

揚水発電所貯水池における濁質挙動の制御

井上素行¹・米山 望²

¹ 正会員 東京電力(株) (〒100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-3)

² 正会員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

三次元乱流現象、水温・濁度による密度変化と流れの相互作用および大幅な貯水位変化を考慮した揚水発電所貯水池内水温・濁質挙動の予測手法を用いて実運用中の揚水発電所上部貯水池を対象に発電所運転時の貯水池内の流動および濁質挙動の特徴を解析的に検討した。

この結果、対象貯水池の運転時の濁質巻き上げによる高濁度化メカニズムが明らかになるとともに、洪水時に大量の濁水が流入する揚水発電所において使用水車発電機の組み合わせや貯水位などを適切に選択すれば、貯水池内の濁質巻き上げ挙動を制御でき、それにより発電所の運転機能を維持しつつ濁水長期化現象の軽減を図れる可能性があることが明らかになった。

Key Words : pumped storage reservoir, water temperature, turbidity, 3D numerical simulation, free surface

1. はじめに

揚水発電所貯水池の上流域に大規模な崩壊地などの濁水発生源があり、降雨に伴い大量の濁水が貯水池に流入した場合には、10ミクロン以下の微粒の濁質が長期間に亘って貯水池内に浮遊滞留し、その結果下流河川が長期に亘って濁ることがある。このような濁水の長期化現象を軽減するために、電力会社では揚水運転を自主的に規制するケースが生じてきている。

一方、揚水発電は、大型火力や原子力等のベース電源と組み合わせることにより、近年の電力需要の昼夜の格差拡大に対応した効率的な発電運用が可能であることや、非常用電源としての起動性の良さ等から、その運転時間はここ数十年間で約2倍にも増加しており、電力の安定供給における重要性はますます増大している。

著者らは、揚水発電所における濁水長期化現象を軽減し、かつ発電所機能を極力確保するための合理的なダム・発電所運用方策の研究に取り組んでおり^{1),2)}、これまでに、揚水運転時の大量放流による貯水池内の濁水巻き上げ挙動や濁水長期化への影響を定量的に検討するための貯水池内水温・濁質挙動の予測手法を開発している³⁾。この予測手法は、貯水池内の水温・濁質挙動を大量放流が引き起こす複雑流況、水温・濁質による貯水池水の密度変化と流れの相互作用および揚水運転による大幅な貯水位変化を考慮した三次元乱流解析により高い精度で予測するものであり、新高瀬川発電所(混合揚水式、出力128万kW)の上部貯水池である高瀬貯水池を対象とした現地測定結果および水理模型実験結果との比較により解析精度を検証している。

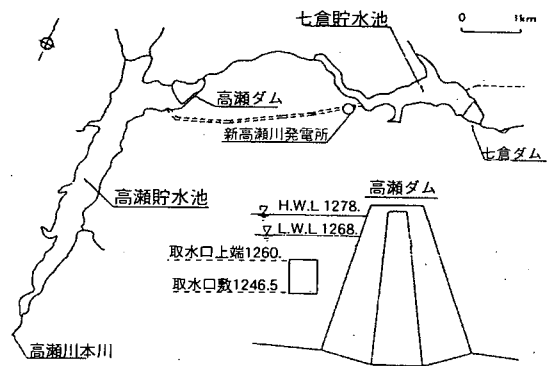


図-1 新高瀬川発電所流域の概要

本論はこの予測手法を揚水発電所実貯水池に適用して揚水発電所運転時の貯水池内の複雑な三次元流動および濁質挙動の特徴を考察するとともに、ダム・発電所の運用方法の工夫による同貯水池内の濁質挙動の制御の可能性に関して基礎的検討を行った結果を報告するものである。

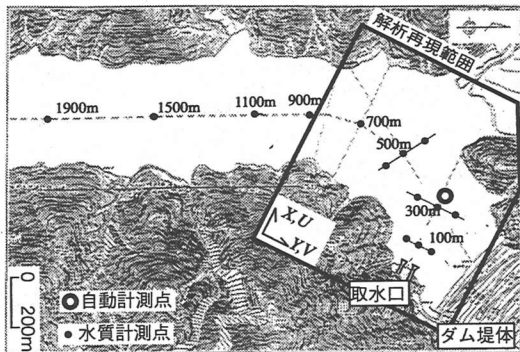
2. 対象貯水池の概要と解析地形

本論で対象とする高瀬貯水池は新高瀬川発電所の上部貯水池である。同貯水池は、土砂流出が激しい流域に位置するため、有効貯水容量に比べて総貯水容量が非常に大きい特徴がある。流域の概要を図-1に、高瀬貯水池、高瀬ダムおよび発電所の諸元を表-1に示す。

揚水発電所取水口は高瀬ダム直上流の右岸側に2門

表一 高瀬ダムおよび発電所諸元

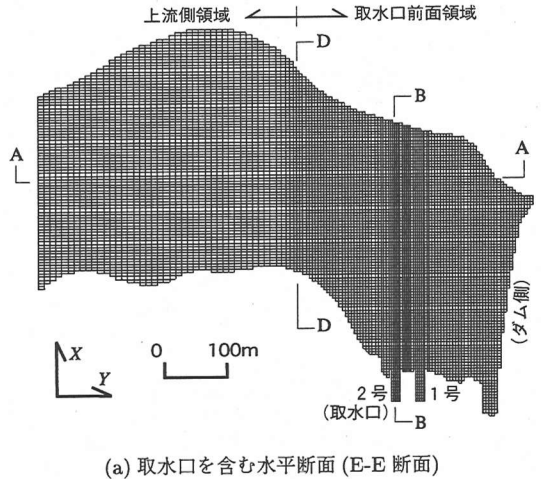
高瀬ダム	種類	ロックフィルダム
	高さ	176m
高瀬貯水池	ダム天端標高	E.L.1280m
	総貯水量	76,200,000m ³
	有効貯水量	16,200,000m ³
	利用水深	10m
	高水位(H.W.L)	EL.1278m
	低水位(L.W.L)	EL.1268m
	湛水面積	1.78km ²
取水口	湛水長	4.95km
	取水口数	2
	形状寸法(幅)	15.5m
	形状寸法(高さ)	13.8m
新高瀬川発電所	敷標高	EL.1246m
	最大出力	128万kW
	最大使用水量(発電時)	660m ³ /s
	(揚水時)	440m ³ /s
有効落差	243.6m	



