複合型曝気循環装置の強制水循環に関する実地調査実験*

－浅層の水溫躍層破壊過程と循環構造の可視化－

中田 亮生¹⁾, 岩松 裕二²⁾, 須山 史昭³⁾, 山岸 真孝⁴⁾, 細木 佑索⁴⁾

Field Experiment on Forced Water Circulation

by Multifunctional Aerator in a Dam Reservoir

- Visualization of Thermocline Destruction Process and Flow

Structure in Shallow Layer -

Akinori NAKATA, Yuji IWAMATSU, Fumiaki SUYAMA, Masataka YAMAGISHI and
Yusaku HOSOKI

ABSTRACT

Multifunctional aerators were installed in Hiyoshi Dam in Kyoto to oxygenate the deep anaerobic water layer and destroy the thermal stratification in the shallow layer. In August of 2011, field experiments were performed to ascertain the effect of thermocline destruction. In the experiments, the temperature and flow distributions were directly measured near one of the aerators with a high spatial and temporal resolution, and a video camera clearly captured images of water containing sediment that was lifted from the deep layer. Analysis of the data confirmed that the thermocline in the shallow layer was destroyed within an 8-10m radius of the aerator and to a 3m depth in a period of 10minutes, and a horizontal intrusion was present at a depth of 2.7m in the external region. In addition, to assess the performance of the aerator for thermocline destruction, the thermal energy, potential energy and circulation flow rate were also investigated.

Keywords: Forced water circulation, Air bubble plume, Field experiment, Thermocline, Stratified reservoir

1. はじめに

ダム貯水池のような閉鎖性水域における水質問題には、アオコや淡水赤潮と呼ばれる藻類の異常増殖、深層の水域の嫌気化（酸素の欠乏）とそれに伴う底泥の重金属類等の溶出、洪水後の濁水が長期間にわたって停滞する濁水問題、夏季に深層の低温水が放流されてしまう冷水害などがある。中でも特に深刻な問題は、藻類の異常増殖と深層水の嫌気化であろう。これらの問題は、水域内の循環状況、流入する栄養塩類濃度、日射、気温などの複合的な要因で発生する。通常、夏季においては、強い日射と気温の上昇が表層の水温を上昇させ、その鉛直勾配が大きい安定した密

度成層、いわゆる水溫躍層を形成し、結果として、水域の鉛直混合が抑制されて問題が顕著化する。

以上のような水質問題を改善する主な対策として、種々の曝気循環装置が導入される。一般に、地上よりコンプレッサーを用いて、空気を十数から二十メートル程度の水深で開放し、酸素を供給して嫌気化を直接的に改善する。さらに、その空気塊または気泡群が、周囲の水を連行することによって強制的な水循環を作り出し、成層の破壊と発達抑制、さらには藻類の有光層への滞留などを防止する。

曝気循環装置は一般に、水質改善要求やその規模に応じて、次の4方式¹⁾に分類される。

(1) 全層循環：底層から散気し、全層にわたって循環させて可能な限り躍層を破壊する。

(2) 躍層低下：躍層よりやや下方から散気し、躍層をより深層に下げる。

(3) 浅層（表層）循環：躍層またはそれより上方で散気し、躍層を維持した状態で浅層域での水循環を実現する。

* 原稿受付 2014 年 9 月 8 日

1) 正会員 大阪電気通信大学 工学部 (〒572-8530 大阪府寝屋川市初町 18-8, E-mail: a-nakata@isc.osakac.ac.jp)

2) 水資源機構 琵琶湖開発総合管理所

3) 大阪電気通信大学大学院 工学研究科

4) 丸島アクアシステム 環境エンジニアリング部

(4) 深層(水)曝気: 嫌気化した深層水を取り込んで酸素を供給し, 再度深層に返す(躍層を維持して嫌気化を抑制する)。

京都府南丹市の日吉ダム貯水池に, 2009 年に導入された曝気循環装置は, 上記の(2)躍層低下または(3)浅層循環方式(躍層の位置によって方式が変わる)に加え,

(4) 深層曝気方式を, 選択的に実現できる複合方式の新型装置である。その装置の性能評価の一環として, 著者らはこれらの効果を現地で調査する機会を得た。ここでは, 本装置の浅層循環機能の詳細な評価を目的とし, 気泡噴流が水温躍層を破壊する過程と, それを引き起こす水循環構造について調査した結果について報告する。

