

良好な水環境の実現に向けて

国立研究開発法人 土木研究所寒地土木研究所寒地水圏研究グループ水環境保全チーム 首席研究員

巖倉 啓子

1. はじめに

わが国は、世界でも有数の多雨地帯であるモンスーンアジアの東端に位置し、年平均降水量（1986～2015年）は1,668mmで、世界（陸域）の年平均降水量約1,065mmの約1.6倍となっている¹⁾。降雨や積雪によりもたらされる水資源は地下水や表流水として流域を潤し、我々の生活用水や産業用水として無くてはならないものであると同時に多様で豊かな生態系を育んでいる。

公共事業における社会基盤整備は、持続可能な地域社会の形成や人々の安全安心で豊かな暮らしを確保するため、河川や湖沼における水環境や生物の生息・生育環境の保全、水資源の持続的利用に配慮して実施することが重要となっており、現場に即した技術課題の解決を図っていくことが必要である。

一方、北日本日本海側を中心とする多雪地域においては、春先にもたらされる融雪による水資源供給は農業や河川生態系の季節的なサイクルの維持に不可欠であるが、地球温暖化に伴う気候変動により、豪雨の増加のみならず、積雪量の減少や気温上昇による渇水や水質悪化等のリスクの増加も懸念されており、水循環系における物質循環システムに着目した適応策の構築も必要となっている。

水環境保全チームでは、社会基盤整備を進める上で解決しなければならない土木技術の課題のうち、河川工事におけるサケ等の重要な水産資源や貴重動植物の生息環境の保全に関する研究、河川の治水機能と環境機能の両立を図る河畔林管理に関する研究を実施するとともに、流域の水資源・物質循環の総合的な管理を目指し、水域における有害物質の発生等の把握・対策等、流域における土砂の輸

送実態の把握、積雪から供給される水資源量の把握や予測など、水環境に関わる様々なリスクを把握・評価する手法、具体的な対処技術の開発を進めている。

以下、主な研究テーマについて説明する。

2. 魚類生息・産卵環境および河道維持管理を考慮した低水路の河道掘削技術に関する研究

河川整備や河道の維持管理は治水・利水・環境の調和を図ることが目標とされている。河川空間は様々な生物の貴重な生息環境となっているが、特に積雪寒冷地の河川では水産資源の観点からも地域環境のシンボリックな意味でもサケ等の生息・産卵環境の保全の重要度は高く、北海道開発局等の事業者と連携し治水と環境が両立する河川整備の実践的な方法に

魚類生息・産卵環境及び河道維持管理を考慮した低水路の河道掘削技術に関する研究

▶ 低水路河道は魚類の生息や産卵場として重要ですが、治水安全度の向上を図るため掘削が必要となる場合があります。そこで、河道の物理環境と魚類の生息・産卵環境との関連性を評価する技術を開発し、魚類の生息・産卵環境の保全・創出を図りつつ、河道の維持管理の面でも有利となる低水路河道掘削技術を開発しています。

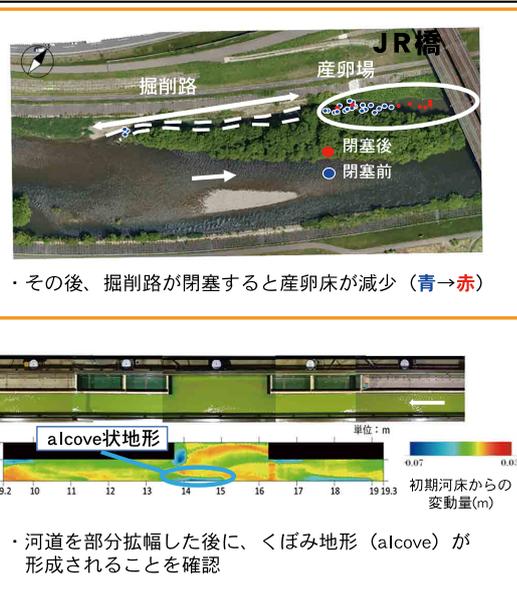
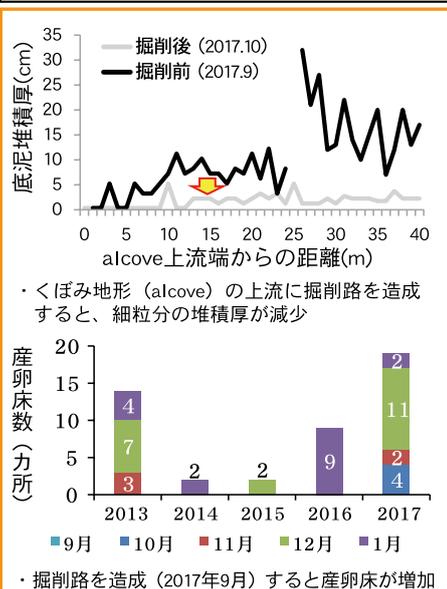
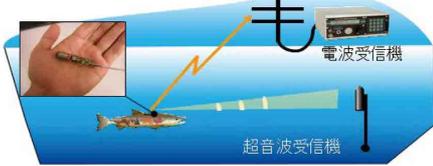


