

# 積雪・融雪・降雨を考慮した 氷板厚計算式に関する検討

## INVESTIGATION ON ICE SHEET THICKNESS CALCULATION CONSIDERING SNOW COVER, SNOWMELT, RAINFALL

吉川 泰弘<sup>1</sup>・横山 洋<sup>2</sup>

Yasuhiro YOSHIKAWA, Hiroshi YOKOYAMA

<sup>1</sup>正会員 博(工) 北見工業大学准教授 工学部 (〒090-8507 北海道北見市公園町165)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 土木研究所寒地土木研究所水環境保全チーム(〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

寒冷地河川の河川管理・河川工事を行う上で、アイスジャム発生前に現れる解氷の時期の推定が求められている。解氷時期を推定する指標として、氷板厚の計算値は重要な指標となっている。本研究の目的は氷板厚計算式の精度向上である。係数 $\alpha$ を氷板厚と積雪深に応じて変動させて、水深を融雪と降雨に応じて変動させる計算モデルを構築し検討を試みた。検討の結果、本計算式の計算値は、従来よりも精度が高いことを確認した。また、本検討により、河氷上の積雪深は陸上の積雪深よりも小さい可能性が推察された。過冷却または降雪によって河川内に晶氷が発生し、流下する晶氷が氷板下に滞留して、晶氷の氷化により氷板が厚くなる現象について、計算上の最小水温を適切に設定すれば表現が出来る可能性を示した。

**Key Words:** ice sheet thickness calculation, snow cover, snowmelt rainfall, river

### 1. はじめに

寒冷地河川では、冬期に河氷が形成されて春先になると河氷が解氷し下流へと流下する。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する。寒冷地河川の河川管理・河川工事を行う上で、アイスジャム発生前に現れる解氷の時期の推定が求められている。具体的に河川管理では、解氷時期において樋門等の河川管理施設の操作確保に努める必要がある。事例<sup>1)</sup>として、2018年3月に浦幌川でアイスジャムが発生し、樋門ゲート付近の河氷堆積により樋門操作に支障が生じた。一方で、排水ポンプ車による内水排除が実施出来たため、浸水等の被害は発生しなかった。事前に解氷時期を推定することで、樋門操作の確保、排水作業のための資機材確保、除雪等による進入路や作業場の確保を事前に検討・準備することが可能となる。解氷時期における河道内の河川工事においては、河道内を河氷が流下するため人的物的な危険を伴う。また、定期的実施されている流量観測業務についても解氷時期は危険を伴う。これらの理由により、現場では解氷時期の推定が求められている。

解氷時期を推定する指標<sup>2)</sup>として、氷板厚の計算値は

重要な指標となっている。現場で用いられている氷板厚の計算方法は、実測氷板厚を再現できるように係数の試行錯誤を行い、形成に関する係数である $\alpha$ を一定、融解に関する係数である水深を一定で計算することが多い<sup>3)</sup>。 $\alpha$ と水深を一定とする条件は、積雪や融雪・降雨による流量の増加現象を無視する条件となり、また、実際には氷の厚さが変わることによって $\alpha$ の値が変化したが、これを無視する条件となり、実現象を表現出来ていない。

本研究は、氷板厚の変動要因が明確になるように既往手法<sup>3)</sup>よりも実現象を表現出来る氷板厚計算式を提案し、氷板厚計算式の精度向上を目的としている。係数 $\alpha$ を氷板厚と積雪深に応じて変動させて、水深を融雪と降雨に応じて変動させる計算モデルを構築し検討を試みた。本計算式の精度向上により、解氷時期の推定精度の向上に寄与できる。本提案は、今後の気候変動を踏まえた寒冷地河川の河川管理の在り方を考える上での基礎資料となる。

