

結氷河川における水位変動を考慮した 流量推定手法の現地適用 河川結氷時の流量推定手法マニュアル(案)を用いて

札幌開発建設部 河川計画課
河川計画課
寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ寒地河川チーム

平松 裕基
倉本 洋平
平田 智道

結氷河川時の流量算出において、札幌開発建設部で従来用いられてきた手法では、日流量のみの算出となり、時刻水位の変動を反映できない状況である。寒地土木研究所の「河川結氷時の流量推定手法マニュアル(案)」(新結氷補正)では、水位変動を考慮した時刻流量の算出が可能となることから、この手法を現地河川に適用した。具体的には、札幌開発建設部管内の結氷する8観測所について、従来の手法と新結氷補正の手法で算出された結果を比較することによって、豊平低渇流量等の水文統計資料に違いが表れるか等について調べた結果、本論文で対象とした範囲内ではその違いは小さいことがわかった。

キーワード：結氷河川、結氷補正、時刻流量

1. はじめに

低水流量は、河川管理の基礎資料として活用されており、一般に流量は水位流量曲線式(HQ式)により算出されるが、河川が結氷する期間(結氷期間)の流量は前述のHQ式をそのまま適用することはできない。これは、河水の喫水深、河水底面粗度等の影響によって水位が上昇するため、開水時のような水位と流量の一義的な関係を得ることが困難であることが要因である。そのため、結氷期間においては、別途補正を行うことにより流量を算出している。

こうした結氷補正方法には様々な手法があり、札幌開発建設部では北海道開発局方式(以降、Eye-method法と呼ぶ)を現在用いている。しかしながら、算出された流量は日流量(1日1データ)のみの算出となり、時刻水位の変動を反映した時刻流量は算出できていない状況である。

そこで、吉川ら¹⁾は、河水底面粗度や河水面積の変動といった河川結氷時の水理現象を考慮した流量を流量観測時の観測項目だけで推定する手法を示した。これをもとに、寒地土木研究所では「河川結氷時の流量推定手法マニュアル(案)」²⁾を発行し、河川結氷時の流量推定手法の統一的な運用と管理技術の向上を目指している。また、大野ら^{3)~6)}は当手法の適用に向けた課題について詳細な検証を行っている。

寒地土木研究所の「河川結氷時の流量推定手法マニュアル(案)」による手法(以降、新結氷補正と呼ぶ)

では、結氷河川における水位変動を考慮した時刻流量を算出できることから、本論文では日流量よりも詳細な時刻流量を得ることを目的とした新結氷補正の現地河川に適用した。具体的には、札幌開発建設部管内の結氷する8観測所(石狩川の橋本町、岩見沢大橋、月形、旧美唄川の大豊橋、雨竜川の幌加内、多度志、千秋、雨竜橋)を対象として、過去10カ年(2014~2023年)の結氷期間の流量を整理した。この整理を通じて、推定した流量と観測流量との間にはずれが見られ、その要因としては推定値として算出した断面積や喫水深と、これらの実際の値との間にずれがあるためと考えられることから、このずれが小さくなる手法について検討した。その上で、新結氷補正と従前の結氷補正(Eye-Method法)の流量を比較することによって、豊平低渇及び最小流量、年総量に違いが表れるかを調べた。

2. 結氷補正の計算方法と特性

(1) 従前の結氷補正(現行法)

Eye-Method法では図-1の手順により流量を算出する。

- 流量観測日における流量(観測流量)を非結氷期のHQ式に代入し、相当水位 H' を算出する。
- 流量観測日における水位 H と相当水位 H' の差 ΔH を算出する。
- 流量観測日以外の日を含めた連続的な水位から ΔH を差し引くことで、連続的な相当水位 H' を求める。

(d) これを再び非結氷期のHQ式に代入し直すことにより、日流量を算出する。

本手法は、補正した流量が観測流量に合うように、非結氷期のHQ式から逆算で相当水位 H' を求め、観測値との差 ΔH を時系列に線形補間することにより日流量を求めるものである。

