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)

岩 松 裕 二* 中 田 亮 生**,* 小 阪 公 則***
佐 藤 友 宣† 山 岸 真 孝††

Field Experiment in Forced Water Circulation of Shallow Layer by Advanced Submergible Aerator in Reservoir (Visualization of Directly Destructed Thermocline and Examination of Effect of Air-Opening Configuration on Water Entrainment)

Yuji IWAMATSU*, Akinori NAKATA **,*, †, Kiminori KOSAKA ***,
Tomonobu SATO † and Masataka YAMAGISHI ††

* Lake Biwa Development Integrated Operation & Maintenance Office, Japan Water Agency, 2-1-10 Katata, Otsu, Shiga 520-0243, Japan

** Department of Environmental Science, Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University, 18-8 Hatsu-cho, Neyagawa, Osaka 572-8530, Japan

*** Kusaki Dam O & M Office, Japan Water Agency, 564-6 Zama, Higashimachi, Midori, Gunma 376-0303, Japan

† Hiyoshi Dam O & M Office, Japan Water Agency, 68 Mikogatani, Hiyoshicho-naka, Nantan, Kyoto 629-0335, Japan

†† Environmental Technology Division, Marsima Aqua System Corporation, 5-3-17 Tanimachi, Chuoku, Osaka 540-8577, Japan

Abstract

In Hiyoshi Reservoir (Kyoto Prefecture, Japan), two submergible aerators were installed in 1997 and have been used for the elimination of the anaerobic layer in the deep reservoir. In 2009, one of these aerators was modified as a trial, to circulate water in the shallow layer of the reservoir, so as to release spent air (oxygen-poor air) from the top of the aerator into the shallow layer. As a performance evaluation test, a field study of shallow layer circulation was conducted during the summer in 2010, under the condition of a strong thermocline existing at a depth of around 5 m. In the field test, water temperature distribution was measured within a 20 m radius around the aerator and at water depths of 0 to 20 m, during both the operation and idling of the aerator. Secondly, the velocity distribution of radial flow was measured around the aerator to clarify the water entrainment due to the air plume. As a result, it was confirmed that the thermocline was destroyed within a 10-13 m radius during operation, a horizontal cold flow (intrusion) was observed at the depth of the bottom, a cold dome resulted from thermocline destruction, and a newly developed air parcel shredder enhanced the water entrainment effect.

Keywords: Aerating circulation; Bubble plume; Thermocline; Water entrainment; Dam reservoir

1. はじめに

京都府南丹市にある日吉ダムは1997年、淀川の総合開発の一環として桂川流域の治水・利水を目的に建設された多目的ダムである。その貯水池は天若湖と呼ばれ、湛水面積は2.74 km²、総貯水量は6600万m³である。貯水池には当初、深層の嫌気化抑制のために2基の深層曝気装置が導入されていた。当該装置は、地上のコンプレッサーから供給される圧縮空気を湖底に設置された装置本

体へ供給し、深層の水塊を取り込んでその内部で曝気した後、酸素濃度が高められた水塊を再度深層に戻す仕組みで、形成された密度成層にほとんど影響することなく深層水の曝気のみを行ういわゆる深（水）層曝気方式¹⁾の装置である。曝気の過程では、装置内に供給された圧縮空気の多くが余剰空気（未溶解空気）として装置内に蓄積されるために、装置本体から排気管を通じてそれを水面上に大気開放する。余剰空気には圧縮機の動力より得た大きなポテンシャルエネルギーが残存しており、エ

* 独立行政法人水資源機構琵琶湖開発総合管理所 〒520-0243 滋賀県大津市堅田 2-1-10

** 大阪電気通信大学工学部環境科学科 〒572-8530 寝屋川市初町 18-8

*** 独立行政法人水資源機構草木ダム管理所 〒376-0303 群馬県みどり市東町座間 564-6

† 独立行政法人水資源機構日吉ダム管理所 〒629-0335 京都府南丹市日吉町中神子ヶ谷 68

†† 株式会社丸島アクアシステム 〒540-8577 大阪市中央区谷町 5-3-17

†† 連絡先：a-nakata@isc.osakac.ac.jp

Fig. 1 Hiyoshi Dam and its reservoir.

