

# 晶氷の氷化を考慮した 氷厚変動計算手法の一提案

## Proposal of a Method to Calculate Ice Thickness Variation Considering the Transition of Frazil into Ice

吉川 泰弘<sup>1</sup>・渡邊 康玄<sup>2</sup>

Yasuhiro YOSHIKAWA, Yasuharu WATANABE

<sup>1</sup> 正会員 工修 独立行政法人 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-7602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

<sup>2</sup> 正会員 工博 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

In this study, the behavior of ice plates and frazil were clarified by categorizing temporal changes based on the results of field observation conducted at the Shokotsu and Yubetsu rivers in Hokkaido. Of particular note in this study was the indication of the possible contribution of frazil-to-ice transition to the formation of ice plates. A method for calculating ice thickness variation considering such transition was developed, and the validity of the calculated values was verified. It was also found from the results of this study that, compared with the Yubetsu River, frazil in the Shokotsu River was more likely to accumulate due to the low flow frequency. In other words, frazil was more likely to transition into ice because the friction velocity on the underside of the ice is small and the water temperature in Shokotsu was low.

**Key Words :** Ice thickness, Frazil, Frozen River, Observation, Calculation, Hokkaido

### 1. はじめに

冬期間の北海道の河川は気温の低下とともに結氷するため、多くの河川が結氷しその一部の河川では結氷に伴う工学的な問題が生じている。山下ら<sup>1)</sup>により整理された北海道内の河川結氷図が示すとおり道東と道北の河川は結氷しやすく、道東ではアイスジャミングによる水位上昇、道北では晶氷による取水障害の問題が発生しており、これらの解決策の確立が望まれている。アイスジャミングの一例としては、1995年3月18日に渚滑川の KP16.6 から KP20.2 の 3.6km の区間において、上流から流下してきた氷が滞留および閉塞したため、KP19.3 の上渚滑水位観測所において水位が計画高水位まであと 14cm まで上昇した事が報告されている。但し、バックホウで氷を早急に除去したためこの水位上昇による内水氾濫等の被害は免れている。このアイスジャミングの発生原因について Shen<sup>2)</sup>らは、暖かい降雨を伴う暖気により融雪を促したため水位が上昇し、水位上昇によって氷板は破壊されながら下流へと流れ、河床勾配が緩やかで川幅の狭い蛇行部の KP16.6 の箇所滞留および閉塞したと推定している。

前出の渚滑川から約 30km 南下した位置に渚滑川と平行するように湧別川が流れている。図-1 に示す渚滑

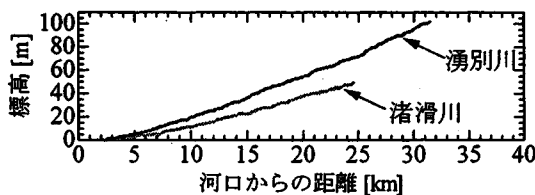


図-1 渚滑川と湧別川の平均河床高 (2000 年測量)

川の平均河床勾配は 1/410 で湧別川は 1/290 であり湧別川の方が急勾配である。湧別川において 1995 年 3 月の同期間でアイスジャミングは発生しておらず、この理由として、観測データから気温は同程度であり降雨量は湧別川の方が少ないことから、湧別川では降雨量が少なかったため融雪が促されなかったと推定できる。しかし、この期間のみならず現在までに湧別川においてアイスジャミングの発生が報告されていないことから、気象条件の違いの他に他の要因による氷板の形成過程の違いが予見される。

氷板の形成過程を再現する計算手法として積算寒度を独立変数とする氷厚変動計算があり、この計算手法は気温が氷板の形成に支配的な影響を与えるダムや湖沼において良い再現性が得られている。しかし、急流河川や晶氷が流下する河川においてはその適用事例は著者が知る限り少なく、この原因の 1 つとして、吉川ら<sup>3)</sup>

の氷板と晶氷の現地観測の解析結果より氷板の形成に晶氷の氷化による氷板の増加が示唆されていることから、積算寒度を用いた氷厚計算において晶氷の氷化を考慮していないためであると推定出来る。

