

寒冷地河川の取水施設における 晶氷変動量の推定手法

AN ESTIMATION METHOD OF FRAZIL SLUSH VARIATION IN TAKE FACILITIES ON ICE-COVERED RIVERS

吉川 泰弘¹・黒田 保孝²・橋場 雅弘³

Yasuhiro YOSHIKAWA, Yasutaka KURODA, Masahiro HASHIBA

¹ 正会員 博(工) 北見工業大学助教 社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

² 正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム主任研究員 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

³ 正会員 福田水文センター (〒001-0024 北海道札幌市北区北 24 条西 15 丁目 2-5)

In this paper, Frazil slush variation mechanism and a method of frazil slush variation estimation on ice-covered river are studied. This study did develop a frazil slush generation, transport and accumulation calculation model. The continuous input values of this model are air temperature, wind velocity, sunshine duration, snowfall depth and water level. We carried out field observation of frazil slush accumulation using the ADCP and the SWIP. It was shown that the calculation model built by this study can reproduce the frazil slush variation of the real river. The increase of frazil slush transport, the increase of frazil slush generation and the upstream frazil slush accumulation volume are important values when considering frazil slush blockage of water intakes.

Key Words: Ice-covered river, Frazil slush accumulation, Estimation method, Water intake blockage

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。形成された河水は、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、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。現状把握のため、2014 年 6 月から 11 月の期間において、寒地土木研究所が中心となり著者らとともに、道北道東地域の河川水を取水している市町村へ聞き取り調査を実施したところ、聞き取り調査が実施できた 35 市町村の内、37% にあたる 13 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を得た。諸外国においても、冬期の取水障害の事例^{2,3,4)} が報告されている。

寒冷地河川の晶氷の発生、流下、堆積による晶氷変動現象および冬期の取水障害対策について、結氷河川現象のフロー図⁵⁾、現地観測および聞き取り調査に基づき整理したものを図-1 に示す。

図-1 の上流域の晶氷発生については、開水面が存在し気温が零下の条件において、層流では薄氷が形成され、乱流では晶氷が形成される。水温が零下で降雪があれば、降雪は河川内に供給される。河床材料周りに

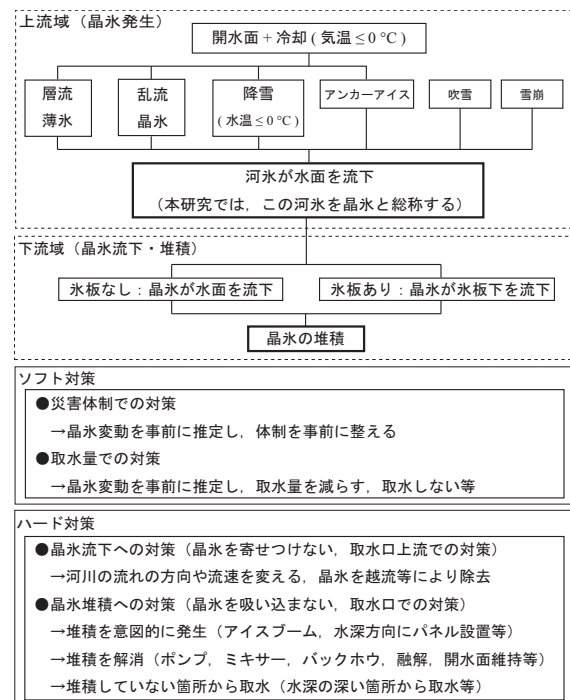


図-1 晶氷変動の現象と冬期の取水障害対策

氷が形成されればアンカーアイス⁶⁾となる。アンカーアイスは、水温の上昇や流速の増加により、河床材料から剥がれて、水よりも軽いため河川水面に浮上する⁷⁾。水温が零下で河川近傍で吹雪があると、陸地の積雪は巻き上がり、これらの雪は河川内に供給される。水温が零下で河川近傍で雪崩があると、これらの雪は河川内に供給される。これらの河水は形成要因によって

呼称が異なるが、本研究では総称して晶氷と呼称する。晶氷発生メカニズムについては、気温、風速、日照時間、降雪深、河川の水深、河川の流速、対象地点の緯度を入力値とする晶氷発生計算モデルを用いて、吹雪、雪崩以外の現象を明らかにした既往研究⁸⁾がある。

