

ダム流入土砂の分級過程とそれに対応した効率的除去手法の研究

—リモートセンシングを用いた嘉瀬川ダム流域の被覆状況調査とダム堆砂対策—

橋本晴行、全 炳徳、渡辺勝利、上野賢仁、山中 稔、笠井美青
野上昭治、財津寿比古、是沢 毅、森 義勝、江頭正幸、緒方 勤
鬼塚英文、宮原幸嗣、高瀬 智、丸岡義隆、遠山修平

1. はじめに

本研究は、佐賀県佐賀郡富士町において現在建設中の嘉瀬川ダムを対象にして、リモートセンシングを用いた嘉瀬川ダム流域の被覆状況調査を行うとともに、その結果をもとに嘉瀬川ダムの堆砂対策について検討したものである。まず、リモートセンシングや現地調査などにより流域の植物活性度や被覆状況を明らかにする。次に、現地調査により嘉瀬川ダム流域内の各河川の河道内堆積土砂の粒度特性を調べる。その結果や周辺の既設ダムの堆砂データ、土砂水文学の知見などを基にダムへの嘉瀬川ダムへの流入土砂量を推定する。最後に、その成果を基にした堆砂対策の検討を行う。

2. 嘉瀬川ダム流域の地盤条件と被覆状況

(1) 嘉瀬川ダム流域の地盤条件

嘉瀬川ダム流域の表層地質図及び風化状況図を地理情報システム (GIS) にデジタイズによりデータ入力し、GIS解析により、嘉瀬川ダム流域の土砂生産性を調べた。

図-1に嘉瀬川ダム流域の表層地質図を示す。嘉瀬川ダム流域はほぼ花崗岩類で構成されている。花崗岩類は一般に風化されやすく、風化が進行すると砂礫状の「まさ土」となる。図-2は流域内の風化状況（風化殻の深度）を示す。GIS解析により、風化状況が10m以上の割合を算出した結果、風化状況が10m以上の割合が、北山ダム流域：71.5%、嘉瀬川ダム流域：96.5%（北山ダム流域を除く）、嘉瀬川ダム流域：86.5%（北山ダム流域を含む）であることが分かった。したがって、嘉瀬川ダム流域からの土砂の流出量は、他の表層岩類からなる流域よりも多いことが予想される。また、嘉瀬川ダム流域（北山ダム流域を除く）の方が北山ダム流域よりも、土砂の生産性は高いことが予測される。