本研究では氷板の形成過程に着目し現地観測を実施して観測結果から氷板と晶氷の経時変化を明らかにし、さらに積算寒度を用いた氷厚変動計算を基に晶氷の滞留による氷化を考慮した氷厚変動計算手法を構築して現象の解明を試みた。

ここで言う年度とは例えば 2000 年度は 2000 年 4 月から 2001 年 3 月である。KP とはキロポストの略で河口からの上流を正とした距離 (km) である。積算寒度とは日平均気温のマイナス気温だけを積算した絶対値である。氷の結晶の大きさが  $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{m}$  のものを晶氷 (Frazil) と分類している。

2. 現地観測

(1) 観測の地点と日時

北海道の道東に位置する渚滑川と湧別川を対象に図-2 に示す地点で現地観測を行った。観測地点は支川を含む渚滑川 3 地点、湧別川 3 地点の計 6 地点である。図中には各地点の平均水面幅 B[m] を明記している。観測期間は 2007 年 1 月から 3 月であり、各地点の平均的な観測時間は、A1 : 11:00, A2 : 14:00, A3 : 15:00, B1 : 14:00, B2 : 11:00, B3 : 10:00 である。結氷時の河川流量は日変動<sup>4)</sup>する事が知られているが、今回の観測期間は日中の観測が多く一日の内で流量が増加する期間であったと推察できる。

(2) 観測項目

各地点において河床、晶氷、氷板、雪の高さの横断測量を行った。図-3 は横断測量結果の一例であり、横断面の晶氷面積および氷板面積を求める事が可能である。ここで言う晶氷面積とは氷板下に滞留する晶氷の面積である。なお、晶氷の測定については、極めて困難かつ熟練を要し観測する氷穴に L 型定規を沈め手触により晶氷の高さを測定した。水理量の測定は、横断面の 1 測線において鉛直流速と鉛直水温の測定、自記水位計測を実施した。測定箇所の測線の選定は、非結氷時の横断面の流量と相関が良い鉛直平均流速をもつ測線とした。

3. 氷板と晶氷の経時変化

(1) 氷板と晶氷の経時変化の観測結果

観測した晶氷面積を横軸に氷板面積を縦軸として、渚滑川を図-4 A1),A2), 湧別川を図-5 B1),B2) に示

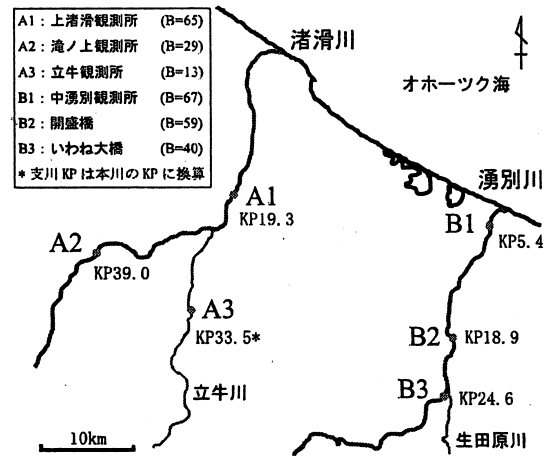


図-2 渚滑川と湧別川の観測地点

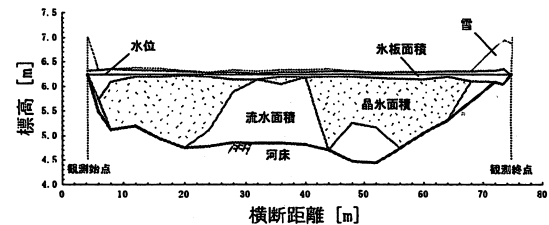


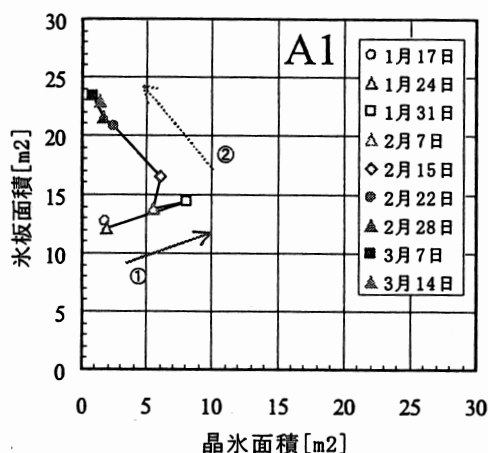
図-3 横断測量結果の一例 (2007/2/14, 中湧別観測所 B1)

