

小規模水域における流動促進装置による効率的な循環流形成に関する研究

呉工業高等専門学校 正会員 ○黒川 岳司
大阪大学工学部 学生会員 尾崎 裕太

1. はじめに

貯水池のような小規模な閉鎖性水域における水質浄化対策の一つとして挙げられる流動促進装置は、循環流を形成して水温成層を破壊・緩和することが目的であるが、装置の稼働によって形成される循環流の様子は、様々な条件によって大きく異なると推測される。そこで本研究では、三次元流体解析によって、装置稼働時の循環流を特徴付けると考えられる各要素（流量、水温差、吸込み位置、底面の形状）の影響を調べ、循環流を広範囲かつ効率的に形成する方法について検討する。

2. 噴流型流動促進装置の概要

噴流型流動促進装置はまず、浮体部で表層水を取り込み、ポンプにより湖底に設置してある攪拌混合器へと圧送される。この際、混合器内で負圧が発生することで周囲の底層水が吸引され、混合器内で表層水との攪拌混合された後、装置前方に噴流として吐出される。この結果、吐出水が持つ浮力効果によって水温成層が破壊・緩和されるが、この吐出水は表層水と底層水が混合していることから、吐出水と周囲水（底層水）の密度差が小さくなるため吐出後にすぐ浮上せず、より遠方にまで、またより緩やかに成層破壊効果をもたらすことが期待される。

3. 三次元流体解析について

本研究での三次元流体解析は、3次元流体解析ソフトウェア「Quickstream」（横河技術情報）を使用した。Quickstreamは、流体を非圧縮性粘性流体として扱い、熱移流、拡散は摩擦熱を無視できる範囲と仮定し、ブーシネスク流体としている。以下に基礎方程式を示す。

$$\text{連続方程式} \quad \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\text{運動方程式} \quad \frac{\partial u_j}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \beta g_i (T - T_0) \quad (2)$$

$$\text{エネルギー方程式} \quad \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + h \quad (3)$$

ここで、 u ：速度、 P ：圧力、 ρ ：密度、 T ：温度、 T_0 ：入口温度、 β ：体積膨張率、 ν ：動粘性係数、 k ：熱拡散係数、 g ：重力加速度、 h ：エンタルピーとする。また、添字 i, j はベクトル成分を示す。

偏微分方程式を差分法で計算を行うが、時間微分の精度を上げる Adams-Bashforth 法、対流項の流れの影響を風上側に対応させる風上差分法、その他の項では中心差分法を用いている。そして、計算は非定常状態から計算を開始し、定常状態に至ると計算を終了する。

4. 解析手法

流動促進装置は水温成層の破壊を目的としているため、小規模な貯水池において夏季の水温成層が形成されている状態を想定して解析を行う。また、壁面、障害物における流速の境界条件として Non-slip 条件を与える。流動促進装置のモデルに関して、断面 $0.25\text{m} \times 0.25\text{m}$ 、長さ 1.0m の中空の直方体とし、ノズルの吐出口は $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ とした。吐出口から吐出する流体の温度設定は、水面の温度と同じにし、表層水の吐出を再現した。空間モデルに関して、流下方向を X 、装置横断方向を Y 、水深方向を Z とした。流量や水温差、吸込み位置をそれぞれ変化させることで、小規模な貯水池において循環流が広範囲で効率よく形成できる方法について検討した。

5. 解析結果と考察

5-1 流量による影響

流量を $0.025\text{m}^3/\text{s}$ から $0.20\text{m}^3/\text{s}$ まで $0.025\text{m}^3/\text{s}$ ずつ変化させ、流量と流速の U, W 成分の関係を検討した。ここでは代表例として、 $0.15\text{m}^3/\text{s}$ の場合の結果を図1、図2に示す。また、流量と流速 U, W 成分の関係をまとめたものをそれぞれ図3と図4に示す。なお、実際の装置では装置後方においては負圧が発生し底層水が吸引されているが、図1よりこのモデルではそれが再現されていることが分かる。

図3、図4より流量の増加に伴い、流速の U 成分の値には正の相関、 W 成分には負の相関があることから、流量を増加させると、流下方向への循環流の影響は大きくなるが、逆に水深方向への影響は小さくなることが明らかである。また、図4から $0.075\text{m}^3/\text{s} \leq \text{流量} \leq 0.125\text{m}^3/\text{s}$ と $0.175\text{m}^3/\text{s} \leq \text{流量}$ の範囲において傾きが他の範囲より大きい。このことから、流量を増やしていくと、流量と上昇流（流速 W 成分）の関係性が周期的に変化していくと考えられる。

