

寒冷地河川における冬期取水障害の 危険度評価手法の精度向上に関する研究

Improvement in accuracy of risk estimation method about the water intake facilities of ice-covered rivers

北見工業大学	○学生員	岩崎香月 (Kazuki Iwasaki)
北見工業大学	正 員	吉川泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
北海道開発局	非正員	高橋賢司 (Kenji Takahashi)
寒地土木研究所	正 員	横山洋 (Hiroshi Yokoyama)
新明和工業	非正員	山本新吾 (Shingo Yamamoto)

1. はじめに

寒冷地の河川では、気温の低下に伴い河道内に河水が形成され結氷する。河水は、硬い氷板と軟らかい晶氷に大別できる。寒冷地の河川では、河川結氷時においても河川水を取水している。河道内を流下する晶氷が、取水口に堆積および閉塞すると、冬期の取水障害が発生する。寒冷地の北海道では、生活用水および工業用水の水源は河川水が93%を占め、全国と比べて河川水への依存度が高い¹⁾こともあり、冬期の取水障害が課題となっている。

既往研究²⁾では、冬期の取水障害の危険度を評価する値として、Fv 値を提案している。Fv 値の値変動によって取水障害の危険度が予測できるため、実際の現場でも運用されている。運用している河川は、名寄市の名寄川と小樽市の赤井川である。一方で、名寄川の真勲別頭首工では、運用を進めている中で Fv 値がピークを過ぎてからも値が高く継続し、現場では安全であるにも関わらず常に警戒態勢に入ってしまう、現場の緊張状態が続くという課題が浮き彫りになった。

本研究では、現地観測データを基にして、Fv 値の再現性の確認と現場の現状を適切に反映するように Fv 値の改良を行い、精度向上を試みた。

2. 現地観測

現地観測地点は、図-1の天塩川水系名寄川の合流点から上流 7.05km 地点に位置する真勲別頭首工周辺とした。真勲別頭首工では、2005 年 1 月、2009 年 2 月、2013 年 1 月に取水障害が発生している。

(1) 観測期間と観測項目

観測期間は、2016 年 12 月 13 日から 2017 年 3 月 18 日である。観測機器は、図-1に示す地点で、水位計、水温計、SWIPを設置した。また、図-2に示す地点で、水位計、ADCP、SWIP を設置した。なお、ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler 1200kHz Teledyne RD Instruments 社) は、河水速度と河水底面の測定³⁾のために 1 台設置した。SWIP(Shallow Water Ice Profiler, ASL Environmental Sciences 社)は、SWIP546kHz と SWIP235kHz の 2 台を河水の存在を確認³⁾するために設置した。SWIP は、センサから超音波を発射し反射強度を測定する機器である。

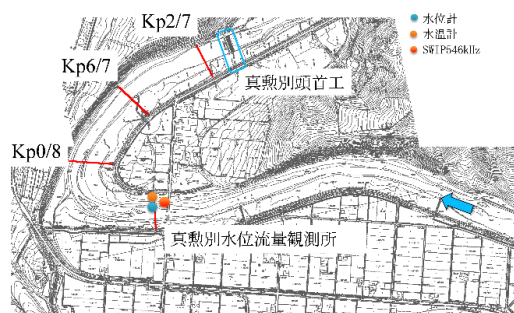


図-1 真勲別頭首工上流部における観測機器設置位置

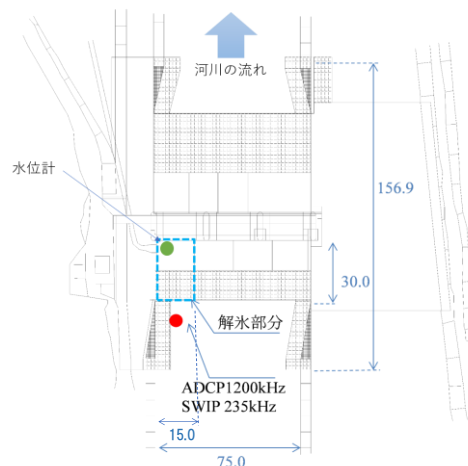


図-2 真勲別頭首工における機器設置位置(平面図)

