

3－1 Question

各セグメントにおける土砂動態の特徴を教えてください。

■Question の意味と背景

河川における土砂動態は、水系・河川によって異なるほか、ダム建設や河道改修といった人為的行為によっても変化する。河道を形成している河床材料の構成、河道を通過する土砂の粒度分布は、河川の勾配や川幅、河床材料等の河道の特性に応じて変化しており、特に、沖積層上を流れる河川（沖積河川）においては、山間地から扇状地、谷底平野、自然堤防帯を経て河口（デルタ）に至る間に、各領域・区間で段階的に変化していく。一般的に、このような縦断的な河道特性の変化に対して、セグメント区分（表-1）と呼ばれる縦断的な区分を行い、そのセグメント区分ごとに河道特性や土砂動態の特徴を把握することが行われる。

多自然川づくりに限らず、河川管理の全般において、人為的改変に対して河川が自然の営力でどう応答するのか、変化の方向性を想定した対応がなされることが望ましい。そのためには、各セグメントの土砂動態の特徴を理解した上で検討を進めることが重要である。

表- 1 沖積河道区間についての代表的なセグメント類型とその特徴 1)

	セグメントM	セグメント1	セグメント2		セグメント3
			2-1	2-2	
地形区分	←山間地→←扇状地→ ←谷底平野→ ←自然堤防帯→ ←デルタ→				
河床材料の代表粒径 d_R	多種多様	2cm 以上	3cm～1cm	1cm～0.3mm	0.3mm 以下
河岸の構成材料	河床河岸に岩が出ていることが多い	表層に砂、シルトが乗ることがあるが、薄く、河床材料と同一物質が占める	細砂、シルト、粘土の混合材料。ただし下部では河床材料と同一		シルト、粘土
勾配の目	多種多様	1/60～1/400	1/400～1/5,000		1/5,000～水平
蛇行程度	多種多様	曲がりが少ない	蛇行が激しいが、川幅水深比が大きいところでは8字蛇行又は島の発生		蛇行が大きいものも小さいものもある
河岸浸食程度	非常に激しい	非常に激しい	中 (河床材料が大きいほうが、水路がよく動く)		弱 (ほとんどの水路の位置は動かない)
低水路の平均深さ	多種多様	0.5～3m	2～8m		3～8m

※セグメントMは、沖積河道区間には当たらず、溪流区間と山地河道区間を包含するものであるが、河川水系全の状況を俯瞰するため、付け加えている。

Answer

土砂動態はセグメントごとに変化し、河床を構成する粒径集団や土砂輸送形態も異なります。

■ Answer の概要と基本的考え方

一般的に、山地河道は土砂の生産源に近いために、幅広い粒径の土砂が存在し、粒径が大きい巨石から非常に細かいシルト・粘土までが混在してみられる。これに対し、平野部の河道は、主に洪水によって輸送されてきた土砂によって構成されているために、河床材料の粒径も各セグメントの河床勾配に対応した形で段階的に小さくなっていく（表-1 の河床材料の代表粒径 d_R を参照）。また、各セグメントに存在する河床材料の幅も、下流に至るほど小さくなっていく。例えば、セグメント1では、礫から砂までが広く存在するのに対し、セグメント3では砂から粘土に限られる。このように、河床材料は縦断的に不連続な分布をもち、同じセグメント内では概ね同様の粒度分布をしているのが一般的である。

しかしながら、各セグメントに見られる土砂が一様な振舞いをしていてではなく、河川地形の中での存在状況や動態も異なる。各セグメントにおける土砂動態の特徴を理解するためには、河床を形成する河床材料を、材料 m (Main)、材料 s (Sub)、材料 t (Transient) の大きく3つの粒径集団に分類して、あるセグメント内の材料構成をとらえることが有効である。対象とするセグメントにおいて、材料 m、s、t に相当する粒径集団が河道内のどこに存在しているかをあらかじめ把握することによって、平水時から出水時にかけての各流量ステージにおける各粒径集団の動態や、改修後の地形変化を推定することが可能となる。

