

ダム貯水池における水環境保全の取り組み

天 野 邦 彦

水環境学会誌 第35巻 第3号 (2012)

pp. 70～74 別刷

社団法人 日本水環境学会

ダム貯水池における水環境保全の取り組み

わが国の主要河川の上流域にはダム貯水池が多く存在しています。国土交通省によると、わが国でこれまでに建設されたダムの貯水量を合計すると、発電や治水のために使われる容量を全て含めて約300億 m^3 になるとのことです。これは琵琶湖の貯水量を超える量であり、ダム貯水池は、水環境として重要な構成要素と言えます。しかしながら、ダム貯水池では、アオコ・カビ臭・淡水赤潮の発生、濁水長期化、冷水等の水質問題が起り、下流の利水者や環境に大きな影響を与えています。このため、ダム貯水池の水環境に関する調査・研究や水質改善事業が鋭意実施されています。本特集では、ダム貯水池について、これまでに解明されている知見や水質改善に向けた取り組みをご紹介します。

(担当編集企画委員 福岡女子大学 柳橋 泰生)

ダム貯水池における水環境保全の取り組み*

天 野 邦 彦

1. はじめに

ダム貯水池は、人為的に建造されるものであるため、その水環境保全の方針は、ダム貯水池が建造される以前の環境からの変化を最小限に抑える（建設による環境影響を最小化する）ことを目指すのが基本である。これに加えて、新たに形成される貯水池に関しては、周辺環境と調和するとともに、利用面での問題を回避・低減することを目指す必要がある。

河川をせき止めて建設されたダム貯水池は、河川水を貯留することで流下にかかる時間を遅らせる施設であると見ることができる。ダムがなければダム地点を速やかに流下したであろう河川水は、ダムが建設されたことで

貯水池に滞留する。このためにダム貯水池からの放流水は、貯水池流入後の経過時間相当の時間遅れをもって河川を流下していると考えられる上に、その間に周囲水との混合、生化学的反応や懸濁物の沈降などによる水質変化が生じるため、放流水質が現時点での流入水質や、ダムがなかった場合の放流地点における水質と異なっていることも不思議ではない。

このような理由から河川水質の不連続性として顕在化する流入水質と放流水質との相違を緩和することは、ダム貯水池建造による環境影響の緩和が必要であるという基本的な観点から見て、ダム貯水池における水環境保全の対象として第一の課題と考えられる。

また、新たに形成されるダム貯水池自体の環境保全について考える際には、自然湖沼における水環境保全の手法の基本的な考え方をほぼ踏襲することが可能である。これは、河川水が長時間滞留するという観点からダム貯水池に類似の環境として自然湖沼をあげることができ、湖沼での水環境保全が参考にできるためである。実際にダム貯水池自体の水環境問題は、富栄養化にともなう問題など、湖沼における水環境問題と類似のものが多い。

このように見ると、ダム貯水池における水環境保全の取り組みを、ダム貯水池の存在による河川水質の不連続性の緩和と貯水池自体の環境保全という大きく分けて2つの視点から整理することができそうである。とくに前者に属するものは、ダム貯水池固有のものと考えられる。もちろん両者は相互に関連しているため、分離すること



Kunihiko Amano

昭和60年 京都大学工学部卒業
62年 京都大学大学院工学研究科修了
同年 建設省土木研究所研究員
平成7年 国立環境研究所主任研究員
10年 建設省土木研究所主任研究員
15年 (独)土木研究所上席研究員
21年 国土交通省国土技術政策総合研究所環境研究部河川環境研究室室長
博士(工学)

* Efforts for Water Environment Conservation in Dam Reservoirs

はできないが、本稿ではダム貯水池固有の不連続性緩和に関する取り組みを中心に、上記の2つの視点に分けて述べることにする。とくに不連続性については、このような状態が生じる機構の概要を述べるとともに、対策の取り組みについて述べる。

なお、ダムによる流況の改変も水環境に係わる重要な要素であるが、本稿では紙面の都合上、水質に係わる現象についてのみ議論する。

2. 不連続性の緩和

2.1 水温変化

貯水池における水温変化は、下流における灌漑用水の水温低下が稲作への障害となることから、従来、冷水放流として問題視されていたが、表面取水や選択取水施設(図1)を設置することで、極端な冷水問題は防ぐことが可能であることが多い。このため、水温変化による問題は、表面取水や選択取水施設の導入により解決可能と考えがちであるが、最近では冷水放流のみでなく、貯水池の存在にともなう流入水温と放流水温との相違が問題視されるようになってきている。

