

定山溪ダム貯水池における 1998 年出水の濁質放流について

- 選択取水装置運用による濁質の放流効果 -

石田 享平*

はじめに

洪水時には濁質を多量に含む流水がダム貯水池に大量に流れ込むが、貯留水は流入水との混合が起ると濁度を高め、その結果ダムからの放流水が濁ることがある。そのような場合には、ダムの貯水量は通常の放流量に比べ圧倒的に大きいため、洪水後長期間にわたって濁度の高い水を下流に放流し続けることになり、下流域における環境や水利用において問題を生ずることがある。そこで放流水の水質維持の観点から、貯水池に流入する濁質を混合・拡散させることなく、洪水中とその直後にできる限り多く放流することが望ましい。そこで、貯水池に温度成層を形成させることで高濁度の流入水を水温躍層の狭い層に閉じこめ、もって選択取水装置により高濁度の水を放流することができれば有効な濁質管理ができると考えられている。

定山溪ダムにおいては貯水池の水温管理と選択的放流ができるように、利水放流管の取水標高を調整できる構造を採用している。同ダムは1998年9月に竣工以来最大規模の洪水に見舞われ、濁水の流入が確認された。その際、出水前後を通じてダム地点及び貯水池内において濁度調査が行われたが、濁水は所期の目論見通りに水温躍層の比較的狭い層にとどまっていたことが確認された。そこで、ダムサイトにて濁水の到達が確認された後、取水口位置を最大濁度の標高に設定し、濁質を早期に放流するための操作が行われた。本報告では、洪水中から後における濁水の挙動に関する調査結果を詳述すると共に、それらの観測結果に基づき、高濁度水を選択放流による貯水池水質維持効果について検証し、報告するものである。

1 定山溪ダムと流域の概要

(1)ダムの概要

定山溪ダムは1992年に石狩川の支川、豊平川の支川白井川の更に支川小樽内川に作られた直轄多目的ダムである。流域面積は104km²であるが、上流域はすべて国有林であり、開発地域や荒廃地の少ない豊かな水源林で構成されている。このため、洪水時においても流入河川の濁りが少ないのが特徴で、ダム完成以来高濁

度の流水が貯水池に流入した実績は無かった。主な流入河川には、小樽内川(流域面積68 km²)と滝の沢川(流域面積14km²)があり、両河川流域で同ダムの集水区域の8割弱を占めている(図-1)。

ダムは堤高114.5m、堤長410m、総貯水量8,230万m³の重力式コンクリートダムである。ダム築造の目的は、洪水防御、上水道用水の確保と発電である。取水塔はダム中央部よりやや左岸寄り、堤体に隣接して作られているが(図-2)、利用水深(EL325.4-381.6m)における任意の標高にて取水できるように、取水口を上下方向に移動可能な構造を採用している。

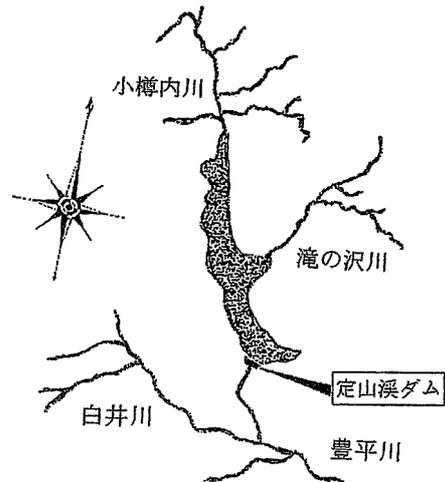


図-1 定山溪ダム貯水池と流入河川

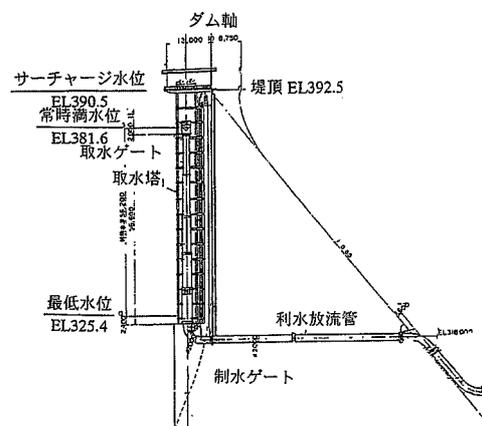


図-2 取水塔概略図

(2)取水位置と水温成層

定山溪ダム貯水池から下流への放流は、取水塔からの取水の外、常用洪水吐き(E.L.318m)と非常用洪水吐き(E.L.388m)から行う。ただし、夏期の貯水池における水温条件に対して支配的なのは、取水塔を通じての発電目的と上水道目的の放流である。貯水開始後1994年までは湛水開始直後における湛水地からの栄養塩類溶出に配慮して、貯水池内の鉛直方向の流れを促すように中層(E.L.338.1m)から取水することとした。しかし、1995年に至り湛水初期の富栄養化の恐れが去ったと判断し、表層取水(自動追従で貯水位から2m下で取水)に変更した。この結果、変更後の夏期における水温分布は、表層の定温部より下の水位では季節毎の水温分布に違いが少なくなった(図-3)¹⁾。また、同図より取水方式を変更した後は中層取水を行っていた1994年当時と比べて、躍層の位置が貯水面から浅い位置になるとともに、水温躍層付近における温度勾配が大きくなっており、際だった違いが認められる。

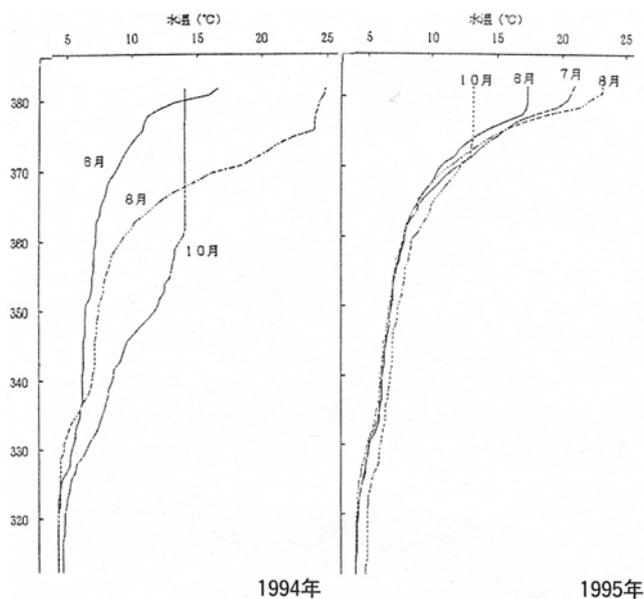


図-3 取水標高変更に伴う貯水池内の水温成層の変化

2 1998年出水の概要と現地観測

(1)出水の概要

降雨は9月16日の1時過ぎから降り始め、翌日の8時までに総雨量157mmとなった。なかでも、16日の14時から18時までが降雨のピークで、1時間毎の雨量は14、24、18、14mmとなり、同流域ではかなり強い降雨強度が続くこととなった(図-4)。その結果、ダム貯水池への流入量は16日14時頃から急激に増加し、ピーク流入量を記録した18時には約180m³/sとなり、ダム完成後