す。図中には、経時変化をみるために観測値を実線で結び時間経過を矢印で表した。立牛観測所 (A3) といわね大橋 (B3) においては、観測した晶氷面積は極めて小さいため図化していない。

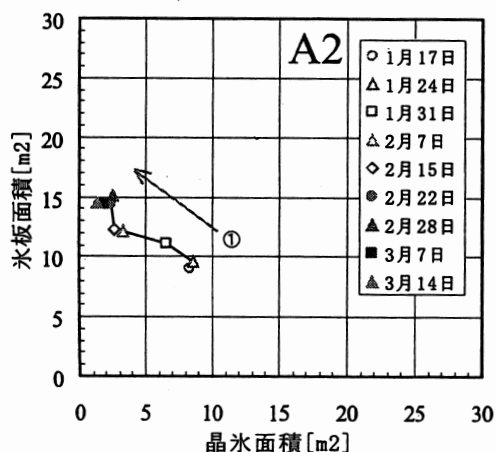
渚滑川において、図-4 A1) の KP19.3 では、結氷初期は晶氷は少なく 1 月 31 日にかけて増加しその後時間経過とともに減少しており、氷板は時間経過とともに増加している。図-4 A2) の KP39.0 では、結氷初期は晶氷は多く存在しその後時間経過とともに減少しており、氷板は時間経過とともに増加している。

湧別川において、図-5 B1) の KP5.4 では、晶氷の増減が A1, A2, B2 に比べて大きくなっており、氷板は 2 月 21 日までは増減が小さくその後時間経過とともに減少している。図-5 B2) の KP18.9 では、結氷初期には晶氷は多く存在しその後時間経過とともに一時増加はあるものの相対的には減少しており、氷板は 2 月 21 日にかけて増加しその後時間経過とともに減少している。

湧別川において、上流 B2 で晶氷が減少すれば下流 B1 でも減少し、上流 B2 で晶氷が増加すれば下流 B1 でも増加しており、B1 と B2 の晶氷の増減は同一の挙動を示している。この観測結果から、湧別川の観測距離 13.5km (KP18.9-KP5.4) においては上下流一貫した晶氷の増減が確認されたが、渚滑川の観測距離 19.7km (KP39.0-KP19.3) においては、上下流一貫した



