

12 流砂系における持続可能な土砂管理技術の開発

研究期間：平成 28 年度～令和 3 年度

プログラムリーダー：水工研究グループ長 箱石 憲昭

研究担当グループ：水工研究グループ（水理チーム）、水環境研究グループ（水質チーム、自然共生 C）
寒地水圏研究グループ（水環境保全チーム）

1. 研究の必要性

流砂系における総合土砂管理の必要性が明確に打ち出されたのは、平成 10 年 7 月の河川審議会・総合土砂管理小委員会の報告に遡る。その後、総合土砂管理の必要性は広く認知され、平成 20 年 7 月に閣議決定された国土形成計画（全国計画）において、その必要性が謳われた。また、新たな国土形成計画（全国計画）（平成 27 年 8 月 14 日閣議決定）では、前計画よりも踏み込んだ記述で、その必要性が以下の通り謳われている。

- ・土砂の流れに起因する安全上、利用上の問題の解決と、土砂によって形成される自然環境や景観の保全を図るため、山地から海岸までの一貫した総合的な土砂管理を行う。（目的）
- ・各種のダムにおいてはダム貯水池への土砂流入の抑制や土砂を適正に流下させる取組を関係機関と連携して推進する。（ダム）
- ・適切な土砂管理を行うための土砂移動に関するデータの収集及び分析や有効な土砂管理を実現する技術の検討及び評価を行う。（調査・研究）

一方、総合的な土砂管理の取組を推進するにあたり、土砂移動に関するデータの収集・分析に資する技術の開発や有効な土砂管理の実現に資する技術の開発は、未だ発展途上の段階にある。

2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、土砂移動に関するデータの収集・分析や有効な土砂管理の実現に資する技術の開発により、総合的な土砂管理の取組の推進を図ることとし、以下の達成目標を設定した。

- (1) 土砂動態のモニタリング技術の開発
- (2) 土砂動態変化に伴う水域・陸域環境影響予測・評価技術、並びに、それらを踏まえた土砂管理技術の開発
- (3) 自然エネルギーを活用した土砂管理技術の開発

3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、令和元年度に実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

(1) 土砂動態のモニタリング技術の開発

流砂系の総合的な土砂管理において、山地で生産される土砂の量・質（粒径）を評価・モニタリングすることはもっとも重要な課題の一つである。また、流域から海域への流出土砂量についても、とくに大規模な土砂生産・洪水イベント時やその後の流出土砂量を継続的かつ定量的に把握した事例は国内ではほとんど見あたらず、観測データの蓄積は十分とはいえない。達成目標（1）は、流砂系の土砂動態評価・モニタリング手法の一つとして、粒径別土砂生産量の空間分布評価手法を構築することを目的としている。令和元年度は、沙流川流域及び隣接する鶴川流域を対象に、平成 28 年（2016 年）8 月豪雨に伴う大規模出水時の浮遊土砂流出量・生産源を明らかにすることを目的に、濁度計による流砂水文観測に加えて、放射性同位体トレーサによる土砂生産源推定を行った。その結果、一連の 4 つの台風に伴う出水期間において、前半（台風 7, 11, 9 号）と後半（台風 10 号）で降雨分布が大きく異なり、沙流川では、前半の 3 つの台風により流域全域から浮遊土砂が生産・流出した一方、後半は局地的豪雨がもたらされた上流域の生産源グループから顕著な浮遊土砂の生産・流出があることを定量的に推定で

きた。これらのことから、放射性同位体トレーサは浮遊土砂の生産源モニタリングツールとして利用可能なことが示された。

(2) 土砂動態変化に伴う水域・陸域環境影響予測・評価技術、並びに、それらを踏まえた土砂管理技術の開発 達成目標(2)は、三つの実施内容で構成されている。

一つ目は、各種土砂供給方法での流量－土砂供給量等の関係を明確にし、土砂供給による下流河川の物理環境変化（地形変化、河床表層材料の変化等）を予測する技術を開発することを目的とするものである。令和元年度は、小渋ダム下流小渋川で平成 30 年度に発生した大規模出水を対象に、平面 2 次元河床変動計算を行うとともに、洪水後測量されたレーザープロファイラデータ等との比較を実施した。小渋川はダムおよび土砂バイパストンネルによって、河川に供給される流量および流砂量がコントロールされる。河床変動計算では、このことを考慮し、供給流量は小渋ダム運用実績をもとに与え、供給土砂は土砂量と粒径分布の時間変化を水力模型実験結果等より推定することで与えた。その結果、大規模出水による供給量増加に伴う河床への堆積および流路の侵食を概ね再現できることを確認した。

二つ目は、土砂供給に伴うダム下流の水域および陸域のレスポンスの解明を目的とするものである。令和元年度は、土砂供給による水域環境への正の効果として、アユ不漁の一因とされる水中のコケ植物繁茂の抑制効果を検証した。土砂堆積により変動する石礫の露出高（砂面から石礫の頂部までの高さ）に着目し、コケ植物の被度と露出高がアユの摂食行動に与える影響を検証した結果、露出高が高いほどコケ植物の繁茂が確認され、露出高 250mm 以上でなわばりアユによる選好性が低下した。このことから、土砂供給によってダム下流の石礫の過度な露出が抑制され、アユの生育場が保全される可能性が示唆された。また、陸域環境の評価軸として、土砂供給のインパクトを受けやすいと考えられる河原固有の植物に着目し、その一種である絶滅危惧種ツツザキヤマジノギクの在・不在と物理環境との関係を解析した結果、ツツザキヤマジノギクが生息しているエリアでは生息していないエリアより比高および砂被度が高い傾向であった。

三つ目は、土砂供給に伴う河川水質の応答特性を把握するとともに、評価対象項目に関する毒性情報の収集や生物試験の実施により、生態リスク評価を目的とするものである。令和元年度は、安全かつ省力的な化学物質濃度の調査方法として期待されるパッシブサンプリング手法の雨天時河川への適用性を検討した。適用可能性の検討として、薄膜拡散勾配（Diffusive Gradients in Thin-films: DGT）を用いたパッシブサンプリング手法（以下 DGT-パッシブサンプリング法）を雨天時の河川で行う観測実験を行い、labile 態金属の平均濃度を推定した。また、人力の採水によるサンプルの金属分析を行い、スポットサンプリングによる濃度データとパッシブサンプリングによる推定平均濃度を比較し、パッシブサンプリング手法の妥当性について検討した。その結果、Mn と Cu ではスポットサンプリングによる時間加重平均濃度に対してパッシブサンプリングによる推定平均濃度が 1.0-3.3 倍の範囲であり、オーダーレベルでの妥当性が確認された。これらの結果から、パッシブサンプリング手法の土砂供給時の適用性が示唆され、本手法を用いることでより現場に即した生態リスク評価が可能となることが期待される。

(3) 自然エネルギーを活用した土砂管理技術の開発

達成目標(3)は、ダムの上下流における水位差エネルギーの活用により、無動力でダム貯水池の堆積土砂を吸引し、ダム下流へ土砂供給する「潜行吸引式排砂管」を開発することによって、適切な量と質（粒径）の土砂を必要とされる河道区間に供給する新たな土砂運搬システムを実用化することを目的としている。令和元年度では、以下の成果が得られた。

- ① 塵芥等の前処理システムの開発においては、先端部に回転スクリーンを付けたドレッジアーアタッチメントを大成建設㈱との共同研究で開発した。このアタッチメントは、巨礫等を含む土砂から細粒土砂を分別吸引し、先端開口度とスクリーン回転数の組合せにより濃度調整を可能とするもので、最大水深 50m 時でも土砂濃度を 8%程度に制御して 50m³/h を吸引できる能力を確認した。
- ② 潜行吸引式排砂管の吸引性能の向上の検討については、昨年度実施した管径 300mm 排砂管の室内実験結果の分析を行った。管径 300mm の流量・土砂濃度計測装置を用いても時間当たり 50m³/h の排砂が可能

であることを確認するとともに、昨年度の結果と比較することで流量・土砂濃度計測装置の有効性を確認した。また、排出される土砂濃度と管内流速の関係を把握し、吸引部、排砂管のサクシオン部、水平部等の区間毎の管損失の評価を行った。これにより、排砂管の設計において、これまで不明であった、排出土砂濃度などの違いによる管損失を求めることができ、管内流速が算定できることから潜行吸引式排砂管による排砂設備の設計が可能となることを示した。

- ③ 吸引管による土砂供給技術の実用化の検討については、潜行吸引式排砂管を用いた排砂設備の設計手順を検討した。同検討では、高落差において 300mm 潜行吸引式排砂管を運用する場合には、負圧の発生の抑制手法として、管径を途中で縮小させる管配置を提案した。これにより、水位差 12m、管長 70m の施設において、土砂濃度 3%で 820m³/日の排砂能力を有する設備として設計できることを示した。さらに、水位差 12m の砂防堰堤において、同設計手法を管配置計画に反映させ、管径 300mm 排砂管を用いた現地実験を実施した。その結果、巨礫の存在による吸引性能の低下により土砂濃度が 2%程度となったが、600m³/日の排砂能力を有する設備となることが確認できた。また、0.1mm～200mm 程度の土砂の排砂実績を得た。これにより、設計手法の妥当性および設計値と同程度の吸引性能を有する設備が現場に配置できることを示すことができた。

DEVELOPMENT OF SUSTAINABLE SEDIMENT MANAGEMENT TECHNOLOGY IN SEDIMENT TRANSPORT SYSTEM

Research Period : FY2016-2021

Program Leader : Director of Hydraulic Engineering Research Group
Hakoishi Noriaki

Research Group : Cold-Region Hydraulic and Aquatic Environment Engineering Research Group (Watershed Environment Engineering Team), Water Environment Research Group(Water Quality and Aquatic Restoration Research Center), Hydraulic Engineering Research Group (River and Dam Hydraulic Engineering Research Team)

Abstract : Consistent comprehensive sediment management from the mountains to the coast is required to solve the safety and operation issues caused by the flow of sediment, and preserve the natural environment and landscape formed by sediment. The development of technology that contribute to the realization of the development and effective sediment management of technology to contribute to the collection and analysis of data related to sediment transport can be found in the still developing stage. For promotion of comprehensive sediment management, we are still in the process of developments of technology for data collection/analysis about sediment movement and technology for realization of efficient sediment management. (1) Development of technology for monitoring sediment dynamics (2) Development of technology for prediction and evaluation for impacts of changes in sediment dynamics on aquatic and terrestrial environments and development of the sediment management technology with these prediction and evaluation (3) Development of technology for sediment management technology using water level difference with the development of technology, we aim to contribute sediment dynamics monitor, survey and prediction of sediment production source, prediction and evaluation for impacts of changes in sediment dynamics on river environment, sustainable sediment management by sediment supply.

Key words : Comprehensive sediment management, Radioactive tracer, Environmental impact, Burrowing type sediment removal suction pipe

12.1 土砂動態のモニタリング技術の開発

12.1.1 粒径別土砂生産量の空間分布評価手法に関する研究

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水環境保全チーム）

研究担当者：村山雅昭、谷瀬敦、水垣滋、村上泰啓

【要旨】

沙流川流域及び隣接する鷓川流域を対象に、平成 28 年（2016 年）8 月豪雨に伴う大規模出水時の浮遊土砂流出量・生産源を明らかにすることを目的に、濁度計による流砂水文観測に加えて、放射性同位体トレーサによる土砂生産源推定を行った。その結果、一連の 4 つの台風に伴う出水期間において、前半（台風 7, 11, 9 号）と後半（台風 10 号）で降雨分布が大きく異なり、沙流川では、前半の 3 つの台風により流域全域から浮遊土砂が生産・流出した一方、後半は局地的豪雨がもたらされた上流域の生産源グループから顕著な浮遊土砂の生産・流出があると推定された。これらのことから、放射性同位体トレーサは浮遊土砂の生産源モニタリングツールとして利用可能なことが示された。

キーワード：平成 28 年 8 月北海道豪雨、浮遊土砂、生産源推定、放射性同位体トレーサ

1. はじめに

平成 10（1998）年 7 月に当時の建設省河川審議会総合政策委員会総合土砂管理小委員会から建設大臣に「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」の答申がなされ、「時間的、空間的な広がりをもった土砂移動の場」を「流砂系」と定義し、流砂系においてそれぞれの河川、海岸の特性を踏まえて、国土マネジメントの一環として適切な土砂管理を行うことが目標にかかげられた¹⁾。これを実践するために、土砂移動に関するデータの収集及び分析や有効な土砂管理を実現する技術の検討及び評価を行うことが求められている。

土砂移動に関するデータの収集及び分析に関して、管理対象となる土砂（ダム堆積土砂、下流の河床材料、海岸砂、沿岸底質、濁質）の粒径に応じた土砂生産、流出、堆積実態をさまざまな時間（出水、季節変動、年々変動）、空間（山地源頭域、小流域、中流域、大流域）スケールで把握すること、すなわち流域スケールで土砂の量、質（粒径）の時空間分布情報を把握することが必須となる。近年、河川上流域から海域まで一貫した研究事例がみられるようになった^{たとえば 2)}。しかし、それらもダムを上流端とした流砂系での事例であり、土砂の生産源（山地）から堆積域（氾らん原、沿岸、海岸）を一連のシステム（流砂系）として捉えて検討された事例は極めて少ない。その要因として、既往の調査手法が領域ごとに設定されているため、流砂系一貫した土砂動態を把握するには限界があることが挙げられる。土砂の一次生産源である山地から海岸

まで、流砂系における土砂生産源の時空間分布を粒径別に評価する新たな調査、解析手法の開発が急務であるが、未だ発展途上の段階にある。

とくに山地上流域からの土砂生産、流出については未解明な部分が多い。山地域は、流砂系の土砂生産源、供給源であり、生産、供給された土砂はその粒径によって輸送される距離が異なる。海岸や沿岸の底質材料となる砂、シルト、粘土といった細粒、微細土砂は、栄養塩のキャリアとしても河川、沿岸生態系において重要な役割を果たす。したがって、流砂系の総合的な土砂管理において、山地で生産される土砂の量、質（粒径）を評価、モニタリングすることはもっとも重要な課題の一つである。

土砂生産量は流域の土砂生産特性の代表的な指標であり、砂防計画やダム堆砂対策を立案する際の基本的かつ極めて重要な情報である。一般に土砂生産量は、砂防、発電、多目的ダム等の堆砂データに基づいて評価されるため、掃流砂や浮遊砂といった比較的粗粒な土砂が対象になる。全国の多数の堆砂データを用いた解析結果から、土砂生産量の主な規定要因として地質特性の影響がよく知られている^{たとえば 3)}。しかし、流域がさまざまな地質で構成される場合、流域内の土砂生産量の空間的な違い（ばらつき）は把握できない。また、ダムがない流域では長期的なデータの蓄積がない場合が多く、土砂生産量の評価も困難となる。近年、濁度計を用いた多地点での同時観測により、浮遊土砂（微細土砂）を対象とした土砂生産量を評価した事例

も報告されているが⁴⁾、観測期間も短く、まだ事例は多くない。このように、流域の土砂生産量の評価は手法により対象粒径がさまざまに異なり、長期的な土砂生産量の空間分布の評価には多大な労力がかかる。したがって、流域内の土砂生産源の空間分布を評価、モニタリングする新たな手法が必要となる。

本研究課題の目的は、流砂系の土砂動態評価、モニタリング手法の一つとして、粒径別に土砂生産量の空間分布を評価、モニタリングする手法を構築、提案することである。まず、流域スケールにおいて粒径別の土砂生産源を定量的に評価するために、対象とする流域の土砂生産流出実態を把握し、土砂生産源推定手法と流出土砂量の観測手法とを組み合わせ、新たな土

砂生産量評価手法を確立する必要がある。さらに、土砂生産量の空間分布特性を評価する手法を開発し、汎用性のある手法として構築、提案することを目指すこととする。

寒地土木研究所では、流域から海域への浮遊土砂流出実態を把握するために、沙流川水系及び隣接する鶴川水系において濁度計観測を用いた流砂水文観測を2011年より継続して実施している。今年度は、平成28年(2016年)8月豪雨による大規模出水時の浮遊土砂生産源を、濁度計観測を用いた流砂水文観測結果と放射性同位体トレーサを用いて明らかにした。

2. 平成28年8月豪雨時の浮遊土砂生産源の評価

2.1 目的

流砂系の総合的な土砂管理において、流域から海域への流出土砂量とともに、その生産源の空間分布は、流域土砂動態の最も基本的かつ重要な情報である。とくに、豪雨や大規模地震に伴う崩壊や地すべりといった大規模土砂生産現象は、その後の土砂流出に長期的に影響を及ぼす可能性があるため⁵⁾、流域末端から海域に流出する土砂が山地のどこから供給されたか、すなわち流域内の土砂生産源を定量的にモニタリングすることが重要な課題の一つとなる。

欧米では、流域から海域に流出する微細土砂を対象に、トレーサ手法を用いた定量的な生産源推定が広く行われている⁶⁾。わが国でも、古くから海岸砂や河床

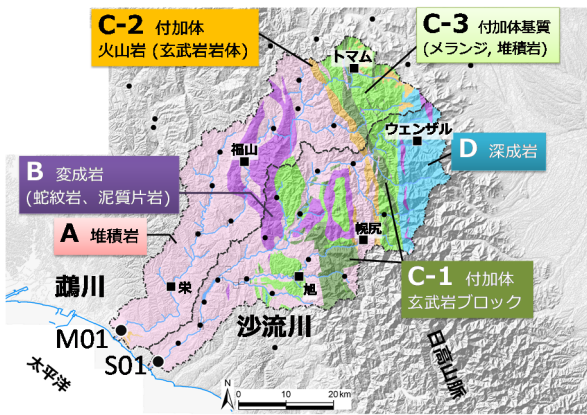


図-1 研究対象流域の観測地点と岩相による生産源区分

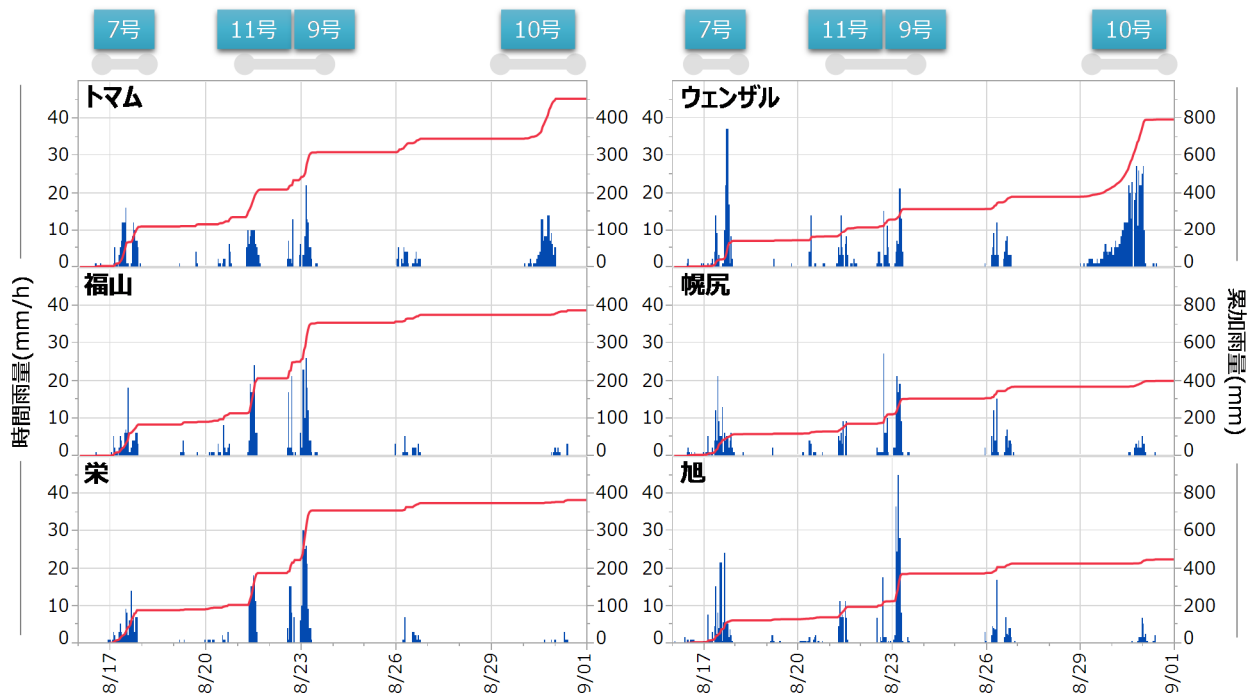


図-2 2016年8月豪雨時の降水量

材料の生産源推定が行われてきたが、大規模な出水に伴う浮遊土砂の生産源寄与度を定量評価した事例は少ない⁷⁾。本研究の目的は、北海道日高山脈周辺で特に降雨が集中した平成 28 年（2016 年）8 月豪雨における、鶴川と沙流川の浮遊土砂流出量・生産源を明らかにすることである。

2. 2 材料と方法

2.2.1 研究対象流域

研究対象流域は、北海道南部で隣接している鶴川及び沙流川流域とした（図-1）。2016年8月の台風来襲時（2016年8月16日～31日）の降水量は、台風7号で103 mm～161 mm、台風11号及び9号で151 mm～252 mmと広範囲で大雨となった（図-2）。一方、台風10号では31 mm～414 mmと地点によるばらつきが大きく、流域の最上流域（ウェンザル）で約400 mmの豪雨（累加雨量で約800 mm）となったが、中・下流域の降水量は小さかった。現地調査を実施したところ、台風10号により大雨となった上流域で表層崩壊や顕著な河道のかく乱を確認している。

2.2.2 調査、分析、解析方法

流域から海域への浮遊土砂流出量を評価するために、鶴川流域はM01地点、沙流川流域はS01地点において後方散乱式濁度計（Infinity Turbi; JFEアドバンテック）及び浮遊土砂サンプラーを設置し、濁度観測と浮遊土砂の採取を行った（図-1）。また、出水期間中に表面採水を行った。濁度観測で得られた濁度連続データは、異常値を除外・補完した後、河川水SS濃度との関係式よりSS濃度に換算し、SS流出量の評価に用いた⁸⁾。

浮遊土砂の生産源推定について、放射性同位体トレーサとしたMizugaki et al. (2012)⁷⁾の方法で行った。岩相で6区分された各生産源グループ（図-1）の浮遊土砂に対する寄与度を推定するため、浮遊土砂サンプラー及び表面採水により採取した浮遊土砂成分の²¹²Pb、²²⁸Ac及び⁴⁰K濃度をガンマ線検出装置により分析した。

