

# 第2章 水源貯水池の 基礎知識



## 第2章 水源貯水池の基礎知識

### 2-1 水文流出過程

#### 2-1-1 雨水の移動経路

流域に降った雨は、樹木の枝葉を通過して、土壌にしみ込んでから河川に流れ出し、貯水池に注ぐ。図 2-1-(1)は降雨から河川までの流出過程を模式的に記したものである。ここでは森林流域を想定している。

雨は樹木に降り注ぎ、雨滴の一部は枝葉や落ち葉によって遮られて、土壌に到達すること無く、大気中に蒸発してゆく。土壌に到達した雨滴の一部は、土壌表面に保持されているうちに次第に蒸発してゆく。これを遮断と蒸発という。また、土壌に浸透した雨水の一部は樹木の根から吸い上げられて、成長のために利用される。そして、葉の気孔から水分が大気中に放出される、この過程を蒸散という。一般的に、樹木や土壌から大気への水分回帰をひとまとめにして蒸発散という。

雨水の地中での挙動について、降り始めの雨量は地中に浸透しても土壌中に保持されて、河川への流出成分とはならない。これを初期損失という。土壌から河川への雨水の流出ルートはいくつかあり、その流出成分の合成で河川流量は形成されている。土壌のごく表層を移動し、降雨の直後に流出する成分を表面流出といい、浅い地下水として移動し、洪水流出の後期を構成する成分を中間流出という。また、土壌の深い層まで到達して、短期的な洪水よりも日常的な河川流量を構成する成分を地下水流出という。

ただし、初期損失と各流出成分は、土壌中の移動状況を実際に計測して得られるものではない。実際のデータは、図 2-1-(1)の両端の雨量と流量のみである。その間の経路（システム）はあくまでも概念的なものであり、例えば中間流出だけを現場で見ることができない。しかし、図 2-1-(1)のように仮定してモデルを組み、パラメーターを調節すると、雨量から流量を精度よく推定できるので、帰納的に土壌中の雨水経路がイメージされている。

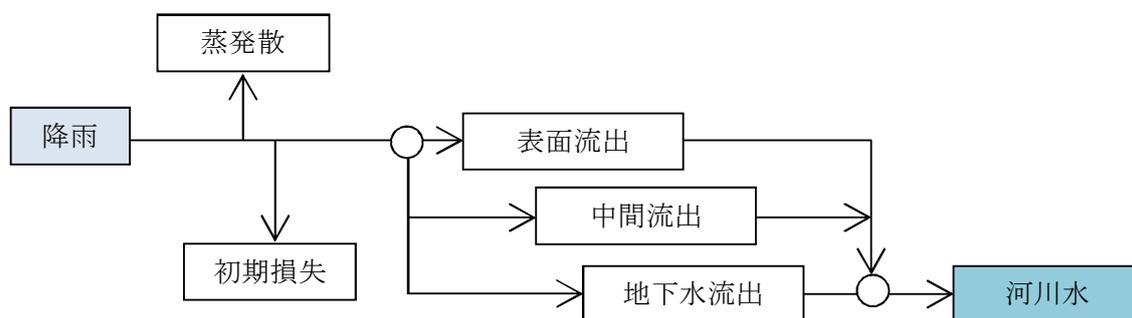


図 2-1-(1) 降雨から河川への流出ルート概念図

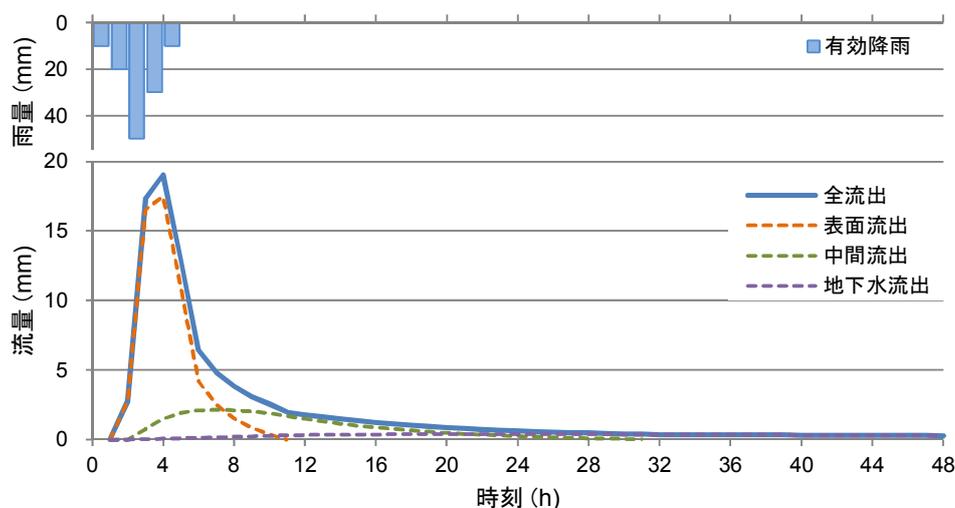


図 2-1-(2) 流出解析の一例 (タンクモデル)

水文流出モデルにおいて、降雨量のうちの河川流出に寄与する雨を有効降雨といい、降雨量から蒸発散量と初期損失量を差し引いた水量になる。図 2-1-(1) の考え方をタンクモデルで計算したものが図 2-1-(2) である。実線が洪水波形で、地中の水移動を概念的に 3 つの時間応答システムに分けると、その合成により河川流量を計算できることが分かる。

### 2-1-2 雨水の流出率

降雨の全てが河川流量になるわけではないことは既に述べた。雨量に対する流量の割合を流出率といい、このパラメーターは流域・貯水池の水収支をチェックする上で大変重要である。流域から貯水池への河川水の供給、土砂輸送や栄養塩輸送などを検討する際、水収支が合っていないと、解析の前提条件が崩れるからである。

$$\gamma = \frac{\sum_{t=1}^{t=T} R(t)}{\sum_{t=1}^{t=T} Q(t)} \quad (2-1)$$

ここで、 $\gamma$ : 流出率、 $R(t)$ : 降雨時系列、 $Q(t)$ : 流量時系列である。ただし、一般に雨量は時間あたり (mm/hour) もしくは日あたり (mm/day) の高さで表され、流量は毎秒の容積 (m<sup>3</sup>/s) で表されるので、計算するには以下のようにして次元をそろえる必要がある。

$$\cdot \text{雨量から総水量へ} \quad \frac{R(\text{mm/h})}{1,000} \times A(\text{km}^2) \times 1,000,000 = R \cdot A \times 1,000(\text{m}^3) \quad (2-2)$$

$$\cdot \text{流量から総流出量へ} \quad Q(\text{m}^3/\text{s}) \times 3,600(\text{s}) = Q \times 3,600(\text{m}^3) \quad (2-3)$$

日本のダム流域では、流出率は 0.6~0.7 になる。つまり、降雨の 3~4 割は蒸発散となり、河川には流出しない。

### 2-1-3 水文諸量データの不確実性

雨量、流量、貯水量などのデータはそれぞれ何らかの誤差を含んでいるので、その特徴を考慮して解析に用いる必要がある。

#### (1) 雨量

雨量は地上雨量計で計測される。これは直径約 20 cm の円筒に降り注いだ雨の量を一定の時間間隔で計量しており、雨量の数値は精度が高い。気象庁はアメダス雨量観測所を日本全国に約 1,300 箇所配置しており、国土面積で割るとおよそ 17 km ごと、290 km<sup>2</sup>に 1 箇所ずつとなる。それ以外にもダム管理者、国土交通省や各県の土木部が独自に雨量計を配置しており、およそ 50 km<sup>2</sup>に一か所くらい設置されていれば高密度といえる。

式(2-2)で流域に降り注いだ雨の総水量を計算することを考えると、1 箇所の雨量計を数十 km<sup>2</sup>の代表値として扱うことに気が付く。雨量計の数値は正確だが、場所の代表性が問題になる。山頂や雨雲の通り道となる山の斜面では雨量が多くなり、標高の低いところや谷間では雨量が小さくなるので、雨量計がどのような場所に配置されているかを地図上で確認してからデータを用いる必要がある。

ダム流域の雨量を求めるには、ティーセン法が用いられる(図 2-1-(3))。これは、複数の雨量観測地点に対して垂直二等分線を引いて、各観測所の支配面積を求めて、面積によって雨量を加重平均する方法である。

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^{i=n} R_i \frac{A_i}{A} \quad (2-4)$$

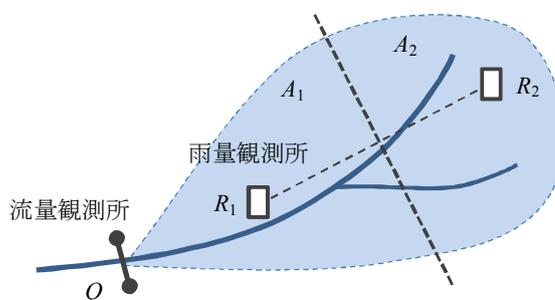


図 2-1-(3) 平均雨量の求め方 (ティーセン法)

#### (2) 流量

流量は、雨量とは違って実測値ではない。河川の水位データから以下の手順で流量に換算している(図 2-1-(4))。①河川の横断形状を測量する、②断面内の数点で流速を計測する、③断面積×流速により流量を算出する、④様々な水位のときに流速計測を行い、水位—流量関係式 (H-Q 式) を作成する、⑤水位計により水位変動をモニタリングし、得られた水位時系列に H-Q 式を適用して流量時系列を推定する。図 2-1-(4)は H-Q 式が 1 つであるが、河道が複断面形状をしている場合は、川幅が急に広がる場所で式を分けて、2 つの式を組み合わせて用いる場合もある。

コンクリート製の用水路で、最低流量から最大流量まで様々な流量観測が行われていれば、精度のよい流量データを得ることができる。しかし、自然河川では河床の土砂移動によって断面が洪水時に変化しやすく、また特に洪水時の観測が難しいために最大流量付近のH-Q式の精度が不明な場合が多い。

そのため、流量データは1~2割の誤差を持つことがある。

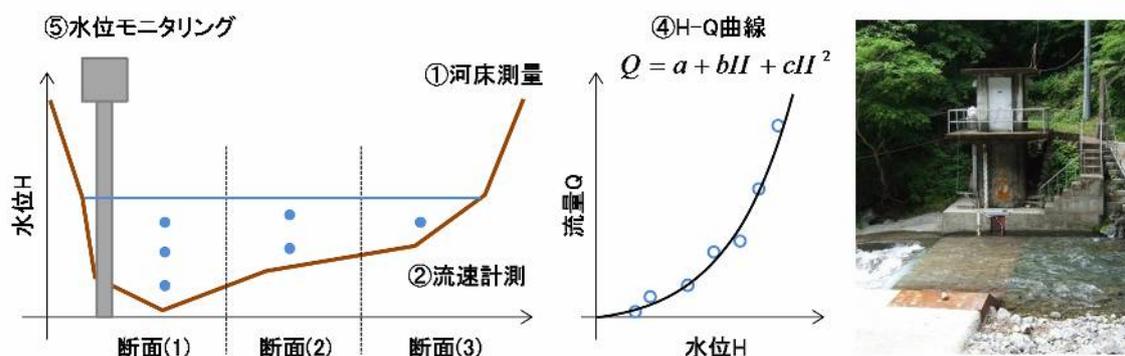


図 2-1-(4) 流量観測法

### (3) 精度検証

雨量から流域全体の降水量を算出する際には空間代表性の問題があり、流量から流域全体の流出水量を算出する際には計測誤差の問題があるが、一般に、流量のほうが大きな誤差を含みやすい。

そこで式(2-1)の流出率を計算し、精度を検証する必要がある。数ヶ月分の雨量および流量データを積分して、流出率を算出して0.6~0.7になれば流量データは確からしい。もし、流出率が1.0を超えた場合、降った雨よりも流出水のほうが多くなることは無いので、流量の計測に問題がある可能性が高い。

また、ダム貯水池では貯水量や放流量を記録しているので、対象期間の総放流量と貯水量の変動分から、総流入量を推定できる。バケツに入れた水と漏れ出た水の量が等しければ水位は変わらないことをイメージすればよい。そして、得られた総流入量と河川流量の積分値を比較すれば、河川流量の誤差の程度がわかる。

なお、図 2-1-(5)に示すように、ダム流入量  $Q_1$  は河川流量  $Q_2$  と異なり、そのままでは比較できない。ダム貯水池の流域面積は流量観測所の流域面積よりも大きいので、ダム流入量を流域面積比で補正して、その補正流量と河川流量を比較する (式(2-5))。

$$Q_1 \frac{A_2}{A_1 + A_2} \Leftrightarrow Q_2 \quad (2-5)$$

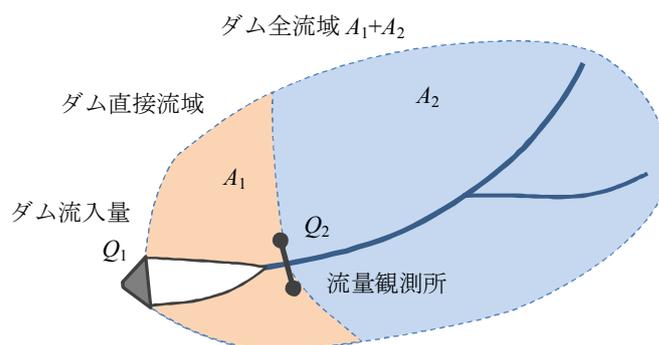


図 2-1-(5) ダム流入量と河川流量の違い

河川流量が過大もしくは過少と判断される場合は、降雨の流出率やダム流入量を参考に、補正係数を乗ずる、もしくは、一定の流量を加減する。前者の方法は洪水流量の不確実性が大きい場合に採用し、後者の方法は低水流量の不確実性が大きい場合に採用する。流量観測所の河床が洪水の影響で上昇もしくは低下した時には、低水流量の推定値に影響が出やすいので、補正係数を乗ずるよりも一定の値を加減したほうが適切に調整できる。

繰り返しになるが、河川流量は計測の性質上、誤差を含みやすいので、その根拠が明確であれば、補正して解析に利用することも可能である。

## 2-2 流域河川の水・物質輸送

物質輸送量  $L$  (g/s) は、流量  $Q$  ( $m^3/s$ ) と対象物質の濃度  $C$  ( $g/m^3$ ) の積で求まる。したがって、河川のある地点での流量と物質濃度の測定が必要である。

