

気泡を用いた鉛直水循環装置に関する水理実験

豊橋技術科学大学 ○見城 拓
 豊橋技術科学大学 正会員 青木伸一
 岡本機械設計 岡本光雄

1. 概説 富栄養化した湖沼や内湾で発生する貧酸素水塊の曝気法の1つとして、図1に示すような気泡を用いた鉛直水循環装置を考案した。本研究はその機能に対する基礎的な検討として、どれだけの水を循環させることが可能かを、実験的に調べるとともに、循環量に対する水理学的理論式を求めることを目的として行った。本研究で使用する装置は、曝気した水を上層で拡散させずに、再び底層に循環させる構造となっている。これにより、栄養塩を多く含んだ底層水による植物プランクトンの増殖をおこさずに底層水の酸素量を増やすことができる。

2. 理論式 装置を循環する水の流量を求める前に、循環を止めた場合に起こる水位上昇量から出発し、それを用いて循環時の流速および流量の理論式を求めた。ただし、水位上昇量: Δh (cm)、気泡発生地点から円筒上端までの高さ: h (cm)、気泡の上昇速度: v_a (cm/s)、水の流速: v (cm/s)、空気の流量: Q_a (cm³/s)、水の流量: Q (cm), 円筒の直径: D (cm)、円筒の断面積: A (cm²)とする。理論式を考える上で次の3つの仮定を設けた。1) 気泡は速やかに終末速度に達し一定速度で運動する。2) 気泡は一様に水中に送り込まれる。3) 気泡は体積変化しない。

(1) **水位上昇量** 気泡が終末速度に達したときの力のつりあいから、円筒内に存在する気泡の浮力を断面積で割った圧力と、水位上昇による圧力がつりあうとして、次の式を得た。

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{Q_a}{v_a A} \quad (1)$$

ここに右辺は、水の体積に対する空気の体積の比(ボイド率: α)を表している。

(2) **流速** 循環時の水位上昇はないと仮定して、式(1)をベルヌーイの式に代入して求められた式に、水の流れにのって気泡の速度が増加することを考慮して次式を得た。ただし、損失係数を k と仮定する。

$$v = \sqrt{2g \left(\frac{Q_a h}{(v_a + v)A} - k \frac{v^2}{2g} \right)} \quad (2)$$

上式を無次元化すると次式となる。

$$\frac{v}{v_a} = \sqrt{\frac{\alpha P}{(1 + \frac{v}{v_a})(1 + k)}} \quad (3), \quad \text{ここに} \quad P = \frac{2gh}{v_a^2} \quad (4)$$

(3) **流量** 流量は $Q = (1 - \alpha)vA$ より求められ、無次元化した形で表すと次式のようになる。

$$\frac{Q}{Q_a} = \frac{v}{v_a} \frac{1}{\alpha} - \frac{v_a}{1 + \frac{v}{v_a}} \quad (5)$$

式(5)において v/v_a は αP の関数なので、 Q/Q_a は α と P の関数である。

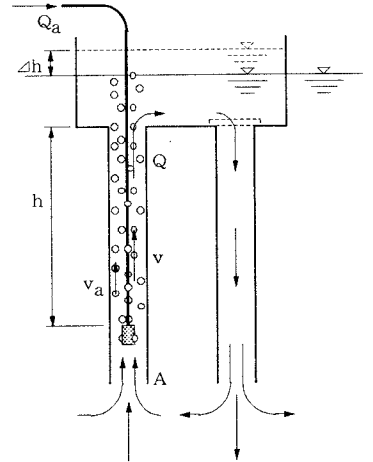


図1 装置の模式図

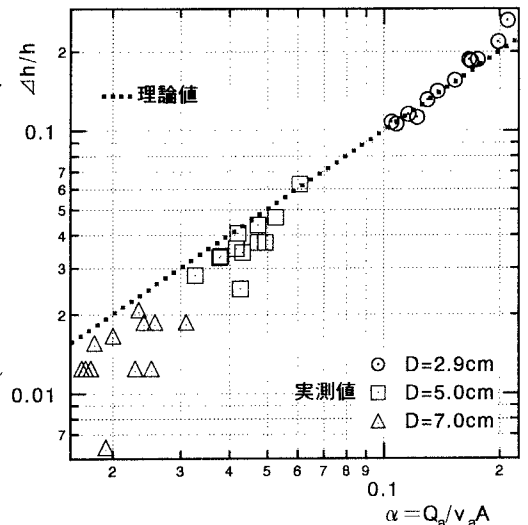


図2 水位上昇量の理論値と実測値の比較

3. 実験概要 求められた理論式を検証するために h を4通り、 A を3通り、 Q_a を3通りに変化させて計36通りの $\Delta h, v_a, v, Q_a, Q$ を測定した。 v_a, v についてはビデオカメラで撮影してコマ送りで観察して測定し、 Q は v より求めた。 Q_a はメスシリンダーとストップウォッチを使って測定した。