### 2. 積雪・融雪・降雨を考慮した氷板厚計算式

#### (1) 氷板厚計算式

氷板厚計算式<sup>4)</sup>は次式となる。

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

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

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

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

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

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

$$\beta = \frac{U_w}{h_w^{\frac{2}{3}}} \quad (7)$$

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

$h_i$ [m] : 氷板厚,  $h'_i$ [m] :  $\Delta t$ 前の氷板厚,  $\alpha$ [無次元] : 形成に関する係数,  $\beta$ [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,  $\Delta t$ [s] : 計算時間間隔で, 86400秒である.  $T'_w$ [°C] :  $\Delta t$ 前の水温,  $\rho_w$ [kg/m<sup>3</sup>] : 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, 氷板厚の計算値が実際の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 $N = 1$ とし, 横断結氷比は $N = h_i/h_{im}$ とする.  $h_{wa}$ [W/m<sup>2</sup>°C] : 水面の熱交換係数であり, 20を与えた.  $\rho_s$ [kg/m<sup>3</sup>] : 雪の密度であり, 100を与えた.  $L_s$ [J/kg] : 雪の潜熱であり,  $3.336 \times 10^5$ を与えた.  $h_s$ [m] : 積雪深.  $h'_s$ [m] :  $\Delta t$ 前の積雪深,  $h_{sa}$ [W/m<sup>2</sup>°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] : 雪の熱伝導率である.  $U_w$ [m/s] : 流速,  $I_b$ [無次元] : 河床勾配,  $B$ [m] : 川幅である.

## (2) 氷板厚計算式の現場への適用と精度向上

本検討の対象箇所は, 網走川の津別観測所である.  $I_b$ は1/944,  $B$ は24を与えた.  $T_a$ は観測値を与えた.

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, 河氷上の

積雪は風の影響により陸上よりも少ないと仮定した. 河氷上の積雪は, 陸上の積雪に積雪減少割合を乗じた. 既往の現地観測<sup>9)</sup>では, 積雪深約30cmの地点に風速約5m/sの風が吹いたことにより, この地点の積雪深が0cmとなり積雪の減少が観測されている. 風速と積雪深の関係が示唆され, 平面二次元の風向風速を考慮した積雪深の増減を表現する必要がある. 本検討では, 簡便のため積雪深の9割が減少すると仮定して積雪減少割合を0.1とした. 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.  $h_w$ の計算方法は後述する. 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<sup>9)</sup>である. 本検討で積雪・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 $\alpha$ を求めた. この場合の $h_w$ は, 冬期の平均流量6m<sup>3</sup>/sから等流水深で与えた.

全面結氷時の氷板厚 $h_{im}$ は, 水温計算に影響を与えるため, 重要なパラメーターである. 既往研究<sup>6)</sup>により, 河氷厚が厚くなると横断方向に結氷が進み結氷幅が大きくなる. 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. 本検討の対象箇所では, 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0.46mの時に結氷幅8mであった. 水面幅は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,  $0.46 \cdot 8 = h_{im} \cdot 20.4$ として,  $h_{im} = 0.46 \times 20.4 \div 8 \cong 1.2$ として与えた. なお, 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.

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<sup>7)</sup>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 $\rho_s$ 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.

式(2)の水温計算式において, 気温がマイナスとなると水温もマイナスとなる. 水温がマイナスとなる過冷却により, 氷が形成されて氷板厚は厚くなる. 既往研究<sup>8)</sup>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明らかにされている. この既往研究<sup>8)</sup>の実験では, 最小水温は-0.028°Cから-0.052°Cの範囲である. 一方で, 既往研究<sup>9)</sup>により, 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の増加する可能性が示されている. 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. 本検討では, 氷板下に滞留する晶氷の氷化による氷板厚の増加について, 計算上の最小水温を小さく設定することで考慮できると仮定した. 計算上の最適な最小水温を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.

