

石狩川水系における水量・水質の両面を考慮した
河川の流況特性

北海道大学大学院 工学研究院	山 田 朋 人
北海道大学大学院 工学研究院	佐 藤 久
北海道大学大学院 工学研究院	中 屋 佑 紀

石狩川水系における水量・水質の両面を考慮した 河川の流況特性

山田 朋人¹・佐藤 久²・中屋 佑紀³

Tomohito YAMADA, Hisashi SATO and Yuki NAKAYA

¹ 北海道大学大学院工学研究院 土木工学部門 教授

² 北海道大学大学院工学研究院 環境工学部門 教授

³ 北海道大学大学院工学研究院 環境工学部門 助教

要 旨

気候変動に伴う洪水災害の激甚化が指摘される一方で、2021年7月には北海道全域において極端な高温かつ少雨が記録された。本研究は、流域における水循環の特徴を水量・水質の双方の観点から解明することを目的とした現地でのモニタリングを主体とする研究項目により構成される。主な観測対象河川は豊平川を含む石狩川下流域である。研究項目は、上流部における積雪・融雪のメカニズム解明、河川水の温度や塩分濃度に加え、生物学的パラメタ（DNA濃度、細菌濃度、大腸菌濃度、薬剤耐性遺伝子濃度）の観測および薬剤耐性遺伝子といった流況特性を特徴づけるプロキシの特定である。以上から、流出特性の理解を向上させるとともに、河川そのものが水質を含む流況に与える影響を明らかにするという科学的意義を有するものである。

《キーワード：石狩川；積雪；融雪；塩水；生物学的パラメタ；薬剤耐性遺伝子》

本研究課題は豊平川上流における積雪・融雪過程による水資源量の変化特性，河口部における塩水遡上，流域内の生物学的パラメタの観測の三つの研究により構成される．以下に，それぞれの研究成果を記述する．

1. 豊平川流域における積雪による水資源の特徴と経年特性

1. はじめに

積雪寒冷地において積雪は灌漑用水や生活用水，発電用水等を供給する重要な水資源であり，安定的な水供給を行うためには積雪量，融雪時期や融雪量についての予測が重要である．札幌市では，石狩川水系豊平川（図1）からの水が水道水源の約98%を占め，うち約80%が豊平川上流の豊平峡ダムと定山溪ダムから供給されており²⁾，両ダムでは，年間総流入量の約半分を融雪期である4月から6月の流入量が占めている．よって札幌の水資源の安定性を考える上で，豊平峡・定山溪ダム流域の積雪量や融雪時期についての議論が必要である．

本研究の目的は，豊平峡ダムと定山溪ダムにおける融雪によるダム湖への流入の特性を調べることと，定山溪ダム下流部に位置する気象観測点での積雪観測データから，ダム流域内の積雪量・融雪時期・融雪量について調べ，融雪流入との関係を明らかにすることである．なお，本稿は令和4年度土木学会北海道支部論文報告集における研究成果¹⁾に基づいて執筆した．

2. 使用データ

国土交通省が公開している水文水質データベース³⁾のダム諸量データより，豊平峡ダムと定山溪ダムの流入量[m³/s]を使用した．また定山溪ダム上流地点の観測サイト（図1の星印）で寒地土木研究所と北海道大学が共同で実施している積雪観測のデータを使用した⁴⁾⁻⁹⁾．

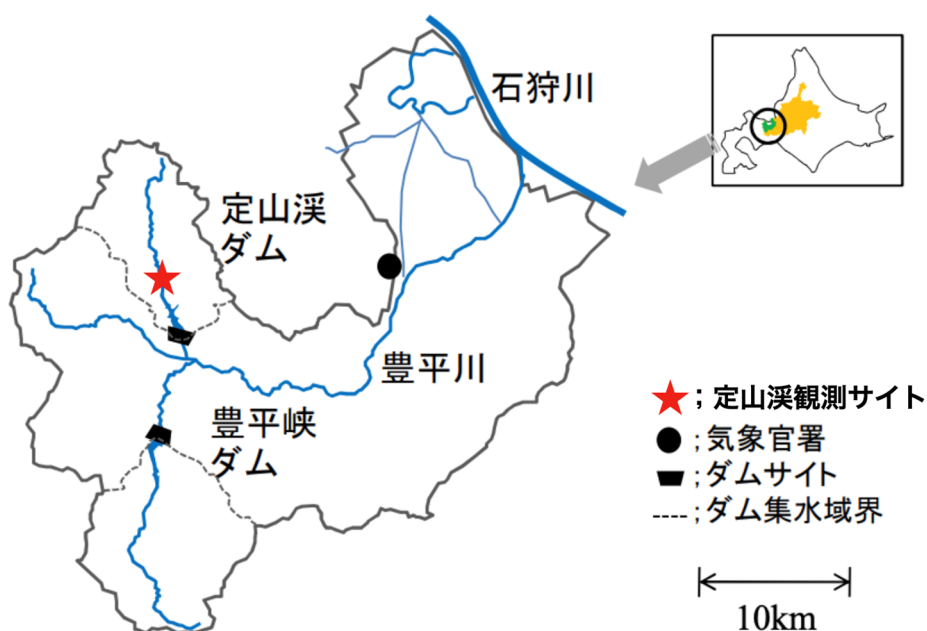


図1 豊平川流域（川村ら⁹⁾の図表を一部修正）

3. 結果

3.1. 豊平峡ダム・定山溪ダムの融雪期の流入量の比較

図2は、豊平峡ダム、定山溪ダムへの融雪期における流入量の散布図を示す。融雪期は流入が卓越する4月1日から6月30日までの期間と定義した。両ダムの融雪期の流入量は概ね同期している。また、多流入年（2006年、2013年）や少流入年（2008年、2019年、2020年）では両ダムの流入量はよく同期している一方、平年的な流入量の年では両ダムの流入量の偏りが大きいことがわかる。

