

河川津波に伴い発生した北海道鵡川のアイスジャム再現計算

Simulation of Ice Jam generated by Tsunami in the Mu River

吉川泰弘¹・阿部孝章²・平井康幸³

Yasuhiro YOSHIKAWA, Takaaki ABE and Yasuyuki HIRAI

The tsunami of 2011 Tohoku Pacific-Coast Earthquake broke river-ice, and generated ice jam in Hokkaido, Japan. This study aimed to clarify the phenomenon of ice jam generated by tsunami in ice covered river. We built the river-ice calculation model. In order to check the accuracy of this calculation model, we conducted ice jam experiment and a calculation value reproduced an experiment value. We understood that it was important to set up “the conditions to generate of ice jam” and “the allowable stress of river-ice” appropriately in this calculation model. This following phenomenon was found by Simulation of Ice Jam. At the time of tsunami intrusion to ice-covered river, River-ice was destroyed and moved to the upstream. River-ice was deposited in narrow river-width. Ice jam was generated at this point.

1. はじめに

2011年3月東北地方太平洋沖地震による津波は、陸上および河川を遡上し、多量の漂流物を発生させた。津波自体の流体力に加えて、漂流物の輸送による衝突力の増大によって、今次津波による被害は拡大した。一方で、積雪寒冷地に位置する河川では、主に気温の低下に伴い河川内に河水が形成される。北海道においては、12月下旬頃から4月上旬頃までの年間の約100日間、河川は結水する。河川結水時に津波が来襲した場合、津波により河水は破壊され漂流物化し、河水が輸送されることにより、被害が拡大することが想定される。今次津波は、河川結水期間の3月に発生している。阿部ら(2012a)は、今次津波来襲後に北海道の鵡川において現地調査を実施している。写真-1に示す現地状況写真において、津波により破壊されたと考えられる河水が、河川内に堆積している状況が確認できる。さらに、河口から2.55kmの水位をみると、津波来襲前には0.91mの水位だったものが、来襲後には1.75mまで上昇し、その後、水位はすぐには下がらずに高水位を持続し、来襲前の水位に戻るまで約4日間かった。現地状況および水位データから、津波により破壊された河水が、上流へと輸送され、ある場所で河水が堆積し流れを堰き止めたため、アイスジャムが発生し、水位が上昇したと予見される。結水河川の津波対策を立案する際には、このような河水の破壊・輸送・堆積、水位の変動のメカニズムを解明する必要がある。

本研究は、東北地方太平洋沖地震津波によって鵡川で



写真-1 河川内の河水の堆積状況 (鵡川, 河口から約2.3km)

発生したアイスジャムの現象解明を目的に、河水の破壊・輸送・堆積を考慮した河水変動計算モデルを構築した。本計算モデル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、水位において実験値と計算値の比較を行った。さらに、本計算モデルを用いて、河川津波に伴い発生した北海道鵡川のアイスジャムの水位変動の再現計算を行い、アイスジャム現象の解明を試みた。

2. 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、氷板の流れ、氷板の形成融解、氷板の破壊、アイスジャム発生条件に関する計算式で構成した。河水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に分けられるが、本計算モデルでは、アイスジャムの主な構成材料と考えられる固定された硬い氷板と破壊されて流下する氷板を対象にした。流れの計算は、一般断面1次元不定流計算モデルとし、連続の式と運動の方程式を用いた。氷板の破壊条件は、流水および流下する氷板による応力と氷板の許容曲げ応力との比較から氷板の破壊を判定した。アイスジャム発生条件は、川幅と氷板厚の関係から判定した。

(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。氷板の形成融解による河川流量の増減、氷板の破壊による

1 正会員 博(工) (独法)土木研究所 寒地土木研究所
寒地河川チーム 研究員
2 正会員 修(農) (独法)土木研究所 寒地土木研究所
寒地河川チーム 研究員
3 正会員 北海道開発局 札幌開発建設部
札幌河川事務所 所長

流下する氷板の増減については連続の式で考慮した。計算方法は、従属変数を空間的に千鳥状に配置して、時間的に蛙飛び (leap-frog) に進める陽的な差分式で行った。河川水における連続の式は式 (1)、運動の方程式は式 (2)、氷板における連続の式は式 (3)、運動の方程式は式 (4) で表した。