2. 3 結果及び考察

図-3 に、沙流川 S01 地点を例に、流量、SS 濃度の観測結果と浮遊土砂の生産源推定結果を示した。7 月下旬の降雨出水時に表面採水した浮遊土砂の生産源寄与度は流量ステージによって変化しているが、台風 9 号による流量ピークと減水期は、ほとんど生産源寄与度が同じであった。一方、浮遊土砂サンプラーで採取された全期間（2016 年 7 月 14 日～9 月 26 日）の浮遊土砂の生産源は、台風 9 号とは異なり、C-3 の寄与度が大きかった。

これらの生産源グループの寄与度を定量評価するため、浮遊土砂量と生産源寄与度を乗じて、生産源グループ別の浮遊土砂流出量（SS 流出量； Q_s ）を算出し、流量（ Q ）との関係を調べた。その結果、生産源グループ別の $Q-Q_s$ 関係を累乗式で回帰することができた（図-4）。この $Q-Q_s$ 式は、表面採水を行った台風 9 号に伴う出水まで適用でき、生産源グループ毎に SS 流出量を評価できる。一方、その後の台風 10 号に伴う出水では、 $Q-Q_s$ 関係がそれ以前と大幅に変化しているため、適用できない。そこで、浮遊土砂サンプラーで採取された全期間（2016 年 7 月 14 日～9 月 26 日）の浮遊土砂の各生産源の寄与度を、濁度計観測により評価した SS 流出量に乗じることで、全期間の各生産源グループからの SS 流出量を算出した。

一連の台風に伴う出水期間において、生産源グループ毎の浮遊土砂流出量の変化を推定するため、生産源グループ毎に、全期間の SS 流出量から台風 10 号より前（BT10）の SS 流出量を差し引くことで、台風 10

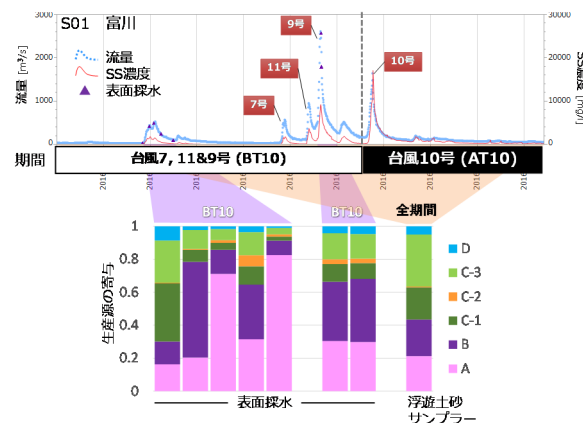


図-3 浮遊土砂に対する生産源寄与度 (S01)

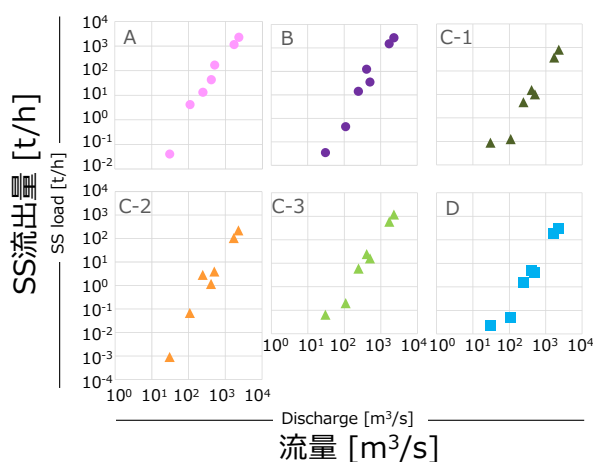


図-4 沙流川 (S01) における生産源区分別の $Q-Q_s$ 関係

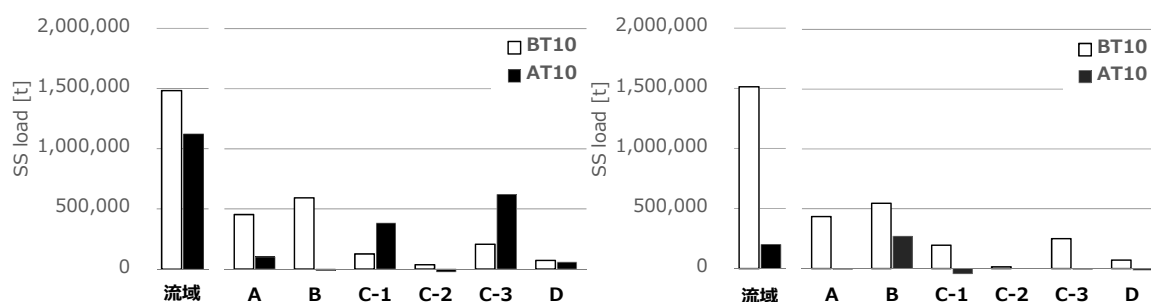


図-5 流域全体と各生産源グループからの浮遊土砂流出量 (左：沙流川、右：鶴川)

号以降 (AT10) の SS 流出量を推定した (図-5)。その結果、沙流川 (S01 地点) では流域からの浮遊土砂流出量が BT10 で 148 万 t、AT10 で 112 万 t であり、AT10 では C-3 や C-1 からの SS 流出量が大きく、上流域が主要な生産源であることを示唆している (図-5 左)。一方、BT10 では B や A といった中・下流域が主要な生産源であったことがわかる。このことは、降雨分布が期別に異なることを反映したものと推察される。

同様に、鶴川 (M01 地点) では、BT10 の浮遊土砂流出量は沙流川と同程度 (151 万 t) で、各生産源グループからの浮遊土砂流出量も類似している (図-5 右)。一方、AT10 の流域からの浮遊土砂流出量は 20 万 t と少なく、主に B から浮遊土砂が生産・流出したものと考えられる。このように、本トレーサ手法は 2016 年 8 月豪雨による土砂生産源の変化を捉えており、浮遊土砂生産源のモニタリングツールとして利用可能なことが示された。

3. まとめ

本報告では、平成28年 (2016年) 8月豪雨に伴う、沙流川及び鶴川流域の浮遊土砂流出について、濁度計による流砂水文観測に加えて、放射性同位体トレーサによる土砂生産源推定手法を用いて、地質による浮遊土砂流出量の違いと出水期間中の生産源の変化を定量的に評価できることがわかった。とくに一連の4つの台風に伴う豪雨出水期間中に、台風7, 11, 9号と台風10号とで降雨分布が大きく異なり、それに伴う浮遊土砂の生産源の変化をとらえることができた。今後の課題として、トレーサ手法で評価した浮遊土砂生産源の空間分布の妥当性について、航空レーザ測量や衛星画像解析等で把握した崩壊地や河道侵食の空間分布等と比較するなど定量的に検証する必要がある。

参考文献

- 1) 山本晃一(編著)：総合土砂管理～流砂系の健全化に向けて～、技報堂出版、東京、386 p.、2014
- 2) 佐藤慎司、宇多高明、岡安徹也、芹沢真澄：天竜川一遠州灘流砂系における土砂移動の変遷と土砂管理に関する検討、海岸工学論文集、Vol. 51、pp. 571-575、2004
- 3) 大久保駿：流出土砂量について—従来の研究の紹介—、土木技術資料 12(7)、pp. 34-39、1970
- 4) 横山勝英、藤塚慎太郎、中沢哲弘、高島創太郎：多点濁度観測による筑後川水系の SS 流出、輸送特性に関する研究、水工学論文集、Vol. 52、pp. 553-558、2008
- 5) 後藤宏二、内田太郎：大規模土砂生産後の流砂系土砂管理のあり方に関する研究、建設マネジメント技術、2012年7月号、pp.49-53、2012
- 6) Collins AL, Walling DE, Leeks GJL: Use of composite fingerprints to determine the provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers, Earth Surface Processes and Landforms, No. 23, pp. 31-52, 1998
- 7) Mizugaki S, Abe T, Murakami Y, Maruyama M, Kubo M : Fingerprinting Suspended Sediment Sources in the Nukabira River, Northern Japan. International Journal of Erosion Control Engineering 5, pp.60-69, 2012
- 8) 水垣滋、園山裕士、谷口徹：鶴川・沙流川水系における濁度計を用いた浮遊土砂観測、第62回 (平成30年度) 北海道開発技術研究発表会論文集、環13(治)、2019

12.2 土砂動態変化に伴う水域・陸域環境影響予測・評価技術、並びに、それらを踏まえた土砂管理技術の開発

12.2.1 土砂供給に伴う河川環境影響評価およびダムからの土砂供給技術の運用手法に関する研究

担当チーム：水工研究グループ（水理）

水環境研究グループ（自然共生研究センター、水質）

研究担当者：石神孝之、宮脇千晴、中西哲

中村圭吾、宮川幸雄、小野田幸生、末吉正尚

山下洋正、平山孝浩、村田里美、鈴木裕識、服部啓太

【要旨】

国土形成計画等において、山地から海岸までの一貫した総合的な土砂管理の推進等が謳われており、これらを推進していくためには、土砂動態のモニタリング、環境影響評価、対策技術を統合した流砂系における持続可能な土砂管理システムの構築が求められている。本研究は、3つの実施内容で構成されている。一つ目は、ダム等からの各種土砂供給手法に伴う土砂動態を予測する技術を開発するとともに、供給土砂によるダム下流河道の河床変動等を予測・評価する技術の提案を目的とするものである。令和元年度は、小渋ダム下流小渋川で平成30年度に発生した大規模出水を対象に、平面2次元河床変動計算を行うとともに、洪水後測量されたレーザープロファイラデータ等との比較を実施した。小渋川はダムおよび土砂バイパストンネルによって、河川に供給される流量および流砂量がコントロールされる。河床変動計算では、このことを考慮し、供給流量は小渋ダム運用実績をもとに与え、供給土砂は土砂量と粒径分布の時間変化を水理模型実験結果等より推定することで与えた。その結果、大規模出水による供給量増加に伴う河床への堆積および流路の侵食を概ね再現できることを確認した。二つ目は、土砂供給に伴うダム下流の水域および陸域のレスポンスの解明を目的とするものである。令和元年度は、土砂供給による水域環境への正の効果として、アユ不漁の一因とされる水中のコケ植物繁茂の抑制効果を検証した。土砂堆積により変動する石礫の露出高（砂面から石礫の頂部までの高さ）に着目し、コケ植物の被度と露出高がアユの摂食行動に与える影響を検証した結果、露出高が高いほどコケ植物の繁茂が確認され、露出高250mm以上でなわばりアユによる選好性が低下した。このことから、土砂供給によってダム下流の石礫の過度な露出が抑制され、アユの生育場が保全される可能性が示唆された。また、陸域環境の評価軸として、土砂供給のインパクトを受けやすいと考えられる河原固有の植物に着目し、その一種である絶滅危惧種ツツザキヤマジノギクの在・不在と物理環境との関係を解析した結果、ツツザキヤマジノギクが生息しているエリアでは生息していないエリアより比高および砂被度が高い傾向であった。三つ目は、土砂供給に伴う河川水質の応答特性を把握するとともに、評価対象項目に関する毒性情報の収集や生物試験の実施により、生態リスク評価を目的とするものである。令和元年度は、安全かつ省力的な化学物質濃度の調査方法として期待されるパッシブサンプリング手法の雨天時河川への適用性を検討した。適用可能性の検討として、薄膜拡散勾配（Diffusive Gradients in Thin-films: DGT）を用いたパッシブサンプリング手法（以下DGT・パッシブサンプリング法）を雨天時の河川で行う観測実験を行い、labile態金属の平均濃度を推定した。また、人力の採水によるサンプルの金属分析を行い、スポットサンプリングによる濃度データとパッシブサンプリングによる推定平均濃度を比較し、パッシブサンプリング手法の妥当性について検討した。その結果、MnとCuではスポットサンプリングによる時間加重平均濃度に対してパッシブサンプリングによる推定平均濃度が1.0-3.3倍の範囲であり、オーダーレベルでの妥当性が確認された。これらの結果から、パッシブサンプリング手法の土砂供給時の適用性が示唆され、本手法を用いることでより現場に即した生態リスク評価が可能となることが期待される。

キーワード：土砂動態、河床変動、河床変動計算、露出高、コケ植物、アユ、河原植物、比高、選好性、生態リスク評価、金属類、形態別存在比率、パッシブサンプリング

1. はじめに

河道改修やダム建設といった流域の開発や治山・砂防による山地の安定によって、河川を流下する土砂の量が減少した、いわゆるhungrywaterの状態となっている¹⁾。流下土砂量の減少が一因となり、河川では河床低下や岩盤の露出が顕在化し、河川内構造物への影響や瀬・淵といった河川が本来持つ微地形の消失が懸念されている。これらの微地形は河川生物の生息場や産卵場に利用されている場合も多く、微地形の消失は河川環境にも負の影響を及ぼすことが懸念される。また、沿岸域でも海浜の後退が起こっており、土砂成分の減少は河川・沿岸全域で大きな問題となっている。一方で、ダム湖や河川狭窄部では土砂の堆積が治水上の課題となっており、定期的な土砂掘削が行われている。さらに、ダム下流では掘削した土砂を環境改善を目的として人為的に供給する取り組みが各地で実施されている。このように流域全体を俯瞰すると、土砂量が過剰な箇所と窮乏している箇所が局在化するアンバランスな状態となっている。

このような背景を受け、2008年に策定された国土形成計画では、「総合的な土砂管理の取組の推進（以下、総合土砂管理）」、いわゆる流域一貫の土砂管理の必要性が謳われ、その解決策として土砂動態のモニタリング、環境影響評価、対策技術を統合した流砂系における持続可能な土砂管理システムの構築が求められている²⁾。2015年に第二次国土形成計画に変更後も、総合的な土砂管理の取組が引き続き推進されており、2019年時点で、全国8地域において総合土砂管理計画が策定され、土砂管理に関する課題への取り組みが進められている。さらに、2019年には、これまで蓄積された総合土砂管理に関する調査・計画策定に係る最新の技術的知見を実務担当者向けにまとめた「総合土砂管理計画策定の手引き 第1.0版」³⁾が公表された。

このような現状においても尚、総合土砂管理の取組が難しい現場もある。山本⁴⁾は総合土砂管理の困難さについて、科学的な不確実性や計画（調整）主体の不在等、様々な面から理由を挙げている。中でも、科学的知見の不足と不確実性は、総合土砂管理計画の策定における判断材料の不足につながり、計画の策定・調整におけるボトルネックとなりうる課題である。この知見とは、具体的には土砂動態およびその変化に対する河川環境の応答に関するに経験的・科学的知見である。河川における土砂動態は主に実験室レベルで蓄えられた知見をもとに、数値計算の技術を現地に適用して将来を予測するものである。しかし、流入土砂量の境界条件は不確実性を大いに伴う上、局所的な河川の流れと土砂動態についても未解明な部分が多い。

土砂動態の変化に対する河川環境の応答については、土砂供給が実施されている現場でのモニタリング調査を通じて事例的に報告されている。これらの中には、例えば、ダム下流で異常繁茂した付着藻類が土砂供給により除去される等の環境改善効果も含まれている⁵⁾。しかし、水域から陸域まで視野を広げた場合の効果の全容については未だ不明な部分も多く、過剰な土砂が下流に供給された場合の治水および環境面への負の影響や、供給される土砂に含まれる重金属などの物質が河川に生息する生物に対する影響に関しても不明な点が多い。このような土砂供給による治水および環境面への未解明のプラス、マイナスのインパクトを明らかにし、土砂動態の予測と環境面での応答をリンクさせることで土砂供給技術の適切な運用、および現場の土砂供給事業の推進に貢献できると考えられる。

本研究では、上記の観点から、以下の三つの点に着目し、研究を実施する。一つ目は、ダム下流の土砂欠乏が顕在化した河川を対象とした土砂供給による河床変動予測技術の開発である。二つ目は、土砂供給に伴うダム下流の陸域および水域のレスポンスの解明である。三つ目は、河川生態系へ影響を及ぼすおそれがある供給土砂に含まれる重金属性物質の安全性の検討である。これらの項目について、本年度実施した研究内容を報告する。

2. 土砂供給方法の違いを考慮した土砂動態の予測技術の開発

ダム下流河道への土砂供給を考えた場合、洪水時に近い土砂供給が理想と考え、一方、ダムでは洪水調節を実施するため、流入量＝放流量にはならないため、洪水調節後の放流量に応じた土砂供給のタイミングや供給量が、洪水時に近い土砂供給手法を選定することが重要と考える。ダム等からの土砂供給方法の違いを考慮した土砂動態の予測技術の開発に関して、2016年度の1次元河床変動モデルを用いて、本検討では、下記に示す供給土砂手法について検討した。

2.1 各供給土砂手法による供給土砂量の設定

洪水時に近い土砂供給手法として、以下の3ケースについて検討した。

- ①土砂バイパス（※単独）
- ②土砂バイパス＋土砂吸引（※土砂吸引はピーク流入量まで運用）
- ③土砂バイパス＋土砂吸引（※土砂吸引は概ねダム無しの

表-1 各ケースの供給土砂量 (単位:千m³)

		ウォッシュロード	浮遊砂	掃流砂	合計	備考
土砂バイパス	ケース①	302	159	350	811	
土砂バイパス +土砂吸引	ケース②	302	214	357	873	土砂吸引はピーク流入量まで運用
	ケース③	302	301	372	975	土砂吸引は概ね流入土砂量(※浮遊砂+掃流砂)になるまで運用

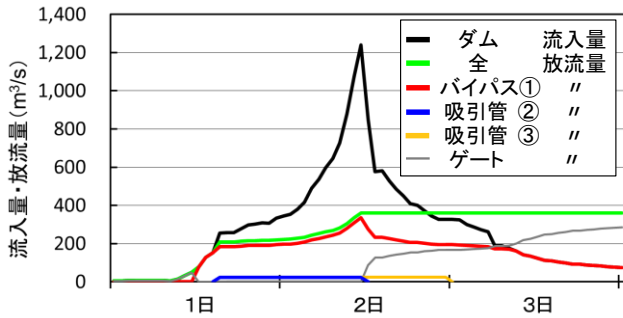


図-1 洪水波形と各設備の放流量

表-2 吸引工法の土砂供給条件

土砂吸引施設	諸元
吸引管径	500mm
管内流速	6m/s
吸引量 (水+土砂)	1.18m ³ /s (1基当たり)
	23.56m ³ /s (20基当たり)
管内体積土砂濃度	10%

表-3 土砂吸引の対象土砂

輸送形態	分類	粒径 No.	粒径区分		代表粒径 (mm)
ウォッシュロード	粘土	1		~ 0.007	0.005
		2	0.007	~ 0.015	0.010
	シルト	3	0.015	~ 0.034	0.023
		4	0.034	~ 0.075	0.051
		5	0.075	~ 0.106	0.089
		6	0.106	~ 0.25	0.163
浮遊砂	砂	7	0.25	~ 0.425	0.326
		8	0.425	~ 0.85	0.601
		9	0.85	~ 2	1.304
		10	2	~ 4.75	3.082
掃流砂	礫	11	4.75	~ 9.5	6.718
		12	9.5	~ 19	13.435
		13	19	~ 37.5	26.693
		14	37.5	~ 75	53.033
	石	15	75	~ 100	86.603
		16	100	~ 150	122.475
		17	150	~ 200	173.205
		18	200	~ 300	244.949
		19	300	~ 400	346.410

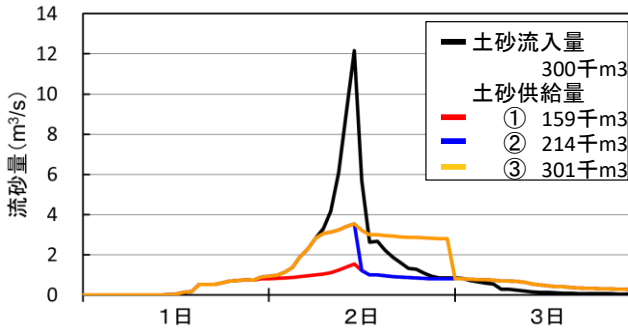


図-2 運用別供給土砂量の時間変化 (浮遊砂)

供給土砂量に相当するまで運用)

各ケースの供給土砂量を表-1に、洪水波形と各設備の放流量を図-1に示す。

なお、ウォッシュロードについては、放流量に応じた供給土砂量となるため、土砂吸引による排出効率も悪いことが想定されることから、各土砂供給手法とも同じとした。また、浮遊砂については、土砂バイパスによる排出効率が掃流砂と比較して悪い(分派堰を通過するため)、土砂吸引により供給土砂量を増加させることとした。最後に、掃流砂については、土砂バイパスによる排出効率が良いため、土砂吸引により供給土砂量を微増させることとした。土砂バイパスの土砂供給量は、既往成果による土砂バイパス運用後の土砂収支図より、貯砂ダム有りのバイパス土砂量に、貯砂ダム上流の堆積土砂をバイパス土砂量とバイパス後土砂量の分担割合でバイパス土砂量分を加味して算

定した。このほか、土木研究所の水理模型実験より、計画波形に対するバイパス流入土砂量と流入土砂量との関係が検討されているが、水理模型実験では、分派堰上流にある貯砂ダムが有る条件で実施しているため、細粒分・粗粒分ともにピーク流量前は、ピーク流量後と比較してバイパスへの土砂の流入が少ない傾向が見られた。本検討では、土砂供給手法の効果を確認することが目的であることから、貯砂ダムが無い状況を想定し、ピーク流量前もピーク流量後と同様に、バイパス流量に応じた土砂量が流入するものと想定した。具体的には、水理模型実験で得られたバイパスへの流入土砂量が、近似式： $Q_s = \alpha Q^{\beta}$ で表されるも

表4 各ケースの供給土砂量

	シルト	砂	礫	合計
土砂量	57 千 m ³	111 千 m ³	48 千 m ³	216 千 m ³
割合	26%	52%	22%	100%

のとし、細粒分はピーク前後とも $\beta=1.2$ （ピーク流量後の再現結果）、粗粒分は $\beta=1$ （ピーク流量後の再現結果）を採用した。ただし、ピーク流量前は、洪水時の流入土砂量を上限値とした（流入土砂量以上は供給できないものとした）。

土砂吸引施設の設定能力は、土木研究所で得られている実験等の知見を参考に表-2のとおりとした。なお、本検討では、20基の設置を想定し、土砂吸引の運用時間は、土砂バイパスで洪水調節を実施する時間（※全量バイパスする時間は除く）のうち、①ピーク流入量までの21時間（ケース②）、②概ね流入土砂量（浮遊砂・掃流砂）が供給可能な時間33時間（ケース③）の2ケースを想定した。土砂吸引の対象土砂は、表-3に示すとおりであり、粘着性が有り、排出効率の悪いウォッシュロードを除く、主に浮遊砂（砂）を対象とした。図-2に各ケースの供給土砂量の時間変化（浮遊砂）を示す。