A1) KP19.3 B=65m



A2) KP39.0 B=29m

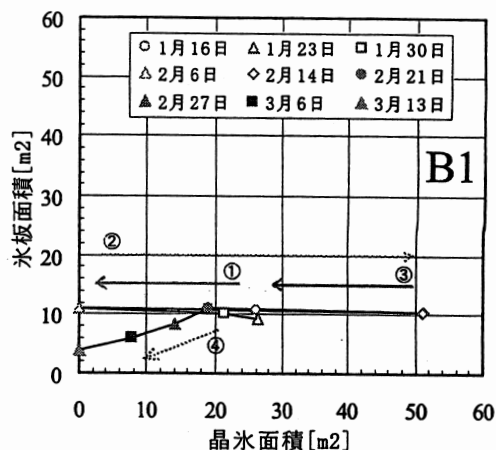
図-4 渚滑川における氷板と晶氷の経時変化

晶氷の増減は確認されなかった。観測距離の違いがあるため一概には言えないが、今回の観測結果から湧別川の方が渚滑川よりも晶氷の流下の頻度が多いと推定出来る。

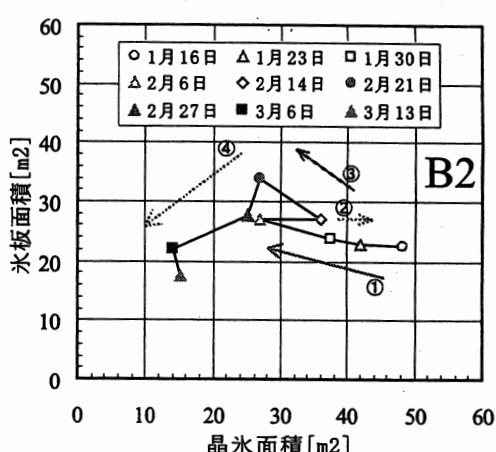
## (2) 氷板と晶氷の経時変化の分類

観測結果より氷板と晶氷は経時変化しており、これらの経時変化を5つに分類した。但し、これらの経時変化は1週間毎の観測結果から導かれたものであり日変化、時間変化は考慮できていない。分類した経時変化を図-6に示し、想定している各経時変化の期間および晶氷の挙動について以下に記す。

- I.) 結氷初期で氷板および晶氷が増加する期間。晶氷の増加はその地点での発生によるものと上流からの流下によるものが推察される。
- II.) 氷板が増加し晶氷が減少している期間。晶氷の減少は晶氷の氷化によるものと下流への流出によるものが推察される。



B1) KP5.4 B=67m



B2) KP18.9 B=59m

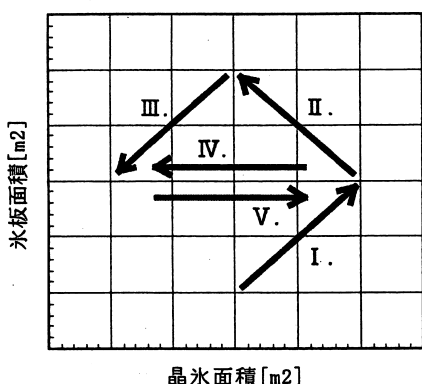
図-5 湧別川における氷板と晶氷の経時変化

- III.) 結氷終期で氷板および晶氷が減少する期間。気温の上昇に伴う融解によるものと水位上昇に伴う氷の破壊によるものが推察される。
- IV.) 氷板は変化せず晶氷が減少する期間。晶氷の減少は下流への流出によるものと推察される。
- V.) 氷板は変化せず晶氷が増加する期間。晶氷の増加はその地点での発生によるものと上流からの流下によるものが推察される。

今回の現地観測結果から氷板と晶氷の経時変化を分類する事により、十分に解明されていない氷板と晶氷の挙動を把握する事が出来た。特に、アイスジャミングの原因となる氷板の形成に晶氷の氷化が寄与する可能性が示唆された。

## 4. 氷厚変動計算手法の構築

氷板の形成過程の解明を目的に、本検討では既往の積算寒度を用いた氷厚変動計算手法を基にして晶氷の氷化を考慮した氷厚変動計算手法を構築した。



- I. 氷板・晶氷ともに増加
- II. 氷板は増加し、晶氷は減少
- III. 氷板・晶氷ともに減少
- IV. 氷板は変化なし、晶氷は減少
- V. 氷板は変化なし、晶氷は増加

図-6 氷板と晶氷の経時変化の分類図

### (1) 積算寒度を用いた氷厚変動計算

積算寒度を用いた氷厚変動計算は、St. Lawrence River で9年間の観測値と計算値の比較から妥当性が確認されている氷板の融解を考慮した下記の Shen<sup>5)</sup>の式を用いた。なお、この積算寒度を用いた氷厚変動計算は晶氷の氷化による氷厚の増加は考慮していない。

$$h_i = \sqrt{h_{i0}^2 + \alpha S - \beta t^\theta} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_0 & \text{when } T_a^{(2)} \geq T_B \\ \alpha = \alpha_0 + (T_a^{(2)} - T_B)m & \text{when } T_a^{(2)} < T_B \end{cases}$$