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

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

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

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

$A[\text{m}^2]$: 河川水が流れる面積, 氷板の面積, $Q[\text{m}^3/\text{s}]$: 河川流量, 氷板流量, $z[\text{m}]$: 河床高, $h[\text{m}]$: 厚さ, $n[\text{s}/\text{m}^{1/3}]$: Manningの粗度係数, $u[\text{m}/\text{s}]$: 河川縦断方向の速さ, $S[\text{m}]$: 潤辺, $R[\text{m}]$: 径深, $I_r[\text{無次元}]$: 氷板の抵抗項, $\rho_w[\text{kg}/\text{m}^3]$: 水の密度で1000を与え, $\rho_i[\text{kg}/\text{m}^3]$: 氷の密度で920を与えた。 $t[\text{sec}]$: 時間, $x[\text{m}]$: 距離, $g[\text{m}/\text{s}^2]$: 重力加速度で9.8である。添え字 w (water) は河川水に関する値, is (ice sheet) は固定している氷板に関する値, if (ice flow) は流れている氷板に関する値であり, i (ice) は氷板に関する値である。

本研究では、氷板の河川水への抵抗について、河川水と氷板の境界面における粗度に加えて、氷板が厚くなるほど抵抗が大きくなる影響について、河川水の運動の方程式に、次式の氷板の抵抗項を加えることで考慮した。

$$I_r = \frac{\gamma C_D u_w^2}{2 g dx} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\gamma = \frac{h_{if}}{h_{if} + h_w} \quad \dots\dots\dots (6)$$

C_D : 氷板の抗力係数, $dx[\text{m}]$: 計算断面間隔, γ : 氷板厚の割合である。 C_D はアイスジャム水理実験の実験値と計算値の比較により, $C_D = 2 \times 10^{-5}$ の値を得た。

河床の粗度係数 n_b は、固定値を与えた。氷板の粗度係数 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 から、Sabaneevの式 (7) を用いて算出した。

$$n_i = \left(2n_o^{\frac{3}{2}} - n_b^{\frac{3}{2}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

河床と氷板の合成粗度係数 n_o の計算式、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 の計算式は、吉川ら (2011a) の計算手法に準じた。

(2) 氷板の形成融解式

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 であり、氷板の形成から融解までを計算することが可能である熱フラックス式から導出された吉川ら (2012) の式 (8) を用いた。

$$h_{is} = h'_{is} - \left(\frac{65.2}{10^5} \right) \alpha \frac{T_a}{h'_{is}} - \left(\frac{45.8}{10^2} \right) \beta^{4/5} T_w h_w^{1/3} \quad \dots\dots (8)$$

$$\alpha = 0.906 - 2.770 \frac{I_b B}{h_w} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\beta = \frac{u_w}{h_w^{2/3}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$h'_{is}[\text{m}]$: Δt 前の氷板厚, $T_a[^\circ\text{C}]$: 気温, $T_w[^\circ\text{C}]$: 水温, $I_b[\text{無次元}]$: 河床勾配, $B[\text{m}]$: 川幅である。

(3) 氷板破壊条件

本研究における破壊される氷板は以下のように扱った。氷板が受ける荷重については、流水による鉛直上向きの等分布荷重と流下する氷板の衝突による荷重とした。破壊の形態については、これらの荷重による曲げ破壊とした。鉛直方向の荷重によるせん断破壊については、曲げ破壊に比べて頻度が少ないと考えて対象としていない。梁の種類については、氷板は水位変動に応じて上下に変動するため氷板と河岸は自由条件であり、氷板は河川縦断方向に形成されるため氷板相互間は固定条件であるため、氷板相互間では上下水平方向の移動、回転が来ない固定支点と考えて片持梁および両持梁とした。なお、破壊される氷板の縦断方向の単位長さは計算格子間隔とした。

氷板の破壊条件は、流水および氷板により加えられる応力 σ_{max} と氷板の許容応力 σ_a を用いて、式 (11) の条件時に氷板は破壊すると判定した。なお、本研究での氷板の許容応力 $\sigma_a[\text{MPa}]$ は、後述する鶴川アイスジャム再現計算において再現性が高い値であった 1×10^{-4} とした。

$$\sigma_{max} > \sigma_a \quad \dots\dots\dots (11)$$

a) 流水による曲げ応力

流水が氷板に与える力は、等分布荷重を集中荷重に換算して考慮した。流水による曲げ応力 σ_{max} は、氷板が片持梁の場合を式 (12) とし、両持梁の場合を式 (13) とした。ここで、 $I_w[\text{無次元}]$: 河床勾配である。

$$\sigma_{max} = 3\rho_w \left(\frac{dx u_w I_w}{h_{is}} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\sigma_{max} = \frac{\rho_w}{4} \left(\frac{dx u_w I_w}{h_{is}} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

