

◆ ダム技術特集 ◆

ダム貯水池における水質管理の高度化に向けて

天野邦彦* 安田佳哉**

1. はじめに

ダム貯水池が果たしている治水、利水への貢献が社会にとって重要であることは論を待たないが、近年の環境に対する関心の高まりから、とかくダムは悪者にされることが多い。環境への影響が大きい大型事業は、社会的な必要性と自然環境保護の両者を共に満たすことが望まれているが、問題を一つ一つ解決していくことで環境への負荷を低減することが可能となると考えられる。環境と一口に言っても極めて多岐にわたるため、ここでは問題を水質に絞り議論を進めることにする。

ダムの建設に伴い形成される貯水池に生起する水質変化については、従来多くの検討が行われてきており、貯水池特有の水質現象としてまとめられている。貯水池特有の水質現象として従来よく取りざたされるものとして、冷水、濁水長期化、富栄養化という3つの現象があり、これらは通常、貯水池建設前に行うべき水質予測の対象になっている。

これら3つの現象は、種々の対策が講じられてきているにも係わらず依然としてダム貯水池における水質に係わる問題として重要なものであり、ダム貯水池の水質管理について考察する時にまず対象とすべき問題であるといえる。本稿では、まずこれら3つの現象について簡単に述べた後、これらの現象がいかにして問題となりうるかについて整理しまとめる。さらに、現象と問題との関連に従い、ダム貯水池における水質管理の高度化を行う上で今後進めていくべき方向性及び実際の事例について述べる。

2. ダム貯水池の水質現象と問題についての従来の整理

(1) 冷水現象

冷水現象は、一般的に水深の深いダム貯水池において、春から秋にかけての水温成層化により底

部に形成された低い温度の水が、底層から放流された場合に起きる。流入河川水温に比べて低い水温の放流水が下流河川に流下することが問題となってきた。従来、灌漑用水の水温低下は稲作への障害となることから問題となっていましたが、冷水放流を防ぐ方法として表面取水、選択取水施設を設置することで、極端な冷水問題は防ぐことが可能になっており、技術的には解決が可能と考えられている。

(2) 濁水長期化現象

濁水長期化現象は、出水時に濁った河川水が貯水池に貯留されることで、出水後長期にわたって濁水が下流に放流される現象である。濁水長期化現象は、出水中に含まれる土粒子の粒径数 μ 以下の割合が多い場合、貯水池における土粒子の沈降に時間がかかり、とくに発生の可能性が高くなるほか、出水が起こったときの貯水池の水温分布や、取水、放流口の位置(水深)、出水規模と貯水池容量との関係により程度に差が生じる。

濁水長期化現象に関しては、貯水池内の問題と下流河川における問題に分けて考える必要がある。貯水池内の問題としては、水の濁りに伴う景観障害が主たる問題と考えられる。貯水池内の濁りの原因としては、出水時の流入濁水が貯留されて濁る場合、貯水位低下時に貯水池流入部末端に堆積した土砂が洗掘されて水が濁る場合がある。

貯水池の濁りが継続する期間は、濁りの原因となる土粒子の粒径と貯水池容量に対する出水規模により規定される。土粒子の粒径については、数 μ 以下の粒径のものは沈降速度が極めて小さく、なかなか沈降しないため、濁りが継続する期間が長くなる。土粒子の粒径(特に出水時)は、地域特性により決まっており、出水時の濁質粒径が小さい貯水池では、濁水長期化が起こる可能性が高くなる。

また、出水により貯水池に流入した濁水の量が貯水池容量に比べて大きいほど、濁水長期化が起こる可能性は高くなる。特に成層破壊が起こるほ

どの出水が貯水池に流入した場合は、清澄化に時間がかかる。

濁水長期化の問題は、貯水池水の濁りよりも下流河川における問題が多い様に見受けられる。特に下流における魚類への影響が問題点とされる場合が多く、特に水産に関する問題が指摘されることが多い。

冷水問題同様、表面取水、選択取水による清澄水放流や、バイパス水路による出水時の濁水早期放流による濁水長期化対策がとられており、一定の成果は上げているが、大規模出水に伴う濁水長期化については、対策が困難である。

