

第4章
流域における
諸現象の調査研究



第4章 流域における諸現象の調査研究

4-1 長期的な水質傾向

4-1-1 濃度による水質傾向

水質変動には、主に経年変動、周期変動（季節変動）、台風や豪雨による突発的な変動（不規則変動）がある。水質汚濁状況の変化を把握するには経年変動によって長期的な水質傾向を捉えることにより水質汚濁が進行しているか、改善されているかを見ることができる。

図4-1-(1)は約60年間の月1回の丹波川における濁度測定値を時系列グラフであらわしたものである。昭和40年ころから50年にかけて変動が大きく高い値となっている月が多い。

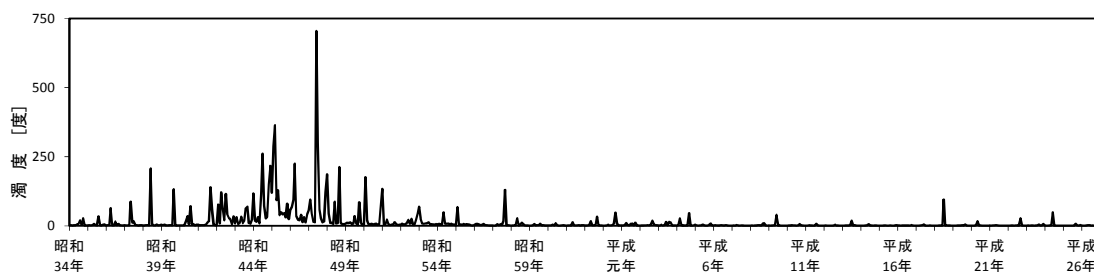


図4-1-(1) 濁度月データの時系列図

ここから年平均値を求めてグラフに表すと図4-1-(2)となる。月変動が大きく明確でなかった傾向がはっきりと示された。図4-1-(3)は全期間の8月の値だけで示したグラフである。年平均値と同様に、昭和49年以降減少傾向にあることがわかる。このように、長期的な水質変動を解析する際は、平均をとると分かり易い。

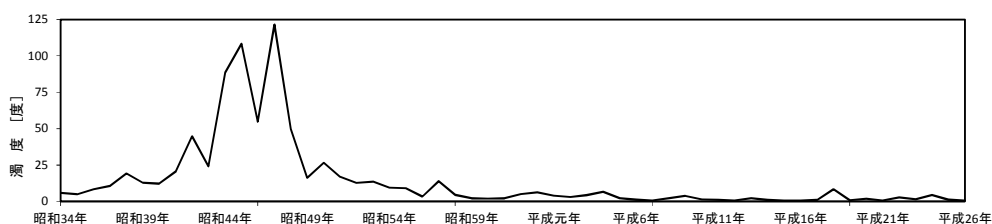


図4-1-(2) 年平均値の時系列図

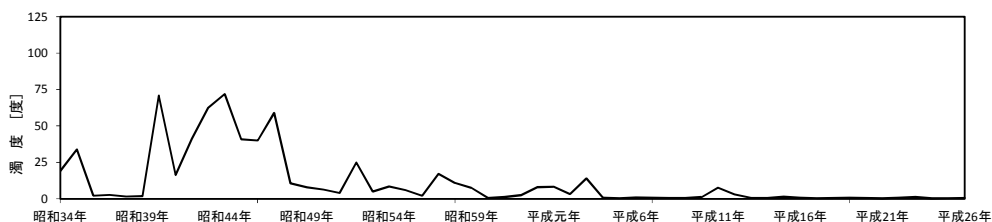


図4-1-(3) 毎年8月の濁度の時系列図

なお、年平均グラフの変動が大きく傾向を読み取るのが難しい場合は移動平均(3年、5年...)をとると長期変動が見やすくなる。

周期的変動は一定の周期で変化するものであり、季節変動のように気温や水温などのように毎年同じような変動(図 4-1-(4)) を示すものや、溶存酸素のような日変動などがある。図 4-1-(5)に水温の年平均値および2月・8月測定値の時系列図を示す。

