

オソベツ川における吹雪による晶氷増加と アイスジャム発生危険箇所の抽出に関する研究

STUDY ON SNOWSTORM-INDUCED INCREASES IN FRAZIL SLUSH
AND THE IDENTIFICATION OF POTENTIAL ICE JAM LOCATIONS
ON THE OSOBETSU RIVER

鳥谷部寿人¹・吉川泰弘²・阿部孝章³・黒田保孝⁴・
船木淳悟⁴・佐藤好茂⁵・津村喜武⁶

Toshihito TOYABE, Yasuhiro YOSHIKAWA, Takaaki ABE, Yasutaka KURODA,
Jungo FUNAKI, Yoshishige SATO and Yoshitake TSUMURA

¹正会員 土木研究所 寒地土木研究所 道東支所(〒085-0014 北海道釧路市末広町10丁目1-6)

²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)

³正会員 博(工) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム(〒062-7602 北海道札幌市豊平区平岸1-3)

⁴正会員 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム(〒062-7602 北海道札幌市豊平区平岸1-3)

⁵正会員 北海道開発局 帯広開発建設部帯広河川事務所(〒089-0536 北海道中川郡幕別町札内西町73-6)

⁶非会員 北海道開発局 釧路開発建設部 (〒085-0017 北海道釧路町幸町10-3 釧路地方合同庁舎)

In December 2014, an ice jam occurred on the Osobetsu River after a snowstorm. This study investigated factors that contribute to increases in frazil slush and identified locations prone to ice jams. Previous studies using a hydraulic model experiment showed that an ice sheet's Froude number become small where ice sheets are static or accumulated. Moreover, a frazil slush calculation model that is based on the theory of heat balance in stream water accurately reproduced the measured thickness of frazil slush. However, no previous studies on ice jams have taken into account the Froude numbers of ice sheets. Also, certain weather phenomena, such as snowstorms and avalanches, are not factored into the current model for calculating frazil slush thickness. Therefore, the authors developed the model such as to take into account the effect of snowstorms. Furthermore, we used the Froude number of the ice sheet to identify potential ice jam locations on the Osobetsu River.

Key Words : Ice jam, Frazil slush, Calculation model, Ice-sheet's Froude number

1. はじめに

北海道の結氷河川では、冬期において氷板、晶氷等の流下によって引き起こされるアイスジャムの発生が報告されている。この現象は、冬期間の水道用水や工業用水¹⁾、発電²⁾などの取水障害を引き起こし利水の安定的供給を脅かす大きな社会的リスクとして懸念される。また、2010年2月に渚滑川³⁾でもアイスジャムによる急激な水位上昇が確認されており、近年みられる短時間に降る集中豪雨や豪雪などの極端現象や温暖化による将来の気候変動がもたらすリスクを考えると、その発生要因等を調査・分析し、発生メカニズムの解明、発生防止対策や被害軽減対策を立案する意義は大きい。なお、アイスジャ

ムは国内固有の事象ではなく、寒冷気候の諸外国では一般的な事象である。⁴⁾

アイスジャムには河川解氷時の河氷の破壊と流下に起因するもの⁵⁾と、河川結氷初期の晶氷の増加と流下に起因するもの⁶⁾がある。2014年12月釧路川水系オソベツ川において晶氷の影響によるアイスジャムが発生した。晶氷の増加と流下に起因するアイスジャム対策を実施する上で、アイスジャムの発生危険箇所ならびにアイスジャムの材料となる晶氷の発生条件に関する知見が重要である。アイスジャムの発生条件⁷⁾に関しては川幅、水深ならびに河床勾配に着目したアイスジャム水理実験があり、氷板が滞留または堆積する区間で氷板のフルード数が小さくなることを示している。晶氷の発生条件に関しては、晶氷発生計算モデル⁸⁾により、北海道天塩川水系名寄川

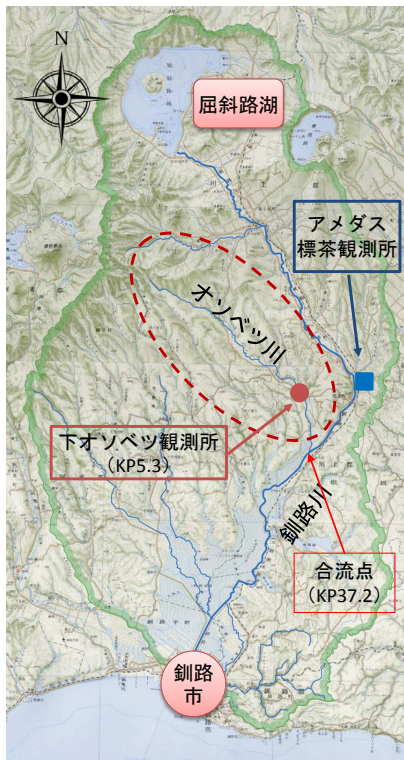


図-1 調査箇所図 (1/50,000)