### 2-2-1 河川からの負荷量

物質濃度の日変動がある河川では、センサーを用いて連続測定を行うか、一定時間間隔で測定する。流量が把握されている河川では、連続測定の数値と流量の積を求める。流量の連続測定は容易であるが、水質測定、特に水質計のセンサーでの測定ができない水質項目の物質量は、一定時間間隔で物質濃度を測定している時は、物質濃度・流量とも平均値を用いる場合と、物質濃度は平均値を用い流量は積算値を用いる場合とがある。

$$\text{日負荷量} = \text{濃度 (mg/L)} \times \text{流量 (m}^3/\text{日)}$$

$$\text{濃度 : mg/L} = \text{g/m}^3$$

### 2-2-2 流域からの流入負荷及び流入水質の算定

流域からの流入水質は、特にセンサーでの測定ができない水質項目については、測定分析を頻繁に行うことはできない。この場合、センサーなどで連続測定可能な水質項目を説明変数とする重回帰分析により推定値を求め、水質変化や負荷量を推定することができる。図2-2-(1)は丹波川において月1回測定された濁度、総窒素、総リンの時系列図である。

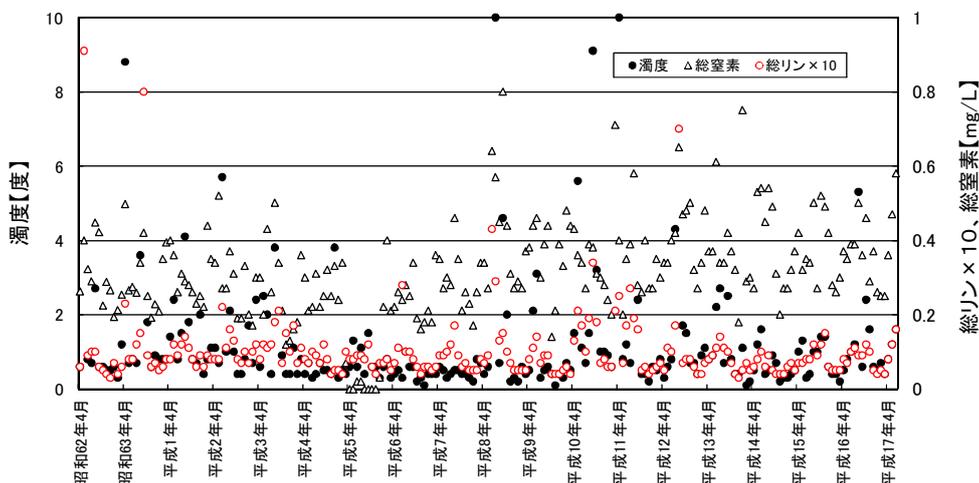


図2-2-(1) 丹波川水質変化(昭和62年4月—平成17年6月)

濁度は連続測定できる項目であることから、濁度を用いて総リン、総窒素を推定するモデル式を作成する。

$$y_P = 0.010x^{1/2} \quad (R^*=0.842)$$

$$y_N = 0.0629 \times \ln(10x) + 0.1859 \quad (R^*=0.477)$$

$R^*$ : 自由度調整済み重相関係数、 $n=219$ , 有意水準99%値  $r_{99}=0.175$

得られた式を用い連続測定される濁度からそれぞれの推定値を算出し、同じく連続測定できる流量との積により負荷量も求めることができる。

### 2-3 水質

#### 2-3-1 貯水池水質管理に重要な水質項目

昔は有機物の間接指標である BOD (生物化学的酸素要求量: 河川) や COD (化学的酸素要求量: 湖沼・海域)、過マンガン酸カリウム消費量(水道水関連)で水質が監視されていたが、最近では富栄養化対策のため栄養塩 (リン・窒素) もモニタリングされるようになった。また、有機物も直接指標である TOC(全有機炭素)が用いられている。

##### (1) リン(P)

リンは希少元素であり、富栄養化の原因物質である。粒子態リン、有機態リンと溶存態リンから構成され、ほとんどがリン酸として存在する。溶存態リンは水中では pH や他の金

属イオンの存在により様々な形態(オルトリン酸、ポリリン酸等)をとる。貯水池に堆積した底泥中のリンは生物由来のものがほとんどである。堆積岩に多く含まれ、火成岩にも含まれる。岩石が風化して土壌(砂や粘土)の中に含まれることになる。土壌中のリンは土壌や有機物とともに地表を流下する水によって河川や貯水池に入る。土壌に含まれる溶液中のリンはそのまま植物に吸収されるが、粒子態のリンはほとんどが水底に堆積し、嫌気状態になることによって還元され溶存態リンとなり生物に吸収される。

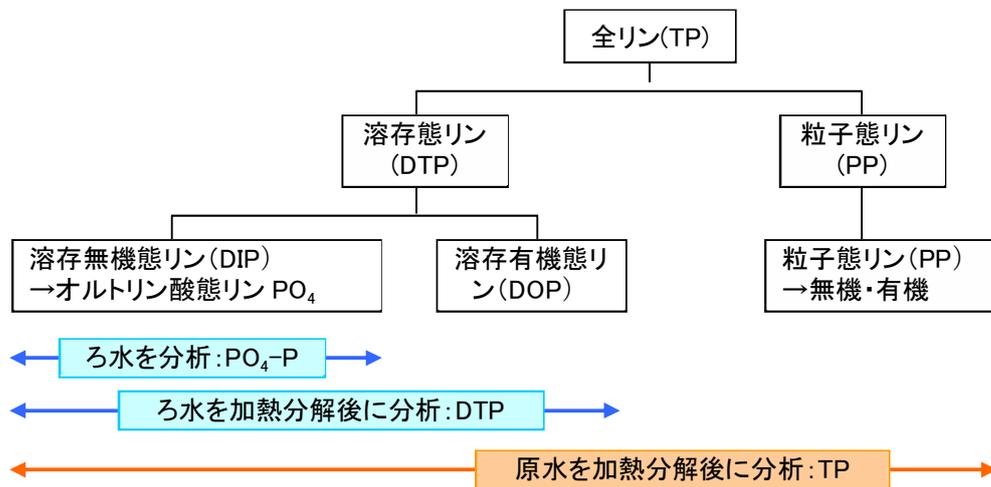


図 2-3-(1) リンの形態

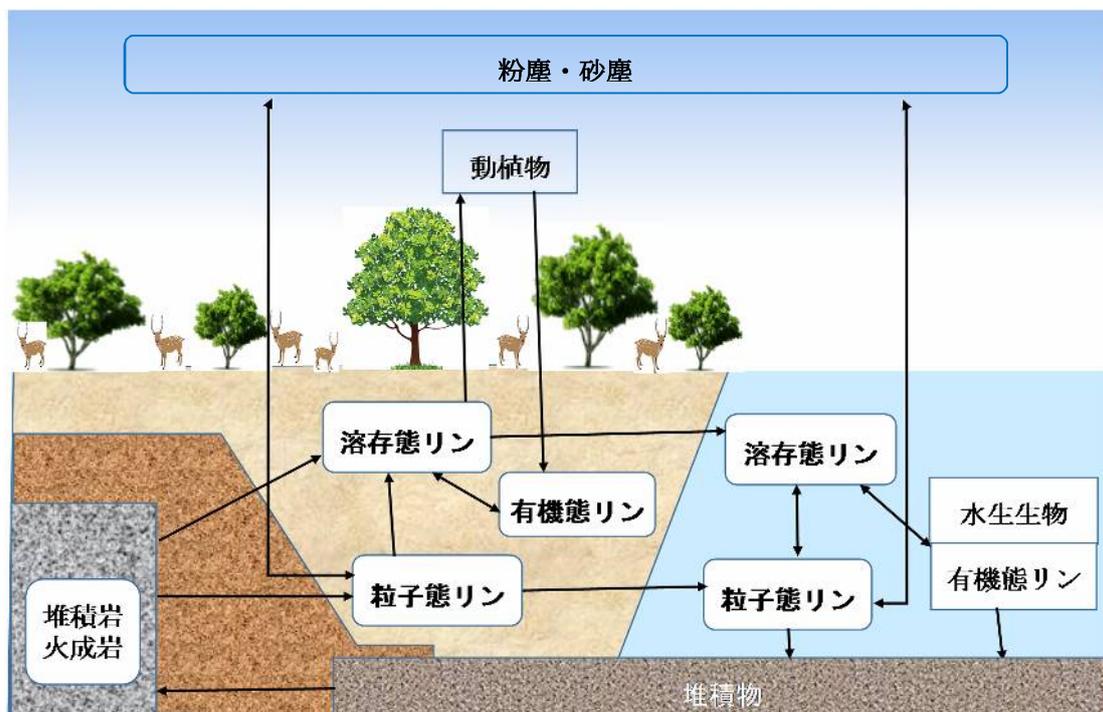


図 2-3-(2) リンの動態・循環

(2) 窒素(N)

窒素もリンと同じ富栄養化原因物質である。硝酸態窒素 ( $\text{NO}_3^-$ )、亜硝酸態窒素( $\text{NO}_2^-$ )、アンモニア( $\text{NH}_4^+$ )の形態は植物に吸収されやすく、農業では肥料として使用されている。窒素の大部分は大気中の窒素ガスとして存在する。窒素固定菌は大気中の窒素分子をアンモニアに変換され、有機態窒素となる。有機態窒素はアンモニア化成菌によりアンモニア態窒素に分解され、好気条件下で硝化菌により硝酸に酸化される。

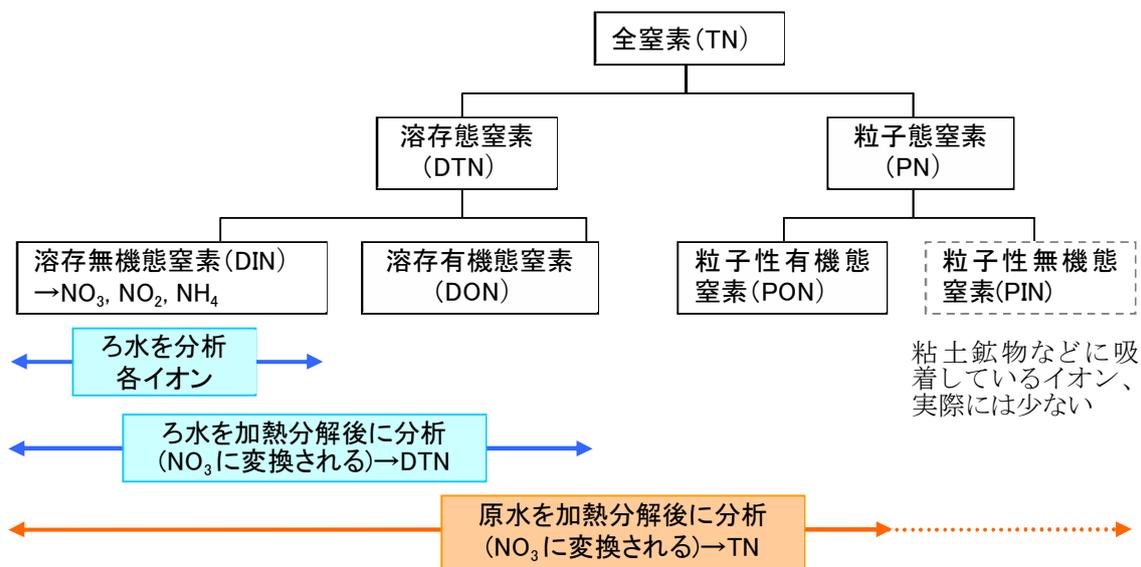


図 2-3-(3) 窒素の形態

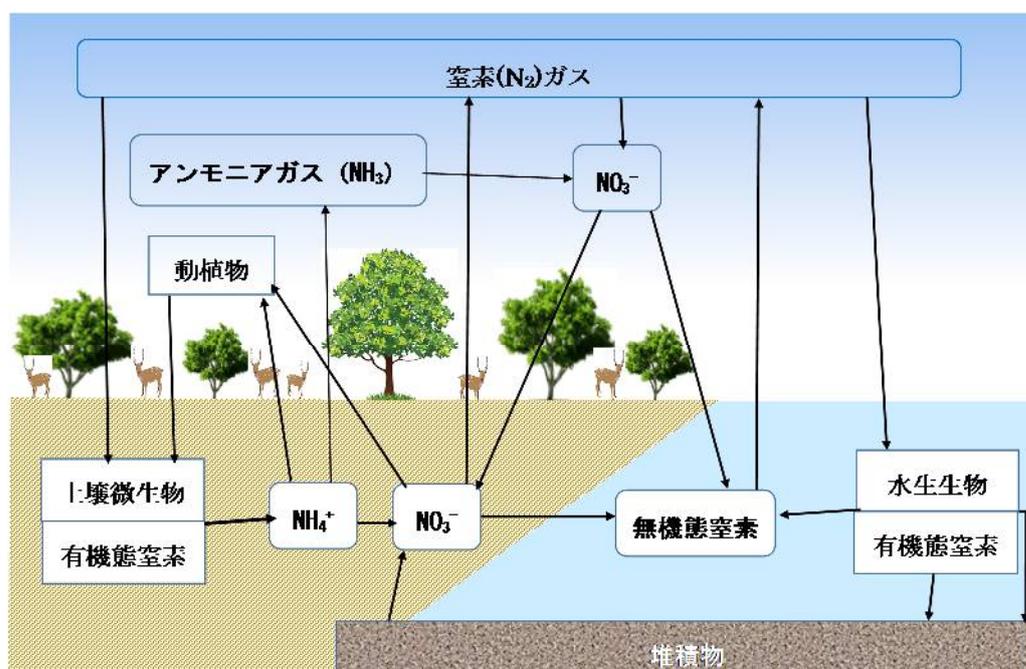


図 2-3-(4) 窒素の動態・循環

窒素及びリンについては、生物の成長に適した割合が存在し、レッドフィールド比と呼ばれる。その比率は以下のとおりである。

$$C : N : P = 106 : 16 : 1 \quad (\text{mol 濃度比} : \text{mol/L})$$

$$C = 12 \text{ g/mol}, N = 14 \text{ g/mol}, P = 31 \text{ g/mol}$$

したがって、質量濃度比(mg/l)に直すと、(mol/L × mg/mol) となるため、

$$C : N : P = 1.272 : 0.224 : 0.031 = 41 : 7.2 : 1$$

となる。つまり、

N/P > 16 (mol 比) ないし 7.2 (質量濃度比) のときリン制限

N/P < 16 (mol 比) ないし 7.2 (質量濃度比) のとき窒素制限

となる。

### (3) マンガン(Mn)

マンガンは岩石由来で軟マンガン鉱 ( $\text{MnO}_2$ )、菱マンガン鉱 ( $\text{MnCO}_3$ ) などとして産出する。その動態については、図 2-3-(5)のとおりである。マンガンは生命を維持する上での必須元素であるが、水道水のマンガンは、飲み水に色がつく、渋みの原因となり味が悪くなるという「生活上支障関連項目」として基準値が決められている。