(2) 嘉瀬川ダム流域の植生状況

樹木などの活性度は、環境の変化に大きく影響を受ける。植物活性度が低下すると地盤に悪影響（例えば、結合力の低下による地盤の軟弱化）を及ぼし、さらには土砂流出量の

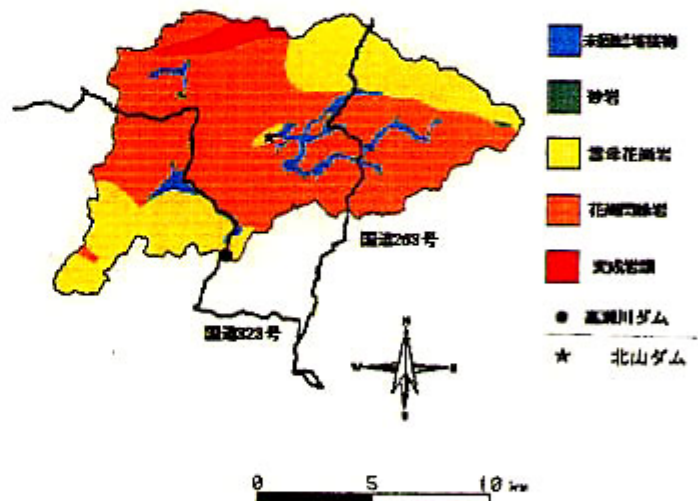


図-1 嘉瀬川ダム流域の表層地質図



図-2 嘉瀬川ダム流域の風化状況図

増大に繋がると考えられる。そこで、嘉瀬川ダム及び北山ダム周辺の植生について人工衛星データ (LANDSAT-5/TM) 解析を行った。

1) 植生指標NDVI

植物の状態を分光特性として表現する場合、植物の葉に含まれるクロロフィルの量、葉の量、樹木の種類などにより、他の物体に比べて極めて特徴のある分光反射特性を持っている。これらのことから、植物の分光反射特性が分かれば、植物の生育状態を判断することが可能である (図-3)。この分光反射特性を利用して、人工衛星データ及び現地調査により植物活性の大きさが調査できる。植物活性の大きさを表す指標として、植生指標NDVIが $NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED) + 1} \times 128$ として定義されている。ここに、NIR：近赤外域バンドの反射率、RED：赤色光域バンドの反射率である。

2) 人工衛星データによる植生調査

1994年から97年のLANDSATデータから嘉瀬川ダム流域の植生指標NDVIを調べた。その結果、以下のことが判明した。

①1994年3月31日のデータが植物活性度が最も高い。

②1996年と1997年のデータにはあまり差が見られない (これは、1991年の19号台風により影響を受けていた樹木が1994年には回復しているが、1994年の夏から始まった渇水の影響が植物の活性度を低下させたものと思われる)。

③植物活性度が高い地域 (北山ダム流域) とそうでない地域 (北山ダム流域を除いた地域) に分けられる (図-4)。

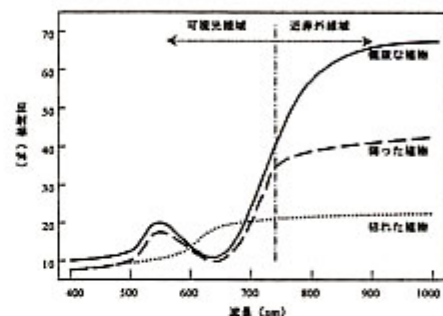


図-3 植物の分光反射特性

(3) 嘉瀬川ダム流域および周辺既設ダム流域の被覆状況

本節においては、まず、97年のLANDSAT衛星データを用いて嘉瀬川ダム流域の被覆分類図を作成し被覆割合を求めた。次に、88、94、96年のデータを解析し、被覆の経年変化を調べた。最後に、97年のデータを用いて、筑紫山系と筑後川流域のダム (南畑、背振、伊岐佐、河内、北山、松原、下笠、江川、寺内の各ダム) を解析し、各ダム流域の被覆状況と比堆砂量との関係を調べた。また、植生指標 (NDVI) を求め、比堆砂量との関連についても調べた。

1) 嘉瀬川ダム流域の被覆状況

1997年4月24日のデータから作成した被覆分類図 (図-5) に、ダム流域を重ね合わせて、被覆状況の割合を見た。嘉瀬川ダム (北山ダム流域を含む) は、針葉樹54%、広葉樹15%、田9%、伐採した部分6%である。北山ダム流域は、針葉樹49%、広葉樹16%、田9%、伐採地7%である。両流域は、北山ダム流域が嘉瀬川ダム流域の一部でもあるため、被覆割合は似通った値になっている。嘉瀬川ダム流域から、北山ダム流域を除外すると、北山ダム流域と比較して、針葉樹が57%と若干大きな値になっている。

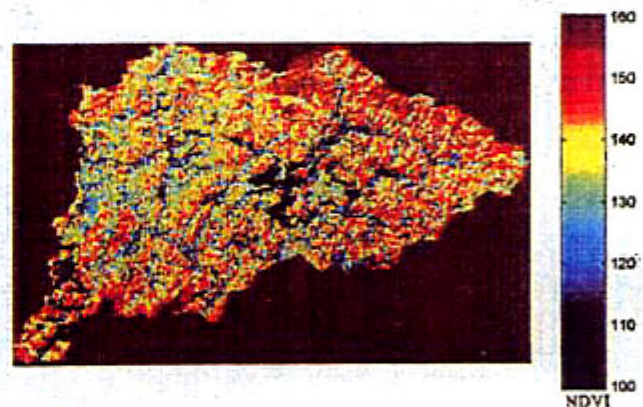


図-4 嘉瀬川ダム流域のNDVI解析結果 (1994年3月31日観測)

