

氷板厚計算式に基づく 実用的な解氷時期推定手法の開発

吉川 泰弘¹・横山 洋²・平田 智道²・阿部 孝章²

¹正会員 北見工業大学准教授 工学部 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)
E-mail: yoshi@mail.kitami-it.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)
E-mail: yokoyama-h22ab@ceri.go.jp

本研究の目的は、アイスジャム発生前に現れる解氷時期の推定手法の開発である。解氷時期に氷板厚が減少するため、氷板厚の計算式の精度向上を試みた。積雪・融雪・降雨を考慮した氷板厚計算式は、計算値の精度が高いことを示し、支配的なパラメータは計算上の最小水温であることが分かった。解氷時期を推定する指標として、氷板厚の変動加速度 P_B を提案した。6つの入力値を用いる実用的な解氷時期推定手法を開発した。本手法は、アイスジャム発生付近で P_B のピークが現れており、安全側で解氷時期を推定した。本手法においては、全面結氷時の氷板厚も重要なパラメータであることが分かった。

Key Words: break-up period, estimation method, ice sheet thickness, acceleration, river

1. はじめに

冬期の寒冷地河川の河道内では、気温低下に伴い河氷が形成され、気温上昇に伴い河氷は解氷する。河氷の形成時期と解氷時期は、河氷が流下するため、河道内で作業する際には危険を伴う。特に形成時期に比べて河氷の量が多い解氷時期では、流下した河氷が河道で閉塞すると川の流れがせき止められてアイスジャムによる災害が発生¹⁾する。寒冷地河川の河川管理・河川工事を行う上で、いつアイスジャムが発生するかを事前に予測して対応することが望ましい。より安全側で考えると、アイスジャムは解氷の後に発生する現象であるため、アイスジャム発生前の解氷時期を推定する必要がある。解氷時期は氷板厚の減少期間と関連することが指摘²⁾されている。現場³⁾では、解氷時期を推定する指標として、氷板厚の計算値が重要な指標となっている。一方で、現在の氷板厚の計算手法⁴⁾では、積雪・融雪・降雨を考慮しておらず実現を再現していない課題がある。

本研究は、積雪・融雪・降雨を考慮した氷板厚計算式を用いて氷板厚の再現性の向上を試みた。さらに、迅速に解氷時期を推定するために、本計算式の支配パラメータを明らかにして入力データの見直しを行い、実用的な解氷時期推定手法を開発して妥当性の検討を行った。

2. 積雪・融雪・降雨を考慮した氷板厚計算式

積雪・融雪・降雨を考慮した氷板厚計算式を用いて、2020年3月に網走川津別観測所で観測されたアイスジャム現象を対象に氷板厚の再現を試みた。

(1) 氷板厚計算式

氷板厚計算式⁵⁾は、氷板厚の熱収支を、河氷表面から大気への熱フラックス、積雪深の熱収支、流水から河氷底面への熱フラックスを用いて表現し、この式を差分して導いた式(1)を用いた。晶氷は、氷板下に滞留する晶氷の厚さの観測値や計算値が得られないため無視した。

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

$$T_w = \frac{T_a}{1-\gamma} + \frac{\gamma T'_w}{1+\gamma} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{h_w \rho_w C_p}{(1-N) h_{wa} \Delta t} \quad (3)$$

$$\alpha = \alpha' \times \alpha'' \quad (4)$$

$$\alpha' = 1 - \frac{\rho_s L_s \frac{dh_s}{dt}}{h_{sa} (T_s - T_a)} \quad (5)$$

$$\alpha'' = \frac{\frac{h'_i}{k_i}}{\frac{1}{h_{sa}} + \frac{h'_s}{k_s} + \frac{h'_i}{k_i}} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{U_w}{h_w^3} \quad (7)$$