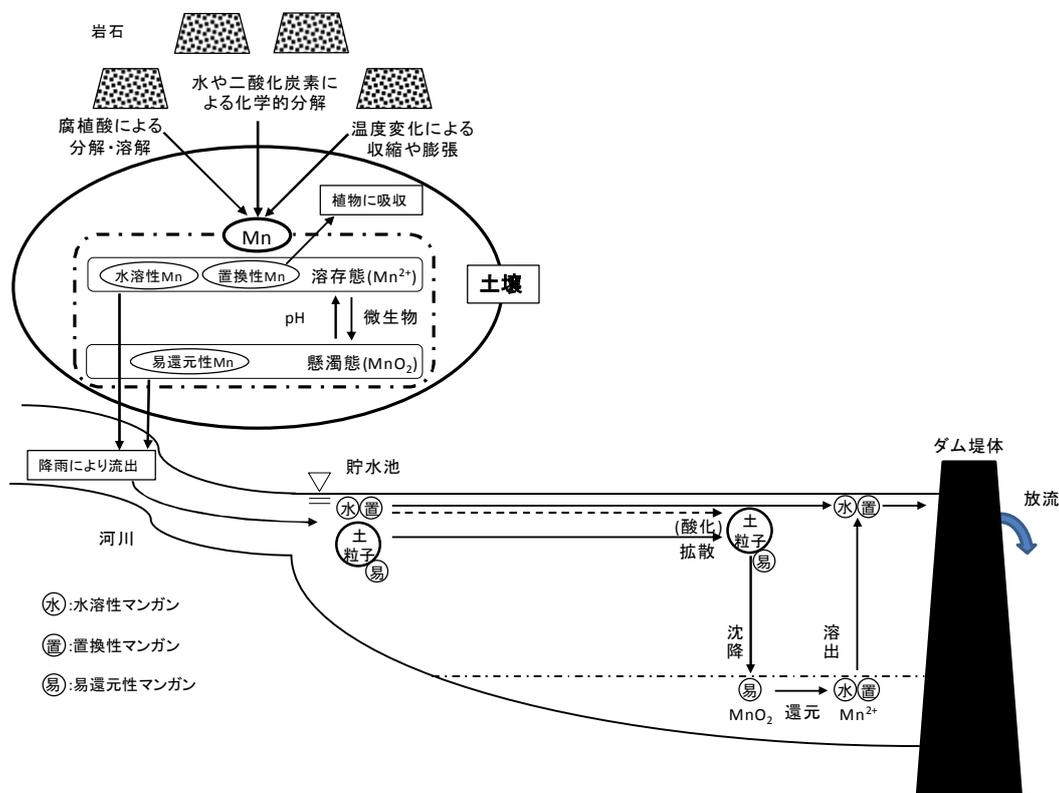


図 2-3-(5) マンガンの動態

2-3-2 水質調査方法

文中の測定機器等の図は、実際に小河内貯水池で用いた測定器の使用説明書に記載されているものである。また、写真は、実際に用いた機器を撮影したものである。

(1) 現地での計器による測定

ア 溶存酸素

溶存酸素は採水直後から時々刻々変化する。したがって、現地で溶存酸素計により測定することが重要である。測定は図 2-3-(6)のようなポータブル溶存酸素計のセンサーを水に浸して測定する。センサーは卓上型も共通で、隔膜式センサーが使用される。流水でない場合はセンサー部分で水を泡立てないようにゆっくり攪拌しながら測定する。最近は、流れがなくてもセンサーを動かす必要がない蛍光分析を用いた無流速式のものがある。

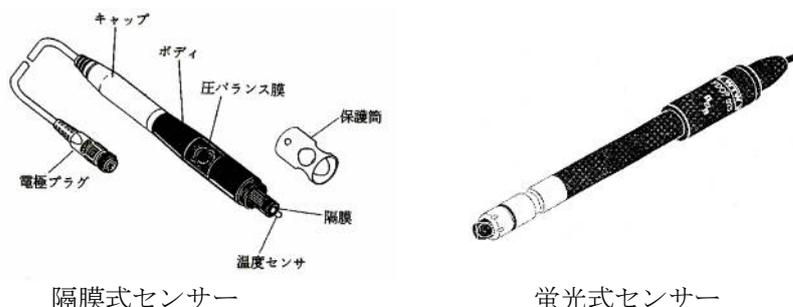


図 2-3-(6) 溶存酸素計

イ 水素イオン濃度 (pH)

図 2-3-(7)のようなガラス電極を用いた pH 計によって測定する。pH は試料採取後、直ちに測定する。乾燥防止キャップをはずし、電極を蒸留水でよく洗い、ろ紙かキムワイプで水分を吸い取ったのち、電極の補充口ゴム栓ははずして測定を行う。但し、電極全体を投込んで測定する時は補充口ゴム栓をしたまま使用する。

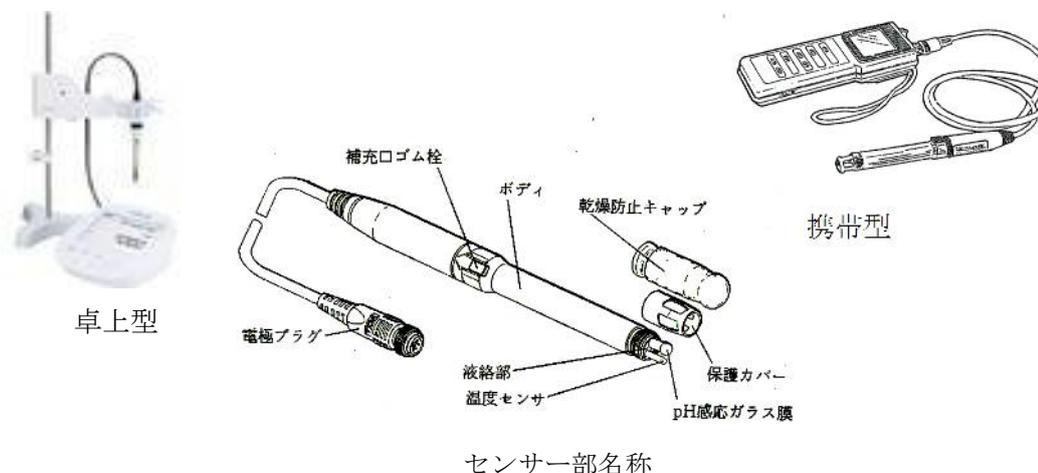


図 2-3-(7) pH 計

## ウ 水温

温度計を用いる。

## エ 多項目水質計

センサーで測定できる水質項目を一つにまとめた計器である（図 2-3-(8)）。通常 3～6 種類のセンサーがセットされている。測定データを機器内に保存していくものとケーブル経由でデータを地上の PC 等に送るものがある。水深方向の測定にも適している。近年は、GPS 機能が付属したものがあり、濃度分布図の自動作成が可能である。

主な測定項目には水温、pH、溶存酸素、電気伝導度、濁度、光量、クロロフィル a、アンモニウムイオン、酸化還元電位、水深等がある。



図 2-3-(8) 多項目水質計センサーの例

### (2) 試料採取方法

試料採取は非常に重要である。試料採取が適切に行われないと、以降の測定操作をどんなに正確に行っても、その測定結果は無意味となる。試料採取は測定目的によって、頻度や採取場所の範囲などが異なる。大きな河川の両岸と中央部、あるいは湖沼の各深度など、同一時刻に異なったポイントで採取する必要が生ずる場合もある。また、成層状態をみるための個々の試料のセットを層別サンプルという。

貯水池での試料採取は、表面からの採水と一定水深からの採水の 2 種類がある。

表面からの試料採取は直接試料容器に採取する場合とバケツや柄杓などで採取後容器に保存する場合がある。直接試料容器に採取する場合は、試料容器を採取場所の水で 3、4 回洗い、試料容器を静かに沈めて満水になるまで試料を流し入れ密栓する。

水深方向の試料採取にはハイロート採水器(図 2-3-(9))やバンドーン採水器(図 2-3-(10))などを用いる。ハイロート採水器は採水容器を固定しふたをした状態で水中に下し、目的の水深でふたにつながるひもを引き採水容器のふたを開け採水した後、ふたのひもを緩めて採水瓶を密閉する。本体部分につながるロープを引き上げ回収する。水深 1m を超える場合は、金属部分に重りを追加して瓶の中の空気による浮力より重くする。バンドーン採水器は筒の両端のゴムキャップを開けて、フックをつなげ、採水する深さまで採水器をおろす。ロープに取り付けたメッセンジャーを落とし、その衝撃でフックを外すことでゴムキャップ

プのフタを閉める。採水器を引き上げて筒の部分から出ているチューブのピンチコックから試料を採取する。



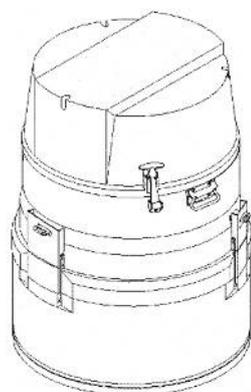
図 2-3-(9) ハイロート採水器



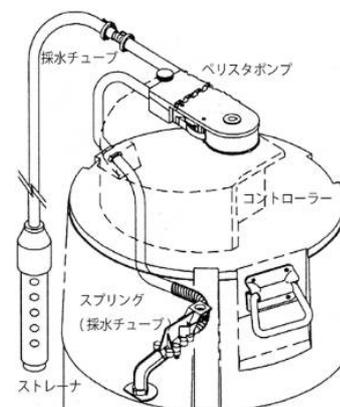
図 2-3-(10) バンドーン採水器

また、自動採水器(図 2-3-(11))を使用することで採取場所の水を採水装置によって自動的に揚水して試料容器に採取することができる。自動採水器には、濁度や水位などの値に応じて採水を行う水質連動採取方式や、決められた時間に採水を行う定時採取方式のものが存在する。

自動採水器を設置する際は水位上昇を考慮して安全な場所に設置することに留意する。河川で採水を行う場合は水面と採水器の高低差を 10～20m程度確保することが望ましい。本共同研究中也洪水時に河川水位が 10m以上上昇し、河床も上流から流下した礫や砂利で 10m近く埋まったケースもあった。このケースの場合、河川水位が機器設置場所よりも高くなったが、採水器をしっかりと固定してあったため流失は免れた。



採水器外観



採水器駆動部分

図 2-3-(11) 自動採水器

なお、採水器は、有機物、油脂類、懸濁物などで汚れやすいので、毎回洗浄に注意する。試料採取時は下記の事項を記録する。

- ①試料の名称、及び試料番号
- ②採取場所の名称及び採取位置(表層水又は採取深度など)
- ③採取年月日、時刻

- ④採取時の天候
- ⑤前日の天候
- ⑥採取者の氏名
- ⑦採取場所の状況(採取現場の略図等、試料の水質に影響を与えると思われる事項)
- ⑧採取時の気温と水温
- ⑨その他、試料の外観(試料の色、濁りなど)、臭気の有無など参考となる事項

### (3) 採取試料の保存方法

採取した試料は、できるだけ早く測定することが理想的であるが、試料数が多い場合や、外部に測定を依頼する場合などは、すぐには測定できないことがある。そこで、測定までの試料の変質を防ぐために種々の手段がとられる(表 2-3-(1))。特に、BOD、COD、TOC、大腸菌群数などの微生物作用に影響を受ける測定項目では、試料中の微生物の活動を抑え、共存する藻類などによる光合成作用を防ぐために、低温(0-10°C)、暗所での保存が必要となる。

試料容器には、試料の保存中に外部からの汚染、容器からの溶出、容器への吸着などによる目的成分の損失などの危険が少ない、共栓ポリエチレン瓶、及び無色共栓ガラス瓶で密栓できるものを用いる。水質測定方法により試料容器が規定されている場合は、その規定による容器を用いる。試料容器は、使用前に水道水などで洗浄し、さらに JISK 0557 に規定されている A1 の水で十分に洗浄する。新しく購入した容器や以前の使用目的が不明な容器は、希硝酸(窒素の測定に用いる場合は希塩酸)溶液に一晩浸漬した後、よく洗浄してから用いる。

#### ア 共栓ポリエチレン瓶

試料中の懸濁物質、りん化合物、有機物、重金属などを付着あるいは吸着する傾向があるが、重金属の吸着は、硝酸あるいは塩酸を添加して保存すれば防止できる。また、ポリエチレン瓶は、通気性があるため藻類が繁殖しやすい。

#### イ 無色共栓ガラス瓶

共栓がすり合わせの場合には、すり合わせの部分に汚れが付着しやすいから注意する。ガラス瓶は、試料の保存中にナトリウム、カリウム、ほう素、シリカ、アルミニウムなどがわずかに溶出する。また、ガラスの種類によっては、ひ素、亜鉛がわずかに溶出するので注意する。

表 2-3-(1) 測定項目別保存条件

	条件
pH	保存できない
BOD	0-10℃の暗所
COD	0-10℃の暗所
TOC	0-10℃の暗所
SS	0-10℃の暗所
大腸菌群	0-5℃の暗所
溶解性Fe、Mn	試料採取直後にろ紙でろ過、初めの50mLは捨てる液を硝酸でpHを1に調整
全りん	クロロホルム(5mL/L)を加え0-10℃の暗所 又は、硫酸や硝酸でpHを約2に調整
NO <sup>2-</sup> 、NO <sup>3-</sup>	クロロホルム(5mL/L)を加え0-10℃の暗所
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、全窒素	塩酸又は硫酸でpHを2-3に調整し、0-10℃の暗所

#### (4) 分析方法

水質分析を行うとき、水は最も多く使用するものなので、その純度にもよく注意する必要がある。通常、水質測定では、JISK 0557に規定されている A1・・・A4の水を用いる。

A1の水は、器具類の洗浄及びA2、A3の水の原料などに用いる。A2の水は、一般的な測定及びA3、A4の水の原料などに用いる。A3の水は、試薬の調製、微量成分の測定などに用いる。A4の水は、微量成分の測定などに用いる。溶存酸素を含まない水、炭酸を含まない水、COD<sub>Mn</sub>の測定に用いる水、TOCの測定に用いる水などの調製方法がJISK 0557に記載されている。

#### ア 窒素

##### (ア) アンモニア態窒素

試料を蒸留処理してアンモニア態窒素を共存物から分離した後、インドフェノール青吸光光度法、中和滴定法又は流れ分析法を適用。またはイオンクロマトグラフ法(蒸留操作なし)

