

1次元混合氷径河水変動計算モデルの開発と アイスジャムの再現計算

ONE-DIMENSIONAL MIXTURE RIVER ICE CALCULATION AND ICE JAM SIMULATION

吉川 泰弘¹・阿部 孝章²・渡邊 康玄³・伊藤 丹⁴

Yasuhiro YOSHIKAWA, Takaaki ABE, Yasuharu WATANABE, Akashi ITOU

¹ 正会員 博(工) 北見工業大学助教 社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

² 正会員 修(農) 寒地土木研究所 寒地河川チーム研究員 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

³ 正会員 博(工) 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)

⁴ 正会員 修(工) 寒地土木研究所 寒地河川チーム上席研究員 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

This study aims to clarify the mechanism of ice jams on ice-covered rivers. We focused on the phenomenon whereby river ice of various sizes accumulates in narrow spaces over rivers. Before conducting an ice jam hydraulic experiment, we developed a calculation model for the occurrence of ice jams formed from river ice of mixed sizes under one-dimensional unsteady flow. The occurrence of ice jam was found to depend on the ratio of river width to ice size. The calculation model created in this study was found to be able to reproduce the water level of the ice jam experiment.

Key Words: *Ice-covered river, River ice jam, Calculation, Ice jam experiment*

1. はじめに

結氷河川では、春先になると河道内に形成された河水が解氷する。解氷した河水が、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、流れがせき止められ、河川水位は急激に上昇し、アイスジャムが発生する。アイスジャムによる災害は、アメリカ、カナダ、中国、ロシアなどの気温が零下になる諸外国で起こっており、水位の上昇とともに河水および流水が民地に氾濫する。我が国においてもアイスジャムによる人的被害¹⁾や水位の急激な上昇²⁾が報告されている。アイスジャムの対策として、Beltaos³⁾によると、バップルブロックのような構造物を人的被害が無い箇所に設置し、人工的にアイスジャムを発生させる対策や、河水の厚さが厚くなる前に、長いアームを持つ特殊な重機を結氷河川内に乗り入れて、下流側から人工的に河水を破壊する対策が示されている。一方で、アイスジャムの発生時期、発生場所、水位上昇量、継続時間についての知見は、十分には得られていないため、アイスジャム現象の解明が望まれている。

アイスジャム現象は、河水の形成融解、流水および河水衝突による破壊、河水の流下堆積という熱力学、構造力学、水理学等の分野を含む複雑な現象である。これらの現象を解明するために、現地観測、水理実験、数値計算を用いて複合的に研究が行われている。

Beltaosら⁴⁾は、河川縦断方向のアイスジャムの厚さ

を連続的に測定することに成功し、このデータを用いて数値計算モデルのキャリブレーションを行っている。Hicksら⁵⁾は、アイスジャムの水理実験および数値計算モデルを用いて、アイスジャム時の河水における圧力とひずみ速度との関係についての検討を行っている。Carson⁶⁾らは、アイスジャムの観測値をベンチマークとして、7つの数値計算モデルを対象に計算結果の妥当性について検討を行っている。著者ら⁷⁾は、数値計算モデルを用いて、アイスジャム発生時は氷板の移動速度が減衰すると仮定してアイスジャムを評価し、河川津波により発生したアイスジャム現象の再現に成功している。しかし、アイスジャムの発生条件の物理的意味が明確となっていないことや、河水の大きさを考慮していないという課題がある。また、近年の現地観測結果^{2,8)}から、解氷および河川津波により破壊された河水の大きさは、単一の大きさではないことが明らかとなっている。一方で、既往研究では、アイスジャム発生時の河水の大きさについて、十分には検討されていない。

本研究は、アイスジャム対策立案時の基礎資料を得ることを念頭に、河川横断面内に様々な大きさの氷板が存在する状況下で、これらの氷板が狭窄部で堆積することによるアイスジャム発生現象を対象とした1次元河水変動計算モデルの開発を試みた。アイスジャム実験を実施し、アイスジャム発生時の水位の比較を行うことで、本計算モデルの妥当性を確認した。

2. 1次元混合氷径河水変動計算モデルの構築

本計算モデルは、河川水の流れ、流動する氷板の流れ、固定した氷板の形成融解、河川水温、アイスジャム発生条件に関する計算で構成している。概念図を図-1に示す。河氷は大別すると、硬い氷板とその下に存在する柔らかい晶氷、氷板上に存在する積雪に分けられるが、本計算モデルでは、固定された硬い氷板とその下を流動する氷板を対象としている。晶氷および積雪については考慮していない。流動する氷板は、固定した氷板が外力を受けて解氷した場合、ある氷板サイズに分断されて流動する氷板となる。本論文での氷径とは、氷板の面的な幅と長さを代表する径としている。