図-1

➤ 魚類の遡上や自然産卵が可能な河川環境の創出を図るため、河川や沿岸域、河川・沿岸構造物周辺において魚類の行動を定量的に計測する手法を開発しています。
さらに、魚類の生息や遡上環境の観点から構造物を評価し、改善する手法を開発しています。

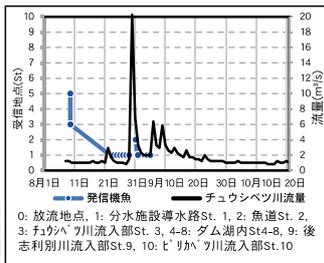
バイオテレメトリー技術



超音波発信機の装着状況



・サケ等に超音波発信機を装着して行動形態を把握し、構造物設計等に役立てる。



・魚カウンターで魚類数も把握し、自然再生産の保全施策等とその成果を活かしていく。

・ダム貯水池に受信機を設置し、サクラマスの行動を調査した。

図-2

関し研究を行っている (図-1)。

札幌市街地の中心部を貫流する豊平川は、1978年に市民による「カムバックサーモン運動」が開始されて以来²⁾、現在でも官民の様々な関係者によるサケの調査・保全活動が活発な河川である。この豊平川でサケの産卵に適した環境の創出を目指し、「アルコブ (alcove)」と呼ばれる下流から上流に入り組んだ「くぼ地」の上流に掘削路を造成して通水したところ、河床の細粒分の堆積厚が5 cm以下に減少し産卵床数が約2倍に増加した。

その後、出水の影響で掘削路が埋まると産卵床は半分程度に減少した。閉塞による流速、水深の変化に伴い産卵床に影響があったと推察された³⁾が、地域の自主的な維持作業が行われ、産卵床の保全活動を継続している。

また、河川の部分的な拡幅が河床変化に与える影響を検証するため模型実験を行った。拡幅の幅を複列砂州領域にして拡幅部の流れ方向の延長を複数パターン設定して実験を行ったところ、拡幅部に深掘れが形成され、増水後の水位低下とともにアルコブが形成される場合があることが確認できた⁴⁾。

豊平川の河道掘削工事は、これらの研究成果を活用して治水上の安全性確保とサケの良好な産卵環境の維持を目指した掘削断面を設定し、市民団体や研究機関および行政との合同調査を行いながら現在実施されている。

3. 自然再生産を目指した水産有用種の行動に着目した河川・沿岸構造物の評価・改善手法に関する研究

川から海までの河川連続性を確保することは、河川環境の保全や再生を行う場合の代表的な目標である。重要な水産資源であるサケ科魚類は、海洋から河川上流部まで広範囲を行き来する種である。その中でも日本人になじみ深く多数漁獲されているシロサケは、そのほとんどが人工孵化放流事業によりその個体数が維持管理されてきた。ところが2005年頃から来遊数が大きく減少し続けているため、近年は生態系保全や水産資源維持の観点から、自然産卵による資源再生産が重要視されている⁵⁾。

本研究では、魚類の遡上や自然産卵が可能な環境の創出に資することを目的として、魚類の行動から構造物の評価や改善手法を開発している (図-2)。ここでは、魚類に超音波発信器を付けてその行動を把握する「バイオテレメトリー技術」が活用されている。北海道の後志利別川上流にある美利河ダムでの調査事例では、サクラマス幼魚がダム湖内を回遊する行動や支川や魚道を遡上する行動が確認された⁶⁾。

また、魚体と流水の電位差を利用して電極上を魚が通過すると検知する「魚カ

ウンター」を魚道に設置し、通過する魚類数の計測を行っている⁷⁾。これを用いれば、ふ化場等がなく遡上数の不明な河川でも自然産卵をおこなうシロサケ等の個体数を明らかにできる。これら計測機による魚の行動や産卵床の分布状況等を総合的に解析し、魚類の持続的再生産が行われる河川環境の創出方法を提示することを目指している。