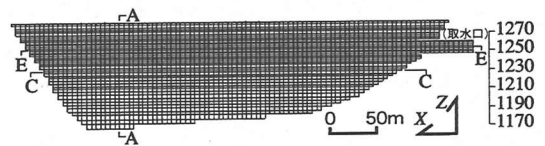
図一 高瀬貯水池

(ダム堤体側の1号取水口および上流側の2号取水口)設置され、各取水口にそれぞれ2台の水車発電機(1台あたりの最大揚水流量110m³/s)が接続されている。H.W.L.(標高1278m)での貯水池の水面形状を図一に示す。

解析地形およびメッシュ分割は予測手法の検証時の形状³⁾と同様に、取水口、ダム堤体および取水口の対岸を含むおよそ300m×700mの領域(図一参照)とした。座標系はX軸を取水口中心軸に合わせた三次元座標系とし、メッシュ分割は取水口からの高流速水中噴流部およびその周辺を細かくした。解析地形の取水口を含む水平および鉛直断面におけるメッシュ分割図を図一に示す。

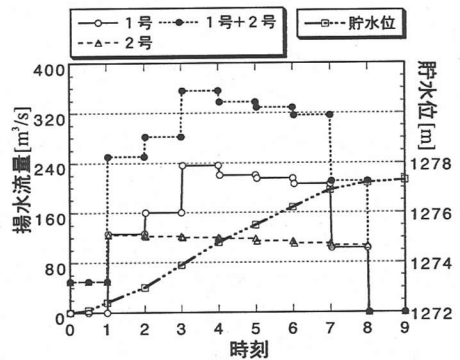


(a) 取水口を含む水平断面 (E-E 断面)



(b) 取水口を含む鉛直断面 (B-B 断面)

図一 解析地形のメッシュ分割図



図一 平成10年9月17日の揚水流量と貯水位の変化

3. 揚水発電所貯水池における流動および濁質挙動の特徴

(1) 揚水運転時の挙動の特徴

対象貯水池における揚水運転時の流動と濁質挙動の特徴を調べるため、平成10年9月17日の揚水運転時の挙動を著者らの予測法を用いて解析により検討した。

当日の揚水流量と貯水位の変化を図一に示す。また、揚水運転の前後である16日午後3時と17日午前8時の貯水池内水・濁質濃度分布を図一に示す。同図は図一に示す各水質計測点の測定結果を標高ごとに平均して示している。水・濁質濃度分布の解析初期条件は16日午後3時の測定結果を基に作成した。

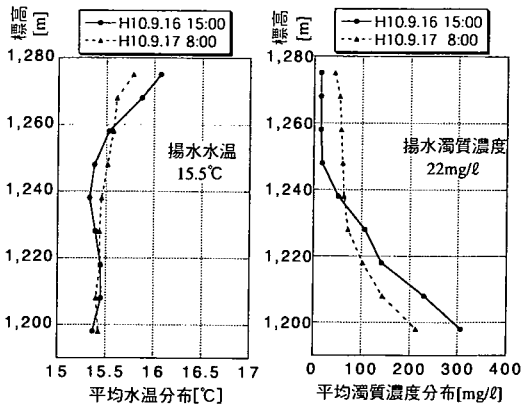


図-5 揚水前後の水・濁質濃度測定結果

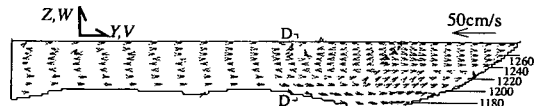


図-7 貯水池内の流況 (A-A断面)

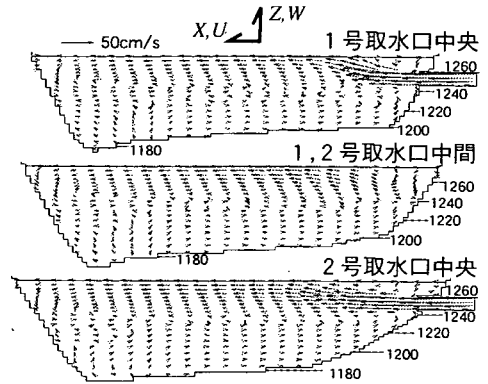


図-8 貯水池内の流況

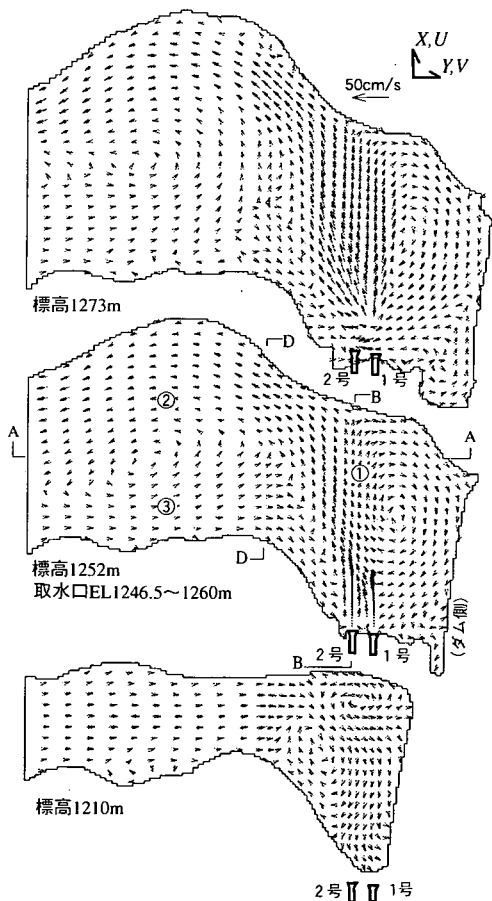


図-6 貯水池内の流況 (水平断面)

a) 流況

解析による午前3時半時点の標高1273m(水面近傍), 標高1252m(取水口中央標高), 標高1210mでの流速ベクトルを図-6に, A-A断面での流速ベクトルを図-7に, また, 1号取水口中央, 2号取水口中央(B-B断

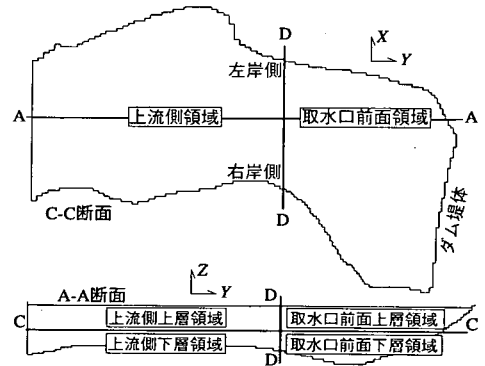


図-9 断面および領域説明図

面) および両取水口中間位置断面における流速ベクトルを図-8に示す。

これらの図からわかるように, C-C断面(標高1230m)を境とした上層領域と下層領域および, D-D断面を境とした噴流部を含む取水口前面領域と上流側領域では, 流況が大きく異なるため, 以下ではこれらの区分を用いて貯水池内の挙動を分析する(図-9)。