ここに、 $h_i$ [m]:氷厚、 $h_{i0}$ [m]:初期の氷厚、 $\alpha[\frac{cm^2}{^\circ C \cdot day}]$ :定数であり、 $S[^\circ C \cdot day]$ :計算開始からの積算寒度、 $\beta[cm \cdot day^{-\theta}]$ :定数で0.254とした。 $t$ [days]:計算開始からの日数、 $\theta$ [無次元]:定数で1.0とした。 $\alpha_0[\frac{cm^2}{^\circ C \cdot day}]$ :定数で1.434とした。 $T_a^{(2)}[^\circ C \cdot day]$ :1日前と2日前の積算寒度の平均値、 $T_B[^\circ C]$ :氷板の融解の基準となる積算寒度で0.56とした。 $m$ [無次元]:氷板の融解時の $\alpha$ の減少勾配であり-0.72とした。なお、各定数については本来、各河川の各地点毎に観測データから実証して与えるべきであるが、本研究で対象としている河川では十分な観測データがないため、St. Lawrence River で用いられている定数を準用して与えた。

### (2) 晶氷の氷化を考慮した氷厚変動計算

晶氷の挙動について、物理的観点では流下するか滞留するかの違いがあり、滞留時には物質的観点から晶氷の融解、維持、氷化が考えられる。本検討では晶氷の滞留による氷化を水量から判定し、晶氷の氷化による氷厚の増加を考慮した氷厚変動計算を構築した。

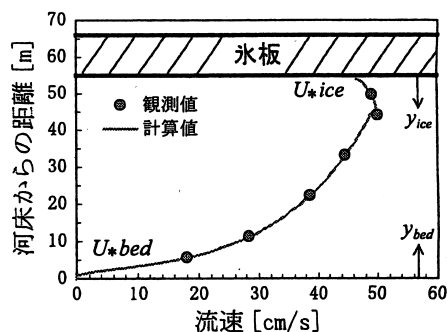


図-7 鉛直流速分布の一例 (2007/1/13, いわね大橋 B3)

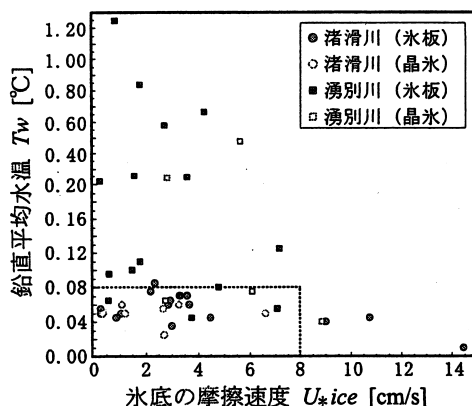


図-8 渚滑川と湧別川における晶氷の氷化の判定図

#### a) 晶氷の流下および滞留

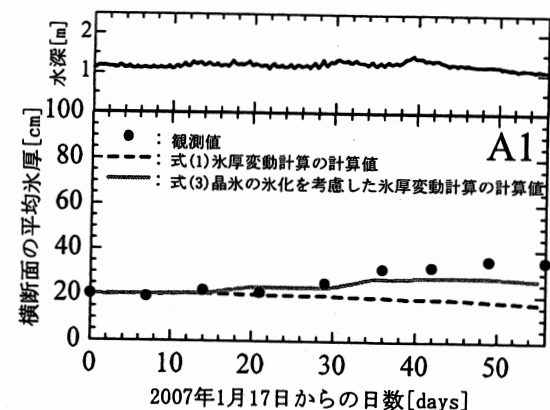
晶氷の流下および滞留の判定基準として、観測した鉛直流速分布から求められる氷による摩擦速度を判定基準とした。摩擦速度は結氷下の鉛直流速分布<sup>6)</sup>である式(2)から算出した。