曝気循環装置による水循環に関しては, それが流体力学的な観点からも興味深い現象である。貯水池などの密度成層を対象とした模型実験または理論的な研究は数多く, Mcdougall²⁾の実験的研究が先駆的で, Asaeda ら³⁾の成果は現在も, 曝気による水域内の基本的な循環構造の把握や循環(揚水)流量設計に多く活用されている。現地においてその流動現象を把握するための調査も多数報告されており, 例えば国内のダムでは, 松梨ら⁴⁾が, 全層曝気循環装置の1つである空気揚水筒を対象とし, 気泡弾の放出水面近傍で電磁流速計を用いて計測を行い, 流速分布から連行流量と効率を求めている。その他にも丹羽ら⁵⁾, 豊島⁶⁾, 梅田ら⁷⁾, 岩松ら⁸⁾など, 海外では, Imberger ら⁹⁾, McGinnis ら¹⁰⁾, Singleton ら¹¹⁾など多くの報告例がある。

以上の研究から得られた知見の一つは, 気泡噴流によって連行された低温の水塊が, 浅層における高温のそれと混合し, その後, 密度流として水平方向に広がるイントリュージョンを含む循環構造が, 広範囲の貯水池の水質を管理する上で重要であるという点である。しかしながら, このような気泡噴流が引き起こす水循環について, その2次元鉛直断面の構造を時系列で詳細に現地観測した例は, Imberger ら⁹⁾, 梅田ら⁷⁾, 岩松ら⁸⁾に限られる。

Imberger ら⁹⁾は, Wungong Dam 貯水池(オーストラリア)に設置された散気装置から放出される気泡噴流の近傍で, 水温や塩分濃度などを観測し, 密度成層とイントリュージョンの構造を示した他, 2個の音響センサーから複合された音響画像よりサーマル構造を可視化している。さらにそれらの結果から, 気泡噴流のエネルギー変換過程などを明らかにしている。梅田ら⁷⁾は, 湖底設置型散気装置が複数台設置された土師ダム貯水池(広島県)を対象に, ADCP(超音波多層流向流速計)を取り付けた観測船の曳航による流動空間分布計測, 曝気の近傍に設置した ADCP による1ヶ月間の流速分布計測および多水深に取り付けた水温計から水温成層の状態を計測し, イントリュージョンの特性を詳細に把握している。一方, 岩松ら⁸⁾は本研究に先立って2010年夏, 日吉ダムに設置された新型曝気循環装置が, 運転開始より約1時間後の定常な貯水池状態に

において, 装置近傍の鉛直断面の水温・流速分布を観測し, 装置上方の直接的な躍層破壊範囲と, そこから水平に広がるイントリュージョンを可視化し, 散気部形状の違いによる気泡噴流とその流動状態の相違について検討している。

本研究では, 岩松らが実施した上記の調査実験に引き続き, 本装置の浅層循環機能の詳細な評価を目的とし, 深層からの水連行による躍層破壊の進行過程と循環構造を, さらに高い空間・時間分解能で調査する実験を, 2011年8月に行った。実験では第一に, 温度計を取り付けた計測ケーブルを, 装置より北側20m×深さ20mの範囲で掃引し, 2次元断面の水温分布を1分ごとの30分間にわたって計測した。第二に, 装置周辺の流れが安定した状態で, 2次元の電磁流速計を装置近傍に設置して流速・流向を計測した。以上の計測を, 曝気循環装置への供給空気流量が異なる条件について行い, 空気流量による影響も調べた。また, 当時の貯水池では実験前から中・深層でかなり濃い濁水が滞留しており, 幸いにも装置から解放される気泡噴流がそれを連行し, 貯水池表面に広がる結果となった。そこで実験中, ビデオカメラを用いて貯水池表面を撮影し, その濁水の広がりから, 水温と流速の計測結果に対応する流れの可視化映像を得た。以上の結果から, 躍層破壊の進行過程と循環構造を, これまでにない空間・時間解像度で明らかにするとともに, 躍層破壊の効果と循環流量を定量的に評価し, 装置の浅層循環性能を確認したので報告する。

2. 日吉ダム貯水池と複合型曝気循環装置

2.1 日吉ダム貯水池(天若湖)

実験の対象とする日吉ダム(京都府南丹市日吉町)は, 淀川の総合開発の一環として, 淀川水系桂川に建設された多目的(洪水調節, 不特定利水, 上水道)ダムで, 堤頂長は438m, 堤高は67.4mである。その貯水池の堤体近傍の水域図をFig.1(全体図を左下に表示)に示す。貯水池は天若湖(あまわかこ)とも呼ばれ, 貯水池の面積は2.74km², 最大貯水量は6,600万m³である。図中の点線で描いた丸(2箇所)の位置の水中に, 新型の曝気循環装置が2基設置されている。これら装置の上流側にみられる破線は, 流木の侵入を防ぐ網場で, その中央には水温, 水質の鉛直分布を6時間ごとに計測する自動観測装置が設置されてい

Fig. 1 Hiyoshi dam and its reservoir (Amawakako).