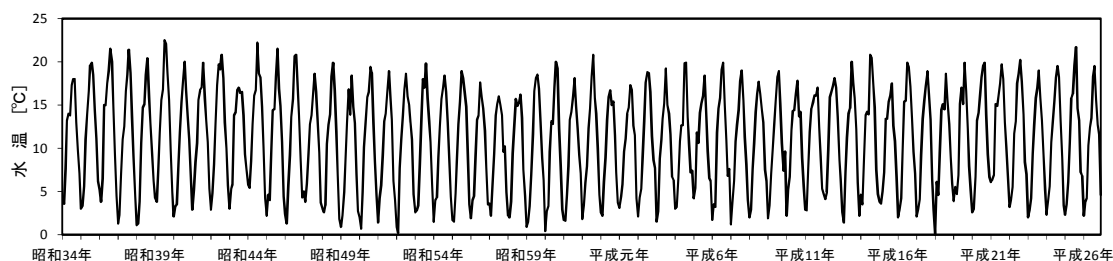


図 4-1-(4) 小菅川における水温の時系列図

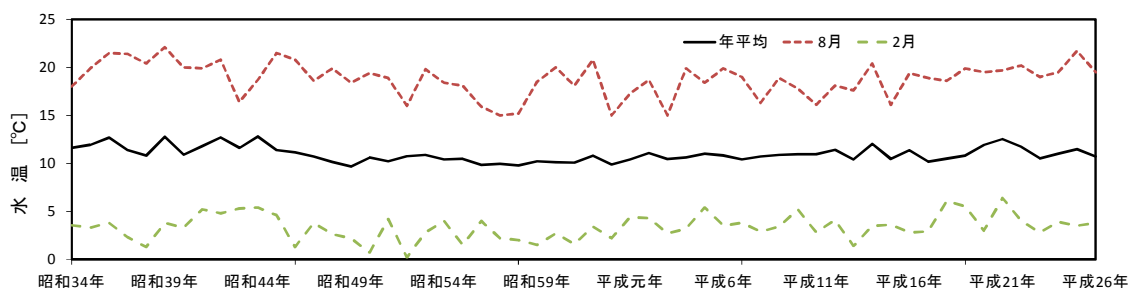


図 4-1-(5) 小菅川における水温年平均値および2月・8月測定値の時系列図

また、貯水池のしくみに変更(放流水深の変更、水質改善対策の導入など)があった場合は、変更が発生した年の以前と以後それぞれの平均値で比較することもできる。その一例として、夏期の放流水深の変更を実施した1992年前後の放流水水温(8月)の経年変動を図 4-1-(6)に示す。

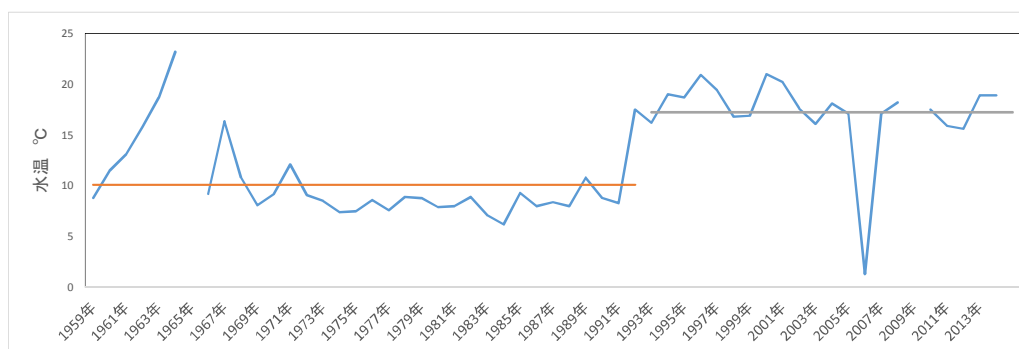


図 4-1-(6) 放流水8月の水温(～1991、1992～平均値比較)

時系列変動分析を貯水池や貯水池に流入する河川に適用することにより、流域の開発、人口増減などによる水質の動向を把握することができる。流域の水質汚濁は貯水池の水質状況に大きく影響する。したがって、流入河川の水質動向を明確にすることも貯水池管理

には重要である。

また、時系列変動分析をするうえで留意すべき事項として、水質項目や測定方法の変更がある。代表的な例としては、有機物指標である過マンガン酸カリウム消費量のTOCへの変更がある。このような場合は、新旧両方の方法で測定し、回帰分析により変換式を求め、比較を行う。このとき、データ数は20以上が望ましい。

小河内貯水池の場合、有機物量は流入河川水質、放流水質ともに過マンガン酸カリウム消費量で表されていたが、平成19年より河川水質はTOCで測定されている。ここで、データの連続性、流入水と放流水の関係を求めるにはどちらかの値に統一することが必要である。

4-1-2 負荷量による水質傾向

流域からの流入水が貯水池での水質に与える影響を把握するには、濃度よりも負荷量で表すほうがよりよく把握できる。図4-1-(7)は3河川の濁度を比較したものであるが負荷量で表すと図4-1-(8)となり濃度が低い河川でも貯水池に与える負荷が大きいことがあることがわかる。流域対策を行う場合、負荷量の変動傾向を把握することも重要である。

