

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

佐藤 友宣¹・岩松 裕二²

¹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）

²独立行政法人水資源機構 旧吉野川河口堰管理所（〒771-0144徳島県徳島市川内町榎瀬841）

ダム貯水池深層部における貧酸素水塊を改善するために設置している深層曝気装置の余剰空気を浅層循環に有効利用することを目的として、2005年度から「水没式複合型曝気装置」の開発を行い、これまでの室内および現地実験により、新たな水質保全設備として実用化が実現した。

本稿は、新たな曝気装置「水没式複合型曝気装置」の実用化までの各種実験結果について報告するものである。

キーワード 水没式複合型曝気装置、室内・現地実験、連行効率、実用化

1. はじめに

深層曝気装置の余剰空気を浅層循環に有効利用することを目的として、2005年度から「水没式複合型曝気装置」の開発を、水資源機構と㈱丸島アクアシステムの共同により行った。

曝気装置の改造比較図を図-1に示す。

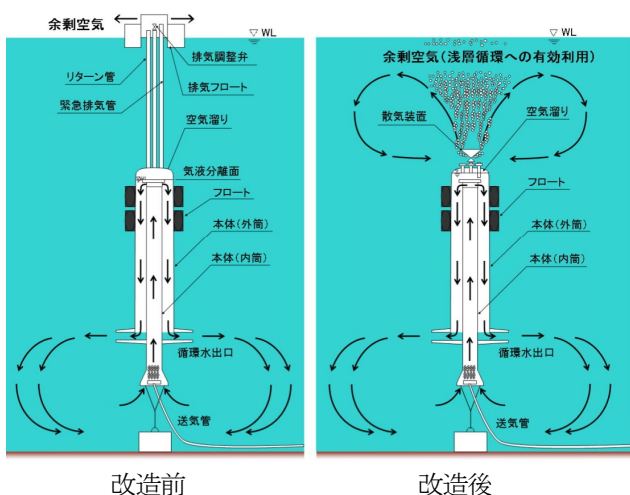


図-1 改造前後比較図

今回開発した新たな曝気装置「水没式複合型曝気装置」（以下「複合型曝気装置」という。）とは、従来の深層曝気装置のように装置内部で水中に溶解しない空気を余剰空気として装置頭頂部よりホースを介して気中に

開放するのではなく、水中に排出し、浅層循環に利用するものである。

本実用化実験に先駆け、2005年度より2ヶ年、室内および現場実験を行い、良好な結果が得られたことから、水資源機構の取り組みである技術力の維持・向上、技術の研究・開発を目的とした「水資源技術五箇年計画」により、2008年度から「浅層曝気が併用できる深層曝気装置の実用化」として、日吉ダム（水資源機構）に設置している深層曝気装置を複合型曝気装置に改造し、装置の耐久性確認、装置能力の評価検証など、実用化に向けた各種実験、計測等を行った。

2. 複合型曝気装置の構造および仕組み

(1) 余剰空気の排出機構

複合型曝気装置の装置構造を、図-2に示す。

装置頭頂部では、水中に溶解込まず浮上する空気（余剰空気）を一時的に蓄積するため、装置内部では空気と装置内の水による気液分離面が発生する。

気液分離面は、ダム貯水位および供給空気量により余剰空気とともに変動するため、深層曝気装置の能力低下を防ぐ目的から安定させる必要がある。

そのため、余剰空気を効率よく排出し、気液分離面を安定させるための「自動排出装置」を、複合型曝気装置頭頂部内に取り付けている。

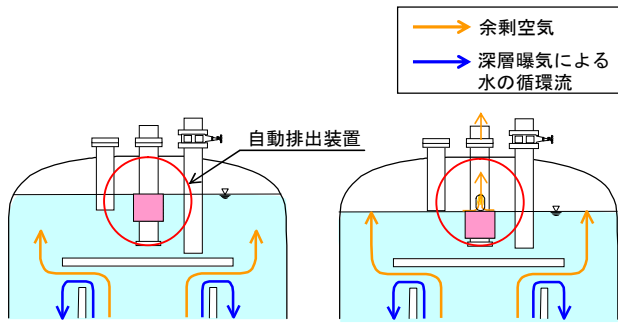


図-2 複合型曝気装置構造図

(2) 自動排出装置

自動排出装置は、装置内の気液分離面の変動（水面の上昇および下降）に合わせて、装置に取り付けられたフロートが追従し、空気孔を開放・閉塞することで余剰空気を水中に排出する重要な装置である（図-3、写真-1参照）。

