

平成26年度

水中ポンプを用いた樋門ゲート前面の 結氷対策に関する研究 —冬期間における河川津波に対応した 確実な樋門操作の実現に向けて—

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 道東支所 ○佐藤 好茂
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム 阿部 孝章
釧路開発建設部 釧路河川事務所 稲垣 尚人

冬期間に河川津波が発生すると、漂流氷板の影響により樋門ゲートの操作が阻害され、内水氾濫が拡大する危険性が懸念されている。このため河川結氷期においても確実な樋門操作が望まれている。本稿では新釧路川の愛国樋門を対象に、水中ポンプを用いた結氷対策の実証試験を行った。現地試験においては結氷が生じることなく、対策の有効性を確認することに成功した。この結果を踏まえ、北海道内の他河川における適用性を検証した。

キーワード：結氷河川、河川津波、樋門ゲート、凍結防止

1. はじめに

積雪寒冷地である北海道は、写真-1に示した新釧路川の河口から上流0.2km付近のように、冬期間に河川の下流域など水面勾配の緩い区間において水面は結氷することが多い。この現象は本川のみならず、樋門吐口水路においても同様に確認することができる。

河川結氷時の地震津波被害として、1952年に発生した十勝沖地震では、北海道東部に位置する釧路市において春採川を遡上した津波は氷板と共に堤内地へ越流し、家屋損壊等の被害が報告されている¹⁾。近年においては2011年3月11日、三陸沖を震源とした東北地方太平洋沖地震により発生した津波は、結氷期の北海道にも到達し複数河川で遡上が確認された²⁾。この津波により河水が破壊され漂流した痕跡は、写真-2のように樋門ゲート前面や樋門吐口水路にも多数残されており、水位変動により自動的に開閉するフラップゲート等の動作を阻害する危険性も懸念されている³⁾。非出水期における樋門の状況について、引き上げ式ローラーゲートにおいても冬期間のゲート開閉調査時⁴⁾には、結氷及び積雪の影響により全閉することができずに開口部が生じた事例も報告されている。樋門ゲートの閉操作が不確実な状態で津波が発生し河川遡上すると、河川水が堤内側へ逆流し内水氾濫等の被害が拡大する恐れがある。

今次津波発生後に行われた現地調査⁵⁾では、堤内地となる樋門呑口水路においても津波遡上痕跡が確認されており、写真-2のような漂流氷板による影響、すなわちゲート操作が阻害されたことが一つの要因として考えられ



写真-1 新釧路川の結氷状況 (2014年1月11日撮影)



写真-2 樋門吐口水路の氷板痕跡 (2011年3月14日撮影)

ている。このような現象の解明に向け、津波遡上時の樋門ゲートに作用する波力を低減させる検討⁶⁾や、氷板を伴う津波の形態に関する研究^{7),8)}、本川より入射する津波が河川構造物に及ぼす波力評価⁹⁾が進められている。



図-1 実施箇所図

しかしながら、現状では樋門吐口水路部に遡上する津波に対し、水位上昇による氷板輸送を抑制する手法は確立されていない。また、樋門吐口ゲート前面に結氷が生じていると、今次津波と同様に氷板の影響によるゲート操作の支障となる危険性を有している。このため、ゲート前面における結氷そのものを抑制する対策が必要不可欠となる。

本稿では、樋門ゲート部の結氷対策を実施するにあたり、有用となる対策案を抽出し、実河川における適応性を確認してコスト面にも配慮した手法の検討を試みた。

2. 冬期間における河川維持管理の現状

北海道開発局の太平洋沿岸地域に位置する、釧路・帯広・室蘭開発建設部における河川部門共通の課題として、地震津波対策が挙げられる。近年、北海道へ到達した津波は、2014年チリ北部地震による遠地津波の到達¹⁰⁾や、2011東北地方太平洋沖地震の津波は記憶に新しいところである。津波発生時の河川遡上距離は、陸上部の遡上よりも遠くまで伝わる傾向にあり、実際に北海道内の1級河川を遡上した距離として、例えば新釧路川においては河口から上流約11kmまで津波の遡上による水位上昇が確認されている²⁾。

