

冬期取水障害における晶氷変動量の勾配を用いた危険度評価手法の検討

Risk assessment method by frazil slush variation slope in water intake blockages in winter

北見工業大学	○学生員	諸田匡紀 (Masanori Morota)
北見工業大学	正員	吉川泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
寒地土木研究所	正員	横山洋 (Hiroshi Yokoyama)
旭川開発建設部	非正員	森田共胤 (Tomotsugu Morita)
名寄市	非正員	村山文保 (Fumiyasu Murayama)
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氷が形成され結氷する。河氷は、硬い氷板と軟らかい晶氷に大別できる。形成された河氷は、河道内を流下および河道内に堆積する。一方で、寒冷地の河川では、河川結氷時においても流水を取水している。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。特に、北海道では、生活用水および工業用水の水源地は河川水が93.2%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になっている。既往調査²⁾では、2014年から2015年の期間において、道東・道北の7総合振興局・振興局管内の91市町村のうち、河川から取水を行っている72市町村を対象に取水障害の発生状況などについて聞き取り調査を実施している。聞き取り調査が実施できた56市町村の内、39.3%にあたる22市町村が、河川結氷時の冬期取水において課題があるとの回答が得られている。

既往研究³⁾では、冬期取水障害の危険度を評価する値として、晶氷変動量(F_v 値)が提案されている。 F_v 値の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 F_v 値が運用されている。現在、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。 F_v 値が運用されているなかで、現場の声として、 F_v 値の増加期間中に晶氷が発生するケースが多いとの指摘があった。

本研究は、現場の声を踏まえた F_v 値による冬期取水障害における危険度評価手法の精度向上を目的として、現地観測を実施し、 F_v 値の時間的な増加減少量の勾配(F_{vs} 値)に着目して検討を実施した。

2. 現地観測

現地観測地点は、現場で F_v 値の運用がなされている図-1の天塩川水系名寄川の合流点から上流7.05 km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。

2.1 観測期間と観測項目

観測期間は、2018年12月11日から2019年3月8日とした。観測機器は、図-1に示す地点で、水位計、水温計、ADCP、SWIPを設置した。なお、ADCP(Acoustic

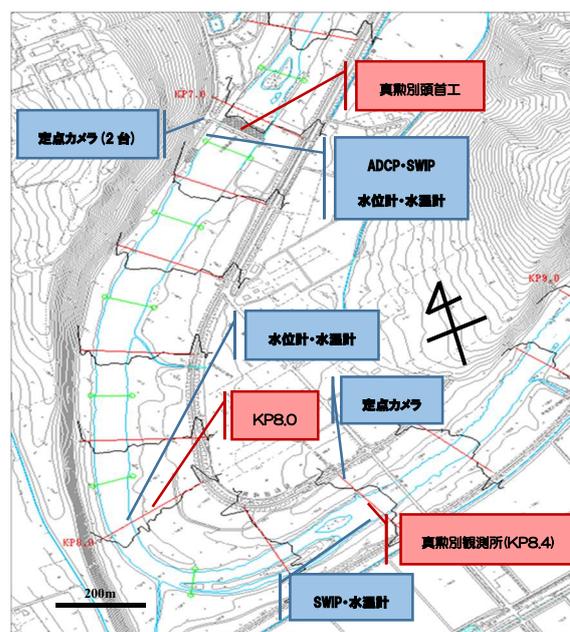


図-1 真勲別頭首工上流部における観測機器設置位置

Doppler Current Profiler 1200kHz, Teledyne RD Instruments社製)は、河氷速度と河氷底面の測定⁴⁾のために1台設置した。SWIP(Shallow Water Ice Profiler, ASL Environmental Sciences社製)は、SWIP546kHzとSWIP235kHzの2台を河氷の存在を確認⁴⁾するために設置した。SWIPは、センサから超音波を放射し反射強度を測定する機器である。反射強度の値が高いほど河氷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。

2.2 現地観測結果

図-2に、降雪、風向風速、気温、水温、ダム放流量、水位、ADCP、SWIPの観測値の経時変化を示す。

気温は12月から氷点下を観測し、1月から2月中旬にかけて最低気温が -20°C 以下となった。今年度の気温の変動傾向は過年度と同様であった。水温は12月下旬から1月中旬までは約 0°C で安定しており、過冷却の状態であった。この時期は晶氷が発生しやすい条件になっていたと推察できる。

