

ダム湖におけるWEPシステムから吐出される 高濃度酸素水の流動メカニズム

FLOW MECHANISM GENERATED BY THE HYPOLIMNETIC OXYGENATOR WEP SYSTEM IN A RESERVOIR

矢島 啓¹・増木新吾²

Hiroshi YAJIMA and Shingo MASUKI

¹正会員 博(工) 鳥取大学准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

²正会員 修(理) 松江土建株式会社 環境部 (〒1690-0046 松江市乃木福富町340)

Physical characteristics about the flow generated by a hypolimnetic oxygenator called WEP system recently developed in Japan were investigated through field tests carried out in Sanbe Reservoir. Field data showed that the oxygen-rich water flow traveled nearly 500 m in four days at nearly the same height of the outflow opening of the device. The thickness of the intrusion, travel time and other important values were derived from the field data. They all showed the flow was similar to the intrusion of bubble plume after the plunging point and was controlled by inertia-buoyancy force, which is generated by 1 m difference between the intake and the outflow of the oxygenator. The wind profile data and spectrum analysis of the water temperature showed the possibility of the existence of internal wave, which was one of the main cause of the vertical displacement of the intrusion shown in the field data.

Key Words : WEP system, hypolimnetic oxygenator, reservoir, dissolved oxygen, field tests, intrusion

1. はじめに

ダム貯水池における夏季の深水層における貧酸素化は、しばしば観測される現象である。これは主に夏季の強い水温成層のために、表層から深水層への酸素輸送が妨げられることによって引き起こされる。このような状態が長期に続くと、栄養塩やマンガン・鉄などの金属類がダム湖底から溶出し、アオコの発生や浄水障害などのダム管理上の大きな問題を生じる¹⁾²⁾。この問題に対処するため、水温成層を維持したまま、深水層に直接酸素を供給する方法が、一般的な管理手法となってきた。この手法は、水温成層を弱めたり破壊しない点において、曝気循環装置とは大きな違いがある。Fastらは、深水層への酸素供給システムとして、1)機械式攪拌、2)空気供給、3)純酸素供給の3つのグループをあげている³⁾。純酸素の供給手法は比較的新しいものであるが、空気を供給する場合と比較して同量の酸素を供給するのに必要な時間供給量が少ないため、装置の規模が小さくなる。

松江土建(株)と土木研究所が共同で特許を取得した(特許第3849986号)水中型気液溶解装置WEP(ウェッ

プ)システムは、純酸素を用いた深水層での酸素供給装置の一つであり、次の3つの特徴をもつ、1)装置を設置した水深の水圧を利用して、酸素を効率良く溶解させる、2)装置内で酸素が溶解するため、吐出する高濃度酸素水塊は気泡により上昇することが無く、ほぼ吐出水深程度を水平拡散する、3)装置を水中で開放しているため、圧力制御の必要はなく、ポンプ吐出量と酸素供給量だけの制御ですむ⁴⁾。松江土建(株)がこれまで行ってきた現地の実証試験の結果から、WEPシステムからの高濃度酸素水の拡散状況は、1960年代から研究がなされているBubble PlumeのPlunge Point以降に発生するIntrusionと考えることができた^{5),6)}。しかしながら、高濃度酸素水の流動に関する詳細なデータは取得されておらず、今後、WEPシステムを効率的に運用されるためには、その流動メカニズムを明らかにする必要がある。

そこで本研究では、島根県太田市にある三瓶ダムにおいて、異なる条件下においてWEPシステムの運転を行い、WEPシステムから吐出される高濃度酸素水の挙動(以下、Intrusionと呼ぶことにする)を調べるとともに、それらに影響を与える要因についての検討を行った。