(1) 流れの計算

流れの計算は、連続の式と運動の方程式を用いた。計算方法は、従属変数を空間的に千鳥状 (staggered) に配置して、時間的に蛙飛び (leap-frog) に進める陽的な差分式とした。

河川水における連続の式は式 (1)、運動の方程式は式 (2) で表した。式 (1) の左辺第三項は、固定した氷板が気温低下等により形成されることによる河川流量の減少と、融解されることによる河川流量の増加を表している。左辺第四項は、流動する氷板の形成融解による河川流量の増減を表している。

$$\frac{\partial A_w}{\partial t} + \frac{\partial Q_w}{\partial x} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial A_{is}}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial A_{if}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_w^2}{A_w} \right) + g A_w \frac{\partial}{\partial x} \left(z + h_w + \frac{\rho_i}{\rho_w} (h_{is} + h_{if}) \right) \\ + \frac{g n_b^2 u_w |u_w| S_w}{R_w^{1/3}} + \frac{\rho_i g n_i^2 (u_w - u_i) |u_w - u_i| S_i}{R_i^{1/3}} \\ + g A_w I_{rw} = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

流動する氷板の連続の式は式 (3)、運動の方程式は式 (4) で表した。式 (3) の左辺第三項は、固定した氷板が破壊され流動することによる氷板面積の増加を表している。左辺第四項は、流動する氷板が気温低下等により形成されることによる氷板面積の増加と、融解されることによる氷板面積の減少を表している。なお、本計算モデルは氷径を考慮してアイスジャム発生を判断しているが、式 (3) と式 (4) では、これらの氷板を集合体として扱っている。

$$\frac{\partial A_{if}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{if}}{\partial x} - \frac{\partial A_{is}}{\partial t} - \frac{\partial A_{if}}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{if}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_{if}^2}{A_{if}} \right) + g A_{if} \frac{\partial}{\partial x} (z + h_w + h_{is} + h_{if}) \\ - \frac{g n_i^2 (u_w - u_i) |u_w - u_i| S_i}{R_i^{1/3}} - g A_{if} I_{ri} + g A_{if} I_s = 0 \quad (4) \end{aligned}$$

$A(\text{m}^2)$: 河川水の流積, 流動している氷板面積および固定した氷板面積, $Q(\frac{\text{m}^3}{\text{s}})$: 河川流量, 氷板流量, $z(\text{m})$: 河

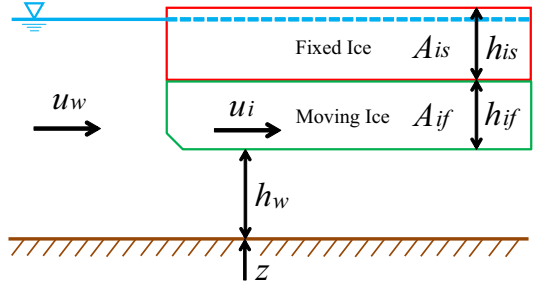


図-1 混合氷径河水変動計算モデルの概念図

床高, $h(\text{m})$: 厚さ, $n(\frac{\text{s}}{\text{m}^3})$: Manning の粗度係数, $u(\frac{\text{m}}{\text{s}})$: 河川縦断方向の速さ, $S(\text{m})$: 潤辺, $R(\text{m})$: 径深, I_{rw} (無次元): 河川水が受ける氷板の形状抵抗項, I_{ri} (無次元): 氷板が受ける河川水の形状抵抗項, I_s (無次元): 河床と流動する氷板, 固定した氷板と流動する氷板の境界における抵抗項, $\rho_w(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3})$: 水の密度で 1000, $\rho_i(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3})$: 氷の密度で 920. $t(\text{sec})$: 時間, $x(\text{m})$: 距離, $g(\frac{\text{m}}{\text{s}^2})$: 重力加速度で 9.8. 添え字 w (water) は河川水に関する値, is (ice sheet) は固定した氷板に関する値, if (ice flow) は流動している氷板に関する値であり, \overline{if} は流動している氷板が気温低下等により形成融解を受けた値である. i (ice) は氷板に関する値で, $h_i = h_{is} + h_{if}$ とした。

a) 粗度係数と径深

河床の Manning の粗度係数 n_b は、実験の再現計算において固定値 0.02 を与えた。氷板の Manning の粗度係数 n_i は、河床と氷板の合成粗度係数 n_o と河床の粗度係数 n_b を用いて、Sabaneev の式 (5) を用いて算出した。

$$n_i = \left(2n_o^{\frac{3}{2}} - n_b^{\frac{3}{2}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