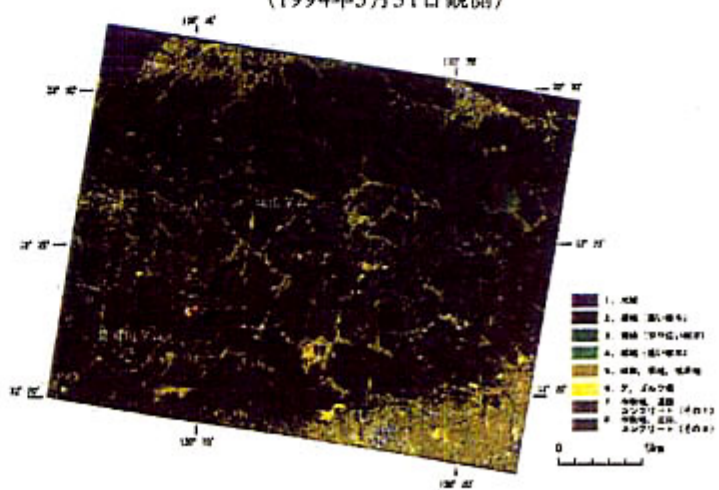


図-5 嘉瀬川ダム流域の被覆分類図

2) 嘉瀬川ダム流域の被覆状況変化

1997年のデータに加えて、1988, 1994, 1996年のデータを解析し、被覆状況の変化を見た。4年分の被覆分類図を比較すると、流域内で大きな変化は見られなかった。また、樹林地と平地との境界はほとんど変化がなく、流域内で大きな土地利用の変化は無いものと思われる。

また、1975年と1993年に撮影された航空写真から流域の被覆状況を見ると、1975年当時は伐採されている領域が多く、1993年では非常に少ないことがわかる。1993年の画像は、解析したLANDSAT衛星と撮影時期が近く、被覆状況も比較的良く対応している。

4年分のLANDSAT衛星データと2年分の航空写真で、嘉瀬川ダムと北山ダム流域の被覆状況の経年変化を見た結果、過去20年で特に森林の状態が大きく変化しているが、最近10年間では大きな変化は認められないことが分かった。

3) 各ダム流域の被覆分類図

図-6は各ダム流域の被覆割合を示す。なお、松原ダム流域は衛星データから外れているため、流域の一部のみである。北山ダムと嘉瀬川ダムの流域の被覆割合はほぼ同じ割合で、他のダムと比較して、田畑、草地等の割合が高い。南畑ダム、背振ダム、河内ダムは近接しているが、被覆割合は若干違っている。江川ダムと寺内ダムは似通った割合である。松原ダムと下笠ダムも隣接しているが、松原ダムの解析が一部のため、かなり違った割合となっている。

4) 各ダム流域の緑地（樹木）の被覆状況と比堆砂量の関係

図-7は各ダム流域の緑地（樹木）の被覆割合と比堆砂量との関係を示したものである。緑地（樹木）と比堆砂量とは明確な関係は見られない。

5) 植物活性度と比堆砂量の関係

各ダム流域の植物活性度すなわち植生指標（NDVI）と比堆砂量との関係については明確な相関は見られない。

3. 嘉瀬川ダムおよび北山ダムに流入する河川の特長

嘉瀬川ダム貯水池に直接流入する主な河川は神水川、浦川、大串川、栗並川、嘉瀬川である（図-8）。嘉瀬川には嘉瀬川ダムサイトから約7km上流に北山ダム（流域面積：54.63km²、57年（昭和32年）竣工）がある。この北山ダムには嘉瀬川と初瀬川が流入している。