図-6および図-7より上層領域では, 取水口からの噴流が対岸に達した後, 左右に分かれており, これに伴い上流側とダム側に水平循環流が発生している。ダム側循環流は流れの領域が狭いために流速が大きく, 取水口の近傍で噴流に合流している。このダム側循環流および地形の影響により, 噴流の放流軸は取水口中心軸より上流側に傾いている。このため, 噴流の大部分は対岸に到達後, 左岸側に沿って上流側に向かっている。この上流側に向かった流れの一部が上流側循環流によ

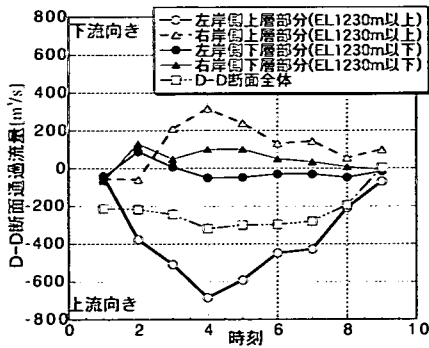


図-10 D-D断面を横切る流量

り右岸沿いに戻り取水口付近で噴流に合流している。

下層領域内(標高1210m)では上流側から取水口に向かう戻り流がある。

また図-8より噴流は取水口近傍で流速が大きく、対岸に向かって徐々に浮上している。また、噴流の放流軸が上流側に傾いているため図-8の断面内では対岸に近づくほど流速が小さくなっている。

下層領域では噴流と逆向きの流れが生じており、取水口近傍の標高1230m~1240m付近では、上向きの流れとなって噴流に合流している。このため、噴流の下方に鉛直循環流が発生していることがわかる。

図-10にD-D断面をC-C断面とA-A断面で分割した四領域を通過する流量の時間変化を示す。同図から分かるように、噴流は水平および鉛直循環を伴うことにより見かけの流量を増し、D-D断面では噴流(左岸側上層部分を通過して上流側に向かう流量)は放流量の1.5~2.0倍程度の大きな値となっている。

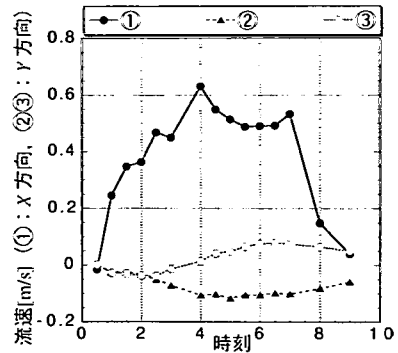
図-11に図-6中に示した①,②,③の各位置における上層および下層領域の流速の時間変化を示す。これより上層領域において、各位置の流速は揚水流量の増加とともに時間遅れを伴いながら増大するが、概ね運転開始後2~4時間程度で安定し、その後の水位の上昇および揚水量の減少とともに低下している。また、下層領域では揚水運転中の流速は小さい。

b) 濁質挙動

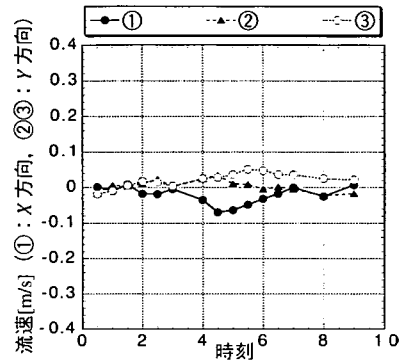
揚水運転開始時点(午前0時)から終了後1時間経過時点(午前9時)までの解析領域全体の各標高平均濁度鉛直分布の時間変化を図-12に示す。同図から濁度は時間の経過とともに上層領域で上昇、下層領域では低下を続け、揚水量が急減した7時以降は濁質濃度分布の変化はほとんどないことがわかる。

また、標高1261m(上層領域内取水口上端レベル)および標高1210m(下層領域内)の濁質濃度分布を図-13および図-14に示す。

図-13から上層領域では、揚水運転時の放流水によ



(a) 上層領域(取水口中央レベル 標高1252m)



(b) 下層領域(貯水池深部 標高1210m)

図-11 流速の時間変化

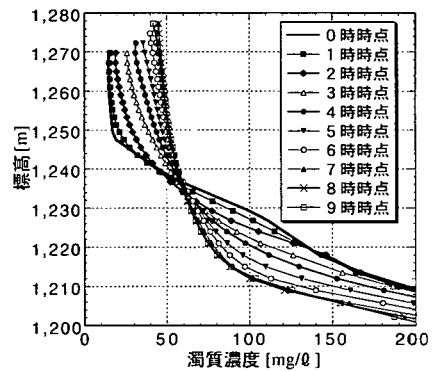


図-12 各標高平均濁質濃度分布の時間変化

りダム側と上流側の循環流の中心付近に高濁度領域が生じること、ダム側の高濁度領域は短時間で形成されること、上流側では時間の経過とともに濁質が広がり高濁度化していくことがわかる。また、揚水流量が急減した7時から8時、さらに揚水運転が終了した8時から9時にかけて、循環流中心の濁度が次第に低下し平面的に一様化する。

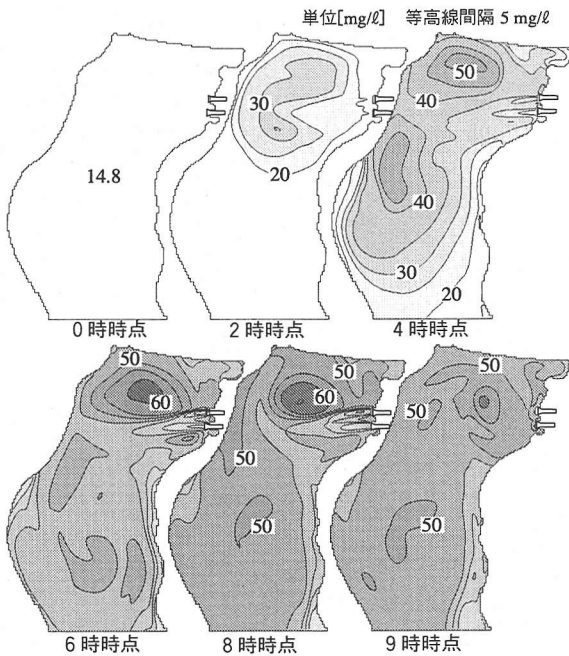


図-13 貯水池内表層の濁質濃度分布の変化 (標高1261m)