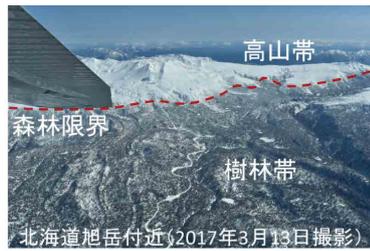
4. リモートセンシング技術を用いた融雪期の水資源管理の高精度化に関する研究

積雪寒冷地では、春に山地から供給される融雪出水をダムに貯留することにより、積雪によってもたらされる豊富な水資源を有効に活用することが可能となっている。一方で融雪洪水時はダムの水位が高い状態で洪水調節操作を行う必要があり、難しいダム運用が求められる。このため、積雪分布の実態やプロセスを解明し、より高精度なダム流入量予測を行うための融雪・流出モデルの開発を目的とした研究を行っている (図-3)。

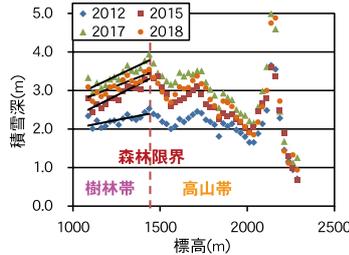
水環境保全チームで、北海道中央部の大雪山周辺において航空レーザー測量により面的な積雪量を調査した結果、高山帯 (森林限界以上の高標高区域) と樹林帯 (高山帯より低く森林のある区域) で積雪の特性が異なることが確認された。樹林帯では標高の増加に伴い積雪深が線

リモートセンシング技術を用いた融雪期の水資源管理の高精度化に関する研究

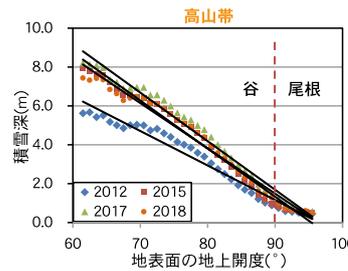
- ▶ 航空レーザ測量により、山間部において広範囲の積雪分布を計測し、その特徴を解明します。さらに、森林限界以上の高標高帯において強風により積雪が移動するプロセスを組み込んだ融雪・流出モデルを開発し、ダムにおける水資源管理の高精度化を図ります。



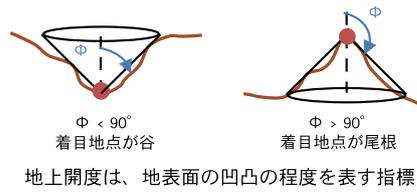
航空レーザ測量による積雪分布の計測



- ・樹林帯では、標高が増加するのに伴い積雪深が線形に増加する。



- ・高山帯では、地上開度が増加するのに伴い積雪深が線形に減少する。



地上開度は、地表面の凹凸の程度を表す指標

地上開度のイメージ

図-3

形に増加するが、高山帯では風により容易に積雪が吹き飛ばされるため線形関係にならない。しかしながら、標高ではなく地表面の凹凸の程度を表す指標である「地上開度」を用いると、積雪深との線形関係が確認された⁸⁾。

この研究成果により、流域上流山地の森林の分布状況・標高・地上開度を把握すると積雪深の面的な推定が容易となる。また、別途研究により人工衛星画像から導かれる雪の面積とダム流入量との間に相関があることも確認している⁹⁾。今後は人工知能も活用しつつ高精度なダムの流入量予測システムの構築を行う予定である。

5. 粒径別土砂生産量の空間分布評価手法に関する研究

山地斜面から生産された土砂は流水によって下流に運ばれ、平野、海岸線等の地形を形成するとともに、動植物の生息・生育環境等を形成している。一方で、土石流等の土砂災害の発生やダム貯水池への堆砂、海岸侵食による砂浜の消失など流域の土砂移動に関わる様々な課題も顕在化している。このため、山地から海岸まで土砂が移動する場合全体を「流砂系」という概念で捉え、流砂系一貫として総合的に土砂移動を把握し、総合的な土砂管理計画を立案し土砂移動に関する問題に対して必要な対策を講じることが望まれている¹⁰⁾。本研究では、流砂水文観測

