



寒冷地河川における樋門ゲート前面の結氷制御方法に関する提案

Proposal on Ice Control Method for Sluice Gate Front in Cold-Climate Rivers

佐藤好茂¹, 阿部孝章¹, 稲垣尚人², 吉川泰弘³, 船木淳悟¹

Yoshishige SATO¹, Takaaki ABE¹, Naoto INAGAKI², Yasuhiro YOSHIKAWA³ and Jungo FUNAKI¹

¹寒地土木研究所

¹Civil Engineering Research Institute for Cold Region

²北海道開発局

²Hokkaido Regional Development Bureaus

³北見工業大学

³KITAMI Institute of Technology

1. はじめに

積雪寒冷地である北海道は、冬期間に河川の下流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。この現象は河川における本川のみならず、図-1に示した樋門吐口水路でも同様に確認することができる。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を確認された¹⁾。この津波により河水が破壊され漂流した痕跡は、図-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²⁾。図-3に示した引き上げ式ローラーゲートにおいても、矢野ら³⁾による冬期間のゲート開閉調査時には、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。このような状態で津波が遡上すると、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⁴⁾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、図-2に示した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ている。しかしながら、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。これらの問題解決に向け、著者らのグループは河川構造物の減災対策として、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⁵⁾や、氷板を伴う津波の形態に関する研究^{6),7)}



図-1 愛国樋門吐口水路の結氷状況



図-2 樋門ゲート前面の氷板痕跡



図-3 ゲート部の結氷及び積雪状況



図－4 実施箇所図

に取り組んでいる。樋門の結氷対策としては、ダムや大規模の堰はゲート付近の凍結防止装置が設置されており、これを樋門の結氷防止対策として用いることも考えられるが、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の懸念がある。

このため本稿では、樋門ゲート部の結氷制御について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. 研究手法

2.1 結氷制御対策案の検討

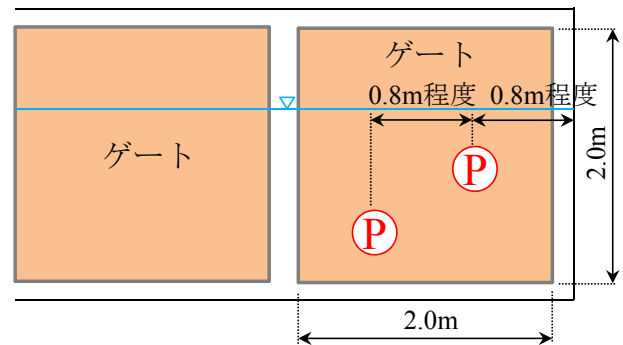
樋門ゲート部における結氷制御について、冬期間は河川流量の減少に伴い水位が低下することから、水深が浅い場合にも有効となり、維持管理面にも配慮して設置が容易であり、なおかつトータルコストが安価となる対策を検証することとした。本稿において検討対象とした方式は、ダムや大規模な堰等で実績が存在する、気泡式、鋼管発熱式、水中ミキサー式に加え、水中ポンプ式の合計4ケースについて比較を実施した。

2.2 水中ポンプ式による現地観測

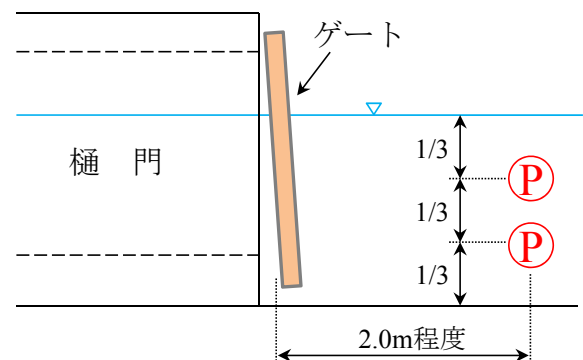
前節検討内容の内、著者らの知見では樋門ゲート部の結氷対策として実績の存在しない、水中ポンプを用いた結氷制御対策の現地観測を実施することとした。本稿において実験対象とした水中ポンプ方式は、ポンプ下部から吸い上げた水を機器上部より排水し、上下層を循環させることにより結氷を防止するものである。

