

河川基金助成事業

「流水型ダム貯水池における堆砂量と その質に関する考察」

助成番号：2024 - 5311 - 004

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻
博士後期課程 中村 亮太

2024 年度

1 はじめに

近年、洪水調節のみを目的とし、河床部に常用洪水吐きを備えた流水型ダム建設が世界各地で進んでいる。流水型ダムとは、平常時に空虚な貯水池に洪水を一時的に貯留することで、下流市街地の水害リスクを低減するダム形式である。流水型ダムは欧米をはじめ世界中で普及しており、水害リスク軽減に貢献してきた。米国では流水型ダムを Dry Dam と呼び、1922 年までに Miami Conservancy District (MCD) がオハイオ州 Dayton に建設した 5 基のダムがその端緒となり、その後、全米各地に普及していった ([1])。MCD が治水策として流水型ダムを採用した背景には、低コストかつ短期間で建設できるという利点があったためである。一方、オーストリアやドイツなどヨーロッパ諸国では流水型ダムを Flood Retention Basin と呼び、比較的小規模なダムを流域上流域に分散配置することで治水を図っている ([2], [3])。これは、小規模分散型の治水策の方が地域の景観や生態系への影響が小さいと考えられているためである ([4])。

日本における流水型ダムの建設の歴史は古く、大きく 2 つの時期に区分できる。第 1 の時期は 1950 年代後半から 1970 年代にかけてであり、第 2 の時期は 2005 年以降現在までである。前者のダムは主に農林水産省が所管しており、後者は国土交通省が所管している。「流水型ダム」という用語自体は比較的新しく、2006 年に当時の佐賀県知事が使用したことが端緒となった。このため、実際には 70 年以上前から日本国内に流水型ダムが存在するにもかかわらず、古くに建設されたものの中には、現在でも流水型ダムとして認識されていないものがある。日本では流水型ダムのインベントリが未だ整備されていないことから、流水型ダムについての貯水池堆砂や河川生態系への影響に関する情報も体系的に整理されていない現状がある。

流水型ダムは、その構造や運用の特性から、洪水時における貯水池の土砂捕捉率が貯水ダムよりも著しく低いと考えられている。流水型ダムは貯水池土砂管理の観点から、スルーシング排砂やフラッシング排砂に分類される。スルーシング排砂とは、洪水時に貯水位を低下させて貯水池をフリーフローで運用し、流入する土砂をダム内に堆積させることなく下流へと通過させる方法である。恩田ら ([5], [6]) は、スルーシング排砂を採用するダムでは、排砂ゲートが河床部に近いほど土砂捕捉率が低下することを示している。流水型ダムは河床部に配置された常用洪水吐きが排砂ゲートとして機能するため、洪水時における貯水池の土砂捕捉率は必然的に低くなる。さらに、流水型ダムの貯水池は平常時に空虚であるため、洪水時に堆積した土砂は中小規模の洪水によって徐々に侵食され、ダム下流へと排出される。したがって、流水型ダムは流砂の連続性を維持しやすいダム形式であり、貯水池土砂管理や河川生態系への影響という観点から優れた特徴を有している。

一方で、流水型ダムの貯水池においても、条件によっては無視できない量の土砂が堆積することがある ([7], [8], [9])。大規模洪水時には貯水池が湛水し、貯水池内に広く土砂が堆積する。洪水終盤に貯水位が低下すると、フラッシング排砂で見られるような水みちが貯水池内に形成され、その流路に沿って土砂が侵食される。このとき、水みち幅に対して貯水池幅が著しく広い貯水池では、水みちの外側（つまり氾濫原域）に堆積した土砂は侵食されず、そのまま貯水池内にとどまる。フラッシング排砂における水みち幅は、排砂流量の平方根に比例するとされており、排砂流量は排砂ゲートの規模に依存する ([10], [11],

[12]). したがって、流水型ダムにおける水みち幅も洪水吐きの規模に影響されると考えられる。このことから、流水型ダム貯水池では、貯水池の形状や洪水吐きの規模が堆砂量や細粒土砂の堆積状況に大きく影響すると推察される。しかし、日本では流水型ダムに関する体系的な情報が不足していることから、貯水池の堆砂特性やその支配要因に関する知見も依然として乏しい。

そこで本研究では、(1) 日本全国の流水型ダムのインベントリを新たに作成し、日本の流水型ダムの基本的特徴について改めて整理し、(2) 貯水池における堆砂量やその粒径についての実態を整理し、(3) それらを規定する要因として貯水池形状と洪水吐きの規模に注目した考察を行った。本研究の新規性と独創性は、本研究で新たに作成した日本の流水型ダムのインベントリに基づいて実施した包括的なデータ収集および現地調査に基づいて、流水型ダム貯水池の堆砂特性について議論している点にある。

本報告書は、本章含め全 6 章によって構成される。2 章では日本の流水型ダムのインベントリを作成し、さらに、日本の流水型ダムの基本的特徴について整理する。3 章は材料と方法、4 章は結果、5 章は考察、6 章は結論である。

キーワード：流水型ダム，インベントリ，貯水池堆砂，貯水池土砂管理

2 材料と方法

2.1 日本の流水型ダム

2.1.1 流水型ダムの定義とスクリーニング方法

日本における流水型ダムの一部は、鈴木ら[13]によってスクリーニングされている。鈴木らは、(1) 目的が洪水調節・農地防災のみであること、(2) 現在供用されているダムであること、(3) 重力式コンクリートダムであること、(4) 総貯水容量が 50 万 m^3 以上かつ湛水面積 5ha 以上であること、の 4 条件に基づき 25 基のダムを抽出し、ダム管理者へのアンケート調査によって河床部放流設備の設置高を確認することで、8 基の流水型ダムを特定した。しかし、この中には、フィルダムや 4 つ目の条件を満たさない小規模なダムが含まれておらず、また 2008 年以降に建設・計画されたダムも反映されていない。

本研究では、鈴木らの基準を拡張し、以下の 3 条件のすべてを満たすダムを流水型ダムとして定義した。

- ・ 目的が洪水調節・農地防災のみであること、
- ・ 河床部に放流設備を有し、平常時に貯水がないことが確認できたこと
- ・ 放流設備として取水塔を用いていないこと、

である。ここで、3 つ目の条件について補足すると、取水塔は本来、利水を目的としたダムで使用される構造であるが、これを治水目的に転用しているダムも存在する。このようなダムでは、貯水池から下流までの水の流路が複雑化し、取水口周辺に止水域が形成される。そのため、流水型ダムの「貯水池からダム下流までよどみなく河川水が流れる」という特徴から逸脱する可能性がある。この理由から、本研究では取水塔を用いる治水専用ダムを流水型ダムのインベントリから除外した¹。

以上の条件に基づいて、日本における流水型ダムを 3 つのステップでスクリーニングした。まず、ダム年鑑 2019、ダム便覧（ともに一般財団法人日本ダム協会）に基づいて、目的が洪水調節のみであるダムを抽出した。その中から、GoogleEarth などの衛星画像から、複数時期の平常時に貯水がないことが確認できたダムを抽出した。最終的な確認として、ダム管理者への聞き取り調査、現地視察を実施し、流水型ダムであることを確認したダムを流水型ダムとした。

2.1.2 基本的な特徴の整理

2.1.1 に示す手順で作成された日本の流水型ダムのインベントリを用いて、日本の流水型ダムの基本的な特徴について整理した。本研究では、日本列島における流水型ダムの水平分布と、貯水池の物理的・水文学的規模、河床部常用洪水吐きの数と規模に注目した。

河床部の常用洪水吐きの構造や規模は、流水型ダムの堆砂に最も影響を及ぼすと考えられる。流水型ダムには通常、河床部の常用洪水吐きとクレスト部の非常用洪水吐きが設置されており、堤体中段にオリフィスを有する流水型ダムも存在する。Sumi[1]は河床部常

¹ 取水塔を放流設備として用いる治水専用ダムには、寺尾ダム（富山県）、大倉川ダム（静岡県）、御手洗ダム（鹿児島県）の 3 基が該当する。本研究では、これらのダムを流水型ダムとして扱わないが、流水型ダムと類似の特徴を有していると考えられる。