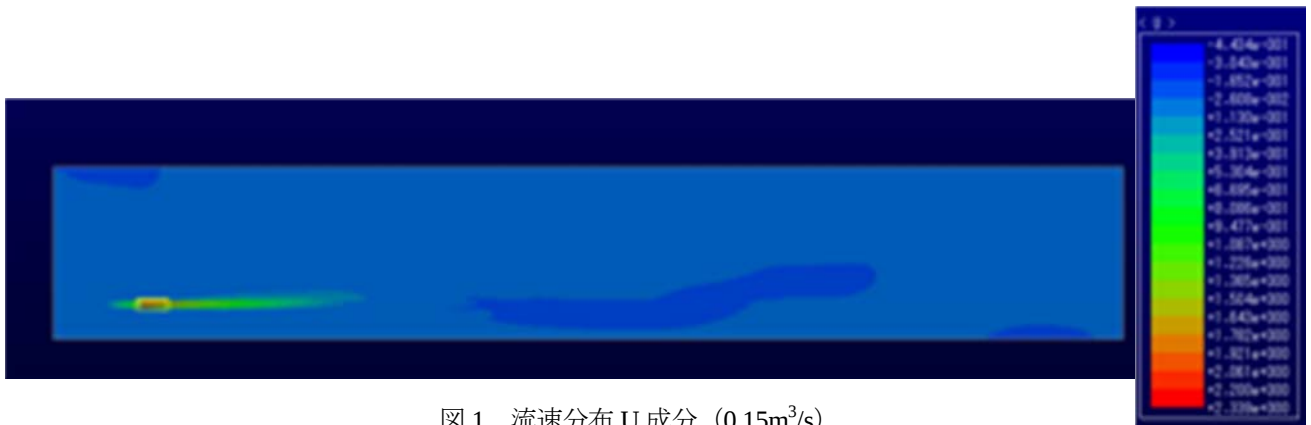


図1 流速分布 U 成分 (0.15m³/s)

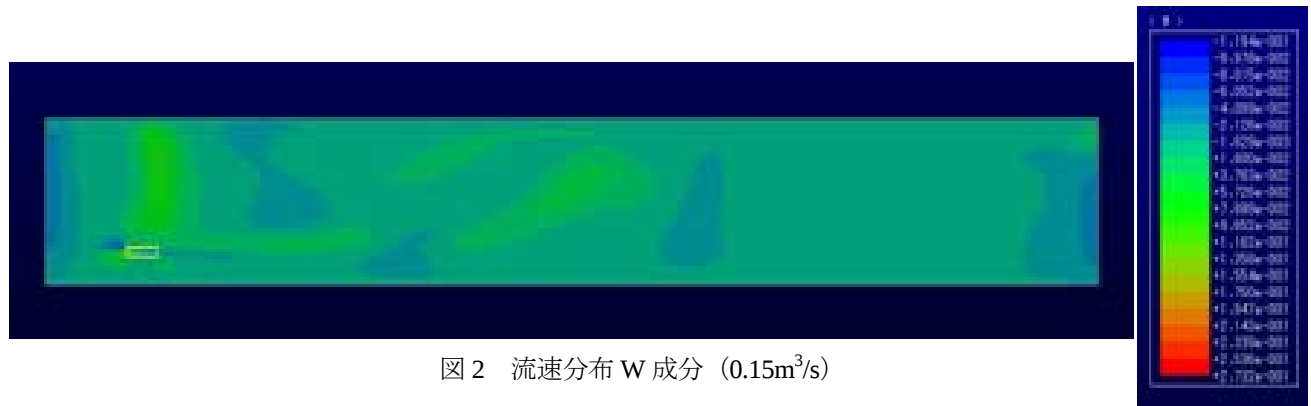


図2 流速分布 W 成分 (0.15m³/s)

