

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

STUDY ON THE SELECTIVE WITHDRAWAL SYSTEM WITH SIMULTANEOUS OPERATION OF MULTI GATES IN A RESERVOIR

矢島 啓¹・吉川 栄²
Hiroshi YAJIMA and Sakae KIKKAWA

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)

Nowadays, a selective withdrawal system (SWS) in a dam is essential for the conservation of water quality in the reservoir. However, we cannot say that the operation of SWS has been fully examined in Japan. On the other hand, in the United States, there are many methods of operation. For example, some dams use three or more gate levels, operated simultaneously, to blend the desired water quality. To make clear the efficiency of this operation, we conducted numerical simulations using the one-dimensional water quality simulation model, DYRESM-CAEDYM, developed by CWR. The simulated results indicated that this operation has a greater potential for controlling water quality in the reservoir, especially when it is combined with the surface and mid-layer intake operation.

Key Words : *Selective withdrawal system, multi gates, reservoir, water quality, DYRESM-CAEDYM.*

1. はじめに

ダム貯水池における水質問題として、濁水長期化現象、冷水放流問題、富栄養化などが挙げられる。これらの水質対策として今日一般的にダムに備えられている選択取水設備（以下、SWSと略）は、1900年代初めに、貯水池低層部の水質悪化問題に対応するため、ダム底部の放水バルブからのフラッシュという形で始まり、現在の形に発展していった¹⁾。当初SWSは、理論よりも実務が先行しているが、1960年代になり、選択取水時の取水層の厚さや取水量に関する理論的研究が始まった¹⁾。その後、数値計算モデルの開発・発展に伴い、鉛直1次元モデルを用いてダム貯水池の様々な水深から選択取水を行ったときの水質への影響を評価する研究²⁾や、水理解析シミュレーションモデルとLPやDPなどの最適化手法との組み合わせによりSWSの運用計画を検討する研究³⁾⁴⁾も行われた。さらに、数値計算モデルが水温だけでなく、濁度やDOなどの水質も計算対象とするようになると、2次元の水理水質計算モデルを用い、SWSがダム湖の水温躍層の低下効果や濁水長期化現象の制御機効果を持つことも明らかにされている⁵⁾。このような研究面での発展を受け、高知県にある早明浦ダム（昭和50年3月完成）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、既往の操作に関する課題を踏まえ、2次元の水理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⁶⁾。

日本におけるSWSは、1970年代後半の施工以来、多くのダムで設置されている⁷⁾。この運用状況を(財)ダム水源地環境整備センターが全国21のダムを対象に行った調査では、常時表層取水が16ダム、底部取水が1ダム、出水や期別による弾力的運用が4ダムであった⁸⁾。このように表層取水が多いのは、冷水放流を防ぐためであるが、その運用面においては、十分検討されているとはいえない。今後は、早明浦ダムのような詳細な検討が必要となると考えられる。このような日本の状況に対し、米国では、1970年には全米のダムを対象にしたSWSのアンケート調査を行い、その規模等についての一覧表を作成している⁹⁾。その後、データの更新と新たな調査項目を含めて全米40のダムを対象にアンケート調査を実施している¹⁰⁾。これによると、SWSの設置理由としては、水温対策が32ダム、DO対策が17ダム、濁度対策が5ダムとなっている。日本ではダム貯水池内のDOがSWSで議論されることが少ないのとは異なっている。また、この調査で明らかにされていることは、調査対象中の8ダムにおいて、2つ以上のゲートを同時に操作し、それらの水を混合させ希望の水質にしたものを放流する運用を行っている事例がみられた。このような状況を鑑みると、日本におけるSWSの運用は、ダムの歴史が長い米国と比較してまだ検討の余地があると言える。

そこで本研究では、現在、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を運用した取水を行いそれらを混合して放流する異高同時SWSを検討するため、

西オーストラリア大学Centre for Water Research (CWR)で開発された1次元貯水池流動解析モデルDYRESM (DYnamic REservoir Simulation Model) と水質予測モデルCAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model) をカップリングしたDYRESM-CAEDYM¹¹⁾を利用し、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と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。ただし、道奥らが指摘しているように、オリジナルのDYRESMコードでは考慮されていない、洪水時の流入密度流による鉛直混合過程を組み込み、日本のように先鋭なハイドログラフを持つ流入河川の影響を考慮できる改良型モデルを使用した¹²⁾。また、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。