用洪水吐きをゲートの有無によって流水型ダムを類型している．本研究では，(1)ゲートの有無，(2)常用洪水吐きの有無，(3)常用洪水吐き規模（高さおよび幅）に注目して，日本の流水型ダムの河床部常用洪水吐きの特徴について整理した（図 2.1）．これらの情報は，既往文献やダム管理者からの提供資料，および現地調査によって収集した．

流水型ダムの規模は，主に堤高，堤長，総貯水容量，および流域面積によって表されることが多い．これらの指標は，ダムの構造的・機能的特徴を把握する上で基本となるものであり，ダム規模の比較にも用いられている．Sumi[1]は，4カ国（日本，アメリカ，オーストリア，スイス）の流水型ダムを対象に，堤高と総貯水容量の関係を整理することで，各国のダム規模の特徴を比較した．ここでは新たに構築した日本の流水型ダムのインベントリに基づいて，Sumi[1]によるダイアグラムに日本の流水型ダムのプロットを追加した．流水型ダム貯水池の水文的な規模を，相当雨量によって評価した．相当雨量は，洪水調節容量（流水型ダムの場合有効貯水容量に一致する）を流域面積で除すことで得られるパラメータである．

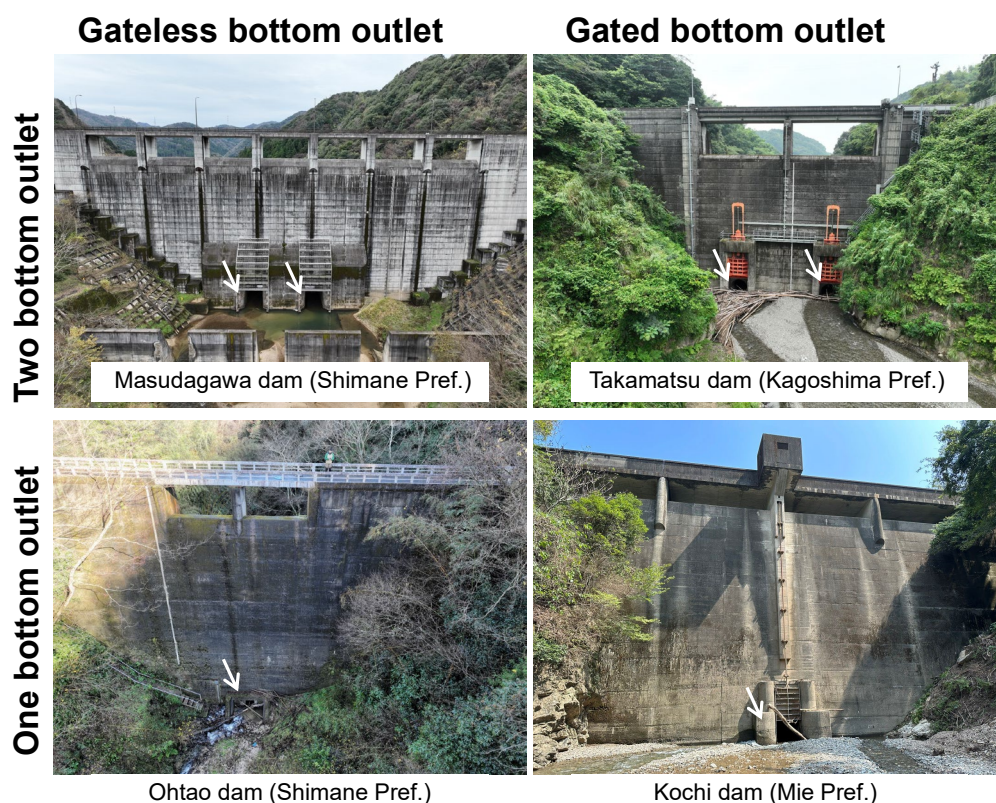


図 2.1 河床部常用洪水吐きの設置数とゲートの有無に基づいた流水型ダムの類型．
（図中矢印は常用洪水吐きの位置を示す）

2.2 貯水池堆砂

2.2.1 貯水池堆砂量の推移

本研究では，各ダム管理者による定期的な堆砂測量によって把握されている流水型ダム貯水池の堆砂量データを収集した．流水型ダムにおける堆砂測量には，通常，平均断面法が用いられている．平均断面法は，貯水池を横断する複数の測線を設定し，隣接する測線

間の断面積の平均値に測線間距離を掛けることで、堆積土砂量を算出する手法である。収集した最新の堆砂量データを用いて、堆砂率を算出した。堆砂率は、現在における貯水池の堆砂状況を把握する上で重要な指標となる。ここでは、堆砂率を初期総貯水容量に占める堆砂量の割合として定義した。

2.2.2 堆砂を構成する主要な粒径成分

流水型ダム貯水池における堆砂を構成する主要な粒径成分のうち、本研究では特に細粒土砂（砂～粘土）の堆積状況に着目して整理を行った。流水型ダムのインベントリに基づき、22基²の流水型ダムについて現地踏査を実施し、貯水池内の細粒土砂の堆積状況を目視により評価した。堆積の程度は、『ほとんど堆積していない』、『堆積が見られるが顕著ではない』、『顕著な堆積が見られる』の3段階に分類した（図2.2）。細粒土砂の『堆積が見られるが顕著ではない』貯水池は、河原状に堆積した礫の上に、細粒土砂がパッチ状に堆積しているものをいうこととする。細粒土砂の『顕著な堆積が見られる』貯水池には、水みち部に僅かな裸地が見られる程度で、貯水池一面に細粒土砂の厚い堆積が見られるものをいうこととする。『堆積が見られるが顕著ではない』と『顕著な堆積が見られる』貯水池の違いは明らかであり、観察者によるバイアスはないものとして扱う。



図 2.2 流水型ダム貯水池における細粒土砂の堆積状況（1:ほとんど堆積していない，2:堆積が見られるが顕著ではない，3:顕著な堆積が見られる）

2.2.3 水みち部における河床材料調査

流水型ダム貯水池内の水みち部における河床材料粒径について調査した。河床材料調査は、画像解析による方法と線格子法のいずれかで実施した。画像解析による方法では、スケールとともに撮影した河床の写真から、画像処理ソフト（ImageJ）によって粒径を計測した。写真上に20×20cmの格子線を描画し、格子点上に位置する河床材の2辺（長径と短径）を計測し、その相加平均をその河床材の粒径値とした。写真の撮影は水域と陸域の境界において行い、撮影箇所による粒径評価のばらつきを抑えるため、少なくとも5枚の写真を撮影した。線格子法では、調査区間において河川縦断方向に2～3つの巻き尺を張り、巻き尺に沿って最大粒径程度の一定間隔で河床材を抽出した。抽出した河床材の2辺（長径と短径）を定規により計測し、その相乗平均をその河床材の粒径値とした。調査区

² 3章において詳述するが、日本には運用中の流水型ダムが24基存在する（2025年4月現在）。

間において少なくとも 100 個の粒径値を得るようにした。粒径分類として、AGU による基準を参考に、細礫 (fine gravel: 2-16mm)、粗礫 (coarse gravel: 16-64mm)、小石 (small cobbles : 64-128mm)、大石 (large cobbles: 128-256mm)、巨石 (boulders: 256mm-) を用い、各粒径分類の個数割合を算出した。

調査対象とした流水型ダムは、夏坂ダム、レン滝ダム、外柵沢ダム、松尾ダム、河内ダム、小匠ダム、嵯峨谷ダム、大峠ダム、益田川ダム、岸川防災ダム、西之谷ダム、高松ダムの 12 基とした。

2.3 堆砂特性に与える要因の評価

2.3.1 貯水池形状と常用洪水吐き規模による効果

貯水池幅が広いほど、流水型ダム貯水池における堆砂量は大きくなり、細粒土砂も堆積しやすくなると考えられる。ここでいう貯水池幅とは、水みち幅に対する相対的なものである。そこで本研究では、貯水池幅と水みち幅を計測し、貯水池幅に対する水みち幅の比を「相対的水みち幅」と定義した (図 2.3)。貯水池幅と水みち幅は、ダム堤体付近の 5 つの任意断面において計測し、相対的水みち幅の計算にはそれぞれの平均値を用いた。

