ダム貯水池における選択取水設備を用いた 水温成層コントロールに関する研究 CONTROL OF THERMAL STRATIFICATION IN A RESERVOIR USING A SELECTIVE WITHDRAWAL SYSTEM

矢島 啓¹・吉川 栄²・石黒 潤³ Hiroshi YAJIMA, Sakae KIKKAWA and Jun ISHIGURO

¹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)
²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)
³非会員 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 mainly used for the control of released water quality (e.g. temperature, SS, metals) released from a dam reservoir. Capacities of most Japanese dams are smaller than those of foreign countries. Therefore we can also use SWS to control the water quality in a reservoir by controlling thermal stratification. To demonstrate the efficiency of this process, we applied numerical simulations (using the one-dimensional hydrodynamics model called DYRESM, developed by CWR) to various-shaped dam types. The results indicated that the heat budget in a reservoir is mostly affected by the difference of released water temperature corresponding to the SWS operation, and that the effectiveness of the control is dependent on the epilimnion volume and inflow rate.

Key Words : Selective withdrawal system, reservoir, control of thermal stratification, DYRESM.

1. はじめに

近年,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対策として、一般的に選択取水 設備(以下, SWSと略)が備えられている¹⁾. SWSの運 用方法や運用効果については、これまでに様々な調査研 究がなされている. 早明浦ダムでは, 鉛直2次元の水理 水質計算モデルを用い、洪水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²⁾.また、一庫ダムでは、 富栄養化・冷水放流対策を目的としたSWSの弾力的な運 用を行い、SWS運用が水質障害の抑制に効果的であるこ とを実証している³. しかし, SWSの運用は、ダムサイ トごとに異なる固有の複雑な条件に支配される. そのた め、現在のところ体系化された知見がなく、個々の検討 に委ねられ、多くのダムでは一般的に常時表層取水を 行っているのが実状である⁴. また,諸外国においては 貯水池の規模が大きいことが多いため, SWSを用いた同 様の検討事例は見られない.

以上のような背景から,著者らは,鳥取県鳥取市に位置する千代川水系袋川に建設中である殿ダム貯水池を対象に,弾力的なSWSの実運用に向けた検討を実施している⁵.ここでは,殿ダム貯水池の長期・短期の水質保全に及ぼす影響について検討を行い,平水時には常時表層

取水よりも異高同時選択取水(同時に2つ以上の取水 ゲートから取水)を含む弾力的な運用,出水前には常時 表層取水により成層を浅くすることが望ましいとの結論 を得ている.

そこで本研究では、殿ダムにおける平水時から出水時 のSWS運用の切換について試行的な検討を加える. すな わち、出水前におけるSWS運用による水温成層コント ロールの有用性とその効果についての検討を行う. さら に, 殿ダムの条件からダム湖の堤高と総貯水容量を変化 させ、ダム湖形状の違いがSWS運用による水温成層コン トロールに与える影響についての検討も行い、ダム湖形 状の違いによるSWS運用の有用性を評価する.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®により 解析を行う. DYRESM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. なお, 計算に用いるモデルパラ メータは, 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⁷.

2. 対象ダム貯水池

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m³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38.1km²,湛水面積は0.64km²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ゲートレス洪水吐き,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.

3. 水温成層発達の基礎的検討

(1) 検討目的

殿ダム貯水池内の成層構造は、SWSの運用方法に影響 を受け、それに伴い貯水池内の水質にも違いの生じる可 能性が高いことが明らかとなっている⁵⁾.ダムサイトに よっては、貯水池内の水質を長期的な観点からみた場合、 一般的な表層取水による運用を行うより、季節別に取水 位置を変更する運用や異高同時選択取水を行う運用が貯 水池内の水温勾配が緩く、温水層が厚く形成されるため、 取水可能範囲が広くなる.また、底層へのDO供給が比 較的スムーズに行われる等のメリットがある.一方、洪 水時の濁水対策のような短期的な運用においては、成層 化した貯水池の方が濁水放流は比較容易で保全措置の効 果も高くなる傾向を示す.このような長期的・短期的な 運用を考えると、洪水直前にできるだけ多くのSSを放流 できる成層状態に近づけるSWSの運用を検討する必要が ある.

そこで、まず、出水期で貯水池の成層化が盛んな時期 を対象に、SWSの操作が成層発達に与える影響の基礎的 な検討を行う.

(2)計算条件及びSWS運用ケースの設定

殿ダム貯水池における成層期及び出水期は,6月~10 月の期間である.ここでは、貯水池内の成層状態が最も 安定する8月中である,8月1日から14日間を対象とした 計算を行った.