(3) 富栄養化現象

富栄養化現象は、窒素やリン濃度の高い河川に建設された貯水池において藻類が大量に発生することに伴う現象を指すと考えられる。藻類は、貯水池や湖沼といった水圏における生態系の食物連鎖を支える存在であり、貯水池において増殖すること自体が問題とは考えられないが、増殖量が過多になると、以下のような問題が生じことがある。

富栄養化現象に係わる問題としては、貯水池での問題と下流における利水の観点からの問題がある。貯水池内の問題としては、①貯水池での藻類の大量増殖、特にアオコや淡水赤潮等の植物プランクトンの集積に伴う景観障害 ②大量に増殖した藻類がやがて貯水池底部に沈降し分解を受けることで酸素を消費し、底層での貧(無)酸素水塊の発達がおこることによる栄養塩や鉄、マンガンの底泥からの溶出や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、トリハロメタン生成能が増加する問題(富栄養化した貯水池から取水する浄水場では、前塩素処理を行うことがあるが、この際トリハロメタンが生成される。トリハロメタンは、発がん性物質と推定され、その人体影響が懸念されている¹⁾) 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色問題 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伴う浄水場におけるろ過障害等が挙げられる。

流入河川水の栄養塩(窒素、リン)濃度が高い貯水池で富栄養化に伴う問題が起こっている場合、根本的な解決は流域レベルでの栄養塩負荷の削減以

外にはないが、対症療法的な対策も問題によってはある程度有効である。曝気循環による藻類増殖抑制、藻類種組成への影響や、底層曝気による底層の貧(無)酸素水の解消などが実効的な対策である。

3. ダム貯水池水質に係わる問題の今後の捉え方

(1) 水温変化

冷水現象については、名前が示すとおり従来、春季から夏季にかけて流入河川水に比べて低水温の水を放流することで灌漑用水温の低下や下流河川に生息する魚類への影響が懸念される問題であった。

しかし、貯水池が建設されることによる下流河川水温への影響について考えた場合、貯水池建設による影響は、本来流入河川水温と放流水温の違いにより評価されるべきものと考えられる。下流河川における環境影響を考える場合、そもそも貯水池が建設されることにより下流河川の流量変動が変化するので、水温だけの議論は成立しないが、放流水温を上げると言うことだけでは問題が完全に解決したことにはならないと考えられる。

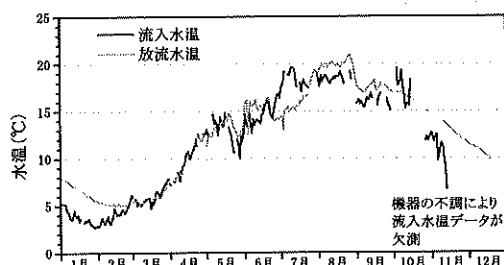


図-1 ガム貯水池における流入と放流水温の比較例

下流河川において水温変化に敏感な魚類(産卵期が水温により決定される種)がいる場合、秋季から冬季にかけての放流水温の低下パターンが流入河川水温のそれに比べて著しく異なるようなることがあれば、下流河川の環境に影響を与える可能性があると考えざるを得ない。例えば、図-1はあるダムにおける平成10年に観測された流入、放流水温の記録について示したものであるが、1月に放流水温が流入水温を3°C程度上回るほか、11月に流入水温が急激に低下しても、放流水温は余り低下せず、流入水温に比べて高い水温の水を放流していたことがわかる。

下流河川水温への影響の度合いを考える場合、

その影響範囲はダムからの放流量と下流の残流域面積や他支川や本川との合流時の流量比の違いによっても変わってくる。このため、今後貯水池による下流河川の水温変化について検討する場合、貯水池放流水のみでなく、下流のいくつかの基準地点での水温変化についても正確に把握し、適切な放流水温の管理を行うことが望まれる時代が来る可能性が高いと考えられる。

ダム管理の立場からは、放流水温の管理手法として選択取水の運用、曝気循環等を用いた貯水池内の水温躍層位置(水温が急に低くなる水深)のコントロールが考えられ、放流水温に関する問題は、生起する可能性があったとしても技術的に対処は可能と考えられる。