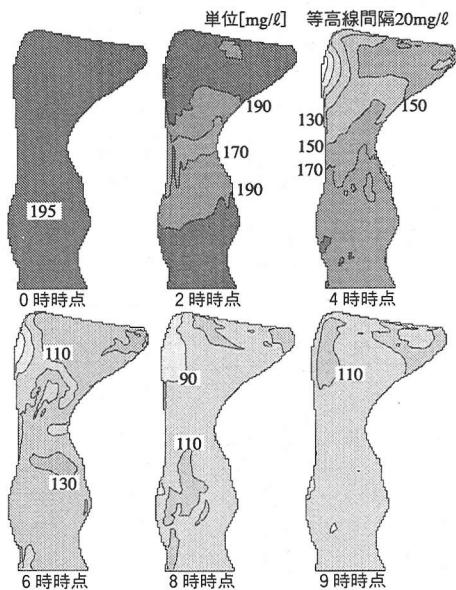


図-14 貯水池内下層の濁質濃度分布の変化 (標高1210m)

また、図-14 から下層領域では、2時間経過後の比較的早期に噴流の直上流域で濁度が低下し始め、噴流から離れた上流部では時間とともに徐々に濁度が低下する。図-10において下層領域では上流側から取水口前面領域に向かって戻り流が分布していることと合わせて考えると、大流量の噴流に伴う貯水池全体の鉛直循環流によって、上流側下層領域の高濁度水は噴流

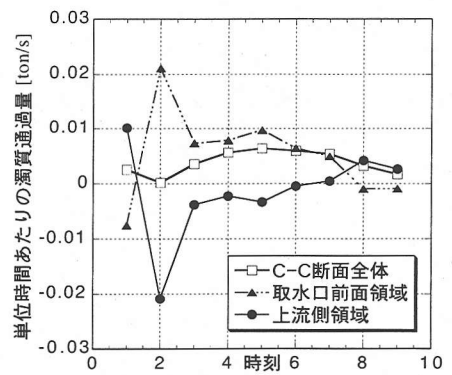


図-15 C-C断面を移流により上昇する濁質量

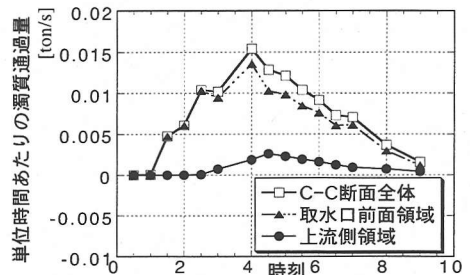


図-16 C-C断面を拡散により上昇する濁質量

下部へ移動し、噴流により上層に巻き上げられていると考えられる。揚水終了後はダム付近の一部を除いて濁度の分布は一様化する。

c) 下層濁水の巻き上げによる貯水池高濁度化のメカニズム

揚水運転に伴う貯水池内の下層濁水の巻き上げおよび移動による貯水池全体の高濁度化のメカニズムについて検討を行った。

C-C断面(標高1230m)を通過する濁質量を移流項に起因する量と拡散項に起因する量を区別して時刻ごとに求めたものを図-15および図-16に示す。

ここに移流項に起因する量は、計算セル $P_{i,j,k}$ (水平断面面積 $\Delta S_{i,j}$)において、水平断面を横切る沈降速度を考慮した鉛直方向の流速を $w_{i,j}$ 、風上側の濁度を $C_{i,j}$ とした場合、単位時間あたりの移流による濁質上昇量を $\Sigma(C_{i,j}w_{i,j}\Delta S_{i,j})$ により算定した。

また、拡散項に起因する量は、水平断面に接する上側の計算セルの濁度を $Cu_{i,j}$ 、下側を $Cd_{i,j}$ 、両セルの中心間隔を Δz とした場合、単位時間あたりの拡散による濁質上昇量は

$$\Sigma \left[\left(\beta + \frac{\nu_{i,j}}{PrC} \right) \frac{Cd_{i,j} - Cu_{i,j}}{\Delta z} \Delta S_{i,j} \right]$$

により算定した。ここに、 ν_t : 渦動粘性係数、 PrC : 濁質拡散率である。

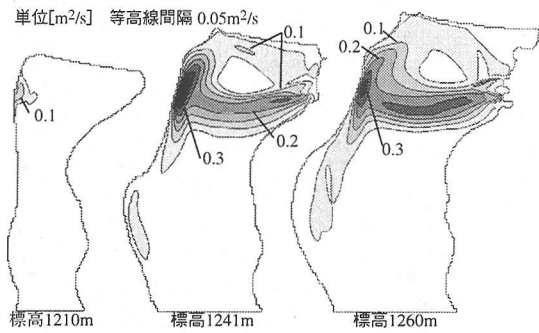


図-17 渦動粘性係数の分布の解析結果

図-15 および図-16 により、下層領域の濁質巻き上げは主に噴流部を含む取水口前面領域で発生しており、その原因は噴流高速流部で上昇流および拡散混合の両方である。一方、上流領域では流速が小さいことから拡散による濁質巻き上げはほとんど生じず、移流による上昇および下降が一時的に生じている。

図-17 に6時時点の標高1261m(上層領域取水口上端レベル)、標高1241m(上層領域取水口下端より4m下のレベル)、標高1210m(下層領域)における渦動粘性係数の分布を示す。拡散量は渦動粘性係数の値にほぼ比例するため、噴流が取水口から対岸に達し左右に広がるまでの間で拡散量が多いこと、また循環流中心や下層領域、上流側領域では拡散量が少ないことが確認できる。

図-18 は D-D 断面における移流による濁質通過量(上流側から取水口前面に向かう方向が正)を示したものである。これより D-D 断面左岸側上層部分を通過して上流へ向かう大量の濁質移動が認められる。これは取水口前面上層領域に上昇した濁質が噴流により上流方向へ移動することによるものである。また、上層領域右岸側での下流方向への濁質移動は噴流に伴う上流側循環流の戻り流によるものである。下層領域では、特に右岸側において主に上流側領域から取水口前面領域に向かう流れによる濁質移動が認められる。

これらを D-D 断面全体でみれば流動が安定しない運転開始後2時間後の一時期を除いて、取水口前面領域で巻き上げられた濁質は主に D-D 断面上層部分を通過して上流側領域に移動している。