本計算においては、出水前の平常流量における成層発 達の評価を行うため、殿ダムでの平均的な流量で計算を 行う必要がある.そこで、計算に用いる流入量・放流量



は、1989年~2001年の平均流量(3.58m³/s)とし、計算期間 を通じて一定で与えた.また、流入水温については、殿 ダムサイト付近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10年間 (1990年~1999年)の同日同時間を平均した時系列データ を用いた.なお、平均流入水温は約20℃である.

計算に必要となる気象データは、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10年間(1990年~ 1999年)の同日同時間のデータを平均した値を用いた. また、計算の初期水温は、成層が発達するまでに要する 時間を把握するため、その期間の平均流入水温程度とし、 20℃を全層一定で設定した.

SWSの運用方法は、国土交通省中国地方整備局管内で は一般的である常時水面下3mで取水する運用をCase1, 水面下7mで取水する運用をCase2,水面下13mで取水す る運用をCase3とする3ケースを設定する.また、全流入 量と等しい流量をSWSから放流することとした.

(3)SWS運用の違いがダム貯水池の水温成層発達に与える 影響

SWS運用が成層発達に与える影響を評価するため,先 に示した3ケースの水温分布を図-2に,計算開始から7日 目・14日目の正午の水温鉛直分布を図-3に示す.また, 水深増加に伴って減少する短波放射量を同図に併せて示 す.水深方向の短波放射量は,次式で与えられる.

ここで,Z:水深(m), $Q_{sw}:$ 水面での短波放射量

 (W/m^2) , Q(Z): 水深Zにおける短波放射量, η_A : 短波

$$Q(Z) = Q_{sw} e^{-\eta_A Z} \tag{1}$$



図-2 SWS運用の違いによる水温成層の発達状況(赤破線:取水位置)



りη₄≒0.55としている.

まず、図-2に着目し、水温成層発達の特性について検 討する.全計算ケースを通じて計算開始では鉛直方向に 一定であった水温が表層から徐々に温められ、5~10日 程度で成層化し、水温躍層が形成されることが分かる. しかし、その発達状況は、計算ケース毎に違いがある. Case1では、他ケースと比べ躍層界面が不明瞭で計算期 間においてその位置が次第に水深5~6m付近へ漸近し、 赤破線で示した取水位置より数m低くなる. Case2では、 計算開始から5日程度で躍層界面が取水位置である水深 7m付近に形成され、その後は一定の高さを保持してい る. Case3では、Case2と同様に取水位置に躍層界面が形 成されるが、計算開始から10日程度経過した後である.

さらに, 躍層界面付近の成層強度を比較するために 図-3に着目すると, Case2が最も2次躍層界面付近(水温 20℃~22℃程度)の水温勾配が大きく,強い成層状態で あることが分かる.2次躍層界面付近の密度勾配をブル ント-バイサラ振動数(N)により定義される密度成層の安 定度(N²)で比較しても, Case1が0.00105, Case2が0.00325, Case3が0.00106となり, Case2が最も安定した成層状態で あることが分かる.これは,同図に示すQ(Z)に着目する と,日射により表層から貯水池内は温められるが,その 影響が及ぶ水深とSWSによる取水位置が他ケースに比べ て一致するため、より安定した水温躍層を形成しやすい 条件が整っているからであると考えられる. Case3は、 SWSの影響により2次躍層の界面が他ケースに比べ低い 位置に形成されるが、日射の影響が取水位置まで殆ど及 ばないため、水温勾配がCase2より緩くなることが分か る. Case1は、2次躍層の界面が発達する位置が最も高く なるが、比較的水温勾配は緩い. これは、日射の影響が 及ぶ水深が取水位置より深く、成層発達に対するSWSの 影響が小さいためと考えられる. 以上のように、殿ダム 貯水池において平均流量程度で出水前に強い成層状態を 成形するには、Case2が望ましく、より高い位置に躍層 界面を形成させるにはCase1が有効であると考えられる.

(4) 水温成層発達に寄与する熱量の評価

前節の検討により、SWS運用の違いによる成層発達の 特性が概ね示された.ここでは、ダム貯水池における熱 収支の違いについて検討するため、Caselを基準とした Case2及びCase3の貯水池内に蓄積される累積熱量差を 図-4に示す.ここに示す $\Delta Q_{whr} \ge \Delta Q_{pen}$ は次式で与えら れ、全熱量差は $\Delta Q_{whr} \ge \Delta Q_{pen}$ の和となる.

$$\Delta Q_{wdr} = -4.2 \times 10^6 \cdot \Delta T \cdot q \tag{2}$$

$$\Delta Q_{pen} = 3600 \cdot \Delta Q \cdot A \tag{3}$$

ここで、 ΔQ_{wdr} : 放流による熱量差(J)、 ΔT : Case1を 基準とした対象ケースの放流水温差($^{\circ}$ C)、q: 放流量 (m³/h)、 ΔQ_{pen} : 水面が獲得する正味の熱量差(J)、 ΔQ : Case1を基準とした対象ケースの短波・長波・潜熱・顕 熱を合計した放射量差(W/m²)、A: 水表面積(m²)である.