2.2 各土砂供給手法による土砂動態

各土砂供給手法における土砂収支をウォッシュロードは、流入土砂のうち2~3%が河道内に堆積しているが、概ね土砂供給手法によらず、最下流まで流下し、河道内には堆積しない傾向にある。また、各土砂供給手法の堆積土砂量は、洪水時と比較して55~75%程度と少ない傾向にあるが、ダムで洪水調節を実施していることから、流入量に応じた土砂供給はできないためと考える。浮遊砂は、流入土砂のうち47~59%が河道内に堆積しており、各土砂供給手法とも概ね流入土砂量の約半分が堆積する傾向にある。各土砂供給手法の堆積土砂量は、洪水時と比較して、土砂バイパス単独では55%、土砂バイパスと組み合わせ土砂吸引をピーク流入量まで運用するケースでは87%、土砂吸引をピーク流入量以降も運用するケースで131%程度と、各手法で大きく異なり、土砂バイパスと組み合わせ土砂吸引をピーク流入量まで運用するケースでは、概ね洪水時と近い結果となった。このことから、土砂吸引の運用期間に留意し、土砂バイパスと土砂吸引とを適切に組み合わせ実施することで、洪水時に近い土砂供給が可能であると考えられる。掃流砂は、流入土砂のうち99%が河道内に堆積しており、土砂供給手法によらず、河道内に概ね全量堆積する傾向にある。各土砂供給手法の堆積土砂量は、洪水時と比

較して90~96%程度であり、ほぼ同様な土砂供給が行われている。また、洪水後の河床変動量を図-3に示す。以上から土砂バイパスのみで目標に達しない場合は、技術の組合せで供給量や河床変動量を目標に近づけることが可能となることを示した。

2.3 土砂供給量を変化させた2次元河床変動計算

土砂供給による河川の応答を予測するため、小渋ダム下流小渋川を対象とした2次元河床変動による解析を実施した。解析は、平成30年9、10月に発生した出水を対象とした。なお、解析には汎用河床変動モデルであるiRICのNays2DHソルバー⁶を使用した。本検討は、土砂バイパストンネルから高濃度の土砂が供給され、土砂バイパストンネルの運用によって、供給される土砂の量と、粒度分布といった質が異なる。そのため、Nays2DHの上流からの土砂供給量を任意に変化させることが可能なように改良を施した。

2.3.1 供給土砂量の算定

平成30年度出水を対象に、貯水池上流からの流入土砂量を検討した上で、土砂バイパスの運用を考慮したダム下流河道への土砂供給量を検討する。ここでは、検討に先立ち、平成30年度の土砂バイパス試験運用の概要を整理した。

平成30年度の土砂バイパスの試験運用実績は、7/4~7/5（台風7号）、9/4~9/6（台風21号）、9/30~10/3（台風24号）の3回であった。7/4~7/5の試験運用では、土砂バイパス吐口下流左岸の河岸において被災が発生したため、バイパス放流を途中で中断している。9/30~10/3の運用では、バイパス最大放流量は約195m³/s、バイパス運用時間は約69時間となり、過去（平成28、平成29年度）の試験運用の中でも最大の放流量と最長の放流時間となった。

平成30年度の土砂バイパス試験実績を基に、試験運用前後の年間土砂収支が算定されている。年間土砂収支の概要は下記となる。

- 小渋ダムへの年間流入土砂量（残流域込み、空隙込み）は、約163.7 万m³と推定。
- バイパス放流土砂量は、約21.6 万m³と推定。
- ダムからの放流土砂量は、約6.6 万m³と推定され、

表-5 供給土砂量のパラメータ推定

分類	分類 (土砂収支上)	粒径 No.	粒径区分	代表粒径 (mm)	間隙率	β (一次設定値)	トライアル結果	
							α	β
粘土	シルト	1	~ 0.007	0.005	0.75	2.2	1.4E-08	3.0
		2	0.007 ~ 0.015	0.010	0.70	2.2		3.0
		3	0.015 ~ 0.034	0.023	0.65	2.2		3.0
		4	0.034 ~ 0.075	0.051	0.59	2.2		3.0
砂	砂	5	0.075 ~ 0.106	0.089	0.55	2.2	1.9E-06	2.2
		6	0.106 ~ 0.25	0.163	0.51	2.2		2.2
		7	0.25 ~ 0.425	0.326	0.46	2.0		2.0
		8	0.425 ~ 0.85	0.601	0.42	2.0		2.0
		9	0.85 ~ 2	1.304	0.36	2.0		2.0
礫	礫	10	2 ~ 4.75	3.082	0.30	2.0	2.0E-06	2.0
		11	4.75 ~ 9.5	6.718	0.25	2.0		2.0
		12	9.5 ~ 19	13.435	0.20	2.0		2.0
		13	19 ~ 37.5	26.693	0.15	2.0		2.0
		14	37.5 ~ 75	53.033	0.15	1.0		1.0
石	石	15	75 ~ 100	86.603	0.15	1.0	2.0E-06	1.0
		16	100 ~ 150	122.475	0.15	1.0		1.0
		17	150 ~ 200	173.205	0.15	1.0		1.0
		18	200 ~ 300	244.949	0.15	1.0		1.0
		19	300 ~ 400	346.410	0.15	1.0		1.0

バイパス放流土砂量と併せて約28.6 万m³ が下流河川へ供給されているものとする。なお、H30 年度の試験運用実績では、減勢工内にはほとんど土砂が堆積していない (77m³ 程度)。

以上より、平成30年度の年間土砂収支結果は、総量約21.6 万m³、土砂の質的分布は表-5と推定した。平成30年度では、砂分が全体の52%を占めている。

土砂バイパストンネルによる土砂供給量は、上流の第3貯砂堰での捕捉土砂量や分派堰上流部に堆積した土砂量の影響を受けるため、貯水池上流の流入土砂量から推定することは難しいと考える。従って、本検討では、平成30年度の運用によるバイパストンネル放流量から $Q_s = \alpha Q^{\beta}$ 式で土砂量が表されるものとして推定した。

- 平成30年度の運用実績より、7/4 22:40~7/5 9:10の約10時間、9/4 19:20~9/6 15:30の約44時間、9/30 19:10~10/3 16:30の約69時間を対象期間とした。
- ①の期間のバイパストンネル放流量 (30分データ) を収集。
- 粒径区分・粒径毎の間隙率・ β (一次設定値) は既往成果を踏襲。

推定トライアルの結果、供給土砂量 α および β を表-5ように設定することとした。

2.3.2 計算条件

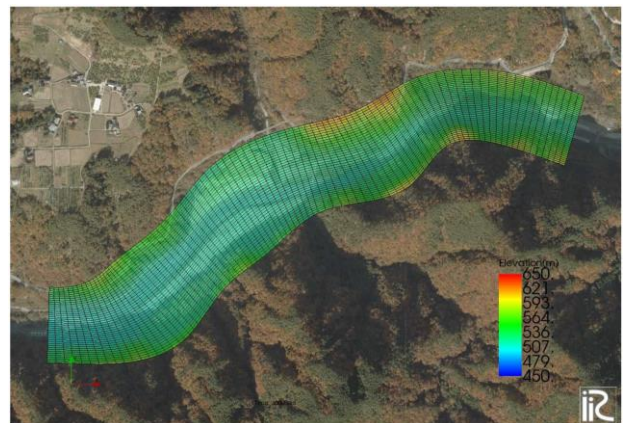


図-3 計算領域

表-6 計算条件

項目	内容	備考
モデル	平面二次元河床変動解析モデル	流砂量式：芦田・道上式
計算対象範囲	第二床止工上流～小渋ダム減勢工下流 (3.06k~4.8k)	
地形条件	平成29年度LPデータ地形 メッシュサイズ： X 約20m、Y 約5m	
時刻間隔 dt	0.05 sec	
流量条件 (上流端)	小渋ダムの実績流量波形	約4日間 (図-5.1.1)
水位条件 (下流端)	0.0k断面における等流水深	河床勾配 i=0.004 (計算区間平均値)
河床材料	・19粒径区分 (0.005~346.4mm) ・3区間を設定	3.06k~3.2k : 3.15k 粒度分布 3.2k~4.0k : 3.45k 粒度分布 4.0k~ : 4.8k : 4.075k 粒度分布
粗度係数	0.040	
層厚	交換層厚：0.2m、移動床厚：0.2m	
給砂条件	上流端に粒径別供給土砂量を設定 (捕流砂)	

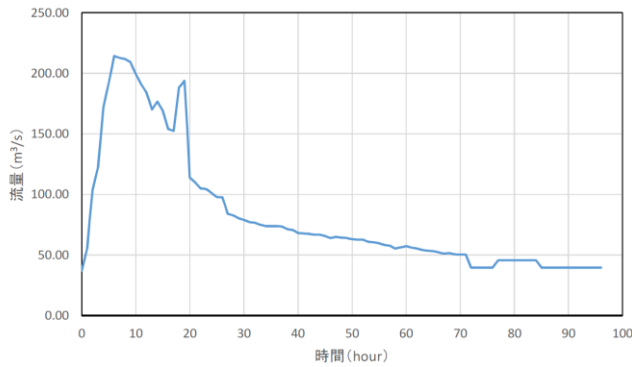


図-4 上流端流入流量の時系列変化

計算範囲は図-3に示す、小渋川第二床止工上流～小渋ダム減勢工下流（3.06k～4.8k）の約1.8kmを対象とした。計算領域は、横断測線及び河道に沿って、河道メッシュを作成し、平面2次元河床変動計算用の河道モデルを作成した。ここでは、河道の縦断方向に約20m、横断方向に約5mのメッシュを作成した。その他の計算条件については、表-6に示す。また、対象とした流量の波形を図-4に示す。

2.3.2 計算結果

計算結果の概略を以下に示す。

- 小渋ダムのピーク放流量210 m³/s 程度の出水であったが、流量ピーク時でも低水路内を流れが生じており、中流の平場は冠水していない。
- 掃流力の平面分布を見ると、計算区間の下流～中流で相対的に低くなっている。
- 河床変動高の平面分布を見ると、掃流力が相対的に小さい計算区間の下流～中流で堆積が進行している様子が見られる。

また、河床変動計算結果の河床高と、レーザープロファイラによる実測の河床変動量について、比較したものを図-5に示す。レーザープロファイラの河床変動量は、出水前後の測量値の差分である。計算結果は、計算結果の河道部の堆積が顕著であったが、側岸侵食の発生程度をある程度再現している。また、下流部における左岸側の侵食および右岸側の堆積を良好に再現している。

土砂バイパストンネルから放流される土砂濃度は高濃度である。そのため、浮遊砂の沈降、巻き上げは沖積河川で考えられるメカニズムとは異なる可能性が考えられる。今後は、土砂濃度に応じた浮遊砂の沈降・巻き上げメカニズムを考慮した浮遊砂の取り扱いを行う予定である。

3. 土砂供給による河川環境のレスポンス

3.1 河床の物理環境と河原植物ツツザキヤマジノギクの在・不在との関係に関する報告

3.1.1 はじめに

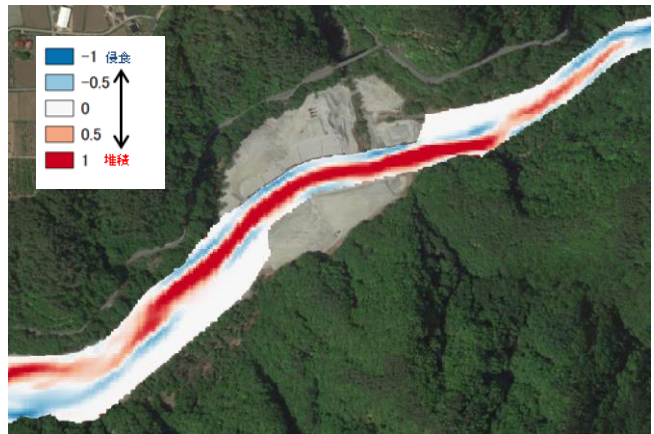


図-5 洪水前後の河床高の変化比較。上：河床変動計算結果
下：レーザープロファイラ計測による差分

日本の急流河川の多くは、砂礫の生産や堆積が盛んなため、被植のまばらな砂礫質の河原が発達する⁷⁾。これらの礫河原は土砂供給量の増減によるインパクトを受けやすく⁷⁾、土砂供給量が減少すると礫河原も著しく縮小する。礫河原には固有の植物（河原植物）や動物が生息しており、礫河原の縮小はこれら河原動植物の生息場の消失も意味する⁸⁾。特にダム下流では河原面積が減少しやすい傾向にあり、土砂供給は河原動植物の生息地再生効果も期待できる。そこで本研究では、陸域環境について、土砂供給量のインパクトを受けやすいと考えられる河原植物を対象に、ダム下流の物理環境と河原植物の応答との関係について解明し、その応答の予測技術の構築とそれを踏まえたダム下流への土砂供給の評価プロセスについて提案を行うことを目的とする。

過年度までの研究によって、土砂供給を開始したダムを対象に現地調査を行った結果、大規模な土砂供給後における陸域の比高（水際との標高差、m）の増大、および比高に応じて陸域で優先する植物種が異なる傾向（植物種によって比高に対する選好性が異なること）が確認された⁹⁾。

このため、河原植物についても、特定の物理環境を嗜好することが推定され、この解明により、物理環境の変化に対する河原植物の応答を予測できることが示唆される。

そこで今年度の研究では、河原植物である絶滅危惧種ツツザキヤマジノギクを対象に、土砂供給により変動すると考えられる河床の物理環境と河原植物の選好性との関係をより詳細に把握することを目的として、河原植物の在・不在のエリアを抽出し、それぞれの河床の物理環境を比較した。

3.1.2 方法

調査地として、2016年度より排砂バイパストンネルによる土砂供給が開始され、下流への土砂供給が実施されている小渋ダム（長野県下伊那郡）を選定した。この地域には、河原植物の一種であるツツザキヤマジノギクが生育しており（図-6 右）、この種を対象とした調査を行った。

具体的には、はじめに、ツツザキヤマジノギクが生育しているエリアとしていないエリア（それぞれ在エリア、不在エリアとよぶ）の2箇所が隣接する場所を選定した。次に、各エリア内に横断2測線をひき、測線上の陸域部の2mごとにおける、50×50 cm コドラート内の物理環境（図-6 左）、すなわち、比高 (m)、河床の被度 (%)、土壌厚 (cm)、を計測した。このとき、比高はトータルステーション（Trimble S3, ニコン社製）を用いて標高を計測し、水際との標高差から比高 (m) を求めた。河床の被度は、河床材料をその粒径から Wentworth の粒径区分に基づき¹⁰、巨石 (256 mm 以上)、石 (64 mm 以上～256 mm 未満)、礫 (16 mm 以上～64 mm 未満)、砂利 (2 mm 以上～16 mm 未満)、砂 (2 mm 未満) の5つに分類し、それぞれのコドラート内に占める割合を10%刻みで目視計測した。土壌厚は検土杖を用いて計測した。同様に、植生に関するデータ、すなわちコドラート内の全植物の植被率 (%)、ツツザキヤマジノギクの在・不在を計測した。このとき、植被率は10%刻みで目視計測した。また、在エリアを対象に、横断2測線のほか、ツツザキヤマジノギクが生育している20のコドラートを抽出し、同様の計測を実施した。計測は、2018年6月および10月の2回実施した。この間、9月に出水があり、小渋ダム下流に排砂バイパストンネルから土砂が供給された。

最後に、調査データをもとに、在・不在エリアおよび時期 (6、10月) の違いに対する物理環境の違いを二元配置分散分析で解析した。このとき、 $p < 0.05$ で有意差があると判定した。また、ツツザキヤマジノギクの在・不在に関するベストモデルの抽出のため、在・不在を目的変数 (在を1、不在を0と判定) とし、河床に関する各物理環境を説



図-6 (左) 調査コドラートの一例

(右) 河原植物ツツザキヤマジノギク近影

明変数とした一般化線形モデルを作成した場合のAIC (赤池情報量基準, Akaike's Information Criterion) を算出した。AICはモデルの妥当性を評価する際に用いられる指標であり、モデルのあてはまりの良さと用いる変数の少なさを統合した指標で、AICが小さいほどあてはまりが良い効率的なモデルであることを示す。これらの解析ソフトには R (ver.3.5.0) を用いた¹¹⁾。

3.1.3 調査結果および考察

二元配置分散分析の結果、比高について、在エリアの方が不在エリアより有意に高く、時期 (6、10月) による有意な違いは見られなかった (図-7)。砂被度は在エリアの方が不在エリアよりも有意に高く、10月の方が6月より有意に高かった (図-7)。このほか、エリア間で有意差があったのは、礫被度 (在の方が低い)、時期間で有意差があったのは、巨石被度 (10月の方が低い) のみであった。

9月に土砂供給が行われたことから、このときに堆積した土砂の影響により、10月の方が6月より砂被度が高くなった。これは10月の巨石被度が6月より低くなったこととも矛盾しない。在エリアの砂被度の方が不在エリアより有意に高かったことから (図-7)、土砂供給による細粒土砂の堆積は、ツツザキヤマジノギクの生息ポテンシャルを高めることが予測される。一方、土砂供給前後で比高に有意な差は確認されなかったものの、在エリアで比高の平均値がやや上昇しており (図-7)、今回の調査では土砂供給が比高の変化を通じてツツザキヤマジノギクの在エリアを不在に変えるような影響は見られなかった。

また、解析の結果、最もAICが小さい組み合わせは、比高、砂被度、土厚であった。また、単独の変数では、比高が最もAICが低くなった。このことから、河床の物理環境において、比高の違いがツツザキヤマジノギクの在・不在に最も寄与することが示唆され、比高が高いほど在の傾向が高まると推定される (図-8)。比高が高いほど在の傾向が高まる理由としては、比高が低い水際近辺は増水による冠水頻度が高く、攪乱を受けやすいためと推定される。一般にはツツザキヤマジノギクは二年生植物といわれてお

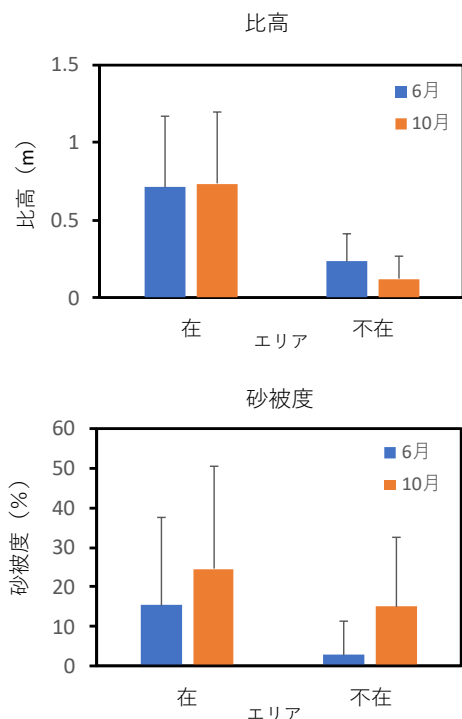


図7 小渋ダム下流におけるツツザキヤマジノギクの在・不在エリアおよび土砂供給前後 (6、10月) に対する河床の物理環境の違い (河床の物理環境のうち、比高、砂被度の結果のみ掲載。エラーバーは標準偏差を表す。)

り、ある程度安定した環境が必要と考えられる。また、他の変数では砂被度や土厚が選定されたことから、河床表層の細粒子もツツザキヤマジノギクの在・不在に影響を及ぼす可能性がある。

本研究では、ツツザキヤマジノギクの在・不在のエリアで比較を行ったが、ツツザキヤマジノギクの選好性の分析にあたっては、在・不在よりも詳細なパラメータ、すなわちコドラー内株数、1株あたりの花数、ロゼット幅等の生育しているツツザキヤマジノギクの状態についても観測・分析が必要であり、今後調査、分析を予定している。

3.2 土砂供給前後の水域の環境と付着藻類の変化

3.2.1 はじめに

ダムからの土砂供給事業の本格化に向け、人為的な土砂供給に対する河川生物の応答を把握し、予測可能な指標として土砂動態とリンクさせることが喫緊の課題といえる¹²⁾。過年度までの研究によって、水産有用魚種のアユの採餌場として石礫の露出高 (砂面から突出した高さ)¹³⁾の選好性を調べる事で、許容される露出高の最小値 (5cm程度) を提示した¹⁴⁾。一方、河床の粗粒化に伴う石礫の極度な露出は、安定的な河床環境を形成し、付着藻類などの異常繁

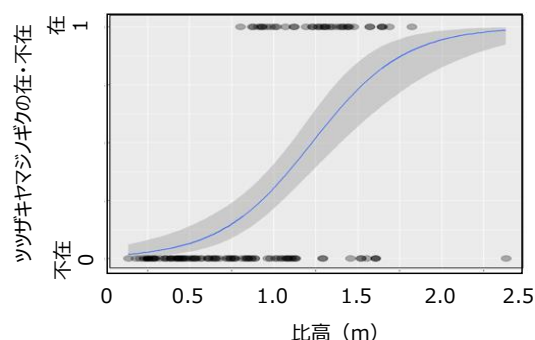


図8 比高に対するツツザキヤマジノギクの在・不在のロジスティック回帰結果 (小渋ダム下流の調査事例、青色は回帰曲線、灰色塗部は95%信頼区間を表す。)

茂を生じる一因とされ、アユの餌の質の低下につながる¹⁵⁾。

そのため、藻類が異常繁茂し、餌環境が劣化する露出高の閾値を明らかにできれば、アユの採餌環境を保全する際の露出高の上限が提示できる。これにより、人為的な土砂供給による石礫の埋没と砂の移動による攪乱作用の必要性について整理することが可能となり、総合土砂管理を推進する客観的な根拠となる。

そこで本研究では、矢作川のダム下流におけるコケ植物 (蘚類) を用いて、なわばりアユに許容される露出高の最大値を検討した。調査地 (詳細は後述) で確認されているコケ植物は、ニブハタケナガゴケ (*Ectropothecium obtusulum*) とアオハイゴケ (*Rhynchosetegium riparioides*) の2種で、前者は常に水中の礫上に生育する種である¹⁶⁾ことから、本調査で確認された蘚類はニブハタケナガゴケと推測されている¹⁷⁾。その繁茂の抑制効果の検証のために矢作川研究所によって設置された石礫 (コケ植物の付着していない) 投入の実験区¹⁷⁾を部分的に利用し、コケ植物の被度がアユによる採餌場所の利用に及ぼす影響の有無について検証するとともに、コケ植物の被度と石礫の露出高がアユの摂食・なわばり行動に与える影響について整理した。

3.2.2 方法

調査地として、コケ植物の繁茂が顕在化している矢作川の阿摺ダムの約700 m下流の地点を設定した (図-9)。2018年8月に主に潜水目視調査によってデータを収集した。アユについては食み跡、縄張り防衛行動 (群れアユとの区別として)、体サイズを計測した。石ごとにコケ植物の被度、石の長径、露出高について記録するとともに、水理条件 (流速、水深) も計測した。アユに関するデータを用いて、コケ植物の被度がアユによる採餌場所の選好性に及ぼす効果を検証した。また、物理環境を用いてその要因を探索した。さらに、コケ植物の被度と露出高に対するアユの選択