b) 流水および氷板による曲げ応力

流水および氷板による曲げ応力 σ_{max} は、氷板が片持梁の場合を式 (14) とし、両持梁の場合を式 (16) とした。ここで、 $E[\text{MPa}]$: 曲げ弾性係数であり、久保 (1980) の既往研究を参考に 3470.8MPa を与えた。

$$\sigma_{max} = 6\rho_w \left(\frac{u_w I_w}{h_{is} k} \right)^2 \left| k dx \frac{\sin(k dx)}{\cos(k dx)} + \frac{1}{\sin(k dx)} - 1 \right| \dots (14)$$

$$k = \sqrt{\frac{12\rho_i h_{if} u_{if}^2}{E h_{is}^3}} \dots (15)$$

$$\sigma_{max} = \frac{\rho_i h_{if} dx I_w}{4} \left(\frac{u_i}{h_{is}} \right)^2 \dots (16)$$

(4) アイスジャム発生条件

本計算モデルは、固体である氷板の移動を河川水と同様に運動方程式を用いて計算している。アイスジャム現象の一つとして、氷板の量に対して川幅が狭い場合に、氷板が物理的に通過できないため、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。本計算モデルでは、この現象を再現するために、川幅に対して氷板厚がある一定の厚さになった時にアイスジャムが発生し、氷板の移動速度が減速すると仮定し、式 (17) よりアイスジャム現象の再現を試みた。

$$u'_i = \lambda u_i \quad \text{when} \quad IJ \geq \frac{B}{h_{if}} \dots (17)$$

$u'_i[\text{m/s}]$: アイスジャム発生時の氷板速度, $IJ[\text{無次元}]$: 川幅氷板厚比, $\lambda[\text{無次元}]$: アイスジャム発生時の氷板速度の減速率である。本研究における実験および実河川の再現計算の結果より、実験の IJ は 5、実河川の IJ は 300、は実験および実河川ともに 0.5 の値を得た。また、アイスジャム発生時における合成粗度係数は、吉川ら (2011b) によって得られた実河川の値 $n_o=0.058$ を与えた。

3. 本計算モデルの妥当性

構築した河水変動計算モデル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、水位において実験値と計算値の比較を行った。

(1) 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、水路幅の半分の幅 0.1m の狭窄部を設置した。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。

氷の製作は、シリコン製ゴムで型枠を作り、型枠内

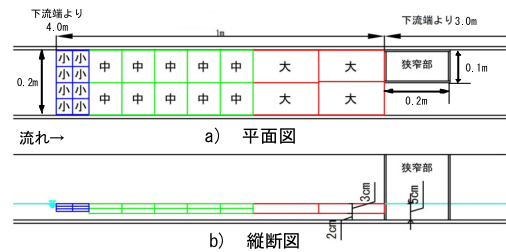


図-1 実験水路内の狭窄部の位置と水の配置

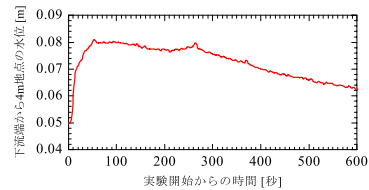


図-2 実験の境界条件の上流の水位

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 (吉川ら, 2011b) の結果を参考にし、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。氷の配置は、実河川の解氷時の河水は、互いに衝突し融解されながら小さくなり下流すると考えられるため、下流から上流に向かって氷のサイズを小さくして配置した。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-1 に示す。水位測定のために、実験水路の下流端から 2.00m、3.05m、4.00m の 3 箇所、箇所毎に水路底面から 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。

水理実験の下流端から 4m 地点における水位を図-2 に示す。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 (ティドビット 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

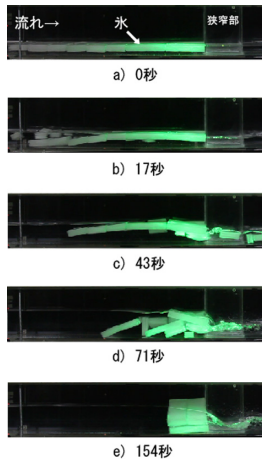


図-3 解氷からアイスジャム発生までの実験状況

は0.58℃であった。

(2) 実験結果

実験状況を図-3に示す。図-3から、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形を変えながら、狭窄部を通り抜けて全て下流へと流下した。