エネルギーの有効利用という観点からは、これを大気開放せずに利用したいところである。そこで、これを装置本体より水中に放出して浅層水を強制的に循環させ、そこに増殖するアオコや淡水赤潮を抑制する目的の機能を付加するための仕様変更が検討された^{2,3)}。その結果、2009年に装置の改良が行われ、深層曝気に加えて浅層循環または躍層低下循環¹⁾の機能を併せ持つ水没式複合型曝気循環装置として運転を開始した。

導入された曝気装置の安全性や効果検証の一環として著者らは、装置より開放される気泡噴流による浅層水の循環効果などを調査する現地実験を、2010年の8月と9月に実施した。気泡噴流が引き起こす閉鎖水域内の水循環構造に関しては、その解明がダム貯水池や湖沼等における水質管理に限らず多目的な用途があり、従来から多くの研究例⁴⁻⁶⁾があるが、それらは一様な流体中に関するものが多い。密度成層が形成された流体中に関しては、Mcdougall⁷⁾の実験的研究が先駆的で、浅枝ら^{8,9)}による研究成果は、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。実際のダム貯水池や湖における循環構造に関する現地実験は、国内では松梨ら¹⁰⁾、丹羽ら¹¹⁾、豊島ら（草木ダム）¹²⁾、梅田ら（土師ダム）¹³⁾、国外ではImbergerら（Wungong Dam）¹⁴⁾、McGinnisら¹⁵⁾、Singletonら（Spring Hollow Reservoir）¹⁶⁾に代表されるように種々の報告例がある。この中で特に貯水池の広範な水質管理に重要なイントリュージョン（Intrusion）¹⁷⁾の特性までを詳細に捉えたものは、Imbergerら¹⁴⁾、梅田ら¹³⁾の報告に見られる。

曝気による貯水池内の循環構造の形状および規模は、当該の貯水池の環境条件の他、放出される気泡のサイズやその密度などを決定する装置の散気部構造と、水深および曝気流量などの運転条件に依存する。より効果的な曝気装置の設計・開発という観点からは、目的および環境条件に応じた装置の構造と運転条件の最適値を見出すことが要求される。そのためには、現地において実機が運転された際の躍層破壊と循環構造の特性などが装置ごとに調査され、その結果から得られた評価事例は多数提供されることが望ましい。

以上のような背景から本研究では、今回の新型装置導入に伴う各種調査に併せ、密度成層が形成された実際の貯水池の浅層において、気泡噴流による定常的な水循環構造と、曝気装置の散気部形状の違いによる水連行の効果を調べるための実験を、いずれも現地にて行った。実験では第一に、複数の水温計を取り付けた計測用ロープを装置近傍で水平に移動させ、南北20m、水深20mの鉛直断面における装置稼働前後の水温分布を、貯水池環

Fig. 2 Picture and schematic view of Submersible Aerator installed in 1997 (without modification).

境がやや異なる2条件について従来に無い高い空間分解能で計測した。第二に、気泡噴流の水連行効果を調べるため、装置上方の水面近傍における流速を、装置上部の散気口真上に取り付けた気塊せん断部が有る場合と無い場合について行った。以上の結果、直接的な躍層破壊範囲の規模・形状と、そこから水平に外側に広がるイントリュージョン（intrusion）の存在を示すとともに、気塊せん断部が水連行効果に及ぼす影響などを明らかにした。

2. 日吉ダム貯水池と実験対象の曝気循環装置の概要

2.1 日吉ダム貯水池

日吉ダム貯水池（天若湖）の堤体近傍の水域を Fig. 1 に示す。ダムの堤体長さが438m、高さが67.4mで、貯水池はダムの南東に東西に広く位置しており、総貯水量は6600万 m^3 である。ダムの建造に併せて1996年に導入された水没式の（深層）曝気装置が、図中の点線で描く丸で示す位置に貯水池の中央に二機、東西に275mの距離をおいて設置されている。西側が一号機、東側が二号機である。二号機からおよそ100m上流に離れた地点には流木止め設備があり、そのほぼ中央には水質自動観測装置が設置され、貯水位、水温、溶存酸素、pH等のデータを6時間毎に観測している。貯水池の北岸には、気象観測装置等を備えた管理事務所、深層曝気装置に圧縮空気を供給するための機械室などがある。