河床と氷板の合成粗度係数 n_o は、流速係数 ϕ (無次元) を用いた式 (6) とした。 ϕ は著者ら⁹⁾ の式 (7) を用いた。なお、本実験の再現計算における式 (7) の適用条件は $3\text{cm} \leq (h_{is} + h_{if})$ とし、適用範囲を $3 < \phi < 30$ とした。適用条件以外の n_i は、固定値 0.02 を与えた。なお、式 (8) は、実河川データを基にして得たものである。

$$n_o = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{\phi \sqrt{g}} \quad (6)$$

$$\phi = \frac{C_o}{R^{0.25} I_e^{0.5}} \quad (7)$$

$$C_o = 0.154 + 0.005 \text{ days} \quad (8)$$

$R(\text{m})$: 結氷時の流積全体の径深, I_e (無次元): エネルギー勾配, $C_o(\text{m}^{\frac{1}{4}})$ は氷板底面が流水により融解されて滑らかになることによる粗度の減少の程度を表しており, days は結氷後からの日数である。

河床の影響を受ける径深 R_w と氷板の影響を受ける径深 R_i は、河床と氷板の粗度係数比および流速差を考慮した式 (9), (10), (11) に示す Shen の式¹⁰⁾ を用いた。

$$R_w = \frac{1}{1 + \alpha_i} \frac{A_w}{B + 2 h_w} \quad (9)$$

$$R_i = \frac{\alpha_i}{1 + \alpha_i} \frac{A_w}{N B} \quad (10)$$

$$\alpha_i = \left(\frac{n_i^2}{n_b^2} \frac{N(u_w - u_i)^2}{u_w^2} \right)^{\frac{3}{4}} \frac{B}{B + 2h_w} \quad (11)$$

$$N = \frac{h_{is} + h_{if}}{h_{io}} \quad (12)$$

$B(\text{m})$: 川幅, N (無次元): 横断結氷比で川幅に対する氷板幅の割合であり, $0 \leq N \leq 1$ の範囲となる. 本モデルは河川縦断方向の1次元計算モデルであるため, 鉛直方向の氷板厚から横断方向の氷板幅を推定する必要がある. 既往研究¹¹⁾において鉛直方向に氷板面積が増加すると, 横断方向に氷板面積が増加することが観測されていることから, 本研究では, $h_{io}(\text{m})$: 水面が全て氷板で覆われる場合の平均氷板厚として, 式(12)より横断結氷比を算出した. なお, 本実験の再現計算では h_{io} は 3cm とした.

b) 形状抵抗項 I_{rw} , I_{ri}

河川水が氷板形状により受ける抵抗 I_{rw} , 氷板が河川水により受ける抵抗 I_{ri} について, 運動の方程式に次式の形状抵抗項を加えることで考慮した. 形状抵抗の概念図を図-2 に示す.

$$I_{rw} = \frac{C_D}{2gdx} \left(\frac{\Delta h}{h_w} \right) (u_w - u_i) |u_w - u_i| \quad (13)$$

$$I_{ri} = \frac{C_D}{2gdx} \left(\frac{\Delta h}{h_{if}} \right) (u_w - u_i) |u_w - u_i| \quad (14)$$

$$\Delta h = (\dot{z} + \dot{h}_w) - (z + h_w) \quad (15)$$

C_D : 抗力係数で実験値との比較により $C_D=0.4$ を得た.
 $dx(\text{m})$: 計算区間間隔である.

c) 氷板の境界における抵抗項 I_s

水深が氷板厚よりも小さく氷板が河床に接する場合の河床と流動する氷板の境界の抵抗項, 流動する氷板が固定氷板下を流下する場合の固定した氷板と流動する氷板の境界における抵抗項は, 運動方程式に次式の抵抗項を加えることで考慮した. なお, $\sin \theta$ は水平を基準とした場合の勾配である.

$$I_s = \sin \theta \left(1 - \frac{\rho_w \hat{A}_{if}}{\rho_i A_i} \right) \quad (16)$$

流動する氷板が河床に接する場合:

$$\hat{A}_{if} = \frac{A_{if} h_w}{h_{if}}$$

$\sin \theta$: 河床の勾配

流動する氷板が固定氷板下に存在する場合:

$$\hat{A}_{if} = A_{if}$$

$\sin \theta$: 固定氷板底面の勾配

(2) 氷板形成融解式

氷板の形成融解の計算式は, 入力値が気温, 水温, 有効水深およびその地点固有の係数 α , β のみである熱フラックス式から導出された吉川ら¹²⁾の式(17)を用いた.

