

寒冷地河川における氷板厚計算式の精度向上に関する検討

A Study on Improvement of Accuracy of Ice Thickness Sheet Calculation for Cold Rivers

北見工業大学
北見工業大学
寒地土木研究所

○学生員 西岡雅浩 (Masahiro Nishioka)
正員 吉川泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
正員 横山洋 (Hiroshi Yokoyama)

1. はじめに

寒冷地河川では、冬期に気温の低下や流速の減少により、河水が形成される。形成された河氷は、気温が上昇し流量が多くなると融解、破壊されて解氷し下流へと流下する。流下した河氷が狭窄部や橋脚箇所、蛇行部などで滞留して河道を閉塞させると、川の流れがせき止められて、アイスジャム現象が発生することがある。アイスジャム現象は、流れの阻害による水位上昇や浸水¹⁾、取水口の閉塞²⁾、河氷に巻き込まれる事故¹⁾など、人的・物的な被害も報告されている。

寒冷地河川の河川管理・河川工事を行う上で、解氷時期の推定指標である氷板厚の計算値は、重要な指標となっている。一方で、従来の計算方法は、形成に関する係数である α 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。 α 、水深が一定の条件は、積雪や融雪・降雨による流量の増加現象を考慮していないこととなる。また、実際には氷の厚さが変わることによって α の値が変化するが、これを無視していることとなる。

本研究では、形成に関する係数である α と、融解・降雨に関する係数である水深を時系列で計算し、氷板厚の計算値の精度向上を目的として検討を行った。

2. 氷板厚計算式

氷板厚計算式³⁾は次式となる。

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

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

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

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

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

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

$$\alpha = 0.906 - 2.770 \cdot I_b \cdot B / h_w \quad (7)$$

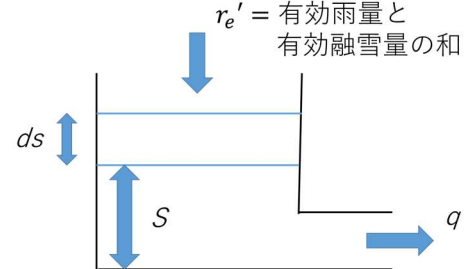


図-1 準線形貯留型モデルの概要

$$\beta = \frac{U_w}{h_w^{\frac{2}{3}}} \quad (8)$$

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] : 気温であり, 観測値を与えた. T_w [°C] : 水温, h_w [m] : 水深, Δt [s] : 計算時間間隔であり, 86400 秒とした. 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. [m] : 全面結氷時の氷板厚であり, 1 を与えた. 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] : 積雪深であり, 観測値を与えた. 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] : 雪の熱伝導率であり, 0.076 を与えた. U_w [m/s] : 流速, I_b [無次元] : 河床勾配であり, 1/944 を与えた, B [m] : 川幅であり, 24 を与えた. なお, 本検討の対象とした箇所は, 網走川の津別観測所である。

水深については融雪と降雨を考慮して精度向上を試みた。融雪量と雨量による水深上昇は、準線形貯留型モデル⁴⁾を用いた。概念図を図-1 に示し、計算式を次に示す。

$$\frac{ds}{dt} = r_e' - q \quad (9)$$

$$S = k'q \quad (10)$$

$$k' = \frac{t_c}{2} \quad (11)$$

r_e' [mm/h] : 有効雨量と有効融雪量の和, 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⁵⁾を用いた。

$$t_c = CA^{0.22}r_e'^{-0.35}/60 \quad (12)$$

$A[\text{km}^2]$: 流域面積であり, 1380 を与え, $C[\text{無次元}]$: 土地利用形態で決まる定数⁵⁾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. また, t_c の値は, 過去のアイスジャムによる氾濫が発生した際の r_e' を用いて, 洪水到達時間を算出し, その値を平均した 43.45 を与えた.

気温上昇から融雪量を求めるために, Degree-day 法⁶⁾を用いた. 本研究では 1 時間毎の融雪量を求めるため, 次式を用いた.

$$SM = T \cdot K \quad (13)$$

$SM[\text{mm/h}]$: 1 時間毎の融雪量, $T[^\circ\text{C}]$: 1 時間毎の気温, $K[\text{mm/h} \cdot ^\circ\text{C}]$: 融雪係数であり 1.7÷24 を与えた⁷⁾. 融雪時期は, 気温が 0°C 以上の時に融雪するものとした⁶⁾.