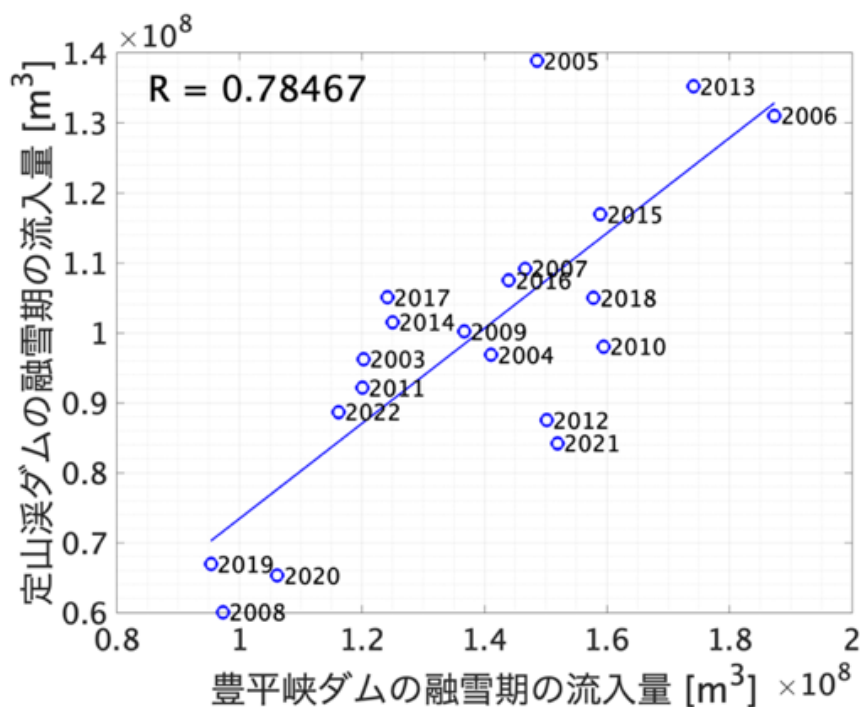


図2 豊平峡ダム・定山溪ダムの融雪期(4月から6月)の総流入量の比較

3.2. 豊平峡ダム・定山溪ダムの融雪期の流入量の経年傾向

図3は、2003年から2022年の各年における両ダムへの4月から6月における総流入量を示す。融雪期の流入量は両ダムともに減少傾向にあることがわかった。両ダムの融雪期の流入量の合計は20年間で約17%減少している。

3.3. SWE観測データを利用した降雪量・融雪量の解析

融雪期の流入量が減少する要因として、降雪量の減少と、早期の融雪による融雪期の開始時点での積雪量の減少の2つが考えられる。そこで、定山溪観測サイトでの積雪重量計で測定している積雪相当水量 (mm) (Snow water equivalent, 以下SWE) を用いて降雪期の降雪量・融雪量を求めた。ただし、ここではSWEが毎年12月初旬に増加し始め、3月末にピークを迎えることを踏まえ、12月1日から3月31日を降雪期と定義した。

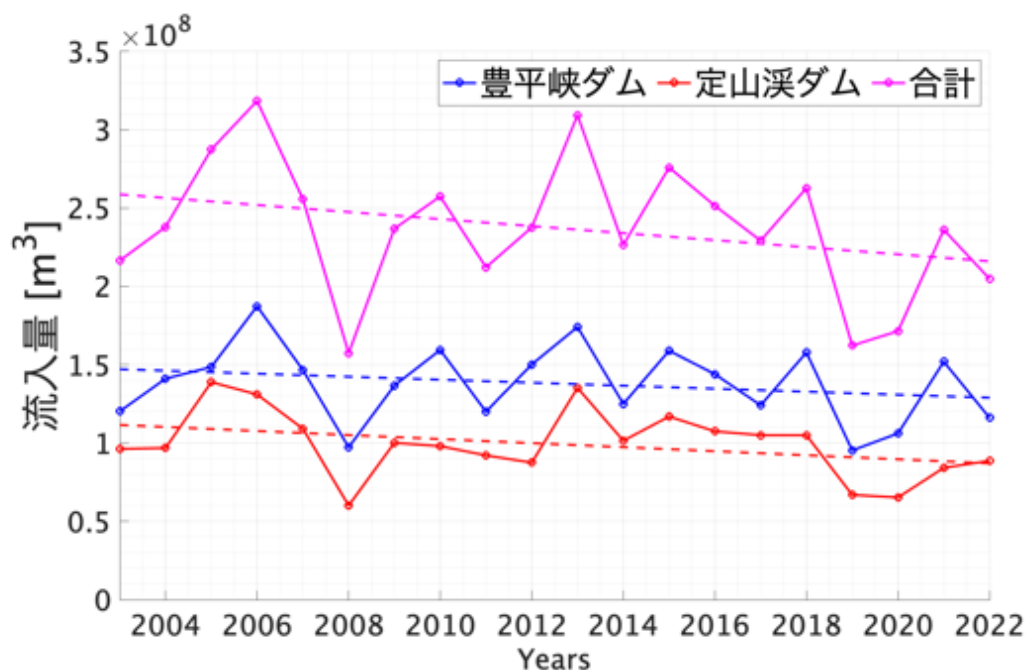


図3 豊平峡ダム・定山溪ダムの融雪期（4月から6月）の総流入量の経年変化

解析手法は、元データ（時別値）に24時間移動平均処理をした後、前の時刻の値との差分を取り、1時間のSWEの増加量もしくは減少量を求め、期間内の増加量の総和を累積増加量、減少量の総和を累積減少量、累積増加量から累積減少量を引いたものを正味増加量とした。SWEの増加は降雪、SWEの減少は融雪による流出にそれぞれ相当するため、SWEの累積増加量、累積減少量、正味増加量はそれぞれ、降雪期に降った雪の量、降雪期に解けた雪の量、降雪期の間増加した正味の雪の量を表すものとみなせる。