本章では、これらの河川について流域面積、縦断勾配、河幅、土砂の粒度特性を調べた。



図-6 各ダム流域の被覆割合

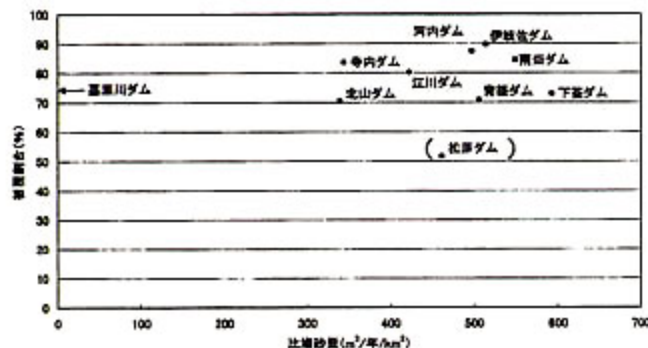


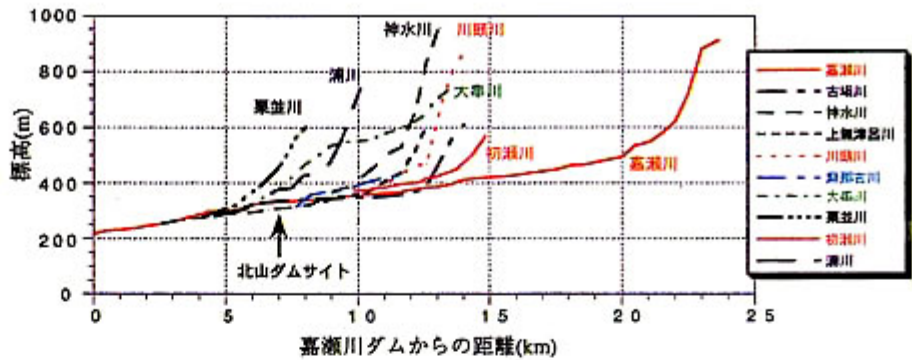
図-7 各ダム流域の緑地と比堆砂量との関係



図-8 嘉瀬川ダム、北山ダムに流入する河川

(1) 各河川の縦断勾配

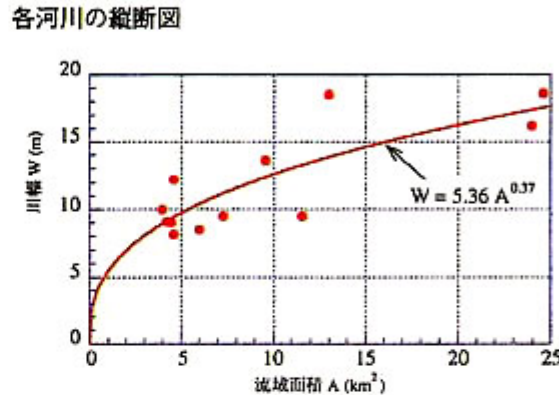
図-9には各河川の縦断図を示す。北山ダムに流入する嘉瀬川、初瀬川は嘉瀬川ダムに流入する他の河川よりも緩勾配である。



(2) 河幅

各河川が他川と合流する直前の地点および神水川における流域面積24.6km²の地点において調べた河幅と流域面積の調査結果を図-10に示す。同図には回帰式

$W = 5.36A^{0.37}$ も示す。ここに、河幅Wの単位はm、流域面積Aのそれはkm²である。



(3) 河道士砂の粒度特性

土砂の粒度特性については、まず、各流域の出口に近い場所において1m×1mのプロットを設け、プロットに含まれるレキについて大きい方から40個抽出し、レキ径を計測した。レキ径は、3次元の方向に計測されたレキの長さの平均値とした。次に、100mm以下の土砂レキについては、JIS規格のふるいを用いて粒度分析を行った。

図-11は、1m×1mのプロットにおいて測定されたレキ径分布を示す。それぞれの河川から生産されるレキ径分布は大まかにいえばほぼ等しい。100mm以下の粒径の土砂について粒度分析した結果を図-12に示す。粒度分析からも、河道士砂の粒度特性は河川間に大きな差異は認められないことが分かる。

