

第5章  
貯水池における  
諸現象の調査研究



## 第5章 貯水池における諸現象の調査研究

### 5-1 貯水池の濁水長期化

平成19年9月に襲来した台風により、小河内貯水池は数か月の間、図5-1-(1)に示すような白濁状態となった。そのため、ダム下流の多摩川も長期間白濁状態となり、利水上様々な問題が発生した。白濁状態の原因と対策を検討するためにはその状態の把握が重要である。



図5-1-(1) 台風通過後の小河内貯水池

#### 5-1-1 データ解析による濁水長期化現象の把握

流入水質が大きく変動しても、放流水質の変動は小さく入力と出力の関係を捉えるのは難しい。流域河川流入水質と放流水の関係性を捉えるには相互相関分析を行うとよい。相互相関分析は、出力要因への入力要因が与える影響の時間差を算定する方法である。濁度の時間データを例にすると、時間単位で濁度の流入総負荷量と放流水の濁度負荷量 $(0_1, 0_2, \dots, 0_n)$ のデータを用意し相関係数を求める。さらに、流入水の影響が時間遅れで放流水に与える影響を求めるため、データを1時間ずらして $(I_1 : 0_2, I_2 : 0_3, \dots, I_{n-1} : 0_n)$ 相関係数を求める。これを繰り返し得られた図5-1-(2)の様な相互相関コログラム(相関係数のグラフ)を書く。相関係数は235時間で最大値を示し、235時間前の流入水の影響が放流水に現れていることを示す。

#### 相互相関分析

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} \{(x_t - \bar{x}_t)(y_t - \bar{y}_{t+k})\}}{\sqrt{\sum_{t=1}^{n-k} \{(x_t - \bar{x}_t)^2 (y_{t+k} - \bar{y}_{t+k})^2\}}}$$

$n$  : データ数,  $k$  : 時間遅れ,  
 $x$  : 流入3河川分の合成濁度,  
 $y$  : 放流の濁度

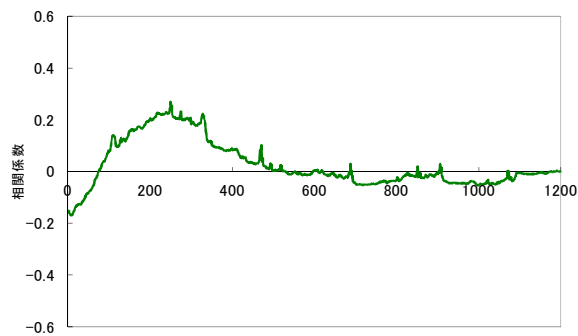


図 5-1-(2) 相互相関分析結果

この結果を用いて高濁度の流入水が放流水に与える影響期間を算定する。図 5-1-(3) に示すように水温躍層の上を流入水が流下していくと考える。

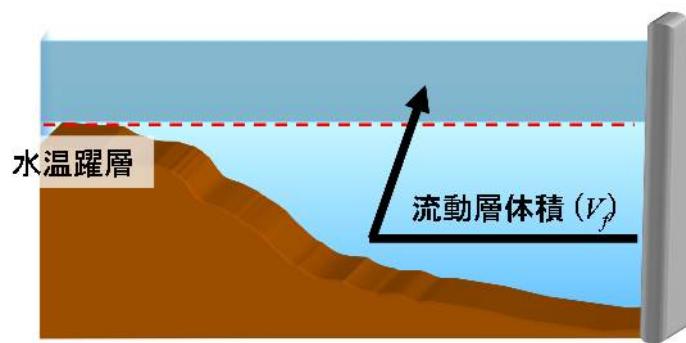


図 5-1-(3) 流動層の模式図

流入水のデータ期間をデータ開始時間：降雨イベント開始時刻、データ終了時間：丹波川の濁度が基底濁度の2倍を下回る直前時刻とし、図 5-1-(4) のように設定した。

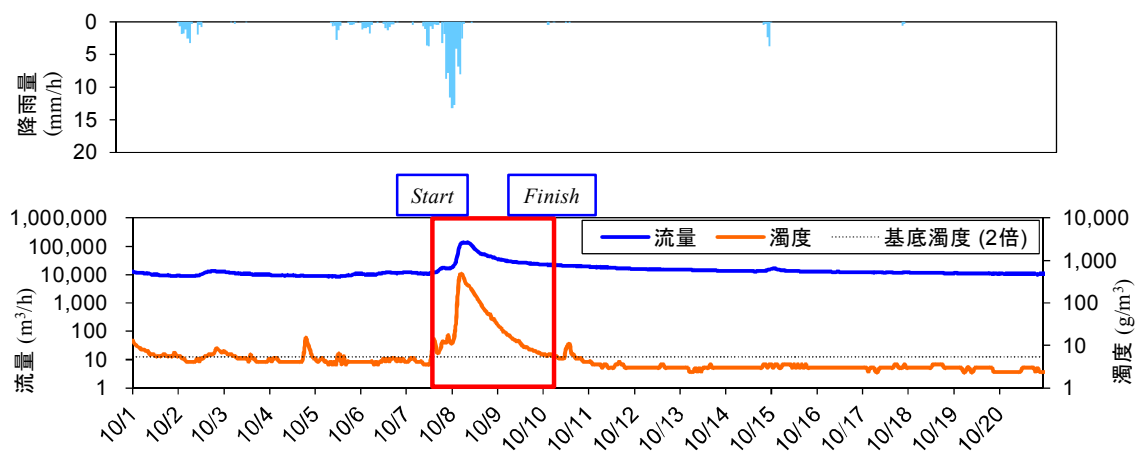


図 5-1-(4) 流入地点の影響算定期間

放流地点の影響算定期間はデータ開始時間に相互相関分析を用いて推定された流出に要する時間を基に決定し、データ終了時間は流動層体積を積算流入量が上回る時刻とした。その結果、図 5-1-(5) に示す高濁度水が放流されるまでの時間が算定された。

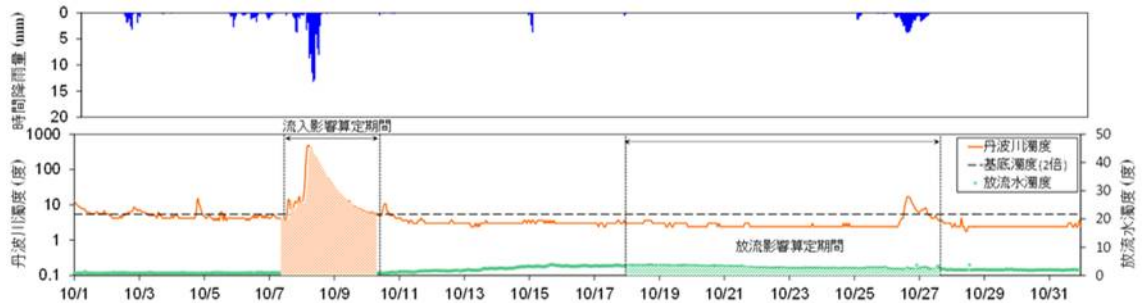


図 5-1-(5) 降雨量および濁度の時系列図

この結果を用いて、濁質の収支を算定することも可能である。算定には、小河内貯水池の各河川流入測水所での流量及び濁度の時間データを用いる。流入河川並びに放流地点の濁度は高濁度時の採水試料から求めたデータ(図 5-1-(6))から求めた SS 換算式を用いて濁度から濁質濃度 (SS) に換算している。

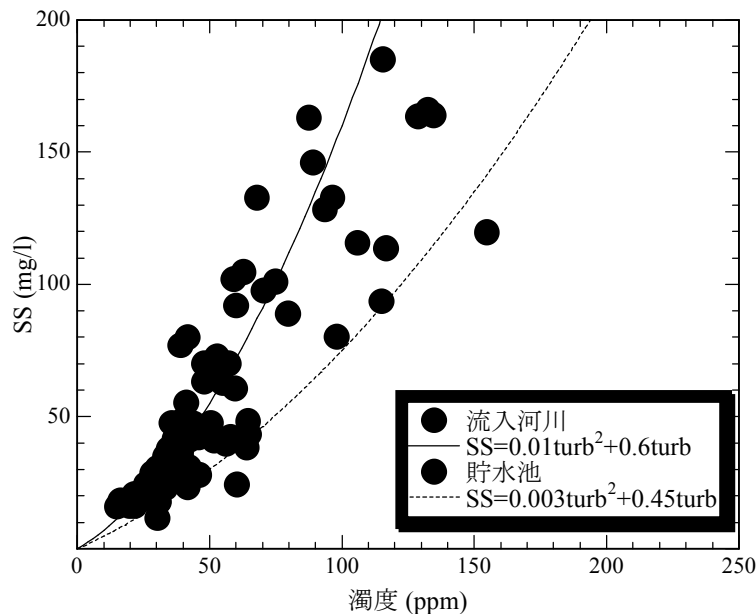


図 5-1-(6) 高濁度時の SS と濁度の散布図

濁度測定値から SS(濁質濃度)への換算式

流入河川 :  $SS = 0.01Tb^2 + 0.6Tb$

放流水 :  $SS = 0.003Tb^2 + 0.45Tb$

濁度データを濁質濃度に変換後、まず、相互相関分析により、降雨イベントの流入高濁度水の放流の時間遅れ(流出に要した時間)を求める。推定した流出時間を基に算定した流動層体積を降雨イベント毎にまとめたものを表 5-1-(1)に示す。

