

湿原河川における懸濁物質の時間的・空間的变化とその要因

雫田まき

1. はじめに

懸濁物質（以下 SS と略記）とは、水中に懸濁している不溶解性物質のことで、JIS では懸濁物質、環境基準では浮遊物質といい、2 mm のふるいを通し 1 μm の濾過材のうえに残留する物質と定義されている（国土交通省水質連絡会, 2008）。

SS には、粘土鉱物に由来する微粒子や、植物プランクトンとその死骸、下水、工場排水等に由来する有機物や金属の沈殿物等が含まれる。一般に、清澄な河川では、粘土分が主体であり、汚濁が進んだ河川では、有機物の比率が高く、湖沼や海域では、季節によってプランクトンとその遺骸が多くなるとされている。SS 濃度は、水の濁りや透明度に大きく影響を与えるほか、生態系に対しては、魚類のエラを塞ぐことにより呼吸を妨げて窒息死させる危険性や、太陽光線の透過を妨げ、藻類の光合成を阻害させる等の影響がある（国土交通省水質連絡会, 2008）。加えて、上流のダム等で SS が堰き止められることで、ダム湖の貯水容量を圧迫し、下流では SS の供給不足によって海岸線が後退する等の問題が報告されている（Mizugaki et al., 2012）。

河川によって輸送された SS の多くは河口域および沿岸域で沈降・堆積する（北野, 1984）。ここでは、SS 濃度が高くなると全窒素（T-N）、全リン（T-P）濃度も増加傾向を示すことも報告されている（比嘉ら, 2001）。特に T-P は SS との相関関係が高く、T-P の約 70% が土壌粒子などに吸着し流出している（比嘉ら, 2001）。このように SS は河口域や沿岸域に対して植物プランクトンの養分である栄養塩類のキャリアとなり、海の豊かさを育む手助けをしている（武川・二瓶, 2013）。その一方で、河口からの栄養塩の流入が過剰な閉鎖性海域では、拡散効果が小さいこともあり、SS が輸送した栄養塩類は富栄養化を引き起こす要因にもなり得る（環境省, 2010）。そのため、SS 濃度に応じて栄養塩類濃度も変化し、沿岸域に与えるインパクトも同時に変動しやすいため、SS が輸送する栄養塩類のバランスを保つことが大切であると考えられる。

本研究は、閉鎖性海域である厚岸湖に流入する別寒辺牛川流域を対象とし、SS の分布と動態について研究を行った。厚岸湖では、一年間を通して漁業活動が行われているため、流入する別寒辺牛川からの懸濁物質の動態の把握は重要である。

Nagao et al. (2010) は、別寒辺牛川中流域において 2004 年から 2008 年にかけて定期的にサンプリングを行い粒子状有機炭素（POC）の動態を調査し、春の融雪期間に濁度の値が高くなるが、融雪期間が過ぎると夏季と同様の濁度値を示すことを明らかにした。POC

は全有機炭素中の粒子状の有機炭素を指しており、SS もこの POC に含まれる。そのため、SS の指標となる濁度と POC の炭素同位体組成を調べることで SS 濃度の測定および発生起源解明に大きく役立つ。また、別寒辺牛川流域北部に隣接する矢白別演習場周辺流域から別寒辺牛川水系に流出する土砂に関する調査も行われており、矢白別演習場から大量の土砂が流出し、これを防ぐために砂防ダムが建設された（矢白別演習場・風連川水系土砂流出対策等委員会, 2014）。

このように別寒辺牛川流域では、過去に SS に関するいくつかの研究が行われてきたが、流域全体を対象とした研究は行われていない。そこで、本研究は別寒辺牛川流域全体の SS に着目し、その空間分布と季節変化、および河川最下流部の感潮域における短時間の流出動態を明らかにすることを目的とした。具体的には、SS の空間分布や時間変化を集水域の土地利用や各河岸の状態と関連づけて SS の起源を考察し、厚岸湖に流出する直前において、潮汐が SS の流出に与える影響を考察した。

2. 研究地域

本研究は、北海道道東に位置し、標茶町、厚岸町にまたがり厚岸湖に流入する河川である別寒辺牛川流域を研究対象とした（図 1 (a)）。調査地の一部は平成 5 年より厚岸湖・別寒辺牛湿原（5,277 ha）としてラムサール条約の登録湿地となっている。また、別寒辺牛川流域の別寒辺牛湿原は、高層湿原が原生的な状態で残されていることから、令和 3 年 3 月 30 日に厚岸霧多布昆布森国定公園に指定された（環境省, 2023）。

別寒辺牛川は、根釧台地とその谷壁斜面を流域とする河川で、流域面積は約 686 km² を有する。流域の傾斜は 0-20°（10 m メッシュ）で特に水辺や湿地帯は 5° 以下の平坦な地形を呈する。主な支流に、チライカリベツ川、トライベツ川、フッボウシ川、大別川、尾幌川がある。

別寒辺牛川は汽水湖の厚岸湖に流入する河川であり、厚岸湖では閉鎖性海域の特徴を生かした牡蠣やアサリの養殖が行われている。冬季にはチカやコマイなどの氷下待網漁が行われ（環境省, 2023）、ここでは一年を通して漁業が行われている。この地域は、亜寒帯の気候区分に属しており、1991-2020 年までの年間平均気温は 5.8°C、降水量は 1195.2 mm であった（気象庁, 2024）。流域の地質は、別寒辺牛川本流を境に東西に分かれており、東側は火山灰地質で、西側は段丘堆積物となっている（図 1 (b)：地質図 Navi (<https://gbank.gsj.jp/geonavi/>) を用いて作成）。

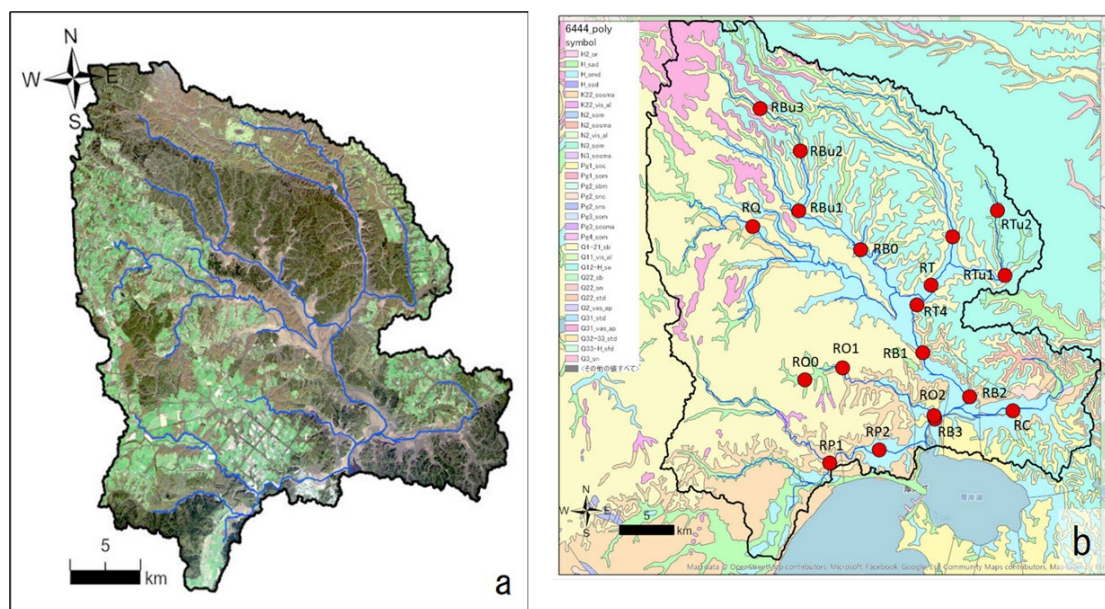


図 1. (a) 別寒辺牛川流域の位置および河川名、(b) 流域の地質図（東側緑色・ピンク色：火山灰地質、西側黄色：段丘堆積物）およびサンプリング地点。

3. 研究方法

3.1 広域サンプリング地点の設定

別寒辺牛川流域の最上流部から河口部に至る SS の空間分布を把握するために広範囲にサンプリングポイントを設置した。本流の別寒辺牛川のほか支流のチライカリベツ川、チャンベツ川、トライベツ川、フッポウシ川、大別川、尾幌川に合計 19 か所のサンプリングポイントを設置した（図 1-b）。サンプリングは、2023 年 12 月 1-4 日、2024 年 3 月 25-28 日、4 月 11-14 日、7 月 23-26 日、8 月 22-24 日に行った。採水は、橋上または川岸から表層水をバケツ採水した。河川内に入れる地点では表層水を直接バケツまたはボトルで採水した。橋上からの採水にあたっては、バケツを 2 回共洗いし、3 回目の採水を試料に用いた。採水したバケツの水試料を用い、まず事前に洗浄した 1L の遮光ボトルを 2 回共洗いし、3 回目に 2mm メッシュの篩で濾過した試料を保存した。こうして作成した SS 分析用の水試料は室内分析まで冷蔵保存した。その後バケツに残った水試料を用いて多項目水質計（ザイレム社 YSI ProDSS）により、水温、濁度、電気伝導度、pH、溶存酸素濃度を測定した。