水みち幅は、洪水吐き規模によって決まる排砂流量の影響を受けると考えられる。フラッシング排砂に関する既往研究に基づき、本研究では水みち幅が排砂流量の平方根に比例すると仮定し、両者を関連付ける比例定数を相関分析によって求めた。排砂流量は、河床部常用洪水吐きが開水路流を保つ最大流量と仮定し、マンニング式によって推定した。水みち幅と排砂流量との間に有意な関係が認められた場合、相対的水みち幅は、貯水池平面形状と河床部常用洪水吐きの規模という 2 つの要素に依存するパラメータであるといえる。

最後に、相対的水みち幅と堆砂率との関係について相関分析を行い、さらに、相対的水みち幅と細粒土砂の堆積状況との関係についても検討した。

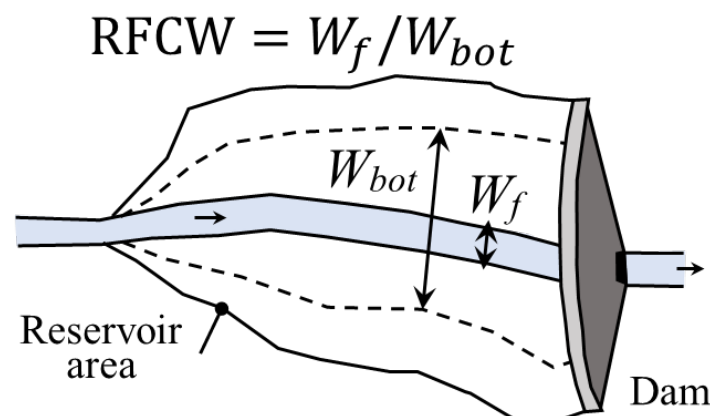


図 2.3 相対的水みち幅の定義 (水みち幅 : W_f , 貯水池底部幅 : W_{bot})

3 結果

3.1 日本の流水型ダムの特徴

3.1.1 インベントリ

スクリーニングの結果、31基のダムが流水型ダムであった（表 3.1）。そのうち24基は運用中であり、残りの7基のダムは建設中または計画中である（2025年4月現在）。運用中のダムの17基が農地防災ダム、7基が国土交通省管轄ダムである。現在建設中または計画中のダムは、すべて国土交通省所管のダムである。

日本の流水型ダムは、所管機関によって建設時期が異なる。農地防災ダムは、1957年から1975年の期間に建設されており、1975年に竣工した加子母防災ダム以来、農地防災ダムとしての流水型ダムは建設されていない。2005年以降に建設された、または建設・計画中である流水型ダムは、すべて国土交通省所管の流水型ダムである。ダム形式に注目すると、大半のダムが重力式コンクリートダムであり、ロックフィルダムであるのは2基（四和ダム、宮川防災ダム）に限られる。

3.1.2 流水型ダムの水平分布

日本における流水型ダムは、降雨量の多い地域に集中して分布している。日本列島における流水型ダムの分布を図 3.1 に示した。日本における流水型ダムは、九州地方、中部地方、東北地方に集中している。図 3.1 には、日本列島における過去30年間の年間平均降雨量の分布を示した。ここでは標準偏差に基づいて、平均降雨量を6つに区分した。流水型ダムが建設される傾向にある地域は、平均降雨量が多い地域であることがわかる。一方で、洪水調節のほかに農業用水の目的を含むダムは、平均降雨量の小さいエリアに建設される傾向がある。流水型ダムのサイトの平均降雨量は、F+Aのダムの平均降雨量より有意に大きかった（t-test, $p < 0.05$ ）。

3.1.3 流水型ダムの貯水池規模

Sumi[1]による国内外の流水型ダムの貯水池規模について、貯水容量と堤高の関係を整理している。図 3.2 は、Sumi による図に、今回新たに確認された流水型ダムのデータを追加したものである。日本の流水型ダムは主に山間部に立地しており、堤高と総貯水容量の間には一定の相関がみられる。図 3.3 には、国内外の流水型ダムの相当雨量を比較した。日本の流水型ダムの相当雨量は約50mmであるが、現在建設中または計画中である流水型ダムは相当雨量が250mmを超える大規模なものも見られる。

3.1.4 流水型ダム河床部常用洪水吐き

表 3.1 に流水型ダムの河床部常用洪水吐き規模（幅、高さ）と条数、ゲートの有無を整理した。日本の24基の流水型ダムのうち、12基の流水型ダムにゲートが設置されており、そのすべてが農地防災ダムである。運用に関する明確な基準は定められていない。そのため、洪水時のゲート操作は下流域の氾濫リスクを考慮しつつ、管理者の判断に委ねられているのが実情である。たとえば、河内ダムと松尾ダム（ともに三重県）では、「運用は消防本部の判断のみによって行われ、明確な運用基準は存在しない」とされている。しかし、

実際に洪水時におけるゲート操作が実施されているダムは少ない。ダム管理者への聞き取り調査によって、ゲート操作による洪水調節の実績が確認されているのは、小匠ダムと高松ダムのみであった。

流水型ダムの河床部常用洪水吐きの条数は、1条～3条であり、4条以上のダムはなかった。14基の流水型ダムは河床部常用洪水吐きが2条設置されており、残りの9基は1条設置されている。河床部常用洪水吐きが3条設置されているダムは、四和ダムのみだった。

一部の農地防災ダムでは、本来利水目的に使用される施設を流量調節目的に転用している。例えば、加子母防災ダムでは、ドロップインレット型の放流設備を採用しており、通常時は底部のオリフィスから水が流れ、洪水時には越流部上部から水が溢れ出す構造となっている。また、流水型ダムとして設計されたロックフィルダム（例えば、宮川防災ダム）では、樋管を洪水放流用の調節工として用いているといった特徴が見られた。

表 3.1 日本の流水型ダム諸元（農地防災ダム：No.1～17，国土交通省所管ダム：No.18～31，建設中・計画中ダム：No.25～31）

N.	ダム一般					堤体		貯水池		河床部常用洪水吐き		
	ダム名	水系	河川名	竣工年	流域面積	堤高	堤頂長	総貯水容量	有効貯水容量	高さ × 幅	条数	ゲートの有 無
					[km ²]	[m]	[m]	[×10 ³ m ³]	[×10 ³ m ³]	[m]		
1	鹿倉	米代川	荒川	1957	25.1	20	70	857	850	Φ 2.00	2	Gateless
2	嵯峨谷	益田川	都茂川	1957	16.8	34.6	96	828	828	1.20 × 1.00	2	Gateless
3	小匠	太田川	小匠川	1959	40	35.9	137	7,490	7,490	Φ 4.50	2	Gateless
4	大峠	益田川	馬谷川	1959	5.5	23.2	67.4	239	239	1.20 × 1.00	1	Gateless
5	四和	奥入瀬川	後藤川	1961	22.9	22.8	121.2	825	814	Φ 1.50	3	Gated
6	外柵沢	北上川	外柵沢川	1961	7.5	22.5	169	994	994	Φ 1.10	1	Gated
7	岸川防災	六角川	今出川	1962	26.5	26.5	66	330	306	Φ 3.00	1	Gated
8	銀山川	最上川	銀山川	1963	22.9	21.3	60	263	243	Φ 2.00	2	Gated
9	河内	加茂川	鳥羽河内川	1963	9.2	24	78	761	759	1.80 × 1.60	1	Gated
10	松尾	加茂川	松尾川	1963	10.1	17	63.6	349	349	2.20 × 2.00	2	Gateless
11	夏坂	馬淵川	熊原川	1966	19.8	27.5	141	810	770	Φ 3.10	1	Gated
12	高尾野	高尾野川	高尾野川	1966	11.7	35	95	800	750	2.00 × 1.40	2	Gated
13	飛山	能生川	能生川	1967	20.4	44.6	180	1,400	1,190	2.60 × 3.06	1	Gateless
14	レン滝	北上川	南畑川	1968	14.1	37.7	170	1,869	1,868	Φ 1.10	1	Gated
15	高松	高松川	高松川	1969	22.9	37	60	1,200	1,126	Φ 2.00	2	Gated
16	宮川防災	神通川	宮川	1971	5.8	29	150.7	1,628	1,128	Unknown	2	Gated
17	加子母防災	木曾川	飛騨川支流白川	1975	16	35.6	119.8	733	540	Φ 2.20	2	Gateless
18	益田川	益田川	益田川	2005	87.6	48	169	6,750	6,500	3.40 × 4.45	2	Gateless
19	辰巳	犀川	犀川	2012	77.1	47	195	6,000	5,800	2.9 × 2.9	2	Gateless
20	西之谷	新川	新川	2012	6.8	21.5	135.8	793	718	1.60 × 1.90	1	Gateless
21	浅川	信濃川	浅川	2016	15.2	53	165	1,100	1,060	1.45 × 1.30	1	Gateless

