

流域を対象とした過去・将来における水資源の利用可能性

北海道大学大学院 工学研究院 山 田 朋 人

流域を対象とした過去・将来における水資源の利用可能性

山田 朋人¹
Tomohito YAMADA

¹ 北海道大学大学院 工学研究院 土木工学部門 教授

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。確率的な評価を行うことで、過去・将来における北海道、特に石狩川流域の水資源の利用可能性について明らかにする。主な現地観測の対象は豊平川を含む石狩川下流域である。他流域への展開は既存観測データ等を用いて検討する。研究項目は、上流部における積雪・融雪のメカニズム解明、渇水の発生確率の将来変化、下流域での塩水遡上の発生確率の将来変化の定量化に向けた研究を推進した。

《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，石狩川河口部における塩水遡上，の二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

北海道大学 山田朋人

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．札幌市水道局によると，札幌市では，石狩川水系豊平川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¹⁾，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．よって札幌市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，融雪時期，融雪による流入等の特性を把握することが重要であるが，近年の気候変動にともない積雪量の変化や融雪の早期化が懸念されている²⁾³⁾．

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分析することと，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．

2章では，使用するデータと観測サイト，降雪期・融雪期の定義について，3章では，豊平峡ダムと定山溪ダムの流入量の経年特性について，4章では，定山溪ダム下流部に位置する観測サイトでのデータを用いた解析結果について述べる．なお，本稿は令和5年度土木学会地球環境論文集における研究成果⁴⁾に基づいて執筆した．

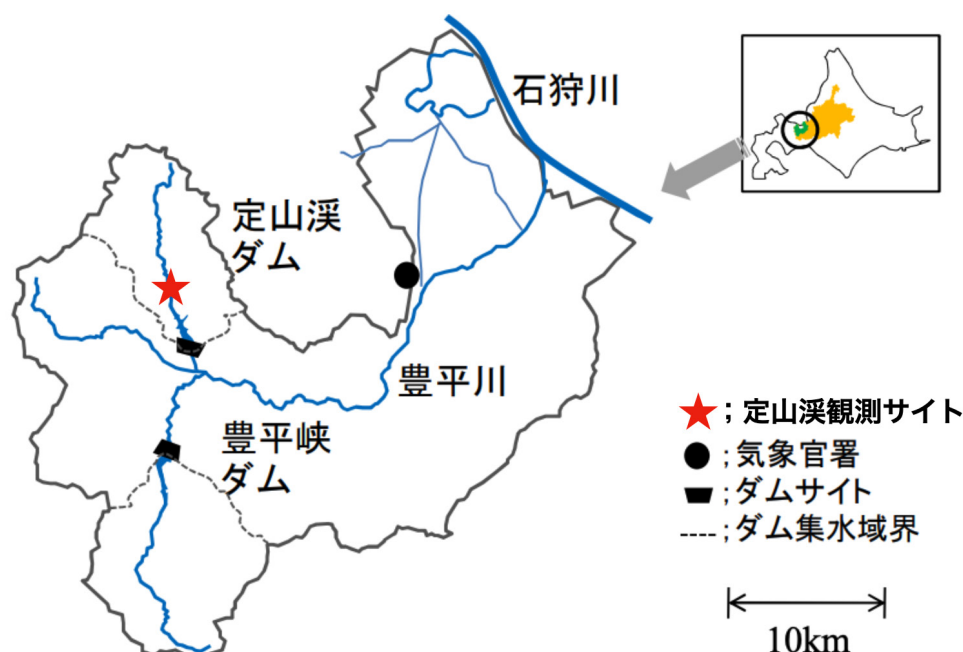


図-1 豊平川流域 川村ら⁴⁾の図表を一部修正

2. 使用データと観測サイト・手法

2.1. 使用データと観測サイト

本研究では、国土交通省が公開している水文水質データベース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。両ダムともに2002年5月から現在まで、1時間毎のダム諸量データが公開されている。

本研究ではまた、定山溪ダムの流域内に位置する積雪観測サイトでの観測データを使用した。この観測は寒地土木研究所と北海道大学が図-1の星印に示される定山溪ダム流木処理場（標高398 m）で2005年12月から毎年積雪時期に行っているものである⁵⁾⁻¹⁰⁾。

観測項目は、下向き短波放射量[W/m²]、下向き長波放射量[W/m²]、上向き短波放射量[W/m²]、上向き長波放射量[W/m²]、表面温度[°C]、風速[m/s]、降水量[mm]、気温[°C]、相対湿度[%]、積雪重量[kg/m²]、積雪深[cm]、積雪底面流出量[mm]である。すべての観測項目について1時間おきに測定している。観測機器の概念図と写真を図-2に示す。

2.1. 降雪期と融雪期の定義

本研究では以降、12月1日から3月31日までを「降雪期」、4月1日から6月30日までを「融雪期」と定義する。降雪期については、対象年の前年の12月1日から対象年の3月31日までを対象年の降雪期とする。たとえば2006年の降雪期は2005年12月1日から2006年3月31日までで、融雪期は2006年4月1日から6月30日までである。

3. 豊平峡ダムと定山溪ダムのダム湖への流入量

3.1 豊平峡ダムと定山溪ダムのダム湖への流入の特性

図-3、図-4に、豊平峡ダムと定山溪ダムの2003年から2022年までの各年3月から7月までの日平均流入量と、20年間の平均値を示す。両ダムとも4月初旬から6月末にかけて、平年に流入量が多くなっており、この時期に融雪による流入量の増加が起こっていることが読み取れる。両ダムの流入量の20年平均値はともに5月初旬にピークを迎えており、ピーク時の流入量は豊平峡ダムが約40 m³/s、定山溪ダムが約30 m³/sである。豊平峡ダムの方が定山溪ダムより平年に流入量が多いが、これは豊平峡ダムの流域面積が159 km²なのに対し、定山溪ダムの流域面積は104 km²であり、豊平峡ダムのほうが定山溪ダムより流域面積が広いためであると考えられる。

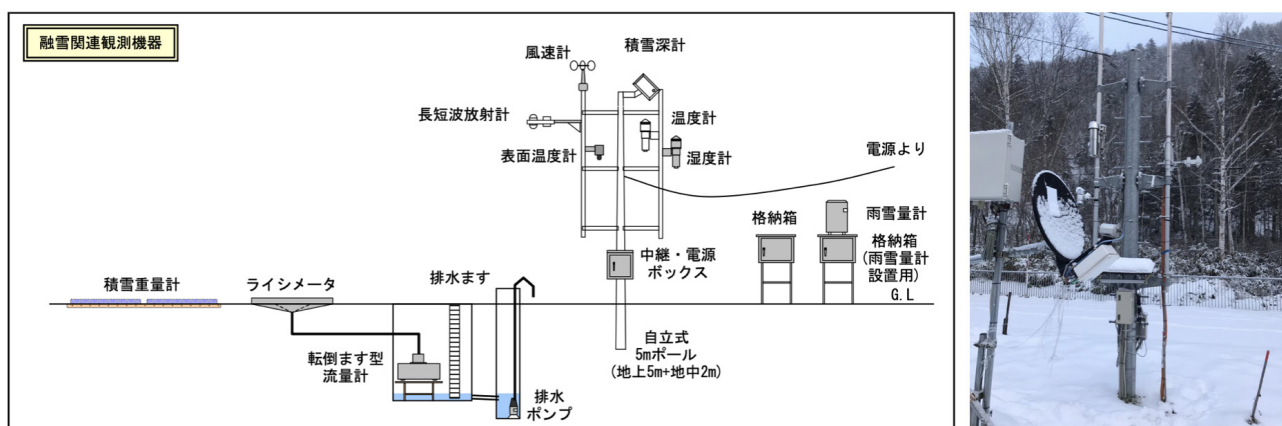


図-2 定山溪サイト観測機器 谷瀬ら⁵⁾の図表を一部修正

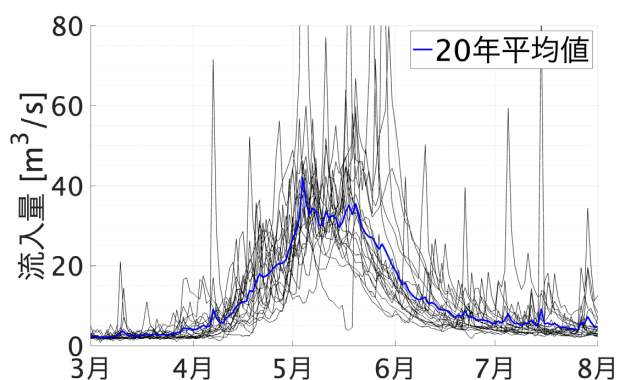


図-3 豊平峡ダムの日平均流入量
(2003年から2022年)

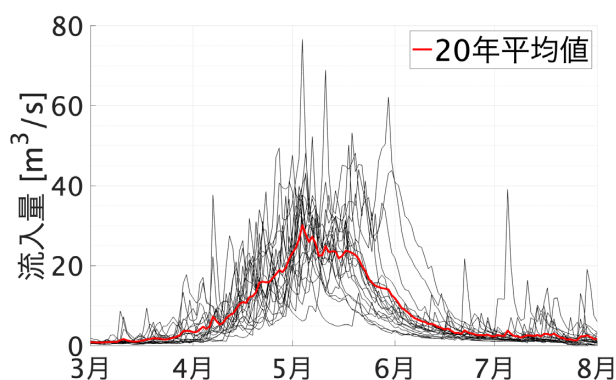


図-4 定山溪ダムの日平均流入量
(2003年から2022年)

図-5は、豊平峡ダム・定山溪ダムの融雪期におけるダム湖への総流入量の散布図を示す。ただし融雪期は2章で定義した通り4月1日から6月30日までの期間である。図中の青色の実線は最小二乗法により求めた回帰直線である。図から、両ダム湖への融雪期の総流入量は概ね同期していることがわかるが、2005年のように豊平峡ダムの流入量が平年的であるのに対して定山溪ダムの流入量が平年と比べて極端に多い年や、2012年や2021年のように豊平峡ダムの流入量が平年的であるのに対して定山溪ダムの流入量が平年より少ない年もみられる。このような両ダムの流入量の偏りは、両ダム流域の降雪量の偏りに起因すると考えられる。また、2008年、2019年、2020年は両ダムともに流入量が極端に少ないことがわかる。両ダムの流域は約20 km離れており、斜面の向きも異なっているが、一方のダム流域が少雪の年にもう一方のダム流域が多雪となるといった積雪による水資源の相互補完関係はみられず、極端な少雪年では両ダムともに積雪による水資源量が少なくなるといえる。