る。ダム湖の北岸には、曝気循環装置への空気供給のためのコンプレッサー室（15kW×2台）、船着き場がある。

2.2 複合型曝気循環装置

日吉ダム貯水池に2009年、複合型曝気循環装置として導入された新型装置の概略をFig. 2（中央）に示す。当該装置は、地上より圧縮機によって貯水池深層に送り込まれた空気塊を、湖底に垂直に設置された装置本体（二重構造の管、最大直径2m、長さ16m）の内側管内最下部から上方に散気する。散気された空気は、内側管内を上昇する際に、その下端の開閉部より深層水を取り込んで連行しながら酸素を供給する。酸素が供給された深層水は内側管上端の開閉部まで上昇し、その後、外側管に流れ込んで下降し、再び深層に返される（深層曝気）。この過程で、全供給量の90%程度と見積られる未溶解空気は、装置上方で気液分離されて装置外部の水中に直接開放され、その浮上作用が周囲の浅層水を連行して循環させる（浅層循環）。未溶解空気開放部の真上には、直径1m、高さ40cmの盃形状のコーンが設置され、空気塊を分断して気泡群として放出し、効果的に水を連行するように工夫されている。ただし、洪水後の濁水や冷水が浅層に巻き上げられて問題になるなど、浅層循環を行うことが水質改善に寄与しない場合には、装置上方に接続された排気管を通じてこれを水面上に解放し、浅層に影響を与えることなく深層曝気のみを行う。

Fig. 2 Composed aerator and measurement method of water temperature in shallow layer.

3. 調査実験実施期間中の貯水池環境

調査実験は2011年の8月9日（予備実験）および8月16～18日（本実験）に実施した。4日間の日中の天候は概ね晴れで、24時間を通じて降水もほとんどなく、強固な躍層が形成される典型的な夏季の貯水池環境となった。今回の実験対象としたのは2号機（Fig. 1の水域内東側）で、実験期間中は、貯水池の流入・放流量も少なく、その水位は8月9日が177.2EL.m、8月16～18日が175.4～174.8EL.m（平均175.1EL.m）と安定していた。これより、気塊（気泡）が放出される装置上部の水深は、それぞれ12.7mと10.9～10.3m（平均10.6m）となる。また、実験期間中、水深10m近傍より深い中・深層で、濃い濁水の滞留が観測

されていた。これは、後述する水温および流速の計測結果と対応する映像が得られる好条件となった。

4. 水温計測による躍層破壊過程の可視化

4.1 計測の方法

水温計測の基本的な方法を示した概略図をFig. 2に示す。28個の熱電対（K型、素線径0.3mm）を取り付けた長さ20mの計測用ロープを、計測用フロートと錘（真鍮、質量6.8kg）を用いて、水面から鉛直に吊るした。計測用フロートの上には、ポータブルデータロガー（江藤電気、THERMIC 2300A）6台を格納した水温計測ユニットが搭載されている。熱電対の取り付けは、Fig. 2の右下に示すように、水温の鉛直変化の大きい水面付近を比較的密にした。計測用フロートは、移動用ロープを使用して、曝気装置真上から北へ向かって20mの距離の水面上を、40sかけて等速で移動（速度：約0.5m/s）させた。データロガーの計測周期は0.2sに設定したので、断面の水平方向の分解能は10cmとなる。計測用フロートの移動は、作業用フロートと作業船上の作業員が、移動用ロープの引っ張り手繰り出しを交互に繰り返して行った。移動用ロープには2mごとに印をつけ、装置真上を貯水池南岸から北岸に向かって南北に張った位置決め用のロープに沿うようにした。事前に移動作業のリハーサルを行い、フロートの1移動（20m）にかかる時間（40s）の誤差は概ね1s以内を実現した。

計測はまず、水温の初期値を得るために装置稼働直前に行った。その後速やかに装置を稼働し、曝気直後（気泡の水面放出直後）から再開し、往路の計測（40s）の後、20sの待機時間を設け、復路の計測（40s）を行った。このように、計測と待機を30分間（15往復）繰り返した。なお、計測用ロープには相当の流水抵抗が作用し、それが鉛直より最大約30°傾くため、得られた水温データは後に、移動速度の誤差と併せて位置補正（水平と深さ方向）を行った。

曝気循環装置への供給空気流量 Q_a は、大気圧 p_0 で1.4と0.7Nm³/minの2通りとし、計測（装置稼働）日時は、本実験1日目（8月16日）の12:26から（ $Q_a=1.4$ Nm³/min）と、同2日目（8月17日）の11:58から（ $Q_a=0.7$ Nm³/min）である。少なくとも計測前12時間は装置を運転せず、貯水池には可能な限り人為的な擾乱が無いように配慮した。