図-1の下流域の晶氷流下・堆積については、上流で発生した晶氷が、下流において、氷板がない場合は水面を流下し、氷板がある場合は氷板下を流下する。晶氷の流下速度が遅くなると、その地点で堆積する。なお、取水施設においては、下流に取水堰が設けられていることが多く、堰上げのため流速が遅くなるため、河水が形成されやすい地点となる。晶氷の流下および堆積に関する Shen ら⁹⁾の既往研究では、諸外国での現地観測、水理実験から、摩擦速度と粒径を用いて流下と堆積を表現する晶氷輸送量式を提案している。なお、著者ら¹⁰⁾は、日本の河川の天塩川においても、本計算式は適用が可能であることを確認している。

図-1のソフト対策については、事前の準備や体制を整える対策、取水量の調整による対策が考えられる。実際の現場では、取水量の低下を確認した時点で直ぐさま現場に入って対応しており、その時間帯は深夜の場合もある。現場では、現在、入手できるデータを用いて、取水口に晶氷がいつ、どのくらい流れてくるのかを推定する実用的な手法が望まれている。しかし、実河川の晶氷変動の現象は、氷板下の現象であり現場でも目視ができないため、十分には解明されていない。このため、現場では対症療法的に対応がなされている。

図-1のハード対策については、晶氷流下への対策として、冬期に意図的に流れを変化させる対策、水面の晶氷のみを越流させる対策がある。晶氷堆積への対策として、流水雪流入防止対策工¹¹⁾、アイスブーム^{12,13,14)}などの晶氷の堆積を意図的に発生または解消する対策がある。ハード対策は、個別的な現地状況に合わせた対策がそれぞれ実施されている。

本研究の目的は、図-1における氷板下の晶氷変動の現象解明とソフト対策となる晶氷変動の推定手法の開発である。直接的に目視できない氷板下の晶氷変動現象を解明するために現地観測を実施し、事前の体制を整えるための晶氷変動を推定する手法を開発した。

2. 氷板下の晶氷変動の現地観測

(1) 観測期間と場所、観測項目

観測期間は2014年12月15日から2015年3月13日、観測地点は図-2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。本観測地点は、2005年1月、2009年2月、2013年1月に、晶氷堆積による取水障害が発生⁸⁾している。

真勲別頭首工上流の観測項目を図-2に示す。KP7.2、KP7.6、KP8.0、KP8.4において、10分毎に水位測定(応用地質株式会社、S&DL mini)を実施し、晶氷と氷板の

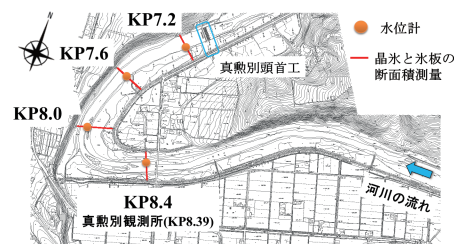


図-2 真勲別頭首工上流の観測項目 (平面図)

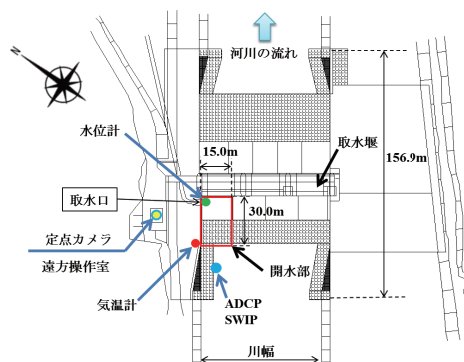


図-3 真勲別頭首工周辺 (KP7.05) の観測項目 (平面図)

断面積測定を計6回実施した。河川結氷時の横断測線上に設けた四辺形の観測穴にL型ポールを入れて、手に伝わる感覚を基に晶氷厚と氷板厚を測定し、四辺の平均値を測定値とした。これらの測定値から横断面における晶氷面積と氷板面積を求めた。晶氷粒径調査¹⁰⁾をKP7.2で計3回、KP7.6で計2回、KP8.0で計1回実施した。晶氷粒径は、河水に穴を開けてバンドーン採水器により採取し、写真撮影および画像解析により測定¹⁰⁾した。各粒子ごとに、長径、中間径、短径を測定した。KP8.4付近には、国土交通省が設置しているCCTVを用いて結氷状況を確認した。KPとはキロポストの略で、天塩川との合流点からの距離kmである。