表 5-1-(1) 降雨イベント毎の流動層体積

	年月日	放流開始までの所要時間 (時間)	流動層体積 (m <sup>3</sup> )	放流終了までの所要時間 (時間)
降雨A	2009年10月7日	250	874	492
降雨B	2010年6月29日	350	1,722	418

流出時間 k と流動層体積より求めた各降雨イベントの貯水池流入開始時刻と終了時刻、放流開始時刻と終了時刻(濁質収支算定期間)を表 5-4-(2)に示す。

表 5-1-(2) 降雨イベントの濁質収支算定期間

2009年10月7日				2010年6月29日			
開始時刻		終了時刻		開始時刻		終了時刻	
流入	2009/10/7 6:00	流入	2009/10/10 7:00	流入	2010/6/29 17:00	流入	2010/7/1 18:00
放流	2009/10/17 16:00	放流	2009/10/27 17:00	放流	2010/7/14 7:00	放流	2010/7/17 2:00

算定された流入期間と放流期間より、流入と放流地点における濁質収支を求め、貯水池内に残存する濁質量を算定する。

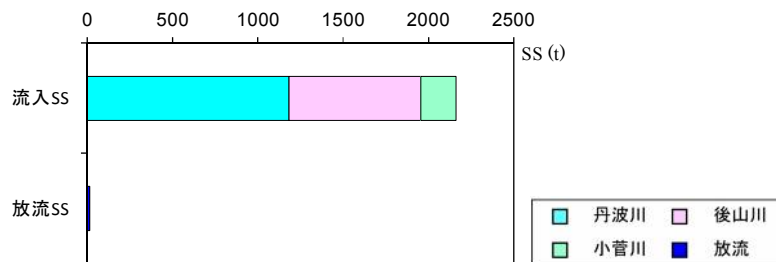


図 5-1-(7) 降雨イベント A の濁質収支算定結果

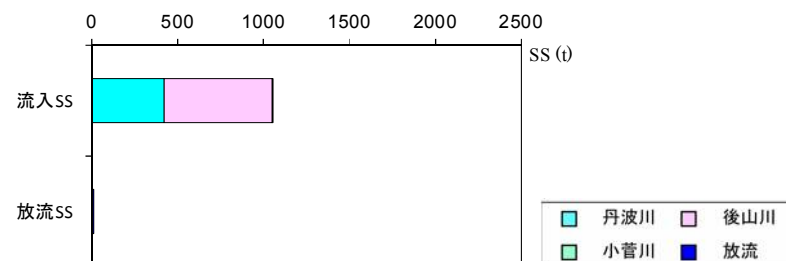


図 5-1-(8) 降雨イベント B の濁質収支算定結果

図から明らかなように、降雨イベントAの場合、2165(t)のSSが流入し、降雨イベントBでは、それぞれ1054(t)のSSが貯水池内に流入したことが推定できたことから、降雨の規模が大きくなるに従い、流入SSが多くなることが示された。

さらに、各降雨イベントにおける流入SSに対する放流SSの割合は、0.8%(A)、1.0%(B)であったことから、規模の大きな降雨によって流域からSSがもたらされるに伴い、沈降し易いSSが多く流入する傾向にあることが考えられる。実際には、流入水量と同じ水量が放流した後も微細な粘土やシルトが浮遊して残留しており、晴天時の清澄な河川水によって薄められた状態で徐々に放流されており、降雨影響はかなり長期にわたって及んでいると考えられる。

### 5-1-2 セディメントトラップを用いた濁質調査

大雨による濁質の長期滞留の状況を把握するには、貯水池内での深度方向の濁質の挙動を把握することも重要である。

濁質の状態を捉えるには図5-1-(9)に示すようなセディメントトラップ(捕集瓶)を用い、一定期間経過後、捕集瓶内の濁質を採取し、その成分分析を行う。貯水池内で発生した藻類も捕集されるため、粘土、シルトを対象とする場合は、瓶内から回収した試料を強熱して有機物を除去する。

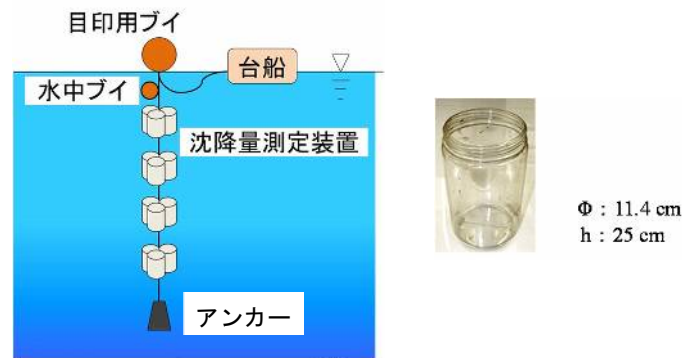


図5-1-(9) セディメントトラップの例

また、セディメントトラップを用いて沈降量や高濁度水の位置を推定することも可能である。図5-1-(10)に示すように水深17mから37m付近を高濁度水が流下していったことが推察できる。

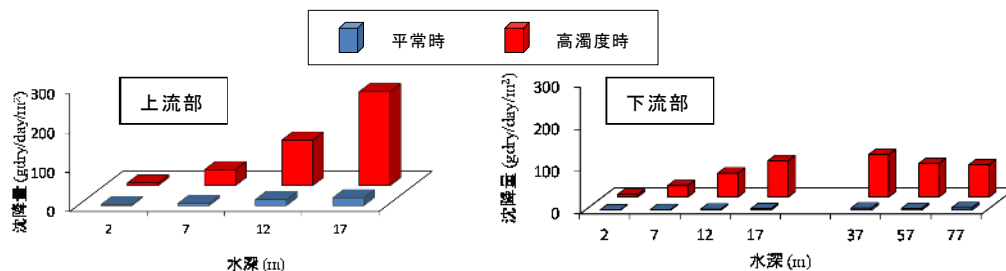


図5-1-(10) 上流部と下流部の沈降量の比較

セディメントトラップで捕捉された粒子の粒度分布を調べると濁質の特徴がわかる。図5-1-(11)に示すように平常時にはシルトが大部分を占めていたのに対し、高濁度時には、粘土粒子が多くを占めている。

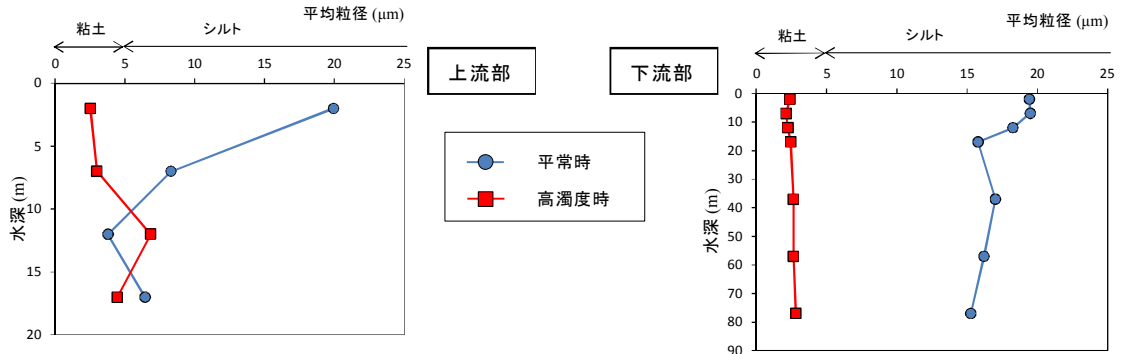


図 5-1-(11) 沈降物質の平均粒径

また、多項目水質計を用いて水深方向に濁度等を測定し、濁度最大となる水深の水をバンドン式採水器などで採水し、高濁度水の分析を行うことにより濁水の性質を把握することもできる。