の最大流入量を記録した(図-4)。

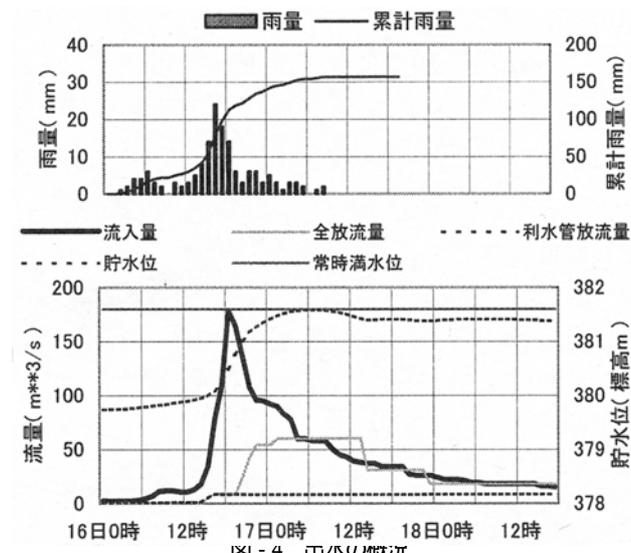


図-4 止水の概況

出水の開始時点におけるダムの貯水位は常時満水位(EL381.6m)に対して2m弱の余裕があった。そこで、ダムからの放流は貯水池への流入量と貯水位の推移を監視しつつその量を増加させていたが、貯水位が常時満水位に達した17日4時頃には、流入量は既にピークを過ぎて洪水流量(60m³/s)にまで低下しており、全期間を通じて水位維持の操作を行うにとどまった。放流の方法に関しては、16日19時30分から19日9時まで常用洪水吐きから放流しており、最大放流量は利水放流と併せて60m³/sであった。また、利水放流は、16日14時頃から発電放流を始め、雨の強くなった同日16時からフル発電(取水量約8.3m³/s)とし、洪水終了後29日までは日平均取水量4m³/s以上と高い水準での発電放流を続けている。発電放流のための取水標高は出水後しばらく平常時と同じ表層取水を継続していた。しかし、濁水の到達がダムサイトで確認された後の17日14時以降、ダムサイト地点における観測濁度が高い標高から取水するように、取水口の変更を行っていた。高濁度層からの選択取水を継続した10月6日までの取水標高は表1の通りである。

表-1 取水ゲート操作記録

日 時	取水位	取水方式
98年 9月17日14時	EL373.00	選択取水開始
98年 9月21日14時	EL370.00	取水標高変更
98年 9月25日 9時	EL369.00	同 上
98年 9月29日 9時	EL368.00	同 上
98年 9月30日10時	EL367.50	同 上
98年10月 2日10時	EL366.50	同 上
98年10月 6日10時	貯水位-2m	表層取水復帰

(2)ダム地点における水温分布と濁度分布の観測

定山溪ダムではダムサイト地点において通常1日6回(3、8、9、10、13、15、21時)、水温と濁度を自動計測していた。計測方法は取水塔内に設置した計測装置が、鉛直方向に移動しながら0.5m毎に計測する。計測範囲は貯水位よりほぼ1m下から、定山溪ダムの管理上の最低水位である325mまでである。ダムサイトに濁水が到達したことを確認した後、17日13時以降は2時間毎1日12回の自動計測を実施するように計測タイミングの変更を行っている。なお、濁度の計測は光源に赤外線発光ダイオードを使用した散乱光方式²⁾である。

(3)貯水池における濁度の分布調査

濁水がダムサイトに到達した日の翌日である9月19日以降、ほぼ1週間おきに全部で4回(9月19日、25日、10月2日、9日)、貯水池内の濁度調査を行った。調査箇所は、4測線(SP400m、1000m、2200m、3600m)を設け、それぞれの測線につき横断方向に5~9カ所の測点を設定していた(図-5左)。また、各測線では鉛直方向に1mピッチで濁度と水温の観測を行い、最初の観測において濁水の影響の認められなくなった水深約23m(標高358m)付近までを調査対象区域とした(図-5右)。なお、濁度の観測方法は、積分球式測定法²⁾を採用した。

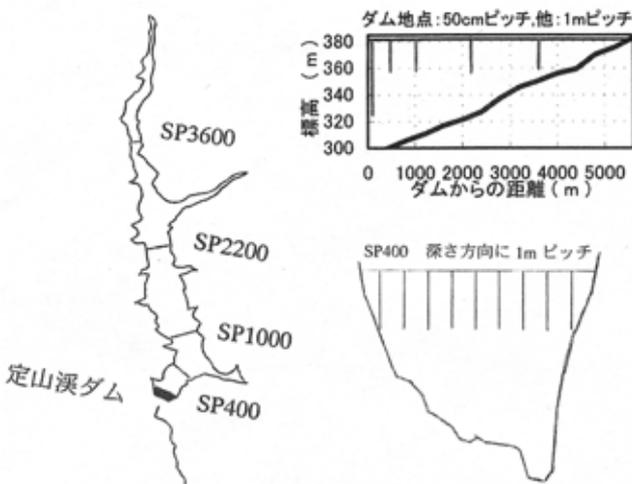


図-5 濁度計測箇所図

(4)流入河川の濁度調査

本洪水期間中に流入河川である小樽内川と滝の沢川の両河川において水質調査を行った。調査地点は全集水面積の65%を占める小樽内川の小樽内観測所と、同10%を占める滝の沢川の滝の沢観測所で採水を行い、水質分析等の調査を行った。採水回数は9月16日12時から17日6時までそれぞれ7回行っている。調査項目