図4は、各年におけるSWEの累積増加量、累積減少量、正味の増加量を示す。2017年や2012年は累積増加量に対する正味増加量の割合が大きく、降雪期の間ほとんど融雪が起きなかったことがわかる。2008年や2021年は累積増加量に対する正味増加量の割合が小さく、降った雪の多くが降雪期に解けたことがわかる。

3.4. SWE・積雪深のピーク日の経年傾向

図5にSWEがピークを迎える日付の経年変化を示す。SWEのピーク日は観測開始以来の17年間で約13日、積雪深のピークは約22日早まっており、積雪深のピーク日とSWEのピーク日の差が広がっている。ここから融雪の早期化が起こっていると言える。また積雪深のピーク日とSWEのピーク日の日数の差は年々大きくなっている。

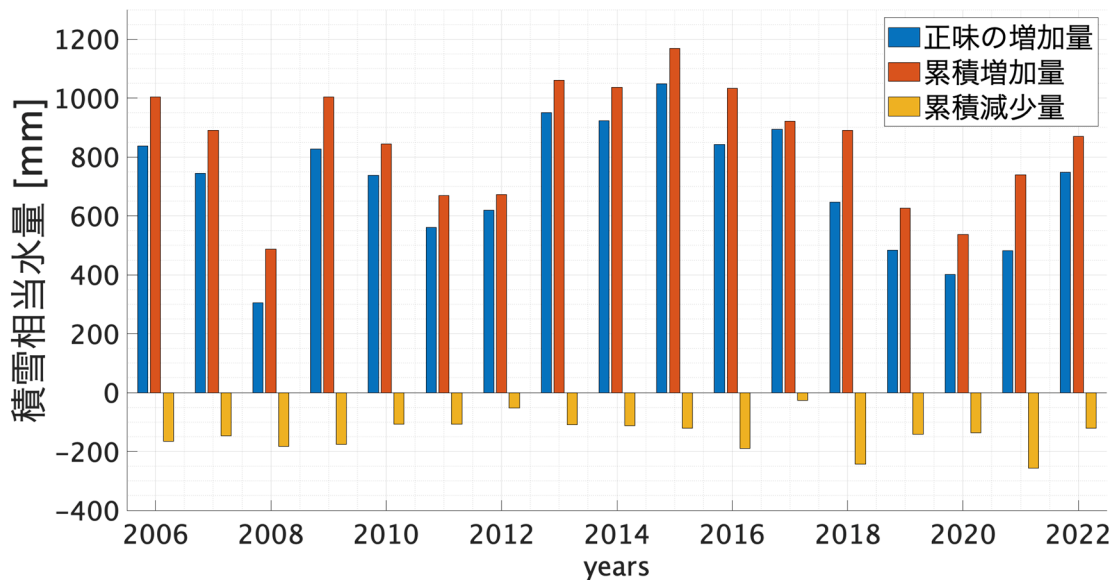


図4 降雪期(12月から3月)のSWE累積増加量・累積減少量・正味増加量

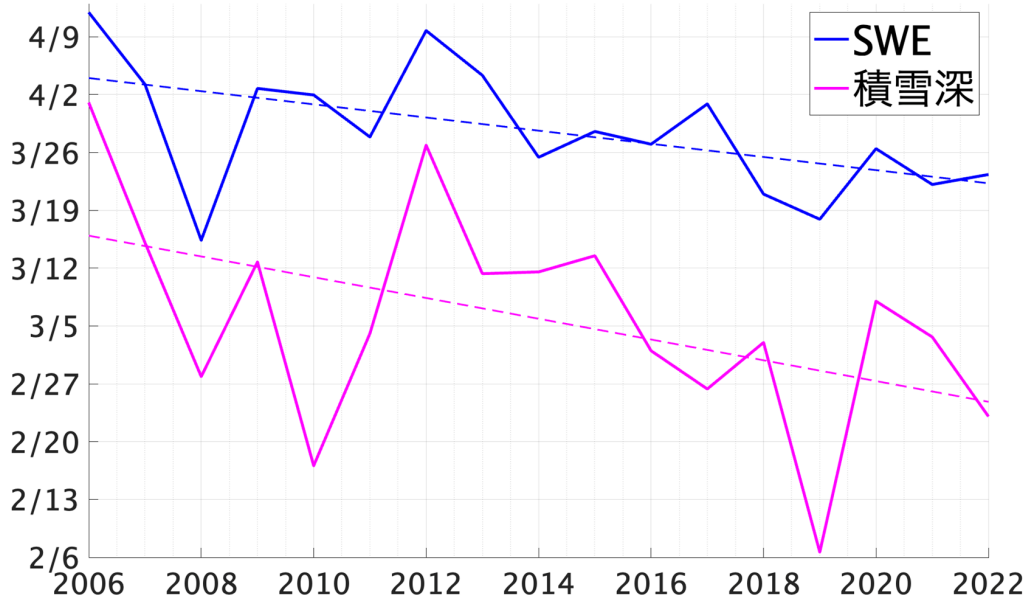


図5 SWE・積雪深が最大となる日付

4. まとめ

豊平峡・定山溪両ダム流域の積雪による水資源について、その特性と経年傾向を明らかにするため、水文水質データベースの流入量のデータと、定山溪ダム上流地点において寒地土木研究所と北海道大学が共同で実施している積雪観測のデータを使用した解析を行った。融雪期を4月1日から6月30日までと定義すると、2003年から2022年の豊平峡ダムと定山溪ダムの融雪期のダム湖への総流入量は概ね同期していること、特に多流入年と少流入年ではよく同期し、平年の流入量は流入量の偏りが大きいことが分かった。またどちらのダムについても、融雪期の総流入量は年々減少傾向にあることがわかった。またSWE・積雪深が最大となる日は早まっており、融雪時期の早期化が確認された。