図-10 流域面積と河幅の関係

4. 嘉瀬川ダム周辺および筑後川流域における既設ダムの堆砂状況

本章は河川流量が既知の場合にダム堆砂量を評価する方法について検討するものである。まず、既設ダムの堆砂状況の事例として、現在、建設中の嘉瀬川ダム周辺から、筑紫山系にある南畑ダム、背振ダム、

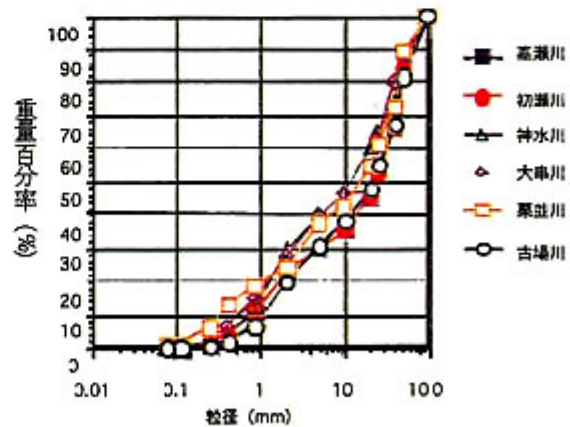
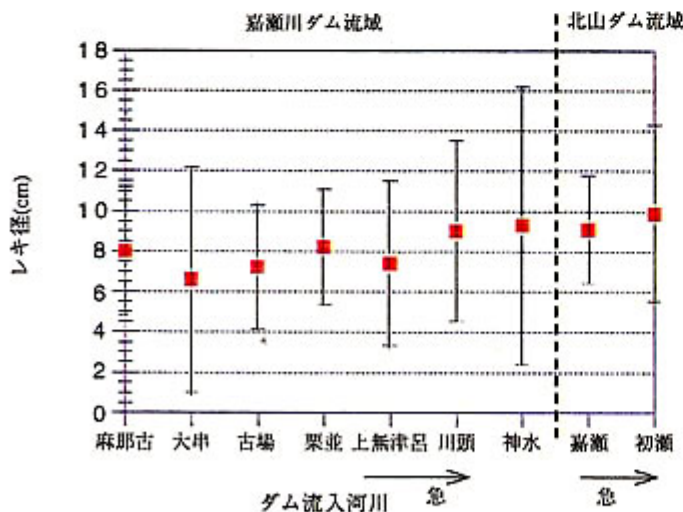


図-11 各河川における設定プロット内の最大レキのレキ径分布 (平均河床勾配順)

図-12 各河川における堆積土砂の粒径加積曲線

河内ダム、北山ダム、伊岐佐ダムを選ぶ。これらの地域はいずれも花崗岩質の地質からなる地域である。

次に、これらの地域とは地質条件の異なる地域として筑後川流域から松原ダム、下笠ダム、江川ダム、寺内ダムを選び、それらのダムについても堆砂状況を調べる。最後に土砂水理学の知見を基にこれらのダム堆砂量と河川流量との関係式を求めると。

(1) 比堆砂量から見た既設ダムの堆砂状況

貯水容量200万 m^3 以上、堆砂率25%以下、経過年数10年以上の貯水池について、比堆砂量と流域面積との関係を水系別に示された図¹⁾に、本調査結果をプロットした。筑紫山系のダム堆砂状況は、わが国でも流出土砂量の少ない中国地方の河川の近傍にプロットされ、中国地方の堆砂状況に類似していることが分かった。一方、筑後川流域のダムについては、江川・寺内ダムは筑紫山系のダム堆砂状況と同じであるが、松原・下笠ダムは、木曾川、吉野川など構造線沿いの河川に近い堆砂状況であることが分かった。

(2) 年堆砂量と年総流量との関係

計画堆砂量算定においては、通常、類似な流域特性の既設ダムを選び、その比堆砂量から算定されることが行われる。比堆砂量が安定化するためには、経過年数としては少なくとも15年～20年を要するが、類似地域に15年～20年以上経過した既設ダムが常に存在するとは限らない。ここでは、比堆砂量以外の方法で堆砂量を算定する方法を考えてみよう。