2. 本研究で使用するモデルの検証

(1) 検証ダムと計算対象年

モデルの検証のため、江の川流域の広島県高田郡八千代町に位置し、堤高50m・堤頂長300m・総貯水容量4700万m³の規模を有する重力コンクリート式の国土交通省直轄の多目的ダムである土師ダムのデータを使用する。土師ダムの平均的な年間回転率は約9.8であり、検証計算は直近10年のうち、各年で変動する気象条件や流況に対する再現性を検討するため、「洪水年」と「渇水年」を計算対象年として選定した。選定された対象年は、渇水年として1994年、洪水年として1997年(300m³/s程度の中規模洪水が4回)、1999年(1,000m³/s程度の大規模洪水がある)の出水形態の異なる3年である。平均貯水容量に対する洪水時の日流入量は、1997年の中規模洪水で60%以上、1999年の大規模洪水で160%程度となっている。

(2) 検証計算結果

検証計算は、土師ダム管理所が貯水池の湖心で行っている定期観測の1月における観測値を年初めの計算初期値として行った。パラメータの同定は、水温→DO→栄養塩類→植物プランクトン(動物プランクトンは考慮していない)の順番を基本に、各パラメータ間のフィードバックを考慮しながら行った。検証計算で得られた水温・DO・Chl.aの表層と最下層の結果を図-1に示す。図中、ダム湖心で得られた表層(水深0.1m)と最下層(湖底上1m)における観測結果も示している。

図-1(a), (d), (g)に示される水温の検証結果は、洪水年、渇水年にかかわらず再現精度の高いことが分かる。また、図-1(b), (e), (h)に示すDOの検証結果は、4月以降、表層と最下層の水温差が大きくなり成層が発達するのに伴い、下層が貧酸素化していく様子が再現できている。次に、図-1(c), (f), (i)に示すChl.aの検証結果をみると、Chl.a濃度は、植物プランクトンに含まれる合計量であり、水温や