真勲別頭首工周辺の観測項目を図-3に示す。10分毎に気温測定(onset, ティドビット v2)と水位測定(上記機器と同等)、1分毎に定点カメラ撮影(brinno, Time-LapseCamera, TLC200)、頭首工より44m上流、左岸水際から約7mにおいて、河水速度と河水底面の測定¹⁵⁾のためのADCP(Teledyne RD Instruments, WorkHorse Sentinel 1200kHz)、河水の存在を確認¹⁵⁾するためのSWIP(ASL Environmental Sciences, Shallow Water Ice profiler 546kHz)を河床から水面にセンサを向けて河床に設置した。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。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。

定点カメラとCCTVの観測結果より、真勲別頭首工周辺(KP7.05)では、2014年12月6日から2015年3月19日までの期間、水面が河水で覆われる完全結氷期間であった。真勲別観測所周辺(KP8.4)では、2014年12月16日から2015年3月10日までの期間、完全結氷期間であった。

結氷区間については、定期的に目視による観測を実

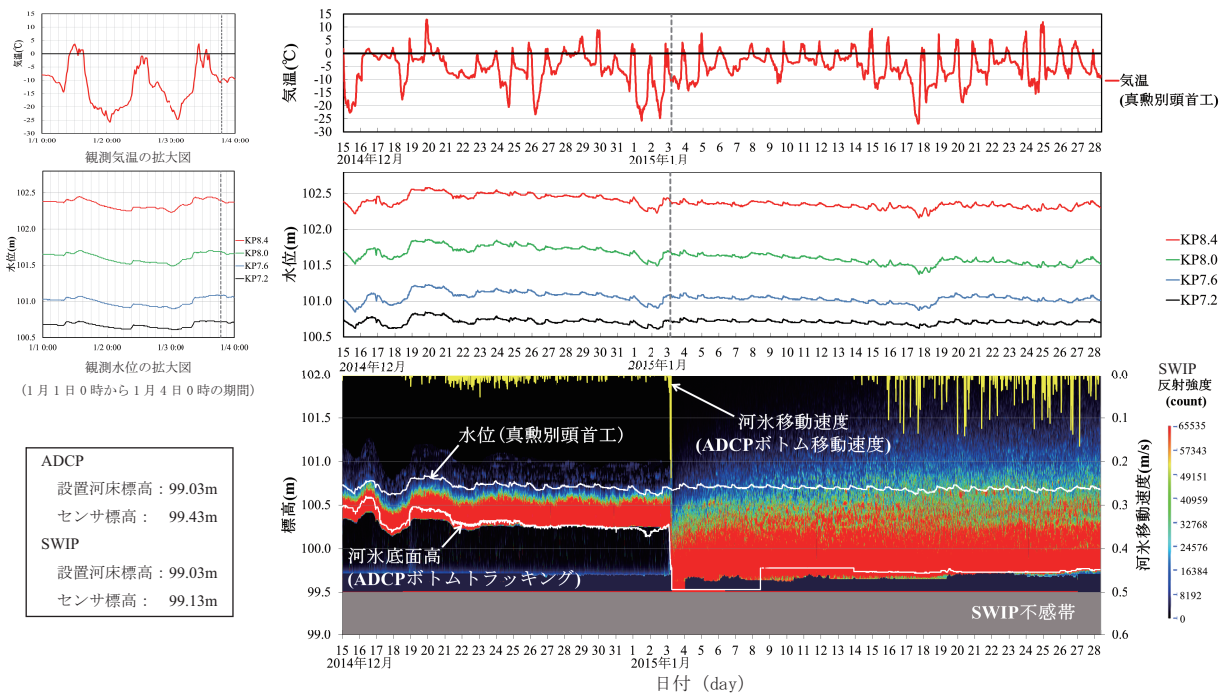


図-4 真敷別頭首工周辺 (KP7.05) における晶氷堆積時の気温、水位、ADCP、SWIP の経時変化

施した。観測期間中、KP7.05 から KP12.0 付近までは完全結氷であった。KP14.3 付近では部分結氷であり、晶氷が水面を流下する状況を確認している。

(2) 氷板下の晶氷堆積現象

氷板下の晶氷が水深方向に堆積する現象を観測した。図-4 に、晶氷堆積時の気温、水位、ADCP、SWIP の経時変化を示す。図-4 において、SWIP の反射強度が高い箇所は河水である。真敷別頭首工での水位と ADCP ボトムトラッキングによる河水底面高で囲まれた領域は、SWIP の測定値より、河水の存在領域と判断できる。SWIP の河水変動をみると 1 月 3 日 21 時 30 分に水深方向に河水が堆積している。ADCP の河水底面高の測定値も、この時期に低下している。ADCP の河水移動速度は、1 月 3 日 19 時 20 分に 4cm/s であり、1 月 3 日 20 時 30 分では 24cm/s と速くなる。その後、1 月 3 日 20 時 40 分では河水移動速度は 0m/s となった。SWIP と ADCP の測定値から、1 月 3 日 21 時 30 分に河水が水深方向に堆積したと判断できる。晶氷堆積後は、SWIP データから有効水深が増加し、ADCP データから 1 月 14 日 20 時 20 分より河水の移動が測定された。なお、ADCP のセンサは河水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、河水底面高と河水移動速度となる¹⁵⁾。