としては、各種水質分析の他、現地において水温、流量を計った。なお、濁度の計測は積分球式測定法²⁾によった。

(5)貯水池内の懸濁物質の粒度分析

貯水池の濁度調査を4回目に実施した10月9日、懸濁物質の粒度調査を行った。調査箇所は各調査測線毎に1点とし、最も高い濁度の観測された測点、標高において、バンドーン採水器を用いて採水を行い、コーンター・カウンター法にて粒度分析を実施した。

3 現地観測の結果

(1)ダム地点における濁度観測結果

ダム地点における濁度と水温の観測結果の一例を図6に示す。同図左は濁水がダムサイトに到達する直前(17日3時)の計測結果であるが、貯水池表層から約6mが18 弱の一定水温で、定温層を過ぎると深さを増すにつれて急激に水温が低下する水温成層が形成されている。同図中にダムサイトで高濁度が最初に確認された17日9時における計測結果を示した。高濁度層は標高371mを中心とする狭い層に鋭いピークをもつ鉛直分布となっている。また、一連の出水においてダム地点におけるピーク濁度が最高となった9月17日21時における計測結果を同図右に示した。濁度分布は深さ方向に複数のピークを示しており、懸濁物質の分布幅が拡がり、濁度20度以上の範囲は7m強であった。

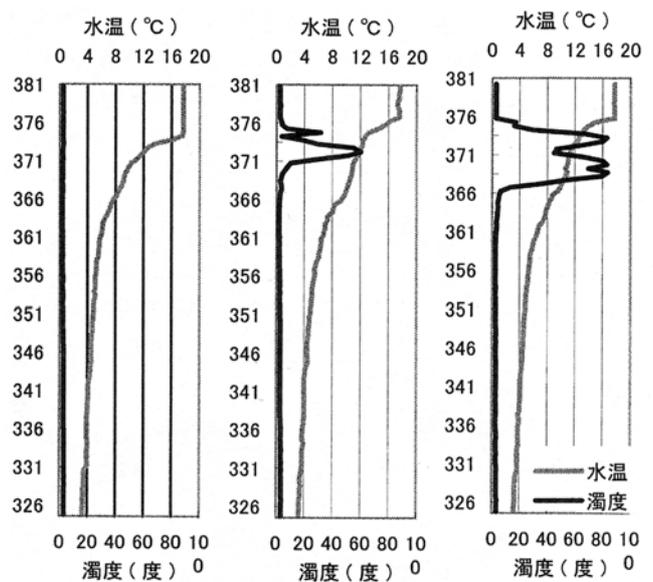


図-6 ダム地点における濁度と水温分布

(2)洪水規模と温度成層への影響

流入量が増加し始めた16日8時から、洪水がおさまった17日6時までの総流入量は約8.6百万m³であった。一

方、出水が始まった16日8時時点におけるダム貯水量は56百万 m^3 であったことから、当該出水における総流入量は貯水量の15%程度である。この割合は「温度成層破壊がやや起こる」とされる50%に比べて十分小さく、実現象でも躍層破壊が起こっていないことと符合する³⁾。

(3) 貯水池における濁度の分布状況調査結果

貯水池内の4側線において9月19日に計測した濁度の断面内分布を図7に示す。観測の時点は洪水の盛時から2～3日を経ているが、SP400と1,000mには濁度が100度を超える高濁度層が認められる一方、SP2,200、3,600mと上流に向かうに従って、高濁度層の面積が少なくなっている。このことは貯水池内を流下した高濁度の水がダムにせき止められてダム近傍の濁度が高くなる一方、上流域では洪水後の清水の流入により希釈が進んだ結果と考えられる。また、SP400と1,000mでは高濁度部分が右岸に寄っているが、これは貯水池がSP500m付近で右岸側に折れ曲がっているために、上流から流れ込んだ濁水が最短ルートを下流した結果と考えられる。

(4) 流入河川の濁度調査結果

定山溪ダム貯水池へ流入する2河川において観測した濁度について、貯水池への流入量の推移とともに図8に示したのが図8である。観測間隔は不規則であるが、濁度はダム流入量の増加に伴い急激に増大したことが分かる。他方、流入量の減少過程において、濁度は流入量の減少速度より以上の速さで急減している。上の関係より貯水池への濁質の供給は、流入量の減少に伴い速やかに収束したものと思われる。

