

# 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

## FIELD OBSERVATION AND EVALUATION OF DESTRATIFICATION BY AERATION CIRCULATION IN A DAM RESERVOIR

豊島 靖<sup>1</sup>・天野 邦彦<sup>2</sup>・田中 康泰<sup>3</sup>

Yasushi TOYOSHIMA, Kunihiko AMANO and Yasuhiro TANAKA

<sup>1</sup>正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川環境研究室 (〒305-0804 つくば市旭1)

<sup>2</sup>正会員 工博 独立行政法人土木研究所 河川生態チーム (〒305-8516 つくば市南原1-6)

<sup>3</sup>国土交通省 北海道開発局室蘭開発建設部 苫小牧治水総合事業所 (〒053-0011 苫小牧市末広町3丁目)

The purpose of this research is to examine the operation technique of the aeration circulation device that suits a local situation by the observations of the water temperature, the direction and velocity of the wind, etc. in the stratified dam reservoir.

As a result, it was shown that the intrusion position by the aeration circulation is influenced by the water temperature distribution. Moreover, the flows of water in this reservoir was shown to have received the influence of wind driven flow, inflow and outflow strongly. Therefore, it was suggested that affected area by aeration can be wider if the aeration circulation device was operated referring to the flow of the reservoir that was presumed by the observations.

**Key Words :** Stratified reservoir, destratification, aeration, bubble plume

### 1. はじめに

富栄養化した貯水池では、夏期に水温成層が形成されることで鉛直方向の混合が抑制され、表層の植物プランクトンの大量増殖や、底層の貧酸素化及び堆積物からの栄養塩の溶出増加などの水質問題が起りやすくなる。

水温成層が形成されている富栄養湖の水質改善手法として曝気を行う場合、鉛直方向に強制的な循環を起こし成層破壊する手法と、底層部に酸素を供給することを目的とした底層曝気の2種類があり、運用方法やその曝気方式も各種考案されている。成層破壊型の水質への影響については、比較的浅い貯水池において利点と欠点の両面から検討が行われている<sup>1)</sup>。また、底層曝気については現地での適用や<sup>2)</sup>、非常に微細な空気を放出するマイクロバブル方式の曝気手法が考案されている<sup>3)</sup>。

貯水池表層に集積する植物プランクトンの大量増殖のなかでも、とりわけ藍藻類の大量増殖は水道水の異臭味問題を引き起こすこともあり問題である。藍藻類については鉛直混合が抑制された状況で優占的に増殖しやすくなるとされており、鉛直循環はこの利点が解消するため藍藻類を抑制する可能性がある<sup>1)</sup>と考えられる。

本研究は、表層付近に形成される水温成層を破壊し鉛直混合を促進するとともに、循環混合を平面的に広範囲にするため、成層破壊型の曝気循環が行われているダム貯水池において、曝気循環装置周辺の水温の観測により曝気循環による成層の破壊状況を把握するとともに、貯水池全体の水温・風向・風速等の観測により貯水池全体の水温構造の変化を把握することで、現地の状況に即した曝気循環装置の運用手法を検討することを目的とする。

### 2. 現地観測の概要と曝気循環装置の運用状況

#### (1) 現地観測の概要

調査対象とした貯水池は昭和52年に完成・運用されている、利根川水系渡良瀬川の上流、群馬県東村に位置する草木ダムである。草木ダムは総貯水量約6,000万 $\text{m}^3$ 、洪水期の最大水深は約37m、湛水面積は約1.7 $\text{km}^2$ であり、洪水調節、かんがい・水道・工業用水、発電を目的とした多目的ダムである。当貯水池においては、富栄養化等の水質対策として曝気循環が平成4年より実施されている。