$$\bar{\alpha} = 0.906 - 2.770 \cdot I_b \cdot B/h_w \quad (8)$$

h_i [m]: 氷板厚, h'_i [m]: Δt 前の氷板厚, α [無次元]: 形成に関する係数, β [無次元]: 融解に関する係数, T_a [°C]: 気温, T_w [°C]: 水温, h_w [m]: 水深, Δt [s]: 計算時間間隔で 86400 秒である. T'_w [°C]: Δt 前の水温, ρ_w [kg/m³]: 水の密度であり 1000 を与えた. C_p [J/kg·°C]: 水の比熱であり 4200 を与えた. N [無次元]: 横断結氷比で, 川幅に対する結氷幅の割合であり $0 \leq N \leq 1$ である. N は, 氷板厚の計算値 h_i が全面結氷時の氷板厚 h_{im} 以上となる場合に, 全面結氷と仮定して $N = 1$ となる. 横断結氷比は $N = h_i/h_{im}$ とする. h_{wa} [W/m²°C]: 水面の熱交換係数であり 20 を与えた. ρ_s [kg/m³]: 雪の密度であり 100 を与えた. L_s [J/kg]: 雪の潜熱であり 3.336×10^5 を与えた. h_s [m]: 積雪深, h'_s [m]: Δt 前の積雪深, h_{sa} [W/m²°C]: 熱交換係数であり 25 を与えた. T_s [°C]: 雪の温度であり 0 を与えた. k_i [W/m°°C]: 氷の熱伝導率であり 2.31 を与えた. k_s [W/m°°C]: 雪の熱伝導率, U_w [m/s]: 流速, I_b [無次元]: 河床勾配, B [m]: 川幅である.

本検討の対象箇所は, 網走川の津別観測所である. T_a は観測値を与えた. 2019年12月10日から2020年3月2日の計11回の観測データの平均値より, I_b は1/851, B は20.6を与えた. 後述する流量と粗度係数も, 津別観測所の観測値に基づき与えた.

融雪量は, 積雪深の観測値を用いて次式から求めた.

$$SM = -\frac{dh_s}{dt} \times 1000 \times \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (9)$$

SM [mm/h]: 1時間毎の融雪量. 気温が0°C以上の場合に融雪するものとし, SM が負の値の場合はゼロとした.

有効融雪量と有効雨量は, 次式から求めた.

$$SM_e = SM \cdot f \quad (10)$$

$$r_e = r \cdot f \quad (11)$$

$$r'_e = SM_e + r_e \quad (12)$$

SM_e [mm/h]: 有効融雪量, f [無次元]: 流出係数. 流出係数は山地河川の値⁹⁾である0.75を与えた. r_e [mm/h]: 有効雨量, r [mm/h]: 雨量であり観測値を与えた. r'_e [mm/h]: 有効融雪量と有効雨量の和である.

流出高は, 次式の準線形貯留型モデル⁷⁾から求めた.

$$\frac{ds}{dt} = r'_e - q \quad (13)$$

$$S = k'q \quad (14)$$

$$k' = \frac{t_c}{2} \quad (15)$$

q [mm/h]: 流出高, S [mm]: タンクの貯留量, k' [h]: 貯留係数, t_c [h]: 洪水到達時間であり, 次式に示す角屋・福島の式⁹⁾を用いた.

$$t_c = CA^{0.22} r_e'^{-0.35} / 60 \quad (16)$$

A [km²]: 流域面積であり1380を与え, C [無次元]: 土地

利用形態に準ずる定数⁹⁾であり, 自然丘陵山地として290を与えた. t_c の単位はminからhourにするために単位変換を行った. 本検討の t_c は, 対象河川で過去にアイスジャムが発生した時期の r'_e を式(16)に与えて洪水到達時間を算出し, それらの値を平均した43.45を与えた.

式(14)を式(13)に代入し既往研究⁹⁾を参考にして, 1次のテイラー展開で表すと次式となる.

$$q_2 = \frac{\frac{\Delta t}{2}(r_{e1}' + r_{e2}') - q_1(\frac{\Delta t}{2} - k')}{k' + \frac{\Delta t}{2}} \quad (17)$$

q_2 [mm/h]: 流出高, q_1 [mm/h]: 1時間前の流出高, r_{e2}' [mm/h]: 有効雨量と有効融雪量の和, r_{e1}' [mm/h]: 1時間前の有効雨量と有効融雪量の和, Δt [h]: 時間であり1を与えた. この式(17)に, 式(12)と式(15)で得られた値をそれぞれ代入し流出高を求めた.

融雪と降雨による流量 Q [m³/s]は次式により求めた.

$$Q = \frac{A \times q_2}{3.6} \quad (18)$$

水深は, マニングの平均流速公式を用いて式(18)の流量から次式により求めた. 求める水深は等流水深となる.

$$h_w = \left(\frac{Qn}{\sqrt{I_b B}} \right)^{\frac{3}{5}} + \bar{h}_w \quad (19)$$

$$U_w = \frac{Q}{h_w B} \quad (20)$$

n [s/m^{1/3}]: 粗度係数で0.047を与えた. \bar{h}_w [m]: 初期水深で平均流量4.26m³/sの場合の等流水深を与えた.