2018年度はダムの試験放流が行われている。ダムは1月初旬から $3\text{ m}^3/\text{sec}$ 、段階的に放流量を上げて1月11日

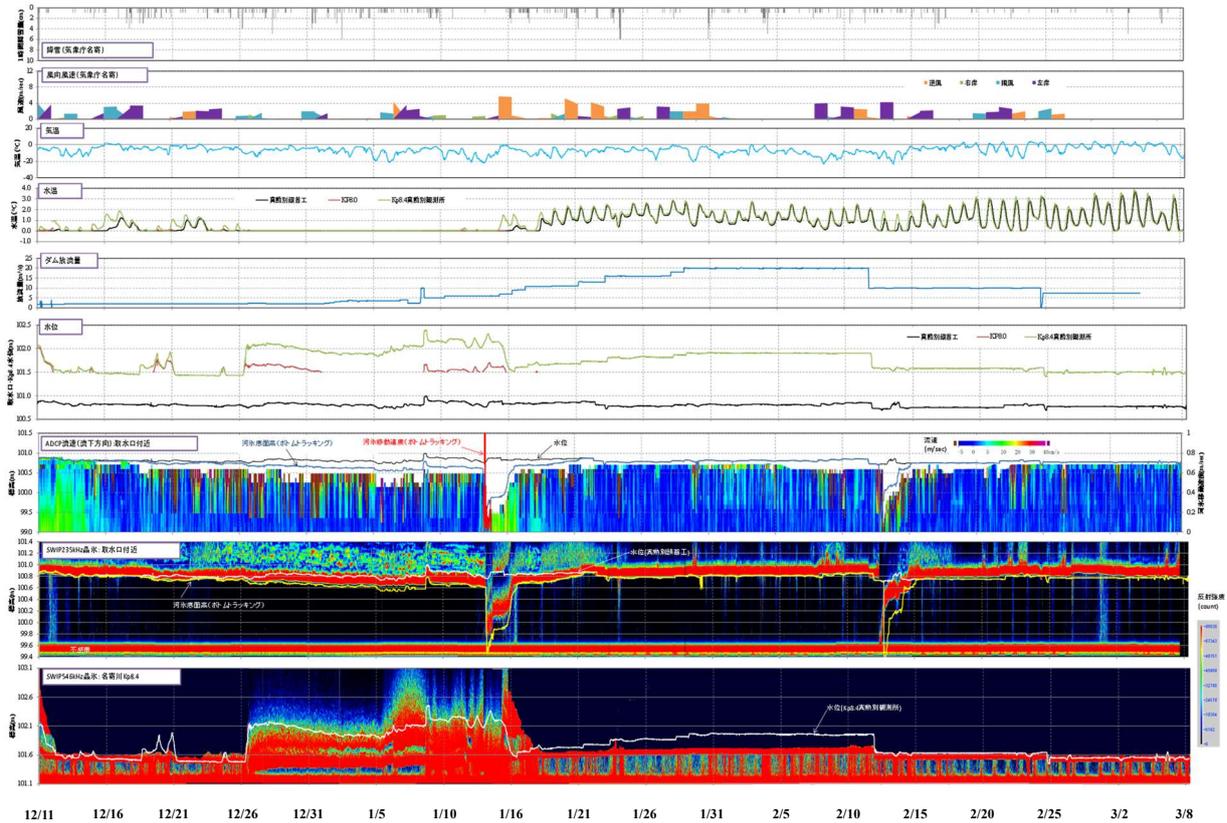


図-2 降雪，風向風速，気温，水温，ダム放流量，水位，ADCP，SWIP の観測値の経時変化

には $6 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，1月15日に $7 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，1月17日に $11 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，1月21日に $13 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，1月29日に $16 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，1月29日から2月12日まで $20 \text{ m}^3/\text{sec}$ で最大となり，その後 $10 \text{ m}^3/\text{sec}$ になった．ダム試験放流が $10 \text{ m}^3/\text{sec}$ 以上になると，水温は $1\sim 3^\circ\text{C}$ まで上昇した．

真敷別観測所(Kp8.4)の水位をみると，河水が厚くなる12月下旬から1月16日まで，水位が 0.5m 程度上昇した．真敷別頭首工では，水位の変化はあまりみられなかった．