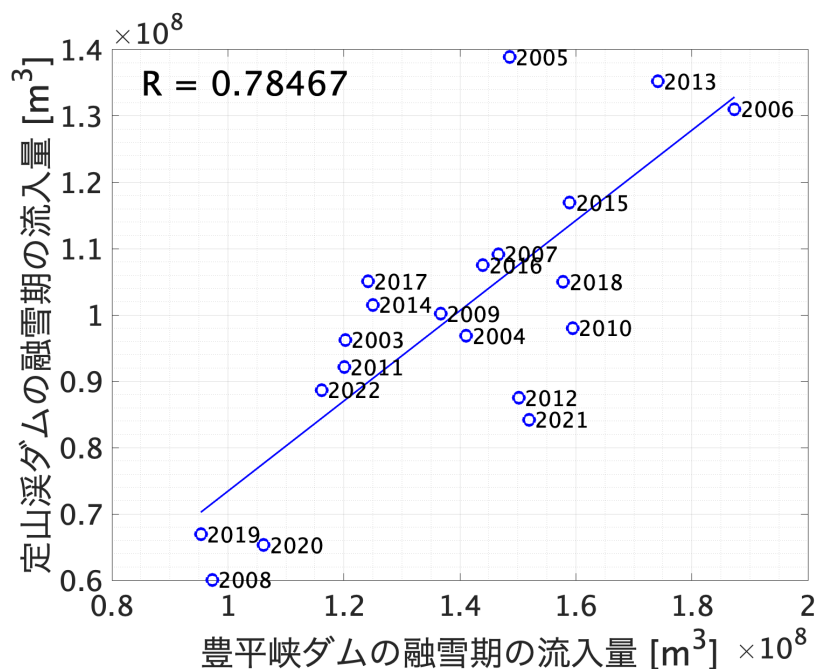


図-5 豊平峡・定山溪ダムの融雪期（4月から6月）の総流入量の比較

3.2 豊平峡ダムと定山溪ダムのダム湖への流入量の経年傾向

図-6は、豊平峡ダムと定山溪ダムのダム湖への融雪期の総流入量の経年変化を示す。破線は最小二乗法により求めたそれぞれのダムの流入量の回帰直線である。両ダムの融雪期の総流入量は、年々変動しつつ、両ダムともに減少傾向にあることがわかる。両ダムの融雪期の総流入量の合計は20年間で約17%減少している。両ダム流域で3ヶ月間に使用される水は、札幌の人口を1,971,225人（令和5年1月1日現在）、札幌市民一人当たりの水使用量を350 L、札幌市民のうち82%が両ダムの水を使用する¹⁾と仮定すると、およそ $5.15 \times 10^7 \text{ m}^3$ であり（図-6の黒破線）、現状では両ダム流域で利用される水を補うことが出来ている。

図-7、図-8、図-9はそれぞれ、融雪期である4月、5月、6月の両ダムの総流入量の経年変化を示す。4月、5月、6月の総流入量の回帰直線の傾きはそれぞれ、 $1.19 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ 、 $-2.64 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ 、 $-7.96 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ で、5月の総流入量が大きく減少したことが、融雪期の総流入量が減少した主要な原因であることがわかる。また、5月、6月の流入量は減少傾向を示している一方で、4月の流入量は増加傾向を示していることから、融雪流入の時期が早期化していると考えられる。

4. 定山溪積雪観測データの解析結果

本章では、2章で述べた定山溪積雪観測サイトでの観測データを使用した積雪深と積雪相当水量（Snow Water Equivalent, 以下SWE）に関する解析の結果を示す。SWEは、積雪重量 $[\text{kg}/\text{m}^2]$ を水量 $[\text{mm}]$ に変換したもので、 1 m^2 あたりの積雪をすべて溶かしたときの水の高さを表す。定山溪観測サイトでは隣接した2つの積雪重量計による2種類の積雪重量の観測値があるが、本研究では2つの積雪重量の値の平均をその時刻の積雪重量とみなし、SWEに変換して使用した。

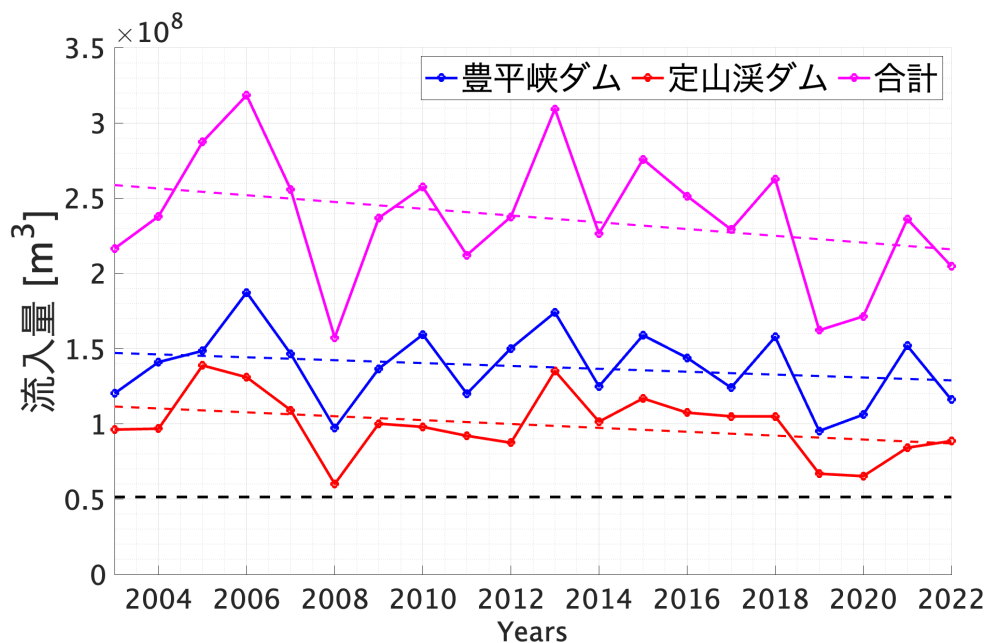


図-6 豊平峡・定山溪ダムの融雪期（4月から6月）の総流入量の推移

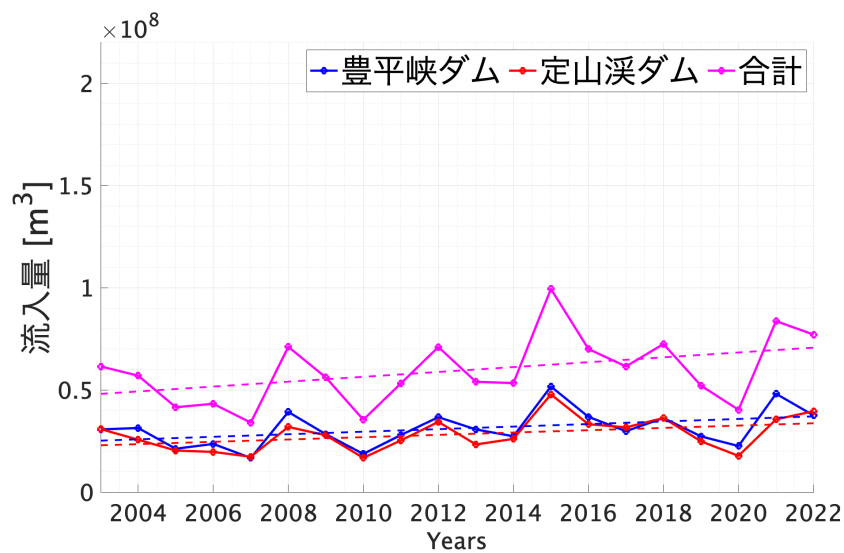


図-7 4月の総流入量の推移

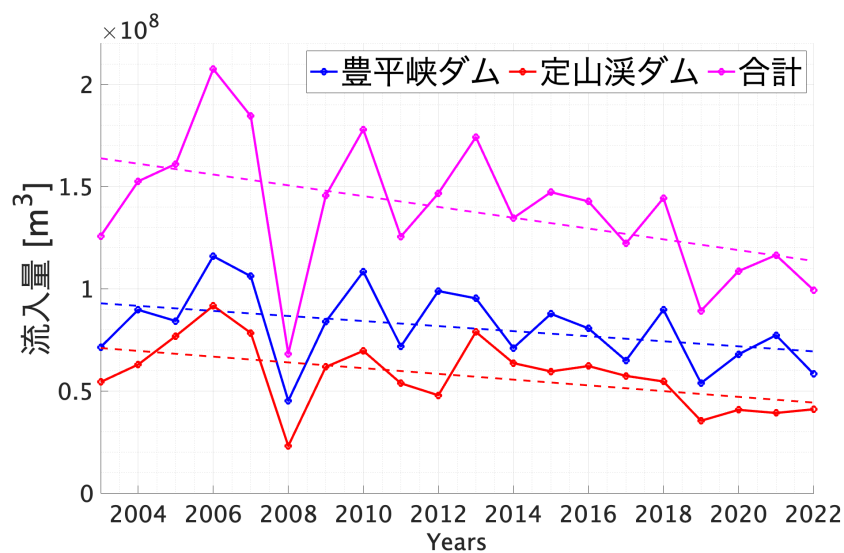


図-8 5月の総流入量の推移

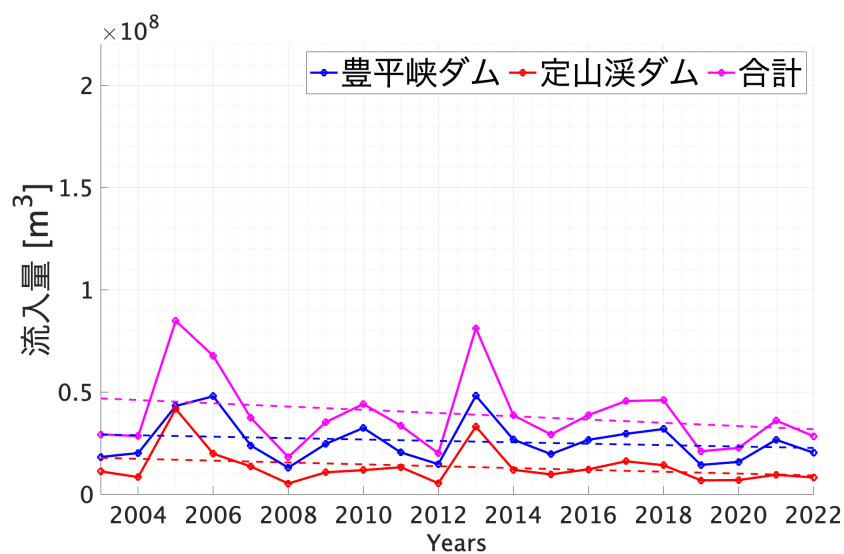


図-9 6月の総流入量の推移

4.1 定山溪観測サイトでの積雪深・SWEの特性

図-10に2006年から2022年の各年における積雪深・SWEの経時変化を示す。図中の斜線は左からそれぞれ 0.2 g/cm^3 、 0.3 g/cm^3 、 0.4 g/cm^3 、 0.5 g/cm^3 、 0.6 g/cm^3 の等密度線を示す。また矢印は時間の推移を示している。図に示すように、積雪深とSWEは時間経過に伴いループを描く。積雪深は降雪により増加し、自身の重さなどにより圧密されると減少するため、細かな変動を繰り返す一方、SWEは積雪を水に換算した量であるので、融雪や蒸発などの理由でその場から雪が失われない限り減少しないため、積雪深と比較して変動が小さい。積雪が開始すると、積雪深・SWEはともに増加していく。この期間、積雪の全層平均密度はおよそ 0.2 g/cm^3 から 0.3 g/cm^3 間で激しく変動しつつ、積雪の増加に伴う圧密により徐々に大きくなっていく。その後、積雪深はピークを迎え減少に転じるが、SWEはしばらくの間、増加を続ける。この期間は降雪による積雪深の増加よりも圧密による積雪深の減少が卓越する期間である。この期間の全層平均密度はおよそ 0.4 g/cm^3 から 0.5 g/cm^3 である。SWEがピークを迎え減少に転じると、本格的な融雪が開始したといえる。この期間は、およそ 0.6 g/cm^3 から 0.65 g/cm^3 の全層平均密度を保って直線的に積雪が減少していく。

図-11は、積雪深・SWEの2006年から2022年までの17年間の平均値を縦軸に、横軸に時間を示したものである。積雪深は11月初旬から3月初旬にかけて増加し、5月中旬にかけて減少していく。SWEは11月中旬から3月末にかけて増加し、5月中旬にかけて減少していく。積雪深の17年平均値がピークを迎える日付は3月3日、SWEの17年平均値がピークを迎える日付は3月25日で、両者のピーク日には約22日のずれがある。また積雪深の最大値は約170 cm、SWEの最大値は約800 mmである。