反射強度の値が高いほど河水が密に存在することを表す。なお、真勲別頭首工周辺では、取水障害対策のために、開水部(30m×15m)が設けられている。

(2) 現地観測結果

氷板下の晶氷が水深方向に堆積する現象を SWIP にて捉えることが出来た。図-3 に、晶氷堆積時の降雪、風向風速、気温、水温、水位、ADCP、SWIP の経時変化を示す。なお、風向は真勲別頭首工を基準とし、順風は流れ方向の風向、右岸は右岸方向の風向を表している。

図-3 の下段図において、SWIP の反射強度が高い箇所は河水である。図-3 の SWIP データの図と中段図の ADCP

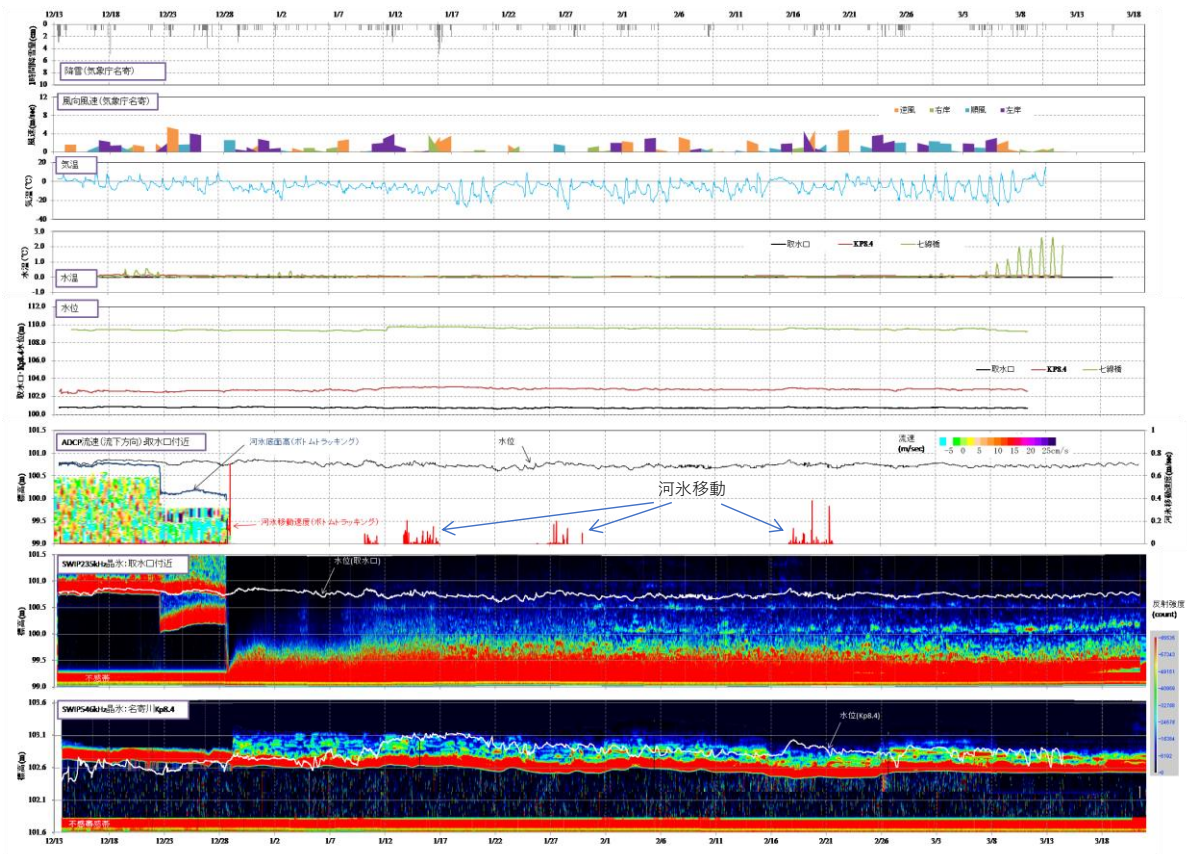


図-3 時系列変化図（真勲別頭首工）

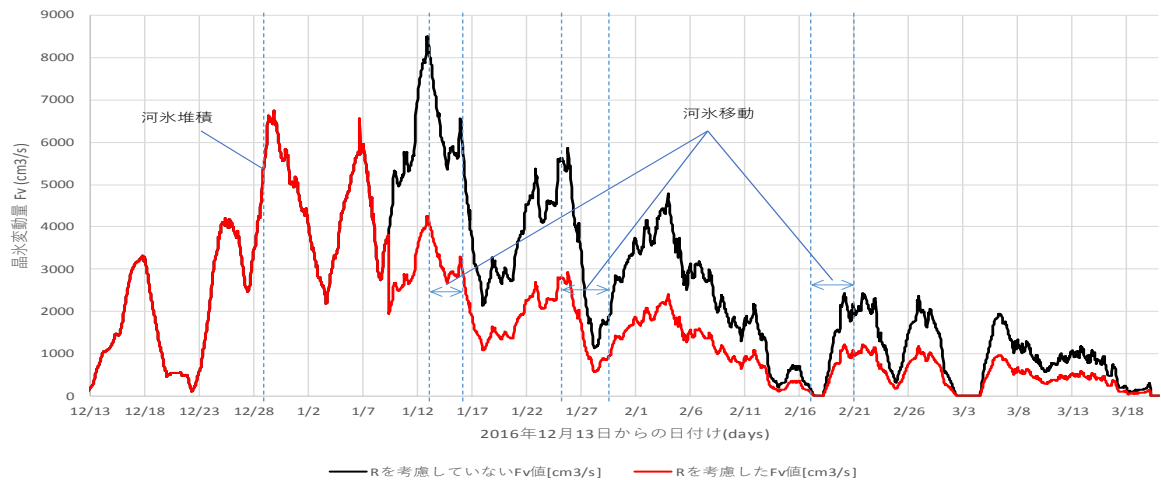


図-4 晶氷変動量 Fv 値

のデータの図より、真勲別頭首工での水位と ADCP ボトムトラッキングによる河氷底面高で囲まれた領域は、12月22日18時に0.5m程度増加している。なお、ADCPのセンサは河氷面に向いているため、ボトムトラッキングとボトム移動速度の測定値は、河氷底面高と河氷移動速度となる。SWIPのデータにおいても、河氷底面が河床方向に堆積していることから、河氷の存在領域と判断できる。また、急激に増加しているため、河氷が上流から流下して堆積したと推察できる。SWIPの河氷変動をみると、12月28日22時10分に河床底面まで河氷が堆

積し、その状況は調査終了時の3月18日まで続いている。また、ADCPの河氷底面高の測定値も、この時期に低下している。ADCPボトムトラッキングによる河氷移動速度をみると、氷が堆積し始める12月22日付近から動き始め、この動きは12月28日まで続き、その後、河氷移動速度はゼロとなる。SWIPとADCPの測定値から、12月28日22時10分に、河氷が水深方向に堆積したと判断できる。

12月28日以降では、1月13日～1月16日、1月25日～1月29日、2月17日～2月21日の期間で、河氷移

動速度が速くなり、河氷が移動していることが分かる。この3期間はすでに、河氷が河床まで堆積している状況であるため、取水障害につながる危険性が高い期間であったと推察できる。本観測により、河氷の変動を捉えることができた。

3. 晶氷変動量 Fv 値

冬期の取水障害の危険度を評価する値は、既往研究¹⁾で提案されている晶氷変動量 Fv 値を基にした。さらに、名寄川の真勲別頭首工で課題となった「Fv 値がピークを過ぎてからも値が高く継続し、現場では安全であるにも関わらず常に警戒態勢に入ってしまう、現場の緊張状態が続く」という現場状況と一致しない現象を再現できるように改良を加えた。

