

# 選択取水方式がダム貯水池の長期・短期の水質保全に与える影響に関する研究

EFFECT OF SELECTIVE WITHDRAWAL SYSTEM OPERATION ON THE LONG- AND SHORT- TERM WATER CONSERVATION IN A RESERVOIR

矢島 啓<sup>1</sup>・吉川 栄<sup>2</sup>・石黒 潤<sup>3</sup>

Hiroshi YAJIMA, Sakae KIKKAWA and Jun ISHIGURO

<sup>1</sup>正会員 博(工) 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

<sup>2</sup>正会員 西谷技術コンサルタント株式会社 都市・環境部 (〒682-0025 倉吉市八屋354-1)

<sup>3</sup>正会員 修(工) 西谷技術コンサルタント株式会社 都市・環境部 (〒682-0025 倉吉市八屋354-1)

A selective withdrawal system (SWS) is essential for the conservation of water quality in a dam reservoir. To make clear the desirable operation of SWS, we applied numerical simulations (the one-dimensional and the three-dimensional water quality simulation models called DYRESM-CAEDYM and ELCOM-CAEDYM, developed by CWR) to the Tono dam reservoir which is now under construction. The results of 1-D simulations indicated that SWS operation using two intake gates simultaneously could be more desirable for the daily operation considering the water temperature, DO and Chl.a in the reservoir. But the results of 3-D simulations indicated that the surface intake operation could release more suspended solid from the reservoir during flooding period.

**Key Words :** *Selective withdrawal system, reservoir, water conservation, DYRESM, ELCOM, CAEDYM*

## 1. はじめに

ダム貯水池においては、濁水長期化、冷水放流、富栄養化などの水質保全における一般的な対策として、選択取水設備（以下、SWSと略）が備えられている<sup>1)</sup>。

高知県にある早明浦ダムでは、建設時に設置した表面取水設備を、その後SWSへと改造を行い、鉛直2次元の水力水質計算モデルにより、洪水の規模と濁度の状況に応じたSWSの運用方式を構築している<sup>2)</sup>。また、堀田らは同様の2次元モデルを用い、常時表層取水のダムにおいて、なるべくコンジット位置と合わせて取水すると、躍層位置（あるいは濁水流入位置）が下がり、濁水長期化現象を軽減できることを明らかにしている<sup>3)</sup>。このように近年では、濁水を対象にした詳細な検討が増えている。しかしながら、SWSの運用は、SWS方式、ダムの規模や形式、流域の水文特性などダムサイト毎に異なる固有の複雑な条件に支配される。したがって、濁度以外にも多くの評価項目を有するダム貯水池の水質保全においては、どのような運用が最適であるかを把握することは困難である。その結果、現状では冷水や濁水の放流を避けやすい常時表層取水を行うSWSの運用事例が多くなっている<sup>4)</sup>。しかしながら、近年では、濁水、冷水放流問題に加えて、下流河川の生態環境保全の観点から、受熱期以降に表層の温水を放流することによる温水放流

問題も認識されるようになっており<sup>5)</sup>、今後さらにSWS運用の高度な検討が必要となってくると考えられる。

矢島らは、日本で運用事例がほとんどない同時に2つ以上の取水ゲートから同時に取水する異高同時選択取水について鉛直1次元モデルを用いた検討を行い、貯水池の水質保全には、表層取水よりも異高同時選択取水が望ましい可能性が高いとの結論を得た<sup>6)</sup>。しかし、この研究では、年間を通じた長期の検討であるため、平水時の運用が洪水時にどのような影響を与えるかは明らかにされていない。そこで本研究では、西オーストラリア大学 Centre for Water Researchで開発された1次元貯水池流動解析モデルDYRESMと3次元貯水池流動解析モデルELCOMおよび水質予測モデルCAEDYMがそれぞれカップリングしたDYRESM-CAEDYM<sup>7)</sup>とELCOM-CAEDYM<sup>8)</sup>を利用し、千代川水系袋川の鳥取県鳥取市国府町殿地内に建設中である殿ダム貯水池を対象に、異高同時選択取水を含むSWS運用の違いがダム貯水池内の長期的な水温成層構造や水質に与える影響及び放流水に与える影響を明らかにすると同時に、短期的な出水時における影響についての検討も行う。DYRESM-CAEDYMの計算においては、鉛直方向に分割する最小層厚を1m、最大層厚を2mとし、計算時間間隔を1時間とした。ELCOM-CAEDYMの計算においては、水平方向は20m格子、鉛直方向は1m毎の分割、計算時間間隔を30秒とした。