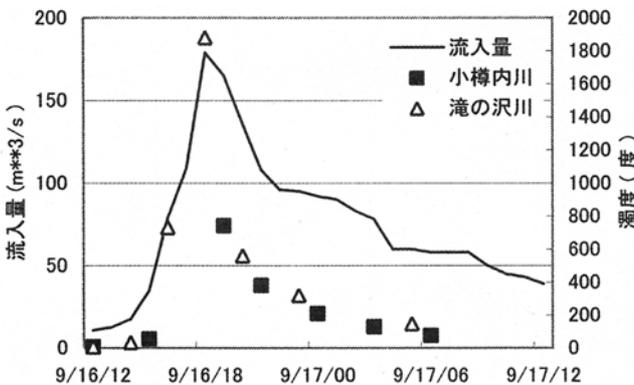


図 - 8 洪水期間中におけるダム流入量と河川の濁度

(5) 懸濁物質の粒度

貯水池内の4地点にて採水した濁水についてコーンター・カウンター法にて濁質の粒度を調べた結果を図9に示す。

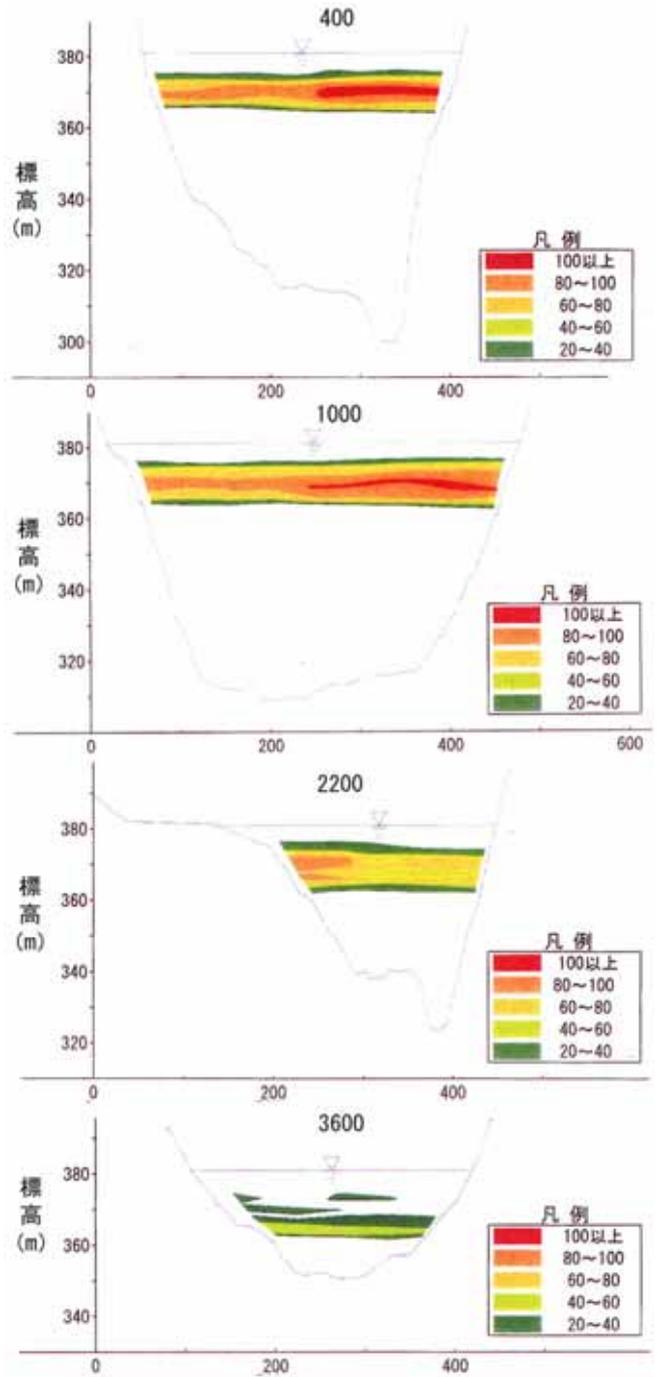


図 7 濁度の断面分布図

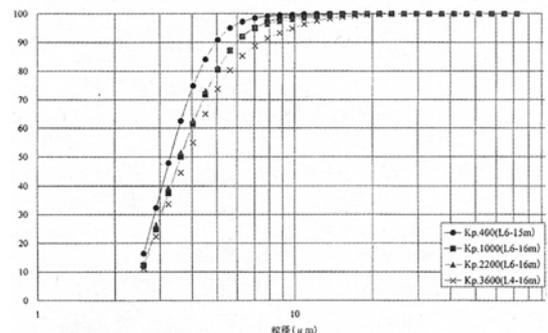


図 - 9 懸濁物質の粒径加積曲線

9に示した。ダムサイトに近づくにつれ粒径が細かくなっており、中央粒径 d_{50} は3~4 μm であった。

4 貯水池における濁質の挙動

(1)濁水の流入標高

洪水が起こったとき貯水池では水温成層が形成されており、貯水池に流入した濁水は標高371m付近の躍層を貯水池全体に層状に拡がりながら流下したことが確認された(図6、7)。また、濁質がダムサイトに到達したとき、最も高濁度を示した標高部分の水温は図6から約12℃であることが分かる。他方、流入河川が高濁度であった16日15時~18時頃の河川水温は、小樽内川で13.3~13.5℃、滝の沢川で12.4~13.4℃であった。

通常、河川水は同密度(同水温)の層に進入するが、ここでは懸濁物質を含む流入水は同じ水温の水より比重が大きいため、比重のより近いやや低めの水温層に密度流として進入したと考えられる。密度流体の密度に関し、水温を両河川のほぼ重なる温度帯である13.2~13.4℃、濁度を取水塔で観測した最高濁度を丸めて90度、濁質の乾燥密度を2.56g/cm³として計算すると、0.999422~0.999472となる。これは12℃で濁度2.2度の貯水池の水の密度0.999493より若干小さい値となっている。

(2)貯水池濁度分布に見る濁質の排出効果

貯水池内の縦断的な濁度分布を経時的に示したのが図10である。縦断的にはいずれの日も下流側線が高濃度となっており、上流測線に向かうに従い低濃度となる。そして時間の経過に従い、濁度分布は濁質を放流していたダムサイトや希釈効果の期待される上流端ばかりではなく、全体的に濃度の低下が見られる。これより、ダムサイトにおいて選択取水した結果、濁質の放流効果がダム周辺にのみにとどまらず、上流断面にまで及んでいると考えられる。また、時間の経過に関わりなく、濁度20の下限線は標高364~361m付近にあり、その下降速度は緩やかである。従って、浮遊濁質量(濁度分布曲線が基線との間で囲う面積)が減少した理由は、懸濁物質の沈降というよりはむしろ、下流方向への流下による効果が支配的であったものとする。これより、高濁度の貯留水を選択的に下流に放流したことは、貯水池内における濁質制御に関して有効に機能したと考えられる。