22	最上小国川	最上川	最上小国川	2018	37.4	41	143	2,300	2,100	1.60 × 1.70	2	Gateless
23	玉来	大野川	玉来川	2022	87	52	130	4,090	4,000	3.75 × 3.75	2	Gateless
24	阿蘇立野	白川	白川	2023	383	90	200	10,100	9,500	5.00 × 5.00	1	Gateless
25	三笠ぼんべつ	石狩川	奔別川	-	35.4	53	160	8,620	8,500			
26	足羽川	九頭竜川	部子川	-	105	96	460	28,700	28,200			
27	大戸川	淀川	大戸川	-	152	67.5	200	21,900	21,900			
28	矢原川	三隅川	矢原川	-	47.6	51.3	266.5	7,000	6,700			
29	城原川	筑後川	城原川	-	42.5	100	500	3,550	3,500			
30	鳥羽河内	加茂川	鳥羽河内川	-	11.6	39	193	2,960	2,863			
31	川辺川	球磨川	川辺川	-	470	107.5	262.5	130,000				

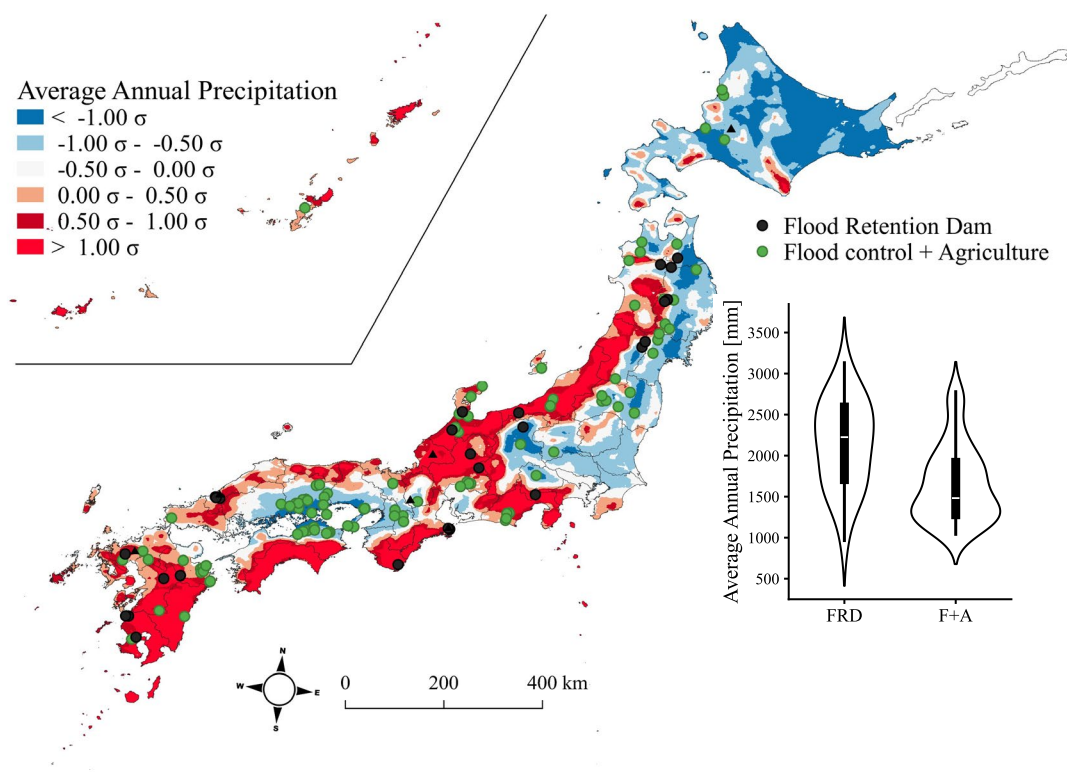


図 3.1 平均年間降雨量による流水型ダムの水平分布の特徴付け

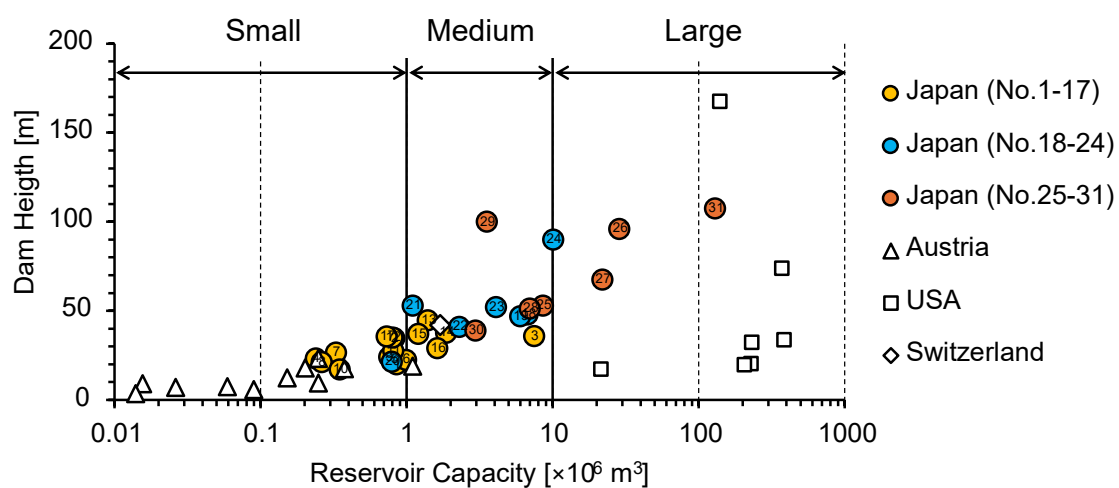


図 3.2 日本とオーストリア，アメリカ合衆国，スイスにおける流水型ダムの貯水容量と堤高の関係（[1], [4]に加筆修正）.