Case2とCase1の比較を示す図-4(a), Case3とCase1の比 較を示す図-4(b)の両図で、放流による熱量差が日射によ るものに比べ大きく、貯水池内の熱収支に及ぼす影響が 大きいことが分かる. 全熱量差に着目すると, 同図(a)で は、14日後で約10TJとなっている. すなわち、Case1に 比べCase2は、貯水池内に約10TJの熱量が多く蓄積され たことになる. 図-3よりCase1とCase2の躍層界面の高さ (温水層厚)は1m程度の差であることから、この熱量差が Case2のより強い成層状態に寄与していると考えられる. 同図(b)では、14日後で約23TJとなっている. Case3は、 Case1に比べ約23TJ, Case2と比べると約13TJの熱量が多 く蓄積されたことになる.しかし, Case3は, Case1と同 程度の成層強度であった.これは、Case3は、取水位置 付近に躍層界面が形成される過程において日射の影響が 小さい低温水をCase1より長く放流したため、より多く の熱量を蓄積できたが、Case1に比べ温水層が7m程度厚 くなったためであると考えられる.

以上のように、ケース間の熱量差により、形成される 成層強度への影響を定量的に評価するためには、今後詳 細な検討が必要となるが、SWSによる貯水池内の熱量の 調整、すなわち、水温成層のコントロールは殿ダムにお いて概ね可能であることが明らかとなった.

4. ダム湖形状を考慮したSWSによる水温成層コ ントロール

(1) 検討目的

前章では,殿ダムにおける平均的な境界条件を用いて 水温成層発達の基礎的検討を述べたが,本章では,実流 況における検討を行う.さらに,ダム湖形状がSWS運用 効果に与える影響を評価するため,流量・気象の境界条 件を同一条件とし,ダム湖形状を変化させた検討を加え る.

(2)計算条件の設定

ここでは、水温成層コントロールの一般的な傾向を把 握するため、渇水年のような異常流況ではなく、平均的 な流況で貯水位がほぼ一定の年を選定した.計算は、平 水年である1995年(最大時間流量:約55m³/s【7/218:00】) と洪水年である1997年(約120m³/s【7/1211:00】)を対象と した.なお、1997年は流入量が50m³/sを超える出水が2 回あったが、流入量が大きい早い時期の方を検討対象と した.

計算の初期水温は、各対象年の1月1日0:00の流入水温 を全層一定に与え、初期水位は常時満水位に設定した. また、SWSの機能が最大限に発揮できるよう、SWSの 最大取水量である約7.4m³/s以下の放流量を全量SWSより 取水し、余剰水を洪水吐きから放流することとした.

(3)計算ケースの設定

殿ダムにおけるSWSの運用ケースとして、一般的な SWSの運用事例である常時水面下3mで取水するケース をCase I とし、前章で述べた殿ダムで最も成層化しやす い常時水面下7m取水をCase II とした.また、常時水面 下7m取水(Case II)においてSWSの洪水時対策運用として、 洪水7日前の正午から水面下3m運用を行うケースをCase III、さらに、洪水吐きが中層付近に設置されたダムを想 定した検討を加え、洪水時対策運用が水面下15mのケー スをCaseIVとした.ここでは、流入量が50m³s以上とな る時を洪水時と定義した.SWS運用ケースの模式図を 図-5に示す.

次に、ダム湖形状を考慮した検討に用いる湖盆データ は、殿ダムのH-Vを基に変化率を掛けて作成することと した.ただし、ここでの変化率は、殿ダムを全国87ヶ所 の国土交通省直轄ダムと比較し⁸⁾⁹、検討するダム湖形状



の規模を決定することとした.殿ダムと国土交通省直轄 ダムの貯水池の堤高と総貯水容量の関係を図-6に示す.