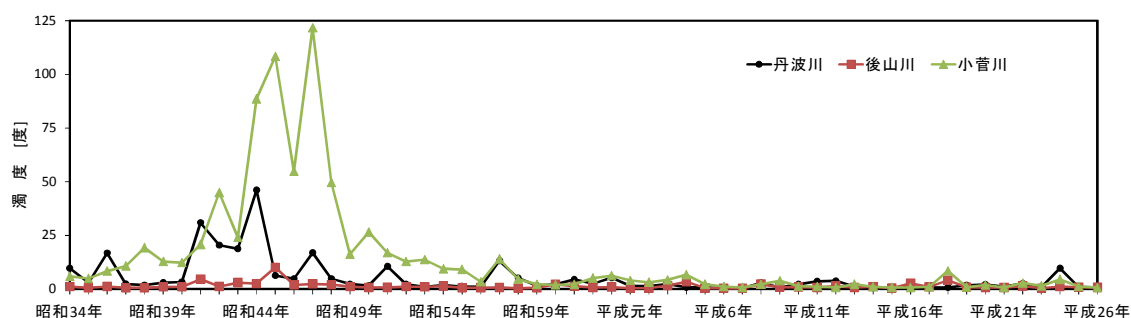


図 4-1-(7) 濁度年平均値の3河川比較

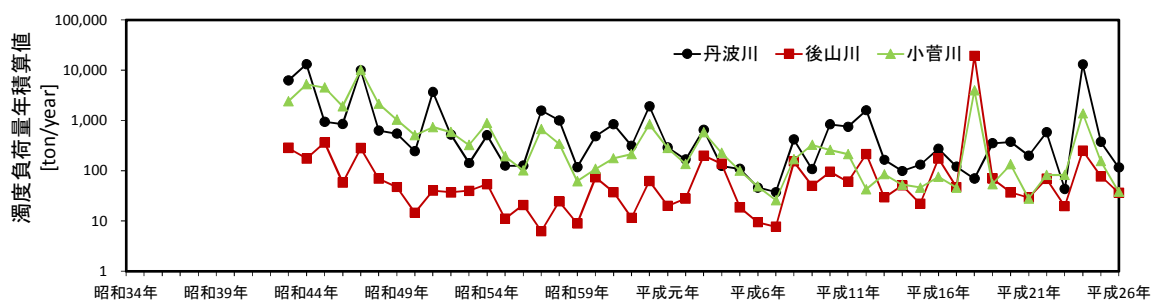


図 4-1-(8) 濁度負荷量年積算値の3河川比較

4-2 洪水時の物質輸送

4-2-1 洪水時の河川試料採取

平常時も河川は様々な物質を含んで流下している。しかし、洪水時はその物質が増加し、貯水池に様々な影響を与える。わかりやすい例としては流木や濁度の上昇として確認できるが、目視のみでは把握できないものも多いため、試料を採取し、分析を行うことが重要である。しかし、河川増水時は通行止めにより採水などの現場作業はできない。

そこで、洪水時の試料採取には危険を回避するため、自動採水器を用いる。自動採水器は2章でも紹介したように、降雨、河川水位、河川水濁度などの起動設定値をあらかじめ入力しておくことで自動起動ものやテレメーターを使用して遠隔操作も可能なもの、採水間隔も設定できるものがある。

図4-2-(1)は測水所において降水時に1時間間隔で自動採水器により採水した試料の分析結果である。河川流量上昇に伴い採水が開始され24サンプルが得られている。流量は測水所で自動測定されているものを用いている。降水量は、採水地点の周辺の降水量測定ポイントのデータを用いてティーセン法で求めている。

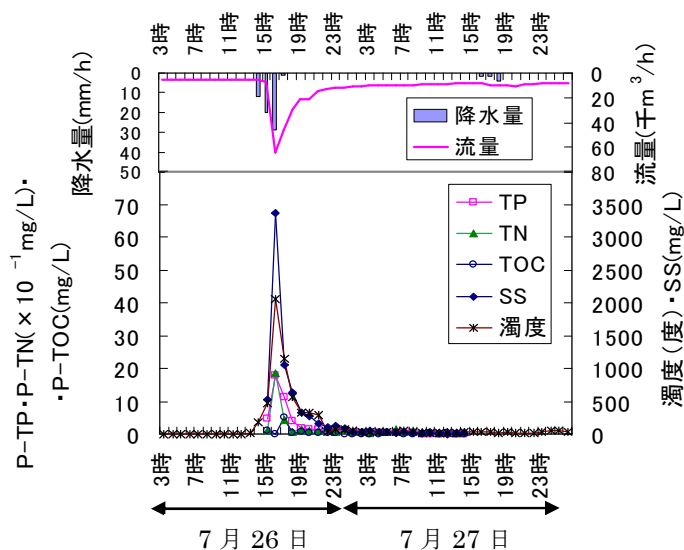


図4-2-(1) 後山川における降水時の河川水質（平成20年度）

自動採水された試料は可能な限り迅速に回収し分析を行う。有機物や窒素類の測定を行う場合は特に注意が必要である。採水試料を保存するため保冷機能が付属している自動採水器もある。

4-2-2 洪水時水質測定データを用いた物質輸送の解析

物質輸送の解析には、洪水時に採水した水試料を測定した濃度データと流量・濁度などの自動測定データを用いる。濃度と流量を積算し負荷量として捉え、多変量解析などの統計分析を行う。

また、洪水時の調査を行うときは平常時の状態を把握しておくことも必要である。下の図 4-2-(2)は平常時と降雨時に1時間間隔でそれぞれ24時間採水した試料の分析結果である。平常時のサンプルには調査前1週間以上降雨が無かった日を選定した。降雨時調査における対象降雨イベントの総降雨量は、小菅川が48mm、後山川が100mmであった。