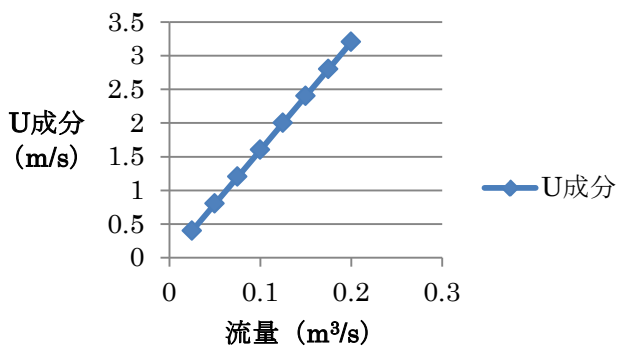


図3 流量と U 成分の関係

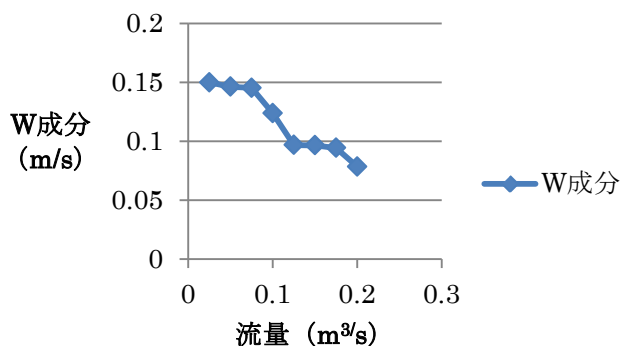


図4 流量と W 成分の関係



図5 流速分布 (温度差 3°C)

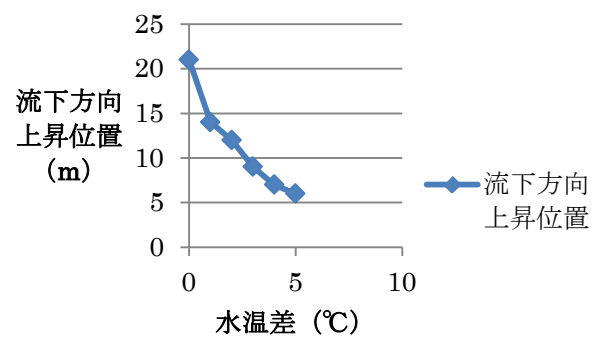


図6 水温差と流下方向上昇位置の関係

5-2 温度差による影響

次に、表層水と底層水の温度差を 0°C から 5°C まで温度差を 1°C ずつ変化させ解析を行い、温度差と混合水の上昇位置の関係を検討した。代表的な例として、温度差 3°C の場合の結果を図 5 に示し、結果をまとめたものを図 6

に示す。ただし、コンタに関しては図 1 と同様であるため以下では省略する。

図 6 から結果には負の相関がみられ、水温差が増加するにつれて、流下方向上昇位置が流動促進装置に近くなることが分かる。一般的には、水の密度は水温により決定され、表層水と底層水の水温が異なり、密度差（水温差）が大きくなるにつれて混合水に作用する浮力が大きくなることから説明できる。

5-3 水温差と吸込み位置による影響

次に、吸込み位置を装置上部から流下方向に 9.2m ずつ変化させ、それぞれの位置で水温差 0℃、1℃、3℃、5℃ の場合について解析を行い、吸込み位置と水温差の関係を検討した。代表例として、温度差 3℃ の場合の各吸い込み位置での結果を図 7 から図 11 に示す。これらより、吸込み位置を流下方向に移動させるほど、装置からの噴流が上昇し水面に達する位置が流下方向に伸びていることがわかる。そこで、各水温差において、吸込み位置と噴流の流下方向の上昇位置の関係をまとめた結果を図 12 から図 15 に示す。以下、流動促進装置からの吸込み装置までの流下方向の距離を D とする。

水温差 0℃ の場合（図 12）と水温差がある場合（図 13 から図 15）では、吸込み位置と上昇位置の関係の傾向が大きく異なる。水温差 0℃ の場合（図 12）は、 $D \leq 9.2\text{m}$ では流下方向上昇位置が一定値になっていて、 $D \geq 18.4\text{m}$ では減少している。これは、水温差がないため混合水に浮力が作用せず、 $D \leq 9.2\text{m}$ のように吸込み位置が装置上部にある場合は、吸込み装置による影響がなく噴流が最遠端まで達して大きな循環流が生じ、 $D \geq 18.4\text{m}$ では混合水に浮力は作用していないものの吸込み位置による影響が生じて混合水が上昇したと考えられる。