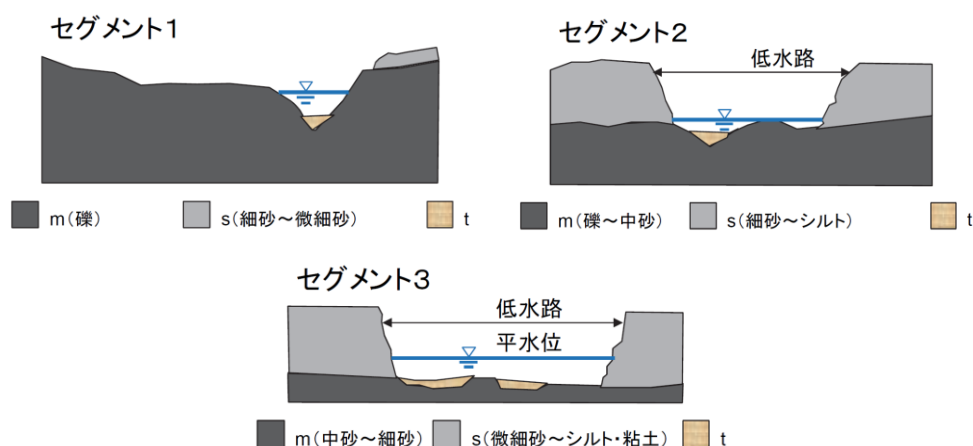


図-1 各セグメント類型における材料 m, s, t の典型的な存在状況¹⁾

■Answer の詳細

(1) 流砂系における土砂動態の全体像の捉え方

流程が長い河川においては、山地、谷底平野、扇状地、自然堤防帯、河口デルタ等の地形に応じて異なる土砂動態を有する。そしてその特性は、河川の縦断的な土砂輸送の結果として形作られている。したがって、大規模河川での土砂動態の全体像を把握するためには、流域全体を俯瞰した「流砂系」の視点が重要となる。

流砂系を捉えようとするとき、一般にその範囲は広範囲に及び、性質の異なる場から構成されているため、流域～沿岸域の個別領域の現象の理解と技術的検討を単純に積み上げるだけでは、各領域で使用されてきた異なる記述方法が合体させられることになり、必ずしも全体像の理解にはつながらない。こうしたことから、流砂系全体を見通すための土砂動態の共通の捉え方、共通的な記述法を意識して採用することが必要となる。流砂系の土砂動態の全体像を捉えるための大前提として、土砂を一括りに扱うのではなく、量と質（粒径）の両方に着目することが挙げられる¹⁾。

なお、これらを反映した流砂系の総合的な土砂管理計画がいくつかの河川（流砂系）を対象に策定されてきている（コラム-総合土砂管理計画参照）とともに、これらの観点からの対策も講じられるようになってきている（コラム-ダムからの土砂還元対策の事例他参照）。

(2) 低水路の河床材料粒度分布の縦断的な変化

低水路の河床材料の粒度分布の縦断変化の例を図-2 に示す。扇状地区間（セグメント 1）では、礫スケールの土砂が大部分を占める。ただし、河床表層は細かい土砂が洗い流されて粗粒化しているのが普通であり、表層とその下層とでは粒度分布が全く異なることに留意が必要である。河床表層を覆う石礫が移動するような出水では、その下層に存在するより小さい粒径の土砂が大量に移動することとなる。自然堤防帯（セグメント 2-2）の河床は中砂が主体である。セグメント 1 と 2 の勾配変化点下流側の移行区間では、礫から砂へと主材料が変化している。より下流のデルタ（セグメント 3）では、シルトと細砂が主体となっている。これは典型的な例であり、河床材料の縦断分布には河川ごとに違いがみられる。