(3)ダム地点濁度分布に見る濁質の排出効果

ダムサイトの水質自動監視装置にて計測した毎日9時と21時における最高濁度と平均濁度を図11に示した。最高濁度は文字通り当該時刻に計測した鉛直濁度

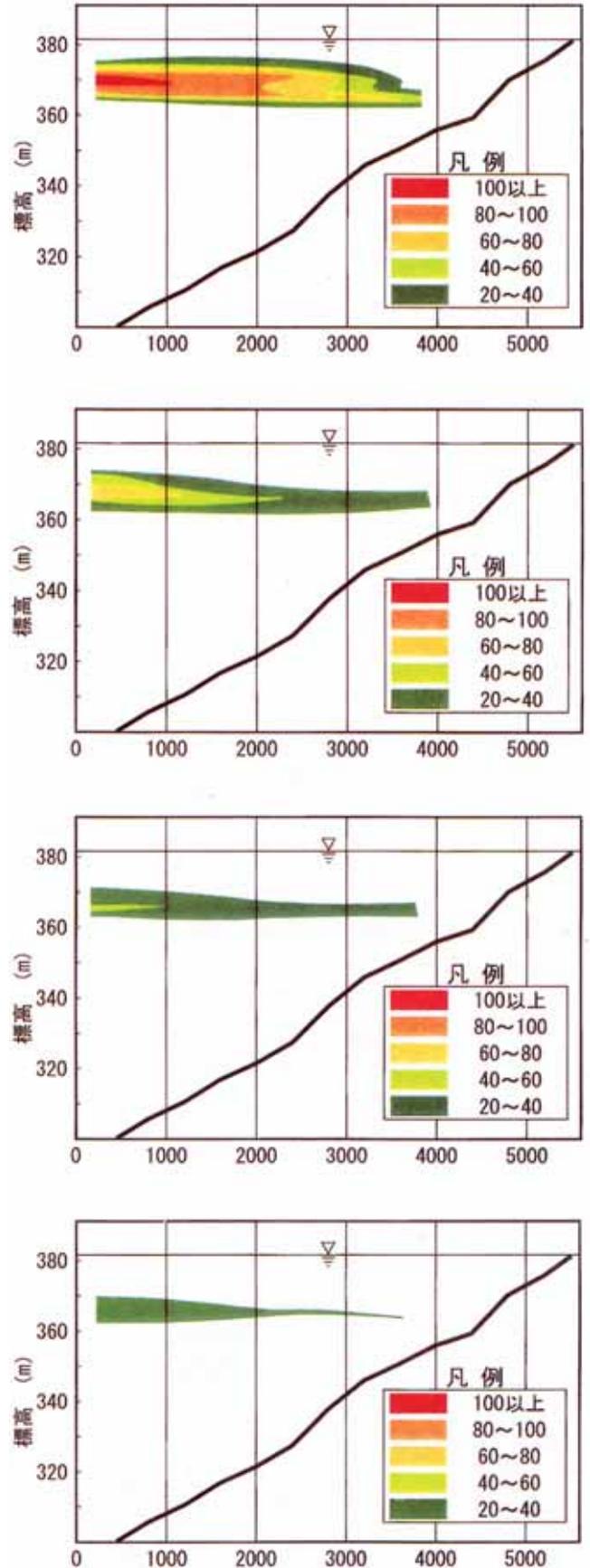


図 - 10 貯水池内の濁度の経時変化(縦断図)

分布の最高値である。平均濁度は貯水面から標高325mまで50cmピッチで観測した濁度の平均値である。ここに、当該期間における貯水位変化が1m程度であったため、平均濁度は貯水塔付近の濁質総量の増減を代表すると見なすことができる。平均濁度は9月18～20日にかけて振動しつつピークを記録した後、選択取水を継続していた10月6日まで急激に低下している。他方、最高濁度は17日の19時に最高値88.2度を記録した後、減少に転じておりその傾向は平均濁度と概ね同じである。また、取水方法を表層取水に変更した10月6日以降は何れも濁度の低下勾配が折れて小さくなっていることが分かる。この濁度の低下勾配の急曲折からも、選択取水が貯水池内に浮遊する濁質を減少させるのに有効に機能したことが伺われる。

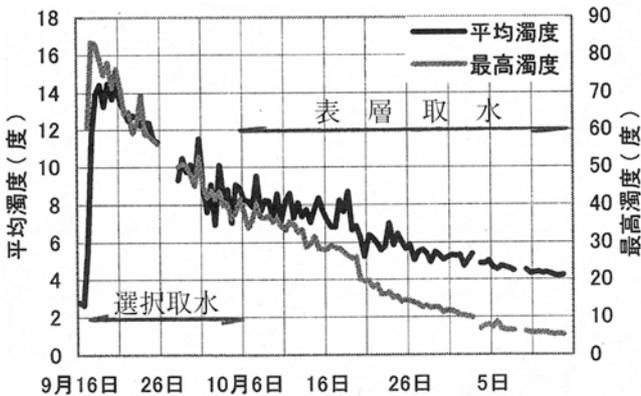


図 - 11 ダムサイトにおける濁度の推移

(4)濁質の混合

取水塔付近における濁度変化の特徴的現象として、10月20日を境としてその前後で、何れの濁度の推移も不連続に段落ちしていることがある(図11参照)。この時期には濁質の滞留量を急激に減らすような人為的な操作は行っていないので、これは貯水池内の条件変化によるものと考えた。そこで、その前後の取水塔における水温と濁度との分布を精査したところ、10月19日夕刻から20日朝方にかけて、表層部分の水温が低下すると共に温度成層がかたちを大きく変えていることが判明した。そして、水温分布の変化と同時に濁質の拡散が水面方向に進行して、半日ほどの間にピーク濁度は20%以上低下し、水面付近の濁度は50%程高くなっていることが判明した(図12)。他方、標高355mより低い観測箇所の濁度分布にはほとんど変化は認められず、比較した時刻間で急激な沈降または観測範囲外の下層水との混合が起きたとは考えられない。しかし、平均濁度(自動計測によりモニターしているダムサイト

付近における濁度総和と言い換えてもよい)の減少に関しては、上層における鉛直方向の水の循環と濁質の混合のみでは説明できない。そこで、貯水池上層において鉛直方向の循環と同時に水平方向の混合も起こり、ダムサイトから離れた位置にあったより濁度の低い水との混合が起こり、その結果ダム地点における見かけ上の濁度総量が減少したのと考えた。

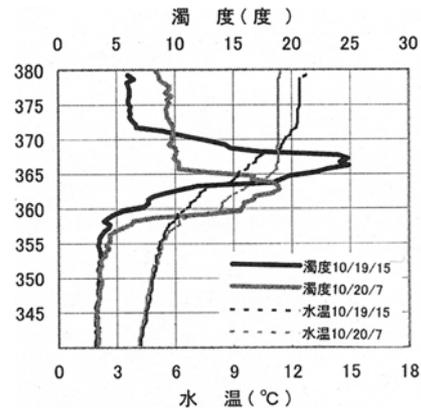


図 - 12 濁質の拡散と水温成層

(5)濁質の沈降

SP400において計測した標高毎の全測点の平均濁度分布を図13-1に示した。濁度分布は時間を経過するにつれて、そのピーク標高を下げつつ、またピーク濁度を低下させている。これはSP1,000と2,200の測線においてSP400とほぼ同様の傾向を示している一方、SP3,600では出水当初不規則な推移を示している。各測線においてピーク濁度を記録した標高を調査日毎に整理したのが図13-2である。流入河川の影響を受けるSP3,600以外の各測点は、濁度分布のピーク位置を徐々に低下させる傾向が読みとられる。そこで、ピーク濁度を記録した標高の下降量について、SP3,600m以外の三測線の平均値を各期間毎に整理した結果を表2に示した。

