

三瓶ダムにおいて WEP システムから供給された高濃度酸素水の流動解析と数値シミュレーション

鳥取大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 矢島 啓

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。この問題に対処するため、松江土建(株)と土木研究所は、純酸素を用いた深水層での酸素供給装置である WEP システムを開発した¹⁾。しかし、装置から吐出される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、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、島根県大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、高濃度酸素水の挙動（以下、Intrusion）を調べるとともに、その流動を予測できる数値シミュレーションモデルの開発を ELCOM-CAEDYM を利用して行った。

2. 実験の概要²⁾

三瓶ダムは島根県中部に位置し、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）。2004 年に当ダムの上水を利用して大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存在し、底泥から栄養塩や金属が溶出していることが明らかとなった。それを防ぐため、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。

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。湖水を、気液溶解室の下につけられたダクトより吸い込み、水面にあるフロートに設置された PSA 酸素発生装置より酸素を供給し、溶解室の中でほぼ完全に溶解後、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。吐出水の溶存酸素濃度(DO)は水深に比例し、水深 10m で 50mg/L、水深 20m で 70mg/L 以上の高濃度酸素水を吐出することができる。

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 上昇させ吐出を継続する。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が No.0+70m に存在しているため、No.0+30 と No.1+30m の 2 箇所を設置・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。装置停止後 2 ヶ月が経過した 9 月 28 日でも、深水層の溶存酸素が十分存在していることが分かる（図-3 参照）。

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、事前の予備調査と 2006 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、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、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。

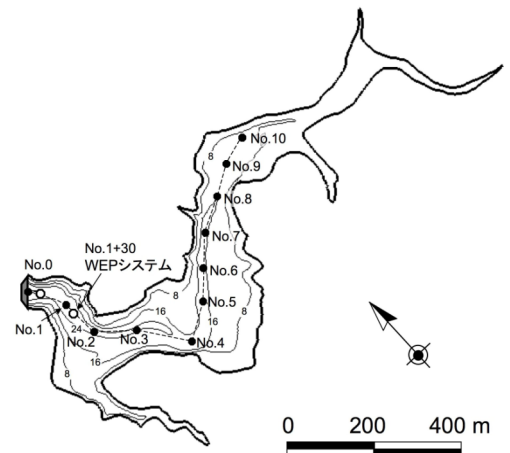


図-1 三瓶ダムの概要（コンターラインは常時満水位を基準とした水深）

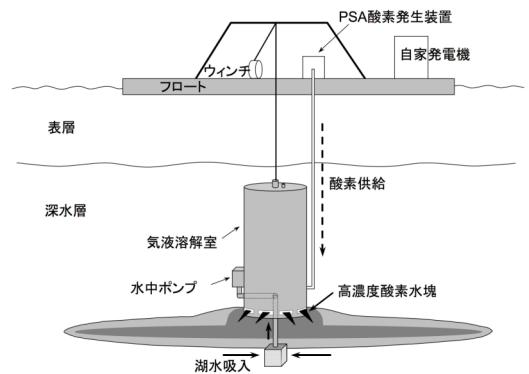


図-2 WEP システムの概要

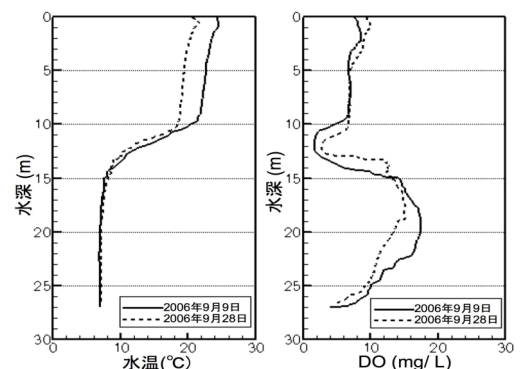


図-3 貯水池 No.1+30 における水温・DO 鉛直分布

キーワード：貯水池、貧酸素化、WEP システム、ELCOM-CAEDYM、溶存酸素

〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101 TEL 0857-31-5696 FAX 0857-28-7899 Email yajima@cv.tottori-u.ac.jp

3. 高濃度酸素水の流動解析

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-4 に示す。Intrusion は上下に変動しながら進行しているが、その厚みは、装置から離れるとともに薄くなっていることがわかる。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。

システムの性能を評価する上で、Intrusion の広がる速度は重要な要素となる。図-5 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 らの理論で示されたように、広がり距離は時間 t の $2/3$ 乗に比例することが、今回の実験からも確認できる。また、図-6 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。このように Intrusion は数 mm/s 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. 高濃度酸素水の流動に関する数値シミュレーションモデルの開発