1時および2時時点を含めて運転開始直後に濁質の通過量が大きく変動している原因は、水平および鉛直の循環流の形成や揚水の放流水と貯水池内上層水の水温差による流動が変化過程にあるためと考えられる。

図-19 は全解析領域を C-C 断面および D-D 断面で分割した4領域(取水口前面の上層および下層領域、上流側の上層および下層領域)ならびに全解析領域の上層全体および下層全体における濁質量の時間変化を示

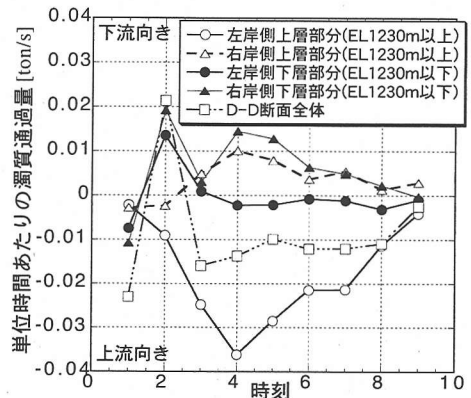


図-18 D-D断面を移流により通過する濁質量

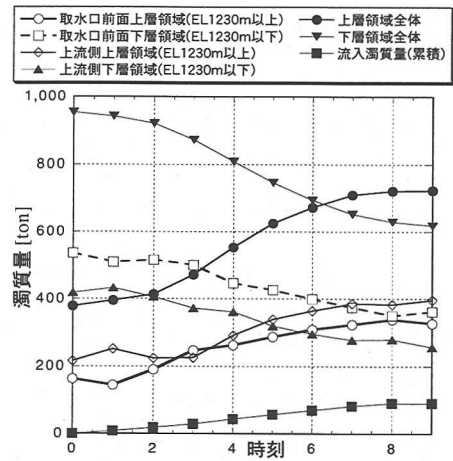


図-19 濁質量の時間変化

したものである。

これより、下層領域では揚水運転時間中濁質量が低下し、上層領域では上昇すること、その変化度合いは流動が安定する2時以降で大きくなるのがわかる。

以上から、濁質の巻き上げおよび移動による貯水池全体の高濁度化メカニズムは概ね次のように要約できる。

- i 揚水運転時の取水口からの高速大流量の水中噴流に起因する、噴流に向かう上向きの流れおよび乱れによる拡散混合により、貯水池下層領域に分布する濁質が上昇し噴流に取り込まれる。噴流の流量は、貯水池の地形の影響によって形成される水平・鉛直の循環流と取水口前面で合流し、これらを連行することにより取水口からの放流量の1.5～2.0倍程度に増大する。
- ii 取水口前面上層領域からの濁質上昇のうち、移流によるものは取水口付近の噴流下部、また、拡散によるものは噴流が取水口から対岸に到達するまでの間で主に発生する。

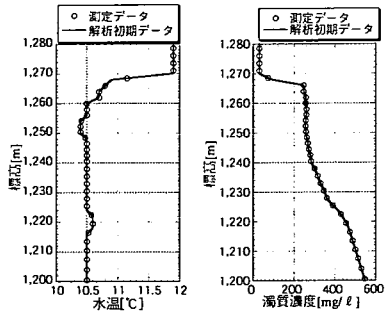


図-20 7月5日7時の水質データ

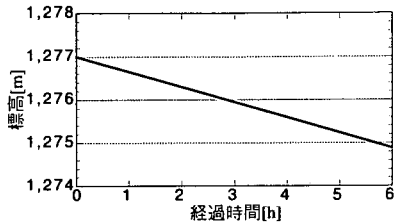


図-21 経過時間と水位の関係

- iii 取水口前面下層領域から上昇した濁質が水平方向の移流により貯水池全体に広がっていく。
- iv 下層領域では上流側下層領域の濁質が取水口前面下層領域へ補給される。

(2) 発電運転時の挙動の特徴

発電運転時の貯水池内の流動と濁質挙動の特徴を調べるため、発電流量を $158\text{m}^3/\text{s}$ で一定 (1号, 2号均等) とした解析を実施した。貯水池内の初期水温と濁度の分布は洪水流入直後の平成7年7月5日午前7時に取水口から約300m離れた自動計測点 (図-2参照) において測定した鉛直分布 (図-20参照) を貯水池全体に与えた。また、解析中の水位は対象貯水池の運用に用いている貯水池容量-水位曲線から算定して時間とともに低下させた (図-21参照)。

a) 流況

解析開始4時間経過後の流速ベクトルを図-22～図-24示す。図-22は表層レベル (標高1273m) の水平断面、図-23はA-A断面、図-24はB-B断面における分布である。

また、図-25はD-D断面におけるY方向流速Vの鉛直分布 (標高別平均値)、図-26はY方向流速VのD-D断面上層部分における平均値の時間変化、図-27はD-D断面通過流量の時間変化である。

これらより、発電時の流動は上層領域が主体であること、流速はD-D断面上層部分で 2cm/s 以下と揚水時に比べて小さく、下層部分では流向のばらつきがあると同時に流速はさらに小さいこと (図-22～図-25)、取水口前面上層領域には発電流量の85%がD-D断面

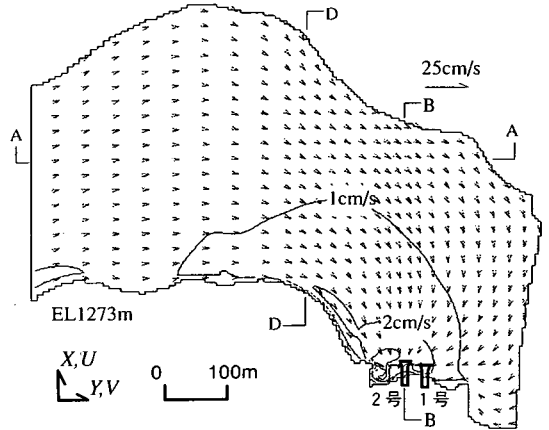


図-22 発電時の流況 (標高1273m)

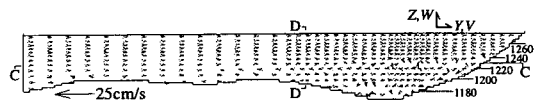


図-23 発電時の流況 (A-A断面)

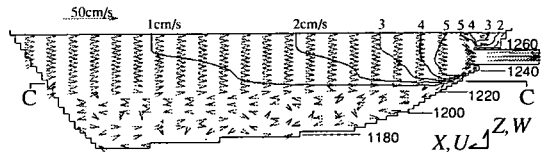


図-24 発電時の流況 (B-B断面)