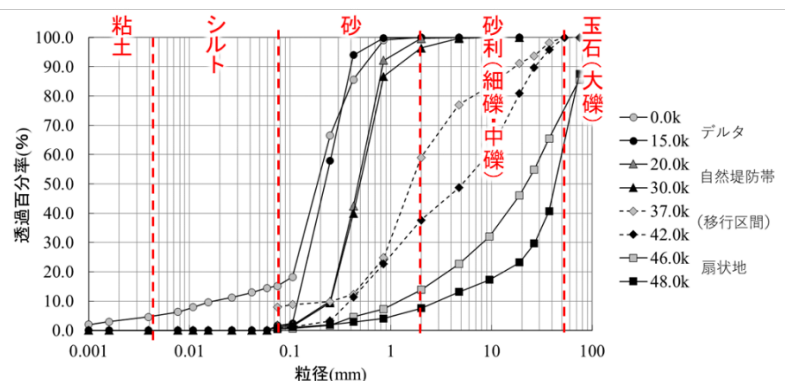


図-2 低水路部における河床材料粒度分布の縦断的变化の例

(3) 各セグメントにおける河道断面内での河床材料 m、s、t の分布状況と特徴

各セグメントにおける土砂動態の特徴を理解するためには、河床を形成する河床材料を粒径集団に分類してとらえることが有効であり、河床材料は材料 m、s、t に大きく分類することができる(図-1)。先に述べた低水路河床材料の縦断分布に加え、断面内での分布に着目する。

セグメント 1 (扇状地) では、河岸部を含めて大部分を材料 m が占めるが、セグメント 2 (主に自然堤防帯)、3 (デルタ) では、低水路河岸と高水敷は材料 s で占められる。また、セグメント 3 では、m、s、t の粒径の幅が小さくなり、材料 t がより存在しやすくなる²⁾。このような見方が各セグメントにおける土砂動態を理解する上で有益であることは既に述べたが、各材料が河道管理や河川環境管理にどのように関わっているかについて、具体例を交えて述べる。

材料 m は河床材料の“主役”といえる。材料 m は、安定的に存在し、河道の骨格である縦断形状や砂州形状、低水路の粗度係数、構造物の設計に必須である最大洗堀深、ハビタットの評価に重要な瀬・淵の形態などを規定している。「河床材料」と言えば自動的に材料 m を指すことも多い²⁾。

材料 s は材料 m の“相手役”といえる。主流路の脇で、浮遊してきた細粒土砂が堆積することで材料 s からなる河床や河岸が形成される。材料 s はセグメント 2 と 3 では高水敷の本体を構成している。ここでの材料 s に関する情報は、低水路河岸の侵食形態・速度の予測や護岸の必要性の判断、水制などによる材料 s の堆積促進効果の判断、低水路川幅拡幅後の土砂堆積による川幅縮小の推定、高水敷掘削後の再堆積の予測などに必要となる。また材料 s は、粒度の面でも場所的にも植生繁茂に好ましい条件を持つので、密生した植生を伴うことが一般的である。図-1 に示したように、セグメント 1 での材料 s の堆積は、あっても一般に薄い。

しかしそこでは、材料 m である礫が露出している場所に比べ植物がずっと繁茂しやすい。植物繁茂を分析する際にも、材料 s の調査は重要である。

材料 t は河床材料の“端役”といえる。材料 t の存在は、一時的で不安定なことが多く、ちよつとした出水があるとフラッシュされ、あるいは増減する。そういう意味で材料 t は、材料 m、s のような“本格的な”河床材料とは呼べない。しかし、材料 m が一時的にせよ部分的にせよ材料 t に覆われることは、ハビタット構造の変化として重要であり、平水が長く続くときの物質循環にも影響を与える。さらに、流域の変状による供給土砂の変化が材料 t の挙動にいち早く現れることも考えられる。こうしたことから、今後の水環境管理において材料 t の重要性が増すことが考えられる。