3.2 濁度の測定

3.2.1 測定原理

濁度の測定には YSI ProDSS と JFE アドバンテック社のワイパー式メモリークロロフィル濁度計 Infinity series EPSA-CLW の 2 つを用いた。前者は地点ごとの測定に、後者は 1 地点での連続データの取得に利用した。どちらも測定には赤外光後方散乱式のセンサーを使用している。測定原理は、水流に光源を透過させ、その反射した光を受

光素子で受け取り、受け取った反射率によって濁度を測定するものである。単位は FTU、FNU、NTU と表記が異なるが、どれもホルマジン標準液を用いて校正を行っていることに加えて 90° 散乱光を測定しているため同様の値とみなすことができる。これらの違いは、センサーの光源の波長の違いのみである。

3.2.2 濁度の時間変動

SS の代用として濁度を長期間測定しその動態を調べた。使用機器はワイパー式メモリークロフィル濁度計 Infinity series である。2024 年 5 月 25-26 日は別寒辺牛川最下流に位置する RB3 において、2024 年 10 月 4-6 日は RB3 と別寒辺牛川中流の RB1 の 2 地点で同時測定した。RB3 では左岸から約 20m 流心に向かった地点の表層にワイパー式メモリークロフィル濁度計、河床に米国 SonTek 社の超音波ドップラー流速プロファイラー (IQ plus) と水圧式水位計 (HOBO U20L ウォーターレベルロガー) および電気伝導度計 (HOBO U24 電気伝導率ロガー) を設置し、5 分毎の測定を行った。RB1 においても RB3 同様の機器を設置し測定を行った。

3.2.3 カヌーによる濁度の空間分布測定

降雨直後の別寒辺牛川下流域における SS の動態を調べるため、2024 年 10 月 5 日 10 時 10 分から 12 時 40 分にかけて別寒辺牛川本流の RB1 から RB3 に至る区間をカヌーで移動し、河川の表層水の濁度を YSI ProDSS で連続測定した。また、この区間の 7 地点で採水し、河川内における濁度と SS の空間分布データを取得した。YSI ProDSS センサーはカヌー横に取り付け、水面直下のデータを記録した。

この観測と同時に、動画とタイムラプス映像を撮影し、別寒辺牛川本流の兩岸の様子を撮影した。カヌー先端部に左岸と右岸を撮影する 2 台の動画撮影用カメラ (GoPro) を設置し、カヌーの航行によって連続撮影する試みである。ただし、GoPro による撮影結果はデータが欠損してしまったため、今回の報告ではこのデータは用いていない。

3.3 SS 分析

現地で網目 2 mm のふるいを通して採水した水試料を冷蔵状態で実験室に持ち帰り、採水から 1 週間以内に分析した。分析は、1 L の水試料を十分に攪拌後、孔径 1 μ m のガラス繊維濾紙 (Whatman 製 GF/B) を通して吸引濾過し、ろ過後 105-110°C の炉で濾紙を 2 時間乾燥させた。使用した濾紙は事前に同様の条件下で乾燥し、乾燥後重量を測定している。濾過後乾燥させた濾紙を放熱後秤量し、濾過後の重量から濾過前の重量を差し引きその重量を SS と定義した。秤量に用いた電子天秤は SARTORIUS 社製の Entris II Essential Line で、測定精度は、0.1mg である。

3.4 土地利用解析

SS と集水域の土地利用・土地被覆 (以下 LULC と略称) との関係を調べるため、ArcGIS Pro を用いて教師付き分類により土地利用解析を行った。使用データは USGS EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) から取得した 2022 年 11 月 1 日の Landsat8 のデータである。LULC は、6 つに分類 (水域、開墾地、森林、草地、裸地、湿

地・河間地)した。また、別寒辺牛川流域の北部には日本最大の陸上自衛隊の演習施設である矢臼別演習場が存在しており、別寒辺牛川本流最上流からトライベツ川上流部分まで広がっている。この地域についても集水域同様に 6 つに分類して別寒辺牛川流域に与える影響について考察した。

4. 結果

4.1 SS と濁度の関係

季節を変えて 5 回実施した SS と濁度の測定結果を用い、SS と濁度の関係を示した結果を図 4 に示す。冬季渇水期に行った観測 (図 2-a) では両者に有意な相関関係が認められなかったものの、それ以外の 4 回の観測においては、SS と濁度の間にいずれも有意な正の相関関係がみられた ($p < 0.005$)。よって、以下に示す結果については、SS の測定ができずに濁度のみの観測が行われた場合においては、それぞれの採水期間の回帰直線を用いて濁度を SS に換算して SS の指標とした。

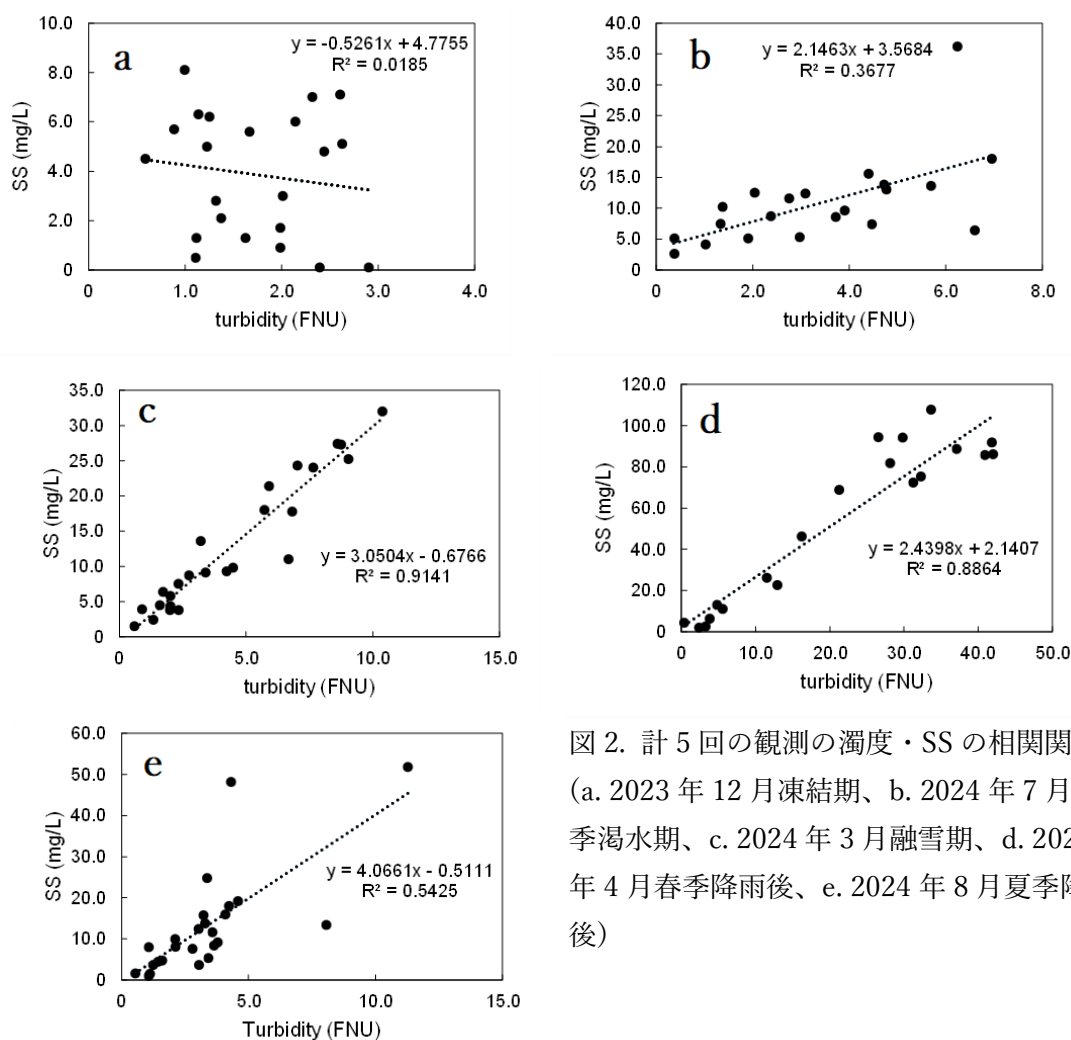


図 2. 計 5 回の観測の濁度・SS の相関関係 (a. 2023 年 12 月凍結期、b. 2024 年 7 月夏季渇水期、c. 2024 年 3 月融雪期、d. 2024 年 4 月春季降雨後、e. 2024 年 8 月夏季降雨後)