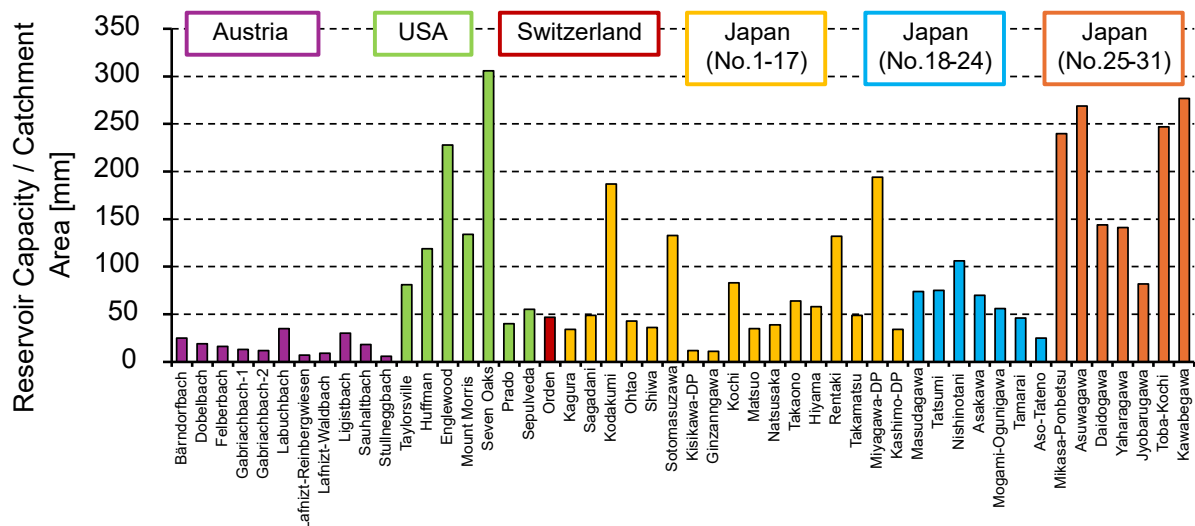


図 3.3 日本とオーストリア，アメリカ合衆国，スイスにおける流水型ダムの相当雨量

3.2 貯水池堆砂の特性

堆砂測量データを収集できた 12 基の流水型ダムについて，堆砂率を比較した結果を図 3.4 に示す．堆砂率の最大は，外柘沢ダムの 10.17% であり，最小は大峠ダムの -0.80% だった．大峠ダムにおける堆砂量が負となっているのは，貯水池において斜面崩壊が生じているためである．なお，堆砂測量データを入手できたのは 12 基であり，他の流水型ダムでは，堆砂測量が実施されていなかったか，データ入手時に技術的な不備があったため，堆砂率を算出できなかった．

相対的水みち幅と堆砂率との間の関係を相関分析によって調べた結果（図 3.5），両者の間には式（1）に示す負の相関が見られた（ $R^2 = 0.80$ ）．

$$\text{堆砂率}[\%] = -7.66[\text{相対的水みち幅}] + 8.10 \quad (1)$$

さらに，水みち幅と排砂流量の平方根との関係を相関分析によって調べた結果（図 3.5），両者の間には式（2）に示す正の相関が見られた（ $R^2 = 0.84$ ）．

$$\text{水みち幅}[\text{m}] = 4.13\sqrt{\text{排砂流量}} \quad (2)$$

貯水池における細粒土砂の堆積状況と，相対的水みち幅との関係を図 3.6 に示した．本研究では，細粒土砂の堆積状況を目視によって 3 群（「ほとんど堆積していない」，「堆積が見られるが顕著ではない」，「顕著な堆積が見られる」）に類型した．各群の相対的水みち幅の分布を図 3.6 に示した．Mann-Whitney の U 検定によって多重比較を行った結果（有意水準は Bonferroni 補正によって調整した），『ほとんど堆積していない』と『堆積が見られるが顕著ではない』（ $p < 0.001$ ），『顕著な堆積が見られる』（ $p = 0.013$ ）との間で有意差が見られた．一方，『顕著な堆積が見られる』貯水池における相対的水みち幅の平均値の方が，『堆積が見られるが顕著ではない』貯水池におけるそれより小さいが，両者の間には

有意差が見られなかった ($p = 0.430$).

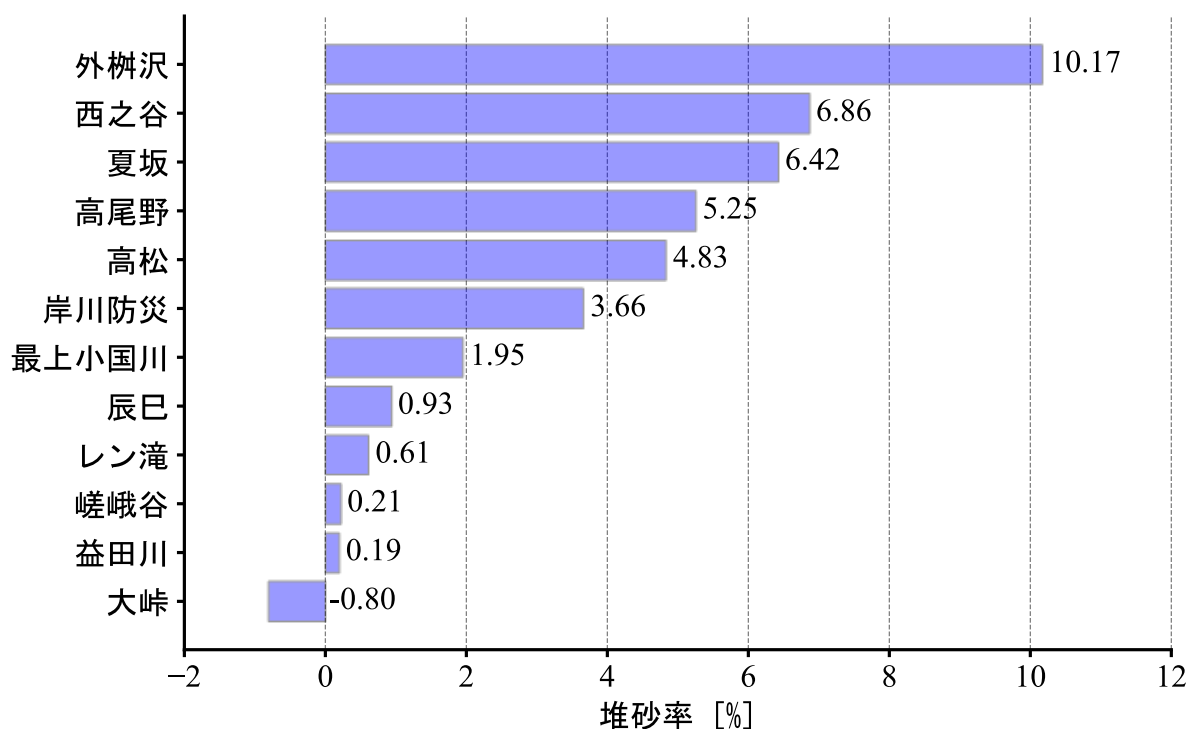


図 3.4 12 基の流水型ダム貯水池における堆砂率の比較

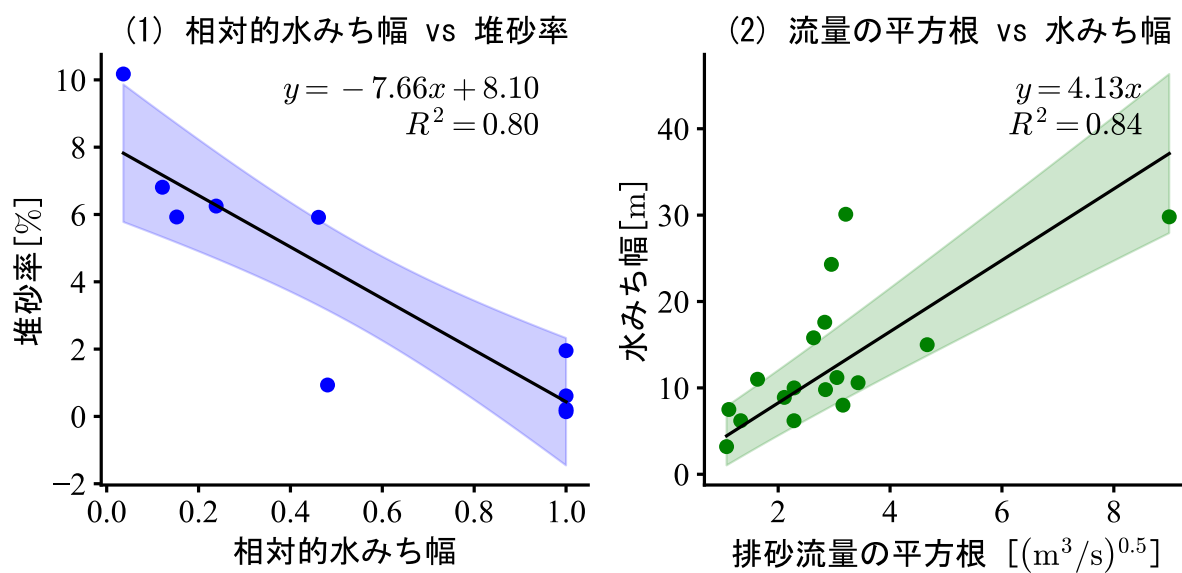


図 3.5 (1) 相対的水みち幅と堆砂率の関係, (2) 排砂流量の平方根と水みち幅の関係 (図中における色付きの領域は 95%信頼区間を示す)