流入水温と放流水温との間に変化が生じる原因は、流入水温が気温や気象により変化するのに対して、放流水温は貯水池における水温変化と取水・放流位置の組み合わせにより変化するためである(放流水温は取水・放流口付近の水深における貯水池水温に近い値を示す)。もちろん貯水池における水温変化は流入水温の影響を大きく受けるし、気温や気象の影響を受けるため流入水温と類似の年間変動特性を示すことが一般的であるが、とくに容量が大きく回転率の低い貯水池においては、貯水池に蓄積する熱容量も大きくなるために、放流水温変化が流入水温変化に比べて緩慢になり、流入・放流水温差が大きくなる傾向がある。例えば秋から冬にかけての気温低下時には貯水池表層で冷却が起こるため、貯水池全体が鉛直方向に混合するが、春から秋にかけて蓄積された熱を表層から放熱しながら表層から徐々に鉛直混合が進行するため、容量が大きく深いダム貯水池では、水温低下が流入河川ほど速く進行せず、晩秋から初春にかけて温水放流となる場合がある。

また、水深が深い貯水池では、春から秋にかけて貯水池の水深方向に大きく水温が変化する水温成層が形成さ

れることが多い。水温成層が形成された貯水池では、流入水と等温の層より浅い位置で取水すると温水が、深い位置で取水すると冷水が放流される。選択取水施設が利用可能で、ほぼ等水温の層から取水することができれば水温差は生じないが、流入水量と放流量が大きく異なり、貯水位が急速に変化する場合、これが不可能になることがある。既設ダムにおける事例として、寡雨により夏場に渇水が生じて急激に水位が低下した際に、表層からの取水を行いながらも放流水温の急激な低下が生じたことが確認されている。これは、渇水による流入河川水量の低下にともない、流入河川から供給される熱エネルギー量が低下する一方、下流への熱エネルギー放流量は低下せず、貯水池内の熱エネルギー収支が急激に負になる状況で、水温の高い表層部分の貯水が放流されてしまった後は、水位低下前に中層から底層にかけて存在した冷水を放流せざるを得なくなったことから生じた現象である。

洪水期と非洪水期に異なる管理目標水位をもつダム貯水池があるが、このようなダム貯水池においては洪水期を迎える際に、洪水に備える制限水位にまで水位を低下させるために放流を実施する。水温成層期にこのような水位低下を大きく行くと、上記と同様の理由から冷水放流になる恐れがある。環境影響予測の過程でこのような現象が予測されたあるダム貯水池では、年間を通してダム上下流における水温変化の不連続性を緩和することを目指して、制限水位への水位低下を行う6月後半における冷水放流を防止するために、利水の制約を満たしつつ3月の貯水量を制限するという対策をとる計画になっている(図1)。

水温の不連続性は、ダム貯水池の持つ貯留効果による水温変化の時間遅れと、水温成層期における取水深さによる影響により生じると考えられる他に、貯水池運用による上下流での流況変化が大きく、これにともなうダム貯水池内の熱エネルギー収支のバランスがとれなくなる場合に生じると考えられる。

水温変化に合わせて産卵する魚類が多く存在するなど、水温変化は河川の生物にとって非常に重要な項目であり、ダム貯水池による河川水温の不連続性の緩和は重要な課題である。水温の不連続性は、表面取水や選択取水設備の利用で相当程度の緩和が可能である。しかし、ダム貯水池の本来目的である利水のための貯水や洪水