真敷別頭首工における現地観測において良好な結果が得られている。一方で氷板のフルード数を実際の河川に適用した事例はなく、晶氷発生計算モデルでは暴風雪や雪崩といった気象現象を考慮した研究は十分に実施されていない。

本研究は、暴風雪に伴う晶氷の増加によって発生したアイスジャム現象の解明を目的とする。気象・水文データおよび現地調査を基に、晶氷発生計算モデルを用いて晶氷の発生要因を検討し、さらに氷板のフルード数を用いてアイスジャムの発生危険箇所の抽出を試みた。

2. 2014年12月オソベツ川のアイスジャム

(1) 調査箇所

北海道東部を流れるオソベツ川は、図-1に示すとおり一級河川釧路川(幹線流路延長154km, 流域面積2,510km²)の一次支川である。本川流路延長26.3km, 流域面積168.2km²であり、釧路川KP37.2地点右岸で合流している。なお、釧路川のKP(キロポスト)は河口からの距離(km)である。また、釧路川との合流点は釧路湿原内の釧路川中流部に位置しており、河床勾配は釧路川合流点付近で1/1200程度、上流部で1/200程度である。

(2) 気象・水理

アメダス標茶観測所の1時間当たりの降雪、風向・風速、気温と下オソベツ観測所(KP5.3)の10分水位を図-2に示す。写真-1に下オソベツ観測所の状況を示す。なお、オソベツ川のKPは釧路川合流点(KP37.2)からの距離(km)である。釧路地方では発達した低気圧により記録的な暴

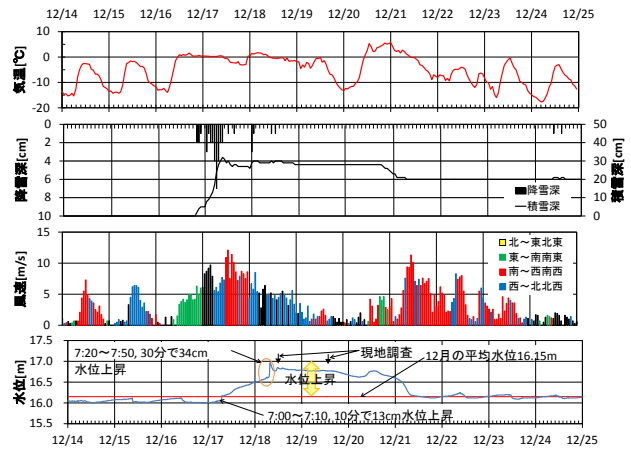


図-2 気象・水文(2014年12月14日から24日)

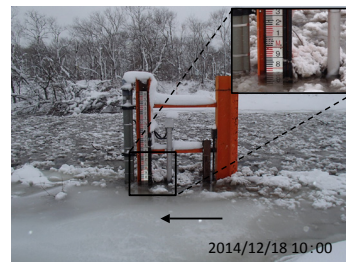


写真-1 下オソベツ観測所

風雪となりアメダス標茶観測所においてもその影響が観測された。気温は12月14日から16日にかけて日周期を繰り返しながらマイナスの値で推移していたが、低気圧の通過に伴い、17日から18日にかけては一日を通してほぼ0°Cに近い値を示した。降雪深ならびに積雪深は、16日以前は0cmであったが、16日夜半から雪が降り始め17日には日降雪深が32cmとなった。この時期の風向は南から西南西の風が卓越しているが、17日から18日までの風向は低気圧の移動に伴い、方角的には反時計回りに推移した。風速は16日午前中の平均で2.0m/s程度であったが、17日には日平均風速8.0m/s、18日には日平均風速5.2m/sとなっている。水位は14日0:00から17日7:00までは12月の平均水位(H=16.15m)程度であったが、17日の7:00から7:10までの10分間で13cm上昇した。その後も水位の上昇が続き、18日7:20に16.63mだった水位がピーク時の7:50には16.97mに達しており、この30分間で34cmの急激な水位上昇を記録した。なお、水位はいずれも暫定値である。