図-1に、曝気循環装置の位置と水温・風向・風速観測

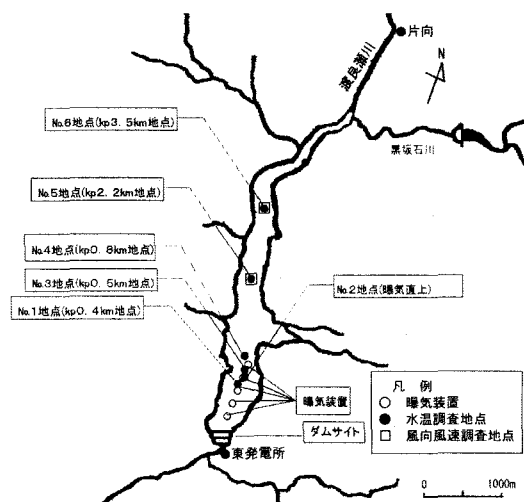


図-1 対象貯水池の平面図及び調査地点。

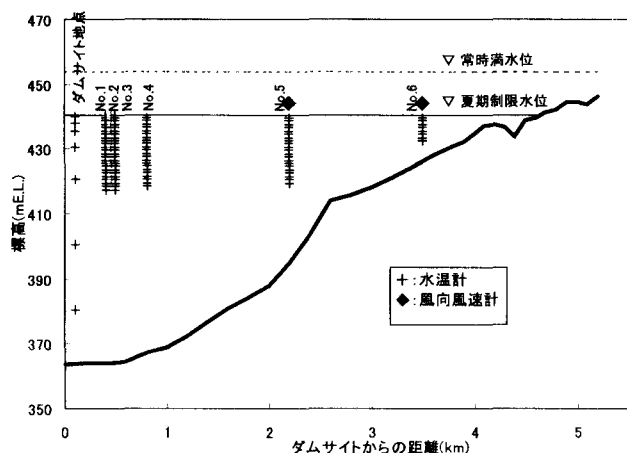


図-2 対象貯水池の縦断面図及び調査地点。

地点の平面図を示す。曝気循環装置は5基設置されており、今回研究対象とした平成10年には6月21日から10月2日まで運用された。

現地観測は水深方向にメモリー水温計（アレック電子社製、MDS-T）を投入・設置し、10分おきの水温変化について連続観測を行った。観測水深については、曝気循環装置の空気吹き出し口を最大で20mまでしか下げられないことから、水深23mまでとし、水面から基本的に1m間隔で設置した（図-2）。曝気循環装置による水温変化を把握するため、曝気循環装置近傍では平面的に密な配置を行うとともに、貯水池全体の変化についても確認するため、曝気循環装置から離れた地点にも水温計を配置した。これと同時に、水面上1mに設置した風向・風速計（メテック社製、VP-300DC）により10分おきの風向・風速変化についても連続観測を行った。現地観測は8月17日から11月22日まで行った。

また、草木ダム管理所によりダムサイト近傍の水温及び貯水位、流入・放流量等の観測が1年を通じて行われており、それら観測結果も踏まえて考察した。

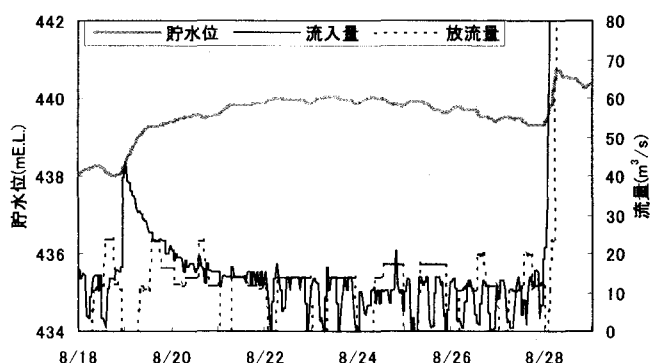
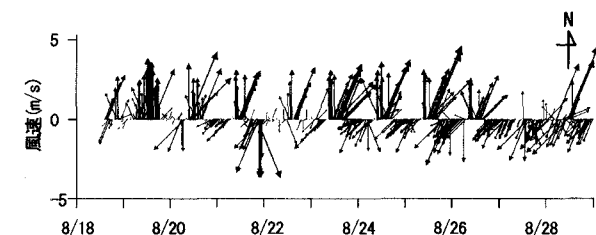
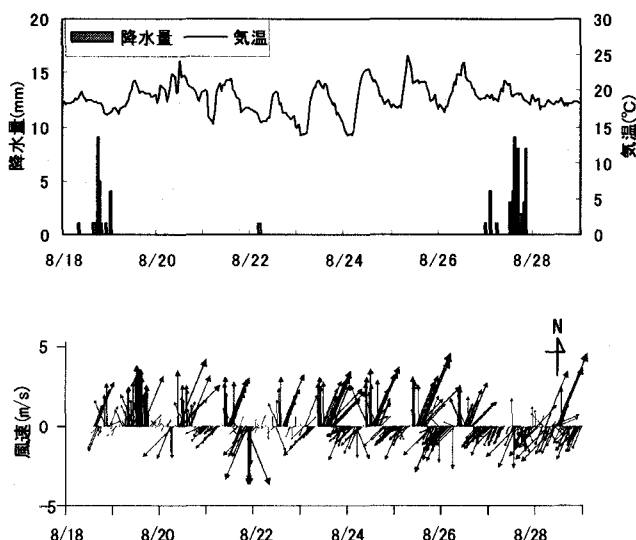