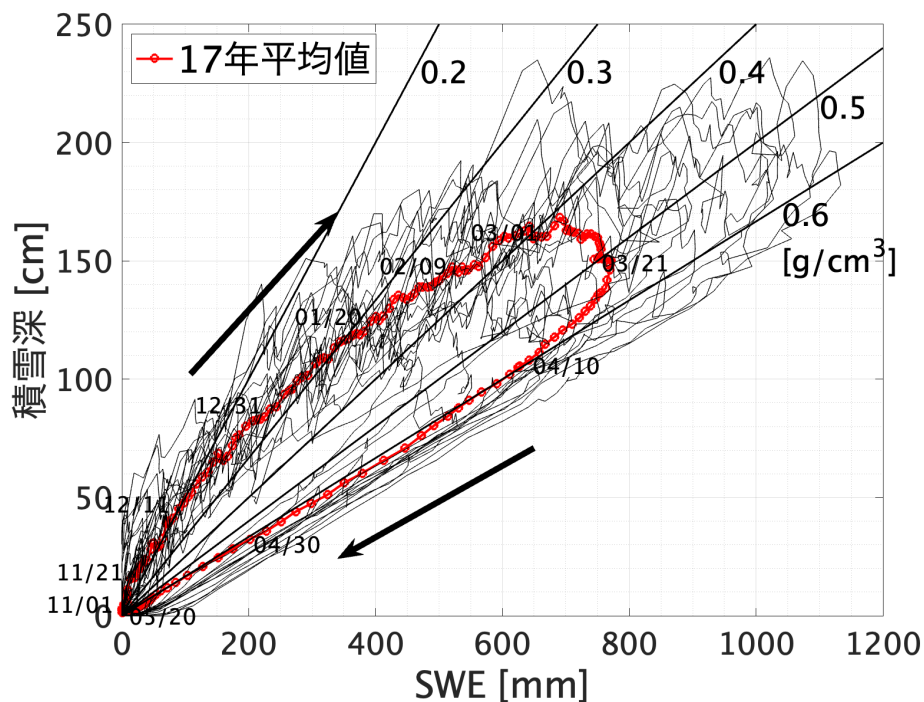


図-10 定山溪観測サイトでの積雪深・SWE

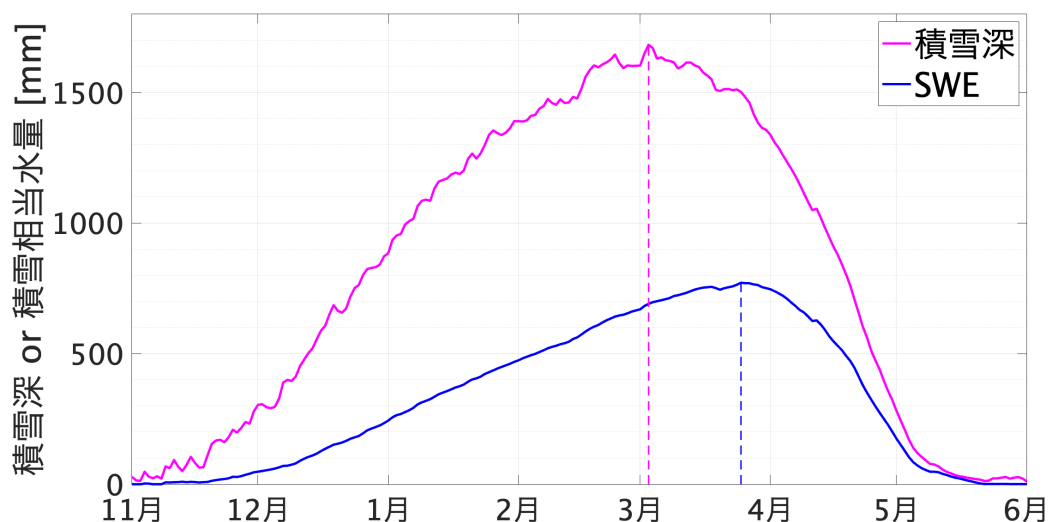


図-11 定山溪観測サイトでの積雪深・SWEの2006年から2022年までの17年平年値

4.2 定山溪観測サイトにおける積雪深・SWEのピーク日の推移

図-12に、積雪深・SWEのピーク日の推移を示す。破線は最小二乗法により求めた回帰直線である。回帰直線の傾きより、SWEが最大となる日付は観測開始以来の17年間で約13日早まっていることがわかる。前節で述べたように、SWEがピークを迎えた後に本格的な融雪が始まるので、この結果から融雪の早期化が起こっているといえる。また、積雪深が最大となる日付は回帰直線の傾きより17年間で約22日早まっている。積雪深のピーク日が早まる要因として、降雪のピークが早まっていること、雪の圧密が早まっていることなどが考えられる。また、積雪深のピーク日とSWEのピーク日の日数差が広がっている。これは、前節で述べた降雪による積雪深の増加よりも圧密による積雪深の減少が卓越する期間が長くなっていることを意味する。上記の結果は、積雪深と積雪密度の関係が長期的に変化しており、過去の観測で得られる積雪深と積雪密度の関係を現在もしくは将来に適用することができない可能性を示唆する。

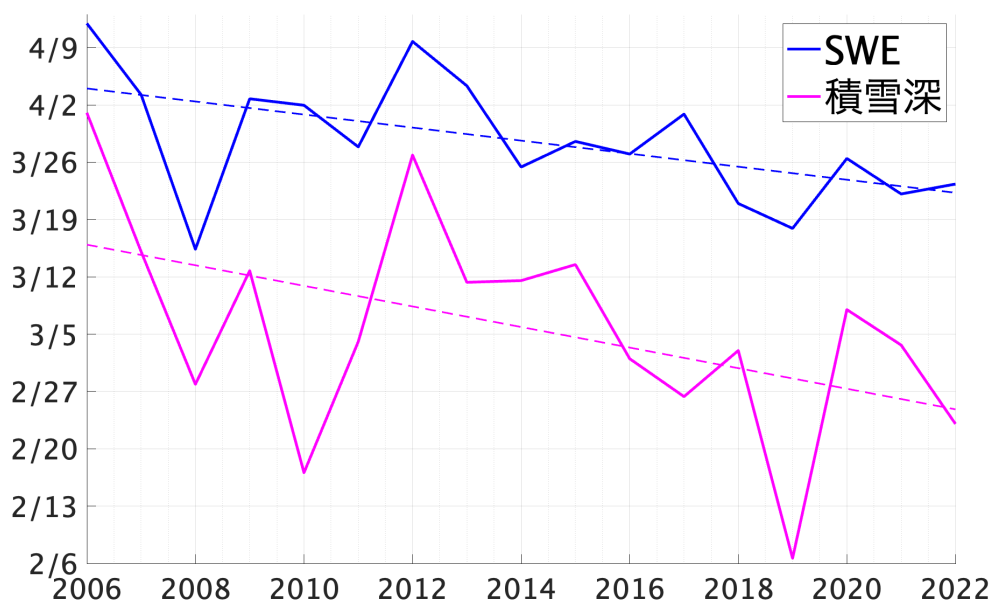


図-12 定山溪観測サイトにおいてSWE・積雪深が最大となる日付の推移

4.3 降雪期のSWE増加量・減少量に関する解析

融雪期のダム湖への流入量が減少する要因として、ダム流域内の降雪期の降雪量の減少と、降雪期の融雪量の増加、すなわち融雪の早期化が考えられる。ダム流域内における降雪期（12月1日～3月31日）の降雪量・融雪量と、融雪期（4月1日～6月30日）のダム湖への流入量との関係を明らかにするため、定山溪観測サイトでのSWEを用いた解析を行った。

図-13に解析手法の概念図を示す。2006年から2022年までの各シーズンのSWEの元データ（1時間値）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SWEの累積増加量、減少量の総和をSWEの累積減少量とした。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ので、降雪期のSWEの累積増加量、累積減少量はそれぞれ、降雪期に降った雪の総量、降雪期に解けて流出した雪の総量に相当する。

図-14に結果を示す。図中の縦方向・横方向の破線はそれぞれ、SWE累積増加量・累積減少量の17年平均値を示す。以後、図中の破線で区切られる4つの象限を、右上から反時計回りに第一象限、第二象限、第三象限、第四象限とする。

累積増加量に対する累積減少量の割合の平均値は0.17、最大値は0.38（2008年）、最小値は0.03（2017年）であった。これは平年の降雪量は降雪期の降雪の2割ほど、多い年では4割近くが降雪期の間に解けていることを意味する。

四つの象限のうち、降雪期に最も多くの水資源を確保すると考えられるのは、降雪量が平年より多く、かつ融雪量が平年より少ない第四象限であるが、この象限に含まれる2013年や2015年は実際に融雪期の総流入量が多いことがわかる。また、最も水資源を確保できないと考えられるのは、降雪量が平年より少なく、かつ融雪量が平年より多い第二象限であるが、この象限に含まれる2008年、2019年、2021年は実際に融雪期の総流入量は少ないことがわかる。一方で2022年は、第四象限に属しているにもかかわらず融雪期の総流入量が少ない。また、図より降雪期のSWE累積増加量と融雪期の総流入量には正の相関があることが読み取れるが、SWE累積減少量と総流入量の関係は読み取れない。また、降雪期のSWE累積増加量・累積減少量いずれに関しても、有意な経年傾向は確認されなかった。これは、融雪期の総流入量はダム流域全体の積雪の影響を受けるのに対し、降雪期のSWE累積増加量・累積減少量はダムの下流部の1点での観測データを使用したものであり、流域内の積雪は空間的な分布を考慮していないためであると考えられる。