(3) 現地の状況

図-3に調査箇所を示す。写真-2に下オソベツ橋(KP3.0)、厚生橋(KP5.4)で上下流方向に撮影した写真を示す。なお、合流部(KP0.2)と恵橋(KP8.0)で河水は確認されていない。また、いずれの調査箇所においても河道を覆うような氷板は確認されていない。写真-2(b)の下オソベツ観測所における18日13時において水位(16.82m)はピーク時と比べて15cm低下していた。写真-2(a)の18日13時において下オソベツ橋(KP3.0)、写真-2(b)の厚生

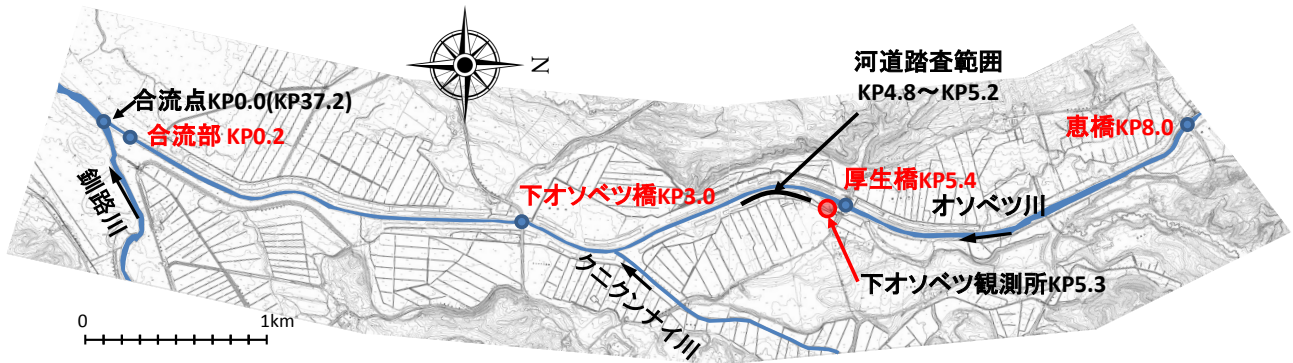


図-3 調査箇所 (1/2, 500)

橋(KP5.4)の上下流方向に晶氷が滞留している。写真-2(a)の19日15時において下オソベツ橋(KP3.0)では晶氷は確認されず、写真-2(b)の厚生橋(KP5.4)上下流には晶氷が滞留し、橋の上流には開水面が広がっていた。

写真-3にKPごとの上下流方向の河道状況を示す。18日正午過ぎに下オソベツ観測所から下流方向に向かって河道を調べた。KP5.2, KP5.0では上下流とも河水が河道内に滞留あるいは堆積している状況が確認された。また、両河岸ともに樹木が繁茂しており、17日に大量に積もった雪の重みで樹幹が折れ、河道内に倒れこんでいる状況が確認できた。また上流側に向けて撮影した画像には枝に雪の痕跡がある一方で下流側に向けて撮影した画像にはないことから、降雪時は上流から下流に向かって強い風が吹いていたと推察された。なお、KP4.8では上下流とも河道内に河水は確認されなかった。

3. アイスジャムの材料となる晶氷の発生

(1) 晶氷発生計算モデル

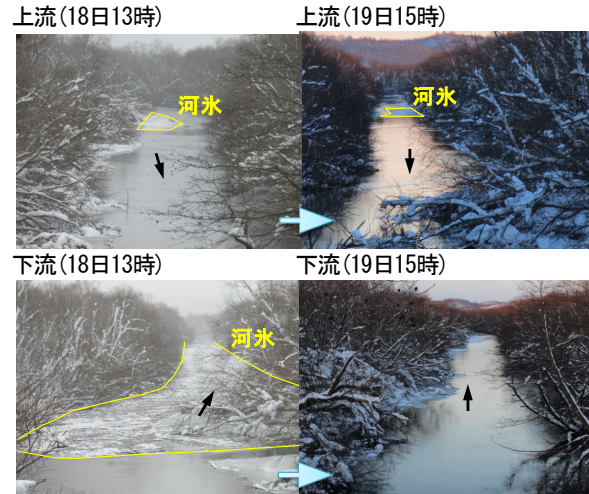
晶氷発生計算モデル⁶⁾は、以下の開水面における熱収支と降雪の影響を考慮したモデルを用いた。