図-3 観測期間中の気温・降水量，風向・風速，貯水位・流入・放流量。

## (2) 曝気循環装置の運用状況

曝気循環には散気量 $2.4\text{ m}^3/\text{min}$ 、散気管径150mmの装置を用いている。曝気循環装置については、空気の吹き出し水深（吐出水深）の違いによる成層破壊の特性の変化を調べるために、6月21日から10月2日までの運用期間中、吐出水深を変化させた。吐出水深は、6月21日の稼働開始から水深20mに設置し運用していたものを、7月13日から水深10mに変更した。さらに8月18日から水深15mに変更し運用した。

## 3. 貯水池全体の水温変化

### (1) 気象及び水文条件

貯水池の水温変化に影響を与える外部要因としては、気象条件や流入・放流量といった水文条件が挙げられる。

当貯水池においては8月28日に大規模な出水があり、貯水池全体が混合され、その後は表層に日射による成層が残るのみであったことから、本研究では水温成層が維持されていた8月28日までの観測結果について整理した。

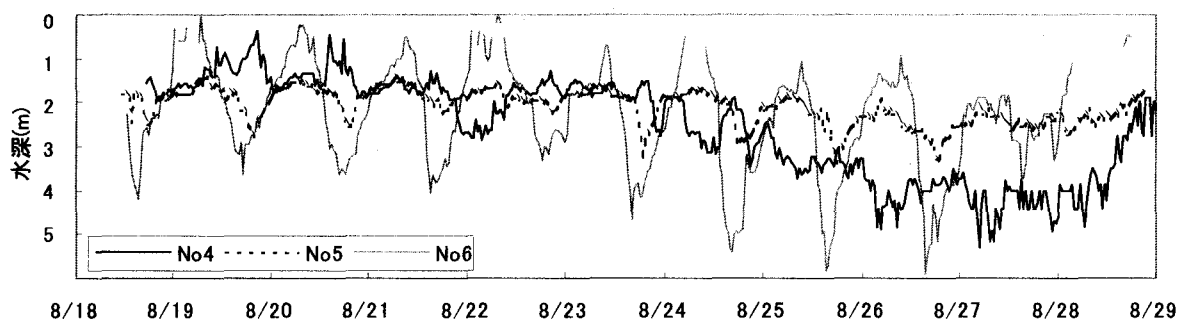


図-4 水温21℃の水深変化.

当貯水池における気温・降水量，風向・風速，貯水位・流入・放流量の変化を図-3に示す．ここで風速は南寄りの風をプラス，北寄りをマイナスとしベクトル表示した．なお，気温・降水量は近傍の日光地点のアメダスデータを用いた．