積雪の影響は, 式(5)の h_s , 式(6)の h'_s に観測値を代入することで考慮した. h_s は氷板形成に影響を与える. 一方で, 陸上で観測された積雪と河氷上の積雪は, 風の影響により異なることが推測される. 本検討では, 入力値である河氷上の積雪は, 観測された陸上の積雪に積雪減少割合0.1を乗じて与えた. 積雪減少割合の設定方法については今後の課題である.

融雪・降雨の影響は, 式(1), 式(3), 式(7)の h_w で考慮した. 再現する実現象としては, 気温上昇により融雪が促され, 融雪水および降雨が河川へと流入して, 水深を上昇させる現象となる.

式(8)は, 2005年12月から2006年3月の北海道12水系49観測所の249観測データを用いて求めた式⁵⁾である. 後述するCase1の積雪・融雪・降雨の影響を無視する場合は, h_w を一定値として式(8)より一定値の α を求めた. この場合の h_w は等流水深で与えた.

全面結氷時の氷板厚 h_{im} は, 水温および氷板厚の計算値に影響を与える重要なパラメーターである. 既往研究¹⁰⁾により, 河氷厚と横断方向の結氷幅は相関があることが推察されている. 本対象箇所では, 全面結氷時の氷板厚 h_{im} の観測値が無いので, 以下の手法で算出した. 現地観測データより, 横断面の平均氷板厚の最大値0.326mの時に結氷幅12.4mであった. 川幅は20.4mであり, こ

の値が全面結氷時の結氷幅となることから、 $0.326:12.4 = h_{im}:20.4$ として、 $h_{im} \cong 0.536$ を与えた。

雪の熱伝導率 k_s は、氷板厚形成に影響を与える。値が大きいと雪の影響が小さくなり氷板形成が進む。本検討では、既往研究¹⁰⁾による北海道の新雪、こしまり雪、しまり雪を対象とした k_s と ρ_s の関係式： $k_s = 4184 \times 10^{-3.73+2.16 \times 0.001 \times \rho_s}$ を用いて k_s を算出した。

本計算式では定式化していない実現象がある。既往研究¹²⁾の実験では、水温がマイナスとなる過冷却により流水中に晶氷が発生し、その後、水温は上昇することが示されている。この実験の過冷却時の最小水温は、 -0.028°C から -0.052°C の範囲である。また既往研究¹⁰⁾の現地観測では、上流から流下する晶氷が下流の氷板下に滞留して、晶氷が氷化することにより氷板厚が増加する可能性が示されている。この上流からの晶氷の発生要因は、上記の過冷却によるものと水面への降雪によるものがある。本計算式では、上流からの晶氷が氷板下に滞留する「晶氷の氷化による氷板厚の増加」の現象について定式化していない。一方で、式(2)の水温計算式では、気温がマイナスとなると水温もマイナスとなる。計算上の最小水温をマイナスに設定することで、式(1)より水温がマイナスの場合は、氷板厚は厚くなる。計算上の最小水温を小さく設定するほど氷板厚は厚くなる。本計算式は「晶氷の氷化による氷板厚の増加」の現象を定式化していないが、計算上の最小水温をマイナスに設定することで氷板厚を厚くさせて、間接的にこの現象を考慮できると仮定した。計算上の最適な最小水温は、 0.000°C から -0.100°C の範囲で計算を行い誤差が小さい値を採用した。

(2) 本計算式の計算値と観測値の比較

本計算式の入力値は、気温、降水量、積雪深、流量、川幅、河床勾配、マンシングの粗度係数、流域面積、洪水到達時間、流出係数、全面結氷時の氷板厚、計算上の最小水温であり、一箇所の時系列の氷板厚を出力する。気温、降水量、積雪深は時系列データである。2019年度の12月1日から3月31日までの期間において、網走川の津別観測所の氷板厚の計算値と観測値を比較した。 α 、積雪・融解・降雨、最小水温において、表-1の計算条件で計算を実施した。Case1の一定値は、水深 0.469 m 、 $\alpha = 0.763$ 、 $\beta = 0.729$ である。

氷板厚の計算値と観測値を図-1a)に示す。氷板厚の計算値と観測値の二乗平均平方根誤差は、Case1は 0.39 m 、Case2は 0.38 m 、Case3は 0.36 m 、Case4は 0.21 m であった。 α が一定値の Case1、 α を変動させた Case2、さらに積雪・融解・降雨を考慮した Case3 よりも、計算上の最小水温の最適値を与えた Case4 の方が、氷板厚の計算値の精度は高い。図-1a)の約75日前後で各 Case の氷板厚の変動が異なる。気温は約73.4から74.9日までプラス、約