2.2 水没式複合型曝気循環装置

日吉ダム貯水池では毎年、春先から初秋の受熱期に水温躍層が形成され、深層では無酸素状態になり、底質から栄養塩、硫化水素、マンガン等の水質汚濁物質が溶出する恐れがある。このような底層の嫌気化を抑制し、水質障害を防止するための深層曝気装置が2基、1997年のダム建造に併せて導入された。その写真および構造を Fig. 2 に示す。装置本体は高さ16m、直径2.2mの二重構造の円筒形で、錘と自立用フロートによって貯水池の底に垂直に設置されている。陸上（機械室）に設置された空気圧縮機（動力：15kW）から送気ホースを介して送られた圧縮空気が、装置底部の散気管に供給され、その表面に複数設けられた小孔から放出されて小気泡となる。それが内筒を上昇するとき、深層の貧酸素水塊が引

き込まれて内筒を上昇し、その過程で気泡が溶解して豊富な酸素を含んだ水となる。酸素を豊富に含んだ水塊は、外筒を下降して再び深層に戻され、この過程を繰り返すことによって深層の貧酸素状態が改善される。

当該装置では、地上より送り込んだ圧縮空気（供給空気量：最大 $1.4 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ）のうち、水に溶解した酸素等以外は余剰空気となって装置上部の排気ホースを通り、水面上の排気装置から大気へ開放される。本装置の利用目的を、水温躍層を維持して深層の水質改善のみを行う深層曝気方式¹⁾に限定すればこのような大気開放が有効ではあるが、余剰空気には圧縮機の動力より得た大きなポテンシャルエネルギーが残存している。当然、装置上部から余剰空気を直接水中に開放すれば、その上層の水循環が引き起こされ、浅層循環または躍層低下循環方式¹⁾の装置として多目的に利用できるようになる。そこで、既設の装置の仕様を変更し、多目的の複合型曝気装置として利用できるよう、装置の改良を2009年に行った²⁾。仕様変更項目は、本体内部で発生する余剰空気を排出するための(1)自動排出弁と、排出された気塊をせん断して細分化し、分散した気泡噴流として浮上させる(2)気塊せん断部である。その部分を含む装置本体上部の概略と写真をFig. 3に示す。自動排出弁は、装置内の気液界面の変動（水面の上昇および下降）に応じて、装置に取り付けられたフロートが追従し、空気孔を開放・閉塞することによって適切に空気を水中に排出する。気塊せん断部は直径1 m、高さ40 cmの盃形状（逆円すい形状）で、その下方より放出される余剰空気塊を細分化して周囲に広げることを目的とした形状である。いずれも数種類の方式・形状において模型実験を行うことにより、現状に適した安全で効果的な構造が採用されるに至っている³⁾。

3. 水温測定による躍層の直接破壊領域の可視化

3.1 実験の方法と環境条件

水温測定の実験方法と装置上方水面の気泡噴流の写真をそれぞれ、Fig. 4の右側とFig. 5に示す。計測のため

Fig. 3 Modification of Aerator No.2 (automatic air exhauster and air parcel shredder).

のワイヤーケーブル（直径5 mm、長さ22 m）に30個の熱電対温度計（K型）を取り付け、それをフロートと円錐形の錘（質量3.5 kg）を使って水中に鉛直を保持し、水平に移動させることによって二次元鉛直断面の水温分布を測定した。熱電対の取り付けは、計測水深が水深0.1から20 mまでに対応するようにし、水面近くは密に、水深が大きくなると粗くした。水平の計測位置は、装置上方水面の気泡噴流が出現する中心点を基準に北側20 mの範囲で2 m間隔とし、流心線方向（東西方向）と計測断面は概ね直交するようにした。測定の位置精度を上げるため、ダム貯水池北岸の船着き場から南岸にわたって南北にロープを張って固定し、フロートをこれに沿って移動させた。

計測の手順はまず、水中に鉛直につり下げられた計測用ケーブルを、各測定点において約1分間静止状態で保持し、水温の鉛直分布に関するデータをケーブルが安定した状態で取得した。1測定点の計測が完了すれば、ロープに目印として固定した2 m間隔のマーカーに沿って移動させ、速やかに次の計測に移行した。この一連の作業を曝気装置の稼働直前と稼働後約30分経過後にそれぞれ行った。計測時間は1断面計測に概ね30分から1時間を要した。熱電対で計測されたデータは計測船上のロガー（江藤電気、THERMODAC EF MODEL 5020 A）によって集約した後、パーソナルコンピュータに記録した。ロガーのサンプリング周波数は5sに設定し、各測

Fig. 4 Measuring method of water temperature and flow velocity.