(3) 水位の実験値と計算値の比較

計算時間間隔はクーラン数0.005、水路および氷の粗度係数は0.02とした。計算における氷の破壊については、実験における氷はすでに個々に分断されているため、計算上の氷の破壊は、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条件とした。

実験水路下流端から4m地点（狭窄部上流）の水位における実験水位と計算水位を図-4に示す。図には、事前に実施した氷がない場合の実験水位と計算水位を合わせて示した。図-4の水なしの場合において、計算水位は時系列的に実験水位を良く再現しているのが分かる。図-4の水ありの場合は、実験開始直後において、計算水位は実験水位よりも早く上昇している。この原因の一つとして、計算上、上流から強制的に氷を破壊させているため、このことが実現現象と一致していないと考えられる。一方、水位のピーク値をみると、計算水位は実験開始27秒後に15.0cm、実験水位は実験開始114秒後に14.6cmであり、その差は4mmであり良く一致している。実験開始425秒後においては、計算水位と実験水位が一致していない。アイスジャム発生時の実験状況は、堆積した氷が流速および水温の影響を受けて融解され形を変えて下流へと流れる状況が確認されている。計算上の水温は、上流端の

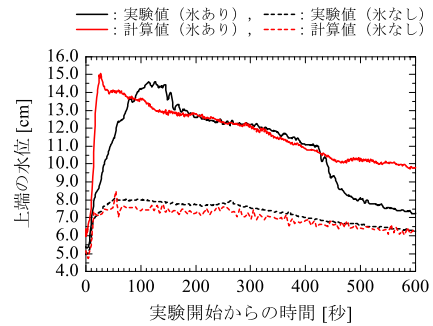


図-4 アイスジャム実験における水位の実験値と計算値の比較（水路下流端から4m地点）

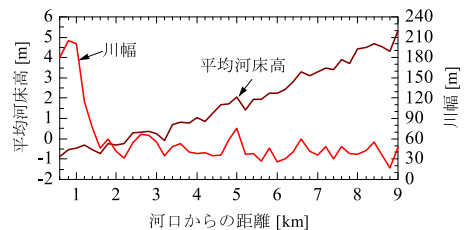


図-5 鵡川のアイスジャム再現計算

平均水温0.48℃を一定値として与えているため、氷の融解が進まずに、氷が堆積し続けたと考えられる。

本計算モデルは上記の課題を有しているが、アイスジャム発生による水位上昇およびその後の水位の減少について定性的にみると、計算水位は実験水位を良く再現していると言える。

4. 鵡川のアイスジャム再現計算

(1) 計算条件

計算期間は2011年3月11日から16日の6日間、計算区間は河口から0.6kmから9.0kmの区間とした。計算時間間隔はクーラン数0.02、河床の粗度係数0.035、氷板の粗度係数0.020とした。津波来襲前の縦断的な氷板厚は、阿部ら（2012b）の計算結果を与えた。上流の境界条件は流量5.0m³/sを一定値として与え、下流の境界条件は1分毎の水位を与えた。横断形状は一般断面とした。参考までに津波来襲前の平均河床高と川幅を図-5に示す。

下流の水位データについて、鵡川河口より一番近い潮位観測所は、河口から西へ約10kmの苫小牧東港であるが、津波来襲時は欠測であったため、河口から西へ約25kmの位置にある苫小牧西港の潮位データを用いた。このため、本研究ではアイスジャムの再現を目的としているため、下流の水位データの調整を行った。具体的には、苫小牧西港の潮位に0.8を乗じた値を鵡川河口水位とした。さらに、2011年3月12日の4:22から4:27の期間において、河川津波によりアイスジャムが解消され、水位が

下降する計算結果となった。アイスジャムの再現性を高めるために、この期間の水位データのみ最大で31cm減じた。また、河川水温として0.09℃を与えた。

(2) 水位の観測値と計算値の比較

図-6に水位の観測値と計算値を示す。図には氷なしの計算値も合わせて示した。図-6より、氷ありの計算水位は観測水位の上昇および下降を良く再現している。計算1.5日後から計算4.0日後の期間では、短期間のアイスジャムの解消および発生により計算水位が変動している。

(3) アイスジャム現象に関する考察

図-7に河川縦断の水板厚の変化を示す。図-7より、アイスジャムが発生したと推定される地点は、河口から1.6km, 2.0km, 2.2kmの地点である。これらの地点は、図-5より川幅が狭い地点である。図-7の計算結果から河川津波に伴う鶴川のアイスジャム現象として、以下の現象が推定できる。津波が河川を遡上する押し波時に、水板は破壊されながら上流へと輸送され、水板が下流へと流下する引き波時に、水板は川幅が狭い河道において堆積した。このため、河積が狭められアイスジャムが発生し、流れが止められ水位が上昇した。アイスジャム発生地点は、一箇所に留まらず、津波が河川を遡上するタイミングで下流から上流へと移動した。その後、水板は流速および水温の影響により融解され下流へと移動した。