## 2. 1次元モデルを用いたSWS運用の違いが長期的なダム貯水池の水環境に与える影響の検討

### (1) 対象ダム貯水池と計算対象年

殿ダム貯水池は、平成23年完成予定の堤高75m、堤頂長280m、総貯水量1240万 $m^3$ の規模を有する国土交通省直轄のロックフィルダムである。図-1に貯水池の平面図を示す。流域面積は38.1 $km^2$ 、湛水面積は0.64 $km^2$ の比較的小規模な貯水池である。取水放流設備としては、取水レベルが常時満水位と同高な洪水吐設備、発電及び利水を目的とした選択取水設備、緊急時対応の予備設備として低水放流設備が計画されている。

計算対象年は、洪水時の検討も行うため、1990年～1999年の10年間において大規模な出水がある1990年と1997年を選定した。選定した2年は、いずれも最大時間流量が120 $m^3/s$ 程度と同規模な出水であるが、図-2に示すように1990年は9月17日の出水前まで濁水により貯水位が大幅に低下しているのに対し、1997年は1年を通じて貯水位がほぼ一定であり、年間を通じた貯水位の変動パターンが異なるため、SWSの運用の違いによる貯水池の水環境への影響も異なるものと考えられる。

### (2) 1次元モデルと計算条件

本研究では、洪水流入の影響を考慮した1次元モデル改良型DYRESM<sup>9)</sup>を用いた。ただし、モデルパラメータの設定は、殿ダムと、回転率、気象、地形等の諸条件が類似しており、計算に必要な気象、水質データも比較的充実した中国地方の直轄ダムである土師ダムにおける検証計算から同定された値を用いた<sup>6)</sup>。

計算に使用する流入河川流量は、実測値を用い、取水放流量は、日単位に利水計算により設定されている値をもとに時間単位の放流量を設定した。計算に必要な気象データは、近傍の鳥取地方気象台等の観測値を適宜補正して推定した値を用いた。流入水温については、殿ダムサイト付近(以下、殿地点とする)での定期調査による観測値と殿地点における日平均気温を用いた回帰式により推定した。流入水質については、殿地点における水質調査の観測値をもとに作成したLQ式により推定した。なお、流入SSに関しては、10 $\mu m$ 以下の粒径に主眼をおき、表-1のように粒径区分を設定し、殿地点での流量が3 $m^3/s$ 以上の場合に採水・分析して得られた平均的な粒度分布曲線から各区分の配分比率を決定し、各区分において1/2の配分比率となる加積率に対する粒径を代表粒径として設定した。ただし、これらの粒度分析結果は、殿地点での流量が30 $m^3/s$ 程度までのものであり、今後のデータ蓄積により見直す必要がある。

### (3) SWSの運用ケースの設定

SWSの運用方法として、一般的なSWSの運用事例である常時水面下3mを取水するケースをCase1とし、水面



図-1 殿ダム貯水池平面図

表-1 流入SSの粒度区分

粒径区分	代表粒径	配分比率	累加比率
2 $\mu m$ 以下	0.6 $\mu m$	3%	3%
2～4 $\mu m$	3.0 $\mu m$	2%	5%
4～7 $\mu m$	5.2 $\mu m$	3%	8%
7～10 $\mu m$	9.1 $\mu m$	5%	13%
10～20 $\mu m$	13 $\mu m$	16%	29%
20 $\mu m$ 以上	53 $\mu m$	71%	100%

