

河川結氷時の1次元水温計算に関する一考察

土木研究所 寒地土木研究所 正会員 吉川 泰弘
 北見工業大学 社会環境工学科 正会員 渡邊 康玄
 北見工業大学 社会環境工学科 正会員 早川 博
 土木研究所 寒地土木研究所 正会員 平井 康幸

1. はじめに

河川結氷時における水温が上昇すると、河道内の河水は融解される。一方、河道内に河水が形成されると、大気と河川水との間において河水が存在するため、放射、対流による熱交換が遮られ、それと同時に、河水と河川水との間で熱交換が始まる。河氷形成と水温変化は相互に影響を及ぼすため、河氷形成機構を明らかにするためには、河川水温が受ける影響要因を検討する必要がある。

本研究は、河氷形成による熱収支変化を考慮した1次元水温計算式を用いて、現地における観測値、熱収支を考慮しない場合の計算値との比較から、本計算モデルの計算値の誤差評価を行った。

2. 1次元水温計算式

1次元水温計算式は、式(1)に示す Shen²⁾の式を基にして、河氷形成による熱収支変化を考慮した。

$$\frac{\partial(A\rho_w C_p T_w)}{\partial t} + \frac{\partial(Q\rho_w C_p T_w)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \rho_w C_p \frac{T_w}{\partial x} \right) - B_o \phi_T \quad (1)$$

T_w [°C]:水温, Q [m³/s]:流量, A [m²]:流積であり水が流れる面積である。 ρ_w [$\frac{kg}{m^3}$]:水の密度で999.8を与えた。 C_p [$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$]:水の比熱で4.2を与えた。 E_x [$\frac{m^2}{s}$]:拡散係数で0.001を与えた。 B_o [m]:開水面の幅(岸氷と岸氷の間の距離), ϕ_T [$\frac{W}{m^2}$]:開水面における単位面積当たりの熱量, t [sec]:時間, x [m]:距離である。

本研究では、大気と河川水、河氷と河川水との熱収支を図-1のように考え、川幅 B に対する結氷幅の割合を横断結氷比 ($0 \leq P \leq 1$) として、1次元水温計算式を式(2)の形で表した。

$$\frac{\partial(A\rho_w C_p T_w)}{\partial t} + \frac{\partial(Q\rho_w C_p T_w)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \rho_w C_p \frac{T_w}{\partial x} \right) - (1-P)B\phi_{wa} - PB\phi_{wi} \quad (2)$$

$$\phi_{wa} = h_{wa} (T'_w - T_a) \quad (3)$$

$$\phi_w = h_{wi} (T'_w - T_f) \quad (4)$$

$$h_{wi} = C_{wi} \frac{U_w^{0.8}}{h_w^{0.2}} \quad (5)$$

h_{wa} [$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$]:水面の熱交換係数で20を与えた²⁾。

C_{wi} [$\frac{W \cdot s^{0.8}}{^\circ C \cdot m^{2.6}}$]は1622を与え³⁾, T_f [°C]:河氷底面の温

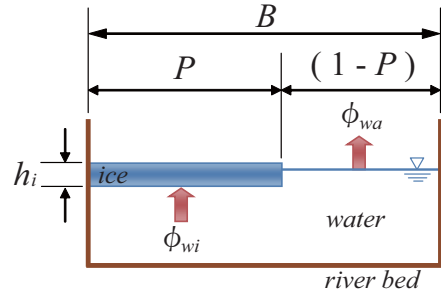


図-1 河川結氷時の横断面における熱収支概念図



図-2 観測地点の位置図

度であり0を与えた。 U_w [$\frac{m}{s}$]:横断面平均流速, h_w [m]:河床から河氷底面までの有効水深である。 T'_w [°C]: Δt 後の水温で未知数となる。

横断結氷比 P について、既往研究⁴⁾により、横断河氷と平面河氷との関係には相関があることが示唆されており、また、現場における経験値として、人が河氷の上に乗る作業をしても河氷は割れない条件として、気泡を含んでいない氷板の厚さが5cm程度に形成されることが目安となっている。本研究では、簡便のため横断面の平均氷板厚 h_i [m] が5cmの場合の横断結氷比 P を1として、横断結氷比は $P = 20h_i$ として算出した。

3. 本計算モデルの計算水温

本計算モデルの計算値と観測値の比較を行った。また、河氷形成による熱収支変化を考慮した場合と無視した場合の計算結果の比較を行った。

(1) 計算条件

計算対象河川は北海道北部に位置する天塩川の図-2に示す KP94.2 から KP108.0 の13.8kmとした。KPとはキロポストの略で河口からの距離 km である。計算期間は開水時から結氷時を経て解氷時までの2008年12月25日0:00から2009年3月20日0:00の85日間と

Key Words: 結氷河川, 河氷, 水温, 熱収支

〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所 TEL011-841-1639

した。現地観測は図-2に示す6地点において、水位(測定精度±1cm)、水温(測定精度±0.05℃)、気温(測定精度JISA級±0.15℃以下)を10分毎に観測している。境界条件は、上流端で流量と水温を下流端で水位を与えた。計算断面間隔は200mの河道データを線形補完して $\Delta x=100m$ 、時間間隔は $\Delta t=0.5$ 秒とした。

河水の計算については、1次元河水変動計算モデル¹⁾を用いた。なお、河水形成と河川水温は相互に影響を及ぼすため、水温計算の応答をみている本研究では、河水の計算に用いる水温は観測水温を与えて、河水と水温の計算を独立させた。