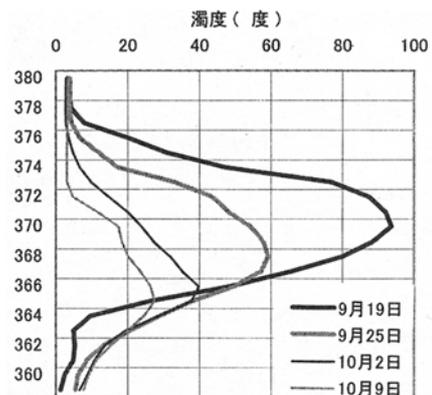


図13-1 SP400mにおける濁度の鉛直分布の経時変化

表-2 濁度のピーク標高の下降速度

	9/19-9/25	9/25-10/2	10/2-10/9	単位
下降量	3.3	1.6	1.1	m
下降速度	50	23	16	cm/day

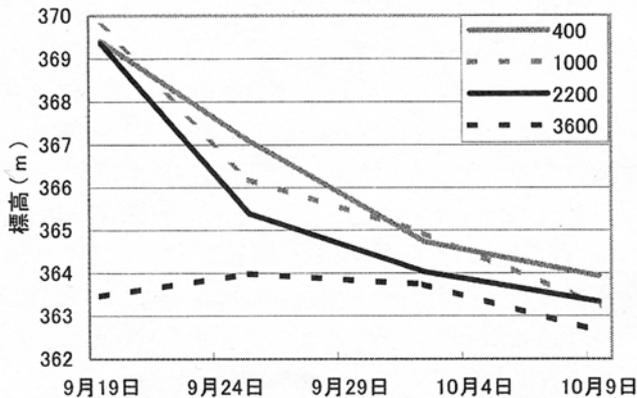


図-13-2 各測線における濁度ピーク標高の経時変化

10月2日に実施した濁質の粒度分布調査より中央粒径 $d_{50} = 3 \sim 4 \mu$ が、また、ダムサイトにおける濁度と水温の自動観測から高濁度層の水温 $10 \sim 14$ (図6参照)が分かっていることから、これらにRubeyの式⁴⁾を適用すると、濁質の沈降速度は $50 \sim 100 \text{cm/day}$ と推計された。これは濁度ピークの下降速度から推計した沈降速度 16cm/day に比べてかなり大きな値である。そこで、同沈降速度が濁水流入直後から一定と仮定して21日間の沈降水量を計算すると、 $10.5 \text{m} \sim 21 \text{m}$ となる。しかし、高濁度層の上端が水深 6m であった一方、粒度分析の調査水深が 16m (当該測線の濁度ピーク箇所)であること、また沈降速度が日を追って徐々に鈍化すること等を考えると、本推計値は過大と考えられる。そこで、以下の考察では濁質の沈降速度として表2の値を用いることとした。

5 選択放流と貯水池における濁質収支

貯水池の中間層に密度流となって流入し浮遊する濁質の放流に関して、選択取水施設が所期の効用を發揮したことについて前節で定性的に説明した。そこで、本節では流入した濁質の放流効果について量的に検証を行い、選択取水装置の有効性に関して更なる検証を行う。ここでは濁度調査を行った貯水池の表層約 23m 部分を一つの「水塊」として扱い、これを通過する濁質の収支から選択取水の濁質放流に関する量的な効果を明らかにしていく。

(1) 収支計算の考え方

水塊への濁質の供給は上流域からの流入水が運び込

む量(A)のみである。他方、水塊から外へ出る濁質に関しては、放流水に含まれる濁質(B)、沈降により水塊外へ出る濁質(C)と湖底を這うように水塊の上流端をかすめ通過する濁質(D)の和で表されると考えた。そして、水塊内にある濁質(E)は連続の関係から、A~Eで次のように表すことができると仮定して以下の検証を行っている。ここに、は推計誤差である。

$$E = A - B - C - D +$$

ただし、A：対象期間内に流入した濁質

B：同、ダムから放流した濁質

C：同、沈降した濁質

D：同、低層密度流として通過した濁質

E：検討時点の水塊内の濁質

ここに、対象期間は出水の開始時点から、収支計算を行う時点までの期間を指す

水塊内の濁質(E)に関しては4回の濁度観測結果から求められるので、各時点での計算を行うこととした。

ここに水塊の底部上流端をかすめ通過する濁質(D)とは、成層化した貯水池に密度流が流入した際、水温躍層部分で比重の軽い流体と重い流体とに分岐することがあるとされている⁵⁾が、その後者を想定している(図14参照)。

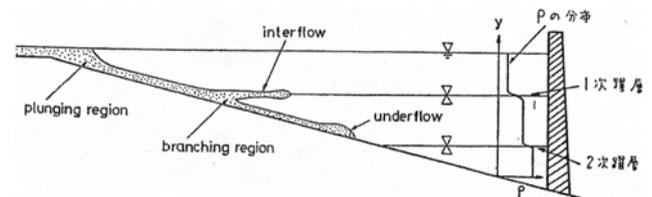


図-14 成層化した貯水池での密度流

(2) 貯水池に流入した濁質量の推計

当該洪水期間中に貯水池に流入した濁質量の量は、1時間毎に流入河川のSS観測値と貯水池への流入量との積として求めた。ただし、流入水のSSに関しては、全集水面積の65%を占める小樽内川の実測値が流入水のSSを代表できるものと仮定し、また実測値のない各時刻のSSは直近の実測値から内挿にて1時間毎に求めた値を計算に用いた。流入量はダム貯水池への全流入量として求められた毎正時の値を用いた。上記仮定の下、9月16日15時から17日12時までの間に、貯水池に流れこんだ流入量と濁質の総量は次のように推計された。

総流入量	$7.3 \times 10^6 \text{m}^3$
総流入濁質量(A)	3,600ton

(3)放流水に含まれる濁度

高濁度の貯留水を選択取水により放流し始めた9月17日14時から、貯水池内の濁度調査を行った各時点まで、利水放流管から下流河川に放出した濁度の総和を求めた。総濁度は当該期間における利水放流管からの毎正時の放流量と取水標高の実測濁度との積として求めた。同期間における利水放流管からの放流濁度の総和は、各時点で表3の通り推計された。

表 - 3 放流水の濁度

	9/19	9/25	10/2	10/9	単位
総放流濁度	100	325	420	460	$\times 10^6 \text{度m}^3$

(4)水塊内の濁度

貯水池にて行った濁度調査結果から、計測した各時点において水塊内に漂っていた総濁度を計測濁度と水量の積として求めることとした。4測線における各標高の濁度は、横断方向に設けた全測点の平均値で代表することとした。また、貯水池の縦断方向の濁度分布に関しては4調査測線しかデータがないので、各測線の間中点まで各測線の平均濁度が代表できると仮定して推計計算を行った。貯水量は標高1mごとの容量を求め、これにその標高を代表する濁度を乗じて濁度の量とした。上記方法にて求めた各観測時点における濁度を表4に示した。