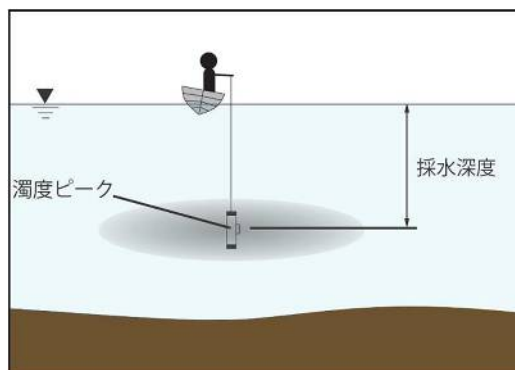


図 5-1-(12) 多項目水質計による最大濁度水深の測定

## 5-2 分画フェンスの機能

### 5-2-1 分画フェンスの設置状況

小河内貯水池では、藍藻類によるアオコ発生が問題となり、その増殖場所が貯水池上流部（河川流入部）であることが確認されている。そこで、藍藻類の湖心への拡散を防ぐ目的で、平成16年から貯水池上流部に分画フェンスが設置された（図5-2-(1)）。また、分画フェンスにより、栄養塩を多く含む河川流入水が深層に誘導され、湖心部表層での藻類の異常増殖を抑制することが期待された。

分画フェンスは不透水性シートの上辺にフロート、下辺に錘をつけたもので、貯水池の谷を横断するように水面から吊り下げてある。丹波川と小菅川の流入部には深さ2 mの第二フェンスが設置されており、さらに少し下流側には深さ10 mの第一フェンスが設置されている。峰谷川の流入部には、深さ10 mの分画フェンスが設置されている。

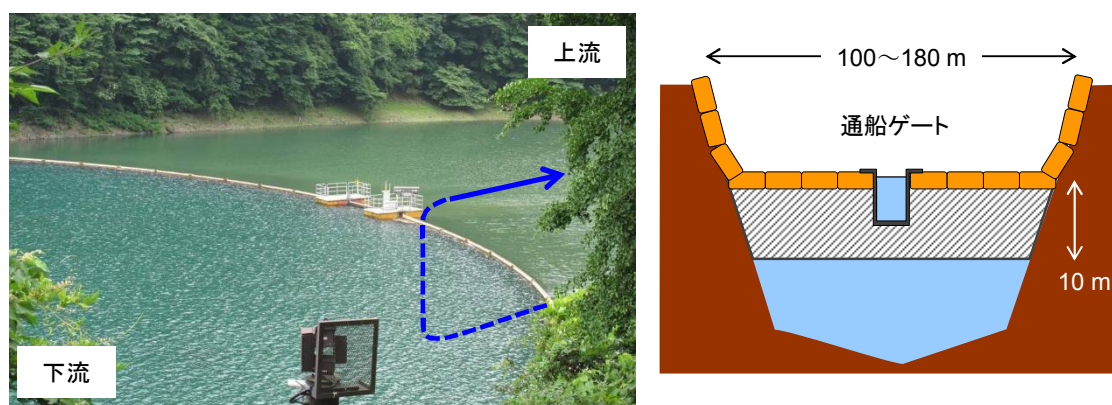


図 5-2-(1) 分画フェンスの設置状況

### 5-2-2 分画フェンス周辺の水温・流れ

#### (1) 観測方法

丹波川流入部の分画フェンス付近で水温と流速の鉛直分布を計測した（図5-2-(2)）。St. 1は河川流入部付近で、St. 6が分画フェンスの直上流、St. 7が直下流である。超音波流速計（周波数1200kHzと600kHz）を用いて、作業船により湖底設置、引き上げ、移動、再設置を繰り返して、縦断的な分布データを取得した。1地点あたりの停泊時間は15分間であり、層厚は0.5 mである。また、有線式の多項目水質計を用いて水温、濁度、クロロフィルの鉛直分布を0.1 m間隔で計測した。観測は2008年7月15日である。

#### (2) 結果

上流部のSt. 1~St. 4では底層に100 mm/s程度の流れがみられ、St. 5~St. 8では水深10 m付近に流速ピークが存在している。これは冷たい河川水が貯水池の湖底を下層密度流として流下してゆき、St. 5付近で湖底から剥離して水深10 m付近の等水温帯に貫入し、



中層密度流となって湖心部に移動している様子を表している。

その後、河川水層の上部は分画フェンスに衝突して湧昇・反転流となり、水深2~6 mを上流に向かって移動している(図5-2-(1)の青線のイメージ)。また、河川水層の下部は分画フェンスの下端を通過してから、徐々に浮上し、水深5 m付近を下流(湖心)に向かって移動している。観測期間内の取水施設のゲート位置は水深6.5 mに設定されており、分画フェンスを通過した河川水を、効率よく堤体方向に導いていると考えられる。

水温の鉛直分布を見ると、分画フェンスの下流の方が表層の温水層(赤色の部分)の厚みがあり、上流側は水深2~10 mまで水温が比較的一様になっている。分画フェンス下流側の水温は、図では一部分に見えるが、湖全体に広がっている。

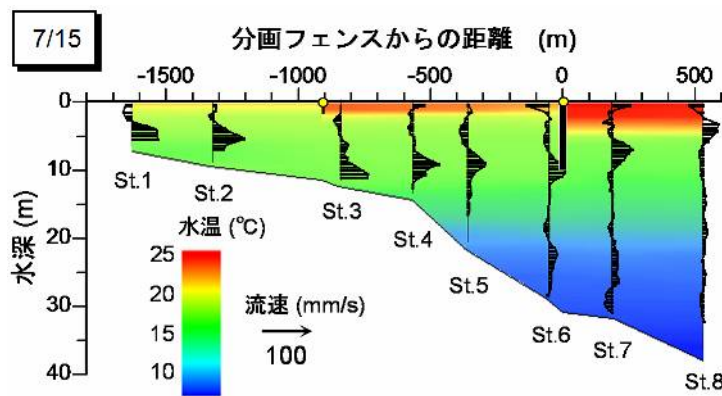


図5-2-(2) 分画フェンス周辺の水温と流れ

### 5-2-3 シミュレーションによる流動現象の理解

三次元流体モデルを用いて、分画フェンスが水温・流動におよぼす影響を検証した。本モデルは、基礎方程式に非圧縮とブジネスク近似を施した3次元Navier-Stokes式と連続式を用いており、静水圧近似の流体モデルである。計算格子にスタガード格子を用いUltimate Quickest法によって離散化している。乱流モデルはLESを採用している。

水平方向のグリッドサイズ(dx, dy)は可変であり、分画フェンス周辺は12.5 mのグリッドを用い(水面幅180 mを15分割)、分画フェンスから離れるにしたがって25 m、50 m、100 mとグリッドサイズを大きくして計算時間を短縮した。鉛直方向はdz=1.0 mである。検証期間は2008年7月10日から20日である。

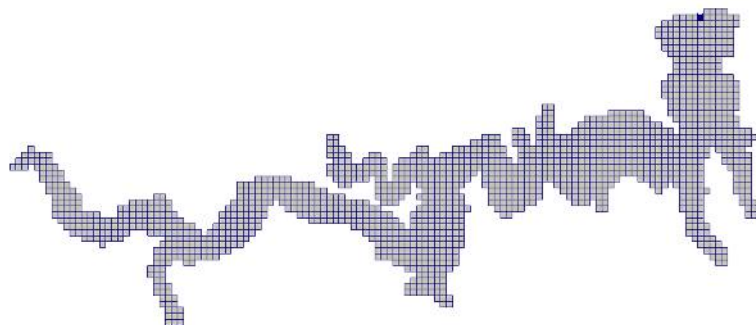


図5-4-(3) 数値計算の格子例(全域50mの場合)

最初に貯水池全体に7月10日0時の分画フェンス下流側の鉛直水温分布を与えた。これは分画フェンスが無かったと仮定したときの状態に相当する。上流からは河川流量を与え、ダム付近の取水施設から放流し、また水面には気象（気温、日射、風）を与えた。

分画フェンス付近の計算結果を図5-2-(4)に示す。計算開始時は仮想的に分画フェンスの上流と下流を同じ水温分布にしていたが、時間の経過とともに水温構造に差が出てくる。例えば、水温17.3℃の等値線は計算初期に水深5mにあったが、上流側では徐々に水深10m付近まで下がってゆく。また、72時間後には、分画フェンス下流側で表層水温が上昇するにもかかわらず、上流側では低く維持されている。

