

コアンダ効果を利用した新たな湧昇流発生手法の有用性に関する研究

東京電機大学 学生会員 ○近藤 秀紀

東京電機大学 正会員 佐藤 大作

東京電機大学 正会員 有田 正光

1. はじめに

夏季のダム貯水池では栄養塩の流入と成層化による富栄養化に起因する植物プランクトンの異常増殖、つまり有機汚染による水質悪化が問題となっている。この水質悪化を軽減するための有効な対策の一つとして空気泡もしくは空気弾を利用する曝気循環法がある。これは貯水池内に湧昇流を形成させて上下層の循環を促し、上層のプランクトンを無光層まで導き、増殖を抑制することで水質改善を計る手法である。しかし、この手法はランニングコストが高いなどの問題があると考えられる。本研究では、自然エネルギーを活用した低ランニングコストの湧昇流形成手法を提案し、その効果を実験的に検証しようとするものである。

2. 提案する湧昇流形成法の原理

図-1 に提案する湧昇流発生手法のメカニズムの概念図を示す。同図に示すように貯水池上流端の副ダムの深い位置から斜め上方に θ_0 の角度で噴流を放流する。放流された噴流はコアンダ効果により副ダム壁面に再付着し、壁面噴流として流動する。この壁面噴流により貯水池内に湧昇流を発生させ、曝気法と同様のメカニズムで水質浄化を計ろうとするものである。なお、噴流は副ダム上流に貯留される河川水の位置エネルギーによって放流されるため、自然エネルギーを活用した動力不要の運用が可能となる。

表-1 は既往の研究⁽¹⁾⁽²⁾に基づく自由噴流と壁面噴流の諸量についての比較結果である。同表より、全体として壁面噴流は自由噴流に比較して、平均流速 u_m 、流量 Q は大きく、拡がり幅 $b_{1/2}$ は小さくなるのが分かる。これより、速い流速と強い連行が期待できる壁面噴流が、より効果的な湧昇流を形成することが分かった。次に、各噴流の詳細な流況について実験的に検討を行った。

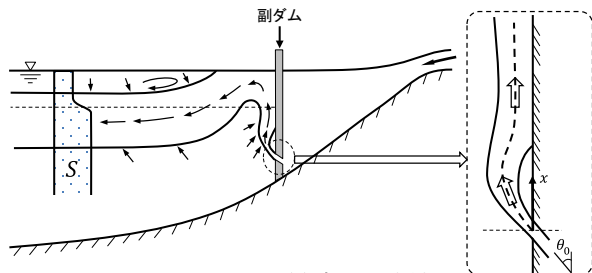


図-1 湧昇流の発生法

表-1 自由噴流と壁面噴流の諸量の比較

	自由噴流	壁面噴流
無次元流速	$\frac{u_m}{U_0} = \frac{3.78}{\sqrt{\frac{x}{h_0/2}}} = \frac{3.78}{\sqrt{2} \sqrt{\frac{x}{h_0}}} = \frac{2.67}{\sqrt{\frac{x}{h_0}}}$	$\frac{u_m}{U_0} = \frac{3.50}{\sqrt{\frac{x}{h_0}}}$
拡がり幅	$b_{1/2} = 0.1x \rightarrow b_{1/2} = 2b_{1/2} = 0.2x$	$b_{1/2} = 0.068x$
無次元流量	$\frac{Q}{Q_0} = 0.44 \sqrt{\frac{x}{h_0/2}} = 0.44\sqrt{2} \sqrt{\frac{x}{h_0}} = 0.622 \sqrt{\frac{x}{h_0}}$	$\frac{Q}{Q_0} = 0.248 \left(\frac{x}{h_0}\right)$
連行速度	$a_e = 0.053 \rightarrow v_e = 0.053u_m$	$a_e = 0.035 \rightarrow v_e = 0.035u_m$

注 U_0 は放流速度、 x は流下方向の距離、 h_0 は放流口幅、 u_m は軸上最大流速、 $b_{1/2}$ は流速が u_m の半分となる拡がり幅（半値幅）、 Q は流量、 Q_0 は放出流量、 v_e は連行速度、 a_e は連行係数である。座標系は図-1 に示す通りである。