まず、掃流砂や浮流砂を伴う場合の流砂量について考える。断面全体の流量を Q 、流砂量を Q_s とそれぞれおくと、流砂量式は簡単に

$$Q_s = Q \frac{K}{s\phi} l_e \quad (1)$$

となる²⁾。ここに、 l_e : エネルギー勾配 \div 河床勾配、 ϕ : 流速係数、 s : 粒子水中比重である。 K を簡単に定数として取り扱い、式(1)を積分すると

$$\int_0^{1\text{year}} Q_s dt = \int_0^{1\text{year}} Q \frac{K}{s\phi} l_e dt = \frac{K}{s\phi} l_e \int_0^{1\text{year}} Q dt \quad (2)$$

取り扱いとしてはかなり荒いものではあるが、年流砂量(=年堆砂量)が年総流量に比例することが分かる。図-13は、筑紫山系および筑後川流域のダムにおける年堆砂量と年総流入量との関係を示したものである。明らかに、年堆砂量は年総流入量に関連づけられ、回帰式として次式を得る。

$$\int_0^{1\text{year}} Q_s dt = 1.378 \times 10^{-4} \times \left(\int_0^{1\text{year}} Q dt \right)^{1.02} \quad (3)$$

(単位: m^3/year)

これは式(2)にほぼ一致している。

以上のことから、貯水池計画の当該河川流量の数値データ

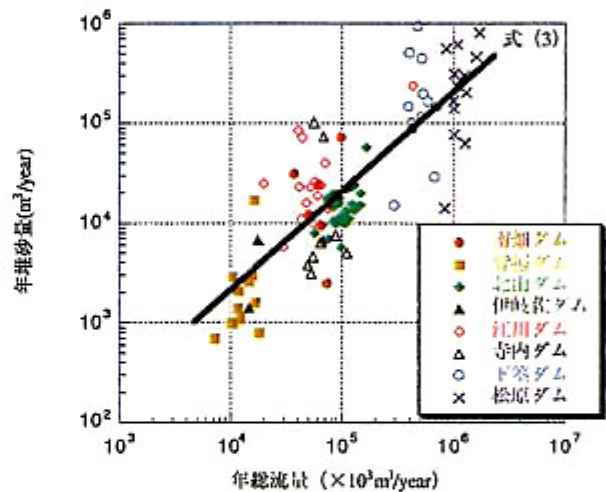


図-13 年堆砂量と年総流入量との関係 (経過年数10年以上のデータを使用)

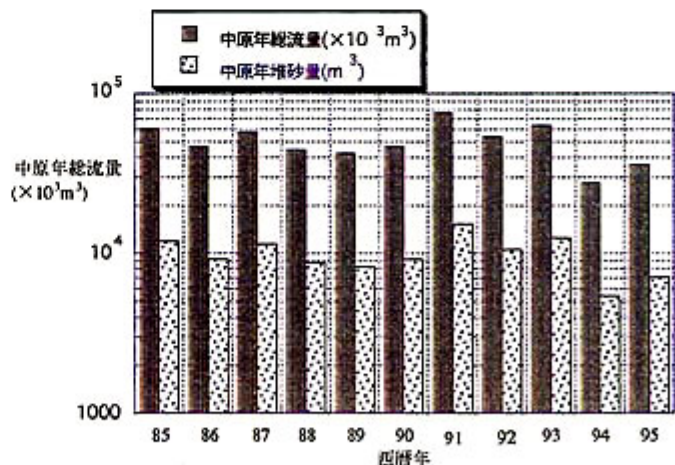


図-14 嘉瀬川中原地点における実測年総流量と推定年堆砂量の変化

が分かれば年流砂量が明らかになり、その結果、計画対象ダムにおける計画堆砂量が評価できることになる。

5. 嘉瀬川ダムの堆砂量の推定

前章において得られた年堆砂量の式(3)を用いて嘉瀬川の中原地点における実測流量を基に年堆砂量を推定してみよう。

図-14にその結果を示す。中原地点では平均的には年間 $50.51 \times 10^6 \text{m}^3$ の流量があり、その結果として平均 $9,932 \text{m}^3$ の年間流砂量が推定されることになる。当然、推定式には誤差が含まれており、中原地点での流量規模においては約 $2,000 \sim 100,000 \text{m}^3$ の年間流砂量の推定幅が考えられる。