図5-2-(5)に96時間後の分画フェンス周辺の流動と水温分布を示す。水深10m付近の流れは河川水の密度流を表しており、分画フェンスに衝突する流れと、潜り込んで浮上する流れが存在することが分かる。流速ベクトルが小さくて分かりにくいものの、分画フェンスに衝突した流れは上昇して反転流になっている。現地で観測された水温分布と流れが良好に再現されていることから、分画フェンスが存在することで特徴的な水温・流動構造が形成されることが明らかになった。

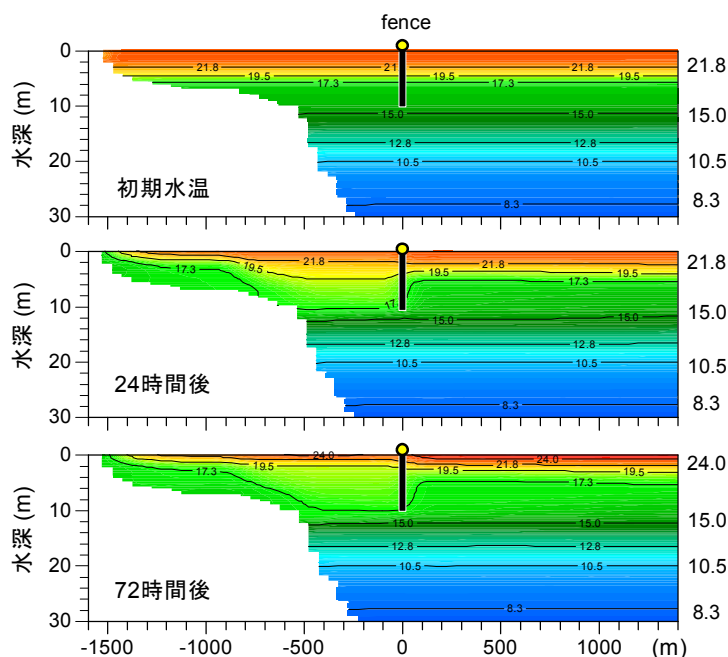


図5-2-(4) 分画フェンスによる水温の変化過程

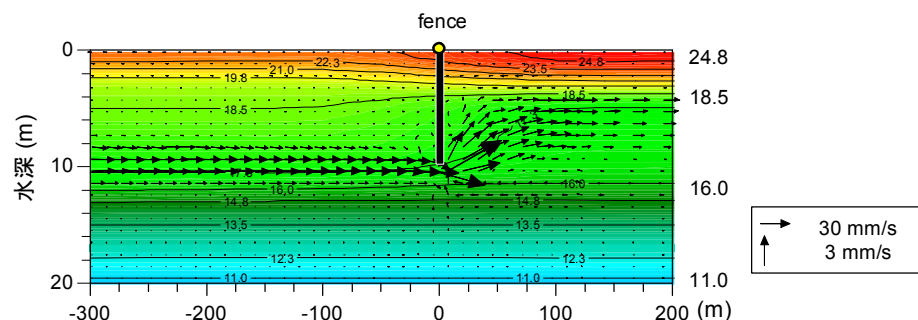


図5-2-(5) 分画フェンス周辺の流動構造（色は水温を表す）

#### 5-2-4 分画フェンスの効果

現地観測および数値シミュレーションの結果から、分画フェンスの機能や効果について考察すると、次のようになる。

夏季は貯水池の表層が暖まるので、河川水の方が相対的に冷たく、そのために河川水は中層密度流として貯水池の中を移動する。その移動水深が分画フェンスの深さよりも浅い場合、河川水の一部は分画フェンスに衝突して湧昇・反転流を形成し、鉛直混合が促進される。そのため、分画フェンスの上流側では下流側よりも水温が低くなり、かつ混合層の厚みが分画フェンスの深さと同程度になる。

夏季のアオコ（ミクロキスティス）は水温が 20℃以上になると活性が高まり、25℃を超えると大増殖につながると言われており、分画フェンスは上流湖水の冷却を促進することでアオコが増殖しにくい環境を作り出している。さらに、植物プランクトンは流れが弱くて光の届きやすい水域で増殖しやすい。そのため、分画フェンスは鉛直混合や流れを生み出すことで、植物プランクトンの増殖を抑制していると言える。

つまり、分画フェンスは異常増殖したアオコの湖心への拡散を防止する目的で設置されたが、それだけではなく、上流側の流れと水温構造を変化させる効果があり、物理的にアオコが増殖しにくい環境を作り出していることが分かった。

### 5-3 表層水移送装置の機能

#### 5-3-1 表層水移送装置の概要

小河内貯水池では上流部で発生するアオコを、分画フェンスで堰き止めつつ、表層水移送装置で吸引して無光・低水温の湖底に放流し、その活性を失わせる方策が検討された（図 5-3-(1)）。

表層水移送装置は最大出力 15 kw のポンプと直径 1 m、全長 500~800 m のフレキシブルホースで構成されている。分画フェンスの上流側に設置された集積装置が、表層のアオコ等を吸引し、フレキシブルホースにて下流まで輸送することで満水時水深が 40 m の地点にて吐出する。最大出力時の流量は 0.64 m<sup>3</sup>/s である。また、吐出された水流による底泥の巻き上げを防ぐため、吐出部には幅・奥行き 2 m、高さ 1 m の金属かごが取り付けられており、側面がメッシュ、上面と下面は板である。

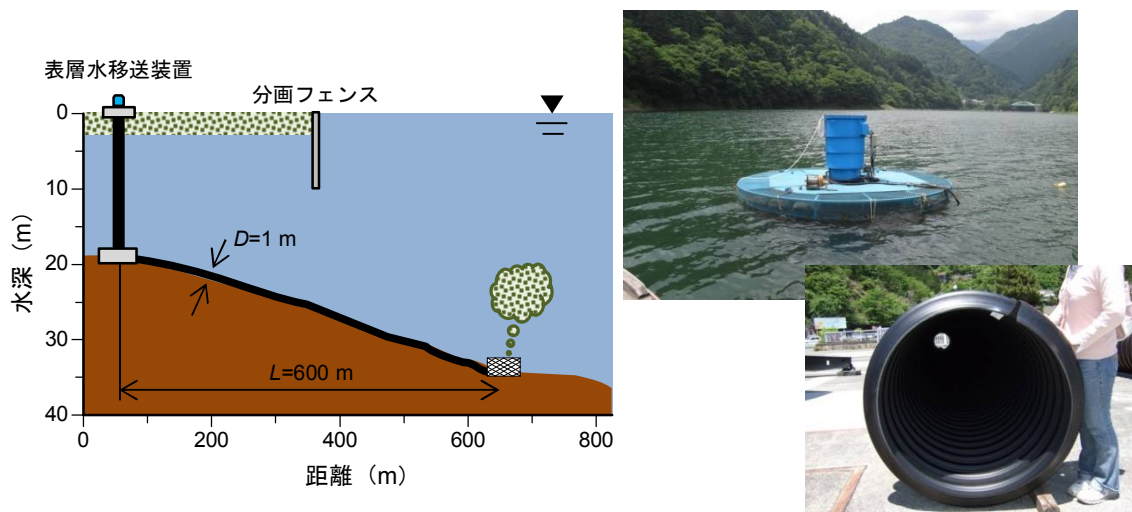


図 5-3-(1) 表層水移送装置の設置状況

### 5-3-2 吐出水のプルーム運動

表層から移送された吐出水の挙動を把握するため、吐出口周辺で水温、クロロフィル a 濃度、濁度、流速を詳細に計測したところ、水温が最も顕著な傾向を示した (図 5-3-(2))。

メモリー式水温計を 1~2 m 間隔で取り付けられたロープ (サーミスターチェーン) を作成し、これを吐出口の金属かご (St. B) と、そこから 10 m 離れた場所 (St. A) に取り付けて、10 分間隔で水温鉛直分布をモニタリングした。計測期間の前半は表層水移送装置を稼働させ、後半 (9 月 3 日以降) は停止させている。

まず、St. A (吐出口から 10 m 離れている) では装置の稼働・停止に関わらず水温はゆるやかに日変動していた。一方、St. B (吐出口の真上) では、装置の稼働中に湖底から水深 15 m までの約 10 m の範囲で水温が著しく乱れており、水深 13 m 付近では安定していた。さらに、装置を停止させると St. A と St. B の水温構造は同じになった。