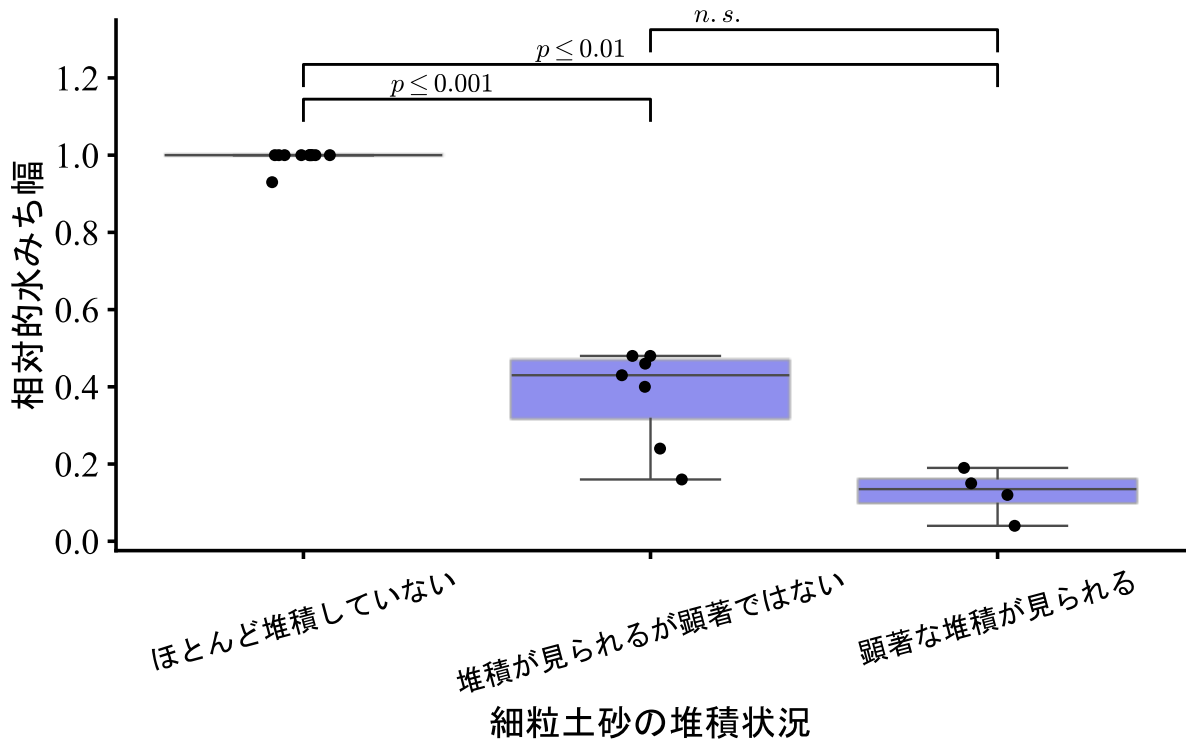


図 3.6 流水型ダム貯水池における細粒土砂の堆積状況と相対的水みち幅との関係（有意水準は $p = 0.05$ とした）

3.2.1 水みち部における河床材料粒径

図 3.7 に、レン滝ダム、外柵沢ダム、嵯峨谷ダム、大峠ダム、益田川ダム、西之谷ダム、高松ダムの上流、貯水池、下流地点の水みち部における粒径加積曲線を示す。参考として、貯水ダムである笹倉ダム（島根県）における結果も示している。残りの 5 基の流水型ダム（夏坂ダム、松尾ダム、河内ダム、小匠ダム、岸川防災ダム）における結果は、分析が終了していないため掲載していない。大峠ダムを除いたすべての流水型ダムで、貯水池地点における代表粒径 d_{60} が、上流地点におけるそれに比べて小さかった。その傾向は、特に外柵沢ダム、益田川ダム、西之谷ダムにおいて顕著だった。

図 3.8 には、図 3.7 に示した 7 基のダムにおける 3 地点代表粒径 d_{60} と河床勾配との関係について示した。参考として三國谷ら[14]による自然河川、波多野ら[15]による貯水ダム下流における河床粒径と河床勾配との関係についても示した。自然河川と同様に、流水型ダムにおいても河床勾配が大きいほど、河床粒径が大きい傾向があり、その傾向は貯水ダム下流のそれと明確に異なった。