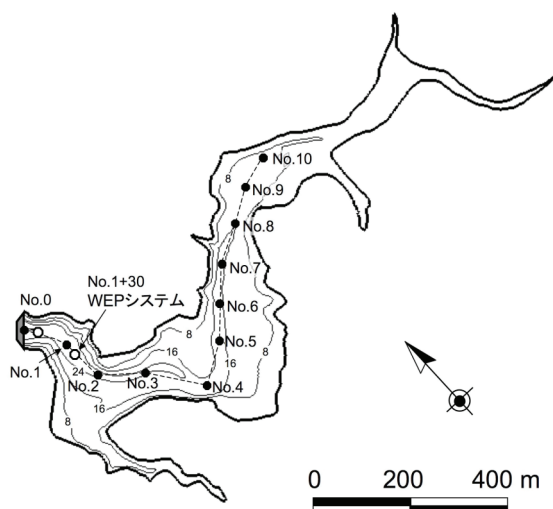


図-1 三瓶ダムの概要（コンターラインは常時満水位を基準とした水深）

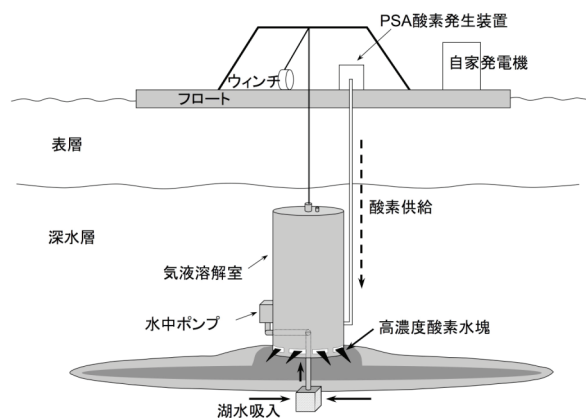


図-2 WEPシステムの概要

2. 三瓶ダムにおける現地調査

(1) 三瓶ダムの概要

三瓶ダムは島根県の中部に位置し、小規模な富栄養化した、河川型形状の貯水池である（図-1参照）。常時満水位EL.127mにおける貯水池の規模は、最大水深約32m、水表面積0.23km²、貯水池容量 2.45×10^6 m³である。2004年に三瓶ダムの上水を利用している島根県太田市で水道水のカビ臭が問題となり、調査の結果、深水層における貧酸素水塊が年間を通して散在することが明らかとなった。そこで、貧酸素化に伴う底泥からの栄養塩や金属の溶出を防ぐため、同貯水池において初めて、2006年4月からWEPシステムを利用した貯水池の水質改善実験が行われた。

(2) WEPシステムの概要

WEPシステムは、図-2に示すように、水中において酸素と水を接触溶解させる形式の装置である。吐出量の違いにより、用いる水中ポンプは5.5kWと15kWがあり、それぞれ毎時60m³と120m³の水を、気液溶解室（直径

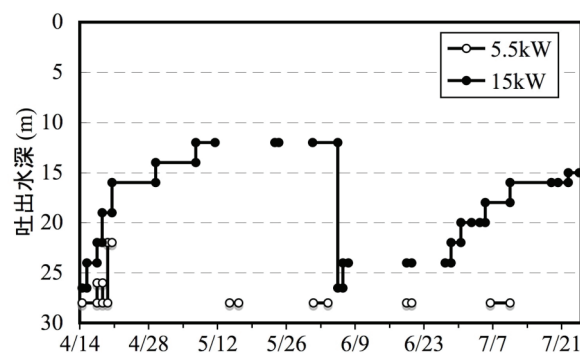


図-3 WEPシステムの運転状況

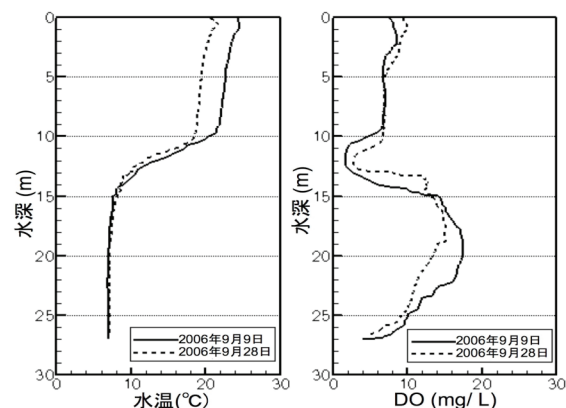


図-4 貯水池No.1+30における水温・DO鉛直分布

1.4m、高さ約3.2m）の下につけられたダクトより吸い込む。酸素は、水面にあるフロートに設置されたPSA酸素発生装置より供給され、溶解室の中でほぼ完全に溶解する。その後、溶解室最下部の周囲に設けられた、高さ10cmの吐出口より高濃度酸素水塊が吐出される。溶解室の吐出口は、湖水の吸入口の1m上部に位置する。吐出水の溶存酸素濃度は水深に比例し、水深10mで50mg/L、水深20mで70mg/L以上の過飽和状態の高濃度酸素水を吐出することができる（濃度は酸素供給量にも依存する）。