参考文献

- 1) 長谷川禎史, 山田朋人, 2023: 豊平川流域における積雪水資源の特性に関する研究, 令和4年度土木学会北海道支部論文報告集, 79, B-04.
- 2) 札幌市水道局. “水源の確保状況”. 札幌市水道局ホームページ. 2020-07, <https://www.city.sapporo.jp/suido/overview/suigen/kakuho.html>, (参照2023-01-23).
- 3) 国土交通省. 水文水質データベース. <http://www1.river.go.jp/>, (参照2023-01-23).
- 4) 谷瀬敦, 山下彰司. 積雪重量計を用いた積雪層の観測について. 水工学論文集 2007;51:355-60.
- 5) 細井遵敬, 山田朋人, 2020: 圧縮指数の変化特性を利用した札幌定山溪における積雪圧密過程, 令和1年度土木学会北海道支部論文報告集, 76, B-04.
- 6) 細井遵敬, 山田朋人, 2019: 札幌定山溪における融雪過程の年々特性, 平成30年度土木学会北海道支部論文報告集, 75, B-31.
- 7) 大野愛佳, 岡地寛季, 山田朋人, 2022: 高密度の積雪の安定度評価に用いる密度と圧縮粘性係数の関係, 令和3年度土木学会北海道支部論文報告集, 78, B-37.
- 8) 正岡由仁, 岡地寛季, 山田朋人, 2021: 積雪内の氷板形成における気象条件の影響, 令和2年度土木学会北海道支部論文報告集, 77, B-30.
- 9) 川村一人, 中津川誠, 杉原幸樹. 気候変動による利水への影響を踏まえたダム貯水池群の最適操作に関する研究. 土木学会論文集B1 (水工学) 2012;68:I_1477-I_1482.

2. 石狩川における塩水遡上発生時の水理・水文学的要因の分析

1. はじめに

本稿は、令和4年度土木学会北海道支部論文報告集における研究成果)に基づいて執筆した¹⁾。

塩水遡上とは、河川の感潮区域において海水が河川の流下方向に対して逆流する現象であり、この現象によって取水に関する被害が生じる恐れがある。塩水遡上の要因としては、潟水による流量の低下や風向風速、潮汐による海面水位の変動などが挙げられる²⁾。よって、塩水遡上では河川、海洋、大気の相互作用に注目する必要がある。

石狩川においては、感潮区域が最大でKP44.5 kmの岩見沢大橋まで及び、前述した弱混合という形態で塩水遡上が発生する。石狩川のKP8 km付近とKP28.0 km付近には取水口があるため³⁾、それらの地点まで塩水が遡上した場合、取水制限が発生する可能性がある(図1)。直近では2021年7月に石狩川と千歳川の合流部の少し手前のKP28.0 km付近まで塩水が遡上した事例を有する。なお、この時期の2021年7月の札幌は1900年から現在までの観測の中で最も平均気温が高く(図4)、石狩川の7月の流域平均総降水量は平年に対して約100mm少ないという特殊な年であった。(図3)

本研究では、塩水遡上には、降雨の低下に伴う流量の低下、風向風速、潮汐など様々な要因があることを踏まえ、石狩川において各要因が塩水と淡水の相互作用にどのように影響を与えるのか明らかにすることを目的とする。また、塩水遡上発生時の気象場とその発生確率についても明らかにすることを旨とする。以上の二つを本研究の目的とする。

2. 手法

2.1. 使用したデータ

石狩川流域における降水量は気象庁の気象台とアメダスのデータを用い、風については気象庁が運用するアメダスの石狩観測所(以下、石狩アメダス)において観測されたデータを用いた。



図1 石狩川河口部の概況図

気温については札幌气象台で観測されたデータを用いた。石狩川河口における潮位変動は、気象庁によって観測されている石狩新港の潮位を用いた。石狩川河口域の流量と水位は、国土交通省札幌開発建設部によって観測されている岩見沢大橋(KP44.5km)の流量と石狩川河口部(KP3.3 km)の水位を用いた。塩分濃度は、国土交通省札幌開発建設部によって観測されている札幌大橋(KP15.00 km)と石狩大橋(KP26.60 km)におけるデータを用いた。

2.3. 二層流モデル

吉田らの研究報告⁴⁾と須賀の論文⁵⁾を参考に、以下のように1次元二層流のモデルを作成した。以下のように、塩水と淡水それぞれの連続式と運動方程式を支配方程式として用いた。

$$\text{淡水の連続式: } \frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} = 0 \cdots \text{①}$$

$$\text{塩水の連続式: } \frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{\partial q_2}{\partial x} = 0 \cdots \text{②}$$

淡水の運動方程式:

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_1^2}{h_1} \right) + gh_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} + gh_1 \frac{\partial h_2}{\partial x} + gh_1 I_b + \frac{f_i}{2} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| - \frac{f_w \rho_3}{2 \rho_1} (u_3 - u_1) |u_3 - u_1| = 0 \cdots \text{③}$$

塩水の運動方程式:

$$\frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_2^2}{h_2} \right) + \frac{\rho_1}{\rho_2} gh_2 \frac{\partial h_1}{\partial x} + gh_2 \frac{\partial h_2}{\partial x} + gh_2 I_b + f_b u_2 |u_2| - \frac{f_i \rho_1}{2 \rho_2} \times (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| = 0 \cdots \text{④}$$

q: 単位幅流量 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) u: 流速 (m s^{-1}) h: 水深 (m) ρ : 密度 (kg m^{-3}) x: 位置 (m) t: 時間 (s) g: 重力加速度 (m s^{-2}) I_b : 河床勾配 f : 界面抵抗係数 (下付き文字は1が淡水、2が塩水、3が大気、bが底面と塩水、iが塩水と淡水、wが淡水と大気を表す。)

層間の剪断力に関するパラメータは以下のものを用いた。

$$\text{剪断力} \cdots \tau = \frac{1}{2} f_i \rho_1 (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \cdots \text{⑤}$$

$$\text{金子の式} \cdots f_i = C \psi^{-n} \cdots \text{⑥}$$

$$\text{岩崎数} \cdots \psi = Re F_{di}^2 \cdots \text{⑦}$$

Cとnは定数、Reはレイノルズ数、 F_{di} は密度フルード数

モデルの作成において以下の通りに仮定をおいた。河道は直線かつ幅は500 mで一定とする。流速及び鉛直密度は鉛直方向に一様であり、淡水と塩水の相互作用は接触面の剪断力のみとした。スタッガード格子を用いて、局所項は前進差分、移流項は風上差分、慣性項と圧力項は中央差分で陽解法を用いた。摩擦項については陽解法で計算すると安定しないため、陰解法を用いた。