下3mと水温躍層より深く深水層からの取水が期待できる水面下13mを同時に2箇所のゲートからの異高同時選択取水を行うCase2とする2ケースを設定する。

なお、殿ダムにおける現実的な運用に配慮するとともに、SWSの機能が最大限に発揮できるように、SWSの最大取水量である約7.4 $m^3/s$ 以下の放流量を全量SWSより取水し、余剰水を洪水吐から放流することとした。また、Case2の計算においては、取水量を等分して2箇所のゲートから取水を行った。

### (4) SWSの運用の違いがダム貯水池の水環境に与える影響

計算対象2年×各2ケース＝全4ケースの計算を行った結果の中で、貯水池内の水温とDOの季節変化を図-2に示す。また、DOの基準として湖沼の水質環境基準C類型を参考に、日平均の最下層のDOが2 $mg/L$ 以下となる日数を表-2に示し、水質問題として富栄養化の指標となるChl.aに関して、表層の日平均のChl.a濃度が15 $\mu g/L$ 以上となる日数を表-3に示す。

まず、図-2をもとにケース毎の水温成層の特性について検討する。貯水位変動の大きい1990年の各ケースは、3月頃まではほぼ様な水温分布を示すのに対し、受熱期を迎えるとSWS運用の違いによる差が現れ、4月～7月には、Case1は水深3～5mに、Case2は水深十数mに水温躍層が形成されている。また、Case1では貯水位が急激に低下する8月初旬に温水層が消失しているが、Case2ではそれまでに温水層が厚く形成されていたため消失していない。貯水位低下後においてもその差は明瞭であり、Case1では再び貯水池内で成層が形成されるのに対し、Case2では形成されていない。一方、貯水位変動の小さい1997年では、夏季において、Case1は水深8m付近に、Case2では水深16m付近に水温躍層が形成されており、