本研究で用いている取水障害の危険度を評価する値は下記の Fv 値となる。

$$F_v = q_f \times h_{fc} \times D \times R \quad (1)$$

F_v [m³/s]: 晶氷変動量であり、値が高いほど晶氷が堆積する可能性が高く、取水障害の危険性が高い。
 q_f [m²/s]: 単位幅晶氷輸送量, h_{fc} [mm]: 発生晶氷厚 h_f における直近の積算値であり、本研究では2日前の積算値とした。 D [無次元]: 上流での包蔵晶氷量の割合 ($0 \leq D \leq 1$) である。 R [無次元]: 上流での晶氷供給割合 ($0 \leq R \leq 1$)。なお、本研究では、Fv 値の変動を現場状況に近づけるため、上流から供給される晶氷割合 R を考慮することで Fv 値の改良を行った。

(1) 単位幅晶氷輸送量 q_f

単位幅晶氷輸送量 q_f は、次式の晶氷輸送計算モデル⁴⁾から求めた。

$$q_f = \Phi \times F \sqrt{\Delta g d_f^3} \quad (2)$$

$$\Phi = 5.487(\Theta - 0.041)^{1.5}$$

$$F = \sqrt{\frac{U_*^2}{\Theta \Delta g d_f}}$$

Φ : 無次元晶氷輸送量, Θ : 無次元せん断力, d_f [m]: 晶氷粒径, U_* [m/s]: 摩擦速度, Δ [無次元]: 水中比重で $(\rho_w - \rho_i)/\rho_w$ である。 ρ_w [kg/m³]: 水の密度で 1000.0 を与えた。 g [m/s²]: 重力加速度で 9.8 を与えた。 F [無次元]: 沈降速度係数は次式⁵⁾を用いた。

$$\frac{1}{F} = 3.18 - 18.22\alpha_p + 80.46\alpha_p^2 - 171.46\alpha_p^3 + 140.95\alpha_p^4$$

$$\alpha_p = \frac{c}{\sqrt{ab}}$$

a [mm]: 長径, b [mm]: 中間径, c [mm]: 短径。晶氷粒径調査による計 162 個の晶氷粒子の平均値を与えた。具体的な値は、長径 7.8mm, 中間径 6.0mm, 短径 4.3mm である。

(2) 直近の発生晶氷厚の積算値 h_{fc}

直近の発生晶氷厚の積算値 h_{fc} は、次式の晶氷発生計算モデルを用いて、発生晶氷厚 h_f を求めた。なお、次式は、開水面において点的な発生晶氷厚を計算する。

$$\frac{dh_f}{dt} = \frac{-\phi_s + \phi_b}{\rho_i L_i (1 - \lambda_f)} + \frac{\phi_e + \phi_c}{\rho_i L_i (1 - \lambda_f)} + \frac{(1 - \lambda_a) dh_a}{(1 - \lambda_f) dt} + \frac{\rho_s}{\rho_i (1 - \lambda_f)} \frac{dh_s}{dt} + \frac{-\phi_w}{\rho_i L_i (1 - \lambda_f)} \quad (3)$$

h_f [mm]: 発生した晶氷厚, t [sec]: 時間であり 1 時間とした。 h_a [mm]: アンカーアイス厚で計算式⁵⁾により求めた。 h_s [mm]: 降雪深で観測値を与えた。 ρ_i [kg/m³]: 氷の密度 - 10°C の場合の値の 917.4 を与え、 ρ_s [kg/m³]: 雪の密度であり新雪の値の 100.0 を与えた。 λ_a [無次元]: アンカーアイスの空隙率であり 0.4 を与え、 λ_f [無次元]: 晶氷の空隙率であり 0.4 を与えた。 L_i [J/kg]: 氷の潜熱であり 3.336×10^5 を与えた。 ϕ [W/m²]: 熱フラックスであり、 ϕ_s : 短波放射量, ϕ_b : 長波放射量, ϕ_e : 潜熱フラックス, ϕ_c : 顕熱フラックス, ϕ_w : 流水から晶氷への熱フラックスであり、それぞれの値は、既往研究⁵⁾と同様の式を用いて値を得た。