既存の津波対策として、樋門のフラップゲート化や遠隔操作化は進められているが、冬期間の河川管理に関する課題、特に結氷河川における津波遡上時の漂流物化した氷板の対策については、現状では未対策となっている。また、北海道においては積雪結氷期となる非出水期の樋門ゲート操作を想定しておらず、結氷期河川津波襲来に対応した排水樋門の対策は実施されていない。

樋門前面の結氷対策としては、ダムや大規模な可動堰のようにゲート付近の凍結防止装置を樋門の結氷防止対策として用いることも考えられる。しかしながら、想定津波遡上区間の樋門ゲート数は莫大であり、改築や維持管理コスト増加が懸念されている。

3. 研究手法

(1) 結氷対策案の検討

樋門ゲート部における結氷制御について、冬期間は河川流量の減少に伴い水位が低下することから、水深が浅い場合にも有効となり、維持管理面にも配慮して設置が容易であること、なおかつトータルコストが安価となる対策を検討した。本稿において検討対象とした方式は、ダムや大規模な可動堰等で実績が存在する、気泡式、鋼管発熱式、水中ミキサー式に加え、水中ポンプ式の合計4ケースについて比較を実施した。

(2) 水中ポンプ式による現地観測

前節検討内容の内、著者らの知見では樋門ゲート部の結氷対策として実績の存在しない、水中ポンプを用いた結氷対策の現地観測を実施することとした。本稿において実験対象とした水中ポンプ方式は、ポンプ下部から吸い上げた水を機器上部より排水し、上下層を循環させることにより結氷を防止するものである。

調査対象箇所は、図-1に示した新釧路川河口から4.5km上流の左岸に位置する愛国樋門とし、樋門断面は2.0m×2.0mの2連、ゲート形式は水位変動に追従する自動フラップゲート方式となっている。調査期間は冬期間の2013年12月20日から2014年2月28日までの約2ヶ月間を対象とした。

実験に使用した機器は、一般工事排水用の2インチ水中ポンプHS2.4S(株)鶴見製作所)である。図-2に示した水中ポンプ設置概要について、水中ポンプの設置位置は、樋門ゲート前面に2台使用して水深1/3毎に設置した。なお、扉門数2門の内、1門側のみに水中ポンプを設置しているのは、気象や水量等について同一条件で比較を行うことができ、水中ポンプの有無による効果が視覚的にも容易に判断可能と考えたためである。

水中ポンプによる結氷制御対策について、現地観測結果を用いて結氷状況の変化を把握し、実河川における効果の検証を行った。

(3) 結氷対策による凍結状況変化の把握

a) 結氷状況の再現計算と現地観測結果の比較

結氷対策実施箇所の結氷状況を推定するにあたり、フリーソフトのiRIC 23 ソフトウェア¹¹⁾に含まれている、1次元不定流計算モデルCERI 1Dソルバによる検討を実施することとした。この理由として、CERI 1Dソルバは河川の流れや河水の変動を計算することができ、伊藤ら¹²⁾による東北地方太平洋沖地震時の鳴瀬川を対象とした計算において、概ね良好な水位の再現性が確認されているためである。

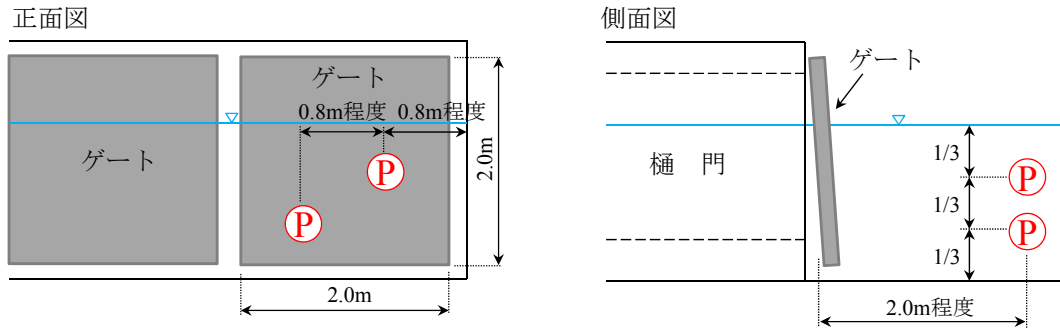


図-2 結氷対策概略図 (図中のPは水中ポンプの位置を示す)