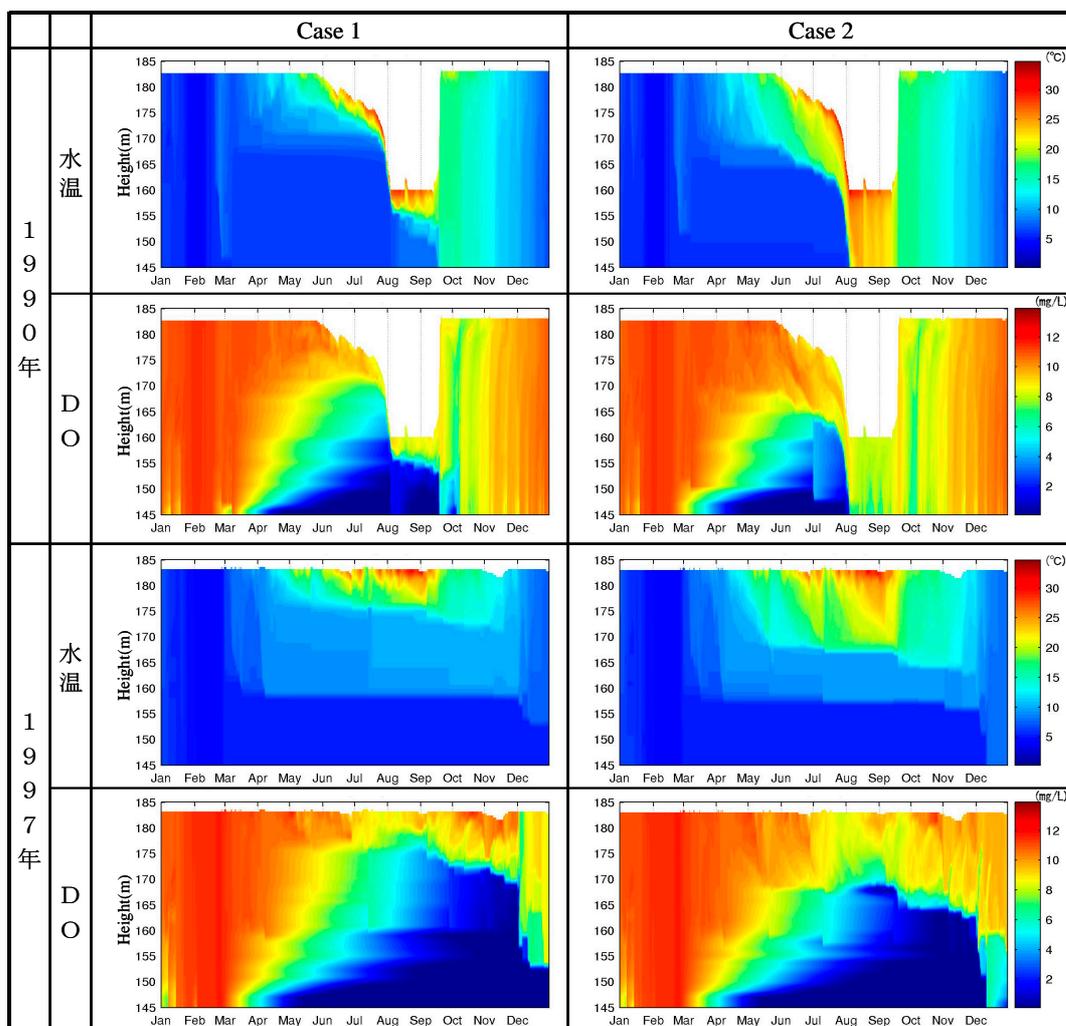


図-2 SWS運用の違いによる水温・DOの季節変化

1900年と同様に、Case1に比べてCase2の方が、水温勾配の緩やかな成層構造が形成されている。

次に貯水池内のDOに着目する。同図に示すDOの季節変化は、全ての計算ケースについて水温構造の影響を受けている。表-2からも明らかのように、各年ともCase1に比べCase2の方が貯水池に占める貧酸素水塊の割合が小さい。渇水年である1990年のCase1では、貯水位が急激に低下する際に全層が貧酸素化しており、しかも、前述したように全層が冷水化することを考えると、生態系への悪影響が懸念される。1997年についても、Case1よりCase2の方が、放熱期を迎えた時に自然対流による下層への酸素供給が比較的スムーズに行われている。

さらに貯水池内のChl.aに着目する。表-3に示すように各年ともCase1の日数が多く、Case2の方が富栄養化対策としての保全効果が期待できる。これは、先述した水温躍層の形成位置の違いにより、Case1の方が流入水の貫入高が高く、Chl.a生産の制限因子となっているリンの外部負荷を植物プランクトンが利用しやすいためである。

#### (5) SWSの運用の違いが下流河川に与える影響

ここでは、ダム貯水池からの放流水による下流河川へ

表-2 最下層(底上1.0m)DO $\leq$ 2mg/L となる日数

	Case 1	Case 2
1990年	153	116
1997年	251	230
計	404	346

表-3 表層Chl.a $\geq$ 15 $\mu$ g/L となる日数

	Case 1	Case 2
1990年	18	9
1997年	71	32
計	89	41

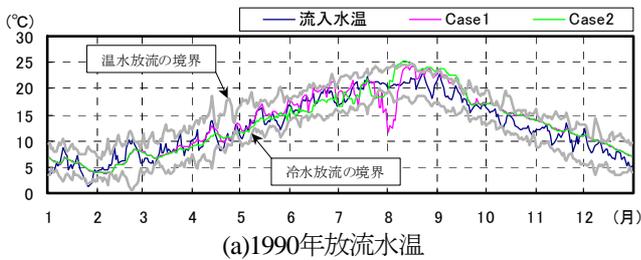
の影響として最も重要な指標となる水温について日平均した値をもとに検討する。各ケースの放流水温（洪水吐からの放流もある場合は、洪水吐とSWSからの放流量でそれぞれの水温を按分した値で評価）の変化を図-3に示し、冷水放流となる日数を表-4に示す。ただし、冷水放流となる境界は、計算対象を含む1990年～1999年の日平均流入水温の標準偏差 $\sigma$ を求め、日平均流入水温に $2\sigma$ を加えた値を温水放流の境界、平均流入水温から $2\sigma$ を引いた値を冷水放流の境界とし、放流水温と併せて図-3に示した。ここで、 $2\sigma$ の平均値は約3°Cである。