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

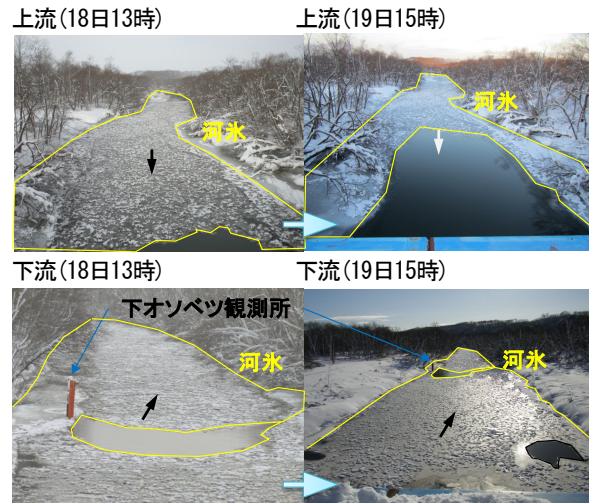
ρ_i [kg/m³] : 氷の密度, ρ_s [kg/m³] : 雪の密度, λ_a [無次元] : アンカーアイスの空隙率, λ_f [無次元] : 晶氷の空隙率, t [sec] : 時間, L_i [J/kg] : 氷の潜熱, h [m] : 厚さ. 添え字は各層の値であり, s は降雪, a はアンカーアイス, f は河川内の晶氷である. ϕ [W/m²] : 熱フラックスであり, ϕ_s : 短波放射量, ϕ_b : 長波放射量, ϕ_e : 潜熱フラックス, ϕ_c : 顕熱フラックス, ϕ_w : 流水から晶氷への熱フラックスである. 各値の計算方法は既往文献⁶⁾と同じにした. 本計算モデルの入力値は、気温、風速、日照時間、降雪深、河川の水深、河川の流速、対象地点の緯度である。

(2) 吹雪による雪の供給について

アメダス標茶観測所では12月18日の気温は0℃程度で、日平均風速5.2m/sが観測されている。さらに、写真-1な



(a) 下オソベツ橋 (KP3.0)



(b) 厚生橋 (KP5.4)

写真-2 河道の状況

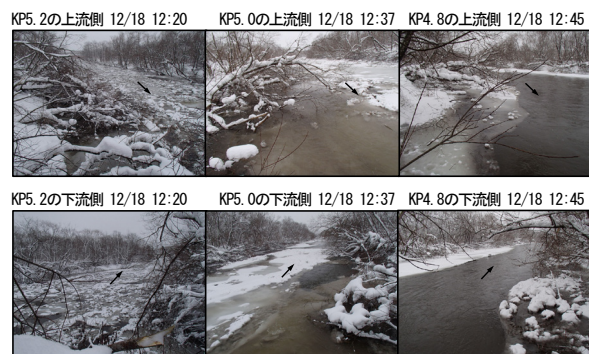


写真-3 河岸から見た河道内の状況 (KP4.8~KP5.2)

表-1 吹雪の発生条件

条件 1	$0 > T > -5$	かつ	$U_7 \geq 6.0$	かつ	$Sd \geq 1\text{cm}$
条件 2	$T \leq -5$	かつ	$U_7 \geq 5.0$	かつ	$Sd \geq 1\text{cm}$
条件 3	$t \leq 10\text{ hr}$				

らびに写真-3から量水標や周辺の樹木に上流方向から吹き込んだとみられる積雪が確認された。降雪以外にも吹雪により雪が水面に運ばれた可能性が考えられる。本研究では、吹雪による河川内への晶氷の供給現象について、晶氷発生計算モデルに組み込んだ。松澤ら⁸⁾は観測から得られた風速と吹雪量の経験式から飽和状態の吹雪量を式(2)で示している。

$$Q = 0.005U_{1.2}^4 \quad (2)$$

$Q[\text{g/m/s}]$:吹雪量, $U_{1.2}[\text{m/s}]$: 高さ1.2mの風速である。吹雪量として供給される雪は降雪と積雪である。風速が速い場合でも、降雪や雪面からの雪が供給されなければ吹雪は発生しない。吹雪の発生条件は竹内⁹⁾による降雪判別を伴う気温と風速による条件や武知ら¹⁰⁾による降雪終了からの経過時間における条件があるが、ここでは気象条件から表-1の判定に基づき、降雪有りの場合の条件1,2かつ経過時間の条件3を満たす場合とした。表-1において $T[^\circ\text{C}]$: 気温, $U_7[\text{m/s}]$: 高さ7.0mの風速, Sd : 積雪深[cm], t [hr]: 降雪終了後の経過時間である。また、風速分布は以下の対数則¹¹⁾を用いた。

$$U = \frac{u^*}{\kappa} \left(\ln \frac{z}{z_0} \right) \quad (3)$$

$U[\text{m/s}]$: 風速, $u^*[\text{m/s}]$: 摩擦速度, κ :カルマン定数(0.4), $z[\text{m}]$: 高度, $z_0[\text{m}]$: 粗度は周辺の土地利用状況より畑・草地0.1~0.3の中央値0.2として与えた。なお、風速の鉛直分布は対数則に従うものとし、 u^* は風速の観測値、観測高度と z_0 から求めた。