ただし現況の把握をするための基礎資料として水温の連続観測データが必要になるが、これらのデータについては観測が行われている貯水池でも、流入河川、貯水池内、放流水温のみで、下流河川にわたり観測されている例は無いのではないかと思われる。技術的には特に困難ではないデータ収集であるので、今後のデータ収集、データベース化が必要と考えられる。

(2) 懸濁物輸送

濁水長期化現象に関しては、今後も下流河川への影響が主要な懸念であり続けると考えられるが、貯水池による水温変化の場合と同様、その影響範囲はダムからの放流量と下流の残流域面積や他支川や本川との合流時の流量比の違いによっても変わってくる。濁水の場合、懸念が水温だけの場合とは違い、すぐに目で見て違いが分かるため、問題が顕在化しやすい。しかし、下流河川において濁水長期化により魚類を含む生態系がどれだけの影響を受けるかについて、定量的に評価することは現時点では情報不足に起因してほぼ不可能と言っても良い。今後の調査研究が必要である。

濁水の影響については、濁りによる影響のみならず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も考えられる。その意味で懸濁物の河川による輸送形態の変化という形での問題の捉え方が必要になってくると思われる。

濁水に関する貯水池での問題は、濁水長期化という言葉で示されるため、あたかも貯水池が建設されることにより懸濁物の放流量が増えるような

錯覚を感じるが、貯水池が建設されることにより河川を流下する懸濁物量は貯水池に沈殿する分、減少している。最近は、この貯水池における土粒子の沈殿や珪藻類による攝取、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国際的な研究が始まっている²⁾。

海洋においては、珪藻類が食物連鎖の中で大きな位置を占めており、重要な種であるが、必須栄養塩としてシリカを要求する。これに対して内湾等で赤潮を形成する渦鞭毛藻類は、シリカを要求しない。このため、藻類全般が必須としている窒素、リンといった栄養塩と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。

大陸の大河川に建造されるダムと日本の様な島国に建造されるダムとでは、その影響の度合いについては異なっており、海洋全域に影響を及ぼすようなレベルでは無いことは自明であるが、外洋との水の交換が制限される東京湾や瀬戸内海等の内湾では、影響を与えるレベルであるかもしれない。現在のところシリカについては河川、ダムなどで定期的な調査項目として取り上げられている箇所が少ないので、現状についての知見は限られたものになるが、Harashima et al.⁴⁾は水質年表に記載されている野洲川と琵琶湖内におけるシリカ濃度を比較して琵琶湖内のシリカ濃度が湖への流入河川(野洲川)のそれに比べて1/7程度に低下すること、この理由として琵琶湖の珪藻類による攝取、沈降や土粒子への吸着、沈降などを上げている。琵琶湖への流入河川水質として野洲川でしか観測がないため、全体としてこれほどの湖沼によるシリカ濃度低下がおこっているかどうかはこれだけでは判定できないが、琵琶湖ほどの大きさの湖であれば、シリカをかなり捕らえるということが示されている。

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、土砂バイパスや、排砂ゲートの設置・運用による懸濁物成分の貯水池内への堆積を防止する技術の発展が望まれるところである。

また、選択取水設備等による影響軽減策がとら

れていながらも、その効果について検証したデータや情報が限られていることは、今後改善すべき反省点である。

(3) 富栄養化現象

アオコや淡水赤潮といった貯水池内で目に付きやすい現象は、アオコの場合 *Microcystis* に代表される藍藻類、淡水赤潮の場合 *Peridinium* や *Ceratium* に代表される渦鞭毛藻類が原因となっている。これら藻類に共通する点は、水面に浮上する能力を持っている点である。例えば *Microcystis* の場合は細胞内に気泡を作り浮力を調整することが可能なことが知られているし、*Peridinium* や *Ceratium* は鞭毛を利用して光に向かって遊泳することが知られている。このような水面に浮上する藻類特性が貯水池内に生じる流れの影響を受けて濃厚な集積をした結果アオコや淡水赤潮として顕在化する。