図-2は雨竜川多度志観測所を例として、水位、流量を示したものであり、黒線が水位、赤丸が観測流量、赤の破線が非結氷期のHQ式を用いて算出した流量、緑線がEye-Method法で算出した流量の変動を示したものである。

非結氷期のHQ流量（赤の破線）は、結氷期間内は観測流量と整合しないが、従前の結氷補正は観測流量を基にするため一致する。しかしながら、当地点はダム放流による水位の日周変動がみられる地点であるが、従前の結氷補正流量は水位変動を考慮していないため、直線的な変動傾向になっている。また、Eye-Method法では、河氷底面の粗度係数や河氷面積の変化については考慮されていない。

(2) 新結氷補正

新結氷補正は図-3の手順により流量を算出する。新結氷補正流量の基礎式は以下の式(1)で示され、流量 Q (m^3/sec)、河氷底面粗度を表す C ($\text{m}^{3/4}/\text{sec}$)、川幅 B_w (m)、流下断面積 A_o (m^2)とする。

$$Q = C B_w^{-\frac{1}{4}} A_o^{\frac{5}{4}} \quad (1)$$

- 結氷時の流量観測データから、喫水深 d (m)、 C 値、川幅 B_w を得る。
- 非結氷時のHA式（水位 H と流積 A の関係式）を流量観測データまたは横断測量データから導出する（現場に応じていずれかを選択する）。
- 観測を実施していない日の d 、 C 、 B_w は、その日を挟む観測日の値を用いて線形補間により時系列に配分する。
- 時系列の連続水位 H から、喫水深 d を差し引いた相当水位 H' をHA式に代入して A_o を求め、時系列配分された C 、 B_w 、 A_o を式(1)に代入し、時系列の流量 Q を求める。

河川結氷時の流速を支配する河氷底面粗度は流水による融解で河氷底面がなめらかになるため、時間経過によって小さくなることが知られている^{1), 7)}。新結氷補正では、この変化を C 値で代表させている。また、河氷は気温、水温等により河氷厚が変化するが、これを観測時の河氷断面積から求めた喫水深 d で表している。

以上のように、新結氷補正では結氷河川の水利現象を踏まえて、時刻毎の水位変動を考慮した流量を算出できるという特性があることがわかる。図-2の紫線が新結氷補正の算出結果であるが、ダム放流による水位変動に応じた流量変化が再現されている。