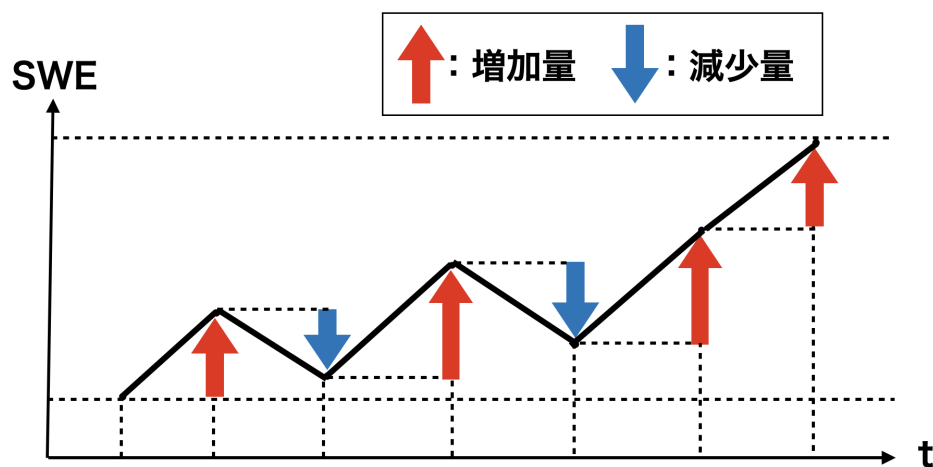


図-13 解析の概念図

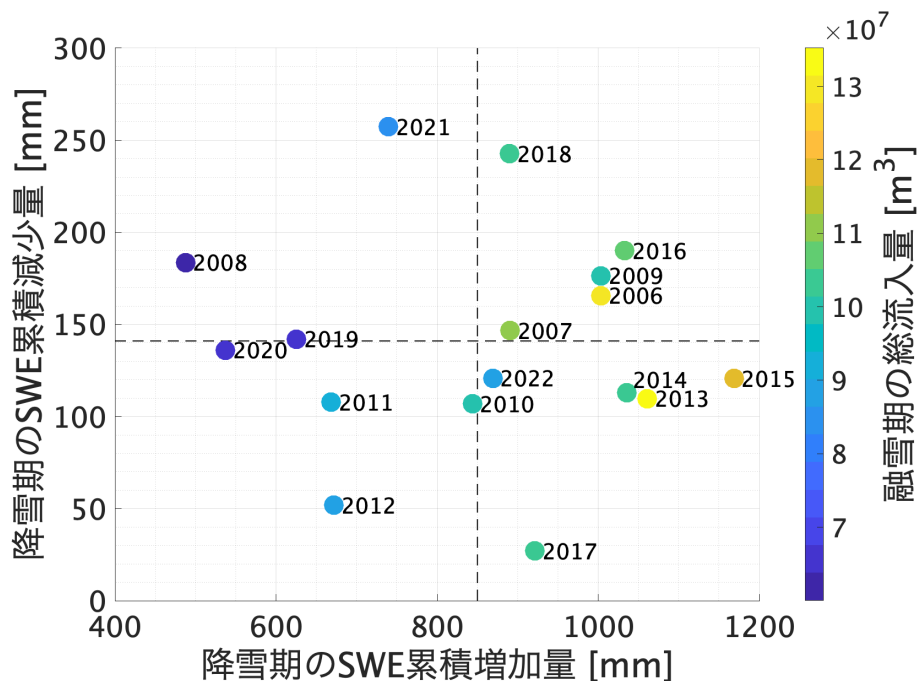


図-14 定山溪観測サイトにおける各年の降雪期のSWE累積増加量・累積減少量と融雪期のダム湖への総流入量

5. おわりに

本研究では、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データと、定山溪ダム流域内の積雪観測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、豊平峡ダムと定山溪ダムの両ダム湖への融雪期の総流入量は概ね同期し、積雪による水資源を相互補完するような関係には無いということがわかった。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。定山溪観測サイトでの積雪深・SWEのピーク日はいずれも早まっており、融雪時期の早期化が確認された。また積雪深・SWEのピーク日の日数差は年々広がっており、積雪深と積雪密度の関係が長期的に変化している可能性が示唆された。定山溪ダム流域について、各年の降雪期の降雪量・融雪量と融雪期のダム湖への流入量の関係を、SWEを用いた解析から分類した結果、降雪期の降雪量および融雪量に経年傾向は確認されなかったが、降雪期の降雪量のおよそ2割が降雪期の間に融雪すること、降雪期の降雪量と融雪期の流入量には正の相関関係があることがわかった。

参考文献

- 1) 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. 2023, <https://www.city.sapporo.jp/suido/overview/suigen/kakuho.html>, (参照2023-04-08).
- 2) Ma, X., Yoshikane, T., Hara, M., Wakazuki, Y., Takahashi, H. G., and Kimura, F.: Hydrological response to future climate change in the agano river basin, japan, Hydrological Research Letters, Vol.4, pp.25-29, 2010.
- 3) Kawazoe, S., Inatsu, M., Yamada, T. J., and Hoshino, T.: Climate change impacts on heavy snowfall in sapporo using 5-km mesh large ensemble simulations, SOLA, Vol.16, pp.233-239, 2020.
- 4) 長谷川禎史, 山田朋人: 豊平川流域における積雪に由来する水資源の特徴と経年特性の分析, 土木学会論文集, 79, 27, 23-27028, 2023.
- 5) 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), Vol.68, No.4, pp.I 1477-I 1482, 2012.

- 6) 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.
- 7) Nakatsugawa, M. and Hoshi, K.: Long-term runoff calculation considering change of snow pack condition, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 2004.
- 8) 細井遵敬, 山田朋人: 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, Vol.75, pp.B-31, 2019.
- 9) 正岡由仁, 岡地寛季, 山田朋人: 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, Vol.77, pp.B-30, 2021.
- 10) 大野愛佳, 岡地寛季, 山田朋人: 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, Vol.78, pp.B-37, 2022.

2. 2016年から2020年冬季における誘電センサーを用いた積雪観測と 誘電特性を考慮した積雪相当水量の推定手法

北海道大学 山田朋人

1. はじめに

積雪深や積雪相当水量 (Snow Water Equivalent: SWE) の観測はその地域における水資源量の把握や雪崩の発生リスク評価、物理モデルの評価において重要である。積雪相当水量とは、全ての積雪が融けて水になった際の水量を長さの次元で表現する物理量である。積雪の重さが観測されている場合は水の密度を用いることで、積雪相当水量を推定することができる。あるいは、積雪深と積雪の鉛直平均密度から推定することが可能である。

積雪相当水量は冬期に積雪として蓄えられる水資源として寒冷地の水文や、またアイスアルベドフィードバックのように積雪を考慮した気候学において重要な役割を担う。本研究では北海道における人口200万人を有する都市の札幌近郊で観測を実施した。対象流域である豊平川には多目的ダムである豊平峡ダムと定山溪ダムがあり、本観測場所は定山溪ダムの上流域に位置する。多目的ダムである定山溪ダムと豊平峡ダムは、融雪期の直前に貯水量が最低となり、春先に流入する多量の融雪水を貯め、初夏の各種用水を確保している。そのため、同地域において積雪相当水量の観測や、その観測手法の発展は不可欠である。

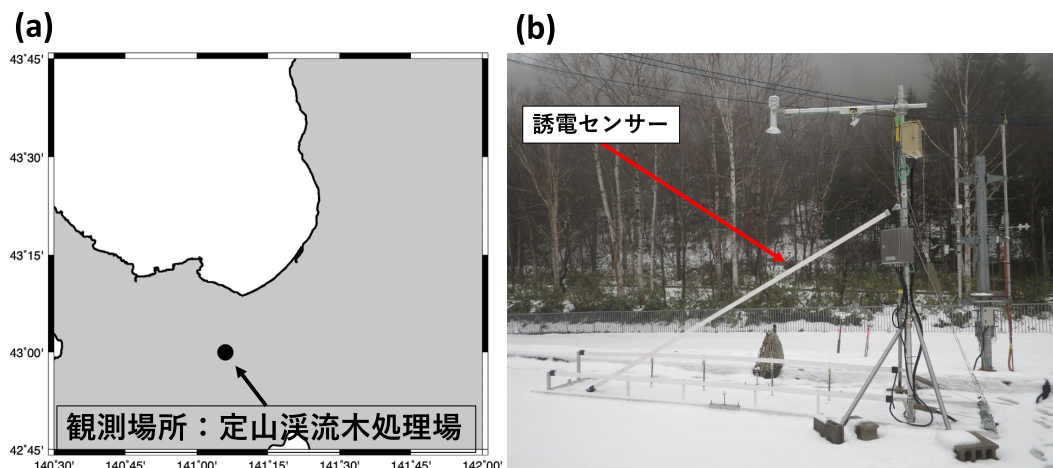


図-1 (a) 観測場所（定山溪流木処理場）を示す地図. (b) 誘電センサー (SPA) の設置状況.

積雪相当水量の観測手法の一つに現地に赴いて実施する積雪断面観測がある。断面観測はその観測に要する時間と観測対象が主に山間地であることにより断続的な観測に多大な労力を必要とする。一方で、遠隔での計測手法を用いた観測は連続観測に適しており、その技術の発展を目指す研究は数多く報告されている。スイスのInstitute for Snow and Avalanche Researchは70年間継続して標高2540mに位置するWeissfluhjoch, Davosでの計測を行ってきた¹⁾。同地点では、降雪粒子を直接観測する融雪式転倒ます雨量計や雪の粒子を計測するParsivelが設置されている。降雪粒子の観測は降水量としての総量の推定は可能であるが、積雪した後の積雪密度や雪質の時間発展を推定する必要がある。2004-2005年と2007-2008年の2シーズンに亘って、ライシメータや誘電センサーを用いた観測手法の検討が実施された。得られた観測結果と断面観測結果の比較から、積雪量のピーク時期までの観測から得られる誘電センサーを含む複数の観測結果の良い点と悪い点を示した。特に誘電センサーはライシメータによる観測とSWEを推定する確率モデル (SIMPLE-SWE) の結果と比較し、観測の簡易な点から新たな観測手法と

して示された¹⁾。Angela et al., (2010)はレーダや宇宙線、誘電センサーによる観測結果を相対比較し、レーダによる面的な観測の可能性を示した²⁾。Anne (2013)は誘電センサーによる観測結果が融雪の物理的パラメータの推定に有用であることを示した³⁾。また本研究の観測場所である定山溪流木処理場において2005年から2022年まで継続的な積雪観測と積雪断面観測を実施してきた⁴⁾⁻⁶⁾。さらに、近年ではレーザを用いた航空機測量による積雪の面的な観測が実施されている^{5),6)}。

観測だけでなく物理モデルによる積雪の雪質変化を推定する手法が提案されている⁷⁾。提案されている物理モデルは積雪の圧密と融解過程を鉛直一次元の雪柱とし、上端は積雪表面における熱収支から得られる熱フラックス、下端は地表面の温度が0度であることを境界条件として四つの支配方程式から時間発展を解くモデルである。こうしたモデルの開発や検証においても上記の観測は重要であり、ある時点における観測だけでなく継続的な観測が重要となる。

本研究では誘電センサーとライシメータを用いた積雪相当水量の観測を実施し、両者の比較から誘電センサーが有する季節性や積雪内の含水率と含氷率に応じたライシメータによる観測結果との相対的な差を定量的に示し、積雪量や時期に応じた補正手法を提案する。なお、本稿は令和5年度土木学会地球環境論文集における研究成果⁷⁾に基づいて執筆した。

2. 観測の概要と観測データ

(1) 観測地点の概要

積雪観測及び積雪断面観測は札幌市南区にある北海道開発局・豊平川統合管理事務所の定山溪流木処理場で行った。同地点は石狩川水系小樽内川の定山溪ダムの上流に位置し、標高は400 m程度である。本研究では、2016-2017年、2018-2019年、2019-2020年の3シーズンに亘って実施した気象及び積雪観測のデータを用いた。観測場所は北海道開発局が管理する流木処理場であり、地面はコンクリートで平坦な場所である。それゆえに積雪はおおむね一様であると考えられる。気象観測では気温、降水量、日射量、風速の計測を実施した。積雪観測ではライシメータによる積雪重量、積雪の底面からの融雪量、誘電センサー(SNOWPACKANALYZER: SPA)を用いた積雪相当水量、電波による積雪深の計測を実施した。また同期間中には合計で7回の積雪断面観測を実施し、そこで得られた積雪密度と積雪温度、雪質の鉛直分布のデータを併せて利用する。図-1に観測地点を示す地図と現地の様子、積雪断面観測の様子を示す。

(2) SWEの観測手法

a) 誘電センサーによるSWEの推定

誘電センサーは異なる周波数の電流を用いた計測手法である。積雪内には氷、水、空気が存在し、それぞれ温度と周波数により誘電率が変化する。その特性を利用し積雪内部の体積に対する氷の体積率、水の体積率を計測する。得られた体積率を利用し、積雪密度と積雪相当水量を推定する。センサーは平たいプラスチック製バンドに三つの平たいワイヤが通っている。そのワイヤ内に電流を流し、プラスチックバンドの周りに存在する物質の誘電率を測定する⁸⁾。電流により形成される電場は周囲3から5cm程度の範囲にのみ影響する。