4.2 計測結果

供給空気流量 Q_a が1.4と0.7Nm³/minの場合について得られた鉛直水温分布の例をFig. 3から6に示す。1断面の計測には40秒を要するが、時刻 t はすべて計測開始時刻を示す。Fig. 3から5のコンター図はいずれも、横軸が装置から北に向かう半径座標 r 、縦軸が水深 d を示す。また、Fig. 3右と6は、曝気前後の代表的な水温分布を半径 r が0,5,10,15mで抽出して示している。装置の散気部は、半径 $r=0$ m、水深 $d=10.9\sim10.3$ mの位置にある。ただし、その位置での計測値は、噴流が計測点を東西方向に1～2m移動

させてしまうための誤差を含む。

曝気前は、水平方向に概ね一様な成層が形成されていることは、これまでの実験経験からも明らかである。しかしながら、計測の方法でも説明したように、計測用ロープが流水抵抗により傾くため、得られた元データの水温分布もそれに応じて変化する。そこで、曝気前の水温分布が、水平方向に一様になるよう、ロープが直線と仮定してその傾き角度を時系列で推定し、水平と深さ方向の位置補正量を求めた。この補正量を、曝気後の水温分布の位置補正に一律に適用している。そのため、水深が 15~20m のデータが一部欠損するので、その領域は省略してある。

曝気前の水温分布から、浅層の水温躍層（水温の急変層）は水深 3m 付近にあることがわかる。空気流量 Q_a が $1.4\text{Nm}^3/\text{min}$ の場合の曝気後の温度コンター図の代表例を、Fig. 4 に時系列で示している。計測された全てのデータよ

Fig. 3 Initial condition of water temperature near aerator (2011/8/16 12:26).

Fig. 4 Contour diagrams of water temperature near aerator for $Q_a = 1.4\text{Nm}^3/\text{min}$ (2011/8/16 12:26).

Fig. 5 Contour diagrams of water temperature near aerator for $Q_a = 0.7\text{Nm}^3/\text{min}$ ($t_0 = 2011/8/17$ 11:58).

(a) $Q_a = 1.4\text{Nm}^3/\text{min}$, $t = 14\text{min}$ (b) $Q_a = 0.7\text{Nm}^3/\text{min}$, $t = 13\text{min}$

Fig. 6 Vertical distribution of water temperature near aerator. 判断すると、気泡によって下層から連行されてきた冷水が、その上方で徐々に拡がり、曝気開始より概ね 10 分で、半径 r が約 10m、水深 d が約 3m までの範囲で安定した冷水塊を形成する。この冷水塊は時間が経過しても拡大せず、その境界は半径約 2m の振幅で時間的に変動している。

供給空気流量 Q_a が $0.7\text{Nm}^3/\text{min}$ の場合について得られた結果は Fig. 5 に同じ様式で示している。この場合についても、先と同様な躍層の破壊過程がみられる。ただし、冷水塊の半径 r は、曝気流量が多い $1.4\text{Nm}^3/\text{min}$ の場合に比べてやや小さい約 8m となっている。

4. 3. 定点計測による結果

冷水塊が拡がる半径 r が 10m の計測点において、Fig. 2 に示した水温計測装置を固定し、温度分布の時系列変化を

計測した。曝気時間は本実験 3 日目 (8 月 18 日) の 9:44 ~10:23 ($Q_a=1.4\text{Nm}^3/\text{min}$ の場合) と, 同 10:51~12:36 ($Q_a=0.7\text{Nm}^3/\text{min}$ の場合) である。結果の一部を Fig. 7 に示す。図 (a) に示す空気流量が多い場合には, 躍層破壊の半径が平均 10m であるため, 曝気中の温度変化が水面付近で明瞭に確認できる。曝気前には浅層で水温 27°C 以上の領域が広範囲に見られるが, 曝気開始以降にほとんど消失している。ただし, この状態は, 曝気を停止すると速やかに元に戻る。興味深い点は, 曝気中, 水深 $0\sim 4\text{m}$ で, 時間軸に直行する波状の温度変化が確認できることである。これを詳細に示すため, 水深 d が 1.5m における水温の時系列図を, コンター図の下に併記している。曝気開始数分で, それまで 29°C 程度だった水温が約 3°C 低下しているが, その後明らかに大きく変動している。先に述べたように, これは破壊範囲が拡張・収縮を繰り返しているためと考えられる。周期は $1\sim 2$ 分である。一方, 図 (b) に示す曝気流量の少ない場合には, 躍層破壊の半径が平均 8m であるため, それが計測点まで十分に届いていない。したがって, 浅層において水温 27°C 以上の領域が, 相対的に多く残存している。ただし, 破壊範囲が拡張・収縮を繰り返すため, 曝気流量が多い場合より, 相対的に高い温度帯で変動している。

Fig. 7 Time history of water temperature at a fixed point of $r=10\text{m}$.