計算に用いられている基礎方程式について、河水を考慮した河川水に関する連続式(1)及び運動方程式(2)、河水に関する連続式(3)及び運動方程式(4)、氷板形成融解式(5)は以下の通りである。

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

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

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

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

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

但し、 A (m^2)は河川水の流積、流れている河水面積及び氷板面積、 Q (m^3/s)は流量及び河水流量、 z (m)は河床高、 h (m)は厚さ、 n ($s/m^{1/3}$)はマンニングの粗度係数、 u (m/s)は河川縦断方向の速さ、 S (m)は潤辺、 R (m)は径深、 ρ_w (kg/m^3)は水の密度、 ρ_i (kg/m^3)は氷の密度、 t (sec)は時間、 x (m)は上流端からの距離、 g (m/s^2)は重力加速度である。添え字の w は河川水に関する値、 is は氷板に関する値、 if は流れている河水に関する値、 i は河水に関する値で $h_i = h_{is} + h_{if}$ 、 h_{is}' (m)は Δt 前の氷板厚、 T_a ($^{\circ}C$)は気温、 α (無次元数)は気温に対する氷板形成の程度を表し $\alpha = 0.906 - 2.770 \frac{I_b B}{h_w}$ 、 I_b (無次元数)は河床勾配、 B (m)は川幅、 β ($m^{1/3}/s$)は水温と有効水深に対する氷板融解の程度を表し $\beta = \frac{u_w}{h_w^{2/3}}$ である。

ここで、水の密度は 999.8 kg/m^3 、氷の密度は 917.4 kg/m^3 、マンニングの粗度係数は $0.022 \text{ s/m}^{1/3}$ を与えている。

始めに計算モデルの妥当性を確認するため、図-1に示したKP1.1~KP7.4の範囲について、東北地方太平洋沖地震前までとなる2010年度冬期間の再現計算を実施した。なお、KP(キロポスト)は河口からの距離を示し、単位は km である。計算対象期間は、2011年2月20日から地震津波到達直前の3月11日までである。この計算により得ら

れた氷板厚と、今次津波発生後の愛国樋門吐口水路における氷板痕跡値を比較し精度を検証することとした。

結氷対策箇所状況を推定するにあたり、まずは調査対象である愛国樋門箇所の水位を算出するため、水量は調査期間となる2013年12月20日から2014年2月28日を対象とし、地形条件はKP1.1~KP7.4の河川横断測量データを与え、この値を基に計算格子の作成を行い、河道内の地形を再現している。境界条件として、流入量は広里水位流量観測所(KP7.4)、下流端水位は鳥取水位観測所(KP1.1)の観測値をそれぞれ用いて計算を行った。

次に、図-1に示した樋門ゲート前面における結氷対策実施箇所の氷板厚を算出するため、地形条件は愛国樋門ゲート前面から新釧路川合流部までの樋門吐口水路形状を再現した。境界条件として下流端水位は前述の計算により得られた愛国樋門箇所の値、樋門呑口からの流入量は $Q=0.005 \text{ m}^3/s$ 、気温については気象庁¹³⁾が公開している釧路地方時間ごとの値、水温については一律 $0^{\circ}C$ を与えている。これらの計算を元に、調査期間内における氷板厚の経時変化を推定し、結氷対策の有無による効果を検証した。

b) 北海道太平洋沿岸地域の河川における適用性

結氷対策については、北海道内河川における適用性の検証として、既往研究³⁾による浦幌十勝川並びに鶴川の氷板厚とCERI 1Dによる計算を行い、実現象との関連性を検討した。

ここでは再現計算により、2011年東北地方太平洋沖地震津波到達前までの観測所水位との比較を行う。対象期間については、前節新釧路川の再現計算と同様の2011年2月20日から3月11日までとした。浦幌十勝川の計算範囲はKP0.4~KP5.6であり、KP3.6の十勝太水位流量観測所を比較対象とした。鶴川の計算範囲はKP0.6~KP9.0、KP2.55の鶴川水位流量観測所を比較対象としている。再現計算結果の水位変動量が観測値と同様の傾向を示していれば、現地における気温等の諸量を与えることで河氷の形成についても、ある程度の相関を有していることが仮定できると考えた。