Fig. 5 Photo of bubble plume on water surface.

Table 1 Experimental conditions (weather conditions included).

	Water temperature		Flow velocity
Date	August 11 th , 2010	August 12 th , 2010	September 22 nd , 2010
Aeration time	14:20~16:50	14:40~15:50	9:00~17:00
Measurement time	15:20~16:50	15:10~15:50	11:30~(with shredder) 15:30~(no shredder)
Weather during measurement	Sunny	Rainy	Sunny, later, cloudy with rains
Precipitation for 24 hours	0.2 mm	40.1mm	1.8mm
Air temperature (min. in morning/max.)	26.6°C (22.5/31.5°C)	24.6°C (23.1/26.9°C)	25.1°C (21.1/30.1°C)
Insolation for 24hours	18.9 MJ·m ⁻²	3.8MJ·m ⁻²	12.5 MJ·m ⁻²
Wind during measurement	S 3.5m·s ⁻¹	0.1m·s ⁻¹	SSE 1.3m·s ⁻¹
Average elevation of reservoir surface	177.4 EL.m	177.9EL.m	174.1 EL.m
Average water depth of top of aerator	12.8 m	13.3m	9.5m
Water volume of in/outflow of reservoir for 24 hours	1,208/486 m ³	1842/1226m ³	304/496m ³
Air flow rate supplied to aerator (including dissolution in water)	1.4 Nm ³ /min

Fig. 6 Water temperature distribution obtained above the aerator ($r=0\text{m}$).

定点で得られた1分間の連続データを平均化してその点の温度とした。

実験時の貯水池の各種条件を **Table 1** の2・3列目に示す。計測日時は8月11と12日のいずれも日中の気温が最も高くなる午後の時間帯として14:00頃を選び、時間を限定して曝気装置を稼働して計測を行った。初日は晴れで24時間の日射量が $18.9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ と比較的多い一方、2日目は雨で日射量は $3.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ で初日の1/5程度である。貯水池の水位は初日が177.4 EL.m、2日目が177.9 EL.mで、このときの装置上端の水深（気泡噴流の放出水深）はそれぞれ12.8 mと13.3 mになる。実験中においては、上流河川から貯水池への流入とダムの放流はあるが、それによる貯水池内の流れは曝気装置が引き起こすによる水流に比べて極めて小さく、今回の計測に影響を与えることはほぼ無いと思われる。なお、装置の曝気空気流量は、コンプレッサーからの供給空気流量（標準状態）で $1.4 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ とした。

3.2 水温計測の結果

水温計測の結果として、曝気前後における気泡噴流上昇点（装置真上、 $r=0 \text{ m}$ ）の水温鉛直分布を **Fig. 6** に示す。左側が初日、右側が2日目、実線が曝気前、点線が曝気後を示す。曝気前の水温分布（初期条件）には両日で浅層に違いが見られる一方、深層ではほとんど変わら

(a) Temperature before using the aerator, T_0 (b) Temperature while aerator is in-use, T (c) Temperature deviation, $(T-T_0)$ **Fig. 7** Water temperature distribution obtained near aerator under sunny condition (August 11th, 2010).

ない。浅層の違いは主に、2日目の午前中にあった降水と、日射の有無が影響している。曝気前後の水温分布を比較すると、いずれも水深5 mより浅層で大きな変化が見られ、それより深層ではほとんど変化がないことがわかる。また、初日は水深3.2 m (26.5°C) を境界に、上方で水温低下、下方で水温上昇がみられ、2日目はその境界が2.5 m (25°C) になっている。ただし、曝気後のデータは、噴流によって計測ケーブルが最大2 m程度、東または西側に流されるため、厳密には装置の真上でない可能性があることに留意願いたい。

装置真上 ($r=0 \text{ m}$) から北側20 mまでの鉛直断面分布は **Fig. 7** と **8** にコンター図で示している。**Fig. 7** が初日、**Fig. 8** が2日目で、(a) から (c) の順に、曝気前 T_0 と曝気後 T および曝気前を基準にした水温偏差 $(T-T_0)$ を、水深 $d=0 \sim 5 \text{ m}$ の範囲に限定して示している。いずれの日も曝気前は水平に概ね様な成層が形成されているが、曝気後にそれが装置近傍の限られた水深と半径の範囲で直接的に破壊されていることがわかる。直接破壊の半径範囲は少なく見積もって10 m、多くて13 mである。その水深に関しては、水温偏差の中立点 ($T-T_0=0^\circ\text{C}$) をそれとすると、それぞれ3.2 mと2.7 mあたりである。初日の躍層破壊範囲が2日目のそれに比べてやや大きくなっている。なお、このような直接的な躍層破

Fig. 8 Water temperature distribution obtained near aerator under rainy condition (August 12th, 2010).