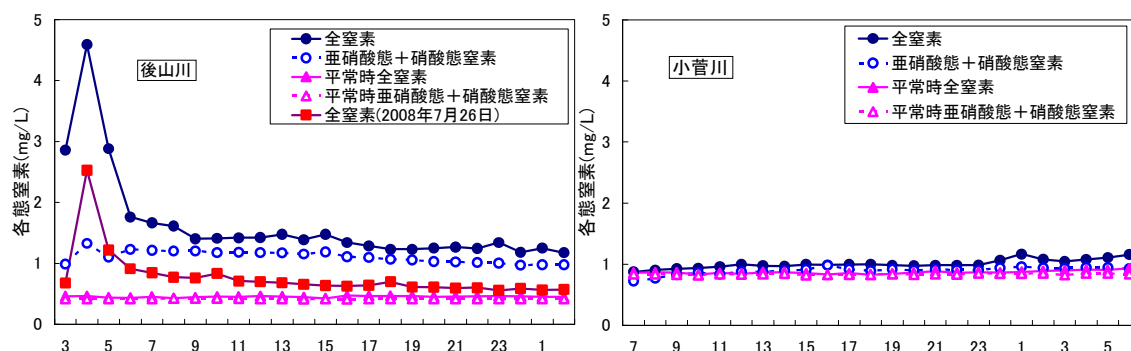


図 4-2-(2) 降雨時と平常時の窒素濃度の差

洪水時の水質分析結果から、河川からの流出特性を把握することができる。図 4-2-(3)は図 4-2-(2)と同時に測定したリンのデータをもとに晴天時と雨天時のリンの流出負荷量を算出したものである。図 4-2-(3)から洪水時には、濁度や流木だけでなくリンについても多く貯水池へ流入していることが分かる。

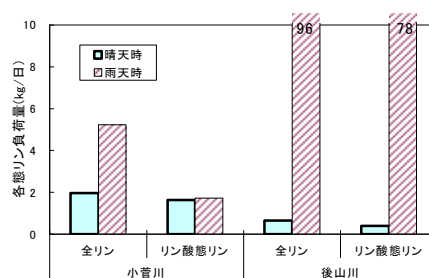


図 4-2-(3) リンの24時間累積負荷量

4-3 流域土壌と水質

貯水池流域の土壌は大雨による土壌流出などにより貯水池の水質に大きな影響を与える。したがって、流域の土壌の特性を把握することは重要である。

4-3-1 流域土壌の採取

土壌採取地点は、目視で土壌が露呈している地点を中心に選定する。現場では図4-3-(1)のように1m四方の範囲の土壌を対象に丸印の5か所で採取する。採取器具の一例を図4-3-(2)に示す。金属成分の分析を行う場合は、テフロン製のスコップを用いる。急峻な地形や樹木などで1mの四方の採取が難しい場合は50cm四方で全体の土壌を採取しよく混合して用いる。採取深さは10cm程度とする。

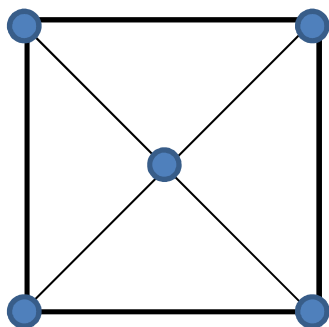


図4-3-(1) 土壌採取地点



図4-3-(2) 採取器具の一例

4-3-2 濁質中の成分分析

土壌試料の調整は、実験室に持ち帰り、2mmのふるいを通す土壌をろ紙を敷いたバットに広げ風乾する。

土壌分析のための前処理は分析項目によって異なる。マンガンは乾燥試料を量り取り、図4-3-(3)の方法で調整したのち、ICPで測定する。他の金属類も図4-3-(3)の左側に示すフローチャートにより試料を調整する。有機物・窒素はCNコーダーなどの固体試料中の炭素・窒素を測定する機器を用いる。機器がない場合、有機物は強熱減量で代用する。窒素の分析は、土壌試料に硫酸、硫酸カリウム及び硫酸銅(II)五水和物を添加し、ケルダール分解法で前処理し、窒素をアンモニウムイオンにして蒸留分離後、インドフェノール青吸光光度法でアンモニウムイオンを定量し、全窒素に換算し求める。リンは硝酸-過塩素酸分解法と硝酸-硫酸分解法のいずれかの分解法で前処理分解し、モリブデン青(アスコルビン酸)吸光光度法で測定する。