三瓶ダムにおけるWEPシステムの運用は、次のように行われた。まず、気液溶解室を、ダム湖最深部に繫留する。吐出された高濃度酸素水は、ほぼ水平に広がるが、同水深において十分な溶存酸素が最遠点まで供給された後、気液溶解室を数m上昇させ、高濃度酸素水塊を吐出する。水温躍層まで上昇させた段階で、再び、最下層部より運用を開始する。深水層全体に溶存酸素が行き渡ったところで、システムの運用を停止する。WEPシステムの設置位置は、ダム建設時の仮締切堤（堤高EL103.5m）がNo.0+70mに存在しているため、5.5kW水中ポンプのものをNo.0+30mに、15kWのシステムをNo.1+30mに設置・運用された。2006年度は、4月14日にシステムの運用を開始し、7月24日に終了している（図-3参照）。但し、その後、本実験のために数日間の運用を行っている。図-4に示すように、装置停止後2ヶ月が経過しても、深水層の溶存酸素が十分存在していることが分かる。

(3) 調査の概要

WEPシステムから吐出される高濃度酸素水塊の流動メカニズムを調べるため、2006年8月11日と同年9月9日～10日の予備調査と、同年9月28日～29日にかけて本調査を行った。本調査においては、15kW型のWEPシステムを図-1に示すNo.1+30の地点に設置した。また、既往の研究により、Intrusionの進む速さは密度勾配に影響を受けることが明らかとなっているため⁶⁾、装置の吐出口を密度勾配が小さい水深5mと、大きな水深12mの2つの異なる水深での調査を行った（図-4参照）。以下、計測の概要を記述する。

a) 装置運転前の水質把握

9月28日は、貯水池内全体の水質を把握するため、No.0, No.1, No.1+30, No.2, No.3, No.4, No.5, No.6, No.8, No.10において、多項目水質計Sonde（Hydrolab社製）で全水深の水質を計測した。

b) 装置運転中の水質把握

9月28日の午後3時1分に装置の吐出口を水深5mで運転を開始し、Sondeによる移動観測（ボートを利用した水面からの鉛直プロファイリング）をNo.1+30を基準に、上流あるいは下流側に原則10mずつ移動しながら水質の測定を行った。また、翌日の午前中に再度、Sondeによる移動観測を行った。その後、午後0時44分に装置の運転を継続しながら、吐出口を水深12mに移動させ、Sondeによる水質の移動観測を引き続き行った。

c) その他の計測

Intrusionの到達時間を調べるため、実験開始前にNo.1+40, No.1+50, No.1+70の水深4, 5, 6mに合計9台のSondeを設置した。また、28日午後6時頃に設置地点をNo.0+30, No.2, No.3の水深5, 6, 7mに変更した。さらに、翌29日午後0時頃に、No.1, No.1+40, No.1+60の水深12, 13, 14mに変更した。データは、1分あるいは2分ごとに取得した。

この他、水温構造の変化等を調べるため、サーミスターチェーン（Star-Oddi社製DST milli-Tを1mごとに5台設置）を2地点に設置した。装置の吐出水深5m時は、No.1+50, No.2の水深3mから7mまで、吐出水深12m時は、No.1+40, No.1+60の水深11mから水深15mまでの水温を1分ごとに計測した。

さらに、吐出水深5m時のIntrusionの流速を計測するため、ドップラー流速計（Nortek社製Vector）を用いた。計測は、No.1+30において、DOが装置起動前より高くなっている水深付近は10cmごとに、それ以外の水深では20cmごとに行った。なお、1地点の計測につき、サンプリングレート32Hzで10秒間計測した。計測範囲は水深4.147m～7.147mとした。