調査対象箇所は、図－4に示した新釧路川左岸 KP4.5 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。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。調査期間は冬期間となる 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。

正面図



側面図



図－5 水中ポンプ設置概略図。(図中の P は水中ポンプの位置を示す)

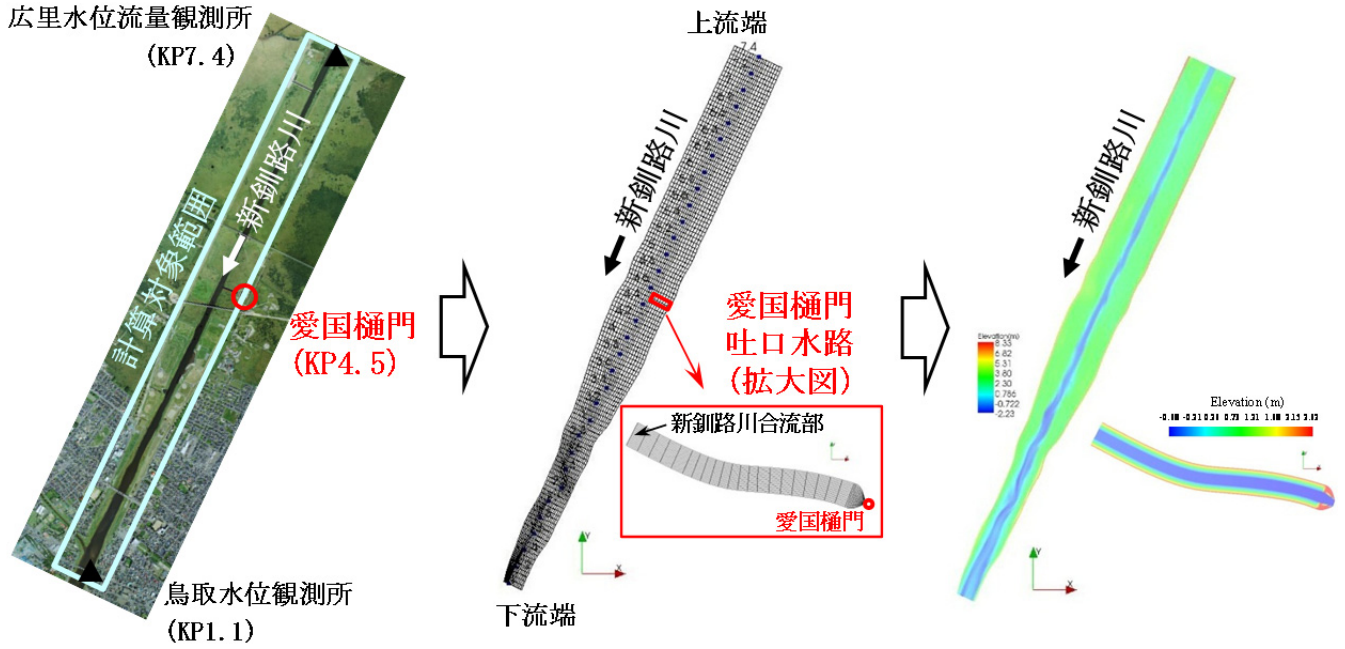
実験に使用した機器は、一般工事排水用の 2 インチ水中ポンプ HS2.4S((株)鶴見製作所)である。図－5に示した水中ポンプ設置概要について、水中ポンプの設置位置は、樋門ゲート前面に2台使用して水深1/3毎に設置した。なお、扉門数2門の内、1門側のみに水中ポンプを設置しているのは、気象や水量等について同一条件で比較を行うことができ、水中ポンプの有無による効果が視覚的にも容易に判断可能と考えたためである。