一方、水温差がある場合（図 13 から図 15）では、吸込み位置が装置に近いほど上昇位置も近くなり、吸込み位置が離れるにしたがって上昇位置も遠くなる傾向にある。例えば、図 14 に示す水温差 3℃ の場合、 $0\text{m} \leq D \leq 9.2\text{m}$ では D の増加に伴い、流下方向上昇位置が増加し、傾きも大きく、 $9.2\text{m} < D \leq 18.4\text{m}$ では $0\text{m} \leq D \leq 9.2\text{m}$ に比べ傾きは緩やかであるものの、 D の増加に伴い、流下方向上昇位置は増加している。ただし、 $D > 18.4\text{m}$ では D が増加しても流下方向上昇位置は変化せず、一定値となっている。つまり、基本的には吸込み位置を流下方向に遠ざけるほど循環流の形成領域を大きくすることができ、この効果は大きい。水温差による浮力作用もあるため、吸込み位置を流下方向に遠ざけることによる形成領域拡大の効果には限界があることを示している。このことから、例えば水温差が 3℃ の場合は、 $D=18.4\text{m}$ 程度とした場合がエネルギーの損失を一番少なくでき、効率的に混合水を循環させることができると考えられる。

5-4 水深の変化と水温差による影響

次に、水深の変化の影響、言い換えると底面形状の影響について検討する。底面が上昇し水深が浅くなり始める位置を、流動促進装置からの距離 13m を基準として 3m ずつ変化させ、それぞれの場合で水温差 0℃、1℃、3℃、5℃ について解析を行った。ここで、流動促進装置から水



図 7 流速分布（水温差 3℃ $D=0\text{m}$ ）

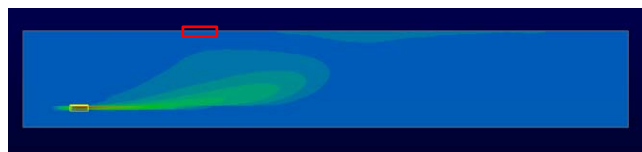


図 8 流速分布（水温差 3℃ $D=9.2\text{m}$ ）



図 9 流速分布（水温差 3℃ $D=18.4\text{m}$ ）



図 10 流速分布（水温差 3℃ $D=27.6\text{m}$ ）



図 11 流速分布（水温差 3℃ $D=36.8\text{m}$ ）

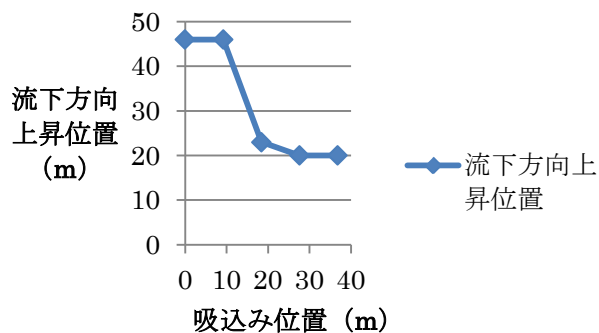


図 12 吸込み位置と流下方向上昇位置（水温差 0℃）

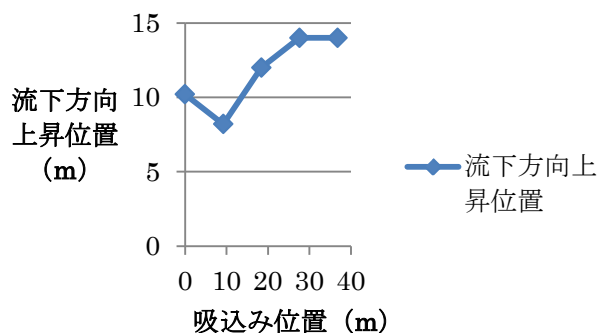


図 13 吸込み位置と流下方向上昇位置（水温差 1℃）

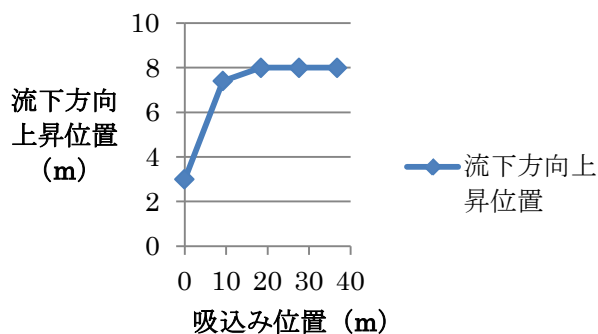


図 14 吸込み位置と流下方向上昇位置 (水温差 3°C)