3. 実験的検討

実験に使用したアクリル水槽は長さ：195 [cm]、高さ：30 [cm]、幅：5 [cm] であり、上流端に噴流の放出装置を設置した。実験では流況を染料によって可視化した。なお、実験は水槽内水と同じ密度の噴流を放流する「均質噴流実験」と、塩分濃度 S を変化させて水槽内水と異なる密度の噴流を放流する「密度噴流実験」を実施した。両実験で共通の各種条件は放出口幅： $h_0=0.5$ [cm]、全水深： $H=25$ [cm]、放出流量： $Q_0=1.5$ [l/min]、放出口位置：水槽底から 7.5 [cm] である。密度噴流実験では水槽内の上下層の水深 h_1, h_2 と塩分濃度 S_1, S_2 および放出塩分濃度 S_0 を設定して実験を実施した（図-3 参照）。以下に実験結果と考察を示す。

[1] 均質噴流実験

均質噴流実験は効果的な湧昇流発生法を抽出するために実施し、本研究では(a)水槽底から上向きに放流する「自由噴流」、(b)放流方向が $\theta_0=0^\circ$ （壁面方向）である通常の壁面噴流（以下、「壁面噴流($\theta_0=0^\circ$)」という）、(c)放流方向が壁面に対して $\theta_0=30^\circ$ の傾きを持つ壁面噴流（以下、「壁面噴流($\theta_0=30^\circ$)」という）の三種のケースについて検討を行った。

図-2 は三種の湧昇流の発生法の無次元流下方向距離 x/h_0 と染料で可視化された無次元拡がり幅 b/h_0 の関係に関する実験結果を示している。同図の実験結果より壁面噴流

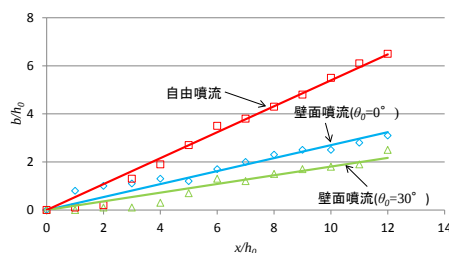


図-2 拡がり幅と流下距離の関係

キーワード 水質浄化、湧昇流、コアンダ効果、壁面噴流、密度噴流、室内実験

連絡先 〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂 TEL：049-296-2911 FAX：049-296-6501

($\theta_0=30^\circ$)のケースが最も拡がり幅が小さく、相対的に最も流速の速い、強い湧昇流が形成されていると言える。

以上の結果から、壁面噴流($\theta_0=30^\circ$)のケースに着目して密度噴流実験を実施した。なお、紙面の都合により割愛するが、コアンダ効果を利用するケースの θ_0 の効果についての実験的検討結果より、 $\theta_0=30^\circ$ のケースで最も効果的に再付着し、流速の速い壁面噴流を得たことを付記する。

[2] 密度噴流実験

写真-1 は密度噴流実験の一例を示している。同写真より、 $\theta_0=30^\circ$ の角度で放流された密度噴流が湧昇流（壁面噴流）として密度界面を貫通して上昇し、水面に到達した後、落下して密度界面近傍に侵入してゆく様子が分かる。つまり湧昇流は密度界面を破壊すると共に上昇過程で下層水を連行して上層に運ぶ。また、その後、密度界面近傍に落下混入する。これら一連の流動によって上下層が循環・混合する結果、提案する手法で水質浄化が期待できることとなる。

図-4 は(a) $X=30$ [cm] における放流前と放流後 15 分の鉛直塩分濃度分布、(b)各地点の塩分濃度の経時変化を示している（座標系および測定点位置は図-3 参照）。同図(a)より放流後は湧昇流への下層水連行によって上層の塩分濃度が上昇していること、放流後もシャープな密度界面が維持されると共に連行によって位置が下降していることが分かる。また、同図(b)の塩分濃度の経時変化より下層水の連行によって上下層が混合される様子が確認できる。これより、提案する手法が上下層循環に有効であることが示された。