## (2) 吹送流による水温変化

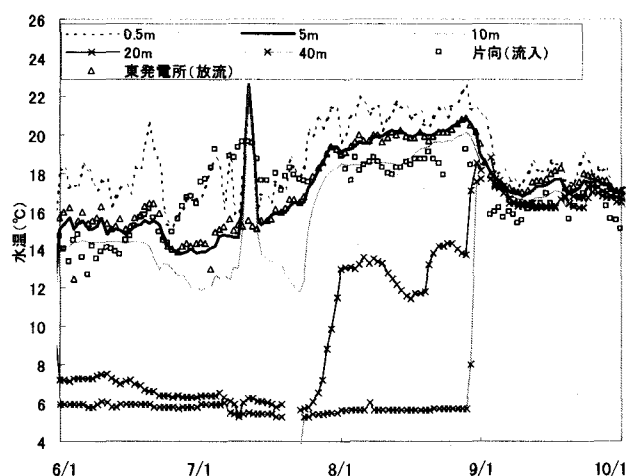
観測地点No. 4, No. 5, No. 6(ダムサイトからそれぞれ0.8km, 2.2km, 3.5km)における水温21℃の水深変化を図-4に示す．No. 5地点は概ね当貯水池の中心であり，No. 4, No. 6地点はNo. 5地点からほぼ等距離にある．図-4をみるとNo. 4地点とNo. 6地点の位相が逆転しており，No. 5地点は他2地点に比べ水深の変化が小さいことが同え，振動の節と考えられる．また，No. 6地点の水深変化がNo. 4地点に比べ大きいのは当貯水池の形状（No. 6地点は水深が浅くなり断面積が小さい）によると考えられる．

貯水池に風が吹くと吹送流により表層水が風下側に輸送され風下の水面が上昇し，水面勾配による傾斜流が起こる．ここで吹送流は水面から水底に向かって急激に小さくなるのに対し，傾斜流は徐々に小さくなることから水面付近は風方向の流れで，水底付近は風方向と逆の流れとなる鉛直循環流となる<sup>4)</sup>，ことが知られている．

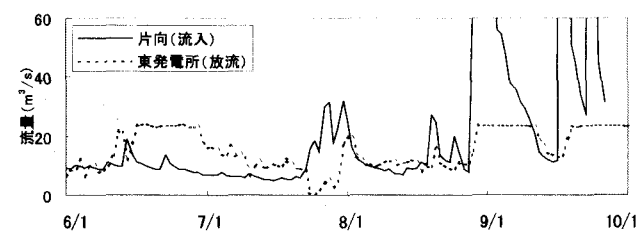
図-3に示した風向・風速と図-4の水温21℃の水深変化を対比してみると，例えば8月20日の昼間に南寄りの風（ダムサイトから上流に向かう風）が吹くとNo. 4地点の水深は上がり，No. 6地点の水深は下がる様子がみられる．また逆に，8月21日の夜中に北寄りの風（上流からダムサイトに向かう風）が吹くとNo. 4地点の水深は下がり，No. 6地点の水深は上がる．これらのことから当貯水池の水温変化には吹送流が密接に関わっていると考えられる．

## (3) 流入及び放流水による水温変化

ダムサイト近傍においては，草木ダム管理所により通年の水温観測が行われている．ここでは平常時及び出水時の流入・放流水と貯水池の水温変化の関係をみるため，ダムサイト近傍と貯水池への流入水（片向地点）及び貯水池からの放流水（東発電所）の水温変化と流入・放流量を図-5に整理した．



(a) ダムサイト近傍及び流入・放流水の水温変化.



(b) 流入量と放流量.

図-5 ダムサイト近傍及び流入・放流水の水温変化と流入・放流量.

この図において流入水等の影響と考えられる特徴的なことを記す．まず水深5mと東発電所（放流）の水温は，図化した期間を通じてほぼ同様に变化しており，東発電所が表層で取水しているためと考えられる．7月22日頃の小規模な出水時には，水深10mの水温が急に上昇して片向（流入）と同程度の水温となっており，流入水が水深10m付近を流れていたと考えられる．7月22日には水深20mの水温も上昇している．これはこの時期の貯水位が約10m上昇したためと考えられ，水位上昇後の水深20mの水温は，水位上昇前の水深10mの水温と同じ程度まで上昇していることから想像される．8月28日以降は大きな出水により全層の水温が同じとなったと考えられる．

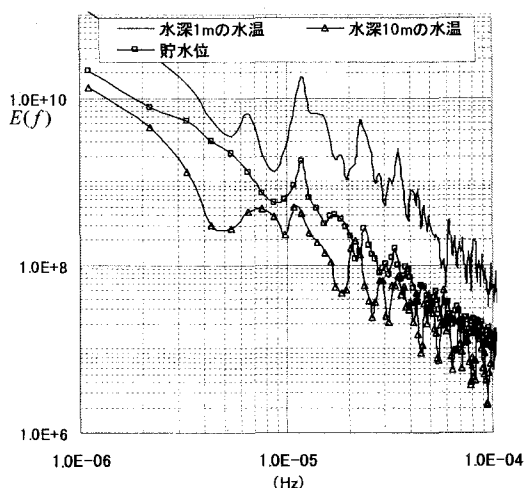


図-6 スペクトル解析結果図.