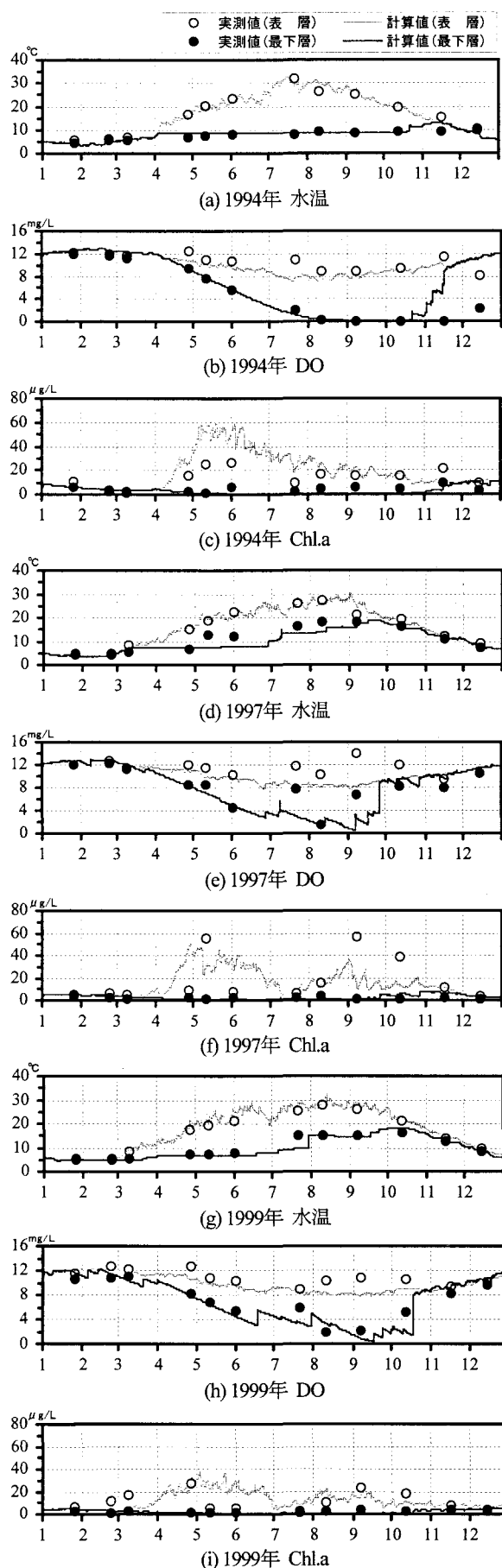


図-1 各年の水温・DO・Chl.aの検証結果

DOに比べて観測で得られた値の代表性に問題もあるが、その基本的な変化傾向や濃度レベルは十分再現できていることは明らかである。特に、検証計算における植物プランクトンとして、珪藻類・緑藻類・藍藻類の3種類を考慮しているが、各年とも、春先4月頃からは珪藻類が、少し送れて緑藻類が、最後に藍藻類が成長する傾向があり、この特徴は、1997年に現地で土師ダム管理所が行ったプランクトン調査による結果とも一致していた。

このように、本研究で用いるモデルは1次元モデルであるが、長期的なダム湖の水質予測には、十分な精度で用いることができることが明らかとなった。

3. SWS運用の違いが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

SWS運用の違いがダム貯水池の水環境に与える影響を調べるため、まず、SWS運用の検討ケースの設定を行う。

土師ダムでは通常水深数mのところから表層取水を行っている。そこで、Case 1として、水深3mの表層取水を行うケースを基本とし、Case 2として水深13mの中層取水を行うケース、Case 3として水深3mと8mの異高同時選択取水を、Case 4として水深3mと13mの異高同時選択取水を行うケースの計4パターンでのSWSの運用について検討を行う。但し、参考として行った実際の運用ケースによる結果は、Case 1とほぼ同様のものとなっていた。

計算に使用する流入河川流量やSWSを含むすべての取水・放流設備における流量は、実際の観測データを用いた。土師ダムの取水・放流設備は、SWSの他、発電用取水（取水レベル13.5m）、オリフィスゲート（放流レベル12.64m）を保有している。オリフィスからの放流は洪水時であるが、平時時の選択取水量は3m³/s程度、発電用取水量は7m³/s程度である。また、異高同時選択取水時の計算においては、観測で得られている選択取水量を等分して2箇所の取水レベルから取水を行なった。

(2) SWS運用の違いが水温成層に与える影響

計算対象3年×各4ケース＝全12ケースの計算を行った結果の中で、水温とDOの季節変化を図-2に示す。

まず、図-2の水温分布に着目する。従来通りの1つの高さから取水するCase 1とCase 2を比較すると、各年とも取水高さがより深いCase 2の方が水温躍層も低くなる、あるいは成層が破壊されていることが分かる。異高同時選択取水を行ったCase 3とCase 4についてみると、より深いところで取水するCase 4の方が水温躍層も低い傾向があることが分かる。この成層状況の特徴を詳しくみるために、鉛直方向の最大水温差と最下層のDO変化を図-3に示す。図-3(a), (c), (e)の最大水温差の図より、各年とも6月頃までの受熱期においては、SWS運用の違いによる大きな差は無く、放熱期に入ってからSWSの運用による差が生じていることが分かる。

そこで放熱期以降に注目すると、図-3(a)に示す1994年

は、Case 1, 3, 4, 2と平均的な取水水深が深くなるに従い、8月中旬以降の最大水温差が小さくなり、成層が弱くなっている。また、同図(c)の1997年は、放熱期に入り、Case 2の最大水温差はCase 1よりも大きくなっている。これは、この年6月下旬の中規模出水時には、両ケースの水面と最下層における水温はそれほど変わらない値を示しているが、Case 1の水温躍層がCase 2より浅く、全体的に緩やかな水温勾配を示すのに対し、Case 2では10℃以上のはっきりとした水温躍層を持っているため、中層付近に流入した中規模出水が、Case 1では中層以深の弱い水温成層を破壊しダム底部まで水温を上昇させるのに対し、Case 2では10℃以上の水温差のある温度躍層を破壊することができず最下層部に冷たい水温が残ったためである。また、異高同時選択取水を行ったCase 3, 4では、Case 1, 2の中間的な挙動を示すのではなく、Case 1より最大水温差が小さく弱い水温成層構造となっている。さらに、同図(e)の1999年は、6月末の大規模出水のとき、Case 1以外では、水温成層が破壊されダム底までほぼ一樣な水温となったため、それ以降のSWS運用の違いによる最大水温差に大きな差がなく、Case 1のみが成層が破壊されなかったため、大きな水温差が9月下旬まで継続している。