粒度分布は、大きなものについてはふるいを用いてふるい分けをする。1 μ m以下の微細な粒子は、レーザー式粒度分布装置などを用いる。

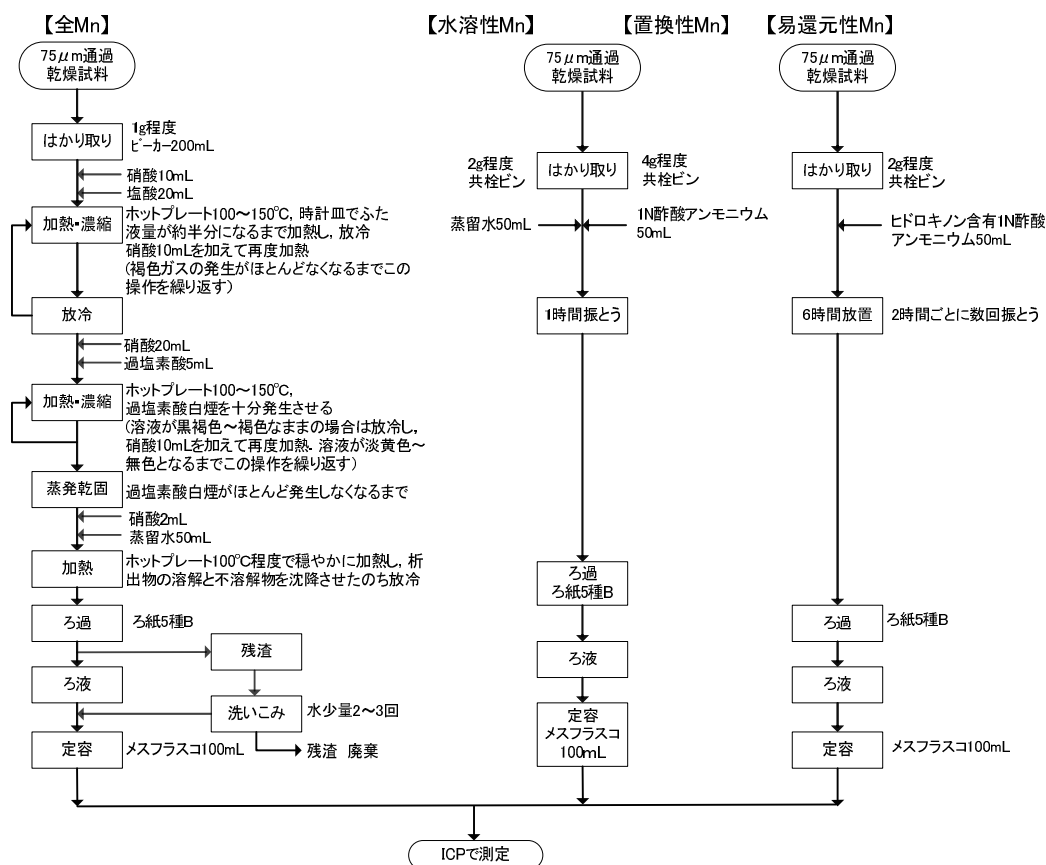


図 4-3-(3) マンガン測定時の試料処理フロー

流出濁質の成分を分析するには、分析項目にもよるが大量の濁質が必要であるため、自動採水器を用い対象の水が一定濁度以上になったときに採取する。カオリン濁度 1mg/L では 1L の試料中には濁質量は約 1mg であり、1000 度あれば約 1g の濁質が採取できる。濁度上昇後、連続して一気に採水することが望ましい。しかし、濁度上昇が小さい降雨開始直後の地表を流下するフラッシュウオーターに含まれる濁質には高濃度のリンや窒素が含まれることが多い。そのため、降雨後どのタイミングで濁水を採取するべきかは、分析目的に沿ってあらかじめ決めておく必要がある。

4-4 流域からのマンガン流出

貯水池では、春から秋にかけて水温躍層が形成され、湖底部への酸素の供給が十分でないため、湖底部が嫌気状態となり底泥から窒素、リン、鉄、マンガン(以下、Mn)等の貯水への溶出が起りやすい。(図4-4-(1))

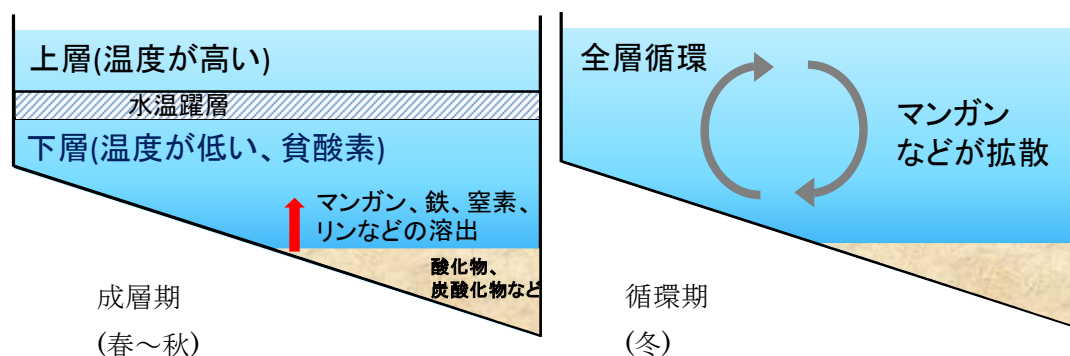


図4-4-(1) 貯水池の成層期と循環期の模式図

水温躍層が存在する場合はこれらの溶出成分を多く含む貯水は貯水池の底層部に停滞することになり、貯水池の放流口が上部の水温躍層に設置されていれば、図4-4-(2)に示すように貯水池からの放流水質に大きな影響を与えることはない。しかし、貯水池が循環期に全層循環となる状態では、深層部に貯留されていた貯水が上部に拡散移動することになる(図4-4-(3))。貯水池の水が水道原水として使用されている場合は、溶存鉄や溶存マンガン濃度が高くなることにより浄水に着色(黒水)や金気臭等が発生するため、浄水処理にマンガン処理プロセスが必要となる。小河内貯水池でも平成4年年夏から表層放流が始まり、その後、冬季の数日間だけマンガン濃度が高くなる現象が発生している。