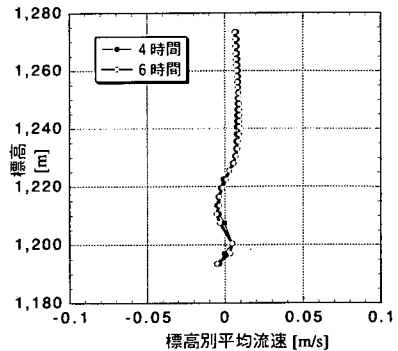


図-25 D-D断面におけるY方向流速Vの鉛直分布 (標高別平均値)

上層を通過して流入していること (図-27)、D-D断面上層部分のY方向平均流速は3時間以降 7.8mm/s に安定すること (図-26) がわかる。

b) 濁質挙動

発電運転開始後6時間経過時点の濁度分布を取水口から100m地点～500m地点で表示し図-28に示す。同図から標高1200m以上の濁度分布は各点ともほとんど

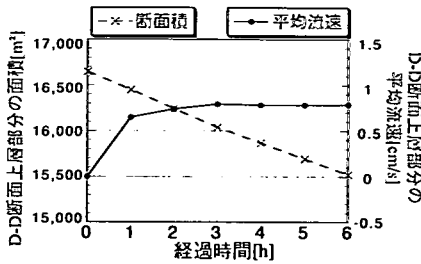


図-26 Y方向流速VのD-D断面上層における平均値

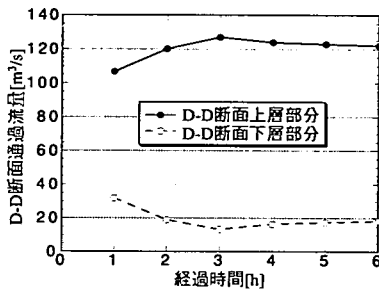


図-27 D-D断면을横切る流量

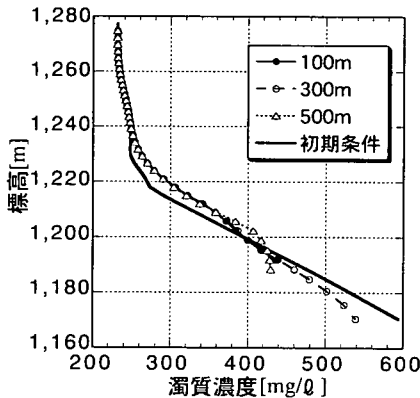


図-28 発電時開始6時間経過時点の濁度分布

ど変化がないこと、標高1200m～1230mの間は濁度が若干上昇し、標高1200m以下では減少しているが変化はさほど大きくないことがわかる。

D-D断面通過濁質量の時間変化を図-29に、全解析領域およびC-C断面およびD-D断面によるその四分領域の濁質量時間変化を図-30に示す。

これらから発電時は、濁質が主にD-D断面上層部分を通過して取水口前面上層領域に運搬され放流されること(図-29)、全体的にみれば各領域の濁質量はほとんど変化せず、発電による下層領域からの濁質の巻き上げはほとんどないこと(図-30)がわかる。

さらに、運転開始後の濁度分布、水位の初期条件および発電流量を変化させて、それらが貯水池内濁度変

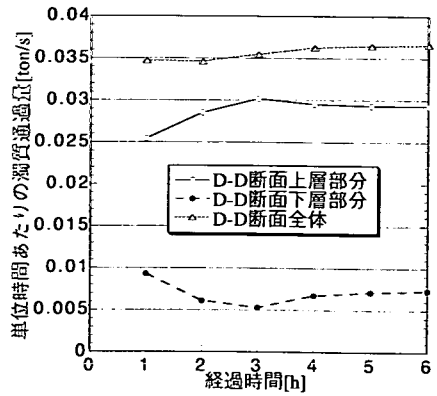


図-29 D-D断면을横切る濁質量

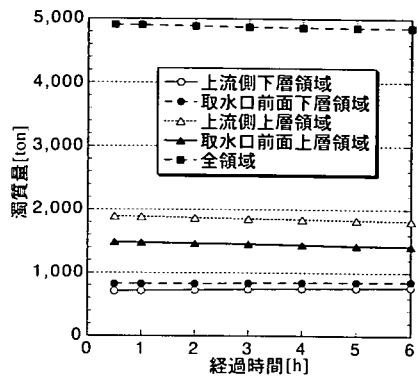


図-30 濁質量の時間変化

表-2 発電時の解析ケース

解析名	初期濁質濃度	初期貯水位	発電流量
解析 1-1	ケース 1	1277m	158m ³ /s
解析 1-2	ケース 1	1273m	158m ³ /s
解析 1-3	ケース 1	1277m	316m ³ /s
解析 2-1	ケース 2	1277m	158m ³ /s
解析 2-2	ケース 2	〃	316m ³ /s

化に及ぼす影響を調べるために同様の解析を行った。

解析ケースおよび濁度分布の初期条件を表-2および図-31に示す。これらの解析においても上層領域の濁度の変化は非常に小さく、下層領域の濁質の巻き上げは少ない結果となった。

各ケースでの取水口内濁度の時間変化を図-32に示す。これにより運転中に取水口から下部貯水池に放流される貯水池水の濁度はほぼ一定であること、取水口内濁度は初期状態における取水口下端(1246.5m)から上端(1260m)までの平均濁度にはほぼ等しいことがわかる。

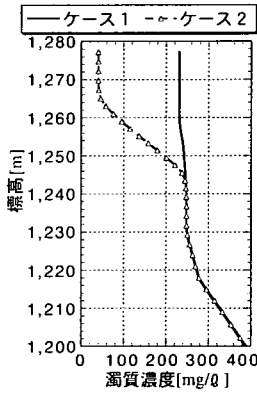


図-31 濁度分布の初期条件

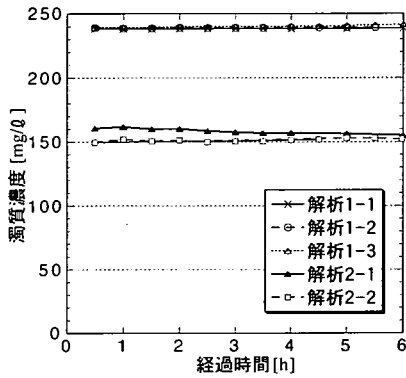


図-32 取水口内濁度の時間変化

4. ダム運用による貯水池内濁質挙動の制御

以上の検討結果から、揚水運転時の大流量放流により取水口前面下層領域の濁質が巻き上げられ取水口前面上層領域が高濁度化すること、および発電運転時においては、濁質濃度分布はほとんど変化せず、上層領域の濁質が下流河川へ放流されることがわかった。このため、貯水池に濁水が流入した場合に、揚水運転時の濁質巻き上げを抑えることができれば、下流河川の濁水長期化を軽減しつつ、運転機能を極力確保することが可能となる。