従って、中原地点の流域面積が 24.6km^2 、嘉瀬川ダム地点での流域面積が 73.8km^2 (北山ダム流域を除外)であることを考慮して、嘉瀬川ダム地点の流砂量を推定すると、1年間で平均 $29,800 \text{m}^3$ 、100年間では平均 298万m^3 となる。計画堆砂量は 430万m^3 とされているが、推定式の精度を考えると両者は良く一致していると言える。

6. 嘉瀬川ダムの堆砂対策

本章では、我が国のダム貯水池における堆砂防除の方法および既設ダムにおける堆砂対策を調べ、それを踏まえて、建設中の嘉瀬川ダムにおける堆砂対策に関する提案を行う。

(1) 堆砂防除対策の現状

ダム貯水池における堆砂防除対策は、図-15に示すように

- 1) ダム計画時における堆砂量の推定、
 - 2) ダム貯水池への流入土砂の防除、
 - 3) ダム貯水池内の堆砂除去
- の3つに大別される。

1) については既に4、5章で述べた通りであるので、以下では2)、3)について述べる。

ダム貯水池への流入土砂の防除対策としては、貯水池上流領域では治山・治水事業が重要となる。また貯水池末端領域では、貯砂ダムを設置して砂礫を貯め、それを掘削除去する方法とバイパス水路を設けることによって流入土砂を貯水池下流に放出する方法とがある。

一方、ダム貯水池からの土砂を除去する方法として、自然の流水を利用する除去法の代表的例としては洪水時、堤体に設けられた土砂吐きや排砂門を用いる

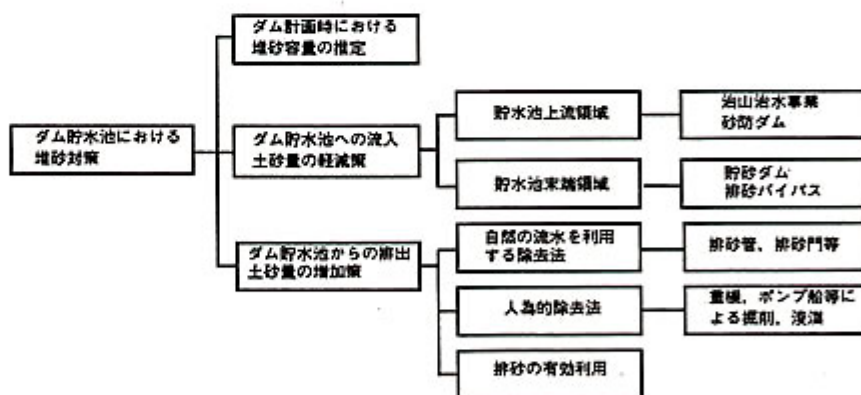


図-15 堆砂防除対策

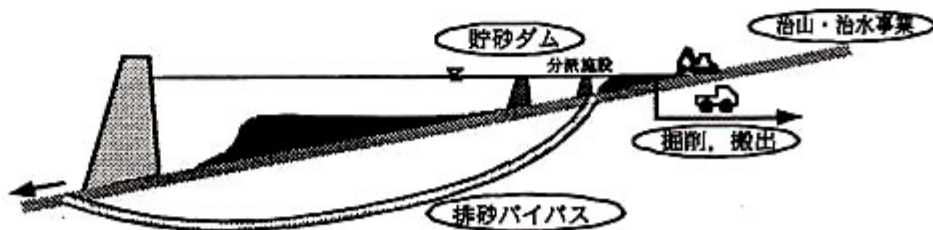


図-16 嘉瀬川ダム堆砂対策

洪水排砂法（フラッシング方式ともいわれる）、排砂管を用いる方法がある。これらは、自然からのエネルギーが供給されること、また下流の河床低下および海岸浸食の防止という点からも優れた方法である。しかし、排砂門のゲート調整、濁水の下流に及ぼす影響、排砂管入り口の閉塞等の問題点がある。