まず、冷水放流の傾向をみる。1990年のCase1では、前節で述べたように、7月後半の急激な貯水位低下の際に温水層が消失するため、流入水温より8℃程度低い冷水放流となっている。一方、同時期のCase2では、温水層がある程度確保できているため、冷水放流の境界を下回るものの、冷水境界との水温差及び冷水放流となる期間を考慮すれば、Case1に比べその影響は小さいことが明らかである。1997年の結果をみると、各ケースとも年間を通じて著しい冷水放流は生じておらず、表-4に示す冷水放流となる日数も僅かである。

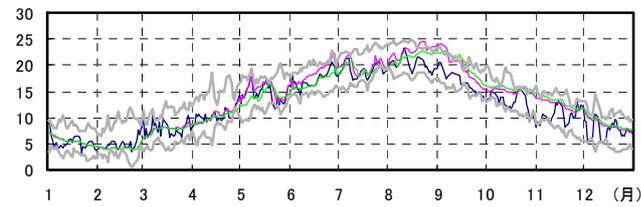
次に温水放流の傾向をみる。1990年ではCase1よりCase2において8月から9月頃にかけて温水放流となる傾

表-4 冷温水放流のケース別日数

	冷水放流		温水放流	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
1990年	15	10	20	47
1997年	1	5	26	18
計	16	15	46	65



(a)1990年放流水温



(b)1997年放流水温

図-3 各ケースにおける放流水温

向にあることが分かる。一方、1997年の同時期においては、Case2よりCase1において温水放流となる傾向にある。表-4でも示されるように、温水放流については、計算対象とした2年で異なる傾向となった。通常、Case2のような運用では、表層付近の温かい層と中層付近の冷たい層から混合取水するため、夏季から秋季にかけての温水放流を低減する効果がある。しかし、1990年のような特異な渇水年では、貯水位低下時にCase1では成層化するのに対し、Case2では全層が暖かくなり温水放流となったため、通常の傾向とは逆の結果となった。

### 3. 3次元モデルを用いたSWS運用の違いが出水時のダム貯水池の水環境に与える影響の検討

#### (1) 検討ケースの設定と計算条件

ELCOM-CADYMにおけるパラメータは、梅田ら<sup>10)</sup>と同様に、東北地方に位置するXダムでの洪水時の濁水流入観測データを用いた検証結果により設定した。

出水時のSWS運用の違いが貯水池の水環境に与える影響を調べるため、1次元モデルを用いた検討のCase1とCase2の運用に加え、それぞれのケースに対し、出水時の濁水対策として、できるだけ多くのSSを放流できるように、SWSの設置箇所が一番SS濃度の高い水深を毎日午前12時に判断し、その高さからSWSによる取水を行うCase3とCase4の計4パターンでのSWS運用について検討を行う。ここで、3次元計算における初期値は、1次元計算で得られたCase1とCase2の運用による計算結果から、1990年9月17日0時及び1997年7月10日0時の値を設定し、計算対象2年×各4ケース=全8ケースについて10日間の計算を行った。

