泡だけのケースで見ると、BP のような対応関係ではなく減少傾向にあるようである。これは、微細気泡が密度界面下方で滞留する事によるガス交換の影響など微細気泡の特徴は含まれていないため、気泡と貧酸素水の接触時間を評価しきれていないためであると考えられる。今後は滞留の効果など微細気泡の特徴を考慮した詳細な検討が必要である。

4. おわりに

本研究で得られた知見を以下に述べる。

(1) 微細気泡を用いた曝気時の流動形態は、数 mm の粒径の気泡とは異なり、密度界面下方で微細気泡がかなりの厚みを持って滞留することや、微細気泡の上昇による下層水の上層への連行など、微細気泡の影響が大きいことが確認された。

(2) ガス交換による酸素増加率の簡易評価式を導出し実験結果と比較したところ、数 mm の粒径の気泡では対応関係がみられたが、微細気泡では対応関係がみられず、微細気泡の酸素供給に関してはより詳細な検討が必要である。

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) Alfred Wuest: Bubble Plume Modeling for Lake Restoration, Water Resources Research, vol28, No12, pp3235-3250, 1992。
- 3) 池田裕一・佐々木俊典・須賀義三：二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、水工学論文集、第44巻、pp1125-1130, 2000。
- 4) 有田正光編著：水圏の環境、東京電気大学出版局、1998。

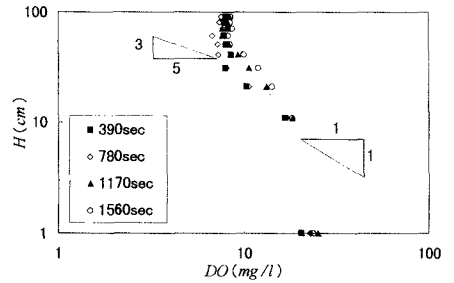


図-4 軸上 DO 濃度分布

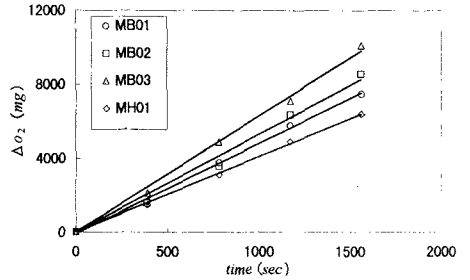


図-5 酸素増加量

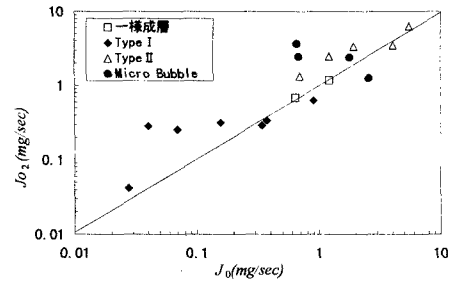


図-6 J_{O_2} - J_0 対応関係

$$z_s = c_0 r_0 \frac{C_{O_0} - C_{O_a}}{C_{O_s} - C_{O_a}} \quad \dots (3)$$