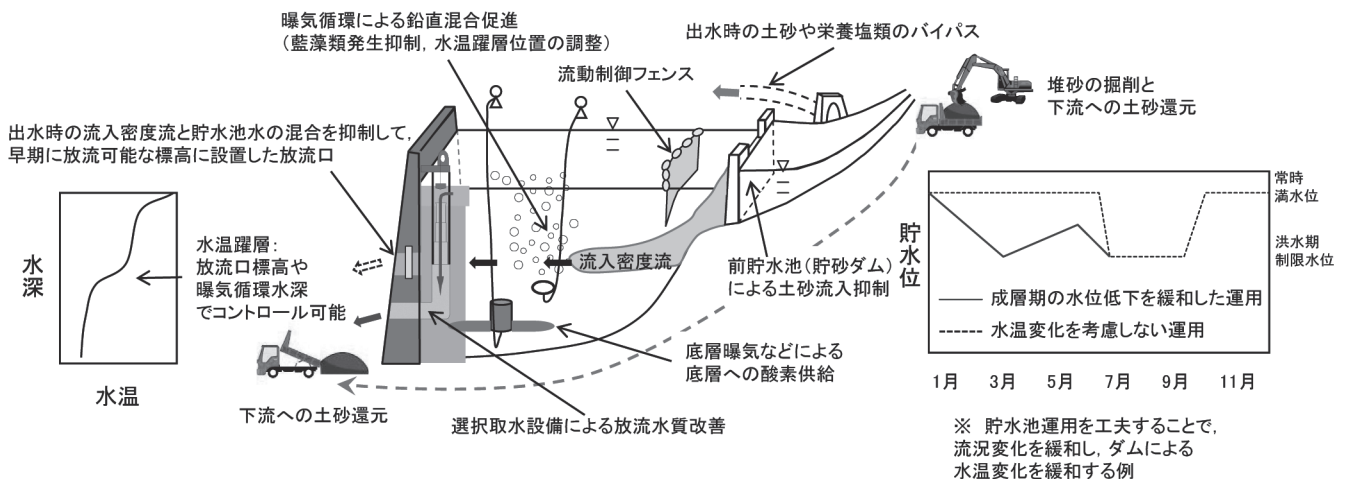


図1 ダム貯水池における水環境保全のための諸対策

調節を行うことにより生じる流況の変化が大きい場合には、河川を流下する熱量フラックスのダム貯水池による変化も大きくなり、取水位置の調整のみでは解決できない可能性がある。このような問題の存在が近年知られるところとなり、対策として季節的な貯水量の調整を行って流況変化を緩和するなど、新たな検討が始まっている古くて新しい問題である。

2.2 流砂量変化

河川が運搬する流砂量についても、ダム貯水池により変化が生じる。流砂量変化にともなう現象のうち、水環境に係わる事象として堆砂と濁水長期化が従来問題視されてきた。ここでは、簡単のために砂以上の粒径を持つ流砂に関する問題を堆砂、懸濁物あるいは濁りと認識されることが多いシルトや粘土に関する問題を濁水と分けて議論する。

堆砂は、その名のとおり土砂が貯水池に堆積することであり、堆砂により貯水容量が減少することが問題視されることが多いが、貯水池に土砂が捕捉される結果として下流河川における流砂量が減少して河床低下や河床材料の粗粒化が生じる現象に対しても近年関心が高まっている。堆砂問題は、流砂のフラックスをダム貯水池が止めてしまうことによる問題であり、環境面では、この不連続性による下流への影響が重大である。

濁水長期化現象は、出水時の濁った河川水が貯水池に貯留され、出水後長期にわたって貯水池が濁り、この濁水が下流に放流される現象である。貯水池がなければ、出水後に川の濁りは通常速やかに低減するが、貯水池の濁りが長期間継続すると、濁水が放流され続けて、ダム下流では出水後も濁りが長期間にわたり低減しないことがある。濁水長期化は、言葉どおり河川水が濁った期間が長期化することが問題視されており、ダム貯水池による流量調整で河川水の濁りのパターンが変化する現象である。このため、下流河川水の濁度の絶対値により問題の程度が規定される現象ではなく、若干の濁度上昇であってもその差を認識することが可能な、清流と呼ばれるような清澄な河川において顕在化することが多い現象である。

濁水長期化は、ダム下流における魚類への影響が問題視される場合が多い。河川における濁水が魚類に与える影響については、濃度だけでなく濁質の粒径が重要な影響規定要因であることが実験的に解明される¹⁾など知見が増えつつあるが、濁りによる水中の光環境の変化や懸濁物の河床への沈着などを通じた生物・生態系への影響については、依然不明な点が多く、今後さらなる研究の進展が望まれる。