そこで、検討するダム湖形状として、殿ダムの堤高 75mと同程度で総貯水容量の規模が異なるA(総貯水容 量:6200千m³)とB(総貯水容量:124000千m³)、及び殿ダ ムの総貯水容量12400千m³と同程度で堤高の規模が異な るC(堤高:50m)とD(堤高:120m)を設定した.ただし、 Cについてはまだ堤高が低い直轄ダムも存在しているが、 水深を確保しSWSの弾力的な洪水時対策運用を行えるよ う堤高の最小値を50mとした.表-1に計算に用いるダム 湖形状の概要と表-2に計算ケースの一覧を示す.

(4) ダム湖形状がSWSによる水温成層コントロールに与える影響

ダム湖形状がSWSによる水温成層コントロールに与え る影響を調べるため、計算対象2年×ダム湖形状5ケース ×SWS運用4ケース=全40ケースについて計算を行った. 得られた結果のうち、各ケースにおける洪水1時間前の 水温鉛直分布を図-7に示す.

まず,殿ダム(回転率:15回/年)において検討する. SWSの通年運用による影響をみるために,Case I とCase IIに着目すると,各対象年ともCase I の水温躍層が高い 位置に形成されている.次に,洪水対策運用による影響 をみるためにCase II とCase IIIを比較すると,躍層位置の





表-1 計算に用いるダム湖形状概要

ダム湖形状		堤高 (m)	総貯水容量 (千 m ³)	回転率 (回/年)
殿ダム		75	12400	15
殿ダムと同じ し	А	75	6200 【0.5 倍】	30 【2.0 倍】
	В	75	124000 【10.0 倍】	1.5 【0.1 倍】
殿ダムと同じ	С	50 【約 0.7 倍】	12400	15
	D	120 【1.6 倍】	12400	15

※【】は殿ダムと比較

表−2 計算ケース

ダム湖形状		通年運用	対策運用	ケース名			
殿ダム	H	水面下3m	なし	Case I			
	1	水面下7m	なし	Case II			
			水面下 3m	CaseIII			
			水面下15m	CaseIV			
А	^H	水面下3m	なし	Case I			
	1	水面下7m	なし	Case II			
	F 7/1		水面下 3m	CaseIII			
	v v		水面下15m	CaseIV			
В		水面下3m	なし	Case I			
		水面下7m	なし	Case II			
			水面下 3m	CaseIII			
	v		水面下15m	CaseIV			
С	H I	水面下3m	なし	Case I			
		水面下7m	なし	Case II			
			水面下 3m	CaseIII			
	v v		水面下15m	CaseIV			
D		水面下3m	なし	Case I			
		水面下7m	なし	Case II			
	- v		水面下 3m	CaseIII			
			水面下15m	CaseIV			

変化は小さいことが分かる.一方, Case II とCaseIVを比較すると, CaseIVの水温躍層は, Case II より5m程度低下し, 取水位置付近で形成されていることが分かる.これにより, Case III とCaseIVの洪水対策運用は同期間であるが, Case II からの水温躍層の変位(SWS運用による影響)に違いが生じることが示唆される. CaseIII は取水位置を7mから3mに切換えるが,その取水位置の間における水温差がCaseIVと比較して小さいため,水温成層に与える影響が小さく, 成層構造が殆ど変化しないと考えられる.一方, CaseIVは, 水温躍層より深い位置から取水するため, 貯水池内の冷水が減少し, それに伴い躍層位置が取水位置付近まで下がると考えられる.

次に、ダム湖形状Aについて検討する.各対象年と も運用ケースによる水温分布の違いが小さい. これは, ダム湖形状Aの総貯水容量は殿ダムの0.5倍(回転率:30 回/年)であるため、流入水が貫入してくる温水層の容量 も小さくなる. このため, 温水層の水と流入水の入れ替 わりや河川流入による鉛直混合が起こり易くなるため、 運用ケースに関係なく流入水程度の水温(約18℃)に漸近 し、各ケース間の水温分布の違いは小さくなったと考え られる. また, 1997年は1995年と比較すると, 運用ケー スの躍層位置に若干の違いが生じている. 各対象年の計 算開始から洪水1時間前までの平均流入量と平均短波放 射量は、1995年は5.37m³/s、50.5W/m²であり、1997年は 4.55m³/s, 53.0W/m²である.これより, 1997年は流入量 が少なく短波放射量が多い. したがって, 1997年は1995 年より強固な水温躍層が形成されやすい環境であるため, 洪水1時間前の躍層位置に違いが生じたと考えられる.

また、ダム湖形状Bについては、総貯水容量は殿ダム と比較すると10倍(回転率:1.5回/年)と大きく、温水層の 容量に対する流入量の割合は小さくなる.そのため、流 入水による温水層の入れ替わりや鉛直混合は生じにくく、 気象要因が支配的な水温成層が形成される.したがって、 Case II とCase III 及びCase IVを比較してみても、躍層位置 の変化は小さい.