##### (イ) 亜硝酸態窒素

ナフチルエチレンジアミン吸光光度法、イオンクロマトグラフ法又は流れ分析法

##### (ウ) 硝酸態窒素

イオンクロマトグラフ法又は流れ分析法、カドミウムなどにより亜硝酸態窒素に還元後、亜硝酸態窒素として測定

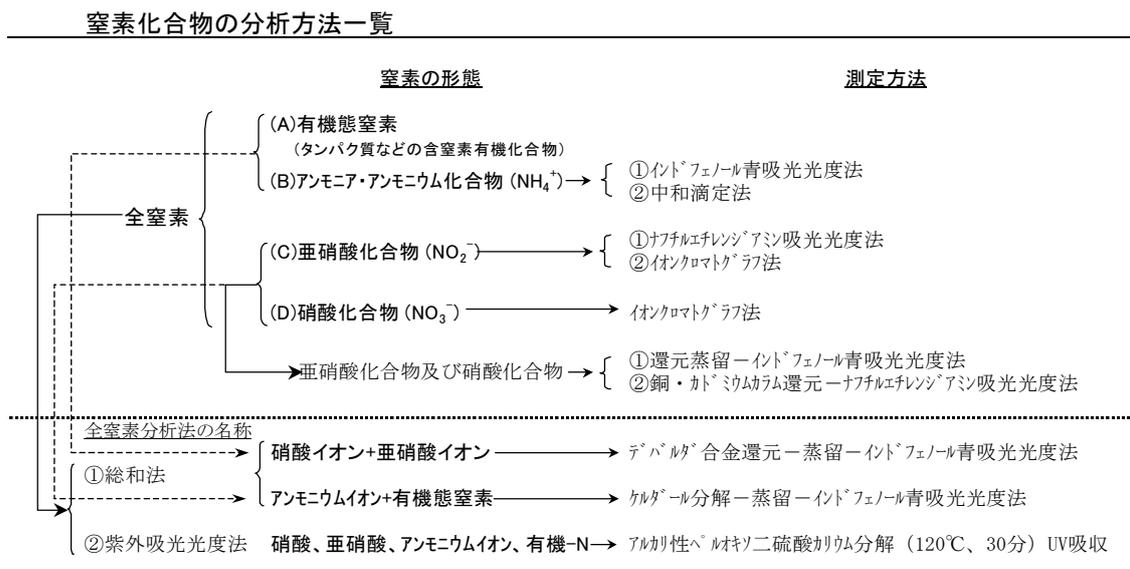


図 2-3-(12) 窒素分析方法

### イ リン

モリブデン青 (アスコルビン酸) 吸光度法、イオンクロマトグラフ法又は流れ分析法

### ウ 有機物 (TOC)

全有機炭素 (TOC : Total Organic Carbon) は、水中の有機物に含まれている炭素を直接定量する有機物の直接指標であり TOC 計で測定する。TOC 計には燃焼式(燃焼酸化 - 赤外線式 TOC 自動計測法)と湿式酸化還元方式がある。一般に燃焼式は比較的高濃度に、湿式酸化還元方式は低濃度(PPB)に対応している。燃焼式は使用に際し純空気、炭酸ガスなどのガスが必要であるが、湿式酸化還元方式はガス類を使用しないため、携帯型もある。

### エ マンガン

ICP 発光分光分析計で測定する場合は、まず試料を孔径 0.45 μm のろ紙でろ過してから測定する。

### オ 浮遊物質 (SS)

浮遊物質(懸濁物質)は、網目 2mm のふるいを通過した試料を通過孔径 1 μm のガラス繊維ろ紙でろ過したときに、ろ紙上に捕捉される物質。水洗後、105~110℃で2時間加熱乾燥し、デンキーター中で放冷した後の質量を測定し、試料 1L 中の mg で表す。

水質分析では、孔径 1 μm のガラス繊維ろ紙を通過したろ水中の物質は溶存物質と定義される。

## 2-4 貯水池水温の季節変化

貯水池の水利・水質特性を考える際に、最も基本的な情報として把握しておくべきことは、基本は水温の鉛直構造である。水温は水の密度を規定する（図 2-4-(1)）。温かい水は密度が小さく（軽い）、冷たい水は密度が大きいく（重い）。そのため、夏場に水面付近が温かく、湖底付近が冷たくなり、温度差は 20℃以上になる（北海道を除く）。そして、水温差があることで流れが生ずる。また、植物プランクトンの生息にも水温が関係する。以下、小河内貯水池で形成される水温分布について記す（図 2-4-(2)）。

### 2-4-1 春の水温分布（受熱期）

冬の間貯水池の全水深が冷やされているので、春を迎えた時点では水温が表層から底層まで一様になっている。本州・四国・九州の山間部にあるダム貯水池では、4～6℃であることが多い。

気温が上昇して日射が強くなると、水面から熱量が入り、表面が温まる。温水は冷水よりも密度が小さいので（軽い）、そのままでは重力的に安定しており、鉛直方向には混ざらない。しかし、風が表面に吹くことで、水塊が鉛直方向に攪拌・混合される。加熱と混合が繰り返えされて、徐々に水深 15～20 m 程度までが温水層になる。表層と底層で水温が異なる状態を水温成層という。

水温 ℃	密度 kg/m <sup>3</sup>	水温 ℃	密度 kg/m <sup>3</sup>	水温 ℃	密度 kg/m <sup>3</sup>
0	999.84				
1	999.90	11	999.61	21	997.99
2	999.94	12	999.49	22	997.77
3	999.96	13	999.38	23	997.54
4	999.97	14	999.24	24	997.30
5	999.96	15	999.10	25	997.04
6	999.94	16	998.94	26	996.78
7	999.90	17	998.77	27	996.51
8	999.85	18	998.60	28	996.23
9	999.78	19	998.41	29	995.94
10	999.70	20	998.20	30	995.65

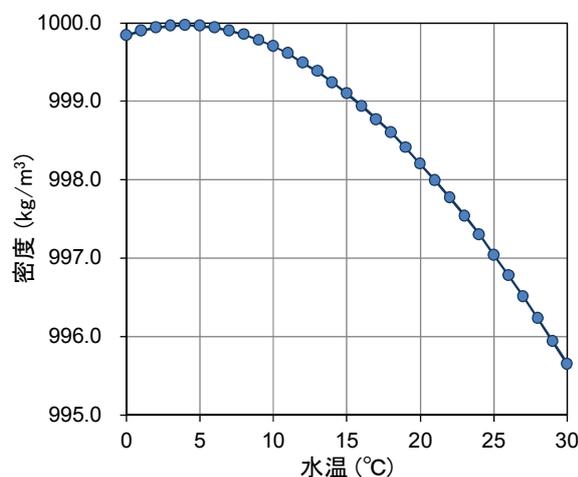


図 2-4-(1) 水温と密度の関係（理科年表 H25 年度版）

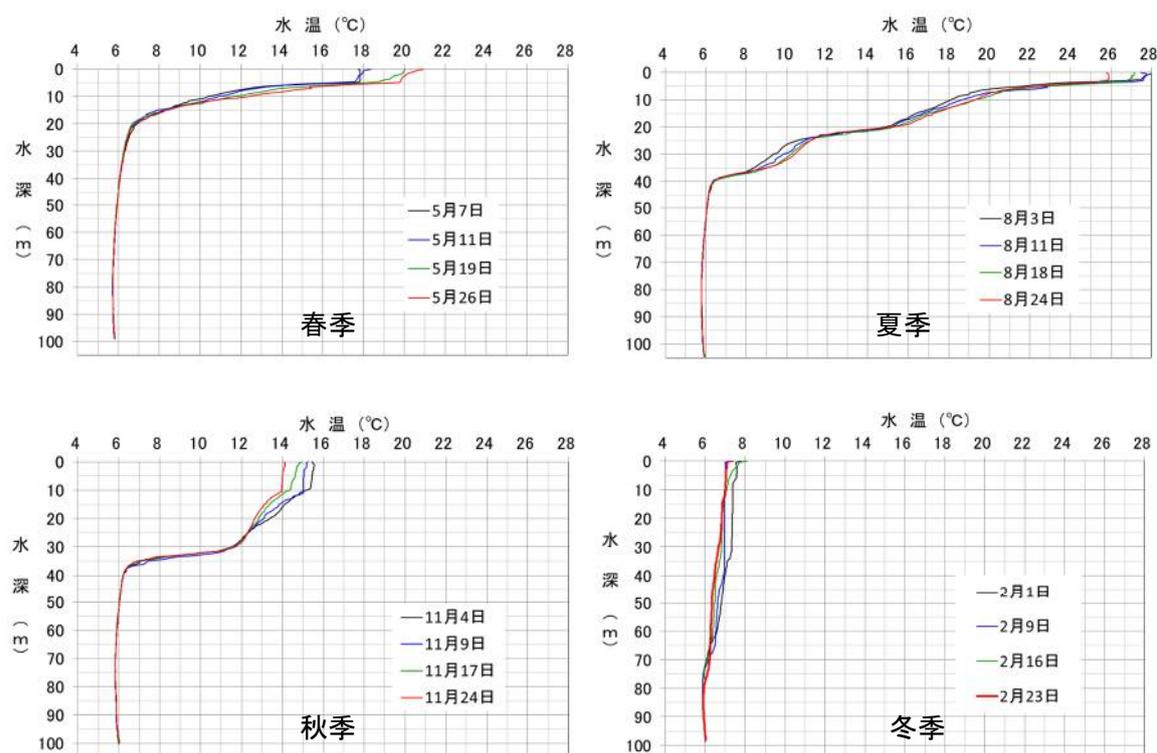


図 2-4-(2) ダム貯水池の水温分布の例 (小川内貯水池ダム前定点 平成 27 年度)

### 2-4-2 夏の水温分布

春から夏にかけて、太陽高度が上昇するので日射が水面に入りやすくなり、さらに気温が上昇してゆくの、表層の水温が上昇してゆく。表面の水温は 25°C 以上に達することがあるが、水深 50 m 付近ではあまり変化せず、6~10°C である。

水面から水深 20 m 程度までは風による鉛直混合が作用し、この領域を混合層という。また、表層温水と底層冷水の間で水温が急激に変化し、この領域を水温躍層という。河川水の水温は表層より低く、底層より高いので、水温躍層に貫入する (2-5-3 参照)。

この時期の特徴は、底層の水が停滞しやすいことである。貯水池や湖沼では水面を通じた熱の授受と風による鉛直混合が支配的であり、それ以外には河川流入と放流による水の動きがある。表層・中層から取水放流されている場合、貯水池におけるほとんど全てのエネルギーのやりとりは表層において行われる。そして、表層と底層では密度差が大きく、水温躍層をはさんだ水の循環が生じないので、深水層では水が停滞する。

水が停滞すると溶存酸素 (DO) が消費されて、貧酸素状態になることがある。このとき、底泥から栄養塩やマンガンが溶出しやすくなり、底層水の溶存物質濃度が上昇する。

### 2-4-3 秋の水温分布（放熱期）

秋になると気温が下がり始め、貯水池の表面水温よりも気温の方が低くなる（気温低下に水温低下が追いつかない）。特に夜間から朝にかけて気温が低下するので、このときに表面の水が冷却され、密度が大きく（重たく）なる。温水の上部に冷水が載っている状態は重力的に不安定であるため、表層冷水が沈降する。冷水塊が沈降しながら周囲水を連行してゆき、鉛直混合が進むので、この現象を冷却混合という。その結果、水温（密度）が均一な混合層が下方に拡大する。

### 2-4-4 冬の水温分布（循環期）

冬は風が強くなるので、冷却混合の効果と相乗して水温成層が消滅する。全層一様の水温分布となるので、密度差による安定性が失われ、表層と底層の水が強風時に混ざることが可能になる。したがって冬を循環期という。

夏には底層が貧酸素化し、栄養塩が溶出することがあるが、冬の循環期に貧酸素状態が解消され、また底層の栄養塩が貯水池全層に行き渡る。

### 2-4-5 ダム貯水池に特有の水温形成

閉鎖性水域の水温は、日射・気温・風が水面に作用することで形成され、それに加えて河川流入水と放流による熱量の輸送が影響する。この点は自然湖沼もダム貯水池も同じであるが、ダム貯水池では放流水深を人為的に変更できるところが異なる。

ダムでは表層放流をする場合、選択取水施設により表層～中層の任意水深で放流する場合、底層から放流する場合のおよそ3つのパターンがある。放流水深の違いが水温形成におよぼす影響は3-3で述べられている。

### 2-4-6 水温計測の方法

水温計測は様々なセンサー技術の中でもかなり基本的なものであり、金属の電気抵抗が温度によって変化することを利用して測定される。

貯水池管理では水温の鉛直分布を計測することが必要であり、測定頻度の観点からは(1)常時計測する方法、(2)作業船などで定期的に調査する方法の2種類があり、鉛直分布計測の観点からは(a)多数のセンサーを水深ごとに固定する方法、(b)1台のセンサーを上下昇降させる方法の2種類があり、合計4つの組み合わせがある（表2-4-(1)）。

表 2-4-(1) 貯水池における水温計測の実際

分類	方法	長所	短所	
(1)常時計測	(a)多層式	水温センサーを数 m おきに配置したケーブルを湖内の台船などから吊り下げる。表層・中層は1~2m間隔、底層は 5m 間隔で計測する。1時間おきに水温を計測し、管理所にデータを送信する。	水温だけを計測する場合は、シンプルな方法である。	多くのセンサーが必要になるので、水温以外の項目も計測したい場合に高価になる。実際、多層・多項目の方式は採用されていない。
	(b)昇降式	水温センサーを含む多項目水質計を自動昇降装置(ウインチ+ワイヤー)により上下させ、数 m おきに各種データを測定する。1 時間おきに装置を動作させて、管理所にデータを送信する(図 2-4-(3))。	水温・濁度・クロロフィル a 濃度・溶存酸素濃度なども同時計測することが可能で、貯水池管理において有用である。	自動昇降装置の機械部分が故障しやすい。
(2)定期調査	(a)多層式	メモリー式水温センサーを数 m おきにロープに取り付け、ブイや台船から吊り下げる。1 時間おきに水温を記録し、1~3 ヶ月ごとにデータを回収する(図 2-4-(4))。	1-a と比べて通信設備が無い分、最も安価。調査研究のために用いられる。	リアルタイムでは水温分布が分からない。
	(b)昇降式	多項目水質計を作業船から吊り下げて、調査員が各種項目の鉛直分布を計測する。調査頻度は 1 週間~1 ヶ月ごと。鉛直間隔は 0.1~1m。通常、作業船で貯水池内を移動して、複数地点で測定される。	データの鉛直間隔が最も狭く、高密度である。多項目水質の詳細な鉛直構造が分かるので、解析に役立つ。	頻繁に調査を行う必要があり、労力と業務費がかかる。