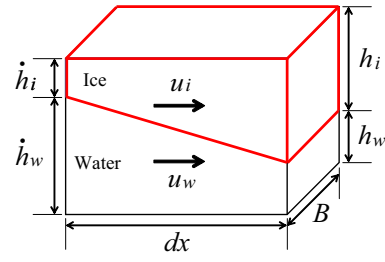


図-2 氷板の形状抵抗の概念図

$$h_i = h'_i - \left(\frac{65.2}{10^5} \right) \alpha \frac{T_a}{h'_i} - \left(\frac{45.8}{10^2} \right) \beta^{4/5} T_w h_w^{1/3} \quad (17)$$

$$\alpha = 0.906 - 2.770 \frac{I_b B}{h_w} \quad (18)$$

$$\beta = \frac{u_w}{h_w^{2/3}} \quad (19)$$

$h_i(\text{m})$: 氷板厚, $h'_i(\text{m})$ は Δt 前の氷板厚, $T_a(^{\circ}\text{C})$: 気温, I_b (無次元): 河床勾配である. なお, T_a , T_w は 1 日の平均値であるため, 例えば 1 時間毎に氷板厚を計算する場合には 24 で割り単位変換した値 $T_a/24$, $T_w/24$ が入力値となる. また, $h'_i(\text{m})$ の初期条件は 1mm とした. α (無次元) は気温に対する氷板形成の程度を表し, 大きくなると氷板を増加させる. β ($\frac{\text{m}^{1/3}}{\text{s}}$) は水温と有効水深に対する氷板融解の程度を表し, 大きくなると氷板を融解させる係数である. また, α は, 積雪または晶氷が氷板と一体となる場合は大きく, 積雪または晶氷の断熱効果がある場合は小さくなる. β は, 動水勾配が大きく粗度が小さい場合は大きく, 動水勾配が小さく粗度が大きい場合は小さくなる.

係数 α は, 北海道における河川結氷時の計 249 回の観測データ解析¹²⁾ から得られた式(18)を用いて算出し, 係数 β は, 式(19)から計算される u_w および h_w を用いて値を得た.

(3) 河川水温計算

1次元河川水温計算式¹³⁾は, 横断結氷比 N を用いて大気と河川水, 氷板と河川水との熱収支変化を考慮している式(20)を用いた.

$$\frac{\partial (A_w \rho_w C_p T_w)}{\partial t} + \frac{\partial (Q_w \rho_w C_p T_w)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_w E_x \rho_w C_p \frac{T_w}{\partial x} \right) - (1 - N) B \phi_{wa} - N B \phi_w \quad (20)$$

$$\phi_{wa} = h_{wa} (T'_w - T_a) \quad (21)$$

$$\phi_w = C_{wi} \frac{u_w^{0.8}}{h_w^{0.2}} (T'_w - T_f) \quad (22)$$

$T_w(^{\circ}\text{C})$: 水温, $C_p(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}})$: 水の比熱で 4.2 を, $E_x(\frac{\text{m}^2}{\text{s}})$: 拡散係数で 0.001 を与えた. ϕ_{wa} , $\phi_w(\frac{\text{W}}{\text{m}^2})$: 大気と河川水, 氷板と河川水との間における単位面積当たりの熱量, $h_{wa}(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}})$: 水面の熱交換係数で 20 を, $C_{wi}(\frac{\text{W} \cdot \text{s}^{0.8}}{\text{C} \cdot \text{m}^{2.6}})$ は 1622 を, $T_f(^{\circ}\text{C})$: 氷板底面の温度であり 0 を与えた. $T'_w(^{\circ}\text{C})$: Δt 後の水温で未知数として扱った.