このフロートは、気液分離面の変動に確実に追従させるために、表面をスパイラル状に加工している（以下、「スパイラルフロート」という）。

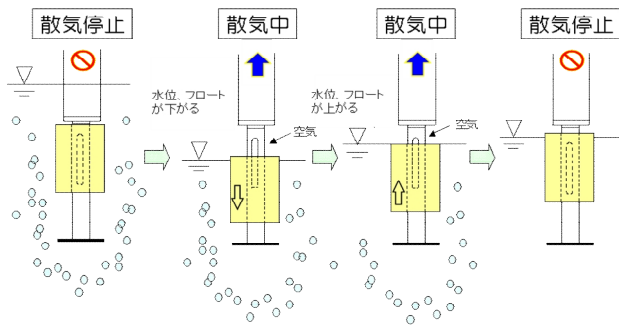


図-3 自動排出装置機構

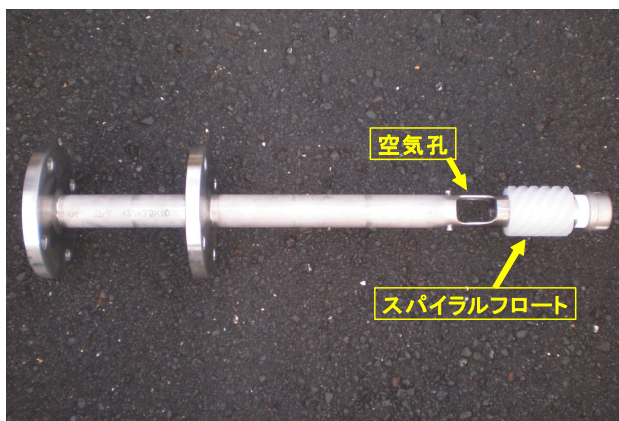


写真-1 自動排出装置

3. 実用化に向けた取り組み

装置実用化に向け、実施した実験等内容は次のとおり

である。

- ① 自動排出装置耐久性確認
- ② 深層曝気装置機能確認
- ③ 装置適用範囲の検証（散気可能深度）
- ④ 効率のよい散気形状の選定（室内実験）
- ⑤ 装置能力の検証
- ⑥ 効率のよい散気形状の選定（現地検証）
- ⑦ 浅層循環機能の任意停止（ON-OFF）機能の追加

(1) 自動排出装置耐久性確認

自動排出装置に取り付けられているスパイラルフロートは気液分離面の変動に追従し稼働することから、高耐久性が求められる。

スパイラルフロートに求められる性能から、耐摩耗性に優れ、加水分解および吸水膨張がない材質として「ポリプロピレン」を採用し、実機で試験運用を行った。

装置を一定の期間稼働させ、計測を行った結果、表-1に示すとおり、摩耗・膨張・変形もなく良好な結果であった。

表-1 スパイラルフロート計測結果

日付	測定時期	測定箇所	寸法(mm)	測定箇所	製品仕様
10月28日	稼働前	A	80	[Diagram showing dimensions A, B, C]	<材質> ポリプロピレン <比重> 0.91 <吸水率> 0.01以下 <強度> 強い <耐加水分解性> 強い
		B	43		
		C	65		
11月26日	稼働29日後	A	80	[Diagram showing dimensions A, B, C]	
		B	43		
		C	65		
12月10日	稼働43日後	A	79.9	[Diagram showing dimensions A, B, C]	
		B	43.3		
		C	64.9		
2月24日	稼働119日後	A	79.9	[Diagram showing dimensions A, B, C]	
		B	43.3		
		C	64.9		

(2) 深層曝気装置機能確認

深層曝気装置は、深層部の貧酸素水塊の改善を行う装置であり、複合型曝気装置においても当然、深層曝気の機能・能力を確保していることが求められる。

機能の確認方法としては、深層部のDO（溶存酸素濃度）改善効果による能力比較がわかりやすいが、外的要因に左右されやすいことから、DO変化によって深層曝気装置の能力判定はしがたい。

