

閉鎖性水域における貧酸素水塊解消に向けた底層設置型バブルストリーマーの開発

豊橋技術科学大学建設工学系

○小林義明

豊橋技術科学大学大学院

水野 亮

岡本機械設計代表

岡本光雄

豊橋技術科学大学建設工学系 正会員 青木伸一

1. はじめに

閉鎖性の強い内湾や汽水湖では、慢性的な富栄養化に伴う底層水の貧酸素化が深刻な問題となっており、魚貝類や底生生物の激滅によって膨大な漁業被害に発展する恐れがある。しかし、夏季に発生する大規模な貧酸素水塊を解決する決定的な打開策がないのが現状である。筆者らは、底層に設置した曝気層内に気泡を送ることで底層水を曝気すると同時に揚水し、水平方向の流動に変化させて酸素を含んだ底層水を広範囲に拡散できる底層設置型バブルストリーマーを開発した。本研究では、本装置の特徴の1つである流量発生機能の確認を目的としている。

2. 底層設置型バブルストリーマーの特徴

図1に本装置の概略図を示す。曝気装置内には多数の円管が配置され、ブロウ装置から送り込まれた空気は空気送入管から微細な気泡となって排出される。このとき気泡が周囲の水を伴って円管内を上昇することで曝気と同時に流動が生まれる。気泡は装置上部に達したとき、再度ブロウ装置に吸い出されるので、装置内部では同じ空気が循環することになる。この場合、酸素濃度は徐々に低下するため、ブロウ装置から曝気装置に空気を送り込む間にエアーコンプレッサーを取り付け、常時酸素を補給する。一方、曝気・揚水された水は、曝気装置側面に設置された排水ダクトから排出されることで水平方向の流動へと変化する。定常状態で作動していると仮定したときにダクトから排出される流量 Q_D は、パイプの揚水理論¹⁾を応用して次式で理論的に求まる。

$$Q_D = nQ_L = nA_P \sqrt{\frac{2gL_P}{c_1(1-\alpha)^Z + c_3}} \quad \cdots (1)$$

ここで、 $c_1 = fL_P/D_P$ 、 $c_3 = 2\alpha/(1-\alpha)$ 、 $Z \approx 1.75$ 、 n : 円管本数、 Q_L : 円管一本での液体流量、 g : 重力加速度、 L_P : 円管長、 D_P : 円管内径、 A_P : 円管断面積、 α : 管内平均ボイド率、 f : 管の摩擦損失係数である。

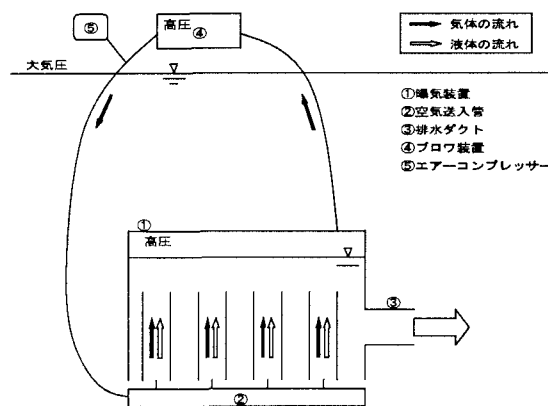


図1 底層設置型バブルストリーマーの構造

従来、空気を底層に送るタイプは、大気圧と水圧の差により多大なエネルギーが必要であった。しかし本装置は、ブロウ装置と曝気装置が2本のホースで完全に結合しているため、装置内部を均一な高圧に保つことが出来る。従って、低エネルギーでの稼動を可能にした。

3. 実験概要

本装置の流量発生機能を確認するために空気を送入したときの円管一本での流量発生実験を基礎実験とし、そのあと模型実験および実機実験を行った。円管一本の実験では内径 $D=30, 39, 50\text{mm}$ に対しそれぞれ長さ $L=20, 30, 40\text{cm}$ のアクリルパイプを計9本用意し、3パターンの空気量 Q_G に対して円管下端で発生する液体流速を測定したため、計27ケースのデータを取得することが出来た。模型は60本 ($D=30\text{mm}, L=30\text{cm}$)、実機は351本 ($D=45\text{mm}, L=40\text{cm}$) のパイプを内蔵し、それぞれ3パターンおよび5パターンの空気量に対してダクトで発生した液体流速を測定した。なお実機と模型の縮尺は容積比1/4であり、実機はダクトを4つ有する。

4. 実験結果

管内平均ボイド率 α には、次式で表される smith の等速度ヘッドモデルを利用した。ここで、 $B = \rho_G/\rho_L$ 、 $C = Q_L/(BQ_G)$ 、 ρ_G : 空気の密度、 ρ_L : 水の密度、 $e=0.4$ である。

$$\alpha = \left[1 + eBC + (1-e)BC \left\{ \frac{B^{-1} + eC}{1 + eC} \right\}^{1/2} \right]^{-1} \quad \cdots (2)$$

このモデルは α を空気量と流量の関数として表すため、式(2)を式(1)に代入して繰り返し計算から Q_L の理論値を求めた。その結果を図2に示す。実測値から、液体流量を増加させる要因として供給空気量の増加、円管長の延長、円管内径の拡大が挙げられる。理論値は定性的な性質を一部表現できてはいるが、円管長の影響による増減については不十分である。これより、摩擦損失だけでは定性的な性質は表現できないと考えられる。そこで、全損失係数 k を用いて Q_L を書き換えたのが次式である。

$$Q_L = A_P \sqrt{2gL_P \frac{\alpha}{1+k}} \quad \cdots (3)$$

上式に式(2)を適用して求めた理論値を図3に示す。理論値は前述した定性的な性質を良く表現できている。しかし、全損失係数 $k=7$ の物理的意味を考えると非常に大きい損失が必要である。