(4) アイスジャム発生条件

アイスジャムが発生する地点として、川幅が狭窄部の地点、水深が氷板厚に対して浅い地点、下流に固定した氷板が存在している地点が考えられる。本計算モデルが対象とするアイスジャム発生地点は、川幅が狭窄部の地点とした。氷板の大きさに対して川幅が狭い場合、氷板が物理的に河道を塞ぐため、氷板の移動速度が遅くなり河道内に堆積する現象が考えられる。一方、本計算モデルは、固体である氷板の流動を河川水と同様に運動方程式を用いて表現しているため、氷板が物理的に河道に閉塞する現象をモデル化する必要がある。砂防工学の分野では、等間隔の格子状構造物による石礫の閉塞に関する研究¹⁴⁾が行われており、礫径の2倍程度の格子間隔であれば、礫と礫のアーチングによる石礫の閉塞が生じることが明らかになっている。水工学の分野においても、氷の大きさと橋梁の径間距離に着目したアーチングの研究¹⁵⁾が行われている。

本計算モデルでは、狭窄部地点のアイスジャム現象を表現するために、川幅に対して氷径(氷板の大きさ)がある一定の径の場合に、アイスジャムが発生し、氷板の移動速度が減衰すると仮定した。式(23)よりアイスジャム現象を表現した。

$$\dot{u}_i = \lambda u_i \quad (23)$$

$\dot{u}_i(\frac{m}{s})$: アイスジャム発生直後の氷板速度, $u_i(\frac{m}{s})$: アイスジャム発生直前の氷板速度, λ (無次元): 氷板速度の減衰割合である。

a) 氷板速度の減衰割合

本計算モデルは、横断面内に各氷径の氷板が複数存在する状況を考慮している。図-3のように、横断面内を代表する氷板の径を B_i と設定した。氷板速度の減衰割合 λ は、川幅 B_w 、氷径 B_i 比である Π を用いて、式(24)で表現した。川幅氷径比と氷板速度の減衰割合の関係を図-4に示す。

$$\lambda = \frac{\Pi - \Pi_e}{\Pi_s - \Pi_e}, \quad \Pi = \frac{B_w}{B_i} \quad (24)$$

Π (無次元): 川幅氷径比で川幅内に代表氷板が何枚存在するかを示す値であり、氷板が断面 $i+1$ から断面 i に流入する場合は $\Pi = B_w(i)/B_i(i+1)$ となり、氷板が断面 $i-1$ から断面 i に流入する場合は $\Pi = B_w(i)/B_i(i-1)$ となる。 Π_s (無次元): アイスジャム発生初期の Π で規模は小さい、 Π_e (無次元): アイスジャム発生終期の Π で規模は大きく、氷板は完全に堆積し氷板速度はゼロとなる。本実験では、 $\Pi_s = 2$ 、 $\Pi_e = 0$ とした。なお、本計算モデルは気温水温上昇による氷板の融解を考慮しているため、 $\Pi = \Pi_e$ の場合でも、時間経過とともに気温水温が上昇すれば氷板は融解し、アイスジャムは解消へ向かう。

横断面内に存在する様々な大きさの氷板を、氷径別に nk 個に区分した。氷板区分 k の氷径は $B_k(m)$ であり、横断面内において氷板区分 k の面積が全氷板面積に占

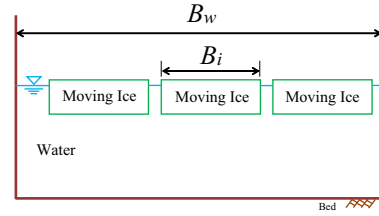
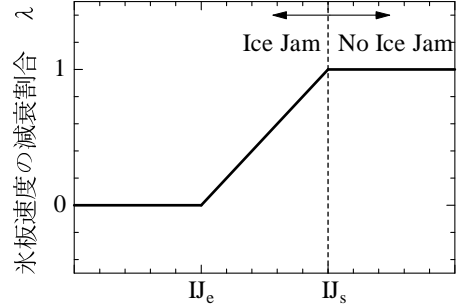


図-3 横断面に存在する代表氷板の概念図



川幅氷径比 $\Pi = B_w / B_i$
(横断面に存在する代表氷板の個数)

図-4 川幅氷径比と氷板速度の減衰割合

めるの割合を p_k (無次元) とした。横断面内を代表する氷径 B_i は、式(25)で表現した。

$$B_i = \sum_{k=1}^{nk} B_k p_k, \quad \sum_{k=1}^{nk} p_k = 1 \quad (25)$$

同じ氷径 B_i でも、遅い速度で河道を通過する場合と、速い速度で河道を通過する場合には、閉塞メカニズムが異なると想定される。現在、このメカニズムは十分には解明されていないため、本研究では、この速度の効果を見逃して B_i を計算している。速度の効果を検討する場合は、 B_i の計算式を改良する必要がある。

b) 氷板別の p_k

氷板区分 k の面積が全氷板面積に占めるの割合 p_k について、上下流から氷板が流動し氷板が流出および流入する現象と、固定していた氷板が解氷し流動を始める現象の2つの現象を想定し計算手法を構築した。