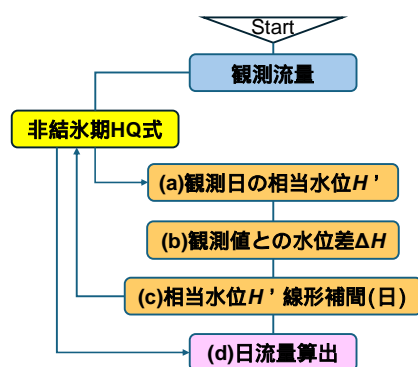


図-1 従前の結氷補正（北海道開発局方式 Eye Method 法）

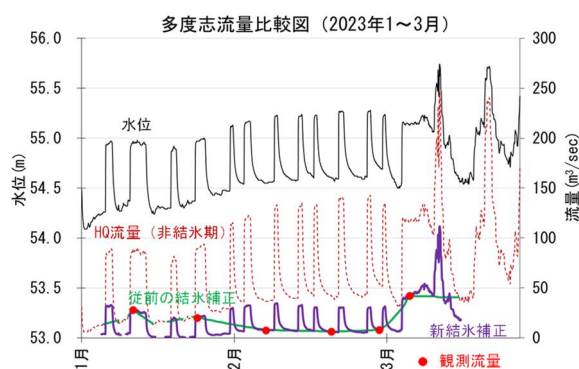


図-2 結氷補正結果の例¹⁾

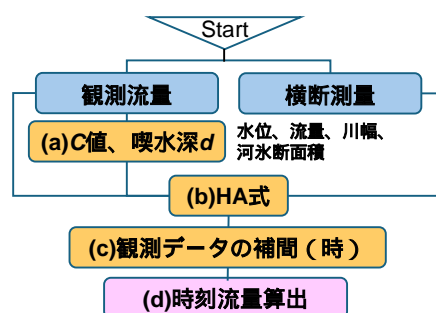


図-3 新結氷補正のフロー

3. 新結氷補正の現地観測データへの適用

(1) HA式を用いた断面積 A_o による流量推定

新結氷補正では、2. (2)の(a)で説明したように、図-4のとおりに観測水位 (H) と断面積 (A) からHA式を作る方法と、図-5のとおりに横断測量データをもとに水位と断面積の一覧表を作成してHA式を作る方法がある。観測値を用いた図-4の手法では、特に河氷断面積が大きい観測所では、ばらつきが大きいことから、本論文では横断測量データを用いた図-5の手法を用いることとした。

横断測量データを用いたHA式から断面積 A_o を求め、新結氷補正により流量を推定した結果が図-6である（雨竜川多度志観測所）。図-6 (a)、(b)は2022年12月～2023年

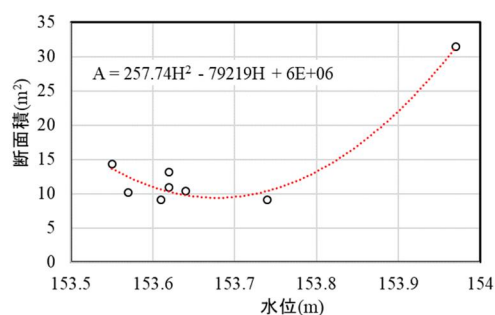


図4 観測値からのHA式

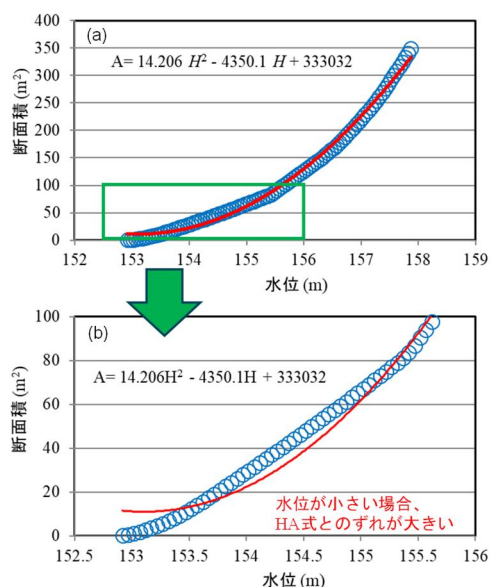


図5 横断測量データからのHA式：(a)中の緑枠を拡大したのが(b)である。

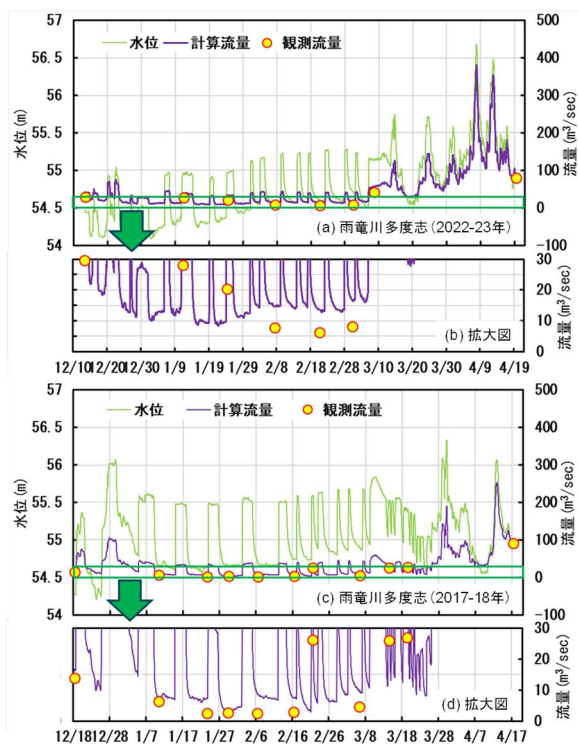


図6 新結氷補正による結果 (HA式を用いた断面積 A_0 による流量推定)