このため、貯水池における流れのパターンや、藻類分布の変化についての詳細な情報を把握しなければ、発生のメカニズムについて理解することは困難である。当研究室では、藻類の集積と流れとの関連について調査するために、淡水赤潮が貯水池の流入末端において長期にわたり発生する貯水池で、流れと赤潮藻類の分布についての昼夜連続観測を行った⁵⁾。図-2にこの観測で捕らえられた赤潮藻類の昼と夜とでの分布と流れの分布を示す。この図から分かるように、この貯水池における赤潮原因藻類は、昼間に表層に集積し濃厚な赤潮を形成すると共に夜間は一部が沈降し、流入河川水の流れにより下流に運搬されている。下流に運搬された藻類は朝になると表層へ移動し、さらに表層での上流へと向かう流れにより、今度は上流に戻される。このような流れの作用により、非常に高濃度の集積を維持しながらも、流入河川水から栄養塩を摂取することが可能となり、長期にわたる赤潮の形成が可能になっていると考えられた。この貯水池においては、窒素やリンの濃度は特に高くないが、上記の流れの構造と藻類の生態が結合して、流入栄養塩を効果的に摂取し集積するという機構により、長期間にわたる濃厚な赤潮を形成していたことが分かった。藻類の集積現象については、常に富栄養化に伴う藻類の大量増殖のように見られるが、流れとの関連が明らかになってくれば、対策手法も発展すると考えられる。

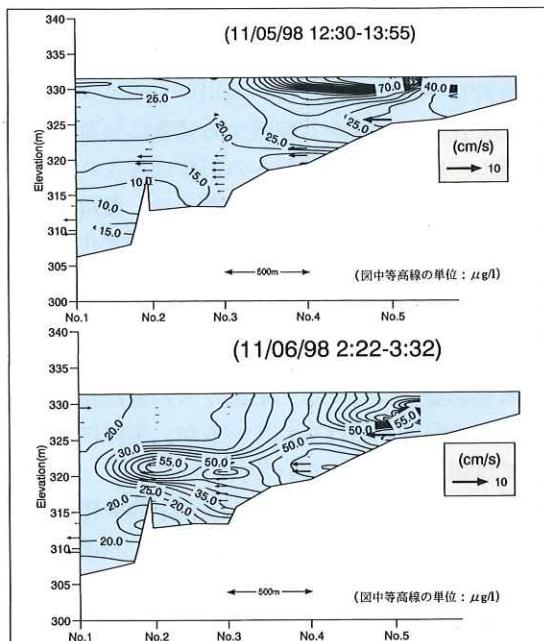


図-2 貯水池末端における赤潮藻類の分布変化(クロロフィル-a)(昼間、夜間)と流速分布

もちろん、他の藻類種との競合の中でアオコや淡水赤潮の原因となる藻類が優占的になる機構は流れだけではなく、水温、栄養塩濃度や存在割合、気象といった要因が複雑に絡み合っている。さらにこれらの環境条件の中でも、貯水池表層で水温成層が強固に形成される環境で問題となる藍藻類等の増殖が促進されるという指摘がある⁶⁾。

表層の水温成層については、表層曝気循環装置による混合促進により緩和することが可能である。表層曝気循環は、いくつかの貯水池において実用運転されている。曝気循環手法は、圧縮空気を水中に放出して出来た気泡が水中を上昇する際に周囲水を連行して上昇流をつくることで鉛直方向の水の混合を促進するものである。この手法により形成される流れについては、解析が進んでいるが⁷⁾、混合の強度とそれが藻類に与える影響については不明な点が多い。

底層水の貧(無)酸素化については、対策として底層曝気手法が用いられており、効果を上げている⁸⁾。底層曝気は名前のとおり成層化した貯水池の底層に酸素を送り込むものであるが、一般に言う曝気循環とは異なり、水温成層には影響を与えずに底層の酸素濃度を上昇させて、底泥に近い底層水の環境を酸化的にすることで鉄、マンガンの溶出、硫化水素発生を抑制することが本手法

の目的とするところである。副次的に底泥からの栄養塩の溶出量を抑制する効果も期待できるが、一般的なダム貯水池では、河川からの流入栄養塩負荷に比べて底泥から回帰する栄養塩負荷の割合は低く、底層曝気の藻類への影響は限られたものと考えられる。しかし、底層曝気は、費用的な問題が解決できれば、底層水の貧(無)酸素化を防ぐ有効な手法であり、鉄やマンガンの溶出、硫化水素の発生が大きな問題となっている貯水池への設置が望まれる。底層曝気を行うことにより起こりうる悪影響については、窒素ガスの過飽和による魚類への影響が挙げられているが、実際に事例としては報告されていない⁹⁾。