式(2)で得られた吹雪量 Q を降雪相当に換算して晶氷発生計算モデルに組み込む手法を記す。前提条件として、吹雪によって運ばれる雪はすべて河道に供給されたと仮定した。雪の密度について谷瀬ら¹²⁾は、積雪深計と積雪重量計を用いた雪の密度の観測を行い、雪の密度は降雪後の気温変化や圧密に伴い時間と共に変化することを観測しており、観測結果から降雪直後の雪の密度は 100kg/m^3 程度の結果を得ている。例えば吹雪量 $Q=1\text{g/m/s}$ の場合、10分間の累計吹雪量は 0.6kg/m であり、雪の密度を 100kg/m^3 として体積に置き換えると雪の体積は $0.006\text{m}^3/\text{m}$ となる。これをcm単位にして高さの次元で表すと 0.6cm となる。このようにして10分累計吹雪高 $H_s[\text{cm}]$ を求めた。なお、(2)式は樹木の無い場合における経験式であるため、河畔林による吹雪の捕捉は考慮されていない。本研究では枝に残された雪の痕跡から卓越した風は上流からであり、河畔林による影響は少ないと考えた。なお、定量的な評価を行う場合は別途、現地観測あるいは実験等により捕捉率を考慮する必要がある。

(3) アイスジャム発生時の晶氷の増加

本計算モデルを用いてアイスジャム発生時の晶氷の発生量を推定した。計算モデルの気象データ入力値は、アメダス標茶観測所の値を用いた。気温・風速は10分ごとの値とし、日照時間は1時間ごとの値を10分ごとの値とした。降雪深は、1時間ごとの値を10分単位で等分した値と、式(2)から求められた10分累計吹雪量 Q を基に計算した10分累計吹雪高 H_s を加えた値とした。水理データは12月3日、11日、22日に下オソベツ観測所で行なった定期流量観測値を用いた。この値を平均して断面平均流速 $0.573[\text{m/s}]$ 、断面平均水深 $0.303[\text{m}]$ を入力値とした。対象地点の緯度としてアメダス標茶観測所の緯度(北緯 43.30°)を与えた。なお、アンカーアイスは水温が 0°C 以下の過冷却状態において最低気温約 -10°C 以下の時に発生する¹³⁾とされており、今回は低気圧の通過に伴い、気温がアイスジャム発生前では、 0°C 付近であったことからアンカーアイスは発生していないと仮定して無視した。

平成26年12月14日0:10からの晶氷発生計算モデルによる発生晶氷厚の計算結果を図-4に示す。図中に吹雪量を考慮した場合としない場合の発生晶氷厚と降雪深の計算結果ならびに水位上昇期間を示した。水位上昇期間は平成26年12月の平均水位(16.15m)より水位が高い期間とした。下オソベツ観測所の水位は12月17日7:00から上昇し始め、12月18日7:50にピークを迎えている。

この24時間の晶氷厚の積算値と水位上昇する前の24時間の値と比較した。吹雪量を考慮しない場合、水位上昇前の晶氷厚の積算値は 3.5cm であり、水位上昇時の値も 3.2cm でその差はほとんどない。一方で吹雪量を考慮した場合、水位上昇前の積算値は 3.6cm であり、水位上昇時の値は 14.8cm で差が生じた。アイスジャム発生期間に関して吹雪量を考慮した方が、晶氷厚は大きくなる結果を得た。

次に、水位上昇と発生晶氷厚の関係を図-5に示す。吹雪量を考慮しない場合、水位上昇の時期に遅れて発生晶氷量が増加していた。一方で吹雪量を考慮したことで水位上昇と発生晶氷厚が増加する時期がおおむね一致した。現地観測および数値計算の検討結果から、陸域に積もった雪の一部が吹雪によって多量に河川へ供給され、晶氷が増加しアイスジャムが発生したと推察された。