図-9 調査地点の全景

指数（礫上のアユの食み跡から導出）を算出し、そのメカニズムを考察した。

3.2.3 調査結果および考察

石礫投入区では周辺区よりも縄張り防衛行動を示したアユが多く（石礫投入区： 3.5 ± 1.29 、周辺区： 0.5 ± 1.23 ；U-test、 $p = 0.02$ ）、その体サイズも大きかった（同 13.09 ± 1.55 、 12.08 ± 1.44 ；U-test、 $p < 0.02$ ）。この結果から、石礫投入区はなわばりアユに選好されていることが示唆された。

物理環境に着目すると、石礫の大きさや露出高については違いがなかったが、石礫投入区ではコケ植物の被度が低かった（石礫投入区： $0.946 \pm 2.592\%$ 、周辺区： $14.573 \pm 25.335\%$ ；U-test、 $p < 0.01$ ）。また、選択指数を算出した結果、露出高の増加によって採餌場所としての選好性は高まったが、ある一定（約 250 mm ）の露出高を越えると選好性が低下し忌避された（図-10）。一方、コケ植物の被度については、その増加に伴い一貫して選好性が減少し、 50% 以上では忌避された。このことから、今回の調査地点では、露出高への選好性に加え、コケ植物の被度の高さを介した選好性への効果も含めた結果として、アユが採餌場所を利用していると考えられた。露出高とコケ植物の被度との間には有意な正の相関がみられ（Spearmanの順位相関、 $\rho = 0.43$ 、 $p < 0.01$ ）、露出高が増加するほどコケ植物の被度が増加した。この理由として、低層部を流れる掃流砂が露出高の高い箇所では届きにくく、掃流砂が礫表面を通過する際に生じる摩耗効果が少ないこと¹⁹が影響している可能性がある。

本研究によって、アユの採餌場所として不適なコケ植物の被度が定量化され、それに付随した露出高の最大値（約 250 mm ）も定量化された。したがって、ダム下流の河床が粗粒化し石礫の露出高が大きすぎる場合には、アユの餌として不適なコケ植物が繁茂し、アユの採餌環境劣化させる可能性がある。これは、露出高の最大値の設定に利用可能な知見として活用できるものの、あくまで一事例としてその適用範囲には留意する必要があるといえる。今後、さ

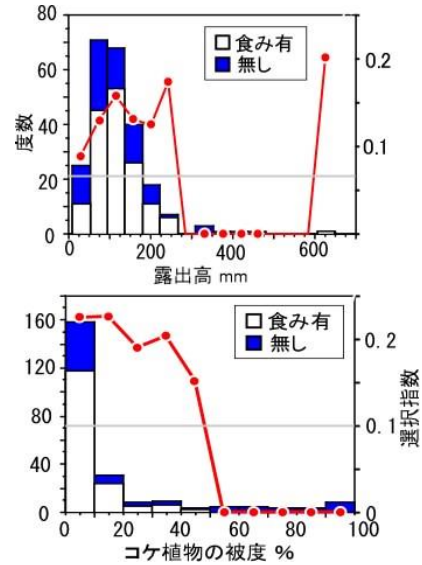


図-10 矢作川における露出高およびコケ植物の被度に対する採餌場所としての選好性

らなる調査・実験による検証を行うことで、より多くの知見を踏まえた露出高の許容範囲の最大値を設定できるといえる。また、過年度までの露出高の最小値を提案した成果と合わせることで、アユの採餌環境を対象とした露出高の許容範囲の設定に貢献できる。そして、土砂供給による攪乱作用の必要性についても露出高を用いた評価が可能となり、今後の総合土砂管理を支援する成果が得られたと言える。

3.2.4 謝辞

本研究を行うにあたり、矢作川研究所の皆さまには、過年度の礫供給実験の情報や現地情報など、多くの有益な情報を提供いただいた。本研究の一部は、公益財団法人河川財団の河川基金の助成を受けて実施されたものである。ここに記して深謝する。

4. 土砂供給による水質のレスポンス

4.1 はじめに

ダムの維持管理において、貯水池の堆砂は大きな問題の一つでありさまざまな排砂の方法が検討・実施されている。排砂した土砂をダムの下流河川に投入する場合、投入された土砂は河川の河床環境や生物相を改善させる正の効果が期待される。一方で、堆砂土砂には、ダム貯水池に堆積した後に吸着したものを含め金属等の化学物質が含まれるため、下流河川に投入された土砂から溶出した化学物質が、その河川に生息する生物に影響する負の効果の可能性が考えられる。そのため、土砂を下流河川に供給する際には、供給土砂から溶出した化学物質による水生生物への影響の可能性を評価する必要がある。また、供給した土砂に

より、溶存酸素や濁度などの水質項目が変化することで、河川に生息する水生生物に影響を与えることが考えられる。

本研究課題では、土砂供給により水質等に与える影響項目（金属類、貧酸素等）について、室内外の試験等により河川水質への応答特性を把握するとともに、評価対象種について影響項目に関する毒性情報の収集や生物試験を実施することにより、生態影響評価を行い、土砂供給に伴う水域環境のレスポンスの解明と予測・評価技術の開発を目的とする。

土砂供給時には上記の通り、供給土砂から重金属類等の化学物質の溶出が懸念され、水中の土砂濃度増加に伴う水質変動をモニタリングすることが求められる。一方で、置土や排砂バイパスなどの土砂供給手法においては雨天時の掃流力によって土砂が流下するため、水質調査を行う場合は降雨時となり、現場河川における人力の採水には安全性の観点から困難が伴う。降雨時に実施可能な調査手法として、自動採水機による採水やセンサー類による水質モニタリングなどが挙げられるが、人力の採水を伴わない調査手法としてパッシブサンプリングが近年注目を集めている。パッシブサンプリングは水環境中にディスク等の捕集剤を一定期間設置することで、捕集された対象物質の時間平均濃度を推定する手法であり、現地で採水を行わずに対象物質の環境中の平均濃度を推定することを目的としている。既往研究では平水時の河川等へ適用例が存在するが¹⁹⁾、流速やSSが増加した雨天時の水環境への適用事例はほとんどない。

平成29年度以前の検討ではダム貯水池底質を用いた金属溶出実験などを行い、土砂供給時の水質変動項目として金属濃度を把握することの重要性を示した。平成30年度では、パッシブサンプリングの土砂供給時河川における適用性の基礎検討として、生物が利用可能な形態であるlabile態金属を捕集する薄膜拡散勾配（Diffusive Gradients in Thin-films: DGT）を用いたパッシブサンプリング手法（以下DGTパッシブサンプリング法）による濁水中金属類のモニタリングについて室内実験で検討を行った。実験ではスポット採水測定で得られたlabile態濃度との間に良好な相関が示され、濁水中でのパッシブサンプリングの適用可能性が確認された。

今年度はSS濃度や流速が増加した雨天時実河川でのDGTパッシブサンプリング法の適用方法及び、DGTパッシブサンプリング法による平均濃度推定の妥当性について、観測実験を行い検討した。

4.2 方法



写真-1 DGTユニット取り付け用の観測機材



写真-2 現場河川での浸漬の様子



図-11 河川観測実施地点

表-7 実施した河川観測

No	日時	DGTユニットの設置時間(h)	設置期間中の総降雨量(mm)
①	11/18-19	20.5	9.00
②	11/22-25	73.5	73.75
③	12/2-3	24.0	12.50
④	2/20-21	24.0	0

4.2.1 DGTパッシブサンプリング法の雨天時河川への適用方法について

パッシブサンプリングに使用した薄膜拡散勾配測定ユニット（DGTユニット）はDGT Research社製のLSNM-NPを使用した²⁰⁾。LSNM-NPは11種の金属（Ag、Al、Cd、

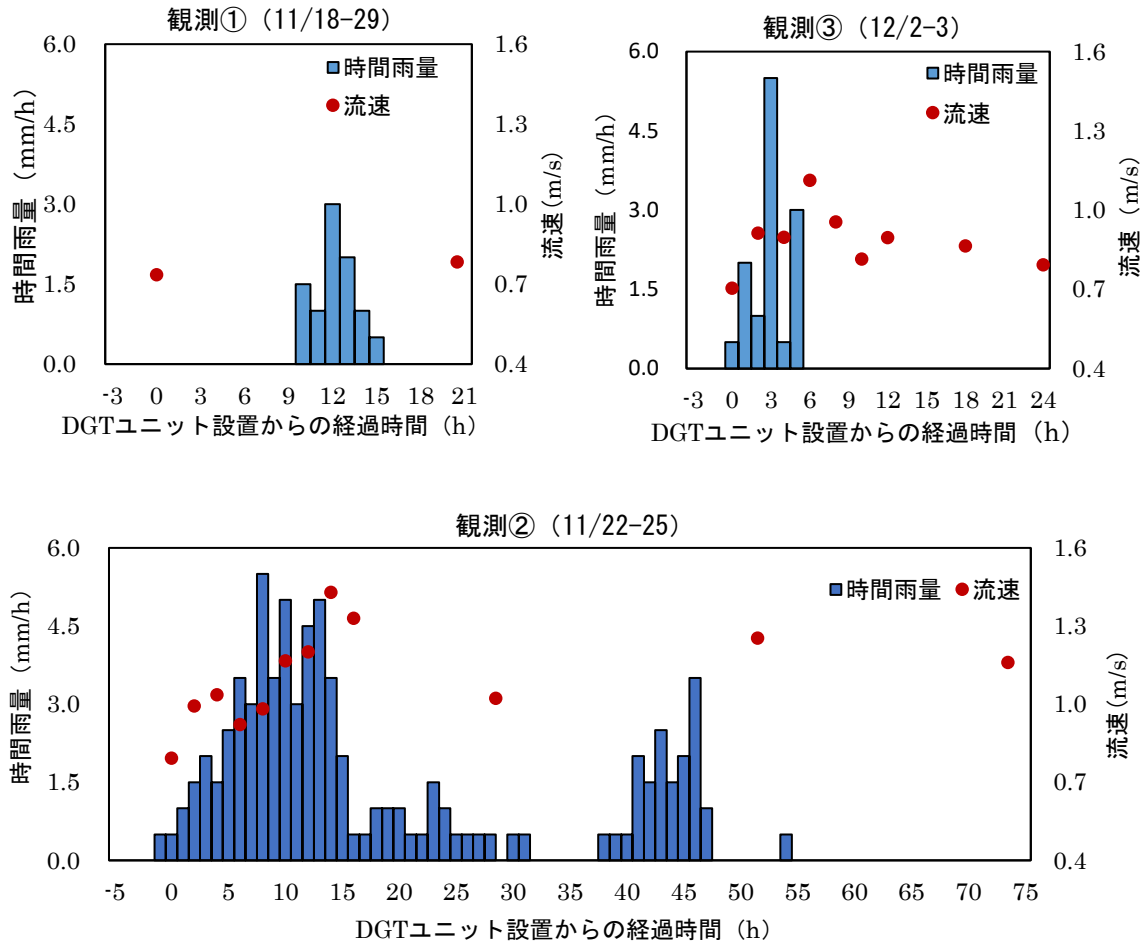


図-12 雨天時河川の観測における雨量と流速の変動

Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) を対象として濃度推定が可能である。DGTパッシブサンプリング法では事前にキレート剤の吸着能を調整する必要があるため、マニュアルに記載された方法に従いDGTユニットにコンディショニングを実施した²⁰⁾。コンディショニング後のDGTユニットは、写真-1に示す通水のために穴をあけた塩ビパイプの中に設置した。現場河川ではそれらのパイプを浮体式の観測機材にとりつけ、写真-2に示すようにDGTユニット河川に浸漬した。DGTユニットの浸漬時間は既往研究では24時間で行われている例が多く^{21,22)}、本研究では現場河川の状況を踏まえつつ、20-80hを目安にDGTユニットの浸漬を行った。

DGTユニットは河川より回収後、キレート剤を取り出し、マニュアルに記載された方法に従って、前処理を行った²⁰⁾。前処理を行い得られた溶出液は後述の金属分析に供した。

4.2.2 雨天時河川における観測について

雨天時河川における観測地点は、恋瀬川流域の下川橋付

近で行った。観測実施地点を図-11に示す。この地点は事前の調査で雨天時に流速とSS濃度の変動を確認して選定した。DGTパッシブサンプリング法を用いた観測は雨天時に3回、平水時に1回行った。観測の一覧を表-7に示す、雨量データは調査地点近隣の気象庁柿岡観測所のデータを用いた。また、現地ではDGTパッシブサンプリング法による濃度算出のために水温と流速の測定を行った。加えて、橋梁上からバケツを用いたGrabサンプリングにより水試料を採取し後述の分析に供した。Grabサンプリングの頻度は観測①では設置時と回収時に採水を行った。事前の降雨確率が高かった観測②と③の降雨開始直後は2時間おきに採水を行い、降雨開始から12時間後以降は24時間に1回以上の頻度で採水を実施した。観測④では6時間おきに採水を行った。

4.2.3 水質・金属類の分析方法

現地にて採取した水試料は実験室に持ち帰り、水質項目としてSS、VSS、DOCの測定を行った。また金属については全量とlabile態の2形態についての分析を行った。全量

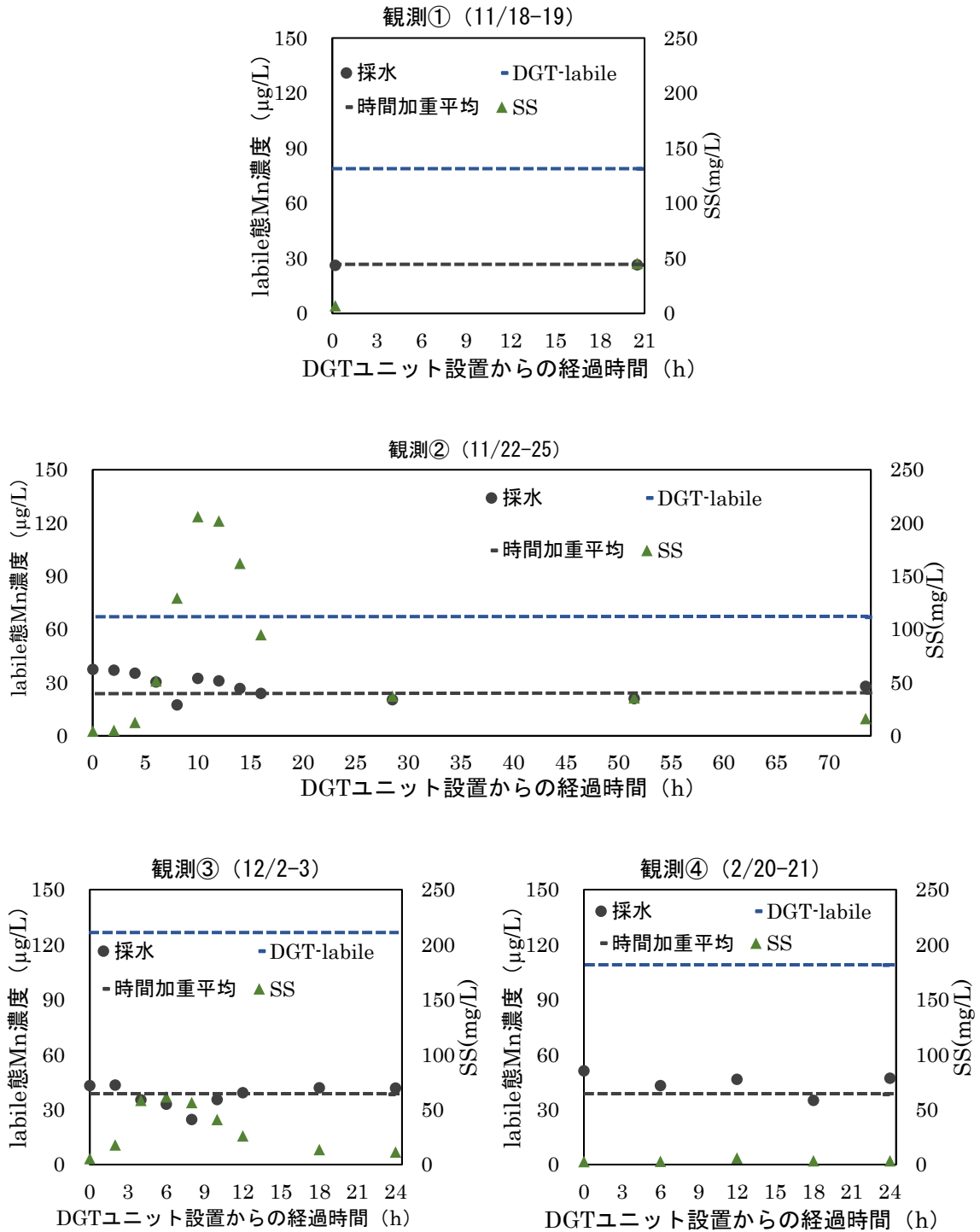


図-13 labile態Mn濃度とSS濃度の時間変化

の分析では硝酸を用いたホットプレート分解による前処理をほどこした。labile態については現地にて0.45 μmフィルターを用いてろ過を行い、ろ液をキレート樹脂 (MetaSEP CH-1、GLサイエンス社製) に通液し、キレート樹脂から金属を溶出後、硝酸を用いたホットプレート分解による前処理を行い測定に供した。全ての前処理済み

試料の測定においてICP-MS (X7CCT, Thermo Fisher Scientific) を使用し、金属12種 (Li、B、Ti、V、Cd、Cr、Mn、Ni、Cu、Ag、Cd、Pb) の濃度を定量した。

DGTパッシブサンプリング法による水中のlabile態平均濃度 (DGTlabile態平均濃度) の算出方法は昨年度報告書と同様に行った⁹⁾。

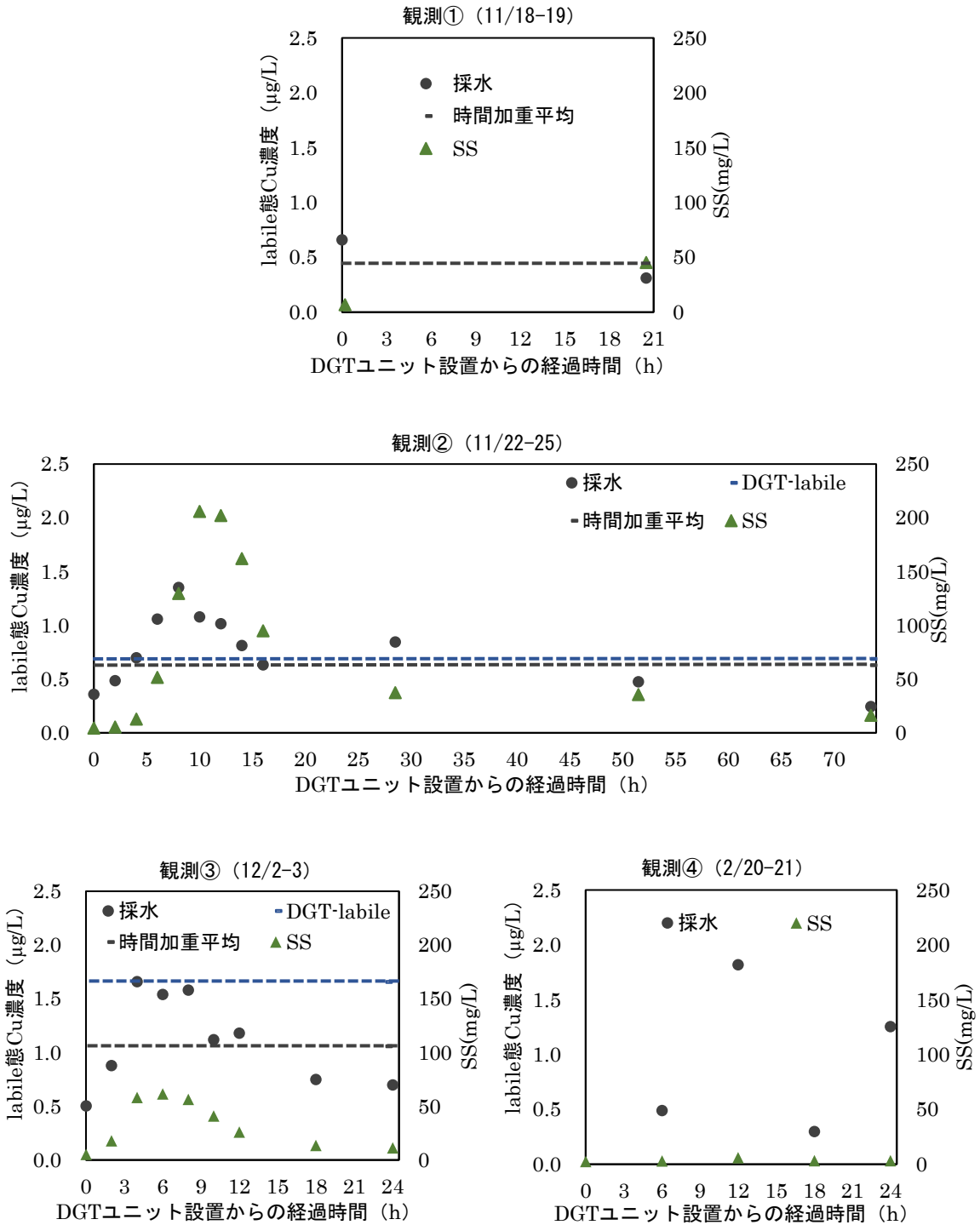


図-14 labile態Cu濃度とSS濃度の時間変化

4. 3 結果と考察

4.3.1 DGTパッシブサンプリング法の雨天時への適用性に関する結果

雨天時の観測①~③における、降水量と流速の関係を図-12にしめす。今回実施した観測の中では流速及び時間雨量が最も大きかったのは観測②であった。また、観測①~

③ではDGTユニットに物理的な機能不全は見られず、後述のとおり必要な水質濃度データが取得できていたことからこれらの観測条件下においてパッシブサンプリング手法が適用可能であることが確認された。