ところで以上の密度噴流実験では下層水の補給を実施していないため、密度界面の低下などの非定常現象を伴うものであった。湧昇流の連行や周囲水との混合などの流況の詳細を把握するためには、湧昇流への連行量に対応する下層塩水を下流側から補給して定常状態を維持することが必要である。図-5 は $S_1=0\%$ 、 $S_2=0.6\%$ 、 $S_0=0\%$ とした上で沖側から下層と等塩分濃度となる $S_3=0.6\%$ の塩水を湧昇流の放出流量と同じ流量 $Q_3=1.5$ [l/min] 補給した実験ケースの各計測点 ch1～ch3（図-3）での塩分濃度の経時変化を示したものである。他の実験条件については図の説明文中に示して

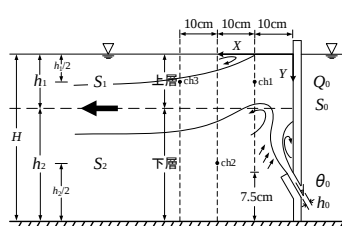


図-3 放出口近傍の模式図

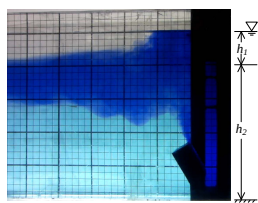
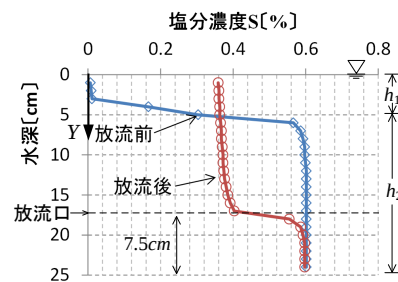
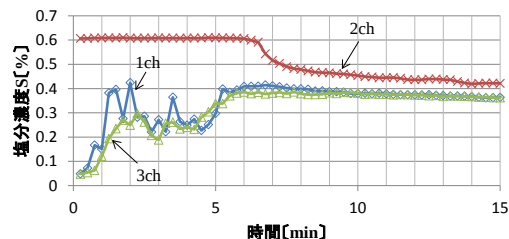


写真-1 流況の可視化
($h_1=5\text{cm}$, $h_2=20\text{cm}$, $S_1=0\%$, $S_2=0.6\%$, $S_0=0.3\%$)



(a)鉛直塩分濃度分布 ($X=30\text{cm}$)



(b)塩分濃度の経時変化

図-4 放流による鉛直塩分濃度分布と経時変化
($h_1=5\text{cm}$, $h_2=20\text{cm}$, $S_1=0\%$, $S_2=0.6\%$, $S_0=0.3\%$)

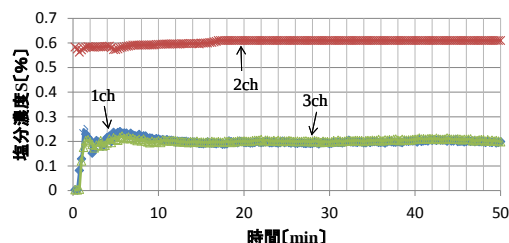


図-5 定常密度噴流実験による塩分濃度の経時変化
($h_1=10\text{cm}$, $h_2=15\text{cm}$, $S_1=0\%$, $S_2=0.6\%$, $S_0=0\%$)

いる。同図より各計測点とも放流後約 5 分で定常状態に達していることが分かり、著者等の実験装置で安定した定常状態を作り出せることが確認できた。今後は定常状態での実験により湧昇流効果の定量的評価を進める予定である。

4. まとめ

本研究は、富栄養化したダム貯水池において、湧昇流を発生させて水質改善を計るための新たな工学的手法を提案し、実験によりその有効性を検証したものである。実験的検討の結果、本研究で提案した壁面に対して斜め ($\theta_0=30^\circ$) に放流してコアンダ効果を利用して形成させる壁面噴流による湧昇流が、貯水池の上下層循環の促進に有効であることを明らかにした。なお、上下層の循環量とそれによる水質浄化効果の定量的評価は残された課題である。

参考文献

- (1) 社河内敏彦編著：噴流工学，森北出版，pp.22-27，pp.32-35，pp.44-49，2004。
- (2) N. ラジャラトナム 原著，野村安正 訳：噴流，森北出版，pp.21，1981。