そこで、深層曝気的能力判定は、循環水の流速により行うこととした。

実験においては、複合型曝気装置の循環水吐出口周辺に取り付けた流速計によって循環水流速を測定して、深層曝気装置改造前後の循環水流速データの比較を行った。

送気空気量（コンプレッサーからの供給空気量）に対する循環水流速測定結果（図-4）に示すとおり、改造後の装置運転においても深層曝気循環水流速の低下はなく、深層曝気装置の本来機能を損なっていないことが確認できた。

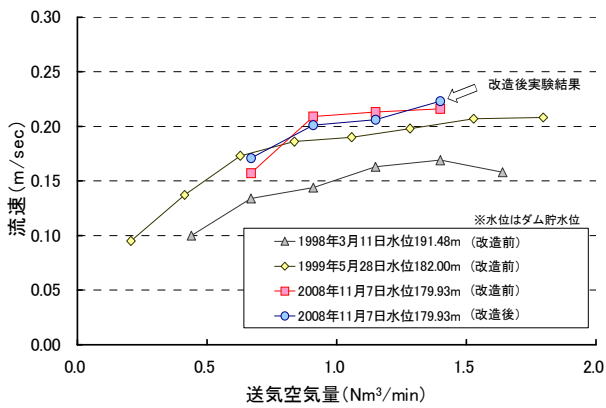


図-4 送気空気量に対する循環水流速の結果

(3) 装置適用範囲の検証 (散気可能深度)

一般的に同一空気量で散気した場合、曝気水深と循環水量は比例する。複合型曝気装置においても、余剰空気吐出位置 (曝気水深) を深くすることで循環水量は増加すると考えられる。

余剰空気の吐出位置は、他のダム貯水池において本装置を採用できるか否かの判断条件となることから、実験により吐出可能な下限位置の確認を行った。

深層曝気装置には何らかのトラブルがあった場合、装置内に空気が溜まり過ぎ、装置本体が浮き上がることを防止するための緊急排気管が設置されている。

実験は、余剰空気吐出口 (通常吐出位置) に取り付けたホースの先端を徐々に下降させ、緊急排気管から余剰空気が排出された位置を運用の下限として確認を行うものとした (図-5参照)。

結果、ホース先端を余剰空気吐出口から約1.5m下降させた位置で緊急排気管からの空気排出を確認したため、安全を考慮して1.0m程度までは吐出位置を下降させた運用が可能であると判断した。

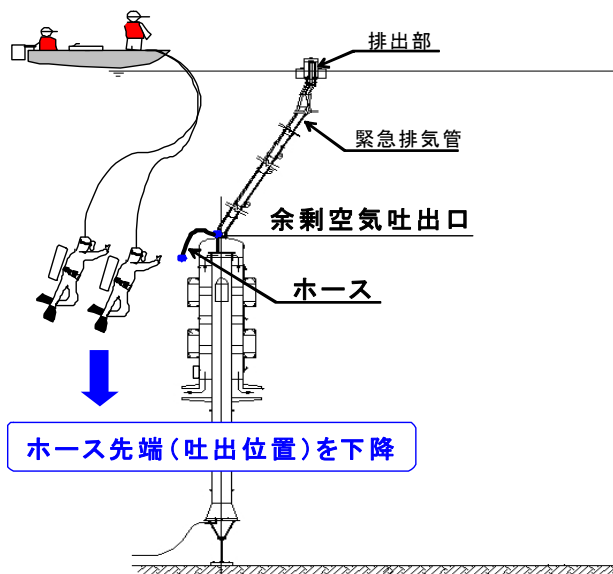


図-5 散気可能深度検証実験

(4) 効率のよい散気形状の選定 (室内実験)

余剰空気の水中排出にあたっては、その気泡の形状や大きさにより循環流量が変化するため、余剰空気を細かくせん断し、かつ広範囲に分散させることが可能な散気装置の形状検討を、室内模型実験により行った。

a) 実験方法

実験に使用した散気装置の模型6種類を写真-2に示す。

これらの模型を水を張った立方体ガラス水槽の中央部に設置し、水槽底面のエアチューブにより空気を供給し、模型周辺の流体挙動を計測した。

計測は、粒子画像速度計測法 (PIV) を用い、水槽に混入したトレーサーをパルス照明により可視化し、記録画像からトレーサーの移動量を解析することで、流速分布を得るものとした。