さらに、ダム湖形状CとDに着目すると、これらは殿



図-7 各ケースにおける洪水1時間前の水温鉛直分布

ダムと同様な回転率である.そのため、ダム湖形状Cで は殿ダムと同様の現象が生じており、運用ケースによる 水温躍層の違いは殿ダムに比べ明確に現れている.これ は、ダム湖形状Cは殿ダムの形状と比較すると、総貯水 容量は同じであるが水深は浅いため、温水層の容量は大 きい.したがって、流入水との入れ替わりや河川流入に よる鉛直混合が生じにくいため、躍層位置に明確な違い が生じたと考えられる.また、ダム湖形状Dでは各ケー ス間の差はみられなかった.これは、ダム湖形状Dの温 水層の容量は殿ダムと比較すると小さい.したがって、 温水層の容量が殿ダムよりも小さいダム湖形状Aでみら れた現象が、ダム湖形状Dでも同様に生じていると考え られる.

(5)SWS運用の違いがダム貯水池の熱収支に与える影響

ここでは貯水池の成層構造を支配する熱収支に着目し、 検討する.SWS運用の違いがダム貯水池の熱収支に与え る影響を評価するために、まず、前章3と同様の方法で、 各対象年の1月1日0:00から洪水1時間前までの常時7m取 水のCaseIIを基準とした貯水池内に蓄積される累積熱量 差を算出し、さらに、各ダム湖形状の総貯水容量で除し た値を図-8に示す.図-8より、97年は洪水年であり、流 量要因が支配的となる影響のため、CaseIIIの殿ダムの絶 対値は、同年のダム湖形状Bのそれより小さくなるが、 これを除けば、殿ダムとダム湖形状Cが他の形状に比べ SWS運用による熱収支の影響を強く受けることが分かる. したがって、SWS運用の違いによる水温成層コントロー ルは、ダム湖形状A、B、Dのように貯水池の成層構造が 気象要因または流量要因のどちらか一方に支配されるよ うな形状においては、効果が小さいと言える.

5. おわりに

ダム貯水池におけるSWSによる水温成層コントロール について,現在建設中の殿ダムにおいて成層発達の基礎 的検討,及び殿ダムと殿ダムのH-Vを基に変化させたダ ム湖形状を対象に,水温鉛直分布と熱収支からの2通り の検討を行った.ここで,本研究で得られた主要な結論 をまとめる.

1) 水温成層発達の基礎的検討から,SWS運用の違いに よる貯水池内の熱収支は、放流による影響が水面での熱 収支による影響に比べ大きく,SWSによる貯水池内の熱 量の調整,すなわち、水温成層のコントロールは殿ダム において概ね可能であることが明らかとなった.

2) 殿ダムと殿ダムのH-Vを基に変化させたダム湖形状 を対象とした検討から,温水層の容量と流入量の割合に よってSWSによる水温成層コントロール効果の優劣が決 まってくることが明らかとなった.さらに,水温成層コ ントロールについては,躍層位置を上げるより,下げる 方が容易であることが分かった.



図-8 Case II を基準とした各貯水池内に蓄積する累 積熱量差と総貯水容量の割合

以上、今回の検討ケースにおいては、殿ダムのように 洪水吐きが常時満水位に設置されるダムでは、洪水前に 躍層位置を上げ、洪水中に洪水吐きからの高濁度水をよ り効率的に放流することを目指すのは難しいが、洪水吐 きが中層に設置してあるようなダムでは、SWSの洪水時 対策運用で躍層位置を洪水吐き付近に下げるようなコン トロールを行えば、より多くのSSを放流する可能性があ る.また、各貯水池においてSWSの運用効果を判断する には、温水層の容量を簡易的に表すことのできる水表面 積と平均流量の割合により示せる可能性がある.

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「殿ダム貯水地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る.

参考文献

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.

 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) 橋場一富ら:選択取水設備の運用について,平成16年度近 畿地方整備局管内技術研究発表会論文集,環-25,2004.

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) 矢島啓・吉川栄・石黒潤: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,水工学論文集, 第50巻, 2006.

6) DYRESM-CAEDYM User Manual , DYRESM Science Manual : http://www2.cwr.uwa.edu.au/~ttfadmin /model/ dyresmcaedym/ index.html.

7) 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.

8) ダム諸量データベース:http://www2.river.go.jp/dam

9) ダム便覧2006:http://www.soc.nii.ac.jp/jdf/Dambinran/ TopIndex.htm

(2006.9.30受付)