このように、基本的には、より深い層から取水することは躍層位置を下げる効果を持つため、洪水流入時や強風時に最下層まで混合しやすい傾向を持つ。しかしながら、時には、より深い層での取水は、下層において大きな水温躍層を形成し、水温躍層が破壊されにくくなることがある。SWS運用においては、取水位置を下げ躍層位置を下げるとともに、水温勾配が緩やかな水温成層構造を形成することも重要である。このためには、異高同時SWSのように、複数の高さからの取水が有効である。

(3) SWS運用の違いがダム貯水池の水質に与える影響

貯水池における長期濁水化に代表されるSSについての問題は、水温成層の状況とともに洪水時のSWSの操作が重要であり、本研究で対象としている単純操作における結果から考察を行うことはできない。したがって、ここで扱う水質問題として、富栄養化に関するChl.aと、貧酸素化に関するDOを対象として考察を行う。

ダム貯水池のChl.a濃度は表層で高くなる。そこで、今回の検討ケースにおける表層での日平均のChl.a濃度が25 μg/L以上となる日数を表-1に示す。これから分かるように、SWSの運用の違いは、植物プランクトンの発生にあまり影響を与えていない。これは、土師ダムのように富栄養化した湖沼では、表層における植物プランクトンの成長は表層の水温に左右されることが多く、この表層の水温は、主に、日々の日射などの気象条件に作用され、SWSの運用がほとんど影響を与えないためである。次にDOについて考察する。