なお、前述の新釧路川については、本稿の対象とした計算範囲内には水位観測所が存在しておらず、水位の比較対象外としているが、本ソルバを用いた新釧路川にお

表-1 結氷対策の比較

方 式	現場条件	施 工 性	コ ス ト	緊急時(故障時)の対応
気泡式	△ コンプレッサー等の設置場所が必用	△ ゲート前面の改修が必用	△ 機器+改修費用	△ 損傷箇所によっては時間を要する
鋼管発熱式	◎ 水深によらず運転可能	△ 戸当り部の改修が必用	△ 機器+改修費用	△ 損傷箇所によっては時間を要する
水中ミキサー式	△ 水深50cm程度必用	○ 投入のみ	○ 機器費のみ	○ 市場性はあまり無い
水中ポンプ式	○ 水深5cm程度から運転可能	○ 投入のみ	◎ 機器は安価	◎ 代替品の調達が容易(汎用品)

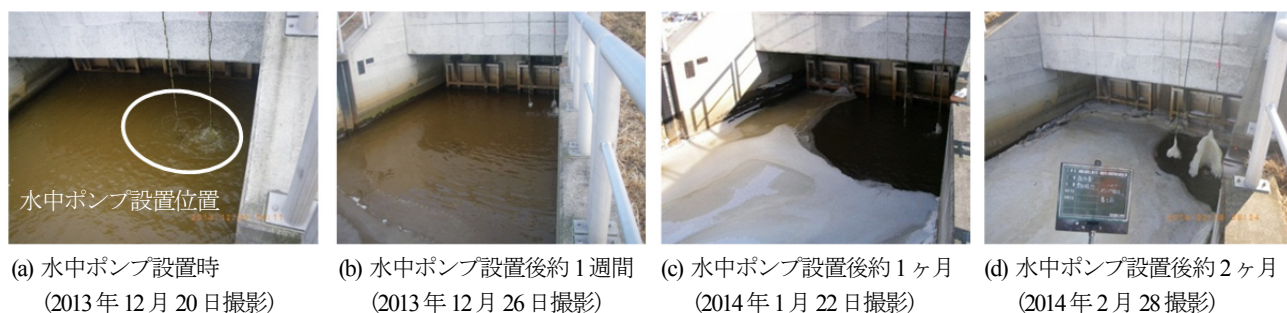


図-3 結氷対策実施状況

ける時系列水位の良好な再現性¹⁴⁾は確認されている。ゆえに複数の河川による再現性、すなわち浦幌十勝川並びに鶴川の観測水位と再現計算水位及び氷板痕跡の氷板厚と氷板厚再現計算結果が一致すれば、新釧路川における再現計算結果の妥当性についても裏付けることが可能と考えられるためである。

これらの検討を基に、北海道内1級河川の結氷対策について効果の検証を実施した。

4. 結果と考察

(1) 結氷対策案の検討結果

表-1は結氷対策の比較結果を示す。各方式の特徴として、気泡式は圧縮空気を供給するための機器設置場所を確保する必要が生じる。鋼管発熱式は冬期間の水位低下による水深の影響を受けない点では有利となる。しかし、機器設置の際には既設樋門戸当り部の改修が必用となり、施工に要する費用の増加が懸念される。水中ミキサー式は、設置は容易であるが運転水深の確保や機器費用が多少割高となる点が挙げられる。水中ポンプ式は運転水位に僅かな制約が生じるが機器費用は安価であり設置も容易である。また、故障等による不測の事態が発生した際にも市場の流通性は高くリース品も多数存在しており、代替機器の調達も容易である。

これらの結果から、各方式に一長一短はあるものの、総合的に判断すると水中ポンプ式が優位であることが確認された。

(2) 現地観測結果

現地観測結果について、図-3(a)に示した水中ポンプ設置時には水面の凍結は見られていない。設置後約1週間となる図-3(b)について、水路の状況では本川側の水面凍結が確認されているが、ゲート前面の結氷は生じていない。結氷対策による効果と推測されるが、この段階では断定することができなかった。図-3(c)に示した設置後約1ヶ月の状況はポンプ周辺のみ結氷しておらず、図-3(d)の調査終了時まで結氷対策実施箇所の凍結は確認されなかった。なお、図-3(d)の水中ポンプ上方向に筒状の結氷が生じているのは、排水による水しぶきが凍結した影響によるものと考えられた。