4月、(c)、(d)は2017年12月～2018年4月の結果を例として示したものであり、全体を示した(a)及び(c)を見ると計算流量と観測流量が整合しているように見えるが、それぞれの図の緑枠部分を拡大した(b)及び(d)を見ると、特に流量が小さな箇所で計算値と観測値が整合していないことがわかる。これ以外の年や観測所においても、推定した流量と観測流量には乖離があった。

この要因は、推定した断面積と実際の断面積のずれによるものと推察した。図5(b)は図5(a)の緑枠部分を拡大したものであり、この図からわかるように、HA式は水位や断面積が小さい部分でプロットとのずれがみられる傾向にあることがわかる。結氷期の水位は比較的小さいことから、HA式から求めた断面積と実際の断面積のずれが、推定した流量と観測流量とのずれに繋がったものと考えられる。

(2) HA式を用いた断面積 A_0 の補間による流量推定

前述したHA式から求めた断面積 A_0 と、結氷時の断面積のずれを小さくするため、断面積 A_0 を補正することとした。2.(2)の(c)までは同じ方法とし、その後は以下のとおりである。

(d) HA式を用いて、時刻水位から断面積(時刻)を算出する。

(e) 観測日に実測した観測断面積とHA式から算出した断面積の差(ΔA_0)を観測日毎に線形補間することとした。この補正された断面積から、式(1)を用いて時刻流量を算出する。

この結果の例を示したのが図7であり、図6と同じ多度志観測所及び年の結果を示している。(a)及びその拡大図である(b)に示すように、ほとんどの観測所では計算流量と観測流量が一致した。しかし、(c)に示すように、多度志観測所で紫線で示す計算流量が負になる期間が生じる現象が発生した。この現象は本論文で対象とした中では2018年の多度志観測所のみであった。

この負になった要因としては、流水断面積が小さく、観測日間の観測水位と観測された流水断面積が大きく変動したためと推察している。図8は、縦軸に流水面積 A_0 の最小値(本節の手法による推定値)、横軸に河水断面積 A_i と流水面積 A_0 の比(実測値)をとって結果を整理したものである。断面積の最小値が負になった多度志観測所は、河水の比率が流水断面積に対して6倍以上となり、多度志以外の観測所と比較して流水面積が小さい傾向にあることがわかる。

流量が負となった状況を改善する方法としては、水位変化の大きい観測日のデータを削除することで断面積のマイナスを解消する結果も得られたが、判断基準が無く、技術者による判断に依存する部分が大きいことから、他の方法を検討する必要がある。