表-1 各 Case の計算条件

各Case	α	積雪・融雪・降雨	最小水温
Case1	一定値 式(8)	積雪深：ゼロ・降水量：ゼロ・水深：一定値	0°C
Case2	変動 式(4)	積雪深：ゼロ・降水量：ゼロ・水深：一定値	0°C
Case3	変動 式(4)	積雪深：観測値・降水量：観測値・水深：変動	0°C
Case4	変動 式(4)	積雪深：観測値・降水量：観測値・水深：変動	-0.014°C 最適値

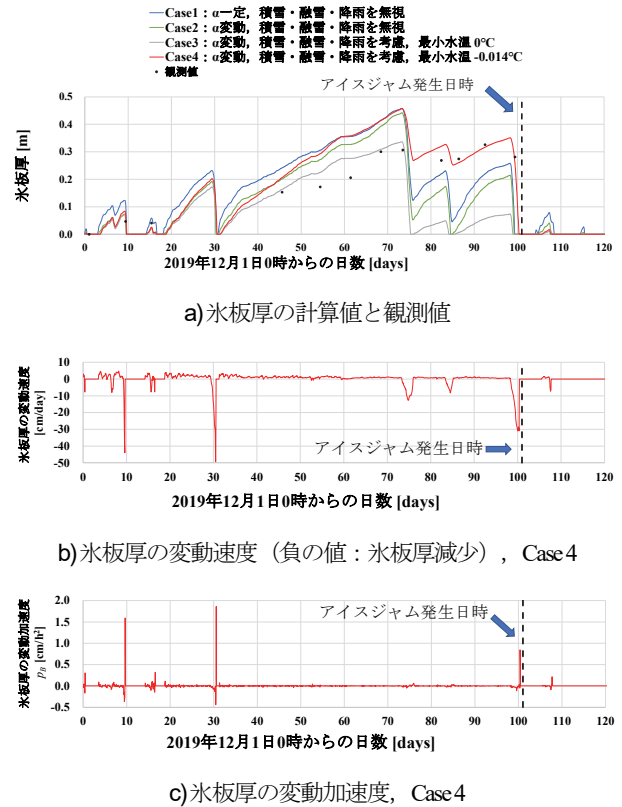


図-1 氷板厚に関する計算値 (2019年度、網走川、津別)

74.3日でピーク値 7.1°C である。この期間で気温が上昇し、計算上の水温も上昇し氷板厚が減少した。Case3の約75.3日で氷板厚はゼロである。各 Case で氷板厚の変動が異なる要因として氷板厚及び積雪深の関数である α の違いが挙げられる。 α は大きいほど氷板厚が厚くなる。各 Case の30~75日と75~100日の α の平均値を氷板厚の減少幅が大きい順にみると、Case3は 0.433 から 0.069 で 0.364 の減少、Case2は 0.698 から 0.550 で 0.148 の減少、Case1は 0.763 で一定値、Case4は 0.489 から 0.355 で 0.134 の減少である。Case3は積雪の影響により α の減少幅が大きい。Case4は α の影響の他に最小水温の設定により氷板厚は厚くなる。 α の変動により氷板厚の変動が異なる。各 Case において約74.8日後の氷板厚の減少幅が異なる要因として水温の影響が挙げられる。約74.8日の計算上の水温のピーク値を氷板厚の減少幅が大きい順にみると、Case3は 1.3°C 、Case2は 1.1°C 、Case1は 0.9°C 、Case4は 0.5°C である。水温のピーク値が高いほど氷板厚の減少幅は大きい。なお水温は、 h_i と h_{im} の影響を受ける。

積雪・融雪・降雨および計算上の最小水温を考慮した

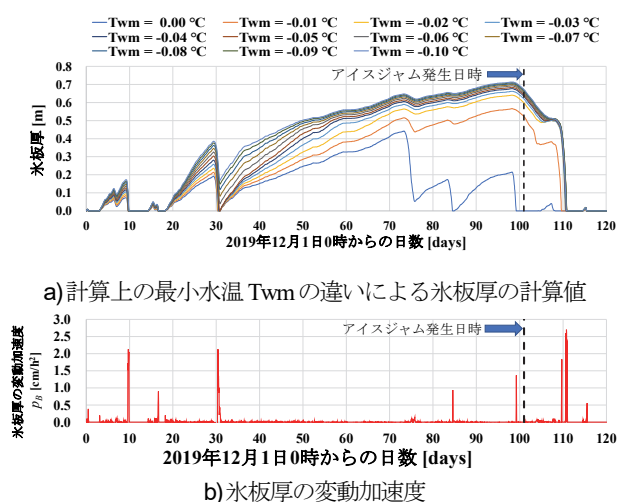


図-2 実用的な解氷時期推定手法による氷板厚と氷板の変動加速度 (2019年度, 網走川, 津別)