表層の平均水温は約 26°C であり、湖底の水温は 8°C であるから、温水が湖底の冷水中からわき出している状態になっている。このとき、温水の密度は小さく、冷水の密度は大きいので、水塊同士の密度差によって浮力が生じ、温水が上昇してゆく。これを「プルーム」と言う。プルームは煙突から放出される煙のように渦を巻きつつ、周囲流体の流れが影響して揺らぎつつ湧き上がっていくので均質な流体ではない。St. B の下層で水温が乱れているのは、この現象である。

さらに、プルームが浮上する際には周囲の冷水を連行してゆくの、徐々に希釈・冷却されてゆく。そして、周囲水の密度と等しくなる水深においてプルームは浮上を停止して、水平方向に移流してゆく。水深 13m よりも上層では 2 地点の水温が等しいことから、この水深でプルームが浮上を停止し、水平に拡がってゆくことを示している。

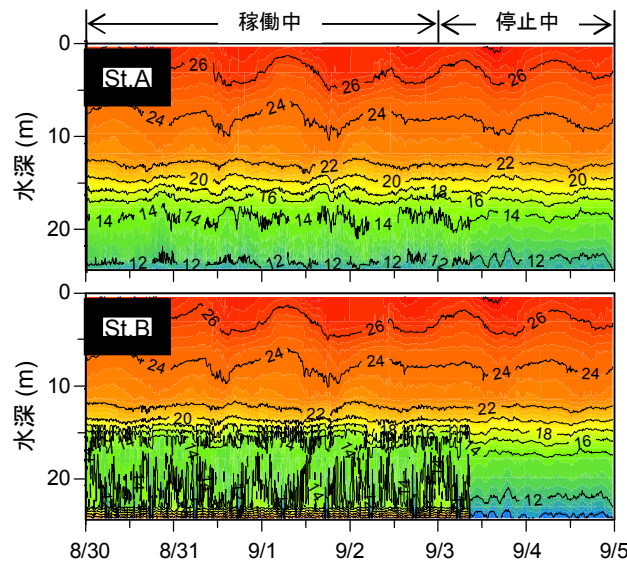


図 5-3-(2) 吐出口直上 (St. B) と 10m 離れた地点 (St. A) の水温変動

### 5-3-3 プルーム運動の一次元鉛直解析

吐出水浮上をプルーム現象として考える。プルームとは冷水中を温水が浮力効果で上昇する現象であり、浮上が停止する水深は鉛直 1 次元解析 (図 5-3-(3)) により推定できる。プルームの渦運動は非常に複雑だが、連行という横流入の概念を導入することで、現象を簡略表現することができる。

周囲水のプルームへの連行速度  $v$  は以下の通りである。

$$v = \alpha_j w \quad (5-3-1)$$

ここで、 $\alpha_j$  は連行係数であり 0.1 とする。 $w$  は鉛直流速である。プルーム内の鉛直流速  $w$  は矩形分布と仮定し、拡がり幅 (半径) を  $b$  とする。プルーム流量  $Q$  は周囲水の連行により増大する。プルームの単位質量あたりの浮力は以下の通り。

$$g' = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} g \quad (5-3-2)$$

ここで  $\rho_1$  : 放出流体の密度、 $\rho_2$  : 周囲流体の密度、 $g$  : 重力加速度とする。放出浮力流束  $H$  は流下方向に保存され以下のようなになる。

$$H = g' Q \quad (5-3-3)$$

$z$  を仮想原点からの距離とすると広がり幅  $b$ 、鉛直流速  $w$  は以下のようなになる。

$$b = \frac{6}{5} \alpha_j z \quad (5-3-4)$$

$$w = \frac{5}{6\alpha_j} \left( \frac{9}{10} \alpha_j \frac{H_0}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot z^{-\frac{1}{3}} \quad (5-3-5)$$

なお、吐出水は水平に放出されるので、放出された瞬間は水平方向の運動量を持つ。しかし、吐出水はかごのメッシュ板に当たると反発力を受け、さらに、メッシュを通過する際に大きく乱れるのでレイノルズ応力が発生し、これらの力により水平方向の運動量はほとんど解消される。その結果、浮力のみによる上昇現象として考えることができるので、放出浮力流束を一定としてブルームの浮上速度、広がり幅、連行速度が求まる。さらに、周囲水の連行により水温が低下して、浮上流量が増大する過程を計算できる。

計算条件として、吐出水の流量はポンプ出力から与えられる最大流量の  $0.64 \text{ m}^3/\text{s}$ 、水温は実測値の  $26.3^\circ\text{C}$ 、周囲水の水温は吐出口から  $50 \text{ m}$  離れた地点の実測分布を与え、湖底では  $8.0^\circ\text{C}$ 、水面では  $28.2^\circ\text{C}$  とした。そしてブルームの単位高さ  $dz$  を  $0.1 \text{ m}$  とし、ブルームの浮上に伴う水温変化を計算した (図 5-3-(4))。その結果、ブルームの水温は水深  $13 \text{ m}$  で貯水池水温と等しくなり、浮上が停止すると推定された。これは、現地観測の結果と一致しており、吐出水がブルームとして浮上していることが理論的にも確認できた。

なお、現地観測では水温以外の項目では、吐出水の動きらしい変化を捉えることができなかった。ブルームの直径が停止水深において  $4.6 \text{ m}$  と推定され、大型貯水池においては点に過ぎないため、ブルーム運動を捉えることは難しいことが分かった。

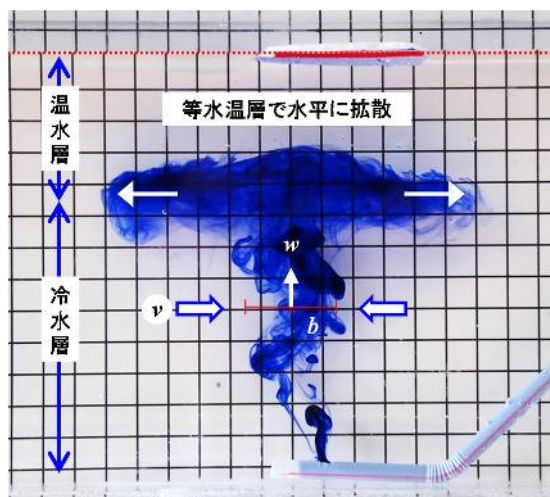


図 5-3-(3) プルームの概念

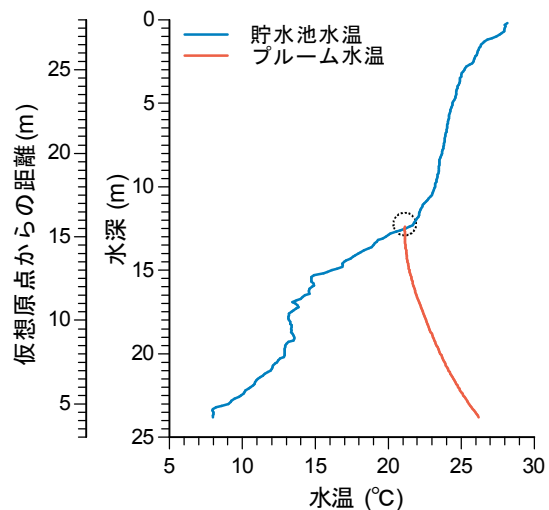


図 5-3-(4) 鉛直一次元解析の結果

#### 5-3-4 三次元流体シミュレーションによる吐出水の運動の確認

鉛直一次元解析による吐出水の浮上過程を三次元流体シミュレーションに組み込んで、吐出水の動きを確認した。これは、一つの格子内で仮想的に連行・希釈計算を行う方法である。計算開始から  $96$  時間を助走期間として、その後、分画フェンス上流側にトレーサーを散布し、表層水移送装置を稼働させた。トレーサーとは着色料のようなものであり、浮力・沈降速度を持たない濃度物質である。

装置稼働から  $24$  時間が経過すると (図 5-3-(5))、表層のトレーサーが上流部に移動し、また、分画フェンスの下流側 (縦断距離  $1,200 \sim 1,800 \text{ m}$ ) の水深  $15 \text{ m}$  付近にトレーサーが出現している。これは、表層に散布したトレーサーが吹送流によって上流側に移動し、

吸入口から表層水移送装置によって吸い込まれ、約 600 m 下流にある吐出口から放出されて、ブルームとして浮上した表層水が水深 15 m 付近で浮上を停止して、水平に広がっている様子を表している。

また、水深 15 m の平面図では、上流（左側）にも 5~10 mm/s の流速ベクトルが延びている。このように、表層水移送装置が生み出す流れは規模が小さいものの、ブルームが浮上・水平移動する水深層において、広範囲の流れを形成することが明らかになった。