4. アイスジャムの発生危険箇所の抽出

(1) 河水のフルード数

既往研究⁹⁾では、アイスジャム発生条件について、アイスジャム発生時の水理量を用いた水理実験を行い、氷板のフルード数を用いてアイスジャム発生の可能性を評価している。氷板のフルード数は分母における代表長として河水厚を取った値であり、小さくなると氷板の速度が減衰して滞留しやすくなることを意味する。晶氷が多量に発生した場合、氷板と同様に塊となって流下するこ

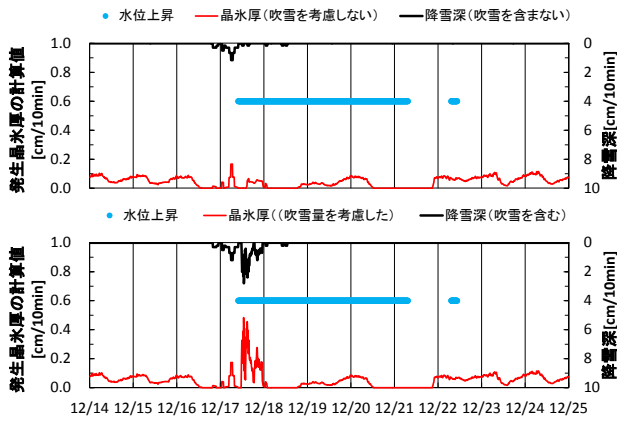


図-4 晶氷発生計算モデルによる計算結果

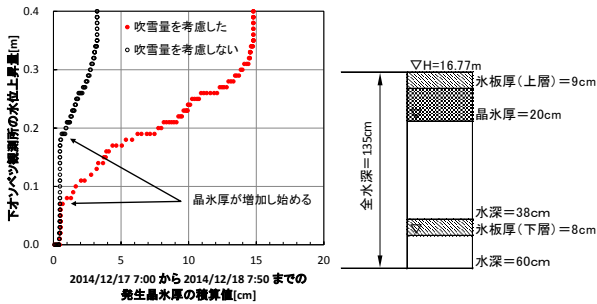


図-5 発生晶氷厚の積算値と水位 図-6 河水の断面図

とから、本研究では氷板のフルード数を試験的に適用し、河水のフルード数と呼称する。検討区間は急激な水位上昇が発生した下オソベツ観測所を含むKP1.0からKP5.4とした。河水のフルード数を以下に示す。

$$Fr_i = \frac{u_i}{\sqrt{\Delta \epsilon g h_f}} \quad (4)$$

$$\Delta \epsilon = \frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w} \quad (5)$$

Fr_i [無次元]: 河水のフルード数, u_i [m/s]: アイスジャム発生直前の河水の速度, g : 重力加速度[m/s²], h_f [m]: 河氷厚, ρ_w [kg/m³]: 水の密度1000 kg/m³, ρ_i [kg/m³]: 氷の密度917 kg/m³である。

河氷のフルード数 Fr_i を求めるには、河氷の厚さ h_i とアイスジャム発生直前の河水の速度 u_i を求める必要がある。以下に具体的な計算条件を明記する。

a) 河氷厚 h_f

下オソベツ観測所周辺における12月19日12時の河氷厚の観測値を図-6に示す。図より河氷厚 h_f は上層が29cm、下層が8cmである。なお、上層の河氷厚 h_f は氷板と晶氷を足した値であり、上層と下層を合わせると河氷厚 $h_f = 0.37$ m, 河氷断面積 $A_i = 8.88$ m²である。

縦断的な河氷厚 h_f は、 $h_f = A_i / B_w$ (水面幅)として求めた。 A_i は一定値を与え、 B_w は後述するiRICソフトウェアで不等流計算を行い算出した。図-7に水面幅 B_w および河氷厚 h_f の縦断変化を示す。

b) アイスジャム発生直前の河水の速度 u_i

アイスジャム発生直前の河氷は、流水と共に流下して

おり、河川の流速に等しいと仮定した。流速の計算はiRICソフトウェア1次元計算モデルCERI 1D¹⁴⁾を用いた。オソベツ川の横断測量(1997年~2000年, 世界測地変換)はKP間(200mピッチ)で行われており、水面幅(20m~30m)と比べると約10倍である。解析するうえで縦断的な横断測線間隔を水面幅程度で与えることが望ましいと考え、測量データを20mピッチで内挿した。次に境界条件である流入量、下流端水位および粗度係数の設定方法を記す。下オソベツ観測所の時刻流量月表より12月の観測流量は12:00のみ記録されている。はじめに12月16日12:00の流入量(4.21m³/s)と下流端水位は釧路川合流点の16日の毎時平均水位12.09mを境界条件として与えて再現計算を行った。下オソベツ観測所12:00の水位(16.03m)と計算水位(16.00m)がほぼ等しくなる粗度係数(0.03)を得た。アイスジャム発生直前の河水の速度 u_i を推定するため、発生1時間前の12月17日6:00の下オソベツ観測水位(16.05m)と等しくなるように流入量を5.21m³/sに設定し、下流端水位は釧路川合流点の17日の毎時平均水位12.11mを与えて計算した。結果を図-8に示す。