（４）各粒径集団の土砂輸送形態の捉え方

河川縦断的な土砂動態の連続性から、セグメントの形成機構や材料 m、s、t の堆積機構をマクロに説明するために、図-3²⁾を示す。図-3 の上段は、山地からの土砂供給を受けて構成される扇状地から自然堤防帯、デルタ（セグメント 1～3）に至る関東平野、大阪平野、濃尾平野等に代表される臨海沖積平野の土砂の堆積構造を模式的に示したものである。今日見られる臨海沖積平野は、約 2 万年前の最終氷期最盛期以降に、断続的な海面上昇に伴って堆積した土砂によって形成された。縦線で示された基盤は沖積層基底礫層を示し、それより上は沖積層を示しており、海面上昇に伴って形成された沖積層の典型的な層序を示している。

図-3 下段は、現在の河川において、礫、砂、シルト・粘土の各粒径集団の輸送形態に着目した整理を示している。各粒径集団の動態を表現する際には、当該河道セグメントでの流送形態が「混合型」か「通過型」かの判別を併せて行う²⁾ものとされている。ここでいう「混合型」、「通過型」とは以下のことを指す。

【混合型】着目している粒径集団が、主河床材料（材料 m）と有意に混じり合いながら輸送される。河床変動に寄与し、河床形状や河床面の状態に応じて自身の流送量も縦断的に有意に変化する。土砂水理学的分類では掃流砂あるいは浮遊砂に当たり、一出水程度の時間スケールで見た土砂起源による分類では Bed material load に当たる。

【通過型】着目している粒径集団が、その場所の主河床材料（材料 m）と有意には混じり合わない（たかだかその隙間を満たす程度）。河床変動にほとんど寄与できず、自身の流送量の縦断変化は小さい。河道条件などによっては、一部が河畔堆積物（材料 s）などになるが、一般にその量は当該粒径集団の土砂移動量に比べればごく小さい。以上から、当該河道セグメン

トは、その粒径集団にとって通過区間となる。土砂水理学的分類では、多くの場合浮遊砂であり、ただし小出水時、平水時には材料mの上を掃流砂で流送されることもある。一出水程度の時間スケールで見た土砂起源による分類では、多くの場合ウォッシュロードに当たる。

図-3 下段に改めて着目すると、上流から下流に向けて、①礫は〔輸送形態の混合型→停止〕し、セグメント 1 の材料 m として振舞う。砂（微細砂を除く）は〔輸送形態の通過型→混合型〕という変化をたどり、礫のセグメント（概ねセグメント 1, 2-1 に該当）、砂のセグメント（概ねセグメント 2-2, 3 に該当）が形成され、②砂のセグメントには、實際上、土砂生産源から主河床材料（材料 m）である砂が直接供給される形になること、③細粒土砂（細砂～シルト～粘土）は、その一部が高水敷や表層細粒土層（材料 s へ）、河口付近（材料 t へ）の河床材料になるものの、多くが海へ流出することを示している²⁾。