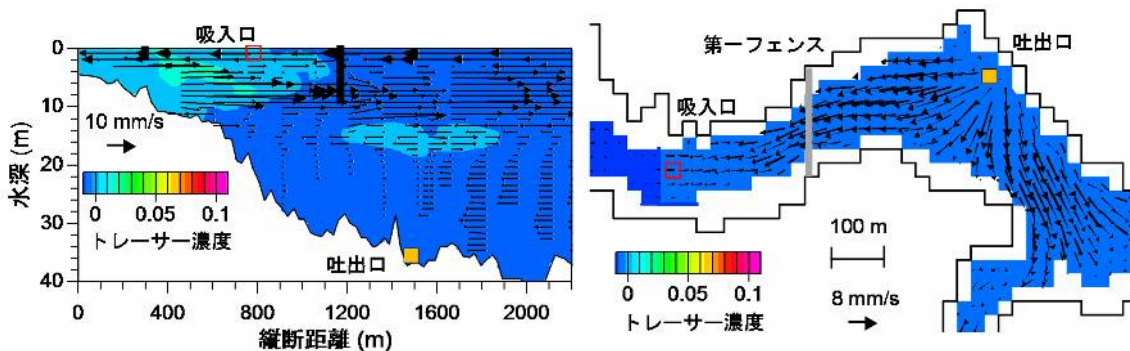


図 5-3-(5) 表層水移送装置の稼働による流れの状況（左：縦断、右：平面）

### 5-3-5 表層水移送装置の効果

表層の植物プランクトンは湖底に放出されて、ブルームとして浮上する。このとき、ブルームが光合成の補償深度よりも深い場所で停止すれば、「植物プランクトンの活性を失わせる」という目的を達成できる。

このことを確認するため、小河内貯水池において、多項目水質計を用いて水温・クロロフィル色素濃度・濁度・光強度の鉛直分布を 0.1m 間隔で測定した。観測期間は 2014 年 5 月 22 日から 10 月 4 日である。光量子データから補償深度を求め（2-6-1）、水温データとブルームの鉛直次元モデルから浮上停止水深を推定して（5-3-3）、両者を比較した（図 5-3-(6)）。

補償深度は 5 月下旬には水深 12 m 程度であるが、徐々に浅くなってゆき、6 月中旬から 8 月中旬までの期間では水深 9m 程度となり、その後、9 月以降は再び水深 12 m 程度になっていた。この変動はクロロフィルや濁度と関係している。これらは懸濁粒子であるので光の透過を阻害するため、補償深度はクロロフィルのピーク水深よりも 2~5 m の下部に位置し、また濁度のピーク水深付近に位置していた。

5 月から 6 月初旬までは補償深度よりも上部にブルームが浮上するので、この期間は装置を稼働すると逆効果である（単に下流に拡散させているだけになる）。7 月~9 月は補償深度よりも深い場所でブルームが停止するので、植物プランクトンの活性を低下させる効果があると言える。なお、2012 年と 2013 年でも同様の検討をしたところ、毎年、傾向は同じであった。

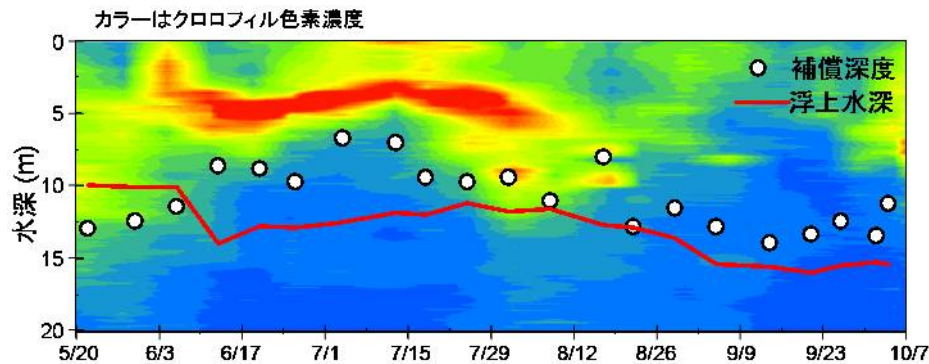


図 5-3-(6) クロロフィル濃度と補償深度、プルームの浮上

#### 5-4 選択取水の機能

栄養塩を含む河川水や洪水時の濁水を効率的にダムから排出するためには、取水施設の運用が重要である。取水ゲート付近の引き込み流れの流速分布を把握し、流動シミュレーションに組み込むことで、ゲート開度と排出効率の関係を推測することが可能になる。

本研究では、乱流計測用の超音波微流速計を用いて取水施設内の流速を計測し、流速分布をモデル化した。

##### 5-4-1 選択取水施設の概要

小河内貯水池では当初、貯水位 28m (満水位からの水深 73.5m) の第一取水管から放流を行っていたが、放流水の冷水対策のために表層付近から取水できる第二取水 (選択取水) 施設を増設した (図 5-4-(1))。本施設は、6 段の可動プレートから構成される幅 6 m の多段ゲート構造となっている。湖水をピンポイントの水深から引き込むのではなく、ゲート頂部から水面までの全範囲の水を引き込む構造になっている。ゲートの下端は貯水位 65 m にあり、取水範囲はそこから表層までの 36.5 m である。

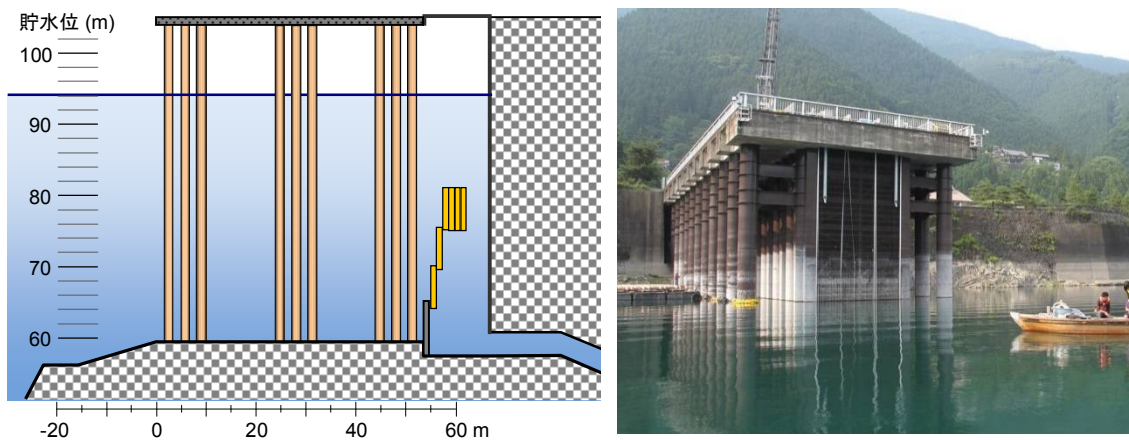


図 5-4-(1) 小河内貯水池の選択取水施設



#### 5-4-2 取水施設内の流速計測

第二取水施設の内部において、流速・水温・濁度の鉛直分布を観測した。一般に用いられる超音波多層流速計は、音波が中心角から 20 度ほど広がるため、構造物近傍の流れを計測できない問題がある。また、表層水移送装置や取水施設などの構造物によって生み出される流速は非常に微弱であるため、それに対応した測定機が必要である。

本研究では、乱流計測用の超音波微流速計を用いた。この装置は超音波多層流速計よりも 10 倍以上精度が高く、数 mm/s の流速を測定できる。一方、点計測であって鉛直分布の同時計測は出来ない。そこで、取水ゲートから約 10 m 離れたところにある管理用ステージから超音波微流速計をワイヤーで吊り下げて、移動と静止を繰り返しながら流速の鉛直分布を計測した(図 5-4-(2))。流速計が回転しないように両端をワイヤーで固定し、水深 0.5m ごとに 30 秒間静止させて 16 Hz ないし 32 Hz でデータを取得し、その平均値を求めた。