表 - 4 水塊内の濁度

	9/19	9/25	10/2	10/9	単位
水塊内濁度	1,010	570	380	300	$\times 10^6 \text{度m}^3$

(5)水塊から沈降した濁質

水塊から沈降した濁質の実測値はないので、前節にて求めた濁度ピークの沈降速度で沈降が起こっていたと仮定して、水塊の域外に沈降した濁度を推計した。推計方法としては、濁度分布のピーク標高の降下速度から求めた日平均降下速度の割合(表2)で濁質が沈降すると仮定して、水塊から域外へ下降した濁度量を推計した。ここに、沈降する濁質の鉛直濃度分布は考慮せず、水塊の下端の濁度に沈降速度と沈降面積、経過日数を乗じて推計を行った。以上の方法にて求めた推計沈降濁度を表5に示した。

表 - 5 水塊から沈降した濁度

	9/19	9/25	10/2	10/9	単位
沈降濁度	20	80	125	150	$\times 10^6 \text{度m}^3$

(6)計測方式の違いによる濁度の補正

現地観測の項で述べたように、取水塔と貯水池にお

ける濁度の計測は異なる方式を採用しているが、計測結果の比較から両者の実測濁度をそのまま比較することには矛盾が生じることが分かった。

取水塔では濁度を2時間間隔で計測しており、貯水池での計測に比べてその計測密度は非常に高い。そこで、時間的に変化する濁度のピークをほぼ捉えられていると考えられ、当該地点における実測最高濁度は88.2度であった。他方、貯水池内の濁度分布の調査は濁度のピーク時期には1回しか行われておらず、各地点における最大濁度を捉えられる可能性は小さい。しかるに、貯水池における計測濁度の最高値は106度であり、取水塔における計測最高濁度より2割以上も大きな実測値となっていた。従って、取水塔における計測濁度は、計測方式の違いによって貯水池のそれに比べて低い濁度と評価された可能性が想定された。

比較のため貯水池のSP400mと取水塔とで計測した9月19日の濁度をプロットしたのが図15である。貯水池内の濁度は左右岸で若干の差は認められるが、おおむね全断面で同様の鉛直分布を示している。一方、取水塔における計測濁度の分布形は似ているものの、その絶対値は左右岸及び中央部の何れの測点の分布と比較しても小さいことが分かる。当然のことながら比較可能な区間における平均濁度に関しても両者には差がみられ、SP400m断面における全測線の平均濁度の総和は取水塔のその約1.25倍となっていた。そこで、取水塔における濁度の計測値を1.25倍に引き伸ばしたところ、貯水池における各測点の計測結果との比較において、分布形と絶対値の両方でよい一致を示すことが分かった。そこで、本報告においては貯水池における濁度との比較に関しては、取水塔の計測濁度を1.25倍した値を用いることとした。

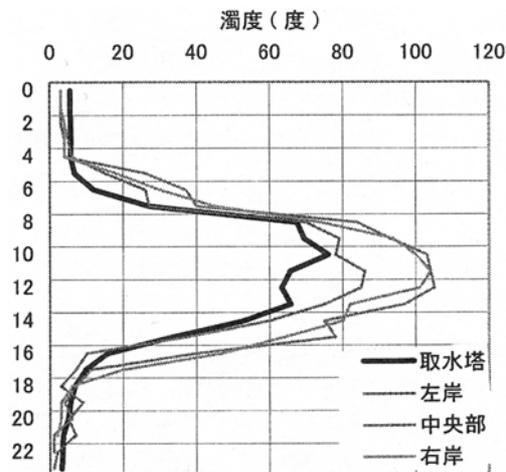


図 - 15 取水塔と貯水池の濁度計測値比較

(7)濁度のSS変換

濁度を物質量に変換するため、本洪水期間中に小樽内観測所にて7回観測したSSと濁度との関係を整理したのが図16である。両者の関係は一般に線形関係にあるといわれており、今回の実測結果もその関係を示している。両者の関係を原点を通る一次式で近似すると、次式で表すことができた。

$$y = 1.75x$$

ここに、y：SS(mg/l)

x：濁度(度)

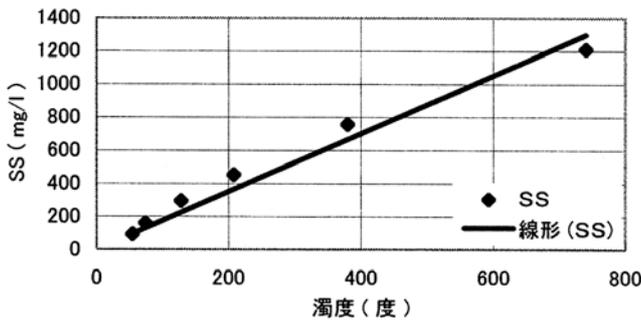


図 - 16 濁度とSSの関係

以上(6)、(7)より、計測濁度を濁質量に変換する式として次式を適用することとした。

$$B = ((3)\text{の濁度}) \times 1.25 \times 1.75$$

$$C = ((5)\text{の濁度}) \times 1.75$$

$$E = ((4)\text{の濁度}) \times 1.75$$

(8)第1回観測における濁質量の収支

今回の一連の調査においては、低層密度流としてダム底部を流れ下った濁質量(D)に関して調査を行っていない。一方、同量は出水が治まり、流水の濁度が低下した時点以降は無視できる程度と考えられる。そこで、洪水直後の9月19日に実施した貯水池の濁度計測結果及び(3)～(5)を用い、 $\epsilon = 0$ として連続式を適用してDを求めた。

$$D = 3,600\text{ton} - B - C - E = 1,600\text{ton}$$

また、AとDは出水が治まってからは一定と考えられるので、その他の濁質量の関係は次式で表すことができる。

$$B + C + E + \epsilon = 2,000\text{ton}$$

(9)第2回以降観測における濁質量の収支

次に、第二回以降の観測値をもとに連続式を適用して、浮遊化した濁質の行方を計算したところ、表6、図17が得られた。濁質量の推計誤差が各推計時点毎に200ton程となった。しかし、濁質の沈降速度がRube yの式ほどではないにせよ、本計算における想定より