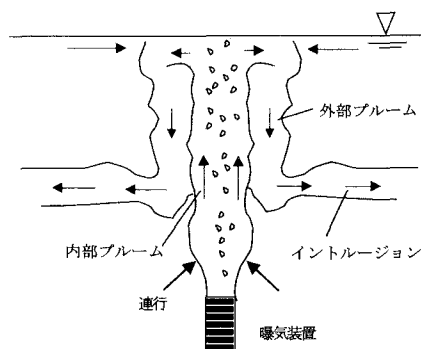


図-7 曝気循環の概念図<sup>5)</sup>.

#### (4) スペクトル解析

当貯水池の水温変化に影響を与える要因を調べるため8月19日から8月27日のNo. 4地点の水温、貯水位、流入・放流量、風速についてエネルギースペクトルを調べた。結果としてNo. 4地点の水温は多くの水深で約23時間の周期が卓越していたものの、水深5mでは21時間、水深10mでは26時間の周期となった。また、貯水位、放流量及び風速は約23時間、流入量は約8時間の周期が卓越していた(図-6)。これらより貯水池の水温は流入・放流・吹送流等により変動する貯水位の影響を受けるとともに、放流・吹送流自体の影響も受けて変動していると考えられる。

### 4. 曝気周辺の水温変化

#### (1) 曝気の影響

##### a) イントルージョンの数

曝気循環装置により周囲に誘起される流動の概念図を図-7に示す。曝気循環装置により放出された気泡は浮力により上昇を始める。内部ブルームと呼ばれるこの領域は水面まで達し、そこで水面に沿った放射状の流れに変わり、しばらく広がった後、沈み込む。この沈み込む流れの領域を外部ブルームと呼び、周囲の密度が外部ブル

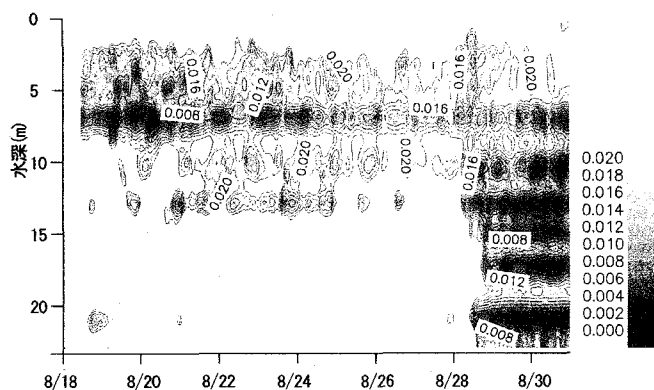


図-8 No. 3地点におけるブライント・ヴァイザル振動数の分布.

ームの水の密度と等しくなった高さでイントルージョンとして周囲に放射状に貫入する<sup>5)</sup>。

浅枝・Imberger<sup>5)</sup>はバブルブルームの周辺の流れを成層の強さと空気量の関係で3タイプに分類できるとしている。これはブライント・ヴァイザル振動数  $N$  と全水深  $H$ 、浮力フラックス  $Q_B g$  より定まる無次元量  $P_N = N^3 H^4 / Q_B g$  により分類され、観測期間中の本貯水池の曝気循環は成層の比較的強い表層付近でも概ね  $P_N < 50$  以下となり、1つの明瞭なイントルージョンが現れる「成層強度に比較して放出空気量が多い場合 ( $P_N < 300$ )」と分類される。

##### b) イントルージョンの位置

イントルージョンの位置はAsaeda・Imberger<sup>6)</sup>により算定できるが、これは質量保存測と運動量保存測を連続的に解くものであり複雑である。ここでは水温観測データにより、簡易にイントルージョンの位置を推定する方法として、ブライント・ヴァイザル振動数による方法と、気泡により上部へ連行される水量を求めるKobus<sup>7)</sup>の式について検討した。