モデルは、西オーストラリア大学 CWR で開発された ELCOM-CAEDYM を用いた。ただし、WEP システムのスケールは、計算の水平グリッド 20m (鉛直方向は、0.1m から 2m まで変化) より小さいため、通常の 3 次元計算の計算ステップ (20 秒) ごとに、装置から吐出された高濃度酸素水が周囲の水を連行し、鉛直方向の運動量を失うまでを独立した積分型計算モジュールとして扱い、その後得られた水塊を、WEP システムが存在する水柱の中立浮力位置に挿入し、3 次元計算を継続する前に、モデルの鉛直分割を当初のグリッドに変換することで計算を連結させた。先にあげた、2006 年 5 月 7 日から 11 日までのシミュレーションを行った結果を、観測結果と併せて図-7 に示す。ダム上流側の Intrusion の進行距離は、観測値と近い結果が得られている。ただし、スカラー量に対して水平方向の渦動拡散係数を導入しているため、ダム堤体付近に Intrusion が到達後も拡散が生じ、観測よりも DO の高濃度層が厚くシミュレートされている。これについては、今後モデルを改良する必要がある。また、シミュレーションより得られた躍層位置の変動を解析した結果、観測で示された Intrusion の上下変動は、内部波の影響を受けていることが明らかとなった。このため、シミュレーションにおいては、鉛直方向の DO の数値拡散を防ぐため、細かなメッシュが必要であった。

5. おわりに

本研究では、WEP システムから吐出される高濃度酸素水についての流動解析を行い、その広がり速度などについて定式化を行うことができた。今後は、定式化に含まれる係数が普遍であるかを調べるとともに、数値シミュレーションモデルについても改良する必要がある。

参考文献 1) 松江土建: 水中型気液溶解装置 WEP システムパンフレット (<http://www.matsue-doken.co.jp/gijutsu/gijutsu01.pdf>). 2) 矢島ら: 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性, 水工学論文集, 第 53 巻, pp. 1339-10344, 2009.

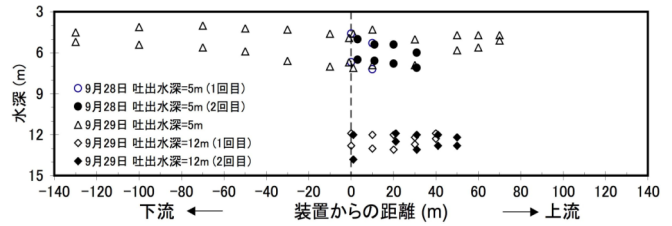


図-4 DO の鉛直分布から得られた Intrusion の様子

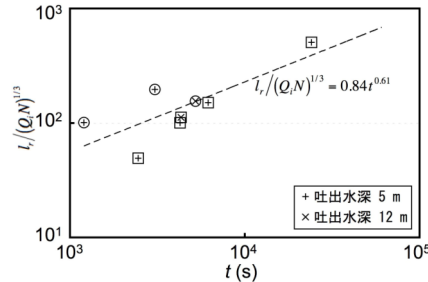


図-5 経過時間と Intrusion 広がり距離

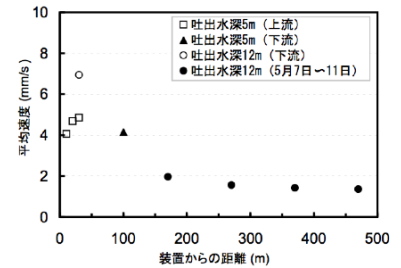


図-6 Intrusion の広がり速度

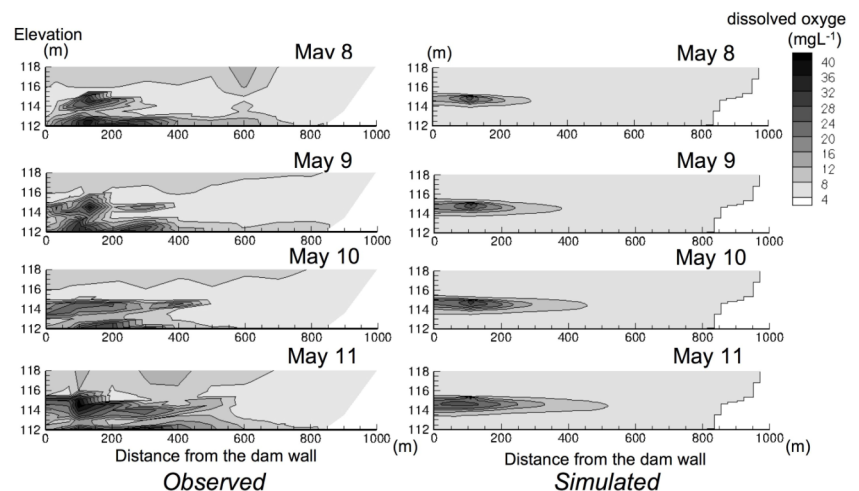


図-7 現地観測と ELCOM-CAEDYM でシミュレートされた高濃度酸素水の広がり