4.2 SS の空間的变化

全観測データの地点ごとの SS の平均濃度 (mg/L) を図 3 に示す。RB1 より上流の地点 (RBu3, RBu2, RBu1, RB0, RQ, RTu2, RTu1, RF, RT, RT4) で比較的高い SS の値を示し、下流では、低い SS の値を示した。

SS の濃度の値が急激に変化する RB1 から RB3 にかけての空間変化をより詳細にみるため、2024 年 10 月 5 日にカヌーを用いて行った濁度の連続観測結果を (図 5) に示す。図には河川表層水の濁度と電気伝導度 (EC) が示されている。別寒辺牛川本流の RB1 から支流のチライカリベツ川が合流する採水地点⑤までは濁度の値が緩やかに上昇傾向にあり、チライカリベツ川と本流合流後に濁度の値が急激に低下することが明らかになった。一方、この合流点を境に、EC は急激に上昇している。濁度と EC の値を照らし合わせると、EC が高くなると同時に濁度の値も上昇していることがわかる。SS の空間分布についても濁度と同様の結果を得られた。

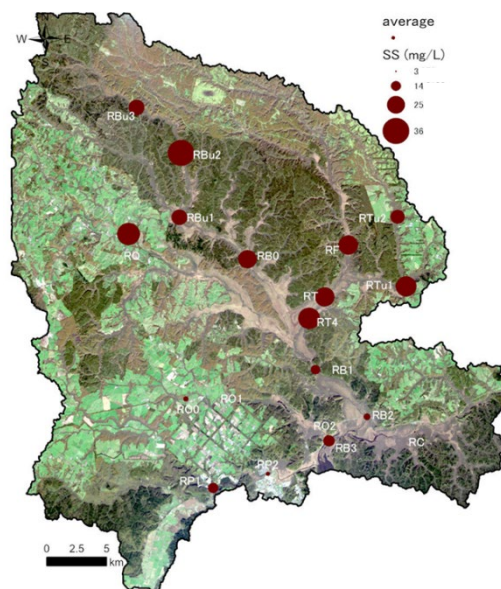


図 3. 計 5 回の観測の SS 濃度平均値。

4.2.1 季節的变化

季節を変えた計 5 回の観測におけるそれぞれの SS 濃度の空間分布図を図 4a-e に示す。観測時期により SS 濃度の空間分布に大きな違いがあることがわかる。特に SS 濃度が高かったのは、夏季の降雨後の観測 (図 4e) で SS 濃度の最大値は RBu2 で 107.7 mg/L であった。次いで SS 濃度の値が高かったのは、春季降雨後の観測 (図 4d) で、SS 濃度の最大値は RQ で 51.8 mg/L となり、降雨後に SS 濃度が特に高くなることが明らかになった。

一方、長期間降雨がなかった凍結期 (図 4a) および夏季渇水期 (図 4b) においては、

各測点で大きな違いはなく、いずれの観測点でも SS 濃度が低かった。融雪期（図 4c）も降雨後の観測同様空間分布に違いがみられ、トライベツ川、フッポウシ川の上流から別寒辺牛川本流下流にかけて SS 濃度が高くなる傾向を示した。また、支流のチライカリベツ川（RC）では、降雨の有無や季節的な違いは特にみられず、常に低い値を示していた。

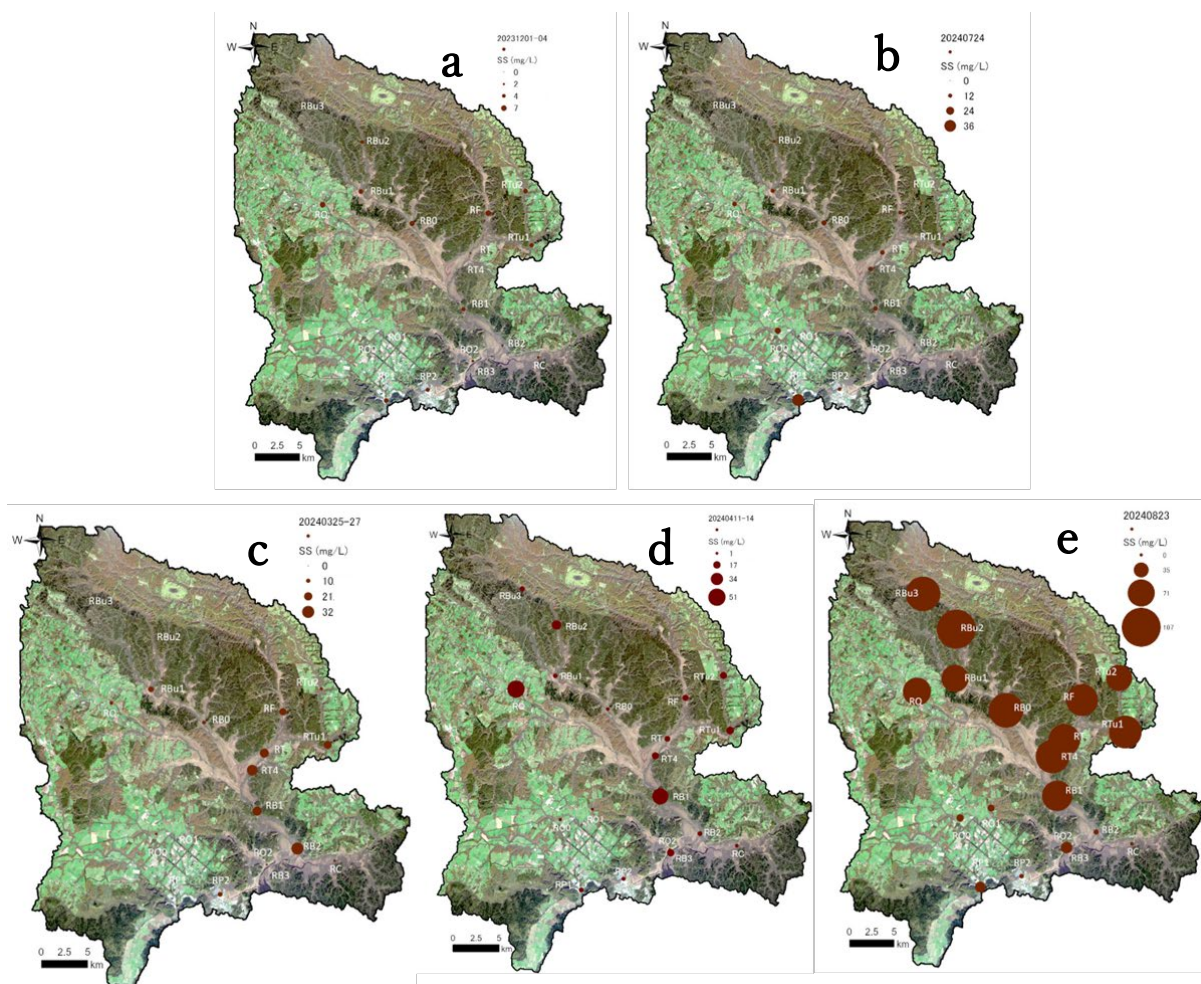


図 4. SS 濃度空間分布 (a.凍結期, b. 夏季渇水期, c.融雪期, d.春季降雨後, e.夏季降雨後)

4.3 短期間変動

4.3.1 潮汐による影響

図 6,7 に 2024 年 5 月 25-26 日および 10 月 4-6 日の RB3 で観測されたインデックス流速 (m/s)、水位(m)、EC、濁度 (FTU) を示す。インデックス流速とは、計測機直上の平均流速を指し、正の値は流出、負の値は流入（遡上）を意味する。図内で EC のピーク値が頭打ちになっているが、これは測器の測定限界値が $16000 \mu\text{S}/\text{cm}$ であるためそれ以上の値は測定できないためである。EC、インデックス流速のグラフよ

り、EC が高くなり塩水が遡上する上げ潮時および、EC が低くなり別寒辺牛川からの淡水が流出する下げ潮時に流速がそれぞれ速くなることがわかり、これらの周期はおおよそ半日周期であることから、これらの変化は潮汐によって生じていることがわかる。同時にインデックス流速と濁度の変動をみると、5 月、10 月どちらの観測においても流速が速くなると同時に濁度の値も高くなることが示された。