なお、本計算式は、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、晶氷の影響は無視している。一方で、本検討の最小水温の設定により、間接的に晶氷の氷化による氷板厚の増加を考慮することが出来る。

### (3) 積雪深から融雪量

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時間毎の融雪量である。気温が $0^\circ\text{C}$ 以上の場合に融雪するものとし、式(9)の $SM$ がマイナスの場合はゼロとした。

### (4) 融雪量と雨量から流量

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]：流出係数であり、流出係数は山地河川の値<sup>9)</sup>である0.75を与えた。 $r_e$ [mm/h]：有効雨量、 $r$ [mm/h]：雨量、 $r'_e$ [mm/h]：有効融雪量と有効雨量の和である。

次に準線形貯留型モデル<sup>10)</sup>を用いて流出高を求めた。計算式を次式に示す。

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

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

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

$q$ [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<sup>11)</sup>を用いた。

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

$A$ [ $\text{km}^2$ ]：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<sup>11)</sup>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、過去のアイスジャムによる氾濫が発生した時期の $r_e'$ 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<sup>12)</sup>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、 $\Delta t$ [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。

流量 $Q$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]は、次式により求めた。

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

### (5) 流量から水深

水深は、マンシ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。

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

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

$n$ [ $\text{s}/\text{m}^{1/3}$ ]：粗度係数で0.035を与えた。 $\bar{h}_w$ [m]：初期水深で冬期の平均流量 $6\text{m}^3/\text{s}$ の場合の等流水深を与えた。なお、実際の河川結氷時の粗度係数は、既往研究<sup>13)</sup>により河氷底面形状に応じて変動することが推定されている。本検討では、簡便のため2019年4月の流量観測結果に基づいて算出された粗度係数0.035を与えている。粗度係数の設定方法については今後検討の余地がある。

## 3. 氷板厚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であり、一箇所の時系列の氷板厚を出力する。2016、2017、2018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観測値と計算値を比較した。 $\alpha$ を一定とするか変動させるか、積雪・融解・降雨を考慮するかしないか、最小水温を $0^\circ\text{C}$ とするか最適値とするかについてCase1~4に区分して、表-1の計算条件で計算を実施した。なお、Case1において $\alpha$ の値は $\alpha = 0.751$ 、水深の値は0.455m、 $\beta = 0.93$ である。2016年度を図-1に示し、2017年度を図-2に示し、2018年度を図-3に示す。

表-1 各Caseの計算条件

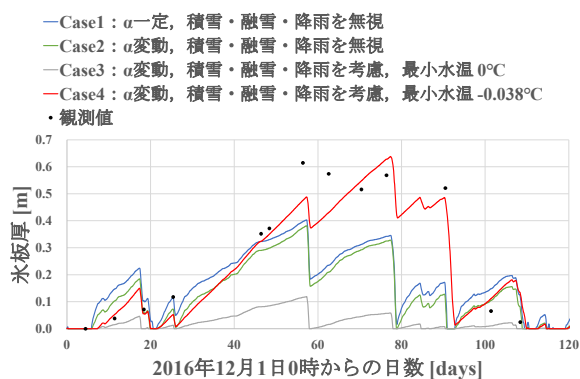
| 各Case | $\alpha$ | 積雪・融雪・降雨                    | 最小水温 |
|-------|----------|-----------------------------|------|
| Case1 | 一定値式(8)  | 積雪深：ゼロ<br>降水量：ゼロ<br>水深：一定値  | 0°C  |
| Case2 | 変動式(4)   | 積雪深：ゼロ<br>降水量：ゼロ<br>水深：一定値  | 0°C  |
| Case3 | 変動式(4)   | 積雪深：観測値<br>降水量：観測値<br>水深：変動 | 0°C  |
| Case4 | 変動式(4)   | 積雪深：観測値<br>降水量：観測値<br>水深：変動 | 最適値  |

2016年度の図-1a), 2017年度の図-2a), 2018年度の図-3a) において、氷板厚の観測値と、 $\alpha$ と水深が一定のCase1,  $\alpha$ と水深が変動するCase4の氷板厚の計算値を比較する。氷板厚の観測値と計算値の二乗平均平方根誤差は、2016年度でCase1は0.47m, Case4は0.18m, 2017年度でCase1は0.22m, Case4は0.15m, 2018年度でCase1は0.38m, Case4は0.09mであった。各年度において $\alpha$ と水深が一定のCase1よりも、 $\alpha$ と水深が変動するCase4の方が氷板厚の推定精度は高い。