壊領域は、別途実施した実験より、曝気開始後約 15 分程度で形成され、その範囲は曝気を継続しても少なくとも数時間はほとんど変化しないことがわかっている¹⁸⁾。また、この破壊領域の底部からは、水平方向に貫入するイントリュージョンが周辺に拡がる様子が明瞭に確認できる。これが長時間をかけて広範囲に躍層を破壊すると考えられる。

3.3 躍層破壊の定量的評価

Fig. 7 と 8 に示したような水温分布が装置上方に同心円状に分布すると仮定し、その水温偏差 $(T-T_0)$ と躍層破壊範囲の体積 V から、直接的な躍層の破壊効果を定量的に示す破壊指数 I_d (Direct destruction Index of thermocline) を次式：

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

より定義して導入した。単位は $K \cdot m^3$ (または $^{\circ}C \cdot m^3$) であり、これに水の密度 ρ ($kg \cdot m^{-3}$) と比熱 C ($J/kg \cdot K$) をかけたものが、この領域における流体体積の熱量の変化分 ΔQ ：

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

Table 2 Direct destruction effect of thermocline by aerator.

	Aug. 11th (Sunny)	Aug. 12th (Rainy)
Destruction radius r_d	10~13 m	10~13 m
Destruction depth d_i (depth of intrusion)	3.2 m	2.7 m
Direct destruction index $I_d (=I_c + I_h)$	2,951 $K \cdot m^3$ (12.4MJ)	3,278 $K \cdot m^3$ (13.8MJ)
I_c	1,997 $K \cdot m^3$ (8.39MJ)	2,009 $K \cdot m^3$ (8.44MJ)
I_h	954 $K \cdot m^3$ (4.01MJ)	1,269 $K \cdot m^3$ (5.33MJ)

に相当する。Fig. 7 と 8 の (c) に示す水温偏差から、これらの諸量を求めたものを Table 2 に示す。

上記の計算のために、直接破壊領域の半径 r は両日とも 13 m とした。またその水深 d は、イントリュージョンの深さ d_i を躍層破壊の中立点として、これより浅層 (水温低下領域) と深層 (水温上昇領域) に分け、それぞれの破壊指数を要素別に求め、 I_c 、 I_h として同表に示した。したがって、これらの合算値が破壊指数 I_d ：

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

である。

破壊指数 I_d は初日と 2 日目でそれぞれ 2,951 と 3,278 $K \cdot m^3$ 、熱量の変化分 ΔQ はそれぞれ 12.4 と 13.8 MJ であり、ほぼ同等であるが、日射の少ない 2 日目がやや (約 10%) 大きい結果となった。また、いずれの日もその約 2/3 が浅層の水温低下分、1/3 が深層の水温上昇分で構成されていることがわかる。つまり、深層の低温水塊が相当量、気泡噴流によって連行され、表層の水温を全体的に低下させていると言える。水温が低下した範囲についてもう少し詳しく吟味すると、初日の範囲が 2 日目のそれより明らかに大きいことがわかる。ただし、この範囲における水温は逆に、初日の低下量 (平均 1.2 $^{\circ}C$) が 2 日目のそれ (平均 1.4 $^{\circ}C$) より小さい。このため、躍層の初期状態が異なる 2 つの場合で、浅層の躍層破壊指数 I_c がほとんど同じ値をとる結果となっている。今後さらに詳細な検討が必要であるが、この点は、ここで導入した躍層破壊指数 I_d が、曝気循環の躍層破壊能力を、浅層における水温躍層の状態に依存せず評価できる可能性を示す。