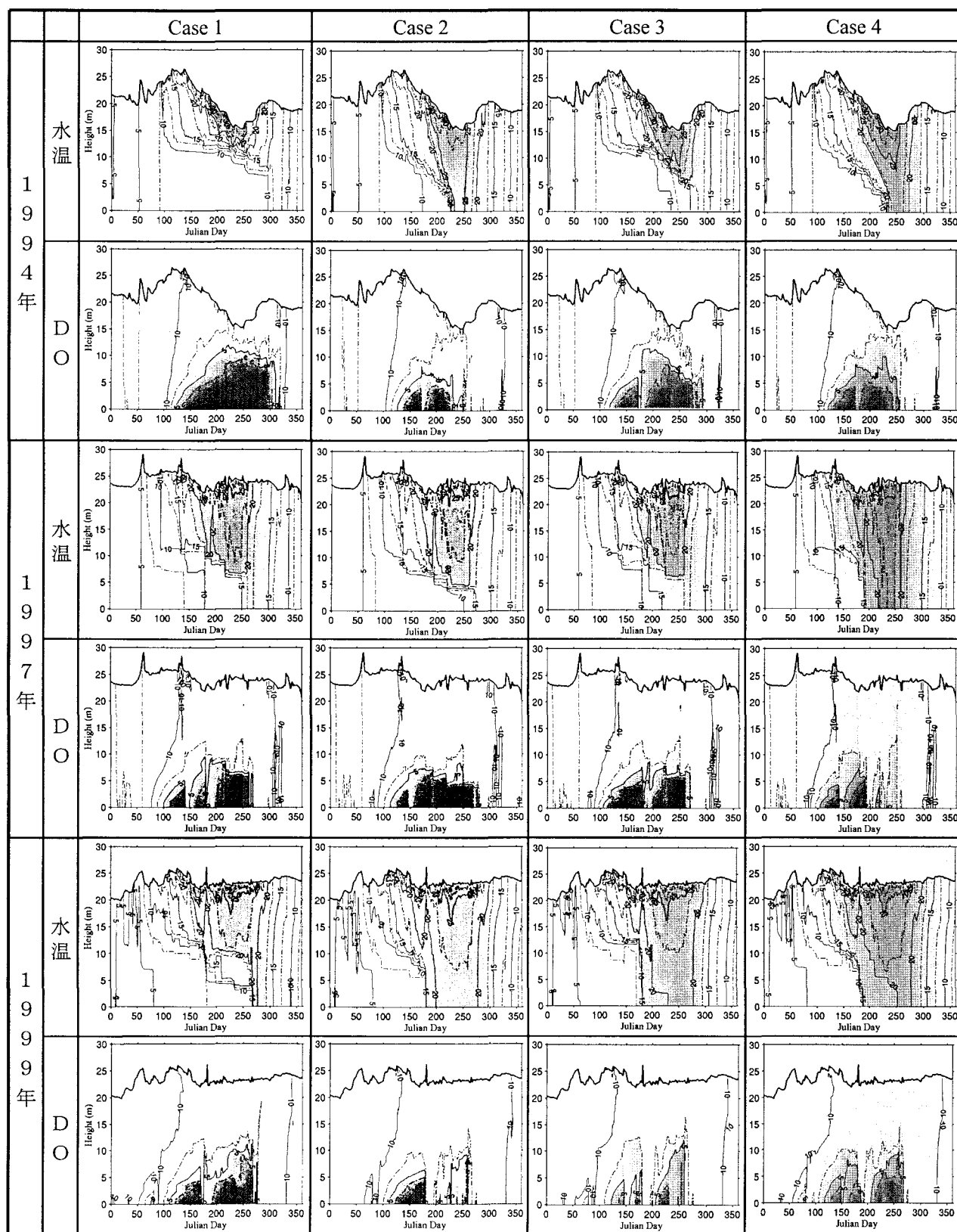


図-2 SWS運用の違いによる水温・DOの季節変化

まず、図-2に示すDOの季節変化をみる。DOの分布は、水温構造に影響されていることが分かる。すなわち、水温成層が形成される4月から10月は、深水層で貧酸素状態となり、洪水の流入に伴って水温成層が破壊されDOは一旦回復しても、その後再び貧酸素状態となっている。

放熱期である11月から3月までは、水温の鉛直分布はほぼ一定であり、貧酸素状態となることはない。

ここで、最下層DOの変化を示した図-3(b), (d), (e)より、各年とも、最大水温差が大きくなるSWS運用が、最下層DOも低くなっていることが分かる。各年毎にみると、

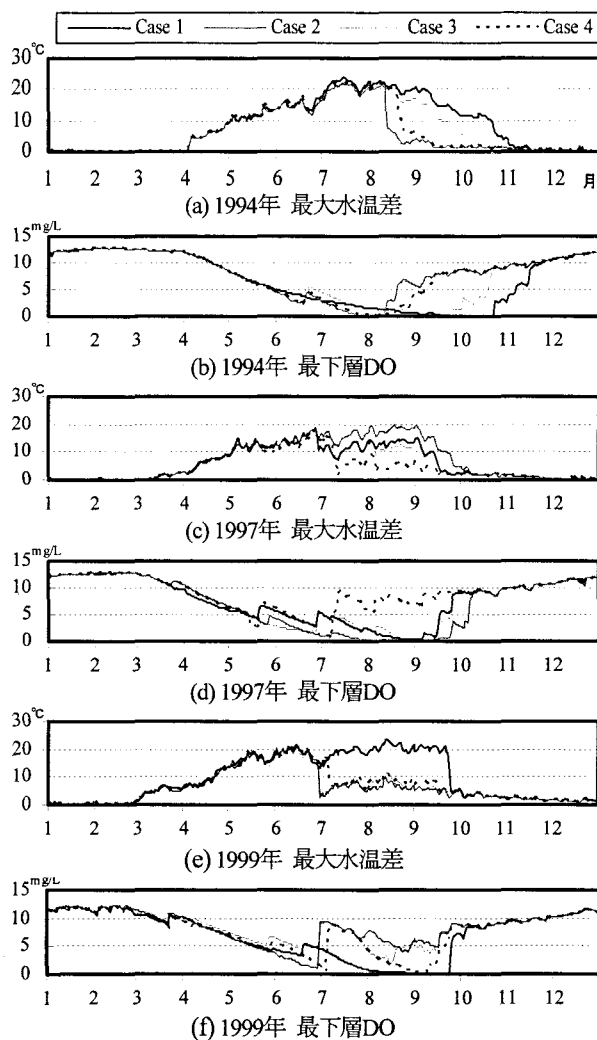


図-3 各ケースにおける最大水温差と最下層DOの変化

表-1 表層Chl.a $\geq 25 \mu\text{g/L}$ となる日数

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
1994年	95	85	84	82
1997年	70	65	61	69
1999年	41	36	49	38
計	206	186	194	189

表-2 最下層DO $\leq 2\text{mg/L}$ となる日数

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
1994年	92	35	67	49
1997年	45	99	52	10
1999年	68	12	2	41
計	205	146	121	100

渇水年である1994年は、水温成層についての考察と同様に、取水高さが低くなるCase 1, 3, 4, 2の順に最下層DOの状態は悪くなっている。また、1997年では、Case 4が一番DOの状態が良い。これは、最大水温差でみたように、Case 4のみが7月中旬の中規模出水時に水温成層が破壊されるため、DOもこの時に回復していることによる。1999年では、6月下旬の大出水によりCase 1以外は成層