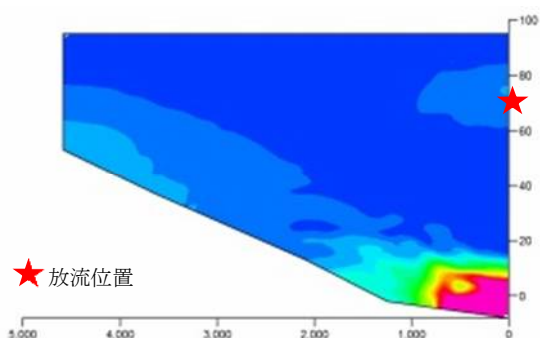


図4-4-(2) 成層期のマンガン濃度分布図

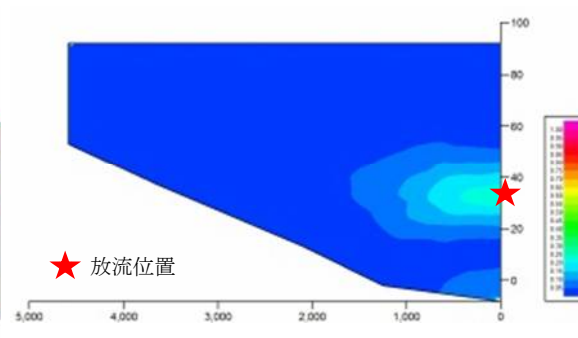


図4-4-(3) 循環期のマンガン濃度分布

図4-4-(2)に示されるように、小河内貯水池では堤体前の底質からの溶出量が多い。ダム建設地の地質が原因とも考えられるため、堤体前から上流に向けて底質の柱状試料を採取し分析を行った。その結果を図4-4-(4)に示す。河川流入部から堤体に向けての底質の粒度分布が下流にいくほど平均粒径が低下していることから、貯水池底質は建設地の地質によるものではなく、流域から流入した濁質が堆積したものと推察することができた。

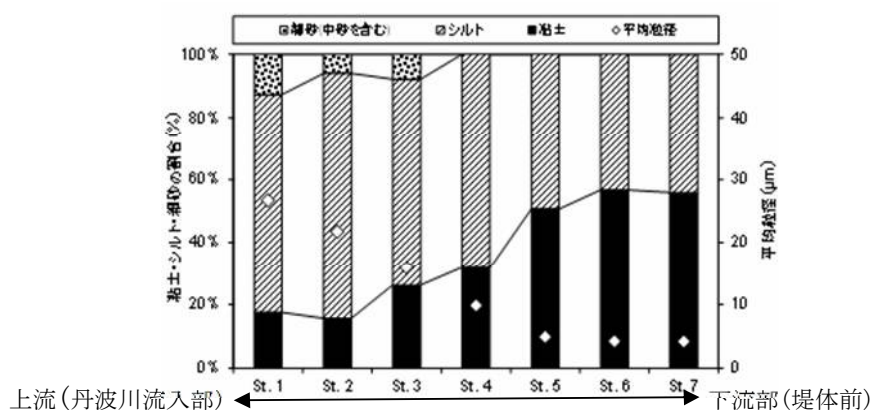


図 4-4-(4) 小河内貯水池湖底部表層土壌の粒度分析結果

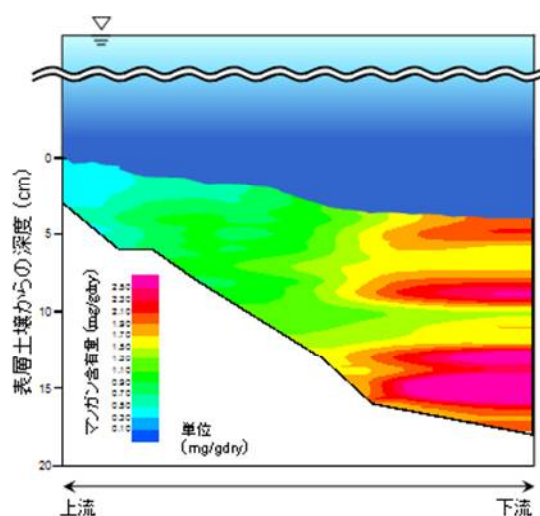


図 4-4-(5) 小河内貯水池底泥のマンガン含有量分布

マンガンは鉱物であるため粘土・シルトに多く含まれる。図 4-4-(4)と図 4-4-(5)より、堤体前のマンガンを多く含む底泥は小河内貯水池流域からの土砂の流入によりもたらされたものだと推定することができる。

そこで、丹波川、小菅川、後山川の3河川流域の土壌を適宜採取し分析を行った。採取は、図 4-4-(6)に示すような河川付近の土壌が露出し降雨時に土砂が流出しやすいと考えられる地点を選択して実施した。