4. 4. 躍層破壊の定量的評価とイントリュージョン

装置真上における躍層の直接的な破壊効果を定量的に評価するために, 曝気前の水温 T_0 と曝気後の水温 T との差分 ($T-T_0$) を求めた。一例として, 曝気流量が $1.4\text{Nm}^3/\text{min}$

の場合 (14min 後) を Fig. 8 の (a) 図, $0.7\text{Nm}^3/\text{min}$ の場合 (13min 後) を同 (b) 図に示す。水温の低下部分を青, 上昇部分を赤で示す。また, 半径 r が $0, 5, 10, 15\text{m}$ での各値を抽出したものを Fig. 9 に示している。これらより, 装置真上から半径 $r=10\text{m}$ または 8m までの浅層で特に, 水温の低下量が大きいことがわかる。

(a) $Q_a=1.4\text{Nm}^3/\text{min}$, $t=14\text{min}$ (b) $Q_a=0.7\text{Nm}^3/\text{min}$, $t=13\text{min}$
Fig. 8 Water temperature change from initial condition

(a) $Q_a=1.4\text{Nm}^3/\text{min}$, $t=14\text{min}$ (b) $Q_a=0.7\text{Nm}^3/\text{min}$, $t=13\text{min}$
Fig. 9 Water temperature change from initial condition

Fig. 8 と 9 に示したような水温分布が装置上方に同心円状に広がっていると仮定し, その水温差と躍層破壊範囲の体積 V から, 躍層の熱的破壊効果を定量的に示す指数 I_d (Direct destruction Index of thermocline) を次式:

$$I_d = \int |T - T_0| dV \quad (1)$$

で定義して導入した。単位は $^\circ\text{C} \cdot \text{m}^3$ (または $\text{K} \cdot \text{m}^3$) であり, これに水の密度 ρ_w (kg/m^3) と比熱 C ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$) をかけると, この範囲における熱量の変化分 ΔQ :

$$\Delta Q = \rho C \cdot I_d \quad (2)$$

が得られることになる。各空気流量 (1.4 と $0.7\text{Nm}^3/\text{min}$) に対する躍層破壊範囲として, 半径 r を 10m と 8m とした。水深 d に関しては, 水温変化の中立線となる $d_c=2.7\text{m}$ を基準にして, その上方を冷却域, 下方 5m までを加熱域とし, それぞれの成分 (I_c , I_h) に分けて算出した。したがって, I_c と I_h の合算値が破壊指数 I_d :

$$I_d = I_c + I_h \quad (3)$$

となる。求めた破壊指数 I_d とその内訳 (I_c , I_h) および熱量変化分 Q を Table. 1 に示す。空気流量 Q_a が半分になる

と, 破壊指数 I_d の値も概ね半分になっている。

曝気前後の水温変化より, 増加した成層のポテンシャルエネルギー ΔE_p が, 次式より求められる。

$$\Delta E_p = 2\pi g \int r z \cdot \{\rho_w(T) - \rho_w(T_0)\} dz dr \quad (4)$$

ただし, $\rho_w(T_0)$ と $\rho_w(T)$ とは, 曝気前後の水温 (T_0 と T) における水の密度, z は上方を正とする位置座標, g は重力加速度を示す。先に示した躍層破壊範囲に限定して, ΔE_p を求めたものを Table 2 に示す。空気流量 Q_a が半分になると, これらの位置エネルギーも概ね半分になっている。参考までに, 散気水深 d_a が 10.6m への空気塊投入動力 P_a :

$$P_a = p_0 Q_a \ln(\rho_w g d / p_0 + 1) \quad (5)$$

と, それを基準にした混合効率 η :

$$\eta = \Delta E_p / (P_a t) \quad (6)$$

を計算したものを併せて Table 2 に示す。効率値は Asaeda ら³⁾ の模型実験の値 (約 5%) より小さい。これは, ここで示した範囲外へのエネルギーの散逸があるからである。

Table. 1 直接的な躍層破壊域の熱量変化

Q_a [Nm ³ /min]	$r \times d_c$ [m]	I_d (I_c, I_h) [$\times 10^3$ °C · m ³]	ΔQ [MJ]
1.4	10×2.7m	I_d : 2.82	11.6
		I_c : 2.52	(-)10.4
		I_h : 0.30	(+)1.22
0.7	8×2.7m	I_d : 1.56	6.45
		I_c : 1.28	(-)5.28
		I_h : 0.28	(+)1.17

