

貯水池における高濃度酸素水の流動に関する基礎的研究

株式会社エース 正会員 ○飯尾 大助
株式会社エステム 正会員 佐藤 達哉

鳥取大学工学部 正会員 矢島 啓
松江土建株式会社 非会員 北迫 弘

1. はじめに 近年、ダム貯水池では底層の貧酸素化が問題となっている。その対策として、様々な曝気装置が用いられている。しかし、水質改善の目標とする水深に対して有効に酸素を拡散させることができない、底泥を巻上げるなどの問題があった。そこで、島根県太田市にある三瓶ダムでは、松江土建株式会社と土木研究所が共同開発した水中型気液溶解装置による水質改善が試みられた。この装置は、気泡ではなく高濃度酸素水を吐出するため泡による上昇がなく、また、装置の吸い込み口が吐出口の1m鉛直下方とあまり差がないため、任意水深での水平拡散を可能としている。しかし、これまでの実験から装置を運転することによる効果の評価はあるものの、詳細な科学的データが不足していた。そこで、本研究では、特に、装置から吐出される高濃度酸素水の拡散の様子、速度等の流動メカニズムについて、現地調査から得られたデータをもとに考察する。

2. 現地観測方法 2006年9月9と10日及び9月28と29日の2回にわたり現地調査を行った。図-1に貯水池の平面形状を示している。装置はNo.1+30に設置してあり、1回目の装置からの吐出水深は24.1m、2回目の吐出水深は当初5m、その後12mに設定した。また、ダム湖内には、およそ100m間隔でNo.0からNo.10の地点にブイを設置している。これらの測点を中心に、水面から多項目水質計(DOや水温等の計測)をつるした一定水深での観測、装置起動前のダム湖を移動しながらの縦断観測(DOや水温等の鉛直分布の測定)、装置起動後はNo.0～No.3までの範囲に絞った縦断観測を行った。また、超音波流速計等を用いた計測も行った。

3. 高濃度酸素水の流動メカニズム 水中型気液溶解装置による高濃度酸素水の流動メカニズムは、Lemckertら¹⁾によって研究されたBubble PlumeのPlunge点後に発生するIntrusionのメカニズム(図-2参照)と同様であると考えた。Lemckertらは、このIntrusionは、流体の定常流に対する運動方程式に支配されていると考え、慣性項と浮力項が釣り合い、粘性項が無視できる状態を想定して、Intrusionの到達距離 l_{rl} (m)とIntrusion厚さ h_{il} (m)に関して次式を得ている。

$$l_{rl} \approx (Q_i N)^{1/3} t^{2/3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$h_{il} \approx \{Q_i / (N l_r)\}^{1/2} \approx \{Q_i / (N^2 t)\}^{1/3} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Q_i :吐出流量(本装置は120m³/h)、 N :ブルント・バイサラ振動数、 t :装置の運転時間(s)である。

4. 観測結果と考察 定点に設置した多項目水質計のDOが上昇した時刻と装置の起動時刻から、高濃度酸素水塊の移動速度を算出したものを図-3に示す。ただし、100m超の到達距離のデータがないため、5月7～11日に松江土建(株)が吐出水深12mで行ったデータも追加して使用した。この図から、高濃度酸素水塊が移動した距離までの平均移動速度は、到達距離が100mで4mm/s(15m/h)、到達距離が270mで1.7mm/s(6m/h)、到達距離が370m以上で1.4mm/s

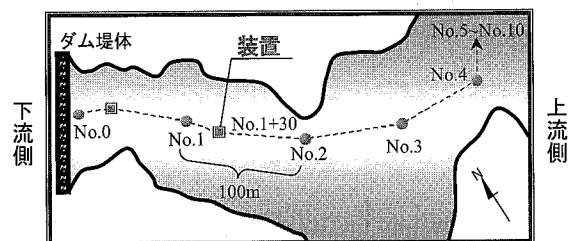


図-1 調査地点

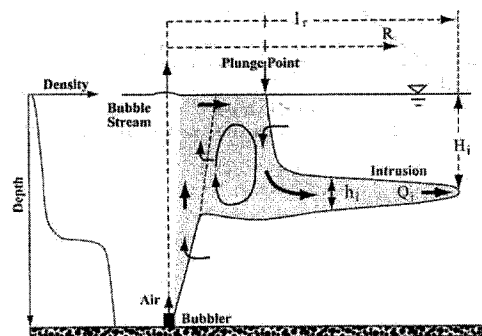


図-2 気泡発生装置によるBubble PlumeとIntrusion

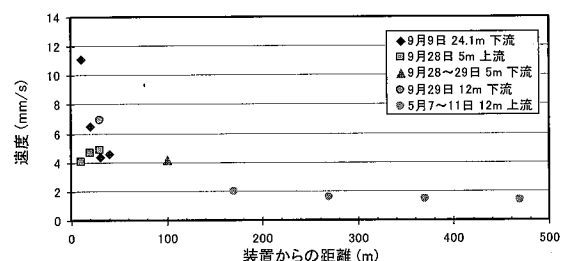


図-3 高濃度酸素水塊の移動速度

(5m/h)程度に漸近していることが分かる。また、超音波流速計を用いた計測でも、DO が高い範囲の水塊は上流に向かって進行し、装置設置付近で、最大5mm/s程度の流速を示すことが分かった。