4.3.2 降雨による影響

観測期間中に降雨があった 2024 年 10 月 4-6 日に RB3 と RB1 で観測された種々の観測値を図 7 と図 8 に示す。流域内の太田に設置されたアメダスによれば、降雨は 10 月 4 日の未明から 5 日未明にかけて計 23 mm 観測された。中流の RB1 では、観測開始から約 1 日は降雨の流速に及ぼす影響は微小であり、ほぼ一定の値を示している（図 8）。降雨終了からおよそ 18 時間後から濁度の値が緩やかに低下していく傾向を示した。一方 RB3 では、降雨期間中に潮汐に伴う濁度の変動の振れ幅が大きかったことに加えて、RB1 同様降雨終了から一定時間が経過すると、潮汐変動に伴う濁度のピーク値も低くなる傾向を示した。また、5 月の結果と比較すると、10 月の観測では 5 月の観測結果よりも濁度が急激に上昇かつ低下していることも大きな特徴である。

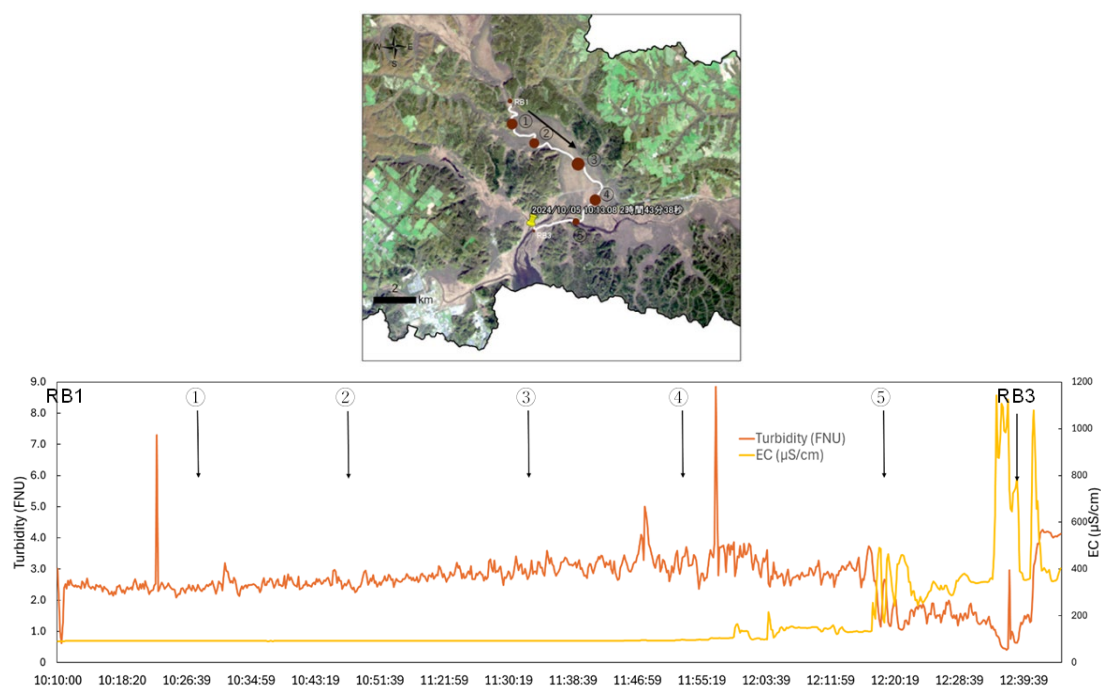


図 5. RB1 から RB3 の濁度（茶色）および EC（黄色）の連続データを下に示し、上の図はカーヌーでの経路および各測点における SS 濃度（茶丸）。

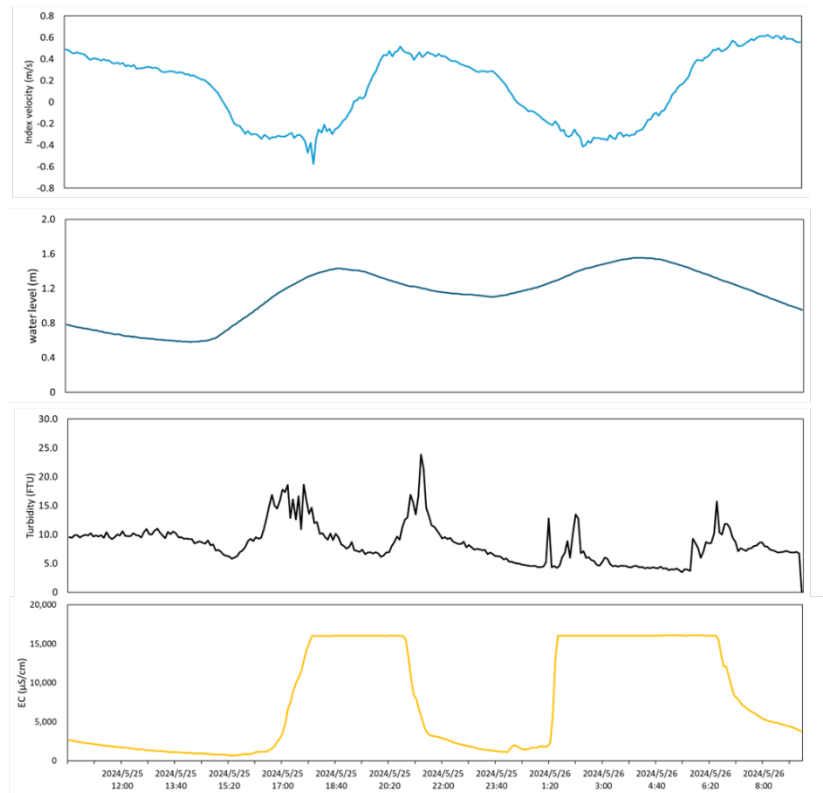


図 6. RB3 における 2024 年 5 月 25-26 日のインデックス流速 (m/s)、水位 (m)、濁度 (FTU)、EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$) の時間変動。

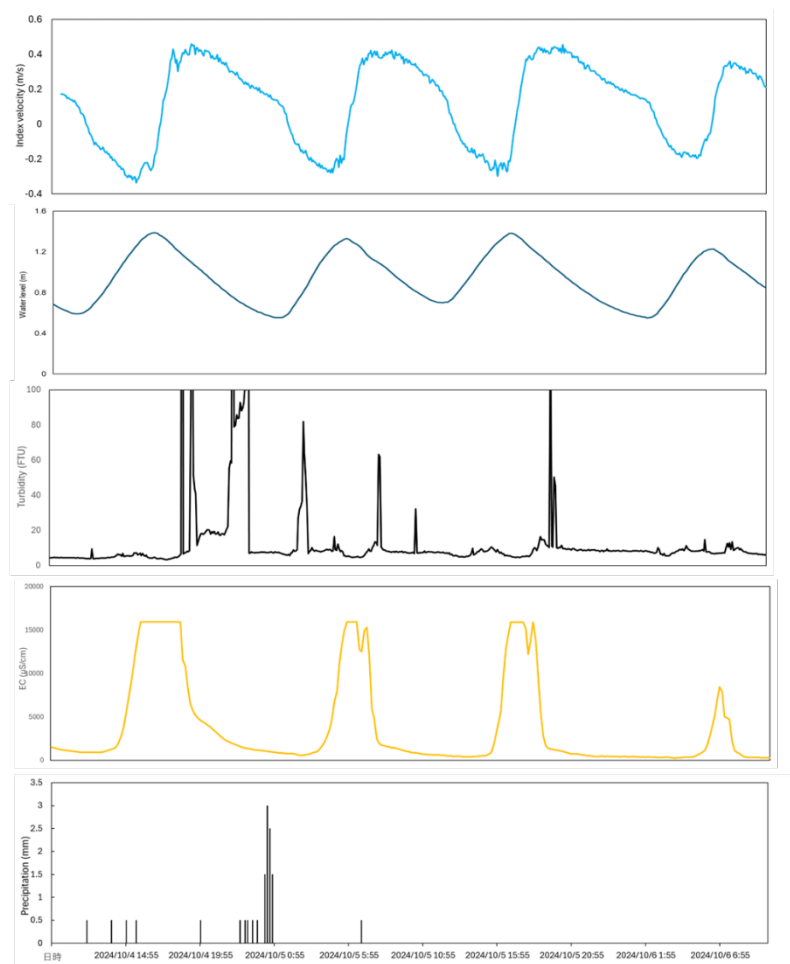


図 7. RB3 における 2024 年 10 月 4-6 日のインデックス流速 (m/s)、水位 (m)、濁度 (FNU)、EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)、降雨量 (mm) の時間変動。濁度については、流木や草等の引っ掛かりにより上がったピーク値は考慮しないものとする。降水量のデータは太田観測所のデータを使用。