電流を流すことによりセンサー周りに発生する電場がセンサー周りに存在する物質にかかることで、電荷が蓄えられる。観測では周りに存在する物質に形成される合計の電気容量を計測する。周りに存在する物質の電気容量は以下の式で表現される⁹⁾。

$$C = C_1 + \frac{C_2 \epsilon_m C_3}{C_2 + \epsilon_m C_3} \quad (1)$$

ここで、 C_1, C_2, C_3 は観測により得られる電気容量、 ϵ_m は周囲の物質の誘電率である。Huebnerら(1997)では観測結果とシミュレーションにより得られた電気容量の一致を示した⁹⁾。得られた誘電率より観測範囲に存在する氷、水、空気の体積率は以下の式群から推定される。

$$\epsilon_m(f_1) = (W\epsilon_w^\alpha + I\epsilon_{ice}^\alpha(f_1, T) + A\epsilon_a^\alpha))^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2)$$

$$\epsilon_m(f_2) = (W\epsilon_w^\alpha + I\epsilon_{ice}^\alpha(f_2, T) + A\epsilon_a^\alpha))^{\frac{1}{\alpha}} \quad (3)$$

$$W + I + A = 1 \quad (4)$$

ここで、 $\epsilon_m(f_1), \epsilon_m(f_2)$ はそれぞれ異なる周波数 f_1, f_2 の電流を用いた時に計測された誘電率を示す。 W, I, A は水、氷、気体の体積率、 $\epsilon_w, \epsilon_{ice}, \epsilon_a$ は水、氷、気体の誘電率を表し、空気の誘電率 ϵ_a は1である。また式(2)、(3)は複数物質の誘電率を推定するための式であるLooyangaの式であり、 α は0.3である。式(2)–(4)に観測から得られた誘電率 $\epsilon_m(f_1), \epsilon_m(f_2)$ を与えることで、水、氷、気体の体積率が観測結果より得られる。さらに得られた体積率から以下の式を用いることで、積雪密度 D が推定される。

$$D = W \times 0.9999 + I \times 0.9150 \quad (5)$$

観測結果は1時間ごとの値であるが、本研究では1時間値を1日平均値として使用した。

b) ライシメータによるSWEの推定

本研究では、誘電センサーの観測結果との比較対象としてライシメータによる積雪重量の計測を実施した。ライシメータ(2 x 2 m)は誘電センサーから数m離れた位置に2地点設置した。観測より得られた積雪重量[kg/m²]に水の密度(999.9 kg/m³)を掛けることで積雪相当水量を推定した。時間解像度は1時間おきである。

(3) 誘電センサーの観測結果の補正手法

誘電センサー用いたSTAHLIら(2004)はWeissfluhjoch, Davos, Switzerlandにおいて2001–2002年と2002–2003年の冬季に同測器を用いた計測を実施した¹⁰⁾。センサー周りに雪が付着する場合と空洞ができる場合における誘電率の違いを課題とするが、同地点で行った断面観測より得られた積雪密度とライシメータから推定された融雪量との比較検証から同測器の有用性を示した。

一方で、センサーが空気に触れる率が高まることにより、推定結果に誤差が生じることが指摘されている。STAHLIら(2004)は積雪とセンサーの間に風や積雪の融解により形成される空隙による推定結果の誤差を指摘した。さらに、空隙が形成されることにより水がセンサーを伝っていくことによる影響について示唆されている。しかし、センサー部が大気中へ露出する割合に応じた観測結果への影響は指摘されておらず、ここではその影響について議論をする。誘電センサーは積雪深とともにセンサー部分が積雪内部に覆われ、空気中に露出する部分は減少する。露出量を考慮しない場合、露出している範囲としていない範囲に一樣に積雪が分布していると仮定して積雪密度は推定される。そのため、露出量を考慮することで積雪相当水量の推定精度が高まることが仮定できる。本研究では同地点において計測した積雪深からセンサーバンドの最高部に対する積雪深の割合で値を除することで積雪相当水量の補正を実施した。

$$SWE_{mod} = SWE \times H_{max}/H_{snow} \quad (H_{snow} \neq 0) \quad (6)$$

ここで、 SWE_{mod} は補正後の積雪相当水量、 SWE は誘電センサーより得られた補正前の積雪相当水量、

H_{max} はセンサーを図-1に示す鉛直上むきのパイプであるマストに固定した高さ、 H_{snow} は積雪深を表す。得られた結果はライシメータ、積雪断面観測より得られた結果と比較検証した。

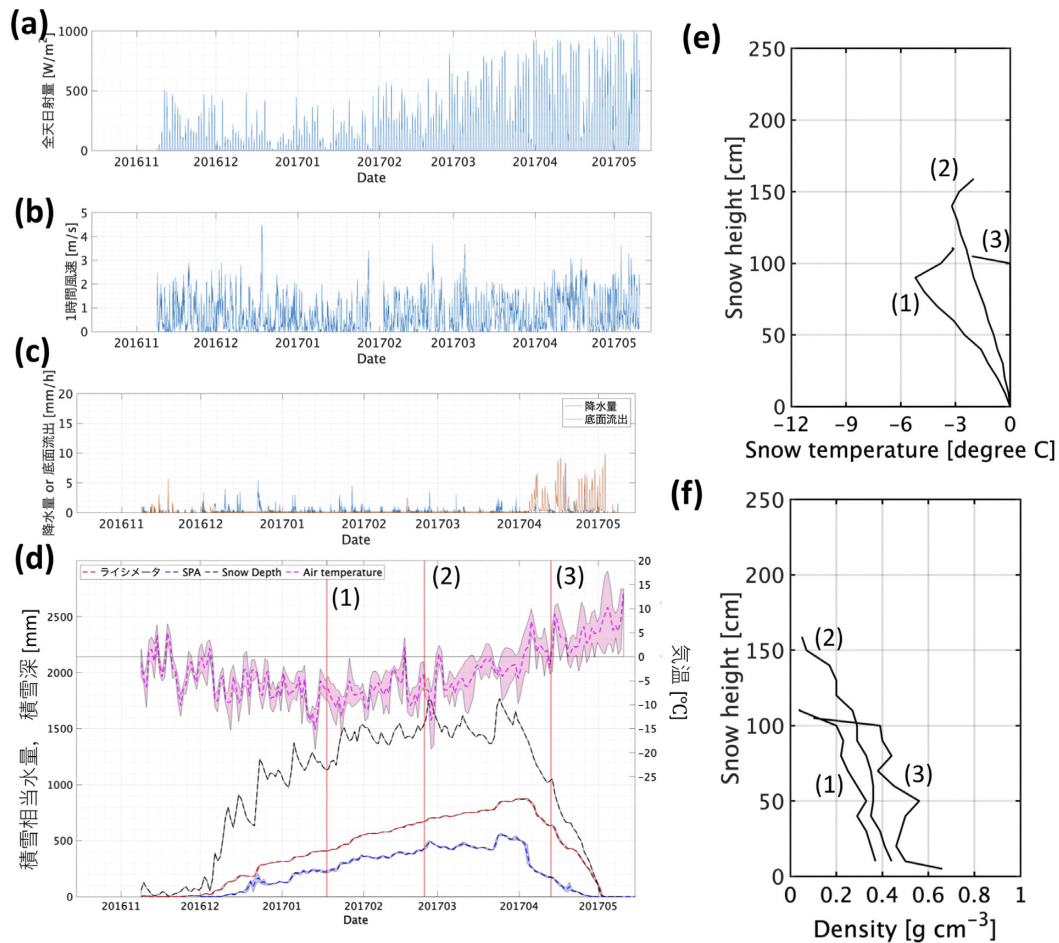


図-2 2016-2017年シーズンの観測結果。(a) 全天日射量, (b) 1時間平均風速, (c) 降水量と底面流出量, (d) 積雪深, 積雪相当水量, 気温の時系列。(d)に示す観測値は1時間毎の観測値の1日平均値と標準偏差を表し, 赤縦線は積雪断面観測実施日を表す。(e), (f)はそれぞれ雪温と積雪密度の鉛直分布を表す。図中に記載した(1)~(3)は図(d)に記載した(1)~(3)の赤点線の日時に観測したことを示す。

3. 結果と考察

図-2, 3, 4に3年間の全天日射量, 1時間平均風速, 降水量, 底面流出量, 気温, 積雪深, ライシメータにより計測した積雪相当水量と誘電センサーによって計測した積雪相当水量の時系列と断面観測により得られた雪温と積雪密度の鉛直分布を示す。それぞれの図の積雪深とその他の観測項目を比較する。

2016-2017年シーズンにおいては, 積雪深のピークは3月下旬 (175 cm程度), 積雪相当水量のピークは4月上旬であった。気温が2月以降に0度を超えると積雪深がおおむね一定値に推移し, 気温が正の値に転じさらに2-5度程度を超えると減少傾向へ転じる。また2月以降には全天日射量が増加傾向へ転じるタイミングであった。風速に対する積雪深の応答は時間スケールが短い, 積雪表面での熱収支を考える際に重要な要素となる。底面からの流出量は4月の初旬に始まる。積雪相当水量の減少するタイミングに対して底面からの流出が始まるタイミングは遅れ時間があり, これは積雪内に融解した水が貯留されていることが原因であると考えられる。一方で, 二つの手法を用いた積雪相当水量の観測結果を比較すると, 絶対値はライシメータに対して誘電センサーの観測結果は過小傾向にあるが, ピークのタイミングはおおむね一致していた。