(3) 結氷対策の効果検証

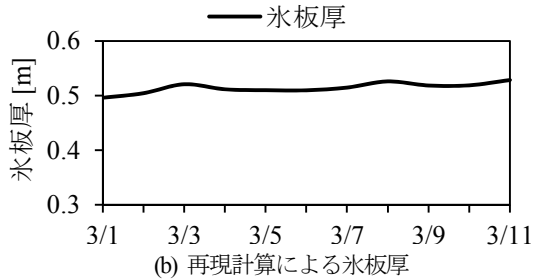
a) 新釧路川における再現計算と現地観測結果の比較

計算モデルの精度検証について、図-4(a)に示した今次津波発生後の氷板痕跡値は $h_i=0.40\text{m}\sim 0.60\text{m}$ であった。この計測値に対し、図-4(b)に示した津波到達前までの氷板厚再現計算結果は $h_i=0.53\text{m}$ となっており、再現計算結果は現地で確認された氷板痕跡値の範囲に含まれていた。このことから結氷厚の再現について、本ソルバの良好な妥当性が確認された。

図-5(a)は調査対象期間内における年度別旬ごとの気温¹⁵⁾を示す。各年度の状況より、1月からは氷点下が続いている様子が窺える。本稿の対象となる2013年度の値をみると、12月中旬から下旬にかけては比較的温暖であるが、それ以降は他年度と比べると平均的な値を示しており、特筆する点は見当たらない。この結果からは当該年



(a) 津波痕跡による氷板厚 (2011年3月18日撮影)



(b) 再現計算による氷板厚

図-4 津波痕跡と再現計算による氷板厚

度が特異な状況とはなっていないことが確認できる。

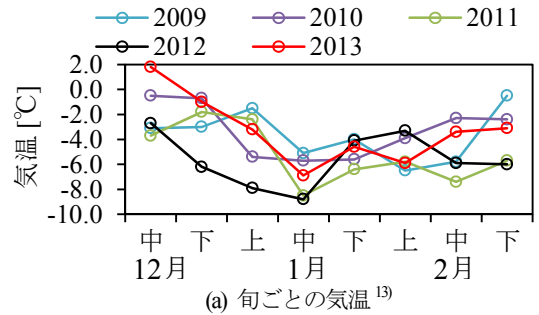
図-5(b)に示した結氷厚計算結果では、水中ポンプ設置時となる12/20の結氷は確認されていない。設置から約1週間後(12/26)及び約1ヶ月後(1/22)、撤去時(2/28)には結氷が生じる結果となり、図-3(a)~(d)に示した水路部の結氷状況と一致している。このように、結氷対策を実施していない場合は、設置から約1週間後の12/26以降は結氷が生じる結果となり、前節図-3(b)のゲート前面のみ結氷が生じていないのは、結氷対策による効果が発現したためと考えられた。

b) 浦幌十勝川、鶴川における適用性

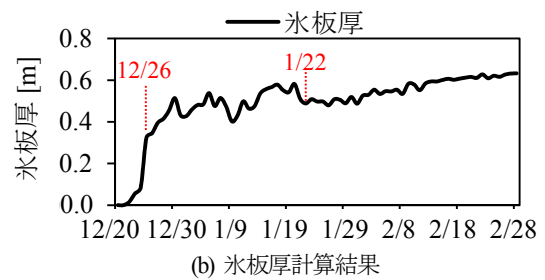
図-6は観測所の計測値と再現計算結果を示す。図-6(a)の浦幌十勝川は水位が概ね一致しており、良好な再現性が確認された。図-6(b)の鶴川については、観測値と比較し再現計算では後半部分の水位が1割程度高い箇所も現れる結果となったが、平均的な水位の傾向は捉えられていた。鶴川の下流端水位として用いた潮位は、データが存在する約10km離れた苫小牧東港であることや、鶴川河口から海域にかけての地形が水位変化に影響した可能性が示唆された。