まず、ブライント・ヴァイザル振動数は式(1)で求められ、 $N$  が大きいほど成層が安定しているといえ、矢島・檜谷<sup>8)</sup>はブライント・ヴァイザル振動数を密度成層の安定性検討に用いて明瞭な結果を得ている。

$$N = \sqrt{\frac{-g}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dz}} \quad (1)$$

ここで  $N$  : ブライント・ヴァイザル振動数,  $g$  : 重力加速度,  $\rho$  : 密度,  $z$  : 上向きを正とした水深方向座標。

図-8に曝気地点から近いNo. 3地点(曝気地点から50m)のブライント・ヴァイザル振動数の分布を示す。図-8よりNo. 3地点のイントルージョンは、水深8m付近に明瞭にみられる不安定な層と考えられる。

次に、式(2)に示すKobus<sup>7)</sup>の式によるイントルージョン位置の検討を行った。まず、曝気循環により周囲の水が連行された後の表層水の水温を、各層間の連行量に

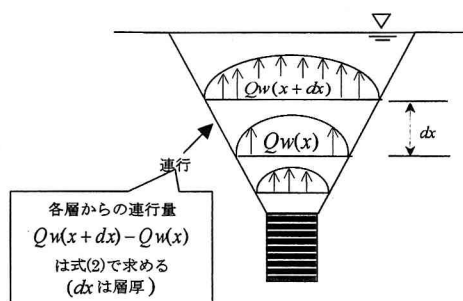


図-9 曝気循環の概念図.

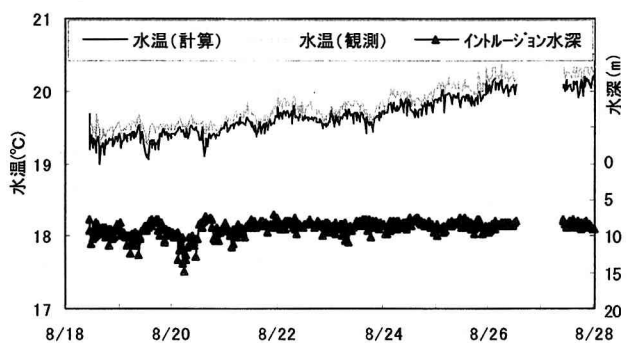


図-10 No. 2 (曝気直上) 地点のイントルージョン位置.

各層の水温を掛け合わせ、表層における連行量で除することで算定した(図-9). 続いて、連行された表層水と同水温となる周辺水域の水深を求め、これをイントルージョン位置と考えた.

$$Qw(x) = 35.6C(x+0.8) \sqrt{\frac{-V_0 \ln\left(1 - \frac{x}{h+10.3}\right)}{\mu_b}} \quad (2)$$

ここで、 $Qw(x)$ : 連行される水量 ( $m^3/s$ ),  $x$ : 曝気装置の空気吐出口からの高さ,  $V_0$ : 注入空気量 ( $m^3/s @ 1atm$ ),  $h$ : 空気吐出口の深さ,  $C = 2V_0 + 0.05$ ,  $\mu_b = 25V_0 + 0.7$  ( $m/s$ )

図-10にNo. 2 (曝気直上) 地点における表層の観測水温, Kobus<sup>7)</sup> の式による計算水温, 及びイントルージョン位置の推定結果を示す. この図より, No. 2地点の表層水温は計算値と観測値がよく整合していることがわかる. また, イントルージョンは水深8m付近となり図-8のプラント・ババヤ振動数の分布からみられるイントルージョン位置ともあっている.

また、後述するがKobus<sup>7)</sup> の式による8月18日から8月27日のダムサイト地点の水温分布においても、イントルージョン位置は水深8m付近と推定された.

これらより水温観測結果から簡易にイントルージョン位置を推定する方法としてKobus<sup>7)</sup> の式が活用できることがわかった.