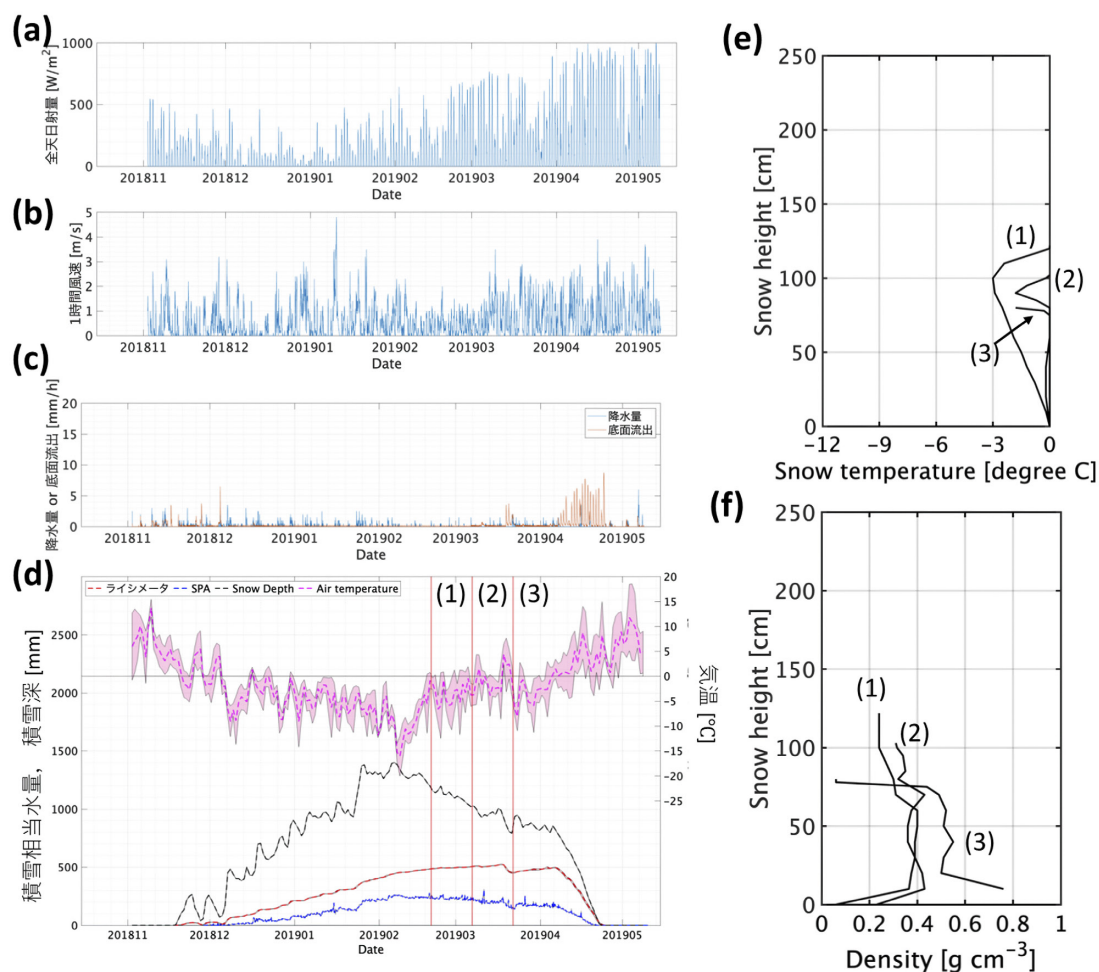


図-3 2018-2019年シーズンの観測結果。項目は図-2と同様。

2018-2019年シーズンの積雪深は140 cmに到達し、2月の初旬に記録された。一度に40 cm増加する降雪イベントは2回存在した。気温と全天日射量と比較すると2016-2017年シーズンと同様の特徴を有する。積雪相当水量のピークは4月上旬であった。積雪深は減少が緩やかな2月から3月下旬と急激に減少する4月以降が存在する。これは気温が2月に急増したのち0度付近を推移し、再度気温が上昇したタイミングと一致する。また底面流出と比較すると4月に発生した流出以前に3月中旬に一度流出した。同シーズンは断面観測を3回実施した。

2019-2020シーズンは積雪量が少なく、ピーク時で130 cmであり、3月初旬に記録された。積雪相当水量は他のシーズンに比べて少なく500 mm以下であり、ピークは3月下旬であった。積雪深と積雪相当水量は全天日射量と気温に対しておおむね他シーズンと同じ特徴を有する。断面観測は1回実施した。

3シーズンの観測結果より積雪深と積雪相当水量のピークを記録するタイミングの差は気温の変化が支配要因であると推定できる。それに加えて積雪内の雪質は新雪、こしまり、しまり、ざらめ、氷板と種々存在し、それぞれ密度や粒子形状が異なるため、浸透速度が異なる。特に、氷板は不透水層であることから横方向の水の流動をもたらす。こうした理由から積雪内の雪質が流出のタイミングに影響をもたらすことが考えられる。

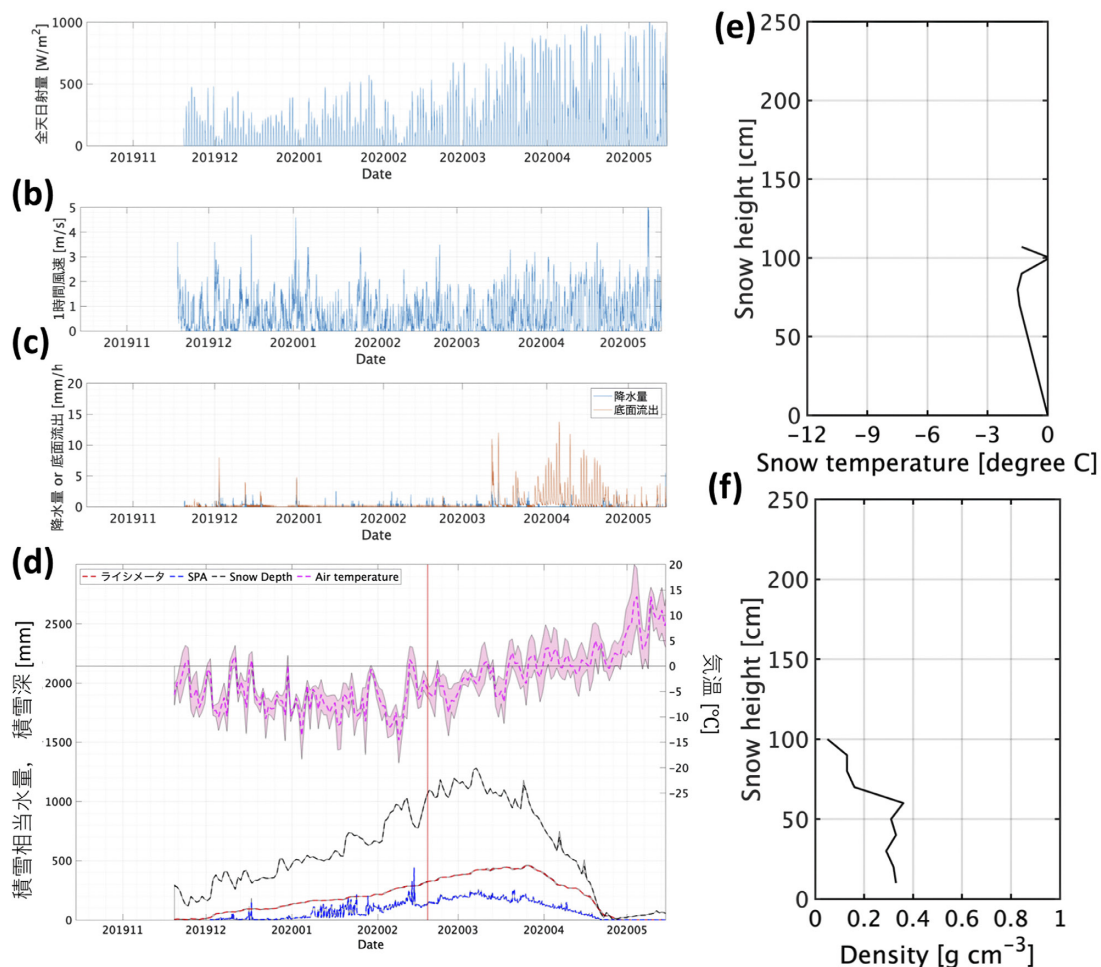


図-4 2019-2020年シーズンの観測結果。項目は図-2と同様

2016-2017, 2018-2019, 2019-2020シーズンの間に実施した7回の断面観測より雪温の鉛直分布は積雪表面から20~30 cm程度の深さで最低値が観測される傾向にある。また温度は-3度前後である。一方で、積雪密度の鉛直分布は下層にいくにつれて密度が大きくなる傾向がある。観測実施のタイミングが遅くなるにつれて密度は鉛直方向に一定になる傾向があり、これは積雪内が鉛直一様のざらめになった可能性を示唆する。積雪内の雪質は積雪深と積雪相当水量だけでは表現できず、電気伝導度を用いた観測である誘電センサーの観測は観測原理から積雪内部の雪質の推定に有効であると考えられる。

図-5にライシメータと誘電センサーにより計測した日平均の積雪相当水量の3期間分の散布図を示す。ライシメータの計測結果に対して誘電センサーにより計測した値は初頭（12月から3月）において概ね0.6倍、融雪期（4月）においてライシメータに対して0.2~0.5倍程度の関係である。ここでは観測結果を1時間平均値とした。誘電センサーはセンサーへ付着する雪や水滴の影響を受けるため集中した降雪によりセンサーへ降雪が付着した場合の影響を平滑化するために1時間平均値とした。(a)は観測の生データを用いた場合、(b)は補正式(5)を用いて補正した観測結果と比較した結果である。補正を実施した場合、誘電センサーの観測結果は積雪重量計から推定した積雪相当水量と1対1の関係に近づくことがわかる。積雪深が増加傾向にある降雪期、積雪深がおおむね一定値である時期、減少傾向になる融雪期にシーズンをそれぞれ降雪期、中期、融雪期と定義すると、誘電センサーの観測結果はライシメータに対して2倍、2倍から3倍、3倍程度に推移することがわかる。これは、積雪期における誘電率、中期の積雪内部の雪質、融雪期においては水と氷が混在するためそれぞれの誘電率が変化するためであると考えられる。

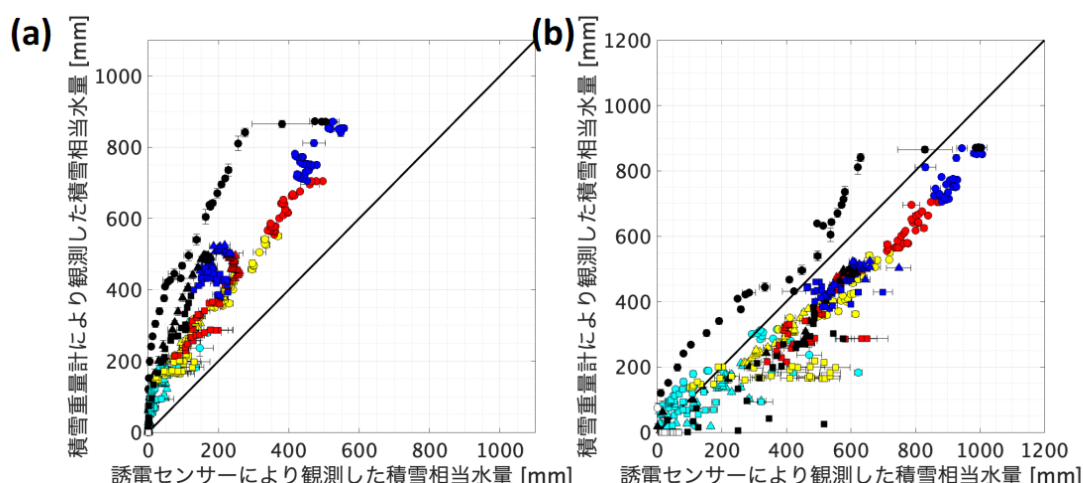


図-5 積雪重量計と誘電センサーの積雪相当水量の観測結果の比較。(a)は補正式(5)を適用前、(b)は適用後の結果を表す。丸は2016–2017年、三角は2018–2019年、四角は2019–2020年、色は月を表しそれぞれ、水色：12月、黄色：1月、赤色：2月、青色：3月、黒色：4月、バーは標準偏差を表す。

4. まとめ

本研究は、積雪内の水資源の推定の際に重要である積雪の継続的な観測結果を紹介した。積雪の観測は断面観測だけでなく積雪重量計などを用いた積雪観測と気象観測を合わせることで積雪の雪質変化特性を推定することが可能となる。また本研究では、積雪相当水量の観測手法として提案されている誘電センサーを用いた観測を同時に実施した。誘電センサーの観測結果と積雪重量計の観測結果を比較することで積雪内部の変化特性を推定の可能性が示された。誘電センサーはその観測原理から積雪内部の雪質変化と積雪内に氷と水が混在するタイミングで相対差によって変化し、降雪期には2倍程度、融雪期には3倍程度であった。この特性は誘電センサーが積雪内部の雪質の特性を推定できる可能性を示す。

今後は、同観測を継続的に実施し、積雪内の変化特性の詳細を分析する。また観測と物理モデルを併用することで、積雪内部の雪質の変化特性を推定する手法の構築を目指す。

参考文献

- 1) Egli, Luca., Tobias. Jonas, and Roland. Meister.: Comparison of different automatic methods for estimating snow water equivalent, *Cold Regions Science and Technology*, 57.2–3, 107–115, 2009.
- 2) Lundberg, Angela, Nils Granlund, and David Gustafsson.: Towards automated ‘Ground truth’ snow measurements—A review of operational and new measurement methods for Sweden, Norway, and Finland, *Hydrological processes*, 24.14, 1955–1970, 2010.
- 3) Heggli, Anne.: Data analysis of the snow pack analyzing system tested by UCAR, *Proceedings of the Western Snow Conference*, Lake Worth, FL, USA. 2013.
- 4) Nakatsugawa, Makoto, and Kiyoshi Hoshi.: Long-term runoff calculation considering change of snow pack condition, *J. Hydrosoci. Hydraul. Eng.*, Available at: <http://env-web.ceri.go.jp/houkoku/2004/49.pdf> (accessed May 2005), 2004.
- 5) 西原照雅, 谷瀬敦: 積雪分布のパターンの類似性に着目した積雪分布の推定手法の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), 73(4), I_37–I_42, 2017.
- 6) 西原照雅, 谷瀬敦: 複数回の航空レーザ測量結果を活用した代表 1 地点の観測値から簡易にダム流域の積雪分布を推定する手法の検討, 河川技術論文集, 23, 269–274, 2017.
- 7) 岡地寛季, 山田朋人: 2016 年から 2020 年冬季における誘電センサーを用いた積雪観測と誘電特性を

考慮した積雪相当水量の推定手法, 土木学会論文集, 79, 27, 23-27020, 2023.