図 2-4-(3) 多項目水質計の自動昇降装置 (小河内貯水池)

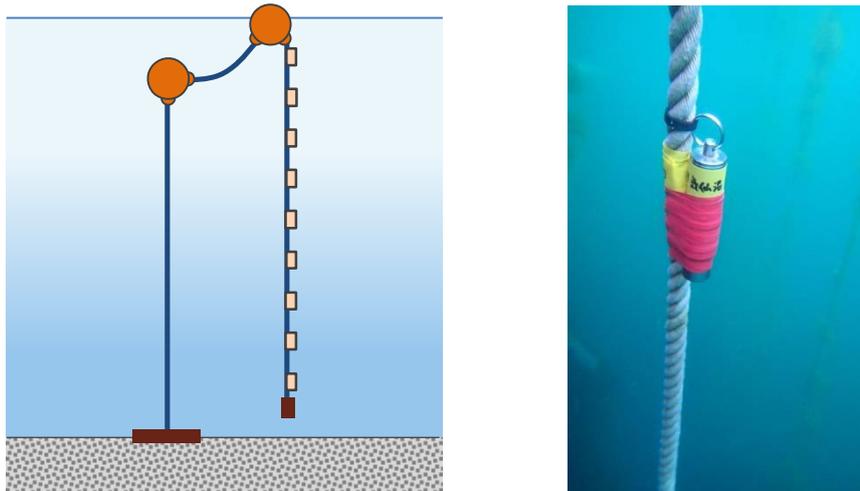


図 2-4-(4) 多層式水温計（サーミスターチェーン）

## 2-5 貯水池で生ずる流れ

### 2-5-1 風に起因する流れ

水面に風が吹くと、水面摩擦の影響で表層水が風下に吹き寄せられ、このときの流れを吹送流という。そして、その下の層では逆向きに（風上に）水が移動し、これを補償流という（図 2-5-(1)）。

表層水の吹き寄せにより風下側の水面が持ち上がる（セットアップ）一方で、内部の躍層面は押し下げられる（セットダウン）。水平面からのセットアップ量を $\Delta h_1$ 、内部界面のセットダウン量を $\Delta h_2$ 、上層基準の相対密度差を $\Delta\rho = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$ とすると、 $\Delta h_1 = \Delta\rho \times \Delta h_2$ となる。春季の貯水池では上下層の水温差が $1\sim 5^\circ\text{C}$ で、相対密度差は $1/40,000\sim 1/4,000$ になり、夏季は水温差が $10\sim 15^\circ\text{C}$ で、相対密度差が $1/800\sim 1/400$ になる。

そのため、水面変位はわずか数 mm であっても（計測できないレベル）、躍層面の変位は数 m～数十 m に達する。

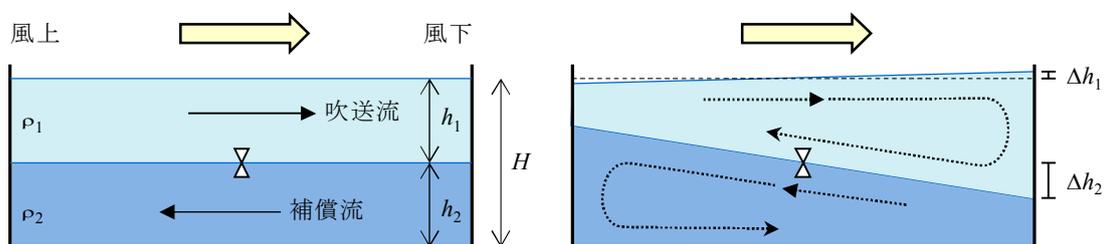


図 2-5-(1) 風による貯水池の流れ

### 2-5-2 内部静振と往復流

内部界面が傾斜した状態は重力的に不安定であり、風が停止すると界面が水平に復元しようとする。さらに、水平に復元してからも慣性力により界面が逆に傾き、振動が続く（図2-5-(2)）。内部界面がシーソーのように揺れ動く様子を内部静振といい、周期は次式で表される。

$$T = 2L \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} \cdot \frac{1}{g} \cdot \left( \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right)} \quad (2-6)$$

ここで、 $T$ ：内部静振の周期、 $L$ ：湖の軸長、 $h_1$ ：上層厚、 $h_2$ ：下層厚、 $\rho_1$ ：上層密度、 $\rho_2$ ：下層密度である。内部静振の周期は数時間～数日になり、非常にゆっくりとした動きが水中で発生する。

細長く直線的な貯水池では、界面の上下振動によって、上層と下層で逆向きの往復流が発生する。界面が水平になったときに最大流速が発生し、界面の最大傾斜時は流速がゼロになる。春季の強風時には内部静振に起因する下層流速が0.1 m/sを超える事例も報告されている（図2-5-(3)）。

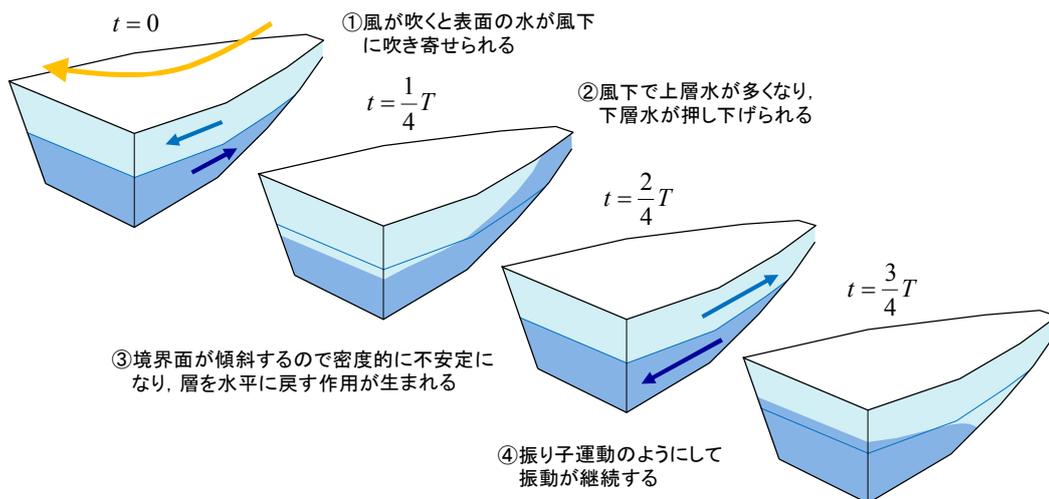


図 2-5-(2) 内部静振と往復流

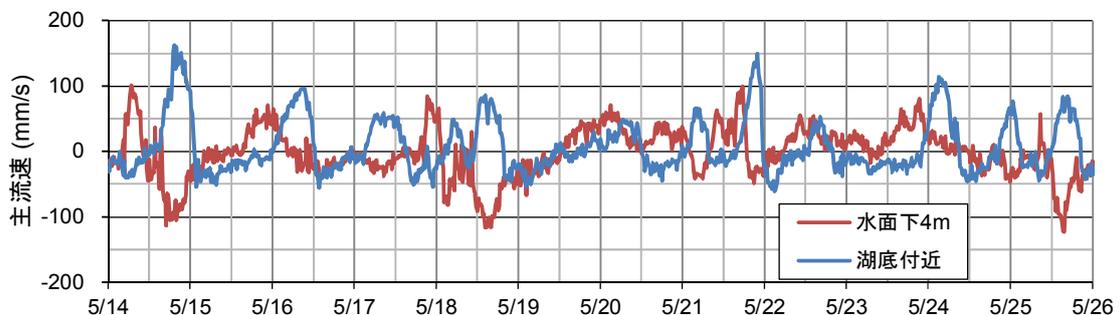


図 2-5-(3) 表層の吹送流と湖底付近の流れ（宮城県七ヶ宿貯水池、2004 年）

水面付近（水深約 4m）と湖底付近（水深約 38m）で逆向きの流れが生じており、往復振動の周期が約 1 日となっている。この周期は静振の理論値と一致する。

## 2-5-3 河川流入水による流れ

## (1) 密度流の構造

貯水池では流入した河川水が密度流に沿って移動する（図 2-5-(4)）。2-4 で述べたように、自然界の水は水温、濁度、塩分などによって何らかの密度を持っており、密度の大きい（重い）水が下部に、密度の小さい（軽い）水が上部に位置する。貯水池には密度の鉛直分布が形成され、河川水はその密度が貯水池の密度と等しくなる水深層を流れる。

春から秋にかけて、貯水池では表層から温められて水温成層が形成され、河川水の水温は表層よりも低い。そのため、河川水は貯水池の流入部において潜り込み、しばらく湖底を流下してゆく。密度が等しい水深層に到達すると、そこで離陸して水平に貫入し、中層密度流となって堤体方向に移動してゆく。なお、潜り込みや流下過程において周囲水（温水）を連行して希釈されるので、中層密度流の密度は河川水よりも若干小さくなる。河川水が貯水池の表層水よりも温かい場合は表層密度流となり、河川水が貯水池の全層の水温よりも冷たい場合は下層（底層）密度流となる。また、水温以外にも土砂濃度（SS）も密度に影響し、洪水時の高濃度濁水は密度が大きくなって下層密度流となる場合がある。

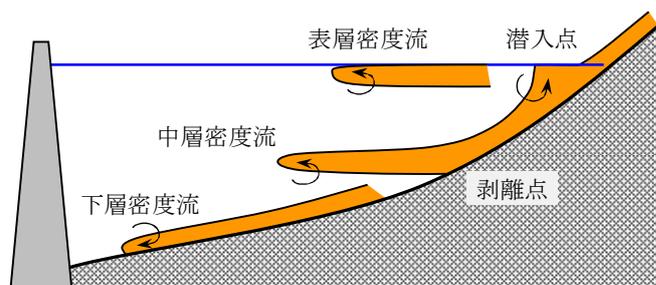


図 2-5-(4) 貯水池で生ずる密度流

## (2) 濁水密度流

土砂濃度を考慮した濁水の密度は次の通りである。

$$\rho_{ss} = \rho \left\{ 1 + \frac{C_{ss}}{1000} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\sigma} \right) \right\} \quad (2-7)$$

ここで、 $\rho_{ss}$ ：濁水の密度( $\text{kg/m}^3$ )、 $\rho$ ：水の密度( $\text{kg/m}^3$ )、 $\sigma$ ：土粒子密度( $\text{kg/m}^3$ )、 $C_{ss}$ ：土砂濃度( $\text{mg/l}$ )である。洪水時には河川水に微細土砂が混じることで、密度が大きくなるので、濁水は清水よりも重くなる。

例えば、水温が  $20^\circ\text{C}$  の淡水の密度は  $998.232 \text{ (kg/m}^3)$  であり、ここに微細土砂が混じって  $1,000$  度の濁水となった場合、密度は  $998.855 \text{ (kg/m}^3)$  となり、 $0.623 \text{ (kg/m}^3)$  だけ大きくなる。この値は水温が  $16.7^\circ\text{C}$  の清水・淡水と同じ密度であり、微細土砂の混入が水温を約  $3^\circ\text{C}$  下げたのと同じ効果を持つ。

## 2-5-4 濁水長期化現象

洪水時の濁水は貯水池内で長期間滞留することがある。上流河川では洪水時に砂礫やシルト・粘土が輸送されるが、これらが停滞水域に入ると沈降速度の大きな粒子から順に堆積してゆく。

層流状態と考えることの出来る水域（粒子レイノルズ数が小さい）では、ストークスの沈降速度式が適用できる。

$$w_s = \frac{1}{18\mu}(\rho_s - \rho_w)gd^2 \quad (2-8)$$

ここで、 $w_s$ : 沈降速度、 $\mu$ : 水の粘性係数、 $d$ : 粒子径であり、表 2-5-(1) のような値になる。

3  $\mu\text{m}$  の粒子は 1 ヶ月で 21 m 沈降するはずだが、実際には濁水は躍層付近に数週間から数ヶ月間とどまることもあり、なかなか沈降しない。そして、放流水の濁りが長期間続き、「濁水長期化」という問題を引き起こす。

小河内貯水池における例をあげると、平成 23 年に台風 12 号（9 月 3 日）と台風 15 号（9 月 20 日）の 2 つの台風が通過し、どちらの台風からも 400m<sup>3</sup>/s を超える流入があったため、濁水が貯水池に流入した。平成 23 年 11 月 15 日の濁度分布から、はじめの台風通過の約 2 か月後であっても、水深 10m から 40m に濁度 20 程度程度の濁水層が残存していることがわかる（図 2-5-(5)）。

貯水池の微細粒子が沈降しにくい原因は完全には解明されておらず、粒子間の電気的な反発力、内部静振や中層密度流の影響により躍層付近で発生する乱れ、鉛直循環流などが関係している可能性がある。

そのため、数値シミュレーションで濁水現象を再現する際には、ストークス沈降速度よりも小さい沈降速度を与えることもある。これは現地で採取した濁水の沈降塔実験から求める場合と、数値計算の結果が現地観測結果を再現できるようにトライ・アンド・エラーで調整する場合がある。

表 2-5-(1) 貯水池に浮遊する微細粒子の沈降速度（Stokes 式による）

粒径 ( $\mu\text{m}$ )	粒径 (mm)	沈降速度(m/day)
1	0.001	0.08
3	0.003	0.70
10	0.010	7.75

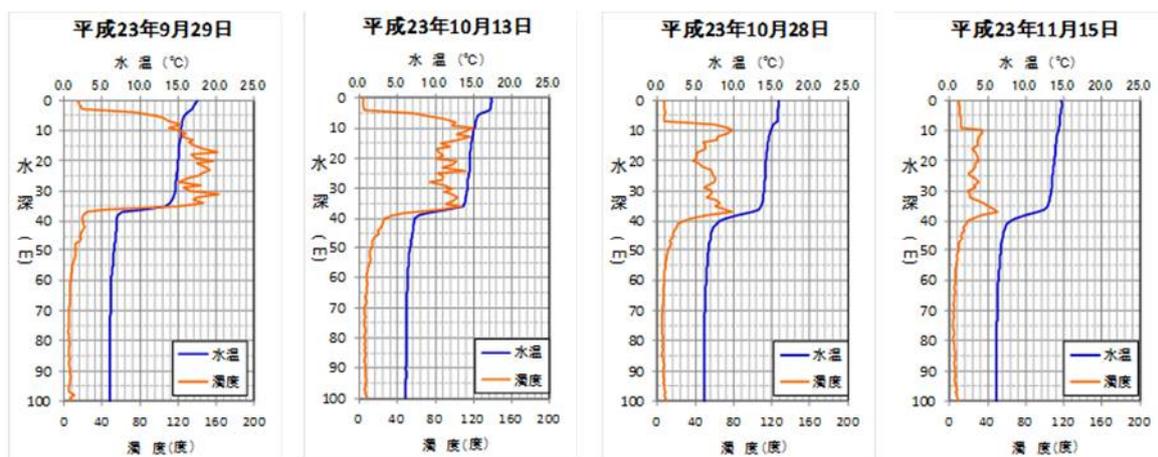


図 2-5-(5) 濁水の滞留状況（小河内貯水池ダム前定点 平成 23 年度）

### 2-5-5 流動の計測方法

貯水池の流速を計測する装置として、電磁流速計と超音波流速計がある。

#### (1) 電磁流速計

電磁流速計は球状センサーが触れている水の二次元流速（X-Y 成分）を計測する。貯水池では大抵、ロープを使って機器を係留するので、センサーの向きが揺れ動く。そのため、ジャイロコンパスを内蔵した機器を用いることで、センサー基準線の方位角と、それに対する X-Y 流速を計測し、両者から流速の東西・南北方向成分を出力する。貯水池ではこれまでに述べてきたように水温成層があり、密度流が発生するので、水深ごとに流れの傾向が異なる。これを調べるには、電磁流速計を水深方向に多数設置することが必要となる。