また、同時に多項目水質計を用いて水温・濁度の鉛直分布を測定した。これらの観測は 2008 年と 2009 年の夏季に 10 回実施した。

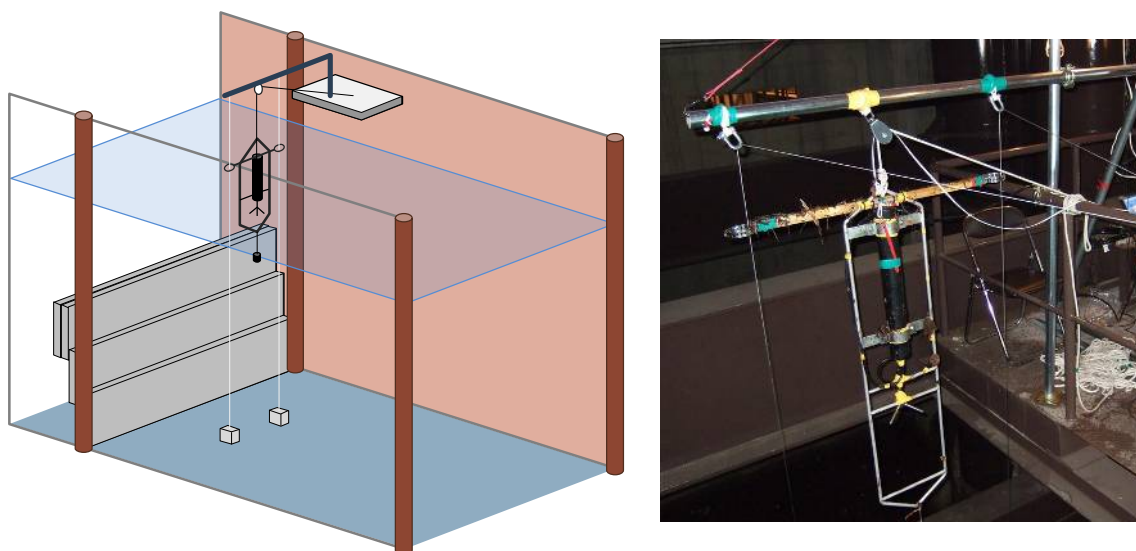


図 5-4-(2) 超音波微流速計による取水流れの計測

#### 5-4-3 取水施設内の流速分布

計測は様々な放流量・ゲート高さの組み合わせで 10 回行った(図 5-4-(3)は代表 2 例)。流速の最大値は 0.1~0.2 m/s であり、最大流速の発生位置はゲート上端よりも数 m 上部であった。その鉛直分布は正規分布に近い。同じ日に放流量を 9.0 → 10.5 → 12.0 m<sup>3</sup>/s と変化させると、最大流速も 0.150 → 0.190 → 0.192 m/s と大きくなった。流動層の厚さも放流量の増加に伴って増大し、ゲートより下側に引き込みの影響が拡大していた。取水塔内部と外部の水温分布はゲートよりも下側で異なっており、取水塔内部の水温は約 3 度低い。これは、貯水池の深層水がゲートに向かって引き上げられているためである。

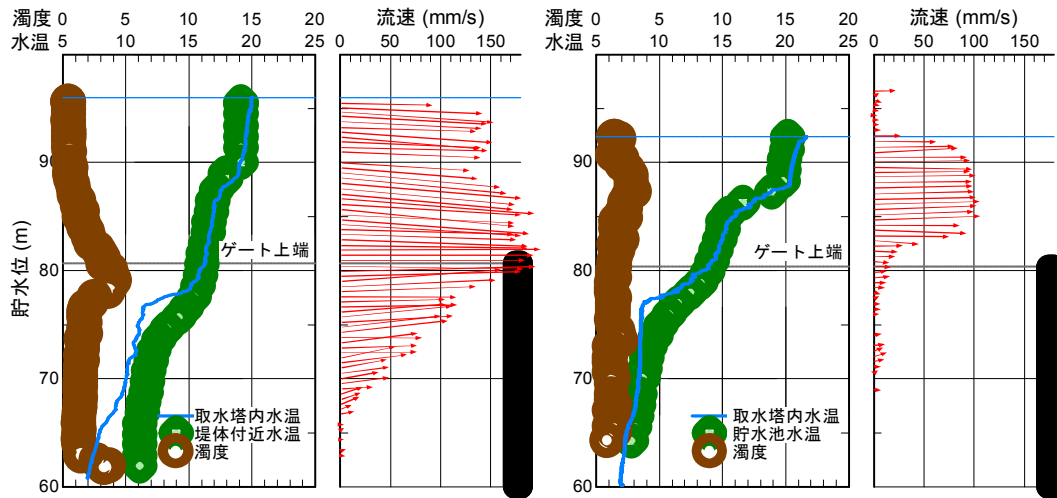


図 5-4-(3) 多段ゲート前面の水温・流速鉛直分布

(左：2008年10月2日、放流量 16.0 m<sup>3</sup>/s、右：2009年6月19日、放流量 4.0 m<sup>3</sup>/s)

また、放流量が 6 m<sup>3</sup>/s よりも大きい場合は一次躍層よりも上部の表層に一定流速が発生し、6 m<sup>3</sup>/s を下回ると表層の引き込み流れは弱くなった。

#### 5-4-4 取水による流速分布のモデル化

二次元水路での実験値を基に得られた Brooks・Koh の流動層厚  $\delta$  は次の通りである。

$$\delta = A \left( \frac{q}{\sqrt{g d_\epsilon}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5-4-1)$$

$$d_\epsilon = \frac{\rho_G - \rho_s}{\rho_G} \frac{1}{Z_G} \quad (5-4-2)$$

ここで、 $q$ ：単位幅あたりの取水量、 $d_\epsilon$ ：水面とゲート上端の相対密度差の勾配、 $\rho_s$ ：水面密度、 $\rho_G$ ：ゲート上端の密度、 $Z_G$ ：水面からゲート上端までの距離、 $A$ ：定数 (2.7±0.2)、である。小河内貯水池の取水施設は十分に貯水池に張り出しているため二次元水路での実験結果の適用性が高いと考えられ、密度勾配と取水量のみで評価できる利点がある。

流速分布は正規分布として扱う。

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (5-4-3)$$

ここで、 $f(z)$ ：確率密度関数、 $\sigma$ ：標準偏差 (=  $\delta/3.92$ )、 $z$ ：中心からの距離である。

表層の流速は前節で述べたように、一次躍層より上部で一定流速となり、かつその大きさは放流量により変化する。そこで、放流量が 6 m<sup>3</sup>/s より大きい場合は一次躍層の位置の流速を水面まで一定に引き延ばし、6 m<sup>3</sup>/s より小さい場合はゼロとする。

正規分布の中心座標 (最大流速が現れる水深) は、既往研究では水面とゲート上端の中

心に設定することが多いが、明確な根拠は示されていない。小河内貯水池での実測結果からは、ゲート上端から 2 m 程度上部に最大流速が現れることが多いため、本検討では正規分布の中心をゲートの 2 m 上部に設定する

以上から、流動層厚と相対流速分布を求め、流動層下端  $z_b$  から表面  $z_s$  までの鉛直積分値が単位幅流量と等しくなるように係数  $B$  を決める。

$$q = B \cdot \int_{z_b}^{z_s} f(z) dz \quad (5-4-4)$$

係数  $B$  を相対流速分布に乗ずることで、取水流速分布が得られる。

より簡便な方法としては、最大流速を以下の式から求めて、相対流速分布を引き延ばす方法もある。

$$U_{max} = C \frac{2q}{\delta} \quad (5-4-5)$$

ここで、 $C$  は補正係数であり、0.955 である。式(5-6-3)において、 $z=0$  としたときに最大流速の相対値が得られるので、 $D = U_{max} / f(0)$  により引き延ばし係数  $D$  を求め、係数  $D$  を相対流速分布に乗ずることで、取水流速分布が得られる。ただし、式(5-4-5)は表層の一定流速の領域を考慮していない方法なので、誤差が生ずる。