上下流からの氷板の流出流入は、式(26)で表現した。式(26)の p_k^* (無次元)は、氷板区分 k の面積が流出流入した氷板面積に占める割合である。本計算モデルでは、後述する水理実験状況を踏まえて、氷板流出時は氷径が小さいものから選択的に流出すると仮定した。

$$\frac{\partial(A_{if} p_k)}{\partial t} = p_k^* \frac{\partial A_{if}}{\partial t} \quad (26)$$

$$(\text{断面 } i \text{ から流出}) \quad p_k^* \frac{\partial A_{if}}{\partial t} + \frac{A_{if} p_k}{\Delta t} = 0 \quad (27)$$

$$(\text{断面 } i+1 \text{ から断面 } i \text{ に流入}) \quad p_k^* = p_{k(i+1)}^* \quad (28)$$

$$(\text{断面 } i-1 \text{ から断面 } i \text{ に流入}) \quad p_k^* = p_{k(i-1)}^* \quad (29)$$

固定した氷板が、解氷と判断された場合は、瞬時に固定した氷板が流動する氷板になると仮定して計算を行った。図-5に概念図を示す。解氷後の流動する氷板の \check{p}_k は、図-5の記号を用いて式(30)で表現した。なお、固定した氷板が解氷時に、どのような氷径分布(\check{p}_k)になるかについては、今後、検討が必要である。

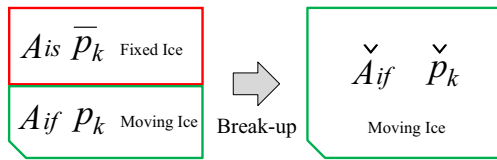


図-5 固定した氷板の解氷の概念図

$$\check{P}_k = \frac{A_{is}\bar{P}_k + A_{if}P_k}{\check{A}_{if}} \quad (30)$$

$$\check{A}_{if} = A_{is} + A_{if} \quad (31)$$

3. アイスジャム再現計算

開発した1次元混合氷径河氷変動計算モデルの計算結果の妥当性を確認するために、アイスジャムの水理実験を実施し、実験水位と計算水位の比較を行った。

(1) 水理実験⁷⁾

a) 実験条件

実験水路の底面と側面は透明なアクリル板で構成し、水路長9.0m、水路幅0.2m、水路勾配1/500である。実験水路の下流端から2.8mの位置より上流へ0.2mの区間に、図-6a)のように水路幅の半分の幅0.1mの狭窄部を設置した。渚滑川のアイスジャム²⁾の発生区間(KP14.4-KP19.0)の不等流計算の結果から、最小川幅は約30m、最大川幅は約60mであり、その比は1:2であった。実験では、この比を用いて狭窄部を設定している。流量は、貯水槽の水をポンプにより導水パイプを通して実験水路へと供給し、導水パイプに設置したバルブの調整によって、実験水路への流量を制御した。

氷は本物の氷を使用し氷の製作は、シリコーン製ゴムで型枠を作り、型枠内を水道水で満たした状態で冷蔵庫(ハイアール電気冷蔵庫 家庭用 JF-NC205A)に入れて、冷却度1、急冷モードとして、冷蔵庫内の温度約-16℃の中で氷を製作した。製作に要する時間は、小さいもので8時間、大きいもので20時間程度であった。製作した氷は、小型のこぎりで整形した。製作した氷のサイズおよび個数は、2010年2月の渚滑川の現地調査²⁾の結果を参考にして、大(20.0×9.9×3.0, 4個)、中(10.0×9.9×1.5, 20個)、小(5.0×4.9×0.8, 24個)に区分して決定した。氷の大きさの単位はcmである。本実験は水路条件により、氷板サイズと鉛直方向の現地縮尺は1/20で川幅は1/300であり一致していない。本実験は現象を把握するための実験と位置付けている。

氷の配置は、実河川の解氷時の河氷は、上流では互いに衝突し破壊されながら小さくなり、下流には解氷していない大きな河氷が存在すると考えられる。本計算では上流から解氷すると仮定して、上流から下流に向かって氷のサイズを大きくして配置した。狭窄部の氷が実験開始前に流下しないように、狭窄部の上流に位置する大きい氷のみ、幅を10.2cmとした。実験水路内の狭窄部の位置と氷の配置を図-6に示す。