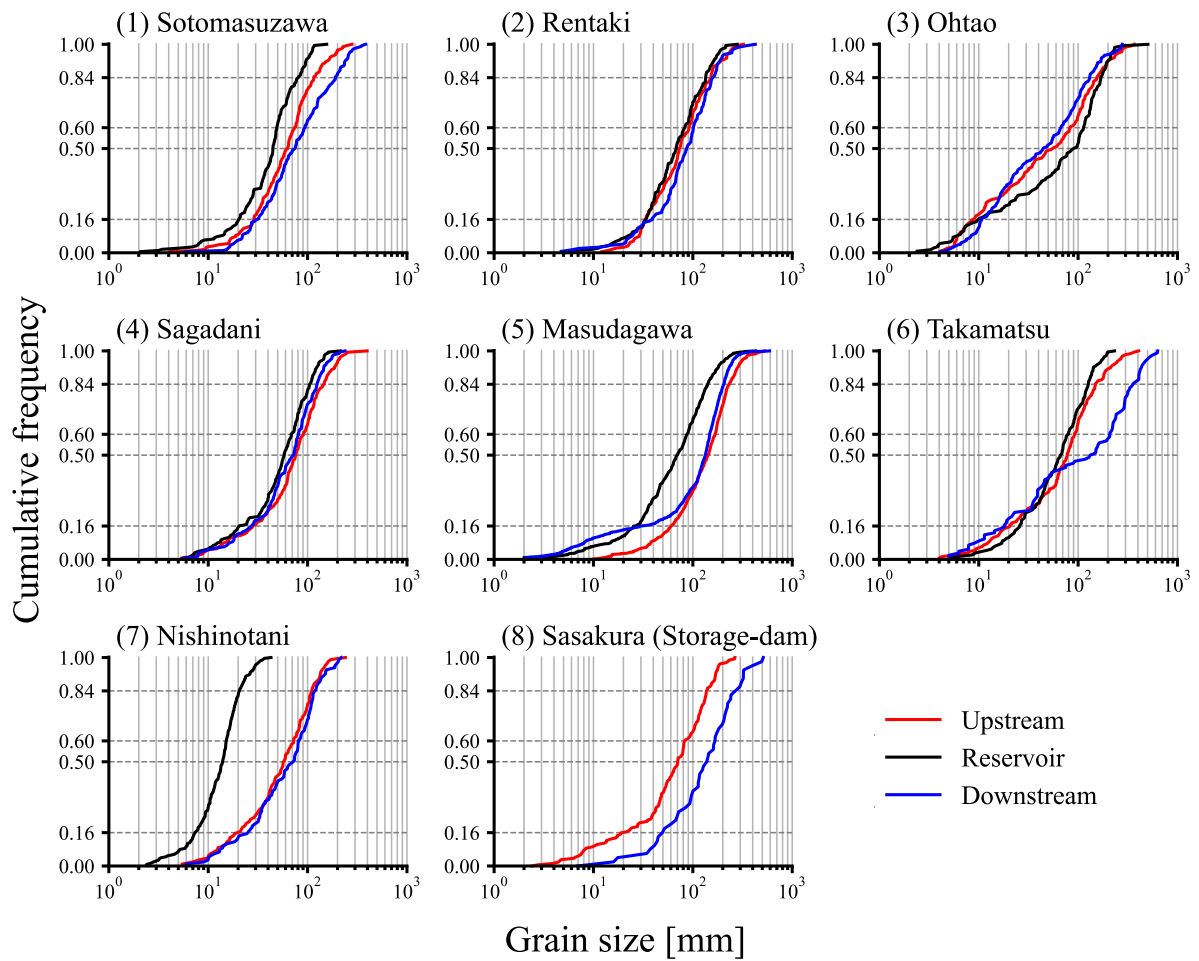


図 3.7 流水型ダムの上流，貯水池，下流地点の水みち部における粒径加積曲線

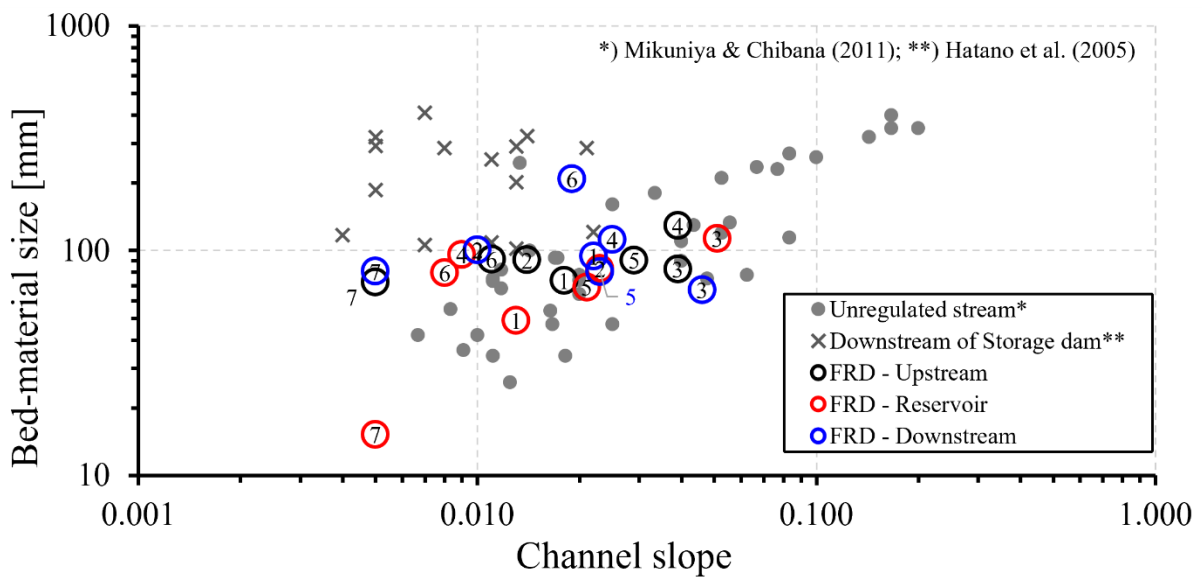


図 3.8 流水型ダムの上流，貯水池，下流地点の水みち部における代表粒径と河床勾配との関係（マーカーの数字は図 3.7 に示す数字に対応する）。

4 考察

4.1 日本の流水型ダムの特徴

流水型ダムは、平均年間降雨量が多い地域に集中していた（図 3.1）。流量が安定している地域では、貯水池による水資源開発は必要ではなく、洪水調節のみを目的とした流水型ダムとされることが多いと推測される。また、ダムを計画する際、利水容量を設けると下流の利水者との協議が必要となる。時に協議が長引くことがあるため、水資源開発が特別必要ではない場合は、洪水調節のみを目的とする流水型ダムとしたことも考えられる。

現在運用中の約半数の流水型ダムにゲートが設置されているが（表 3.1）、実際に洪水時のゲート操作が行われているダムは2基に限られる。これは農地防災ダムを中心とする多くの流水型ダムが小さい流域に建設されており、さらに、これらのダムは流出量や水位の常時観測を行っていない場合が多い。また、さらに管理事務所に常駐職員が配置されていない。これらのことから、ゲート操作によって効率的に流量を制御することは、技術的・人的な観点から困難であると考えられる。

4.2 堆砂率に与える貯水池形状と洪水吐き規模の影響

本研究では、流水型ダム貯水池における堆砂率と相対的水みち幅との関係を調べ、両者の間に負の相関があることを示した。流水型ダム貯水池では水みちに沿って堆砂の侵食が進行するため、貯水池底部幅に対して、水みち幅が狭い貯水池では、堆砂量が多くなりやすい。ここで、相対的水みち幅は、貯水池底部幅に対する水みち幅の比として定義される。図 3.5(2)において示したように、水みち幅と排砂流量の平方根との間に相関が見られた。排砂流量は、河床部常用洪水吐きの規模に依存することから、水みち幅と河床部常用洪水吐き規模との間に関連性を見出すことができた。河床部常用洪水吐き規模が小さいダムは、一般的に高い洪水カット率が必要とされるダムである。高い洪水カット率を有するダムが平坦なダムサイトに建設される場合、水みち幅が狭くなり、堆砂が進行しやすい。以上のことから、貯水池堆砂率は、貯水池底部幅と河床部洪水吐き規模によって説明されることが示された。

流水型ダム貯水池における水みち幅と排砂流量の平方根との関係は、フラッシング排砂実施時に貯水池に形成される水みち幅と排砂流量の関係と同様である（[10], [11]）。ただし、本研究で用いた排砂流量は、フラッシング排砂を対象とした既往研究（[10], [11]）とは異なる。既往研究では、フラッシング排砂実施時の平均流量を用いた方法を用いているが、本研究では、河床部常用洪水吐きが開水路流を保つ最大流量を、マニング式により簡易的に推定して用いた。本来は、貯水位と流量の関係式（ $H \cdot Q$ 式）に基づき流量を求める必要があるが、対象ダムの全てについて $H \cdot Q$ 式の情報が得られなかったため、簡易的手法を採用したものである。このような簡易的な手法を用いたためか、水みち幅が 10m 未満の範囲ではばらつきは小さかったが、10m を超える規模の大きな貯水池ではばらつきが大きくなる傾向が見られた。したがって、規模の大きい貯水池においては、本結果の適用にあたって注意が必要である。

堆砂率と相対的水みち幅の間に、有意な相関が見られたが、この関係には時間軸を考慮していない点に注意する必要がある。特に相対的水みち幅の小さな貯水池では、氾濫原域に

堆積した土砂は侵食されず貯水池に留まる．そのため，堆砂量は大規模な洪水が発生する度に増加する．時間軸を考慮した堆砂率の推定は，今後の課題としたい．

4.3 細粒土砂の堆積に与える貯水池形状と洪水吐き規模の影響

流水型ダム貯水池における細粒土砂の堆積状況と相対的水みち幅との関係を図 3.6 に示した．流水型ダム貯水池に細粒土砂が『ほとんど堆積していない』と『堆積が見られるが顕著ではない』、『顕著な堆積が見られる』との間で有意差が見られた．つまり，水みち幅が貯水池底部幅に一致するような貯水池の場合，細粒土砂は堆積しにくい．

貯水池における細粒土砂の堆積状況と相対的水みち幅の関係を比較した結果，『顕著な堆積が見られる』貯水池の相対的水みち幅の平均値は，『堆積が見られるが顕著ではない』貯水池のそれよりも小さい傾向が示された（図 3.6）．ただし，両者の相対的水みち幅の平均値に意差は認められなかった．

知花らは，貯砂ダムの下流では洪水後期における土砂の不連続が生じるため，結果として貯砂ダム下流の水みちの河床低下が生じることを報告している[16]．細粒土砂の『堆積が見られるが顕著ではない』と分類された飛山ダム（新潟県）の貯水池にも貯砂ダムが設置されており，水みち幅は『顕著な堆積が見られる』貯水池と同程度である 0.16 だった．飛山ダムでは，貯水池内に設置された貯砂ダムによって貯砂ダム下流の河床低下が進行し，結果として相対的水みち幅が小さくなっている可能性がある．

高尾野ダム（鹿児島県）における相対的水みち幅も 0.24 と小さかった．高尾野ダムは，河床部常用洪水吐きが河床標高より高い位置に設置されており，堆砂面が常用洪水吐きの標高まで進行することで平常時の貯水池が空虚となっている．堆砂面が高くなることで，谷幅が広がり，結果として相対的水みち幅が小さくなっていると考えられる．