4. 流速測定による水連行効果の検討

4.1 実験の方法と環境条件

流速測定の実験装置構成を Fig. 4 の左側に示す。フロートと錘 (質量：3.5 kg) を用いて電磁流速計 (JFE アレック, AEM213D) の受感部を水中に沈め、水平方向の流速を測定した。測定位置は、曝気装置真上より南側に $r=3.5$ m、水深 $d=0.05$ から 5 m とした。フロートは水温測定と同様、計測位置固定のために Fig. 5 に示す水面上のロープに係留した。流速計本体はフロートの中央に鉛直に加工された穴から、ロープと固定用フレームおよび滑車によって、任意の深さに調整・固定が簡単にできるよう工夫した。流速計の表示部を作業船上に設置して、各計測点について 40 秒間、サンプリング周波数 1 Hz で測定し、それを 4 回繰り返して平均値を求め

た。このような計測を、曝気装置上部の気塊せん断部がある場合とない場合について行った。なお、水中カメラを用いた気泡噴流の撮影も同時に行った。

実験時の貯水池の各種条件を **Table 1** の 4 列目に示す。計測日時は 9 月 22 日で、日中は断続的であるが 8 月よりも長時間にわたって曝気装置を運転して計測を行った。曝気空気流量は 8 月のそれと同じ ($1.4 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) である。天候は晴れのち曇り時々雨で、24 時間の日射量と降水量はそれぞれ $12.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ と 1.8 mm であった。貯水池の水位は 174.1 EL.m で、このときの装置上端の水深 (気泡噴流の放出水深) は 9.5 m になり、8 月の場合より 3.3 から 3.8 m 浅くなっていることになる。参考までに、当日の 9:00 (曝気前) および 15:00 (曝気中) に、流木止めに常設の水質自動観測装置 (曝気装置の約 100 m 東に位置する) より得られた鉛直水温分布を **Fig. 9** に示す。水深 6 m 付近に明瞭な躍層が確認され、曝気中でも **Fig. 6** に示されたような表層の大きな水温低下は見られない。これは、曝気後数時間が経過しても先に示した直接的な躍層破壊がこの位置 ($r \approx 100 \text{ m}$) まで到達していないこと、イントリュージョンによる広範な躍層破壊は、数時間の曝気運転程度では顕著に現れないことを示す。

4.2 流速の測定結果と気泡噴流による循環構造

流速の測定結果を **Fig. 10** に示す。(a) と (b) はそれぞれ気塊せん断部がある場合と無い場合を示し、いずれも流速の大きさ v ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) と流向 ϕ (deg) を示している。なお、流向は北 (N) が 0 度で時計周りを正として表している。

Fig. 9 Water temperature distribution obtained by automated measuring instrument at log boom (Sep. 22nd, 2010).

(a) with shredder (b) no shredder

Fig. 10 Flow velocity distribution near water surface around aerator ($r=3.5 \text{ m}$).

流速の大きさは、気塊せん断部の有無にかかわらず水面で最大 $40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 近くになるが、水深とともに急激に小さくなり、 0.5 から 1 m より深いところでは $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下の一様で小さな値となる。このような水深の比較的大きいところでは、気塊せん断部がある場合の流速が、それがない場合の流速より大きくなっている。少々粗い評価ではあるが、ここで得られた流速 v を水面から水深 5 m の範囲で平均値を求めた結果、気塊せん断部がある場合で $7.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、ない場合で $5.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ となった。これは、気泡による水の連行効果が、気塊せん断部がある場合の方がなくない場合よりも大きい可能性を示唆しており、直径 1 m のコーンが気泡を効果的に細分化してより水平方向に大きな水流を引き起こした結果と考えられる。実験中、水中カメラによって気泡噴流を撮影した画像の例を **Fig. 11** に示す。水面上における噴流の直径には、気塊せん断部の有無によってあまり差が認められなかったが、水中写真では破線で示すようにその差は明らかで、気塊せん断部のある場合のせん断直後における気泡噴流の直径 ($1.2 \sim 1.5 \text{ m}$) が、無い場合のそれ ($30 \sim 40 \text{ cm}$) よりもはるかに大きくなっている。気泡単独の大きさ (直径) については、気塊せん断部のある場合では、せん断直後速やかに数 mm から 1 cm 程度となっている。その後、水圧による変化、気泡の併合・分離などが起こると考えられるが、概ねその大きさを維持して水面まで到達する。一方、せん断部がない場合では散気直後、写真のように密集した状態ですぐには分離して小気泡とならない。しかし、その上昇過程で徐々に分離して広がり、水面上では数 mm から 1 cm 程度のサイズとなって現れる。つまり、いずれの場合も最終的には気泡サイズは同程度となるが、気塊せん断部を取り付けた方が、より早い段階でそれが実現され、かつ広い範囲に分布させることができると言える。