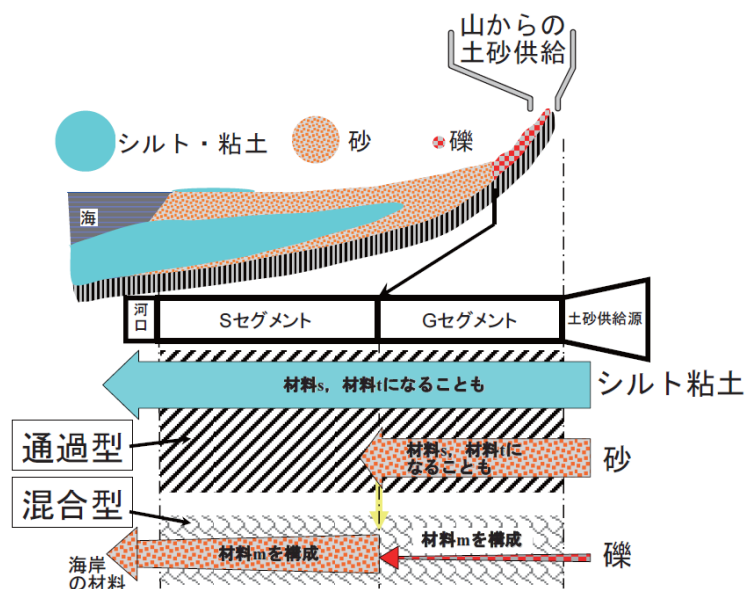


図-3 河床縦断地形の形成，河床材料分級とマクロな土砂収支²⁾

■コラムー 総合土砂管理計画

土砂に関わる課題は、山地部、平野部、河口・海岸部のそれぞれの領域において様々な形で発生している。山地部では、荒廃山地からの流出土砂による溪流河道部での異常堆積あるいは局所侵食や土石流、山腹崩壊、地すべりによる災害発生、ダム貯水池の堆砂による機能低下等が、また、平野部では河床低下（構造物の被災に係る滞筋部の低下を含む）や河床における岩盤の露出などが、河口部では河口砂州の縮小、上流への後退等の変化が、海岸部では海岸侵食等がみられている。海岸侵食は、状況によっては国土の保全にも関わってくる。礫河原の縮小と樹林化の進展など河川の環境形成システムの変調にも、土砂動態の変化が関わっている可能性がある。原因となっている現象が、程度の差はあっても、当該領域を超えたより広域のスケールにまたがることが多く、個別領域の対応だけでは課題の根本的な解決には至らないという状況も想定・考慮すべきである¹⁾。

こうした認識を踏まえ、土砂に関わる課題を総合的に解決するための視点として、流域の源頭部から海岸までの一貫した土砂の運動領域を「流砂系」という概念で捉え、個別領域の特性を踏まえつつ、土砂の移動による災害の防止、適切な河川等の整備・管理、生態系や景観等の河川・海岸環境の保全、河川・海岸の適正な利活用を通じて、豊かで活力ある社会を実現することなどを目標として、総合的な土砂管理を行うことが必要との認識が共有化されている¹⁾。

「総合的な土砂管理」とは、上記のような土砂移動に関する課題に対して、砂防・ダム・河川・海岸の個別領域の問題として対策を行うだけでは解決できない場合に、各領域の個別の対策にとどまらず、流砂系を一貫して、土砂の生産の抑制、流出の調節等の必要な対策を講じ、解決を図ることをいう¹⁾。

総合土砂管理計画の策定は、全国で進められており、平成30年現在8地域で策定されており、他の流砂系でも計画策定に向けて検討が進められている（図-4）。



■コラムーダムからの土砂還元対策の事例

ダム等は、治水や利水、環境の面において重要な役割を果たしている。一方で、水や土砂、その他の物質を貯留するため、河川の状況や貯水池の機能そのものにも影響する。近年では、貯水池内の堆砂対策として土砂還元等の対策が実施されるようになってきている。

ダムからの土砂還元は、貯水池堆砂対策、流砂系総合土砂管理計画等の一環として様々な手法で実施されている。日本のダムにおいて実施事例が多く、下流河川の環境に対するインパクト（効果・影響）が大きいと考えられる事例を表-2に示す。

土砂バイパストンネル、フラッシング・スルーシング排砂は、ダム地点を通過する下流への土砂供給量を増加させる。貯砂ダムは、堆積土砂の除去（掘削）が必要であり、この土砂を下流河川に還元（置土）することにより、下流河川の環境にインパクトを与える。これは、ダム貯水池内での浚渫・掘削も同様である。

表-2 ダム下流河川の環境に効果・影響が生じやすい代表的な対策例

堆砂対策（土砂還元）	日本における事例
流入土砂を減らす対策	
・貯砂ダム（堆積土砂の除去）	美和ダム 小渋ダム 長島ダム
流入する土砂を貯めずに流す対策	
・土砂バイパストンネル	旭ダム 美和ダム 小渋ダム
・スルーシング排砂	鯖石川ダム 出し平ダム 宇奈月ダム
貯まった土砂を排出する対策	
・浚渫・掘削	秋葉ダム 二瀬ダム 美和ダム 泰阜ダム
・フラッシング排砂	出し平ダム 宇奈月ダム