富栄養化現象については、生化学的変化に伴う現象であり、顕在化する現象についての理解は限られたものであるため今後さらなる現象に対する定量的理解を進める必要がある。

(4) 今後の水質問題の捉え方

以上、ダム貯水池に典型的な水質に係わる3つの現象について議論してきたが、今後の水質現象の捉え方をとりまとめると表-1の様な形になると考えられる。3種類の貯水池水質現象について従来の位置づけから今後さらに発展し、流域における水循環の中での熱量、無機および有機物の輸送への貯水池の影響について、空間的には流域全体を視野に入れ、なおかつ影響を受ける対象としては人間活動にのみ注目するのではなく、生態系への影響についても配慮していくことが必要になってくると考えられる。

ただし、この様な現象の捉え方をしようとした場合、まず情報不足が問題としてあげられる。環境に関する議論に関しては、正確な情報が不足す

表-1 貯水池の水質についての捉え方

対象		従来の位置づけ	今後望まれる現象の捉え方
水質現象	冷水現象	春季から夏季の低水温放流	貯水池上下流での河川水温変動の変化
	濁水長期化現象	出水後の高濁度水放流期間の長期化	土砂輸送を含めた河川による物質輸送量の変化
	富栄養化現象	景観、着臭、着色	生態系の食物連鎖を含めた影響
空間的影響範囲		貯水池、下流河川	流域全体の中での位置づけ
被影響者	社会的影響 (農業、漁業、水道等)		生態系への影響

るかあるいは全くないところで不毛な言い合いが繰り広げられるケースが多い。ダム水質に係わる現象についても、今後少なくともダム管理者として行っている諸対策の効果、効用について正確に把握するという意味でも、より広範囲の情報の収集が必要と考えられる。

4. ダム貯水池の水質保全に関する最新事例

以上、ダム貯水池に關係する水質問題について述べてきた。これらは、主に今後の問題の捉え方の方向性について述べたもので、どちらかというとソフトウェアに関する部分であった。本章では、一旦ここから離れ、ダム施設に関するハードウェアに関する開発について言及する。

(1) ダム用空気エネルギー・システム (DAS)

沖縄総合事務局北部ダム事務所において開発されたこのシステムは、ダムからの放流水のもつエネルギーを用いて圧縮空気を製造し、貯蔵、利用するものである¹⁰⁾。圧縮空気については曝気や噴水のみならず、羽地ダム取水設備に日本で初めて採用され建設が進んでいる空気ロックによるゲートレス取水設備や、水質とは直接関係ないが冷暖房や換気に利用が可能となっている。

川崎¹⁰⁾は、DASの利点として水力発電の採算以下の小放流量でも成り立つこと、流量変動に対しても適用範囲が広いこと、クリーンで低コストかつ変換効率の高いシステムであること等を述べている。貯水池の水質管理の面からは曝気循環、底層曝気に使用する圧縮空気を大量かつ廉価に作成できる本システムの可能性は非常に高いものである。また、ゲートレス取水設備はゲートを用いることなく空気の出し入れのみで取水管の開閉が出来、維持管理が容易と考えられることから、選択取水の柔軟な運用を可能にすると考えられ、優れたシステムである(図-3)。

(2) 三春ダムにおける対策

富栄養化対策として、貯水池内でとりうる手法の見本市とも言えるのが三春ダムである。本ダムでは、図-4に示されるように、貯水池への栄養塩流入を削減するために流入水バイパス、前貯水池(4カ所)、藻類抑制を目指して浅層曝気(5カ所)、底層での貧(無)酸素水塊の発達を防ぐために底層曝気(2カ所)が設置されている。