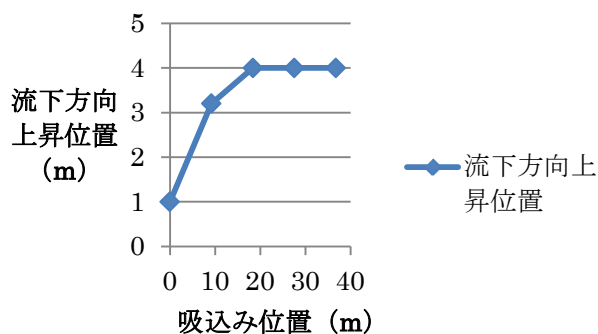


図 15 吸込み位置と流下方向上昇位置 (水温差 5°C)

水深変化位置までの距離を S とする。代表例として、水温差 0°C で $S=13\text{m}$ と $S=16\text{m}$ の場合と 1°C の場合の各位置での結果を図 16 から図 22 に示す。

水温差が 0°C の場合は、水深変化位置が $S=13\text{m}$ を超えると混合水が吸込み装置の影響により、水深変化位置の影響を受けないが、 $S \leq 25\text{m}$ では混合水が底面に衝突し、衝突による影響を受け、混合水が水深方向に流れ始める。水温差が 1°C の場合は、 $S \geq 17\text{m}$ では水深変化位置の影響を受けていないが、図 13 から水温差 1°C の場合は流下方向上昇位置が 14m であることから $S < 14\text{m}$ においては影響を受けると考えられる。その他の水温差においても同様の傾向が得られた。ただし、これらの底面形状の変化の影響は、底面に衝突して初めて影響を受けるものであって、実質的には影響はほとんどないと言える。

6. 結論

本研究では、三次元流体解析を行い、流動促進装置稼働時の循環流に対する流量、水温差、吸込み位置および底面の形状の各影響を調べ、循環流を広範囲かつ効率的に形成する方法を検討し、以下の知見を得られた。

- (1) 流量を増加させた場合、流下方向への影響は比例的に増加するが、流量の増加に対する噴流の到達距離の増加割合は大きくない。
- (2) 水温差が小さい場合、混合水に作用する浮力が小さいため、混合水の上昇位置が流動促進装置に近くなり、装置付近に関しては成層破壊効果が見られたが、

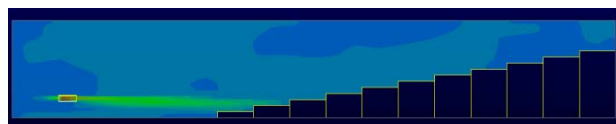


図 16 流速分布 ($S=13\text{m}$ 水温差 0°C)

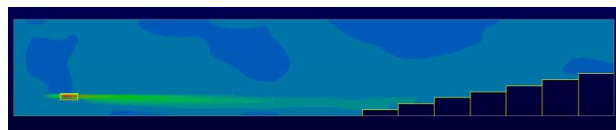


図 17 流速分布 ($S=25\text{m}$ 水温差 0°C)



図 18 流速分布 (水温差 3°C $S=13\text{m}$)

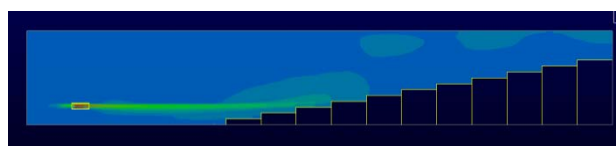


図 19 流速分布 (水温差 3°C $S=16\text{m}$)

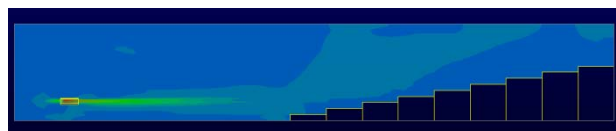


図 20 流速分布 (水温差 3°C $S=19\text{m}$)



図 21 流速分布 (水温差 3°C $S=22\text{m}$)



図 22 流速分布 (水温差 3°C $S=25\text{m}$)

広範囲での成層破壊効果はあまり期待できない。

- (3) 吸込み装置の位置が噴流の到達距離に与える影響は大きく、流動促進装置から前方 18m 程度先の水面に設置した場合が最も効率的に循環流の形成領域を大きくすることができる。ただし、水温差による浮力作用もあるため、吸込み位置を流下方向に遠ざけることによる形成領域拡大の効果には限界がある。
- (4) 底面形状の影響は、噴流の底面に衝突した場合のみ影響を受けるため、実質的には影響は小さい。

参考文献

- 1) 平原裕, 黒川岳司, 北真人: 噴流型流動促進装置が導入された貯水池における流動の解析: 第 63 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, II-28 (2011)