図-7に示した氷板厚計測値³⁾と同地点の再現計算結果を比較すると、両河川で再現計算結果は計測値よりも下回る傾向にあったが、最小値については概ね一致していた。この要因として、河氷の形成過程において河岸の死水域など流速が遅い箇所については、河道内での融解による影響が小さく氷板厚が発達した個体が存在していたことや、調査箇所の氷板痕跡は他の地点から輸送された物が混在している可能性が影響したと推測された。また、計算結果は格子上の値に依存する面もあり、上述のような詳細な変化まで再現されていないことが考えられた。

図-7(a)ではKPI.1の氷板厚に若干ではあるが変動が生じていた。これは計算スキームの中で、河氷形成の指標



(a) 旬ごとの気温¹³⁾



(b) 氷板厚計算結果

図-5 結氷対策期間内における気温と氷板厚計算結果

となる、現地の氷板観測値を元にして動的に算出した係数 α と β が用いられており¹⁵⁾、多数の計算においては観測結果を精度良く再現している。しかし、 α と β は地点固有の係数であるため、本稿の対象範囲においては、僅かではあるがばらつきが生じた可能性が示唆された。

既往研究によると、氷板形成融解式と観測値249データの比較では、86%が $\pm 10\text{cm}$ の誤差に入る結果となっている¹⁵⁾。本稿の結果においても平均値は誤差内に含まれており、水位や氷板厚の再現性について本モデルの再現性は比較的良好であることが確認された。

今次津波発生後の北海道内における現地調査³⁾において計測した氷板厚の最大値は、図-7に示した浦幌十勝川は $h_{\text{max}}=0.48\text{m}$ 、鶴川は $h_{\text{max}}=0.40\text{m}$ であり、図-5(b)に示した本稿の計算条件による氷板厚は最大約 $h_i=0.63\text{m}$ であった。このため、今次津波において河川遡上が確認されたこれらの河川についても氷板厚は適用範囲内となっており、結氷対策の効果が期待できる。

5. まとめと今後の課題

本稿において樋門ゲート前面の結氷対策を検討した結果、対象とした4方式の中では水中ポンプ方式が総合的に優位であることが確認された。本手法は、汎用品を用いて実施することが可能であり、特殊な設備等を必要としないことが利点と言える。