図 4-4-(6) 土壌が露出した様子

図 4-4-(7)に土壤採取地点を示す。黒字は 2015 年度、赤字は 2016 年度に採取を実施した地点である。

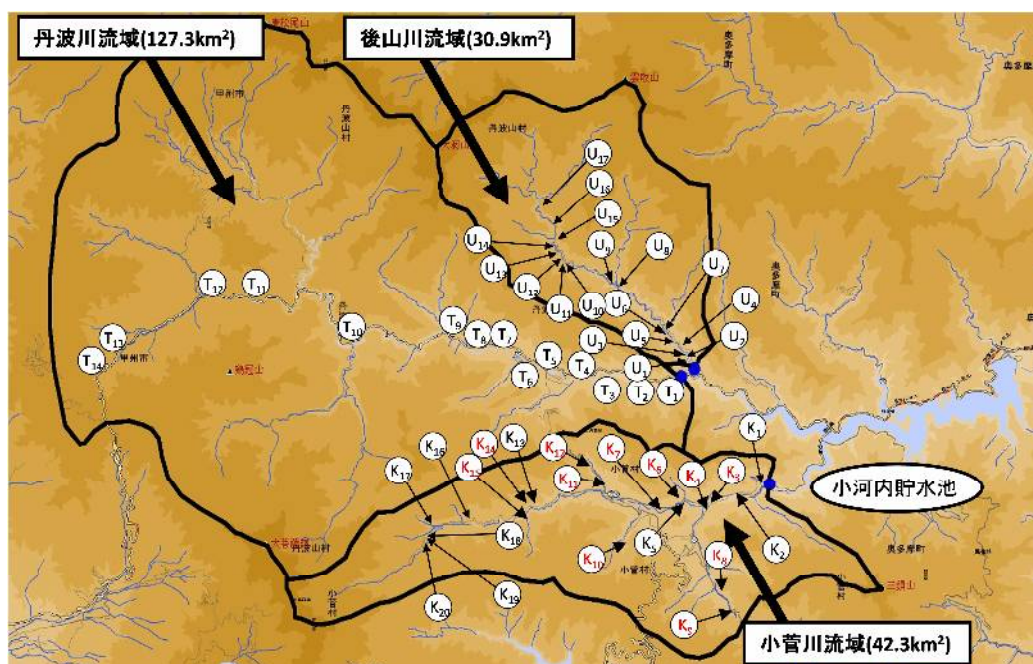


図 4-4-(7) 土壤採取地点

採取した土壤を分析し、土壤中のマンガン含有量を推定する重回帰分析を行うことにより、河川別のマンガン含有特性を示すことができる。今回は、採取時に測定した pH、実験室で測定した強熱減量、粒度試験結果(粘土含有率、シルト含有率、平均粒径、10%通過粒径、90%通過粒径)を説明変数に用いて重回帰分析を行った。その結果、丹波川、小菅川の流域土壤のマンガン含有量はともに強熱減量が説明変数に選ばれ統計的に有意な重回帰式が得られた。丹波川流域の土壤は、強熱減量よりも 10%通過粒径がマンガン含有量と一番強い負の相関関係となり、土壤の粒径の最小値が小さくなるほどマンガン含有量が多くなることが示された。後山川流域は他の 2 河川と異なりシルト含有率がマンガン含有率と一番強い相関関係となったが 90%有意水準以下であり、そのほかの粒度関連の項目の相関係数もシルト含有率の相関係数よりもわずかに低い値でほぼ同じであった。このことから、後山川流域の土壤は岩石由来、丹波川流域は岩石由来と植生、小菅川流域は植生の影響が強いと考えることができ、3 河川それぞれでマンガン含有量への影響要因に違いがあることが推定される。

以上より、マンガンは粘土やシルトなどの微細な濁質と挙動を共にして貯水池に流入することがわかる。したがって、濁質が大量に流入する大雨時の濁度を SS に換算して流入濁質量を求め、マンガン含有率を乗じることにより、降雨時に流域から貯水池へ流入するマンガンの量を推測することが可能である。図 4-4-(8)は平成 21 年と平成 22 年に発生した降雨 A 及び降雨 B で発生した高濁度流入水について、マンガンの量の算定を行った結果であ

る。後山川は流域が小さく、他の2河川に比べて流量も小さいが、濁度の値が大きくまた単位濁質量あたりのマンガン含有量が高いことから2つの降雨ともマンガン推定値は3河川中最大となった。

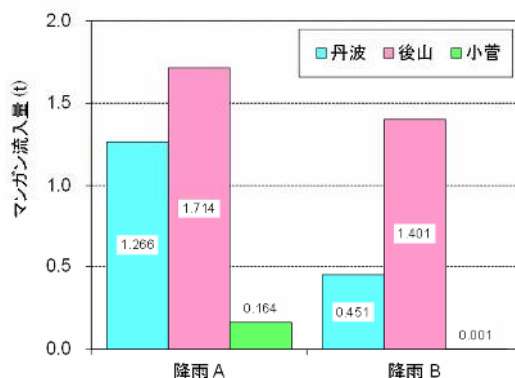


図 4-4-(8) 降雨時に流域から貯水池に流入するマンガン量の推定

4-5 貯水池への栄養塩流入

閉鎖性水域である貯水池は、流入河川による影響を受け、水質が変化しやすい。流入河川からの影響として代表的なものに富栄養化が挙げられる。小河内貯水池では流入河川流域の生活排水の浄化施設設置を行っている。しかし、藍藻類によるアオコの形成は、ほぼ毎年発生している。藻類に必要な栄養は樹木や草花と同じ窒素・リン・カリウムである。カリウムは地球上にはふんだんにあることから、窒素とリンの量が多くなると藻類の大量発生につながってくる。小河内貯水池の藻類発生はNP比からリンの存在量によって制御されている。したがって、貯水池へのリンの流入量を削減できれば藻類抑制対策となる。大気の80%近くを占める窒素に比べ、リンは希少元素でありその供給のもとは鉱石である。リン鉱石は、リン酸塩鉱物を主成分としている。無機質と有機質リン鉱石とに分けられ、無機質リン鉱石はマグマや火成岩の生成などの火山活動によってできる鉱物である。一方、有機質リン鉱石は太古の昔に魚類や脊椎動物の遺骸が海底で堆積し、地殻の変動・隆起で地上に現れたものである。