水位測定のために、実験水路の下流端から4.00mの

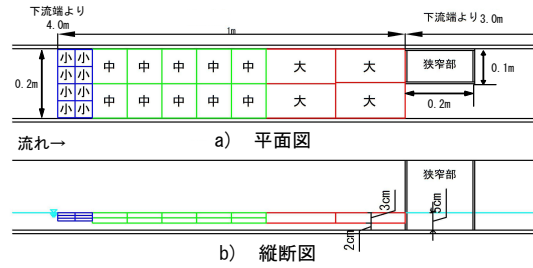


図-6 実験水路内の狭窄部の位置と氷板の配置

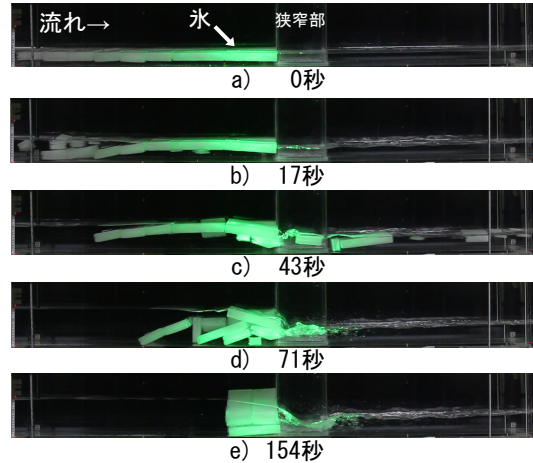


図-7 解氷からアイスジャム発生までの実験状況

地点で、水路底面から1.5cmの位置にピエゾ管を設置した。ピエゾ管と圧力センサー(ATM.1ST型圧力計発信器, STS Sensor Technik Sirmach AG)を導水管で接続し、圧力センサーからの電圧は、データロガー(NR-600スタンドアロン計測ユニット, 株式会社キーエンス)を介して値を得た。電圧と水位の関係式から、1秒毎の水位を測定した。気温は下流端から2mと6mの計2箇所に、水温は上流端に2箇所と下流端に2箇所の計4箇所に、温度計(テイドビットv2, UTBI-001, 米国オンセットコンピュータ社, 精度±0.02℃)を設置し測定した。平均気温は11.25℃、上流端の平均水温は0.48℃、下流端の平均水温は0.58℃であった。

b) 実験結果

実験状況を図-7に示す。図-7より、実験開始17秒後に、流水が氷の上を流れ、氷が不安定になり、実験開始43秒後には、氷が分断されて小さい氷が流下している。さらに、実験開始71秒後には、氷が狭窄部上流で堆積しアイスジャムが発生している状況が分かる。その後、氷は、流水の影響により融解されて形を変えていき、これに伴い水位は徐々に低下した。

(2) 再現計算

a) 計算条件

計算時間は600秒で計算時間間隔 Δt はクーラン数0.01で算出し、計算区間は下流端より2mから4mの計2mの区間で計算区間間隔 Δx は1cmとした。水路の粗度係数は0.02とした。計算における氷の破壊については、実験前の氷は個々に分断されているため、実験状況を参考にして実験開始0秒から100秒にかけて上流から順に破壊させる計算条件とした。

b) 実験水位と計算水位の比較

狭窄部上流における実験水位と計算水位を図-8に示す。図には、氷がない場合の実験水位と計算水位を合わせて示しており、計算水位は実験水位を良く再現している。図-8の氷ありの場合、実験開始直後からの実験水位の上昇を計算で良く再現している。その後、実験水位に比べて計算水位の方が早く上昇している。本計算モデルの流動する氷板は、固定する氷板下を沿いながら流下する現象を考慮しているが、実験時の状況は、上記の現象も見られたが、これ以外にも、上流から氷が流下する際に、水路床にも水面に存在する氷にも接触せずに、流水中を流下する氷が確認されている。このため、本来ならどこからも抵抗を受けずに流下する氷について、計算上では水面に存在する氷の抵抗を受ける計算となり、実験水位に比べて計算水位が早く上昇したと推定される。ピーク水位において、実験水位は14.58cm、計算水位は13.96cmと誤差6.2mmの精度で再現している。その後の水位の下降については、計算水位は実験水位を良く再現している。水位が下降する要因は、実験及び計算から、水温および流速によって氷が融解され、氷の形が変化したことにより、徐々に閉塞状況が解消され、流れやすくなったためと考えられる。一方で、実験開始425秒後では、計算水位と実験水位が一致していない。実験時の状況は、氷は水平方向に回転するだけではなく、鉛直方向にも回転しており、大きな氷でも狭窄部を通過する状況であった。本計算モデルは、鉛直方向の回転現象は考慮していないため、氷の通過による水位の急激な低下を再現できなかったと推定される。なお、氷板の回転は、流下方向に鉛直回転する場合と横断方向に鉛直回転する場合の二つの状態が考えられる。どのような条件でこれらの回転が発生するかについては、今後、研究を進める必要があるが、これらの回転により、計算上、氷板厚と氷板幅を再設定することで、現象を再現できる可能性がある。