4.3.2 DGTパッシブサンプリング法によるDGTlabile態平均濃度の算出結果

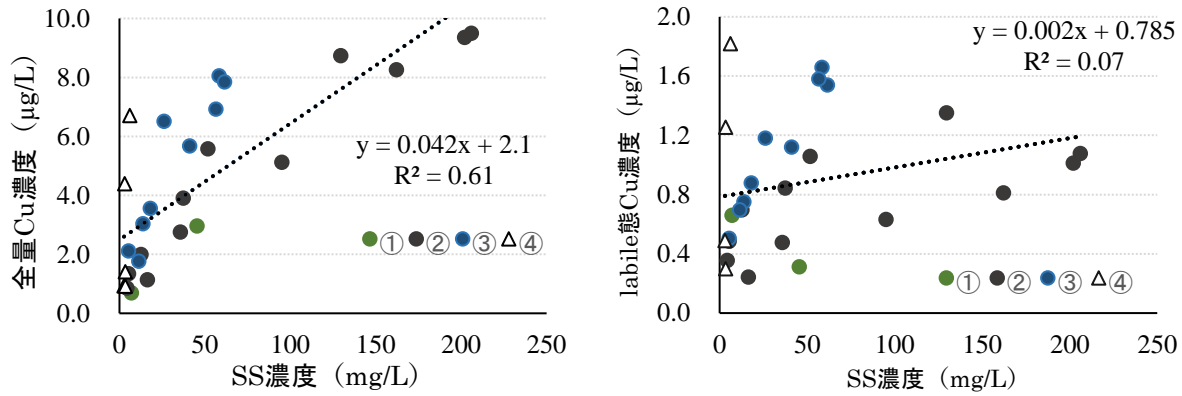


図-15 全量Cu濃度とlabile態Cu濃度のSS濃度との関係

観測の結果DGTユニットの抽出液に対して定量下限値以上を示すものはMnとCuのみであったため、これら二つの金属を以下では対象とした。分析の対象かつLSNM-NP対象である他の金属6種 (Ag、Ni、Pb、Cd、Co、Cr) では採水試料のlabile態金属濃度についても多くが定量限界値以下を示したため、本研究で実施した観測においてはDGTパッシブサンプリング法による算出が難しいと考えられた。

観測①～④における、採水試料のlabile態Mn濃度とSS濃度の関係を図-13に示す。また、各グラフに算出されたDGTlabile態平均濃度と採水試料の分析値の時間加重平均濃度をそれぞれ破線で示した。DGTlabile態平均濃度と採水試料の時間加重平均濃度を比較した際には、①～④すべてにおいてDGTlabile態平均濃度は時間加重平均濃度を上回っており、それらの比率は2.77-3.30倍であった。また、MnとSS濃度の関係について、採水試料のlabile態Mn濃度はすべての観測で20-60 µg/Lの範囲であり、SS濃度の変動に対するlabile態Mnの変化は見られなかった。

観測①～④における、採水試料のlabile態Cu濃度とSS濃度の関係を図-14に示す。また、各グラフにはDGTlabile態平均濃度と採水試料の時間加重平均濃度をそれぞれ破線で示した。観測①と④のDGTlabile態平均濃度のCu濃度は定量下限値以下であった。④については採水した水試料でも定量下限値以下を示したものが存在したため、時間加重平均濃度は算出しなかった。CuのDGTlabile平均濃度は時間加重平均濃度を上回っており、それらの比率は観測②で1.09倍、観測③で1.57倍であった。また、観測②と③では、SS濃度の増加に伴うlabile態Cuの増加傾向が見られた。すべての観測における全量Cuおよびlabile態CuとSSの関係を図-15に示す。SS濃度と全量Cu濃度では一定の相関関係がみられるが、観測②と③では比例関係の傾きに差が出る傾向が見られた。また、SS濃度とlabile態Cu

濃度では相関関係が得られず、観測②と③では全量Cu濃度と同様にSS濃度との比例関係の傾きに差が出る傾向が見られた。これらのことから出水ごとにlabile態Cu濃度の流出特性は変化すると考えられた。

MnとCuともにDGTlabile態平均濃度が採水試料の時間加重平均濃度より高い値を示す傾向が見られた。また、Mnについては採水試料のlabile態Mn濃度全てよりもDGTlabile態平均濃度が高い値を示していた。これらのことから、MnのDGTlabile態平均濃度が過大評価になっている可能性が考えられた。Cuについては観測②で1.09倍を示し、採水試料のlabile態Cu濃度の最大値がDGTlabile態平均濃度を超えているため、算出濃度については妥当性が示された。観測③については、4-8 hの間にDGTlabile態平均濃度と同じ程度のlabile態Cu濃度を示しているが、9 h以降では濃度が減少傾向であったため、濃度を過大評価している可能性が考えられた。これらの結果からDGTパッシブサンプリング法はMnとCuでは1.09-3.30倍程度の過大評価を示すことが考えられたものの、生物影響の検討に必要なオーダーレベルの推定が可能であり、安全側のリスク評価時に適用できる濃度情報が得られることが示された。

今年度に行った雨天時観測は最大でも雨天時の1時間降水量が5.5 mm/h、期間中の平均降雨量が1.0 mm/hと出水のスケールとしては小～中規模なものであると考えられた。今後はより降水量の大きい雨天時における観測や土砂供給を実施中のダム下流河川における観測を行い、土砂供給時河川におけるDGTパッシブサンプリング法の実用化に向けた検討をしていく予定である。

5. まとめ

本研究では、土砂供給に伴う土砂・水質の動態、そして土砂供給が陸域における生物および水域における生物に

及ぼす影響について調査を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 土砂バイパスのみで目標に達しない場合は、置き土や排砂管といった技術の組合せで供給量や河床変動量を目標に近づけることが可能となることを示した。
- 土砂バイパス下流河川の河床変動量の予測技術の開発のため、小渋川を対象に高濃度の土砂を供給した際の二次元河床変動計算を実施し、レーザープロファイラデータと河床高の比較を実施した結果、計算結果には河道の堆積が見られるものの、全体的には良好に再現できていることを確認した。
- 陸域において、土砂供給のインパクトを受けやすいと考えられる河原植物の一種ツツザキヤマジノギクの在・不在と河床環境との関係を解析した結果、ツツザキヤマジノギクの在のエリアでは不在のエリアより比高および砂被度が有意に高く、これらがツツザキヤマジノギクの選好性に寄与することが示唆された。
- 水域において、なわばりアユおよび水中のコケ植物の被度と露出高との関連を解析した結果、露出高が高いほどコケ植物の繁茂が確認され、露出高250 mm以上でなわばりアユによる選好性が低下し、コケ植物の被度の高さが一因と考えられた。
- 水生生物に直接影響を及ぼすとされる形態 (labile態) のモニタリング手法として、DGTパッシブサンプリング法の適用可能性を雨天時河川において検討した。その結果、DGTパッシブサンプリング法が雨天時河川に適用可能であることが確認された。加えて、採水による水試料の時間加重平均濃度とDGT-labile平均濃度の比率はMnで2.77-3.30倍、Cuで1.09-1.57倍であり、現場河川中の平均濃度を生物影響の検討に必要なオーダーレベルの推定が可能であり、リスク評価時に使用する濃度情報が得られることが示された。

参考文献

- 1) Kondolf G.M. : Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels, Environmental Management Vol. 21, No. 4, pp. 533-551, 1997
- 2) 国土交通省 : 国土形成計画 (全国版)、2015
- 3) 一般財団法人国土技術研究センター : 総合土砂管理計画策定の手引き 第1.0版、2019
- 4) 山本晃一編著 : 総合土砂管理計画流砂系の健全化に向けて、技報堂出版、2014

- 5) 坂本博文、谷崎保、角哲也 : 河川土砂還元を組み合わせた真名川ダム弾力的管理試験「フラッシュ放流」、河川技術論文集、Vol.11、pp.273-278、2005
- 6) iRIC Project HP : <http://i-ric.org/ja/> (令和2年3月閲覧)
- 7) 池田裕一、飯村耕介、高村智史、木原検貴 : 礫河原保全事業後の植生管理が出水時の流況に与える影響に関する基礎的研究、環境システム研究論文発表会講演集、Vol.44、pp.99-104、2016
- 8) 村中孝司、鷺谷いづみ : 鬼怒川礫質河原における外来牧草シナダレスズメガヤの侵入と河原固有植物の急激な減少 : 緊急対策の必要性、保全生態学研究、Vol.6(2)、pp.111-122、2001
- 9) 土木研究所 : 平成30年度研究開発プログラム報告書「12.2.1 土砂供給に伴う河川環境影響評価およびダムからの土砂供給技術の運用手法に関する研究」、2019
- 10) Wentworth C. K.: A scale of grade and class terms for clastic sediments, The Journal of Geology, Vol.30(5), pp.377-392, 1922
- 11) R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- 12) 萱場祐一、森照貴、小野田幸生、宮川幸雄、末吉正尚 : ダムからの土砂供給が下流河川に生息する水生生物に及ぼす影響・効果の予測・評価手法の提案、土木技術資料、Vol.58、No.10、pp.30-35、2016
- 13) 小野田幸生、堀田大貴、萱場祐一 : 土砂供給に伴う河床環境変化の評価に向けた露出高による石礫の埋没度の定量化、河川技術論文集、Vol.24、pp.343-348、2018
- 14) Hotta T, Onoda Y, Miyagawa Y, Sueyoshi M, Kayaba Y: Relationship between exposure height of stones and feeding behavior of ayu in a large experimental flume. In Proc. 12th International Symposium on Ecohydraulics, 2018
- 15) 矢作川研究所 : 平成 28 年度豊田市矢作川研究所シンポジウム記録 天然アユが元気に暮らす川づくり、矢作川研究、No.22、pp.69-106、2018
- 16) 内田朝子 : 矢作川の水中に生えるコケ、豊田市矢作川研究所 Rio、No. 204、p.6、2017
- 17) 白金晶子、内田朝子、山本敏哉 : 矢作川の河床改善実験によるアユの生息場環境の回復—実験の概要と物理環境・藻類について—、矢作川研究、No.23、pp.35-39、2019
- 18) Luce, J. J., Steele, R., & Lapointe, M. F.: A physically based statistical model of sand abrasion effects on

12 流砂系における持続可能な土砂管理技術の開発

- periphyton biomass. *Ecological Modelling*, Vol.221(2), pp.353-361, 2010
- 19) 益永茂樹：河川水中重金属の生物利用性に与える存在形態と共存物質の影響、河川整備基金助成事業報告書、助成番号 24-1211-011、2013
- 20) DGT Research Ltd. : Practical guide for using DGT for metals in waters.
- 21) 内藤航、森美和子、岩崎雄一、加茂将史、益永茂樹：薄膜拡散勾配 (Diffusive Gradients in Thin-films: DGT) 法を用いた河川水における金属類の生物利用性の評価、水環境学会誌、Vol.34、No.2、pp.65-71、2011
- 22) 永井孝志、恒見清考、川本朱美：河川水中における重金属のスペシエーション: Diffusive Gradients in Thin-films 法による分析と化学平衡モデルによる推定、陸水学会誌、Vol.68、pp.391-401、2011

12.3 自然エネルギーを活用した土砂管理技術の開発

12.3.1 吸引管を用いたダムからの土砂供給技術に関する研究

担当チーム：水工研究グループ（水理）

研究担当者：石神孝之、宮川仁、宮脇千晴、高田翔也

【要旨】

本研究は、ダムにおける上下流の水位差エネルギーの活用により、無動力でダム堆積土砂を吸引し、ダム下流へ土砂供給する「潜行吸引式排砂管」を開発することによって、適切な量と質（粒径）の土砂を制御しつつ必要とされる河道区間に土砂を供給する新たな土砂運搬システムを実用化することを目的としている。令和元年度では、以下の成果が得られた。

- ① 塵芥等の前処理システムの開発においては、先端部に回転スクリーンを付けたドレッジアーアタッチメントを大成建設㈱との共同研究で開発した。このアタッチメントは、巨礫等を含む土砂から細粒土砂を分別吸引し、先端開口度とスクリーン回転数の組合せにより濃度調整を可能とするもので、最大水深 50m 時でも土砂濃度を 8%程度に制御して 50m³/h を吸引できる能力を確認した。
- ② 潜行吸引式排砂管の吸引性能の向上の検討については、昨年度実施した管径 300mm 排砂管の室内実験結果の分析を行った。管径 300mm の流量・土砂濃度計測装置を用いても時間当たり 50m³/h の排砂が可能であることを確認するとともに、昨年度の結果と比較することで流量・土砂濃度計測装置の有効性を確認した。また、排出される土砂濃度と管内流速の関係を把握し、吸引部、排砂管のサクション部、水平部等の区間毎の管損失の評価を行った。これにより、排砂管の設計において、これまで不明であった、排出土砂濃度などの違いによる管損失を求めることができ、管内流速が算定できることから潜行吸引式排砂管による排砂設備の設計が可能となることを示した。
- ③ 吸引管による土砂供給技術の実用化の検討については、潜行吸引式排砂管を用いた排砂設備の設計手順を検討した。同検討では、高落差において 300mm 潜行吸引式排砂管を運用する場合には、負圧の発生を抑制手法として、管径を途中で小さくさせる管配置を提案した。これにより、水位差 12m、管長 70m の施設において、土砂濃度 3%で 820m³/日の排砂能力を有する設備として設計できることを示した。さらに、水位差 12m の砂防堰堤において、同設計手法を管配置計画に反映させ、管径 300mm 排砂管を用いた現地実験を実施した。その結果、巨礫の存在による吸引性能の低下により土砂濃度が 2%程度となったが、600m³/日の排砂能力を有する設備となることが確認できた。また、0.1mm～200mm 程度の土砂の排砂実績を得た。これにより、設計手法の妥当性および設計値と同程度の吸引性能を有する設備が現場に配置できることを示すことができた。

キーワード：ダム貯水池、堆砂対策、潜行吸引式排砂管、吸引工法、水中施工技術

1. はじめに

国土形成計画（全国計画）等において、山地から海岸までの一貫した総合的な土砂管理の推進等が謳われている。ダムで土砂が捕捉されることにより、下流の河床の粗粒化などの河床環境への影響が懸念されている。実用化されているダムからの土砂供給技術は、下流河川の水域のみならず陸域の環境に影響を与えると同時に、ダムにおける適用条件も厳しく貯水池運用にも影響を与えることやコスト、労力、時間も多くなるのが現状であり、これらの影響を軽減して運用できる土砂供給技術が確立されていない。このため、

下流河川の環境改善に適切な質・量の土砂を必要とされる河道区間に運搬することを可能にする効率的、効果的なダムからの土砂供給技術が求められている。

そこで、土木研究所では、ダム貯水池の堆砂対策およびダム下流の流砂環境の保全・改善のために、より広範な貯水池運用条件に適用可能かつ経済的な土砂供給手法として、ダムの上下流における水位差エネルギーを活用し、無動力でダム貯水池の堆積土砂を吸引するフレキシブル管を用いた排砂手法（通称：潜行吸引式排砂管（以下、吸引管））の開発を行っている。これまでの検討により、巨石、塵芥や粘性のほぼ無い

砂礫は小規模落差でも下流へ供給可能であることを確認している¹⁾³⁾。また、吸引管を用いて適切な量と質（粒径）の土砂を制御しつつ下流河川の環境改善に必要とされる土砂を必要とされる河道区間に供給する新たな土砂運搬システムの実用化することを目的に研究を実施している。

吸引管の構造を図-1に示す。フレキシブル管をU字形に折り返したような形状で、一方を取水口とし、折り返し部（以下、吸引部（鉄製））の管底面に不透水性のシートを貼り、吸引部の管底面等と上流部の管底面に穴を設けて土砂の吸引口とする簡易な構造となっている。また、吸引管の操作イメージを図-2に示す。まず、①吸引管を堆砂の表面に設置し、吸引管下流のゲートを開くことにより、堆砂を吸引・放流する。②堆砂はすり鉢状に崩れながら吸引され、吸引部は堆砂中に潜行していく。吸引部が底面に達した後も土中で吸引部と上流部の管底面に設置された穴から土砂を吸引、すり鉢状に排砂され続け、③最終的には再び堆砂の表面に吸引部が現れる仕組みを想定している。

塵芥等の前処理システムの開発については、先端部に回転スクリーンを付けたドレッジャーアタッチメントを共同研究で開発した。

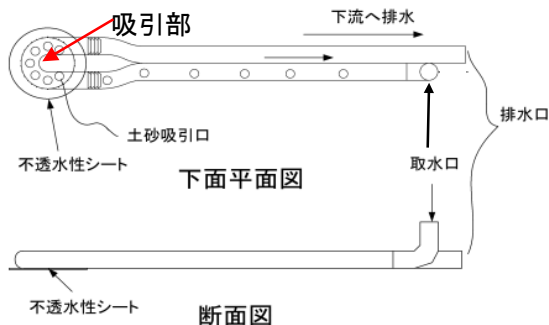


図-1 潜行吸引式排砂管の構造図

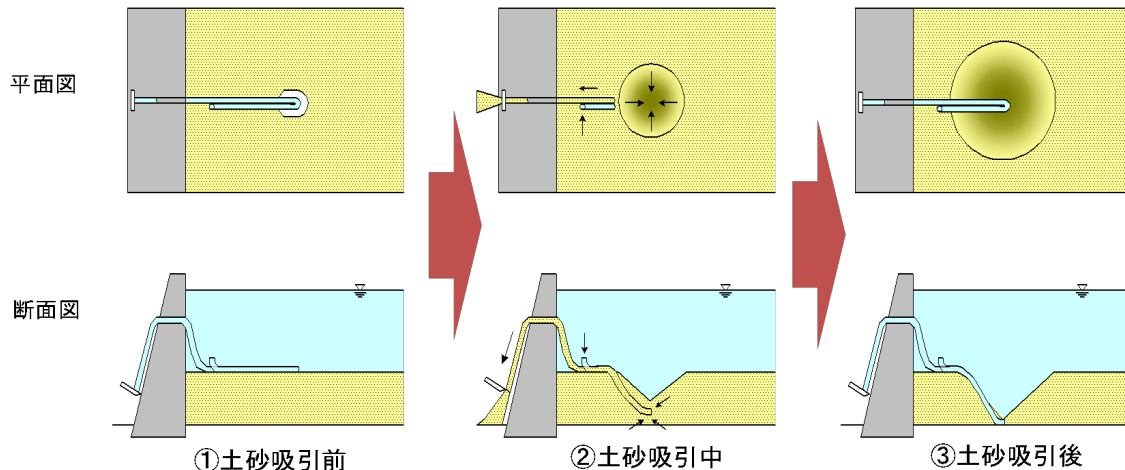


図-2 潜行吸引式排砂管の操作イメージ

潜行吸引式排砂管の吸引性能の向上の検討については、昨年度実施した管径 300mm 排砂管の室内実験結果の分析を行った。結果の分析においては、流量・土砂濃度計測装置（以下、土砂濃度計測装置）の有効性を確認した上で時間当たりの排砂量や排出される土砂濃度と管内流速の関係を把握するとともに、管損失の評価を行った。加えて、過年度の管径 100mm 排砂管の実験結果と比較を行い、管損失に及ぼす管径の違いによる影響の評価も行った。

吸引管による土砂供給技術の実用化の検討については、潜行吸引式排砂管を用いた排砂設備の設計手順を整理した。そして、水位差 12m の砂防堰堤において、設計を行い、管径 300mm 排砂管を用いた現地実験を実施し、設計手法の妥当性および吸引性能を確認した。以下、詳細を述べる。

2. 塵芥等の前処理システムの開発

2.1 吸引困難な塵芥等の前処理システムの検討

塵芥等の前処理システムの開発については、これまでダム湖内の土砂を潜行吸引式排砂管によって出水時に排砂する手法を大成建設㈱との共同研究を通じて検討してきた。具体的にはシャフト式水中作業機（TiROBO UW）等を使って貯水池内に土砂ピットを構築し、沈木・巨石・塵芥等を取り除いた土砂をピットに集積して一時ストックする前処理技術の開発を行ってきた⁴⁾⁵⁾。ここでは令和元年度までに前処理作業を効率的に行うために新たに開発したドレッジャー（分別吸引）アタッチメントについて紹介する。

2.1.1 ドレッジャー（分別吸引）アタッチメント検討手順と開発要件

ドレッジャー（分別吸引）アタッチメントの開発・検討期間は2年間とした。平成30年度では、小型サ



図-3 プロトタイプモデルアタッチメントの全体と先端部



図-4 吸引前土砂（自然堆砂）の状況



図-5 片桐ダム現場実験の状況



図-6 巨石、沈木の分別吸引状況

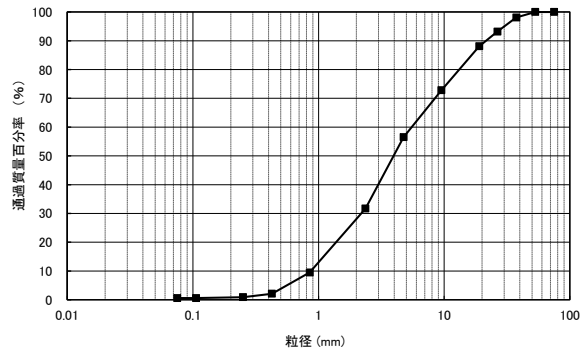


図-7 吸引後の粒度分布

イズのプロトタイプモデルで設計と試作を行い、現場実験等により仕様・構造・性能を確認するとともに機械仕様や構造面での課題を抽出した。令和元年度では、実装モデルでの改良設計と改良アタッチメントの製作及び性能試験を行い、課題の改善状況と実用ベースの作業能力を確認した。なお、アタッチメントの検討においては、潜行吸引式排砂管で排砂可能な土砂粒径を分別できるスクリーン機構を有し、水深 50m からでも浚渫可能なポンプ性能を有しかつ水中作業機に搭載可能な重量 (2.5t 以内) に収めることを開発要件とした。

2.1.2 プロトタイプモデルによる現場実験

①プロトタイプモデルの仕様

プロトタイプモデルは、汎用リース品である口径 150 mm、出力 26kW、吐出量 2.0m³/分のボルテックス型水中サンドポンプをベースとし、吸引先端にケーシ

ング回転式スクリーン (最大開口幅 100 mm) と掻き寄せビットを有する構造とした (図-3)。

②現場実験概要

試作したプロトタイプモデルにおけるスクリーンの有効性及び連続運転による土砂濃度 (体積濃度) を確認するため、図-4 に示す 100mm を超える礫が存在する長野県片桐ダム貯水池内の堆積土砂をポンプ吸引して上流沈砂池まで輸送 (輸送距離 100m) する実験を行った。なお現場実験では、水中作業機の代用機として 0.8m³ 級水陸両用バックホウを使用した (図-5)。また管径 200mm の土砂濃度計測装置⁶⁾を使用してリアルタイムで管内の流量と圧力、土砂濃度の確認を行った。