ADCPにより，河水速度，河氷底面高が測定されており，真敷別頭首工では12月18日から結氷し始め，河氷厚が徐々に増加し，1月21日に全面解氷となった．その間，1月14日に河氷厚が一時的に増加し，河床底面付近まで水深方向に河氷が堆積しているのが分かる．また，河氷の堆積により流水断面積が小さくなるため，河床付近の流速が速くなっている．2月13日には上流からの河水の流下により，河床まで一時的に氷詰まりが発生しているがすぐに解消している．

真敷別頭首工のSWIP 235kHzより，1月14日と2月13日に河水が河床付近まで堆積している．また，真敷別観測所(Kp8.4)のSWIP 546kHzより，12月下旬から1月16日までの水位が上昇している期間に水深方向に河水が堆積している．

名寄市で真敷別頭首工に設置された定点カメラの映像を対象にして，河川区間を河川の手前，中央，奥で区分して，実際に晶氷が流れている期間，大きさ，量，砕氷作業状況を目視で確認した．

なお，2018年度は，1月初旬からサンルダムにおいて試験湛水に係る段階的なダム放流を実施したため，名寄川の状況は過年度と大きく異なる様相を示した．上記の水位変動と河氷変動におけるダム放流の影響については十分には明らかには出来なかったが，通常運用に移行する次年度以降のモニタリングが望まれる．

3. F_v 値の精度向上

2018年度の F_v 値の運用後に名寄市へ聞き取り調査を実施した．実際の現象との整合性について， F_v 値の増加期間中に現場で晶氷が発生している場合が多いとの指摘を受けた．この意見を踏まえて，本研究では F_v 値の時間的な増加減少量の勾配 (F_{vs} 値) に注目して検討を実施した．

3.1 F_v 値の時間勾配

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改良された F_v 値⁵⁾である．

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

F_v [m^3/s]: 晶氷変動量，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 [m^2/s]: 単位幅晶氷輸送量， h_{fc} [m]: 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日目の積算値とした． 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 ($0 \leq R \leq 1$)． R は，ダム放流の影響を踏まえて，既往研究⁵⁾より，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と仮定して $R=1$ とした。

F_v 値の時間勾配 (F_{vs} 値) 算出時の時間間隔は、10分、30分、1時間の計3パターンとして検討した。従来の F_v 値を図-3に示し、時間間隔10分、1時間をそれぞれ図-4、5に示す。紙面上30分の結果は割愛する。なお、図中の黄線は晶氷発生期間、青線、緑線、赤線はそれぞれ、定点カメラから見て河川の奥側(右岸)、中央、手前側(左岸)に晶氷が滞留している期間を表している。

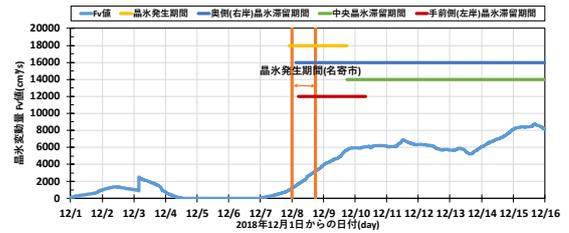


図-3 従来の F_v 値

晶氷発生期間に着目して、従来の F_v 値の結果と F_{vs} 値の結果を比べると、 F_{vs} 値の方が晶氷発生期間を抽出している。 F_{vs} 値の時間間隔が10分の場合は F_{vs} 値の変動を細かく捉え、1時間の場合は F_{vs} 値の変動を粗く捉えていることが分かる。

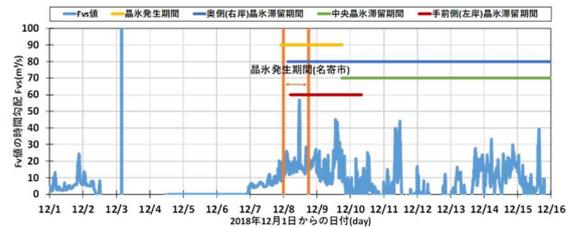


図-4 F_{vs} 値(時間間隔 10 分)