3. 調査結果

(1) IntrusionのフローレジームとEntrainment

表-1 実験中の浮力振動数 N と無次元流量 G

吐出水深	運転時間	N (rad s ⁻¹)	G
5.0 m	9月28日15:01	1.55-1.89	1279-1307
	- 9月29日12:44	$\times 10^{-2}$	
12.0 m	9月29日12:44	2.40-4.05	1463-1536
	- 9月29日16:30	$\times 10^{-2}$	

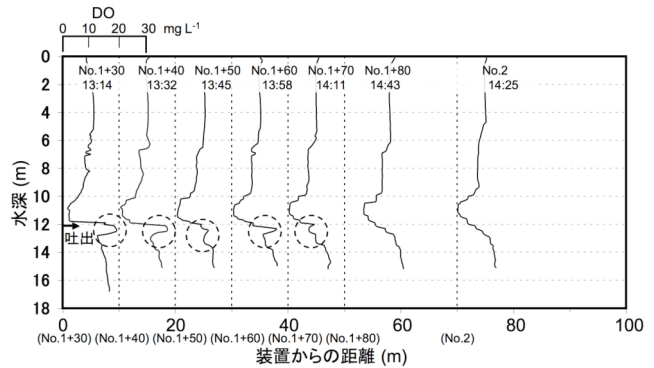


図-5 DOの鉛直分布から得られたIntrusionの様子

Intrusionに関する既往の研究は、(1)式に示す定常・非圧縮性流体の運動方程式において、軸対象に広がる流れを仮定した各項の次元解析をもとに行われている⁶⁾⁸⁾⁹⁾。

$$v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} \quad (1)$$

ここで、 v_i は x_i 方向の流速成分、 p は圧力、 ρ は密度、 ν は動粘性係数である。これらの研究によると、十分時間が経過した後は、(1)式の右辺第2項の粘性項と右辺第1項の浮力（圧力）項がバランスする流れとなり、その領域においては、Intrusionの広がり距離 l_r は時間 t に関して $t^{1/2}$ に比例する。それ以前のレジームにおいては、(1)式左辺の慣性項と浮力項がバランスする流れとなる。この領域においては、研究者により異なり、 l_r は $t^{1/2}$ 、 $t^{2/3}$ 、 $t^{3/4}$ に比例する結果が得られている。Lemkertらの研究によると⁶⁾、流量に関する無次元パラメータ $G=(Q_i^2 N/\nu^3)^{1/5}$ （ここで、 Q_i はIntrusion流量、 N は浮力振動数）を用いて、時間 $N^4 G$ までは慣性項と浮力（圧力）項がバランスする流れとなり、それ以降は、浮力項と粘性項がバランスする流れとなる。

本研究においては、吐出水深5m、12mについて、それぞれの $N^4 G$ は 56×10^3 、 20×10^3 秒であり、ダム貯水池の側岸の影響がない距離約100mまでに取得したデータは、慣性項と浮力項がバランスするレジームであった。（表-1参照）

また、実験で得られたデータを解析するにあたりIntrusionの流量を推定する必要がある。装置から吐出される流量は既知であるが、吐出されると同時に大量のEntrainmentが生じていることが予想される。一般に、JetによるEntrainment量は、主に流速に比例する形で表される¹⁰⁾。よって、水深の違いによるEntrainment量の違いは