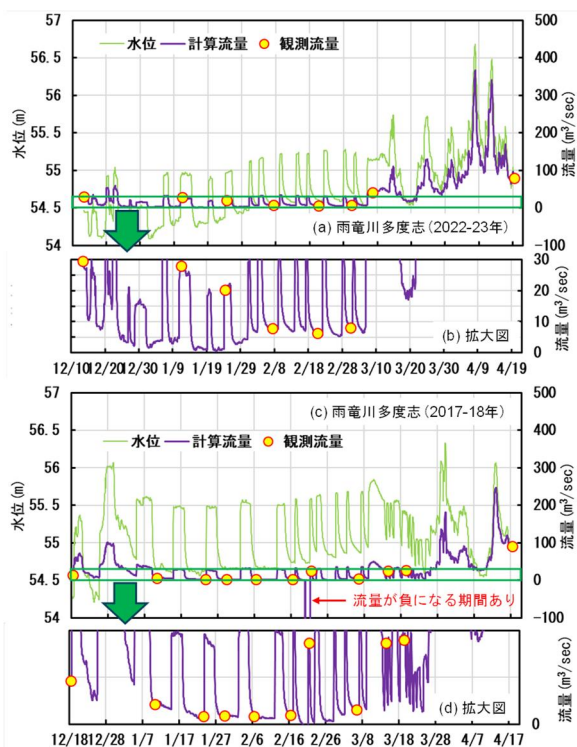


図-7 新結氷補正による結果（HA 式を用いた断面積 A_0 の補間による流量推定）

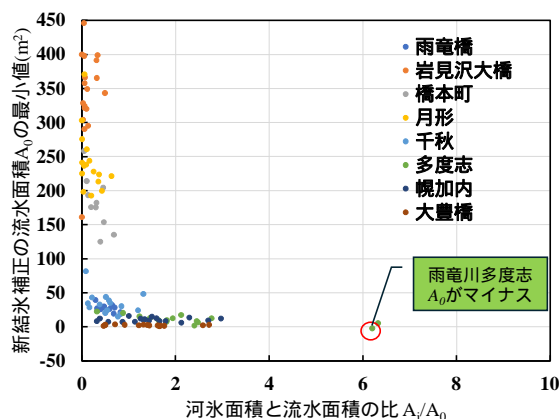


図-8 流水断面積 A_0 と河氷断面積 A_i の関係

(3) HA 一覧表を用いた喫水深の補間による流量算出

前述のように、河氷が厚く、流水面積の小さな観測所では検討の余地が残されていることがわかった。この要因として、平均河氷厚を示す喫水深 d が精度良く推定できていないためと推察し、断面積 A_0 ではなく、 d を線形補間する手法を用いた検討を行った。また、3. (1) で説明した HA 式によるずれを改善するため、以下のような手法を用いることとした。HA 式は図-5 の横断観測データから算出されているが、この元となる図-5 の青丸のプロットは、表-1 (a) のように各水位に対応する断面積を直接求めたものである。このように、HA 式を用いるのではなく、表-1 の HA 一覧表を用いて断面積のずれを解消することとした（以降、スライス法と呼ぶ）。ただし、ここでは断面積から有効水位（ $H - d$ ）を逆算するため、

表-1 水位 H と断面積 A の一覧表

(a) 水位から断面積算出 (b) 断面積から水位算出

| 水位(m) | 断面積(m ²) |
|-------|----------------------|
| 52.40 | 0.01 |
| 52.41 | 0.02 |
| 52.42 | 0.04 |
| 52.43 | 0.06 |
| 52.44 | 0.09 |
| 52.45 | 0.11 |
| 52.46 | 0.14 |
| 52.47 | 0.16 |
| 52.48 | 0.19 |
| 52.49 | 0.21 |

| 断面積(m ²) | 水位(m) |
|----------------------|-------|
| 2.30 | 52.95 |
| 2.31 | 52.95 |
| 2.32 | 52.96 |
| 2.33 | 52.96 |
| 2.34 | 52.96 |
| 2.35 | 52.96 |
| 2.36 | 52.96 |
| 2.37 | 52.96 |
| 2.38 | 52.96 |
| 2.39 | 52.97 |