流砂量の不連続性にともなう影響として、海洋環境に対するものへの関心が高まってきていることも近年の状況と言える。濁水の関係では、懸濁物に吸着されている物質（例えばシリカやリン）の下流への輸送形態が変わることによる影響が考えられる。河川を流下する懸濁物量は、貯水池に沈殿する分、減少する。このため大陸において建設された貯水池における土粒子の沈殿や珪藻類による摂取、沈殿によるシリカの減少が、海洋環境に影響しているのではないかとする研究が報告されている²⁾。藻類全般が必須としている窒素・リンといった栄養塩類と珪藻類のみが必要とするシリカの比率は海洋における

優占藻類種の決定に大きな影響を及ぼす可能性があることが以前から指摘されており³⁾、シリカが窒素・リンに比べて減少した場合、赤潮の発生頻度増加などの悪影響が考えられる。

ただし、日本のダム貯水池のように回転率の高いダムでは、その影響は大陸の巨大な貯水池とは異なり、海洋全域に影響を及ぼすようなレベルではないことは自明である。また、日本のダム貯水池における水質解析に基づいて、珪藻類が摂取した後にこれが貯水池に沈殿することによるシリカ捕捉量を推定したところ、貯水池への流入量の1%程度と算定されており⁴⁾、日本では貯水池の珪藻類による摂取の影響は小さいと考えられる。しかし、このような貯水池における水の貯留にともなう輸送懸濁物質の欠損という問題意識は、ダム貯水池による水環境への影響に関して、生物に有害なものとして認識される濁りの変化（長期化）というだけでなく、ダムによる捕捉にともなう懸濁物質運搬の不連続性という文脈から、検討する必要があるという方向性を示している。

このことは、粒径の大きな砂礫の輸送について、より顕著である。ダム下流河川における砂礫輸送量の減少は、河床環境を改変し、底生動物や魚類に影響を与えていることが明らかになりつつあり、後述するように土砂をダム下流に還元することでこのような影響を緩和しようとする試みが増えてきている。

ダム管理の立場からは、河川水を貯留するのが貯水池の役割なので、河川水による懸濁物の運搬量をダムの上下流で近づけることは相当困難であるが、濁水長期化や堆砂問題解決のために開発されてきた諸対策が懸濁物質運搬の不連続性の緩和にも十分役立つと考えられる。

選択取水施設を有効に活用することで、出水後は積極的に濁水を放流する運用を行う計画に加えて、出水時の流入水をなるべく表層水と混合させずに放流できるように放流口（洪水吐き）の位置を設計する例が増えている（図1）。この対策は、貯水池内のバイパスとも言うべき対策であり、水温成層期に生じた出水をなるべく貯水池内で混合させずに放流することで、物質フラックスの変化を緩和しようとするものである。この効果向上を目的として、水温成層を積極的に制御するための曝気循環装置の利用や、流動制御フェンス（カーテン）の利用もみられる⁵⁾（図1）。

より粒径の大きな土砂に関しては、①貯水池上流に設置した貯砂ダムにより捕捉された流入土砂や貯水池に堆積した流入土砂を掘削浚渫して下流に運搬する（土砂還元と呼ばれている）、②貯水池を避けたトンネルなどの土砂バイパスにより出水時の流砂量の一部を貯水池に流入させずにバイパスする、③出水末期に貯水位を低下させて土砂を排出するフラッシングを行う、といった対策が講じられている（図1）。これらの事例はまだ多くないが、ダム貯水池に敷設されたバイパス水路として古いものでは、1908年に神戸市水道局の布引五本松ダムに設置されたものが挙げられ、古い事例として世界的にも類を見ないものであり⁶⁾、貯水池における土砂対策の歴史を考える上でも特筆される。近年になり、土砂バイパスは旭ダム、美和ダムに設置されている^{5,7)}。フラッシングは、黒部川における出し平ダムと宇奈月ダムの連携排砂が代表例である⁸⁾。土砂還元に関しては、施設的な