河水堆積時から 2.35 日前の気温をみると、1 月 1 日 12 時 10 分で 3.6℃、1 月 2 日 1 時 10 分で -25.8℃と、13 時間で気温が 29.4℃低下している。この時期に、気温低下のため晶氷が多量に発生し、河川の開水面に晶氷が供給された可能性があり、観測地点で堆積した河水は晶氷である可能性が高い。本研究では、堆積した河水は晶氷と仮定して検討を進めた。なお、晶氷堆積時から約 11 時間前では、気温は 3.7℃まで上昇している。

真敷別頭首工上流の KP8.4 の水位をみると、1 月 1 日

12 時 10 分で 102.42m、1 月 2 日 1 時 10 分で 102.29m と、12 時間で水位が 13cm 下降している。その後、1 月 3 日 8 時 50 分には元の水位の 102.42m に戻り、その 12 時間 40 分後に晶氷が堆積した。河川結氷時の水位変動について、水位計の地点で結氷すると河水厚の影響を受けて水位は上昇し、解氷すると水位は下降する。水位計の上流で河水が堆積すると、上流で流水が堰き止められるため、下流の水位は下降する。水位計の下流で河水が堆積すると、下流で流水が堰上がるため、上流の水位は上昇する。河川結氷時の水位変動をみる場合、上流か下流のどちらかの影響を受けたのかを考慮する必要がある。今回の観測では、水位が下降した後に、水位は上昇し元に戻っていることから、上流で河水が堆積し、流水が堰き止められ、その後、河水は下流へと流下したと推察できる。

現地観測結果から、気温低下により発生した晶氷が上流の河川内に供給される。河川内の晶氷は、その下流の氷板下に堆積する。晶氷の堆積のため流れは堰き止められて、この地点よりさらに下流の KP8.4 の水位は低下する。気温の上昇および晶氷の発生により、上流の晶氷の堆積は解消されて下流へと流下し、流れの遅い頭首工周辺において晶氷が堆積したと推察できる。

(3) 晶氷面積と氷板面積の縦断変化

晶氷面積と氷板面積の縦断変化を図-5 に示す。現地観測は、晶氷堆積後の 2015 年 1 月 15 日、1 月 27 日、2 月 5 日、2 月 20 日、3 月 5 日、3 月 13 日に実施した。

晶氷面積の大きさは、KP7.2、KP7.6、KP8.4、KP8.0 の順であり、KP8.0 の面積は小さい。晶氷面積の観測期間の変動速度の平均値をみると、KP7.2 では 0.29m²/day、KP7.6 では 0.02m²/day、KP8.0 では -0.14m²/day、KP8.4 では -0.07m²/day である。下流の KP7.2 と KP7.6 では、

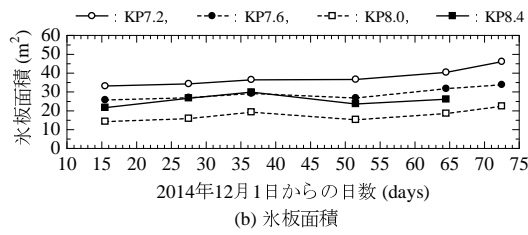
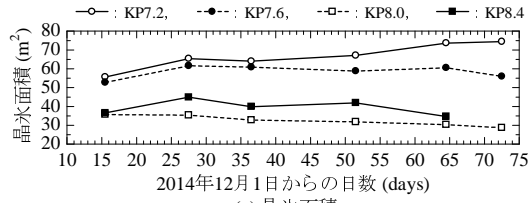