実験装置レイアウトを図-6に示す。

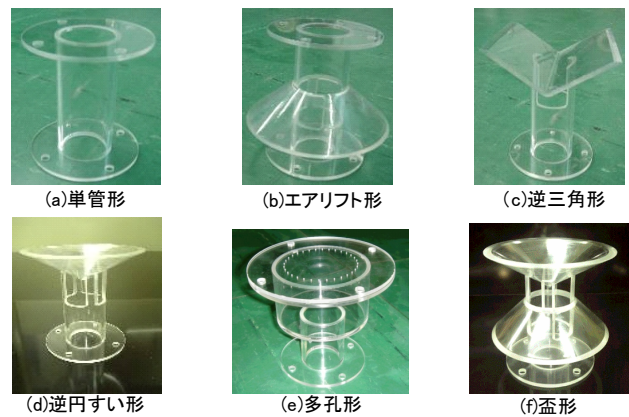


写真-2 実験用散気装置 (模型)

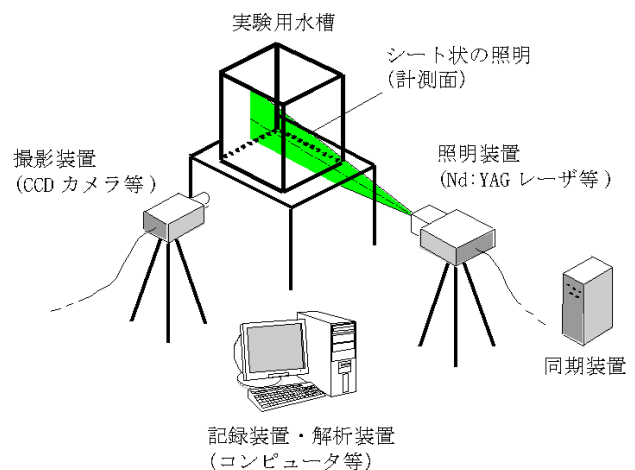


図-6 実験装置レイアウト

b) 実験結果

気塊を放出して十分な時間が経過した状態で撮影された画像の一例を図-7に示す。水中で排出され、せん断された気塊は、周辺の水を連行して上昇し、連行された水は水面付近で同心円状に広がって循環流となる。