$$U_{ice} = \frac{U_{*ice}}{k} \ln \frac{30y_{ice}}{k_{sice}} \quad (2)$$

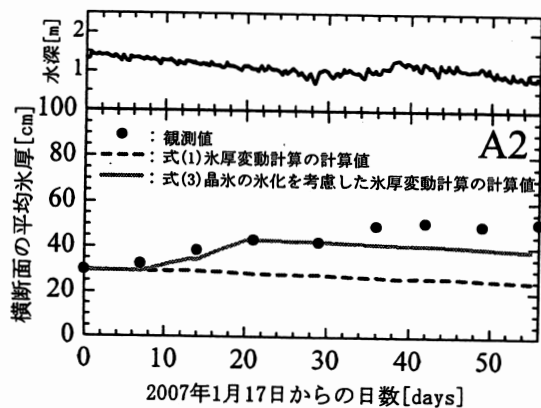
ここに、 $u_{ice}$ [m/s]:鉛直平均流速、 $u_{*ice}$ [m/s]:摩擦速度、 $k$ :Karman 定数で0.4とした。 $y_{ice}$ [m]:氷底から河床方向への距離、 $k_{sice}$ :相当粗度である。添え字のiceは鉛直流速分布の最大流速から上層の値を表している。流速の観測値と計算値の一例を図-7に示す。図-7より各水深毎の流速の観測値と計算値が良く一致しているのが分かる。

#### b) 晶氷の氷化

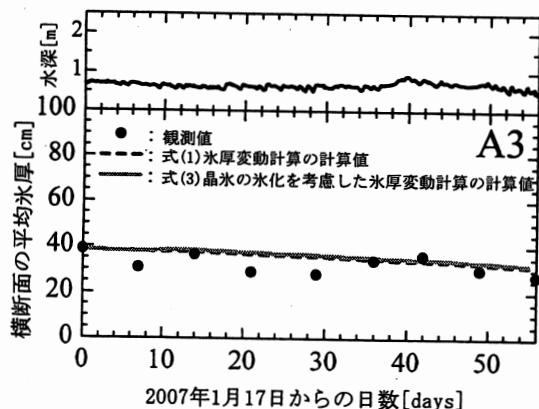
晶氷の維持および氷化の判定基準として鉛直平均水温として、観測した鉛直水温がある閾値を超えて低くなると氷化するものとした。横軸に摩擦速度、縦軸に水温を取り晶氷の氷化の判定図を図-8に示す。本検討では観測と観測を挟む期間の晶氷の氷化を議論しているため、図-8の値は各観測間の平均値をプロットしている。また、氷底が氷板の場合を中塗りで氷底が晶氷の場合を中抜きで表している。



A1) KP19.3 B=65m [渚滑川]

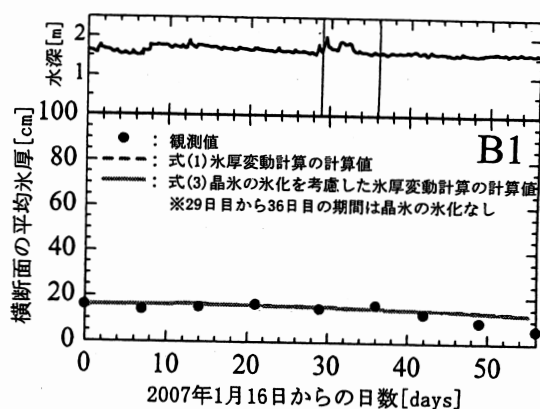


A2) KP39.0 B=29m [渚滑川]

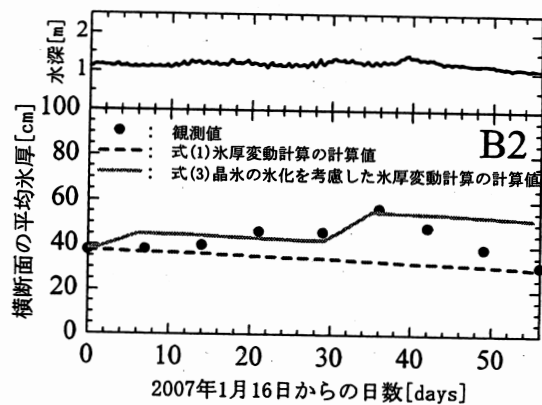


A3) KP33.5 B=13m [立牛川]