図-5 晶氷面積と氷板面積の縦断変化

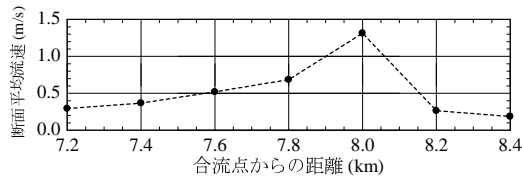


図-6 一般断面不等流計算による断面平均流速

晶氷が多く堆積し時間経過とともに面積は増加する。KP8.0では晶氷が少なく時間経過とともに面積は減少する。KP8.4では時間経過とともに面積は減少する。

氷板面積の大きさは、KP7.2, KP7.6, KP8.4, KP8.0の順であり、晶氷と同様にKP8.0の面積は小さい。氷板面積の観測期間の変動速度の平均値をみると、KP7.2では0.27m²/day, KP7.6では0.17m²/day, KP8.0では0.20m²/day, KP8.4では0.14m²/dayであり、全ての断面で氷板面積は増加する。

晶氷面積の違いの要因を検討するために、一般断面不等流計算を実施し、計算により得られた断面平均流速を図-6に示す。計算に用いた流量は、観測期間の平均値5.89m³/sとした。図-6より、晶氷の面積が時間経過とともに減少するKP8.0では、断面平均流速が他の断面に比べて速い。KP8.0では、上流から流下してくる晶氷は、堆積せずに下流へと流下したと推察できる。本検討より、晶氷の変動は、縦断的に一律な現象ではなく、水理量の影響を受けることが推察された。

3. 晶氷変動計算モデルと晶氷変動量の推定

本研究で観測された氷板下の晶氷堆積現象は、取水口より44m上流で発生した現象であり、取水障害の一手手前の現象である。氷板下の晶氷堆積現象を気象条件と水理条件により推定するために、晶氷変動計算モデルを構築した。本計算モデルを用いて、晶氷変動量を推定する手法を開発した。

(1) 晶氷発生計算モデル

晶氷発生計算モデルは、開水面において点的な発生晶氷厚を計算する次式⁸⁾を用いた。

$$\frac{dh_f}{dt} = \frac{-\phi_s + \phi_b}{\rho_i L_i (1 - \lambda_f)} + \frac{\phi_e + \phi_c}{\rho_i L_i (1 - \lambda_f)} +$$

$$\frac{(1 - \lambda_a) dh_a}{(1 - \lambda_f) dt} + \frac{\rho_s}{\rho_i (1 - \lambda_f)} \frac{dh_s}{dt} + \frac{-\phi_w}{\rho_i L_i (1 - \lambda_f)} \quad (1)$$

h_f [m]:発生した晶氷厚, t [sec]:時間であり1時間とした。 h_a [m]:アンカーアイス厚で計算式⁸⁾により求めた。 h_s [m]:降雪深で観測値を与えた。 ρ_i [$\frac{kg}{m^3}$]:氷の密度-10℃の場合の値の917.4を与え、 ρ_s [$\frac{kg}{m^3}$]: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 [$\frac{J}{kg}$]:氷の潜熱であり3.336×10⁵を与えた。 ϕ [$\frac{W}{m^2}$]: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⁸⁾と同様の式を用いて値を得た。

(2) 晶氷輸送計算モデル

晶氷輸送計算モデルは、次式⁹⁾を用いた。

$$\Phi = 5.487(\Theta - 0.041)^{1.5} \quad (2)$$

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

$$\Theta = \frac{U_*^2}{F^2 \Delta g d_f} \quad (4)$$

Φ :無次元晶氷輸送量, Θ :無次元せん断力, q_f [$\frac{m^2}{s}$]:単位幅晶氷輸送量, 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 [$\frac{kg}{m^3}$]: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¹⁶⁾を用いた。

$$\frac{1}{F} = 3.18 - 18.22\alpha_p + 80.46\alpha_p^2 - 171.46\alpha_p^3 + 140.95\alpha_p^4 \quad (5)$$

$$\alpha_p = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (6)$$

a [m]:長径, b [m]:中間径, c [m]: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。摩擦速度 U_* は次式となる。

$$U_* = \sqrt{gRI} \quad (7)$$

R [m]:径深, I [無次元]:エネルギー勾配である。 R は以下のように求めた。北海道開発局が実施している真勲別観測所における流量観測のデータを用いて、流水断面積 A [m²], 川幅 B [m], 有効水深 h [m]を取得した。本観測所は完全結氷であり水面は河水で覆われているため、近似的に $R \equiv A/(2B+2h)$ として値を得た。連続値への変換については、 A は、水位から河水の喫水深を引いた有効水位と流水断面積の関係式(H - A 式)を求め、連続測定水位を H - A 式に代入することにより流水断面積の値を得た。 B は、流量観測時の川幅を線形で与えた。 h は、 $h=A/B$ として求めた。 I は、水面勾配としてKP8.0とKP8.4の測定水位より与えた。