これらのデータを、流動層の水面から深さ方向に積分し、それに模型中央から計測軸までを半径とする円周長さを掛けて水連行流量 Q_w を算出した。

空気流量 Q_a で標準化して水連行効率 $C_e(=Q_w/Q_a)$ を求めた結果を図-8に示す。

この結果より、複合型曝気装置に取り付ける散気装置形状は、水連行効率が一番優位であった「盃形」とした。

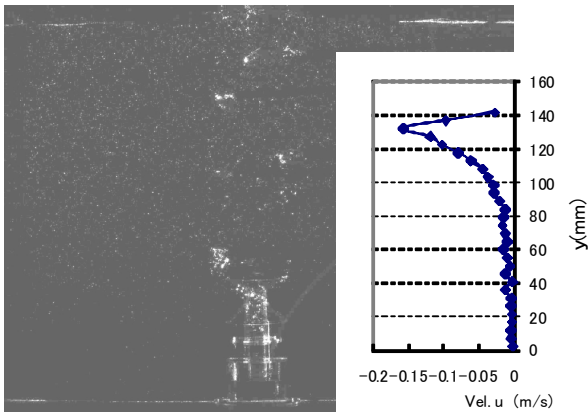


図-7 実験結果一例（盃形の場合）

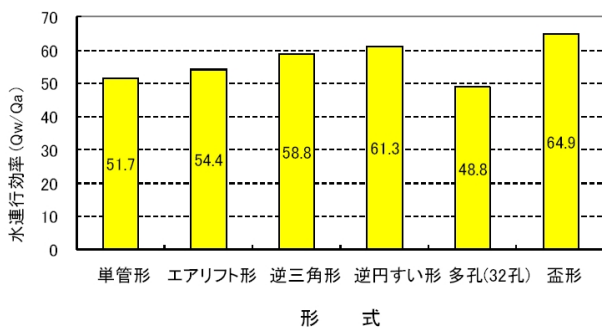


図-8 水連行効率

(5) 装置能力の検証

複合型曝気装置の浅層循環能力は、装置運転に伴う貯水池水温鉛直分布の変化により検証を行うものとした。

a) 効果検証方法

検証は複合型曝気装置の運転による貯水池水温変化と、既設の浅層曝気装置の運転による水温変化との比較を行うものとした。

なお、検証比較データは複合型曝気装置の運転による水温計測時と、貯水状況・流況・水温躍層形成状況が最も似た、過去の浅層曝気装置運転時データとした。

b) 検証結果

日吉ダムにおいて冷水放流対策として定める放流水温の下限値 15°C を確保することを指標として、2009年度に実施した検証の結果は次のとおりであった。

2009(H21)：運転開始35日後に 15°C 以上を確保

2002(H14)：運転開始30日後に 15°C 以上を確保

水温計測データを図-9に示す。

複合型曝気装置の運転による貯水池鉛直方向における水温躍層の変化は、気象条件等による差異はあるものの既設浅層曝気装置と比較しても、同等の効果を1基でも発揮することが確認できた。

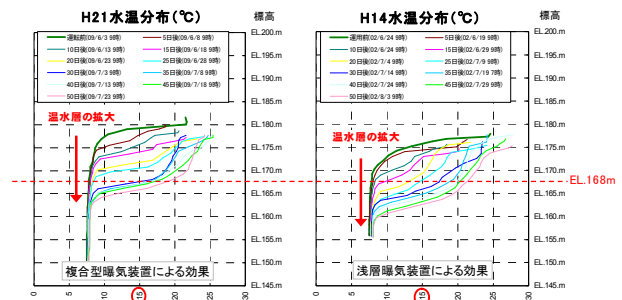


図-9 水温躍層変化グラフ

(6) 効率のよい散気形状の選定（現地検証）

室内実験により選定した盃形散気装置の効果を確認するため、複合型曝気装置に盃形の寸法を変化させた各散気装置を取り付け、現地実験を実施した。

a) 実験方法

盃形の直径を $200\cdot 600\cdot 800\cdot 1,000\text{mm}$ と段階的に変化させた散気装置を順次取り付けて、吐出口上方の流動層における流速の分布を測定した。

なお、盃形の最大寸法は、曝気装置本体の構造および強度上の制約により $1,000\text{mm}$ としている。

測定深さは、水面から水深 1m までは 0.1m 毎、それより深い領域では約 5m まで 0.5m 毎とし、範囲は曝気装置中心より 3.5m および 10m 離れた位置とした。