- 8) 山下ら: 融雪特性を有する物質・流出機構の相互作用に関する研究, 土木研究所成果報告書, 42, 2010.
- 9) 正岡由仁, 岡地寛季, 山田朋人: 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, 2021.
- 10) 長谷川禎史, 山田朋人: 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, 2023.

3. 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

北海道大学 山田朋人

1. はじめに

塩水遡上とは、河口付近において流下方向に対して逆方向に塩水が遡上する現象である。塩水遡上に影響を与える要因として、河川流量、風、潮汐、河床形状などが挙げられる¹⁾。本邦において河口二層流に関する研究は福島らの観測²⁾に端を発し、多くの調査や研究が行われてきた。河川の塩分濃度が上昇すると河川水の取水、水性生物の生息環境などに影響を与えるため、塩水遡上の発生要因や物理機構の解明は重要な課題となっている。

石狩川は北海道中央部の大雪山系石狩岳に源を発し、石狩平野を経て日本海石狩湾へと流入する幹線流路延長268km、流域面積14330km²の日本を代表する大河川である。図-1に石狩川河口域の概況図を示す。河口部においては河床勾配が非常に緩いため感潮区間は河口から44.5kmである岩見沢大橋にまで及び、塩水と淡水が二層に分かれる弱混合型で塩水遡上が発生する。渇水期には塩水遡上距離は河口から26.6kmである石狩大橋以上の距離にまで及ぶ場合がある。また、石狩川河口部の大きな特徴として流路が南東から北西の向きに20km以上に渡って直行しているという点が挙げられる。この特徴により北西-南東方向の風の影響を受けやすく、南東風が吹き続けると塩水楔は上流側に伸び先端部も上昇することが明らかになっている²⁾。塩水遡上により図-1に示す灌漑用水、工業用水、上水の取水に影響を及ぼす恐れがある³⁾。

本研究では、石狩川における塩水遡上距離の経年変化と塩水遡上発生時の気象場について分析を行った。なお、本稿は令和5年度土木学会北海道支部論文報告集における研究成果⁴⁾に基づいて執筆した。

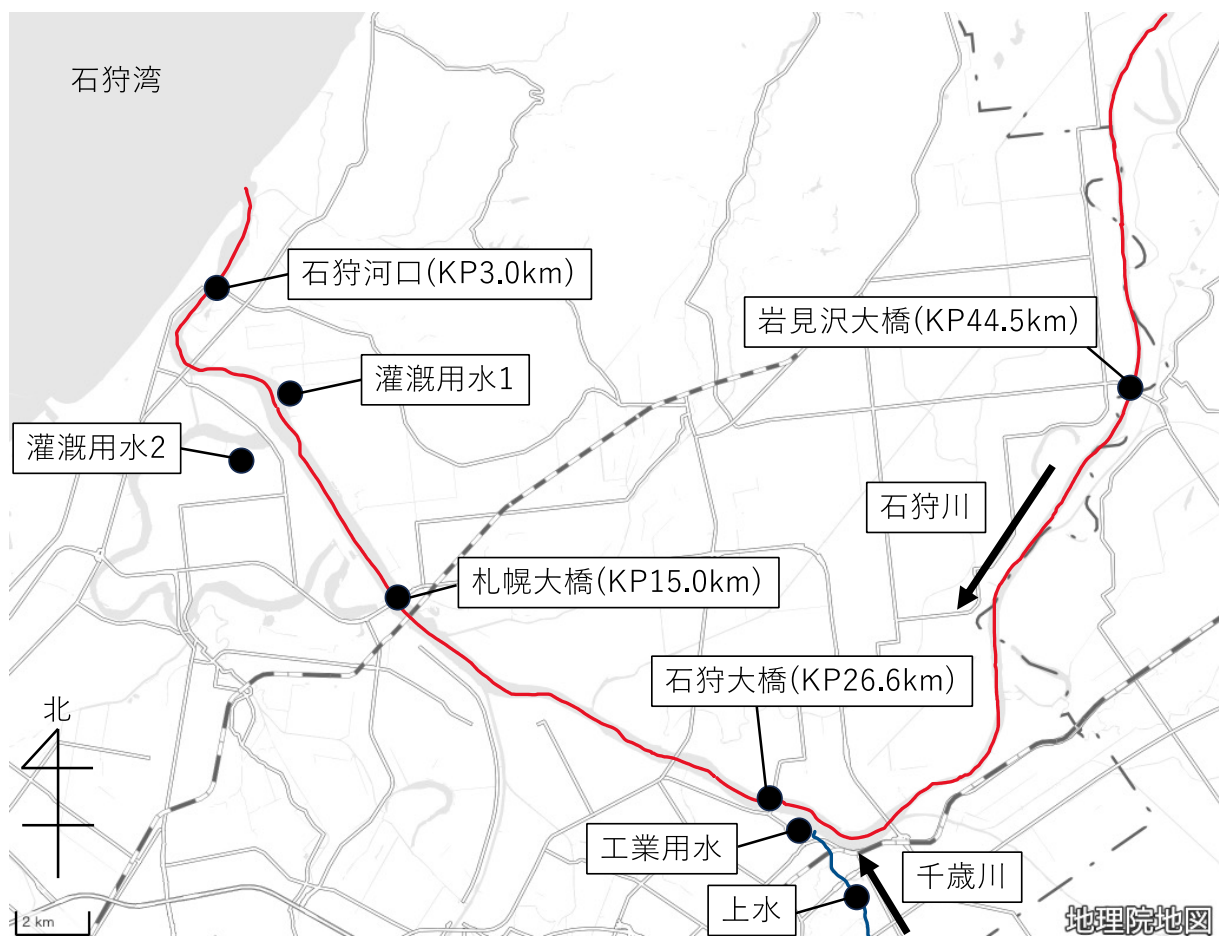


図-1 石狩川河口域の概況図

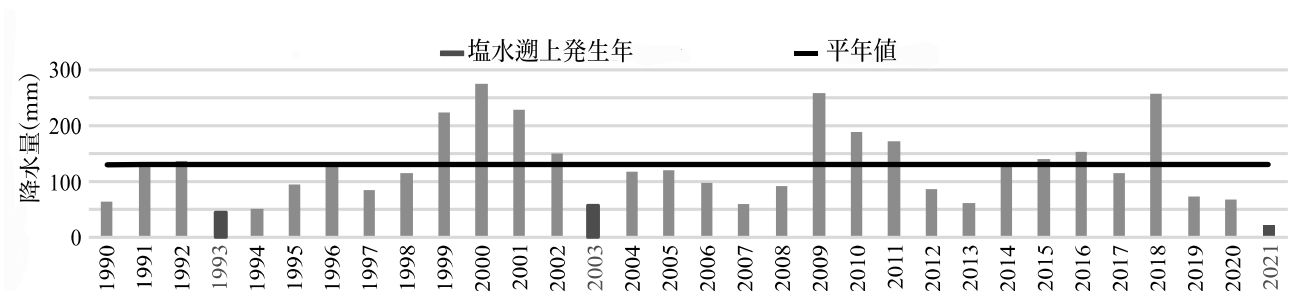
2. 使用したデータと研究手法

2.1 使用したデータ

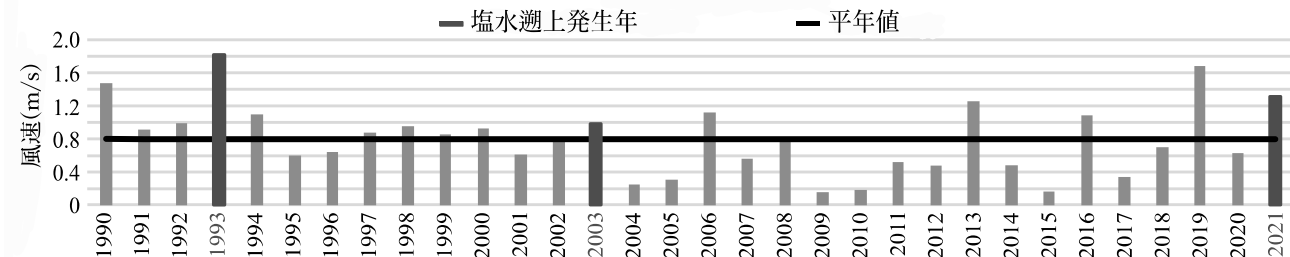
石狩川流域における降水量については、石狩川流域内の全ての気象台とアメダス(AMeDAS: Automated Meteorological Data Acquisition System)のデータを使用した。風向風速についてはアメダスの石狩観測所(以下、石狩アメダス)におけるデータを使用した。気温については札幌管区気象台で観測されたデータを使用した。塩分濃度については、国土交通省札幌開発建設部によって石狩大橋(KP26.6km)の橋脚に鉛直方向に塩分濃度計を設置して観測されているデータと、塩淡水境界の縦断観測結果を使用した。縦断観測が行われた1988～1989年、1992～2004年、2021年については各年における最大塩水遡上距離の経年変化を分析した。2006～2020年については縦断観測が行われていないが、石狩大橋(KP26.6km)において塩分濃度計による観測が行われている。海水の塩分濃度は30～35psuであるため、いずれかの高さで25psu以上の塩分濃度が観測された場合、KP26.6kmに塩水が到達したと判定した。

また、降雨量、地上付近の水平風、気温、気圧、上空大気層厚さに注目して気象場の分類を行った。解析に使用したデータセットは、水平解像度約30kmのECMWF第5世代大気再解析データの7月平均場である。本解析では、1979年から2021年の43年間を使用した。

a) 石狩川における7月の流域平均総降水量



b) 石狩 AMeDAS における7月の風速の南東成分



c) 札幌気象台における7月の平均気温

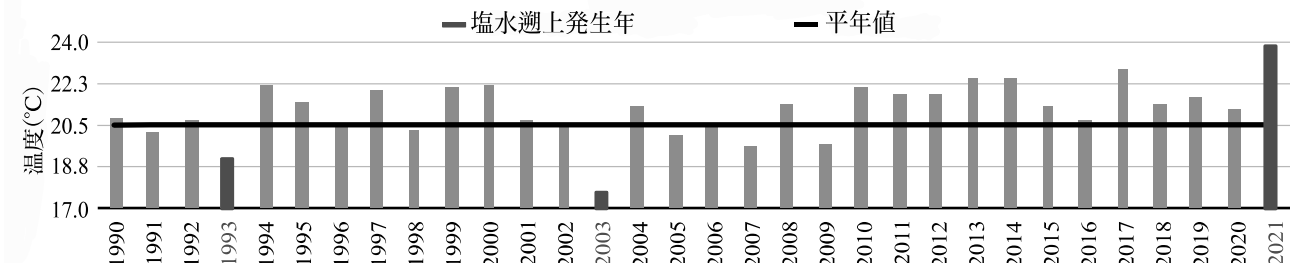


図-2 1990年から2021年における7月の総降水量、南東風、気温

2.2. 塩水遡上の発生条件の検討

石狩川の渇水期である7月を対象とし、塩水遡上が発生した年の降水量、風、気温の平年差を分析する。

塩水がKP28.5km以上まで遡上した年は1993年、2002年、2003年、2021年の4年である。しかし、2002年にKP28.5kmまで遡上が観測されたのは7月3日であり、6月の気象要因を大きく受けていると考えられる。したがって、本研究では7月における塩水遡上発生年を1993年、2003年、2021年の3年とした。