また、新釧路川の愛国樋門を対象とした現地試験においては結氷が生じることはなく、本方式による凍結防止効果を確認し、結氷対策の有効性を示すことができた。

結氷対策の適用範囲について、本稿の条件における氷板厚計算結果より、氷板厚は最大約 $h_i=0.63\text{m}$ まで効果の

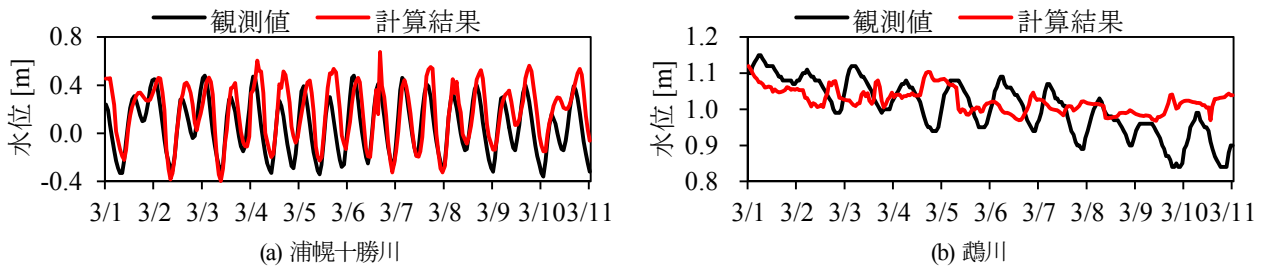


図-6 観測所水位と再現計算結果の比較

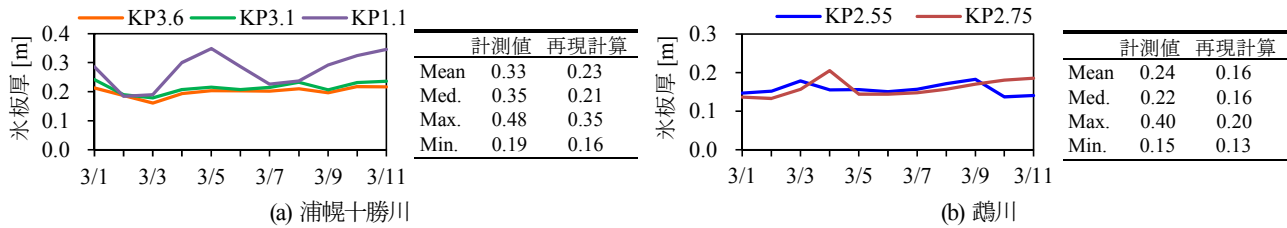


図-7 津波痕跡による氷板厚と再現計算結果の比較。(a),(b)共に左のグラフは再現計算結果、右の表は津波痕跡計測値³⁾と再現計算結果の値を示す

発現が確認され、浦幌十勝川、鶴川においても結氷対策の効果が期待できる。

今後は実用化に向け、より詳細な水理諸量データを蓄積し、更なる精度の向上を図る必要性が考えられる。また、ラック式の樋門ゲート等についても、結氷対策の効果検証を実施する予定である。

謝辞：本研究の実施にあたり、国土交通省北海道開発局釧路開発建設部釧路河川事務所には、貴重な資料の提供並びに有用な助言を頂いた。帯広開発建設部帯広河川事務所及び同札内川ダム管理支所、室蘭開発建設部苫小牧河川事務所には、有用な助言を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 北海道大学 十勝沖地震調査委員会: 十勝沖地震調査報告 1952年3月4日, 1954.
- 2) 阿部孝章, 吉川泰弘, 安田浩保, 平井康幸: 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.1_1525 - I_1530, 2012.
- 3) 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.
- 4) 矢野雅昭, 吉川泰弘, 石谷隆始: 冬期間の河川における樋門の凍結状況について, 第 53 回北海道開発技術研究発表会, AA-3, 2009.
- 5) 阿部孝章, 吉川泰弘, 矢野雅昭, 永多朋紀, 稲垣達弘, 桃枝英幸, 村上泰啓, 平井康幸: 2011年東北地方太平洋沖地震により発生した津波の結氷河川における遡上状況及び氷板痕跡調査, 寒地土木研究所月報, No.705, pp. 20 - 30, 2012.

- 6) 阿部孝章, 吉川泰弘, 佐藤好茂, 伊藤丹: 樋門ゲートに対する河川津波波力減勢工の提案とその効果について, 河川技術論文集, 第 19 巻, pp.381 - 386, 2013.
- 7) 阿部孝章, 吉川泰弘, 佐藤好茂, 伊藤丹: 氷板群を伴う河川津波が治水施設に及ぼす影響に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 70 号, B-32, 2014.
- 8) 佐藤好茂, 阿部孝章, 吉川泰弘, 伊藤丹: 氷板混合津波が橋桁に及ぼす波力特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp. I_851 - I_855, 2014.
- 9) 阿部孝章, 佐藤好茂, 伊藤丹: 樋門ゲートに対する河川津波波力低減手法に関する研究, 第 57 回北海道開発技術研究発表会, AA-34, 2014.
- 10) (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム, 道東支所, 2014 年チリ北部地震により発生した北海道内の津波観測状況について(第 1 報), pp. 3 - 12, URL: <http://river.ceri.go.jp/contents/disaster/2014Iquique.pdf>(参照日 2015 年 1 月 9 日).
- 11) 河川シミュレーションソフト iRIC, URL: <http://iric.org/ja/>(参照日 2015 年 1 月 9 日).
- 12) 伊藤丹, 阿部孝章, 鳥谷部寿人, 吉川泰弘: 1次元河川計算ソフトウェア CERIID の公開について, 寒地土木研究所月報, No.720, pp. 21 - 27, 2013.
- 13) 気象庁, URL: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>(参照日 2015 年 1 月 9 日).
- 14) (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム, 道東支所, 道北支所: 津波河川遡上予測の手引き(案), pp. 24 - 27, URL: <http://river.ceri.go.jp/contents/tool/pdf/tsunamijudan.pdf>(参照日 2015 年 1 月 9 日).
- 15) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博: 結氷河川における河氷形成と河道特性の関係に関する考察, 第 25 回寒地技術シンポジウム, pp.190 - 195, 2009.