Case4 について考察する。氷板厚の計算値の精度が向上するだけでなく、 α の設定について、従来では実測氷板厚を再現できるように α を検討して設定していたが、この検討は不要となる。 α は式(4),(5),(6)の形で定式化されており α の物理的な意味が明確となるため、氷板厚の変動要因の解釈が容易となる。一方で、高い精度で氷板厚を計算するためには、計算上の最小水温に最適値を与える必要がある。また、本検討により、計算上の最小水温は、積雪・融雪・降雨よりも氷板厚に大きな影響を与え、その範囲は0.00℃から-0.10℃の範囲であることが推察された。この点を利点として捉えると、最小水温を0.00℃から-0.10℃の範囲で全て計算することにより、年により異なる気象条件を包括する形で氷板厚を推定することが可能となる。

3. 実用的な解氷時期推定手法の開発

積雪・融雪・降雨を考慮した氷板厚計算式による検討を踏まえて、実用的な解氷時期推定手法の開発を試みた。ここでの実用的とは基礎データが少ない箇所でも推定ができるように入力値を減らすこととした。前述の検討では、式(1)を用いて氷板厚の推定を試みた。本検討では、式(1)の1階微分の氷板厚の変動速度と式(1)の2階微分の氷板厚の変動加速度を用いて解氷時期の推定を試みた。

(1) 実用的な解氷時期推定手法

解氷時期は氷板厚の減少期間と関連²⁾し、解氷時期はアイスジャム発生前に現れる。図-1b)に計算値の氷板厚の変動速度を示す。図-1b)の変動速度は、アイスジャム発生日時の前に負の値を示し、解氷時期を推定している可能性がある。さらに、氷板厚の変動加速度 P_B [cm/h²]

表-2 アイスジャム発生日時と計算入力値

河川名	水位観測所名	アメダス	発生推定日時 ^{1),13)}	河床勾配	水面幅(m)	流量(m ³ /s)
常呂川	忠志	北見	2018/3/9 午後	1/810	35	13.9
鶴川	鶴川	鶴川	2018/3/9 3:30	1/891	60	11.9
網走川	美幌	美幌	2018/3/9 午後	1/1,000	19	7.7
網走川	津別	津別	2020/3/11 9:03	1/232	20	6.6
オサラッペ川	鷹栖橋	旭川	2020/3/11 12:30	1/697	25	2.2

を図-1c)に示す。図より、変動速度よりも変動加速度の方が鋭いピーク値を示しており期間が明確である。また、図-1b)では、約74日と約84日で変動速度が負の値を示しているが、現地観測から氷板は存在しており、解氷時期と一致していない。一方で、図-1c)では、これらの日の値は抑えられている。氷板厚の変動加速度 P_B の方が、明確に解氷時期を推定できる可能性がある。本検討では P_B を解氷時期の指標とする。

実用的な解氷時期の推定手法として、積雪・融雪・降雨の影響は無視して入力値を減らし、計算上の最小水温を0.00℃から-0.10℃の範囲で0.01℃毎に計算して、氷板厚の変動加速度 P_B の最大を求める手法とした。最大値を採用することで安全側で解氷時期を推定できる。入力値は、気温 T_a 、流量 Q 、川幅 B 、河床勾配 I_b 、マンニングの粗度係数 n 、計算上の全面結氷時の氷板厚 h_{im} の6つとなる。気温は時系列データ、他のデータは固定値である。本手法は、表-1のCase2の計算条件を基に、計算上の最小水温をある範囲で計算する手法となる。

計算上の最小水温を変化させた場合の氷板厚の計算値を図-2a)に示し、氷板厚の変動加速度 P_B を図-2b)に示す。図-2a)より、計算上の最小水温の値によって氷板厚の変動が異なる。図-2b)より、アイスジャム発生前の期間以外にも P_B が高い値を示し、空振りの期間がある。一方で、アイスジャム発生前には P_B は高い値を示しており、見逃しは無く、 P_B で解氷時期を推定できた。