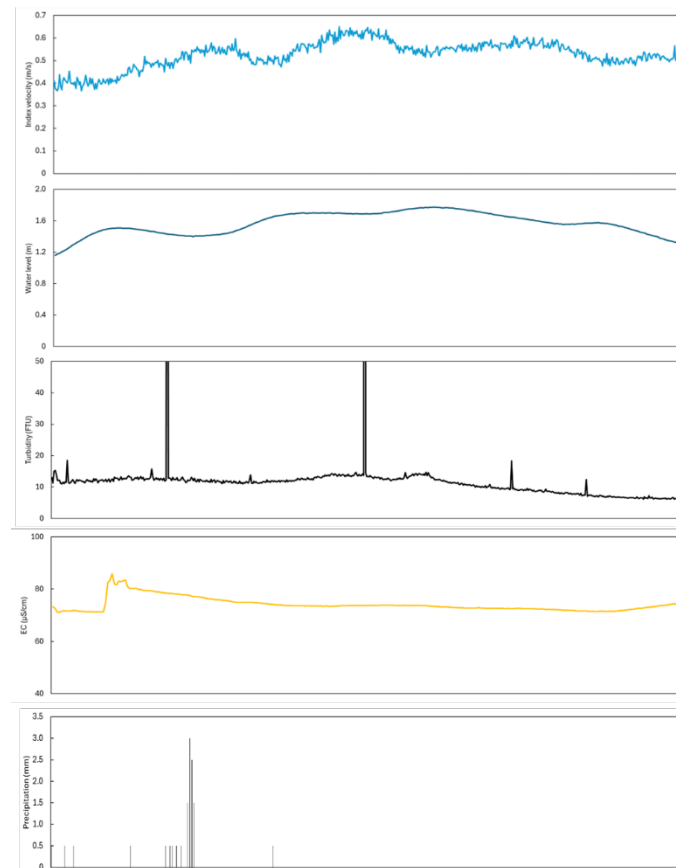


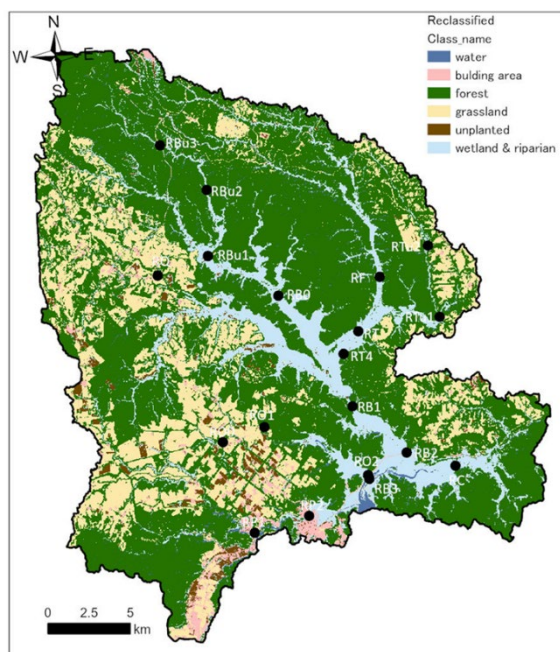
図 8. RB1 における 2024 年 10 月 4-6 日のインデックス流速 (m/s)、水位 (m)、濁度 (FTU)、EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)、降雨量 (mm) の時間変動。濁度については、流木や草等の引っ掛かりにより上がったピーク値は考慮しないものとする。降水量のデータは太田観測所のデータを使用。

4.4 土地利用解析

別寒辺牛川流域の LULC を 6 つに区分し ArcGIS Pro で教師付き分類を行った。その結果、主な LULC は森林地帯の約 430 km^2 (63%) であり、次いで草地 (20%)、湿地・河間地 (13%)、人工物、裸地 (同率、2%)、水域 (1%) と続いていた (図 9)。森林地帯は主に別寒辺牛川本流周辺に位置し、草地は流域の西側に多く位置していた。森林地帯は別寒辺牛川中流域東側では常緑樹が広がり、その他の地点では混交林が占めていた。草地は、植物が生育している牧草地および矢臼別演習場内の同様地点が主なものであり、植物が生育していない休耕地および土壌が削られている土地を裸地としており、主に草地内に点在していた。湿地帯については衛星画像からは高層・低層湿原の分類はできなかったため、森林地帯ではなく、かつ枯れている植物部分を湿地帯と定義した。人工物は、建物を人工物と定義した。

別寒辺牛川流域北部には陸上自衛隊の日本最大の演習場である矢臼別演習場が本流の

RBu3 東側から支流のフッポウシ川をまたぎトライベツ川観測点 RTu2 北側まで存在している。この地域については他地域同様に分類を行っており、演習場内の草地については、草類が茂っている地点、裸地については、土壌がむき出しになっている地点と分類した。演習場内の大部分は森林地帯だが、演習場中央部には大規模な草地および裸地が確認され、この地点はフッポウシ川上流域に位置していた。



	area (km ²)	ratio
water	5.132014	1%
bulding area	16.918475	2%
forest	429.5418	63%
grassland	135.841524	20%
unplanted	12.288954	2%
wetland & riparian	85.801152	13%
	685.523919	100%

図 9. 別寒辺牛川流域における LULC 図および流域面積に占める各 LULC の面積割合。

5. 考察

5.1 SS と濁度の関係

本研究において冬季渇水期を除く 4 期間の観測で SS と濁度には有意な正の相関関係があることが分かった。SS と濁度の関係については一般的に相関関係があるとされており(水垣ら, 2017)、一部期間を除き別寒辺牛川流域でも成り立つことが言えた。

冬季渇水期において、SS と濁度に有意な正の相関関係がみられなかった要因として、冬季渇水期(12-3 月)に厚岸町では平均気温が 0°C を下回り(気象庁, 2024)、この寒さによって河岸土壌が凍結し、河川内の粒子状有機物の割合が低下し SS 濃度も低下したと考えられる。このように SS 濃度の低い時期には、比較的粒径が小さい SS が多く存在し濁度計の散乱光強度を上げる(横山, 2002)ほか、河川水に溶け込んだ有色溶存有機物の割合が相対的に高くなりこれらが今回用いた濁度計の赤外光後方散乱式センサーに影響を与えた可能性が挙げられる。

5.2 SS の空間分布にみられる特徴

5.2.1 季節的变化

計 5 期間に行った SS 濃度の空間分布は、渇水期、出水期で大きく異なることが分かった。渇水期においては、SS 濃度に空間的な差はみられなかった(図 4a, b)。渇水期は

降雨や融雪等の特定のイベントによって河川内に土砂が供給されないため、冬季渇水期における SS 濃度は冬季における SS 濃度、夏季渇水期における SS 濃度は夏季における SS 濃度とみなすことができる。特に冬季渇水期に SS 濃度が低かった要因として、5.1 でも議論した通り、冬季凍結期の寒さによって河岸土壌が凍結していることや、流量・流速の低下により河岸の浸食が抑えられたと考えられる。一方、夏季渇水期では冬季凍結期のように土壌凍結はないものの、降水がないため流量も低下し流速も比較的穏やかとなり河岸の浸食が冬季凍結期同様に抑えられたことに加えて、流速低下に伴う河床堆積物からの再懸濁の低下で SS 濃度が低くなったと考えられる。

出水期においては、それぞれの観測で空間的に違いがみられたことに加えて SS 濃度が高い地点も異なっていた。融雪期には上流で低い値を示し、下流にかけて高くなる傾向を示した（図 4c）。融雪により徐々に融解し始めた土壌から浸食が始まり、その結果上流域から供給された SS が下流域へ順次供給されたためと考えられる。春季降雨後では、特に支流のチャンベツ川の RQ および別寒辺牛川本流中流の RB1 で 50 mg/L と高い値を示した（図 4d）。RQ 地点のチャンベツ川流域周辺の主な土地利用が農地であり（図 9）、かつ近くに牧場があることから、春季の降雨により冬季に凍っていた土壌が融解し懸濁物質が一気に供給された可能性がある。RB1 地点では、RQ 地点の SS 濃度がそのまま反映された可能性と洪水により流量が増加したことで RB1 周辺の表層から懸濁物質が流出し SS 濃度が高くなった可能性の 2 つの要因が考えられる。夏季出水期では、別寒辺牛川本流中流の RB1 より上流全域で非常に高い SS 濃度を示した（図 4e）。このサンプリングは降雨直後（降雨終了 4h 後）であったということもあり、降雨によって河川内に SS が一気に流出し 100 mg/L 前後という非常に高い値を示したのではないかと推測される。RB1 より下流では逆の傾向がみられたがこれは、厚岸湖からの塩水が流入する上げ潮時に採水を行ったため塩水の遡上によって SS が希釈された、あるいは SS が塩水によって凝集し沈殿した可能性がある。