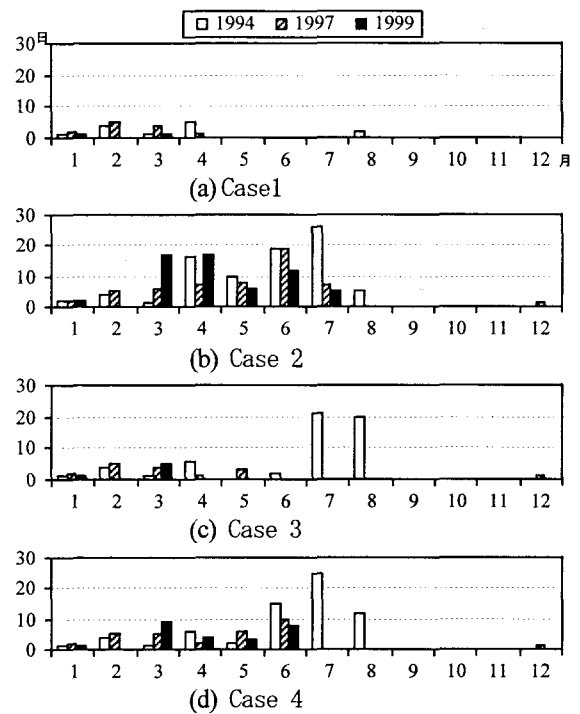


図-4 SWSが冷水放流する月別日数

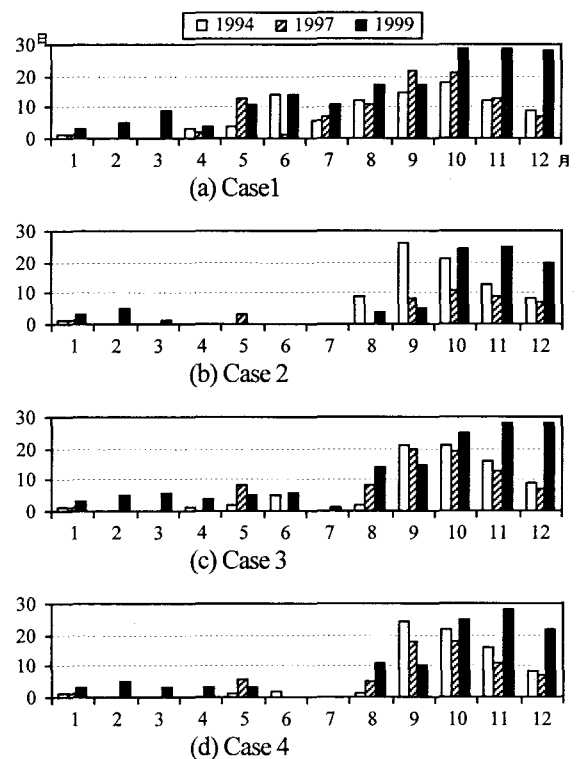


図-5 SWSが温水放流する月別日数

が破壊し、DOも一度回復しているが、その後、Case 2以外は再び貧酸素化している。

ここで、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 2mg/L を下回る日数を調べた結果を表-2に示す。これによると、Case 3あるいはCase 4のような同時選択取水は、Case 1の表層取水より、深水層の貧酸素化を発生させる可能性は少ない。

4. SWS運用の違いがダムからの放流水に与える影響の検討

SWSが放流水に与える影響を考える場合、通常DOが放流水で問題となることは少なく、Chl.aも表層取水を行ったときにのみ問題となる。そこで、ここでは水温を対象に検討を行う。また、水温については、冷水放流が問題となることが多いが、河川の生態系を考えると、本来流れている河川水の水温より高くなる温水放流も好ましくない。そこで、水温については、日平均した値をもとに、ダム貯水池流入地点での河川水温を基準にして、選択取水からの放流水が2℃以上低くあるいは高くなる日数を月別にカウントしたものを図-4、図-5に示す。