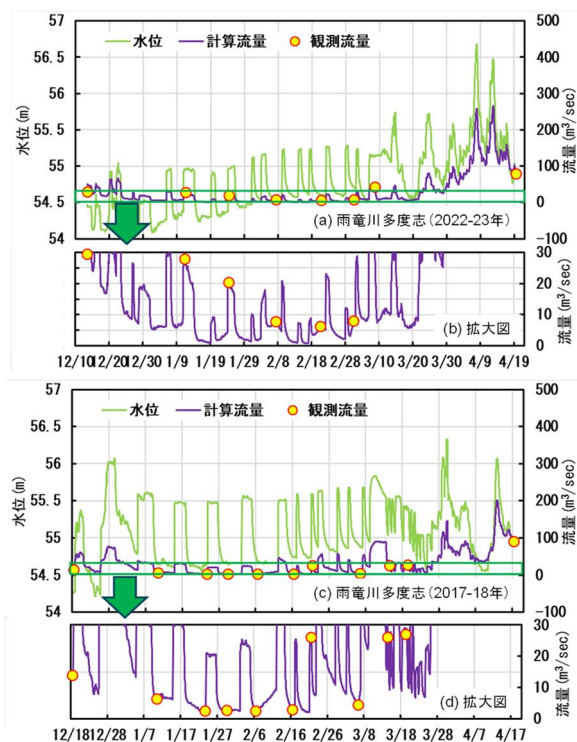


図-9 新結氷補正による結果（HA 一覧表喫水深の線形補間による流量推定）

表-1 (b) のような断面積を 0.01 m^2 刻みで並べた一覧表が必要になる。算出手法は以下の通りである。

- 結氷時の流量観測データから、喫水深 d (m)、 C 値、川幅 B_w を得る。観測を実施していない日の d 、 C 、 B_w は、その日を挟む観測日の値を用いて線形補間により時系列に配分する（2. (2) の (a)、(c) と同じ）。
- 観測した断面積から、断面積と水位の HA 一覧表を作成し（表-1 (b)）、これを用いて有効水位（ $H - d$ ）を求める。
- 観測水位から有効水位を差し引くことにより、観測日の喫水深 d を算出する。
- 観測日の喫水深 d を観測日毎に線形補間し、時刻に配分する。
- 時刻水位 H から喫水深 d を差し引くことにより、流水断面の有効水位（ $H - d$ ）を算出し、表-1 (a) の一覧表から断面積を抽出し、式(1)より時刻流量を推定する。

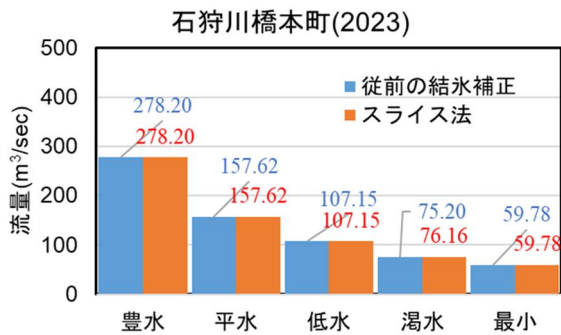


図-10 豊平低渇及び最小流量の比較（石狩川橋本町）

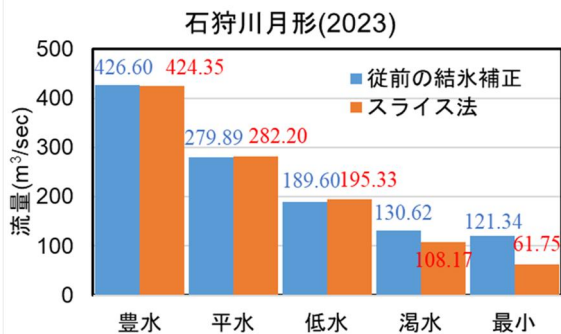


図-11 豊平低渇及び最小流量の比較（石狩川月形）

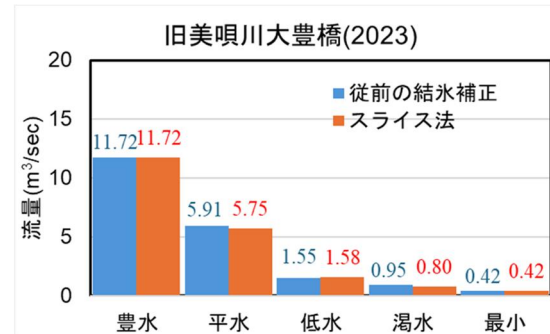
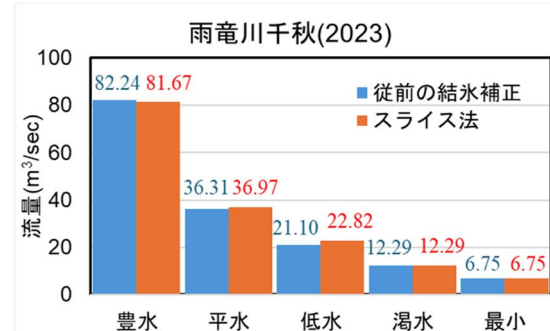


図-12 豊平低渇及び最小流量の比較（旧美唄川大豊橋）



この手法による結果が図-9であり、図-6、7と同じ多度志観測所及び年の結果を示している。図-9 (b)、(d)の拡大図を見ると、スライス法による計算流量と観測流量は合致しており、流量が負になることも生じなかったことがわかる。以上より、同じ観測所及び年の結果を比較した図-6(d)、図-7(d)、図-9(d)を見ると、図-9(d)が最も観測流量に合致する流量を推定できていると考えられる。