そこで、ダム・発電所の運用方法が濁質の巻き上げ量に与える影響を解析的に検討した。

初期水温・濁質分布は濁水流入直後の平成7年7月5日午前7時の実測データを用いた(図-20)。下部貯水池からの流入水は、当日の現地データに基づき水温10.4℃、濁質濃度96mg/lとした。解析ケースを表-3に示す。なお、解析中の貯水位は対象貯水池の貯水池容量-貯水位曲線から算定して揚水流量に応じて時間とともに上昇させた。

表-3 洪水流入時を想定した揚水運用解析ケース

解析名	初期貯水位	揚水流量 m^3/s	
		1号取水口	2号取水口
解析 3-1	L.W.L.	110	0
解析 3-2a	L.W.L.	110	110
解析 3-2b	L.W.L.+5m	110	110
解析 3-2c	L.W.L.+7.5m	110	110
解析 3-3a	L.W.L.	220	0
解析 3-3b	L.W.L.	0	220
解析 3-4a	L.W.L.	110	220
解析 3-4b	L.W.L.	220	110
解析 3-5a	L.W.L.	220	220
解析 3-5b	L.W.L.+5m	220	220
解析 3-5c	L.W.L.+7.5m	220	220
解析 3-6a	L.W.L.	110 → 220 運転開始 2 時間後に変更	110 → 220 運転開始 2 時間後に変更
解析 3-6b	L.W.L.	110 → 220 運転開始 4 時間後に変更	110 → 220 運転開始 4 時間後に変更
解析 3-6c	L.W.L.	110 → 220 運転開始 6 時間後に変更	110 → 220 運転開始 6 時間後に変更

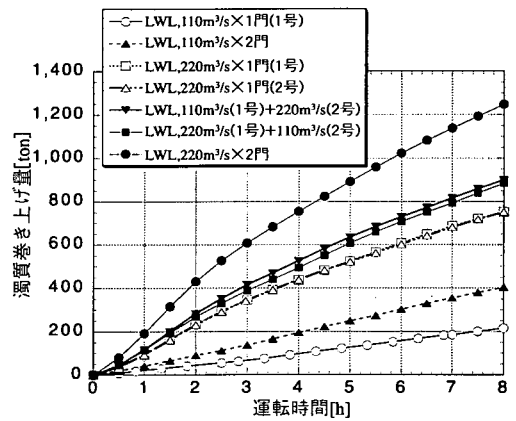


図-33 水車発電機の運転組み合わせによる濁質巻き上げ量の変化

(1) 運転方法の検討

a) 水車発電機の運転組み合わせ

対象とした発電所では2門の取水口にそれぞれ2台の水車発電機(1台あたり揚水量110 m^3/s)が接続されていることから、各門の揚水流量は運転する水車発電機数により、0, 110, 220 m^3/s のうちから選択できる。よって、2門で8通りの運転組み合わせが考えられる。ここでは、運転組み合わせが異なる場合に上層領域への濁質巻き上げ量がどのように変化するかを検討した。

初期貯水位をL.W.L.とした場合の濁質巻き上げ量の経時変化を図-33に示す。これより、揚水流量が220 m^3/s の場合、1号取水口または2号取水口のどちらか1門の取水口のみを用いて揚水を行う運転方法に比べて、1号取水口および2号取水口に分散させて均等に放流させた場合には、流動層の濁質濃度上昇を40%前

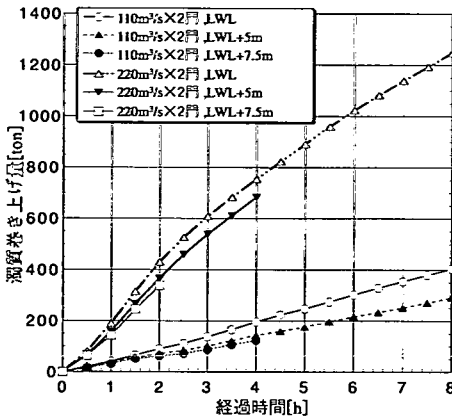


図-34 初期貯水位の違いによる濁質巻き上げ量の変化

後低減できることがわかる。また、片方だけの取水口から流入させた場合は、今回の貯水池の条件においては取水口の選択による差異は見られない。

b) 貯水位

初期貯水位が L.W.L., L.W.L.+5m および L.W.L.+7.5m とした場合の濁質巻き上げ量の経時変化をそれぞれ図-34 に示す。

これらから運転組み合わせが同じ場合、初期貯水位を高くした方が濁質巻き上げ量を低減できることがわかる。L.W.L. から揚水を開始する場合と L.W.L.+5m および L.W.L.+7.5m から開始する場合では、110m³/s × 1門の場合では濁質巻き上げ量をそれぞれ 27% および 37% 程度低減できる。また 220m³/s × 2門の場合ではそれぞれ 15% および 21% 程度低減できる。このため、貯水位の面で濁質の巻き上げ量を抑制するには、高い貯水位で運用することが効果的である。

c) 揚水量

運転開始から累積した揚水量に対して濁質上昇量がどのように変化するかを検討した。横軸を揚水量にし、濁質上昇量を算定した結果を図-35 に示す。これより、濁質巻き上げ量は揚水量に比例することがわかる。また、110m³/s × 1門で揚水した場合と 110m³/s × 2門で揚水した場合では、同じ揚水量であれば濁質の巻き上げ量はほとんど同じになる。220m³/s × 1門で揚水した場合と 220m³/s × 2門で揚水した場合についても同様である。

近年、濁水流入時に揚水運転を全面規制あるいは揚水流量を制限する対策が実施されるケースが見られるが、揚水量が少なければ濁質巻き上げへの影響は小さく、以上のような種々の運転パターンとそれに伴う影響の評価をあらかじめ定量的に行っておくことにより、緊急時における短時間使用など揚水運用の選択の幅を広げることが可能と考えられる。