投資が比較的少なくて済むことから、事例が増えてきている^{9,10)}。その中には、比較的大きな粒径の礫も還元対象にして、下流河川環境の向上を目指す長安口ダムにおける事例など、積極的に環境保全を目指すものもある。ただし砂以上の比較的粒径の大きい土砂供給については、ダム貯水池により流況が変化した下流へどれほど供給するのが環境面からみて適切なのかという課題が残っており¹¹⁾、研究の進展が望まれる。

ダム堆砂や濁水長期化問題は、旧来よりダム運用上の問題として顕在化していたが、近年ではこれらの問題に対する捉え方が多様化してきたことで、再度脚光を浴びている古くて新しい問題である。今後とも、種々の対策を複合的に検討することで、問題の軽減対策を進めることが望まれている。

2.3 有機物変化

ダム貯水池は、これまで述べてきたように、河川流況を変化させるために、上下流において土砂を含む各種の物質フラックスを変化させる。本節では、河川水が運搬する物質の中でも自然環境や生物にとって重要な有機物について議論する。河川を流下する有機物は、その大きさにより、倒流木、粗大有機物 (CPOM: > 1 mm)、微細有機物 (FPOM: 0.45 ~ 1 mm)、溶存有機物 (DOM: < 0.45 mm) に分類される他、藻類や水生植物などの河川内で生産された自地性 (自生性) のものと、陸上生態系で生産された異地性 (他生性) というように由来によっても分類される¹²⁾。

河川の上流からの物質やエネルギー輸送が下流の生態系に連続的に影響を与えることや、河川における有機物供給形態の連続的変化が底生生物群集構成に与える影響などを関連させた河川連続体仮説 (River Continuum Concept)¹³⁾ によれば、日本のダムの多くが立地するような山間部 (上流部) では、河川を流下する有機物の多くは、陸地由来の有機物である。とくに山間部では出水時には、落葉の粉碎物のような粗大有機物が貯水池に多く流入すると考えられるが、これらの多くは貯水池に沈殿する可能性が高い。ダム貯水池により捕捉されて陸地由来の有機物の流れの連続性が途絶えることで、ダム下流では底生動物の餌不足が生じるという生態系への影響が生じるようにも思われるが、ダム貯水池において生産される有機物が下流に供給されることで、必ずしもそのようにはならないようである。

波多野ら¹⁴⁾ は、16基のダム直下で生息場所の物理化学的条件や餌資源の組成や量を介した底生動物群集への影響について調査し、ダム直下で底生動物現存量と個体数密度の著しい増加と生物多様性の低下がみられたことを報告している。また波多野ら¹⁴⁾ は、流れてくる懸濁態有機物を網や口器などで濾過する方法で栄養を得る濾過食者と、河床に堆積した有機物を集めることで栄養を得る収集食者が、ダム直下で個体数・現存量とも多いこと、群集中で濾過食者の割合が著しく大きいことを示している。ダム直下では、ダム貯水池由来の植物プランクトンが豊富に流れてくるために、これらの底生動物現存量が増加したと考えられている。ダム貯水池は河川に比べて広大な水面を有することから、表層部分においては一般に光が十分に供給される。また滞留時間も長くなることから、ダム貯水池では、植物プランクトン濃度が流

入河川に比して増加し、これが下流に放流される場合が多い。このように見るとダム貯水池は、異地性 (他生性) の粗大有機物を減少させて自地性 (自生性) の微細有機物を増加させる機能を持っている可能性が高い。ダムから放流される植物プランクトンによる下流河川生態系への影響については、いくつかの研究事例があるが、餌として利用され、シマトビケラ科やブユ科の幼虫が増加するといった影響が以前から指摘されている¹⁵⁾。

このような視点で見ると、ダム貯水池の一次生産量の違いが、下流河川生態系に与える影響の大きさを規定する可能性が想定されるが、下流河川の物理環境によっても影響が異なることが示されており、現象は複雑である。竹門ら¹⁶⁾ が木津川と宇治川においてダム貯水池で生産された植物プランクトンが河川を流下する微少な粒状有機物 (100 μm のメッシュサイズのネットで濾過した残留物) の中に占める割合を調査した結果では、ダム貯水池由来成分が 50% に減少するまでの流下距離は、木津川では 5.2 km (渇水時), 3.1 km (平水時), 7.6 km (増水時)、宇治川では 12 km (平水時), 7.9 km (増水時) となっている。木津川の方が宇治川よりも短距離で減少する理由として木津川の河床に砂礫が多いことを示唆しているように、下流河川の物理環境によってもダム貯水池から流下する植物プランクトンの下流河川生態系への影響は異なると考えられる。そもそもダム貯水池による下流河川生態系への影響は流況変化によるものなど他の要因も大きく、有機物輸送の変化が下流河川生態系に与える影響については不明な部分が多い。このため、ダム貯水池による有機物輸送の不連続化による環境影響や、緩和策の必要性について明らかにするには、今後の研究が必須である。