図4には、模型および実機の排出流量を円管本数で除して円管一本分に換算した値を示す。円管一本の実験でよい一致を示す smith モデルと全損失係数 $k=7$ を用いた理論値と比較すると、模型および実機の排出流量はどちらも約半分に落ちることがわかった。装置内部の流れが複雑化しているためダクトに向かう流れの抵抗になる流れが生じたり、装置内部の壁面摩擦等によって流速が低下したものと考えられる。

模型では水深変化が可能であったため、水深 0.5m および 1.0m でダクトでの流速を測定したが、水深による排出流量の変化は見られない (図5)。

実機の総排出流量は約 70000cm³/s であり、これを1日に換算すると約 6000m³/day となる。

5. 結論

実機と模型の排出流量をパイプ一本に換算した結果、両者のスケール交換性は良く、装置内部のパイプ本数を6倍、装置容積を4倍した場合でも、実機の排出流量は模型のそれと非常によく対応していた。このことを理論的に検討した結果、定性的な性質については忠実に表現できた。さらに、損失の影響評価にやや問題が残るものの定量的な性質についても表現できた。また、本装置の排出流量は1日に約

6000m³ であり、水深 1m までならば水深による排出流量への影響は無いことがわかった。

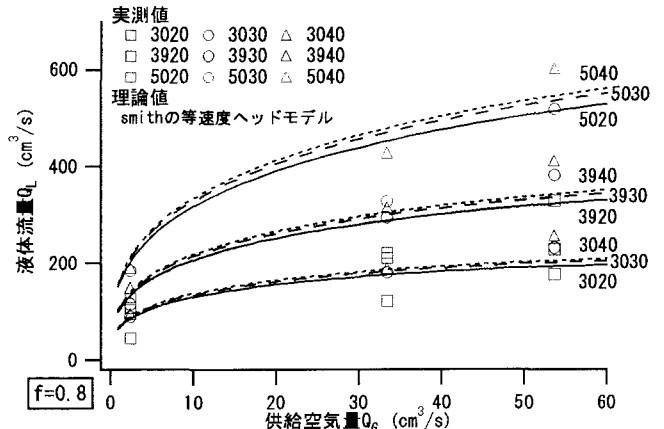


図2 smithのモデルを適用した場合の理論値

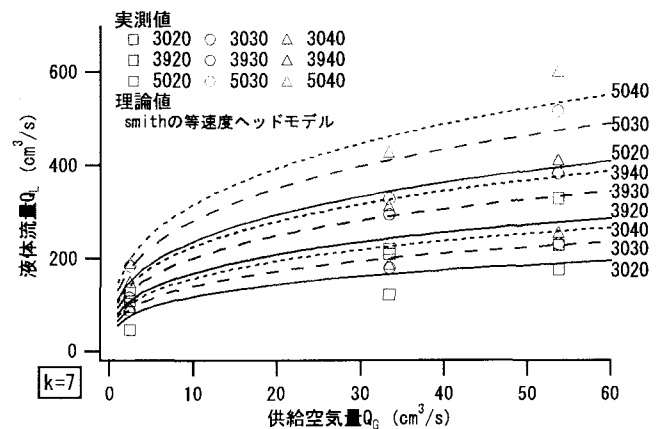


図3 全損失係数 k と smith のモデルを適用した理論値

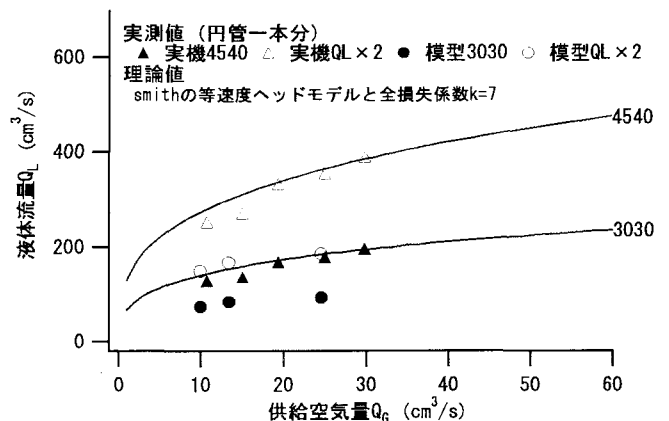


図4 模型・実機の液体流量の実測値と理論値

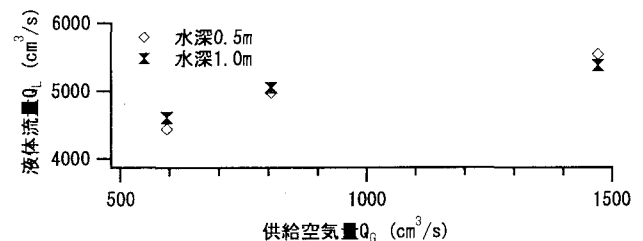


図5 水深変化による液体流量への影響

参考文献

- 1) 日本機械学会編(1989), 「気液二相流技術ハンドブック」, コロナ社, pp218-221