図-4の冷水放流という観点からは、表層取水のCase 1では、冷水問題が発生することは少なく、Case 2のように中層取水を行う運用が一番問題となることが分かる。異高同時選択取水を行うケースについては、1994年のような渇水年では、水位の低下した6～8月の夏季に強い水温成層が形成され、水深13mの取水が底層からの取水となっており、その影響で冷水が放流されることもある。しかし、このような特異な状況でなければ、異高同時選択取水からの冷水放流はそれほど問題とならない。一方、図-5の温水放流という観点からは、どのケースをみても、9月～12月の放熱期に多く発生している。また、表層取水のCase 1は年間100日以上温水放流を行っており、河川の生態系に与える影響が大きい可能性がある。

5. おわりに

ダム貯水池における水質管理対策として、SWSの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ケースを含めた選択取水方式の検討を行った。ここで、本研究で得られた主要な結論をまとめる。

- 1) CWRで開発された1次元の貯水池流動水質予測モデルDYRESM-CAEDYMに、鉛直混合過程を組み込むことにより、日本のダム貯水池における長期の水質予測を十分な精度で行うことができることを明らかにした。
- 2) SWSの運用による貯水池内の水環境を考えた場合、深水層の貧酸素化を防ぐためには、できるだけ強固な成層を形成しないようにすることが重要である。このため、普段から低い層からの取水を含む選択取水を行い水温躍層を下げておくとともに、洪水流入や強風時に成層が破壊されやすくなるため、異高同時取水のように複数の高さから取水を行い、貯水池内の水温勾配を緩やかにしておくことが必要である。また、SWSの運用は、貯水池表層でのプランクトンの増殖にあまり影響を与えない。
- 3) SWSからの放流水の水温を調べた結果、表層選択取水の場合、冷水放流はほとんど問題とならないが、長期にわたり温水放流している危険性があり、河川の生態系にとっては問題である。一方、異高同時選択取水を行っ

た場合は、9月以降の放熱期における温水放流は避けにくい。夏期のかんがい期においては、渇水年のように浅い水深で強固な水温成層が形成され、貯水位も低い場合はさらに検討を要するが、一般的な流況の年では、冷水・温水放流のどちらも避けられる可能性がある。

以上の成果を踏まえ、今後は、高度な水質予測計算モデルを用い、季節や貯水池の成層状況などを考慮した多様なSWS運用ルールを検討を行う必要がある。また、同時に、既存の運用ルールについても、その情報収集と分析を行うべきである。

謝辞：ここで使用した土師ダムに関するデータは、国土交通省中国地方整備局土師ダム管理所から提供して頂いた。また、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委託を受けた、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

- 1) Jorg Imberger : Selective withdrawal (a review), the 2nd International Symposium on Stratified Flows, Vol.1, pp.381-340, 1980.
- 2) Jacques Gaillard : Multilevel withdrawal and water quality, J. Environmental Eng., Vol.110, No.1, pp.123-130, 1984.
- 3) 高埴琢馬・池淵周一・小尻利治：濁質水を考慮したダム制御に関する一考察，京都大学防災研究所年報，第22号B-2, pp.167-178, 1979.
- 4) Darrell G. Fontane, Hohn W. Labradie and Bruce Loftis : Optimal control of reservoir discharge quality through selective withdrawal, Water Resour. Res., Vol.17, No.6, pp.1594-1604, 1981.
- 5) 堀田哲夫・陳飛勇・山下芳浩・東海林光：成層型ダム湖における濁水特性と選択取水効果に関する事例的研究，水工学論文集，第46巻，pp.1079-1084, 2002.
- 6) 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.
- 7) 川崎秀明：ダム技術の動向と課題，ダム日本，No.700, pp.21-33, 2003.
- 8) 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年度ダム水源環境技術研究所所報，pp.30-37, 2000.
- 9) The Task Committee on Outlet Works, Committee on Hydraulic Structures : Register of selective withdrawal works in unites states, J.Hydraulics division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.96, No.HY9, pp.1841-11872, 1970.
- 10) Tracy B.Vermeyen, Connie DeMoyer, Wayne Delzer and Dennis Kubly (Bureau of Reclamation, Co) : A survey of selective withdrawal systems (Final rept.), 2003.
- 11) Jason Antenucci : User Guide for the coupled CWR dynamic reservoir simulation model and computational aquatic ecosystems dynamic model DYRESM-CAEDYM, 2003.
- 12) 道奥康治・松尾昌和・香川健一・斉藤敦：貯水池の富栄養化にともなう熱塩成層のモデル化，水工学論文集，第47巻，pp.1237-1242, 2003.

(2004.9.30 受付)