#### (2) SWS運用の違いが出水時の濁水流入に与える影響

得られた結果のうち、Case1とCase2の水温とSS分布について、ピーク流量発生3時間後の袋川本川の中心軸

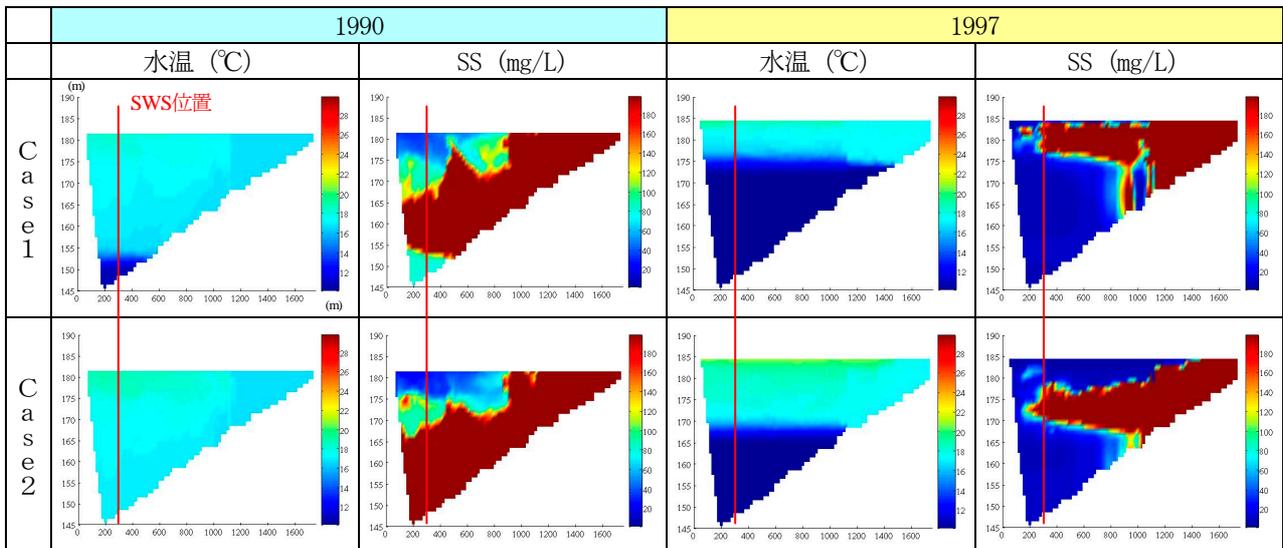
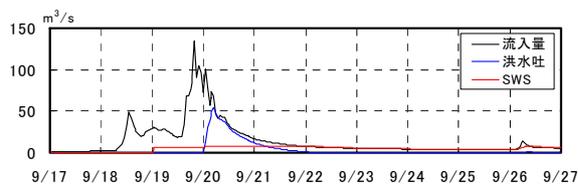
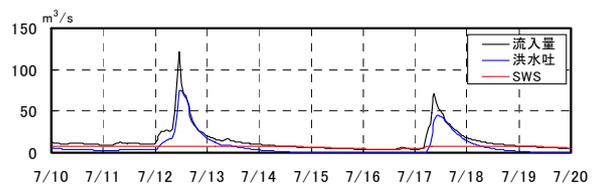


図-4 出水期におけるピーク流量発生3時間後の水温とSSの分布（袋川本川縦断面）

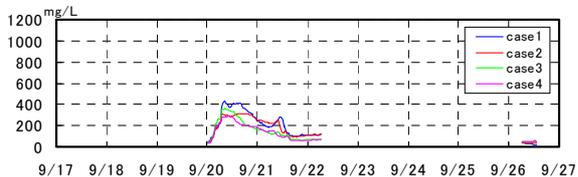


(a) 1990年

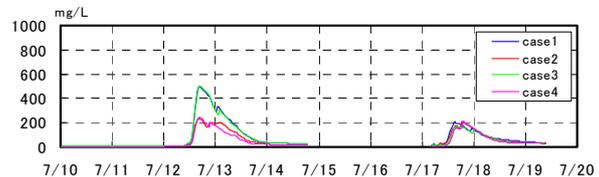


(b) 1997年

図-5 ダム貯水池への流量およびゲートからの取水・放流量

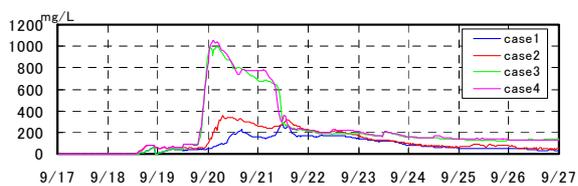


(a) 1990年

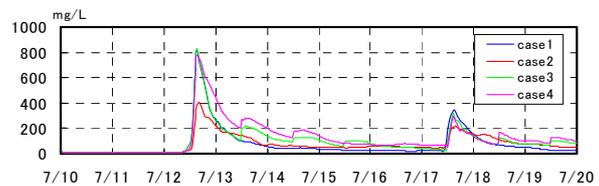


(b) 1997年

図-6 洪水吐からの放流におけるSS濃度の変化



(a) 1990年



(b) 1997年

図-7 選択取水設備からの放流におけるSS濃度の変化

に沿った縦断分布を図-4に示す。

まず、1990年に着目する。Case1では出水前の水位がEL.163.1m（全水深約18m）であり、下層約8mに冷水が滞留している（図-2参照）。図-4には、流入してきた濁水が、この冷水層を破壊することなくその上層に貫入し、洪水の流入とともに水位も上昇し、濁水が冷水層より上層全体に広がっていく様子が示されている。これに対し、Case2においては、洪水流入時に水温がほぼ一定の鉛直分布であるため、ダム最深部まで濁水が流入し、Case1よりも広範囲に濁水が広がっていく様子が分かる。