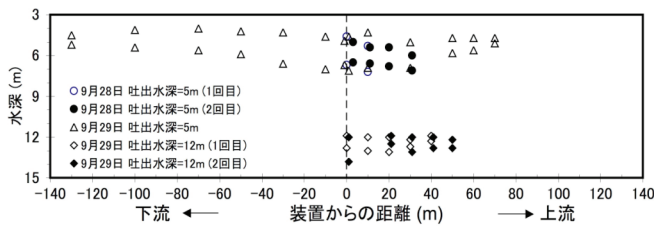


図-6 DOの鉛直分布から得られたIntrusionの様子

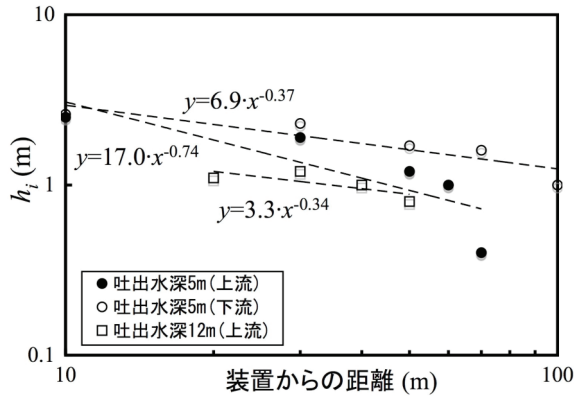


図-7 装置からの距離とIntrusionの厚み h_i の関係

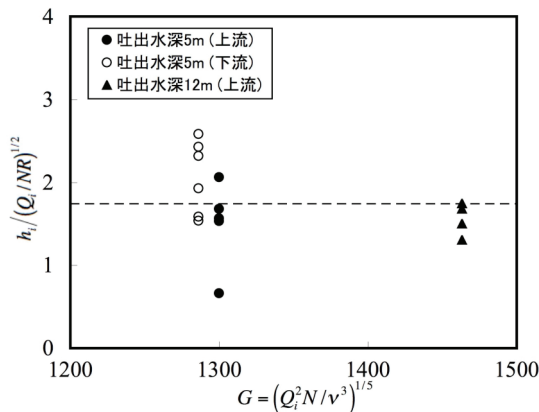


図-8 無次元流量 G と無次元Intrusionの厚みの関係

ないとして、水深12mの実験における吐出時、バックグラウンドおよび吐出直後の3つのDO値から、Entrainment係数を13.8として推定した。なお、水深5m時の場合は、バックグラウンド値が同水深付近で大きく変化するため、推定を行わなかった。

(2) Intrusionの厚み

吐出水深12mのときのIntrusionの様子の例を図-5に示す。図中のDO値は、装置からの距離の地点を、それぞれのDOプロファイルの基準 (0 mg/L) として示している。この図から、Intrusionは丸い点線で示したようにNo.1+70まで達していることが分かる。ここで、計測で得られたDOの鉛直プロファイルからDOがバックグラウンドの値から上昇している範囲をIntrusionと定義し、その境界の位置をプロットしたものを図-6に示す。Intrusionの厚みは、装置から離れるとともに薄くなっていること

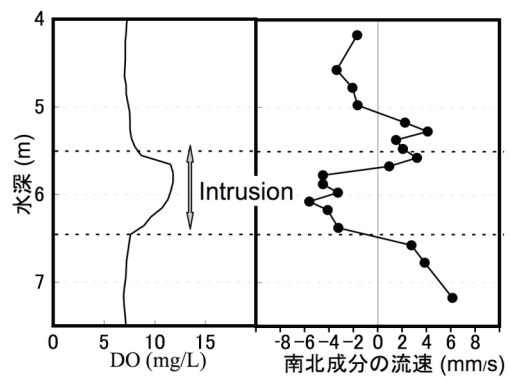


図-9 DOの鉛直分布から得られたIntrusionの様子

がわかる。また、Intrusion上部の境界は吐出水深と同じ程度であるが、下部境界は吸入水深よりも深い。これは、WEP装置の吸入口に、一度吐出されたDOが再流入していることが考えられる。

さらに、装置からの距離とIntrusionの厚みの関係を、側岸の影響のない100mまでの範囲で、同じ吐出水深の、上下流の同方向への観測がある場合は、連続した一連の観測の中から最終観測のものをプロットしたものを図-7に示す。Lemckertらの研究⁶⁾によると装置からの距離 R と厚み h_i の関係は、

$$h_i \approx 0.61 \left(\frac{Q_i}{NR} \right)^{1/2} \quad (2)$$

となっており、理論上は、 R に関して-1/2乗に比例することになる。図-7に示されているべき指数は、-0.74から-0.34と近い値になっているが、データのばらつきも大きい。また、(2)式における比例定数に関して整理したものを図-8に示す。図中に点線で示す平均値から、WEPシステムに関するIntrusionの厚みは、