■参考事例 1—置土によるダムからの土砂還元（那賀川-長安ロダム）

ダム有効容量の確保、河川環境の復元・回復を目的として、ダム流入土砂を掘削・運搬し、ダム下流河道に投入する土砂還元（置土）を実施

a. ポイント

ダム上流域の掘削により、上流から流下してくる土砂の捕捉機能を確認し、流入する礫分・砂分を陸上掘削により捕捉・除去する⁴⁾。

掘削土砂は、土砂移動の連続性を確保して河川環境の復元・回復に資するべく、ダンプにより運搬し、主に下流河道へ置土を行う（図-5）⁴⁾。

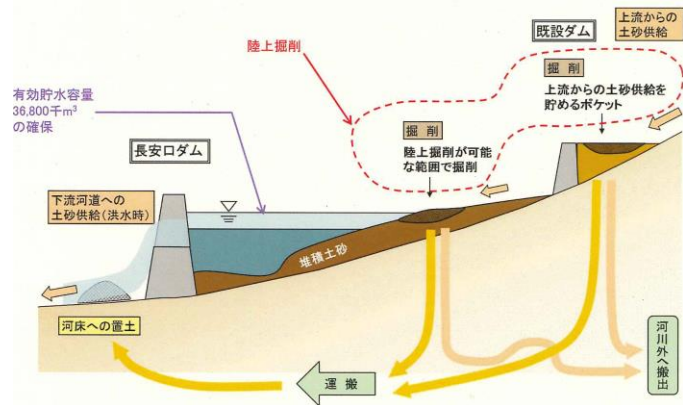


図-5 長安ロダムにおける堆砂対策のイメージ⁴⁾

b. 土砂還元実績

平成 19 年～平成 26 年の 8 年間に、113 万 m³ の土砂還元を実施した。大規模な出水の発生時には、約 10～30 万 m³/年の土砂が流下している（図-6）⁴⁾。

c. モニタリングの状況

置土に合わせてモニタリング（河床材料、瀬淵分布、魚類、底生生物、付着藻類）を実施しており、置土流下後、土砂堆積によって平瀬・早瀬が形成された区間が確認されている⁴⁾。クレンジング効果や魚類産卵環境の回復等も確認されている（図-7）⁵⁾。



図-6 置土の流下状況⁴⁾
（平成 26 年 小計箇所）



図-7 河川景観と河床材料の経年変化（小計橋）⁴⁾

■参考事例 2—排砂バイパストンネル（三峰川-美和ダム）

土砂バイパストンネルにより細粒土砂の貯水池への流入・堆積を抑制し、下流河川へ供給

a. ポイント

土砂バイパス施設（土砂バイパストンネル、分派堰、貯砂ダム）を整備し、貯水池への土砂流入を抑制するとともに、湖内堆砂対策施設を整備し、貯水池内の堆砂を抑制している。また、これらの施設により、ダム地点における土砂移動の連続性を強化している（図-8）。

b. 試験運用とモニタリングの状況

美和ダムの土砂流入を抑制する堆砂対策の中心となる施設である土砂バイパス施設が平成17年5月に完成し、同年の出水期から試験運用を開始している。

現在、土砂バイパス施設の試験運用を行いつつ、湖内堆砂対策施設の建設を踏まえた、物理環境、水質、生物環境の変化を把握するためにデザインされたモニタリング（図-9）が実施されている。