(2) 計算値と観測値

計算区間の上流端から8.4km下流の地点KP99.6における計算値と観測値を図-3に示す。水位の計算値は、観測値の経時的な上昇および降下を各地点で良く再現している。急激な水位上昇は、河水が滞留し流積を狭めたためであり、78日目付近の急激な水位低下は、解氷により河水が流下して流積を広げたためである。また、水位の微小振幅は上流に位置する岩尾内ダム放流量の影響である。水温の計算値は、解氷前の76日目付近において計算水位が観測水位よりも上昇しているものの、定性的にみると観測値の経時的な上昇を良く再現している。

(3) 河水形成による熱収支変化

式(2)において $\phi_{wa}=0$ 、 $\phi_{wi}=0$ として熱収支変化を無視した場合の計算値と、考慮した計算値の観測値に対する相対誤差を図-4に示す。10日目付近の大きな誤差は、10分毎に得られた1データの値であり機器の測定誤差である可能性が高い。10日目から76日目期間は誤差が小さいが、76日目以後は誤差が大きくなっている。また、76日目以後において、熱収支を無視した場合の計算値は、考慮した場合に比べて、誤差は大きく水温は高い。この期間の気温はマイナスであることから、実現象では、解氷に向かうとともに河水面積は小さくなり、大気と河川水との熱交換が始まり、気温の低下に伴って河川水温も低くなったと推察できる。

熱収支変化を無視した計算水温と考慮した計算水温の相対誤差ヒストグラムを、図-5、6に示す。なお、縦軸は対数目盛とし、階級についてはスタージェスの式を用いて階級の個数16、階級の幅0.2としている。図-5より熱収支変化を無視した計算の相対誤差は、+0.1℃から+0.3℃の範囲に全体の77%が入るのに対して、図-6より熱収支変化を考慮した計算の相対誤差は、-0.1℃から+0.1℃の範囲に全体の85%が入る。熱収支変化を考慮した方が、無視した場合に比べて、観測水温(測定精度±0.05℃)に対する計算水温の精度が高いことを示した。

4. まとめ

河水形成による熱収支変化を考慮した1次元水温計算式を構築し、計算値は、観測値の経時的な変動を良く再現することを示した。計算結果の検討から、解氷

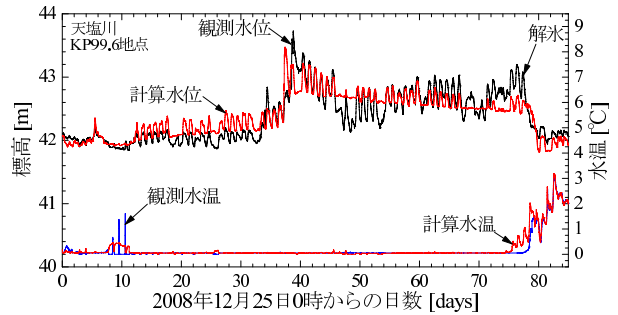


図-3 水温と水位の計算値と観測値 (熱収支変化考慮)

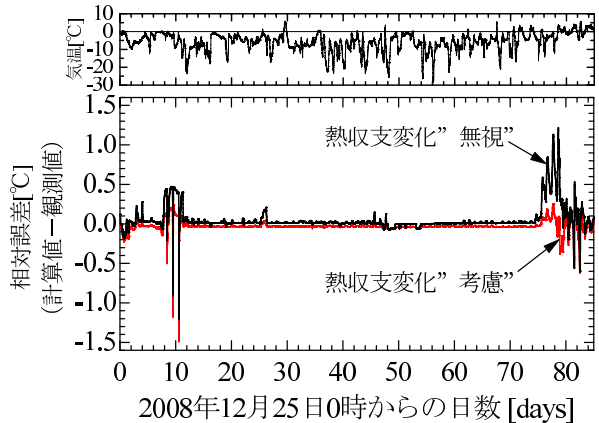


図-4 水温の相対誤差と気温

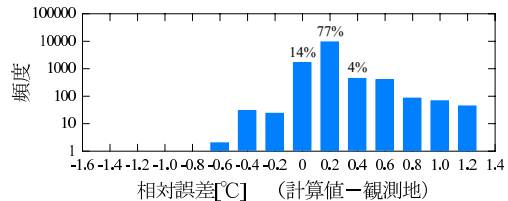


図-5 熱収支を”無視”した計算水温の相対誤差ヒストグラム

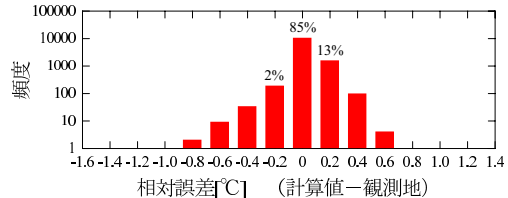


図-6 熱収支を”考慮”した計算水温の相対誤差ヒストグラム

に向かうとともに河水面積は小さくなり、大気と河川水との熱交換が始まることが推察された。本計算モデルにおいて熱収支変化を考慮した方が、無視した場合に比べて、観測水温に対する計算水温の精度が高いことを示した。

参考文献

- 1) 吉川 泰弘, 渡邊 康玄, 早川 博, 平井 康幸: 寒地河川における河水変動が河川水位へ与える影響, 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文報告集, 第66号, B-3, 2010.
- 2) A. M. Wasantha Lal, Hung Tao Shen: MATHEMATICAL MODEL FOR RIVER ICE PROCESSES, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.117, No.7, pp.851-867, 1991.
- 3) George D. Ashton, Ed.: River Lake Ice Engineering, Water Resources Publications, pp.289, 1986.
- 4) 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, 2009.