以上を整理すると，流水型ダム貯水池内における細粒土砂の堆積状況は，相対的水みち幅によって説明することができるが，貯水池内における貯砂ダムの有無や，河床部洪水吐き標高によってはその限りではない．

4.4 貯水池の水みち部における河床材料粒径

流水型ダム貯水池の水みち部における河床材料粒径は，上流地点のそれに比べて小さかった（図 3.7）．その傾向は，外柵沢ダム，西之谷ダム，益田川ダムにおいて特に顕著だった．外柵沢ダムや西之谷ダムは相対的水みち幅が特に小さいダムであり，堆砂率が高く，細粒土砂が顕著に堆積している．このような貯水池では，洪水時に発生する掃流力が小さいことが考えられ，結果として河床粒径も上流地点より小さくなっているものと考えられる．

5 まとめ

流水型ダムとは、河床部に常用洪水吐きを有する治水専用ダムである。本研究は、日本における流水型ダム貯水池における堆砂量および粒径の実態を明らかにし、それらを規定する要因について考察することを目的とした。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) スクリーニングの結果、31基の流水型ダムが確認された。そのうち24基が運用中、7基が建設中または計画中だった（2025年4月現在）。運用中の24基の流水型ダムのうち17基が農林水産省所管、残りの7基は国土交通省所管である。日本における流水型ダムの水平分布を確認したところ、平均年降雨量が多い地域に集中していることが分かった。
- (2) 運用中の流水型ダムのうち、堆砂量データを収集できたのは12基だった。そのほかのダムは、堆砂測量が実施されていないなどの理由から、堆砂量データを収集できなかった。堆砂率（初期総貯水容量に占める堆積土砂量の割合）を整理したところ、堆砂率の最大は外柵沢ダムの10.17%、最小は大峠ダムの-0.80%であった。
- (3) 堆砂率と相対的水みち幅との関係を相関分析によって調べた結果、両者には相関が見られた。さらに、水みち幅と排砂流量の平方根との間にも、相関が見られた。この結果を用いると、河床縦断勾配と洪水吐き規模（高さ×幅）を与えることで、水みち幅を推定できる。貯水池底部幅と推定された水みち幅を用いて相対的水みち幅を計算することで、堆砂率を推定することができる。
- (4) 細粒土砂の堆積状況と相対的水みち幅との関係を調べた結果、『ほとんど堆積していない』群とその他の群との間には有意差が見られた。一方で、『顕著な堆積が見られる』群の相対的水みち幅は『堆積が見られるが顕著ではない』群のそれよりも小さかったものの、有意差は確認されなかった。

流水型ダム貯水池における堆砂実態と支配要因を明らかにすることで、新規流水型ダムの貯水池堆砂特性を大まかに予測することができる。そのため、本研究の成果は、特に流水型ダム事業の初期段階における意思決定を補助するツールとして活用されるなどの効果が期待される。

6 謝辞

本研究の実施にあたり、各ダム管理者より多数の情報提供をいただいたほか、現地調査にあたって便宜を図っていただいた。本研究全般にわたり、京都大学防災研究所水資源環境研究センターの角哲也特定教授、小林草平准教授は、多大なご支援をいただいた。ここに記して謝意を表したい。

7 参考文献

- [1] T. Sumi, “Designing and Operating of Flood Retention ‘Dry’ Dams in Japan and USA,” in *ICHE 2008. Proceedings of the 8th International Conference on*

- Hydro-Science and Engineering*, S. S. Y. Wang, Ed., Nagoya, Japan: Nagoya Hydraulic Research Institute for River Basin Management, Sep. 2008.
- [2] M. Scholz and A. J. Sadowski, "Conceptual classification model for Sustainable Flood Retention Basins," *J Environ Manage*, vol. 90, no. 1, pp. 624–633, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2007.12.018.
 - [3] T. Sumi, "The History and Current Issues of Flood Retention Basin (in Japanese)," *Water Science*, vol. 57, no. 3, pp. 12–32, Aug. 2013, doi: 10.20820/SUIRIKAGAKU.57.3_12.
 - [4] A. Shirai, Y. Iwami, and T. Sumi, "Comparison of In-Stream Flood Mitigation Dams in Austria and Japan (in Japanese)," *Journal of Japan Society of Dam Engineers*, vol. 21, no. 4, pp. 272–277, Dec. 2011, doi: 10.11315/JSDE.21.272.
 - [5] C. Onda and T. Sumi, "ESTIMATION OF EFFECTS OF SEDIMENT ROUTING AND ITS PROMOTION IN HYDROPOWER DAMS CONSIDERING PROPERTIES OF RESERVOIR SEDIMENTATION (in Japanese)," *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, vol. 74, no. 4, p. I_361-I_366, 2018, doi: 10.2208/JSCEJHE.74.I_361.
 - [6] C. Onda and T. Sumi, "EFFECTS OF SEDIMENT SLUICING OPERATION IN HYDROPOWER DAMS CONSIDERING PROPERTIES OF RESERVOIR SEDIMENTATION (in Japanese)," *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, vol. 73, no. 4, p. I_949-I_954, 2017, doi: 10.2208/JSCEJHE.73.I_949.
 - [7] G. L. Morris and J. Fan, *Reservoir Sedimentation Handbook*. New York: McGraw-Hill Book Co., 1998.
 - [8] R. Nakamura, S. Kobayashi, and T. Sumi, "SEDIMENTATION AND SEDIMENT MANAGEMENT METHOD OF FLOOD RETENTION DAM RESERVOIR - A CASE STUDY OF NISHINOTANI DAM (in Japanese)," *Advances in River Engineering*, vol. 30, pp. 125–130, 2024, doi: 10.11532/RIVER.30.0_125.
 - [9] T. Sumi, "Overseas Affairs Hydraulic Design and Management of Orden Dam for Flood Control in Switzerland (in Japanese)," *Engineering for dams*, vol. 241, pp. 3–16, 2006.
 - [10] E. Atkinson, "The feasibility of flushing sediment from reservoirs," *HR Wallingford Report OD 137 to British Overseas Development Admin: London, UK*, 1996.
 - [11] T. Sumi and M. Iguchi, "Technical Feasibility Study of Sediment Flushing in Reservoirs Using the RESCON Model (in Japanese)," *Journal of Japan Society of Dam Engineers*, vol. 15, no. 2, pp. 92–105, 2005, doi: 10.11315/JSDE.15.92.
 - [12] J. S. Lai and H. W. Shen, "Flushing sediment through reservoirs," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 34, no. 2, pp. 237–255, 1996, doi: 10.1080/00221689609498499.
 - [13] S. Suzuki, A. Shirai, and S. Funahashi, "Study on the feature of dry dams -

- Investigation by questionnaire to dry dam managers -,” *Report of Water Resource Environment Research Institute*, pp. 73–79, 2008, Accessed: Jul. 29, 2024. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1523669555898442752>
- [14] T. Mikuniya and T. Chibana, “SUB-SEGMENT DIVISION AND THE DETERMINANT FACTORS OF THE BED MATERIALS IN MOUNTAINOUS STREAM (in Japanese),” *Advances in River Engineering*, vol. 17, pp. 131–136, 2011, doi: 10.11532/RIVER.17.0_131.
- [15] K. Hatano, Y. Takemon, and S. Ikebuchi, “Characteristics of benthos community and habitat structure in the downstream reaches of reservoir dams,” *Disaster Prevention Research Institute Annuals*, vol. 48, no. B, pp. 919–934, 2005.
- [16] T. Chibana, “Formation of delta deposits and physical features,” in *The Science of Dams and the Environment III: Ecotone and Environmental Creation (in Japanese)*, H. Ichiyanagi, Y. Ezaki, and H. Tanida, Eds., Japan: Kyoto University Press, 2014, ch. 4, pp. 81–102.

・ 助成事業者紹介

氏名 中村 亮太

現職：京都大学 防災研究所 非常勤研究員