#### (2) 超音波多層流速計（湖底設置式）

超音波多層流速計（ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler）は超音波を水中に発振して、水流によって浮遊移動する懸濁物質（植物プランクトンやそのデトリタス、土砂粒子など）からの反射波を受信し、そのドップラーシフトを解析することで水の流速を求める装置である。音速を  $C$ 、発振から受信までの時間を  $T$ 、対象物までの距離を  $L$  とすれば、

$$2L = C \times T \quad (2-9)$$

となるので、反射波を連続的に受信すればセンサー直近から遠方までの流速分布を捉えられる。すなわち、湖底や水面に設置すれば、流速の鉛直分布を計測できる。電磁流速計と同様にジャイロコンパスを登載しており、東西・南北方向流速を出力する。

水深が数十メートルある貯水池では周波数が 500 kHz～1,500 kHz の装置が適しており、超音波の周波数によって計測可能距離と距離分解能が異なる（表 2-5-(2)、図 2-5-(6)）。発振回数（平均化時間）を長くすると計測精度は向上するが、電池消費が大きくなるので、これらも勘案して計測設定を作ることになる。

表 2-5-(2) 超音波多層流速計の性能 (例)

周波数	計測可能距離	距離分解能 (層厚)	発振回数	流速精度
600 kHz	40~60 m	0.5~1 m	120 回 (秒)	5.6~12.0 mm/s
1200 kHz	15~25 m	0.25~0.5 m	120 回 (秒)	5.6~12.0 mm/s

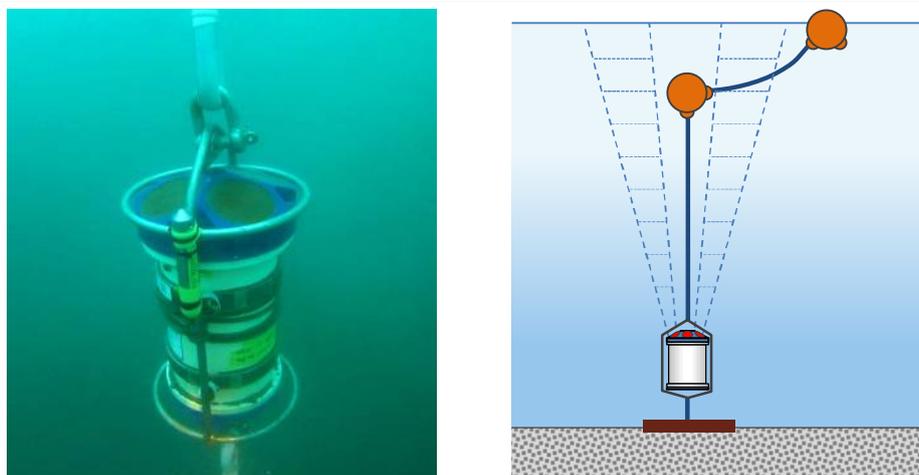


図 2-5-(6) 超音波多層流速計の設置例

### (3) 超音波多層流速計 (曳航式)

センサーを水面に浸けて下向きに超音波を発信して流速鉛直分布を計測しつつ、水面を移動しながら断面の流速分布を計測する「曳航式超音波流速計」もある。この方法では、対象とする水域の鉛直断面内の流速分布を計測できて、貯水池では横断面内の流速分布や、縦断面（上流～堤体）の流速分布を知ることができる。

計測の原理は、センサーから見たときの水の相対速度と、センサーの移動速度（対地速度）を合成することで、水の絶対流速を算出している。センサーの移動速度は、超音波の湖底からの反射波を解析して算出する方法（ボトムトラック）、もしくは GPS 測位から算出する方法（GPS トラック）のどちらかで求められる。

実際の計測技術は、センサーを作業船の舷側に取り付けて走行する方法と、専用の小型模型ボートの中心にセンサーを取り付けて、ボートを作業船で曳航する方法がある。この時、計測の時間（1波群の平均時間）を5秒に設定すると、流速の精度は5 cm/s程度になる（1,200 kHzの場合）。曳航式ではセンサーを時速4~8 kmで移動させるので、計測時間中の移動距離が5.6~11.1 mとなり、この水平移動距離の範囲内の水柱の平均流速を計測していることになる。平均時間をより長くすれば原理上の計測精度は向上するものの、移動距離が長くなるので、空間平均が大きくなってしまい、流速データが意味をなさない。このように、流速の精度の考え方では固定式と曳航式では異なり、曳航式は比較的強い流れを短時間に計測することに適している。貯水池では洪水時の密度流や強風時の吹送流の流速は10 mm/sを超えることがあり、このような顕著な流れの流速分布を捉えるのに曳航式は適しているものの、数 mm から数 cm の定常流は計測が難しい場合がある。

### 2-5-6 流動の数値シミュレーション

ダム貯水池の水温成層や流動現象を再現、予測するには、目的に応じてモデル形式を選択する。水域で用いられる流体モデルは、①鉛直一次元モデル、②縦断一次元モデル、③鉛直二次元モデル、④平面二次元モデル、⑤三次元モデルの5種類がある(図2-5-(7))。

#### (1) モデル形式の選び方

①鉛直一次元モデルは、貯水池の水深方向のみを計算するモデルであり、水温鉛直分布の季節変化を予測する際に用いられる。水平方向  $x - y$  の流動は扱わず、水深方向  $z$  の混合と熱伝導のみを扱う。計算がシンプルであるため、長期間の予測計算が簡単にできる。

②縦断一次元モデルは、貯水池の流下方向を  $x$  軸として、水深  $z$  と幅  $y$  の状態変化は取り扱わない。比較的水深が浅く(15 m程度)、川のような流れになる発電専用ダム(取水堰)における洪水時の解析に用いられる。この場合、水深方向の温度成層場は考えず、流下方向に開水路の不定流計算を行って、水面変化と流速を求める。

③鉛直二次元モデルは、貯水池の長手方向を  $x$  軸に、水深方向を  $z$  軸にしたモデルで、幅  $y$  の状態変化は扱わない。最も一般的に用いられる形式であり、水温成層場と流速場の予測が行える(図2-5-(8))。水質モデルや生態系モデルを組み込んだモデルも使われる。貯水池が流下方向に細長い性質を利用して、幅  $y$  方向の状態を積分的に扱うので、自然湖沼のように円形に近い場合や、枝分かれている貯水池には向かない。なお、枝分かれている貯水池については、枝状の水域ごとに二次元モデルを作成して、結合する方法もある。

④平面二次元モデルは、貯水池の長手方向を  $x$  軸に、幅方向を  $y$  軸にしたモデルで、水深  $z$  の状態変化は扱わない。水温成層が発達しない浅い水域(10 m以下)に適用可能であるが、現実的にはあまり使われない。

⑤三次元モデルは、地形形状を忠実に再現するモデルであり、2010年代から実用化に向けた開発が進められている。貯水池では水温や流速が平面的にも分布するため、水質対策施設の配置を適切に計画するためには三次元モデルを使用することが望ましい。

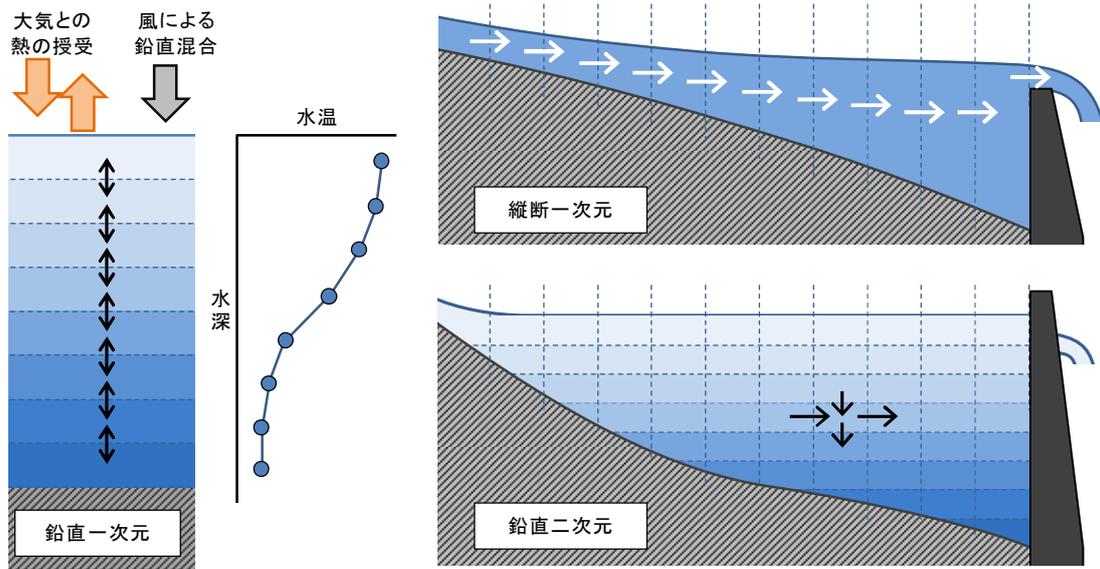


図 2-5-(7) 水域シミュレーションの次元の取り方

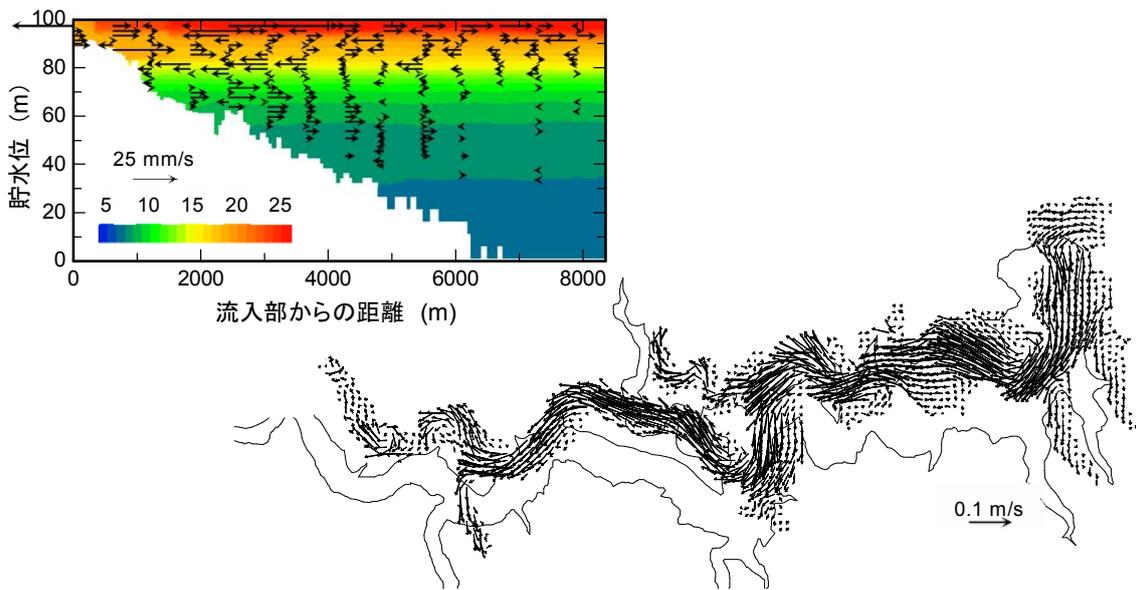


図 2-5-(8) 二次元モデル（左上）と三次元モデル（右下）の計算例

## (2) 外力としての風の与え方

水深方向の鉛直混合や表面流を計算する際に、風向風速データが非常に重要である。一般に、風向風速はダム管理所の1地点のみで計測されている。二次元モデルの場合は、経験的にダム管理所の風速を2~3倍に増大させて与えることが多い。これは貯水池の湖上風が管理所の風よりも強いためであるが、風速の倍率を理論的に検討することが難しいので、実測された水温の鉛直構造を再現できるように風速を調節することが多い。

三次元モデルの場合は、湖上風の平面分布を与える必要がある。山間部の貯水池は蛇行しており、風は谷筋に沿って吹くので、ダム管理所の風向を全域一様に適用すると、現実と異なる方向に風応力を与えることになる(図2-5-(9))。二次元モデルでは平面的な蛇行を考慮しない分、風の向きと地形が一致するが、三次元モデルでは風の向きと地形が一致しなくなり、「地形を忠実に再現しているにもかかわらず、風の与え方が不適切なために再現性が低下する」という事態に陥る。