4-5-1 流域のリンの分布

4-3より、小河内貯水池の底質は、流域の土砂が降雨などにより、貯水池に流入したものであるということがわかっている。栄養塩の一つであるリンは土壌に吸着しやすく、大雨により流域から貯水池へ土壌が流入する際に、リンも一緒に流入する。オルトリン酸のようにイオン形態となっているリンは水に可溶であり、放流水とともに排出されるが、土壌に吸着している有機態リンなどは濁質とともに沈降し、貯水池底泥となる。底泥中に含まれるリンは、貯水池底層が貧酸素状態になると還元されてイオン化し水に溶け出す。

リンの発生源は鉱物由来であるが、植物に吸収され植物にも多く含まれる。植物は枯死や落葉等により地面に堆積し腐葉土となり、降雨などの地表面を流れる水とともに流出する。そのためリンの流出は流域に分布する植物の状態に大きく影響される。流域整備の状況が丹波川、小菅川、後山川の3河川流域の土壌にどのような影響を与えるかを調査するため、河川流域の土壌が露出している場所を選択して図4-4-(7)に示す3河川合計約50ヶ所で土壌の採取を行った。

後山川流域の全リンは、下流側から上流側にかけて全リン含有量が緩やかに増加している傾向にある。後山川流域は、落葉広葉樹が多く分布しており、その結果、土壌の採取地点によっては、全リン含有量が多くなっている所も存在するものと推察される。丹波川流域と小菅川流域は、民家が集中している地域等の人為的活動が盛んな地域の付近の土壌が全リン含有量が高い。小菅川流域では、日あたりが悪く湿潤な土壌であった場所の全リン含有量が高かった。湿潤な土壌中では、植物遺体である落枝・落葉の微生物による分解速度が早く、土壌へのリンの供給に影響していると考えられる。

4-5-2 小河内貯水池流入河川流域土壌の土壌全リン含有量

各河川流域について、全リン含有量を目的変数とした重回帰分析を行い、土壌中の全リン含有量の影響要因となる項目を把握した。説明変数候補はpH、強熱減量、粒度（粘土含有率、シルト含有率、平均粒径、90%通過粒径、10%通過粒径）とし、相関分析を行った。説明変数候補間の内部相関と物理的有意性を考慮し、変数増加法による重回帰分析の結果、3河川流域とも自由度調整済み重相関係数（ R^* 値）が0.7を上回り、全リン含有量を目的変数とする有意性の高い推定式を構築した。

後山川流域における全リン含有量[P-mg/DS-g]

$$y_U = 10^{-0.537} x_1^{0.642} x_2^{-0.601} \quad (R^* = 0.789)$$

丹波川流域における全リン含有量[P-mg/DS-g]

$$y_T = 10^{-1.733} x_1^{1.339} \quad (R^* = 0.707)$$

小菅川流域における全リン含有量[P-mg/DS-g]

$$y_K = 0.037x_1 - 0.018 \quad (R^* = 0.703)$$

x_1 : 強熱減量[%], x_2 : pH

得られた式から土壌の全リン含有量への影響要因について考える。これらの3つの式すべてに、説明変数に強熱減量が選択されている。強熱減量とは有機物の指標であり、植物の落枝・落葉は土壌有機物となる。リンは植物における栄養源の1つであり、乾物植物体内中には約2000ppmのリン元素が含まれていることから、植物中の枝・幹・葉にも多量のリンが含まれている。本分析で全河川流域において、全リン含有量モデル式の説明変数に強

熱減量が選択されたということは、植物の落枝・落葉中に含まれるリン量の影響が大きいということを示していると考えられる。

後山川流域を対象とした推定式は、説明変数に pH も同時に選択された。pH が 4~7 の酸性土壌では、中性に近づくほど、植物によるリンの吸収量が増加し、土壌中の全リン含有量は減少するため、全リン含有量と pH は負の相関関係を持つと考えられる。後山川流域はブナ・イヌブナ群集といった広葉樹林の植生割合が 3 河川流域で最も高い。森林土壌の pH は、降雨が植物の幹を伝って土壌に降る樹幹流の影響を受け、広葉樹林の樹幹流は外林雨よりも高いと言われているため、広葉樹林帯での土壌 pH は高くなると推測される。また、広葉樹林の落葉は針葉樹林の落葉よりも分解が早く、植物によるリンの吸収量に影響している可能性が高い。以上より、後山川流域のみで pH が説明変数に選択された理由は、3 河川流域の採取地点の中では広葉樹林が最も多く分布している流域であり、この植生が土壌中のリン含有量と pH に影響を与えることが考えられる。

以上から、小河内貯水池上流にある 3 河川流域土壌のリン含有量は有機物による影響力が最も強いということがわかった。森林土壌中の有機物とは、主に植物の落枝・落葉のことであり、影響要因が強熱減量である全リンは、森林土壌中では落枝・落葉中に多く存在していると考えられる。