流向に関しては、水面において気泡噴流の上昇点を中心に外側に同心円状に広がっていることが明らかに観測されたが、計測結果ではそのような流れ (北向き: $\phi = 0^\circ$) となっていない。また、水深 0.3 m までとそれより深いところで不連続になっている。これらは、流速計を水面で支持するフロート (喫水: 約 3 cm) による擾乱が影響していると考えられ、流速の大きさに関しても若干その影響があると思われる。この点を差し引いてデータを解釈すると、流向は水面近くで気泡噴流から離れるように南 ($\phi = 180^\circ$) に向かい、水深が大きくなると徐々に向きを変え、水深 $d = 1 \text{ m}$ 付近では逆に噴流に近づくように北向き ($\phi = 0^\circ$) に向かうと考えられる。これは、噴流が水面に達した後に同心円状に水平に拡がる際に、その頸部にドーナツ形状の水平渦が形成されるため、その上方と下方で向きが異なる流向を計測したものと考え

(a) with shredder (b) without shredder

Fig. 11 Photos of bubble plume.

Fig. 12 Flow structure in reservoir by bubble plume from aeration facility (modified from Asaeda et al.^{8,9)}).

られる。

さらに水深が大きくなるとデータのばらつきは大きいですが、東 ($\phi = 90^\circ$) から南 ($\phi = 180^\circ$) 向きの範囲で緩やかな流れを形成しているようである。なお、水中で撮影したビデオカメラの映像からは、気泡噴流はその中心周りに緩やかに左巻きの螺旋を描きながら上昇し、その後水面で同心円状に拡がることを確認された。流速の計測は噴流の南側であるから、この左巻きの渦が結果的に、比較的水深が大きいところでの流向 (東から南向き) に影響していると思われる。

以上の結果から得られた流れの構造は、水温測定の結果と併せ、Fig. 12 に示す浅枝らが模型実験によって得た気泡噴流の循環構造の一例^{8,9)}とよく一致している。

5. まとめ

日吉ダム貯水池に導入された水没式複合型曝気装置の性能評価の一環として、浅層水循環に関する現地調査実験を2010年の夏季、水深5m付近に一次躍層が形成された条件で実施した。第一に、複数の水温計を備えた測定装置を曝気装置近傍で水平移動させ、その鉛直断面における曝気装置稼働前後の水温を、貯水池の状況が異なる場合について計測した。第二に、気泡噴流の水連行効果を調べるため、装置上方水面近傍の流速を、装置上部の散気口真上に取り付けた気塊せん断部が有る場合と無い場合について行った。結果は以下の通り要約できる。

(1) 水温測定の結果、直接的な躍層破壊範囲は半径約10～13m、深さ2.7～3.2mに及ぶことと、その最深部から水平に貫入するいわゆるイントリュージョンの存在を明らかにすることができた。さらに、曝気前後の水温偏差と上記の破壊範囲の積より、躍層破壊を定量的に示す指数を導入して求めた結果、躍層の状態が異なる二条件でほぼ同じ値をとることがわかった。さらに、導入した指数が環境条件に依存しない装置能力の一つを表す可能性があることも示した。

(2) 流速測定の結果、装置から放出される気泡噴流周辺の循環構造の一部が明らかになり、その結果は、水温測定の結果とも併せ、浅枝らによる模型実験から得られた知見とよく一致した。さらに、気塊せん断部を設けた場合に、水連行の効果が向上する可能性を示すことができた。

今後の課題としては、今回のような計測を時系列で実施することによって、イントリュージョンの発生とその

進行過程を詳細に分析し、さらに広範囲の貯水池環境への効果を明らかにすることによって、本装置の効果検証をより詳細に行う必要があると考える。これらについては、同貯水池にて引き続き詳細な実験を2011年以降実施しており^{18,19)}、追って詳細を報告する予定である。

謝 辞

本研究における実験およびデータ整理のために、多大なご協力を頂いた大阪電気通信大学工学部環境技術学科・増本唯君、古野友也君、須山史昭君、中井一敬君、瀬尾琢朗君、市原昂君に心より謝意を表す。

(原稿受付 2013年7月16日)

(原稿受理 2013年12月3日)