と岩石由来の放射性同位体を用いて、山地から下流に流出してきた土砂の生産源の空間分布を推定する手法を開発している(図-4)。

調査流域は日高山脈に源を発する鶴川と沙流川とし、流域の地質分布の特性を踏まえて様々な地点の斜面から土砂を採取し放射性同位体の濃度を測り、統計解析により地質図における「地質区分」と放射性同位体濃度の関係が最も強い組合せを見いだした。その結果、3つの放射性同位体を用いることで、流域の地質区分をもとに土砂生産源を6つのグループに分類することができた。なお、解析過程で関連性が薄い放射性同位体は除外されている。

下流で採取した土砂に対する各生産源グループの寄与度は、3つの放射性同位体濃度(鉛 212、アクチニウム 228、カリウム 40)における各生産源グループと下流土砂との距離が小さいほど、高くなると考えることができる。具体的には、各生産源グループの3つの放射性同位体濃度のばらつきの程度で割った「マハラノビスの距離」の逆数に比例すると仮定した式で求めることができる¹¹⁾。

なお、以前は0.5mm未満の粒径で分析が可能であったが、現在は9.5mmまでの粒径について上記の方法の適用性について検討をすすめている¹²⁾。

今後は、山地からの土砂流出について空間分布と併せて時間軸で定量的な評価

を行う手法の構築を目指して、豪雨イベント後の一連の土砂生産・流出量を現地調査やリモートセンシング等を活用した解析や、地質条件にGIS地形データ解析による地形条件と組み合わせた、「土砂の流れやすさ」(土砂連結性ポテンシャル)評価の研究開発を進め、流域の土砂移動実態を時間的・空間的に把握できるモニタリング手法の提案につなげていく予定である。

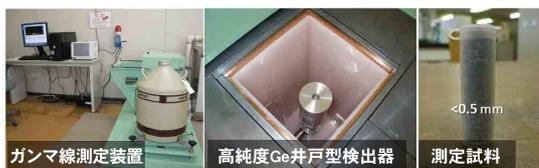
また、流域の土砂移動に関して、地震により発生した崩壊土砂の斜面上および河道内での移動実態の解明に関する研究も実施している(図-5)。

2018年(平成30年)北海道胆振東部地震は、北海道内で初めて震度7を観測し、土砂崩れ等による死者42名を始め広域に甚大な被害を及ぼした¹³⁾。震源を中心に多数の崩壊地が発生し、その数は厚真町、安平町、むかわ町の3町を合計した全体で7,093か所¹⁴⁾に達し、このうち厚真町だけでも4,815か所を数えた。これら崩壊地で生産された土砂の二次移動を把握することを目的に、基盤岩の風化観測やインターバルカメラでの斜面の連続監視、河川での濁度観測等のモニタリングを継続している。

現在のところ下流の河道や海岸において、崩壊土砂の影響が推察されるような大きな変化は確認されていないが、産官学の連携スキームにより中長期的な視点に立ったデータの蓄積を行っていく。

粒径別土砂生産量の空間分布評価手法に関する研究

山地から河川を通じて海岸や海域に輸送される様々な粒径の土砂が、流域のどこからどれだけ供給されたかを解明するため、流砂水文観測や放射性同位体等のトレーサを用いて土砂生産量の空間分布を解析し、評価する手法を開発しています。



・放射性同位体分析を行い、土砂生産源を推定する。

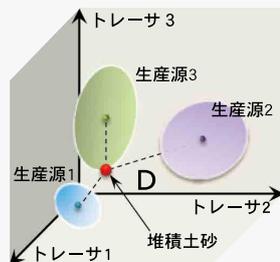


・流域の土砂生産源として、トレーサ特性の異なる6つの地質（岩相）グループに区分

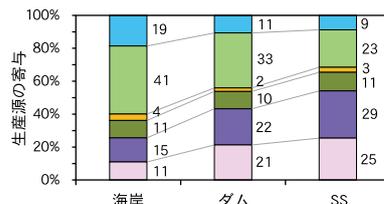
土砂生産源の寄与

$$p_i = \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}$$

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1$$



p_i : 生産源グループ*i*の寄与
 d_i : 堆積土砂と生産源グループ*i*のマハラノビスの距離



・土砂の種類（粒径）によって主要な生産源が異なる。

図-4

地震により発生した崩壊土砂の斜面上および河道内での移動実態の解明に関する研究（新規）

厚真川流域を対象に、地震後の崩壊土砂の移動実態の把握に向け、モニタリング調査を行っています。

① 地震後の崩壊斜面上の土砂動態と河川への移動実態の解明

- 崩壊斜面の崩壊土砂の移動実態
- 定点監視：複数斜面でインターバル撮影
- 撮影画像等をもとに、土砂移動の経時変化・植被状況の確認
- 関係機関とは観測および調査データの共有を図る