3.2 F_v 値の時間勾配 (F_{vs} 値) の平均値 F_{va} 値

F_v 値の時間勾配 (F_{vs} 値) は従来の F_v 値よりも晶氷発生期間を抽出できた。しかし、変動が大きいため、運用時にアラートの頻度が増加することが考えられる。本検討では、さらに値の変動を抑えるために、 F_{vs} 値を平均した下記の F_{va} 値を用いて検討を行った。本研究の F_{vs} 値は時間毎の F_v 値の差としている。

$$F_{va} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{vs} \quad (2)$$

F_{va} [m³/s] : F_v 値の時間勾配 (F_{vs} 値) の平均値。 F_{vs} [m³/s] : F_v 値の時間勾配。 n はデータの個数で、本検討では3時間、6時間、9時間、12時間、24時間、36時間、48時間のデータ数として検討を実施した。



図-5 F_{vs} 値(時間間隔 1 時間)

3.3 基準値の設定

名寄市の定点カメラを目視観測して実際に晶氷が流れている期間を明らかにし、この期間と予測値である F_v 値の時間勾配 (F_{vs} 値) と F_{va} 値を比較して正答率を算出した。予測値における正答率の基準値は、現地状況を踏まえて試行錯誤により設定した。 F_{vs} 値では基準値を $50\text{m}^3/\text{s}$ 、 F_{va} 値では基準値を $10\text{m}^3/\text{s}$ とした。

正答の判定は、①晶氷が流れている期間に予測値が基準値を超えているか(現場から見た場合)、②晶氷の流れ始めに予測値が基準値を超えているか(現場から見た場合(晶氷発生時)) ③予測値が基準値を超えたときに晶氷は流れているか(計算値から見た場合)、④予測値が基準値を超えたときに晶氷は流れ始めているか(計算値から見た場合(晶氷発生時)) の4パターンから判定した。①②は現地の晶氷発生を予測できているかの確認であり、③④は予測値を基に出したアラートが正しいかの確認となる。なお、ダム放流前後での正答率も検討した。



図-6 F_{va} 値(6 時間)

3.4 F_{vs} 値の正答率

F_{vs} 値の正答率を表-1に示す。①現場から見た場合は61.5%、②現場から見た場合(晶氷発生時)は38.5%と高い正答率であったが、③計算値から見た場合は12.5%、④計算値から見た場合(晶氷発生時)は8.6%と低い正答率となった。全体の平均は30.3%であった。

ダム放流前(12/1~1/8)では、①現場から見た場合と②現場から見た場合(晶氷発生時)ではそれぞれ100%正答率であった。③計算値から見た場合と④計算値から見た場合(晶氷発生時)ではそれぞれ8.2%、5.7%と低い正答率であった。全体の平均は53.5%であった。ダム放流後(1/9~3/31)では、①現場から見た場合と②現場から見た場合(晶氷発生時)はそれぞれ54.5%、37.5%であった。③計算値から見た場合と④計算値から見た場合(晶氷発生時)はそれぞれ16.0%、10.7%であった。全体の平均は29.7%であった。

3.5 F_{va} 値の正答率

F_{va} 値の正答率とダム放流前後の正答率を表-2、表-3に示す。表-2の12時間、24時間、36時間、48時間の平均値をみると、35.0%、26.1%、23.7%、22.1%であり、平均時間を長くとると正答率が低くなる。ダム放流前と

表-1 F_{vs} 値の正答率

	全期間	放流前(12/1~1/8)	放流後(1/9~3/31)
現地から見た場合	61.5%	100%	54.5%
現地から見た場合(晶氷発生時)	38.5%	100%	37.5%
計算値から見た場合	12.5%	8.2%	16.0%
計算値から見た場合(晶氷発生時)	8.6%	5.7%	10.7%
平均	30.3%	53.5%	29.7%

表-2 F_{va} 値の正答率

	3時間	6時間	9時間	12時間	24時間	36時間	48時間
現地から見た場合	61.5%	53.8%	50.0%	50.0%	34.6%	30.8%	23.1%
現地から見た場合(晶氷発生時)	46.2%	50.0%	42.3%	34.6%	15.4%	19.2%	15.4%
計算値から見た場合	18.7%	22.2%	27.7%	34.2%	37.5%	27.6%	30.0%
計算値から見た場合(晶氷発生時)	13.2%	20.6%	23.4%	21.1%	16.7%	17.2%	20.0%
平均	34.9%	36.7%	35.9%	35.0%	26.1%	23.7%	22.1%