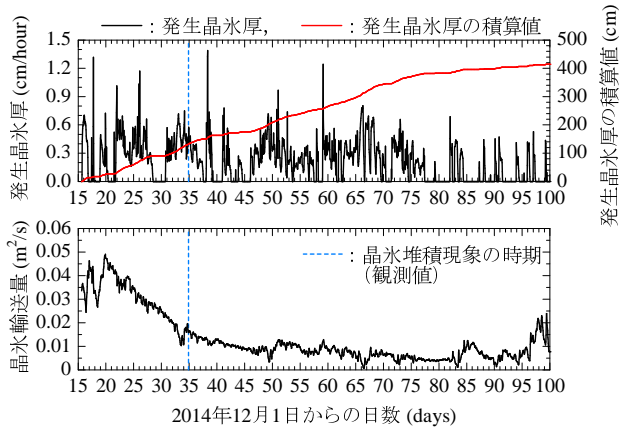


図-7 晶氷輸送量と発生晶氷厚の経時変化 (計算値)

(3) 晶氷輸送量と発生晶氷厚の経時変化

KP8.4 における晶氷輸送量と発生晶氷厚および発生晶氷厚の積算値を図-7 に示す。

図-7 の晶氷輸送量は、相対的にみると減少している。しかし、1月3日0時(34.00日目)では $0.01\text{m}^2/\text{s}$ 、1月3日17時では $0.02\text{m}^2/\text{s}$ と、晶氷堆積現象が発生する前では晶氷輸送量が増加している。観測地点(KP7.05)の晶氷堆積現象が発生する前に、上流のKP8.4において晶氷輸送量は増加している。

晶氷現象発生前の発生晶氷厚をみると、12月30日17時(30.73日目)から晶氷が発生している。その後、1月2日1時(堆積現象の1.83日前)に $0.72\text{cm}/\text{hour}$ 、1月3日3時(堆積現象の0.75日前)に $0.75\text{cm}/\text{hour}$ と2つのピーク値がある。晶氷堆積現象が発生する直近では、発生晶氷厚が増加している。

計算開始(15.00日目)から晶氷堆積現象発生までの期間において、発生晶氷厚の積算値は増加している。晶氷輸送量は、晶氷堆積現象発生時に比べて、この期間の方が値が大きい。2014年12月25日の結氷区間調査では、観測地点(KP7.05)からKP14.3まで結氷しており、これより上流は水面が確認できる開水状態であった。上流の開水面で発生した晶氷が、その下流の水板下に堆積することにより、発生した晶氷は、直ぐさま下流の観測地点まで到達しない現象が予見される。

現地観測結果および数値計算結果に基づく考察から、観測地点における晶氷堆積の要因として、晶氷輸送量の増加、直近の発生晶氷厚の増加、上流での包蔵晶氷量の影響が想定された。

(4) 取水施設の晶氷変動量の推定

完全結氷時の取水施設における取水障害の危険性は、晶氷輸送量、直近の発生晶氷厚、上流での包蔵晶氷量に比例すると仮定して、本研究では、取水障害の危険度を表す値を晶氷変動量と呼称して次式で定義した。

$$F_v = q_f \times h_{fc} \times D \quad (8)$$

$F_v[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}]$: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。 $h_{fc}[\text{m}]$:直近の発生晶氷厚の積算値であり、本観測において晶氷堆積の2.35日前から、気温が急激に低下した現象を参

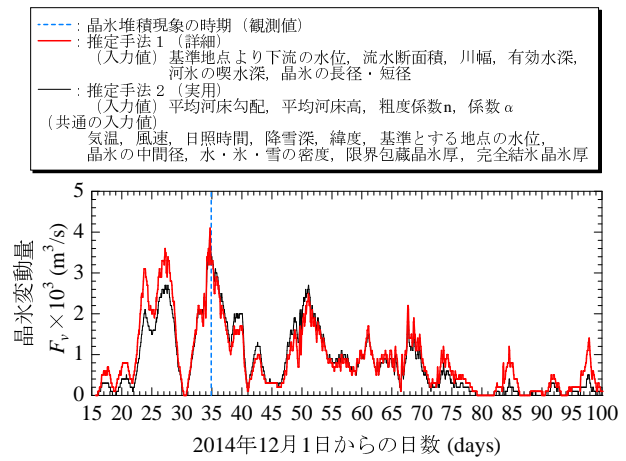


図-8 取水施設の晶氷変動量(値が高いと取水障害の可能性大)