測定ポイントの概略を図-10に示す。

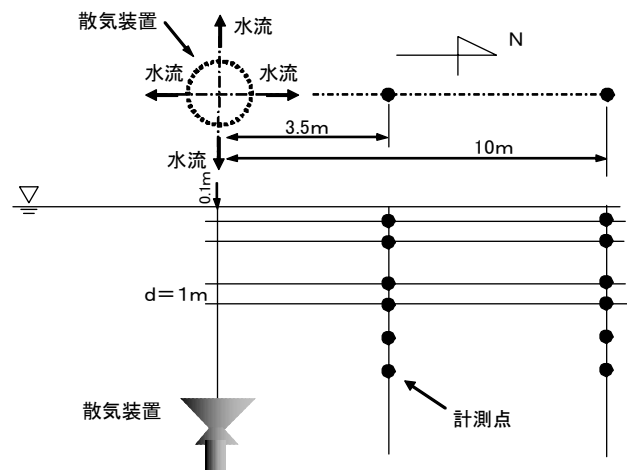


図-10 測定ポイント概略図

b) 測定結果

計測された流速データを図-11に示す。

4種類の直径の盃形散気装置と、参考に単管形の結果を併せて示している。

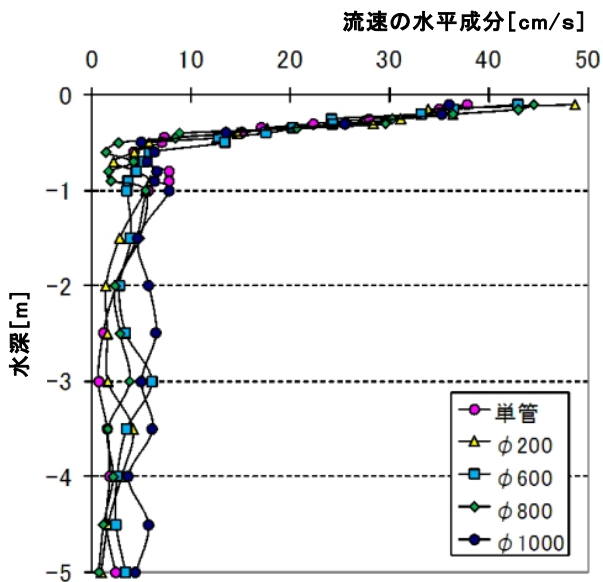


図-11(a) 水平距離3.5mでの流速

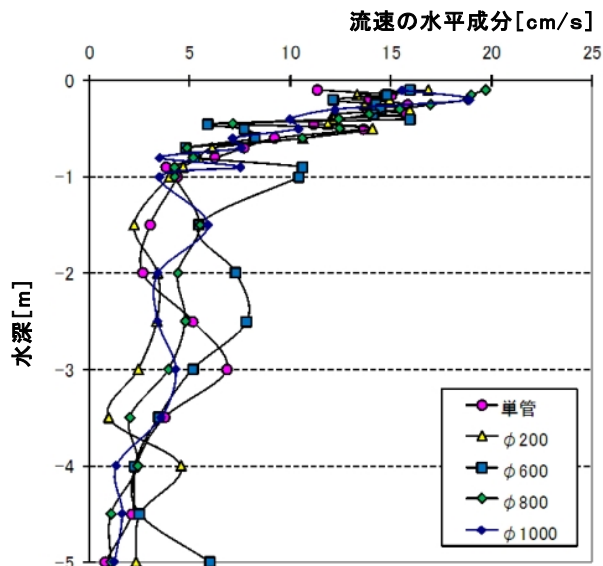


図-11(b) 水平距離10mでの流速

c) 水連行流量と効率

浅層における攪拌効果を定量的に評価するために、図-11で得られた流速分布のデータから、室内実験と同手法により、水の連行流量 Q_w から連行効率 $C_e (=Q_w/Q_a)$ を算出した。

最終的に得られた連行効率を図-12に示す。

現地検証においても室内実験同様に、単管形に比べて盃形の方がいずれも大きな連行効率値となっている。

また、盃形の直径の増加に対して、概ね増大する傾向が明らかとなった。

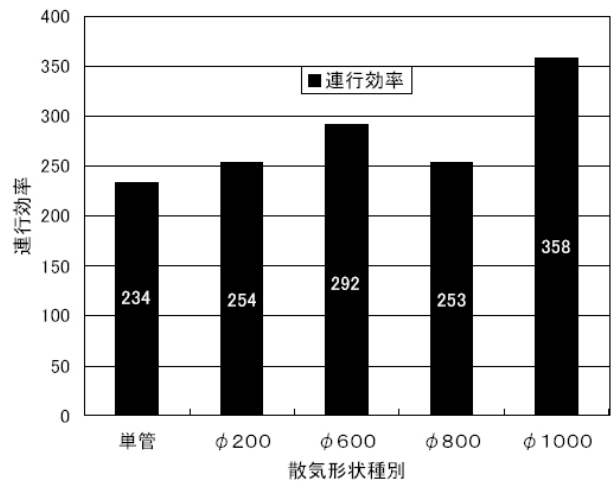


図-12 水連行効率の比較

(7) 浅層循環機能の任意停止機能の追加

複合型曝気装置は、深層曝気装置の余剰空気を浅層循環に利用した装置であるため、運転の主目的は、あくまでも深層曝気によるDO改善である。

現地実験を実施するなか、降雨による出水でダム貯水池に濁水が流入した際、浅層循環運転により中層に流れ込む濁水が巻き上がり、景観障害を引き起こす事態が発生した。

装置を停止させれば景観障害は収まるが、装置本来の目的である深層曝気機能も停止させることとなるため、浅層循環機能は任意で停止することができる必要があると判断し、追加の取り組みを実施した。

a) 浅層循環停止装置の概要

複合型曝気装置において深層曝気機能の運転を継続し、浅層循環機能(余剰空気の水中排出)のみを停止(ON-OFF)させるため、図-13に示す機能を考案し、実機の改良を行った。