$$h_i \approx 1.7 \left(\frac{Q_i}{NR} \right)^{1/2} \quad (3)$$

となる。(2)・(3)式とでは係数に大きな違いがあるが、吐出水の再流入や実験装置の違いによる原点の取り扱い方の問題が影響していると考えられる。

9月29日の9時頃に、装置から約3.2m上流地点で計測したDOと流速の鉛直分布を図-9に示す。この地点においては、南北方向の流れが卓越するため、この成分の流速のみ示している。この図から分かるように、DOから判断されるIntrusionの厚みは1mであるが、流速成分から判断される厚みは約80cmであり両者は一致しない。これは、Diddenらの研究¹¹⁾にみられるように、Intrusionの境界部には、Intrusionとは反対への流れがあり、特に上部の境界では、DOからはIntrusionと判断される水深においても、装置に向かう流れが存在しているからである。従って(2)式では、Intrusionの厚みの正確な評価はできないが、同式を用いてWEPシステムの供給DOの厚みに関して工学的に評価あるいは推定することができる。

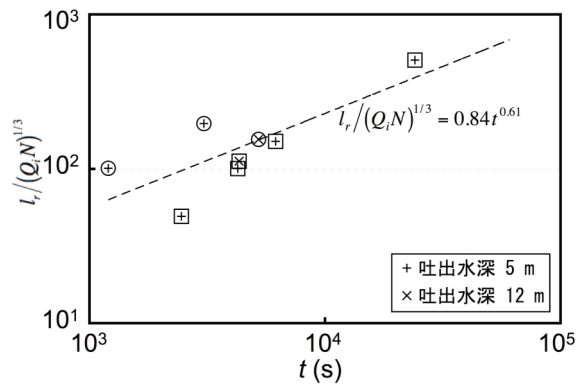


図-10 経過時間と無次元Intrusion広がり距離の関係

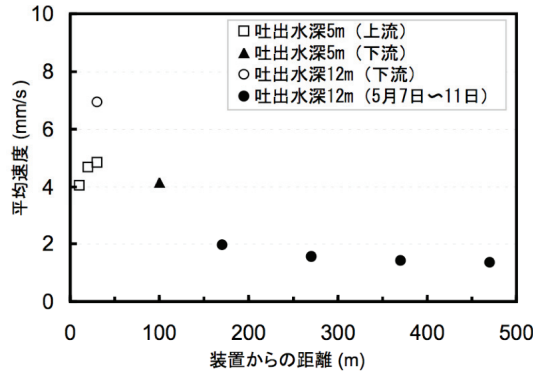


図-11 Intrusionの広がり速度

(3) Intrusionの広がり速度

WEPシステムの性能を評価する上でIntrusionの厚みと並んで、Intrusionの広がり速度も重要な要素となる。図-10にIntrusionの経過時間と無次元化した広がり距離の関係を示す。Lemckertらの研究⁹⁾から得られている実験式は、次式の通りであり、理論からは時間 t の2/3乗に比例することが示されている。

$$l_r \approx 0.40 (Q_i N)^{1/3} t^{2/3} \quad (4)$$

図-10に示される時間 t に関するべき乗の係数は0.61とほぼ理論値と一致する。また、比例定数は実験結果から次式の通りとなり、(4)式に近い結果が得られた。

$$l_r \approx 0.56 (Q_i N)^{1/3} t^{2/3} \quad (5)$$

Lemckertらの実験と係数に違いがあるが、Lemckertらの実験でもデータのばらつきは大きく、bubblerの起動時間を基準に時間を評価するなどの問題もあるため、本質的には同じ流れでも、係数が一致するかについては疑問が残る。また、図-11にIntrusionの広がっていく平均速度を示す。参考として、2006年5月7日から11日までのシステム運転時に得られた値も示している。このときには4日間で500m近く進んでいる。ただし、100m以上の距離では、徐々に2次元的な広がりではなく、上下流方向への1次元的な広がりになることに注意を要する。装置付近での流速のオーダーは、図-9に示すドップラー流速計で得られた値と一致している。このようにIntrusionは数mm/s

表-2 三瓶ダムにおける内部静振の固有周期 T_m

l (m)	850
ε	1.27×10^{-3}
C_i (m/s)	0.26
$h_{1,2}$ (m)	12, 10
T_m (hr)	1.8 ($m=1$), 0.9 ($m=2$)