c) 川幅縮小比 $\hat{\lambda}$

既往研究¹⁵⁾では、河道狭窄部がアイスジャム発生現象に与える影響について、川幅縮小比 $\hat{\lambda}$ で評価している。図-9に川幅の模式図を示し、川幅縮小比 $\hat{\lambda}$ は以下となる。

$$\hat{\lambda} = \frac{\lambda_1 \cdot B_2 + \lambda_0(B_1 - B_2)}{B_1} = \frac{B_2}{B_1} \quad (6)$$

λ [無次元]: 河水の速度の減衰割合, $\lambda_0 = 0$, $\lambda_1 = 1$, B_1 : 上流の川幅, B_2 : 下流の川幅を表す。なお、川幅縮小比 $\hat{\lambda}$ の影響を受けるのは上流の断面(1-1)である。結果を図-10に示す。

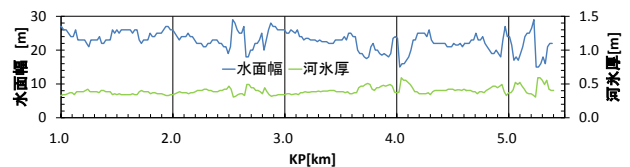


図-7 河氷厚 h_f と水面幅 B_w の縦断変化

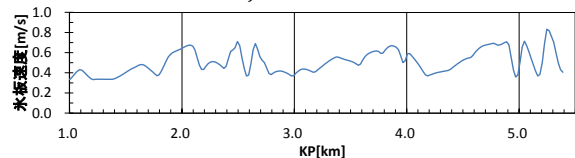


図-8 アイスジャム発生直前の河水の速度 u_i の縦断変化

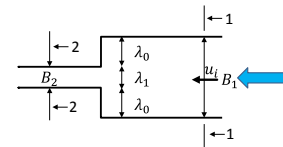


図-9 川幅縮小比 $\hat{\lambda}$ の考え方

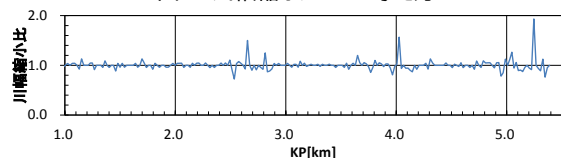


図-10 川幅縮小比 $\hat{\lambda}$ の縦断変化

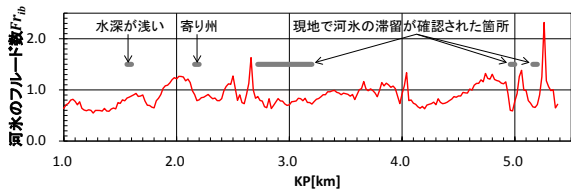


図-11 「川幅の影響を考慮した河氷のフルード数」 Fr_{ib} の縦断変化 (Fr_{ib} が小さいほどアイスジャム発生の危険性が高くなる)

(2) アイスジャムの発生危険箇所

本研究では実河川におけるアイスジャム発生危険箇所を抽出する値として以下の「川幅の影響を考慮した河氷のフルード数」 Fr_{ib} [無次元]を提案する。

$$Fr_{ib} = Fr_i \hat{\lambda} \quad (7)$$

Fr_{ib} の縦断的な変化を図-11に示す。図-11より、KP1.0～KP1.8, KP2.2～KP2.4, KP2.6, KP2.8～KP3.2, KP4.1～KP4.5, KP5.0, KP5.2で Fr_{ib} の小さい箇所が見られた。このうち、KP2.7～KP3.2, KP5.0, KP5.2は現地で河氷の滞留が確認された箇所に相当する。2015年9月25日に横断測量を行ったところ、水深が浅い所(KP1.6)や寄り州が発達して一部陸化している箇所(KP2.2)が確認された。図-9は河道を模式的に簡素化したものであるが、冬期間の渇水時には一部で急縮箇所がみられ、これも河氷の流下の阻害要因と考えられた。また、河岸に樹木が密に繁茂し、樹幹が河道内に倒れ込む状況も見られた。このように河積が狭まっている所に、樹木が倒れこみ、河氷の流下をいっそう阻害していた可能性も伺われた。