5. まとめ

河水変動計算モデルを構築し、実験値および観測値との比較から計算値の妥当性を確認した。本計算モデルは、アイスジャム発生条件、水板の許容応力を適切に与えることが重要であるとわかった。河川津波に伴い発生した北海道鶴川のアイスジャムの水位変動の再現計算を行い、アイスジャムの発生箇所およびその挙動を明らかにした。

謝辞：本研究は、科研費（課題番号24360197、基盤研究(B) 河川結氷時における津波遡上の挙動解明、代表渡邊康玄教授）の助成を受けたものである。また、北海道開発局室蘭開発建設部には河道諸元データ等をご提供いただいた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 阿部孝章・吉川泰弘・安田浩保・平井康幸（2012a）：2011年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波の北海道内における河川遡上，土木学会論文集B1（水工学），Vol.68，No.4，pp.I_1525-I_1530。
 阿部孝章・吉川泰弘・平井康幸（2012b）：結氷時河川津波による漂流水板の衝突力評価に関する研究，土木学会，河川技術論文集，第18巻，pp.411-416。
 久保義光（1980）：水工学序説，水工学刊行会，pp.40。
 吉川泰弘・渡邊康玄・早川 博・平井康幸（2011a）：河川解

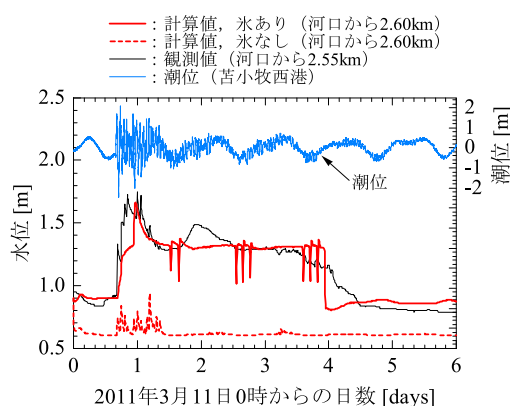


図-6 河川津波に伴い発生した鶴川アイスジャムにおける水位の観測値と計算値の比較

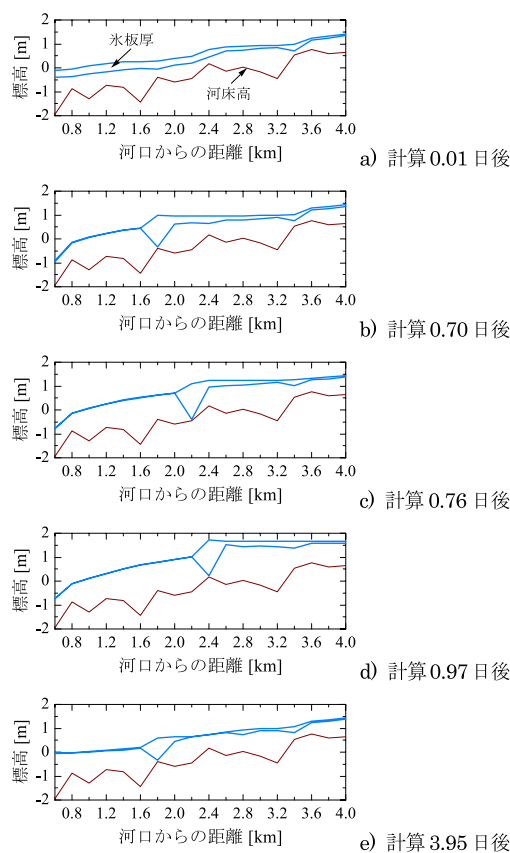


図-7 河川津波時の縦断的な水板厚の変化

- 氷時の河水の破壊と流下に関する研究，土木学会論文集B1（水工学），Vol.67，No.4，pp.I_1075-I_1080。
 吉川泰弘・渡邊康玄・早川 博・平井康幸（2011b）：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。
 吉川泰弘・渡邊康玄・早川 博・平井康幸（2012）：結氷河川における解氷現象と実用的な水板厚計算式の開発，土木学会論文集B1（水工学），Vol.68，No.1，pp.21-34。