Table. 2 直接的な躍層破壊域の位置エネルギー増加

Q_a [Nm ³ /min]	P_a [W]	ΔE_p [kJ]	η [%]
1.4	1669	26.4	1.9
	($d_a=10.6$ m)	(14min 後)	
0.7	835	13.2	2.2
	($d_a=10.6$ m)	(13min 後)	

Fig. 8 に示した結果からは, 躍層破壊におけるもう一つ重要な事柄が確認できる。直接的な躍層破壊範囲より外側 (半径 $r > 10$ または 8m) で, 半径方向に水平に伸びる水温の変化を示す細長い領域がある。躍層の直接破壊範囲を決定する際に採用した, 水温変化の中立水深 ($d_c=2.7$ m) の上層では水温は低下し, 下層では上昇している。この部分は, 中層より連行された水塊が真上の躍層を直接破壊した後, 等密度の水深へと水平に貫入するイントリュージョンを示していると推測される。今回の実験では, 装置近傍の直接的な躍層破壊の過程に着目して, 短時間かつ狭範囲の計測を行ったが, このイントリュージョンが長時間をかけて, 徐々に貯水池全体の躍層を破壊することになる。Table 2 に示した効率値が Asaeda ら³⁾ のそれより小さかったのは, このイントリュージョンの水温変化を除いたためである。なお, 貯水池全体の躍層破壊については, 翌

2012 年に広範な実験を行っているの, 追って報告する。

5. 流速計測による流れの可視化

5.1. 計測の方法

装置上方周辺の流速分布を計測するため, 二次元電磁流速計 (JFE アレック, AEM213-D) を使用した。流速計のセンサー部分は直径 5cm, 長さ 30cm の円柱形で, 円柱の長手方向に直行する二次元断面での流速が計測できる。センサー部分を計測用フロートの中央に加工された穴から, 計測用ケーブルを携えたロープを介して水中に沈めた。ロープはフロートの上部で, ロープ固定用フレームと滑車によって, 任意の深さに調整・固定が簡単にできるよう工夫し, 他端には錘 (真鍮, 質量 3.5kg) を付けて鉛直を保持した。計測深さは, 水面から水深 1m までは密に, それより深いところでは粗く設定した。計測は本実験 3 日目 (8 月 18 日), 気泡噴流が水面に表れてから 30 分以上経過した比較的安定な状態で実施し, 各計測点で原則 30 秒の時間をかけて平均流速を求めた。このような計測を, 曝気装置真上より南側に 3.5, 6.0, 10, 15m および北側に 3.5m 離れた位置で実施した。位置設定の誤差は, 風によって水面上のフロートが少し流される場合があるため, 東西に概ね ± 0.5 m である。実験時の貯水池環境から, 装置を運転しなければ水の流れはほとんどなく, また後述する水面の状態からも, 装置による擾乱は概ね同心円状に広がると推測できた。このため, 水温と流速との計測位置が南北に異なっても, 同じ方向で得たものと大差ないと判断した。

5.2. 計測結果

空気流量が 1.4Nm³/min の場合に得られた流速の計測結果を Fig. 10 に示す。装置に近い 3.5m 地点では, 南・北側ともに水面近くで 30cm/s 程度になるが, 水深とともに急激に小さくなり, 1m より深いところでは 10cm/s を下回る。流向はややばらつきがあるが, 南・北側のデータを併せて考えると, 水面付近では装置から離れる方向 (半径方向) に, それより少し深くなると装置を中心に反時計回りに緩やかに回転しながら中心に向かうと推測できる。南側 6m の地点では, 水面付近での流速が 3.5m の地点に比べてやや小さい。流向は, 水面近くでは装置から離れる方向であるが, 水深が深くなるにつれて装置に近づく方向へと滑らかに変化する。南側 10m の地点では, 水面近くの流速がさらに小さい。流向は興味深い分布を示す。水面近くでは, 装置から離れる流れと近づく逆の流れが観測され, 水深が深くなると概ね装置から離れる流れとなる。南側 15m の地点では, 流速は全体的に小さくなる。流向についてはデータのばらつきが大きい, 水面近くでは装置に近づく方向, 水深が深くなると装置から離れる方向と判断できる。

以上の流れの分布を全て併せて考慮すると, Fig. 11 に示すような流れのプロファイルが解析できる。装置から放出される気泡群は, 周辺の水塊を緩やかに左回りに巻き込

みながら表層まで連行し、連行された水はその後、水面近くで装置から離れるように周辺に拡がる。さらに半径 10m 付近で、水深 3m 付近まで潜り込んで水平に拡がる。これに対応するような二次循環流が、半径 10m 以上の範囲で発生している。水面付近での連行流の前線位置は一定ではなく、半径 10m の位置を中心にして前進・後退を繰り返しながら時間的に変動している。

曝気流量が $0.7\text{Nm}^3/\text{min}$ の場合は、紙面の都合により詳細なデータは割愛するが、得られた流速値から解析すると、Fig. 10 と同様ではあるが半径方向にやや規模の小さい循環構造がみられ、連行流の前線位置は約 8m と推測された。

なお、これらの流れのプロファイルは、いずれの空気流量の場合も、すでに得られた水温分布特性とよく対応する。

Fig. 10 Horizontal velocity distribution for $Q_a = 1.4\text{Nm}^3/\text{min}$.