また、1997年の出水時は、Case1では水深約10m、Case2では水深約16mの位置に水温躍層が存在するため（図-2参照）、この水深の直上部に濁水がほぼ水平に貫入している様子が分かる。

### (3) SWS運用の違いが出水時の濁水放流に与える影響

出水時の濁水放流に与える影響を調べるために、貯水池への流入、各放流設備からの放流量および放流水におけるSS濃度の変化を示したものを図-5～図-7に示す。図-5に示されるように、洪水吐からの放流量は、出水時の24時間程度はSWSからの放流量に比べ大きい。洪水低減後は、SWSからすべて放流されている。また、表-5には、計算期間10日間における各放流設備からのSS放流量について、長期濁水化の問題となる粒径10 $\mu$ m以下と、それ以上のSSに分けて示した。

まず、図-6に示す出水時に大きな放流量がある洪水吐からのSS濃度をみる。1990年の出水時には各ケースとも

大きな濃度差がなく、表-5から、下層に冷水層が残り濁水流入が下層まで広がらないCase1が833tonと、Case2の703tonより若干多くのSSを放流していることが分かる。また、洪水時対応の運用を行った場合、SWSがより深い水深から取水することにより下層への流れが強くなる影響のため、表層付近の洪水吐からの放流量はCase3で694ton、Case4で597tonと減少している（表-5参照）。また、1997年では、濁水がより上層に貫入しているCase1あるいはCase3の方がより多くのSSを放流している。

次に、SWSからの放流に着目する。図-7に示されるように、1990年では、出水時対応を行ったCase3とCase4のSS濃度の増加は顕著であるが、1997年のように上層に濁水が貫入する場合は、SWSよりも洪水吐から放流されるSSの割合が1990年と比べて大きくなるため、SWSの弾力的運用による増加は、1990年に比較して小さくなる（表-5参照）。

放流するSSの粒径に着目すると、表-5から10 $\mu$ mより大きなSSは、流入量に対しわずかな放流量となっており、放流設備から放流するのが難しいことが分かる。また、10 $\mu$ mより小さなSSについては、流入量に対し、最大で1990年は48%、1997年は63%を放流することが可能であることが明らかとなった。これらはいずれもCase3の運用ケースであり、結果として、常時表層取水+出水時対応の運用が、1990年と1997年のどちらの年も、また、10 $\mu$ mより小さいSSも大きなSSについても、一番多くのSSを放流できることが明らかとなった。

表-5 1990年と1997年の出水時におけるSS流入量および放流量 (単位: ton)

		1990			1997			備考	
		粒径区分		計	粒径区分		計		
		≤10 μm	>10 μm		≤10 μm	>10 μm			
流入量		2666	17838	20504	1554	10401	11955		
放流量	Case1	洪水吐	569	264	833	628	376	1004	常時3m取水
		SWS	409	28	437	343	94	437	
		計	979	292	1271	971	470	1442	
	Case2	洪水吐	499	204	703	437	199	636	常時3m+13m取水
		SWS	524	113	636	356	97	453	
		計	1023	317	1340	793	296	1089	
	Case3	洪水吐	496	198	694	588	364	951	常時3m取水&出水時対応
		SWS	772	470	1242	396	213	610	
		計	1268	669	1936	984	577	1561	
	Case4	洪水吐	440	157	597	381	193	574	常時3m+13m取水&出水時対応
		SWS	797	497	1294	458	289	747	
		計	1237	653	1890	839	483	1322	