したがって、三次元モデルに関しては、水理モデルだけではなく、大気場のモデルも必要となり、今後の課題と言える。

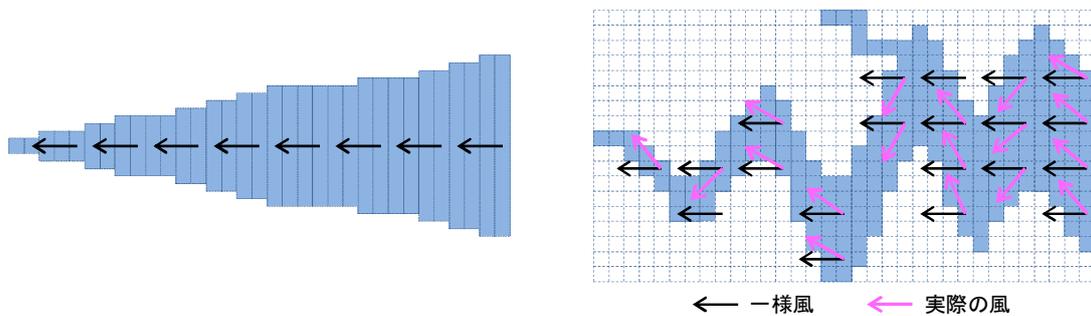


図2-5-(9) 鉛直二次元モデル(左)と三次元モデル(右)の湖上風の与え方

## 2-6 植物プランクトンの挙動

### 2-6-1 水中の光分布と植物プランクトンの関係

植物プランクトンは水・二酸化炭素と太陽光エネルギーを使って光合成をして、有機物を合成して酸素と水を放出する。この有機物生産の過程を基礎生産(一次生産)という。光合成に必要な太陽光は、水中に入ると散乱や吸収により、深さとともに光強度が減衰してゆく。この関係は、Lambert-Beerの法則と言われ、指数関数で表される。

$$I = I_0 e^{-kz} \quad (2-10)$$

ここで $I$ は水中の光強度、 $I_0$ は水面近傍(水深1~10cm程度)の光強度、 $z$ は水深、 $k$ は光消散係数である。水深-光強度分布を対数グラフにプロットすると(図2-6-(1))に、光の減衰が直線的になっていることから、理論式(2-10)が成立していることが分かる。

また、植物プランクトンは生物として呼吸をしており、酸素と体内の有機物を消費して、

水中に酸素を放出している。

水面付近では光が豊富なため生産量が多く、深くなると光が弱くなるので生産量が減少して、呼吸量の方が相対的に多くなる。図2-6-(1)に示すように、光合成による総生産量と呼吸量の差を純生産量と言ひ、純生産がゼロとなる水深（生産と呼吸が釣り合っって増減が無い水深）を補償深度という。これより深くなると、植物プランクトンは増殖できない。補償深度は水面の光が概ね 1/100 に減衰した水深と言われている。

ただし、光が強すぎる場合は光合成が阻害されるので（強光阻害という）、晴天時には水面よりも少し深い場所でプランクトン量が多くなる。曇天時には光が弱いので水面付近にピークが現れる。

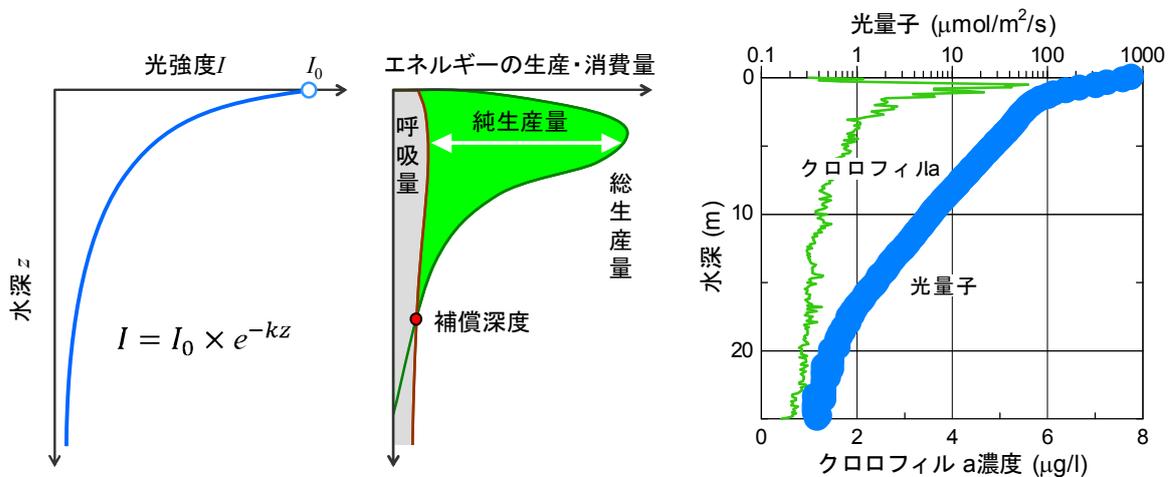


図 2-6-(1) 水中の光強度分布（左）、光合成の状況（中）、それらの実測値（右）

実測値は光強度を対数表示しており、直線的な分布は指数関数を意味する

### 2-6-2 透明度

水中の光強度は光量子センサーもしくは透明度板によって計測できる。図2-6-(1)の右図は光量子センサーによる計測例であり、専用の計測機器が必要である。一方で、透明度板は1865年にSecchi氏によって提案されたものであり、直径30cmの白色円板とロープ、おもりで構成される図2-6-(2)。これを水中に沈めて目視で確認できなくなる水深が透明度である。

水中に植物プランクトンや懸濁粒子が多ければ透明度は低くなる。経験的な値として、透明度が2mより浅ければ富栄養状態、2~10mであれば中栄養、10mよりも深ければ貧栄養と考えられる。非常に簡便な方法であり、世界中で昔から計測されてデータが蓄積されているので、水環境の変化を捉えることが出来る。

さて、前述の補償深度は透明度の2~2.5倍と言われている。そのため、透明度を測定することで植物プランクトンの分布範囲を概略推定することができる。また、補償深度を  $Z_c$ 、透明度を  $T$  として、以下のようにおく。

$$Z_c = 2T \tag{2-11}$$

補償深度における光の強さを  $I_c$  とすると、次のようになる。

$$I_c = I_0 e^{-kZ_c} = 0.01 \times I_0 \quad (2-12)$$

これらから光消散係数と補償深度、透明度に関する次式が導かれる。

$$k = \frac{4.605}{Z_c}, \quad k = \frac{2.303}{T} \quad (2-13)$$

このようにして、透明度を測定することで水中の光分布を計算することができる。



図 2-6-(2) 透明度計測の方法

### 2-6-3 光以外の生育環境

植物プランクトンの生育には、光条件以外に水温、栄養塩が関係している。種類ごとに好適な水温があり、例えば星形珪藻アステリオネラは水温 15°C 付近を好むので、春先に表層～中層において増殖して淡水赤潮を起こしやすい。また、アオコは 25°C 以上を好むので、夏場の表層に現れる。また、栄養塩が豊富な河川流入部や、底泥から溶出した栄養塩が表層に回帰しやすい浅い水域でも増殖しやすい。

植物プランクトンの空間分布には、水温、流動が関係している。植物プランクトンの大半は自分で泳ぐことが出来ず、ほぼ水と同じ密度で中立浮遊している。ここで、水の密度が成層の影響で水深方向に変化するので、わずかな密度変化の影響を受けやすく、密度の急変点（混合層の下端）に集積する傾向がある。また、貯水池中心部のように風が強く流れが速い場所よりも、入江や蛇行部の風の弱い場所において集積・増殖しやすい。

### 2-6-4 植物プランクトン現存量の分析方法

植物プランクトンの現存量の表現方法は、セル数（細胞数）で表す方法と、クロロフィル色素濃度で表す方法がある。

セル数については、ある水深から湖水を採取して 5～20 μm メッシュでろ過し、濃縮したサンプルを顕微鏡で観察し、種類、形状、数を記録してゆく。

クロロフィル色素濃度については、湖水をガラス繊維フィルター（目合い 1 μm 程度）でろ過した後に、フィルターをアセトン溶液に漬け込んでクロロフィル色素を抽出し、抽出

溶液の吸光度を測定する。もしくは、DMF 溶液に漬けてクロロフィル色素を抽出し、抽出溶液の蛍光光度を測定する。蛍光法は、クロロフィル色素に青色の励起光を照射すると赤色の蛍光を発する性質を利用した方法である。

伝統的にはアセトン抽出吸光度法が用いられるが、DMFの方が抽出能力が高く、抽出溶液の冷凍保存が可能であるため、最近は蛍光光度法が用いられることも多い。

### 2-6-5 蛍光センサーによる現場測定方法

前述の分析方法は植物プランクトン現存量を正確に把握できるものの、一回の調査で分析できる数量には限界がある。1990年代後半から、現場型の励起蛍光センサーが用いられるようになった。水深・水温・電気伝導度センサー（CTD）に励起蛍光センサーを追加した多項目水質計を用いて、これを水面から吊り下げると蛍光値の鉛直分布を短時間で取得できる。例えば、水深50mの地点において0.1m間隔でデータを取得するのに5分程度しかかからない。

別途、10点ほどで採水してクロロフィル色素濃度を分析し、多項目水質計により同じ水深で計測した蛍光値と比較することで検量線を作成する。検量線を用いて多項目水質計の蛍光値をクロロフィル色素濃度に換算する。この方法であれば、多地点での植物プランクトン現存量の鉛直分布を手軽に計測できて、空間的な分布状況を短時間に把握できる。



図 2-6-(3) 多項目水質計による蛍光値測定



図 2-6-(4) バンドーン採水器による採水

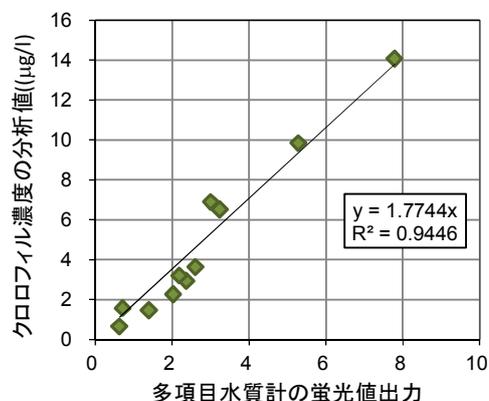


図 2-6-(5) 水質計の蛍光値と採水サンプルのクロロフィル濃度の相関

## 2-7 植物プランクトンの種類と好適環境

植物プランクトンとは、プランクトン（水中や水面に浮遊して生活する生物）のうち光合成を行うものの総称であり、様々な分類群の生物を含む。藍藻類は藍色細菌（シアノバクテリア）とも呼ばれ、大腸菌等と同様に、明確な核を持たない原核生物である。また、真核生物の植物プランクトンとしては、緑藻類、珪藻類のほか、黄金藻類や渦鞭毛藻類などがある。

湖沼では、富栄養化にともなってこれらの植物プランクトンが大量増殖し、湖水が着色する淡水赤潮や水の華と呼ばれる現象がしばしば観察される。特に、藍藻類の大量増殖はアオコと呼ばれ、全国の貯水池で問題となっている。これら植物プランクトンの大量増殖は、異臭味障害や浄水処理障害を引き起こすことから、注意が必要である。

本節では、水道と関わりの深い生物を中心として、貯水池でよく見られる植物プランクトンとその好適環境について概説する。なお、生物の大きさについて値を示した場合は、日本の水道生物<sup>1)</sup>の値を引用している。

### 2-7-1 藍藻類

藍藻類は、淡水湖沼や海洋をはじめ、極地の湖沼から温泉まで、幅広い環境に生息している。一般的に藍藻類は高水温下における増殖に優れるため、夏季～秋季には富栄養化した湖沼で大量増殖する<sup>2)</sup>。ガス胞を持つ種が表層で増殖した場合には、他の植物プランクトンを被陰することで優占し、しばしばアオコを形成する。また、藍藻類の一部はガス態の窒素(N<sub>2</sub>)を同化する窒素固定を行うことから、硝酸やアンモニアが枯渇した場合にも有利である<sup>2)</sup>。代表的なアオコ形成種としては、*Microcystis* 属と *Anabaena* 属が良く知られている。

#### ・*Microcystis* 属

数 $\mu\text{m}$ 程度の球状の細胞が寒天質に包まれた群体を形成する(図 2-7-(1))。夏季～秋季にかけて表層で大量増殖し、アオコを形成する<sup>1)</sup>。群体は浮力を持つため凝集沈殿での除去が難しい。また、塩素処理で群体が壊れると、細胞がろ過池から漏洩することがある<sup>3)</sup>。群体の形状等に基づき5種に分類されていたが、現在は *M. aeruginosa* として1種にまとめられている<sup>4)</sup>。一部の株は強力な肝臓毒であるミクロシスチンを産生し、米国オハイオ州では2014年に本種由来のミクロシスチンが基準値を超過したことで、飲用禁止の勧告が行われた<sup>5)</sup>。

#### ・*Anabaena* 属

10 $\mu\text{m}$ 前後の球状の細胞が数珠状につながり糸状体を形成する(図 2-7-(2))。糸状体はらせん状のもの、まっすぐのもの、不規則のものなど、様々である。ヘテロシストと呼ばれる細胞を形成し、窒素固定を行う。初夏から秋期に表層で大量増殖し、アオコを形成する<sup>1)</sup>。かび臭原因物質であるジェオスミンを産生する種が多く、各地で異臭味障害の原因となっている。生育環境が悪化すると休眠細胞を形成する。

・ *Phormidium* 属

円盤型もしくは円筒型の細胞が連なって鞘に包まれた糸状体を形成する。付着性の種も多いが、貯水池では *P. tenue* 等の浮遊性の種が一般的にみられる。本種はかび臭原因物質である 2-メチルイソボルネオール (2-MIB) を産生し、富栄養化した湖沼で初夏～秋に大量増殖し異臭味障害の原因となる<sup>1)</sup>。また、本種は底泥に付着性藻類として存在することもあり、2-MIB 被害の原因となった例も報告されている<sup>6)</sup>。

・ *Synechococcus* 属

細胞の直径は 0.5～2 $\mu\text{m}$  程度と小さく、ピコプランクトンに属するものが多い。富栄養化した湖沼で春から秋にかけて大量増殖することがある<sup>1)</sup>。原水中に多数含まれる場合、漏出障害（浄水濁度の上昇）を引き起こすことがある<sup>3)</sup>。



図 2-7-(1) *M. aeruginosa*

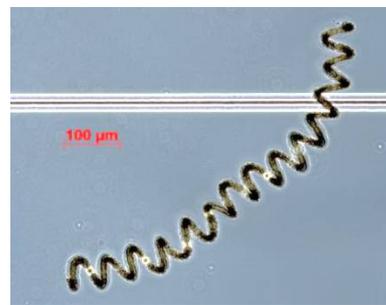


図 2-7-(2) *Anabaena* 属

## 2-7-2 緑藻類

緑藻類は、単細胞で存在するものから、群体や糸状体を形成するもの、あるいは鞭毛をもち運動性を有するものなど、非常に多様な体制の種を含む。緑藻類は、一般的に晩春から初秋にかけて増殖することが多い<sup>1)</sup>。水道水源では様々な種の緑藻が見られるが、ここでは小内貯水池でよく観察される種や水道障害の原因となる種について概説する。