3. 貯水池の水環境保全

ダム貯水池に類似の自然景観として自然湖沼がある。このため、ダム貯水池における水環境保全の取り組みは、自然湖沼のそれとほぼ類似であり、主なものとして富栄養化対策があげられる。富栄養化にともなう問題として、①貯水池での藻類の大量増殖、とくにアオコや淡水赤潮等の植物プランクトンの集積にともなう景観障害、②大量に増殖した藻類を含む有機物が貯水池底部に沈降し、この分解にともなう酸素消費による底層での貧 (無) 酸素水塊の発生、③底層の貧 (無) 酸素化にともなう、鉄・マンガンなどの金属や栄養塩類の底泥からの溶出、硫化水素の発生、が挙げられる。また、利水の観点から見た問題としては、①増殖した藻類が有機物量を増加させることから、上水におけるトリハロメタン生成能が増加する問題、②カビ臭物質を産出する藻類の発生による水道水への着臭問題、③底泥から溶出した鉄・マンガンによる着色問題、④硫化水素臭問題、⑤珪藻類の大量発生にともなう浄水場におけるろ過障害等が挙げられる¹⁷⁾。

富栄養化対策は、流域における栄養塩類や有機物負荷の発生や流出の抑制を行うことが基本である。ただし、これらの対策は、多大な資金が必要な場合が多い上に、流域住民の協力が不可欠であり、一朝一夕には進まない。このため、貯水池内においても種々の対策をとる必要がある場合が多いが、あくまでも基本的に抜本的対策とはなり得ず問題緩和を目指すものであるということを経

理解しておく必要がある。このような限界は理解したうえで、ダム貯水池において効果的と考えられる富栄養化対策をあげると、①バイパス等の手法で栄養塩濃度が高い水を貯水池に貯留させないようにする方法、②曝気循環のように貯水池表層における鉛直循環を促進させることで藍藻類に代表される迷惑種が優占しにくくなるように環境を改変する方法、流入端へのフェンスの設置のように局所的な流動を変化させることで赤潮藻類の集積を防ぐ方法など、特定の藻類にとって有利な環境を改変する方法、③底層曝気のように底層が還元的環境になったことで発生する問題を未然に防ぐ方法、があり有効性が認められている¹⁷⁾(図1)。これらの他に、バイオマニピュレーションなど生態系に働きかける手法が検討されているが、持続性や制御の可能性に未だ不明な点が多い。

4. まとめ

以上述べてきたように、ダム貯水池における水環境保全は、水利用や水産業における問題の回避・低減という観点で始まった取り組みが多いが、水環境保全に対する意識の高まりとともに、ダム貯水池という貯留施設が、河川による水・エネルギー・物質輸送の様相を改変させることにともなう環境変化を最小化することで、河川の生物や生態系に与える影響を回避・低減することを目指すという方向に向かいつつあると言える¹⁸⁾。

元々水利用や水産業における問題の回避・低減という観点で始まった取り組みの中でも、問題発生の根本原因を修正する効果をもつものについては、適切な運用をすることで、ダム貯水池における環境保全のみでなく下流河川への環境影響低減にもつなげることが可能である。ダム貯水池建設にともなう環境変化は、複合的で複雑なものであるが、少なくとも水温、濁度あるいは懸濁物濃度、有機物量など水質指標により定量的に評価可能な項目に関しては、貯水池運用における制約の下で、ダム上下流での変化を最小化していく取り組みがより必要になろう。

また、本稿では言及しなかったが、ダム貯水池による洪水調節にともなう流況の変化は、下流河川における攪乱の低下を招くことで、河川の物理環境やひいては生物の生息環境を改変することが指摘されている。土砂輸送と河道形成の観点からも、洪水イベントは重要である。また、河川が固有に持つ流況の季節的な変化の特徴は、その河川の環境を特徴づけるものである^{19,20)}。