初期条件として、流量は0とし、水位は下流端の水位と等しいものとした。上層の境界条件として、上流端では岩見沢大橋(KP44.5 km)地点の淡水の流量を、下流端では石狩河口(KP3.0 km)地点の水位を用いた。下層の境界条件として、上流端では塩水が遡上しないと仮定して流量を0とし、下流端では石狩河口(KP3.0 km)地点の水位から-5mの値を用いた。計算距離はKP3.0~KP40.0 kmで河床形状は石狩川の最深河床高を用いた。風は石狩アメダスにおいて観測された風速風向ベクトルを南東北西方向に正射影した風ベクトルを用い、空間方向に一定とした。

3. 結果

3.1. 塩水遡上の発生に関する気象要因

石狩川河口部は南西から北東に向かって流下しており、風が上流（下流）向きに吹くと、塩淡水界面水位は低く（高く）なることが考えられる⁹⁾。そこで、石狩アメダスにおける風速ベクトルを南東から北西の向きに正射影し、石狩川の流下方向の成分を取り出した。

図2 は1990年から2021年の7月における石狩アメダスの風速の南東成分を示しており、塩水遡上が発生した年は平年より風速の南東成分が大きいことが分かる。2021年7月の風速の南東成分は平年と比べて0.5 m/s大きかった。図3 は1990年から2021年の7月における石狩川流域の流域平均の総降水量を示しており、塩水遡上が発生した年においては平年よりも降水量が少なかったことが分かる。特に、2021年7月においては100 mm程度少なく、過去32年間で最小であった。したがって、2021年においては、7月を通して南東風が卓越し、降水量が少なかったことが示され、塩水遡上が起こりやすい条件を満たしていた。図4 は1990年から2021年の7月における札幌気象台の月平均の降水量を示しており、塩水遡上発生時には高温と低温の2パターンあることが分かる。