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。

2.3 結氷制御対策による変化の把握

結氷制御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 2.3 ソフトウェア⁸⁾に含まれている、1次元不定流計算モデル CER1D 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、CER1D ソルバは河川の流れや河氷の変動を計算することができ、伊藤ら⁹⁾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。

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)は以下の通りである。



図－6 iRIC ソフトウェア⁸⁾を用いた CERIID による計算実施概要．(左から計算実施範囲，新釧路川及び愛国樋門吐口水路の計算格子，計算格子から作成した地形を示す)

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

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

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

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

但し、 A (m²)は 河川水の流積，流れている河氷面積及び氷板面積， Q (m³/s)は流量及び河氷流量， 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/m³)は水の密度， ρ_i (kg/m³)は氷の密度， t (sec)は時間， x (m)は距離， g (m/s²)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 は流れている河氷に関する値， i は河氷に関する値で $h_i = h_{is} + h_{if}$ である．

ここで、水の密度は 999.8 kg/m³，氷の密度は 917.4 kg/m³，マンニングの粗度係数は 0.022 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－6左に示した対象範囲について，東北地方太平洋沖地震時の再現計算を実施した．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．

その後，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，図－6中に示した計算格子の作成を行い，図－6右のような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－4に示した樋門ゲート前面における結氷制御対策実施箇所の氷板厚を算出するため，地形条件は図－6中に示した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ている．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 $Q = 0.005$ m³/s，気温については気象庁¹⁰⁾ 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℃を与えている．なお，氷板厚の計算は，開始直後から結氷が生じるまでには，僅かではあるがタイムラグが発生することから，計算開始を 10 日前の 12 月 10 日から実施している．

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，結氷制御対策の有無による効果を検証した．

表－１ 樋門ゲートを想定した結氷制御対策の比較

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－７ 水中ポンプによる結氷制御対策実施状況

3. 結果と考察

3. 1 対策案の検証結果

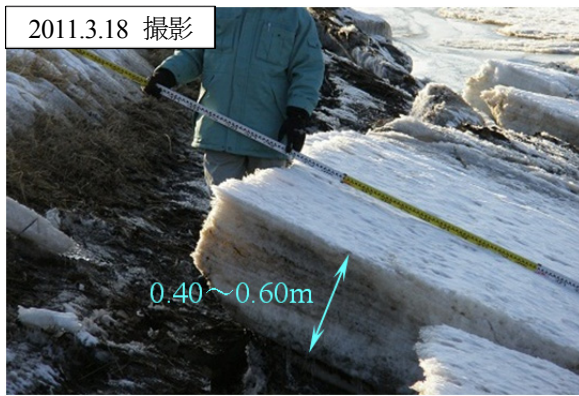
表－１は結氷制御方式の比較結果を示す。各方式の特徴として、気泡式は圧縮空気を供給するための機器設置場所を確保する必要が生じる。鋼管発熱式は冬期間の水位低下による水深の影響を受けない点では有利となる。しかし、機器設置の際には既設樋門戸当り部の改修が必用となり、施工に要する費用の増加が懸念される。水中ミキサー式は、設置は容易であるが運転水深の確保や機器費用が多少割高となる点が挙げられる。水中ポンプ式は運転水位に僅かな制約が生じるが機器費用は安価であり設置も容易である。

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。

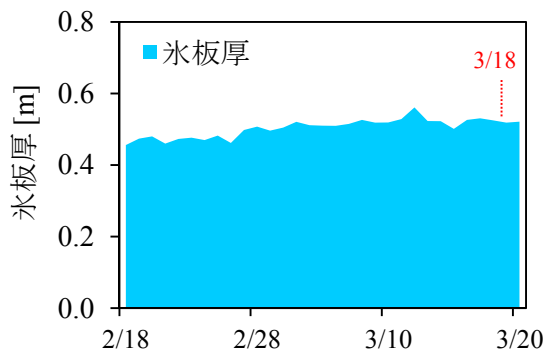
これらの結果から、各方式に一長一短はあるものの、総合的に判断すると、水中ポンプ式が優位であることが確認された。