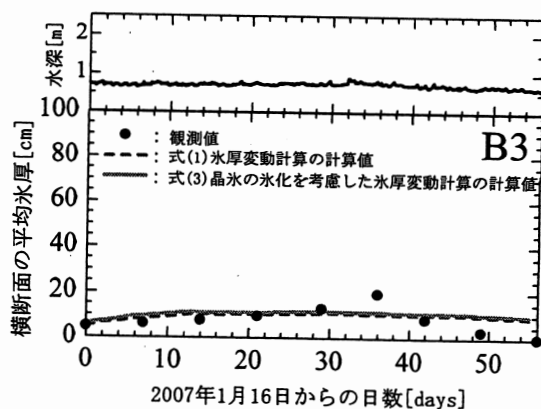
図-9 渚滑川における氷厚の観測値と計算値



B1) KP5.4 B=67m [湧別川]



B2) KP18.9 B=59m [湧別川]



B3) KP24.6 B=40m [湧別川]

図-10 湧別川における氷厚の観測値と計算値

晶氷が氷化するかどうか判定する期間は晶氷が減少する期間とし、図-6のII, III, IVの期間とした。晶氷が増加する期間I, Vは、晶氷は氷化しないと仮定している。この理由として、期間Iにおいて晶氷の氷化があると仮定すると、氷板の増加は気温によるものと晶氷の氷化によるものが考えられ、観測される晶氷の増加量はその地点での発生量と上流から流下した量を足した量から氷化した量を引いた量と推察できる。しかし今回の観測手法では、定量的に晶氷の発生量、上流から流下した量、氷化した量を分類する事は困難であ

る。また、期間Vにおいても晶氷の増加量を分類する事は困難であるため、本検討では、期間I, Vは晶氷は氷化しないと仮定して検討を進めている。

図-8において、摩擦速度  $U_{*ice}$  が  $8[\text{cm/s}]$  以下および水温  $T_w$  が  $0.08[^\circ\text{C}]$  以下となる点線で囲われた領域の観測期間について晶氷が氷化すると判定した。これらの閾値については、観測および実験を重ねデータの蓄積を行い晶氷の大きさ毎に決定する必要があるが、現時点では観測データが少なく十分な解析が行えないため、本検討では観測値と計算値が一致するような閾値

を試行錯誤を行い決定した。

晶氷が氷化すると判定された観測期間において、下記の式 (3) より晶氷の氷化による氷厚の増加量を評価した。

$$h_{if} = h_i + h_f \quad (3)$$

$$h_f = h_{f(1)} + \left| \frac{(A_f^{j+1} - A_f^j)/B}{D^{j+1} - D^j} \right| \quad (4)$$

ここに、 $h_{if}[m]$ ：晶氷の氷化を考慮した氷厚、 $h_i[m]$ ：積算寒度を用いた氷厚、 $h_f[m]$ ：晶氷の氷化による氷厚、 $h_{f(1)}[m]$ ：計算開始日から1日前までの晶氷の氷化による氷厚の積算値、 $A_f^j[m^2]$ ：晶氷面積（観測値）、 $B[m]$ ：川幅、 $D^j[days]$ ：計算開始からの日数である。上付きの  $j$  について、今回の観測は1地点で9回実施しており最初の観測を1回目とした場合の観測番号である。計算時間間隔は1日である。

### (3) 氷厚の観測値と計算値の比較

氷厚の観測値、積算寒度を用いた氷厚変動計算の計算値、晶氷の氷化を考慮した氷厚変動計算の計算値および自記水位計から河床高を引いた水深について、渚滑川は図-9に湧別川は図-10に示す。

渚滑川の図-9のA1およびA2において、晶氷の氷化を考慮した氷厚変動計算の方が積算寒度を用いた氷厚変動計算よりも観測値と良く一致している。晶氷が極めて少ないA3においては、どちらの計算値も観測値と良く一致する結果であった。