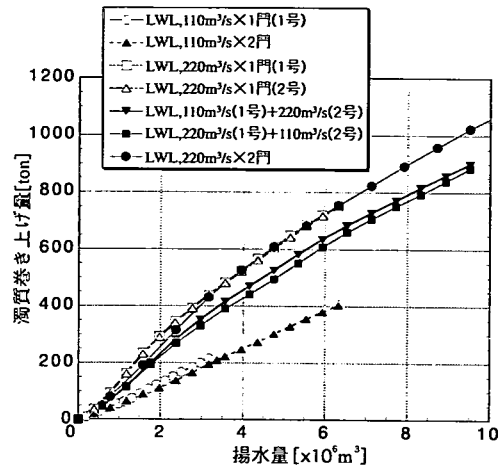


図-35 揚水量と濁質巻き上げ量の関係

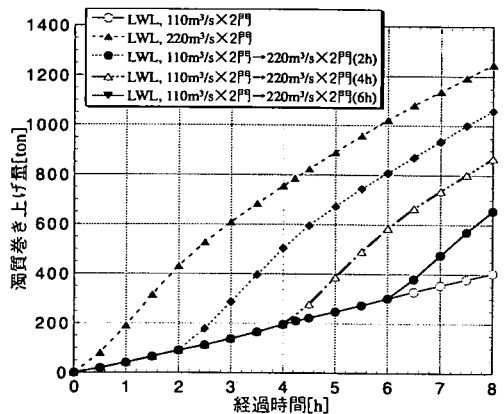


図-36 揚水流量を途中増加した場合の巻き上げ量(時間)

(2) 濁質挙動を考慮した運転方法

電力の需要は深夜に少なく、明け方に最低となる特性を持っている。このため、大規模な洪水により濁水が流入した場合の濁質挙動を考慮した運転方法として、ダムの貯水位 L.W.L. からある程度上昇するまでは 110m³/s × 2門とし、明け方に運転台数を増やして 220m³/s × 2門を行うというように、揚水流量を途中で増加させる方法が考えられる。図-36 および図-37 は、一定流量で揚水する場合と比較して上記運転方法の濁質巻き上げ量低減効果を解析により検討した結果である。

両図より、220m³/s × 2門で一定流量運転を行う場合に比べ、110m³/s × 2門で運転開始したあと 4 時間後に 220m³/s × 2門に変更した場合には、濁質の巻き上げ量を 20% 程度低減することが可能である。

ここでは初期貯水位を L.W.L. として検討を行ったが、初期貯水位を高くすれば一層の濁質巻き上げの低

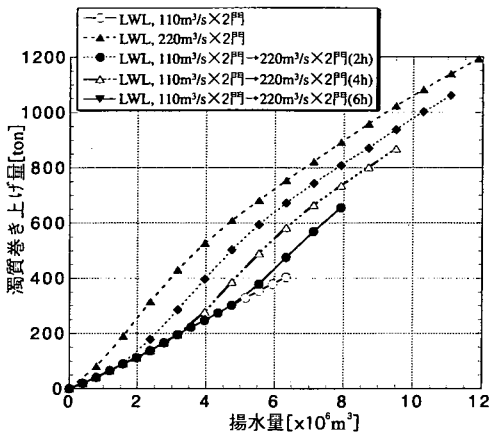


図-37 揚水流量を途中増加した場合の巻き上げ量(揚水量)

減が図られると考えられる。濁水現象に対して特性が異なる複数の揚水発電所の運用の組み合わせを工夫することによって濁水長期化を軽減し、かつ、運転機能の一層の発揮が可能となると考えられる。

5. おわりに

大規模な貯水容量を有する揚水発電所上部貯水池運転時の流動と濁質挙動の特徴およびダム運用による濁水長期化軽減効果について実貯水池をモデルとして検討した結果、以下のことがわかった。

- i. 揚水運転時の下層濁質の巻き上げは、大流量の放流に伴う水中噴流部での上向きの流れの発生および乱流拡散混合による下層高濁度水の連行によって生じるものであり、高濁度化した噴流はその後、主に上層部での移流により貯水池全体に広がっていく。このために、貯水池下層の濁水を巻き上げないダム運用の工夫が重要である。

- ii. 発電運転時については、取水の範囲が主に取水口敷より少し低い標高以浅で、かつ平面的には取水口の前面付近の水域から取水される。このため、発電による下流域へ放流濁度を低減させるためには、取水口前面表層領域の濁度の上昇を抑制することが重要である。

- iii. 洪水流入直後の揚水運転に関するパラメータスタディーにより、取水口前面上層領域の濁質濃度を抑制するためには、放流流速を小さく、高い貯水位で運転することが望ましいことがわかった。そのため、洪水流入後の濁水長期化が懸念される場合、電力系統の需給状況等を考慮の上、①使用水車発電機を選択する、時間をかけて運転するなどにより揚水運転時の放流流速をできるだけ小さくする、②できるだけ高い貯水位で揚水運転する、あるいは③これらを組み合わせるなどの運転方法の工夫により、濁水長期化を軽減しながら、揚水発電所を運用できる可能性があることが明らかになった。

今後、さらに具体的な運転方法の検討・効果の定量的な評価を行い、濁水長期化の軽減と電力設備としての機能確保に万全を期す必要がある。

最後に本研究を進めるにあたって貴重なご指導をいただいた京都大学井上和也教授に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 岩佐義朗, 松尾直規, 井上素行: 貯水池の濁度解析について, 京都大学防災年報, 第21号B-2, 1978.
- 2) 米山望, 角湯正剛: 自由液面解析コード (FRESH) の開発-三次元化と並列化-, 電中研報告 U95063, 1996.
- 3) 米山望, 井上素行: 三次元数値解析による揚水発電所貯水池内水温・濁質挙動の予測手法, 土木学会論文集, No.684/II-56, pp.127-140, 2001.

(2000.9.28 受付)

MITIGATION OF THE TURBIDITY IN A PUMPED STORAGE RESERVOIR WITH THE OPTIMAL OPERATION OF DAM AND POWER PLANT

Motoyuki INOUE and Nozomu YONEYAMA

In this paper, turbidity behavior in a pumped storage reservoir is examined using a prediction method which enables to predict it well with taking account of turbulent flow, water temperature, turbidity and change of water level. The prediction results indicate that the upward flow and the turbulent diffusion, which are caused by a high-speed flow from an intake, may carry turbidity in the lower layer of the reservoir to the upper layer in plant operation. The present study suggests that adequate selection of operational conditions would suppress the increase of the turbidity at the upper layer of the reservoir. It means that there is a possibility to mitigate the turbidity with the optimal plant operation.