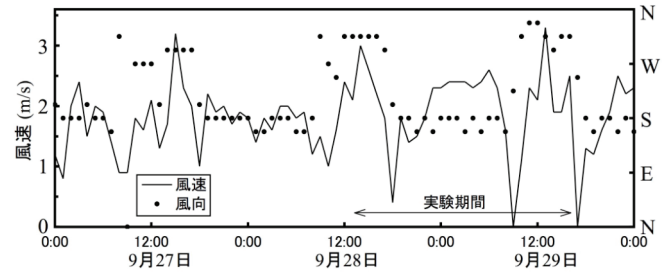


図-12 三瓶ダム管理所における風況

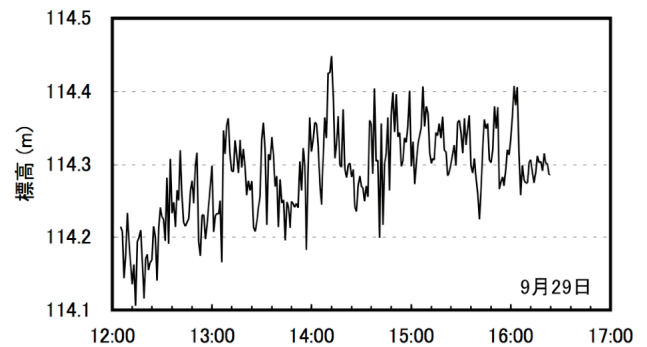


図-13 No. 1+60における水温13℃ラインの変動

というゆっくりとした流れで、貯水池の端までDOを運んでいることが分かった。

(4) Intrusionの上限変動に関する検討

図-6にみられるように、Intrusionが上下に変動する流れの様相は内部波の影響を受けている可能性がある。そこで、ダム堤体付近に位置する三瓶ダム管理所における風況を図-12に示す。実験期間中の最大風速は3.5m/sと弱い、風向をみると観測日前日の9月27日も含め、9時から17時頃までは下流から上流に向かって、それ以外は、上流から下流に向かって吹く風が交互に規則的に生じている。

まず、表-1に示す水温躍層に相当する水深12mにおける浮力振動数 N から振動周期を求めると、0.04～0.07時間であった。また、三瓶ダムの流下方向に対する内部静振の固有周期 T_m を2成層に対する次式に従って求めた結果を表-2に示す。ただし、ダム湖の長さを躍層界面での距離にとり、 h_2 も平均的な水深を用いた。

$$T_m = \frac{2l}{mC_i} = \frac{2l}{m} \sqrt{\frac{h_1 + h_2}{\varepsilon g h_1 h_2}} \quad (6)$$

ここで、 l は貯水池の水平スケール、 m はモード数、 C_l は内部波速、 h_1 、 h_2 はそれぞれ上・下層の水深、 ε は相対密度差、 g は重力加速度である。

また、No.1+60に設置した水温データから、躍層中心付近の水温に相当する13℃の水深を求めた結果を図-13に示す。観測期間が短いことと、水温計の設置間隔が1mに対して、13℃ラインの変動が20cm程度と小さいため、解析精度に問題が残るが、図中、午後2時半頃までは、上流側に吹く風の影響で、風下側に位置するNo.1+60では、躍層の位置が上昇し、それ以降安定していることが分かる。このデータをもとにスペクトル解析を行った結果、変動周期は0.78時間と0.33時間が卓越していた。この周期は、表-2に示す内部静振の固有振動周期と比較すると半分以下の時間であり、内部静振の発生は認められなかった。また、この周期は、浮力振動数 N から求められた振動周期と比較すると大きいものの、貯水池内が連続成層状態であることを考慮すると、実際の振動周期はこれより長いと考えられ、内部波が発生している可能性があると考えられた。今後は、流下方向以外の内部静振、様々なモードの内部波や、Intrusionによるshear waveなどについて検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、三瓶ダムを対象として松江土建（株）と土木研究所が開発した酸素供給装置（WEPシステム）に関する現地観測を行い、装置から吐出される高濃度酸素水塊の流動メカニズムについて検討した。ここで、本研究で得られた主要な結論をまとめる。