人為的な除去法としては、重機を用いた機械掘削、グラブ船、ポンプ船による浚渫や掘削が行われている。この方法は、上述の自然の流水を利用する方法のような貯水池の洪水の発生やゲートの調整等が不要であるため、計画的な排砂が可能となる。また、採取した土砂を骨材資源として利用できる。しかし、掘削コストが高いことや稼働効率の面で沈木等の障害物の影響を受けるといった欠点がある。

（2）既設ダムにおける堆砂対策

全国的に堆砂の著しい中部地方と堆砂の比較的少ない中国地方の既設ダムにおける堆砂対策について実例の調査を行った。

中部地方の天竜川水系は堆砂率が最も多い水系として知られていることから、小渋ダム、美和ダム、船明（ふなぎら）ダム、秋葉ダム、佐久間ダムにおける堆砂対策の見学、調査を行った。

小渋ダムには2つの貯砂ダムが設置されており、その1つは77年（昭和52年）に日本で初めて建設された小渋第1貯砂ダム（コンクリート重力式）、他の1つは、小渋第2貯砂ダム（ブロック式）である。美和ダムでは流入土砂の大部がシルト分であることから恒久的な堆砂対策として排砂バイパスが計画され、現在その建設が進められている。船明ダムでは、ダム堆砂を洪水の掃流力によって下流へ輸送しようとする先進的な試みがなされている。秋葉ダム、佐久間ダムでは、ポンプ船、グラブ船による大規模な湖内移送、湖外搬出がなされている。

中国地方における堆砂対策に関して、山口県内の既設ダムの排砂施設の調査を行った。山口県内のダムでは排砂対策として排砂管が採用されているが、排砂管の使用については消極的であり、その理由としては、バルブの開閉時における障害の発生の危険性があること、および濁水が下流に及ぼす影響を予測出来ないことであった。

（3）嘉瀬川ダムにおける堆砂対策

嘉瀬川ダムの予測流入土砂量およびその性状を踏まえて、上述の既設ダムの排砂対策を参考に、嘉瀬川ダムにおける堆砂防除方法の選定、排砂計画等を提案した。図-16は、嘉瀬川ダムの堆砂対策の概要を示している。堆砂対策の基本計画としては、嘉瀬川ダムに流入する河川上流域における治山・治水工事（植生工、護岸工、砂防ダム等）を行うとともに貯砂ダムを設置し、貯水池末端部における堆砂の機械掘削、搬出を行う。なお、堆砂が予測以上の速度で進行し、計画堆砂量を上回る危険性が生じた場合、排砂バイパスを建設し土砂を下流へ排出する。このような堆砂対策に加えて、ダム建設に伴う上下流における環境変化に関する調査も重要事項としている。

7. おわりに

以上、リモートセンシング情報を用いて、嘉瀬川ダム流域と周辺既設ダム流域の被覆状況を比較した。また、各ダム流域の被覆割合や植生指標を求め、嘉瀬川ダム流域と比較するとともに、比堆砂量との関係を調べた。その結果、被覆割合や植生指標との明確な関係を見出すまでには至らなかった。河道土砂の粒度特性は河川間に大きな差異は認められない。筑紫山系および筑後川流域の既設ダムについて堆砂状況を調べ、嘉瀬川ダムにおける堆砂量を推定した。その結果、嘉瀬川ダム地点の流砂量は1年間で平均29,800m³、100年間では平均298万m³となることが分かった。最後に、嘉瀬川ダムの予測堆砂量を踏まえ、既設ダムの排砂対策を参考に、嘉瀬川ダムにおける堆砂防除方法の選定、排砂計画を提案した。

参考文献

- 1) 芦田和男・高橋保・道上正規：河川の土砂災害と対策，森北出版（株），1983.
- 2) 椿東一郎：水理学Ⅱ，森北出版（株），1974.