表-3 ダム放流前 (12/1~1/8) とダム放流後 (1/9~3/31) の F_{va} 値の正答率

	3時間(12/1~1/8)	6時間(12/1~1/8)	9時間(12/1~1/8)	12時間(12/1~1/8)	24時間(12/1~1/8)	36時間(12/1~1/8)	48時間(12/1~1/8)
現地から見た場合	100%	100%	75.0%	75.0%	50.0%	50.0%	50.0%
現地から見た場合(晶氷発生時)	100%	100%	75.0%	75.0%	25.0%	25.0%	0.0%
計算値から見た場合	15.6%	21.1%	20.0%	27.3%	25.0%	28.6%	33.3%
計算値から見た場合(晶氷発生時)	12.5%	21.1%	20.0%	18.2%	12.5%	14.3%	0.0%
平均	57.0%	60.6%	47.5%	48.9%	28.1%	29.5%	20.8%
	3時間(1/9~3/31)	6時間(1/9~3/31)	9時間(1/9~3/31)	12時間(1/9~3/31)	24時間(1/9~3/31)	36時間(1/9~3/31)	48時間(1/9~3/31)
現地から見た場合	54.5%	45.5%	45.5%	45.5%	31.8%	27.3%	18.2%
現地から見た場合(晶氷発生時)	36.4%	40.9%	36.4%	27.3%	13.6%	18.2%	18.2%
計算値から見た場合	20.3%	22.7%	31.3%	37.0%	43.8%	27.3%	28.6%
計算値から見た場合(晶氷発生時)	13.6%	20.5%	25.0%	22.2%	18.8%	18.2%	28.6%
平均	31.2%	32.4%	34.6%	33.0%	27.0%	22.8%	23.4%

ダム放流後の検討結果においても、同様の結果となった。表-2の3時間、6時間、9時間の平均値でみると、34.9%、36.7%、35.9%であり、平均時間を6時間とした場合が最も正答率が高い。ダム放流前の検討結果においても、平均時間を6時間にした場合が最も正答率が高い。ダム放流後は9時間であった。

4. まとめ

本研究により以下のことが明らかとなった。

F_v 値の時間勾配 (F_{vs} 値) を用いた場合と F_{vs} 値の平均値 (F_{va} 値) を用いた場合では、 F_{va} 値の方が正答率は高く、平均する時間は6時間にした場合の正答率が高い結果が得られた。 F_{vs} 値を用いる場合は、1時間毎の時間勾配においても変動が大きく、 F_{vs} 値が基準値を超えても実際に晶氷が発生していない期間のみられ全体の正答率が低い値となった。 F_{va} 値を用いる場合は、 F_{vs} 値を用いる場合に比べて、値の変動を抑えることができ、より精度を高めることが出来た。

真勲別頭首工の SWIP 235kHz の現地観測結果から、1月14日と2月13日に晶氷が河床まで堆積しており取水障害の危険性が高い。1月14日において、予測値の F_{va} 値(6時間)では計算値は基準値を超えている。定点カメラを用いた目測観測では水面に晶氷が発生していない。2月13日において、予測値の F_{va} 値(6時間)では計算値は基準値を超えていない。定点カメラを用いた目測観測では水面に晶氷が発生している。本検討の正答率は、定点カメラを用いた水面の目測観測を基準としており、河氷下の晶氷は考慮していない。一方で、河氷下の晶氷を捉

える SWIP 235kHz の設置場所も取水口の直近ではない。予測値の精度低下の要因の一つとして、基準となる現場の晶氷発生を観測精度による影響が挙げられる。対策の一つとして SWIP 235kHz と ADCP の設置場所を真勲別頭首工の取水口の直近にすることが挙げられる。

2018年度はサンルダムの試験湛水という特異な条件下であったため、通常運用に移行する次年度以降に F_{va} 値の検証が求められる。

謝辞：本研究は、福田水文センターより現地観測のご協力を頂いた。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：平成30年版北海道の水資源，p.8，2018。
- 2) 横山洋，矢部浩規，佐々木泰訓，大野修，吉川泰弘：北海道内の水道取水障害の現状について，第33回寒地技術シンポジウム論文・報告集，2017。
- 3) 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，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.72, No.4, pp. I_307-I_312，2016。
- 4) 橋場雅弘，吉川泰弘：天塩川における河川解氷時の河氷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
- 5) 岩崎香月，吉川泰弘，高橋賢司，横山洋，山本新吾：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，平成30年度土木学会北海道支部論文報告集，第75号，B-25，2018。