(3) 上流での包蔵晶氷量の割合 D

上流での包蔵晶氷量の割合 D は、次式で求めた。

$$D = \frac{h_{fadd} - h_{fmin}}{h_{fmax}} \quad (4)$$

h_{fadd} [mm]: 計算開始から現在までの発生晶氷厚の積算値。 h_{fmin} [mm]: 完全結晶晶氷厚で、計算開始から完全結氷するまでの発生晶氷厚の積算値。 h_{fmax} [mm]: 取水施設より上流で包蔵可能な限界包蔵晶氷厚。 h_{fmax} は、上流の開水面における発生晶氷体積 V_f [m³], 下流の結氷面の縦断距離 L_i [mm], 下流の結氷面の川幅 B_i [mm] として、 $h_{fmax} = V_f / (L_i B_i)$ と定義した。 $D=0$ の場合、発生した晶氷は、河氷下に包蔵されて下流へは流れない。 $D=1$ の場合、発生した晶氷は、河氷下にこれ以上包蔵できないため下流へと流れる。

(4) 上流での晶氷供給割合 R

上流での晶氷供給割合 R の考え方について説明する。河川縦断方向の河川結氷と R の概念図を図-5 に示す。図-5 より、名寄川の真勲別頭首工より上流には、上名寄頭首工が設置されている。河川結氷は、下流の真勲別頭首工から始まり上流へと進んで行く。河川結氷が上名寄頭首工まで到達した場合、降雪や気温低下によって晶氷が発生する条件となっても、水面が結氷しているため、結氷下の流水に晶氷が供給されることはないと考えられる。言い換えると、河川結氷が上流へと進むと、上流から流水内に供給される晶氷が減少すると考えられる。

一方で、本研究の Fv 値は、ある地点の現象を表現する値であり、厳密には河川縦断方向の現象を再現することが出来ない。そこで本研究では、計算される氷の厚さ

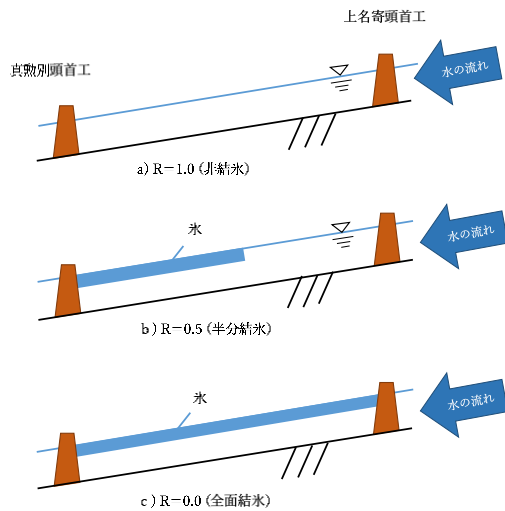


図-5 河川縦断方向の河川結氷と R の概念図

h_i がある値 h_{im} 以上になった場合($h_i > h_{im}$), 上流側への河川結氷も進行していると仮定した。つまり, F_v 値を計算する地点の氷の厚さがある値以上になった場合, 上流の堰や流れの速い結氷しない地点まで結氷すると考えて, 上流から流水内に供給される晶氷が減少すると想定した。この時の晶氷が供給される割合は, 0 で供給なし, 1 で供給ありとした。

図-5 における R について, a)は, 水面に氷がない状態で, 発生した晶氷は流水内に全て供給されるため, $R=1.0$ となる。b)は, 河川縦断方向において水面が半分結氷している状態で, $R=0.5$ とする。発生した晶氷量の内, 半分が流水内に供給される現象を表現している。c)は, 水面が全て結氷している状態で, $R=0.0$ とする。発生した晶氷量は, 流水に供給されない現象を表現している。