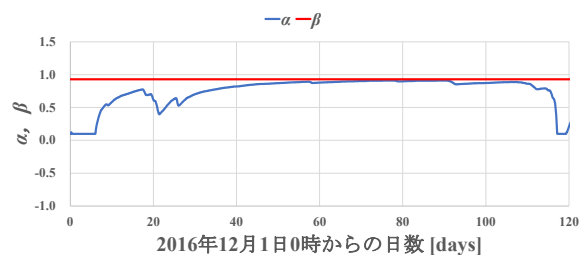
$\alpha$ の値の違いによる氷板厚の変化を検討する。水深が一定の条件において、 $\alpha = 0.751$ で一定値のCase1,  $\alpha$ が変動するCase2を比較する。Case2における各年度の $\alpha$ と $\beta$ の計算値を図-1b), 図-2b), 図-3b)に示す。なお、水深が一定値のため、 $\beta$ は一定値となる。Case1とCase2の氷板厚の平均絶対誤差を求めると、2016年度と2017年度は3cm, 2018年度は2cmの誤差であった。Case1とCase2では、 $\alpha$ の値の違いによる氷板厚の変化は数cm程度であった。

次に、積雪・融雪・降雨を考慮するCase3とCase4の各年度の $\alpha$ と $\beta$ の計算値を図-1c), 図-2c), 図-3c)に示す。Case3とCase4の $\alpha$ と $\beta$ の計算値は、Case1及びCase2よりも小さい。この理由として、積雪を影響したことにより断熱効果のため $\alpha$ は小さくなり、水深を考慮したことにより水深の上昇に伴い $\beta$ は小さくなったと考えられる。 $\alpha$ が小さいほど氷板の形成が進まないため、図-1a), 図-2a), 図-3a)より、Case3の氷板厚は、Case1及びCase2の氷板厚よりも小さい。本検討により、積雪・融雪・降雨を考慮したことにより、 $\alpha$ の値は小さくなり結果として氷板厚は小さい値となった。積雪減少割合0.1, 全面結氷時の氷板厚1.2m, 粗度係数 $0.035s/m^{1/3}$ の設定方法の課題はあるが、Case3の計算値は観測値を再現することが出来なかった。なお、Case4の氷板厚は、最小水温の最適値を与えているため、各Caseよりも観測値に近く精度が高い。

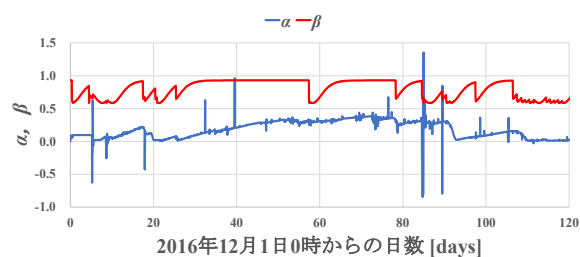
Case4について記述する。最小水温の最適値の算出は、



a) 氷板厚の観測値と計算値



b)  $\alpha$ と $\beta$ の計算値 (Case2)



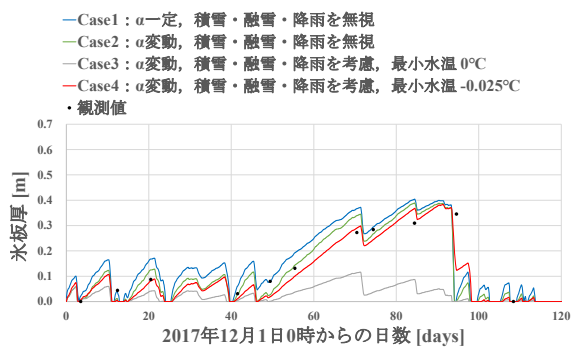
c)  $\alpha$ と $\beta$ の計算値 (Case3, Case4)



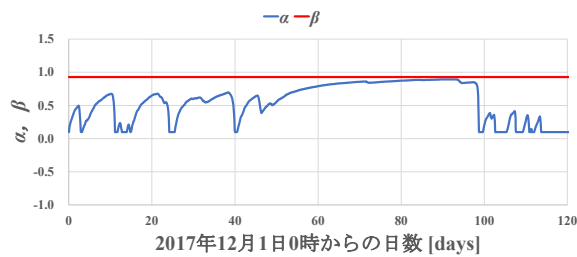
d) 積雪深の観測値 (計算入力値)