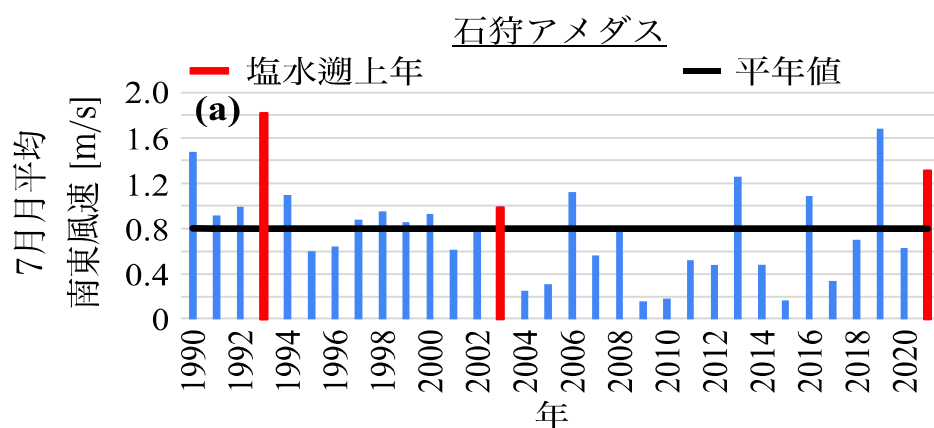


図2 1990年～2021年7月の石狩アメダスの風速の南東成分

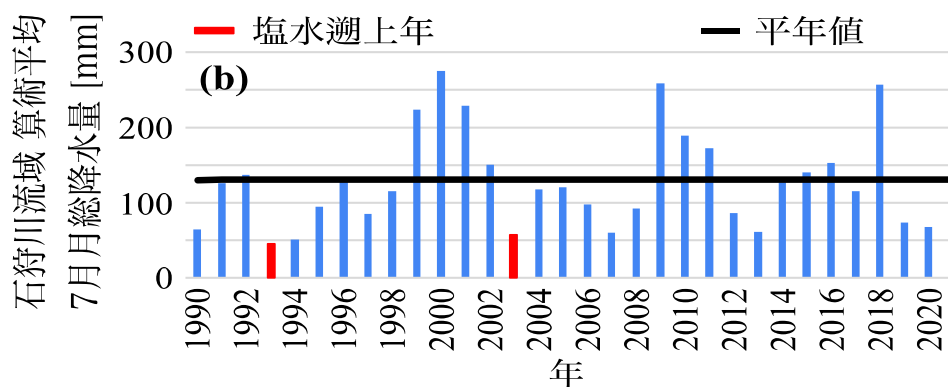


図3 1990年から2021年7月の石狩川の流域平均総降水量

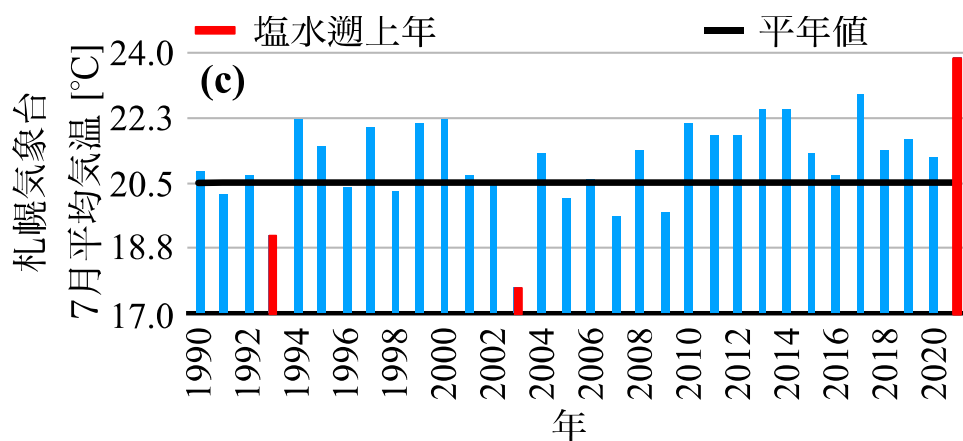


図4 1990年から2021年7月の札幌気象台の平均気温

3. 2. 2021年7月の石狩川河口域の気象状況と水文データ

2021年7月の石狩アメダスにおける総降水量は6.0 mmであり、平年値（94.9 mm）に対して非常に少なく、7月8日から7月31日まで無降雨日が連続していた。図5に2021年7月の石狩アメダスにおける風速・風向を示す。南東から北西に吹く風（南東風）を赤、北西から南東に吹く風（北西風）を青で示す。風速は1ヶ月通して5 m/sより小さく、7月1日から7月16日までは南東風が吹き、7月16日から7月22日までは南東風が止み、22日以降から再び南東風が吹いていた。図6に2021年7月の石狩河口（KP3.3 km）における水位を示す。7月初めは小潮でその後大潮、小潮、大潮、小潮と変化していることが分かる。図7に2021年7月の石狩大橋（KP26.60 km）における標高ごとの塩分濃度を示す。7月23日から塩分濃度の高い領域が上昇しており、その後塩分濃度は一度下がり、再び上がっている挙動が見て取れる。図5を見ると、7月20日付近では南東風が止んでいる。時間的遅れはあるものの、この南東風が止んだことが塩分濃度の低下に影響したのではないだろうか。次に潮汐の影響に注目する。図6を見ると、塩水が引いたタイミングと、大潮のタイミングが重なっていることがわかる。潮汐運動が大きくなると塩水と淡水の鉛直混合が強くなり、緩混合型に移行し、塩水は引いていくことが予想される。2021年7月の事例では塩水は千歳川の取水口まで到達しなかったが、もし南東風が連続する風の場合が7月20日付近も続いていた場合や、潮汐のタイミングがずれていて、7月後半に小潮であった場合、塩水はより上流まで到達し、取水に影響した可能性がある。

3. 3. 風の影響を考慮した二層流モデル

2021年7月の風速・潮汐の観測結果をモデルに適用した場合、図8のように塩水遡上距離は最大KP 30kmほどであった。一方、7月中旬に南東風が止んだ部分に4 m/sの南東風を与えた場合、図9のように塩水遡上距離は最大KP40 kmほどであった。風を変化させた場合と潮汐を変化させた場合の最大塩水遡上距離の感度分析結果を図10に示す。

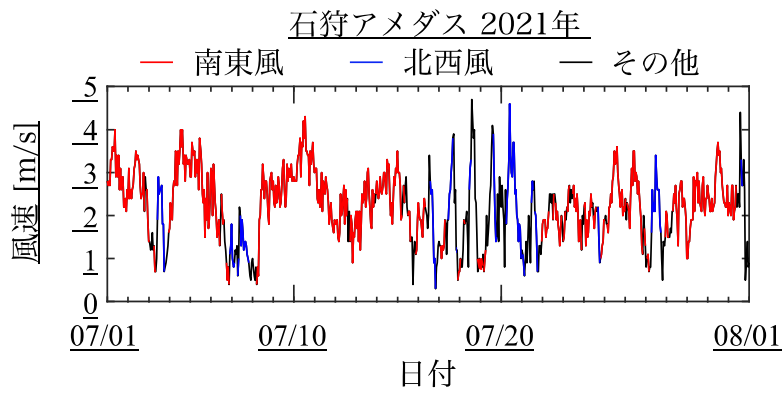


図5 2021年7月のアメダスの石狩観測所における風速[m/s]