・ *Oocystis* 属

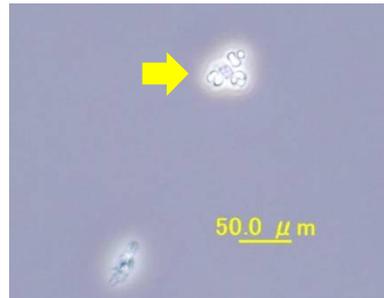
湖沼の植物プランクトンとして一般的であり、細胞は楕円形又はレモン形で幅 6～10 $\mu\text{m}$  程度、長さ 15～23 $\mu\text{m}$  程度である。2～8 個の細胞が集まって母細胞の膜に包まれた群体が一般的だが、単細胞でもよく見られる。(図 2-7-(3))

・ *Dictyosphaerium* 属

湖沼で、特に春から夏にかけて一般的にみられる<sup>1)</sup>。直径 2～10 $\mu\text{m}$  の細胞が 4 個ずつ糸状の構造で連結して集まり、群体を形成する (図 2-7-(4))。原水中で繁殖すると、凝集沈殿で除去しきれずにろ過漏洩障害を引き起こすことがある<sup>3)</sup>。

・ *Chlamydomonas* 属

球形～卵型の単細胞で、大きさは 10～30 $\mu\text{m}$  程度である。細胞の全部に 2 本の鞭毛をもち、遊泳性があるため、ろ過水中に漏洩することがある<sup>3)</sup>。

図 2-7-(3) *Oocystis* 属図 2-7-(4) *Dictyosphaerium* 属

### 2-7-3 珪藻類

珪藻類は、珪酸質の殻に包まれた真核藻類である。殻は多くの場合箱と蓋との関係のように外殻と内殻に分かれ、箱の上下にあたる面を殻面、側面にあたる面を殻環面と呼ぶ。珪藻類は単細胞で独立して存在するもののほか、帯状や星状など、特徴的な形態の群体を形成するものもあり、和名は形態的な特徴をよく表している。珪藻類は淡水から海水、土壌などいたるところに生息し、浮遊性のものと付着性のものがある。浮遊性の珪藻類は春先に日射量の増加と水温の上昇に伴って湖沼で大量発生する<sup>4)</sup>。夏期には栄養塩の枯渇や捕食圧の増加により珪藻のブルームは衰退し、その環境条件に適応した藍藻類に取って代わられることが多い<sup>2)</sup>。珪藻類は原水に大量に含まれると浄水処理上の問題となるものがある。ここでは、貯水池で一般的にみられる浮遊性の種について概説する。

#### ・ *Synedra* 属 (和名：ハリケイソウ)

単独で浮遊するものが多く、種によっては凝集沈殿で除去されにくいいため、原水に大量に含まれるとろ過閉塞障害の原因となる<sup>3)</sup>。*S. acus* は湖沼で一般的にみられる種で、細胞の長さは 100~300 $\mu\text{m}$ 、幅は約 5 $\mu\text{m}$  と、細胞が比較的大きい。小河内貯水池では平成 14 年に本種が大量発生し、下流に位置する小作浄水場でろ過閉塞障害を引き起こした事例が知られている。

#### ・ *Aulacoseira* 属

円筒状の細胞が殻面で連結し、糸状の群体を形成する。糸状体が大きく、凝集沈殿による除去性が悪いことから、大量発生するとろ過閉塞障害を引き起こすことがある<sup>3)</sup>。*A. granulate* は代表的な種であり、細胞の長さは 10~36 $\mu\text{m}$ 、直径は 5~21 $\mu\text{m}$  で末端の細胞に長い棘を持つ。貯水池でもしばしば大量増殖し、水の華の構成種となる。

#### ・ *Asterionella* 属 (和名：ホシガタケイソウ)

細胞は長さ 40~130 $\mu\text{m}$ 、幅 1~2 $\mu\text{m}$  の桿状で、両端が膨らんでいる。複数の細胞の一端がつながり、星状若しくはジグザグに並んだ特徴的な群体を形成する (図 2-7-(5))。湖沼で一般的にみられ、上記の種とともに春や秋に増殖する<sup>1)</sup>。原水に大量に含まれると、ろ過閉塞障害を引き起こす<sup>3)</sup>。

- ・ *Fragilaria* 属 (オビガタケイソウ)

湖沼では植物プランクトンとして一般的であり、河川では付着性の種も見られる。細胞が殻面で連結して帯状の群体を形成する (図 2-7-(6))。 *F. crotonensis* は浮遊性であり、個々の細胞は長さ 40~170 $\mu\text{m}$ 、幅 2~3 $\mu\text{m}$  である。群体が大きいと、原水で大量発生するとろ過閉塞の原因となることがある<sup>3)</sup>。

- ・ *Cyclotella* 属 (ヒメマルケイソウ)

細胞は太鼓状で、直径 5~50 $\mu\text{m}$  と比較的小型である (図 2-7-(7))。浮遊性であり、単独で存在するか、殻面でつながって群体を形成することがある。春や秋に湖沼で増殖することが多い<sup>1)</sup>。小型の細胞が原水中に多く含まれると、ろ過池から漏洩し浄水濁度上昇の原因となることがある<sup>3)</sup>。

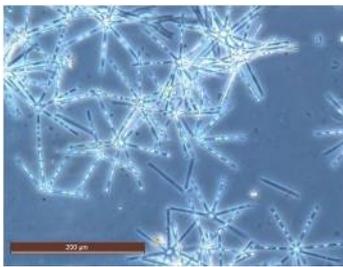


図 2-7-(5) *Asterionella* 属

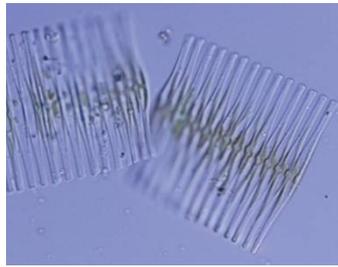


図 2-7-(6) *Fragilaria* 属

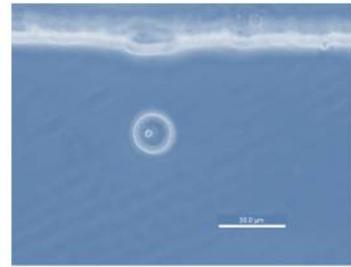


図 2-7-(7) *Cyclotella* 属

#### 2-7-4 その他の藻類

前述の藻類以外にも、貯水池には様々な藻類が存在し、その中には異臭味の原因となるものや水の華を形成するものなど、水質管理上重要な種も多く含まれる。その一部について概説する。

- ・ 黄金藻類

黄金藻類は多くの種が鞭毛をもち、遊泳性である。

*Uroglena* は主に春から初夏にかけて増殖し、5~19 $\times$ 3~8 $\mu\text{m}$  の細胞が球形の寒天質の表層に規則的に並び、直径 50~250 $\mu\text{m}$  の群体を形成する。*U. americana* は淡水赤潮を形成し、生ぐさ臭の原因主として代表的な藻類である。

*Dinobryon* は湖沼でよくみられる種であり、円筒形の被殻に入った細胞が樹状に連なって群体を形成する。本種も水に生ぐさ臭をつけるとされている (図 2-7-(8))。

- ・ 渦鞭毛藻類

単細胞で存在し、細胞が殻で被われる種も多い。細胞表面には縦横の溝が存在し、それぞれの溝にある 2 本の鞭毛により遊泳性を持つ。貯水池ではいずれも被殻を持つ *Peridinium* や *Ceratium* が一般的にみられ、これらの種は大量増殖すると湖水を着色して水の華を形成する (図 2-7-(9))。貯水池で異常増殖した後に腐敗して、水道原水で腐敗臭の問題となることがある。



図 2-7-(8) *Dinobryon* 属 (赤枠内)

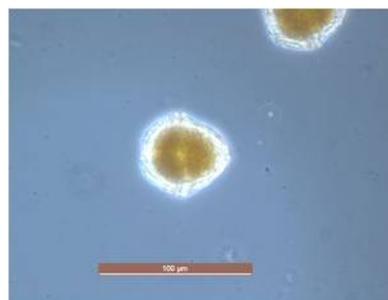


図 2-7-(9) *Peridinium* 属

### 2-7-5 生物障害とその対策

貯水池の植物プランクトンによって引き起こされる代表的な生物障害とその対策について、表 2-7-(1) に示す。なお、原因となった生物により有効な対策は異なるため、詳細については専門書<sup>3)</sup>を参照されたい。

表 2-7-(1) 代表的な生物障害とその対策

生物障害	代表的な生物種	浄水処理上の対応策
異臭味障害 (かび臭)	藍藻類 ( <i>Anabaena</i> 、 <i>Phormidium</i> など)	粉末活性炭処理 マイクロストレーナ オゾン処理
異臭味障害 (なまぐさ臭)	<i>Uroglena</i> 、 <i>Dinobryon</i> など	塩素処理 粉末活性炭処理 オゾン処理
ろ過池閉塞障害	大型珪藻類 ( <i>Synedra</i> 、 <i>Asterionella</i> など)	凝集剤の注入強化 前塩素処理 凝集 pH の低減 マイクロストレーナー
ろ過池漏えい障害	小型珪藻類 ( <i>Cyclotella</i> など) <i>Synechococcus</i> 、 <i>Mirocystis</i> 、 <i>Dictyosphaerium</i> など	凝集剤の注入強化 二段凝集処理 前塩素処理 凝集 pH の低減 前塩素の停止 (群体性のもの)

### 2-7-6 小河内貯水池における植物プランクトンの季節遷移

小河内貯水池ダム前地点の生産層 (表面から透明度の3倍の深さまでの層) における生物数の推移を、図 2-7-(10) に示す。主要な植物プランクトンの総数は、年により大きくばらつくものの、4月から5月にかけて増加し、6~7月に減少した後に8~9月に再びピークを迎えるといった傾向がうかがえる。月ごとの平均値 (図 2-7-(11)) を算出すると、4月から5月の春季にかけては珪藻類が多くを占め、6~7月に生物総数が減少に転じたのちに、8月から11月の秋季にかけては緑藻類が多くを占めるという傾向が顕著である。

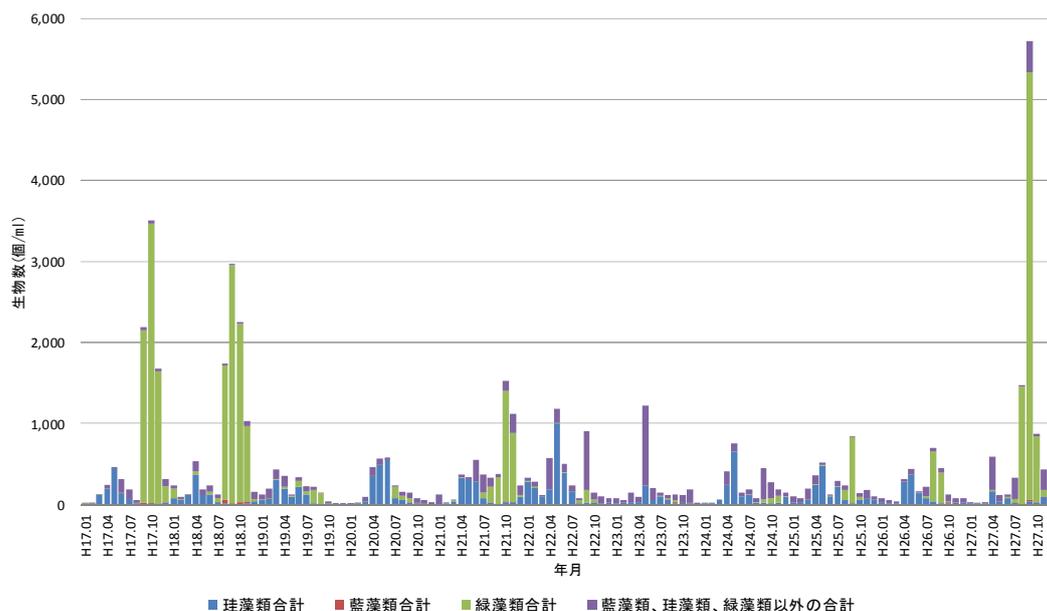


図 2-7-(10) ダム前定点(生産層)における主な生物数(平成 17 年 1 月～平成 27 年 12 月)

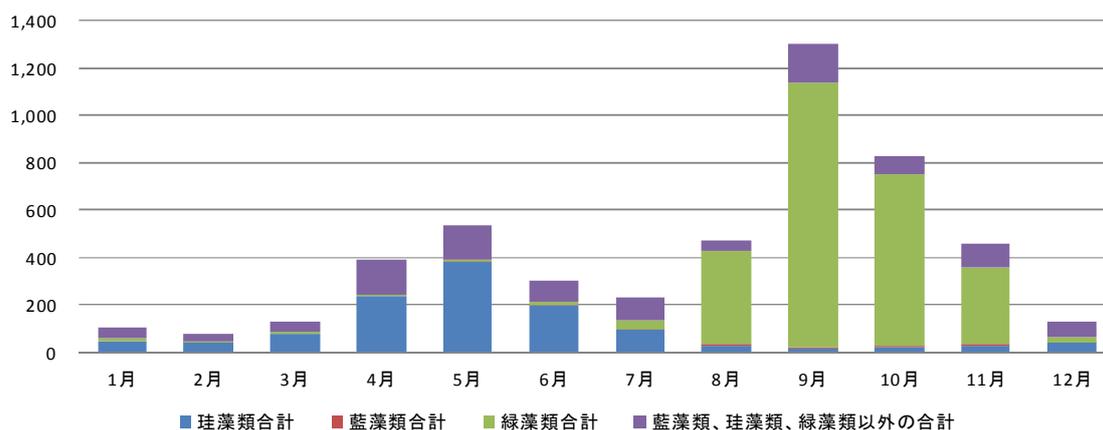


図 2-7-(11) ダム前定点(生産層)における主な生物数  
(月毎平均、平成 17 年 1 月～平成 27 年 12 月)

引用文献

- 1) 日本水道協会編「日本の水道生物—写真と解説—改訂版」、社団法人日本水道協会、2008 年
- 2) A.J.ホーン・C.R.ゴールドマン著、手塚泰彦訳「陸水学」、京都大学学術出版会、1999 年
- 3) 日本水道協会編「生物障害を起こさないための浄水処理の手引き」、社団法人日本水道協会、2006 年
- 4) 渡邊信ほか編「藻類ハンドブック」、株式会社エヌ・ティー・エス、2012 年
- 5) 「米国の飲料水における藻類毒への対応について」、水道ホットニュース第 464-3 号、水道技術研究センター、2015 年
- 6) 小澤和也・木村文宣「貯水池浅場上の底泥がカビ臭現象に与える影響に関する調査研究」、水源地環境技術研究所所報(平成 24 年度) p.3-9、2013 年