図-1 2016年度における観測値と計算値

式(2)の水温計算式の最小水温を $0.000^{\circ}\text{C}$ から $-0.100^{\circ}\text{C}$ の範囲で $0.001^{\circ}\text{C}$ 間隔で計算し、氷板厚の観測値と計算値の誤差が小さくなる場合の値を算出した。算出した最適な最小水温は、2016年度は $-0.038^{\circ}\text{C}$ , 2017年度は $-0.025^{\circ}\text{C}$ , 2018年度は $-0.005^{\circ}\text{C}$ であった。最適な最小水温が異なる要因の一つとして積雪が考えられる。各年度の積雪深の観測値を図-1d), 図-2d), 図-3d)に示す。図-1d), 図-



a) 氷板厚の観測値と計算値



b)  $\alpha$ と $\beta$ の計算値 (Case2)

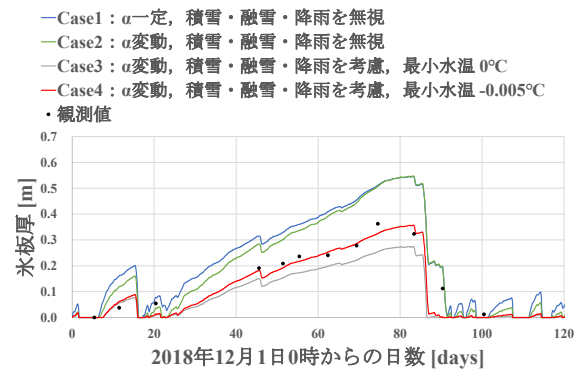


c)  $\alpha$ と $\beta$ の計算値 (Case3, Case4)

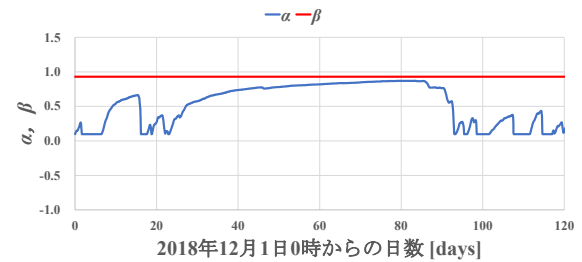


d) 積雪深の観測値 (計算入力値)

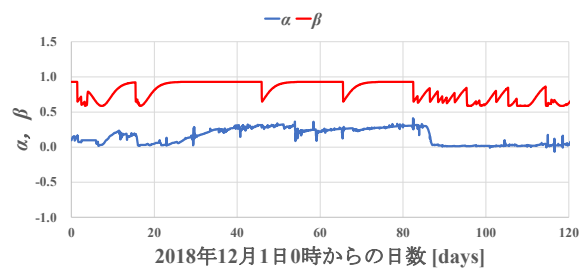
図-2 2017年度における観測値と計算値



a) 氷板厚の観測値と計算値



b)  $\alpha$ と $\beta$ の計算値 (Case2)



c)  $\alpha$ と $\beta$ の計算値 (Case3, Case4)



d) 積雪深の観測値 (計算入力値)

図-3 2018年度における観測値と計算値

2d), 図-3d)より, 積雪深のピークは年度順に72cm, 63cm, 49cmである. 12月1日から80日間の結氷中期までの降雪を積算すると年度順に233cm, 200cm, 181cmである. 積雪深のピーク, 降雪の積算値が大きい年度ほど最小水温が低い. 一方, 期間中の積算寒度は年度順に456°C, 481°C, 476°Cであり同程度である. 積雪深のピーク, 降雪の積算値が大きい年度ほど最小水温が低い理由について実現象を踏まえて考えると, 降雪によって

河川内に晶氷が発生し, 流下する晶氷が氷板下に滞留する. その後, 摩擦速度が遅く水温が低い条件で, 晶氷が氷化して氷板が厚くなる現象<sup>6)</sup>が考えられる. 本検討において, 積雪深が大きい年は「晶氷の氷化」により氷板が厚くなりやすく, 最小水温を小さく設定する必要があると推察できる.