(2) 本手法における入力値の設定方法

実用的な本手法の入力値において、迅速な設定を目指して、新たな観測が不要となるように一般に入手可能な値として検討を行った。対象箇所は、2018年3月および2020年3月にアイスジャム^{1),13)}が発生し、その発生日時が判明している箇所とした。なお、解氷時期は判明していない。表-2に対象箇所のアイスジャム発生日時および計算入力値を示す。気温 T_a は近傍の気象庁観測所の毎時データを与えた。流量 Q は国土交通省水文水質データベースに基づいて過去10年間(2011年~2020年)の低水流量の平均値とした。川幅 B はGoogle Earthの衛星データから読み取った。河床勾配 I_b は国土交通省河川整備計画の計画勾配を使用し、マンニングの粗度係数 n は自然河川における標準的な値¹⁴⁾として0.03を与えた。

全面結氷時の氷板厚 h_{im} について記述する。観測データで得られる横断面の平均氷板厚の最大値とその時の結氷幅、川幅を用いて前述した方法で h_{im} を算出した。全

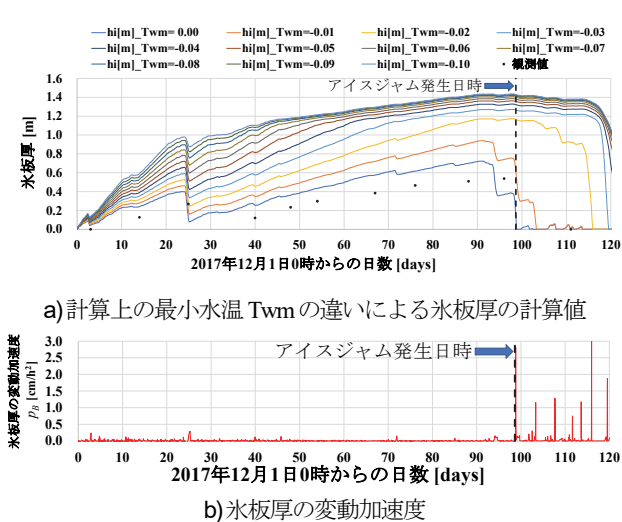


図-3 氷板厚と氷板の変動加速度（常呂川，忠志）

対象箇所での h_{im} の平均値は 0.48m であった。この値で計算した結果、 P_B のピーク値とアイスジャム発生日時に誤差が生じた。そのため、既往研究^{25,19)}を参考に、 h_{im} を 0.4m から 1.2m の範囲として 0.2m 間隔で与え、解氷時期を推定できる値を検討した。この結果、 $h_{im}=1.2m$ が最適値であった。 h_{im} において観測値よりも最適値が大きい要因の一つとして、実用的な本手法では積雪を無視していることが挙げられる。積雪を無視すると、断熱効果が無くなり同じ気温に対して氷板厚は厚くなる。一方で、 h_{im} が大きいと、計算上、全面結氷までに時間がかかり、水面からの日射により水温は高くなり融解されやすく氷板厚は薄くなる。本手法は、積雪を無視した影響を h_{im} で補っていると推察できる。

(3) 氷板厚の変動加速度 P_B とアイスジャム発生日時

解氷時期の推定には氷板厚の変動加速度 P_B のピーク値を用いた。計算上の最小水温が異なる各計算値の P_B を 1 時間毎に算出し、その最大値を計算値とした。アイスジャム発生日時の前に P_B が高くなるか検討を行った。

表-2 から常呂川と網走川のアイスジャム発生日の時刻は判明していない。観測所の水位上昇時刻を発生時刻と仮定し、常呂川は 3 月 9 日 15 時、網走川美幌は 3 月 9 日 13 時を発生日時と仮定した。2018 年 3 月のアイスジャムの検討結果を図-3,4,5 に示す。発生日時と解氷時期 (P_B のピーク値) を比較すると、常呂川では発生日時の約 5 時間後に P_B のピークが現れた。鶴川では発生日時の約 3 時間前に P_B のピークが現れた。網走川美幌では発生日時の約 5 時間前に P_B のピークが現れた。2020 年 3 月のアイスジャムの検討結果を図-6,7 に示す。網走川では発生日時の 1.6 日前に P_B のピークが現れた。オサラッペ川では発生日時の 1.6 日前に P_B のピークが現れた。