## (2) 吹送流及び流入水の影響

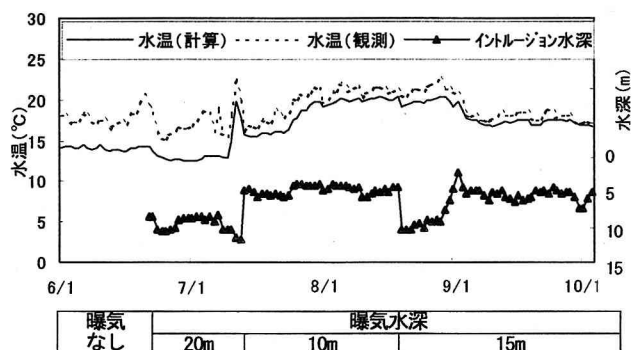


図-11 ダムサイト近傍におけるイントルージョン位置.

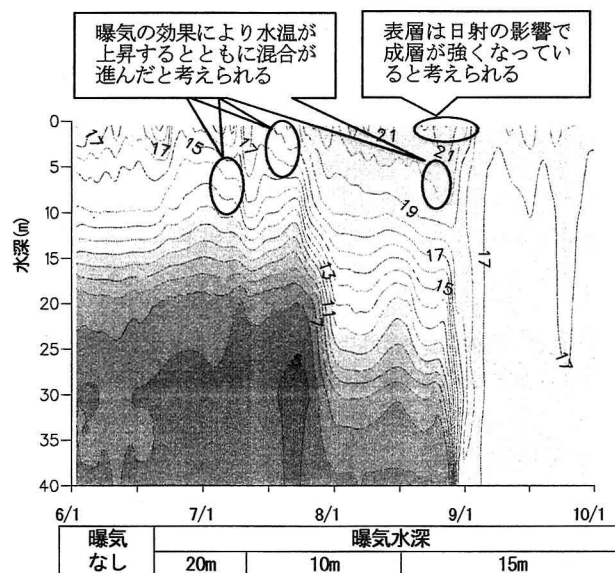


図-12 ダムサイト近傍における水温変化.

ここでもう一度、図-8のプラント・ババヤ振動数の図をみると、水深8m付近には曝気循環によるイントルージョンと考えられる不安定な層が明瞭にみられるが、その周辺の水深においても不安定な層が存在することがわかる. これは先に述べた吹送流等の影響と考えられ、水深5m以浅は吹送流、水深5m付近は放流、水深10m以深は流入や貯水位の変動により不安定となっていると考えられる.

## 5. 考察

### (1) 水温分布を考慮した曝気水深の設定

ダムサイト近傍の水温分布を用いて、Kobus<sup>7)</sup> の式によりイントルージョン位置を推定した(図-11). この図によると曝気水深を15mとした期間においては水深8m付近にイントルージョンがみられ図-10に示した結果とよくあっている. 曝気水深が20m, 10mのときのイントルージョン位置はそれぞれ、9m, 5m付近であり、曝気水深が15mと20mではあまりイントルージョンの位置に差がないことがわかる.

次に、図-12にダムサイト近傍の水温変化を示した.

この期間における曝気水深を整理すると、6月20日までは曝気循環装置は稼動しておらず、6月21日から7月12日までは水深20m、7月13日から8月17日までは水深10m、8月18日以降は水深15mである。

図-12から曝気循環の影響と考えられる水温変化がみられるのは、7月7日頃の水深7m付近、7月15日頃の水深5m付近、8月20日頃の水深10m付近であり、水温が上昇するとともに水温勾配は小さくなり混合が進んでおり、混合が促進されている水深は推定されたイントルージョン位置付近であることがわかる。

その他の特徴的な水温変化は以下のように考察される。6月20日頃の曝気水深が20mの期間において、水深10m以浅の水温が急に低下しているのは、平均気温が10℃程度と冷え込む日があったためと考えられる。また、7月22日頃は出水による放流の影響で比較的深いところまで水温が上昇していると考えられる。

これらより曝気による成層破壊のためには、水温分布の把握によりイントルージョン位置を推定することで、より精度よく成層破壊（混合）が行なわれるように曝気水深を適宜調整することが重要と考えられる。