Fig. 11 Estimated flow profile for $Q_a = 1.4\text{Nm}^3/\text{min}$.

6. 貯水池表層への濁水連行とイントリュージョン

6.1. 濁水の撮影画像

貯水池中層（水深約 10m）の水は当該装置の気塊放出によって表層に連行される。今回の実験では幸いにもそれ以

深に濃い濁水が滞留していたため、それをトレーサーとして連行流の広がり調べることができた。

Fig. 12 に、水面に濁水が広がる様子を撮影した写真を示す。撮影日は 8 月 9 日（予備実験日）で、このときの供給空気流量は $1.4\text{Nm}^3/\text{min}$ であった。いずれも北岸のコンプレッサー室近傍より撮影したものである。曝気開始時刻（気泡が最初に水面に到達した時刻）は 11:05 であり、それから 27 分後までの代表的な写真を選んでいる。図 (a) はその 5 分後の写真である。形状が若干いびつではあるが、すでに直径約 20m の円状に濃い濁水が広がっている。興味深いことは、その濃い濁水の外側に、点線で示した薄い濁水の広がり確認できることである。さらに時間が経過すると図 (b) と (c) に示すように、濃い濁水の領域は変化しない一方、薄い濁水の領域は拡大を続けている。27 分後の図 (d) からは、濁水が網場の近くまで到達している様子がわかる。水温と流速の結果を併せて考慮すると、濃い濁水が表層の躍層破壊範囲に対応し、薄い濁水が水深 2.7m で見られたイントリュージョンに対応すると推測できる。

上記の曝気開始の 41 分後（11:46）より、速やかに空気流量を $0.7\text{Nm}^3/\text{min}$ に変更した。それから約 30 分後に水面を撮影した写真を、先に示した曝気流量 Q_a が $1.4\text{Nm}^3/\text{min}$ の場合と併せて Fig. 13 に示す。濃い濁水の範囲は直径約 16m となり、曝気流量が $1.4\text{Nm}^3/\text{min}$ の場合より明らかに小さい。しかし、薄い濁水の範囲はさらに広がっている。

ビデオカメラで撮影した映像から、この濁水の拡散範囲の時系列変化（40 分間）を、南北および東側で解析した。それを Fig. 14 に示す。濁水の半径は最初急激に拡大し、その後ほぼ一定の速度で広がっている。その速度は $1 \sim 1.5\text{m}/\text{min}$ ($2 \sim 3\text{cm}/\text{s}$) である。すでに Fig. 10 に得られている直接的な計測値からこれに対応する値を選ぶと、図 (e) の半径 $r = 15\text{m}$ の水深 2～3m 付近の値（約 $5\text{cm}/\text{s}$ ）が適切であろう。こちらの方がやや大きい、その理由はイントリュージョン先端の濁度が低く、水面上で十分な色の変化が確認できなかったものと考えられる。

7. イントリュージョン流量の推定

これまでに得られた結果から、装置真上の冷水塊より水深 3m 付近へ貫入するイントリュージョンの存在が明らかである。ここでは、流速の計測結果より、その流速 v_i を特定し、周辺への貫入面積 $2\pi r \Delta d_i$ を掛け、流量 Q_i :

$$Q_i = 2\pi r \Delta d_i v_i \quad (7)$$

を算定した。流速 v_i と貫入厚さ Δd_i は、Fig. 10 (e) の水深 3m 付近のデータ ($Q_a = 1.4\text{Nm}^3/\text{min}$) からそれぞれ、 $5.0\text{cm}/\text{s}$ と 1.0m と粗く見積もった。その結果、イントリュージョン流量 Q_i は約 $280\text{m}^3/\text{min}$ ($4.7\text{m}^3/\text{s}$) となり、空気流量 Q_a に対する連行倍率は 200 倍となる。この流量を基準に、当該貯水池の浅層循環に要する日数を求めた。その結果、本装置 1 基で、貯水池浅層 5m ($175.1 \sim 180.1\text{E.L.m.}$) に相当

する貯水量 ($6,926 \times 10^3 \text{ m}^3$) を対象とすれば約 17 日, Fig. 1 に示した堤体近くの比較的閉鎖された水域 (全貯水面積の約 1/7) に限定すれば約 2.4 日で計算上, 対象水塊の循環を完了することになる。

Fig. 12 Pictures of spreading muddy water for $Q_a = 1.4 \text{ Nm}^3/\text{min}$ (8/9 11:05~).