4. F_v 値の計算値と現地観測との比較

真熟別頭首工の取水施設における晶氷変動量 F_v 値を図-4に示す。入力値である気温, 日照時間, 風速, 降雪については, 気象庁の 10 分データを用いた。また, F_v 値を計算する上での固定値は以下の値を用いた。lb:河床勾配 1/480, Z:水位計設置地点の河床高(TP) 99.41m, Zh:水位計と河床高 Z との距離 0m, B:川幅 67.96m, α :氷厚計算の係数 0.9, n:マンニングの粗度係数 $0.03 \text{ s/m}^{1/3}$, ρ_w :水の密度 $1000 \text{ m}^3/\text{kg}$, ρ_i :氷の密度 $917.4 \text{ m}^3/\text{kg}$, ρ_s :雪の密度 $100 \text{ m}^3/\text{kg}$, db:晶氷の中間径 6mm, h_{im} :全面結氷時の氷板厚 0.5m, h_{fmax} :限界包蔵晶氷厚 1.5m, h_{fmin} :完全結氷時までの基準晶氷厚 0m, iD:晶氷厚を積算する時間 48 hours, T_{a+} :上流から流れてくる水温 2°C , R: h_{im} 以上の場合に上流から晶氷が供給される割合。

図-4 の F_v 値と図-3 の観測結果を比較する。図-3 の観測では 12 月 28 日に河水が水深方向に堆積しており, 図-4 の F_v 値では, 28 日に F_v 値が上昇しており, 現地状況を F_v 値で表現している。

図-3 の ADCP の河水移動速度をみると, 1 月 13 日～1 月 16 日, 1 月 25 日～1 月 29 日, 2 月 17 日～2 月 21 日

の期間で河水が移動していることが分かる。図-4 の F_v 値の変動は, 1 月 13 日～1 月 16 日では, 約 4000 から約 2000 まで下降している。1 月 25 日～1 月 29 日では, 約 3000 から約 600 まで下降している。2 月 17 日～2 月 21 日では, 0 まで下降し, その後, 1000 まで上昇している。これらの期間の F_v 値は, 下降時と上昇時であり, いずれも F_v 値が大きく変動する期間であった。

図-4 において 1 月 7 日以降の F_v 値をみると, R を考慮した計算値の方が下降している。これは, 1 月 7 日頃に氷厚 h_i が h_{im} の厚さを越えて R が 0.5 となり, 結氷下の流水に晶氷が供給されない現象になったことを示している。図-4 の R を考慮した計算値の方が, 結氷が進んだ後に F_v 値が高くなり, 現地の状況に沿った値となっていることが分かる。一方で, 本研究では, R を 0.5 として与えているが, この値は現場状況を踏まえた根拠を持っていないため, 今後, 検討が必要である。

従来の F_v 値に上流での晶氷供給割合 R を考慮することにより, F_v 値の変動を実際の現場状況に近づけることが出来た。

5. まとめ

本研究により, 以下のことが明らかとなった。現地観測の結果, SWIP と ADCP の測定値から河水の変動を捉えることができ, 取水障害につながる危険性が高い期間を観測することが出来た。晶氷の供給量を R で表現することにより, 晶氷変動量の値の精度が向上し, F_v 値の変動を現場状況に近づけることが出来た。一方で, R の値については, 現場状況を踏まえて与えることが, 今後の課題である。

謝辞: 本研究の現地観測は, 福田水文センターのご協力を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 北海道総合政策部政策局土地水対策課:北海道の水資源, p.8,18, 2014.
- 2) 吉川泰弘, 黒田保孝, 橋場雅弘:寒冷地河川の取水施設における晶氷変動量の推定手法, 土木学会論文誌B1(水工学), Vol.72, No.4, pp.I_307-I_312, 2016.
- 3) 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, 土木学会, 河川技術論文集, 第 17 巻, pp.365-370, 2011.
- 4) Hung Tao Shen, De Sheng Wang: Under Cover Transport and Accumulation of Frazil Granules, Journal of Hydraulic Engineering, 121(2), pp.184-195, 1995.
- 5) Mantz, P. A.: Low sediment transport rates over flat beds, Journal of Hydraulic Div., ASCE, 106(7), pp.1173-1190, 1980.
- 6) 吉川泰弘ほか:寒冷地河川における晶氷発生計算モデルの開発と取水障害の発生条件, 土木学会論文誌 B1(水工学), Vol. 71, No. 4, pp. I 1327-I 1332, 2015.