③実験結果と課題

図-6 に示す水中カメラ映像及び図-7 に示す沈砂池へ吸引後の土砂の粒度分布から、ポンプ先端のスク

12 流砂系における持続可能な土砂管理技術の開発



図-8 管閉塞の状況

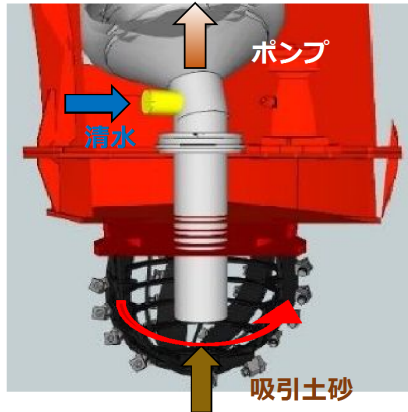


図-9 改良モデルの機構図



図-10 試験で使用した土砂

リーンにより概ね 60 mm 以上の礫と木材を除去しながら高濃度の土砂を分別吸引できることを確認し、スクリーンの有効性を確認できた。また、連続運転時の土砂濃度は 10% 程度で、吸引能力 $25\text{m}^3/\text{h}$ (プロトタイプモデルでの目標性能の 80%) を確認できた。しかし、吸引時の土砂濃度急増による流速低下や礫の噛み込みによる配管閉塞が発生 (図-8) し、①吸引粒径と配管径のバランス、②流速低下に対するポンプ能力、③吸引時の土砂濃度管理が課題として抽出された。

2.1.3 アタッチメントの改良検討

プロトタイプモデルの現場実験における課題を踏まえ、実装モデルでは以下の 3 項目の変更・改良を行った。

①スクリーン最大開口幅とポンプ口径の見直し

ポンプ口径 150 mm に対して最大スクリーン幅を 100 mm としていたことが礫噛み込み閉塞の原因と考えられ、口径を 200 mm、スクリーン開口幅を 60 mm に変更した。

②サンドポンプ能力の増強

吸引時の土砂濃度増加に伴い配管抵抗増による流速低下が、後述する堆積限界流速を下回ると配管閉塞を起こす。このため、サンドポンプ出力を増強して流速低下要因を軽減し、口径 200 mm、出力 55kW、吐出量 $6.0\text{m}^3/\text{分}$ の水中攪乱型サンドポンプに変更した。

③土砂濃度抑制機構の追加

実験では、オペレータから水中の土砂吸引状況が見えないため、砂の吸引過多による配管閉塞を防止するために土砂濃度計測値を確認しながらアタッチメントを上下させていた。このため土砂濃度が安定せず吸引効率が下がること、土砂濃度急増による配管閉塞を完全に排除できない問題があった。これを解決するため、二重管方式による清水吸引構造とし (図-9)、吸引管先端の開口度とスクリーンの掻込み回転数により土砂吸引量を制御するものとした。

2.1.4 改良アタッチメントの性能確認実験

①実験概要

図-10 に示すスクリーンの開口幅を上回る大きさの礫を含む 4 種類の土砂を混合した土砂によりアタッチメント製作工場内の試験水槽を使用し、ポンプ吸引した土砂スラリーを配管輸送 (配管延長 150m) 後に水槽へ戻して循環させる方法で性能確認実験を行い、土砂濃度の制御状況と土砂吸引能力の確認を行った (図-11)。

実験ケースは、先端開口度を 3 ケース (46, 62, 80%)、スクリーン回転数を 3 ケース (20, 40, 60rpm) とし、プロトタイプモデル時と同様にポンプ吐出時の流量と圧力、土砂濃度を計測した。

②実験結果

清水のみと土砂吸引した場合の実験結果を表-1 に示す。

(a)ポンプ出力と口径を 150mm から 200mm に変更したことによる管内流速低下の抑制

プロトタイプモデルの現場実験では土砂濃度 10% 時、流量が清水時と比べて 2 割以上低下していたが、ポンプおよび口径を変更したことで流量低下

表-1 改良モデルの性能確認実験結果

先端開口度(%)		46%			62%			80%		
スクリーン回転数(rpm)		20	40	60	20	40	60	20	40	60
清水のみ	流量(m ³ /分)	9.55	9.59	9.53	9.44	9.44	9.48	9.57	9.54	9.57
	圧力(MPa)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
土砂	流量(m ³ /分)	9.13	8.92	8.69	8.38	8.27	8.55	8.71	8.59	8.39
	土砂濃度(%)	6.8	7.6	9.0	10.3	10.7	8.5	10.7	11.4	11.0
	圧力(MPa)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.10	0.11	0.11	0.11

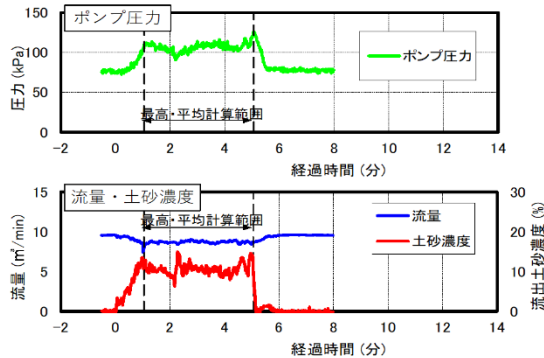


図-11 各測定値の経時変化
(先端開口度 80%, 20rpm)



図-12 潜行吸引式排砂管 (φ300mm) の設置状況

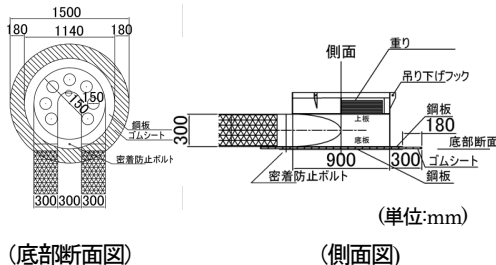


図-13 潜行吸引式排砂管 (φ300mm) 吸引部の構造

を1割に抑えることができた。これより配管閉塞に繋がる流速低下を抑制できることが確認できた。

(b) 吸引管先端開口度の違いによる土砂濃度の影響

先端開口度を絞れば、吸引流速が上がり土砂濃度が増加すると想定していたが、結果は同一回転数で比較すると開口度を絞ることで土砂濃度にわずかな上昇は見られるが、その影響は小さいことがわかった。

(c) スクリーン回転数の違いによる土砂濃度の影響

スクリーン回転数を上げれば、土砂の掻き込み量が増加して土砂濃度が上昇すると想定していたが、40rpm 以上では遠心力で掻き込み量が減少し、濃度が逆に小さくなる傾向となった。

(d) 流量・土砂濃度の経時変化

図-11 は先端開口度 80%, 回転数 20rpm の測定結果である。土砂濃度は 10% 程度で安定していることを示しており、土砂濃度抑制機構の効果が表れた結果となった。

2.2 まとめ

巨礫等を含む土砂から細粒土砂を分別吸引し、先端開口度とスクリーン回転数の組合せにより濃度調整可能なドレッジアーアタッチメントが完成した。これにより最大水深 50m 時のポンプ揚水能力 (6.9m³/分) から換算すれば、土砂濃度を 8% 程度に制御して浚渫能力 50m³/h を実現できると考えている。

3. 吸引管における吸引性能の向上の検討

3.1 管径300mm室内実験による検討

開発中の潜行吸引式排砂管について、これまでの検討において、実際のダムでの堆砂対策技術として活用可能な規模が明らかとなっていないことや排砂管の施設を設計する上で必要となる管損失の評価ができていない。

そこで、昨年度実施した安価に製作できる最大規模の管径300mmについて室内実験の結果の詳細を分析し、土砂濃度計測装置^①の有効性を確認した上で時間当たりの排砂量や排出される土砂濃度 (以下、排出土砂濃度) と管内流速の関係を把握するとともに、管損失の評価を行い、排砂管の設計法を示す。また過年度報告書^②の管径100mmの実験結果と比較を行い、管径の違いによる管損失の評価も行った。

管径300mmの排砂管の堆砂設置状況と吸引部の構造を図-12, 図-13に示す。排砂管は、フレキシブル管材を U 字状に曲げたような形状となっており、曲がり部 (以下、吸引部) は鉄材、吸引部の上下流管はサクシオンホース、吸引部の底面には不透水性のシート、吸引部と上流管の底面には管径の半分の大きさの土砂吸引口を配している。管径300mmの排砂管の吸引部の直径は1.5mで、吸引部底面に直径150mmの土砂吸引口を7個、上流管底面に直径150mmの土砂吸引口を250mm間隔で5個配置しており、吸引部の重量は約700kgである。

3.1.1 実験概要

① 実験方法

実験の状況を図-14に示す。また、実験は図-15に示す水槽で実施した。排砂管は、土砂を水槽内に床板から約 2.5m の高さまで投入した後、土砂表面上に設置

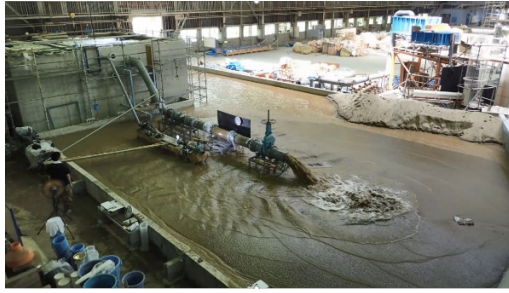


図-14 実験中の様子

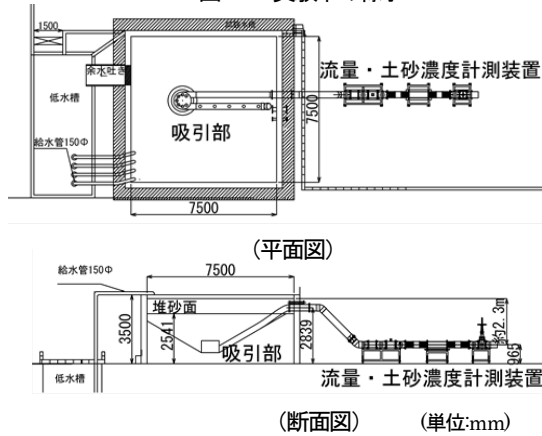


図-15 実験施設概要図

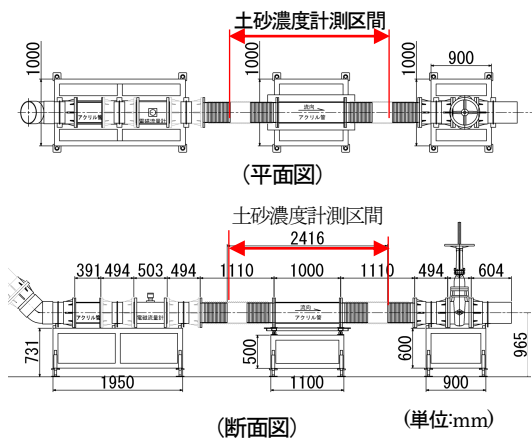


図-16 土砂濃度計測装置と止水バルブ

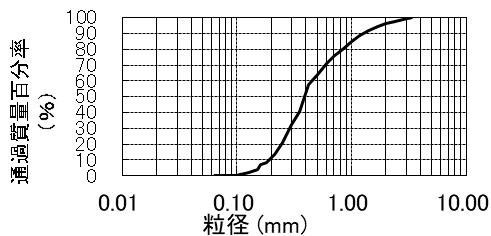


図-17 実験土砂の粒度分布

した。この高さを初期河床高 (吸引部深度 0m) とする。排砂管と水槽外の管径 300mm の塩化ビニル管を接続し、下流に図-16 に示す土砂濃度計測装置、管終端部に止水バルブ (スルースバルブ) を設置した。過年度報告書^⑥と同様の方法で給水、管終端部との水位差を約2.3m程度確保する。管終端部は床板から約1m

に位置し、吸引部が床板に到達すると管終端部より低くなる。土砂は図-17 に示す粒径 0.053mm~3.35mm で構成される平均粒径 0.55mm の混合粒径砂を使用した。なお、本研究で言う土砂濃度とは、(1)式で示す体積土砂濃度を指す。

$$C = V_s/V \quad (1)$$

ここにC:体積土砂濃度、 V_s :土粒子の実質部分の体積(m³)、V:土砂混じりの水の体積(m³)を表す。

実験は、バルブを全開にして開始し、吸引部での土砂吸引と自重により潜行する条件で実施し、表-2 の項目を計測した。実験終了は吸引部の深度が概ね床板に到達し、吐口から排出される土砂濃度が概ね1%未満とした。

以上の実験から管径300mmの土砂濃度計測装置の有用性、排砂量、土砂濃度と管内流速の関係、管損失について分析した。

②管径300mm土砂濃度計測装置の土砂濃度計測方法
過年度報告書^⑥では管径100mmの土砂濃度計測装置の有用性を確認した。ここでは管径を300mmに拡大した場合の土砂濃度計測装置の精度検証を行った。図-16 に示す濃度計測区間の重量を荷重計で計測することで、管内の土砂濃度 (以下、管内土砂濃度) の清水のみと土砂混合時の重量の比から(2)式により管内土砂濃度に換算した。この管内土砂濃度 C_1 について、管内に土砂の堆積がない場合は排出土砂濃度と一致するが、土砂が堆積した場合は排出されない (移動していない) 土砂の重量 (濃度) が含まれるため排出土砂濃度とは異なる。このため、堆積した場合に(3)式~(5)式で管内土砂濃度を補正し排出土砂濃度を推定した。なお、解析では秒単位で取得した計測値は流体が概ね5秒で吸引部から吐口部まで到達することを踏まえ5秒平均値を採用した。

$$C_1 = \frac{W}{\frac{W_w}{\rho_w} - 1} = \frac{W_w - 1}{\gamma_s - 1} \quad (2)$$

$$S = R^2 \cos^{-1} \left(\frac{R-a}{R} \right) - (R-a) \sqrt{R^2 - (R-a)^2} \quad (3)$$

$$Ra = 1 - \left(\frac{S}{R^2 \pi} \right) \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{1}{Ra} \left[\left(\frac{W_w - 1}{\gamma_s - 1} \right) - (1 - Ra)(1 - \varepsilon) \right] \quad (5)$$

$$Ra = 0.37882v - 0.13646 \quad (6)$$

$$Ra = 0.3247v - 0.3506 \quad (7)$$

ここに、 C_1 :管内土砂濃度または排出土砂濃度、W:土砂混合時の流体荷重(g)、 W_w :水のみ荷重(g)、 ρ_w :水の密度(g/cm³)、 ρ_s :土砂の密度(g/cm³)、 γ_s :土粒子

比重、 S :堆積断面積(cm^2)、 R :管半径(cm)、 a :堆積厚(cm)、 Ra :流積比、 ε :空隙率(0.4)、 v :管内流速(cm/s)、 C_2 :堆積層が生じた際の排出土砂濃度を表す。

表-2 実験計測項目

計測項目	計測方法	計測間隔
水槽内水位	水位計	1秒間隔
吸引部深度	水位計	1秒間隔
管内流量	電磁流量計	1秒間隔
流砂量	計測区間の荷重を荷重計で計測	1秒間隔
流況	アクリル管内の土砂移動・堆積状況をビデオ撮影・観察	連続
管内圧力	圧力計	1秒間隔
総排砂量	レベル測量(実験前後の貯水池内形状から算定)	実験前後

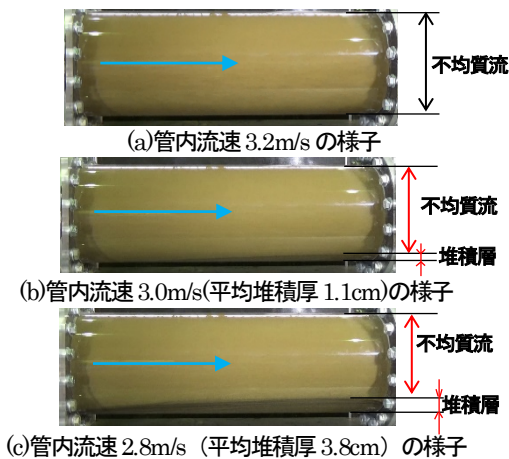


図-18 実験中のアクリル管内の流れの様子

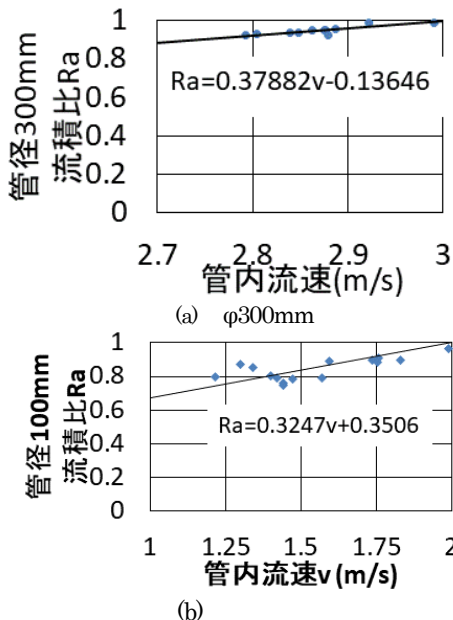


図-19 管径 300mm と管径 100mm の流積比と流速の関係

3.1.2 実験結果および考察

①管径 300mm 土砂濃度計測装置の精度検証

図-18 に管径 300mm の実験中のアクリル管内の流れの様子を示す。土砂の堆積状態等を確認したところ、概ね流速 3m/s 未満の場合に堆積層が生じた。このた

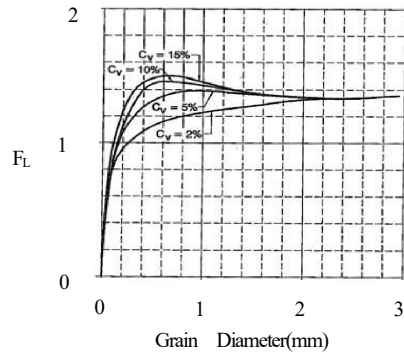


図-20 Durand 式の F_L 、粒径、土砂濃度の関係⁷⁾

め流速 3m/s 未満については流況観察から堆積厚を計測して(3)式により堆積厚に相当する土砂の断面積を計算し、(4)式により堆積土を考慮した土砂の断面積の比率を控除した流積比を求めた。図-19(a)に示す流積比と管内流速との関係から近似式(6)式を算出して(5)式で補正し排出土砂濃度を求めた。また、過年度報告書⁶⁾の管径 100mm の実験の吸引部を制御しないケースにおける流積比は流速 2m/s 未満の場合に堆積層が生じたことから図-19(b)の関係から(7)式を用いて算出している。

また、摺動流と堆積流の境界流速として代表的な Durand の堆積限界流速⁷⁾の(8)式がある。

$$v_L = F_L \sqrt{4gR(\gamma_s - 1)} \quad (8)$$

ここに、 v_L :堆積限界流速(m/s)、 F_L :粒径と土砂濃度で決まる定数(図-20)、 g :重力加速度(m/s^2)を表す。

管径 300mm での粒径 0.053mm~3.35mm の土砂濃度 2%~15%の堆積限界流速は 0.62m/s~4.67m/s の範囲となり、流速 3m/s はこの範囲の中で、実験の現象と合致した。

実験は図-21 に示すように 3 時間行い、土砂濃度計測装置による計測から求めた総排砂量は 50.19m³ (空隙率 0.4 含む) となった。実験前後の水槽内の土砂の測量から総排砂量を計算し、土砂濃度計測装置から計算された総土砂量と比較した。図-22 に実験後の水槽内の状況と縦横断測量結果から得た河床高を示す。等高線法により求めた総排砂量は 48.96m³ (空隙率 0.4 含む) となった。2%程度の差はあるが、管径 300mm の土砂濃度計測装置においても精度の高い排出土砂濃度が計測できたと考えられる。

②管径 300mm での排砂量と管内流速と土砂濃度の関係

実験では図-21 および図-23 に示すように実験開始直後から吸引部は潜行し、概ね 30 分で吸引部が水槽の床板に到達し、潜行中は排出土砂濃度が上昇すると

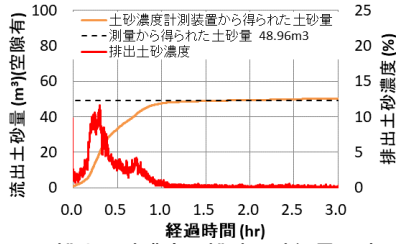


図-21 排出土砂濃度と排砂土砂総量の時間変化

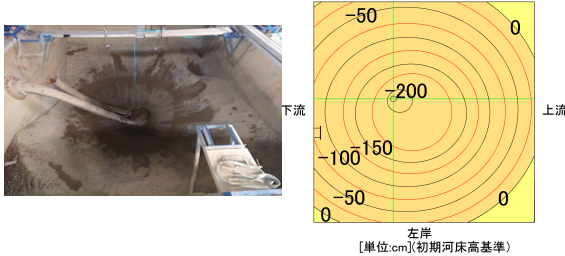


図-22 実験後の水槽内の状況と河床高

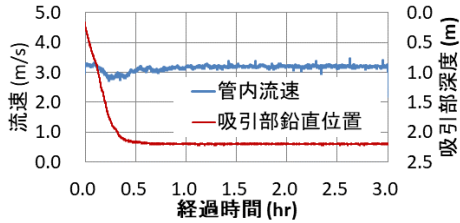


図-23 管内流速と吸引部鉛直位置の時間変化

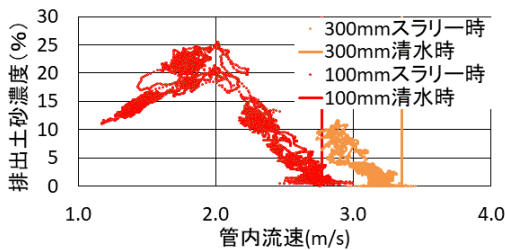


図-24 管内流速と排出土砂濃度の関係

ともに管内流速が低下する現象が確認された。図-21に示したとおり1時間で概ね50m³の排砂を確認した。

この結果から、排砂管4系統を用いて48時間の洪水中に運用できれば9600m³相当の土砂が排砂できることとなり、実際のダムにおける堆砂対策に活用可能な規模と考えられる。

図-24に管径100mmと管径300mmの管内流速と排出土砂濃度の関係を示す。清水時は管径300mmの流速が約3.4m/s、管径100mmの流速が約2.8m/sである。また、管径300mmでは土砂濃度の上昇に伴って管内流速が低下し、管径100mmでは流速2m/sまでは管内流速が低下した。これは吸引部からの土砂吸引量の増加に伴う損失の増加によるものと考えられる。また管径100mmの流速1.2m/sから2m/sの間は、流速と排出土砂濃度は正の相関となった。これは排砂管の吸引部が水槽の床板に到達、土中に完全に埋