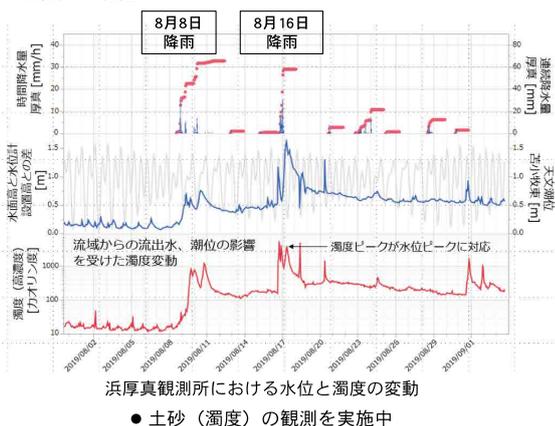


図-5

6. 底層環境に着目した停滞性水域の水環境管理技術に関する研究

湖沼やダムなどの停滞性水域では、ある程度の水深を持つと湖水の下層部には水温が低い或いは塩分濃度が高い、相対的に密度の高い水塊が溜まり、上層部と下層部の間の水の循環が極めて起きづら

くなる現象が見られる。下層部の水塊では湖底に堆積した有機物が好気性細菌に分解される過程で酸素が消費され無酸素状態となり、さらに水塊中の硫酸イオンや硫黄分が嫌気性細菌の活動により還元され毒性の高い硫化水素が発生する場合がある。

北海道東部に位置する網走湖は、ワカサギやシジミなどの漁業活動が盛んな最

大水深約16mの汽水湖であるが、網走川を通じてオホーツク海から遡上した塩水が下層部に滞留し貧酸素化が進行している。本研究では、網走湖の水質環境の実態を把握した上で、下層部の貧酸素水塊に直接酸素を供給する装置を試験的に設置し、水質改善効果の検証を行っている（図-6）。

酸素供給装置は直径・高さ共に3m程

底層環境に着目した停滞性水域の水環境管理技術に関する研究

ダムや湖沼などの停滞性水域では、貧酸素水塊が原因でアオコなど様々な水質障害が発生して、上水や漁業などに多大な被害を及ぼします。そこで、酸素供給による貧酸素水塊の改善手法及びその制御手法の研究を行っています。

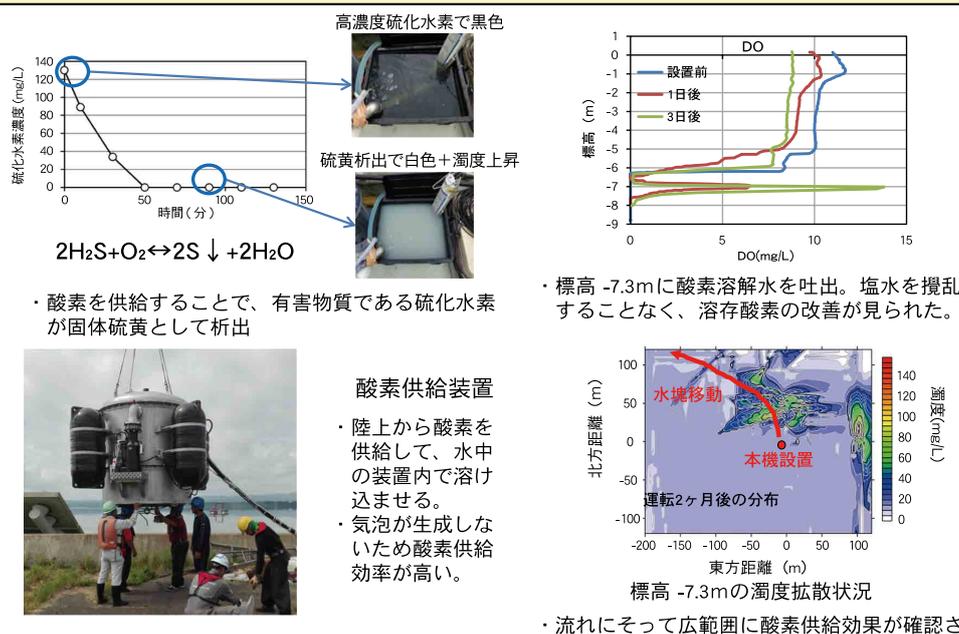


図-6

度の大きさであり、大気を濃縮して酸素濃度を圧縮により20%から90%まで上げた気体を装置に圧送し水に溶け込ませて湖内に排出する。酸素を気体の状態に入れ込むと泡の影響で乱れが発生し貧酸素水塊の上層部へ拡散させるおそれがあるが、本装置では酸素を完全に水に溶け込ませてから湖内に排出することが可能であるため上下に乱れずに下層部で水平方向に水質の改善が図られ、さらに、水塊に高濃度で存在した硫化水素は固体硫黄として析出することが確認された¹⁵⁾。