幾分大きいとするならば沈降濁質量(C)が推計よりも大きくなり推計誤差が少なくなると考えられる。濁度等の実測値が面的にも時間的にも疎であったため、推計計算において大胆な仮定を導入したことを勘案するならば、推計誤差が残るとしても本推計結果はマクロで濁質の収支を説明できているように考える。

表 - 6 浮遊濁質の行方

	9/19	9/25	10/2	10/9	単位
B放流濁質	220	710	920	1,010	ton
C沈降濁質	30	140	220	260	ton
E浮遊濁質	1,760	1,000	660	530	ton
ϵ 推計誤差	0	150	200	200	ton
計	2,000	2,000	2,000	2,000	ton

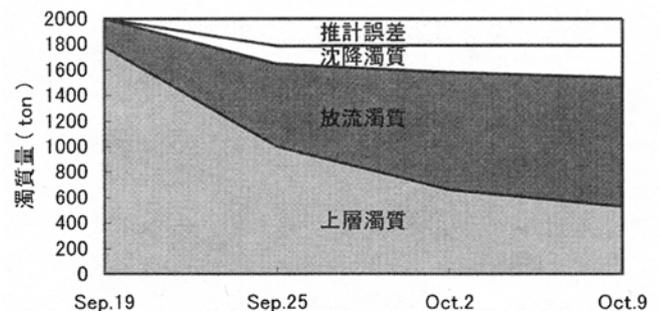


図 - 17 濁質の経時的移動

貯水池における濁度調査を最後に行った10月9日時点における濁質の動きを模式的に表すと図18のように整理することができる。これより、洪水後の3週間ほど高濁度層から取水(放水)を続けた結果、上層密度流として貯水池に流入した濁質の半分程度を下流に放流することができたことが分かる。洪水時における最大流入量が180m³/sに対して、最大利水放流量が8m³/s強に過ぎなかったにもかかわらず、貯水池内で拡散させることなく浮遊化した濁質の半分程度も放流できたことは選択取水の大きな効果と考える。

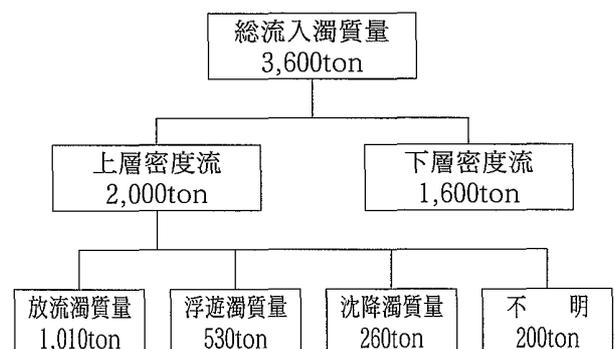


図 - 18 流入濁質の行方(10月6日現在)

5 まとめ

本調査は出水以前から計画されていたものではなく、高濁度の密度流がダム地点で観測された後に補足的に調査したものである。従って、検証の十分でない部分もあるが、マクロな現象理解はできたものとする。そして、以上の調査と分析の結果から、次の事項が分かった。

- (1) 1996年以降夏期においては表層取水を行っていたが、本洪水発生時には貯水池には貯水面から6m付近から急な温度勾配の躍層を持つ水温成層が形成されていた。このため、
- (2) 濁質を含んだ流水は、標高371m付近の躍層内を貯水池全体に層状に拡がりながら流下した。即ち、設計段階における目論見通りに温度躍層の狭い層に浮遊する濁質を封じ込められたことが確認できた。
- (3) 流入水の水温は12.4~1.35 であったのに対して、濁水の流入した層の水温は12 であった。これは濁質の影響で流水の比重が高くなり、より密度の高い低水温の層に流れ込んだものと考えられる。
- (4) 貯水池における濁度分布は時間の経過と共に低下したが、その傾向は濁質の放流を行っていたダムサイト付近のみにとどまらず上流まで及んでいた。
- (5) 貯水池上層の定温部の水温が下がり、定温域が高濁度層に達した際、濁質の混合拡散が定温層内で起こった。この際、混合は鉛直方向ばかりではなく、水平方向にも起こっていることが想定された。
- (6) 検証対象の洪水においては短時間に大量の濁質が貯水池内に流入し、その一部が貯水池内に漂うことになった。選択取水による放流は最大流入量の20分の1足らずの利水放流であったにもかかわらず、浮遊化した流入濁質の半分を排出できたと推計された。
- (7) 以上より、検討対象とした出水事例における貯水池の濁水管理については、選択取水装置は所期の目的に対して有効に機能したものと考えられる。

おわりに

今回調査対象とした定山溪ダムにおける出水では、

高濁度の水を3週間にわたって放流することができ、その結果、浮遊する濁質の半分近くを下流に流すことができた。しかし、通常河川では濁水の放流が長期化すると種々の問題が発生するため、短時間により多くの濁質を放流することが望まれる。そこで、常用洪水吐きから放流を行った期間で、今回と同量程度の濁質を放流しようとする、利水放流容量の約2倍の20m³/s程度の放流が必要となることが分かった。そこで、ダム設備の設計に当たっては、取水塔からの放流を利水放流のみに限定することなく、洪水放流も可能な構造とするならば、濁水管理がこれまで以上に効率的にできる可能性があるものとする。

また、今回の調査では貯水池の表層約23mの濁度を測り、流入した濁質の収支について調べた。しかし、ダム湖底を這うように流入した濁質に関しては未調査であり、また、貯水池内における密度流の流速に関しても未調査であった。そこで、1998年の出水を上回る出水において、低層の密度流や、密度流の流速、その他に関する調査を実施することができれば、貯水池内における濁質の挙動と、選択放流の効果をより明確にできるものと期待される。

参考資料

- 1) 観測データは北海学園大学工学部余湖典昭教授が計測したものを許しを得て引用させていただきました。
- 2) 濁度の計測方法に関しては、建設省河川局監修「河川水質試験方法(案)」試験方法編、技報堂出版、pp 379-384
- 3) 例えば、岩佐義郎編著「湖沼工学」、山海堂、pp198
- 4) 例えば、河村三郎著「土砂水理学」、森北出版、pp 23
- 5) 福岡捷二・福嶋祐介・村田和夫・荒井健：成層化した二次元貯水池における密度流の実験的研究、土木学会論文報告集、第283号1980年1月



石田 享平

北海道開発土木研究所
環境水工部長