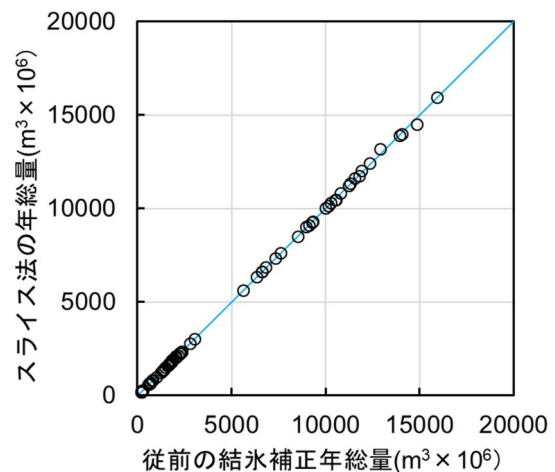


図-14 年総量の比較

4. 水文統計資料への影響

(1) 豊平低渇流量の比較

豊水、平水、低水、渇水流量を算出し、従前の結氷補正（Eye-Method法）とスライス法の結果の比較を行った。この結果の例を図-10～図-13に示しており、いずれの地点も従前の方法とスライス法では大きな違いは見られなかった。この傾向はその他の観測所や2023年以外の年を整理した結果でも同様であり、冬期の結氷補正方法を変えたとしても、本論文で対象としたデータの範囲内では豊平低渇流量に与える影響は小さいことがわかった。

(2) 最小流量の比較

従前のEye-Method法では日流量のみの算出であったが、新結氷補正では時刻流量が算出される。3. (3)に示したスライス法によって、最小流量の値や発生時期が従前法と比べて変化するかを検証した。最小流量の値の例は図-10～図-13に示すとおりである。8観測所10力年の結果では、18回最小流量の発生日時の変化が認められた。これは全体の22%となるが、結氷期の流量が時刻算出になったことで、データ数が増え、いままで見えなかった結氷期の渇水状況が反映されたものと考えられる。

(3) 年総量の比較

8観測所10力年での年総量の比較を図-14に示す。横軸はEye-Method法による従前の結氷補正年総流量、縦軸はスライス法により算出した値であり、図中の45°の青線は両者が一致していることを示す。Eye-Method法の結氷補正とスライス法の年総量は、図中の青線付近にプロットが位置していることから、両者は概ね一致していることがわかる。両者の流量差を算出してみると、流量差は最大4%、最小-2%であった。そのため、結氷期間の流量算出を、スライス法に変更した場合でも、本論文で対象としたデータの範囲内では、年総量はほとんど変わらないという結果が得られた。

5. 河川の結氷と解氷の時期の流量の連続性

従前の結氷補正では、結氷日や解氷日が観測日と一致していない場合には、その前後（HQ式とEye-method法の変化時）で流量に段差が生じることになる。

解決方法として、新結氷補正の式(1)を結氷時、解氷時の前後から適用させる方法を試行した。新結氷補正では、式(1)が非結氷期においても適用可能である（喫水深 d を0とおく）ことから、結氷期間前後の非結氷期の観測日から計算して、結氷開始時と解氷時をそのまま摺り付ける方法を採用した。

図-15、16の紫線はスライス法による計算流量を示しており、結氷時は図-15、解氷時は図-16のようになり、スライス法により計算した流量はスムーズに非結氷期の流量に繋がる結果が得られている。

また、結氷期間を設定するには結氷時期と解氷時期の選定が必要である。これは、水位の変化、気温の変動、CCTV等の映像などを手掛かりとして手動で決定しており、評価基準はないため、技術者判断による部分であった。しかし、この結氷開始時と解氷時を摺り付ける方法を用いると、結氷及び解氷時期を手動で設定する必要が生じなくなるという利点もある。