考に、簡便のため、2.0日前から現在までの発生晶氷厚の積算値を与えた。 D [無次元]:上流での包蔵晶氷量の割合($0 \leq D \leq 1$)であり、次式で定義した。

$$D = \frac{h_{fadd} - h_{fmin}}{h_{fmax}} \quad (9)$$

$D=0$ の場合、発生した晶氷は、河水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、河水下にこれ以上包蔵できないため下流へと流れる。 $h_{fadd}[\text{m}]$:計算開始から現在までの発生晶氷厚の積算値である。 $h_{fmin}[\text{m}]$: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である。本検討では、完全結氷の状態から計算を開始しているため、 0.0m を与えた。 $h_{fmax}[\text{m}]$:取水施設より上流で包蔵可能な限界包蔵晶氷厚である。上流の開水面における発生晶氷体積 $V_f[\text{m}^3]$ 、下流の結水面の縦断距離 $L_i[\text{m}]$ 、下流の結水面の川幅 $B_i[\text{m}]$ として、 $h_{fmax}=V_f/(L_i B_i)$ と定義した。本検討では試行錯誤により $h_{fmax}=1.5\text{m}$ とした。

取水施設での晶氷変動量 F_v を図-8に示す。図中には、入力値が異なる[推定手法1]と[推定手法2]、晶氷堆積現象の時期を示した。前述した手法は推定手法1である。図-8より、取水口より44m上流で発生した取水障害の一手手前の晶氷堆積現象の時期において、計算期間中、最も晶氷変動量が多い。晶氷変動量 F_v は、取水施設周辺での晶氷堆積現象を推定可能であることを示した。なお、過去の取水障害を対象に、後述する推定手法2で $h_{fmax}=1.5$ 、 $h_{fmin}=1.5$ として F_v を計算し、本計算モデルの検証を行った。検証の結果、取水障害時の F_v は、相対的に高い値を示す結果を得ている。

(5) 実用的な晶氷変動量の推定手法

現場で本推定手法を運用する場合、入力値は少ない方が利便性が高い。現地において、リアルタイムで取得可能なデータは、気象庁の気象データ、国土交通省の水位データである。真敷別頭首工では、気象データは名寄観測所、水位データは真敷別観測所で取得が可能である。地形データとして、夏期に測量を実施することにより、平均河床勾配、平均河床高の値は取得可能である。入力値を少なくした実用的な推定手法[推定手法2]の晶氷変動量 F_v を図-8に示す。推定手法1と

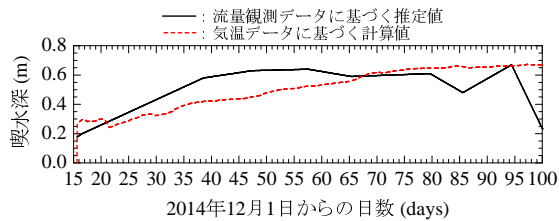


図-9 喫水深における推定値と計算値

推定手法2の F_v の絶対誤差の平均値は $0.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、相関係数は0.9であり相関が高い。

推定手法2の入力値の数の削減方法を以下に記す。

式(6)の α_p は、長径 a と短径 b における関係式¹⁰⁾を、式(6)に代入することにより、 $\alpha_p = 0.5846604$ の一定値を得た。式(7)の I は平均河床勾配 $1/480$ を与えた。式(7)の R は完全結氷時のため、 $R \equiv A/(2B+2h) \equiv h/2$ とした。水位 HZ 、河氷の喫水深 d 、平均河床高 Z とすると、有効水深は、 $h = HZ - d - Z$ により得られる。河氷の喫水深 d は、河氷厚 h_i とすると、 $d = (\rho_i/\rho_w)h_i$ となり、径深 R を求めるためには、河氷厚 h_i を求めればよい。河氷厚の計算は、河氷 \equiv 氷板と仮定して、次式の氷板の形成融解の計算式¹⁷⁾により値を得た。

$$h_i = h'_i - \left(\frac{65.2}{10^5}\right) \alpha \frac{T_a}{h'_i} - \left(\frac{45.8}{10^2}\right) \beta^{4/5} T_w h^{1/3} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{u}{h^{2/3}} \quad (11)$$