5. まとめ

2014年12月18日に北海道東部に位置するオソベツ川で発生したアイスジャムにおいて、気象・水理データおよび現地調査に基づきその発生要因について整理・分析した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 記録的な豪雪と強風を伴う低気圧によって発生した吹雪により、河道に運ばれた雪を晶氷発生計算モデルに取り込むことで、発生晶氷厚の増加と水位上昇の関係を明らかにした。このことは、雪由来の晶氷が多量に発生することで、流水の流下が妨げられ、アイスジャム発生のリスクが高まることを意味している。
- 2) 「川幅の影響を考慮した河氷のフルード数」 Fr_{ib} を用いてアイスジャム発生危険箇所の抽出を試みた結果、河氷が滞留、堆積した区間で Fr_{ib} が減少していることが示され、実際の河川においても Fr_{ib} を指標としてアイスジャム発生危険箇所を予測できることが示唆された。

この現象は河川管理や取水施設等に影響を及ぼすものであり、近年の異常気象等によって引き起こされるリスクの一つと考えられる。得られた知見は、アイスジャムの発生防止対策や被害軽減対策に適用可能な技術であり、さらに事象を集めて研究を進めていく必要がある。

謝辞：寒地土木研究所雪氷チーム松澤勝博士には吹雪の発生現象について助言を頂いた。㈱北開水工コンサルタント釧路支店ならびに寒地土木研究所道東支所鶴澤利樹氏には現地調査に協力して頂いた。査読者の方には拙稿の改良に有益な助言を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 入交泰文, 吉川泰弘, 黒田保孝: 天塩川水系名寄川真敷別頭首工における晶氷の発生について, 第58回(平成26年度)北海道開発技術研究発表会, 2015.
- 2) 伊藤丹, 吉川泰弘, 黒田保孝, 村瀬竜也: 2013年4月にAダムで発生したアイスジャムによる取水障害, 土木学会北海道支部論文報告集, 第70号, 2013.
- 3) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 渚滑川のアイスジャムに関する現地観測, 寒地土木研究所月報, No701, pp. 2-9, 2011.
- 4) Shahramanjan M. A.: Ice Jams forecast and technologies of their destruction on the rivers of the Russian Federation, *International Association of Hydraulic Engineering and Research, International Symposium on Ice*, 17th, pp. XXV II - XL II, 2004.
- 5) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 河川解氷時の河氷の破壊と流下に関する研究, 水工学論文集, 第55巻, pp. S_1075-S_1080, 2011.
- 6) 吉川泰弘, 黒田保孝, 橋場雅弘, 入交泰文: 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, 水工学論文集, Vol. 59, pp. I_1327-1332, 2015.
- 7) 吉川泰弘, 黒田保孝, 伊藤丹, 渡邊康玄: 結氷河川における河道形状を考慮したアイスジャム発生条件に関する研究, 河川技術論文集第20巻, pp. 241-246, 2014.
- 8) 松澤勝, 金子学, 伊東靖彦, 上田真代, 武知洋太: 風速と吹雪量の経験式の適用に関する一考察, 第26回寒地技術シンポジウム, pp. 45-48, 2010.
- 9) 竹内政夫: 降雪時の高い地吹雪の発生臨界風速, 昭和61年度日本雪氷学会全国大会予稿集, pp. 252, 1986.
- 10) 武知洋太, 中村浩, 松澤勝, 川中敏朗: 地吹雪発生時の気象条件に関する一考察, 雪氷研究大会講演要旨集 2010(0), 216-216, 2010.
- 11) 近藤純正ホームページ, URL: <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke01.html>(参照日2015年7月2日)
- 12) 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, 第51巻, pp. 355-360, 2007.
- 13) 清原正道: アンカーアイスの形態と発生条件について_第11回寒地技術シンポジウム, pp. 159-163, 1995.
- 14) 河川シミュレーションソフトiRIC, URL: <http://iric.org/ja/>(参照日2015年5月26日)
- 15) 北島笙子, 吉川泰弘, 黒田保孝: 河道狭窄部がアイスジャム発生条件に与える影響, 土木学会北海道支部論文報告集, 第71号, 2014.

(2015. 9. 30受付)