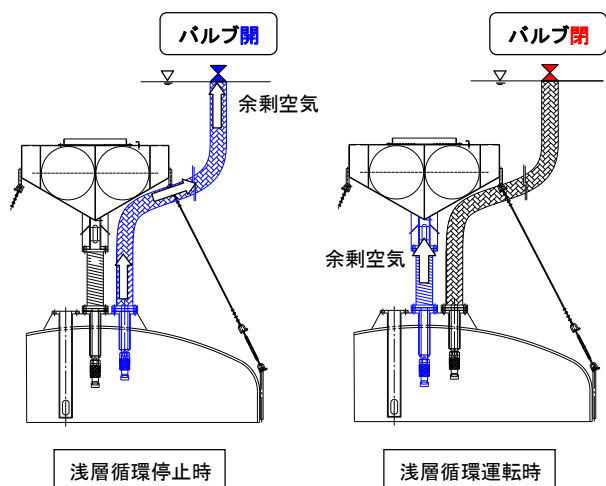


図-13 浅層循環停止装置図

b) 改良結果

装置改良を行い、実際に濁水が流入した際に、浅層循環停止装置の機能確認を行った。

結果は、写真-3に示すとおり、複合型曝気装置の運転を継続したまま、水面上に設置したバルブを開放させ、余剰空気を大気中に排出することにより浅層循環機能のみを停止させることができた。

停止直後、貯水池表層部においては、濁水の巻き上がりが消滅し、深層曝気機能のみとすることが可能となった。



浅層循環機能あり



浅層循環機能のみ停止

写真-3 複合型曝気装置運転状況

4. 実験総括

複合型曝気装置実用化に向けて実施した各実験や検証の結果は、次のとおりである。

- ① 自動排出装置の安定した余剰空気の排出、フロートの耐久性を各種検証により確認した結果、安定した挙動と高耐久性を有した装置であることが確認できた。
- ② 既存の深層曝気装置への影響を実機で確認した結果、複合化に伴う本来機能の低下および有害な事象は確認されなかった。

また、散気可能深度の検証により、採用可能な深度の範囲を確認し、他ダム貯水池への採用枠を拡大することができた。

- ③ 曝気装置複合化に合わせ、考案した効率的な散気装置形状は、室内および現場実験から盃形の水連行効率が一番優位な結果となり、本装置に採用した。
- ④ 実験過程において確認した濁水による景観障害に対して、浅層循環機能のみを任意で停止できる装置を考案し、任意停止が可能となった。

以上のとおり、各機能確認等において良好な結果を得ることができた。

5. まとめ

これまで行ってきた複合型曝気装置の各種確認作業、実験・検証、貯水池運用データの結果を総合的に判断し、新たな水質保全設備として実用化が可能となった。

この成果により、実用化の第1弾として2011年度に機構内の2ダムにおいて、既設の深層曝気装置を複合型曝気装置に改造を行った。

日吉ダムにおいては、今後、複合型曝気装置2基および既設の浅層曝気装置1基を用いた、水質保全のための最適運転パターンの検討を予定している。

複合型曝気装置は、深層・浅層曝気装置の複合化によりライフサイクルコストの低減、および浅層曝気装置の設備規模縮小または運転時間短縮等によるCO2排出量を含めた人的環境負荷の抑制が可能であることから、今後、新規の設置を含めて同様の深層曝気装置が設置されているダム貯水池等において採用され、水質改善およびコスト低減に大いに寄与することを期待している。

なお、本装置に関連する技術は、水資源機構が保有する技術として現在まで実験の成果ごとに、自動排出装置、散気装置に係る4つの特許を出願し、既に2つの特許を取得している。

謝辞：本実証実験を遂行するにあたり、大阪電気通信大学中田亮生准教授、(株)丸島アクアシステム各位に種々のご指導、ご協力を頂いたことに対し、記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 深層曝気の有効活用について
平成18年度水資源機構技術研究発表会
平成19年度近畿地方整備局研究発表会
- 2) 水没式複合型曝気装置の実用化（中間報告）
平成21年度水資源機構技術研究発表会
- 3) 水没式複合型曝気装置における実地調査研究
大阪電気通信大学工学部環境技術学科 中田亮生(2011)