今後のダム貯水池における水環境保全の取り組みとして大きく期待されるのは、ダム貯水池が提供する治水、利水の機能を維持しつつ、流況改変にともない失われた河川機能の修復を図ることであろう。このためには河川流域全体の中でダム貯水池が発揮する必要がある治水利水機能を再度明確にすると共に、流況改変による生態系

への影響の理解に努めることで、下流河川環境を改善するような貯水池運用を検討していく必要がある。貯水池環境と下流河川の環境のバランスを意識しつつ運用も含めて水環境保全の最適解を見つけていくという姿勢が重要になる。

参考文献

- 1) 村岡敬子, 天野邦彦, 土居隆秀, 久保田仁志, 三輪準二 (2011) 高濃度濁水下におけるアユの生存率と懸濁物質の粒度組成の関係, 魚類学雑誌, 58 (2), 141-151.
- 2) Vörösmarty, C. J., Sharma, K., Fekete, B., Copeland, A. H., Holden, J., Marble, J. and Lough, J. A. (1997) The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world, *Ambio*, 26, 210-219.
- 3) Officer, C. B. and Ryther, J. H. (1980) The possible importance of silicon in marine eutrophication, *Marine Ecology Progress Series*, 3, 83-91.
- 4) 天野邦彦, 時岡利和 (2007) ダム貯水池における珪藻類による珪酸補足量の評価, 環境工学研究論文集, 44, 539-545.
- 5) 柏井条介, 櫻井寿之 (2004) 貯水池の保全設備-濁水長期化対策-, *ダム技術*, (214), 12-26.
- 6) 角哲也 (2005) 土砂管理で「千年ダム」の実現を, 季刊河川レビュー, (131), 34-41.
- 7) 竹田正彦, 矢澤聖一 (2007) 美和ダム再開発事業・洪水バイパス施設の概要, *ダム技術*, (250), 207-211.
- 8) 進藤裕之, 二俣秀 (2002) 国内初の連携排砂・連携通砂の実施-黒部川宇奈月ダムの連携排砂計画と環境調査, *ダム技術*, (190), 29-36.
- 9) 角哲也, 藤田正治 (2009) 下流河川への土砂還元の実状と実態, *河川技術論文集*, 15, 459-464.
- 10) 国土交通省河川局河川環境課 (2011) 下流河川土砂還元マニュアル(案)第2版.
- 11) 柏井条介 (2004) 貯水池機能の保全設備-排砂対策-, *ダム技術*, (215), 12-24.
- 12) 吉村千洋, 谷田一三, 古米弘明, 中島典之 (2006) 河川生態系を支える多様な粒状有機物, *応用生態工学*, 9 (1), 85-101.
- 13) Vannote, R. L., Minshall G. W., Cummins K. W., Sedell J. R. and Cushing C. E. (1980), The river continuum concept, *Can. J. Fish. Aqua. Sci.*, 37, 130-137.
- 14) 波多野圭亮, 竹門康弘, 池淵周一 (2005) 貯水ダム下流の環境変化と底生動物群集の様式, 京都大学防災研究所年報, 48 (B).
- 15) 谷田一三, 竹門康弘 (1999) ダムが河川の底生動物へ与える影響, *応用生態工学*, 2 (2), 153-164.
- 16) 竹門康弘, 山本佳奈, 池淵周一 (2006) 河川下流域における懸濁有機物の流程変化と砂州環境の関係, 京都大学防災研究所年報, 49 (B), 677-690.
- 17) 天野邦彦 (2004) 貯水池機能の保全設備-水質保全(富栄養化対策等)-, *ダム技術*, (212), 12-20.
- 18) 天野邦彦, 安田佳哉 (2001) ダム貯水池における水質管理の高度化にむけて, *土木技術資料*, 43 (3), 18-23.
- 19) Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., and Stromberg, J. C. (1997), The natural flow regime, *Bioscience*, 47, 769-784.
- 20) Bunn, S. E. and Arthington, A. H. (2002) Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity, *Environmental Management*, 30 (4), 492-507.