(a) $Q_a = 1.4 \text{ Nm}^3/\text{min}$ ($t = 27 \text{ min}$) (b) $Q_a = 0.7 \text{ Nm}^3/\text{min}$ ($t = 31 \text{ min}$)
Fig. 13 Comparison of range of light muddy water for different air flow rate Q_a .

Fig. 14 Time history of increasing radius of dark muddy water for $Q_a = 1.4 \text{ Nm}^3/\text{min}$.

8. まとめ

日吉ダム貯水池に導入された曝気循環装置の性能評価の一環として, 浅層循環効果を調査する実験を, 現地にて 2011 年 8 月に実施した。結果は以下の通り要約できる。

(1) 装置周辺の水温計測結果から, 浅層の水溫躍層は, 空気流量が $1.4 \text{ Nm}^3/\text{min}$ の場合に半径 10m, 曝気流量が $0.7 \text{ Nm}^3/\text{min}$ の場合に半径 8m の範囲で, いずれも水深約 3m

まで直接的に破壊されること, それが曝気開始後約 10 分で完了すること, さらにその破壊域は 1~2 分の周期で拡大・収縮を繰り返すことを明らかにした。また, その外縁より周辺に伸びるイントリュージョンを確認した。

(2) 気泡噴流による躍層の直接的な破壊効果を, 熱量および位置エネルギーの変化から定量的に求めることができ, それらが空気流量とよく対応することを明らかにした。

(3) 流速の計測結果から, 温度計測結果に対応した連行流の循環構造と周囲の 2 次循環流を確認した。

(4) 曝気装置上方水面より撮影された濁水の拡散画像から, 水温および流速の計測結果を裏付ける結果を得た。

(5) イントリュージョンの流量は, 空気流量が $1.4 \text{ Nm}^3/\text{min}$ の場合で約 $280 \text{ m}^3/\text{min}$ ($4.7 \text{ m}^3/\text{s}$) となり, 空気流量に対して 200 倍となった。

謝 辞

実地調査実験の実施にあたり, 大阪電気通信大学工学部環境技術学科の北川健太君, 澤村健司君, 谷村幸彦君, 寺阪太佑君, 夏井清成君, 野本真広君, 早藤大輔君に多大なご協力を頂いた。ここに厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 有田正光, 他: 水圏の環境, 東京電機大学出版局, (2005), pp. 263-264.
- 2) McDougall, T.J.: Bubble plumes in stratified environments, Journal of Fluid Mechanics, Vol.4(1978) pp. 655-672.
- 3) Asaeda, T., Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, Journal of Fluid Mechanics, Vol.249(1993) pp. 35-57.
- 4) 松梨史郎, 宮永洋一: 気泡噴流に関する現地実験, 水工学論文集, Vol.34 (1990), pp. 145-150.
- 5) 丹羽薫, 久納誠, 大西実, 山下芳浩: 貯水池流動制御による水質保全対策, 水工学論文集, 37(1993) pp. 271-276.
- 6) 豊島靖, 天野邦彦, 田中康泰: ダム貯水池における曝気循環による成層破壊状況の現地観測と評価, 水工学論文集, Vol.47 (2003) pp. 1243-1248.
- 7) 梅田信, 宮崎貴紅子, 富岡誠司: 曝気式循環施設により生じる貯水池内流動の現地観測, 土木学会論文集, Vol.775 (2004) pp. 55-68.
- 8) 岩松裕二, 中田亮生, 小阪公則, 佐藤友宣, 山岸真孝: ダム貯水池における水没式複合型曝気循環装置の浅層循環に関する実地調査実験 (水温躍層の直接破壊領域の可視化と散気部形状による水連行効果の検討), 水環境学会論文集, Vol.37, No.2 (2014) pp. 63-69.
- 9) Imberger, J., Ivey, G. N.: On the Nature of Turbulence in a Stratified Fluid. Part II: Application to Lakes, Journal of Physical Oceanography, Vol.21, No.5(1991), pp. 659-680.
- 10) McGinnis, D. F., Lorke, A., Wüest, A., Stöckli, A., Little, J. C.: Interaction between a bubble plume and the near field in a stratified lake, Water Resources Research, Vol.40, No.10(2004) W10206.
- 11) Singleton, V. L., Gantzer, P., Little, J. C.: Linear bubble plume model for hypolimnetic oxygenation:

Full-scale validation and sensitivity analysis, Water
Resources Research, Vol.43(2007) W02405.