なお、2016年、環境基本法第16条に基づき定められている水質汚濁に係る環境基準のうち、生活環境の保全に関する環境基準に、底層溶存酸素量が追加された。これは中央環境審議会水環境部会が環境大臣に提出した答申に基づいたものであり、水域の底層を生息域とする魚介類等の水生生物の生息環境の保全・再生を目的としている¹⁶⁾。

環境基準の達成状況の評価、運用等に係る重要事項については、引き続き中央環境審議会で審議され、今後は具体的な水域における類型指定の検討を行う予定である。この類型指定の決定後は各水域で具体的な水質改善対策が求められることとなり、本研究のような対策技術の開発が急務である。

7. おわりに

水環境保全にかかる主要な研究課題について紹介してきたが、上記以外にも河道内樹木や堤防植生の管理に関する研究、汽水域の河道形状と生物生息環境の関係性の解明に向けた研究も実施しており、また、調査研究の過程で様々な関係機関や市民、地域団体との連携・協力体制の構築にも取り組んでいる。

当チームでは、安全で持続可能な社会経済の構築に対する水環境の多面的な関わりを踏まえ、現在そして将来のニーズを見据えつつ、今後も鋭意研究開発を進めていく。

【参考文献】

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局 水資源部：令和元年版日本の水資源の現況について、第1章水の循環と水資源の賦存状況2 降水量, <https://www.mlit.go.jp/common/001316355.pdf>, (最終確認日R2.6.24)
- 2) 北海道開発局：石狩川治水史(6-1)：https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/ud49g7000000tzs6.html, (最終確認日R2.6.24)
- 3) 片岡朋子ほか：豊平川におけるサケ自然産卵場再生試験、平成30年度北海道開発技術研究発表会、2019.2
- 4) 矢野雅昭ほか：中規模河床波発生領域によるalcove形成条件に関する数値計算、土木学会北海道支部論文報告集、第73号、2017.2
- 5) 森田健太郎：サケを食べながら守り続けるために。日本水産学会誌、86(3)：180-183、2020。
- 6) 布川雅典ほか：美利河ダム湛水域におけるサクラマス幼魚の行動。寒地土木研究所月報、780：2-7、2018。
- 7) 布川雅ほか：2020 サケカウンターによるサケ(Oncorhynchus keta)移動数計測。SALMON情報、14：34-37、2020。

- 8) 西原照雅ほか：航空レーザー測量を用いた風衝斜面及び風背斜面における積雪分布の分析、土木学会論文集B1(水工学)74(4)、I_883-I_888、2018。
- 9) 西原照雅ほか：人工衛星画像から抽出した雪面の情報を融雪期のダム管理に活用する手法の検討、日本リモートセンシング学会誌/39巻(2019)4号。
- 10) 国土交通省：河川砂防技術基準 計画編(基本計画編)・p.4、2004。
- 11) Mizugaki S et al.: Fingerprinting suspended sediment sources in the Nukabira River, northern Japan. International Journal of Erosion Control Engineering 5 (1): 60-69, 2012.
- 12) 水垣滋ほか：土砂生産源推定のためのトレーサ探索と粒径の影響。平成30年度砂防学会研究発表会概要集、p.213-214、2018。
- 13) 気象庁：平成30年北海道胆振東部地震の関連情報、https://www.jma.go.jp/jma/menu/20180906_iburi_jishin_menu.html, (最終確認日R2.6.16)。
- 14) 村上泰啓ほか：平成30年北海道胆振東部地震における全崩壊地面積の推定、令和2年度砂防学会研究発表会概要集、(印刷中)、2020。
- 15) 杉原幸樹ほか：汽水湖の底層貧酸素改善に関する現地試験、土木学会論文G(環境)、Vol.74, No.7, III_35-III_41, 2018。
- 16) 環境省：水質汚濁に係る環境基準の追加等に係る告示改正について、<http://www.env.go.jp/press/102287.html>(最終確認日R2.6.24)