5.2.2 無降水時間の影響

各観測における SS 濃度と無降水時間との関係について検討した。その結果、各観測における無降水時間は、冬季凍結期を除く観測においてサンプリング地点毎の SS 濃度標準偏差と負の相関関係があることを示している（表 1; 図 10）。つまり、最終降雨（降水量 > 1 mm）からサンプリングまでの時間が短いほど別寒辺牛川流域全体の SS 濃度の空間分布の差が大きい（図 10）。一般的に降雨後の SS 濃度の動態は流量変動と関係があるとされている（清水, 1998; 水垣ら, 2015）。しかし、別寒辺牛川流域は他河川に比べると傾斜が緩やかであり降雨後から河川内の流量増加までの時間も比較的長くなると予想される。そのため、採水時における最終降雨からの時間が短いほど上流域と下流域で SS 濃度に差がみられたと推測される。

表 1. 冬季凍結期を除く観測における SS 濃度標準偏差および無降水時間

	SS濃度標準偏差	無降水時間 (min)
2023年12月	2.307	4650
2024年3月	7.548	11100
2024年4月	9.505	4410
2024年7月	13.382	6000
2024年8月	38.387	240

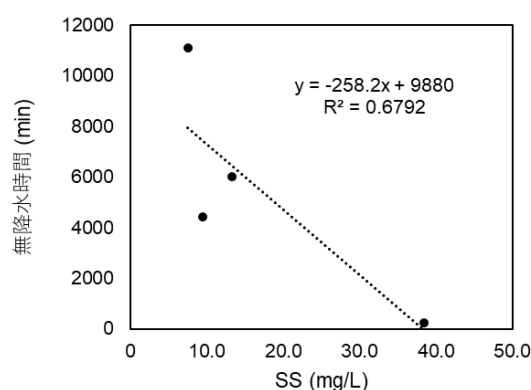


図 10. 冬季凍結期を除く観測におけるサンプリング地点毎の SS 濃度標準偏差と無降水時間との関係。

5.2.3 土地利用および土地被覆による違い

別寒辺牛川流域の広域サンプリング地点を主に起点として 23 の小集水域に区分した図を作成し、それぞれの集水域における各 LULC 率を算出した (図 11)。その結果支流のチャンベツ川の RQ で草地の割合が 41.8%と最も高い値を示した。先行研究によれば、年平均土砂流出量は森林面積率に対して負の相関、農地面積率に対して正の相関があるとされている (Walling and Webb, 1996)。しかし、SS の空間分布と採水した集水域の LULC との関係を調べたところ、RQ の SS 濃度と草地が関係している可能性がみられたが、RQ を含むすべての観測において草地と LULC の間に有意な相関関係は得られなかった ($R^2 < 0.01$)。そのため別寒辺牛川流域の SS 濃度は周辺の LULC 以外の他要因によって決まる可能性が示唆された。

先行研究では、別寒辺牛川流域における SS の供給源として自衛隊の矢白別演習場が指摘されていた (矢白別演習場・風連川水系土砂流出対策等委員会, 2014)。別寒辺牛川流域で矢白別演習場からの影響が考えられる地点はトライベツ川およびフッポウシ川である。今回の調査では、これらの 2 支流で特出して SS の値が高くなる結果は得られなかった。2005 年に上流の矢白別演習場境にトライベツ川砂防ダムが建設されたため、トライベツ川では砂防ダムより上流からの土砂の供給は低減した可能性がある。一方

で、フッポウシ川にはトライベツ川に建設されたような砂防ダムはなく、矢白別演習場から土砂が供給される可能性は捨てきれない。今回の 5 回の観測においては、フッポウシ川由来の SS をトライベツ川のサンプリング地点と比較すると同様の挙動を示していることから、矢白別演習場からの供給ではなくトライベツ川と同様に河岸や河床堆積物からの供給を示唆している。

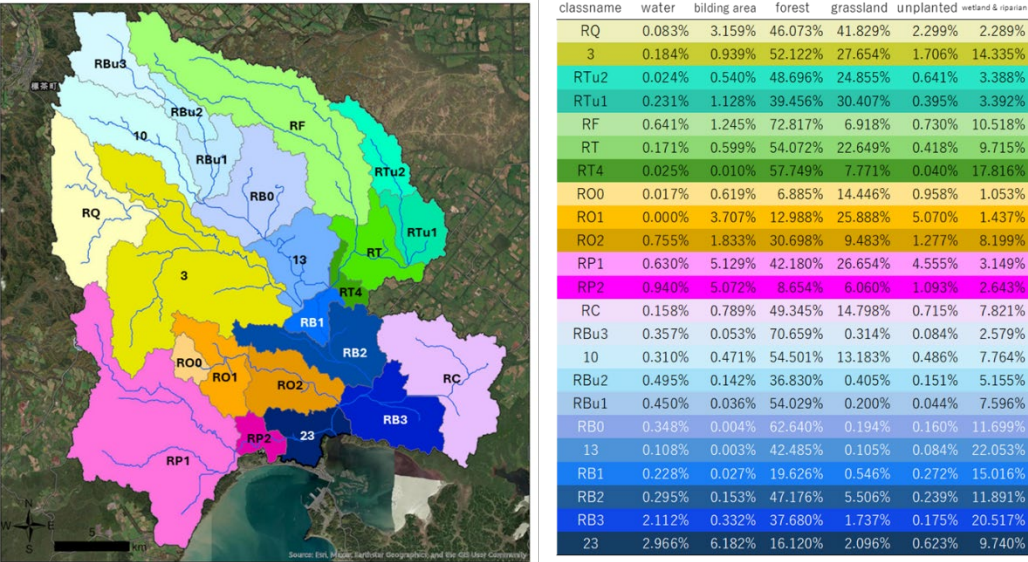


図 11. 各集水域の区分とそれぞれの集水域における LULC の面積割合。

5.3 SS の供給源

5.2.3 で議論した通り、別寒辺牛川流域の SS は、従来考えられてきた農地からの供給に加え、その他の要因も存在することが考えられる。その一つとして挙げられるのが、河川兩岸の侵食崖からの供給である（写真 1）。屈斜路湖に起源をもつ火砕流台地を侵食して流下する別寒辺牛川水系の河川の兩岸には、高さ 1m 程度の侵食崖が発達する。侵食崖の露頭を観察すると、河岸段丘を構成する堆積物は上流では火砕流や段丘堆積物などが目立ち、下流に向かうにつれて泥炭が卓越するようになる。河川水量の増加時に、この侵食崖から細粒の物質が河川水中に供給され、SS の供給源となることが予想される。

その他の要因としては、降雨等で河川内に供給された SS が河床に堆積し、河川流量が増加した際に、この堆積物が再懸濁して河川水中を流下する可能性である。事実、全てのサンプリング地点を通じて、流心付近の河床には細粒物質が堆積していることを確認しており、流速の変化によって、これらの細粒堆積物が再懸濁して SS 濃度を高めることは十分考えられる。