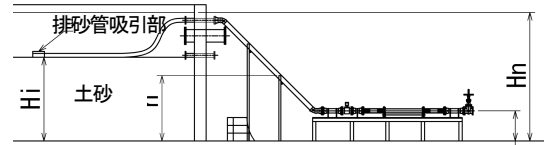


図-25 Hn,Hi,Hoの関係

まったことで、吸引部の損失が変化したことや側部の土砂しか吸引されないため土砂吸引量が低下したためと考えられる。

3.1.3 排砂管の管損失の評価

①排砂管の管損失の考え方

排砂管は吸引口から堆砂を管内へ吸引し、輸送管を通じて土砂のスラリー輸送によりダム下流河川へ排出するものである。このため土砂を含む管内の流体の水に対する比重は、1より大きくなり(9)式により求められる。管内は土砂を含むため管内の任意の位置における位置水頭(床板を基準とした高さ:図-25を参照)と速度水頭は比重を考慮した(10)式、(11)式と表わすことができる。また、圧力水頭は(12)式となる。

$$\gamma = (1 - C) + \gamma_s C \quad (9)$$

$$H_h = \gamma(h - H_o) + H_o \quad (10)$$

$$H_v = \gamma \frac{v^2}{2g} \quad (11)$$

$$H_p = \frac{p}{\rho_w g} \quad (12)$$

ここに、 γ :管内比重、 C :排出土砂濃度、 H_h :位置水頭(m)、 h :管の任意位置の高さ(m)、 H_o :吐口部標高(m)、 H_v :速度水頭(m)、 H_p :圧力水頭(m)、 p :圧力(Pa)を表す。

ここで貯水位と吐口部の高さとの差で与えられる有効落差を考えると、吸引部から吐口部までの土砂を含む水の存在を考慮し(13)式となる。さらに、損失水頭は管内流速と比重の関係式となると考えられることから(14)式と仮定すると、損失水頭を考慮したベルヌーイの定理を適用すると(15)式が成立する。これにより排砂管の施設設計では流速、圧力、位置(特に吸引部)、損失の水頭と有効落差の関係から設計できる。

$$H_e = (H_n - H_i) + \gamma(H_i - H_o) \quad (13)$$

$$H_f = F\gamma \frac{v^2}{2g} \quad (14)$$

$$(H_n - H_i) + \gamma(H_i - H_o) = \gamma \frac{v^2}{2g} + F\gamma \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

ここに、 H_e :有効落差(m)、 H_n :貯水位(m)、 H_i :吸引部標高(m)、 H_f :管内での吸引や曲がり等の抵抗や摩擦による損失水頭(m)、 F :全管路損失係数、 P_h :任意の位置 h での圧力(kN/m²)を表す。

ここで、吐口部を基準($H_o=0$)とし(15)式を管内流

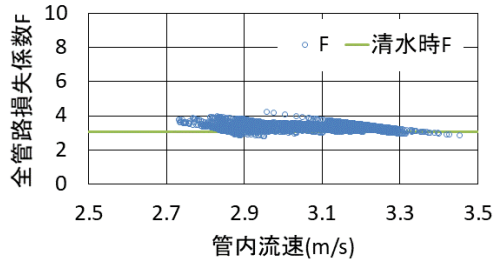


図-26 全管路損失係数と管内流速の関係 (300mm)

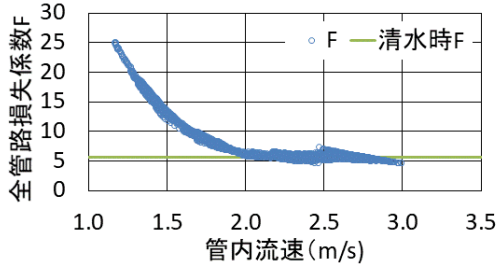


図-27 全管路損失係数と管内流速の関係 (100mm)

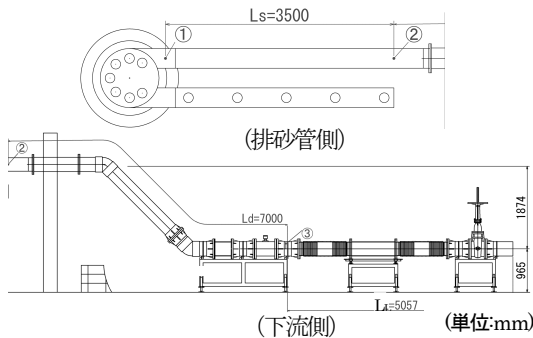


図-28 φ300mm 圧力計測位置

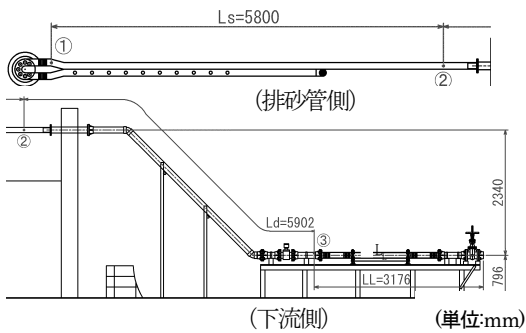


図-29 φ100mm 圧力計測位置

速で整理すると(16)式となる。

$$v = \sqrt{\frac{2g(H_n - H_i + \gamma H_i)}{\gamma(1+F)}} \quad (16)$$

さらに、全管路損失係数 F は(17)式に示すように、吸引部、管路部、その他の吐口部までのすべての損失係数の和で表すことができる。

$$F = f_i + f_l \frac{L}{D} + f_{etc} \quad (17)$$

ここに f_i :吸引部の損失係数、 f_l :摩擦損失係数、 f_{etc} :その他曲がり等管路内の損失係数の和、 D :管径(m)、 L :管長(m)を表す。

以上、全管路損失係数 F を求めれば(16)式から土砂濃度 C に対する管内流速 v が算定可能となり、排砂設備として排出可能土砂濃度が明らかとなる施設設計ができる。

②管損失、損失係数およびその評価

そこで実験結果を基に管損失を求め、損失係数を評価する。管径 300mm の全管路損失係数 F と管内流速の関係を図-26 に、管径 100mm での全管路損失係数 F と管内流速の関係を図-27 に示す。管径 300mm、管径 100mm とともに管内流速の低下とともに、全管路損失係数が上昇傾向にある。特に、管径 100mm に着目すると、管内流速 2m/s より低下すると急激に損失係数が増加していることがわかる。管内流速 2m/s は管径 100mm における堆積層が形成される流速であり、管路における土砂堆積が損失係数の増大に関係しているものと考えられる。管径 300mm においても管内流速 3m/s よりも小さくなった場合は損失係数が上昇する傾向も見受けられる。

また、管径 300mm および過年度報告書^⑩の管径 100mm での実験において、管内の圧力を図-28、図-29 に示す吸引部の直下流 (①)、サクシオン部の終端部 (②)、流量計の下流部 (③) で計測した。この計測結果から有効落差と①の全エネルギー水頭の差から吸引部での損失水頭、①と②の全エネルギー水頭の差からサクシオン部での損失水頭、②と③の差から下降部での損失水頭、③と速度水頭との差から水平部での損失水頭を求める。管径 300mm における圧力計測位置での全エネルギー水頭と排出土砂濃度の時間変化を図-30 に、管径 100mm における圧力計測位置での全エネルギー水頭と排出土砂濃度の時間変化を図-31 に示す。管径 300mm、管径 100mm とともに、土砂濃度が上昇すると全エネルギー水頭が低下していることがわかる。この結果を基に管径 300mm、管径 100mm それぞれの全管路損失係数を(18)式のとおり分割した。

$$F = f_i + f_s \frac{L_s}{D} + f_d \frac{L_d}{D} + f_L \frac{L_L}{D} \quad (18)$$

ここに f_i :吸引部の損失係数、 f_s :サクシオン部の損失係数、 f_d :降下部の損失係数、 f_L :水平部の損失係数、 L_s :サクシオン部の管延長(m)、 L_d :降下部の管延長(m)、 L_L :水平部の管延長(m)を表す。

表-3 に各箇所における損失係数の範囲を示す。管径

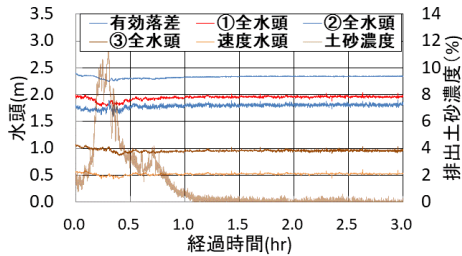


図-30 全エネルギー水頭と土砂濃度の時間変化 (300mm)

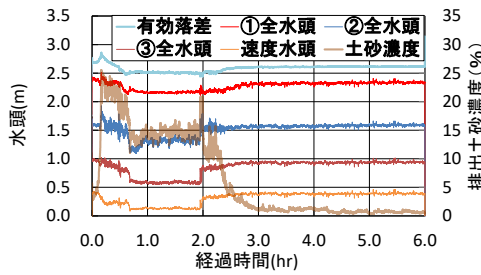


図-31 全エネルギー水頭と土砂濃度の時間変化 (100mm)

が小さくなると損失係数の最大値が大きくなることや吸引部が管路に比べて損失係数が大きいことがわかる。また、図-32 に管径 300mm と管径 100mm の吸引部の損失係数 f_i と排出土砂濃度の関係を、図-33 に管径 300mm と管径 100mm のサクシジョン部の損失係数 f_s と排出土砂濃度の関係を、図-34 に管径 300mm と管径 100mm の降下部損失係数 f_d と排出土砂濃度の関係を、図-35 に管径 300mm と管径 100mm の水平部の損失係数 f_l と排出土砂濃度の関係を示す。なお、図中にはそれぞれの損失係数に管内比重 γ を考慮した値も記載した。清水時の損失から変動がみられる。特に、管径 100mm については、土砂濃度 10%以上となった場合は損失係数が二分されている。これは、前述したとおり吸引部が床板付近となって、吸引機構が変化したことや土砂が管路部に堆積したことなどによるものと考えられる。

また、ここでポンプ浚渫において用いられている長谷川ら⁹⁾が提案した送泥時の管路摩擦係数 f を算出する(19)式、(20)式がある。

$$f_l' = \alpha \times f_l \quad (19)$$

$$\alpha = 1 + \beta(\gamma - 1) \quad (20)$$

ここに、 f_l' :送泥時の管路摩擦係数、 f_l :送水時の管路摩擦係数、 α :送泥時の管摩擦損失係数の増加割合、 β :材料係数(表-4)を表す。

ここで、 f_l は比重 γ が考慮された損失係数となっているため、実験から求めた水平部の損失係数 f_l に比重を考慮した γf_l と比較した。なお、本実験で使用した土砂は細砂で材料係数として $\beta=3$ を採用するのが妥

表-3 各箇所における損失係数の範囲

管径	100mm			300mm		
	損失係数	清水時最大値	最小値	清水時最大値	最小値	
f_i	0.067	3.451	0.464	0.057	1.169	0.491
f_s	0.035	0.234	0.023	0.032	0.041	0
f_d	0.025	0.108	0.022	0.062	0.096	0.06
f_l	0.045	0.197	0.037	0.05	0.075	0.042

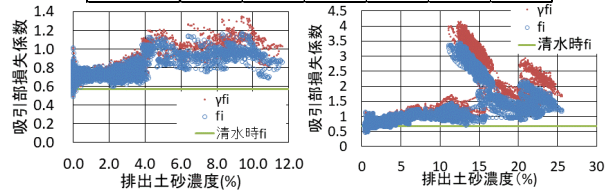


図-32 吸引部の損失係数 f_i と排出土砂濃度の関係

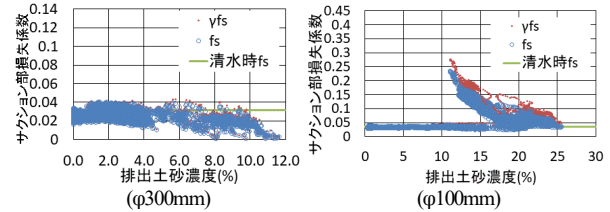


図-33 サクシジョン部の損失係数 f_s と排出土砂濃度の関係

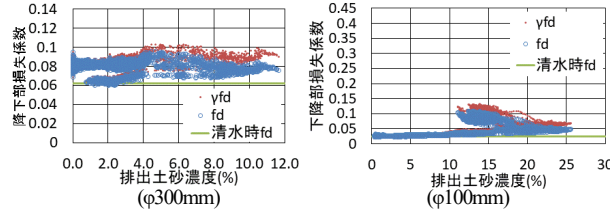


図-34 降下部の損失係数 f_d と排出土砂濃度の関係

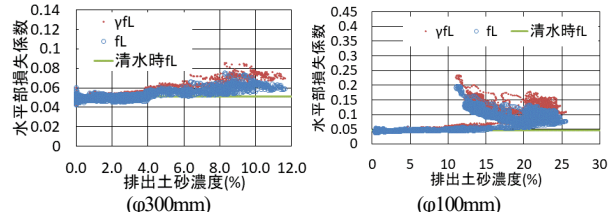


図-35 水平部の損失係数 f_l と排出土砂濃度の関係

表-4 材料係数⁵⁾

材料	β
粘土・シルト	2
細砂	3
砂・礫交じり砂	4
礫	5

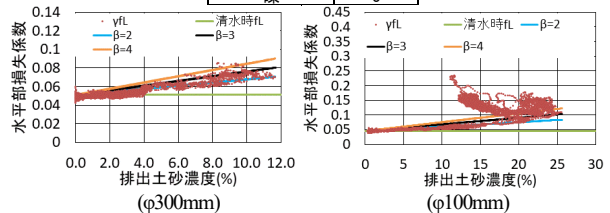


図-36 水平部の損失係数 f_l と排出土砂濃度の関係(再掲)

当と考えられるが、比較のため $\beta=2$ および $\beta=4$ の値も計算した。図-36 に管径 300mm と管径 100mm の水平部損失係数と排出土砂濃度の関係を示す。材料係数として過大な傾向はあるが、土砂濃度が 10%程度と小さい場合には、実験から得られた γf_l は長谷川の式から得られる f と概ね合致しており、設計において長谷川の式を採用しても問題ないといえる。一方、管径

100mm のケースのように土砂濃度が 10% を超え、長谷川の式から求められる f と実験値 γf が大きくかい離する場合(前述の吸引部が土砂に埋まり吸引機構が変化した状態)は長谷川の式は用いられない。

以上、管径 300mm では長谷川の式が適用できることがわかった。一方、管径 100mm では長谷川の式を適用できない場合があるが、土砂濃度が大きい場合であり、設計しようとする土砂濃度を所定以上とする考え方であれば、長谷川の式を適用することで足り、設計において土砂濃度が大きい場合は考慮しなくても良いと考えられる。

さらに、排砂管の損失係数を評価した設計では、(1)の考え方により現場条件を基に吸引部位置および目標とする土砂濃度を設定し、図-32~図-35 の傾向を踏まえて損失係数および管内流速を求められ、土砂による管損失を考慮した事前の施設設計が可能となる。

3.1.4 室内実験まとめ

室内実験の分析の結果は次のとおりである。

- ①土砂濃度計測装置について、過年度報告書⁹⁾で構築した管径 100mm の装置を管径 300mm に拡大しても精度の高い排出土砂濃度が計測できることを確認した。
- ②この計測装置を用いることで、水位差が概ね一定の条件の水力実験の結果から管径 300mm については、ダム貯水池の堆砂処理量として相応の排砂が可能な規模であることを確認した。また、排砂管の設計において、これまで不明であった管径や排出土砂濃度などの違いによる管損失が求められ、さらに管内流速を算出することにより施設設計が可能となった。これにより、排砂管が堆砂対策技術の 1 つの実用技術となると示すことができたと考ええる。

なお、本検討では、単一の混合粒径砂を用いた場合で整理した。今後汎用化に向けては、粒径の違いによる損失係数の整理が必要となると考える。

4. 吸引管による土砂供給技術の実用化

4.1 潜行吸引式排砂管を用いた排砂設備の設計法

ここでは、排砂管の操作イメージを図-2 に示したが、以上の検討結果を踏まえて排砂管における排砂メカニズムと排砂設備の設計上の留意点、設計手順を整理する。

4.1.1 排砂メカニズムと設計上の留意点

この技術は貯水池の水位と放流地点の水位差を利用して、水位差で生じる管路内の通水に伴い、吸引口で発生する負圧により堆砂を管内へ吸引し、輸送管を

通じてダム下流河川へ排出するものである。原理としては、(21)式に示すベルヌーイの定理により説明できる。

$$Z_A + \frac{P_A}{w} + \frac{v_A^2}{2g} = \gamma Z_B + \frac{P_B}{w} + \gamma \frac{v_B^2}{2g} + \sum h \quad (21)$$

ここに、 Z_A, Z_B : 水面 A および任意の位置高さ B(m)、 $P_A (= 0), P_B$: 水面 A および任意の位置 B での圧力 (kN/m²)、 w : 水の単位体積重量(kN/m³)、 $v_A (= 0), v_B$: 水面 A および任意の位置 B 流速(m/s)、 $\sum h$: 排砂管内での吸引や曲がり等の抵抗および摩擦による損失水頭 (m)、 γ : スラリー比重を表す。

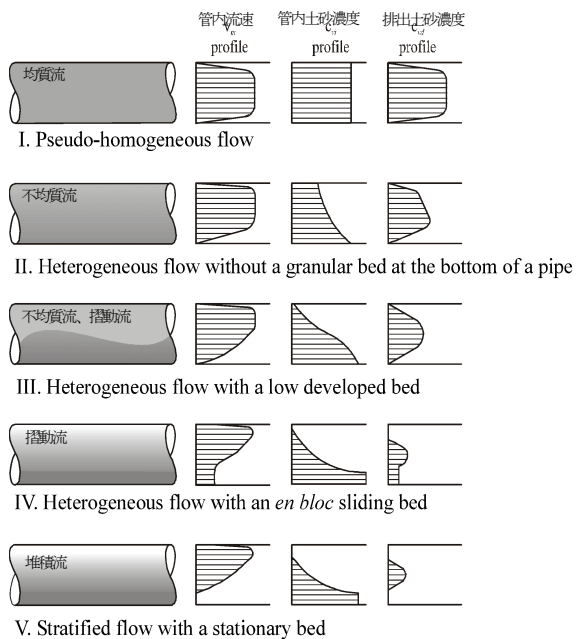
ここで、排砂管は土砂のスラリー輸送を扱うため、設計では(21)式に示す管内流速、管内圧力、位置 (特に吸引部) について、損失との関係性から以下の留意が必要となる。

(1)管内流速

排砂管は吸引部と輸送部から構成され、土砂は、吸引部で浮遊、吸引され、輸送部では鉛直と水平の流れの組合せにより輸送される。

特に、ダム貯水池では排砂管は縦断距離が大きくなるため主に水平輸送となり、水平管路のスラリー輸送の特徴を踏まえ設計が必要となる。水平管路による土砂のスラリー輸送の流送形態を図-37^{9)~11)}に示すとともに次の特徴がある^{11),12)}。

- ① 土砂は流速が早いほど浮遊しやすい
- ② 土砂は管径が細いほど浮遊しやすい



※文献5)の図に6, 7)の文献を参考に筆者が別の呼称を日本語で記載

図-37 流送形態別の流速、管内濃度、排出濃度の関係

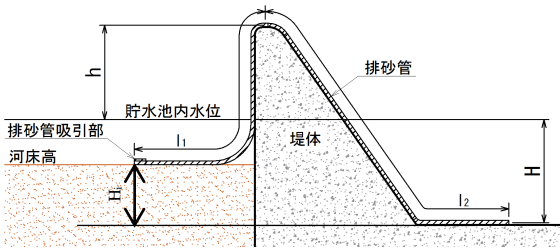


図-38 排砂管のサイフォン形式

③ 土砂流の摩擦抵抗は流送形態で決まる

①は流速が大きいと均質流だが、流速が低下すると、下層が高濃度となる不均質流、摺動層となる摺動流、堆積層となる堆積流に変化することから分かる。それぞれの状態変化点における流速を浮遊限界流速、摺動限界流速、堆積限界流速と定義されており、摺動流の流れの下限は、粒子が管底に堆積を開始する流速である。代表的なものとして Durand の堆積限界流速 ((8)式)がある。

浚渫設備における設計では、水平管路はこの堆積限界流速を目安に設計することが望ましいとされている。

②は同じ流速でも管が細い方が乱れによる浮遊作用が生じやすく(8)式はこれを表している。

③は流速が大きい均質流で摩擦抵抗は最小となり不均質流、摺動流となるにつれ摩擦抵抗が大きくなる事が知られている。このことを踏まえ、浚渫設備における設計では、土砂のスラリー輸送時の管路摩擦係数 f' は清水時の管路摩擦係数 f の α 倍とした長谷川ら⁸⁾が提案した(19)式、(20)式を用いる。

他方、管の流れは高速流の場合、摩擦抵抗が大きくなる。このためスラリー輸送では土砂濃度一定の場合、摩擦抵抗が最小となる平均流速が輸送や摩耗の観点から効率的とされている。なお、砂利のような大粒径の土砂を水平管の流れで掃流させる場合は大きい方が流動しやすい傾向がある¹³⁾。また、排砂管は、吸引部またはダム堤体を越す際には主に鉛直輸送となる。この際、土砂を浮遊、輸送させる管内流速は沈降速度

より大きいことが必要となるが、既往の知見では鉛直管路の流れでは主流速が粒子を浮遊させるため水平管路の流れより輸送が容易となる特徴がある¹⁴⁾ことが知られ、排砂管では水平輸送の管内流速が設計上留意すべき流速になると考えられる。

また、管内流速は吸引部や曲がり等の区間毎、土砂濃度毎の形状損失および摩擦損失による影響を受け、これを踏まえ全損失水頭と水位差との関係を確認して設計する。管内の損失を考慮したスラリー輸送時の管内流速は(16)式となる。

表-5にこれまでの主な試験実績を示す。管径毎の実績を見ると、排砂可能な粒径は0.1mmから吸引口径程度(50mm~150mm)の大きさとなっている。また、清水時で管内流速2.3m/s~3.7m/sが確保されれば、平均土砂濃度5%程度での排砂が可能な技術であることが確認できる。また、管径が大きくなると時間当たりの排砂量が多くなることが見受けられる。

(2) 管内圧力

排砂管には外圧および内圧がかかるが管路を長くすると損失が大きくなることで内外圧力差が大きくなり、膨張や収縮が生じる。そこで設計では、区間ごとに内外圧力差を計算し、管の許容圧力範囲内であることを確認する必要がある。また管路が長く流速が速いときや図-38に示すサイフォン形式のとき、一部に負圧が発生するため、負圧にも耐える管の材質や構造を選定する必要がある。また、排砂管では、水位差を大きくとれば、管内流速は大きくなるため、管内損失が大きくなり、負圧が発生しやすくなることから水位差に制約が生じる。

さらに、排砂管の設置方法として、①ダム堤体内に設置し、排砂管全体が貯水位より下にある場合(堤体内放流形式)、②ダム堤体を越え、排砂管の一部が貯水位より上に存在する場合(サイフォン形式、図-38)の二つに分類される。特にサイフォン形式の場合など管の一部が動水こう配線より高い区間が存在するときは、圧力水頭が負になる。なお、負圧の限度は理論的