6. おわりに

札幌開発建設部では結氷期間の流量は、北海道開発局方式（Eye-Method法）を用いて算出してきた。この方法では日流量のみの算出となることから、本研究では結氷河川における水位変動を考慮した日流量よりも詳細な時刻流量を得ることを目的とした検討を実施した。流量の推定手法として、寒地土木研究所より発行されている「河川結氷時の流量推定手法マニュアル（案）」（新結氷補正）を用い、札幌開発建設部管内の結氷する河川を対象に現地河川に適用を行った。本研究により得られた主な成果を以下に示す。

- 新結氷補正により推定した流量と観測流量にずれが見られ、その要因は、HA式から算出した断面積と実際の断面積のずれによるものと考えられる。
- 特に、流水断面積が小さく、河水断面積の比率が大きい場合には、異常値が見られやすい。これを改善するため、喫水深 d を線形補間で補正し、さらにHA式を用いずに水位と断面積の一覧表から直接求めた断面積から時刻流量を推定することとした（スライス法）。その結果、本論文で対象としたデータの範囲内では、推定流量が観測流量と整合した。
- この補正方法により算出した流量について、水文統計資料（豊平低渇及び最小流量、年総量）に与える影響を調べた結果、本論文で対象としたデータの範

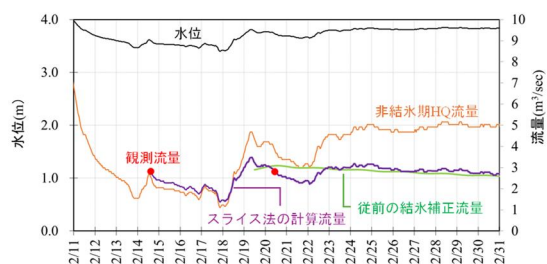


図-15 結氷時の比較（旧美唄川大豊橋 2023 年度）

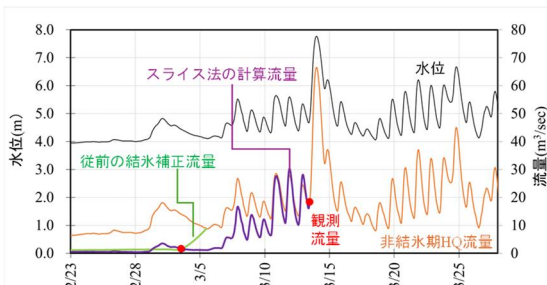


図-16 解氷時の比較（旧美唄川大豊橋 2023 年度）

囲内では北海道開発局方式（Eye-Method法）により算出された値とほとんど変わらないことがわかった。

本論文での検討の範囲内では観測流量に整合する時刻流量が推定できたと考えており、今後は新結氷補正のマニュアル（案）にもスライス法による流量推定の手法を反映していきたいと考えている。

謝辞

本研究の実施にあたり、北見工業大学の吉川泰弘教授、寒地土木研究所寒地河川チームの堀田伸之上席研究員、阿部孝章主任研究員に多くの貴重なアドバイスを頂きました。ここに記して謝意を申し上げます。

参考文献

- 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 河川結氷時の観測流量影響要因と新たな流量推定手法, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.1075-1080, 2010.
- 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所寒地河川チーム: 河川結氷時の流量推定手法マニュアル（案）, 2012.
- 大野修, 横山洋, 佐々木靖博: 結氷河川における流量推定手法の適用性に関する検討, 第 61 回(平成 29 年度)北海道開発技術研究発表会, 防 17, 2018.
- 大野修, 横山洋, 佐々木靖博, 吉川泰弘: 結氷河川における流量推定手法についての課題に関する検討, 寒地土木研究所月報, 第 786 号, pp.39-45, 2018.
- 大野修, 横山洋, 矢部浩規: 結氷河川における流量推定手法に関する課題について, 第 62 回(平成 30 年度)北海道開発技術研究発表会, 防 38, 2019.
- 大野修, 横山洋: 河川結氷期間用 HQ 式補正方法の実地適用提案のまとめ及び今後の展開への課題 結氷河川における流量推定手法に関する実用普及検討, 第 65 回北海道開発技術研究発表会論文, 2021.
- 橋場雅弘, 吉川泰弘: 天塩川における河川解氷時の河水の挙動に関する現地観測, 河川技術論文, 第 17 巻, 2011.