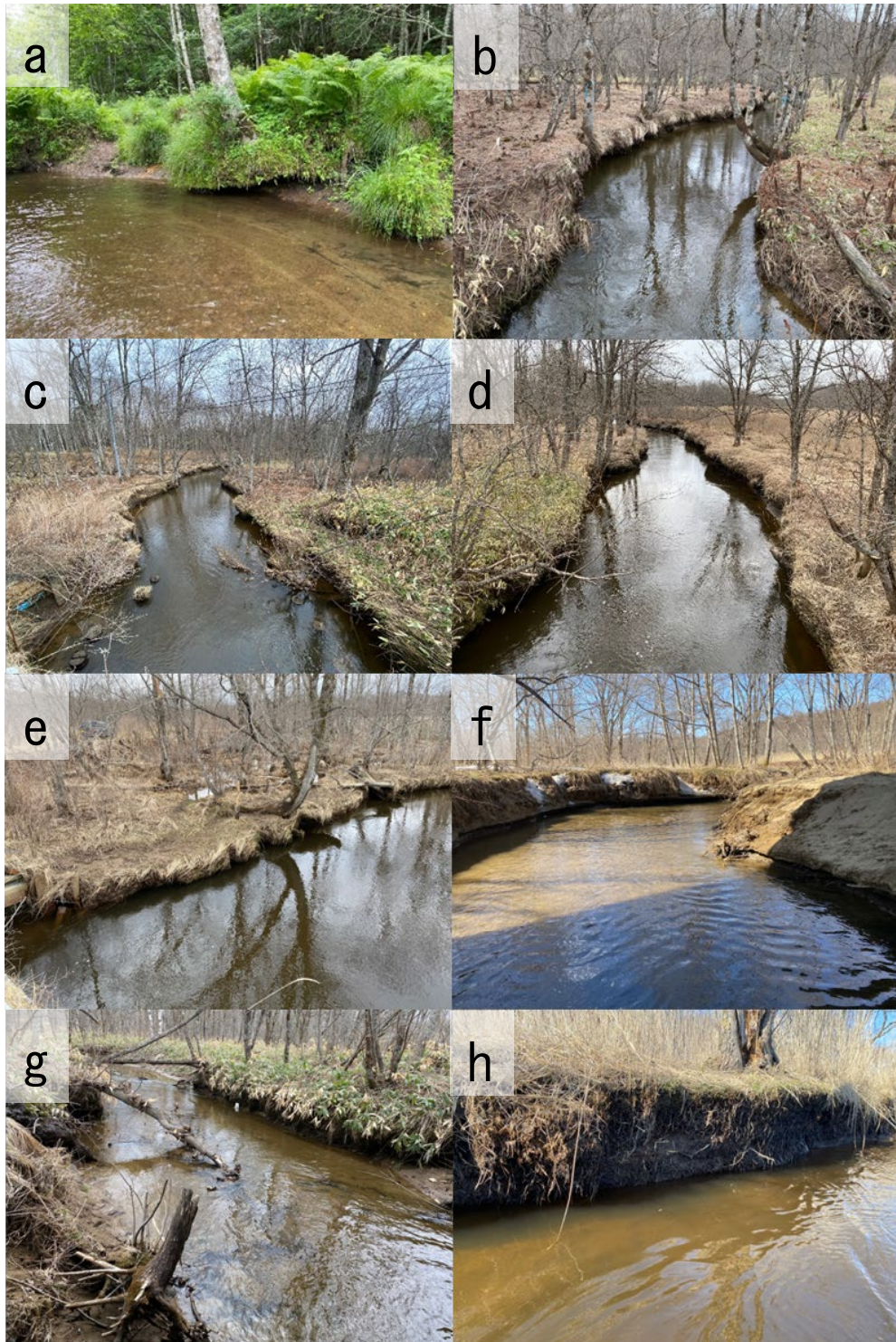


写真 1- a. RBu3 (2024/7/24)、b. RBu2 (2024/4/12)、c. RBu1 (2024/4/12)、d. RF (2024/4/12)、e. RB0 (2024/4/12)、f. RTu1 (2024/3/26)、g. RTu2 (2024/4/12)、h. 本流⑤ (2024/4/13) の河岸浸食が起こる可能性のある地点。

5.4 河口域での動態

河口の RB3 では、潮汐の影響を受けて流速および水位上昇時に濁度が上昇する結果が得られた (図 6,7)。この結果は、上げ潮および下げ潮の双方において河川内の流速が低下した際に SS が沈降し、再び流速が上昇すると同時に SS が巻き上げられ再懸濁を起していることを示唆している。また、別寒辺牛川ないし厚岸湖から供給された SS 濃度の高い水塊が上げ潮や下げ潮で観測地点の RB3 を行き来し、潮汐に応じて濁度の上昇と低下を繰り返し起こしている可能性も考えられる。同様な考察は、RB3 地点の溶存有機物濃度 (CDOM) について調べた先行研究でも指摘されている (竹内, 2022)。また、厚岸湖からの塩水が遡上することで懸濁物質が凝集しフロック形成をした結果、濁度の値がピーク後急激に低下を示している可能性も指摘したい (図 6,7)。

2024 年 5 月に行った観測で濁度のピーク時間に違いがみられたことについて、水位と濁度の値を比較すると水位の変動幅が大きいほど濁度のピーク時間が持続している。一方で、水位差が小さいほどピーク時間が短く濁度の低下反応が速いことが伺える。堆積物の輸送には、主に掃流砂輸送と懸濁砂輸送の 2 つがある。掃流砂輸送は、底質に密着した粒子が滑走、転がり、飛躍し輸送されるのに対し、懸濁砂輸送は乱流による抗力で水柱内の粒子が輸送される (Van Rijn, 1993)。堆積物の輸送速度は一般に底質に近いところで最も高くなる (Kraus, 1987; Tonk and Masselink, 2005; Cartier and Hequette, 2015) が、強い波や潮流によって堆積物が水柱全体で混合されることがある (ex. Brand et al., 2019)。このことは、潮汐による水位差が大きくなると河川内の垂直方向への攪拌効果が大きくなり、河床からの再懸濁量が増加することを指しているといえる。これまでの調査で本研究の調査地の別寒辺牛川は強混合河川 (図 13) であることが分かっている。そのため、本研究においても潮位差が大きいほど濁度の低下までに時間を要するのではないかと考えられる。

降雨後の 2024 年 10 月に行った RB3 での SS の動態は、5 月に行った観測と同様に潮汐の変動に伴って濁度の値も増加していた。しかし、10 月の観測は降雨後ということもあり、5 月の観測とは異なり、濁度値が 3 倍以上であった。これは、上流からの懸濁物質の供給量が増加したことに起因すると考えられる。また、降雨終了から約 1 日経つと濁度上昇値も落ち着くことが明らかになった。中流域の RB1 においても河口域と同様の観測を行い、潮汐の変動と共に流速も変動していることが分かったが、濁度の値は河口域のように潮汐の影響は受けていなかった。しかし、降雨終了から約 1 日経つと同様に濁度の値が緩やかに低下していく様子が観測され、上流からの懸濁物質の供給量が低下したためであると考えられる。

5.5 厚岸湖への SS 推定流出量

Ding ら (Ding et al., 未発表) は、別寒辺牛川最下流地点 (RB3) において流量観測を行い、凍結融解期を除く 4-11 月の期間において降水量から流出量を推定する簡便式を示した (式 (1), (2))。

$$d = 0.2916P + 4.4173 \quad (1)$$

$$\Sigma Q = d * t \quad (2)$$

ここで、 d は流出量 (m^3/s)、 P は降水量 (mm)、 Q は累積流出量 (m^3)、 t は 5 分間隔で観測した累積観測時間 (min) である。

この(1)(2)式を用いて 5 月および 10 月の別寒辺牛川最下流地点 RB3 における流量を算出した。そこから観測で得られた SS 濃度と濁度の回帰直線 (図 12; 表 2) を用いて SS 濃度を推定し、その後厚岸湖に流出する SS を推定した。ただし 10 月に行った観測では濁度のデータが流木やアマモ等の SS 以外の攪乱要因によって異常な値を示していたため、5 月の観測データと比較するため 30 FTU 以上の値は打ち切り、濁度の平均値を用いて SS 濃度を推定した。

5 月および 10 月の RB3 における SS の流出量を算出した結果、小規模降雨では 1 日あたり 1.5 kg 前後の SS が厚岸湖に流出していることが予測された (表 2)。また、この結果より RB3 において流量が多い 10 月の観測よりも流量が少ない 5 月の観測の方が SS の流出量が多い。5 月、10 月の両観測はともに大潮であるが、10 月の観測では 5 月の観測に比べると潮位差が 56cm もあり、5 月観測時の方がより潮位変化が大きかったといえる。このことは RB3 においては、降水よりも潮汐の方が流量を支配することで、結果的に SS の流出量に強く影響していることを示唆している。

表 2. RB3 における推定 SS 流出量および流量

	2024/5/25-26	2024/10/4-6
d	11.29906	13.86514
ΣQ ($t=5\text{min}$)	338.9718	415.9542
SS濃度と濁度の回帰式	$y = 0.2656x + 3.3413$	$y = 1.0268x - 0.9167$
観測全期間SS流出量 (kg/total)	1.8083	2.1017
SS流出量 (kg/day)	1.8083	1.0718

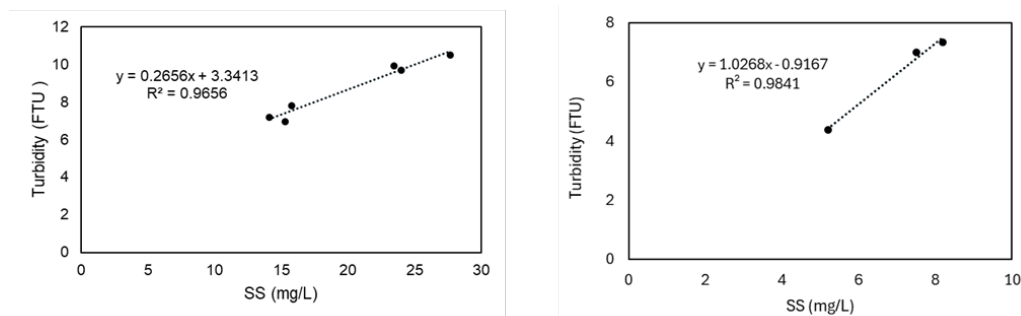


図 12. RB3 における右: 5 月、左: 10 月の SS と濁度の相関関係

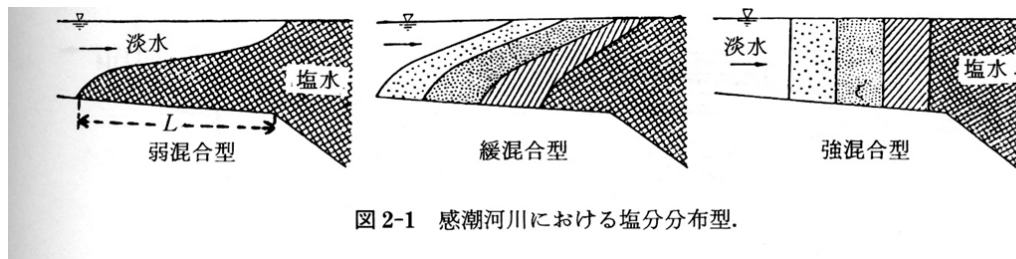


図 2-1 感潮河川における塩分分布型.