次に、移動観測から得られた高 DO の Intrusion 層の上下境界位置を図-4 に示す。ただし、9 月 9 と 10 日の実験では、ダム湖底に高濃度酸素水塊が接触していたため、これ以後の解析からはデータを除外した。この図より、Intrusion は一定の水深を進むのではなく、層厚を変えながら若干の上下の変動を伴い、装置から遠くなるにつれ、層厚が薄くなっていることが分かる。また、装置起動前の移動観測から、貯水池内では水深約 11m に水温躍層が確認されており、(2) 式からも分かるように、成層強度の強い吐出水深 12m の方が、層厚が薄くなることが明らかとなった。

次に、高濃度酸素水塊が進行する水深の水塊の特性値として、Intrusion 層における水温・密度を調べた。

ここでは、Intrusion が確認できる移動観測のデータを用い、地点毎に DO が上昇している水深範囲における平均の水温と密度を求め、さらにそれらの平均値と標準偏差を求めた。まず、吐出水深 5m では、高濃度酸素水塊の平均の水温 19.34℃、密度 998.465kg/m³ であり(標準偏差は 0.06℃, 0.011kg/m³)、吐出水深 12m では、水温 9.66℃、密度 999.871kg/m³ であった(標準偏差は 0.30℃, 0.025kg/m³)。吐出水深 12m の時の標準偏差は大きい、水深 12m 前後における 0.3℃の違いは水深にして 0.3~0.5m の違いである。また、装置起動前の吸込口における水温、密度の平均値は、吐出水深 5m ではそれぞれ 19.32℃, 998.467kg/m³ であり、吐出水深 12m では 9.99℃, 999.841kg/m³ であった。これより、吸い込まれた水はほとんど水温・密度を変化することなく吐出され、同程度の水温・密度の水深を広げることが確認できた。よって、Intrusion の上下の変動は、貯水池内の水温・密度構造自体が変動する要因の影響を受けている可能性がある。

ここで、現場における装置の運転計画に必要な情報として、(1), (2) 式の比例定数を決定する必要がある。まず、到達距離 l_r を $(Q_i N)^{1/3}$ で除した値と、水塊が到達するのに要した時間の関係を図-5 に示す。図中の近似曲線の傾きは 0.5943 であり、相関係数は 0.97 と高いものであった。この直線の傾きは(1)式から 0.66 であることが期待でき、それに近い値が得られた。また、実際は、到達距離が 100m 程度以上になると、高濃度酸素水はダム湖の境界に到達し始め、同心円状の広がり物理的に難しくなる。そこで、到達距離が 140m までのデータを用いて傾きを求めると 0.7061 となり、理論値に近い値が得られた。ここで、(1)式における比例定数の平均値を求めると 0.93 となった。よって、到達距離 l_r は、(3)式のように表すことができる。また、(2)式に従って、この比例定数を求めると、Intrusion の貫入厚さ h_{il} は(4)式で与えられた。

$$l_r \approx 0.93(Q_i N)^{1/3} t^{2/3} \dots \dots \dots (3), \quad h_{il} = 7.83\{Q_i/(NR)\}^{1/2} \dots \dots \dots (4)$$

5. おわりに 今回の現地観測により高濃度酸素水が進んでいく様子が明らかとなり、その移動メカニズムは、Bubble Plume の Intrusion と同様であることが明らかになった。また、観測データを用いて、装置運転時間に応じた Intrusion 到達距離と貫入厚さを評価するための定式化も行った。今後は、数値シミュレーションを用いた再現計算により、Intrusion 進行時の上下変動の原因を明らかにする予定である。

参考文献 1) Lemckert, J. Charles and Jorg Lmberger: Anisymmetric intrusive gravity currents in linearly Stratified fluids, J. Hydraulic Engineering, Vol. 119, No. 6, ASCE, pp. 662-679, 1992

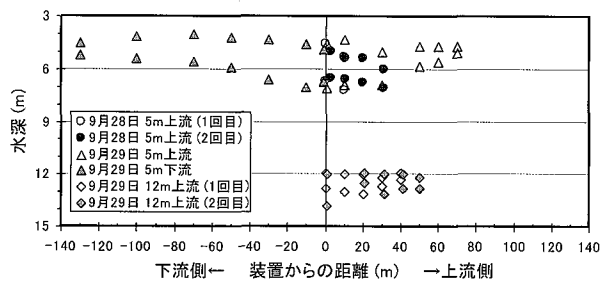


図-4 装置からの距離ごとの Intrusion 層の上下位置

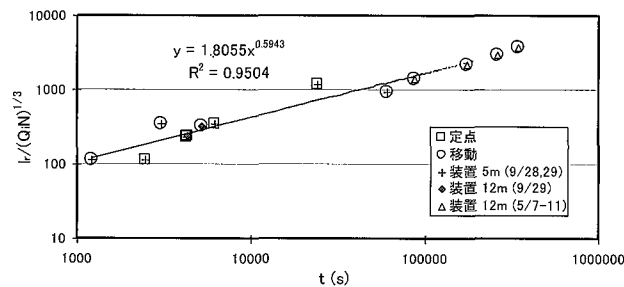


図-5 到達時間と到達半径/($Q_i N$)^{1/3} の関係