湧別川の図-10のB1において、29日目から36日目の期間で晶氷が氷化するという判定結果であり、晶氷の氷化を考慮した計算値は観測値と一致しない結果であった。この期間の水深をみると急激な上昇があった事が観測値から分かる。晶氷の氷化の判定図に用いた値は、各観測間の平均値でありこの期間に水理量の変化があったとしても判定図に反映する事は出来ない。図-3は29日目の結氷状況であり、氷板面積および晶氷面積が大きく流水面積が小さい。このような流水面積が小さい状況下において、急激な水深上昇が起きると小さい流水面積に水が集中して摩擦速度は大きくなり図-8の晶氷の氷化の領域外になると推定できるため、この期間については晶氷は流下し氷化は起こらないと判断した。この判断のもとに計算を行うとB1においてどちらの計算値も観測値と良く一致した。

湧別川の図-10のB2においては、晶氷の氷化を考慮した方が考慮しない場合と比べて観測値と良く一致している。しかし、氷厚ピーク後の氷厚の減少を計算値で再現出来ていない。氷厚の減少の理由が氷板の急激な融解または破壊とすると、本モデルではこれらを考慮していないため再現出来なかったと言える。晶氷が

極めて少ない湧別川の図-10のB3においては、どちらの計算値も観測値と良く一致する結果であった。

急流河川かつ晶氷が流下する河川である渚滑川と湧別川の氷板の形成過程について、St.Lawrence Riverで妥当性が確認されている積算寒度を用いた氷厚変動計算よりも晶氷の氷化を考慮した氷厚変動計算の計算値が観測値と良く一致しているため、St.Lawrence Riverとは氷板の形成過程が異なると事が示唆された。渚滑川と湧別川の晶氷の氷化の起こりやすさについては、図-8の晶氷が氷化する領域の観測期間は、渚滑川で20期間、湧別川で7期間であり、渚滑川の方が晶氷の滞留しやすく晶氷の氷化が起きやすいと今回の検討結果から推定できる。

## 5. まとめ

渚滑川と湧別川の現地観測結果から、氷板と晶氷の経時変化を5つに分類してその挙動を把握し、アイスジャミングの原因となる氷板の形成に晶氷の氷化が寄与する可能性が示唆された。急流河川かつ晶氷が流下する河川である渚滑川と湧別川の氷厚変動計算手法として、積算寒度を用いた氷厚変動計算を基とした晶氷の氷化を考慮した氷厚変動計算を用いる事により、観測値をより良く再現する事が可能となった。渚滑川と湧別川の晶氷の挙動の違いについては、渚滑川は湧別川に比べて氷底の摩擦速度が小さいため晶氷が滞留しやすく、水温が低いため晶氷の氷化が起きやすいと今回の検討結果から推定された。

謝辞 本研究を行うにあたり、米国 Clarkson 大学の Shen 教授にはご指導を頂きました。北海道開発局網走開発建設部には資料の提供等の御尽力を頂きました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 山下彰司, 小林正隆, 宮昭彦, 平山健一：北海道における河川の結氷特性と結氷下の水理特性について、北海道開発局開発土木研究所 報文, pp.59-74, 1993.
- 2) H.T.Shen, 山崎誠, 星清, 渡邊康玄, 平山健一：渚滑川のアイスジャミングの検討, 第15回寒地技術シンポジウム, pp.370-375, 1999.
- 3) 吉川泰弘, 渡邊康玄：渚滑川と湧別川における氷板と晶氷の現地観測, 土木学会北海道支部論文報告集, 第64号, 2008.
- 4) 山崎誠, 小山俊, 長谷川和義, 平山健一：寒地河川における冬期渇水後期の流量変動予測, 土木学会論文集 No.565/2-39, pp.11-20, 1997.
- 5) H.T.Shen, POOJITHA D. YAPA : A unified degree-day method for river ice cover thickness simulation, Can. J. Eng. 12. 54-62, 1985.
- 6) George D. Ashton, Ed.: River Lake Ice Engineering, Water Resources Publications, pp308, 1986.

(2008. 4. 3 受付)