流量を求めるために, まず, 次式を用いて有効融雪量と有効雨量を求めた.

$$SM_e = SM \cdot f \quad (14)$$

$$r_e = r \cdot f \quad (15)$$

$$r_e' = SM_e + r_e \quad (16)$$

$SM_e[\text{mm/h}]$: 有効融雪量, $SM[\text{mm/h}]$: 1 時間当たりの融雪量であり, 式(13)より求めた, $r_e[\text{mm/h}]$: 有効雨量, $r[\text{mm/h}]$: 観測雨量, $f[\text{無次元}]$: 流出係数であり, 本研究では, 河川の流出係数が不明だったため山地河川とし, 0.75 を与えた⁸⁾.

次に準線形貯留型モデルにより流出高を求める. 既往研究⁹⁾を参考にして, 式(9)に式(10)を代入して 1 次のテイラー展開で表すと次式となる.

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

$q_2[\text{mm/h}]$: 流出高, $q_1[\text{mm/h}]$: 1 時間前の流出高, $r_{e2}'[\text{mm/h}]$: 有効雨量と有効融雪量の和, $r_{e1}'[\text{mm/h}]$: 1 時間前の有効雨量と有効融雪量の和, $\Delta t[\text{h}]$: 時間であり, 1 を与えた. この式(17)に, 式(11)と式(16)で得られた値をそれぞれ代入し, 流出高を求める. 次に流量を次式により求めた.

$$Q = \frac{Aq}{3.6} \quad (18)$$

$Q[\text{m}^3/\text{s}]$: 流量, $q[\text{mm/h}]$: 流出高であり, 式(17)より求めた.

水深は, 次式のマンニングの平均流速公式を用いて, 流量から求めた. 求める水深は, 等流水深となる.

$$Q = U_w \cdot A = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} B h_w \sqrt{I_b} = \frac{\sqrt{I_b}}{n} B h_w^{\frac{5}{3}} \quad (19)$$

$$h_w = \left(\frac{Qn}{\sqrt{I_b} B} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (20)$$

$$U_w = \frac{Q}{A} \quad (21)$$

$Q[\text{m}^3/\text{s}]$: 流量であり, 式(18)より求めた. $n[\text{s}/\text{m}^{1/3}]$: 粗度係数であり, 0.03 を与えた.

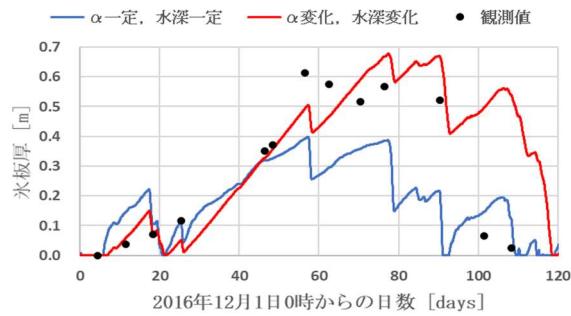
α と水深を一定値で与える場合は, α は式(7)を用いた. 水深は流量を一定値 $6\text{m}^3/\text{s}$ として式(20)から求めた. α と水深を変動させる場合は, α は式(4)を用いた. 水深は式(18)から求めた流量を式(20)に代入し求めた.

3. 氷板厚計算式の精度の検証

計算期間は 2016 年から 2019 年の 3 年間に於いて各年度の 12 月 1 日から 3 月 31 日までとした. 2019 年から 2020 年は観測値がないため, 過去の論文¹⁰⁾と比較した.

各年度の α , 水深を一定値とした場合と変動させた場合の氷板厚の計算値と観測値を図-2 に示す. 各年度の α , 水深を変動させた氷板厚の計算値は, 観測値の変動を再現している. 表-1 は各年度の α , 水深を一定値とした場合と変動させた場合の二乗平均平方根誤差である. 2017 年から 2018 年の期間と 2018 年から 2019 年の期間において, α と水深を一定値にした場合よりも α と水深を変動させた場合の方が観測値との誤差は小さい. 2016 年から 2017 年の期間では, 変動させた場合の方が, 二乗平均平方根誤差が 1.7cm 大きい. 誤差を生む期間は計算値と観測値との乖離がある後半である. 3 年分の二乗平均平方根誤差の平均値でみると, α , 水深を一定値とした場合 35.7cm であり, 変動させた場合 22.1cm である. α , 水深を一定値とした場合よりも変動させた場合の方が精度は高い.