#### 4. 氷板厚計算式の有用性と課題

積雪・融雪・降雨および計算上の最小水温を考慮した氷板厚計算式(本検討のCase4)の有用性を以下に記す。 $\alpha$ の設定について、従来の試行錯誤や経験式を用いることなく設定することが可能となった。従来では実測氷板厚を再現できる $\alpha$ を検討して与えていたが、この作業が不要となる。また、 $\alpha$ 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。氷板厚の計算値の精度が向上するため、解氷時期の推定精度が向上するとともに、河氷上で作業を行う流量観測時の安全性が向上する。

一方で、本式の課題が明確となった。計算上の最低水温を $0^{\circ}\text{C}$ として積雪・融雪・降雨を考慮した場合(本検討のCase3)は、 $\alpha$ の値は小さくなり氷板厚は小さい値となるため、計算値は観測値を再現することが出来なかった。要因として、積雪減少割合、全面結氷時の氷板厚、粗度係数が適切に設定されていないことに加えて、対象箇所の上流から流下する晶氷が対象箇所の氷板下に滞留し氷化して氷板厚が厚くなる現象を考慮していないことが考えられた。この「晶氷の氷化」について、計算上の最小水温の最適値を与えることで間接的に表現出来る可能性が示された。すなわち、計算上の最小水温を小さく設定すれば氷板厚は厚くなる。図-1a)、図-2a)、図-3a)よりこの計算上の最小水温の氷板厚への影響は、積雪・融雪・降雨の影響に比べて大きいことが推察される。

本検討により、高い精度で氷板厚を計算するためには、上流からの晶氷の流下を適切に表現する必要が示された。この現象について計算上の最小水温で間接的に考慮できる可能性を示した。しかし実務上、最適値は年度毎に異なるため、リアルタイムで氷板厚を精度良く推定することは難しい。一方で、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 $0.000^{\circ}\text{C}$ から $-0.100^{\circ}\text{C}$ の範囲であることが推定されている。この点を利点として捉え、最小水温を $0.000^{\circ}\text{C}$ から $-0.100^{\circ}\text{C}$ の範囲で全て計算することにより、年度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。氷板厚が減少する時期は解氷時期と関連することから、解氷時期の推定手法として、 $0.000^{\circ}\text{C}$ から $-0.100^{\circ}\text{C}$ の計算結果に基づいて、氷板厚の減少時期を把握すれば、安全側で解氷時期を推定することが可能性となる。また、汎用性を高くするために入力値を減らすことを考えると、積雪・融雪・降雨を無視して、計算上の最小水温の範囲内の計算値のみで解氷時期を推定する手法が考えられる。

#### 5. まとめ

積雪・融雪・降雨および計算上の最小水温を考慮した氷板厚計算式(本検討のCase4)は、従来の計算方法よりも精度が高いことを確認した。本検討により、河氷上の積雪深は陸上の積雪深よりも小さい可能性が推察された。氷板下に滞留する晶氷の氷化による氷板厚の増加について、計算上の最小水温で表現出来ることが推察された。

#### 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, 1\_1039-1\_1044, 2018.
- 2) 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.
- 3) 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.1\_1363-1\_1368, 2021.
- 4) 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.
- 5) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 平井康幸: 天塩川における解氷現象と気温の関係について, 国土交通省, 北海道開発局技術研究発表会, 第52回, 安-23, 2009.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 角屋睦, 福島晟: 中小河川の洪水到達時間, 京大防災研究所年報, 第19号B, 昭和51年4月, pp.143-152, 1976.
- 12) 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, pp.1-21, 2011.
- 13) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 河川結氷時の観測流量影響要因と新たな流量推定手法, 土木学会, 水工学論文集, 第54巻, pp.1075-1080, 2010.

(2022. 3. 25受付)