参 考 文 献

- 1) ダム水源地環境整備センター (1995) 曝気・循環施設マニュアル, 13-18.
- 2) 佐藤友宣 (2012) 新たな曝気装置の開発「水没式複合型曝気装置」の実現報告, ダム技術, **315**, 40-48.
- 3) 小阪公則, 岩松裕二, 中田亮生, 山岸真孝 (2011) 「水没式複合型曝気装置」の実用化について, 第45回日本水環境学会年会講演集, 86.
- 4) Helmut E. Kobus (1968) Analysis of the Flow Induced by Air-Bubble Systems, Proceedings of the 11th International Conference in Coastal Engineering, **2**, 1016-1031.
- 5) David L. Wilkinson (1979) Two-Dimensional Bubble Plumes, Journal of the Hydraulics Division, **105** (2), 139-154.
- 6) Milgram, J. H. (1983) Mean flow in round bubble plumes, Journal of Fluid Mechanics, **133**, 345-376.
- 7) Trevor J. McDougall (1978) Bubble plumes in stratified environments, Journal of Fluid Mechanics, **4**, 655-672.
- 8) 浅枝隆, Imberger, J. (1989) 連続成層中の Bubble Plume の挙動について, 土木学会論文集, 第411号/II-12, 105-112.
- 9) Takashi Asaeda and Jörg Imberger (1993) Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, Journal of Fluid Mechanics, **249**, 35-57.
- 10) 松梨史郎, 宮永洋一 (1990) 気泡噴流に関する現地実験, 水工学論文集, **34**, 145-150.
- 11) 丹羽薫, 久納誠, 大西実, 山下芳浩 (1993) 貯水池流動制御による水質保全対策, 水工学論文集, **37**, 271-276.
- 12) 豊島靖, 天野邦彦, 田中康泰 (2003) 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, **47**, 1243-1248.
- 13) 梅田信, 宮崎貴紅子, 富岡誠司 (2004) 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, **775**, 55-68.
- 14) Imberger, J. and Ivey, G. N. (1991) On the Nature of Turbulence in a Stratified Fluid. Part II: Application to Lakes, Journal of Physical Oceanography, **21** (5), 659-680.
- 15) McGinnis, D. F., Lorke, A., Wüest, A., Stöckli, A. and Little, J. C. (2004) Interaction between a bubble plume and the near field in a stratified lake, Water Resources Research, **40** (10), W10206.
- 16) Singleton, V. L., Gantzer, P. and Little, J. C. (2007) Linear bubble plume model for hypolimnetic oxygenation: Full-scale validation and sensitivity analysis, Water Resources Research, **43**, W02405.
- 17) Manins, P. C. (1976) Intrusion into a stratified fluid, Journal of Fluid Mechanics, **74** (03), 547-560.
- 18) 須山史昭, 岩松裕二, 中田亮生, 佐藤友宣, 山岸真孝, 細木佑索 (2012) 水没式複合型曝気循環装置の浅層循環効果に関する実地調査実験—水温躍層破壊過程の可視化—, 可視化情報学会全国講演会2012姫路, 67.
- 19) 岩松裕二, 須山史昭, 中田亮生, 佐藤友宣, 山岸真孝, 細木佑索 (2012) 水没式複合型曝気循環装置の浅層循環効果に関する実地調査実験—水温躍層における流れの可視化—, 可視化情報学会全国講演会2012姫路, 69.

[論 文 要 旨]

日吉ダム貯水池の深層における嫌気化抑制のために運用されていた水没式の深層曝気装置を2009年、内部で発生する未溶解空気を浅層循環に有効利用できるような仕様変更した。その効果検証の一環として翌年夏、浅層循環に関する調査実験を、水深5 m付近に一次躍層が形成された条件で実施した。第一に、複数の水温計を取り付けた計測用ロープを装置の北側水面近傍で水平移動させ、南北20 m、水深20 mの鉛直断面における装置稼働前後の水温を、貯水池環境が異なる場合について計測した。第二に、気泡噴流の水連行効果を調べるため、装置上方水面近傍の流速の測定を、装置上部の散気部形状が異なる場合について行った。その結果、直接的な躍層破壊範囲は半径約10～13 m、深さ2.7～3.2 mに及ぶこと、その最深部から水平に貫入するいわゆるイントリュージョンが存在すること、気塊せん断部が水連行効果を増大させる可能性などを明らかにした。

キーワード：曝気循環；気泡噴流；水温躍層；水連行；ダム貯水池