$h_i[\text{m}]$:河氷厚、 $h'_i[\text{m}]$ は Δt 前の河氷厚、 $T_a[^\circ\text{C}]$:気温、 $T_w[^\circ\text{C}]$:水温であり気温から推定¹⁷⁾した。有効水深 h は、 $h = HZ - (\rho_i/\rho_w)h'_i - Z$ から求めた。 $u[\text{m/s}]$:流速は、マンニングの平均流速公式において、 $n[\text{s/m}^{1/3}]$:粗度係数0.03、 R は $R=h/2$ 、 I は平均河床勾配を与えて値を得た。 α [無次元]は気温に対する氷板形成の程度を表し、本検討では0.9を与えた。流量観測データの喫水深を線形補完した値と本計算式による気温データから求めた喫水深を図-9に示す。絶対誤差の平均値は10cmであった。

4. まとめ

完全結氷している取水施設周辺において、取水障害を引き起こす晶氷堆積の要因は、現地観測と数値計算による考察から、晶氷輸送量の増加、直近の発生晶氷厚の増加、上流での包蔵晶氷量の影響が示唆された。これらの要因を考慮した晶氷変動量 F_v を提案した。一般公開されている国土交通省と気象庁のデータを用いて F_v を推定する実用的な手法を示した。

本研究成果は、「完全結氷している取水施設において、気象データと水理データのリアルタイム値や予測値を本計算モデルに与えて F_v を求め、現在の現場における晶氷堆積による取水障害の危険性を把握して事前に体制を整える」という新たなソフト対策の一つとなる可能性がある。

謝辞:本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発公募地域課題分野(河川)、JSPS 科研費 若手研究(B)26870023の助成を受けた。名寄市浄水場、渡邊尚宏氏(元寒地土木研究所)、鳥谷部寿人氏(寒地土木研究所)、芳賀聖一氏(福田水文センター)には、聞き取り調査、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：北海道の水資源，p.8,18，2014。
- 2) Steven F. Daly, Robert Ettema: Frazil Ice Blockage of Water Intakes in the Great Lakes, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.132(8), pp.814–824, 2006.
- 3) Martin Richard, Brian Morse: Multiple frazil ice blockages at a water intake in the St. Lawrence River, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.53(2), pp.131–149, 2008.
- 4) Robert Ettema, Gokhan Kirkil, Steven Daly: Frazil ice concerns for channels, pump-lines, penstocks, siphons, and tunnels in mountainous regions, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.55(2), pp.202–211, 2009.
- 5) Hung Tao Shen: Mathematical modeling of river ice processes, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.62(1), pp.3–13, 2010.
- 6) David J. Kerr, Hung Tao Shen, Steven F. Daly: Evolution and hydraulic resistance of anchor ice on gravel bed, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.35(2), pp.101–114, 2002.
- 7) 橋場雅弘ほか：アンカーアイスの平面分布と含有物質に関する現地観測，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.70, No.4, pp.I.1279–I.1284, 2014。
- 8) 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，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.71, No.4, pp.I.1327–I.1332, 2015。
- 9) Hung Tao Shen, De Sheng Wang: Under Cover Transport and Accumulation of Frazil Granules, *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(2), pp.184–195, 1995.
- 10) 吉川泰弘ほか：結氷河川における晶氷粒径分布と晶氷輸送量の現地観測，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.69, No.4, pp.I.697–I.702, 2013。
- 11) 峯田稔ほか：小規模寒地河川における流氷雪制御方法に関する研究，水工学論文集，第37巻，pp.135–140, 1993。
- 12) 中田満洋，菊谷智孝：結氷河川における取水確保対策について—永山床止めからの安定取水確保対策—，平成13年度北海道開発技術研究発表会，河-11，2002。
- 13) 植田知行ほか：取水口における晶氷侵入対策工の効果，寒地技術シンポジウム，第19回，pp.356–363, 2003。
- 14) 植田知行ほか：寒冷地河川における晶氷移動制御対策，寒地技術シンポジウム，第19回，pp.364–370, 2003。
- 15) 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。
- 16) Mantz, P. A.: Low sediment transport rates over flat beds, *Journal of Hydraulic Div.*, ASCE, 106(7), pp.1173–1190, 1980.
- 17) Yasuhiro Yoshikawa, Yasuharu Watanabe, Akashi Itoh: A SIMPLE EQUATION FOR ICE SHEET THICKNESS AND ICE FORMATION/BREAKUP PREDICTION, *Journal of JSCE*, Vol.2, pp.203–213, 2014。