本計算モデルは、これらの課題を有しているが、狭窄部におけるアイスジャム発生時の水位上昇およびその後の水位の減少について、計算水位は実験水位を良く再現しており、上記の精度でアイスジャム現象を再現することが可能である。

4. まとめ

河川横断面内に様々な大きさの氷板が存在し、これらの氷板が狭窄部に堆積することによるアイスジャム現象を再現することが可能な1次元混合氷径河氷変動計算モデルを開発した。実験水位と計算水位の比較から、本計算モデルの計算結果の妥当性を確認した。

謝辞：(株)水工リサーチには水理実験のご協力、新潟大学の安田浩保先生には計算結果可視化ツールのご提供、河川整備基金25-1212-002、河川整備基金24-1114-001、科研費基盤研究(B)24360197の助成を受けました。記して謝意を表します。

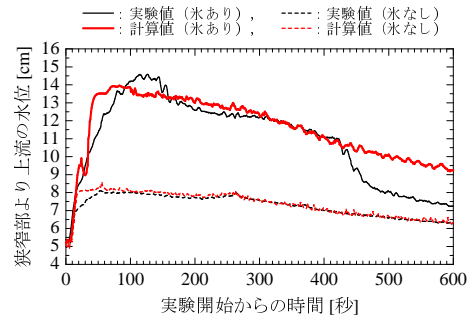


図-8 実験水位と計算水位の比較 (下流端から4m地点)

参考文献

- 1) 原文宏, 佐伯浩, 今泉彰, 大久保周一朗: アイスジャム発生による流量の急変, 第10回寒地技術シンポジウム, pp.462-470, 1994.
- 2) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 2010年2月に渚滑川で発生したアイスジャムに関する研究, 土木学会, 河川技術論文集, 第17巻, pp.353-358, 2011.
- 3) Beltaos, S.: Progress in the study and management of river ice jams, Cold Regions Science and Technology, 51, pp.2-19, 2008.
- 4) Beltaos, S., Burrell, B.C.: Ice-jam model testing: Matapedia River case studies, 1994 and 1995, Cold Regions Science and Technology, 60, pp.29-39, 2010.
- 5) She, Y., Hicks, F., Steffler, P., Healy, D.: Constitutive model for internal resistance of moving ice accumulations and Eulerian implementation for river ice jam formation, Cold Regions Science and Technology, 55, pp.286-294, 2009.
- 6) Carson, R., Groeneveld, J., Healy, D., She, Y., Malenchak, J., Morris, M., Saucet, J.P., Kolarski, T., Shen, H.T.: Tests of Numerical Models of Ice Jams - Phase 3, 14th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, 2007.
- 7) 吉川泰弘, 阿部孝章, 平井康幸: 河川津波に伴い発生した北海道鶴川のアイスジャム再現計算, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I.416-I.420, 2012.
- 8) 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸: 北海道太平洋岸地域で発生した河川津波に伴う漂流氷板の寸法計測, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I.1436-I.1440, 2012.
- 9) 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.
- 10) Shen, H.T., Shen, H., Tsai, S.M.: Dynamic transport of river ice, Journal of Hydraulic Research, 28, pp.659-671, 1990.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 河川結氷時の1次元水温計算に関する一考察, 土木学会, 年次学術講演会講演概要集, 第65回, 2010.
- 14) 高橋保, 中川一, 里深好文, 王浩民: 格子型砂防ダムの閉塞モデル, 京都大学防災研究所年報, 第43号(B-2), pp.287-294, 2000.
- 15) 榎国夫, 国松靖, 佐伯浩: 橋脚による氷盤のarch形成条件に関する実験的研究, 土木学会, 水工学論文集, 第36巻, pp.299-304, 1992.