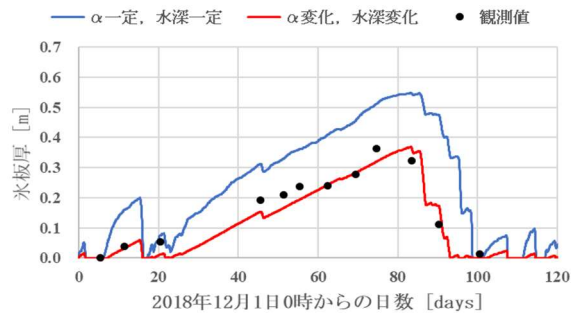
α , 水深を変動させた氷板厚の計算において, 計算上の最小水温の試行錯誤を行っている. 計算上, 最小水温が低くなるとその分の氷板が形成される. 試行錯誤の結果, 2016 年から 2017 年の期間の閾値が -0.05°C , 2017 年から 2018 年の期間の閾値が -0.04°C , 2018 年から 2019 年の期間の閾値が -0.02°C となった. 年度によって最適な最小水温が異なる要因の一つとして, 2016 年から 2019 年の 3 年間に於いて各年度の 12 月 1 日から 3 月 31 日の合計降雪量が関係していると考えられる. 合計降雪量は 2016 年から 2017 年の期間が 288cm, 2017 年から 2018 年の期間が 237cm, 2018 年から 2019 年の期間が 219cm である. 合計降雪量が多い年ほど, 最小水温の閾値が低くなり氷板が形成されやすい. 実現象として, 降雪が多い年は, 河川内に供給される氷が多くなり, これらの氷は晶氷と呼ばれ, 氷板の底面に滞留し氷化されて, 氷板が厚くなることが推察される. このため, 合計降雪量が多い年は, 計算上の最小水温は低くなると推察される.



(a) 2016-2017 年 (津別アメダス)



(b) 2017-2018 年 (津別アメダス)



(c) 2018-2019 年 (津別アメダス)



(d) 2019-2020 年 (津別アメダス)

図-2 各年度の氷板厚の計算値と観測値

次に、図-2(d)に示す2019年から2020年の計算値について、この年度の観測値を入手できなかったが、アイスジャムが発生した日は分かっているため、この日を図示している。最小水温は、 -0.04°C から -0.08°C を与えて最適な値を検討した。最小水温を -0.04°C で計算すると α 、水深を一定値とした場合と変わらなかった。最小水温を -0.07°C 、 -0.08°C で計算すると、アイスジャムの発生日の3月11日を過ぎてから、氷板厚が0になり適切では

表-1 各年度の二乗平均平方根誤差 [cm]

	α 一定, 水深一定	α 変化, 水深変化
2016-17	41.8	43.5
2017-18	19.0	13.0
2018-19	46.2	9.7
平均	35.7	22.1

なかった。最小水温 -0.05°C の場合は、3月11日のアイスジャム発生の37時間前に氷板厚が0となり、最小水温 -0.06°C の場合は、8時間前に0になる。

4. まとめ

氷板厚計算式の α と水深を変動させた計算を試みた。 α 、水深を一定値として計算するより変動させて計算した方が精度は高い。一方で、変動させる場合は、最小水温を適切に設定する必要性が分かった。

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, I_1039-I_1044, 2018.
- 2) 入交泰文, 吉川泰弘, 黒田保孝: 土塩川水系名寄川真 敷別頭首工における晶氷の発生について, 平成26年度北海道開発技術研究発表会, 2015.
- 3) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 結氷河川における解氷現象と実用的な氷板厚計算式の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.1, pp.21-34, 2012.
- 4) 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年9月.
- 5) 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.
- 6) 河島克久, 飯倉茂弘, 杉山友康, 遠藤徹, 藤井俊茂: 鉄道防災に適用可能な日融雪量の簡易推定方法, 日本雪氷学会誌, 64巻6号, pp.605-615, 2002.
- 7) 宮田俊介, 朝岡良浩, 風間聡: 全国の AMeDAS 観測点における Degree-day 法および融雪係数の検証, 土木学会論文集 B1(水工学)Vol.68, No.4, pp.I_343-I_348, 2012.
- 8) 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.
- 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, pp.1-21, 2011.
- 10) 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.