図-2a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す。図に示す通り、塩水遡上発生年は平年と比較して降水量は小さく、1993年は平年に対して約80mm、2003年は平年に対して約70mm小さい。特に2021年7月においては平年に対して100mm程度少ない約22mmであり、過去32年間で最小値を記録していたことが分かる。

図-2bは図-2aと同期間について石狩アメダスの風速の南東成分を示す。なお、縦軸については1時間ごとの風速ベクトルを南東から北西の向きに正射影し、7月を通しての1時間平均を取ったものである。図に示す通り、塩水遡上発生年は平年に対して風速の南東成分が大きく、1993年は平年に対して約1.0m/s、2003年は平年に対して約0.2m/s、2021年7月は平年に対して約0.5m/s大きい。

図-2cは図-2a、2bと同期間における札幌管区気象台における月平均気温を示す。塩水遡上発生年の内1993年と2003年は平年に対して低温であり、1993年は平年に対して1.4℃、2003年は平年に対して2.8℃小さい。一方、2021年は平年に対して高温であり、平年値より3.4℃高かった。

以上より、石狩川での塩水遡上発生時には、少雨と南東風という条件は共通しているが、気温は高温と低温の2パターンに分類されることが考えられる。

2. 3気象場の分類

気象場の分類手法としては、自己組織化マップ⁵⁾（以下、SOM）を主軸にし、主成分分析とk-meansクラスタリングを組み合わせる手法⁶⁾を用いた。入力情報は、海面更正気圧、2m高さ気温、10m高さ水平風（東西風・南北風）、降雨量、500hPaにおけるジオポテンシャル高さの6変数である。対象領域は北緯40度から46度、東経138度から146度とし、領域内の全てのグリッドデータを使用した。したがってデータの入力次元は、気象変数の数（6変数）にグリッド数（東西32グリッド×南北24グリッド）をかけた4,608次元のデータである。入力データ数は43個であり、各アンサンブルの7月平均場を使用している。ただし、それぞれの気象変数同士あるいはグリッド同士は独立ではなく、互いに依存関係にあるため、はじめに主成分分析を使用して次元の削減を行なっている。さらに使用する変数は、異なる次元と単位の変数であるため、それぞれのグリッドと変数ごとに0から1へ規格化を行った値を入力情報とした。その上で主成分分析により計算された主成分に対して、累積寄与率が上位95%となるような上位主成分のみをSOMの学習情報とした。

3. 結果

図-3に最大塩水遡上距離の経年変化を示す。1990～1991年、2005～2020年は縦断観測が行われていないため最大塩水遡上距離が0となっているが、2006～2020年については石狩大橋(KP26.6km)における塩分濃度計の観測結果により河口から26.6kmに塩水が到達したか判定が可能である。表-1に2006～2020年の7月に塩水がKP26.6kmに到達したか否かを示す。図-3の横軸の年については、赤色が7月にKP26.6km以上まで塩水が到達した年であることを、灰色が縦断観測も塩分濃度計による定点観測も行われていないことを表す。

SOMによる学習結果として、気象場を計9パターンに分類した。図-4に平年に対して小雨かつ南東風が卓越しており低温のパターンの水平風と気圧のコンポジット平均場を示す。図-5に平年に対して小雨かつ南東風が卓越しており高温のパターンの水平風と気圧のコンポジット平均場を示す。7月にKP26.6km以上まで塩水が到達した年の内、低温のパターンには1993、2003年が分類され、高温のパターンには2013、2019、2021年が分類された。

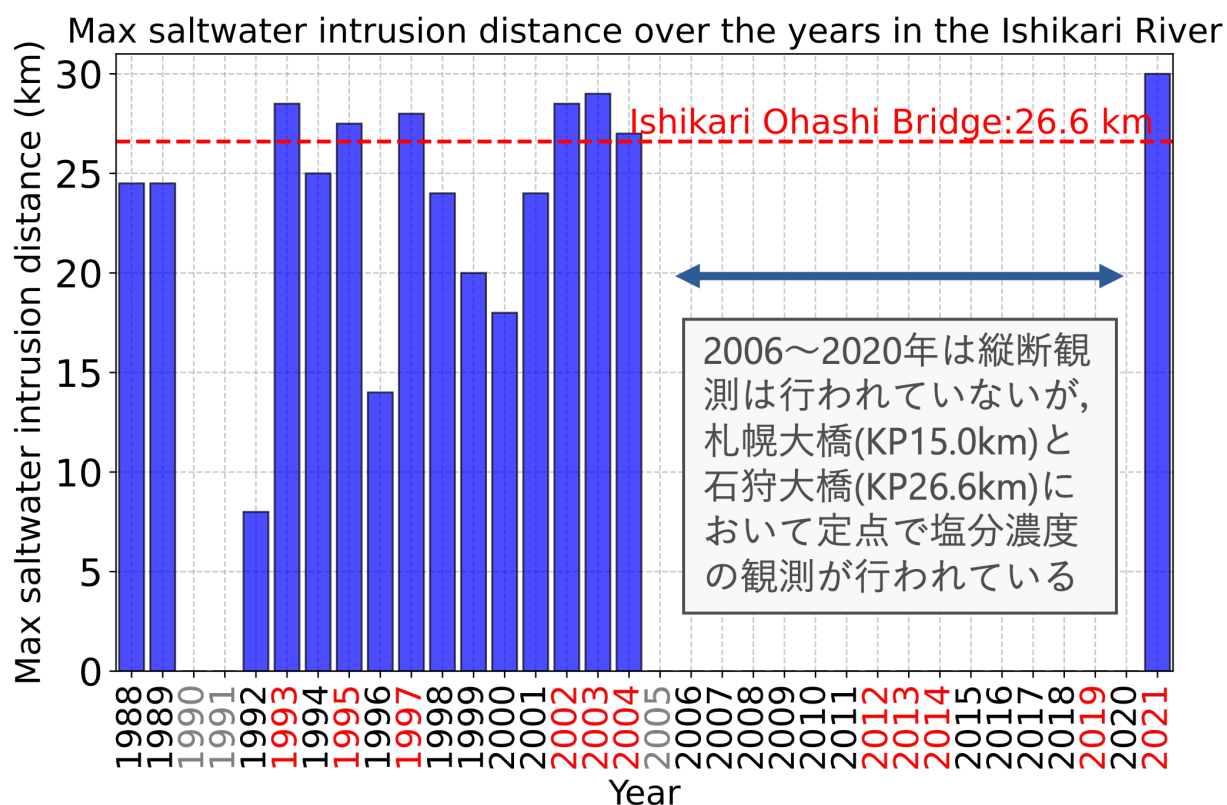


図-3 最大塩水遡上距離の経年変化(横軸の年について、赤色が7月にKP26.6km以上まで塩水が到達した年であることを表し、灰色がその年に縦断観測も塩分濃度計による定点観測も行われていないことを表す。)

表-1 石狩大橋における塩分濃度の観測結果

年	塩水が石狩大橋(KP26.6km)に到達したか否か
2006	×
2007	×
2008	×
2009	×
2010	×
2011	×
2012	○
2013	○
2014	○
2015	×
2016	×
2017	×
2018	×
2019	○
2020	×
2021	○

※海水の塩分濃度は30～35psuなので25psu以上の塩分濃度が確認された場合に到達とする

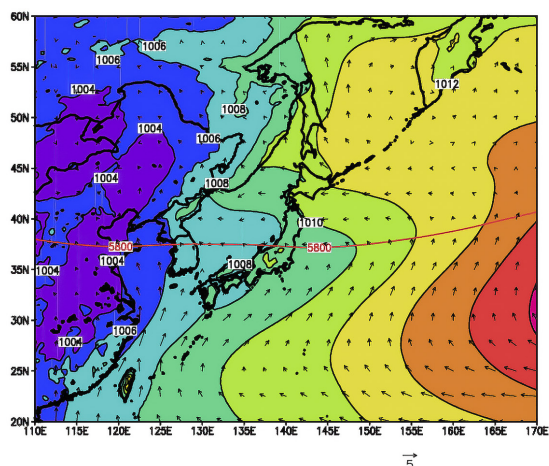


図-4 小雨かつ南東風が卓越し、低温の場合の
水平風と気圧のコンポジット平均場

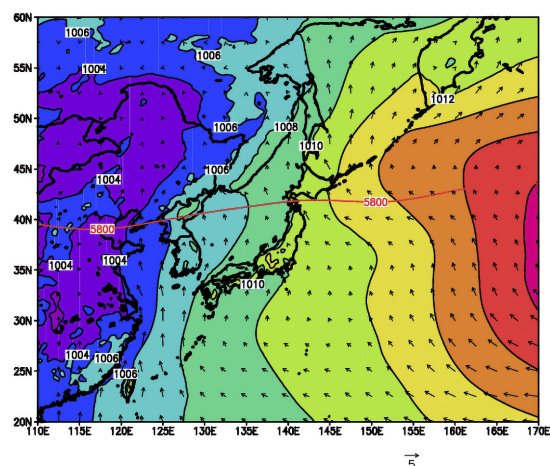


図-5 小雨かつ南東風が卓越し、高温の場合の
水平風と気圧のコンポジット平均場

4. まとめ

1993年、2003年、2021年の7月の気象場を分析した結果、石狩川において塩水遡上発生年には平年に対して小雨かつ南東風が卓越しており高温のパターンと、平年に対して小雨かつ南東風が卓越しており低温のパターンの2パターンが見られることが分かっている⁹⁾。1979年から2021年までの気象場を分類した結果、塩水が7月にKP26.6kmを越えた年において、10年中2年が平年に対して小雨かつ南東風が卓越し低温のパターンに、10年中3年が平年に対して小雨かつ南東風が卓越し高温のパターンに分類された。これらのことから、少雨かつ南東風が卓越する塩水遡上条件を満たす代表的な気象場として寒暖が異なる気象場パターンが存在し、過去の塩水遡上年の半数は上記パターンのいずれかであることがわかった。

参考文献

- 1) 福島久雄：石狩川河口の観測，日本海洋学会誌，第1巻，第1号，pp.57-73，1942
- 2) 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，pp.361-365，2004
- 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) 田中健人，大屋祐太，石原道秀，山田朋人：石狩川における塩水遡上距離の経年変化と塩水遡上発生時の気象場，令和5年度土木学会北海道支部論文報告集，80，2024
- 5) T.Kohonen：Self-organized formation of topologically correct feature maps, Biological Cybernetics, 43, pp.59-69, 1982
- 6) T.Nguyen, M.Nakatsugawa, T.J.Yamada, T.Hoshino：Assessing climate change impacts on extreme rainfall and severe flooding during the summer monsoon season in the Ishikari River basin, Japan, Hydrological Research Letters, 14(4), pp.155-161, 2020