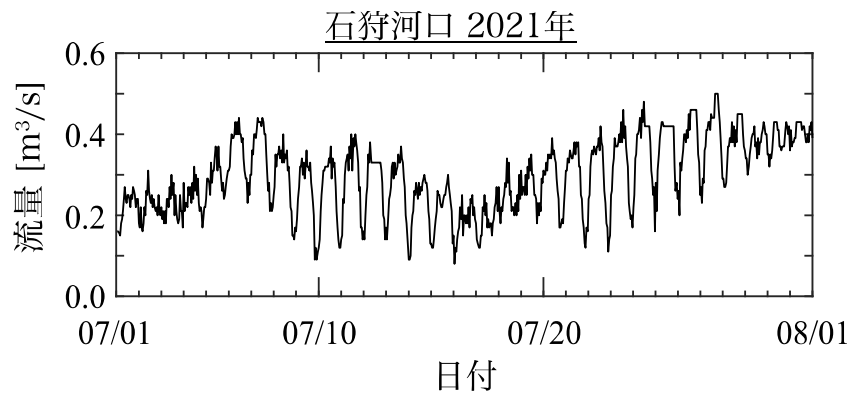


図6 2021年7月の石狩河口における水位

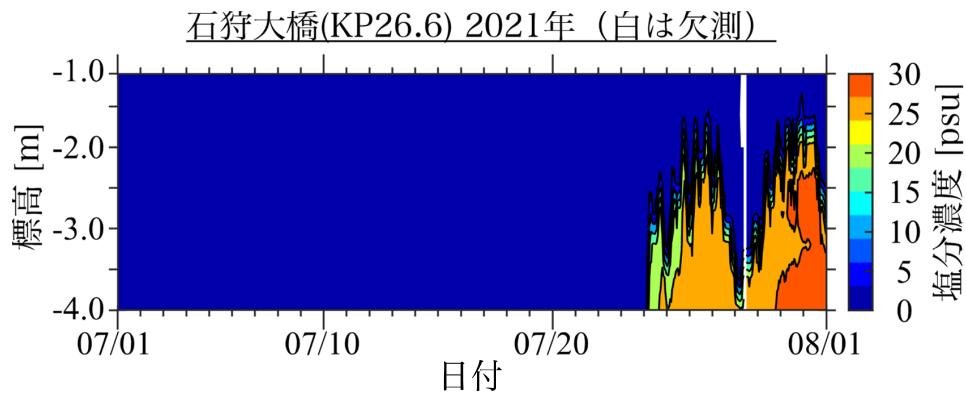


図7 2021年7月の石狩大橋における塩分濃度

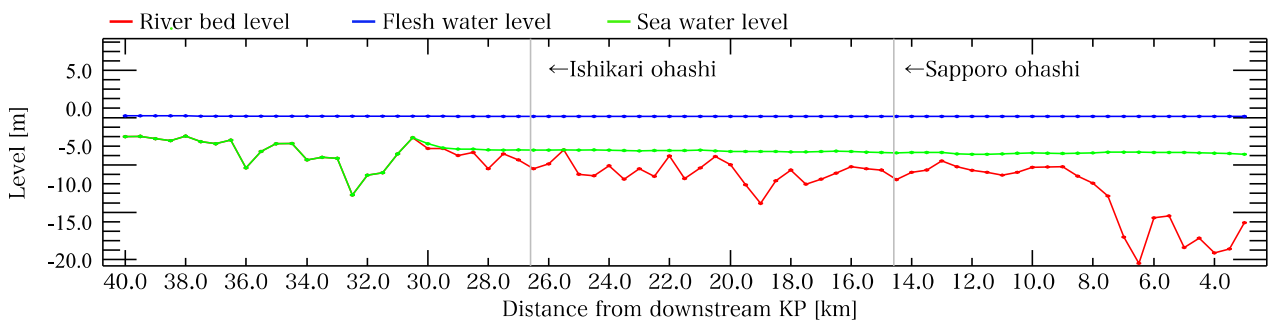


図8 2021年7月の観測データを用いた場合

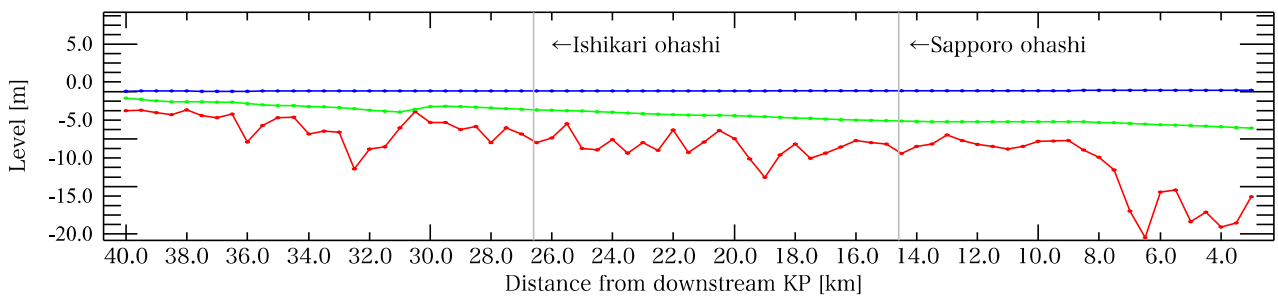


図9 南東風が止んだ部分に南東風を与えた場合

	観測通り	大潮を小潮に	大潮を振幅0に
観測通り	約KP30km	約KP30km	約KP30km
南東風1m/s	約KP30km	約KP30km	約KP30km
南東風2m/s	約KP30km	約KP30km	約KP30km
南東風3m/s	約KP30km	約KP30km	約KP30km
南東風4m/s	約KP40km	約KP40km	約KP40km

図10 最大塩水遡上距離の感度分析結果

4. まとめ

石狩川河口部においては、過去に取水口付近まで塩水が遡上した事例を有しており、より塩水が遡上した場合取水制限となる可能性がある。本研究において、石狩川で塩水遡上が起こる気象状況として、降雨が少ないかつ南東風が卓越しているが、その中でも高温のパターンと低温のパターンがあることがわかった。また、弱混合の二層流モデルを用いた感度分析の結果、風は塩水遡上に大きく影響を与えることが分かった。上記の感度実験により、2021年7月後半に南東風が仮に継続した場合、塩水が取水口に到達し、取水制限となった可能性が示唆された。塩水遡上発生時の気象場の詳細な分析や二層流モデルの再現性の確認を今後の検討課題とする。

参考文献

- 1) 田中健人, 山田朋人, 2023: 石狩川の感潮区域における大気の影響を踏まえた海水と淡水の相互作用, 令和4年度土木学会北海道支部論文報告集, 79, B-11.
- 2) 有田正光, 池田裕一, 中井正則, 中村由行, 道奥康治, 村上和男: 水圏の環境, 東京電機大学出版局, 1998
- 3) 小倉和紀, 宮崎俊行, 唐澤圭: 石狩川下流部における塩水遡上による利水への影響予測について, 北海道開発局平成14年度技術研究発表会, 2003
- 4) 柏村正和, 吉田静男: 密度流の研究I 塩水くさびの模型実験, 北海道大学工学部研究報告, 41, p327-342, 1966
- 5) 須賀堯三: 一次元二層不定流の数値計算, 海岸工学講演会論文集, 第24巻, pp544-548, 1977
- 6) 横尾啓介, 吉田静男, 荒川範彦: 河口二層流に与える風の影響, 海岸工学論文集, 第51巻, pp361-365, 2004

3. 豊平川における薬剤耐性菌濃度のモニタリング

薬剤耐性菌は抗生物質の効きにくい、または効かない細菌であり、抗生物質の使用に伴い出現し、その数は増大してきた。環境中で薬剤耐性菌が増大するとヒトや動物が感染症にかかった場合に抗菌薬の治療が不可能になる。薬剤耐性によって世界では現在年間70万人が死亡している。このまま何の対策も講じなければ、薬剤耐性菌に起因する死亡者数は2050年には全世界において1000万人に達すると予測されている。そこで本研究では豊平川の薬剤耐性菌濃度を測定した。河川水は定山溪市街、環状北大橋、豊水大橋で採取した。