2018 年の常呂川のみアイスジャムの発生日時 (仮定日時) の約 5 時間後に P_B のピーク値が現れており、推定

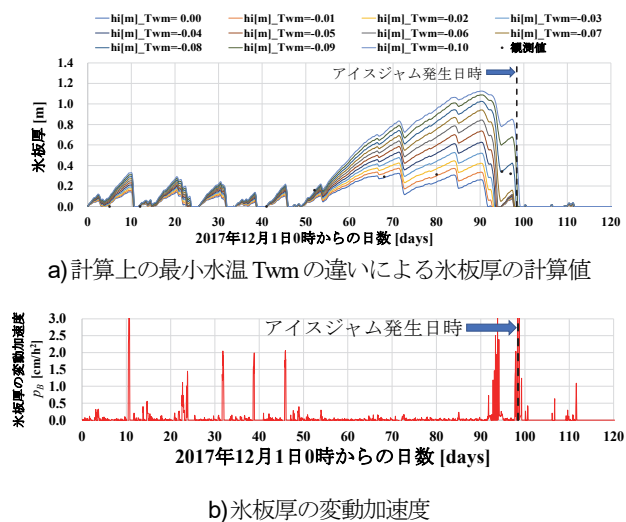


図-4 氷板厚と氷板の変動加速度（鶴川，鶴川）

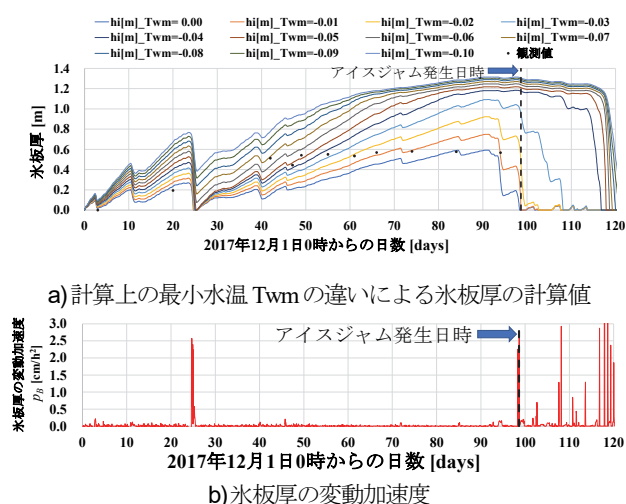


図-5 氷板厚と氷板の変動加速度（網走川，美幌）

ができていない。水位上昇から仮定した発生日時の誤差、 h_{im} による誤差が考えられる。一方で、気象協会の気温予報は 10 日先であるのに対して、本検討の誤差は約 5 時間である。他の箇所では、アイスジャム発生日時の前に P_B のピークが確実に現れており安全側で推定できた。

4. まとめ

積雪・融雪・降雨を考慮した氷板厚計算式により氷板厚の計算値の精度を向上させ、計算上の最小水温が支配パラメーターであることが分かった。解氷時期は氷板厚が減少する期間に現れるため、氷板厚の変動加速度 P_B を用いて解氷時期を推定した。6 つの入力値 (気温、流量、川幅、河床勾配、マニングの粗度係数、計算上の全面結氷時の氷板厚) を用いる実用的な解氷時期推定手法を開発し、空振りはあるが見逃しはゼロであり、推定値の妥当性を確認した。本手法においては全面結氷時の氷板厚 h_{im} も重要なパラメーターであることが分かった。