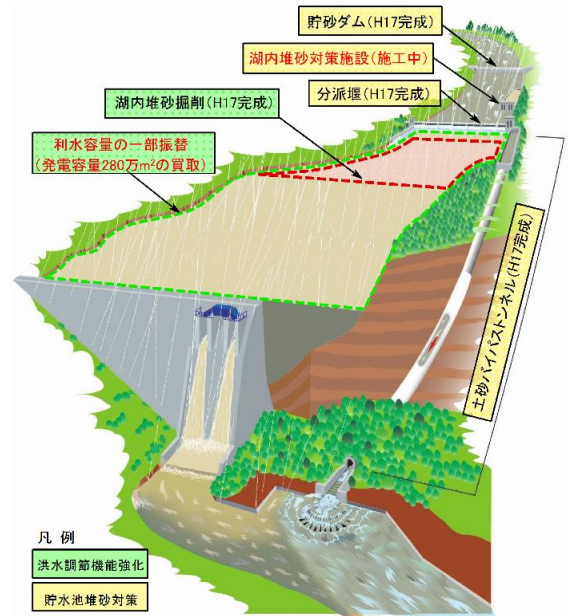


図-8 土砂バイパストンネルの状況⁶⁾

環境モニタリング調査地点

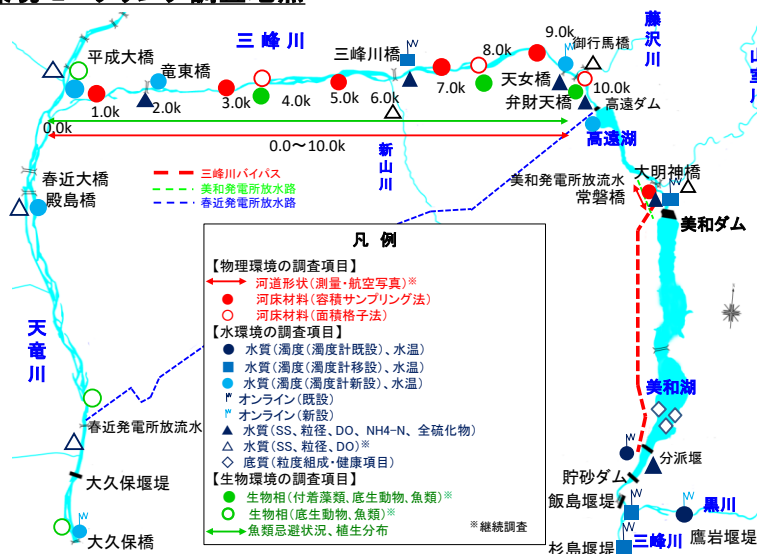


図-9 環境モニタリング調査地点⁷⁾

■より深く知りたい技術者のための参考図書等

- 国土技術政策総合研究所河川研究部，（独）土木研究所水環境研究グループ自然共生センター：ダム下流河川の物理環境との関係についての捉え方-下流河川の生物・生態系との関係把握に向けて-，国土技術政策総合研究所資料，第 521 号，土木研究所資料，第 4140 号，2009.
- 山本晃一編著／河川財団企画：総合土砂管理計画－流砂系の健全化に向けて－，技法堂出版，2014.
- 山本晃一著／河川環境管理財団企画：沖積河川～構造と動態～，技法堂出版，2010.
- 国土交通省水管理・国土保全局：国土交通省河川砂防技術基準調査編，2014.

■参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局：国土交通省河川砂防技術基準調査編，2014.
- 2) 国土技術政策総合研究所河川研究部，（独）土木研究所水環境研究グループ自然共生センター：ダム下流河川の物理環境との関係についての捉え方-下流河川の生物・生態系との関係把握に向けて-，国土技術政策総合研究所資料，第 521 号，土木研究所資料，第 4140 号，2009.
- 3) 国土交通省：HP，<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/dosyakanri.html>
- 4) 長安ロダム貯水池機能保全技術会議：長安ロダム貯水池機能保全対策レポート（最終報告）参考資料，2016.
- 5) 那賀川河川事務所：那賀川の土砂還元と生物の再生への取り組み動画について，那賀川事務所 HP，<http://www.skr.mlit.go.jp/nakagawa/committee/dam-reservoir.html>
- 6) 三峰川総合開発工事事務所：事業のあらまし，三峰川総合開発工事事務所 HP，<http://www.cbr.mlit.go.jp/mibuso/jigyo/02naiyou.html>.
- 7) 三峰川総合開発工事事務所：第 4 回 美和ダム再開発湖内堆砂対策施設モニタリング委員会，第 4 回委員会説明資料，2017.