#### 4. おわりに

ダム貯水池における水質管理対策として、SWSの弾力的な運用を目的として、現在建設中の殿ダムを対象に異高同時選択取水という現在日本で積極的になされていない運用と一般的な常時表層取水の2通りの効果について検討を行った。ここで、本研究で得られた主要な結論をまとめる。

1) 1次元モデルを用いた検討から、異高同時選択取水は、貯水池におけるより緩やか水温勾配をもつ水温成層を生じ、下層の貧酸素化を抑え、流入水による外部負荷の貫入位置の違いから植物プランクトンの増殖も抑えることができる可能性が高く、下流河川への影響に関しても、1990年のような特異な渇水時に生じる常時表層取水時の深刻な冷水放流を回避でき、1997年のような貯水位変動が小さい年には、夏季から秋季にかけての温水放流を低減する効果があることが明らかとなった。

2) 3次元モデルを用いた検討から、1990年のような渇水時は、出水で水位が大幅に上昇するため、貯水池内での濁水の拡散を抑えることは難しいが、1997年のように常時満水位の状態成層化されておれば、濁水の拡散を減少させ、より多くのSSを放流することができる。さらに、SWSの常時表層取水と出水時対応を行ったケースが、すべてのケースについて一番多くのSSを放流することができることが分かった。

以上、今回の検討ケースにおいては、殿ダムにおける水質保全対策には、平常時は異高同時取水、出水時には常時表層取水を行っている成層状態に対する出水時対応が望ましいとの結論になった。これらを同時に満たすためには、出水前にSWS運用の変更が必要である。そのため、このような複雑な操作を行うためには、予測シミュレーション結果にもとづくSWSの操作支援システム<sup>11)</sup>のような新たなシステムの導入が必要であると考えられる。

**謝辞:** 本研究で使用したモデルは、国土交通省中国地方整備局殿ダム工事事務所からの鳥取大学における受託研究「殿ダム貯水池内及び下流河川の水質予測評価」の研究成果を使用している。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 丹羽薫・天野邦彦：河川環境講座（その8）—ダム貯水池の水質保全—, 土木技術資料, 32-10, pp.72-79, 1990.
- 2) 高野浩一・左近重信・及川拓治：高濁度放流期間の短縮を目的とした早明浦ダムの取水設備の改造と運用, 大ダム, NO.187, pp.3-15, 2004.
- 3) 堀田哲夫・浅枝隆・富岡誠司ら：下層密度流によるダム貯水池の濁水長期化現象とその対策, 水文・水資源学会誌, Vol.16, No.3, pp.236-245, 2003.
- 4) 吉田延雄・中村徹：選択取水設備の運用効果について, 平成11年度ダム水源地環境技術研究所所報, pp.30-37, 2000.
- 5) 工藤勝弘・岩崎健次：ダム貯水池の水質問題への取り組み, 大ダム, No.187, pp.236-245, 2003.
- 6) 矢島啓・吉川栄：異高同時選択取水によるダム貯水池の水質保全効果に関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp.1135-1140, 2005.
- 7) DYRESM-CAEDYM User Manual, DYRESM Science Manual & Caedym Science Manual : <http://www2.cwr.uwa.edu.au/~ttfadmin/model/dyresmcaedym/index.html>.
- 8) ELCOM User Manual and ELCOM Science Manual : [http://www2.cwr.uwa.edu.au/~ttfadmin/cwrsoft/doc/elcom\\_user/index.html](http://www2.cwr.uwa.edu.au/~ttfadmin/cwrsoft/doc/elcom_user/index.html).
- 9) 矢島啓・吉川栄・稲若孝治：洪水流入の影響を考慮した一次元貯水池流動モデルDYRESMの検討, 水工学論文集, 第49巻, pp.1129-1134, 2005.
- 10) 梅田信・池上迅ら：ダム貯水池における洪水濁水挙動に関する数値解析, 水工学論文集, 第48巻, pp.1363-1368, 2004.
- 11) Thomas Ewing, Jose R. Romero et al : A real-time reservoir decision support system., HYDROINFORMATICS (In 3 Volumes, with CD-Rom), Proceedings of the 6th International Conference, Vol 2, pp. 1123-1131, 2004.

(2005.9.30受付)