推定の結果、提案手法により取水の流速分布を良好に再現できた (図 5-4-(4))。このモデル式を数値シミュレーションに組み込んで使うことが可能である。

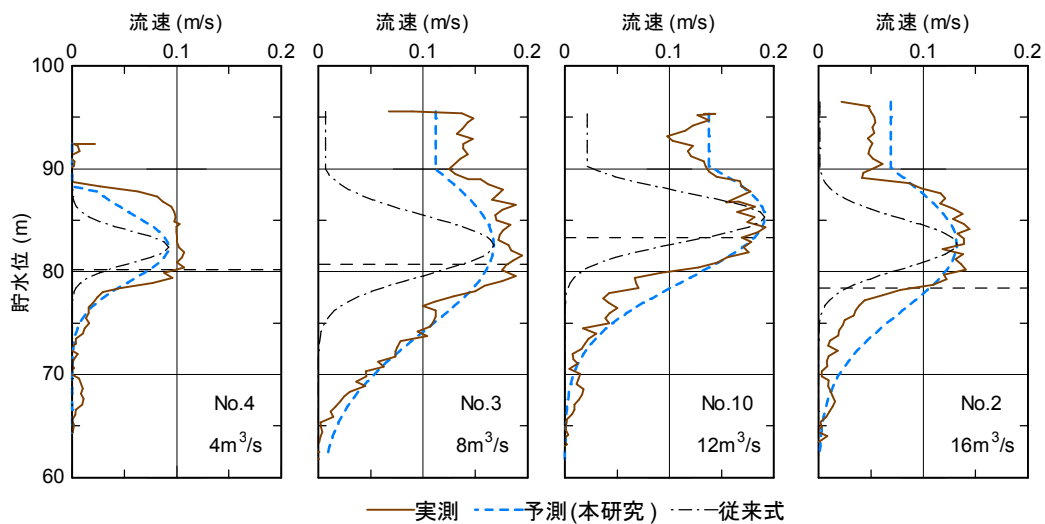


図 5-4-(4) 取水流速分布の推定結果 (右下の数値は放流量)

### 5-5 流動制御による水質管理

これまでに述べてきた流動制御施設のうち、分画フェンスと選択取水の組み合わせ運用について、ケーススタディーを行った。この2施設は、運用に電力をほとんど使わず、エネルギーやランニングコストの面で有利と考えられるためである。

三次元流体シミュレーションに分画フェンスと選択取水の機能を組み込んで、2015年5月1日から8月20日までの計算を行い、受熱期の成層発達過程に対する各種装置の影響を調べた。初期条件として5月1日の水温鉛直分布を貯水池全域に分布させ、境界条件として河川流入量、ダム放流量、気象（気温、日射、風など）を与えた。

計算ケースは、フェンスの有・無と、取水位置が中層（82m）・底層（65m）の組み合わせの4つである。Case1-1：フェンス無し・中層、Case1-2：フェンス有り・中層、Case2-1：フェンス無し・底層、Case2-2：フェンス有り・底層とした。

図5-5-(1)は取水位置の変更と水温の関係を示しており、放流位置を深くすると水温躍層が低下し、上部温水層が厚みを増すことが分かる。これは河川水が深層に誘導されやすくなることを表している。

図5-5-(2)はフェンスの有無と水温の対応関係を、フェンス付近の地点で比較したものであり、中層放流のときの結果を示している。これより、フェンスを設置することでその上流側と下流側で明確に水温分布が異なっていることが分かる。これは、5章4節で述べたメカニズム（吹送流と鉛直循環流）による。また、下流側地点では貯水位85～90mの範囲で、フェンスを設置することで水温が低下している。下流側地点は貯水池全域を代表すると考えられるので、上流側に設置されたフェンスが河川水や湖水の流動を変えて、貯水池全体の水温構造に影響がおよぶことが分かる。

図5-5-(3)は各ケースのトレーサー分布図である。7月1日から河川水に濃度物質（沈降無し）を注入し続け、30日後と50日後の分布状況を示している。中層放流のCase1-1とCase1-2を比較すると、分画フェンス無しの場合は表面から貯水位80mまでトレーサーが分布しているが、フェンス有りでは表面にトレーサーが見られず、より狭い水深範囲を河川水が流れていることが分かる。フェンスが表層への物質供給を制限するのは、底層放流のCase2でも確認できる。放流位置の違いについては、Case1-2の中層放流の方が、Case2-2の底層放流よりもトレーサーの分布範囲が狭い。

トレーサー注入から50日後の残存率は、Case1-1と1-2が共に約60%、Case2-1が80%、Case2-2が90%であった。河川水の早期排出という観点では、貯水位82mの中層放流が有利であり、底層放流の場合は分画フェンスを設置して河川水をできるだけ深い場所に誘導することで、残存率を下げることが出来る。

富栄養化防止の観点からは、栄養塩を含む河川水を効率的に排出すること、また、表層の植物プランクトンに栄養塩が利用されないように、河川水の中層にとどめておくこと、表層の水温を低下させることが重要であるが、これらを満たすのは分画フェンスを設置して、中層放流するCase1-2であることが示された。

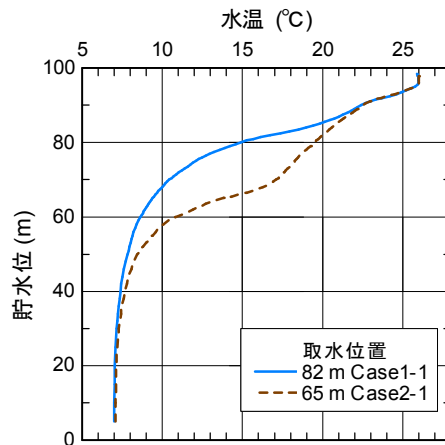


図 5-5- (1) 取水位置の違いによる水温分布の違い (8月19日、ダム堤体付近)

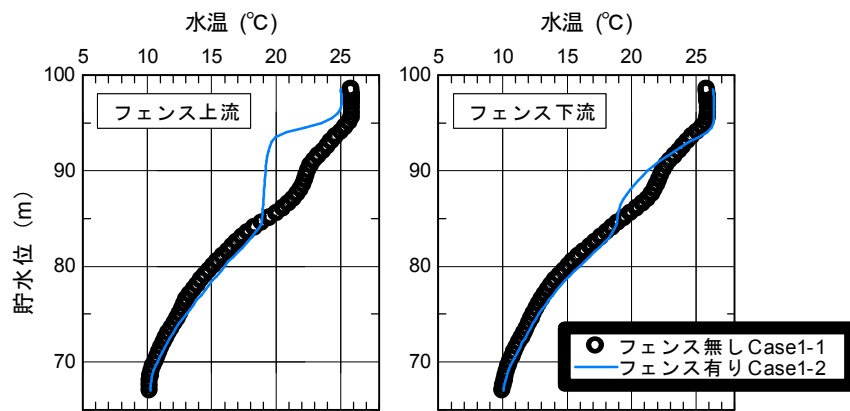


図 5-5- (2) フェンスの有無による水温分布の違い

(8月19日、上流部、取水位置 82 m)

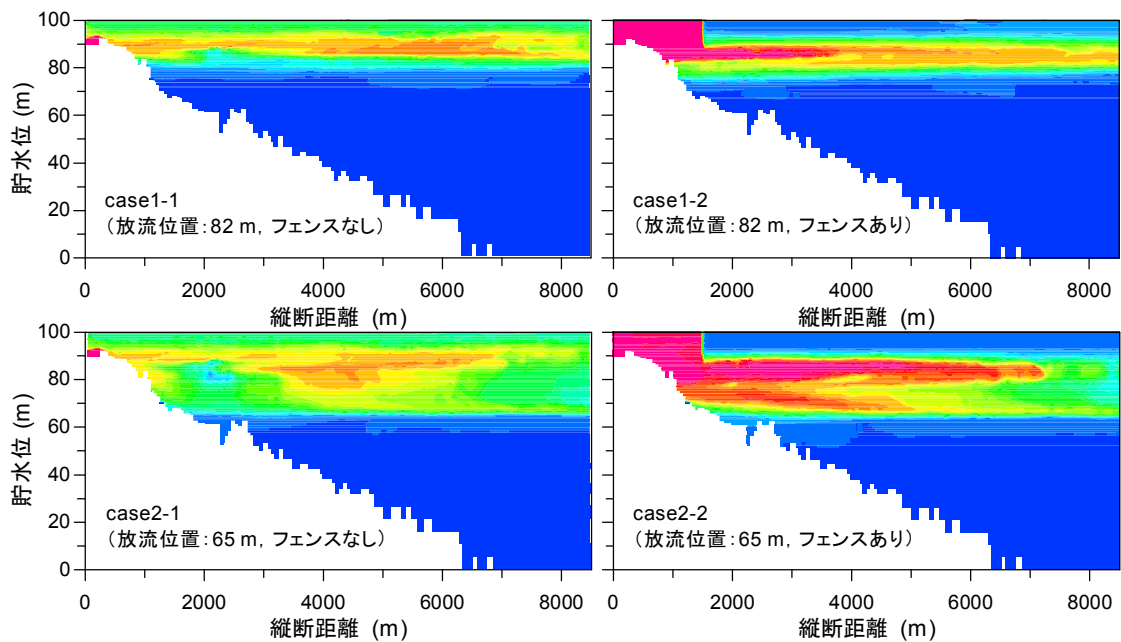


図 5-5- (3) トレーサーの分布図

(7月1日から投入、50日後の8月19日の結果)