図 13. 感潮河川における塩分分布型 (奥田, 1996)

5.6 別寒辺牛川流域と他河川の比較

別寒辺牛川本流の上流域における勾配は、最も急峻な地点で約 $1/660$ (<1.72 m) である (図 14)。一般的な河川の河床勾配は、海に近い下流部で $1/1000$ - $1/5000$ 、中流部で $1/100$ - $1/1000$ 、上流山間部で $1/100$ より急である (国土交通省, 2003)。これと比較すると、別寒辺牛川流域が緩勾配な河川であることがわかる。そのため、SS も上流から下流へ一度に供給されるのではなく、沈降と再懸濁を繰り返してゆっくりと河口まで運ばれていくのではないかと予想される。

別寒辺牛川流域と同様の気候帯である釧路湿原源流域の牧草地域における融雪融凍期の土砂流出に関する研究によると、 60 mm/day 前後の降雨の影響で SS 濃度は約 200 - 1000 mg/L 前後の最大値を観測している (高石ら, 2007)。また、北海道中央部の沙流川水系額平川流域で行われた浮遊土砂の研究では、およそ 4 日間で総雨量 202 mm の降雨出水イベントが発生し、その際に約 $293,000$ t の浮遊土砂が流出している (Mizugaki et al., 2012)。これらの研究と比較すると本研究では、融雪融解期のイベントは観測できていないものの夏季の降雨後において、釧路湿原源流域と同様の降水量で SS 濃度が 100 mg/L 前後と低い値を示していた。これは森林地帯や湿地帯が周辺土地利用を占めている別寒辺牛川流域では草地地域と比べて SS の流出が抑えられているためと考えられる。



図 14. 別寒辺牛川流域の傾斜 (m)。色が薄いほど傾斜が緩やかである。

6. 結論

本研究では、豊富な海産資源がある厚岸湖に流入する河川である別寒辺牛川流域の懸濁物質に着目し、懸濁物質の空間分布および流出動態を明らかにするため、広域サンプリングおよび連続測定を行い空間的変動と時間的変動を検討した。

流域内の広域サンプリングの結果、渇水期にはSS濃度に空間的な差はみられなかったが、出水期には空間分布に大きな違いがあることが分かった。出水期においてSS濃度が高かった地点は別寒辺牛川中流のRB1地点よりも上流域で、下流に行くにつれてSS濃度が低下していく様子が確認できた。このような空間分布の違いは、集水域の土地利用および土地被覆（LULC）と関係があると先行研究では示唆されているが、本研究においては農業地域が密集している支流のRQ以外の地点において、LULCとSS濃度の両者に有意な関係はみられなかったため、河岸もしくは河床堆積物からの供給の可能性があることがわかった。最下流観測点でのSSの時間変動に関しては、潮汐による影響が支配的であった。潮汐の影響でSSの再懸濁化、塩水によるコロイド粒子形成、高濁度水塊の移動が起こり、SS濃度が上昇と低下を繰り返していることが示唆された。

参考文献

- Brand, E., Sloover, L.D., Wulf, W.D., Montreuil, A.L., Vos, S., Chen, M. (2019). Cross-Shore Suspended Sediment Transport in Relation to Topographic Changes in the Intertidal Zone of a Macro-Tidal Beach (Mariakerke, Belgium). *J Marine science and engineering*. 7(6), 172. <http://dx.doi.org/10.3390/jmse7060172>
- Cartier, A., Héquette, A. (2015). Vertical distribution of longshore sediment transport on barred macrotidal beaches, northern France. *Cont. Shelf Res.*, 93, 1–16.
- Evelien Brand, Margaret Chen, Anne-Lise Montreuil. (2020). Optimizing measurements of sediment transport in the intertidal zone. *Earth-Science Reviews.*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103029>
- Hayakawa A, Shimizu M, Woli KP, Kuramochi K, Hatano R. (2006). Evaluating stream water quality through land use analysis in two grassland catchments: impact of wetlands on stream nitrogen concentration. *J Environ Qual*. 1-35(2), 617-27. doi: 10.2134/jeq2005.0343. PMID: 16510707.
- 比嘉 栄三郎, 仲宗根 一哉, 大見謝 辰男, 満本 裕影. (2001). 沖縄島の河川火口から海域へのSS及び栄養塩の流出. *沖縄衛生環境研究所報*, (35), 111-119.
- 北野 康 河口域の地球化学 (総説) (1985). *地球化学*. 18(2) 65-71. <https://doi.org/10.14934/chikyukagaku.18.65>
- 国土交通省 (2003). 日本と世界の河川の比較. https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/kasen/gaiyou/panf/gaiyou2003/pdf/1.pdf
- 国土交通省水質連絡会. 河川水質試験方法 (案) (2008). https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/suishitsu/houhou.html
- 環境省 閉鎖性海域中長期ビジョン, 閉鎖性海域中長期ビジョン策定に係る懇談会. 2010. (2023). 環境省 2022 約湿地リーフレット 2023 修正. https://www.env.go.jp/nature/ramsar/conv/ramsarleaflet/11_Akkeshi-ko_and_Bekanbeushi-shitsugen.pdf
- Kraus, N.C. (1987). Application of portable traps for obtaining point measurements of sediment transport rates in the surfzone. *J. Coast. Res.*, 3, 139–152.
- Mizugaki S, Abe T, Murakami Y, Maruyama M, Kubo M. (2012). Fingerprinting suspended sediment sources in the Nukabira River, northern Japan. *International Journal of Erosion Control Engineering*. 5(1), 60-69.
- 水垣 滋, 平井 康幸, 谷瀬 敦, 久保 まゆみ. (2015). 積雪寒冷地における流域からの濁質流出と環境への影響評価・管理手法に関する研究. *国立研究開発法人 土木研究所 平成27年度プロジェクト研究報告書*, 11-1.

- 水垣 滋, 捧 雅章, 小田島 大祐. (2017). 濁度計を用いた浮遊土砂・栄養塩の連続観測. 第60回北海道開発技術研究発表会. https://thesis.ceri.go.jp/db/documents/public_detail/62422
- 武川 一樹, 二瓶 泰雄. (2013). 日本の河川における浮遊土砂輸送量と流量の相関関係. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*. 69(2), 1221-1225. https://doi.org/10.2208/kaigan.69.I_1221
- 奥田節夫 (1996) 感潮河川における流れと塩分分布. 西條八束・奥田節夫編「河川感潮域—その自然と変貌—」、名古屋大学出版会、248p.
- Seiya Nagao, Takafumi Aramaki, Osamu Seki, Masao Uchida, Yasuyuki Shibata, (2010). Carbon isotopes and lignin composition of POC in a small river in Bikanbeushi Moor, northern Japan, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268(7–8), 1098-1101, ISSN 0168-583X, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.10.108>.
- 清水 収 (1998). 土砂収支解析による流域土砂輸送の時空間特性に関する研究. *北海道大学農学部 演習林研究報告*. 55(1), 123-215.
- 竹内 祥太 (2022). 北海道東部別寒辺牛川における有色溶存有機物の流出動態. *修士論文*.
- Tonk, A.; Masselink, G. (2005). Evaluation of Longshore Transport Equations with OBS Sensors, Streamer Traps and Fluorescent Tracer. *J. Coast. Res.*, 21, 915–931.
- 高橋 洋行, 白戸 利克, 金谷 雅宏. (2007). 北海道東部の牧草地域における融雪融凍期の土砂流出特性. *農業農村工学会誌*. 75(12), 1113-1116. <https://doi.org/10.11408/jjsidre2007.75.1113>.
- 高石 洋行, 白石 利克, 金谷 雅宏. (2007). 北海道東部の牧草地域における融雪融凍期の土砂流出特性. *journal of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering*. 75(12), 1113-1116.
- Van Rijn, L.C., (1993; 2006). Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. *Aqua Publications*, Netherlands.
- Walling D. & Webb B. (1996). Erosion and sediment yield: global and regional perspectives. *Environmental Science*.
- 矢白別演習場・風連川水系土砂流出対策等検討委員会 矢白別演習場・風連川水系土砂流出対策等に関する最終調査報告書. (2014).
- 横山勝英 (2002). 濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察. *土木学会論文集*, 698(II-58), 93-98.