- 1) WEPシステムから吐出される高濃度酸素水塊の流動メカニズムは、Bubble PlumeによるIntrusionのメカニズムと同様であり、慣性項と浮力項が釣り合っている状態での流れであることが明らかになった。
- 2) 装置から放出された高濃度酸素水塊（Intrusion）は、ほぼ水平に進行していくが、一定の水深を進むのではなく、若干の上下を伴いながら移動していくことが分かった。また、高濃度酸素水の厚みも吐出水深によって変化し、密度勾配の小さいところでは厚く、大きいところでは薄くなることが確認された。
- 3) Intrusionの移動速度を算出した結果、平均移動速度は、到達距離が100mで4mm/s（15m/h）程度と非常に小さいことが明らかになった。
- 4) ドップラー流速計から得られた流速分布により、DOが高い値を示している水深範囲においても、Intrusionの進行方向と反対方向への流れが確認され、高濃度のDOの水深とIntrusionとは必ずしも一致しないことが確認できた。
- 5) 現地における風況や水温の変動データから内部波の

発生の可能性が高いと判断されたが、水温データを用いたスペクトル解析からは、明瞭な内部静振の確認はできなかった。

本研究で得られた評価式によりWEPシステムからの距離に応じたIntrusionの層厚や、装置運転時間に応じたIntrusionの到達距離を評価できる。今後は、さらに詳細で長期の現地観測を行うとともに、数値シミュレーションを利用してIntrusionの上下の変動過程を明らかにすることにより、さらに、現象を詳細に把握していきたいと考えている。

謝辞：研究を始めるにあたり、埼玉大学浅枝隆教授からは有益なコメントをいただいた。また、現地調査において、環境システム(株)鮎川和泰氏に数々の便宜を図っていただいた。データ解析にあたっては、西オーストラリアJörg Imberger教授および清水健司氏、グリフィス大学Charles Lemckert准教授から貴重なコメントを頂いた。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Nowlin, W.H., EVARTS, J.L. and Vannni M.J. : Release rates and potential fates of nitrogen and phosphorus from sediments in a eutrophic reservoir, *Freshwater Biology*, 50 (2), 301-322, 2005.
- 2) Beutel, M.W, Leonard, T.M., Dent, S.R., Moore, B.C. : Effects of aerobic and anaerobic conditions on P, N, Fe, Mn, and Hg accumulation in waters overlaying profundal sediments of an oligo-mesotrophic lake, *Water Res.*, 42, 1953-1962, 2008.
- 3) Fast, A.W. and Lorenzen, M.W. : Synoptic survey of hypolimnetic aeration, *J. Envir. Engrg.*, ASCE, 102 (6), 1161-1173, 1976.
- 4) 松江土建株式会社：水中型気液溶解装置WEP（ウェッブ）システムパンフレット (<http://www.matsue-doken.co.jp/gijutsu/gijutsu01.pdf>).
- 5) Asaeda, T. and Imberger, J. : Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, *J. Fluid Mech.*, 249, pp.35-57, 1993.
- 6) Lemckert, J.C. and Imberger, J. : Axisymmetric intrusive gravity currents in linearly stratified fluid, *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, 119(6), 662-679, 1993.
- 7) 松江土建株式会社：水中型気液溶解装置評価書, 2006.
- 8) Didden, N. and Maxworthy, T. : The viscous spreading of plane and axisymmetric gravity currents, *J. Fluid Mech.*, 121, 27-42, 1982.
- 9) Ivey, G.N., and Kerr, R.C. : Axisymmetric withdrawal and inflow in a density-stratified container, *J. Fluid Mech.*, 61, 115-137, 1989.
- 10) Falcone, A.M. and Cataldo, J.C. : Entrainment velocity in an axisymmetric turbulent jet, *J. of Fluids Eng.*, 125, pp.620-627, 2003.
- 11) Didden, N. and Maxworthy, T. : The viscous spreading of plane and axisymmetric gravity currents, *J. Fluid Mech.*, 121, 27-42, 1982.

(2008. 9. 30受付)