表-5 これまでの実績

管径	吸引口径	場所	水位差	管延長	流速(清水)	排砂時間	排砂量(空隙込)	排砂可能粒径	時間当たり排砂量	排砂時流速(概ね)	土砂濃度(平均)
100mm	50mm	室内	2.6m	約16m	2.8m/s	約4.5時間	約30m ³	0.1mm~2mm	約6.7m ³ /h	2.5m/s	5.66%
		発電所沈砂池	3.2m	約36m	2.3m/s	15分	約1.2m ³	0.1mm~50mm(長径80mm)	約4.8m ³ /h	2.2m/s	4.63%
200mm	100mm	穂高砂防観測所	3.3m	約13m	3.7m/s	78分	約17m ³	0.1mm~長径38mm	約13m ³ /h	3.7m/s	1.92%
		高滝ダム貯砂ダム	1.6m	約18m	2.4m/s	15分	約5.5m ³	0.1mm~100mm(長径140mm)	約22m ³ /h	2.3m/s	5.07%
300mm	150mm	室内	2.4m	約16m	3.4m/s	約1時間	約50m ³	0.1mm~2mm	約50m ³ /h	2.7m/s	5.13%
		高滝ダム貯砂ダム	1.6m	約18m	2.6m/s	2時間	約21m ³	0.1mm~150mm(長径180mm)	約10.5m ³ /h	2.5m/s	0.99%

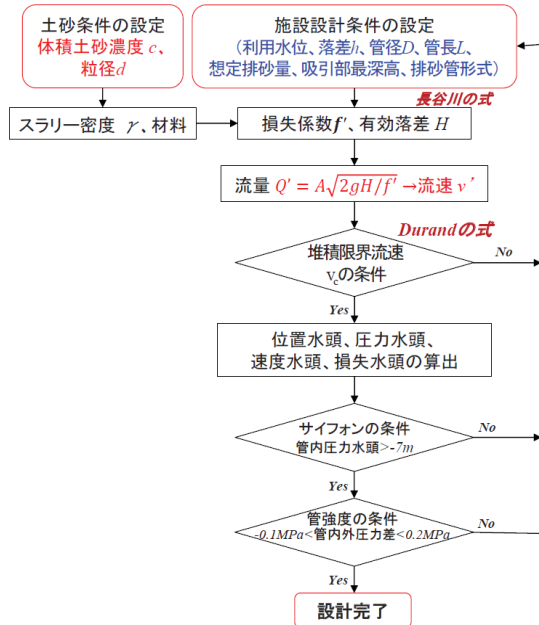


図-39 排砂設備設計の流れ

には1気圧(-10.33m)となるが、実際は水中に溶けた空気の気化や曲がりの部分の遠心力による圧力低下のため、圧力水頭の下限值は7~8.5mとなる¹⁵⁾。このとき水位差Hは(22)式を満たす限界値以下となる設計が必要となる。

$$-7 \sim -8.5 \leq -\gamma h - (\gamma - \frac{F_2}{1+F_1+F_2})H - \frac{F_2(1-\gamma)}{1+F_1+F_2}H_i \quad (22)$$

ここに、 h :貯水位からサイフォン頂部高さ(m)、 H :水位差(m)、 H_i :吸引部標高(出口基準)(m)、 F_1 :吸引部から頂部までの区間(l_1)の全管路損失係数、 F_2 :頂部から吐口までの区間(l_2)の全管路損失係数を表す。

(3)吸引部位置

排砂管は土砂吸引に伴い、吸引部が土中へ潜行する特徴がある。管内スラリーの比重は、水のみより大きくなるため、深くなると大きな比重は吸引しづらくなり、土砂濃度が低下する関係がある³⁾。このため、排砂量、水中安息角を踏まえ設計条件として吸引部が最深となる位置を設定して設計することが必要である。

4.1.2 排砂設備の設計手順とまとめ

以上の設計条件を基にして排砂管の設計フロー(図-39)を提案する。まず対象となるダムにおける諸元等の基本条件の確認を行い、水位差等、排砂条件から排砂管形式(堤体内放流形式またはサイフォン形式)を決定する。このときサイフォン形式の場合堤体を跨げる高さを貯水位から7~8.5mを目安とする。形式を決定後、排砂量と吸引部の最低深さ等を決定し排砂管諸元を設定する。また、土砂条件として土砂濃度および粒径を検討し、清水時の管路摩擦係数を用いて、(19)

式、(20)式よりスラリー輸送時の管路摩擦係数を得る。さらに設定した管路延長および管路摩擦係数、形状損失係数を用いて、(16)式により管内流速を算出する。管内流速は、既往の実験結果や堆積限界流速を目安とし、排砂管の諸元を再度検討する。管内外圧力差は区間ごとに計算し、管の許容圧力範囲内であることを確認する。またサイフォン形式の場合、水位差やサイフォン頂部高が制限内であることを確認し、サイフォン形式が適用可能かを検討する。

以上により単一管の排砂量が求められ、設計排砂量、排砂時間等に合わせ本数を設定することで、排砂管によって必要な土砂量を排砂できる設備を設計できる手法が整理できた。

4.2 砂防堰堤を用いた高落差の排砂設備

4.2.1 施設設計概要

上述した設計手順を用いて、砂防堰堤での排砂実験における排砂設備の配置について設計を行った。堰堤の諸元は、水通し高 EL.912m であり水位差 12m を確保できる。排砂管配置縦断面図および事前の概略設計の結果(土砂濃度 3%での管軸方向距離における水頭分布)を図-40 に示す。排砂管の設置については、堰堤上流側と下流側排出口までの落差 $H_n=12m$ 、上流側管長 $L_1=38m$ (上流管長含む)、堰堤部管長 $L_2=10.3m$ 、下流側管長 $L_3=20.5m$ とし、管径 300mm (吸引口径 150mm) の吸引部を堰堤上流約 34m に置き、途中、排砂管はサイフォン形式(高さ EL.913m)で配置し、堰堤上流側の吸引部は水深 0.5m の位置から 2m 潜行するものとして施設設計を行った。また、特筆すべき点として、堰堤部直上流から下流を管径 200mm とすることで、堰堤上流側の動水勾配を小さくし、最大負圧発生位置での負圧を抑制する工夫を行った。

事前の設計に用いる土砂は現場のダム堆砂の粒径から代表粒径 1.9mm と設定した。また吸引部最深部高は EL.909.5m とした。スラリー輸送時の管路摩擦係数は一般の鉄管で用いられている清水時の値 0.02 を基に、土砂濃度 3%を想定し、(19)式、(20)式から求めた。その結果、管内流速は(16)式から清水時の管径 300mm で約 2.8m/s、土砂濃度 3%で約 2.7m/s となった。管内許容圧力限界値を-7m としたところ、サイフォン頂部で設計値は限界値以内であることを確認した。管内流速は代表粒径 1.9mm での堆積限界流速 4.36m/s を下回るが、表-5 に示した既往の実験結果から 3%程度での土砂濃度の排砂は可能と考えられる。以上から本施設では約 820m³ (空隙率=0.4 と仮定) を約 24 時間で排砂可能な設備となると考えられる。

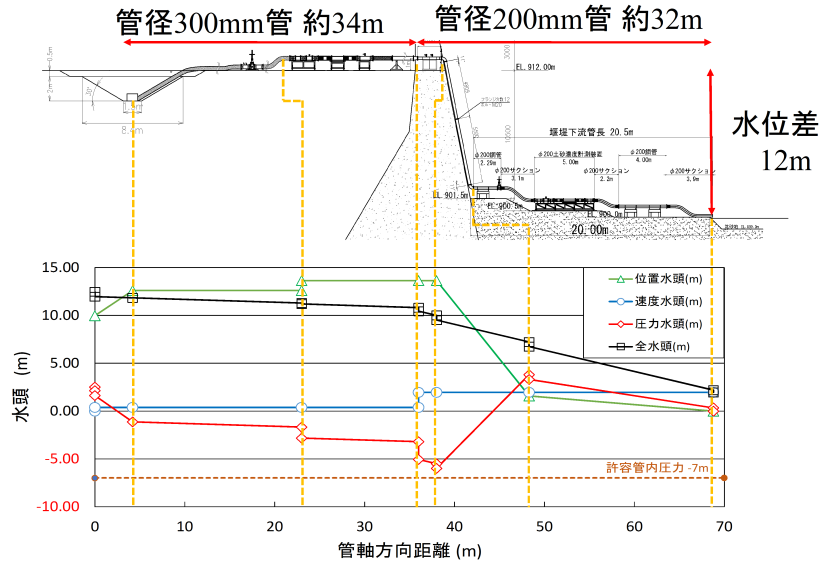


図-40 排砂管配置縦断図と管軸方向距離における水頭分布（土砂濃度 3%）

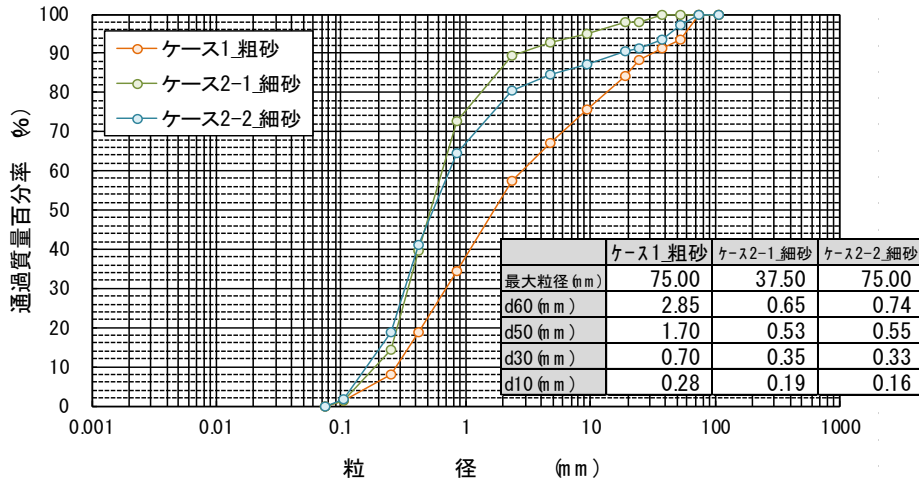


図-41 実験使用土砂

4.2.2 実験概要

現地排砂実験は、天竜川水系松川の長野県片桐ダム上流の松川砂防堰堤において実施した。対象土砂は、塵芥等を除去した $d_{50}=0.53\text{mm}\sim 1.7\text{mm}$ の3条件としている（図-41）。図-42 に示すとおり、堰堤の上流側に吸引部を設置し、堰堤下流側の沈砂地へ排砂するように排砂管を設置した。

計測項目としては、電磁流量計により流量、ピエゾ管により図-43 に示すように圧力を計測した。さらに、開発した土砂濃度計測装置により、堰堤上下流において土砂濃度をリアルタイムで計測し、排出土砂量を算出するとともに、実験後の下流側沈砂池に堆積した形状の変化からも排出土砂量を算出した。

4.2.3 実験結果および考察

図-44 に土砂の $d_{50}=0.53\text{mm}$ の条件（ケース 2-1）

で、4度の潜行（着底-クレーンで引き揚げ）操作を行った30分間の実験結果を示す。ここで、実験中の吸引部位置の水位はおよそ一定で、管内流速は上流側（φ300）で約 3m/s、下流側（φ200）で約 6.7m/s となり、高落差においても安定したサイフォンが形成できる配置であることを確認した。また、排砂特性としては、潜行初期に高い土砂濃度を示しながら潜行し、吸引部の潜行速度が低下するにつれ土砂濃度が低下していることが分かる。これは、吸引部に集まる土砂量が少なくなるとともに現場の吸引できない粒径の土砂も集まり、吸引しにくくなったためであった。このため、吸引部を引き上げて位置を移動して次の実験を行った。

本ケースにおける累積排砂量については、流量と土砂濃度の計測値よりおよそ 7.4m^3 が得られた。潜行時

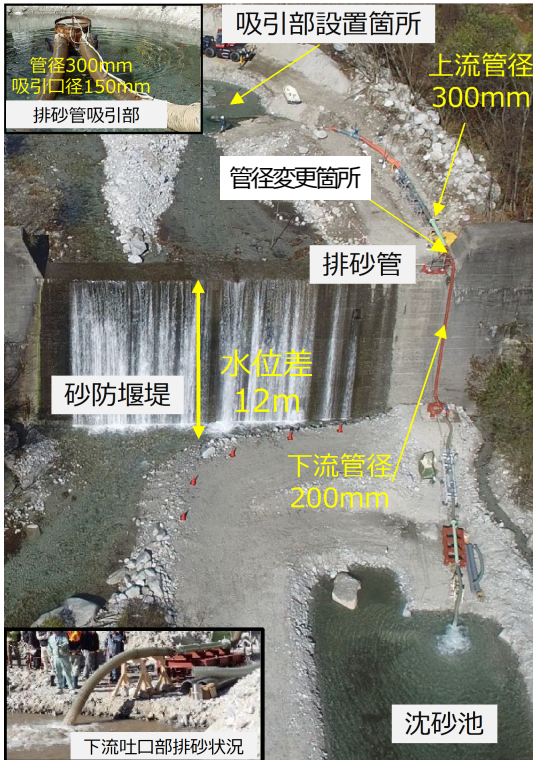


図-42 排砂管の配置

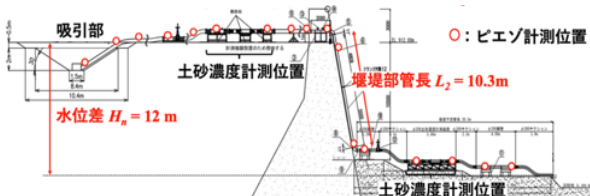


図-43 ピエゾ設置位置図

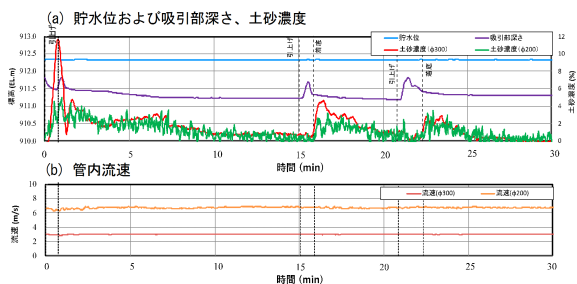


図-44 吸引部位置、土砂濃度、管内流速の関係

(図-44の経過時間2分、17分頃)には、管内流速が小さい上流側において、土砂濃度の上昇に伴い堆積層の形成が生じたため、荷重計測に基づくφ300の土砂濃度計測値は大きくなっているが、補正を行い堆積の生じていない下流側(φ200)計測値と同様の土砂濃度となることは確認している。また、沈砂池に排出され堆積した土砂(図-46)より、最大長径200mmの土砂を排出できたことを確認した。

図-47は、土砂濃度3%の際の管内の各水頭を設計したものと、同じく土砂濃度3%の際の圧力水頭の実



図-45 堆積層の形成の状況

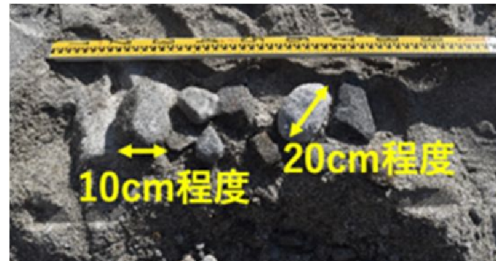


図-46 排出土砂

験値を示したものである。速度水頭について設計値と実験値が概ね一致しており、圧力水頭についても負圧発生位置での評価を安全側に行うことで、事前の施設設計が可能であることが分かった。また、図-47には管径300mmで全施設配置を行った場合の動水勾配および圧力水頭も付記しているが、この場合堰堤上流側での圧力低下が大きく、サイフンの条件を満たすことができていない。これより本設計のとおり、堰堤部直上流から堰堤下流側での管径縮小が負圧抑制に有効であることを確認した。また、今回の実験では、礫による吸引性能の低下がみられたが、排砂時間における土砂濃度から推定した排砂性能では平均土砂濃度は2%程度となり600m³/日が排砂可能となると考えられた。本ケースにおける配置事例は、今後の実運用に際し有用になるものと考えられる。

4.2.3 高落差の排砂設備の設計と実験のまとめ

管径300mmを用いた水位差12m、管長約70mでの現地実験を通じ、0.1mm~200mmの粒径の土砂について、清水時において事前の施設設計で管内流速2.83m/s、実験で3.01m/sが計測されるなど設計値と概ね同様の排砂能力を確認した。また、吸引性能の低下により土砂濃度約2%での排砂となったが、推定で600m³/日の排砂能力を有する施設となることを確認した。また負圧の発生を抑制できる施設配置等が行えることを確認するなど有用な知見が得られた。以上から排砂管がダムでの堆砂対策技術の1つとなり得ることを示せたと考える。

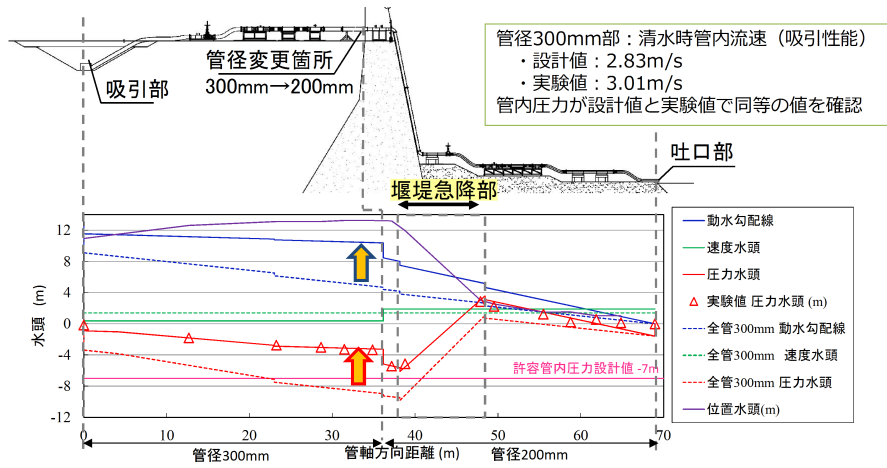


図-47 各水頭の事前設計値と実験値の比較(土砂濃度 3%)

5. まとめ

以上、令和元年度において検討し、得られた成果は次のとおりである。

塵芥等の前処理システムの開発については巨礫等を含む土砂から細粒土砂を分別吸引し、先端開口度とスクリーン回転数の組合せで濃度調整可能なドレジャータッチメントを開発した。最大水深 50m 時でもポンプ揚水能力 (6.9m³/分) から換算すれば土砂濃度を 8%程度に制御し浚渫能力 50m³/h が可能と考える。

潜行吸引式排砂管の吸引性能の向上の検討については、管径 300mm の流量・土砂濃度計測装置を用いても時間当たり 50m³/h の排砂が可能であることを確認するとともに、昨年度の結果と比較することで流量・土砂濃度計測装置の有効性を確認した。また、排砂管の設計において、これまで不明であった管径や土砂濃度などの違いによる管損失が求められ、さらに管内流速を算出することにより施設設計が可能となった。

吸引管による土砂供給技術の実用化の検討については、設計条件を基にした単一管の排砂管の設計フローを提案し、設計排砂量、排砂時間等に合わせ本数を設定することで、必要な土砂量を排砂できる設備が設計できることを整理した。また、高落差の施設においては、下流の管径を縮小することで、堰堤上流側の動水勾配を小さくし、最大負圧発生位置での負圧を抑制する設計法も提案した。そして、管径 300mm を用いた水位差 12m の現地実験を通じて、設計値と概ね同様の排砂能力を確認した。この結果、排砂管がダムでの堆砂対策技術の 1 つとなり得ることを示せた。

今後ダムにおける堆砂対策技術の 1 つとして、潜行吸引式排砂管の現地実装が期待される。引き続き、よ

り広範な貯水池条件に適用可能で、経済的な堆砂対策手法として早期の現場に適用できるよう、吸引管技術の確立に向け、検討を続けてまいりたい。

謝辞： 室内実験は国交省国土技術政策総合研究所の河川水理実験施設を使用して実施した。現地実験では、長野県飯田建設事務所松川ダム管理事務所、国土交通省中部地方整備局天竜川上流河川事務所の皆様に多大なご協力をいただきました。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 櫻井寿之、箱石憲昭：潜行吸引式排砂管の現地排砂実験、土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.69, No.4, pp. I_1075-I_1080, 2013
- 2) Miyakawa M., Hakoishi N., and Sakurai T. : Development of the Sediment Removal Suction Pipe by Laboratory and Field Experiments, Dams and Reservoirs under changing Challenges "82th Annual Meeting of ICOLD 2014",pp.V-15V-24, International Commission on Large Dams , Bali , Indonesia, 2014
- 3) 宮川仁、箱石憲昭、石神孝之、櫻井寿之：潜行吸引式排砂管の現地排砂実験による実用化に向けた検討、河川技術論文集、Vol.21, pp.189-194, 2015
- 4) 宮川仁、本山健士ら：吸引工法（潜行吸引式排砂管）の現場適用に向けた塵芥等の前処理手法に関する一検討、土木学会第 72 回年次学術講演会、VI, pp.1703-1704, 2017
- 5) 佐野和幸、木村政俊ら：水中作業機の沈木切削アタッチメントの開発、土木学会第 73 回年次学術講演会、II, pp.153-154, 2018
- 6) 土木研究所：平成 30 年度研究開発プログラム報告書「12.3.1 吸引管を用いたダムからの土砂供給技術に

- に関する研究」、2019（参考：宮川仁、岩田幸治、石神孝之：管径 100mm 潜行吸引式排砂管における土砂濃度計測と吸引排砂特性、河川技術論文集、Vol.25、pp.753-758、2019）
- 7) Durand R.: “Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes-Experimental Research”, IAHR 5th Congress, Minneapolis, pp.89-103, 1953
 - 8) 長谷川源太郎、八木得次、徳永省三：運輸技術研究所別冊 浚渫ポンプの性格とその使用法、三角舎、p.11、1958
 - 9) Matousek,V.:Dredge Pumps & Slurry Transport、Lecture Notes. Delft: Delft University of Technology、2004
 - 10) 高橋弘：スラリー輸送研究の歩みと固液混相流研究の将来展望、混相流、31 巻、2 号、pp.130-134、2017
 - 11) 片山裕之、田島芳満：水圧吸引方式の土砂管路輸送技術、混相流、27 巻、3 号、pp.282-289、2013
 - 12) 小川元：排砂管に関する公式について、作業船、Vol.35、pp.69-74、1964
 - 13) 小川元：管による掃流輸送砂量について、第7回海岸工学講演会講演集、pp.1-5、1960
 - 14) 小川元：鉛直上昇流中における粒子沈降に関する実験および船吸込管に関する考察、山口大学工学部学報、第9巻、第1号、1958
 - 15) 社団法人土木学会：土木工学ハンドブック第四版 I、p.491、技報堂出版、1989