大腸菌数は、定山溪市街で1MPN/mL以下、環状北大橋で1MPN/mL以下であったが、豊水大橋で5MPN/mL程度に増大した。環状北大橋とその次の橋である豊水大橋の間は1.6kmしか離れていないにも関わらず大腸菌数が増大したのは、これらの端の間に合流式下水道の雨水吐き口がある（図1）ので、ここから未処理下水が流出しているためと考えられる。



図1 合流式下水道の雨水吐き口の位置図

サンプル中の薬剤耐性遺伝子（ARGs）をショットガンシーケンシング解析した。ARGsを含むコンティグを耐性を示す抗生物質のclassごとに分類し、カバレッジ（数に相当）を合計した。8つのclass（multidrug, アミノグリコシド系, β ラクタム系, MLS（Macrolide-Lincosamide-Streptogramin）, ペプチド系, バシトラシン, テトラサイクリン系, フルオロキノロン系）がARGsの主な内訳であった（定山溪市街：94.1%, 豊水大橋：91.9%, 雁来大橋：91.4%）。定山溪市街と比較して、豊水大橋および雁来大橋においてはMLSが最も増大していた。定山溪市街においては他の試料と比較してバシトラシンの割合が大きかった。他のclassの構成割合に大きな変化は見られなかった。カバレッジは、全てのclassにおいて定山溪市街より豊水大橋および雁来大橋が大きかった。

各ARGsごとのカバレッジをclassごとに解析したところ、定山溪市街と比較して豊水大橋において、大きく増大しているARGsが存在した。それらのARGsは多くがプラスミドにコードされていた。この結果より、4種類のARGs (bla_{FOX} , $mphE$, $msrE$, $mphA$) を選定し、Real-Time PCR法により河川におけるARGsの消長を定量的に解析した。 bla_{FOX} は定山溪市街では 10^2 copies/mL以下であったのに対し、豊水

大橋では 10^4 copies/mL程度に増大した。この結果は、札幌市街が豊平川への薬剤耐性菌の負荷源となっていることを示している。

まとめ

本研究では豊平川の薬剤耐性菌濃度を測定した。大腸菌数は、環状北大橋では定山溪市街と同程度であったが、豊水大橋で増大した。(図2) これは豊水大橋の直上に合流式下水道の雨水吐き口があるためと考えられた。薬剤耐性遺伝子をショットガンシーケンシング解析した。薬剤耐性遺伝子の数は豊平川の流下に伴って増大した。札幌市街が豊平川への薬剤耐性菌の負荷源となっていることが示された。(図3)

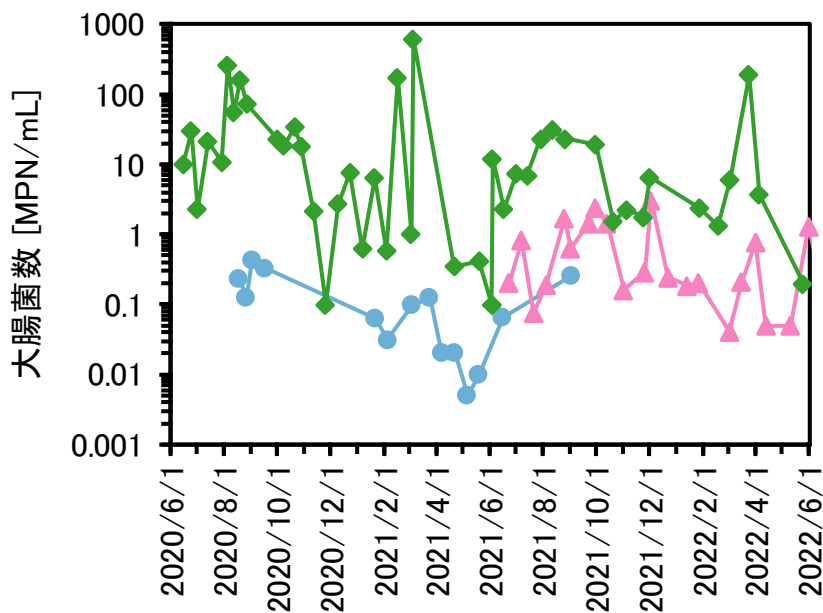


図2 定山溪市街 (●), 環状北大橋 (▲), 豊水大橋 (◆) における大腸菌数の経時変化

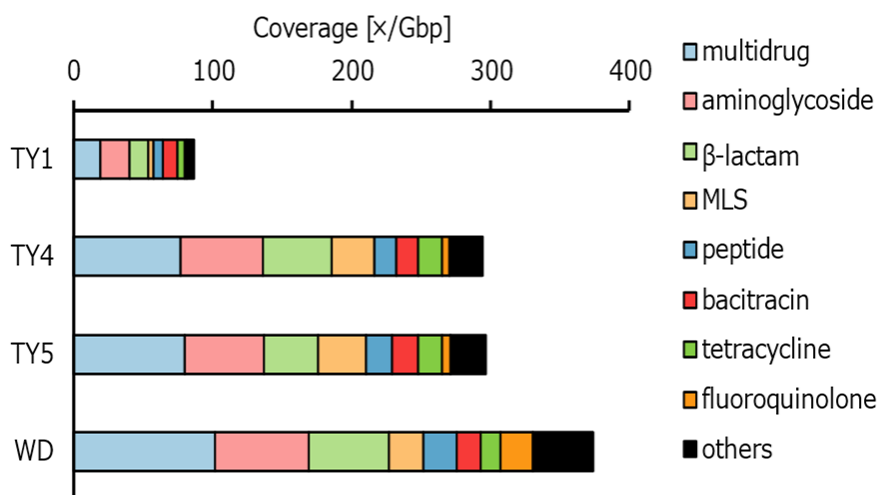


図3 ARGsのclassごとの分類。(定山溪市街(TY1), 豊水大橋(TY4), 雁来大橋0(TY5), 下水処理水(WD).)