3. 2 現地観測結果

現地観測結果について、図－７(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－７(b)について、水路全体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



(a) 津波痕跡による氷板厚



(b) 再現計算結果による氷板厚

図-8 氷板痕跡と結氷厚再現計算結果

い。結氷制御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-7(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-7(d)の調査終了時まで結氷制御対策実施箇所の凍結は確認されなかった。なお、図-7(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. 3 ゲート前面の結氷が抑制される効果

計算モデルの精度検証について、図-8(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-8(b)に示した氷板厚再現計算結果は $h_i=0.52\text{m}$ 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-9は調査対象期間内における年度別旬ごとの気温¹⁰⁾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度が特異な状況とはなっていないことが確認できる。

図-10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

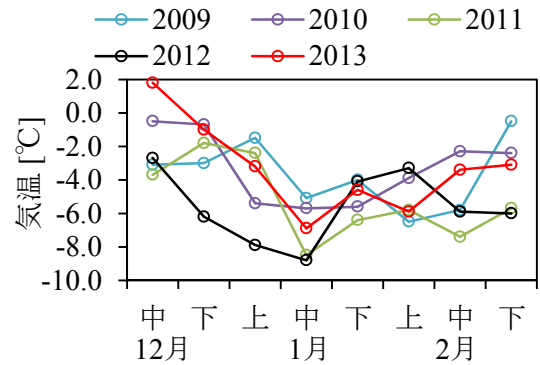
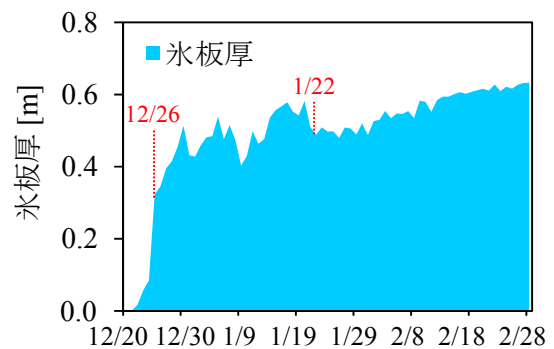
図-9 調査対象期間内における旬ごとの気温¹⁰⁾
(凡例は年度を示す)

図-10 結氷制御対策期間内における氷板厚計算結果

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-7(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、結氷制御未対策時は、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-7(b)のゲート前面のみ結氷が生じていないのは、結氷制御対策による効果が発現したためと考えられた。

阿部ら²⁾による今次津波発生後の北海道内における現地調査において、計測した氷板厚の最大値について、鶴川は $h_{\text{max}}=0.40\text{m}$ 、沙流川は $h_{\text{max}}=0.35\text{m}$ 、浦幌十勝川は $h_{\text{max}}=0.48\text{m}$ であった。図-10に示した本稿の条件による氷板厚は最大約 $h_i=0.63\text{m}$ であり、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、結氷制御対策の効果が期待できる。

4. 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制御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水中ポンプを用いた現地試験においては結氷が生じることはなく、本方式による対策の有効性が確認された。

結氷制御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 $h_i=0.63\text{m}$ まで効果の発現が確認された。

本稿により、実河川を対象とした水中ポンプによる樋門ゲート前面の凍結防止効果を確認し、結氷制御方法を示すことに成功した。

今後は実用化に向けて、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、他のゲート方式、例えばラック式の樋門ゲート等についても、結氷制御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治水課及び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) 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. I_1525 - I_1530, 2012.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 河川シミュレーションソフト iRIC, URL: <http://iric.org/ja/> (参照日 2014 年 10 月 31 日).
- 9) 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 CERI1D の公開について, 寒地土木研究所月報, No.720, pp. 21 - 27, 2013.
- 10) 気象庁, URL: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (参照日 2014 年 10 月 31 日).