4. 実験結果および考察

(1) 水位上昇量 図2に式(1)と実測値との比較を示す。 $D=2.9\text{cm}$ の円筒の値はほぼ理論値に近いが、 $D=5.0, 7.0\text{cm}$ の円筒の値は理論値に比べてやや小さい傾向がある。水が循環していないので摩擦損失や形状による損失は0であるはずであり、 Q_a や v_a 、 Δh の測定に誤差が存在したことが考えられる。

(2) 流速 図3に式(3)と実測値との比較を示す。 $k=0$ の曲線は損失を無視した場合の理論値を表しており、 k の値が大きくなるほど損失が大きな場合を表している。実測値は、多少ばらつきがあるものの理論値を表す曲線の傾きに合わせて分布しており、 k が3程度と仮定すればほぼ理論値に近い値を示していることが分かる。本研究で用いた装置では、入口損失と出口損失および摩擦損失があると考えられるが、一般的に入口の損失係数は0.5、出口の損失係数の値は1.0程度とされており、また摩擦損失は今回の実験ケースではこれらに比べてかなり小さいと予想されるので、エネルギー損失のメカニズムについては今後検討する必要がある。

(3) 流量 $k=3$ の場合について水の流量と空気の流量の比を示したのが図4である。ボイド率 α をパラメータとして Q/Q_a と P の関係をj示している。シンボルの横に示した数字は、それぞれの実測値における α の値である。少し前後しているものもあるが、理論値と実測値に近い値を示していることが分かる。

5. 結論 いくつかの仮定の下に水位上昇量、流速および流量の理論式を導き水理実験により検証した。条件を良くすれば、送り込む空気の流量の30倍以上の水を循環させることが可能なことが分かった。理論式より類推して、循環流量を大きくするためには、1)空気は深いところから送り込んだ方がよいこと、2)同じ空気量であれば気泡が小さい方がよいこと、3)空気を送り込む側の断面積は大きい方がよいこと等があげられる。

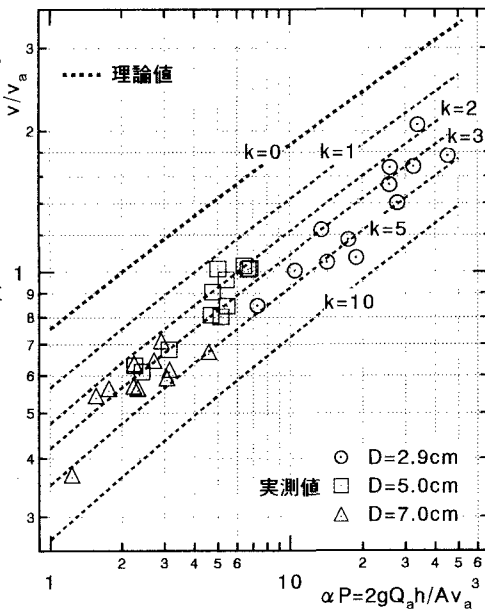


図3 流速の理論値と実測値の比較

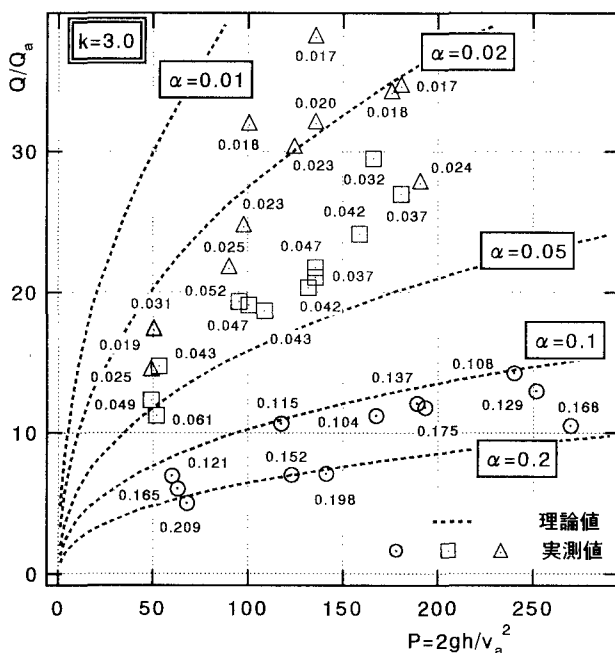


図4 流量の理論値と実測値の比較