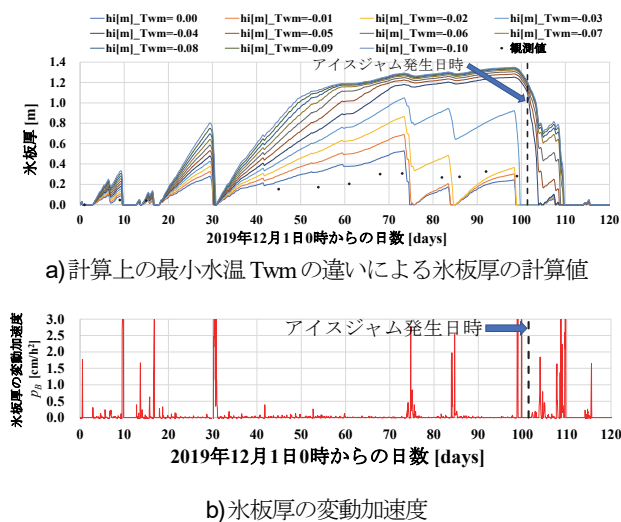


図-6 氷板厚と氷板の変動加速度（網走川，津別）

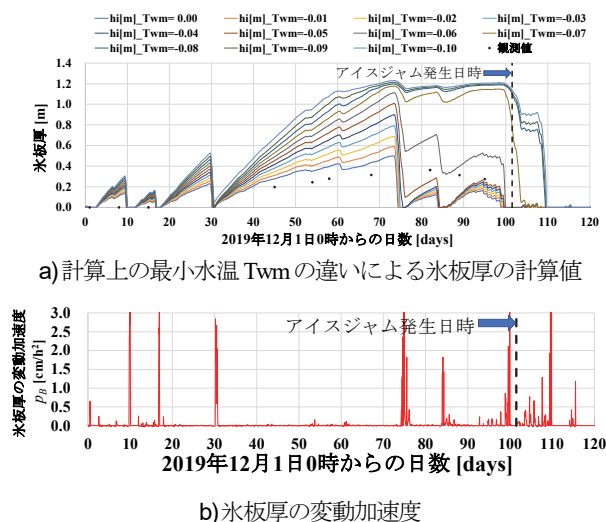


図-7 氷板厚と氷板の変動加速度（オサラッペ川，鷹栖橋）

参考文献

- 1) 横山洋, 吉川泰弘, 伊波友生, 前田俊一, 矢部浩規: 2018年3月北海道アイスジャム洪水による被害の現象解明と今後の課題, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.5, I_1039-I_1044, 2018.
- 2) 伊藤丹, 黒田保孝, 吉川泰弘, 結城憲明: 天塩川における結氷初期と解氷期に関する現地観測, 寒地土木研究所月報, No.723, pp.2-10, 2013.
- 3) 横山洋, 吉川泰弘, 大串弘哉: アイスジャム発生予測プログラムの現地河川への適用性評価と課題について, 国土交通省, 国土技術研究会, 2021.
- 4) 横山洋, 吉川泰弘, 伊波友生, 大串弘哉: アイスジャム発生過程を踏まえた発生箇所・時期の予測手法の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.77, No.2, pp.I_1363-I_1368, 2021.
- 5) 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.
- 6) 国土交通省河川砂防技術基準調査編: 国土交通省, 水管理・国土保全局, 第3章, 第2節, p.11, 平成26年4月.
- 7) 橋本健, 森田正: 土地利用変化を評価する洪水流出モデルに関する研究, 土木学会論文報告書, 第325号, pp.45-50, 1982.
- 8) 角屋睦, 福島晟: 中小河川の洪水到達時間, 京大防災

- 9) 岡本芳美: 流出計算マルチ・タンク・モデルに基づく分割法について (I), 水利科学, 55巻, 3号, p.p.1-21, 2011.
- 10) 吉川泰弘, 渡邊康玄: 渚滑川と湧別川における晶氷の氷化を考慮した氷厚変動計算の一考察, 寒地土木研究所月報, No.668, pp.20-30, 2009.
- 11) 和泉薫, 藤岡敏夫: 積雪の変態と熱伝導率の研究 I, 低温科学 物理篇, 第33輯, pp.91-102, 1976.
- 12) Shi Qiang Ye, Jay Doering, and Hung Tao Shen: A laboratory study of frazil evolution in a counter-rotating flume, Canadian Journal of Civil Engineering, 31, pp.899-914, 2004.
- 13) 横山洋, 吉川泰弘, 伊波友生, 矢部浩規: 2020年3月に発生したアイスジャムの現地調査および発生リスクの評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.76, No.2, pp.I_157-I_162, 2020.
- 14) 池田駿介: 詳述 水理学, 技報堂出版, pp.249, 1999.
- 15) 橋場雅弘, 吉川泰弘: 超音波測定機器を用いた河川結氷時の河氷底面形状の現地調査, 河川技術論文集, 第18巻, pp.149-154, 2012.

(Received May 31, 2022)
(Accepted September 1, 2022)

DEVELOPMENT OF PRACTICAL BREAK-UP PERIOD ESTIMATION METHOD BASED ON ICE SHEET THICKNESS EQUATION

Yasuhiro YOSHIKAWA, Hiroshi YOKOYAMA,
Tomomichi HIRATA and Takaaki ABE

The purpose of this study was to develop an estimation method for the break-up period that occurs before ice jams occur. Ice sheet thickness decreases during the break-up period. Ice sheet thickness calculation considering snow cover, snowmelt, rainfall are highly accurate in their calculated values. The calculated minimum water temperature was found to be an important value. The acceleration of ice sheet thickness variation P_B , was used to estimate the break-up period. This method uses six input values, estimated the break-up period on the safe side. The ice sheet thickness when fully frozen is an important parameter too.