例えば今回の観測期間においては、曝気水深を15mとした8月20日頃は水深10m付近では混合が進んでいるが、表層には日射による水温成層が発達してきている。ここで曝気水深を10mとした場合のイントルージョン位置をKobus<sup>7)</sup>の式により推定したところ、水深4m付近にイントルージョンが貫入すると推定され、表層の成層破壊には効果があったと考えられる。同様に8月後半の大きな出水で水温躍層が破壊された後は表層に日射による成層が残るのみであったことから曝気水深を浅くするほうが良かったと考えられる。

## (2) 貯水池の流動を考慮した曝気水深の設定

曝気循環装置はダムサイト側に偏在しているため、イントルージョン位置における流向が上流向きなら曝気循環の効果はより広範囲となり、逆方向なら効果は狭い範囲に限られることが想像される。このことから曝気循環による成層破壊をより広範囲に行い、藍藻類を抑制するためには、貯水池の流動を考慮することが重要である。

今回の検討結果より、貯水池全体の水温変化は貯水位や吹送流・放流水等の影響を受け、なかでも吹送流の影響により昼夜で水温分布が変動することが示された。日中は南寄りの風、すなわちダムサイトから上流へ向かう風の影響を受け、上流側での水温分布が下降し、ダムサイト側での水温分布は上昇する現象がみられ、夜間はその逆の現象がみられた。これらの事象は、貯水池上空に吹く風と貯水池全体の水温を把握すれば、大まかには貯水池内の水の流れを把握できることを示している。

これらより、曝気水深は貯水池の水温分布を把握し、貯水池内の水の流れを推定して設定することで、曝気循環装置をより効果的に運用できると考えられる。

## 6. おわりに

今回の検討で明らかになった当貯水池での曝気循環装置の効果的な運用方法は次のとおりである。

1) 曝気循環によるイントルージョン位置の推定を簡易に行う方法としてKobus<sup>7)</sup>の式は有効である。

2) 曝気循環によるイントルージョンの位置は水温分布に大きく影響を受ける。つまり曝気水深が同じであってもイントルージョン位置は変化することから、水温分布の把握によりイントルージョン位置を推定し、より精度よく表層の成層破壊（混合）が進むように曝気循環装置を運用することで、藍藻類を抑制できる可能性がある。

3) 当貯水池内の水の流れは、吹送流・放流水等の影響を強く受け、水温分布を変化させている。これは逆に言えば風と水温分布を観測することで大まかな貯水池内の流動を推定できることを示している。これより水温分布等の把握により水の流れを推定し、イントルージョンを水の流れと同じ向きの層に貫入させることで曝気循環による成層破壊がより面的に広範囲となると考えられる。

これらの結果から、曝気循環装置の実際の運用に際しては、曝気量に加えて、水温分布及び貯水池内の水の流れを考慮し、適切な吐出水深を設定することが重要であることが示された。

謝辞：本研究の実施にあたり、水資源開発公団草木ダム管理所からは貴重な観測データのご提供と、現地観測においてご高配を頂いた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 天野邦彦・藤原正好、成層破壊型曝気循環による貯水池水質変化の現地観測とその評価、環境工学研究論文集、第39巻、pp.191-200, 2002.
- 2) 中村悟・梶谷隆志、布目ダムにおける深層曝気装置の水質改善効果、ダム技術、N164, pp.42-52, 2000.
- 3) 道奥康治・神田徹・大成博文・森口昌仁・松尾昌和・白澤静敏・松尾克美、マイクロバブルによる富栄養貯水池の水質改善工と浄化効率、水工学論文集、第45巻、pp.1201-1206, 2001.
- 4) 岩佐義朗、湖水の流動と成因、湖沼工学、pp.106-115, 1990.
- 5) 浅枝隆・Jörg Imberger、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、pp.55-62, 1989.
- 6) Asaeda, T. and Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, *J. Fluid Mech.*, Vol.249, pp.35-57, 1993.
- 7) Kobus, H. E.: Analysis of the flow induced by an air-bubble system, *Proc. 11<sup>th</sup> conference of Coastal Engineering, London*, pp.1016-1031, 1968.
- 8) 矢島啓・梶谷治・道上正規・清水孝則、湖山湖における成層時の内部波と流れに関する現地観測、水工学論文集、第46巻、pp.1001-1006, 2002.

(2002. 9. 30受付)