また、本ダムにおいては、灌漑用水と水道用水

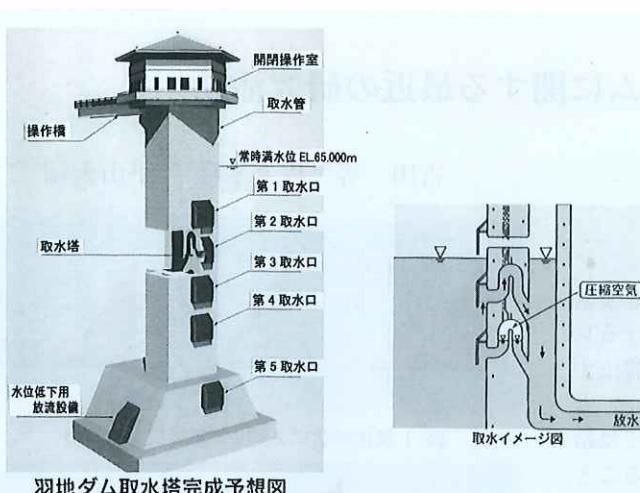


図-3 ゲートレス取水設備

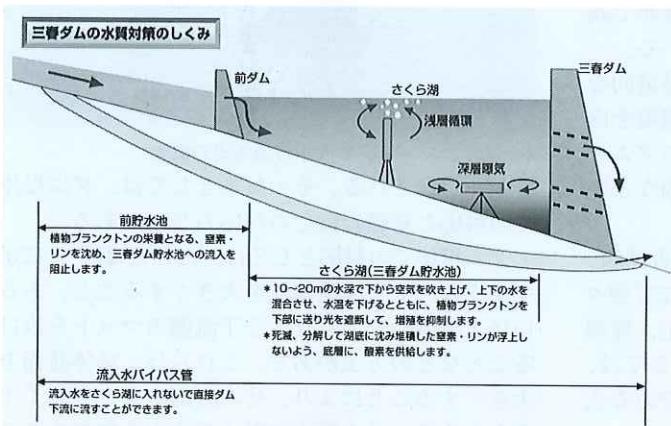


図-4 三春ダム水質保全対策概念図

の取水口が独立しており、目的に応じて別の場所からの取水が可能となっており、利水の面から見た水質問題発生を抑制しうる点で有効な手立てとなっている。

5. まとめ

ダム貯水池の水質に関しては、今後その変化の機構、流域の水循環の中での役割、生態系への影響など、広範囲な調査に基づいた知見を深めると共に、新たに開発された水質対策施設の効果についても引き続き詳細な調査に基づく評価を行っていく必要がある。

参考文献

- 須藤隆一、桜井敏郎、森忠洋、岡田光正 (編) : 富栄養化対策総合資料集, サイエンスフォーラム, 1983.
- Ittekot, V., L. Rahm, D. P. Swaney and C. Humborg : Perturbed Silicon Cycle Discussed, EOS, Transactions, American Geophysical Union, v.81, n.18, pp.198-200, 2000.
- Officer, C. B. and J. H. Ryther : The possible importance of silicon in marine eutrophication, Marine Ecology Progress Series, v.3, pp.83-91.
- Harashima A., T. Kimoto, Y. Tanaka, T. Wakabayashi, T. Toshiyasu, E. Ohta and K. Furusawa : Silica Deficiency in the Aquatic Continuum -A Case Study in Japan, Proceedings for 2nd international workshop on the global silica cycle (投稿中), 2000.
- 天野邦彦、田中康泰、鈴木宏幸、安田佳哉 : 貯水池末端における持続的な淡水赤潮に関する研究, 水工学論文集, 第44巻, pp.1083-1088, 2000.
- Paerl, H. W., Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters, Limnology and Oceanography, v.33, n.4, pp.823-847
- Asaeda, T. and J. Imberger, Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, J. Fluid Mech., v.249, pp.35-57, 1993.
- 例えは、中村悟、梶谷隆志 : 布目ダムにおける深層曝気装置の水質改善効果, ダム技術, n.164, pp.42-52, 2000.
- Cooke, G. D., E. B. Welch, S. A. Peterson and P. R. Newroth : Restoration and Management of Lakes and Reservoirs, Lewis Publishers, 1993.
- 川崎秀明 : ダム用空気エネルギー・システムの開発, ダム技術, n.160, pp.16-34, 2000.

天野邦彦*



安田佳哉**



国土交通省土木研究所
環境部環境計画研究室
主任研究員、工博
Dr. Kunihiko AMANO

同 環境計画研究室長
Yoshiya YASUDA